



Revista Galega do Ensino



Revista Galega do Ensino

COMITÉ DE REDACCIÓN

Ana María Platas Tasende / Dirección
M. del Mar Lorenzo Moledo / Subdirección
María Natividad Rodríguez López / Secretaría
Javier Vilariño Pintos / Ilustración

CONSELLO ASESOR

Antonio de Ron Pedreira
Agustín Dosil Maceira
Constantino García González
Carlos García Riestra
Xesús P. González Moreiras
Venancio Graña Martínez
José Eduardo López Pereira
Senén Montero Feijóo
José Carlos Otero López
Carlos Pajares Vales
Vicente Peña Saavedra
María Pilar Mar Pérez Marsó
Ángel Rebolledo Varela
Manuel Regueiro Tenreiro
María Jesús Suárez Sixto
José Luis Valcarce Gómez

TRADUCCIÓN E CORRECCIÓN LINGÜÍSTICA

Begoña Méndez Vázquez

COLABORACIÓN, CORRESPONDENCIA, INTERCAMBIO E PEDIDOS

Consellería de Educación e Ordenación Universitaria
Dirección Xeral de Política Lingüística
Edificio Administrativo San Caetano
15704 Santiago de Compostela
e-mail: revista.galega.ensino@mail.xunta.es



Número especial

Balances dun século

Volume I

CIENCIAS

COORDINADOR

Carlos Pajares Vales

*O Comité de Redacción non asume
necesariamente as opinións expostas
polos autores*

Prohibida a reprodución total ou parcial
do contido sen a autorización expresa da RGE

© Xunta de Galicia

Edita: Consellería de Educación e Ordenación Universitaria
Dirección Xeral de Política Lingüística

Imprime: Grafinova, S. A.

Depósito Legal: C - 818 - 96

ISSN: 1133 - 911X



Índice








Presentacións

- | | | |
|---|--|---------|
| ❧ | Presentación
<i>Manuel Fraga Iribarne</i> | páx. 15 |
| ❧ | Para unha fin de século
<i>Celso Currás Fernández</i> | páx. 17 |
| ❧ | Limiar
<i>Carlos Pajares Vales</i> | páx. 19 |

Colaboracións

- | | | |
|---|--|---------|
| ❧ | As Ciencias Matemáticas no século XX
<i>Luís A. Cordero</i> | páx. 23 |
| ❧ | A Teoría da Relatividade
<i>Alfonso Vázquez Ramallo</i> | páx. 45 |
| ❧ | Mecánica cuántica
<i>J. Sánchez Guillén</i> | páx. 65 |

❧	Núcleos e partículas <i>Carlos Pajares Vales</i>	páx. 85
❧	Astrofísica e Cosmoxía <i>José M. Fernández de Labastida y del Olmo</i>	páx. 109
❧	Química: balance dun século <i>M. Arturo López Quintela</i>	páx. 141
❧	A Bioquímica no final do milenio. Un século de historia <i>Manuel Freire Rama</i>	páx. 157
❧	A Xenética no século XX <i>Ángel Carracedo Álvarez</i>	páx. 175
❧	A tectónica de placas e o impacto Kt. Unha gran revolución xeolóxica e unha gran controversia do século XX <i>Federico Vilas Martín</i>	páx. 193

	A Medicina no século XX <i>Fernando Domínguez Puente</i>	páx. 215
	A Cirurxía no século XX <i>Miguel Caínzos Fernández</i>	páx. 233
	Os computadores do século pasado <i>Senén Barro Ameneiro</i>	páx. 251
	Electrónica: Ciencia e Tecnoloxía <i>Diego Cabello Ferrer / Carlos Gómez-Reino Carnota</i>	páx. 273
	A Biotecnoloxía no século XX: ¿o inicio dunha revolución? <i>Tomás G. Villa / Juan M. Lema Rodicio</i>	páx. 293
	Mente e cerebro <i>Carlos Acuña Castroviejo</i>	páx. 315
	Medio ambiente <i>Felipe Macías Vázquez</i>	páx. 337

***Premios
Nobel***



Fisioloxía ou Medicina

páx. 361



Física

páx. 367



Química

páx. 374



Ciencias Económicas

páx. 381

***Normas para
os autores***



Comité de Redacción

páx. 385



Presentacións

PRESENTACIÓN

Cómpre —e bo sería facelo con talante e espírito críticos— un repaso ás evolucións e variacións habidas nas diferentes áreas do coñecemento no que o xénero humano está inmerso e se desenvolve.

É costume das nosas culturas occidentais facer balances periódicos dos logros acadados a partir das propostas presentadas. Deste xeito avalíanse moitas veces os resultados nas áreas científicas e técnicas nas que as posibilidades de lograr metas están supeditadas de contino á metodoloxía e, sobre todo, á tecnoloxía alcanzable en cada momento.

Outra cousa é o pensamento, a ideoloxía, o criterio ou criterios con que se elixe unha liña de actuación. Isto non é cuestión de menor importancia, pois sabemos que as conductas mudaron a miúdo os rumbos da nosa historia.

Desde as ideoloxías ata as maquinarias científicas e técnicas, todo pode quedar obsoleto. Adaptarse ós tempos ten moito que ver con ser capaces de coñece-lo pasado e entende-la súa evolución nos diferentes ámbitos da actuación humana. Este coñecemento e mais este entendemento poderán ofrecernos un punto de apoio para seguirmos avanzando en ciencia, en tecnoloxía, en pensamento, e axudarannos outrosí a discernirmos entre o que é verdadeira evolución e o que é un simple cambio.

A *Revista Galega do Ensino* —non podía ser doutra maneira— súmase a esas reflexións con este número extraordinario, *Balances dun século*, dedicado a comprobalas evolucións e pescudar nos métodos baixo diferentes puntos de vista, coa calidade e o rigor ós que xa nos ten acostumados.

Manuel Fraga Iribarne
Presidente da Xunta de Galicia

PARA UNHA FIN DE SECULO

Os remates dos séculos inclinan sempre á reflexión. Non ía ser menos o deste, tan axitado nos terreos da historia, da sociedade e da política coma innovador nos eidos do pensamento, das diversas ciencias, das comunicacións, do ensino, das leis ou das artes.

A *Revista Galega do Ensino*, coa que esta Consellería, desde hai anos, quere ofrecer ó profesorado vías de expresión dos seus achados e de actualización dos seus coñecementos, comprácese en editar, con motivo destas datas tan singulares, un número especial no que se recollen estudos varios sobre o século XX.

As particulares visións dun nutrido grupo de especialistas en diferentes disciplinas sobre os principais acontecementos, as ideas ou os descubrimentos máis transcendentales deste século demostran canto houbo de inquedañas, canto de inventos e de poderosa forza creativa na última centuria, que parece se-la porta que abre ó infinito as posibilidades da nova, na que tan axiña nos corresponde entrar.

Sen dúbida, estes *Balances dun século* han gozar dunha entusiasta acollida por parte dos lectores e servir de punto de referencia para docentes e estudiosos interesados no desenvolvemento da cultura. Moito do que acadaron os nosos predecesores lémbrese nas seguintes páxinas. Algúns, por certo, nin sequera foron os nosos predecesores: son os nosos coetáneos, e viven e alentan canda nós mentres lle arrincan ó mundo os seus máis agochados segredos e nos entregan os logros finais das súas incontables horas de dedicación. Non pode ser outra a maneira de conquistar un futuro que xa é presente.

Celso Currás Fernández
Conselleiro de Educación
e Ordenación Universitaria

LIMIAR

Cando o conselleiro Celso Currás e maila directora da *Revista Galega do Ensino*, Ana María Platas, me propuxeron coordinar un volume sobre a Ciencia e a Técnica no século XX, que fose complementario doutro volume dedicado ás Letras e as Ciencias Sociais, pareceume que estes libros poderían ser de utilidade para profesores de institutos, colexios, universidades e, en xeral, para un amplo sector de lectores, sempre e cando se atinase nos enfoques e mais nos obxectivos.

Nestes últimos anos están aparecendo e aparecerán moitas máis publicacións onde se repasen de xeito exhaustivo tódolos logros acadados e os problemas que restan nun determinado eido do coñecemento. Son artigos do tipo *review* nos que os lectores potenciais son os expertos dese eido determinado. Non é isto o que se pretende no noso caso.

Tamén están saíndo á rúa 'enciclopedias' dedicadas ó século XX onde se recollen varias disciplinas e se lles aplica unha orde tal que se poida atopar calquera dato relacionado con elas. Tampouco pretendemos facer unha obra deste tipo.

Trátase simplemente de contar, dun xeito que chegue a un gran número de persoas, feitos relevantes da Ciencia e da Técnica no século XX, cunha extensión razoablemente limitada, de forma que un lector poida satisfacer a súa curiosidade nun tempo tamén razoable, e que ademais lles sexa de proveito sobre todo a persoas que se moven no mundo do ensino, sen renunciar a outros lectores potenciais.

Por todo isto, a elección dos temas non foi doada. Con seguridade non se atoparán algúns relevantes, pero a súa inclusión significaría a exclusión doutros notables ou a extensión excesiva do volume.

Existe un gran consenso en considerar que o século XX foi o século da Física e da Bioloxía. Partindo delas, coidamos que había que trata-las dúas revolucións vividas dentro da primeira: a Relatividade e a Mecánica cuántica; doutra banda a Xenética e a Bioquímica maila Bioloxía molecular dentro da segunda. As dúas revolucións da Física ilumináronnos o mundo do máis grande e do máis pequeno, é

dicir, a Astrofísica e a Cosmoloxía e mailos núcleos e as partículas elementais, o pulo das correspondentes en Bioloxía, a medra da Biotecnoloxía e a drástica mudanza da Medicina. A todas estas disciplinas importantes no século XX había que engadir as ciencias básicas: Matemáticas, Química e Xeoloxía. O volume non podía deixar de incluí-la Electrónica e Optoelectrónica por un lado e os ordenadores e a Tecnoloxía da información por outro, xurridas en gran medida da Física. A Cirurxía, a mente e o cerebro e mailo medio natural son tres grandes ramas do coñecemento que durante o século XX experimentaron transformacións radicais. Esta foi a miña elección. Todos estes temas son tratados por expertos destacados en cada materia, todos investigadores en Galicia, algúns con experiencia en divulgación; o resto fixeron un esforzo para ser comprensibles.

Co volume pódese gozar e pasar uns momentos agradables. Polo menos esa é a miña opinión. Sen embargo, esta opinión non é a importante. A importante é a súa, que desexo sexa coincidente. Neste caso os obxectivos do volume estarán cumpridos.

Carlos Pajares Vales
Coordinador do volume de Ciencias





Colaboracións

AS CIENCIAS MATEMÁTICAS NO SÉCULO XX

*Luís A. Cordero**

Universidade de Santiago
de Compostela

“Entristécame que a xente culta nin
sequera saiba que o meu tema existe”

Paul R. Halmos

Resumi-la evolución das Matemáticas ó longo do século XX nunhas poucas páxinas é unha tarefa imposible. Tanto por razóns obxectivas como por razóns subxectivas, tendo en conta os modos de pensamento que temos os matemáticos e a nosa linguaxe tan especial, achegarlle ó lector os avances habidos neste século no pensamento matemático sen recorrer ás fórmulas paréceme, cando me dispoño a comezar a escribir, algo irrealizable.

Ademais, coído que un matemático, ó enfrenta-la tarefa de escribir un artigo como este, que se supón de divulgación, debe ter en conta que polo menos a metade dos seus lectores deixarán de ler ó que atopen nel unha primeira ecuación, e non é difícil imaxinar qué ocorrerá cos que continúen ó daren coa segunda. Así que eu, que comparto este punto de vista, vou tentar escribir este traballo sen utilizar

fórmulas, confiado en que o meu lector saberá desculparme polas moitas imprecisións, erros e omisións que sen dúbida hei cometer.

AS CIENCIAS MATEMÁTICAS: A NOSA CULTURA INVISIBLE

Ninguén cun nivel cultural medio pode nega-la existencia do pensamento matemático como algo inherente ó poder racional do home, formando parte da súa natureza e da súa historia.

Na proposición non de lei do Congreso dos Deputados sobre o Ano Mundial das Matemáticas 2000 dise:

As Matemáticas son unha das máximas expresións da intelixencia humana e constitúen un eixe central na historia da cultura e das ideas. Gracias á súa universalidade aplícanse nas outras ciencias, nas ciencias da natureza, nas

* Catedrático de Xeometría e Topoloxía.

ciencias sociais, nas enxeñerías, nas novas tecnoloxías, e nas distintas ramas do saber mais nos diferentes tipos de actividade humana, de tal xeito que resultan ser fundamentais no desenvolvemento e progreso dos pobos.

O impacto e influencia das Matemáticas na nosa forma actual de vida é indiscutible e débese ó seu espectacular crecemento e ó aumento das súas aplicacións, principalmene no último tercio do século XX, no que todo se *matematiza*. Moitas das cousas que forman parte da nosa vida cotiá e das que non poderíamos prescindir facilmente, como a radio, o teléfono, a televisión, as calculadoras, os ordenadores, os códigos de barras, os discos compactos, o escáner ou os satélites artificiais, por exemplo, non serían posibles sen a aplicación de numerosos resultados matemáticos. Malia iso, e aínda que a súa historia se mide por milenios, os matemáticos temos que admitir que as Matemáticas son, sen dúbida, as máis impopulares de tódalas ciencias, e ocupan o último posto da lista no que á comunicación e coñecemento do home medio se refire.

F. Hirzebruch sinala:

Sen Matemáticas non habería un pensamento lóxico estruturado; o pensamento matemático é un compoñente fundamental do mundo moderno. Historicamente as Matemáticas foron a chave que abriu as portas da ilustración. Hoxe, as Matemáticas puras poden aínda ser consideradas como o garda do graal do pensamento lóxico.

O CAMBIO DE SÉCULO: DO XIX Ó XX

Sería imposible falar dos logros acadados polas Matemáticas no século XX sen facer referencia á revolución experimentada polo pensamento matemático ó longo do século anterior. Non só a súa linguaxe, senón os fundamentos lóxicos das Matemáticas actuais, dependen dun xeito esencial do acontecido durante o século XIX.

Unha das características primordiais das Matemáticas é o seu rigor, é dicir, o coidado en non admitir máis que aquilo que fose probado por un razoamento, e fixar con precisión as bases de todo razoamento. Sen embargo, este coidado non existiu sempre, como mostra a historia das Matemáticas nos séculos XVII e XVIII, cando os continuadores da obra de Newton e de Leibniz, aínda que culminan as colosais creacións do Cálculo infinitesimal e do Cálculo integral, inquietaban seriamente os científicos e mais os filósofos polas súas ousadías nos esvaradíos terreos do infinito e do infinitésimo, que se atopaban na base de todo o cálculo, ousadías provocadas por unha incontrolada chamada á intuición.

Non obstante, os rápidos progresos experimentados neses séculos fixeron que as Matemáticas entraran no XIX —para moitos o verdadeiro século da Matemática pura— nun período de axitado crecemento caracterizado por dous feitos: 1) a crítica dos fundamentos, primeiro os da Análise, logo os da

Xeometría, e por último tamén os da Lóxica, e 2) por unha tendencia á xeneralización, tentando libera-las Matemáticas das presuncións intuitivas e lograr que fosen un obxecto de estudio en por si, independentes da Filosofía natural. As melloras nos sistemas de cálculo, coa elaboración dun sistema rigoroso de análise, conducen, nun último termo, á Mecánica cuántica e á Teoría da Relatividade, e, como consecuencia, a un coñecemento e comprensión máis fondos da natureza da materia e do espazo. Doutra banda, ó cuestiona-la lóxica do Cálculo e da Xeometría, descóbrense un novo mundo para as Matemáticas nas teorías dos conxuntos infinitos e das xeometrías non-euclidianas, o que de feito conducirá, ó longo do primeiro tercio do século XX, ó mellor entendemento dos seus propios fundamentos.

Estas dúas direccións, unha aplicada e con influencias alleas, a outra teórica, introspectiva e abstracta, teñen en realidade unhas raíces comúns e mostran a simbiose existente entre Matemática pura e Matemática aplicada.

Dunha parte, J. Fourier (1768-1830) intúe que toda función pode ser expresada como suma de certas funcións básicas simples que representan as vibracións periódicas que forman os tons puros musicais ou as cores básicas da luz. Esta idea de Fourier, motivada pola súa análise da calor nos corpos, é unha das máis importantes da historia das Matemáticas. Os estudos derivados deste descubrimento esténdense ó longo de todo o século XIX e involu-

cran os máis importantes matemáticos da época, como Dirichlet, Riemann, Weierstrass ou Cantor. Eles analizan qué é o que valida o método (a converxencia controlada das sumas infinitas) e qué é o que pode invalidalo. Os seus estudos permítenlles ós físicos teóricos (seguindo o camiño no que a teoría é válida) transforma-la Física clásica por medio destes novos instrumentos matemáticos. Pola súa banda, os matemáticos exploran as moitas vías nas que o método de Fourier non funciona. Descubren deste xeito o amplo mundo, ata entón descoñecido, dos conxuntos infinitos.

Prodúcese asemade un descubrimento sorprendente e desconcertante: a Xeometría euclidiana non é o único tipo de xeometría posible. Hoxe sabemos que este achado se debe a K. F. Gauss (1777-1855), o matemático máis grande de tódolos tempos, quen nunca o publicou por medo ó ridículo; o creto da primeira publicación, en 1826, débese atribuír a N. Lobachevski (1792-1856) e J. Bólyai (1802-1860), que, dun xeito independente e case simultáneo, deron a coñecer o que hoxe chamamos Xeometría hiperbólica. A clave para tal achado atópase no feito de que un dos postulados da Xeometría euclidiana, o Postulado da Paralela ou Postulado V, non é por forza certo. É dicir, dos dez axiomas da Xeometría euclidiana, o Axioma da Paralela pode ser negado e, así e todo, aínda é posible construír cos nove restantes unha Xeometría perfectamente consistente; ou o que é o mesmo, tal axioma é independente dos

outros nove. Este descubrimento leva de contado á pluralización das Matemáticas: onde antes había unha xeometría agora temos xeometrías e, nun último termo, álxebras e non só unha álgebra, sistemas numéricos e non un só sistema numérico. O pulo definitivo destas consideracións puramente abstractas sobre as xeometrías non-euclidianas prodúcese coa definición por G. B. Riemann (1826-1866) das “configuracións n -dimensionais”, co que se crean os modelos matemáticos que lle permitirán a A. Einstein (1879-1955), anos máis tarde, o desenvolvemento da Teoría da Relatividade.

Estas dúas direccións seguidas no século XIX, se ben poden ser consideradas fundamentais, non foron certamente as únicas. As necesidades da Física matemática provocaron o inicio do desenvolvemento da Análise complexa, é dicir, do estudio das funcións sobre os números complexos. Este progreso, que se leva a cabo canda o da Análise de Fourier, segue a ter hoxe en día aplicacións constantes non só na Física matemática senón tamén, por exemplo, desempeñando un papel central na resolución de arresvados problemas da moi abstracta e pura Teoría dos Números Primos. Doutra banda, a Teoría de Grupos, iniciada por E. Galois (1811-1832) ó tratar de resolverlo problema, xa clásico daquela, de atopar as raíces dunha ecuación polinómica, a Álgebra de Boole, xermolo da lóxica matemática (G. Boole, 1815-1864), ou a Álgebra de Matrices (A. Cayley 1821-1895), xorden como conse-

cuencia de consideracións puramente teóricas e como resposta a necesidades puramente intelectuais; con todo, co andar do tempo todas elas se teñen mostrado claramente útiles nas súas aplicacións.

Desta visión do sucedido no século XIX, incompleta e moi superficial, pódese extraer emporiso unha importante conclusión que marca o devir das Matemáticas ó longo do século XX: aínda que as Matemáticas están moldadas tanto pola necesidade de comprensión da forma pura como pola determinación dun feito científico, ámbolos dous moldes producen estruturas semellantes e, independentemente de se o seu desenvolvemento vén motivado polo seu interese intrínseco, como se se realiza polo interese das súas aplicacións, os problemas que se xeran e as estruturas necesarias para resolvelos comparten unha base lóxica común, e só se diferencian na forma de seren expresados. Por iso, e dun modo case xeral, as Matemáticas eran xa aceptadas, a finais do século XIX, como unha forma de pensamento axiomatizado.

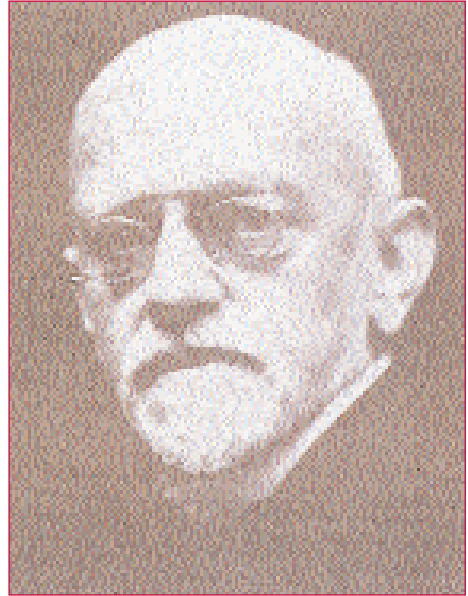
AS CIENCIAS MATEMÁTICAS NO SÉCULO XX

O desenvolvemento experimentaldo polas Matemáticas ó longo do século XX é, se non maior, si polo menos comparable ó de calquera das outras ciencias. O ocorrido nestes cen anos pódese resumir, dun xeito moi simple, dicindo que a súa primeira

metade estivo marcada pola idea de que “canta máis abstracción, mellor”; este concepto foi cambiando co paso do tempo, e semella que na segunda metade do século o principio predominante pasou a ser que “existen niveis óptimos de abstracción”.

Postos a sinala-las influencias máis relevantes que condicionan o desenvolvemento das Matemáticas na primeira metade do século, é obrigado asocialas, nunha inicial aproximación, cos nomes de dous ilustres matemáticos: Georg Cantor (1845-1918) e David Hilbert (1862-1943).

Cando a Matemática se movía no medio dun mare magnum de novos conceptos e teorías e dunha nova linguaxe que nacía coa Teoría dos Conxuntos Infinitos de Cantor, prodúcese un feito que marca decisivamente o seu desenvolvemento posterior ó longo de todo o século. En agosto do ano 1900 celebrouse en París o 2º Congreso Mundial de Matemáticas; na sección de Bibliografía e Historia, Ensino e Métodos, nunha sesión presidida precisamente por Cantor, Hilbert pronunciaba unha conferencia titulada “Os problemas futuros das Matemáticas”. Nela presentaba unha lista de vintetrés problemas non resoltos que, na súa opinión, eran os máis importantes cos que se enfrontaban as Matemáticas naquel momento e que deberían centra-lo traballo investigador nos seguintes anos. Os problemas propostos por Hilbert marcaron o devir das Matemáticas a partir do momento da súa formulación e ata os nosos días,



David Hilbert presentou na súa conferencia do ano 1900 en París, que acadou moita sona, unha lista de vintetrés problemas matemáticos non resoltos.

nos que, por certo, algún deles aínda segue sen resolver. Tal foi a importancia desa lista de problemas que os matemáticos que lograron solucionar algún deles obtiveron un recoñecemento unánime por parte de toda a comunidade matemática.

Pero máis importante aínda cá lista de problemas de Hilbert foi a súa proclamación de fe persoal na posible resolución de todo problema matemático, feita na primeira parte da conferencia e que se resume nas súas propias palabras como segue: “(Os matemáticos) oímos sempre resoar esta chamada: aquí te-lo problema, búscalle solución. Ti podes atopala polo razoamento

puro. Xamais o matemático será levado a dicir: *Ignorabimus*".

Hilbert baseábase no convencemento de que a natureza das Matemáticas consiste en propoñer e resolver problemas, polo que os instrumentos do pensamento puro na mente dos matemáticos creadores deben ser sempre suficientes para resolver calquera problema matemático que se lles propoña. Segundo el, as esixencias e as condicións xerais ás que debe correspondela solución dun problema matemático son dúas: 1ª, a exactitude da solución, que debe obterse por medio dun número finito de conclusións; e 2ª, esa solución debe fundamentarse sobre un número finito de hipóteses proporcionadas polo mesmo problema e formuladas, en cada caso, con precisión.

O método axiomático así propugnado por Hilbert non era algo novo, xa que foi o utilizado por Euclides, por exemplo; pero a Hilbert se debe que comezara a ser coñecido e utilizado, na súa forma moderna, a finais do século XIX. Como auténtico mestre da axiomática, o espírito de Hilbert exerceu unha profunda influencia no universo matemático de principios do século, e por iso debe ser considerado como un deses grandes homes que dominan e caracterizan toda unha época. O rigor da súa linguaxe e a marabillosa perfección dos seus razoamentos fixeron que o seu traballo fose un modelo para tódolos matemáticos posteriores. O seu libro *Grundlagen der Geometrie* (Fundamentos da Xeometría, 1ª ed. 1899) marca o inicio da axiomatización das

Matemáticas, ou, por sermos máis precisos, da utilización dos sistemas de axiomas formais como base de cada unha das disciplinas matemáticas e, eventualmente, de tódalas Matemáticas.

Non obstante, a implantación desta concepción hilbertiana, esencialmente formalista, non foi doada; el mesmo coñecía mellor ca ninguén a grande influencia exercida polas outras dúas escolas de pensamento sobre a fundamentación das Matemáticas que xurdiron nos comezos do século.

Dunha parte estaba a Escola loxísta; os seus principais impulsores foron os ingleses B. Russell (1872-1970) e A. N. Whitehead (1861-1947). Os membros desta escola sostiñan que a Matemática é unha rama da Lóxica e, xa que logo, avogaban pola definición dos conceptos matemáticos en termos de nocións lóxicas e a proba das súas proposicións como teoremas de lóxica. Este enfoque non era novo xa que o principio de que as Matemáticas son derivables da Lóxica se remonta a Leibniz, quen distinguía entre verdades da razón, ou necesarias, e verdades de feito, ou continxentes. En 1903, na súa obra *Principios da Matemática*, Russell escribía: "O feito de que tódalas Matemáticas son lóxica simbólica é un dos achados máis grandes da nosa época..."

Doutra banda estaba a chamada Escola intuicionista, fundada por L. E. J. Brouwer (1881-1966), ó que máis tarde se une Hermann Weyl (1885-

-1955). Brouwer concibía o pensamento matemático como un proceso de construcións mentais que crea o seu propio universo, independente da experiencia e restrinxido só na medida en que debe de estar baseado na intuición matemática fundamental. Brouwer escribía: “O único fundamento posible para as Matemáticas ten que buscarse neste proceso constructivo, limitado pola obriga de captar con reflexión, cultura e refinamento de espírito qué teses son aceptables á intuición e evidentes á mente e qué teses non o son”. Como non recoñecía ningún principio da Lóxica *a priori*, tampouco non recoñecía a tarefa matemática de deducir conclusións a partir de axiomas; para el, os paradoxos eran un defecto da Lóxica e non da verdade matemática, así que negaba a lexitimidade absoluta das regras aristotélicas da Lóxica, chegando a citar a Lei do Tercio Excluído para conxuntos infinitos como exemplo de principio lóxico que se estaba a aplicar con excesiva liberdade. Hilbert, reaccionando contra esta corrente, chegaría a declarar, alporizado, no ano 1924: “Despoxa-lo matemático da Lei do Tercio Excluído equivale a negarlle o telescopio ó astrónomo, ou o uso dos seus puños ó boxeador”.

Co fin de salva-la Matemática clásica da demoledora crítica intuicionista, así como tamén a Teoría Conxuntista de Cantor, que se estaba a crebar polo mal dos paradoxos, Hilbert propuxo que a Matemática fose formulada como unha teoría axiomática formal. Impulsou deste xeito unha terceira

escola, a Escola formalista, baseada na filosofía de que todo o contido das Matemáticas pode transformarse nun sistema de fórmulas simbólicas; xunto a este sistema formal existe un eido chamado Metamatemática, dominio separado que serve de xustificación para o sistema de fórmulas, xa que o seu obxecto de investigación son as propias demostracións das Matemáticas ordinarias. Esta concepción formalista ou hilbertiana distingue os enunciados ‘reais’ dos ‘ideais’, segundo o seu uso implique ou non a posesión dun significado intuitivo. Ademais, o engadido de ‘elementos ideais’ a un sistema para completa-la súa estrutura e simplificar así o desenvolvemento da correspondente teoría, resultou ser un procedemento moi proveitoso.

Hilbert e os seus seguidores crían que co procedemento de edificar e formaliza-la demostración matemática por medio dun sistema de postulados non contradictorios, podería introducirse nas Matemáticas o mesmo tipo de certeza que as Leis de Newton introduciran na Mecánica dous séculos antes. Sen embargo, do mesmo xeito que a Mecánica cuántica botou por terra o determinismo newtoniano, así a publicación do Teorema de Incompletitude por Kurt Gödel (1906-1978), no ano 1931, fixo o mesmo coa certeza hilbertiana. No seu teorema —sen dúbida un dos resultados máis profundos da historia do pensamento—, Gödel establece a sorprendente conclusión de que as Matemáticas non poden ser encadea-

das á Lóxica, deixando sentado que a Aritmética e, *a fortiori*, a Ciencia matemática, é unha teoría incompleta. Isto viña a significa-lo seguinte: dado un conxunto calquera de axiomas que inclúa os da Aritmética, non existe ningún proceso de demostración con forza abonda para probar que tal conxunto é, ó mesmo tempo, consistente e completo, xa que se fose completo tería que ser contradictorio, e se non contén contradicións entón sempre existen enunciados matemáticos verdadeiros que non poden derivar do conxunto de axiomas de partida. Utilizando as palabras de Hilbert, Gödel probou que nas Matemáticas sempre existe un "*Ignorabimus*".

Gödel facía ver así que as Matemáticas non son unha ciencia todopoderosa e que estaban moi lonxe de probalo todo como algúns pretendían, xa que nin sequera daban constatado a súa propia consistencia. Poñíase así mesmo en evidencia que se a Teoría de Conxuntos non é contradictoria cando se basea nun sistema de axiomas no que non figure o Axioma da Elección (que estipula a posibilidade de elixir un elemento en cada conxunto dunha familia de conxuntos), entón tampouco o é a teoría obtida engadíndolle ó sistema o Axioma da Elección e a Hipótese do Continuo (que di que todo conxunto non numerable de números reais ten a potencia do continuo, entendendo por 'continuo' o conxunto de tódolos números reais). Polo tanto, non se puido probar nin a veracidade nin a falsidade do Axioma da Elección e da

Hipótese do Continuo, disxuntiva que dividía os matemáticos e coa que rematou no ano 1963 o americano P. J. Cohen (1934-...) ó probar no seu Teorema de Indicibilidade que se trata de dous axiomas independentes do resto, e que a supresión dun ou de ámbolos dous, e mesmo a negación de calquera deles, daría orixe a Matemáticas diferentes. Por certo, Cohen deu así resposta ó primeiro dos problemas da lista proposta por Hilbert en 1900.

En resumo, todas estas convulsións experimentadas pola axiomática primitiva ó longo da década dos trinta provocaron modificacións substanciais na forma de pensamento matemático e conduciron, en definitiva, á inclusión dun formalismo-clase no sistema e á fusión dos axiomas da Teoría de Conxuntos cos do Cálculo lóxico. En todo caso, un feito predominante acabou por ser incuestionable: o triunfo das ideas de Cantor.

A introducción por Cantor, nos últimos anos do século XIX, dos conxuntos infinitos no vocabulario das Matemáticas deu orixe á Teoría de Conxuntos, e con ela proporcionou unha nova e rica linguaxe que permitiu achar novas demostracións de feitos xa coñecidos e, sobre todo, considera-las Matemáticas desde unha nova perspectiva, con resultados tan afagadores que logrou estimular enerxicamente as xeracións posteriores. A Teoría de Conxuntos, que deixara estampada unha impresión indeleble nas cuestións filosóficas máis fondas dos fundamentos

das Matemáticas, impulsou que os problemas máis arrevesados das súas principais áreas fosen repropostos e moitas veces resoltos; acusáronse daquela os efectos do poderoso pulo innovador xerado por ela.

Por exemplo, cuestións sobre a estabilidade das solucións das ecuacións diferenciais, nas que as solucións representan traxectorias de obxectos en movemento, foron traducidas en problemas de xeometría de certos conxuntos de puntos chamados superficies, o que axudou ó afianzamento dun novo campo nacente: a Topoloxía. Dun xeito análogo, cuestións sobre a estrutura común das matrices, dos grupos e dos conxuntos, conduciron ó amplo dominio hoxe coñecido como Álgebra abstracta. E métodos similares, ó seren aplicados á Análise do século XIX, levaron á Análise abstracta, na que as integrais e derivadas do cálculo clásico se aplican en espazos de dimensión infinita. Estas tres disciplinas, Álgebra, Análise e Topoloxía, representan a cultura común dun matemático do noso século. As definicións, teorías e métodos destes tres campos conforman hoxe o fundamento da educación matemática, e ninguén pode ser considerado culto en Matemáticas se non pode lelas e escribilas na linguaxe da Álgebra, da Análise e da Topoloxía. Partindo destes tres campos, nados nos albores do século XX, xorde a increíble variedade das Matemáticas dos nosos días.

Esta rápida exposición das orixes, artífices e principais áreas que levan ás

Matemáticas contemporáneas, quedaría incompleta se non se cita a decisiva influencia exercida, entre os anos corenta e ata ben entrados os setenta, pola aparición no mundo matemático dunha iniciativa moi singular coñecida baixo o nome de Nicolás Bourbaki.

No primeiro semestre do curso 1934-35, un grupo de matemáticos franceses mozos, case todos antigos alumnos da Escola Normal Superior de París, formado ó principio por H. Cartan (1904-...), C. Chevalley (1909-1984), J. Delsarte (1903-1968), J. Dieudonné (1906-1992) e A. Weil (1906-1998), decidiron escribir xuntos un libro sobre Análise. Nun primeiro momento concibírono pensando nos estudantes das universidades francesas e como substituto dun libro de E. Goursat, que consideraban xa anticuado, polo que decidiron redactar un novo texto que respondera axeitadamente ás necesidades das Matemáticas do século XX. Con este fin, comezaron a reunirse unha vez ó mes para discutiren o seu plan. Axiña, chegaron nesas reunións á conclusión de que non lles sería posible limitarse só a escribir un texto de Análise. A Álgebra, por exemplo, que cambiara por completo nos últimos anos como resultado dos impulsos vidos desde Alemaña, debidos principalmente ó traballo de Emmy Noether (1882-1935) e dos seus estudantes, estaba xa a muda-la cara de toda a Matemática. Doutra banda, as distintas ramas das Matemáticas tiñan acadado un desenvolvemento de tal magnitude que a especialización era xa



Henri Cartan (esquerda) e Jean Dieudonné (dereita) son dous dos fundadores do grupo Bourbaki. Os dous cóntanse entre os máis brillantes especialistas, á marxe das súas publicacións baixo o pseudónimo do *matemático pantasma*.

absolutamente necesaria para case tódolos matemáticos. Só aqueles da estatura científica dun David Hilbert ou dun Henri Poincaré podían pensar en abranguer todo o conxunto da Matemática. Para un matemático medio, sen embargo, era xa pouco menos que imposible ter unha perspectiva completa da Matemática e coñecer tódalas relacións existentes entre as súas diferentes ramas.

Todo isto fixo que o grupo comecara a decatarse do enorme que tería de ser o seu traballo, polo que decidiron que tal tarefa non podía facela un só individuo e que a súa división entre os

distintos membros do grupo de acordo coa especialización de cadaquén sería contraproducente para o seu obxectivo final: expoñe-los conceptos básicos comúns a tódalas ramas das Matemáticas, en primeiro lugar, e, unicamente unha vez feito isto, dedicarse a cada unha das súas áreas.

Desde o principio, Bourbaki non dubidou en adopta-lo método axiomático, polo que ten sido criticado duramente en moitas ocasións, pero el consideráboo absolutamente necesario para poder acadalo seu obxectivo. A idea, moi simple, que inspira o método axiomático é a seguinte: no canto de

defini-los obxectos que se van investigar, o que hai que facer é unha lista das propiedades fundamentais dos obxectos que se van utilizar no estudio. Estas propiedades tómanse como axiomas, e a partir de aquí xa non é importante cáles son os obxectos que se estudian. As demostracións constrúense de tal xeito que as súas conclusións poden ser aplicadas tamén a calquera outro obxecto que satisfaga eses mesmos axiomas. É case increíble que unha idea tan sinxela, que transformou completamente as Matemáticas, tardara tanto tempo en ser posta en práctica.

Esta decisión de Bourbaki de utilizar-lo método axiomático levouno á necesidade de adoptar un novo ordenamento das diferentes ramas das Matemáticas, xa que non era posible mante-la división clásica en Análise, Cálculo diferencial, Xeometría, Teoría de Números, etc.; no seu lugar xurdiu a noción de ‘estructura’, que permitiu a introducción do concepto de ‘isomorfismo’ e, con el, unha nova clasificación das disciplinas fundamentais dentro das Matemáticas.

Os primeiros fascículos da obra de Bourbaki, que titulou *Elementos de Matemática*, apareceron no ano 1939 e chegou a publicar arredor de cincuenta volumes; o emprego do singular no título, Matemática e non Matemáticas, plasma a idea que inspira o seu traballo, e que queda nidiamente exposta cando sinala: “O tratado toma as Matemáticas na súa orixe e dá demostracións completas”.

Con partidarios entusiastas, pero tamén con detractores moi importantes, ninguén, sen embargo, se atreverá a nega-la influencia da obra de Bourbaki, sen a cal as Matemáticas do século XX serían algo totalmente distinto do que son: unha ciencia robustecida e unificada, cimentada sobre unha fonte única, a Teoría de Conxuntos, tal e como Hilbert preconizara. E, se ben quedan ramas das Matemáticas que deberán ser axiomatizadas sobre ese fundamento, e aínda que as Matemáticas seguen apuntando cara á abstracción e a xeneralización, co paso dos anos comezan a recordar que os seus intereses e estímulo máis importantes sempre se atopan nas súas aplicacións. Morris Klein sinala: “Pretender desterrar das Matemáticas as súas aplicacións equivalería a querer concentra-la vida dun animal unicamente nos seus ósos, sen dedicar atención ós seus músculos, nervios e vísceras”.

MATEMÁTICA PURA E MATEMÁTICA APLICADA

Armand Borel, membro destacado do grupo Bourbaki, dixo nunha ocasión:

As Matemáticas son coma un grande iceberg; por baixo da superficie atópanse as Matemáticas puras, fóra da vista da xente. Por riba da auga está a punta do iceberg, a parte visible que se deu en chamar Matemática aplicada. A maioría da xente só ve esa punta que emerge sobre a auga e non se decatan de que esa porción que eles ven non existiría sen a outra porción, moitísimo máis grande, que permanece agachada da súa vista por baixo da auga, a Matemática pura.

A Matemática aplicada pode ser considerada como aquela actividade ou actividades nas que as Matemáticas atopan a súa aplicación máis alá dos seus propios intereses. Pola súa mesma natureza, a Matemática aplicada é interdiciplinar e a ela deberían dedicarse, en termos ideais, só aqueles que non teñen o principal interese nas Matemáticas por si mesmas. Desde este punto de vista, por exemplo, se a outra materia implicada fose a Física, sería difícil decidir se os interesados nela son físicos teóricos ou matemáticos aplicados, e mesmo se estamos a falar de Física teórica ou de Matemática aplicada.

É indiscutible que a relación entre as Matemáticas e moitas das outras ciencias leva experimentando un cambio substancial ó longo das últimas décadas, cambio que en xeral foi positivo e deu froitos claramente perceptibles. O desenvolvemento dos ordenadores, cada vez máis potentes, ten moito que ver con este cambio, pero non é o seu único responsable, aínda que nun nivel popular semella identificarse a Matemática aplicada con aquela que utiliza os ordenadores como ferramenta. Emporiso, este cambio non afecta o feito de que a Matemática continúa sendo unha ciencia esencialmente distinta de calquera outra.

Á Matemática chamáronlle, algunhas veces, a 'raíña das ciencias'. Para algúns é algo superior, e a súa existencia xustificase de seu; nesta visión plásmase un sentimento de autosuficiencia e presunción, que se reafirma coa con-

sideración tan estendida entre moitos matemáticos de que só necesitan deles mesmos. Esta actitude mostra unha especie de sentimento case divino ou celestial, polo que a superioridade da mente sobre a materia atopa a súa mellor expresión nas Matemáticas, xa que elas son, ó mesmo tempo, a máis nobre e pura forma do pensamento. Seguramente unha das máis apaixonadas confesións, neste sentido, foi a do matemático inglés G. H. Hardy (1877-1947), quen afirmou que a mellor forma de xustifica-la práctica das Matemáticas é a de consideralas como unha forma de arte.

Diante desta actitude extrema de Hardy, que defendeu o estudio das Matemáticas como unha forma superior do coñecemento humano, independentemente da súa utilidade social, atópase a postura oposta, que entende que só se deben considerar e estudar aqueles aspectos das Matemáticas que sexan útiles socialmente. Esta visión atopou, probablemente, a súa máxima expresión na China, polo que é coñecida como 'Maoísmo matemático'. Baixo o réxime de Mao declarouse, nun certo momento, unha moratoria sobre a investigación científica en xeral que afectou tamén as Matemáticas. Os investigadores foron obrigados a realizalo seu traballo de acordo co principio de que "a investigación científica debe servi-la política proletaria, os traballadores, os campesiños e os soldados, e estar integrada totalmente no proceso productivo". Durante ese período funcionaron na China comités asesores

que informaban sobre a importancia da investigación que se estaba a realizar en Matemáticas, así como sobre a súa conformidade con ese principio político; é dicir, sempre baixo o criterio de que a investigación que se fixese debía estar dirixida á resolución de problemas prácticos, e que o seu ensino debería basearse en aplicacións concretas. Ata se fixo presión sobre os investigadores para que abandonasen o seu traballo en certas áreas inútiles para tal obxectivo, como ocorreu, por exemplo, coa Topoloxía¹.

As Matemáticas tamén teñen sido consideradas, durante longo tempo, como o “servente da Ciencia”; é dicir, como un operario cuantitativo que proporciona as ferramentas, e tamén moitas veces o marco axeitado, ás outras ciencias. Esta consideración non ten sentido na actualidade; hoxe son xa tantas as actividades nas que os matemáticos colaboran co resto dos científicos que as Matemáticas son máis un compañeiro de viaxe ca un servente.

Unha terceira forma de concibi-las Matemáticas é consideralas como a linguaxe da que dependen as outras ciencias para cuantifica-lo que fan. R. Feynmann, premio Nobel de Física no ano 1965 polo seu traballo sobre a electrodinámica cuántica, dixo: “O Universo semella ser indescribible non sendo coa linguaxe das Matemáticas”. Non é difícil ilustrar esta afirmación, xa

que os exemplos ó longo da historia son innumerables. Pola súa relevancia, citarei só tres.

Primeiro exemplo: Newton quería achar un marco teórico que lle permitise describi-lo movemento dos obxectos baixo a influencia da forza da gravidade, incluíndo nese marco as Leis de Kepler do movemento planetario, e logrou o seu obxectivo ó enunci-la súa Lei de Gravitación Universal. Pero ó mesmo tempo desenvolveu o cálculo infinitesimal, un dos maiores logros da ciencia ó longo da historia.

Segundo exemplo: Einstein empregou moitos anos en tratar de formular dun xeito preciso o feito de que a gravitación é unha consecuencia da curvatura do espacio-tempo, pero non sabía cómo expresalo en termos matemáticos. Contan as crónicas que, certo día, dirixiuse ó seu amigo M. Grossman e díxolle: “Grossman, tes que me axudar ou vou tolear”. Este amigo faloulle entón a Einstein do traballo de Riemann sobre os espacos con curvatura. Neste contexto, o da Xeometría non-euclidiana, xa se desenvolvera unha inxente cantidade de investigación básica ou pura, que se atopaba en disposición de ser usada. Einstein, que era ante todo un físico e matemático só por necesidade, respirou entón aliviado e continuou co seu traballo sobre a Teoría da Relatividade Xeral.

¹ En 1976, unha delegación de matemáticos americanos visitou a China, e tiveron entón a oportunidade de celebrar encontros informais con algúns matemáticos chineses. No informe que elaboraron sobre a visita recóllese descrições das súas entrevistas que permiten constata-la terrible realidade daquela situación.

Esta conexión entre as Matemáticas e a Física, tan clara nestes dous exemplos, ten estado presente en tódolos tempos, xa que a motivación máis importante da Matemática foi desde sempre a Física, ou, se se prefire, o mundo que nos rodea, motivación que segue a medrar co paso do tempo, tanto en extensión coma en profundidade. S. Weinberg, tamén premio Nobel de Física, fala da existencia de coincidencias 'sorprendentes' ou 'fantasmais'. Segundo el, sempre resulta sorprendente para o físico que imaxina un novo concepto ou idea constatar, *a posteriori*, que os matemáticos xa estiveran antes alí. A Teoría Abstracta de Grupos, que ninguén dubidaría en situar dentro da Matemática pura, proporciona un claro exemplo desta situación.

Terceiro exemplo: en esencia, un grupo é simplemente unha forma matemática de expresa-la noción de simetría. Cando os físicos descubren, na primeira metade do século, a existencia da Teoría de Grupos, atópanse con que iso é precisamente o que eles necesitan para unifica-las grandes leis da Física (da conservación da enerxía, do momento, do spin, da carga, etc.). Estas leis resultan ser un reflexo da simetría do mundo que nos rodea, e este sutil principio é un dos conceptos fundamentais na ciencia actual. Por exemplo, é ben sabido que, por razóns bastante complexas, a pregunta máis básica que se pode facer sobre unha partícula elemental é cál é o seu grupo de simetrías.

O PODER DAS MATEMÁTICAS

En termos xerais, ós matemáticos sempre se nos acusa de vivir nunha torre de marfil, perdidos nun mundo de abstracción formado por puntos infinitamente pequenos, circunferencias perfectamente redondas ou liñas infinitamente delgadas, por exemplo; é dicir, obxectos ideais que son irrelevantes para o mundo que nos rodea.

Pero coído que a abstracción non é, en absoluto, algo malo ou negativo, e que a construción de modelos ideais do mundo ó noso redor sobre unha base matemática ten resultado positiva en innumerables ocasións. Lémbrese que o mundo non é como semella ser. Por exemplo, ¿quen podería imaxinar, mirando pola fiestra, que a masa se aproxima ó infinito cando un se achega á velocidade da luz? Certamente, poderíamos preguntar: ¿a quen lle interesa iso? É obvio que lles interesa ós físicos, e supoño que tamén ós matemáticos, e, se a historia serve para algo, temos que admitir que tamén lles interesa a moitos máis, aínda que a miúdo ese interese xurda anos, ou mesmo décadas ou séculos, despois de que a correspondente teoría matemática fora desenvolvida. Por exemplo, a Xeometría de Riemann, que foi esencial para a formulación da Teoría da Relatividade, foi formulada sesenta anos antes de que Einstein a utilizara. A Teoría de Grupos de Lie (S. Lie, 1842-1899), fundamental na Física actual, desenvolveuse polo menos trinta anos antes de se comezar a aplicar na Física de

Partículas. A Teoría de Galois, ferramenta indispensable na Criptografía moderna, iniciou o seu camiño hai máis de cento cincuenta anos.

Doutra banda, o descubrimento do positrón polo físico P. A. M. Dirac (1902-1984) amosa como, ás veces, as Matemáticas chegan a ser “máis reais cá propia realidade”. Dirac estableceu as ecuacións de movemento do electrón baseándose fundamentalmente en consideracións de simetría. Pero sucedeu algo inesperado: as súas ecuacións predicían a existencia dunha certa partícula, idéntica ó electrón en todo agás na súa carga. Ninguén observara esta hipotética ‘antipartícula’, pero os físicos experimentais confirmaron rapidamente a súa existencia. Este descubrimento ten sido catalogado como un dos grandes triunfos da Física, pero teño para min que máis ben foi, de feito, un gran triunfo das Matemáticas.

Permítanme que describa outros exemplos, máis recentes no tempo, que amosan esa interrelación que se produce, sempre dun xeito inesperado e sorprendente, entre as Matemáticas e as outras ciencias, e que levan por medio das Matemáticas a obter elegantes solucións de problemas propostos nesoutras ciencias.

Os químicos xa sabían, desde comezos do século, que cando un fluxo de raios X atravesaba un cristal, cada un dos seus raios sofre unha difracción ó bater cun átomo dentro do cristal; así, ó obter a imaxe do cristal por medio dos

raios X, o que se consegue é unha imaxe bidimensional na que o nivel de escuridade varía de acordo coa situación no espazo dos distintos átomos que forman o cristal. Isto era unha especie de xeroglífico para os químicos, pois o que eles querían era poder describir con precisión a situación espacial dos átomos dentro do cristal. O problema co que topaban era o seguinte: os raios X, o mesmo ca calquera outra radiación electromagnética, pódense ver como ondas, ben determinadas pola súa amplitude e a súa fase; pero as imaxes bidimensionais obtidas por medio dos raios X detectan só as amplitudes das ondas e non as súas fases, o que en definitiva facía aparentemente imposible a dedución da estrutura tridimensional do cristal.

Este problema, que durante décadas intrigou ós químicos, non foi resolvido ata corenta anos máis tarde, ó redor de 1950, e a súa solución débese a un matemático chamado H. Hauptman, quen se decatou de que podía ser formulado en termos puramente matemáticos, e que para el existía xa unha solución moi elegante. Ata aquel momento os cristalógrafos só podían observa-lo que poderíamos pensar como a ‘sombra’ dun fenómeno físico, pero Hauptman probou que se podía reconstruí-lo fenómeno físico real a partir desa ‘sombra’, utilizando unha maquinaria matemática xa clásica e que se atopaba a disposición da comunidade científica desde había arredor de cen anos: as técnicas da Teoría de

Fourier². Por certo, Hauptman recibiu o premio Nobel de Química en 1985.

O feito certo e indiscutible é que a aplicabilidade ou non aplicabilidade dunha determinada teoría matemática é algo non predicible. P. A. Griffiths, matemático e director do Instituto de Estudos Avanzados de Princeton, abunda nesta afirmación ó dicir: "Canto máis fundamental é a Matemática implicada tanto máis ampla resulta se-la súa aplicación".

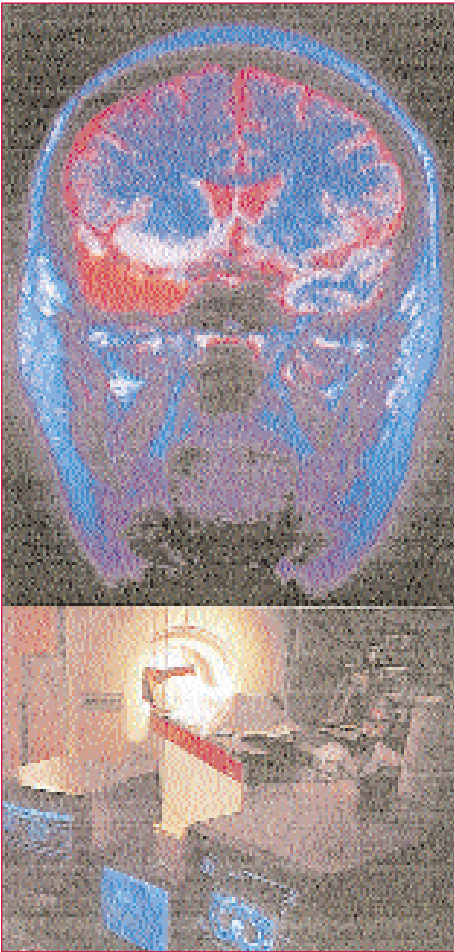
Unha excelente ilustración deste feito xurdiu hai só unhas décadas, cando o enxeñeiro A. M. Cormack andaba á busca dun método que lle permitise precisa-la localización e densidade dun obxecto no interior do corpo humano sen ter que recorrer á cirurxía. Daquela os médicos só dispoñían dos raios X que, como xa dixemos, proporcionan información unicamente en dúas dimensións.

O problema que se propón é o seguinte: se se fai pasar un feixe de raios a través dun obxecto de densidade variable, é posible medi-la cantidade de radiación que sae polo outro lado do obxecto e, polo tanto, cánta materia existe no obxecto ó longo da traxectoria de cada un dos raios do feixe. A cuestión é cómo se poden reconstruí-las distintas densidades no interior do obxecto

to a partir da información así obtida. A solución para este problema, desde o punto de vista puramente matemático, era xa coñecida desde moitos anos atrás, a partir dos traballos dun matemático chamado J. Radon (1887-1956). Usando as técnicas de Radon³, Cormack observou que é posible determinar con toda precisión a localización e maila forma dun obxecto no interior do corpo humano a partir das imaxes do obxecto obtidas por medio dos raios X desde distintos ángulos. Naceu así o xa popular escáner ou TAC, é dicir, a tomografía axial computarizada. Este mesmo principio foi estendido posteriormente para obte-las imaxes por resonancia magnética, aínda dunha maior precisión. En ámbalas técnicas se realiza unha gran cantidade de medidas que son esencialmente unidimensionais, e utilízase unha técnica puramente matemática para reconstruí-la, a partir delas, unha imaxe tridimensional. Máis recentemente, facendo uso das antipartículas descubertas por Dirac, desenvolveuse a tomografía por emisión de positróns, que permite medir non só a anatomía, senón tamén o metabolismo do órgano en cuestión. A. M. Cormack, enxeñeiro, foi galardoado co premio Nobel de Medicina no ano 1979.

² A función densidade de electróns é unha función triplemente periódica, non negativa e con soporte moi pequeno, e é posible determina-los valores absolutos dos seus coeficientes de Fourier a partir de medidas experimentais. A partir disto, Hauptman foi quen de deduci-las fases das ondas a partir das intensidades na placa de raios X.

³ Existen moitas outras aplicacións da técnica de Radon, posiblemente non tan coñecidas nin de tanta repercusión popular. Por exemplo, a técnica de Radon utilízase en Oceanografía para determina-la temperatura dos océanos, o que non é algo intrascendente, xa que esa temperatura ten unha enorme influencia sobre o clima.



Imaxe do cerebro por resonancia magnética R.N.M. Os estudos de Cormack deron pé ó nacemento do TAC e posteriores modificacións.

Posiblemente unha das razóns polas que as Matemáticas chegaron a ser de tanta utilidade é que lograron romper coas súas barreiras internas. Téñase en conta que Henri Poincaré (1854-1912) foi, probablemente, o

último matemático do que se podería dicir que tiña un coñecemento global das Matemáticas. O inmenso desenvolvemento acadado ó longo do século XX fai imposible que ninguén posúa hoxe tal coñecemento.

É un feito indiscutible que a Segunda Guerra Mundial pode considerarse como unha fronteira no avance da maioría das ciencias, e podemos falar dun antes e un despois dela, polo menos no tocante ás Matemáticas. Lamentablemente, a guerra foi desde sempre unha das motivacións máis importantes para o desenvolvemento de aplicacións en tódolos ámbitos da ciencia, e as Matemáticas non son alleas a esta influencia.

Nos Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial, os matemáticos con máis talento foron recrutados para traballar nos centros de investigación do Goberno, nas industrias de guerra, etc. Unha lista non exhaustiva das actividades nas que eses matemáticos estiveron directamente implicados inclúe, por exemplo, a aerodinámica, a hidrodinámica, a balística, o desenvolvemento do radar e do sonar, a fabricación da bomba atómica, a criptografía e a intelixencia militar, a fotografía aérea, a meteoroloxía, a investigación operativa, o perfeccionamento dos ordenadores, a econometría, os foguetes, a progresión de teorías de control, etc. Foron innumerables os investigadores de sona involucrados nestas e noutras moitas actividades, igual que moitos dos seus discípulos.

A explosión da bomba atómica sobre o Xapón e a posterior invención de novas bombas máis potentes, fixo que os físicos atómicos, que vivían nas súas torres de marfil académicas, experimentaran un fondo sentimento de culpabilidade, tamén estendido á comunidade matemática. As Matemáticas, que se consideraban a si mesmas como unha doutrina arredada, allea ás influencias e condicionamentos impostos ás outras ciencias polas realidades do mundo e libres da súa contaminación, mostráronse de súpeto como algo que tamén posuía a capacidade de producir un enorme dano. Algúns matemáticos comezaron entón a distinguir no seu traballo unha parte boa, a Matemática pura, e unha parte mala, a Matemática aplicada de calquera tipo que fose. De feito, algúns matemáticos, e con eles toda unha xeración de discípulos, abandonaron para sempre o estudio das aplicacións. Por exemplo, N. Wiener (1894-1964), que estivera involucrado na evolución de teorías de control, renunciou a todo apoio do Goberno ó seu traballo e dedicou o resto da súa vida a un “traballo bo”, en Biofísica, e ó activismo a prol dos dereitos humanos.

Despois da Segunda Guerra Mundial chegou a Guerra Fría e o inicio da carreira espacial. De novo, milleiros de matemáticos foron empregados nas actividades das industrias aeroespaciais, tanto nos Estados Unidos como na Unión Soviética; e algo

semellante está pasando no momento actual co perfeccionamento teórico e industrial dos ordenadores.

A implicación das Matemáticas nas actividades que, directa ou indirectamente, gardan algunha relación coa guerra ten acadado tal grao de importancia que xa se teñen escoitado voces afirmando que, da mesma forma que a Primeira Guerra Mundial foi a guerra dos químicos, e a Segunda Guerra foi a dos físicos, a Terceira Guerra, que confiemos nunca se chegue a producir, será a guerra dos matemáticos. Quizais este sería un bo momento para lembrarles ós científicos en xeral, e ós matemáticos en particular, a advertencia que os alquimistas facían ós seus discípulos: “Apartade os poderosos dos vosos laboratorios, pois abusan do sagrado misterio para poñelo ó servicio do seu poder egoísta”.

En definitiva, por unha ou outra razón, o feito certo é que as Matemáticas veñen caracterizándose nestes últimos tempos por unha tendencia á especialización en subcampos cada vez máis pequenos. Unha primeira consecuencia disto é que algúns destes subcampos están sendo explorados moi a fondo. Unha segunda consecuencia é que os matemáticos temos un enorme problema de comunicación entre nós mesmos. É innegable a persistencia desta fragmentación en pequenos subcampos⁴, pero os seus efectos negativos quedan paliados polo feito de que

4 O “Mathematics Subject Classification 2000”, publicado por Math. Reviews e Zentralblatt für Math., abrangue 63 áreas, 557 subáreas e 5031 sub-subáreas.

moitos problemas especialmente interesantes poden estudiarse agora desde unha perspectiva moito máis xeral.

OUTRAS APLICACIÓNS DAS MATEMÁTICAS

Do que levo dito ata agora, o meu lector podería deducir que a relación das Matemáticas con outras ciencias só se produce, ou polo menos fundamentalmente, coa Física. Tal conclusión, quizais válida antano, non sería correcta hoxe en día. As Matemáticas están a facer numerosas contribucións a moitas outras disciplinas, ó tempo que esoutras disciplinas propoñen tamén novos retos ás Matemáticas, con distintos tipos de problemas que levan a novas aplicacións, e así sucesivamente.

Un exemplo ilustrativo disto proporcionáno o estudo da dinámica dos fluídos. O aparello matemático deste campo xira, fundamentalmente, ó redor das chamadas ecuacións de Navier-Stokes. Actualmente estas ecuacións estanse utilizando para estudar unha increíble cantidade de fenómenos, como por exemplo a aerodinámica, a formación e comportamento dos furacáns, o fluxo sanguíneo no corazón, os fluxos a través de membranas porosas, a mestura do combustible nun carburador, a formación de cristais líquidos, o comportamento do plasma nun reactor de fusión, o movemento das galaxias, as correntes, as nubes, os ventos, etc. Esta lista, aínda que incompleta, pode dar unha idea de por qué

tanta xente se interesa nestas ecuacións.

En particular, o estudo das turbulencias e do caos esperta un interese especial hoxe en día, tanto desde o punto de vista teórico como desde o práctico. O estudo do comportamento caótico, é dicir, desas situacións nas que pequenos cambios producen grandes efectos, é probablemente un dos aspectos das Matemáticas implicadas que atrae unha maior atención popular (lémbrese o terrible efecto que unhas poucas moléculas de clorofluorocarbonados producen no ozono da nosa atmosfera).

Algunhas outras áreas das Matemáticas, aínda que non moitas, certamente, teñen sido tamén utilizadas no pasado nas chamadas Ciencias da Vida, como ocorre por exemplo coa Estatística, se ben esa utilización se producía nun nivel non fundamental. Esta situación está cambiando. Gracias ás novas técnicas creadas en tempos recentes e á aparición dos ordenadores, a Matemática pode xa traballar coa complexidade dos organismos biolóxicos e contribúe dun xeito importante ó seu mellor coñecemento. A capacidade das Matemáticas para distinguir modelos e organizar información comeza a penetrar sistemas tan básicos como, por exemplo, as redes de neuronas. O desenvolvemento do escáner, xunto cos estudos sobre a dinámica dos fluídos, permitiu, por exemplo, a elaboración de modelos por ordenador do ril, do oído e do páncreas e os do corazón

permitiron xa melloras no deseño das válvulas artificiais.

Hoxe, biólogos e matemáticos traballan xuntos no estudio dos mecanismos de duplicación do ADN. A denominada Teoría de Nós, que moi poucos matemáticos dubidarían en cualificar como pura, xunto coa Teoría de Probabilidades e a Combinatoria, axudan a que os biólogos comprendan mellor a complexidade da mecánica tridimensional nas cadeas do ADN.

¿E que dicir da Economía? As aplicacións das Matemáticas na Economía son tamén innumerables. O modelo do economista americano K. Arrow, premio Nobel de Economía, permite predici-lo comportamento dos mercados libres; o éxito deste modelo foi tal que se está producindo unha matematización do conxunto das ciencias económicas.

Na industria, a modelización por ordenador está a revolucionar todo dun xeito tal que aquelas industrias que non se adapten ó cambio corren o risco de quedar desfasadas. As mellores, tanto no *hardware* como na modelización matemática ou nos algoritmos implicados no *software*, fan avanzar

estas aplicacións dunha forma extremadamente rápida. Un bo exemplo desta situación proporciónao o deseño dos microchips, que se realiza por métodos matemáticos utilizando a denominada Matemática discreta⁵. Outra área básica da Matemática, a Teoría de Corpos Finitos, atopou numerosas e importantes aplicacións na teoría de ordenadores e nas comunicacións⁶.

¿MATEMÁTICA PURA OU MATEMÁTICA APLICADA?

Hoxe en día estamos xa afeitos a falar de que hai que elixir entre investigación 'pura' ou investigación 'aplicada', dos Plans I+D, etc., e coido que tal disxuntiva é puramente artificial, polo menos en Matemáticas. De feito, unha gran parte do que se adoita chamar Matemática pura ten a súa orixe en investigación moi práctica, e reciprocamente. Nada impide que algún día, nun futuro quén sabe se moi próximo ou aínda moi distante, o traballo realizado nun contexto esencialmente 'puro', e por xentes visceralmente tan puras como o foi Hardy, retorne nun contexto de importante investigación práctica. E xa que a historia debe de

⁵ Unha tarefa estándar para comprobar placas con circuitos integrados consiste en mover un instrumento ó longo de centos ou milleiros de puntos no circuito e realizar algunha tarefa ou proba en cada un deles. Como levar a cabo tal test no mínimo tempo posible é un caso particular do denominado "problema do vendedor", é dicir, determina-lo camiño para visitar tódolos vértices dun grafo de forma que tal camiño sexa de lonxitude mínima.

⁶ Por exemplo, un reto para as compañías telefónicas consiste en construír sistemas que sexan ó mesmo tempo eficientes e robustos; é dicir, que utilicen o menor número posible de liñas para conducir-las chamadas, pero que asemade as dean reconducido con rapidez e eficacia cando o sistema sofre unha sobrecarga. Matematicamente isto pode ser calculado mediante un grafo do que os vértices serían as centrais telefónicas implicadas e as arestas representan as liñas telefónicas entre as distintas centrais.

servirnos sempre como guía, non resulta aventurado pensar que as aplicacións máis importantes aínda están por chegar, e farano moi probablemente en áreas que non poderíamos nin imaxinar neste momento.

Penso que a forma máis apropiada de describi-la relación entre a Matemática pura e a Matemática aplicada é consideralas como simbióticas; nunha das dúas podería sobrevivir sen a outra. A Matemática aplicada necesita da pura para exercer as súas funcións e acadalos seus obxectivos, e para que a Matemática pura non resulte estéril, sen sentido e morta, necesita da revitalización e o contacto coa realidade que só a Matemática aplicada lle pode proporcionar.

Paul R. Halmos, matemático puro ‘militante’, ó reflexionar sobre ámbalas Matemáticas, escribe:

Comprende-lo mundo e, quizais, cambialo, é a motivación do matemático aplicado. Unha vez fixado un problema, as técnicas para resolvelo son elixidas e vulgadas en función da súa efectividade; e a satisfacción atópase de acordo co grao de coincidencia da solución obtida coa realidade e a súa utilidade para realizar predicións. Pola contra, a motivación dun matemático puro é, con frecuencia, simplemente a curiosidade. A elección da técnica para resolver un problema está dictada, polo menos en parte, pola súa harmonía co contexto que o rodea, e a satisfacción é maior na medida en que a solución atopada amose conexións insospeitadas entre ideas ou conceptos que parecían moi distantes entre si.

Moitos matemáticos puros consideran a súa actividade como unha arte.

Os matemáticos aplicados parecen considera-lo seu tema, ás veces, como unha simple sistematización de métodos. Moitos matemáticos puros cren que a Matemática aplicada non é outra cousa que unha bolsa chea de trucos, sen máis mérito que o feito de que eses trucos funcionan. Para moitos matemáticos aplicados a maior parte da Matemática pura merece ser descrita como unha abstracción sen máis sentido que o seu amor por si mesma e, polo tanto, sen mérito ningún.

Este clima de tensión entre Matemática pura e Matemática aplicada non é novo, nin tampouco é algo polo que debemos lamentarnos. De feito, esta tensión é unha fonte inesgotable de novas matemáticas; primeiro a teoría acada a práctica e logo a práctica conduce a unha nova teoría. Esta situación é algo tan vello coma a propia Matemática.

BIBLIOGRAFÍA

- Cartan, H., “Nicolas Bourbaki and Contemporary Mathematics”, *The Math. Intelligencer* vol. 2 (4) 1980, 175-180.
- Casacuberta, C., e M. Castellet (eds.), *Mathematica Research Today and Tomorrow*, Lecture Notes in Math. 1525, Berlín, Springer-Verlag, 1992.
- Halmos, P. R., *Selecta. Expository Writing*, Berlín, Springer-Verlag, 1983.

Kline, M., *Mathematics in the Western Culture*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1971.

— *Matemáticas. La pérdida de la certidumbre*, Madrid, Siglo XXI de España Eds., 1985.

Steen L. A. (ed.), *Mathematics Today. Twelve Informal Essays*, Berlín, Springer-Verlag, 1978.

— *Mathematics Tomorrow*, Berlín, Springer-Verlag, 1981.



A TEORÍA DA RELATIVIDADE

*Alfonso Vázquez Ramallo**
Universidade de Santiago
de Compostela

ALBERT EINSTEIN E A TEORÍA DA RELATIVIDADE

A relatividade é unha teoría sobre o espacio e o tempo que modificou profundamente a nosa comprensión do universo. A diferenza da Mecánica cuántica —a outra gran revolución conceptual da Física do século XX— a Teoría da Relatividade foi a creación individual dunha soa persoa: Albert Einstein. Por esta razón, o autor destas liñas pensa que convén principiar este pequeno resumo das ideas básicas da relatividade e das súas consecuencias cun pequeno resumo biográfico do creador da dita teoría.

Albert Einstein naceu en Ulm (Alemaña) no ano 1879. Fixo os seus primeiros estudos en Múnic e ós dez anos ingresou no Gymnasium Liutpold. Considerado un mal estudante pola súa indiferencia ante o ensino que recibía, algúns dos seus profesores aconselláronlle abandona-los estudos. Sen embargo, Einstein tiña unha formación autodidacta en Física e Matemáticas. Ós dezasete anos ingresa no

Instituto Politécnico de Zúric, onde o seu desinterese polos cursos continuou e a piques estivo de suspende-los exames.

En 1900 rematou os seus estudos. Gracias á axuda dun amigo conseguiu un emprego na oficina de patentes de Berna. Este posto de traballo proporcionoulle unha certa seguridade económica que lle permitiu elabora-las súas innovadoras ideas illado das principais correntes da Física. En 1905 deu ó prelo tres artigos revolucionarios. No primeiro deles daba unha explicación do efecto fotoeléctrico, pola que recibiría o premio Nobel en 1921. No segundo artigo desenvolvía unha teoría xeral dos movementos de axitación molecular. Finalmente, no terceiro formulaba a Teoría Especial da Relatividade.

Malia o seu illamento, o seu traballo comezou a ser recoñecido, o que fixo que lle ofreceran postos docentes en Zúric, Praga e Berlín. En 1915, en plena Primeira Guerra Mundial, Einstein completou a súa formulación da Teoría Xeral da Relatividade. Despois

* Catedrático de Física Teórica.

da chegada de Hitler ó poder en 1933, emigrou ós Estados Unidos, onde ocupou un posto no Institute for Advanced Studies en Princeton. Einstein faleceu no ano 1955. Á marxe da Física, Einstein destacou polo seu pacifismo e os seus valores morais.

No que segue imos facer un percorrido polas ideas básicas da Teoría da Relatividade, comezando polos seus antecedentes históricos.

A Teoría da Relatividade tivo tal influencia na nosa percepción da realidade e do universo, e deu lugar a tal cantidade de aplicacións prácticas e tecnolóxicas, que é difícil facer unha lista exhaustiva dos seus logros directos ou indirectos. Como toda teoría científica, debe considerarse incompleta e, polo tanto, susceptible de ser modificada. Posto que a ciencia sen feitos experimentais se converte, en último termo, en especulación, procuraremos na nosa exposición incluí-las experiencias realizadas co propósito de verifica-las diferentes prediccions teóricas. O que imos relatar é unha das máis grandes fazañas intelectuais da historia da humanidade con consecuencias que persistirán durante os vindeiros séculos.

A FÍSICA A FINAIS DO SÉCULO XIX

A física clásica está construída sobre dúas columnas básicas: a Mecánica newtoniana e a Teoría electromagnética. Os logros destas dúas teorías son considerables e pode dicirse

sen esaxeración que os coñecementos derivados delas son responsables da maior parte do progreso técnico acadado a finais do século XIX.

A mecánica de Newton permitiu describir de xeito razoablemente correcto o movemento dos obxectos materiais. A aplicación das leis de movemento de Newton deu lugar a un gran desenvolvemento da enxeñería. Por outra banda, as ecuacións newtonianas explican o movemento dos planetas e outros obxectos celestes con gran precisión.

A Teoría Electromagnética de Maxwell logrou unificar, nun mesmo marco teórico, os fenómenos eléctricos, magnéticos e da luz. As ecuacións obtidas por Maxwell constitúen a culminación e a síntese de moitas leis e observacións efectuadas desde o século XVII sobre a luz, a electricidade e o magnetismo.

A Mecánica clásica ten os seus alicerces nunha determinada concepción do espacio e do tempo. De feito, na Mecánica newtoniana admítense implicitamente que o espacio e o tempo son inertes, no sentido de que o movemento dos corpos non inflúe en absoluto neles. Deste xeito, na teoría clásica suponse que é posible introducir un tempo universal, único e absoluto, que transcorre uniformemente e de igual maneira para tódolos corpos. Como imos explicar máis adiante, estes conceptos clásicos teñen que ser revisados ante a evidencia dunha serie de feitos experimentais que os contradín. O

resultado desta análise é a Teoría da Relatividade, que supón unha intensa revolución científica e filosófica, como consecuencia da cal a nosa comprensión do mundo físico cambia profundamente.

Tal como acontece habitualmente na ciencia, a mesma Física clásica contén o xerme das ideas relativistas. Para poñer de manifesto este feito só hai que descubri-las inconsistencias e incompatibilidades entre o Electromagnetismo e a Mecánica clásica. Neste sentido é importante resaltar que estas dúas teorías se comportan de xeito distinto cando se cambia de sistema de referencia.

Un sistema de referencia é un sistema de coordenadas que permite fixar a posición dos corpos no espazo e un sistema de reloxos que serve para determinalo tempo; son unha clase destacada os chamados sistemas de referencia inerciais, que se definen como aqueles nos que unha partícula que se move libremente (é dicir, sobre a cal non se exerce forza ningunha) o fai cun movemento uniforme (ou sexa, con velocidade constante). Desta definición séguese que o movemento relativo de dous sistemas de referencia inerciais é o que corresponde a unha velocidade relativa constante. Para verificar este feito abonda considerar unha partícula libre que estea en repouso con respecto a un sistema de referencia inercial K . Posto que a partícula é libre, o seu movemento noutro sistema inercial K' debe ser uniforme, é dicir, con velocidade constante. Dado

que estaba en repouso no sistema K , a velocidade da partícula medida no sistema K' debe se-la velocidade relativa de K respecto de K' , o que proba a nosa afirmación.

O Principio de Relatividade de Galileo establece que as leis da Mecánica clásica son as mesmas en tódolos sistemas de referencia inerciais. Para verificar que a mecánica de Newton satisfai este principio, é esencial supoñer que o tempo é absoluto e, polo tanto, independente do sistema de referencia. Unha consecuencia inmediata desta suposición é a lei clásica de composición de velocidades, que establece que as velocidades se compoñen como unha simple suma ordinaria. Así, por exemplo, se alguén que vai nun tren en movemento lanza un obxecto, a velocidade deste medida por alguén que está parado na estación é a suma da velocidade con que foi lanzado desde o tren máis a velocidade do tren.

Contrariamente ó que acontece na Mecánica newtoniana, a Teoría Electromagnética de Maxwell non satisfai o Principio de Relatividade de Galileo. Isto é unha consecuencia de que nas ecuacións de Maxwell intervén explicitamente a velocidade de propagación das ondas electromagnéticas no baleiro. Esta velocidade coincide coa velocidade da luz no baleiro, que denotaremos por c , e é numericamente igual a trescentos mil quilómetros por segundo. De feito, pensábase que as ecuacións de Maxwell só eran válidas cando se aplicaban a un sistema de referencia en repouso absoluto, que

estaría ligado a un medio hipotético denominado éter universal. Admitíase que o éter era un medio que penetraba todo, homoxéneo e isótropo, que se atopa en repouso absoluto e enchendo todo o espazo.

No século XIX os físicos tiñan varias razóns teóricas para crer na existencia do éter; a principal era a propia natureza da interacción electromagnética. Sabíase que o electromagnetismo se propaga por medio de campos e considerábase que eses campos necesitaban un soporte material. Así pois, os campos electromagnéticos e a luz non serían máis que vibracións do éter, da mesma maneira que o son non é outra cousa que un movemento oscilatorio dun gas. É preciso sinalar que, desde o punto de vista da Física do século XIX, esta interpretación era, sen dúbida, a máis natural, xa que estaba en concordancia coa mentalidade mecanicista da época. Ademais, pensábase que a interacción gravitatoria, responsable da caída dos corpos e do movemento dos astros, tamén tiña o éter como soporte material. Deste xeito, as teorías de campos coñecidas daquela considerábanse simplemente como unha descrición dos posibles movementos do éter.

Neste contexto histórico xorde o problema de demostrar experimentalmente a existencia das velocidades absolutas. É bastante doado deseñar un experimento ideal con este obxectivo: supoñamos que temos un corpo que se move con respecto ó éter inmóbil. Imaxinemos que colocamos nel unha fonte e un detector de luz. Segundo a

lei clásica de composición de velocidades, se o corpo se move na mesma dirección e sentido da luz, esperaríase que a súa velocidade fose menor, mentres que se nos movemos na dirección contraria á da propagación da luz, a velocidade desta debería de ser maior. Emporiso, a velocidade da luz é moi grande comparada coas velocidades que se poden acadar con corpos macroscópicos. Isto quere dicir que, se medimos directamente a variación da velocidade da luz, o efecto vai ser máis pequeno cá precisión dos aparellos de medida e, polo tanto, inapreciable experimentalmente.

A solución a este problema de medición achárona os físicos americanos Michelson e Morley. No canto de medir directamente a velocidade, eles propuxeron compara-los tempos de percorrido da luz ó longo de dúas direccións distintas. Nunha das direccións o raio de luz percorría un camiño paralelo á dirección de movemento respecto ó éter, mentres que na outra dirección a luz é perpendicular á dirección de movemento. Tras ser reflectidos en espellos, os raios facíanse coincidir. Se realmente a velocidade da luz dependera da dirección de movemento, o tempo de percorrido dos dous raios sería distinto e produciríase unha figura de interferencia facilmente observable.

Michelson e Morley levaron a cabo o seu experimento por primeira vez en 1881. Como velocidade respecto ó éter utilizaron a velocidade do movemento orbital da Terra. Para sorpresa

dos dous científicos e dos seus contemporáneos, non se observou interferencia ningunha e, polo tanto, non se puido poñer de manifesto a máis mínima influencia do movemento do interferómetro na velocidade da luz. O experimento de Michelson-Morley foi repetido en varias ocasións con instrumentos de maior precisión e con idéntico resultado.

Existen outras evidencias da constancia da velocidade da luz. En 1912, outro experimento fundamental foi proposto polo astrónomo holandés W. de Sitter. Consistía en observa-la luz emitida por un sistema de estrelas dobres próximas entre si e que xiran arredor do centro de masa común. De Sitter sinalou que certas parellas destas estrelas teñen un plano orbital case paralelo á nosa visual, de xeito que cada estrela se afasta ou achega á Terra alternativamente mentres xira ó redor da súa compañeira. Se a velocidade da luz emitida pola estrela cando se afasta fose distinta da velocidade da luz emitida cando se achega a nós, poderíamos ver unha imaxe múltiple dela. Isto non se observa experimentalmente pois soamente se ven as órbitas elípticas regulares que as dúas estrelas describen unha ó redor da outra.

Moitas outras experiencias confirmaron o resultado negativo do experimento de Michelson-Morley. Sinalemos, por exemplo, unha verificación da constancia da velocidade da luz, realizada moi recentemente utilizando os sinais de radio dos satélites artificiais do sistema de posición global

GPS. Esta análise permitiu verifica-la independencia da velocidade da luz coa dirección cunha precisión de tres partes en mil millóns.

A TEORÍA ESPECIAL DA RELATIVIDADE

Os feitos experimentais que acabamos de describir poñen de manifesto a inexistencia do éter e que, daquela,



Albert Einstein, o creador da Teoría da Relatividade.

non ten sentido falar de repouso absoluto. Isto levou a Einstein a retoma-lo Principio de Relatividade que, como xa sabemos, na súa versión clásica non é satisfeito pola Teoría Electromagnética. A reformulación deste principio implica, necesariamente, un cambio das nocións newtonianas absolutas do espacio e do tempo.

Como resultado da súa análise, Einstein formulou a Teoría Especial da Relatividade, baseada nos dous postulados seguintes:

1) Principio de Relatividade de Einstein: as leis da Física (e non soamente as da Mecánica) son as mesmas en tódolos sistemas de referencia inerciais.

2) Existe unha velocidade límite de propagación das interaccións que é a velocidade da luz no baleiro c .

O primeiro destes postulados indícanos claramente que a transformación de coordenadas e tempo entre dous sistemas de referencia inerciais debe de diferir substancialmente da transformación de Galileo, pois esta última, como xa foi mencionado, non deixa invariante as ecuacións do electromagnetismo.

No segundo postulado, Einstein elevou a categoría de principio unha característica da electrodinámica de Maxwell. Neste postulado faise a hipótese de que a velocidade máxima de propagación das interaccións no baleiro ten un carácter universal, que está ligada ás propiedades do espacio e do

tempo e non depende do tipo particular de interacción. En virtude do principio de relatividade, esta velocidade máxima debe se-la mesma en tódolos sistemas de referencia inerciais, o que está en consonancia cos resultados do experimento de Michelson-Morley.

A existencia dunha velocidade límite de propagación das interaccións implica automaticamente que a velocidade con que se poden mover os corpos materiais non pode ser superior a c . De feito, se unha partícula puidese moverse cunha velocidade maior cá da luz, o intercambio desta partícula entre dous corpos xeraría unha interacción entre eles que se propagaría cunha velocidade superior á da luz. Deste xeito, o segundo postulado de Einstein limita superiormente as posibles velocidades na natureza.

Cómpre salientar que, sen entrar en contradicción coa Teoría da Relatividade, poden atoparse puntos que se moven cunha velocidade superior á da luz, pero que, sen embargo, non transportan un corpo ou dan lugar a unha interacción. Como exemplo disto, consideremos dúas varas AB e CD , tal como se amosa na figura 1. Supoñamos que a vara CD rota con respecto ó punto C e que a vara AB está fixa. Considerémo-lo punto xeométrico P no cal as dúas varas se cortan. Se o ángulo α que forman as dúas varas é tan pequeno como queiramos e se a lonxitude das varas é arbitrariamente grande, a velocidade do punto P poder ser tan grande como se queira.

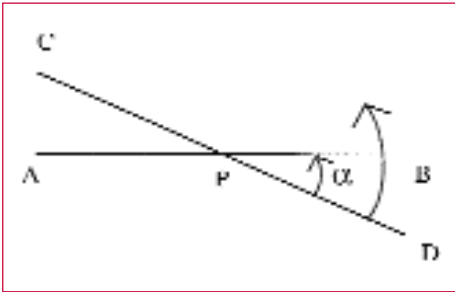


Figura 1.

Sen embargo, o punto P non corresponde a un único punto material das varas e, polo tanto, o seu movemento non vai acompañado de transporte de enerxía e non pode transmitir interaccións.

Non é difícil convencerse de que a constancia da velocidade da luz en tódolos sistemas de referencia inerciais contradí a noción clásica de tempo absoluto. Para ilustrar este feito consideremos dous sistemas de referencia K e K'. Sexan XYZ e X'Y'Z' os eixes de coordenadas de K e K' respectivamente. Supoñamos que o sistema K' se move con respecto a K ó longo dos eixes X e X', tal como se amosa na figura 2.

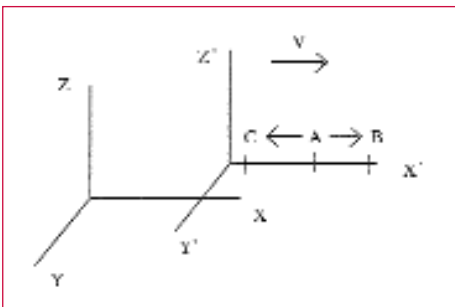


Figura 2.

Imaxinemos que desde o punto A, que está no eixe X', enviamos sinais en sentidos opostos. Sexan B e C dous puntos do eixe X' que equidistan do punto de emisión A. Os puntos B e C están en repouso no sistema K' e, posto que a velocidade da luz é a mesma en tódalas direccións, os raios de luz chegarán, no sistema K', no mesmo intre ós puntos B e C. É doado concluir que, con todo, a chegada do raio a estes dous puntos non pode ser simultánea no sistema K. En efecto, para un observador no sistema K, o punto C vai ó encontro do raio de luz, mentres que o punto B se afasta del. A velocidade da luz en K vale o mesmo que en K' e, en consecuencia, o raio alcanzará o punto C antes có punto B. Deste xeito, dous sucesos simultáneos nun sistema de referencia inercial non teñen por qué selo noutro sistema inercial, o que rompe a concepción clásica do tempo como algo absoluto e independente do estado de movemento do observador.

Dados dous sucesos arbitrarios, a súa ordenación temporal pode depender do sistema de referencia. Daquela, nun sistema de referencia un suceso pode ser anterior a outro, mentres que é posible que para outro observador inercial sexa posterior. Existe, non obstante, unha situación na cal a ordenación temporal é independente do sistema de referencia. Isto acontece cando os dous sucesos poden conectarse por medio dun sinal que se propaga a unha velocidade menor ou igual á da luz. Neste caso é sinxelo probar que o suceso que emite o sinal precede en tódolos

sistemas de referencia o suceso que a recibe. Así, no noso exemplo anterior, a emisión da luz desde o punto A prece- de sempre no tempo, en tódolos siste- mas de referencia, a chegada da luz ós puntos B e C.

En xeral, se dous sucesos se poden vincular causalmente entre si, é dicir, se un deles é a causa do outro, a súa ordenación temporal é a mesma para tódolos observadores. Esta propiedade denomínase principio de causalidade e resulta crucial para a consis- tencia da teoría; de feito, se non se verificase este principio sería imposible construír teorías científicas predictivas pois non distinguiríamos causas de efectos. A ordenación temporal de dous sucesos depende do observador cando, ó tratar de conectalos cun sinal, este se propaga a unha velocidade superior á da luz, o que, como sabemos, non está permitido polo segundo postulado de Einstein e, en consecuencia, estes dous sucesos non poden estar relacionados causalmente. Así, a existencia dunha velocidade límite das interaccións está ligada ó principio de causalidade e evita que existan paradoxos.

Para construí-lo formalismo ma- temático da Teoría da Relatividade, considérase un espacio vectorial de catro dimensións onde o tempo é a cuarta coordenada e os sucesos son simplemente puntos. Neste espacio vectorial defínese unha distancia entre puntos tal que dous puntos están a dis- tancia nula se os correspondentes suce- sos poden conectarse por un raio de luz. Este espacio de catro dimensións

denomínase espacio de Minkowski ou, simplemente, espacio-tempo.

Para atopar as leis de transforma- ción entre diferentes sistemas de refe- rencia inerciais só hai que obte-los cam- bios lineais de coordenadas do espacio-tempo que deixen invariante a métrica do espacio de Minkowski. A correspondente transformación de coordenadas denomínase transforma- ción de Lorentz. Se temos dous siste- mas de referencia como os da figura 2, a relación entre (x, y, z, t) e (x', y', z', t') é a seguinte:

$$t = \frac{t' + \frac{V}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$y = y' \quad z = z'$$

Obsérvese que na ecuación anterior aparece o cociente entre a velocidade V do sistema de referencia K' respecto a K e a velocidade da luz c . Se V é pequena con respecto a c , a ecuación anterior redúcese á Lei de Transformación de Galileo e, en particular, os tempos t e t' son iguais. Ademais, a transforma- ción de Lorentz só está definida cando a velocidade V é estrictamente menor ca c .

É sinxelo extraer algunhas conse- cuencias importantes da transforma- ción de Lorentz. Supoñamos, en pri- meiro lugar, que temos unha regra que se atopa en repouso no sistema de

referencia K e que é paralela ó eixe X. Sexa L_0 a lonxitude da regra medida no sistema K. Imos determinar canto vale a lonxitude L para un observador ligado ó sistema de referencia K' , onde a regra se move con velocidade V. Para iso temos que determina-las coordenadas dos dous extremos da regra no sistema K' nun mesmo instante t' . Usando a lei de transformación de Lorentz para a coordenada x pódese obter a relación entre as lonxitudes en repouso (L_0) e en movemento (L):

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

A raíz cadrada que aparece no segundo membro desta ecuación é menor ca un e, polo tanto, a lonxitude



Hendrik A. Lorentz. As ecuacións de Lorentz permitiron a Einstein elabora-la teoría completa da relatividade.

en repouso L_0 (denominada lonxitude propia) é maior cá lonxitude en movemento L. Este resultado da Teoría da Relatividade denomínase contracción de Lorentz.

A transformación de Lorentz tamén nos permite obter a relación entre os tempos medidos por reloxos de dous sistemas de referencia distintos. Supoñamos que un destes reloxos se atopa en repouso no sistema K' . Consideremos dous sucesos que ocorren no mesmo punto do espazo no sistema K' e sexa τ_0 o tempo transcorrido entre estes dous sucesos medido desde K' . A τ_0 denominámolo tempo propio. Facendo uso da lei de transformación de tempos, podemos obter a relación entre τ_0 e o tempo τ medido por un observador ligado ó sistema de referencia K. Esta relación é:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Nótese que no sistema K os dous sucesos ocorren nun punto que se move con velocidade V. Da ecuación anterior séguese que τ_0 é menor ca τ , o que quere dicir que o reloxo de K' atrasa con respecto ó reloxo de K.

Hai que sinalar que se consideramos intervalos de tempos entre sucesos que ocorren no mesmo punto de K, e se comparamos estes intervalos temporais coas medidas feitas desde o sistema K' , chegaríamos á conclusión de que, contrariamente ó que acontecía antes, os reloxos de K atrasan con

respecto ós de K' . Isto non supón contradición ningunha pois as dúas comparacións das marchas dos reloxos son completamente diferentes. De feito, para establecer que un reloxo de K' atrasa con respecto ós reloxos do sistema K hai que proceder da seguinte maneira: supoñamos que nun certo instante o reloxo de K' pasa por diante do reloxo de K e, nese intre, as indicacións dos dous reloxos coinciden. Para comparar posteriormente os tempos temos que cotexa-las indicacións do mesmo reloxo de K' coas do outro reloxo de K , que agora está situado no punto polo cal o reloxo de K' estea pasando nese intre. Segundo a Teoría da Relatividade, como resultado desta experiencia concluíríamos que o reloxo de K' atrasa con respecto ós de K . Deste xeito, para compara-las marchas dos reloxos en dous sistemas de referencia precísanse varios reloxos nun deles e un reloxo no outro. Polo tanto, este proceso non é simétrico con respecto ós dous sistemas: o reloxo que atrasa é sempre aquel que se compara con varios reloxos do outro sistema.

É tamén interesante analiza-lo (mal) chamado paradoxo dos xemelgos. Imaxinemos dous xemelgos: un deles é astronauta e emprende unha viaxe a unha galaxia afastada, utilizando unha nave espacial capaz de moverse a velocidades próximas á da luz. Segundo a relatividade, ó regreso da súa viaxe o astronauta sería máis novo có seu irmán.

O posible paradoxo xorde do feito de que, desde o punto de vista do

astronauta, o que se move non é el senón o seu irmán. Polo tanto, poderíamos pensar que este último debería ter menos idade á fin da viaxe. Isto, sen embargo, non é correcto pois os sistemas de referencia ligados ós dous irmáns non son equivalentes. En efecto, o astronauta regresa á Terra, o que quere dicir que describe unha traxectoria pechada e, a diferenza do seu irmán, un sistema de coordenadas ligado a el non é inercial. Así pois, non existe ambigüidade e o irmán máis vello é certamente aquel que ficou na Terra.

Convén observar que despois destas viaxes espaciais é posible adianta-lo futuro pero nunca se pode viaxar ó pasado. Isto último, que acontece en moitas narracións de ciencia ficción, violaría o principio de causalidade e soamente se podería facer, no contexto da Teoría Especial da Relatividade, viaxando a velocidades superiores á da luz, algo que, como xa sabemos, está prohibido polos postulados da teoría.

Estas diferencias entre as indicacións de dous reloxos en función do seu estado de movemento son mínimas cando as velocidades ás que se moven son pequenas comparadas coa velocidade da luz. Isto é o que acontece coas velocidades máximas que a tecnoloxía actual nos permite acadar en trens, avións, foguetes e outros medios de transporte. Polo tanto, para poder aprecia-las diferencias temporais predicidas pola Teoría Especial da Relatividade nestes casos debemos dispoñer de reloxos de extraordinaria

precisión. Ende ben, o progreso da Física proporcionáanos instrumentos de medida do tempo coa exactitude requirida.

Todo proceso físico que se repite de xeito uniforme pode ser utilizado como reloxo. As medicións máis precisas do tempo son aquelas feitas por medio dos denominados reloxos atómicos. O funcionamento destes reloxos está baseado no feito de que os átomos emiten radiación cunha frecuencia ben determinada. Así, por exemplo, os átomos dun isótopo do cesio de peso molecular 133 teñen un estado fundamental desdoblado en dous pola interacción magnética entre os electróns e o núcleo. Este desdoblamento coñécese co nome de estrutura hiperfina. A frecuencia da radiación emitida na transición dun electrón entre estes dous niveis serve para defini-lo segundo patrón no sistema internacional de unidades.

As transicións entre diferentes niveis dun átomo poden utilizarse para sintonizar un dispositivo electrónico con gran precisión e, deste xeito, construír un reloxo atómico. Para facérmolos unha idea da exactitude que se pode conseguir, basta mencionar que cun reloxo construído cun máser de hidróxeno (que utiliza un mecanismo similar ós reloxos de átomos de cesio) pode chegarse á fantástica precisión dun segundo en cen millóns de anos, suficiente para detecta-los efectos relativistas nos corpos que se moven en velocidades moito máis pequenas cá da luz.

Nunha serie de experimentos realizados nos anos sesenta e setenta, varios reloxos atómicos foron colocados en avións durante horas para verifica-los efectos relativistas. De feito, ademais da dilatación temporal que depende da velocidade, existe un efecto gravitatorio que varía coa altura do voo. Estes dous efectos foron comprobados nestas experiencias cun grao aceptable de precisión (1 %).

A dilatación relativista do tempo pasa de ser un pequeno efecto a ser enorme cando nos achegamos á velocidade da luz. Isto non é posible coa tecnoloxía actual para os corpos macroscópicos pero, sen embargo, é perfectamente factible para partículas subatómicas. De feito, nin sequera é necesario accelera-las partículas ata velocidades próximas á da luz, pois a Terra está sendo bombardeada arreo polos raios cósmicos, que son núcleos atómicos que viaxan a través do espacio interestelar a velocidades próximas á da luz. Estes núcleos colisionan coas moléculas do aire das capas altas da atmosfera e dan lugar a moitas partículas que chegan de continuo á superficie da Terra.

A maior parte das partículas que se orixinan na colisión dos raios cósmicos coas moléculas do aire son muóns. Os muóns son partículas da familia do electrón, pero unhas duasetas seis veces máis pesadas. Ademais, os muóns son inestables, pois desintégranse en electróns e neutrinos. O seu tempo de vida media en repouso é de dúas millonésimas de segundo. Se o

tempo de vida media dos muóns non dependese da velocidade, aínda viaxando á velocidade da luz, estes percorrerían uns seiscentos metros por termo medio e, polo tanto, non chegarían á superficie da Terra. Tendo en conta que os muóns que chegan á superficie terrestre son creados a uns quince quilómetros de altura, é evidente que a súa vida media en movemento debe de ser maior cá vida media en repouso. É sinxelo estima-lo valor da vida media en movemento: basta dividi-lo espacio percorrido polos muóns (quince quilómetros) pola velocidade da luz. O resultado desta división é de cincuenta millonésimas de segundo, é dicir, unhas vintecinco veces máis cós muóns en repouso. Vemos que neste caso a dilatación temporal relativista non se trata dunha pequena corrección senón, ó contrario, dun efecto moi grande.

Na actualidade os muóns poden producirse artificialmente nos aceleradores de partículas. En 1976 realizouse unha experiencia no Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) onde se estudiou a vida media de muóns que se movían a unha velocidade igual a 0,9994 veces a da luz. Medindo a vida media dos muóns en movemento e comparando o resultado da medida coa fórmula relativista (posto que coñecemos con exactitude a velocidade dos muóns) demostrouse que o valor experimental coincide coa predicción da Teoría da Relatividade cunha precisión superior a dúas partes por mil.

MECÁNICA RELATIVISTA

Na Mecánica clásica, as interaccións entre partículas materiais represéntanse mediante unha enerxía potencial, que é función das coordenadas das partículas que interactúan. É doado decatarse de que este xeito de describi-las interaccións supón unha propagación instantánea destas e, polo tanto, é inconsistente co segundo postulado da Teoría Especial da Relatividade. Por outra banda, as ecuacións da Mecánica newtoniana non son as mesmas se se fai unha transformación de Lorentz, o que quere dicir que non satisfán o principio de relatividade de Einstein. Por estas razóns queda claro que hai que construír unha nova mecánica (a Mecánica relativista) que sexa compatible cos dous postulados de Einstein.

Para que unha teoría verifique o principio de relatividade de Einstein ten que ser posible establecer unha formulación consistente dela no espacio-tempo. Isto conséguese utilizando magnitudes vectoriais con catro compoñentes: tres espaciais e unha temporal. Unha formulación deste tipo dise que é covariante relativista. A Teoría Electromagnética de Maxwell pode ser formulada deste xeito, o que asegura que as súas leis se verifican en tódolos sistemas de referencia inerciais.

Para establece-las leis relativistas do movemento dos corpos cómpre atopalos vectores con catro compoñentes que conteñan a información das propiedades mecánicas dun sistema.



James Clerk Maxwell foi quen introduciu no século XIX o modelo estatístico no que se basea a teoría da cinética da materia.

Dúas destas propiedades son a enerxía e o impulso. No contexto matemático do espacio-tempo é doado probar que a enerxía e o impulso forman parte dun mesmo vector cuadridimensional. Isto é moi importante porque supón unha certa equivalencia entre dúas magnitudes que son moi distintas na Mecánica newtoniana.

Unha consecuencia da unificación da enerxía e o impulso é o feito de que a inercia, é dicir, a resistencia dun corpo a poñerse en movemento,

aumenta coa velocidade e tende a infinito cando a velocidade do corpo se achega á da luz. Isto é consistente coa existencia dunha velocidade límite. Imaxinemos que aplicamos unha forza constante sobre un corpo. Na Mecánica newtoniana este corpo tería unha aceleración constante e, polo tanto, a súa velocidade incrementaríase indefinidamente. O impulso dunha partícula relativista sobre a cal actúa unha forza constante aumenta tamén cun ritmo constante. Sen embargo, cando a partícula acada unha velocidade próxima á da luz, a súa inercia tende a infinito e, polo tanto, aínda que o seu impulso medra indefinidamente, a súa velocidade aproxímase asintoticamente á velocidade da luz. Este tipo de comportamento relativista é hoxe en día verificado a cotío nos aceleradores de partículas.

Outra propiedade moi importante é o valor da enerxía dunha partícula nun sistema de referencia no que esta se atopa en repouso. A partir das ecuacións relativistas pódese demostrar que a dita enerxía é igual á masa da partícula multiplicada pola velocidade da luz ó cadrado. Esta afirmación é a chamada Lei de Equivalencia entre a masa e a enerxía, e pode expresarse matematicamente pola ecuación $E=mc^2$, unha das máis coñecidas da Física.

No contexto da Mecánica relativista é posible ter partículas de masa nula; o exemplo máis común é o fotón, que é o cuanto de luz. Unha partícula de masa nula móvese por forza á velocidade da luz e a súa enerxía E está

relacionada co seu momento p pola ecuación $E=pc$. É importante subliñar que non existe ningún sistema de referencia no que o fotón se atope en repouso. De existir tería que viaxar á velocidade da luz, cousa que é imposible pois a transformación de Lorentz non está definida para $V=c$. Por esta razón non ten sentido falar dun fotón en repouso e, de feito, sabemos que, segundo os postulados de Einstein, a luz se move á mesma velocidade en tódolos sistemas de referencia e polo tanto a velocidade do fotón sempre debe ser igual a c .

A Mecánica relativista desempeñou un papel esencial na comprensión da natureza cuántica da luz. Nótese que se supoñemos que a luz está constituída por fotóns, estamos adoptando unha interpretación corpuscular da radiación electromagnética. Isto supón unha certa unificación entre a materia e a radiación e, de feito, a Cinemática relativista é esencial para entender os procesos de interacción entre a materia e a radiación, tales como, por exemplo, o efecto Compton (dispersión da luz por electróns) ou os procesos de aniquilación de partículas e antipartículas, nos que a materia se transforma en radiación.

A enerxía total dunha partícula é a suma da súa enerxía en repouso (que depende da súa masa) e da enerxía cinética (que depende da súa velocidade). En calquera proceso físico ten que se conserva-la enerxía total das partículas e non necesariamente algunha destas dúas contribucións por separado.

Isto significa que, en particular, a masa non ten por qué conservarse. De feito, hai moitas reaccións en Física nuclear nas que a suma das masas dos produtos finais é menor cá suma das masas das partículas antes de se iniciar a reacción. Nin sequera o número de partículas ten que ser constante e, así, existen moitos procesos nos que se crean novas partículas ou nos que as partículas iniciais se aniquilan dando lugar a outras novas no estado final da reacción.

Sempre que nun proceso haxa unha diminución da masa total, e polo tanto das enerxías en repouso das partículas, necesariamente debe incrementarse a enerxía cinética. Deste xeito, neste tipo de proceso estamos convertendo a masa en enerxía. Este é precisamente o fundamento teórico da enerxía nuclear. Para ter unha idea das ordes de magnitude nesta equivalencia entre masa e enerxía, o máis apropiado é facer un sinxelo cálculo numérico. Supoñamos que convertemos un quilogramo de materia en enerxía. Por medio da ecuación $E=mc^2$ é inmediato verificar que un quilogramo de materia corresponde a 9×10^{16} joules. Esta enerxía é equivalente á que se libera na combustión de quince millóns de barrís de petróleo.

As aplicacións da radioactividade e a enerxía nuclear son, hoxe en día, moi numerosas. Ademais do seu uso militar e das centrais nucleares, podemos sinalar as aplicacións médicas (como técnica de diagnóstico e tratamento) ou en Arqueoloxía (para datar con precisión os restos). É tamén

importante destacar que as reaccións nucleares de fisión son as responsables da radiación emitida polo Sol e as outras estrelas. Ademais, estas reaccións serven para sintetiza-los elementos químicos pesados a partir do hidróxeno primordial e, polo tanto, son cruciais para a existencia da materia tal como se dá en toda a súa diversidade no noso planeta. Así pois, se non se puidese transformar materia en enerxía simplemente non existiríamos nin nós nin o noso planeta.

A TEORÍA XERAL DA RELATIVIDADE

A Lei da Gravitación Universal de Newton describe a atracción gravitatoria entre dúas masas en termos dunha interacción instantánea que, como xa sabemos, é incompatible coa Teoría da Relatividade. Einstein era plenamente consciente deste problema e púxose a traballar nel nada máis formula-la Teoría Especial da Relatividade. O seu punto de partida foi unha característica importante da interacción gravitatoria: o principio de equivalencia.

A segunda lei de Newton establece que a aceleración que experimenta unha partícula é proporcional á forza que se exerce sobre ela. A constante de proporcionalidade é a chamada masa inercial. En principio debemos distingui-la masa inercial da masa gravitatoria, que é a que aparece na expresión da forza da gravidade na Lei da Gravitación Universal. Newton supuxo que estas dúas masas son

iguais. Esta hipótese estaba baseada na observación experimental (que se remonta a Galileo Galilei no século XVI) de que os corpos caen coa mesma aceleración con independencia da súa masa. No século XIX, esta igualdade entre a masa inercial e a masa gravitatoria foi verificada con moita máis precisión polo físico húngaro Eötvös, que utilizou unha balanza de torsión. Na actualidade, a igualdade entre as masas inercial e gravitatoria está comprobada experimentalmente cunha precisión dunha parte en cen mil millóns.

Se tódolos corpos sofren a mesma aceleración nun campo gravitatorio con independencia da súa masa, é claro que a interacción gravitatoria pode anularse escollendo un sistema de referencia non inercial que se mova coa aceleración da gravidade. Así, por exemplo, un observador situado nun ascensor en caída libre non detectaría a atracción gravitatoria exercida pola Terra sobre os diferentes corpos que viaxan con el no ascensor. Existe entón unha certa equivalencia entre o campo gravitatorio e un sistema de referencia non inercial.

Esta equivalencia entre un sistema de referencia acelerado e o campo gravitatorio ten un carácter local. Para ilustrar este punto imaxinémo-lo campo gravitatorio da Terra. Este campo depende da distancia do punto ó centro da Terra e anúlase cando nos afastamos infinitamente del. Escollendo un sistema de referencia acelerado, podemos anula-lo campo gravitatorio

nun punto arbitrario, pero non é posible facelo simultaneamente en tódolos puntos do espacio. Deste xeito, a diferenza entre un sistema non inercial e un campo gravitatorio é o seu diferente comportamento global.

Cambiar de sistema de referencia non é outra cousa que facer un cambio de coordenadas no espacio-tempo e, deste xeito, un sistema de referencia non inercial é simplemente un sistema de coordenadas curvilíneas no espacio-tempo. A situación é similar á que se dá na xeometría ordinaria. Así, por exemplo, un plano pode ser parametrizado en coordenadas cartesianas (en termos de dúas distancias) ou en coordenadas polares planas (en termos dunha distancia e un ángulo). A descrición dun plano en coordenadas curvilíneas é formalmente moi similar á dunha superficie curva. De feito, toda superficie semella localmente un plano (o seu plano tanxente). Por esta razón, para un observador na superficie da Terra non é obvio que esta teña forma esférica. Evidentemente hai maneiras de distinguir entre unha superficie plana e outra que non o é por medio de medidas efectuadas en diferentes puntos que poñan de manifesto a curvatura da superficie.

Baseado na analoxía coa teoría de superficies, Einstein propuxo que o campo gravitatorio pode ser representado como unha curvatura do espacio-tempo. A presenza dunha masa distorsiona o espacio-tempo e modifica a súa xeometría. O espacio e o tempo pasan así de ser un marco pasivo onde

teñen lugar os acontecementos, a converterse en participantes activos na dinámica. Einstein denominou a súa teoría da gravitación como Teoría Xeral da Relatividade, en contraste coa teoría especial que soamente se ocupa dos sistemas inerciais e os espacio-tempos planos.

A teoría elaborada por Einstein é de grande elegancia e simplicidade e permite facer unha serie de predicións que poden ser verificadas experimentalmente. Unha destas predicións é que a luz se desvía da súa traxectoria como consecuencia do campo gravitatorio. En 1915 Einstein calculou o valor concreto da desviación da luz ó pasar preto do Sol. Esta predicción fíxoa en plena Primeira Guerra Mundial, o que non foi obstáculo para esperta-lo interese do astrónomo británico Eddington que, en 1919 (uns poucos meses antes do final da guerra), organizou unha dobre expedición co obxectivo de verificar a predicción relativista nunha eclipse de sol. As medidas realizáronse na illa de Príncipe (fronte á costa da Guinea española) e na cidade brasileira de Sobral, e confirmaron a predicción de Einstein. Este éxito tivo un grande efecto na opinión pública mundial e fixo moi popular a Teoría Xeral da Relatividade. Estas medidas foron repetidas con máis precisión ó longo dos anos noutras eclipses e o resultado sempre foi concordante coa teoría.

Na actualidade, as mellores observacións da desviación gravitatoria da luz son as realizadas cos quásares, aproveitando o feito de que algúns

deles se observan no ceo con ángulos moi próximos e que nun período moi preciso do ano pasan por detrás do Sol. Medindo entón a variación do ángulo relativo, pode estimarse o efecto relativista de desviación da luz. Os valores observados coinciden coa predición da Teoría Xeral da Relatividade cun erro dun 1 %. Outra consecuencia da atracción gravitatoria da materia sobre a luz son as chamadas lentes gravitacionais, nas que a desviación gravitatoria da luz produce imaxes múltiples dun mesmo obxecto. A primeira evidencia deste efecto obtívose en 1979, cando se observaron dous quásares moi próximos e similares que resultaron ser unha imaxe dobre dun único quásar.

A Teoría Xeral da Relatividade resolveu un problema da Teoría da Gravitación Universal de Newton que levaba pendente desde a metade do século XIX. Este problema era o do desprazamento do perihelio do planeta Mercurio. Como é ben coñecido, os planetas móvense arredor do Sol en órbitas elípticas. De feito, as perturbacións producidas polos movementos dos outros planetas producen pequenas desviacións respecto ás traxectorias elípticas, unha das cales é o lento desprazamento do punto da órbita máis próximo ó Sol (o perihelio). Estas desviacións poden ser calculadas con grande éxito na teoría newtoniana e, deste xeito, Adams e Le Verrier foron capaces de predicir no século XIX a existencia e localización do planeta Neptuno a partir das perturbacións da

órbita de Urano. Existía, con todo, unha diferenza de 43 segundos de arco por século entre os valores calculados e observados para o desprazamento do perihelio de Mercurio. Einstein demostrou en 1915 que a Teoría da Relatividade dá conta desta diferenza. As medidas actuais das órbitas dos planetas con radares de alta potencia confirman este resultado.

Outros tipos de tests experimentais da relatividade refírense ó retardo temporal dos sinais e ó desprazamento cara ó vermello das raias espectrais. Estes efectos foron verificados experimentalmente con gran precisión en medidas realizadas no laboratorio e con foguetes e sondas espaciais. Neste sentido é interesante sinalalas medidas do retardo temporal efectuadas coas sondas Viking na superficie de Marte que permitiron verifica-la corrección relativista cun erro do un por mil.

Tamén é interesante mencionar unha das predicións máis espectaculars da Teoría Xeral da Relatividade: os buratos negros. Estes obxectos fórmanse cando unha masa moi grande é comprimida nun volume moi pequeno, co que se xera unha rexión do espaciotempo que non pode comunicarse co exterior. Existe hoxe en día un certo consenso entre os astrofísicos en que estes obxectos existen nalgúns sistemas binarios de estrelas, nos quásares e nos núcleos activos das galaxias (véxase o artigo de J. M. F. Labastida neste mesmo número da REVISTA GALEGA DO ENSINO).

En definitiva, a Teoría Xeral da Relatividade é na actualidade unha ferramenta imprescindible para poder interpreta-las observacións do Cosmos e para elaborar modelos que nos permitan avanzar na súa comprensión.

RELATIVIDADE E MECÁNICA CUÁNTICA

A Mecánica cuántica describe os fenómenos físicos que ocorren a escalas de distancia atómicas (para máis detalles consúltese o artigo de J. Sánchez Guillén neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A Teoría Especial da Relatividade é imprescindible para poder entende-la física dos procesos nos que interveñen velocidades próximas á da luz. Se estes dous requisitos sobre distancias e velocidades se satisfán simultaneamente é evidente que, por razóns físicas de consistencia, a teoría relevante ten que ser cuántico-relativista.

A chamada Mecánica cuántica relativista foi un primeiro intento de conciliar estas dúas grandes teorías físicas do século XX. O procedemento utilizado para estende-la Mecánica cuántica ó dominio relativista é o de construír novas ecuacións de onda compatibles cos principios da relatividade especial. Particularmente interesante é a ecuación de onda construída por Dirac, que proporcionou unha teoría relativista do electrón. Quizais a máis espectacular das prediccións da ecuación de Dirac foi a existencia das antipartículas, con propiedades moi

similares ás partículas, e que se aniquilan, dando lugar a radiación, cando se poñen en contacto con elas. O descubrimento do positrón nos raios cósmicos foi unha confirmación de que as ideas de Dirac son correctas.

A pesar dos seus éxitos, a Mecánica cuántica relativista tamén presentaba graves inconsistencias. Para resolver estes problemas desenvóléronse as chamadas Teorías cuánticas de campos, nas que se abandona a formulación de teoría dunha partícula en favor dun formalismo de moitas partículas, onde o número destas non é necesariamente constante. As Teorías cuánticas de campos son as utilizadas para formula-lo chamado modelo estándar da Física das partículas elementais, que describe con grande éxito a física de tódalas interaccións elementais da materia agás a gravidade. Sinalemos, a modo de exemplo, que o principio de exclusión de Pauli e o tipo de estatística cuántica satisfeito polas diferentes partículas elementais son unha consecuencia do carácter cuántico-relativista destas teorías. É interesante lembrar neste punto que o principio de Pauli é un ingrediente crucial para entende-la disposición dos electróns nos átomos e, consecuentemente, determina as propiedades químicas destes.

A construción dunha teoría cuántica consistente que incorpore os principios da relatividade xeral é un problema aínda non resolto. De feito, a elaboración dunha teoría cuántica da gravidade é a meta de moitos dos

traballos máis actuais en Física teórica. A teoría de supercordas é a máis cualificada candidata para construí-la chamada «teoría de todo» que unifique tódalas interaccións da natureza sen excepción.

Einstein dedicou, sen éxito, os últimos anos da súa vida a tratar de atopar unha teoría unificada. Esta é unha tarefa para o século XXI que, probablemente, requirirá algunhas revolucións conceptuais e novos métodos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Einstein, Albert, *Sobre la Teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza Editorial, 1984.
- [2] Schwinger, Julian, *El legado de Einstein*, Biblioteca Scientific American, Barcelona, Prensa Científica, 1995.
- [3] Sánchez Ron, José Manuel, *El origen y desarrollo de la Relatividad*, Madrid, Alianza Editorial, 1983.



MECÁNICA CUÁNTICA

J. Sánchez Guillén*
Universidade de Santiago
de Compostela

1. NOVO SÉCULO, NOVA FÍSICA

A Física 'clásica', baseada nas leis de Newton da dinámica de partículas e as de Maxwell para o campo electromagnético, é o resultado de tratar de entende-la natureza á mesma escala en que se nos amosa, con obxectos de tamaño relativamente grande. A finais do século XIX parecía describir perfectamente tódolos feitos observados; incluso se deu un paso máis especulativo ó explicar Boltzmann a termodinámica aplicando estas leis ós aínda 'hipotéticos' átomos, que con tanto éxito viñan empregando os químicos durante todo o século. Incluíu para isto a teoría da probabilidade e información e, ademais, iniciábase así a Física teórica.

A medida que se foron desenvolvendo as técnicas experimentais e ía sendo posible observar 'realmente' os átomos e os seus contituíntes, viuse claro o comportamento da radiación e das partículas pequenas que se ían descubriendo, como o electrón, era ás veces

ben diferente do observado nas experiencias habituais con obxectos do tamaño do laboratorio. As leis da Física clásica non resultaban válidas no mundo atómico e subatómico.

En realidade non hai nada de asombroso en que as partículas pequenas non obedezan as leis da Física clásica, pois esta utiliza conceptos como os de posición, velocidade e traxectoria do movemento, baseados en experimentos realizados con obxectos grandes. É a nosa experiencia a que nos di, en particular, que ó medi-la posición x dunha partícula en varios intreos t_1, t_2, \dots , a diferenza entre dúas posicións Δx tende a cero cando o intervalo temporal entre as medicións correspondentes Δt tende tamén a cero. E á nosa escala de tamaños, parécenos obvio que podemos dividir tantas veces como queiramos estes intervalos sen que cambie nada relevante. Son estas observacións empíricas as que nos permiten defini-la velocidade como o límite $v = \lim (\Delta x / \Delta t)_{\Delta t \rightarrow 0}$. Con x e v determinados en todo momento podemos falar

* Catedrático de Física Teórica.

de traxectoria do movemento. Pero as extrapolacións son por veces enganosas, como sucedeu ó pensar que a Terra era chaira e, en efecto, ó pasar ó mundo atómico este esquema clásico resulta problemático. En primeiro lugar non está claro cómo podemos localizar partículas de tamaños tan pequenos e determina-las súas posicións x . Isto pódese resolver utilizando microscopios e feixes de luz láser, como instrumentos de medición. Pero resulta que se facemos outra medición, ó cabo dun tempo moi, moi curto Δt , atopámonos con que moitas veces a diferenca Δx coa posición anterior xa non tende a cero cando $\Delta t \rightarrow 0$. A medida que Δt diminúe, a diferenca Δx pode facerse cada vez máis errática. Ó repeti-lo experimento varias veces, obtemos valores tanto máis arbitrarios de Δx , canto menor é Δt . Está claro que ó baixar a escalas moi pequenas xa non se poden definir velocidades e traxectorias.

É evidente que a propia estrutura atómica pon límites ás divisións sucesivas indefinidas da materia. Iso xa non estaba claro para a enerxía e tardamos moito en decatarnos, aínda que, como se sabe pola relatividade, materia e enerxía son equivalentes. Existe unha escala dada pola constante de Planck

$$\hbar \sim 10^{-34} \text{ joules (J) segundos(s)} \quad (1)$$

que marca a fronteira para o dominio de aplicación ou validez da Física clásica. Como vemos, \hbar é [enerxía] \times [tempo] e representa a acción dun proceso, que é a enerxía cinética (subtraendo a poten-

cial cando a haxa) polo tempo que este dura, tendo en conta o seu comezo e fin e certos detalles do seu desenvolvemento. Cando as características dun sistema son tales que as súas accións correspondentes diminúen ata valores da orde de \hbar (o *cuanto* mínimo de acción), o que pasará ó considerar átomos e partículas *soltos*, o seu comportamento é ben distinto do previsto pola Mecánica clásica e debe describirse por outras leis: as da *Mecánica cuántica*.

A primeira vista pode semellar estraño e contra o sentido común: ¿como se pode predicir entón o comportamento das partículas co tempo?, ¿que sucederá ó ir considerando partículas máis grandes e pasar ó dominio das leis da Física clásica?... E ¿por qué todo isto?

O primeiro é lembrar que nos obxectos típicos da nosa escala de tamaños, hai polo menos 6×10^{23} átomos, que é o inverso da masa do protón ou neutrón medida en gramos, pois son estes os que lles proporcionan esencialmente a masa nos átomos. Polo tanto, as observacións clásicas son en certo modo o resultado de extrapolacións de millóns de millóns de millóns de millóns (24 ceros como mínimo) de partículas. Por iso os valores das enerxías, tempos e outras magnitudes das partículas atómicas e subatómicas resultan tan extremadamente pequenos se os medimos nas nosas unidades típicas da Física clásica (quilos, metros, etc.), como vimos arriba coa acción, que reflicte tódalas súas características.

Resulta que os experimentos efectuados directamente coas partículas mostran que, se ben as diversas fluctuacións das súas posicións, Δx , parecen arbitrarias como dixemos, a súa media si ten certa regularidade e iso é precisamente o que permite calcula-la Mecánica cuántica. Así, aínda que non poidamos defini-la velocidade instantánea no sentido clásico, si podemos facelo no sentido da media. Máis aínda, a Mecánica cuántica demostra cómo tenden a cero as Δx , ou sexa as *fluctuacións cuánticas*, ó iren aumentando os valores das magnitudes características dos obxectos. O mesmo ocorre con moitas outras magnitudes ademais das posicións ou coordenadas.

A idea de que as leis cuánticas se van achegando ás leis clásicas, ata coincidiren con elas nas condicións macroscópicas adecuadas, postulouse nos comezos da Mecánica cuántica (*principio de correspondencia* de Bohr) e foi unha axuda moi importante para a súa construción. En seguida se demostrou rigorosamente que as medias que calcula a Mecánica cuántica satisfán as leis clásicas. Quedaba por establecer cómo se realiza a dita transición cuántica-clásica e, sobre todo, comprobar se esta era de natureza cuántica, é dicir, se, en definitiva, as leis cuánticas eran universais e podían explicar tamén a propia Física clásica de Newton, Maxwell e Boltzmann. De feito, esta posibilidade, tan atractiva para a maioría, tivo detractores como o propio Einstein pois, como imos ver, encerra admiti-lo azar mesmo no comportamento indivi-

dual de cada partícula e, polo tanto, certo grao inevitable de indeterminación.

O paso á escala clásica, de tamaños grandes polo xeral, dáse de forma natural ó considerar moitas partículas (¡o difícil é illalas!). Esta transición denomínase tecnicamente *decoherencia* (por se chamar coherencia a propiedade detrás da indeterminación) e resulta, como xa apuntamos, da interacción das partículas estudias coas outras moitas do *medio ambiente*. Como é lóxico, sempre se dá nas nosas medidas, pois os propios aparellos son xa un medio ambiente. O proceso de medida entraña evidentemente interaccións e é macroscópico.

Aínda que o problema é complexo e aínda quede algún aspecto menos claro, está ben entendido que ó pasar a obxectos máis grandes, o intervalo temporal mínimo para obter practicamente a media en cada medida se fai moi pequeno, de xeito que case sempre nos atopamos con este valor medio en cada proceso de medición, como sucede na Física clásica. ¡Para unha partícula de 1g e 1cm a temperatura ambiente, o tempo típico de desaparición das fluctuacións cuánticas é de 10^{-23} s! Dicimos 'case sempre' porque hai situacións excepcionais, nas que sistemas moi especiais como os superconductores, superfluídos, láseres ou estrelas de neutróns (*púlsares*), manteñen a tempos e distancias macroscópicas as propiedades cuánticas, coas súas fluctuacións características. Pero en xeral, para partículas macroscópicas esta Δt crítica

faise tan pequena que non ten ningunha importancia na práctica. Desde fai un par de anos hai experimentos que permiten estudar e comproba-los tempos de desaparición das fluctuacións cuánticas, demostrando de forma espectacular as predicións da Física cuántica, que aparece así como a teoría fundamental que o explica todo; agás a gravitación, que ten en construción a súa formulación cuántica, con resultados moi alentadores.

2. UN POUCO DE HISTORIA

O primeiro paso cara á Física cuántica deuno M. Planck no ano 1900. Aconteceu buscando unha fórmula que interpolase dous resultados teóricos que se obtiveran para a lei de distribución da radiación dun corpo negro coa frecuencia $I(\nu)$. Experimentalmente obsérvase unha curva cun máximo no centro, nas frecuencias medias. Utilizando diferentes suposicións, puidérase reproducir coa Física clásica a curva experimental só para as zonas inicial (baixas frecuencias) e final (altas frecuencias), ou sexa, as súas asíntotas para $\nu \rightarrow 0$ e $\nu \rightarrow \infty$. M. Planck conseguiu achar empiricamente unha fórmula moi sinxela para toda a curva, interpolando entre as dúas asíntotas. Presentouna nun primeiro artigo publicado en 1900 sen espertar un interese especial. Pero M. Planck observou que a súa fórmula coincidía perfectamente coa distribución experimental, demasiado perfectamente para ser unha casualidade. Tratou de comprender

cómo se podía chegar a esta fórmula teoricamente. Decatouse de que abondaba con facer unha soa suposición —¡pero ben estraña!—: que a enerxía do campo electromagnético só pode cambiar descontinuamente, por porcións ou cuantos de enerxía, e que cada un é proporcional á frecuencia ν

$$\epsilon_\nu = 2 \pi \hbar \nu \quad (2)$$

con \hbar a constante (ás veces utilízase $h = 2\pi\hbar$), da que se deu o valor determinado experimentalmente en (1).

Foi a primeira manifestación clara da nova Física, da fenomenoloxía cuántica. Sen embargo necesitáronse case outros trinta anos para chegar á formulación teórica actual da Física cuántica. Foron moitos os físicos que fixeron grandes achegas ó seu desenvolvemento ademais de M. Planck. A. Einstein creou en seguida a teoría do efecto fotoeléctrico utilizando a hipótese de cuantización de M. Planck. Púidose verificar así directamente que a enerxía do campo electromagnético se transmite sempre polos cuantos de Planck, non só na emisión. Máis tarde, N. Bohr enunciou os seus postulados de cuantización para explica-los espectros de radiación atómica. Aínda que era un modelo e moi sinxelo, foi unha síntese xenial dos elementos básicos da Física cuántica, como imos ver no seguinte apartado. Ademais, acadou grandes éxitos experimentais, como a resolución do problema dos distintos elementos (helio especialmente) nos espectros de estrelas, que deu convencido a Einstein da súa validez. Precisamente



Max Planck e Albert Einstein, primeiro e terceiro pola esquerda, nunha recepción en Berlín no ano 1931.

foi este quen demostrou por fin rigorosamente a propia fórmula da radiación de Planck utilizando os principios cuánticos coa idea de probabilidade de Boltzmann, dando orixe á formulación moderna cuántica de campos.

Pero a Física cuántica como teoría (e non como receitas para calcular algúns casos particulares) empezou coa idea de L. de Broglie de que a materia (partículas) tamén posúe propiedades ondulatorias en analoxía co campo electromagnético, do que se acababa de establecer o aspecto dual corpuscular. O seu razoamento foi moi lóxico e xa o usamos arriba: se na relatividade son simétricas (intercambiables) materia e

enerxía, e a radiación (enerxía ondulatoria) compórtase tamén como partícula, as partículas (materia) deben comportarse pola súa vez como ondas para manter a simetría. Baseándose nesta idea, W. Heisenberg e E. Schrödinger puideron formular as bases da Mecánica cuántica en 1925-1926.

Por se-la nova ciencia tan diferente da Física clásica, requiriuse moito esforzo para a súa comprensión e para o desenvolvemento do formalismo matemático adecuado. M. Born, N. Bohr, P. Dirac e W. Pauli contribuíron notablemente. O problema maior de Schrödinger foi que empezou co caso relativista, que era, como vimos, o que

se podía formular mellor seguindo principios xerais. Pero a interpretación das solucións que se obtiñan parecía imposible. Ademais, o problema que quería resolver como demostración da nova teoría, os átomos lixeiros, é moi pouco relativista, pois as velocidades dos electróns son centos de veces menores cá da luz. Por iso, a súa ecuación e a ideoloxía básica cuántica son un dos saltos creativos máis sorprendentes da Física.

Foron Dirac e Pauli, seguindo os pasos de Einstein, os que conseguiron interpreta-la teoría relativista coa novidade de que describe, canda a materia, as antipartículas, a predicción máis espectacular da Mecánica cuántica relativista. Esta teoría, chamada tamén cuántica de campos, resultou de tal complexidade que non foi resolvida ata hoxe. Os principios e interpretación son comúns á Mecánica cuántica non relativista de Schrödinger.

A Física cuántica describe o comportamento de obxectos pequenos con accións da orde da constante de Planck. É difícil imaxinalo que iso significa, entre outras razóns porque, como dixemos, a acción non é un concepto intuitivo. Vén a corresponder a unha suma acumulativa do tempo pola enerxía cinética dunha partícula (se é libre) do intre inicial ó final do seu percorrido. Na Física clásica séguese unha traxectoria que a fai mínima. En xeral, unha acción pequena corresponde a moi pouca enerxía ou a moi pouco tempo, como é o caso típico dos constituíntes últimos da materia. Recordemos que

nun gramo hai da orde de 6×10^{23} átomos. Así, para mover un gramo un centímetro coas achegas enerxéticas dun átomo, necesitaríamos esperar 10^{27} segundos (un ano ten só 10^7). Son, polo tanto, as leis da Física cuántica as que describen o comportamento das partículas elementais como o electrón, o protón, o neutrón, o neutrino e moitas máis. Tamén a Física atómica, nuclear e en parte molecular pertencen ó dominio da Física cuántica. A Física cuántica, desde logo, non invalida a Física clásica: os obxectos macroscópicos con accións moito maiores ca \hbar obedecen as leis clásicas cunha gran precisión. De feito, como vimos, a Física cuántica explica precisamente, a través da decoherencia, o comportamento clásico. En moitos casos, con todo, os efectos cuánticos séntense ata a escala macroscópica. Así sucede cando se consideran fenómenos a moi baixas temperaturas e, por conseguinte, con movemento moi lento das partículas, e se consegue unha acción coordinada (*coherente*) dun gran número deles, no estado sólido ou na radiación electromagnética. Só a Física cuántica puido explicalo comportamento dos electróns nos corpos sólidos, ou fenómenos como a superconductividade e a superfluidez, e conducir a inventos como o láser. Polo outro extremo, hai partículas cósmicas de tal enerxía (10^{20} e V) que individualmente teñen un comportamento practicamente clásico na súa interacción ó chegar á Terra.

Subliñemos finalmente que a influencia da Física cuántica non se

esgota coas posibilidades extensas das súas aplicacións, que claramente están a marca-lo noso futuro. A Física cuántica constitúe un paso revolucionario no desenvolvemento da Física enteira como ciencia e posiblemente ata no desenvolvemento da mente humana e a súa comprensión do mundo. Demostra moi claramente que o noso coñecemento non debe pretender explicar sempre as novas rexións de fenómenos da natureza polos métodos antigos, empregados anteriormente. Tampouco a ciencia debe abstraerse da observación, porque é unha parte da ciencia mesma e inflúe de xeito decisivo nas cuestións que poden suscitarse. Ademais ensínanos que os métodos de descrición dos fenómenos observados poden ser moi distintos do que sabemos desde hai séculos, facéndose menos indirectos e necesitando un formalismo matemático pouco común.

Os éxitos da Mecánica cuántica fixéronnos ós físicos do cambio de milenio moito máis audaces e emprendedores en comparación cos anteriores. Nos anos seguintes á demostración da teoría cuántica de campos ou relativista a mediados dos oitenta, propuxéronse varios esquemas do universo bastante revolucionarios, que inclúen a súa propia orixe. Abranguen dimensións adicionais ás tres ordinarias e as partículas *elementais* como vibracións de cordas, en vez de puntos sen dimensión, e as súas xeneralizacións a *membranas*. Ideas da Mecánica cuántica tales como as de indeterminación (impensables antes), déixanse sentir nou-

tras ramas do coñecemento, mesmo alén das ciencias.

3. PROPIEDADES ONDULATORIAS DAS PARTÍCULAS

A idea de que toda partícula posúe propiedades ondulatorias foi publicada por L. de Broglie no ano 1923. Postulou que co movemento dunha partícula de *momento* $p = mv$ (ou sexa, *masa* x *velocidade*), está asociada unha onda de lonxitude

$$\lambda = h/p \quad (3)$$

Hai varias observacións que conducen a esta idea. Non imos segui-lo camiño histórico, senón que discutíremolos dous fenómenos máis demostrativos.

Un dos feitos físicos que non se pode explicar de ningunha maneira polas leis da Física clásica é a estrutura do átomo. Segundo os experimentos de Rutherford, os átomos son como sistemas solares en miniatura: cunha partícula pesada no centro, o núcleo, de tamaño cen mil veces menor có do átomo, cargado positivamente, arredor do cal xiran un ou varios electróns cargados negativamente. Considerarémolo caso máis sinxelo do átomo de hidróxeno, cun só electrón xirando arredor dun protón. A lei de Newton para a forza $F = ma$, onde a é a aceleración centrífuga, e a de Coulomb para a enerxía potencial $V = -e^2/r$, onde e é a carga do protón, dannos en seguida o valor da enerxía total das órbitas, $E_t = -e^2/2r$,

que poden considerarse aproximadamente circulares, sendo r os seus radios. Como vemos, pode tomar calquera valor, iso si, negativo pois o electrón está ligado ó protón e, polo tanto, E_i diminúe canto maior sexa o seu valor numérico (ou *absoluto*), é dicir, canto *menor* sexa o radio r . Segundo as leis de Maxwell ou electrodinámica clásica, toda partícula cargada con aceleración emite ondas electromagnéticas e perde enerxía. Polo tanto, como vimos, o radio do electrón iría diminuindo de continuo, é dicir, iría caendo cara ó protón no centro. No seu camiño o electrón emitiría radiación, cunha frecuencia dada pola de rotación, que evidentemente aumenta ó se facer menor o radio, pois é o número de *voltas* por segundo. O espectro de radiación sería un continuo con tódalas frecuencias maiores cá correspondente ó radio inicial e o átomo deixaría sempre de existir ó acabar o electrón no protón.

Así sería a imaxe do átomo segundo a Física clásica. Ten pouco que ver co que se observa experimentalmente. Que a súa vida deba rematar necesariamente contradí rotundamente o feito de que o átomo de hidróxeno pode existir un tempo indefinido. O espectro do átomo de hidróxeno tampouco é nada continuo na realidade. Experimentalmente obsérvase un conxunto de liñas con frecuencias discretas, que se describen pola relación empírica de Balmer

$$\nu = R (1/n^2 - 1/m^2) \quad (4)$$

con m e n enteiros ($m > n$) e R a constante de Rydberg de frecuencia.

¿Como se podería tratar de dar unha explicación a estes feitos experimentais? É ben sabido que, para explicar (4), N. Bohr supuxo que a enerxía do electrón no átomo pode tomar só algúns valores discretos E_n , como xa mostrou o efecto fotoeléctrico. Como a frecuencia da onda emitida ó pasar o electrón do nivel E_m ó E_n virá dada segundo a relación de Planck (2), teremos

$$\nu = (E_m - E_n) / 2\pi\hbar \quad (5)$$

polo que evidentemente ha verificarse que

$$E_n = -2\pi\hbar R / n^2 \quad (6)$$

para obte-lo resultado experimental (4). Este valor deduciuno Bohr aplicando as leis de Newton e Coulomb, como queda descrito, pero para cada órbita circular discretizada e, sobre todo, co seu principio de correspondencia. Con este xustificou a parte máis difícil, que foi a relación da frecuencia de radiación ν coa do movemento circular e que obtivo de trata-los electróns como un dipolo clásico entre dúas órbitas extremas.

A demostración da hipótese de discretización dos niveis enerxéticos do electrón nun átomo proporcionouna a Mecánica cuántica. En realidade pódense entender xa os valores tan particulares (6) das propiedades ondulatorias do movemento dos electróns, que foi precisamente o punto de partida de Schrödinger para a súa formulación

xeral e matematicamente rigorosa. Resumímo-lo argumento, pero podemos crelo e saltar ó parágrafo seguinte.

En efecto, supoñamos que co electrón estea asociada dalgún xeito unha onda que se propaga ó longo da súa órbita do mesmo modo que o fai a onda nunha corda pechada nunha circunferencia. Sabemos que unha onda así non pode ter unha lonxitude de onda calquera, senón que ha de ser discreta: a súa lonxitude ha de ser un divisor da lonxitude da órbita e vén dada por $\lambda_n = l/n = 2\pi r_n/n$ con n un número enteiro. Utilizando a condición de Broglie (3) pola que $\lambda_n \times p_n = 2\pi\hbar$, obtémola ecuación (6) facilmente e co propio valor da constante ($R = me^4/4\hbar^3$); basta ter en conta que a enerxía cinética $p_n^2/2m$ coincide en valor absoluto coa enerxía total $-e^2/2r_n$ e substituír p_n . Tamén se deduce axiña que $r_n \times p_n = 2\pi n\hbar$, é dicir, que o momento angular das partículas está así mesmo cuantizado. Este resultado, de capital importancia para a estrutura da materia, tamén o descubriu Bohr como unha consecuencia das súas hipóteses.

Aínda que o estudio dos átomos foi moi significativo, existen probas máis directas do comportamento ondulatorio das partículas pequenas como o electrón. Baséanse no fenómeno de interferencia característico das ondas (¡tan coñecido nas de radio!) e ausente nas partículas clásicas. Un dos experimentos máis conclusivos foi o de Davisson e Germer no ano 1927. Aínda que realizado despois da creación da Mecánica cuántica, permanece ata hoxe

un dos indicadores máis claros das manifestacións cuánticas no movemento das partículas, polo que merece unha discusión máis detallada.

Estudiaron a reflexión dun feixe de electróns incidente sobre un cristal baixo certo ángulo, seguindo o esquema usado anteriormente para a investigación da natureza dos raios X. Obsérvanse así os electróns reflectidos nos diversos planos paralelos da rede cristalina mediante un detector ó que se lle pode variar a posición. Os electróns percorren camiños distintos e, se tivesen un comportamento ondulatorio, haberá interferencia entre eles. Esta



Louis de Broglie chegou á conclusión de que electróns e protóns podían ter, coma a luz, propiedades ondulatorias.

maniféstase con máximos de intensidade, para certos valores do ángulo, a distancia entre os planos e a lonxitude de onda λ . É o mesmo que sucede cos raios X e moi análogo ó arco da vella, onde os planos son a capa de auga que atravesa a luz solar.

Para partículas clásicas non se esperaba ver interferencia ningunha nin, polo tanto, máximos nin mínimos. Pero o experimento realizado por Davisson e Germer deu resultados inequívocos: os electróns produciron unha interferencia clara cos máximos característicos. A lonxitude de onda de electróns con velocidades diferentes mostrou tamén de acordo co postulado de De Broglie (3).

Cabe subliñar que este tipo de experimento pode demostrar aspectos aínda máis profundos e significativos descubríndonos en boa medida o que significa a natureza ondulatoria das partículas. O patrón de interferencia dos electróns non depende da intensidade do feixe incidente, e así ata que se chega a intensidades tan baixas como para pensar que só uns poucos electróns (ou ata un único electrón) caían sobre o cristal. ¿Que debe suceder neste caso? De Broglie pensaba que o electrón mesmo é como un paquete de ondas. Entón un só electrón debería dalo mesmo patrón de interferencia ca moitos deles, aínda que cunha intensidade moi baixa, é dicir, a mesma imaxe de interferencia. Pero en realidade sucede algo ben diferente. Cada electrón dá un só punto na pantalla do detector, isto é, reflíctese cun ángulo

fixo e compórtase, polo tanto, como unha verdadeira partícula, enteira e puntual, sen se desdobrar en partes. Aparentemente os ángulos ou posicións dos puntos onde aparecen na placa resultan arbitrarios. Sen embargo, ó repeti-lo experimento moitas veces os puntos vanse ordenando nun histograma regular que tende a coincidir coa curva do patrón de interferencia. Podemos concluír de aí que o electrón non é un paquete de ondas no sentido clásico, senón que o que proporciona a súa onda asociada é máis ben a probabilidade de aparecer nun determinado lugar.

É instructivo tamén ve-lo que ocorre cando o experimento do tipo Davisson e Germer se realiza con partículas meirandes. Para p crecente a lonxitude de onda λ faise moi pequena. A imaxe de interferencia amosa moitas oscilacións. Os detectores teñen a súa resolución propia e chega un momento no que non poden distinguir entre máximos veciños, indicando entón unha distribución homoxénea efectiva que resulta ó face-la media sobre as oscilacións de interferencia. A imaxe é logo a que corresponde ás partículas na Física clásica. Como vemos, a transición da rexión cuántica á clásica procede dunha maneira bastante peculiar. Non se pode dicir que para partículas grandes non haxa interferencia; máis ben a interferencia resulta inobservable, de modo que as partículas grandes poden ser descritas nos termos da Física clásica.

4. MECÁNICA CUÁNTICA: FUNCIÓN DE ONDA E OBSERVABLES

A conclusión que se segue dos feitos experimentais e mellor os explica é que o estado dunha partícula cuántica non vén caracterizado por certos números (os valores das coordenadas e momentos) como na clásica, senón por unha *función*, chamada *de onda* e que adoita designarse coa letra grega $\psi(t, \mathbf{r})$. Representa tódalas posibles propiedades (*ψ qué*), en todo instante (*t, cándo*) e lugar (*\mathbf{r} , ónde*). É o primeiro principio da Mecánica cuántica. Resulta así que especificar un estado nesta require moita máis información que na mecánica clásica. Os estados caracterízanse agora por funcións. A mecánica cuántica baséase en que *a función de onda determina por completo o estado dunha partícula*, o que significa estrictamente que non fai falla engadir ningunha outra información para saber todo o posible da partícula en consideración.

É lóxico que unha información tan absoluta teña un contido restrinxido. Como vimos, a función de onda non implica que a propia partícula sexa exactamente un paquete de ondas, unha perturbación localizada, senón que a dita función se refire só á probabilidade de presenza da partícula en calquera punto do espacio. A interpretación probabilista da función de onda, que foi proposta e elaborada por M. Born, N. Bohr e W. Heisenberg nos anos 1926 a 1930, está nos fundamentos da Mecánica cuántica. O seu enunciado

preciso di que *a función de onda dunha partícula $\psi(t, \mathbf{r})$ representa a probabilidade, mediante o seu módulo ó cadrado $|\psi(t, \mathbf{r})|^2$ de encontra-la partícula en torno a \mathbf{r} do espacio no instante t .*

Esta é a versión máis simple. A estrutura matemática permite —e a natureza utilízao en efecto— atributos moito máis sutís cá posición, como novos tipos de cargas ou momentos angulares intrínsecos (*spins*).

É unha peculiaridade moi importante da Física cuántica que unha partícula que se encontra nun estado (con función de onda ψ_1) poida estar á vez con certa probabilidade noutro estado (función de onda ψ_2). Isto débese a que, dito sinxelamente, hai máis funcións de onda diferentes ca estados independentes. Nesta situación, a función de onda que ha conter tódalas posibilidades do sistema será unha combinación de ψ_1 e ψ_2 , o que implica interferencia entre ambas. A probabilidade de presenza da partícula nun punto calquera virá dada entón, non só pola suma dos seus módulos ó cadrado, senón tamén polo produto ou *solapamento* de ambas. Esta contribución adicional á probabilidade, análoga a un termo de interferencia, amosa que a información probabilística contida nas funcións de onda se diferencia das leis estatísticas clásicas nas que a probabilidade se refire ó comportamento do colectivo. Pero na Mecánica cuántica a probabilidade é un atributo de cada partícula: *o azar chega ata o individual*.

Un exemplo para visualizar claramente isto proporcióno o experimento *Gedanken* da dobre físgoa, que asigna as funcións de onda ψ_1 e ψ_2 ás dúas posibilidades independentes que ten cada electrón de chegar ós detectores dunha pantalla de observación pasando por unha das dúas físgoas. Logo de repetir este experimento imaxinario moitas veces, o histograma de rexistros correspondente ó módulo ó cadrado da función de onda total tendería a unha figura típica da difracción, co seu máximo principal e os secundarios.

Vexamos agora o que ocorre cando se intentan medir valores das coordenadas de posición ou momentos dunha partícula na mecánica cuántica. Como mostra o experimento, cada medición proporciona por si mesma un valor aleatorio de tódolos posibles, con probabilidade dada *a priori* polos módulos ó cadrado das funcións de onda correspondentes. Ó repeti-las medicións podemos calcula-los *valores medios* da coordenada ou do momento cos valores resultantes de tódalas medidas.

Son estes valores medios os que presentan certa regularidade, como dixemos, e polo tanto son os que constitúen o obxecto do estudio e descrición da Mecánica cuántica; ó entrar no dominio da Física clásica, pasan a se-las magnitudes ordinarias desta. Coñecendo as probabilidades de encontrar unha partícula en calquera punto do espacio ou cunha certa velocidade a través das funcións de onda respectivas, pódense predicir estas medias (ou valores esperados). Para o

seu cálculo, tratándose de funcións, non é estraño que as coordenadas de posición ou as velocidades veñan dadas polas *operacións* sobre estas funcións que as ditas magnitudes representan na súa caracterización matemática. Estas operacións son a multiplicación e derivación respectivamente.

As magnitudes observables en Mecánica cuántica correspóndense, en efecto, a *operadores* en linguaxe matemática, e indícanse adoito con letras maiúsculas $A(\mathbf{r}, \mathbf{p})$. O máis importante de todos é sen dúbida o que representa a enerxía, que se chama *hamiltoniano* e se indica por $H(\mathbf{r}, \mathbf{p})$. Acostuma te-la mesma estrutura que na Física clásica, suma do termo cinético $p^2/2m$ e potencial $V(\mathbf{r})$ (como o de Coulomb $-e^2/r$ por exemplo) só que agora \mathbf{r} e \mathbf{p} son operadores, que gañan a vida derivando e multiplicando as funcións de onda.

5. A ECUCACIÓN DE SCHRÖDINGER

Ata agora discutimos cómo se describe unha partícula en Mecánica cuántica nun instante dado t : toda a información acerca dela está incluída na súa función de onda $\psi(t, \mathbf{r})$. Agora imos discuti-la súa evolución no tempo. Como na Física clásica, suponse que se se coñece toda a información necesaria sobre a partícula nun instante inicial, o seu comportamento futuro está determinado.

Isto significa en Mecánica cuántica que, ó da-la función de onda no ins-

tante inicial, podemos calculala en calquera outro intre. Este principio realízase aquí por medio dunha ecuación para $\psi(t)$, análoga ás ecuacións de onda clásicas pero cunha soa derivada respecto ó tempo, indicada por d/dt . Descubriuna Schrödinger no ano 1926 ó tratar de reproducir-lo comportamento ondulatorio das partículas e xeneralizalo para potenciais de calquera tipo,

$$i\hbar \frac{d\psi(t, \mathbf{r})}{dt} = H(\mathbf{r}, \mathbf{p})\psi(t, \mathbf{r}) \quad (7)$$

Esta ecuación substitúe a Lei de Newton para as partículas cuánticas. Na forma seméllase á de difusión da calor, inventada por Fourier, pero é complexa ($i = \sqrt{-1}$), involucra operadores e o importante, como levamos visto, é a propia función, cun módulo que é unha probabilidade.

A forma de proceder é expresa-lo hamiltoniano (ou sexa, a enerxía cinética e potencial) mediante os operadores correspondentes e resolve-la ecuación coas condicións especiais que caracterizan o sistema ou proceso (ás veces a condición é simplemente que as propiedades relevantes son estacionarias e non mudan no tempo). Así, obtemos $\psi(t, \mathbf{r})$ e con ela en principio sabemos todo o que se pode saber. Como analizamos a continuación, as medicións en cuántica supoñen un certo cambio brusco a unha das posibilidades que $\psi(t, \mathbf{r})$ representa con probabilidade $|\psi(t, \mathbf{r})|^2$. Pero a evolución da función de onda entre medidas, que é o que representa a ecuación de Schrödinger, é

continua e determinista e por iso pode resolverse sen ambigüidade.

A ecuación de Schrödinger non se deduce na mecánica cuántica senón que é un postulado derivado de observacións empíricas. Sen embargo, pódese xustificar *a posteriori* considerando as súas consecuencias e comparándoas co que en realidade ocorre na natureza. Como dixemos en 1, é moi doado demostrar que da ecuación de Schrödinger se segue que os valores medios de observables satisfán as leis da Mecánica clásica (o principio de correspondencia). Isto significa que as partículas de tamaño grande (ordinarias), con fluctuacións moi pequenas nas súas variables, descríbense pola Mecánica clásica cunha gran precisión, de acordo coa nosa experiencia práctica. A Mecánica cuántica é realmente completa e explica incluso cándo é máis práctica a descrición clásica.

6. INCERTEZA CUÁNTICA

Pasemos a discuti-lo que ocorre ó tratar de medir unha magnitude física calquera, como as coordenadas \mathbf{r} , momentos \mathbf{p} ou combinacións de ambas que en xeral representamos por $A(\mathbf{r}, \mathbf{p})$. Interésanos especialmente a precisión coa que se poden determinar. Ó efectuar medicións repetidas veces, obtense un conxunto de valores experimentais que fluctúan arredor do valor medio e a magnitude destas fluctuacións determina a precisión do noso coñecemento de A . Canto menores

sexan estas, tanto maior será a precisión do observable A . Como medida das fluctuacións adóitase introducir na teoría de probabilidade a *dispersión* ΔA , que non é máis que a media do cadrado das desviacións das medidas individuais respecto ó valor medio. ΔA vén dada directamente pola función de onda e está claro que é tanto maior canto máis ancha sexa a expresión do seu módulo $|\psi(t, \mathbf{r})|^2$.

Preséntase un problema de gran importancia: ¿existen casos nos que a dispersión ΔA é igual a cero? É moi fácil convencerse de que si, e que para isto a función de onda non pode ser calquera senón que ha satisfacer unha relación moi especial co que tratamos de medir. A idea é simple: unha vez medido, sabemos exactamente en qué estado se atopa. A formulación matemática é tamén moi sinxela e as funcións que a satisfán chámanse autofuncións ou funcións *propias* do operador A . Para as funcións propias dos operadores correspondentes ás magnitudes físicas, as súas medidas non fluctúan: os seus valores coinciden sempre co medio e chámanse autovalores ou valores propios. Chegamos así a unha caracterización matemática do proceso de medida:

Cando nun experimento se mide unha magnitude característica dunha partícula, como resultado deste, a partícula queda coa función propia correspondente ó autovalor medido.

Significa que do catálogo completo de posibilidades que representa *a priori*

a función de onda, ó medir selecciónase unha: o resultado. Antes de medir só sabíamo-la probabilidade de obter un certo valor; despois de medir, a función de onda queda *reducida* á correspondente a ese valor medio exclusivamente. Sucesivas medidas desa *mesma* magnitude sempre darán o mesmo resultado, *con certeza absoluta*.

Se efectuamos en cambio a medida *doutra* magnitude *distinta*, teremos en xeral só certa probabilidade de achar un valor dado. O máis sorprendente acontece se facemos unha terceira medición consecutiva, volvendo medi-la primeira das magnitudes, a que era *certa* antes da segunda medida. Como agora a certeza xa pasou á segunda magnitude, para a primeira volvemos ter só certa probabilidade.

Aparece así outra complicación moi característica da Mecánica cuántica: ¿cales son as condicións para que poidamos medir varias magnitudes físicas á vez? Na Física clásica sempre é posible. Pola contra, na Mecánica cuántica só é posible cando esas magnitudes poidan comparti-las mesmas funcións propias e que estas o sexan á vez de tódolos operadores que as representan. Iso só ocorre en casos excepcionais, cando as magnitudes A, B, C, \dots polas que nos preguntamos teñen unha propiedade especial: que non importe a orde na que facémo-las preguntas (as medidas). ¡A vida cotiá está chea de exemplos nos que a orde das preguntas inflúe nas respostas! Na linguaxe matemática, *as cantidades físicas poden ser medidas simultaneamente sempre que os*

seus operadores correspondentes polos que se representan sexan **conmutables**.

Volvendo ás características dunha partícula, resulta que as representacións matemáticas de \mathbf{r} e \mathbf{p} (produto e derivada) non son conmutables. Por iso na *Mecánica cuántica non se pode medir á vez unha coordenada e a compoñente do momento (ou velocidade) na mesma dirección*.

A restricción sobre as medicións de \mathbf{r} e \mathbf{p} pódese formular de forma precisa como unha cota infranqueable, dada pola constante de Planck e chámase *principio de incerteza* de W. Heisenberg.

$$\Delta r \Delta p \geq \hbar / 2 \quad (8)$$

Significa que canto maior sexa a precisión da coordenada, tanto menor será a do momento e viceversa, de forma que o seu produto sexa sempre



De esquerda a dereita: Jan Aler, Max Steenbeck e Warner Heisenberg. O último é o pai do *principio de incerteza*.

polo menos $\hbar / 2$. Obsérvase que nas condicións da Física clásica, \hbar pode tomarse como nula e por iso non hai incerteza na práctica.

Cabe subliñar que a relación (8) non é de seu algo completamente novo na Física. Na teoría clásica do movemento ondulatorio aparece unha certa restricción sobre a localización dun paquete de ondas. Pensemos, por exemplo, que habemos de recibir polo menos un período completo para detectar un ton musical correspondente a unha vibración.

O que trae de novo a Física cuántica, á parte da interpretación, é que a indeterminación se aplica a toda partícula e é polo tanto unha relación universal. Suscitou moitas discusións no momento da creación da Física cuántica, porque parecía non estar de acordo coa nosa experiencia, que, a primeira vista, permitiría realizar unha medición de \mathbf{r} e \mathbf{p} con maior precisión cá limitada por (8). Propuxéronse varios experimentos que puideran contradicilas relacións de incerteza (8). Todos eles, así como calquera dos múltiples experimentos reais ou mentais (*Gedanken*) para falsificala, teñen explicación clara dentro da Física cuántica.

7. SIMETRÍAS E LEIS DE CONSERVACIÓN

A idea de simetría non é nada novo da Física cuántica. Tamén no mundo clásico, como é ben sabido, hai moitos casos nos que se manifesta

algunha simetría, que sempre conduce a unha simplificación importante do seu tratamento. Así sucede, por exemplo, cando o potencial no que se move a partícula non depende dos ángulos, senón só da distancia á orixe: as forzas centrais. Entón o problema simplifícase moitísimo de xeito que fai posible a súa resolución xeral. Na Física cuántica o fenómeno de simetría ten un papel aínda máis importante. Esencialmente débese a dúas razóns:

- A propia formulación do problema na Mecánica cuántica é moito máis conveniente para a manifestación dunha simetría que na Mecánica clásica; nesta, os valores iniciais de \mathbf{r} e \mathbf{p} dunha partícula destrúen a simetría, escollendo unha traxectoria de entre tódalas posibles, a cal en por si pode non posuír simetría ningunha. Na Mecánica cuántica, en cambio, a función de onda non involucra nada que poida contradicila simetría. A mesma formulación do problema aquí é simétrica e así as consecuencias dunha simetría na Mecánica cuántica adoitan ser moito máis claras.

- A Física cuántica pretende se-la ciencia que explica a estrutura do micro e do macrocosmos e, polo tanto, dar unha explicación á existencia das propias forzas. O feito de que, por exemplo, un campo sexa central, para a Física cuántica non é un fenómeno puramente empírico. Trata de comprender por qué é central. Como unha posible liña de explicación (e case a única) úsase precisamente a idea de simetría; é dicir, pártese da idea de que

o potencial debe ser central por esixencia da simetría. Con esixencias de simetría aínda máis fortes soubo chegar a poder determinar case univocamente as propiedades das forzas fundamentais, que actúan entre as partículas na natureza, como ocorre coa invariancia de fase local chamada *gauge*.

Esta simetría reflicte a posibilidade de cambia-las funcións de onda das partículas en todo o que non afecta á probabilidade, dada polo seu módulo ó cadrado, como o signo ou, máis en xeral, a *fase*. Se esta elección se fai dunha vez e igual en tódalas partes, ou sexa, *globalmente*, só se consegue unha simplificación para os cálculos; pero se, como é máis natural, se reivindicada a liberdade de elección en calquera instante e en calquera lugar, ou sexa, para cada \mathbf{r} e t , sucede algo de gran transcendencia: aparecen os axentes mediadores das forzas fundamentais e con tódalas súas propiedades completamente determinadas. É a única forma de asegura-la dita liberdade de elección.

8. INTERPRETACIÓN DA MECÁNICA CUÁNTICA

Nos apartados precedentes describimos cualitativamente a ideoloxía básica da Mecánica cuántica, utilizando unhas poucas fórmulas para dar unha impresión o menos vaga posible. Esta xurdiu da experiencia e pasou innumerables comprobacións experimentais, algunhas deseñadas especialmente para buscar calquera contra-

dicción. Chámaselle ás veces a *interpretación de Copenhaguen* ou *ortodoxa* por razóns históricas e tamén porque existen algunhas interpretacións alternativas para tratar de evitar ou facer máis comprensibles algúns dos seus aspectos menos alcanzables para a intuición clásica. Entre as cuestións que presentaron dificultades destacámo-las seguintes.

A) FORMALISMO MATEMÁTICO

Como levamos visto, a Mecánica cuántica utiliza matemática moito máis abstracta cá clásica, o que non satisfizo a algúns nos seus comezos, pois parecíalles que a concepción da realidade se evaporaba nun formalismo.

Efectivamente, a Mecánica cuántica require unha matemática máis complexa, pero hai que lembrar que estaba xa construída e ben entendida. Ademais, é natural que problemas máis complicados precisen ferramentas máis avanzadas. De feito, hoxe utilízanse habitualmente as técnicas típicas da Mecánica cuántica para os problemas clásicos complexos, como os de moitos corpos ou non lineais. Onde este primeiro inconveniente si se manifesta claramente é na gravidade cuántica, en plena eclosión actualmente. Aquí os físicos temos de construí-la ferramenta matemática, o que está resolvendo algúns problemas pendentes desta. Ás veces as teorías físicas nacen co cordón umbilical do formalismo do que logo se desprenden ó entenderse mellor,

pero outras veces, como ocorreu co cálculo diferencial de Newton e Leibniz no nacemento da Mecánica, o formalismo é realmente importante e unha contribución adicional da Física.

B) COÑECEMENTO LIMITADO

A restricción esencial sobre o coñecemento dun sistema ás probabilidades que encerra a súa función de onda foi, como dixemos, difícil de aceptar ó principio, mesmo por grandes físicos, como nos recorda a famosa frase de Einstein de que o creador non pode xogar ós dados. Curiosa frase se se pensa que todo o que acontece na natureza, desde a grande explosión, pode considerarse como un gran xogo, ou sexa, o resultado do azar suxeito unicamente ás leis da física e poucas máis. A cuestión desde a Física é se a Mecánica cuántica é completa ou non. É dicir, se existen outras variables que non coñecemos, ocultas, que polo tanto só se manifesten nunha media.

Bell elaborou sistematicamente as consecuencias desta proposta, partindo do feito simple de que se o número de variables aumenta, é lóxico que a media das mesmas magnitudes non sexa igual á predicada pola cuántica. Téñense realizado moitos experimentos para dilucidar esta cuestión, que tamén comprobaban o propio proceso da media discutido a continuación, coa resposta sempre favorable á Mecánica cuántica.

C) O PROCESO DA MEDIDA

Pode parecer coma se o propio proceso de medición, esencial na Mecánica cuántica, producise o resultado. Tamén orixinou reservas a redución brusca da función de onda á correspondente ó valor medio. Utilizando leis de conservación absolutas, como a carga eléctrica ou similares, e experimentos con varias medicións separadas, pódese formular como unha aparente transmisión instantánea de información, contra o principio de causalidade e a relatividade.

Como ilustración, supoñamos unha función de onda moi estendida no espacio dun sistema con só dúas posibilidades. Se se mide nun dos extremos, a función de onda queda colapsada á opción obtida e xa sabemos o que non obterá a media no outro extremo (que pode traducirse ó que se obterá con certeza se se trataba dunha dicotomía). Esta información é virtual: non se pode facer efectiva ata que non se comuniquen os medidores e comparen, polo que non viola a causalidade. En calquera caso, esta realidade virtual é un feito comprobado e que ten incluso moitas aplicacións prácticas, sempre limitadas pola velocidade finita da comunicación da información. Ás veces chámanlle realismo local ós intentos de evitar estas conclusións, sobre todo coas variables ocultas, que como dixemos nunca se manifestaron.

De tódolos xeitos, hai que admitir que o *colapso* da función de onda

aparece como algo brusco e descontrolado. O proceso de medida é esencial, pero en certo modo pode considerarse externo á Mecánica cuántica e, en definitiva, clásico. Por iso algúns físicos pensaron respostas a este posible problema conceptual, que pertencen máis ben ó terreo da epistemoloxía. Móvense entre dúas opcións extremas; unha é recorrer á consciencia dicindo que se produce na mente. Un dos problemas sería a Cosmoloxía, que está tratando o universo completo. O outro extremo é dicir que en realidade non hai tal colapso. Non sería máis que un atallo para calcular certas propiedades, que representa unha complicada superposición obxecto-equipe de medida. Nesta liña, a análise detallada da Física, tanto formal como experimental, da transición cuántica-clásica (a *decoherencia*), como interacción co medio, está progresando moito na actualidade. Isto permite explicar, como dixemos, coa mesma Mecánica cuántica a transición á clásica e o propio proceso de medida.

No ámbito máis filosófico da interpretación, as propostas foron desde as máis conservadoras que avogan por unha distinción entre os terreos cuántico e clásico co resultado dunha especie de media co mesmo resultado. Ou de forma máis radical, recorrer á existencia de camiños ou 'mundos' paralelos de forma que, en cada medida, o que se percibe como colapso non é outra cousa que a evolución cara a un deles. Esta opción foi quizais a máis elaborada.

9. EPÍLOGO

A Mecánica cuántica naceu co século XX e entrando no XXI está tan firmemente establecida que debe facer parte do noso capital cultural persoal e, desde logo, dos contidos das ensinanzas medias, que é a súa mellor fonte. Nos nosos días está penetrando en terreos novos tanto nas aplicacións (por exemplo, os tan buscados ordenadores cuánticos) coma no básico coa cuantización da gravitación, que é o último reducto clásico. Polo de agora esta tarefa é formal, pero o seu contido é tan fascinante coma a orixe do universo e a dinámica dos buratos negros, da existencia dos cales vaise acumulando evidencia. Polo tanto, convén estarmos atentos, o que é doado na era da información. Na dirección da rede <http://xxx.unizar.es> podemos seleccionar *Quantum Physics* e atoparémolos últimos avances, ás veces de forma alcanzable. Lembremos, para rematar, que Balmer —precursor da Física cuántica coa súa fórmula (4)— era profesor de instituto en Basilea, onde catrocentos anos antes un médico, Paracelso, descubrira o hidróxeno.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Schrödinger, Erwin, *Cursos de la Universidad de Verano de Santander*, 1, Madrid, Signo, 1935, 1-73.
- 2 Pascual, Pedro, e Alberto Galindo, *Mecánica cuántica*, Madrid, Eude-

- ma Universidad, Manuales Eude-
ma, 1989.
- 3 Yndurain, Francisco, *Mecánica
cuántica*, Madrid, Alianza Univer-
sidad Textos, Alianza Editorial,
1988.
- 4 Sánchez Guillén, Joaquín, e Mijail A.
Braun, *Física cuántica*, Ma-
drid, Alianza Universidad Tex-
tos, Alianza Editorial, 1993.



NÚCLEOS E PARTÍCULAS

*Carlos Pajares Vales**
Universidade de Santiago
de Compostela

INTRODUCCIÓN

Desde os tempos máis remotos, nas máis antigas civilizacións, o home preguntouse polo interior das cousas, furgou dentro delas e tentou coñecer qué é o que lles dá consistencia e se existe algo subxacente e común a todas elas a pesar da súa infinita variedade.

Hai máis de 2500 anos, en Grecia, Tales constatou que calquera substancia podía clasificarse como sólido, líquido e gas; dado que a auga existía nas tres formas, ¿non se podía da-lo caso de que fose a auga o constituínte de toda a materia? Na mesma liña de pensamento, Aristóteles e os seus seguidores postularon que a materia estaba formada por terra, lume, aire e auga. O seu mestre Platón elaborou a idea da existencia de estruturas formais básicas, como as figuras xeométricas fundamentais a partir das cales se ‘formaban’ tódalas cousas. Platón supoñía que estas estruturas básicas eran triángulos. Anteriormente Leucipo e o seu discípulo Demócrito

(585 a. C.) suxeriron a posibilidade de que a materia estivese constituída por pequenas partículas indivisibles, os átomos (ατομος). A construción de tódalas cousas a partir doutras pezas elementais non é, desde logo, unha verdade necesaria que tarde ou cedo tiña que establecerse. Así, por exemplo, en culturas orientais e tamén en determinados momentos do século XX pensouse que existía unha globalidade, de tal xeito que todo estea composto de todo, así que calquera parte inflúe e dá consistencia, en maior ou menor medida, a calquera outra parte, e reciprocamente. Neste esquema non é certo que uns poucos elementos constrúan tódalas cousas; só podería selo no sentido dunha aproximación á realidade, válida en determinadas condicións cando se puidese despreza-la influencia da maior parte de elementos.

O século XIX comezou co establecemento da moderna teoría atómica da materia. Sabíase que unha gran variedade de substancias podían obterse combinando diferentes cantidades

* Catedrático de Física Teórica.

duns poucos elementos. Dalton, en 1808, propuxo que estas combinacións se entenderían se cada elemento estaba constituído por átomos. A combinación de átomos de distintos elementos producía as moléculas das substancias non elementais. Supuxo que os átomos eran indivisibles e por iso adoptou o nome grego. En 1869, Dimitri Mendeleev descubriu que ó ordena-los elementos atómicos do máis lixeiro (hidróxeno) ó máis pesado, as súas propiedades se repetían a intervalos regulares (sistema periódico dos elementos). Esta regularidade apuntaba, como se vería posteriormente, a que os átomos non son elementais senón sistemas complexos, compostos doutros 'elementos'. As diferentes combinacións destes elementos dan lugar ós distintos átomos, o que explicaría as regularidades.

O século remata con dous descubrimentos fundamentais na busca da elementalidade: o descubrimento do electrón por J. J. Thomson en 1897, premio Nobel 1906 (posteriormente Millikan mediría a carga, premio Nobel 1923) e o da radioactividade por H. Becquerel, Pierre e Marie Curie (p. N. 1903). Rutherford (p. N. de Química 1908), traballando no laboratorio Cavendish de Cambridge que dirixía Thomson, demostra nos anos 1896-1900 que a radiación de Becquerel tiña tres compoñentes diferentes: a radiación α , β e γ . Esta última resultou ser radiación electromagnética de alta frecuencia, incluso superior á dos raios X descubertos por Roentgen en 1896 (p. N. 1901). A radiación β consistía en

electróns e a α en partículas masivas cargadas positivamente e que posteriormente foron identificadas como núcleos de átomos de helio.

Co século estréase tamén a Mecánica cuántica. O día de Santa Lucía de 1900, Planck (p. N. 1918) explica a dependencia na frecuencia e na temperatura da densidade de enerxía do chamado corpo negro e introduce a hipótese de que a radiación era absorvida ou emitida en cantidades discretas proporcionais á frecuencia da dita radiación.

$$E = h \nu \quad (1)$$

A constante de Planck h escribíase e calculábase por primeira vez. Einstein (p. N. 1921) retomaba en 1905 a dita hipótese para explica-lo efecto fotoeléctrico, indo máis aló ó supoñer que a radiación electromagnética non só era absorbida ou emitida en cantidades $h\nu$, senón que eran partículas de enerxía $h\nu$. O mesmo ano 1905, Einstein tamén publicaba a Teoría da Relatividade Restrinxida, coa que se transformaba radicalmente o concepto de espacio e tempo e se contemplaban as transformacións de masa en enerxía e reciprocamente de enerxía en masa.

A Mecánica cuántica —construída na década dos anos vinte— e a Relatividade constitúen dúas grandes revolucións científicas conceptuais imprescindibles para comprender multitude de fenómenos físicos; en concreto, fixeron posible o avance na busca da elementalidade.

DESCUBRIMIENTO DO NÚCLEO ATÓMICO

Na mesma primeira década, Rutherford e Soddy descubriron que algúns átomos podían desintegrarse espontaneamente, producindo outros átomos. Tamén Pierre Curie e Marie Curi-Sklodowska descubren novos elementos radioactivos, o radio e o polonio (a Marie Curie concedéronlle por isto o premio Nobel de Química 1911) nos produtos de desintegración do uranio. Con todo isto empeza a sospeitarse que os átomos teñen estrutura interna e que esta debería diferir moi pouco duns átomos a outros próximos no sistema periódico.

Nos anos 1909-1913, Ernest Rutherford —agora en Manchester—, Ernest Marsden e Hans Geiger realizaron diversos experimentos cos que demostraban que efectivamente os átomos posuían unha estrutura interna: o núcleo. Os experimentos consistían en bombardear unha folla delgada de ouro con partículas α provenientes dunha fonte de radio⁽¹⁾ (ver figura 1).

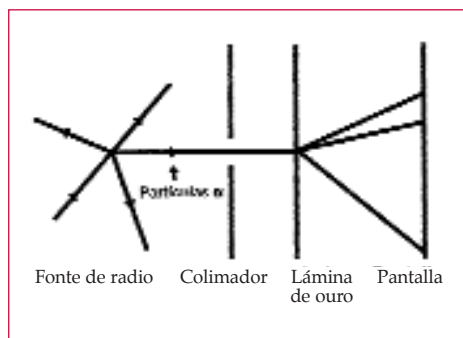


Figura 1. Experimento de Rutherford.

Se a distribución de materia dentro do átomo fose homoxénea, esperaríase que a maior parte de partículas α saísen cara a adiante e moi poucas a grandes ángulos. Sen embargo saían moitas máis das esperadas a grandes ángulos e mesmo algunhas rebotaban para atrás. Segundo Rutherford «foi coma se dispararas unha bala de 4 cm contra un anaco de papel de seda e rebotara cara a atrás golpeándote». Dentro dos átomos había concentracións de materia moito máis pesadas cás partículas. O átomo está composto de electróns situados en capas, no exterior dun núcleo cunha carga positiva igual ó número de electróns exteriores. O núcleo ten unhas dimensións duns cantos fermi $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$. Como as dimensións dos átomos son da orde de amstrongs, $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$, os núcleos son cen mil veces máis pequenos cós átomos. Isto non quere dicir que os átomos estean practicamente baleiros. Os electróns están ligados ós núcleos mediante a forza atractiva (por teren cargas opostas) coulombiana. Esta forza eléctrica entre cargas, responsable de que estean ligados os electróns ó núcleo e que non escapen, é debida á existencia dun campo eléctrico que dota de consistencia o espazo entre os electróns e o núcleo. Outra maneira de expresa-lo mesmo, é dicir que entre os electróns e o núcleo se intercambian fotóns, os 'cuantos' do campo electromagnético existente. Estes fotóns dan consistencia e enchen o espazo entre os electróns exteriores e o núcleo.

O experimento de Rutherford é típico de toda unha serie de ensaios que se sucederon ó longo do século para tratar de explora-lo interior de obxectos cada vez máis pequenos. Fundamentalmente, o experimento consta dun feixe de partículas (partículas α no experimento anterior) aceleradas para dotalas dunha enerxía E e un momento p suficientemente alto, que inciden sobre un branco. As ondas asociadas ás partículas do feixe teñen unha lonxitude λ relacionada co momento lineal p da partícula

$$P = h / \lambda \quad (2)$$

de tal maneira que se se quere explorar un branco de tamaño caracterizado polo radio R , se verifica $\lambda \leq R$ (figura 2).



Figura 2. Lonxitude de onda menor có tamaño do obxecto.

Ondas con lonxitude de onda maior có radio son insensibles ó branco, non se dan conta da súa existencia. Canto máis pequeno é o branco que queremos explorar, menor é a lonxitude de onda e máis grande debe ser p e, polo tanto, maior a enerxía da partícula lanzada como sonda. Por iso, a medida que se quere entrar máis no interior e explorar

tamaños máis pequenos, necesítanse aceleradores máis potentes.

ESTRUCTURA DO NÚCLEO. PROTÓNS E NEUTRÓNS

A estrutura electrónica dos átomos explícase rapidamente, primeiro cos modelos simplificados de Bohr (p. N. 1922) e Sommerfeld e despois coa formulación da Mecánica cuántica e en particular da ecuación de Schrödinger (p. N. 1933), o principio de incerteza de Heisenberg (p. N. 1932) e o principio de Pauli (p. N. 1945). Sen embargo, poucas cousas se sabían sobre o núcleo central, á parte de que



Erwin Schrödinger, premio Nobel de Física en 1933, na súa intervención no XIV Congreso da Asociación Española para o Progreso das Ciencias celebrado en Santiago de Compostela no ano 1934.

estaba cargado positivamente e que era moi denso. Diversos experimentos para estudia-lo núcleo foron realizados por Rutherford e Chadwick na década dos vinte, no Laboratorio Cavendish de Cambridge, ó que Rutherford volvera sucedendo a Thomson no cargo de director. Tamén Irene Joliot-Curie e Frederic Joliot (p. N. de Química 1935) realizaban uns experimentos similares en París.

Rutherford suxerira a existencia dunha partícula neutra, de masa practicamente igual á do protón. Chadwick (p. N. 1935) demostrou finalmente, en 1932, a existencia do neutrón mediante un experimento no que lanzaba partículas α provenientes dunha fonte radioactiva sobre un branco de berilio. Tíñase observado nos experimentos mencionados anteriormente que se producía radiación penetrante neutra. Chadwick estudiou esta radiación, facéndoa incidir sobre parafina de cera, substancia rica en hidróxeno. A radiación, ó chocar cos núcleos de hidróxeno, protóns, facíao retroceder⁽¹⁾ (ver figura 3). Estes protóns eran detectados por unha cámara de ionización que contén gas e dous electrodos. Cando os protóns entran na cámara, golpean os electróns dos átomos do gas facendo que estes queden ionizados con carga positiva, o que provoca unha diferenza de potencial nos electrodos. Se estes electrodos están encaixados nun circuíto exterior, aparece unha corrente eléctrica. Chadwick podía así medi-lo número de protóns e a súa enerxía para deducir que debían de ser golpeados

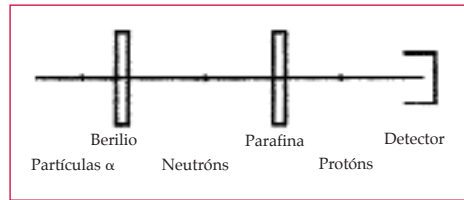


Figura 3. Experimento de Chadwick.

por partículas da mesma masa e neutras, neutróns. Un núcleo de masa A veces a dun protón ou neutrón ten Z protóns (igual número có de electróns) e $A - Z$ neutróns. O núcleo dun átomo de Z electróns ten que ter Z protones para ser neutro, pero pode ter diferente número de neutróns. Ós núcleos co mesmo Z e diferente A chámaseles isótopos. A forma dun núcleo é aproximadamente esférica cun radio R , $R = R_0 A^{1/3}$, $R_0 = 1.1$ fm, segundo revelaron definitivamente os experimentos de colisións de electróns con núcleos iniciados no acelerador de Stanford por Hofstadter en 1953 (p. N. 1961).

FORZAS NUCLEARES

Os protóns do núcleo atómico experimentan a repulsión coulombiana; sen embargo, o feito de permaneceren unidos no núcleo implica a existencia dunha forza atractiva moi poderosa capaz de vencer a repulsión electromagnética. Debido á súa intensidade chámase forza forte e é experimentada polos protóns e neutróns pero non polos electróns (en xeral exercérase entre todo un conxunto de partículas chamadas hadróns e non entre outro

conxunto de partículas chamadas leptóns); a forza é de curto alcance, uns poucos fermis, en contraste coa forza electromagnética que ten alcance infinito. Este comportamento diferente suxeriu a Yukawa en 1935 (p. N. 1949) predici-la existencia do mesón π (en realidade son tres π^+ , π^- , π^0 cunha masa de cerca de 140 Mev) que tiña nas interaccións fortes o mesmo papel có fotón nas electromagnéticas. En efecto, se considerámo-lo potencial $V = \exp(-\mu r) / r$ (potencial de Yukawa) a súa transformada de Fourier é $1 / (q^2 + \mu^2)$, que corresponde ó intercambio dunha partícula de masa μ , entre as partículas sometidas ó potencial V . No caso de interacción coulombiana, $V(r) = 1 / r$, alcance infinito e $\mu = 0$, masa do fotón. No caso de interacción forte $V(r) \approx 0$ se $r > 1/\mu \approx 1$ fermi. Polo tanto $\mu = 100-200$ Mev. Outra maneira equivalente de deduci-lo mesmo resultado é utilizando o principio de incerteza enerxía-tempo de Heisenberg. En 1947 o mesón π foi detectado por Powell (p. N. 1950) e outros colegas en experimentos de raios cósmicos. Anteriormente detectárase o mesón μ^- de masa 105 Mev que se cría que era a partícula predicida por Yukawa. Sen embargo non o era, dado que os muóns son leptóns e non interaccionan fortemente.

Os raios cósmicos consisten en diversas partículas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (protóns, núcleos, electróns, neutrinos, fotóns) que inciden sobre a Terra provenientes do exterior (a orixe extraterrestre foi demostrada por Victor Hess, p. N.

1936, mediante experiencias realizadas nun globo en 1912) e son detectadas mediante técnicas baseadas nos trazos que deixan as partículas en emulsións fotográficas e na cámara de néboa de Wilson (p. N. 1927). As técnicas relacionadas con esta última foron desenvolvidas por Blackett (p. N. 1948) e os seus colaboradores.

O balance entre a forza forte e a electromagnética é responsable da estabilidade dos núcleos e, polo tanto, do rango de valores permitidos para A e Z . Núcleos con $Z > 118$ non se coñecen, pois a medida que aumenta o número de protóns crece fortemente a repulsión electrostática e é moi difícil compensala.

Para Z pequeno, os núcleos estables teñen aproximadamente o mesmo número de neutróns ca de protóns $N \approx Z \approx A/2$. Os núcleos máis pesados deben ter máis neutróns para compensalo aumento de interaccións coulombianas, ata que chega un momento en que a dita compensación xa non é posible. As estrelas de neutróns poden pensarse como núcleos estables aínda que neste caso $Z \approx 0$ e A é da orde de miles de billóns. Debido á gran disparidade entre o número de nucleóns (protóns e neutróns) dos núcleos usuais e as estrelas de neutróns, ultimamente especulouse coa posibilidade da existencia de materia estable que cubrise o gran salto en masa. Sería materia estraña, na que interviría conxuntamente cos quarks ordinarios o quark estraño do que falaremos máis adiante. A posibilidade de existencia de materia estraña en forma

de estrelas, así como a súa posible detección, é un tópico hoxe en día de grande interese.

Dado un núcleo estable, é necesario proporcionar enerxía para extraer un dos seus nucleóns. Obviamente, esa enerxía será máis grande ou máis pequena dependendo de se o nucleón está na superficie ou no interior, pero en calquera caso podemos falar de enerxía media. É a enerxía de ligadura B , necesaria para romper-lo núcleo A causa da equivalencia entre enerxía e masa, $E = mc^2$, a diferenza entre a suma da masa dos nucleóns e a masa do núcleo $M(A, Z)$ é B/c^2 .

$$B/c^2 + M(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n \quad (3)$$

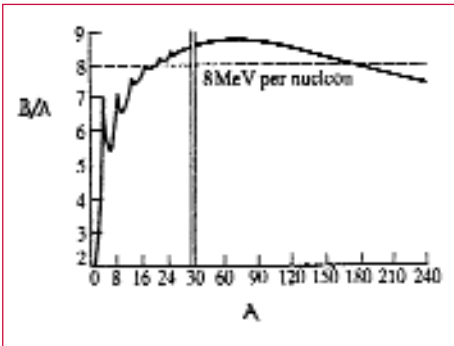


Figura 4. Enerxía de ligadura por nucleón en función de A .

A enerxía de ligadura por nucleón B/A depende de A (como se representa na figura 4). Apréciase que os valores maiores de B/A están no rango $50 < A < 120$, e polo tanto núcleos con A dentro dos ditos valores é máis difícil rompelos.

Ademais da interacción forte, responsable entre outras cousas de que os protóns e neutróns estean ligados formando os núcleos, existe outra forza a nivel nuclear, a interacción débil responsable da desintegración β de núcleos. Unha desintegración β é a que experimenta o neutrón que se transforma nun protón e emite un electrón. Se só fose así, por conservación de enerxía e momento, o electrón saínte debe ter unha enerxía fixa. Sen embargo a enerxía que se medía variaba dunha maneira continua entre dous límites. Igualmente, dado que o neutrón ten spin $1/2$ non pode desintegrarse en protón e electrón só, pois ó te-las dúas spin $1/2$, ó combinalas conxuntamente co momento angular orbital que é enteiro, dá un número enteiro. Niels Bohr, nunha carta a Pauli, expresa que chegou a pensar que a escala nuclear quizais non se conservaba a enerxía. Pauli non podía considerar tal hipótese e en 1931 propuxo a existencia dunha misteriosa partícula, o neutrino, que debería ter spin $1/2$ para que se conservase o momento angular, masa nula ou moi pequena e carga cero, e que interaccionase moi debilmente coa materia. A reacción sería: $n \rightarrow p + e^- + \nu$.

A proposta foi acollida con grande escepticismo pola comunidade científica, escepticismo que crecía a medida que pasaba o tempo sen que fose detectado o neutrino. Finalmente, en 1956, despois de máis de dúas décadas, Cowan e Reines (p. N. 1985), nun experimento realizado no reactor nuclear de Savannah River, (afluente do río

Columbia nos Estados Unidos), lográban detectalo gracias a que no reactor hai unha gran cantidade de neutróns, de tal maneira que ó se desintegrar podía alcanzarse unha estatística alta de neutrinos (un billón por cm^2 e segundo) e así, colocando no seu camiño moitas toneladas dunha solución de cadmio, conseguir que algún puidese interaccionar ocasionalmente. Ó observarlos produtos da interacción, deduciron a existencia do neutrino incidente.

Ademais do electron existe o muón μ^- $m_\mu = 105 \text{ Mev}$ xa mencionado anteriormente e o tauón τ^- , $m_\tau = 1.77 \text{ Gev}$, descuberto por M. Perl (p. N. 1995) en 1975. Ademais do neutrino ν_e asociado ó electrón, L. Lederman, M. Schwartz e J. Steinberger (p. N. 1988) demostraron en 1964 a existencia doutras clases de neutrinos. Ós membros das tres xeracións

$$\begin{array}{ccc} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{array} \quad (4)$$



Jack Steinberger, premio Nobel de Física en 1988, durante unha conferencia na Universidade de Santiago de Compostela.

chámaselles leptóns. A todas elas asígnaselle-lo número cuántico leptónico +1. O número cuántico leptónico é conservado nas reaccións entre partículas.

A interacción débil é de moi curto alcance. Similarmente á interacción electromagnética na que se realiza intercambiando un fotón, neste caso intercámbianse as partículas W^\pm e Z^0 que teñen unha gran masa, 80 e 91 GeV respectivamente, responsable do curto alcance da interacción⁽²⁾ (tamén da súa débil intensidade, dado que esta é inversamente proporcional neste caso ó cadrado das masas das partículas intermediarias). A predicción da existencia das ditas partículas pesadas realizouse dentro do contexto da teoría unificadora das interaccións débiles e fortes proposta por S. Weinberg e A. Salam en 1967 (p. N. 1979). A teoría baseábase nas teorías de campos de gauge non abelianos proposta por Yang e Mills en 1954, englobaba por unha parte a descrición das interaccións débiles mediante o lagrangiano de Fermi, primeiramente proposto por este nos anos 33 e 34 para describi-la interacción β de núcleos (foi a primeira utilización dos campos asociados a partículas de spin 1/2 cuantificados) e posteriormente mellorado por N. Cabibbo; por outra parte, a electrodinámica cuántica desenvolvida independentemente por R. P. Feynman, J. Schwinger e S. Tomonaga (p. N. 1965) que é a cuantificación da teoría electromagnética. A teoría de unificación de Weinberg e Salam non empezou a tomarse en consideración seriamente

ata que G.'t Hooft —na súa tese de doutoramento dirixida por M. Veltman— demostrou a renormalización da teoría, é dicir, que as diverxencias que aparecían nesa teoría de campos podían tratarse coherentemente. G.'t Hooft e Veltman foron galardoados por iso co p. N. 1999. A teoría de unificación electrodébil prediciu a existencia de correntes débiles neutras que foron observadas por primeira vez en 1973 no Centro Europeo de Partículas Elementais de Xenebra. No ano 83, Carlo Rubbia, á fronte dunha colaboración de máis de douscentos físicos, detectou por primeira vez as tres partículas W^\pm e Z^0 predicidas, polo que recibiu o p. N. en 1984 que compartiu con S. Van der Meer, quen desenvolveu unhas determinadas técnicas de aceleradores (arrefriamento estocástico) que fixeron posible alcanzar nos aceleradores enerxías necesarias para detecta-las ditas partículas. O éxito do descubrimento foi unha empresa europea de grande importancia. A modo de exemplo, citemos que o *New York Times* en primeira páxina encabezaba a noticia do descubrimento co título “Europa 3 USA 0”.

FISIÓN E FUSIÓN NUCLEAR

Se un núcleo pesado rompe en dous máis lixeiros, a curva da figura 4 indica que a enerxía de ligadura por nucleón é máis grande nos núcleos fisionados ca no núcleo pesado orixinal e, polo tanto, liberarase enerxía no proceso. A fisión espontánea é un proceso

moi raro; sen embargo a fisión pode ser inducida bombardeando un núcleo, por exemplo o uranio 235, con neutróns. O proceso de fisión máis típico é

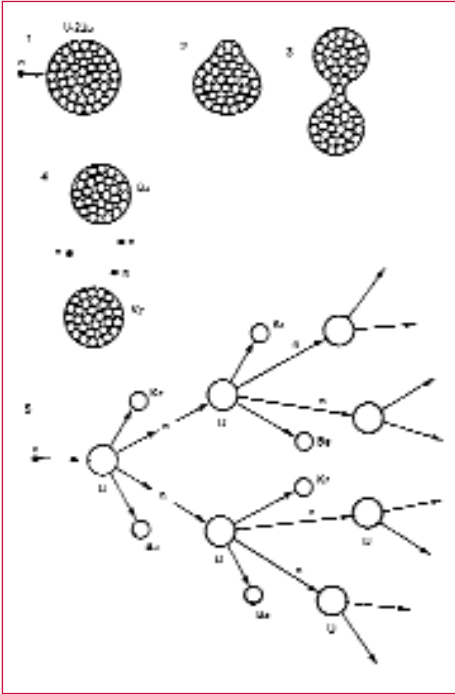


Figura 5. Reacción en cadea.

o debuxado na figura 5, no que: 1) neutrón lento, de baixa enerxía, é absorbido por un núcleo de uranio 235; 2) o núcleo faise inestable; 3) o núcleo defórmasse, dividíndose en dous; 4) como resultado da fisión aparecen os núcleos estables de bario e cripton conxuntamente con dous ou tres neutróns. Na reacción libérase enerxía; 5) os neutróns producidos que sexan lentos poden chocar contra outro núcleo de

uranio 235 dando lugar de novo ó proceso. É a reacción en cadea orixe da explosión nuclear, a chamada bomba atómica. Nun reactor nuclear esa explosión contrólase mediante 'moderadores' que usualmente son barras de boro ou cadmio que absorben neutróns e polo tanto reducen o número de fisións. A enerxía liberada, que é da orde de máis dun millón de veces a liberada nun proceso químico, utilízase para quentar un fluído, normalmente auga, que pola súa vez se dirixe a unha turbina para a xeración de corrente eléctrica.

A historia da fisión nuclear e a da obtención da bomba atómica é moi interesante. Digamos brevemente que nos primeiros anos da década dos trinta, E. Fermi en Italia conseguira a técnica de enlentecer neutróns e modifica-los núcleos de varios átomos, logrando diversos isótopos. Irradiou uranio en 1934 pero non interpretou correctamente o que sucedía. Por outra parte, aproveitou a viaxe para recolle-lo premio Nobel en 1938 para non volver á Italia de Mussolini. En Alemaña, Otto Hahn (p. N. de Química 1944) e Lisa Meitner fixeron experimentos análogos e atoparon como subproduto bario, que é moito máis lixeiro có uranio. Lisa Meitner, xudía, tivo que fuxir de Alemaña a Suecia, onde contactou con Otto Frisch, quen interpretou correctamente o fenómeno físico. Italia e Alemaña perderon moito tempo elaborando a bomba atómica, tempo que non perderon os aliados, que desenvolveron o proxecto

Manhattan no que precisamente Fermi tivo un papel importante.

Na fusión nuclear, dous núcleos moi lixeiros fúndense nun máis pesado. De novo (de acordo coa figura 4), a enerxía de ligadura por nucleón do estado inicial (os núcleos moi lixeiros) é inferior á correspondente ó estado final (o núcleo pesado) e polo tanto libérase enerxía. O proceso de fusión máis coñecido é o que se produce no interior das estrelas, queimando hidróxeno, protóns e liberando enerxía que permite contrabalancea-la forza gravitatoria que tende a aperta-la estrela. Os diversos procesos foron estudados en detalle por H. A. Bethe (p. N. 1967). Tamén son os procesos de fusión os responsables da chamada nucleosíntese dos elementos que sucedeu nos primeiros instantes do universo, calculada por W. A. Fowler (p. N. 1983).

Aínda que o potencial destructivo da fusión foi ensaiada inicialmente en 1952 coa bomba de hidróxeno, experimentos liderados na Unión Soviética por Andrei Sakharov e nos Estados Unidos por E. Teller, o desenvolvemento da fusión para producir electricidade aínda non se conseguiu a pesar do enorme esforzo realizado e das grandes vantaxes da fusión como fonte de enerxía. En efecto, o combustible básico é deuterio ou auga pesada abundante e, polo tanto, barato. A fusión non produce materiais radioactivos de longa vida. O proceso de fusión párase instantaneamente se se cesa a subministración de combustible, así que é seguro fronte a accidentes.

Con tantas vantaxes, é máis dramática a pregunta: ¿por que é tan difícil a fusión controlada? As reaccións de fusión dependen de tres parámetros básicos⁽⁶⁾: temperatura, densidade e tempo de confinamento. Para que os núcleos de dous átomos cheguen a fusionarse, teñen que aproximarse ás súas distancias nucleares e por iso deben estar despoxados dos electróns que os rodean, polo que o combustible ha estar en estado de plasma, é dicir, gas ionizado. Un plasma no que os ións deben ter enerxía abonda como para vencer-la repulsión coulombiana e así producir numerosas reaccións de fusión e polo tanto moita enerxía neta.

Para dota-los ións do plasma de suficiente enerxía, este debería de estar a unha temperatura de cen millóns de graos. Por outra parte, tamén é necesario que haxa un número mínimo de colisións para que se produza unha cantidade apreciable de reaccións de fusión e polo tanto o plasma debe ter unha densidade mínima. Unha vez creado o plasma a alta temperatura, cómpre mantelo á dita temperatura durante un certo tempo suficiente para que se produza enerxía neta. Manter un plasma quente non é doado, pois tende a arrefriarse por difusión, é dicir, movementos de partículas desde onde existe unha concentración alta a outras onde haxa unha baixa concentración. O tempo que tardaría o plasma en arrefriarse se non se quentase constantemente, chámase tempo de confinamento.

Para conseguir que o plasma non arrefría, o método máis eficaz é o seguido no modelo Tokamak (Toroidal Kamera Magnetik) no que se confina mediante campos magnéticos (ver figura 6). Desta maneira, evítase que o

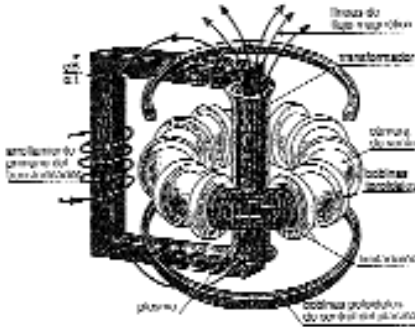


Figura 6. Esquema dun dispositivo Tokamak. (Tomado de J. A. Tagle, *La fusión nuclear*, Edit. Debate, Madrid, 1995).

plasma perda enerxía ó bater coas paredes de recintos convencionais e tamén a deterioración destes. As partículas do gas ionizado xiran arredor das liñas de campo magnético e se non existe difusión transversal a elas, ó non as poder atravesar quedarían atrapadas. En 1969, investigadores rusos conseguiron cun Tokamak un plasma a cinco millóns de graos a alta densidade durante centésimas de segundo. Logo en Harwell (Reino Unido) e Princeton obtivéronse resultados importantes, pero aínda se está lonxe da meta perseguida. Diversos programas internacionais apuntan a conseguir un prototipo de reactor nuclear de fusión, produc-

ción de enerxía neta, antes do primeiro cuarto de século.

MODELOS NUCLEARES. NÚMEROS MÁXICOS

A gran complexidade das interaccións fortes, xunta o feito de que os núcleos poden ter ata máis de 250 nucleóns, fai que sexa moi difícil desenvolver un tratamento exacto da estrutura nuclear. Por iso se desenvolveron modelos aproximados, razoablemente simples e capaces de describi-lo comportamento dos núcleos.

Un dos modelos máis vellos é o da gota líquida, inventado por G. Gamow. Nunha gota líquida os compoñentes, átomos ou moléculas, están ligados formando a gota dun xeito que nalgún sentido é similar ó que sucede no núcleo, aínda que a forza sexa moi diferente en alcance e intensidade. Así, como exemplo de similitude, nos dous sistemas, a gota e o núcleo, hai na superficie unha forza cara a adentro exercida sobre os seus compoñentes, resultando un efecto de tensión superficial que fai que tanto a gota coma o núcleo teñan unha forma aproximadamente esférica. O modelo da gota líquida, engadíndolle a repulsión eléctrica entre protóns, é capaz de reproducir a dependencia da enerxía de ligadura en A (fig. 4); sen embargo non pode reproducir propiedades importantes como os niveis de enerxía do núcleo.

O modelo de capas é especialmente axeitado para isto e resulta

análogo en certo sentido a unha descrición do tipo niveis atómicos ó nivel do núcleo. Considerando un neutrón, mentres estea no centro non experimentará ningunha forza neta xa que se compensarán as forzas exercidas por tódolos nucleóns sobre el. Polo tanto o potencial sería constante para $r \sim 0$. Sen embargo, se o neutrón está próximo á superficie do núcleo, experimentará unha forza atractiva cara ó interior, que será máis forte canto máis preto estea da superficie (tensión superficial). Finalmente, a forza e o potencial serán nulos cando o nucleón estea fóra do núcleo. O potencial será similar ó representado na figura 7. Os protóns están igualmente confinados nun pozo de potencial como na figura, cunha lixeira diferenza na superficie debido á forza eléctrica que experimentarán.

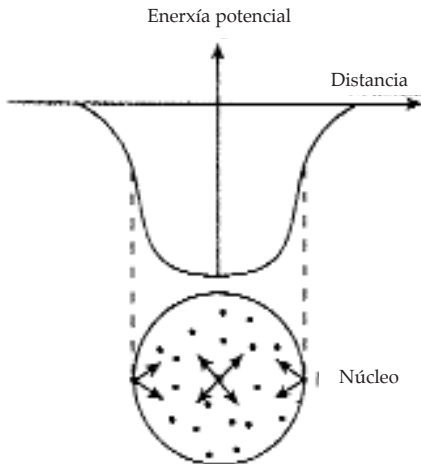


Figura 7. Enerxía potencial media que sente un nucleón nun núcleo.

Neses pozos, os nucleóns ocuparán toda unha serie de niveis de enerxía espaciados de acordo coa solución da ecuación de Schödinger co dito potencial. Os niveis de enerxía están caracterizados por diversos números cuánticos, da mesma maneira que os niveis de enerxía dun electrón nun átomo. Debido ó principio de Pauli, os neutróns (protóns), ó seren partículas de spin $1/2$, non poden dous deles ter os mesmos números cuánticos e isto fai que cada nivel teña un número máximo de neutróns e protóns; cando o alcanza dise que a capa está chea. As capas están cheas no momento en que o número de protóns Z e o de neutrones $A - Z$ toma os valores

$$Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$$

$$A - Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$

que son os números máxicos.

Os núcleos coas capas cheas son máis estables cós núcleos con A e Z próximos a elas. Exemplos deles son: helio ($Z = 2$ $A = 4$), osíxeno ($Z = 8$ $A = 16$), chumbo ($Z = 82$ $A = 208$). O cometido que desempeñan é similar ó dos gases nobres cando se fala de átomos. As propiedades de núcleos cuns poucos nucleóns en exceso ou defecto respecto ós que teñen as capas cheas explícanse facilmente en termos deses 'buratos'. Sen embargo, cando hai moitos buratos a situación faise máis complicada e é máis apropiado o uso do chamado modelo colectivo, desenvolvido por Aage Bohr (fillo de Niels), B. Mottelson e J. Raiwater (p. N. 1975). Polas súas achegas ó modelo de capas

(o modelo de capas con encaixe jj , que inclúe o encaixe spin-órbita) a María Goeppert Mayer e a Jensen foilles concedido o p. N. 1963. A traxectoria de María Goeppert Mayer é un exemplo de tenacidade e intelixencia, coas que vence obstáculos tradicionais que inclúen a discriminación por ser muller. Estudiu con Max Born en Gottingen e logo de obte-lo doutoramento casou cun americano, Joseph Mayer, con quen foi ós Estados Unidos en 1930 onde non conseguiu un posto universitario debido ás regras discriminatorias existentes. Só moito máis tarde, en 1946, cando o seu marido se trasladou á Universidade de Chicago, ela conseguiu un posto de traballo a tempo parcial no recentemente creado Laboratorio Nacional de Argonne, situado a sesenta quilómetros de Chicago⁽⁷⁾.

ANTIPARTÍCULAS

No ano 1930, Dirac postulou que por cada partícula debía existir outra partícula chamada antipartícula, con tódalas propiedades intrínsecas iguais (masa, spin) agás a carga eléctrica e outros números cuánticos considerados como cargas (número bariónico, número leptónico, extrañeza...) que teñen as opostas ás que ten a partícula. Entre as reaccións posibles, as antipartículas poden aniquilarse ó colisionar coas partículas, producindo fotóns. Así, a un electrón correspóndelle a antipartícula chamada positrón que

se aniquila mediante a reacción $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

Dirac introduciu o seu postulado para esquivar-la existencia de estados con enerxía negativa solucións da ecuación relativista para partículas de spin $1/2$ que el mesmo propuxera. Dirac supuxo que tódolos niveis de enerxía negativa estaban ocupados por electróns e que o conxunto formaba o baleiro, é dicir, o estado de enerxía máis baixa. Cando faltaba un electrón (de enerxía negativa) dese baleiro, aparecía un oco que se comportaba coma se tivese carga positiva e enerxía positiva. Ese 'oco' é o positrón e tapábase mediante un electrón de enerxía positiva, transformándose a enerxía do oco (positrón) e do electrón en fotóns.

A hipótese de Dirac ten os seus puntos febles e carece de autoconsistencia (o baleiro supono neutro, aínda que estea cheo de electróns de enerxía negativa) e só despois de que se introducira a cuantificación dos campos (segunda cuantificación) se clarificou o problema. En calquera caso, a súa predicción espectacular da existencia de antipartículas foi comprobada axiña ó descubrir C. D. Andersen (p. N. 1936), en 1932, positróns nas cascadas atmosféricas producidas polos raios cósmicos.

Posteriormente descubríronse antiprotóns, antineutróns e numerosas antipartículas. Tamén se obtiveron, en experimentos con aceleradores, núcleos lixeiros de antimateria, é dicir, formados por antiprotóns e antineutróns.



Figura 8. Apantallamento da carga eléctrica.

Apuntemos que por primeira vez aparece o baleiro cunha estrutura. Este aparente paradoxo: o baleiro ten 'algo', é común nas teorías cuánticas de campos. Así, en electromagnetismo, se colocamos unha carga negativa ó seu redor créanse cargas positivas e negativas debido á existencia dun campo eléctrico producido pola carga orixinaria. As cargas positivas e negativas oriéntanse como se ilustra na figura 8, de tal maneira que o medio no que están se polariza. Microscopicamente, na electrodinámica cuántica, a explicación deste fenómeno é que unha partícula cargada, por exemplo un electrón, emite fotóns que pola súa vez producen pares positrón-electrón. Estes pares oriéntanse de tal xeito que os positróns estean máis cerca do electrón orixinario cós electróns (debido á interacción coulombiana, cargas de signo oposto atraense e do mesmo signo repélense). Desta forma o medio queda polarizado.

A creación de pares electrón-positrón e a súa posterior aniquilación non

require por forza a existencia dun electrón orixinario que emita fotóns, senón que pola contra pode darse no baleiro. A aparente violación da conservación da enerxía non sería tal se se aniquilan nun tempo Δt que cumpra o principio de incerteza enerxía-tempo de Heisenberg

$$\Delta E \Delta t \sim h \quad (5)$$

Desta maneira o baleiro queda dotado de estrutura.

CLASIFICACIÓN DAS PARTÍCULAS ELEMENTAIS

Con motivo do estudio das interaccións fortes, mediante experimentos de aceleradores empezáronse a descubrir toda unha serie de partículas (pola súa activa participación neste proceso, L. W. Álvarez obtivo o p. N. 1968). A principios dos sesenta, o número superaba amplamente as cen. ¿Como se podería poñer orde en todo aquel zoo?

Unha situación similar producírase nos diversos elementos, átomos, do sistema periódico, ou nos diversos núcleos. A orde nos átomos e os núcleos establecérase acudindo a un principio de simetría, o de Pauli, que permitía nun caso clasificar en capas os diversos electróns e noutro os protóns e neutróns. Por iso, ante a gran variedade de partículas buscábase a simetría que permitise entender tal diversidade e clasificalas partículas.

M. Gell-Mann, Zweig e Y. Ne'eman independentemente, propuxeron que a simetría buscada era SU(3)

(o conxunto de matrices 3×3 , unitarias e determinante 1). É dicir, as interaccións fortes eran invariantes fronte ás transformacións do dito grupo, cando ese grupo se aplicaba ás partículas elementais que senten as interaccións fortes (hadróns). En linguaxe máis matemática, asignaron a cada partícula un vector que fose vector base dunha representación irreducible do grupo. Todas estas representacións pódense obter a partir de dúas, que se chaman fundamentais⁽⁶⁾ e teñen dimensión 3, 3 e 3^* . Ós tres vectores base da representación 3, Gell-Mann chamoulles quarks (nome arbitrario tomado de *Finnegans Wake* de James Joyce, sen significado en inglés): o quark up u , o quark down d e o quark estraño s . Os vectores das representacións désígnanse polos números cuánticos: hipercarga Y , isospín T e terceira compoñente de isospín T_3 . O isospín T foi introducido por Heisenberg para describir que o protón e o neutrón eran 'iguais' respecto á interacción forte. Os dous tiñan o mesmo $T(T=1/2)$, diferenciándose pola terceira compoñente, $T_3 = +1/2$ para o protón e $T_3 = -1/2$ para o neutrón. Igualmente, a tódolos hadróns se lles asigna un T e un T_3 . A hipercarga está relacionada coa carga eléctrica mediante a relación de Gell-Mann e Nishijima

$$Q = T_3 + Y/2 \quad (6)$$

Os quarks d , u e s teñen $Q = -1/3$, $2/3$ e $-1/3$ respectivamente; u e d son dobretes con $T=1/2$ e $T_3=-1/2$ respectivamente. Os vectores da representación 3^* son os antiquarks, d , u e s que teñen Q , Y e T_3 opostos ós correspon-

dentos ós quarks. Tódolos hadróns de spin enteiro (mesóns) obtéñense a partir dun quark e un antiquark $q\bar{q}$ (os quarks suponse que teñen spin $1/2$). Os hadróns de spin semienteiro (barións) fórmanse a partir de 3 quarks qqq . Desta maneira, tódolos hadróns quedan clasificados e obtéñense os seus números cuánticos a partir de $q\bar{q}$ ou qqq (ver, por exemplo, referencias 1, 2 e 8). Ademais de clasificar tódolos hadróns coñecidos, tamén prediciu a existencia dalgúns como a Ω^- , partícula de spin $3/2$ formada por 3 quarks s , confirmado en 1964 en experimentos do acelerador de Brookhaven. M. Gell-Mann recibiu o p. N. en 1969; na explicación, o comité Nobel tamén mencionaba a Y . Ne'eman. A este, o mesmo ano, foille concedido o premio Einstein que por primeira vez se outorgaba a alguén non norteamericano.

Aínda que os quarks deran lugar a prediccións espectacularmente comprobadas e á clasificación dos hadróns, non se posuía evidencia física real da súa existencia. Por iso en 1969 se realizaron no acelerador lineal de Stanford colisións profundamente inelásticas electrón-protón. Nos choques en que o electrón é desviado a grande ángulo, o fotón intermedio formado (ver figura 9) ten gran momento e por tanto pequena λ co que puede 'ver' o interior do protón. O experimento (análogo ó de Rutherford no seu día) demostraba inequivocamente que o protón tiña partes, os hipotéticos quarks. Ós tres principais responsables do experimento, J. J. Friedman, H. W. Kendall e

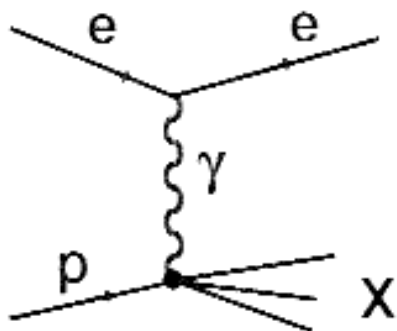


Figura 9. Colisión $e+p \rightarrow e+x$ (x denota particulares que resultan da rotura do protón).

R. Taylor, concedéronlle-lo p. N. en 1990.

Ós tres quarks d , u e s engadíronse outros tres. Primeiro en 1974, S. Ting e B. Richter (p. N. 1976) descubriron, traballando independentemente un en Brookhaven e outro en Stanford, a partícula $J\psi$ de masa 3.1 Gev estado ligado do quark encantado c e do seu anti-quark \bar{c} . En seguida se descubriron mesóns e barións que contiñan o quark c ou o anti-quark \bar{c} . En 1975, un equipo liderado por L. Lederman descubriu a partícula upsilon de masa 9.45 Gev,



De esquerda a dereita, primeiro J. Cronin (premio Nobel de Física en 1980), segundo I. Prigogine (premio Nobel de Química en 1972) e cuarto B. Richter (premio Nobel de Física en 1976), nun acto na Universidade de Santiago de Compostela.

traballando co acelerador do laboratorio Fermi. Esta partícula é un estado ligado dun novo quark b (bottom) e o seu antiquark \bar{b} . Finalmente en 1994, tamén no laboratorio Fermi, descubríronse sucesos que non poderían interpretarse sen a existencia dun novo quark t (top) e o seu antiquark. Desta maneira temos tres xeracións de quarks:

$$\begin{array}{ccc} u & c & t \\ & , & , \\ d & s & b \end{array} \quad (7)$$

que agrupamos en tres dobretes. ¿Por que hai o mesmo número de xeracións de quarks có que viramos de leptóns? No cálculo da vida media de desintegracións de certas partículas aparecerían infinitos que só poden cancelarse se se cumpre unha relación entre as cargas dos leptóns e a dos quarks da xeración correspondente. Tamén xorde a pregunta: ¿por que só tres xeracións de pares de quarks e leptóns? Hai dúas evidencias experimentais⁽⁹⁾ de que non pode haber máis: nos experimentos do CERN mediuse a desintegración de Z^0 con gran precisión, estando en total acordo coa existencia de tres xeracións de leptóns. Por outra parte, a nucleosíntese do deuterio e do helio efectuada nas primeiras etapas do universo é moi sensible tamén ó número de xeracións de leptóns. A proporción actual dos citados elementos exclúe case definitivamente máis xeracións. Observemos que, unha vez máis, o máis pequeno do universo ten que ver co máis grande.

CONFINAMENTO DOS QUARKS

Os quarks existen dentro dos hadróns e mesmo así non se viron libres fóra das partículas. ¿Poderíamos obter quarks libres e polo tanto carga fraccionaria?, ¿como son as forzas entre os quarks dentro do hadrón?

Os quarks interaccionan intercambiando unhas partículas chamadas gluóns (*glue* en inglés significa pegamento). Os quarks mantéñense ligados no protón debido ós gluóns que se intercambian, que actúan como unha especie de pegamento. Os gluóns, a diferenza do que sucedía na interacción electromagnética cos fotóns, interaccionarán entre eles directamente, é dicir, péganse uns a outros. Os gluóns son os portadores da interacción forte e a teoría que os estudia chámase Cromodinámica cuántica⁽¹⁾.

Na figura 8 ilustrábase o fenómeno da polarización. Debido ó apantallamento de carga, se medímo-la carga neta en valor absoluto a unha distancia maior có tamaño da carga orixinal, atopámonos que esta é menor cá carga orixinal. Se diminuímo-la distancia, a carga aumenta. No caso da Cromodinámica cuántica, a constante que desempeña o papel da carga eléctrica é a carga de cor, pero neste caso, debido a que os gluóns interaccionan con eles mesmos, o apantallamento da carga de cor é completamente diferente. A carga de cor diminúe coa distancia. Por iso, a forza entre os quarks a moi pequenas distancias é nula, o que explica por qué

os quarks se comportan coma se estivesen libres dentro do protón. É a liberdade asintótica.

¿Que sucede a distancias máis grandes, cando intentamos separar un quark dos outros dous nun protón ou un quark dun antiquark nun mesón? Crese que en condicións normais é imposible obter quarks libres, aínda que no hai unha demostración rigorosa deste confinamento. O fenómeno do confinamento dos quarks dentro dos hadróns é moi similar ó que sucede nun material superconductor. Un superconductor ten a susceptibilidade magnética cero $\mu = 0$ e polo tanto as liñas do campo magnético externo H son rexeitadas e non penetran nel. A analogía coa situación en Cromodinámica cuántica (QCD) realízase cambiando o campo magnético polo campo creado polas cargas de cor dos quarks dentro do hadrón, o material superconductor polo baleiro externo en QCD e o baleiro externo en QED ($\mu=1$) polo interior do hadrón (ver figura 10).

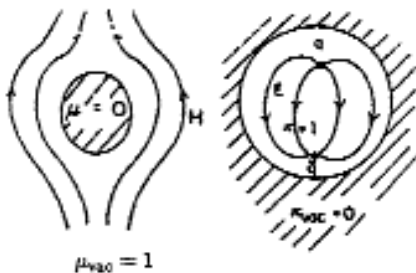


Figura 10. Material superconductor (diamagnetismo perfecto, $\mu=0$) versus o baleiro en cromodinámica cuántica (perfecto dialéctrico de cor $K=0$).

O interior e o exterior están intercambiados nos dous casos. Da mesma maneira que as liñas de H son rexeitadas, as liñas do campo debido ás cargas de cor son rexeitadas polo baleiro e polo tanto confinadas ó interior do hadrón. Así, os quarks non poden saír do hadrón.

LIBERACIÓN DOS QUARKS. SOPA DE QUARKS E GLUÓNS

O confinamento dos quarks podería deixar de cumprirse a altas temperaturas e presións. De feito, nunha etapa da evolución do universo, próxima á orixe, arredor de 10^{-5} seg., debeu de existir unha sopa de quarks e gluóns a moi altas temperaturas. Na busca da elementalidade foise do complexo ó simple; de macromoléculas pasamos a moléculas, átomos, núcleos, protóns e neutróns, quarks e gluóns. O proceso na historia do universo foi ó revés. Despois da etapa na que habería quarks e gluóns a moi altas temperaturas, empezáronse a condensar os quarks, ó se arrefría-la temperatura por efecto da expansión do universo, sufrindo unha transición de fase, formando os hadróns. Posteriormente, os protóns e neutróns empezáran a nucleosíntese formando núcleos atómicos (ata o ferro), seguindo o proceso en dereitura á complexidade.

¿Pódense obter en laboratorio quarks e gluóns libres⁽⁹⁾, verificando a transición de fase? Desde a década dos

oitenta, estanse facendo no Centro Europeo de Partículas (CERN) de Xenebra experimentos consistentes en colisións de núcleos pesados a moi alta enerxía, contra núcleos pesados para intentar obter quarks e gluóns libres. A idea subxacente é a seguinte: moitas das colisións prodúcense entre os protóns e neutróns dun núcleo e os doutro núcleo. En cada colisión individual, dada a alta enerxía do choque, poderíanse producir moitas partículas e, por mor da colisión resultarían tamén miles delas. Sen embargo, cada partícula ocupa un determinado volume e, ó seren moitas, o volume dispoñible ó colisionar os dous núcleos, ó menos durante un certo tempo da orde de 1-2 segundos, é moito menor có volume necesario para producir tal cantidade de partículas. Durante un certo tempo só terémo-los constituíntes das partículas, os quarks e gluóns nun volume de arredor de $\pi R^2 v \tau$, sendo V a velocidade do choque e $\tau \sim 1-2$ seg. Despois ese volume aumentará, diminuírá a súa temperatura e os quarks e gluóns formarán os hadróns observados. O feito de se produciren ou non como etapa intermedia os quarks e gluóns ten diversas consecuencias que poden verificarse experimentalmente.

Actualmente hai unha certa polémica sobre se se obtivo ou non a sopa de quarks e gluóns, sobre todo en colisións centrais Pb-Pb. En calquera caso, os experimentos do novo acelerador de Brookhaven (EUA), do

que se esperan os primeiros datos para este mesmo ano, e os do futuro gran colisionador de hadróns (LHC) do CERN, dilucidarán a cuestión e permitirannos coñecer cómo foi aquela transición de fase próxima á orixe do universo e cómo son as forzas responsables do confinamento dos quarks.

SIMETRÍAS NAS PARTÍCULAS ELEMENTAIS

O concepto de simetría é tan vello coma a civilización. Cómo naceu é un misterio que se cadra permaneza para sempre. Sen embargo o home sempre se sentiu profundamente impresionado polas estruturas simétricas do mundo físico e biolóxico. Na medida en que a civilización humana se desenvolve, a simetría penetra en tódalas disciplinas da actividade humana: pintura, literatura, arquitectura, escultura, música. O «Crab Canon» de J. S. Bach é un dueto de violíns no que a música dun é o resultado de aplica-la moviola á música do outro; a música dun é o resultado de lle aplica-la inversión temporal ó outro⁽⁹⁾.

O concepto de simetría tal como o usamos no exemplo musical, é dicir, transformación baixo a cal o sistema obtido coincide co orixinal, tivo a súa materialización matemática no século XIX, primeiro con Galois (1811-1832), e logo con Sophus Lie (1842-1899) que crearon o concepto de grupo e a teoría de grupos continuos (grupos de Lie) respectivamente. Sen embargo, o papel

importantísimo da simetría en Física non é coñecido ata este século e xustamente son a Teoría da Relatividade e a Mecánica cuántica as dúas teorías que revolucionan a Física, as que determinaron o papel decisivo das simetrías. Na primeira establécese que as leis da Física son invariantes fronte ás transformacións de Lorentz, e despois do establecemento da Mecánica cuántica quedou claro que as leis de conservación son unha consecuencia dunha simetría (esta relación poderíase ter establecido na Mecánica clásica).

No dominio das partículas elementais xa apuntámo-lo papel da simetría na introducción dos quarks. As interaccións débiles posúen unha determinada simetría de gauge e as interaccións fortes outra. É a simetría a que establece e determina a interacción.

Respecto ás simetrías discretas, críase que tódalas interaccións eran invariantes fronte á paridade P , intercambio da esquerda e a dereita, a C conxugación de carga cambio de signo das cargas ($Q, Y, T, S...$) e da inversión temporal. Esta crenza viuse incrementada coa demostración por Pauli e Lüders, independentemente en 1955, de que o produto das tres debía ser invariante para calquera interacción. Emporiso, T. D. Lee e C. N. Yang (p. N. 1957) propuxeron en 1956 que a paridade era violada nas interaccións débiles, indicando un experimento de desintegración β de núcleos no que se podería verifica-la súa proposta. O experimento foi realizado por Madame



C. N. Yang, premio Nobel de Física en 1957, nunha das súas visitas a Santiago de Compostela.

Wu un ano despois e confirmou a violación. Pauli non creu moito na proposta de Lee e Yang e dedicouse a poñer papeliños no despacho de Madame Wu dicindo que o experimento daría un resultado negativo.

O produto de CP tampouco é conservado polas interaccións débiles como demostraron experimentalmente en 1964 J. Cronin, V. Fitch (p. N. 1980) e colaboradores, estudiando as desintegracións do mesón K^0 e a súa antipartícula \bar{K}^0 en 2 e 3 pións. A violación de CP supón unha evidencia indirecta da violación da inversión temporal. A violación de CP é un dos requisitos necesarios para explicar por qué o universo no que vivimos está composto de materia e non de antimateria (materia formada por estados ligados de positróns con antinúcleos, é dicir, núcleos formados por antiprotóns e antineutróns). De acordo coa proposta de Andrei Sakharov (p. N. da Paz), ademais disto necesítase que o protón sexa inestable, aínda que a súa vida media sexa extremadamente grande como predín algunhas teorías de unificación de tódalas interaccións e que o universo tivese unha etapa inicial de rapidísima expansión.

PROBLEMAS NON RESOLTOS E PERSPECTIVAS

Anteriormente xa mencionamos unha das principais incógnitas: o confinamento dos quarks.

Unha segunda incógnita fundamental é o problema das masas, é dicir, cómo adquiren as partículas as súas masas e en concreto os quarks e as partículas de gauge, como W^\pm , Z^0 . O problema das masas das partículas gauge púxose de relevo desde o comezo da súa formulación. Nun seminario, en Princeton en 1955, sobre as teorías de

Yang-Mills, Yang foi requirido varias veces por Pauli sobre o dito problema; o seminario interrompeuse e só proseguiu debido á insistencia do anfitrión Oppenheimer. Sería quince anos despois cando Higgs e, independentemente, Brout e Engels, propuxeron o mecanismo de 'rotura espontánea da simetría', introducindo a(s) partícula(s) de spin cero, chamada de Higgs, e o campo asociado a ela. A busca do Higgs é un dos principais obxectivos e desafíos que ten a Física de partículas elementais e unha das razóns polas que Europa, coa colaboración dos Estados Unidos e Xapón, aprobou adapta-lo acelerador de 27 quilómetros de perímetro, actual LEP (gran colisionador electrón-positrón) para que se puidesen acelerar hadróns, transformándose no LHC (gran colisionador de hadróns) que colisionará hadróns cunha enerxía ata $7 \cdot 10^{12}$ ev contra hadróns coa mesma enerxía. 'Cazar' o Higgs ou demostrar-la súa non existencia pode ensinarnos a comprender qué é a masa. Macroscopicamente, Newton estableceu qué é a resistencia (inercia) que teñen os corpos ó cambio de movemento. ¿Como se xera esta resistencia microscopicamente? Un ministro de investigación do Reino Unido ofreceu hai uns anos unha botella de champaña decente a quen, nunha páxina, lle explicara qué é a partícula Higgs e por qué se quere atopar, mesmo gastando gran cantidade de diñeiro dado que se tiña que construí-lo LHC. A explicación tiña de ser comprensible para un avogado como era el. Un dos gañadores da oferta, D. Miller, deu a seguinte expli-

cación de cómo a partícula Higgs actúa para que as partículas teñan masa e cómo o mesmo adquire masa: consideremos un cóctel ofrecido a unha colectividade, por exemplo, membros do partido conservador. O salón está cheo, coas persoas uniformemente repartidas. En cada sitio hai alguén. O campo asociado á partícula Higgs ten un valor no espacio. Neste caso é constante, é o mesmo xa sexa nun lugar ou noutro, posto que hai o mesmo número de xente en calquera lugar. De repente entra Margaret Thatcher. A medida que ela vai pasando polo salón, os admiradores forman unha aglomeración local arredor dela. Esta aglomeración aumenta a inercia a deixar de moverse. Ela non pode pasar porque hai moitos que van detrás. Noutras palabras, ela adquire masa. Igualmente se houberse un rumor entre os asistentes, sen necesidade de que estivese Margaret Thatcher, provocaríanse aglomeracións provocando resistencia a que deixase de propagarse o rumor. O mesmo campo asociado á partícula de Higgs adquire masa.

Mediante esta analogía simple descríbense dúas das ideas fundamentais: as partículas teñen diferente masa porque interaccionan de forma distinta co campo asociado á partícula de Higgs que impregna todo o espacio. A maior interacción, maior masa. A segunda idea fundamental é a rotura espontánea da simetría. Ó principio hai a mesma densidade de persoas en calquera sitio do salón. É unha simetría perfecta. Despois, aparecen as aglome-

racións, rompe a simetría. Esa rotura dá lugar a que as partículas adquiren diferente masa. A diferenciación non se pode dar doutra maneira que rompendo a simetría. Unha partícula só pode ser ela mesma e diferente das outras, porque hai unha rotura da perfección, da orde da simetría.

Un terceiro problema na Física de Partículas é o descoñecemento teórico que se ten sobre toda unha serie de constantes e parámetros, como a velocidade da luz c , a constante de Planck h , a constante de gravitación universal G , a carga do electrón e , etc. Incluso en teorías ambiciosas, como a que unifica as interaccións electromagnéticas e débiles, aparecen constantes non establecidas teoricamente e o seu valor só é determinado experimentalmente. Ten-se especulado que o valor desas constantes é ese e non outro porque se non non podería haber vida intelixente na Terra. É o famoso principio antrópico. Non imos entrar a discutir aquí ese principio. Máis ambiciosa fisicamente é a busca dunha teoría que unifique tódalas interaccións, a electromagnética-débil, a forte e a gravitatoria, na que queden determinadas tódalas constantes e parámetros dentro da mesma teoría. Sería unha teoría do todo. Hoxe en día, unha esperanza desa teoría constitúena as Teorías de supercordas, que poden englobala chamada supersimetría, simetría na que clasifican no mesmo grupo fermións e bosóns.

Non cabe dúbida de que estes tres problemas fundamentais farán que a busca da elementalidade sexa no sécu-

lo XXI tan apaixonante como o foi no século XX e que estea chea de insospeitadas sorpresas como sucedeu neste último.

Algún lector podería estar pensando: ¿para que serve todo isto? É a pregunta que fixo o ministro de Facenda británico e ilustre economista Gladstone ó físico Michael Faraday no século XIX. A resposta foi: “Non o sei, pero seguro que os seus sucesores cobrarán impostos por iso”. Efectivamente, Faraday acababa de descubri-la inducción electromagnética, clave para o funcionamento dos motores eléctricos, entre outras cosas.

Igualmente, no noso caso o fundamental foi o impresionante avance no coñecemento do máis pequeno. Indirectamente tamén foi a orixe de importantísimos instrumentos aplicados a moi diversos campos. A busca do elemental deu lugar historicamente a múltiples aplicacións. A xeito de exemplo citémo-lo descubrimento dos raios X, o escáner, a resonancia magnética nuclear, o squid (dispositivo superconductor de interferencia cuántica), a tecnoloxía de baleiro, as melloras no tratamento de datos, a arquitectura de ordenadores, a rede www, a electrónica de alta velocidade e un longo etcétera que sen ningunha dúbida reverteu en beneficio da Humanidade. Sendo todo isto importante, no é comparable co feito de que a Humanidade continúe buscando alén, no máis pequeno e no máis grande, seguindo o impulso inicial que lle permitiu saír dos bosques tropicais e propagarse pola Terra toda.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Close, F., *La cebolla cósmica*, Barcelona, Edit. Crítica, 1988.
- (2) Braun, M., “As partículas elementais e as súas interaccións”, *Revista Galega do Ensino*, 25, 1999, 29-44.
- (3) Pajares C., “Os raios cósmicos”, *Revista Galega do Ensino*, 27, 2000, 73-85.
- (4) Zas, E., *Revista Española de Física* 10, 2, 1996, 4-10.
- (5) Cronin, J., T. K. Gaisser e S. P. Sworidy, *Investigación y Ciencia*, marzo 1997.
- (6) Tagle, J. A., *La fusión nuclear*, Madrid, Edit. Debate, 1995.
- (7) *Twentieth Century Physics*, Vol. I, II, III, Inst. Of Physics Publishing and American Institute of Physics Press, Bristol e Nova York, 1995.
- (8) Pajares, C., “¿De que están feitas as cousas? As partículas elementais”, *Revista Galega do Ensino*, 16, maio 1997, 31-48.
- (9) Steinberger, J., C. N. Yang, A. Capella, D. Fernández de Labastida e M. Báez, en *Estructuras del Universo*, Edit. Univ. Santiago de Compostela, 1994.
- (10) Pajares, C., *De lo más pequeño a lo más grande del Universo*, Santiago de Compostela, Ed. Compostela, 1996.

ASTROFÍSICA E COSMOLOXÍA

*José M. Fernández de Labastida y del Olmo**
 Universidade de Santiago
 de Compostela

Nun balance de fin de século como o que se presenta neste artigo é natural comezar preguntándose cáles eran os coñecementos que se tiñan sobre o universo hai cen anos. A realidade é que daquela eran ben escasos comparados cos que manexamos hoxe en día. Nesa época a penas dispoñíamos dun coñecemento rudimentario da nosa galaxia e aínda non se sabía a resposta a preguntas tan básicas como, por exemplo, por qué as estrelas brillan. O coñecemento do universo era moi limitado: non existían nin as ferramentas para observalo nin a Física na que interpreta-las observacións. O século que agora dá cabo caracterizouse polo descubrimento de novas clases de obxectos a medida que os instrumentos para observa-lo universo foron evolucionando. Paralelamente, foron descubríndose os fundamentos da Física, o que permitiu o espectacular desenvolvemento da Astrofísica. Non esquezamos que o obxectivo desta disciplina é interpreta-las observacións astronómicas dos obxectos que poboan

o universo, como as estrelas e as galaxias, en termos de modelos físicos.

A Cosmoxía persegue os mesmos fins que a Astrofísica pero tratando o universo dunha forma unificada, como un todo. Ámbalas dúas forman parte da Astronomía, que se define como a ciencia que estudia a orixe, a evolución, a composición, a distribución e o movemento da materia maila radiación presente no universo. No século que agora termina experimentámola chamada terceira idade da Cosmoxía, froito do descubrimento da Teoría Xeral da Relatividade por Albert Einstein. Fican moi atrás a visión xeocéntrica do universo da primeira idade, culminada por Ptolomeo no século II, e a visión heliocéntrica de Copérnico no século XVI. Hoxe sabemos que vivimos nun universo que evoluciona arreo e que contén miles de millóns de galaxias dentro da esfera que somos quen de observar. Ademais, dispoñemos dun modelo, o do *big bang*, o da grande explosión, baseado non só na Teoría da Relatividade Xeral que

* Catedrático de Física Teórica.

describe a interacción gravitatoria, señón tamén nas teorías físicas correspondentes ó resto das interaccións fundamentais. Este modelo proporciona unha explicación cualitativa e cuantitativa da evolución do universo desde unha fracción de segundo despois do seu nacemento ata o presente, uns catorce mil millóns de anos máis tarde. Todo este progreso no noso coñecemento era impensable hai cen anos.

Neste artigo presentarase primeiramente un balance dos principais avances na Astrofísica; describirémos-las propiedades físicas da materia e a radiación que poboan o noso universo. A continuación, equipados con ese coñecemento, estudarase o modelo cosmolóxico estándar, o modelo do *big bang*, revisando os seus fundamentos e limitacións. Para finalizar, analizaranse algunhas das preguntas clave que deberán ser afrontadas no século que agora comeza.

1. OS INSTRUMENTOS

A Astrofísica diferénciase das demais ciencias experimentais en que nela non se poden preparar, modificar ou controla-los obxectos que estudia. Debido a isto depende profundamente do grao de desenvolvemento dos seus instrumentos de observación para medir aspectos dos sinais que nos chegan do espazo exterior. Estes sinais están constituídos fundamentalmente por radiación electromagnética. Só en contadas ocasións puidemos estudar

corpos extraterrestres nos nosos laboratorios; é o caso das rochas lunares e dos meteoritos ou rochas provenientes doutras zonas do sistema solar que caen na Terra. Nas últimas décadas tamén se estudaron sinais vidos do exterior, constituídos por neutrinos e por raios cósmicos, termo utilizado para as partículas de moi alta enerxía que teñen a súa orixe alén do sistema solar. Sen embargo, ata o momento, non é moita a información extraída do seu estudio. O noso coñecemento do universo débese fundamentalmente ás observacións baseadas na radiación electromagnética.

A radiación electromagnética procedente de fóra do noso planeta chéganos nun rango de enerxías que cobre gran parte do espectro electromagnético, desde ondas de radio con lonxitudes de onda de metros ata raios gamma con lonxitudes de onda de billonésimas de metro. A luz visible corresponde a unha pequena franxa deste amplo espectro que abrangue doce ordes de magnitude. Ata os anos trinta as nosas observacións eran puramente ópticas e polo tanto só se coñecían obxectos que emitían luz visible, como as estrelas, e obxectos sobre os que a luz visible se reflectía, como os planetas e os satélites. Nas últimas décadas o uso de novos instrumentos capaces de medir radiación electromagnética proveniente do espazo exterior noutras zonas do espectro permitiu mellorar de forma espectacular o noso coñecemento do universo.

A lonxitude de onda da radiación emitida por un corpo está relacionada coa súa temperatura. Os obxectos temperados emiten radiación infravermella (lonxitudes de onda de dez milésimas de metro) e os máis quentes, radiación de alta enerxía en forma de raios X o raios gamma. Un mesmo obxecto presenta un aspecto moi diferente dependendo da zona do espectro electromagnético no que se estea observando. Por exemplo, no rango do espectro visible, unha das maiores estruturas observadas no universo, un cúmulo de galaxias, aparece como un conxunto de miles de millóns de estrelas brillantes, cunha temperatura de aproximadamente 10.000 graos. Sen embargo, se esa estrutura é observada no rango do espectro correspondente ós raios X, o que se observa é un plasma intergaláctico a moi altas temperaturas: 10 millóns de graos. Por outra parte, se a observación se fai no infravermello, atópase po tépedo intergaláctico a temperaturas duns centos de graos. A información obtida nos distintos rangos constitúe un importante ingrediente para entender os fenómenos que teñen lugar nos variados obxectos que poboan o noso universo.

A Astrofísica necesita medi-la posición, a intensidade, a lonxitude de onda, a polarización e a variación no tempo dos sinais que nos chegan. Para iso utiliza unha variedade de instrumentos que se centran fundamentalmente en detectar os sinais de natureza electromagnética. Sen embargo, debido á presenza da atmosfera terres-

tre, só parte destes sinais chega á superficie da Terra. A maior parte do espectro electromagnético da radiación proveniente do espazo exterior non pode observarse desde a superficie terrestre debido a que a atmosfera é opaca ou moi pouco transparente fóra das rexións do espectro visible e de parte do de ondas de radio. A necesidade de obter información no rango máis amplo posible do espectro obrigou a colocar algúns destes instrumentos en órbita arredor da Terra.

Os instrumentos que se deseñan para formar imaxes de obxectos moi distantes denomínanse telescopios. Os primeiros foron os de tipo óptico, que proporcionan imaxes no rango do espectro visible. Nesta categoría están desde os sinxelos telescopios deseñados por Galileo no século XVII ata o moderno telescopio espacial Hubble. Os telescopios para formar imaxes no rango das ondas de radio, os radiotelescopios, comezaron a construírse nos anos trinta. Hoxe dispomos de avanzados radiotelescopios como o de Arecibo en Porto Rico e o Very Large Array (VLA) en Novo México. Existen tamén telescopios infravermellos, en xeral situados a grandes alturas para evitar que non todo o sinal infravermello chegado do exterior sexa absorbido pola atmosfera. Para explorar outras zonas do espectro electromagnético deseñáronse distintos tipos de telescopios que se colocaron en globos, naves espaciais e satélites artificiais. Gracias a eles dispoñemos na actualidade de

información no rango do ultravioleta, os raios X e os raios gamma.

O problema máis importante co que se enfrontan os telescopios é que a cantidade de enerxía que nos chega dunha determinada fonte é moi pequena. Por exemplo, a enerxía que recibimos dalgunha das estrelas máis brillantes durante os últimos mil anos é aproximadamente a mesma que se necesita para levantar este volume uns centímetros. Por iso os instrumentos de detección deben deseñarse de xeito que sexan sensibles ós sinais máis minúsculos. Os constituíntes elementais da radiación electromagnética son os fotóns. Moitos dos obxectos do noso universo producen emisións que supoñen a recepción duns poucos fotóns. Actualmente os telescopios contan con sistemas electrónicos que permiten grava-lo impacto de case tódolos fotóns que lles chegan. Isto, máis a colocación de telescopios no espazo exterior, resolveu en gran medida o problema relacionado coas baixas intensidades dos sinais que impactan nos nosos instrumentos de medida.

A interacción electromagnética recollida nun telescopio xera unha serie de datos que son recompilados en forma de espectro. Un espectro é unha gráfica na que se debuxa a intensidade do sinal recibido en relación coa súa lonxitude de onda nun determinado rango, que depende do tipo de telescopio. Nos telescopios ópticos, este rango é o do espectro visible e tipicamente as gráficas resultantes presentan as chamadas liñas espectrais. A presenza

destas liñas débese a que os átomos sofren transicións de enerxía que xeran a emisión e absorción de fotóns a lonxitudes de onda concretas. A cada átomo pode asociarse un conxunto de liñas espectrais que o identifica. Por iso, a partir das gráficas xeradas por un telescopio óptico, podemos coñecer a natureza da fonte que orixinou o sinal recibido. Por exemplo, gracias a estes estudos, sábese que as estrelas conteñen abundantes cantidades de hidróxeno e helio. Os sinais recibidos constitúen unha firma do estado dun obxecto pois non só permiten obter información sobre os seus constituíntes, senón tamén sobre a súa distribución a partir das intensidades correspondentes a cada liña espectral. Calquera modelo que se formule dun obxecto debe conducir a un espectro de liñas espectrais como os observados. Na actualidade dispoñemos de modelos que fan predicións acordes coas observacións.

2. OS OBXECTOS

A Astrofísica non se limita a realizar unha descrición do observado; trata de entender-lo observado de maneira que usando as leis da Física é posible inferir de qué están feitos os obxectos e cómo evolucionan co transcurso do tempo. Isto faino propoñendo modelos que a miúdo conducen á realización de novas observacións para confirmalos. Se retomámo-lo exemplo do cúmulo de galaxias discutido anteriormente, as medidas realizadas indican que as galaxias se moven a altas

velocidades. Un modelo que describa a evolución do cúmulo deberá explicar se a forza gravitatoria entre galaxias é suficiente para mantelas xuntas, mesmo movéndose a velocidades tan extremas. Ata hoxe non se coñece ningún modelo satisfactorio para explicar este fenómeno, a non ser que á parte das galaxias se introduza no sistema unha enorme cantidade de materia adicional. Esta materia, comunmente chamada materia escura, ha supoñe-lo 90 % da materia do cúmulo para dispoñer dun modelo consistente. Nas zonas do espectro electromagnético observadas non hai rastro desta materia escura. Trátase dun dos problemas abertos máis interesantes da Astrofísica. A solución pode ser simplemente que existan obxectos similares ós planetas vagando entre as galaxias en enormes cantidades, ou, pola contra, que descoñezámo-la existencia de novos tipos de materia presentes no noso universo. As especulacións relativas a esta segunda posibilidade teñen sido numerosas nas últimas décadas.

Os obxectos que compoñen o universo son variados en formas e tamaños. Sen embargo, todos, desde os máis pequenos ós máis grandes, están fortemente dominados pola forza da gravidade. Na evolución destes obxectos a gravidade ten un papel fundamental impondo unha tendencia universal que o obriga a facerse cada vez máis pequeno. A súa vida consiste basicamente nunha continua loita por vencer esta tendencia, a miúdo usando as outras interaccións fundamentais. Se

nalgún momento da vida dun obxecto esa tendencia universal debida á gravidade non pode resistirse, este colapso indefinidamente e convértese nun burato negro. Un obxecto desta natureza fórmase cando se fai tan pequeno en relación á súa masa que a gravidade no interior dunha esfera centrada nel é tan grande que nada pode escapar, nin sequera a luz.

A forma en que os distintos obxectos do universo vencen a tendencia universal ó colapso propiciada pola gravidade é variada. A forza debida á gravidade nun obxecto é tanto máis grande canto maior é a masa do obxecto. Diferentes tipos de forzas de presión contrarrestan nos planetas e nas estrelas a forza gravitatoria orixinando ciclos evolutivos. Estes comprenden desde a vida tranquila dos planetas inactivos ata as violentas conductas das estrelas moi masivas. No caso dos cúmulos de galaxias, a forma en que se compensa a tendencia universal da gravidade é diferente. Aquí os constituíntes interaccionan só gravitatoriamente e o xeito de evita-lo colapso débese a que estes están en órbita.

O SISTEMA SOLAR

Despois destas consideracións xerais sobre os obxectos que poboan o universo, principiámo-la súa descrición. Por volta do noso planeta encontrámonos co sistema solar. Este consta dunha estrela, o Sol, os planetas e outros obxectos como satélites, asteroides e cometas. Entre os planetas, habitamos un con características moi espe-

ciais que permitiron a existencia da vida.

Coma no caso de calquera outro obxecto do universo, a evolución dun planeta está dominada fundamentalmente pola gravidade. Os planetas son corpos pequenos abondo como para que a forza da gravidade que tende a comprimilos sexa tan feble que non se poida producir no seu interior a fusión nuclear do hidróxeno en helio, fenómeno omnipresente na maior parte da vida dunha estrela. Igual có resto dos obxectos do universo, os planetas formáronse por acrecencia e a súa evolución depende fundamentalmente do seu tamaño. Os planetas pequenos como Mercurio ou Plutón son corpos que levan inactivos moito tempo. Debido á súa masa tan pequena, a enerxía térmica producida despois do colapso gravitacional que orixinou a súa formación foi moi pequena. Por outra parte, a súa capa rochosa externa é tan fina que a pouca enerxía térmica que houbo xacando foi expulsada axiña. En xeral, as superficies destes planetas, unha vez formadas, permanecen inalteradas para sempre agás cando algún obxecto colisiona con eles.

Amais dos planetas pequenos, satélites como a Lúa, e asteroides como os que poboan o cinto existente entre Marte e Xúpiter, levaron unha vida igualmente monótona. As condicións que agora existen nestes obxectos son practicamente as mesmas cás presentes na súa formación hai 4500 millóns de anos. Constitúen polo tanto un interesante conxunto de fósiles cósmicos.

Existen outros obxectos pequenos no noso sistema solar que, a pesar de selo, tiveron unha evolución menos monótona cós que acabamos de describir. Cando un corpo pequeno se atopa preto doutro meirande, a forza gravitatoria exercida polo grande sobre o pequeno produce neste unha serie de deformacións, de natureza similar ás mareas, que determinan totalmente a súa evolución. Os cometas son corpos que sofren este fenómeno. Estes obxectos son pequenos anacos de xeo (duns dez quilómetros de lonxitude) que ó achegárense ó Sol segregan po e gas. Outro exemplo de corpos sometidos a un fenómeno similar son os aneis dos planetas de gran tamaño, como Xúpiter e Saturno. A enorme masa destes planetas orixina deformacións nos satélites que a rodean producindo a súa destrución. O resultado é a formación dunha gran cantidade de pequenos corpos que están en órbitas arredor dos planetas e que vistos desde lonxe semellan formar un anel.

Os planetas de tamaño medio como Marte, Venus ou a Terra teñen unha capa externa o suficientemente mesta como para que a enerxía térmica interna sexa expedita lentamente, durante unha gran fracción do tempo transcorrido desde a súa formación. A calor que flúe desde o interior produce fenómenos como os volcáns, os movementos tectónicos e a exacción de gases que xeran atmosferas.

Os outros catro planetas do noso sistema solar, os de gran tamaño, Xúpiter, Saturno, Urano e Neptuno,

presentan propiedades moi distintas ás dos anteriores. Son fundamentalmente gasosos, formados por hidróxeno e helio, cunha composición máis parecida á do Sol ca á da Terra. Todos eles teñen un núcleo rochoso. O seu aspecto exterior é moi cambiante e é nestes planetas onde se producen os fenómenos máis virulentos do noso sistema solar, tirante o Sol.

De tódolos obxectos do noso sistema solar, o Sol ten un papel crucial. É o obxecto máis masivo (máis de 300.000 veces a masa da Terra ou unhas 1000 veces a de Xúpiter), arredor do cal están en órbita os planetas. Trátase dunha estrela de tamaño medio da que temos moita información debido á súa proximidade. As súas características son comúns ás dos obxectos que a continuación se describen.

AS ESTRELAS

O interior dun obxecto cunha masa superior ó oito por cento da do Sol (unhas oitenta veces a masa de Xúpiter) quece tanto que se producen procesos de fusión nuclear no seu interior durante un longo período de tempo. Os obxectos que experimentan este fenómeno denomínanse estrelas. Ó contrario cós planetas, que só reflicten parte da luz que reciben, as estrelas, froito do proceso de fusión nuclear presente no seu interior, emiten luz propia e brillan. Como ocorre en xeral con tódolos obxectos que poboan o universo, nunha estrela compiten dúas forzas, a da gravidade e a nuclear. Esta última xera unha presión interna que contra-

resta o colapso gravitatorio. Tal proceso permanece en equilibrio durante un longo período de tempo, miles de millóns de anos, emitindo pola súa vez enerxía ó espazo interestelar. Esa enerxía é a que observamos en forma de radiación electromagnética e, no caso do Sol, é a responsable da nosa existencia. Na vida dunha estrela chega un momento en que as fontes xeradoras dos procesos de fusión no seu interior se esgotan e a forza gravitatoria vence e produce o seu colapso. Se a masa final da estrela é pequena, esta termina sendo unha anana branca ou unha estrela de neutróns. Se, pola contra, a masa é moi grande, a estrela sofre colapsos indefinidamente ata se converter nun burato negro.

Incluso cando son observadas cos telescopios máis potentes, as estrelas aparecen ante nós coma puntos de luz; mesmo así é posible obter bastante información sobre elas. Unha das propiedades de uso máis común é o brillo. Tomándoo como referencia xerouse a noción de magnitude dunha estrela: as estrelas máis brillantes son as de primeira magnitude. A noción clásica de magnitude foi evolucionando, e hoxe en día responde a unha cantidade definida con precisión en termos do fluxo de enerxía nun determinado rango de frecuencias proveniente da estrela que atravesa a superficie dun telescopio.

Outras propiedades importantes das estrelas son a distancia á que se atopan da Terra, a temperatura, a luminosidade, a masa e o radio. Para as estrelas máis próximas, a distancia mídese

por triangulación, usando o diámetro da órbita terrestre como lonxitude básica e medindo o desprazamento da posición dunha estrela cando se observa desde dous puntos opostos da órbita. A distancia a estrelas máis afastadas obtense a partir das estrelas chamadas Cefeidas. Para describir cómo se mide a partir delas é preciso falar primeiro doutras propiedades como a temperatura e a luminosidade das estrelas.

A temperatura dunha estrela obtense a partir de medidas do seu espectro e da súa cor, axustándoas a modelos que describen o estado das estrelas. A temperatura utilízase para clasificar as estrelas nunha secuencia espectral; cada clase denótase por letras concretas do alfabeto. Percorrendo o espectro desde as máis quentes ás máis frías estas son: O, B, A, F, G, K e M. Ás veces estas letras veñen precedidas doutras cando se trata dunha clasificación dentro dun determinado tipo de estrelas; por exemplo, se se trata de ananas brancas, cada letra viría precedida dun D. Tamén se utilizan subíndices numéricos para subdividirlas clases: os menores corresponden ás maiores temperaturas.

As propiedades máis significativas na vida dunha estrela son a masa, a luminosidade e o radio. A masa é difícil de medir; só en situacións nas que unha estrela está en órbita arrededor doutra é posible determinala súa masa utilizando a terceira lei de Kepler. Esta lei relaciona o período e o radio da órbita coa masa do sistema. A luminosidade é a potencia de emisión total da

estrela e determínase a partir do fluxo de enerxía que esta emite e da distancia; se f é o fluxo e d a distancia, a luminosidade L toma a forma: $L = 4\pi d^2 f$. Finalmente, o radio mídese a partir da temperatura e a luminosidade, usando a relación termodinámica que relaciona a emisividade e dun corpo negro coa súa temperatura T , $e = \sigma T^4$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzman. Tendo en conta que a luminosidade é e multiplicado pola área da superficie da estrela, $4\pi R^2$, sendo R o seu radio, obtense para o cadrado deste, $R^2 = L / 4\pi \sigma T^4$.

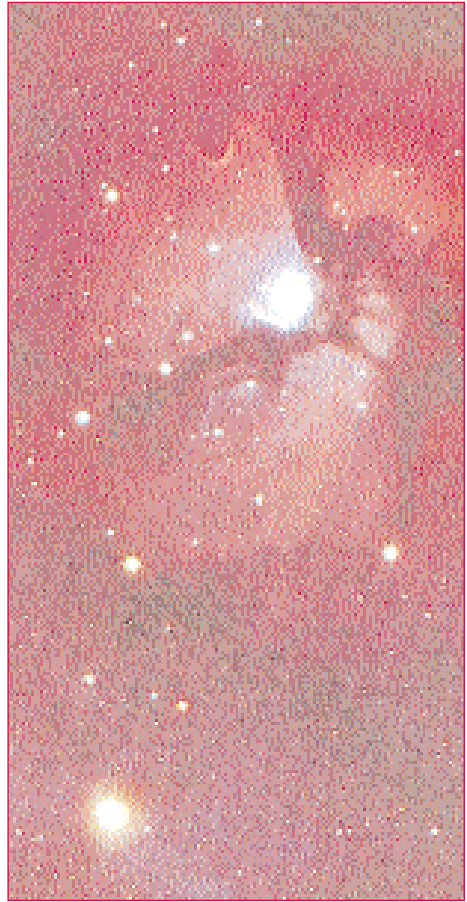
As medidas que normalmente se efectúan dunha estrela son o fluxo, a distancia e a temperatura; a partir delas obtense —mediante as relacións anteriores— a luminosidade e o radio. Sen embargo, en moitas ocasións hai que proceder de forma diferente. Por exemplo, o procedemento baseado na triangulación para medir distancias só é factible para estrelas próximas. A distancia a estrelas máis afastadas obtense partindo da medida do fluxo f . O procedemento neste caso consiste en localizar unha estrela Cefeida na zona onde se quere medi-la distancia. Estas estrelas son variables e o seu comportamento axústase a unha relación sinxela entre o seu período de variación e a súa luminosidade; medindo este período obtense a luminosidade que permite deducir-la distancia a partir da medida do fluxo e a relación considerada no parágrafo anterior, $L = 4\pi d^2 f$. Unha Cefeida é unha útil vara de medir para determinar distancias no universo.

Para obter a distancia á que está unha galaxia remota basta atopar nela unha Cefeida e medir o seu período e brillo.

Unha vez descritas as propiedades básicas que observamos das estrelas, estamos en condicións de analizar a súa evolución. As estrelas fórmanse cando as nubes de gases interestelares resultan inestables e sofren un colapso gravitacional. Os detalles do proceso que orixina o nacemento dunha estrela non se coñecen ben porque teñen lugar no interior dunha nube de gas que non emite luz. A información de que dispoñemos conseguiuase basicamente a partir da radioastronomía. Téñense formulado varios mecanismos para explicar cal é a orixe da inestabilidade que causa o colapso gravitacional. Unha das propostas sostén que as inestabilidades se deben ás ondas de choque que produce unha supernova achegada ao medio interestelar. As supernovas son estrelas próximas ó seu estadio final que sofren unha enorme explosión cando empeza a extinguirse o proceso interno de fusión.

O modelo máis asentado da formación do sistema solar baséase no colapso dunha nube de gas que andaba rotando, de xeito que parte dela non se incorporou ó Sol senón que formou un disco ó seu redor. O material deste disco condensouse en materia sólida. Estes sólidos colisionaron entre eles debido á forza da gravidade, e froito dunha continua acrecencia formáronse os planetas e os satélites. Os planetas no interior do sistema solar están for-

mados fundamentalmente de material rochoso debido a que a parte interior do disco era a que estaba máis quente.



As estrelas fórmanse cando inmensas nubes de gas colapsan baixo a súa propia gravidade.

Unha vez que unha estrela completou a fase de colapso gravitacional e o seu interior quece ata unha temperatura superior ós catro millóns de graos,

as reaccións de fusión comezan. Estas forman unha cadea na que catro protóns forman un núcleo de helio emitindo dúas partículas cargadas positivamente: dous positróns. A cadea de reaccións é exotérmica, e proporciona a calor suficiente como para manter unha estrela como o Sol no seu estado actual durante uns 10.000 millóns de anos. As estrelas máis masivas queiman o seu combustible nuclear moito máis de prása e teñen unha vida máis curta. O desenvolvemento da Física nuclear permitiu construír modelos que describen o proceso que se produce no interior da estrela e cómo parte da súa enerxía é transferida ó espacio exterior. Estes modelos predín a temperatura, a luminosidade e o tamaño para unha estrela dunha determinada masa. Os resultados teóricos concordan de forma moi satisfactoria coas observacións.

A fase da vida dunha estrela na que queima de forma regular o seu combustible nuclear é coñecida como a fase da secuencia principal. A orixe desta denominación radica na situación que as estrelas ocupan durante esta fase no diagrama de Hertzsprung-Russell. Neste diagrama a ordenada é a luminosidade, que medra cara a arriba; a abcisa é a temperatura, que decrece cara á dereita. As estrelas que se atopan na fase mencionada distribúense ó longo dunha franxa característica coñecida como a secuencia principal. Cando unha estrela comeza a ter unha idade avanzada abandona esta franxa e

sitúase noutras zonas características do diagrama.

AS XIGANTES VERMELLAS

A maioría das estrelas do universo teñen aproximadamente o mesmo radio. Este obtense a partir da lei de radiación do corpo negro, como xa indicamos, unha vez medidas a luminosidade e maila temperatura. En xeral, as estrelas máis luminosas son as de máis alta temperatura. Existen sen embargo excepcións a esta regra; de feito, algunhas poden observarse a simple vista. Varias das estrelas máis brillantes do ceo nocturno son claramente vermellas e moi luminosas. A cor avermellada implica baixa temperatura e, polo tanto, de acordo coa regra xeral, deberían ser pouco luminosas. Este comportamento distinto débese a que se trata de estrelas en idade avanzada que xa abandonaron a secuencia principal. Os seus radios son da orde de varios centos de veces o radio do Sol. Por esta característica, e pola súa cor, estas estrelas denomínanse xigantes vermellas. O seu tamaño é tan grande que se o centro dunha delas estivese localizado no centro do Sol, a Terra estaría no seu interior.

Os modelos físicos que explican a evolución das estrelas predín un comportamento como o observado. Unha estrela permanece na secuencia principal ata que esgota o seu combustible nuclear. Cando deixan de producirse procesos de fusión nuclear no seu interior, a zona central da estrela contráese e faise moi densa. A estrela deixa de ser

homoxénea e, debido a que o peso das moléculas no interior é maior có das do exterior, prodúcese un gradiente de presión que expulsa unha enorme capa de hidróxeno para fóra. O tamaño da estrela medra considerablemente e as capas externas arrefríanse. A estrela resultante corresponde a unha luminosidade maior cá que tiña, pero cunha temperatura inferior.

As xigantes vermellas teñen unha vida bastante efémera. Nestas estrelas seguen a producirse reaccións de fusión do hidróxeno nunha capa que rodea o núcleo central. Este núcleo está formado fundamentalmente de helio e nel prodúcense reaccións nucleares que involucran elementos máis pesados. Tres núcleos de helio fúsiónanse para producir un núcleo de carbono e este, pola súa vez, trala captura de núcleos de helio adicionais, produce elementos como o osíxeno e o ferro. O ferro é o elemento do sistema periódico cun núcleo mellor ligado; en tódalas reaccións de fusión nas que participa, os elementos resultantes son máis pesados có de partida e entón é preciso subministrar enerxía para que se produzan. Existen procesos de fusión exotérmicos para elementos máis lixeiros có ferro pero todos son endotérmicos para os máis pesados. Neste último caso só a fisión pode producir enerxía. A fisión, ó contrario que a fusión, é un proceso no que un núcleo se descompón en núcleos máis lixeiros. A fisión é a responsable dos procesos que ocorren na explosión dunha bomba atómica ou na xeración de enerxía dun reactor

nuclear. Por outra parte, a fusión é a responsable da bomba H ou de hidróxeno, baseada no mesmo proceso nuclear que se produce no interior das estrelas.

Fixemos unha descrición das estrelas considerándoas como obxectos illados no medio interestelar. Pero a miúdo forman os chamados sistemas binarios nos que unha estrela está en órbita respecto a outra, de forma semellante a como os planetas do sistema solar están en órbita arredor do Sol. Cando as estrelas se atopan moi preto, a máis masiva delas, e que polo tanto evoluciona máis de présa, non se converte nunha xigante vermella —segundo o proceso descrito— porque non hai espazo para a súa enorme capa externa. No canto de engulir a estrela acompañante, o que se produce é un continuo depósito de masa nela. O intercambio de masa prolóngase polo resto da vida combinada das estrelas, orixinando fenómenos moi enerxéticos e explosivos nos estadios finais.

AS ANANAS BRANCAS

Logo duns cantos centos de millóns de anos, os procesos de fusión nuclear presentes nunha xigante vermella tamén se esgotan e a estrela sofre un novo colapso gravitacional. Neste colapso a estrela faise tan densa que o seu interior se poboa da denominada materia dexenerada. Un dos principios fundamentais da Mecánica cuántica, o principio de incerteza, implica que as posicións das partículas non poden coñecerse con precisión. Só é posible

determina-la rexión do espacio que poden ocupar. É coma se existise un movemento intrínseco de maneira que pode considerarse que as partículas posúen unha presión propia. Así mesmo, o principio de exclusión de Pauli, tamén de natureza cuántica, limita o número de electróns que poden estar presentes nun determinado nivel atómico (para máis detalles, consúltase o artigo "Mecánica cuántica", de J. Sánchez Guillén neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A densidades moi altas supérase un límite a partir do cal a materia posúe unha presión de natureza puramente cuántica. Este tipo de presión, denominada presión de dexeneración, non depende da temperatura e, aínda que presente, é desprezable a densidades ordinarias. Sen embargo, cando a densidade é moi alta, a presión de dexeneración faise dominante. As primeiras partículas que sofren o efecto desta presión son os electróns, resistíndose a ser comprimidos polo colapso gravitatorio. Cando o núcleo dunha estrela chega a un estado no que este é contrarrestado pola presión de dexeneración debida ós electróns, a estrela convértese nunha anana branca. Este nome débese a dúas propiedades. No colapso que se orixina a estrela sofre unha notable redución de tamaño. Unha estrela cunha masa coma a do Sol reduce o seu tamaño unhas 1000 veces. As ananas brancas son brancas porque inicialmente están moi quentes debido á enorme compresión; despois dese estado inicial arrefrían lentamente e logo duns miles de millóns de anos apáganse.

Permanecen frías eternamente sopor-tando unha densidade de máis de dez toneladas por centímetro cúbico.

AS ESTRELAS DE NEUTRÓNS

Non tódalas estrelas terminan converténdose en ananas brancas; só as máis lixeiras, aquelas que no seu estado inicial tiñan unha masa inferior a oito veces a masa do Sol, evolucionan da forma descrita. As estrelas máis masivas chegan á súa fase final cunha masa superior ó chamado límite de Chandrasekhar (1,4 veces a masa do Sol) e o colapso gravitacional correspondente condúceas a un estado distinto ó dunha anana branca. Neste tipo de estrelas a forza gravitacional resulta tan grande que non pode ser contrarrestada pola presión de dexeneración debida ós electróns. A estrela colapsa ata alcanzar unhas densidades tan altas que os electróns e os protóns se combinan para formaren neutróns. Estes neutróns forman pola súa vez materia dexenerada, orixinando unha presión abonda para contrarresta-la forza gravitacional. Isto ocorre cando a masa da estrela no seu estado final, aínda que elevada, non supera tres veces a masa do Sol. O produto deste proceso é a creación dunha estrela de neutróns. As estrelas de neutróns son moi densas, teñen un tamaño moi reducido, pode ser tan pequeno coma o da illa de Sálvora, aínda que conteñan unha masa superior á do Sol.

No colapso gravitatorio que orixina unha estrela de neutróns emítese de forma brusca unha enorme cantidade

de enerxía en forma de raios X, raios gamma e neutrinos. Esta emisión é a responsable de que a capa externa da estrela, enriquecida pola nucleosíntese previa, explote de forma violenta nunha supernova. Neste proceso expúlsanse elementos pesados ó medio interestelar. O remanente despois da explosión é un núcleo atómico xigante formado por neutróns que se fai invisible nun curto período de tempo e que acadada densidades da orde dos centos de millóns de toneladas por centímetro cúbico. Nunha galaxia como a nosa estímase que se produce unha explosión correspondente a unha supernova cada trinta anos. Así e todo, non sempre é posible observala porque o po interestelar a miúdo o impide. En 1987 produciuse a observación dunha supernova na Gran Nube de Magallanes, unha galaxia irregular satélite da nosa, que moitos astrónomos catalogaron como a observación máis espectacular desde a invención do telescopio. O seu estudio supuxo un notable avance no noso coñecemento sobre as propiedades das supernovas.

As estrelas de neutróns foron descubertas debido a observacións astronómicas de raios X, raios gamma e ondas de radio. Neste último contexto descubríronse os púlsares, obxectos emisores de pulsos compostos por ondas de radio de forma regular. O período destes pulsos é moi estable e, en xeral, de segundos. Un dos púlsares máis famosos é o da nebulosa do Cangrexo que nos chega unhas trinta veces por segundo. As observacións no

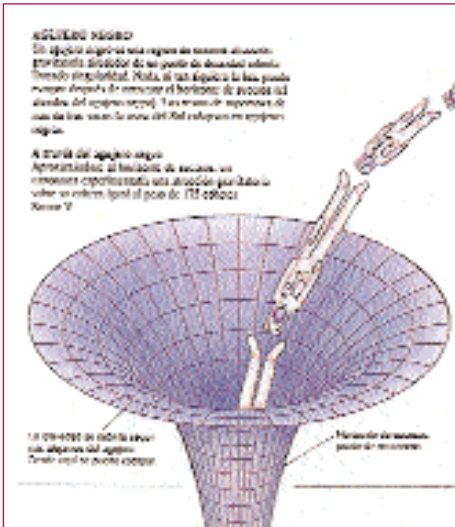
decrecemento desta frecuencia suxiren que a súa orixe tivo lugar hai novecentos anos. Probablemente a orixe deste púlsar corresponde á supernova observada polos astrónomos chineses no ano 1054. Observouse que os pulsos provenientes dos púlsares tamén conteñen raios gamma e raios X.

Os púlsares foron identificados como estrelas de neutróns en rotación, formadas despois da explosión correspondente a unha supernova. Para que un obxecto rote coa frecuencia que o fai un púlsar este ha ser moi compacto. O pulso de radiación electromagnética que emite débese á emisión producida por partículas que se moven a velocidades relativistas no enorme campo magnético producido pola estrela. O pulso varre unha zona do espacio de forma similar a como o fai a luz do faro da illa de Sálvora. Debido á dirección da emisión, non sempre se observa o pulso proveniente dun púlsar, por iso existen remanentes de explosións debidas a supernovas das cales non se identificou o púlsar correspondente.

OS BURATOS NEGROS

As estrelas cunha masa inicial superior a cincuenta veces a masa do Sol chegan á súa fase final con masas que superan o límite das tres masas solares correspondente ás estrelas de neutróns. Cando unha estrela chega á súa etapa derradeira cunha masa superior a este límite, o seu núcleo colapsa indefinidamente e créase un burato negro. Os buratos negros foron propostos no contexto da Teoría Xeral da

Relatividade, en 1916, e identificados por primeira vez en 1970. Os buratos negros son difíciles de observar porque o campo gravitacional que xeran é tan intenso que a radiación electromagnética non pode escapar del. Isto orixinou que a busca de buratos negros sexa un importante campo de investigación. Aínda que a luz non pode escapar dun burato negro, este pode formar parte dun sistema binario de estrelas, absorbindo materia da súa estrela compañeira. Esta materia, antes de ser atrapada, quece e xira derredor do burato negro emitindo enormes cantidades de raios X. Ata o momento téñense observado varios sistemas binarios que posúen estas características. Un deles é Cygnus X-1 que, á parte de ser unha intensa fonte de emisión de raios X, estimouse que a súa masa é oito veces



Simil xeométrico dun burato negro. (Tomado de *Quest* Edit. Rialp).

a masa do Sol. A masa determínase a partir do período e das variacións na luminosidade da estrela que a acompaña.

A masa do burato negro está concentrada nunha rexión moi pequena do espacio e exerce unha forte atracción gravitacional sobre as partículas que andan preto. É tan forte que a velocidade de escape por volta del é superior á da luz e polo tanto ningunha partícula situada no interior desa zona pode escapar á súa atracción. A distancia ó centro do burato negro á cal a velocidade de escape é a velocidade da luz coñécese como o radio do burato negro, e a superficie esférica correspondente como o horizonte. O radio depende da masa do burato negro e pode ser moi pequeno; para un burato negro de masa igual á do Sol, o radio é duns tres quilómetros. A estrutura do interior do burato negro é descoñecida. Se só utilizámo-la Teoría Xeral da Relatividade, trátase dun punto singular de densidade infinita. Sen embargo, non se pode confiar totalmente nesta teoría cando se describen situacións con densidades tan elevadas como as que teñen lugar nesa situación. O feito mesmo de que apareza unha singularidade é unha manifestación de que a teoría é incompleta. Cómpre dispoñer dunha teoría da interacción gravitatoria que teña en conta os efectos cuánticos para poder ter unha descrición máis realista do interior destes obxectos.

Nos anos setenta fixéronse progresos notables no estudio dos aspectos

tos cuánticos dos buratos negros. Os traballos de Yakov B. Zel'dovich e Stephen Hawking conduciron a predicir que os buratos negros sofren un proceso de evaporación. Estes primeiros estudos cuánticos indican que o burato negro pode non ser tan negro coma se pensaba. O fenómeno de evaporación prodúcese debido á emisión dun tipo de radiación comunmente coñecido hoxe como a radiación de Hawking. Para explicar en qué consiste, comecemos lembrando outra das consecuencias do principio de incerteza. Segundo este principio mecánico-cuántico, é posible viola-la lei de conservación da enerxía, sempre que se faga en espazos de tempo moi curtos. O universo é quen de producir masa e enerxía pero só se estas desaparecen axiña. Noutras palabras, poden darse fluctuacións do baleiro de xeito que se creen parellas de partículas e antipartículas que despois dun breve período de tempo se aniquilen. Cando unha destas fluctuacións ten lugar preto do horizonte dun burato negro pode ocorrer que unha das partículas caia no seu interior e a outra escape; a que escapa leva así unha enerxía neta do burato negro e un observador no exterior interpreta que este está emitindo partículas. Este fenómeno ocorre seguido e o resultado é a emisión dun fluxo de partículas: a radiación de Hawking.

A enerxía que se emite na radiación de Hawking fai que o burato negro vaia perdendo masa. O ritmo ó que se emite esta radiación é tanto máis grande canto menor é a masa do bura-

to negro. Co transcurso do tempo o burato negro radia cada vez con máis intensidade e mingua cada vez máis rápido. Describi-lo que ocorre nos procesos finais da evaporación é entrar aínda máis no terreo do especulativo. Non se descarta que simplemente se evapore totalmente e, polo tanto, o burato negro desapareza. Téñense realizado estimacións sobre o tempo que tardaría un burato negro en evaporarse. Para un que teña aproximadamente o dobre de masa que o Sol, a predicción é duns 10^{70} anos (un un seguido de setenta ceros), enorme comparada coa idade do universo (tan só da orde de 10^{10} anos). Esta cifra, unida ó feito de que ademais nas primeiras épocas a emisión de radiación de Hawking é a máis débil, implica que o efecto é irrelevante desde o punto de vista da Astrofísica. A finais dos anos setenta apuntouse a posible existencia de buratos negros primordiais. Estes formaríanse no *big bang*, con masas pequenas comparadas coa do Sol, que se terían evaporado completamente na actualidade. Estes obxectos, de existiren, terían deixado unha pegada en termos de radiación gamma que non se observou ata hoxe. Desde un punto de vista experimental pódese afirmar que non se ten evidencia da evaporación de ningún tipo de burato negro.

A VÍA LÁCTEA

As estrelas que poboan o universo aparecen agrupadas de maneira que forman estruturas máis extensas. Estas estruturas clasifícanse en

cúmulos de estrelas, galaxias, cúmulos de galaxias e cuásares. O Sol forma parte da galaxia denominada Vía Láctea, que ten unha cantidade de masa visible da orde de 100.000 millóns de veces a masa da dita estrela. A evolución destas estruturas está regulada pola interacción gravitatoria. Dentro dunha galaxia, as estrelas aparecen a miúdo agrupadas en cúmulos de estrelas. Un exemplo que quizais resulte familiar é o cúmulo das Pleiades, sete das cales poden observarse a simple vista nas noites claras do outono cando se elevan no leste despois do solpor. Estas sete son parte dun cúmulo dunhas cen estrelas que se descubren cando se mira cun telescopio. Nos cúmulos como o das Pleiades, un conxunto de estrelas nacen xuntas e seguen a mesma órbita arredor da galaxia á que pertencen durante uns cantos centos de millóns de anos, ata que forzas similares ás das mareas as arredan. Na nosa galaxia existen cúmulos de estrelas moito maiores, con decenas de miles de estrelas, que están en órbita lonxe do plano que forma a galaxia. Nesas rexións as forzas separadoras son máis febles e eses cúmulos manteñen a súa estrutura durante períodos de tempo moito máis longos.

A Vía Láctea é unha galaxia de forma espiral, co Sol situado nun dos seus brazos, aproximadamente a dous tercios da súa lonxitude total. O noso sistema solar tarda uns douscentos cincuenta millóns de anos en dar unha volta arredor do seu centro. Igual cá maioría das galaxias espirais, a Vía

Láctea é moi delgada e contén unha gran cantidade de po e gas interestelar (aproximadamente un dez por cento da súa masa total). Nela obsérvase un subsistema formado por materia máis antiga, estruturalmente diferente, que se denomina halo galáctico. A materia deste halo móvese en órbitas elípticas que tenden a conducila contra o centro da galaxia.

O centro da Vía Láctea contén un obxecto de características singulares en relación coas do resto dos seus compoñentes. É difícil estudiala natureza deste obxecto xa que os sinais que nos chegan desa zona teñen que atravesar rexións densas en material interestelar. A información que posuímos débese á detección de ondas de radio. Todo indica que no centro hai un potente emisor destas ondas non superior en tamaño ó noso sistema solar. Moitos astrónomos comparten a opinión de que quizais no centro da nosa galaxia se atope un burato negro cunha masa da orde dun millón de veces a masa do Sol.

Os coñecementos sobre a nosa Vía Láctea revelan a existencia dun problema nos nosos modelos físicos. A partir do estudio do movemento das estrelas situadas en planos perpendiculares ó plano da galaxia, conclúese que a materia observada non é suficiente para explica-las súas traxectorias. Os cálculos indican que fai falta o dobre da materia observada para dispor dunha explicación satisfactoria. A situación complícase aínda máis se se analiza o movemento de obxectos a grandes distancias do centro da galaxia. Neste caso

cómpre dispor de dez veces a masa observada. Todo isto indica que a Vía Láctea contén materia que non observamos, denominada comunmente materia escura. Non coñecemos na actualidade cál é o seu contido, pero unha posibilidade é que estea formada por obxectos subestelares nos que as reaccións nucleares non desempeñan un papel importante quantando o seu interior. Estes obxectos, con masas entre dez e cincuenta veces a masa de Xúpiter, son coñecidos como ananas marróns e na última década téñense observado algúns candidatos. Sen embargo, polo momento non se posúe información sobre a súa abundancia.

AS GALAXIAS

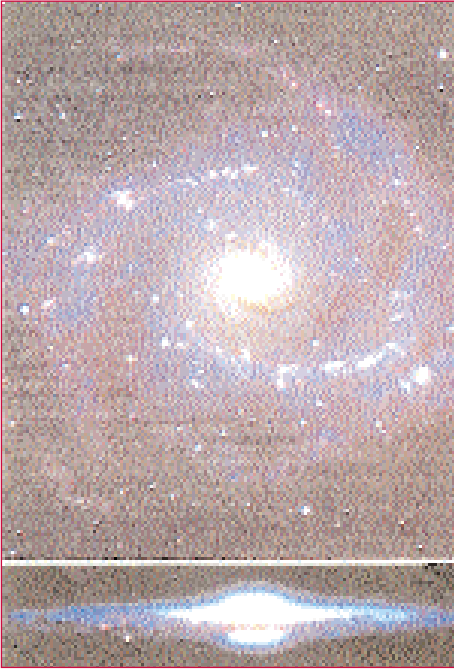
A forma espiral da Vía Láctea non é a única que as galaxias adquiren. Segundo a súa feitura, as galaxias clasifícanse en espirais, elípticas e irregulares. Estas formas teñen que ver coas súas propiedades: as galaxias espirais con brazos máis soltos e as irregulares conteñen un maior número de estrelas novas e máis cantidade de gas interestelar. Pola contra, nas galaxias elípticas o gas interestelar está ausente e as súas estrelas teñen unha avanzada idade común. Estas peculiaridades fan que as galaxias espirais sexan máis azuladas cás elípticas.

A característica que lle atribuímos á Vía Láctea de posuír dúas poboacións de estrelas, unha no halo e outra no disco, é compartida por moitas outras galaxias. A evolución do halo é sinxela: tódalas estrelas se formaron simulta-

neamente e todas elas van envellecendo á vez, sendo as máis masivas as primeiras en se converter en gigantes vermellas. No disco, sen embargo, a vida é menos rutineira. Neste caso, a materia interestelar producida cando as xigantes vermellas evolucionan a ananas brancas e a estrelas de neutróns permanece no disco e xera a formación de novas estrelas. Parte da materia segregada polas xigantes vermellas é rica en elementos pesados e por iso as estrelas novas conteñen maiores cantidades de carbono, nitróxeno, osíxeno e ferro cás estrelas de maior idade. No halo encóntrase unha proporción moito máis pequena de elementos pesados ca no disco.

As galaxias conteñen en xeral os dous tipos de poboacións de estrelas: halo e disco. As elípticas non adoitan conter disco e nas espirais cos brazos moi soltos o halo acostuma estar ausente. A evolución das galaxias elípticas é moi sinxela: tódalas estrelas envellecen ó tempo e abandonan a secuencia principal en momentos distintos dependendo da súa masa inicial. Nas galaxias espirais as estrelas máis antigas expulsan materia interestelar que se recicla para formar novas estrelas. Nalgunhas estrelas espirais observouse que a poboación de estrelas novas é moi elevada.

No que respecta á formación das galaxias, todo parece indicar que hai dous factores predominantes: as propiedades intrínsecas da galaxia e o contorno no que se encontran. Respecto ó primeiro, é natural que a masa e o



Dúas vistas de galaxias espirais. Arriba a NGC 2997 e debaixo un perfil da NGC 4565 onde se mostra con claridade a protuberancia central e o fino bordo externo do disco. A nosa galaxia, a Vía Láctea, é deste tipo.

momento angular inicial desempeñen un papel importante. As galaxias cunha velocidade angular elevada teñen unha maior tendencia a seren espirais. Unha velocidade angular pequena favorece en cambio a formación dunha galaxia elíptica sen disco. O contorno tamén é determinante no proceso de formación. Observouse que as galaxias que forman un grupo de galaxias non moi grande tenden a ser elípticas. As galaxias elípticas de gran tamaño encóntranse xeralmente no núcleo de cúmulo de galaxias moi poboados.

OS CÚMULOS DE GALAXIAS

Coma as estrelas, as galaxias aparecen agrupadas. Sen embargo, contrariamente ó caso das estrelas, a distancia entre galaxias dun mesmo cúmulo é só un factor entre dez e trinta veces a dimensión lineal das galaxias. Os cúmulos de galaxias observados presentan un enorme rango no que respecta ó número de galaxias que conteñen. Algúns están formados por un conxunto pequeno de galaxias, como é o caso do Grupo Local ó que pertence a Vía Láctea, consistente en tres galaxias espirais de gran tamaño (unha delas a Vía Láctea) e máis dunha ducia de galaxias máis pequenas. Outros chegan a conter miles de galaxias enormes e infinidade de galaxias máis pequenas. Xeralmente, nestes cúmulos o centro está poboado de galaxias elípticas de gran tamaño, con masas de ata cen veces a da Vía Láctea. Nos cúmulos máis poboados observouse a existencia de materia intercumular que supón aproximadamente o dez por cento da masa total.

Os cúmulos de galaxias aparecen pola súa vez agrupados nos denominados supercúmulos, con forma de acio. Entre estes acios aparecen enormes zonas baleiras onde a penas se atopan unhas poucas galaxias illadas. Esta estrutura parece producirse en tódalas direccións e pénsase que é universal. Os estudos realizados sobre a dinámica dos cúmulos e supercúmulos de galaxias conducen a concluír que a materia que se observa neles é insuficiente para mantelos ligados gravita-

cionalmente. O mesmo ca no caso das galaxias, destes estudos dedúcese que unha gran parte da materia do universo non foi observada. Esta materia escura constitúe o noventa por cento da masa total dun cúmulo ou supercúmulo. A natureza desta materia non observada é un dos grandes problemas con que se enfrontan hoxe en día a Astrofísica e a Cosmoloxía.

OS CUÁSARES

A principios dos anos sesenta descubríronse uns obxectos que non encaixaban en ningunha das estruturas estudias ata aquel momento. Tratábase de obxectos de tamaño reducido situados a enormes distancias, que brillaban tanto coma galaxias próximas completas. A gran distancia asociada a estes obxectos debíase ó alto desprazamento cara ó vermello que presentaba o seu espectro electromagnético. Como se describe polo miúdo na próxima sección, existe unha relación entre a distancia dun obxecto e o desprazamento cara ó vermello do seu espectro; canto máis arredado, maior é o dito desprazamento. Por outra parte, a escala de tempo en que estes obxectos presentaban variacións indicaba que se trataba dunha estrutura de tamaño reducido, segundo observacións recentes, do tamaño do sistema solar. Para unha distancia tan grande, o brillo observado implicaba que estes obxectos tiñan unha luminosidade da orde dun millón de veces a do Sol.

Desde o seu descubrimento, baralláronse diversos modelos para expli-

ca-los cuásares. Hoxe en día adquiriu solidez o modelo que asocia os cuásares a núcleos de galaxias moi activos. Os cuásares semellan máis unha estrela ca unha galaxia porque a emisión proveniente do seu núcleo é tan grande que ensombrece calquera outra procedente das súas estrelas veciñas. As observacións apuntan a que a fonte de enerxía fundamental deste núcleo é un burato negro xigante de ó pé de mil millóns de veces a masa do Sol. Cando se produce acrecencia de materia por este burato negro xigante, xéranse chorros de partículas a altas enerxías con efectos que se teñen observado cos radiotelescopios.

Os cuásares posúen unha luminosidade tan grande que poden ser detectados a enormes distancias. O cuásar máis distante que se observou está situado a uns 14.000 millóns de anos-luz. Cando observamos un obxecto tan remoto estamos mirando cara a atrás no tempo xa que a luz procedente del tardou 14.000 millóns de anos en chegar ata nós. O estudio destes obxectos achega polo tanto información sobre cómo era o universo daquela. As observacións indican que nesa época os cuásares eran moito máis abundantes ca en tempos máis próximos. O feito de non atopar cuásares a distancias maiores ós 14.000 millóns de anos fai pensar que estes, e posiblemente tamén as galaxias, non se formaran anteriormente. Tales datos conducen a concluír que o noso universo evolucionou moito desde a súa existencia e que o seguirá facendo no futuro. O estudio desta

evolución desde un punto de vista global é o obxectivo principal da Cosmoloxía, que será o tema central da seguinte sección.

3. A VISIÓN GLOBAL

Unha vez descritos os obxectos que poboan o universo, podemos facernos preguntas sobre o universo como un todo. Cuestións deste tipo levan sendo unha constante ó longo da historia. Desde tempos moi remotos o home interrogouse sobre cál é a orixe do universo, cómo evoluciona (ou máis ben se evoluciona ou non) e qué pasará con el no futuro. Unha simple ollada ó ceo nunha noite clara transmite a sensación de estarmos contemplando unha enorme cantidade de obxectos inmóbiles. Unha observación perseverante ó longo dunha vida humana indica que a posición dos obxectos no ceo é basicamente constante. A idea de que o universo evoluciona como un todo é moi recente, propúxose neste século hai uns oitenta anos. A dispoñibilidade nesa época de novos telescopios e espectrógrafos moito mellores cós seus predecesores (aínda que moi primitivos se os comparamos co estándar actual) permitiu obter información ata entón descoñecida sobre os obxectos que ocupan o noso universo.

Astrónomos como Edwin Hubble obtiveron o espectro da radiación electromagnética emitida desde galaxias moi distantes. A sorpresa das medidas efectuadas foi que os

espectros aparecían desprazados cara a lonxitudes de ondas máis longas. Este fenómeno coñécese como o desprazamento ó vermello. Trátase dunha manifestación do chamado efecto Doppler, aplicable a calquera fonte de radiación (ben sexa acústica ou electromagnética) en movemento. A miúdo temos experimentado nas rúas da nosa cidade cómo o ton da sirena dunha ambulancia cambia cando pasa preto de nós. As ondas acústicas que recibimos son emitidas primeiro por unha fonte que se achega a nós e despois por unha que se arreda. Este fenómeno ocorre cos obxectos do universo en movemento respecto a nós. A lonxitude de onda da radiación que nos chega é superior á esperada, o que indica que a fonte correspondente se aparta de nós.

Se unha estrela en repouso con respecto ó noso telescopio emite luz, a distancia entre as fronteas de ondas que lle chegan é a mesma cá lonxitude de onda da luz emitida pola estrela. Se a estrela se esta aproximando a nós, a distancia entre as fronteas de onda é máis pequena (a luz viaxa sempre á mesma velocidade nun determinado medio) e o noso telescopio mide unha lonxitude de onda inferior á da luz emitida. Prodúcese nese caso un desprazamento no espectro cara ó azul. Pola contra, se a estrela emisora se está afastando do telescopio, as fronteas de onda chégannos máis distanciadas e a lonxitude de onda que medimos é superior á da luz emitida. Prodúcese entón un desprazamento ó vermello. A partir da diferenza en lonxitude de

onda obtense facilmente a velocidade da fonte emisora respecto ó telescopio.

A LEI DE HUBBLE

Nos anos vinte observouse que os espectros da radiación electromagnética emitida polos obxectos que poboaban o noso universo se achaban sempre desprazados cara ó vermello. Edwin Hubble descubriu que ademais existía unha relación sinxela entre a velocidade respecto á Terra da fonte emisora e a distancia á que esta se encontraba. Concretamente, se v é a velocidade e d a distancia, os datos obtidos axustábanse á relación $v = H d$, onde H é unha constante, denominada constante de Hubble en honor ó seu descubridor.

A lei de Hubble foi confirmada experimentalmente ó longo dos setenta anos transcorridos des que foi proposta. O seu descubrimento demostra que o universo se expande. A súa forma funcional non implica que a Terra sexa o centro do universo. O universo en expansión no que vivimos é coma un biscoito de froitas que se está a expandir no forno. Cada un dos anacos de froita observa cómo os máis se separan del. Para cada galaxia, tódalas demais se están apartando respecto a ela.

A constante de Hubble está relacionada coa idade do universo. Se supoñemos que a velocidade de expansión do universo non cambiou (hipótese bastante razoable segundo o noso coñecemento actual), o tempo t que lle levou expandirse, de tal maneira que unha galaxia concreta estea situada a

unha distancia d da Terra, vén determinada pola ecuación (tan familiar) que relaciona distancia, velocidade e tempo: $d = v t$. Combinando esta relación coa lei de Hubble obtense que $t = 1/H$, é dicir, o inverso da constante de Hubble é a idade do universo. O valor da constante de Hubble non se coñece moi ben porque é unha cantidade difícil de medir. Por unha parte, as galaxias que conducen a unha medición máis exacta de H son as que están máis arredadas pois o movemento aleatorio destas respecto á Terra resulta desprezable. Por outra, precisamente para esas galaxias a medición da distancia é máis complicada.

Durante moitos anos a idade do universo estivo cifrada entre 10.000 e 20.000 millóns de anos. As observacións realizadas nos últimos anos polo telescopio espacial Hubble permitiron reducir notablemente a incerteza neste valor. Os últimos resultados publicados froito da análise dos datos obtidos con este telescopio calculan que a idade do universo é de 14.000 millóns de anos, cunha incerteza de 1.000 millóns de anos arriba ou abaixo. Isto constitúe unha significativa mellora respecto ós acoutamentos anteriores, que só foi posible gracias á colocación dun telescopio no espacio.

O BIG BANG

A explicación máis sinxela da lei de Hubble consiste en postular que inicialmente todo o universo estaba concentrado a moi alta densidade. A explosión desa configuración tan densa

produciu a expansión do espacio e que cada un dos obxectos no universo se estea separando de tódolos demais. Este modelo, coñecido como do *big bang* ou da grande explosión, predí que a evolución do universo comezou hai aproximadamente 14.000 millóns de anos. A idea de que o universo ten un principio orixina moitas preguntas de carácter filosófico. A máis obvia é que había antes do *big bang*. Os nosos coñecementos actuais non teñen resposta a esta pregunta pero o feito de que se puidera expresar en relación co modelo do *big bang* inquietou a moitos científicos. Ata os anos sesenta, cando a lei de Hubble era a única de carácter cosmolóxico que se coñecía, formuláronse unha variedade de modelos onde o universo non evolucionaba. Esta situación cambiou nos anos sesenta co descubrimento dunha serie de pegadas do *big bang* que facían este modelo cada vez menos incuestionable.

O rastro do *big bang* máis importante atopado ata agora é a radiación de fondo de microondas. Como en moitas outras ocasións, o descubrimento produciuse no marco da realización dun proxecto de investigación que non espertaba moito interese. En 1965, Arno Penzias e Robert Wilson andaban embarcados nun proxecto dos laboratorios Bell, tratando de identificar tódalas fontes de ruído de fondo nunha antena con calibración de alta resolución. O obxectivo era que unha vez realizada a identificación puideran coñecer con precisión o fluxo recibido pola antena procedente dunha fonte de

microondas. Penzias e Wilson non deron identificado certa cantidade de ruído de fondo. Pouco despois descubriuse que ese ruído era o eco da grande explosión inherente ó modelo do *big bang*. O sinal detectado resultou se-lo mesmo en tódalas direccións nas que se mediu, e axiña se observou que se axustaba ó espectro de emisión dun corpo negro a unha temperatura duns 2,7 K. Un corpo negro é un obxecto que absorbe toda a radiación que lle chega. Nos últimos anos mediuse a radiación de fondo de microondas con gran precisión. As observacións recentes realizadas polo espectrómetro FIRAS do COBE (*Cosmic Background Explorer*) indican que as desviacións do espectro dun corpo negro son menores a 300 partes por millón, e que a temperatura é $2,727 \pm 0,002$ K. Ademais, observouse que esta temperatura é basicamente a mesma, independentemente da dirección na que se mida. Isto dinos que o universo é isótropo.

O significado da radiación de fondo de microondas descuberta por Penzias e Wilson entendeuse rapidamente gracias a Robert Dicke, aínda que a existencia dun fenómeno desta natureza fora predicida con anterioridade por George Gamow. Nas épocas máis temperás do universo, este estaba moi quente e polo tanto era moi rico en fotóns. Cando o universo acadou a idade dun millón de anos arrefriara abondo como para que a materia deixase de estar ionizada, producíndose o desencaixamento da radiación e a materia. A radiación presente nese

momento observámola hoxe moi fría, co espectro típico dun corpo negro que alcanza a súa maior intensidade no rango das microondas. Se observásemo-la radiación de fondo cara a atrás no tempo, veríamos cómo a súa temperatura aumenta. A medida que nos achegásemos a épocas máis temperás, observariámola radiación cada vez máis quente e o universo máis denso, ata chegar un intre no que puídesse crearse materia. Nese momento estaríamos no estado no que a radiación e a materia comezaban a acercarse a unha situación de equilibrio.

A validez da lei de Hubble e a detección da radiación de fondo de microondas demostran que o universo estivo expandíndose durante un longo período de tempo. Outro dato importante en favor da teoría do *big bang* é a observación dunha abundancia dos elementos máis lixeiros do universo consistente coas predicións baseadas na nucleosíntese da teoría do *big bang*. Cando o universo tiña unha idade de aproximadamente uns minutos, a temperatura era tan alta que se produciron elementos lixeiros como o helio e o litio por medio de reaccións nucleares. A teoría predí que arredor de 1/4 da masa do universo debería corresponder ó helio, que concorda coas observacións experimentais.

A HOMOXENEIDADE E A ISOTROPÍA

Ademais de isotrópico —como demostran as observacións da radiación de fondo de microondas—, o universo é tamén homoxéneo. Un univer-

so homoxéneo é aquel no que as súas propiedades son as mesmas en calquera punto. Isto só é certo de forma aproximada para o noso universo, pero é unha aproximación excelente cando se estudian grandes rexións. Isotropía e homoxeneidade son dous dos puntos de partida do modelo do *big bang*. A descrición matemática deste modelo asenta na solución ás ecuacións da relatividade xeral de Einstein que se obtéñen ó impoñer-las ditas propiedades. Estas ecuacións relacionan a xeometría do espacio-tempo co seu contido de materia (para máis detalles, consúltese o artigo "A teoría da relatividade", de A. Vázquez Ramallo neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A solución, coñecida como a solución de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, vén dada en termos dun factor de escala cósmico que contén a información de cómo evolucionan tódalas lonxitudes físicas do universo (distancias entre galaxias, lonxitudes de onda dos fotóns, etc.) co transcorrer do tempo. En realidade, existen tres tipos de solucións ás ecuacións da relatividade xeral de Einstein coas hipóteses mencionadas. No primeiro tipo, o universo expándese tan de vagar que a atracción gravitatoria sería capaz de frear-la expansión e chegaría un momento a partir do cal as galaxias empezaría a achegarse unhas ás outras. O universo sufriría un colapso e tería un final. No segundo tipo, a expansión é tan rápida que a atracción gravitatoria non podería parala, as galaxias estarían separándose constantemente. Por último, no terceiro tipo, o universo

expáñdese coa velocidade xusta para evita-lo colapso. No primeiro tipo de modelo o universo non é infinito no espacio, trátase dun universo pechado. A gravidade é forte abondo como para curva-lo espacio, que se pecharía sobre si mesmo. Nos outros dous tipos o espacio é infinito e o universo non ten fin, trátase de universos abertos, o primeiro curvado e o segundo plano.

Que o noso universo poida ser pechado non quere dicir que puidera ter un bordo onde remata. Para imaxinarmos qué se quere dicir por un espacio finito no primeiro tipo de solucións, debemos considerar unha analoxía cunha dimensión menor. A superficie da Terra é bidimensional e finita, sen bordos. Por moito que viaxemos pola superficie da Terra nunca chegaremos a un punto onde esta termine; de feito, é posible que topemos co punto de partida. O mesmo ocorre nas solucións do primeiro tipo pero nunha dimensión superior. Trátase dun universo tridimensional, finito e sen bordos. Coma na Terra, poderíamos viaxar e chegar ó punto de partida. Sen embargo, xa que a velocidade á que podemos facelo non pode ser superior á da luz, tardaríamos tanto que lle daría tempo ó universo a se comprimir de novo e dar cabo.

É importante salientalo feito de que aínda que inicialmente as hipóteses de isotropía e homoxeneidade foron introducidas por Einstein para simplifica-lo problema matemático, resultou que proporcionan unha descrición do universo bastante atinada tanto a tempos temperáns coma na

actualidade cando se calcula a media sobre distancias suficientemente grandes. Pero dos tres tipos de solucións posibles só un corresponde ó noso universo. Para saber cál, cómpre coñece-la súa densidade media. Se a densidade é inferior a un certo valor crítico, a gravidade será insuficiente para frea-la expansión. Se a densidade é superior ó valor crítico, a gravidade parará a expansión nalgún momento futuro e comezará o colapso do universo. Medí-la densidade do universo é difícil porque hai que incluí-la materia escura da cal se sabe moi pouco. As estimacións realizadas nas últimas décadas indican unha densidade inferior á crítica e favorecen unha solución do segundo ou terceiro tipo.

En calquera dos tres tipos de solucións existe un comezo do universo no que a densidade de materia era moi alta, infinita. Nese momento tivo lugar a grande explosión, o *big bang*, e desde entón ata os nosos días o universo expáñdese. En xeral, na Física, cando existe unha situación na que unha cantidade física se fai infinita, dise que se ten unha singularidade. A presenza de singularidades constitúe unha limitación: indícanos que a teoría non é aplicable nesa situación e que para describila correctamente debemos incluír aspectos que non estamos considerando. Desde o descubrimento destas solucións, os físicos téñense preguntado se a Teoría da Relatividade Xeral predí a existencia da singularidade inicial ou se trata simplemente dunha propiedade particular da solución

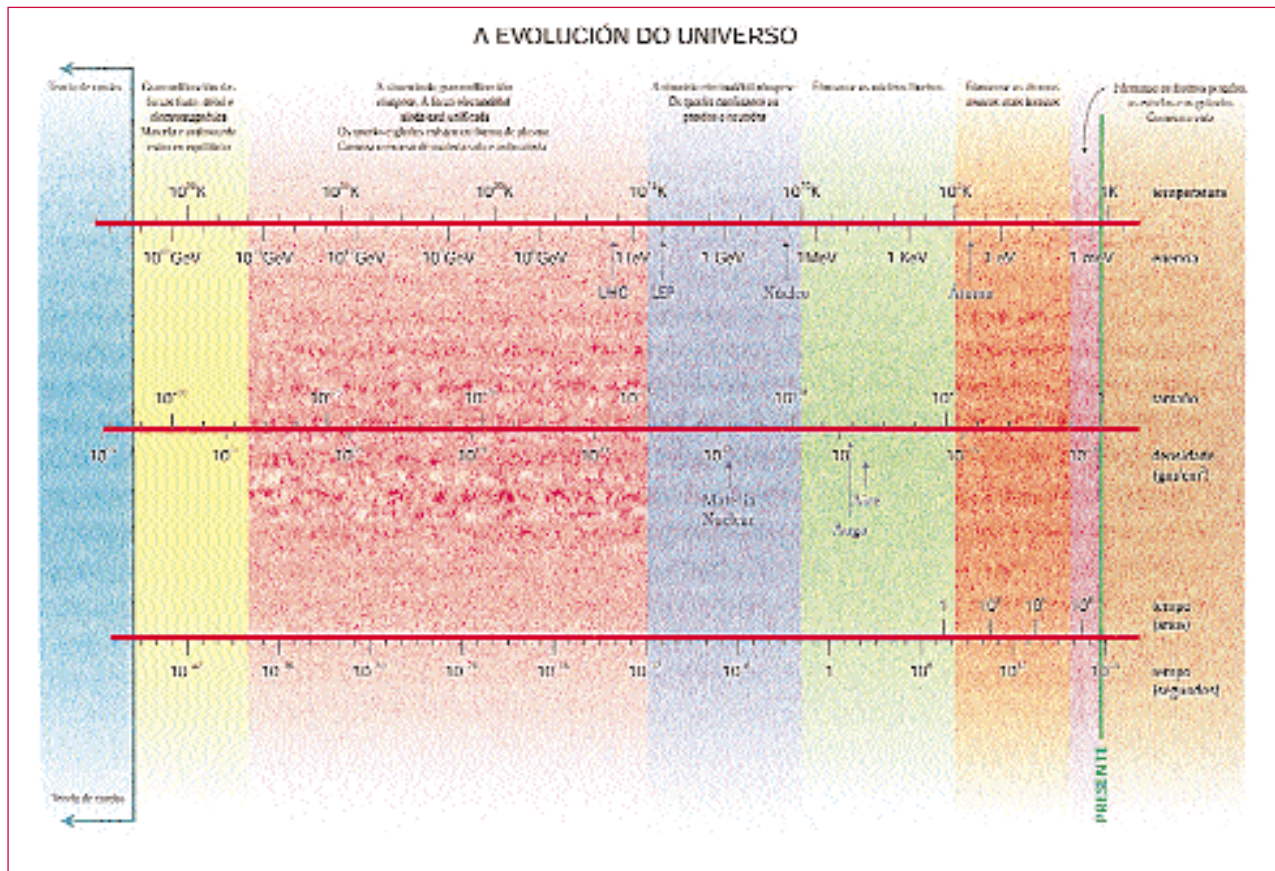
encontrada. Os teoremas sobre a existencia de singularidades de Stephen Hawking e Roger Penrose dos anos setenta responderon a esta pregunta de forma positiva. Isto indica que unha descrición baseada só na relatividade xeral é incompleta cando se teñen densidades demasiado altas. É razoable que así sexa; nesas situacións os efectos da mecánica cuántica son importantes e cómpre combina-la física do máis grande, a relatividade xeral, coa física do máis pequeno, a Mecánica cuántica, para obter unha descrición coherente. Polo momento non se sabe cómo facelo, a construción dunha teoría da gravidade cuántica é un dos grandes problemas con que a Física se enfrenta no século que agora comeza.

A EVOLUCIÓN DO UNIVERSO

Nas últimas décadas avanzaouse considerablemente na creación dun modelo que describa a evolución do universo. Hoxe en día, facendo uso das leis correspondentes ás catro interaccións fundamentais, dispónse dun que resulta moi satisfactorio a partir dun momento moi próximo á grande explosión inicial. A medida que nos achegamos ó momento inicial, $t = 0$, o universo faise tan denso que é necesario utiliza-la teoría cuántica da gravidade. Polo momento non se dispón dunha teoría deste tipo e por iso o modelo non é válido para tempos anteriores a 10^{-43} segundos. Este tempo, denominado tempo de Planck, é extremadamente pequeno, trátase dunha fracción decimal con 43 ceros. Toda a materia que

agora vemos no universo, miles de millóns de galaxias, estaba daquela comprimida no tamaño dun núcleo atómico. A densidade tan extrema que se acadaba nese intre era de 10^{92} gramos por centímetro cúbico, enorme comparada coa densidade da auga (1 gramo por centímetro cúbico) e inimaginable comparada coa densidade media do universo actual (un átomo de hidróxeno por centímetro cúbico).

Para tempos posteriores ó tempo de Planck, dispónse dun modelo que describe o estado do universo ata os nosos días, con prediccións atinadas en xeral cando se comparan cos fenómenos observados. Ás altas densidades nas que se encontraba o universo en tempos posteriores ó de Planck, a súa temperatura era enorme. A temperatura indícanola velocidade media á que se moven as partículas. Nesa época as súas velocidades eran tan elevadas que podían vencer as forzas entre elas. Producíanse moitas colisións moi enerxéticas que daban como resultado a produción doutras partículas en pares partícula-antipartícula. As partículas e antipartículas interaccionan pola súa vez e aniquílanse. Nese estado do universo primordial tiña lugar unha cadea de procesos cuánticos cunha estrutura que ía variando a medida que se producía a expansión e o universo arrefriaba. Se a temperatura baixa, a velocidade das partículas diminúe e non se producen os procesos de creación de pares; dominan entón as aniquilacións e os agrupamentos das partículas.



Evolución do universo. As distintas épocas da evolución do universo, segundo o modelo do *big bang* ou grande explosión, representáanse ó longo da liña do tempo. Paralelas a esta representáanse liñas que indican a temperatura, a enerxía cinética media das partículas e a densidade do universo. Así mesmo, inclúese información sobre o tamaño do universo tomando como unidade o seu tamaño actual.

Estes fenómenos dan lugar ó que se coñece como *big bang* nucleosíntese.

Desde o tempo de Planck ata que transcorreu o primeiro segundo, o universo expandiuse de tal forma que a súa densidade pasou dos 10^{92} gramos por centímetro cúbico a só 500.000 gramos por centímetro cúbico. Durante este período o universo consistía nunha mestura en equilibrio térmico das partículas elementais características das altas enerxías. Entre estas partículas encontrábanse as tres familias de quarks e leptóns que hoxe constitúen o piar do chamado modelo estándar das partículas elementais e as interaccións fundamentais. Os detalles do que ocorreu en gran parte desta época son bastante especulativos, xa que cos aceleradores de partículas máis potentes de que se dispón (por exemplo, o LEP no CERN ou Centro Europeo de Investigacións Nucleares) non se alcanzou a enerxía suficiente. Mesmo nas enerxías acadadas se estudaron máis colisións de partículas illadas có comportamento de agregados destas, aínda que nos últimos anos se progresou considerablemente neste último aspecto (para máis detalles consúltese o artigo "Núcleos e partículas", de C. Pajares Vales neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). Na ilustración da evolución do universo pode verse cómo o novo acelerador en construción do CERN, o LHC, suporá unha mellora, pero, así e todo, encontraremos moi lonxe das enerxías propias das partículas nas épocas máis temperás do universo.

O modelo estándar das interaccións fundamentais (verificado hoxe con gran precisión ata as enerxías alcanzadas no acelerador LEP) é froito da rotura de simetría dun modelo máis fundamental. Os fenómenos de rotura de simetría prodúcense cando o sistema baixo consideración se configura nun estado que posúe unha simetría inferior á da teoría física que goberna o seu comportamento. Conforme vai arrefriando, o universo evoluciona en estados que cada vez corresponden a unha simetría menor. O modelo mormente aceptado é o chamado modelo de grande unificación onde a interacción forte aparece unificada coa electrodébil. Na etapa inmediatamente posterior ó tempo de Planck atopámonos cun universo formado por materia e antimateria en equilibrio no que tres das interaccións que agora coñecemos se encontran unificadas nunha. A medida que o universo arrefría, a enorme simetría dos modelos de grande unificación rompe e as interaccións fundamentais comezan a diferenciarse.

Antes de se cumpri-la primeira millonésima de segundo, a interacción forte xa se diferenciara da electrodébil e producíase a asimetría entre materia e antimateria. É entón cando comeza a rompe-la interacción electrodébil en débil e electromagnética, e cando os quarks empezan a confinarse en protóns e neutróns. Chégase así ós albores do primeiro segundo, cun universo unhas dez mil veces máis pequeno có actual con tódalas interaccións fundamentais diferenciadas. É importante

remarcar que o coñecemento de gran parte deste período da evolución do universo é bastante especulativo. Existen modelos alternativos e seguirán propoñéndose outros no futuro, ata que algún quede marcado por ir acompañado dalgunha pegada clara que permanecera ata os nosos días e sexa observada.

Un segundo despois do *big bang*, a temperatura do universo era de 10.000 millóns de graos e estaba composto por fotóns, electróns, positróns, neutrinos, antineutrinos, protóns e neutróns. Segundo vai descendendo a temperatura, a creación de pares de electróns e positróns deixa de ser posible e estes aniquílanse entre si deixando un remanente de electróns debido á mencionada asimetría materia-antimateria. Os neutrinos e os antineutrinos, en virtude do carácter tan feble da forza con que interaccionan, non se aniquilan e quedan poboando o universo de forma similar ós fotóns que forman a radiación de fondo de microondas. Este remanente desa época é difícil de observar debido á enorme dificultade que entraña a detección de neutrinos, e ata hoxe non se teñen indicios experimentais da súa existencia.

Aproximadamente cen segundos despois do *big bang*, a temperatura era de 1.000 millóns de graos. A esta temperatura os protóns e os neutróns comezan a combinarse en núcleos de deuterio que pola súa vez se combinan con máis protóns e neutróns para formaren núcleos de helio e outros menos lixeiros como os de litio e berilio. Os

modelos actuais que describen as interaccións fundamentais fan unha predicción para a produción de helio nesta época que, como xa se indicou, é consistente coa observada experimentalmente. É importante destacar que, nestas prediccións, un ingrediente importante é o número de especies de neutrinos. Sabemos a partir dos experimentos realizados no CERN nesta última década que só existen tres especies, valor que concorda perfectamente coa abundancia de helio observada.

A produción de helio e dos demais elementos lixeiros tivo lugar durante as primeiras horas posteriores ó *big bang*. Despois, ó longo dos cen mil anos seguintes, o universo seguiu expandíndose ata que a temperatura descendeu a uns poucos miles de graos, temperatura á cal os electróns non dispoñían de enerxía suficiente para vencer-la interacción electromagnética, combinándose consecuentemente en átomos. Cando este proceso se completou xa non existían partículas cargadas e a interacción entre fotóns e materia reduciuse considerablemente. Prodúcese entón o desencaixamento da materia e da radiación, non existe o equilibrio térmico entre elas. A radiación evoluciona en equilibrio térmico por si mesma ata os nosos días deixando unha pegada clara na radiación de fondo de microondas.

A partir dos cen mil anos comezan a aparecer no universo pequenas variacións da densidade na distribución da materia que conducen á formación de galaxias. Conforme transcorre

o tempo, o gas de hidróxeno e helio das galaxias disgrégase en nubes máis pequenas que comezan a colapsarse e a xerar estrelas. Hai uns 10.000 millóns de anos produciuse o colapso dunha nube de gas que deu lugar a unha insignificante estrela nun dos brazos dunha galaxia. Esta estrela tiña un planeta no que despois de transcorridos uns cantos centos de millóns de anos empezaron a producirse reaccións químicas nos seus océanos que induciron un fenómeno coñecido como a vida. Correrón 5.000 millóns de anos, e logo de producírense complexos procesos de natureza biolóxica, apareceron criaturas intelixentes nese planeta. Estas criaturas puxéronlle o nome Sol á estrela e Vía Láctea á galaxia, e nun período relativamente curto de tempo foron quen de descubrir cómo evolucionara o universo do que facían parte.

A INFLACIÓN

O modelo estándar cosmolóxico que describimos ten algúns problemas inherentes. Podemos preguntarnos por exemplo por qué o universo é tan uniforme como se nos presenta. Observamos zonas do universo que semellan basicamente iguais, tan separadas unha doutra que a luz non tivo tempo para viaxar entre elas. Non foi posible que a luz puidera fluír para igualalas súas respectivas densidades e temperaturas. Como consecuencia, a uniformidade observada tivo que preceder a expansión. Outra pregunta que pon en dificultades o modelo estándar cosmolóxico é por qué a velocidade de expansión

do universo é a que é, xusto a suficiente para contrarresta-lo efecto de atracción exercido pola forza gravitatoria conxunta de toda a materia presente no universo. É preciso facer un axuste moi fino nas condicións temperás do universo para que este, despois do longo período de tempo transcorrido, non terminara nun enorme colapso ou nunha expansión tan rápida que non deixaría que se orixinaran as estrelas e as galaxias. O mesmo ca no caso das fluctuacións, é moito máis satisfactorio dispoñer dun modelo que non precise duns axustes tan finos para poder predicir a situación actual, un modelo no que o universo observado sexa un produto natural baixo unha ampla banda de condicións nun pasado remoto.

As limitacións descritas non invalidan o modelo estándar cosmolóxico pero si apuntan a súa inconclusión. Co obxectivo de completalo, nos anos oitenta propúxose a teoría da inflación. Esta teoría postula que o universo atravesou nas súas épocas máis temperás un estado de expansión moi rápida, de aí o nome de inflación. Contrariamente ó caso estándar no que a expansión se deceleraba co tempo, segundo a nova teoría a expansión acelerábase durante un certo período de tempo, inducindo un distanciamento entre os obxectos cada vez máis rápido. O propio espacio se expandía máis rápido cá velocidade da luz, estando os obxectos quietos respecto ó espacio e, polo tanto, sen entrar en contradición coa relatividade. Debido a esa expansión primordial, as partículas puideron estar nalgún

momento tan preto unhas doutras que nese estado tiñan densidades e temperaturas comúns. Máis tarde, durante a inflación, algunhas partes do universo perderon contacto. O modelo predí así mesmo un universo plano, do tipo terceiro entre os tres descritos anteriormente. Desde os oitenta ten habido observacións que parecían desbota-la posibilidade dun universo plano, e a teoría da inflación sufriu diversas modificacións. Na actualidade, gran parte da comunidade científica opina que dunha ou doutra forma houbo un período de inflación que de forma natural explica por qué o universo onde vivimos é o que é no contexto do modelo estándar cosmolóxico. Por outra parte, observacións moi recentes apuntan a confirmación de que, en efecto, o universo é plano.

4. AS PREGUNTAS

No comezo dun século como no que estamos inmersos, despois do balance do progreso acontecido no que agora remata, é natural preguntarse cales son as grandes cuestións pendentes. Empezar unha tarefa deste tipo entraña grandes riscos. Practicamente tódalas preguntas que nos fixeramos no ano 1900 serían consideradas como irrelevantes uns anos despois. Sen embargo, a situación non é a mesma. O avance da ciencia que se produciu no século XX supera de sobra o de tódolos séculos anteriores xuntos. Estamos polo tanto nunha posición vantaxosa para atrevernos a facer preguntas sen

que estas queden fóra de lugar nuns poucos anos. ¿Saberemos facer uso desta vantaxe?

Un dos problemas fundamentais ó que habemos de enfrontarnos é o da materia escura. As observacións indican que practicamente o noventa por cento da materia do universo non se manifesta nunha forma que deramos detectado experimentalmente. Ten habido moitas especulacións sobre a natureza deste tipo de materia pero ningunha resultou concluínte. Este problema aparece mesturado co da constante cosmolóxica que agora brevemente describimos.

As ecuacións da relatividade xeral poden incluír un termo adicional caracterizado por unha constante que se denomina constante cosmolóxica. Este termo introduciuno Einstein para que estas ecuacións puideran ter solucións con universos estáticos, acorde co que se cría na súa época. Unha vez que se fixo firme a lei de Hubble, que favorecía un universo en expansión, esta constante resultou incómoda e intentouse durante moitos anos encontrar algunha explicación para que sexa tan pequena, consonte se segue das observacións experimentais. Todo parece indicar que a resposta a preguntas como as da materia escura e a da constante cosmolóxica poden estar encerradas en problemas de índole máis formal ou fundamental como é o da gravidade cuántica.

A Teoría Xeral da Relatividade que describe a interacción gravitatoria

mostrouse intransixente coa Mecánica cuántica, agás nos tímidos avances que se fixeron sobre os aspectos cuánticos dos buratos negros. Non se dispón polo de agora dunha teoría cuántica da gravidade completa pero si existe unha candidata moi notable: a teoría de cordas. Esta teoría, amais de cumprir esa función, tamén proporciona un marco no que as catro interaccións fundamentais se encontran unificadas, unha das metas máis perseguidas nas últimas décadas polos físicos teóricos. Na teoría de cordas, os obxectos básicos non son partículas puntuais senón obxectos que posúen unha lonxitude intrínseca, similares a anacos infinitamente delgados de cordas. Os modos de vibración destas cordas, semellantes ás notas que emite unha corda de violín, son as partículas elementais. As cordas teñen polo tanto unha infinidade de partículas; sen embargo, só unhas poucas teñen masas lixeiras, que serían as relacionadas máis directamente coas partículas que coñecemos. A teoría de cordas pode albergar no seu seo o modelo estándar das partículas elementais, que con tanta precisión se verificou experimentalmente. Isto é unha propiedade importante desta teoría pero a fundamental é que tamén contén a Teoría da Relatividade Xeral. Polo momento non sabemos moito da teoría de cordas, se ben na última década lévanse feito importantes progresos. Esta teoría foi capaz de ofrecer unha descrición microscópica dalgúns tipos de buratos negros, feito que non se lograra anteriormente. Queda moito que avanzar no desenvolvemento da teoría de cor-

das, e con seguridade ha ser un dos campos de estudio máis importante dos físicos teóricos en gran parte do século que agora comeza. Dela pode nacer unha explicación do que ocorreu no noso universo en tempos da orde do tempo de Planck que evite a singularidade e que, aínda que non resolva a pregunta de qué había antes do *big bang*, teña como consecuencia, por exemplo, a irrelevancia desta. O novo modelo desa etapa tan temperá que podería emerxer terá que afronta-la resolución doutras preguntas que están aínda sen contestar, desde a orixe da materia escura ou a descrición da época de inflación, ata a explicación da asimetría entre a materia e a antimateria.

Desde un punto de vista de observación, os retos son tamén enormes. Discernir se o noso universo é pechado ou aberto é un deles. Recentemente achegáronse novos datos, os do proxecto Boomerang, que favorecerían un universo plano. É dicir, parece que a densidade do noso universo é aproximadamente a densidade crítica que fai que o universo se expanda indefinidamente pero ó ritmo máis lento posible. Estes resultados están de acordo cos modelos de inflación máis pioneiros. Outro reto importante é observa-la distribución de neutrinos de fondo remanentes das primeiras épocas da evolución do noso universo.

Un campo importante que merece a atención de físicos experimentais e teóricos, no que sen dúbida se fará un notable esforzo nos anos vindeiros, é o

dos raios cósmicos. Por este nome coñécense os fenómenos producidos por partículas a moi altas enerxías que penetran a atmosfera terrestre. Aínda que non son moitas, o fluxo destas partículas é elevado abondo como para poder ser observadas experimentalmente. O seu estudio é moi importante porque se trata de procesos de moi altas enerxías, hoxe por hoxe irreproducibles nos aceleradores dos laboratorios de física de altas enerxías.

Por último, enlazando cos aspectos máis especulativos, podemos preguntarnos se, tal e como parece predicir unha descrición do comezo do universo baseado na teoría de cordas, o universo constaba inicialmente de máis das catro dimensións, tres espaciais e unha temporal, que agora coñecemos. Se esta teoría é a apropiada, esa propiedade é inevitable. Un universo cunha dimensión espacial superior a tres é difícil de imaxinar. Se tivesemos que acepta-la súa existencia, o importante sería ser capaces de estudia-la teoría ata o punto de que puidesemos identifica-las pegadas que disto deberían permanecer hoxe. A súa observación, así como a doutros posibles tipos de

rastros relacionados coa teoría de cordas, constituirían uns dos grandes retos experimentais nas próximas décadas. Pero primeiro hai que predicilas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Bowers, Richard L., e Terry Deeming, *Astrophysics*, Boston, Jones and Bartlett, 1984.

Hawking, Stephen, *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*, Madrid, Alianza, D. L. 1994.

Silk, Joseph, *The Big Bang*, Nova York, W. H. Freeman and Company, 1988.

Thorne, Kip S., *Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein*, Nova York, W. W. Norton and Company, 1994.

Wald, Robert M., *Space, Time and Gravity*, Chicago, The Chicago University Press, 1992.

Weinberg, Steven, *Los Tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza, D. L. 1996, (1977).



QUÍMICA: BALANCE DUN SÉCULO

*M. Arturo López Quintela**
Universidade de Santiago
de Compostela

A nosa maneira de vivir, pero tamén —e máis importante— a nosa filosofía e maila nosa concepción da vida, mudaron por completo neste último século. A nosa actual concepción do mundo (no que por suposto nos incluímos) é difícil de entender sen ter en conta os recursos tecnolóxicos e os avances científicos tan extraordinarios que se teñen dado nos últimos cen anos. ¿Como se pode entende-la nosa forma de vida sen estes cada vez máis rápidos e ‘memoriados’ ordenadores, aínda que sigan sendo sumamente ‘tontos’?, ¿como se pode concibi-la vida actual sen tódolos medios de transporte?, ¿como se entende a existencia sen te-la oportunidade de vibrar coa nosa música máis querida almacenada dixitalmente nestes planos CD?, e ¿que poderíamos facer sen os materiais que utilizamos decote para vestirmos, sentarnos, calzarnos, para gozar das nosas afeccións, para facer e illa-las nosas casas, etc.? Sen os grandes avances das ciencias e máis concretamente da Química, que tiveron lugar neste

último século, nada disto tería sido posible.

A Química era, a principios de século, pouco máis que unha serie de leis e receitas empíricas obtidas a partir de experimentos realizados en precarias condicións. As leis clásicas da Física impoñían un marco extremadamente ríxido á posible interpretación dos experimentos que comezaron a realizarse entón. Axiña se observou que aquelas leis clásicas —pensadas como inmutables— non só non permitían explica-los feitos experimentais da Química senón que, aínda peor, moitas veces parecían estar en franca contradición con eles. En poucos anos, a presión dos feitos experimentais en contra das leis clásicas foi tan grande que unha enorme explosión de novas ideas comezou a aparecer por tódalas partes deitando o novo zume que había cambiar por completo a nosa concepción da Química, das Ciencias Naturais e, en definitiva, a nosa concepción do mundo.

* Catedrático de Química-Física.

Ocuparíanos moito tempo e espacío realizar unha descrición pormenorizada de tódolos avances importantes que se deron na Química durante este século. Por iso ofreceremos neste artigo unha visión moi personalizada —aínda que xeral— do que consideramos que foi crucial no desenvolvemento desta fermosa ciencia. É ímolo facer esquematizando estes avances por áreas temáticas segundo unha certa orde cronolóxica.

Primeiramente comentaremos os pasos máis decisivos que houbo que dar para sentar as bases da Química cuántica. Era difícil, a principios do século XX, atopar unha explicación razoable —partindo dos postulados da Mecánica clásica— para un número cada vez máis importante de experimentos que se foran realizando ó longo deses primeiros anos. Max Planck soubo dar un paso esencial —e arriscado para o seu tempo— ó considerar que a enerxía era unha variable non continua: a enerxía está cuantizada en paquetes (cuantos) de valor $h\nu$, sendo ν a frecuencia da onda de enerxía e h unha constante que recibiría por iso o nome de constante de Planck. En seguida se observa que a idea de Planck é excelente e comeza a aclararse o escuro e desesperanzador panorama que a Mecánica clásica deixara no seu intento de explica-lo mundo dos átomos e as moléculas. Einstein aplica con notable éxito as ideas de Planck para explica-lo efecto fotoeléctrico e a capacidade calorífica dos sólidos, e Bohr desenvolve unha primeira —aínda que errónea—

idea moi intuitiva de cómo podería ser o átomo. Sen embargo, as cousas non eran tan doadas. O pensamento clásico lineal estaba moi arraigado e nesas condicións era moi difícil avanzar. Críase que no mundo atómico un podería atopar unha ecuación (igual ca no mundo clásico) a partir da cal obteríamola información que procurabamos. Heisenberg foi o encargado de botar abaixo esta idea ó impoñer certas condicións: existen variables conxugadas non compatibles (por exemplo, posición e momento; enerxía e tempo, etc.), de xeito que se coñecemos unha desas variables con suficiente precisión, automaticamente perdemos toda a información precisa respecto da outra variable. Houbo entón que renunciar ó concepto do ‘preciso’ e o ‘determinado’, e substituílos polo ‘indeterminado’ e ‘impreciso’ introducindo para isto a ‘probabilidade’. Xa non poderíamos falar dunha ecuación que predixera ónde se atopa un determinado electrón dun átomo nun intre particular, senón que deberíamos conformarnos con coñecer-la probabilidade de encontrar ese electrón nunha rexión determinada do espacio. Este importante aspecto non se pode pasar por alto, pois supón un recoñecemento implícito da nosa limitación respecto ó coñecemento que podemos posuír das partes máis pequenas da materia. Era difícil aceptar esta idea, mesmo para aqueles que contribuíran dun xeito ou doutro á súa concepción, como por exemplo Einstein, que sempre se rebelaría contra as consecuencias das súas propias teorías.

Por se isto non abundase, un novo feito, ligado coa natureza das cousas (enténdase, por exemplo, a natureza dun electrón ou dun neutrón ou dun fotón de radiación) viría complicar aínda máis o problema. Moitos experimentos realizados cos átomos e moléculas daban a entender que os electróns eran corpúsculos moi pequenos cunha masa determinada (e polo tanto localizada xalundes no espacio). Pero, por outra parte, outros experimentos requirían, sorprendentemente, para a súa explicación que os electróns foran tratados como ondas. Cando se pensa nunha onda, automaticamente se lle asocia unha extensión espacial porque as ondas veñen determinadas pola súa frecuencia, que representa a repetición dun período espacial na unidade de tempo. Pero entón, ¿como encaixar esta idea de onda coa da partícula (algo moi concreto e localizado no espacio)?

De Broglie deu o primeiro paso na busca dunha explicación introducindo a hipótese —máis tarde confirmada— de que a toda partícula se lle pode asociar unha onda cunha frecuencia característica. Con todo, isto non aclara a dúbida anterior pois non se trata de que unha entidade (a partícula) leve consigo outra entidade (onda). Nese caso, trataríase de dúas entidades conxuntas. Non é así: só existe unha única entidade e por iso, anos máis tarde, acuñárase para ela a inimaxinable (polo menos para min) expresión: ‘entidade onda-corpúsculo’.

Logo de andar manexando este concepto durante o resto deste século e

ver que si interpreta adecuadamente os feitos experimentais, seguimos (je, moi probablemente, seguiremos!) preguntándonos qué pode ser algo que reúna como esencia do seu ser dous conceptos aparentemente contrarios. Pero deixemos este difícil interrogante nunha parte da nosa mente (para pensar quizais niso, de vez en cando) e sigamos co noso breve percorrido polo mundo atómico-molecular.

E. Schrödinger sería o encargado de introducir, en xaneiro de 1926, a ecuación que os químicos viñan buscando desde moito tempo atrás: unha ecuación a partir da cal se puidera coñecer todo acerca dese átomo ou molécula, ben é certo que coas limitacións que mencionamos, é dicir, é unha ecuación de probabilidades e non conduce máis que á obtención de funcións de onda, e o seu cadrado dános probabilidades de encontra-los electróns (orbitais). Felices coa ecuación de Schrödinger debaixo do brazo, os químicos tiñan por primeira vez unha ferramenta coa cal se poderían non só interpretar tódolos feitos experimentais coñecidos ata entón, senón —e máis importante— predicir outros novos desde a nosa mesa de despacho sen necesidade de ir ó laboratorio. ¿Non era isto como o descubrimento da pedra filosofal coa que moitos soñaran? Con todo, a euforia inicial pouco había durar de novo.

En primeiro lugar, a ecuación de Schrödinger non permite explicar determinados fenómenos relativistas. Isto non obstante foi resolvido por

P. A. M. Dirac quen, en 1928, descubriu a ecuación relativista mecanocuántica que lle permitiu predici-la existencia do spin do electrón. Este concepto fora anteriormente proposto por Uhlenbeck e Goudsmit para explicar algunhas observacións realizadas en espectros atómicos. E, outra volta, aparece unha interrogante: ¿que é realmente ese spin? Certamente podemos dicir que o spin é un momento angular intrínseco que posúen as ondas-partículas elementais. Dunha forma non moi precisa, poderíase pensar nel como nun momento angular debido ó xiro da partícula sobre o seu propio eixe, pero esta imaxe non é correcta pois o spin non é un efecto clásico. De novo debemos asumir-la nosa limitación respecto á representación ou imaxe que este concepto representa.

Posteriormente observaríase tamén que aquelas partículas que posúen spin enteiro (en unidades da constante reducida de Planck) obedecen á estatística de Bose-Einstein (véxase máis adiante) e non hai restricción en canto ó número de partículas que poden existir nun determinado nivel enerxético, mentres aquelas que posúen spins semienteiros (electróns, por exemplo) responden á estatística de Fermi-Dirac, sen que poida haber máis dunha partícula por nivel cuántico de enerxía (Principio de exclusión de Pauli).

Por outra parte, pronto se viu que, aínda que se dispoñía dunha ecuación para dar resposta ás nosas preguntas, só eramos capaces de resolver-la ecuación para situacións sumamente

sinxelas. Para sermos máis precisos, a ecuación de Schrödinger só se pode resolver de forma exacta para o átomo de hidróxeno ou ións hidroxenoides (aqueles que posúen unicamente un só electrón), pois a presenza de termos correspondentes ás interaccións interelectrónicas fai inviable a súa resolución analítica. É necesario entón introducir aproximacións para a aplicación da ecuación de Schrödinger a casos concretos. D. R. Hartree e V. Fock idearon un método iterativo (método de campo autoconsistente) para resolver de forma aproximada a ecuación e poder así ser aplicada a casos máis complexos. A aproximación Hartree-Fock (H-F) transformaba a ecuación irresoluble de Schrödinger para n electróns en n ecuacións resolubles, unha para cada electrón. En 1951 Roothaan demostrou que a maneira máis conveniente de expresar los orbitais utilizados na aproximación H-F é en forma de combinación lineal dun conxunto de funcións, denominadas 'funcións base'.

O químico desexaría, sen embargo, poder aplica-la ecuación de Schrödinger a moléculas, e para iso cómpre introducir novas aproximacións. A aproximación de Born-Oppenheimer considera de forma correcta que os electróns se moven moito máis de prisa cós núcleos, o que permite resolver-la ecuación de ondas para os electróns mantendo fixas as posicións dos núcleos. Emporiso, dentro desta aproximación é necesario realizar aínda outras para poder levar a bo termo o estudio de moléculas.

Un paso importante foi a aplicación a moléculas do método autoconsistente H-F; pero isto só foi posible a partir dos anos sesenta mediante o uso de ordenadores. Como as moléculas están compostas por átomos enlazados, utilízanse orbitais atómicos (OA) como funcións base e cada orbital molecular (OM) exprésase entón como unha combinación lineal de OA (aproximación CLOA). Esta aproximación introducida por Mulliken e Hund sería de grande importancia para o coñecemento do enlace químico. A contribución de cada OA na combinación CLOA calcúlase entón resolvendo as ecuacións H-F. Neste campo hai que recoñece-lo gran labor levado a cabo por J. A. Pople, que desenvolveu a maior parte dos métodos computacionais utilizando funcións gaussianas (Programas GAUSSIAN) como funcións base, máis doados de integrar cós máis precisos orbitais atómicos (funcións de Slater). Aínda que con estes procedementos se necesita utilizar un maior número de funcións base para 'construír' a molécula, redúcense en cambio de forma moi notable os tempos de cálculo.

Os estudos teóricos de moléculas realizados nos termos descritos denomínanse cálculos *ab initio* e son os máis usados na actualidade, gracias ó desenvolvemento dos cada vez máis rápidos ordenadores. Sen embargo, polas dificultades de cálculo, sobre todo cando as moléculas posúen moitos átomos ou estes teñen un peso atómico alto (posúen polo tanto un elevado número de

electróns), faise necesario realizar aproximacións para resolver algunhas das integrais máis difíciles que aparecen no cálculo. Algunhas destas integrais poden ser avaliadas experimentalmente (por exemplo, mediante métodos espectroscópicos) e outras poden ser introducidas como parámetros axustables, evitando así o seu custoso cálculo. Os métodos que realizan estas aproximacións denomínanse métodos semi-empíricos e foron os máis usados durante a primeira metade do século XX. Debemos destacar aquí, dentro destes métodos, unha aproximación que conseguiu notables éxitos no estudo de moléculas con enlaces pi, desenvolvida por E. Hückel a principios dos anos trinta e que se coñece como aproximación Hückel, consistente en tratar de forma independente os electróns sigma e pi das moléculas.

Antes de finalizar esta rápida visión das orixes da Química cuántica debemos destaca-la aparición, nos derradeiros anos do século, da técnica do funcional de densidade —debido fundamentalmente a W. Kohn— que permitiu dar un salto cuantitativo importante no tamaño dos sistemas estudados e abriu as portas ó estudio cuantitativo dos sólidos nanoestructurados que, por posuíren un número elevado de átomos (normalmente pesados) eran difíciles de abordar polos métodos antes mencionados.

Fixemos referencia ás dificultades que ten a resolución da ecuación de ondas para un sistema tan 'simple' como unha molécula de varios átomos.

Pero o químico ten que enfrontarse normalmente co comportamento, non dunha molécula, senón dun número moi elevado delas (da orde dun mol, é dicir, aproximadamente 10^{24} moléculas). Ben é certo que sería totalmente absurdo resolver unha ecuación de ondas que contivese a información de todo ese elevado número de moléculas. Aínda que puidesemos resolve-la dita ecuación, de pouco nos había servir, pois faríanos falta máis tempo cá idade actual estimada do universo para imprimir toda a información. ¡Canto tempo necesitaríamos despois para procesala no noso finito cerebro! Por iso, desde principios de século desenvolveuse unha disciplina coa intención de uni-las propiedades dun átomo ou

molécula (obxectivo da Química cuántica que acabamos de sinalar) coas dos sistemas macroscópicos e que se denomina Mecánica estatística. Sen esta extraordinaria ferramenta pouco podería dicir hoxe en día a Química verbo dos seus compostos e das reaccións entre eles. Os nomes de Maxwell, Boltzmann e Gibbs están ligados á evolución desta área. Sería Boltzmann o encargado de desenvolve-la estatística que leva o seu nome e que permite estudia-lo comportamento dun sistema formado por un número elevado de partículas distinguibles, coñecido o comportamento das partículas individuais. Esta estatística habería ser ampliada por Fermi e Dirac (para a súa aplicación a fermións, como por



Enrico Fermi no laboratorio da Universidade de Roma.

exemplo os electróns) e por Bose e Einstein (para a súa aplicación a bosóns, como por exemplo os fotóns). Os primeiros éxitos da Mecánica estatística foron impresionantes. Así, a modo de exemplo, a entropía estándar do He calculada a partir da Mecánica estatística (30.11 u. e.), coincidía de forma case exacta coa determinada experimentalmente (30.13 u. e.). Mediante sinxelos modelos utilizados para describi-las moléculas individuais (como o rotor ríxido ou o oscilador harmónico), a Mecánica estatística puido, en poucos anos, abordar con suma elegancia o cálculo de magnitudes tan complexas e variadas como constantes de equilibrio en fase gasosa ou capacidades caloríficas (e a súa dependencia coa temperatura) de sólidos cristalinos. Neste último capítulo son destacables as achegas de Einstein e Debye con cadansúa teoría que levan os seus respectivos nomes.

A pesar dese éxito, as limitacións da Mecánica estatística fixéronse notar axiña polas mesmas razóns cás aludidas para a Química cuántica. Coñécese perfectamente hoxe en día as ecuacións que hai que utilizar para obte-lo comportamento estatístico dunha cantidade elevada (por exemplo, un mol) de calquera substancia en equilibrio. Sen embargo, o problema reside de novo no cálculo. Este cálculo pódese levar a cabo de forma relativamente simple cando o sistema é ideal, é dicir, cando non existen interaccións entre as moléculas (ou átomos, ións, etc.) do sistema. Sen embargo, cando

existen interaccións (como sucede nun gas real ou nun líquido) resulta imposible resolver-las integrais que aparecen (integral de configuración). Ornstein e Zernicke, no ano 1914, desenvolveron un método aproximado para ter en conta estas interaccións, que resultaría importante para o coñecemento non só de líquidos sinxelos e as súas mesturas, senón tamén para disolucións máis complexas, como poden se-las disolucións de polímeros e coloides.

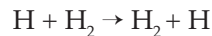
Unha das aplicacións máis importantes da Mecánica estatística foi o estudio de disolucións de electrólitos, de extraordinaria importancia para o desenvolvemento teórico da electroquímica. Debye e Hückel, introducindo diferentes simplificacións, deron resollido a ecuación non lineal que Boltzmann derivara a partir da ecuación de Poisson para o estudio dunha disolución de ións. A teoría de Debye-Hückel é capaz de describir de forma correcta as propiedades termodinámicas de calquera disolución de electrólito fortes, aínda que é exacta só no límite de concentracións moi diluídas dos ións.

Ata aquí falamos unicamente de sistemas (moléculas, átomos, ións, disolucións...) que están en equilibrio, pero o químico está moito máis interesado nas transformacións das substancias, é dicir, nas reaccións químicas e, xa que logo, en sistemas que non se atopan en equilibrio. O formidable problema co que se enfrontaron os nosos proxenitores do século pasado era tratar de obter uns postulados (e por

consequente unhas ecuacións) que permitiran aborda-los sistemas en desequilibrio, da mesma forma que xa se fixera para os sistemas en equilibrio (como se acaba de comentar). Isto resultaría moito máis difícil. Tanto é así que aínda hoxe en día está por resolver de forma definitiva esta cuestión e non existe un tratamento único ó respecto. Logo habemos volver sobre isto.

Polo momento diremos que —como ten pasado moitas veces na ciencia— tivo que xurdir unha idea ‘simple’ e extraordinariamente intuitiva para que a ciencia das reaccións químicas (Cinética química) puidera avanzar como o fixeron as outras ramas da Química durante o século XX. Ó non existir unha ecuación minimamente manexable que se puidera aplicar a partir duns poucos postulados como se fixera na Química cuántica e na Mecánica estatística, Eyring introduciu a xenial idea da existencia dun case-equilibrio entre reactivos e produtos e unha ‘especie’ intermedia denominada complexo activado ou estado de transición. Habendo xa un equilibrio polo medio, poderíase entón utilizar toda a maquinaria desenvolvida pola Mecánica estatística ó estudio das reaccións químicas. Desde aquela houbo moitísimos estudos tendentes a explicar por qué esta sinxela idea daba —e dá— na práctica tan bos resultados. O achado orixinal de Eyring pode considerarse como a pedra fundamental na que se basea practicamente todo o coñecemento actual das reaccións químicas.

A idea da existencia deste complexo activado (ou estado de transición) foi comprobada teoricamente mediante cálculos rigorosos realizados en reaccións sinxelas. Como reacción básica de estudio pode tomarse a formación da molécula de H_2 a partir dos seus átomos, que non é máis que o problema da formación do enlace entre dous átomos de hidróxeno. Normalmente faise estudando a reacción:



(colisión dun átomo de hidróxeno cunha molécula para intercambiar un átomo de hidróxeno). O problema pódese descompoñer en dúas partes: primeiro abórdase o estudio da superficie de enerxía potencial resolvendo a ecuación de Schrödinger para distintas posicións dos átomos, cuestión que pode ser acometida polos procedementos que vimos na Química cuántica. Despois estúdase o movemento dos átomos (núcleos) nesa superficie de enerxía potencial creada pola densidade dos electróns. Para ese movemento pódese supoñer que os átomos seguen as leis clásicas (os efectos cuánticos son desprezables agás en casos moi concretos a baixas temperaturas). Pode comprenderse a dificultade enorme que supón este procedemento: 1º) a dificultade de resolver por algún procedemento *ab initio* toda a curva de enerxía potencial do sistema (¡non só o mínimo de enerxía!); isto leva consigo dificultades como a determinación do ‘punto cadeira’ (que representa un mínimo dentro dun máximo), co que complica adicionalmente a

converxencia dos métodos autoconsistentes utilizados; 2º) a dificultade de realizar sobre esta superficie un cálculo do movemento dos átomos para obter inicialmente as colisións entre eles e —achando a media das colisións mediante os procedementos da Mecánica estatística— obter finalmente a constante de velocidade. London e o propio Eyring, entre outros, desenvolveron métodos semiempíricos para simplificarlos cálculos. Un avance importante neste campo, que poderíamos denominar Química teórica das reaccións químicas, produciuse co desenvolvemento experimental dos feixes moleculares, que permitiu estudar reaccións con moléculas en determinados estados enerxéticos (de translación, electrónicos, de vibración e mesmo de rotación) realizándose colisións a ángulos fixados e determinando os produtos (con resolución enerxética) que se obteñen tamén en función do ángulo. Polas dificultades comentadas, o estudo da reacción química tivo que centrarse case exclusivamente no marco da teoría do estado de transición, desenvolvéndose diferentes aproximacións segundo o tipo de reaccións involucradas. Iso constituíu un pequeno problema pola atomización dos métodos utilizados. Non obstante, existen algunhas aproximacións que demostraron ter unha validez bastante xeral e que son as que brevemente comentaremos.

En primeiro lugar, debemos destacar os traballos de R. B. Woodward que, xunto con R. Hoffman, desenvolveu a Teoría da Conservación da

Simetría Orbital, de extraordinaria importancia para comprender a reacción química. Esta teoría desenvolveuse sobre a base da Teoría de OM, introducindo a idea de que nas reaccións concertadas ha conservarse a simetría orbital. Este, en principio, simple postulado foi un punto de apoio para comprender os mecanismos de reacción na Química orgánica e abriu na metade do século pasado un camiño racional e elegante para sintetizar novos compostos. A Química orgánica pasaba así de ser unha ciencia case exclusivamente empírica a ser unha ciencia na que se podía planificar e executar a síntese dunha molécula en termos concretos baseados en mecanismos de reacción. A combinación da teoría do estado de transición e a teoría de OM iniciada por Ingold nos anos trinta, xunto coa conservación da simetría orbital conduciron a un esquema de traballo no que Woodward foi un verdadeiro mestre que abriu o camiño para chegar ás complexas sínteses que hoxe somos capaces de apreciar nos laboratorios orgánicos de todo o mundo e que podemos definir como auténtica arquitectura molecular.

Dentro do capítulo de reaccións en disolución debemos destacar os traballos de P. Debye, J. N. Bronsted e N. Bjerrum, que introduciron a teoría de Debye-Hückel dos coeficientes de actividade de disolucións de electrólitos na estimación dos cambios entrópicos que teñen lugar durante a formación do complexo activado (estado de transición). Estes traballos foron de

grande importancia para comprender-la catálise ácido-base, tan importante en química.

L. Michaelis e M. L. Menten, no temperán ano de 1913, introduciron un esquema moi sinxelo para explica-la catálise enzimática. Este esquema, que se baseaba na formación dun complexo enzima-substrato como paso previo para a formación dos produtos, resultou se-la base da maioría dos mecanismos de reacción desenvolvidos para comprender este importante capítulo da Bioquímica moderna. Un esquema similar a este sería o estudiado algúns anos máis tarde por I. Langmuir para explica-la catálise heteroxénea, engadindo a idea de que agora o número de moléculas de reactivo que se poden unir ó catalizador para forma-lo complexo de adsorción pode ser maior ca un e vén limitado unicamente pola superficie do catalizador. Con isto, Langmuir daría a primeira explicación satisfactoria das isothermas de adsorción.

Dentro das reaccións de transferencia electrónica, o simple concepto acuñado por R. A. Marcus acerca das curvas de enerxía potencial, encadrado na Teoría do Estado de Transición, foi decisivo para comprender reaccións tan variadas como: reaccións redox, reaccións de transferencia electrónica en procesos biolóxicos, reaccións electroquímicas, etc.

Antes de abandona-lo extenso capítulo da cinética química, debemos destacar dous feitos moi importantes

que tiveron lugar neste século: por unha parte, o descubrimento das técnicas de relaxación por M. Eigen, nos anos cincuenta, conduciu ó desenvolvemento dun gran número de técnicas experimentais para o estudio de reaccións rápidas (reaccións que transcurren en tempos inferiores ó milisegundo, é dicir, inferiores ó tempo de mestura dos reactivos). Reaccións moi rápidas, como as de transferencia protónica ou electrónica, de tanta importancia nos organismos vivos, foron desta forma estudadas en detalle e contribuíron de maneira decisiva ó avance dos nosos coñecementos sobre a química da materia viva.

En segundo lugar, B. B. Belousov e A. M. Zhabotinski descubriron—non sen pasar, o primeiro, longas penas para que os seus resultados foran aceptados pola comunidade científica—, tamén arredor dos anos cincuenta, as reaccións oscilantes (figura 1). Estas reaccións, que parecen a primeira vista contradicirlas leis da termodinámica, foron a base para comprender cómo a materia pode autoorganizarse formando estruturas, sen que por iso haxa que cuestiona-la termodinámica. Este aspecto líganos, de forma inmediata, coa termodinámica dos procesos irreversibles. Foi Onsager quen desenvolveu nos anos trinta a teoría fenomenolóxica deses procesos (sistemas en réxime de non equilibrio). Onsager predixo que para sistemas non moi lonxe do equilibrio, debería existir unha relación lineal entre as forzas que

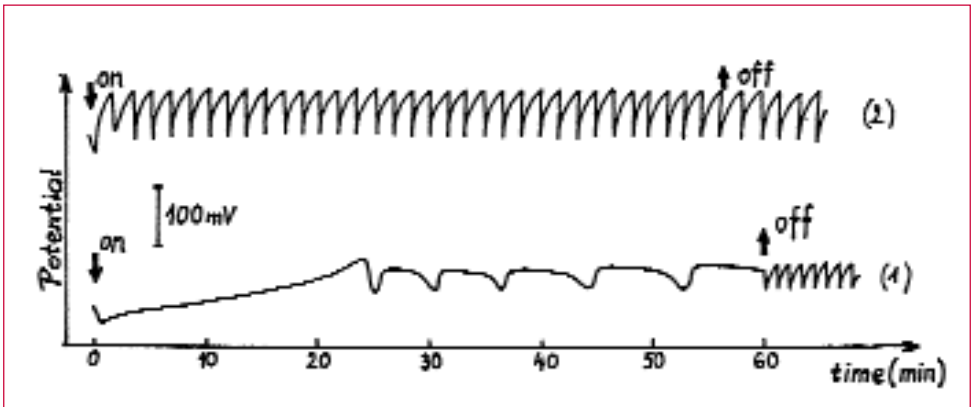


Figura 1. (a) Oscilacións observadas na concentración (proporcional ó potencial electroquímico) na reacción de 0.05M KBrO_3 , 0.2M ácido malónico, 1.0M ácido sulfúrico en presenza de dous catalizadores diferentes (curvas 1 e 2). (b) Ondas espaciais observadas para a reacción anterior en presenza de ferroína.



levan o sistema fóra do equilibrio e a resposta do sistema (fluxos).

Esta teoría aplicaríase tamén ó estudo das reaccións químicas, pois estas representan unha forma particular de sistemas en non equilibrio. Sería axiña abandonada polos éxitos conseguidos coa Teoría do Estado de

Transición, que posúe unha base teórica máis sólida. Sen embargo, houbo que botar man dos avances realizados no campo dos fenómenos irreversibles para explicala orixe das reaccións oscilantes. Neste campo, I. Prigogine desenvolveu modelos sinxelos que explicaban de forma precisa a formación de estruturas coherentes (estructuras disipativas) en campos tan diferentes como a Física (láseres, convección, etc.), a Química (reaccións oscilantes, precipitación —aneis de Liesegang—, etc.), a Bioloxía (estructuras organizadas en insectos, estrutura de cunchas, etc.), a Ecoloxía, etc.

Se ben a comprensión de todos estes sistemas a partir dos primeiros principios é unha cuestión aínda por resolver, quedou sen embargo clara a conexión entre este gran número de fenómenos en campos tan diversos e establecéronse modelos comúns para todos eles. Tamén quedou clara a razón

da formación destas estruturas coherentes: os sistemas reaccionan fronte a un estado de non equilibrio (perturbación) da forma máis 'eficiente' posible e isto leva á formación de estruturas cando a perturbación aparta o sistema do equilibrio suficientemente como para levalo fóra da rexión de resposta lineal (teoría de Onsager). A palabra 'eficiente' non está sempre asociada, polo tanto, a que a produción da entropía sexa mínima (principio que só é válido para sistemas pouco apartados do equilibrio). Cando o sistema está apartado abondo do equilibrio podería 'reaccionar' á perturbación sen acudir a ese principio, procurando disipar a enerxía do sistema da forma máis eficiente, o cal, como se dixo, pode levar á formación de estruturas organizadas. Nos últimos anos desta centuria viuse que as estruturas que se orixinan nos sistemas de non equilibrio son sensibles ás condicións ambientais (condicións termodinámicas nas que se atopa o sistema), de modo que poden aparecer novas estruturas mediante un cambio nesas condicións (un mecanismo deste tipo podería explica-la evolución das especies). Máis aínda, viuse que, en determinadas condicións, o sistema pode evolucionar cara ó caos. Neste estado, o comportamento do sistema faise tan extraordinariamente sensible ás condicións iniciais que resulta totalmente impredicible o seu comportamento (¡salvo que puidese-mos dispor dunha precisión infinita na determinación das condicións termodinámicas do sistema!). Aínda que se leva avanzado enormemente no estu-

dio destes sistemas non lineais, é este un campo aínda por explorar, sobre todo no das reaccións químicas axustadas que ocorren nos organismos vivos.

O estudio das interfases foi un dos que máis progresou durante o século pasado e contribuíu de forma decisiva ó avance en áreas tan importantes como a electroquímica, os coloides, a catálise heteroxénea e os polímeros en disolución. Dentro desta área debemos destaca-los importantes traballos levados acabo por G. Gouy, D. L. Chapman e O. Stern, que desenvolveron modelos da dobre capa eléctrica. Estes modelos serviron de base para a Teoría de Debye-Hückel (xa comentada) así como para obter o potencial de interacción en dispersións coloidais e disolucións de polielectrólitos, un dos cales, o potencial DLVO (debido a Derjauin, Landau, Verwey e Overbeek), resultou se-lo que lograría un maior ámbito de aplicación.

Desde que W. Nernst, a principios de século, deduciu termodinamicamente a relación lineal (que leva o seu nome) existente entre o potencial de equilibrio e o logaritmo da concentración nunha interfase M^{n+}/M , M =metal, a electroquímica tivo un avance máis ben lento debido ós escasos coñecementos que se tiñan tanto das interfases como da propia reacción química. Houbo que agarda-lo desenvolvemento da Teoría do Estado de Transición e a Teoría de Debye-Hückel dos electrólitos para que esta importante área comezara a deixar de ser unha ciencia con certos aires de 'alquimia'. A

proporcionalidade existente entre a densidade de corrente e a concentración serviu de base para que Heyrovsky ideara nos anos vinte unha das primeiras técnicas electroanalíticas: a polarografía, baseada nun electrodo de gotas de mercurio. O grande auxe que tivo esta técnica nos anos posteriores serviu ademais para estudar os procesos cinéticos que teñen lugar nos electrodos e estableceu así o paso a outros métodos electroquímicos amplamente utilizados hoxe en día (como a voltametría, a cronoamperometría, etc.).

A importancia de dispor de electrodos selectivos a unha determinada especie química como método electroanalítico selectivo foi posta de manifesto no desenvolvemento temperán do, hoxe moi popular, pHmetro, baseado nunha membrana sensible ós ións de H^+ . Nas últimas décadas deste século asistimos ó gran desenvolvemento de electrodos sensibles a un bo número de especies (moléculas contaminantes, ións metálicos pesados, gases, etc.), cada vez máis específicos, máis sensibles e de menor tamaño; de forma que deron paso, nestes últimos anos, ás matrices sensoras (narices e linguas electrónicos) formadas por unha ensamblaxe, de dimensións reducidas, de diferentes electrodos sensibles a diversas especies.

Convén resaltar agora as técnicas de microscopía de forzas, desenvolvidas na última década do século que nos ocupa, a raíz do importante descubrimento da microscopía de efecto túnel levada a cabo por H. Rohrer e

G. Binnig. Estas técnicas supuxeron un extraordinario avance no coñecemento das superficies, en xeral, e das interfaces electrificadas nos procesos electroquímicos, en particular. As posibilidades que abren estas innovadoras técnicas, que permiten ver realmente os átomos (figura 2) nos seus medios naturais, son extraordinarias. Así, a modo de exemplo, demostrouse

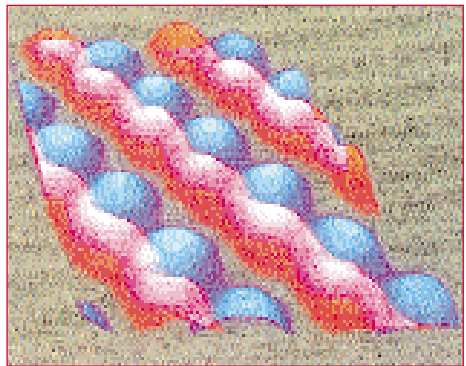


Figura 2. Imaxe da superficie dun cristal de silicio obtida por microscopía de efecto túnel. As esferas azuis representan os átomos de silicio situados sobre a superficie do cristal.

a posibilidade de realizar unha oxidación controlada dun só átomo na superficie dun sólido. Isto quere dicir que este século pasado, que comezou cunha serie de descubrimentos de fundamental transcendencia, non quixo abandonarnos sen antes lanzarnos cara a unha nova dimensión nas reaccións químicas: a posibilidade de levar a cabo, de forma sinxela, reaccións entre unicamente dous átomos ou dúas moléculas (¡imaxinemos por un momento a enorme densidade de información

que poderíamos almacenar nunha superficie mediante unha técnica deste tipo!). Sen dúbida, a nosa idea da reacción química, tanto desde un punto de vista experimental coma teórico, cambiará drasticamente nos vindeiros anos con estes nanolaboratorios, e estas técnicas constituirán unha verdadeira enxeñería atómico-molecular. Con ela poderase estudar o comportamento de átomos e moléculas individualmente, así como tamén a súa manipulación, o que poñerá a proba os nosos modelos e teorías atómico-moleculares.

Un campo de extraordinaria importancia, que quizais sexa o que máis ten influído nas nosas vidas, é o dos polímeros. Desenvolvidos fundamentalmente a raíz das explotacións petrolíferas, unha inxente cantidade de polímeros foron sintetizados durante este século, con propiedades que van desde os plásticos de grande elasticidade (cauchos, etc.) ata polímeros de dureza comparable ós aceiros máis resistentes (fibras de carbono). Estas propiedades pódense cambiar controlando adecuadamente a estrutura do polímero durante a súa síntese.

Un polímero pódese definir como unha molécula de elevada masa molecular. Aínda que hoxe en día a idea da existencia de moléculas con masas moleculares elevadas (macromoléculas) nos parece perfectamente aceptable, pois que convivimos con elas (plásticos), non era así a principios de século. Corrían xa os anos vinte cando o químico orgánico alemán Herman Staudinger recibía esta crítica dos seus

colegas, referíndose á posibilidade de existencia das macromoléculas: “déixeme advertilo do seu erro acerca das moléculas grandes; non hai moléculas orgánicas de masas moleculares superiores a 5.000. Recomendolle que purifique os seus produtos adecuadamente e verá que o que vostede chama macromoléculas non son máis que agregados de moléculas pequenas...”. Nas seguintes décadas, non só se comprobaría que o erro era da comunidade científica da época que estaba de acordo con esas palabras, senón que o número de moléculas de polímeros descubertas (a maioría sintetizadas no laboratorio) aumentaría de forma tan drástica que cambiaría totalmente a nosa forma de vida. As posibilidades de formar polímeros con diferentes estruturas pero da mesma composición (homopolímeros), ou de composicións diferentes (heteropolímeros), así como de diferentes masas moleculares, abría de tal forma o abano de posibilidades que farían desta área unha das de maior riqueza en canto á posibilidade de dispoñer duns materiais cunhas propiedades determinadas. Se a isto engadímola posibilidade de mesturar diferentes polímeros no produto final (como por exemplo nos materiais compostos formados pola mestura de resinas epoxídicas con fibra de carbono que se caracterizan pola súa extraordinaria combinación de propiedades: dureza e lixeireza), teremos unha case ilimitada fonte de novos produtos.

Dous fitos importantes podemos destacar no avance desta fermosa área

científica, que se produciron arredor dos anos cincuenta. Por unha parte, o descubrimento realizado por Ziegler de que a coñecida síntese de polietileno de baixa cristalinidade e altamente ramificado realizada a altas presións, podía levarse a cabo a temperatura ambiente e a presión atmosférica mediante un catalizador preparado a partir dun alquilo de aluminio e un haluro dun metal de transición. Pero o que resultou máis importante foi que a reacción non só era máis fácil, senón as novas características do polietileno obtido: era un polímero lineal altamente cristalino e dunha gran densidade. G. Natta desenvolvería nos seguintes anos outros catalizadores, hoxe coñecidos como catalizadores Ziegler-Natta, que permiten controla-la estereorregularidade dos polímeros obtidos. Dous anos antes de que lles concederan a ambos o Nobel (1963) polo descubrimento destes importantes catalizadores, escribía Natta un artigo en *Scientific American* co suxestivo e descritivo título “Polímeros construídos de forma precisa” (algo así como polímeros construído ‘á carta’), que daba conta do importante salto cualitativo que se producira na síntese de polímeros ó poder regula-la súa estereoquímica. Por outra parte, tamén nos anos cincuenta, P. J. Flory, en colaboración con M. L. Huggins, introducía a súa teoría estatística das disolucións de polímeros. Abríase a explicación do comportamento quimicofísico das macromoléculas en disolución. Flory refinaría —nos anos cincuenta e sesenta— a súa teoría na forma que se considera actualmente.

Iso, xunto coas ideas das leis de escalado que incorporou P.-G. de Gennes (procedentes dos fenómenos críticos) nos anos sesenta e setenta, constitúe a base sólida na que se fundamentan as ideas actuais das disolucións de polímeros.

Tocante ós fenómenos críticos, cabe destacar que a súa interpretación foi un campo, en principio, vedado á maioría das teorías desenvolvidas desde principios de século, debido sobre todo á existencia de grandes fluctuacións das magnitudes termodinámicas existentes nos sistemas próximos a un punto crítico. O único que se coñecía ata o derradeiro tercio do século pasado era a existencia de leis de escala: estas leis experimentais predín que, ó se aproximar ó punto crítico, a maior parte das magnitudes fisicoquímicas ou ben se anulaban ou ben diverxían mediante unha lei de potencias (exemplo: γ -tensión interfacial- $\propto \epsilon^x$, representando ϵ a distancia ó punto crítico e x un expoñente crítico universal). H. E. Stanley introduciu a primeira explicación das leis de escala encontradas nas rexións críticas baseándose na Teoría do Grupo de Renormalización desenvolvida por K. Wilson. Con isto chegábase a comprender e a calcular de forma cuantitativa propiedades quimicofísicas en sistemas con fluctuacións importantes nas magnitudes termodinámicas.

É evidente que neste curto espazo non podemos cubrir tódolos aspectos da química que desexaríamos. Existe un monte deles que fican no tinreiro. Por exemplo, os métodos de

simulación por ordenador que conformaron un novo e poderoso vértice no triángulo que agora forma coa teoría e os experimentos. Os métodos espectroscópicos (microondas, infravermello, UV-Vis, fluorescencia e fosforescencia, resonancias de spin e nuclear, etc.) que viron o seu nacemento, crecemento e consolidación neste século e deron lugar a unha morea de técnicas analíticas tanto de aplicación xeral como de investigación. As técnicas de difracción (de electróns, raios X, neutróns e luz láser) que viron a aparición de novas e potentes fontes de radiación, aproveitando a radiación da freada (*Bremsstrahlung*) nas instalacións dos aceleradores de partículas (sincrotrón). A química dos compostos inorgánicos, entre os que deberíamos resaltar os compostos organometálicos de tanta utilidade na catálise homoxénea e a síntese de polímeros antes mencionada; a química dos compostos de coordinación; os compostos deficientes de electróns; a química do silicio e os semicondutores, que supuxeron o nacemento da industria electrónica,

quizais a máis representativa deste século pasado; os supercondutores de alta temperatura que nos deixan ante o novo século co reto de entendermos cómo e por qué os electróns (recorde-mos, de spin semienteiro) poden apiñarse formando entidades de spin enteiro e, polo tanto, moverse xuntos de forma coherente (como o poden facer os fotóns) sen resistencia eléctrica. As baterías, células de combustible e a fotoelectroquímica, que constitúen as bases dos novos métodos de produción, conversión e almacenamento de enerxías limpas (enerxías sen combustión); etc.

Quixemos amosar aquí algúns dos aspectos máis relevantes das diversas áreas que tiveron unha grande importancia no desenvolvemento da Química do século XX. Moitos outros, tamén importantes, non viron a luz neste —necesariamente curto— artigo, xa non só por falta de espazo, senón pola necesidade de coñecementos específicos nas diversas áreas implicadas¹.



1 Agradecimentos: quixera agradecer a Saulo Vázquez, M. Carmen Blanco e Enrique Guitián os seus valiosos comentarios e a revisión dalgunhas partes deste artigo, asumindo que a responsabilidade última dos erros que nel se poidan atopar é unicamente do autor.

A BIOQUÍMICA NO FINAL DO MILENIO. UN SÉCULO DE HISTORIA

*Manuel Freire Rama**
Universidade de Santiago
de Compostela

PREÁMBULO

En poucos casos a traxectoria dunha ciencia pode asignarse a un período tan curto coma no caso da Bioquímica: o século XX comprende o período do seu nacemento e tamén o da súa consolidación a un moi elevado nivel.

Estamos, entón, diante da máis nova pero se cadra a máis desenvolvida rama das ciencias da vida. A súa competencia na caracterización das reaccións que experimentan as moléculas que compoñen as células para dar lugar á súa actividade biolóxica e, polo tanto, á de tódolos seres vivos, fai que se constituía nunha ciencia básica á que hai que recorrer para explica-lo fundamento do crecemento, o desenvolvemento e ata a enfermidade e morte dos organismos. Entroncan nela outras ramas das ciencias da vida, especialmente a Microbioloxía, a Xenética e a Fisioloxía.

Pola transcendencia dos seus obxectivos, enténdese a súa importancia e tamén a razón do seu espectacular desenvolvemento, especialmente nos últimos lustros deste século. A influencia que o coñecemento dos procesos biolóxicos ten na nosa sociedade, ó permitir incidir neles para a produción de alimentos, de fármacos e para remedialas súas patoloxías, proporciona importantes argumentos para xustificala relevancia dos estudos bioquímicos.

Neste artigo ímonos introducir, coa síntese que isto require, nas vicisitudes desta ciencia ó longo do século XX, que coincide coa súa propia historia. Aínda que foron moitos os implicados —cunha morea de achegas que contribuíron á promoción do desenvolvemento científico da Bioquímica— referirémonos, en prol da síntese antes apuntada, ós personaxes e fitos científicos máis relevantes. O que, de xeito ningún, pode significar un menosprezo dos centenares de científicos e descubrimentos que marcan a historia da Bioquímica.

* Catedrático de Bioquímica e Bioloxía Molecular.

AS ORIXES

A Bioquímica ten a súa xénese na adecuación da Química orgánica ós procesos biolóxicos, ó estudio das funcións do organismo vivo. Segundo isto, a Bioquímica aparece como unha ciencia confluyente cos estudos químicos e fisiolóxicos dos seres vivos. O preludio desta xénese lévanos contra mediados da segunda metade do século XIX, tempo no que o coñecemento dos constituintes químicos da materia viva xa acadaban un certo nivel. É a partir deste incipiente coñecemento cando, xa no ocaso do século XIX, se sentarían as bases para consolida-lo nacemento da Bioquímica.

Así, o termo Bioquímica foi introducido por primeira vez en 1903 polo alemán Carl Neuberg (que, como veremos máis adiante, foi o creador dunha formidable escola de investigadores bioquímicos) para designa-las súas achegas, e mailas doutros, no eido da caracterización das estruturas dos compoñentes das células e a súa función dentro delas.

Por todo isto, é importante facer unha breve recapitulación do estadio no que, a finais do século XIX, se atopaba o coñecemento da composición química da materia viva e en estudos que tiveran a súa orixe na análise química dos alimentos, no estudio dos compoñentes do corpo humano, dos microorganismos e nos métodos da síntese química.

O coñecemento da composición química dos seres vivos nace co propio século XIX. Así, cos traballos de Gay Lussac e Thénard, arredor de 1811, nos que se determina a composición elemental do azucre de cana, iníciase o estudio dos hidratos de carbono como compoñentes da materia viva. Case dúas décadas máis tarde, en 1827, os traballos do médico inglés Willian Prout permitiron progresar neste coñecemento ó establecer que os alimentos contiñan, amais de hidratos de carbono, graxas e uns compoñentes que se denominarían, unha década máis tarde (1838), proteínas; así que xa na primeira metade do século XIX, as proteínas considerábanse moléculas primordiais dos seres vivos. Mulder, en 1838, describe as 'proteínas' como 'os primeiros' dos compoñentes do sangue, ovos e queixo.

Os ácidos nucleicos non foron descubertos ata avanzada a segunda metade do século XIX. Miescher illou por primeira vez o ADN en 1869. Quedaba un longo camiño por percorrer ata chegar a establece-las estruturas dos principais compoñentes químicos da materia viva, as proteínas e os ácidos nucleicos, o que non se lograría ata as primeiras décadas do século XX. É, polo tanto, comprensible que a Bioquímica non acadara un desenvolvemento importante ata eses anos.

Sen embargo, a idea de relaciona-la composición da materia viva coa actividade biolóxica xa aparece incipientemente no mesmo século XIX, cando aínda estaban a aflora-los

coñecementos dos tipos moleculares presentes nela. A isto contribuía a propia observación da natureza, que diversos e importantes científicos fixeron cos precarios medios daquela dispoñibles. Así, o estudio de procesos como a combustión, a respiración, a nutrición, constituíron fontes de importante promoción do coñecemento: o ciclo do carbono en animais e plantas, establecido por Justus Von Liebig; a relación entre combustión e respiración, co desprendemento de CO_2 , descuberto por Lavoisier; o proceso de acción dos zumes gástricos, que levou a Berzelius, en 1835, a introducir o termo 'catálise' para designalo proceso de degradación dos alimentos.

O estudio da catálise promoveu o desenvolvemento da teoría da acción das enzimas, ó coñecemento das cales contribuirían de xeito determinante os estudos de Emil Fischer en 1852, pioneiros en recoñece-los catalizadores como proteínas que exercen a súa acción por unha adecuada interacción das enzimas cos substratos que se catalizan: a teoría da chave-pechadura. O termo enzima, para referirse a estes catalizadores biolóxicos, foi máis tarde introducido por Kühne, en 1878.

Outra das achegas que, no século XIX, axudaron a consolidar as bases sobre as que se fundamentaría o desenvolvemento da Bioquímica e da propia Bioloxía no século XX, foi a teoría da organización celular, que Schwann presentou en 1836: os 'gránulos celulares' como contedores unitarios dos procesos químicos da materia viva. O

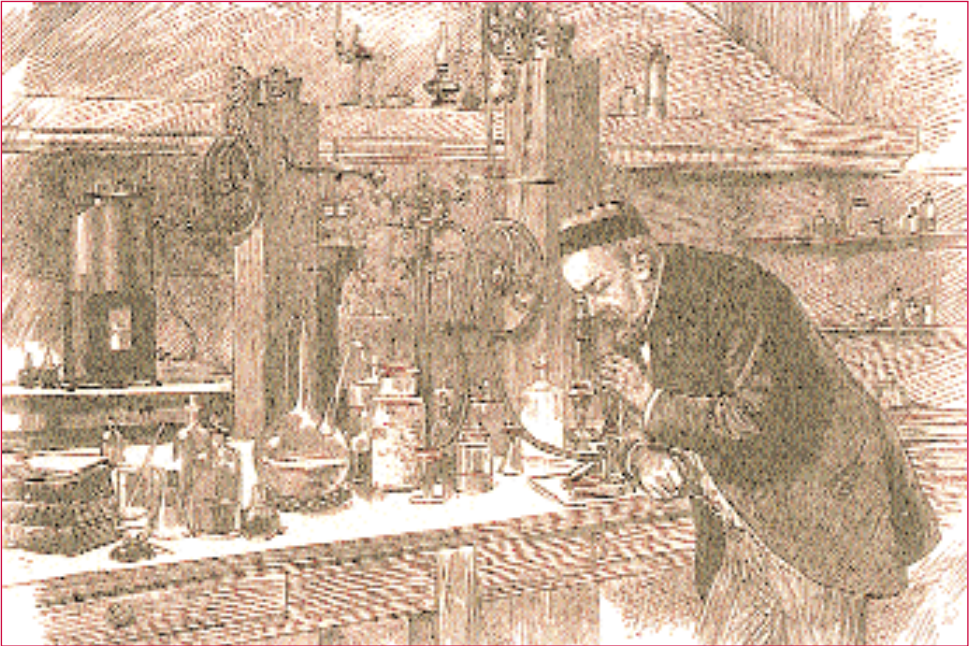
mesmo Schwann, tres anos máis tarde, aplicaría o termo 'forza metabólica' para designar os procesos nas células: introducíase o termo 'metabolismo' co sentido actual. Con todo isto, o sistema biolóxico sobre o que, de forma extraordinaria, recaería a atención bioquímica naqueles anos foi a fermentación; tal vez pola transcendencia social que tiña —e segue tendo— a preparación de produtos tan importantes para os nosos hábitos nutricionais como son o pan, o viño, o queixo, etc.

Desde finais do século XVI, cando o belga Jan Baptiste Van Helmot, discípulo de Paracelso, descubriu o desprendemento de CO_2 na fermentación da uva e da malta, ata ben entrado o século XX, a fermentación de extractos e zumes biolóxicos ocupou a dedicación de decenas de investigadores, mesmo nos anos —especialmente do século XIX— nos que, a pesar do apreciable avance no coñecemento dos compoñentes químicos dos seres vivos aínda se andaba lonxe de establecer as súas relacións coa actividade biolóxica.

O estudio do proceso da fermentación do extracto de uva por Pasteur, Schwann e outros, levou a mediados do século XIX a establecer que a fermentación estaba ligada á presenza dos lévedos; os 'fermentos' eran estes microorganismos que se multiplicaban como causa da fermentación. Estas observacións significaban un soporte para a teoría vitalista (a vida como resultado dunha forza vital 'sobrenatural' presente dentro dos organismos) inoperante na primeira metade do

século XIX. Sen embargo, a conclusión á que Liebig e Berzelius chegan no seu estudio —xa entrada a segunda meta-

de do século XIX—, de que a fermentación era un proceso químico, alentaba a rotura do vitalismo.



Pasteur no seu Laboratorio. Gravado de The Graphic, 1885.

A investigación da fermentación non só ía romper de vez co modelo vitalista na Bioloxía senón que, no último lustro do século XIX, ía revolucionalo propio estudio desta ciencia; a isto contribuíu o experimento de Eduard Buchner, que conseguiu (1897) reproducir a transformación da glicosa en alcohol utilizando extractos de lévedos. Demostrábase que a ‘vida’ podía saír das células. Podíanse reconstruír *in*

vitro os procesos que as células realizaban *in vivo*, dentro delas.

O extracto de lévedos de Buchner, denominado entón ‘zimasa’, foi obxecto de intensa investigación nos primeiros anos do século XX. Investigación diversificada na caracterización dos compoñentes da zimasa e da propia fermentación, así como da súa función no proceso: nacía a Bioquímica.

A CONSOLIDACIÓN. A PRIMEIRA METADE DO SÉCULO XX

A Bioquímica consolídase como importante ciencia da vida nos primeiros cincuenta anos dos século XX. A resolución de varios retos que na Bioloxía se consideraban importantes, prioritarios, a xuízo das achegas debidas ás investigacións biolóxicas do século XIX: a caracterización das reaccións enzimáticas e das estruturas das proteínas, así como a resolución do proceso da fermentación, foron logros que consolidaron a súa posición.

DA REACCIÓN ENZIMÁTICA ÁS RUTAS METABÓLICAS

Cronoloxicamente, a caracterización da reacción enzimática foi o primeiro dos importantes retos resoltos pola investigación bioquímica; foron básicos os traballos pioneiros de Berzelius e Emil Fischer. De maneira que, o que hoxe coñecemos como mecanismos cinéticos —transformación dos substratos por interacción específica coa enzima, a través de complexos enzima-substratos dos que se xeran os produtos das reaccións bioquímicas— e como ecuacións e constantes cinéticas —que permiten a rápida e fácil caracterización das posibilidades catalíticas e regulatorias das enzimas— foron establecidos na primeira década do século XX.

Diversas liñas de traballo, de diferentes grupos, contribuíron a todo isto. A purificación de enzimas, iniciada por Richard Willstätter; a caracterización

do complexo enzima-substrato para a catálise por Henry e Brown; a teoría do estado estacionario e o desenvolvemento das ecuacións cinéticas achegadas por Biggs, Haldane, Menten e Michaelis, entre outros, fixeron que xa en 1913 se chegara a un elevado grao de coñecemento da reacción bioquímica.

As constantes achegas que, a partir destes anos, se fixeron sobre a base do illamento e purificación de moitas enzimas —incluída a cristalización dunha delas por Summer en 1926, a ureasa— permitiron afondar no coñecemento dos procesos metabólicos; estableceuse que estes non eran máis que unha concatenación de reaccións enzimáticas que compartían substratos e produtos, e que os datos obtidos nos laboratorios eran perfectamente extrapolables ás reaccións metabólicas *in vivo*. O paradigma do estudo do metabolismo —non podía ser doutro xeito— constituíuno a investigación da fermentación, que foi a primeira ruta metabólica estudiada. Era todo un desafío á habilidade investigadora o establecer cómo aquel extracto conseguido ó triturar levaduras nun morteiro e suspendido nun medio acuoso, é dicir, a ‘zimasa’ de Buchner, era quen de transforma-la glicosa en etanol. O alemán Carl Neuberg e os seus discípulos Embden, Mayerhof e Parnas levaron a cabo os primeiros traballos de dilucidación das reaccións polas diferentes enzimas contidas na zimasa capaces de transforma-la glicosa en dúas moléculas de etanol e dúas de

anhídrido carbónico. Esta ruta denominouse glicólise.

O completo coñecemento das reaccións bioquímicas desta ruta esencial para tódolos seres vivos non se tivo ata ben entrados os anos corenta. A isto tamén contribuíron bioquímicos das escolas alemáns. Alemaña lideraba daquela a maior parte das diferentes ramas da ciencia, como é sabido. Así, Warburg, Kalchar, Lipman, ós que se uniu Ochoa (foi discípulo de Meyerhof), contribuíron a completa-lo moi importante aspecto enerxético da glicólise, concretada na síntese da molécula enerxética por excelencia: o ATP (descuberto en 1929 por Fiske e Subbarow). Estableceuse, ademais, que a síntese de ATP era a finalidade primordial da glicólise e diferenciouse a eficiencia deste proceso en distintos organismos aerobios e anaerobios. Canda os estudos da glicólise, nas primeiras décadas do século XX, progresaron de xeito notable os estudos doutras facetas do metabolismo das células tales como o metabolismo do glicóxeno, brillantemente descuberto por Carl e Greta Cori no seu laboratorio de St. Louis; o estudo das transformacións das graxas e dos ácidos graxos, de Knoop, Lypman e Lynen; dos aminoácidos por Embden e Knoop; do ciclo da urea por Krebs e Henseleit; e do ciclo do ácido cítrico, bautizado como ciclo Krebs, que na súa Alemaña de orixe e logo en Inglaterra, lograra establece-la degradación cíclica do acetil-coenzima A, aínda que as súas principais reaccións foran descubertas por Ochoa (xa

nos Estados Unidos) e algunhas por Knoop e Szent-Györgyi.

Xunta o estudio das transformacións metabólicas dos compoñentes celulares menos complexos (azucres, graxa, aminoácidos), ou o que se denominou metabolismo intermediario, unha intensa actividade investigadora foi tamén despregada na primeira metade do século no estudio da fotosíntese. Así os traballos pioneiros de Hill, Warburg, Ochoa, Horecker, Calvin e Arnon, principalmente, chegaron a establece-los mecanismos polos que as células vexetais, nas reaccións localizadas nos seus cloroplastos, eran capaces de, co simple recurso externo da auga, do anhídrido carbónico, de compoñentes minerais e da luz, producir enerxía biolóxica (ATP) para xera-la síntese de azucres, graxas, aminoácidos, etc., é dicir, tódolos nutrientes. A fábrica biotecnolóxica máis formidable e barata. Debemos apuntar que hoxe en día ó home abondaríalle con conserva-la conforme nola deu a natureza, máis que incidir na manipulación de procesos dos que se consegue un rendemento e eficaz aproveitamento co simple coidado e prevención da agresión e a contaminación ambiental.

A ESTRUCTURA DAS PROTEÍNAS

Unha faceta da investigación bioquímica que debemos salienta-la pola súa especial transcendencia, e que se desenvolveu paralelamente ó estudio do metabolismo na primeira metade do século XX, é o estudio estrutural das proteínas. A súa importancia

queda claramente resaltada ó ser estes compoñentes celulares os responsables das diferentes reaccións bioquímicas, por constituírense nas estruturas das propias enzimas.

A complexidade estrutural das proteínas é facilmente deducible por estar formadas por vinte aminoácidos diferentes que, en distinta proporción e orde, se concatenan por centos nas proteínas. A isto hai que engadi-la presenza de decenas de miles de especies moleculares de proteínas diferentes nas células. É fácil acredita-lo mérito que tiveron, a teor dos medios dispoñibles, as achegas sobre a estrutura das proteínas aparecidas nas primeiras décadas do século XX.

O estudio das estruturas das proteínas iniciouse nos primeiros anos do século XX (1905-1920); partindo da análise dos seus hidrolizados —levados a cabo por Haberman, Schützenberg e Fischer— estableceuse a súa composición por aminoácidos. O propio Fischer e mais Hofmeister propuxeron a teoría da concatenación peptídica da estrutura das proteínas (os aminoácidos ligaríanse por enlaces similares ós das peptonas, de aí o seu nome de estrutura peptídica). A consideración das proteínas como macromoléculas, con tamaños superiores á vintena de aminoácidos concatenados, foi introducida por Standinger e Swedberg; a teoría foi moi controvertida naqueles anos, tanto que Standinger recibiu o premio Nobel en 1953, trinta e tres anos máis tarde da súa proposta.

Rematando a primeira metade do século XX, a aplicación das técnicas de difracción de raios X a proteínas cristalizadas propiciaría un espectacular avance no coñecemento da estrutura das proteínas. De acordo coa distancia entre os átomos e grupos de átomos destas moléculas, obtidas por raios X, e apoiándose na construción de modelos moleculares a escala das distancias atómicas, o americano Linus Pauling propuxo os modelos de distribución espacial da cadea de proteínas: as hélices α . A forma que adoptarían as concatenacións de aminoácidos é a dunha hélice, coma unha escaleira de caracol. Este modelo demostrouse, co tempo, xeneralizado á maioría das proteínas, aínda que agora sabemos que estas conformacións en hélice α coexisten con outras menos abundantes, descubertas naqueles anos, correspondentes a interaccións entre cadeas de proteínas de disposición lineal: lámina β (ou β -queratina) e as distribucións espaciais irregulares sen unha figura xeométrica definida.

Os relevantes traballos pioneiros de Pauling sobre as estruturas das proteínas, non só abriron o camiño para a análise estrutural das proteínas, cada vez máis de actualidade, senón que foron referencia clave para a determinación da estrutura do ADN, que máis adiante veremos.

Sen embargo, o coñecemento da distribución espacial dos átomos dunha proteína é só unha parte da cuestión referida á estrutura da molécula. A outra, e moi importante, é o

coñecemento da súa estrutura primaria: o número e a orde en que os aminoácidos se dispoñen na cadea que constitúe a proteína. Coa secuenciación da primeira proteína, a insulina, por Sanger, no ano 1951, consolidaríase a laboriosa metodoloxía para coñece-la estrutura primaria das proteínas.

Nas primeiras décadas do século XX, prodúcese unha importante consolidación da Bioquímica; o coñecemento do funcionamento das proteínas, os hidratos de carbono, lípidos, aminoácidos e outras moléculas pequenas dentro das células acadou un importante nivel. A progresión no esclarecemento das estruturas de moitas das proteínas celulares e o descubrimento das estruturas e función dos ácidos nucleicos, que se produciría nos primeiros anos da segunda metade do século XX, propiciarían un espectacular progreso no coñecemento non só do resultado de moitas rutas metabólicas, senón dos detalles dos seus mecanismos moleculares.

O GRAN DESENVOLVEMENTO. A SEGUNDA METADE DO SÉCULO XX

Malia o nivel de coñecemento do metabolismo alcanzado na primeira metade do século XX, era completamente descoñecida a orixe molecular das proteínas, así como a estrutura e a función celular dos ácidos nucleicos.

Desde os experimentos de Mendel, en 1866, nos que se apuntaba unha relación entre determinados

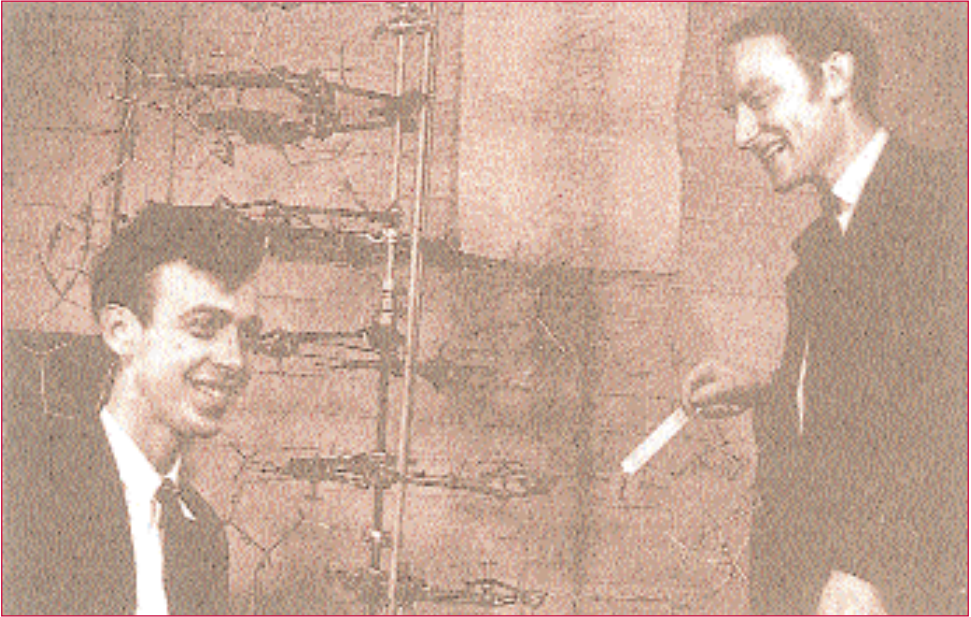
factores xenéticos e os trazos hereditarios dos individuos, ata os traballos de Beadle e Tatum en 1940, que establecían unha directa relación entre unha estrutura xenética básica: un xene, e a produción dunha enzima, pouco se avanzara no coñecemento de estruturas dos ácidos nucleicos e no esclarecemento da súa función celular ou a produción de enzimas.

As observacións de Linus Pauling a finais dos anos corenta sobre a estrutura das globinas dos individuos coa anemia falciforme, que confirmaban unha relación entre mutación xenética e alteracións da secuencia de aminoácidos das proteínas, e o coñecemento de que o ADN —descuberto por Miescher en 1869— estaba constituído por cadeas de nucleótidos, permitiron establecer, entrado o ano 1950, a colinearidade entre secuencia de nucleótidos do ADN e secuencia de aminoácidos das proteínas.

A DOBRE HÉLICE

No ano 1953 presentaríase un resultado que ía propiciar unha espectacular aceleración na investigación bioquímica dos ácidos nucleicos e as proteínas. Nese ano, James D. Watson e Francisc Crick publicaron na revista *Nature* as conclusións do seu traballo sobre o modelo estrutural do ADN: a dobre hélice.

Baseándose nos datos de difracción de raios X de cristais de ADN bacteriano obtidos por Wilkins e Franklin, e seguindo unha metodoloxía de

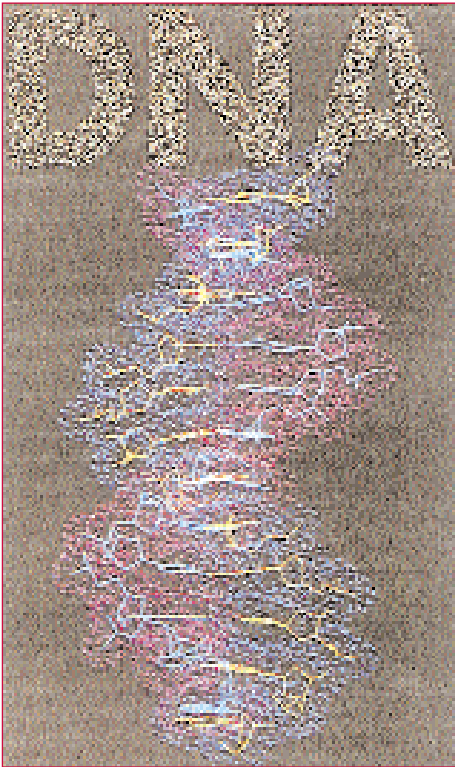


Os doutores James Dewey Watson e Francis Harry Compton Crick pasan xunta un modelo a escala da estrutura do DNA descuberta por eles.

construcción de modelos a escala, tal como fixera Pauling para establece-los modelos estruturais das proteínas, nos laboratorios da Universidade de Cambridge, propuxeron unha estrutura para o ADN consistente nunha dobre cadea enfrontada, en dirección antiparalela, e mantida como unha dobre hélice por emparellamento de bases A-T e G-C mediante enlaces de pontes de hidróxeno.

O modelo permitía explica-la reprodución celular, na cal os caracteres xenéticos, os xenes do ADN, eran transmitidos fielmente pola súa duplicación semiconservativa. Un cromosoma era fielmente copiado, de maneira

que cada un dos cromosomas xerados conservaba unha febra do orixinal, pasando cada copia a cada unha das células nacentes. Esta situación reproducíase tanto na xeración de organismos unicelulares coma nos embrións dos organismos superiores. Precisamente, como se foi coñecendo ó longo dos seguintes anos, un dos éxitos do modelo de Watson e Crick era a súa universalidade, que respondía ás características estruturais do ADN presente en todo tipo de células. Da mesma maneira, os estudos da síntese de ADN, a replicación, iniciados por Arthur Kornberg uns anos máis tarde, viñeron a demostra-la universalidade



Visión coloreada no ordenador dunha cadea de DNA enroscada en dobre hélice.

das reaccións bioquímicas básicas implicadas neste proceso nos diferentes tipos celulares. De novo, como ocurría co metabolismo da glicosa ou outros nutrientes, constatabase a universalidade dos principios básicos de igualdade da estruturación e actividade das moléculas dos seres vivos.

A EXPRESIÓN XÉNICA

Quedaba por resolver, sen embargo, unha importante cuestión: a

relación bioquímica entre o ADN, os xenes e as proteínas. A asignación do papel biolóxico do ARN, xa entrados os anos sesenta, ía esclarece-los mecanismos moleculares desta relación.

Os ácidos ribonucleicos (ARN), descubertos nas primeiras décadas do século XX, non foron caracterizados nos diferentes tipos que hoxe coñecemos: ARN mensaxeiro (ARNm), ARN ribosómico (ARNr) e ARN transferente (ARNt) ata mediados os anos sesenta. O descubrimento en 1956 do ARNm por Volkin e Astrachan, como unha molécula que contiña unha secuencia fiel a unha febra do ADN, marcou o inicio da caracterización da expresión xénica, proceso que foi totalmente determinado en menos dunha década. A expresión xénica, a capacidade dun xene para ordena-la síntese dunha proteína era o resultado da produción dun ARNm por unha das febras do ADN cunha secuencia de nucleótidos que era traducida, a continuación, nunha secuencia concreta de aminoácidos dunha proteína, mediante unha ruta metabólica realizada nos ribosomas, coa participación do ARNt e do ARNr e cun mecanismo esencialmente idéntico en tódolos seres vivos.

É admirable que a dilucidación da concatenación de reaccións bioquímicas, moi complexas, que dan lugar á expresión dun xene, se resolvera en tan curto período de tempo, polo menos nos seus aspectos moleculares máis esenciais. O máis notorio das achegas que permitiron establece-la relación funcional do ADN coa síntese de

proteínas, poderíamos resumilo en tres grandes liñas experimentais: a presentación do mecanismo molecular da expresión dun xene nunha bacteria, o establecemento do código xenético e o descubrimento da ruta metabólica para a síntese das proteínas nos ribosomas.

A descrición da expresión xénica da β -Galactosidasa publicada por Francois Jacob e Jacques Monod, en 1961, na que se delineaba a síntese intermedia dun ARNm e a produción da proteína codificada por el, marcou un fito na demostración das vías metabólicas que conducían á relación do ADN coa síntese dunha proteína.

Canto ó código xenético, a relación das secuencias de nucleótidos do ADN capaces de codificar, de dirixir, a presenza dun aminoácido determinado na secuencia dunha proteína, foi establecido entre 1962 e 1966 nunha carreira vertixinosa e competitiva de experimentación dos grupos de Nirenberg e Ochoa. A experimentación converxeu na conclusión dun código de transmisión xenética, na que se establecía que cada aminoácido dunha proteína resultaba codificado por un triplete universal de nucleótidos, resultado da combinación de tres dos catro nucleótidos diferentes presentes no ADN, coas bases: adenina, citosina, guanina e timina, de todos coñecidas. Os traballos de síntese química de Khorana e de análises xenéticas de Crick contribuíron a corroboralos resultados de Nirenberg e Ochoa.

A ruta metabólica para a síntese de proteínas implica a culminación do proceso da expresión dun xene, no que se produce a tradución da 'mensaxe' implícita na secuencia de nucleótidos dun ARNm nunha secuencia de aminoácidos dunha proteína, pola mediación dos ARNt (transportadores de aminoácidos e 'adaptadores' da secuencia do ARNm á da proteína que vai ser sintetizada) e dos ARNr presentes nos ribosomas, orgánulos que constitúen a 'mesa de traballo' na que se realiza a síntese de proteínas. Varios son os grupos de investigadores que, cos seus traballos, favoreceron o esclarecemento dos mecanismos moleculares desta ruta metabólica, a principios dos setenta. O grupo de Severo Ochoa foi o máis notable deles.

O FINAL DO MILENIO E O FUTURO

Chegado o derradeiro cuarto do século, establecérase a forma na que os ácidos nucleicos se implicaban na actividade celular completando o que poderíamos denominar 'cadro metabólico das células', de forma que se daba resposta, a nivel molecular, á antes denominada forza vital dos seres vivos, incluída a súa capacidade para transmitir e conserva-los seus caracteres xenéticos. Pero o avance do estudio bioquímico tiña por diante a resolución de varias cuestións aínda moi transcendentales. Era coñecida a replicación do cromosoma, pero, ¿que eventos moleculares gobernan a súa regulación e o proceso da división das células, básico

na reprodución e mesmo no mantemento dos organismos?, ¿por que morren e envellecen as células?, ¿cal é a orixe molecular das enfermidades? Moitas preguntas para ser completamente resolvidas na última vintena do milenio. A pesar disto, logrouse afondar en varias delas de xeito notable durante eses anos. Tamén o derradeiro cuarto de século foi especialmente xeneroso na incorporación de novas metodoloxías que foron decisivas para dar un gran pulo á investigación bioquímica. En resumo, poderíamos sinala-la introducción das técnicas inmunolóxicas, o uso de anticorpos dirixidos contra as estruturas das diferentes proteínas purificadas das células, que constitúen un excelente instrumento para caracteriza-los mecanismos da súa actividade bioquímica. O método baséase na alta e selectiva especificidade que os anticorpos posúen para recoñece-las proteínas das que derivan. Mencionemos, de pasada, a utilidade dos anticorpos con finalidades terapéuticas no control de infeccións.

Sen embargo, a metodoloxía do ADN recombinante é, sen dúbida, a estrela no referente á achega de forza innovadora á investigación bioquímica. Utilizando enzimas e substratos implicados no metabolismo dos ácidos nucleicos, e incorporando ademais as enzimas de restricción (descubertas por Arber en 1962 e purificadas por Nathaus e Smith unha década máis tarde), así como a transfección e crecemento de plásmidos bacterianos, os grupos de Boyer, Cohen e Berg

desenvolven as técnicas de clonación do ADN nos seus laboratorios nos Estados Unidos a mediados dos anos setenta.

En síntese, a clonación do ADN permite a multiplicación selectiva de parte de cromosomas da célula, especificamente útiles, como os que corresponden ás estruturas dos xenes que posúen a información para a biosíntese dunha determinada proteína. A isto hai que engadir que, paralelamente ó desenvolvemento das técnicas de clonación do ADN, o inglés F. Sanger (que secuenciara por primeira vez unha proteína, a insulina, unha vintena de anos antes) e os americanos Maxam e Gilbert, desenvolveron a metodoloxía para a secuenciación do ADN. Con todo isto propiciouse a rápida selección e secuenciación dun xene e dispúxose entón dun formidable medio para caracterizar non só os xenes, senón as secuencias das proteínas que estes codifican. Temos que advertir que a secuenciación automática dunha proteína completa, aínda hoxe en día, é inaccesible en períodos de tempo inferiores a varios anos. A secuenciación de fragmentos de proteínas, da orde da vintena de aminoácidos, nos secuenciadores automáticos, é posible en poucas horas. Esta posibilidade é suficiente referencia, sen entrar en detalles, para deduci-la súa completa estrutura primaria a partir dos datos de secuenciación do ADN do seu xene.

O uso da metodoloxía do ADN recombinante non só acelerou o coñecemento das estruturas das proteínas

e os xenes, senón que permitiu incidir de forma determinante na expresión xénica, chegando á súa manipulación *in vivo*. A produción de ADN recombinado en vectores (virus ou plásmidos) que poden ser introducidos nas células para inhibir ou activar nelas a expresión dunha proteína concreta ou integrarse ó xenoma celular abriu un abano de posibilidades para perfeccionalo coñecemento das actividades bioquímicas das proteínas. A súa utilidade chegou a posibilita-la 'reparación' de disfuncións en diversas patoloxías, ou á xeración de individuos transxénicos, pola alteración dirixida dun xene en células xerminais. O que nos conduce ó mundo, xa popularizado, da 'terapia xénica', aínda nun incipiente grao de experiencia.

A metodoloxía da reacción en cadea da polimerasa (PCR), introducida por K. Mullis en 1985, e coa que, en esencia, se consegue a rápida multiplicación selectiva de fragmentos de ADN, veu a enriquece-las posibilidades de análise e manipulación do propio ADN.

Coas novas e as clásicas metodoloxías avanzouse significativamente no coñecemento dos procesos bioquímicos que permiten e controlan a división das células, e tamén a súa morte. De maneira que se demostrou que tanto a división das células como a súa morte biolóxica (coñecida como apóptose) son procesos nos que interveñen centenas de proteínas, moitas delas xa coñecidas, e constitúense en actividades metabólicas localizadas en diferen-

tes partes das células que se coordinan e regulan de acordo con sinais moleculares específicos; é dicir, coma calquera outra ruta metabólica, aínda que a súa complexidade sexa grande.

Por outra parte, os procesos de comunicación celular reveláronse na última década do milenio como rutas metabólicas básicas en todo tipo de células. O concepto clásico de regulación hormonal substituíuse polo de sinalización celular, xa que a diversidade de sinais, de tipos moleculares, que participan na comunicación entre células, incluso dentro dos mesmos tecidos, supera, con moito, a clásica proposta das coñecidas hormonas, afectando a todo tipo de procesos desde o metabolismo das pequenas biomoléculas ata a expresión xénica, pasando pola división e a morte das células.

Así mesmo, a capacidade de avanzar no coñecemento dos mecanismos moleculares da actividade celular levou a moderna Bioquímica a implicarse no estudio dos procesos de diferenciación celular, de especial interese en animais; tamén na caracterización da orixe molecular das enfermidades, de forma que o clásico coñecemento das doenzas ligadas a anomalías xenéticas, co uso das novas tecnoloxías, expandiuse á investigación dos acontecementos que, derivados ou non do envellecemento, conducen a patoloxías como o cancro (a máis notoria), as inmunodeficiencias ou patoloxías neurolóxicas como o Alzheimer, nas que se acadou un importante progreso.

A XEITO DE EPÍLOGO

Acabamos de ver, nunha sucinta presentación da evolución da Bioquímica no século que concluíu, cómo o esforzo de decenas de xeracións de investigadores de todo o mundo, especialmente da vella Europa e a nova América, permitiu engarzar miles de contribucións na cadea do coñecemento da Bioquímica, que desde os tateos dos primeiros anos desta centuria, alcanza, nos seus tempos postremeiros, unhas cotas que asombrarían os pioneiros das escolas alemanas.

O que semellaban retos dificilmente alcanzables a curto prazo, superáronse notablemente, non só no referido ó esclarecemento das diferentes rutas metabólicas dentro das células, senón na súa regulación e influencia polo contorno celular. Alcanzouse, ademais, un importante nivel no coñecemento da orixe molecular das enfermidades. Este aspecto e mailos progresos na manipulación da expresión xénica —ligada ó ADN recombinante e á metodoloxía del derivada, incluída a amplificación por PCR— permitiron ademais achega-los estudos bioquímicos a aplicacións sanitarias e biotecnolóxicas (producción dirixida de fármacos, de alimentos, etc.) de indubidable e concreto proveito socioeconómico.

Queda moito camiño aínda por andar, pero á vista do actual desenvolvemento da investigación bioquímica, non é aventurado predicir que en

poucos anos se teña un importante e minucioso coñecemento dos aspectos da Bioloxía dos seres vivos arriba apuntados.

ESPAÑA NA HISTORIA DA BIOQUÍMICA

Non é omisión, pola miña parte, a falta de mención de bioquímicos españois participantes no nacemento ou nos anos decisivos de crecemento da Bioquímica, coa excepción de Severo Ochoa. A investigación nesta e nas demais ramas da ciencia en España (sacando o milagre científico de Ramón y Cajal) foi absolutamente precaria nos pasados anos. O noso atraso científico, cimentado nas propias patoloxías sociais do noso país, nos séculos XVIII e XIX (no que non imos entrar), fixo pouco posible o afloramento e consolidación de escolas científicas nas que o traballo formativo sistemático e continuado cristalizara na formación de investigadores. Desgraciadamente, e como consecuencia disto, a situación prolongouse excesivamente no propio século XX.

O caso de Ochoa, coma o do propio Cajal, que el tanto admiraba, son notabilísimas excepcións. Polo que respecta a Ochoa, a súa consolidación como científico produciuse na súa longa estancia nos Estados Unidos de América, desde o ano 1939.

Evidentemente, neste artigo só se fai referencia ós nomes máis significativos, con algunha inevitable omisión, se cadra inxustificada. Pero mesmo así, na



Clase de anatomía de Ramón y Cajal. Santiago Ramón y Cajal foi o milagre científico dos primeiros anos do século XX en España. No ano 1919 concedéuselle o premio Nobel de Medicina e Fisioloxía.

ciencia bioquímica española non aparecen científicos relevantes ata entrados os anos sesenta. O que se pode denominar núcleo orixinario, do que ían derivar as principais escolas de formación de bioquímicos, iníciase arredor do grupo de científicos que en 1963 fundan a Sociedade Española de Bioquímica, cun aglutinador clave que foi Severo Ochoa.

O acto de fundación tivo lugar precisamente en Galicia e concretamente en Santiago de Compostela. Tratábase dun grupo pequeno, unha vintena na que destacaba a presenza de Alberto Sols. Este científico valen-

ciano foi o bioquímico español máis importante. Formado a finais dos anos cincuenta na magnífica escola de Carl Cori nos Estados Unidos, o seu laboratorio do Consello Superior de Investigacións Científicas de Madrid foi a escola de toda unha xeración de bioquímicos, ós que se lles abriron as portas ó mundo da caracterización das reaccións enzimáticas do metabolismo, especialmente de hidratos de carbono, ó que Sols fixo notables achegas.

Nos anos sesenta e setenta consolidáronse outros grupos, tanto no Consello de Investigacións Científicas como na Universidade. Referíndonos



No ano 1959 o bioquímico Severo Ochoa obtivo o premio Nobel de Medicina e Fisioloxía polos seus traballos sobre o código xenético.

ós máis significativos, debemos mencionar-las escolas de Margarita Salas, Eladio Viñuela, Julio Rodríguez Villanueva, Manuel Losada e David Vázquez. Estas escolas de bioquímicos españois tiveron, ademais, a peculiaridade de fomenta-la formación posterior ó doutoramento dos seus discípulos nos máis prominentes laboratorios americanos e europeos. De maneira

que nos anos oitenta o elenco de bioquímicos españois acadou un nivel extraordinario en número e categoría científica. A calidade dos seus traballos, realizados en España e fóra dela, contribuíu apreciablemente ós progresos sinalados na Bioquímica deses anos. A medida de todo isto dáa o feito de que a investigación bioquímica española, en produción científica, se atopa en sexto lugar no nivel internacional.

Por outra parte, a xeración dos oitenta foi o motor das xa importantes e diversas escolas de Bioquímica que cooperaron ó desenvolvemento científico das universidades españolas, fóra do foco central de Madrid.

Nos últimos anos deste milenio, sen embargo, a Bioquímica, e tal vez moitas outras áreas da ciencia en España, atópase nunha encrucillada desde a que se albisca un futuro sombrizo. Resaltaría uns aspectos que, ó meu entender, son determinantes: a organización científica, o financiamento e a participación da iniciativa privada.

Os centros do Consello de Investigacións Científicas (CSIC) e, mormente, as universidades, acaparan a iniciativa investigadora española, co cal nos atopamos cun deseño de organización absolutamente polarizado nos centros públicos. Se ben o CSIC conta cunha organización exclusivamente dedicada á investigación, non ocorre o mesmo coas universidades, onde a organización das actividades investigadoras está desprazada pola dependen-

cia da actividade docente, cuns claros problemas como son o desequilibrio nos graos de dedicación docente-investigadora e a falta dunha clara e específica regulamentación das actividades investigadoras. De maneira que no referente á organización científica, para a nosa desgracia, o elemento humano do problema segue coma nos anos setenta: dependencia absoluta da iniciativa persoal, sen que se teñan desenvolvido as infraestructuras organizativas de apoio e selección da calidade das investigacións. Ó tempo, as desproporcións entre dedicación docente e investigadora agrávanse coa ampliación esaxerada de universidades e titulacións nos anos noventa. A docencia acapara gran parte dos horarios, non se produciu un adecuado e proporcional aumento do persoal que tenda a asemella-la dedicación docente española coa media dos demais países desenvolvidos. A anécdota tirada das memorias de Ochoa ilustra esta situación: comentaba Ochoa que Carl Cori tivo que paraliza-las súas investigacións cando na Facultade de Medicina de Washington tivo que dar durante o ano corenta clases a estudantes de Medici-

na, cando hoxe en día o labor docente dun profesor universitario español anda polos dous centenares de horas anuais.

O financiamento, sen embargo, mellorou sensiblemente tanto no Estado como nos gobernos autonómicos. Isto encerra unha certa contradición porque as precarias condicións de traballo dos investigadores destinatarios non propician un axeitado aproveitamento dos recursos.

Por último, é lamentable a escasísima incidencia da iniciativa privada no financiamento e participación na actividade investigadora. Nin no referente a contratación nin na achega financeira, en xeral, se asoma á metade da media dos países europeos. Partidas orzamentarias dedicadas á actividade investigadora que, no remate deste milenio, escasamente alcanzan o 1 % do PIB (menos da metade da media europea), con participacións privadas que non chegan ó 10 % do investimento público, xustifican a impresión antes apuntada dunha perspectiva desalentadora. Un país sen ciencia ten moi comprometido o seu futuro benestar.



A XENÉTICA NO SÉCULO XX

Ángel Carracedo*
 Universidade de Santiago
 de Compostela

A Xenética pode ser considerada plenamente unha ciencia deste século. E isto é aínda máis certo se lembramos que o xenial descubrimento de Mendel pasou desapercibido ata que foi redescuberto no ano 1900. A esta ciencia aínda moza chegoulle un só século para producir unha auténtica revolución no reino da Bioloxía e da Medicina. Pero foi nos últimos quince anos cando tal revolución se fixo patente.

Faremos neste capítulo un breve percorrido pola historia da Xenética neste século e remataremos cos espectaculares descubrimentos dos últimos anos que culminaron co desciframento completo do mapa do xenoma humano, o que abre novas perspectivas para o coñecemento e tratamento das enfermidades.

O COMEZO DA XENÉTICA COMO CIENCIA: GREGOR JOHANN MENDEL

A herdanza dos caracteres físicos ten sido obxecto de curiosidade e inte-

rese desde hai ben tempo. Os antigos hebreos, os gregos, os exipcios, os chineses e os eruditos da Alta Idade Media (particularmente a Medicina árabe), describiron moitos fenómenos xenéticos e propuxeron numerosas teorías procurando a súa explicación, a maioría delas erróneas. Foi no século XIX cando a Bioloxía se liberou da súa actitude especulativa e se transformou nunha ciencia verdadeiramente experimental.

A herdanza de caracteres iniciou o seu estudo coa hibridación de plantas, pero resultaba de imposible explicación para os científicos por mor da complexidade dos fenómenos xenéticos nos modelos que se usaban. Eran os botánicos entón os que intentaban entende-la herdanza.

Ó mesmo tempo, os zoólogos estudiaban e debatían con paixón as ideas evolutivas. En 1859, Charles Darwin publicou a súa obra fundamental *Sobre el origen de las especies*, resultado de vinte e cinco anos de estudo e baseada nunha enorme cantidade de

* Catedrático de Medicina Legal.

datos. A obra de Darwin supuxo unha auténtica revolución que non se limitou ó campo biolóxico pois implicou tamén problemas relixiosos e filosóficos fundamentais.

Segundo a teoría da evolución biolóxica de Darwin, as formas orgánicas agora existentes proceden doutras distintas que existiron no pasado, a través dun proceso de descendencia con modificación. Darwin reuniu unha evidencia proveniente de moi diversas disciplinas de investigación biolóxica a prol do feito evolutivo e logrou que esas disciplinas converxeran no ámbito da explicación nun proceso natural: a selección natural. Co obxecto de impoñer estas dúas revolucionarias concepcións, Darwin introduce unha nova e radical perspectiva: o pensamento poboacional. En contraste coa visión esencialista dominante no seu tempo, a variación individual, lonxe de ser trivial, é para el a pedra angular do proceso evolutivo. Son as diferencias existentes entre os organismos no seo dunha poboación as que, ó se magnificar no espazo e no tempo, constitúen a evolución biolóxica. A teoría da evolución foi case inmediatamente aceptada pola comunidade científica, pero a da selección natural tivo que agardar ata a terceira década do século XX para a súa aceptación xeral.

O esquema de Darwin carecía dunha explicación para a orixe e o mantemento da variación xenética sobre a que opera a selección. Anos despois de *Origen de las Especies*, en 1868, Darwin intenta explica-lo fenó-

meno da herdanza a través da hipótese provisional da panxénese, resultado dun intenso traballo de recompilación e interpretación conceptual dun gran número de observacións e experimentos, que se recollen nun tratado de dous volumes (*The variation of animals under domestication*). Nela postula a existencia de partículas hereditarias ou de reprodución, que chamou xémulas. Contrariamente ás conclusións de *Origen de las Especies*, a súa hipótese da herdanza resultou errónea, como demostrou, entre outros, o seu sobriño Francis Galton. De calquera xeito, o seu traballo estimulou o pensamento xenético.

A enorme controversia sobre as teorías evolucionistas, que se



Figura 1. Gregor Mendel (1822-1884).

prolongou ó longo de boa parte do século, encerraba a dificultade engadida do entón descoñecido mecanismo da herdanza dos caracteres. É neste contexto onde se desenvolve a obra de Mendel (figura 1), xustamente considerado pai da Xenética.

Gregor Johann Mendel naceu en Heizendorf (Austria) o 22 de xullo de 1822. Logo de graduarse, ingresou na orde de Santo Agostiño en 1843, e ordenouse sacerdote en 1847 co nome de Gregorio. En 1853 regresou ó mosteiro de Brünn e finalmente foi nomeado profesor de Física e Historia Natural.

En 1854 comezou a súa famosa serie planeada de investigacións verbo da herdanza dos híbridos vexetais, que deu a coñecer ante a Sociedade dos Naturalistas de Brünn no artigo “Versuche über Pflanzenhybriden”, que practicamente pasou inadvertido.

Despois de ser elixido en 1868 abade do mosteiro de Brünn e de toda a orde en Austria, Mendel faleceu nese convento o 6 de xaneiro de 1884.

O éxito de Mendel debeuse, por unha parte, á súa extraordinaria planificación dos experimentos, a súa meticulosidade na aplicación do método científico e os seus coñecementos, pero tamén á elección dunha especie sinxela, moi apta para a súa investigación (*Pisum sativum*) e á selección de caracteres obxectivos e simples. Outra das claves do éxito de Mendel foi a aplicación racional do método cuantitativo. Nos oito anos que duraron as súas

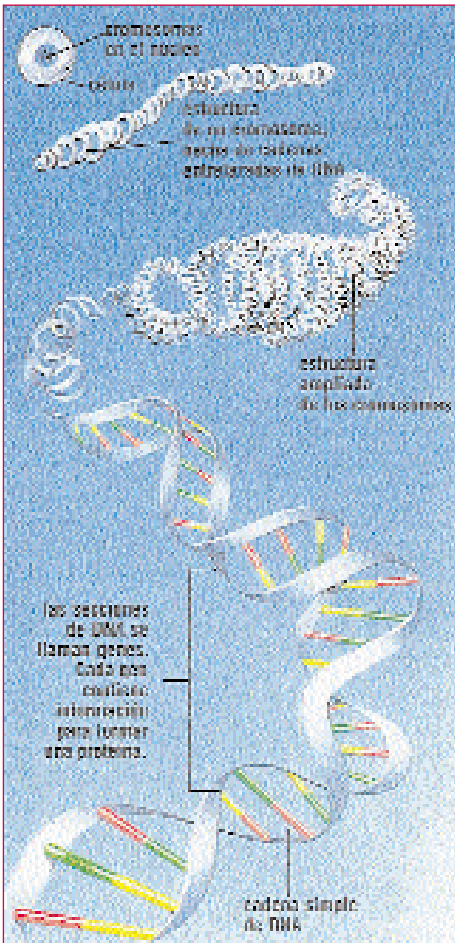
experimentacións realizou uns dez mil cruzamentos.

A análise matemática dos datos obtidos levouno a tres conclusións básicas, hoxe coñecidas como as leis de dominancia, segregación e independencia e que constitúen os piares sobre os que ó longo deste século se edificou a Xenética.

Antes do redescubrimento da obra de Mendel, no espectacular desenvolvemento científico de finais do século XIX, outros achados contribuíron ó avance da nova ciencia; cabe cita-lo dos cromosomas e os seus movementos na división celular, descritos por Flemming (1879-1881), a hipótese do seu papel na herdanza (Rabl, 1884), a mitose (Van Beneden, 1884) e a diferenciación das liñas celulares xermlinal e somática (Weismann, 1882).

No ano 1900, experimentando en híbridos vexetais, tres científicos, De Vries, Correns e Tschermak chegaron a un tempo, pero independentemente, a redescubri-lo traballo de Mendel.

Hugo de Vries experimentou con prímulas as leis de Mendel e comprobou a súa veracidade, atribuíulle a Mendel a lei da segregación e demostrou a existencia de mutacións que se herdaban á descendencia. De Vries chamoulles ás mutacións ‘cambios ó chou nos xenes’. Carl Correns comprendeu o alcance dos postulados de Mendel e chamoulles ós principios da herdanza Leis de Mendel e enunciounas como hoxe as coñecemos. Pola súa banda,



Cada cromosoma mide uns 2 cm de longo. Axéitanse nos diminutos núcleos ó envolverse sobre si mesmos. (Tomado de *Quest*. Edit. Rialp).

Erich von Tschermak logrou que volver editarse a obra de Mendel nas series de Ostwald, *Klassiker der exakten Wissenschaften*.

A XENÉTICA COMO CIENCIA: A TEORÍA DO XENE

Johansen, en 1905, corroborou as Leis de Mendel e demostrou o compoñente xenético e ambiental da variación fenotípica; concluíu ademais que o compoñente ambiental non se herda. Introduciu outrosí os termos xene, alelo, fenotipo e xenotipo.

En 1906, Bateson bautizou a nova ciencia que estudiaba, a herdanza dos caracteres, como Xenética.

Aínda que a finais da primeira década do século xa se coñecía bastante dos cromosomas, era moi difícil relacionalos cos xenes. Tamén era difícil relacionar cos cromosomas os caracteres claramente herdables que se coñecían. Karl Landsteiner descubriera o grupo ABO no ano 1900 (se ben a súa herdanza non foi demostrada ata algún tempo despois), Archibald Garrod descubriu en 1909 que a alcaptonuria se debía ó fallo dunha enzima. ¿Serían os xenes enzimas?

A solución a todos estes enigmas proporcionouna Thomas Hunt Morgan, que comezou o seu traballo na Universidade de Columbia en 1909. Morgan elixiu como ferramenta de traballo a mosca do vinagre, *Drosophila melanogaster*, que tiña como vantaxe a súa morfoloxía simple e rápida reprodución, xa que cada dez días se produce unha nova xeración. Xa en 1910, Morgan puido determina-la herdanza ligada ó cromosoma X da cor dos ollos na *Drosophila*. Iso significaba que os xenes tiñan que estar nos cromosomas.

Seguindo con experimentos en *Drosophila*, o grupo de Morgan demostrou que os xenes estaban contidos nos cromosomas nunha disposición lineal e que polo menos unha serie de caracteres dependentes do cromosoma X se transmitían ligados. Daquela, a lei da independencia de Mendel non se cumpría para algúns caracteres, se ben mesmo nos caracteres ligados empezaron a atoparse excepcións ó mecanismo de ligamento.

En 1913, A. H. Sturtevant escribiu un artigo revolucionario na Xenética e que marcou o seu desenvolvemento neste século "The linear arrangement of six sex-linked factors in *Drosophila*, as shown by their mode of association". Sturtevant puido comprobar que os xenes que se trasmitían xuntos se encontraban no mesmo cromosoma e que os que se comportaban independentemente estaban en cromosomas distintos. Mendel tivera fortuna no seu experimento pois os xenes que estudou estaban en cromosomas distintos ou moi distantes dentro do mesmo cromosoma.

Lentamente Sturtevant e os seus sucesores foron construíndo un mapa de ligamento para a *Drosophila* e axiña moitos dos seus caracteres físicos transmisibles puideron ser localizados de forma precisa.

Sturtevant demostrou tamén en 1925 a ocorrencia de mutacións que prognosticara De Vries. O estudo da mutación foi desenvolvido a fondo por H. J. Muller, quen, en 1927, demostrou

a acción mutaxénica dos raios X, inaugurando así a longa lista de xenetistas laureados polo premio Nobel (recibido en 1946).

OS PROBLEMAS POLÍTICOS DO DESENVOLVEMENTO DA XENÉTICA

A Xenética foi obxecto desde os seus comezos dunha utilización ideolóxica que moitas veces supuxo unha limitación ó seu progreso. Este foi o caso do evolucionismo tan fortemente contestado por extremismos relixiosos durante boa parte deste século, pero tamén os novos coñecementos crearon problemas.

Sir Francis Galton, primo de Darwin e que tiña en común con Mendel nacer o mesmo ano e a súa paixón polas matemáticas, foi o precursor da biometría moderna, o primeiro en desenvolver estudos con xemelgos pero tamén o fundador da eugenésia.

Galton, coma a maioría dos científicos victorianos, era inmensamente rico e interesouse na herdanza das calidades, especialmente na calidade de xenio (un exemplo para el eran as familias de xuíces). En 1908 creou a Eugenics Education Society. En 1911 finou sen descendencia e deixoulle toda a súa fortuna ó Laboratory for National Eugenics da Universidade de Londres. En 1920, este laboratorio dividiuse en dous, o laboratorio Galton da Universidade de Londres, que desde entón se dedicou á investigación xenética, e a Sociedade de Eugenésia, que

tiña a misión, perseguida durante moitos anos, de mellora-la raza humana.

Simultaneamente, Lombroso enunciaba a súa teoría, non refutada ata moitos anos despois, sobre o determinismo físico da criminalidade, a par que un movemento euxenésico cruzou o mundo culminando cos horrores da Alemaña nazi.

Do extremo determinismo físico e xenético pasouse ó extremo determinismo cultural. A Stalin non lle agradaba a idea de que algo, aínda que só fose a cor dos ollos da mosca do vinagre, puidese estar determinado pola Bioloxía. Marx insistira en que cambiando o ambiente era posible cambialo todo. Por forza o mendelismo e o morganismo ¡tiñan que ser un complot capitalista!

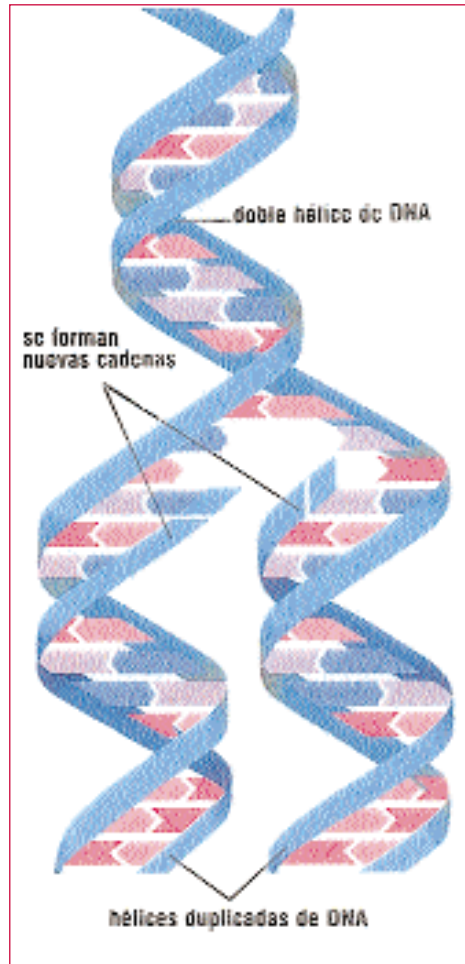
O ministro de agricultura de Stalin, Trofim Denisovitch Lysenko, comezou unha campaña contra xenes e cromosomas. Varios xenetistas foron arrestados, entre eles Vasilov, un dos mellores, quen foi condenado en 1940 por sabotaxe contra a agricultura polas súas ideas sobre a xenética e morreu nun campo de prisioneiros en 1943.

A XENÉTICA MOLECULAR

Un momento decisivo na evolución da Xenética veu da man da Bioquímica e levou ó coñecemento molecular do xene.

Quizais este momento se iniciou contra 1940, cando Beadle decidiu

buscar un material de experimentación máis axeitado cá *Drosophila* e elixiu o xénero *Neurospora* que é un sistema biolóxico máis simple aínda cá *Drosophila* e cun tempo de reprodución máis reducido. En 1941, mediante a



Desdoblamento dunha cadea (Tomado de *Quest.* Edit. Rialp).

inducción de mutacións, Beadle e Tatum demostraron que a función dos xenes era a de controla-la produción de determinadas enzimas, e estableceron o aforismo de “un xene-unha enzima”, polo que se determinaba en gran medida a función real dos xenes.

Despois dos fungos foron as bacterias as escollidas como material de investigación. En 1944, Avery, McLeod e McCarthy, traballando con dúas estirpes de pneumococo (que como os guisantes de Mendel eran lisos ou rugosos), demostraron que o material xenético non era unha proteína senón os ácidos nucleicos. Quedaba por probar se isto, ademais de nas bacterias, ocorría no resto dos organismos vivos.

Precisáronse case dez anos para que Hershey e Chase (1952) demostraran que tamén en virus o ácido desoxirribonucleico (ADN) era o axente responsable da herdanza. Coa demostración, pouco tempo despois, de que isto tamén sucedía en animais superiores, todo se concentrou no ADN. Estaba claro que era o único material que se transmitía de feito de xeración en xeración.

Pero ¿como unha substancia tan simple podía copiarse a si mesma, codificar unha información tan enorme e pasa-la información dunha a outra xeración? Había só unha fonte de variación no ADN, as catro bases nitrogenadas: adenina, guanina, timina e citosina. O número de bases variaba de

especie a especie pero había sempre a mesma proporción de A a T e de G a C.

A principios da década dos cincuenta, un biólogo americano, James Watson, foi a Cambridge onde lle encomendaron traballar na bioquímica dos ácidos nucleicos, tema que a el non lle gustaba. Pronto coñeceu a Francis Crick, un físico graduado na Universidade de Londres. Ambos estaban interesados na estrutura das moléculas biolóxicas e acudiron a modelos cristalográficos desenvolvidos por outros investigadores e principalmente por Wilkins. Watson e Crick estudaron o patrón de difracción de raios X da molécula de ADN e publicaron en *Nature*, no ano 1953, unha nota curta de só unha páxina na que se ofrecía un modelo moi simple e claro da estrutura molecular do ADN: unha dobre hélice, algo así como unha escaleira de caracol (figura 2). De repente todo comezaba a encaixar: emparellábanse as adeninas coas timinas e as guaninas



Figura 2. Modelo de Crick e Watson do ADN da dobre hélice.

coas citosinas. A autoduplicación era adiantada no propio artigo de *Nature* (posteriormente Kornberg demostrou *in vitro* a autoduplicación), pero quedaba unha cuestión: ¿como estaba codificada a información xenética no ADN?

Todo o mundo asumía que o ADN cromosómico era coma un libro con letras (as catro bases) que contiña as instrucións para facer unha mosca ou un ser humano. O seguinte reto era descifra-lo código.

Pero en seguida se suceden os descubrimentos. En 1958 Matthew Meselson e Franklin Stahl demostraron que o ADN se replicaba semiconservativamente. O problema de cómo a secuencia do ARN se traduce en secuencia proteica empezaba a resolverse.

Outra volta Watson e Crick, traballando con mutáxenos químicos en ADN de bacteriófagos, observaron que se se inserían unha ou dúas bases (A, T, C, G) no ADN dos fagos, estes non crecían, pero cando si se inserían, tres medraban case normalmente. Suxeriron que o código xenético se lía en grupos de tres letras, de tal modo que se se inserían unha ou dúas toda a mensaxe quedaba distorsionada.

Toda a información xenética, codificada nunha linguaxe simple con palabras de tres letras e un alfabeto de catro letras, albergábase nos cromosomas do núcleo e as proteínas sintetizábanse no resto da célula, pero ¿como se transfería a información aí?

De contado se comprendeu cómo era o fluxo da información xenética (figura 3), o que Watson chamou o dogma central da Bioloxía: o ADN transcríbese a outro ácido nucleico ARN que é o que pasa ó citoplasma para fabrica-las proteínas.

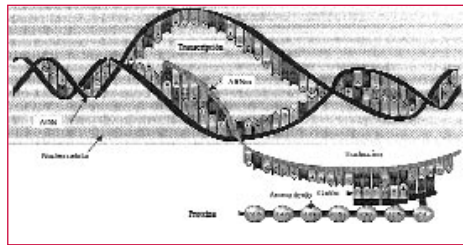


Figura 3. Conversión da información xenética.

Ese mesmo ano, 1958, Arthur Kornberg illa a polimerasa do ADN e un ano despois Severo Ochoa illa a ARN polimerasa, descubrimento fundamental co que se inicia a elucidación do código. En 1961, Sidney Brenner, François Jacob e Meselson descubriron o ARN mensaxeiro e finalmente, en 1966, Marshall Nirenberg e Har Gobind Khorana terminan de desvela-lo código xenético.

Simultaneamente a estes descubrimentos, Seymour Benzer publica en 1955 o seu primeiro traballo sobre a estrutura fina do locus rII no fago T4. En 1961 Jacob e Jacques Monod propoñen o modelo do operón como mecanismo de regulación da expresión xénica en procariontas.

O código xenético era sorprendentemente universal, case o mesmo

desde bacterias a seres humanos. Ademais, como demostraron Charles Yanofsky e o seu equipo en 1964, era colineal: os xenes estaban aliñados un xunta outros, a mensaxe do ADN era lida directamente ó ARN e isto determinaba a orde dos aminoácidos nunha proteína.

Os setenta presencian a chegada das técnicas de manipulación do ADN. En 1970 íllanse as primeiras endonucleasas de restricción, e H. Temin e D. Baltimore descubren a transcriptasa inversa. En 1972 constrúese no laboratorio de Paul Berg o primeiro ADN recombinante *in vitro*. En 1975, Ed Southern descobre o Southern blotting e a tecnoloxía de análise electroforética de fragmentos pequenos de ADN. O ano 1977 foi pródigo: publícanse as técnicas de secuenciación do ADN de Walter Gilbert e de Frederick Sanger e ese mesmo ano varios autores descubren que os xenes eucariotas se encontran interrompidos (intrones) e que o ADN da maior parte dos xenomas é ADN non codificante.

Pero o máis espectacular estaba por chegar cos descubrimentos da década dos oitenta que culminaron co Proxecto Xenoma Humano.

O DESENVOLVEMENTO DAS ÚLTIMAS DÉCADAS: O PROXECTO XENOMA HUMANO

Os esforzos económicos e científicos multiplicáronse nas últimas décadas ante a evidencia da revolución que

para a Medicina e a Bioloxía supoñía a xenética molecular.

Sería imposible enumerar tódolos logros científicos destes últimos vinte anos que correron paralelos ós avances tecnolóxicos. Limitarémonos a sinalalos que, na nosa opinión, tiveron maior repercusión.

O primeiro de todos foi un gran descubrimento teórico, realizado en 1985 polo equipo de Alec Jeffreys da Universidade de Leicester. Este grupo, analizando o ADN de secuencias intrónicas (non codificante), descubriu que estaba organizado de forma repetitiva e que esas secuencias repetidas eran extraordinariamente polimórficas, isto é, que o número de repeticións de cada secuencia repetitiva variaba enormemente entre as persoas. Este feito, xunto co descubrimento posterior da variación en secuencias repetitivas pequenas (microsatélites), posibilitou a realización de mapas xenéticos e o descubrimento do locus xénico (é dicir, do lugar do cromosoma) do que dependían numerosas enfermidades e características xenéticas.

Sen embargo, malia estes descubrimentos, a análise da variación xenética e a análise de ADN en xeral seguía sendo lenta e tediosa e baseábase nos métodos descritos por Southern empregando sondas marcadas con isótopos radioactivos.

Os científicos buscaban entón un método para replicar anacos de ADN millóns de veces, de modo que a súa análise se simplificase. As polimerasas

de ADN podían facer ese papel, pero o problema era que unha etapa intermedia para a replicación do ADN consiste en separa-las dúas febras do ADN (que é unha cadea dobre) e isto había que facelo con calor, de modo que as polimerasas animais se desnaturalizaban. Un investigador da compañía Cetus, Kary Mullis, tivo unha idea xenial: ¿como solucionaban o problema da replicación de ADN as bacterias que vivían en augas termais a elevadísimas temperaturas? En 1986, el mailo seu equipo conseguiron illar unha polimerasa termoestable derivada da bacteria *Thermus aquaticus* e conseguiron automatiza-la técnica de reacción en cadea da polimerasa (PCR).

A PCR supuxo unha gran revolución tecnolóxica en tódolos campos da Xenética. Paralelamente, os avances tecnolóxicos foron considerables, destacando a aplicación á secuenciación de ADN da tecnoloxía de fluorocromos (que permitiu substituí-lo uso de isótopos), o descubrimento da electroforese capilar e a robótica. Todo iso permitiu finalmente a fabricación de secuenciadores automáticos de gran fiabilidade e rapidez con capacidade de secuenciar miles e miles de bases por día.

Os avances tecnolóxicos culminaron co descubrimento recente dos chips de ADN (*DNA microarrays*) que permiten a inmovilización ou a síntese *in situ* de decenas de miles de sondas nunha pequena superficie, o que posibilita estudos de expresión ou de secuencia a grande escala. Isto supón un adianto

tecnolóxico de tal magnitude que afectará a toda a Xenética do novo milenio.

O Proxecto Xenoma Humano naceu da innovación tecnolóxica aínda que finalmente o investimento realizado nel posibilitou o desenvolvemento desta innovación.

En 1984 e 1985, Robert Sinsheimer e Renato Dulbecco expuxeron a súa idea do importante que sería secuenciar todo o Xenoma Humano. Ambos chegaron á mesma conclusión a través de camiños ben distintos e tendo en común, unicamente, a súa proximidade no tempo e que os dous residían en California.

A finais de 1985 ocorrúeselle a mesma idea a Charles Delisi, que traballaba para o Departamento de Enerxía dos Estados Unidos (DOE), se ben se encontraba nunha situación que lle permitiu convertelo nun programa de investigación governamental. En efecto, os laboratorios do DOE estaban en crise, motivada en gran parte porque o seu traballo tiña menos interese ante a caída económica e militar do bloque soviético e era unha oportunidade para relanzalos.

Unha vez emprendido o programa do DOE, a rivalidade entre este e os institutos nacionais de saúde estadounidenses (NIH) conduciu o Proxecto Xenoma ás primeiras páxinas de *Science*, *Nature* e as principais revistas, converténdoo en obxecto dunha controversia aparentemente interminable.

A idea inicial era secuenciarlo xenoma humano, pero iso esixía unha serie de logros previos, como distintos mapas xenéticos, incluíndo os dos organismos dos que mellor se comprendía a súa xenética e era máis accesible ós experimentos cás dos seres humanos.

O Proxecto Xenoma redefiniuse entre 1986 e 1988 para englobar tres obxectivos técnicos: o primeiro, obter un mapa de ligamento (en 1995 xa dispoñiamos de mapas de ligamento de certa densidade); o segundo, obter un mapa físico para facilita-lo exame directo do ADN producindo coleccións ordenadas de fragmentos clonados de ADN, e o terceiro, que era o obxectivo final do proxecto, obter a secuencia completa do ADN humano.

Desde o principio estaba claro que, para acadar estes obxectivos técnicos, o Proxecto Xenoma necesitaba recursos. Se ben o esforzo de financiamento público foi principalmente norteamericano (que o custean desde 1990), tamén foi secundado por algúns países europeos, a propia Unión Europea, Xapón e Canadá.

Ó principio da década dos noventa o progreso era lento, pero antes de 1996 xa se lograra secuenciarlo xenoma de *Saccharomyces cerevisiae* e *Escherichia coli*. A primeira secuencia completa do xenoma dun organismo multicelular, o *Caenorhabditis elegans*, foi completada a finais de 1998.

A data prevista para secuenciarlo arredor de tres mil millóns de bases do

xenoma humano e completa-lo proxecto era o ano 2025 en 1990, que pasou ó 2010 en 1995, pero todo foi máis de prisa do esperado, e non só polos avances tecnolóxicos.

En 1997, a posibilidade aberta pola oficina de patentes americana de permiti-la patente de xenes ou parte de xenes, e o impacto que isto ía ter na industria biomédica e farmacéutica, conduciu a un consorcio privado, a compañía Celera Genomics, a entrar na carreira pola secuencia do xenoma. Este grupo utilizou unha estratexia distinta de análise da do consorcio público, e nunha carreira trepidante chegaron de forma simultánea á conclusión do proxecto.

O 26 de xuño do ano 2000, o presidente dos Estados Unidos, Bill Clinton, o primeiro ministro británico, Tony Blair, o presidente de Celera Genomics, Craig Venter e mailo director do Proxecto Xenoma Humano, Francis Collins, anunciaron a consecución da secuencia completa do xenoma humano e a chegada dunha nova era para a Medicina.

O DESENVOLVEMENTO DAS DISTINTAS ESPECIALIDADES DA XENÉTICA

XENÉTICA DE POBOACIÓNS

Ó longo deste século non só a Xenética clínica se beneficiou dos avances na Xenética; moitas outras disciplinas e aplicacións desta ciencia foron xurdindo ó longo destes anos. Entre

elas cabe sinala-la Xenética de poboacións, a Antropoloxía, a Xenética médica, a Immunoxenética e a Xenética forense. Imos dar conta da súa evolución histórica brevemente.

Os individuos que pertencen a unha mesma especie difiren nunha multitude de características, moitas das cales son hereditarias. A finalidade máis importante da Xenética de poboacións consiste en comprende-la natureza e orixe desas diferencias hereditarias.

Canda o redescubrimento do mendelismo, a principios de século, desenvolveuse a teoría matemática da evolución, baseada na Xenética mendeliana, debida principalmente a R. A. Fisher, J. B. S. Haldane e Sewall Wright. Unha gran cantidade de traballos posteriores baseáronse nos principios establecidos por eses tres eminentes científicos. A Xenética de poboacións experimental, iniciada por S. S. Chetverikov —quen, traballando con *Drosophila* foi o primeiro que identificou grandes fontes de variabilidade xenética— e continuada por Theodosius Dobzhansky e E. B. Ford entre outros, proporcionou observacións básicas realizadas en poboacións humanas e de laboratorio, que permitiron comproba-la validez das teorías evolutivas.

Neste sentido, a Xenética de poboacións permitiu aclarar un conflito que xurdira con Darwin: o da natureza da variación sobre a que se produce a evolución. Mentres que Darwin

puxo énfase na evolución gradual e continua que transforma a variación dentro das poboacións en variación entre poboacións, outros, como Thomas Huxley e, inicialmente, Galton, crían que a evolución procedía de forma rápida e descontinua, polo que a selección usaba primariamente variación descontinua, e non tiña ningún valor evolutivo a variación continua. Co mendelismo, este antagonismo acentuouse ata se converter en conflito entre os mendelianos por un lado, que apoiaban a evolución descontinua, e os biométricos polo outro, que estudiaban cuantitativamente a variación nos caracteres físicos e crían na evolución darwiniana. Os primeiros estaban capitaneados por Bateson, Morgan e Hugo de Vries, mentres que Karl Pearson e W. F. R. Weldon (xunto con Galton, que se uniu a eles ideoloxicamente despois) foron os principais biométricos.

En 1908 formúlase a lei de Hardy-Weinberg que relaciona as frecuencias xénicas coas xenotípicas en poboacións panmícticas e que é a verdadeira pedra angular da Xenética de poboacións. Entre 1918 e 1932, a longa polémica entre biométricos e mendelianos resólvese finalmente: Ronald Fisher, Sewall Wright e J. B. S. Haldane levaron a cabo a síntese do darwinismo, o mendelismo e a biometría e fundan a Teoría da Xenética de Poboacións. Fisher demostra en 1918 que a variación cuantitativa é unha consecuencia natural da herdanza mendeliana.

A integración da Xenética de poboacións con outros programas de investigación evolutiva, tales como a Bioloxía de poboacións experimental, a sistemática, a Paleontoloxía, a Zooloxía e a Botánica, produciron durante o período de 1937-1950 a Teoría Sintética ou Neodarwinista da evolución. Nela prodúcese a maior integración de disciplinas, nunca antes alcanzada, dunha teoría evolutiva.

O descubrimento dos polimorfismos electroforéticos e a súa aplicación en 1966 por R. Lewontin, J. L. Hubby e H. Harris ó estudio da variación alozímica das poboacións naturais, permitiu obter as primeiras estimacións da variación xenética de infinidade de especies.

Dúas teorías contrapostas intentan explica-lo mantemento dos polimorfismos moleculares nas poboacións e, en xeral, a evolución molecular: a teoría neutralista da evolución molecular e a teoría seleccionista. A primeira mantén que a maior parte da evolución molecular é neutra, é dicir, que a maioría das variantes moleculares son selectivamente equivalentes e non afectan a capacidade reproductiva dos organismos (Kimura 1968, 1983). Desde o punto de vista seleccionista, suponse que a maioría dos polimorfismos están mantidos nas poboacións pola acción da selección natural equilibradora e a evolución molecular sería o froito da fixación de mutantes vantaxosos pola acción da selección positiva (Lewontin, 1974).

Sen embargo, o debate entre seleccionistas e neutralistas durante as últimas décadas non conseguiu esclarecer de forma definitiva o significado evolutivo da variabilidade xenética molecular, se ben é certo que se produciu unha certa aproximación entre as dúas escolas.

Hoxe en día admítase que unha certa parte (seguramente a maioría) dos cambios moleculares son neutros e o seu destino está gobernado nas poboacións naturais pola mutación e a deriva xenética, pero que existen tamén evidencias experimentais da acción da selección natural sobre a variabilidade molecular.

Xa na última década, o descubrimento dos polimorfismos de ADN nuclear e de ADN mitocondrial produciron unha revolución na xenética de poboacións humanas e está permitindo trazar cunha precisión antes inimaxinable modelos de migracións desde os albores da humanidade ata tempos recentes.

O estudio de polimorfismos xenéticos está permitindo clarifica-la historia evolutiva das poboacións humanas. Tódolos datos de polimorfismos xenético-moleculares apoian a hipótese de que a poboación africana constitúe a poboación humana máis antiga ó igual cás análises de ADN mitocondrial (hipótese da Eva africana) que é unha molécula que se herda exclusivamente pola vía materna, moi apropiada para este tipo de análise e tamén para a de restos óseos antigos.

A orixe do home e a posición que ocupa na natureza é un problema que ten recibido a atención de pensadores e científicos durante longo tempo. Os avances en xenética que se sucederon durante a última centuria estannos achegando progresivamente á súa resolución.

A XENÉTICA NA MEDICINA

Aínda que o interese polas enfermidades xenéticas data de antigo, a Xenética médica desenvolveuse desde o punto de vista científico enteiramente no século XX e pódese dicir que comezou con el vinculada á Inmunoematoloxía co descubrimento do grupo ABO por Karl Landsteiner en 1900 e a demostración da súa herdanza mendeliana un tempo despois, e co descubrimento da herdanza da alcaptonuria por Archibald Garrod en 1901.

Se ben a Inmunoematoloxía, e mais unha especialidade derivada dela, a Xenética forense, tiveron un auxe importante ata a primeira metade do século, o seguinte paso importante na Xenética médica propiamente dita produciuse en 1956, cando Tjio e Levan por unha parte e, de forma independente, Ford e Hamerton, demostraron con claridade e por primeira vez que o número de cromosomas no home era de 46 e non de 48 como se crera ata entón. Tres anos despois Lejeune en París e Ford e Jacobs no Reino Unido demostraron que en pacientes co síndrome de Down había alteracións cromosómicas claras e recoñecibles.

A Xenética médica estivo ligada á Citoxenética ata finais deste século, cando o coñecemento do xenoma produciu unha revolución de tal natureza nela que afectou non só a Xenética, senón toda a Medicina.

A cuestión é que a Citoxenética pasou a ter unha importancia cuantitativamente menor no diagnóstico da enfermidade xenética comparado coa análise de diferencias sutís no ADN por técnicas moleculares. O outro gran cambio é que a Xenética se interesou non só pola enfermidade puramente xenética, senón pola enfermidade cun compoñente xenético e outro ambiental, como por exemplo o cancro, que ás veces ten un compoñente hereditario, pero que, sobre todo, é un chorro de acontecementos en xenes cunha análise que ten grande importancia para o seu diagnóstico, prognóstico e mesmo o seu tratamento.

Pero ó mesmo tempo cambiou o espectro da enfermidade e o impacto clínico da doenza xenética incrementouse de continuo ó longo deste século, e é previsible que se siga incrementando no vindeiro. Estímase que nos países occidentais a porcentaxe de mortes en idade pediátrica atribuíble a causas xenéticas pasou do 10 % a principios de século a máis do 40 % na actualidade. Entre o 3 % e o 7 % dos acabados de nacer sofren un trastorno xenético; destes, o 0,4 % son cromosopatías, o 1,1 % enfermidades monoxenéticas e o resto enfermidades multixenéticas.

Daquela, o espectro da enfermidade xenética cambiou tamén notablemente e os trastornos cromosómicos pasaron a ser menos importantes cós cambios xenéticos máis sutís (mutacións), que actualmente representan o 80 % dos diagnósticos xenéticos. Esta porcentaxe incrementárase máis como consecuencia do coñecemento do xenoma humano: actualmente coñécense uns oito mil xenes susceptibles de mutacións que orixinen trastornos monoxénicos. Hoxe en día poden analizarse molecularmente máis de mil destas enfermidades pero é de esperar que nesta década case tódolos trastornos xenéticos poidan ser analizados.

A segura introducción de métodos máis rápidos e baratos de *screening* da man dos chips de ADN fará máis rápido e factible o estudo xenético naquelas afeccións nas que os beneficios en termos de prevención sexan importantes.

O avance dos nosos coñecementos sobre os compoñentes moleculares que constitúen a base dos diferentes procesos biolóxicos e a súa aplicación á enfermidade deu lugar á creación do termo Medicina molecular e a Xenética médica estase integrando neste novo concepto. Xa neste momento non hai ningunha especialidade médica que non se vira inundada por este tipo de conceptos, pero sen dúbida a culminación do Proxecto Xenoma Humano e o gran desenvolvemento tecnolóxico marcará un punto de inflexión e terá unha gran repercusión práctica na Medicina na próxima década.

Estes avances afectarán principalmente a análise do compoñente xenético ou de reacción individual da enfermidade (non só a xenética ou complexa senón a enfermidade de causa basicamente non xenética) e afectará o diagnóstico, prognóstico e tratamento da maioría das enfermidades.

Os coñecementos sobre o xenoma que se están adquirindo de forma vertixinosa orixinarán (xa están orixinando) unha demanda asistencial progresiva a medida que se encontren marcadores de utilidade clínica probada. Nos últimos cinco anos, as demandas de análises moleculares están medrando máis dun cen por cento por ano e é de esperar que esta porcentaxe se incremente ou mantéña. A información xenética que se xera vai suscitar unha serie de problemas prácticos e tamén éticos ós que hai que ir buscando unha resposta axeitada, tanto desde o punto de vista médico e de planificación sanitaria coma educativo e social.

A nova Medicina que se avexia posuirá un compoñente predictivo de futuras patoloxías no individuo san que requirirá unha forma diferente de acomete-los problemas de saúde, sen a penas similitude na actualidade. Da man da revolución xenética prevense cambios no concepto de enfermidade, e ciencias nacentes como a farmacoxenética, farmacoxenómica e a proteómica terán unha grande importancia nas próximas décadas.

A terapia xénica que xa se iniciou con éxito na década dos noventa para o

tratamento do déficit dunha enzima, a adenosín desaminasa, que produce unha inmunodeficiencia que obriga os nenos que a padecen a viviren illados, está cobrando un enorme interese para o tratamento doutras enfermidades xenéticas, enfermidades infecciosas e o cancro.

Outras disciplinas da Xenética, como a Xenética forense, están hoxe completamente establecidas e gracias á análise da variación no ADN identifícanse individuos, analízanse vestixios de interese criminal ou fanse investigacións biolóxicas da paternidade cunha seguridade cada vez maior.

Pero o cambio vertixinoso de conceptos tamén orixina problemas éticos que haberá que resolver. Por exemplo, se unha análise pode predicir que unha persoa moza vai morrer dunha enfermidade xenética incurable, ¿fará esa persoa a análise?; e ¿cal será a súa actitude se esa mesma análise pode informalo de que lles pasará ou non esa enfermidade ós seus descendentes?, ¿gustaríalle a alguén saber que debido ós seus xenes, o seu traballo nunha industria pode orixinarlle cancro?, ¿gustaríalle a esa persoa que os responsables desa industria ou a súa compañía de seguros coñecesen esa predisposición?, ¿gustaríanos que tódolos individuos estivesemos fichados xeneticamente para perseguir mellor os delitos?, ¿e os criminais reincidentes?, ¿poden os xenes ser patentados?

Estas son algunhas das cuestións que empezamos a formularnos como

consecuencia dos avances tecnolóxicos na xenética humana. Para atender estas cuestións, o propio proxecto xenoma dedica unha parte importante do orzamento a promover a reflexión sobre estas cuestións, que son cruciais para que a nova xenética se use adecuadamente.

Ademais do impacto na Medicina e como logro máis importante, parece claro que a nova Xenética e a culminación do Proxecto Xenoma Humano vai revelar os detalles moleculares da especie humana, e isto permitiranos maravillarnos da similitude existente entre nosoutros e, ó tempo, celebra-la nosa diversidade.

BIBLIOGRAFÍA

- Berry, R. J., *Neo-Darwinism*, Londres, E. Arnold, 1982.
- Bowler, P. J., *The mendelian revolution: the emergence of the hereditarian concepts in modern science and society*, Londres, Athlone, 1989.
- Dunn, L. C., *A short history of genetics*, Nova York, McGraw-Hill, 1965.
- Mayr, E., *The growth of biological thought. Diversity, evolution and inheritance*, Cambridge, Harvard University Press, MA, 1982.
- Moore, J. A., *Science as a way of knowing. The foundations of modern biology*, Cambridge, Harvard University Press, MA, 1993.

Olby, R. C., *Origins of Mendelism*, Londres, Constable, 1966.

_____*El camino hacia la doble hélice*, Madrid, Alianza, 1991.

Portugal, F. H., e J. S. Cohen, *A century of DNA*, Cambridge, MIT Press, MA, 1977.

Provine, W. B., *The origins of theoretical population genetics*, Chicago, The University of Chicago Press, 1971.

Stent, G. S., e R. Calendar, *Genetics: An introductory narrative*, San Francisco, Freeman, 2ª edición, 1978.

Stubble, H., *History of genetics*, Cambridge, MIT press, MA, 1972.

Sturtevant, A. H., *A history of genetics*, Nova York, Raper and Row, 1965.

Watson, J. D., *La doble hélice*, Barcelona, Salvat, 1987.



A TECTÓNICA DE PLACAS E O IMPACTO KT. UNHA GRAN REVOLUCIÓN XEOLÓXICA E UNHA GRAN CONTROVERSA DO SÉCULO XX

Federico Vilas Martín*
Universidade de Vigo

INTRODUCCIÓN

En case tódolos asuntos, a mente humana tende fortemente a xulgar á luz da súa propia experiencia, coñecemento e prexuízos, antes que en función das evidencias presentadas. Deste modo, as ideas novas son xulgadas polas crenzas prevalecentes. Se as ideas son demasiado revolucionarias, é dicir, se se apartan demasiado das teorías reinantes, e se non se poden asimilar ó corpo de coñecementos de moda, non serán aceptables. Cando se fan os descubrimentos antes de tempo, é case seguro que serán ignorados ou rexeitados cunha oposición insuperable, de modo que na maioría dos casos, tanto daría no telos feito.

Beveridge, 1950

Se observamos detidamente a historia da Humanidade, podemos decatarnos de que é moi difícil non resultar afectado polas revolucións políticas ou económicas. Pola contra, a xente común permanece á marxe ou allea ás explicacións científicas ou artísticas, aínda que por veces cheguen a constituír unha auténtica revolución. A historia bríndanos numerosos exemplos; os libros da Biblia (Bentor, 1978) conteñen

frecuentes e moi exactas descrições de acontecementos xeolóxicos: terremotos e os seus conseguintes movementos de terras (o paso do río Xordán), inundacións (Sodoma e Gomorra), volcanismo (o monte Sinaí), etc. Moitos destes sucesos xeolóxicos deberon de impresionar profundamente as mentes precientíficas da época en que se escribiu a Biblia, por iso foron considerados de orixe supranatural. Só hoxe chega a comprenderse que estes acontecementos xeolóxicos forman parte do escenario apropiado para creala atmosfera precisa do relato bíblico e o seu principal sentido.

Máis próximo á nosa época, o reverendo Thomas Burnet, eminente pastor anglicano e capelán privado do rei Guillerme III, entre 1680 e 1690 publicou, primeiro en latín e logo en inglés, os catro libros de *Telluris theoria sacra*, ou *La Teoría sagrada de la Tierra: Conteniendo un Informe del Origen de la Tierra y de todos los Cambios Generales que se han experimentado, o que están por experimentar hasta la consumación de*

* Catedrático de Estratigrafía.

todas las cosas. Burnet contou a historia do noso planeta proclamada pola infalible concordancia entre a palabra de Deus (os Textos Sagrados) e a obra de Deus (os obxectos da natureza). A súa obra, de moi pobre contido empírico, tal como insisten os seus detractores, non podería ser criticada por mesturar ciencia e relixión cando a taxonomía do seu tempo non recoñecía tal división, e mesmo non existía unha palabra para o que agora denominamos ciencia. Hoxe Burnet aparece nos nosos libros de texto como o arquetipo dunha idolatría bíblica que retivo o progreso da ciencia. Esta caracterización persiste na nosa xeración. Fenton e Fenton, na súa popular obra *Xigantes da xeoloxía* (1952, 22) rexeita a teoría de Burnet como “unha serie de ideas excéntricas acerca do desenvolvemento da Terra”.

Do mesmo xeito, e noutros ámbitos sociais, ninguén foi consciente no seu momento do que significaba o Cubismo ou o Surrealismo e só hoxe podemos avalialos enmarcados nos problemas da época. No mesmo sentido, pódese dicir que as revolucións científicas actuais pasan inadvertidas, mentres que recoñécemo-la importancia dos descubrimentos que ocorreron hai uns corenta ou cincuenta anos.

¿Cando comezou a última ‘revolución’ das Ciencias da Terra? A crenza dunha Terra ‘estable’ e non ‘móbil’, segundo a cal os continentes permaneceron na mesma posición, foi un punto de vista combatido por Wegener e logo en menor medida por Taylor. Foi preciso que transcorreran uns cincuenta

anos para lograr unha conversión masiva ós puntos de vista mobilistas. Non parece que medio século sexa un período excesivamente longo de indecisión e incerteza, no campo da ciencia son numerosos os exemplos que se poden citar: a teoría heliocéntrica de Copérnico e a persecución de Galileo pola mesma idea moito tempo máis tarde, o longo conflito novecentista entre xeólogos catastrofistas e uniformitaristas, a cuestionada idea da evolución darwiniana xa desde o comezo do século XIX, etc.

A principios do século XX toma forma a teoría sobre a mobilidade dos continentes, como produto da vitalidade do planeta Terra, e é a finais da década dos sesenta cando a revolución da tectónica de placas tomou ó asalto a ciencia da Xeoloxía. Constitúe esta a grande e indiscutible revolución da Xeoloxía no eido científico do século. Non obstante, outra nova idea xerminal parece entrar a finais da centuria e vén a esclarece-la forte controversia entre teorías enfrontadas: as influencias extraterrestres tanto na creación de vida como nas interrupcións na evolución biolóxica por extincións masivas de organismos en determinados momentos da historia xeolóxica do planeta. Non hai dúbida de que no campo da evolución tivo lugar un grande avance, a teoría do catastrofismo, é dicir, a non-uniformidade dos procesos ó longo do tempo, tal como postulan outras teorías científicas. Aínda cando a teoría contraria, o uniformitarismo, sobreviviu ata os nosos días, novas probas viñeron a demostrar que a maquinaria do

mundo que describiu James Hutton, padre da Xeoloxía, no seu libro *Theory of the Earth*, publicado en 1785, non sempre funciona en ciclos suaves e harmónicos; os cataclismos modificaron moitas veces a face da Terra ó longo dos tempos (Hallam, 1989).

Por iso, ó tempo que a propia dinámica do planeta Terra o fai evolucionar, a Wegener permitiulle explicala deriva dos continentes ata posicións distintas ás que hoxe ocupan, chegando a ser esta última a idea xerminal da nova tectónica global ou tectónica de placas de Wilson. Actualmente, cobran importancia, dentro dunha gran polémica científica, as hipóteses formuladas por Luis e Walter Álvarez sobre os impactos de corpos celestes ocorridos na Terra, como causantes de escenarios catastróficos que producirían grandes interrupcións da evolución biolóxica a consecuencia de extincións masivas. A 'grande extinción' descrita polos Álvarez non supón a única extinción en masa que coñeceu o noso planeta pero si foi relevante para a nosa especie, xa que daquel cataclismo, os entón pequenos mamíferos, gracias ós pasos evolutivos, terminarían producindo especies como a dos humanos. Os impactos catastróficos eran reais, e así o evidenciaban as mostras lunares e imaxes dos planetas enviadas polas sondas espaciais, polo que o gradualismo estrito debería estar desbotado. A comunidade xeolóxica, absorta no gran descubrimento da tectónica de placas, a penas advertía a evidencia lunar e planetaria de impactos catastróficos, e tódolos antigos prexuízos uniformitarios que-

daron reforzados polo triunfo da nova tectónica global: océanos tan grandes que para cruzalos en avión fan falta horas, medraron a unha taxa de poucos centímetros por ano e fan pensar que a teoría da tectónica de placas é a máis gradual e uniformitaria que se poida imaxinar. O testemuño do cráter Chicxulub, que establece e confirma para uns investigadores a hipótese do impacto por un grande asteroide ou cometa, sucedido hai sesenta e cinco millóns de anos na fronteira entre o Cretáceo e o Terciario, marca un novo punto de vista na controversia uniformismo-catastrofismo.

Son polo tanto dúas as excitantes ideas que no século XX acadan unha merecedora e destacable atención no campo das ciencias da Terra: a primeira, a que se aglutina baixo a denominación "da deriva dos continentes á tectónica de placas", teoría que transformou a nosa ciencia completamente ofrecendo unha nova comprensión da Terra; a segunda, a gran controversia suscitada polo denominado 'impacto KT' que introduce os xeólogos no mundo do postuniformitarismo.

DA DERIVA DOS CONTINENTES Á TECTÓNICA DE PLACAS

...o compoñente máis importante é a suposición de grandes movementos horizontais de deriva que moveron os bloques continentais no curso do tempo xeolóxico e presumiblemente continúen aínda.

A. Wegener, 1915

OS PRECURSORES

Con posterioridade a Darwin, analizouse a distribución de animais e plantas con relación ós seus fósiles. Huxley propoñía unha orixe saltacional das especies. De Vries entendía que as especies cambiaban por mutacións e así explicaba as leis de Gregor Mendel. Extinguidos os réptiles xigantes, os mamíferos evolucionaron en función de cambios climáticos; o home, un primate que ó pasar da selva á sabana camiñaba erguido. A evolución dos marsupiais en Australia e os edentados en América do Sur chamou a atención polas súas diferencias con Eurasia, África e América do Norte. Comezaron a compararse os rexistros fósiles de cada continente. Edward Forbes xa propoñía en 1846 «pontes entre continentes» para explica-las relacións entre organismos distantes. Entre os monos sen cola de África encontrábase o elo perdido que dera orixe ó home.

As relacións entre as especies non eran claras de todo. Os xeólogos que abrazaran de contado o evolucionismo de Darwin crían a Edward Suess, que en 1904 postulaba que a Terra evolucionara contraéndose, orixinando así as montañas pregadas. Para F. Taylor (1910) as montañas orixináranse polo movemento dos continentes, pero como consecuencia de forzas de marea provocadas polo suposto desprendemento da Lúa durante o Cretáceo. Só algúns pregamentos se explicaban por movementos horizontais locais.

O punto de partida da hipótese de Taylor non foi a observación da coincidencia do contorno dos continentes que bordean o Atlántico, tal como claramente xa apuntara Schneider en 1858, senón a disposición das cadeas montañosas do Terciario de Eurasia. Sen dúbida, Taylor coñecía polo miúdo o traballo de Edward Suess, *The face of the Earth*, sobre os supostos movementos de contracción sufridos polo arrefriamento da Terra. A idea dun 'gran desprazamento' da codia terrestre xorde en Taylor como primeira hipótese, coherente e elaborada, do que hoxe denominamos deriva continental. Taylor non lle prestou demasiada atención ó mecanismo do desprazamento continental na súa monografía de 1910, razón pola cal a súa obra non acadou o eco que cabería esperarse na comunidade xeolóxica.

Foi Alfred Wegener quen encarou o problema da aparente mobilidade dalgunhas especies: non se requiría de grandes migracións de animais nin pontes hoxe desaparecidas; ¡os que se moveran foran os continentes!

Son diversas as primeiras formulacións que apuntan a posible migración dos continentes (Hallam, 1976). Moitas céntranse na opinión xeneralizada, na metade do século XIX, sobre a complementariedade das liñas de costa dos continentes do Atlántico sur. Tamén se especulou sobre a formación do océano Atlántico, como consecuencia da depresión deixada pola Atlántida, un misterioso continente supostamente desaparecido.

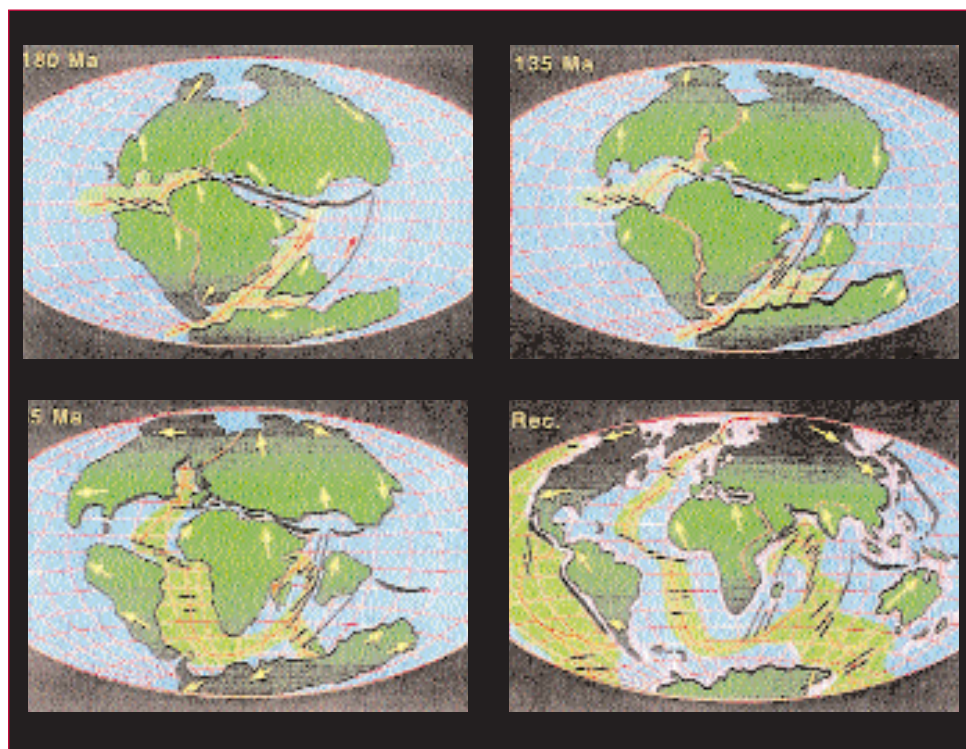


Figura 1. A evolución de terras e mares:

Hai 180 millóns de anos, a primitiva masa terrestre chamada Panxea empezou a desmembrarse. Primeiro, os continentes dividíronse ó longo das liñas dos océanos Índico e Atlántico setentrional. América do Norte separouse de África e o mesmo ocorreu coa India respecto á Antártida. Os vastos continentes de Laurasia, ó N., e Gondwana, ó S., quedaron case completamente separados polo chamado mar de Tetis. A Terra tiña tres grandes masas terrestres, ademais da India, que xa se empezara a mover cara ó N.

Hai 135 millóns de anos, despois de máis de 45 millóns de deriva dos continentes, estes aínda non adquiriran a forma que hoxe nos é familiar. As dúas grandes fracturas orixinais, o Atlántico Norte e o océano Índico, continuaron abrindo-se. O Atlántico Norte tiña entón unha anchura duns 1000 km. Unha serie de fracturas estendéronse ata o Mar do Labrador, separando as terras de Gronlandia de América do Norte. Entrementes, a India continuaba avanzando cara á costa meridional de Asia, aínda distante uns 3200 Km.

Hai 65 millóns de anos, os continentes empezaron a toma-la súa actual configuración. América do Sur separouse por fin de África, mentres que en Gondwana só Australia e a Antártida empezaron a moverse por separado. Unha prolongación da macrofractura do Atlántico Norte producirá outra gran fractura en Laurasia: Gronlandia separarase de Europa, e tamén o continente norteamericano do euroasiático. (A área coloreada con verde claro amosa a magnitude dos movementos da codia).

A DERIVA DOS CONTINENTES

A imaxe convencional da estrutura e evolución da Terra que se tiña a principios de século veu a ser substituída pola revolucionaria hipótese wegeneriana da deriva continental.

Segundo o seu propio relato, Wegener tivo a definitiva sospeita de que os continentes se moveran lateralmente cando advertiu a notable coincidencia entre os contornos continentais a ámbalas beiras do Atlántico. Sucedería algo así como lles ocorre ás capas de xeo cando rompen e se desprazan, di Lange Koch que chegou a pensar Wegener, un dos compañeiros da expedición a Gronlandia. A busca de evidencias foi tan fructífera e corroboraban de tal xeito a súa idea inicial que expuxo a súa hipótese no seu libro *Die Entstehung der Kontinente* (1915). En 1920, 1922 e 1929 publicáronse edicións revisadas. A de 1922 atraeu a máxima atención e foi traducida ó inglés en 1924 baixo o título *The origin of continents and oceans*. Nesa edición aparece por primeira vez, correctamente traducido, o termo *continental displacement* (desprazamento continental), que posteriormente se transformou en *continental drift* (deriva continental). Wegener postulou a presenza dun enorme supercontinente denominado Panxea (fig.1), que significa 'Todo Terra' e que se fracturou hai 180 millóns de anos, primeiro no hemisferio sur e logo no norte; Europa e Norteamérica terían permanecido unidos ata o Cuaternario (1 millón de anos). Pero o mesmo que o argumento máis consistente foi o da

similitude entre rochas e cintos oroxénicos existentes entre os dous lados do Atlántico, tamén o foron os argumentos paleontolóxicos e paleoclimáticos.

Desafortunadamente, o mecanismo que propuxo foi a diferente atracción da gravidade entre o Ecuador e os polos, e unha deriva contra o oeste producta das atraccións da Lúa e o Sol. Para explicar este movemento propoñía un fondo mariño viscoso sobre o que os continentes se abrían paso no seu desprazamento. Os xeofísicos corrixírono no sentido de que o fondo do mar é ríxido.

Aínda que Wegener morreu sendo un descoñecido en 1930, durante unha expedición a Gronlandia, a posterior acumulación de argumentos foille dando a razón. Arthur Holmes (1929) explicou a deriva dos continentes por correntes convectivas no manto, de forma que a codia continental e mariña se moven xuntas sobre esta porción plástica do manto. Tampouco a Holmes lle creron demasiado. Veining Meinesz recoñece nas fosas oceánicas o lugar onde as correntes convectivas se afunden. O wegenerista Du Toit (1927) estudia comparativamente os fragmentos do supercontinente austral Gondwana separado de Laurasia polo Mar de Tetis. K. Runcorn (1962) e E. Irving (1964) corroboran o movemento dos polos mediante estudos paleomagnéticos, e as incongruencias xurdidas entre os datos obtidos soluciónanse cando se supoñen os continentes ensamblados. Paralelamente, investigadores como M. Ewing e B. Heezen (1962) recoñecen

que as dorsais mesoceánicas percorren todo o planeta.

A principios dos anos sesenta, Harry Hess (1962) e Robert Dietz (1961) reformulan a Wegener e Holmes na *Historia das cuncas oceánicas* e a *Teoría do espallamento do fondo oceánico* respectivamente. Hess, un recoñecido xeólogo da Universidade de Princeton, foi un dos impulsores do Proxecto Mohole, o encargado da perforación oceánica para a exploración da capa do manto terrestre. A súa gran contribución foi a integración dun certo número de feitos dispares: a aparente xuventude do fondo oceánico, o peculiar sistema que ofrecen as illas en forma de arco que circundan o océano Pacífico e o seu elevado número de volcáns, sismos, grandes fosas, etc. Propuxo que o fondo mariño se creou nas grandes dorsais medio-oceánicas, e logo esparéxese ata consumirse nas fosas e introducirse no manto terrestre. O seu modelo foi relacionado co da deriva dos continentes e suxírese que estes foron transportados ó longo do proceso polo efecto das correntes de convección que se xeran dentro do manto. Explicábase así a orixe das montañas e terremotos por forzas de tensión e de compresión. Agora si, a suma dos novos datos abría as portas á 'Revolución Wegeneriana'. Vine (1969) e Vine e Matthews (1963) explicaron o carácter simétrico das franxas magnéticas dos basaltos, contiguas ás dorsais mesoceánicas, como produto das inversións periódicas do campo magnético. Excitante hipótese esta última, que supón ter algo así

como unha 'gravadora natural' do campo magnético, que permitiu determina-la velocidade do transporte oceánico.

TECTÓNICA DE PLACAS: UNHA TEORÍA UNIFICADORA

Tan recentemente como en 1965, o xeofísico canadense Tuzo Wilson especula sobre a natureza das grandes fracturas na codia oceánica, que denomina fallas de transformación, e propón que todo o noso planeta se move en placas, creándose materia nas dorsais e consumíndose nas fosas oceánicas. A superficie terrestre estaría así dividida en diversas grandes placas ríxidas. Estas ideas expostas nos traballos de Wilson, constitúen o xerme da inicialmente denominada como 'nova tectónica global' por B. Isacks, J. Oliver e R. Sykes en 1968, para agrupa-los conceptos de 'deriva continental', 'esparexemento do fondo oceánico' e 'fallas de transformación', hoxe coñecida como Teoría da tectónica de placas.

Posteriormente, Morgan (1968) divide a superficie terrestre en vinte placas que poden ter límites de tres tipos: diverxentes, onde nace codia oceánica; converxentes, onde a codia oceánica se destrúe; e transformantes, onde non se crea nin se destrúe codia. Adoptouse a suposición de que as placas varían a súa espesura, acadando ata os 250 quilómetros naquelas compostas por manto superior e codia continental, mentres que aquelas outras do manto superior e codia oceánica chegan ata os 100 quilómetros e constitúen o que se denomina litosfera.

A litosfera repousa sobre a astenosfera, capa plástica na que o movemento resultante dalgún tipo de sistema de transferencia de calor dentro dela causa o desprazamento das placas.

Esta nova visión da superficie terrestre estimulou a recompilación de datos sobre zonas de fractura e anomalías magnéticas en todo o globo. O modelo agora obtido polo francés Le Pichon (1968) foi aínda máis simple có de Morgan: só seis placas maiores, denominadas Americana, Euroasiática, Africana, India, Pacífica e Antártida.

A maior parte dos xeólogos aceptan a teoría da tectónica de placas como a única que pode unificar e explicar numerosos fenómenos xeolóxicos. En consecuencia, moitos dos procesos xeolóxicos son vistos agora desde esta perspectiva. Aínda máis, debido a que tódolos denominados planetas terrestres tiveron unha orixe similar, pregúntase se esta teoría é única para a Terra ou pola contra opera do mesmo xeito nos outros planetas terrestres.

OS LÍMITES DE PLACAS

As placas teñen un movemento relativo dunha respecto a outra de xeito que os seus límites poden ser caracterizados como: *a)* diverxentes, *b)* converxentes, e *c)* transformantes. A interacción de placas e os seus límites forman a maior parte da orixe da actividade sísmica e volcánica da Terra así como da orixe dos sistemas de montañas.

a) As placas son diverxentes (fig. 2) cando se separan e se forma unha nova litosfera oceánica. Os límites diverxentes son lugares onde a codia se expande, se adelgaza e se fractura na medida en que o magma, derivado da fusión parcial do manto, alcanza a superficie. As sucesivas inxeccións de magma, ó arrefriarse, dan lugar á nova codia oceánica á vez que rexistran a intensidade e a orientación do campo magnético terrestre. A pesar de que este tipo de límites está moi ligado á formación das cristas oceánicas tal como a Dorsal Medio-Oceánica, tamén ocorren durante os estadios iniciais da fractura continental: o magma ascende por baixo do continente, a codia inicialmente elévase, expándese e adelgaza. Os vales do leste de África constitúen un magnífico exemplo deste estadio de ruptura continental. A continuidade do proceso conduce á separación en dous bloques continentais, tal como sucede no Mar Vermello separando a Península de Arabia de África e no Golfo de California que separa a Baixa California de México. Na medida en que estes mares estreitos recentemente creados continúan ampliándose, eventualmente poden chegar a ser unha extensa cunca oceánica tal como a Atlántica, que separa as Américas de Europa e África por miles de quilómetros. A Dorsal Medio-Oceánica constitúe o límite entre esas dúas placas diverxentes; mentres a Americana se despraza cara ó oeste, a Euroasiática e Africana móvese en dereitura ó leste.

b) As placas converxentes supoñen a colisión entre elas e, polo tanto, o lugar de destrución e reciclaxe da vella litosfera que progresivamente se forma nos límites das placas diverxentes. Doutra forma teríamos unha Terra en expansión. No límite converxente, unha das placas descende por debaixo da outra por subducción. As zonas de

subducción constitúen algo así como un plano inclinado no que se localizan os focos sísmicos, coñecido como plano de Benioff. A maior parte destes planos inclínanse cara a abaixo a partir das fosas oceánicas xeradas nos arcos illas ou continentes adxacentes, marcando o límite de escorregamento entre placas converxentes. Na medida en que a

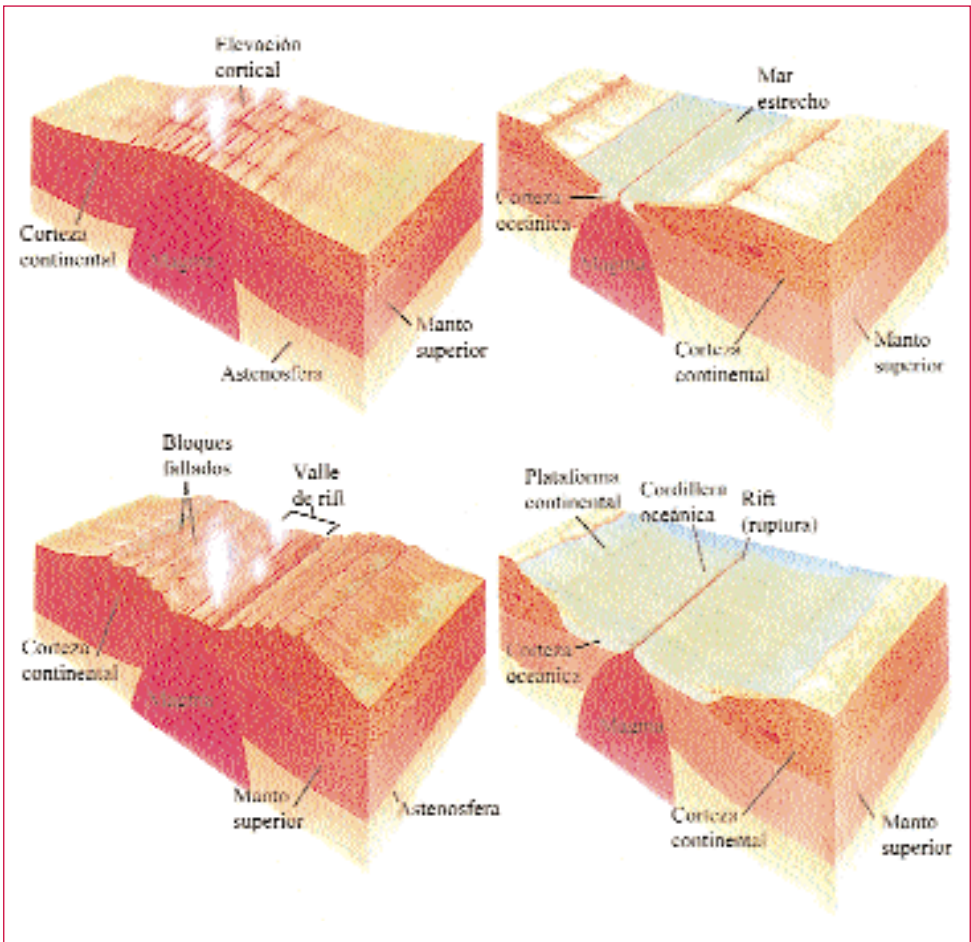


Figura 2. Evolución dun límite diverxente de placas. (Modificado de Monroe e Wicander, 1992).

placa subducente se introduce na astenosfera, quece e eventualmente incorpórase ó manto. Sen embargo, a subducción non ocorre cando ámbalas placas converxentes son continentais xa que a codia continental non ten a densidade necesaria para ser subducida dentro do manto.

Os límites converxentes caracterízanse por deformación, vulcanismo, formación oroxénica, sismicidade e importantes depósitos minerais. A partir das ideas de Tuzo Wilson chégase a recoñecer tres tipos de límites de placas converxentes: oceánica-oceánica, oceánica-continental e continental-continental.

Cando dúas placas oceánicas converxen, unha delas é subducida por debaixo da outra ó longo do límite de placa oceánica-oceánica (fig.3). A placa subducente dóbrase contra abaixo cun ángulo entre 5° e 10° para formar unha depresión oceánica seguida dun complexo, en forma de cuña, de sedimentos mariños pregados e fallados e litosfera

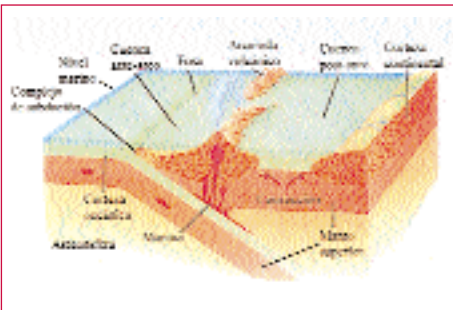


Figura 3. Evolución dun límite diverxente de placas. (Modificado de Monroe e Wicander, 1992).

oceánica arrincada da placa descendente. Na medida en que a placa descendente se introduce na astenosfera, afúndese parcialmente xerando un magma menos denso cás rochas adxacentes, polo que ascende á superficie formando unha cadea curvada (como resultado da intersección dun plano cunha esfera) de volcáns, que se denominan arcos-illa. A ámbolos lados destes arcos-illas xéranse dúas cuncas: a cunca ante-arco tende a somerizarse por recheo de sedimentos procedentes da erosión dos volcáns, mentres que na cunca tras-arco pode producirse un adelgazamento da súa codia litosférica, como consecuencia dun alto grao de subducción, ata o punto que chega a iniciarse unha expansión se o magma chega a rompe-la delgada codia, iniciándose unha nova codia oceánica. Un bo exemplo constitúe o Mar de Xapón entre o continente Asiático e as illas de Xapón.

Cando se trata da converxencia dunha placa oceánica e outra continental, a primeira, debido á súa maior densidade, é subducida por debaixo da continental ó longo do límite de placa oceánica-continental (fig. 4). A placa oceánica descendente dá lugar a unha fosa, seguida dun complexo de subducción consistente en capas de rochas falladas en forma de cuña, que marcan o límite externo da cunca ante-arco. Na medida en que a placa oceánica descende dentro da astenosfera, fúndese e xérase magma. Este magma ascende entre a corteza continental, irrompe na superficie orixinando volcáns, tamén

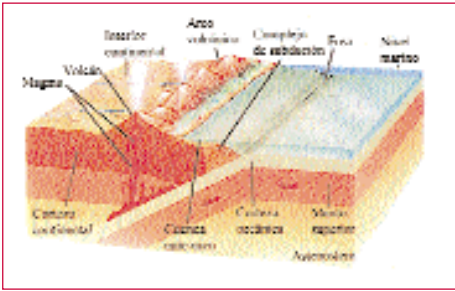


Figura 4. Limite entre placas oceánica-continental. (Modificado de Monroe e Wicander, 1992).

chamados arcos volcánicos, ou intrúese na marxe continental como plutóns, particularmente batolitos. Un excelente exemplo deste tipo constitúeo a costa do Pacífico de América do Sur, onde a placa Nazca está sendo continuamente subducida por Sudamérica: a fosa de Chile-Perú é o lugar de subducción e a Cordilleira dos Andes é a resultante cadea volcánica.

Finalmente, cando dúas placas converxen a través dun límite de placa continental con outra continental (fig. 5), unha placa pode esvarar sobre a outra, pero nunca subducida debido á súa baixa e igual densidade e grande espesura. Inicialmente, eses continen-

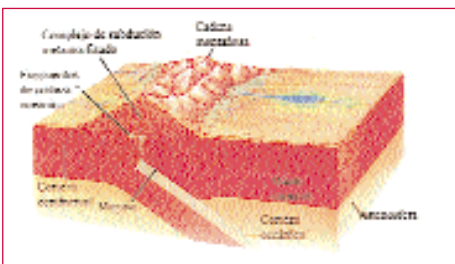


Figura 5. Limite entre placa continental-continental. (Modificado de Monroe e Wicander, 1992).

tes encontrábanse separados por codia oceánica ata que foi subducida por un dos continentes, que presentará as características dun límite de placa oceánica-continental. Se a codia oceánica é totalmente consumida, os dous continentes colisionan formando unha nova cordilleira de montañas. A cordilleira do Himalaia é o resultado da colisión entre a India e Asia que comezou aproximadamente hai corenta ou cincuenta millóns de anos e aínda continúa. A súa grande altura resulta da grosa acumulación de litosfera continental e a elevación producida como consecuencia do forzado e parcial escorregamento da placa india baixo a placa asiática durante a colisión.

c) Os movementos horizontais entre placas teñen lugar ó longo de fallas de transformación, onde as placas esvaran lateralmente de forma case paralela á dirección do movemento da placa. Non se destrúe nin se crea litosfera ó longo do límite transformante. As de transformación son unha clase particular de fallas que 'transforman' ou cambian un tipo de movemento entre placas noutro tipo diferente. A maioría das fallas de transformación conectan dous segmentos de dorsal oceánica, pero tamén poden conectar dorsais con fosas e fosas con fosas (fig. 6). Unha das fallas de transformación mellor coñecidas é a de San Andrés en California, que separa a placa do Pacífico da de Norteamérica.

A teoría da tectónica de placas, froito da hipótese da deriva continental, mostrouse capaz de integrar

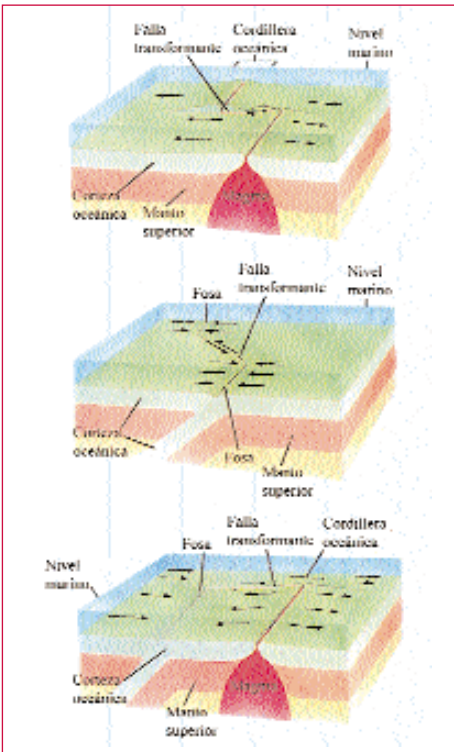


Figura 6. Movimientos horizontales entre placas por fallas transformantes. (Modificado de Monroe e Wicander, 1992).

diversos fenómenos xeolóxicos e contribuíu a obter unha imaxe máis coherente e intelixible da evolución da Terra. O maior obstáculo para aceptala foi a carencia dun mecanismo que explicase o movemento continental. Cando se soubo que os continentes e os fondos oceánicos se moven xuntos e non separados e que se forma codia nas dorsais por ascenso de magma, a maior parte dos xeólogos aceptaron a existencia dalgún tipo de sistema convectivo

de calor como proceso responsable para o movemento das placas, pero aínda quedan algúns interrogantes sen resolver, tales como ¿cal é o tipo de sistema convectivo de calor?, ¿son as placas participantes activas ou simplemente pasivas pasaxeiras? Ó remate do século aínda non se desenvolveu unha teoría comprensiva sobre o mecanismo conductor das placas. Non obstante, a teoría da tectónica de placas constitúe o maior avance das ciencias da Terra des de que, a principios do século XIX, a aceptación dos paradigmas do uniformitarismo e a correlación estratigráfica de fósiles lle outorgou á Xeoloxía o rango dunha verdadeira ciencia. Por ser Alfred Wegener o científico que realmente iniciou ese camiño, merece o recoñecemento debido a un dos innovadores máis importantes do século.

O IMPACTO KT

Pero era demasiado tarde. En aquel momento la roca se estremeció y tembló bajo sus pies. El gran ruido retumbante, más fuerte que antes, vibró en el suelo y reverberó en las montañas. Después, con la precipitación de un cauterio, llegó un gran destello rojo. Mucho más allá de las montañas orientales saltó hacia el cielo y salpicó de carmín las nubes que lo encapotaban. En aquel valle de sombra y luz fría y cadavérica, parecía algo insoportablemente violento y furioso. Picos de piedra y colinas como cuchillos mellados estallaban en un negro llamativo contra las llamas que se elevaban en Golgoroth. Después llegó el gran estallido de un trueno.

J. R. R. Tolkien, *El señor de los anillos*

INTRODUCCIÓN

Se a vida evolucionase en continentes que por momentos estaban unidos e por veces illados, tal como expuxo Wegener, e por iso dentro dun proceso de cambios graduais e uniformes, xorde a inmediata pregunta de cómo sucederon as bruscas interrupcións na evolución biolóxica e, sen lugar a dúbidas, tamén cómo e cándo se creou a vida.

En 1954 foron recoñecidos os estromatolitos como as primeiras formas viventes (arrecifes de algas supostamente semellantes ás actuais bacterias, e algas verdeazuladas fosilizadas) do Precámbrico do Gunflint Chert, Ontario, Canadá. Posteriormente, acháronse outros tipos de fósiles primixenios: filamentos ramificados semellantes a fungos, algas unicelulares, arranxos tetraédricos de células semellantes a esporas ou células espiñentas (Schopf, 1979); pero a pregunta era cómo xurdiran estas formas de vida que hoxe coñecemos polos fósiles.

Xa en 1929, J. B. S. Haldane propuxo un 'caldo quente e diluído' (H₂O, CO₂ e NH₃) que nunha atmosfera reductora (sen osíxeno) permitise que os raios ultravioletas proporcionaran a enerxía necesaria para a vida. En 1952, Harold Urey retomou as ideas de Oparin e Haldane, e a través de chispas eléctricas en mesturas de hidróxeno, metano, amoníaco e auga obtivo aldehidos, ácidos orgánicos e aminoácidos. Esta teoría da 'sopa quente' está aproximadamente vixente con relación

á particular historia de arrefriamento e diferenciación xeoquímica do noso planeta respecto doutros. O individuo primixenio non só debeu reproducirse senón que, ademais, dependeu de fontes de alimentación, un eficiente mecanismo químico interno e de certa capacidade para ambientarse aínda en condicións de crises ambientais (Soffen, 1982). As 500.000 especies subseguintes, que posuían a mesma composición bioquímica (carbono, hidróxeno, osíxeno, nitróxeno, CHON), códigos xenéticos e ata a asimetría nas moléculas de aminoácidos, confirmaban unha única orixe para a vida que hoxe coñecemos. A definición de 'vida' pode tomarse como a capacidade de reproducirse, ou a capacidade de evolucionar por selección natural. Os biólogos S. Body e M. Harrington indicaron en 1979 que os aminoácidos dominantes con asimetría cara á esquerda son selectivamente absorvidos polas arxilas bentónicas. E pensouse que na capacidade das arxilas de transmitir cargas eléctricas se produciu a enerxía que tería orixinado o 'individuo primixenio'.

Estas teorías foron usadas para avalia-la posibilidade de vida en Marte durante a misión espacial do Viking (1976-1979). O solo de Marte foi analizado mediante tres experimentos: pirólise (absorción ou redución de óxidos de C₁₄ en presenza ou ausencia de luz), intercambio radiactivo (alimentación de probables microbios cunha 'sopa bioquímica' marcada radioactivamente) e intercambio gasoso

(humedecemento do solo marciano con vapor de auga, con 'sopa' nutritiva). Só os dous primeiros experimentos deron débiles respostas, que foron explicadas por fenómenos de oxidación dun composto tipo peróxido ou superóxido de ferro. De tódalas maneiras, especúlase que os polos de Marte poden preservar mellor as moléculas orgánicas cá regolita (solo oxidado) da que trouxo mostras a nave espacial Viking (Soffen, 1982).

O LÍMITE CRETÁCEO-TERCIARIO

O límite Cretáceo-Terciario sinala unha das grandes discontinuidades da historia da Terra, e por iso se emprega como liña divisoria que separa eras fundamentais na evolución da vida: o Mesozoico e o Cenozoico.

Tódalas teorías que trataron de explica-la orixe da vida desde o rexistro xeolóxico consideraron o sistema terrestre como pechado. Hoxe en día coñécese que a extinción dos dinosauros e outros organismos hai sesenta e cinco millóns de anos se debeu ó impacto dun corpo celeste (asteroide ou cometa) que orixinou unha nube de po que cubriu significativamente a atmosfera. O amortecemento da luz orixinou un drástico arrefriamento do clima durante un tempo abondo como para altera-las cadeas tróficas dos organismos máis especializados; e os dinosauros extinguíronse.

A proposta foi formulada por Luis e Walter Álvarez (pai e fillo), da Universidade de California, Berkeley.

Físico e xeólogo recoñeceron en Gubbio (Italia) unha capa de arxila de só un centímetro significativamente rica en iridio, un elemento particularmente característico dos meteoritos do tipo 'chondrites' (Álvarez *et al.*, 1980). Esta capa de arxila está situada exactamente no límite do tránsito do Cretáceo ó Terciario, polo que se denominou como límite KT. Esta anomalía de iridio non se encontraba noutros niveis estratigráficos, o que descartaba a posibilidade dalgunha causa terrestre común, como o vulcanismo. Por outra parte, o iridio é un dos seis elementos do grupo do platino, que están concentrados no núcleo terrestre e está ausente da superficie. Todos eles poden ser liberados na Terra por un impacto de asteroides e cometas. A anomalía KT presenta eses elementos nas mesmas proporcións ca nos meteoritos. Deste modo aparece un claro sinal que asocia a anomalía de iridio a un obxecto extraterrestre e non a unha erupción volcánica —como tamén se postulara— onde as proporcións entre elementos do platino son distintas.

Malia as numerosas dúbidas, máis ben paleontolóxicas ca estratigráficas, que existían inicialmente, a anomalía de iridio en KT convenceu de que pagaba a pena buscar un cráter de impacto xigante daquela época. A primeira pregunta evidente era ónde tivo lugar o impacto: ¿continente ou océano? As primeiras indagacións, baseadas en criterios xeoquímicos, apuntaban o océano, se ben semellaba imposible que un cráter estimado en

150 a 200 quilómetros de diámetro non fora detectado polos barcos oceanográficos. A este respecto, a teoría da tectónica de placas proporcionaba un bo argumento xa que unha quinta parte da codia oceánica que existía na época do límite Cretáceo-Terciario sufriu subducción desde entón; se o cráter buscado se atopaba nesa codia, estaría totalmente destruído. Outras pistas contradictorias apuntaban un impacto continental, fóra do alcance da codia oceánica. Ó longo da década de 1980, na medida en que se ían descubrindo cada vez máis evidencias que apoiaban a idea do impacto para a extinción producida no KT, recoñeceu-se en diferentes afloramentos rochosos e nos fondos mariños próximos á península de Yucatán a evidencia dun gran tsunami, unicamente explicables por un grande impacto. Este produciuse no continente pero o suficientemente preto do océano como para que se xerara un tsunami. A estrutura circular de anomalías gravitatorias en Yucatán suxería a existencia dun cráter, hoxe enterrado e invisible desde a superficie, na área de Chicxulub. Inicialmente confundido cun volcán polos xeólogos da petrolera PEMEX de México, o cráter Chicxulub era meirande ca calquera cráter de impacto coñecido na Terra.

O grupo de Berkeley dos Álvarez presentou unha descrición moi convincente de cómo tivera lugar a grande extinción. Tituláranos humoristicamente “Darkness at noon”, título dunha coñecida obra de A. Koestler que en España se traduciu por *El cero y el*

infinito, e que literalmente significa ‘escuridade ó mediodía’. Suxerían que, se un meteorito de dez quilómetros de diámetro batese contra a Terra hai sesenta e cinco millóns de anos, enormes cantidades de restos de rochas pulverizadas pola explosión e o impacto se inxectarían na estratosfera e axiña se distribuirían por todo o globo, diminuíndo a luz que normalmente chega á superficie da Terra.

Na conseguinte escuridade, a fotosíntese interromperíase e a ruptura da cadea de alimentos produciría unhas pautas de extinción que son observables nos datos paleontolóxicos. A capa de arxila en que se encontrara a anomalía de iridio de Italia tiña que ser —supoñían— o po que nos anos seguintes ó impacto se fora depositando gradualmente sobre a superficie da Terra. Deste modo naceu unha das máis sorprendentes hipóteses da ciencia moderna. O equipo Álvarez publicou o seu primeiro informe na revista *Science*, o 6 de xuño de 1980, baixo o título “Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction” (“Causa extraterrestre para a extinción do Cretáceo -Terciario”).

A ‘Grande Extinción’ que ocorreu hai sesenta e cinco millóns de anos debido a unha catástrofe cósmica e as súas implicacións na teoría da evolución foi obxecto de numerosas críticas xurdidas desde diversos ámbitos científicos. A Conferencia de Snowbird celebrada en Utha (EUA), en 1981, que se titulou “Impactos de corpos grandes e evolución terrestre: implicacións

xeolóxicas, climatolóxicas e biolóxicas”, puxo de relevo a intensa investigación que se realizaba, tanto sobre aspectos derivados de factores astronómicos, como a chuvia de cometas que periodicamente visitan a Terra, ata escenarios dun posible ‘inverno nuclear’, etc.

Son numerosas as preguntas que a ciencia pode facerse ante un feito de tal magnitude e tanta transcendencia. Unha delas é considerar se logo dunha guerra nuclear a especie coñecida como *Homo sapiens* se vería condenada á extinción; a resposta é si. ¿Sería posible que o impacto de finais do Cretáceo destruíse de xeito similar o medio natural, condenando os superviventes á extinción incluso durante un período de tempo despois do Holocausto? En xullo de 1994 os grandes telescopios apuntaron a Xúpiter para observar o impacto do cometa Shoemaker-Levy 9, que fora captado por ese planeta. Cando o cometa se afundi na atmosfera de Xúpiter, grandes penachos de material despedido polo choque eleváronse por riba do planeta e despois, como consecuencia da enorme gravidade de Xúpiter, esboroáronse sobre a súa superficie xerando intensas emisións de calor que puideron verse como radiación infravermella desde os telescopios da Terra. A natureza estaba ofrecendo, a unha distancia segura, un experimento que era a proba de que os grandes impactos non son só algo que puido suceder no pasado.

Os Álvarez analizaron catro ‘mecanismos causantes de morte’,

provocados polo impacto KT, que poderían ter contribuído á extinción. En primeiro lugar estaba a escuridade global de tres a seis meses de duración que detivo a fotosíntese. Un segundo mecanismo era o efecto invernadoiro, é dicir, a introducción na atmosfera dunha enorme cantidade de vapor, consecuencia do impacto no océano, que actuou como unha pantalla na Terra apresando a calor; en poucos meses as temperaturas globais sufrirían un significativo incremento, o suficiente para causa-la morte a moitos animais. Un terceiro mecanismo podería ter producido efectos catastróficos debido a un fenómeno inverso, un arrefriamento global: mentres persistiu o período de escuridade, as temperaturas globais puideron baixar 18°, e durante un tempo suficiente como para acabar coa maior parte dos animais incapaces de hibernar. Un cuarto mecanismo de morte baseábase na posibilidade de chuvias ácidas mortais en todo o mundo, derivado do impacto e a conseguinte transformación do nitróxeno atmosférico en óxidos de nitróxeno.

As conflictivas interpretacións dos acontecementos que levaron á desaparición dos dinosauros e causaron a extinción masiva do Cretáceo-Terciario, poida que non se logre coñecerlas por agora, pero é evidente que unha ‘revolución’ varreu o mundo contra finais do Cretáceo e trouxo un mundo novo. Un mundo que entraba no período Terciario sen dinosauros e outras especies de organismos.

Axiña se recoñeceron máis evidencias deste impacto Cretáceo-Terciario (anomalías xeoquímicas e evidencias físicas nos cristais de cuarzo) ó tempo que se encontraban pistas de impactos similares doutras idades (extincións do Titoniano, Hauteriviano, Cenomaniano e Eoceno Tardío; Torbett, 1989). Non é doado atopar evidencias de impactos no rexistro xeolóxico. Un grande impacto como o acontecemento do límite do KT, o suficientemente grande como para causar unha extinción en masa, pode localizarse no rexistro xeolóxico, porque os fósiles son distintos por encima e por debaixo do nivel de impacto. Buscar impactos máis pequenos que non deixen efectos sobre os seres vivos é moi difícil, e probablemente os seus depósitos só se achen casualmente. Non obstante, a lista de evidencias de impactos é cada vez máis numerosa; algúns están asociados a extincións en masa e outros poida que non teñan máis que efectos biolóxicos locais. No rexistro estratigráfico, a constatación de impactos vai desde idades moi antigas (leitos de esférulas e exectos de idade precámbrica) ata outras máis recentes (exectos procedentes do Plioceno), ou ata na actualidade se dan fenómenos similares aínda que menores, como o ocorrido o 30 de xuño de 1908 en Tunguska, Siberia.

O detallado rexistro fósil dos últimos 570 millóns de anos desde o final do Precámbrico proporciona a evidencia de cinco grandes extincións en masa e doutras cinco máis pequenas. O

límite KT é a máis recente das cinco grandes extincións e proporcionou moita máis información cás máis.

As influencias de impactos celestes no rexistro xeolóxico resultaron sumamente importantes xa que cambiaron varias veces o rumbo da evolución biolóxica (Hallam, 1984). Do estudo da sucesión de cráteres producidos polo impacto de meteoritos esbozouse unha secuencia de eventos cunha periodicidade de vinteito millóns de anos. ¿A que se debe esta periodicidade? Hai varias hipóteses astronómicas en relación cos eventos de extincións provocadas polos impactos de cometas; unha atribuída á presenza dunha pequena estrela, compañeira do Sol, Némesis, que orbitara arredor del cada vinteiseis millóns de anos. A. Muller (1985) razoou que posto que a maior parte das estrelas se presentan emparelladas, unha orbitando arredor da outra, o Sol podería ter unha compañeira aínda non descuberta, probablemente unha estrela anana dun a dez con relación á masa do Sol. Ó principio pensou que, cada vinteiseis millóns de anos, a estrela compañeira podería estar preto do Sol, o suficiente como para altera-las órbitas dos asteroides da rexión comprendida entre Xúpiter e Marte. Biet Hut, experto en dinámica orbital, suxeriu en 1983 a idea de que a estrela compañeira do Sol afectase a nube de refugallos interestelares situados alén de Plutón e que se supón son os que dan orixe ós cometas. Unha última hipótese propón a idea dun planeta X, aínda por descubrir, que na súa

viaxe orbital arredor do Sol puido producir perturbacións causantes das chuvas periódicas de cometas destructores (Torbett e Smoluchoski, 1984). Desde puntos de vista distintos, as tres chegan a conclusións similares. Incluso os astrónomos norteamericanos M. Rampino, R. Schwart e P. James, propoñentes da primeira hipótese, chegan a deducir unha ciclicidade de chuvas de cometas pola repercusión que o Sol, ó cruza-lo plano da nosa galaxia, exerce sobre a nube de cometas de Oort que está próxima ó dito plano. As extincións periódicas poderían así ser explicadas, calculándose períodos de tempo duns trinta e tres millóns de anos.

Parece sorprendente a asimetría entre a revolución da tectónica de placas e o cambio do punto de vista que requiría a hipótese do impacto KT: mentres que a tectónica de placas foi uniformitaria en concepto, pero cambiou de forma espectacular a visión tradicional da Xeoloxía, a aceptación da hipótese dos impactos, aínda que catastróficos en concepto, están a ter un efecto máis gradual.

O novo enfoque do interese nas extincións, inspirado en boa parte pola hipótese dos Álvarez, está a producir unha transformación non só no pensamento sobre a natureza da evolución, senón tamén no do uniformitarismo incondicional. O punto de vista tradicional darwinista inclúe esa competencia entre as especies como un impulso na historia da vida, con cambios no medio físico como un asunto de impor-

tancia secundaria. No novo punto de vista, a evolución parece ter un componente substancialmente oportunista. Podía haber longos períodos nos cales a vida evolucionaba gradualmente debido á competencia entre as especies, pero eran interrompidos por episodios de extremos cambios ambientais que alteraban o curso da historia da vida. A loita primaria é a que se leva a cabo co clima, a xeoloxía e tal vez contra asaltos ou agresións extraterrestres. Os perdedores extínguense adoito en grandes vagas de morte. Os superviventes ocupan os hábitats que quedaron baleiros e desenvólvense con medios que non tiveron ó seu alcance antes da extinción masiva. En conxunto, unhas cousas e outras, trátase dun período de morte e creación. As extincións non só alteran o reloxo do cambio evolutivo, senón que controlan a vida en direccións completamente novas. É posible que os paleontólogos, axudados polos Álvarez e os astrofísicos, acaben por descubrir que a historia da vida está conformada nos seus camiños decisivos por forzas celestes.

A hipótese do impacto KT dos Álvarez foi máis aló do que eles imaxinaron. O impulso que recibiu o estudio dos asteroides levou a recoñecer aqueles ricos en gases volátiles (chondrites carbonáticos; Chapman, 1982). E actualmente especúlase se cometas ou asteroides puideran axudar na orixe da vida transportando moléculas complexas cara á Terra. Deste modo, a vida non sería autóctona senón que podería ter sido transportada desde

un corpo celeste cunha diferenciación xeoquímica semellante á nosa. As atmosferas dos nosos veciños, Venus e Marte, indicannos hoxe a probable evolución do noso planeta (prexudiciais ambas para o noso *modus vivendi*), unha de gasificación (efecto invernadoiro) e outra contraria, de degasificación da nosa atmosfera.

COROLARIO

A ciencia xeolóxica neste século, a pesar dos prexuízos conservadores e as modas intelectuais, permítenos destacar en primeiro lugar unha nova visión sobre o funcionamento da Terra, que se inicia coa deriva continental e culmina coa tectónica de placas, e, segundo, unha ruptura no eterno enfrontamento entre gradualistas e catastrofistas, á vez que reformula a nosa posición actual no planeta. A recente aceptación da hipótese do impacto KT, ademais da nova perspectiva que ofrece ó conducirnos incluso alén do sistema solar, leva tamén a un gran número de reflexións de evidente actualidade:

1. A nosa orixe está vinculada a unha evolución xeolóxica, química e biolóxica, particularmente sementada de accidentes e catástrofes dun planeta menor que viaxa arredor dunha estrela menor nunha de tantas galaxias do universo.

2. A nosa fin tamén pode depender dos mesmos mecanismos azarosos: ó analiza-lo tráxico destino dos grandes dinosauros, o fenómeno que fixo

posible a evolución dos mamíferos e, en consecuencia, a nosa propia evolución, desde o *Homo sapiens* hai 500.000 anos, ata o desenvolvemento dunha esencialísima característica como é a conciencia, fai que nos formulemos preguntas verbo do noso pasado e do noso futuro. Só os seres humanos se interrogan sobre as súas orixes e se preocupan polo futuro. Esta autoconciencia é a fonte da relixión e a xustiza, das artes e das ciencias, é a nosa propia humanidade. Na opinión da maior parte dos científicos, Gould (1984) dixo: “La conciencia es un caprichoso accidente de la evolución, un producto de un linaje peculiar que desarrolló la mayor parte de los componentes de la inteligencia para otros procesos evolutivos”.

3. De tódalas especies existentes, ou que existiron no pasado, só nós conseguimos chegar a dispoñer de poder abondo para provoca-la nosa propia extinción e a conciencia suficiente para decatármonos de que estamos condenados a sufrilo noso propio medo. Podemos mira-lo futuro e contempla-la nosa morte, como especie, en circunstancias non moi distintas daquelas que se precipitaron sobre os poboadores do período Cretáceo. A única diferenza é que os dinosauros deberían culpar da súa extinción a elementos procedentes das estrelas, mentres que nós non poderíamos culpar a ninguén máis ca a nós mesmos.

Luis Álvarez deuse conta do paralelismo existente entre a hipotética catástrofe que condenou os dinosauros

e unha guerra nuclear, comparación que nos fai dubidar das esperanzas de que se poida sobrevivir a semellante circunstancia: o mundo quedaría novamente sumido na escuridade de ferruxe durante semanas e reduciríase a luz necesaria para o desenvolvemento das plantas. Ó mesmo tempo, produciría unha onda de frío implacable por tódalas partes. O resultado podería ser a desaparición da especie humana.

4. Afortunadamente, a ciencia permítenos, coñecendo estas circunstancias, poder prever, mitigar e ata alterar los ciclos bioxeoquímicos: é posible que nunca cheguemos a saber con certeza qué lles ocorreu ós dinosauros, pero o certo é que sabemos bastante como para preguntarnos se iso mesmo podería ocorrer nos a nós. Se o que lles afectou foi unha catástrofe repentina, pensemos nunha guerra nuclear e sentiremos calafríos. Se a súa desaparición se produciu gradualmente, debido a unha acumulación de causas que alteraron o medio ambiente, non temos máis remedio que pensar nos efectos do exceso de poboación, a deforestación, os venenos químicos e a polución cada vez maior sobre a habitabilidade da Terra. Mesmo se dun modo ou outro se logra evita-la guerra nuclear, o mundo segue enfrontado á inmediata perspectiva de extincións que podería rivalizar, e incluso superar, a que tivo lugar a finais do Cretáceo.

5. Ende mal, o desenvolvemento non foi coherente co coñecemento e estes ciclos bioxeoquímicos están sendo alterados prexudicialmente

pola nosa propia actividade. Dous investigadores, Paul Ehrlich e Daniel Simberloff, preveñen de que a poboación humana está medrando de modo tan explosivo e está modificando o medio natural de xeito tan drástico que outras especies están perecendo a un ritmo alarmante, tanto é así, que podería acadar as proporcións dunha extinción masiva nos próximos douscentos anos. “Por primeira vez en la historia geológica —dixo Ehrlich— un episodio de gran importancia será puesto en acción por el exceso de capacidad de una especie, el Homo sapiens”.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L. W., W. Álvarez, F. Asaro, e H. V. Michel, “Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction”, *Science*, 208, 1980, 1095-1108.
- Bentor, Y. K., “Geological Events in the Bible”, *Terra Nova*, 1, 326-338.
- Beveridge, W. I. B., *The art of scientific investigations*, Londres, Heinemann, 1950.
- Burnet, T., *Telluris Theoria Sacra*, Londres, 1680-1689.
- Chapman, C. R., “Asteroids”, en J. K. Beatty, B. O’Leary, e A. Chaikin, *The new Solar System*, Cambridge, Mass., Cambridge Univ. Press e Sky Publ. Co., 1982, 97-104.
- Dietz, R., “Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea

- floor", *Nature*, Londres, 190, 1961, 854-7.
- Du Toit, A. L., *A geological comparison of South America with South Africa*. Carnegie Inst. Wash. Publ. 381, 1927, 1-157.
- Fenton, C. L., e M. A. Fenton, *Giants of Geology*, Garden City, N. Y.: Doubleday, 1952.
- Gould, S. J., "Making These Bones Live", *New York Times*, 9 de dezembro, 1979.
- Hallam, A., *De la Deriva de los Continentes a la Tectónica de Placas*, Barcelona, Ed. Labor, 1976.
- "The causes of Mass Extinctions", *Nature*, 308, 1984.
- Great Geological Controversies*, Oxford University Press, 2ª edición, 1989.
- Heezen, B., "The sea floor", en S. K. Runcorn (ed), *Continental drift*, Nova York, Academic Press, 1962.
- Hess, H., *History of ocean basins*, en: A. E. J. Engel et al. (ed.), *Petrologic studies*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, 1962.
- Holmes, A., *Radioactivity and earth movements*, Glasgow, Trans. Geol. Soc. 18, 1929, 559-606.
- Hsü, K. J., *La Gran Extinción: catástrofe cósmica, dinosaurios y la teoría de la evolución*, Barcelona, Antoni Bosch, editor, 1986.
- Hutton, J., *Theory of the Earth with proofs and illustrations*, 2 vols., Edimburgo, 1975.
- Irving, S., *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*, Nova York, J. Willey, 1964.
- Le Pichon, X., "Sea floor spreading and continental drift", *J. Geophys. Res.* 73, 1968, 3661-97.
- Monroe, J. S., e R. Wicander, *Physical Geology*, West Publ. Co., 1992.
- Morgan, W., "Rises, trenches, great faults and crustal blocks", *J. Geophys. Res.* 73, 1968, 1959-82.
- Muller, R. A., "An adventure in Science", *New York Times*, 24 de marzo, 1985.
- Runcorn, S. K., "Paleomagnetic evidence for continental drift and its geophysical cause", en S. K. Runcorn (ed.), *Continental drift*, Nova York, Academic Press, 1962.
- Schopf, J. W., "La evolución de las células primitivas", en: *Evolución*, Serie Investigación y Ciencia, Barcelona, Ed. Labor S. A., 1979, 51-67.
- Soffen, G. A., "Life on Mars?", en: Beatty, J. K., B. O'Leary, e A. Chaikin. *The new Solar System*, Cambridge, Cambridge Univ. Press e Sky Publ. Co., Mass., 1982, 93-96.
- Suess, E., *The face of the Earth* (5 vols.), Oxford, Clarendon Press, 1904-9.

- Taylor, F. B., *Bearing of the tertiary mountain belt on the origin of the Earth's plan*, Bull. Geol. Soc. Amer., 21, 1910, 179-226.
- Torbett, M. V., e R. Smoluchowski, "Orbital Stability of the unseen Solar Companion Linked to Periodic Extinction Events", *Nature*, 311, 1984.
- Torbett, M. V., "Solar system and galactic influences on the stability of the Earth", *Global and Planetary Change*, 75, 1-2, 333, 1989.
- Vilas, F., "Las cuatro revoluciones científicas al Génesis", Lección Maxistral de Apertura de curso, Universidade de Vigo, 1996.
- Vine, F., "Spreading of the sea floor: new evidence", *Science* 154, 1966, 1045-15.
- Vine, F., e D. H. Matthews, "Magnetic anomalies over oceanic ridges", *Nature*, 199, 1963, 479.
- Wegener, A., *Die Entstehung der Kontinent*, Petermanns Mitteilungen, 1925, 185-95, 253-6, 305-9.
- *The origin of continents and oceans*. Translated from the 4th revised German edition of 1929 by J. Biram, with an introduction by B.C. King, Londres, Methuen, 1966.
- Wilson, T., "A new class of faults and their bearing on continental drift", *Nature*, 207, 1965, 343-7.



A MEDICINA NO SÉCULO XX

*Fernando Domínguez Puente**
Universidade de Santiago
de Compostela

INTRODUCCIÓN

A percepción xeral de que a Medicina avanzou ó longo do século XX xustifícase suficientemente analizando a evolución de diversos indicadores sanitarios, algún dos cales se recolle na táboa I. En España, a mortalidade de nais e fillos tralo parto viuse substancialmente reducida ó longo do século. A mortalidade é menor tanto en número absoluto (aínda cando a poboación total aumentou), coma de forma relativa. Así, no ano 1980 só falecen catorce de mil nenos nados vivos; esa cifra é trece veces superior en 1900 (táboa I). É obvio que esta drástica diminución da mortalidade non é gratuíta e obedece a unha mellor asistencia médica. Son varias as razóns que xustifican esta mellora sanitaria; só mencionarei dúas: o desenvolvemento da medicina racional ou científica e o da saúde pública e dos servicios asistenciais públicos.

TÁBOA I
Mortalidade de nais e fillos tralo parto

	1900	1980
Nais	3.000	181
Fillos	125.000	6.676
Fillos mortos (por mil nados vivos)	186	14
Poboación Total (millóns)	18	37

A Medicina é unha rama das ciencias positivas. Con esta proposición, deliberadamente, exclúo outras prácticas 'médicas' chamadas alternativas, naturais, etc., que, na miña opinión, dan logros imposibles de avaliar pola ausencia dun corpo rigoroso de datos experimentais que permita as súas análises.

O propio concepto de enfermidade mudou e, progresivamente, foise desprendendo de connotacions máxicas ou metafísicas, aínda que é notoria a persistencia de curandeiros ou de

* Catedrático de Fisioloxía.

profesionais sanitarios con estudos universitarios que ofrecen remedios alleos á medicina racional. Non pretendo facer valoración ningunha (pois a súa argumentación excede o ámbito desta publicación) das prácticas médicas alternativas, senón xustificar por qué non se volve facer mención delas ó longo do artigo. Tampouco me vou referir a medicinas tradicionais distintas da occidental.

Limitareime, pois, a trata-lo desenvolvemento da Medicina racional da que debemos resaltar, polo menos, tres grandes facetas. En primeiro lugar, os enormes avances científicos que permitiron comprende-la orixe e as manifestacións clínicas de bo número de enfermidades. En segundo lugar, o desenvolvemento de novos métodos diagnósticos non invasivos, moitos dos cales supuxeron grandes revolucións tecnolóxicas que permiten diagnósticos máis precisos e precoces. O abano é enorme e iníciase a principios de século cos raios X (a primeira radiografía tomouna Röntgen da man da súa muller en 1895), o electrocardiograma desenvolvido por Einthoven ou o modesto esfingomanómetro que permite medirla presión arterial ideado en 1896 polo médico italiano Riva-Rocci e perfeccionado polo ruso Nicolai Korotkoff en 1905. Ó longo do século fóronse incorporando o microscopio electrónico ou, máis recentemente, a endoscopia, a tomografía axial computarizada (TAC), a tomografía de emisión de positrons (PET) que permite diagnosticar metástases mínimas ou analiza-lo cerebro en

pleno funcionamento, a resonancia magnética nuclear, láseres, ultrasóns e un longo etcétera que revolucionou a capacidade diagnóstica do médico. En terceiro lugar, as ferramentas terapéuticas perfeccionadas ó longo do século XX, que dotaron o médico dun arsenal enorme e, nalgúns casos, excepcionalmente eficaz para combater-la enfermidade.

Non vou desenvolver algúns temas que por dereito propio deberan figurar aquí como son a Xenética ou a Neurociencia, por ser tratados máis extensamente noutros artigos desta monografía. A Cirurxía escíndese da Medicina e trátase nun capítulo independente.

A MEDICINA PÚBLICA

No século XIX a percepción de que a pobreza ou a explotación laboral infantil afecta negativamente a saúde fai que a sociedade tome conciencia da importancia da prevención e así a saúde pública vólvese obxecto da política, da administración e da xustiza. O desenvolvemento que a Medicina preventiva acadou hoxe nas sociedades occidentais é enorme; é difícil atopar algunha faceta da vida humana que non se vexa afectada por consideracións sanitarias. A prevención de enfermidades inflúe radicalmente na nosa forma de vida: desde a dieta, pasando polo exercicio ata numerosas regulacións que afectan a calidade da auga ou a salubridade dos edificios públicos. A

preocupación polo medio natural, en boa medida, ten a súa orixe nunha inquietude pola repercusión que a súa alteración, a contaminación, ten sobre a saúde da poboación.

Tradicionalmente a Medicina privada atendeu as necesidades médicas das clases acomodadas, mentres que as institucións sanitarias públicas eran entidades caritativas. O establecemento dun sistema estatal asistencial sufragado con impostos modificou enormemente o escenario da asistencia médica, que deixou de ser maioritariamente privada para se converter hoxe en fundamentalmente pública. A universalidade da asistencia médica pública non é só un dereito senón unha realidade práctica da que se beneficia toda a poboación. Os pacientes, á marxe das súas condicións económicas, recorren á asistencia médica pública, especialmente nos casos que revisten maior gravidade, pola garantía de calidade asistencial que lle ofrece. Nunca a poboación gozou de mellor saúde e dunha maior esperanza de vida; sen embargo, paradoxalmente, o grao de insatisfacción e de críticas ós servizos de asistencia públicos (á parte da cor política do goberno que os administre) que mostra o cidadán é grande. Analiza-las razóns deste descontento supera as intencións deste artigo pero é conveniente constatar que a súa existencia garante que a saúde pública seguirá sendo motivo central do debate público en anos vindeiros. Como consecuencia disto, o gasto público en sanidade vai seguir medrando e un dos

desafíos máis importantes que afectan á asistencia pública é sorprendente-mente de orixe económica e non médica: a contención do gasto sanitario. Hai trinta anos era impensable que a moderación do gasto médico se convertese no principal desafío da saúde pública nos países europeos; sen embargo, hoxe é así. En consecuencia, o médico perdeu protagonismo en beneficio dos xestores públicos.

Paralelamente, asistimos a un afastamento cada vez maior entre a asistencia sanitaria ou, mellor aínda, os dereitos sanitarios básicos dos habitantes dos países pobres e a dos países desenvolvidos —incluso nestes últimos, non tódolos sectores sociais teñen *de facto* os mesmos niveis de saúde—. A saúde dos países máis pobres é un problema de Occidente, non só por razóns éticas, senón tamén polo feito de que estes países se converten en depósitos de axentes infecciosos que acaban atacando indiscriminadamente a toda a humanidade (o caso da SIDA é emblemático). Todo isto indícanos que a saúde pública non deba ter fronteiras nacionais. Así, durante este século asistimos ó nacemento de organismos internacionais que se ocupan da saúde pública en todo o mundo, como a OMS (Organización Mundial da Saúde, fundada en 1948) que conseguiu a erradicación da varíola en todo o planeta en 1977.

Pódese afirmar que a mellora da saúde pública nos países pobres pasa por repeti-los pasos que Occidente previamente ten dado; daquela, haberá

que erradica-la explotación infantil, a miseria ou as taxas de natalidade incontroladas, entre outros moitos aspectos, para acadar-las niveis de saúde que actualmente gozan os países occidentais.

O papel central que os grandes hospitais desempeñan na atención sanitaria é un dos aspectos máis significativos do noso sistema sanitario e do dos países da nosa contorna. Sirva como exemplo o incremento do número de camas hospitalarias por mil habitantes. No Reino Unido dobrouse desde 1860 ata 1940, isto é, en oitenta anos; desde 1940 ata 1980 volveuse duplicar, esta vez en só corenta anos. As innovacións tecnolóxicas son asombrosas, como mencionamos antes. Canda isto, o desenvolvemento de quirófanos ben equipados, con condicións hixiénicas excepcionais, transformou o hospital nun centro que acolle tódalas clases sociais e deixou de ser unha institución destinada ós pobres. Outro aspecto non menos relevante do hospital é que se converteu no centro de atención das urxencias médicas, de tal forma que o cidadán, cando sente o menor síntoma, non dubida en acudir a el.

O perfeccionamento de laboratorios e servicios de apoio fixo que non só se incrementara a tecnoloxía médica, senón tamén o persoal altamente especializado que a manexa. Non é de sorprender, polo tanto, que os custos hospitalarios se disparasen e que a gran maioría das persoas ou institucións que tradicionalmente eran propietarias de

hospitais ou sanatorios acabasen non podendo resisti-la escalada dos custos; só coa integración dos hospitais no Sistema Nacional de Saúde se lles puido facer fronte. Por outra parte, estes custos ameazan o propio Sistema.

Algúns críticos afirman que os hospitais modernos contribuíron pouco á Medicina non sendo para incrementa-los custos. Arguméntase que foron as medidas de saúde pública do século XIX as que diminuíron realmente a mortalidade. Aínda que excesivamente radicais, estas afirmacións deben servirnos para cuestiona-lo porvir dos hospitais na súa forma actual: ¿serán considerados no futuro como dinosauros da medicina?; ¿debemos substituí-los macrocentros que estamos construindo por outros máis reducidos e variados?; ¿cargouse de máis o papel asistencial do hospital?, son interrogantes que, en beneficio das futuras xeracións, deberemos saber resolver.

A EVOLUCIÓN DAS ENFERMIDADES

Desde os inicios do século XX xerouse unha enorme cantidade de coñecementos sobre os axentes externos —químicos, físicos e biolóxicos— que aflixen o noso organismo. Paralelamente, foi necesario entender cómo os axentes externos actúan sobre o noso corpo, identifica-lo obxecto da súa acción e comprende-las consecuencias orgánicas desta.

O tipo de enfermidades e as consecuencias que teñen sobre a saúde

variaron co avance do século. Algunhas das causas desta variación son as seguintes. Por unha parte, o desenvolvemento da Medicina permitiu atallar ou polo menos paliar-las consecuencias morbosas dunha enfermidade como a tuberculose, que pasou de ser unha causa principal de mortalidade a principios de século a unha patoloxía perfectamente controlada hoxe en día —nalgún caso elimínase a enfermidade porque se elimina o axente causal—; por outra, a permanente evolución dos axentes biolóxicos causa a

variabilidade da enfermidade e da súa presentación clínica.

Na táboa II podemos ve-la evolución experimentada polas causas de mortalidade infantil no Reino Unido durante o pasado século. Por unha parte, a mortalidade debida a patoloxías de orixe non xenética diminuíu sensiblemente. En gran medida este descenso é achacable a un mellor control das doenzas infecciosas. Por outra parte, a mortalidade debida a enfermidades cun compoñente xenético, especialmente o grupo de multifactoriais, medrou de continuo durante a centuria.

TÁBOA II
Porcentaxe de mortes infantís

Patoloxías	Anos			
	1914	1954	1966	1976
Non xenéticas	83	62	58	50
Xenéticas simples	2	12	8	9
Xenéticas multifactoriais	14	25	31	38

Para entender adecuadamente esta táboa cómpre unha aclaración do que consideramos enfermidades xenéticas multifactoriais (figura 1). Unha enfermidade pode ter unha orixe fundamentalmente ambiental (unha gripe, por exemplo, que ten como factor desencadeante un virus que é un axente exterior ó organismo) ou esencialmente xenético (un xene é un constituinte do organismo que pode verse afectado) como no caso da hemofilia. O xene afectado transmítese de pais a

fillos, e a enfermidade non necesita dun axente externo para desencadearse nos fillos. Sen embargo estes casos son extremos xa que na maioría das patoloxías a enfermidade ten un dobre compoñente, ambiental e xenético; o cancro, por exemplo, iníciase porque un axente externo canceríxeno interacciona cun xene que controla a proliferación celular.

A maior parte das patoloxías presentan este dobre compoñente, sen

Ambiental	Xenética Multifactorial	Xenética Simple
Gripe Sarampelo Enfermidade infecciosa	Diabete Cancro E. autoinmunes	Fibrose Quística Hemofilia

Figura 1. Continuum das enfermidades.

embargo demostra-la súa orixe non é doado. Francis Crick, o coñecido biólogo molecular, que, xunto con Watson, esclareceu a estrutura tridimensional do ADN, afirma que a orixe dunha enfermidade non se establece ata que se aclara a escala molecular. A historia familiar fainos sospeita-la existencia dun compoñente xenético nunha enfermidade. Rastrexa-la participación e, posteriormente, identificar un xene responsable dunha enfermidade multifactorial non é fácil e non foi posible ata a chegada das técnicas de Xenética molecular. A xenética humana percorreu un longo camiño desde que, a principios de século, Garrod propón a orixe xenética dalgunhas enfermidades metabólicas, pasando por Linus Pauling que describe a primeira enfermidade en termos moleculares, a anemia falciforme; hoxe en día xa están descritas máis de tres mil cincocentas patoloxías xénicas. O desenvolvemento da Citoxenética, a rama da Xenética que estudia as lesións cromosómicas, produciuse paralelamente neste século. Para esta-

blece-lo número exacto de cromosomas humanos houbo que esperar a 1956, cando o científico de Java, doutor Joe Hin Tjio, que traballaba en Zaragoza (España), en colaboración co seu mestre, o profesor sueco Johan Levan, estableceu o número en corenta e seis.

O FUNCIONAMENTO NORMAL DO ORGANISMO

Unha enfermidade é unha alteración do funcionamento normal dun órgano. Non é posible entender nin a orixe nin o curso da enfermidade sen coñecer previamente o funcionamento normal do organismo. Por iso revisáremos os avances fundamentais que durante este século afectaron a comprensión do funcionamento do corpo.

O coñecemento de cómo funciona o noso organismo avanzou de forma prodixiosa no século XX. A finais do século XIX, a Fisioloxía, a ciencia que estudia a función orgánica, empezou a ter entidade de seu e a organizarse como tal, e xa produciu científicos de

enorme talle como Claude Bernard (o seu pensamento segue estando de actualidade). Sen embargo, conceptos tan básicos como os de vitamina, hormona, neurotransmisor, anticorpo, etc., foron acuñados durante o pasado século. Repasaremos brevemente algúns capítulos destacados.

A INMUNOLOXÍA E A LOITA CONTRA A INFECCIÓN

A introducción da vacina e a caracterización de microorganismos responsables de varias enfermidades infecciosas foi un logro alcanzado no século XIX. Emporiso, a ciencia médica carecía nos albores do século XX de ferramentas terapéuticas, agás as preventivas, na loita contra as enfermidades infecciosas. Máis aínda, ata finais dese século non foi posible enténdelos principios do funcionamento do sistema inmune.

Paul Ehrlich, científico alemán, pode considerarse o iniciador da quimioterapia, isto é, a utilización de produtos químicos para o tratamento de enfermidades. Foi el quen introduciu o Salvarsan, unha preparación sintética que contén arsénico e que se utilizou satisfactoriamente no tratamento da sífilis. Ata a aparición dos antibióticos, o Salvarsan foi o método de tratamento por excelencia desta enfermidade. As consecuencias sociais do dito achado serían comparables ás que hoxe teríamos se se encontrase un remedio inmediato para a curación da SIDA. En 1932,

vintedous anos máis tarde, o discípulo de Ehrlich, Gerhard Domagk, daquela director do laboratorio de investigación da casa Bayer, descobre o efecto curativo dun colorante vermello nas infeccións causadas por estreptococos. Pouco despois, en 1939, recibe polo seu achado o premio Nobel que o réxime nazi lle impide recoller. Científicos do Instituto Pasteur de París descubren que o principio activo presente no colorante é a sulfanilamida, e establecen así un novo fito na curación das enfermidades infecciosas. Esta droga presentaba efectos secundarios que levaron a comunidade científica a buscar novos derivados dela, fundamentalmente na familia das sulfonamidas da que lograron illar uns cincuenta produtos clinicamente útiles.

Sen embargo, os antibióticos axiña desprazaron a quimioterapia no tratamento das enfermidades infecciosas. A diferenza entre antibióticos e quimioterápicos é que os primeiros son produtos naturais, ou máis recentemente semisintéticos, mentres que os últimos son sintéticos. A historia do descubrimento dos antibióticos por Sir Alexander Fleming é ben coñecida e reflicte esa mestura de azar e xenio subxacente detrás de gran número de avances científicos. A antibiose, a morte dun organismo polos produtos doutro distinto, xa se coñecía no século XIX. Sen embargo, só Fleming se decatou da importancia que a antibiose podía ter no tratamento das enfermidades infecciosas. Traballando con estafilococos puido comproba-lo efecto bactericida



Paul Ehrlich descubriu en 1910 o Salvarsán, que resultou eficaz no tratamento da sifilis con quimioterapia.

do fungo *Penicillium* —que deu nome á penicilina—. A pesar da súa crenza en que a penicilina era un potente antibactericida sen efectos secundarios, pasaron dez anos ata que a hipótese de Fleming fose comprobada. O científico australiano Howard Florey logrou interesa-lo bioquímico Ernest Chain de Oxford, quen finalmente obtivo preparados bastante puros de penicilina que demostraron a súa enorme potencia bactericida. A industria farmacéutica británica, quizais polo estoupido da Segunda Guerra Mundial que se produce neses momentos, cometeu un dos maiores erros históricos cando desbotou a produción industrial e comercial



A repercusión social do descubrimento de Ehrlich non se fixo esperar. Cartel de R. Casas que anuncia un sanatorio para sifilíticos.

da penicilina. Posteriormente foi a industria americana a que apostou por ela e en 1944 utilizábase xa nos campos de batalla. En 1945, Fleming, Florey e Chain recibiron o premio Nobel.

A penicilina atacaba os mesmos microbios cás sulfonamidas e moitos outros, pero sen efectos secundarios. Este grande éxito levou á busca de novos antibióticos en todo o mundo. O primeiro logro foi a estreptomina que se demostrou eficaz na loita contra unha enfermidade mítica, ata o momento intratable, a tise ou tuberculose. Aínda que pouco despois puido comprobarse que o bacilo de Kock se adapta rapidamente e acaba sendo resistente. Afortunadamente, acháronse outras drogas eficaces no tratamento da tuberculose que manteñen a raia esta enfermidade que, ata hai ben pouco, se consideraba practicamente erradicada e que, sen embargo, coñeceu un rebrote significativo en datas recentes.

Hoxe en día, a pesar do grande arsenal terapéutico e a enorme experiencia no uso dos antibióticos, o continuo crecemento de bacterias resistentes a estes é causa de gran preocupación e esixe o seu uso racional.

Atopar axentes antivirais resultou unha tarefa extraordinariamente difícil a pesar duns inicios enormemente esperanzadores. Os mellores resultados obtivéronse co uso de vacinas que Edward Jenner introduciu na práctica médica a finais do século XVIII. O desenvolvemento dos coñecementos

básicos permitiu o cultivo de virus no laboratorio e o seu posterior estudio mediante novas técnicas que ían progresando simultaneamente, como por exemplo o microscopio electrónico. A información así obtida permitiu a finais dos cincuenta e nos sesenta a produción de novas vacinas máis efectivas, e enfermidades que antes azoutaban a Humanidade, como a varíola, a poliomielite, o sarampelo ou a rubéola están hoxe erradicadas ou, polo menos, controladas. Un exemplo disto último é a gripe que, a pesar da súa enorme variabilidade que dificulta o desenvolvemento dunha vacina que logre erradicala, fai, sen embargo, improbable que se produzan pandemias como a que varreu o mundo en 1918-1919 e que causou a morte de máis de quince millóns de persoas.

Ultimamente e, en parte, debido ás enormes repercusións sociais que tivo a SIDA, iniciouse unha nova busca de drogas sintéticas que poidan interferir co ciclo vital do virus, inhibindo algún proceso, preferiblemente específico do virus. Certamente esta busca acadou importantes éxitos parciais grazas ó avance logrado cos novos tratamentos, como se reflicte no mellor prognóstico dos pacientes afectados.

As bases do funcionamento do sistema inmune foron un crebacabezas durante boa parte do século. Contrariamente ó que sucede noutras ramas das ciencias médicas, os avances teóricos desenvolvéronse antes de que se puideran obter achados experimentais que os confirmaran. Así, a teoría da

selección clonal proposta por Macfarlane Burnet na década dos cincuenta necesitou máis de vinte anos para ser corroborada experimentalmente.

Os experimentos de Karl Landsteiner a principios de século demostraron a enorme capacidade que o noso organismo ten para xerar miles de millóns de anticorpos distintos e a súa grande especificidade (son quen de rexeitar tecidos idénticos se proceden de doadores diferentes). Ata ben entrada a década dos setenta non se puido demostrar o mecanismo polo que o sistema inmune dá xerado tantos miles de millóns de anticorpos diferentes, por outra parte, necesarios para enfrontarse ó mundo dos microorganismos que é tremendamente variable. Está fóra do contexto desta revisión explica-los mecanismos da xeración somática da diversidade de anticorpos por recombinación xénica, pero o seu descubrimento foi un dos maiores fitos da Fisioloxía deste século XX, como o testemuña a concesión en solitario do premio Nobel ó seu descubridor, o científico xaponés Susumu Tonegawa.

Outro achado de grande importancia na inmunoloxía médica foi a identificación dos xenes que participan no rexeitamento dos tecidos, coñecidos no rato como complexo principal de histocompatibilidade e no home como antíxenos leucocitarios humanos (HLA). Tres científicos foron os principais responsables destes descubrimentos que tanto facilitaron a rutina do transplante de órganos nos hospitais: Baruj Benacerraf, nado en Venezuela, o

norteamericano George Snell e o francés Jean Dausset. Sen embargo, ata a introducción da droga inmunosupresora ciclosporina, o transplante non tivo o florecemento que hoxe coñecemos.

É corrente na ciencia que algúns experimentos tendentes a aclarar procesos básicos acaben dando lugar a aplicacións prácticas de índole industrial de gran relevancia. Un exemplo do dito é o desenvolvemento dos anticorpos monoclonais polo científico arxentino, de nacionalidade británica, Cesar Milstein, e o investigador alemán, prematuramente desaparecido, George Köhler, que, tratando de aclarar-los mecanismos que xeran a diversidade de anticorpos, desenvolveron unha ferramenta de uso universal tanto nos laboratorios de investigación como clínicos de todo o mundo. A importancia dos anticorpos monoclonais reflíctese na concesión a ambos do premio Nobel.

OS MENSAXEIROUS QUÍMICOS E A FARMACOLOXÍA

A primeira vez que se puido demostrar fidedignamente a transmisión química do impulso nervioso foi gracias ó experimento *soñado* polo científico alemán Otto Loewi. El describe así cómo lle xurdiu a idea de realiza-lo experimento:

Na noite do sábado de resurrección de 1921, espertei e escribín unhas poucas notas nun anaco pequeno de papel. Entón volvíñ quedar durmido. Ocurréuseme ás seis da mañá que durante a

noite escribira algo moi importante pero non dei descifrado os garabatos que fixera. Ese domingo foi o día máis terrible de toda a miña vida científica. Durante a noite, sen embargo, acordei outra vez e lembrei o que era. Erguinme ó momento, fun ó laboratorio, fixen o experimento co corazón da ra e... ás cinco en punto a transmisión química do impulso nervioso ficaba demostrada concluintemente.

O experimento soñado por Loewi consistía en estimula-lo nervio vago nunha ra, o que reduce a frecuencia cardíaca, e poñer en contacto o corazón dunha segunda ra co líquido que bañaba o corazón estimulado. Así, o segundo corazón, ó que non se lle estimulara o nervio vago, diminúe a súa frecuencia ó se poñer en contacto co mensaxeiro químico presente no líquido que bañaba o primeiro corazón e que se liberou por estimulación do nervio vago do primeiro animal.

Hoxe son moitos os neurotransmisores caracterizados. Ademais, e este foi un campo especialmente fructífero da Farmacoloxía, desenvolvéronse fármacos que poden ser agonistas ou antagonistas dos ditos neurotransmisores. Estes novos fármacos supuxeron unha grande axuda no tratamento de múltiples doenzas que afectan a distintos campos pero, quizais, en ningún tivo unha repercusión social maior ca no tratamento dalgún dos trastornos da conducta, polo valor emblemático que estas doenzas acadaron dada a crenza tradicional de que as enfermidades mentais teñen un compoñente inmaterial, inaccesible ó médico e, polo tanto, resistente ó tratamento farmacolóxico.

Afortunadamente o psiquiatra moderno conta cun abano de fármacos que poden, se non curar de vez, polo menos paliar en parte os devastadores efectos que algúns trastornos mentais exercen sobre os pacientes.

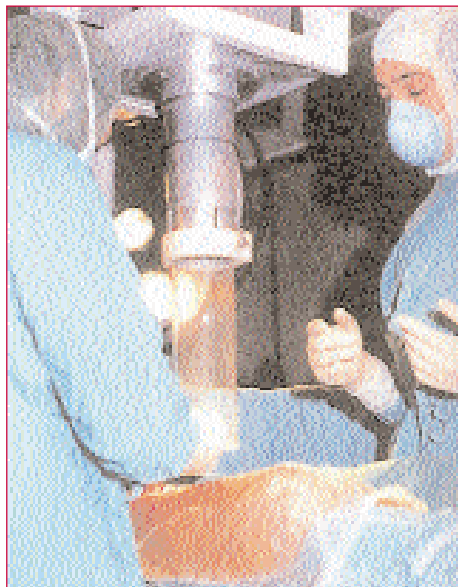
Un dos grandes retos da Farmacoloxía actual é atopar un remedio eficaz que impida ou, ó menos, free o desenvolvemento dos procesos neurodexenerativos. Estes, nas súas manifestacións máis severas, invalidan os pacientes para desenvolveren unha vida normal. Son procesos que afectan especialmente a poboación de maior idade e teñen cada vez máis incidencia na poboación debido ó progresivo envellecemento da nosa sociedade.

Os accidentes cardiovasculares son unha das causas máis frecuentes de morte na nosa sociedade. A introdución de fármacos que diminúen o risco tromboembólico ou que destrúan o trombo unha vez formado, como os activadores do plasminóxeno, permitiron reduci-la mortalidade dos pacientes afectados dun infarto de miocardio. Sen embargo, logo de se producir a lesión, debido á natureza do músculo cardíaco, esta é irreversible. A bioenxeñería estase perfeccionando coa esperanza de obter —a partir de células embrionarias cultivadas no laboratorio— células que poidan substituí-lo tecido lesionado. A idea que fundamenta este tipo de investigacións é tratar de reproducir no laboratorio as condicións que se producen durante o desenvolvemento embrionario e que permiten que un número reducido de

células dea lugar a órganos funcionais diferenciados. O coñecemento das bases fisiolóxicas que regulan o desenvolvemento embrionario aínda é hoxe moi escaso, pero as esperanzas terapéuticas que esperta son enormes. Así, en teoría, a escaseza de órganos necesarios para os transplantes pasaría á historia. Sen dúbida esta singradura, de especial importancia no século XXI, está sementada de grandes dificultades científicas e tamén de grandes sombras éticas que requiren outros avances da ética médica.

A introducción de novos hábitos de vida que reducen ou evitan a exposición a axentes canceríxenos, como pode se-lo abandono do tabaco, o cambio no tipo de dieta, etc., fai que a aparición de casos de cancro tenda a diminuír a pesar do incremento progresivo da esperanza de vida. O cancro, un complexo grupo de enfermidades, beneficiouse en gran forma da introducción de novos tratamentos, cirúrxicos e adxuvantes como a quimio e a radioterapia; unido isto a innovadores métodos de exploración que permiten un diagnóstico cada vez máis precoz do tumor, fai que o pronóstico dos pacientes mellorara nalgúns casos espectacularmente.

O avance da radioterapia debeuse en gran medida á produción de aparellos capaces de producir altas enerxías —da orde de millóns de electrón voltios—. Estes instrumentos poden subministrar doses elevadas de forma versátil, dependendo da extensión e localización do órgano afectado. Dada



Técnica de radioterapia intraoperatoria con acelerador lineal de electróns e fotóns de alta enerxía.

a súa utilidade terapéutica, aparellos como aceleradores lineais ou o cobalto-60 convertéronse en tratamentos comúns de cancros profundos.

A quimioterapia no tratamento do cancro avanzou considerablemente, e son xa varios os tipos de cancros que se poden curar con drogas. A utilización destas de forma combinada potencia o seu efecto e obtéñense así tratamentos máis radicais. Lamentablemente, todos estes tratamentos afectan non só a células cancerosas senón tamén a células normais que se dividen activamente, como as precursoras das células sanguíneas que se localizan na medula ósea. As transfusións e, máis recentemente, o transplante de medula ósea son medidas paliativas que tratan

de repara-lo efecto indesexable da quimioterapia sobre as células sas do organismo.

Existen moitos tratamentos experimentais deseñados para abordar diversos aspectos da patoloxía tumoral. Así, impedi-la anixionxénese, o desenvolvemento de novos vasos, necesarios para o crecemento do tumor, é un campo prometedor. A utilización de fármacos que tornan máis radiosensibles os tumores, a hipertermia, etc., son posibilidades terapéuticas que se exploran activamente. A introducción de xenes foráneos nas células tumorais capaces de dete-lo seu crecemento é unha das esperanzas da terapia xénica. Ten sucedido con frecuencia —e, quizais, o cancro non sexa unha excepción— que a mellora e o perfeccionamento dos medios terapéuticos existentes logran resultados mellores e máis consistentes que moitas terapias prometedoras nas que se invisten inxentes cantidades de recursos e que ó cabo non resultan máis que cantos de sereas. É difícil pensar que exista mellor alternativa terapéutica cá cirurxía no tratamento de moitos cancros e que esta vaia verse desprazada a curto ou medio prazo por outros tratamentos alternativos.

A ENDOCRINOLOXÍA, UNHA CIENCIA DO SÉCULO XX

A Endocrinoloxía desenvólvese no século XX. A introducción do termo hormona —do grego *ormao*, ‘esperta-la

actividade’—prodúcese na primeira década do século polo fisiólogo británico Starling que, estudiando os mecanismos de secreción pancreática, encontrou que eran estimulados por un mensaxeiro químico producido durante a dixestión ó que lle chamou secretina.

En 1921, Frederick G. Banting e Charles H. Best, na Universidade de Toronto, illaron extractos de páncreas de cans que, inxectados en cans diabéticos lograba mantelos vivos. A este extracto chamáronlle insulina. En xaneiro de 1922 inxectaron por vez primeira un ser humano con insulina. Era un neno diabético en moi mal estado ó que a inxección de insulina lle reduciu os niveis de glicosa. Un ano máis tarde, o bioquímico James B. Collip purificou suficientemente os extractos pancreáticos diminuindo así os efectos indesexables da súa administración. O mesmo ano concedéuselle o premio Nobel a Banting e a Macleod; no seu laboratorio fixéranse os experimentos. A Comisión Nobel ignorou a Best, o alumno asistente de Banting. Este último, furioso polo rexeitamento de Best, compartiu a dotación económica do premio con el. Macleod fixo o mesmo con Collip. A gran demanda creada pola insulina tivo que esperar a que a produción industrial desta alcanzase os mercados. Cando iso foi posible logrouse que os rapaces diabéticos puidesen levar unha vida normal e supera-lo destino tráxico que lles esperaría de non ter esta hormona.

O descubrimento das hormonas sexuais femininas e do control hormonal do ciclo ovárico tivo unha enorme repercusión social xa que permitiu introduci-los anticonceptivos orais. As hormonas tiroideas e o papel do iodo, necesario para a súa biosíntese, afectan a políticas gobernamentais especialmente en territorios endémicos como Galicia e ten moita importancia na loita contra o cretinismo. Programas de prevención nos que se abordan a detección precoz, no neno que acaba de nacer, de metabolopatías conxénitas e hipotiroidismo permitiron loitar eficazmente contra o atraso mental.

Un dos avances máis espectaculars da Endocrinoloxía produciuse na década dos sesenta: o descubrimento de que as persoas diabéticas xeran anticorpos dirixidos contra a insulina. Este feito, no seu día sorprendente, serviu para que Solomon A. Berson e a súa colaboradora, premiada máis tarde co Nobel, Rosalyn Yalow, desenvolveran unha técnica que permitía determinar con extraordinaria sensibilidade e especificidade os niveis circulantes dunha hormona. Esta técnica que se coñece como *radioinmunoensaio*, permitiulle ó endocrinólogo clínico coñecer-los niveis circulantes das hormonas con precisión e poder establecer diagnósticos baseados en datos fiables.

Un logro de gran repercusión teórica foi o illamento e a caracterización das hormonas hipotalámicas; supuxo un verdadeiro reto experimental xa que se necesitaron hipotálamos de cen-

tos de miles de animais para ter suficiente material de partida para secuenciar estas hormonas. Dous científicos, de forma independente aínda que ambos desenvolveron o seu labor nos Estados Unidos traballaron neste proxecto: un de orixe polaca, o profesor Andrew Schally, que illou as hormonas de medio millón de hipotálamos de porco. O outro científico, Roger Guillemin, de orixe francesa, traballou con hipotálamos de ovella. Para decatarse do enorme esforzo que este traballo supuxo basta mencionalo feito de que obte-lo miligramo inicial da primeira hormona hipotalámica illada, o TRH, foi máis caro que traer á Terra un miligramo de po lunar.

As hormonas circulan polo sangue e actúan sobre as células dos órganos que son diana das súas accións. Un descubrimento extraordinario realizou o doutor Earl Sutherland que descubriu que a hormona, no seu caso a adrenalina, actúa sobre a célula incrementando os niveis dunha molécula que funciona como mensaxeiro dentro da célula. Polo tanto, se a hormona é o primeiro mensaxeiro, a molécula intracelular inducida pola hormona coñécese como segundo mensaxeiro. Sutherland caracterizou o AMPc, o segundo mensaxeiro por excelencia. Hoxe en día o estudio dos mensaxeiros intracelulares é un campo activísimo, enormemente fructífero, imbricado coa xenética molecular, e vai ser un dos terreos que achegue máis beneficios á práctica médica.

AS VITAMINAS

A falta de vitaminas maniféstase en sociedades que por diversas razóns están sometidas a dietas pobres, pouco variadas. Probablemente entre os investigadores clínicos españois, un dos máis relevantes fora o médico asturiano Gaspar Casal que no século XVIII describiu por vez primeira unha enfermidade carencial, a pelagra, causada por unha dieta deficiente nunha vitamina. Son moi variadas as manifestacións clínicas que causa unha alimentación carente nalgunha vitamina e así, enfermidades como o escorbuto, o beriberi, a anemia perniciosa ou o raquitismo se orixinan pola carencia de distintas vitaminas. Cando se enriquecen dietas pobres con suplementos vitamínicos, as manifestacións clínicas desaparecen como o demostrou o médico holandés Eijkman cando o destinaron a Xava para atender unha epidemia de beriberi que asolaba as prisións daquela illa. Un exemplo rechamante foi tamén o tratamento da anemia perniciosa, unha enfermidade que a principios de século era fatal, e que gracias ós traballos dos médicos estadounidenses George Minot e William Murphy puido curarse cando lles deron fígado cru de boi ós pacientes afectados. Igual de intragable é, probablemente, a inxestión de aceite de fígado de bacallao, un complemento frecuente na alimentación dos nenos ata datas relativamente frecuentes dado o seu rico contido vitamínico.

A natureza química das vitaminas non foi descuberta ata ben entrado o século XX. O médico húngaro Albert Szent-Györgyi, en 1928, non sen unha certa dose de fortuna, puido illa-la vitamina C da glándula suprarrenal. Hoxe en día as vitaminas sintetízanse en grandes plantas industriais e a xente fai un consumo masivo delas sen se decatarse de que o seu uso esaxerado non é inocuo; especialmente o exceso de vitaminas liposolubles pode ser daniño.

A ALTA TECNOLOXÍA E A SÚA APLICACIÓN MÉDICA

A introducción dos raios X por Wilhem Röntgen foi o comezo dun século no que a Medicina e, especialmente, o diagnóstico médico, se revolucionou coa introducción de aparellos tecnoloxicamente moi sofisticados. Os raios X, así como as radiacións radioactivas, axiña demostraron o seu valor terapéutico, aínda que tamén se recoñeceron os seus efectos daniños na inducción de tumores. Iniciáronse pronto experimentos para introducir substancias opacas ós raios X que permitiran revelar órganos ou outras formacións tanto normais coma anormais. En 1905 Friedrich Voelcker, de Heidelberg, desenvolveu a pielografía retrógrada, a introducción dunha substancia radiopaca na pelve renal a través dun uréter para estudiala permeabilidade das vías urinarias. En 1921, Jean Sicard, mediante a introducción dunha solución iodada, puido estudiala conduto raquídeo e, máis tarde, a árbore



Estudio do cerebro por resonancia magnética.

bronquial. En 1927, o portugués Antonio Moniz, en Lisboa, puido inxectar contraste e identificar así as arterias cerebrais. Ata 1962 non foi posible estudia-las arterias coronarias. Hoxe en día o cateterismo cardíaco —introducción dun pequeno tubo nun vaso periférico que chega ata o corazón— é unha especialidade médica plenamente desenvolvida e que contribúe de forma decisiva ó diagnóstico e tratamento do enfermo cardíaco. O procedemento iniciouse dunha forma espectacular en 1929 cando o médico alemán Werner Forssmann, utilizándose el mesmo como coello de indias, abriu unha vea do seu brazo, inseriu a punta dun catéter de aproximadamente 3,2 mm de diámetro e 76 cm de lonxitude, e empurrouno cara a arriba pola vea do brazo, ó longo das veas intratorácicas, dentro do adro do seu corazón.

O diagnóstico baseado en raios X sufriu un avance espectacular en 1972 coa introducción da Tomografía Axial Computarizada (TAC) por G. N. Hounsfield. A base do sistema é integra-las imaxes obtidas por raios X para obter unha imaxe dunha sección completa dunha rexión do corpo humano. O desenvolvemento matemático que fixo este proceso posible foi responsabilidade de Allan M. Cormack que recibiu canda Hounsfield o Nobel en 1979.

A utilización médica do son permitiu o desenvolvemento de dúas técnicas de diagnóstico non invasivo que xeneralizaron o seu uso dada a súa grande utilidade práctica. Por unha parte, a ecografía que se usa en diversas especialidades médicas, desde a obstetricia á cardioloxía, e que permite captar imaxes de forma moito máis inocua ca mediante o uso de radiacións. En efecto, a ecografía é o procedemento de obtención de imaxes fetais máis estendido, xa que mesmo nun período tan sensible á acción mutaxénica de axentes externos como o desenvolvemento fetal, este método parece non ter efectos secundarios destacables.

A resonancia magnética permítenos obter, coma o TAC, imaxes de seccións do organismo mediante a utilización de ondas de radio.

O PET déixanos medi-los positróns emitidos polo decaemento dun trazador radioactivo que se lle administra ó paciente. Este método é moi sensible e preciso e fixo posible o estu-

dio do cerebro *in vivo*. Así, nun suxeito normal que desenvolve unha tarefa, o PET pode permitir identifica-las áreas ou zonas cerebrais que se activan ó realízala. O PET contribuíu en gran medida ó avance actual da neurociencia cognitiva que estudia o papel do cerebro no desenvolvemento de tarefas superiores propias do home, como emocións ou consciencia. Outro aspecto moi relevante do PET é a súa sensibilidade para a detección de metástase. No paciente cun tumor, o tratamento poscirúrxico, en gran medida, vai depender da presenza de metástase. O PET é hoxe en día o método de diagnóstico máis sensible dunha metástase.

A utilización do láser na práctica médica esténdese cada vez máis; non só proporciona ondas de alta enerxía, senón que tamén pode focalizar, concentra-las ondas en puntos microscópicos. O tecido así alcanzado é destruído por calor ou por reaccións fotoquímicas, sen deixar cicatrices e cun sangrado mínimo. A conxunción destes factores converte o láser no bisturí óptico por excelencia en intervencións que requiren do cirurxián cortes de gran precisión, como sucede na cirurxía oftálmica.

A INVESTIGACIÓN E A DOCENCIA DA MEDICINA

Quixera dedicarlle este derradeiro apartado, mesmo que fose brevemente, á docencia e á investigación como axentes do desenvolvemento da Medicina no século XX.

Dous foron tradicionalmente os grandes modelos sobre os que se baseou o ensino médico. O primeiro, o modelo francés, nace coa Revolución Francesa. Este, por oposición ó ensino libresco tradicional, destaca o método práctico. O seu lema *peu lire, beaucoup voir, beaucoup faire* é claramente indicativo. Considerábase nel a observación a carón da cama do enfermo e na sala de autopsias como o centro do ensino. Acorde con isto, este sistema introduce a lección clínica, analizando casos de pacientes concretos e o internado en servicios hospitalarios como principais ferramentas docentes (José María López Piñero, *Breve historia de la medicina*, Madrid, Alianza Editorial, 2000).

O outro gran modelo é o alemán. Asumido o modelo francés, desenvólveo un paso máis introducindo a medicina do laboratorio. Xa no século XIX, Wilhelm von Humboldt desenvolve este concepto en dous principios: 1) adscribi-la formación dos médicos a facultades de Medicina en universidades públicas, que debían ser para o Estado unha responsabilidade económica e administrativa de primeira orde, e 2) manter estreitamente asociadas a investigación e mailo ensino tanto na selección do profesorado coma na práctica docente. O resultado desta reforma foi a aparición dun profesional do ensino e a investigación médicos, dedicado a eles en exclusividade tras varios anos de dedicación á investigación que faculta para a docencia. Por outra parte, o importante gasto público destinado ás universidades

fixo posible unha organización baseada nun instituto para cada disciplina básica e unha *Klinik* (hospital universitario de carácter monográfico) para cada materia clínica. Institutos e clínicas ofreceron os medios adecuados para o desenvolvemento da investigación e da nova concepción da docencia (José María López Piñero, *op.cit.*).

O modelo alemán foi a base sobre a que colleu corpo o norteamericano, que acadou a preeminencia mundial durante este século. Flexner, un entusiasta do modelo alemán, reformou o ensino médico nos Estados Unidos promovendo a investigación médica como condición *sine qua non* para poder desenvolver-la docencia. O primeiro en adopta-lo modelo alemán foi o hospital Johns Hopkins, ó que en seguida seguiron as universidades de Pensilvania, Chicago, Harvard e Michigan. A innovación docente estendeuse rapidamente polos Estados Unidos e en poucos anos xa chegara a vinte universidades. En 1948 fúndanse os Institutos Nacionais da Saúde, o que significa un robustecemento definitivo da investigación médica americana. Como indicativo do éxito do sistema baste sinala-la gran cantidade de investigadores americanos ou estranxeiros

que, traballando en universidades americanas, recibiron o premio Nobel de Medicina.

En España non existe un modelo definido de ensino médico debido á escaseza crónica dos recursos necesarios. A Universidade careceu de dotacións suficientes para facerse cargo dos hospitais e, dalgunha forma, sempre necesitou apoiarse noutras institucións do Estado para o mantemento económico dos hospitais necesarios para a docencia. A situación actual non é unha excepción xa que o hospital universitario, aínda que así chamado, é financiado enteiramente a través da sanidade pública sen que a Universidade contribúa economicamente ó seu mantemento. Polo tanto, é o carácter asistencial e non o docente-investigador o que marca o carácter dos nosos hospitais universitarios. É obvio que mentres esta tendencia non se inverte —o que certamente non é previsible a curto prazo— a investigación clínica española arrastrará un grave lastre. Neste aspecto, a Universidade española non puido incorpora-los avances que supuxo a escola alemana do século pasado e esa é en gran medida unha das razóns do atraso que nos afecta neste campo.



A CIRURXÍA NO SÉCULO XX

*Miguel Caínzos Fernández**
Universidade de Santiago
de Compostela

O século XX pode considerarse, sen ningunha dúbida, como o do gran desenvolvemento da Cirurxía, ata o punto de que durante o derradeiro cuarto do século, a Cirurxía foi reputada por moitos o 'motor' da Medicina moderna.

Sen embargo, nun contexto de obxectividade é necesario considera-lo século XX como unha consecuencia lóxica da gran revolución que a ciencia en xeral e a Medicina en particular viviron ó longo do XIX. A Cirurxía non foi allea a esta gran mudanza científica e da práctica médica que sacudiu aquela centuria. Neste sentido, autores como López Piñeiro (1) opinan que hoxano estamos sendo vítimas dun 'chauvinismo histórico' que privilexia en exceso o máis recente. No tereno da Cirurxía, o cambio do século XIX ó XX foi dun crecemento explosivo para esta rama da Medicina.

Considérase como data de inicio da Cirurxía moderna o ano 1846, cando ten lugar o descubrimento da anestesia por William Morton. Ata daquela, a

cirurxía estaba limitada á reparación de hernias e fracturas, a realización de amputacións e a resolución de procesos inflamatorios superficiais. A primeira intervención con anestesia xeral realízase o cirurxián americano John Warren, mentres Morton aplicaba a anestesia na Ether Dome do Massachusetts General Hospital de Boston.

O ano 1867 supón outra data histórica para o desenvolvemento da cirurxía, xa que a proposta do cirurxián británico Lister de operar baixo os principios da asepsia e antisepsia supuxo outrosí unha revolución extraordinaria. Ata aquela data as infeccións postoperatorias supuñan unha enorme limitación ó avance da cirurxía. A partir de aquí, as infeccións constitúen un problema da Cirurxía, pero pódense controlar e diminuír. Isto permitiu acceder a practicamente tódalas partes do organismo humano, e, consecuentemente, que a Cirurxía se desenvolvera case sen ningún tipo de limitacións.

Neste sentido, pode ser de interese analiza-los procedementos

* Catedrático de Cirurxía.

cirúrxicos máis habituais e comprobá-la grande importancia que tivo o século XX para o seu desenvolvemento. Observaremos nesta análise o feito de que moitas veces a Cirurxía vai beneficiarse de xeito extraordinario de diversos descubrimentos acaecidos noutras ramas da Medicina, especialmente durante a primeira metade do século. Refírome a feitos tan importantes como o achado dos antibióticos ou o coñecemento dos grupos sanguíneos coa conseguinte realización das transfusións.

APENDICITE AGUDA E APENDICECTOMÍA

A primeira intervención para realiza-la exérese do apéndice realizouse durante a segunda metade do século XIX. Robert L. Tait practicou a primeira apendicectomía no Reino Unido no ano 1880. É interesante destacar que, xa avanzado o século XX, en 1940, a mortalidade por apendicite aguda chegaba aínda ó vinte por cento, sobre todo en pacientes de idade avanzada e que presentaban una peritonite difusa. Coa aparición dos antibióticos e o inicio da súa utilización na cirurxía, conseguíuse reducir notoriamente a mortalidade por apendicectomía, sendo no momento actual inferior ó dous por cento.

ÚLCERA PÉPTICA GASTRODUODENAL

Os últimos vinte anos do século XIX supuxeron un grande avance para a Cirurxía da patoloxía gástrica, tanto benigna coma maligna. Así, Eugène

Doyen, no ano 1892 en París, foi o cirurxián que iniciou a cirurxía da úlcera péptica crónica ó realizar unha conexión do estómago ó intestino delgado ou gastro-enterostomía. Esta técnica xa fora descrita en 1881, sen embargo constituía unha maneira moi elemental de tratar de resolve-lo problema ulceroso e de feito, a maioría das veces, desenvolvíanse novas úlceras despois da intervención cirúrxica.

A técnica cirúrxica que se considerou como a ideal naqueles anos para tratar esta patoloxía era a realización dunha gastrectomía parcial, é dicir, a resección da parte distal do estómago, co obxectivo de elimina-las células productoras de ácido clorhídrico (CLH), que é o responsable do desenvolvemento das úlceras pépticas. Theodor Billroth foi o primeiro cirurxián que a levou a cabo, a principios do ano 1881 na cidade de Viena, para tratar un enfermo que presentaba un cancro gástrico. Realizou unha conexión entre o estómago e o duodeno ou Billroth I. En novembro do mesmo ano, Rydigier, utilizou a mesma técnica para o tratamento dunha úlcera péptica gástrica.

Catro anos máis tarde, Billroth deseña un novo tipo de gastrectomía, a denominada Billroth II, que consiste na unión entre o estómago e o intestino delgado proximal ou xexuno, unha vez reseçada a parte do estómago enfermo, case sempre por un tumor maligno. A finais do século XIX, no ano 1897, Carl Schlatter realiza en Zúric unha gastrectomía total nun paciente aqueixado

por un cancro de estómago, unindo o esófago ó intestino delgado.

Dentro xa do século XX, a cirurxía da úlcera péptica mantense nas mesmas coordenadas que nos últimos anos do XIX, pero nos cincuenta e sesenta iníciase a chamada 'cirurxía funcional', que consiste en actuar sobre o nervio vago, responsable da secreción da acetilcolina e, en último lugar, do CLH. Desenvolvéronse diversos tipos de vaguectomía: a troncular, a selectiva e a suprselectiva, dependendo da conservación ou non das ramas anterior e posterior do nervio vago e das fibras nerviosas que innervan a parte inferior do estómago.

En 1894, Henry P. Pean, un cirurxián que conseguiu un gran prestixio na Cirurxía gástrica, publicou os resultados do tratamento da perforación dunha úlcera péptica duodenal, pero xa dous anos antes, Ludwig Heusner realizara en Barmen a primeira intervención para resolver a perforación dunha úlcera péptica que loxicamente desenvolvera unha peritonite. Durante o século XX, o enfoque deste problema mantívose dentro das mesmas coordenadas: acceso á cavidade abdominal a través dunha laparotomía media, peche da perforación gástrica ou duodenal e limpeza exhaustiva da cavidade abdominal para evitar as consecuencias da peritonite.

Durante os derradeiros vinte anos do século XX, a cirurxía da úlcera péptica quedou reducida practicamente ós casos de complicacións como son a

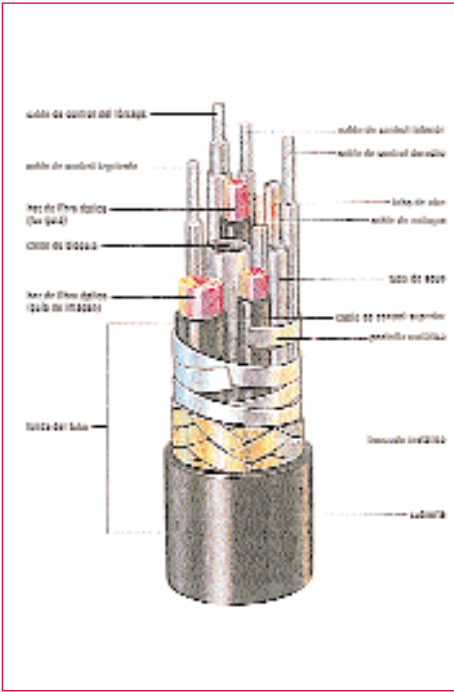
perforación, a hemorraxia e a obstrución. A cirurxía electiva desta patoloxía reduciuse de maneira significativa como consecuencia da utilización de medicamentos moi activos na redución da produción do CLH e, máis recentemente, dos antagonistas da histamina (anti H2) como cimetidina ou ranitidina. Aínda posteriormente, un novo tipo de medicamentos como o Omeprazol, que afectan selectivamente a bomba de hidroxenións na célula parietal gástrica, diminuíndo así a produción de CLH, empregáronse con éxito no tratamento da enfermidade ulcerosa gástrica e duodenal.

Por outra parte, na década de 1990, a gran novidade na patoloxía ulcerosa veu dada polo descubrimento da importancia da bacteria *Helicobacter pylori* na etioloxía da enfermidade. Isto está permitindo tratar satisfactoriamente con antibióticos aqueles enfermos co estómago colonizado por este microorganismo.

Canto á cirurxía da neoplasia ou cancro gástrico, durante os últimos anos do século XX produciuse un incremento das gastrectomías totais e a realización paralela dunha linfadenectomía ou 'toilette linfática' agresiva.

CÁLCULOS BILIARES E COLECISTECTOMÍA

A colecistectomía fíxose por primeira vez na cidade de Berlín no ano 1882, por Carl J. A. Langenbuch. Nos Estados Unidos de América realizou a primeira o cirurxián Justus van Ohage



Manguera dun endoscopio. O endoscopio pódese usar para explora-lo interior do corpo e incluso para realizar intervencións cirúrxicas por control remoto. (Tomado de *Quest*. Edit. Rialp).

en 1886 na cidade de Minnesota. Sen embargo, hai que esperar ata o ano 1910, para que o cirurxián americano William J. Mayo a popularice e a converta na técnica de referencia.

Aínda que tecnicamente a colecistectomía estaba ben definida, ata a década de 1930 só se operaban os enfermos que presentaban cálculos biliares con complicacións importantes como podía se-la colecistite aguda. O motivo disto era a chamada 'hemorragia icterica' debido á deficiencia de pro-

trombina. A demostración polo danés Henrik Dam de que este problema se solucionaba coa administración de vitamina K, permitiu que a operación dos cálculos biliares se fixese moi segura e que diminuíra de xeito significativo a taxa de mortalidade postoperatoria. Desde entón é unha operación das que se practica con maior frecuencia en calquera Servicio de Cirurxía Xeral.

Durante a década dos noventa, esta intervención coñeceu un grande avance técnico ó se poder realizar mediante a vía laparoscópica, que permite extrae-la vesícula biliar a través duns tubos de pequeno diámetro guiados dentro da cavidade abdominal por unha minúscula cámara de vídeo. Este logro consolidouse definitivamente, sendo considerado no momento actual como o *gold estándar*. A exérese da vesícula biliar con cálculos biliares pola vía laparoscópica permitiu un gran descenso da morbi-mortalidade postoperatoria, xa que o traumatismo desta técnica cirúrxica é moito menor có provocado cando se utilizaba a vía aberta clásica, tanto no que se refire á dor postoperatoria, coma á afectación do sistema inmunitario do paciente.

Actualmente, o risco de complicacións postoperatorias na patoloxía litiasica biliar incrementase nos pacientes de idade moi avanzada que presentan colecistite aguda ou cálculos no colédoco con ictericia, o cal pode dar lugar ó desenvolvemento dunha colanxite aguda moi severa que pode poñer en risco a vida do enfermo.

BOCIO E TIROIDECTOMÍA

No hai dúbida de que os pioneiros da cirurxía tiroidea, a finais do século XIX, foron os cirurxiáns Jacques Reverdin e Theodor Kocher. Este último desenvolveu a súa carreira como cirurxián na súa cidade, Berna, e chegou a conseguilo premio Nobel no ano 1909.

Kocher viviu nun medio onde o bocio (agrandamento da glándula tiroidea con compresión traqueal e asfixia) era endémico, así que desenvolveu un grande interese no tratamento cirúrxico desta entidade nosolóxica, ata o punto de que este cirurxián suízo fixo máis de seiscentas tiroidectomías totais.

Unha vez máis, Theodor Kocher, en Viena, tamén impulsou a cirurxía tiroidea, practicando tanto tiroidectomías totais coma parciais, deixando nestas un pequeno fragmento da tiroide. Estas últimas son as que se realizan no momento actual para trata-los casos de bocio, xa que se se fai unha tiroidectomía total, extirpando toda a glándula tiroidea, prodúcese cretinismo, é dicir, pacientes obesos e con atraso mental, sendo necesaria a administración de hormona tiroidea (T4) para contrarrestala falta de formación desta pola tiroide. O cirurxián americano William Halsted foi o primeiro en decatarse deste problema derivado da propia técnica cirúrxica se esta era moi agresiva. Por iso desde entón, sempre que se intervén un bocio, déixase unha peque-

na cantidade de tecido tiroideo para que poida produci-la hormona tiroidea.

CANCRO DE MAMA E MASTECTOMÍA

En Europa e concretamente no Reino Unido, foi o cirurxián Charles H. Moore na cidade de Londres quen puxo de relevo a mediados do século XIX as vantaxes da mastectomía radical nas pacientes con cancro de mama.

Sen embargo, foi nos Estados Unidos de América onde o gran cirurxián William Halsted introduciu a mastectomía radical con exérese da mama e os músculos pectoral maior e menor, a finais do século XIX.

Xa no século XX, o cirurxián Patey demostrou que a mastectomía radical modificada, sen elimina-los músculos pectorais e extirpando exclusivamente a glándula mamaria e os ganglios da axila do mesmo lado, era suficiente desde un punto de vista oncolóxico para tratar cirurxicamente os tumores da mama.

O diagnóstico máis precoz destes tumores e, polo tanto, o seu menor tamaño, permitiu durante os últimos anos do século XX realizar unha cirurxía cada vez menos agresiva co obxectivo de conserva-la mama naqueles casos que é posible. Desenvolveuse así a técnica da cuadrantectomía e da tumorectomía, consistente en extirpar exclusivamente o tumor rodeado dunha zona de tecido san da mama,

unido a unha linfadenectomía axilar se se considera necesario.

Paralelamente, o significativo progreso da radioterapia e da quimioterapia como terapias adxuvantes asociadas á cirurxía permitiu a realización de exéreses mamarias cada vez máis pequenas.

A terapia con anti-estróxenos (Tamoxifeno) despois da cirurxía contribuíu de maneira notoria a evita-la recidiva dos tumores da glándula mamaria.

Así pois, vemos na análise destes procedementos cirúrxicos moi comúns, cómo a Cirurxía evolucionou notablemente ó longo do século XX, pero como unha continuación lóxica dos primeiros pasos dados polos cirurxiáns da segunda metade do século XX e, paralelamente, reducindo a súa agresividade naqueles casos nos que a aparición dunha medicación adecuada permite limitar con seguridade a acción do cirurxián.

ASPECTOS MÁIS IMPORTANTES DA CIRURXÍA DO SÉCULO XX

Diversos feitos históricos e de carácter científico acaecidos ó longo do século XX influíron notablemente sobre o desenvolvemento da Cirurxía. Así, cómpre ter en conta a chegada da Primeira Guerra Mundial entre os anos 1914 e 1918, o descubrimento dos antibióticos a principios dos corenta, a Segunda Guerra Mundial (1939-1945)

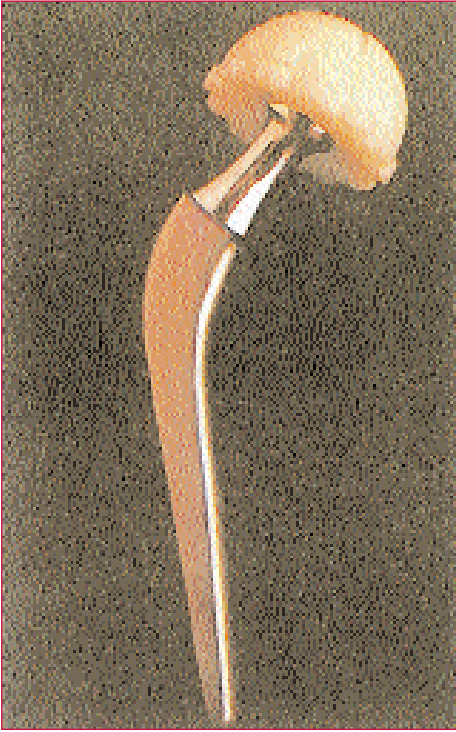
ou o descubrimento dos grupos sanguíneos.

Desde un punto de vista cirúrxico, os últimos corenta anos do século XX poden considerarse como espectaculares para o desenvolvemento da Cirurxía. Referímonos ó inicio dos transplantes de órganos nas décadas dos cincuenta ós setenta, ó desenvolvemento da profilaxe antibiótica e da nutrición artificial nos anos setenta, ó grande avance das suturas mecánicas durante os setenta e oitenta, á aparición da Cirurxía laparoscópica durante a década dos noventa e á iniciación da Cirurxía robótica a finais dos anos noventa.

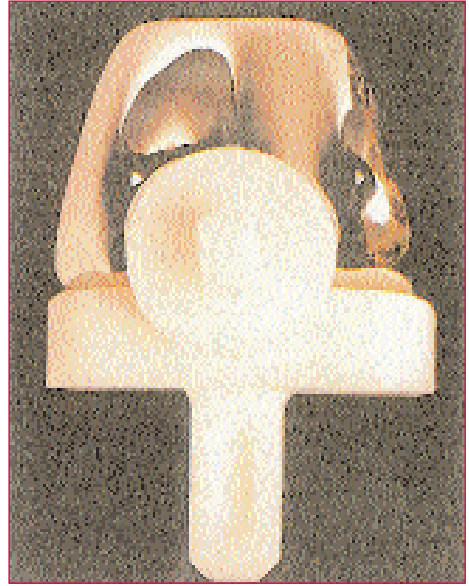
Pode dicirse sen medo a esaxerar, que a Primeira Guerra Mundial revolucionou as técnicas cirúrxicas utilizadas ata entón e, por outra parte, introduciu o tratamento de lesións non tratadas ata ese momento.

Quizais un dos avances máis notables foi o que se produciu no tratamento das feridas coa implantación dun desbridamento precoz cunha escisión dos tecidos gravemente contusionados, así como a extirpación dos corpos estraños presentes dentro dela. Todo isto permitiu a sutura primitiva das feridas contusas e contaminadas. Esta sutura primaria non só se utilizou nas feridas dos tecidos brandos, senón tamén nas articulares, nas fracturas abertas e nas lesións abertas pleuropulmonares e craneocerebrais.

Durante a guerra, chegouse á conclusión de que o tratamento máis eficaz



no tratamento do *shock* grave causado por feridas de guerra, era o restablecemento do volume sanguíneo mediante a transfusión de sangue. Outro avance importante foi o coñecemento da importancia da toxemia na fisiopatoloxía do *shock*. Esta achega tivo gran valor no terreo terapéutico, xa que os cirurxiáns aprenderon que era necesario realizar urxentamente a intervención cirúrxica nos pacientes en *shock* para eliminar canto antes o foco de sepse que estaba levando o enfermo ó *shock* e, posteriormente, de non se remonta-la situación, á morte.



Á esquerda, unha prótese de cadeira feita de aceiro inoxidable e plástico. Arriba, unha prótese de xeonllo feita cos mesmos materiais.

O tratamento cirúrxico das fracturas da cadeira, as fracturas con perda de substancia do maxilar inferior, as feridas do abdome e sobre todo a cirurxía do pulmón, experimentaron unha verdadeira revolución durante os anos da Primeira Guerra Mundial. Os cirurxiáns familiarizáronse co pneumotórax, coa abordaxe do pulmón por toracotomía ampla, etc. Avanzouse notablemente no tratamento cirúrxico da hernia diafragmática ou dos aneurismas arteriovenosos. Outras moitas técnicas cirúrxicas desenvolvéronse durante este período histórico, ata o punto de que o famoso cirurxián

francés Forgue chegou a dicir que “Nestes catro anos fixemos máis progresos ca en corenta de práctica cirúrxica en tempo de paz”.

O vienés Karl Landsteiner, cate-drático de Anatomía patolóxica, descobre e tipifica no ano 1930 os grupos sanguíneos (A, B e 0) no Rockefeller Institute for Medical Research de Nova York. Este descubrimento influíu de xeito importante na Cirurxía, xa que a partir de entón se puideron establece-las compatibilidades e incompatibilidades entre os diferentes grupos e, xa que logo, realiza-las transfusións sanguíneas con seguridade.

A Guerra Civil española (1936-39) deu lugar, entre outros avances, a un notable desenvolvemento na reparación cirúrxica das lesións nerviosas.

Durante a Segunda Guerra Mundial, un dos avances máis importantes foi a mellora das técnicas de transfusión de sangue, coa a introducción dun aparello para a toma e administración do sangue mediante un método pechado co cal o sangue non entraba en contacto co aire. Tamén durante os anos da guerra, o traumatólogo español José Trueta desenvolve e pon de moda o seu método —o ‘método español’— para o tratamento das fracturas.

Outro descubrimento esencial para a Cirurxía foi o da penicilina no ano 1945, polo escocés Alexander Fleming. Con esta substancia derivada do fungo *Penicillium notatum* levaba traballando desde 1928 en Londres na súa Cátedra de Bacterioloxía. O achado

dos antibióticos permitiu dar un gran paso á Cirurxía ó dispoñer dunha excelente ferramenta para trata-las infeccións que se producían durante o postoperatorio. É interesante comentar, polo pouco coñecido do dato, que Sir Alexander Fleming foi cirurxián, xa que no ano 1906 foi admitido no Royal College of Surgeons of England, aínda que practicamente non exerceu a profesión. A penicilina demostrou ser moi eficaz en guerras posteriores e utilizouse con profusión en feridas de partes brandas e en feridas de partes brandas con fractura.

En 1946, o cirurxián portugués Cid dos Santos realiza a primeira tromboarteriectomía, procedemento consistente en eliminar na mesma intervención cirúrxica o coágulo e o ateroma do vaso sanguíneo. As dúas primeiras intervencións realizounas nas arterias femoral e na axilar respectivamente.

O 1950 é un ano importante para o desenvolvemento e a expansión da Cirurxía. Así, o doutor Richard H. Lawker realizou un transplante do ril esquerdo a unha enferma de 49 anos que presentaba unha enfermidade poliquística; Ruth Toker foi o primeiro ser humano sometido a un transplante de ril. Dous meses despois da operación, o funcionamento do ril transplantado era completamente normal. Abriuse así unha era nova de enormes expectativas na Medicina e a Cirurxía, que se fixo xa definitiva a partir do transplante que se realizou en Boston entre dous irmáns xemelgos en 1954.

Tamén en 1950, o doutor Dood publica a operación de dous casos de cancro de páncreas nos cales realizou con éxito a extirpación da glándula, e os irmáns Judet colocan unha prótese de cadeira para substituí-la cabeza do fémur. Con esta nova intervención, cámbiase radicalmente o tratamento habitual das enfermidades de dexeneración crónica da articulación da cadeira, que viña sendo a realización dunha artrodese ou inmovilización da articulación.

O ano 1952 é decisivo para o desenvolvemento da Cirurxía, xa que é cando o americano Forest D. Dodrill describe un corazón artificial consistente nun aparello corazón-pulmón que permite deriva-lo sangue evitando o seu paso polo corazón, co cal este órgano pode quedar completamente illado da circulación sanguínea e se facilita así a cirurxía cardíaca. O seu inventor utilízao con éxito por primeira vez nunha operación da válvula esquerda do corazón. A máquina fai a vez do corazón esquerdo e mediante un dispositivo mecánico simula a súa función contráctil. Este aparello e os que o seguiron permitiron realizar intervencións cardíacas que eran impensables ata o momento, impulsando dun modo moi importante a cirurxía cardíaca mediante intervencións cirúrxicas sobre o corazón parado e sen sangue. Este descubrimento permitiu desenvolver-la cirurxía a 'corazón aberto' con circulación extra-corpórea, de forma segura e sistemática a partir do

año 1953; o pionero no uso desta nova tecnoloxía foi o doutor Gibbon.

O 3 de decembro de 1967 en Cidade do Cabo (Sudáfrica), iníciase a historia dos transplantes de corazón ó lle realiza-lo primeiro o doutor Christian Barnard ó paciente Louis Balskanski. Este primeiro enfermo faleceu ós quince días debido a unha pneumonía. Pero, afortunadamente, o doctor Shumway levou a cabo un segundo transplante nos Estados Unidos (Palo Alto, California). Este cirurxián americano continúa traballando nesta dirección pero a un ritmo moi lento debido ós frecuentes rexeitamentos do órgano transplantado e ás infeccións postoperatorias. Hai que esperar ó descubrimento da Ciclosporina A a finais dos anos setenta —como comentaremos posteriormente— para que o transplante de corazón e outros como o de fígado se convertan nunha técnica de rutina.

A finais dos anos cincuenta e principios dos sesenta, os cirurxiáns americanos Moore no Hospital Peter Bent Brigham de Boston e Starzl na North Western University de Chicago, comezaron a realización experimental de transplantes ortotópicos de fígado no can. A partir destes primeiros ensaios chegouse a domina-la técnica e, conseqüentemente, a poder realizala con tódalas garantías cirúrxicas no ser humano. Os dous grupos que impulsaron con gran forza o avance da Cirurxía nesta área foron os doutores Thomas E. Starzl primeiro en Denver e posteriormente en Pittsburgh (EUA) e

Sir Roy Calne desde o King's College da Universidade de Cambridge (RU), en Europa. Hoxe, o transplante de fígado converteuse nunha técnica estándar, ata o punto de que, no momento actual, máis de vinte hospitais españois a practican.

Outros dos avances importantes para a Cirurxía que se produciron durante os anos setenta, non tiveron relación coa técnica cirúrxica, senón coa mellora do estado nutricional do paciente cirúrxico e coa prevención das infeccións postoperatorias.

No ano 1966 o doutor Dudrick, que traballaba no famoso laboratorio do profesor americano Jonathan Rhoads, autor de importantes contribucións científicas sobre o catabolismo postoperatorio dos pacientes cirúrxicos, chamou a atención sobre a necesidade dun balance positivo de nitróxeno nos pacientes sometidos a este tipo de intervencións. Por outra parte, no seu traballo experimental, Dudrick puxo de relevo que o enfermo sometido a cirurxía podía ser nutrido de maneira artificial a través de catéteres colocados en veas centrais. Isto é o que se denominou 'nutrición parenteral total'. En 1969, o mesmo autor publicou o resultado da nutrición artificial no primeiro paciente humano, un neno.

Desde entón, a nutrición artificial é unha parte do armamento terapéutico do cirurxián, e miles e miles de enfermos se beneficiaron da posibilidade de recibir unha nutrición adecuada

tanto antes de seren sometidos á cirurxía coma despois dela. É difícil imaxinar no momento actual a práctica cotiá de certos tipos de cirurxía maior sen a axuda inestimable da nutrición artificial. Durante a década dos noventa, a nutrición artificial seguiu desenvolvéndose e púxose de relevo a supremacía da 'nutrición enteral' que consiste en colocar un catéter na parte alta do tubo dixestivo e a través del facer chegar directamente a nutrición ó intestino. Este método demostrou ser máis fisiolóxico ó coloca-los nutrientes en contacto directo coa mucosa intestinal e, ademais, evítanse algunhas das complicacións relacionadas cos catéteres situados nas veas centrais.

A nutrición artificial contribuíu por si soa e de maneira notoria a diminuí-las complicacións postoperatorias e, dentro delas, as infeccións. Así e todo, a descrición realizada por Kunin e Efrom desde os Estados Unidos de América do novo concepto da profilaxe antibiótica supuxo un grande pulo na loita clásica do cirurxián contra a infección. Os cirurxiáns utilizaran previamente a profilaxe antibiótica pero non conseguiran reduci-las infeccións postoperatorias. O motivo era ben sinxelo: os antibióticos administrábanse despois da operación e cando chegaban ós tecidos do paciente, os microorganismos xa se multiplicaran e era moi difícil evita-lo avance da infección.

O grande acerto de Kunin e Efrom foi administra-lo antibiótico uns minutos antes da intervención cirúrxica, de tal maneira que cando o

cirurxían realizaba a incisión operatoria, os tecidos do paciente tiñan xa niveis de antibiótico suficientes como para destruí-los xermes que contaminasen a ferida operatoria durante o acto cirúrxico. A partir dese momento sentáronse adecuadamente as indicacións da profilaxe antibiótica de acordo cos microorganismos propios de cada área anatómica, utilizando antibióticos eficaces para destruí-la flora microbiana. É obvio que, a pesar desta estratexia, seguen producíndose infeccións despois da cirurxía pero a realidade é que diminuíron de xeito significativo cando comparámo-las taxas actuais coas que tiñamos antes de instaurar a moderna profilaxe antibiótica. En calquera caso, o desenvolvemento das infeccións postoperatorias é un problema clásico da Cirurxía, produciuse desde as primeiras operacións que se realizaron, mantívose ó longo dos séculos XIX e XX e segue sendo o principal problema da Cirurxía moderna nos albores do século XXI.

No ano 1978 a Cirurxía dos transplantes recibe outro grande impulso ó descubrir de maneira fortuíta o doutor Borell, en Suecia, a Ciclosporina A. Esta substancia demostrouse moi activa fronte ó rexeitamento dos órganos implantados por parte do sistema de defensa inmunitario do organismo humano. Pode afirmarse que no terreo do transplante de órganos hai un antes e un despois en relación co descubrimento da Ciclosporina. O doutor Roy Calne, da Universidade de Cambridge no Reino Unido, foi o primeiro en utili-

zala nun transplante de ril, e puido comproba-la súa alta eficacia na redución do rexeitamento. Por outra parte, isto permitía que as infeccións postoperatorias se puideran controlar moito mellor. En 1980, o doutor Shumway empregou esta droga nun transplante cardíaco, e desde entón vén utilizándose decote en calquera tipo de transplante. Durante os últimos anos noventa apareceron outras substancias anti-rexeitamento moi eficaces, como a K-506.

Desde que en 1922 se descubriu a produción da hormona insulina polo páncreas, a Medicina tratou de loitar contra unha das enfermidades máis comúns como é a diabeite que, aínda hoxe, produce unha elevada morbilidade e mortalidade. Unha das modalidades terapéuticas utilizadas durante a última parte do século XX foi o transplante do páncreas co obxectivo de corrixi-los defectos metabólicos da diabeite ó dota-lo paciente cun novo órgano que lle proporciona un tecido pancreático endocrino normal, o cal permite que, unha vez realizado o transplante, o enfermo poida suprimir-lo tratamento esóxico con insulina, xa que as células-B pancreáticas transplantadas actúan como unha fonte endóxena de insulina. A finais dos anos oitenta, realizáranse máis de mil cincocentos transplantes de páncreas no mundo en arredor de oitenta hospitais. Neste terreo, os últimos avances tratan de valida-la eficacia do transplante de illotes pancreáticos illados. Se esta nova modalidade de transplante pan-

creático se demostra viable, poderíase evita-lo transplante de todo o órgano.

No ano 1987, o cirurxián francés Monet realizou con éxito a primeira colecistectomía ou exérese da vesícula biliar pola vía laparoscópica. Para a gran maioría dos cirurxiáns esta intervención pasou completamente desapercibida, e houbo que esperar uns anos máis para sermos conscientes de que unha técnica se abría camiño na cirurxía do aparello dixestivo.

Realmente, non se trataba só dunha nova técnica cirúrxica, senón dunha verdadeira revolución dentro da técnica cirúrxica: a Cirurxía laparoscópica. Foi unha innovación tecnolóxica que nos obrigou a un novo esforzo de aprendizaxe, a partir de cero outra volta, a rompe-los esquemas e os hábitos establecidos clasicamente durante máis de cen anos e a iniciarnos no manexo do campo operatorio a través de pequenos orificios e tubos que guían os nosos instrumentos e, o máis importante e innovador, a pequena cámara de vídeo que nos vai permitir ve-lo interior do paciente e a área enferma a través dun monitor de televisión.

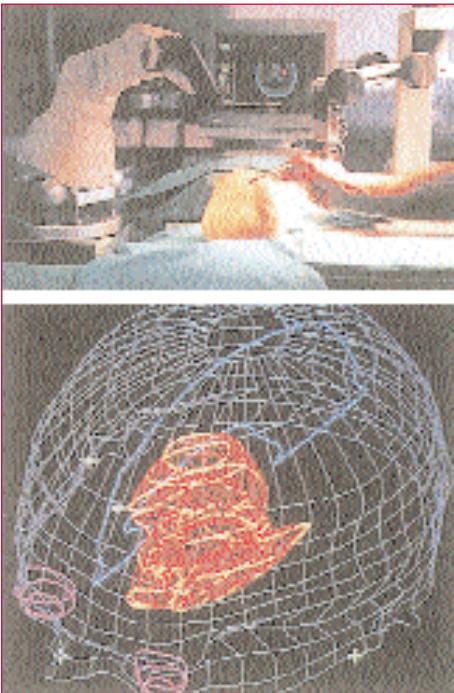
Cando o mundo da Cirurxía foi consciente de que xurdía unha nova era, produciuse inicialmente un rexeitamento importante por unha gran parte dos profesionais con máis anos de experiencia técnica, que se negaban a aceptar que fose posible acceder á cavidade abdominal e a realiza-la exérese de órganos como a vesícula biliar sen abri-lo paciente a través dunha

laparotomía e poder tocar e palpa-las estruturas anatómicas sobre as que se realizaba a intervención cirúrxica. Realmente foi unha época na que resultaba moi interesante asistir ós congresos de Cirurxía e poder escoita-los vehementes detractores desta nova técnica. Curiosamente, moitos deles, que agresivamente poñían de relevo tódolos inconvenientes posibles da nova técnica e tecnoloxía, eran considerados os mellores cirurxiáns do momento nos respectivos países. Ende ben, o convencemento e o tesón dos cirurxiáns máis novos e os de mediana idade permitiu seguir practicando a cirurxía laparoscópica e demostrar así que estabamos diante do futuro da Cirurxía.

O éxito foi tal que foron suficientes menos de cinco anos para que, a mediados dos noventa, en tódolos congresos e revistas máis prestixiosas da Cirurxía, se aceptase que a vía laparoscópica debía considerarse como o *gold standar* en procedementos tales como a colecistectomía para o tratamento da colelitiase ou cálculos biliares. Pero no quedou aquí o éxito da nova técnica. Ó longo dos dez últimos anos do século XX, púxose de relevo que era ideal para o tratamento das hernias de hiato, nas cales unha porción do estómago ascende e se introduce na cavidade torácica, ou na exérese do bazo cando presenta patoloxía non traumática nin tumoral. En moitos hospitais demostrouse que a técnica era tamén adecuada para a exérese do apéndice cecal en casos de apendicite aguda ou para a herniografía da hernia inguinal especialmente en

casos de hernias recidivadas ou bilaterais. A patoloxía benigna do colon foi outro dos campos nos que a Cirurxía laparoscópica demostrou o seu interese.

Un dos aspectos onde se xeraron maiores dúbidas foi no tratamento dos tumores a través da vía laparoscópica, xa que suscitaba a sospeita de se a realización imprescindible do pneumopertoneo —introducción de CO₂ na cavi-



Gracias á imaxe en tres dimensións proporcionada polo escáner (abaixo) poden os cirurxiáns situar con toda exactitude o punto da intervención. Gracias ó microordenador, os cirurxiáns poden usa-la imaxe de forma interactiva para guía-lo robot cando están facendo a intervención (arriba).

dade abdominal ata alcanzar unha presión duns 14 mm de Hg— para poder realiza-la intervención cirúrxica, facilitaríaa diseminación distante de células tumorais procedentes do tumor que se pretendía extirpar. Por outra banda, algunhas pequenas estatísticas dos primeiros anos de utilización desta técnica cirúrxica, chamaron a atención sobre o feito importante de que se producían tumores nos lugares da parede abdominal onde se colocaban os trocares a través dos cales se introducen os instrumentos necesarios para realiza-la operación. Sen embargo, esta preocupación foi sendo menor ó longo dos anos e a medida que a experiencia era maior. Así, no 85 Congreso do American College of Surgeons (cirurxiáns) celebrado en outubro do ano 1999 na cidade americana de San Francisco, nunha sesión dedicada á cirurxía laparoscópica na cirurxía do colon e do recto, a doutora Heidi Nelson da Clínica Mayo en Rochester, presentou máis de trescentos casos de cancro de colon operados con éxito con cirurxía laparoscópica e cun seguimento de varios anos, que permitían concluir que era posible utiliza-la nova vía nesta patoloxía tumoral. O doutor James W. Fleshman, de St. Louis, demostrou que tamén era válida na patoloxía tumoral do recto.

¿Por que a Cirurxía laparoscópica se desenvolveu con tal velocidade e éxito a pesar dos seus importantes detractores e as dificultades tecnolóxicas iniciais? A súa evolución foi fulminante porque era evidente que o

traumatismo cirúrxico que se inflixía ó paciente era moito menor có causado pola vía laparotómica clásica para realiza-lo mesmo procedemento. A dor que experimentaba o enfermo despois da intervención reducíase e a súa recuperación era máis rápida, de tal maneira que un paciente ó que se lle realizaba unha colecistectomía pola vía laparoscópica ás vintecatro horas da operación era dado de alta, cando a estancia hospitalaria habitual en cirurxía aberta era duns sete días. Outro dos aspectos moi favorables a este tipo de cirurxía foi a notoria redución das infeccións postoperatorias debido a que, en vez de realizar unhas laparotomías máis ou menos grandes, se utilizaban mini-incisións dun ou dous centímetros para poder coloca-los trocares e, por outra parte, púidose demostrar a través do estudio de diversos parámetros que a cirurxía pola vía laparoscópica practicamente non altera o sistema inmune e de defensa do paciente, co cal, se durante a intervención cirúrxica se produce algunha pequena contaminación bacteriana, o sistema inmunolóxico do enfermo resólvea eficazmente destruindo microorganismos responsables. Por todo isto, hoxe, no ano 2000, o cirurxián que non practica a Cirurxía laparoscópica naqueles casos en que demostrou o seu valor, sabe que perdeu o tren do futuro.

Pero a Cirurxía laparoscópica non quedou só no terreo da cavidade abdominal senón que, debido ó seu alto interese, axiña se estendeu a outros

territorios como é o da cavidade torácica, de tal maneira que a cirurxía toracoscópica experimentou un enorme desenvolvemento constituíndo o patrón de ouro para intervencións tales como a exérese das bullas enfisematosas, o diagnóstico da extensión dos tumores da área mediastínica, etc.

A pesar de todo o dito, a Cirurxía do século XX non se contentou con avances tan espectaculares como os comentados, senón que, levada do gran progreso tecnolóxico, nos derradeiros cinco anos do século empezouse a desenvolver-la denominada 'cirurxía robótica' na cal un ordenador é o que realiza os pasos máis importantes e delicados da operación. Na especialidade de Neurocirurxía xa había uns anos que se estaba a utiliza-lo ordenador para guía-los pasos máis comprometidos do neurocirurxián na denominada 'cirurxía estereotáctica'. As demais especialidades cirúrxicas mantivéronse na marxe desta nova tecnoloxía ata finais do século, e así, no congreso do American College of Surgeons citado antes, puidemos asistir á presentación de instrumentos altamente sofisticados como o *EndoWrist* que, ante o asombro dos cirurxiáns, pode realizar coa máxima precisión os movementos do pulso, cun erro de desprazamento máximo de "un milímetro"... E todo isto dirixido a través dun ordenador.

Isto lévanos ata as portas do século XXI cun novo concepto para os cirurxiáns, o da *Cibercirurxía* que está xa dando lugar a unha nova era para a

Cirurxía. Trátase dun termo moi difícil de definir, pero pódese entender por tal un novo concepto da Cirurxía e un novo conxunto de termos cos cales o cirurxián pode comprender e reimaxinala arte da Cirurxía na Era da Información. Esta nova era a nivel global para a Humanidade seguiu a Era Industrial e leva desenvolvéndose os últimos trinta anos, concretamente, desde finais dos sesenta ata ben entrados os noventa, como puxo de relevo Francis Fukuyama.

O concepto de *Cibercirurxía* inclúe unha complementariedade entre os clínicos e as máquinas —esencialmente os ordenadores— e a integración das diversas tecnoloxías dixitais dentro do espazo do diagnóstico e o tratamento cirúrxicos. O concepto inclúe tamén o uso habitual de tecnoloxías avanzadas como son a tecnoloxía da interface humana e aparellos como o da realidade virtual, a imaxe tridimensional, etc. Estas tecnoloxías novas e moi avanzadas permiten o desenvolvemento de novos conceptos como o de *tele-medicina* e *tele-cirurxía*.

Segundo Richard Satava, do Departamento de Cirurxía da Yale University School of Medicine, a visión dun quirófano do futuro está baseada no concepto fundamental do desenvolvemento destas novas tecnoloxías dentro dun ambiente no cal tanto a cirurxía coma a radioloxía intervencionista poden ser realizadas mediante a 'imaxe guiada'.

A Cirurxía axudada por ordenador será unha realidade nos anos vindeiros. Estas tecnoloxías ben desenvolvidas xa e utilizadas habitualmente na industria, están estendéndose á área do tratamento cirúrxico a través da colaboración entre enxeñeiros, especialistas en robótica, expertos en ordenadores e cirurxiáns. Estes últimos terán que compartirlas súas necesidades e inquietudes cos especialistas, xa que as aplicacións das técnicas de cirurxía guiada pola imaxe e a robótica inclúen un amplo espectro de especialidades cirúrxicas que van desde a Neurocirurxía á Ortopedia pasando pola Cirurxía xeral.

O uso da cirurxía asistida por ordenador e dos robots proporcionaralle ó cirurxián maior precisión, maior destreza, máis resistencia e máis información. Por iso, sen ningunha dúbida, o cirurxián non poderá estar alleo a esta revolución e terá que realizar un grande esforzo para poñerse á altura das novas tecnoloxías e poder beneficiarse delas. O gran cambio representado pola cirurxía laparoscópica durante os dez últimos anos é practicamente anecdótico se se compara cos que se producirán nas próximas décadas. O cirurxián está ante o momento máis revolucionario da Cirurxía. Conceptos clásicos como o da habilidade manual serán substituídos pola absoluta precisión do ordenador. A man do cirurxián terá que se aliar coa moderna tecnoloxía para non perderlo seu papel protagonista. Nunca tanto valor terá a expresión do talen-

to do cirurxián coma nos próximos anos, xa que pode asegurarse que o mellor cirurxián do futuro será o máis intelixente, non o máis hábil.

BIBLIOGRAFÍA

- Caínzos, M., "Discursos de Investidura de D. Konrad Messmer como *Doutor Honoris Causa*", Imprenta Universitaria, Universidade de Santiago de Compostela, 1998.
- Calne, R., *Liver Transplantation*, Orlando, Grune & Stratton, Inc. Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 2ª edición, 1987.
- Caralps A., e outros, *Trasplante de Organos y Tejidos*, Barcelona, Ediciones Doyma, 1987.
- Diccionario de los Premio Nobel de Medicina, *Noticias Médicas*, 3.745 e 3.746, 97-111, 2000.
- Dudrick, S. J., e outros, "Can intravenous feeding as a sole means of nutrition support growth in the child and restore weight loss in an adult? An affirmative answer", *Ann Surg*, 169: 974, 1969.
- Ellis, H., *Operations that made History*, Londres, Greenwich Medical Media, 1996.
- Fukuyama, F., *La Gran Ruptura*, Barcelona, SQN Ediciones B, 2000.
- Groth, C. G., *Pancreatic Transplantation*, Philadelphia, W. B. Saunders Company, 1988.
- Thorwald, J., *El Triunfo de la Cirugía*, Barcelona, Ediciones Destino, 1960.
- Glasscheib, H. S., *El Laberinto de la Medicina*, Barcelona, Ediciones Destino, 1964.
- Haeger K., *Historia de la Cirugía*, Madrid, Editorial Raíces, S.A., 1993.
- Kunin, C. M., e H. Y. Efrom, "Prophylaxis in surgery", *J Am Med Ass*, 137, 1977, 1003-1008.
- Laín Entralgo, P., *Historia Universal de la Medicina*, Barcelona, Salvat Editores, 1972.
- "La medicina del siglo XX, 1922", *Diario Médico*, 2000, 89-92.
- "La medicina del siglo XX, 1945", *Diario Médico*, 2000, 181-184.
- "La medicina del siglo XX, 1950", *Diario Médico*, 2000, 201-204.
- "La medicina del siglo XX, 1952", *Diario Médico*, 2000, 209-212.
- López Piñeiro, J. M., "La medicina en el siglo XX", *La Aventura de la Historia*, Año 2, núm. 14, 1999, 29.
- Perisat, J., "Laparoscopic cholecystectomy", *Am J Surg*, 165, 1993, 444-449.
- Rodríguez, J. M., "Una 'mirada' apasionada al mundo de los trasplantes cardíacos", *Noticias Médicas*, 3746, 2000, 12-17.

Satava, R. M., *Cybersurgery*, Nova York, Wiley-Liss, 1998.

Starzl, T. E., *El Hombre Puzzle. Memorias de un Cirujano de Trasplantes*, Barcelona, J. R. Prous Editores S. A., 1994.

Sutcliffe, J., e N. Duin, *Historia de la Medicina. Desde la Prehistoria hasta*

el Año 2020, Barcelona, Naturart, S. A., 1993.

Thorwald, J., *El Triunfo de la Cirugía*, Barcelona, Ediciones Destino, 1960.

— *El Siglo de los Cirujanos*, Barcelona, Ediciones Destino, 1958.



OS COMPUTADORES DO SÉCULO PASADO

*Senén Barro Ameneiro**
Universidade de Santiago
de Compostela

Ós meus fillos, Mateo e Darío.
Espero que sexan felices nese mundo
inzado de computadores no que lles
tocou vivir

1. INTRODUCCIÓN

Falar da historia da computación e facelo restrinxíndonos ó século que acaba de rematar, é practicamente o mesmo que facelo comezando en calquera instante anterior. É certo que a idea de computación como tal xorde moito antes do século XX, mesmo é posible que sexa case tan antiga coma a Humanidade, pero a computación, como hoxe se nos amosa a través dos computadores electrónicos dixitais, é pouco anterior á minisaia ou ós enxeños espaciais.

Nun interese constante por realizar artefactos que superen as nosas limitacións, logramos avantaxar case tódalas nosas capacidades físicas, como correr, nadar ou levantar pesos, e moitas das nosas incapacidades naturais, como voar ou vivir no espacio.

Somos quen de ve-lo infinitamente pequeno ou arredado e de oí-lo que resulta inaudible mesmo para os animais cos oídos máis sensibles, pero aínda nos quedan por vencer artificialmente moitas das capacidades que denominamos intelectuais. Así como o microscopio e o telescopio amplifican en sentidos opostos as nosas posibilidades para ve-los obxectos do universo no que vivimos, o computador é actualmente a ferramenta que pretende amplificar aquelas capacidades que asociamos ó noso órgano máis preciado e descoñecido: o cerebro. Deste modo, se a revolución industrial que vivimos nos dous últimos séculos se desenvolveu mediante máquinas que estenderon e magnificaron as nosas capacidades físicas, a revolución da información na que agora estamos inmersos baséase en máquinas que amplían e apoian algunhas das nosas

* Catedrático de Ciencias da Computación e Intelixencia Artificial.

capacidades mentais. O avance foi espectacular en moitos sentidos. A capacidade de almacenamento, recuperación e transmisión de información é enorme e non deixa de medrar a un ritmo exponencial; a potencia de cálculo dalgúns supercomputadores¹ actuais cífrase en varios billóns de operacións con números reais por segundo. O campión no xogo do xadrez aliméntase agora a cinco voltios² e as probas de explosións nucleares, por fortuna, están deixando de facerse con plutonio e pasan a realizarse con silicio. Sen embargo, aínda son moitas as capacidades do intelecto humano que o computador nin sequera conseguiu remedar. A nosa capacidade para expresarnos en linguaxe natural ou o sentido común, do que todos gozamos, aínda que, todo hai que dicilo, en moi distinto grao, son só algúns exemplos

que dificilmente encontrarán solución utilizando unicamente a ‘forza da computación’ en bruto.

O contido que segue tratará de recoller algúns dos fitos máis relevantes da historia da computación, máis co ánimo de divulgar e promove-la reflexión ca co de sermos exhaustivos —pensemos en que a simple enumeración de tódolos feitos que tiveron unha influencia destacada na historia da computación demandaría máis páxinas cás que se dedican a todo este artigo—.³ Se ben enfocámo-lo noso obxectivo sobre o aínda morno cadáver do século XX e o desenvolvemento nel da computación dixital, non queremos deixar fóra do visor algo da ‘prehistoria’ do *homo calculans* e da posmodernidade computacional que xa estamos comezando a vivir.

1 Os supercomputadores son os computadores máis potentes que existen en cada momento. O primeiro computador que se considerou dentro desta categoría foi realizado nos anos sesenta para o Departamento de Defensa estadounidense. O feito de que calquera computador persoal teña na actualidade unha capacidade de cálculo moi superior ó dito supercomputador, dános boa conta do dinamismo que se produce neste eido. O resto dos computadores adoitan agruparse en xeral en *mainframes*, minicomputadores —computadores de moi altas e altas prestacións, respectivamente, pensados para atender un gran número de usuarios—, estacións de traballo e microcomputadores (os coñecidos como ‘pecés’) —orientados á súa utilización individual ou, en todo caso, por parte dun número reducido de usuarios de forma simultánea—. Na actualidade están proliferando uns computadores de reducido tamaño e escasa potencia de cálculo, que poderíamos denominar *picocomputadores*, entre os que son especialmente populares os asistentes dixitais persoais ou PDA (*Personal Digital Assistants*). Aínda que inicialmente están pensados para a súa utilización como axendas, calendarios, directorios de teléfonos, etc., xa comezaron a aparecer usos máis sofisticados deles, como a navegación por Internet ou o apoio á telemonitorización de pacientes (S. Barro, J. R. Presedo, D. Castro, M. Fernández-Delgado, S. Fraga, M. Lama e J. Vila, *Intelligent Telemonitoring of critical-care patients*. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. Número especial sobre “Telemedicine”. Vol. 18, núm. 4, 1999, 80-88).

2 S. Barro, “El campeón de ajedrez y la máquina que sabía sumar: la ficción científica (parte 1ª); la realidad (parte 2ª); la reflexión (parte 3ª)”, *El Correo Gallego*, Suplemento de Ciencia y Tecnología, núms. 85, 86 e 87, abril e maio de 1997.

3 O proxecto “Computing’s Millenium Timeline” está tratando de establecer os feitos máis importantes no ámbito das tecnoloxías da información ó longo dos últimos mil anos. Sexa cal sexa o resultado último, non cabe dúbida de que tales feitos se aglutinarán ó final da liña do tempo, tal como parecen apiñarse as árbores que vemos ó final dunha longa avenida.

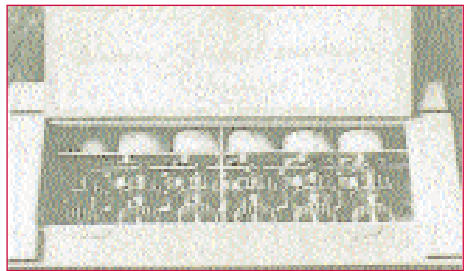
2. A PREHISTORIA DA COMPUTACIÓN

O primeiro dispositivo de computación coñecido é o ábaco, orixinario de Babilonia (hoxe Iraq), hai uns cinco mil anos. As sucesivas filas de doas ou bólas dun ábaco representan as unidades, decenas, centenas..., e en cada ringleira fíxase un número concreto utilizando unha cantidade equivalente de pezas. A pesar da súa enorme sinxeleza, ou se cadra por iso mesmo, o ábaco permite que unha persoa adestrada realice as operacións aritméticas elementais cunha inusitada rapidez⁴. As moi posteriores regras de cálculo ou as calculadoras mecánicas comparten, senón na forma si no fondo, a idea principal que guiou o invento do ábaco: apoiar mecanicamente as persoas na realización de cálculos máis ou menos complexos e repetitivos.

Fixémonos en que os sistemas de numeración que se foron utilizando ó longo da historia da Humanidade non sempre se axeitaron ós dispositivos de computación utilizados en cada momento. Así ocorreu, por exemplo, cos números romanos fronte ó ábaco ou cos números de orixe árabe que nós utilizamos fronte á codificación que se segue nos computadores dixitais. Neste sentido, temos que pensar que non existe un problema importante se se realiza a correcta tradución no nivel

de entrada de datos e de lectura de resultados entre o sistema de numeración empregado 'a man' e aquel utilizado internamente polo sistema de computación elixido.

Aínda que posiblemente a máis famosa máquina de calcular mecánica se debe a Blaise Pascal (1623-1662), hoxe en día considérase que a primeira calculadora foi obra do profesor alemán Wilhelm Schickard (1592-1635), construída en 1623, xusto o ano do nacemento de Pascal. Non obstante, a repercusión da obra de Pascal foi moito maior. A súa famosa Pascalina, realizada en 1642, cando Pascal só contaba dezanove anos de idade, é unha calculadora mecánica que opera mediante rodas dentadas e pesas. Para sumar e restar, a Pascalina xiraba as rodas, rexistrando así os valores, e utilizaba as pesas para realiza-la propagación do carrexo dunha roda a outra.



Máquina de calcular de Blaise Pascal, Conservatorio Nacional das Artes e Oficios, París.

⁴ Nunha proba realizada en 1947, un xaponés cun ábaco enfrontouse a un estadounidense que usaba a máis moderna calculadora electromecánica da época. O xaponés gañou en tódalas ocasións agás na realización de multiplicacións. É moi triste que os escenarios de enfrontamento entre os países representados por ámbolos contendentes foran en ocasións ben distintos.

Os tres séculos seguintes á aparición da primeira calculadora mecánica viviron a chegada continua de ideas e máquinas, se ben cada nova realización foise apoiando dun modo ou outro nas anteriores. En calquera caso, probablemente as contribucións máis transcendentales se deban a Charles Babbage (1791-1871). Referímonos á súa Máquina de Diferencias e á súa Máquina Analítica. Aínda que ningunha delas chegou a funcionar plenamente, as súas achegas considéranse a base da moderna computación.

Si podemos dicir que ningunha máquina, por extraordinaria e complexa que sexa, é máis interesante có seu creador, isto é especialmente certo na persoa de Babbage⁵. Argúmentase con frecuencia que foron as limitacións tecnolóxicas da época que lle tocou vivir as que lle impediron concluí-la súa obra. A falsidade deste argumento púxose de manifesto coincidindo co bicentenario do seu nacemento, en 1991, cando o Museo da Ciencia de Londres construíu integramente unha máquina de diferencias número 2, baseada nos planos de Babbage, utilizando exclusivamente técnicas e materiais dispoñibles a mediados do século XIX. A máquina funcionou perfectamente tras solucionar un pequeno número de erros obvios encontrados nos planos deixados por Babbage. O proxecto continúa na actualidade, co obxectivo de realiza-la parte dedicada

á impresión dos resultados sobre tarxetas perforadas.

O que case con total seguridade impediu a Babbage finaliza-los seus proxectos foi ese afán seu por construí-la mellor das máquinas que a súa cabeza podía concibir. Como referendo ás miñas palabras, gustárame lembrar aquí a experiencia que máis tarde contaría o matemático John Fletcher Mouton, da Universidade de Cambridge, sobre unha visita que lle fixo a Babbage poucos anos antes da súa morte. A medida que Babbage lle ía ensinando os diferentes talleres nos que ó longo dos anos se fixeran os traballos de construción das máquinas de calcular deseñadas por el, o estado de execución destas era cada vez máis pobre. Segundo Babbage, a execución de cada unha delas fora abandonada cando unha nova proposta era mellor e máis simple cá anterior, de tal modo que o esforzo para levala a cabo integramente se antollaba menor que completa-lo deseño previo. A última das habitacións, segundo Fletcher, non tiña nin trazas dunha máquina de calcular. A resposta de Babbage foi a mesma: "Aínda non está construída, pero estou traballando nela, e levará menos tempo construíla enteira que o que suporía completa-la Máquina Analítica desde o estado no que a deixei". En fin, tamén algúns políticos levan unha traxectoria semellante de eternas promesas de mellora-lo que antes non concluíron, ou ás veces nin sequera empezaron.

⁵ *Charles Babbage and his Calculating Engines*, publicación do Science Museum de Londres, 1998.

A primeira calculadora comercializada con certo éxito coñeceu co curioso nome de 'aritmómetro'. Foi desenvolvida polo francés Charles Xavier Thomas (1785-1870) —coñecido como Charles de Colmar— e foi merecedora da medalla de ouro da Exposición Internacional de Londres, en 1862. A máquina en cuestión daba realizado as operacións aritméticas básicas e calcular raíces cadradas con precisión. O aritmómetro foi, polo tanto, o primeiro exemplo da avidez coa que estes aparellos eran desexados. Debemos ter en conta que xa naquela época comezaban a cobrar carácter de necesidade; sirva como exemplo o feito de que a realización das táboas do censo de poboación estadounidense realizado en 1880, repetido cada dez anos por mandato da súa Constitución, necesitou dun período de máis de sete anos para se completar. O seguinte censo, de 1890, fíxose en 'só' dous anos e medio, gracias a un plan de codificación en tarxetas perforadas das respostas ás preguntas do censo e á máquina realizada por Herman Hollerith (1860-1929), que permitía a súa lectura e clasificación. O éxito da máquina de Hollerith tivo a súa continuación na Tabulating Machine Company, fundada por el en 1896. Seguro que o nome desta compañía no lles di nada, aínda que quizais si lles soe o daquela que naceu trala súa fusión con outras empresas: International Business Machines Corporation, máis coñecida polo acrónimo IBM.

O papel dos españois nestes inicios da computación non foi especialmente brillante, sacando, claro está, o desempeñado por Leonardo Torres Quevedo (1852-1936), que fixo contribucións de primeira fila no ámbito da automática e a computación analóxica. Membro da Real Academia de Ciencias de Madrid, desenvolveu diversas calculadoras e dous autómatas electromecánicos para xogar ó xadrez. Aínda que non é este o lugar axeitado para destacar moitos outros inventos e méritos de Torres Quevedo, permítanme dicirles unicamente que un teleférico deseñado por el segue aínda marabillando a quen o utiliza para cruza-las cataratas do Niágara.

3. A COMPUTACIÓN CONTEMPORÁNEA

Con certos matices, asúmese que a computación moderna ou computación contemporánea comeza cos primeiros computadores electrónicos baseados en válvulas ou tubos de baleiro e continúa ata os nosos días, dividida en catro xeracións de computadores, as cales se identifican cos avances máis significativos experimentados polos dispositivos coa que os ditos computadores se deseñaron: tubos de baleiro, transistores, circuítos integrados e microprocesadores, respectivamente. Asumiremos e seguiremos esta forma de presenta-la evolución dos computadores, entendendo que as fronteiras entre as sucesivas xeracións son cando menos difusas. Dedicaremos, con todo, unha maior atención á

primeira e á última, precisamente por representaren, respectivamente, o nacemento e a globalización da moderna computación. En todo caso, é obrigado antes facer referencia a certos fitos ou fundamentos teóricos da computación, aínda que por limitacións de espacio imos reducilos a dous: a álgebra de Boole e a máquina de Turing.

ÁLXEBRA DE BOOLE

A álgebra de Boole recibe este nome porque foi desenvolvida polo matemático inglés George Boole (1815-1864). Trátase dun conxunto de símbolos, que poden representar números, letras, obxectos, calquera cousa, en definitiva, e regras para manexalos ditos símbolos. Deste modo, o mesmo dito no marco da aritmética clásica " $5+3=8$ " é certo, no marco da álgebra do Boole " $a \text{ E } 1 = a$ " tamén o é. As tres operacións lóxicas máis elementais da álgebra de Boole son a negación (Non), a conxunción (E) e a disxunción (Ou). Calquera operación lóxica pode poñerse como combinación destas tres operacións primitivas. De feito, isto tamén é certo se consideramos simplemente a operación negación da conxunción (Non E). Asumindo o código binario

formado unicamente polos símbolos "0" e "1", a definición da operación "Non E", que representaremos de forma máis abreviada mediante o símbolo "***", é a seguinte: $0*0=1$, $0*1=1$, $1*0=1$, $1*1=0$. Se establecemos unha identificación entre o valor "verdadeiro" e o "1", o valor "falso" e o "0" e o símbolo "***" e a negación da conxunción de dúas proposicións lóxicas, que só poden ter valor verdadeiro ou falso, resulta que o mesmo que " $1*1=0$ ", a negación da conxunción de dúas proposicións verdadeiras dá un valor falso⁶.

Pódese dicir que a obra de Boole transportou a lóxica do terreo filosófico ó matemático.⁷ Ata ese momento, a xa milenaria lóxica formal non superara o siloxismo, un método de razoamento deductivo que parte dunha premisa maior e unha menor para chegar a unha conclusión, o que permite inferir, por exemplo, que "eu son mortal" a partir do coñecemento de que "tódalas persoas son mortais" e "eu son unha persoa". O transcendental paso que permite formalizar este e outros métodos de razoamento e, con isto, facilitá-la súa computarización, debémollos en boa medida a Boole.

6 Calquera computador podería deseñarse simplemente sobre a base da combinación adecuada de operadores lóxicos "Non E". A Bioloxía ofrécenos exemplos aínda máis incríbles de cómo se pode conformalo moi complexo a partir de elementos extremadamente simples: un bo exemplo disto é o feito de que as "instrucións do programa xenético" dos organismos se codifiquen simplemente na orde na que aparecen no ADN as catro bases: adenina, timina, guanina e citosina.

7 Dous foron os traballos clave neste sentido: "The mathematical analysis of logic. Being an essay towards a calculus of deductive reasoning" (Análise matemática da lóxica. Un ensaio cara ó cálculo do razoamento deductivo) e "An investigation of the laws of thought" (Unha investigación das leis do pensamento), publicados no ano 1847 e 1854, respectivamente.

MÁQUINA DE TURING

En 1937 publicouse nas actas da Sociedade Matemática de Londres un artigo do aínda mozo matemático Alan Turing, da Universidade de Cambridge, nado en Londres en 1912. Este artigo, titulado “On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem” (Sobre os números computarizables cunha aplicación ó problema da decisión), está considerado como unha das contribucións teóricas máis relevantes á lóxica matemática e a computación. Neste artigo descríbese unha hipotética máquina, coñecida desde entón como máquina de Turing, composta simplemente por un dispositivo de lectura/escritura e unha cinta de lonxitude infinita, segmentada en pequenas celas, ó xeito dun carrete fotográfico sen fin. En cada unha das celas das que se compón a cinta pode almacenarse un símbolo, ou deixala simplemente en branco. O símbolo escrito nunha cela pode ser recoñecido polo dispositivo de lectura cando este se sitúa nela. Así mesmo, ese dispositivo pode escribir calquera símbolo na posición na que se atope en cada momento. A lectura dun novo símbolo por parte da máquina provocará unha acción de resposta, que será función do símbolo lido e o estado interno da máquina no momento da lectura. Deste modo, dous símbolos idénticos, lidos en intres diferentes, poden provocar respostas distintas da máquina. Pense o lector nun simple

bolígrafo de émbolo; a mesma entrada ó sistema, consistente en pulsa-lo émbolo, terá consecuencias distintas, concretamente que a punta do bolígrafo saia ou entre, en función do estado, punta dentro ou fóra, respectivamente, no que se encontre o bolígrafo no momento de aplica-la dita entrada. A máquina de Turing é tan simple que só pode facer tres cousas: le-lo contido dunha cela e deterse; borrar un símbolo e escribir un novo; e, finalmente, ler unha cela e moverse cara á esquerda ou a dereita. Hai dúas cousas que nos marabillan sobre esta máquina: en primeiro lugar, que sendo tan simple poida resolver case calquera problema matemático ou lóxico que se nos ocorra, mesmo utilizando unicamente un código binario, composto por uns e brancos (ceros); en segundo lugar, a xenialidade de Turing para poder pensar neste nivel de abstracción cando aínda non existía ningún dispositivo real que puidese asemellarse á súa máquina —algunha moi leve e sutil inspiración podía proceder, se acaso, das máquinas de Babbage—. Hoxe resulta evidente que a máquina de Turing é basicamente un computador, no que a cinta é a memoria de propósito xeral, capaz de almacenar non só datos senón tamén instrucións, e o dispositivo de lectura/escritura é a unidade de procesamento central.

A máquina de Turing é unha formalización do concepto de algoritmo⁸ independente de calquera realización

⁸ A palabra algoritmo provén de Muhammad ibn Musa Al'Khowarizmi, quen no século XII desenvolveu o concepto de proceso que hai que seguir para lograr algún obxectivo.

ou implementación práctica deste. Un problema dise computable se para el existe un algoritmo e, polo tanto, unha máquina de Turing que o resolva. E aquí convén chama-la atención sobre o feito de que unha máquina de Turing poida resolver 'case' calquera problema matemático ou lóxico. Existen problemas que non se poden resolver mediante unha máquina de Turing e, polo tanto, entran na categoría de problemas insolubles algorítmicamente.

Non tódalas contribucións de Turing se mantiveron no terreo teórico —de feito, os que o coñeceron afirman que sempre tivo un enorme interese por todo tipo de experimentación práctica—. Durante a Segunda Guerra Mundial tivo un papel clave na realización dunha máquina electrónica, denominada Colossus, que permitiu 'reben-tar' as mensaxes que os alemáns cifraban a través da complexa máquina Enigma. Este feito tivo tal relevancia no discorrer da guerra que, aínda que non se di que Turing fixo gaña-la guerra, hai quen afirma que podería terse perdido sen el.

Sen dúbida a obra de Turing adiantouse ó seu tempo e desgraciadamente tamén a súa vida, que non foi respectada pola sociedade británica da época, para a cal a homosexualidade era un crime. Nunha carta a un amigo, dicía: "Temo que o día de mañá alguén recorra ó seguinte siloxismo: Turing cre que as máquinas pensan; Turing déitase con homes; logo, as máquinas non pensan". En 1952 foi arrestado por manter relacións homosexuais e tralo

xuízo aceptou que se lle administraran inxeccións de estróxenos (como alternativa a unha pena de cárcere) que o volveron impotente e, tal como el mesmo manifestou a un seu compañeiro de Cambridge, fixéronlle medra-los peitos. O 7 de xuño de 1954 atopárono morto logo de que inxerise, case con toda seguridade de forma consciente e voluntaria, cianuro potásico.



Alan Turing.

3.1 PRIMEIRA XERACIÓN

A historia dos computadores electrónicos e, con eles, da computación tal e como hoxe a coñecemos, ten unha orixe difusa. O recoñecemento ó traballo pioneiro de John Vincent Atanasoff

e Clifford E. Berry, que desenvolveron en 1939 o primeiro prototipo de computador dixital, chegoulles en 1973, tras un xuízo que invalidou a patente do computador ENIAC (Electronic Numerator, Integrator, Analyzer, and Computer), realizado por un equipo de científicos e enxeñeiros⁹ na Universidade de Pensilvania, en Filadelfia (EUA). A pesar disto, en xeral é o ENIAC o que adoita darse como referencia da orixe dos modernos computadores¹⁰. Este computador posuía 18.000 válvulas, consumía 100 quilowatts, ocupaba unha gran habitación e realizaba a suma de 5.000 números decimais de dez díxitos por segundo. Esta capacidade de cálculo, que hoxe nos parece ridícula xa que é superada por calquera calculadora de peto programable, era considerada enorme naquela época.

Hai dúas consideracións respecto ó ENIAC que resultan especialmente importantes. En primeiro lugar o feito de se tratar dun computador dixital de propósito xeral, é dicir, un dispositivo de computación con capacidade de ser reconfigurado para realizar tarefas diferentes. Isto lévanos á segunda consideración, e é que a reconfiguración debía realizarse mediante a reorganización de miles de cables e conmutadores. O ENIAC, polo tanto, carecía da

capacidade de almacena-lo programa que se ía executar, polo que non podemos consideralo un computador en sentido estricto; polo menos, non se temos en conta a semántica que hoxe asociamos ó dito termo. Precisamente, esta limitación foi discutida por un dos deseñadores do ENIAC, J. Presper Eckert, con John von Neumann, quen deu máis tarde solución ó problema introducindo o transcendental concepto de 'programa almacenado', como substituto do 'programa de cables'. Para facérmonos unha idea do avance que isto supuxo, permítanme comparalo co que suporía que nunha única etapa evolutiva pasasemos do rixido sistema nervioso dunha sambesuga á plasticidade que posúe o cerebro dun gato ou un can. Simplemente esta achega faría que Neumann pasase ós anais da historia da computación con letras de ouro, pero as súas contribucións foron moitas máis. Tamén foi el quen levou ó deseño do EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) a aritmética binaria, como substituta da decimal, coa que operaba o seu predecesor, o ENIAC. Sen embargo, o EDVAC só existiu 'sobre o papel', mentres que si foron realidade o BINAC (BINary Automatic Calculator), de Eckert e Mauchly, e o EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic

⁹ Creo que é importante destacar que a computación é unha disciplina que se apoia nos modelos, os métodos e as ferramentas das que se valen as ciencias para o seu avance, á vez que, por suposto, participa dos métodos de desenvolvemento e innovación tecnolóxicos. Presenta, polo tanto, esa compoñente ambivalente que posúen aquelas disciplinas que se nutren tanto do descubrimento como do invento.

¹⁰ A idea de utilizar tubos de baleiro para o deseño de computadores tivérona Atanasoff e Berry, entón na Universidade de Iowa, ó deseñar en 1939 o ABC (Atanasoff-Berry Computer). O ABC nunca chegou a estar operativo e si, máis tarde, o ENIAC.

Calculator), de Maurice Wilkes, desenvolvido na Universidade de Cambridge, Inglaterra. Ambos viron a luz en 1949, pero o segundo uns meses antes, polo que, case con total seguridade, podemos consideralo como o primeiro computador dixital electrónico de programa almacenado totalmente operativo.

O computador ENIAC foi inicialmente desenvolvido para a súa utilización militar durante a Segunda Guerra Mundial, aínda que en realidade non se rematou ata dous meses despois do final desta. O seu pulo á computación

moderna foi decisivo. De feito, dous dos creadores do ENIAC, John Mauchly, da Universidade de Pensilvania, e o mencionado Eckert, fundaron unha compañía para desenvolver unha versión comercial do ENIAC, coñecida como UNIVAC. Con isto deron paso ó principio da fin da posesión case en exclusiva dos computadores por parte dos militares e dun reducido colectivo de científicos e enxeñeiros. Algúns historiadores da computación sitúan o comezo da primeira xeración de computadores coincidindo con este feito, ocorrido no ano 1951.

Xeración	Inicio	Elementos de deseño	Programación	Memoria	Periféricos de entrada e saída de datos	Procesamento	Exemplo
Primeira	1951	Tubos de baleiro	Linguaxes máquina e ensamblador	Tambores e cintas magnéticas	Tarxetas perforadas	Por lotes	UNIVAC-I
Segunda	1960	Transistores	Linguaxes de alto nivel	Núcleos e discos magnéticos	Teclado e monitor	Tempo compartido	PDP-8
Terceira	1967	Circuitos integrados	Linguaxes orientadas a aplicacións	Discos magnéticos e <i>Floppy</i>	Rato	Distribuído	B3500
Cuarta	1975	Microprocesador	Orientada a obxectos	Memorias de semiconductor, CD-ROM, DVD	Impresora láser	Multiprocesamento	IBM-PC
Quinta	¿-?	<i>Software</i> baseado en Intelixencia Artificial	Orientada á aprendizaxe	Orgánica	Interface en linguaxe natural	Ubicuo	¿-?

Táboa I. Distintas xeracións de computadores e algúns dos feitos máis destacados que as acompañaron.



O ENIAC arriba e o UNIVAC abaixo, que foi a versión comercial do primeiro. (Tomado de *Quest*, Edit. Rialp).

Coma case sempre ocorre durante a curva de desenvolvemento dunha tecnoloxía, nesta época vivíuse un exceso de optimismo en canto ás posibilidades que os computadores poñían ó noso dispor. As referencias ós computadores da época como ‘cerebros electrónicos’, a chamada ó alistamento da armada estadounidense baixo o

reclamo: “¿Canto dá a raíz cúbica da décimo sexta potencia do número 2589? ¿O computador ENIAC da armada pode darche a resposta nunha fracción de segundo!”, ou a afirmación dun dos fundadores de IBM en relación a que uns poucos IBM 701 —o primeiro computador comercializado por esa firma—, serían suficientes para atender as necesidades mundiais de computación, ilustran, aínda que sexa dun modo anecdótico, o hiperoptimismo reinante naquela época.

3.2 SEGUNDA XERACIÓN

O invento do transistor en 1947 cambiou radicalmente a forma na que continuarían desenvolvéndose os sucesivos computadores, dando paso á súa segunda xeración. Isto non sucedeu, non obstante, ata que en 1960 comezaron a deseñarse os computadores mediante transistores, substituíndo as inmensas válvulas de baleiro. Ó contrario que os tubos de baleiro, os transistores son pequenos, teñen un baixo consumo e disipan pouca calor, ademais de ser máis rápidos na conmutación entre estados e moito máis fiables no seu funcionamento.

Durante esta época resulta especialmente destacable o amplo desenvolvemento das linguaxes de programación de alto nivel —con expresións que posúen unha sintaxe relativamente próxima á linguaxe natural—. O COBOL (*Common Business Oriented Language*), por exemplo, apareceu en 1960 e foi a linguaxe máis utilizada durante dúas décadas. Ignorada

despois, o seu uso foi recuperado nos últimos anos para ‘remendar’ os programas incapaces de empezar con bo pé o ano 2000.

Son dúas as empresas e os computadores que marcaron en boa medida esta época: a serie de computadores System/360 de IBM e o PDP-8 de Digital Equipment Corporation, este último o primeiro verdadeiro minicomputador. Sen embargo, foron os avances introducidos nas linguaxes de programación e nos sistemas operativos os que deron un grande pulo á utilización dos computadores durante esta segunda xeración. Se os sistemas operativos da década dos cincuenta buscaban fundamentalmente mellora-lo rendemento da máquina, algúns dos avances realizados durante esta época —como a aparición dos sistemas de tempo compartido, achega de Fernando Corbató, do MIT (Massachusetts Institute of Technology)— devolveron boa parte do control da máquina ós usuarios. Este feito acentuouse na seguinte xeración, de tal modo que sistemas operativos tan populares como o UNIX, que comezaron a desenvolver en 1969 Dennis Ritchie e Kenneth Thompson, responden precisamente a esta filosofía.

3.3 TERCEIRA XERACIÓN

En 1958, Jack St. Clair Kilby e Robert Noyce realizaron o primeiro circuíto integrado ou *chip*, incorporando múltiples transistores e outros dispositivos electrónicos nunha única oblea de silicio. O primeiro circuíto integrado

comercial apareceu en 1961, fabricado por Fairchild Corporation. Con todo, houbo que agardar ata 1967 para que os computadores comezasen a fabricarse mediante esta tecnoloxía, dando paso á coñecida como terceira xeración de computadores. Os primeiros computadores que incorporaron circuítos integrados foron os B2500 e B3500 de Burroughs.

Desta época son dous dos avances que máis incidencia tiveron na que hoxe tendemos a denominar como sociedade da información: o concepto de ‘rede de área global’, desenvolvido como parte do proxecto ARPANet, embrión da hoxe ubicua Internet, e o de ‘rede de área local’, a través da invención de Ethernet por Robert Metcalfe, en Xerox PARC.

Se se me permite un comentario un tanto á marxe, direilles que tamén foi durante esta terceira xeración, concretamente en 1968, cando se asumiu o estándar de seis díxitos para a representación da data (AAMMDD), algo que, como todos saben, había traernos moitos crebacabezas nos últimos anos.

3.4 CUARTA XERACIÓN

En 1969, unha compañía xaponesa fabricante de calculadoras, Busicom, pediulle á empresa Intel o desenvolvemento dun conxunto de circuítos integrados para unha liña nova de calculadoras electrónicas programables que desexaba lanzar ó mercado. A súa idea era ofrecer unha serie de calculadoras

con diferentes capacidades e opcións. O enxeñeiro de Intel, Maurice E. Hoff, fíxose cargo do proxecto¹¹. As experiencias previas neste sentido sempre foran acompañadas do redeseño dos circuítos cada vez que cambiaban as especificacións do produto final. Hoff pensou que ese redeseño podería evitarse se conseguía desenvolver un circuítio lóxico de propósito xeral, que puidese programarse, igual cá unidade de procesamento central dun computador. O resultado foi o Intel 4004, o primeiro microprocesador da historia¹². Despois de case trinta anos de evolución, hoxe vémo-lo 4004 como un microprocesador tremendamente simple; 2.250 transistores e 60.000 operacións por segundo son cifras moi apartadas das que ofrecen os microprocesadores máis recentes, que integran varios millóns de transistores. En calquera caso, resulta moi significativo que un circuítio integrado tivese unha capacidade de cálculo unha orde de magnitude maior ca un computador como o ENIAC, do que se daban o tamaño e peso en metros cúbicos e toneladas, respectivamente.

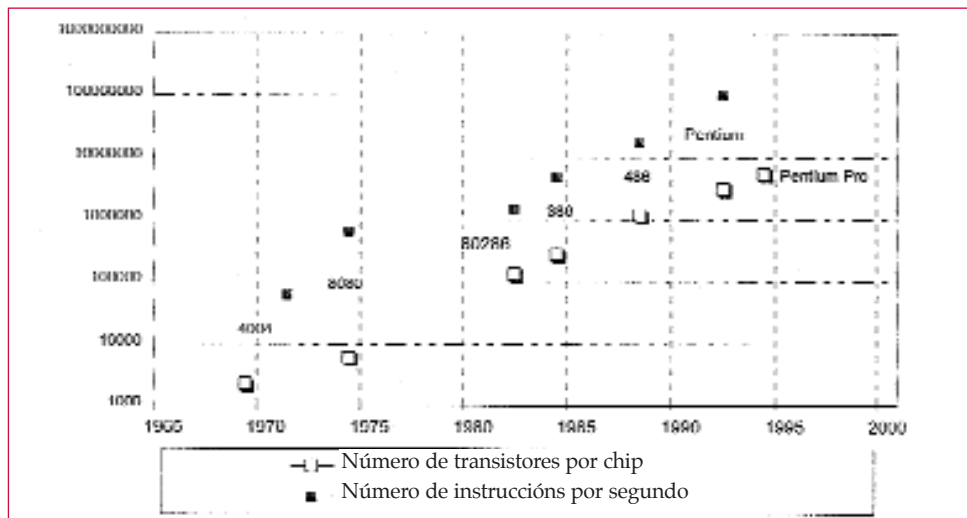
Busicom recibiu o resultado do seu encargo en forma de catro circuítos

integrados: o microprocesador propiamente dito, a memoria RAM —memoria de acceso aleatorio—, para o almacenamento temporal de datos, a memoria ROM —memoria só para lectura— destinada ó almacenamento permanente das instrucións que definían en cada caso un dispositivo ou calculadora concreta, e un circuítio de entrada/saída para o diálogo entre o microprocesador e o ‘mundo exterior’. Busicom obtivo unha brillante solución ós seus problemas —o que, sen embargo, non lle serviu para evita-la súa desaparición anos máis tarde— e a Humanidade recibiu un dos inventos que máis dinamizaron as tecnoloxías da información e as comunicacións, e con elas as nosas vidas.

Particularmente transcendente no haber do microprocesador foi o desenvolvemento do computador persoal, polo que supuxo de globalización da computación. Non pasaron moitos anos des que Steve Jobs e Steve Wozniak fixeron realidade a súa idea de crear un microcomputador —un computador baseado nun microprocesador— tan simple que puidese utilizarse directamente tras sacalo da súa caixa e enchufalo, como facemos, por

11 S. Barro, «Ponga un microprocesador en su vida», *El Correo Gallego*, Suplemento de Ciencia y Tecnología, núm. 70, 24 de novembro de 1996.

12 Un microprocesador é o corazón dun computador integrado nun único *chip* —unha lámina de silicio envolta nunha cápsula, que se comunica con outros dispositivos a través dunha serie de filamentos ou patillas—. Nun microprocesador inclúese a unidade encargada de realizar operacións aritméticas e lóxicas básicas (unidade aritmético-lóxica) e a unidade de control, encargada de le-las instrucións que compoñen un programa que se vai executar, de descodificar (interpretar) as ditas instrucións e de facer que o conxunto de elementos que soportan a computación operen ordenadamente e nos momentos precisos, para conseguir así a execución correcta do dito programa.



Táboa II. Complexidade, en número de transistores por *chip*, e potencia, en número de instrucións executadas por segundo, dalgúns dos microprocesadores de Intel. (Fonte: http://www.i-probe.com/i-probe/ip_intel.html).

exemplo, cun electrodoméstico¹³. Pouco despois da fundación de Apple Computer Inc., en abril de 1977, o Apple II¹⁴, con monitor, teclado, unidade de disco flexible e sistema operativo, viu a luz e con el naceu realmente a revolución do ordenador persoal, definitivamente potenciada, sen dúbida, por tres ‘megaempresas’ do sector da informática: Intel, mediante os seus microprocesadores, IBM, verdadeira artífice da difusión do ordenador persoal ou PC, e Microsoft, que achega o *software*, cos sistemas operativos como a meniña dos seus ollos.

Se a cuarta xeración de computadores se asocia ó microprocesador, non cabe dúbida que esta aínda está en marcha e non perdeu vixencia. Os esforzos por fabricar microprocesadores máis potentes e versátiles son continuos e parece que seguirán dando froitos aínda uns anos máis. A xa famosa Lei de Moore, enunciada a principios dos setenta por Gordon Moore, cofundador de Intel, así o constata; Moore observou durante os primeiros anos a relación prezo/prestacións dos *chips* desenvolvidos para o deseño de computadores, e baseándose nisto predixo

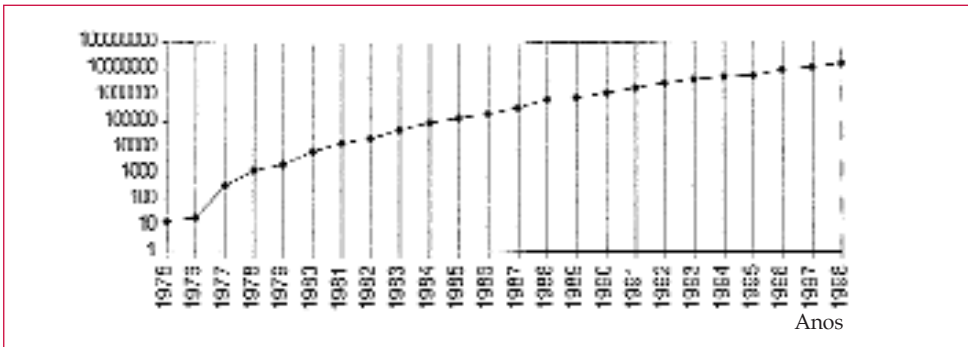
¹³ Se ben se asume que o primeiro computador persoal é o Altair 8800, considerar como tal un computador que carecía dos máis elementais periféricos é, cando menos, un exceso.

¹⁴ Recordo que nos últimos cursos da carreira os alumnos facíamos cola diante do único computador do que dispuñamos para realiza-las prácticas, precisamente unha versión avanzada do Apple II, tal como agora facemos para sacar diñeiro dun caixeiro automático ou, segundo conta meu pai, como se facía cando el era neno coa cartilla de racio-namento na man.

que a capacidade destes se dobraría cada ano (en realidade isto vén ocorrendo cada ano e medio, aproximadamente). En boa medida, esta lei segue vixente (táboa II) e é previsible que se manteña ata que se alcancen os límites físicos en canto a integración de transistores mediante a tecnoloxía do silicio [Bohr, 1998]. En calquera caso, o principal valor non se encontra no soporte físico senón no soporte lóxico e, en maior medida, na información e o coñecemento. Como mostra, un botón: fixémonos na evolución da facturación experimentada por Microsoft desde a súa fundación, en 1975 (táboa III), ou o aínda máis explosivo incremento de valor de empresas que venden información, como Yahoo!, que pasou en moito menos tempo a 'valer' varios billóns de pesetas.

Permítanme que analice con algo de calma a evolución que experimentou na súa facturación Microsoft, e que amosa cómo basicamente se foi do-

brando cada dous anos. Este fenómeno, con certos matices, é semellante noutras empresas do sector. Se vostedes mo permiten, e o propio Bill Gates, cofundador e presidente de Microsoft, gustaríame denominala 'Lei de Barro', e non precisamente como agoiro dun futuro pouco prometedor para esa empresa. Fixémonos en que nesta ocasión non falamos de duplicar prestacións, senón o volume de negocio, que é algo ben distinto. En calquera caso, este fenómeno pode ter unha relación importante co que concreta a Lei de Moore. Ó se duplica-lo número de transistores nun circuíto integrado, duplícanse basicamente as súas prestacións. Este feito vai acompañado dun incremento das aplicacións ás que pode destinarse e da utilidade destas, pero, sobre todo, promove o 'axigantamento' dos programas xa existentes, que se van dotando de novas posibilidades, moitas delas, a dicir verdade, bastante estériles —mentres escribo para vostedes este



Táboa III. Evolución da facturación da empresa Microsoft.

(Fonte: <http://www.microsoft.com/MSCorp/Museum/timelines/microsoft/timeline.asp>).

artigo, por exemplo, estou utilizando o procesador de textos nun nivel que seguramente non alcanza o 5 % das súas opcións—. A utilidade derivada dunha tecnoloxía evoluciona en xeral de modo logarítmico en relación ó avance ou crecemento desa tecnoloxía, de tal xeito que se esta última medra exponencialmente, a primeira só o fará linealmente. Sen embargo, as empresas que achegan utilidade á tecnoloxía amáñanse para creceren exponencialmente, en xeral, creando e mantendo falsas necesidades en nós, os seus clientes.

4. ¿QUINTA XERACIÓN?

Se ben xa existiu un intento por dar paso á denominada ‘quinta xeración de computadores’, este non tivo éxito. Polo menos non na forma na que os xaponeses concibiron o que, sen dúbida, foi un dos seus máis ambiciosos ‘megaproxectos’ tecnolóxicos, comunmente denominado proxecto da máquina Prolog. Foi iniciado polo Ministerio de Comercio e Industria xaponés en 1982 e fixo énfase no uso intensivo da linguaxe de programación lóxica Prolog —desenvolvido por Alain Colmerauer, da Universidade de Marsella, unha década antes— e no

desenvolvemento de computadores especialmente adecuados para a execución de programas escritos na dita linguaxe. Tralo fracaso deste plan, no ano 1991 os xaponeses decidiron saltarse directamente a quinta xeración de computadores e dar paso á sexta, baseada nas redes neuronais artificiais. Non deixa de sorprendeme esta brusca transición entre dous paradigmas de computación tradicionalmente enfrontados, como son a computación lóxica (simbólica) e a computación neuronal (subsimbólica), tan allea ó usual eclecticismo e á formulación conciliadora dos orientais.

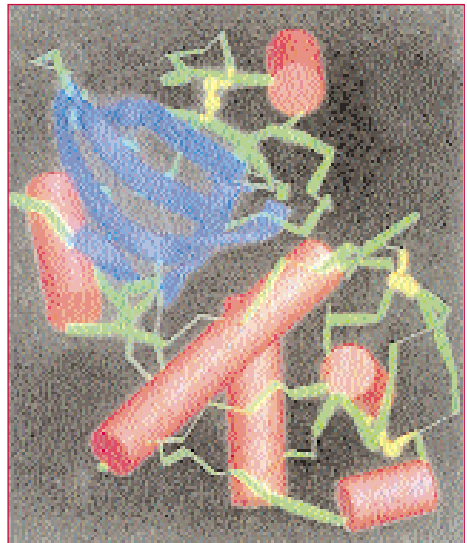
Por outra parte, hai quen considera que xa levamos algún tempo na quinta xeración, da man dos computadores masivamente paralelos; ou que se está entrando actualmente, co apoio das tecnoloxías das telecomunicacións, baixo o concepto da computación ubícuca. Se os primeiros centros de cálculo se organizaban arredor dun ordenador de altas prestacións, con capacidade de atender as necesidades de múltiples usuarios conectados a el simultaneamente: ‘un computador para moitas persoas’, e despois vivímo-lo slogan das compañías líderes do sector informático, tanto de *hardware* como de *software*: ‘un computador en cada despacho ou mesa’¹⁵, actualmente estamos

¹⁵ Consequilo non foi unicamente mérito de IBM ou doutras empresas dedicadas a ofrecernos computadores cada vez máis potentes e baratos. Tamén contribuíu decisivamente a isto a facilidade coa que case calquera persoa pode utilizar estes ordenadores, mesmo sendo leiga en temas informáticos. As interfaces baseadas en iconas, que tantos beneficios deron a Bill Gates, son unha idea orixinal do centro de investigación en Palo Alto, Estados Unidos, pertencente á empresa Xerox Corporation. Steven Jobs, cofundador de Apple, visitou o centro a principios dos oitenta e tomou boa nota do computador Xerox Star, o seu rato, a súa pantalla gráfica e a interacción co usuario baseada en iconas. Sen dúbida esta visita tivo un claro reflexo no Macintosh.

asistindo ó imparable avance dunha forma de computación que ben podería atender ó lema de: ‘moitos computadores ó servizo de calquera persoa’. De calquera xeito, e se mo permiten, a min gustaríame reserva-la consideración de quinta xeración a un tipo de computadores que aínda está por chegar. Sen prexuízo de que vaian aparecendo novos avances no terreo do *hardware* que supoñan achegas, se non revolucionarias si significativas abondo como para merece-la dita consideración, penso que un avance cualitativo terá que vir da man do *software* e, máis concretamente, daquel que asociamos cunha rama das ciencias da computación coñecida co nome de Intelixencia Artificial.

O termo ‘Intelixencia Artificial’ foi acuñado en 1956 por John McCarthy, do MIT, no hemisferio da primeira xeración de computadores. Sen embargo, aínda non contribuíu dun xeito definitivo a introducirmos nesa quinta xeración que, como dixen, ha apoiarse máis nos avances no *software* e non tanto no *hardware*. Raymond Kurzweil, presidente da Kurzweil Technologies Inc., asegura no seu libro *La era de las máquinas espirituales*, que cun PC de mil dólares do ano 2020 se alcanzará a capacidade do cerebro humano —aproximadamente 100.000 millóns de neuronas e 100 billóns de conexións—, e que no ano 2050 a súa potencia será equivalente a mil millóns de cerebros humanos. Sen embargo,

non é o mesmo potencia de cálculo ou de computación ca intelixencia. O supercomputador máis potente actualmente non será moito máis intelixente có máis simple dos ordenadores persoais, se ambos se programan, por exemplo, para a resolución de ecuacións diferenciais. En calquera caso, creo oportuno reproducir unha interesante reflexión de Vicente Campos¹⁶, cando sinala que o abismo que separa a expresión “o computador é un instrumento que serve para calcular” de “o computador calcula”, non é moi distinto do que hai entre “o garfo é un



A base para construír un ordenador seguindo o modelo do cerebro humano sería o *biochip*. Estes pola súa vez estarían construídos a base de moléculas de proteínas como a que aquí se pode ver nunha imaxe de ordenador.

16 “Tecnofilia y Tecnofobia”, *Anthropos*, núm. 164, 1995, páxs. 79-82.

instrumento que serve para comer” de “o garfo come”. O que o segundo desprazamento semántico pareza unha tontería e o primeiro non, non é máis que un sinal de que a transformación xa está en curso.

Os computadores de quinta xeración darán unha maior importancia ós seus ‘sentidos’, xa que dedicarán proporcionalmente cada vez máis recursos á entrada e saída de información do exterior e menos ó seu procesamento interno. En definitiva, o que estamos dicindo é que nos imiten un pouco máis na súa organización. Este proceso estase a dar de forma progresiva. Nos primeiros computadores, o proceso de introducir información era francamente laborioso e lento. Desde a utilización inicial de caravillas para a interconexión de circuítos específicos e as tarxetas perforadas, que apareceron poucos anos despois, as cousas foron mudando notablemente. Hoxe non nos conformamos con ter un teclado sofisticado, unha pantalla de moi alta resolución e capaz de reproducir millóns de cores, ou unha impresora veloz e silenciosa. A isto unimos unha plétora de novos dispositivos como o rato, o CD-ROM, a conexión a rede, o escáner, a cámara, o micrófono, os altofalantes, tarxetas de adquisición e xeración de sinais analóxicos, por non falar dos narices electrónicos ou os sintetizadores de olores, que aínda dan os seus primeiros pasos. Estes medios para percibi-lo contorno e actuar sobre el

requiren unha crecente capacidade de computación por parte dos computadores, que ven cómo se despraza a súa potencia de cálculo desde o seu núcleo á periferia. Segundo apunta Michael Dertouzos, director do Laboratory for Computer Science do MIT, nos anos setenta só o dez por cento das ordes do ordenador se referían a aparellos de entrada-saída, como pantallas, impresoras e teclados. A maioría das ordes dedicábanse a operacións que transformaban a información interna do ordenador. A mediados dos noventa, esa proporción subiu ó oitenta e cinco por cento¹⁷.

Eses computadores da quinta xeración deberán permitirnos dialogar con eles dunha forma case natural. Aínda que xa se levan dado algúns pasos firmes neste sentido, andamos lonxe de conseguilo. ¿Lembran o computador HAL 9000 da película *2001, odisea en el espacio*? Nese filme HAL guía a nave *Discovery* nunha misión secreta, mostrando unha autonomía de funcionamento sorprendente e interaccionando cos membros da tripulación en linguaxe natural, coma se fose un máis deles. ¿Podería hoxe en día construírse un ordenador capaz de emulalo HAL nas súas competencias? A resposta ten dous matices ben diferenciados, segundo nos centremos nunha perspectiva máis próxima á tecnoloxía dos computadores ou ó campo da intelixencia artificial. A tecnoloxía dos computadores xa permitiu construír

17 M. L. Dertouzos, *What Will Be: How the New World of Information Will Change Our Lives*, Nova York, HarperEdge Publishers, 1997.

computadores capaces de realizar billóns de operacións por segundo (Teraflops). Con todo, a intelixencia artificial, á que se lle atribuiría a responsabilidade de dota-la armazón de cálculo de HAL de capacidades propias dos seres intelixentes e, en última instancia, propias do ser humano, non logrou avanzar tanto. ¿Lograrémolo no século que acaba de nacer? Déixolle o privilexio de responder a quen no ano 2100 se dirixa a vostedes desde esta mesma revista.

5. ¿ONDE ESTAMOS?

Os beneficios e posibilidades dos computadores son tan evidentes que non creo que pague a pena insistir aquí neles. Pola contra, coído que nunca está de máis incidir nalgúns aspectos da súa cara menos agradable. A dependencia á que nos están sometendo, o seu componse inescrutable, o acento que poñen nos desequilibrios sociais ou o illamento que poden inducir en nós, son algúns dos trazos que definen esa cara con máis intensidade.

Superado xa o século XX, é momento de facer balances e un deles lévanos a tratar de concretar aqueles inventos que foron máis relevantes para a Humanidade. É certo que os avións, a televisión, a radio, os foguetes, que nos permitiron chegar á lúa, son inventos sen os cales o mundo non sería hoxe como é. Pero tamén é certo que a televisión e a radio se están dixitalizando, e chegar á lúa ou voar como

hoxe o facemos terían sido misións imposibles sen a participación dos computadores. Isto non nos permite dicir, por suposto, que o computador é o invento máis relevante, pero si que é un dos que, co tempo, e dun modo crecente, alcanzaron o status de imprescindibile. A sanidade, a industria, a investigación, as comunicacións, o ocio..., para qué seguir enumerando, practicamente todo aquilo no que podemos pensar, ten unha crecente dependencia dos computadores. Resulta un exercicio interesante —que lles recomendo que fagan nalgunha ocasión— pensar naquilo que non poderíamos facer ó longo dun día normal da nosa vida se non existisen os computadores. O computador co que estou escribindolles, os múltiples microcontroladores que incorpora o meu coche, calquera coche, o teléfono móbil, o caixeiro automático, o control da iluminación nas rúas e semáforos, a televisión, o equipo de música, a lavadora, a cámara de vídeo, as máquinas expendedoras, as dos aparcamentos, os surtidores de gasolina, estean trucados ou non, os xoguets dos meus fillos...

Á marxe dos erros intencionados e os virus informáticos, os erros ou defectos causados inconscientemente, tanto no soporte físico coma no soporte lóxico, son bombas latentes de repercusións impredecibles. O primeiro erro ou *bug* —traducible como 'becho'—, produciuse no computador Harward Mark II, e foi descuberto no ano 1945 por Grace Murray Hopper. A causa dun fallo nun relé foi un caruncho, tal

como recolle a documentación que se garda no Museo Nacional de Historia Americana, en Washington D. C. (figura 1). Recentemente asistimos a dous erros bastante máis serios. Un deles afectou o deseño do microprocesador Pentium e foi detectado por un usuario especialmente tenaz e competente, o que obrigou a Intel á substitución de miles deles xa incorporados nos computadores doutros tantos usuarios. Doutra índole foi o problema informático do ano 2000, derivado da incapacidade dalgúns computadores e programas informáticos para operaren adecuadamente cos días posteriores ó 31 de decembro de 1999. Neste caso tratouse máis dun problema de ‘caducidade’ de certos sistemas informáticos que dun verdadeiro erro de deseño. Se me permiten a ironía, supuxo o invento dos sistemas informáticos con data de caducidade. Estes defectos non son, nin moito menos, casos illados. Os erros informáticos, sobre todo nos programas ou *software*, son moi comúns, aínda que as súas repercusións non

alcancen nin de lonxe as que tivo o comentado problema do ano 2000 —limitándonos ó terreo estrictamente económico, foi o erro máis custoso para a humanidade, sacando a Segunda Guerra Mundial—. A complexidade de moitos programas e o carácter crítico dalgunhas das aplicacións abordadas é tal que cada vez resulta máis difícil depuralos¹⁸. Sabemos que o sistema operativo Windows 98, por exemplo, foi parcheando os múltiples erros que se foron detectando despois de iniciada a súa comercialización. Estes erros poden ter gran transcendencia cando permiten que os sistemas sexan ‘violentados’ por usuarios non autorizados. O principal problema é que moitos destes fallos pasan desapercibidos ata que un cúmulo de circunstancias delata un mal funcionamento do sistema, o que pode resultar banal, se unicamente supón que a nosa tarxeta de débito quede retida nun caixeiro automático, ou fatal, se afecta o *software* de control e supervisión dunha central nuclear, por exemplo.



Figura 1. O primeiro caso real de *bug* ou erro informático, documentado dunha forma moi orixinal.

¹⁸ É máis, a limitación das máquinas de Turing para poder determinar de calquera programa se este terá fin ou continuará executándose indefinidamente, pode enunciarse tamén como a imposibilidade para dotar calquera das linguaxes de programación que utilizamos dun depurador de erros infalible.

Xa dixemos que en boa medida o microprocesador, e con el o ordenador persoal, deron lugar a un proceso imparabile de globalización da computación, impulsado definitivamente polo fenómeno Internet. É certo, pero debemos ter moi presente que non é o mesmo globalizar que socializar. A separación entre as nacións ricas e as pobres, que comezara a estreitarse despois da Segunda Guerra Mundial, camiña en sentido inverso trala introducción masiva dos computadores, e dificilmente isto é unha simple coincidencia. Por suposto que a tecnoloxía é neutra e é o uso ou o abuso que se faga dela o que resultará ó cabo bo ou malo. Pero, coma case sempre, calquera novo punto de apoio serve para manexar máis eficazmente a panca coa que as clases medias (nós) manexan as clases baixas (os outros) en beneficio das clases altas (eles). Desafortunadamente, o computador non está sendo alleo a esta tendencia.

Permítanme comentarlles finalmente un recente artigo da revista *National Geographic*, na súa edición en español —Vol. 5, núm. 2, agosto de 1999—, que inclúe unha mirada a través dos tempos de tres cidades: Alexandría, no século I, Córdoba, no século X, e a Nova York actual. As ilustracións que recrean unha escena de cada unha delas reflicten o barullo cosmopolita dunha avenida de Alexandría, a aprendizaxe e a diversión que involucra dous nenos cordobeses e un

erudito da época e, finalmente, unha moza no seu apartamento de Nova York —un dos típicos baixos reacondicionados para vivenda—, que se conecta co mundo exterior a través do computador, o teléfono móbil, a televisión e a radio¹⁹. Non creo que sexa unha casualidade esta imaxe que se nos presenta. Se ben é certo que o discorrer da revolución industrial ou a vida nas cidades, entre outros factores, empuaránnos a unha progresiva inmersión en nichos *vivendi* cada vez máis reducidos, o que sen dúbida acentuou notablemente a televisión, corrémolo risco de que o computador sexa a puntilla que acabe por transformar en virtual a nosa vida en sociedade e que as nosas conversas, discusións, paixóns, bicos, roces, emocións ou sentimentos, discorran unicamente polo fío de cobre ou a fibra óptica. O noso paso polo terceiro contorno, tal como o denomina Javier Echeverría²⁰, parece inevitable. Trátemos, ademais, de que sexa desexable. Para iso podemos segui-lo exemplo dunha importante empresa de pizzas; o mesmo ca no seu caso, “¡o secreto está na masa!”, pero, claro está, é outra masa: a nosa masa cerebral posta ó servizo do uso racional dos computadores.

Xa podemos dicir que os computadores son unha creación do século pasado. Sen embargo, a historia da computación non fixo máis que empazar. Se a presenza dos humanos sobre a Terra abrangue a penas unha hora

19 En <http://www.nationalgeographic.com/3cities> pode verse unha versión interactiva desa ilustración.

20 Javier Echeverría, *Telépolis*, Barcelona, Ediciones Destino, 1999.

dun hipotético ano no que puidesemos comprimi-la idade do universo, a dos computadores redúcese a unha décima de segundo. A computación cuántica ou a computación con ADN están aínda a abrollar e seguro que nos esperan avances que non pasan aínda, nin sequera fugazmente, pola cabeza de ningún científico da computación. Esperemos que nos permitamos a nós mesmos continuar algúns segundos máis este apaixonante e complexo 'xogo'.

BIBLIOGRAFÍA

Augarten, S., *Bit by Bit - An Illustrated History of Computers*, Nova York, Ticknor & Fields, 1984.

Kurzweil, R., *The age of intelligent machines*, Cambridge, Massachusetts (EUA), Massachusetts Institute of Technology, 1991 (edición en español: *La era de las máquinas inteligentes*, México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1994).

— *The age of spiritual machines*, Viking Penguin, 1999 (edición en español: *La era de las máquinas espirituales*, Editorial Planeta, 1999).

Neumann, J. von, *The computer and the brain*, Yale University Press, 1958.

Strathern, Paul, *Turing y el ordenador*, Século XXI de España Editores, S. A., 1999.

ALGÚNS ENDEREZOS WEB DE INTERESE

“Charles Babbage Institute (CBI)”, centro de investigación da Universidade de Minnesota, EUA, dedicado a promover o estudo e preservación da historia da computación e o procesamento de información:

<http://www.cbi.umn.edu/>

Historia da computación, contada pola IEEE Computer Society:

<http://computer.org/history/>

Museo virtual de Microsoft:

http://www.microsoft.com/MS_Corp/Museum/timelines/microsoft/timeline.asp

Computer Science Department, en Virginia Tech:

<http://ei.ces.vt.edu/~history/index.html>



ELECTRÓNICA: CIENCIA E TECNOLOXÍA

*Diego Cabello Ferrer**
*Carlos Gómez-Reino Carnota***
 Universidade de Santiago
 de Compostela

1. INTRODUCCIÓN

A Electrónica é unha rama da ciencia e a tecnoloxía bastante recente, que adquiriu entidade propia neste século e que continúa en constante e intensa evolución e interrelación con outras ciencias. Naceu como unha rama da Física e na súa orixe trataba de englobalo referente ás propiedades dos electróns libres no baleiro. Antes dos anos corenta, o termo 'electrónica' era utilizado case exclusivamente polos físicos, e con el referíanse ó electrón e as súas propiedades. Como tal rama, polo tanto, os seus antecedentes sitúanse a finais do século XIX, cando J. J. Thomson descubriu o electrón. Foi algo máis tarde cando se albiscaron as grandes vantaxes de controlar fluxos de electróns mediante os denominados dispositivos electrónicos, e produciuse entón un amplo e rápido desenvolvemento da Electrónica, tanto nos seus fundamentos coma nas súas aplicacións. Ó principio foron as fortes necesidades creadas xa por aquelas datas

nas comunicacións as que moveron este avance, seguindo pola radio, a instrumentación e os sistemas de control, a televisión e, máis recentemente, a denominada 'electrónica de consumo' e a informática.

Durante a primeira metade do século XX deuse un rápido desenvolvemento dos tubos de baleiro e dos circuitos nos que interveñen, o que de xeito natural motivou un importante avance na Teoría de Circuitos. Sen embargo, o grande pulo da Electrónica, responsable do nivel tecnolóxico actual, debeuse á substitución dos tubos de baleiro polos dispositivos semiconductores. Neste sentido, sinálase como fito histórico a invención do transistor, aínda que tamén o foi a introducción da tecnoloxía planar de silicio e o concepto de circuíto integrado.

Á vista destas consideracións, pode definirse a Electrónica dun modo xenérico como: "A rama da Ciencia e a Tecnoloxía que se ocupa do estudo das leis que rexen o tránsito controlado de cargas eléctricas en medios materiais e

* Catedrático de Electrónica.

**Catedrático de Óptica.

no baleiro, as propiedades nas que se basea, os dispositivos nos que ocorre e as aplicacións ás que dá lugar". Os seus contidos pódense agrupar pois en dous grandes apartados: Física de semicondutores e dispositivos electrónicos e circuítos e sistemas electrónicos. Como podemos inferir dos seus contidos, a Electrónica é unha área de coñecemento que participa das propiedades das 'ciencias do natural' (análise) e das 'ciencias do artificial' (síntese e tecnoloxía).

O perfeccionamento tecnolóxico necesario para obter dispositivos e circuítos con elevadas prestacións fixo que a Electrónica estendera lazos de dependencia a outras ramas da ciencia; un dos máis palpables é o que a liga coa ciencia dos materiais. Existen, con todo, outras relacións; por exemplo, o desenvolvemento recente das comunicacións ópticas propiciou que se intensifiquen esforzos no campo da Optoelectrónica, a través da cal a Electrónica se achegou á Óptica; noutro ámbito, a posibilidade de execución de microsistemas, que inclúen sensores e actuadores dentro do circuíto integrado, abriu posibilidades de aplicación e interrelación da Electrónica con outras parcelas, como por exemplo a Micromecánica. Non podemos esquecer as conexións entre a Electrónica e a Arquitectura de ordenadores ou coa Informática. Daquela, o deseño electrónico, no contexto das tecnoloxías modernas, é un campo multidisciplinar.

Os dispositivos electrónicos desenvólvense e modélanse como

resultado de estudia-las distintas propiedades dos materiais. O uso masivo destes dispositivos permite construír circuítos en moi alta escala de integración (VLSI) ou mesmo sistemas sobre un *chip* (SOC). A única forma de completa-lo deseño dun sistema complexo nun tempo razoable é mediante ordenadores para simular, optimizar e deseña-lo circuíto; xorde así o deseño asistido por ordenador (CAD). Coa conxunción destes catro compoñentes (materiais, dispositivos, circuítos e deseño asistido por ordenador) é posible aborda-lo reto de obter circuítos cada vez máis complexos.

A Electrónica naceu e desenvolveuse, polo tanto, cun marcado carácter aplicado, que é o que lle confiere a súa autonomía. En consecuencia, o interese desta área polo movemento das partículas cargadas está condicionado á aplicación do dito movemento nos dispositivos electrónicos, para a posterior aplicación destes nos circuítos electrónicos; así é, a través das súas utilidades, como a Electrónica cumpre hoxe en día un papel primordial. O seu efecto sobre o avance científico e o tecnolóxico foi e é importantísimo, e ela mesma saíu beneficiada, o que propiciou que, nun proceso rexenerativo, se dispararan expectativas e aplicacións en menos de cincuenta anos (investigación básica — desenvolvemento tecnolóxico — instrumentación — nova investigación e desenvolvemento...). Ademais, a través das súas aplicacións, a Electrónica introduciuse en tódolos sectores, non só científicos e

tecnolóxicos en sentido estricto, senón tamén nos industriais, médicos, mercantís e financeiros, artísticos e, cada vez máis, nos utensilios comúns que nos rodean.

Neste traballo pretendemos mostra-los contidos da Electrónica analizando a súa evolución histórica a través dos descubrimentos dos dispositivos básicos. Unha análise paralela da evolución das súas aplicacións é prohibitiva por extensa e, ademais, as grandes aplicacións (control, proceso de datos, comunicación e instrumentación) permanecen. O que cambia é a tecnoloxía usada na súa realización.

Seguindo a S. Bracho (1999), nesta evolución histórica podemos distingui-las seguintes etapas:

- Do electrón ó transistor; antecedentes históricos da Electrónica.
- Do transistor ó amplificador integrado; primeiras etapas da tecnoloxía de semicondutores.
- O microprocesador no deseño de sistemas dixitais.
- Integración VLSI. Circuitos dixitais, mixtos e microsistemas.

Vexamos brevemente os principais logros acadados en cada unha destas etapas. Posteriormente completaremos o traballo mostrando as conexións da Electrónica coa Optoelectrónica e comentando a evolución desta última.

2. DO ELECTRÓN Ó TRANSISTOR. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DA ELECTRÓNICA

Como xa comentamos, os antecedentes da Electrónica sitúanse contra finais do século XIX. Podemos falar pois dunha etapa pre-electrónica que cobre os sucesos previos ó descubrimento das válvulas de baleiro (díodos e tríodos termoiónicos). Entre estes sucesos hai que considera-la obra de Maxwell, a xeración e detección de ondas electromagnéticas (Hertz), o desenvolvemento da radiotelegrafía (Lodge, Popou, Marconi), os raios catódicos (tubo de Geissler, 1860), o oscilógrafo (Braun, 1895), o descubrimento do electrón (Thomson, 1897) ou a formulación da teoría 'clásica' da conducción (Drude, 1900; Lorentz, 1905).

Sen embargo, é posible establecer que a Electrónica nace cos primeiros dispositivos que permiten o control por un campo eléctrico da conducción en válvulas de baleiro. Así, en 1905, A. Fleming descobre o díodo termoiónico, e en 1907 Lee de Forest, o tríodo. Ámbalas válvulas están baseadas na emisión termoiónica (Edison, 1883). O díodo nace buscando un detector de ondas. A introducción dun terceiro electrodo (gradicela metálica) entre ánodo e cátodo permitía o control da tensión catódica con outra moito menor aplicada na gradicela, de forma que a válvula amplificaba. Este fenómeno de amplificación de sinais eléctricos tivo gran transcendencia coa súa aplicación á transmisión de sinais

de radio, de rádar ou de TV, ou á amplificación de sinais de audio. A introducción de novas gradicelas levou ó tetrodo e ó pentodo. Apareceron tamén os tubos cheos de gas, entre os que destaca o tiratrón, que permitía a rectificación controlada.

Entre os circuítos máis notables desta época están os amplificadores operacionais, executados con tubos termoiónicos, que deron orixe ó cálculo analóxico e ós computadores analóxicos, hoxe extinguidos como tales.

Nesta época tódolos dispositivos electrónicos están baseados no movemento de electróns no baleiro ou en gases, baixo o control de campos eléctricos e magnéticos, e na xeración destes portadores mediante emisión termoiónica, fotoeléctrica ou secundaria. Podemos considerar que esta época dá cabo en 1948, coa invención do transistor. Emporiso, na actualidade aínda se seguen usando os tubos termoiónicos na amplificación de audio de altas prestacións.

3. DO TRANSISTOR Ó AMPLIFICADOR INTEGRADO. PRIMEIRAS ETAPAS DA TECNOLOXÍA DE SEMICONDUCTORES

A verdadeira orixe da Electrónica, tal como a coñecemos actualmente, hai que situala na aparición dos dispositivos de estado sólido. A partir dese momento, os dispositivos electrónicos máis relevantes asentan na inxección e

o transporte controlado de electróns libres e ligados no interior de cristais semicondutores (Ge, Si, GaAs...) nos que hai heteroxeneidades controladas que permiten realiza-las mesmas funcións que antes cumprían as válvulas e outras novas non pensadas ata agora. Nace así a electrónica dos semicondutores, pasando a primeira liña a Física do estado sólido.

3.1 PRIMEIROS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

O primeiro dispositivo semiconductor fabricado é o díodo de unión. O seu funcionamento baséase no feito de que a unión de dous semicondutores, un impurificado con impurezas de natureza aceptadora (semiconductor tipo P) e outro con impurezas doadoras (semiconductor de tipo N), xera unha barreira de potencial, V_{bi} , na zona da unión. Esta barreira pódese alterar mediante a aplicación dunha tensión exterior, aumentándoa ou diminuíndoa, o que fai que o dispositivo teña un comportamento asimétrico respecto da aparición dunha corrente, que dependerá da polaridade e valor da tensión aplicada. A figura 1 mostra un esquema da unión pn no que se distinguen as rexións neutras P e N, unha rexión desprovista de portadores libres (capa baleira) que se estende a ámbolos lados da unión metalúrxica ($x = 0$), o potencial de barreira asociado e cómo estes quedan afectados pola polarización aplicada: directa se V_A é positiva, e inversa se V_A é negativa.

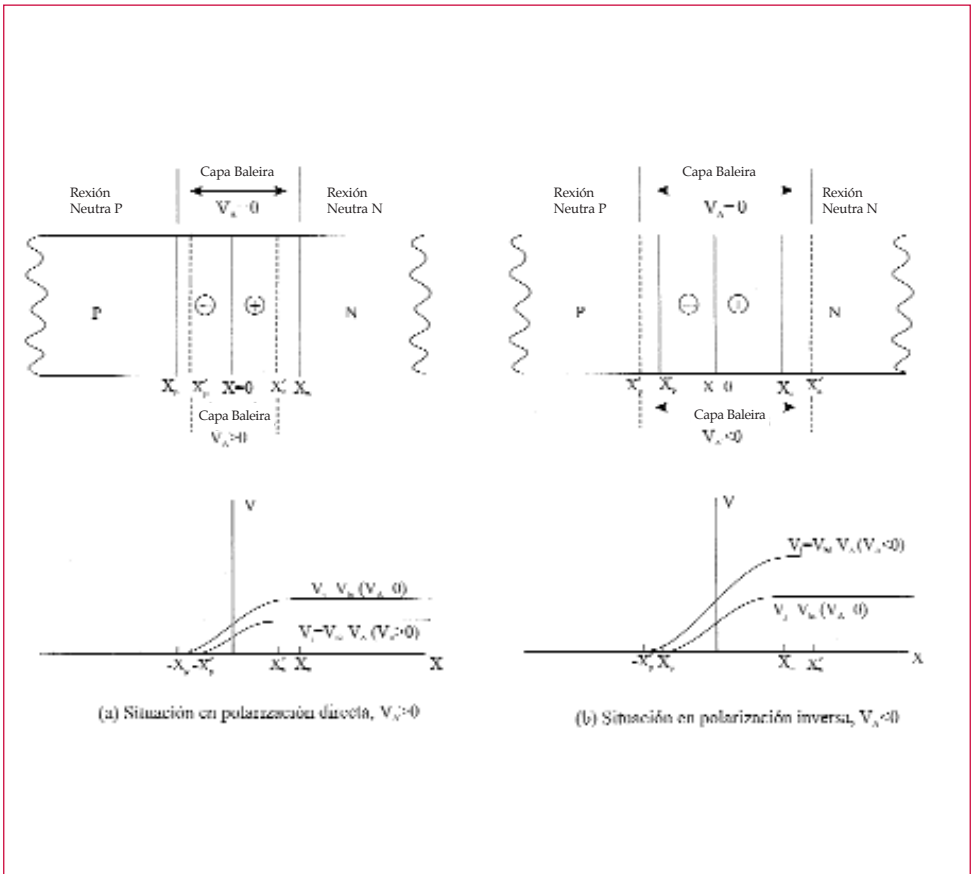


Figura 1. Esquema dunha unión PN en polarización directa e inversa e barreira de potencial xerada.

A teoría fundamental para a obtención das súas características tensión-corrente foi desenvolvida por Shockley en 1949 e posteriormente ampliada por outros autores. A figura 2 ilustra a forma da relación tensión-corrente nun díodo ideal; podemos observar que existen dous estados asociados ó tipo de polarización: nun deles —polarización directa—, o díodo actúa

practicamente como un cortocircuíto; no outro —polarización inversa—, actúa como un circuíto aberto. A corrente en polarización directa débese á inxección de portadores maioritarios nas zonas onde son minoritarios, que se difunden nela. En inversa dáse o fenómeno de extracción de portadores de onde son minoritarios. Por iso a corrente é moi pequena e negativa.

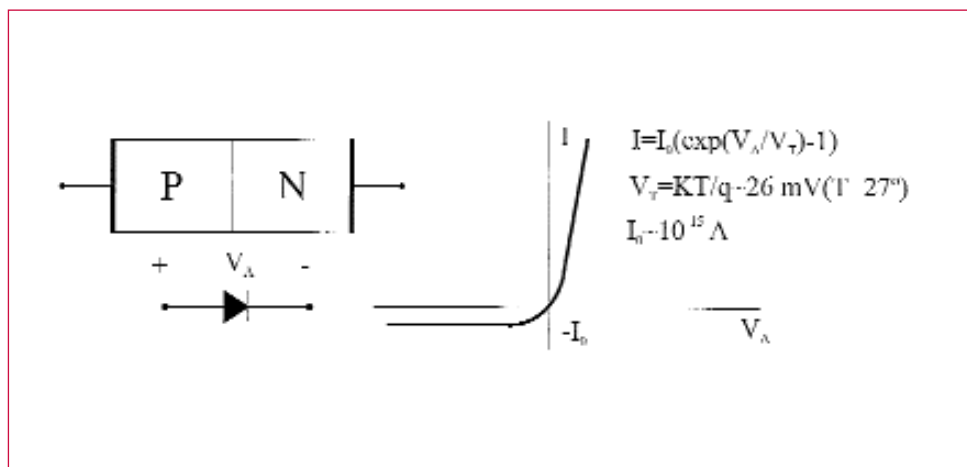


Figura 2. Diodo ideal: esquema, símbolo curva característica.

A importancia que ten a unión *pn* dentro da electrónica non é só polas súas aplicacións directas, senón tamén por se-la estrutura base no desenvolvemento doutros dispositivos. O descubrimento do transistor por un equipo de investigadores dos laboratorios de Bell Telephone ten un impacto sen precedentes na industria electrónica. O transistor nace como consecuencia da busca dun dispositivo de estado sólido que puidera substituí-lo tríodo termoiónico. Para iso fixéronse experimentos introducindo un semiconductor nun campo eléctrico, que fallaron debido á existencia de estados superficiais. Analizando estes estados, Barden e Bratman descubriron en 1947 o transistor de puntas de contacto. Pouco despois, en 1948, Shockley descobre o transistor bipolar de unión (BJT). Este está constituído por tres zonas semiconductoras impurificadas alternativamente

con impurezas doadoras e aceptadoras. Teremos polo tanto dous tipos de transistores, *pn_p* e *np_n*, tal como se ilustra na figura 3, na que recolleamos ademais o símbolo utilizado para a súa representación.

Podemos pensar no transistor *pn_p* como en dúas unións *pn* moi próximas. Unha unión está constituída polo emisor e a base e a outra polas rexións de base e colector. A rexión de base é moi estreita, polo que a proximidade das unións fai que estas interaccionen entre si, o que dota o transistor da posibilidade de presentar ganancias de tensión ou de corrente.

O transistor bipolar posúe catro rexións de funcionamento, determinadas polas polaridades das tensións aplicadas a ámbalas unións. A zona máis común de funcionamento é a zona activa directa, que se corresponde

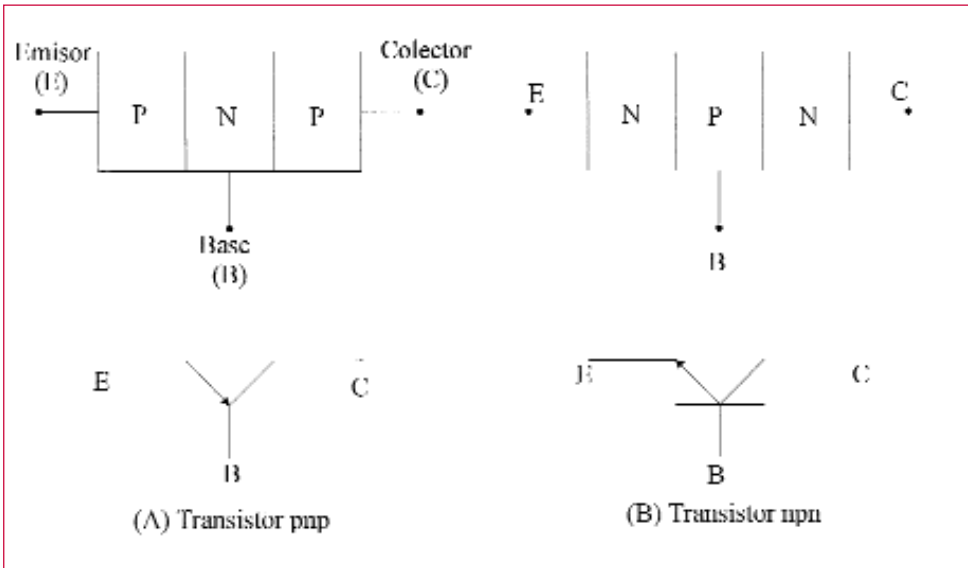


Figura 3. Transistores bipolares: estrutura e símbolos.

cunha polarización directa da unión emisor-base e inversa da unión base-colector. As outras posibles combinacións de polarización conducen ás rexións de corte, saturación ou rexión activa inversa. Por outra parte, como o transistor é un dispositivo de tres terminais, ó ser estudado como elemento de circuíto, como tal cuadripolo, un dos terminais debe ser común á entrada e á saída, dando así lugar a tres configuracións básicas, que se denominan base común, emisor común e colector común, indicando estes nomes qué terminal é común á entrada e á saída.

A figura 4 amosa de forma cualitativa os fluxos de portadores existentes nun transistor bipolar $p^{+}np$ en rexión activa directa (p^{+} indica rexión

fortemente impurificada) sobre unha configuración de base común. Mediante este esquema podemos ilustrar o efecto de ganancia en corrente.

O dispositivo $p^{+}np$ polarizado na rexión activa directa require que o emisor teña un potencial maior có da base, e o colector un potencial menor có desta. Con esta polarización, o emisor inxectará unha gran cantidade de ocós na base; algúns electróns serán inxectados desde a base cara ó emisor. O efecto combinado é a creación dunha corrente positiva de emisor que crecerá exponencialmente coa tensión V_{EB} . A unión base-colector está polarizada en inversa, polo que os fluxos de portadores estarán asociados á extracción de portadores de onde son minoritarios; é

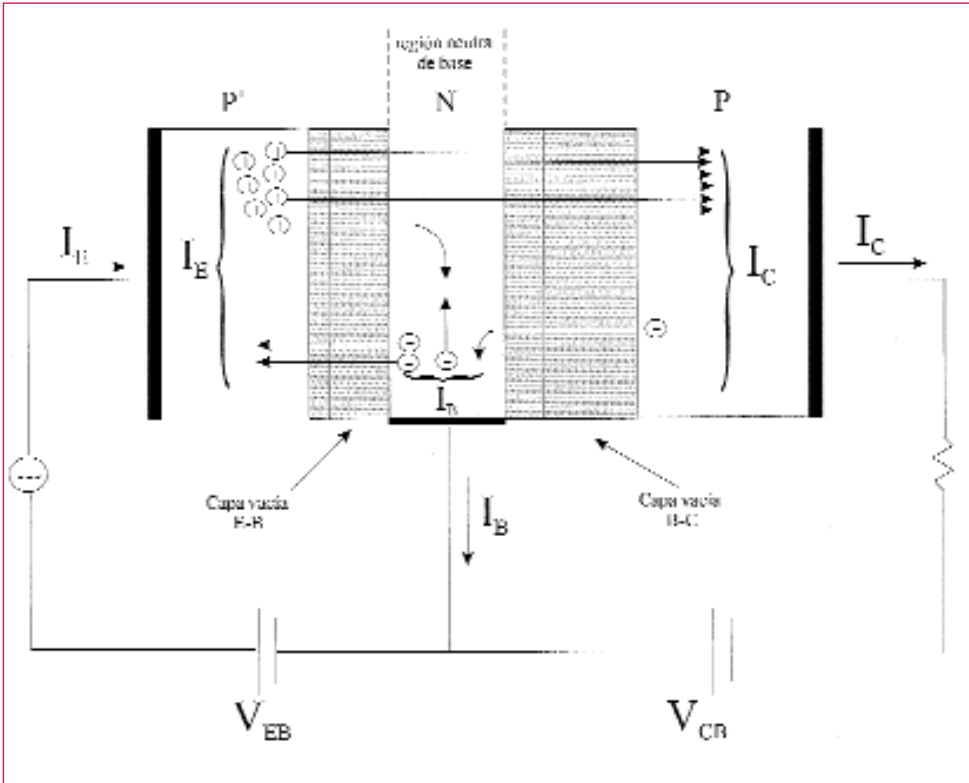


Figura 4. Flujo de portadores nun transistor bipolar (rexión activa directa).

dicir, electróns desde o colector eocos desde a base. O primeiro destes fluxos é realmente pequeno; sen embargo, respecto do segundo, dada a estreiteza da rexión de base, os ocos inxectados desde o emisor difúndense nela sen a penas recombinación e son recollidos case na súa totalidade polo colector. Isto orixina unha corrente no colector que depende exponencialmente da tensión V_{EB} .

Os tres compoñentes que orixinan a corrente de base na rexión activa

débense á inxección de electróns cara ó emisor, como corresponde á unión p^n polarizada en directa, á achega de electróns para a recombinación cos ocos na rexión neutra de base e á extracción de minoritarios desde o colector. Sen embargo, o valor da corrente asociada a estes fluxos de portadores é pequeno comparado coas correntes de emisor e de colector.

A posibilidade de obter unha gran ganancia en corrente para o dispositivo en emisor común débese ó feito de que

unha pequena corrente de base forza unha polarización directa da unión emisor-base, o que orixina unha grande inxección de ocos desde o emisor que son recollidos polo colector, dando lugar á aparición dunha corrente no colector moi superior á da base; aparece así unha ganancia en corrente $\beta = I_C/I_B$ elevada.

Os primeiros transistores bipolares aparecen no mercado en 1952. Pero non é ata 1954 cando Ebers-Moll e Giacoletto realizan dous traballos teóricos básicos para a comprensión do funcionamento do transistor bipolar. O primeiro deles formula as ecuacións

das características tensión-corrente en continua e o segundo chega o modelo híbrido para pequeno sinal, que representa o seu comportamento como elemento de circuíto. A figura 5 ilustra o modelo de Ebers-Moll; α_F e α_R representan ganancias en corrente en directa e inversa respectivamente. Nese mesmo ano, Kroemer propón modifica-lo transistor de unión introducindo un campo na base mediante a súa impurificación de forma gradual; xorde así o transistor de deriva. Aínda que o transistor bipolar está sendo desprazado nas aplicacións por outros dispositivos, encheu unha época moi

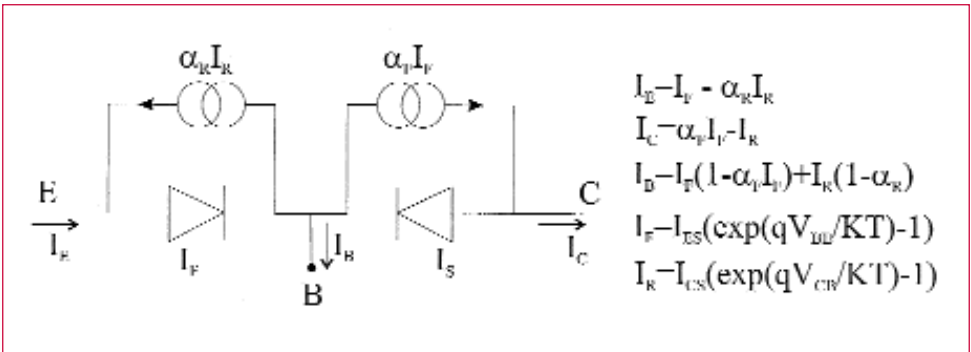


Figura 5. Modelo de Ebers-Moll do transistor bipolar.

importante da electrónica dos semiconductores.

En 1952, Shockley descobre o transistor de efecto campo de unión (JFET). Trátase dun dispositivo unipolar; é dicir, involucra un só tipo de portador nos seus procesos de transporte e o seu principio de funcionamento é o

control por un campo externo da conductividade dunha canle de carga móbil que enlaza dous electrodos coa polarización adecuada para facilita-lo transporte de portadores pola canle. No JFET, a canle créase mediante dúas unións *pn* polarizadas en sentido inverso. O uso do transistor JFET é moi

limitado na actualidade. Sen embargo, un transistor con funcionamento equivalente ó deste, o MESFET, proposto inicialmente por Mead en 1966, e executado sobre arseniuro de galio (GaAs) úsase frecuentemente en aplicacións de moi alta frecuencia. Neste tipo de transistor úsase unha unión metal-semiconductor para delimita-la anchura da canle.

Nos anos cincuenta desenvólense tamén outros dispositivos. Así, en 1956 Moll propón estruturas de catro capas (*pnpn*), base dos dispositivos semicondutores para o control de potencia (tiristores e triacs). En 1958 aparece o díodo túnel, dispositivo tipicamente cuántico, e os díodos Zéner e de avalancha. Por outra parte, coa aparición ese mesmo ano do láser, refórzase unha nova rama da Electrónica: a Electrónica cuántica. En 1960, J. A. Hoerni describe un transistor planar no que tanto as rexións de base como de emisor se difunden a través de ventás abertas nunha capa de óxido (SiO_2) xerada na superficie do semiconductor. Desta forma, as rexións de base e emisor terminan na dita superficie. O contacto de colector tamén se pode realizar nela. É a orixe da tecnoloxía planar, que posteriormente permitirá producir unha gran cantidade de circuítos simultaneamente sobre unha oblea circular de silicio.

Na década dos sesenta danse tres importantes avances na Electrónica: pásase da tecnoloxía do xermanio á do silicio, desenvólense os dispositivos

de efecto campo e nacen e desenvólense os circuítos integrados.

3.2 O TRANSISTOR MOS

En 1960, Kahny e Atalla, dos laboratorios da Bell Telephone, propoñen a estrutura MOS (Metal-Oxido-Semiconductor) como realización dun novo tipo de transistor de efecto campo. A súa principal característica é ser un dispositivo superficial, no que os procesos relevantes ocorren na superficie do semiconductor, en contraposición cos BJT e JFET, baseados en fenómenos de volume. O efecto amplificador do novo transistor, o mesmo có do JFET, susténtase tamén no control da conductividade, neste caso superficial, que conecta os terminais de drenador e fonte mediante o campo eléctrico transversal creado polo potencial aplicado ó terminal de porta. Este terminal está illado electricamente da fonte e o drenador por unha capa de dióxido de Si.

Así e todo, mesmo estando a idea ben establecida, a obtención de transistores MOS fiables non foi posible ata que se coñeceron completamente as características da capa de óxido e da interfase óxido-semiconductor. Isto posibilitou introducir no proceso de fabricación distintos procesos de estabilización que minimizaron os efectos dos ións alcalinos ou das cargas fixas existentes no óxido, así como os dos estados superficiais.

En función da polaridade da canle podemos distinguir dous tipos de transistor MOS: de canle *n* e de canle *p*. A

figura 6 mostra a estrutura dun transistor de canle n de realce. Nela podemos observa-la existencia dunha canle de lonxitude L e anchura W que conecta os terminais de fonte (S) e drenador (D). Nesta estrutura de realce a canle créase mediante a aplicación dun potencial V_G ó electrodo de porta (G) superior a un determinado valor V_T coñecido como tensión limiar; esta depen-

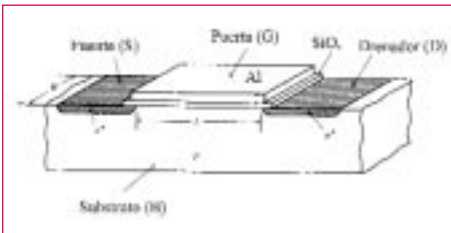


Figura 6. Estructura dun transistor MOS canle n de realce.

de das características da capa de óxido, do semiconductor e do potencial V_B aplicado ó electrodo de substrato (B).

A aplicación dun potencial axeitado ó terminal de drenador respecto do potencial de fonte orixina a aparición dun fluxo de electróns na canle, o que dará lugar a unha corrente de drenador. Nestes transistores distínguense tres rexións de funcionamento: corte, tríodo e saturación. A primeira delas ocorre cando a tensión de porta non alcanza o valor requirido para xerar canle. Na rexión tríodo existe xa unha canle que conecta a rexión de fonte coa de drenador. A rexión de saturación acádase cando esta canle se estrangula. A figura 7 ilustra esta situación.

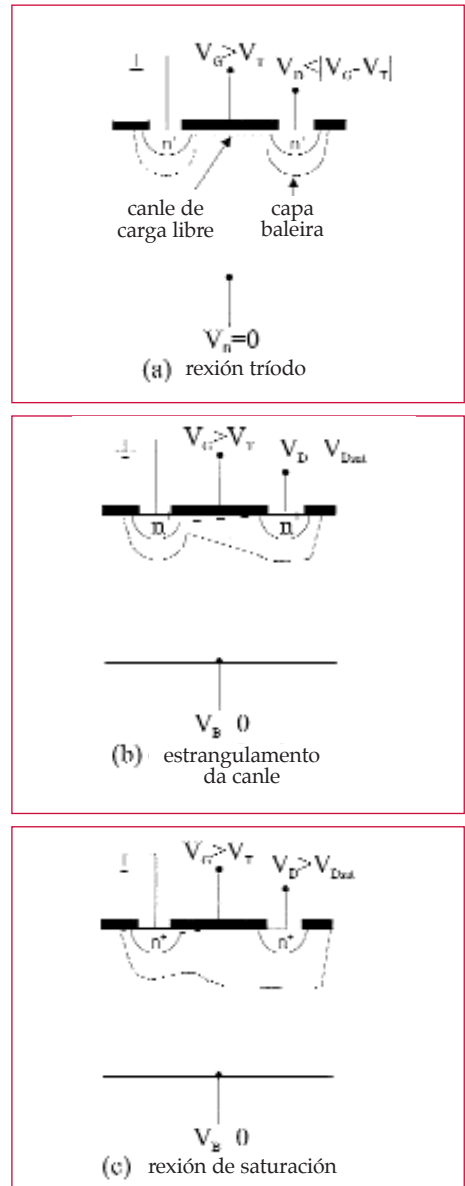


Figura 7. Transistores MOS operando en rexión tríodo (a), inicio da saturación (b) e rexión de saturación (c).

A corrente de drenador en cada situación de polarización dependerá da densidade de carga libre na canle, controlada tanto por V_D como por V_G e V_B . Distintas aproximacións para a estima-

ción da carga libre na canle conduciran a distintas expresións da corrente I_D . A máis sinxela de todas é a coñecida como lei do cadrado, que indicamos a continuación.

Tensións aplicadas	Estado do transistor	Corrente de drenador
$V_{GS} < V_T$	Rexión de corte	$I_D = 0$
$V_{GS} > V_T$ $V_{DS} < V_{DS,sat}$	Rexión triodo	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$
$V_{GS} > V_T$ $V_{DS} > V_{DS,sat}$	Rexión de saturación	$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$

A condición de saturación alcánzase cando $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ sendo V_T

$$V_T = V_{T0} + \frac{\sqrt{2q\phi_s N_A}}{C_{ox}} (\sqrt{2\phi_f + \bar{V}_{ms}} - \sqrt{2\phi_f})$$

con V_{SB} a tensión de polarización do substrato, q a carga do electrón, ϵ_s a permitividade dieléctrica e V_{T0} , μ_n , C_{ox} , N_A e ϕ_f parámetros asociados á estrutura implementada.

3.3 OS PRIMEIROS CIRCUÍTO INTEGRADOS

As décadas dos sesenta e setenta caracterízanse polo desenvolvemento da tecnoloxía integrada, de maior alcance cá propia invención do transistor. Este substituíu as funcións de circuíto das válvulas, pero os circuíto integrados son a base dunha nova filosofía de deseño.

O concepto de circuíto integrado (CI), inventado independentemente por Tack Kilby en Texas Instruments e

por Robert Noyce en Fairchild Semiconductor, facía posible a fabricación de circuíto formados por gran cantidade de transistores, coas súas resistencias e condensadores asociados, nun único substrato. Esta tecnoloxía foi producindo circuíto e sistemas electrónicos cada vez máis complexos sobre un monocristal de silicio. Os elementos discretos (transistores, díodos, resistencias e condensadores) substitúense por áreas funcionais equivalentes. Estas áreas amplificadoras, rectificadoras, resistivas ou almacenadoras de carga conéctanse directa e inseparablemente e permiten obter sobre o cristal ou óxido substrato a realización do circuíto discreto equivalente. O éxito comercial destes circuíto débese á posibilidade de automatizalo proceso de produción.

Podemos clasificarlos circuíto integrados segundo o campo de aplicación (dixitais ou analóxicos), a tecnoloxía soporte (bipolar, MOS ou

CMOS) e o grao de integración: pequena (SSI, 100 dispositivos por *chip*), mediana (MSI, 1000 dispositivos), grande escala (LSI, 10.000 dispositivos) ou escala moi grande (VLSI, máis de 100.000 dispositivos)

A forma repetitiva e o carácter binario dos circuitos lóxicos fíxoos especialmente cómodos á tecnoloxía integrada. Así, nesta década van aparecendo as primeiras series de familias lóxicas bipolares (Lóxica Transistor Transistor, TTL; Lóxica de Emisores acoplados, ECL), MOS e CMOS. Trátase dunha serie de circuitos dixitais que responden a unha escala de integración pequena ou mediana. Desde entón fóronse introducindo variantes e melloras encamiñadas a aumentala velocidade de funcionamento e diminuí-lo consumo. Por outra parte, os circuitos analóxicos son máis complexos e o primeiro que alcanzou perfección comparable ós dixitais foi o amplificador operacional. A introducción por Fairchild Semiconductor do circuito μ A741 a moi baixo custo popularizou a utilización deste tipo de compoñentes analóxicos.

Unha constante na evolución da tecnoloxía integrada son os avances na miniaturización, fiabilidade, velocidade de operación e redución de custo dos circuitos integrados. Unha calculadora dixital realizada en 1965 con tecnoloxía bipolar necesitaba 150 CI con 100 compoñentes cada un. En 1969, a mesma calculadora realizábase con 4 CI en tecnoloxía MOS e en 1971 cun só CI, tecnoloxía MOS tamén. Iníciase así

a etapa de integración en grande escala, que produce sobre un monocristal subsistemas electrónicos con miles de compoñentes. As primeiras realizacións desta etapa foron os rexistros de desprazamento de 1000 bits e as memorias MOS. A tecnoloxía dominante na integración a grande escala é a CMOS.

4. O MICROPROCESADOR NO DESEÑO DE SISTEMAS DIXITAIS

Un expoñente da integración a grande escala (LSI) é o microprocesador. A súa aparición en 1971 supón un novo fito na historia dos circuitos integrados. Trátase do circuito I4004 de Intel, que implementa a unidade central dun procesador. Este circuito posuía un bus interno de só 4 bits. Pouco despois apareceron os microprocesadores de 8 bits, entre os que podemos destaca-lo I8080 ou o M6800 de Motorola, e que podemos considerar como a primeira xeración de microprocesadores.

Un microprocesador non é máis que a unidade central de procesamento (CPU) dun ordenador. Por conseguinte, para poder implementar un sistema baseado en microprocesadores hai que incluír toda outra serie de elementos, tales como as memorias, RAM e ROM, ou os adaptadores de periféricos, síncronos ou asíncronos. A construción dun sistema microprocesador implica pois a conexión de 6 ou máis CI complexos. Sen embargo, unha gran

novidade que achegan os microprocesadores é a programación, o que implica dispoñer do *software* necesario para o desenvolvemento de aplicacións: linguaxes ensamblador, compiladores, etc. Xorden así os sistemas de desenvolvemento.

A aparición dos microprocesadores orixina unha grande evolución do deseño electrónico dixital. O avance das tecnoloxías e das capacidades de integración permite integrar parte dos periféricos no CI principal, incrementalo tamaño do bus, a frecuencia de operación, etc. Este desenvolvemento leva á sucesiva aparición de seguintes xeracións de microprocesadores, cada vez máis evolucionados. Cabería citar aquí como exemplos que marcan un fito no desenvolvemento o 68000 de Motorola, o 80386 de Intel. Os microprocesadores continúan en evolución permanente e proba disto é a posibilidade de obter ordenadores persoais cada vez máis potentes.

5. INTEGRACIÓN VLSI. CIRCUÍTOS DIXITAIS, MIXTOS E MICROSISTEMAS

Inicialmente o deseño dos circuítos integrados realizábase no ámbito da industria dos semicondutores; fabricábanse en grandes cantidades e vendíanse como produtos estándar. Sen embargo, a aparición das técnicas de deseño con bloques funcionais e as ferramentas CAD introducen un cambio importante, facilitando o deseño de circuítos de aplicacións específicas (das

súas iniciais en inglés, ASIC) por persoas alleas a esa industria. Un feito importante que hai que considerar é a publicación en 1980 por parte de Mead e Conway do libro titulado *Introduction to VLSI systems*, que introduciu no ámbito académico universitario o deseño de CI.

Un aspecto no deseño dos CI é o seu custe económico. Nos de produción estándar, o custo do desenvolvemento do *chip* é elevado, pero compénsase coa produción de grandes cantidades, o que abarata o produto final. No caso dos ASIC, o custo é un aspecto importante debido ó número relativamente pequeno de unidades que se producen. Polo tanto, os ASIC só se volven económicos cando se reducen os gastos de desenvolvemento mediante a introdución de novos métodos de deseño e o uso de ferramentas CAD. Por outra parte, para facilitar que institucións con orzamentos moi elevados, tales como as universidades, poidan acceder ó deseño de CI, xorde o concepto de *Multi-Project Chip*, que permite integrar deseños de distintas institucións nunha mesma oblea. Pódense realizar así circuítos en cantidades moi reducidas, facendo posible o acceso ó Si por parte das universidades a un custo reducido. Tamén é importante a contribución do proxecto EUROCHIP, lanzado polo Terceiro Programa Marco da Comunidade Europea en 1989, pois permite que as universidades dispoñan dun conxunto de ferramentas de deseño e simulación a moi baixo custo.

Á hora de deseñar circuítos que resolvan tarefas complexas aparecen distintas opcións: pódese elixir o uso de dispositivos lóxicos programables (PLD), que son circuítos de produción estándar programables polo usuario, tales como os *arrays* de portas programables (PLA) ou as redes de portas programables por campo (FPGA) introducidas na década dos noventa, ou ben optar por solucións ASIC.

A posibilidade de implementar ASIC nun espacio curto de tempo débese ó uso dunha metodoloxía de deseño xerárquica, que inclúe distintos pasos que abranguen desde as especificacións funcionais ata o produto final. Para a súa execución, o deseñador dispón de bloques funcionais, que non son máis que un conxunto de celas básicas que constitúen elementos de circuítos de uso común: portas lóxicas, biestables ou bloques máis complexos, a partir dos cales é posible construír tódalas funcións dixitais. Os datos das celas predeseñadas están contidas nunha librería de celas que inclúe o sistema CAD. Este contorno de traballo facilita a tarefa de conecta-las celas para implementa-lo circuítos, simular para comprobar se se cumpren as especificacións de deseño, determina-la súa disposición sobre o plano do chip (*layout*) e xera-lo ficheiro que conterá os datos que describen o circuítos e que se debe enviar á fundición para obter finalmente o chip.

Tamén é posible aborda-lo deseño do ASIC con elementos simples, o que proporcionará deseños máis optimiza-

dos á custa dun maior esforzo e tempo. Neste caso o fabricante de semicondutores proporciona os parámetros eléctricos e as regras de deseño para a disposición dos compoñentes correspondentes ó proceso tecnolóxico usado. Temos que sinalar aquí a importancia que a simulación a nivel de circuítos ten en todos estes procesos e que proporciona o programa SPICE. Este empezouse a desenvolver no ano 1971 na Universidade de Berkeley, e foron aparecendo sucesivamente versións melloradas. Por outra parte, no deseño de ASIC é de crucial importancia a fase de test, que debe ser incluída xa na propia fase de deseño. Tamén constitúe unha axuda importante o uso de sistemas de síntese automática.

Ó longo de todos estes anos foise incrementando a complexidade dos circuítos integrados, tanto pola redución do tamaño dos transistores individuais como polo aumento do tamaño máximo de chip que se pode fabricar de forma económica. Xa en 1964, G. Moore —que máis tarde se converteu nun dos fundadores da empresa Intel Corporation— prediciu un incremento logarítmico anual da complexidade; este continuou desde entón, aínda que cunha pendente menos pronunciada que nos primeiros anos. Así, os transistores MOS pasaron de ter lonxitudes de canle de decenas de micras a lonxitudes inferiores á micra (existen actualmente tecnoloxías comerciais de 0.25 micras), ou a área de chip, que foi aumentando desde tamaños de 1 mm² a dimensións que se aproximan a varios cm². A evolución tamén foi

constante no relativo á frecuencia de traballo e á diminución da potencia disipada, cunha redución paulatina nas tensións de alimentación. Este ritmo de crecemento tamén se prevé para o futuro. Segundo unha táboa titulada *SIA roadmap*, publicada en 1994 pola Asociación de Fabricantes de Semicondutores (SIA) nos Estados Unidos e revisada en 1997, que marca a evolución prevista da industria ata o ano 2012, espérase obter un circuíto integrado en ultra alta escala de integración (ULSI) de cen millóns de transistores no ano 2003.

O ritmo de crecemento tecnolóxico permite que na actualidade se poidan integrar sobre un mesmo substrato circuítos e compoñentess ben distintos. Este é o caso dos circuítos mixtos analóxicos e dixitais, que inclúen dentro dun mesmo substrato unha aplicación completa, con parte analóxica e dixital. Isto orixinou un renacemento do deseño analóxico, limitado nos anos oitenta ó deseño de amplificadores operacionais, filtros e conversores A/D e D/A, fundamentalmente sobre tecnoloxías nMOS e CMOS. Como consecuencia destes avances aparecen novas técnicas de deseño (circuítos de capacidade conmutada, deseños en modo corrente, etc.) de grande importancia no trazado da parte analóxica dos circuítos mixtos. Nesta categoría de circuítos mixtos hai que incluír tamén os microsistemas, que conteñen no mesmo substrato sensores e actuadores, que poden ser térmicos, ópticos, mecánicos, etc., e constitúen o que se denomina un sistema completo no *chip*.

Como puidemos observar nestas liñas, unha constante na evolución da electrónica é a implementación de circuítos cada vez máis complexos mediante o desenvolvemento de novas tecnoloxías que permiten unha maior miniaturización dos dispositivos. Os logros acadados fixeron que a electrónica se introducira en tódolos sectores da actividade humana, creando ó seu redor unha das industrias máis importantes do mundo. Esta evolución seguirá nun futuro. A aparición das nanotecnoloxías e a conmutación molecular xeran novos retos.

6. OPTOELECTRÓNICA

Da mesma forma que a invención do transistor, a finais da década dos anos corenta, marcou o inicio da era da Electrónica, o desenvolvemento case simultáneo, nos anos sesenta, da fibra óptica e do láser de semicondutores iniciou a era da Fotónica. Dentro deste contexto, a Optoelectrónica podería definirse como a conxunción da Electrónica e da Fotónica, baseada na manipulación de electróns e fotóns, para a súa aplicación a distintos sectores da produción a través da enxeñería. Isto converteuna nun elemento de capital importancia no desenvolvemento tecnolóxico da sociedade de hoxe en día.

A Optoelectrónica é, pois, un dominio aplicado que asenta sobre o coñecemento xerado e establecido nas ciencias básicas e que pon a énfase nos dispositivos que incorporan interfaces

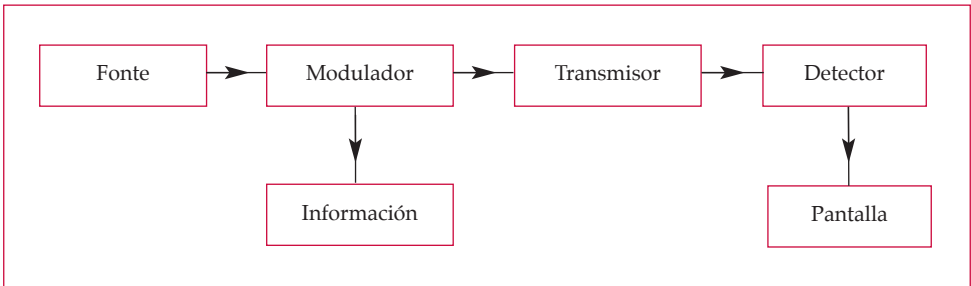


Figura 8. Diagrama de bloques dun sistema optoelectrónico.

para a conversión de sinais eléctricos en ópticas e viceversa, e nos sistemas que conforman estes dispositivos.

A figura 8 amosa os dispositivos que integran un sistema optoelectrónico típico. A fonte é o xerador de luz que serve como onda portadora de información e a súa función fundamental é converter enerxía eléctrica en luz cunha eficiencia abonda que nos permita axustala ó transmisor. Os díodos emisores de luz (LED) e os láseres de semicondutores (LDs) son as fontes utilizadas nun sistema optoelectrónico. Un LED é unha unión p-n con polarización directa, que inxecta portadores nunha zona activa arredor da unión, producíndose luz por emisión espontánea debido á recombinación dos electróns da banda de conduction cos ocos da banda de valencia. Un LD é un LED cunha cavidade óptica que produce realimentación e xera emisión estimulada de radiación nunha banda espectral máis estreita cá da luz emitida por un díodo. Os moduladores son dispositivos rápidos que operan a escala de tempos de micro a nanosegundos, por medio dos cales se rexistra a informa-

ción na luz por modificación analóxica ou dixital dalgunha das súas características: amplitude, fase, polarización, frecuencia, etc. A modulación obtense por aplicación externa de campos eléctricos, magnéticos ou ondas acústicas que afectan as propiedades físicas do medio a través do cal se propaga a luz. A gran vantaxe dos moduladores é o seu reducido tamaño e a súa capacidade para seren integrados monoliticamente coas fontes de luz nun sistema optoelectrónico.

A onda portadora de información propágase ó longo dunha canle de transmisión que é a fibra óptica. Esta é un medio confinador de luz cunha estrutura de índice de refracción que pode ser de escalón (homoxénea) ou de gradiente de índice (inhomoxénea) e permite, segundo sexa o diámetro da fibra, a existencia dun ou máis posibles modos de propagación. O material principal utilizado na fabricación de fibras ópticas, para transmisión de información, é sílice puro ou dopado; tamén se fabrican fibras ópticas de vidros multicomponentes ou de sílice/silicona. O uso de fibras monomo-

do ou multimodo depende das presentacións do sistema. Nunha fibra monomodo, que ten a característica esencial de que se propaga un modo, non existe dispersión intermodal e isto ten importancia considerable na transmisión de información a longa distancia.

Despois da viaxe (que pode ser longa) da portadora óptica a través da canle de transmisión, a información ha ser detectada e transducida do dominio fotónico ó eléctrico. Disto dedúcese que, independentemente da tecnoloxía en que se basee o sistema, ó final, sempre se xera a necesidade de detectalo sinal óptico e tratar, convenientemente, o sinal eléctrico resultante. É dicir, necesítanse dispositivos optoelectrónicos coñecidos como fotodetectores. Estes dispositivos están compostos por materiais fotoconducivos (díodos pn, pin ou de avalancha/APD) que teñen por misión converte-lo sinal fotónico en eléctrico, con tempos de resposta entre micro e picosegundos. Así, mediante unha polarización inversa do material fotoconducivo, os electróns liberados pola absorción de fotóns xeran unha corrente eléctrica proporcional á potencia óptica detectada. A importancia do fotodetector é obvia xa que determina cómo o sistema realiza a súa tarefa, establecendo o nexo de unión co mundo exterior a través da pantalla, interface entre maquina e ser humano. A interacción maquina/pantalla é adoito electrónica, mentres que a interacción pantalla/humano é visual (figura 9), por iso esta ha reunir características de lexibilidade para unha lec-

tura rápida e precisa dos datos, brillo adecuado para unha boa percepción visual e alto contraste para unha optimización da agudeza visual.

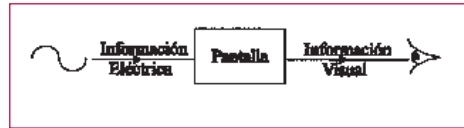


Figura 9. Interacción sistema/observador.

Por outra parte, o progreso da Optoelectrónica vai unido inexorablemente á investigación sobre novos materiais, que se desenvolve en física do estado sólido e que fixo posible novas formas de xeración, modulación, transmisión e detección de luz. En particular, a Optoelectrónica creceu rapidamente, a partir da década dos sesenta e principios dos setenta, co desenvolvemento da fibra óptica de cuarzo de baixo custo, seguido polo láser de semiconductores de dobre heteroestructura que facilitaba a emisión de luz a temperatura ambiente. Estes primeiros avances, xunta outros posteriores, como os láseres de cavidade vertical, as fibras ópticas dopadas con terras raras, os *arrays* de fotodíodos e as pantallas activas de semiconductores, por sinalar algúns exemplos, levaron a unha intensa e fructífera actividade en I+D sobre as aplicacións da Optoelectrónica. Entre elas, podemos cita-los sensores ópticos que permiten medir unha ampla gama de magnitudes físicas e químicas para medio ambiente e procesos de control, as comunicacións de banda ancha para longa distancia, o procesado de información para

computación óptica ou os discos compactos para memorias ópticas.

A outro nivel, e para rematar, un dos métodos máis efectivos para coñecer-lo estado dun determinado campo da tecnoloxía, así como para prever cales van se-los camiños que percorra no futuro, consiste en establece-la evolución do seu mercado de vendas. Neste sentido, o mercado da Optoelectrónica acadou aproximadamente 50 billóns de dólares USA en 1994 e prevese que ascenda a 200 billóns dentro de dez anos. Se a estes datos agregamos que, por exemplo, o mercado mundial de vendas de cable de fibra óptica foi de 5.7 billóns de dólares en 1994, que supuxo 6 millóns de quilómetros de cable terrestre e submariño instalado, que chegou a 14.5 billóns en 1999 (12 millóns de quilómetros de cable instalado) e que en 1995 se venderon máis de 50 millóns de láseres de semicondutores, podemos facernos unha idea da importancia que ten a Optoelectrónica no mercado de vendas de produtos tecnolóxicos. Para o futuro, e como mostra, baste dicir que en Xapón se estimou que para o ano 2010 a Optoelectrónica representará o 20 % do seu PIB.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, R. J., e outros, *CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation*, IEEE Press, 1998.
- Bardeen, J., e W. H. Bratain, "The Transistor, a Semiconductor Triode", *Phys. Rev.*, 74, 230, 1948.
- Bracho, S., *La Ingeniería Microelectrónica ante el cambio del Milenio*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1999.
- Desmond Smith, S., *Optoelectronic Devices*, Nova York, Prentice-Hall, 1995.
- Gray, P. R., e outros, *Analog MOS integrated Circuits*, Nova York, IEEE Press, 1980.
- Gray, P. R., e R. G. Meyer, *Analysis and design of Analog Integrated Circuits*, Nova York, John Wiley and Sons, 1977. (Terceira edición en 1993).
- Grebene, A. B., *Bipolar and MOS Analog Integrated Circuits Designs*, Nova York, John Wiley and Sons, 1984.
- Hodges, D. A., e Jackson, *Analysis and Design of Digital Integrated Circuits*, Nova York, McGraw-Hill, 1983.
- Ismail, M., e T. Fiez, *Analog VLSI. Signal and Information Processing*, Nova York, McGraw-Hill, 1994.
- Iway, H., "CMOS Technology-Year 2010 and Beyon", *IEEE Journal of solid state circuits*, vol. 34, 3, 1999, 357-366.
- Mead, C., e C. A. Conway, *Introduction to VLSI systems*, Addison Wesley, 1980.
- Moore, G. E., "Microprocessor and integrated electronic technology",

Proceedings of the IEEE, vol. 64, 6, 1976, 837-841.

Naish, P., e P. Bishop, *Designing ASICs*, Ellis Horwood, 1988.

Nicollian, F. H., e J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*, Nova York, John Wiley and Sons, 1982.

Proceedings of the IEEE. Special Issue: 50th Anniversary of the Transistor, vol. 86, 1, xaneiro, 1998.

Proceedings of the IEEE. Special Issue: Integrated Sensors, Microactuators & Microsystems, vol. 86, 8, agosto, 1998.

Shockley, W., "The theory of p - n Junctions in Semiconductors and p - n Junctions Transistors", *Bell. Syst. Tech. J.*, 28, 435, 1949.

Tsividis, Y. P., *Operation and Modelling of the MOS transistor*, Nova York, McGraw-Hill, 1987.

Uiga, E., *Optoelectronics*, Nova York, Prentice-Hall, 1995.

Wood, D., *Optoelectronic Semiconductor Devices*, Nova York, Prentice-Hall, 1994.



A BIOTECNOLOXÍA NO SÉCULO XX: ¿O INICIO DUNHA REVOLUCIÓN?

Tomás G. Villa*
Juan M. Lema Rodicio**
Universidade de Santiago
de Compostela

BIO + TECNOLOXÍA. UN PERCORRIDO HISTÓRICO

Acostúmase considerar a Noé, que descubriu por manipulación das uvas o proceso de fermentación alcohólica, como o precursor da utilización práctica polo home de procesos microbianos. Desde entón, a Humanidade utiliza un número de procesos 'naturais', especialmente orientados á produción de alimentos: pan, viño, cerveja...

Para isto tiveron que se desenvolver técnicas sinxelas de produción con deseños baseados na experiencia e a observación como, por exemplo, a fabricación de pan, que require cumprir unha serie de etapas, non evidentes a primeira vista. Noutros casos máis complexos, a posta a punto dalgúns sistemas utilizados tradicionalmente supuxo unhas boas doses de enxeño ("enxeñarizando procesos naturais") como por exemplo o proceso de obtención do *aceto balsámico* de Módena,

Italia, onde se dispón dunha batería de 'biorreactores' operando en semicontínuo, con tempos de residencia de ata ¡cen anos!

'Biotecnoloxía', termo acuñado nos anos vinte polo enxeñeiro húngaro Karl Ereky, é un paradigma da filosofía productiva que dominou a Humanidade no século que concluíu e que pola súa vez herdara, en termos de forza de desenvolvemento, da Revolución Industrial, isto é, "máis, mellor e máis barato". Desde logo non é previsible que, cando acuñou a palabra, estivese Ereky predicindo o futuro porque, entre outras cousas, naqueles anos descoñecíanse as endonucleasas de restricción, acababan de descubrirse os bacteriófagos por Twort e D'Herelle e a *Escherichia coli* (a bacteria hóspede da maioría das manipulacións xenéticas) era case aínda *Bacterium coli mutabile*.

Emporiso, o certo é que a fusión de ámbalas palabras, 'bio' e 'tecnoloxía', representou un enorme revulsivo no último cuarto do século XX, cando

* Catedrático de Microbioloxía.

** Catedrático de Enxeñería Química.

parecía que a sociedade andaba algo desleixada polo síndrome post conquista da lúa.

Non se podería comprende-lo rápido desenvolvemento da Biotecnoloxía sen mencionar algúns aspectos da ciencia e a tecnoloxía, dos seus conceptos, desvelos e metamorfoses —nunca mellor dito— seculares. O século XVI caracterizouse por un intento de romper con moldes que arrastraba, desde tempos ancestrais, a daquela incipiente Ciencia. Sobresae neste sentido Aureolus Philippus Theophastrus Bombastrus von Hemheim (1493-1541) —aínda que el mesmo se chamaba Paracelso, como desprezo á figura do galeno romano Celso— por ser unha fonte inesgotable de teorías, pero, iso si, con aspectos rabelaisianos. Como traballara en Basilea, estaba influenciado polo Humanismo que alí florecera mesmo antes da Reforma e que se traduciu en aplicación práctica das súas ideas, como foi a loita contra a enfermidade; así, por exemplo, utilizou o metal alquímico máis poderoso, o mercurio, para o tratamento da sífilis, servindo polo tanto de ponte de unión entre a vella alquimia e os novos conceptos de quimioterapia e iatroquímica, espírito que en definitiva herdou tamén a moderna Biotecnoloxía e sen dúbida ocupará unha área moi importante na centuria que principia.

O século XVIII caracterizouse por un racionalismo sen concesións e pensábase que todo o que existía se debía a estruturas matemáticas definidas. Non é de estrañar, logo, que as ciencias

precursoras da Biotecnoloxía, en definitiva empíricas, non tivesen a aceptación que os séculos XIX e XX lles recoñeceu. Debemos toma-la viaxe de cinco anos que comezou Charles Darwin o 27 de decembro de 1831 a bordo do *Beagle* e que o trouxo de regreso a Inglaterra “co convencemento de que as especies biolóxicas non eran inmutables”, como algo premonitorio que engarza co sentimento de evolución acelerada que a Biotecnoloxía —mediada pola manipulación xenética— pode estar conculcando ós seres vivos do planeta.

Como grandes precusores, sen dúbida, hai que menciona-las figuras de Lázaro Spallanzani (do que este ano se celebra o bicentenario da súa morte) e Louis Pasteur, a quen podería recoñecerse co título de primeiro biotecnólogo moderno. Lémbrese cómo refutou belamente as teorías sobre a xeración espontánea en 1860 e cómo chegaría á cima do seu poderío científico en 1863 cando resolveu, a instancias do emperador de Francia, os problemas xurridos nos procesos de elaboración do viño.

A principios do século XX ten lugar o desenvolvemento dunha industria incipiente baseada na acción de microorganismos para a produción de disolventes (etanol, acetona, butanol...), ácidos (cítrico, acético, etc.), completando así o campo que ata ese momento se limitara á área alimentaria (bebidas alcohólicas, panificación...). A eficacia dos procesos era baixa, pois non se comprendían nin os principios

microbiolóxicos nin se dispoñía de ferramentas ó xeito.

Tamén a comezos de século asoma xa unha preocupación pola conservación do medio, especialmente o acuoso, en contornos das grandes cidades, moitas das cales xa dispoñían de sistemas de saneamento para a recollida das súas augas residuais. É entón cando ten lugar a construción das primeiras plantas para o tratamento e recuperación destes vertidos mediante dispositivos moi elementais baseados na acción de asociacións microbianas desenvolvidas naturalmente.

Nos anos vinte, o extraordinario desenvolvemento da industria petroquímica, orientada non só á produción de carburantes senón tamén de infinidade de produtos da química dos hidrocarburos, incentivou o estudo de procesos térmicos e catalíticos que axiña desbancaron, pola súa maior eficacia, os sistemas de produción baseados na transformación microbiana.

De novo os produtos obtidos por procesos biolóxicos se limitan, basicamente, ó campo das industrias alimentarias. Este panorama manteríase inalterado por décadas debido ás baixas productividades, os problemas operacionais e as necesidades de aseptia.

Adicionalmente, dúas das posibles vantaxes comparativas dos procesos biolóxicos —menores requirimentos enerxéticos e impacto menos agresivo co medio natural— carecían, e así foi ata hai relativamente pouco

tempo, de importancia real, dado o baixo custo da enerxía e a pouca atención prestada á preservación do medio.

En pleno fragor da Segunda Guerra Mundial, Avery, MacLeod, e McCarthy decatábanse en 1944 de que o 'principio transformante' que Griffith describira a finais dos anos vinte para pneumococos non era outra cousa que segmentos dunha molécula de ácido desoxirribonucleico (ADN), inequivocamente a molécula-base da vida e, desde logo, pedra angular da Biotecnoloxía molecular. Sería nunha molécula estruturalmente tan sinxela coma esta onde residise a información xenética, concepto posteriormente confirmado por Hershey e Chase en 1952. Esta contribución, xunto coas de Max Delbrück e Salvador Luria sobre a bioloxía e a recombinación xenética en bacteriófagos, fertilizaron adecuadamente o campo científico para que en 1953 se propuxese desde a Universidade de Cambridge (Watson & Crick, Reino Unido) a estrutura dunha molécula de DNA, vixente basicamente aínda hoxe, utilizando unhas boas fotografías de difracción de raios X realizadas por Rosalind Franklin.

Tamén neste mesmo período, e debido sen dúbida ás necesidades masivas de antibióticos requiridas polos feridos da Segunda Guerra Mundial, ten lugar o desenvolvemento básico da enxeñaría de grandes fermentadores para a produción de fármacos. Para isto tiveráanse que aplicar conceptos sobre axitación, transferencia de osíxeno, e desenvolver

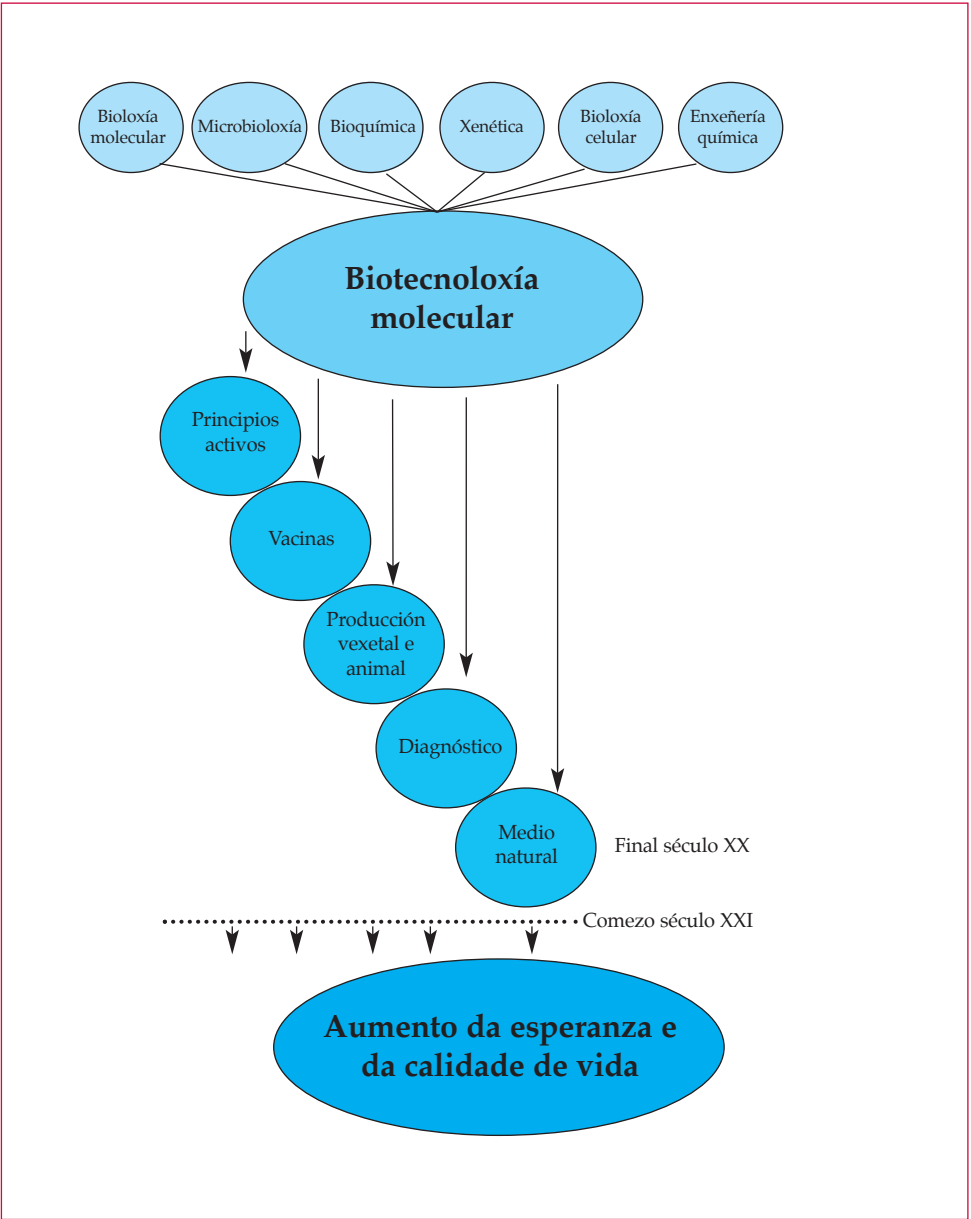


Figura 1. Xénese e contribucións da Bioteconoloxía no século XX.

dispositivos eficaces de esterilización ou procesos de concentración e purificación de produtos.

Á fin da década dos sesenta, era xa evidente que as bacterias contiñan un modelo de organización xénica (operón/regulón, fundamental no desenvolvemento da Biotecnoloxía molecular) e que como pouco posuía dous tipos de endonucleasas, das cales as chamadas de tipo II que recoñecen e cortan unha secuencia específica de pares de bases no DNA, estaban chamadas a causar unha auténtica revolución na Bioloxía molecular xa que permitiron infinidade de moléculas recombinantes de DNA. Din os historiadores da Biotecnoloxía molecular que cando Stanley Cohen en Stanford e Herbert Boyer en San Francisco idearon en 1973 o método básico para transplantar xenes dun organismo vivo a outro, e que estes se expresasen conferíndolle ó ser receptor características fenotípicas que antes non tiña, sabían perfectamente o que estaban facendo e que o primeiro, en particular, tiña unha visión da entón incipiente Biotecnoloxía (segundo se reacuñaría na reunión de Asilomar, California). Non sería xusto, por outra banda, se non se destacase o mérito do profesor Bolívar ó desenvolve-lo primeiro plásmido pequeno (pBR322) verdadeiramente efectivo para a clonación en bacterias Gram negativas.

A Biotecnoloxía, se ben é unha rama moi nova da ciencia, parte de áreas moi consolidadas. Calquera observador imparcial da actual situa-

ción en que encontra a Biotecnoloxía mundial neste cambio de século e milenio, decatárase da situación complexa que atravesa debido, en parte, ó seu carácter multidisciplinar, o que fai que os profesionais procedan de eidos máis tradicionais como a Bioquímica, a Microbioloxía, a Enxeñería química, a Xenética, a Fisioloxía vexetal e animal, etc. (figura 1) e en parte tamén (aplicado para España en particular) debido á inexistencia dun marco administrativo que aglutine tódolos biotecnólogos para formaren unha 'casa común' desta aventura apaixonante que representa a Biotecnoloxía.

O impacto das 'novas tecnoloxías biolóxicas' (termo que podería competir co propio de Biotecnoloxía) manifestouse xa en moitos dos aspectos presentes na vida cotiá da Humanidade (saúde, ambiente, alimentación...). Deixando á parte a amplísima área da Medicina biotecnolóxica, que será obxecto dun tratamento diferenciado nesta publicación, a Biotecnoloxía permitiu o desenvolvemento de procesos eficaces e competitivos nas áreas que se indican:

- obtención de produtos bioactivos para o home e os animais,
- produción vexetal e biodiversidade,
- produción de enzimas, alimentos e bebidas por fermentación,
- agricultura e alimentación,
- carburantes e produtos químicos finos,

- tratamento e valorización de produtos de refugallos,
- recuperación de solos e acuíferos contaminados.

Na táboa 1 preséntanse algunhas previsións de mercado dalgúns pro-

ductos, pertencentes a diversos campos de aplicación. Nos seguintes apartados revisaranse varios destes grandes campos, como unha mostra da potencialidade económica, científica, tecnolóxica e social da Biotecnoloxía.

Composto ¹	Valor (USD x 10 ⁶)	Anos para o desenvolvemento
Aminoácidos (9)	1.703	5
Vitaminas (6)	668	10-15
Enzimas (11)	218	5
Hormonas esteroídicas (6)	368	10
Hormonas peptídicas (9)	268	5
Antíxenos virais (9)	300	5-10
Interferón (Alfa + Beta)	300	5
Antibióticos	4.240	10
Pesticidas	100	5-10
Metano	12.572	10
Etanol+Etilen e Propilenglicois	2.737	5-10
Aromáticos (aspirina + Fenol)	1.251	5-10
Inorgánicos (H ₂ e NH ₃)	2.681	15

Táboa 1. Predicción de mercado de produtos obtidos por Enxeñería xenética.

PRINCIPIOS BIOACTIVOS PARA A INDUSTRIA FARMACÉUTICA

O primeiro produto biotecnolóxico de alto poder farmacéutico foi a insulina humana clonada en sistemas bacterianos. Ese fármaco podería considerarse como un 'paradigma biotecnolóxico' e, en liñas xerais, serviu de modelo ós outros produtos farmacéuticos de índole biotecnolóxica.

Xa en 1921, Banting e Best (Toronto) comezaran o traballo sobre a posible relación entre unha hormona pancreática e a diabete inducida en cans, logo de lles extirpar este órgano e comprobar que un extracto proteico de páncreas mitigaba ou eliminaba transitoriamente os síntomas diabéticos. Tras dun intento fallido, o neno Leonard Thompson recibía o 1 de xaneiro de 1922 unha inxección de hormona semipurificada que melloraba sensiblemente

1 Os números entre parénteses representan o número de compostos xa existentes no momento da predicción.

te o seu estado diabético. Nos dous meses seguintes, o grupo de Toronto puido anunciar por fin o descubrimento da hormona pancreática que chamaron insulina. A finais dese ano, Banting e McLeod recibiron o premio Nobel de Medicina; o primeiro compartiuno con Best. Todo foi, case se pode dicir, espectacularmente rápido para a insulina, feito que se ten repetido arreo en todo o que atangue á chamada Biotecnoloxía farmacéutica. Así, en 1923, a empresa estadounidense Eli Lilly & Co empezaba a produci-la comercialmente e ó ano seguinte facíao Novo Nordisk desde Copenhaguen. Foi nesta empresa danesa onde se conseguiu, hai agora cincuenta anos, a insulina cristalina de acción retardada, que tiña como vanta-

xe a diminución do número de inxeccións diarias necesarias para regula-la glicemia.

Tendo en conta os cento corenta millóns de diabéticos existentes no mundo, non é de estrañar a alegría con que a sociedade celebrou a chegada das insulinas recombinantes humanas que representaba, entre outras cousas, a fonte inesgotable deste produto xénico humano. Con toda probabilidade o século XXI vai ver novas insulinas recombinantes, máis eficientes, de absorción lenta ou ben de acción moi rápida (por inversión da orde de codóns no xene), e mesmo se poderá ver reintroducido o xene nos enfermos para que outro órgano produza de novo a hormona.

Producto	Célula hospedadora ¹	Empresas produtoras	Ano	Indicación/ aplicación
Insulina humana ²	B	Eli Lilly & Co., Novo Nordisk	1981-82	Diabete
Hormona de , crecemento humana (hGH)	B,M	Genentech, Bio-Tech General, Carbiotech, Eli Lilly/Hybritech	1985	Ananismo
Interferón alfa-2a sarcoma de Kaposi en SIDA	B	Hoffmann-La Roche AG	1986	Leucemia
Vacina anti-hepatite B	L	Merck & Co. Inc./Chiron Corp., SmithKiine Beecham pic	1986	Prevenición da hepatite B
Interferón alfa-2b	B	Schering-Plough AG	1986	Leucemia, verrugas xenitais, arcoma de Kaposi, hepatite non A non B
Activador tisular	M	Genentech Inc.	1987	Infarto crítico de miocardio,

1 Clave: B, bacterias; L, lévedos; M, células de diferentes mamíferos; H, fungos filamentosos.

2 Finalizado o século XX, a diabete afectaba a máis de 140 millóns de persoas no mundo, das cales o 10 % necesitan inxectarse insulina diariamente.

Producto	Célula hospedadora	Empresas productoras	Ano	Indicación/aplicación
				embolia pulmonar do plasminóxeno
Somatotropina	B, M	Genzyme Transgenics Corp., Genentech Inc.	1987	Deficiencia de hGH en nenos 1
Vacina anti-influenza B	B	Praxis Biologics	1988	Influenza de tipo B
Eritropoyetina	M	Amgen Inc., Ortho Biotech, Genzyme Transgenic Corp.1	1989	Anemia crónica causada por insuficiencia renal
Interferón alfa-n3	B	Interferon Sciences	1989	Verrugas xenitais
Interferón gamma-1b	B, L, M	Genentech Inc.	1990	Enfermidade granulomatosa crónica
Factor estimulante de colonias de granulocitos (G-CSF)	B	Amgen Inc.	1991	Neutropenia causada por quimioterapia
Factor estimulante de colonias de granulocitos e macrófagos (GM-CSF)	L	Immunex, Hoechst AG-Roussel Uclaf	1991	Infección relacionada co transplante autólogo de medula ósea
Interleuquina-2	B	Cetus Corp., Interferon Sciences	1992	Terapia para o cancro, desordes sanguíneas e de medula ósea
(IL-2)		Synergen		
Factor VIII (da coagulación sanguínea)	M	Varias empresas	1992	Hemofilia A
DNAsa	M	Genentech Inc.	1993	Fibrose quística
Interferón beta-1b (Betaferon)	B	Schering AG Pliarma	1993	Esclerose múltiple
Beta-glicocerebrosidasa	M	Genzyme Transgenics Corp.	1994	Enfermidade de Gaucher

Tabla 2. Productos farmacéuticos recombinantes no mercado.

Seguindo o ronsel deixado pola insulina humana recombinante, tivo lugar un crecemento espectacular do catálogo de produtos farmacéuticos comercializados, como se recolle na táboa 2, tendencia que debería proseguir no século XXI, prevéndose que nos primeiros anos se logren uns cento corenta produtos recombinantes sometidos ás máis estrictas regulacións.

Como se pode apreciar na táboa 3, os sistemas de expresión que se desenvolveron na última vintena dos anos do século XX inclúen bacterias (dominado por *E. coli*, seguido cada vez máis de preto por outras que claramente posúen un status GRAS —*Generally Recognized As Safe*— como é o caso de *Bacillus subtilis* e en menor grao aínda *Corynebacterium glutamicum*/*Brevibacterium lactofermentum*), lévedos (*S. cerevisiae*, *K. lactis*, *P. pastoris* e *H. polymorpha*) e fungos filamentosos (*Phycomyces*, *Aspergillus*). Durante a década de 1960 e principios da seguinte, traballouse activamente con dous lévedos metilotróficos: *Pichia pastoris* e *Hansenula polymorpha* (sin. *Pichia polymorpha*) como microorganismos de fermentación robustos (especialmente a primeira)

destinados a transformalos residuos industriais das petroleiras en proteína unicelular. Logo dunha crise duns quince anos, ámbalas especies máis *Kluyveromyces lactis*, *Schizosaccharomyces pombe* e máis recentemente *Yarrowia lipolytica* (sin. *Candida lipolytica*) foron configurándose como alternativas (ás veces moi superiores) á todopoderosa *S. cerevisiae* no apartado de Biotecnoloxía das fermentacións para a produción de fármacos recombinantes de calidade (véxanse as táboas 2 e 3).

Unha das principais vantaxes que presentan os lévedos en relación con produtos de xenos humanos ou implicados directamente na terapia humana, é a súa capacidade de glicosilación dos produtos xénicos, ás veces imitando as glicosilacións realizadas por células de mamífero como é o caso de *S. pombe*. A xeito de exemplo, a táboa 4 resume os niveis de produtividade en fermentadores para algúns xenos humanos expresados en lévedos. No século entrante desenvolveranse sistemas, hoxe incipientes, de arqueobacterias (*Halobacterium* e *Haloarcula*) que son capaces de glicosilar dun modo moi similar ós sistemas eucarióticos.

Lévedo hospedador	Producto	Ano
<i>Pichia pastoris</i>	Antíxeno de superficie do virus da hepatite B	1987
	Estreptoquinasa	1989
	Factor de necrose tumoral humano	1989
	Lisozima bovina	1989
	Aprotinina	1991
	Fragmento C da toxina do tétanos	1991
	gp 120 do HIV	1991

Lévedo hospedador	Producto	Ano
	Receptor de IgE humano	1992
	Transferrina	1995
	Inhibidor da proteínasa 6 humano	1995
	Alérxenos herbáceos	1996
	Diversas amilasas	1996
	Opsina bovina	1997
	Lacasa	1997
	Alérxeno Bla g4	1998
	Factor humano tisular	1998
	Lipasa biliar humana	1998
	Patatinas	1998
	Gonadotropina coriónica humana e activa	1999
	Proteína atrapaolores da abella	1999
<i>Hansenula polymorpha</i>	Antíxeno de superficie mediano do virus da hepatitis B	1989
	Seroalbúmina humana	1990
	Antíxenos de superficie S e L do virus da hepatitis B	1991
<i>Kluyveromyces lactis</i>	Activador tisular do plasminóxeno	1990
	Interleuquina-I b humana	1991
	Seroalbúmina humana	1991
	Antíxeno de superficie do virus da hepatitis B	1992
	Lactoglobulina beta ovina	1996
<i>Schizosaccharomyces pombe</i>	Antitrombina III humana	1987
	Factor XIIIa humano	1989
	Factor estimulador de colonias de macrófagos (truncado)	1994
<i>Yarrowia lipolytica</i>	Interferón porcino	1990
	Factor de coagulación XIIIa	1992
	b-Glicuronidasa	1993
	Antíxeno de superficie hepatitis B	1994
	Caseín quinasa II	1997

Táboa 3. Productos terapéuticos (ou relacionados) recombinantes expresados en lévedos diferentes a *Saccharomyces cerevisiae*

Producto	Lévedo hospedador	Promotor	Productividade	Ano
Seroalbúmina humana	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	CUPI	0,6 mg/L	1986
	<i>Kluyveromyces lactis</i>	UYPI	35-45 mg/L	1990
		PGK/LAC4	300-400 mg/L	1991
Monómero de AgsHB	<i>S. cerevisiae</i>	PGK1	1-2 mg / 100 mg de proteína	1982
	<i>Hansenula polymorpha</i>	MOX1	2,7-3,6 mg / 100 mg de proteína	1989
		AOX1	2,3 mg / 100 mg de proteína	1987

Producto	Lévedo hospedador	Promotor	Productividade	Ano
Seroalbúmina humana	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	CUPI	0,6 mg/L	1986
	<i>Kluyveromyces lactis</i>	UYPI	35-45 mg/L	1990
		PGK/LAC4	300-400 mg/L	1991
Monómero de A _g sHB	<i>S. cerevisiae</i>	PGK1	1-2 mg/100 mg de proteína	1982
	<i>Hansenula polymorpha</i>	MOX1	2,7-3,6 mg/100 mg de proteína	1989
	<i>Pichia pastoris</i>	AOX1	2,3 mg/100 mg de proteína	1987
Interleuquina-1b humana	<i>S. cerevisiae</i> <i>K. lactis</i>	PGK PH05	1-2 mg/L 80 mg/L	1987 1991
Interferón alfa humano	<i>S. cerevisiae</i>	PGK1	5 mg/L	1982
IGF-1	<i>S. cerevisiae</i>	ADH2/GAPDH	25 mg/L	1989
Lactoferrina humana	<i>S. cerevisiae</i>	Chelatin	1,5-2 mg/L	1993
Lactoglobulina beta ovina	<i>S. cerevisiae</i>	PGK	40-50 mg/L	1996
	<i>K. lactis</i>	PGK	40-50 mg/L	1996
Hirudina	<i>S. cerevisiae</i>	GAL10	59 mg/L	1995
Fibrinóxeno	<i>S. cerevisiae</i>	GAL1	30 mg/L	1995

Táboa 4. Productividade para determinados compostos terapéuticos, recombinantes, sintetizados en distintos lévedos.

Unha área de enorme importancia económica e social que previsiblemente se acrecentará durante o primeiro cuarto do século XXI é o desenvolvemento de vacinas para previlas enfermidades infecciosas que provocan dezasete dos cincuenta millóns de falecementos que ocorren cada ano no mundo. Delas, as dez máis preocupantes, pola súa incidencia, son as infeccións respiratorias agudas, a tuberculose, as enfermidades diarréicas, a malaria, a hepatite B, a SIDA, o sarampelo, o tétano neonatal, a tose ferina, a lombriga intestinal e a anquilostomiasis.

Segundo a Organización Mundial da Saúde (OMS), cada ano morren des-

tas enfermidades infecciosas case nove millóns de nenos menores de catorce anos e polo menos tres millóns salvaríanse se as vacinas xa existentes se utilizasen máis amplamente. Os demais necesitarían doutras vacinas aínda inexistentes para sobrevivir. Resulta dramático comprobar que nos postremos tempos do século XX falecían aínda setecentos cincuenta mil nenos ó ano debido a unha enfermidade tan clásica como o sarampelo.

A elaboración de vacinas está impulsada por, como pouco, tres factores: I) a necesidade de salvar vidas; II) o descubrimento científico e a innovación tecnolóxica propia da nosa sociedade; e III) o concepto de que os

microorganismos causantes de enfermidades son tamén seres xenéticos e, como tales, suxeitos ás mesmas forzas evolutivas có home. Como ben sinalou Joshua Lederberg, este último aspecto delimita unha vía de dous sentidos e han vixiarse constantemente os patóxenos emerxentes, as cepas resistentes, etc.

A produción industrial de produtos de alto valor engadido representou, baixo o punto de vista tecnolóxico, un importante reto no campo de deseño de dispositivos de fermentación. Así, a necesidade de prove-los cultivos de altas velocidades de aireación propiciou o desenvolvemento de novos sistemas tanto para a subministración de aire (difusores, membranas), como para a homoxeneización do equipo. Especialmente delicados son os equipos destinados a cultivos de células animais, cun elevado cociente respiratorio e que, ó tempo, presentan unha elevada fragilidade. Entre os sistemas que se mostraron máis eficaces destacan os fermentadores *air lift*, os equipos con perfusores e os encaixes fermentadores/membranas, con diferentes tecnoloxías e campos de aplicación.

Os sistemas de monitorización e control do proceso experimentaron un extraordinario avance nos últimos anos, tanto no equipamento coma nas estratexias de control. Hoxe en día non é infrecuente a instalación de equipos relativamente sofisticados, como espectrómetros de masas conectados *on line* ó sistema de fermentación. A análise detallada do caudal e, sobre

todo, da composición dos gases desprendidos, permiten precisar polo miúdo o estado metabólico do cultivo e, deste xeito, caracterizar con exactitude a fase de fermentación. Con isto lógrase non só maximiza-la produción senón, ademais, evitar situacións non desexadas como a derivación do fluxo metabólico a rutas diferentes.

Introduciuse con éxito, ademais, o concepto de control do proceso baseado en sistemas expertos (*expert systems*), moitas veces combinado co uso de 'lóxica borrosa' (*fuzzy logic*) que permitiu efectuar un adecuado control sen necesidade dun modelo matemático preciso, que en moitas ocasións resulta complexo ou inviable formular (figura 1).



O algodón de tubo de ensaio é un interesante resultado biotecnolóxico. Cada célula convértese nunha fibra de algodón e o proceso é máis rápido có cultivo tradicional.

Mención á parte merece o desenvolvemento dunha serie de 'biosensores' capaces de detectar tanto parámetros de tipo xenérico (ATP...) como produtos específicos (glicosa, lactosa, ácidos, proteínas...), o cal permitiu un eficaz proceso de monitorización *on line*. O desenvolvemento máis espectacular consiste nos biosensores producidos con tecnoloxía *chip* que permitirán unha moi complexa instrumentación incluso a baixo prezo, nos puntos máis sensibles do equipo.

Tamén houbo que desenvolver técnicas de concentración e purificación (*dowstream*) sofisticadas para lograr, a un tempo, a recuperación do produto desexado e a eliminación de compoñentes indesexados, bioloxicamente inactivos. É destacable que moitos dos produtos obtidos se encontran no caldo de cultivo a uns niveis extremadamente baixos, se ben o seu elevado valor fai interesante a súa recuperación (ver táboa 3). Entre as diferentes

metodoloxías máis innovadoras destacan as técnicas cromatográficas (de intercambio iónico, de afinidade, por exemplo), xa a escala industrial, e as técnicas de concentración-separación por membranas.

A Biotecnoloxía farmacéutica estivo desde o seu inicio sometida á dobre vertente de tratar de obter produtos bioactivos que contribúan a paliar a dor e a enfermidade pero, ó tempo, de desenvolver procesos que abaraten custos de produción e xeren beneficios ás empresas correspondentes (ha considerarse que, á marxe do apoio prestado por entes gobernamentais a través de plans específicos, a investigación en Biotecnoloxía foi financiada, especialmente, por compañías farmacéuticas. Neste sentido, as táboas 5 e 6 resumen as fusións máis recentes entre empresas e as líderes por cotas de mercado das empresas a finais do século XX.

Comprador	Adquisición	Data	Tamaño (millóns de USD)
American Home	Monsanto	6/98	34400
Sandoz	Ciba-Geigy	3/96	30100
Glaxo Holdings	Weicome	1/95	14300
Bristol-Myers	Sqtjibb	7/89	12100
Roche Holding	Corange	5/97	10200
American Home Products	American Cyanamid	8/94	9600
Hoechst	Marion Merrell Dow	2/95	7800
Accionistas	Zeneca	6/92	7000
Upjohn	Pharmacia	8/95	7000

Táboa 5. Algunhas das grandes fusións de empresas biotecnolóxicas.

	Consortios	Mercado (%)
1	Glaxo-Wellcome	4,70
2	Novartis	4,40
3	Merck + Co.	3,50
4	Hoechst Marion Roussel	3,50
5	Bristol-Myers-Squibb	3,10
6	American Home	3,00
7	Johnson & Johnson	2,90
8	Pfizer	2,90
9	Hoffmann-La Roche	2,60
10	SmithKline-Beecham	2,50
Total (de vendas do sector farmacéutico)		33,10

Táboa 6. As dez empresas farmacéuticas líderes a finais do século XX.

A BIOTECNOLOXÍA E A PROTECCIÓN DO MEDIO

O uso de microorganismos para a eliminación de materia orgánica en augas residuais domésticas lévase aplicando durante moitos anos, primeiro nas chamadas 'fosas sépticas' e logo en unidades mellor controladas. A 'lagoaxe estendida' é tamén unha técnica tradicional que, aínda con melloras de tipo operacional e de deseño, segue sendo útil.

Sen embargo, o desenvolvemento espectacular dos procesos industriais, especialmente no século XX, xerou a produción de residuos tanto en fase líquida como gasosa e sólida. Nestes efluentes atópanse adoito materiais xenobióticos que, en numerosas oca-

sións, resultan dificilmente biodegradables (ou biodispoñibles), polo que se acumulan en solos, sedimentos e, por veces, en seres vivos. Por outra parte, un número considerable destes produtos resultan tóxicos para os organismos vivos, polo que se requiriu a aplicación de novas técnicas e procesos tanto para o tratamento de augas como de solos e, en menor medida, de gases contaminados.

Un dos procesos con máis éxito, hoxe empregado masivamente na industria, é o de eliminación de augas residuais; palíase así o preocupante problema da eutrofización das augas. O proceso baséase na acción combinada de microorganismos autótrofos, que oxidan a materia amoniacal a nitrato (proceso de *nitrificación*) e heterótrofos, que utilizando materia orgánica carbonada reducen o nitrato formato a nitróxeno atmosférico (proceso de *desnitrificación*). Co fin de mellora-la eficacia desenvóléronse equipos para acadar unha máis rápida transferencia de materia (osíxeno) e procedementos para lograr unha maior densidade celular no reactor (sistemas de inmovilización bacteriana ou equipos de membrana).

A eliminación de fósforo —segundo macronutriente de importancia— conséguese mediante un proceso no que se alternan etapas de liberación de fosfato con etapas de acumulación intracelular, mediante o establecemento de ciclos anóxicos/aerobios no equipo.

Sen dúbida, a eliminación biolóxica de materiais tóxicos en augas residuais foi un campo no que se lograron resultados notables. A combinación de técnicas de enriquecemento en determinados grupos tróficos coa aplicación en equipos especiais (reactores de membrana, sistemas de elevada densidade celular con microorganismos inmobilizados...), fixo posible a eliminación de compostos xenobióticos considerados, ata hai pouco, como materiais recalcitrantes.

O abandono de espazos industriais e a súa transformación en zonas residenciais ou de lecer requiriu a recuperación de solos e acuíferos. Tamén os derramos de petróleo no mar, especialmente no caso de accidentes de superpetroleiros (na mente de todos están os casos do *Torrey Canyon*, *Exxon Valdez* e, máis próximo, o do *Aegean Sea*) incentivaron o estudo deste problema. As técnicas de biorremediación, baseadas na acción de microorganismos 'naturais' ou 'especializados', tiveron, por este motivo, un enorme desenvolvemento. En ocasións efectúase simplemente unha 'fertilización' do terreo, engadindo nutrientes para permiti-lo nacemento de microorganismos 'naturais', ás veces complementando o proceso coa adición de materiais que aumenten a 'biodisponibilidade' do contaminante. Noutras faise unha sementeira de microorganismos previamente seleccionados para realiza-la metabolización especializada destes contaminantes específicos.

A aplicación de microorganismos recombinantes no medio natural está, aínda, nunha fase moi previa. As regulacións legais á liberación ó medio de microorganismos manipulados xeneticamente son moi restrictivas pois aínda non se coñece con precisión o impacto que exercerían fóra do seu ámbito de aplicación inmediato. Pénsese, por exemplo, qué sucedería de se producir un escape de microorganismos resistentes (ou mesmo que metabolicen) antibióticos... Un campo de actuación de grande interese consiste en introducir nestes microorganismos unha sonda que, en ausencia do material contaminante, produza a lise celular, tras disparar un mecanismo auto-destrutivo. Hai ben pouco permitiuse a liberación controlada nun terreo contaminado de microorganismos *enxeñerizados* segundo estas ideas; a avaliación dos seus resultados está aínda pendente.

Tamén se prestou moita atención á degradación microbiana de residuos industriais aparentemente non-biodegradables. Un exemplo significativo é a aplicación á mineralización de TNT, almacenado por toneladas en recintos militares ou a biodegradación de isómeros de lindano (hexaclorociclohexano), un insecticida empregado profusamente ata os anos sesenta; a súa produción ía inexorablemente asociada á dos seus isómeros, menos activos, que se vertían libremente en solos e vertedoiros.

Por último, cabe destaca-lo esforzo dedicado ó tratamento de

gases contaminados, especialmente con materiais xofrados (H_2S , mercaptanos) ou compostos orgánicos volátiles (VOC's). Para iso estanse a desenvolver biofiltros, bioabsorbedores ou biolavadores con diferentes configuracións e modos de actuación distintos e excelentes perspectivas de utilidade práctica.

O TRIÁNGULO BIOTECNOLOXÍA, PRODUCCIÓN VEXETAL E BIODIVERSIDADE

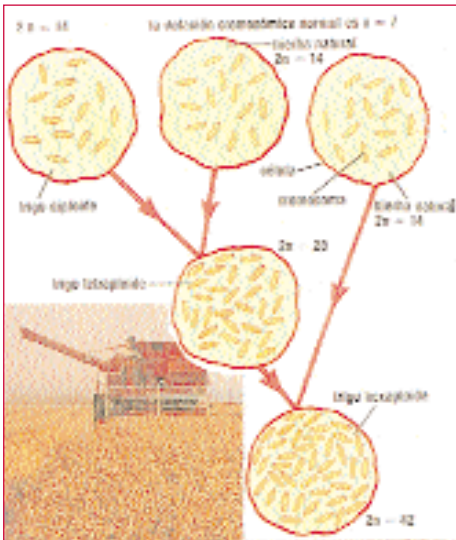
O futuro da Biotecnoloxía no século que empeza estará previsiblemente ligado ós seres fotosintéticos (fundamentalmente plantas e en menor medida algas microscópicas). Deséxase que as sementeiras produzan máis, que sexan máis resistentes a enfermidades, que non necesiten (ou necesiten un mínimo) de pesticidas, que consuman pouca auga, e ata que a manipulación produza froitos non só máis grandes, coma na actualidade, senón tamén máis saborosos.

É evidente que a medida que se foi poboando o planeta aumentaron as necesidades de alimentos, os cales, conforme se incrementaba o grao de benestar, tiñan que ser mellores en calidade alimentaria, presentación e hixiene. Isto conseguíuse en parte nas últimas duascenas xeracións humanas (aproximadamente equivalente a uns catro mil anos da vida do home) mediante a manipulación xenética que chamaremos 'convencional' e permitiu a obtención dunha enorme variedade

de híbridos. O século XIX e os dous primeiros tercios do XX son sen dúbida típicos neste aspecto. Púidose así alimentala Humanidade, agás en certas grandes fames debidas especialmente a unha imperdoable falta de previsión e, sobre todo, de sensibilidade na repartición dos excedentes alimentarios do chamado 'primeiro mundo'.

Este proceso, sen embargo, levou consigo unha drástica diminución do número de plantas utilizadas para a alimentación (o mesmo se podería dicir, incluso en maior grao de redución, para o caso dos animais utilizados na alimentación humana), o que xerou, ó principio de vagar e logo de xeito máis evidente, unha notable diminución da biodiversidade. A Humanidade, ó longo de toda a súa historia, utilizou unhas tres mil plantas das oitenta mil estimadas comestibles que aínda quedan no planeta na actualidade. Destas tres mil, o home cultiva a grande escala só cento cincuenta e, destas, vintenove proporcionan o noventa por cento dos alimentos: 7 cereais (arroz, trigo, millo, sorgo, cebada, millo miúdo e tritcale, que proporcionan o 52 % da enerxía total); 3 tubérculos (mandioca, pataca e batata); 8 leguminosas (cacahuets, chícharos, garavanzos, soia, fabas, feixóns, feixóns varados e chícharos de Angola); 7 oleaxinosas; 2 azucreiras (cana e remolacha) e 2 froiteiras (bananeira e coco).

O noventa e nove por cento das necesidades alimenticias dos humanos procede do medio terrestre e só o un por cento do medio acuícola (incluída a



Moitas plantas teñen a rara propiedade de duplicar ou triplicar os seus cromosomas (poliploidía). A colleita do trigo moderno, por exemplo, é moito máis doada cá tradicional.

pesca en mar aberto). A tendencia, segundo os observadores da UNESCO, é que esta cifra permaneza igual ou mesmo aumente cara ó medio terrestre no século que comeza, por canto a produtividade dunha hectárea de terra é moito máis alta cá parte equivalente de medio acuático. Xa que logo, ¿cara a onde debe ser canalizado o esforzo investigador de índole biotecnolóxica? Posiblemente cara ó medio terrestre, xa que é alí onde maioritariamente se atopan os recursos alimentarios máis estendidos. Por outro lado, non sería desatinado tratar de aunar esforzos públicos de investimento transnacional para tentar aumentar ese baixo un por cento da produción acuícola.

A conclusión é inevitable: o home é (foino sempre) un manipulador primario de seres vivos e, ó facelo no seu proveito, induce a perda da biodiversidade do planeta, xa que favorece a selección dunhas poucas especies ou razas que necesita. Existe unha serie de exemplos xa clásicos que inciden nesta idea. Así, entre 1945 e 1986, Grecia abandona o noventa e cinco por cento de variedades nativas de trigo e moitas delas pérdense; entre 1970 e 1973 España perde sete de dez cultivos primitivos de melóns; na actualidade, a República Sudafricana perdeu o noventa e nove por cento de variedades nativas de sorgo e Francia só conta doce variedades de maceira fronte ás dúas mil que tiña no século XIX.

Por outra parte, esta manipulación conduciu a un aumento de enfermidades por dexeneración xenética dos cultivos e, concomitantemente, un aumento espectacular do consumo de produtos fitosanitarios. Os exemplos clásicos inclúen a acción de *Phytophthora infestans* que destruíu a metade da produción de pataca en Irlanda en 1846 (cunha extraordinaria incidencia social, como foron as emigracións masivas do Vello ó Novo Mundo) e houbo que recorrer a cruzamentos con reserva xenética silvestre (*Solanum demissum*). O mesmo podería dicirse para filoxera, que en 1860 arrasou os viñedos europeos ou a destrución de millo sudista por *Helmintosporium maydis*. Tense recorrido sistematicamente na historia a retrocruzamentos co fondo xenético silvestre para recupera-la resistencia a

pragas e factores ambientais, mesmo a sabendas do coñecido axioma de que os híbridos acabarían por desenvolver os seus propios parasitos/patóxenos específicos e que outra volta haberá que recorrer ó retrocruzamento nun ciclo permanente e repetitivo.

Nos quince ou vinte últimos anos do século XX, a Biotecnoloxía conseguiu introducir infinidade de características dominantes en cultivos de plantas importantes na alimentación humana que as fan resistentes a unha gran variedade de factores ambientais adversos e que van desde a resistencia a patóxenos tales como virus, viroides, bacterias e fungos filamentosos ata resistencia á auga de rega rica en sal ou resistencia á maduración rápida de certos froitos. Esta serie de movementos de manipulación xenética dos xenomios principais das plantas (tamén coñecida como *transxénese*) foi motivada por dous factores clave: o esgotamento paulatino dos recursos e do potencial da xenética convencional e a curiosidade inherente ó científico. Con ser isto importante, a achega da Biotecnoloxía no capítulo de biodiversidade está aínda por vir e desenvolverase neste século que comeza. Debido a que as técnicas de Bioloxía molecular que utiliza son moi poderosas, é labor relativamente simple protexe-la biodiversidade de calquera ser vivo (entendéndose como un todo, tal e como ocorre na natureza); pero tamén pode entenderse por biodiversidade a preservación da característica ou conxunto de características máis importantes da especie

de que se trate e traspasar estas a outra receptora. Deste xeito garantiríase que non se perda de vez o positivo que a natureza seleccionou mediante evolución natural durante millóns de anos. Tal práctica, sempre que se poida, debe realizarse mediante 'paratransxénese', é dicir, clonación sobre xenomios secundarios (mitocondrias ou cloroplastos) das células de animais ou plantas, respectivamente, para distorsionar o menos posible a marcha evolutiva propia da especie receptora.

	Actual ¹	Potencial ²
Cana de azucre	70-90	150-200
Mandioca	60	100
Tomate	70-150	150-200
Aceite de palma	2-5	10-12
Cacahuete	1,6	4,0
Aceite de ricino	0,6	2,5
Coníferas temperadas	6-8	20-30
Coníferas tropicais	12-20	40-60
Fronzosas tropicais	10-20	40-100

Táboa 7. Producións actuais e potenciais dalgunhas plantas cultivadas e especies forestais (Tm/Ha).

1 Esta estimación enténdese só para cultivos realizados por procedementos clásicos, incluíndo a mellora xenética.

2 As producións potenciais teñen en conta: a) aumento de reforestación, si pertinente; b) mellora xenética por manipulación de células xerminais; c) desenvolvemento de plásmidos centroméricos e plantas transxénicas (non inclúe, sen embargo, o desenvolvemento que poida conseguirse segundo as estimacións con plantas paratransxénicas); d) optimización de procesos; e) educación laboral do traballador; f) política empresarial.

O outro factor importante que acompaña a achega da Biotecnoloxía á produción vexetal, mediante accións ABP (accións biotecnolóxicas posibles) ten que ver evidentemente co aumento da produción pura da biomasa vexetal. A xeito de exemplo amósanse na táboa 7 as estimacións realizadas por expertos da ONU para o século entrante nalgúns cultivos mediante ABP.

Un aspecto relativamente pouco desenvolvido pola Biotecnoloxía para o mundo de produción vexetal relacionado coa Bioenerxética é a obtención de novas estirpes ou variedades con maior rendemento na formación de biomasa. Os factores que inflúen no rendemento da conversión enerxética da fotosíntese de plantas superiores son os seguintes: da enerxía solar incidente, dado que as plantas non utilizan a zona IR (43 %) e a reflexión de enerxía por follaxe e transmisión ó chan (34,4 %) e tendo en conta a redución intrínseca debida ó ciclo de Calvin (Rubisco) (9,8 %) e á corrección respiratoria (6,5 %), só se aproveita entre un seis e un sete por cento da enerxía solar incidente. Ademais, se se ten en conta o rendemento real interanual, esta cifra resulta aínda inferior (pode baixar ata un 2,5 % para a cana de azucre). Un simple cálculo indica que serían necesarias cincuenta hectáreas de bosque para acumular a mesma enerxía que acumularía unha hectárea de espellos. As ABP a longo prazo incluírían: *a*) o incremento da zona do espectro electromagnético de captación enerxética para as plantas verdes e *b*) o incremen-

to no rendemento do Ciclo de Calvin, ben aumentando o número de moléculas de ribulosa 1,5-di-fosfato-carboxilasa (Rubisco), aumentando as reservas intracelulares de ribulosa 1,5-di-fosfato, aumentando o número de cloroplastos por célula, etc.

As ABP máis evidentes —moitas das cales xa foron desenvolvidas por transxénese— derivan de eliminar as perdas que sobre os cultivos xeran enfermidades causadas por microorganismos (incluíndo as provocadas por fungos fitopatóxenos) e por insectos; só controlando estas perdas aumentaría considerablemente o rendemento medio das plantas cultivadas.

A parte negativa é que as plantas de alto rendemento poden causar efectos negativos no medio natural como son lixivación de fertilizantes e deterioración da calidade das augas, aumento do consumo de biocidas non degradables, diminución da pesca, aumento da construción de silos e outros almacéns e baixada das hectáreas dedicadas ó cultivo do algodón e de leguminosas. En países como a India comprobouse que este tipo de cultivos con variedades de moi alto rendemento incidiu negativamente tamén en aspectos socioeconómicos como son o aumento drástico dos créditos bancarios, a autarquía alimenticia, o aumento do traballo asalariado e a diminución de propietarios de terra cultivable e o aumento do prezo da terra, entre outros.

A mediados dos anos oitenta do século XX, calculábase nunha media de

cinco a dez anos anos o tempo necesario para conseguir aumentar notablemente mediante transxénese (sen incluír a paratransxénese) a produción dos compostos listados. En moitos casos (especialmente naqueles en que o produto é codificado por varios xenos que definen unha ruta bioquímica complexa, caso da maioría dos antibióticos), a previsión foi lamentablemente curta e nos casos nos que se logrou a clonación da ruta completa, a produción non era significativamente superior á conseguida coas estirpes que os xenéticos clásicos desenvolveran ó longo de miles de mutacións e selección posterior.

Rematando o século XX, en concreto en 1995, realizouse un interesante balance (táboa 8) sobre a incidencia que a Biotecnoloxía molecular de plantas cultivadas tivera na economía daqueles países en vías de desenvolvemento que, ou ben importaran as novas plantas transxénicas ou ben realizaran un esforzo orzamentario adicional para desenvolve-las súas propias.

A. Por técnicas de cultivo celular e de tecidos		
Ata 1995	20,9	Café (8), bananas (16), arroz (6), goma (5), tabaco (2), vainilla (2), patacas (1)
1995-2000	21,2	Cana de azucre / remolacha azucreira (16), cacao (15), té (4), soia (3), aceite de palma (3), trigo (3), millo (1), aceite de xirasol (1)
Século XXI	3,4	Algodón (15), coco (10)

B. Por plantas transxénicas		
Ata 1995	6,4	Goma (5), tabaco (2), millo (1), patacas (1)
1995-2000	17,5	Remolacha azucreira (16), bananas (16), algodón (15), arroz (6), soia (3), xirasol (1)
Século XXI	21,7	Café (27), cana de azucre (16), cacao (15), coco (10), té (4), aceite de palma (3), trigo e fariña (3)
C. Por plantas paratransxénicas		
Non existen predicións		

Táboa 8. Incidencia da Biotecnoloxía clásica e molecular nas economías de países en vías de desenvolvemento a finais do século XX e previsións para a primeira década do XXI (medido como exportacións x 10⁵ millóns de USD)¹.

¹ Os números entre parénteses aluden ó número de países incluídos no estudo.

CONCLUSIÓN

Con estas notas pretendemos reflexionar sobre os logros e potencialidades da Biotecnoloxía en diferentes campos de aplicación. A pesar dos seus poucos anos, a Biotecnoloxía contribuíu á resolución de problemas importantes para a Humanidade, dando respostas eficaces en campos tan variados como a saúde, a alimentación e o medio natural.

As contribucións achegadas pola Biotecnoloxía son, ata o de agora, de enorme relevancia, se ben quizais nos encontremos simplemente no principio dunha verdadeira revolución que

permitirá cambia-los sistemas produtivos e que afectará decisivamente a calidade de vida dos cidadáns.

REFERENCIAS

Bolívar, F., e outros, *Construction and characterization of New Cloning Vehicles. II*, Multipurpose Systeme. Gene II, 1997, 95-113.

Cohen, J., e outros, *Construction of Biologically Functional Bacterial Plasmids in vitro* PNAS 70, 1973, 3240-3244.

Cohen, J., "The genomics Gamble", *Science*, 275, 1997, 767-776.

Correa, C. M., *Innovación y producción en América Latina*, Bos Aires, Arxentina, Colección CEA-CBC, 1996.

— "Private Biopharmaceutical Capacity in Developing Countries",

Biotechnology and Development Monitor, 9, 1999, 7-8.

Glick, B. R., e J. P. Pasternak, *Molecular Biotechnology. Principles & Applications of Recombinant DNA*, American Society for Microbiology, EUA, ASM Press, 1994.

Sasson, A., *Biotechnologies in Developing Countries: Present and Future*, volume 1, Regional and National Survey, France, ONU Publishing, 1993.

— *Bioteecnoloxías aplicadas a la producción de fármacos y vacunas*, Cuba, Elfos Scientiae, 1998.

Tombs, M. P., *Biotechnology & Genetic Engineering Reviews*, Reino Unido, Intercept Ltd., 1997.

Villa, T. G., e J. Abalde, *Profiles on Biotechnology*, Santiago de Compostela, Servicio de Publicacións da Universidade de Santiago de Compostela, 1992.



MENTE E CEREBRO

Carlos Acuña Castroviejo*
Universidade de Santiago
de Compostela

Os principios evolutivos baseados na doutrina de Darwin¹ foron unha ferramenta fundamental para chegar a comprender as formas e as funcións dos corpos dos animais. Unicamente as ciencias que tratan do cerebro, a mente e a conducta humana quedaron relativamente illadas do poder explicativo deste enfoque, concentrándose en cambio nas operacións e atributos do cerebro e da conducta tal e como os coñecemos hoxe en día.

Se a selección² natural darwiniana é a principal forza organizadora detrás do deseño funcional das especies, evidentemente proporciona un marco teórico para ordenar a enorme cantidade de datos que se acumularon nos últimos anos sobre o cerebro, a mente e maila conducta. Ó trata-lo cerebro e a

mente como unha colección de instrumentos que evolucionan para resolver os problemas de adaptación cos que se enfrontaron os nosos devanceiros, a lóxica do cerebro e da mente contemporánea tórnase máis clara.

A teoría da selección establece que os individuos de calquera especie que estean mellor adaptados para sobreviviren nas condicións ambientais predominantes son os que se reproducen con máis éxito. Esta teoría viuse reforzada pola Xenética³ e polo coñecemento de que moitos xenes⁴ existen en distintas variantes (alelos⁵), cada un dos cales pode conferirlle características lixeiramente diferentes ó seu portador. Esta variación alélica proporciona o ambiente rico sobre o cal actúa a selección, e cando as situacións

* Catedrático de Fisioloxía

1 C. Darwin, *The origin of species by means of natural selection*, Londres, J. Murray, sexta edición, 1884.

2 Reproducción diferencial e non ó azar de diferentes xenotipos que operan para alterar a frecuencia de xenes nunha poboación.

3 A Xenética é a rama da ciencia implicada en cómo se transmite e cáles son as consecuencias da xeración dos compoñentes da herdanza biolóxica.

4 Secuencias específicas de nucleótidos na molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) que representan as unidades funcionais da herdanza.

5 Formas mutuamente exclusivas do mesmo xene, que ocupan idéntico lugar en cromosomas homólogos e gobernan o mesmo proceso bioquímico e de desenvolvemento.

cambian os individuos que levan outros alelos vólvense os mellor adaptados e, xa que logo, os de máis éxito. Engadidas á fonte da variación alélica, as mutacións⁶ ou mesmo os cambios maiores no xenoma⁷ producidos pola reordenación⁸ dos cromosomas poden, en condicións axeitadas, producir maiores desvíos na forma e tamén na función. Esta selección darwiniana, con todo, non nos informa sobre o progreso, o éxito ou o fracaso, ou a competencia dunha especie.

A ciencia da evolución unifica a bioloxía, desde as moléculas ata a conducta máis complexa. Baixo a ampla diversidade do deseño animal descansan uns principios organizadores unificadores e un proceso común de desenvolvemento. O descubrimento de que os vertebrados e os invertebrados expresan xenos similares (por exemplo, os xenos *homeobox*⁹) durante o desenvolvemento de rexións aproximadamente comparables tivo un impacto enorme, e non menor na promoción da re-emerxencia do campo da bioloxía evolutiva do desenvolvemento.

A EVOLUCIÓN DO CEREBRO HUMANO

ESTRUCTURA, ONTOXENIA¹⁰ E FILOXENIA¹¹

Se o que fai humano o home é o seu cerebro, ¿que é este órgano dotado desas calidades?, ¿é unha máquina, unha computadora? Non, é un biosistema. Esta distinción é fundamental xa que os biosistemas teñen historia, filoxenética e ontoxenética, e están dotados das leis e propiedades de tódolos seres vivos.

O cerebro contén dous tipos principais de células. As neuronas son os elementos que producen sinais de maneira activa. As células gliais son máis numerosas, de varios tipos e con funcións diversas; un tipo de glía actúa como elemento estrutural do cerebro; outros teñen funcións de mantemento do medio interno cerebral (homeostase¹²). No cerebro hai varios tipos de neuronas, pero todas teñen un patrón xeral similar (figura 1.A). O corpo celular (soma) contén o núcleo e varios orgánulos implicados en funcións de

6 Calquera cambio detectable e herdable no material xenético non producido por segregación xenética ou recombinación, que é transmitido a células fillas e a xeracións sucesivas, sempre e cando non sexa un factor letal dominante.

7 O complemento xenético completo dun organismo. Encóntrase nun grupo de cromosomas en eucariotas (células de organismos superiores que conteñen un verdadeiro núcleo rodeado por unha membrana nuclear).

8 Ordenación de maneira diferente das rexións dos cromosomas. Os cromosomas son as estruturas dentro do núcleo das células do home que conteñen o material hereditario (ADN). Normalmente hai 46 cromosomas no home, incluíndo dous que determinan o sexo do individuo, XX para a muller e XY para o home.

9 Do grego *homeo*, 'similar', e do inglés *box*, 'caixa', refírese a unha secuencia no ADN, común ós xenos que dirixen o desenvolvemento da estrutura corporal en, virtualmente, tódolos animais, incluíndo vermes, moscas, paxaros, ratos e o home.

10 Desenvolvemento do individuo, referido en especial ó período embrionario.

11 As relacións de grupos de organismos reflectidas nas súas historias evolutivas.

12 A tendencia á estabilidade nos estados corporais normais (ambiente interno) do organismo. Prodúcese por un sistema de mecanismos de control activados por un *feedback* negativo.

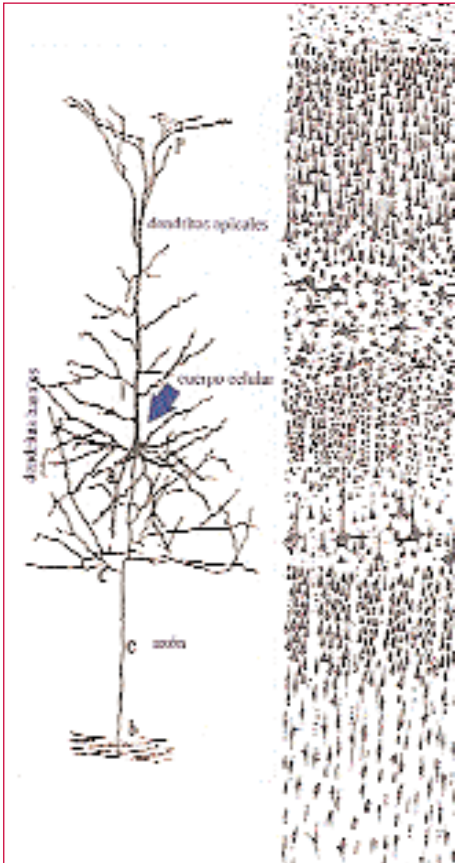


Figura 1. A: neurona da cortiza cerebral. e: axón; a, l e p: dendritas. O soma neuronal é a parte central máis escura. B: corte da cortiza cerebral visual do home, mostrando os tipos de neuronas en cada lámina horizontal. A parte superior é a superficie da cortiza e a inferior continúaase coa substancia branca¹³.

síntese para o mantemento da función neuronal. Do soma, que pode medir entre unhas dez e cen micras de diámetro, saen unhas arborizacións chama-

das dendritas que reciben moitos contactos procedentes doutras neuronas; estes contactos chámanse sinapse. Os sinais doutras neuronas chegan sempre a través da sinapse. Cada neurona emite un axón, unha prolongación da neurona de lonxitude variable, desde algunhas micras ata cento cincuenta centímetros. O axón é a vía de saída da neurona, que leva os sinais ata outras neuronas a través da sinapse. Os sinais xerados nas neuronas condúcense como un impulso nervioso a través do axón. A velocidade de condución é finita e varía segundo o tipo de neurona, pero é constante ó longo de cada axón. O impulso nervioso xérase mediante un mecanismo electroquímico que consome enerxía, orixinando o potencial de acción, un cambio transitorio rápido no potencial eléctrico da membrana da neurona que se despraza a velocidade constante desde o soma ata o final do axón, o terminal sináptico.

O volume do cerebro do home é duns 1.370 ml, e a cortiza cerebral contén uns 28 billóns de neuronas cada unha conectada coa outra por medio dun gran número (de un a dez trillóns) de contactos sinápticos. Santiago Ramón y Cajal (1904) estableceu o dogma de que a relación entre as células nerviosas é de contigüidade, non de continuidade. Para saltar esa separación entre unha e outra neurona no contacto sináptico necesítase unha substancia química que transmita o sinal entre

13 S. Ramón y Cajal, 1904.

elas. Estas substancias chámanse neurotransmisores. Cando o potencial de acción chega ó terminal sináptico, promove a liberación dun neurotransmisor que leva o sinal á seguinte neurona. Os neurotransmisores únense a lugares específicos na membrana das neuronas chamados receptores. Un dos maiores avances na Neurofarmacoloxía do século XX foi o coñecemento dos tipos de neurotransmisor, de receptor e da interacción neurotransmisor-receptor.

Outro dos descubrimentos máis importantes da Neurociencia foi o da plasticidade sináptica, no que se mantén que a eficacia da transmisión nunha sinapse neuronal —e a formación

inicial de sinapse durante o desenvolvemento— depende do nivel de actividade sincrónica nas neuronas. A plasticidade sináptica é un factor importante na ontoxenia dos circuitos neuronais na corteza cerebral. Durante a ontoxenia, os axóns son guiados por sinais químicos ata establece-los seus contactos. A estabilización e o refinamento posterior deses contactos sinápticos depende en parte da actividade dos circuitos. Algúns deses contactos fortalecéense, mentres que outros se debilitan e mesmo desaparecen dependendo da actividade sincrónica nesas neuronas. Polo tanto, no nivel sináptico, non hai dous cerebros iguais e debido á súa experiencia cada cerebro está cambiando continuamente. Existe

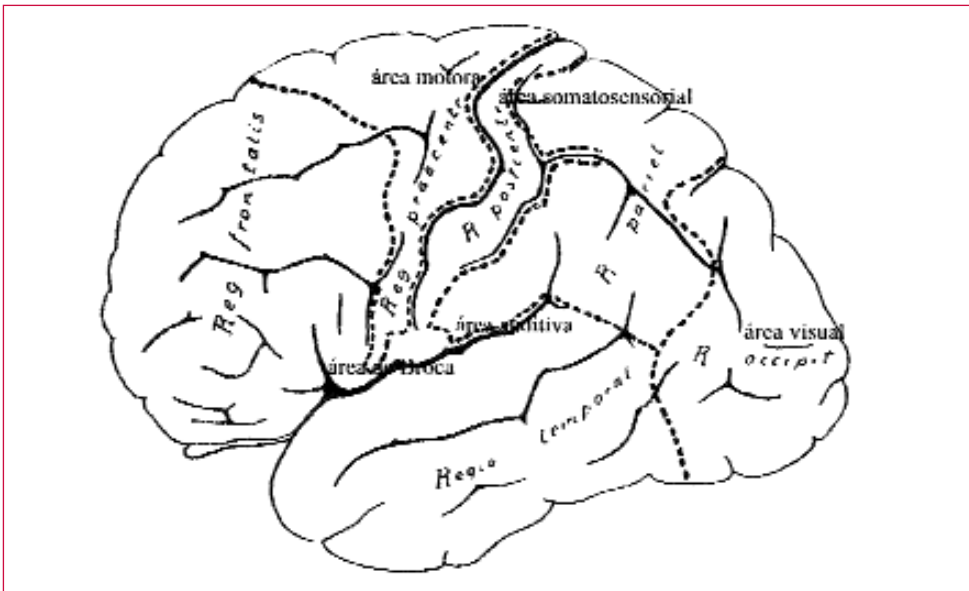


Figura 2. Vista lateral do hemisferio cerebral dereito do home. Sinálanse as rexións frontal, temporal, parietal e occipital. A rexión arredor da fisura de Rolando subdivídese en dúas rexións, a pre- e a poscentral (Brodmann, 1909).

a evidencia de que os mecanismos de plasticidade sináptica son as bases da aprendizaxe e da memoria.

A cortiza cerebral¹⁴ (figura 1.B) ten unha estrutura formada por, en xeral, seis láminas horizontais constituídas por diferentes tipos de neuronas; as neuronas de cada lámina están interconectadas a través de conexións verticais formando unha columna; cada columna de neuronas está conectada a outras a través de conexións horizontais. Esta estrutura fundamental é o módulo básico para o procesamento da información no cerebro. A riqueza de conexións sinápticas, determinada pola plasticidade sináptica, determinará as características —é dicir, a eficacia— deste procesamento.

¿Como se desenvolve e como evolucionou a cortiza cerebral? (figura 2) Durante o transcurso da evolución, a cortiza cerebral incrementou a súa superficie pero non o seu grosor, unha tendencia que pode apreciarse nun período relativamente curto da evolución dos primates. A cortiza do home só é un quince por cento máis grosa cá dos macacos, pero é dez veces maior en superficie. É indubidable que para comprender cómo medrou esta estrutura tan complexa no transcurso da evolución dos mamíferos, necesitamos

examina-los cambios celulares que se produciron durante a ontoxenia do cerebro¹⁵.

Os xenos e as moléculas que controlan as primeiras etapas da xénese da cortiza cerebral son bos candidatos para determina-lo tamaño e o patrón básico da organización cortical específica das especies. Pasko Rakic¹⁶ demostrou que, durante o desenvolvemento, a cortiza cerebral está formada por un elevado número de unidades radiais, cada unha delas constituída por un grupo de neuronas relacionadas clonicamente¹⁷ producidas no mesmo lugar da zona proliferante que dá orixe á cortiza cerebral. O incremento da superficie da cortiza cerebral puido ocorrer mediante a adición de unidades radiais, tanto como resultado de divisións extra das células fundadoras da zona proliferante como, posiblemente, por alteración do momento e da velocidade á que morren células fundadoras superfluas.

A zona proliferante ou ventricular (está próxima ó ventrículo cerebral durante o período embrionario, de aí o seu nome) vai orixina-las neuronas da cortiza cerebral e alí encóntranse moitas células precursoras en período de división, de aí o seu nome de 'proliferante'. As células migran cara á placa

14 Manto duns 3 mm de espesor que cobre a superficie do cerebro. Está formado por células (neuronas e glía) dispostas en láminas paralelas á superficie do cerebro.

15 S. J. Gould, *Ontogeny and Phylogeny*, Cambridge, MA, Harvard University Press, 1977.

16 P. Rakic, "Specification of cerebral cortical areas", *Science*, 241, 1988, 170-176.

17 Os clons celulares son un grupo de células idénticas xeneticamente que descendem, en células eucariotas, por mitose dunha célula ancestral única común.

cortical en desenvolvemento que está por baixo da superficie da pia¹⁸. A migración entre a zona proliferante e a placa cortical realízase formando un regueiro de neuronas: as unidades radiais. Varios mecanismos celulares determinan a localización exacta das neuronas que se van formando nas tres dimensións da cortiza cerebral. A posición de cada neurona é moi importante cando empezan a formarse conexións intrínsecas e extrínsecas e cando comezan a emerxer as áreas corticais. A superficie da cortiza vén determinada polo número de unidades radiais formadas polas células fundadoras na zona ventricular. Isto implica que o incremento da superficie cortical durante a evolución puido realizarse mediante o incremento de novas unidades radiais¹⁹. Un corolario é que os xenes que controlan a produción de células na zona ventricular durante as primeiras etapas do desenvolvemento do embrión poderían determina-lo tamaño da cortiza cerebral. Cambios relativamente pequenos no momento das divisións celulares poderían ter grandes consecuencias funcionais; por exemplo, incrementaríase o número de células fundadoras, e como inicialmente a proliferación é exponencial, duplicaríanse o número de células fundadoras e, xa que logo, o número de

columnas radiais. Estes cambios poden explica-las diferencias de dez veces o tamaño da superficie da cortiza cerebral nos macacos e no home.

A morte celular (apoptose²⁰) pode ser tamén un factor de control do número de células na zona proliferante ventricular. A apoptose é un proceso complexo, polo que as mutacións en certos xenes poden afecta-lo momento en que ocorre e desta forma altera-la produción de células destinadas para estruturas cerebrais específicas. A alteración do balance entre formación e apoptose de células na zona proliferante puido ser un mecanismo mediante o cal as mutacións influirían na expansión da cortiza cerebral durante a evolución.

Para comprende-lo proceso da evolución é necesario examina-los seus produtos: a morfoloxía actual nun certo número de especies. A comparación revela similitudes e diferencias que nos permiten facer inferencias sobre os mecanismos que conduciron ás estruturas actuais. Características comúns puideron herdarse dun antepasado común. Se unha estrutura non está presente entre dous especies pódese asumir que evolucionaron de maneira independente.

18 Ou piamáter: membrana que cobre a superficie da cortiza cerebral.

19 P. Rakic, "A small step for the cell, a giant leap for mankind: a hypothesis of neocortical expansion during evolution", *Trends in Neuroscience*, 18, 1995, 383-388.

20 Un dos dous mecanismos polos que ten lugar a morte celular (o outro é por necrose). Apoptose é o mecanismo responsable da eliminación fisiolóxica das células e parece estar programada intrínsecamente. Esta forma de morte celular serve como balance da mitose para regula-lo tamaño dos tecidos dos animais.

A neocortiza²¹ cerebral está dividida en tódolos mamíferos en moitas unidades funcionais, cada unha cunha aparencia diferente, cun patrón de conexións único e con neuronas con preferencias comúns a estímulos (figura 2). A complexidade da conducta²² é paralela ó incremento no tamaño da neocortiza, ó número das súas subdivisións funcionais e á complexidade da súa organización interna. As similitudes e diferencias na organización da cortiza cerebral entre especies son moi claras, o problema é determinar cómo ocorreron eses cambios en tamaño e número e cómo relacionalos con cambios na conducta. Intentáronse varias formas de acometer este problema e revelouose que existe un plan básico común para a cortiza cerebral en tódolos mamíferos, o que permitiu propoñer algunhas das maneiras en que este plan puido modificarse. Como os tipos de cambios son comúns a tódalas especies e restrinxidos, considérase que detrás hai un mecanismo común. O tamaño da neocortiza cerebral e o número de áreas corticais puido incrementarse mediante a adición de novas aferencias²³ sensoriais desde a expansión da periferia, canda unha expansión do rudimento embrionario da neocortiza, a placa cortical, durante o desenvolvemento. Unha proposta é que os cambios teñen lugar a través de variacións no desenvolvemento do sistema nervioso e que a identidade das áreas corticais resulta dos patróns de

actividade das súas aferencias durante o desenvolvemento.

As áreas sensoriais da cortiza cerebral poden diferenciarse porque cada unha contén unha representación completa dun sistema sensorial periférico, por exemplo, da retina, da pel, da cóclea, etc. (figura 2). As neuronas en cada área teñen respostas específicas ou preferencias a estímulos. Debido a isto é posible determinar estes sistemas en diferentes especies de mamíferos, o que revelou que a organización da neocortiza ten características comúns en tódalas especies, como a presenza de distintas áreas funcionais, incluíndo campos independentes para representa-la visión, a audición, etc. Este feito indica que tódolos mamíferos, independentemente da súa orixe filoxenética, teñen o mesmo patrón de organización. Cambia, sen embargo, o tamaño e a localización deses campos. En xeral, o tamaño das áreas da cortiza parece relacionado co uso que cada especie fai do órgano periférico. Por exemplo, o gato ten almofadas especializadas nas súas patas dianteiras —probablemente para identificar e captura-las súas presas— e como consecuencia ten unha representación das almofadas moi grande na cortiza somatosensorial; é dicir, o número de neuronas dedicadas ás almofadas é moito maior có número das dedicadas a representa-lo rabo, que usa menos. Da mesma maneira, o incremento no tamaño da súa área

21 Cortiza cerebral de aparición filoxenética máis recente.

22 A resposta observable dunha situación e os procesos inconscientes subxacentes.

23 Sinais nerviosos que chegan a unha zona determinada do sistema nervioso.

auditiva pode tamén indicar un aumento na especialización funcional.

A organización da cortiza parece outrosí reflecti-la conducta social. Por exemplo, os marsupiais con conducta social máis elaborada (por exemplo, a vida en comunidades, a defensa común ante predadores) posúen zonas corticais moito máis desenvolvidas ca outros marsupiais que non teñen esa conducta social. En xeral, a diversidade da organización cortical vai parella á especialización relacionada coa función. Tódolos mamíferos teñen unha constelación común de campos corticais e as súas modificacións son limitadas. Aínda que o tamaño e a organización interna cambien, os campos corticais nunca desaparecen completa-

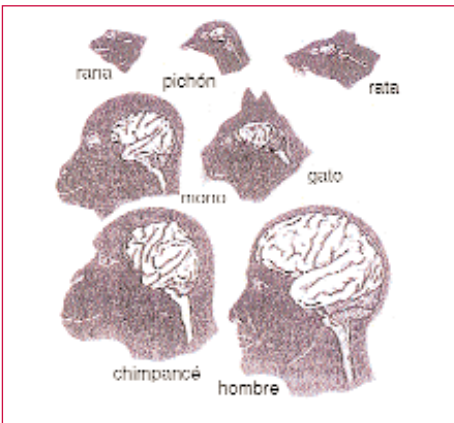


Figura 3. Cerebros de varias especies de vertebrados, desde a rana e ata o home²⁴, pasando polo mono.

mente. Mesmo se algunha función está pouco desenvolvida, como a visión nas toupas, hai un campo visual mínimo desenvolvido na súa cortiza cerebral.

Outra tendencia no desenvolvemento filoxenético é o incremento na cantidade de cortiza cerebral que aparece entre as áreas sensoriais primarias²⁵ (figura 3). Os primates teñen moita máis cortiza entre as áreas primarias visuais, somatosensoriais e auditivas có resto dos mamíferos. Por exemplo, os marsupiais teñen dúas ou tres áreas visuais, mentres que o mono macaco ten máis de vinte. O punto importante é o incremento na superficie cortical e no número de campos que aparecen entre os campos sensoriais primarios.

Nalgunhas especies engadíronse novos campos corticais cun cambio concomitante no patrón ou no peso das conexións entre áreas que altera a relación entre os campos existentes. Como resultado, estruturas que se mantiveran desde antepasados comúns poden desempeñar novas funcións, é dicir, son homólogas. Por exemplo, os receptores representados na área somatosensorial primaria cambiaron durante a evolución; no *platypus*²⁶ están representados receptores mecano-sensoriais e electro-sensoriais, mentres que nos primates se intercala a representación de

24 Baseado en M. R. Rosenzweig e A. L. Leiman (1982), *Physiological Psychology*, D. C. Heath & Co.

25 Aquelas zonas da cortiza cerebral que primeiro reciben os sinais dunha modalidade sensorial dada (somestesia, visual, auditiva, olfatoria, gustativa).

26 Un pequeno mamífero ovíparo acuático da orde dos monotremas.

receptores mecano-sensoriais de adaptación lenta e rápida.

En resumo, especies moi separadas —pertencentes ás tres ramas principais da árbore evolutiva dos mamíferos— amosan algunhas similitudes nas divisións básicas da neocortiza. Todas teñen subdivisións corticais independentes que responden preferentemente a unha ou máis das modalidades sensoriais. Cada campo ten unha organización topográfica e unha aparencia microscópica xeral similar, o que indica que os campos son homólogos ou herdados dun antepasado común en vez orixinárense independentemente en cada especie. Este plan básico é tan robusto que está presente en animais moi especializados e ata nos primates.

¿Que mecanismos produciron eses cambios durante a evolución? Semella probable que estivesen implicados diferentes procesos no cambio de tamaño e complexidade dunha área, no número de áreas e nas súas localizacións. As mutacións xenéticas que alteran o número de divisións celulares durante o desenvolvemento son unha posible causa do incremento do tamaño dunha área ou da súa complexidade. Os cambios na periferia sensorial como resultado de mutacións que alteran o número e o tipo de receptores nun órgano sensorial poden influír no tamaño dun campo cortical ó modificar as condicións de desenvolvemento, así como contribuír á organización do campo no individuo adulto a través de mecanismos dependentes do uso.

Nun sentido amplo, acontecementos ambientais, como a aparición da cultura ou a aprendizaxe social, poden influír no desenvolvemento cortical e axudar ós cambios dinámicos no cerebro adulto. Por exemplo, a evolución da linguaxe no home debeu de producir cambios dependentes do uso na organización da cortiza cerebral. A área de Broca (figura 2) —área primaria para a produción da linguaxe— pode considerarse como a expansión dependente do uso da representación das estruturas orais na cortiza motora. Modificacións estruturais e funcionais na periferia axudan a poñer en marcha a especialización funcional cortical.

A aparición de novas áreas corticais entre as áreas primarias puido xerarse como resultado de cambios nas aferencias, que crearían combinacións de aferencias novas. Se a actividade dos novos sinais aferentes se correlaciona co dos sinais aferentes xa existentes procedentes da mesma parte do corpo, pódense formar novos módulos. A agregación deses novos módulos funcionalmente similares, cunha redistribución a unha nova localización, puidera dar lugar a unha nova área. Eses cambios poden ocorrer con bastante rapidez na evolución. Por exemplo, a cortiza somatosensorial do raposo voador (un megaquiróptero, probablemente ramificación precoz da liña dos primates e, polo tanto, unha etapa primitiva na evolución da cortiza cerebral dos primates) ten tres áreas; nunha delas represéntase o tacto profundo e o superficial. Os primates

teñen catro áreas, e o tacto superficial e o profundo están representados en áreas independentes.

Existe entón a evidencia de que as grandes diferencias na organización da corteza cerebral nos mamíferos actuais pode explicarse por cambios na morfoloxía do corpo, incluíndo a adición ou modificación dos receptores sensoriais, de influencias ambientais e de cambios no tamaño da lámina cortical no desenvolvemento. Como a conducta supe-

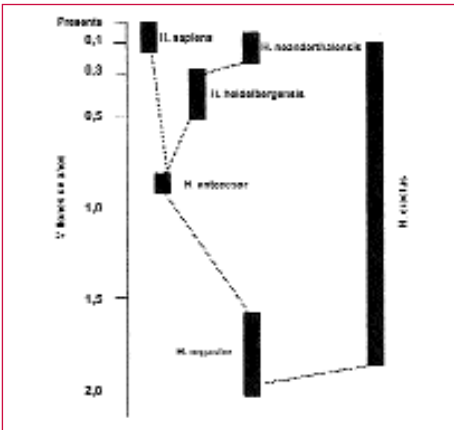


Figura 4. *Homo* ó longo dos dous millóns de anos pasados, comezando nunha división entre o *H. erectus*, que migrou a Asia, e o *H. ergaster* que despois migrou en varias ondas a Europa pero que tamén retivo unha poboación en África. O *H. ergaster* puido chegar a se-lo *H. antecessor*, que parece que deu orixe a dúas liñaxes: unha, os predecesores dos Neandertal, migraron a Europa mentres que os outros ficaron en África e chegaron a se-los *H. sapiens*, que emigraron a Europa e a Asia hai uns 70.000 anos (baseado en M. C. Corballis, 1998²⁷).

rior, as actividades cognitivas e a linguaxe están claramente ligadas á corteza cerebral, deberon orixinarse a través dun proceso similar. Esta perspectiva conduce a un novo grupo de regras para estudialas funcións cognitivas, porque o incremento da capacidade cognitiva, a linguaxe e as habilidades sociais asociadas co home están suxeitas a cambios na morfoloxía externa, ó ambiente e á rede interna de procesamento sensorial. As funcións superiores non poden separarse deses factores. A evolución da mente é a evolución do cerebro, que depende de efectos xenéticos e epixenéticos sobre o desenvolvemento do sistema nervioso.

Podemos afirmar que a arquitectura da mente ten as súas bases na arquitectura do cerebro. O tamaño e a complexidade da corteza cerebral é unha das características distintivas dos primates, especialmente do home. Para comprender cómo evolucionou a mente humana debemos coñecer as presións, influencias e mecanismos que moldearon a evolución desta corteza cerebral.

Existe un plan básico para a organización da corteza cerebral en tódolos mamíferos. Estes patróns de organización cortical puideron orixinarse a partir dunha combinación de requisitos ambientais e de cambios nos programas de desenvolvemento. O desenvolvemento é a etapa sensible na que pode actuar a selección. ¿Como operan esas

²⁷ "Evolution of the human mind", en *Advances in Psychological Science*, vol. 2: *Biological and Cognitive Aspects*, M. Sabourin, F. Craik e M. Robert (eds.), páxs. 31-62, Hove, Inglaterra, Psychology Press/Erlbaum.

influencias no ámbito xenético e celular?

A cortiza cerebral dos mamíferos actuais está formada por seis láminas e teñen unha organización modular. Aínda que os tipos neuronais difiren significativamente no detalle, todos utilizan os mesmos grupos de neurotransmisores e receptores. Os diferentes mamíferos elaboran cortizas grandes ó aumenta-las áreas corticais sensoriais primarias e as áreas motoras²⁸ (figura 2) e ó elaborar novas áreas corticais. Un dos acontecementos máis rechamantes da bioloxía evolutiva é o incremento do cerebro homínido (de 400 a uns 1300 gramos) que está asociado a un incremento nas habilidades manuais, á adquisición dunha cultura de útiles de pedra, de vida familiar e, quizais máis tarde, dunha linguaxe e culturas actuais. O aumento de tamaño do cerebro foi acompañado da expansión da cortiza dos lóbulos parietal e temporal, da aparición das áreas corticais da linguaxe e dun incremento na asimetría entre os hemisferios cerebrais. O cerebro do *homo sapiens* non semella ter cambiado un chisco o seu tamaño, forma ou morfoloxía externa des que a especie apareceu hai cen mil anos. Parece difícil de crer, sen embargo, que a transición do home das cavernas ata o actual tivese lugar sen cambios importantes nas características de operación do cerebro (figura 4). Tales cambios evolutivos puideron ocorrer dentro dos parámetros da estrutura cerebral, polo que as modificacións no

procesamento dinámico do cerebro poden non se revelar en cambios do tamaño ou morfoloxía externa.

A preadaptación foi unha das contribucións máis significativas á evolución. A preadaptación é o concepto de que unha estrutura, función ou habilidade pode chegar a modificarse para executar unha función nova, e a miúdo non relacionada. Estudos comparativos da cortiza cerebral están revelando cómo o mapa básico da periferia sensorial chegou a modificarse para propósitos especiais en mamíferos tan apartados como os monotremas e os monos.

Unha forma de preadaptación é que unha estrutura engada novas funcións a outra existente. A boca, que se especializou para respirar e comer, é un exemplo interesante xa que proporcionou unha preadaptación na evolución do home que permitiu o desenvolvemento da fala. Aínda que a lingua e os dentes evolucionaron para manipular a comida, fixéronse esenciais para a articulación lingüística. O achado de neuronas na cortiza do lóbulo prefrontal (área F5) que se activan cando un mono observa outro que realiza xestos ou manipulacións é de grande interese. Estas neuronas, chamadas especulares, xa que reflicten o que outro mono fai, poden se-la evidencia dun sistema que permita a representación directa entre a produción e a percepción de xestos intencionais. A área F5 nos monos é a equivalente á de Broca no home, a área

28 Aquelas zonas da cortiza cerebral de onde saen os axóns que levan as ordes para o movemento.

cortical máis importante involucrada na produción da linguaxe. Como o antepasado común dos monos e do home viviu hai uns trinta millóns de anos, as preadaptacións neurofisiolóxicas para, polo menos, algúns aspectos da linguaxe puideron ter lugar moito antes do que se pensaba.

Aínda que o bipedalismo e a liberación das mans puideron lanza-la comunicación xestual, o primeiro homínido aínda tiña o cerebro dos grandes monos. O enorme incremento do tamaño do cerebro que distingue o home moderno dos grandes monos empezou hai máis de dous millóns de anos (figura 4) coa emerxencia do xénero *homo*, asociada coa primeira evidencia da fabricación de utensilios de pedra. Os cambios no tracto vocal necesarios para produci-la linguaxe parece que ocorreron relativamente tarde na evolución do homínido e aínda do Neandertal, que viviron hai só trinta mil anos, e probablemente eran anatomicamente incapaces de producir unha linguaxe articulada. Algúns investigadores pensan que a linguaxe non apareceu ata que xurdiu o *Homo sapiens*, pero parece bioloxicamente máis plausible que un sistema tan complexo como a linguaxe se desenvolvese gradualmente a través da evolución do homínido.

O paso de usa-la man para xesticular a emprega-la boca traería varias vantaxes: requiríase menos enerxía; a comunicación podía continuar na escuridade e entre grandes distancias; as mans estaban libres. Estes feitos facili-

tarían a ensinanza ó mesmo tempo que se facían demostracións e probablemente se aceleraría a manufactura e a tecnoloxía. O reduci-la linguaxe a un fluxo temporal forza os símbolos a ser menos icónicos e, polo tanto, máis simbólicos, o que aumentaría a capacidade de almacenamento e a habilidade para asociar e abstraer.

Pero eses cambios non se fixeron sen custo, xa que unha forma puramente temporal de comunicación impón unha gran carga na temporización precisa e no patrón temporal. Isto puido proporcionar unha gran presión na asimetría cerebral para a linguaxe, xa que o control preciso da secuencia temporal sería máis doada de executar dentro dun único hemisferio cerebral, sen a necesidade de utilizar conexións entre os dous, que son relativamente lentas. Unha consecuencia do cambio á linguaxe vocal puido ser unha asimetría programada xeneticamente, quizais imposta sobre asimetrías débiles preexistentes, que se reflicten, no home moderno, na forte tendencia da poboación ós destros e na dominancia do hemisferio esquerdo para a linguaxe.

As preadaptacións non teñen que ser por forza só estruturais; moitas actitudes do home, incluíndo a emoción de desgusto ou as manifestacións —mediadas polo sistema nervioso autónomo— do amor, como o avermellarse, poden te-la súa orixe en ancestrais mecanismos protectores ou estratéxicos do homínido.

Outro concepto importante é o de modularidade, a idea de que o cerebro e a mente están formados por moitas unidades, cada unha ó servizo dunha función particular e utilizando mecanismos adaptados a ela, en vez de ser unha máquina de propósito xeral. A organización modular reflíctese no desenvolvemento de habilidades conceptuais nos nenos, e os experimentos que revelaron esas habilidades son un exemplo de 'enxeñaría ó revés', despezar un sistema para ver cómo funciona. O mesmo enfoque, guiado polos principios evolutivos, estase a utilizar para analiza-las funcións da mente tales como a linguaxe, as emocións ou a aparente conducta irracional (por exemplo, comer feces). O enfoque oposto—utilizado por investigadores da vida artificial e por algúns deseñadores de robots—é empregar principios evolutivos para construír un organismo activo desde cero. O máis importante é a demostración de que ve-lo cerebro e a mente a través da lente da selección natural se está revelando un rico filón de ideas. Ó final estas poderían axudar a integra-los enfoques dispares da Neurociencia contemporánea e da Psicología cognitiva.

PERCEPCIÓN²⁹

¿Cal é a relación entre o mundo físico que nos rodea e a nosa experien-

cia perceptiva sensorial? O obxectivo experimental é descubri-los mecanismos cerebrais implicados nas transformacións neuronais que ocorren nas sucesivas etapas do procesamento. As características primitivas dun estímulo (luz, calor, son, forza, substancias químicas) que nos afecta transdúcese³⁰ selectivamente nos terminais periféricos das fibras nerviosas sensoriais (receptores). A nosa experiencia perceptiva está mediada, unha vez que o estímulo desapareceu e cun pequeno atraso temporal, por imaxes abstractas determinadas polas propiedades de transducción dos receptores e polas propiedades de procesamento das redes neuronais cerebrais implicadas. Como estas redes neuronais son propias de cada individuo, a nosa experiencia perceptiva é única. A activación dos receptores xera impulsos nerviosos (potenciais de acción) que se proxectan e reenvían a través das vías sensoriais do sistema nervioso; estes sinais son susceptibles de transformación a cada nivel sináptico, impostos pola microestructura das poboacións neuronais e pola influencia reguladora dos sistemas neurais do sistema nervioso central. Os sistemas sensoriais principais (visión, somestesia, etc.) proxectan as súas conexións ás áreas sensoriais primarias da corteza cerebral coma nun mapa topográfico (figura 2); son as chamadas *representacións*, que nos proporcionan a idea dun reflexo neural no

²⁹ O proceso mediante o cal se recoñecen e interpretan a natureza e o significado dos estímulos sensoriais.

³⁰ Transformación dun tipo de enerxía noutro. Por exemplo, a enerxía electroquímica nos fotorreceptores da retina é a transducción da enerxía luminosa.

cerebro dalgún aspecto particular do mundo sensorial. Algúns sinais van máis ou menos directamente a unha saída motora e realizan as transformacións de coordenadas espaciais unindo as dimensións sensoriais e motoras. Supoñemos que as representacións de entrada se combinan con recordos almacenados de experiencias pasadas, conducindo nun caso a percepción e noutro a patróns de actividade neural que ó se activar producen movementos; en moitos casos están inextricablemente unidos. As representacións neurais no cerebro varían ó longo dun *continuum* desde as isomórficas ó estímulo físico ou patróns de movemento a eses que son máis abstractos.

O método máis productivo utilizado en estudos dos mecanismos cerebrais en percepción é a combinación de medidas psicofísicas³¹ da execución de primates humanos e non humanos mentres realizan tarefas perceptivas, con rexistros simultáneos de sinais da actividade cerebral evocadas polos estímulos das tarefas e as respostas dos suxeitos. A finalidade é identificar as relacións causais entre a conducta e os acontecementos cerebrais e determinar cales deses acontecementos poden mostrarse necesarios e suficientes para a conducta.

Os sinais dos atributos dos diferentes estímulos (por exemplo, de ima-

xes visuais, tacto) proxéctanse a través dos sistemas aferentes a distintas áreas corticais, conectadas entre si, que están especializadas en formas de procesamento dun ou máis atributos, máis que en localización funcional. Non se atopou zona final ningunha de orde superior á que esas zonas proxectasen e na que se integrase unha imaxe neuronal de percepción (figura 6). Unha hipótese é que tales imaxes neuronais están embebidas na actividade dinámica dos mesmos sistemas distribuídos³². En efecto, ó non estar localizada toda a información que necesita o cerebro para realizar unha tarefa determinada, a conclusión inevitable é que os procesos sensoriais, cognitivos e motores resultan de interaccións paralelas entre grandes poboacións de neuronas distribuídas entre múltiples estruturas da corteza cerebral e subcorticais. De aquí derivou a necesidade da 'unión', é dicir, do proceso responsable da unión funcional desta actividade distribuída. Esta hipótese deu lugar ó 'problema da unión': ¿como se unen e recoñecen as actividades neuronais dentro e entre os nodos dun sistema distribuído como un estado de representación coherente da percepción? A solución proposta é que a unión se permite gracias a unha sincronización transitoria da actividade neuronal nas diferentes rexións do sistema. A hipótese da unión está limitada xa que non ofrece solución ó

31 A Psicofísica é a ciencia que correlaciona as características físicas dun estímulo (por exemplo, a súa intensidade) coa resposta a ese estímulo, para explicar os factores psicolóxicos implicados na relación.

32 Un sistema formado por calquera combinación de grupos neuronais interconectados, coa finalidade de transmitir, recibir e procesar información.

eterno problema: ¿que ocorre a continuación? É dicir, ¿que mecanismos neuronais poden imaxinarse que recoñezan a presenza ou ausencia de sincronización a unha frecuencia particular, e identifiquen o patrón como o evocado por un evento externo particular?

¿CALES SON AS FUNCIÓNS BÁSICAS DA CORTIZA CEREBRAL?

A contestación directa é que non o sabemos. Sobre a base do dito ata agora puidera supoñerse que coñecemos moito sobre a función da cortiza cerebral, pero non é así. O coñecemento dispoñible é fenomenolóxico³³, con poucas explicacións dos mecanismos. Sabemos moito da 'xeografía' do cerebro e das súas conexións. Foron respostas ás preguntas de 'onde', formuladas no século XX. Tales respostas revelan pouco sobre as características operativas do cerebro. O que necesitamos para unha comprensión da función cerebral é coñece-los mecanismos da actividade dinámica de grandes poboacións de neuronas nos sistemas cerebrais.

Dous dos principais problemas da Neurociencia que non se deron resolvido son, o primeiro a natureza das operacións dinámicas nos microcircuitos locais e nos sistemas distribuídos da cortiza cerebral. Atribuíronse moitas funcións da cortiza cerebral no ámbito fenomenolóxico, tales como a

detección do limiar dos estímulos, amplificación, converxencia de características dos estímulos, sincronización, etc. Ningún deles, sen embargo, se comprende completamente no ámbito da operación dos circuitos locais. O segundo problema sitúase a maior escala: ¿cales son as operacións neuronais dentro dos sistemas distribuídos da cortiza cerebral? Aquí o fenómeno de converxencia de características dos estímulos alcanza a súa expresión máxima nos sistemas distribuídos dos lóbulos parietal, temporal e frontal. Nas neuronas do lóbulo parietal intégranse combinacións de características sensoriais e motoras integradas con mecanismos neuronais asociados a estados de motivación. Aínda que coñecemos-las propiedades funcionais dos sistemas distribuídos do lóbulo parietal, descoñecemos-las operacións corticais que as producen.

Esas dúas preguntas tratan con accións en poboacións neuronais que varían en número desde uns centos de neuronas nunha columna cortical a millóns nos sistemas distribuídos. Pero teñen unha calidade en común: as propiedades dinámicas das accións das poboacións neuronais non poden deducirse da acción de neuronas individuais dentro delas. As propiedades das poboacións non son a simple suma das partes, emerxen da actividade dinámica como un todo. As propiedades emerxentes cerebro-mente non son

33 A rama dunha ciencia que clasifica e describe os seus fenómenos sen intentar explicalos.

iguais, da mesma maneira que pulmóns e respiración non son idénticos.

NEUROCIENCIA COGNITIVA

Este novo campo formouse pola unión de certos aspectos da ciencia cognitiva³⁴ coa Neurobioloxía do cerebro humano, coa finalidade de descubrir cómo funcionan os cerebros humanos durante a reflexión. Quizais é a máis humana das ciencias xa que está implicada na natureza do coñecemento e en cómo o adquirimos e usamos. O

tema central das ciencias cognitivas, formulado en termos actuais, é o do concepto das representacións mentais.

Os deseños experimentais dos psicólogos cognitivos e neurocientíficos proceden de deseños da arquitectura cognitiva da percepción, a memoria, a linguaxe, a atención e actividades similares embutidas en tarefas que os suxeitos poidan realizar. Recentemente coincidiu a aparición neste campo dos métodos para ve-lo cerebro do home durante o funcionamento. Son os métodos de imaxe cerebral, como o PET³⁵ e a IRMf³⁶. A actividade xerada no cerebro

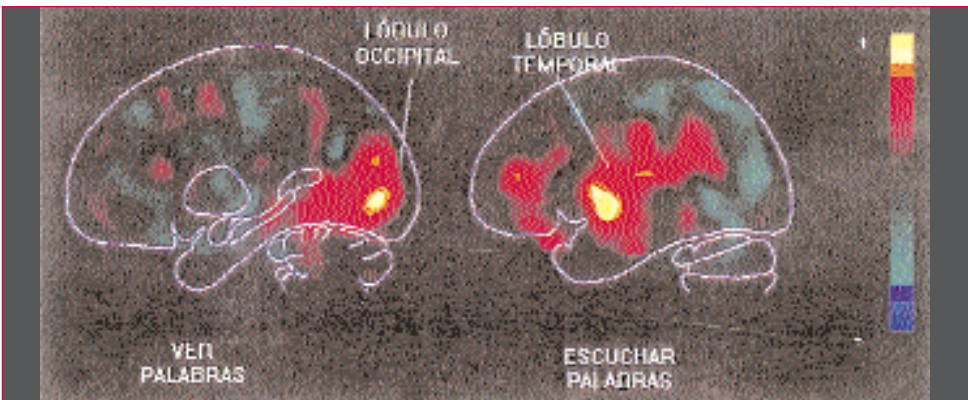


Figura 5. Imaxe de zonas de activación no cerebro do home obtida coa técnica da PET. Cando o suxeito ve palabras prodúcese unha forte activación na rexión occipital, correspondente á área visual. Cando escoita palabras prodúcese unha intensa activación na zona do lóbulo temporal, correspondente á rexión auditiva.

34 Relacionada co proceso de coñecemento, comprensión e aprendizaxe de algo.

35 PET: Positron Emission Tomography (tomografía mediante a emisión de positróns). Require a inhalación ou inxección de moléculas trazadoras marcadas radioactivamente. Proporcionou información da anatomía funcional do cerebro e cómo cambia en diferentes estados de conducta, particularmente cando o home executa tarefas cognitivas.

36 Imaxe por resonancia magnética funcional. A resonancia magnética nuclear (RMN) é un método non invasivo que permite estudos químicos específicos do tecido cerebral vivo. A imaxe mediante resonancia magnética (MRI: magnetic resonance imaging) é un método para visualizar tecidos vivos baseados en sinais de RMN de prótons na auga dos tecidos. O sinal local da auga aumenta co aumento da actividade neuronal. O método proporciona imaxes tridimensionais da anatomía cerebral.

durante a execución das tarefas pode detectarse e localizarse; prodúcense así mapas de actividade cerebral durante os procesos perceptivos, motores e cognitivos (figura 5).

Con esta metodoloxía confirmouse a localización das áreas sensoriais e

motoras da corteza cerebral do home. Pero eses estudos revelaron que o tamaño desas áreas varía entre individuos e entre hemisferios do mesmo cerebro, e que poden cambiar de tamaño debido a experiencias intensas de tipo sensorial ou motor. Ademais, púxose de manifesto que esas áreas

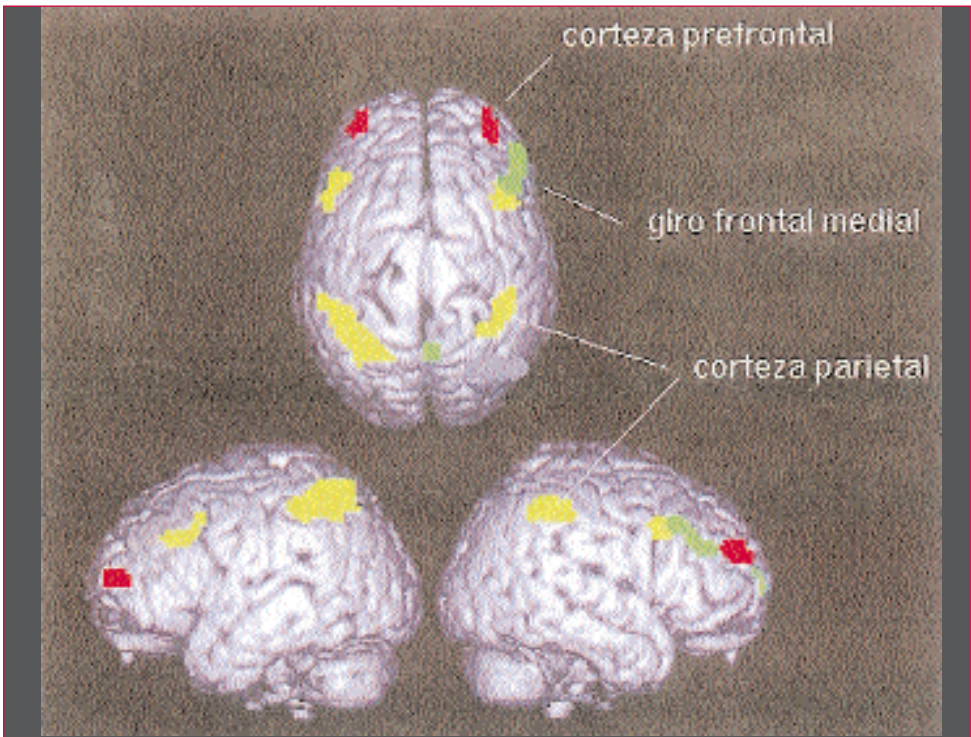


Figura 6. Imaxe obtida mediante RMNf do cerebro humano cando o suxeito realiza unha tarefa na que ten que recordar un obxectivo xeral final mentres executa outras tarefas con obxectivos distintos. Equivalente a cando se nos interrompe cunha pregunta mentres lemos un libro e temos que recordar e volver ó punto onde deixámo-la lectura. As cores amarela, verde e vermella sinalan as áreas da corteza cerebral activadas durante a execución da tarefa. Non hai unha activación de toda a corteza do cerebro, senón que se producen activacións en zonas discretas, distribuídas na corteza cerebral.³⁷

37 Segundo E. Koehlin, *et al.*, *Nature* 399, 148, 1999, 151.

poden estar activas cando un suxeito imaxina experiencias perceptivas ou motoras, pero sen movemento.

De xeito similar tamén se definiu a localización de rexións activas durante operacións perceptivas superiores. Demostrouse que moitas funcións cognitivas que se cría que se localizaban nunha área única da cortiza cerebral implican en realidade moitas áreas, frecuentemente moi separadas, nunha disposición distribuída, non xerárquica (figura 6).

Ata a máis simple das operacións cognitivas, incluíndo a linguaxe, a aprendizaxe, o recordo e a atención, están asociadas con grupos máis ou menos diferentes de rexións activas distribuídas por toda a cortiza cerebral. Eses nodos de actividade cambian en intensidade e posición no tempo conforme progresa a execución da tarefa cognitiva. É importante notar que as áreas da cortiza cerebral entre os lugares activos non amosan signos de activación relacionada coa tarefa. Este é un feito importante, xa que non hai evidencia dunha actividade masiva na cortiza cerebral. Finalmente, confirmáronse as funcións da cortiza cerebral do lóbulo frontal na memoria do traballo³⁸, en planificación e en accións voluntarias, e mesmo se observaron defectos na activación do lóbulo frontal nalgúns estados psicóticos³⁹ (figura 7).

Estes resultados apoian os conceptos de segregación funcional de certos procesos en rexións localizadas da cortiza cerebral e a súa integración funcional na acción dun sistema distribuído formado por moitas rexións locais activas durante a realización de tarefas perceptivas ou cognitivas (figura 6). Pero estes resultados non son máis que respostas elegantes a preguntas 'xeográficas'; só nos informan de 'ónde' ocorren os acontecementos, pero non revelan as operacións neuronais que xeran eses sinais. Esta será a seguinte importante e difícil etapa: descubrir cómo se relacionan eses sinais coa actividade das neuronas que as xeran. Este é un problema crucial que moitos científicos están abordando mediante experimentos con primates non humanos mentres traballan en tarefas perceptivas ou cognitivas. O paradigma experimental inclúe o rexistro simultáneo da actividade cerebral.

A EXPLICACIÓN NEUROBIOLÓXICA DO EU

Unha das preguntas máis problemáticas en filosofía das ciencias biolóxicas é cómo algo chamado 'sentimento' entra nos acontecementos físicos que comprenden un organismo. O problema da consciencia pode describirse en termos de cómo o cerebro xera un sentido de si mesmo (o eu) que é o

38 A memoria é unha función mental complexa que ten catro fases distintas: (1) memorización ou aprendizaxe, (2) retención, (3) recordo e (4) recoñecemento. Clinicamente subdivídese en inmediata, recente e remota. A memoria de traballo é a memoria inmediata, que utilizamos para retermos recordos durante tempos curtos.

39 Trastornos nos que hai unha perda dos límites do ego ou unha grande alteración da realidade con delirios ou alucinacións

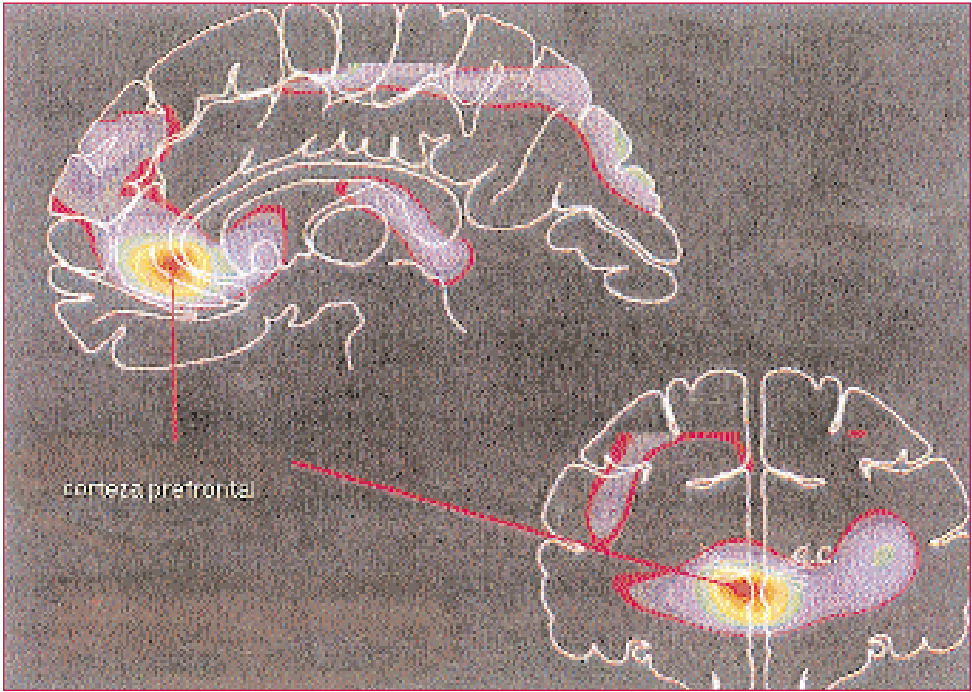


Figura 7. Imaxe obtida mediante a PET nun enfermo psicótico. Hai unha diminución significativa da actividade metabólica na rexión sinalada na corteza prefrontal (á esquerda da imaxe)⁴⁰.

verdadeiro suxeito da experiencia. Moitas das enfermidades que producen os maiores sufrimentos nos seres humanos, como a esquizofrenia⁴¹, son trastornos primarios do eu.

¿Como está organizado o cerebro para facer posible a actividade mental? Esta pregunta, e as súas respostas, é central para comprende-la orixe emerxente da mente. A conciencia dun

mesmo é, quizais, o aspecto evolutivo máis importante: ser consciente de que se é consciente. ¿Cal é a explicación neurobiolóxica do eu? O mantemento dun medio interno estable (homeostase) é imperativo para regula-la vida de calquera organismo. Damasio⁴² suxire que a emerxencia, na evolución, de sistemas neuronais organizados ó servicio desta función proporciona as etapas

40 Baseado en W. C. Drevets *et al.*, *Nature* 386, 1997, 824-827.

41 Un grave trastorno emocional de profundidade psicótica marcado caracteristicamente por un afastamento da realidade con delirios, alucinacións, desharmonía emocional e conducta regresiva.

42 A. Damasio, *The feeling of what happens: Body and emotion in the making of consciousness*, Harcourt Brace, 1999.

iniciais cara á emerxencia do eu. ¿Como xurdiu? ¿Cando xurdiu? A evidencia paleontolóxica apunta a que apareceu moi cedo, nun espacio de centos de miles de anos. Esta evolución tan rápida foi de difícil explicación. A partir de pequenas mutacións nos xenos que regulan a morfoloxía cerebral pódense producir, como levamos visto, grandes cambios na estrutura do cerebro. Estes cambios incorporáranse con gran rapidez ás estruturas cerebrais xa existentes.

A finais da década de 1980, Gerald Edelman propuxo —a partir dun modelo de funcionamento do sistema inmunolóxico, polo que recibiu o premio Nobel de Fisioloxía e Medicina en 1972— que o funcionamento do cerebro podía estar baseado nun sistema de selección, e ofrece unha explicación para esa emerxencia tan rápida no marco da súa Teoría de Selección de Grupo Neuronal. Hai un sistema de selección durante o desenvolvemento do feto e outro determinado pola experiencia durante o resto da vida. Probablemente se ‘programe’ moi pouco durante o desenvolvemento fetal, o que quere dicir que nacemos cun equipo básico moi simple, pero ese deseño permítenos construí-lo noso propio cerebro ó longo da vida. Nesta evolución é crucial o proceso de conectar, correlacionar e xerarquizar-la información. A experiencia —un aspecto importantísimo— non é pasiva, senón que forma parte activa da construción do cerebro.

Naturalmente, o argumento básico está en explicar cómo se incorporan os cambios ós circuítos cerebrais. Para intentar contestar esta pregunta debemos coñecer-la estrutura fundamental do cerebro. É necesario un substrato neuronal, coas súas conexións, é dicir, unha rede neuronal. Ademais, a experiencia utiliza, selecciona ou crea novos circuítos —ou mapas, na terminoloxía de Edelman— nas redes neuronais do cerebro, establecendo conexións adecuadas que permitan soste-la actividade a través de sinais *reentrantes*. Santiago Ramón y Cajal dicíao dunha maneira gráfica: hai que facer ximnasia mental para desenvolve-lo cerebro, da mesma maneira que facemos ximnasia muscular para desenvolve-los músculos do noso corpo.

Para Damasio, o eu ten un precedente pre-consciente biolóxico, o proto-eu, que corresponde a unha colección coherente de patróns neuronais que representan nun mapa, momento a momento, o estado físico do organismo. as principais estruturas do sistema nervioso implicadas inclúen os núcleos do tronco cerebral, hipotálamo, o mesencéfalo e as cortizas insular e somatosensoriais. Este amplo sistema crea unha representación de primeira orde dos estados actuais do corpo. En paralelo créanse mapas sensoriais que representan obxectos, tanto obxectos presentes no mundo coma imaxes mentais. A súa interacción necesariamente altera o estado actual do organismo. Isto conduce á proposición central de que a base para un coñecemento

consciente do eu é un estado de sensación que xorde cando nos organismos se representa un proto-eu non consciente no proceso de ser modificado por obxectos. En esencia, un sentido do eu depende da creación dun mapa de segunda orde, en certas rexións cerebrais, de cómo foi alterado o proto-eu.

Damasio propón distincións conceptuais importantes entre o eu e o eu autobiográfico, entre o núcleo e a consciencia ampla, e entre emoción e sentimento. O núcleo do eu é o protagonista transitorio da consciencia que se xera continuamente a través do encontro con obxectos. En contraste, o eu autobiográfico depende fortemente da formación de recordos duradeiros de experiencias. A identidade persoal é un concomitante obvio do eu autobiográfico.

A consciencia nuclear é unha consecuencia dos mesmos mecanismos que xeran o propio núcleo, co elemento engadido do incremento no procesamento de obxectos que estiveron implicados en xera-lo núcleo. En contraste, a consciencia ampla depende de manter na mente, no tempo, unha multiplicidade de patróns neuronais que describen o eu autobiográfico. Unha implicación importante desta tese é que a consciencia non é o privilexiado dominio dun sistema sensorial, xa que a lesión dunha canle sensorial non ten influencia sobre a consciencia nuclear.

Estamos no albor dunha nova era e nos anos vindeiros participaremos nunha excitante viaxe a través do cerebro e a conducta que nos permitirá comprender as claves do ser humano.



MEDIO AMBIENTE

Felipe Macías Vázquez
Universidade de Santiago
de Compostela

INTRODUCCIÓN: OS PROBLEMAS AMBIENTAIS

O século XX foi o século del medio ambiente. Ó longo destes pasados cen anos, e de forma particularmente acelerada nos últimos trinta, foise incrementado o noso coñecemento dos procesos que se producen de forma natural na biosfera, e a súa variación ó longo do tempo iniciouse, pero aínda queda moito máis por coñecer: a comprensión da heteroxeneidade e a complexidade das interaccións ambientais. Comprobouse que as actuacións humanas teñen agora un poder de perturbación e modificación das condicións locais moi superior ó existente nos restantes períodos históricos que poden chegar, nalgúns casos, a presentar un carácter global de consecuencias non perfectamente coñecidas pola excesiva simplificación que se realiza na modelización dos procesos ambientais.

Tamén se viu que os recursos necesarios para o desenvolvemento das sociedades humanas son cada vez

máis importantes e diversos, chegando, en moitos casos, ó forzamento da capacidade productiva dos sistemas naturais, e mesmo á súa deterioración ou destrución, con consecuencias serias de modificación de hábitats, perda de biodiversidade e creación de áreas contaminadas que, para seren restauradas requiren, ademais de tempo e coñecementos, importantes esforzos económicos non sempre dispoñibles.

Se a isto se engade o continuo incremento da poboación e as demandas (plenamente xustificadas) de xeneralización da calidade de vida dos países avanzados ós menos desenvolvidos —polo menos das súas manifestacións máis positivas (dispoñibilidade de alimentos, sanidade, acceso á cultura e a unha vida digna para tódolos habitantes...)— compréndese a necesidade de introducir mecanismos legais e políticos de actuación que freen a deterioración dos recursos, controlen a degradación ambiental e permitan un desenvolvemento das sociedades

* Catedrático de Edafoloxía.

humanas en harmonía co seu contorno. Así é que o medio natural pasou neste século de ser simplemente un subministrador de recursos (en moitos casos de bens libres) a converterse nun elemento importante nos campos científico, económico, lexislativo, político e incluso a ser parte fundamental de moitas das visións ou concepcións do mundo das nosas sociedades.

Emporiso, isto non quere dicir que antes deste século non tivesen importancia os problemas ambientais. Coma en todo, somos herdeiros do noso pasado, das actuacións transformadoras do medio natural realizadas polas sociedades anteriores das que recibimos aspectos negativos como a deforestación (probablemente iniciada desde as primeiras manifestacións humanas pero fortemente acelerada coa Revolución Neolítica e a chegada das 'culturas do lume mediterráneas' coas súas importantes consecuencias de erosión de solos), a intensa transformación en solos agrícolas da maior parte da superficie europea cunha enorme perda de biodiversidade e unha gran simplificación dos hábitats existentes mailos problemas puntuais (nalgúns casos globais) de contaminación dos sistemas naturais, con liberación de elementos retidos nos materiais xeolóxicos á atmosfera, as augas, os solos e organismos bióticos. Cada etapa de desenvolvemento deixou as súas pegadas, sendo particularmente importante o período romano e, sobre todo, desde a Revolución Industrial ata o século XX, se ben hai que dicir que

para a maior parte dos procesos de mobilización de elementos e substancias perigosas de orixe natural e, sobre todo as de orixe antrópica, os últimos trinta ou corenta anos do século XX supoñen cantidades superiores ás do conxunto de tódolos períodos históricos anteriores. Analizaremos este aspecto da contaminación mediante dous esquemas (figs. 1 e 2).

O primeiro, a evolución da liberación de chumbo (un dos metais pesados máis perigosos) á atmosfera ó longo do tempo, para a que existen un gran número de métodos de estudo baseados na análise do contido de

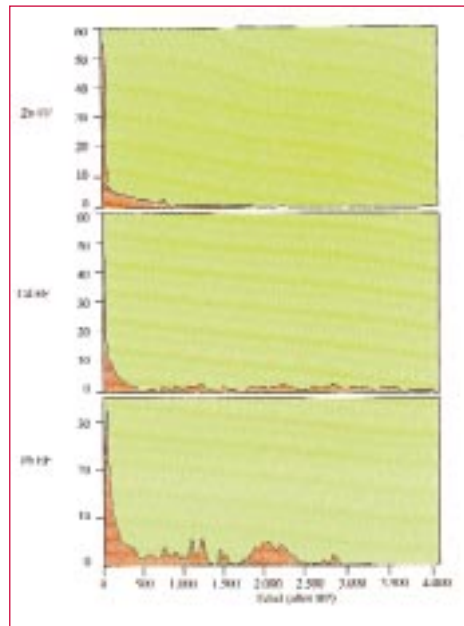


Fig. 1. Variación do contido de Pb, Zn e Cd nos últimos 4000 anos nunha turbeira ombrotrofica da Serra do Xistral. (Martínez Cortizas, *et al.*, 1997).

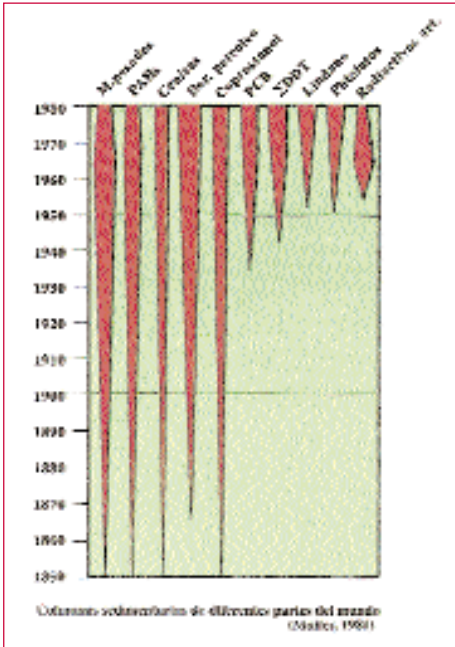


Fig. 2. Presencia de contaminantes en sedimentos de diferentes idades. (Forstner, 1989).

chumbo existente en rexistros de idade coñecida, tales como sedimentos lacustres ou columnas de xeo acumulado nos casquetes polares. No noso caso, dispoñemos dun dos mellores arquivos históricos das condicións paleoambientais, as turbeiras ombrotróficas de Galicia, que foron utilizadas como indicadores das variacións da contaminación metálica atmosférica e como rexistro das variacións de temperatura (Martínez Cortizas, *et al.*, 1997 e 99).

Unha turbeira ombrotrófica é un solo orgánico constituído por restos vexetais, máis ou menos transformados (turberización), de comunidades

bióticas que viven en posicións de cima da paisaxe en ambientes nos que a velocidade de mineralización dos restos vexetais (por mor do frío ou do predominio das condicións de anaerobiose) é inferior á de produción, o que conduce á acumulación dos residuos orgánicos na superficie cun ritmo variable en función das condicións ambientais. A medida que a turbeira aumenta de espesor, as raíces das comunidades vexetais non alcanzan o substrato litolóxico e deben alimentarse fundamentalmente das achegas atmosféricas de chuva e partículas arrastradas polo vento (o que as diferencia das turbeiras mineralotróficas nas que a vexetación se alimenta do substrato litolóxico e das disolucións acuosas que xa tomaron contacto cos solos e material xeolóxico), polo que a composición de cada capa de turba (que se pode datar con C-14) está relacionada coas condicións de equilibrio entre a vexetación da turbeira e as condicións ambientais existentes no período de vida das plantas. Estas formacións atópanse en áreas de montaña do norte de Europa e teñen o seu límite sur nas zonas montañosas do norte de Galicia (fundamentalmente nas serras do Buio e Xistral). Canto maior é o seu espesor, máis longo adoita ser o período histórico recollido; en Galicia dispoñemos das turbeiras ombrotróficas de maior idade de Europa (superiores a 5000 anos), o cal é lóxico se se considera que esta zona foi unha das primeiras áreas europeas con glaciario que foron liberadas dos xeos do último período frío. Pola súa

importancia, estes rexistros deben ser estudiaados e protexidos, por iso están incluídos nas zonas propostas pola Xunta de Galicia para a Rede Natura 2000 derivada da Directiva Hábitat.

Na figura 1 obsérvase a distribución do chumbo nunha turbeira ombrotrofica do Xistral. Ponse de manifesto que o primeiro sinal de contaminación por chumbo (aínda que moi feble) se produce hai uns 4000 anos, polo que dado que este metal foi un dos primeiros en ser utilizados polo home debido á súa doada extracción a partir de sulfuros, o seu baixo punto de fusión e a súa capacidade para se aliar co Sn, permite supor que esta data é o comezo do seu aproveitamento en Galicia. Con pequenas fases de incremento e descenso chégase ó período romano, no que o sinal de contaminación se amplía fortemente en intensidade e duración temporal ata a caída do Imperio, cando de novo hai un importante retroceso do sinal de chumbo atmosférico. Seguen pequenas pulsacións de incremento que coinciden cos reinos visigodos, o esplendor do período musulmán e as guerras dos reinos católicos, ás que segue un novo descenso que coincide co descubrimento de América, quizais pola existencia de períodos de paz en España ou polo traslado das actividades extractivas e de beneficiación do chumbo ó novo continente.

O inicio da Revolución Industrial eleva outra volta o sinal ata niveis similares ós do período romano e o da aparición do automóbil; a utilización

do chumbo nas gasolinas leva as concentracións de chumbo atmosférico retidas a valores moi elevados que só comezan a decrecer coa chegada das gasolinas sen chumbo.

Neste caso viuse que a actividade antrópica, mesmo a das culturas relativamente incipientes, foi quen de modificar fortemente un parámetro de indubidable relevancia como é o contido de chumbo atmosférico. Compróbase a clara relación entre este e a intensidade das actuacións humanas en períodos especiais da historia (guerras, desenvolvemento...) e tamén que hai unha resposta, nese caso rápida, ás medidas de corrección (substitución por gasolinas sen chumbo), se ben aínda non sabémo-las consecuencias que puido ter sobre a herdanza xenética de tódolos seres vivos a exposición ás concentracións de chumbo no aire, na auga e nos alimentos que produciu nestes dous últimos séculos. Efectivamente, a contaminación, en especial a dos medios con escasa capacidade de amortecemento como o aire, a auga e os organismos, é un dos principais problemas ambientais que vai asociado ó avance das culturas humanas con maior ou menor intensidade e variedade de produtos.

Na figura 2, elaborada por Forstner en 1989 a partir do estudio de sedimentos datados e da presenza e abundancia de determinados contaminantes, pode apreciarse que a maioría destes pertencen ó noso século e que conservan unha tendencia crecente ó longo da centuria en moitos casos ou

cun intento de mitigación a partir da década dos sesenta ou setenta noutros. Sen dúbida, estas datas, como logo imos ver, teñen unha gran relevancia na dinámica das actuacións ambientais.

Para unha gran parte dos autores que falan dos problemas ambientais, o acento incide sobre a contaminación polo elevado número de substancias perigosas, moitas delas artificiais, que se liberaron ó ambiente a causa das actividades humanas. É o caso dos organoclorados (DDT, dioxinas, PCB, clorofluocarbonos, lindano...), nitro e fosfoderivados orgánicos (diferentes explosivos, herbicidas, insecticidas), organometálicos (estannosos, mercuriais, arsenicais...), hidrocarburos (carbonos orgánicos volátiles, PAH...), radioactivos procedentes das explosións nucleares ou das centrais nucleares, etc., para os que o 5º Plan Ambiental da Unión Europea consideraba, en 1993, que había máis de dous mil produtos químicos de alta produción dos que debería establecerse unha avaliación da súa actividade no ambiente, mentres que o obxectivo fixado para o ano 2000 era a análise de cincuenta destes produtos e a elaboración de programas de redución de riscos ambientais derivados da súa presenza na biosfera.

A liberación de substancias contaminantes na biosfera é, sen dúbida, unha das nosas principais preocupacións. Para outros autores hai outros problemas tamén importantes: unha das síntesis realizadas asegura que os

principais inimigos da calidade ambiental do noso século poden agruparse en “a serra, a vaca e o automóbil”, expresando que son a deforestación (coa súa perda de biodiversidade, solos, poder de absorción de CO₂ e depuración do aire e da auga, etc.), a transformación de solos forestais e de cultivos en praderías monoespecíficas ou de baixa variabilidade específica adaptados ás necesidades do gando de alta produción cárnica e láctea e os contaminantes liberados nas actividades gandeiras (metano, compostos nitroxenados, fertilizantes fosforados, antibióticos...) xunto coas consecuencias do automóbil (liberación á biosfera de chumbo e outros metais, óxidos de nitróxeno, CO₂, compostos orgánicos volátiles e persistentes... e a necesidade de creación de infraestructuras viarias cada vez máis amplas e numerosas que compartimentan a biosfera e limitan a capacidade de rexeneración de moitas especies) os procesos antrópicos que causan a gran maioría dos nosos problemas.

Sen dúbida, a lista queda curta e podería discutirse a orde de agresividade, pero non é menos certo que a urbanización, a industrialización, a minería, as actividades recreativas... son outras moitas actividades humanas que ocasionan agresións ó medio ambiente. En último termo poderíamos dicir que as agresións ambientais están simplemente producidas polo feito de que unha das especies do planeta, a humana, escapou ós mecanismos reguladores que impuxera a natureza e fíxose

excesivamente numerosa e destructiva, ó ir eliminando paulatinamente tódolos seus competidores polos recursos naturais (desde hai tempo xa só se compite entre humanos) ó tempo que incrementaba exponencialmente as súas necesidades e capacidades de alteración ata facelas de carácter global.

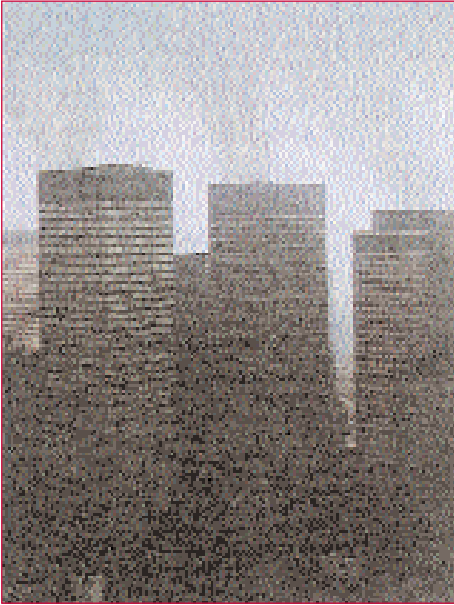
Se somos herdeiros e actores dos problemas ambientais, tamén o somos dos coñecementos xerados polas sociedades anteriores. Como outras moitas, as Ciencias Ambientais son ciencias de terceira, cuarta ou quinta xeración que se basean na aparición previa de conceptos e métodos de estudio desenvolvidos noutros campos do saber ó longo da historia da Humanidade e, particularmente, nos séculos XVII, XVIII e XIX, nos que o avance da Física e a Química primeiro, xunto coa aplicación dos conceptos matemáticos, abriaron o camiño para converter coñecementos meramente descritivos nas súas orixes nas bases das Ciencias Ambientais, a Xeoloxía e a Bioloxía, e, máis tarde, noutras moitas derivadas delas, pero con maior capacidade de comprensión da heteroxeneidade e de integración da globalidade dos sistemas naturais terrestres como a Edafoloxía, a Bioxeografía ou a Ecoloxía, nas que o compoñente xeográfico desenvolvidos polos grandes viaxeiros-científicos do século XIX foi clave. É, polo tanto, este carácter globalizador do medio ambiente, xerado nos séculos anteriores e desenvolvidos no XX, no que “todo inflúe en todo” (primeira lei da Ecoloxía segundo Barry Commo-

mer) ou, levándoo ó extremo, “no que o bate-las as dunha bolboreta na China pode se-la causa dunha tormenta no outro extremo do mundo”, o paradigma das nosas concepcións ambientais actuais.

A GLOBALIZACIÓN: ANTECEDENTES E POSIBLES EXCESOS

A finais do século XX o termo ‘globalización’ pasou a ocupar, xunta outros similares, a expresión de moda para manifesta-la interrelación existente entre todo o que ocorre na parte da Terra na que se realiza a actividade humana. O termo aplícase nas Ciencias Ambientais, pero xa foi adoptado ata polas Ciencias Sociais e Económicas. Sen embargo, non é un concepto novo senón que ten antecedentes bastante antigos e moi ben definidos ó longo do século XVIII nas Ciencias Naturais e, por suposto, moito antes, no pensamento filosófico-relixioso.

Deixando á parte as ideas unitarias filosóficos-relixiosas sobre a natureza e o seu funcionamento, quizais o concepto científico ambiental mellor desenvolvidos fora o de biosfera. Vernadsky foi o gran divulgador deste termo que, parece, xa utilizaba Lamarck a comezos do século XIX, e posteriormente foi retomado por Suess (1875) para quen a biosfera é a “envoltura específica da codia terrestre na que asenta a vida que é quen rexe a súa composición, propiedades e dinámica”. Estas ideas básicas foron



Arriba, polución atmosférica en Nova York.
Abaixo, polución de auga en Chicago.

ampliadas e dotadas de formato científico por Vernadsky ó longo dos seus numerosos escritos e, particularmente, na súa obra *La Biosfera*, publicada en ruso en 1926 e en francés en 1929. Segundo este autor “a Biosfera é a esfera terrestre resultante da interacción da atmosfera (máis ben da troposfera xunto coa capa protectora da ozonosfera), hidrosfera, biosfera e litosfera”. Idea moi parecida á de que “o solo é a interacción da litosfera, hidrosfera, biosfera e atmosfera” ou de que “o solo é o produto da interacción ó longo do tempo dos factores de formación clima, rocha ou material orixinal, topografía e organismos”.

Segundo os inventores do termo e o seu desenvolver principal, a biosfera ten, ademais do seu carácter complexo, o aspecto esencial de que é a propia vida a que leva o papel activo da creación de substancias, da súa dinámica de transformación e, en consecuencia, dos procesos e leis que a rexen. En palabras de Vernadsky, “a biosfera pode definirse como unha rexión da codia terrestre sementada de transformadores que converten as radiacións cósmicas en enerxía terrestre activa, enerxía eléctrica, química, mecánica, térmica, etc. Os compostos que eran estables no campo termodinámico da materia viva, vólvense inestables cando penetran, unha vez que perece o organismo, dentro do campo termodinámico da biosfera onde orixinan unha fonte de enerxía libre”. É dicir, é a vida a que capta a enerxía solar transformándoa en compostos que só son

posibles mentres existe vida, e que son posteriormente transformados noutros termodinamicamente estables no medio ambiente creado (máis ben modificado) pola propia vida, ó tempo que se logra un certo mantemento da enerxía captada mercé ós ciclos metabólicos que utilizan as substancias inicialmente formadas e os seus produtos de degradación ata que se alcanzan as condicións de equilibrio que, novamente, serán rotas pola actividade vital. En palabras de Vernadsky, “a vida perturba permanente e incansablemente a inercia química sobre a superficie terrestre”, o que nos leva á conclusión de que é o continuo cambio de enerxía, alimentos e información o que caracteriza os sistemas naturais, e que a globalidade de funcionamento dos sistemas ambientais é, simplemente, unha consecuencia de que todos están dirixidos pola actividade vital.

Segundo Margalef (1997), tralas achegas de Vernadsky, “la palabra biosfera ha pasado a ser de uso corriente para referirse a la porción de nuestro planeta habitada por seres vivos y manifiestamente organizada por ellos. La composición de las envolturas líquida y gaseosa no se entienden sino a través de la propia actividad vital y la propia litosfera está también sometida a la acción de los seres vivos en su parte externa”. A vida ten o papel clave nos ciclos principais dos elementos químicos na superficie terrestre, en substancias como o O_2 e o CO_2 , ata o punto de modifica-la propia atmosfera terrestre que pasou de ser anosixénica nos dous

mil primeiros millóns de anos da súa existencia a osixénica nos seguintes ata os nosos días. É pois o continuo cambio inducido polas manifestacións vitais na súa interacción coa capa externa da Terra o que, ó cabo, mantén a vida sobre a Terra. Margalef expresábo así en 1980: “los cambios en la biosfera han estimulado la evolución. Las áreas que han estado menos sometidas a alteraciones, son, notoriamente, un archivo de especies que en una buena proporción tienen carácter arcaico o de reliquia” e, repetindo as súas palabras de 1974, “la climax es la utopía de los ecólogos”.

Heteroxeneidade, globalidade, cambio e control e dirección destes pola propia vida é entón o que caracteriza a biosfera e, polo tanto, o medio ambiente a partir das ideas de Vernadsky ampliadas e comentadas por Margalef (1980 e 1997). Os problemas xorden cando os cambios se producen a un ritmo anormalmente rápido producido por unha das especies viventes que, como xa se dixo, quizais escapara ó control natural en moitos aspectos.

Antes de continuar, parece adecuado reflexionar sobre o personaxe de Vernadsky para tratar de comprender-las causas que o levaron ás súas xeniais intuicións. Nado en San Petersburgo en 1863, matricúlase no Departamento de Ciencias Naturais da Universidade de San Petersburgo onde estudia Física, Matemáticas, Química (con Mendeleiev) e Xeografía, Mineraloxía e Cristalografía con V. V. Dokuchaev, o fundador da Edafoloxía

científica, do que chega a ser axudante impregnándose das súas ideas sobre o solo, a súa formación, propiedades, distribución xeográfica e, sobre todo, a visión unificada da natureza (Demolon —1949— considérao o discípulo máis brillante da escola rusa fundada por Dokuchaev). Máis tarde estudia Cristalografía e Mineraloxía en Múnic e Mineraloxía, Termodinámica (con Le Chatelier), Química, Física e Cristalografía (con Pierre Curie) en París. Regresa a Moscova e é nomeado profesor non titular en 1898. Na Universidade de Moscova dá cursos sobre a historia da ciencia e, en particular, sobre a visión científica do mundo, así como de cristalografía e mineraloxía.

A obra do xeoquímico norteamericano Frank W. Clarke, *Los datos de la Geoquímica*, lévao a esta ciencia, que el considera a de maior interese no século XX. En 1909 publica numerosos artigos e, finalmente, engade ós seus coñecementos sobre a materia inerte o seu interese polos ciclos biolóxicos. Coñece a Vavilov (o autor que estableceu os centros de diseminación das plantas cultivadas) e, progresivamente, establece que “os fenómenos xeoquímicos son a base da biosfera”. En 1923 fala xa do seu laboratorio como Laboratorio de Bioxeoquímica. Regresa a París onde ensina os seus saberes e coñece a Theilard de Chardin e Roy cos que crea o novo concepto de ‘noosfera’ ou “esfera da intelixencia que segue a biosfera na ruta evolutiva da materia”. Publica o seu libro *La Geochimie* en 1924 que, segundo Oparin, o inspirou fortemente

para a súa obra *El origen de la Vida*. Pouco despois, en 1926, publica *La Biosfera*, á que seguen libros e artigos sobre a xeoquímica das augas, isótopos e organismos vivos, oceanografía e xeoquímica, problemas da radioxeoloxía, ensaios bioxeoquímicos, a estrutura química da biosfera e o seu contorno... ata a súa morte en 1945.

Non cabe dúbida de que, ademais da súa inquietude, a súa importante formación básica en Química, Mineraloxía, Termodinámica, Edafoloxía, Bioxeografía... capacitouno para chegar ó campo da Bioxeoquímica cunha visión clara da interrelación de tódolos constituíntes da biosfera e unha gran capacidade para interpretar de forma sintética e unificada os procesos químicos nos que intervén a materia inerte e a actividade biolóxica. Cabe preguntarse se isto sería posible coa formación que reciben dos seus profesores e cos traballos tan especializados que realizan os nosos actuais e futuros ambientalistas.

A idea de globalidade de Vernadsky e outros moitos autores que estudiaaron os procesos bioxeoquímicos da Terra foi enormemente ampliada nalgunhas concepcións recentes que alcanzaron un certo recoñecemento público en amplos sectores sociais, pero que, en contraposición, teñen recibido fortes críticas por parte dos xeoquímicos e algúns ecólogos (Margalef, 1997, entre eles). Referímonos á idea de *Gaia*, tal como foi expresada por Lovelock e colaboradores (1982). Segundo este autor, “as respostas do

planeta como unha entidade unificada levan a recoñecer na propia biosfera enteira os trazos esenciais dun organismo ou superorganismo”, ó que denominan Gaia pola deusa ou personificación da Terra. Sen dúbida, desde o punto de vista científico, hai unha clara esaxeración ó considerar que procesos que na maioría dos casos se deben a mecanismos reguladores derivados da composición físico-química da biosfera, ou da interacción de diferentes organismos coa materia inanimada, son consecuencia da actuación dun organismo independente constituído pola totalidade da biosfera. Esta visión da natureza é similar á que se utiliza desde hai pouco nas Ciencias do Solo cando se di que un “solo nace, evoluciona e morre” ou cando se fala da “saúde dun solo”, conceptos que se ben parecen admisibles como figuras ou conceptos didácticos, non resultan correctos, xa que tanto o solo coma a biosfera son medios ou sistemas nos que se produce a vida e que a consecuencia da actividade dos organismos que conteñen adquiren determinadas propiedades, sen que por iso poidan ser considerados como sistemas vivos con funcionamento independente. Son medios de vida pero non organismos vivos.

DESENVOLVEMENTO E/OU MEDIO AMBIENTE

O medio ambiente é o marco onde se desenvolve a vida dos organismos, e os seus problemas derivan das transformacións producidas nese mar-

co por causas naturais ou antrópicas ás que os organismos que viven nel non poden adaptarse.

Sempre se fala das actuacións antrópicas como as grandes causantes da perda de biodiversidade e da calidade do ambiente, pero esquecese que na historia da Terra producíronse momentos de enormes extincións, provocados por cambios bruscos nas condicións ás que só uns poucos organismos foron quen de adaptarse. As grandes extincións do Precámbrico, do Pérmico ou do Mesozoico poñen de manifesto que a ecosfera está en continua mutación desde o principio dos tempos. Mutacións ás veces rápidas e traumáticas ás que non poden adaptarse moitos organismos prodúcense, aínda que son raras, pero predominan os cambios máis lentos nos que a adaptación é máis doada a través dunha serie de ‘desequilibrios sucesivos’ nos que as modificacións se producen pouco e pouco.

Algunhas modificacións naturais, como a que se supón causada polo meteorito que, entre outros, parece que causou a extinción dos grandes vertebrados da Era Secundaria, deberon de ser case instantáneas; outras, aínda que moito máis lentas como o cambio de atmosfera do Precámbrico, deberon de ter importantes consecuencias para o sistema e para os organismos que o habitaban. Sen embargo, a situación á que chegaron o home e a biosfera no século XX é nova, xa que se trata de investigar se o desenvolvemento da especie humana non acabará primeiro

co medio ambiente e, como consecuencia, consigo mesmo.

A actividade humana, ó utilizar productos naturais cunha velocidade e intensidade crecente, adquiriu a capacidade de producir cambios a ritmos que, sen dúbida, forzaron a capacidade de adaptación de moitos organismos e causaron a súa extinción. Moitas especies desaparecen sen que nos decatemos, como consecuencia directa ou indirecta do noso modo de vida. Ó longo da historia da Humanidade, esta capacidade variou espacialmente en función do predominio das diferentes culturas, pero a partir da Revolución Industrial e, sobre todo, da Segunda Guerra Mundial, esta capacidade de produción/alteración multiplicouse e xerou os grandes problemas ambientais do presente.

Por citar algunhas catástrofes con consecuencias graves para o ambiente e o home producidas desde a Segunda Guerra, temos: o *smog* de Donora (Pensilvania) de 1948, ou de Londres en 1952, con miles de mortos, a contaminación por dioxinas de Seveso (Italia) en 1976, a morte lenta por contaminación do lago Baikal en Rusia ou do Eire (EUA), o centenar de mortos por inxestión de peixes contaminados de Minamata (Xapón) en 1969, os accidentes das centrais nucleares de Harrisburg e Chernobil, a contaminación do Rin, a traxedia de Bhopal (India) que supuxo máis de dous mil mortos e decenas de miles de feridos polo escape de gases tóxicos, as mareas negras, as inversións de temperatura,

as chuvias ácidas de Sudbury (Ontario), etc.

Sen embargo, malia estas catástrofes máis ou menos puntuais, a maior parte dos autores están de acordo en que os problemas do ambiente se producen, de forma insidiosa e continua, por mor do incremento de poboación e das necesidades humanas, o que conduce á explotación intensiva dos recursos naturais coa ameaza do seu esgotamento. Quizais o argumento máis forte neste sentido foi o exposto polo Club de Roma que, na súa primeira mensaxe realizada na década dos setenta, "Os límites do crecemento", indicaba a imposibilidade de mante-los ritmos do crecemento económico e da poboación. Segundo eles, os recursos non renovables estaban esgotándose en moitos casos e os renovables estaban sendo explotados por riba da capacidade de renovación, polo que cómpre enlentece-lo crecemento.



Medindo os niveis de radiación exterior en Chernobil.

Estas ideas de crecemento cero e da necesidade de aplicar fortes restricións ó incremento da poboación foron posteriormente moi discutidas e, tras algúns fallos importantes nas predicións, chegouse ó convencemento na década dos noventa de que as ideas do Club de Roma eran excesivamente catastrofistas e malthusianas (Margalef, 1987). A este cambio de filosofía contribuíron feitos como o descubrimento de novos depósitos, a aparición de substitutos dalgúns produtos que se consideraban imprescindibles, o menor crecemento da demanda, o claro enlenteceamento no crecemento da poboación, o grande incremento tecnolóxico e a demostración da capacidade de eliminar moitos dos produtos nocivos dos procesos industriais e de corrixi-los efectos degradativos producidos, etc., todo o cal contribuíu a crear unhas previsións moito máis optimistas cás que se tiñan no período da crise do petróleo.

Do tema de discusión dos setenta, “o límite dos recursos”, pasouse nos noventa a formula-los problemas dos “límites dos recipientes de residuos humanos”, o que indicaba que unha nova etapa productivista se iniciaba. Outros cambios de concepción entre o setenta e o noventa, indicados por diferentes autores, son, entre outros, o paso da preocupación polos impactos relacionados coa produción ó maior interese polos impactos producidos durante o uso dos produtos e, sobre todo, polos residuos; da atención ás fontes puntuais de contaminación e os danos

locais, á maior preocupación polas fontes difusas e os riscos; da preocupación pola escaseza do gas e o carbón á consideración de que hai e se utiliza demasiado. É dicir, pasouse dunha preocupación ambiental polas actuacións puntuais de contaminación industrial a considerar máis as consecuencias globais do noso modo de vida, o que sen dúbida ten que ver coas importantes modificacións que sufriu a actividade industrial, primeiro con solucións de ‘final de entubado’, que reduciron fortemente a emisión de contaminantes atmosféricos e, máis tarde, de ‘modificación dos procesos productivos’, o que permitiu un maior control ambiental na cantidade e natureza dos residuos producidos. Este cambio de situación e algunhas consideracións sociais sobre a necesidade dun certo crecemento reactivaron as ideas *desenvolventistas* na última década, se ben se conserva e amplía a preocupación polos problemas ambientais, sendo o ‘crecemento sostible’ a idea básica desta fin de século tal como o recolle o 5º Plan da Comunidade Europea (ampliado ata o 2002) que leva por título *Hacia un crecimiento sostenible*.

A pesar deste importante cambio de tendencia entre os setenta e os noventa, o certo é que continúa existindo un importante debate sobre as concepcións ambientais e coexisten posturas catastrofistas con postulados fortemente *desenvolventistas*. Non cabe dúbida de que existen problemas ambientais e que cómpre acometelos con rigor científico para atopar medi-

das tecnolóxicas e socioeconómicas que permitan evitalos o mitígalos. Hai produtos que comezan a ser escasos: petróleo, ouro, cobre. Tamén os recursos renovables están sometidos a uns límites de utilización xa que non se pode forza-lo seu uso cando se pon en perigo a sostibilidade da súa capacidade de renovación. Isto por exemplo é o que está ocorrendo coa auga nalgunhas rexións do planeta onde a contaminación supera a capacidade depuradora do ciclo hidrolóxico. Tamén a fauna salvaxe experimentou unha forte redución nos últimos cincuenta anos tanto en cantidade coma en variedade, debido á forte presión da caza e a pesca combinada coa destrución dos seus hábitats. No Programa para o Medio Ambiente das Nacións Unidas 2000-2001, afirmase que “ha desaparecido el 50 % de los humedales y de los bosques, la degradación ha afectado a los 2/3 de las tierras agrícolas en los últimos 50 años y el 60 % de los grandes ríos están fragmentados por presas y canales, ha desaparecido el 30 % de las especies marinas de agua dulce y se ha producido degradación incluso en terrenos antes inalcanzables tales como la tundra, el ártico o las profundidades más remotas”.

Á vista do anterior non é estraño que autores como Goodland (1991) afirmen que chegamos ós límites do crecemento, sinalando, para xustificar a súa afirmación as seguintes probas:

— O enorme incremento da erosión dos solos producido en amplas zonas da Terra.

— As importantes perdas de diversidade biolóxica.

— O excesivo consumo humano de biomasa: o home utiliza aproximadamente o 40 % da produción neta total da fotosíntese (25 % se se considera a fotosíntese, oceánica). Se se duplica a poboación (o que está previsto aproximadamente para o 2016), utilizaríase respectivamente o 80 % ou o 50 % da capacidade da fotosíntese co que a seguinte duplicación sería xa imposible a non ser que se incrementase a eficiencia do proceso fotosintético que, segundo a maioría dos autores, é moi baixa, de arredor do 1 % da enerxía solar ou se descubrisen outras formas de producir biomasa.

— O efecto invernadoiro: pola súa importancia, analizáremolo con máis detalle. O denominado ‘efecto invernadoiro’ ou ‘quentamento climático’ é un tema xa clásico nas discusións ambientais. A partir das medidas de concentración de CO₂ na atmosfera iniciadas por Keeling na cima do Mauna Loa en Hawai, a finais dos cincuenta, quedou en seguida claro que se estaba producindo un incremento do contido deste gas na atmosfera e, dado que as emisións producidas pola queima de combustibles fósiles experimentou un forte aumento desde finais da Segunda Guerra Mundial, atribuíuselle a este proceso o incremento do C atmosférico. Cálculos posteriores deron como resultado que se produciu un aumento da orde do 25 % nos últimos cento trinta anos e, de seguir ese ritmo, a concentración de CO₂ atmosférico (arredor do

0,03 % na década dos sesenta) duplicaría a do período preindustrial (IPCC, 1966). Este feito, xunto co incremento da presenza doutros gases de efecto invernadoiro, como o CH₄, NO_x e os clorofluocarbonos (a contribución ó efecto invernadoiro, segundo o European Environmental Assessment, é: CO₂: 65 %, CH₄: 20 %; CFC: 10 % e H₂O: 5 %) levou a diferentes expertos climáticos a predicir un incremento da temperatura media da Terra que inicialmente se estimou nuns 8 °C para o 2100 e na actualidade considérase que podería oscilar entre 1 e 3,5 °C (IPCC, 1998).

As consecuencias dun quentamento como o previsto polo Panel Internacional do Cambio Climático (IPCC) serían moi graves para a biodiversidade e producirían importantes trastornos socioeconómicos. Fisicamente produciríase un incremento do nivel do mar (sobre 50 cm, IPCC 1998), causado pola fusión total ou parcial dos casquetes polares, co alagamento de grandes superficies de terreo e a práctica desaparición dalgúns países (pequenas illas do Pacífico ou zonas de extensos litorais como Birmania...), un cambio na circulación atmosférica con fortes modificacións das temperaturas e distribución das precipitacións e tormentas, o que leva consigo unha importante modificación dos cultivos e dos recursos económicos (o millo ou o eucalipto poderían cultivarse en Escandinavia e quizais as zonas de turismo estival se situasen ó norte de Escocia). Con todo, os maiores proble-

mas ambientais serían sufridos polas comunidades bióticas que non poden trasladarse seguindo os cambios climáticos, a vexetación, os invertebrados e sobre todo os microorganismos, verían modificado bruscamente o seu hábitat e os que non puideran adaptarse ás novas condicións serían eliminados.

Esta situación obriga a realizar importantes modificacións nas emisións ou ben nos sistemas de retirada do CO₂ e os outros gases de efecto invernadoiro da atmosfera. Deberían reducirse do 30 ó 35 % as emisións de gases de invernadoiros para que os incrementos sexan compatibles coa sostibilidade dos ecosistemas e do 50 ó 70 % para que no ano 2010 se tivese unha concentración de XO₂ similar á de 1990. Estas cifras son bastante superiores ás aprobadas na Conferencia de Kioto (Europa 8 % menos en 2010 ca en 1990), polo que algúns países europeos (Austria, Finlandia, Suecia e Noruega) propuxeron taxas engadidas para as enerxías térmicas obtidas a partir de combustibles fósiles.

Outros investigadores consideran que non está claro o grao de quentamento que se producirá (de feito o descenso das estimacións do propio IPCC dos 8 °C iniciais ós entre 1 e 3,5 actuais indica que a calidade das modelizacións primeiras era bastante mala) e que, polo tanto, hai dúbidas razoables para estima-lo grao de quentamento que se producirá, fundamentalmente porque os modelos de predicción son basicamente modelos físicos que non teñen en conta a capacidade de

amortecemento dos procesos que ten a Terra. Así, non se inclúen nos modelos o incremento da alteración mineral e do transporte de ións bicarbonato ó mar que se producirá como consecuencia da maior acidez das chuvias ó estar en contacto a auga cunha maior presión de CO_2 , nin tampouco se inclúen os efectos do incremento de absorción de CO_2 pola biomasa (efecto fertilizante do CO_2), nin o incremento da fixación de C en corais, moluscos, etc. É dicir, hai un gran número de mecanismos reguladores dos sistemas biosféricos que interveñen na temperatura da Terra e que non foron considerados, entre outras cousas porque se descoñece a súa capacidade e velocidade de actuación e, como consecuencia, utilízanse só magnitudes físicas. O debate está aberto e,

se ben queda demostrado que hai un incremento do CO_2 atmosférico claramente atribuíble á queima dos combustibles fósiles, non o é menos que se descoñece a capacidade reguladora dos mecanismos bioxeoquímicos e, polo tanto, as prediccións dos nosos modelos físicos poden ser erróneas. De aí que moitos investigadores falen só da 'hipótese do efecto invernadoiro' e non dun feito que se producirá inexorablemente.

De tódalas formas é importante sinalar que o efecto invernadoiro é un proceso natural producido pola presenza de pequenas cantidades de gases que teñen esta propiedade na atmosfera. Se esta só contivese osíxeno e nitróxeno, a temperatura da Terra

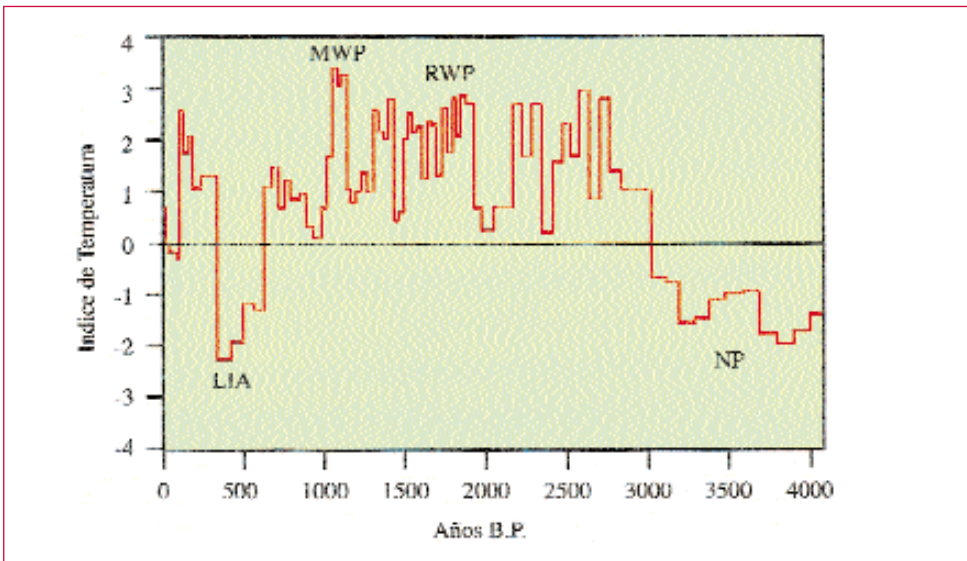


Fig. 3.- Variación do índice de temperatura nos últimos 4000 anos de acordo co contido de Hg nunha turbeira do Xistral (Martínez Cortizas, *et al.*, 1999).

sería duns 33 °C máis baixa, co cal a vida, tal como a coñecemos, non existiría. Tamén é preciso sinalar que non estamos nun dos momentos máis cálidos e de maior presión de CO₂ da historia da Terra, senón que en realidade estamos nun dos máis fríos e case acabados de saír do último episodio glaciario. Así, o modelo BLAG, elaborado por tres grandes xeoquímicos —Berner, Lasaga e Garrels (1983)—, indica que no Mioceno a concentración de CO₂ debía de ser en volta de dez veces a actual e no Cretáceo unhas cincuenta veces máis, coas consecuentes elevacións da temperatura que neste último período se estima que debía superalos 25 °C de media. Tamén as investigacións nas columnas de xeo de diferentes lugares —principalmente a gran columna de xeo estudada en Vostok, na Antártida, por un equipo franco-ruso (Lorius, *et al.*, 1990)— indican que a temperatura hai uns cento cincuenta mil anos era superior á actual e que tralo avance dos xeos se produciron diferentes períodos intermedios nos que a temperatura e a concentración de CO₂ atmosférico subiron a ritmos similares ós observados actualmente, é dicir, unha duplicación en períodos por volta dos cento cincuenta anos. Máis recentemente, Martínez Cortizas *et al* (1999) puideron precisar que os cambios de temperatura da orde dos que agora espera o IPCC son normais na historia recente do planeta: nos últimos catro mil anos presentáronse episodios fríos como a pequena glaciación, xunto a períodos máis cálidos, como os óptimos do ano 1000 e do período roma-

no (fig. 3) cando a temperatura era superior á actual (uns 3 °C) e similar á que se espera polo IPCC para o ano 2100. É dicir, que a suba de temperatura prevista na estimación máis desfavorable actual é semellante ás oscilacións naturais experimentadas na Terra incluso en períodos próximos, se ben quizais cunha variación algo máis rápida.

Por outra parte, datos recentes demostraron que o normal da historia da Terra é que non existan polos (máis do 90 % do tempo). Non é estraño, logo, que se discuta bastante verbo da intensidade do forzamiento climático producido polo home e que, curiosamente, mentres científicos como os físicos, meteorólogos e ecólogos, que estudian series de tempo relativamente curtas, se pronuncian claramente polo cambio climático, outros, como os xeólogos, xeoquímicos... que estudian series maiores de tempo, poñan en cuestión a importancia destes mesmo admitindo que, efectivamente, hai un considerable incremento das emisións de gases de efecto invernadoiro e que o interglaciario no que nos atopamos está sendo algo máis longo do normal. Allégre (1990) sintetiza dicindo: ¿induciría o home un superinterglaciario? A resposta depende da capacidade dos sistemas de biorregulación da composición da atmosfera que teña a Terra e da súa velocidade de resposta, así como, por suposto, das medidas tomadas polo home, se ben parece claro xa que, considerando grandes períodos, a temperatura da Terra depende fundamentalmente da enerxía

que recibe do espazo, é dicir, da súa posición astronómica, sendo menor o efecto producido polos cambios na composición dos gases da atmosfera.

A controversia sobre o efecto invernadoiro creou un novo principio ambiental denominado 'principio de precaución' (WCED, 1987), que foi adoptado internacionalmente naqueles casos en que hai un risco de consecuencias ambientais irreversibles. Segundo este principio, a carencia de seguridade nas probas científicas non debe ser un argumento para frear as accións e medidas que reduzan os problemas ambientais, ou, como se di en *World in Environmental Transition*, "os custos de rexeita-la hipótese de efecto invernadoiro, se é correcta, son moi superiores ós que se producirían aceptando a hipótese aínda que se probe posteriormente que era falsa". En esencia, este principio de prevención ou precaución para os *feddbacks difusos* deriva do feito de que resulta moito máis custoso corrixi-los problemas cando xa se produciron cós custos que se invisten na prevención para evitar que se produzan, que é o principio en que asenta a Avaliación de Impacto Ambiental.

Non cabe dúbida de que este principio debe ser aplicado sempre, pero tamén hai críticas no sentido de que moitos problemas ambientais con causas perfectamente coñecidas e cientificamente demostradas non son atendidos e, sen embargo, no caso do efecto invernadoiro hai un importante interese por parte dalgúns países en

consideralo como prioritario. Por outra parte, aplicar indiscriminadamente o principio de precaución podería levar a un certo colapso nas actuacións humanas, polo que autores como Cameron e Wade-Gery (1992) consideran que o principio de precaución debe utilizarse só cando existan bases científicas e só referíndose a procesos con consecuencias irreversibles. A mesma idea de poder aplica-los coñecementos dispoñibles atópase no concepto de 'Carga Crítica de Contaminantes', que na súa definición sinala que é a "máxima cantidade de contaminante que un sistema pode recibir sen que se modifiquen a longo prazo nin a súa composición nin a súa función, polo menos segundo os coñecementos dispoñibles", admitindo que a pesar de que non se coñece todo poden planificarse actuacións de acordo coa información existente. Este principio foi a base dos acordos internacionais para a redución das emisións de xofre dentro do Convenio de Contaminación Atmosférica Transfronteiriza (Convenio de Xenebra) e ultimamente da Directiva de Teitos de Emisión de S (2000).

En síntese, os problemas ambientais existen pero son complexos e non sempre se posúe o coñecemento científico suficiente para comprender tódalas interaccións, polo que non resulta extraña a polarización entre posturas catastrofistas ou excesivamente optimistas acerca da capacidade da Terra para soporta-las nosas actuacións. A pesar disto, parece que a postura europea é bastante coherente.

Medio ambiente e desenvolvemento poden ser compatibles se se realizan as consideracións precisas, localizando as actuacións que causen maiores impactos nos lugares resistentes e protexendo as zonas sensibles, é dicir, coñecendo previamente a sensibilidade do espacio ás nosas actuacións. Métodos como os Estudios de Avaliación de Impacto Ambiental e conceptos como o de 'cargas críticas' ou o de 'bombas químicas' (Macías, 1996) deben utilizarse como instrumentos básicos da planificación dun desenvolvemento sostible mesmo a pesar de tódalas dúbidas que efectivamente seguen existindo sobre a posibilidade da sostibilidade.

Para entender correctamente este concepto debe terse en conta que as Nacións Unidas consideran que "o desenvolvemento só o é se permite un incremento da calidade de vida". Neste sentido, é coñecida a conclusión da Conferencia de Nacións Unidas de Nairobi na que se afirma que a pobreza é a peor das contaminacións. Na mesma liña, o informe de 1987 da Comisión Mundial para o Medio Ambiente e o Desenvolvemento, máis coñecido como "Informe Brudtland", insiste en que a actividade humana ten que desenvolverse de xeito sostible para todo o planeta no camiño cara ó futuro, entendendo por desenvolvemento sostible o que satisfai as necesidades do presente sen poñer en perigo a capacidade das xeracións futuras para cubri-las súas propias necesidades. Isto implica que debe protexerse o equilibrio xeral e o valor da reserva de

capital natural e te-las seguintes características: mante-la calidade de vida xeral, permitir un acceso continuo ós recursos naturais, impedir que perdu-ren os danos ó medio natural. De forma didáctica: "Non cóma-las sementes coas que has sementa-la colleita de mañá".

A XESTIÓN AMBIENTAL: O MEDIO AMBIENTE E AS POLÍTICAS SECTORIAIS

Hai só trinta anos, os problemas ambientais eran similares ou incluso máis intensos, nalgúns casos, cós que se producen hoxe en día; sen embargo, a sensibilidade social fronte ás múltiples alteracións do contorno era moito menor. Os problemas da contaminación considerábanse consecuencias lóxicas e inevitables do 'progreso', polo que se asumían como algo que debía aceptarse a cambio das melloras no nivel de vida. Emporiso, xa daquela algúns científicos advertían sobre o perigo que se aveciñaba se as 'externalidades' ou os 'custos sociais dos procesos productivos' seguían medrando. Ó tempo naceron os primeiros movementos sociais sensibilizados pola crecente deterioración do contorno natural. Desde entón a sensibilidade ou o respecto á natureza incrementouse. En Europa, esta sensibilidade pasou a tódalas políticas de actuación. No cumio de 1972 aparece a primeira mención explícita dos xefes de Estado e de Goberno europeos sobre a necesidade de prestar unha atención especial ó medio. Esa primeira declaración

concretouse máis tarde nos Programas de Acción multianuais, dos que se desenvolveron cinco.

Os Programas Comunitarios de Acción sobre o Medio Ambiente derivan da Conferencia de Nacións Unidas de Estocolmo (1972) e iníciáanse en 1973. Os dous primeiros estaban dirixidos a paliar os danos ambientais ocasionados polas actividades productivas. No terceiro (1983-86) postulábase unha política de protección baseada na prevención dos danos mediante a integración das esixencias ambientais na planificación e execución das actividades económicas, afirmándose que a prevención é máis barata cá reparación. No cuarto (1987, Ano Europeo do Medio Ambiente-1992), refórzase o proxecto integrador e rexéitase a concepción do medio ambiente como restricción ó desenvolvemento, recoñéndose pola contra que a política de protección ambiental pode e debe contribuír ó crecemento e á creación de empregos (Medio Ambiente motor de desenvolvemento). Derivado deste cuarto programa, a política ambiental alcanza unhas dimensións tales que a fan formar parte esencial de tódalas políticas económicas, industriais, agrícolas e sociais que poñan en práctica a Comunidade e os Estados membros. Sen embargo, é importante insistir en que a política ambiental non debe ser unha máis das políticas sectoriais (concepción baseada na vella idea napoleónica da organización do Estado) senón algo integrador que impregne tódalas demais políticas. De xeito paralelo a

este esforzo, a política ambiental foi subindo de nivel: a Acta Única Europea engade en 1987 un título específico no Tratado Constitutivo da Comunidade Europea e formula a relación co medio ambiente como un dos obxectivos e principios fundamentais da acción europea. Este tratado, asinado en Roma en 1957, non tiña en conta o medio ambiente entre os seus obxectivos de regulación e, por outra parte, o desenvolvemento económico da década dos sesenta acompañase de agresións importantes contra o medio. A súa degradación vai creando na opinión pública un sentimento crecente de preocupación. O Cumio de Xefes de Estado e de Goberno da Comunidade Europea, celebrada en París en 1972, afirma na súa resolución final que se “concederá unha atención particular ós valores e bens non materiais e á protección do medio ambiente co fin de poñer-lo progreso ó servicio dos homes”. En 1973 iníciase o primeiro programa ambiental e, a partir de aí, produciuse unha enorme proliferación de normativas sobre augas, residuos, aire, natureza, etc. A Acta Única Europea modifica os Tratados Constitutivos da Comunidade Europea introducindo, entre outras cousas, un novo título na terceira parte do Tratado de Roma: “O medio ambiente”.

En 1993 dáse un avance de extraordinaria importancia coa entrada en vigor do Tratado da Unión Europea no que se introduce o crecemento sostible, respectuoso co medio ambiente, entre as misións da Comunidade Europea. No

apartado 2 do artigo 130 R dise que as “esixencias da protección do medio ambiente deberán integrarse na definición e na realización das demais políticas da Comunidade”, o que queda especificamente consagrado no artigo 6 do Tratado de Amsterdam en 1996. Tamén en 1993 se introduce o denominado ‘principio de cautela’ e en xuño de 1998 o cumio de Cardiff senta as bases dunha actuación coordinada a escala comunitaria no que se refire á integración das esixencias ambientais nas políticas da Unión. Os primeiros sectores para os que se elabora unha estratexia de integración son os de Enerxía, Transporte e Agricultura. No Transporte, esta política de integración incide na necesidade de reducir as emisións de CO₂ de acordo co cumio de Kioto, mentres que en 1992 a reforma da PAC introduciu algúns cambios para reducir a excesiva intensificación da agricultura que producira e que, se ben elevara moi considerablemente as cotas de produción de alimentos, tamén ocasionou graves desequilibrios ambientais. De acordo coa reunión de Cardiff en 1999, a Comisión presenta as “Orientacións para unha agricultura sostible”, expoñendo con forza os problemas ambientais da agricultura actual. En 1998, o Cumio de Viena invita os Consellos do Mercado Interior, Industria e Desenvolvemento a definir as súas propias estratexias de integración ambiental. En 1999 preséntase a Comunicación sobre Mercado Interior e Medio Ambiente con propostas de impostos e gravames ambientais. En abril do mesmo ano o Consello de

Industria presenta novos modelos de produción e consumo sostibles nos que se formula a necesidade de combinar a protección do medio ambiente coa competencia industrial. Tamén en 1999 se presenta a Comunicación sobre a Pesca, cunha estratexia sostible de redución da presión da pesca, a reordenación integrada das zonas costeiras, a mellora das investigacións científicas, etc. En novembro é o Medio Urbano o que se trata no Parlamento Europeo.

En resumo, xa é moi difícil que en calquera das políticas non se fale de medio ambiente e que non se discutan criterios ambientais. Agora o que se necesita é que se aumente o coñecemento, que este se poña en acción e que as consideracións ambientais pasen a realizarse desde unha disciplina máis, aínda que moi complexa e difícil, do campo do saber científico.

BIBLIOGRAFÍA

- Allègre, C., *Economiser la planète*, Ed. Fayard, 1990.
- Berner, R. A., A. Lasaga, R. M. Garrels, “The carbonate-silica geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years”, *Am. Sci.*, 283, 1983, 641-683.
- Cameron, J., e W. Wade-Gery, “Addressing Uncertainty, Law, Policy and the Development of the Precautionary Principle”, *SERGE Working Paper*, GEC, Reino Unido,

- Norwich, University of East Anglia, 1992, 92-43.
- Commomer, B., *Making Peace with the Planet*, Nova York, Pantheon Books, 1990.
- European Environment Agency, *Europe's Environment: The Second Assessment*, Elsevier, 1998.
- Förstner, U., *Contaminated Sediments*, Berlín, Springer-Verlag, 1989.
- Goodland, R., *The case that the world has reached limits*, en *Environmental Sustainable Economic Development: Building on Brundtland*, París, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991.
- Holmberg, J., *Principles and tools in planning for sustainability. In sustainability in the Municipal planning. SBI Report 92*, Copenhagen, The National Institute for Construction Research, 1992.
- Hoyer, K.G., *World in environmental Transition. In The Global Environment. Science, Technology and Management*, ed. By Brune, D, et al., John Wiley, 1997.
- Lorius, C., et al., "The ice-core record climate sensitivity and future greenhouse warming", *Nature*, 347, 1990, 139-145.
- Lovelock, J. E., *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford Univ. Press, 1982.
- Macías, F., *Nuevos conceptos de planificación y gestión ambiental. Evaluación de Impactos y Cargas Críticas de Contaminantes*, Conferencia invitada en XIII Congreso Latinoamericano de Ciencias do Solo, Brasil, CD Software Grafico Comercio e Serviços Ltda., 1996.
- Margalef, R., *La biosfera. Entre la termodinámica y el juego*, Ed. Omega, 1980.
- _____, *Prólogo de la Biosfera de Vladimir I. Vernadsky*, Fundación Argentaria, 1997.
- Martínez Cortizas, A., et al., "Four thousand years of a atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorded by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (Northwestern Spain)", *Water, Air and soil Pollution*, 100, 1997, 387-403.
- Martínez Cortizas, A., et al., "Mercury in a Spanish Peat Bog: Archive of Climate Change and Atmospheric Metal Deposition", *Science*, 284, 1999, 939-942.
- Naciones Unidas, *Guía Mundial de los Recursos 2000-2001: Pueblos y ecosistemas: la deshilachada red de la vida*, Naciones Unidas, Programa para el Medio Ambiente, 2000.
- Odum, E. P., "Input management of production systems", *Science*, 1989, 243.
- Vernadsky, V. I., *La Géochimie*, 1924.
- _____, *La biosfera*, Fundación Argentaria, 1997.



Premios Nobel

PREMIOS NOBEL DE FISIOLOXÍA OU MEDICINA

Ano	Laureados	Motivos
1901	Emil Adolf von Behring	“polo seu estudio da terapia de soro, en especial para combate-la difteria, co que abriu unha nova vía no campo da ciencia médica e mais puxo nas mans dos médicos unha arma victoriosa contra a doenza e a morte”
1902	Ronald Ross	“polo seu estudio da malaria, co que amosou cómo se introduce no organismo e sentou os alicerces para unha magnífica investigación sobre esta doenza e os métodos para combatela”
1903	Niels Ryberg Finsen	“en recoñecemento da súa contribución ó tratamento con radiación luminosa dalgunhas doenzas, especialmente a <i>lupus vulgaris</i> , co que abriu unha nova vía para a ciencia médica”
1904	Ivan Petrovich Pavlov	“en recoñecemento do seu estudio da fisioloxía da dixestión, co que transformou e ampliou o coñecemento sobre aspectos vitais desta cuestión”
1905	Robert Koch	“polas súas investigacións e descubrimentos relacionados coa tuberculose”
1906	Camillo Golgi Santiago Ramón y Cajal	“en recoñecemento do seu estudio da estrutura do sistema nervioso”
1907	Charles Louis Alphonse Laveran	“en recoñecemento do seu estudio do papel dos protozoos como causa das doenzas”
1908	Ilya Ilyich Mechnikov Paul Ehrlich	“en recoñecemento do seu estudio da inmunoloxía”
1909	Emil Theodor Kocher	“polo seu estudio da fisioloxía, a patoloxía e a cirurxía da glándula tiroide”
1910	Albrecht Kossel	“en recoñecemento das contribucións ó noso coñecemento da química celular a través do seu estudio das proteínas, incluídas as substancias nucleicas”
1911	Allvar Gullstrand	“polo seu estudio das dioptrías do ollo”
1912	Alexis Carrel	“en recoñecemento do seu estudio das suturas vasculares e os transplantes de vasos sanguíneos e órganos”
1913	Charles Robert Richet	“en recoñecemento do seu estudio da anafilaxe”

1914	Robert Bárány	“polo seu estudio da fisioloxía e a patoloxía do aparello vestibular”
1919	Jules Bordet	“polos seus descubrimentos relativos á inmunoloxía”
1920	Schack August Steenberger Krogh	“polo seu descubrimento da capilaridade como mecanismo regulador”
1922	Archibald Vivian Hill	“polo seu descubrimento relativo á produción de calor no músculo”
	Otto Fritz Meyerhof	“polo seu descubrimento da relación estable entre o consumo de osíxeno e o metabolismo do ácido láctico no músculo”
1923	Frederick Grant Banting John James Richard Macleod	“polo descubrimento da insulina”
1924	Willem Einthoven	“polo seu descubrimento do mecanismo do electrocardiograma”
1926	Johannes Andreas Grib Fibiger	“polo seu descubrimento do carcinoma <i>Spiroptera</i> ”
1927	Julius Wagner-Jauregg	“polo seu descubrimento do valor terapéutico da inoculación da malaria no tratamento da demencia paralítica”
1928	Charles Jules Henri Nicolle	“polo seu estudio do tifo”
1929	Christiaan Eijkman	“polo seu descubrimento da vitamina antineurítica”
	Frederick Gowland Hopkins	“ polo seu descubrimento das vitaminas que estimulan o crecemento”
1930	Karl Landsteiner	“polo seu descubrimento dos grupos sanguíneos humanos”
1931	Otto Heinrich Warburg	“polo seu descubrimento da natureza e o modo de actuación da enzima respiratoria”
1932	Charles Scott Sherrington Edgar Douglas Adrian	“polos seus descubrimentos relativos ás funcións das neuronas”
1933	Thomas Hunt Morgan	“polos seus descubrimentos relativos ó papel do cromosoma na herdanza”
1934	George Hoyt Whipple George Richards Minot William Parry Murphy	“polos seus descubrimentos relativos á terapia do fígado nos casos de anemia”
1935	Hans Spemann	“polo seu descubrimento do efecto organizador no desenvolvemento embrionario”

1936	Henry Hallett Dale Otto Loewi	“polos seus descubrimentos relativos á transmisión química dos impulsos nerviosos”
1937	Albert Szent-Györgyi von Nagyrápolyi	“polos seus descubrimentos relacionados cos procesos de combustión biolóxica, con especial referencia á vitamina C e a catálise do ácido fumárico”
1938	Corneille Jean François Heymans	“polo descubrimento do papel dos mecanismos que regulan a respiración”
1939	Gerhard Domagk	“polo descubrimento dos efectos antibacterianos do pron-tosil”
1943	Henrik Carl Peter Dam Edward Adelbert Doisy	“polo seu descubrimento da vitamina K” “polo seu descubrimento da natureza química da vitamina K”
1944	Joseph Erlanger Herbert Spencer Gasser	“polos seus descubrimentos relativos ás funcións altamente diferenciadas das fibras nerviosas”
1945	Alexander Fleming Ernst Boris Chain Howard Walter Florey	“polo descubrimento da penicilina e o seu efecto curativo en varias doenzas infecciosas”
1946	Hermann Joseph Muller	“polo descubrimento da produción de mutacións pola irradiación de raios X”
1947	Carl Ferdinand Cori Gerty Theresa Cori (nada Radnitz)	“polo seu descubrimento do curso da conversión catalítica do glicóxeno”
	Bernardo Alberto Houssay	“polo seu descubrimento do papel da hormona do lóbulo anterior pituitario no metabolismo do azucre”
1948	Paul Hermann Müller	“polo seu descubrimento da alta eficacia do DDT como veneno contra varios artrópodos”
1949	Walter Rudolf Hess	“polo seu descubrimento da organización funcional do cerebro como coordinador das actividades dos órganos”
	Antonio Caetano de Abreu Freire Egas Moniz	“polo seu descubrimento do valor terapéutico da leucotomía en certas psicoses”
1950	Edward Calvin Kendall Tadeus Reichstein Philip Showalter Hench	“polos seus descubrimentos relativos ás hormonas do córtex, a súa estrutura e os seus efectos biolóxicos”
1951	Max Theiler	“polos seus descubrimentos relativos á febre amarela e ó xeito de combatela”
1952	Selman Abraham Waksman	“polo seu descubrimento da estreptomicina, o primeiro antibiótico efectivo contra a tuberculose”

1953	Hans Adolf Krebs Fritz Albert Lipmann	“polo seu descubrimento do ciclo do ácido cítrico” “polo seu descubrimento da coenzima A e a súa importancia no metabolismo”
1954	John Franklin Enders Thomas Huckle Weller Frederick Chapman Robbins	“polo seu descubrimento da capacidade dos virus da poliomielite de crecer en cultivos de varios tipos de tecido”
1955	Axel Hugo Theodor Theorell	“polos seus descubrimentos relativos á natureza e ó modo de actuación das enzimas oxidantes”
1956	André Frédéric Cournand Werner Forssmann Dickinson W. Richards	“polos seus descubrimentos relativos á caterización do corazón e ós cambios patolóxicos no sistema circulatorio”
1957	Daniel Bovet	“polos seus descubrimentos relativos ós compoñentes sintéticos que inhiben a actuación de certas substancias do corpo, e especialmente a súa actuación sobre o sistema vascular e os músculos”
1958	George Wells Beadle Edward Lawrie Tatum Joshua Lederberg	“polo seu descubrimento de que os xenes actúan regulando sucesos químicos” “polos seus descubrimentos relativos á recombinación xenética e á organización do material xenético da bacteria”
1959	Severo Ochoa Arthur Kornberg	“polo seu descubrimento dos mecanismos da síntese biolóxica do ácido ribonucleico e do ácido desoxirribonucleico”
1960	Frank Macfarlane Burnet Peter Brian Medawar	“polo descubrimento da tolerancia inmunolóxica adquirida”
1961	Georg von Békésy	“polos seus descubrimentos do mecanismo físico da estimulación no <i>cochlea</i> ”
1962	Francis Harry Compton Crick James Dewey Watson Maurice Hugh Frederick Wilkins	“polos seus descubrimentos relativos á estrutura molecular dos ácidos nucleicos e a súa importancia para a transferencia de información en materiais biolóxicos”
1963	John Carew Eccles Alan Lloyd Hodgkin Andrew Fielding Huxley	“polos seus descubrimentos relativos ós mecanismos iónicos implicados na excitación e na inhibición nas partes periféricas e centrais da membrana da célula nerviosa”
1964	Konrad Bloch Feodor Lynen	“polos seus descubrimentos relativos ó mecanismo e á regulación do colesterol e do metabolismo do ácido graxo”
1965	François Jacob André Lwoff Jacques Monod	“polos seus descubrimentos relativos ó control xenético da síntese de enzimas e virus”

1966	Peyton Rous Charles Brenton Huggins	“polo seu descubrimento dos virus que inducen tumores” “polos seus descubrimentos relativos ó tratamento hormonal do cancro de próstata”
1967	Ragnar Granit Haldan Keffer Hartline George Wald	“polos seus descubrimentos relativos ós procesos visuais primarios, fisiolóxicos e químicos no ollo”
1968	Robert W. Holley Har Gobind Khorana Marshall W. Nirenberg	“pola súa interpretación do código xenético e a súa función na síntese de proteínas”
1969	Max Delbrück Alfred D. Hershey Salvador E. Luria	“polos seus descubrimentos relativos ó mecanismo de replicación e á estrutura xenética dos virus”
1970	Bernard Katz Ulf von Euler Julius Axelrod	“polos seus descubrimentos relativos ós transmisores humorais nos terminais nerviosos e ó mecanismo do seu almacenamento, liberación e inactivación”
1971	Earl W. Jr. Sutherland	“polos seus descubrimentos relativos ós mecanismos de actuación das hormonas”
1972	Gerald M. Edelman Rodney R. Porter	“polos seus descubrimentos relativos á estrutura química dos anticorpos”
1973	Karl von Frisch Konrad Lorenz Nikolaas Tinbergen	“polos seus descubrimentos relativos á organización dos modelos de comportamento individual e social”
1974	Albert Claude Christian de Duve George E. Palade	“polos seus descubrimentos relativos á organización estrutural e funcional da célula”
1975	David Baltimore Renato Dulbecco Howard Martin Temin	“polos seus descubrimentos relativos á interacción entre os virus tumorais e o material xenético da célula”
1976	Baruch S. Blumberg D. Carleton Gajdusek	“polos seus descubrimentos relativos ós novos mecanismos para a orixe e a diseminación das doenzas contaxiosas”
1977	Roger Guillemin Andrew V. Schally Rosalyn Yalow	“polos seus descubrimentos relativos á produción da hormona péptida do cerebro” “polo desenvolvemento de probas radioinmunolóxicas das hormonas péptidas”
1978	Werner Arber Daniel Nathans Hamilton O. Smith	“polo descubrimento das enzimas de restricción e a súa aplicación ós problemas da xenética molecular”

1979	Alan M. Cormack Godfrey N. Hounsfield	“polo desenvolvemento da tomografía asistida por ordenador”
1980	Baruj Benacerraf Jean Dausset George D. Snell	“polos seus descubrimentos relativos ás estruturas xeneticamente determinadas sobre a superficie celular que regulan as reaccións inmunolóxicas”
1981	Roger W. Sperry	“polos seus descubrimentos relativos á especialización funcional dos hemisferios cerebrais”
	David H. Hubel Torsten N. Wiesel	“polos seus descubrimentos relativos ó procesamento de información no sistema visual”
1982	Sune K. Bergström Bengt I. Samuelsson John R. Vane	“polos seus descubrimentos relativos ás prostaglandinas e ás substancias bioloxicamente activas relacionadas”
1983	Barbara McClintock	“polo descubrimento dos elementos xenéticos móbiles”
1984	Niels K. Jerne George J. F. Köhler César Milstein	“polas teorías relativas á especificidade do desenvolvemento e o control do sistema inmunolóxico e o descubrimento do principio para a produción de anticorpos monoclonais”
1985	Michael S. Brown Joseph L. Goldstein	“polos seus descubrimentos relativos á regulación do metabolismo do colesterol”
1986	Stanley Cohen Rita Levi-Montalcini	“polo seu descubrimento dos factores de crecemento”
1987	Susumu Tonegawa	“polo seu descubrimento do principio xenético para a xeración da diversidade de anticorpos”
1988	James W. Black Gertrude B. Elion George H. Hitchings	“polos seus descubrimentos de importantes principios para o tratamento con fármacos”
1989	J. Michael Bishop Harold E. Varmus	“polo seu descubrimento da orixe celular dos oncoxenes retrovirais”
1990	Joseph E. Murray E. Donnall Thomas	“polos seus descubrimentos relativos ó transplante de órganos e células no tratamento de doenzas humanas”
1991	Erwin Neher Bert Sakmann	“polos seus descubrimentos relativos á función das canles iónicas nas células”
1992	Edmond H. Fischer Edwin G. Krebs	“polos seus descubrimentos relativos á fosforilación reversible de proteínas como mecanismo biolóxico regulador”
1993	Richard J. Roberts Phillip A. Sharp	“polos seus descubrimentos independentes sobre o desdoblamento dos xenes”

1994	Alfred G. Gilman Martin Rodbell	“polo seu descubrimento das proteínas G e do papel destas proteínas na transdución de sinais nas células”
1995	Edward B. Lewis Christiane Nüsslein-Volhard Eric F. Wieschaus	“polos seus descubrimentos relativos ó control xenético do desenvolvemento embrional temperán”
1996	Peter C. Doherty Rolf M. Zinkernagel	“polos seus descubrimentos relativos á especificidade da defensa inmune celular”
1997	Stanley B. Prusiner	“polo seu descubrimento dos prions —un novo principio biolóxico da infección—”
1998	Robert F. Furchgott Louis J. Ignarro Ferid Murad	“polos seus descubrimentos relativos ó óxido nítrico como molécula sinaladora no sistema cardiovascular”
1999	Günter Blobel	“polo descubrimento do feito de que as proteínas posúen sinais intrínsecos que rexen o seu transporte e localización na célula”

PREMIOS NOBEL DE FÍSICA

Ano	Laureados	Motivos
1901	Wilhelm Conrad Röntgen	“en recoñecemento dos extraordinarios servicios prestados ó descubri-los notables raios que, en consecuencia, recibiron o seu nome” ¹
1902	Hendrik Antoon Lorentz Pieter Zeeman	“en recoñecemento do extraordinario servico que prestaron coas súas investigacións sobre a influencia dos campos magnéticos nos fenómenos de radiación”
1903	Antoine Henri Becquerel Pierre Curie Marie Curie (nada Sklodowska)	“en recoñecemento dos extraordinarios servicios que prestou co seu descubrimento da radioactividade espontánea” “en recoñecemento dos extraordinarios servicios que prestaron coas súas investigacións conxuntas sobre os fenómenos da radiación descubertos polo profesor Henri Becquerel”
1904	John William Strutt Rayleigh	“polas súas investigacións sobre as densidades dos máis importantes gases e polo seu descubrimento do argon en relación con estes estudos”
1905	Philipp Eduard Anton Lenard	“polo seu traballo sobre os raios catódicos”
1906	Joseph John Thomson	“en recoñecemento dos grandes méritos das súas investigacións teóricas e experimentais sobre a condución da electricidade en gases”
1907	Albert Abraham Michelson	“polos seus instrumentos ópticos de precisión e as investi-

		gacións espectroscópicas e metrolóxicas levadas a cabo coa súa axuda”
1908	Gabriel Lippmann	“polo seu método de reprodución fotográfica de cores baseado no fenómeno da interferencia”
1909	Guglielmo Marconi Karl Ferdinand Braun	“en recoñecemento das súas contribucións ó desenvolvemento da telegrafía sen fíos”
1910	Johannes Diderik van der Waals	“polo seu traballo sobre a ecuación do estado para os gases e os líquidos”
1911	Wilhelm Wien	“polos seus descubrimentos relativos ás leis que rexen a radiación de calor”
1912	Nils Gustav Dalén	“pola súa invención de reguladores automáticos para usar en conxunción con acumuladores de gas para iluminar faros marítimos e boias”
1913	Heike Kamerlingh-Onnes	“polas súas investigacións sobre as propiedades da materia a baixas temperaturas, que conduciron, entre outras cousas, á obtención do helio líquido”
1914	Max von Laue	“polo seu descubrimento da difracción dos raios X polos cristais”
1915	William Henry Bragg William Lawrence Bragg	“polos seus servicios na análise da estrutura dos cristais mediante os raios X”
1917	Charles Glover Barkla	“polo seu descubrimento da radiación de raios X característica dos elementos”
1918	Max Karl Ernst Ludwig Planck	“en recoñecemento dos servicios prestados ó progreso da Física co seu descubrimento dos cuantos de enerxía”
1919	Johannes Stark	“polo seu descubrimento do efecto Doppler en raios canles e o desdoblamento de liñas espectrais en campos eléctricos”
1920	Charles Edouard Guillaume	“en recoñecemento do servicio prestado ás medicións de precisión na Física co seu descubrimento das anomalías en aliaxes de níquel e aceiro”
1921	Albert Einstein	“polos seus servicios á Física teórica, e especialmente polo seu descubrimento da lei do efecto fotoeléctrico”
1922	Niels Bohr	“polos seus servicios na investigación da estrutura dos átomos e da radiación que emana deles”
1923	Robert Andrews Millikan	“polo seu traballo sobre a carga elemental da electricidade e sobre o efecto fotoeléctrico”

1924	Karl Manne Georg Siegbahn	“polos seus descubrimentos e investigacións no campo da espectrografía de raios X”
1925	James Franck Gustav Hertz	“polo seu descubrimento das leis que rexen o impacto dun electrón nun átomo”
1926	Jean Baptiste Perrin	“polo seu traballo sobre a estrutura descontinua da materia, e en especial polo seu descubrimento do equilibrio de sedimentación”
1927	Arthur Holly Compton Charles Thomson Rees Wilson	“polo seu descubrimento do efecto que leva o seu nome” “polo seu método de detección de partículas electricamente cargadas a través da condensación de vapor”
1928	Owen Willans Richardson	“polo seu traballo sobre o fenómeno termoiónico e especialmente polo descubrimento da lei que leva o seu nome”
1929	Louis-Victor de Broglie	“polo seu descubrimento da natureza ondulatoria dos electróns”
1930	Chandrasekhara Venkata Raman	“polo seu traballo sobre a difusión da luz e polo descubrimento do efecto que leva o seu nome”
1932	Werner Heisenberg	“pola creación da mecánica cuántica, que, entre outras cousas, levou ó descubrimento das formas alotrópicas do hidróxeno”
1933	Erwin Schrödinger Paul Adrien Maurice Dirac	“polo descubrimento de novas formas productivas da teoría atómica”
1935	James Chadwick	“polo descubrimento do neutrón”
1936	Victor Franz Hess Carl David Anderson	“polo seu descubrimento da radiación cósmica” “polo seu descubrimento do positrón”
1937	Clinton Joseph Davison George Paget Thomson	“polo seu descubrimento experimental da difracción de electróns a través dos cristais”
1938	Enrico Fermi	“polas súas demostracións da existencia de novos elementos radioactivos producidos polo bombardeo de neutróns, e polo seu descubrimento das reaccións nucleares producidos por neutróns lentos”
1939	Ernest Orlando Lawrence	“pola invención e o desenvolvemento do ciclotrón e polos resultados obtidos con el, especialmente en relación cos elementos radioactivos artificiais”
1943	Otto Stern	“pola súa contribución ó desenvolvemento do método de raios moleculares e o seu descubrimento do momento magnético do protón”

1944	Isidor Isaac Rabi	“pola seu método de resonancia para rexistra-las propiedades magnéticas dos núcleos atómicos”
1945	Wolfgang Pauli	“pola descubrimiento do principio de exclusión, tamén chamado principio de Pauli”
1946	Percy Williams Bridgman	“pola invención dun aparello para producir presións extremadamente altas, e polos descubrimentos que con el levou a cabo no campo da física de altas presións”
1947	Edward Victor Appleton	“pola súas investigacións en física da atmosfera superior, e especialmente polo descubrimento da chamada capa de Appleton”
1948	Patrick Maynard Stuart Blackett	“pola seu desenvolvemento do método da cámara de nubes de Wilson, co que fixo descubrimentos nos eidos da Física nuclear”
1949	Hideki Yukawa	“pola súa predicción da existencia de mesóns sobre a base dun traballo teórico sobre as forzas nucleares”
1950	Cecil Frank Powell	“pola seu desenvolvemento do método fotográfico para estudia-los procesos nucleares e os seus descubrimentos relativos ós mesóns feitos con este método”
1951	John Douglas Cockcroft Ernest Thomas Sinton Walton	“pola seu traballo pioneiro sobre a transmutación dos núcleos atómicos por medio de partículas aceleradas artificialmente”
1952	Felix Bloch Edward Mills Purcell	“pola seu desenvolvemento de novos métodos para a medición nuclear magnética de precisión e por outros descubrimentos relacionados”
1953	Frits (Frederik) Zernike	“pola súa demostración do método de contraste de fase, e especialmente pola súa invención do microscopio de contraste de fase”
1954	Max Born	“pola súa fundamental investigación sobre Mecánica cuántica, e especialmente pola súa interpretación estatística da función de onda”
	Walther Bothe	“pola método de contadores en coincidencia e os seus descubrimentos feitos con el”
1955	Willis Eugene Lamb	“pola seus descubrimentos relativos á estrutura do espectro do hidróxeno”
	Polykarp Kusch	“pola súa determinación precisa do momento magnético do electrón”
1956	William Shockley John Bardeen Walter Houser Brattain	“pola súas investigacións sobre semicondutores e o seu descubrimento do efecto transistor”

1957	Chen Ning Yang Tsung-Dao Lee	“pola súa penetrante investigación das chamadas leis de paridade, que conduciu a importantes descubrimentos relativos ás partículas elementais”
1958	Pavel Alekseevich Cherenkov Il'ia Mikhailovich Frank Igor Ievgenievich Tamm	“polo descubrimento e a interpretación do efecto Cherenkov”
1959	Emilio Gino Segrè Owen Chamberlain	“polo seu descubrimento do antiprotón”
1960	Donald A. Glaser	“pola invención da cámara de burbullas”
1961	Robert Hofstadter Rudolf Ludwig Mössbauer	“polos seus estudos pioneiros sobre a difusión de electróns en núcleos atómicos e os conseguintes descubrimentos relativos á estrutura dos nucleóns” “polas súas investigacións relativas á absorción por resonancia da radiación gamma e mailo seu conseguinte descubrimento do efecto que leva o seu nome”
1962	Lev Davidovich Landau	“polas súas teorías pioneiras acerca da materia condensada, especialmente o helio líquido”
1963	Eugene Paul Wigner Maria Goeppert-Mayer J. Hans D. Jensen	“polas súas contribucións á teoría do núcleo atómico e das partículas elementais, en particular a través do descubrimento e a aplicación de principios fundamentais da simetría” “polos seus descubrimentos relativos á estrutura de capas nucleares”
1964	Charles H. Townes Nicolai Gennadiyevich Basov Aleksandr Mikhailovich Prokhorov	“polo traballo fundamental no campo da electrónica cuántica, que conduciu á construción de osciladores e amplificadores baseados no principio máser-láser”
1965	Sin-Itiro Tomonaga Julian Schwinger Richard P. Feynman	“polo seu traballo fundamental na cuántica dos campos electromagnéticos, de profundas consecuencias para a Física das partículas elementais”
1966	Alfred Kastler	“polo descubrimento e o desenvolvemento de métodos ópticos para o estudo das resonancias herzianas nos átomos”
1967	Hans Albrecht Bethe	“polas súas contribucións á teoría das reaccións nucleares, e especialmente os seus descubrimentos relativos á produción de enerxía nas estrelas”
1968	Luis W. Alvarez	“polas súas contribucións decisivas á Física das partículas elementais, e en particular o descubrimento dun gran número de estados de resonancia feitos posibles a través

		do seu desenvolvemento da técnica do uso a cámara de burbullas de hidróxeno e a análise de datos"
1969	Murray Gell-Mann	"polas súas contribucións e descubrimentos relativos á clasificación das partículas elementais e as súas interaccións"
1970	Hannes Alfvén	"polo traballo fundamental e os descubrimentos na hidrodinámica magnética, con fructíferas aplicacións en diferentes partes da física do plasma"
	Louis Néel	"polo traballo fundamental e os descubrimentos relativos ó antiferromagnetismo e o ferromagnetismo, que conduciron a importantes aplicacións na física do estado sólido"
1971	Dennis Gabor	"pola súa invención e desenvolvemento do método holográfico"
1972	John Bardeen Leon N. Cooper J. Robert Schrieffer	"pola súa teoría da superconductividade, usualmente chamada teoría BCS, desenvolvida conxuntamente"
1973	Leo Esaki Ivar Giaever	"polos seus descubrimentos experimentais relativos ós fenómenos do efecto túnel nos semicondutores e superconductores, respectivamente"
	Brian D. Josephson	"polas súas predicións teóricas sobre as propiedades dunha supercorrente a través dunha barreira de túnel, en particular aqueles fenómenos que xeralmente se coñecen por efectos Josephson"
1974	Martin Ryle Antony Hewish	"pola súa investigación pioneira na Astrofísica: a Ryle polas súas observacións e os seus inventos, en particular o da técnica da síntese de apertura, e a Hewish polo seu papel decisivo no descubrimento dos púlsares"
1975	Aage Bohr Ben Mottelson James Rainwater	"polo descubrimento da conexión entre os movementos colectivos e os movementos das partículas nos núcleos atómicos e o desenvolvemento da teoría do núcleo atómico baseada nesta conexión"
1976	Burton Richter Samuel C. C. Ting	"polo seu traballo pioneiro no descubrimento dun novo tipo de partícula elemental pesada"
1977	Philip W. Anderson Neville F. Mott John H. van Vleck	"polas súas investigacións teóricas fundamentais da estrutura electrónica dos sistemas magnéticos e desordenados"
1978	Piotr Leonidovich Kapitsa	"polas súas invencións básicas e descubrimentos na área da física a baixas temperaturas"
	Arno A. Penzias Robert W. Wilson	"polo seu descubrimento da radiación cósmica de fondo"

1979	Sheldon Lee Glashow Abdus Salam Steven Weinberg	“polas súas contribucións á teoría da unificación das interaccións débil e electromagnética entre partículas elementais, incluída, entre outras cousas, a predicción da corrente neutra débil”
1980	James W. Cronin Val L. Fitch	“polo descubrimento da violación dos principios dunha simetría fundamental na desintegración dos mesóns K neutros”
1981	Nicolaas Bloembergen Arthur L. Schawlow	“pola súa contribución ó desenvolvemento da espectroscopia con láser”
	Kai Manne Siegbahn	“pola súa contribución ó desenvolvemento do espectrómetro de electróns de alto poder de resolución”
1982	Kenneth G. Wilson	“pola súa teoría dos fenómenos críticos en conexión coas transicións de fase”
1983	Subramanyan Chandrasekhar	“polos seus estudos teóricos dos procesos físicos relevantes para a estrutura e a evolución das estrelas”
	William A. Fowler	“polos seus estudos teóricos e experimentais sobre as reaccións nucleares relevantes para a formación dos elementos químicos no universo”
1984	Carlo Rubbia Simon van der Meer	“polas súas contribucións decisivas ó gran proxecto que conduciu ó descubrimento das partículas de campo W e Z, comunicadoras da interacción débil”
1985	Klaus von Klitzing	“polo descubrimento do efecto Hall cuántico”
1986	Ernst Ruska	“polo seu traballo fundamental na óptica electrónica, e polo deseño do primeiro microscopio electrónico”
	Gerd Binnig Heinrich Rohrer	“polo seu deseño do microscopio electrónico de efecto túnel”
1987	Johannes Georg Bednorz Karl Alexander Müller	“polo seu importante descubrimento da superconductividade nos materiais cerámicos”
1988	Leon Max Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger	“polo método de feixes de neutrinos e a demostración da estrutura dos leptóns a través do descubrimento do neutrino muónico”
1989	Norman Foster Ramsey	“pola invención do método dos campos oscilatorios separados e o seu uso nos reloxos de máser de hidróxeno e outros reloxos atómicos”
	Hans Georg Dehmelt Wolfgang Paul	“polo desenvolvemento da técnica para atrapar ións”

1990	Jerome I. Friedman Henry W. Kendall Richard E. Taylor	“polas súas investigacións pioneiras relativas á difusión profundamente inelástica de electróns sobre protóns e neutróns ligados, que foron de esencial importancia para o desenvolvemento do modelo dos <i>quarks</i> na física de partículas”
1991	Pierre-Gilles de Gennes	“por descubrir que os métodos desenvolvidos para estudar os fenómenos ordenados en sistemas simples poden ser xeneralizados para as formas máis complexas de materia, e en particular para os cristais líquidos e os polímeros”
1992	Georges Charpak	“pola súa invención e desenvolvemento de detectores de partículas, e en particular a cámara proporcional multi-chispas”
1993	Russell A. Hulse Joseph H. Taylor Jr.	“polo descubrimento dun novo tipo de púlsar, que abriu novas posibilidades para o estudo da gravitación”
1994	Bertram N. Brockhouse Clifford G. Shull	“polo desenvolvemento da espectroscopia de neutróns” “polo desenvolvemento da técnica de difracción de neutróns”
1995	Martin L. Perl Frederick Reines	“polo descubrimento do leptón tau” “pola detección dos neutrinos”
1996	David M. Lee Douglas D. Osheroff Robert C. Richardson	“polo seu descubrimento da superfluidez no helio 3”
1997	Steven Chu Claude Cohen-Tannoudji William D. Phillips	“polo desenvolvemento de métodos para arrefriar e atrapar átomos con luz láser”
1998	Robert B. Laughlin Horst L. Störmer Daniel C. Tsui	“polo seu descubrimento dunha nova forma de fluído cuántico con excitacións con carga fraccionaria”
1999	Gerardus 't Hooft Martinus J. G. Veltman	“por explica-la estrutura cuántica das interaccións electrodébiles na física”

PREMIOS NOBEL DE QUÍMICA

Ano	Laureados	Motivos
1901	Jacobus Henricus van 't Hoff	“en recoñecemento dos extraordinarios servizos prestados mediante o descubrimento das leis da dinámica química e da presión osmótica en solucións”
1902	Hermann Emil Fischer	“en recoñecemento dos extraordinarios servizos prestados co seu traballo sobre a síntese de azúcreos purinas”

1903	Svante August Arrhenius	<i>“en recoñecemento dos extraordinarios servicios prestados no progreso da Química coa súa teoría da disociación electrolítica”</i>
1904	William Ramsay	<i>“en recoñecemento dos seus servicios co descubrimento dos gases nobres no aire e maila súa determinación do seu lugar no sistema periódico”</i>
1905	Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer	<i>“en recoñecemento dos seus servicios no progreso da Química orgánica e da industria química co seu traballo sobre cores orgánicas e compostos hidroaromáticos”</i>
1906	Henri Moissan	<i>“en recoñecemento dos grandes servicios prestados coa súa investigación e o illamento da fluorina, e pola adopción, ó servico da ciencia, do forno eléctrico que leva o seu nome”</i>
1907	Eduard Buchner	<i>“polas súas investigacións biomédicas e o seu descubrimento da fermentación sen células”</i>
1908	Ernest Rutherford	<i>“polas súas investigacións sobre a desintegración dos elementos e maila química das substancias radioactivas”</i>
1909	Wilhelm Ostwald	<i>“en recoñecemento do seu traballo sobre a catálise, e polas súas investigacións sobre os principios fundamentais que rexen os equilibrios químicos e as velocidades de reacción”</i>
1910	Otto Wallach	<i>“en recoñecemento dos seus servicios á Química orgánica e á industria química co seu traballo pioneiro no eido dos compostos acíclicos”</i>
1911	Marie Curie (nada Sklodowska)	<i>“en recoñecemento dos seus servicios ó progreso da Química co descubrimento dos elementos radio e do polonio, o illamento do radio e o estudio da natureza e os compoñentes deste notable elemento”</i>
1912	Victor Grignard	<i>“polo descubrimento do chamado reaxente de Grignard, que nos últimos anos permitiu un gran progreso da Química orgánica”</i>
	Paul Sabatier	<i>“polo seu método de hidroxenación de compostos orgánicos na presenza de metais finamente divididos, co que a Química orgánica progresou grandemente nos últimos anos”</i>
1913	Alfred Werner	<i>“en recoñecemento do seu traballo sobre as relacións de enlace de átomos en moléculas, co que deitou unha nova luz sobre investigacións anteriores e abriu novos campos de investigación, especialmente na Química inorgánica”</i>
1914	Theodore William Richards	<i>“en recoñecemento das súas determinacións do peso atómico dun amplo número de elementos químicos”</i>

1915	Richard Martin Willstätter	“polas súas investigacións sobre os pigmentos das plantas, e en particular a clorofila”
1918	Fritz Haber	“polas síntese do amoníaco a partir dos seus elementos”
1920	Walther Hermann Nernst	“en recoñecemento do seu traballo sobre termoquímica”
1921	Frederick Soddy	“polas súas contribucións ó noso coñecemento da química das substancias radioactivas e polas súas investigacións sobre a orixe e a natureza dos isótopos”
1922	Francis William Aston	“polo seu descubrimento, a través do seu espectrógrafo de masas, de isótopos nun gran número de elementos non-radioactivos, e pola formulación da regra do número enteiro”
1923	Fritz Pregl	“pola súa invención do método de microanálise de compostos orgánicos”
1925	Richard Adolf Zsigmondy	“pola súa demostración da natureza heteroxénea das solucións de coloides e polos métodos utilizados, que se converteron en fundamentais na moderna química de coloides”
1926	The (Theodor) Svedberg	“polo seu traballo sobre os sistemas dispersos”
1927	Heinrich Otto Wieland	“polas súas investigacións sobre a constitución dos ácidos da bile e as substancias relacionadas”
1928	Adolf Otto Reinhold Windaus	“polos servizos prestados a través da súa investigación sobre a constitución dos esteroides e a súa relación coas vitaminas”
1929	Arthur Harden Hans Karl August Simon von Euler-Chelpin	“polas súas investigacións sobre a fermentación de azucres e enzimas”
1930	Hans Fischer	“polas súas investigacións sobre a constitución da haemina e a clorofila e especialmente pola súa síntese da haemina”
1931	Carl Bosch Friedrich Bergius	“en recoñecemento das súas contribucións á invención e o desenvolvemento de procesos químicos a altas presións”
1932	Irving Langmuir	“polos seus descubrimentos e investigacións sobre química de superficies”
1934	Harold Clayton Urey	“polo seu descubrimento do hidróxeno pesado”
1935	Frédéric Joliot Irène Joliot-Curie	“en recoñecemento da súa síntese de novos elementos radioactivos”

1936	Petrus (Peter) Josephus Wilhelmus Debye	“polas súas contribucións ó noso coñecemento da estrutura molecular a través das súas investigacións sobre momentos dipolares e sobre a difracción de raios X e de electróns en gases”
1937	Walter Norman Haworth	“polas súas investigacións sobre os hidratos de carbono e a vitamina C”
	Paul Karrer	“polas súas investigacións sobre os carotenoides, as flavinas e as vitaminas A e B2”
1938	Richard Kuhn	“polo seu traballo sobre os carotenoides e as vitaminas”
1939	Adolf Friedrich Johann Butenandt	“polo seu traballo sobre as hormonas sexuais”
	Leopold Ruzicka	“polo seu traballo sobre os polimetilenos e os terpenos máis altos”
1943	George de Hevesy	“polo seu traballo sobre a aplicación de isótopos como indicadores na investigación dos procesos químicos”
1944	Otto Hahn	“polo seu descubrimento da fisión de núcleos pesados”
1945	Artturi Ilmari Virtanen	“pola súa investigación e os inventos na área da Química agrícola e dos alimentos, especialmente polo seu método de protección da forraxe”
1946	James Batcheller Sumner	“por descubrir que as enzimas poden ser cristalizadas”
	John Howard Northrop Wendell Meredith Stanley	“pola súa preparación de enzimas e proteínas de virus en forma pura”
1947	Robert Robinson	“polas súas investigacións sobre os produtos vexetais de importancia para a Bioloxía, especialmente os alcaloides”
1948	Arne Wilhelm Kaurin Tiselius	“pola súa investigación sobre a electroforese e a análise de adsorción, e especialmente polos seus descubrimentos relativos á natureza complexa das proteínas do soro”
1949	William Francis GIAUQUE	“polas súas contribucións no eido da Termodinámica química, e en especial no relativo ó comportamento das substancias a temperaturas extremadamente baixas”
1950	Otto Paul Hermann Diels Kurt Alder	“polo seu descubrimento e desenvolvemento da síntese de diens”
1951	Edwin Mattison McMillan Glenn Theodore Seaborg	“polos seus descubrimentos na química dos elementos transuránicos”
1952	Archer John Porter Martin Richard Laurence Millington Synge	“pola súa invención da cromatografía”

1953	Hermann Staudinger	“polos seus descubrimentos no eido da Química macro molecular”
1954	Linus Carl Pauling	“polas súas investigacións sobre a natureza do enlace químico e a súa aplicación á elucidación da estrutura das substancias complexas”
1955	Vincent du Vigneaud	“polo seu traballo sobre os compostos sulfurados bioquimicamente importantes, e en especial pola primeira síntese dunha hormona polipéptida”
1956	Cyril Norman Hinshelwood Nikolai Nikolaevich Semenov	“polas súas investigacións sobre o mecanismo das reaccións químicas”
1957	Alexander R. Todd	“polo seu traballo sobre os nucleótidos e as coenzimas nucleótidas”
1958	Frederick Sanger	“polo seu traballo sobre a estrutura das proteínas, e en especial da insulina”
1959	Jaroslav Heyrovsk”	“polo seu descubrimento e desenvolvemento dos métodos polarográficos de análise”
1960	Willard Frank Libby	“polo seu método para aplica-lo carbono 14 para a determinación da idade na Arqueoloxía, a Xeoloxía, a Xeofísica e outras ramas da ciencia”
1961	Melvin Calvin	“pola súa investigación sobre a asimilación do ácido carbónico polas plantas”
1962	Max Ferdinand Perutz John Cowdery Kendrew	“polos seus estudos sobre as estruturas das globulinas”
1963	Karl Ziegler Giulio Natta	“polos seus descubrimentos no eido da Química e a tecnoloxía dos polímeros altos”
1964	Dorothy Crowfoot-Hodgkin	“polas súas determinacións por raios X das estruturas de importantes substancias bioquímicas”
1965	Robert Burns Woodward	“polos seus logros sobresalientes na arte da síntese orgánica”
1966	Robert S. Mulliken	“polo seu fundamental traballo relativo ós enlaces químicos e a estrutura electrónica das moléculas polo método orbital”
1967	Manfred Eigen Ronald George Wreyford Norrish George Porter	“polos seus estudos sobre as reaccións químicas extremadamente rápidas provocadas mediante a perturbación do equilibrio mediante impulsos moi curtos de enerxía”

1968	Lars Onsager	“polo descubrimento das relacións recíprocas que levan o seu nome, que son fundamentais para a termodinámica dos procesos irreversibles”
1969	Derek H. R. Barton Odd Hassel	“polas súas contribucións ó desenvolvemento do concepto de conformación e a súa aplicación á Química”
1970	Luis F. Leloir	“polo seu descubrimento de nucleótidos azucres e o seu papel na biosíntese dos hidratos de carbono”
1971	Gerhard Herzberg	“polas súas contribucións ó coñecemento da estrutura electrónica e da xeometría das moléculas, e en particular das radicais libres”
1972	Christian B. Anfinsen	“polo seu traballo sobre a ribonucleasa, e en especial sobre a conexión entre a secuencia dos aminoácidos e a confirmación bioloxicamente activa”
	Stanford Moore William H. Stein	“pola súa contribución á comprensión da conexión entre estrutura química e actividade catalítica do centro activo da ribonucleasa”
1973	Ernst Otto Fischer Geoffrey Wilkinson	“polo seu traballo pioneiro, levado a cabo independentemente, sobre a química dos compostos organo-metálicos, chamados compostos <i>sándwich</i> ”
1974	Paul J. Flory	“polos seus logros fundamentais, tanto teóricos como experimentais, na química física das macromoléculas”
1975	John Warcup Cornforth	“polo seu traballo sobre a estereoquímica das reaccións catalíticas das enzimas”
	Vladimir Prelog	“pola súa investigación sobre a estereoquímica das moléculas orgánicas e reaccións”
1976	William N. Lipscomb	“polos seus estudos sobre a estrutura dos borados, que deitaron luz sobre os problemas dos enlaces químicos”
1977	Ilya Prigogine	“polas súas contribucións á termodinámica dos procesos irreversibles, e en particular á teoría das estruturas dissipativas”
1978	Peter D. Mitchell	“pola súa contribución á comprensión da transferencia de enerxía biolóxica a través da formulación da teoría quimiosmótica”
1979	Herbert C. Brown Georg Wittig	“polo seu desenvolvemento da aplicación de compostos orgánicos borados e fosforados, respectivamente, en reagentes importantes da síntese orgánica”
1980	Paul Berg	“polos seus estudos fundamentais da bioquímica dos ácidos nucleicos, con especial atención ó DNA recombinante”

	Walter Gilbert Frederick Sanger	“polas súas contribucións relativas á determinación das secuencias básicas nos ácidos nucleicos”
1981	Kenichi Fukui Roald Hoffmann	“polas súas teorías, desenvolvidas independentemente, relativas ó curso das reaccións químicas”
1982	Aaron Klug	“polo seu desenvolvemento do microscopio electrónico cristalográfico para elucidar estruturalmente complexos proteínicos e nucleicos bioloxicamente importantes”
1983	Henry Taube	“polo seu traballo sobre os mecanismos de reacción de transferencia de electróns, especialmente nos complexos de metais”
1984	Robert Bruce Merrifield	“polo seu desenvolvemento da metodoloxía para a síntese química sobre unha matriz sólida”
1985	Herbert A. Hauptman Jerome Karle	“polos seus logros sobresaíntes no desenvolvemento de métodos directos para a determinación de estruturas cristalinas”
1986	Dudley R. Herschbach Yuan Tseh Lee John C. Polanyi	“polas súas contribucións relativas á dinámica dos procesos químicos elementais”
1987	Donald J. Cram Jean-Marie Lehn Charles J. Pedersen	“polo seu desenvolvemento e aplicación de moléculas con interaccións estruturalmente específicas de alta selectividade”
1988	Johann Deisenhofer Robert Huber Hartmut Michel	“pola determinación da estrutura tridimensional do centro dunha reacción de fotosíntese”
1989	Sidney Altman Thomas Robert Cech	“polo seu descubrimento das propiedades catalíticas do ácido ribonucleico”
1990	Elias James Corey	“polo seu desenvolvemento da teoría e da metodoloxía da síntese orgánica”
1991	Richard Robert Ernst	“polas súas contribucións ó desenvolvemento da metodoloxía da espectroscopia de resonancia magnética nuclear de alta resolución”
1992	Rudolph A. Marcus	“polas súas contribucións á teoría das reaccións de transferencia electrónica nos sistemas químicos”
1993	Kary Banks Mullis	“pola súa invención do método da reacción en cadea polimerasa”
	Michael Smith	“polas súas contribucións fundamentais ó establecemento da mutaxénese baseada nos oligonucleótidos e o seu desenvolvemento para os estudos das proteínas”

1994	George A. Olah	“pola súa contribución á química da carbocación”
1995	Paul Crutzen Mario Molina Frank Sherwood Rowland	“polo seu traballo sobre química atmosférica, e en particular a relativa á formación e á descomposición do ozono”
1996	Robert F. Curl Jr. Harold W. Kroto Richard E. Smalley	“polo seu descubrimento dos fulerenos”
1997	Paul D. Boyer John E. Walker	“pola súa elucidación do mecanismo enzimático subxacente na síntese do trifosfato de adenosina (ATP)”
	Jens C. Skou	“polo primeiro descubrimento dunha enzima que transporta un ión, Na^+ , K^+ -ATPase”
1998	Walter Kohn	“polo seu desenvolvemento da teoría da densidade funcional”
	John A. Pople	“polo seu desenvolvemento de métodos computacionais na Química cuántica”
1999	Ahmed H. Zewail	“polos seus estudos sobre os estados de transición das reaccións químicas por medio da espectroscopia de femto segundo”

PREMIOS NOBEL DE CIENCIAS ECONÓMICAS

Ano	Laureados	Motivos
1969	Ragnar Frisch Jan Tinbergen	“por teren desenvolvido e aplicado modelos dinámicos para a análise dos procesos económicos”
1970	Paul A. Samuelson	“polo traballo científico a través do cal desenvolveu unha teoría económica estática e dinámica e contribuíu activamente a eleva-lo nivel da análise na ciencia económica”
1971	Simon Kuznets	“pola súa interpretación empiricamente fundamentada do crecemento económico, que conduciu a unha visión nova e máis profunda da estrutura económica e social e o proceso do desenvolvemento”
1972	John R. Hicks Kenneth J. Arrow	“polas súas contribucións pioneiras á teoría do equilibrio económico xeral e á teoría do benestar”
1973	Wassily Leontief	“polo desenvolvemento do método <i>input-output</i> e pola súa aplicación a importantes problemas económicos”
1974	Gunnar Myrdal Friedrich August von Hayek	“polo seu traballo pioneiro na teoría do diñeiro e as fluctuacións económicas e mais pola súa penetrante análise da

		interdependencia dos fenómenos económicos, sociais e institucionais”
1975	Leonid Vitaliyevich Kantorovich Tjalling C. Koopmans	“polas súas contribucións á teoría da colocación óptima dos recursos”
1976	Milton Friedman	“polos seus logros nos campos da análise do consumo, a historia e a teoría monetaria, e mais pola súa demostración da complexidade da política de estabilización”
1977	Bertil Ohlin James E. Meade	“polas súas innovadoras contribucións á teoría do comercio internacional e dos movementos internacionais de capital”
1978	Herbert A. Simon	“pola súa investigación pioneira do proceso de toma de decisións nas organizacións económicas”
1979	Theodore W. Schultz Arthur Lewis	“pola súa investigación pioneira sobre o desenvolvemento económico, con especial consideración dos problemas dos países en vías de desenvolvemento”
1980	Lawrence R. Klein	“pola creación de modelos econométricos e a aplicación á análise das fluctuacións e das políticas económicas”
1981	James Tobin	“pola súa análise dos mercados financeiros e as súas relacións coas decisións sobre os gastos, o emprego, a produción e os prezos”
1982	George J. Stigler	“polos seus estudos seminais sobre as estruturas industriais, o funcionamento dos mercados e as causas e os efectos da regulación pública”
1983	Gerard Debreu	“por ter incorporado novos métodos analíticos na teoría económica e pola súa reformulación rigorosa da teoría do equilibrio xeral”
1984	Richard Stone	“polas súas contribucións fundamentais ó desenvolvemento de sistemas de contabilidade nacional, que melloraron grandemente as bases da análise económica empírica”
1985	Franco Modigliani	“pola súa análise pioneira do aforo e dos mercados financeiros”
1986	James M. Buchanan Jr.	“polo seu desenvolvemento das bases contractuais e constitucionais da teoría económica e política da toma de decisións”
1987	Robert M. Solow	“polas súas contribucións á teoría do crecemento económico”
1988	Maurice Allais	“polas súas contribucións pioneiras á teoría dos mercados e da utilización eficiente dos recursos”

1989	Trygve Haavelmo	“pola súa clarificación da teoría da probabilidade, os fundamentos da econometría e as súas análises das estruturas económicas simultáneas”
1990	Harry M. Markowitz Merton H. Miller William F. Sharpe	“polo seu traballo pioneiro na teoría da economía financeira”
1991	Ronald H. Coase	“polo seu descubrimento e clarificación do significado dos custos de transacción e dos dereitos de propiedade para a estrutura institucional e o funcionamento da economía”
1992	Gary S. Becker	“por ter estendido o dominio da análise microeconómica a un amplo abano de comportamentos e interaccións humanos, incluído o comportamento non de mercado”
1993	Robert W. Fogel Douglass C. North	“por teren renovado a investigación da historia económica ó aplicaren a teoría económica e os métodos cuantitativos para explica-lo cambio económico e institucional”
1994	John C. Harsanyi John F. Nash Reinhard Selten	“pola súa análise pioneira dos equilibrios na teoría de xogos non cooperativos”
1995	Robert E. Lucas Jr.	“por ter desenvolvido e aplicado a hipótese das expectativas racionais, co que transformou a análise macroeconómica e afondou no noso coñecemento da política económica”
1996	James A. Mirrlees William Vickrey	“polas súas contribucións fundamentais á teoría económica dos incentivos baixo información asimétrica”
1997	Robert C. Merton Myron S. Scholes	“por un novo método para determina-lo valor de derivados”
1998	Amartya Sen	“polas súas contribucións á economía do benestar”
1999	Robert A. Mundell	“pola súa análise da política monetaria e fiscal baixo diferentes réximes de tipos de cambio, e a súa análise das áreas de monetarias óptimas”





Normas para os autores

NORMAS PARA OS AUTORES

Comité de Redacción

Os profesores interesados en remitir estudos, prácticas, recensións de libros ou noticias para a súa publicación na *Revista Galega do Ensino* (RGE) deberán aterse ás seguintes indicacións, tendo en conta que non se aceptarán os traballos que non as respecten:

1ª) As colaboracións serán inéditas. Consistirán en investigacións teóricas ou prácticas relacionadas co ensino. Deben presentar especial interese para calquera dos tres niveis —primario, secundario, universitario—integrados no contido multidisciplinar da RGE. Preferiranse os traballos dun só firmante e non se aceptarán os asinados por máis de dous. O nome e os apelidos do autor, seguidos do do centro docente ou institución onde traballe, figurarán debaixo do título. As recensións darán noticia de libros de actualidade (enténdese do mesmo ano en que se envían á Revista) e nelas o nome, apelidos e centro do autor poranse ó final. Cando se trate dunha primeira colaboración, indicaranse, en folio á parte nome, centro, enderezo e teléfono. Axuntarase un breve currículo (15 a 20 liñas).

2ª) Os autores presentarán os traballos en disquete, acompañados de copia impresa en letra Courier tamaño 12, paso non compensado. Cada páxina debe ter 2.275 matrices (caracteres + espazos en branco), o que equivale a folios Din A4 de 35 liñas con 65 matrices por liña.

Aplicacións soportadas.

Ficheiros de texto.

Sempre que sexa posible, o ficheiro deberá estar almacenado en formato *Word 97 para Windows*.

Word 97 para Windows soporta ficheiros de:

Word Perfect ata a versión 5.x para MS.DOS e Windows,

Microsoft Publisher 2.0

E ficheiros MS.DOS e ASCII

Word Perfect 5.1 para MS-DOS.

QuarkXPress 3.3 para Power Macintosh

Postscript con formato MAC ou PC.

Follas de cálculo:

O xestor de follas de cálculo utilizado é *Excel 97* para Windows.

Soporta conversión desde formato.

Lotus 1-2-3,
QuattroPro/DOS,
Microsoft Works,
dBASE,
 versións anteriores de *Excel*.

Bases de datos:

O xestor de base de datos é *Acces 97 2.5 para Windows*. Os ficheiros con formato dBASE son recoñecidos pola aplicación.

3ª) Os orixinais deberán estar correctamente redactados e puntuados, e escritos, se for posible, en lingua galega. A RGE, que seguirá as normas oficiais do idioma galego, incluso nas opcións preferidas por elas, resérvase a capacidade de facer correccións de estilo, maiormente naqueles puntos que poidan resultar escuros ou ambiguos. Non se usará letra negra (grosa). A cursiva ou as comiñas deberán responder ás convencións internacionais. Toda sigla ha de ser desenvolvida entre parénteses a primeira vez que se cite nun traballo. Exemplo: RAG (Real Academia Galega).

4ª) Así mesmo, a RGE prégalles ós autores o envío de ilustracións de boa calidade, en cor ou en branco e negro (fotografías, fotocopias, mapas, debuxos, gráficos). Para a publicación das recensións é imprescindible a fotocopia da cuberta do libro.

5ª) Os traballos terán a extensión seguinte (cítanse a mínima e a máxima en folios Din A4, entendendo incluídos cadros e esquemas): “Colaboracións Especiais”, 15-25; “Estudios”, 10-25; “Prácticas”, 6-15; “Recensións”, 3-5; “Noticias”, 1-4.

6ª) No caso de estaren divididos en apartados e subapartados, os orixinais han ir acompañados do correspondente índice, organizado con cifras ou letras. Este índice non se publicará.

7ª) O Comité de Redacción decidirá a conveniencia da publicación dos traballos, que serán avaliados por especialistas nas materias de que se trate.

8ª) Os colaboradores da RGE recibirán unha ficha, que cubrirán cos seus datos e o seu perfil académico e profesional.

9ª) A cada autor dun traballo publicado na RGE enviaránselle tres exemplares dela e vinte e cinco separatas.

10ª) Os estudos con notas presentarán estas preferentemente a pé de páxina.

11ª) As referencias bibliográficas que aparezan no corpo do traballo disporanse abreviadamente segundo un dos modos seguintes, máis adiante detallados:

(A. Parrilla, *La integración...*, p. 18)
 — sistema europeo:

(Parrilla, 1992a, 18) — sistema americano:

Debe terse en conta que o sistema europeo prefere a substitución das referencias bibliográficas incrustadas no corpo do traballo por chamadas e notas a pé de páxina, nas que non hai orde alfabética e os nomes dos autores figuran antes dos apelidos; nelas adoitan usarse as referencias bibliográficas cos datos editoriais completos.

O sistema americano permite suprimir as notas a pé de páxina cando son exclusivamente bibliográficas, polo que resulta indispensable unha bibliografía final na que se detallen tódolos datos.

12ª) A bibliografía consultada como base das colaboracións colocárase ó final delas, ordenada alfabeticamente polos apelidos dos autores, seguidos dos seus nomes, completos ou abreviados coa letra inicial; despois poñeráse coma ou dous puntos. Debe entenderse que, feita calquera destas eleccións, non se mesturará coa outra.

Utilizarase sangría francesa, é dicir, sangraranse tódalas liñas, agás a primeira de cada entrada.

Os títulos de libros, revistas e xornais irán en letra cursiva; os de capítulos de libros, de artigos aparecidos en revistas e xornais, ou de traballos en libros colectivos poñeráse entre comiñas, indicando a continuación o xornal, revista ou libro en que se integran.

Escribíranse logo tódolos datos editoriais, sempre pola mesma orde: lugar de edición, editorial, ano (se non se citou antes, segundo o sistema americano) e, se se desexa, colección. No caso das revistas abonda con poñer o número e o ano; no de xornais, a data completa.

Indicárase o número da edición do libro, abreviadamente ou voado, só cando non sexa a primeira.

Sinaláranse as páxinas que comprenden o capítulo ou o artigo ós que se fai referencia.

Cando se citen dous ou máis traballos dun autor, ordenáranse cronoloxicamente, pero o apelido e o nome só aparecerán na primeira entrada: nas seguintes substituíranse por un trazo longo ó que seguirá, sen puntuación intermedia, o título que corresponda.

Elixido un sistema (o europeo ou o americano), non se mesturará co outro.

Pregábase un uso atento e rigoroso da puntuación, tal como se observa nos exemplos que seguen. Os apartados, que aparecen aquí por razóns de claridade, non se reproducirán na lista de referencias bibliográficas, que debe compoñerse con atención exclusiva á orde alfabética.

Reitérase, así mesmo, que esta orde non se respecta nas notas a pé de páxina, nas que os nomes propios van antepostos ós apelidos. En todo caso, os números xa publicados da RGE poden servir de guía para estas ou outras dúbidas.

SISTEMA EUROPEO

A) LIBROS dun só autor:

Goldstein, A., *Prescription for child mental health and education*, New York, Pergamon, 1978.

Parrilla, A., *La integración escolar y los profesores*, Madrid, Cincel, 2ª ed., 1992 (ou 1992²).

Tarrío Varela, A., *Literatura galega. Aportacións a unha Historia crítica*, Vigo, Xerais, 1995.

B) LIBROS de varios autores:

Cando os autores son dous ou tres, só se inverte o nome do primeiro. Se son máis de tres adóitase citar só o primeiro, seguido de "e outros". Se foran moitos e ningún deles figurase como coordinador, editor, director, recompilador, etc., utilizaranse as siglas AA.VV. ou VV. AA. (Varios Autores).

Ares Vázquez, M. Carme, e outros, *Diccionario Xerais da Lingua*, Vigo, Xerais, 1986.

López Casanova, A., e E. Alonso, *El análisis estilístico. Poesía /Novela*. Valencia, Bello, 1975.

Santamaría, Andrés, Augusto Cuartas e Joaquín Mangada, *Diccionario de incorreccións, particularidades y curiosidades del lenguaje*, Madrid, Paraninfo, 1995.

VV. AA., *Comprensión lingüística en estudiantes de Primaria y ESO*, Madrid, Ministerio de Educación y Cultura, 1996.

C) ARTIGOS aparecidos en revistas e xornais:

Laín Entralgo, P., "¿Generación del 98?", *El País*, 26-XI-1996, pp. 13-14.

Siguán, M., "O ensino bilingüe. Unha perspectiva de conxunto", *Revista Galega do Ensino*, 1, 1993, pp. 13-30.

Theilgaard, A., "Aggression and the XYY personality", *International Journal Law & Psychiatric*, 6, 1983, pp. 413-421.

D) CAPÍTULOS de libros dun só autor:

Moreno Báez, E., "Manierismo y Barroco", en *Reflexiones sobre el 'Quijote'*, Madrid, Prensa Española, 1971², pp. 107-125.

E) TRABALLOS en publicacións colectivas (libros de varios autores, dictionarios, enciclopedias, actas, misceláneas...):

Fernández Mosquera, S., "Quevedo y los emblemas: una comunicación difícil", en S. López Poza (ed.), *Literatura emblemática hispánica. Actas del I Simposio Internacional*, A Coruña, Universidade, 1996, pp. 447-459.

Oliveira, A. Resende de, "Pai Gómez Charinho", en G. Tavanni e G. Lanciani (eds.), *Diccionario de Literatura Medieval Galega e Portuguesa*, Lisboa, Caminho, 1993, pp. 502-503.

Requejo Osorio, A., "Desarrollo Comunitario y Educación", en J. M. Quintana (coord.), *Iniciativas sociales en educación informal*, Madrid, Rialp, 1991, pp. 349-360.

SISTEMA AMERICANO

O sistema americano permite unha maior brevidade debido ás referencias bibliográficas intercaladas no corpo do traballo e ó aforro de notas a pé de páxina. Na bibliografía todo se pon igual ca no europeo, con excepción da data, que figura entre parénteses despois do nome do autor. Cando se mencionen varios

libros dun autor publicados no mesmo ano, usaranse letras minúsculas comezando polo *a*. Daremos só algúns exemplos elixidos entre os dos apartados anteriores:

A)

Parrilla, A. (1992a): *La integración escolar y los profesores*, Madrid, Cincel, 2ª ed.

Tarrío Varela, A. (1995): *Literatura galega. Aportacións a unha Historia crítica*, Vigo, Xerais.

B)

López Casanova, A., e E. Alonso (1975): *El análisis estilístico. Poesía/Novela*, Valencia, Bello.

C)

Siguán, M. (1993): “O ensino bilíngüe. Unha perspectiva de conxunto”, *Revista Galega do Ensino*, 1, 13-30.

D)

Moreno Báez, E (1971²): “Manierismo y Barroco”, en *Reflexiones sobre el ‘Quijote’*, Madrid, Prensa Española, 107-125.

E)

Oliveira, A. Resende de (1993): “Pai Gómez Charinho”, en G. Tavanni e G. Lanciani (eds.), *Diccionario de Literatura Medieval Galega e Portuguesa*, Lisboa, Caminho, 502-503.

13ª) Nas RECENSIÓNS deben figurar sempre os mesmos datos e pola mesma orde:

Título: *Letra cursiva minúscula.*

Autor: Nome e apelidos.

Traductor: Cando sexa pertinente.

Editorial: Nome dela, lugar e ano de edición.

Colección: Se a hai e desexa mencionarse.

Núm. pp.: Número de páxinas.

Tamaño: Número de cm de alto por número de cm de largo.

14ª) Os repertorios de NOVIDADES EDITORIAIS respectarán as indicacións bibliográficas descritas.

15ª) Enténdense como NOTICIAS as que informen sobre investigación, educación e ensino. Poderán anunciarse congresos, cursos, certames, bolsas, actos culturais, etc., sempre que sexa coa anticipación conveniente e non resulten desfasadas no momento da aparición da RGE.

Así mesmo, mediante breves resumos, pódense dar NOTICIAS de acontecementos recentes: congresos, cursos, exposicións, estreas teatrais, concertos e actos culturais diversos.

16ª) O Comité de Redacción resérvasse a facultade de introduci-las modificacións que estime oportunas na aplicación das normas publicadas. Os orixinais non serán devoltos.



