

Tema 8

Física cuántica. Relatividade especial

Evolución das ideas acerca da natureza da luz	Dualidade onda-corpúsculo
Experimento de Young (da dobre fenda	Principio de indeterminación de Heisenberg
Efecto fotoeléctrico. Enerxía e momento lineal dun fotón	Problemas e cuestións

Relatividade especial

8-1 Evolución das ideas acerca da natureza da luz

Dende os filósofos da Grecia clásica, a natureza da luz foi obxecto de debate, enfrontándose dúas teorías antagónicas: a teoría corpuscular que supoñía que a luz era un fluxo de partículas emitidas polos corpos luminosos, e a teoría ondulatoria que consideraba a luz como unha onda, é dicir, a propagación a través dun medio das perturbacións producidas polos corpos luminosos.

No século XVII os partidarios da teoría corpuscular encabezados por Newton e os defensores da teoría ondulatoria como Huygens, continuaban este debate. Cada teoría explicaba facilmente algúns fenómenos luminosos, e tiña serias dificultades para explicar outros, como se resume a continuación.

1) A luz pode propagarse no baleiro. Isto sucede, por exemplo, cando a luz solar acada aos planetas atravesando o espacio baleiro, ou cando a luz atravesa un tubo de vidro no que se practicou o baleiro.

A teoría corpuscular indica que a luz consiste nunha serie de partículas que se moven a gran velocidade e en liña recta, atravesando os corpos transparentes e o baleiro.

No século XVII non se coñecía ningún tipo de onda que se propagase sen necesidade dun medio material, polo que a teoría ondulatoria considerou que debía existir un fluído que enchía o espacio baleiro e permitía a propagación da luz. As propiedades deste fluído fantasmagórico que se chamou éter, eran contradictorias.

Por un lado o éter non ofrecía ningunha resistencia a ser atravesado polos planetas no seu movemento arredor do Sol, e por outra banda a súa elasticidade mecánica, é dicir, a súa

resistencia a ser separado da posición de equilibrio ou a ser deformado, debería ser moito maior cá dun resorte de aceiro. En efecto, a velocidade de propagación dunha onda é directamente proporcional á constante elástica do medio, de xeito que a altísima velocidade da luz implicaba unha enorme constante de elasticidade do éter.

A hipótese da existencia do éter, non supoñía un punto en contra da teoría ondulatoria, pois Newton necesitaba esta mesma hipótese para explicar varios fenómenos luminosos dentro da teoría corpuscular.

2) *A luz propágase en liña recta.* A teoría corpuscular explica que cando a luz atravesa un buraco nunha parede ou pantalla, o feixe de partículas de luz que atravesan o buraco continúan o seu movemento en liña recta.

A teoría ondulatoria non podía explicar porqué a luz non se difracta ao atravesar un buraco, de xeito análogo a cando unha onda sonora atravesa unha porta, situación na que se "dobra" cara ao exterior acadando lugares que non están en liña coa porta e a fonte de son.

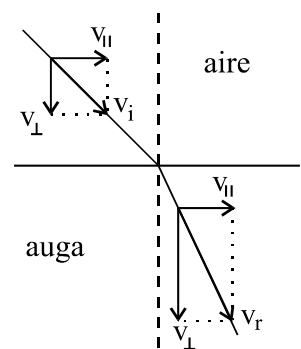
3) *A luz reflíctase sobre as superficies pulidas cumpríndose que o ángulo de incidencia é igual ao ángulo de reflexión.*

Para a teoría corpuscular as partículas de luz rebotan nunha capa de éter de extrema resistencia elástica que recubre a superficie dos corpos pulidos, comportándose coma bolas de billar ao chocar cunha parede.

A teoría ondulatoria explica o fenómeno da reflexión a partir do principio de Huygens, considerando que cada punto acadado pola onda convértese en emisor de ondas secundarias, que ao superporse forman un novo fronte de ondas.

4) *A luz refráctase ao atravesar a superficie de separación entre dous medios, cumpríndose a lei de Snell: $n_1 \text{sen} \alpha_i = n_2 \text{sen} \alpha_r$.*

Newton explicou este fenómeno considerando que as partículas de luz, son aceleradas ao pasar dende o aire, onde o éter é menos elástico, á auga, onde o éter é máis elástico. Ao aumentar a compoñente da velocidade perpendicular á superficie de separación prodúcese o cambio na dirección da luz (Fig.1). Observar que a teoría corpuscular supón que a velocidade da luz é maior na auga que no aire.



Refracción da luz.

A teoría ondulatoria explica a refracción baseándose no principio de Huygens, e supoñendo que a velocidade da luz é menor na auga que no aire. Ao non poder medirse a velocidade de propagación da luz no aire e na auga, non se podía constatar cal das dúas teorías explicaba correctamente a lei de Snell da refracción.

A dificultade para explicar a propagación rectilínea da luz, e o enorme prestixio de Newton, fixeron que a teoría ondulatoria fose rexeitada pola maioría dos científicos en favor da teoría corpuscular durante case dous séculos.

No século XIX **Young** e **Fresnel** realizaron unha experiencia na que se observaba con claridade a difracción da luz ao atravesar dúas fendas moi estreitas, e a posterior interferencia entre os fronts de onda da luz difractada. Este experimento permitiu calcular a lonxitude de onda da luz

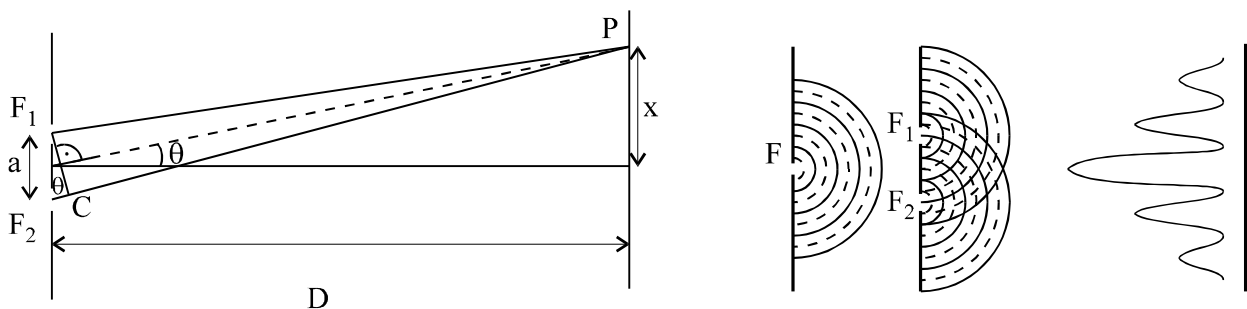
visible, da orde de 10^{-7} m, e explicar a súa propagación rectilínea ao atravesar un buraco nunha pantalla, xa que a difracción só se produce se a abertura ten un tamaño similar á lonxitude de onda. Esta experiencia "da dobre fenda" confirmaba plenamente o carácter ondulatorio da luz. Posteriormente **Maxwell** identificou a luz como un tipo de onda electromagnética, constituída por campos eléctricos e magnéticos oscilantes, que se propagaba no baleiro sen necesidade de ningún medio material, polo que tamén desapareceu a necesidade da existencia do éter como soporte das ondas luminosas.

Parecía totalmente pechado o debate entre a teoría ondulatoria e a corpuscular da luz, en favor da primeira, cando **Einstein** en 1902 explica correctamente o efecto fotoeléctrico, ou emisión de electróns por un metal ao iluminalo, baseándose na hipótese de que a luz estaba formada por partículas. A teoría ondulatoria era incapaz de explicar as observacións experimentais sobre este fenómeno.

A luz parecía comportarse a veces coma onda (ao difractarse e interferir) e a veces coma corpúsculo (no efecto fotoeléctrico).

8-2 Experimento de Young (da dobre fenda)

A experiencia de Young consiste en facer pasar a luz solar a través dunha fenda F que segundo o principio de Huygens convértese en emisor de ondas, dando lugar a un fronte de ondas cilíndrico, é dicir, a luz difrátase ao atravesar a rañura. A continuación a luz acada dúas novas fendas F_1 e F_2 , nas que volve a difractarse producíndose dous novos frontes de onda cilíndricos.



Ao superarse as ondas emitidas dende F_1 e F_2 sobre unha pantalla, prodúcese unha serie de franxas de interferencia alternativamente brillantes e escuras. Para que as ondas emitidas dende cada fenda, interfiran en fase sobre a pantalla e se produza un máximo, a diferenza entre as distancias entre cada foco e o punto debe ser igual a un número enteiro de lonxitudes de onda:

$$\overline{F_2P} - \overline{F_1P} = n\lambda$$

Na experiencia a distancia a entre as rañuras é moito menor que a distancia D á pantalla, e o ángulo θ é pequeno, polo que podemos escribir:

$$\overline{F_2P} - \overline{F_1P} = \overline{F_2C} = a \cdot \text{sen}\theta = a \frac{x}{D}$$

de xeito que as posicións x da pantalla correspondente a máximos luminosos verifican que:

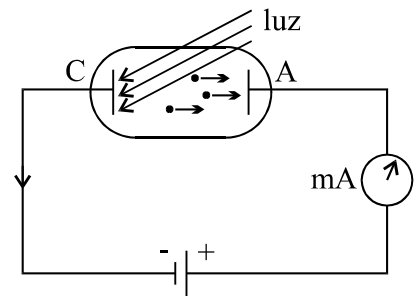
$$a \frac{x}{D} = n\lambda$$

esta expresión permite calcular a partir das distancias a , D e x a lonxitude de onda da luz visible.

8-3 Efecto fotoeléctrico. Enerxía e momento lineal dun fotón

O efecto fotoeléctrico consiste na emisión de electróns da superficie dun metal ao iluminalo. Pode estudiarse nunha célula fotoeléctrica ou ampola transparente na que se fixo o baleiro, e que contén dous electrodos unidos a unha batería.

Ao iluminar o electrodo negativo ou cátodo, este emite electróns que son atraídos polo electrodo positivo ou ánodo, pechando o circuíto, de xeito que o amperímetro detecta o paso dunha corrente eléctrica.



Célula fotoeléctrica.

Para que un electrón dun metal dado, poida vencer a atracción eléctrica exercida polos ións positivos da rede cristalina, necesita absorber enerxía da luz incidente. A enerxía necesaria para que un electrón escape do metal chámase enerxía de enlace, e non é a mesma para tódolos electróns pois uns están mais debilmente ligados ao metal cos outros.

A enerxía de enlace correspondente aos electróns máis debilmente atraídos polo metal coñécese como *función traballo* Φ , e será a mínima enerxía necesaria para arrancar un electrón do metal.

Se un electrón con enerxía de enlace mínima Φ , absorbe unha cantidade de enerxía E da luz incidente, sendo E maior ca Φ , a enerxía "sobrante" transfórmase en enerxía cinética E_c do electrón: $E = E_c + \Phi$. Podemos medir experimentalmente nunha célula fotoeléctrica a enerxía cinética máxima, e a velocidade máxima, dos electróns emitidos, cambiando a polaridade da pila, e observando o potencial V_0 para o que ningún electrón chega ao electrodo A da dereita. Nese momento a E_c máxima dos electróns é igual ao traballo eléctrico realizado cando se desprazan entre os dous electrodos en contra da forza eléctrica:

$$E_{c \text{ máx}} = \frac{1}{2} m_e v_{\text{máx}}^2 = eV_0$$

sendo $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a masa e a carga de electrón, respectivamente, e V_0 o chamado potencial de freado ou de detención.

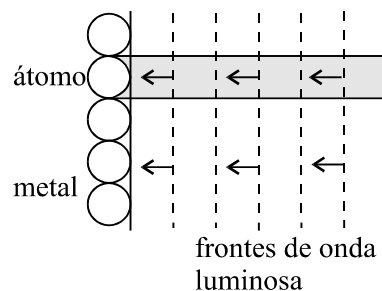
Os resultados experimentais do estudio da célula fotoeléctrica poden resumirse nos seguintes feitos:

- (1) O número de electróns emitidos, e por tanto a intensidade de corrente, é proporcional á intensidade da iluminación.
- (2) A emisión de electróns é case instantánea, e aparece e desaparece coa iluminación sen a penas atraso (arredor de 10^{-9} s).
- (3) A velocidade máxima dos electróns emitidos non depende da intensidade luminosa, pero si da súa frecuencia ν ou da lonxitude de onda λ , ($c = \lambda \nu$).
- (4) Para cada metal existe unha frecuencia mínima, limiar, límite ou de corte ν_0 , por debaixo da que non se produce o efecto fotoeléctrico. Alternativamente podemos dicir que existe unha lonxitude de onda máxima, limiar, límite ou de corte λ_0 por encima da que non se produce efecto fotoeléctrico. ($c = \lambda_0 \nu_0$).

As observacións experimentais 2, 3 e 4 son irreconciliables coas prediccións feitas pola teoría ondulatoria electromagnética da luz. A teoría ondulatoria considera que a enerxía luminosa está

distribuída uniformemente sobre os frontes de onda, e que cando estes chegan ao metal, cada átomo só pode absorber a enerxía correspondente á porción de superficie do fronte de onda luminosa que intercepta. No caso máis favorable a enerxía absorbida por un átomo pode depositarse sobre un único electrón, que despois de acumular suficiente enerxía podería escapar da superficie do metal.

Con este mecanismo de absorción de enerxía durante o choque da onda luminosa sobre os átomos do metal, as prediccions da teoría ondulatoria só coinciden co feito experimental (1). Dedúcese de xeito inmediato un atraso na emisión de electróns que irá aumentando ao diminuír a intensidade da luz (en contradicción co feito 2), unha velocidade máxima dos electróns emitidos proporcional á intensidade de luz pero non a súa frecuencia (en contradicción co feito 3) e a emisión de electróns con independencia da frecuencia da luz (en contradicción co feito 4). Resumindo a teoría ondulatoria era incapaz de explicar porqué se producía o efecto fotoeléctrico de xeito case instantáneo, e porqué unha luz débil de frecuencia alta producía emisión de electróns e unha luz intensa de frecuencia baixa non.



Einstein en 1902 propuxo unha teoría que explicaba os resultados experimentais do efecto fotoeléctrico. Einstein considerou que a luz estaba formada por partículas chamadas *cuantos de luz ou fotóns*, e que a enerxía E de cada fotón era proporcional a frecuencia ν da luz:

$$E=h\nu$$

sendo $h=6,63\cdot 10^{-34} J\cdot s$ a constante de Plank.

A teoría de Einstein explica de inmediato o problema da emisión case instantánea dos electróns: cando a luz, por débil que sexa, chega ao metal un fotón golpeará a un electrón que ao absorber a súa enerxía poderá escapar da superficie metálica.

Para que a luz produza o efecto fotoeléctrico a enerxía do fotón, $E=h\nu$, debe ser igual ou maior que a función traballo Φ do metal. Se é maior, $h\nu>\Phi$, a diferenza de enerxía $h\nu-\Phi$ transfórmase en enerxía cinética do electrón, e aplicando o principio de conservación da enerxía:

$$h\nu= \Phi+E_c$$

Un fotón ademais de enerxía posúe cantidade de movemento p que está relacionada coa lonxitude de onda da luz mediante a relación:

$$p= \frac{h}{\lambda}$$

8-4 Dualidade onda-corpúsculo

A experiencia de Young da dobre fenda na que se observa a difracción e interferencia da luz, só pode explicarse coa teoría ondulatoria, e o efecto fotoeléctrico confirma o carácter corpuscular da luz, que podemos imaxinar por tanto coma un fluxo de fotóns.

Para tratar de conciliar os dous fenómenos podemos considerar a seguinte hipótese: os fotóns de luz interfíren entre si dalgún xeito despois de atravesar as fendas na experiencia de Young, producindo as interferencias na pantalla. Pero existe evidencia experimental en contra desta hipótese.

En efecto, se realizamos a experiencia de Young empregando unha iluminación débil, as franxas de interferencia obtidas na pantalla serán a penas perceptibles. Para observalas con claridade

podemos colocar unha placa fotográfica sobre a pantalla, e aumentar o tempo de exposición para compensar a débil iluminación. Podemos preguntarnos se con independencia da intensidade luminosa, quedarán rexistradas sobre a placa fotográfica as franxas de interferencia.

Se diminuímos a intensidade de luz de xeito que non pase un fotón a través das fendas, antes de que o anterior acade a pantalla, será imposible a interacción entre fotóns despois de atravesar as fendas, polo que se as franxas de interferencia son producidas polas interaccións entre fotóns, estas deberán desaparecer.

Experimentalmente obsérvase que con independencia do débil que sexa a luz empregada, sobre as placas fotográficas sempre se observan as franxas de interferencia. Isto indica que *cada fotón posúe un carácter ondulatorio*; que cada fotón atravesa as dúas fendas simultaneamente e difractase, e que a posterior interferencia da lugar a unha probabilidade alta de que o fotón choque na pantalla nunha posición correspondente a un máximo ou franxa brillante e, unha probabilidade baixa de que chegue a unha posición de mínimo ou franxa escura.

Louis De Broglie, en 1923, na súa tese de doutoramento desenrolou a seguinte idea: a materia e a radiación (ou enerxía electromagnética) poden converterse a unha na outra segundo a ecuación de Einstein, $E=mc^2$, polo que se a radiación luminosa presenta unha natureza dual no sentido de comportarse a veces coma onda e a veces coma corpúsculo, tamén as partículas materiais como os electróns, protóns, neutróns etc, deben presentar este carácter dual e comportarse a veces coma onda.

Concluíu que *cada partícula material* de enerxía E e momento lineal, $p=mv$, *está gobernada por unha onda* cunha frecuencia ν e unha lonxitude onda λ dadas polas relacións:

$$E = h\nu ; p = \frac{h}{\lambda}$$

sendo h a constante de Plank. De xeito que *a probabilidade de atopar a partícula nun punto será igual ao cadrado da función de onda nese punto*. (Nota: Esta é a interpretación actual da relación entre unha partícula e a onda asociada. De Broglie supuxo incorrectamente que o cadrado da función de onda daba a densidade de materia en cada punto).

Se esta conclusión é correcta, podemos esperar que cando se perturba o movemento dunha partícula, de xeito que a onda asociada non se propaga libremente, aparecerán fenómenos de interferencia e difracción similares ós producidos polas ondas mecánicas e electromagnéticas.

Os electróns acelerados por unha diferenza de potencial de 10^4 V, similar á voltaxe dun tubo de televisión, gañan unha enerxía eV que se transforma en enerxía cinética $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = p^2/2m = eV$, polo que:

$$p = \sqrt{2m_e eV}$$

de xeito que podemos obter a lonxitude da onda asociada a ditos electróns obtendo:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}} \approx 10^{-11} \text{ m}$$

A lonxitude de onda dos electróns é comparable á distancia que separa os planos de átomos nun sólido cristalino, de xeito que o facer pasar un feixe destes electróns a través dun cristal, debería manifestarse o seu carácter ondulatorio e producirse o fenómeno de difracción correspondente. En 1927 o británico Thomson realizou dita experiencia confirmando plenamente a teoría de De Broglie. Posteriormente tamén se observou o fenómeno de difracción en experimentos con protóns e neutróns, confirmándose a natureza dual da materia.

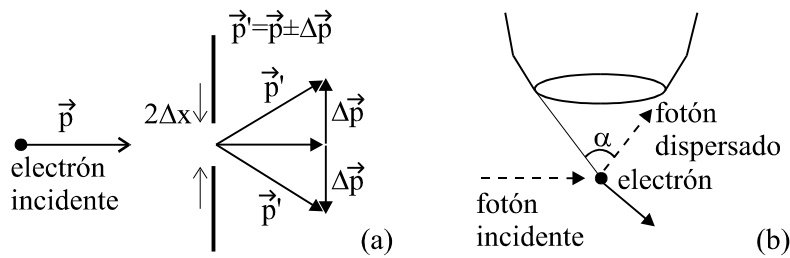
8-5 Principio de indeterminación de Heisemberg

O principio de indeterminación para a posición e o momento lineal

Consideremos unha partícula localizada nun punto do intervalo $(x-\Delta x, x+\Delta x)$, sendo por tanto Δx a indeterminación na posición, e supoñamos que medimos o momento lineal obtendo un valor comprendido entre $p-\Delta p$ e $p+\Delta p$, sendo Δp a indeterminación do momento lineal. O principio de indeterminación de Heisemberg indica que *é imposible medir simultaneamente e con absoluta precisión, a posición e o momento lineal dunha partícula*, e establece que os límites inferiores das indeterminacións que se cometen verifican:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

sendo h a constante de Plank.



Para entender o significado deste principio, consideremos dúas situacións físicas simples.

a) Supoñamos (Fig.a) un electrón movéndose cun momento lineal p . Podemos determinar a súa posición observando se pasa a través dunha abertura de tamaño $2\Delta x$, instante no que a indeterminación da súa posición será Δx . Ao atravesar a abertura o electrón difractase polo que o seu momento lineal queda indeterminado, podendo tomar valores comprendidos entre $p-\Delta p$ e $p+\Delta p$, verificándose que $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$. Ao diminuír o tamaño da abertura diminúe Δx pero aumenta o ancho da figura de difracción e polo tanto Δp .

b) Consideremos outra experiencia (Fig.b), na que desexamos observar a posición dun electrón mediante un microscopio. Debemos indicar que se trata dunha experiencia idealizada, que non se podería realizar realmente, porque a “luz” a empregar tería unha frecuencia altísima que simplemente non existe, sen embargo as ideas desenroladas son correctas e ilustrativas.

Un fotón da luz con que iluminamos, golpea ao electrón e acada o obxectivo do microscopio. Para elo a dirección do momento lineal do fotón, debe estar dentro do ángulo α formado polo obxectivo dende a posición do electrón. Durante o choque hai un intercambio de momento lineal entre o fotón e o electrón, de xeito que a observación modifica o momento lineal do electrón que queda indeterminado. E a posición do electrón queda indeterminada pola difracción do fotón ao atravesar o obxectivo do microscopio.

Podemos diminuír Δp empregando luz de maior lonxitude de onda λ , de xeito que o momento lineal do fotón $p=h/\lambda$ sexa menor e a interacción co electrón e a Δp producida diminúan, pero neste caso a difracción do fotón no obxectivo do microscopio e Δx aumentan. Podemos diminuír Δx usando luz de menor lonxitude λ , co que diminúe a difracción no obxectivo, pero entón aumenta o momento lineal intercambiado entre o fotón e o electrón e a indeterminación Δp deste.

O principio de indeterminación non afecta aos obxectos macroscópicos, como un coche en marcha, porque a indeterminación con que calculamos a posición e a velocidade, son moito maiores cós valores mínimos impostos polo principio de indeterminación. Pero para as partículas microscópicas a imposibilidade de medir simultaneamente e con exactitude a posición e o momento lineal orixina consecuencias importantísimas. Na Mecánica Clásica coñecendo a posición e a velocidade inicial dunha partícula, e a forza que actúa sobre ela, podemos calcular a

súa traxectoria. De xeito que a partir da posición e velocidade das partículas do universo nun instante dado, e das forzas con que interaccionan entre si, poderíamos calcular a súa evolución, incluíndo a dos seres vivos que viven nel. Esta teoría coñecida como determinismo científico elimina o libre albedrío dos seres humanos, asemellándoos a sistemas de partículas complexos de evolución predeterminada. O principio de indeterminación asegura a imposibilidade de medir a situación exacta dunha partícula nun instante dado e polo tanto de predicir con exactitude o seu comportamento futuro.

A Mecánica Cuántica

A imposibilidade de determinar a posición e a traxectoria dunha partícula microscópica obriga a falar en termos de probabilidade de atopar a partícula nun determinado punto en cada instante. Dita probabilidade é igual ao cadrado da función de onda asociada a partícula.

O cálculo da función de onda correspondente a cada sistema físico, xunto coa extracción da información contida nela, realízanse mediante a Mecánica Cuántica. Esta teoría proporciona as probabilidades de obter cada posible resultado ao facer unha medición, pero non subministra ningunha información sobre os detalles de cada proceso individual, e asegura que *a información probabilista contida na función de onda é a máxima que podemos chegar a coñecer do sistema físico correspondente.*

O principio de indeterminación para a enerxía e o tempo

Existe un segundo principio de indeterminación referido ao valor medido da enerxía dunha partícula e o intervalo de tempo necesario para efectuar a medida. Se o resultado da medida da enerxía está comprendido entre $E-\Delta E$ e $E+\Delta E$, sendo ΔE a súa indeterminación, e a medida realizouse durante un intervalo de tempo Δt , o *principio de indeterminación para a enerxía e o tempo* esixe que:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

sendo h a constante de Plank.

Expresado noutros termos se dispoñemos dun intervalo de tempo Δt para efectuar a medida da enerxía dun sistema, esta non pode medirse cunha indeterminación ΔE menor cá imposta polo principio de indeterminación.

Consideremos, por exemplo, un electrón no estado fundamental do átomo de hidróxeno (orbital 1s). O electrón permanece indefinidamente neste estado polo que dispoñemos dun tempo infinito $\Delta t = \infty$ para efectuar a medida da enerxía, que estará perfectamente determinada, $\Delta E = 0$.

Se un electrón está situado nun estado excitado, é dicir, nun orbital de maior enerxía có fundamental, ao cabo de certo tempo caerá a un orbital de menor enerxía. Non podemos predicir exactamente o intervalo de tempo que permanece o electrón no estado excitado, pero si calcular o valor medio deste tempo, ou vida media Δt do estado. A medida da enerxía do electrón non pode realizarse cunha indeterminación ΔE menor cá permitida polo principio de indeterminación. Polo tanto, un electrón nun estado excitado de vida media Δt non ten unha enerxía perfectamente determinada e pode posuír unha enerxía comprendida entre $E-\Delta E$ e $E+\Delta E$, verificándose que $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$.

O feito de ter introducido o principio de indeterminación asociado ao proceso de medida, pode levar a idea errónea de que a realización da medida sempre produce unha modificación do sistema, e que isto produce a incerteza nas magnitudes detectadas. O principio de indeterminación cúmprese sempre, incluso cando a observación realizada non afecte ao sistema; por exemplo ao usar campos magnéticos para diferenciar entre estados de espín (do inglés spin=rotación) da partícula. Outro exemplo son os estados enredados: nun determinado proceso

emitense, en direccións opostas, dous fotóns descritos por unha función de onda común; se deixamos que se afasten entre si unha gran distancia e realizamos unha medida sobre un deles, a función de onda “colapsa” *instantaneamente*, e o outro fotón queda afectado no mesmo instante. Isto é necesario para que o sistema verifique o principio de indeterminación, aínda que clásicamente non é posible pois ningunha información pode viaxar máis rápido cá luz.

8-6 Problemas e cuestións

1. O xulio, J, é unha unidade moi grande para expresar enerxías en sistemas atómicos. Resulta apropiado empregar a unidade electrón-voltio, eV, definida como a enerxía potencial eléctrica que posúe unha carga positiva de magnitude igual á do electrón, colocada nun punto dun campo eléctrico cun potencial de 1 voltio. Calcular a equivalencia entre as dúas unidades.

Solución: $W=q\cdot\Delta V=1,6\cdot 10^{-19}\text{ C}\cdot 1\text{ V}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ J}$; **1 eV=1,6·10⁻¹⁹ J**

2. Un feixe de luz monocromática de lonxitude de onda $488\cdot 10^{-9}\text{ m}$ incide sobre un material que ten un traballo de extracción de $3,2\cdot 10^{-19}\text{ J}$. Calcular:

- a) A lonxitude de onda umbral.
 b) A velocidade dos electróns emitidos.
 Datos: $m_e=9,1\cdot 10^{-31}\text{ kg}$; $h=6,63\cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$; $c=3\cdot 10^8\text{ ms}^{-1}$.

Solución:

- a) Frecuencia de corte:

$$\Phi = h\nu_0; \nu_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{3,2\cdot 10^{-19}\text{ J}}{6,63\cdot 10^{-34}\text{ Js}} = 4,827\cdot 10^{14}\text{ Hz.}$$

Lonxitude de onda máxima:

$$c = \lambda_0\nu_0; \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3\cdot 10^8\text{ ms}^{-1}}{4,827\cdot 10^{14}\text{ Hz}} = 6,215\cdot 10^{-7}\text{ m.}$$

- b) Frecuencia da luz monocromática:

$$c = \lambda\nu; \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\cdot 10^8\text{ ms}^{-1}}{488\cdot 10^{-9}\text{ m}} = 6,148\cdot 10^{14}\text{ Hz}$$

Energía cinética máxima dos electróns emitidos:

$$h\nu = \Phi + E_c; E_c = h\nu - \Phi = 6,63\cdot 10^{-34}\text{ Js}\cdot 6,148\cdot 10^{14}\text{ Hz} - 3,2\cdot 10^{-19}\text{ J} = 8,761\cdot 10^{-20}\text{ J.}$$

Velocidade máxima:

$$E_c = \frac{1}{2}m_e v^2; v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = \sqrt{\frac{2\cdot 8,761\cdot 10^{-20}}{9,1\cdot 10^{-31}}} = 4,388\cdot 10^5\text{ ms}^{-1}$$

3. Calcular a lonxitude de onda máxima e a frecuencia de corte da luz que pode producir o efecto fotoeléctrico no aluminio, que ten unha función traballo de 4,2 eV. Calcular a enerxía cinética máxima, a velocidade máxima e o potencial de freado dos electróns emitidos ao iluminar o aluminio con luz de $10,6\cdot 10^{14}\text{ s}^{-1}$.

Datos: $m_e=9,1\cdot 10^{-31}\text{ kg}$; $e=1,6\cdot 10^{-19}\text{ C}$; $h=6,63\cdot 10^{-34}\text{ Js}$; $1\text{ eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{ J}$; $c=3\cdot 10^8\text{ ms}^{-1}$.

Solución:

Función traballo:

$$\Phi = 4,2\text{ eV}\cdot \frac{1,6\cdot 10^{-19}\text{ J}}{1\text{ eV}} = 6,72\cdot 10^{-19}\text{ J}$$

Frecuencia de corte:

$$\Phi = h\nu_0; \nu_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{6,72 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 1,014 \cdot 10^{15} \text{ Hz.}$$

Lonxitude de onda máxima:

$$c = \lambda_0 \nu_0; \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{1,014 \cdot 10^{15} \text{ Hz}} = 2,959 \cdot 10^{-7} \text{ m.}$$

Energía cinética máxima dos electróns emitidos:

$$h\nu = \Phi + E_c; E_c = h\nu - \Phi = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 10,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 6,72 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,078 \cdot 10^{-20} \text{ J.}$$

Velocidade máxima:

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v^2; v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,078 \cdot 10^{-20}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,601 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$$

Potencial de freado:

$$E_c = eV_0; V_0 = \frac{E_c}{e} = \frac{3,078 \cdot 10^{-20} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0,1923 \text{ V.}$$

4. a) Se o traballo de extracción dunha superficie de potasio é de 2,2 eV, poderíase empregar o potasio en células fotoeléctricas para funcionar con luz visible?. A luz visible está comprendida entre lonxitudes de onda de 380 nm e 775 nm.

b) Canto vale a velocidade máxima de saída dos fotoelectróns? E o potencial de freado?

Datos: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg.}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s.}$; $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m.}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}.$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$

Solución:

$$\Phi = 2,2 \text{ eV} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 3,52 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Frecuencia de corte:

$$\Phi = h\nu_0; \nu_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{3,52 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 5,309 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

Lonxitude de onda máxima:

$$c = \lambda_0 \nu_0; \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5,309 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 5,651 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} = 565,1 \text{ nm.}$$

A célula fotoeléctrica con electrodo de potasio funcionará con luz visible de lonxitude de onda menor que $\lambda_0 = 565,1 \text{ nm.}$, é dicir, comprendida entre 380 nm e 565,1 nm.

b) A velocidade máxima de saída dos fotoelectróns corresponde á iluminación cos fotóns de maior frecuencia ou de menor lonxitude de onda:

$$c = \lambda \nu; \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{380 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 7,895 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Energía cinética máxima dos electróns emitidos:

$$h\nu = \Phi + E_c; E_c = h\nu - \Phi = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7,895 \cdot 10^{14} \text{ Hz} - 3,52 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,714 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Velocidade máxima:

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v^2; v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,714 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 6,138 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$$

Potencial de freado:

$$E_c = eV_0; V_0 = \frac{E_c}{e} = \frac{1,714 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 1,071 \text{ V}.$$

5. Unha fonte de luz violeta de $7 \cdot 10^{14}$ Hz de frecuencia emite 20 W uniformemente en tódalas direccións. Calcular o número de fotóns por segundo que acadan unha superficie de 1 mm^2 colocada a 2 m de distancia en dirección perpendicular á luz emitida.

Datos: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Solución:

Superficie da esfera: $S = 4\pi R^2 = 4\pi(2 \text{ m})^2 = 16\pi \text{ m}^2$.

Energía que atravesará por segundo a porción de superficie de $1 \text{ mm}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$:

$$\frac{20 \text{ Js}^{-1}}{16\pi \text{ m}^2} = \frac{x}{10^{-6} \text{ m}^2}; x = 3,979 \cdot 10^{-7} \frac{\text{J}}{\text{s}}.$$

Energía dun fotón: $E = hv = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 7 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 4,641 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Número de fotóns que atravesará por segundo a porción de superficie de 1 mm^2 :

$$N = \frac{x}{E} = \frac{3,979 \cdot 10^{-7} \text{ J/s}}{4,641 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 8,574 \cdot 10^{11} \text{ fotóns/s}$$

6. Un material iluminado con luz de frecuencia $6,5 \cdot 10^{14}$ Hz emite fotoelectróns, cun potencial de freado de 0,4 V.

a) Calcular a lonxitude de onda limiar, a frecuencia de corte e o traballo de extracción.

b) Calcular a velocidade máxima dos electróns emitidos e o potencial de freado, ao empregar radiación de $7,6 \cdot 10^{14}$ Hz.

Datos: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ JAs}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

R.- a) $\lambda_0 = 5,420 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $\nu_0 = 5,535 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$; $\Phi = 3,67 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; b) $v_{\text{max}} = 5,485 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$; $V_0 = 0,8556 \text{ V}$.

7. A lonxitude de onda máxima para provocar o efecto fotoeléctrico na prata é de 2660 \AA .

a) Calcular a frecuencia de corte e o traballo de extracción.

b) Se a luz empregada ten unha $\lambda = 2000 \text{ \AA}$, calcular a enerxía cinética máxima dos electróns emitidos e o potencial de freado.

Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

R.- a) $\nu_0 = 1,128 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$; $\Phi = 7,479 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; b) $E_c = 2,466 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $V_0 = 1,541 \text{ V}$.

8. A enerxía de arranque dos electróns dun material vale 2 eV. Se o iluminamos cunha luz monocromática de $\lambda = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, cunha intensidade de $3 \cdot 10^{-9} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

a) Calcular a enerxía cinética máxima dos electróns liberados.

b) Supoñendo que cada un dos fotóns producen a emisión dun electrón, calcular o número de electróns emitidos por unidade de superficie e tempo.

Datos: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ JAs}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

R.- a) $E_c=3,43 \cdot 10^{-19}$ J ; b) $4,525 \cdot 10^9$ electróns $\cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

9. O traballo de extracción de electróns nun metal é de $5 \cdot 10^{-19}$ J. Unha luz de lonxitude de onda 375 nm, incide sobre o metal; calcula: a) a frecuencia umbral. b) a enerxía cinética dos electróns extraídos. (Datos: constante de Plank $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s; $1m=10^9$ nm)

R.- a) $v_0=7,55 \cdot 10^{14}$ Hz ; b) $E_c=2,98 \cdot 10^{-20}$ J

10. Si o traballo de extracción para certo metal é $5,6 \cdot 10^{-19}$ J. Calcula: a) a frecuencia umbral por debaixo da cal non hai efecto fotoeléctrico nese metal; b) o potencial de freado que se debe aplicar para que os electróns emitidos non cheguen ó ánodo si a luz incidente é de 320 nm. (Datos: $c=3 \cdot 10^8$ m/s; $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Js ; $1 \text{ nm}=10^{-9}$ m; $q_e=1,60 \cdot 10^{-19}$ C)

R.- a) $v_0=8,44 \cdot 10^{14}$ Hz ; b) $V_0=0,38$ V

11. O traballo de extracción do cátodo metálico nunha célula fotoeléctrica é 3,32 eV. Sobre el incide radiación de lonxitude de onda $X = 325$ nm; calcula: a) a velocidade máxima coa que son emitidos os electróns; b) o potencial de freado. (Datos $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J; $1e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C, $1\text{nm} = 10^{-9}$ m; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s ; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js).

R.- a) $v_{\max}=4,2 \cdot 10^5$ m/s ; b) $V_0=0,5$ V

12. A teoría ondulatoria de Huygens sobre a natureza da luz vén confirmada polos fenómenos: a) Reflexión e formación de sombras. b) Refracción e interferencias. c) Efecto fotoeléctrico e efecto Compton.

Solución: b

Huygens explicou a reflexión e a refracción da luz a partir da consideración de que no foco luminoso se orixina unha fronte de ondas que se propaga polo espazo. A enerxía estaría distribuída uniformemente por todo o fronte de ondas.

13. O efecto fotoeléctrico, que tipo de característica da luz pon de manifesto? a) O seu carácter corpuscular. b) O seu carácter ondulatorio. c) Ningún dos dous.

Solución: a

Manifesta o carácter corpuscular ó actuar os raios de luz como partículas (fotóns) que impactan de xeito cuantizado contra os electróns. Segundo a teoría fotónica de Einstein, que permite explicar o efecto fotoeléctrico, a luz é un fluxo continuo de partículas, sen masa en repouso, chamadas fotóns, cunha enerxía relacionada coa frecuencia segundo $E= h\nu$

14. De que depende a emisión de fotoelectróns nunha célula fotoeléctrica?. a) Da intensidade da luz incidente. b) Da frecuencia da luz incidente. c) Da distancia entre os electrodos.

Solución: b

A emisión de fotoelectróns dependerá de que a enerxía dos fotóns incidentes sexa superior a un valor umbral característico para cada metal. Dita enerxía depende da frecuencia segundo a ecuación de Planck: $E= h\nu$.

A emisión ou non de electróns depende da frecuencia da luz incidente, isto é, da enerxía de cada fotón dos que impacta. Só unha vez cumprido un mínimo de enerxía por fotón, extraeránse máis electróns canto máis intensidade de luz se dispoña.

15. Observouse que, cando a frecuencia da radiación que incide sobre unha placa dun metal e ν , a enerxía cinética dos electróns extraídos e E_c . Se triplicamos a frecuencia da radiación incidente, podemos afirmar que a enerxía cinética dos electróns extraídos é $3E_c$? Razona a resposta.

R.- Non. Ao triplicar a frecuencia, $\nu'=3\nu$, a enerxía cinética E'_c é igual á triple da inicial E_c máis 2Φ : $E'_c=3E_c+2\Phi$.

16. O efecto fotoeléctrico, que teoría confirma sobre a natureza da luz? Razona a resposta.

17. Dar unha explicación do efecto fotoeléctrico e xustificar o aspecto corpuscular da luz.

18. A enerxía dun cuanto de luz é directamente proporcional a : a) lonxitude de onda; b) frecuencia; c) ó cadrado da velocidade da luz.

19. No efecto fotoeléctrico: a) a enerxía cinética dos electróns emitidos depende da intensidade da luz incidente; b) hai unha frecuencia mínima para a luz incidente; c) o traballo de extracción non depende da natureza do metal.

20. A cantidade de movemento dun fotón ven expresada por: a) $p=mc^2$; b) $p=h\nu$; c) $p=h/\lambda$.

Dualidade onda-corpúsculo

21. Describe algún exemplo ou exemplos nos que se poña de manifesto o dobre comportamento ondulatorio e corpuscular da luz.

22. Pode un electrón ser considerado coma unha onda? Xustifíquese a resposta.

23. Cando se dispersan raios X en grafito, obsérvase que emerxen fotóns de menor enerxía que a incidente e electróns de alta velocidade. Este fenómeno pode explicarse por: a) unha colisión totalmente inelástica entre un fotón e un átomo; b) elástica entre un fotón e un electrón; c) elástica entre dous fotóns

24. Da hipótese de De Broglie, dualidade onda-corpúsculo, dérivase como consecuencia: a) que os electróns poden mostrar comportamento ondulatorio $\lambda=h/p$; b) que a enerxía das partículas atómicas está cuantizada $E=h\nu$; c) que a enerxía total dunha partícula é $E=mc^2$.

25. A relación entre a velocidade dunha partícula e a lonxitude de onda asociada establécese: a) a través da relación de Einstein masa-enerxía, b) por medio do principio de Heisenberg, c) coa ecuación de De Broglie.

Principio de indeterminación.

26. Macro e microcosmos. Sistemas esencialmente afectados pola propia detección

27. Se a incerteza na medida da posición dunha partícula é de $6,00 \cdot 10^{-30}$ m, a incerteza mínima na medida do momento é: a) a mesma, b) maior; c) ningunha. (Datos: $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Js)

8-7 Relatividade especial

A relatividade especial de Albert Einstein publicada en 1905, é unha nova mecánica, que substitúe á mecánica clásica de Newton, cando os obxectos a estudio, se moven a velocidades próximas á da luz. Esta teoría introduce grandes modificacións nos conceptos de espazo, tempo, masa e enerxía. Historicamente foi a necesidade de eliminar certas asimetrías e contradicións da teoría electromagnética de Maxwell as que levaran a Einstein á formular a súa teoría de relatividade. Antes de entrar en materia repasaremos como estaban a mecánica e o electromagnetismo a principios do século XX.

Os conceptos de espazo e tempo absolutos da mecánica clásica

A mecánica clásica emprega coma marco conceptual as ideas de espazo e tempo absolutos. Esta teoría ten unha exactitude numérica e unha capacidade predictiva excepcionais, cando se emprega no cálculo das órbitas dos planetas no sistema solar. A modo de exemplo podemos citar que os cálculos de Leverrier e Adams realizados sobre a órbita de Urano, demostraban que a traxectoria observada non se axustaba á calculada coa teoría. Para explicar esta anomalía propuxeron a existencia doutro planeta que estaba a perturbar a órbita de Urano e, calcularon a posición no espazo do novo planeta. Cando os telescopios do observatorio de Berlín en 1846, se orientaron cara a dita posición apreciaron un punto tenue no firmamento, o planeta Neptuno. A gran precisión da teoría demostra que as ideas de espazo e tempo absolutos empregadas na mecánica clásica, son válidas no estudio do movemento dos astros e nos cálculos de lanzamento de proxectís e traxectorias de corpos en movemento nas proximidades da superficie terrestre.

Que significa tempo absoluto? Con esta idea entendemos que o tempo transcorre ao mesmo ritmo en todo o universo. Para asignar un valor numérico ao tempo no que ocorre cada evento podemos imaxinar o seguinte proceso:

Partimos dunha serie de reloxos idénticos e que marcan a mesma hora, situados nun lugar da Terra, a continuación mandamos un observador provisto dun destes reloxos ata calquera rexión do espazo, onde poderá asignar a cada acontecemento próximo, o valor do tempo que marca o reloxo.

Podemos adiantar que este concepto de tempo absoluto, tan intuitivo e que nos parece a priori evidente con toda certeza, non se corresponde coa forma en que se comporta esta magnitude no universo.

Que entendemos por espazo absoluto? Podemos dicir que é o marco inmaterial e inmutable no que se producen os movementos e interaccións das partículas do universo. Expliquemos esta idea e para simplificar consideremos que o movemento das partículas que interaccionan prodúcese sobre unha superficie plana. Sobre dito plano podemos imaxinar un sistema de referencia SR de coordenadas cartesianas que consiste en dous eixes X e Y , perpendiculares entre si que se cortan no punto $(0,0)$ a orixe de coordenadas. Asociemos a este sistema unha cuadrícula formada por liñas paralelas aos eixes de coordenadas e equidistantes. Cada punto P do plano queda

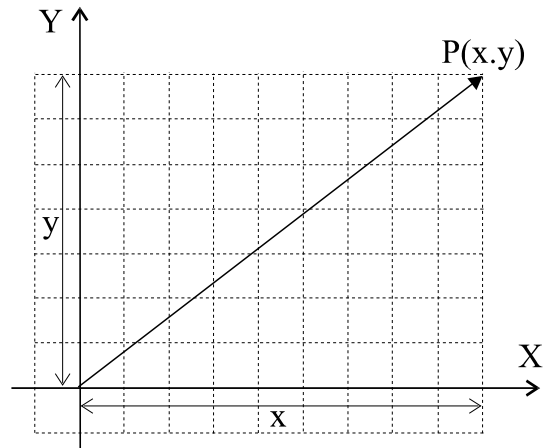
especificado polas coordenadas (x,y) e a distancia entre dous puntos $P_1(x_1,y_1)$ e $P_2(x_2,y_2)$ ven dada a través do teorema de Pitágoras:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Cando dicimos que o espazo é inmutable queremos indicar dúas cousas:

i) que a cuadrícula asociada ao SR é ríxida, permanece sempre igual en forma e tamaño, non pode deformarse estirarse nin comprimirse, e como consecuencia

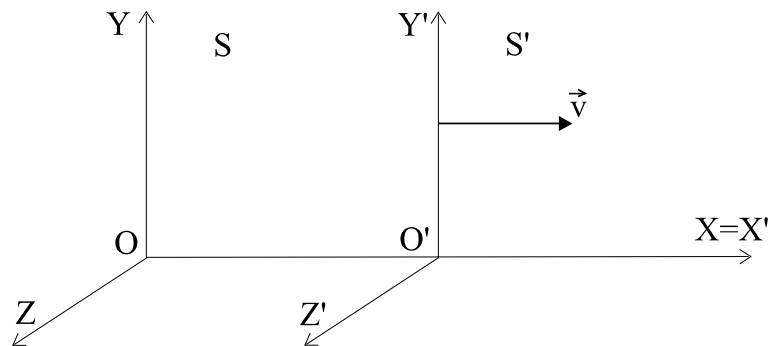
ii) que a distancia d entre dous puntos fixos é constante.



Igual que ocorría co concepto de tempo absoluto, estas ideas de marco soporte espacial inalterable, de cuadrícula indeformable e de distancia constante entre puntos fixos, *non* se corresponde, sorprendentemente, coa realidade física.

Sistemas de referencia móbiles. Transformacións de Galileo.

Sexan dous sistemas de coordenadas S e S' tales que o sistema S' móvese con velocidade v constante respecto a S , na dirección positiva do eixe X . Estamos interesados nas ecuacións que permiten transformar as coordenadas asignadas a un suceso cando se observa dende cada sistema.



En mecánica clásica podemos asignar o tempo no que sucede un evento, mediante un reloxo que se atope nas inmediacións do suceso, sendo irrelevante que o reloxo estea en repouso en S ou movéndose con velocidade v solidariamente con sistema S' . Se chamamos t ao tempo que marcan os reloxos en repouso con S e, t' ao tempo que sinalan os reloxos en movemento solidario con S' , teremos para calquera evento:

$$t = t'$$

Tomamos as orixes de coordenadas coincidentes no instante inicial: $O=O'$ en $t=t'=0$. Se un suceso ocorre visto dende S na posición (x,y,z) no instante t , ao observalo dende S' sucede no mesmo instante $t'=t$ e na posición (x',y',z') , cumpríndose:

$$t'=t, x'=x-vt, y'=y, z'=z$$

As ecuacións anteriores coñécense como *transformacións de Galileo*. As transformacións de Galileo manteñen constante a distancia entre dous sucesos simultáneos, con independencia do SR dende o que se observe:

$$x'_2 - x'_1 = (x_2 - vt_2) - (x_1 - vt_1) = x_2 - x_1 \text{ se } t_2 = t_1$$

A medición simultánea da posición dos extremos dunha barra ríxida permite obter, restando ambas posicións, a lonxitude da barra, que será independente do sistema de referencia.

O intervalo espacial entre dous sucesos non simultáneos é distinto para diferentes observadores; por exemplo ao tocar dúas veces a bucina nun coche en marcha, o condutor dirá que as dúas veces premeu no mesmo punto, pero o que ve un peón na beirarrúa son dous sucesos afastados pola distancia percorrida polo coche no tempo transcorrido entre os dous.

Sistemas de referencia inerciais. Invariancia das leis da mecánica.

Se prescindimos dos pequenos efectos debidos á rotación da Terra, calquera laboratorio fixo na superficie terrestre constitúe un *SR* non acelerado. Cando realizamos experiencias de dinámica nun laboratorio terrestre fixo, observamos que os obxectos non sometidos a forzas, manteñen o estado de repouso ou *MRU* indefinidamente. É dicir, con respecto a este *SR* cúmprese a lei de inercia, motivo polo que se chaman sistemas de referencia inerciais *SRI*. Neles comprobamos experimentalmente a lei fundamental da dinámica $F=ma$, que relaciona a forza F , medible cun dinamómetro, aplicada sobre un corpo de masa m , e a aceleración a producida. Tamén observariamos a validez do principio de acción e reacción e das leis de conservación do momento lineal, do momento angular e da enerxía. Resumindo: os laboratorios terrestres fíxos son *SRI* nos que se cumpren as leis da mecánica de Newton.

Demostremos agora que todo *SR* en *MRU* con respecto a un laboratorio terrestre fixo constitúe tamén un *SRI*. Serían exemplos de tales *SRI* móbiles, un autobús, un tren ou un avión movéndose en liña recta con velocidade constante. Para demostrar que tales *SR* son inerciais derivamos con respecto ao tempo as transformacións de Galileo:

$$V' = \frac{dx'}{dt} = \frac{d(x-vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v = V - v$$

$$V' = V - v$$

Se un obxecto non está sometido a forzas, a velocidade V con respecto ao laboratorio terrestre fixo S será constante. A ecuación anterior implica que a velocidade V' respecto ao sistema móbil S' tamén é constante, polo que se cumpre a lei de inercia. Por tanto os *SR* móbiles, en *MRU* respecto a un *SRI* fixo na superficie terrestre, son tamén *SRI*.

Probemos que nos *SRI* móbiles tamén se cumpre a lei fundamental da dinámica $F=ma$. Derivando dúas veces con respecto ao tempo as transformacións de Galileo:

$$a' = \frac{d^2 x'}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}(x - vt) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} - v \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} = a$$
$$a' = a$$

Esta igualdade establece que todos os *SRI* en *MRU* entre si, midén a mesma aceleración para cada corpo en movemento e, dado que en mecánica clásica considérase a masa m constante, o produto ma toma o mesmo valor en todos os *SRI*. Polo tanto se un corpo de masa m está sometido a unha forza F , todos os *SRI* miden o mesmo produto ma e confirman a validez da ecuación $F=ma$, suposto que todos os *SRI* miden valores iguais de forza F . Analogamente a suposición de que todos os *SRI* miden valores iguais de forza, implica a validez da lei de acción e reacción en todos eles e, en consecuencia en todos os *SRI* se cumpren as leis de conservación do momento lineal, do momento angular e da enerxía e os demais teoremas da mecánica.

Todo o visto neste apartado pode resumirse no seguinte principio:

Principio da relatividade na mecánica:

As leis da dinámica son invariantes, é dicir, teñen a mesma forma e son expresadas polas mesmas ecuacións, en todos os sistemas de referencia inerciais, cando se usan as transformacións de Galileo. Con outras palabras: As leis da mecánica son as mesmas para todos os observadores inerciais en MRU entre si, cando se usan as transformacións de Galileo.

Os mecanismos de resortes, poleas e engranaxes e, en xeral, calquera dispositivo ou montaxe experimental mecánico, ten un comportamento exactamente idéntico, con independencia do *SRI* no que se atope, sexa este un laboratorio terrestre fixo, ou un tren ou un avión en *MRU*. En consecuencia ningunha experiencia de mecánica permite diferenciar entre *SRI* e, non hai un *SRI* privilexiado, con outras palabras non existe un *SRI* en “repouso absoluto”.

De existir un *SRI* privilexiado, as leis da dinámica serían especialmente sinxelas cando se expresan en dito sistema e, rematamos de probar que todas as leis da dinámica son exactamente iguais en todos os *SRI*. So podemos referirnos a *SRI* en *MRU* entre si, rexeitando a idea de que algún deles son especiais porque están “realmente” en repouso. A idea de repouso absoluto carece de soporte experimental e teórico na mecánica.

Ao iniciar estes comentarios distinguimos entre *SRI* fixos na superficie terrestre e *SRI* móbiles en *MRU* con respecto aos primeiros. Pero tales sistemas fixos móvense a gran velocidade solidariamente coa Terra arredor do Sol e acompañando ao Sol arredor do centro da galaxia. A distinción entre *SRI* estacionarios e *SRI* móbiles era artificial dende o principio. Todos os *SRI* son equivalentes, pois non poden diferenciarse entre si mediante experiencias de mecánica.

Sistemas de referencia non inerciais.

Nun autobús que acelera ao arrancar, os obxectos non sometidos a forzas, coma un balón colocado no chan, realizarían un movemento acelerado cara a parte traseira do autobús, polo que non se cumpriría a lei de inercia. Os sistemas de referencia acelerados son sistemas non inerciais.

As ecuacións de Maxwell

Son un conxunto de catro expresións matemáticas, publicadas en 1864, que describen a totalidade do electromagnetismo. A primeira delas é a lei de Gauss do campo eléctrico que identifica, como fontes e sumidoiros de campo, ás cargas eléctricas. A segunda establece que non existen cargas ou polos magnéticos illados. A terceira, a lei de Faraday, indica que un campo magnético variable da lugar, nas súas inmediacións, a un campo eléctrico variable. Por último a cuarta ecuación de Maxwell é unha extensión da lei de Ampere (as liñas de campo magnético son pechadas, enlazando ás correntes que as producen) e expresa que un campo eléctrico variable crea, nas súas proximidades, un campo magnético variable.

Maxwell predixo a existencia de ondas electromagnéticas *EM* ao darse conta que unha carga eléctrica oscilante da lugar a un campo eléctrico variable, que crea un campo magnético variable, este un campo eléctrico variable, e así sucesivamente. Como resultado aparece unha propagación a través do espazo das perturbacións dos campos eléctricos e magnéticos iniciais. Ao calcular a velocidade de propagación das ondas *EM* obtivo unha velocidade igual a da luz; negándose a crer que o resultado teórico fose unha casualidade, identificou á luz como un tipo de onda *EM*.

A súa teoría suxeriu a posibilidade de xerar ondas *EM* no laboratorio, feito que corroborou Heinrich Hertz, mediante circuitos eléctricos oscilantes e que, posteriormente, supuxo o inicio da era das comunicación rápidas por ondas de radio. Estas notas históricas ilustran a conexión estreita entre desenrolo teórico, avance experimental e aparición de novas tecnoloxías, o que constitúe unha constante na evolución da ciencia.

A tradición mecanicista dos físicos da época, que só coñecían ondas mecánicas que se propagaban en medios materiais elásticos, levounos a supor a existencia dun medio que actuará como soporte material das ondas *EM*: o éter.

Asimetrías e contradicións da teoría de Maxwell

Unha asimetría: nas experiencias de indución *EM*, a interpretación teórica do que sucede, é totalmente diferente se movemos o condutor dentro do campo magnético do imán ou, se é o imán o que se acerca ou afasta do condutor. Sen embargo o fenómeno observado depende unicamente do movemento relativo entre o condutor e o imán.

Unha contradición: un observador en repouso respecto ao éter vería as ondas *EM* inmóbiles, e os campos eléctrico e magnético asociados á onda non responderían ás leis de Maxwell. Os campos eléctricos e magnéticos oscilantes, en repouso respecto ao observador, non emitirán ondas *EM* o que estaría en conflito coa teoría. Esta asegura que un campo eléctrico ou magnético oscilante, en repouso no sistema de referencia, son fonte emisora de ondas *EM*. Logo teoricamente a existencia de ondas *EM* estáticas é un absurdo e, experimentalmente xamais se observou nada parecido.

Einstein comprendeu que a idea mesma da existencia do éter levaba as ideas de repouso absoluto e movemento absoluto, é dicir, con respecto ao éter, que non parecían ter correspondencia coa realidade. Toda a física debería reinterpretarse renunciando a estas ideas e expresándose en termos de movemento relativo.

Canto máis tempo dedicaba a elaborar esta teoría, mais se convencía de que non realizaría progresos ata, que atopase un principio físico sólido e firme, no que cimentar a construción teórica que buscaba. Encontrou este principio usando a idea xa coñecida de que as leis da dinámica son as mesmas para todos os observadores inercias, que se moven uns con respecto a outros con velocidade constante. Chegaba con ampliar este feito para todos os fenómenos físicos, non só os mecánicos. Elevou a postulado esta suposición co seguinte enunciado:

Principio da relatividade

Todos os fenómenos da Física transcorren de igual xeito, cando son observados, dende sistemas de referencia inerciais en MRU entre si. En consecuencia as leis da natureza deben ter a mesma expresión para todos os sistemas de referencia inerciais.

Esta idea está plenamente confirmada pola experiencia: calquera aparato mecánico, eléctrico, óptico ou electrónico funciona exactamente igual dentro dun avión a gran velocidade que na superficie da Terra. Ademais os fenómenos físicos, químicos e biolóxicos seguen as mesmas leis con independencia da situación xeográfica do laboratorio onde se realicen e, por tanto, a velocidade asociada ao movemento de rotación da Terra, que vale 1700 km/h no ecuador e é nula cerca dos polos, non afecta aos procesos da natureza.

Un dos procesos físicos de maior importancia é a xeración e propagación de ondas EM e, ao igual cos demais fenómenos debe cumprir o principio da relatividade pero, dada a súa transcendencia no desenrolo da teoría, enunciase esta idea como un 2º principio:

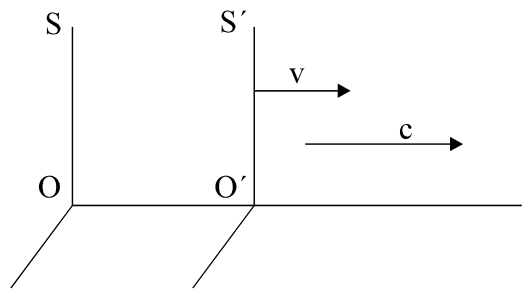
Principio da constancia da velocidade da luz

A velocidade de propagación da luz no espazo baleiro é a mesma ($c \approx 300.000$ km/s) en todos os sistemas inerciais (en MRU relativo entre si), sendo ademais independente da velocidade da fonte emisora de luz.

Se a fonte luminosa está en repouso no sistema inercial, o principio da relatividade esixe que, a velocidade da luz sexa independente do movemento relativo do sistema de referencia.

Se a fonte de luz está en movemento respecto ao sistema de referencia, as vibracións *EM* emitidas en cada instante se propagan en todas as direccións a velocidade c dende o punto en que se atope a fonte nese intre. De non ser así no *SRI* en repouso coa fonte non se cumpriría o principio de constancia da velocidade da luz.

A constancia da velocidade da luz é incompatible coa lei de transformación de velocidades de Galileo. Sexa un sistema S' en movemento relativo respecto ao sistema S , con velocidade v dirixida no sentido positivo das X . Se a velocidade da luz no sistema S' na dirección positiva das X é c , entón respecto a S a velocidade da luz será $c+v$, cando empregamos as transformacións de Galileo.



O experimento de Michelson e Morley realizado en 1887 confirmara que a velocidade da luz na superficie da Terra, era independente da dirección en que se medira. Non observaron distintas velocidades de propagación da luz ao medila en direccións paralela e perpendicular á rotación terrestre. A pesar de que o experimento baseado en métodos interferométricos tiña sensibilidade de sobra para detectar a diferenza de velocidade que prognosticaban as transformacións de Galileo. Este resultado foi unha sorpresa científica que non podía explicarse dentro do marco conceptual da física clásica

As transformacións entre as coordenadas espaciais e o tempo, en distintos sistemas de referencia inerciais, debían modificarse para que foran compatibles coa constancia da velocidade de propagación da luz.

Unha consecuencia importante da constancia da velocidade da luz é a relatividade do concepto de *simultaneidade*. Consideremos un vagón de tren movéndose con *MRU* e velocidade v respecto a unha estación. Unha persoa ao lado das vías ve pasar o tren e, cando o centro do vagón pasa por diante del, observa que dous raios caen ao mesmo tempo un en cada extremo do vagón. Dado que as distancias a cada extremo do vagón son iguais e a velocidade con que se achega a luz procedente de cada lóstrego é a mesma, calcula que o tempo tardado polos dous lóstregos en chegar ata el é o mesmo. E como os observa ao mesmo tempo deduce que os sucesos foron simultáneos.

Un pasaxeiro situado no centro do vagón percibe antes o lóstrego procedente do extremo dianteiro do vagón. Como as distancias a cada extremo do vagón son iguais e a velocidade con que se achega a luz procedente de cada lóstrego é a mesma, calcula que o tempo tardado polos dous lóstregos en chegar ata el é o mesmo. E como os ve en instantes diferentes deduce que os

sucesos non foron simultáneos.

Sincronización de reloxos

Que observadores en movemento relativo non se poñan de acordo, nin sequera, en que dous sucesos sucederon ao non ao mesmo tempo, ilustra o coidado que debe terse ao establecer un procedemento, que permita asignar un valor de tempo a cada suceso.

Un reloxo en repouso na orixe de coordenadas O do sistema S , permite medir o instante de tempo correspondente a sucesos ocorridos nas inmediacións de O . Un reloxo idéntico ao anterior, en repouso nun punto P do sistema S , proporciona o tempo dos sucesos próximos a P . Para que os valores de tempo medidos sexan coherentes os dous reloxos deben estar sincronizados pero, como entenderemos máis adiante, de ningunha forma podemos “poñer en hora” os dous reloxos no punto O e logo levar un deles ao punto P .

Dous reloxos idénticos en repouso no sistema S , nos puntos O e P , están sincronizados, por definición, se o tempo que tarda a luz en ir dende O a P é igual ao que tarda en ir dende P a O . É dicir, o tempo transcorrido dende que se emite un raio de luz dende O (suceso 1), ata que chega a P e se reflicte nun espello cara a O (suceso 2), é igual ao tempo transcorrido dende o suceso 2 ata que a luz reflectida volve a O (suceso 3):

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2$$

, onde t_1 e t_3 son valores de tempo medidos no reloxo en O e, t_2 está proporcionado polo reloxo en P . Facilmente entenderemos esta definición con un exemplo: se o punto P dista 300.000 km da orixe O e, mandamos o raio de luz no instante $t_1=0\text{h}:0\text{m}:0''$, que chega a P no tempo $t_2=0\text{h}:0\text{m}:1''$ e se reflicte retornando a O en $t_3=0\text{h}:0\text{m}:2''$, os dous reloxos están sincronizados.

O mesmo procedemento permite definir e asignar un tempo a cada evento no sistema S' , a partir de reloxos idénticos en repouso no sistema e, sincronizados do xeito explicado anteriormente. O método é válido porque todos os sistemas inerciais son equivalentes e, en todos se cumpre o principio de constancia da velocidade da luz.

Fixémonos en que reloxos en repouso e sincronizados no sistema S' , por exemplo en O' e nun punto P' do semieixe positivo de abscisas X' , non estarán sincronizados no sistema S que afirmará, que a luz procedente de O' que se dirixe a P' tarda máis que en facer o percorrido inverso, pois no primeiro caso o receptor aléxase da luz que lle chega e, no segundo acércase a ela.

Transformacións de Lorentz-Einstein

Vamos obter as relacións entre as coordenadas espaciais e a temporal nos sistemas inerciais S e S' , compatibles co principio de constancia da velocidade da luz.

Consideremos que no instante inicial as orixes de ambos sistemas coinciden e que, nese instante, se emite un raio de luz dende dito punto orixe na dirección positiva das X . A velocidade da luz é a mesma nos dous sistemas, polo que:

$$x=ct \ ; \ x'=ct'$$

Suporemos unha relación lineal entre x e x' da forma:

$$x = \gamma(x' + vt')$$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

onde γ é un coeficiente función da velocidade que debe tender a 1 cando a velocidade se aproxime a cero.

Esto é suficiente para obter as transformacións buscadas:

$$x' = \gamma(x - vt) = \gamma(ct - vt) = \gamma(c - v)t = \gamma(c - v) \frac{x}{c} = \frac{\gamma(c - v)}{c} \gamma(x' + vt')$$

$$x' \left(1 - \frac{\gamma^2(c - v)}{c} \right) = \frac{\gamma^2(c - v)v}{c} t' \ ; \ x' \left(\frac{c - \gamma^2(c - v)}{c} \right) = \frac{\gamma^2(c - v)}{c} vt'$$

$$x' [c - \gamma^2(c - v)] = \gamma^2(c - v)vt' \ ; \ x' = \frac{\gamma^2(c - v)v}{c - \gamma^2(c - v)} t' \ ; \ \frac{\gamma^2(c - v)v}{c - \gamma^2(c - v)} = \frac{x'}{t'} = c$$

$$\gamma^2(c - v)v = c^2 - \gamma^2(c - v)c \ ; \ \gamma^2(c - v)(c + v) = c^2 \ ; \ \gamma^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - v^2/c^2}}$$

Vemos que: $\gamma \geq 1$; $\gamma \rightarrow 1$ cando $v \ll c$; $\gamma \rightarrow \infty$ cando $v \rightarrow c$

Relación entre os tempos de cada sistema:

$$t' = \frac{x'}{c} = \frac{\gamma(x - vt)}{c} = \frac{\gamma(ct - vt)}{c} = \frac{\gamma(ct - vx/c)}{c} = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \ ; \ t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

Analogamente: $t = \gamma \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right)$

O destello de luz emitido no instante inicial, cando as orixes dos sistemas S e S' coinciden, dende dita orixe común, debe propagarse en forma de fronte de ondas esféricas, centrados en O cando se observa dende S e, centrados en O' ao velo dende S' . Debe cumprirse que a ecuación do fronte de onda teña a mesma forma nos dous sistemas:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \ ; \ x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

o que esixe: $y=y'$ e $z=z'$. En efecto, consideremos as interseccións do fronte esférico co plano XY , as circunferencias correspondentes cumpren as ecuacións:

$$x^2 + y^2 = c^2 t^2 \ ; \ x'^2 + y'^2 = c^2 t'^2$$

substituíndo as ecuacións (2) e (4) na segunda das anteriores:

$$\gamma^2(x^2 - 2xvt + v^2t^2) + y'^2 = c^2\gamma^2\left(t^2 - 2t\frac{v}{c^2}x + \frac{v^2}{c^4}x^2\right)$$

$$y'^2 = \gamma^2\left(c^2t^2 - \cancel{2t\frac{v}{c^2}x} + \frac{v^2}{c^2}x^2 - x^2 + \cancel{2xvt} - v^2t^2\right) = \gamma^2\left(t^2(c^2 - v^2) - x^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\right) = c^2t^2 - x^2 = y^2 ; y' = y$$

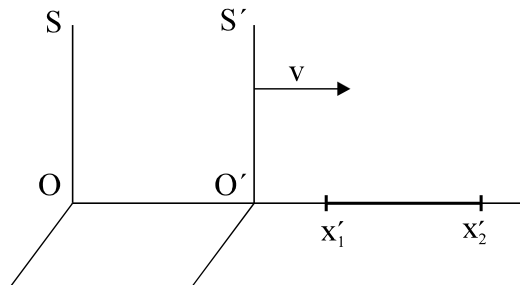
Analogamente compróbase que $z' = z$.

Recompilemos as ecuacións obtidas, coñecidas como **transformacións de Lorentz-Einstein**:

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) & x &= \gamma(x' + vt') \\ y' &= y & y &= y' \\ z' &= z & z &= z' \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) & t &= \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) \end{aligned} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Contracción de lonxitudes

Sexa unha barra ríxida en repouso no sistema S' con extremos x'_1 e x'_2 . A lonxitude da barra no sistema S' na que está en repouso, chámase *lonxitude propia* l_0 : $l_0 = x'_2 - x'_1$



A lonxitude l da barra medida no sistema S , respecto ao que está en movemento é $l = x_2 - x_1$, onde x_1 e x_2 deben medirse

simultaneamente no sistema S . Sexa $t_1 = t_2 = t$ o instante no que se miden ditos extremos da barra e usemos as transformacións de Lorentz-Einstein para relacionar ambas medidas da lonxitude da barra:

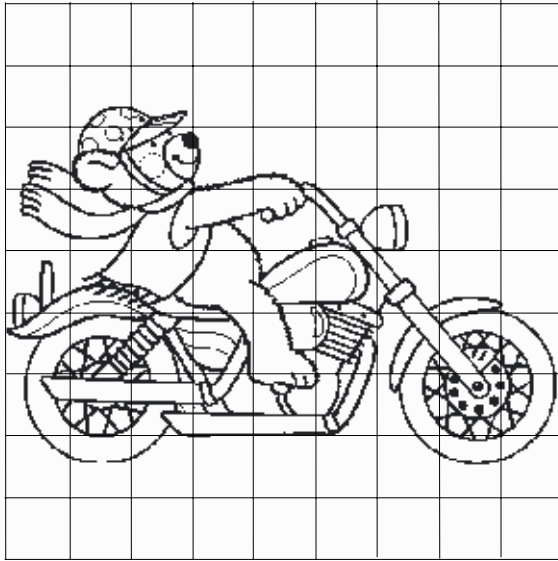
$$l_0 = \gamma(x_2 - vt_2) - \gamma(x_1 - vt_1) = \gamma(x_2 - x_1) - \cancel{\gamma(t_2 - t_1)} = \gamma l$$

$$l = l_0 / \gamma$$

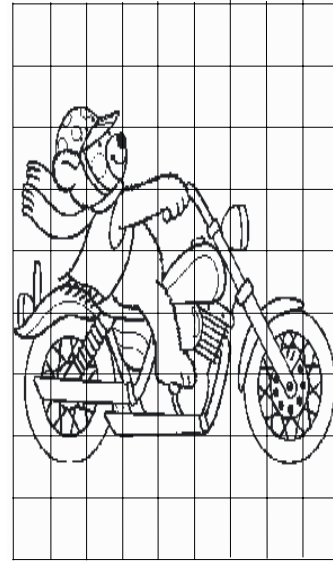
Como $\gamma \geq 1$ a lonxitude l da barra en movemento no sistema S , medida en dito sistema, é menor que a lonxitude propia l_0 , medida no sistema S' no que está en repouso. *Ao aumentar a velocidade os obxectos parecen contraerse na dirección do movemento.* Está contracción refírese os valores de lonxitude medidos pois, o obxecto en si non experimenta ningunha variación de tamaño e, a medida que se detén, a lonxitude medida recupera o valor da lonxitude propia.

A lonxitude das barras ríxidas perpendiculares á dirección do movemente permanece constante:

$$y'_2 - y'_1 = y_2 - y_1 \ ; \ z'_2 - z'_1 = z_2 - z_1$$



Motocicleta en repouso respecto ao observador

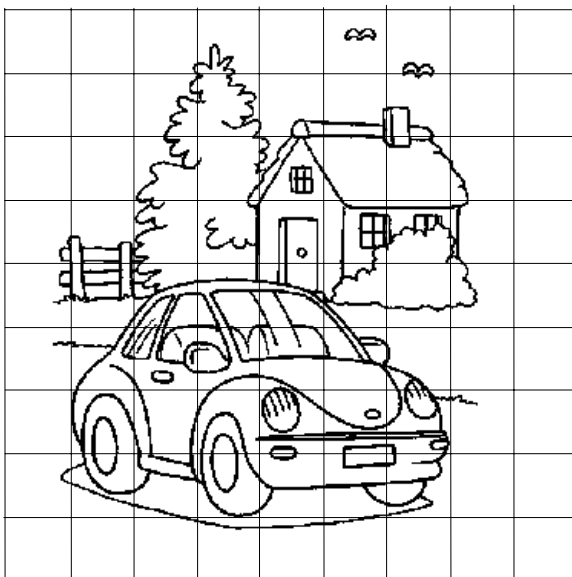


Motocicleta movéndose a gran velocidade

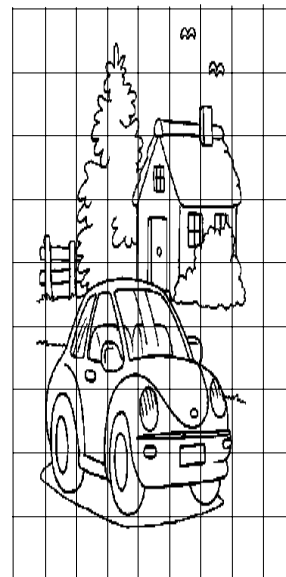
O mesmo sucedería se a barra estivera en repouso no sistema S , no que tería unha largura igual a súa lonxitude propia l_0 , $l_0 = x_2 - x_1$. Dende o sistema S' a barra moveríase e ao medir as posicións dos extremos no mesmo instante $t'_1 = t'_2 = t'$ observariáase contraída ata unha lonxitude $l = l_0/\gamma$.

$$l_0 = x_2 - x_1 = \gamma(x'_2 - vt'_2) - \gamma(x'_1 - vt'_1) = \gamma(x'_2 - x'_1) - \cancel{\gamma(t'_2 - t'_1)} = \gamma l$$

Polo tanto para un observador en movemente solidario con S' as distancias na dirección do movemente parecen reducirse, a métrica do espacio contráese.



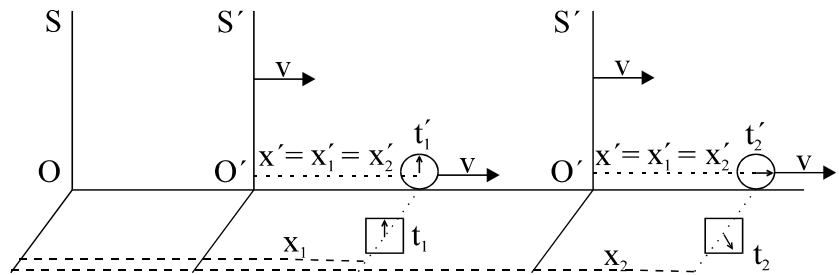
O que ve un observador en repouso



O que ve un observador que se move a gran velocidade

Dilatación do tempo

Consideremos un reloxo en repouso no sistema S' , no punto x' do eixe de abscisas (reloxo circular na figura). Sexan dous eventos que se producen nas proximidades do reloxo, por exemplo, podemos imaxinar unha persoa en repouso con respecto a S' situada no punto x' que da dúas palmadas; no suceso 1, o reloxo ten a agulla cara arriba e, transcorrido certos instantes durante os que a agulla avanza, ocorre o suceso 2, no que o reloxo ten a agulla cara a dereita. O tempo transcorrido entre ambos sucesos, medidos no sistema S' no que o reloxo empregado está en repouso, chámase tempo propio:



$$t_0 = t'_2 - t'_1$$

Calculemos o tempo transcorrido entre ambos eventos ao medilo no sistema S respecto o que, a persoa que da as palmadas está en movemento. Observemos que as posicións de ambos sucesos son distintas respecto a S : $x_1 \neq x_2$.

$$t_2 = \gamma \left(t'_2 + \frac{v}{c^2} x'_2 \right); \quad t_1 = \gamma \left(t'_1 + \frac{v}{c^2} x'_1 \right) \Rightarrow t_2 - t_1 = \gamma (t'_2 - t'_1) + \frac{v}{c^2} (x'_2 - x'_1)$$

$$t = \gamma t_0$$

Como $\gamma \geq 1$, o tempo t transcorrido entre ambos eventos visto dende S é maior que o tempo propio t_0 transcorrido en S' . Os reloxos en repouso en S (reloxos cadrados na figura) adiantan con respecto ao reloxo móbil. O tempo transcorre máis lentamente (dilatación do tempo) no sistema S' en movemento respecto a S . Este efecto é real e observable: os modernos reloxos atómicos de enorme precisión son quen de detectar esta consecuencia: usamos dous reloxos idénticos que sincronizamos, un queda en terra e outro sóbese a un avión que realiza un viaxe de ida e volta, ao comparar os dous reloxos vemos que o reloxo móbil atrasa con respecto ao que quedou en terra: o tempo transcorre máis lentamente no avión en movemento.

Este mesmo exemplo serve para aclarar un aparente paradoxo: ao considerar S' en movemento respecto a S obtemos que $t' < t$, pero se imaxinamos a S en movemento respecto a S' concluiríamos que $t < t'$. Pero dos reloxos que marchaban ao mesmo en terra, so un foi subido a un avión e acelerado ata acadar certa velocidade; é este reloxo acelerado o que atrasa respecto ao que non foi sometido a forzas de aceleración.

Outros resultados da teoría da relatividade:

Adición de velocidades

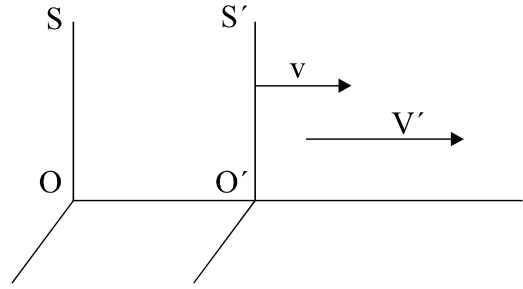
Sexa un corpo en movemento con velocidade V' respecto a S' , segundo o debuxo. A velocidade

V con respecto a S vale:

$$V = \frac{v + V'}{1 + vV'/c^2}$$

Se v e/ou V' son pequenas fronte a c obtemos a lei de adición de velocidades da mecánica clásica. Pero para valores de v e V' menores pero próximos a c teríamos:

$$V \approx 2c/2, V \approx c$$



e ningún corpo pode moverse a unha velocidade igual ou maior a da luz en ningún sistema de coordenadas.

Aumento da masa dun corpo ao aumentar a velocidade

Sexa m_0 a masa dun corpo medida nun sistema S no que está en repouso. Ao aumentar a velocidade da partícula aumenta a súa masa:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Ao aumentar a masa, a forza necesaria para continuar a aceleración da partícula faise cada vez maior e, para velocidades próximas a c , masa e forza serían infinitas, por dita razón a velocidade da luz é un límite inalcanzable para as partículas con masa.

Equivalencia masa-enerxía

Masa e enerxía poden transformarse a unha na outra verificándose que:

$$E = mc^2$$

Este resultado sorprendente foi confirmado posteriormente nas reaccións nucleares, nas que a destrución dunha pequena cantidade de masa orixina enormes cantidades de enerxía. Por outro lado nos aceleradores de partículas prodúcense colisións de alta enerxía que permiten materializar partículas.

Cuestións

- 28) Segundo a teoría da relatividade dous observadores en sistemas de referencia inerciais miden: a) a mesma velocidade da luz; b) o mesmo espazo; c) o mesmo tempo.
- 29) Un vehículo espacial afástase da Terra cunha velocidade de $0,5c$ (c =velocidade da luz). Dende a Terra mándase un sinal luminoso e a tripulación mide a velocidade do sinal obtendo o valor: a) $0,5c$; b) c ; c) $1,5c$.

- 30) A ecuación de Einstein $E=mc^2$ implica que: a) unha determinada masa m necesita unha enerxía E para poñerse en movemento; b) a enerxía E é a que ten unha masa m que se move a velocidade da luz; c) E é a enerxía equivalente a unha determinada masa.
- 31) Os mesóns son partículas elementais que, poden materializarse nos laboratorios de alta enerxía, e dos que se coñece a súa vida media ou tempo que permanecen en termo medio sen desintegrarse. Tamén se producen cando os raios cósmicos, protóns moi enerxéticos procedentes do espazo exterior, baten coas capas altas da atmosfera. Os mesóns producidos deste xeito acadan a superficie terrestre aínda que, a súa vida media é varias veces menor do tempo que necesitarían para cruzar a atmosfera, incluso se viaxarán a velocidades próximas á da luz. Isto demostra que para os mesóns creados e proxectados a gran velocidade polos raios cósmicos, o tempo transcorre máis lentamente que para os mesóns en repouso no laboratorio. Dende o punto de vista dun observador que viaxará cos mesóns a gran velocidade, a altura da atmosfera aparecería contraída, polo que se desprazaría unha distancia compatible co tempo de vida dos mesóns.
- 32) O sistema S' móvese respecto a S cunha velocidade v na dirección positiva das X . No instante inicial, $t=t'=0$, as orixes dos sistemas coinciden $O=O'$, e nese intre emítese un destello de luz dende a orixe común. Respecto a S un raio de luz desprázase nun tempo t ata o punto $P(x=0, y=ct, z=0)$. Respecto a S' chega ao punto $P'(x',y', z'=0)$. Comprobar o principio de constancia da velocidade da luz.

Calculemos a velocidade da luz no sistema S' :

$$v_{luz en S'}^2 = \frac{x'^2 + y'^2}{t'^2} = \frac{\gamma^2(x-vt)^2 + y^2}{\gamma^2\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)^2}$$

como $x=0$, substituíndo:

$$v_{luz en S'}^2 = \frac{\gamma^2 v^2 t^2 + y^2}{\gamma^2 t^2} = \frac{\gamma^2 v^2 t^2 + c^2 t^2}{\gamma^2 t^2} = \frac{\frac{c^2}{c^2 - v^2} v^2 + c^2}{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} = \frac{\cancel{c^2} v^2 + c^4 - \cancel{c^2} v^2}{\cancel{c^2} - v^2} = c^2$$

$$v_{luz en S'} = c$$