

FÍSICA CUÁNTICA. PARTÍCULAS E FORZAS FUNDAMENTAIS

1. LIMITACIÓNS DA FÍSICA CLÁSICA

- 1.1. A radiación do corpo negro e a hipótese de Planck
- 1.2. O efecto fotoeléctrico e a explicación de Einstein
- 1.3. Os espectros atómicos e o átomo de Bohr

2. MECÁNICA CUÁNTICA

- 2.1. Dualidade onda-partícula
- 2.2. Principio de indeterminación de Heisenberg
- 2.3. Aplicacións da mecánica cuántica

3. FORZAS E PARTÍCULAS FUNDAMENTAIS

- 3.1. Teorías de unificación

4.- ORIXE E EVOLUCIÓN DO UNIVERSO

1. LIMITACIÓNS DA FÍSICA CLÁSICA

Tres grandes ramas conformaban a finais do século XIX o que se deu en chamar "física clásica":

- A mecánica de Newton.
- A electrodinámica de Maxwell.
- A termodinámica de Clausius e Boltzmann.

Estas tres ramas, en conxunto, explicaban de forma satisfactoria a maioría dos fenómenos físicos coñecidos ata entón; tíñase, así, a sensación de que a física chegara á súa ansiada meta: explicar todos os fenómenos naturais. Con todo, a mecánica clásica incorría en fortes contradicións cando se intentaba aplicar ao ámbito de velocidades próximas á da luz. Xurdiu así a teoría da relatividade restrinxida ou especial. Por outra banda, xa algúns anos antes de que Einstein publicase a súa teoría da relatividade especial (1905), se viña observando o fracaso da física clásica á hora de explicar fenómenos que parecían ter unha relación inmediata coa constitución máis elemental da materia. Entre eles cabe citar a radiación do **corpo negro e os espectros atómicos**.

Sería, curiosamente, unha persoa remisa nun primeiro momento á idea da cuantización da materia en forma de átomos a que introducise o concepto de cuantización da enerxía en forma de cuantos. En efecto, foi Max Planck quen, en 1900, ao non ver outra posible alternativa para explicar a radiación térmica dos corpos quentes, deu o paso decisivo cara a unha nova física aplicable á escala atómica e subatómica. Nun principio, a noción do cuanto non foi ben acollida pola comunidade física, posiblemente porque o seu propio autor tampouco parecía demasiado satisfeito con ela.

Pero en 1905, Einstein, por entón á marxe dos círculos tradicionais do pensamento e a investigación científicos, publicou na revista *Annalen der Physik* o artigo titulado "Sobre un punto de vista heurístico relativo á produción e transformación da luz". Nel retomou a idea de Planck aplicada á luz e logrou explicar con ela un fenómeno adicional que xa anunciara Hertz ao xerar e detectar as ondas electromagnéticas: o efecto fotoeléctrico, que consiste na indución de corrente eléctrica entre superficies metálicas ao iluminalas con fontes ricas en radiación ultravioleta. É a partir de entón cando empeza a tomarse en consideración a natureza cuántica das radiacións electromagnéticas e, con ela, a natureza dual onda-corpúsculo da luz.

Na década dos anos vinte, e coas achegas de Louis de Broglie, Born, Heisenberg, Schrödinger e outros, nace a nova mecánica do mundo atómico e subatómico: a mecánica cuántica.

1.1. A radiación do corpo negro e a hipótese de Planck

Observaches como cambia de cor unha barra de ferro ao ser quentada? Ao principio só emite radiación infravermella, que non vemos; despois empeza a emitir luz vermella e, a temperaturas superiores, presenta cor branca, e ata branco-azulado.

*A enerxía electromagnética que emite un corpo debido á súa temperatura denomínase **radiación térmica**.*

Esta radiación térmica varía tanto coa temperatura como coa composición do corpo. Existe, con todo, un conxunto de corpos cuxa radiación térmica só depende da súa temperatura. Denomínanse **corpos negros**, e a finais do século XIX sabíase que a súa radiación obedecía a dúas leis básicas: a lei de Stefan-Boltzmann e a lei do desprazamento de Wien.

En 1884, Ludwig Boltzmann deduciu teoricamente a expresión que relaciona a intensidade irradiada (enerxía por unidade de tempo e área) coa temperatura absoluta dun corpo. Esta expresión fora calculada empiricamente por Josef Stefan en 1879, polo que se soe coñecer como **lei de Stefan-Boltzmann**. Según esta lei:

A intensidade da radiación térmica dun corpo negro é proporcional á cuarta potencia da súa temperatura absoluta.

$$I = \sigma T^4$$

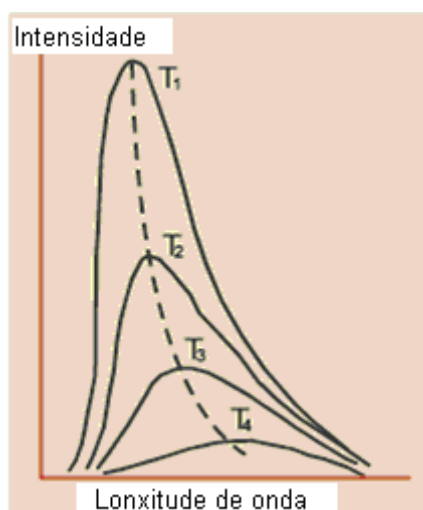
Nesta expresión I é a intensidade dada en W/m^2 , e σ é a chamada constante universal de Stefan-Boltzmann, cuxo valor é

$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

A segunda lei foi enunciada en 1893 por Wilhelm Wien e é coñecida como **lei do desprazamento de Wien**. Según ela:

O produto da lonxitude de onda correspondente ao máximo de emisión λ_{max} pola temperatura absoluta é constante.

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,897755 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



Exemplo: Cal é a temperatura aproximada da superficie do Sol se emite luz de 510 nm de lonxitude de onda no máximo de intensidade?

Solución: a temperatura obtense a partir da lei de Wien:

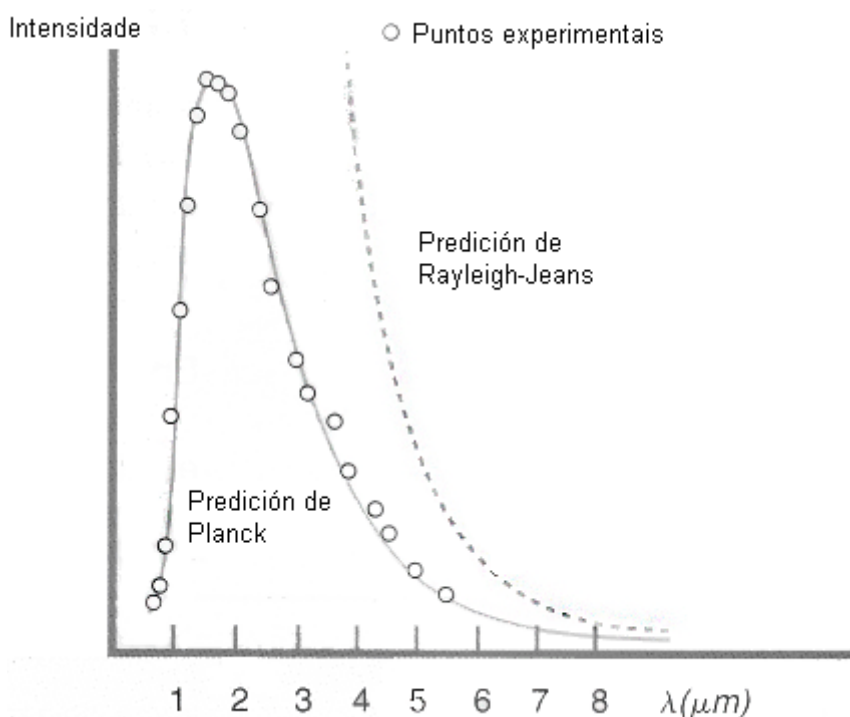
$$\lambda_{\text{max}} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{510 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 5,7 \cdot 10^3 \text{ K}$$

Hipótese de Planck

A principios do ano 1900 dous físicos ingleses, lord John W. Rayleigh (1842-1919) e sir James H. Jeans (1877-1946), utilizaron os principios do electromagnetismo e a termodinámica clásicos para describir a radiación do corpo negro. Obtiveron unha expresión matemática (lei de Rayleigh-Jeans) na que a enerxía da radiación diminúe ao aumentar a lonxitude de onda, pero aumenta indefinidamente ao diminuír esta.

En cambio, segundo os resultados experimentais, a enerxía tende a cero para lonxitudes de onda moi pequenas, como as correspondentes ao ultravioleta, que era a zona de maior enerxía do espectro electromagnético coñecida nese momento. Este fracaso da teoría clásica foi tan importante que se denominou **catástrofe ultravioleta**.



A finais dese mesmo ano, o físico alemán Max Planck (1858-1947) formulou as seguintes hipóteses como punto de partida para intentar explicar a radiación do corpo negro:

- Os átomos que emiten a radiación compórtanse como osciladores harmónicos.
- Cada oscilador absorbe ou emite enerxía da radiación nunha cantidade proporcional á súa frecuencia de oscilación f :

$$E_0 = hf \quad h: \text{constante de Planck} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Así, a enerxía total emitida ou absorbida por cada oscilador atómico só pode ter un número enteiro n de porcións de enerxía E_0 :

$$E = nE_0; E = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Os paquetes de enerxía hf chamáronse **cuantos**, de maneira que a enerxía dos osciladores está cuantizada e n é un número cuántico.

Ao desenvolver esta hipótese cuántica, Planck obtivo unha expresión que lle permitiu reproducir a distribución de enerxías observada experimentalmente.

Exemplo: Calcula a frecuencia, o período e a enerxía dunha radiación de 920 nm situada na zona infravermella do espectro do hidróxeno. Datos: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Solución: se se aplica $c = \lambda f$, dedúcese o valor da frecuencia:

$$3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} = 920 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot f; \text{ de onde: } f = 3,26 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Unha vez coñecida a frecuencia, o valor do período é o seu inverso:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{3,26 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3,07 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$

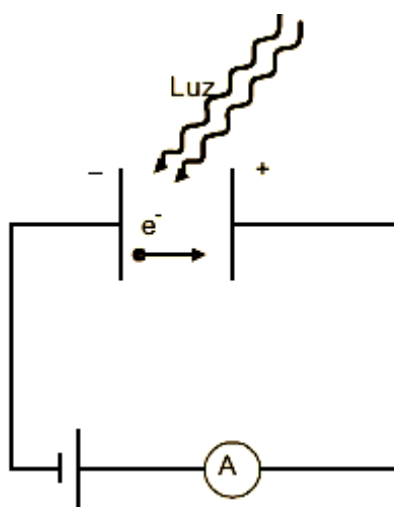
O valor da enerxía calcúlase a partir da ecuación de Planck: $E_0 = hf$

$$E_0 = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3,26 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 2,16 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

1.2. O efecto fotoeléctrico e a explicación de Einstein

Unha das maiores ironías da historia da física foi o feito de que o descubrimento do efecto fotoeléctrico, que requiría volver considerar a natureza corpuscular da luz, fose unha consecuencia do experimento que consagrou a natureza ondulatoria electromagnética da luz: o experimento de Hertz.

Hertz observou que unha faísca eléctrica saltaba con máis facilidade entre dúas esferas unidas a un circuíto se estas estaban puídas e eran iluminadas con radiación ultravioleta. Un dispositivo experimental que permite observar este efecto é o que aparece na seguinte figura. As dúas placas metálicas enfrontadas atópanse a diferente potencial nun tubo sen carga, o que permite refugar a influencia do aire. Nun momento dado, ao iluminar o cátodo con certa radiación, establécese o tránsito de corrente eléctrica entre as placas, o que pode detectarse co amperímetro A.



Este fenómeno empezou a ser estudado en detalle, pero a súa natureza permaneceu descoñecida ata que Thomson descubriu o electrón. A partir de entón sóubose que os responsables do establecemento da corrente fotoeléctrica eran os electróns do metal.

Estes electróns que "saltaban" da superficie metálica debían posuír a enerxía cinética suficiente para chegar ata a outra placa. A devandita enerxía cinética podía determinarse invertendo o potencial entre as placas, de modo que os electróns se freasen, e atopando o valor do potencial para o cal xa non chegaban electróns á outra placa. Este valor de potencial coñécese como **potencial de freado**.

Pronto se observou que o efecto fotoeléctrico obedecía a unha serie de fenómenos un tanto sorprendentes e para os que non se atopaba explicación no marco dos modelos clásicos. Algúns dos máis destacados eran os seguintes:

- Só se emiten electróns (se o potencial é nulo) cando a frecuencia da luz que incide sobre a placa supera certo valor f_0 que se denomina **frecuencia limiar**, e que é característico de cada metal.
- Por baixo de devandita frecuencia limiar non hai emisión de electróns, aínda que se aumente a intensidade luminosa.
- Por encima de devandita frecuencia limiar, un aumento de intensidade luminosa produce un incremento do número de electróns emitidos, pero non da súa enerxía cinética máxima.
- O número de electróns emitidos é proporcional á intensidade da radiación luminosa recibida.

Estas observacións entraban en contradición coas leis clásicas, segundo as cales o efecto fotoeléctrico debería producirse para calquera frecuencia, sempre que a intensidade luminosa fose o suficientemente grande. Ademais, segundo as predicións clásicas, a enerxía cinética dos electróns emitidos debería aumentar coa intensidade, cousa que non sucede. Pola contra, a enerxía cinética só mostra dependencia da frecuencia incidente.

Outro feito adicional era que a emisión de electróns da superficie parecía ser case instantánea, ata para intensidades moi baixas. Os tempos eran de nanosegundos. Desde o punto de vista clásico, esperábase un tempo maior para absorber a radiación antes de alcanzar a enerxía cinética necesaria.

Explicación de Einstein do efecto fotoeléctrico

Einstein, no mencionado traballo de 1905, retomou a idea dos cuantos de Planck e fixo unha achega nova: non limitou a súa aplicación á explicación da absorción ou emisión de enerxía por parte dos osciladores atómicos, como fixo Planck, senón que a estendeu á propia natureza e propagación da luz. Deste xeito, *Einstein volveu introducir a natureza corpuscular na propagación da luz e a súa interacción coa materia*.

Segundo el, a enerxía luminosa non se reparte dun modo uniforme en todos os puntos dunha fronte de onda, senón que se atopa concentrada en cuantos "de enerxía" que posteriormente se denominarían **fotóns**. Así, a luz ordinaria estaría formada por unha infinidade de fotóns de diferentes "tamaños enerxéticos" que se propagan en todas direccións á velocidade da luz. Dese modo, ao interaccionar a luz coa materia, os osciladores atómicos absorben aqueles fotóns que lles son permitidos, segundo regras que veremos máis adiante.

Tendo en conta estas consideracións, Einstein logrou dar unha explicación de todos os feitos observados no efecto fotoeléctrico. Segundo el, un fotón de luz pode ter a enerxía suficiente para arrincar un electrón dun átomo. O electrón transforma dita enerxía no traballo necesario que debe efectuar contra a forza de atracción electrostática que o liga ao átomo. Dado que os átomos de distintos metais son diferentes, esa enerxía tamén será distinta para cada metal, o que explica a especificidade da frecuencia limiar para os diversos metais.

Así pois, **o traballo de extracción necesario para arrincar un electrón dunha superficie metálica é igual a h multiplicado pola frecuencia limiar**:

$$W = hf_0$$

Con todo, a enerxía dos fotóns da luz incidente pode ser maior que o traballo de extracción. Neste caso, a enerxía restante é a enerxía cinética que adquire o electrón unha vez extraído da superficie metálica. É dicir, se a enerxía do fotón de luz incidente é hf , ha de cumprirse que:

$$hf = W + \frac{1}{2}m_e v_{máx}^2$$

expresión coñecida como **ecuación de Einstein do efecto fotoeléctrico**. Dado que $W = hf_0$, podemos escribila tamén do seguinte modo:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}m_e v_{máx}^2$$

É dicir:

$$E_{incidente} = E_{umbral} + E_c$$

Así se explica por que non aumenta a enerxía cinética dos electróns ao incrementarse a intensidade da luz. Como vemos, esta enerxía cinética depende unicamente da frecuencia da luz incidente e da frecuencia limiar. Por iso, un aumento de intensidade só supón un incremento do número de fotóns que chegan á superficie, co que é maior o número de electróns arrincados, pero non a súa enerxía cinética.

En 1916, o físico norteamericano Robert A. Millikan (1868-1953) proporcionou unha demostración experimental da teoría fotónica de Einstein e Planck ao achar o valor da constante de Planck (h) medindo nun mesmo metal os potenciais de freado necesarios para distintas radiacións incidentes de frecuencias coñecidas. O valor que obtivo concordaba co que Planck usara na súa explicación da emisión do corpo negro. É evidente que esa concordancia por dous métodos tan distintos non podía ser froito da casualidade, polo que a idea do fotón adquiría carta de natureza.

Exemplo: A frecuencia umbral de extracción de electróns dun determinado metal por efecto fotoeléctrico é $f_0 = 2,02 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Se sobre dito metal inciden fotóns de 12 eV, acha a enerxía cinética máxima dos electróns arrancados. Datos: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Solución: a ecuación de Einstein do efecto fotoeléctrico é: $E_{c,máx} = hf - hf_0$, sendo f a frecuencia radiación incidente e hf_0 o traballo de extracción.

Sabemos que o electrón-voltio (eV) é a enerxía que adquire un electrón cando se somete á diferenza de potencial de 1 voltio. No Sistema Internacional esta unidade de enerxía equivale a: $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, xa que neste sistema de unidades a carga exprésase en culombios (C).

Con todo isto resulta:

$$E_{c, n\alpha} = 12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} - 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,02 \cdot 10^{14} = 1,79 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

1.3. Os espectros atómicos e o átomo de Bohr

Newton demostrou que a luz branca podía ser descomposta nas súas cores integrantes ao atravesar un prisma, o que daba orixe ao que el denominou un espectro continuo.

Con todo, obtéñense espectros distintos a partir da luz emitida por gases quentes ou sometidos a unha descarga eléctrica en tubos a baixa presión. Se se fai pasar a luz emitida polo gas neseas condicións por unha rendixa estreita e se descompón logo nun prisma ou calquera outro medio dispersor (rede de difracción, por exemplo), o espectro obtido é descontinuo, e presenta as seguintes características:

- Está formado por unha serie de liñas de distintas cores sobre un fondo escuro.
- O espectro é característico de cada elemento, de modo que non hai dous elementos que presenten o mesmo espectro.

Este segundo feito foi a causa de que os espectros se convertesen nun potente método de análise, pero tamén expuxo a físicos e químicos un novo interrogante: se o espectro é algo característico de cada elemento, deberá estar directamente relacionado coa natureza dos átomos que constitúen o devandito elemento.

Debido a isto, tratouse de buscar algunha regularidade nos espectros e algunha expresión matemática que os representase. En 1885, **Balmer** (1825-1898) atopou a expresión matemática que correspondía ao espectro visible do hidróxeno atómico e que, escrita en termos actuais, é a seguinte:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

onde n é un número enteiro maior que 2, e R é a denominada **constante de Rydberg**, cuxo valor é:

$$R = 109\,677,6 \text{ cm}^{-1}$$

Na expresión de Balmer, ao dar a n sucesivamente os valores 3, 4, 5..., obtíñanse as lonxitudes de onda da primeira liña (denominada H- α ou "hidróxeno alfa"), da segunda (H- β ou "hidróxeno beta"), da terceira, etcétera.

Rydberg e **Ritz** supuxeron que a expresión de Balmer era tan só un caso particular dunha expresión máis xeral que tiña a seguinte forma:

$$\frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

onde $\tilde{\nu}$ é o chamado **número de onda** ou **frecuencia reducida**, que non é outra cousa que o inverso da lonxitude de onda.

Conforme os espectroscopios gañaban en poder de resolución, ían aparecendo distintas series espectrais en zonas do infravermello e o ultravioleta que respondían á expresión anterior.

Serie de:	n_1	n_2	Zona
Lyman	1	2,3,4...	Ultravioleta
Balmer	2	3,4,5...	Visible
Paschen	3	4,5,6...	Infravermello
Brackett	4	5,6,7...	Infravermello
Pfund	5	6,7,8...	Infravermello

A aparente complexidade dalgúns espectros debíase á superposición de distintas series espectrais.

Exemplo: A serie de Balmer do espectro de emisión do átomo de hidróxeno está formada por radiacións producidas ao caer un electrón á segunda órbita ($n=2$) desde órbitas de maior enerxía. Todas as radiacións da serie corresponden á zona do visible. Calcula a lonxitude de onda da liña máis próxima á rexión do infravermello

Solución: xa que a zona infravermella ten frecuencias máis baixas que a visible, a radiación visible de menor frecuencia será a máis cercana ao infravermello. Por tanto, debe escollerse o salto electrónico que implique o menor cambio enerxético. Coma en todas as transicións da serie de Balmer o electrón acaba na segunda órbita, o tránsito de mínima enerxía será o que proveña da terceira órbita ($n=3$), que é a máis cercana.

Aplicando $\frac{1}{\lambda} = \tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

e tomando $n_1 = 2$, $n_2 = 3$ e $R = 109\,677,6 \text{ cm}^{-1}$ resulta: $\frac{1}{\lambda} = 109677,6 \cdot 100 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$

De onde: $\lambda = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 656 \text{ nm}$

A pesar de atoparse a regularidade no caso do espectro máis sinxelo, o de hidróxeno, a pregunta fundamental seguía en pé: *a que se deben esas liñas que aparecen nos espectros? Por que as series espectrais son converxentes?*

O átomo de Bohr

En 1911, os experimentos de **Rutherford** e os seus colaboradores **Geiger** e **Marsden** empezaron a aclarar a natureza atómica, que, como empezaba a ser evidente, era nuclear. Isto quere dicir que a práctica totalidade da masa atómica se concentra no núcleo dos átomos, cargado positivamente. A estabilidade dos átomos requiría que os electróns virasen ao redor do núcleo en diferentes órbitas. Neste punto, con todo, a física clásica volvía introducir outra contradición: os electróns en movemento circular periódico debían emitir radiación electromagnética de modo continuo. Isto levaba inexorablemente a concluír que a súa traxectoria acabaría no núcleo. Con todo, os resultados demostraban que o núcleo era positivo. A situación parecía non ter saída.

Á vista deste estado de cousas, Niels Bohr botou man da teoría dos cuantos de Planck e Einstein, que viña demostrando a súa eficacia fronte ás teorías clásicas. Así, en xullo de 1913, o físico danés publicou un primeiro artigo, *Sobre a constitución de átomos e moléculas*, no que comeza a plasmar a súa idea do átomo. En esencia, o modelo de Bohr expón os seguintes postulados:

- **Primeiro postulado.** Existen órbitas, denominadas "permitidas", nas que o electrón que se move con celeridade constante non emite ningún tipo de radiación. Estas órbitas constitúen estados estacionarios do átomo.
- **Segundo postulado.** As órbitas permitidas son as únicas nas que pode moverse o electrón. Dado que estas órbitas están cuantizadas, o momento angular do electrón nelas tomará valores discretos (ou cuantizados tamén). Os devanditos valores relaciónanse coa constante de Planck do seguinte modo:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}$$

onde n é un número enteiro que cuantiza os posibles valores do momento angular, polo que se denomina **número cuántico principal**.

- **Terceiro postulado.** O electrón só pode pasar dunhas órbitas permitidas a outras absorbendo (se se despraza a órbitas superiores) ou emitindo (se se despraza a órbitas inferiores) enerxía en forma de cuantos, é dicir, absorbendo ou emitindo fotóns. Se E' é a enerxía dunha órbita superior, e E , a dunha órbita inferior, a enerxía emitida nese salto será:

$$\Delta E = E' - E = hf$$

En consecuencia, Bohr non só introduciu a condición de cuantización da enerxía de Planck e Einstein, senón que engadiu a condición de cuantización do momento angular. A idea de Bohr, co seu modelo atómico, era explicar a estabilidade dos átomos e os resultados do experimento de Rutherford, así como interpretar os espectros atómicos. Veremos que consegue isto plenamente no caso do hidróxeno atómico.

Cálculo do raio das órbitas permitidas

A forza de atracción electrostática (lei de Coulomb) entre o núcleo e o único electrón do átomo de hidróxeno é unha forza centrípeta, de modo que os seus valores axústanse á seguinte igualdade:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r}$$

onde e é a carga do electrón (cuxo valor é igual que o do núcleo), e m_e , a masa do electrón. Despexando r , obtemos:

$$r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m_e v^2} \quad [1]$$

Con todo, debemos aplicar agora a este radio a condición de cuantización do momento angular exposta no segundo postulado:

$$v = \frac{nh}{2\pi m_e r}$$

ecuación que, substituída na expresión [1] conduce a esta outra:

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

Englobando todas as constantes nunha soa () obtense unha relación entre o radio e o número cuántico principal, n, de modo que:

$$r = 0,53 \cdot n^2 \text{ \AA}$$

Onde utilizamos: $\epsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

É dicir, o radio non pode ter calquera valor, ten que ser igual á constante K multiplicada polo cadrado dun número natural n.

A enerxía das órbitas de Bohr

Con este concepto referímonos á enerxía que tería un electrón situado na órbita que resulta da suma da enerxía cinética e a enerxía potencial:

$$E_{total} = E_c + E_p = \frac{1}{2} m_e v^2 + \frac{-e^2}{4\pi \epsilon_0 r}$$

Substituíndo na enerxía cinética o valor de v deducido anteriormente, obtense:

$$E_c = \frac{1}{8} \cdot \frac{n^2 h^2}{\pi^2 m_e r^2}$$

E substituíndo nela a expresión obtida para r:

$$E_c = \frac{1}{8} \cdot \frac{m_e e^4}{\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

Substituíndo tamén na enerxía potencial o valor obtido para r:

$$E_p = -\frac{1}{4} \cdot \frac{m_e e^4}{\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

Deste xeito, a **enerxía total dun electrón nunha órbita de Bohr** vén dada por:

$$E_{total} = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

ou se o conxunto de constantes se englobasen nunha soa:

$$E_{total} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

A enerxía só pode ter valores múltiplos naturais de K', é dicir, está cuantizada, pois depende dun número cuántico n. Esta expresión indícanos que a diferenza de enerxía entre órbitas tende a diminuír conforme aumenta n (o que explica porqué son converxentes as series espectrais).

Exemplo: Con respecto a un átomo de hidróxeno, calcula a enerxía necesaria, en eV, para excitar ao electrón ata o nivel 6.

Solución: no átomo de hidróxeno, a enerxía correspondente a cada nivel vén dada, en eV, pola expresión de Bohr:

$$E = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Por tanto, a enerxía requerida para excitar un electrón ata o nivel 6 é:

$$E_6 - E_1 = -0,38 - (-13,6) = 13,22 \text{ eV}$$

Cálculo da diferenza enerxética asociada ao cambio de órbita

Usando a expresión da enerxía das órbitas de Bohr, podemos utilizar o terceiro postulado e comprobar o acerto da teoría na explicación do espectro do átomo de hidróxeno.

Para dous estados 1 e 2:

$$E_2 = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n_2^2 h^2} \quad E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n_1^2 h^2}$$

Xa que logo, a diferenza de enerxías entre ambos os niveis:

$$E_{\text{emitida}} = E_2 - E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n_2^2 h^2} - \left(-\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 n_1^2 h^2} \right) = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Tendo en conta que, segundo o terceiro postulado de Bohr, a enerxía é emitida ou absorbida en forma de cuantos (hf):

$$hf = h \frac{c}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

E, xa que logo:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

O gran acerto da teoría de Bohr é que **substituíndo os valores das constantes de fóra da paréntese obtense a constante de Rydberg**.

Este feito supuña outro respaldo experimental á teoría cuántica de Planck e Einstein. Asumindo esta teoría, Bohr conseguiu dar unha explicación física da formación dos espectros de emisión, en particular do espectro do átomo de hidróxeno.

Exemplo: Demostra, substituíndo os valores das constantes que figuran na expresión de Bohr

$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$, que a constante de fóra da paréntese coincide coa de Rydberg.

Os valores das constantes son os seguintes:

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; \varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2; h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

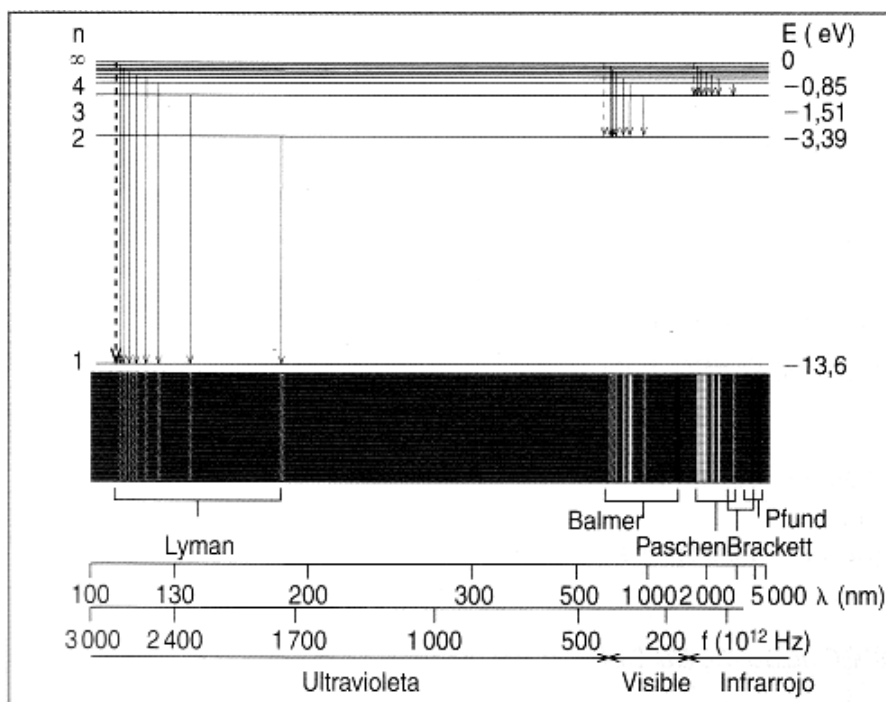
Ao substituílos na expresión do enunciado, obtense o valor da constante de Rydberg:

$$\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 10764390 \text{ m}^{-1} = 107643,9 \text{ cm}^{-1}$$

A desviación do coñecido valor débese ás aproximacións decimais das constantes involucradas.

Como se producen os espectros á luz da teoría de Bohr? A descarga eléctrica no tubo onde se atopa a mostra gasosa suministra a enerxía de excitación; os electróns dos átomos pasan aos niveis superiores. Como na mostra existe un número moi elevado de átomos, non todos os electróns volverán directamente ao nivel inferior, senón que, poderán producirse transicións intermedias. Con todo, posto que as órbitas están cuantizadas, os átomos só emitirán aquelas enerxías que corresponden a diferenzas de enerxía entre as distintas órbitas. Estas enerxías equivalen a determinados valores de frecuencia que poden caer dentro da zona do espectro ultravioleta (serie de Lyman), visible (serie de Balmer) ou infravermello (as demais).

Tamén pode explicarse a partir da expresión das enerxías das órbitas de Bohr o feito de que a separación enerxética entre niveis superiores sexa menor que entre niveis inferiores; por esa razón, as transicións entre niveis superiores son as de menor enerxía (aparecen no infravermello), mentres que as transicións que acaban no nivel 1 son as máis enerxéticas (aparecen no ultravioleta).



A pesar do éxito do modelo de Bohr na explicación do átomo de hidróxeno, pronto se viu que a súa eficacia era limitada e que non concordaba cos espectros de átomos polielectrónicos. Isto levou a realizar sucesivas correccións, como as achegas relativistas de Sommerfeld, e á necesidade de introducir novos números cuánticos. A solución, como veremos, veu da man da nova mecánica cuántica.

2. MECÁNICA CUÁNTICA

Ata principios do século XX, a comunidade científica consideraba o electrón como unha partícula e a radiación electromagnética como unha onda.

Con todo, xa vimos que a radiación electromagnética se comporta en ocasións como un conxunto de fotóns. Este feito, xunto con outros resultados experimentais obtidos ao redor de 1900, non estaba de acordo co establecido ata entón pola comunidade científica. Iso levou aos físicos da época a desenvolver unha nova teoría, a mecánica cuántica.

A continuación describiremos dous aspectos característicos desta teoría: a dualidade onda-partícula e o principio de indeterminación e finalmente veremos algunhas aplicacións da mecánica cuántica no mundo actual.

2.1. Dualidade onda-partícula

En 1924, o físico francés Luís V. de Broglie (1892-1987) suxeriu, na súa tese doutoral, que os electróns podían ter características ondulatorias. A súa hipótese, coñecida como hipótese de De Broglie consistiu en ampliar o comportamento dual da radiación á materia, é dicir, considerou que a materia, especialmente os electróns, tamén presentarían un aspecto corpuscular e un aspecto ondulatorio.

Xa en 1919, Einstein suxerira que os fotóns viaxaban nunha dirección determinada, á velocidade da luz, e con un momento lineal ou cantidade de movemento de valor $\frac{h}{\lambda}$. O seu razoamento baseábase na identidade entre a expresión da enerxía do fotón según a fórmula de Planck e a expresión da enerxía relativista do fotón, cuxa masa (e enerxía) en repouso é cero. Por tanto, a enerxía dun fotón virá dada por:

$$E = mc^2$$

onde m é a masa relativista do fotón.

Igualndo as expresión de Planck ($E = hf$) e Einstein ($E = mc^2$), e tendo en conta a ecuación da cantidade de movemento, obtense:

$$p_{\text{fotón}} = mc = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Dito de outro modo, a lonxitude de onda dun determinado fotón relaciónase coa súa cantidade de movemento, de modo que:

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

Dalgunha forma, esta expresión relaciona unha propiedade corpuscular (momento lineal) cunha propiedade ondulatoria (lonxitude de onda)

O grande acerto de De Broglie consistiu en suxerir que a natureza debía rexirse por leis simétricas, de modo que si unha onda (coma a luz) tiña propiedades corpusculares, un corpúsculo (como o electrón) debía ter propiedades ondulatorias. Así, estendeu a expresión

$\lambda = \frac{h}{p}$ ás partículas materiais que se moveran con velocidade v ; entón podemos afirmar que:

Toda partícula material que se move con velocidade v ten unha lonxitude de onda asociada, dada pola expresión:

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

Exemplo: Un electrón posúe unha enerxía de $4 \cdot 10^5 \text{ eV}$. Acha a lonxitude de onda asociada a el. Datos: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

Solución: toda partícula en movemento ten asociada unha onda (dualidade onda-corpúsculo de De Broglie) correspondéndolle unha lonxitude de onda, λ , que vén dada pola expresión:

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

Como coñecemos a enerxía cinética do electrón, podemos calcular a súa velocidade:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow 4 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = \frac{1}{2} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot v^2 \Rightarrow v = 3,75 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Agora, substituíndo na expresión $\lambda = \frac{h}{mv}$, temos $\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3,75 \cdot 10^8} = 1,94 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

Esta proposta foi considerada inicialmente como carente de realidade física pola súa falta de evidencias experimentais. Con todo, en 1927 os físicos norteamericanos C. Davisson (1881-1958) e L. A. Germer (1896-1971) comprobárona experimentalmente despois de observar a difracción de electróns de forma casual. Ese mesmo ano, o físico inglés Thomson (1892-1975) confirmou a relación obtida teoricamente por De Broglie, $\lambda = \frac{h}{p}$, mediante a difracción de feixes de electróns a través de follas metálicas delgadas.

O diagrama obtido ao facer incidir un feixe de electróns sobre dúas rendixas estreitas coincidía co obtido con fotóns da mesma lonxitude de onda.

2.2. Principio de indeterminación de Heisenberg

Segundo a física clásica, o erro nunha medida débese á imprecisión do aparello de medida. Heisenberg e Bohr puxeron en dúbida esta suposición.

A cuestión exposta era: ata que punto é posible determinar simultaneamente a posición e o momento lineal dun obxecto cuántico: materia, como un electrón, ou radiación, como un fotón?

En 1927, o físico alemán Werner K. Heisenberg (1901-1976) deu a resposta enunciando o seu **principio de indeterminación** ou **principio de incerteza**, o cal nos proporciona uns límites para a información que podemos coñecer dun obxecto cuántico. Este principio ten dúas partes:

- Non é posible determinar simultaneamente o valor exacto da posición x e do momento lineal p dun obxecto cuántico. Os valores das indeterminacións correspondentes compren:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Δx : indeterminación na posición espacial; Δp : indeterminación no momento lineal

Desta relación vemos que un alto grao de precisión no valor da posición equivale a unha gran indeterminación na medida de momento lineal (e, polo tanto, na velocidade) do obxecto.

- Non é posible determinar simultaneamente o valor medido da enerxía E dun obxecto cuántico e o intervalo de tempo necesario para efectuar a medida. Isto esixe que se cumpra:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

ΔE : indeterminación na enerxía ; Δt : indeterminación no tempo

Así, este principio fai evidente a necesidade de que os sistemas cuánticos exprésense en termos de probabilidade.

Exemplo: Se a posición dun electrón pode medirse cunha exactitude de $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$, con que precisión se pode coñecer a súa velocidade?

Se a indeterminación da posición é $\Delta x = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$, a da velocidade será:

$$\Delta v = \frac{h}{2\pi m \Delta x} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

2.3. Aplicacións da mecánica cuántica

Os postulados e os resultados de la mecánica cuántica poden parecernos estraños e afastados da realidade cotiá. Con todo, hoxe en día as súas aplicacións chegan a todos os ámbitos da vida moderna.

➤ Célula fotoeléctrica

Dispositivo baseado no efecto fotoeléctrico. Cando a radiación incidente alcanza a célula fotoeléctrica, provoca unha emisión de electróns que dan lugar a unha corrente eléctrica. Esta corrente utilízase para pór en funcionamento outro circuío máis potente, que, á súa vez, abre portas automaticamente, vela pola seguridade nos ascensores, dispara alarmas, contabiliza unidades en cadeas de montaxe...

➤ Microscopio electrónico

Este tipo de microscopio utiliza as características ondulatorias dos electróns. Así, conséguense lonxitudes de onda de hasta 3\AA , moi inferiores aos 400 nm mínimos dos microscopios ópticos que usan luz visible.

A lonxitude de onda dos electróns contrólase fixando a súa velocidade; para iso impúlsaselles mediante unha diferenza de potencial determinada. O feixe de electróns é enfocado mediante lentes magnéticas (electroímáns). O feixe atravesa a mostra, que debe ser moi delgada, e a imaxe recóllese nunha pantalla fluorescente ou nunha emulsión fotográfica.

Moitos avances en bioloxía e medicina débense ao microscopio electrónico. Con el observáronse os virus da gripe, de só 30 nm . Así mesmo, a microscopía electrónica é fundamental para a industria.

➤ Láser

O láser (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) é luz monocromática, é dicir, dunha frecuencia determinada, coherente, moi intensa e concentrada.

O proceso de xeración dun pulso láser consta dos seguintes pasos:

1. Un flash moi intenso de luz verde proporciona enerxía a moitos ións de cromo e lévaos a estados excitados de vida curta (10 ns).
2. Os ións perden enerxía e pasan a un estado metaestable, onde poden permanecer máis tempo (10^3 ns).
3. A emisión dun fotón por un ión provoca unha reacción en cadea, a cal xera o pulso láser.
4. Para concentrar os fotóns do pulso nun único sentido diríxense mediante un espello e un semiespello.

O láser emite radiación visible. Actualmente, o láser aplícase en campos tan dispares como nas telecomunicacións (fibras ópticas), nos lectores de discos compactos, en cirurxía (bisturís), na industria (soldadores e cortadores de precisión)... Existe outro dispositivo, o máser, que emite radiación de microondas.

3.- FORZAS E PARTÍCULAS FUNDAMENTAIS

A gran variedade de interaccións existentes no Universo pode describirse mediante catro tipo de forzas fundamentais: *nuclear forte*, *electromagnética*, *nuclear débil* e *gravitacional* (a día de hoxe atópase en estudo a posible aparición dunha quinta forza).

Dende hai algúns séculos se coñecía a existencia de tres forzas ou interaccións: eléctricas, magnéticas e gravitacionais. Son ben coñecidas as aportacións de Brahe, Copérnico, Galileo, Newton, Coulomb, Faraday, Gauss... para describir este tipo de interaccións. Aínda así, houbo que agardar ata que Maxwell foi quen de reunir electricidade e magnetismo nas súas coñecidas ecuacións na última metade do século XIX.

A comezos do século XX se sucederon unha serie de acontecementos que cambiaron as bases da Física. Albert Einstein formulou a Relatividade Xeral, que permitía entender o comportamento de estrelas e galaxias. Max Plank, Bohr, Schrödinger e moitos outros contribuíron á creación da Mecánica Cuántica, capaz de explicar o comportamento do mundo atómico e subatómico. Agora ben, parece claro que deberíamos ser capaces de explicar todo o Universo mediante unha extensión do mundo subatómico. O propio Einstein dedicou gran parte da súa vida a intentar conseguilo pero non puido facelo, máis aínda cando no 1930 se constatou que a gravidade e o electromagnetismo non eran as únicas forzas existentes e se descubriron as forzas nucleares (fortes e débiles).

3.1. Teorías de unificación

A gran meta da física consiste en ser capaz de unificar, baixo unha mesma teoría, todas as interaccións coñecidas. Como xa se dixo, a primeira unificación correu a cargo de Maxwell amparando baixo o electromagnetismo as que se crían interaccións moi distintas: magnetismo e electricidade.

Modelo Electrodébil

Resulta da fusión de conceptos cuánticos coa relatividade e unifica o electromagnetismo e a forza nuclear débil, amosando que se trata da mesma interacción, só que presenta “caras distintas” tratando con enerxías baixas. A temperatura suficientemente alta adoitan a mesma forma (Weinberg, Salam e Glashow)

Modelo Estándar

Trátase dunha teoría cuántica de campos que explica tres das catro interaccións fundamentais, quedando pendente a da gravidade.

As teorías e os descubrimentos desde o decenio de 1930 traducíronse nun notable acercamento ao coñecemento da estrutura fundamental da materia: todo no universo está formado a partires duns bloques de construción básicos chamados partículas fundamentais. Estes bloques se integran dentro dunha teoría desenvolvida a principios da década de 1970 que soubo explicar case todos os resultados experimentais e foi capaz de predicir unha ampla variedade de fenómenos. Ao longo do tempo e a través de moitos experimentos, o **modelo estándar** estableceuse como unha teoría física ben probada. Existen 12 **partículas fundamentais** que se agrupan en familias:

- 1) Na familia 1 atópanse as partículas que forma na materia coñecida.
- 2) Na familia 2 atópanse as partículas de alta enerxía que se detectan nos aceleradores de partícula e nos raios cósmicos.
- 3) Na familia 3 agrúpanse as de moi alta enerxía e que se cre, existiron nos primeiros momentos da formación do universo (*big bang*).

	Leptóns		Quarks	
Familia 1	Electrón	Neutrino	Down (d)	Up (u)
Familia 2	Muón	Neutrino muónico	Strange	Charm
Familia 3	Tauón	Neutrino tauónico	Bottom	Top

Se reparamos na táboa anterior vemos que, das partículas que sempre pensamos que eran fundamentais, só está o electrón. Protóns e neutróns non son partículas fundamentais senón que están formados por quarks Up (con carga $2e/3$) e Down (de carga $-e/3$):

Protón: $u+u+d$ sendo a carga total $2 \cdot (2e/3) + (-e/3) = +e$

Neutrón: $u+d+d$ sendo a carga total $2e/3 + 2 \cdot (-e/3) = 0$

A materia ordinaria que coñecemos está formada por partículas da familia 1 (electróns e quarks u e d). Agora ben, cada partícula posúe tamén a súa antipartícula polo que se poden formar antiprotóns, antineutróns e positróns (antielectróns). Cada antipartícula posúe igual masa que a partícula pero propiedades opostas (por exemplo, o positrón ten carga $+1$ e o antiprotón posúe carga -1). Materia e antimateria se aniquilan entre elas, producindo a cantidade equivalente de enerxía.

A antimateria puido obterse experimentalmente pero non se observa de xeito natural.

Os **Leptóns** poden existir de xeito illado, o máis coñecido é o electrón, mentres que os **Quarks** só existen dun xeito agrupado e dan lugar ás partículas denominadas **hadróns**. Existen dous tipos de hadróns.

mesóns, están formados por un quark e un antiquark

barións, como o **protón** e o **neutrón**, están formados por tres quarks.

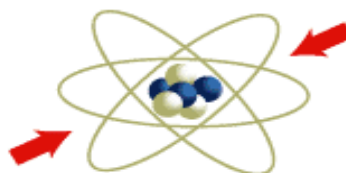
Para explicar as **interaccións fundamentais** co modelo estándar son necesarias unhas partículas que actúen de mediadoras entre as que xa coñecemos, así que, ademais das partículas que constitúen a materia, hai outras que son responsables das forzas que existen na natureza. A máis coñecida é o fotón, que é o “mediador” da forza electromagnética, pero tamén temos outras:

Interacción	Mediador
Nuclear forte	Gluón
Nuclear débil	Bosóns W e Z
Electromagnética	Fotón
Gravitacional	Gravitón (non detectada)

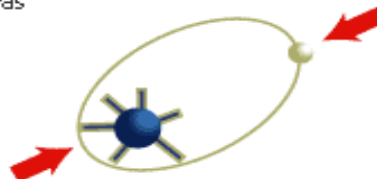
FUERZA NUCLEAR FUERTE
 Partícula de intercambio: gluón
 Acción: mantene unido el núcleo atómico



FUERZA ELECTROMAGNÉTICA
 Partícula de intercambio: fotón
 Acción: mantene el átomo unido



FUERZA GRAVITATORIA
 Partícula de intercambio: gravitón
 Acción: rixe el movimiento de los planetas



FUERZA NUCLEAR DÉBIL
 Partícula de intercambio: partículas W^\pm y Z^0
 Acción: provoca desintegraciones radiactivas



Fuente: CERN, Ginebra

Teorías de supercuerdas

Hai propostas 5 teorías de cordas e a chamada *teoría M* que pretende englobalas a todas elas. O concepto fundamental destas teorías é que substitúe ás partículas por cordas. As cordas son minúsculos fíos indivisibles de enerxía que se atopan vibrando, sendo dun tamaño unhas 10^{20} veces menor que o núcleo atómico.

Segundo esta teoría, cada “partícula fundamental” estaría formada por unha soa corda, diferenciándose entre elas en que posúen un estado distinto de vibración. A masa de cada partícula quedaría explicada pola enerxía coa que está vibrando a corda, isto ofrece unha relación

entre o modo de vibración e a forza gravitacional que lle corresponde. De igual xeito, todas as forzas están unificadas polas distintas oscilacións microscópicas das cordas e todos os fenómenos do Universo se poderían explicar en función dos seus constituíntes elementais e das forzas que actúan entre eles.

A gran dificultade da teoría reside en que se necesitan desenvolver novas técnicas matemáticas para tratar as súas relacións (trabállase con 11 dimensións, 7 máis do habitual) e que, de momento, non se poden facer sobre ela comprobacións experimentais.

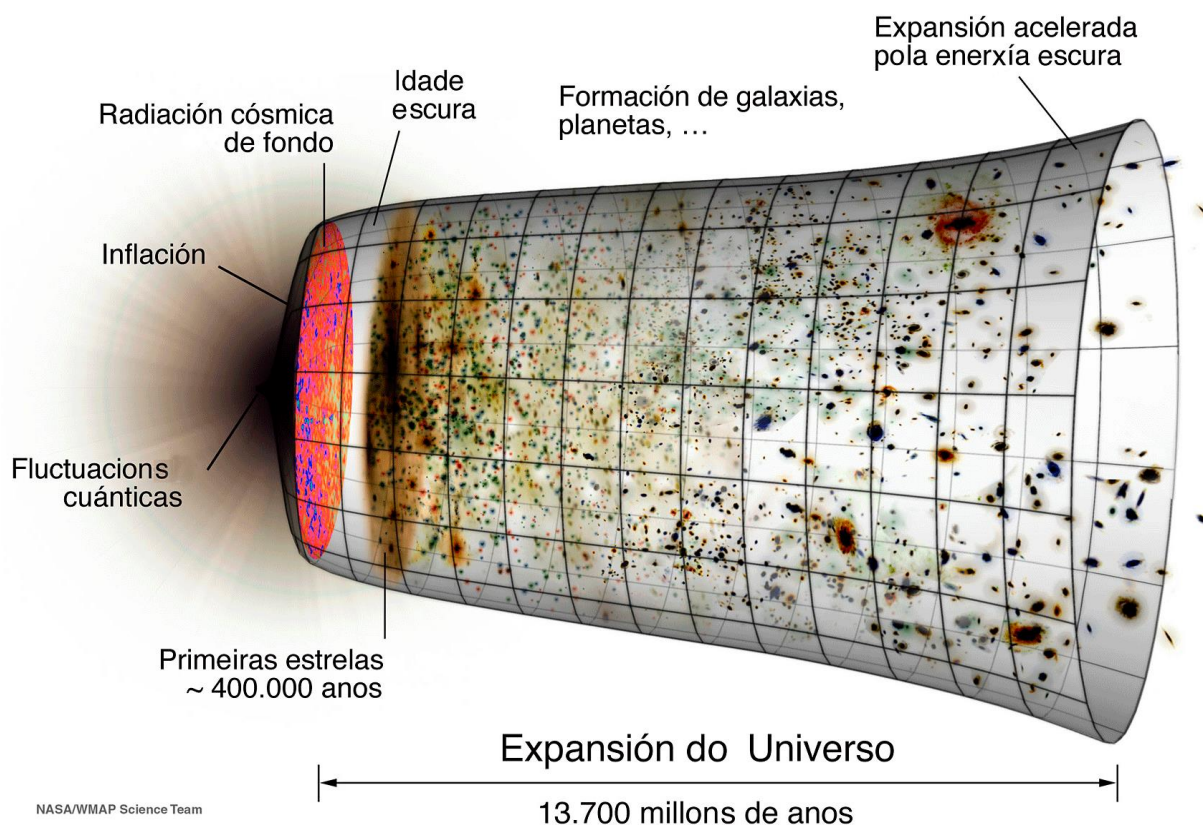
4.- ORIXE E EVOLUCIÓN DO UNIVERSO

De xeito xeral, acéptase que unha gran explosión ou big bang orixinou o Universo hai uns 13700 millóns de anos. A teoría do Big Bang considera que toda a enerxía, espazo e tempo estaban acumulados nun punto (singularidade) de densidade case infinita. Cando estoupa, xurde o espazo e tempo a vaise expandindo e arrefriando de xeito que comeza a condensar enerxía para formar partículas. Aos 10^{-12} s xurdirían os quarks, electróns e neutrinos (xunto coas súas antipartículas). Aos 10^{-4} s aparecen os protóns, neutróns e fotóns.

Nestes primeiros instantes do Universo tivo que existir unha asimetría que permitiu que a materia prevalecera sobre a antimateria.

Os primeiros núcleos aparecen aos tres minutos da explosión pero tiveron que pasar uns 400.000 anos ata que os electróns se unisen a eles para formar os primeiros átomos lixeiros (hidróxeno e helio). É neste momento cando se produce a radiación cósmica de fondo de microondas.

As primeiras estrelas existiron logo de 560 millóns de anos, que logo formaron as primeiras galaxias (750 millóns de anos despois do estoupido inicial).



Hoxe en día sabemos que só o 4,5 % del universo está composto por átomos, mentres que un 23,5% é materia escura e outro 72% enerxía escura.

A presenza da enerxía escura ponse de manifesto en que a expansión do Universo está sendo máis rápida da prevista, polo que debe existir unha “presión” interior que a produce. A enerxía asociada con este proceso é á que denominamos enerxía escuro.

Por outra banda, o estudo da rotación de estrelas e galaxias e dos fenómenos producidos nas lentes gravitacionais, revelou que existe unha maior forza gravitacional da que se pode explicar coa materia coñecida. Isto se supón que é debido á presenza da que se denomina materia escura, un tipo de materia (que non se conta como enerxía escura -recordemos que $E=mc^2$) que non é materia ordinaria. Chámase así porque non emite ningún tipo de radiación electromagnética e non pode ser detectada.