

Física quàntica i de partícules: la màgia del món petit

La mecànica quàntica és el suport fonamental de tota la ciència moderna. Les seves equacions descriuen el comportament dels objectes minúsculs, de la mida del àtom o encara menys i proporcionen la única explicació del món del "més petit".

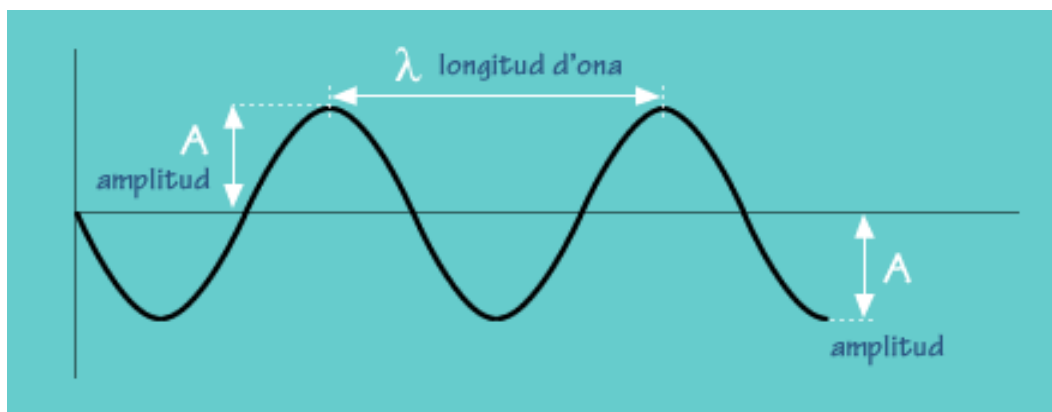
Sense aquestes equacions, els científics no haurien estat capaços de dissenyar centrals nuclears o bombes, construir làsers, ni explicar perquè el Sol es manté calent. Sense la mecànica quàntica la química encara estaria en una època fosca i no existiria la biologia molecular, ni l'explicació del DNA, ni la enginyeria genètica.

Segons la física clàssica, en el nostre món coexisteixen dues classes d'objectes físics: les partícules i les ones.

Una partícula clàssica es comporta com una boleta: podem conèixer exactament la seva posició i mesurar-ne la velocitat.

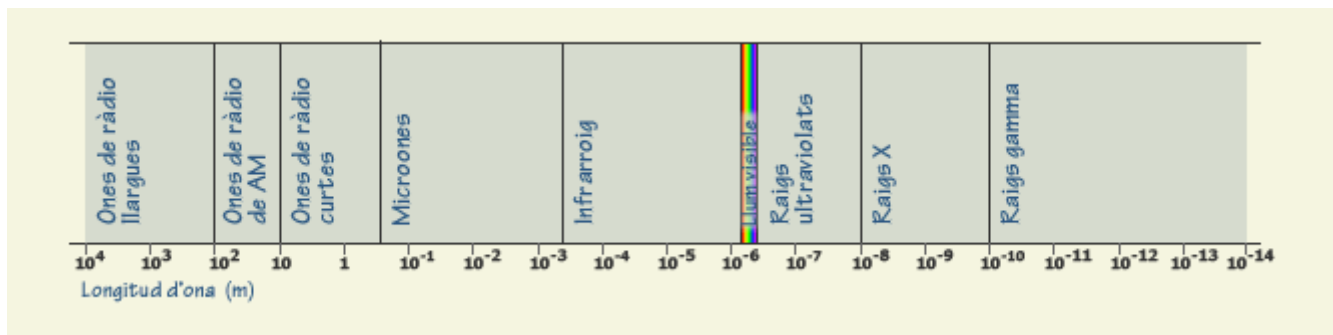
Una ona és una pertorbació que es propaga. Hi ha transport d'energia sense que hi hagi transport de matèria. Les ones no es localitzen en un punt concret com les partícules, sinó que s'estenen per tot l'espai per on es propaguen. Tampoc no podem descriure'n fàcilment la velocitat, ja que cada un dels infinits punts de l'ona tenen velocitats diferents.

Per caracteritzar una ona no n'hi ha prou amb saber la velocitat (v) amb que es mou. A més necessitem conèixer-ne l'amplitud (A), que és l'altura de les ones i la longitud d'ona (λ), que és la distància entre dues crestes consecutives. Una altra magnitud important en l'estudi de les ones és la freqüència (f), que és el nombre d'oscil·lacions que es produeixen per unitat de temps. La freqüència i la longitud d'ona es relacionen per la fórmula: $v = \lambda \cdot f$



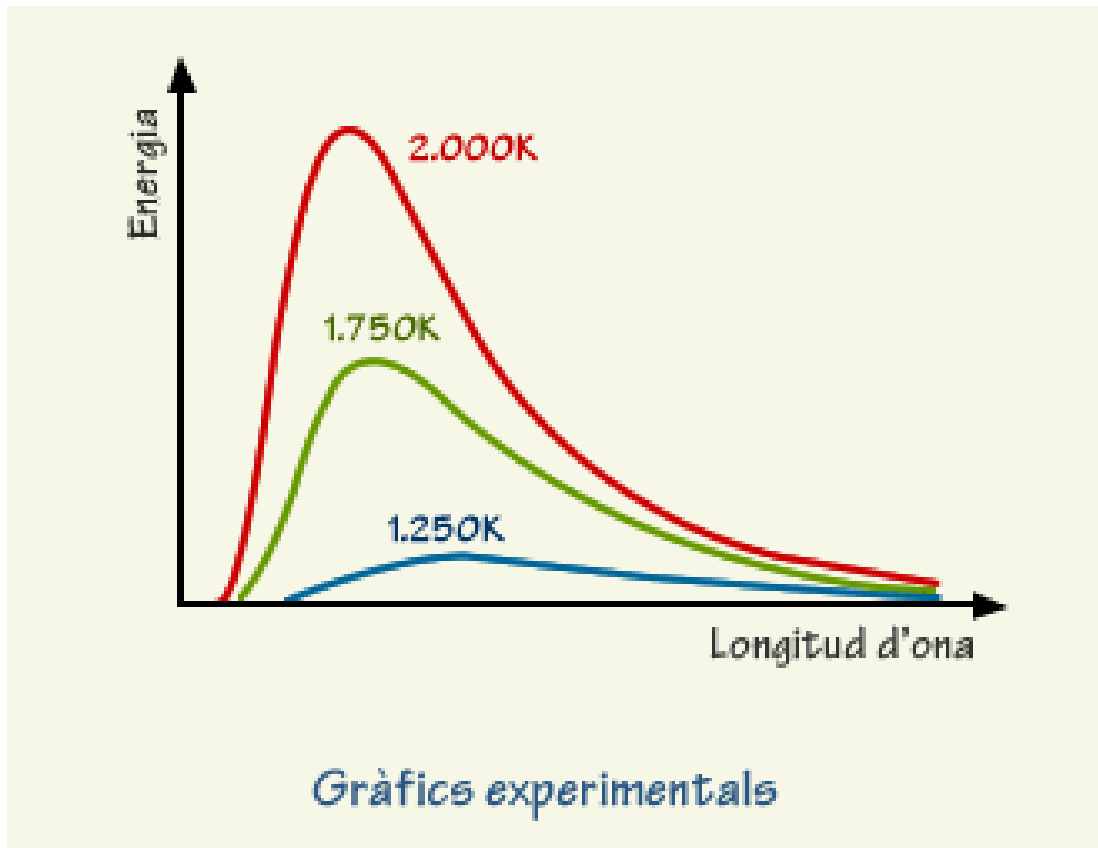
Les ones electromagnètiques

Una classe molt important d'ones són les anomenades ones electromagnètiques. Estan formades per un camp elèctric i un camp magnètic que vibren perpendicularment i es propaguen en el buit amb una velocitat c . La llum, les ones de la radio, de la televisió, els raigs X,... són ones electromagnètiques. Es diferencien en la longitud d'ona. El conjunt de totes les longituds d'ona forma l'espectre d'ones electromagnètiques.



En l'espectre hi ha una petita regió amb longitud d'ona compresa entre 400 i 700 nanòmetres ($1\text{nm}=10^{-9}$) que constitueix la llum visible. L'ull humà no pot veure ones electromagnètiques fora d'aquest domini. La velocitat de propagació (c) és la de la llum i és la mateixa per a totes les ones electromagnètiques.

La radiació del cos negre



A finals del segle XIX els físics estudiaven la radiació del "cos negre" (un cos hipotètic que fos capaç d'absorbir tota la radiació que li arribés i de tornar-la a emetre). La característica més rellevant és que la radiació que emet no depèn de la composició sinó únicament de la temperatura.

Rayleigh i Jeans van enunciar una llei que es basava en la física clàssica per intentar explicar la radiació del cos negre. Els resultats concordaven amb els resultats experimentals per a freqüències baixes però donaven resultats absurds per a freqüències altes. Aquesta discrepància va rebre el nom de "catàstrofe ultraviolada".

Quantificació de l'energia: la solució de Planck

L'any 1900 Max Planck, veient que la física clàssica no era capaç de resoldre el problema, va fer una hipòtesi



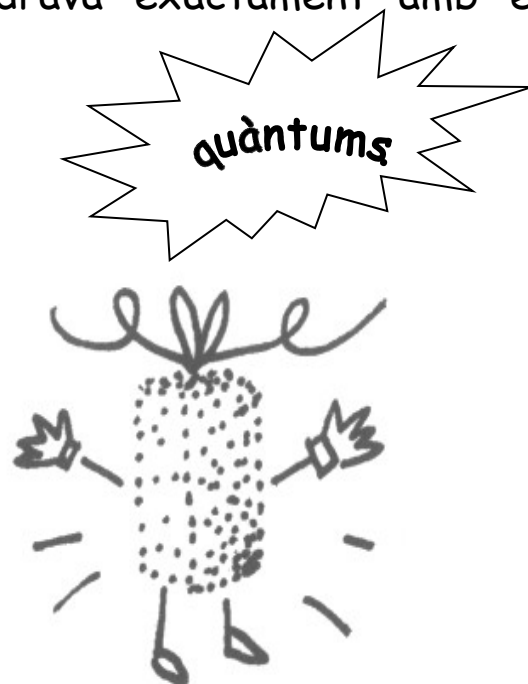
revolucionària: va suposar que l'energia no era contínua sinó que era discreta, és a dir, s'agrupava en petits "paquets", anomenats quàntums.

Així l'energia prenia la forma:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

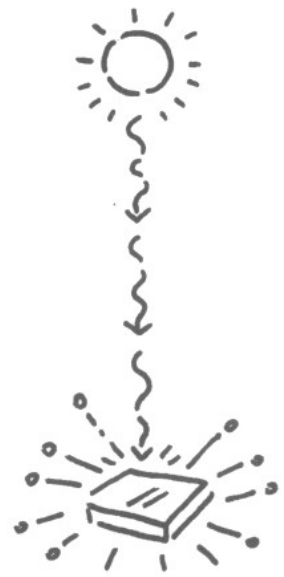
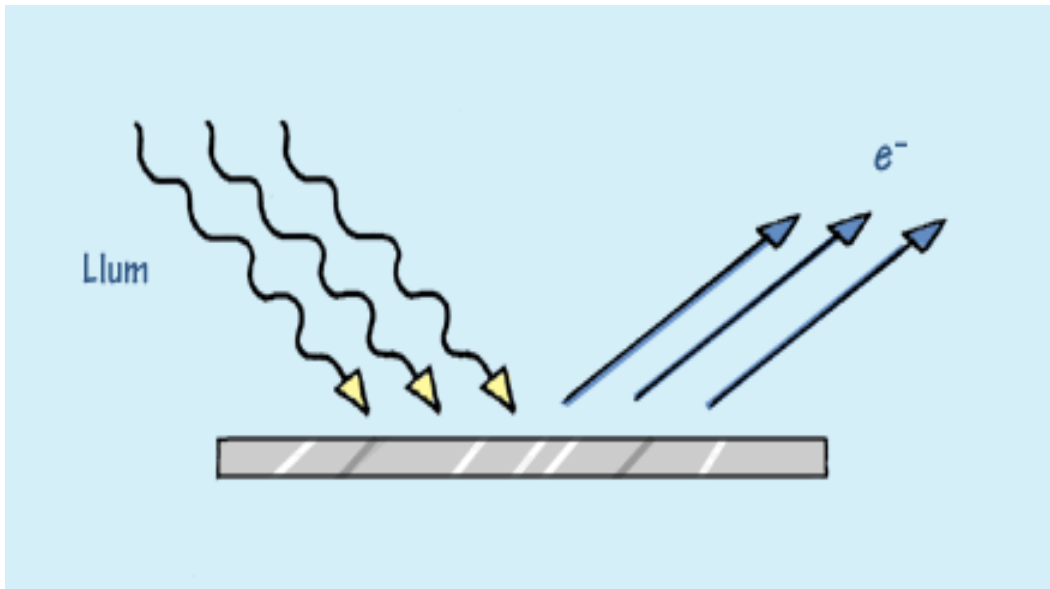
on $n=1,2,3,\dots$; f és la freqüència i h és l'anomenada constant de Planck, que val $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Amb aquesta sorprenent hipòtesi, Planck va obtenir una fórmula que quadrava exactament amb els resultats experimentals.



L'efecte fotoelèctric

A finals del segle XIX el físic Heinrich Hertz va descobrir l'efecte fotoelèctric. Quan s'il·lumina una làmina d'un determinat metall es produeix un corrent elèctric pel fet que la llum té energia per arrancar electrons el metall.



Aquests fenomen no es pot explicar des de la física clàssica. L'any 1900 Philip Lenard va demostrar experimentalment que l'energia dels electrons arrencats no depenia de la intensitat de la llum sinó de la seva freqüència. Quan il·luminava la làmina amb una llum vermella, és a dir, de baixa freqüència, encara que fos molt intensa, no s'arrencaven electrons. En canvi, si la il·luminaven amb llum blava o ultraviolada, encara que fos molt feble, és a dir d'intensitat baixa, sempre s'arrencaven electrons.

El pas endavant decisiu per resoldre aquest problema i obrir les portes a la física quàntica el va donar Albert Einstein l'any 1905.

En un revolucionari article va afirmar que la llum estava formada per petites partícules, petits "quantums de llum" anomenats fotons.

L'energia de cada fotó està quantitzada segons la fórmula $E=h.f$ (on h és la constant de Planck).



Amb aquesta fórmula podem calcular l'energia de cada classe de radiació electromagnètica. Els fotons tenen més energia com més gran és la freqüència. A partir d'aquesta idea fonamental, Einstein va ser capaç d'explicar correctament els experiments. La llum ultraviolada, encara que sigui molt dèbil, està formada per fotons molt energètics. La llum infraroja té fotons poc energètics i, per molt intensa que sigui, no podrà arrencar electrons. Això explica teòricament l'experiència anterior, en que es veia que arrencar electrons o no arrencar-ne depenia del color més que no pas de la intensitat. No importa doncs la quantitat de fotons, la intensitat de la llum, sinó la "qualitat", l'energia de cada un.

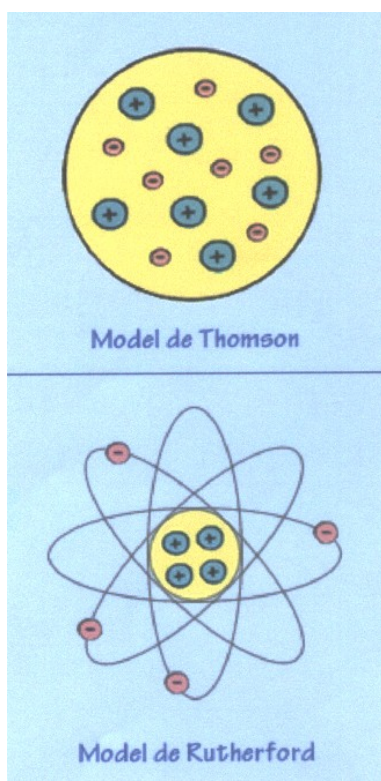
Aquestes idees van ser comprovades per Millikan l'any 1916. Després d'això, la llum va deixar de ser considerada únicament com una ona per passar a ser considerada com un fenomen que té característiques

Els models atòmics

Un altre dels problemes per als quals la física clàssica no tenia resposta a finals del segle XIX era l'anàlisi de les ratlles dels espectres de gasos calents. Els àtoms d'un gas en ésser excitats per descàrregues elèctriques, emeten llum. Quan s'observa aquesta llum a través d'un espectroscopi es veuen una sèrie de ratlles de colors, és a dir de longituds d'ona, diferents. Cada element té les seves línies característiques.



El problema que es plantejaven els físics teòrics era trobar un model atòmic que pogués explicar els resultats experimentals.



El primer intent seriós, degut a Thomson l'any 1904, considerava l'àtom com una esfera massissa amb càrrega elèctrica positiva en que hi havia incrustats els electrons.

Aquest model va ser descartat el 1911 després que Rutherford fes tot

un seguit d'experiments que van demostrar que l'àtom no podia ser "massís" sinó que havia d'estar gairebé tot buit. Va proposar un model on hi havia dues parts, el nucli, amb càrrega elèctrica positiva on estava concentrada tota la major part de la massa del àtom i l'escorça, formada pels electrons que giren al voltant del nucli.

Aquest model va suposar un important pas endavant, però encara presentava dos problemes: es contradeia amb les lleis clàssiques de l'electromagnetisme i no podia explicar les ratlles espectrals dels elements.

L'any 1913 Bohr va proposar un model per a l'àtom d'hidrogen basant-se en els treballs de Planck, Einstein i Rutherford. Aquest model va ser capaç d'explicar totes les línies espectrals observades i fins i tot de predir noves línies per a l'infraroig i l'ultraviolat, que van ser obtingudes en experiments posteriors.

El model de Bohr es basava en tres postulats. El més important per a nosaltres és que va resoldre el problema suposant que les energies atòmiques estan quantitzades. Una vegada més, la idea de quantificació va resoldre un problema que no tenia solució des de la física clàssica.

L'any 1924 un físic francès anomenat Louis de Broglie va donar un pas més en el desenvolupament de la física quàntica. Va plantejar-se que si la llum té propietats alhora d'ona i de partícula, potser també la matèria té propietats d'ona al mateix temps que es comporta com un conjunt de partícules.

Va suposar que a cada partícula se li pot associar una ona de longitud :

$$\lambda = h / m.v$$

on h és la constant de Planck i m i v la massa i la velocitat de la partícula. Aquesta idea no va ser gaire ben rebuda ja que en aquell temps no hi havia cap prova que les partícules es comportessin com a ones.

L'any 1927 Davisson i Germer van proposar-se comprovar la hipòtesi de De Broglie.

En el seu experiment i en altres de posteriors més sofisticats, van enviar un feix d'electrons a través d'un foradet contra un detector d'electrons, és a dir, una pantalla sensible als impactes i van poder observar clarament les bandes d'interferència, com si es tractessin d'ones.

Schrödinger i la mecànica quàntica

L'any 1925 el físic austríac Erwin Schrödinger va desenvolupar la seva teoria de la mecànica quàntica. Aquesta teoria va sorgir com una generalització de les idees de De Broglie i va portar a resultats molt sorprenents.

Schrödinger va plantejar-se com podia descriure objectes físics que es comportaven alhora com ones i com partícules. La seva idea va ser aplicar les idees de De Broglie als electrons lligats a l'àtom.

Per descriure una ona s'utilitza l'anomenada funció d'ona $\psi(x,t)$ que ens permet saber l'estat de cada punt del medi on es troba l'ona, per a cada instant en concret. Treballant amb matemàtiques molt complexes, Schrödinger va aconseguir obtenir la seva famosa equació:

$$i\hbar \frac{\partial \psi (x,t)}{\partial t} = H \psi (x,t)$$

Aquesta equació relaciona l'energia d'un sistema amb les seves propietats ondulatòries.

Les solucions de l'equació es poden interpretar en termes de probabilitat. La funció d'ona que s'obté resolent l'equació ens permet calcular la probabilitat que una partícula, per exemple un electró, estigui en un lloc determinat.

El trencament amb la física clàssica és absolut. A partir d'ara ja no es pot saber si un electró anirà cap amunt o cap avall, cap a la dreta o cap l'esquerra, sinó que només podem saber la probabilitat que estigui en un lloc determinat.

Així la física va perdre el seu caràcter determinista per passar a tenir un aspecte molt més aleatori.

Molts físics destacats es van mostrar en contra d'aquesta idea. El mateix Einstein, que havia contribuït decisivament a l'impuls de la física quàntica, va fer la famosa frase "Deu no juga als daus", on mostrava clarament el seu rebuig a una teoria probabilística en el marc de la física.

El principi d'incertesa de Heisenberg

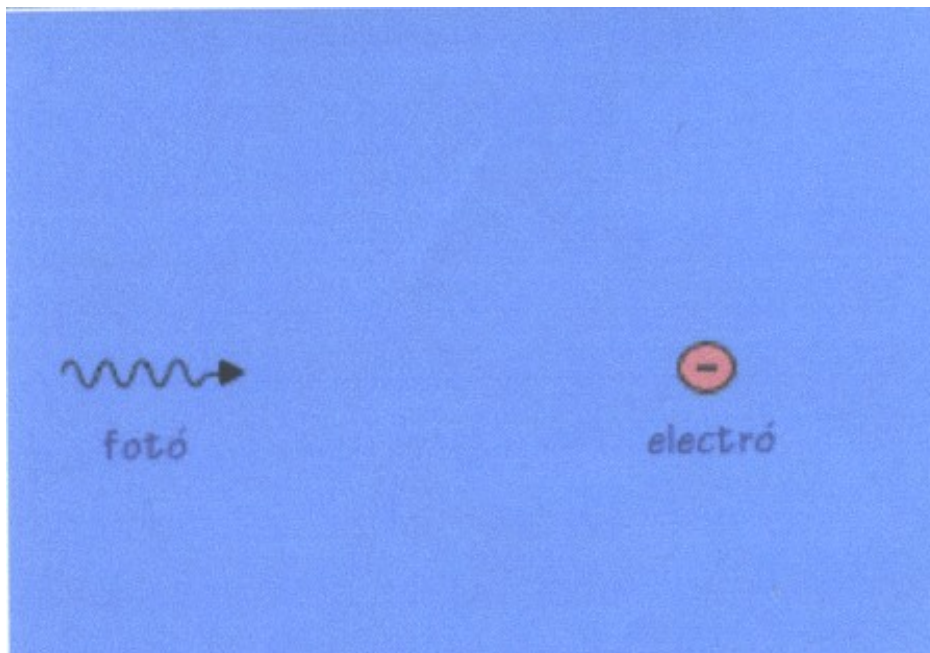
El 1927 el físic alemany Werner Heisenberg va fer un



pas més per situar definitivament el món de les partícules en el terreny de la probabilitat. El seu principi d'incertesa estableix que no es poden conèixer simultàniament amb precisió absoluta la posició i la quantitat de moviment d'una partícula. La formulació matemàtica d'aquests principi és.

$$\Delta x \cdot \Delta p > h/4 \pi$$

on Δx representa la incertesa en la posició, Δp la incertesa en la quantitat de moviment i h és la constant de Planck.

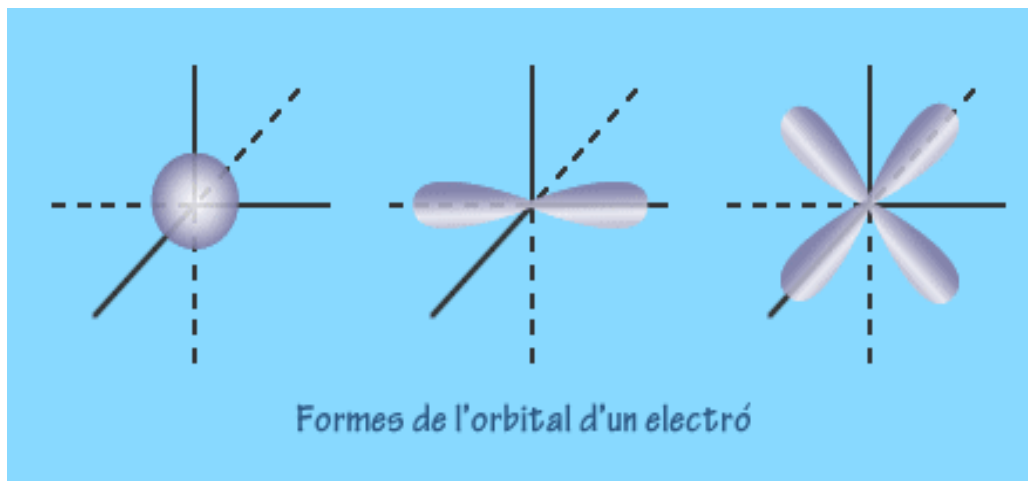


Aquest principi es pot interpretar d'una forma força entenedora. És evident que per poder veure una partícula, hem de projectar-hi llum, o sigui fotons, a sobre. Si la partícula és macroscòpica, una pilota, per exemple, la llum no la modificarà substancialment. Ara bé, si és un electró o una altra partícula molt petita, aquest efecte és molt important. El fotó impacta amb l'electró i li comunica una gran quantitat d'energia, amb la qual cosa ja no podem determinar on és i amb quina velocitat es mou.

Aquest principi té efectes molt importants per a les partícules però no en el món macroscòpic on els seus efectes són indetectables.

L'estructura de l'àtom en la mecànica quàntica

La teoria de Schrödinger va ser capaç d'explicar satisfactòriament tots els aspectes de l'estructura del àtom. El més remarcable és el fet que els electrons no giren en òrbites estables al voltant del nucli com si fossin els planetes al voltant del Sol.



L'equació d'ona aplicada a un àtom ens introdueix el concepte d'orbital atòmic. Un orbital és una regió al voltant del nucli en la qual és més probable trobar l'electró. Cal remarcar que no és un núvol d'electrons amb una forma fixada i estable sinó que és una regió en que, amb molta probabilitat (normalment més del 95%) podem trobar l'electró.

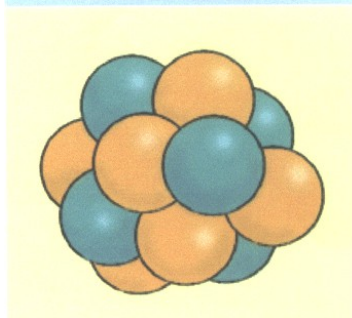
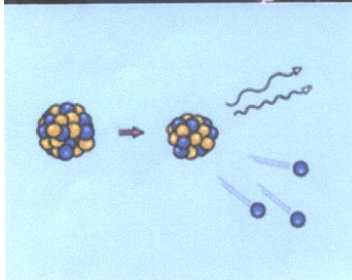
Quan apliquem la teoria de Schrödinger a l'àtom d'hidrogen obtenim que només són possibles certs orbitals que queden caracteritzats per quatre nombres quàntics.

Nom	Símbol	Valors possibles	Propietat característica
Principal	n	1,2,3, ...	Energia i grandària de l'orbital
Azimutal	l	0,1,2,...	Forma de l'orbital
Magnètic	m	des de $-l$ fins a $+l$	Orientació de l'orbital
Spin	s	1/2, -1/2	Spin



Partícules elementals

Ja des de la Grècia clàssica els homes es van preguntar de què estava feta la matèria. Demòcrit (segle IV abans de Crist) va postular que estava formada per diminutes partícules anomenades àtoms (que en grec vol dir indivisible). Aquesta idea va ser acceptada fins que, el 1897, Thompson va descobrir l'electró. Poc temps mes tard, es van descobrir el protó i el neutró. Els àtoms ja no eren les partícules "elementals" que constituïen la matèria sinó que estaven formades per partícules més petites.



Amb el neixement de la mecànica quàntica i els avenços tecnològics en la física experimental la situació es va anar complicant. Cada poc temps es descobrien noves partícules elementals. Actualment se'n coneixen més de 100.

Partícules de força

En el món on vivim estem envoltats de forces. Si volem moure un objecte o si el volem deformar, necessitem fer una força. Ara bé, quin és l'origen de les forces?

Actualment se sap que cada una de les forces fonamentals va associada a una partícula elemental, que actua com a

transmissora de la força. Aquestes partícules s'anomenen bosons.

Vegem quines són aquestes forces i partícules:

- La força gravitatòria. És una força molt dèbil però que actua a grans distàncies i és universal: cap partícula pot escapar-ne. La partícula associada és el gravitó, que encara no ha pogut ser detectada.
- La força electromagnètica. Actua només entre partícules amb càrrega elèctrica. És molt més forta que la gravetat (10^{37} vegades més gran) i la partícula que la transporta és el fotó.
- La força nuclear dèbil. Únicament actua a distàncies molt curtes (del ordre de 10^{-15} metres), és més feble que la força electromagnètica (només 10^{34} vegades més gran que la gravetat). És la responsable de la radioactivitat. Hi ha tres partícules que la transporten, els anomenats bosons vectorials massius: W^+ W^- Z^0 .
- La força nuclear forta. És la que manté units els protons i els neutrons en els nuclis atòmics. També és d'abast molt curt (10^{-15} metres) i és la més forta de les tres (10^{39} vegades la gravetat). Les partícules que la transporten són els gluons.

La física teòrica actual intenta trobar una teoria que unifiqui les quatre forces, l'anomenada "Teoria de gran unificació" (TGU). De moment no ho han aconseguit, encara que hi ha diversos intents, ja que la gravetat continua escapant a totes les unificacions.

Partícules constituents de la matèria.

Les partícules constituents de la matèria o partícules de matèria s'anomenen fermions .

Els fermions es poden classificar en dues classes : leptons i quarks.

- els leptons. El més conegut és l'electró. però n'hi ha cinc més: el muó, el tauó i els tres neutrins associats: neutrí electrònic, neutrí tauònic i neutrí muònic. A més, cada leptó té la seva antipartícula corresponent. el més famós és el positró, que és igual que el electró però amb càrrega positiva. Si una partícula es troba amb la seva antipartícula corresponent, les dues desapareixen i s'obté energia,
- els quarks. Se'n coneixen 6 diferents amb els seus antiquarks corresponents. A diferència dels leptons, els quarks no poden existir "sols", sinó que sempre estan agrupats formant altres partícules anomenades hadrons.

Els quarks poden associar-se de dues maneres:

- En grups de tres, formant els anomenats barions, entre els quals es troben el protó i el neutró .
- En grups de dos formant els mesons, entre els quals destaquen els pions (mesons pi) i els kaons.

A la taula següent es pot veure la classificació de totes les partícules elementals.

