

La teoría cuántica y la física de partículas

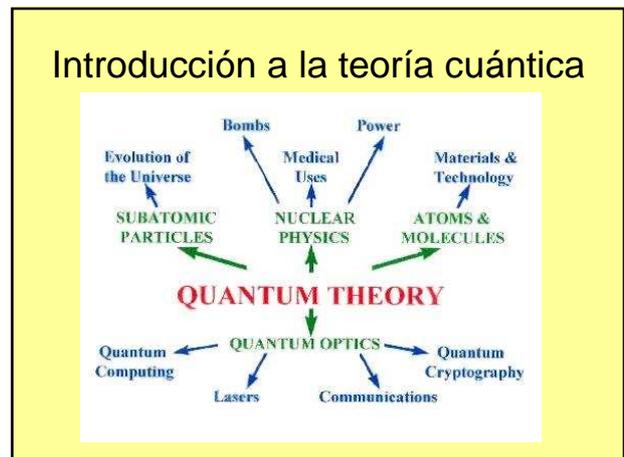
Antonio Diéguez
Universidad de Málaga

Bibliografía

- DAVIES, P. C. W. y J. R. BROWN (1989) *El espíritu en el átomo*, Madrid: Alianza.
- GRIBBIN, J. (1986) *En busca del gato de Schrödinger*, Barcelona: Salvat.
- HERBERT, N. (1985) *Quantum Reality*, Garden City: Anchor Press.
- JAMMER, M. (1966) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, New York: McGraw-Hill.
- KRAGH, H. (2007) *Generaciones cuánticas. Una historia de la física en el siglo XX*, Madrid: Akal.
- KUMAR, M. *Quantum: Einstein, Bohr y el gran debate sobre la naturaleza de la realidad*, Barcelona: Kairos.
- ORTOLI, S. y J.-P. PHARABOD (1985) *El cántico de la cuántica*, Barcelona: Gedisa.
- PASCUAL, P. (Ed.) (1984), *Partículas elementales*, Barcelona: Prensa científica.
- RAE, A. (1989) *Física cuántica. ¿Ilusión o realidad?*, Madrid: Alianza.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (2001) *Historia de la física cuántica*, vol. 1, Barcelona: Crítica.
- SELLERI, F. (1986) *El debate de la teoría cuántica*, Madrid: Alianza.

Introducción a la teoría cuántica

- “Como teoría del átomo, la mecánica cuántica es quizás la más exitosa teoría en la historia de la ciencia. Permite a los físicos, químicos e ingenieros calcular y predecir el resultado de un gran número de experimentos y crear una nueva y avanzada tecnología basadas en el conocimiento del comportamiento de los objetos atómicos. Pero es también una teoría que desafía a nuestra imaginación. Parece violar algunos principios fundamentales de la física clásica, principios que han llegado a formar parte del sentido común en Occidente desde el surgimiento de la visión moderna del mundo durante el Renacimiento”.
- Stanford Encyclopedia of Philosophy, “Copenhague Interpretation of Quantum Mechanics”.



Introducción a la teoría cuántica

- 1) http://www.youtube.com/watch?v=_t7Pt0PLLEk
- 2) <http://www.youtube.com/watch?v=e5Nrm479lCg>
- 3) http://www.youtube.com/watch?v=LbV_XjGxVKA
- 4) http://www.youtube.com/watch?v=aVGWdLTc_qY
- 5) <http://www.youtube.com/watch?v=XbqTpfh4seo>

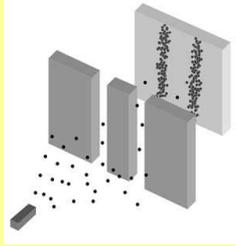
- Duración aprox. 30 min.
- http://www.youtube.com/watch?v=Nv1_YB1ledE

Experimento doble rendija

- Este experimento es una buena ilustración de las peculiaridades a las que conduce la teoría cuántica, y de la imposibilidad de reducir sus aportaciones al sentido común o a los conceptos clásicos.
- El resultado rompe con la separación entre onda y partícula de la física clásica; muestra que los sistemas cuánticos se comportan de forma muy extraña, y nos lleva a la conclusión de que ese comportamiento se ve afectado por el hecho de su observación.
- Un sistema cuántico ya no puede ser localizado, a la manera de las partículas clásicas, de forma precisa en cualquier momento.

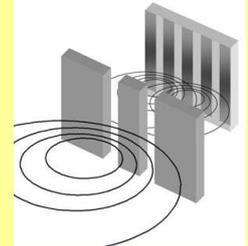
Experimento doble rendija

- Supongamos una pantalla en la que hay dos finas rendijas y tras la cual hay otra pantalla.
- Desde un punto concreto situado delante de ambas pantallas lanzamos partículas hacia ellas (disparamos balas, por ejemplo).
- ¿Qué resultado quedará en la pantalla del fondo?



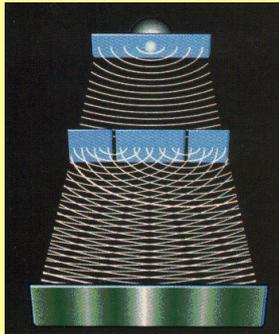
Experimento doble rendija

- A continuación sustituimos el lanzador de partículas por una fuente de ondas.
- ¿Qué resultado quedará en la pantalla del fondo?



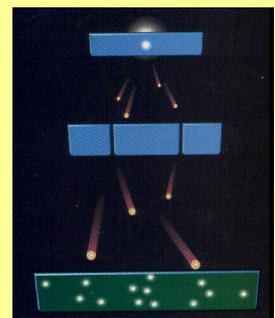
Experimento doble rendija

- Un haz de fotones (o electrones) es lanzado hacia la pantalla con dos pequeñas rendijas. El haz crea la imagen de un patrón de interferencias sobre la segunda pantalla.
- Se comporta, pues, como una serie de ondas.



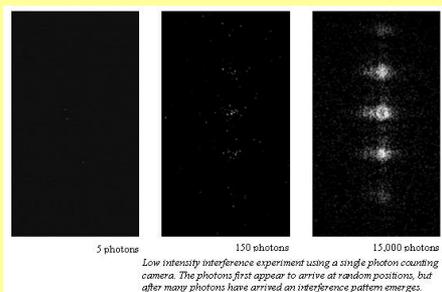
Experimento doble rendija

- A continuación se reduce la intensidad del haz, de modo que sólo un fotón o un electrón atraviesa una rendija en cada momento.
- Deberían comportarse como partículas. Y así parece en principio; cada uno de ellos llega a un lugar determinado de la segunda pantalla, pero...



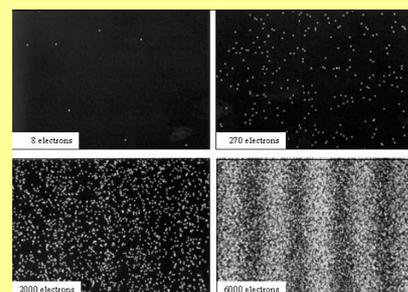
Experimento doble rendija

- Pero el resultado final es sorprendente: un patrón de interferencia.



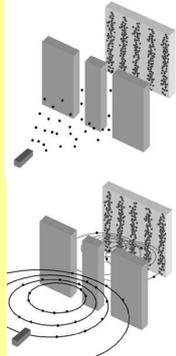
Experimento doble rendija

- Pero el resultado final es sorprendente: un patrón de interferencia.



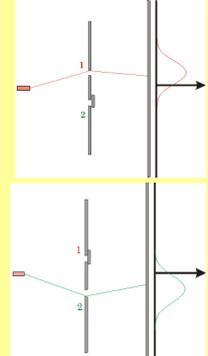
Experimento doble rendija

- Los fotones o los electrones individualmente se han comportado como ondas. Es como si cada uno de ellos ha pasado a la vez por las dos rendijas y ha interferido consigo mismo, aunque esta forma de decirlo no sea muy correcta.
- Otro modo mejor de decirlo es que su trayectoria ha sido el resultado de la **superposición** de las dos trayectorias posibles.



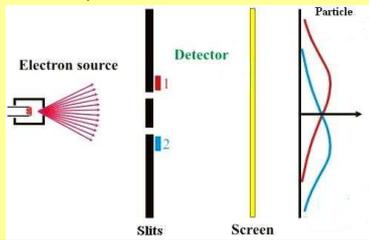
Experimento doble rendija

- Pero las sorpresas no acaban ahí.
- Si se cierra una de las dos rendijas, los fotones y los electrones se comportan entonces como partículas. La superposición de las dos imágenes obtenidas con cada una de las rendijas cerradas alternativamente no es un patrón de interferencia.
- Los fotones y electrones, de algún modo, "saben" si están abiertas las dos rendijas o no.



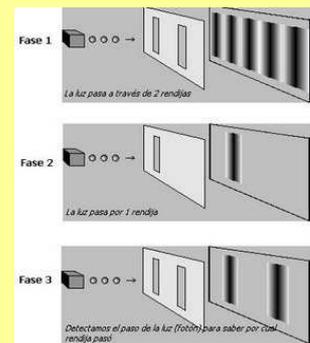
Experimento doble rendija

- Y lo que es más interesante, si se mantienen abiertas las dos rendijas, pero se coloca un detector para averiguar por dónde pasan los fotones o los electrones, éstos se comportan también entonces como partículas.
- De algún modo, el acto de observar la trayectoria hace que desaparezca el estado de superposición de ambas trayectorias posible y sólo una de ellas sea la realmente tomada. Es lo que se conoce como "colapso de la función de onda".



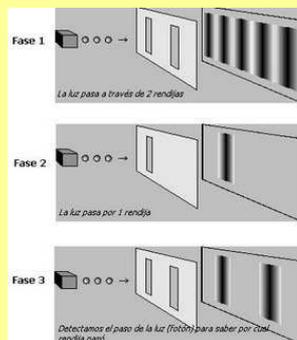
Experimento doble rendija

- De manera que tenemos tres posibilidades:
- Con las dos rendijas abiertas los fotones o electrones dan un patrón de interferencia (se comportan como ondas).
- Con una rendija abierta se comportan como partículas.
- Con las dos rendijas abiertas, pero con un detector, se comportan como partículas.

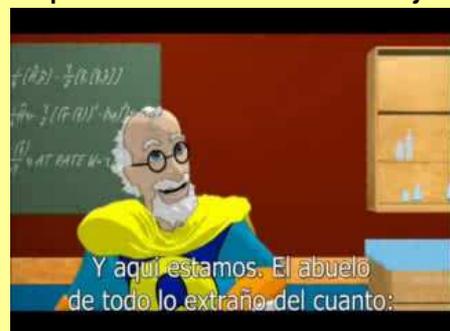


Experimento doble rendija

- El experimento de la doble rendija ha sido realizado con electrones de uno en uno (1974 y 1989).
- Pero en 1999 también se consiguió realizar con fullerenos, que son moléculas de más de 60 átomos.



Experimento doble rendija

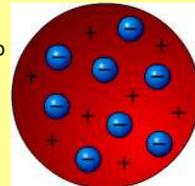
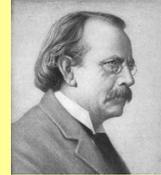


- <http://www.youtube.com/watch?v=x53UGGB7XMI> (subtitulado en español)

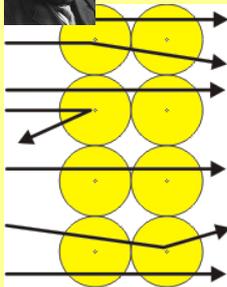
Modelos atómicos a comienzos del siglo XX

Modelo atómico de J. J. Thomson (1904)

- El **modelo del átomo del pastel de ciruelas** fue propuesto por **Joseph John Thomson**, el descubridor en 1897 del electrón. Este modelo fue propuesto en 1904.
- El átomo es una esfera de densidad uniforme, cargada positivamente, con un número compensatorio de electrones, de carga negativa, en su interior.
- Problema: **imposibilidad de explicar los espectros de emisión de rayas.**



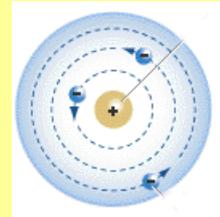
Modelo atómico de Rutherford (1911)



- En un famoso experimento, Ernst Rutherford bombardeó finas láminas de oro con un haz de partículas alfa, que son productos radioactivos idénticos al núcleo del helio, con una gran masa, con carga positiva y poseen una gran energía cinética. La gran mayoría de ellas, como era de esperar, atravesaron la lámina y salieron dispersadas con un pequeño ángulo de inclinación. Pero sorprendentemente algunas rebotaron frontalmente y salieron despedidas hacia atrás.
- Por tanto, el modelo de Thomson no podía ser correcto. **Los átomos de la lámina debían tener concentrada la mayor parte de su masa en un núcleo con carga positiva rodeado de electrones relativamente alejados del núcleo.**

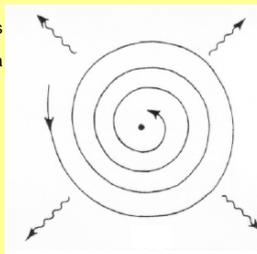
Modelo atómico de Rutherford

- El átomo análogo al **sistema solar**. Un núcleo muy pequeño cargado positivamente en el cual se concentra casi toda la masa. Girando en torno a él, a una distancia comparable a la que separa a Plutón del Sol, están los electrones.
- Pero este modelo también presentó problemas:



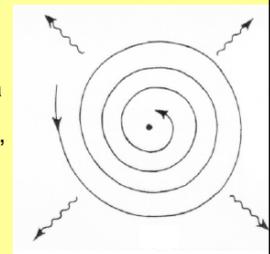
Modelo atómico de Rutherford

- ¿Cuál es la estructura del núcleo?
- De acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell, cualquier carga acelerada (que vaya cada vez más rápido, más lento o que cambie su dirección de movimiento) emite una onda electromagnética, tanto más energética cuanto mayor sea la carga y más rápida sea la variación de velocidad. Los electrones están en movimiento acelerado y, por tanto, según las ecuaciones de Maxwell deben emitir constantemente energía —esto es, deben radiar o em de frecuencia igual a la correspondiente a su rotación—, con una pérdida que les haría caer hacia el núcleo en una mínima fracción de segundo.

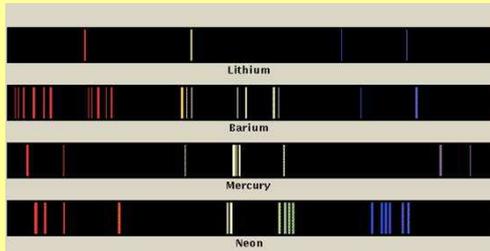


Modelo atómico de Rutherford

Al caer, la frecuencia de su movimiento sería cada vez mayor y, por tanto, la luz emitida debería ir aumentando gradualmente de frecuencia, dando lugar a un espectro de emisión continuo. Lo que se observa, sin embargo, es que los átomos pueden emitir ondas electromagnéticas sólo en destellos de frecuencias discretas específicas (las líneas espectrales).



Modelo atómico de Rutherford

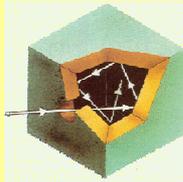
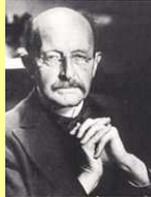


Espectros de emisión: los gases incandescentes emiten radiación sólo con ciertas longitudes de onda. Cada espectro es diferente para cada gas.

La vieja teoría cuántica

Max Planck: La idea del cuanto de energía

- La teoría cuántica comenzó históricamente en 1900 con el intento por parte del físico alemán Max Planck de explicar la discrepancia entre la radiación observada emitida por un cuerpo negro y la predicción teórica de lo que debía ser dicha radiación.
- Un cuerpo negro es un cuerpo ideal capaz de absorber toda radiación que incida sobre él, sin reflejar, por tanto, la energía incidente. Si le proporcionamos mucha energía se irá calentando hasta emitir él mismo radiación electromagnética visible.
- Experimentalmente, el interior de una esfera o de otro recipiente es una buena aproximación.

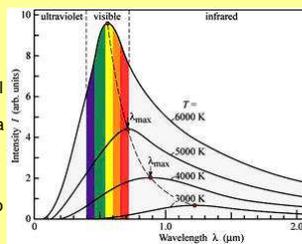


Max Planck: La idea del cuanto

- **Planck** investigaba la emisión de radiación por cuerpos sólidos al ser calentados. Alguna vez habrá notado que si pone un alambre en el fuego este se calienta y al retirarlo sigue emitiendo calor (radiación electromagnética infrarroja). Es más, el alambre puede volverse rojo y aún blanco si la temperatura es lo suficientemente alta. Esto es, el cuerpo al calentarse puede emitir luz (radiación electromagnética visible). ¿De donde sale esta radiación? Podemos explicar este fenómeno recurriendo a lo que sabemos sobre la teoría de Maxwell.
- Se suponía que la superficie del material estaba compuesta por una infinidad de osciladores muy pequeños (que hoy diríamos que son los átomos del material) que se encuentran vibrando alrededor de un punto de equilibrio. Cuanto más caliente está el material, más rápido y con mayor amplitud vibran esos minúsculos osciladores, emitiendo parte de la energía que tienen en forma de onda electromagnética. Al emitir esta energía, oscilan más despacio: es decir, se enfrían.

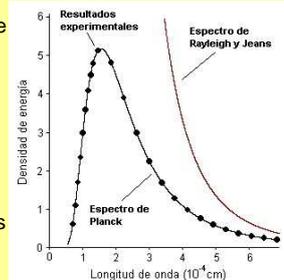
Max Planck: La idea del cuanto

- Igual que un hierro muy caliente va cambiando de color según aumenta su temperatura (rojo, amarillo, blanco) un cuerpo negro emite radiación con una distribución de frecuencias determinadas. Esta radiación, denominada *radiación de cuerpo negro*, sigue una curva. Dependiendo de la temperatura del cuerpo, la radiación emitida varía.
- El eje vertical representa la energía emitida y el horizontal la longitud de onda. Cuanto más caliente está el cuerpo, más radiación emite, y más hacia la izquierda está el máximo de esa emisión. Un cuerpo bastante frío emite casi toda la energía en la región infrarroja y no lo vemos brillar, un cuerpo más caliente brilla con color rojo, uno muy caliente sería amarillo, etc.



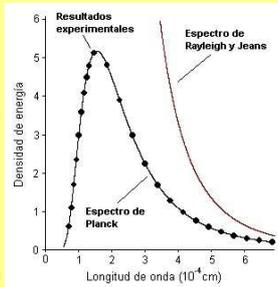
Max Planck: La idea del cuanto

- Al aplicar las teorías clásicas a la radiación de cuerpo negro, se obtenía una curva teórica de la radiación emitida. Pero **ninguna curva teórica de las calculadas coincidía con la curva obtenida experimentalmente**. La más conocida era la propuesta por Lord **Rayleigh** en 1900, y perfeccionada por Sir James **Jeans** en 1905. El problema es que **predecía que un cuerpo negro debería emitir una energía infinita**.



Max Planck: La idea del cuanto

- La curva que se obtenía se ajustaba muy bien a la curva real para longitudes de onda largas, pero para longitudes de onda cortas divergía de una forma exagerada: no es que fuera algo diferente, es que era totalmente imposible.
- El fracaso de la propuesta de Rayleigh y Jeans suele llamarse "catástrofe ultravioleta" (pues la divergencia se producía para longitudes de onda en la región ultravioleta).



Max Planck: La idea del cuanto

- Ya en 1900 (con anterioridad a la propuesta Rayleigh-Jeans) Planck pensaba que ninguna curva obtenida a partir de los presupuestos teóricos vigentes era capaz de encajar con los resultados experimentales, así que le dio la vuelta al asunto.
- Primero encontró, por tanteo, la fórmula matemática que mejor reproducía el espectro experimental y luego dedujo las hipótesis que eran necesarias para obtener esa fórmula analíticamente. Encontró que la única hipótesis importante que necesitaba era que la energía en forma de radiación debía ser emitida o absorbida solo en pequeños paquetes, que llamó **cuanta**, y no en forma continua como se pensaba hasta ese momento.

Max Planck: La idea del cuanto

- Esa suposición era simplemente una pequeña argucia matemática, a la que Planck, en principio, no dio mucha importancia, ni consideró como una concepción del Universo físico. La suposición era que los minúsculos osciladores que componían la materia **no podían tener cualquier energía arbitraria, sino sólo valores discretos entre los cuáles no era posible ningún valor.**
- Planck obtuvo el premio Nobel de física en 1918.
- Fuente de buena parte del texto sobre Planck hasta aquí: <http://eltamiz.com/2007/09/24/cuantica-sin-formulas-la-hipotesis-de-planck/>

Max Planck: La idea del cuanto

- La distribución de la energía de radiación de un cuerpo negro debía estar cuantizada según la fórmula siguiente:

$$E = h \nu$$

o también

$$E = nh\nu$$

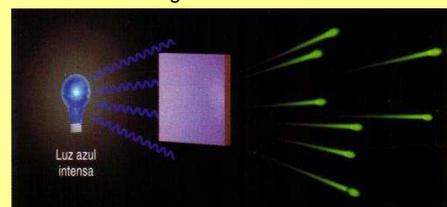
- Lo cual significa que la energía radiante de frecuencia ν es emitida y absorbida en cantidades finitas **múltiplos enteros n de $h\nu$** , siendo **h** una nueva **constante de la física**, cuyo valor actual, determinado experimentalmente, es $6,63 \times 10^{-34}$ julios-seg.

Max Planck: La idea del cuanto

- Otra forma de expresarlo es diciendo que **la energía se emite o absorbe por la materia en "paquetes" discretos con valor igual al producto de la constante h por la frecuencia correspondiente a la radiación emitida o absorbida.** Estos "paquetes" de energía reciben el nombre de *cuanta*.
- Planck los consideró un mero **artificio matemático** introducido en "un acto de desesperación". Como puede apreciarse, le daban un aspecto "corpúscular" a un fenómeno, como la radiación electromagnética, que había sido considerado como ondulatorio.
- Él siguió pensando que, pese a todo, la energía de la radiación no era discontinua, pues los campos electromagnéticos eran continuos. Se trataba sólo de que los intercambios de energía entre los átomos y la radiación se limitaban a cantidades discretas.

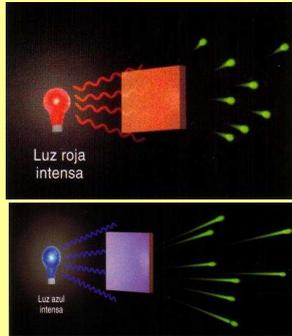
Einstein: efecto fotoeléctrico

- Este efecto consiste en la emisión de electrones en algunos sólidos (metálicos o semiconductores) irradiados por luz o, en general, por oem.
- Fue descubierto y descrito experimentalmente por Heinrich Hertz en 1887 y suponía un importante desafío a la teoría electromagnética de la luz.



Einstein: efecto fotoeléctrico

- Contrariamente a lo que cabía esperar en función de la teoría de Maxwell, la energía del electrón emitido es independiente de la **intensidad** de la radiación. En cambio, la energía cinética de estos electrones crece con el incremento de la **frecuencia** de la radiación.

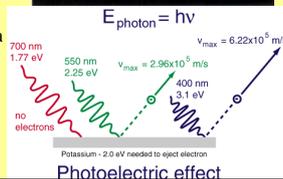
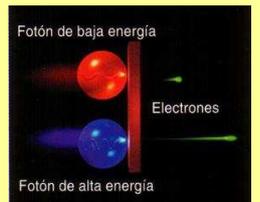


Einstein: efecto fotoeléctrico

- Dicho de otro modo: Si la bombilla tenue no era capaz de producir el efecto fotoeléctrico, entonces por mucho que aumentara la intensidad de la luz, *no salía ni un solo electrón del metal*. También pasaba al revés: si la bombilla era capaz de arrancar electrones del metal, era posible disminuir su potencia todo lo que se quisiera. Incluso un debilísimo rayo de luz de la bombilla era capaz de arrancar electrones - arrancaba menos electrones que la luz potente, pero los arrancaba.
- ¿De qué dependía entonces que se produjera el efecto, si no era de la intensidad de la luz? **El factor que decidía que se arrancaran electrones era el color de la luz de la bombilla**. Dicho en términos más técnicos era la *frecuencia* de la radiación, pero nuestros ojos "ven" la frecuencia de la luz como el color, de modo que nos vale con eso.
- Además, a mayor frecuencia, mayor era la energía del electrón emitido.

Einstein: efecto fotoeléctrico

- En 1905 Albert Einstein explica el efecto fotoeléctrico a partir de la suposición de que en toda radiación de frecuencia ν , la energía se concentra en porciones o "cuantos de luz" de valor $h\nu$ (cuantos del campo electromagnético, denominados más tarde, en 1928, "fotones").
- Si la frecuencia es baja, el fotón no tiene suficiente energía para expulsar al electrón (por mucha que sea la intensidad de la luz). A partir de cierta frecuencia es capaz de hacerlo y, cuanto mayor sea la frecuencia, con mayor será la energía del electrón expulsado. La intensidad solo determina el número de electrones expulsados, no su energía.



Einstein: efecto fotoeléctrico

- Einstein supuso, por tanto, que la energía no está distribuida por toda la onda, sino concentrada en corpúsculos cuya energía es proporcional a la frecuencia de la onda en la que están inmersos. La fórmula que expresa el valor de la energía cinética del electrón emitido es $E = h\nu - P$, donde P es el gasto de energía que debe realizarse para desprender al electrón del metal.



Einstein: efecto fotoeléctrico

- En general, los fenómenos conectados con la emisión o transformación de la luz se entienden mejor si se supone que la energía de la luz está distribuida en el espacio de forma discontinua y no uniformemente sobre el frente de onda. La energía de las oscilaciones del campo electromagnético **existe** sólo en unidades discretas, de valor $h\nu$, que se comportan como partículas en determinadas circunstancias.
- Einstein extiende, pues, el concepto de cuanto más allá de donde lo había dejado Planck. **Si para éste el cuanto de acción está asociado con la interacción entre radiación y materia, para Einstein el cuanto de luz es la forma misma de la radiación en tránsito**. Planck no quiso aceptar este paso.
- Einstein recibió el Premio Nobel en 1921 por este trabajo.

Modelo atómico de Bohr



En 1913 Niels Bohr propone un nuevo modelo de átomo que, utilizando la hipótesis de Planck es capaz de explicar por qué el átomo no colapsa poco tiempo después de radiar energía a todas las frecuencias. El modelo de Bohr se basa en dos postulados:

Modelo atómico de Bohr

- a) Ciertos movimientos de los electrones en el átomo son estables (sin radiación) y tienen lugar en la naturaleza, satisfaciendo las condiciones de cuantificación. Dichos movimientos vienen dados por órbitas estacionarias en cada una de las cuales el momento angular del electrón (mvr , donde r es el radio de la órbita) es múltiplo entero de $h/2\pi$, es decir, $mvr = nh/2\pi$. El átomo sólo puede hallarse en estos estados estacionarios cuantificados, que poseen una energía fija y definida. El estado estacionario con la energía más baja posible en el átomo es el estado fundamental, los otros estados estacionarios son estados excitados. Para el estado fundamental $n = 1$ en la ecuación anterior; para el siguiente estado $n = 2$, etc.

En otras palabras, el electrón sólo puede moverse en órbitas con un radio determinado, no a cualquier distancia del núcleo. Al hacerlo, no emite radiación.

Modelo atómico de Bohr

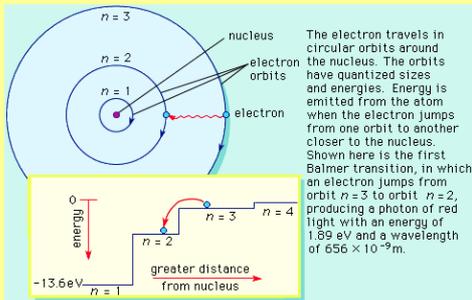
- b) El átomo es susceptible de pasar, mediante una brusca "transición", de un estado cuántico de energía E_i a otro de energía $E_k < E_i$ (o inversamente), viniendo acompañada esta transición de la emisión (o absorción) de un "cuanto de luz" (fotón) igual a $h\nu$, de forma que la conservación de la energía impone la relación

$$h\nu = E_i - E_k = \Delta E$$

conocida como "ley de las frecuencias de Bohr" (siendo ν la frecuencia de la radiación (oem) emitida).

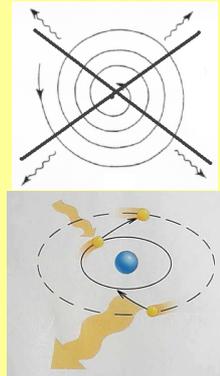
En otras palabras, para "saltar" de una órbita a otra, el electrón necesita absorber energía (si la órbita es de mayor energía) o emitir energía en forma de radiación (si la órbita es de menor energía).

Modelo atómico de Bohr



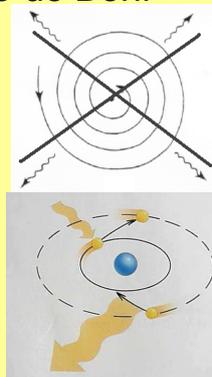
Modelo atómico de Bohr

- Bohr introduce, pues, como hipótesis *ad hoc* la idea de que las ecuaciones de Maxwell no son aplicables en la escala subatómica. Los electrones se mantienen en la misma órbita alrededor del núcleo sin radiar o perder energía. Cada órbita tiene asociada cierto nivel de energía y los electrones sólo emiten (o absorben) un cuanto de energía (un fotón) al pasar de una órbita, o mejor dicho, de un nivel de energía, a otro.



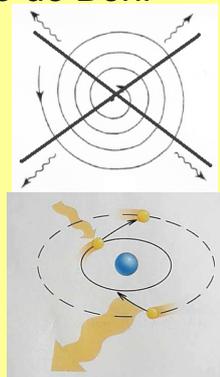
Modelo atómico de Bohr

- Cuando el átomo absorbe energía del exterior, el electrón se desplaza a una nueva órbita estable con mayor energía. Cuando el electrón vuelve a la órbita previa, la pérdida de energía del electrón viene determinada por la diferencia de energía entre el estado fundamental y el estado excitado, y se cede en forma de fotón con la frecuencia dada según la fórmula anterior.
- La frecuencia del fotón emitido o absorbido corresponde al "escalón energético" saltado.

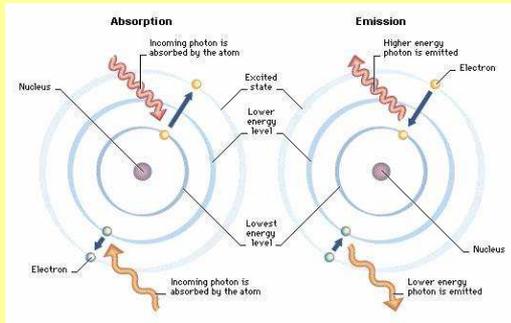


Modelo atómico de Bohr

- Entre una órbita y otra no hay un lugar definido en el que pueda estar el electrón.
- Un electrón no desciende de un nivel de energía a otro por ninguna razón concreta. El átomo tenderá a estar en su nivel de energía más bajo, pero es imposible predecir cuándo un electrón concreto efectuará el salto. Ningún agente externo empuja al electrón, ni tampoco ningún mecanismo interno. El salto simplemente ocurre, sin ninguna razón en particular.
- Este hecho representa una ruptura con la causalidad estricta.

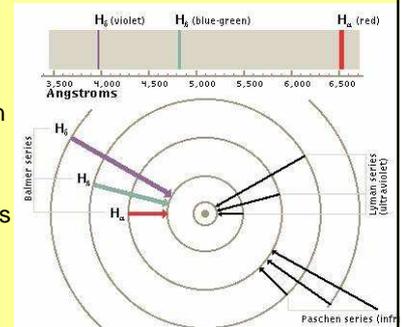


Modelo atómico de Bohr



Modelo atómico de Bohr

Las rayas de los espectros de emisión de cada elemento se corresponden con ciertas longitudes de onda características porque los fotones son emitidos con unas energías determinadas y sólo con esas.



Modelo atómico de Bohr

Problemas del modelo de Bohr:

- Sólo conseguía explicar satisfactoriamente las propiedades del átomo de hidrógeno, con un único electrón.
- No explicaba por qué en cada capa había un número máximo posible de electrones y por qué no terminaban todos los electrones en la capa más cercana al núcleo.
- El electromagnetismo de Maxwell se rechazaba en algunos aspectos y se admitía en otros.
- Permitía muchas más líneas espectrales de las que realmente se observan.

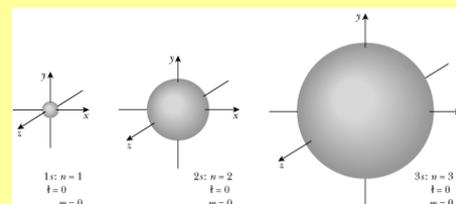
Modelo atómico de Bohr

- 1915-1916. **Sommerfeld** establece tres números cuánticos para describir el comportamiento del electrón. El primer número cuántico o número cuántico principal (designado por la letra n) corresponde a los niveles energéticos (K, L, M, N, ...) del modelo de Bohr y toma valores enteros 1, 2, 3, ... El número cuántico secundario (designado por la letra l) corresponde a los posibles "subniveles" de energía dentro de cada nivel – "subniveles" que Sommerfeld imaginó como órbitas elípticas–, y toma los valores desde 0 a $n - 1$. El tercer número cuántico (designado por m_l) es el número cuántico magnético y corresponde a la orientación de la órbita; puede tomar los valores enteros desde $-l$ a l para cada valor de l .

Modelo atómico de Bohr

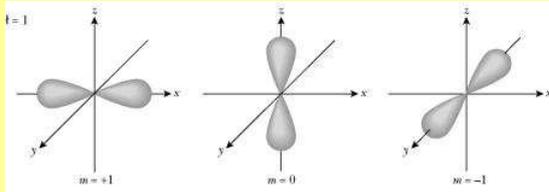
| N.º cuántico | Valores |
|--------------------|--|
| principal n | 1, 2, 3, ∞ |
| secundario l | para un valor de n 0, 1, 2, ... ($n - 1$) |
| magnético m_l | para un valor de l -1, ... -1, 0, 1, ... 1 |

Modelo atómico de Bohr



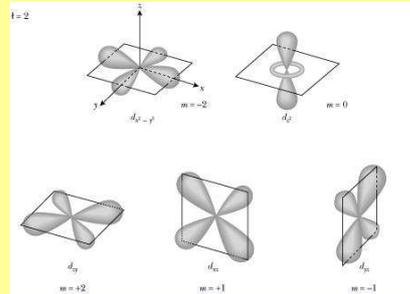
- Los orbitales 0, 1, 2 y 3 del número cuántico secundario l , se designan actualmente como s, p, d y f.
- En la imagen aparecen los orbitales s

Modelo atómico de Bohr



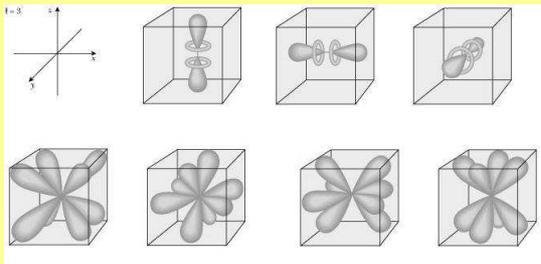
Orbitales p

Modelo atómico de Bohr



Orbitales d

Modelo atómico de Bohr



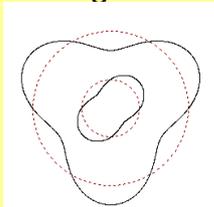
Orbitales f_a

De Broglie: dualidad onda/partícula

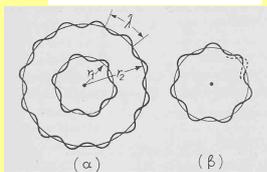
- 1923-1924. Luis de Broglie establece la **idea base de la mecánica ondulatoria**. Intentó obtener una teoría sintética de las ondas y de los corpúsculos, en la cual el corpúsculo apareciera como una especie de accidente incorporado a la estructura de una onda y guiado por su propagación. En su tesis doctoral (1924) sostuvo que, no sólo los fotones, también los electrones se comportan como partículas y como ondas; y en general "una onda puede ser una partícula y una partícula puede ser una onda".
- Podemos decir que si lo primero lo había mostrado Einstein, lo segundo fue mérito de de Broglie.



De Broglie: dualidad onda/partícula



- Toda partícula en movimiento tiene asociada una onda cuya longitud de onda es $\lambda = h/p$, donde p es la cantidad de movimiento o momento de la partícula (mv). La cuantización de las órbitas permitidas en el modelo atómico de Bohr puede obtenerse de la hipótesis de que la circunferencia de la órbita ha de tener la longitud adecuada para contener un número entero de longitudes de onda. De ahí que las zonas intermedias no estén permitidas.



De Broglie: dualidad onda/partícula

- En esencia, el razonamiento de de Broglie fue el siguiente:

$$E = mc^2 = h\nu \quad \text{y}$$

$$\nu = c/\lambda ,$$

luego

$$\lambda mc^2 = hc \Rightarrow \lambda = hc/mc^2 \Rightarrow \lambda = h/mc,$$

por tanto

$$\lambda = h/p$$

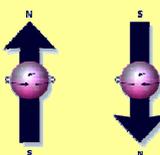
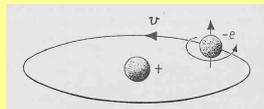
- Obtuvo el premio Nobel de física en 1929.

Pauli: principio de exclusión

- 1925: **Wolfgang Pauli** sostuvo que la estructura de capas del átomo queda explicada si cada posible órbita o estado es etiquetado con *cuatro* números cuánticos y se supone que cada uno de estos estados sólo puede ser ocupado por un electrón. Así pues, en un átomo no puede haber dos electrones con el mismo conjunto de (cuatro) números cuánticos.
- El cuarto número cuántico fue introducido por Pauli sin conectarle ninguna imagen concreta.



Pauli: principio de exclusión



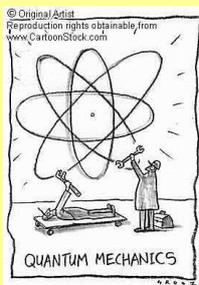
- En noviembre de ese mismo año, los holandeses Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck mostraron que dicho número expresa el valor del momento angular intrínseco o **spin** del electrón, debido al cual éste se comporta como un pequeño imán. (Este número cuántico se designa como m_s y toma los valores $\pm 1/2 \hbar$, donde $\hbar = h/2\pi$).

Videos sobre los modelos atómicos

- <http://www.youtube.com/watch?v=hHknBJGaFS0>
- <http://www.youtube.com/watch?v=VRxwwN9L6cA>
- <http://www.youtube.com/watch?v=pLXJXDVN7Ik>
- <http://www.youtube.com/watch?v=lt1C1CBTGRQ>
- <http://www.youtube.com/watch?v=hSLXmI5Fes8>

La nueva teoría cuántica

La mecánica cuántica



- “A pesar de su nombre altisonante y su solución exitosa de numerosos problemas de la física atómica, la teoría cuántica [...] antes de 1925 era, desde un punto de vista metodológico, un lamentable batiburrillo de hipótesis, principios, teoremas y recetas computacionales más que una teoría lógicamente consistente”.

Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*.

La mecánica cuántica

- 1925-1926: Werner **Heisenberg**, Max **Born** y Pascual **Jordan** desarrollan la **mecánica de matrices**.
- En ella, cada magnitud mecánica **observable** (como energía y momento) de un sistema cuántico es representada por una **matriz**, es decir, por un conjunto de valores **cuyo producto no es conmutativo**, en lugar de por valores únicos ordinarios.
- Este carácter no conmutativo implica que el orden en que se realicen las medidas puede cambiar el resultado.



La mecánica cuántica

- No hay imagen material adecuada del átomo o de las partículas subatómicas. No pueden caracterizarse en términos de la física clásica. Sólo pueden calcularse los resultados de posibles observaciones. La MC es una teoría sobre **resultados de experimentos**.

- Heisenberg obtuvo el premio Nobel de física en 1932 y Born en 1954.



La mecánica cuántica

- 1926: Erwin **Schrödinger** desarrolla la **mecánica ondulatoria**.
- Formula una ecuación de onda para las partículas materiales. Dicha ecuación describe (de manera determinista) la evolución en el tiempo de la función de onda Ψ , que, a su vez, es la representación del estado de un sistema cuántico.
- En forma simplificada la ecuación es:

$$H \Psi = E \Psi$$

donde H es un operador conocido como Hamiltoniano y E es la energía.

$$\Delta \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - U) \psi = 0$$

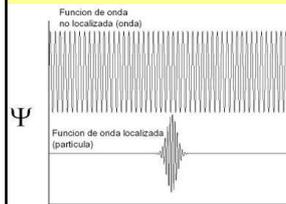


La mecánica cuántica

- Schrödinger formula esta ecuación inspirado por las ideas de de Broglie y movido por su rechazo de la formulación de Heisenberg.
- Dicha ecuación permite calcular el comportamiento y evolución de los sistemas cuánticos. Se la llama ecuación de onda porque su estructura formal, en la medida en que recoge los aspectos ondulatorios manifestados por estos sistemas, es análoga a las ecuaciones de ondas de la física clásica.
- Además de facilitar los cálculos, la mecánica ondulatoria era también menos abstracta que la mecánica matricial y, de acuerdo con muchos físicos, preferible desde un punto de vista conceptual.
- La ecuación describe el comportamiento de la función de onda, pero no interpreta qué es la función de onda.

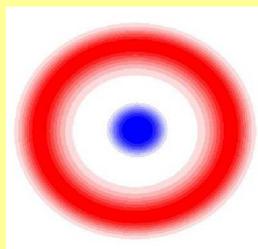
La mecánica cuántica

- Schrödinger pensó en un principio que Ψ estaba asociada a "un proceso vibratorio real en el interior del átomo". Adscribió a Ψ un significado electromagnético. Supuso que la función de onda expresaba una distribución continua de carga eléctrica en el espacio y consideró a las **partículas como grupos o paquetes de ondas que no se expanden en el espacio** con el transcurso del tiempo, lo cual les da su apariencia de partículas. Negó con ello la existencia de niveles discretos de energía y de saltos cuánticos.



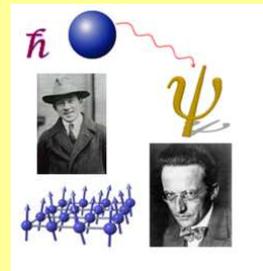
La mecánica cuántica

- Pronto estas ideas se mostraron erróneas. No quedaba claro cómo un paquete de ondas conservaba su estabilidad. Además, la función de ondas adoptaba valores complejos (múltiplos de $\sqrt{-1}$ y, por tanto, no podía ser real).
- Posteriormente sostuvo que el **electrón no era una partícula localizada con precisión, sino que estaba repartida por el espacio**. Los electrones serían vibraciones electrónicas repartidas en forma de nube alrededor del núcleo.

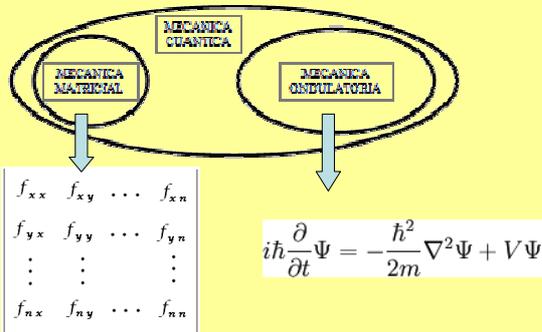


La mecánica cuántica

- Ese mismo año Schrödinger "demostró" que el formalismo de Heisenberg es una mera transposición algebraica de la mecánica ondulatoria. Ambos habían hecho el mismo descubrimiento, pero expresado en diferente formalismo matemático. Poco antes Dirac había ofrecido también una prueba de esa equivalencia. La demostración definitiva y correcta la ofreció von Neuman en su libro de 1949.
- Schrödinger obtuvo el premio Nobel de física en 1933.

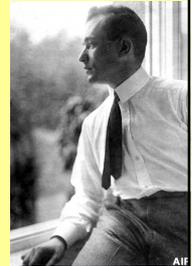


La mecánica cuántica



La mecánica cuántica

- En 1926 Max **Born** da una **interpretación probabilística** de la función de onda. Born hizo una crítica de la interpretación realista que Schrödinger había dado de Ψ y ofreció una interpretación alternativa que, aceptada en lo esencial por Bohr y por Heisenberg, se convirtió en la interpretación ortodoxa.
- Born pensaba que la multidimensionalidad de Ψ y su valor complejo impedían considerarla como la representación de una onda real, tal como pretendía Schrödinger. Ψ estaba asociada más bien con la probabilidad de la presencia de **partículas**.



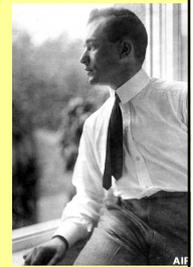
La mecánica cuántica

- En concreto, $|\Psi|^2$ (podíamos decir, la intensidad de la onda) sería proporcional a la probabilidad de **encontrar** el electrón en cierta posición en el tiempo t .
- Por lo tanto, las ondas de Schrödinger, no son reales; no hay nada que ondule en ellas, ningún sustrato básico que vibre, sino que son "**ondas de probabilidad**", observables sólo a través de la medida de $|\Psi|^2$.
- La función de onda Ψ no representa ningún sistema físico, sino nuestro **conocimiento** de éste. (La interpretación ortodoxa posterior es que se trata de un mero instrumento de cálculo).



La mecánica cuántica

- Esto significa que los sistemas cuánticos no tienen valores definidos, ni siquiera en principio. Sólo poseen ciertas probabilidades de exhibir ciertos valores si intentamos medirlos. Nótese que a lo que se refiere $|\Psi|^2$ es al resultado obtenido en un proceso de medida y no a una realidad objetiva: se trata de la probabilidad de que un observador **encuentre** la partícula **si efectúa una medición**, en lugar de la probabilidad de que la partícula esté allí sin más.
- Born reducía así los aspectos ondulatorios introducidos por el formalismo a una mera representación de nuestro conocimiento sobre el comportamiento de las partículas.
- Por otro lado, la noción de probabilidad difiere aquí de la noción clásica: se considera que **el carácter probabilístico es inherente a los fenómenos y no el mero fruto de nuestra ignorancia**.

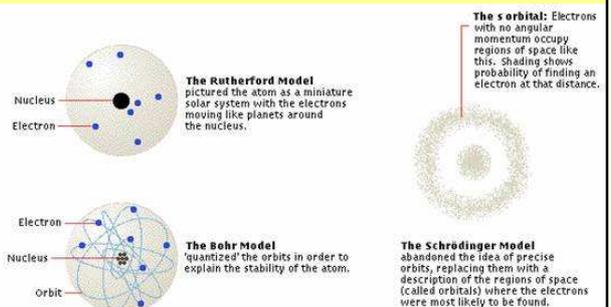


La mecánica cuántica

- Por tanto, hemos de dejar de considerar al electrón como una partícula situada en un lugar determinado, confinado a órbitas sencillas.
- El electrón se **representa** más bien como una nube de carga eléctrica repartida en el espacio en torno al núcleo. Las zonas de mayor densidad electrónica corresponden a las zonas donde con mayor probabilidad se encuentra el electrón.
- Las regiones delimitadas donde la probabilidad de encontrar al electrón son del 90-99% se denominan 'orbitales'.



La mecánica cuántica



La mecánica cuántica

- Además, la densidad de probabilidad de un campo Ψ formado por la superposición de Ψ_1 y Ψ_2 no será $P(\Psi) = P(\Psi_1) + P(\Psi_2)$, como en la probabilidad clásica, sino $|\Psi_1 + \Psi_2|^2 \neq |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$. (La probabilidad de que un fotón llegue a un punto de una pantalla a través de una rendija A o una rendija B no es igual a la probabilidad de que llegue pasando por A más la probabilidad de que llegue pasando por B. Así lo muestran los efectos de interferencia en el experimento de la doble rendija).
- Heisenberg aceptó la interpretación probabilística de Born, pero consideró necesario atribuir a Ψ algún tipo de realidad física. De otro modo no podría explicarse el fenómeno de la interferencia en el experimento de la doble rendija. Años más tarde, en 1961, escribiría que estas ondas de probabilidad eran una "formulación cuantitativa del concepto de $\delta\upsilon\upsilon\mu\mu\iota\zeta$ o, en la posterior versión latina, *potentia*, de la filosofía aristotélica".

La mecánica cuántica



- En 1927 Niels Bohr formula su **Principio de complementariedad**.
- Las descripciones en términos de onda y las descripciones en términos de partículas refieren aspectos complementarios de los fenómenos microfísicos. Las "contradicciones" entre ambos aspectos son irreducibles, en contra de lo que pensaba Einstein.

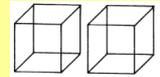
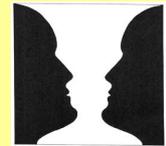
La mecánica cuántica

- La aplicación de determinados conceptos clásicos en la descripción de un fenómeno cuántico excluye la aplicabilidad de otros conceptos que en la física clásica habrían podido acompañar sin problemas a los primeros.
- Es posible determinar el comportamiento del sistema atendiendo a sus aspectos corpusculares, o bien a sus aspectos ondulatorios, puesto que un sistema microfísico permite las dos posibilidades, pero lo que no se puede es determinar ambos aspectos simultáneamente. Las condiciones experimentales en las que el sistema es susceptible de ser descrito como partícula excluyen a las condiciones experimentales en las que es susceptible de ser descrito como onda. Bohr llama a estas posibilidades alternativas '**descripciones complementarias**'.



La mecánica cuántica

- Son descripciones complementarias porque, siendo excluyentes, ya que los dispositivos experimentales para determinarlas son excluyentes, ambas son necesarias para dar una caracterización completa del sistema microfísico.
- Pero no hay en ello ninguna contradicción, puesto que para Bohr estas descripciones lo son del **fenómeno** cuántico, esto es, del conjunto del sistema observado y del instrumento de observación (que no pueden ser considerados con independencia el uno del otro), y no de la realidad objetiva.



La mecánica cuántica

- Si fueran descripciones de la realidad objetiva, habría que atribuirle a ésta la posesión simultánea de características contradictorias. **Las descripciones clásicas en términos de ondas y de partículas no serían aplicables por este motivo a una realidad exterior, sino únicamente al modo en que la realidad se nos aparece en el contexto de las condiciones experimentales, y en este caso lo serían de manera complementaria.**
- Se trata, por otro lado, de una limitación en la aplicabilidad que **no sería superable sustituyendo esos conceptos clásicos por otros nuevos**, porque la expresión de las experiencias obtenidas a través de nuestros instrumentos de observación **no puede prescindir de ellos**.

La mecánica cuántica

- También en 1927 Heisenberg formula su conocido **Principio de indeterminación (o incertidumbre)**, según el cual, los valores de las variables *canónicamente conjugadas*, como **posición y momento**, o **energía y tiempo**, no pueden ser medidos simultáneamente con un grado de precisión arbitrario; el error no puede ser reducido más allá de un cierto límite ($\sim h$). En formulación actual:
$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h/4\pi \quad \text{y} \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$$
- Así pues, cuanto más precisión se consiga en la determinación del valor de una de esas variables, menos precisión se podría conseguir en la determinación del valor de su correspondiente conjugada.
- Este es uno de los puntos principales de discrepancia entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica

- En un primer momento Heisenberg explicó la limitación teórica expresada por el principio de indeterminación acudiendo a una limitación de tipo práctico: la perturbación inevitable que en cualquier acto de observación producen los instrumentos de medida sobre el sistema microfísico impediría aumentar la precisión por encima del límite prescrito.
- Si en la física clásica la perturbación causada por los instrumentos sobre el sistema observado era calculable y, en principio, mediante los refinamientos experimentales adecuados, era evitable o minimizable, en la física cuántica, la indivisibilidad del cuanto de acción y su importancia en el ámbito atómico la convertía en algo irreductible e incontrolable.

La mecánica cuántica



- Esta explicación presupone que el sistema microfísico posee antes de la observación valores determinados para las variables consideradas y que esos valores son modificados por la acción de nuestros instrumentos en el acto de observación, quedando ya para siempre desconocido su valor exacto. **La indeterminación no sería, pues, una característica del sistema, sino una limitación en nuestra capacidad para conocerlo.**

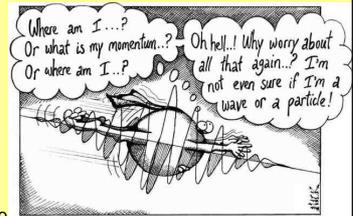
La mecánica cuántica



Ahora bien, tal cosa, aparte de obviar la posibilidad de mediciones que no perturban el sistema, como la que describieron Einstein, Podolsky y Rosen (tal como luego veremos), contradecía la tesis de su maestro Bohr sobre la imposibilidad de tratar al instrumento de medida y al microsistema observado como dos entidades independientes. Por eso Heisenberg abandonó pronto esta explicación, aún cuando muchos científicos y manuales de física se la siguen atribuyendo como si hubiese sido su opinión definitiva.

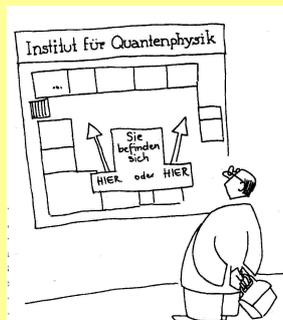
La mecánica cuántica

La explicación acordada finalmente por Bohr y Heisenberg fue la siguiente: Dado que no cabe considerar por separado el sistema observado y el instrumento empleado, a no ser como una mera abstracción, no cabe tampoco hablar de las propiedades medidas por el instrumento como si fueran independientes de éste. **Antes de ser medido, el sistema microfísico no posee ciertos atributos en una forma definida.** Sólo después del acto de medición, y en el contexto de la completa situación experimental, se puede decir que el sistema adquiere un valor definido para esos atributos.



La mecánica cuántica

- Dicho claramente, **antes de que alguien lo observe, un electrón no tiene una posición o una velocidad concretas**; cuando alguien mide su posición o su velocidad, el mismo proceso de medición hace que el electrón adquiera una posición o una velocidad determinadas, pero si se mide su posición con gran exactitud la situación experimental excluye hacer lo propio con la velocidad (y viceversa), ya que en cada caso son necesarias diferentes interacciones con el microsistema.
- De hecho, si la interpretación "perturbacionista" fuera correcta, entonces cabría pensar, como hizo Einstein, que la teoría cuántica no era una teoría **completa**, pues sería incapaz de recoger determinados valores bien definidos del sistema.



La mecánica cuántica

- En el artículo de 1927 donde presenta su principio de indeterminación, Heisenberg concluye:

"En vista de la íntima conexión entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción, podría sugerirse que detrás del universo estadístico de la percepción permanece oculto un mundo 'real' regido por la causalidad. Tal especulación nos parece —y esto ha de ser enfatizado— inútil y sin sentido. Pues **la física ha de limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones**".

- Por su parte, Bohr escribe:

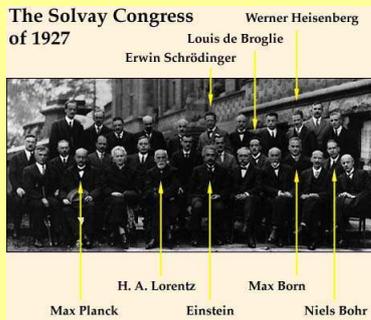
"No hay un mundo cuántico. Hay sólo abstractas descripciones físicas cuánticas. Es equivocado pensar que la tarea de la física es averiguar cómo es la naturaleza. La física se refiere a lo que nosotros podemos decir de ella".

- Y Pauli:

"El concepto de objeto material, de constitución y naturaleza independientes del observador, es ajeno a la física moderna, la que forzada por los hechos ha debido renunciar a esta abstracción".

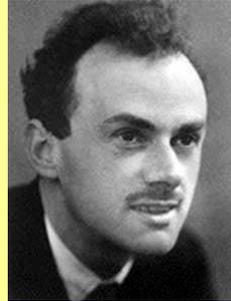
La mecánica cuántica

- 1927: *V Congreso Solvay* en Bruselas. A partir de entonces la interpretación de Copenhague comienza a ser adoptada por la mayoría de los físicos. Muestran su oposición en diverso grado Schrödinger, de Broglie, Lorentz, Einstein y Planck.



La mecánica cuántica

- 1929: Paul **Dirac** unifica los dos enfoques de la mecánica cuántica y de la teoría especial de la relatividad, explicando el spin $1/2$ del electrón y prediciendo la existencia de antimateria (el positrón sería descubierto en 1932 por Anderson y Neddermeyer).



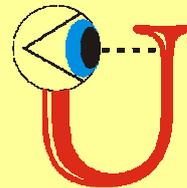
La mecánica cuántica

- Tenemos, pues, que para Bohr **los conceptos que emplea la física no se refieren a una realidad exterior directamente** (que, sin embargo, no es negada), **sino a un objeto fenoménico que es el resultado de la conjunción de dos sistemas físicos mutuamente dependientes –el instrumento de medida y el sistema observado**, inseparablemente integrados en una totalidad que sólo puede ser escindida a modo de abstracción.
- Tenemos también que para Bohr, Heisenberg y Born **la función de onda es un procedimiento de cálculo que delimita la probabilidad de obtener ciertos resultados experimentales**, con lo que además del realismo de la mecánica clásica queda desterrado también el determinismo, muy a pesar de Einstein.
- Pues bien, von Neumann introducirá un nuevo elemento en la interpretación de la teoría cuántica que la escorará hacia el idealismo subjetivo, alejándola de la epistemología bohriana: concede un papel central a la **consciencia** en el acto de medición.

La interpretación de von Neumann



- En 1932 John **von Neumann** publica su obra *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica*, en la que proporciona una formalización axiomática de la mecánica cuántica. Los estados atómicos vienen caracterizados por vectores en el espacio abstracto de Hilbert (un espacio vectorial complejo). El formalismo deja como resultado la necesidad de otorgar un papel destacado a la **consciencia** en el acto de medida: el simple conocimiento por parte de un observador cambia el estado de un sistema físico.



La interpretación de von Neumann

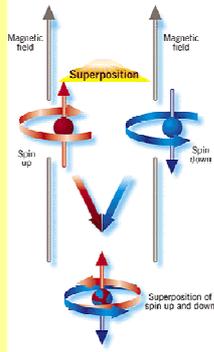
- Ya no es sólo que las leyes de la mecánica cuántica, más que a la realidad exterior, hagan referencia a lo fenoménico, a la totalidad formada por el sistema observado y el dispositivo experimental, o incluso a nuestro conocimiento, es además **que todo lo que el físico pueda llamar 'realidad' en el nivel cuántico viene determinado por la consciencia humana en ejercicio**.
- Von Neumann concluye asimismo la imposibilidad de completar de manera causal (variables ocultas) la mecánica cuántica.



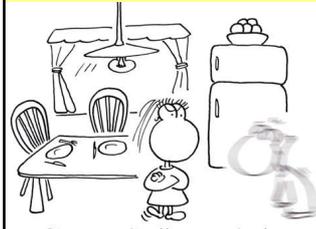
La interpretación de Copenhague

Problema de la medida

- Mientras no se efectúa ninguna medición sobre un sistema microfísico, éste evoluciona de manera determinista según la ecuación de onda de Schrödinger. Ahora bien, en esta ecuación el sistema evoluciona como una suma de todos los estados posibles superpuestos, en analogía con los fenómenos de superposición y suma de amplitudes en las ondas reales. Dicho de otro modo, cualquier combinación lineal de estados es también un estado posible. (Principio de superposición)
- Por ejemplo, antes de ser medida, la *orientación del spin* de un electrón vendrá caracterizada por la ecuación de onda como la "mezcla" de los dos estados posibles con los valores $+1/2$ y $-1/2$.



Problema de la medida

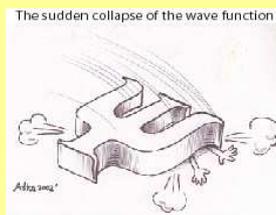


"How many times I've told you not to work on the quantum amplifier just before dinner? Now we have to wait until your wave function collapses. Again!"

Sin embargo, una vez que se efectúa una medición sobre el sistema, obviamente el resultado que se obtiene es siempre uno sólo de los estados posibles y no una superposición de estados. Por tanto, como explicó von Neumann, se produce en el acto de medir un cambio discontinuo en la función de onda que no está regido por la ecuación de onda de Schrödinger y que presenta un carácter indeterminista.

Problema de la medida

- Este cambio instantáneo es el '**colapso de la función de onda**'. La cuestión es ¿cómo y por qué se produce este extraño salto?, ¿es un cambio que afecta sólo a nuestro conocimiento del sistema, o se trata, por el contrario, de una verdadera transformación física que la medición introduce de algún modo en el sistema medido?



Problema de la medida

- Una primera respuesta oficial era la que había dado Max Born. Puesto que $|\Psi|^2$ representa la probabilidad de **encontrar** una partícula en un volumen dado, no habría ningún colapso de ninguna onda real provocado por nuestra medición, tal como sucedía en la interpretación de Schrödinger, sino un mero cambio perfectamente explicable en nuestro estado de conocimiento sobre el sistema. De no saber qué valor tomarán determinadas variables, pasaríamos a conocer ese valor con exactitud.

La interpretación de von Neumann

- Otra respuesta fue la de von Neumann. El '**colapso de la función de onda**', ocurre, según von Neumann, cuando se produce una observación **consciente** del sistema, obteniéndose como resultado uno de los estados posibles.
- La frontera entre el sistema medido y el aparato de medición puede ser movida arbitrariamente, con lo cual también el instrumento puede ser tratado, a diferencia de lo que Bohr pensaba, como un sistema cuántico representado por la función de onda. El aparato de medida puede estar en un estado de enredo (entanglement) con el sistema. Esto significa que no es en el instrumento donde dicha función colapsa. Y por tanto, sólo la consciencia del observador puede ser el lugar donde colapsa la función de onda, donde las posibilidades se contraen en una sola.



Problema de la interpretación de Ψ

- Acerca del significado de Ψ ha habido propuestas muy variadas. Simplificando pueden reducirse a cinco:
 - 1) Representa algo real (un campo físico de algún tipo, ciertas propiedades objetivas) de un sistema cuántico individual.
 - 2) No representa nada real; es simplemente un instrumento matemático para calcular las probabilidades de obtener ciertos resultados en posibles mediciones efectuadas sobre sistemas microfísicos individuales.
 - 3) Describe nuestro estado de conocimiento sobre un sistema microfísico.
 - 4) No representa una realidad actual, sino más bien un conjunto de *potencialidades* que podrían ser actualizadas de acuerdo con las condiciones experimentales.
 - 5) Describe el comportamiento de un conjunto de sistemas, nunca de un sistema sólo.

Problema de la interpretación de Ψ

- La primera interpretación tiene a su vez muchas variantes. De uno u otro modo ha sido defendida por Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm, Bell y Penrose, por citar a los más importantes.
- La segunda forma parte de la llamada '*interpretación de Copenhague*' de la mecánica cuántica, y es la mayoritariamente aceptada por los físicos, dada la autoridad de su máximo inspirador Niels Bohr.
- La tercera, que también es considerada como ingrediente de la interpretación de Copenhague, fue defendida por Born, y en ciertos momentos por Bohr, por Heisenberg e incluso por Schrödinger.
- La cuarta fue formulada por el Heisenberg más tardío.
- La quinta constituye el núcleo de la *interpretación estadística* de la mecánica cuántica, desarrollada en diferentes grados y versiones por Einstein, Popper, Landé, y Ballentine entre otros.

La interpretación de Copenhague

- La interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica fue el primer conjunto de respuestas para estos problemas. No consiste en una doctrina claramente expuesta y sistematizada, ni es entendida de igual modo en todos sus aspectos por aquellos que declaran aceptarla. Se trata más bien –dice Max Jammer– de "un denominador común para una variedad de puntos de vista relacionados", que ni siquiera está "necesariamente ligado con una posición filosófica o ideológica específica."
- Sus máximos representantes, Bohr y Heisenberg, no siempre expresaron las mismas tesis sobre el significado de los principios cuánticos fundamentales.

La interpretación de Copenhague

- Heisenberg, por ejemplo, aceptó durante mucho tiempo una visión instrumentalista de la física que no encajaba muy bien con las ideas de Bohr. Además, ambos, pero Heisenberg sobre todo, variaron sus posiciones a lo largo de su vida. Por si eso no bastara, von Neumann, otro de los promotores de esta interpretación, mantuvo la tesis del papel central de la consciencia en el acto de medición, que no fue aceptada por Bohr y Heisenberg, aunque a veces se las meta en el mismo saco. Por todo ello, es posible encontrar versiones notablemente diferentes, en ocasiones hasta contradictorias, de la citada interpretación.



La interpretación de Copenhague

- En la interpretación de Copenhague aparecen ligadas cuestiones epistemológicas y cuestiones ontológicas, si bien a estas últimas, dada la atmósfera positivista en la que se desenvolvía la investigación en física en la década de los 20 y los 30, se las intentó evitar infructuosamente.
- El núcleo de esta interpretación es la tesis de Bohr según la cual los conceptos clásicos con los que la física describía el mundo siguen siendo necesarios para explicar los fenómenos cuánticos tal como nuestros instrumentos los detectan y miden, pero –y he aquí lo esencial– no son aplicables a los sistemas cuánticos considerados *en sí mismos*, ya que para determinadas características que se obtienen en una medición sobre un sistema cuántico, sólo se puede decir que adquieren "realidad" en el conjunto del dispositivo experimental.

La interpretación de Copenhague

De acuerdo con la interpretación de Copenhague:

- La función de onda es una herramienta de cálculo. Lo que el físico hace es construir una función de onda a partir de ciertas observaciones, y esa función es meramente un catálogo de las probabilidades de los resultados de posteriores mediciones.
- El estado de un sistema entre dos observaciones no puede ser descrito. Carece de sentido en la teoría.
- La descripción de la observación dependerá del completo dispositivo experimental utilizado. Los conceptos clásicos (onda, corpúsculo, etc.) son imprescindibles en dicha descripción.
- El colapso de la función de onda no es más que la determinación por parte del dispositivo de medida (debido a su carácter macroscópico) de uno de los posibles resultados de esa medida. Es la actualización de una potencialidad.
- No puede trazarse una frontera precisa entre el dispositivo experimental y el sistema medido.
- Los sistemas cuánticos tienen una naturaleza tanto ondulatoria como corpuscular, aunque la manifestación de una u otra dependerá del dispositivo empleado en su medición. Nunca pueden manifestarse simultáneamente. (**Hoy día, sin embargo, han logrado observarse a la vez.**)

Paradojas cuánticas

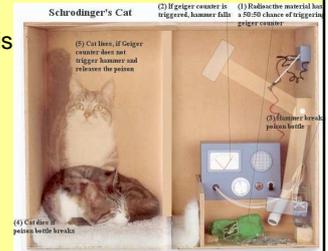
La paradoja del gato de Schrödinger

- En 1935, poco después de la aparición del libro de von Neumann, y bajo la forma de dos ingeniosos experimentos mentales, se llevó a cabo un desafío explícito al "espíritu de Copenhague" por parte de dos de las grandes figuras que habían contribuido al nacimiento de la física cuántica.
- En uno de esos experimentos, Schrödinger puso de manifiesto que las paradojas surgidas de las superposiciones de estados en los sistemas microfísicos no estaban confinadas en el ámbito atómico y subatómico, sino que podían ser trasladadas al ámbito macroscópico.



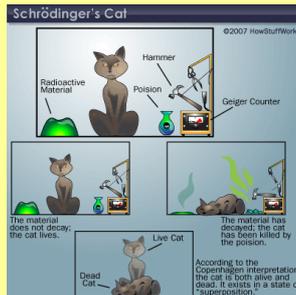
La paradoja del gato de Schrödinger

- Se trata de un experimento mental formulado contra la tesis de Bohr de que un sistema permanece en una superposición de estados y no adquiere valores definidos hasta que se efectúa una medición sobre él.
- Muestra en toda su crudeza el problema de la medida.



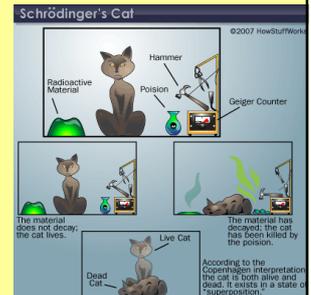
La paradoja del gato de Schrödinger

- Si la interpretación de Copenhague era correcta, sería posible construir un dispositivo experimental basado en un fenómeno de desintegración atómica, en el cual un gato permanecería antes de que alguien lo observara en una superposición de estados vivo/muerto (es decir, ni vivo ni muerto), y sólo adquiriría uno de esos dos estados en el momento en que se realizara la observación.



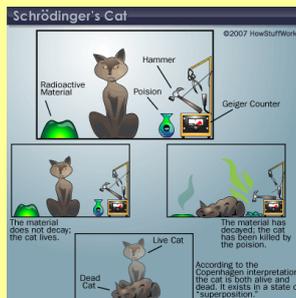
La paradoja del gato de Schrödinger

- En un caja, encerramos un gato junto con una fuente radioactiva, un contador Geiger, un martillo y un recipiente con un gas venenoso. La desintegración de la fuente es un proceso cuántico, que tiene una probabilidad del 50% de ocurrir.
- Si ocurre, el contador Geiger activa un dispositivo por el cual el martillo rompe el frasco del gas, y el gato muere. Si no ocurre, el gato permanece vivo. Todo está medido en un caja, y la única forma de saber si el gato sigue vivo o muerto es abriéndola.



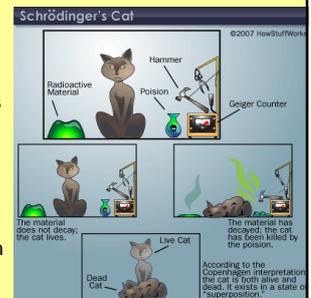
La paradoja del gato de Schrödinger

- Por tanto, el gato tiene una probabilidad del 50% de estar vivo o muerto. Según la interpretación cuántica, mientras no se abra la caja, el gato está en una superposición de estados, es decir, está a la vez en un estado vivo y muerto, lo cual parece ridículo.
- Cuando se abre la caja, se colapsa la función de onda y el gato adquiere en ese momento uno de esos dos estados de forma definida. Antes de eso, ninguno de los dos estados tiene realidad.



La paradoja del gato de Schrödinger

- En la actualidad se han conseguido obtener "gatitos" de Schrödinger en el laboratorio.
- En 1996 se consiguió poner un ión de Berio en dos lugares a la vez, esto es, en superposición de estados.
- Una de las explicaciones más aceptadas de por qué esto no se da a niveles mayores es la "decoherencia".
- Según esta idea, la interacción con el entorno destruye la superposición. Los estados clásicos (vivo o muerto) serían los más robustos en dicha interacción.



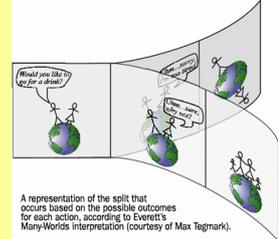
La paradoja del gato de Schrödinger



- Puede verse un vídeo sobre esta paradoja en la siguiente dirección
http://www.youtube.com/watch?v=JC9A_E5kg7Y

La paradoja del gato de Schrödinger

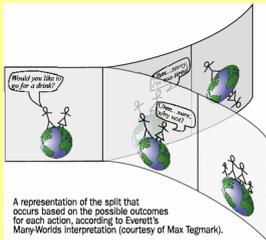
- Existe una interpretación alternativa a la de Copenhague de la mecánica cuántica que proporciona una visión diferente y sorprendente de lo ocurrido. Dicha interpretación fue desarrollada en 1957 por Hugh Everett, III en su tesis doctoral, que sólo tenía nueve páginas.



- En la interpretación de Everett, si miramos en la caja y encontramos que el gato está vivo, esta observación ha creado un universo paralelo en el que encontramos que el gato está muerto. Todo acto de medición de un sistema cuántico bifurca el universo.

La paradoja del gato de Schrödinger

- Desde este planteamiento, cuando encontramos el gato vivo, este resultado aparente es una ilusión, puesto que hemos creado otro universo paralelo en el que encontramos al gato muerto. Y ambos universos son reales.
- No hay, por tanto, colapso de la función de onda.



La paradoja EPR



- "No me satisface la idea de poseer una maquinaria que permita profetizar, pero a la que no seamos capaces de dar un significado claro." (Carta de Einstein a Born, 3-12-1953).
- "Dios no juega a los dados con el Universo." (Carta de Einstein a Born, 12-12-1926).

La paradoja EPR

- También en 1935 Einstein en colaboración con los jóvenes físicos Boris Podolsky y Nathan Rosen presentó en un breve artículo un caso imaginario con el que sus autores pretendían mostrar la **incompletud** de la mecánica cuántica.
- Para Bohr y para todos los partidarios de la ortodoxia, la mecánica cuántica era una teoría completa, o sea, la función de onda recogía toda la información relevante acerca de un sistema individual, sin que quedara fuera de ella ninguna **variable oculta** cuyo conocimiento pudiera restaurar el determinismo perdido de la física clásica. El carácter probabilístico de las predicciones cuánticas era, por tanto, un dato irreductible y último; no procedía de una falta de conocimiento sobre el sistema observado.
- A pesar de que von Neumann parecía haber demostrado en su libro la inviabilidad de las variables ocultas, Einstein se resistía a descartar la posibilidad de una futura teoría capaz de explicar causalmente, mediante un conocimiento más completo, lo que la mecánica cuántica atribuía al puro azar; y calificaba de "filosofía tranquilizadora", e incluso de "religión", las convicciones de Bohr y de Heisenberg en sentido contrario.

La paradoja EPR

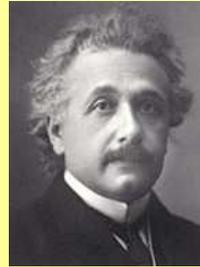
- El artículo comienza dando un criterio de completud para cualquier teoría física. Para que una teoría sea completa "todo **elemento de la realidad física** ha de tener una contrapartida en la teoría física." Pero ¿qué debe considerarse como "elemento de la realidad física"? La aclaración de esta cuestión es un punto esencial del experimento EPR y dice así:
"Si podemos predecir con certeza (*i. e.*, con probabilidad igual a la unidad) el valor de una cantidad física sin perturbar el sistema de ningún modo, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física".
- Si se puede calcular el valor exacto de una magnitud sin tan siquiera intervenir sobre el sistema físico al que se le atribuye, parece razonable pensar que es porque en realidad el sistema tiene ese valor para esa magnitud.

La paradoja EPR

Hay dos premisas adicionales que son asumidas de pasada a lo largo del artículo.

- 1) Se supone que para dos sistemas que hayan interactuado en el pasado, si esa interacción ha cesado en el momento en que se efectúa la medición, ningún cambio que tenga lugar en uno de ellos puede ser consecuencia de un cambio en el otro (supuesto de **localidad**).
 - 2) Se acepta que las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica están confirmadas empíricamente (supuesto de **validez**).
- La importancia del supuesto de localidad será realizada en el ulterior desarrollo del problema abierto por el experimento EPR.
 - Este supuesto elimina la posibilidad de que la medición sobre un sistema ejerza alguna influencia instantánea sobre el otro sistema. Una vez separados, los dos sistemas son independientes. Pensar lo contrario sería para EPR tanto como postular misteriosas acciones telepáticas entre los dos sistemas.

La paradoja EPR



- Mediante el experimento mental que proponen, Einstein, Podolsky y Rosen quieren probar que si se acepta la caracterización dada de la realidad física correspondiente a una magnitud física (junto con los dos supuestos implícitos de localidad y validez), entonces la mecánica cuántica es incompleta, pues habría elementos de la realidad física sin una contrapartida en la teoría.
- Veamos el razonamiento.

La paradoja EPR

- Sea un sistema compuesto por dos partículas A y B que han estado interactuando entre el tiempo y después han dejado de interactuar. Se supone que se conoce el estado de las dos partículas antes de interactuar y, por tanto, se puede determinar (mediante la ecuación de Schrödinger) el estado del sistema compuesto por las dos partículas en cualquier tiempo posterior, incluso cuando han dejado de interactuar.
- Si medimos ahora el momento de una de las partículas (digamos A) mediante el instrumental apropiado, podemos calcular con seguridad el momento de la partícula B sin tener que efectuar ninguna medición sobre ella. Asimismo, si en lugar del momento, decidimos medir la posición de A , podemos calcular la posición de B . Puesto que en ambos casos hemos podido establecer los valores de la posición y el momento de una de las partículas sin perturbarla en absoluto, hemos de aceptar que la partícula posee real y simultáneamente una posición y un momento con esos valores. Ahora bien, la mecánica cuántica no recoge esa posibilidad en su formalismo, por lo tanto la mecánica cuántica es una teoría incompleta.

La paradoja EPR

- Bohr se apresuró a dar una respuesta al argumento. Apareció publicada en el número siguiente de la *Physical Review*. Allí Bohr critica el criterio de realidad propuesto y se reafirma en la idea de que la única descripción posible es la del fenómeno cuántico, es decir, la totalidad de la situación experimental.
- Una medida efectuada sobre el sistema es una medida sobre esa totalidad. Ciertamente no se perturba directamente la partícula B , pero al medir la posición o el momento de la partícula A , si que se ejerce "una influencia sobre las condiciones mismas que definen los tipos posibles de predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema", entendiendo que en el sistema sigue incluida la partícula B , que no puede ser considerada independientemente de A , aunque haya dejado de interactuar con ella.
- Por tanto, medir la posición de A excluye medir el momento de A y de B , y medir el momento de A excluye medir la posición de A y de B .
- Dado que no se puede medir simultáneamente la posición y el momento de una partícula, la conclusión de EPR de que posición y momento corresponden simultáneamente a dos elementos existentes de la realidad está injustificada.

Las desigualdades de Bell

- Así quedaron las cosas en lo fundamental durante tres décadas, hasta que en 1964 el físico irlandés John Bell, investigador del CERN, fue capaz de darle un giro inesperado a la situación.
- Bell desarrolló y publicó un teorema matemático que abría la posibilidad, al menos en principio, de determinar experimentalmente quién tenía la razón, si Bohr y los partidarios de la interpretación de Copenhague o Einstein y los partidarios de las variables ocultas.
- Ese mismo año de 1964, en un artículo que se publicó dos más tarde, Bell mostró además que la prueba de von Neumann en la que se establecía la inviabilidad de cualquier ampliación de la teoría cuántica mediante variables ocultas estaba basada en un postulado cuya validez no se podía mantener para otros estados de tipo diferente a los considerados por von Neumann.
- Con ello justificaba teóricamente por qué David Bohm había podido elaborar usando variables ocultas un modelo (no local) del electrón que igualaba en capacidad explicativa al modelo mecánico-cuántico standard.

Las desigualdades de Bell

- El teorema en sí es una desigualdad matemática que limita el nivel de correlación esperable para los resultados de medidas simultáneas efectuadas sobre dos partículas que han estado interactuando.
- Esta desigualdad marca una diferencia cuantitativa susceptible de contrastación empírica entre la interpretación de Copenhague y la interpretación realista-local de Einstein.
- La mecánica cuántica entendida al modo de **Copenhague** predecía que bajo ciertas condiciones el **grado de correlación debía sobrepasar el límite marcado por la desigualdad de Bell**, y era, por tanto, mayor que el grado de correlación permitido por la teoría entendida al modo de Einstein, que predecía el cumplimiento de la desigualdad en todas las circunstancias.

Las desigualdades de Bell

- Un ejemplo cotidiano:

$$n^{\circ}(\text{H, F}) + n^{\circ}(\text{NF, +45}) \geq n^{\circ}(\text{H, +45})$$

El número de hombres fumadores + el número de no fumadores mayores de 45 años \geq el número de hombres mayores de 45 años.

- Demostración:

$$n^{\circ}(\text{H, F}) = n^{\circ}(\text{H, F, +45}) + n^{\circ}(\text{H, F, -45})$$

$$n^{\circ}(\text{NF, +45}) = n^{\circ}(\text{H, NF, +45}) + n^{\circ}(\text{M, NF, +45})$$

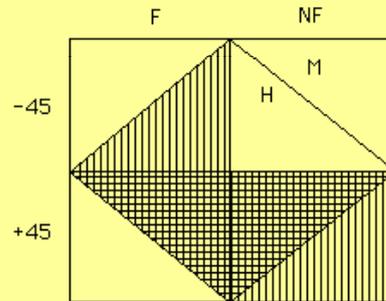
$$n^{\circ}(\text{H, +45}) = n^{\circ}(\text{H, F, +45}) + n^{\circ}(\text{H, NF, +45})$$

Sumando las dos primeras ecuaciones tenemos:

$$n^{\circ}(\text{H, F}) + n^{\circ}(\text{NF, +45}) = n^{\circ}(\text{H, F, +45}) + n^{\circ}(\text{H, F, -45}) + n^{\circ}(\text{H, NF, +45}) + n^{\circ}(\text{M, NF, +45})$$

Ahora bien, los términos primero y tercero del lado derecho de la igualdad son los que dan por resultado $n^{\circ}(\text{H, +45})$, como se ve en la tercera ecuación, con lo que se demuestra la desigualdad expresada por el teorema.

Las desigualdades de Bell



Las desigualdades de Bell



- Así pues, en pocas palabras, Bell consiguió establecer a partir de la hipótesis de la localidad y de la existencia de variables ocultas una predicción empírica que resultaba incompatible con las predicciones de la mecánica cuántica en su forma conocida. De ahí concluía que si las predicciones de esta última eran correctas, entonces había que desestimar las teorías de variables ocultas locales.

Las desigualdades de Bell

- El mérito de haber conseguido montar (en 1982) un experimento con las mayores garantías corresponde a los físicos del Instituto de Óptica de la Universidad de París Alain Aspect, Jean Dalibard y Gerard Roger.
- El experimento consistía en lo esencial en una situación comparable a la descrita en el experimento EPR, solo que en lugar de medir la posición y el momento en un sistema de dos partículas, se medía el ángulo de polarización de dos fotones correlacionados emitidos por una fuente común.
- El resultado fue que las desigualdades de Bell no se cumplían en ese sistema, o lo que es igual, que las predicciones obtenidas con las hipótesis de las variables ocultas y la localidad eran fallidas. El realismo local de Einstein se hacía así insostenible, mientras que la interpretación de Copenhague salía de la prueba mejor parada que antes.

Las desigualdades de Bell

- Desde el punto de vista de la interpretación de Copenhague, hay que abandonar el supuesto de la realidad.
- Mientras no se efectúa ninguna medición sobre el sistema, éste evoluciona según la ecuación de onda de Schrödinger, sin tomar valores definidos para ciertos atributos. Dicha ecuación es aplicable al sistema como un todo, aun cuando sus partes (las dos partículas en el experimento EPR) estén alejadas y hayan dejado de interactuar. Sólo al realizar una medición sobre el sistema adquiere "realidad" el valor medido, pero como el sistema sigue siendo un todo hasta el momento de la medición, el resultado de ésta es algo que compete a ese todo.
- Así pues, no es extraño que el valor medido en una partícula esté correlacionado con el valor medido en la otra. Una vez que las condiciones experimentales que definen el valor obtenido en una partícula han sido puestas, lo han sido para la totalidad del sistema y, por tanto, también para la otra partícula.

Las desigualdades de Bell

- Por utilizar los términos aristotélicos a los que recurrió Heisenberg, el sistema como un todo encierra una serie de potencialidades que se actualizan en todo el sistema cuando se efectúa la medida. La actualización de determinadas potencialidades provocada por la medición en una partícula significa la actualización de otras potencialidades en la segunda partícula. No hay influencias transmitidas entre dos partículas, sino un todo inanalizable o, si se quiere, un sistema no-separable.

Las desigualdades de Bell

- El inconveniente de esta solución es su alto coste desde el punto de vista epistemológico. Una epistemología fenomenista con su aparejada renuncia a predicar algo sobre la realidad independiente no es un precio que un científico pague alegremente.
- De ahí que muchos físicos se refugien en una actitud pragmática, pensando quizá que con ello son fieles al espíritu de Copenhague y al sano escepticismo profesional. Se ciñen a la aplicación y el desarrollo de las ecuaciones y consideran todo lo demás, es decir, las cuestiones sobre el fundamento de la teoría, como problemas filosóficos sin sentido que, en todo caso, ya han sido despejados por Bohr.
- Sin embargo, existe actualmente una tendencia a tomar la no-localidad como una característica fundamental e intrínseca del universo. (Teoría de Bohm o teoría de Everett).
- Conviene aclarar que las correlaciones en los resultados de las observaciones no permitirían enviar señales a velocidades supraluminicas, porque el resultado de una medición sobre un sistema siempre será estocástico, con lo cual no se entra en conflicto con el segundo postulado de la relatividad especial.

La física de partículas

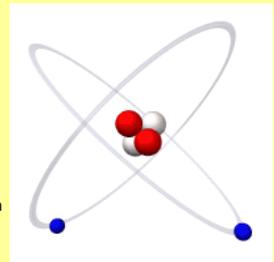
Los inicios de la física atómica

- En 1897 J. J. Thomson determinó experimentalmente que los rayos catódicos estaban formados por partículas cargadas negativamente a las que se denominó como 'electrones'.
- El protón, causante de la carga positiva del núcleo atómico, fue llamado así por Rutherford en 1919. Rutherford estableció que tenía la misma carga que el electrón, pero de signo contrario y que era una partícula mucho más masiva.
- En 1913 el físico británico Frederick Soddy descubrió que átomos del mismo elemento químico, por tanto, con las mismas propiedades químicas, podían tener diferentes propiedades radioactivas. Llamó 'isótopos' a estos distintos tipos de átomos.
- Durante los años 20 algunos físicos contemplaron la posibilidad de una partícula que fuera la combinación de un electrón y un protón, y le dieron el nombre de 'neutrón'.
- En 1932 el físico británico James Chadwick atribuyó los efectos de cierto tipo de radiación a que ésta estaba formada por partículas neutras y muy masivas que se correspondían con los hipotéticos neutrones.
- Inmediatamente, Heisenberg sugirió que el núcleo tenía que estar formado por protones y neutrones.

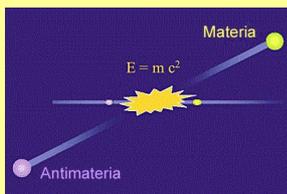
Los inicios de la física atómica

Por tanto:

- El número de protones en el núcleo decide a qué elemento corresponde el átomo.
- El número de electrones es el mismo que el de protones y determina la química del átomo y del elemento.
- Pero algunos átomos del mismo elemento pueden diferir en el número de neutrones, con lo cual los elementos químicos se pueden dar en diferentes variedades llamadas 'isótopos'. Pueden también variar en el número de electrones, dando lugar a diferentes 'iones'.



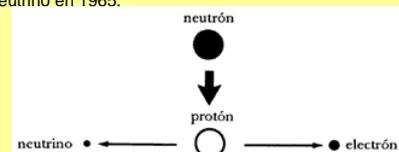
Los inicios de la física atómica



- En 1932, Carl D. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, descubrió en los rayos cósmicos la primera partícula de antimateria: el positrón. El positrón tiene una masa similar a la del electrón, pero carga positiva.
- La antimateria está formada por partículas de igual masa y carga eléctrica que la materia, pero de signo contrario.
- Cuando la materia se encuentra con la antimateria, se aniquilan produciendo una gran energía.
- Inversamente, si se concentra gran energía en un punto, puede transformarse en una partícula de materia y otra de antimateria.

Los inicios de la física atómica

- Hay núcleos inestables en los que el neutrón puede desintegrarse. Tras la desintegración del neutrón, los núcleos emiten un electrón y adquieren una unidad de carga positiva. Los electrones emitidos por esos núcleos constituyen una radiación conocida como rayos beta.
- En 1934, Enrico Fermi postuló que la radiación beta no sólo produce electrones y protones, sino también una partícula desconocida de carga neutra a la que llamó neutrino.
- El neutrino (y el antineutrino), al igual que el fotón, no tiene masa, por lo que interactúa muy poco con la materia.
- El antineutrino se detectó por primera vez en 1956, en un reactor nuclear y el neutrino en 1965.



Los inicios de la física atómica

- La fuerza responsable de la radiación beta se conoce como 'fuerza débil'.
- En 1967, Abdus Salam y Steven Weinberg, de forma independiente cada uno, propusieron una teoría que unificaba esta interacción con la fuerza electromagnética, de la misma manera que Maxwell hizo con el magnetismo y la electricidad.
- Sugirieron que había unas partículas que transmitían esta fuerza.
- Estas partículas se conocen hoy como bosones W^+ , W^- y Z .
- Fueron detectadas en 1982 en el CERN por Carlo Rubbia y su equipo.



EL PAÍS, jueves 18 de octubre de 1984

SOCIEDAD

Premios Nobel 1984

Los dos científicos trabajan en el mismo laboratorio

Carlo Rubbia y Simón van der Meer, premio Nobel de Física por su contribución al descubrimiento de partículas subatómicas

El descubrimiento de nuevas componentes de la materia, realizado en el laboratorio subterráneo del CERN en Ginebra, en la frontera franco-suiza, fue hecho posible por el premio de física otorgado a este año, según se anunció ayer en Estocolmo.

Los dos científicos trabajan en el mismo laboratorio

Carlo Rubbia, italiano, y Simón van der Meer, holandés, fueron galardonados por su papel en el descubrimiento de las partículas subatómicas denominadas W^+ y W^- . La información sobre el descubrimiento de estas partículas, que se dio a conocer el 2 de agosto, fue el resultado de la realización de los experimentos de colisión de protones.

El descubrimiento de estas partículas es el resultado de la transformación de la energía en materia. En 1967, Carlo Rubbia tuvo la idea de utilizar las aceleraciones de partículas para producir estas partículas. Para ello, diseñó un acelerador de partículas que permitiera la producción de estas partículas, que se denominaron W^+ y W^- . En un momento dado, las partículas W^+ y W^- se transformaron en partículas W^+ y W^- .

El descubrimiento de estas partículas es el resultado de la transformación de la energía en materia. En 1967, Carlo Rubbia tuvo la idea de utilizar las aceleraciones de partículas para producir estas partículas. Para ello, diseñó un acelerador de partículas que permitiera la producción de estas partículas, que se denominaron W^+ y W^- . En un momento dado, las partículas W^+ y W^- se transformaron en partículas W^+ y W^- .

Carlo Rubbia y Simón van der Meer, premio Nobel de Física por su contribución al descubrimiento de partículas subatómicas

El holandés Simón van der Meer nació el 24 de septiembre de 1925 en la zona de Breda. Realizó su doctorado en física en la Universidad de Groninga. Trabajó en el CERN en Ginebra, en la frontera franco-suiza, desde 1961. En 1967, fue galardonado con el premio Nobel de Física por su contribución al descubrimiento de las partículas subatómicas denominadas W^+ y W^- .

Los inicios de la física atómica



- En 1935, Hideki Yukawa, por entonces un profesor de física en la Universidad de Osaka, sugirió una explicación para justificar que los neutrones y los protones se mantengan unidos en el núcleo a pesar de que la carga positiva tiende a romper el núcleo debido a la fuerza de repulsión eléctrica. Propuso que existía otra fuerza más intensa responsable de la unión. La fuerza eléctrica es transportada por el fotón, de modo que, según Yukawa, esta fuerza (conocida hoy como 'fuerza fuerte') debía estar transportada por otra partícula hipotética, a la que llamó 'mesón'.
- Yukawa obtuvo el premio Nobel en 1949.
- El mesón pi, o pión, responsable de esta fuerza, fue detectado en 1947 por Frank Powell.
- A lo largo de los siguientes años se fueron detectando en los rayos cósmicos o en los aceleradores de partículas más partículas elementales inestables y extrañas, hasta llegar a más de trescientos.

Los inicios de la física atómica

- También la cuarta fuerza fundamental de la naturaleza, y la más débil de todas, la fuerza de la gravedad, sería transmitida por unas partículas hipotéticas sin masa, hasta ahora no detectadas, llamadas 'gravitones'.
- Al igual que la fuerza electromagnética y a diferencia de la fuerza fuerte y la fuerza débil, su alcance es infinito.

Gravitones Transportan la gravedad.

Experimentado por todas las partículas con masa.

Todo el peso que sentimos es el resultado de la interacción gravitatoria.

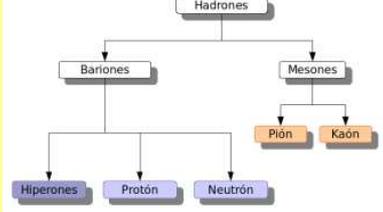
Poniendo un poco de orden

- El electrón, el muón, el tauón, sus correspondientes neutrinos y todas sus antipartículas se clasifican como **leptones** (leptós = ligero). Habría pues un total de 12. No experimentan la interacción fuerte. Todas las demás (con excepción del fotón) experimentan dicha interacción y se denominan **hadrones** (hadrós = fuerte).

| Partículas de materia | LEPTONES | |
|--|---|--|
| | Partícula | Neutrino |
| Todas las partículas ordinarias pertenecen a este grupo. | Electrón Responsable de la electricidad y de las reacciones químicas: tiene carga -1. | Neutrino electrónico Partícula sin carga eléctrica y probablemente sin masa; nuestro cuerpo es atravesado por miles de millones de neutrinos cada segundo. |
| Estas partículas existieron en los momentos iniciales del Big Bang. Ahora solamente se encuentran en los rayos cósmicos y en los aceleradores. | Muón Parente pesado del electrón; vive unos dos milonésimas de segundo. | Neutrino muónico Creado junto con los muones en la desintegración de ciertas partículas. |
| | Tau Todavía más pesado, es muy inestable. Descubierta en 1975. | Neutrino tauónico Descubierto en el 2000. |

Poniendo un poco de orden

- Los hadrones que, al desintegrarse, tienen entre su producto final un protón se denominan **bariones** (barys = pesado). Los que sólo dan lugar a fotones y leptones se denominan **mesones** (mesos = intermedio).
- El pión, el kaón y la partícula eta, etc. (y sus antipartículas) son mesones.
- El protón, el neutrón, los hiperones, etc. (y sus antipartículas) son bariones.



El modelo estándar

- Hasta los años 60, se creía que los protones, los neutrones y el resto de los hadrones eran partículas elementales, pero los experimentos en que colisionaban protones con otros protones o con electrones a alta velocidad indicaron que, en realidad, estaban formados por partículas más pequeñas. Estas partículas fueron llamadas "quarks" por el físico Murray Gell-Mann. El nombre procede de la frase de Joyce "Tres quarks para Muster Mark".
- Independientemente, el físico George Zwaig llegó a la misma conclusión que Gell-Mann en 1964.



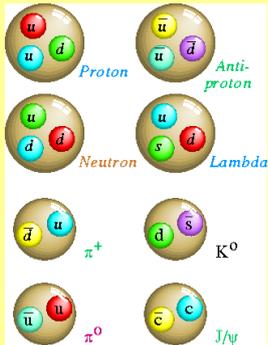
El modelo estándar

- Lo que Gell-Mann hizo fue establecer un grupo de partículas que quizás fueran fundamentales, con propiedades tales que si eran puestas adecuadamente juntas formarían todos los distintos hadrones con sus propiedades. Una combinación contendría el protón, otra el neutrón, otra los distintos piones, etc.
- Gell-Mann descubrió que no podía conseguir esto si se atenía al principio de que cada partícula debe tener cargas eléctricas o bien iguales en magnitud a la carga del electrón o del protón o múltiplos de ellas. Halló, en cambio, que las partículas constituyentes de los hadrones debían tener cargas fraccionarias.
- Esto era casi una herejía, pero pese a todo Gell-Mann publicó su trabajo en 1963.



El modelo estándar

- Sugirió que existían tres quarks fundamentales que constituirían los hadrones y tres antiquarks que constituirían los antihadrones. Cada hadrón estaba formado por dos o tres de esos quarks. Los mesones estaban hechos de dos y los bariones de tres.
- Estos tres quarks fueron llamados 'up' (arriba), 'down' (abajo) y 'strange' (extraño). Se abrevian como u, d y s.
- Estos nombres no tienen un significado literal.



El modelo estándar



- Algunas personas pensaban que tenía que haber al menos un quark más. Una de ellas era el premio Nobel norteamericano Julian S. Schwinger.
- A Schwinger le parecía que los quarks eran partículas elementales como los leptones y que tenía que existir una simetría entre esos dos conjuntos de partículas.
- Entonces se conocían cuatro leptones (y cuatro antileptones): el electrón y su neutrino y el muón y su neutrino. Schwinger postuló un cuarto quark.
- Este cuarto quark fue detectado en 1974 en el acelerador de la Universidad de Stanford. Fue bautizado como 'charm' (encanto), o abreviadamente 'c'.

El modelo estándar

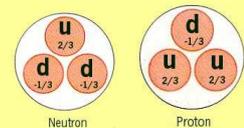
- Por aquel entonces se descubrieron dos nuevos leptones: el tauón y su neutrino.
- Esto sugería la existencia de nuevos tipos de quarks.
- En 1978 fue efectivamente descubierta una quinta partícula, que fue llamada 'bottom' (fondo) o también 'beauty' (belleza).
- La sexta partícula, el quark 'top' (cima) o también 'truth' (verdad) fue descubierto en 1994.

| QUARKS | | Partículas de materia |
|--|--|--|
| Up (u) Tiene carga eléctrica de +2/3; los protones tienen dos y los neutrones uno. | Down (d) Tiene carga eléctrica de -1/3; los protones tienen uno y los neutrones dos. | Todas las partículas ordinarias pertenecen a este grupo. |
| Charm (c) Pariente pesado del u. Descubierta en 1974. | Strange (s) Pariente pesado del d. Descubierta en 1964. | Estas partículas existieron en los momentos iniciales del Big Bang. Ahora solamente se encuentran en los rayos cósmicos y en los aceleradores. |
| Top (t) Todavía más pesado. Descubierta en 1994. | Bottom (b) Todavía más pesado; su detección ha sido un hito importante para la teoría electrodébil. Descubierta en 1977. | |

El modelo estándar

- Cada uno de estas modalidades diferentes de quark fueron designadas por los físicos como 'sabor'. Había, pues, seis sabores de quarks y seis de antiquarks.
- Para formar hadrones, cada sabor se combina con otros en función de su carga fraccionaria y el resultado debe ser la carga de la partícula de la que se trate.

| Flavor | Charge |
|---------|--------|
| Up | + 2/3 |
| Down | - 1/3 |
| Charm | + 2/3 |
| Strange | - 1/3 |
| Top | + 2/3 |
| Bottom | - 1/3 |



El modelo estándar

- Pero faltaba por explicar el mecanismo de su funcionamiento.
- En 1947, tres físicos habían elaborado de forma independiente una explicación de lo que sucede en la interacción entre electrones y fotones. Se trataba de Julian Schwinger, Richard Feynman y Sin-itiro Tomonaga, quienes recibieron el premio Nobel por ello en 1965. La teoría que desarrollaron se denomina 'electrodinámica cuántica'.



El modelo estándar

- Los científicos pensaron que las técnicas de la electrodinámica cuántica podrían ser usadas para explicar las interacciones fuerte y débil, pero no fue así.
- Finalmente, como vimos antes, Salam y Weinberg consiguieron una explicación unificada de la fuerza electromagnética y la fuerza débil, pero la fuerza fuerte siguió presentando problemas.
- Por ejemplo, según el principio de exclusión de Pauli los quarks, como todas las partículas llamadas 'fermiones', no podían estar en el mismo sistema si sus características cuánticas son idénticas. Sin embargo, había hadrones que parecían estar formados por tres quarks idénticos, es decir, con el mismo sabor, o (como el protón y el neutrón) por dos idénticos y uno distinto.
- Era posible que hubiera alguna distinción entre los quarks que hubiera pasado desapercibida. Si cada sabor pudiera subdividirse en tres variedades, no habría problema entonces en que un hadrón estuviera formado por tres quarks con el mismo sabor sin que ello violara el principio de exclusión de Pauli.

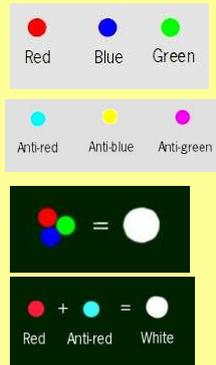
El modelo estándar

- Empezando en 1964, varios físicos —entre ellos Oscar Greenberg, Yoichiro Nambu y Moo-Young Han, que estaban todos en universidades norteamericanas— trabajaron sobre este asunto de las variedades de los quarks.
- Decidieron que las variedades no eran algo análogo a ninguna otra cosa y no podían ser realmente descritas. Sólo podía dárseles un nombre y detallar la forma en la que trabajan. El nombre que se le dio a la distinción fue 'color'. De ahí que la teoría se conozca como ' **cromodinámica cuántica**'.
- Nambu ha escrito: "El color se introdujo en la teoría de los quarks como un elemento *ad hoc* para solventar el problema de la estadística de los quarks".
- La teoría fue desarrollada en los años 70 por Gell-Mann



El modelo estándar

- Evidentemente, los quarks no tienen color en sentido literal. Se trata de una analogía.
- Como se sabe, los tres colores fundamentales, rojo, azul y verde, se combinan para dar el blanco. Si todos los quarks se hallan en variedades rojas, verdes y azules (y los antiquarks en sus colores complementarios), la combinación de uno de cada color conduce a la desaparición del color, a la blancura. Cada combinación de quarks en los hadrones tiene que producir un resultado blanco.
- Esto explica por qué hay tres quarks en cada barión y dos quarks (o mejor un quark y un antiquark) en cada mesón.



El modelo estándar

- ¿Qué mantiene unidos a los quarks?
- Entre los quarks actúa la interacción fuerte. Los hadrones experimentan la fuerza fuerte de forma secundaria porque están hechos de quarks. Los piones, que son las partículas de intercambio de esta interacción secundaria de los hadrones, son partículas ellas mismas formadas por quarks. En otras palabras, todo el énfasis de la interacción fuerte fundamental debe ser desviado a los quarks.
- Tiene que existir, por tanto, alguna partícula de intercambio a nivel de los quarks. Fue Gell-Mann quien la llamó gluón, porque era la cola que mantenía unidos a los quarks.



El modelo estándar

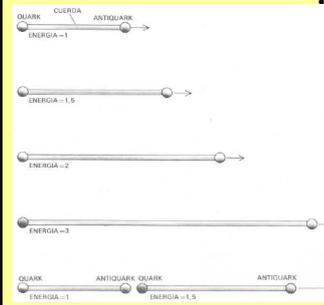
- Durante algún tiempo se intentó observar experimentalmente algún quark aislado, pero todos los intentos fueron infructuosos.
- Una explicación de este fracaso lo da la teoría del **confinamiento**.



El modelo estándar

- Según la teoría del confinamiento, hay algo que impide que los quarks sean extraídos de los hadrones. Se supone que la fuerza que los mantiene unidos es tan fuerte que no puede ser vencida por las energías que seamos capaces de suministrar.
- Los gluones tendrían propiedades inusuales. En el caso de las otras partículas de intercambio, cuanto mayor es la distancia entre partículas sometidas a la interacción, menos serán las partículas de intercambio que saltan entre ellas y más débil es la interacción.
- Las interacciones gravitatorias y electromagnéticas se hacen más débiles según el cuadrado de la distancia. Las interacciones débiles y las interacciones fuertes secundarias entre hadrones declinan en intensidad más rápidamente aún con la distancia.
- En el caso de los quarks y los gluones es al revés. Si intentamos separar dos quarks, el número de gluones que saltan entre ellos se incrementa. Esto equivale a decir que la fuerza de atracción entre los quarks se incrementa con la distancia.

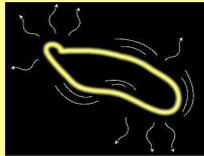
El modelo estándar



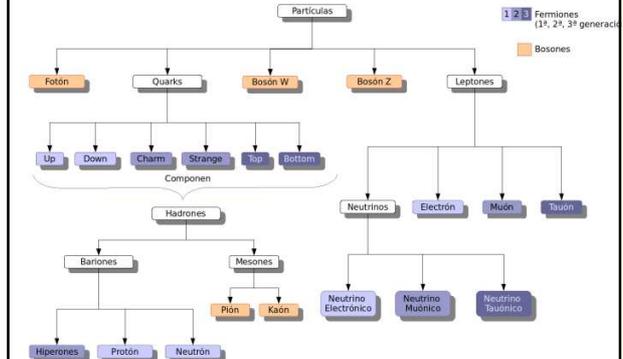
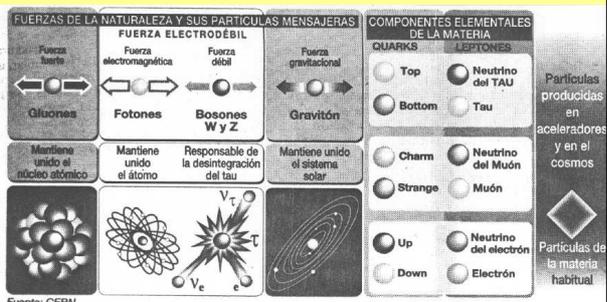
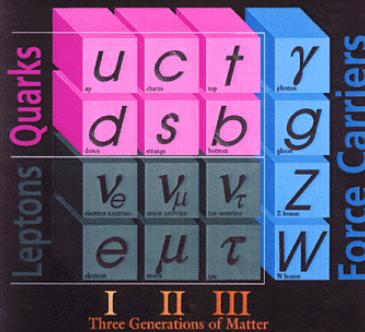
- Una explicación más reciente procedente del aparato matemático de la teoría lleva a imaginar los quarks como si estuvieran ligados entre sí de manera parecida a como están ligados los dos extremos de una goma elástica: por medio de la misma goma. Lo que llamamos un quark sería uno de los extremos de la goma. Es evidente que en esta situación es imposible obtener un quark aislado. Si rompemos la goma para liberar uno de los quark, todo lo que tendremos serán dos trozos más cortos de la goma. Dado que cada trozo tendrá dos extremos, el proceso puede ser interpretado como la creación de un mesón en el laboratorio.

Supercuerdas

- Esta última explicación procede de una nueva propuesta teórica, todavía puramente especulativa: la teoría de las supercuerdas. Sus orígenes se remontan a los trabajos de Gabriele Veneziano en 1968. Predecía además la existencia de partículas más rápidas que la luz (taquiones).
- Pretende ser una Teoría de todo (TOE), intentando, pues, integrar la cuatro fuerzas fundamentales, incluida la gravedad.
- En 1974, John Schwartz y Joël Scherk elaboraron una versión más simple en la que el Universo tiene 10 dimensiones. Las cuerdas serían los constituyentes elementales de la materia. Tendrían un longitud de 10^{-35} m y podrían ser abiertas o cerradas. **Las partículas no serían sino sus diferentes modos de vibración.**
- No ha conducido hasta ahora a ninguna predicción comprobable.



ELEMENTARY PARTICLES



Fuente: CERN

