

7º tema: La ciencia en el siglo XX. 1ª parte

- Las relaciones entre el Estado, la Industria y la Ciencia
- La teoría de la relatividad
- La física cuántica

2 La nueva ciencia. Introducción

- El siglo XX estuvo marcado por
- > dos Guerras Mundiales,
 - > por la guerra fría que siguió a la II Guerra Mundial y el establecimiento de los dos grandes bloques
 - > y por la caída del muro de Berlín y el ulterior desplazamiento de la hegemonía hacia el bloque liderado por Estados Unidos.

3

La nueva ciencia. Introducción (2)

Gracias a unas relaciones cada vez más estrechas entre el Estado, la industria y la ciencia, ésta ha crecido a un ritmo sin precedentes.

Vamos a ver varios aspectos de estas relaciones:

1. La militarización de la ciencia
2. La *nueva* política científica
3. La ciencia y la tecnología
4. Ciencia y sociedad

4 La militarización de la ciencia

La asociación entre la ciencia y la esfera militar

La asociación (que existía desde tiempo atrás) se vio reforzada en la Primera Guerra Mundial.

Destacan artefactos tales como:

- > Tanques,
- > Aeroplanos,
- > Submarinos,
- > Comunicaciones por radio
- > Armas químicas.

El acontecimiento más destacado fue la participación de químicos franceses y británicos en el desarrollo de gases lacrimógenos y de químicos alemanes en el desarrollo del “gas mostaza”.

Se calcula que entre titulados universitarios y diplomados participaron más de 5.500 científicos en las investigaciones sobre guerra química.

5

La militarización de la ciencia (2)

Los físicos tomaron parte particularmente en la elaboración de un sistema de detección antisubmarino, que pasada la guerra, sería conocido como *sónar*.

En 1914 noventa y tres intelectuales alemanes, entre ellos Planck y otros catorce científicos destacados firmaron una declaración tomando partido por su bloque.

Esta declaración provocó hostilidad hacia los científicos alemanes, especialmente entre los franceses. Cuando finalizó la guerra, los científicos alemanes fueron condenados en bloque y marginados de las instituciones y foros internacionales.

6

La militarización de la ciencia (3)

Algunos gobiernos decidieron impulsar la creación de ciertas instituciones que relacionasen la investigación científica y tecnológica y el esfuerzo de guerra.

- > **Gran Bretaña:** Department of Scientific and Industrial Research (1916), compuesto por un gabinete político y otro científico para promover la ciencia y la tecnología nacionales.
- > **EE.UU.:** National Research Council (NRC), como una extensión de la National Academy of Sciences.
- > **Francia:** Institut de la Recherche Scientifique Appliquée à la Défense Nationale y el Centre Nationale de Recherches Scientifiques (CNRS) (1938)
- > **Alemania:** Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft (NGW) (1920), que recibía y distribuía fondos estatales para el sostenimiento y desarrollo de la investigación.

7

La militarización de la ciencia (4)

Estos vínculos entre la ciencia y el mundo militar se consolidaron definitivamente en la Segunda Guerra Mundial.

En EE.UU. se creó en 1940 el National Defense Research Committee, que incorporó destacados científicos y representantes de las fuerzas armadas y del Gobierno.

Durante el año siguiente se incorporó también la investigación médica, y se convirtió en la Office of Scientific Research and Development (OSRC).

- > Se encargaba de la financiación completa de investigaciones contratadas con universidades y empresas, o el establecimiento de nuevos laboratorios cuando era necesario.
- > Entre sus proyectos destacan el Proyecto Manhattan y el radar.

8

La militarización de la ciencia (5)

En 1939 los científicos ya conocían la posibilidad de que una reacción de los átomos de uranio en cadena liberase una gran cantidad de energía.

Alertaron a los políticos de las posibilidades de la fisión nuclear.

En Francia, Rusia y Japón se orientaron las primeras investigaciones hacia la construcción de un reactor nuclear.

En EE.UU. Leo Szilard convenció a varios colegas científicos de que los alemanes podían estar trabajando en la creación de una bomba que emplease esa reacción en cadena.

En agosto de 1939 A. Einstein escribió al presidente Roosevelt alertándole de esta posibilidad.

Roosevelt nombró un comité que informó a favor de la realización de investigaciones más detalladas.

9

La militarización de la ciencia (6)

- El NDRC dirigió estas investigaciones.
- > En el Naval Research Laboratory se orientaron hacia la separación y concentración de los isótopos de uranio.
 - > En la Universidad de Columbia y bajo la dirección de E. Fermi hacia la construcción de un reactor nuclear que emplease el isótopo más fisionable: el U^{235}
 - > En 1941 E. Lawrence y su equipo de Berkeley descubrieron que el plutonio también era un elemento fisionable.

10

La militarización de la ciencia (7)

En Gran Bretaña, otros dos exiliados Otto Frisch y Rudolf Peierls también informaron de las posibilidades bélicas de la fisión.

El gobierno creó el “Comité MAUD” que en 1941 informó de la posibilidad de la creación de la bomba y de la obtención de energía por fisión controlada.

A finales de ese año, los británicos, inmersos en la guerra, habían conseguido darle cierta madurez al proyecto.

Pero entonces la OSRD entra en escena y da un paso definitivo: el proyecto de la fabricación de la bomba se puso en manos del Cuerpo de Ingenieros del Ejercito. Nacía así el Proyecto Manhattan.

11

La militarización de la ciencia (8)

El Proyecto Manhattan:

- > Se desarrolló entre 1942 y 1946.
- > Se invirtió en él 2.000 millones de dólares
- > Implicó físicos de distintas universidades y laboratorios,
- > así como empresas encargadas de la producción de uranio, plutonio y grafito
- > Se construyeron dos plantas para la producción a gran escala y una instalación final para la construcción de la bomba en Los Álamos, dirigida por Julius Robert Oppenheimer.
- > A finales de 1942 el grupo dirigido por E. Fermi conseguía la primera reacción nuclear controlada empleando uranio como combustible y grafito como moderador.
- > El 16 de junio de 1945 se ensayaba con éxito la primera explosión atómica,
- > El 6 y el 9 de agosto se lanzaban dos bombas, una de uranio y otra de plutonio sobre Hiroshima y Nagasaki.

12

La militarización de la ciencia (9)

Alemania también había sostenido un programa atómico, pero lo había llevado a una escala mucho menor y con una organización menos estricta entre los grupos de investigación.

Orientaron las investigaciones hacia la construcción de un reactor nuclear de uranio, que usaría agua pesada (oxígeno y deuterio, un isótopo de hidrógeno de masa 2)

La única fuente de agua pesada estaba en la planta de Vermork de la compañía noruega Norsk Hydro, que obtenía unos 10 kg al mes como un subproducto de la producción de amoníaco para fertilizantes.

13

La militarización de la ciencia (10)

Los franceses, enterados del interés alemán por la producción noruega se anticiparon y compraron toda el agua pesada almacenada.

Cuando los alemanes ocuparon la fábrica en mayo de 1940 la reconvirtieron para la elaboración de agua pesada.

Fue bombardeada por los aliados en noviembre de 1943.

14

La militarización de la ciencia (11)

Una vez finalizada la guerra y con la ocupación de Alemania, el ejército norteamericano recogió toda la información que pudo acerca de los desarrollos científico, tecnológicos e industriales que se había llevado a cabo.

Captó científicos e ingenieros y los incorporó a sus propios programas.

El programa alemán sobre cohetes, encabezado por W. von Braun, que había conseguido un proyectil autopropulsado con carga explosiva capaz de alcanzar Londres, fue continuado en EE.UU. (para lo que siguió contando con von Braun y parte de su equipo).

La Unión Soviética desarrolló programas similares.

15

La militarización de la ciencia (12)

Con la Guerra Fría estas investigaciones constituyeron el germen del programa de misiles y de la carrera espacial.

El primer asalto lo ganaron los Soviéticos con el lanzamiento el 4 de octubre de 1957 del *Sputnik* (83 kg)

Seguido el 3 de noviembre por el *Sputnik II* (508 kg), que lanzó al espacio a la perra Laika.

Los norteamericanos lanzaron su primer satélite, el *Explorer I* de 14 kg el 31 de enero de 1958.

16 La nueva política científica

La intervención del Estado en la gestión de la ciencia implicaba:

- > una orientación de las investigaciones hacia determinados objetivos considerados de utilidad nacional y
- > un cambio en las prácticas científicas.
- > Se produjo un cambio en la orientación del conocimiento científico:
 - > Se paso de un interés por los mecanismos de funcionamiento de la naturaleza, a
 - > Un interés por la predictibilidad y control de la naturaleza.
 - > Los límites entre la ciencia básica y la aplicada se han difuminado.

17

La nueva política científica (2)

Se suele considerar que el origen de la política científica tienen lugar en 1945 cuando Vannevar Bush (presidente del OSRD) presentó un informe al presidente Roosevelt.

En “Science, the Endless Frontier” se defendía que:

- > El Gobierno debía apoyar la ciencia básica para posibilitar el desarrollo tecnológico e industrial.
- > Proponía la creación de una Fundación Nacional gestionada por científicos del mundo académico e industrial.
- > En 1950 se aprobaba la creación de la National Science Foundation (NSF).
- > Nacía a la sombra de otras agencias orientadas hacia las investigaciones militares: la Office of Naval Research y la US Atomic Energy Commission (heredera del proyecto Manhattan).
- > Estas agencias disfrutaron de mayor presupuesto.

18 La nueva política científica (3)

- > En 1953 había casi cien mil científicos e ingenieros trabajando en unas 200 compañías relacionadas con las investigaciones de defensa.
- > A finales de los 60 se constató que las oportunidades de investigación superaban los fondos disponibles:
 - > Era preciso establecer una política de prioridades
- > Se creó la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) que asumió la guía en la elaboración de:
 - > Políticas,
 - > Indicadores de resultados de investigación
 - > Intercambios de información.

19 La nueva política científica (4)

Surge también la “ciencia de la ciencia”: un programa de análisis sobre la nueva ciencia.

En 1963, Derek de Solla Price publicó una obra ya clásica, titulada *Little Science, Big Science*.

- > Solla Price utilizó métodos cuantitativos para caracterizar la transición de la “Ciencia Pequeña” a la “Gran Ciencia”.
- > Por “Ciencia Pequeña” entendía la ciencia practicada hasta la primera mitad del siglo XX,
 - > centrada en los investigadores individuales,
 - > con un número reducido de científicos y
 - > con unos medios técnicos que, salvo excepciones, eran accesibles a cada investigador, utilizando sus propios recursos económicos.

20 La nueva política científica (5)

- > Por “Gran Ciencia” se entiende la ciencia tal como empieza a organizarse en el mundo desarrollado a partir de la Segunda Guerra Mundial,
 - > basada en el precedente del proyecto Manhattan y otros similares.
 - > Una de sus características más notables es, la *gran cantidad de **recursos, actividades y resultados*** científicos que se concentran en ella.
 - > Otra característica es el *acelerado ritmo de **crecimiento*** que presentan todas sus variables características.

21

La nueva política científica (5)

- > Solla Price, sin embargo, demostró que *la pauta normal de crecimiento de las actividades científicas era **exponencial*** y
- > que lo que caracterizaba a la época de la Gran Ciencia es que *el crecimiento exponencial había empezado a **ralentizarse*** como consecuencia de la aproximación a su límite de saturación, para seguir la forma de una curva logística.
- > Si consideramos el número de investigadores científicos, o de revistas científicas, o de descubrimientos reflejados en publicaciones científicas, se observa un crecimiento exponencial que hace que estas magnitudes se dupliquen cada 10 o 15 años.

22

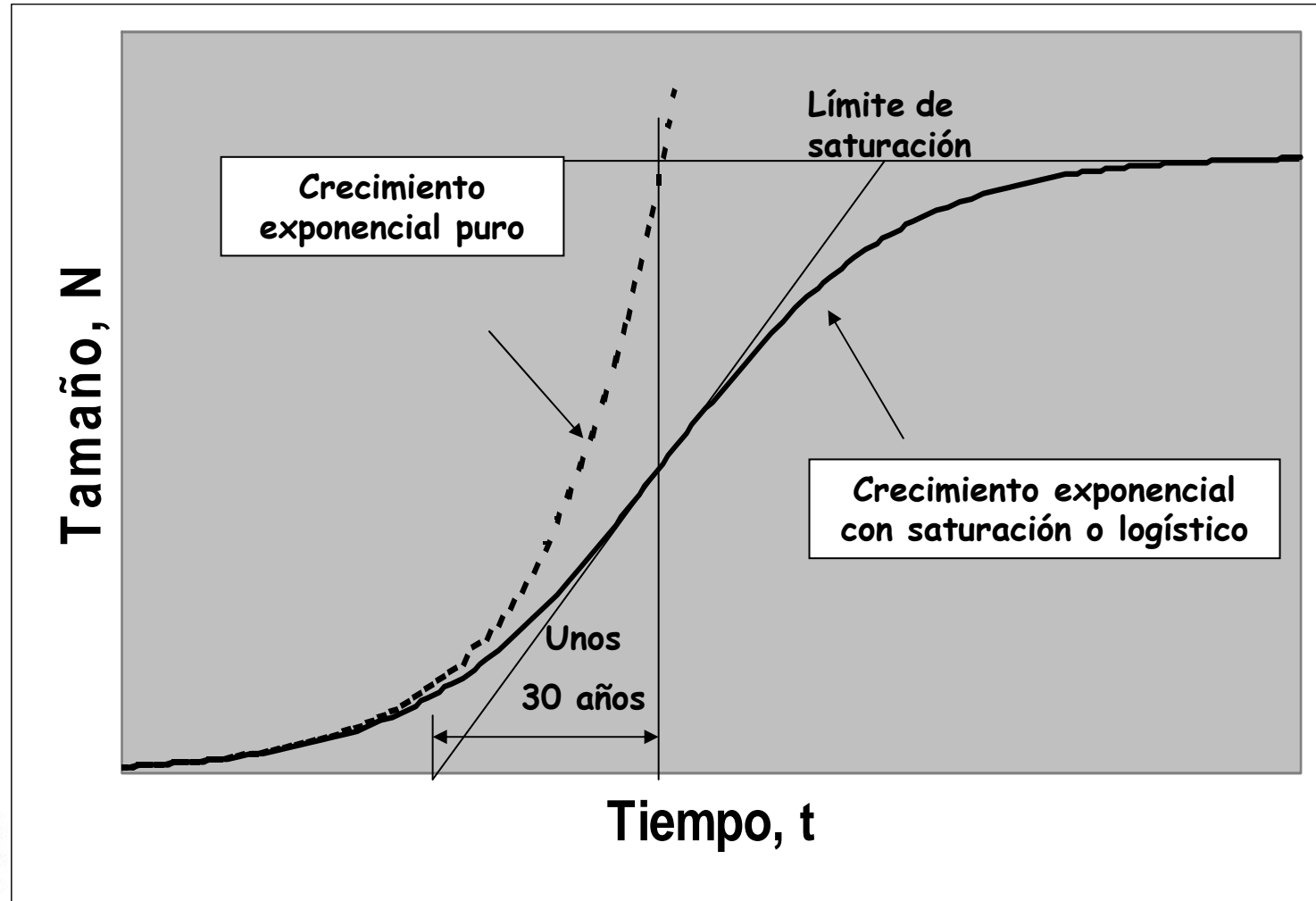
La nueva política científica (6)

- Una consecuencia de esta tasa de crecimiento es el **carácter contemporáneo** de la ciencia:
- > la mitad de los científicos que han existido en toda la historia de la ciencia moderna habrán aparecido en los últimos 15 años.
 - > Teniendo en cuenta que la vida media de un científico es de unos 45 años, Price calculó que en los años sesenta vivían el 87,5 % de todos los científicos que había habido en toda la historia de la ciencia.

23 La nueva política científica (7)

- > El crecimiento exponencial de una variable no puede continuar indefinidamente, porque conduciría a absurdos (tendría que llegar a haber más científicos que habitantes en el planeta, por ejemplo).
- > A medida que una variable que crece exponencialmente se aproxima a su límite **la tasa de crecimiento tiende a oscilar o a disminuir**, adoptando la gráfica de una curva logística.
- > La tesis de Price en 1963 era que la aparición de la Gran Ciencia coincidía con el comienzo de la fase de inflexión de la tasas de crecimiento exponencial y su transformación en un crecimiento logístico.

24 La nueva política científica (8)



25 La nueva política científica (9)

- > Los datos parecen confirmar esta ralentización del crecimiento de la ciencia en el núcleo de los países más avanzados.
- > En los países periféricos el ritmo sigue siendo creciente.
- > Esto permite sugerir que la ciencia del siglo XXI tendrá que encontrar un equilibrio entre recursos y objetivos.

26 La nueva política científica (9)

- > Calculaba que tardaría unos treinta años en llegar al punto central de la curva y otros treinta, aproximadamente en llegar al nivel de saturación.
- > Las consecuencias prácticas de estas ideas de Price son importantes. Durante varios siglos el avance del conocimiento científico ha ido acompañado por un crecimiento exponencial de la actividad científica. En la medida en que este crecimiento se vaya haciendo más lento, ¿cómo afectará al progreso de la ciencia?

Nuevas características del actual modo de hacer ciencia:

- > Deformación de lo que debería ser la carrera científica al inflarse artificialmente el volumen de la investigación:
 1. Fragmentación excesiva de las especialidades.
 2. Incremento exagerado del número de congresos, reuniones científicas y publicaciones.
 3. Mayor competencia entre individuos y grupos de trabajo a parte de su verdadera contribución al progreso científico.

28

La nueva política científica (10)

- > Aparición de campos interdisciplinarios:
 - > Geofísica, geoquímica, astrofísica o bioquímica.
- > Aparición de áreas transdisciplinarias:
 - > Ciencias de la tierra, ciencias medioambientales, ciencias de la salud, o ciencia de los materiales.

29

La ciencia y la tecnología

Las relaciones entre la ciencia y la tecnología se ha complicado notablemente en el siglo XX.

Hasta ese momento predominaba una concepción **lineal** de las relaciones entre la ciencia y la tecnología:

*ciencia básica → ciencias aplicadas → ingeniería
→ innovaciones tecnológicas*

A lo largo de la historia se han producido innovaciones tecnológicas sin que previamente hayan tenido lugar desarrollos en las ciencias básicas.

Los nuevos modelos que dan cuenta de las complejas y variadas relaciones entre la ciencia y la tecnología no pasan por alto los ejemplos históricos.

30 La ciencia y la tecnología (2)

- > Se da el caso de que desarrollos en ciertas técnicas posibilitan la producción de artefactos científicos que contribuyen a la mejora del conocimiento científico.
- > También ocurre que, el desarrollo de ciertos artefactos complejos induce a la búsqueda de explicaciones sobre su funcionamiento.
- > Actualmente se suele preferir hablar acerca de **complejos científico-tecnológicos** para evitar el problema de la demarcación y la determinación de las relaciones.

31

La ciencia y la tecnología (3)

- > Los complejos científico-tecnológicos están marcados por ciertas características:
 - > **Combinación de propósitos de las investigaciones:** búsqueda de explicaciones y búsqueda de resultados útiles que justifiquen las inversiones en los nuevos proyectos de investigación.
 - > **Combinación de diferentes tipos de investigadores:** en los proyectos de investigación se combinan científicos con tecnólogos.
- > Los lugares en los que se produce la ciencia ya no se reducen a las universidades y los centros de investigación públicos: han entrado en escena los laboratorios de las empresas.

En EE.UU la primera empresa en establecer un laboratorio de investigación propio fue *General Electric* en 1901.

En 1907 ya contaba con 45 investigadores (científicos y técnicos)

- > Entre sus tareas no sólo se contemplaba el desarrollo comercial de los productos derivados de la investigación aplicada,
- > Sino también se llevaban a cabo investigaciones básicas con posibles implicaciones industriales.
- > Se integraba así la innovación en la propia empresa: la investigación básica produciría beneficios a medio y largo plazo.

Otro ejemplo es el laboratorio que estableció en 1902 la empresa Du Pont.

Hacia 1940 más de dos mil empresas estadounidenses tenían laboratorios de investigación propios, en los que trabajaban 70.000 científicos, ingenieros y técnicos.

33

Experimento Michelson-Morley

El **experimento de Michelson-Morley** se realizó en 1887 y está considerado como la primera prueba contra la teoría del éter.

El resultado negativo del experimento constituiría la base experimental de la teoría de la relatividad especial.

La teoría física del final del S. XIX postulaba que la luz necesitaba un medio para transportarse (como el aire para el sonido), llamado “éter”.

Como la velocidad de la luz es tan grande, era muy complicado diseñar un experimento para detectar la presencia del éter.

34

Experimento Michelson-Morley (2)

Michelson y Morley se propusieron medir la velocidad relativa a la que se mueve la Tierra con respecto al éter.

Cada año, la Tierra recorre una distancia enorme en su órbita alrededor del Sol, a una velocidad de 30 km/s, más de 100.000 km/h.

Se creía que la dirección del "viento del éter" con respecto a la posición de la estrella variaría al medirse desde la Tierra, y así podría ser detectado.

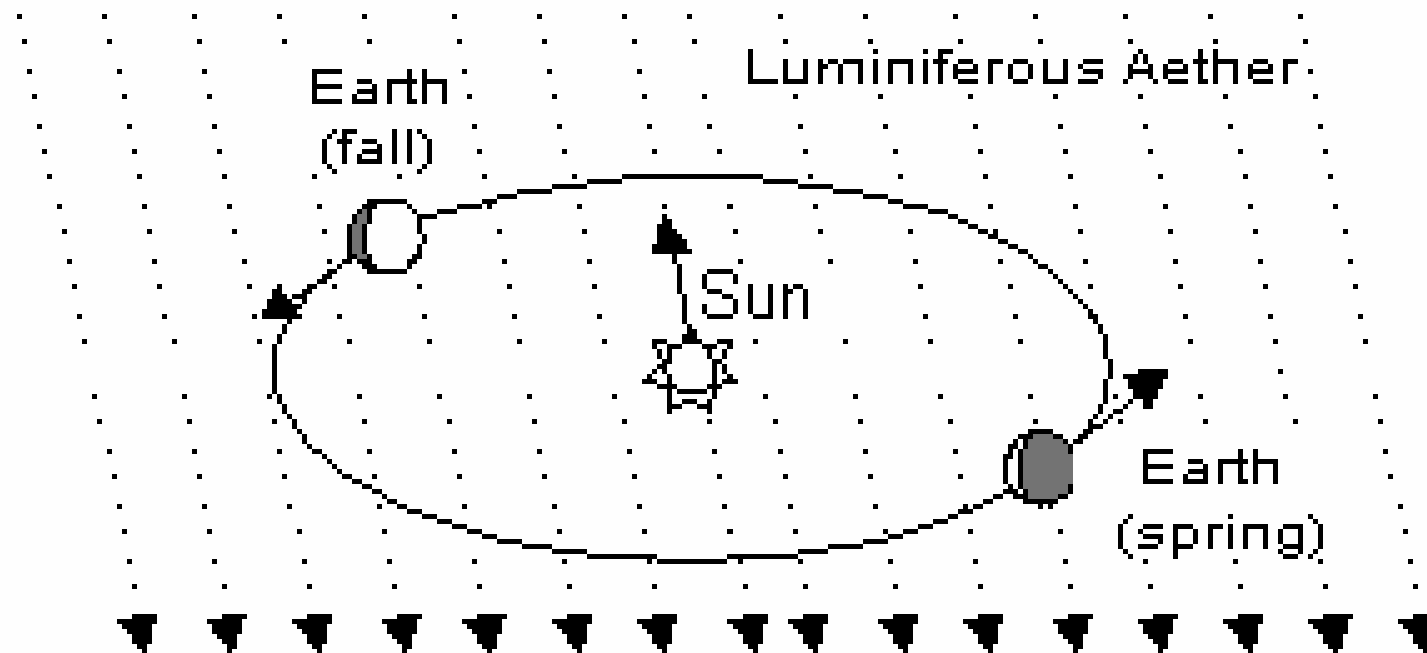
Por esta razón, y para evitar los efectos que podría provocar el Sol en el "viento" al moverse por el espacio, el experimento debería llevarse a cabo en varios momentos del año.

35

Experimento Michelson-Morley (3)

Historia da ciência

A



36

Experimento Michelson-Morley (4)

El efecto del viento del éter sobre las ondas de luz sería como el de una corriente de un río en un nadador

- > que se mueve a favor o en contra de la corriente, o
- > que se mueve atravesando la corriente.

El tiempo invertido en el primer caso sería inferior al tiempo en el segundo caso.

La luz llegaría a la Tierra con diferentes velocidades, en función de la posición que ocupase con respecto al éter.

37

Experimento Michelson-Morley (5)

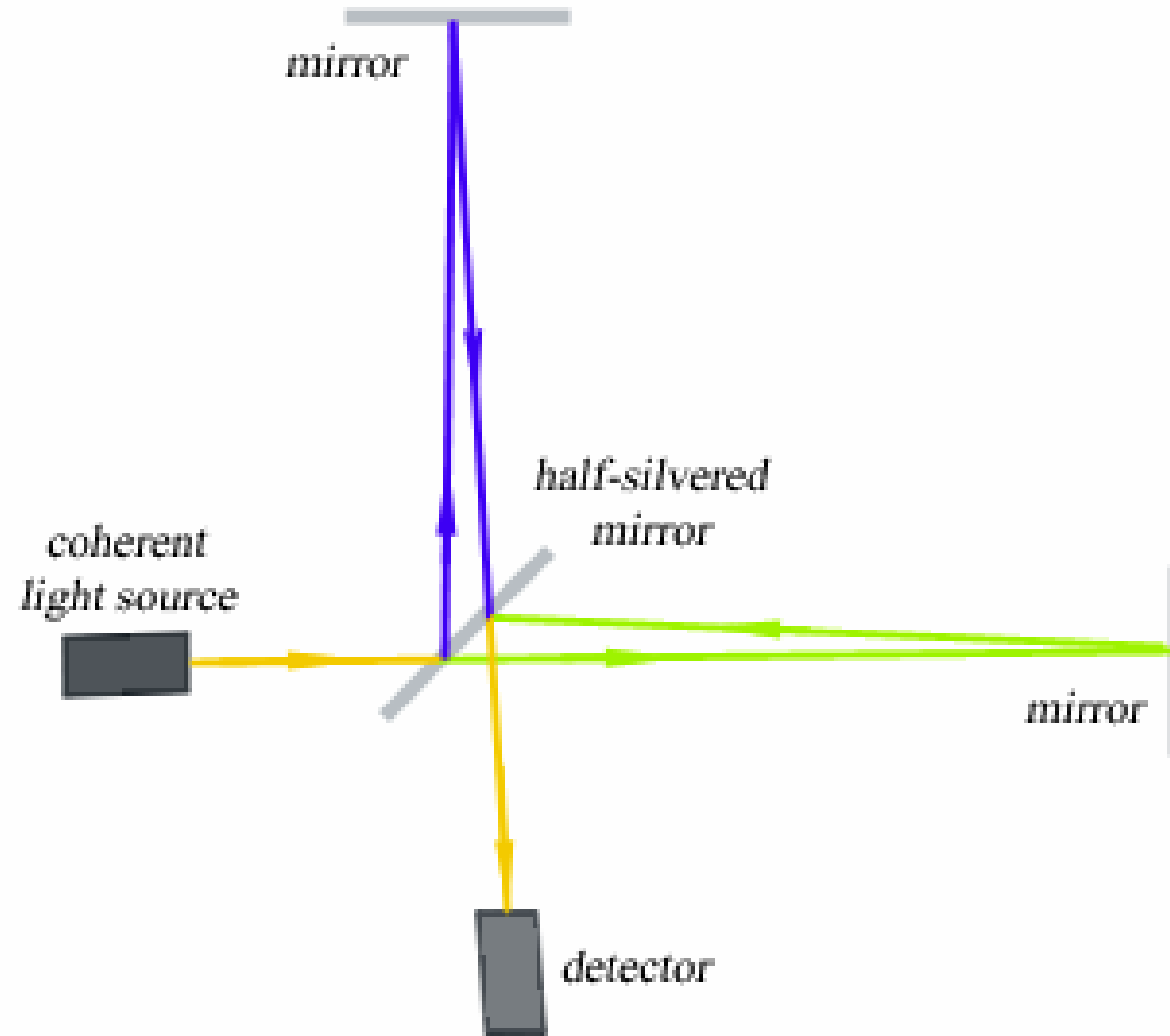
- > En la base de un edificio cercano al nivel del mar, Michelson y Morley construyeron el interferómetro de Michelson.
- > Se compone de una lente semiplataada, que divide la luz monocromática en dos haces de luz que viajan en un determinado ángulo el uno respecto al otro.
- > Al abandonar la división, cada haz se refleja varias veces entre unos determinados espejos (para que tengan más recorrido o camino óptico).
- > Finalmente se vuelven a unir, creando un patrón de interferencia que depende de la velocidad de la luz en los dos brazos del interferómetro.
- > Cualquier diferencia en esta velocidad (provocada por la diferente dirección de movimiento de la luz con respecto al movimiento del éter) sería detectada.

38

Experimento Michelson-Morley (6)

Historia de la ciencia

Ana Cuevas 07-08



39

Experimento Michelson-Morley (7)

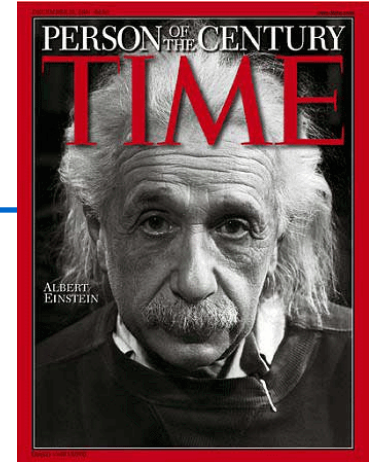
El experimento fue fallido. El aparato se comportó como si no hubiese "viento del éter".

- > no mostró las propiedades del éter,
- > no se produjo ninguna diferencia de velocidad de la luz y,
- > ninguno de los efectos que el "viento del éter" tenía que producir.

Este resultado no podía ser explicado por la teoría de las ondas vigente en la época.

Se intentaron muchas explicaciones, como que la Tierra arrastraba de alguna forma al propio éter, pero todas ellas resultaron ser incorrectas.

40 Teoría de la relatividad especial



Según las leyes de Newton, el tiempo y el espacio son los mismos para los diferentes observadores de un mismo fenómeno físico.

Lorentz, antes de que Einstein hubiese formulado la teoría de la relatividad ya había descubierto que el electromagnetismo no encajaba con la física newtoniana

- > las observaciones de un fenómeno podrían diferir de dos personas si una estuviera moviéndose relativamente con respecto de la otra a velocidades próximas a las de la luz.
- > Así, uno puede observar la inexistencia de un campo magnético mientras la otra observa dicho campo en el mismo espacio físico.

Lorentz sugirió una teoría del éter en la cual objetos y observadores viajarían a través de un éter estacionario,

- > sufriendo un acortamiento físico (hipótesis de contracción de Lorentz)
- > y un cambio en el paso del tiempo.

La presión del éter también ralentizaba el paso del tiempo, de tal modo que la velocidad de la luz respecto al éter (la distancia que recorre un haz de luz dividida por el tiempo que emplea en hacerlo) habría de mantenerse constante, tal y como revelaba el experimento.

La explicación de Lorentz reconciliaba parcialmente la física newtoniana y el electromagnetismo,

- > aplicando la transformación de Lorentz, que vendría a sustituir a la transformación de Galileo vigente en el sistema newtoniano.

La formulación del electromagnetismo frente a las transformaciones de Lorentz fue también estudiada por el físico francés H. Poincaré.

Cuando las velocidades involucradas son mucho menores que c (la velocidad de la luz), las leyes resultantes son en la práctica las mismas que en la teoría de Newton, y las transformaciones se reducen a las de Galileo.

43

Teoría de la relatividad especial (4)

Lorentz sugirió su transformación como una descripción matemática precisa de los resultados de los experimentos.

Einstein derivó dichas ecuaciones de dos hipótesis fundamentales:

- > la constancia de la velocidad de la luz, c ,
- > no existe en el universo un sistema de referencia absoluto, con lo que la pregunta de si un objeto está en reposo o se mueve con velocidad constante carece de sentido.

De esta idea surgió el título original de la teoría, “Teoría de los invariantes”. Fue Max Planck quien sugirió posteriormente el término “relatividad” para resaltar la noción de transformación de las leyes de la física entre observadores moviéndose relativamente entre sí.

44

Teoría de la relatividad especial (5)

Einstein se planteó las siguientes preguntas:

1. ¿Qué ocurriría si descartamos la existencia del éter y asumimos sencillamente que la velocidad de la luz es constante respecto a cualquier sistema de referencia en movimiento uniforme?
2. ¿Cómo habría de cambiar nuestra noción del tiempo y el espacio para acondicionarlas a esa nueva realidad?

45

Teoría de la relatividad especial (6)

La relatividad especial estudia el comportamiento de objetos y observadores que permanecen en reposo o se mueven con movimiento uniforme (i.e., velocidad relativa constante).

En este caso, se dice que el observador está en un *sistema de referencia inercial*.

Einstein postuló que las ecuaciones de Maxwell deben tener la misma forma en cualquier sistema de referencia inercial y que, por lo tanto, es imposible distinguir, a partir de experimentos electromagnéticos, un sistema de referencia inercial de otro.

El *tiempo medido entre dos sucesos depende del movimiento de quien lo mide*.

La comparación de espacios y tiempos entre observadores inerciales puede ser realizada usando las transformaciones de Lorentz.

46

Teoría de la relatividad especial (7)

Invariancia de la velocidad de la luz

- > Para fundamentar la relatividad especial, Einstein postuló que la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores inerciales.
- > También propuso que toda teoría física debe ser descrita por leyes que tengan forma matemática similar en cualquier sistema de referencia inercial.
- > El primer postulado está en concordancia con las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, y
- > el segundo utiliza un principio de razonamiento lógico similar al utilizado por Galileo para formular sus relaciones de transformación entre sistemas de referencias.

47

Teoría de la relatividad especial (8)

Einstein mostró que de dichos principios se deducen las ecuaciones de Lorentz.

Al aplicar las leyes bajo estos principios, la mecánica resultante tiene varias propiedades interesantes:

- > Cuando las velocidades de los objetos considerados son mucho menores que la velocidad de la luz, las leyes resultantes son las descritas por Newton.
- > El electromagnetismo no es ya un conjunto de leyes que requiera una transformación diferente de la aplicada en mecánica.

48

Teoría de la relatividad especial (9)

- > **El tiempo y el espacio dejan de ser invariantes** al cambiar de sistema de referencia, pasando a ser dependientes de las velocidades relativas de los sistemas de referencia de los observadores:
 - > Dos eventos que ocurren simultáneamente en diferentes lugares para un sistema de referencia, pueden ocurrir en tiempos diferentes en otro sistema de referencia (la simultaneidad es relativa).
 - > De igual manera, si ocurren en un mismo lugar en un sistema, pueden ocurrir en lugares diferentes en otro.
- > Los intervalos temporales entre sucesos dependen del sistema de referencia en que se miden (por ejemplo, la célebre paradoja de los gemelos). Las distancias entre sucesos, también.

49 Teoría de la relatividad especial (10)

La **paradoja de los gemelos** es un experimento mental que pretende demostrar que el espacio-tiempo que es capaz de contraerse o expandirse dependiendo del sistema de referencia. En él dos hermanos gemelos tienen una percepción del tiempo diferente.

- > Uno hace un largo viaje a una estrella, y otro se queda en la Tierra.
- > A la vuelta, el gemelo que ha realizado el viaje es más joven que el que se quedó en la Tierra.
- > La explicación se basa en la dilatación del tiempo predicha por la teoría especial de la relatividad.
- > El gemelo que viaja en la nave espacial tendrá una velocidad relativa (supongamos cercana a la luz) respecto a su gemelo en la tierra.
- > El tiempo del gemelo de la nave espacial irá más lento que el que permanece en la Tierra y por tanto **el de la Tierra envejecerá más rápido** respecto a su hermano.

50 Teoría de la relatividad especial (11)

Inexistencia de un sistema de referencia absoluto

Previamente se creía que el universo viajaba a través del éter (identificable como el espacio absoluto) en relación al cual podían ser medidas velocidades.

Sin embargo, los resultados del famoso experimento Michelson-Morley, sugirieron que,

- > o la Tierra estaba siempre estacionaria (lo que es un absurdo),
- > o la noción de un sistema de referencia absoluto era errónea y debía de ser desechada.

Einstein concluyó con la teoría especial de la relatividad que cualquier movimiento es relativo, no existiendo ningún concepto universal de "estacionario".

51

Teoría de la relatividad especial (12)

Einstein demostró que la energía y la masa, anteriormente consideradas propiedades medibles diferenciadas, eran equivalentes, y se relacionaban a través de la ecuación más famosa de la teoría:

$$E = mc^2$$

donde E es la energía, m es la masa y c es la velocidad de la luz en el vacío.

A la velocidad de la luz, la energía será infinita, lo que impide que las partículas que tienen masa en reposo puedan alcanzar la velocidad de la luz.

52 Teoría de la relatividad especial (13)

Esta es una de las principales consecuencias de la teoría: pone un límite superior a las leyes de la Mecánica clásica y la gravedad propuestas por Newton cuando las velocidades se acercan a las de la luz.

Nada que pueda transportar masa o información puede moverse más rápido que dicha velocidad.

Cuando la velocidad de un objeto se acerca a la velocidad de la luz (en cualquier sistema) la cantidad de energía requerida para seguir aumentando su velocidad aumenta rápida y asintóticamente hacia infinito, haciendo imposible alcanzar la velocidad de la luz.

53 Teoría de la relatividad especial (14)

Sólo partículas sin masa, tales como los fotones, pueden alcanzar dicha velocidad (y de hecho deben trasladarse en cualquier sistema de referencia a esa velocidad) que es aproximadamente 300,000 km por segundo.

Se denominan taquiones a las hipotéticas partículas que se podrían mover más rápido que la velocidad de la luz.

Tales partículas tendrían una masa imaginaria (descrita por un numero complejo) y se moverían tanto más rápido cuanto menor fuera su energía.

Aún no se ha hallado evidencia experimental de su existencia.

54

Teoría de la Relatividad General

La **Teoría General de la Relatividad** o **Relatividad General** es la teoría de la gravedad publicada por Einstein en 1915 y 1916.

El principio fundamental de esta teoría es el *Principio de equivalencia* fuerte, que, informalmente, afirma que lo más parecido a un sistema inercial que existe es un sistema en caída libre.

Esto permite describir la aceleración y la sensación de gravedad como aspectos distintos de la misma realidad.

Einstein postuló que no se puede distinguir experimentalmente entre un cuerpo acelerado uniformemente y un campo gravitacional uniforme.

La teoría general de la relatividad permitió fundar también el campo de la cosmología.

55

Teoría de la Relatividad General (2)

En esta teoría, el espacio-tiempo es tratado como una banda Lorentziana de 4 dimensiones que se curva por la presencia de masa, energía y momento lineal.

La relación entre el momento y la curvatura del espacio-tiempo es gobernada por las ecuaciones de campo de Einstein.

En la relatividad general, fenómenos tales como la caída libre, la órbita de un planeta o la trayectoria de una nave espacial, que la mecánica clásica atribuye a la acción de la fuerza de gravedad, son representados como movimientos inerciales en un espacio-tiempo curvado.

El movimiento de objetos influidos por la geometría del espacio-tiempo ocurre en el espacio-tiempo denominado espacio de Minkowski.

56

Teoría de la Relatividad General (3)

Principios fundamentales

- > El principio general de la relatividad: las leyes de la física deben ser las mismas para todos los observadores (inerciales o no).
- > El principio general de covariancia: las leyes de la física deben tomar la misma forma en todos los sistemas de coordenadas.
- > El movimiento inercial se realiza a través de trayectorias geodésicas.
- > El principio de invariancia local de Lorentz: las leyes de la relatividad especial se aplican localmente para todos los observadores inerciales.
- > Curvatura del espacio-tiempo: permite explicar los efectos gravitacionales como movimientos inerciales en un espacio-tiempo curvado.

57

Teoría de la Relatividad General (4)

- > La curvatura del espacio-tiempo está creada por el estrés de la masa y la energía en el espacio tiempo. La curvatura del espacio-tiempo puede calcularse a partir de la densidad de la materia y energía al igual que de las ecuaciones de campo de Einstein.
- > El principio de equivalencia que había guiado el desarrollo inicial de la teoría es una consecuencia del principio general de la relatividad y del principio del movimiento inercial sobre trayectorias geodésicas (recordar las geometrías no euclídeas).

Desarrollo de la teoría

- > La idea fundamental en la relatividad es que no podemos hablar de las cantidades físicas de velocidad o aceleración sin definir antes el sistema de referencia de las mismas.
- > Y dicho sistema de referencia es definido por elección particular.
- > Todo movimiento es definido y cuantificado relativamente a otra materia.
- > Mientras que en la teoría *especial* de la relatividad se asume que los sistemas de referencia pueden ser extendidos indefinidamente en todas las direcciones en el espacio-tiempo.

59

Teoría de la Relatividad General (6)

- > En la teoría *general* se reconoce que sólo es posible la definición de sistemas aproximados de forma local y durante un tiempo finito para regiones finitas del espacio (de forma similar a como podemos dibujar mapas planos de regiones de la superficie terrestre pero no podemos extenderlos para cubrir la superficie de toda la Tierra sin sufrir distorsión).
- > En relatividad general, las leyes de Newton son asumidas sólo en relación a sistemas de referencia locales.
- > En particular, las partículas libres viajan trazando líneas rectas en sistemas inerciales locales (Lorentz).
- > Cuando esas líneas se extienden, no aparecen como rectas, siendo llamadas geodésicas.
- > La primera ley de Newton se ve reemplazada por la ley del movimiento geodésico.

Se distingue entre:

- > *sistemas de referencia inerciales*, en los que los cuerpos mantienen un movimiento uniforme sin la actuación de o sobre otros cuerpos,
- > *sistemas de referencia no inerciales*, en los que los cuerpos que se mueven libremente sufren una aceleración derivada del propio sistema de referencia.

En sistemas de referencia no inerciales se percibe fuerza derivada del sistema de referencia, no por la influencia directa de otra materia.

(Sentimos fuerzas "gravitatorias" cuando vamos en un coche y giramos en una curva.) De forma similar actúan el efecto Coriolis y la fuerza centrífuga cuando definimos sistemas de referencia basados en materia rotando.

El principio de equivalencia en relatividad general establece que no hay gravedad en un sistema de referencia en caída libre.

Desde esta perspectiva, la gravedad observada en la superficie de la Tierra es la fuerza observada en un sistema de referencia definido por la materia en la superficie

- > que es no libre (es ligada) pero es atraída hacia abajo por la materia terrestre,
- > y es análoga a la fuerza "gravitatoria" sentida en un coche dando una curva.

- > La curvatura le dice a la materia como moverse,
- > y la materia le dice al espacio como curvarse.
- > La relatividad general se distingue de otras teorías de la gravedad por la simplicidad de acoplamiento entre materia y curvatura.

Einstein consideró que el universo es estático. Las observaciones realizadas por Hubble una década después confirman que nuestro universo no es estático sino que está en expansión.

63 Teoría de la Relatividad General (10)

Predicciones de la Relatividad General

- > La teoría de la relatividad general fue comprobada por primera vez gracias a la observación de un eclipse total de Sol en 1919 realizada por A. Eddington, que mostraba que la luz proveniente de estrellas lejanas se curvaba al pasar cerca del campo gravitatorio solar alterando la posición aparente de las estrellas cercanas al disco del Sol.
- > Muchos otros experimentos y aplicaciones han demostrado las predicciones de la relatividad general.

64 Mecánica cuántica

La mecánica del mundo de los átomos y las partículas que los constituyen.

La mecánica cuántica es la parte de la física que estudia, el comportamiento de las partículas muy pequeñas.

El concepto de partícula "muy pequeña" atiende al tamaño en el cual comienzan a notarse efectos como la imposibilidad de conocer con exactitud arbitraria y simultáneamente la posición y el momento de una partícula, entre otros.

A tales efectos suele denominárseles "efectos cuánticos".

Así, la Mecánica cuántica es la que rige el movimiento de sistemas en los cuales los efectos cuánticos sean relevantes.

65 Mecánica cuántica (2)

Thompson había notado en sus investigaciones con el **tubo de rayos catódicos** que:

- > los rayos catódicos sufrían desviaciones en presencia de campos eléctricos y magnéticos,
- > por lo que supuso, correctamente, que estaban compuestos de partículas con carga negativa a las que llamó **electrones**.

Debido a que estas partículas debían provenir necesariamente de los átomos del cátodo, este descubrimiento acabó con la antigua idea de la indivisibilidad atómica.

Los átomos eran eléctricamente neutros, por lo que si en su interior existían partículas negativas como el electrón, debía existir también una cantidad igual de carga positiva.

66 Mecánica cuántica (3)

En 1898 Thompson postuló el modelo del “*pastel de ciruelas*” (o *plum cake model*):

- > los electrones estaban dentro del átomo como ciruelas (negativas) incrustadas en una masa esférica de carga positiva.

Rutherford llegó a la conclusión de que el modelo de Thompson no podía ser correcto y que sus resultados sólo eran compatibles con un átomo donde la mayor parte de la masa estuviera concentrada en un pequeño núcleo.

En 1911 dio a conocer el famoso modelo del sistema solar (único compatible con los resultados experimentales) donde los átomos estarían constituidos por un núcleo positivo muy masivo y electrones negativos girando a su alrededor como lo hacen los planetas en torno al Sol.

67

Mecánica cuántica (4)

En 1864 Maxwell había publicado sus famosas ecuaciones.

Una de las consecuencias de las ecuaciones de Maxwell consistía en que una partícula cargada que se moviera con aceleración debía emitir radiación electromagnética

Los electrones están necesariamente acelerados al recorrer su órbita, ya que aunque no experimenten cambio en la rapidez, sí se produce cambio en la dirección dando lugar a una aceleración **centrípeta**.

Según las ecuaciones de Maxwell, los electrones debían estar emitiendo radiación electromagnética constantemente.

68

Mecánica cuántica (5)

Esto creaba una seria objeción al modelo de Rutherford.

Si un electrón está constantemente emitiendo radiación electromagnética entonces también debe estar perdiendo energía constantemente

Pero si pierde energía su órbita no puede mantenerse y en lugar de describir un círculo debería caer en espiral hacia el núcleo.

Si esto fuese cierto todos los átomos del universo colapsarían rápidamente.

69

Mecánica cuántica (6)

- En 1900 Max Planck se encontraba investigando la emisión de radiación por sólidos, en concreto en el caso de un cuerpo negro.
- > Todos los cuerpos emiten esta radiación electromagnética, pero han de estar suficientemente calientes para emitir luz visible.
 - > El espectro de emisión de la radiación de cuerpo negro no podía ser explicado con la teoría clásica del electromagnetismo y la mecánica clásica. Estas teorías predecía una intensidad de la radiación a bajas longitudes de onda (altas frecuencias) infinita.
 - > El problema con el que Planck se encontraba consistía en que si se aplicaban las ecuaciones de Maxwell a la materia resultaba que un cuerpo debía emitir **la misma cantidad de radiación en todas las frecuencias.**

70 Mecánica cuántica (7)

- > Esto no podía ocurrir porque entonces la cantidad de energía emitida tendría que ser virtualmente infinita.
- > Además, si un objeto caliente emitiera con la misma intensidad en todas las frecuencias entonces todos los objetos calientes se verían blancos, y esto no es lo que se observa en la vida real.
- > Los físicos **Rayleigh** y **Jeans** utilizando la teoría clásica habían calculado de manera rigurosa el **espectro teórico** de emisión térmica.
- > Sin embargo, el **espectro experimental** que se obtenía al calentar diversos materiales no guardaba ninguna relación con este espectro teórico.

- > La solución de Planck fue la siguiente:
 - > encontró primero, por tanteo, la formula matemática que mejor reproducía el espectro experimental y
 - > luego dedujo la hipótesis que era necesaria para obtener esa formula analíticamente.
 - > La única hipótesis que necesitaba era que la energía en forma de radiación debía ser emitida o absorbida sólo en paquetes de energía discretos que llamó **quanta** y no en forma continua como se pensaba hasta ese momento.

72

Mecánica cuántica (9)

Einstein empleó la idea de Planck para explicar la naturaleza de la luz en 1905:

- > Enunciando la hipótesis acerca de la existencia de fotones o cuantos de radiación electromagnética.

Volvía a aparecer el carácter corpuscular de la luz.

La radiación electromagnética revelaba un carácter dual:

- > Algunos de sus aspectos (difracción, interferencias) eran de naturaleza ondulatoria, además el experimento de Young demostraba que la luz está formada por ondas.
- > La de otros era de naturaleza corpuscular.

Esto provocó una sensación de crisis en una ciencia que se creía a punto de su unificación.

La mecánica cuántica iba a ser elaborada en este contexto crítico.

73 Mecánica cuántica (10)

- > Durante dos décadas se intentó integrar las nuevas perspectivas en el esquema de la vieja mecánica.
 - > Este fue el sentido de los primeros trabajos de Bohr acerca de la estructura del átomo.
 - > Desde Rutherford el átomo se considera como un sistema solar en miniatura, con los electrones gravitando en órbitas definidas alrededor del núcleo.
 - > Pero sabemos que esta imagen era incompatible con el electromagnetismo clásico.

74 Mecánica cuántica (11)

La órbita de un objeto cualquiera se puede caracterizar por una cantidad llamada **impulso angular orbital** (L) que mantiene un valor constante durante todo el movimiento.

El impulso angular en su forma mas simple es: $L = m r v$, donde m es la masa del objeto, r el radio de la órbita y v la velocidad.

Bohr postuló que el movimiento del electrón debería responder a las leyes de la mecánica clásica pero incluyó en su modelo la restricción de que

- > el electrón no puede tener órbitas de cualquier radio ni moverse a cualquier velocidad.
- > Cada órbita está caracterizada sólo por el numero natural n (1, 2, 3...).

75 Mecánica cuántica (12)

Añadió dos cláusulas:

- > que el electrón no radiaría energía electromagnética al orbitar el núcleo y
- > que sólo podría hacerlo al pasar de una órbita a otra *discontinuuamente*.

El principal problema serio del modelo de Bohr era de corte metateórico:

- > Fallaba en su coherencia, al mezclar una teoría clásica con una serie de postulados extraños.
- > Por otro lado, ¿por qué cuantizar el impulso angular y no la energía, como lo hacía Planck?,
- > ¿qué significaba la frase "pasar *discontinuuamente* a otra órbita"? No se podía entender por qué los electrones debían actuar así.

76 Mecánica cuántica (13)

De Broglie consideró que la dualidad onda-partícula no era una característica solamente de los fotones, sino también del resto de las partículas subatómicas.

Uno de los grandes logros de la teoría de De Broglie fue el explicar de un modo simple las extrañas reglas de cuantización del átomo de Bohr.

En física clásica se considera a la luz como un fenómeno de naturaleza ondulatoria (Young).

Por otro lado las investigaciones de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico habían demostrado que bajo ciertas circunstancias la luz parece constituida por partículas (fotones).

De Broglie se planteó la siguiente pregunta:

- > ¿No sería posible que aquellas entidades consideradas partículas bajo ciertas condiciones mostraran características de ondas?

La luz se comporta como onda al propagarse por el espacio mientras que lo hace como un conjunto de partículas al interactuar con la materia.

Ambas naturalezas nunca se mezclan,

- > se podría decir que la luz es una onda que al interactuar con la materia parece partícula,
- > o bien, que *está constituida* por partículas cuyo movimiento está determinado por las propiedades de ciertas ondas asociadas.

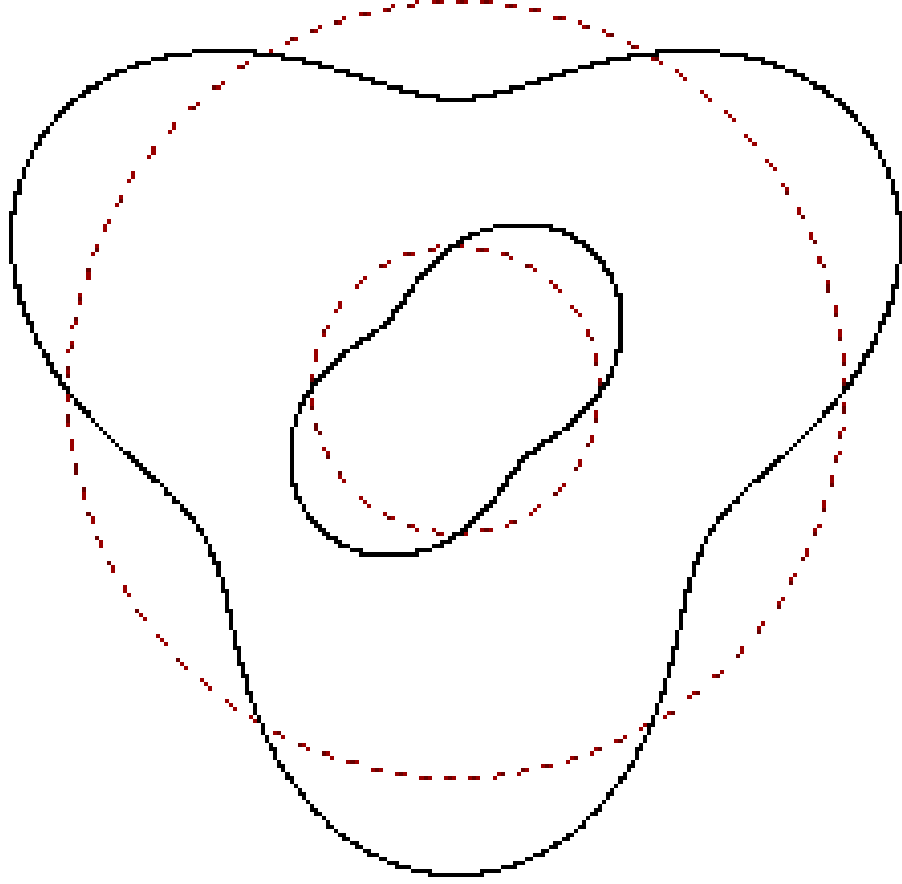
No hay ninguna razón para elegir una de las dos posibilidades.

De Broglie, sin embargo, supuso cierta la segunda posibilidad y analizó la idea de que el movimiento de las partículas estaba gobernado por la propagación de ciertas **ondas piloto** (el nombre con que las bautizó) asociadas.

Historia de la ciencia

Ana Cuevas 07-08

78



79 Mecánica cuántica (15)

En este modelo un electrón era una partícula orbitando alrededor de un núcleo, perfectamente localizable en el punto de la órbita donde se encontrara y poseyendo una velocidad definida (las variables dinámicas clásicas).

La imagen de De Broglie no nos permite determinar dónde está el electrón en su órbita o con que velocidad se mueve.

Pero, ¿que es una onda piloto?, ¿que es lo que vibra?.

En realidad, nada. La interpretación que se hace de esta oscilación es la de una **onda de probabilidad**. Las ondas piloto nos dan la probabilidad de que el electrón (por ejemplo) se encuentre en un punto dado con una cierta velocidad.

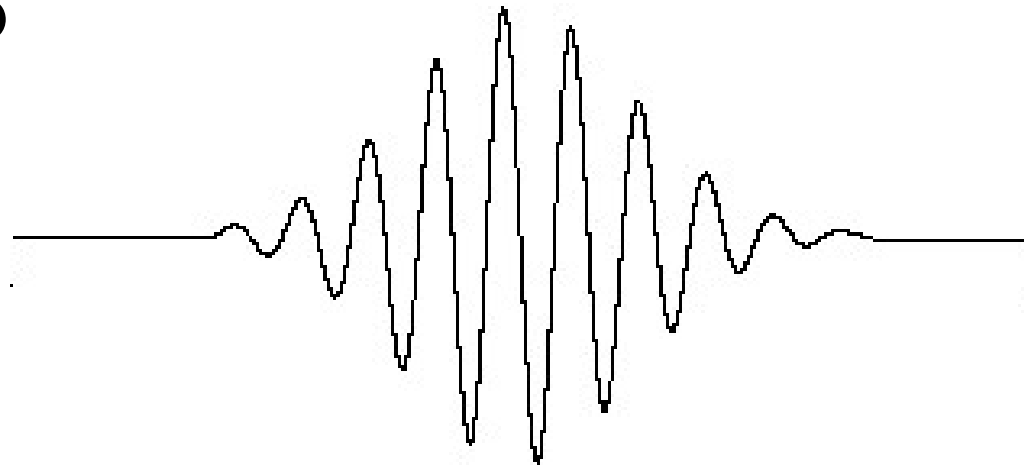
80

Mecánica cuántica (16)

¿Qué le ocurre a un electrón libre?

Si la partícula no está sometida a ninguna fuerza y vaga libremente por el espacio podríamos esperar que su comportamiento fuera, simplemente, el esperable en una partícula clásica.

Las ondas piloto de un electrón libre forman un **grupo**



81

Mecánica cuántica (17)

- > La onda piloto de un electrón en el átomo posee una definida longitud de onda,
- > por el contrario, un grupo de ondas se forma sumando infinitas ondas de longitudes (y por lo tanto frecuencias) diferentes.
- > En casi todo el espacio las ondas sumadas interfieren destructivamente, sólo hay interferencia constructiva en una zona pequeña.
- > Esta sería la localización más probable del electrón.
- > Aún así el electrón no está perfectamente localizado pero sí bastante mejor que dentro de un átomo.

82 Mecánica cuántica (18)

- > Si una onda cualquiera tiene longitud (o frecuencia) bien definidas, esa onda se extenderá por todo el espacio.
- > Si la onda es la suma de muchas ondas de distinta longitud (o frecuencia), de modo que no sea posible definirle una longitud única, su localización en el espacio estará mucho mejor definida.
- > La frecuencia de la onda está asociada a la velocidad de la partícula (también a la energía, impulso...), de manera que:
 - > si conocemos la velocidad de la partícula con bastante precisión perderemos información sobre la posición;
 - > si, en cambio, conocemos bastante bien la posición de la partícula, entonces habremos de renunciar a conocer la velocidad.

83

Mecánica cuántica (19)

- > Este es, más o menos, el **principio de incertidumbre** enunciado por **Heisenberg** en 1927 y deducido a partir de razonamientos con ondas.
- > Este principio impone un límite fundamental a la precisión con que es posible conocer *simultáneamente* la posición e impulso de una partícula.
- > Puede medirse con gran exactitud una de las variables sólo si se aumenta la imprecisión en la medida de la otra.

84 Mecánica cuántica (20)

- > El principio de incertidumbre nos permite explicar **físicamente** el problema del experimento de Young:
 - > Si queremos determinar por cuál de las dos rendijas pasa el electrón estaremos efectuando necesariamente una medición de la posición que tendrá una precisión, por lo menos, del tamaño de una rendija.
 - > La perturbación que producimos entonces, en el impulso, puede calcularse y resulta ser suficiente para destruir el patrón de interferencia.

85 Mecánica cuántica (21)

La propuesta de De Broglie adolecía de un problema. En la mecánica de Newton, donde todas las variables cinemáticas pueden conocerse con precisión arbitraria, existen las llamadas ecuaciones de movimiento que nos permiten determinar la posición, velocidad, etc. de la partícula en cualquier instante de tiempo.

En mecánica cuántica no es posible determinar los valores de estas variables con tanta precisión, por lo que sería absurdo pretender ecuaciones deterministas de movimiento.

Sin embargo era posible una aproximación probabilística dada por las ondas piloto.

- > ¿Cómo se encuentra la forma de las ondas piloto en un caso cualquiera?
- > De Broglie no lo dice. Tampoco aclara como se propagan.

86 Mecánica cuántica (22)

La ecuación para las ondas piloto fue propuesta por **Schrödinger** en 1925.

Cambió el término "ondas piloto" por el de **función de onda** para designar tanto a las ondas mismas como a la función matemática que las representa (la función ψ).

Su teoría fue desarrollada para partículas que viajaran a velocidades **no relativistas** aún cuando la de De Broglie era compatible con la relatividad.

Este descubrimiento supuso un enorme avance para la ciencia, pues proponía un arma analítica muy poderosa para abordar el problema dinámico de las partículas a nivel cuántico en cualquier situación arbitraria.

Con la ecuación de Schrödinger se abría el período de la **moderna teoría cuántica**.

87

Mecánica cuántica (23)

La función de onda no implica una oscilación de nada físico, sino la propagación de probabilidad.

Max Born, en 1926, propuso esta asociación en la forma de un postulado.

Postulado de Born:

si bien no puedo saber con exactitud donde está la partícula antes de medir, conociendo su función de onda puedo asignar una probabilidad a cada punto del espacio que vendrá dada por el cuadrado de la función de onda. Habrá zonas del espacio donde la probabilidad sea muy alta y otras donde sea totalmente despreciable.

Por ejemplo, en el caso de un electrón en el átomo la probabilidad más alta se encuentra en la zona que rodea a las orbitas de Bohr.

Esto no significa que el electrón se encuentre orbitando alrededor del núcleo, no sabemos que está haciendo el electrón, la función de onda no responde esa pregunta.

88

Mecánica cuántica (24)

Estaban sentados los elementos necesarios para el desarrollo de la teoría:

Se fundamentó en una interpretación probabilística, perfectamente corroborada en todos sus campos de aplicación.

La noción de onda no corresponde a ninguna realidad física y no tiene otro significado que el de proporcionar la probabilidad de los resultados de las mediciones.

Las relaciones de no conmutación enunciadas por Heisenberg entre variables conjugadas (por ejemplo, la posición y el impulso de una partícula) le llevaron a enunciar el principio de “incertidumbre” o de “indeterminación”, según el cual es imposible determinar a la vez estas dos magnitudes con precisión absoluta.

89

Mecánica cuántica (25)

- > La mecánica cuántica se apartaba del determinismo clásico, según el cual el estado de un sistema está definido unívocamente por la ecuación de su movimiento y por sus condiciones iniciales.
- > El determinismo en mecánica cuántica no se ocupa de parámetros individuales de partículas, sino de su función de onda, o “vector de estado”:
 - > Las ecuaciones del movimiento y las condiciones iniciales no permiten más que la previsión de probabilidades y de valores medios.
- > Bohr enunció el “principio de complementariedad”, según el cual, la realidad se manifiesta contradictoriamente en representaciones complementarias, ya sean ondulatorias o bien corpusculares.

90

Mecánica cuántica (26)

Una partícula puede encontrarse en diferentes estados cuánticos.

Así como el electrón, en el átomo de Bohr, podía estar en diferentes órbitas caracterizadas por un número natural n ,

cada estado cuántico estará caracterizado por un conjunto de números cuánticos que serán tantos como grados de libertad tenga la partícula

(una partícula en el espacio tiene tres grados de libertad, uno por cada posible dirección de movimiento).

Cada uno de estos estados cuánticos tendrá una función de onda característica.

Por ejemplo, en el átomo de hidrógeno, serían necesarios tres números cuánticos:

1. el numero cuántico principal (**n**) que asigna los niveles de energía,
2. el numero cuántico azimutal (**l**) que asigna los posibles valores de impulso angular y
3. el numero cuántico magnético (**m**) que determina los posibles valores de **momento magnético** de la partícula (una cantidad que caracteriza el campo magnético generado y permite diferenciar las distintas orientaciones de la órbita).

92 Mecánica cuántica (28)

Entre 1922 y 1927 se realizaron varios experimentos con objeto de verificar la validez de las hipótesis cuánticas.

Philips y Taylor (y también Stern y Gerlach) hicieron pasar un haz de átomos de hidrógeno por un campo magnético.

Según la teoría no debía aparecer ninguna desviación en el haz ya que los electrones se encontrarían en su estado base (con momento magnético igual a cero), sin embargo, el haz se separó en dos componentes desviadas simétricamente.

La teoría estaba incompleta.

Los resultados experimentales podían ser explicados si se consideraba que el electrón poseía además del impulso angular orbital, otra variable llamada impulso angular intrínseco o spin.

93

Mecánica cuántica (29)

Si a la función de onda de Schrödinger se agregaba un término que reflejara este impulso angular, la teoría cerraba perfectamente con el experimento.

En 1928 **Paul Adrien Maurice Dirac** desarrolló una teoría relativista de la mecánica cuántica.

Conservó los postulados de Schrödinger exigiendo además que se cumplieran los requisitos de la relatividad de Einstein.

De esta teoría el spin surgía como una consecuencia natural, no se requería ninguna hipótesis adicional.

Según la teoría de relatividad el universo tiene **cuatro dimensiones**. La cuarta dimensión es el **tiempo**.

Dirac encontró que los electrones rotaban y lo hacían *alrededor del eje del tiempo*.

Sentó las bases de la llamada teoría cuántica de campos o teoría cuántica relativista.