

Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias

Jordi Solbes - Vicente Sinarcas

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales.
Universitat de Valencia, España.
jordi.solbes@uv.es

En este trabajo se presenta una propuesta para la enseñanza de la física cuántica que incluye todos los aspectos conceptuales, de procedimiento y de relaciones CTS que es necesario tener en cuenta para conseguir un aprendizaje significativo del alumnado y un cambio de su actitud, como muestra la investigación en didáctica de las ciencias.

Palabras clave: enseñanza, física cuántica, conceptos, procedimientos, actitudes

In this work a proposal is presented for the quantum physics teaching that includes all the conceptual aspects of procedure and STS relations that are necessary to have into account for getting a significant learning of the pupil and a change in his attitude, like investigation in didactics of the sciences shows.

Keywords: teaching, quantum physics, concepts, procedures, attitudes

Introducción

Todos los países avanzados introducen ideas de Física Cuántica en la enseñanza secundaria. En España, los libros de Física y Química de 1º y 2º de Bachillerato incluyen dichas ideas dado que las sucesivas legislaciones, desde la LOGSE¹ (1990) hasta la LOE² (2007) actualmente vigente así lo establecen. También el Polimodal de Argentina incluye ideas básicas de cuántica (Fernandez et al., 1997)

Sin embargo, muchas investigaciones han puesto de manifiesto la existencia de dificultades no superadas que persisten después del proceso de enseñanza aprendizaje de la Física Cuántica (Fischler y Lichtfeldt, 1992; Gil y Solbes, 1993; Solbes, 1996; Petri y Niedderer, 1998; Johnston et al., 1998; Kalkanis et al., 2003; Solbes y Sinarcas, 2009). En España, aunque la situación ha mejorado sensiblemente respecto a la analizada en planes de estudio anteriores (Gil, Senent y Solbes, 1986; Gil y Solbes, 1993), lo cierto es que en los textos actuales (Solbes y Sinarcas, 2009) siguen apareciendo ideas alternativas. Así, por ejemplo, se considera el electrón como una onda o como una partícula. Otros, en los que también se in-

cluyen algunos textos de Física y de Química de primer curso de universidad, hablan de una manera poco clara de la dualidad, como si el electrón fuese onda “y” corpúsculo o como si fuese una onda “asociada” a una partícula. Son muy pocos los que clarifican que los electrones, fotones, etc., no son ni ondas ni partículas clásicas sino objetos de un tipo nuevo. En cuanto a las relaciones de indeterminación, algunos parecen atribuir las a una falta de precisión de los instrumentos mientras que otros dichas relaciones representan un impedimento real para medir con precisión. En cuanto al orbital atómico, se considera que es una zona del espacio que los electrones pueden ocupar, o que el átomo está constituido por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones, es decir, la idea del “orbital estantería” que existe independientemente de los electrones. Tampoco se tienen en cuenta las diferencias entre la Física Clásica y la moderna y, en algunos casos, ni siquiera se explicitan los límites de validez de la primera.

En este tema las ideas alternativas tienen su origen en la enseñanza, bien porque se introducen explícitamente interpretaciones in-

¹ LOGSE (1990) Ley de Ordenación General del Sistema Educativo, España, 1990

² LOE (2007) Ley Orgánica de Educación, España, 2007.

correctas que, en parte, coinciden con las que se cometieron en el desarrollo histórico de la Física moderna, bien porque no se muestra la contradicción entre las nuevas ideas y las clásicas y, en consecuencia, los estudiantes siguen utilizando éstas (Solbes, 1996). Así, por ejemplo, muchos alumnos consideran el electrón como un corpúsculo, limitan la dualidad a la luz o asocian la onda al movimiento (“el movimiento lleva asociada una onda”). Otros afirman que “el electrón no se puede localizar con precisión”, cuando en realidad cada magnitud característica de los fenómenos atómicos puede ser medida con tanta precisión como queramos. La imposibilidad se refiere a la determinación simultánea con precisión absoluta de dos magnitudes conjugadas. Algunas de estas ideas persisten en los estudiantes universitarios (Solbes et al, 1988).

Sin embargo, en investigaciones recientes (Solbes y Sinarcas, 2009) parece que la principal dificultad que tienen los alumnos en el aprendizaje de la Física Cuántica es ontológica: no son capaces de comprender que los electrones, fotones, etc., no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el cuántico. De esto ya advierten historiadores de la ciencia como Kragh (2007): *“A escala ontológica, los cambios han sido sin duda muy profundos, en la mayor parte como resultado de la revolución cuántica... La mecánica cuántica nos ha proporcionado estructuras fundamentales que no tienen similitud ninguna con todo lo que puede ser percibido o medido directamente. Nuestras creencias actuales sobre lo que en última medida constituye el mundo distan mucho de las de la década de 1890, cuando todavía tenía sentido pensar en la materia como una colección de bloques en miniatura.”*

Por otra parte, dichas investigaciones (Solbes y Sinarcas, 2009) muestran que también pueden aparecer dificultades epistemológicas, relacionadas con lo que se puede o no conocer y, por lo tanto, con las relaciones de indeterminación de Heisenberg y con la interpretación probabilista.

En la literatura se proponen varios posibles caminos para introducir la materia: el axiomático, el histórico y el empírico. El primero sólo

se utiliza a nivel universitario. El método empírico consiste en introducir las ideas cuánticas, mediante una serie de experimentos. Es muy usado en los países anglosajones. El ejemplo más conocido es Feynman (1971) que introduce la Física Cuántica a partir de la difracción de electrones. El histórico (Holton, 2004) es el más utilizado en España y consiste en presentar de una forma más o menos cronológica las contribuciones de Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger y Born.

Sin embargo, esta forma simplemente histórica de introducir los conceptos tiene algunos inconvenientes que conviene poner de manifiesto. En primer lugar, se introducen las nuevas ideas, en particular desde Planck hasta De Broglie, tal y como se hizo en los orígenes de la Física Cuántica, sin tener en cuenta los desarrollos posteriores de estas ideas (por ejemplo, limitar a los átomos la idea de órbitas estacionarias, no introducir la interpretación probabilista para los fotones, etc.) ni sus relaciones con los principios de la Física Cuántica. Por otra parte, con este método correspondería cronológicamente comenzar con la teoría de Planck, lo cual no parece conveniente didácticamente para los niveles medios por la gran dificultad que supone (conocimientos de Electromagnetismo y Física estadística) y porque Planck no concibe la expresión $h\nu$ como cuanto de radiación electromagnética.

Por ello, para introducir el tema proponemos, en primer lugar, unos objetivos básicos que permitan el aprendizaje integrado de conceptos, procedimientos y actitudes, teniendo en cuenta las dificultades puestas de manifiesto por la investigación en didáctica de las ciencias que pueden obstaculizar su logro (Solbes y Sinarcas, 2009). (Cuadro 1)

Se ha planteado un tema que incluye todos los aspectos conceptuales, de procedimiento y de relaciones CTSA, etc., ya que como pone de manifiesto la investigación en didáctica de las ciencias, hay que tenerlos en cuenta para conseguir un aprendizaje significativo del alumnado y un cambio de actitud. A nivel conceptual, teniendo en cuenta el currículo oficial, los resultados de la investigación didáctica y el desarrollo histórico de la cuántica, proponemos iniciar el estudio de los fenómenos cuánticos con dos

Cuadro 1. Objetivo de la propuesta y dificultades detectadas

OBJETIVOS	DIFICULTADES
1. Comprender que la Física Clásica(FC) funciona con los modelos de partícula y onda, deterministas, que no pueden explicar una serie de experiencias	No ven la Física Cuántica como un cambio necesario frente a los inconvenientes de la newtoniana
2. Explicar la cuantificación de la luz, la materia y determinadas magnitudes (E; L...)	No saben relacionar un salto de un electrón entre 2 niveles con la correspondiente banda de color del espectro del átomo
3. Comprender que los electrones, protones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el cuántico	Representan al fotón y electrón como partículas clásicas (con trayectorias u órbitas) Interpretan erróneamente la dualidad (ondas y partículas, ondas o partículas según la experiencia).
4. Comprender la función de estado ψ y su interpretación probabilista	No tienen una imagen clara de qué representa la ψ y, por lo tanto, un orbital
5. Entender el significado de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg	Interpretan las relaciones de incertidumbre como un error en la medida por la pequeñez del electrón, el protón, etc. Mantienen el determinismo o las órbitas clásicas
6. Señalar los límites de validez de la FC e indicar las diferencias más notables entre FC y Física Cuántica(FQ)	No tienen claros los límites de la Física Clásica ni las diferencias con la cuántica porque no ven la física cuántica como un cambio frente a la newtoniana
7. Familiarizar con los métodos de trabajo de los científicos	Desconocen los procedimientos implicados y, en particular, qué hacer cuando no coincide lo predicho por la teoría, con los resultados del experimento.
8. Valorar el importante desarrollo científico y técnico que supuso la FQ	No ven las conexiones de la cuántica con la tecnología y la sociedad

de los problemas que originaron la crisis de la Física Clásica: el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos. El procedimiento sería mostrar cómo el efecto fotoeléctrico no puede ser explicado por la teoría electromagnética, por lo que se requieren nuevas hipótesis sobre la naturaleza de la luz que rompen con la teoría clásica. Es conveniente iniciar aquí a los alumnos en la idea de dualidad, para que no incurran en el error de reducir el fotón a su aspecto corpuscular volviendo a las concepciones de Newton. También es necesario recalcar la cuantificación de la energía, que se plantea por primera vez.

A continuación, se debe resaltar la potencia del concepto de fotón, aplicándolo a nuevos fe-

nómenos como el efecto Compton (que sólo se aborda a nivel cualitativo) y los espectros discretos, para evitar la visión simplista de que las teorías se abandonan a consecuencia de unos pocos resultados negativos. En ambos casos es necesario mostrar cómo la Física Clásica era incapaz de explicarlos. Al introducir el modelo de Bohr es necesario insistir en la cuantificación de la energía y del momento angular y en la idea de estado estacionario.

La dualidad muestra que los electrones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos (los cuantos) con un comportamiento cuántico (Feynman, 1971; Balibar y Levy-Leblond, 1984). En consecuencia, se cumplen en este caso las relaciones de

indeterminación y se hace necesario un nuevo modelo para describir el estado y evolución de los cuantos, distinto de los utilizados para las partículas y ondas clásicas: *la función de ondas y su interpretación probabilista*. Este concepto permite criticar algunas ideas erróneas sobre la noción de orbital atómico. Para finalizar es muy adecuado realizar un resumen de las diferencias más notables entre Física Clásica y Moderna, mostrar los límites de validez de la Física Clásica y resaltar las grandes posibilidades de nuevos desarrollo científicos y tecnológicos que abrió la nueva Física.

Conviene hacer notar cómo las ideas introducidas de cuantificación, comportamiento cuántico de los fotones, electrones, etc. (cuantos) y probabilismo, constituyen las principales características de la Física Cuántica y permiten dar respuesta a sus preguntas básicas: ¿cómo se define el estado de un sistema y qué magnitudes lo caracterizan?, ¿cuáles son los valores posibles de cada magnitud?, ¿cuál es la probabilidad de encontrar cada uno de esos valores si se realiza una medida? y ¿cómo evoluciona el estado del sistema en el tiempo?

Dada la dificultad de realizar en este tema trabajos prácticos como pequeñas investigaciones, se propone aquí la utilización de una simulación del profesor Franco (2006) que contiene importantes ingredientes de los mismos como control de variables y realización de gráficas, o la presentación de un video sobre la difracción de electrones. También se observarán espectros de emisión.

Asimismo, se aplican los conceptos introducidos a la comprensión de problemas de relevancia tecnológica, social y ambiental (relaciones CTSA) (Solbes y Vilches, 1997), en particular, las múltiples aplicaciones de la Física Cuántica (del efecto fotoeléctrico, el microscopio electrónico, el láser, la microelectrónica, etc.), ya que como señala Han (1992) todas las nuevas tecnologías son cuánticas, así como las implicaciones de la microelectrónica en la sociedad o el contexto político y social en el que se desarrolla la cuántica. Estas actividades no son complementarias, como aparecen en la mayoría de los textos, sino que se integran en el desarrollo del tema.

En esta propuesta los estudiantes, trabajan-

do en pequeños grupos, abordan las diferentes actividades bajo la dirección del profesor, quien realiza reformulaciones de las aportaciones de los grupos y añade información que puede ser mejor asimilada al responder a cuestiones que los estudiantes se han planteado previamente. Los materiales presentados corresponden al último curso de la enseñanza secundaria (estudiantes de 17 años) y han sido probados por los autores, con buenos resultados que se publicaran próximamente. A continuación, la presentación de la propuesta.

LA FISICA CUÁNTICA. Presentación del Curso

La crisis de la Física Clásica, que tiene lugar a comienzos del siglo XX, está relacionada con la imposibilidad de detectar un sistema de referencia en reposo absoluto –tema desarrollado en un capítulo anterior– y con problemas vinculados a la emisión y absorción de ondas electromagnéticas que, en forma coincidente, iban a exigir un cambio profundo en las concepciones clásicas.

Dichos problemas son: el efecto fotoeléctrico -liberación de electrones por superficies iluminadas- y los espectros discontinuos de los gases. Un tercer problema presente –aunque su mayor complejidad no recomienda su estudio a este nivel–, es el relativo a la interpretación de los espectros continuos emitidos por sólidos y líquidos incandescentes.

Estas cuestiones originaron la crisis de la Física newtoniana, marcando sus límites de validez y poniendo en evidencia la necesidad de profundos cambios en ella. Aunque los primeros cambios aparecen históricamente como retoques, es decir, como hipótesis parciales que rectificaron el edificio teórico existente, pronto se vio la necesidad de un replanteamiento global, elaborándose un nuevo marco conceptual que conocemos como Física Cuántica. De acuerdo con ello desarrollaremos el tema según el siguiente hilo conductor:

1. Efecto fotoeléctrico: los fotones
2. Espectros atómicos y el modelo de Bohr
3. De Broglie y la difracción de electrones

4. Las relaciones de indeterminación de Heisenberg
5. La función de ondas y los niveles de energía
6. Aplicaciones de la Física Cuántica
7. Recapitulación de la Física moderna

1. El Efecto Fotoeléctrico: los fotones

Conviene iniciar el tema abordando el estudio de algunos problemas que a fines del siglo pasado quedaban pendientes de solución en el marco casi acabado de la Física Clásica. En particular, el efecto fotoeléctrico y los espectros atómicos requieren explicación.

En 1886 y 1887 H. Hertz llevó a cabo los experimentos que por primera vez confirmaron la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por la teoría electromagnética de Maxwell. En el curso de estos experimentos Hertz descubrió que una descarga eléctrica ocurría más fácilmente entre dos electrodos cuando llegaba luz a uno de ellos.

Actividad 1. *A título de hipótesis tratar de dar alguna explicación del fenómeno observado por Hertz, es decir, del hecho de que se produce más fácilmente la descarga de un electrodo cuando se ilumina.*

Conviene ahora hacer operativas las ideas expuestas en la actividad anterior.

Actividad 2. *Partiendo de la teoría de Maxwell que concibe la luz como una onda electromagnética -que como tal onda, lleva distribuida uniformemente su energía-, considerar, a título de hipótesis, la influencia de la frecuencia y de la intensidad luminosa sobre la emisión de electrones (la cantidad de electrones emitidos por segundo, su energía cinética, el tiempo que tardaran en ser emitidos...). Analizar el efecto de cambiar el metal.*

Comentarios para el profesor

- En la Actividad 1 los alumnos señalan que la luz facilita la descarga al hacer que se emitan electrones de la superficie del cátodo. Esto es debido a que los electrones adquieren energía cinética al recibir la energía transferida por la onda luminosa.
- La Actividad 2 tiene como objetivo el que los alumnos hagan predicciones sobre lo que debería suceder en el efecto fotoeléctrico de acuerdo con la Física Clásica, para que posteriormente lo contrasten con lo que realmente sucede.
- El profesor completará las predicciones de la Física Clásica indicando lo siguiente: a) la energía cinética de los electrones liberados dependerá de la intensidad de onda y de la frecuencia, b) existirá un tiempo de retardo entre el choque de la luz sobre la superficie y la emisión del electrón porque, como la energía de la luz está distribuida uniformemente en el frente de onda, es necesario un intervalo de tiempo -menor cuanto más intensa sea la onda- durante el cual el electrón está absorbiendo energía de la luz hasta que acumula la suficiente para escapar y c) para un metal dado, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir para cualquier frecuencia de la luz, con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa o dure el tiempo suficiente para que proporcione la energía necesaria para expulsar a los electrones.

Veamos a continuación que los resultados experimentales contradicen las hipótesis emitidas en la actividad anterior. Básicamente estos resultados pueden resumirse como sigue:

- Para un metal dado, el efecto fotoeléctrico sólo se presenta por encima de una cierta frecuencia umbral ν , sea cual sea la intensidad luminosa.
- Si la frecuencia ν se mantiene constante por encima de un valor mínimo ν_0 , el número de electrones crece con la intensidad luminosa, pero no ocurre así con la energía cinética de dichos electrones que se mantiene constante.
- La energía cinética de los electrones aumenta linealmente con la frecuencia ν a partir de un valor umbral ν_0 característico de cada metal de acuerdo con la Figura 1.
- La emisión de electrones es prácticamente instantánea.

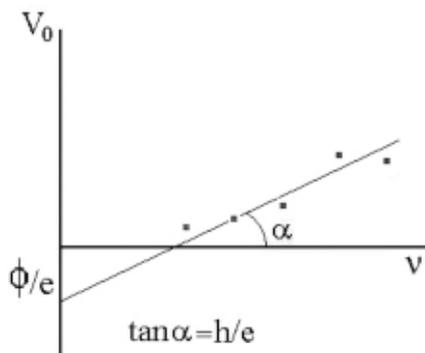


Figura 1. Gráfica del potencial de frenado ($V_0 = E_c/e$) de los electrones en función de la frecuencia. Extrapolando, la intersección con el eje de abscisas nos da el trabajo de extracción por unidad de carga.

Actividad 3. Analizar los resultados experimentales anteriores señalando cuáles contradicen la teoría clásica de la radiación como onda electromagnética que se distribuye uniformemente por el espacio. Extraer conclusiones sobre la naturaleza de la luz.

Comentarios para el profesor

La Actividad 3 es crucial para los alumnos porque al contrastar las hipótesis de la actividad anterior, basadas en la Física Clásica, con los resultados experimentales, se comprueba que las predicciones clásicas no pueden explicar dichos resultados. Así, de acuerdo con la Física Clásica, el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a cualquier frecuencia con la única condición de que la luz sea lo bastante intensa o dure el tiempo suficiente para que proporcione la energía necesaria para expulsar a los electrones, lo que contradice el primer resultado. Por otra parte, la energía cinética de los electrones debe aumentar al hacerse más intenso el haz de luz, en contra del segundo y tercer resultado. Para finalizar, la emisión instantánea no se puede reconciliar, como se ha visto, con la idea de onda que se distribuye uniformemente por el espacio.

Actividad 4. Sugerir alguna nueva hipótesis sobre el comportamiento de la luz, capaz de interpretar los resultados experimentales relativos al efecto fotoeléctrico. En particular se trata de explicar con dicha hipótesis:

- por qué dicho efecto sólo se presenta para frecuencias de la luz superiores a un valor umbral, distinto para cada metal.
- por qué la energía cinética de los electrones liberados es siempre la misma para una frecuencia $\nu = \nu_0$ dada, sea cual sea la intensidad luminosa.
- por qué la emisión de electrones es prácticamente instantánea y su número aumenta al hacerlo la intensidad, manteniendo la frecuencia constante.

Comentarios para el profesor

La Actividad 4 pretende que los alumnos comprendan por qué Einstein en 1905 se vio en la necesidad de considerar que la luz, fenómeno tradicionalmente etiquetado como ondulatorio, manifestaba un comportamiento corpuscular. Por ello, introdujo la hipótesis del fotón.

Con esta nueva hipótesis puede darse una explicación a los diferentes resultados experimentales. En efecto, cada fotón incidirá individualmente sobre un punto de la superficie metálica, arrancando un electrón sólo en el caso de que su energía $h\nu$ sea superior a la atracción de los iones positivos del metal, denominada trabajo de extracción. Ello explica que el efecto fotoeléctrico no se presente por debajo de una frecuencia umbral y no aumente el número de electrones emitidos, aunque aumente la intensidad luminosa $I = n\nu h$, siendo ν el número de fotones incidentes. También explica que la energía cinética sea independiente de la intensidad y crezca, por contra, con la frecuencia. El hecho de que la emisión de electrones sea prácticamente instantánea se puede justificar con dicha hipótesis.

Einstein en su trabajo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico planteó la hipótesis de que las ondas electromagnéticas son una distribución de cuantos o “partículas de luz” - posteriormente fotones - cada uno de los cuales po-

see una energía proporcional a la frecuencia, $E = h\nu$, en donde h es una constante cuyo valor es $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js, denominada constante de Planck, introducida por este físico en 1900 al explicar los espectros continuos de sólidos y líquidos incandescentes, tema que por su complejidad no se aborda en este nivel.

Actividad 5. Calcular el número de fotones por segundo y m^2 a una distancia de 1 m de una bombilla de 100 W, suponiendo una longitud de onda media de 550 nm. Ídem para la luz del Sol, sabiendo que cuando llega a la Tierra tiene una intensidad de unos 1400 W/m^2 , valor denominado constante solar.

Actividad 6. Siendo ν la frecuencia de la radiación (superior a la frecuencia umbral ν_0 necesaria para que se presente el efecto fotoeléctrico), escribir, de acuerdo con la hipótesis anterior, una ecuación que ligue la energía del fotón incidente con la energía cinética del electrón liberado.

Actividad 7. El trabajo de extracción para el sodio vale $3,65 \cdot 10^{-19}$ J. Calcular la energía cinética de un electrón emitido por una superficie de sodio, cuando se ilumina con una luz de longitud de onda: a) $4,1 \cdot 10^{-7}$ m, b) $5,5 \cdot 10^{-7}$ m.

Comentarios para el profesor

La Actividad 5 permite comprobar el gran número de fotones, por unidad de superficie y de tiempo (es decir, por metro cuadrado y por segundo) que constituyen la radiación electromagnética, lo que explica su apariencia continua.

La Actividad 6 pretende llevar a los alumnos a la ecuación fotoeléctrica de Einstein, deducida en 1905

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

en la que h representa la energía del fotón incidente, Φ el trabajo de extracción y E_c la energía cinética máxima del electrón liberado.

Cuando $\nu = \nu_0$, la $E_c = 0$ y, por tanto, $\Phi = h\nu_0$ lo que nos da otra expresión para la ecuación de Einstein

$$E_c = h(\nu - \nu_0)$$

La Actividad 7 brinda un espacio para consolidar el manejo de las ecuaciones en ejemplos concretos y discutir por qué el valor de E_c representa la energía cinética máxima (algunos electrones pueden tener una energía menor debido a la pérdida que experimentan al atravesar el metal).

La hipótesis de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico fue confirmada en 1915 por el físico americano R. A. Millikan cuyos experimentos posibilitaron uno de los procedimientos para determinar la constante de Planck h .

El efecto fotoeléctrico se puede observar fácilmente utilizando una célula fotoeléctrica. Se trata de un tubo de vidrio en el que se ha hecho el vacío, con una placa metálica y un electrodo menor llamado colector.

La energía cinética máxima de los electrones emitidos por la placa metálica iluminada puede medirse utilizando una fuente de tensión variable. Si se conecta la placa de la célula fotoeléctrica al polo positivo de la fuente y el colector al polo negativo, no todos los electrones emitidos por la placa llegarán al colector. Al aumentar la tensión de la fuente disminuirá el número de electrones que alcanzan el colector. Para una tensión determinada, llamada *potencial de frenado*, no llegará ningún electrón lo cual puede ser detectado por un amperímetro colocado en el circuito.

Actividad 8. Utilizar la siguiente simulación para obtener la gráfica del efecto fotoeléctrico variando la intensidad y longitud de onda de la luz, la diferencia de potencial y el trabajo de extracción. Determinar la pendiente de la recta resultante. <http://www.sc.edu/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>

Actividad 9. Indicar aplicaciones del efecto fotoeléctrico.

Comentarios para el profesor

Dado que en Física Cuántica es muy difícil realizar trabajos prácticos en los centros de secundaria, salvo el análisis de espectros, se propone aquí utilizar una excelente simula-

ción del profesor Franco (2006), que contiene importantes ingredientes de los mismos, como control de variables y realización de gráficas. Entre las aplicaciones de las células fotoeléctricas cabe mencionar las alarmas antirrobo y la apertura electrónica de puertas. Muchos detectores de humos se basan en el mismo hecho: se interrumpe el paso de la luz, lo que produce una caída de corriente que activa el interruptor. También utilizan este circuito los fotómetros de los fotógrafos y otros dispositivos para medir la intensidad de luz, p.ej., los espectrofotómetros. Finalmente, un tipo de banda sonora de las películas consiste en una sección estrecha de sombreado variable existente a un lado de la película. La señal eléctrica producida en el detector de una célula fotoeléctrica reproduce las frecuencias de la banda sonora. Actualmente, en algunos de los casos mencionados, en vez células fotoeléctricas se utilizan sensores semiconductores de luz.

En resumen, la luz además de su evidente comportamiento ondulatorio (interferencia, difracción, etc.) manifiesta un comportamiento corpuscular (efecto fotoeléctrico, etc.). ¿Cómo podemos interpretar esto? En el apartado 2 se analizará con detalle tras plantearnos el problema simétrico, es decir, si los objetos clásicamente etiquetados como partículas (p.ej., los electrones) mostrarán propiedades ondulatorias. Pero antes nos referiremos a nuevos hechos que ilustran la validez de la teoría del fotón, en particular, el efecto Compton y la frecuencia máxima de los espectros de rayos X. En el siguiente apartado se aplicará el concepto de fotón a los espectros discontinuos de los átomos.

En el **efecto Compton**, descubierto por dicho físico en 1923, las ondas electromagnéticas de frecuencia elevada (por ejemplo, rayos X) que inciden sobre un obstáculo (por ejemplo, una fina lámina de calcita) son difundidas con su propia frecuencia ν_0 y con una frecuencia ν menor que la incidente. Por otra parte, de la calcita surgen algunos electrones libres, tal como se esquematiza en la Figura 2. Esto resulta sorprendente desde el punto de vista clásico porque según la teoría ondulatoria clásica la frecuencia de las ondas difundidas debe ser igual a la de las ondas incidentes.

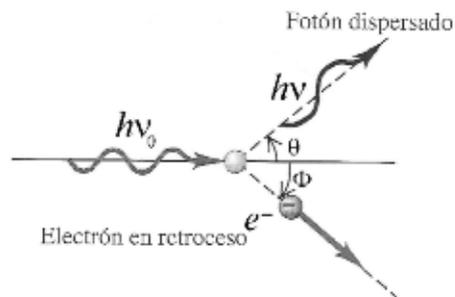


Figura 2. *Dispersión Compton*

Actividad 10. *Dar una interpretación cualitativa de dicho fenómeno y, en particular, del hecho que la frecuencia difundida ν sea menor que la incidente ν_0 . ¿Qué conclusión extraemos con respecto a la naturaleza de la luz?*

Comentarios para el profesor

La Actividad 8 conduce al alumno a interpretar el efecto Compton como una colisión de los fotones con los electrones, a los que transfieren parte de su energía por lo que pasan a tener una energía menor, es decir, una frecuencia menor. Hay que señalar además que estos electrones, al contrario que en el efecto fotoeléctrico, tienen una energía de enlace menor que la energía del fotón, es decir, son prácticamente libres. El carácter direccional del efecto Compton pone de manifiesto que los fotones tienen también cantidad de movimiento dada por $p = E/c$.

2. Espectros atómicos y modelo de Bohr

Como ya es conocido, los modelos atómicos basados en la Física Clásica (Thomson y Rutherford) no podían explicar algunos de los fenómenos observados. Así, el modelo de Thomson (1904) era incapaz de dar cuenta de la dispersión de partículas alfa por una fina lámina de oro (Geiger y Mardsen 1909) y el modelo de Rutherford (1911), si bien explicaba lo anterior, era inconsistente con la teoría electromagnética clásica. Según ésta, un electrón que gira alrededor del núcleo emite energía

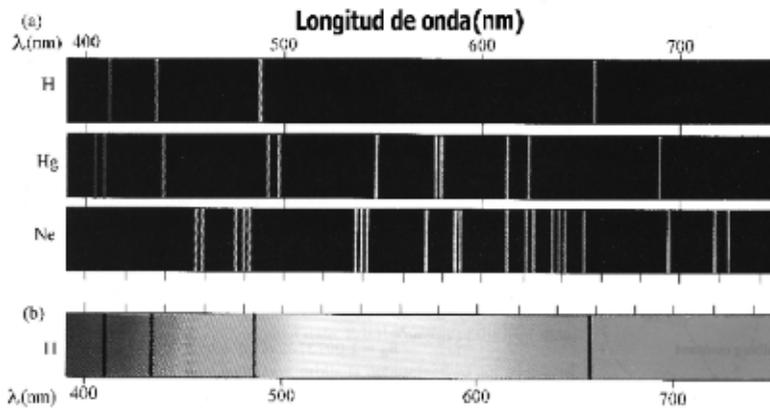


Figura 3. Espectros de emisión del H, Hg y Ne y de absorción del H. Nótese la coincidencia de las rayas en los espectros de absorción y emisión del H (Serway, 1990).

continuamente en forma de ondas electromagnéticas, lo cual le llevaría a caer muy rápidamente sobre el núcleo, en contradicción con la evidente estabilidad de los átomos. Además, ambos modelos eran incapaces de explicar el carácter discontinuo y característico de los espectros atómicos.

Actividad 11. Analizar en el laboratorio algunos espectros.

Para poder explicar dichos espectros, Bohr aplicó en 1913 las nuevas ideas de la teoría cuántica de Einstein al modelo nuclear de Rutherford, modificándolo de forma que diera cuenta de los hechos experimentales relativos a la emisión de luz. De forma esquemática podemos exponer los postulados de Bohr:

- En el átomo, un electrón se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo.
- De la infinidad de órbitas que permite la Física Clásica, el electrón sólo puede moverse en las que el momento angular orbital L cumple $L = mvr = nh/2\pi$.
- El electrón se mueve en una órbita permitida sin radiar energía electromagnética. De esta forma su energía total E permanece constante.
- La emisión o absorción de energía radian-

te se realiza cuando el electrón pasa de una órbita a otra.

Actividad.12. Indicar en qué contradicen los postulados de Bohr a la Física Clásica.

Comentarios para el profesor.

Si el centro no dispone de lámparas de gas, al menos se pueden analizar, con un espectroscopio de bolsillo (una red de difracción) los espectros de emisión de las lámparas de Na, muy utilizadas en el alumbrado urbano, y de los tubos fluorescentes. La luz de éstos contiene el espectro continuo de la sustancia fluorescente blanca que recubre el tubo y algunas rayas intensas del vapor de Hg excitado. El carácter tóxico del Hg, como metal pesado, obliga a reciclar los tubos fluorescentes. Otros espectros, como los de H y Ne se pueden apreciar en la Figura 3.

Para evitar la enseñanza de ideas erróneas algunos se manifiestan contra el uso del modelo de Bohr u otras descripciones del átomo que incluyan órbitas (Fischler y Lichtfeldt, 1992). Se olvida así el interés didáctico de la utilización de modelos. Según los estándares de la U.S. National Science Education (National Research Council, 1996), “Los modelos son esquemas o estructuras provisionales que se corresponden con objetos reales, situaciones, o tipo de situaciones, con un poder explicador. Los modelos ayudan a los científicos e ingenieros a entender cómo funcionan las

cosas". Así que son utilizados como explicación de forma esquemática y sencilla de fenómenos que, de otra manera, requerirían una descripción complicada. También se impide familiarizar a los alumnos con los procedimientos de trabajo de los científicos, que elaboran modelos para explicar los problemas hasta que surgen dificultades que obligan a cambiarlos (Solbes, 1996). Los expertos reales son capaces de emplear diferentes modelos simultáneamente, reconociendo las virtudes y limitaciones de cada uno y aplicándolos adecuadamente (Ireson, 2000).

Por otra parte, Petri y Niedderer (1998) piensan que el modelo de Bohr constituye un paso necesario en el camino del aprendizaje del estudiante. Otros lo ven como un paso histórico importante para entender los átomos (Blanco y Níaz, 1998; Justí y Gilbert, 2000). Además, algunos aprecian el modelo de Bohr (Kalkanis et al. 2003; Solbes, 1996; Solbes y Sinarcas, 2009) como una herramienta útil para definir la visión cuántica de los átomos. Es decir, permite introducir de forma sencilla el concepto de estado, caracterizado por los valores definidos de unas magnitudes, la energía y el momento angular. Además, permite ver que estas magnitudes no pueden tomar todos los valores posibles, sino que están cuantificadas por un número cuántico (Solbes, 1996). Por otro lado, como resultado de las informaciones de los medios de comunicación, de la educación primaria, etc. poseen una representación atómica mediante órbitas, que proponemos explicitar para cambiarla seguidamente. En resumen, evitar el modelo de Bohr impediría salir al paso de la imagen del átomo que tiene el alumnado y privaría a éste de una herramienta que los científicos consideran útil.

En la Actividad 12 se constata que Bohr "mezcla ideas clásicas y cuánticas", introduciendo hipótesis "ad hoc" para evitar los problemas planteados en los modelos de Thomson y Rutherford. Los postulados 2, 3 y 4 están en abierta contradicción con la Física Clásica.

Bohr introduce para los estados del electrón la cuantificación tanto de la energía E como del momento angular L : el electrón sólo puede estar en estados con la energía E y el momento angular L bien definidos. Como estos estados son estacionarios, es decir, de energía constante, supera así el carácter autodestructivo del modelo de Rutherford. Pero además,

el modelo de Bohr pudo explicar los espectros de absorción y emisión del hidrógeno (las distintas series espectrales), como veremos a continuación. Esto es así porque las ideas de Bohr son correctas simplemente sustituyendo el término órbita por nivel energético o estado estacionario, caracterizado por la energía E y el momento angular L .

Es útil representar los distintos valores posibles de la energía por rectas horizontales en un diagrama de niveles energéticos (Figura 4). El estado más bajo tiene una energía E_1 y se denomina estado fundamental. Los estados superiores E_2, E_3, \dots se denominan estados excitados. A temperatura ambiente casi todos los átomos están en el estado fundamental. A temperaturas más elevadas o durante una descarga, muchos átomos pueden estar en estados excitados.

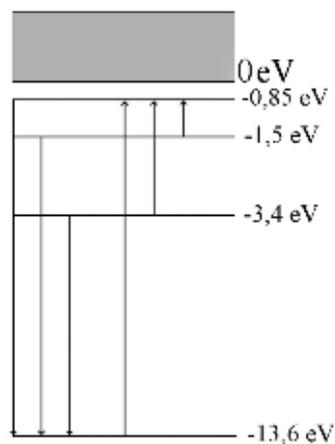


Figura 4. Diagrama de niveles de energía del H, en el que se aprecia la emisión y la absorción

Las hipótesis de Bohr aplicadas al átomo de hidrógeno posibilitaron el cálculo de las órbitas (estados) permitidas y de las energías correspondientes a las mismas. Asimismo permitió deducir la expresión de la longitud de onda de la radiación emitida al pasar de un estado a otro. Abordaremos dicho problema en la actividad siguiente.

Actividad 13. *Utilizando las ideas de Bohr, justificar los espectros de absorción y emisión.*

Comentarios para el profesor.

En la Actividad 13 los alumnos razonan que, al hacer incidir luz, los electrones sólo podrán absorber los fotones de energías iguales a las correspondientes a la transición de un valor energético o nivel a otro superior y sólo emitirán cuando pasen de dicho nivel a otro inferior. Así, la frecuencia de la radiación emitida es igual a la diferencia de energía entre niveles $E_n - E_m = h\nu$.

El espectro visible del hidrógeno está formado por una secuencia de rayas, cada vez más apretadas y que se aproximan a un límite definido en la región ultravioleta UV, conocida con el nombre de serie de Balmer. Éste descubrió en 1885 que las rayas pueden ser expresadas por la siguiente fórmula:

$$1/\lambda = R(1/m^2 - 1/n^2)$$

donde R es la constante de Rydberg ($R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$), $m = 2$ y n toma los valores 3, 4, 5, ... Posteriormente se descubrieron las series de Lyman en el UV ($m = 1$) y de Paschen en el infrarrojo ($m = 3$), etc. para las que $n = m+1, m+2, \dots$ Bohr, en 1913, al calcular el valor de la energía y sustituirlo en la expresión $E_n - E_m = h\nu$ obtuvo la fórmula empírica de Balmer. Aquí seguiremos el proceso inverso.

Actividad 14. *Comparando las expresiones $E_n - E_m = h\nu$ y $1/\lambda = R(1/m^2 - 1/n^2)$ deducir el valor de la energía del estado enésimo e interpretar el origen de las series espectrales y de la energía de ionización.*

Comentarios para el profesor

En la Actividad 14 se realiza una combinación de la ecuación de Balmer y $E_n - E_m = h\nu$ y teniendo en cuenta que $v\lambda = c$, obtenemos $E_n = -Rhc/n^2$ donde se ve que la energía del electrón está cuantificada por el número cuántico principal n . El procedimiento realmente seguido por Bohr fue el contrario: determinó el radio y la energía de la órbita enésima y así comprobó que la constante de

Rydberg, calculada teóricamente, coincidía con la experimental. La opción que se toma aquí evita cálculos y, a su vez, no insiste en la idea de órbitas, centrándose en los “estados discretos de energía”.

Se obtiene: $E_n = -Rhc/n^2$

El nivel fundamental se obtiene para $n = 1$, $E_1 = -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$. Las energías de los estados excitados en eV vendrán dadas por $E_1 = -13,6 \text{ eV} / n^2$. Así pues $E_2 = -3,4 \text{ eV}$, $E_3 = -1,5 \text{ eV}$, etc. Las transiciones de cualquier nivel n a $m = 1$, originan la serie de Lyman, a $m = 2$, la de Balmer, a $m = 3$, la de Paschen, etc. Por otra parte, el potencial de ionización corresponde a la transición de $n = 1$ a $n \rightarrow \infty$ ($E = 0$) donde el electrón estará libre.

Actividad 15. *Explicar qué sucederá si un átomo de hidrógeno en su estado fundamental absorbe un fotón de energía: a) $16,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; b) $21,9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; c) $17,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Determinar la longitud de onda de la luz emitida cuando el átomo vuelva a su estado fundamental (en los casos en que sea posible). Datos $E_1 = -21,76 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $E_2 = -5,43 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $E_3 = -2,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.*

Asimismo, se determinó experimentalmente el siguiente enunciado, que se conoce como *principio de combinación de Rydberg*: “Si dos frecuencias son observadas también lo son sus sumas y diferencias”.

Actividad 16. *(opcional) Interpretar dicho principio a partir del modelo de Bohr.*

Comentarios para el profesor.

La Actividad 16 permite comprobar que, si un electrón puede efectuar una transición del nivel E_3 al nivel E_2 emitiendo la frecuencia ν_{32} y del E_2 al E_1 emitiendo la frecuencia ν_{21} , entonces debe ser posible la transición directa de E_3 a E_1 emitiendo la frecuencia $\nu_{31} = \nu_{32} + \nu_{21}$. Análogamente, si un electrón pasa de E_3 a E_1 emitiendo la frecuencia ν_{31} o a E_2 emitiendo la frecuencia ν_{32} , también debe ser posible la transición de E_2 a E_1 con la frecuencia $\nu_{21} = \nu_{31} - \nu_{32}$.

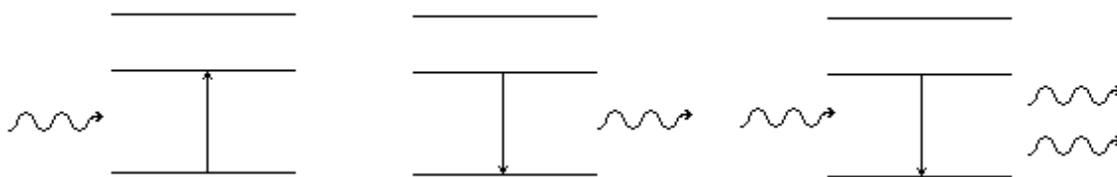


Figura 5. Diagrama de niveles de un átomo con absorción, emisión espontánea y emisión estimulada

Sin embargo, y a pesar de sus éxitos, pronto surgieron dificultades que obligaron a modificar el modelo de Bohr (correcciones de Sommerfeld) y finalmente a sustituirlo por otro, producto del establecimiento de la Mecánica cuántica que supuso un cambio radical de los conceptos físicos. Entre las deficiencias del modelo de Bohr mencionaremos: no explica los espectros de los átomos polielectrónicos e, incluso, el espectro del hidrógeno: al utilizar espectroscopios más potentes o al aplicar campos eléctricos o magnéticos, resultaba ser más complicado de lo previsto en la teoría (aparecían desdoblamientos de las rayas espectrales); tampoco explica la mayor intensidad de unas rayas sobre otras, la anchura de las mismas; la existencia de direcciones privilegiadas en los enlaces atómicos, etc.

Actividad 17. Leer el texto que sigue e indicar sus principales ideas. Valorar asimismo, las múltiples aplicaciones del láser.

La palabra láser proviene de las iniciales de “light amplification by stimulated emission of radiation” (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

La acción del láser se basa en la teoría cuántica. Las primeras ideas sobre emisión estimulada de radiación fueron establecidas por Einstein en 1917. Un átomo puede absorber un fotón si su energía $h\nu$ corresponde a la diferencia entre la energía del electrón y la de un estado disponible. Si el átomo se halla en el estado excitado, el electrón puede pasar espontáneamente al estado inferior emi-

tiendo un fotón, pero también puede ocurrir esta transición cuando un fotón de la misma frecuencia alcanza el átomo excitado. Este fenómeno se denomina “emisión estimulada” y los fotones estimulador y emitido están en fase (Figura 5).

Como normalmente los electrones se encuentran en el estado de energía fundamental, los fotones incidentes se absorberán. Para obtener luz amplificada por emisión estimulada se deben cumplir dos condiciones. Primera, los átomos del material utilizado deben excitarse previamente al estado superior para que la emisión predomine sobre la absorción. Segunda, el estado superior debe ser metaestable - los electrones deben permanecer en él más tiempo de los 10^{-8} s normales - a fin de que la transición al estado inferior tenga lugar por emisión estimulada y no espontáneamente.

Estas y otras dificultades provocaron que esta nueva tecnología se iniciase a finales de los años 40, cuando N. Bassov, A. Prokhorov y Ch. Townes realizaron investigaciones sobre la amplificación de microondas que llevó en 1945 a la construcción del primer maser operativo. Recibieron por ello el premio Nobel de 1964. En 1957 Gordon Gould y Ch. Townes plantearon una amplificación análoga de la luz, lo que condujo en 1960 al primer láser de rubí satisfactorio.

Las múltiples aplicaciones del láser, basadas en su monocromaticidad, direccionalidad y concentración de energía, empiezan hacia 1980 y se pueden mencionar las siguientes: como lectores (de códigos de barras en los supermercados, de discos compactos CD y de videodiscos), bélicas (dirección de proyectiles), industriales (dirección de túneles, soldadura y

grabado de metales, taladro de materiales duros, corte de tejidos, etc.), médicas (microcirugía), científicas (facilitan las experiencias de interferencia, difracción, etc.), artísticas, impresoras láser, holografía, etc. Ha dado lugar a una tecnología nueva llamada **optoelectrónica**, que incluye las telecomunicaciones por fibra óptica, así como los sistemas de almacenamiento de datos de ordenador en CD. La utilización del láser en optoelectrónica se basa en el hecho de que la luz es preferible a las ondas de radio para transmitir información porque la cantidad de datos transmitidos aumenta con la frecuencia del agente empleado.

3. De Broglie y la difracción de electrones

Aunque los trabajos de Planck, Einstein, Bohr y otros habían confirmado de manera rotunda la naturaleza cuántica, discontinua de la luz y de los sistemas atómicos, dichos trabajos sólo pueden ser considerados como los orígenes de la nueva concepción de la materia que habría de sustituir a las teorías clásicas.

En efecto, podemos considerar que el establecimiento de la Física Cuántica se inicia, como ya hemos dicho, en 1923 con los trabajos de Louis De Broglie, en los que introduce una nueva y atrevida hipótesis consistente en atribuir a los electrones -y, en general, a cualquier sistema- un comportamiento ondulatorio, además de su evidente comportamiento corpuscular.

Actividad 18. *Indicar posibles argumentos en apoyo de la hipótesis de De Broglie.*

Comentarios para el profesor.

En la Actividad 18 los estudiantes se refieren habitualmente a los trabajos de Einstein, Compton, etc., en los que se había mostrado que la luz poseía, conjuntamente con sus evidentes propiedades ondulatorias, propiedades típicamente corpusculares. Si existen objetos materiales (los fotones) con esta doble característica ondulatorio-corpuscular, ¿por qué no concebir la posibilidad de que esto mismo se dé en cualquier objeto material? El

profesor puede plantear, para completar las consideraciones anteriores, cómo el carácter cuantificado de los estados estacionarios en el interior del átomo parece relacionarse con el único fenómeno de la Física Clásica en el que aparecen valores discretos: las ondas estacionarias que se forman en un medio confinado.

De Broglie no se limitó, por supuesto, a enunciar una simple hipótesis cualitativa sino que trató de relacionar las magnitudes características del aspecto ondulatorio (la frecuencia o la longitud de onda) con las del corpuscular (las debidas al movimiento). Para obtener la expresión de De Broglie podemos seguir el siguiente camino: establecer la relación entre la longitud de onda y la cantidad de movimiento para los fotones, generalizando después el resultado para todos los objetos materiales.

Actividad 19. *Teniendo en cuenta que la energía de un fotón, según la hipótesis de Planck, puede escribirse como $E = h\nu$ y según la Relatividad ha de ser $E = pc$, establecer la relación existente entre la longitud de onda de un fotón y su cantidad de movimiento.*

Actividad 20. *Calcular la longitud de onda de los siguientes cuerpos, comparándola con la de los rayos X (del orden de 10^{-10} m):*

- La Tierra en su rotación alrededor del Sol ($m = 6 \cdot 10^{24}$ kg y $v = 3 \cdot 10^4$ m/s)*
- Un guijarro de 10g lanzado a 1 m/s.*
- Un electrón que, sometido a un campo eléctrico, ha adquirido la velocidad de $6 \cdot 10^5$ m/s ($m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)*

Comentarios para el profesor.

Si en la Actividad 19 se sustituye en $E = h\nu$, la frecuencia ν por su valor en función de la longitud de onda, resulta $E = h\nu/\lambda = pc$, de donde $\lambda = h/p$. Al generalizar la expresión anterior para cualquier partícula, obtendremos $\lambda = h/p$. Nuevamente tenemos una ecuación que nos relaciona un concepto clásico corpuscular, el momento lineal p con un concepto ondulatorio clásico, la longitud de onda λ . En ambos casos se trata de una nueva clase de ley y no podemos suponer simplemente que cada palabra significa lo mismo que en Física Clásica. Lo mejor sería darle otro nombre,

como momento quantum-lineal, pero si en la Física Cuántica podemos encontrar una magnitud que sea idéntica a nuestra vieja idea de momento lineal cuando el sistema es bastante grande, no es necesario una palabra nueva (Feynman 1971).

Tiene interés en la actividad Actividad 20 calcular la longitud de onda predicha por la hipótesis de De Broglie para un electrón con cierta velocidad. Resulta del orden de 10^{-9} m, comparable a la de los rayos X, por lo que se puede pensar en la posibilidad de detectar su existencia. Por el contrario, la longitud de onda de los objetos macroscópicos es tan pequeña (del orden de 10^{-63} m para la Tierra y de 10^{-32} m para el guijarro) que es impensable detectarla, lo que justifica el hecho de que dichos objetos no muestren comportamiento ondulatorio.

Como muestra la actividad anterior, la longitud de onda correspondiente al movimiento de los objetos macroscópicos (incluso los más diminutos) es tan pequeña que no puede producir efectos perceptibles. En cambio, el valor predicho para la longitud de onda de un electrón que se mueva a velocidades moderadas resulta comparable a la de los rayos X y cabe pensar en la posibilidad de detectar la existencia de dichas ondas.

Actividad 21. *¿A qué fenómenos convendría recurrir para poner en evidencia el comportamiento ondulatorio de los electrones? Describir el posible experimento.*

Comentarios para el profesor.

Los alumnos pueden señalar en la Actividad 21 que conviene recurrir a un fenómeno típicamente ondulatorio, como es la interferencia y la difracción. Para que ésta se produzca, es necesario encontrar obstáculos de dimensiones próximas a la longitud de onda del electrón.

Este problema era análogo al que plantearon los rayos X en 1912. Su solución fue recurrir a redes cristalinas. Sin embargo, los electrones plantean dificultades dado que no pueden atravesar tan fácilmente un cristal

como una radiación electromagnética, puesto que interactúan eléctricamente mucho con la materia. Por ello es necesario estudiar los electrones reflejados en superficies cristalinas. En 1927, utilizando dichas técnicas Davisson y Germer encontraron diagramas de manchas como los obtenidos con rayos X por Von Laue (Figura 6). Al estudiar los electrones transmitidos por hojas metálicas policristalinas extremadamente finas G. P. Thomson logró diagramas de anillos como los obtenidos por Debye y Scherrer a partir de la transmisión de rayos X por láminas (Figura 7). Ambos mostraban con toda claridad la difracción de electrones. Además, los cálculos realizados a partir de las figuras de difracción obtenidas proporcionaban valores de la longitud de ondas que correspondían con los predichos por la relación de De Broglie. Resulta curioso que G. P. Thomson demostrase el comportamiento ondulatorio de los electrones y que su padre J. J. Thomson demostrase el corpuscular.

Actividad 22. *Buscar información sobre las aplicaciones del carácter ondulatorio de los electrones*

Comentarios para el profesor.

La primera aplicación fue su utilización para ampliar objetos con mucho mayor detalle que con el microscopio óptico ordinario. En efecto, la resolución de éste viene limitada por la longitud de onda de la radiación utilizada que, en el caso de la luz, es de 4000 a 7000 Å. Un haz de electrones, en cambio, puede obtenerse con una longitud de onda $\lambda = 1$ Å, lo que multiplica por 1000 nuestra posibilidad de ampliación. Esto dio origen en la década de 1930 a los primeros microscopios electrónicos en los que las lentes de vidrio fueron sustituidas por lentes magnéticas.

También se utilizan electrones, neutrones, etc. para determinar la estructura de los cristales o incluso de moléculas importantes biológicamente, con las que es posible formar un cristal. Sin embargo, los electrones son poco penetrantes dado que interactúan mucho con la materia, por lo que se emplean para el estudio de superficies, cristales finos, etc.

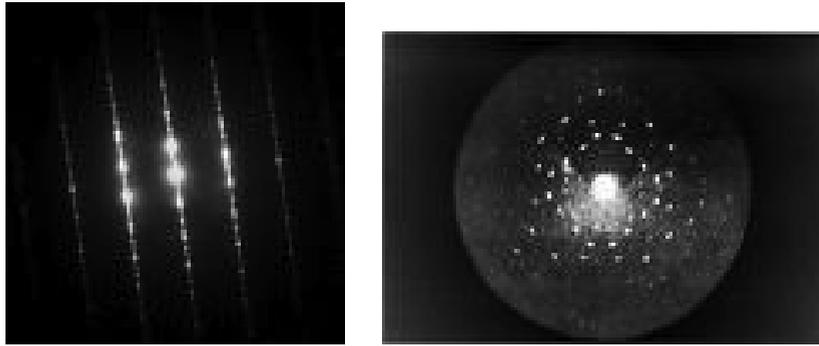


Figura 6. Diagramas de Davisson y Germer con electrones y de von Laue con rayos X

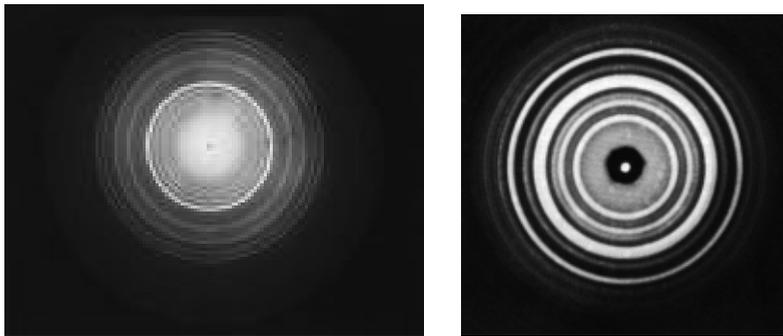


Figura 7. Diagramas de G. P Thomson con electrones y Debye-Scherrer con rayos X

Actividad 23. Establecer las relación entre la energía de los electrones, neutrones y fotones y su longitud de onda. Estimar la energía que deben tener para que puedan ser utilizados en el estudio de estructuras cristalinas. Determinar, asimismo, la longitud de onda de un haz de electrones de 65 eV.

Comentarios para el profesor.

La Actividad 23 permite utilizar las relaciones de De Broglie para determinar las energías en función de λ . Vienen dadas por $E = h\nu = hc / \lambda$ (fotones) y $E = p^2 / 2m = h^2 / 2m\lambda^2$ (partículas). En la actividad podemos ver un ejemplo de utilización de las relaciones obtenidas. Necesitamos una longitud de onda menor o del orden de magnitud que la separación entre planos, es decir, 01 - 1 Å. Conviene expresar los resultados en eV, encontrándose para el fotón un valor de unos 10 KeV; para el electrón

de unos 100 eV y para el neutrón, de unos 0,08 eV. En los dos últimos casos los valores son mucho menores que sus masas y, por tanto, no se necesita la Relatividad. La longitud de onda vendrá dada por $\lambda = h/(2mE)^{1/2} = 1,5 \text{ \AA}$.

En resumen, hemos visto dos problemas característicos del desarrollo de la Física. El primero es típico de los orígenes de una disciplina: se trata de un efecto, el fotoeléctrico, que no puede ser explicado con los conocimientos previamente existentes (la Física Clásica) y, por ello, exige nuevas hipótesis que lo expliquen. El segundo se presenta en un estado más desarrollado de la disciplina: los conocimientos existentes (conceptos, experiencias, etc.) permiten enunciar una hipótesis (la de De Broglie) que experiencias ulteriores confirmarán o no.

Ambos problemas nos llevan a una situación paradójica: en el primero, un fenómeno ondulatorio (la luz) manifiesta propiedades

corpúsculares; en el segundo, objetos inicialmente etiquetados como partículas, manifiestan un comportamiento ondulatorio.

Mostraremos a continuación los esfuerzos que realizaron los físicos de la época para solucionar esta doble paradoja. En particular, nos centraremos en la interpretación del comportamiento ondulatorio de los electrones aunque los razonamientos son extrapolables al comportamiento corpuscular de la luz.

Actividad 24. *¿Cómo se puede interpretar el comportamiento ondulatorio de objetos como los electrones? ¿En qué pueden consistir dichas ondas?*

Comentarios para el profesor.

La Actividad 24 es crucial en el planteamiento de este programa de actividades. Pretende que los alumnos expongan sus ideas (originadas en cursos anteriores, medios de comunicación, etc.) para comprobar si alguna de ellas coincide con los errores que se cometieron durante la génesis de estos conceptos. Ello da pie a que el profesor explicita y discuta las siguientes interpretaciones:

1. La idea de De Broglie de onda “y” partícula, es decir, de una “onda asociada”, guía o piloto de la partícula, con una relación entre ellas similar a la existente entre las planchas de “surf” y las olas que las arrastran es una de las ideas que surgen con mayor frecuencia. Ahora bien, la imposibilidad de explicar la indisoluble unidad entre la onda y la partícula, hace que hablar de “ondas asociadas” sea una mala terminología porque da la impresión de que hubiera un corpúsculo clásico moviéndose junto con una onda, cuando en realidad, como veremos, la onda y la partícula son la misma cosa, no hay nada más. La partícula real tiene propiedades ondulatorias y esto es un hecho. Análogamente, la idea de Bohr de onda o partícula, según la experiencia (complementariedad), tampoco es muy adecuada porque mantiene los modelos clásicos de onda y partícula.

2. El nuevo error, que vino a sustituir al anterior, fue reducir el aspecto corpuscular a un efecto puramente ondulatorio, considerando al electrón como un “paquete de ondas”, como hizo inicialmente Schrödinger.

Sin embargo, fue preciso abandonar esta idea porque los cálculos mostraban que un paquete de ondas, por muy compacto que sea, se difunde rápidamente por el espacio, desapareciendo cualquier posible comportamiento corpuscular.

3. Otra forma de interpretar el comportamiento ondulatorio sería suponer que los electrones son simples corpúsculos y que el comportamiento ondulatorio aparece debido al gran número de ellos. Según esto, la difracción observada al hacer pasar los electrones por una fina lámina metálica no debería presentarse al trabajar con un número reducido de ellos. Sin embargo, la experiencia muestra que si se prolonga la exposición suficiente tiempo, un débil haz de electrones produce el mismo efecto, lo que prueba que la difracción y, por tanto, el carácter ondulatorio es consustancial a cada electrón individual y no es un efecto de la presencia de gran número de ellos.

Todos los intentos de reducir la complejidad onda/corpúsculo a un único efecto fracasaron y necesitamos una nueva interpretación que, en palabras de R. Feynman (1971), podemos expresar así:

Newton pensaba que la luz estaba compuesta de partículas, pero luego se descubrió que ésta se comporta como una onda. Más tarde sin embargo (a principios del siglo XX) se descubrió que la luz algunas veces se comporta verdaderamente como una partícula. Históricamente, por ejemplo, se creía que el electrón se comportaba como una partícula pero luego se pensó que, en algunos aspectos, lo hacía como una onda. Pero, en realidad, éste no se comporta como ninguna de ellas. Renunciando, diremos: ‘No es como ninguna de las dos’.

Sin embargo podemos decir algo más: los electrones se comportan exactamente como la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) es el mismo para todos ellos. Todos son ‘ondas de partículas’ o como se quieran llamar. De este modo, todo lo que sabemos de las propiedades de los electrones (...) se lo aplicaremos también a todas las ‘partículas’ incluyendo los fotones de luz.

En resumen, los electrones o los fotones, por ejemplo, no son ni pequeñas bolas (partículas) ni pequeñas olas (ondas) y deben ser absolutamente concebidos como objetos de tipo nuevo, los “cuantos”. Por tanto, un cuanto no es ni una partícula clásica ni una onda clásica, que sólo son modelos aproximados que describen el comportamiento de un gran número de cuantos.

En los siguientes apartados se desarrollarán algunas implicaciones de la hipótesis de De Broglie.

4. Relaciones de indeterminación de Heisenberg

La hipótesis de De Broglie, al establecer una relación entre el aspecto corpuscular y el ondulatorio para todos los objetos físicos, venía al mismo tiempo a invalidar las leyes clásicas de descripción del movimiento y exigía nuevos conceptos y nuevos principios, es decir, una nueva Mecánica, que incluyera la clásica como caso particular.

Como ya hemos visto, la Mecánica clásica permite, si conocemos la ecuación de movimiento $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ y el estado del sistema en un instante dado, es decir, las condiciones iniciales, determinar el estado en cualquier otro instante.

En ello reside la base del determinismo clásico, doctrina que afirma que si se conoce el estado presente de un sistema y su ley de fuerzas es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medida sobre el mismo.

Actividad 25. Si el electrón viene descrito por una onda armónica plana (electrón libre) o por un paquete de ondas, determinar en ambos casos su λ (o p) y su posición. En consecuencia, ¿es posible determinar simultáneamente la posición r y la cantidad de movimiento p del electrón en cualquier instante, es decir, su movimiento a lo largo de una trayectoria?

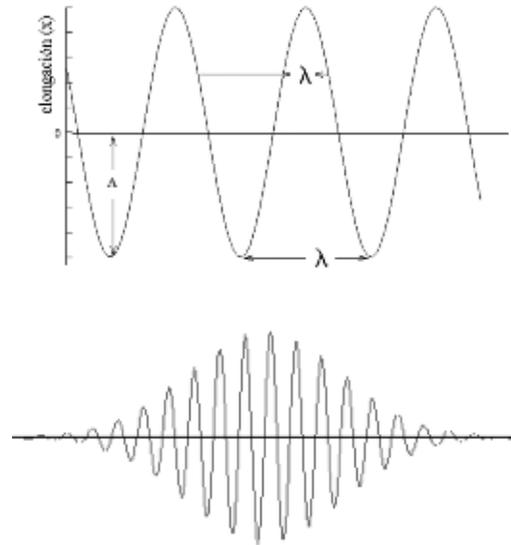


Figura. 8. Onda armónica plana (OAP) y paquete de ondas

Comentarios para el profesor.

La Actividad 25 permite ver que en la OAP (onda armónica plana) la λ (o $p=h/\lambda$) está bien definida ($\Delta p=0$), pero x se extiende de ∞ a $-\infty$ ($\Delta x=\infty$). En el paquete, la partícula no tiene la λ (o p) definida, con lo cual su localización tiene una imprecisión Δx . Se pretende que los estudiantes asocien, de forma cualitativa, el carácter ondulatorio del electrón a una cierta deslocalización que impide situar al electrón en un punto determinado. Se introduce, por tanto, una cierta indeterminación en el movimiento que puede seguir el electrón, por lo cual éste carecerá de una trayectoria absolutamente determinada. Esta actividad trata de relacionar la ecuación de De Broglie con las relaciones de Heisenberg, mostrando cómo ambas modifican los conceptos básicos de la Física Clásica.

Con el título se pretende evitar la tendencia de muchos textos que hablan de principio de incertidumbre. Con ello se olvida que los principios básicos de la teoría cuántica llevan a las relaciones de indeterminación, pero si se parte de éstas no se pueden deducir aquéllos. Por otra parte, hablar de incertidumbre olvida que, como hemos visto en la actividad, se puede determinar con total certidumbre la posición x o la cantidad de movimiento p del electrón.

En la teoría cuántica vemos que las relaciones de indeterminación están conectadas con

las de conmutación. Si dos magnitudes conmutan, es decir, $p_x p_y - p_y p_x = 0$, se pueden preparar los sistemas de forma que se puede medir simultáneamente p_x y p_y con resultados de dispersión cuadrática media tan pequeña como se quiera para ambos. Por el contrario, si no conmutan, $x p_x - p_x x = i\hbar/2\pi$, se cumplen las relaciones de indeterminación. Su importancia reside en que nos permiten averiguar el conjunto de todas las magnitudes compatibles que caracterizan el estado de un sistema, es decir, todas aquellas que se pueden determinar simultáneamente. Así, por ejemplo, un electrón libre vendrá caracterizado por (p_x, p_y, p_z, s_z) , un electrón ligado en un átomo hidrogenoide por (E, L^2, L_z, S_z) , como veremos.

El razonamiento cualitativo anterior puede no dejar claro que el problema no es determinar con precisión la posición del electrón, dado que nada prohíbe un estado de movimiento para el que la posición se conoce con altísima precisión, sino la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición x y la cantidad de movimiento p del electrón, señalando que los límites de dicha precisión vienen dados por las **relaciones de indeterminación de Heisenberg**:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

siendo Δx y Δp las imprecisiones de la posición y la cantidad de movimiento.

Si el principio de incertidumbre establece límites a la precisión con que puede determinarse la posición y la velocidad de un objeto, cabe suponer que dicha imprecisión reaparecerá en la determinación de otras magnitudes cuyo producto tenga las mismas dimensiones que \hbar , como por ejemplo, la energía y el tiempo.

Efectivamente, Heisenberg estableció también que:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

donde Δt no es una imprecisión sino un intervalo característico de la evolución del sistema (por ejemplo, la vida media de un estado).

A continuación proponemos la aplicación de las relaciones de indeterminación al mundo de los objetos macroscópicos y microscópicos, lo que nos permitirá comprobar cómo en el primer caso no se introducen modificaciones prácticas con respecto a las predicciones de la Física Clásica.

Actividad 26. Considerar un grano de polvo que pese 10^{-9} kg y avance a una velocidad de $(1,00 \pm 0,01)$ m/s. ¿Cuál será la indeterminación en la posición? Determinar igualmente la imprecisión en la posición de un electrón (cuyo tamaño convencional se puede considerar 10^{-18} m) que avance con la misma velocidad. ¿Que importancia tendrá dicha imprecisión respecto al tamaño de ambos? (Dato: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)

Comentarios para el profesor.

La Actividad 26 nos muestra que la indeterminación para los objetos macroscópicos ($\Delta x = 10^{-23}$ m) es absolutamente despreciable frente al tamaño del objeto, al contrario de lo que sucede en los microscópicos (para el electrón $\Delta x = 0,1$ m). La razón de este hecho se debe al pequeño valor de la constante \hbar en relación a las masas de los objetos macroscópicos, debido al cual los resultados de las relaciones de indeterminación quedan fuera de los límites de nuestras experiencias ordinarias (aunque hay fenómenos macroscópicos, como veremos, a los que se aplica la Física Cuántica). Análogamente, la pequeñez de los valores que toma la expresión v/c para los objetos ordinarios en movimiento, deja a la Relatividad fuera de nuestras experiencias cotidianas. Es decir, las relaciones de indeterminación establecen los límites más allá de los cuales no se pueden aplicar los conceptos de la Física Clásica.

En este tipo de actividades, algunos textos tratan las relaciones de Heisenberg como una ecuación entre magnitudes, olvidando que se trata de unas relaciones de dispersión, es decir, unas relaciones entre las indeterminaciones (o dispersiones cuadráticas medias) de las magnitudes. Sólo si se usan como aproximaciones, del mismo modo que las ecuaciones dimensionales, permiten estimar valores de magnitudes.

En resumen, las implicaciones de las relaciones de indeterminación son:

- La imposibilidad del conocimiento simultáneo de la posición y de la cantidad de movimiento.
- Consecuentemente, el concepto de trayectoria deja de tener sentido.

- El establecimiento de los límites de validez de la Física Clásica.

Actividad 27. (opcional) Comentar la siguiente proposición señalando hasta qué punto puede considerarse correcta o incorrecta: La indeterminación puede considerarse fruto de la imprecisión de los instrumentos y técnicas de medida utilizados y sólo es subsanable en la medida en que dichos instrumentos y técnicas se perfeccionan.

Comentarios para el profesor:

La Actividad 27 permite salir al paso del error, cometido durante la génesis de estos conceptos, de atribuir la indeterminación a faltas de precisión de los instrumentos de observación (como señala la primera frase de la actividad).

5. La función de ondas y su interpretación probabilística

La crítica radical de los conceptos clásicos que realiza la Mecánica Cuántica, y de la que son expresión la ecuación de De Broglie o las relaciones de indeterminación de Heisenberg, exige consecuentemente una modificación radical del formalismo matemático utilizado para describir el estado de un sistema y su evolución temporal.

Actividad 28. ¿Cómo podría describirse en Física Clásica el estado de movimiento de una partícula? ¿Y el de una onda?

Comentarios para el profesor:

La Actividad 26 pone de manifiesto que en la Mecánica Clásica el estado de movimiento de una partícula, en un instante determinado, queda descrito por su posición r y su velocidad v (o cantidad de movimiento p) y en cualquier instante, por su ecuación de movimiento $r = r(t)$. Análogamente, el estado en un instante determinado de una onda viene dado por su amplitud E_0 , su longitud de onda λ y su frecuencia ν y en cualquier instante, por su ecuación de onda $E = E(r,t)$ (p.ej., una onda armónica plana).

Pero como los fotones, los electrones, etc., no son ni simplemente ondas ni simplemente partículas, se necesita un modelo más general para describir su comportamiento. Para esto Schrödinger introdujo una función que denominó **función de ondas** o **función de estado**. Así como la ecuación de un movimiento se obtiene a partir de la ecuación de Newton, para obtener la función de estado desconocida, debe resolverse una ecuación denominada **ecuación de Schrödinger**. En general, hay diversas funciones posibles correspondientes a distintos valores de la energía que son soluciones de esta ecuación.

Esta función planteó el problema de determinar su significado, que fue resuelto por Born en 1926 apoyándose en consideraciones análogas a las planteadas en las siguientes actividades.

Actividad 29. Teniendo en cuenta que, como hemos visto en temas anteriores, la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico y que según Einstein es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo y de superficie, indicar qué significado podemos atribuirle a dicha amplitud.

Actividad 30 (opcional). Determinar el significado de la intensidad I que atraviesa un polarizador suponiendo que incide sobre él un único fotón.

Comentarios para el profesor

Los alumnos pueden avanzar en la Actividad 29 señalando que siendo $I \propto E^2$ y $I \propto n$, resulta $E^2 \propto n$, es decir, el cuadrado de la amplitud es proporcional al número de fotones. Si tratamos con haces luminosos poco intensos, con un sólo fotón, es evidente que E^2 constituye una medida de la probabilidad de que haya un fotón. En los lugares en que E^2 sea grande, habrá una gran probabilidad de que se encuentre el fotón. Las actividades siguientes nos permiten profundizar en estas ideas. Así, en la Actividad 30 los alumnos recuerdan, por el tema de Óptica (Solbes y Tarín, 1996), que la intensidad de luz transmitida por el polarizador es $I = I_0 \cos^2 \theta$, es decir,

la intensidad I nos indica la fracción de fotones que pasan. Ahora bien, si incide un único fotón (lo cual se puede conseguir con intensidades suficientemente bajas), la expresión $I = I_0 \cos^2 \theta$ no nos puede indicar la fracción de fotón que atraviesa el polarizador ya que el fotón es una partícula y, como tal, indivisible. Por tanto, sólo podemos decir si pasa o no pasa, lo cual implica que $I = I_0 \cos^2 \theta$ (número comprendido entre 0 y 1) indica la probabilidad de que pase un fotón. En otras palabras, el comportamiento probabilista no es debido a la presencia de un gran número de fotones, sino que se aplica a cada fotón individualmente. Algunos pueden pensar que se trata de una actividad compleja, por eso la hemos considerado opcional, pero si se ha estudiado la ley de Malus en Óptica no resulta tan difícil y refuerza considerablemente la interpretación probabilista y, quizá por ello, Dirac (1967) la utiliza como primer ejemplo en el capítulo 1 de sus reeditados *Principios de Mecánica cuántica*.

Actividad 31. Las fotografías que se adjuntan muestran cómo se van formando franjas de interferencia al aumentar el tiempo de exposición, es decir, al incrementar el número de electrones que contribuyen a su formación. ¿Cómo se puede interpretar esto?

Comentarios profesor

Con respecto a los diagramas de interferencia o las fotografías de la Actividad 31, se observa la construcción progresiva de franjas de interferencia de apariencia continua a partir de impactos discretos. Esto pone de manifiesto el carácter corpuscular de los electrones y, por otra parte, su comportamiento probabilista, dado que en los lugares donde la intensidad sea grande, habrá una gran probabilidad de que incidan electrones.

Es conveniente insistir en la probabilidad (para cada partícula) por su importancia como nueva ley del comportamiento de la materia. Por otra parte, al plantearse en diversas situaciones se comprueba que la probabilidad no se limita sólo a la probabilidad de localización. También existen la probabilidad de encontrar-

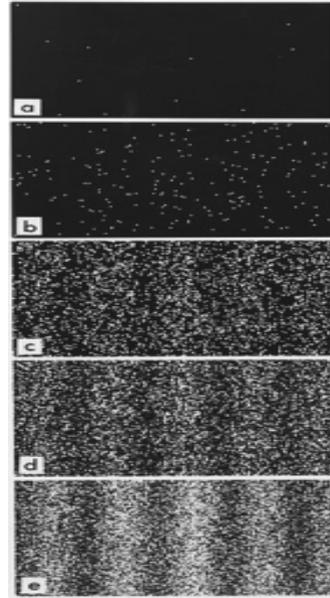


Figura 9. Interferencia realizada electrón a electrón. Las imágenes fueron tomadas tras el impacto de (a) 10, (b) 200, (c) 6.000, (d) 40.000 y (e) 140.000 electrones. Crédito: Wikipedia/GPL

se en un determinado estado de polarización, o de ser dispersado en un ángulo determinado, o la de emisión y absorción, etc.

Por analogía con la luz, Born pensó que $|\Psi(r, t)|^2$ es la probabilidad por unidad de volumen de encontrar al electrón en un elemento de volumen dV . Es conveniente resaltar la conexión de la interpretación probabilista con la dualidad y la indeterminación que, al impedir describir el estado del electrón en un instante determinado dando simultáneamente los valores de las coordenadas y las velocidades como en la Mecánica clásica, sólo permiten predecir las probabilidades de los distintos valores que pueden obtenerse al medir las coordenadas - o la magnitud de que se trate.

Actividad 32. *Mirar el siguiente vídeo y contestar las cuestiones sobre el mismo:*

<http://www.youtube.com/watch?v=KYX4ki7y-xI>

¿Qué sucede cuando las bolitas atraviesan la doble rendija? ¿Y las ondas? ¿Y cuándo la atraviesa un haz de electrones? ¿Y si enviamos muchos electrones, pero uno a uno? ¿Qué sucede si medimos por qué rendija pasa el electrón?

Comentarios profesor

Cuando las bolitas atraviesan la doble rendija se comportan como partículas (cada bolita atraviesa una única rendija) y tenemos 2 distribuciones de bolitas. Cuando se trata de ondas, obtenemos el característico diagrama de interferencia. Pero cuando son electrones, es decir, supuestas partículas, y las ranuras son suficientemente pequeñas, también se obtiene un diagrama de interferencia. Si se ha estudiado el tema de vibraciones y ondas (Solbes y Tarín, 1996), podemos comentar que esto es consecuencia del principio de superposición, es decir, $\psi = \psi_1 + \psi_2$ de donde $\psi^2 = \psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2\cos\phi$. Pero como ya hemos dicho anteriormente algunos críticos propusieron que el comportamiento ondulatorio aparece debido al gran número de electrones, que pueden interactuar entre sí. Según esto, la interferencia observada al hacer pasar los electrones por dos rendijas no debería presentarse al trabajar con un número reducido de ellos. Sin embargo, la experiencia muestra que si se prolonga la exposición suficiente tiempo, se produce el mismo efecto, lo que prueba que la interferencia y, por tanto, el carácter ondulatorio es consustancial a cada electrón individual y no es un efecto de la presencia de gran número de ellos.

Pero lo más extraño (Kastler, 1976; Feynman, 1971) es la desaparición del diagrama de interferencia cuando sabemos por cuál rendija pasan los electrones. Esto es lo más inadecuado del vídeo (y el profesor debe advertir de ello a los estudiantes) porque parece que la desaparición del diagrama de interferencia es debida al “observador”, cuando en realidad es debido a que medimos por dónde pasa el electrón. Pero aún es peor cuando parece atribuirle libre albedrío al electrón que, según sus propias palabras, “decide actuar de forma inconsciente como si supiera que le están observando”, dando pie a toda la utilización ideológica y pseudocientífica de la cuántica

tan criticada por autores como Levy-Leblond (2002). Pese a todo, pensamos que es conveniente utilizarla porque mejora la conocida <http://www.maloka.org/fisica2000/> donde se ve que los electrones impactan como partículas pero no se ve muy claramente el diagrama de interferencia.

Actividad 33. *¿Qué magnitud está bien definida para un electrón libre? ¿Cómo es su función de ondas o de estado? ¿Qué probabilidad hay de localizarlo en una pequeña región del espacio?*

Comentarios profesor

Un electrón libre vendrá caracterizado por (p_x, p_y, p_z, S_z) , las 3 componentes de la cantidad de movimiento y la tercera componente del espín, magnitud que se introduce a continuación. Es decir, un electrón libre tiene bien definida su cantidad de movimiento (o longitud de onda, según De Broglie), por tanto, su función de ondas es la de una onda armónica plana o, con más precisión, $\Psi = \Psi \exp \{i(kx - wt)\}$. En consecuencia, su posición está indeterminada (como una onda va de $-\infty$ a $+\infty$).

A continuación, analizaremos qué sucede si aplicamos la ecuación de Schrödinger a un sistema ligado, como un electrón en un átomo. Se puede modelizar la energía potencial de Coulomb, que dificulta resolver la ecuación de Schrödinger, por **pozos cuánticos**. Se obtienen unas funciones de onda estacionarias y sus correspondientes niveles energéticos que nos dan una primera aproximación para el comportamiento del electrón en el átomo. Por otra parte, puede señalarse que dichos pozos no son una mera abstracción, sino que se fabrican en semiconductores para hacer diodos láser, fotodetectores, etc.

Actividad 34 (opcional). *A partir de la expresión de la energía E en función de la longitud de onda (obtenida en la Actividad 19) y de la relación que existe entre la longitud λ de las ondas estacionarias confinadas en un medio de dimensión L , determinar la E de los estados estacionarios del electrón en un pozo.*

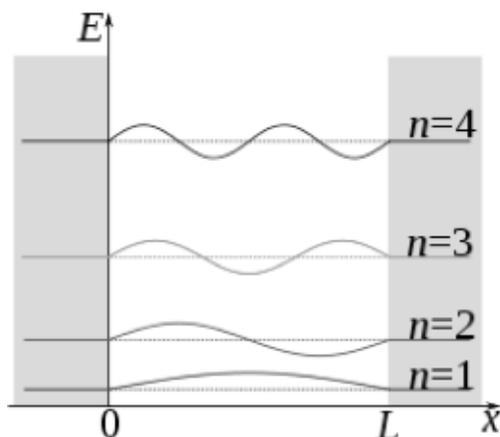


Figura 10. Funciones de onda para una partícula confinada en una caja o pozo.

Comentario para el profesor

Para un potencial constante la energía es, como ya se dijo, $E = p^2 / 2m = h^2 / 2m\lambda^2$ y tenemos en cuenta que para ondas estacionarias, según vimos en el tema de vibraciones y ondas (Solbes y Tarín, 1996), $L = n\lambda/2$. La reutilización de ambas ecuaciones es muy conveniente didácticamente, para reforzar su aprendizaje. Sustituyendo encontramos $E = n^2 h^2 / 8mL^2$, donde $n = 1, 2, 3, \dots$. Es decir, la E está cuantificada (como en el átomo de Bohr) y la cuantificación es una consecuencia del comportamiento ondulatorio del electrón. Aparecen un estado fundamental y estados excitados cada vez más separados ya que la E es directamente proporcional a n^2 , al contrario que en Bohr que es inversamente proporcional a n^2 . Por otra parte, calculando podemos comprobar que para $n=1$, el electrón tiene el máximo de probabilidad de localización en $L/2$, para $n=2$, la probabilidad en $L/4$ es 0, estando los máximos de la distribución de probabilidad en $L/4$ y en $3L/4$.

Si aplicamos la ecuación de Schrödinger a átomos hidrogenoides (un electrón ligado a un núcleo) aparece la discontinuidad en los valores posibles de la energía, encontrándose los mismos niveles energéticos que Bohr había calculado. Pero Bohr postuló que el momento angular de un electrón en un átomo hidrogenoide está cuantificado, siendo $L = n\hbar$, donde n es el número cuántico principal que también cuantifica la energía y toma valores $n=1, 2, 3, \dots$

En cambio, en la teoría cuántica el momento angular está cuantificado por el número cuántico orbital l , de modo que $L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$, donde $l=0, 1, 2, 3, \dots, n-1$, denominados s, p, d, f... También lo está su tercera componente, por el número cuántico magnético m siendo $L_z = m\hbar$, donde $m_l = -l, \dots, 0, \dots, l+1$. Es decir, L no puede tomar todas las orientaciones posibles, sólo $2l+1$. En un átomo polieletrónico la energía depende de n y l , pero no de m_l porque en el caso de una fuerza central no existe ninguna dirección preferente para el eje z.

Actividad 35. ¿Qué es un orbital atómico?

Actividad 36. Recordar los niveles energéticos de los átomos polieletrónicos y el número de electrones en los mismos. Pero con los números cuánticos introducidos anteriormente, el número de electrones en cada nivel resulta ser la mitad. ¿Cómo solucionó Pauli este problema? ¿Cómo explica esto la estructura del sistema periódico?

Comentarios para el profesor

Estas actividades son una revisión de lo estudiado en la Química de 1º de Bachillerato, profundizando en los aspectos cuánticos. En la Actividad 35 los alumnos no relacionan habitualmente el orbital atómico (OA) con la función de ondas del electrón, sino con la región del espacio en que existe probabilidad de encontrarlo. Esta opción suele estar acompañada del error conceptual de considerar el orbital como una región que los electrones pueden ocupar o no. Con otras palabras: el átomo está constituido por un núcleo y orbitales que pueden estar ocupados o no por electrones. Como este error se introduce desde la enseñanza secundaria, es el más persistente de todos los relacionados con la Física moderna.

Los alumnos suelen recordar, al menos de forma memorística, los primeros niveles

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6$

por la importancia que tiene en la Química. Pero no se suelen relacionar los números cuánticos con las magnitudes que cuantifican. Tampoco se justifica la introducción del espín sin el cual no se puede explicar el número de electrones en cada nivel y, en consecuencia,

el sistema periódico. Para ello Pauli introdujo en 1925 un cuarto número cuántico m_s que sólo podía tomar 2 valores y el principio de exclusión de Pauli, según el cual dos electrones de un átomo no pueden estar en el mismo estado, es decir, no pueden tener los mismos números cuánticos n, l, m_l, m_s . El mismo año Uhlenbek y Goudsmit sugirieron que m_s era la componente z , $S_z = m_s \hbar$ de un momento angular intrínseco del electrón denominado espín. Si m_s tiene sólo dos valores S vale $\frac{1}{2}$.

El espín es una propiedad muy importante de las partículas, como la masa y la carga, que permite clasificarlas en dos tipos:

- con espín semientero ($s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$), son los fermiones (fundamentales, como los quarks y leptones constituyentes de la materia, o compuestos como los bariones p, n, \dots o los núcleos de A impar)

- con espín entero ($s = 0, 1, 2, \dots$), son los bosones (fundamentales como los cuantos de interacción, γ , gluones, bosones débiles W^\pm, Z^0 ... o compuestos, mesones, π, K, \dots o núcleos de A par).

El hecho de que los electrones sean fermiones explica no sólo la 'ocupación' de los niveles energéticos de los átomos y con ello el sistema periódico, sino la estabilidad e impenetrabilidad de la materia a pequeña escala e incluso su forma. También, junto a la masa de la estrella, explica las fases finales de la evolución estelar. Los bosones no cumplen el principio de exclusión y, por ello, a bajas temperaturas pueden ocupar todos el mismo estado. Esto permite explicar la superfluidez del He-4, la superconductividad de ciertos metales, etc.

La Actividad 36, permite interpretar las semejanzas en las propiedades químicas de los elementos de un mismo grupo (o columna), ya que todos sus elementos tienen el mismo número de electrones en su última capa. Por ejemplo, en la 1ª columna (grupo de los alcalinos o del Litio Li) todos los elementos tienen un electrón en la última capa que ceden fácilmente. En la penúltima columna (grupo de los halógenos o del Fluor F) a todos les falta un electrón para completar la última capa y, por tanto, tienden a capturarlo. Los elementos de la última columna (los gases nobles) tienen capa completa y por tanto son muy estables, poco reactivos. También pueden justificar la longitud de los periodos (o filas), a partir del número de electrones que completan cada capa: 2, 8, 8, 18, 18, 32... La explicación de la

tabla periódica se ha considerado como uno de los mayores éxitos de la Física Cuántica.

Pero estos niveles permitidos de energía surgen como consecuencia del carácter ondulatorio del electrón y no ligados a la supuesta existencia de órbitas electrónicas que carecen de sentido. En efecto, en vez de órbitas, la ecuación de ondas nos proporciona funciones de estado Ψ u orbitales atómicos, caracterizadas no por un número cuántico, como las órbitas de Bohr, sino por cuatro (n, l, m_l, m_s) que nos dan toda la información posible sobre el estado del sistema. Es decir, nos dan los valores de la energía E , del momento angular L , de las terceras componentes del momento angular L_z y del spin S_z del electrón en átomos hidrogenoideos. Además el cuadrado del módulo de Ψ nos proporciona la densidad de probabilidad de encontrar al electrón en una determinada zona del espacio. Es conveniente señalar que el espín es un momento angular intrínseco característico del electrón y otras partículas elementales, como la masa y la carga, pero sin análogo clásico.

En sistemas más complejos - átomos polieletrónicos, moléculas, etc., que se estudian en la Química - sólo es posible obtener soluciones aproximadas. Así, en los átomos polieletrónicos, la interacción entre electrones origina más niveles energéticos (subniveles), aunque las distribuciones de probabilidad de los orbitales atómicos tengan formas similares. Asimismo, cuando se unen átomos para formar moléculas, la interacción de los electrones más externos, provoca la deslocalización de las distribuciones de probabilidad electrónica de los orbitales moleculares por toda la molécula y el desdoblamiento de los niveles atómicos para dar niveles moleculares. Esta deslocalización de los electrones más externos es la responsable de los enlaces.

6. Aplicaciones de la Física Cuántica

Actividad 37. Enumerar, en conexión con los diversos niveles de organización de la materia, los progresos científicos y tecnológicos fruto de la nueva Física.

Comentarios para el profesor

En la Actividad 37 comprobamos que la Física Cuántica, junto con la Relatividad, abrieron grandes posibilidades a nuevos progresos científicos y tecnológicos. Así, la nueva Física es capaz de explicar el conjunto de los fenómenos físicos, desde la más pequeña escala a la mayor: desde la estructura electrónica del átomo y del enlace químico, los sólidos y sus propiedades (conductividad, magnetismo, etc.), la estructura del núcleo y el mundo de las partículas elementales, hasta la evolución de las estrellas, las galaxias y el Universo. Con respecto a las aplicaciones, hay que mencionar la microelectrónica (base de los ordenadores, las telecomunicaciones, la robótica, la automatización, etc.), el láser, la física nuclear (centrales, bombas, medicina nuclear, etc., un ejemplo más del carácter productivo- destructivo de las ciencias físicas), los nuevos materiales (fruto de la Química Moderna).

Tiene interés subrayar que la Física Cuántica no se aplica sólo a sistemas microscópicos (átomos, núcleos, partículas, etc.) sino a dispositivos macroscópicos como el láser, los diodos, transistores y chips, las bobinas superconductoras de los electroimanes, etc. Incluso el principio de exclusión es responsable de la evolución de las estrellas.

Entre las aplicaciones ya hemos visto la célula fotoeléctrica, el máser y el láser, y el microscopio electrónico. Una aplicación reciente de gran importancia en la nanotecnología es el microscopio de efecto túnel, basado en el descubrimiento de este efecto por Gamow, para explicar la desintegración alfa de los núcleos.

Actividad 38 (opcional). El potencial nuclear viene descrito por la siguiente curva. ¿Es posible que una partícula clásica atravesase la barrera de potencial? ¿Por qué? ¿Cómo puede atravesarla una partícula alfa?

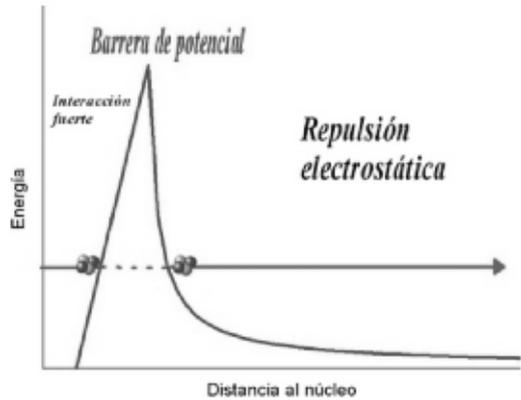


Figura 11. Diagrama de energía para el potencial nuclear

Actividad 39. Busca información en Internet de cómo es posible ver y manipular átomos con el microscopio de efecto túnel

Comentarios para el profesor

Si se ha realizado un análisis de las gráficas de energía potencial gravitatoria y eléctrica (Solbes y Tarín, 1996), es fácil comprender que para pasar bajo la barrera tiene que tener una E_c negativa, ya que $E_c = E - E_p$, lo que es imposible por lo que esta región se denomina clásicamente prohibida. En cambio, la luz (y, en general las ondas electromagnéticas) cuando llegan a un medio opaco, su amplitud disminuye exponencialmente (onda evanescente). Por tanto, si el medio es lo suficientemente delgado, pueden atravesarlo. En consecuencia, dado el comportamiento ondulatorio de la partícula alfa su función de ondas también disminuye exponencialmente y, dependiendo de la altura y anchura de la barrera, tenemos una probabilidad de encontrarla al otro lado. Como es lógico, también se puede explicar con las relaciones de indeterminación de Heisenberg, ya que la energía de una partícula puede venir afectada por una indeterminación ΔE , durante un tiempo $\Delta t = h/\Delta E$, tanto mayor cuanto menor sea la energía ΔE necesaria para atravesar la barrera.

El microscopio de efecto túnel está constituido por una punta de metal finísima. Si acercamos esa punta de metal a un material determinado, los electrones no tienen suficiente energía como para saltar del metal al

material, pero por efecto túnel algunos lo conseguirán. Como la cantidad de electrones que consiguen “saltar” a través del espacio de separación entre nuestra punta de metal y el material depende exponencialmente de la distancia entre la punta y el material esto permite determinar esa distancia de separación con una precisión extrema

En el siguiente tema estudiaremos la Física nuclear y sus implicaciones. Aquí abordaremos algunas aplicaciones técnicas e implicaciones sociales de la microelectrónica.

Actividad 40. Leer el siguiente texto y contestar las preguntas del final

El desarrollo de la electrónica como tecnología se inicia durante la Segunda Revolución Industrial, con la invención del diodo por Fleming en 1904 y del triodo por De Forest en 1906. La primera aplicación fue la radio hacia 1912. La televisión en blanco y negro comenzó hacia 1930 y pasados 10 años ya se había comercializado en los EE.UU. La televisión comercial en color se inició hacia 1950.

Pero el actual desarrollo de la electrónica se produce cuando la antigua electrónica de válvulas es reemplazada por la electrónica de estado sólido. Ambas se basan en el control del comportamiento de los electrones mediante campos eléctricos, primero en el vacío y actualmente en los semiconductores.

El comportamiento de los electrones en los semiconductores se explica por la teoría cuántica mediante la denominada teoría de bandas. En efecto, al igual que sucede con las moléculas, cuando los átomos se unen para formar un sólido, la interacción de los electrones más externos provoca la deslocalización de las distribuciones de probabilidad electrónica por todo el cristal. Los niveles energéticos de dichos electrones, debido a sus interacciones, toman valores de energía que difieren muy poco entre sí, originando una serie de niveles prácticamente continuos (bandas). Entre dichas bandas existen zonas no permitidas energéticamente (bandas prohibidas).

Aunque inicialmente la tecnología de válvulas era superior a la de semiconductores, el gran impulso socioeconómico de los militares estadounidenses a estos últimos, a partir del proyecto de desarro-

llo del radar en la II Guerra Mundial, permitió el desarrollo de la microelectrónica. Ésta se inicia en 1947 con la invención del transistor de contacto por J. Bardeen, W. Brattain y W. Shockley, por el que recibieron el premio Nobel de Física en 1956.

Las ventajas de los transistores sobre las válvulas triodo residen en la miniaturización de los primeros y, en consecuencia, el aumento de velocidad y la disminución del consumo energético. Esto ha favorecido la extraordinaria difusión de la microelectrónica que se ha convertido en la tecnología básica de la actual revolución científico-tecnológica.

Otros descubrimientos importantes de la electrónica de semiconductores han sido la invención del circuito integrado, en 1958, por Kilby, que lo patentó en 1959 y, ese mismo año, Noyce realiza la misma patente, pero con la actual tecnología planar. En 1970 Ted Hoff y la empresa Intel desarrollan el primer microprocesador (chip).

Este desarrollo ha originado una serie de industrias electrónicas que pueden incluirse en uno o más de los siguientes grupos: componentes, comunicaciones, control (empleo de dispositivos electrónicos en el manejo y control de máquinas, base de la automática y la robótica) y ordenadores.

Los productos de la electrónica están presentes en todas las esferas sociales: en la industria, en la administración, en las viviendas (electrodomésticos, ordenadores personales), en el armamento, etc. Sus implicaciones en la vida de los hombres son múltiples: la productividad, la destrucción de empleo, la generación de nuevos empleos, el control de la intimidad de los individuos, etc.

¿Qué implicaciones tiene la microelectrónica en la tecnología y sociedad actual? Profundiza en el tema mediante consultas en Internet.

Valorar críticamente, sopesando ventajas e inconvenientes, su papel en la vida de las personas.

Comentarios para el profesor

El currículum español pide que se traten explícitamente las aplicaciones de la Física Cuántica como la electrónica y sus implicaciones en la Tecnología y la sociedad (CTS), que se pueden seguir en Internet. Podemos mencionar: papel en la productividad, en la destrucción y la generación de empleo, en el control de la intimidad, etc.

7. Recapitulación de la Física Moderna

A título de revisión proponemos las siguientes actividades:

Actividad 41. *Establecer las diferencias más notables entre Física Clásica y Física moderna.*

Actividad 42. *Establecer los límites de validez de la Física Clásica.*

Comentarios para el profesor

Se pueden mencionar en la Actividad 41, las siguientes diferencias entre la visión clásica y cuántica del comportamiento de la materia:

- Carácter continuo de magnitudes como la energía y el momento angular frente al carácter discreto.
- Emisión de radiación de las cargas aceleradas ligadas (igual que las libres) frente a la emisión de radiación de las cargas ligadas sólo en las transiciones de nivel energético (a diferencia de las libres).
- Partículas y campos clásicos frente a cuantos (electrones, fotones, etc) con un comportamiento probabilista.
- Posibilidad frente a imposibilidad de determinar simultáneamente con absoluta precisión la posición y velocidad de una partícula.
- Trayectorias definidas frente a la falta de sentido del concepto de trayectoria para las partículas.

Desde la Relatividad Especial, vista con anterioridad, se podrían añadir las siguientes:

- Carácter absoluto del tiempo ($t=t'$) y del espacio ($x=x'$), frente a su carácter relativo.
- Conservación independiente de la masa y la energía, frente a la equivalencia masa-energía.

En la actividad 42. podemos mencionar, entre otros:

- El límite no relativista: Cuando las velocidades involucradas son apreciablemente menores que la velocidad de la luz en el vacío nos encontramos en el dominio de la Física no relativista ya que el valor de $(v/c)^2$ se hace muy pequeño.
- El límite clásico: Cuando el producto de dos magnitudes conjugadas de un sistema físico toma un valor numérico muy superior a la constante de Planck nos encontramos en el dominio de la Física Clásica. Aunque generalmente esto sucede en los fenómenos macros-

cópicos, hay también fenómenos y dispositivos macroscópicos de carácter cuántico (p.ej. el láser, los diodos y transistores, los superconductores, el helio superfluido, etc.)

Las actividades como ésta y la anterior tienen interés por su carácter recapitulador y porque permiten una mayor comprensión de la Física Clásica al mostrar sus límites de validez o la diferencia entre la teoría clásica y la cuántica y la relativista.

Actividad 43. *Leer el siguiente texto y contestar las preguntas del final*

Hacia 1895 Alemania empieza a ocupar una posición de liderazgo científico e industrial. Como prueba de esta situación basta citar que la producción de acero en 1895 en Alemania era superior a la de Inglaterra y en 1900 era responsable del 90% de la producción mundial de tintes. Otra manifestación del liderazgo científico de Alemania es el hecho de que los principales creadores de las teorías relativista y cuántica -salvo Bohr (danés), De Broglie (francés) y Dirac (inglés)- son alemanes: Einstein, Planck, Sommerfeld, Schrödinger, Born, Heisenberg, Pauli, etc.

Cuando Hitler sube al poder en 1933, se inicia una política belicista, nacionalista y antisemita, promulgándose la ley de restauración de la carrera del funcionariado, según la cual "los funcionarios que no sean de linaje ario han de ser jubilados o pasar a la situación de excedencia". Más de 500.000 personas tuvieron que exiliarse de Alemania, Austria y Checoslovaquia, entre ellos unos 2.500 científicos. Uno de los primeros en ser perseguido fue Einstein. Reunía alguna de las características que más odiaban los nazis: era judío, pacifista y progresista. Schrödinger, pese a su origen judío, podría haber conservado su cátedra en Berlín por ser católico, pero abandonó Alemania por su aversión al nazismo. Pasó a Austria, de donde tuvo que exiliarse al ser anexionada por Alemania en 1938. De los treinta y tres profesores de Física y Matemáticas de la Universidad de Gotinga, veintidós tuvieron que abandonar sus puestos, entre ellos M. Born y J. Frank. Otros físicos exiliados fueron Debye, Hees, Stern, Bloch, Wigner, Bethe y Gabor -que alcanzarían el premio Nobel-, Heitler, London, Nordheim, Peierls, Teller, Szilard, Weisskopf, Baade, Minkowski, Schwarzschild, etc. Muchos de ellos colaboraron

en los EE.UU. con el proyecto Manhattan (construcción y lanzamiento de las primeras bombas atómicas) y con el proyecto radar (localización de aviones o blancos con ondas de radio) y contribuyeron al desarrollo científico estadounidense tras la II Guerra Mundial.

Sin embargo, el nivel científico alemán era tan elevado que aún quedaron muy buenos profesionales en Alemania, como los Premios Nobel Lenard y Stark, miembros del partido nazi, que intentaron desarrollar una física aria (combatiendo las teorías de origen judío, como la relatividad) que sólo fueron apoyados por los nazis inicialmente. Cuando comenzó la guerra, el apoyo nazi se dirigió hacia los físicos que podían participar en el desarrollo armamentístico. En las bombas volantes colaboraron físicos como von Braun y en el proyecto de bomba atómica alemana, Heisenberg (que además presionó a Bohr para que colaborase con los alemanes, por lo cual éste huyó de su país, refugiándose en los EE.UU. en 1942, donde apoyó el proyecto nuclear norteamericano). Hahn (que descubrió con Strassman la fisión nuclear en 1938), Gerlach, von Weizsäcker, Wirtz, Harteck, etc. Aunque no llegaron a producir la bomba por falta de recursos económicos, consiguieron un

reactor nuclear, producir agua pesada, separar los isótopos del uranio, etc. Por último, otros físicos como Planck, Sommerfeld, von Laue, etc, permanecieron al margen.

¿Te resulta familiar alguno de los científicos mencionados en el cuadro? Busca información en Internet sobre alguno de los científicos más relevantes mencionados en este apartado: Einstein, Schrödinger, Born, Heisenberg, Bethe, Teller, etc.

¿Qué efectos puede tener una dictadura como la nazi sobre la ciencia? ¿Conoces otras dictaduras del siglo XX y sus efectos sobre la ciencia?

Comentarios para el profesor

Este cuadro permite unas visiones del contexto histórico y social en que se desarrolla la Física Cuántica. La cuestión 1ª, nos permite conocer no sólo las contribuciones científicas sino también las sociales y políticas, que por los científicos seleccionados son de signo muy diverso. La cuestión 2ª nos muestra los nefastos efectos de las dictaduras en la ciencia, similares en los casos de Hitler, Stalin, Mussolini o Franco.

Referencias

- Balibar, F. y Levy-Leblond, J. M. (1984) *Quantique. Rudiments*. Paris: Interditions.
- Blanco, R. y Níaz, M. (1998). Baroque tower on a gothic base: A lakatosian reconstruction of students' and teachers' understanding of structure of the atom. *Science Education*, 7, pp. 327-360.
- Dirac, P.A.M. (1967) *Principios de Mécanica cuántica*. Barcelona: Ariel.
- Feynman, R. (1971). *Física 1. Mecánica, radiación y calor*. Addison Wesley Longman.
- Fernández, P., González, E. y Solbes, J. (1997). La inclusión de temas actuales de física en el polimodal, *Educación en Ciencias*, 1 (3), pp. 5-10.
- Fischler, H. y Lichtfeld, M. (1992). Modern physics and students conceptions. *Internacional Journal of Science. Education*, 14 (2), pp. 181-190.
- Franco, A. (2006). *Física con ordenador*. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/>
- Gil D., Senent F. y Solbes J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la Física moderna. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2, pp. 16-21.
- Gil D. y Solbes J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education* 15 (3), pp. 255-260.
- Han, M. Y. (1992). *La vida secreta de los cuantos*. Aravaca: Mc Graw-Hill.
- Holton, G. (2004). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35, pp. 15-21.
- Johnston, I., Crawford, K. y Fletcher, P. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20 (4), pp. 427-446.

- Justi, R. y Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science through models: Some challenges in the case of "the atom". *International Journal of Science Education*, 22 (9), pp. 993-1009.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P. y Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*. 87 (2), pp. 257-280.
- Kastler, A. (1976). *Cette étrange matière*. Paris: Stock.
- Kragh, E. (2007). *Generaciones Cuánticas*. Madrid: Tres Cantos.
- Levy-Leblond, J. M. (2002) *Conceptos contrarios o el oficio de científico*. Barcelona: Tusquets.
- National Research Council, (1996). *National Science Education Standards*. National Academy, Washington, DC.
- Petri, J. y Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, 20 (9), pp. 1075-1088.
- Serway, R. (1990). *Physics for Scientists & Engineers*. Philadelphia: Saunders College Publishing, 3rd. ed.
- Solbes, J. (1996). La física moderna y su enseñanza. *Alambique*, 10, pp. 59-67.
- Solbes J, Bernabeu J, Navarro J y Vento V. (1988). Dificultades en la enseñanza/aprendizaje de la física cuántica. *Revista Española de Física*, 2, pp. 22-27.
- Solbes, J. y Sinarcas, V. (2009). Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 23, pp. 123-151.
- Solbes, J. y Tarín, F. (1996). *Física 2º de Bachillerato*. Barcelona: Ed. Octaedro
- Solbes, J. y Vilches, A. (1997). STS interactions and the teaching of physics and chemistry. *Science Education*, 81 (4), pp. 377-386.