

¿Cómo se emite y absorbe radiación? Una introducción a la física cuántica

Francisco Savall Alemany
IES Veles e Vents, Gandia



La UNESCO ha designado el año 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica. En la enseñanza de la Física, es en bachillerato cuando los estudiantes se enfrentan por primera vez al estudio de la física cuántica, especialmente en el segundo curso. Una primera lectura de los textos de uso más habitual para la enseñanza de la física cuántica en bachillerato nos permite observar que suelen presentar una secuencia histórica de los “tópicos cuánticos” (la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, los espectros de los gases, la dualidad onda-partícula de De Broglie, etc.)[1], a pesar de que han pasado más de 100 años desde que se establecieron sus principios más básicos. La investigación didáctica ha constatado que a través de estas propuestas no se consigue que los estudiantes adquieran unos modelos cuánticos de la materia y la radiación coherentes, y que incluso tienen dificultades para explicar los mismos fenómenos que se encuentran en el origen de la teoría cuántica, como el efecto fotoeléctrico o los espectros de los gases.

En este artículo presentamos una propuesta para mejorar la enseñanza de la física cuántica en los cursos introductorios de física, cuya implementación en 2.^º de Bachillerato ha permitido obtener resultados positivos en el aprendizaje de los espectros atómicos por parte del alumnado y en la adquisición de un modelo cuántico del átomo [2]. Esta propuesta se puede usar, con pequeñas modificaciones o adaptaciones, en los cursos introductorios de física cuántica a nivel universitario. No nos centraremos en la presentación de un conjunto de actividades, sino que identificaremos, de manera fundamentada, las ideas clave de un modelo cuántico de la radiación y la materia que tenga capacidad suficiente para explicar fenómenos de emisión y absorción de radiación.

Identificación del problema que llevará a un modelo cuántico de emisión y absorción de radiación

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX existía entre la comunidad de físicos a nivel internacional una cierta sensación de que la física estaba cerca de estar terminada. Solo quedaban algunos aspectos por dilucidar, entre los que se encontraban algunos fenómenos de emisión y absorción de radiación, como el espectro de emisión del cuerpo negro, los espectros de los gases o el efecto fotoeléctrico. Durante el siglo XIX se establecieron las ecuaciones de Maxwell, que per-

mitieron predecir la existencia de ondas electromagnéticas, cuya detección tuvo lugar con posterioridad. De acuerdo con el modelo electromagnético, la emisión de ondas electromagnéticas de una determinada frecuencia es debida a la oscilación de un sistema cargado que oscila a la misma frecuencia que la onda emitida.

Siendo esta la problemática que dio origen a la física cuántica, iniciamos el estudio de la física cuántica planteando a los estudiantes el problema de buscar un modelo que explique la emisión y absorción de radiación. Presentado de este modo, el problema es excesivamente complejo, y se impone la necesidad de hacer un primer análisis, identificando problemas más sencillos que nos permitan avanzar. Es por esto que valoramos de qué maneras podemos emitir luz y qué características tiene la luz emitida en cada caso. No tardamos en identificar fuentes de luz como los procesos de combustión (en los cuales el color de la llama depende de la composición de la sustancia que arde), las bombillas incandescentes (cuyo color depende de la temperatura), las bombillas de bajo consumo o de gases (cuyo color depende del gas que contienen) o los materiales fluorescentes o fosforescentes, que solo emiten luz cuando son estimulados por determinadas radiaciones.

A simple vista, las únicas características que podemos identificar en la luz emitida por las diferentes fuentes son el color y la intensidad. Si pretendemos establecer un modelo que dé cuenta de las características de la radiación emitida por las diferentes fuentes necesitamos conocerlas con más detalle. Para ello, proponemos la construcción y uso de un espectroscopio calibrado para analizar la luz emitida por las fuentes antes citadas [3]. Después de obtener sus espectros, observamos que la combustión y la incandescencia generan luces de espectro continuo, con una infinidad de frecuencias. Sin embargo, los tubos de gases emiten luces de espectro discreto, con pocas frecuencias, algunas más intensas que otras (figura 1). Entre todos los gases, destaca el espectro del hidrógeno por su simplicidad, contiene únicamente cuatro frecuencias, cada una con una intensidad marcadamente diferente, siendo más intensa la radiación de mayor longitud de onda (correspondiente a la línea roja) y la menos intensa la correspondiente a la línea violeta de menor longitud de onda (prácticamente inapreciable en el espectro por su baja intensidad). Parece, por tanto, que el espectro más sencillo de explicar, *a priori*, será el del hidrógeno. La decisión de empezar abordando la explicación del espectro del hidrógeno se ve reforzada por el hecho de que la fuente, los propios átomos de hidrógeno, son los más sencillos: están formados por un único electrón orbitando alrededor de un protón.

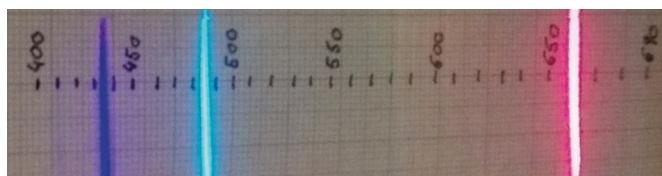


Fig. 1. Espectro de emisión del hidrógeno. Se observan claramente tres líneas con sus respectivas longitudes de onda (en nm) y una cuarta línea de intensidad muy baja de 410 nm de longitud de onda.

Explicación clásica del espectro del hidrógeno

Un primer modelo que dé cuenta del espectro del hidrógeno a partir de la teoría electromagnética lleva a considerar que,

si en la radiación se detectan cuatro frecuencias, debe haber átomos de hidrógeno en la fuente luminosa con un movimiento periódico que corresponda a cada una de esas cuatro frecuencias (figura 2). Por otro lado, el hecho de que la línea roja tenga mayor intensidad se puede atribuir a que haya un mayor número de átomos para los cuales el movimiento periódico de sus cargas coincide con el de dicha radiación. Sería menor el número de átomos cuyas cargas oscilan con la frecuencia de la línea azul, y así sucesivamente para las líneas violetas. Dar por válido este modelo supondría aceptar que cada átomo está vibrando con una de cuatro posibles frecuencias. ¿Quiere decir esto que solo vibran en una de cuatro posibles frecuencias y que no se producen cambios entre ellas? ¿No supondría eso la existencia de 4 tipos diferentes de átomos de hidrógeno, tal vez con propiedades químicas diferentes? No tenemos evidencia de que eso sea así.

Surgen mayores problemas cuando se plantea un análisis energético más complejo. A medida que cada átomo emite radiación debe ir perdiendo energía, lo que se traduce en un acercamiento del electrón al protón en su movimiento orbital, y un cambio en la frecuencia de emisión que no se detecta en los espectros.

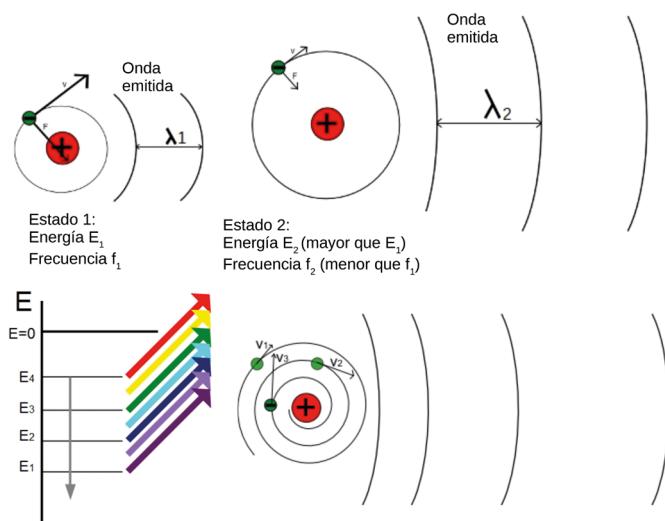


Fig. 2. De acuerdo con el modelo electromagnético de emisión de radiación, los átomos de hidrógeno deberían realizar un movimiento periódico de frecuencia coincidente con la de la radiación emitida. En la parte superior se muestra este hecho para dos átomos y frecuencias. La emisión continua de radiación debería llevar a una pérdida paulatina de energía y a la emisión de un espectro continuo, que no se detecta (parte inferior).

El modelo electromagnético no puede explicar la emisión del espectro del hidrógeno, el del átomo más sencillo. Es más, de acuerdo con dicho modelo, el átomo de hidrógeno ni siquiera es estable. Llegados a este punto, es de gran importancia que los estudiantes se enfrenten a esta situación de crisis para tomar conciencia de que nos enfrentamos a la construcción de un nuevo modelo que rompe con la física aceptada hasta el momento, a un cambio que supuso una profunda crisis en la comunidad científica de principios del siglo xx.

Establecimiento de un primer modelo cuántico que explique el espectro del hidrógeno

La crisis a que nos enfrentamos obligó a la comunidad científica a proponer hipótesis que entraban en conflicto con la

física sólidamente consolidada hasta el momento, y es así como debemos avanzar. Para explicar el espectro del hidrógeno Niels Bohr tuvo que postular que la emisión de radiación se produce cuando los átomos de hidrógeno realizan transiciones entre estados de energía estacionarios, en los cuales los electrones orbitan sin emitir radiación [4, 5]. Este nuevo modelo de emisión rompe con dos aspectos esenciales del modelo electromagnético de emisión de radiación. Por una parte, desvincula la emisión del movimiento periódico de las cargas eléctricas de la fuente, los electrones orbitan en un estado estacionario sin emitir energía. Por otra parte, considera que la frecuencia de la radiación emitida no guarda relación con la frecuencia de oscilación de las cargas eléctricas en la fuente, sino que se relaciona con la diferencia de energía de los estados estacionarios entre los que tiene lugar la transición que da origen a dicha radiación, a través de la ecuación $\Delta E_{\text{átomo}} = h\nu_{\text{radiación}}$, donde h es la constante de Planck. Para dar cuenta de las líneas espectrales del hidrógeno, Bohr postuló que la energía de los estados estacionarios del hidrógeno debía responder a la expresión

$$E = \frac{-13,6 \text{ (eV)}}{n^2} \quad (1)$$

siendo n un número natural.

De acuerdo con los postulados de Bohr, el hecho de que haya cuatro líneas en el espectro del hidrógeno se relacionaría con cuatro transiciones diferentes entre estados estacionarios de sus átomos al ser excitados (figura 3). Esta primera explicación cualitativa no nos debería parecer suficiente para dar por aceptados unos postulados que rompen radicalmente con todo lo que se sabe sobre emisión de ondas electromagnéticas. Buscamos en el hidrógeno más evidencias que apoyen este nuevo modelo.

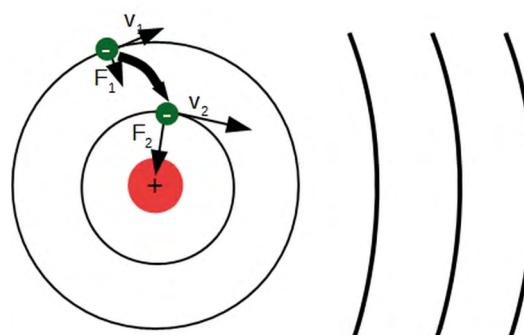


Fig. 3. La emisión de radiación de una determinada frecuencia tiene lugar cuando el átomo lleva a cabo una transición entre estados estacionarios. La frecuencia de la radiación ya no guarda relación con el movimiento periódico orbital del electrón.

La primera evidencia la podemos encontrar en la ionización. Para ionizar los átomos de hidrógeno es necesario iluminarlos con luz de una frecuencia de mínima de $3,28 \cdot 10^{15}$ Hz. Este resultado es coherente con el nuevo modelo cuántico: con la absorción de esta radiación se produce en el átomo una transición de 13,6 eV, que permitiría ionizar a los átomos de hidrógeno (figura 4). Con radiaciones de frecuencia superior se producirían transiciones más energéticas, todas ellas darían una energía positiva al sistema protón-electrón y supondrían la ionización del átomo, fuese cual fuese su energía inicial de acuerdo con la ecuación 1.

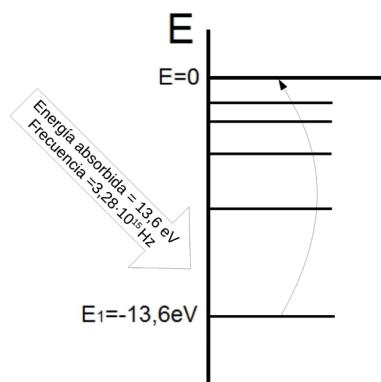


Fig. 4. La emisión de radiación de $3,28 \cdot 10^{15}$ Hz o frecuencia superior lleva al átomo a una energía igual o superior a 0, ionizando el átomo.

Usando la ecuación 1 podemos calcular las frecuencias de la radiación que emite el hidrógeno y compararlas con las registradas en el espectroscopio. Para ello, calculamos la energía de los primeros estados estacionarios del hidrógeno y las frecuencias de las radiaciones que se emiten cuando se producen transiciones entre ellos. Observamos que las frecuencias de las radiaciones registradas con el espectroscopio se corresponden con las transiciones de los átomos de hidrógeno desde los estados 3, 4, 5 y 6 al estado 2 (figura 5). Este avance es crucial (puesto que aporta una sólida evidencia cuantitativa) pero genera dos nuevos problemas:

¿Por qué se observan solo cuatro frecuencias en el espectro y no todas las calculadas? ¿Dónde están las líneas que faltan en el espectro? Una primera reflexión nos permite darnos cuenta de que las frecuencias por las que nos preguntamos corresponden a radiación no visible, siendo así imposible registrarla con nuestro espectroscopio. El uso de técnicas adecuadas, no disponibles en laboratorios escolares, nos permite encontrar las frecuencias no visibles del espectro del hidrógeno y confirmar que coinciden con las que hemos calculado.

¿Se producen transiciones entre cualesquiera estados estacionarios sin pasar por los estados intermedios? De no ser así, en el espectro visible solo se registraría la línea roja, correspondiente a la transición entre el tercero y segundo y estado estacionario. Sin embargo, de acuerdo con la física clásica, si un sistema emite energía lo hará de forma continua, recorriendo el continuo de energía desde el estado inicial hasta el estado final. Aceptar el nuevo modelo cuántico de átomo supone admitir que las transiciones entre estados se producen sin recorrer no solo el continuo de energía sino ni siquiera los estados intermedios. Esto lleva, además, a un choque frontal con el principio de conservación de la energía: la emisión de un tren de onda requiere un breve lapso de tiempo en que el foco emite energía de manera continua, aspecto que no pasó desapercibido a los investigadores de principios del siglo xx, algunos de los cuales llegaron a negar la validez general del principio de conservación de la energía, reduciéndola a intervalos suficientemente largos de tiempo.

Este último problema pasa desapercibido al abordar la explicación de los espectros usando el concepto de fotón. Históricamente el trabajo de Bohr data de 1913 mientras que la explicación dada por Albert Einstein al efecto fotoeléctrico es de 1905. Sin embargo, Bohr considera en su trabajo que la radiación está formada por ondas electromagnéticas. De he-

cho, la hipótesis de cuantización de la energía en la radiación propuesta por Einstein en 1905 sufrió un fuerte rechazo por parte de la comunidad científica y no fue hasta 1923, con la explicación del efecto Compton, que dicho modelo es aceptado. Si bien el estudio del espectro del hidrógeno no nos permite introducir de forma sólida la cuantización de la energía en la radiación, sí resulta interesante destacar que pone de manifiesto profundas dificultades relacionadas con el modelo ondulatorio de radiación, tan profundas como las que afectan a la validez del principio de conservación de la energía.

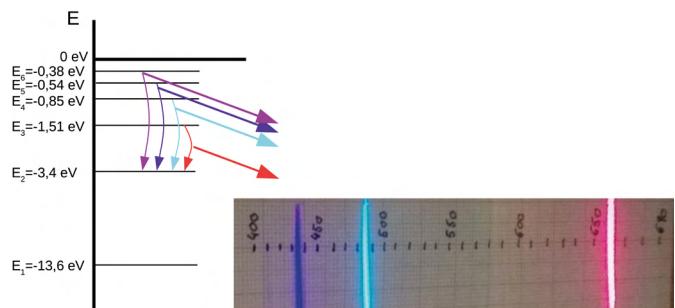


Fig. 5. Las radiaciones detectadas en el espectro visible del hidrógeno se corresponden con las transiciones atómicas desde los estados con $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$ y $n = 6$ al estado con $n = 2$.

Las aportaciones iniciales de Bohr abordaron las frecuencias del espectro del hidrógeno, pero no daban ninguna interpretación de las intensidades. Fue Einstein quien, en 1917, relacionó la intensidad de cada líneapectral con la probabilidad de que se produzca en el átomo la transición electrónica que da lugar a la radiación de dicha frecuencia, de modo que las líneas más intensas del espectro se corresponden con las transiciones más probables en los átomos [6]. El hecho de que las transiciones no tengan lugar necesariamente entre estados estacionarios consecutivos dejaba abierta la cuestión de determinar a qué estado tendrá lugar una transición. La presencia en los espectros de líneas correspondientes a todas las transiciones posibles evidencia que no se pueden hacer predicciones deterministas relativas a los procesos de emisión de los átomos excitados. Esta es otra de las grandes diferencias entre el modelo clásico y cuántico de emisión de radiación [7, 8].

El análisis del espectro de absorción de hidrógeno permite consolidar el modelo establecido e introducir nuevas ideas clave (figura 6). De acuerdo con los postulados de Bohr, las transiciones se pueden producir desde estados de menor energía a estados de mayor energía siempre que se absorba radiación que cumpla con la expresión $\Delta E_{\text{átomo}} = h\nu_{\text{radiación}}$. Esta interpretación, que puede parecer obvia, no está exenta de detalles:

Para que los átomos de hidrógeno realicen transiciones desde el segundo estado estacionario hasta estados de energía superior al absorber las radiaciones cuyas frecuencias aparecen en el espectro es imprescindible que haya una proporción importante de átomos que se encuentren en el segundo estado estacionario. Es decir, los átomos deben estar en un estado de excitación previo, en caso contrario las radiaciones visibles del espectro no se absorberán. Esto se puede conseguir, por ejemplo, calentando el gas.

Cuando un átomo absorbe radiación y alcanza un estado excitado emitirá radiación hasta regresar al estado fundamental antes de absorber radiación de nuevo. Las transiciones múltiples a estados cada vez de mayor energía son

extremadamente improbables. Si no fuese así, se podría ionizar los átomos de hidrógeno con radiación de una frecuencia menor a la que se mide experimentalmente.

Aplicando el modelo cuántico de radiación basado en el concepto de fotón para interpretar los espectros de absorción, también evidenciamos que un átomo no puede absorber dos o más fotones y “sumar” su energía para hacer una transición. Así mismo, al analizar la emisión no se ha considerado la posibilidad de que un átomo emita dos fotones al realizar una única transición entre estados estacionarios. A cada transición energética le corresponde la emisión o absorción de una única frecuencia. Este resultado evidencia, en la interpretación de los espectros, la relación entre frecuencia de la radiación y cantidad de energía emitida o absorbida que conecta con el concepto de fotón.

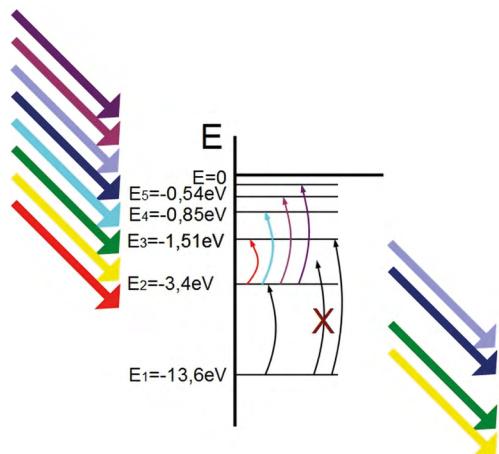


Fig. 6. La formación del espectro de absorción del hidrógeno se debe a que los átomos del gas absorben únicamente las radiaciones que conllevan transiciones entre estados estacionarios. Para que esto ocurra, se necesita que los átomos de hidrógeno se encuentren inicialmente en el segundo estado estacionario, lo que se puede lograr aportando calor. La transición tachada con una X no es posible, puesto que no tiene lugar entre estados estacionarios.

Conclusiones y perspectivas

El modelo establecido se puede emplear para explicar el funcionamiento de las fuentes de radiación que hemos nombrado con anterioridad al estudio en profundidad del espectro del hidrógeno. A pesar de todas sus aplicaciones, la introducción del modelo cuántico de emisión y absorción de radiación no está carente de problemas. Por un lado, supone la aceptación de un modelo corpuscular para la radiación incompatible con el modelo ondulatorio, imprescindible para explicar fenómenos como la interferencia (¡que da cuenta del funcionamiento del mismo espectroscopio!) o para dar sentido a conceptos como frecuencia o longitud de onda de la radiación. Por otro lado, todas las explicaciones que hemos dado de los procesos de emisión y absorción han sido explicaciones *a posteriori*, es decir, establecemos una estructura de niveles energéticos para el hidrógeno que da cuenta de la radiación que emite, pero no disponemos de ningún principio físico que nos permita determinar dicha estructura de niveles y ponerla a prueba mediante el análisis espectral. Por último, incorpora la idea de aleatoriedad intrínseca. Se requiere el establecimiento de una nueva física, que históricamente tuvo lugar a partir de 1925, para superar estas dificultades y recuperar la coherencia en la física.

Referencias

- [1] S. B. MCKAGAN, K. K. PERKINS, M. DUBSON, C. MALLEY, S. REID, R. LEMASTER, y C. E. WIEMAN, Developing and Researching PhET Simulations for Teaching Quantum Mechanics, *American Journal of Physics* **76** (4), 406 (2008).
- [2] F. SAVALL, J. GUIASOLA, S. ROSA y J. MARTÍNEZ-TORREGROSA, Problem-based Structure for a Teaching-Learning Sequence to Overcome Students' Difficulties when Learning About atomic Spectra, *Physical Review Pyisics Education Research* **15**, 020138 (2019).
- [3] F. SAVALL, I. CUESTA, N. PEIRÓ, P. ROCHE y A. TOMÁS, Construcció i ús d'un espectroscopi per a Smartphones (2019). <https://www.uv.es/uvweb/experimenta/ca/novetats/projectes-premiats-2019-explicats-protagonistes-1285927554800/Novetat.html?id=1286094586230>.
- [4] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules, *Philosophical Magazine* **26**, 1 (1913).
- [5] N. BOHR, On the constitution of atoms and molecules. Part II. Systems containing only a single nucleus, *Philosophical Magazine* **26**, 476 (1913).
- [6] A. EINSTEIN (1917), Sobre a teoria quântica da radiação, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27** (1), 93 (2005).
- [7] N. BOHR, *Física atómica y conocimiento humano* (Aguilar, 1964).
- [8] M. JAMMER, *The conceptual development of quantum mechanics* (McGrawHill, 1966).

Descripción de la luz en Bachillerato: modelo ondulatorio clásico, modelo fotónico y teoría cuántica

Pedro González Marhuenda

Dpto. de Física Teórica, Universidad de Valencia (UV),
e Instituto de Física Corpuscular IFIC (UV-CSIC)



Manuel Alonso Sánchez

Sección Local de Alicante de la RSEF



En este artículo, tras repasar los principales aspectos del modelo ondulatorio clásico de la luz que se estudian en Bachillerato, desarrollamos el modelo fotónico, mostrando que su aplicación no tiene por qué limitarse al estudio de hechos no explicables con el modelo ondulatorio clásico, sino que se puede extender a la descripción microscópica del comportamiento de la luz en muchos procesos. En este desarrollo también ponemos en evidencia las limitaciones del modelo, haciendo patente la necesidad de su imple-