



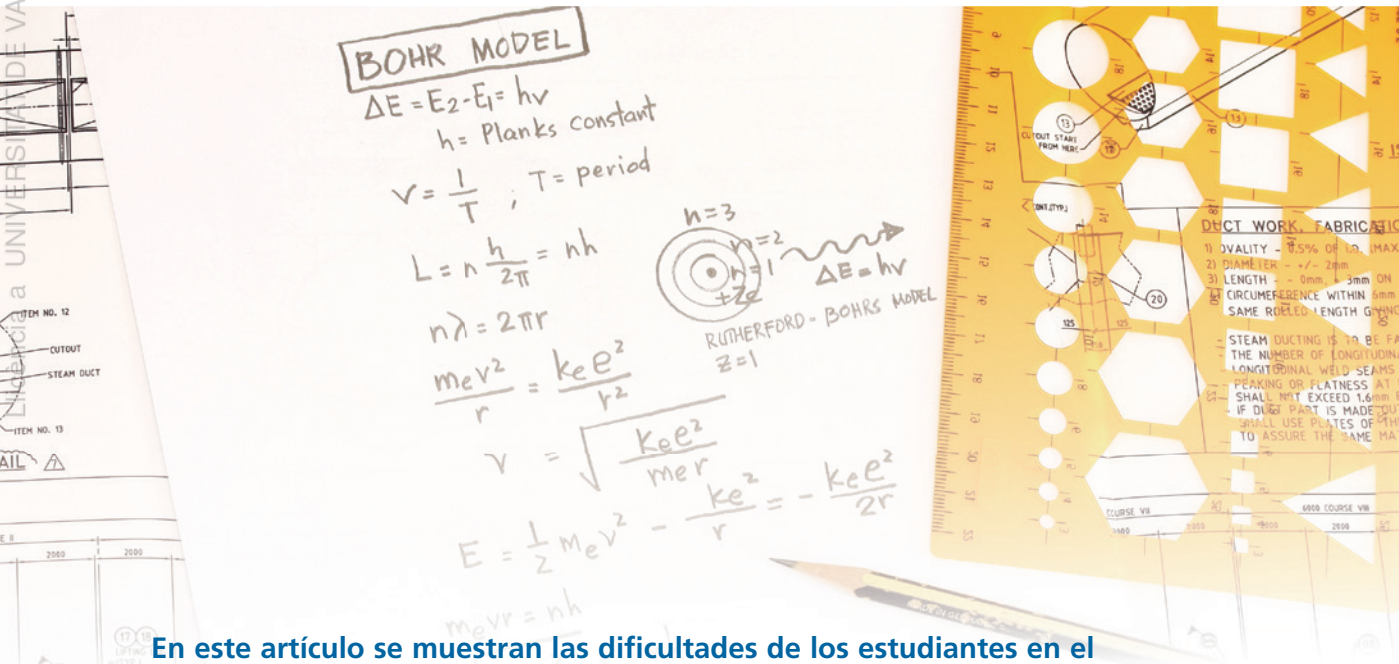
El modelo cuántico del átomo

Dificultades de comprensión y propuestas para su enseñanza

Jordi Solbes

Universidad de Valencia

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA



En este artículo se muestran las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje del modelo cuántico del átomo. Para superarlas se presenta una propuesta de enseñanza de las ideas cuánticas, en particular del modelo precuántico de Bohr, en la que se evita el concepto de órbita, y en la que los niveles permitidos de energía del modelo cuántico surgen como consecuencia del carácter ondulatorio del electrón.

PALABRAS CLAVE

- FÍSICA CUÁNTICA
- COMPRENSIÓN
- MODELO CUÁNTICO
- MODELO ATÓMICO
- MODELO DE BOHR

DIFICULTADES DE APRENDIZAJE DEL MODELO CUÁNTICO

Para entender el modelo cuántico del átomo (de Schrödinger) es necesaria una comprensión de las ideas cuánticas. No obstante, en trabajos recientes (Sinarcas y Solbes, 2013) se ha encontrado que pocos alumnos de 2.º de bachillerato científico son capaces de explicar satisfactoriamente los espectros atómicos y de caracterizar de forma adecuada el estado de un electrón basándose en la función de onda o de estado. En cambio, un 25% del alumnado se refiere al concepto de órbita cuando hablan del movimiento del electrón en torno al núcleo. En cuanto al orbital atómico (OA), consideran que es una zona del espacio que los electrones pueden ocupar. También estiman que el átomo está constituido por un núcleo y un OA que puede estar ocupado o no por electrones, es decir, tienen la idea de un «orbital estantería» que existe independientemente de los electrones.

Sin embargo, la principal dificultad del alumnado en el aprendizaje de la física cuántica es ontológica (Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou, 2003; Solbes y Sinarcas, 2010): **ningún estudiante comprende los electrones, fotones, etc. como objetos de tipo nuevo, es decir, distintos de los modelos clásicos de partícula y onda.** Esta limitación la encontramos también en libros y profesorado.

Por otra parte, también aparecen dificultades epistemológicas relacionadas con lo que se puede o no conocer, es decir, con las relaciones de indeterminación de Heisenberg y con la interpretación probabilista. Así, por ejemplo, menos del 16% del estudiantado entiende adecuadamente el significado de las relaciones de indeterminación.

ERRORES EN LA ENSEÑANZA DEL MODELO CUÁNTICO

a) No se diferencia entre ideas clásicas y cuánticas

En la elaboración escolar del modelo cuántico del átomo la mayor parte de las ideas alternativas que se producen tienen su origen en la enseñanza, bien porque se introducen explícitamente interpretaciones incorrectas que, en parte, coinciden con las que se cometieron en el desarrollo histórico de la cuántica (las ideas iniciales de De Broglie, que considera al electrón partícula y onda, y de Schrödinger que considera el electrón como una onda difundida en el átomo, etc.), bien porque no se muestra la contradicción entre las nuevas ideas y las clásicas y, en consecuencia, el alumnado sigue utilizando estas (Sinarcas y Solbes, 2013).

Por otra parte, **se sigue un método de enseñanza puramente cronológico comenzando con la teoría de Planck, lo que no es conveniente didácticamente para los niveles medios, porque esta presenta una gran dificultad** (supone conocimientos de electromagnetismo y física estadística que el estudiante no tiene). Además, a veces se presenta la expresión $h\nu$ como un *cuanto* de radiación electromagnética o fotón en el marco de la teoría de Planck, concepto que fue introducido posteriormente por Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico.

■

En muchos enfoques se presentan los modelos como una descripción exacta, ignorando sus limitaciones

b) Uso de un modelo de Bohr con órbitas y ondas estacionarias como las de un electrón libre

Se introduce el modelo de Bohr con órbitas y, lo que es más grave, después de De Broglie se representan las órbitas con ondas estacionarias supuestamente armónicas planas, incurriendo así en dos errores: el de la existencia de órbitas y el considerar que la onda de un electrón ligado es como la de un electrón libre. Para evitar la enseñanza de estas ideas erróneas, algunos autores se han manifestado contra el uso del modelo de Bohr (Fischler y Lichtfeld, 1992). Otros –como Solbes, Silvestre y Furió (2010)– proponen continuar usando el modelo de Bohr por dos razones:

- **Para familiarizar a los alumnos con la forma de trabajo de los científicos**, que elaboran modelos para explicar los fenómenos hasta que surgen dificultades que obligan a cambiarlos. La utilización de los modelos clásicos o precuánticos (semiclásicos) es algo frecuente en la práctica corriente de la ciencia. Se utilizan como aproximaciones, es decir, como explicación de forma esquemática y sencilla de fenómenos que de otro modo requerirían una descripción complicada. Sin embargo, en muchos enfoques se presentan los modelos como descripción exacta de la realidad, ignorando que todo modelo tiene sus limitaciones y que solo es útil si se es consciente de ellas.
- **Porque permite introducir de manera sencilla, aunque solo para el caso particular de un electrón ligado a un núcleo, el concepto de «estado del electrón»**, caracterizado por los valores definidos de dos magnitudes: la energía y el momento angular. Además, permite apreciar que estas magnitudes no pueden tomar todos los valores posibles, sino que están cuantificadas por un número cuántico.

c) Presentación inadecuada de las relaciones de Heisenberg

Respecto a las dificultades epistemológicas de la física cuántica, las relaciones de Heisenberg tienen un papel crucial. Muchos textos las llaman «principio de incertidumbre», pero, como muchos otros supuestos principios de la cuántica (correspondencia, exclusión, complementariedad) no es tal principio, ya que no aparece como uno de los postulados que dan respuesta a las 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 obtener cada uno de estos valores si se realiza una medida?, y ¿cómo evoluciona el estado del sistema en el tiempo? Con ello se olvida que **los principios básicos de la teoría cuántica conducen a las relaciones de indeterminación, y que, si se parte de estas, no se pueden deducir aquellos.**

Por otra parte, en su artículo, Heisenberg utilizó indistintamente las palabras «incertidumbre» e «indeterminación», si bien al final, por las traducciones al inglés, prevaleció *uncertainty*, «incertidumbre» (Levy-Leblond, 2002), que da la sensación de que no se puedan conocer la posición o la cantidad de movimiento con precisión, cuando nada prohíbe un estado de movimiento para el que la posición o la cantidad de movimiento se conozca con altísima precisión, sino la imposibilidad de determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición x y la cantidad de movimiento px .

En general, los libros de texto introducen las relaciones de Heisenberg indisociablemente unidas a la observación, lo que puede dar a pie a una utilización ideológica y seudocientífica de la cuántica (Solbes, 2013). En realidad, la teoría cuántica pone

de manifiesto que existe un tamaño o una energía críticas del sistema en las que el comportamiento cuántico deja de ser válido (por ejemplo, no vale para gatos), así como que es la interacción del sistema con el entorno (y una medida es una interacción controlada y reproducible), no la observación, el observador o su conciencia, la responsable de dicho comportamiento y, por tanto, de la indeterminación. Por último, muchos textos las tratan como una ecuación entre magnitudes, olvidando que se trata de unas relaciones entre las desviaciones estándar de las magnitudes.

PROPUESTA DE ACTIVIDADES

Teniendo en cuenta las dificultades de aprendizaje y los errores de enseñanza [se propone iniciar el estudio de los fenómenos cuánticos con dos de los problemas que originaron la crisis de la física clásica: el efecto fotoeléctrico y la existencia de espectros atómicos](#), con objeto de evitar la idea de que son únicamente las limitaciones del electromagnetismo o de la estructura atómica las que justifican la introducción de ideas cuánticas. A continuación, se introduce el modelo de Bohr, el carácter ondulatorio del electrón, la función de onda de un electrón libre y en un pozo, y la función de onda del electrón en el átomo.

Efecto fotoeléctrico

Se trataría de 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 al alumnado 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.

Modelo de Bohr: cuantización de la energía

Para introducir el modelo de Bohr hay que partir de las limitaciones del modelo clásico de Rutherford, incapaz de explicar la evidente estabilidad de los átomos (ya que el electrón acelerado emite radiación) y el carácter discontinuo y característico de los espectros atómicos. Si el centro educativo no dispone de lámparas de gas, se puede analizar, con un espectroscopio de bolsillo el espectro de emisión de las lámparas de Na, muy utilizadas en el alumbrado urbano y el de tubos fluorescentes (imagen 1). La luz de estos contiene el espectro continuo de la sustancia fluorescente blanca que recubre el tubo y algunas rayas intensas del vapor de Hg excitado (Solbes y Sinarcas, 2010). Otros espectros, como los de H y Ne se pueden ver en Internet o en libros de texto. Asimismo, se puede construir un espectroscopio cuantitativo (Savall, Domènech y Martínez-Torregrosa, 2014).

[Es conveniente evitar cualquier representación con órbitas e insistir en la cuantización de la energía y del momento angular, así como en la](#)



Imagen 1. Espectroscopio de bolsillo con espectro continuo de luz visible

idea de estado estacionario, lo que nos lleva a una representación de los niveles energéticos. A partir de ellos se puede pedir al alumnado que justifique los espectros de emisión y absorción. Esto les permite razonar que, al hacer incidir luz, los electrones solo podrán absorber los fotones de energías iguales a las correspondientes a la transición de un valor energético o nivel a otro superior y solo emitirán cuando pasen de dicho nivel a otro inferior. Así, la frecuencia de la radiación emitida puede deducirse de la diferencia de energía entre niveles $E_n - E_m = h\nu$ (imagen 2).

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». Este descubrió en 1885 que las rayas pueden ser expresadas por la

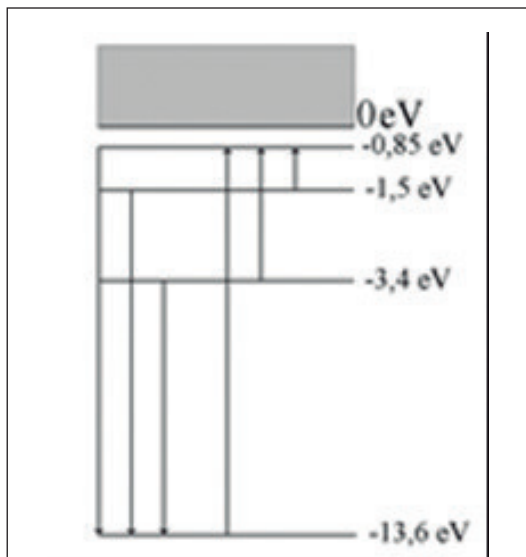


Imagen 2. Diagrama de niveles de energía del hidrógeno, en el que se aprecia la emisión y la absorción de energía

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 y de Paschen en el infrarrojo, etc.

A continuación, se puede proponer al estudiante la siguiente actividad:

Comparando las expresiones $E_n - E_m = h\nu$ y $1/\lambda=R(1/m^2-1/n^2)$, deduce el valor de la energía de los diferentes estados e interpreta el origen de las series espectrales y de la energía de ionización.

La resolución de esta actividad implica una combinación de la ecuación de Balmer y $E_n - E_m = h\nu$. Teniendo en cuenta que $c = \nu \lambda$, obtenemos $E_n = -R h c / n^2$, 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 n ésima 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 observa que la energía del electrón está cuantizada por el número cuántico principal n . 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 vendrán dadas por $E_n = -13,6 \text{ eV} / n^2$. 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, la energía de ionización corresponde a la transición de $n=1$ a n ($E=0$) donde el electrón estará libre.

Carácter ondulatorio de los electrones

Los trabajos de Louis De Broglie introducen una nueva y atrevida hipótesis consistente en atribuir a los electrones un comportamiento ondulatorio, además de su evidente comportamiento corpuscular. Y teniendo en cuenta que la energía de un fotón es $E=h\nu$ y según la teoría de la relatividad es $E=pc$, esto nos permite establecer una relación entre la longitud de onda de un fotón y su cantidad de movimiento $\lambda=h/p$, generalizable a los electrones.

Si se introducen las relaciones de indeterminación (la Ley Orgánica de «Mejora» de la Calidad Educativa, LOMCE, las prescribe en la química de 2.º de bachillerato, pero no en la física de 2.º), conviene hacerlo a partir del carácter ondulatorio del electrón y no del microscopio de Heisenberg. En efecto, si se trata de un electrón libre viene descrito por una onda armónica plana (OAP) cuya λ (o $p=h/\lambda$) está bien definida, por lo que su desviación estándar es $\Delta p = 0$, pero x se extiende de ∞ a $-\infty$, es decir, $\Delta x=\infty$. En cambio, si está descrito por un paquete de onda, no tiene λ (o p) definidos, con lo cual su localización tiene una desviación estándar Δx . Si se hacen problemas numéricos conviene recordar que estos no permiten calcular magnitudes, sino su desviación estándar. **Hay que destacar las implicaciones de las relaciones de indeterminación, es decir, la imposibilidad del conocimiento simultáneo de la posición y de la cantidad de movimiento** –en consecuencia, el concepto de trayectoria deja de tener sentido– y el establecimiento de límites de validez de la física clásica.

La función de onda

Para superar las dificultades ontológicas de la cuántica es recomendable (Levy-Leblond, 2002) insistir en que los electrones, fotones, etc. no son

La teoría cuántica muestra que existe una energía crítica en la que el comportamiento cuántico deja de ser válido



ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos nuevos (los cuantos) con un comportamiento cuántico. En consecuencia, se hace necesario un nuevo modelo para describir el estado y evolución de los cuantos diferente de los utilizados para las partículas y ondas clásicas: la función de onda o de estado, ψ , y su interpretación probabilista. Esta interpretación se puede justificar, como hizo Bohr, teniendo en cuenta que la intensidad de una onda luminosa es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico. Así, como según Einstein la intensidad es proporcional al número de fotones por unidad de tiempo y de superficie, se deduce que el cuadrado de la amplitud del campo eléctrico es proporcional al número de fotones por segundo y por metro cuadrado.

Función de onda de un electrón libre

Presentamos a continuación una actividad que nos permite visualizar la función de onda ψ ; más sencilla, la onda armónica plana (OAP) de un electrón libre.

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

Un electrón libre viene caracterizado por (p_x, p_y, p_z, s_z) , las tres componentes de la cantidad de

movimiento y la tercera componente del espín. Es decir, un electrón libre tiene bien definida su cantidad de movimiento (o longitud de onda, según De Broglie); por tanto, su función de onda es la de una OAP. En consecuencia, su posición está indeterminada (la OAP va de $-\infty$ a $+\infty$).

Función de onda de un electrón ligado

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 mediante una aproximación por pozos cuánticos de dimensión L , que no son una mera abstracción, sino que se fabrican en semiconductores. Se obtiene así que las únicas funciones de onda posibles son OAP estacionarias con longitudes de onda dadas por $L=n \lambda/2$ (imagen 3).

Opcionalmente a partir de la expresión de la energía de un electrón libre $E=h^2/2m\lambda^2$ (que se obtiene a partir de $E=p^2/2m$ y $\lambda=h/p$) y de la relación $L=n \lambda/2$, podemos determinar la E de los estados estacionarios del electrón en un

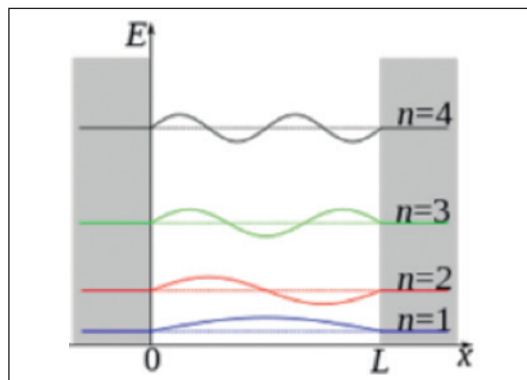


Imagen 3. Funciones de onda para una partícula confinada en una caja o pozo

pozo de energía potencial, $E=n^2h^2/8mL^2$, donde $n=1,2,3\dots$. Es decir, la E está cuantificada y la cuantificación es una consecuencia del comportamiento ondulatorio del electrón.

Átomos hidrogenoides y átomos polielectrónicos

Si aplicamos la ecuación de onda de Schrödinger a átomos hidrogenoides (un electrón ligado a un núcleo) con un potencial coulombiano nos proporciona funciones de estado ψ ; u orbitales atómicos (OA), caracterizados 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, los valores de la energía E , del momento angular L y de las terceras componentes del momento angular L_z y del espín S_z del electrón en átomos hidrogenoides. Pero estos niveles permitidos de energía surgen como consecuencia del carácter ondulatorio del electrón, como hemos visto en la actividad anterior. 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, como la masa y la carga, pero sin análogo clásico.

En sistemas más complejos como los átomos polielectrónicos, solo es posible obtener soluciones aproximadas, y en ellos la interacción entre electrones origina más niveles energéticos (subniveles), aunque las distribuciones de probabilidad de los orbitales atómicos tengan formas similares.

EVALUACIÓN DE LA SECUENCIA

La propuesta didáctica presentada trata de evitar los errores de enseñanza mencionados y ha sido

probada con ocho grupos de 2.º de bachillerato que pertenecían a tres institutos de educación secundaria a lo largo de cuatro cursos, con resultados que ponen de manifiesto una mejora significativa en el aprendizaje de los conceptos necesarios para la comprensión del modelo cuántico del átomo. ◀

Referencias bibliográficas

- FISCHLER, H.; LICHTFELD, M. (1992): «Modern physics and students' conceptions». *International Journal of Science Education*, núm. 14(2), pp. 181-190. Disponible en línea en: DOI: 10.1080/0950069920140206. [Consulta: mayo de 2018.]
- KALKANIS, G.; HADZIDAKI, P.; STAVROU, D. (2003): «An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts». *Science Education*, núm. 87(2), pp. 257-280. Disponible en línea en: DOI 10.1002/sce.10033. [Consulta: mayo de 2018.]
- LEVY-LEBLOND, J.M. (2002): *Conceptos contrarios o el oficio de científico*. Barcelona. Tusquets.
- SAVALL, F.; DOMÈNECH, J.L.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J. (2014): «Espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica». *Revista Brasileira de Ensino de Física*, núm. 36(4), p. 4.302-1/8.
- SINARCAS, V.; SOLBES, J. (2013): «Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato». *Enseñanza de las ciencias*, núm. 31(3), pp. 9-25. Disponible en línea en: DOI: 10.5565/revlenscienv31n3.768. [Consulta: mayo de 2018.]
- SOLBES, J. (2013): «Contribución de las cuestiones sociocientíficas al desarrollo del pensamiento crítico (II): Ejemplos». *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, núm. 10(2), pp. 171-181. Disponible en línea en: DOI: 10.25267/

Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2013.v10.i2.03.

[Consulta: mayo de 2018.]

- SOLBES, J.; SILVESTRE, V.; FURIÓ, C. (2010): «El desarrollo histórico de los modelos de átomo y enlace químico y sus implicaciones didácticas». *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, núm. 24, pp. 83-105. Disponible en línea en: <http://roderic.uv.es/handle/10550/21173>. [Consulta: mayo de 2018.]
- SOLBES, J.; SINARCAS, V. (2010): «Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias». *Revista de enseñanza de la física*, núm. 23(1-2), pp. 57-85. Disponible en línea en: <http://roderic.uv.es/handle/10550/35014>. [Consulta: mayo de 2018.]

Dirección de contacto

Jordi Solbes Matarredona

Universidad de Valencia

jordi.solbes@uv.es

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en noviembre de 2017 y aceptado en mayo de 2018 para su publicación.