

DIFICULTADES EN EL APRENDIZAJE Y LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL BACHILLERATO

DIFFICULTIES IN LEARNING AND TEACHING OF QUANTUM PHYSICS IN
HIGH SCHOOL

Vicent Sinarcas
IES Josep Ribera (Xàtiva)
vicent.sinarcas@gmail.com

Jordi Solbes
Departamento de Didáctica de las Ciencias, Universitat de València
jordi.solbes@uv.es

RESUMEN: La Física Cuántica es una parte importante de la Física. En este artículo, se analiza su enseñanza-aprendizaje en el bachillerato y se muestran las principales dificultades de los estudiantes, particularmente las ontológicas y epistemológicas. El artículo argumenta razonadamente contra prácticas tradicionales en la enseñanza de la cuántica y, finalmente, apunta una nueva aproximación a su enseñanza.

PALABRAS CLAVE: enseñanza-aprendizaje, Física Cuántica, didáctica de la Física.

ABSTRACT: Quantum physics is a very important part of physics. In this paper we analyze its teaching and learning in high school and we show the students' main difficulties, particularly the ontological and epistemological. This article presents some reasoned arguments against traditional methods to teach Quantum physics. Finally, a new approach to quantum physics teaching is showed.

KEYWORDS: Teaching and learning, quantum physics, teaching of physics.

Fecha de recepción: septiembre 2011 • Aceptado: abril 2013

Sinarcas, V. y Solbes, J. (2013) Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato, *Enseñanza de las Ciencias* 31 (3), pp. 9-25

INTRODUCCIÓN

Todos los países avanzados introducen ideas de Física Cuántica en la enseñanza secundaria. En España, los libros de Física y Química de 1.º y 2.º de bachillerato incluyen estas ideas, dado que las sucesivas legislaciones, desde la LOGSE (1990) hasta la LOE (2007) actualmente vigente, así lo establecen. También se ha empezado a introducir por primera vez su enseñanza en países latinoamericanos, con los problemas que ello conlleva de formación del profesorado.

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; Petri y Niedderer, 1998; Johnston *et al.* 1998; Kalkanis *et al.*, 2003). Por esto, a lo largo del trabajo intentaremos dar respuesta a los siguientes problemas:

¿Qué dificultades tienen los estudiantes de Física de 2.º de bachillerato en la comprensión de los aspectos más básicos de la Física Cuántica? ¿Cuáles son las principales carencias de la enseñanza de la Física Cuántica que entorpecen la comprensión de los estudiantes de Física de 2.º de bachillerato?

Ambas preguntas están íntimamente relacionadas y nos demandan un análisis bastante exhaustivo que, por un lado, se centra en las dificultades por parte de los estudiantes para alcanzar una serie de objetivos fundamentales que sirvan como indicadores de la comprensión del tema, y por otro, en los orígenes de estas dificultades, entre los que están las carencias de la enseñanza que reciben a través del profesorado de Física de 2.º de bachillerato y de los libros de texto correspondientes.

Si nos preocupa el problema planteado es porque le concedemos gran importancia a que los estudiantes puedan comprender los aspectos básicos de la Física Cuántica por una serie de razones a varios niveles:

1. a nivel de naturaleza e historia de la ciencia, la Física Cuántica permite dar una imagen más correcta de cómo se desarrolla la ciencia, sobre todo para poner de relieve los problemas que no pudo resolver la Física clásica que provocaron su crisis y el nacimiento de la Física moderna.
2. A nivel conceptual, porque la Física Cuántica es necesaria para una interpretación adecuada de la estructura de la materia y la evolución de los fenómenos microscópicos. Además, es imprescindible para entender el mundo que nos rodea y está cada vez más presente en otras disciplinas como Biología, Química o Medicina; pero también para comprender mejor la propia Física clásica al mostrar sus límites de validez y las diferencias entre ambas teorías.
3. A nivel de las relaciones ciencia-tecnología-sociedad (CTS), dada la creciente importancia de las aplicaciones de la Física Cuántica en nuestra sociedad (electrónica, láser, etc.).
4. A nivel actitudinal, porque a los alumnos les interesan y contribuyen así a mejorar su aprendizaje, no solo las aplicaciones de la cuántica, sino también aspectos más teóricos.

MARCO TEÓRICO

Comenzaremos señalando que en la década de los ochenta no había casi investigación didáctica en Física Cuántica. Como mucho se podía encontrar trabajos sobre cómo introducir determinados temas en revistas como *American Journal of Physics*, *Physics Education*, *The Physics Teacher*. En nuestro país la situación todavía era peor, dado que los currículos de Física y Química de 3.º de BUP y Física de COU casi no introducían Física Cuántica. Por eso las investigaciones en ese plan de estudios sobre didáctica de la Física moderna en nuestro país (Gil y Solbes, 1993) se limitaron fundamentalmente a aspectos de la naturaleza de la ciencia (NdC), en concreto al análisis de si estos alumnos conocían la crisis de la

Física clásica, sus límites de validez, las diferencias entre la Física clásica y la moderna o las razones en contra de las órbitas de Bohr.

Desde los años noventa hasta la actualidad, aunque han aparecido artículos sobre el tema, se puede constatar que la investigación sigue siendo escasa y más aún en nuestro país. Muchas veces se centra en el nivel universitario y en trabajos sobre simulaciones informáticas y experimentos «sencillos». Se ve que hay un consenso general sobre la necesidad de abordar el estudio de la Física Cuántica desde el final de la educación secundaria (Michellini *et al.*, 2000; Olsen, 2002) y en los primeros cursos de la universidad e incluso en la formación del profesorado (Greca y Herscovitz, 2002; Kalkanis *et al.*, 2003; Pereira *et al.*, 2012), interés que deriva de la importancia del tema para la alfabetización científica de los individuos que van a seguir o no estudios científicos y tecnológicos. En esta línea, cabe destacar a algunos autores preocupados por el poco interés de los alumnos hacia la ciencia, y en un intento de transformar los contenidos en algo atractivo, recomiendan modernizar los cursos de Física de secundaria y los introductorios a la universidad mediante la presentación de las ideas cuánticas y relativistas (Holbrow *et al.*, 1995; Solbes, 1996; Ostermann y Moreira, 2000). También hay una gran variedad de propuestas, posiblemente porque la trasposición didáctica de la cuántica es más reciente, desde la descripción de un sistema de dos estados de fotones con polarización lineal (Michellini *et al.*, 2000) hasta la realización de una enseñanza cualitativa de los postulados de la cuántica utilizando una simulación del interferómetro de Mach-Zehnder (Pereira *et al.*, 2012). Aunque muchos trabajos se centran en temas enseñados más comúnmente como el efecto fotoeléctrico, el modelo de Bohr y los espectros atómicos, la ecuación de De Broglie, las relaciones de indeterminación, etc. (Niaz *et al.*, 2010; Olsen, 2002; Pospiech, 2000).

Profundizaremos en las causas de por qué no se está produciendo un aprendizaje apropiado a continuación.

- En el caso de los fenómenos cuánticos, los conceptos y modelos involucrados están aún más alejados de las percepciones cotidianas que muchos otros tópicos de la Física clásica, por lo que su inclusión en la enseñanza de nivel medio no siempre ha sido bien vista por maestros y profesores partidarios de una enseñanza focalizada en los modelos clásicos (Oñorbe, 1996). Muchas veces esto puede ser debido a que el profesorado no tiene la suficiente claridad conceptual sobre la materia que imparte (Kalkanis *et al.*, 2003).
- Otros hablan de que los conceptos involucrados en el estudio de la Física Cuántica son complejos y contraintuitivos, y es necesario tener en cuenta que un tratamiento correcto de la mecánica cuántica supone el uso de un formalismo matemático muy complejo, imposible de entender para los estudiantes de bachillerato (Johnston *et al.*, 1998). Esta postura se acentúa cuando algunos autores afirman que la Física Cuántica solo puede ser formulada en términos de conceptos matemáticos (Gunter, 1980) o que su potencialidad explicativa solo podrá apreciarse a través de un buen manejo del formalismo (Fischler y Lichtfeldt, 1992).
- Pero eso es contradictorio con el hecho de que en los tópicos enseñados mayoritariamente, antes mencionados, se da una visión rápida y superficial, exclusivamente formulística, sin resaltar lo que aportan de nuevo tanto al conocimiento científico como a sus implicaciones CTS. Es decir, se reduce al aprendizaje de unas pocas ecuaciones matemáticamente sencillas que se aplican en «problemas tipo» (Solbes, 1996). En nuestro país, esto se refuerza porque es la forma en la que aparece la Física Cuántica en las pruebas de acceso a la universidad.
- Algunos autores atribuyen la dificultad a la enseñanza de ideas erróneas y, en consecuencia, se manifiestan contra el uso del modelo de Bohr para evitar una descripción del átomo que incluya órbitas (Fischler y Lichtfeldt, 1992). Otros (Solbes, 1996; Kalkanis *et al.*, 2003) se manifiestan en sentido contrario para familiarizar a los alumnos con la naturaleza de la ciencia (NdC) y forma de trabajo de los científicos, que elaboran modelos para explicar los problemas hasta

que surgen dificultades que obligan a cambiarlos. Estos autores recomiendan la utilización de los modelos o las teorías precuánticos por las mismas razones que son utilizados por los físicos: como explicación de forma esquemática y sencilla de fenómenos que de otro modo requerirían una descripción complicada. Sin embargo, aparece un inconveniente: muchos textos presentan las aproximaciones de un modelo como descripción real y correcta, ignorando que todo modelo tiene sus limitaciones y que solo es útil si se es consciente de ellas. Otra razón para usarlos es que los alumnos, como resultado de las informaciones de los medios de comunicación, de la enseñanza previa, etc. poseen una representación atómica mediante órbitas que proponemos explicitar para cambiarla seguidamente, mostrando los límites tanto teóricos como experimentales del modelo.

- La existencia de dificultades no superadas o de visiones deformadas que persisten aún después del proceso de enseñanza-aprendizaje ha sido señalada por Gil y Solbes (1993), Fischler y Lichtfeld (1992), Petri y Niedderer (1998), Johnston *et al.* (1998), Greca y Freire (2003) y otros. Sin embargo, no se encuentran suficientes estudios en la literatura que caractericen el pensamiento del profesor o que propongan alternativas de superación de estas dificultades (Fernández *et al.*, 2005).

Por último, y muy importante, se puede utilizar la enseñanza-aprendizaje de la Física Cuántica para entender aspectos del aprendizaje de los estudiantes en general (Linder, 1993) o sobre el uso de analogías (Kalkanis *et al.*, 2003; McKagan *et al.*, 2008; Neressian, 1992). Así, Linder (1993) señala que la situación de crisis de la Física clásica y el surgimiento de la Física moderna no es la misma que la de la sustitución de la Física aristotélica por la Física clásica. Según este autor, en el primer caso se produce una evolución o reestructuración que no impide que sigamos utilizando los conocimientos y principios de la Física clásica para, por ejemplo, enviar un satélite a Marte. En el segundo, se produce una sustitución y el concepto aristotélico de fuerza no se admite como válido en ninguno de los contextos científicos posteriores. Pero esto, cierto a nivel histórico, es discutible a nivel didáctico porque olvida los cambios procedimentales y axiológicos y, además, es muy difícil que en el aprendizaje se produzca una sustitución (Solbes, 2009).

Neressian (1992) resalta la importancia de recurrir al uso de analogías en el planteamiento inicial de una nueva teoría. Su propuesta se basa en la manera en que razonaban los grandes científicos de la historia, por qué los modelos de teorías ya vigentes eran el punto de partida para la explicación de nuevos fenómenos. Kalkanis *et al.* (2003) señalan que podemos encontrar dos tipos de analogías entre el profesorado en formación que posteriormente serán trasladadas a los estudiantes:

- las analogías clásicas, basadas en la aplicación de la Física clásica al análisis de los fenómenos estudiados que deberían servir para introducir rasgos cuánticos. Refuerzan el pensamiento determinista de los estudiantes en tanto que concilian las visiones cuántica y clásica y hacen que los objetos cuánticos, al darles un tratamiento clásico, sean considerados de una categoría ontológica a la que realmente no pertenecen.
- Analogías pedagógicas, basadas en el uso de símiles de la vida cotidiana. Llevan a la construcción de modelos sintéticos erróneos difíciles de superar. Este es el tipo que más se detecta en los profesores en formación y posiblemente tienen su origen en el hecho de que hablar cualitativamente sobre la teoría cuántica de una forma adecuada es difícil en tanto que todos nuestros conceptos han sido desarrollados a partir de nuestra experiencia diaria (Pospiech, 2000).

Según investigaciones recientes (Kalkanis *et al.*, 2003; 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 (Levy-Leblond, 2003). 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».

Sin embargo, otras investigaciones (Solbes, 2009; Solbes y Sinarcas, 2009) muestran que además de las dificultades conceptuales también pueden aparecer las dificultades procedimentales y axiológicas antes mencionadas y, particularmente, 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.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para resolver el problema propuesto, nos planteamos los siguientes objetivos de investigación:

1. Establecer una serie de objetivos de enseñanza basándonos en el currículo establecido en BOE y DOCV, bastante innovador en lo que concierne a este tema, y las dificultades para conseguirlos, elaboradas a partir de la bibliografía mencionada en el apartado anterior y de la propia experiencia docente. Se pueden ver en la tabla 1.
2. Analizar la comprensión de estos objetivos por los estudiantes y las causas de sus dificultades en este tema.
3. Analizar las carencias de la enseñanza que reciben a través del profesorado de Física de 2.º de bachillerato y de los libros de texto correspondientes.

Para conseguir el segundo objetivo de investigación, hemos elaborado un cuestionario para el alumnado de 2.º de bachillerato. Una selección de los ítems de este se puede ver en la tabla 2, y la relación de los ítems con los objetivos y las dificultades en la tabla 1. Se ha pasado a una muestra de 78 alumnos de 2.º de bachillerato, de seis grupos de seis centros públicos diferentes, después de haberse impartido el tema y dándoles 50 minutos (una sesión lectiva) para contestar. Hay que tener en cuenta que los grupos de Física de 2.º de bachillerato tienen un número reducido de alumnos, dada la escasa afección que suelen mostrar los estudiantes por esta asignatura (Solbes, 2009).

Para conseguir el tercer objetivo, hemos elaborado una red de análisis de textos y un cuestionario para profesores. Una selección de ítems de la red de análisis se puede ver en la tabla 3 y se ha aplicado a diez libros de texto de Física de 2.º de bachillerato de las editoriales con mayor difusión en nuestro país. El segundo se ha pasado a 34 profesores en activo que asistieron a un curso de formación de Física Cuántica al inicio de este para saber sus ideas sobre la enseñanza de estos temas. Pueden verse los ítems al final del apartado 4.2.

Tabla 1.
Objetivos de enseñanza-aprendizaje
de la Física Cuántica y dificultades de los alumnos para conseguirlos

<i>OBJETIVOS</i>	<i>DIFICULTADES</i>	<i>Ítems alumnos</i>
1. Comprender que la Física Clásica (FC) funciona con los modelos de partícula y onda, deterministas, que no pueden explicar una serie de experiencias.	a. No ven la Física Cuántica como un cambio necesario frente a los inconvenientes de la newtoniana.	3.2 y 4.1
2. Explicar la cuantificación de la luz, la materia y determinadas magnitudes (E; L, etc.).	b. No comprenden el papel de los modelos y no saben relacionar un salto de un electrón entre dos niveles con la correspondiente banda de color del espectro del átomo.	1.2
3. Comprender que los electrones, protones, fotones, etc. no son ni ondas ni partículas clásicas, sino objetos nuevos con un comportamiento nuevo, el cuántico.	c. Representan al fotón y al electrón como partículas clásicas (con trayectorias u órbitas). Interpretan erróneamente la dualidad (ondas y partículas, ondas o partículas según la experiencia).	2.3, 2.4, 3.4 y 4.2
4. Comprender la función de estado ψ y su interpretación probabilista.	d. No tienen una imagen clara de qué representa la ψ , por lo tanto, un orbital.	3.4 y 5.2
5. Entender el significado de las relaciones de indeterminación de Heisenberg.	e. Interpretan las relaciones de indeterminación como un error en la medida por la pequeñez del electrón, el protón, etc. Mantienen el determinismo o las órbitas clásicas.	3.4 y 4.2
6. Señalar los límites de validez de la FC e indicar las diferencias más notables entre FC y Física Cuántica (FQ).	f. 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.	2.3, 2.4, 3.2, 3.4, 4.1, 4.2, y 5.2 y 8 (respecto a diferencias)
7. Familiarizar con los métodos de trabajo de los científicos.	g. Desconocen los procedimientos implicados y, en particular, qué hacer cuando no coincide lo predicho por la teoría con los resultados del experimento.	1.2
8. Valorar el importante desarrollo científico y técnico que supuso la FQ.	h. No ven las conexiones de la cuántica con la tecnología y la sociedad.	9

En la preparación de los cuestionarios, se ha tenido en cuenta las técnicas usuales de investigación educativa y se elaboró un primer borrador que examinaron los expertos, se realizó un ensayo piloto para analizar la validez del cuestionario y se reelaboró el cuestionario a la luz de los resultados del ensayo piloto. El análisis de los resultados se realizó independientemente por dos investigadores con objeto de contrastar su validez.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Resultados obtenidos con el cuestionario de alumnos

Mostramos a continuación el análisis de algunos de los resultados obtenidos para los ítems propuestos en el cuestionario destinado a los estudiantes. Se presenta el porcentaje de respuestas correctas y su desviación estándar.

Tabla 2.
Porcentajes de respuestas correctas para los ítems del cuestionario alumnos N=78

ÍTEM	%	S_d
1.2: ¿Cómo explica el modelo de Bohr los espectros discontinuos?	19,2	4,5
2.3: ¿Qué idea tienes de un electrón?	10,3	3,4
2.4: ¿Qué idea tienes de un fotón?	1,2	1,2
3.2: ¿Se puede representar la trayectoria de un perdigón? Explícalo brevemente.	26,9	5,0
3.4: ¿Se puede representar la trayectoria de un electrón? Explícalo brevemente.	7,7	3,0
4.1: El determinismo clásico afirma que si se conocen las condiciones iniciales de un sistema y su ecuación de movimiento (por ejemplo, un MRUA) podemos predecir con exactitud el resultado de una medida sobre él. Explícalo brevemente.	17,9	4,3
4.2: ¿Se aplica este determinismo igualmente a los átomos, electrones, fotones, etc.? Justifícalo.	15,3	4,1
5.2: ¿Cómo se caracteriza el estado de un electrón?	6,4	2,8
8: ¿Qué diferencias hay entre la Física clásica y la Física Cuántica?	9,0	3,2
9: ¿Qué implicaciones tecnológicas y sociales conoces de la Física Cuántica?	10,3	3,4

Podemos destacar el bajo porcentaje de respuestas correctas. El análisis y la discusión con detalle de cada uno de los ítems se realiza a continuación.

ÍTEM 1.2: ¿Cómo explica el modelo de Bohr los espectros discontinuos?	%
NS/NC	53,8
Respuestas correctas	19,2
Respuestas incorrectas	27,0

Los resultados obtenidos en esta cuestión muestran que solo un 19,2% de los alumnos es capaz de explicar satisfactoriamente los espectros discontinuos a partir de las correspondientes transiciones electrónicas entre órbitas permitidas con energía E (y momento angular L) bien definida, de tal forma que la emisión o absorción de energía radiante se produce cuando el electrón pasa de un estado (órbita) a otro, siendo la frecuencia de la radiación emitida o absorbida proporcional a la diferencia de energía entre niveles. De hecho, utilizando un criterio benigno, hemos dado también por buenas aquellas respuestas que no hacen ni este último comentario ni el de la energía E bien definida.

En el resto, hay un 53,8% de NS/NC y un 27,0% de incorrectas. Hay incorrecciones en algunos casos graves, como cuando se confunde al electrón con el átomo: «Las series espectrales del hidrógeno aparecen cuando el átomo cambia de una órbita a otra con diferente nivel de energía.», o cuando confunden y asocian características de las transiciones de «bajada» (espectro de emisión) con las de «subida» (espectro de absorción), por ejemplo: «Bohr explica que los electrones son los que emiten energía pasando de un orbital a otro de nivel energético superior».

ÍTEM 2.3: ¿Qué idea tienes de un electrón?	%
NS/NC	3,8
Respuestas correctas	10,3
Respuestas incorrectas	85,9

Un bajo porcentaje (10,3%) de alumnos tiene un concepto adecuado de electrón en cuanto que es una «partícula» elemental cargada negativamente y con masa que constituye uno de los componentes fundamentales del átomo, y que es un objeto dual. Con criterios benignos no exigimos ni la elemen-

talidad, ni que esta dualidad encaje con la idea de los electrones como objetos nuevos que no son ni partículas ni ondas en sentido clásico. De hecho, no hay ninguno que comente estos dos rasgos.

En el resto, hay un 3,8% de NS/NC y un elevado 85,9% de incorrectas. Encontramos incorrecciones graves en algunos casos, como por ejemplo: «Partícula que gira alrededor de un átomo.», donde se excluye al electrón del propio átomo.

Por otro lado, cabe decir que el 25,6% de los alumnos cuestionados se refieren al concepto de *órbita* cuando hablan del movimiento del electrón en torno al núcleo. Parece, por cierto, que los electrones solo pueden existir en esa situación, como si no hubiera electrones libres. También llegan a decir, en el 12,8% de los casos, que la masa es despreciable o incluso nula, como en este ejemplo: «Se considera que no tiene masa y tiene carga negativa».

ÍTEM 2.4: ¿Qué idea tienes de un fotón?	%
NS/NC	12,8
Respuestas correctas	1,2
Respuestas incorrectas	85,9

Un bajísimo porcentaje (1,2%) de estudiantes tiene un concepto adecuado de fotón como el paquete o cuanto de energía que constituye la radiación electromagnética, sin masa (se propagan con velocidad c) ni carga, y que, al igual que el electrón, es de naturaleza dual (aunque esta dualidad no encaje con la idea de los fotones como objetos nuevos que no son ni partículas ni ondas en sentido clásico). En este sentido, cabe decir que, con criterios benignos también, hemos considerado adecuadas aquellas respuestas que llaman partícula al fotón, o las que no dicen que la carga es nula, pero siempre y cuando se hable de dualidad.

En el resto, hay un 12,8% de NS/NC y un alto 85,9% de incorrectas. Observamos incorrecciones muy graves, como cuando se dice que es el propio fotón el que emite luz, por ejemplo: «Es una partícula que emite luz».

Como contrapartida, tenemos que el 29,5% del total de estudiantes de la muestra relacionan al fotón con la luz, pero la mayoría olvidan su característica principal: la energía. Por ejemplo: «Es la partícula constituyente de los rayos de luz».

Una idea alternativa del 47,4% de los estudiantes es la de considerar al fotón solo como partícula, posiblemente inducida por la enseñanza, que da el paso de la luz como onda a la luz como partícula, sin aclarar su carácter dual.

ÍTEM 3.2: ¿Se puede representar la trayectoria de un perdigón? Explícalo brevemente.	%
NS/NC	21,8
Respuestas correctas	26,9
Respuestas incorrectas	51,3

El 26,9% de la muestra responde adecuadamente que sí se puede representar la trayectoria del perdigón, ya que esta se puede obtener a través de las ecuaciones de movimiento clásicas.

En el resto, hay un 21,8% de NS/NC y un 51,3% de incorrectas. Las incorrecciones que se observan son, en algunos casos, muy graves, como la confusión de la trayectoria con la gráfica posición-tiempo, por ejemplo: «Sí, se puede realizar una gráfica que exprese la posición en función del tiempo» (completada con un dibujo de la gráfica posición-tiempo de un MRU). Cabe decir que esta confusión se reproduce en un 15% de los casos incorrectos.

ÍTEM 3.4: ¿Se puede representar la trayectoria de un electrón? Explícalo brevemente.	%
NS/NC	41,0
Respuestas correctas	7,7
Respuestas incorrectas	51,3

Como vemos existe un bajo porcentaje (7,7%) de estudiantes que contesta adecuadamente que no se puede determinar (y mucho menos representar) la trayectoria del electrón, como consecuencia de las relaciones de Heisenberg, que impiden determinar simultáneamente con precisión absoluta la posición x y la cantidad de movimiento p de este, en las que los límites de esta imprecisión vienen dados por $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$.

En el resto, hay un 41,0% de NS/NC y un 51,3% de incorrectas. Las incorrecciones que hay son, en algunos casos, muy graves, como aquellas que parten de la base de que como no se puede ver el electrón, no podemos saber cómo es la trayectoria, pero que en el fondo sí aceptan que se pueda hablar de trayectoria, como en el caso clásico, por ejemplo: «No se puede representar, el electrón es un elemento muy pequeño que no se puede ver».

Por otro lado, es muy significativo que solo el 9,0% del total haga referencia a los orbitales en sus contestaciones, y la mayoría de estos no tienen claro el propio concepto de orbital, ya que lo conciben como una región que existe con independencia del electrón, como queda patente en el siguiente ejemplo considerado como una incorrección grave: «No, se puede determinar más o menos en el orbital que se encuentra».

ÍTEM 4.1: El determinismo clásico afirma que, si se conocen las condiciones iniciales de un sistema y su ecuación de movimiento (por ejemplo un MRUA), podremos predecir con exactitud el resultado de una medida sobre él. Explícalo brevemente.	%
NS/NC	53,8
Respuestas correctas	17,9
Respuestas incorrectas	28,2

Únicamente el 17,9% del total de la muestra presenta una concepción adecuada que se fundamenta en que la mecánica clásica permite, si conocemos la ecuación de movimiento $r=r(t)$ (generalmente las ecuaciones del MRUA) y el estado del sistema en un instante dado, es decir, las condiciones iniciales, determinar el estado en cualquier otro instante.

En el resto, hay un 53,8% de NS/NC y un 28,2% de respuestas incorrectas. Las incorrecciones que hemos encontrado son, en algunos casos, muy graves, como las que hacen una aplicación incorrecta de las leyes de Newton y/o aluden a la visibilidad, por ejemplo: «Si sobre objetos visibles actúan las mismas fuerzas, tendrán el mismo movimiento y se podrá predecir qué ocurrirá».

Además, el 11,5% de los que contestan lo hacen de forma totalmente matemática o formulística, en términos de parámetros-datos y fórmulas que darán unos resultados; esto hace que queden patentes incorrecciones graves, por ejemplo: «Sí porque siempre te darán algunos datos con los que, mediante las fórmulas adecuadas, encuentras el resultado ($x = x_0 + at$)».

ÍTEM 4.2: ¿Se aplica este determinismo igualmente a los átomos, electrones, fotones, etc.? Justifícalo.	%
NS/NC	43,7
Respuestas correctas	15,3
Respuestas incorrectas	41,0

Hay un bajo porcentaje de estudiantes (15,3%) que muestra una concepción adecuada en el sentido de que no se puede aplicar igualmente el determinismo a estos objetos, ya que, por ejemplo en el caso del electrón, se asocia, de forma cualitativa, su carácter ondulatorio a una cierta deslocalización que impide situarlo en un punto determinado. Se introduce, por tanto, una cierta indeterminación en el movimiento que puede seguir el electrón, por lo que este carecerá de una trayectoria absolutamente determinada. En el fondo de este argumento, subyacen las relaciones de indeterminación de Heisenberg. Hemos aplicado criterios de benignidad aceptando respuestas que justifican el no basándose en argumentos probabilísticos, por ejemplo: «A los electrones se aplica la probabilística (orbitales)».

En el resto, hay un 43,7% de NS/NC y un 41,0% de incorrectas. Las incorrecciones que hemos encontrado son, en algunos casos, muy graves, como aquellas que confieren a estos objetos un comportamiento clásico, por ejemplo: «Sí, porque en estos se utiliza siempre la misma ecuación, y además tenemos la constante de Planck h ».

Como contrapartida, encontramos que un 52,6% de los que contestan lo hacen a favor del no, pero la mayoría usan argumentos erróneos como asociar la indeterminación a un error en la medida dada la pequeñez de los objetos, por ejemplo: «No, debido a la gran inexactitud por su reducido tamaño».

ÍTEM 5.2: ¿Cómo se caracteriza el estado de un electrón?	%
NS/NC	12,8
Respuestas correctas	6,4
Respuestas incorrectas	85,9

Comprobamos que un bajísimo porcentaje de la muestra (6,4%) caracteriza de forma adecuada el estado de un electrón basándose en un modelo más general que no el clásico para describir su comportamiento, a partir de lo que Schrödinger llamó función de ondas o *función de estado* Ψ , que se obtiene resolviendo la denominada ecuación de Schrödinger. También hemos considerado como equivalentes las respuestas que apuntan los cuatro números cuánticos n , l , m_l y m_s que se deducen de la Ψ .

En el resto, hay un 37,2% de NS/NC y un 56,4% de incorrectas. Observamos incorrecciones muy graves, como las que mantienen las mismas magnitudes que en el caso clásico, es decir, posición y velocidad, por ejemplo: «El estado de un electrón se caracteriza por su velocidad y posición».

Por otra parte, cabe decir que solo un 3,8% de los estudiantes hace referencia en sus contestaciones a conceptos como probabilidad y orbital; sin embargo, no tienen claro el propio concepto de orbital, ya que lo conciben como una región que existe con independencia del electrón, como queda patente en el siguiente ejemplo: «No tiene una posición o velocidad conocidas, pero podemos, mediante la probabilidad, saber en qué orbital se encuentra».

ÍTEM 8: ¿Qué diferencias hay entre la Física clásica y la Física Cuántica?	%
NS/NC	24,3
Respuestas correctas (2 o más diferencias)	9,0
Respuestas incorrectas	42,3

Aunque a este nivel se pueden mencionar 5 o 6 diferencias, se considera correcta la respuesta de aquellos que hayan contestado 2 o más, ya que la pregunta habla de diferencias, en plural. Solo hay un 9% de estudiantes que hayan dado más de una respuesta correcta, número muy escaso dado que en el currículo oficial aparece explícitamente.

Cabe decir que un 24,3% de la muestra es capaz de señalar al menos una diferencia con respuestas como, por ejemplo: «La Física clásica habla de certezas y la Física Cuántica de probabilidades», o «Cuantización de la energía», aunque no se ajustan del todo a nuestros criterios.

En el resto, hay un 24,4% de NS/NC y un 42,3% de incorrectas. Hemos encontrado incorrecciones graves, como la confusión de la Física Cuántica con la relatividad, por ejemplo: «Que la Física Cuántica se usa cuando las velocidades se aproximan a la de la luz, de tal forma que las fórmulas cambian ya que se producen deformaciones del tiempo y el espacio». Cabe decir que esta incorrección se da en un 12,8% de los casos.

Otro tipo de incorrecciones que encontramos son derivadas de la contraposición de los términos de exactitud y probabilidad, por ejemplo: «La Física clásica es más exacta y la Cuántica tiene un carácter más probabilístico», atribuyendo así más exactitud a la Física clásica. Se olvidan de que la Cuántica permite determinar con gran exactitud todas las magnitudes *compatibles* (no sujetas a las relaciones de Heisenberg) de un sistema, con 10 dígitos o más de precisión.

ÍTEM 9: ¿Qué implicaciones tecnológicas y sociales conoces de la Física Cuántica?	%
NS/NC	23,1
3 Respuestas correctas	10,3
2 Respuestas correctas	34,5
Una o ninguna correcta	11,5

Como criterio de corrección, hemos considerado correctas aquellas respuestas en las que al menos resultan involucradas tres o más implicaciones, ya que los currículos, los textos y el propio profesorado mencionan muchas más. Únicamente hay un porcentaje del 10,3% que da ejemplos adecuados de implicaciones tecnológicas, en su mayoría las del láser y el microscopio electrónico. Hay que subrayar que, al igual que libros y profesores, no mencionan ninguna implicación social.

Los alumnos mencionan solamente las siguientes implicaciones: «El láser, el microscopio electrónico, la nanotecnología, la tecnología de los ordenadores, la electrónica, la medicina, las células fotoeléctricas, la bomba atómica, el microscopio de efecto túnel». Se puede ver que son limitadas y que no mencionan aplicaciones como la Física Nuclear y de Partículas, que hemos propuesto en los criterios de corrección.

Cabe decir que hay un estimable porcentaje (34,5%) que da dos implicaciones tecnológicas correctas. En el resto, hay un 23,1% de NS/NC y un 32,1% de incorrectas con una (11,5%) o ninguna implicación correcta. Algunos de estos últimos, en la línea de lo que comentábamos en el ítem anterior, nos han puesto ejemplos de relatividad como «el problema de los gemelos».

Resultados obtenidos para la enseñanza (textos y profesores)

Mostramos a continuación un resumen de algunos de los resultados obtenidos después de la aplicación de la red de análisis a los libros de texto. A pesar de que la muestra de libros es reducida, se trata de una selección de algunos de los más utilizados (ECIR, Akal, SM, Oxford, Everest, Anaya, Santillana, Edebé, y dos ediciones diferentes de Mc Graw-Hill) y todos de fechas recientes.

Tabla 3.
Selección de ítems de la red de análisis de textos y número de respuestas correctas

ÍTEMS	N.º
Ítem 1.1: ¿Se menciona que una serie de problemas pusieron en cuestión la Física clásica?	5
Ítem 1.2: ¿Qué problemas se mencionan?	
Ítem 2: En el efecto fotoeléctrico se entiende el fotón como: – una partícula (interpretación corpuscular de Newton). – Un paquete o cuanto de energía. – Se aclara su comportamiento dual.	0
Ítem 8.2: ¿Se ponen en cuestión adecuadamente las órbitas?	2
Ítem 9.1: ¿Se presentan los límites del modelo de Bohr, y que este es un modelo precuántico?	3
Ítem 11: ¿Cómo se interpreta la dualidad?: – onda y partícula, asociada o piloto (De Broglie). – Ondas de materia. – Onda o partícula, según experiencia. – Ni onda ni partícula, sino objeto cuántico (Feynman).	0
Ítem 16: Se relaciona la incertidumbre: – con la imposibilidad de medir con precisión por el propio proceso de medición. – Con la naturaleza ondulatoria del electrón (las ondas clásicas cumplen que $\delta x \delta k \sim 1$). – Con la inexistencia de trayectoria.	2
Ítem 21: ¿Se muestran las diferencias entre la Física clásica y la Física Cuántica?	3
Ítem 22.2: ¿Se presentan 5 o más relaciones de la Física Cuántica con la tecnología?	1

- En el ítem 1.1, vemos que solo la mitad (5 sobre 10) de los libros estudiados advierten de la existencia de una crisis en la Física clásica que da lugar posteriormente a la Física moderna.
- En el ítem 1.2, se observa que la mayoría de libros (9 sobre 10) insisten en explicar el problema del cuerpo negro, sin tener en cuenta que no es nada adecuado didácticamente porque resulta siempre de especial dificultad a la hora de que los alumnos lo entiendan bien, ya que exige conocimientos de electromagnetismo, termodinámica, etc. que no tienen.
- En el 8.2, se aprecia que solo 2 libros ofrecen una justificación adecuada ligada a la dualidad y/o a las relaciones de incertidumbre de Heisenberg: «La imposibilidad de determinar la posición y la velocidad de un móvil en un instante dado, impide, por ejemplo, definir el concepto de trayectoria, no tiene sentido hablar de órbitas electrónicas en los átomos».
- En el ítem 9.1, únicamente tres de los libros presentan las limitaciones del modelo precuántico de Bohr, lo que contribuye a que los alumnos no comprendan su carácter aproximado y la necesidad de cambiarlo por el modelo cuántico.
- En los ítems 2 y 11, se observa que ninguno de los libros presenta los electrones, protones, neutrones, fotones, etc. como objetos de tipo nuevo, es decir, distintos de los modelos clásicos de partícula y onda.
- En el ítem 16, solo dos libros relacionan la incertidumbre como intrínseca a la propia naturaleza de los entes cuánticos (uno en nota al margen), lo cual no favorece que los estudiantes comprendan lo que podemos o no conocer de los sistemas cuánticos, es decir, un cambio epistemológico.
- En el ítem 21, encontramos que tan solo en tres de los libros se pueden encontrar tres diferencias correctas entre la Física clásica y la Cuántica, aunque ninguno de los libros las hace explícitas, lo que contribuiría a comprender y delimitar mejor ambas.
- En el ítem 22.2, únicamente un libro de texto muestra cinco implicaciones de la cuántica con la medicina, la tecnología, etc., y ninguno de ellos presenta implicaciones de la cuántica con la sociedad. Esto denota la escasa importancia que se le da a las relaciones CTS, tema que muchas

veces despierta el interés de los alumnos. El resto lo detallamos: con cuatro implicaciones correctas hay cuatro libros, con tres correctas tenemos dos libros, con dos correctas hay dos libros, y finalmente con una correcta tenemos un libro.

En resumen, se puede apreciar que las grandes editoriales no suelen tener en cuenta las dificultades de los estudiantes, como lo evidencia el que la media de respuestas correctas al cuestionario de los libros ha sido de 3,8 sobre 9 ítems posibles, es decir, bastante baja. Tres de los diez libros analizados se encuentran por encima de la media con cinco respuestas correctas (Ecir, Everest y Mc Graw-Hill1), dos en torno a la media con cuatro respuestas correctas (McGraw-Hill2 y Edebé) y el resto por debajo de la media.

Presentamos a continuación un resumen del análisis de los resultados obtenidos para los ítems propuestos en el cuestionario destinado a los profesores. El cuestionario se ha pasado a 34 profesores que asistieron a cursos de formación.

- En la cuestión «Cómo explicarías la dualidad onda-partícula», se observa que algunos profesores, el 28,1%, tienen ideas alternativas que hacen referencia a la concepción de dualidad como onda asociada a partícula. No hay en esta concepción nada que indique el cambio ontológico que se da en la Física Cuántica, es decir, que no se trata ni de ondas ni partículas clásicas, sino de cuantos. Este patrón se repite, como hemos visto, en los ítems 2 y 11 de los libros de texto.
- En el ítem «Cómo explicarías las relaciones de indeterminación de Heisenberg», encontramos dos concepciones erróneas. En la primera, el 20,6% de los profesores tiene la idea de que no es posible determinar con precisión la posición de una partícula, idea que transmitirán a sus alumnos. En la segunda, el 29,4% asocia las imprecisiones con el proceso de medida, lo que pone de manifiesto que tanto los profesores como los textos (ítem 16) tienen la visión de que hay un cambio epistemológico: es la propia naturaleza cuántica la que establece límites al conocimiento. Por lo tanto, tampoco darán esta visión a los alumnos de 2.º de bachillerato.
- En la cuestión «Qué aspectos o actividades crees que interesa proponer al inicio del tema de Física Cuántica de 2.º de bachillerato», un porcentaje significativo del profesorado (11,8%) establece una doble asociación: de la Física clásica en el mundo macroscópico y de la Cuántica en el microscópico, que a efectos prácticos se traduce en una desvinculación de la Cuántica respecto de la primera con la consecuente pérdida de motivación por parte de los estudiantes. Este patrón se repite también en los libros de texto.
- En el ítem «Qué objetivos importantes pueden servir como indicadores de que el estudiante ha comprendido el tema», el 29,4% de los docentes hace referencia a la resolución de problemas como objetivo, pero tienen la idea de una colección de problemas numéricos, sobre todo no planteados como una investigación (emisión de hipótesis, puesta a prueba de estas para verificarlas o falsarlas, extraer conclusiones, hacerse nuevas preguntas, etc.), y esto contribuye a un aprendizaje casi exclusivamente matemático del tema.
- En la cuestión «Señala aplicaciones tanto teóricas como prácticas de la Cuántica», menos de la mitad de los profesores nos ofrecen cinco o más ejemplos correctos de aplicaciones tanto teóricas como prácticas de la Cuántica, esto nos viene a decir que, al igual que ocurre con los libros, si los profesores en sus clases mencionan aplicaciones lo hacen en número reducido y con carácter anecdótico, al igual que sucede en los libros (ver ítem 22.2).

Por tanto, podemos afirmar que algunos libros y profesores presentan características que no tienen en cuenta las dificultades de los estudiantes y, por tanto, no contribuyen a superarlas e, incluso, en algunos casos introducen ideas alternativas sobre la Física Cuántica.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Del estudio de los diseños o instrumentos desarrollados, podemos extraer las siguientes conclusiones.

Los alumnos muestran un aprendizaje escasamente significativo y se consolidan poco las nuevas concepciones en los estudiantes. Esta proposición se fundamenta en el estudio de los resultados obtenidos en los ítems propuestos en el cuestionario de alumnos, de los cuales hemos presentado una selección en el apartado 4.1, y que resumimos en los siguientes puntos:

- menos del 20% de los alumnos es capaz de explicar satisfactoriamente los espectros discontinuos a partir del modelo de Bohr, lo que puede entorpecer la comprensión de la cuantificación.
- El 0% de los estudiantes ve los electrones, protones, neutrones, fotones, etc. como objetos de tipo nuevo, es decir, distintos de los modelos clásicos de partícula y onda. Este patrón se repite tanto en profesores como en textos.
- Menos del 16% de los estudiantes entiende adecuadamente el significado de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, como hemos visto en los ítems 3.4 y 4.2.
- Un bajísimo porcentaje (6,4%) caracteriza de forma adecuada el estado de un electrón basándose en un modelo más general que el clásico para describir su comportamiento. Lo hace a partir de lo que Schrödinger llamó *función de ondas o función de estado*, que se obtiene resolviendo la denominada ecuación de Schrödinger.
- Solo un 9% de los alumnos es capaz de señalar dos diferencias correctas entre la Física clásica y la Cuántica.
- Tan solo el 10,3% de los alumnos es capaz de dar tres ejemplos de implicaciones tecnológicas de la Cuántica, y ninguno de ellos los da de sociales. Esta limitación la encontramos también en libros y profesores.

Tras el análisis de los resultados obtenidos con la aplicación de la red de análisis de textos, podemos concluir que los libros, considerados globalmente, presentan características que no favorecen el correcto aprendizaje de la Física Cuántica e, incluso, introducen algunas ideas incorrectas sobre temas como la dualidad (por ejemplo, parece que Esta se aplica a los electrones pero no a los fotones), las relaciones de Heisenberg, etc.

La práctica habitual no favorece un aprendizaje significativo, ya que el profesorado introduce de forma acrítica los conceptos desde orientaciones que no tienen en cuenta los resultados de la investigación didáctica. Además presentan ideas incorrectas respecto a la dualidad, la indeterminación, etc.

En resumen, podemos decir que los estudiantes no alcanzan los objetivos propuestos en gran parte porque la enseñanza realizada no favorece la superación de sus dificultades.

Este trabajo, sin embargo, nos abre nuevas perspectivas para continuar investigando. Hemos redactado una secuencia de actividades que tiene en cuenta el currículo oficial, los resultados de la investigación didáctica y el desarrollo histórico de la cuántica (Solbes y Sinarcas, 2010), e incluye aspectos conceptuales, de procedimiento y de relaciones CTS, etc. Hay que tenerlos en cuenta para conseguir cambios conceptuales (ontológicos y epistemológicos, principalmente) y de actitud del alumnado.

A nivel conceptual, proponemos 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. Ambos casos pueden favorecer una mejor comprensión de la naturaleza de la ciencia (NdC) si se muestra cómo la Física clásica es incapaz de explicarlos, por lo que se requieren nuevas hipótesis sobre la naturaleza de la luz y la materia que rompen con la teoría clásica. Es necesario insistir en la cuantificación de la energía y del momento angular, y en el carácter dual del fotón para que no incurran en el error de reducir el fotón a su aspecto corpuscular volviendo a las concepciones de Newton.

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; Levy-Leblond, 2003). En consecuencia, se cumplen en este caso las relaciones de indeterminación y se hace necesario un nuevo modelo para describir el estado y la 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.

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?

A nivel de procedimientos, se hacen experiencias con espectros de emisión y, dado que otras tienen costes prohibitivos para la secundaria, se utilizan simulaciones del efecto fotoeléctrico (Franco, 2006) o sobre cómo afecta la observación a la interferencia de electrones (Pereira *et al.*, 2009), o vídeos de la difracción de electrones. Asimismo, se aplican los conceptos introducidos a la comprensión de problemas de relevancia tecnológica, social (relaciones CTS), en particular, se resaltan las grandes posibilidades de nuevos desarrollos científicos y tecnológicos que abrió la nueva Física (el efecto fotoeléctrico, el microscopio electrónico y de efecto túnel, el láser, la microelectrónica, etc.), ya que todas las nuevas tecnologías son cuánticas (Han, 1992), 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.

Esta unidad didáctica está siendo utilizada con estudiantes de 2.º de bachillerato para comprobar si permite superar las dificultades y conseguir los objetivos propuestos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERNÁNDEZ, P., E. GONZÁLEZ y J. SOLBES (2005). Evolución de las representaciones docentes en la física cuántica. *Enseñanza de las Ciencias, VII Congreso Internacional*.
- FEYNMAN, R. (1971). *Física 1. Mecánica, radiación y calor*: Addison Wesley Longman.
- FISCHLER H. y M. LICHTFEDTÍ (1992). Modern Physics and Students' Conceptions. *International Journal of Science Education*, 14 (2) pp. 181-190.
- FRANCO, A. (2006). *Física con ordenador*. Disponible en línea: <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/>>.
- GIL, D. y J. SOLBES (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15 (3), pp. 255-260.
- GRECA, I. y V. E. HERSCOVITZ (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las ciencias*, 2, (2), pp. 327-338
- GRECA, I. y O. FREIRE (2003). Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? *Science & Education*, 12, pp 541-557.
- GUNTER, L. (1980). Models in Physics: Some pedagogical reflections based on the history of science. *European Journal of Science Education*, 2 (1), pp. 15-23.
- HAN, M. Y. (1992). *La vida secreta de los cuantos*, Aravaca: Mc Graw-Hill.
- HOLBROW, C. H., J. C. AMATO, E. J. GALVEZ y J. N. LLOYD (1995). Modernizing Introductory Physics. *American Journal of Physics*, 63 (12), pp. 1078-1090.

- JOHNSTON, I., K. CRAWFORD y P. FLETCHER (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20 (4), pp. 427-446.
- KALKANIS, G., P. HADZIDAKI y D. STAVROU (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87 (2), pp. 257-280.
- KRAGH, E. (2007). *Generaciones Cuánticas*, Madrid: Tres Cantos.
- LEVY-LEBLOND, J. M. (2003). On the Nature of Quantons. *Science & Education*, 12, pp. 495-502.
- LINDER, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 74 (5), pp. 571-583.
- McKAGAN, S. B., K. K. PERKINS, M. DUBSON, C. MALLEY, S. REID, R. LEMASTER y C. E. WIEMAN (2008). Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76 (4 y 5), pp. 406.
- MICHELINI, M., R. RAGAZZON, L. SANTI y A. STEFANEL (2000). Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, 35 (6), pp.406-410.
- NERESSIAN, N. (1992). Constructing and instructing: The role of 'abstraction techniques' in developing and teaching scientific theories. En R. Duschl y R. Hamilton (eds.). *Philosophy of Science, Cognitive Science & Educational Theory and Practice*, Albany: SUNY Press, pp. 48-68.
- NIJAZ, M., S. KLASSEN, B. McMILLAN, D. METZ (2010). Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks. *Science Education*, 94, pp. 903-931.
- OLSEN, R. V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24, pp. 565-74.
- OÑORBE, A. (1996). Avance de la ciencia en el currículum. *Alambique*, 10, pp. 7-9.
- OSTERMANN, F. y M. A. MOREIRA (2000). Física contemporánea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando la formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 18 (3), pp. 391-405.
- PEREIRA, A. P., C. J. H. CAVALCANTI y F. OSTERMANN (2009). On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, 44 (3), pp. 281-291.
- PEREIRA, A. P., O. FREIRE, C. J. H. CAVALCANTI y F. OSTERMANN (2012). Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29, Especial 2, pp. 831-863.
- PETRI, J. y H. NIEDDERER (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, 20 (9), pp. 1075-1088.
- POSPIECH, G. (2000). Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics. *Physics education*, 35 (6), pp. 393-399.
- SOLBES, J. (1996). La física moderna y su enseñanza. *Alambique*, 10, pp. 59-67.
- SOLBES, J. (2009). Dificultades de aprendizaje y cambio conceptual, procedimental y axiológico (II): nuevas perspectivas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6 (2), pp. 190-212. http://venus.uca.es/eureka/revista/Volumen6/Numero_6_2/Solbes_2009b.pdf
- SOLBES, J. y V. SINARCAS (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. Disponible en línea: <<http://roderic.uv.es/handle/10550/21100>>.
- SOLBES, J. y V. SINARCAS (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*, 23, pp. 57-85. Disponible en línea: <<http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia/ojs/index.php/revista/article/view/48>>.

DIFFICULTIES IN LEARNING AND TEACHING OF QUANTUM PHYSICS IN HIGH SCHOOL

Vicent Sinarcas
IES Josep Ribera (Xàtiva)
vicent.sinarcas@gmail.com

Jordi Solbes
Departamento de Didáctica de las Ciencias, Universitat de València
jordi.solbes@uv.es

This paper looks at the following questions:

What are the difficulties that Physics A-level students face in understanding the most basic aspects of quantum physics? What are the main deficiencies in the teaching of quantum physics that can hinder the understanding of Physics for A-level students?

It is of great importance for students to understand the basics of quantum physics for a number of reasons:

1. In terms of history of science and nature, quantum physics can give a more genuine picture of how science develops.
2. At the conceptual level, quantum physics is necessary for a proper interpretation of the structure of matter and the evolution of microscopic phenomena.
3. In terms of the relationship between science-technology-society (STS), there has been an increase in the importance of quantum physics applications in our society (electronics, laser and others).
4. At an attitudinal level, it is shown that students are interested not only in the quantum applications but also in more theoretical aspects which, in fact, help them to improve their learning.

From recent research it seems the main difficulties that students have in learning quantum physics are given at the ontological level: They fail to understand that electrons, photons, etc., are not classical waves or particles, but new objects with new behavior, the quantum. Research also shows that, in addition to the conceptual difficulties, epistemological difficulties could also appear related to what they may or may not know and, therefore, with the Heisenberg uncertainty relations and the probabilistic interpretation.

To solve the proposed problems we pose the following research objectives:

1. To establish a number of learning objectives based on the official curriculum and the difficulties to achieve them; difficulties developed from the literature and our teaching experience.
2. To analyze the students' understanding of those objectives and the causes of their difficulties in this area.
3. To analyze the knowledge gaps resulting from the educational method in higher education and the corresponding textbooks.

In order to achieve the second research goal we have developed a questionnaire that was responded by a sample of 78 high school students. To achieve the third objective we have developed a network for the analysis of textbooks that has been applied to 10 higher education Physics books and a questionnaire that was responded by 34 teachers in service.

The results obtained from the proposed items in the student questionnaire show that:

- Less than 20% of students are able to explain satisfactorily the discontinuous spectra from the Bohr model, which can hinder the understanding of quantification.
- 0% of students see electrons, protons, neutrons, photons, etc. as a new type of objects, different from the classical models of particle and wave. This pattern is repeated in teachers and textbooks.
- Less than 16% of students properly understand the meaning of the Heisenberg relations.
- A very low percentage (6.4%) adequately characterizes the state of an electron based on a different and more general model than the classical one to describe their behavior, the wave function or the Ψ state of Schrödinger.
- Only 9% of the students are able to point out two correct differences between classical and quantum physics.
- Only 10.3% of the students are able to give three examples of technological implications of quantum mechanics, and none of the social implications. This limitation is also found in books and teachers.

After analyzing the results obtained with the implementation of the network text analysis, we conclude that in general the books have characteristics that are not conducive to proper learning of quantum physics and even introduce some incorrect ideas on topics such as duality (for example, it seems that it applies to electrons but not to photons) or the Heisenberg relations.

The usual practice is not conducive to meaningful learning because the teacher introduces the concepts uncritically, from guidelines that do not take into account the results in educational research. They also have wrong ideas about duality and uncertainty.

In summary, we can say that students do not reach the proposed objectives because the teaching does not help overcoming their difficulties.

This work opens up new perspectives for further research. We designed a sequence of activities that takes into account the official curriculum, the results of educational research and the historical development of quantum physics. It also includes conceptual and procedural contents and topics of Nature of Science (NoS) and STS relations. This teaching unit is being used with high school students to see if they can overcome difficulties and achieve the proposed objectives.