

(Reflexión documentada)

LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA CUÁNTICA: UNA COMPARATIVA DE TRES PAÍSES

THE TEACHING OF QUANTUM PHYSICS: A COMPARISON OF THREE COUNTRIES

O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA: UMA COMPARAÇÃO DE TRÊS PAÍSES

Eduardo Miguel González*, Zulma Estela Muñoz Burbano**, Jordi Solbes***

Cómo citar este artículo: González, E.M., Muñoz Burbano, Z.E. y Solbes, J. (2020). La enseñanza de la física cuántica: una comparativa de tres países. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 15(2). DOI: <http://doi.org/10.14483/23464712.15619>

Resumen

La investigación en enseñanza de la teoría cuántica en los niveles medio, de formación docente y en carreras universitarias es un tema de actualidad. Aquí presentaremos algunos de nuestros estudios al respecto, los cuales fueron realizados junto a otros colegas en España, Argentina y Colombia, en ese orden temporal. La metodología utilizada fue el análisis de los currículos vigentes de nivel medio y de formación docente, de libros de textos y entrevistas semiestructuradas a docentes. A ello se suma una reflexión sobre algunas propuestas de transformación didáctica de las que hemos participado. Es muy interesante el hecho de que, más allá de las diferencias en tiempos y sistemas formativos, parece haber mucha similitud en las dificultades encontradas en la realidad educativa de esta temática. Estas radican tanto en la presencia de fuertes preconcepciones como en la carencia de abordajes complejos que puedan facilitar su evolución.

Palabras clave: educación científica; formación de profesores; física cuántica.

Abstract

In the teaching of quantum theory at intermediate levels, teacher education and university careers is a major topic. This paper presents some of the researchers' studies on this subject, carried out jointly with their colleagues from Spain, Argentina, and Colombia, in this temporal order. The methodology used was the

Recibido: 29 de noviembre de 2019; aprobado: 12 de marzo de 2020.

* Doctor en Ciencias Físicas. Docente de la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Correo electrónico: edumgonza@yahoo.com.ar - ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5560-1709>

** Magíster en Educación, Universidad de Nariño, Colombia. Actualmente se desempeña como docente en la Facultad de Educación de la misma institución. Correo electrónico: zulmamu0706@hotmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2325-9405>

*** Doctor en Ciencias Físicas. Docente del Departamento de Didáctica de las Ciencias de la Universidad de Valencia, España. Correo electrónico: Jordi.solbes@uv.es - ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8220-209X>

analysis of current mid-level curricula, teacher training techniques, textbooks, and semi-structured interviews with teachers. A reflection is added on some didactic transformation proposals in which the researchers participated. It is very interesting that, besides the differences in time and training systems, there seems to be much similarity in the difficulties encountered in the educational reality of this subject—they both face strong prejudice and lack of complex approaches that can facilitate their evolution.

Keywords: science education; teachers training; quantum physics.

Resumo

A pesquisa no ensino da teoria quântica nos níveis de educação média, a formação de professores e as carreiras universitárias são um tópico de grande relevância atual. Aqui, apresentaremos alguns de nossos estudos sobre esse assunto, realizados em conjunto com outros colegas da Espanha, Argentina e Colômbia, nessa ordem temporal. A metodologia utilizada foi a análise dos currículos atuais de nível médio e a formação de professores, livros didáticos e entrevistas semi estruturadas com os professores. A isto, se acrescenta uma reflexão sobre algumas propostas de transformação didática das quais participamos. É muito interessante que, além das diferenças de tempo e sistemas de treinamento, pareça haver muita semelhança nas dificuldades encontradas na realidade educacional desse assunto. Encontram-se tanto na presença de fortes preconceitos quanto na falta de abordagens complexas que possam facilitar sua evolução.

Palavras chave: educação científica; formação profissional; Física quântica.

Introducción

Este artículo corresponde a una reflexión documentada, producto de la investigación didáctica. El objetivo es generar un espacio de reflexión en torno a los problemas que actualmente puede presentar la enseñanza de la física cuántica en la educación secundaria de España, Argentina y Colombia. No se trata de una investigación comparada, pero sí es nuestra pretensión abrir el escenario para que se dé este tipo de investigaciones, que fortalezcan la educación científica de nuestros países.

La enseñanza de la física cuántica ha sido motivo de debate en cuanto a su pertinencia en la educación secundaria. Fruto de ese debate, países como España llevan ya una larga tradición de haber incluido en sus currículos esta temática en la educación secundaria. En Latinoamérica, Brasil y Argentina de igual manera incluyen en la educación secundaria la enseñanza de la física cuántica, situación que no se presenta en Colombia.

1. Razones para introducir la enseñanza de la teoría cuántica

La física cuántica se enseña por múltiples razones en la educación secundaria y en la formación docente en muchos países (Kalkanis, Hadzidaki, Stavrou, 2003; Sinarcas, Solbes, 2013; Krijtenburg-Lewerissa *et al.* 2019):

1. En naturaleza e historia de la ciencia, la física cuántica permite dar una imagen más correcta de cómo se desarrolla la ciencia, familiarizando a los alumnos con la forma de trabajo de los científicos que elaboran modelos para explicar los problemas, hasta que surgen dificultades que obligan a cambiarlos. La utilización de modelos es algo frecuente en la práctica corriente de los científicos que pueden basarse en los de la anterior teoría, como aproximaciones. Ser capaz de moverse entre física clásica y

cuántica es un objetivo deseable para mejorar las visiones del trabajo científico y de los instrumentos de aproximación que se utilizan en cada caso.

2. En aspectos conceptuales, 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. Comprender estas cuestiones nos adentra, si se quiere, a un nivel ontológico, puesto que nos obliga a cuestionar las visiones clásicas de la realidad y a asumir, por tanto, una apertura más amplia de su conocimiento.
3. En las relaciones ciencia, tecnología y sociedad (CTS), por la creciente importancia de las aplicaciones de la física cuántica en nuestra sociedad: láser, electrónica (celulares, ordenadores), superconductividad (trenes *maglev* y producción de campos magnéticos intensos), nuevos materiales (grafeno, placas fotovoltaicas), microscopios de efecto túnel que permiten formar imágenes de átomos (fundamentales en nanotecnología y en nanociencia), resonancia magnética, etc. Estos conocimientos son accesibles a los docentes y al público en general, solo que muchas veces no son reconocidos como tales o no se entiende su vinculación con la teoría cuántica.
4. Por otra parte, recientemente se está recurriendo a la física cuántica para legitimar creencias (como teología o misticismo cuánticos) o pseudociencias: educación o curación cuánticas. Las primeras son temas personales, pero la supuesta curación es un peligro para la salud pública, porque ha hecho que enfermos graves abandonen los tratamientos prescritos por los médicos. Esto apoyándose en el prestigio científico de la física cuántica y en las dificultades de la visión cuántica del comportamiento de la materia, más en concreto, en interpretaciones que unen indisociablemente la indeterminación a la observación o que atribuyen las propiedades de los electrones a las decisiones conscientes del observador, se afirma que la mente o la consciencia pueden curar el cuerpo (Solbes, 2013).
5. A nivel actitudinal, porque a los alumnos les interesan estos temas (no solo las aplicaciones de la cuántica, sino también aspectos más teóricos, que les llaman la atención), los cuales contribuyen a mejorar su aprendizaje. En ese sentido, algunas propuestas didácticas (Osterman, Prado, 2005; Fanaro, 2009; Pereyra, Ostermann y Cavalcanti, 2009; Castrillón, Freire, Rodríguez, 2014) ponen en primer plano los aspectos más *impactantes* o controversiales de la física cuántica, como el interferómetro de Mach Zehnder, la teletransportación, etc.

Situación en España

En España, los temas vinculados con la física moderna están incluidos desde hace bastantes años en el currículo. En la Ley General de Educación (LGE) de 1970, se comenzó a introducir la física cuántica, pero no la relatividad, en el último curso del Bachillerato Unificado Polivalente (BUP) (17 años) y en el Curso de Orientación Universitaria (COU) (18 años), en concreto, la *estructura atómica* en la física y química de 3º de BUP (de 4 h semanales) y en la química de COU (4 h) y la *Naturaleza de la luz. Dualidad onda corpúsculo* en la Física de COU (4 h). En la Física, se enseñaba cuantización de la luz (completando los modelos de la

luz) pero, como había mucha física clásica que enseñar, podía no impartirse. En cambio, en química se introducía la cuantización de la materia, es decir, los modelos atómicos, situados al principio del temario y necesarios para explicar la tabla periódica. De tal modo, se presentaba el conocimiento en dos canales separados e incompletos. El análisis de dicha introducción (Solbes 1986; Gil, Senent, Solbes 1986, 1988; Solbes, Calatayud, Climent, Navarro, 1987; Gil, Solbes, 1993) puso de manifiesto que:

1. La enseñanza de la física cuántica, como se puede apreciar en libros de texto y en cuestionarios al profesorado, viene caracterizada por una introducción desestructurada que simplemente yuxtapone o incluso mezcla las concepciones clásicas y modernas, perjudicando por tanto la correcta comprensión de ambas y proporcionando una imagen deformada de cómo se desarrolla la ciencia y de la propia metodología científica. Se habla de manera poco clara de la dualidad, como si el electrón fuese onda y corpúsculo a la vez o como si fuese una partícula *asociada* de una onda. Otros consideran el electrón como un corpúsculo, limitando la dualidad de toda la materia a la luz.
2. En consecuencia, dicha presentación dificulta que el alumnado alcance una mínima comprensión, ni siquiera cualitativa, de las ideas y conceptos fundamentales del nuevo paradigma. En particular, encontramos elevados porcentajes de alumnos de BUP y COU que: desconocen la existencia de crisis en el desarrollo de la física, no citan ninguno de los problemas que provocaron dicha crisis y no mencionan ninguna de las diferencias entre física clásica y cuántica.

Atendiendo a esta realidad, se elaboró una propuesta para estudiantes de BUP y de COU (Solbes, 1986; Gil, Senent, Solbes, 1986; Gil, Solbes, 1993) que tomaba como punto de partida las dificultades insuperables que originaron la crisis de la física clásica, los límites de validez de esta, e intentaba mostrar las diferencias entre la visión clásica y la moderna sobre el comportamiento de la materia. Además, dicha propuesta intenta superar las dificultades introducidas en la programación oficial y los libros de textos basados en la misma.

Veinte años después, la Ley Orgánica General del Sistema Educativo (LOGSE), de 1990, estableció la nueva estructura del sistema educativo: Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO) de 4 años de duración (13-16 años) y el bachillerato de 2 años (opcional, 17-18 años), que aún se conserva. Pero, mantuvo la *estructura atómica* en la física y química de 1º de bachillerato y en la química de 2º de Bachillerato y consolidó la presencia de la física moderna en la física de 2º de bachillerato con la introducción de la crisis de la física clásica y el surgimiento de la física cuántica, elementos de física relativista, elementos de física cuántica y física nuclear y de partículas. En las sucesivas leyes educativas, no ha habido cambios sustanciales en la enseñanza de la física cuántica.

Por ello, nos planteamos un nuevo estudio en la situación de la cuántica para ver si su enseñanza y aprendizaje había mejorado. Encontramos en los trabajos de Solbes, Sinarcas (2009, 2010), y Sinarcas, Solbes (2013) que:

El análisis de textos, utilizados por el 90 % del profesorado durante el 95 % del tiempo (Caldeira, 1992), mostró que estos, 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 (solo dos libros relacionan la incertidumbre como intrínseca a la propia naturaleza de los entes cuánticos), lo cual no favorece que los estudiantes comprendan lo que podemos o no conocer de los sistemas cuánticos, etc.

Por otra parte, en España los profesores de física y química de secundaria son licenciados en química (más del 80 %), física (10 %) y el resto, otras licenciaturas como ingenierías, bioquímica, etc., que hasta 2010 completaban su formación de 5 años con un curso de aptitud pedagógica (CAP), breve (menos de 200 h). Ahora, por la Declaración de Bolonia, acuerdo que en 1999 firmaron los ministros de Educación de diversos países de Europa para iniciar una convergencia que facilite el intercambio de titulados, las licenciaturas duran un año menos, pero deben cursar el máster de formación del profesorado de secundaria de un año de duración (600 h). Los físicos (con cuántica, estado sólido, etc.) tienen una aceptable formación en contenidos, pero el resto no. Ninguno tiene formación en cómo enseñarlos, porque ni en la licenciatura ni en el máster hay cursos sobre didáctica de la física moderna. Por eso, el profesorado introduce de forma acrítica los conceptos desde orientaciones que no tienen en cuenta los resultados de la investigación didáctica.

Además, textos y profesores introducen errores conceptuales de dos tipos: los directos o explícitos, por interpretaciones incorrectas que, en parte, coinciden con las que se cometieron en el desarrollo histórico de la física cuántica y en desacuerdo con las concepciones actualmente vigentes; y los implícitos, por falta de un tratamiento didáctico clarificador que muestre cómo las nuevas ideas entran en conflicto con las clásicas y, por tanto, con la estructura conceptual del alumno. En consecuencia:

La mayoría del alumnado no es capaz de explicar satisfactoriamente los espectros discontinuos a partir del modelo de Bohr, lo que puede entorpecer la comprensión de la cuantificación.

Los estudiantes no entienden 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 en profesores y textos.

Generalmente, el alumnado no entiende adecuadamente el significado de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg.

- Un bajísimo porcentaje caracteriza de forma adecuada el estado de un electrón basándose en un modelo más general que el clásico, para describir su comportamiento a partir de la función de ondas o función de estado de Schrödinger.
- Muy pocos alumnos son capaces de señalar dos diferencias correctas entre la física clásica y la cuántica.
- De igual manera, muy pocos alumnos pueden dar tres ejemplos de implicaciones tecnológicas de la cuántica, y ninguno habla de las implicaciones sociales. Esta limitación la encontramos también en libros y profesores.

En resumen, podemos decir que los estudiantes no comprenden conceptos básicos de física cuántica en gran parte porque la enseñanza realizada no favorece la superación de sus dificultades.

Según investigaciones recientes (Kalkanis *et al.* 2003; Kragh, 2007; Solbes, 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). Otras investigaciones (Solbes, Sinarcas, 2009) muestran que además de las dificultades conceptuales también pueden aparecer dificultades epistemológicas relacionadas con lo que se puede o no conocer y, por tanto, con las relaciones de indeterminación y con la interpretación probabilista. Aunque muchos las denominan *principio de incertidumbre*, no es un principio, sino una consecuencia de estas, y hablar de incertidumbre da la sensación de que no se puedan conocer la posición x o la cantidad de movimiento p con precisión, cuando nada impide un estado de movimiento en el que x o p se conozcan con altísima precisión; lo imposible es determinar simultáneamente con precisión absoluta x y p (Levy-Leblond, 2002; Solbes, 2018). Por ello, se desarrolló una nueva propuesta que intenta superarlas (Solbes, Sinarcas, 2010) evaluada con ocho grupos de 2° de bachillerato de tres institutos de secundaria a lo largo de cuatro cursos, con resultados que ponen de manifiesto una mejora significativa en el aprendizaje de los conceptos cuánticos (Sinarcas, 2015).

Situación en Argentina

En Argentina existe un sistema no universitario, los Institutos de Educación Superior o Profesorados *terciarios*, destinados a la formación docente inicial. Estos terciarios, si bien cumplieron durante décadas con su misión de proveer docentes al sistema educativo, con el paso del tiempo quedaron alejados de los criterios de dedicación, investigación y producción de conocimientos que eran necesarios según las nuevas demandas educativas. Ello devino en limitaciones estructurales que hacían imposible alcanzar la excelencia anhelada (Maiztegui *et al.* 2001).

Esta realidad se ha modificado en dos sentidos: las universidades se han involucrado recientemente en esta problemática y han creado carreras de formación docente con título de grado; y se han iniciado procesos de transformación de aquellos *terciarios* para acercarlos a las adecuadas condiciones de dedicación y excelencia. Algunos de esos avances se apreciarán en los diseños curriculares que analizamos.

Los temas incluidos en *la física del siglo XX* se desarrollaban en los viejos diseños curriculares en diversas asignaturas como parte de la cultura científica del futuro profesor, pero no siempre se pensaba en abordarlos en la enseñanza (Fernández, González, Solbes, 1997, 2000, 2005).

Para avanzar sobre el estado de las preconcepciones de los docentes en la teoría cuántica nos apoyaremos en un estudio de Fernández, González, Solbes (2000). Se basó en dos instrumentos: una encuesta de preguntas abiertas y semiabiertas, y una entrevista personalizada a 70 docentes en proceso de capacitación o licenciatura. Las respuestas fueron analizadas mediante métodos cualitativos y cuantitativos y los resultados discutidos por varios investigadores. Esto permitió avanzar en el conocimiento de las visiones docentes sobre los temas principales de la física cuántica, mostrar las dificultades conceptuales para el

conocimiento de los modelos tratados y cómo se relacionan estas visiones con modelos anteriores. Repasemos algunos resultados:

Al preguntarles a los profesores qué temas de física cuántica recuerdan haber visto en el cursado de su carrera, sus respuestas no presentaron diferencias significativas; en cambio, sí insistían en: radiación de cuerpo negro, constante de Planck, átomo de Bohr, efecto fotoeléctrico, los que pueden incluirse en el periodo precuántico. Otros agregaban: dualidad onda/partícula, *principio de incertidumbre* o ecuación de Schrödinger. Algunos no recordaban o no contestaban, o mencionaban cuestiones vagas como *quantum* de energía, onda en el átomo.

Al pedirles que describieran algunos fenómenos que no podían ser explicados desde la física clásica, las respuestas vertidas aludieron a los experimentos históricos comunes en la bibliografía, sin mencionar referencias a aplicaciones actuales. Los temas más citados fueron: cuantificación de la energía, efecto fotoeléctrico, catástrofe ultravioleta, radiaciones alfa, beta y gamma, espectro de emisión. Muchos manifestaron no recordar nada sobre esto y algunos aludieron a cuestiones no muy pertinentes, como “espacio y tiempo son relativos” o “no existe el espacio tiempo absoluto”, evidenciando dificultades en diferenciar la física cuántica de la relatividad.

Al preguntárseles por los autores de algunas cuestiones de física cuántica, enunciadas en textos seleccionados, todos los grupos atribuyeron aspectos o problemas a nombres, en forma simplista y memorística, identificándose las siguientes asociaciones:

- Dualidad-De Broglie: se atribuye a este, en forma arbitraria y abstracta, todo lo vinculado al comportamiento dual de los objetos cuánticos.
- Indeterminación-Heisenberg: se le atribuye el *principio de incertidumbre* y todo texto en que se cite el término *incerteza* o *incertidumbre*. Pero al presentárseles la expresión $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$, algunos no pudieron reconocer en ella las relaciones de indeterminación.
- Función de onda-Schrödinger: se le atribuye todo lo que contenga en su expresión la letra ψ (ecuación o función de onda, etc.) y es el único científico citado como autor del formalismo cuántico.
- Principio de exclusión-Pauli: se asegura que este principio fue enunciado por Pauli pero no se sabe en qué consiste.
- H-Planck: se asocia con Planck la radiación de cuerpo negro y toda expresión en donde aparezca h ($E=h\nu$; $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$, etc.), sin otras apreciaciones.

Puede decirse que los recuerdos de los profesores, respecto de los temas desarrollados durante su formación en el profesorado, resultaron ser vagos e imprecisos. Si bien se nota un mayor desarrollo en el grupo de licenciatura, hay algunos aspectos o visiones comunes que se traslucen en todos los grupos.

Más en general, pueden interpretarse los resultados como visiones reduccionistas, donde los conceptos cuánticos aparecen asociados, y no del todo diferenciados, con ideas clásicas. La permanencia de imágenes de ondas o partículas, levemente modificadas, en las explicaciones del comportamiento de los fenómenos cuánticos, señala la sobrevivencia de la física clásica en los profesores que debieran enseñar las nuevas ideas.

Resultados algo diferentes se han hallado cuando se ha dado una adecuada retroalimentación. En tales casos, los mismos docentes en capacitación pueden hacer aportes interesantes, al menos como un avance parcial hacia los modelos cuánticos. Ello surge de los resultados recogidos en la tesis de Fernández (2014) o en la docencia sobre conexiones entre física cuántica y realidad tecnológica en la Licenciatura de Enseñanza de las Ciencias de la UNSAM.

En conclusión, se advierte que el abandono de estas visiones reduccionistas exige de los profesores transitar una serie de rupturas conceptuales, metodológicas y epistemológicas, que no son simples ni evidentes y que deben ser tratadas en forma sistemática.

En Argentina se han producido recientemente reformas curriculares de importancia en el contexto de la Ley Nacional de Educación 26206/06. A fin de orientarnos en el presente, mencionaremos que en los diseños curriculares de media en ciencias naturales de la Provincia de Córdoba (2011), la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2009 y 2015) y de la Provincia de Buenos Aires (2011) se propone una entrada en los temas de la física y química cuántica.

Mencionamos algunas frases extraídas de estos diseños. 1) En física: aproximación al conocimiento del modelo atómico cuántico y niveles y subniveles de energía, orbitales asociados al concepto de probabilidad. Explicar el desarrollo y aportaciones a lo largo de la historia de los diferentes modelos atómicos. Teoría de la naturaleza dual de la luz como consecuencia de su comportamiento en distintas condiciones experimentales. 2) En química: modelos atómicos. Nociones sobre el modelo atómico actual según la mecánica cuántica. Concepto de niveles de energía y orbitales. La tabla periódica y su relación con la distribución de electrones.

Los docentes que trabajan en estos diseños insisten, con razón, en que se trata de un proceso complejo, de largo plazo, que afecta todos los niveles, que se sostiene en instrumentos diversos y complementarios, cuyos efectos aún están siendo investigados. Veamos entonces las propuestas de diseño curricular en la formación docente.

En las provincias de Córdoba (2015) y de Buenos Aires (1999 y 2015), el proyecto curricular de los profesorado de Física y de Química cubre una amplia temática y propone orientaciones actualizadas sobre la teoría cuántica. Mencionaremos a título de ejemplo un párrafo del diseño curricular de Córdoba que es especialmente atractivo:

Desarrollos científicos producidos durante el siglo XX en el campo de la física que han implicado un *quiebre paradigmático* en el tratamiento de los modelos físicos de la realidad, habilitando así la construcción de un cuerpo teórico de modelos más precisos que los ofrecidos, hasta entonces, por el paradigma de la mecánica newtoniana (Profesorado de Córdoba, 2015).

Los anteriores diseños corresponden a proyectos curriculares que recién se están instalando. Es prematuro entonces pronunciarse sobre el impacto de estos en la formación docente en la Argentina. Al respecto hay opiniones contradictorias entre los propios diseñadores y capacitadores sobre cuánto se ha modificado la realidad de hace dos décadas.

En cuanto a los libros de texto para la enseñanza media en Argentina, si bien, ello no había formado parte de nuestro estudio inicial, una primera mirada a diez de los textos de física que

se utilizan habitualmente en secundaria, nos permite concluir algo similar a los resultados de las encuestas a los docentes y, sobre todo, del análisis del impacto de los programas curriculares. Los contenidos en cuestión están correctamente presentados en estos textos. Pero ninguno expresa en su complejidad el tema que se aborda, las rupturas que implica, algo que permita trabajar las preconcepciones clásicas que deben ser superadas, etc. Es verdad que son aproximaciones muy parciales y casi puntuales, lo cual se relaciona con el poco espacio que ocupan estos temas avanzados en la enseñanza habitual. Pero, aun así, la cuestión requiere otro enfoque, con una mayor aproximación a la didáctica del contenido. Solo hay uno de esos textos (y en menor medida un segundo texto) donde se aprecia un mínimo tratamiento didáctico aceptable, donde se combinan las cuestiones conceptuales con las experimentales, donde se expone algo de la historia de la disciplina y donde, al menos, se dejan planteados a los estudiantes algunos interrogantes muy interesantes. Tal vez ello se relacione también con los avances de la didáctica de las ciencias en los últimos años.

Situación de Colombia

La reflexión que se presenta está basada en los resultados de la investigación doctoral “La enseñanza de la estructura atómica de la materia en la educación secundaria en Colombia” y el trabajo de Muñoz, Solbes, Ramos (2019), donde se plantea que la enseñanza de la *estructura atómica de la materia* (EAM) se determina principalmente desde la química y abarca teoría atómica, modelos atómicos, configuración electrónica y tabla periódica. Desde esta perspectiva, se establece que enseñar EAM conlleva como base teórica la física cuántica, pues, de no ser así, su aprendizaje quedaría incompleto y generaría carencias conceptuales y epistemológicas e incluso errores conceptuales (Solbes *et al.* 1987).

El problema planteado en esta investigación parte de la idea de una educación científica en Colombia que enfrenta un dilema relacionado con la brecha entre el desarrollo tecnocientífico y la enseñanza de las ciencias en las aulas, pues los niños y jóvenes se relacionan con productos tecnológicos y aplicaciones de la ciencia moderna, pero en la escuela no encuentran las herramientas para comprender los fundamentos de estos avances y su existencia.

Esta situación se relaciona con lo señalado por Castrillón, Freire, Rodríguez (2014), quienes presentan un panorama en el que la enseñanza de la física cuántica en Colombia es un campo en formación, e incluso se plantean que no trabajar tópicos de la física cuántica en la educación secundaria podría tomarse como una crisis, ya que *deliberadamente* se excluye a los estudiantes de secundaria de las investigaciones de ciencia y tecnología actuales.

La investigación plantea los siguientes problemas en la enseñanza de la EAM: esta se realiza a través de un recorrido solamente cronológico que empieza en Dalton, pasa por Thomson y Rutherford, y se queda en el modelo de Bohr, sin un fundamento en la Física Cuántica, lo que constituye una enseñanza caracterizada por la ambigüedad y el formalismo y sustentada en la presentación acrítica de los modelos atómicos (Solbes *et al.* 1987).

Para comprobar la hipótesis, se consideró analizar planes y programas de enseñanza de las ciencias en Colombia y la presentación de la unidad en los libros de texto, la enseñanza de docentes de grado décimo, en la asignatura de química y los conceptos que relacionan los estudiantes con la teoría cuántica.

En el análisis documental de los *Lineamientos curriculares y estándares básicos de competencia de Ciencias Naturales* (COLOMBIA, 1998, 2006), que corresponden a la legislación vigente en Colombia, se encuentra que estos apuntan a una enseñanza de las ciencias naturales interdisciplinar, integral, con un enfoque *holístico* y contextualizado siempre al *mundo de la vida*. Sin embargo, no hay profundización y ni referencias a la ciencia moderna, tan solo se hace alusión a la ciencia clásica representada por Galileo y Newton (Muñoz, Solbes, Ramos, 2019).

En cuanto al análisis de los *Estándares básicos de competencia para Colombia* (COLOMBIA, 2006) se confirma lo que Lobato, Greca (2005) concluyen sobre cómo el desarrollo científico y tecnológico del siglo XX no está presente en la educación secundaria. En estos documentos, si bien se da cierta libertad al docente sobre los temas a trabajar en su clase, puntos específicos de la física y química modernas no son señalados como mínimos o referencias obligatorias (Muñoz, Solbes, Ramos, 2019). Situación que, como se ha descrito, sí sucede en Argentina y España, desde hace ya algunos años.

Por otra parte, en la investigación referenciada, se analizaron 18 libros de texto de química de grado décimo, de las editoriales más representativas en Colombia, en un periodo comprendido entre 1994 y 2018. Este tiempo corresponde a la entrada en vigor de la Ley General en 1994, que define la organización de la educación formal en este país.

La presencia de errores conceptuales en los libros de texto ha sido ampliamente analizada, así como las inexactitudes e, incluso, la mirada reduccionista que sobre los temas expuestos pueden presentar (Muñoz, Solbes, Ramos, 2019). A continuación se describen, de forma parcial y cualitativa, algunos de los resultados del análisis de libros de texto:

Un pequeño porcentaje de las publicaciones hacen una presentación histórica de los modelos atómicos, de sus antecedentes, pero, no hacen distinción entre modelos clásico, precuántico y cuántico, lo que permite contrastar una presentación reduccionista de este aspecto. De igual manera, los textos analizados no presentan los hechos relacionados con la crisis de la física clásica, lo que dificulta diferenciar entre conceptos clásicos y cuánticos, y comprender la complejidad de los objetos cuánticos.

Por otra parte, no asumen detalladamente las inconsistencias de los modelos atómicos. Los aspectos que se presentan con mayor detalle son: la imposibilidad para el modelo atómico de Thomson, de explicar los resultados en el experimento de Rutherford. Sin embargo, no se explica en detalle la inestabilidad del modelo atómico de Rutherford, en contraposición de la teoría electromagnética clásica.

De igual manera, las relaciones de indeterminación son introducidas con errores en la comprensión de este concepto al relacionarlas con el *microscopio electrónico* o con la inexactitud de los instrumentos de medida, lo que constituye un problema de carácter epistemológico (Muñoz, Solbes, Ramos, 2019). Del análisis de los libros de texto, se concluye que son vectores de errores y su presentación del modelo cuántico es escasa (Muñoz, Solbes, Ramos, 2019).

Con respecto a los docentes, en la misma investigación doctoral, se trabajó con 71 docentes de instituciones educativas tanto privadas como oficiales y de 8 departamentos colombianos a quienes se les indagó sobre estrategias didácticas utilizadas para la enseñanza de tópicos

relacionados con la estructura atómica de la materia y, específicamente, el modelo cuántico. Los resultados del proceso utilizado permiten establecer que se presentan confusiones importantes en el manejo de conceptos y nociones relacionados con la teoría cuántica, el modelo cuántico e incluso con el modelo precuántico de Bohr.

Los docentes utilizan con mucha propiedad la analogía del sistema planetario para referirse al átomo, hay yuxtaposición de conceptos clásicos, cuánticos y precuánticos.

Conclusiones

Hemos visto que en España, Argentina y Colombia se han introducido tópicos de física cuántica en los currículos de la enseñanza secundaria, aunque de manera tardía y no específica en Colombia. Se evidencia también que, en dichos países, hay problemas en la introducción de estos conceptos, ya que muchos libros de texto y docentes de los tres países (e incluso el currículo colombiano), no suelen mostrar la ruptura que supuso la física cuántica respecto de la clásica.

En Colombia no es clara la introducción de la física cuántica en los documentos curriculares y la legislación vigente, lo cual deja ver un problema respecto a los otros dos países referenciados, que muestran ya una tradición en la enseñanza y en la investigación didáctica de esta área.

Los análisis realizados dan cuenta de la prevalencia de errores conceptuales tanto en libros de texto, como en los docentes. De tal manera que el aprendizaje y los conceptos relacionados por los estudiantes se ven afectados por una enseñanza acrítica, con errores y confusiones.

Por ello, el profesorado, que mayoritariamente ha recibido en la universidad una enseñanza muy formalista, rígida e, incluso, dogmática de la física cuántica, sin apenas trabajo experimental o relaciones CTS, se limita a utilizar la enseñanza teórica y libresco de los textos escolares introduciendo interpretaciones incorrectas y errores.

Por ello, como perspectiva planteamos que: es necesaria una formación inicial y permanente del profesorado que a nivel conceptual muestre que las ideas de cuantificación, comportamiento dual de los cuantos y probabilismo constituyen las principales características de la física cuántica, y que ayude a 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? (Sinarcas, Solbes, 2013). Para completar el proceso formativo, sería conveniente realizar experiencias sencillas con espectros de emisión o efecto fotoeléctrico (Savall, Domènech, Martínez-Torregrosa, 2014) y, en otras muy costosas, utilizar simulaciones o videos de la difracción de electrones (Franco, 2006; Pereira, Ostermann, Cavalcanti, 2009). Así mismo, se deben mostrar las relaciones CTS, en particular, los importantes desarrollos científicos y tecnológicos que abrió la nueva física, ya que todas las nuevas tecnologías son cuánticas (Han, 1992), o el contexto político y social en el que se desarrolló la cuántica.

Agradecimientos

A Patricia Fernández, por sus múltiples trabajos y su tesis. A Laura Bono, del equipo redactor de los Diseños Curriculares de la Provincia de Córdoba, a Lucia Iuliani, capacitadora docente de la Provincia de Buenos Aires y a Diego Menoyo, investigador de los profesorado, por sus aportes sobre las transformaciones curriculares en Argentina

Referencias bibliográficas

CALDEIRA, M.H. Los libros de texto de ciencias: ¿Son cómo deberían ser? **Tarbiya**, Madrid, n. 36, pp. 149-167. 1992.

CASTRILLÓN, J.; FREIRE, O.; RODRÍGUEZ, B. Mecánica cuántica fundamental: Una propuesta didáctica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 1, pp. 1505-1-12. 2014.

COLOMBIA. Ministerio de Educación Nacional, Colombia. **Ciencias Naturales y Educación Ambiental**. Lineamientos Curriculares. Bogotá, Colombia. 1998.

COLOMBIA. Ministerio de Educación Nacional, Colombia. **Estándares básicos de competencias en lenguaje, matemáticas, ciencias y ciudadanas: guía sobre lo que los estudiantes deben saber y saber hacer con lo que aprenden**. 183 p. Documentos 3. Bogotá. 2006.

FANARO, B. **La enseñanza de la Mecánica Cuántica en la Escuela Media**. 275 p. Tesis doctoral. Universidad de Burgos. Burgos. 2009.

FERNÁNDEZ, P. Teorías y modelos en la enseñanza–aprendizaje de la Física Moderna. 390 p. Tesis doctoral. Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba. 2014.

FERNÁNDEZ, P.; GONZÁLEZ, E.; SOLBES, J. La inclusión de temas actuales de física en el polimodal. **Educación en Ciencias**, s.l., v. 1, n. 3, pp. 5-10. 1997. DOI: <http://roderic.uv.es/handle/10550/36394>

FERNÁNDEZ, P.; GONZÁLEZ, E.; SOLBES, J. Dificultades de docentes de ciencias en la conceptualización de temas de física actual. In: **Memorias SIEF V (V SIMPOSIO DE INVESTIGADORES EN EDUCACIÓN EN FÍSICA)**. Santa Fe, 18 al 20 de octubre de 2000. Asociación de Profesores de Física de la Argentina.

FERNÁNDEZ, P.; GONZÁLEZ, E.; SOLBES, J. De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. Una propuesta didáctica con base en la discusión de modelos. **Revista de Enseñanza de la Física**, Córdoba, Argentina, v. 18, n. 1, pp. 69-81. 2005.

FRANCO, A. **Física con ordenador**. 2006. <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/>>.

GIL, D.; SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, Londres, v. 15, n. 3, pp. 255-260. 1993. DOI: <https://doi.org/10.1080/0950069930150303>

GIL, D.; SENENT, F.; SOLBES, J. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. **Revista de Enseñanza de la Física**, Córdoba, Argentina, v. 2, n. 1, pp. 16-21. 1986. DOI: <http://roderic.uv.es/handle/10550/44206>

GIL, D.; SENENT, F.; SOLBES, J. La física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados. **Revista Española de Física**, Madrid, v. 3, n. 1, pp. 53-58. 1989. DOI: <http://roderic.uv.es/handle/10550/44250>

HAN, M.Y. **La vida secreta de los cuantos**. McGraw-Hill. Aravaca: España. 1992.

KALKANIS, G.; HADZIDAKI, P.; STAVROU, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. **Science Education**, Nueva York, v. 87, n. 2, pp. 257-280. 2003.

KRAGH, E. **Generaciones cuánticas**. Tres Cantos. Madrid: España. 2007.

KRIJTENBURG-LEWERISSA, K. *et al.* Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into expert opinions. **International Journal of Science Education**, Londres, v. 41, n. 3, pp. 349-366. 2019.

LEVY-LEBLOND, J.M. **Conceptos contrarios o el oficio de científico**. Tusquets. Barcelona: España. 2002.

LEVY-LEBLOND, J.M. On the Nature of Quantons. **Science & Education**, Dordrecht, The Netherlands; Boston, n. 12, pp. 495-502. 2003.

LOBATO, L.; GRECA, I. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de Física do ensino médio. **Ciência e Educação**, Bauru, v. 11, n. 1, pp. 119-132. 2005.

MAIZTEGUI, A.; GONZÁLEZ, E.; TRICÁRICO, H.; SALINAS, J.; PESSOA, A.; GIL, D. La formación de los profesores de ciencias en Iberoamérica. **Revista Iberoamericana de Educación**, Madrid, n. 24, pp. 163-187. 2000.

MUÑOZ, Z.E.; SOLBES, J.; RAMOS, G.E. Estructura atómica de la materia una reflexión sobre su enseñanza en Colombia. **Revista Historia de la Educación Colombiana**, Nariño, n. 22, pp. 99-117. 2019. DOI: <https://doi.org/10.22267/rhec.192222.54>

OSTERMANN, F.; PRADO, S. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 27, n. 2, pp. 193-203. 2005.

PEREIRA, A.P.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C.J.H. On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. **Physics Education**, Bristol, n. 44, pp. 281-291. 2009.

SAVALL, F.; DOMÈNECH, J.L.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J. 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**, São Paulo, v. 36, n. 4, 4302/1-4302/8. 2014.

SINARCAS, V. **Proposta per a l'ensenyament i aprenentatge de la física quàntica en 2n de batxillerat**. 354 p. Doctorat d'Investigació en Didàctica de les Ciències Experimentals, Facultat de Física, Universitat de València, València. 2015.

SINARCAS, V.; SOLBES, J. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 31, n. 3, pp. 9-25. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5565/rev/enscien/v31n3.768>

SOLBES, J. **Introducción a los conceptos básicos de física moderna**. 193 pp. Tesis de Doctorado en Ciencias Físicas. Facultat de Física, Universitat de València, València, 1986.

SOLBES, J. Contribución de las cuestiones sociocientíficas al desarrollo del pensamiento crítico (II): Ejemplos. **Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias**, Cádiz, v. 10, n. 2, pp. 171-181. 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2013.v10.i2.03

SOLBES, J. El modelo cuántico del átomo. Dificultades de comprensión y propuestas para su enseñanza. **Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales**, Barcelona, n. 93, pp. 26-33. 2018.

SOLBES, J.; SINARCAS, V. Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. **Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales**, València, n. 23, pp. 123-151. 2009.

SOLBES, J.; SINARCAS, V. 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**, Córdoba, Argentina, v. 23, n. 1-2, pp. 57-85. 2010.

SOLBES, J.; CALATAYUD, M.L.; CLIMENT, J.B.; NAVARRO, J. Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v. 5, n. 3, pp. 189-195. 1987.