

Revisión sistémica sobre la enseñanza de la estructura atómica desde conceptos cuánticos

María Alejandra Narváez Gómez¹
Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia

Recepción: 28/06/2022

Evaluación: 20/08/2022

Aprobación: 24/09/2022


Artículo de Investigación-Revisión

DOI: <https://doi.org/10.22267/rhec.222929.107>

Resumen

En este artículo se presenta una revisión sistémica sobre la enseñanza de la estructura atómica desde conceptos cuánticos; que hace parte de la investigación doctoral *Conocimiento didáctico del contenido sobre la estructura atómica en docentes en formación en Ciencias naturales en Colombia*. Su objetivo es describir las principales discusiones teóricas frente a la enseñanza estructura atómica desde las diferentes investigaciones que se han realizado a nivel mundial y nacional. La metodología bajo la cual se obtuvo dicha revisión se dio en tres fases, diseñadas a partir de los aportes de Cuesta y de Morales. La primera, Selección y clasificación de la información; la segunda, Lectura analítica y reflexiva; la tercera, Análisis e interpretación de los documentos seleccionados. Uno de los principales resultados destaca la necesidad de incluir en la formación docente en Ciencias naturales, los principios básicos de la física cuántica, con el fin de integrarla en la educación secundaria.

Palabras clave: estructura atómica; física cuántica; formación en ciencias naturales.

¹ Profesora en la Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia. Magister en educación. Grupo de investigación: para el Desarrollo de la Educación y la Pedagogía – GIDEP. Línea de investigación: Enseñanza de las Ciencias. Correo electrónico: alejandarvaez27@gmail.com.  <http://orcid.org/0000-0003-1115-1456>

Systematic review on the teaching of atomic structure from quantum concepts

Abstract

The paper presents a systemic review of the teaching of atomic structure from quantum concepts, which is part of the doctoral research *Didactic knowledge of the content on atomic structure in teachers in training in Natural Sciences in Colombia*. Its objective is to describe the main theoretical discussions on the teaching of atomic structure from the different research carried out worldwide and nationally. The methodology under which this review was obtained was carried out in three phases, designed on the basis of the contributions of Cuesta and Morales. The first: Selection and classification of the information; the second: Analytical and reflective reading; the third: Analysis and interpretation of the selected documents. One of the main results highlights the need to include the basic principles of quantum physics in teacher training in natural sciences to integrate it into secondary education.

Keywords: Atomic structure, quantum physics, training in natural sciences.

Revisão sistemática sobre o ensino da estrutura atômica a partir de conceitos quânticos

Resumo

O artigo apresenta uma revisão sistêmica do ensino da estrutura atômica a partir de conceitos quânticos, que faz parte da pesquisa de doutorado *Conhecimento didático do conteúdo sobre estrutura atômica em professores em formação em Ciências Naturais na Colômbia*. Seu objetivo é descrever as principais discussões teóricas sobre o ensino da estrutura atômica a partir das diferentes pesquisas realizadas em nível mundial e nacional. A metodologia sob a qual essa revisão foi obtida foi realizada em três fases, concebidas com base nas contribuições de Cuesta e Morales. A primeira: Seleção e classificação das informações; a segunda: Leitura analítica e reflexiva; a terceira: Análise e

interpretação dos documentos selecionados. Um dos principais resultados destaca a necessidade de incluir os princípios básicos da física quântica na formação de professores de ciências naturais para integrá-la ao ensino médio.

Palavras-chave: estrutura atômica, física quântica, formação em ciências naturais.

Introducción

En el ámbito educativo se reconoce la importancia de que los profesores cuenten tanto con un conocimiento sólido de los conceptos y procesos científicos, como de la forma en que se construye y valida el conocimiento científico. En este sentido, la física cuántica y su estudio de la estructura atómica han adquirido relevancia por su capacidad para brindar una visión más amplia de la naturaleza y una imagen más precisa de la ciencia en general; por ello, se plantea la necesidad de incluir los principios básicos de la física cuántica en la formación docente.

No obstante, se han identificado limitaciones en la formación de profesores de Ciencias, como: conocimientos insuficientes de los contenidos científicos y dificultades en los aspectos didácticos. Estas limitaciones se acentúan cuando se aborda temas de física y química modernas, que no son integrados adecuadamente en la preparación didáctica, pedagógica y epistemológica. Por lo tanto, resulta fundamental reflexionar sobre la relevancia de la formación del profesorado en Ciencias naturales, especialmente en cuanto a la física cuántica.

En este contexto, la revisión sistémica plantea la necesidad de identificar la preeminencia de incorporar la física cuántica como base en algunos temas de la educación secundaria, como la estructura atómica y la evolución de los fenómenos microscópicos. Asimismo, dentro de las investigaciones revisadas se destaca la necesidad de investigar y comprender los procesos de formación de los profesores de Ciencias en la educación básica y media, donde se establecen los fundamentos esenciales para la formación científica.

Metodología

La revisión sistémica tuvo como propósito, clasificar, sistematizar y reflexionar sobre la enseñanza y aprendizaje de la estructura atómica en profesores en formación; de este modo, a partir de la revisión de artículos

científicos, capítulos, libros, conferencias y similares, se establecieron algunas tendencias y problemáticas de investigación. Así, es un estudio analítico del conocimiento acumulado, que hace parte de la investigación documental que presenta dentro de sus objetivos, inventariar y sistematizar la producción en un área del conocimiento, permitiendo realizar una reflexión profunda sobre las tendencias, vacíos, reconocimiento e interpretación de la realidad; además, y para este caso en particular, fundamenta y justifica la tesis doctoral.²

Ahora bien, a partir de los aportes de Cuesta³ y Morales,⁴ se propuso desarrollar este apartado en tres fases, a saber:

Primera fase: selección y clasificación de la información: teniendo en cuenta el objeto de la investigación, se procedió a establecer la categoría de búsqueda que, para este caso, fue: Estructura atómica desde la física cuántica; es preciso señalar que se abordó desde estudios tanto nacionales como internacionales.

Así, para esta categoría se referenciaron las siguientes subcategorías: a) Enseñanza y aprendizaje de la física cuántica; b) Teoría cuántica y enseñanza de la estructura atómica de la materia; C) Teoría cuántica y enseñanza de la estructura atómica de la materia en Colombia.

Así entonces, los criterios de selección de los documentos fueron los siguientes: documentos académicos (artículos científicos, libros académicos, capítulos de libros, conferencias documentadas a través de memorias y tesis); documentos académicos encontrados en las siguientes bases de datos: Google Académico, Scopus, Scielo, Web of Science, Springer, entre otros catálogos en línea, indistintamente del idioma (principalmente español e inglés) en una ventana temporal enfocada en los últimos 30 años (1992-2022); no obstante, documentos o fuentes son reseñadas por su preponderancia.

Por otra parte, los criterios de exclusión implementados fueron: documentos que no fueran de carácter académico; en idiomas complejos de traducir; que no estuvieran en óptimas condiciones de digitalización; que no referenciasen ampliamente las categorías y subcategorías temáticas.

² Nancy Piedad Molina, “¿Qué es el estado del arte?” *Ciencia y Tecnología para la salud Visual y Ocular*, 3(5), (2005), 73-75. <https://doi.org/10.19052/sv.1666>

³ Yeison Cuesta, “Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016”, *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. No. 44, (2018): 147-166.

⁴ Oscar Morales, *Fundamentos de la investigación documental y la monografía. Manual para la elaboración y presentación de la monografía*. (Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes, 2003).

Finalmente, todos aquellos documentos seleccionados fueron clasificados de acuerdo con su categoría y subcategoría, siendo fichados y salvaguardados en formato PDF en carpetas virtuales.

Segunda fase: lectura analítica y reflexiva: a partir de una primera lectura de los documentos previamente seleccionados y clasificados, se diligenció la matriz de análisis y reflexión, la cual suministra la siguiente información: autoría, país, año de publicación, título del documento, bibliografía, título del recurso que contiene el documento, resumen y reflexiones del investigador.

De este modo, no solo se sustraen los datos informacionales básicos, sino que, además, se hace un tratamiento analítico de la información y se proponen algunas reflexiones generales que proporcionan dichos recursos.

Tercera fase: análisis e interpretación: a partir del análisis e interpretación de los documentos, se establecieron puntos de encuentro, recurrencias, tendencias y diferencias frente a la categoría de estudio; por consiguiente, se plantearon categorías emergentes, mejoramiento y ampliación del objeto de estudio, conclusiones y nuevas preguntas que surjan a futuro.

Resultados

Formación de Profesores: Enseñanza y aprendizaje de la Física cuántica

Cuando se habla sobre los procesos tanto de enseñanza como de aprendizaje de la estructura atómica, se hace indispensable su abordaje desde la física cuántica, por cuanto la comprensión del contenido se sirve de los fundamentos que establece la física cuántica; además, esta posibilita la construcción epistemológica e histórica del saber, con lo cual mitiga posibles vacíos, errores, imprecisiones y similares, ya que se requiere para la comprensión de cuestiones como la estructura electrónica de los átomos; asimismo, para el ordenamiento periódico y los enlaces de las moléculas; esta explica no solo la evolución de los fenómenos microscópicos, sino los avances en otras disciplinas.⁵

⁵ Solbes, Jordi, Calatayud, María Luisa, Climent, Juan Bautista y Navarro, José. “Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos”. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.5, No.3, (1987):189-195. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5162>

La física cuántica es una de las teorías más importantes de la física; por lo tanto, de acuerdo con Pospiech y Schöne,⁶ su enfoque pedagógico debe cumplir tres condiciones: a) captar rápidamente la esencia de la física cuántica sin distraerse de las matemáticas, b) centrarse en los aspectos filosóficos y, c) preparar el camino para futuros desarrollos.

Así, en las últimas décadas, Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou⁷ han producido un importante avance en la comprensión de las características fundamentales de la teoría cuántica, en contraste con la física clásica; en particular, los experimentos sobre la indeterminación, el entrelazamiento y la información cuántica han permitido una comprensión más profunda y han aparecido en la literatura científica popular. Precisamente, estos avances han tenido su reconocimiento con el Premio Nobel de Física de 2022 a Alain Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger, por sus trabajos pioneros en la comunicación cuántica,⁸ realizados hace 30 o 40 años, pero solo premiados actualmente por el auge de la computación cuántica.

Por otra parte, los programas escolares están fuertemente influenciados por el desarrollo histórico de los modelos atómicos, la representación de los electrones mediante las llamadas funciones de onda y, la interpretación de las relaciones de indeterminación, como incertidumbres de la posición y el momento.⁹

⁶ Gesche, Pospiech, & Matthias Schöne. Quantum physics in teacher education. (2011). <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>

⁷ George Kalkanis, Pandora Hadzidaki, & Dimitrius Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, Vol.87, No.2, (2003):257-280. <https://doi.org/10.1002/sci.10033>

⁸ Javier Flores. Premio Nobel de Física 2022 para los investigadores del entrelazamiento cuántico. (2022). https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/premio-nobel-fisica-2022-para-investigadores-pioneros-entrelazamiento-cuatico_18857

⁹ Olimpia Lombardi y Juan Camilo Martínez. Entre mecánica cuántica y estructuras químicas: ¿a qué refiere la química cuántica? *Scientiae Studia*, Vol.10, (2012): 649-670. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662012000400002>; Pedro Gómez. *Desarrollo del conocimiento didáctico en un plan de formación inicial de profesores de matemáticas de secundaria*. (2007). Universidad de Granada; Pedro Gómez. *Desarrollo del conocimiento didáctico en un plan de formación inicial de profesores de matemáticas de secundaria*. (2007). Universidad de Granada; Jordi Solbes, Verónica Silvestre y Carles Furió. El desarrollo histórico de los modelos de átomo y enlace químico y sus implicaciones didácticas. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, (2010): (24), 83-105; Paula Tuzón y Jordi Solbes. Análisis de la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia según la física moderna en primero de bachillerato. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, (2014): (28), 175-195.

Pues bien, según Etkina¹⁰ la formación del profesorado es una relación triangular entre los conocimientos profesionales que se espera que adquieran los profesores en la universidad, su experiencia en la enseñanza de la física en las escuelas y, los requisitos del plan de estudios, el programa de estudios y las autoridades escolares. Para diseñar las clases, los profesores tienen que combinar los conocimientos sobre el contenido, los pedagógicos y, aquéllos sobre el contenido pedagógico.¹¹

La Física cuántica parece ser un campo único en la enseñanza de la física, en parte por su formalismo abstracto, sus diferencias con la física clásica, su falta casi total de experimentos factibles en la enseñanza escolar y, su larga tradición de interpretaciones ambiguas. Además, aunque la física cuántica es un campo de investigación brillante con muchos experimentos fundamentales, existe una divergencia extrema entre los conceptos revelados por la investigación reciente y el enfoque escolar tradicional.¹²

Bajo este escenario, muchas clases escolares -especialmente universitarias- comienzan con el efecto fotoeléctrico, que introduce la luz como partícula, y pasan secuencialmente a los espectros atómicos y los experimentos de doble rendija con electrones. En la física cuántica moderna, conceptos como la superposición, la indeterminación y el entrelazamiento desempeñan un papel central, pero son menos enseñados. En cuanto a esto, Michelini, Ragazzon, Santi y Stefanel¹³ y Pospiech¹⁴ han desarrollado un

¹⁰ Eugenia Etkina. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, Vol.6, No.2. (2010): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>

¹¹ Gesche Pospiech & Matthias Schöne. Quantum physics in teacher education. (2011). <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>

¹² Eugenia Etkina. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, Vol.6, No.2. (2010): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>; Gesche Pospiech & Matthias Schöne. Quantum physics in teacher education. (2011). <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>; George Kalkanis, Pandora Hadzidaki, & Dimitrius Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, Vol.87, No.2, (2003):257-280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>

¹³ Marisa Michelini, Renzo, Ragazzon, Lorenzo, Santi, & Alberto Stefanel. Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, Vol.35, No.6. (2000): 406-410. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/305>

¹⁴ Gesche Pospiech. Uncertainty and complementarity: The hearth of quantum physics. *Physics Education*, Vol.35, No.6, (2000): 393-399. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/303>

camino didáctico mediante la polarización de los fotones que interactúan con cristales polarizados y birrefringentes, para introducir el principio de superposición y las relaciones de indeterminación; sin embargo, este enfoque no es típico de los cursos universitarios de física cuántica.

Es así como, en cualquier itinerario de aprendizaje se puede observar dificultades de aprendizaje de los alumnos; diversos estudios con estudiantes de secundaria y de universidad han analizado los conceptos de la mecánica cuántica y han corroborado esto, como el de Akarsu.¹⁵ Aún más: la dificultad para que los estudiantes comprendan la física cuántica y adquieran los conceptos adecuados depende no solo de la materia, como los modelos atómicos, las relaciones de incertidumbre y las funciones de onda, sino también, del aprendizaje previo, como sugieren Baily y Finkelstein;¹⁶ muchos alumnos no presentan una visión coherente de la incertidumbre y la medición en diferentes contextos.

Baily y Finkelstein se han centrado en los cambios de perspectiva de los alumnos en respuesta a los puntos de vista del profesor y a sus creencias personales sobre el ‘mundo real’; por otro lado, un estudio muestra la importancia de aceptar la complejidad de la enseñanza de la física cuántica, porque en el intento de que la física parezca fácil, corren el riesgo de distorsionar el contenido y el proceso de aprendizaje de la misma, según Levrini, Fantini y Pecori.¹⁷ En consecuencia, y de acuerdo con Levrini y Fantini,¹⁸ un proceso de enseñanza/aprendizaje es significativo si combina, de manera productiva, tres sistemas complejos: el mundo real, el sistema de conocimiento disciplinario de la física y, el sistema cognitivo de los aprendices.

¹⁵ Bayram Akarsu. Instructional designs in quantum physics: A critical review of research. *Asian Journal of Applied Sciences*, Vol.4, No.2. (2011): 112-118. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2011.112.118>

¹⁶ Charles Baily & Noah Finkelstein. Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, Vol.5, No.1. (2009): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.010106>

¹⁷ Levrini, O., Fantini, P., & Pecori, B. (2008). The problem is not understanding the theory, but accepting it: a study on students' difficulties in coping with Quantum Physics. In *Proceedings of the GIREP-EPEC Conference 2007, Frontiers of physics education* (319-324).

¹⁸ Olivia Levrini & Paola Fantini. Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, Vol.22, (2013): 1895-1910. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9587-4>

De nuevo con Baily y Finkelstein,¹⁹ estos sugieren que los fenómenos de la mecánica cuántica con las perspectivas de los estudiantes pueden cambiar significativamente con la instrucción, como la enseñanza explícita de la perspectiva cuántica, pero pueden permanecer mezcladas entre las interpretaciones clásicas y cuánticas.

Además, otros estudios como los de Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou²⁰ y, Asikainen y Hirvonen,²¹ tienen en cuenta a los profesores en formación, sobre el concepto de modelo atómico, en el que se describe el uso del experimento mental de doble rendija como una herramienta de diagnóstico para probar la comprensión de los futuros profesores y maestros con experiencia. Los resultados sugieren que, tanto los experimentos mentales como el experimento de la doble rendija, deberían tener más peso en la formación del profesorado de física, incluso si la experiencia en la enseñanza de la física moderna en la escuela secundaria superior parece desarrollar, hasta cierto punto, las habilidades de los profesores.

Asimismo, Fernández, González y Solbes²² resaltan la relevancia de incluir conceptos cuánticos en la formación de profesores, porque estos ofrecen una imagen más correcta de cómo son desarrolladas las ciencias, además de la interpretación adecuada de la estructura atómica, la evolución de los fenómenos microscópicos y la importancia de la aplicación de la física cuántica en la sociedad.

También, se puede reconocer algunas dificultades para la inclusión de la física cuántica en los procesos de enseñanza-aprendizaje, debido a que los fenómenos cuánticos, los conceptos y modelos están alejados de la percepción cotidiana, lo que dificulta su comprensión.²³

¹⁹ Charles Baily & Noah Finkelstein. Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, Vol.5, No.1. (2009): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.010106>

²⁰ George Kalkanis, Pandora Hadzidaki, & Dimitrius Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, Vol.87, No.2, (2003):257-280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>

²¹ Mervi Asikainen & Pekka Hirvonen. Probing pre-and in-service physics teachers' knowledge using the double-slit thought experiment. *Science & Education*, Vol.23, No.9. (2014): 1811-1833. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9710-1>

²² Patricia Fernández, Eduardo González y Jordi Solbes. Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol.33, No.1. (2021): 35-46. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33275>

²³ Patricia Fernández, Eduardo González y Jordi Solbes. Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol.33, No.1. (2021): 35-46. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33275>.

En ese sentido, Pereira y Solbes²⁴ examinan la dinámica de la perspectiva o punto de vista en la física cuántica, una noción más general que concepción o interpretación, en el contexto de la formación del profesor, centrándose en la dualidad onda-partícula, la superposición de estados y el cálculo de probabilidades para sistemas de dos estados. Dentro de la revisión teórica se resalta que, los estudios revisados sostienen que los estudiantes suelen interpretar las ideas cuánticas en términos clásicos.

De este modo, las preocupaciones de los profesores en formación suelen estar relacionadas con su comprensión conceptual y su interpretación de la física cuántica. A menudo, los estudiantes calculan sin conceptos mentales,²⁵ no comprenden las incertidumbres y los procesos de medición y, los puntos de vista clásicos como las trayectorias y, las propiedades fijas permanecen inalteradas.²⁶

Al respecto, Mannila, Koponen y Niskanen²⁷ descubrieron que había una diferencia entre los profesores actuales y los futuros físicos, la cual radicaba en que los estudiantes actuales se inclinaban por una visión cuántica. De acuerdo con Pospiech y Schöne,²⁸ los profesores tienen una visión limitada de la mecánica cuántica; asimismo, correlacionan los conceptos de la mecánica cuántica con las ideas clásicas, de forma indiferenciada.

Investigaciones recientes como la de Deslauriers y Wieman²⁹ han demostrado que, independientemente de los métodos de enseñanza, los conceptos que se enseña -especialmente en física cuántica- son muy estables, lo que supone un gran obstáculo en el proceso de formación de

²⁴ Alessandro Pereira & Jordi Solbes. The Dynamics of Perspective in Quantum Physics. *Science & Education*, Vol.31, No.2. (2022): 427-450. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00252-9>

²⁵ David Gardner. *Learning in quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Purdue University]. (2002). <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI3104944/>

²⁶ Rainer Müller & Hartmut Wiesner. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S.* (1998), 382.

²⁷ Katja Mannila, Ismo Koponen, & Jouni Niskanen. Building a picture of students' conceptions of wave-and particle-like properties of quantum entities. *European journal of physics*, Vol.23, No.1. (2001): 45. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/23/1/307>

²⁸ Gesche, Pospiech, & Matthias Schöne. Quantum physics in teacher education. (2011). <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>

²⁹ Louis Deslauriers & Carl Wieman, C. Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods. *Physical review special topics-physics education research*, Vol.7, No.1. (2011): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.010101>

profesores en Ciencias y la enseñanza de esta en las escuelas, lo que sugiere que la mencionada triangulación de las experiencias pedagógicas previas de los estudiantes es relevante para su futura formación.

En consonancia con lo anterior, así como también por lo expresado por Baumert, Kunter, Blum, Brunner, Voss, Jordan y Tsai,³⁰ la calidad de las explicaciones de un profesor depende, en gran medida, de sus conocimientos sobre el contenido, por lo que debe ser flexible y ha de adaptarse a las necesidades de sus alumnos; un profesor eficaz es el factor más importante en el aprendizaje de ellos, sostiene Darling-Hammond.³¹

Aunado a esto, para Berg, Demtröder, Euler, Fick, Großmann, Haase et al.,³² la enseñanza de la física debería ser una profesión aparte, una carrera independiente y no, parte de la formación de los futuros físicos. Para enseñar con éxito la física cuántica en las escuelas, además de la enseñanza teórica, son esenciales el conocimiento de la enseñanza metodológica, la discusión de cuestiones históricas y filosóficas y, el Conocimiento Didáctico del Contenido (CDC), incluida la interpretación de los conceptos de la física cuántica y sus principales aplicaciones contemporáneas.

Igualmente, un enfoque de la formación del profesorado, según Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou,³³ identifica cinco elementos interactivos de un modelo de aprendizaje: la exploración de los conocimientos previos de los alumnos, el análisis del contenido desde una perspectiva pedagógica, la identificación de las necesidades de los alumnos, la facilitación de la reconstrucción del conocimiento y, las actividades metacognitivas.

³⁰ Jürgen Baumert, Mareike Kunter, Werner Blum, Martin Brunner, Thamar Voss, Alexander Jordan & Uta Klusmann, Stefan Krauss, Michael Nerubrand, Yi-Miau Tsai. Teachers' mathematical knowledge, cognitive activation in the classroom, and student progress. *American Educational Research Journal*, Vol.47, No.1. (2010): 133-180. <https://doi.org/10.3102/0002831209345157>

³¹ Linda Darling-Hammond. Teacher quality and student achievement. *Education Policy Analysis Archives*, Vol.8, No.1. (2000). <https://doi.org/10.14507/epaa.v8n1.2000>

³² Gunnar Berg, Wolfgang Demtröder, Manfred Euler, Dieter Fick, Siegfried Großmann, Axel Haase, Bernd Kretschmer, Rudolf Lehn, Andreas Müller, Peter Richter, Doeter Röß, Gerhard Sauer, Horst Schecker, Werner Schneider, Elke Sumfleth, Eberthard Umbach, Knut Urban, Michael Vollmer, Manuela Welzel, ... Walter Zimmermann. *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik*. (2006). Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.

³³ George Kalkanis, Pandora Hadzidaki, & Dimitrius Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, Vol.87, No.2, (2003): 257-280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>

Por ello, Deslaurier y Wieman,³⁴ así como Baumert, Kunter, Blum, Brunner, Voss, Jordan y Tsai,³⁵ han demostrado que los profesores necesitan participar en extensas discusiones cualitativas, además de aprender los aspectos formales de la teoría cuántica. Sin embargo, en muchos cursos, los profesores enseñan la física cuántica haciendo hincapié en el formalismo matemático; por eso, los que están en formación suelen desconocer el potencial de la enseñanza de la física cuántica.

Entonces, es válido traer el caso de la formación de profesores en Ciencias en Alemania, donde son formados en dos asignaturas: Física y Matemáticas, con la misma intensidad y relevancia, como manifiestan Pospiech y Schöne.³⁶ Además, como parte de la formación, se imparte conferencias y seminarios sobre pedagogía general y conocimiento del contenido pedagógico; del mismo modo, el estudio de la Física incluye la física experimental y teórica y el trabajo de laboratorio; el curso de Física cubre todas las áreas principales de ella; por lo general, solo unas pocas conferencias están especialmente preparadas para los estudiantes de Pedagogía y son dirigidas principalmente a los estudiantes que han optado por especializarse en Física.

Por otra parte, de acuerdo con Didiş y Redish³⁷ una gran proporción de las investigaciones relacionadas con la formación de profesores en Ciencias ha sido llevada a cabo en el ámbito cognitivo, aunque la investigación en el ámbito afectivo solo se ha realizado recientemente, centrándose en la motivación del logro.³⁸

³⁴ Louis Deslauriers & Carl Wieman, C. Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods. *Physical review special topics-physics education research*, Vol.7, No.1. (2011): <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.010101>

³⁵ Jürgen Baumert, Mareike Kunter, Werner Blum, Martin Brunner, Thamar Voss, Alexander Jordan & Uta Klusmann, Stefan Krauss, Michael Nerubrand, Yi-Miau Tsai. Teachers' mathematical knowledge, cognitive activation in the classroom, and student progress. *American Educational Research Journal*, Vol.47, No.1. (2010): 133-180. <https://doi.org/10.3102/0002831209345157>

³⁶ Gesche, Pospiech, & Matthias Schöne. Quantum physics in teacher education. (2011). <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>

³⁷ Nilüfer Didiş. The Place of Learning Quantum Theory in Physics Teacher Education: Motivational Elements Arising from the Context. *Educational Sciences: Theory & Practice*, Vol.15, No.4. (2015): 1087-1101. 10.12738/estp.2015.4.2522

³⁸ Nilüfer Didiş & Edward F. Redish. How do the students perceive the reasons for their success in a modern physics course? In *Poster presented at the Physics Education Research Conference (PERC 2010)*, (2010). Portland-OR, USA.

En este mismo contexto, la investigación pedagógica sobre la teoría cuántica examina la comprensión sobre Física de los estudiantes de nivel superior de secundaria y de nivel universitario y, proporciona nuevas metodologías sobre la instrucción de la mecánica cuántica,³⁹ Budde, Niedderer, Scott y Leach⁴⁰ y, Budde, Niedderer, Scott y Leach,⁴¹ Didiş⁴²; Didiş y Redish,⁴³ Fernández, González y Solbes;⁴⁴ Gardner;⁴⁵ Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou;⁴⁶ Ireson;⁴⁷ Wattanakasiwich;⁴⁸ Mannila, Koponen y Niskanen;⁴⁹ Michelini, Ragazzon, Santi y Stefanel;⁵⁰ Müller y Wiesner,⁵¹

³⁹ Mervi Asikainen & Pekka Hirvonen. Probing pre-and in-service physics teachers' knowledge using the double-slit thought experiment. *Science & Education*, Vol.23, No.9. (2014): 1811-1833. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9710-1>; Lei Bao. *Dynamics of student modeling: a theory, algorithms, and application to quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Universidad de Maryland]. (1999).

⁴⁰ Marion Budde, Hans Niedderer, Philip Scott, John Leach. Electronium: A quantum atomic teaching model. *Physics Education*, Vol.37, No.3. (2002a): 197-203. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/303>

⁴¹ Marion Budde, Hans Niedderer, Philip Scott, John Leach. The quantum atomic model 'Electronium': A successful teaching tool. *Physics Education*, Vol.37, No.3. (2002b): 204-210. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/304>

⁴² Nilüfer Didiş. The Place of Learning Quantum Theory in Physics Teacher Education: Motivational Elements Arising from the Context. *Educational Sciences: Theory & Practice*, Vol.15, No.4. (2015): 1087-1101. 10.12738/estp.2015.4.2522

⁴³ Nilüfer Didiş & Edward F. Redish. How do the students perceive the reasons for their success in a modern physics course? In *Poster presented at the Physics Education Research Conference (PERC 2010)*, (2010). Portland-OR, USA.

⁴⁴ Patricia Fernández, Eduardo González y Jordi Solbes. Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol. 33, No.1. (2021): 35-46. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33275>

⁴⁵ David Gardner. *Learning in quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Purdue University]. (2002). <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI3104944/>

⁴⁶ George Kalkanis, Pandora Hadzidaki, & Dimitrius Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, Vol.87, No.2, (2003):257-280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>

⁴⁷ Gren Ireson. The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, Vol.35, No.1. (2000): 15. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/1/302>

⁴⁸ Pomrat Wattanakasiwich. *Model of understanding of probability in modern physics* [Tesis Doctoral, Universidad de Chiang Mai]. (2005). https://www.researchgate.net/publication/35698081_Model_of_student_understanding_of_probability_in_modern_physics

⁴⁹ Katja Mannila, Ismo Koponen, & Jouni Niskanen. Building a picture of students' conceptions of wave-and particle-like properties of quantum entities. *European journal of physics*, Vol.23, No.1. (2001): 45. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/23/1/307>

⁵⁰ Marisa Michelini, Renzo, Ragazzon, Lorenzo, Santi, & Alberto Stefanel. Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, Vol.35, No.6. (2000): 406-410. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/305>

⁵¹ Rainer Müller & Hartmut Wiesner. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S*, (1998), 382.

1998; Pereira y Solbes;⁵² Olsen;⁵³ Sadaghiani;⁵⁴ Strnad;⁵⁵ Styer⁵⁶.

Ahora bien, una de las razones de los conceptos erróneos de los estudiantes es la dificultad de los conceptos abstractos en la física cuántica (Sadaghiani;⁵⁷ Styer;⁵⁸) los conceptos erróneos son conceptos estables y no científicos de los individuos; es difícil entender los conceptos abstractos leyendo sus definiciones, por lo que los conceptos erróneos son inevitables en la comprensión de la física cuántica; los conceptos erróneos en mecánica cuántica no son considerados preconceptos, porque los estudiantes casi no tienen oportunidad de adquirir experiencia sobre la teoría cuántica en su vida cotidiana.⁵⁹

Por esta razón, se identificaron como conceptos erróneos, las explicaciones no científicas, coherentes y sólidas de los conceptos que se pueden obtener de los libros de texto, de los profesores o del lenguaje de las clases. Al respecto, Styer⁶⁰ enumeró algunos conceptos erróneos en mecánica cuántica, basándose en su observación de estudiantes, colegas, etc., hizo hincapié en las dificultades conceptuales y, sugirió considerar estos conceptos erróneos, para combatirlos. Después de identificar los conceptos erróneos generales de los estudiantes, Müller y Wiesner⁶¹ investigaron las conceptualizaciones de

⁵² Alessandro Pereira & Jordi Solbes. The Dynamics of Perspective in Quantum Physics. *Science & Education*, Vol.31, No.2. (2022): 427-450. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00252-9>

⁵³ Rolf Vegar Olsen. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, Vol.24, No.6. (2002):565-574. <https://doi.org/10.1080/09500690110073982>

⁵⁴ Homeyra Sadaghiani. (2005). *Barreras conceptuales y matemáticas para los estudiantes que aprenden mecánica cuántica*. Universidad Estatal de Ohio.

⁵⁵ J. Strnad. Quantum physics for beginners. *Physics Education*, Vol.16, (1981): 88-92. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/16/2/306>

⁵⁶ Daniel F. Styer. Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Vol.64, No.1. (1996): 31-34. <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18288>

⁵⁷ Homeyra Sadaghiani. (2005). *Barreras conceptuales y matemáticas para los estudiantes que aprenden mecánica cuántica*. Universidad Estatal de Ohio.

⁵⁸ Daniel F. Styer. Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Vol.64, No.1. (1996): 31-34. <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18288>

⁵⁹ J. Solbes, J. E. García Díaz, A. M. Alcalde de Oñate, N. Rubio Sáez, and J. A. Martínez-Pons, "Recursos y elementos de actualización científica" (Ministerio de Educación y Ciencia, Subdirección General de Formación del Profesorado, 1992).

⁶⁰ Daniel F. Styer. Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Vol.64, No.1. (1996): 31-34. <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18288>

⁶¹ Rainer Müller & Hartmut Wiesner. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S*, (1998), 382.

los profesores alemanes de Física en formación, sobre los sistemas atómicos y, explicaron que la mayoría de los estudiantes cuya especialidad no era la Física, nunca tuvieron la oportunidad de aprender conceptualmente los conceptos de la mecánica cuántica.

Aún más, el estudio de Müller y Wiesner⁶² puede aceptarse como el primer estudio sobre profesores de Física en formación, por lo que es valioso tanto por su diseño como por sus resultados. Por otra parte, el estudio de Ireson⁶³ con estudiantes preuniversitarios en Inglaterra, demostró que estos no podían interpretar la teoría cuántica, al confundir algunas ideas básicas de la teoría entre sí y atribuirles propiedades mecanicistas contradictorias.

De otro lado, Didiş y Redish⁶⁴ examinaron la comprensión por parte de los profesores de Física en formación de algunos conceptos cuánticos, como: operadores, observables, valores propios y conceptos interrelacionados, e identificaron lo siguiente: los estudiantes tenían concepciones insuficientes que influyen en sus descripciones y discriminaciones; su comprensión contiene ideas correctas y erróneas, simultáneamente: su comprensión indefinida influye en el uso de diferentes conceptos indistintamente; hacen explicaciones y discriminaciones a través del razonamiento intuitivo y, algunas de sus concepciones eran totalmente acientíficas.

Ahora bien, los estudios pedagógicos de la teoría cuántica han estado centrados en la comprensión, por parte de los estudiantes, de las representaciones visuales y los problemas que plantean. La afirmación de Eddington⁶⁵ de que “el electrón me hace pensar en una bolita roja y dura en mi cabeza”, es un buen ejemplo de cómo la incapacidad de visualizar los sistemas cuánticos puede llevar a representaciones visuales diferentes. Los investigadores encuestaron a estudiantes de secundaria de Inglaterra y Gales sobre su percepción de los electrones y los fotones, descubriendo que la mayoría de ellos concretaba los conceptos abstractos, imaginando imágenes visuales no científicas.

⁶² Rainer Müller & Hartmut Wiesner. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S*, (1998), 382.

⁶³ Gren Ireson. The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, Vol.35, No.1. (2000): 15. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/1/302>

⁶⁴ Nilüfer Didiş & Edward F. Redish. How do the students perceive the reasons for their success in a modern physics course? In *Poster presented at the Physics Education Research Conference (PERC 2010)*, (2010). Portland-OR, USA.

⁶⁵ Azam Mashhadi y Brian Woolnough, "Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities", *European Journal of Physics* 20, n.º 6 (1 de noviembre de 1999):511, doi:10.1088/0143-0807/20/6/317.

Igualmente, en el estudio de Gil y Solbes⁶⁶ se menciona que la Física moderna, generalmente se introduce en los planes de estudio de la escuela secundaria, sin referencia a las dificultades de la Física clásica, simplemente, yuxtaponiendo los dos paradigmas o incluso mezclándolos, evidenciando que la enseñanza de las Ciencias está dando a los estudiantes, una imagen incorrecta y simplista de la misma; esto está marcado por el empirismo, pero con una ausencia de sus aspectos más relevantes -como la formulación de hipótesis o el diseño experimental.

En este sentido, en el estudio realizado por Mannila, Koponen y Niskanen⁶⁷ con estudiantes universitarios de Física, se reconoció que su principal dificultad era construir una nueva ontología para el cambio conceptual, lo que está en la misma línea de lo propuesto por Sinarcas y Solbes⁶⁸ con estudiantes de bachillerato, cuya principal dificultad en el aprendizaje de la Física cuántica es ontológica, debido a su incapacidad de comprender que los electrones y fotones no son ondas ni partículas, sino objetos nuevos con comportamientos nuevos; además, sostienen que hay 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.

Por otro lado, Bao⁶⁹ explica que los estudiantes pueden interpretar las situaciones de la mecánica cuántica, si hay rastros de la mecánica clásica; de lo contrario, no pueden hacer ninguna interpretación física, con lo que la mecánica cuántica se convierte simplemente en un conjunto de ecuaciones matemáticas. Por el contrario, muchos estudios han sugerido que los cursos de mecánica cuántica deberían evitar los conceptos de la mecánica clásica.

⁶⁶ Daniel Gil. & Jordi Solbes. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, Vol.15, No.3. (1993): 255-260, <https://doi.org/10.1080/0950069930150303>

⁶⁷ Katja Mannila, Ismo Koponen, & Jouni Niskanen. Building a picture of students' conceptions of wave-and particle-like properties of quantum entities. *European journal of physics*, Vol.23, No.1. (2001): 45. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/23/1/307>

⁶⁸ Vicent Sinarcas. y Jordi Solbes. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, Revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.31, No.3. (2013): 9-25. <https://doi.org/10.5565/rev/enscienv31n3.768>

⁶⁹ Lei Bao. *Dynamics of student modeling: a theory, algorithms, and application to quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Universidad de Maryland]. (1999). <https://www.proquest.com/openview/65291a4eec15ec52514e5373435f72f9/1?pqorigsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>

En correspondencia, Olsen⁷⁰ señala que algunos estudiantes muestran claramente conceptos erróneos derivados de su formación en Física clásica.

Finalmente, Pospiech⁷¹ sostiene que las causas de las dificultades para entender la mecánica cuántica comienzan con la mecánica clásica. En un estudio similar, Budde, Niedderer, Scott y Leach⁷² y, Budde, Niedderer, Scott y Leach⁷³ añaden que las razones de las dificultades en el aprendizaje de los modelos atómicos se deben a la diferencia de puntos de vista entre la Física cuántica y la Física clásica. Müller y Wiesner⁷⁴ explican que los estudiantes confunden los conceptos clásicos y cuánticos debido a la naturaleza contrastada de la formación tradicional y la mecánica cuántica, por lo que no es sorprendente que produzcan conceptos erróneos.

Teoría Cuántica y Enseñanza de la Estructura Atómica

Para abordar lo relacionado con la enseñanza de la estructura atómica, se requiere reconocer que esta es parte relevante de la teoría cuántica, hecho fundamental que ubica el tema en cuestión en dos posibilidades: la primera, tiene que ver con las situaciones, tensiones y problemas que conlleva la enseñanza en definitiva de la teoría cuántica; la segunda, es la especificidad que sugiere la enseñanza de la estructura atómica como parte o componente de la teoría en mención. Así, y como lo sugieren Muñoz-Burbano, Solbes y Ramos,⁷⁵ a pesar de la diversidad de escenarios educativos en donde se enseña la Física cuántica y la estructura atómica de la materia, son similares

⁷⁰ Rolf Vegar Olsen. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, Vol.24, No.6. (2002):565-574. <https://doi.org/10.1080/09500690110073982>

⁷¹ Gesche Pospiech. Uncertainty and complementarity: The hearth of quantum physics. *Physics Education*, Vol.35, No.6. (2000): 393-399. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/303>

⁷² Marion Budde, Hans Niedderer, Philip Scott, John Leach. Electronium: A quantum atomic teaching model. *Physics Education*, Vol.37, No.3. (2002a): 197-203. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/303>

⁷³ Marion Budde, Hans Niedderer, Philip Scott, John Leach. The quantum atomic model 'Electronium': A successful teaching tool. *Physics Education*, Vol.37, No.3. (2002b): 204-210. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/304>

⁷⁴ Rainer Müller & Hartmut Wiesner. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S*, (1998), 382.

⁷⁵ Zulman Muñoz-Burbano, Jordi Solbes y Germán Ramos. Análisis de la enseñanza de conceptos cuánticos en la unidad de "Estructura atómica de la materia" en libros de texto. *Praxis & Saber*, Vol.11, No.2., (2020): e10754. <https://doi.org/10.19053/22160159.v11.n27.2020.10754>

las dificultades encontradas, principalmente, aquellas relacionadas con la presencia de preconcepciones que impiden la comprensión y evolución, no solo de conceptos sino de prácticas de estos.

En este sentido, son varios los estudios que identifican la necesidad, así como también la relevancia de enseñar la teoría cuántica en niveles como la secundaria; algunos de ellos los reseña Muñoz-Burbano,⁷⁶ quien identifica que estos estudios desarrollaron hace años, unas bases tanto epistemológicas como didácticas para el abordaje de la enseñanza de la teoría cuántica y los temas que le componen.

Así entonces, están los aportes ejecutados inicialmente en Norteamérica por Haber-Schaim,⁷⁷ quien relata las tensiones y dinámicas propias de la enseñanza de la Física cuántica en el bachillerato; posteriormente, las contribuciones de Strnad⁷⁸ con la enseñanza de la energía y, de Lijnse⁷⁹ con el programa holandés de introducción de la mecánica cuántica en las escuelas secundarias; en Italia, Fabri⁸⁰ abordó la enseñanza de la Física en la escuela; concretamente, el tema relacionado con la masa relativista; y en Hungría, Marx estudia el potencial de la enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela.

En España, Gil, Senent y Solbes⁸¹ hacen un análisis crítico a la introducción de la física moderna en la enseñanza media; asimismo, Solbes, Calatayud, Climent y Navarro⁸² diseñan un currículo para la introducción

⁷⁶ Zulman Muñoz-Burbano. *Enseñanza de la estructura atómica de la materia en la educación secundaria en Colombia* [Tesis Doctoral, Universidad de Nariño]. (2020). <https://sired.udenar.edu.co/7063/>

⁷⁷ U. Haber-Schaim. On the teaching of quantum physics in the senior high school. En A. Loria & P. Thomsen (Eds.), (1975). *Seminar on the Teaching of Physics in schools 2: Electricity, Magnetism, and Quantum physics*.

⁷⁸ J. Strnad. Quantum physics for beginners. *Physics Education*, Vol.16, (1981): 88-92. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/16/2/306>

⁷⁹ P.L. Lijnse. Schoolbeeld of straatbeeld: over onderzoek naar begripsmoeilijkheden van leerlingen bij het leren van mechanica. In *Verslag van de 'Woudschoten' conferentie, Utrecht: Werkgroep Natuurkunde-Didactiek*. (1981)

⁸⁰ E. Fabri. Dialogo sulla massa relativista. *La Fisica nella Scuola*, Vol.14, No.25. (1981).

⁸¹ D. Gil, F. Senent, y Jordi Solbes. Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol.2, No.1. (1986): 16-21. <https://roderic.uv.es/handle/10550/44206>

⁸² Solbes, Jordi, Calatayud, María Luisa, Climent, Juan Bautista y Navarro, José. “Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos”. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.5, No.3, (1987):189-195. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5162>

de la enseñanza del modelo atómico cuántico; Gil y Solbes⁸³ establecen una propuesta para la enseñanza de la física moderna en la enseñanza secundaria; Solbes y Sinarcas⁸⁴ utilizan la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos clave de la física cuántica.

Por otra parte, en Japón, Konuma⁸⁵ hace una propuesta de abordaje de la enseñanza de la física moderna desde una perspectiva tópica o sistémica. A comienzos de la década de 1990, en Alemania, Fischler y Lichtfeldt⁸⁶ estudian las concepciones que poseen los estudiantes al momento de aprender sobre física moderna. Finalmente, en este panorama internacional, Olsen⁸⁷ elabora un estudio en Noruega, dedicado a la introducción de la mecánica cuántica en la escuela secundaria.

Klapp,⁸⁸ en México, explora las diferentes problemáticas que se generaban con la enseñanza de la física moderna en un contexto como el latinoamericano. Así mismo, Fanaro y Otero⁸⁹ analizan todas aquellas situaciones que convergen al momento de enseñar la mecánica cuántica en un contexto académico como el de la escuela media, y ubican su objeto de interés sobre los asuntos didácticos que están relacionados con ello. Oliveira, Vianna y Gerbassi⁹⁰ en Brasil, analizan las prácticas de los profesores encargados de las áreas de ciencias, en especial lo que piensan, dicen y hacen, con relación a los procesos de enseñanza de la física moderna.

⁸³ Daniel Gil. & Jordi Solbes. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, Vol.15, No.3. (1993): 255-260, <https://doi.org/10.1080/0950069930150303>

⁸⁴ Jordi Solbes, y Vicent Sinarcas. Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, No.3. (2009): 123-151. <https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2404>

⁸⁵ Mashhadi Konuma. Topical or Systematic? The teaching of modern physics. En *AIP Conference Proceedings*, Vol. 173, No.1. (1988): 391-394. <https://doi.org/10.1063/1.37538>

⁸⁶ Helmut Fischler & Michael Lichtfeldt. Modern Physics and Students' Conceptions. *International Journal of Science Education*, Vol.14, No.2. (1992): 181-190. <https://doi.org/10.1080/0950069920140206>

⁸⁷ Rolf Vegar Olsen. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, Vol.24, No.6. (2002):565-574. <https://doi.org/10.1080/09500690110073982>

⁸⁸ Jaime Klapp. The teaching of modern physics in Latin America. *AIP Conference Proceedings* 173, (1988): 395-404. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/173/1/395/884880>

⁸⁹ María de los Ángeles Fanaro y María Rita Otero. Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media: análisis de los aspectos afectivos de los estudiantes. *Revista de investigación*, Vol.35, No.73. (2011): 85-118.

⁹⁰ Fabio Oliveira, Deise Miranda Vianna y Reuber Scofano Gerbassi. Física moderna en la escuela secundaria: lo que dicen los profesores. *Revista Brasileira de Enseñanza de la Física*, Vol.29, (2007): 447-454. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000300016>

Respecto a la evolución de las representaciones de los profesores argentinos en la Física cuántica, se tiene los aportes de Fernández, González y Solbes,⁹¹ Alves-Pena⁹² en Brasil, argumenta sobre la relevancia de introducir en la secundaria, tanto temas como ideas propias de la física moderna y contemporánea. De similar manera, se encuentran las experiencias de Tuzón y Solbes,⁹³ quienes analizan la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia según la física moderna en primero de bachillerato; y, de Martínez-Torregrosa, Savall, Doménech, Rey y Rosa⁹⁴ relacionadas con la enseñanza problematizada de la Física cuántica en el nivel secundario.

Finalmente, en lo relativo al tema de la estructura atómica de la materia, son destacables los aportes de Chamizo,⁹⁵ quien explora desde una perspectiva que denomina “cultura química”, la enseñanza de la materia; y, cinco años después propone una tipificación de los modelos de enseñanza de las ciencias. Por otra parte, los aportes de Lombardi y Martínez⁹⁶ referidos a la mecánica cuántica y las estructuras químicas. Ahora bien, como se señaló en párrafos anteriores, tanto la enseñanza como el aprendizaje de la

⁹¹ Patricia Fernández, Eduardo González y Jordi Solbes. Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol.33, No.1. (2021): 35-46. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33275>

⁹² Fábio-Luís Alves-Pena. Por qué, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na sala de aula? *Revista brasileira de Ensino de Física*, Vol.28, No.1. (2006): 1-2. <https://doi.org/10.1590/S0102-47442006000100001>

⁹³ ⁹⁵ Paula Tuzón y Jordi Solbes. Análisis de la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia según la física moderna en primero de bachillerato. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, (2014): (28), 175-195.

⁹⁴ Joaquín Martínez Torregrosa, Francisco Savall Alemany, Josep Lluís Doménech Blanco, Alexandra Rey Cubero y Sergio Rosa Cintas. La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. *Revista De Enseñanza De La Física*, Vol.28, No. 2. (2016): 77–100. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/15813>.

⁹⁵ José Antonio Chamizo. Una tipología de los modelos para la enseñanza de las ciencias. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, (2010): 26-41. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2010.v7.i1.02

⁹⁶ Olimpia Lombardi y Juan Camilo Martínez. Entre mecánica cuántica y estructuras químicas: ¿a qué refiere la química cuántica? *Scientiae Studia*, Vol.10, (2012): 649-670. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662012000400002>

estructura atómica de la materia se valen y fundamentan primariamente en los principios y componentes de la teoría cuántica.⁹⁷

Teoría Cuántica y Enseñanza de la Estructura Atómica en Colombia.

En este punto, la tesis doctoral de Muñoz-Burbano,⁹⁸ enmarcada en el contexto colombiano, indaga sobre la enseñanza de la estructura atómica de la materia en la educación secundaria con base en la teoría cuántica; caracterizó la enseñanza del tema en cuestión y su relación con la teoría cuántica, para lo cual analizó los lineamientos curriculares, estándares básicos de competencia y derechos básicos de aprendizaje (DBA) establecidos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN)⁹⁹ de la República de Colombia para el campo de las Ciencias Naturales.

De igual manera, Muñoz-Burbano, Solbes y Ramos¹⁰⁰ presentan los resultados sobre cómo se introduce en los libros de texto de educación secundaria en Colombia, conceptos cuánticos en la unidad de estructura atómica -conceptos como: crisis de la física clásica, dualidad onda-partícula, modelos atómicos clásicos, semi-cuántico y cuántico, relaciones de indeterminación y números cuánticos-, para ello seleccionaron editoriales de mayor uso en Colombia, además de textos referenciados por los más de

⁹⁷ Solbes, Jordi, Calatayud, María Luisa, Climent, Juan Bautista y Navarro, José. “Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos”. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.5, No.3, (1987):189-195. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5162>; Vicent Sinarcas. y Jordi Solbes. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, Revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.31, No.3. (2013): 9-25. <https://doi.org/10.5565/rev/enscien/v31n3.768>

⁹⁸ Zulman Muñoz-Burbano. *Enseñanza de la estructura atómica de la materia en la educación secundaria en Colombia* [Tesis Doctoral, Universidad de Nariño]. (2020). <https://sired.udenar.edu.co/7063/>

⁹⁹ Ministerio de Educación Nacional (MEN). *Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales*. (2004). Ministerio de Educación Nacional.

¹⁰⁰ Zulman Muñoz-Burbano, Jordi Solbes y Germán Ramos. Análisis de la enseñanza de conceptos cuánticos en la unidad de “Estructura atómica de la materia” en libros de texto. *Praxis & Saber*, Vol.11, No.2., (2020): e10754. <https://doi.org/10.19053/22160159.v11.n27.2020.10754>. Solbes Matarredona, Jordi, Zulman Estela Muñoz Burbano, y Germán Enrique Ramos Zambrano. 2019. “Enseñanza de la Estructura atómica de la Materia en Colombia”. *Revista Historia de la Educación Colombiana* 22 (22): 117-40. <https://doi.org/10.22267/rhec.192222.54>.

70 profesores entrevistados. Los conceptos básicos de la teoría cuántica en la educación secundaria son abordados de forma incipiente, porque es una línea que recién se empieza a ahondar en Colombia, dada su importancia en la configuración de una imagen más correcta de las ciencias. Además de lograr una interpretación adecuada en la enseñanza de la estructura atómica de la materia, la aplicación de la cuántica en el entorno de los estudiantes es cada vez de mayor prevalencia; por esto, se hace un llamado para lograr reducir las brechas que existen en las aulas de clases de los estudiantes colombianos sobre la educación científica que reciben y el desarrollo técnico-científico del momento.

De otra parte, Cuesta y Mosquera¹⁰¹ presentan algunas reflexiones sobre las implicaciones educativas de la naturaleza de las ciencias y la enseñanza de la Mecánica Cuántica, lo cual permite un aporte a la formación del pensamiento científico por su reflexión multidisciplinar: Historia de las ciencias, Epistemología de las ciencias, Filosofía de las ciencias, Sociología de las ciencias, Psicología de las ciencias, entre otras, que validan la construcción y el desarrollo del conocimiento; asimismo, mencionan que ha contribuido en dar paso a nuevas disciplinas como la Didáctica de las ciencias, que realiza un análisis y construcción de nuevas de tendencias prácticas, con el fin de lograr el aprendizaje de los estudiantes y el desarrollo de ideas alternativas sobre la ciencia.

Por su parte, Villaveces¹⁰² asevera que la estructura del átomo, la estructura de las moléculas y los enlaces químicos, son conceptos de la química contemporánea que son enseñados erróneamente en el bachillerato, porque se los aborda en su mayoría como una mezcla fatal de nociones mal construidas, fábulas sin sentido y de reminiscencias de la era mecanicista. Identifica que el principal obstáculo proviene de un miedo a la teoría cuántica por parte de los profesores; esto puede ser por la natural heterogeneidad de las facultades de educación y de los libros de texto; asimismo, porque vienen del trabajo de grupos de profesores que han asumido el problema y han ido generando diversas maneras de entenderlo

¹⁰¹Yeison Javier Cuesta y Carlos Javier Mosquera. Algunas reflexiones en torno a las implicaciones de la NdC en Educación en Ciencias: el caso de la Enseñanza de la Mecánica Cuántica. *VII Congreso Internacional de Formación de Profesores de Ciencias*. (2016). <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/4834>

¹⁰²José Luis Villaveces. La enseñanza de la estructura de los átomos y de las moléculas. *Tecné, Episteme y Didaxis: Ted*, No.9. (2001). <https://doi.org/10.17227/ted.num9-5628>

y desarrollarlo, con variados resultados y disímiles conclusiones. Bajo este entendimiento, reconoce el papel de las facultades de educación en la enseñanza adecuada de la teoría atómica y molecular contemporáneas, para que los licenciados entiendan que los modelos corrientes de átomos y moléculas son objetos matemáticos y, adquieran, en consecuencia, un buen uso operacional de ellos; además, que les permita el desarrollo de investigaciones sobre la forma de enseñar estos temas en bachillerato, con el fin de que Colombia realice aportes significativos en los avances científicos del siglo XXI.

Así, Cuesta¹⁰³ en su estudio sobre las tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016, destaca las dificultades en la enseñanza de la física cuántica debido al formalismo matemático que, en muchas ocasiones, no genera procesos de reflexión de lo abstracto, convirtiendo su enseñanza en prácticas operativas sin análisis. Reconoce la necesidad de transformar los currículos de la física del bachillerato, integrando la física moderna para construir nociones de física después de 1900, en aras de aportar en la construcción de nociones de ciencias.

Pues bien, dentro de la revisión se menciona que el tema más frecuente de las propuestas es el modelo atómico, con el fin de asociar ideas del átomo cuántico. Cuesta¹⁰⁴ menciona que esto se debe a la inclusión de los currículos tanto de Física como de Química en educación secundaria, la prevalencia en la explicación de los modelos clásicos del átomo, pero no cuánticos y, también, la necesidad de reforzar las concepciones cuánticas del átomo.

Respecto a esto, Castrillón¹⁰⁵ implementa una estrategia didáctica para la enseñanza del modelo mecánico cuántico del átomo, mediante la implementación de la Unidad de Producción de Conocimiento como una herramienta de medición pedagógica, en cual se pudo establecer que se convierte en una metodología adecuada en el modelo mecánico-cuántico del átomo.

¹⁰³Yeison Cuesta, “Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016”, *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. No. 44, (2018): 147-166.

¹⁰⁴Yeison Cuesta, “Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016”, *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. No. 44, (2018): 147-166.

¹⁰⁵Claudia Patricia Castrillón. *Estrategia didáctica para la enseñanza del modelo mecánico cuántico del átomo, mediante la implementación de la Unidad de Producción de Conocimiento* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. (2016). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58137http://bdigital.unal.edu.co/54730/>

De otro lado, dentro de las investigaciones realizadas en Colombia, Cuesta¹⁰⁶, Solbes, Muñoz-Burbano y Zambrano¹⁰⁷, Villaveces¹⁰⁸, entre otros, destacan el papel de los libros de texto al momento de impartir una visión instrumental extrapolada a los profesores de Física y, por ende, a sus estudiantes. Sostienen también que, en los libros de texto no se aborda adecuadamente la ruptura que existe entre la física clásica y la física moderna, lo que genera dificultades conceptuales.

Conclusiones

La revisión documental realizada permite evidenciar la necesidad de abordar la enseñanza de la estructura atómica desde conceptos cuánticos, con el fin de elaborar una idea más cercana de la construcción de las ciencias en el aula de clases, que tiene en cuenta los avances científicos, tecnológicos y sociales; para que se contribuya de manera significativa al fortalecimiento de la Alfabetización Científica en Colombia.

La introducción de conceptos cuánticos en la escuela secundaria requiere que, en la formación de profesores en ciencias, se tenga en cuenta dicho contenido, que por la literatura citada deja visibles la necesidad de seguir trabajando en este campo, que aún es incipiente, pero necesario para una adecuada comprensión de los fenómenos microscópicos, estructura electrónica de los átomos, asimismo, el ordenamiento periódico y los enlaces de las moléculas.

Referencias

Akarsu, B. (2011). Instructional designs in quantum physics: A critical review of research. *Asian Journal of Applied Sciences*, 4(2), 112-118. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2011.112.118>

Alves-Pena, F. L. (2006). Por qué, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na

¹⁰⁶Yeison Cuesta, “Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016”, *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. No. 44, (2018): 147-166.

¹⁰⁷Jordi Solbes, Zulman Estela Muñoz-Burbano y Germán Enrique Zambrano. Enseñanza de la estructura atómica de la materia en Colombia. *Revista Historia de la Educación Colombiana*, Vol.22, No.22. (2019): 117-140. <https://doi.org/10.22267/rhec.192222.54>

¹⁰⁸José Luis Villaveces. La enseñanza de la estructura de los átomos y de las moléculas. *Tecné, Episteme y Didaxis: Ted*, No.9. (2001). <https://doi.org/10.17227/ted.num9-5628>

- sala de aula? *Revista brasileira de Ensino de Física*, 28(1), 1-2. <https://doi.org/10.1590/S0102-47442006000100001>
- Asikainen, M. A. & Hirvonen, P. E. Probing pre-and in-service physics teachers' knowledge using the double-slit thought experiment. *Science & Education*, Vol.23, No.9. (2014): 1811-1833. <https://doi.org/10.1007/s11191-014-9710-1>
- Baily, C. & Finkelstein, N. D. (2009). Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 5 (1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.5.010106>
- Bao, L. (1999). *Dynamics of student modeling: a theory, algorithms, and application to quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Universidad de Maryland]. <https://www.proquest.com/openview/65291a4eec15ec52514e5373435f72f9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Baumert, J., Kunter, M., Blum, W., Brunner, M., Voss, T., Jordan, A., & Tsai, Y. M. (2010). Teachers' mathematical knowledge, cognitive activation in the classroom, and student progress. *American Educational Research Journal*, 47 (1), 133-180. <https://doi.org/10.3102/0002831209345157>
- Berg, G., Demtröder, W., Euler, M., Fick, D., Großmann, S., Haase, A., Kretschmer, B., Lehn, R., Müller, A., Richter, P., Röß, D., Sauer, G., Schecker, H., Schneider, W., Sumfleth, E., Umbach, E., Urban, K., Vollmer, M., Welzel, M., ... Zimmermann, W. (2006). *Thesen für ein modernes Lehramtsstudium im Fach Physik*. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- Budde, M., Niedderer, H., Scott P., & Leach, J. (2002a). Electronium: A quantum atomic teaching model. *Physics Education*, 37(3), 197-203. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/303>
- Budde, M., Niedderer, H., Scott, P., & Leach, J. (2002b). The quantum atomic model 'Electronium': A successful teaching tool. *Physics Education*, 37(3), 204-210. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/304>
- Castrillón, C. P. (2016). *Estrategia didáctica para la enseñanza del modelo mecánico cuántico del átomo, mediante la implementación de la Unidad de Producción de Conocimiento* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58137http://bdigital.unal.edu.co/54730/>

- Chamizo, J. A. (2010). Una tipología de los modelos para la enseñanza de las ciencias. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 26-41. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2010.v7.i1.02
- Cuesta, Y. J. (2018). Estado da arte: tendências do ensino da física quântica entre 1986 e 2016. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (44), 147-166.
- Cuesta, Y. J. y Mosquera, C. J. (2016). Algunas reflexiones en torno a las implicaciones de la NdC en Educación en Ciencias: el caso de la Enseñanza de la Mecánica Cuántica. *VII Congreso Internacional de Formación de Profesores de Ciencias*. <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/4834>
- Darling-Hammond, L. (2000). Teacher quality and student achievement. *Education Policy Analysis Archives*, 8, (1). <https://doi.org/10.14507/epaa.v8n1.2000>
- Deslauriers, L. & Wieman, C. (2011). Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods. *Physical review special topics-physics education research*, 7(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.010101>
- Didiş N. (2015). The Place of Learning Quantum Theory in Physics Teacher Education: Motivational Elements Arising from the Context. *Educational Sciences: Theory & Practice*, 15(4), 1087-1101. [10.12738/estp.2015.4.2522](https://doi.org/10.12738/estp.2015.4.2522)
- Didiş, N. & Redish, E. F. (2010). How do the students perceive the reasons for their success in a modern physics course? In *Poster presented at the Physics Education Research Conference (PERC 2010)*, Portland-OR, USA.
- Didiş, N., Eryılmaz, A., & Erkoç, S. (2010). Pre-service Physics Teachers' Comprehension of Quantum Mechanical Concepts. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 6(4), 227-235. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75243>
- Etkina, E. (2010). Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 6 (2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>
- Fabri, E. (1981). Dialogo sulla massa relativista. *La Fisica nella Scuola*, 14, (25).

- Fanaro, M. y Otero, M. (2011). Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media: análisis de los aspectos afectivos de los estudiantes. *Revista de investigación*, 35(73), 85-118.
- Fernández, P. E., González, E. M. y Solbes, J. (2021). Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 33 (1), 35-46. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33275>
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1992). Modern Physics and Students' Conceptions. *International Journal of Science Education*, 14 (2), 181-190. <https://doi.org/10.1080/0950069920140206>
- Flores, J. (2022). Premio Nobel de Física 2022 para los investigadores del entrelazamiento cuántico. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/premio-nobel-fisica-2022-para-investigadores-pioneros-entrelazamiento-cuatico_18857
- Gardner, D. E. (2002). *Learning in quantum mechanics* [Tesis Doctoral, Purdue University]. <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI3104944/>
- Gil, D. & Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15 (3), 255-260, <https://doi.org/10.1080/0950069930150303>
- Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2 (1), 16-21. <https://roderic.uv.es/handle/10550/44206>
- Gómez, P. (2007). *Desarrollo del conocimiento didáctico en un plan de formación inicial de profesores de matemáticas de secundaria*. Universidad de Granada.
- Haber-Schaim, U. (1975). On the teaching of quantum physics in the senior high school. En A. Loria & P. Thomsen (Eds.), *Seminar on the Teaching of Physics in schools 2: Electricity, Magnetism, and Quantum physics*.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35 (1), 15. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/1/302>
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87 (2), 257-280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>

- Klapp, J. (1988). The teaching of modern physics in Latin America. *AIP Conference Proceedings* 173, 395-404. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/173/1/395/884880>
- Konuma, M. Topical or Systematic? The teaching of modern physics. En *AIP Conference Proceedings*, 173 1 (1988), 391-394. <https://doi.org/10.1063/1.37538>
- Levrini, O. & Fantini, P. Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, 22, (2013): 1895-1910. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9587-4>
- Levrini, O., Fantini, P., & Pecori, B. The problem is not understanding the theory, but accepting it: a study on students' difficulties in coping with Quantum Physics. In *Proceedings of the GIREP-EPEC Conference 2007, Frontiers of physics education*, (2008): 319-324.
- Lijnse, P. L. (1981). Schoolbeeld of straatbeeld: over onderzoek naar begripsmoeilijkheden van leerlingen bij het leren van mechanica. In *Verslag van de 'Woudschoten' conferentie, Utrecht: Werkgroep Natuurkunde-Didactiek*.
- Lombardi, O. y Martínez, J. C. (2012). Entre mecánica cuántica y estructuras químicas: ¿a qué refiere la química cuántica? *Scientiae Studia*, 10, 649-670. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662012000400002>
- Mannila, K., Koponen, I. T., & Niskanen, J. A. Building a picture of students' conceptions of wave-and particle-like properties of quantum entities. *European journal of physics*, 23, 1, (2001): 45. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/23/1/307>
- Martínez Torregrosa, Joaquín, Francisco Savall Alemany, Josep Lluís Domènech Blanco, Alexandra Rey Cubero, y Sergio Rosa Cintas. "La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada." *Revista De Enseñanza De La Física*, 28, 2, (2016): 77-100. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/15813>.
- Mashhadi, Azam, and Brian Woolnough. "Insights into students' understanding of quantum physics: visualizing quantum entities." *European Journal of Physics* 20, 6, (1999): 511. doi:10.1088/0143-0807/20/6/317.

- Michellini, Marisa, Ragazzon, Renzo, Santi, Lorenzo, & Stefanel, Alberto. Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, 35, 6, (2000): 406-410. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/305>
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). *Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales*. Bogotá: Ministerio de Educación Nacional. 2004.
- Molina, N. P. ¿Qué es el estado del arte? *Ciencia y Tecnología para la salud Visual y Ocular*, 3 5, (2005): 73-75. <https://doi.org/10.19052/sv.1666>
- Morales, O. *Fundamentos de la investigación documental y la monografía. Manual para la elaboración y presentación de la monografía*. Bogotá: Universidad de Los Andes, 2003.
- Müller, R. & Wiesner, H. Vorstellungen von lehramtsstudenten zur interpretation der quantenmechanik. *Zur didaktik der physik und chemie, Alsbach S*, (1998): 382.
- Muñoz-Burbano, Z. E. *Enseñanza de la estructura atómica de la materia en la educación secundaria en Colombia* (Tesis Doctoral, Universidad de Nariño). 2020. <https://sired.udenar.edu.co/7063/>
- Muñoz-Burbano, Z., Solbes, J. y Ramos, G. E. Análisis de la enseñanza de conceptos cuánticos en la unidad de “Estructura atómica de la materia en libros de texto”. *Praxis & Saber*, 11, 27, (2020): e10754. <https://doi.org/10.19053/22160159.v11.n27.2020.10754>
- Oliveira, F., Vianna, D. y Gerbassi, R. “Física moderna en la escuela secundaria: lo que dicen los profesores”. *Revista Brasileira de Enseñanza de la Física*, 29, (2007): 447-454. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000300016>
- Olsen, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24 6 (2002), 565-574. <https://doi.org/10.1080/09500690110073982>
- Pereira, A. & Solbes, J. The Dynamics of Perspective in Quantum Physics. *Science & Education*, 31 2, (2022): 427-450. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00252-9>
- Pospiech, G. & Schöne, M. Quantum physics in teacher education. (2011): <https://www.fisica.uniud.it/~ffp12/ftp/fullpapers/G%20Pospiech.pdf>

- Pospiech, G. Uncertainty and complementarity: The hearth of quantum physics. *Physics Education*, 35, 6, (2000): 393-399. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/35/6/303>
- Sadaghiani, H. *Barreras conceptuales y matemáticas para los estudiantes que aprenden mecánica cuántica*. Universidad Estatal de Ohio. 2005.
- Sinarcas, V. y Solbes, J. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, Revista de investigación y experiencias didácticas*, 31, 3, (2013): 9-25. <https://doi.org/10.5565/rev/enscienv31n3.768>
- Solbes, J. y 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*, 23 (2009): 123-151. <https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2404>
- Solbes, J., García Díaz, J. E., Alcalde de Oñate, A. M., Rubio Sáez, N. y Martínez-Pons, J. A. *Recursos y elementos de actualización científica*. Ministerio de Educación y Ciencia, Subdirección General de Formación del Profesorado, 1992.
- Solbes, J., Muñoz-Burbano, Z. y Zambrano, G. “Enseñanza de la estructura atómica de la materia en Colombia”. *Revista Historia de la Educación Colombiana*, 22, 22 (2019): 117-140. <https://doi.org/10.22267/rhec.192222.54>
- Solbes, J., Silvestre, V. y Furió, C. El desarrollo histórico de los modelos de átomo y enlace químico y sus implicaciones didácticas. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, (24), (2010): 83-105.
- Solbes, Jordi, Calatayud, María Luisa, Climent, Juan Bautista y Navarro, José. “Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos”. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, Vol.5, No.3, (1987): 189-195. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5162>
- Strnad, J. Quantum physics for beginners. *Physics Education*, 16, (1981): 88-92. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/16/2/306>
- Styer, D. F. Common misconceptions regarding quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 64, 1 (1996): 31-34. <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.18288>

Tuzón, P. y Solbes, J. “Análisis de la enseñanza de la estructura e interacciones de la materia según la física moderna en primero de bachillerato”. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 28 (2014): 175-195.

Villaveces, J. L. La enseñanza de la estructura de los átomos y de las moléculas. *Tecné, Episteme y Didaxis: Ted*, 9, (2001): <https://doi.org/10.17227/ted.num9-5628>

Wattanakasiwich, P. (2005). *Model of understanding of probability in modern physics* [Tesis Doctoral, Universidad de Chiang Mai]. https://www.researchgate.net/publication/35698081_Model_of_student_understanding_of_probability_in_modern_physics

Citar este artículo

Narváez G. María A. “Revisión sistemática sobre la enseñanza de la estructura atómica desde conceptos cuánticos”. *Revista Historia de la Educación Colombiana*. Vol. 28-29 No 28-29, (2022): 247-277.

DOI: <https://doi.org/10.22267/rhec.222929.107>