

La dualidad onda-partícula: un estado del arte de su enseñanza y su aprendizaje en la escuela media y en cursos introductorios del nivel superior

Wave-particle duality: a systematic review of the literature about its teaching and learning in secondary school and introductory university courses

Luciano Ferrufino^{1*}, Nicolás Velasco^{1,2}, Nicolás Gandolfo^{1,2}, Dayana Álvarez¹ y Laura Butler^{1,2}

¹Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Medina Allende y Haya de la Torre. Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

²Instituto de Física Enrique Gaviola, Medina Allende y Haya de la Torre. Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

*E-mail: luciano.ferrufino@unc.edu.ar

Resumen

Las nociones fundamentales de física cuántica forman parte de los currículos de cursos introductorios de universidad, de la formación de docentes de física y también de la escuela secundaria en Argentina y en otros países del mundo. Entre esos conceptos fundamentales se encuentra la dualidad onda-partícula (DOP), concepto clave y puerta de entrada al mundo cuántico. En este trabajo se realiza una revisión sistemática de la literatura sobre la DOP en revistas especializadas sobre educación en ciencias a nivel local, regional e internacional, a fin de recolectar los hallazgos más relevantes en cuanto a su enseñanza y su aprendizaje. Resultados preliminares muestran que tales hallazgos pueden clasificarse según su propósito fundamental en cinco categorías: Recursos para la enseñanza de la DOP, Propuestas didácticas para la enseñanza de la DOP, Dificultades y oportunidades de aprendizaje de la DOP, Reflexiones históricas y epistemológicas sobre la DOP, y Revisiones de la literatura sobre la enseñanza y aprendizaje de física cuántica (que incluyen la DOP).

Palabras clave: Dualidad onda-partícula; Enseñanza; Aprendizaje; Estado del arte; Escuela secundaria; Educación superior.

Abstract

Fundamental notions of quantum physics are included in the curricula of introductory university courses, in the preservice physics teachers training, and also in high schools in Argentina and other countries around the world. Among these fundamental concepts is wave-particle duality (WPD), a key concept and gateway to the quantum world. This work involves a systematic review of the literature on WPD in specialized science education journals at local, regional, and international levels, in order to gather the most significant findings regarding its teaching and learning. Preliminary results show that such findings can be classified according to their fundamental purpose into five categories: Resources for teaching WPD, Didactic proposals for teaching WPD, Learning

difficulties and opportunities in WPD, Historical and epistemological reflections on WPD, and Literature reviews on the teaching and learning of quantum physics (including WPD).

Keywords: Wave-particle duality; Teaching; Learning; Systematic review; High school; Higher education.

I. INTRODUCCIÓN

La dualidad onda-partícula ha sido uno de los conceptos clave en el desarrollo histórico de la teoría cuántica. Los conceptos fundamentales de la teoría como la función de onda y sus interpretaciones probabilísticas fueron desarrollados para superar la dificultad conceptual causada por la noción de dualidad (Jammer, 1989; Kragh, 2002). Por lo tanto, la dualidad es la puerta de entrada a la teoría cuántica y esto debería ser contemplado tanto en los cursos introductorios de nivel superior como en los cursos del nivel secundario.

Además, aún hoy existen intensos debates en relación a la interpretación de la teoría cuántica, y la dualidad onda partícula ha sido uno de los conceptos clave en esos debates desde los inicios de la teoría (Cheong y Song, 2014). Aunque la interpretación de Copenhague es la interpretación más utilizada en los libros de textos y más aceptada por los físicos especialistas y por los profesores universitarios (Mohan, 2020), ésta no forma parte -explícitamente- de los contenidos a enseñar. Es importante tener en cuenta -explícitamente- el problema de la interpretación de la teoría cuántica, así como también la existencia de otras interpretaciones diferentes de la de Copenhague (Mohan, 2020; Norsen, 2013) porque esto contribuye a una mejor comprensión de la teoría (Garritz, 2013).

La física cuántica representa un desafío intelectual alto para los estudiantes (y profesores), debido a los cambios conceptuales que la teoría ha propuesto en relación a la naturaleza de la materia y que resultan muy anti-intuitivos para la gran mayoría de los aprendices. La DOP genera confusión, ya que la experiencia de los estudiantes ha sido con cosas que actúan como partículas o como ondas, pero nunca como ambas a la vez (Ayene, Kriek y Damtie, 2011). La pregunta que surge es ¿cómo podría organizarse la enseñanza sobre la dualidad teniendo en cuenta no solo las dificultades experimentadas por los estudiantes para aprender este concepto, sino también los vivos debates interpretativos que aún subsisten al respecto? La situación planteada advierte un escenario desafiante para organizar la enseñanza y el aprendizaje de este concepto.

Este trabajo se desarrolla en el contexto de un proyecto mayor que pretende diseñar, implementar y evaluar secuencias de enseñanza-aprendizaje sobre varios contenidos, entre los cuales se incluye la DOP, en la escuela media y en el nivel superior del profesorado de física. Para ello, el primer paso es conocer y analizar los hallazgos existentes relativos a la enseñanza y al aprendizaje de la DOP en la educación secundaria y superior. Aunque este contenido está presente desde siempre en los documentos curriculares oficiales para la formación docente, es más reciente su incorporación en los documentos curriculares para la educación secundaria de numerosos países (Stadermann, van den Berg y Goedhart, 2019) entre los cuales se encuentra Argentina. La revisión que se presenta intenta retomar los hallazgos clave en relación a la enseñanza y el aprendizaje de la DOP para orientar el diseño que se pretende abordar en una instancia posterior.

Un antecedente inmediato a esta revisión es el trabajo de Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman y Van Joolingen (2017). Esta revisión se enfoca en investigaciones sobre las concepciones intuitivas, las herramientas de investigación, las estrategias de enseñanza y las aplicaciones multimedia utilizadas en relación a varios contenidos de física cuántica. Estos autores reportan una revisión de 75 artículos publicados en el periodo 1997-2017. La revisión que se presenta aquí complementa, actualiza y especifica el estudio de Krijtenburg-Lewerissa *et al.* (2017) dado que involucra el período 2010-2024, se enfoca específicamente en la noción de dualidad y, por último, agrega discusiones históricas y epistemológicas sobre la DOP que, entendemos, contribuyen de manera sustancial a la comprensión de este contenido.

Las preguntas que guían esta revisión son:

- P1. ¿Cuáles son las características de los recursos que la literatura ofrece para la enseñanza de la DOP?
- P2. ¿En qué contexto y con qué fundamentos pedagógicos y didácticos se han publicado propuestas para la enseñanza de la DOP?
- P3. ¿Cuáles son las principales dificultades y/u oportunidades de aprendizaje de la DOP para distintos niveles educativos?
- P4. ¿Qué diálogos se pueden establecer entre las reflexiones históricas y epistemológicas sobre la DOP y la enseñanza de ese contenido?

II. METODOLOGÍA

El criterio de selección de las revistas se refiere a tres aspectos. El primero de ellos es que los títulos tengan amplia difusión en el ámbito de la educación en ciencias, entendiendo como amplia difusión al conjunto de revistas que convocan un gran número de autores y lectores dentro de esa comunidad. El segundo aspecto tiene que ver con la calidad de las revistas, entendida en términos de su inclusión en bases de datos bien calificadas. Por ello, consideramos títulos incluidos en SCOPUS, base bien reconocida académicamente en la comunidad. Una excepción a este criterio es el de la inclusión de la Revista de Enseñanza de la Física (no incluida en SCOPUS, sí incluida en SCIELO), que está justificada a partir de que es la única revista sobre enseñanza de la física de Argentina, país desde el cual se realiza esta revisión. El último aspecto que se consideró fue procurar una amplia distribución geográfica de los títulos. Se incluyeron títulos locales (Argentina), regionales (Brasil) e internacionales (Europa, EEUU, Asia). Bajo estos criterios, los títulos involucrados en la revisión fueron: Physical Review Physics Education Research, Science & Education, International Journal of Science Education, Science Education, Physics Teacher, Physics Education, Journal of Research in Science Teaching, American Journal of Physics (Sección Educación), Enseñanza de las Ciencias, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, Revista Brasileira de Ensino de Física y Revista de Enseñanza de la Física.

La selección de los artículos se llevó a cabo en varias etapas. En una primera fase, se leyeron los títulos y resúmenes de todos los artículos de los números y volúmenes de las revistas seleccionadas. Esta fase arrojó 18693 artículos. De éstos se eligieron aquellos que contenían, en títulos y/o resúmenes, las palabras clave: dualidad onda partícula o cuántica (y sus variantes en inglés y portugués cuando correspondía). Aquellos en los que aparecía solamente la palabra cuántica, se buscaba si en el cuerpo del texto aparecían las palabras dualidad onda partícula. Si se encontraba esa expresión, el artículo se incluía en la revisión. Esta selección arrojó 183 artículos. De ellos, hubo 21 a los que no se pudo acceder en la web y que no se incluyeron en la revisión. En una segunda etapa se leyeron los 162 artículos seleccionados y se excluyeron aquellos en los que la DOP no se desarrollaba. Este procedimiento nos permitió disponer de 96 artículos para la revisión final. Estos artículos fueron leídos y analizados con relación a cuál era su aporte principal al estudio de la enseñanza y aprendizaje de la DOP. De este modo se identificaron cinco aportes principales que dieron lugar a la siguiente clasificación de los artículos:

A- Recursos para la enseñanza de la DOP. Son estudios que describen herramientas puntuales para el abordaje de un momento específico de una clase orientada a la enseñanza de la DOP. En este sentido, los recursos deben encontrarse despojados de una estrategia de enseñanza explícita. Ejemplos de estos son experimentos, simulaciones, películas, fotos, obras de teatro, etc.

B- Propuestas de enseñanza sobre la DOP. Son artículos que proponen estrategias de enseñanza que involucran una propuesta pedagógica concreta incluyendo objetivos y actividades específicas.

C- Dificultades u oportunidades de aprendizaje de los estudiantes en relación a la DOP. Son artículos que reportan obstáculos u oportunidades de aprendizaje en contextos específicos mientras los estudiantes realizan alguna tarea relativa a la DOP.

D- Historia y epistemología de la DOP. Son artículos de reflexiones históricas y de interpretación sobre la DOP que están, en mayor o menor medida, relacionados con problemas de la enseñanza y el aprendizaje.

E- Estados del arte sobre aprendizaje y enseñanza de la cuántica. Son artículos que reportan revisiones de la literatura sistematizadas y que incluyen a la DOP como parte de ellas.

TABLA I. Resultado de la categorización.

Q	SJR	REVISTA	CATEGORÍAS				
			Recursos	Propuestas	D y O	H y E	Reviews
Q2	0.524	American Journal of Physics	7	0	1	7	0
Q1	1.015	Physical Review Physics Education Research	0	7	14	0	2
Q1	1.311	Science & Education	2	1	6	6	0
Q1	1.003	International Journal of Science Education	0	1	3	0	0
Q1	2.115	Science Education	0	0	2	1	0
Q4	0.21	Revista Brasileira de Ensino de Física	3	3	1	4	0
Q3	0.514	Physics Teacher	5	2	1	3	0

Q3	0.402	Physics Education	2	4	2	0	0
Q1	1.882	Journal of Research in Science Teaching	0	0	1	0	0
Q2	0.501	Enseñanza de las ciencias	0	0	2	0	0
Q2	0.333	Revista Eureka	0	0	0	0	0
-	-	Revista de Enseñanza de la Física	0	1	2	0	0

III. RESULTADOS

Al momento de escribir este artículo se estaba finalizando la lectura de la bibliografía, el análisis de la misma y la síntesis de los resultados. En este sentido, los resultados que se presentan en esta sección deben considerarse como resultados preliminares.

A. Recursos para la enseñanza de la DOP

En relación a esta categoría, se encuentra que los recursos más utilizados para la enseñanza de la DOP son las experiencias de laboratorio, tanto reales como simuladas. Éstas giran en torno a las siguientes prácticas: el interferómetro de Mach-Zehnder (Cavalcanti, Ostermann, Netto y Lima, 2020), el experimento de Young con luz y/o electrones (Velentzas, 2014) y el efecto fotoeléctrico (Melhorato y Nicoli, 2012).

El interferómetro de Mach-Zehnder es un dispositivo utilizado para dividir un haz de luz en dos caminos separados y luego combinarlos para crear un patrón de interferencia. Este patrón se usa para medir diferencias de fase causadas por variaciones en los caminos, permitiendo estudiar fenómenos físicos como la dualidad onda-partícula. Consiste básicamente en dos divisores de haz (espejos semitransparentes) y dos espejos completos, dispuestos de manera que la luz que entra en el primer divisor de haz se divide en dos. El experimento de Young, también conocido como el experimento de la doble rendija, es un montaje de laboratorio útil para observar la naturaleza ondulatoria de la luz. En este experimento se hace pasar luz coherente (como la de un láser) a través de dos rendijas estrechas y paralelas. La luz que pasa por las rendijas se difracta y los haces resultantes se superponen, creando un patrón de interferencia de franjas claras y oscuras en una pantalla detrás de las rendijas. El efecto fotoeléctrico es un fenómeno en el que los electrones son liberados de un material cuando este es iluminado con luz de cierta frecuencia. Si pensamos que la luz está compuesta por partículas llamadas fotones, cuando un fotón de luz golpea un electrón en el material, si la energía del fotón es suficiente, el electrón absorbe esta energía y es expulsado del material.

Gran parte de los recursos son utilizados para desarrollar discusiones cualitativas (Silva Neto, Ostermann y Prado, 2011) y en pocos casos se utiliza el formalismo matemático para corroborar las leyes que explican el fenómeno. Algunos de estos recursos han sido utilizados en el nivel secundario (Velentzas, 2014) y otros en el nivel superior (Cavalcanti *et al.*, 2020).

Desafortunadamente algunos de los montajes de laboratorio, resultan ser difícilmente accesibles debido a que requieren de instrumentales complejos. En contraposición, la mayoría de las simulaciones son de libre acceso y en el caso de los interferómetros, permiten utilizar fotones o electrones y variar el flujo incidente de los mismos (Silva Neto *et al.*, 2011). Al poder utilizar tanto electrones como fotones de forma regulada convierte al recurso en una oportunidad potencial para la discusión de la DOP. Este hecho no ocurre en otras experiencias que solo muestran un solo comportamiento de la luz (Velentzas, 2014).

Otro recurso puede considerarse como producto de esta revisión es la Naturaleza de la Ciencia (Stadermann y Goedhart, 2021a). Un abordaje de este tipo puede aportar una comprensión conceptual profunda con relación a qué es un objeto cuántico, pero también con relación a cómo se construye el conocimiento científico. No es necesario utilizar conceptos matemáticos abstractos por lo que representa un recurso interesante para trabajar en el nivel medio.

B. Propuestas de enseñanza para la DOP

En la revisión de la literatura sobre propuestas de enseñanza, se pueden identificar ciertos patrones recurrentes que revelan características comunes. Algunas de estas propuestas no toman como eje central las ideas de los estudiantes. Es decir, no se enfocan en evaluar el progreso de las concepciones de los y las estudiantes a lo largo del proceso educativo. En lugar de priorizar cómo evolucionan las ideas de los estudiantes, estas propuestas tienden a centrarse

más en los contenidos, vigilando que éstos sean cubiertos de manera eficiente (Bitzenbauer y Meyn, 2020; Fanaro, Otero y Arlengo, 2012; Kaur, Blair, Moschilla y Zadnik, 2017).

Otra característica destacable es que las propuestas suelen no visibilizar sus posturas epistemológicas (Malgieri, Onorato y De Ambrosis, 2017; Solbes y Sinarcas, 2010). En otras palabras, no son explícitas acerca de las concepciones interpretativas adoptadas para abordar la DOP. Además, un número importante de estas propuestas no muestran lo que realmente aprendieron los y las estudiantes. En cambio, los autores de estos trabajos reportan en términos generales las dificultades de aprendizaje encontradas y las experiencias emocionales vividas por los estudiantes durante el proceso educativo. Este enfoque refleja una preocupación genuina por entender las barreras que enfrentan los estudiantes y cómo estas afectan su aprendizaje, aunque adolecen de una caracterización sobre cómo han podido evolucionar sus nociones sobre la DOP como resultado de la propuesta (Marshman y Singh, 2017; Wittmann y Morgan, 2020).

Es importante notar que una parte muy escasa de las propuestas cuenta con una implementación detallada (Bitzenbauer, 2021; Bitzenbauer y Zenger, 2022). La falta de detalles sobre la implementación también impide que otros educadores puedan replicar y adaptar estas propuestas en sus propios contextos. Algunas de estas propuestas no se basan en resultados de investigaciones previas (Bitzenbauer y Zenger, 2022) y, en general, establecen un marco pedagógico amplio reconociendo las dificultades de aprendizaje de los estudiantes, pero no sustentando sus diseños en resultados en investigaciones de educación en ciencias (Kaur *et al.*, 2017).

Por último, todas las propuestas revisadas reconocen la dificultad asociada a la enseñanza de la DOP. Este reconocimiento generalizado refleja un consenso sobre la complejidad intrínseca de este concepto y la necesidad de desarrollar estrategias didácticas específicas para abordar los desafíos que presenta su enseñanza. En cuanto al nivel educativo, las propuestas están, en su mayoría, destinadas al nivel universitario. Este enfoque en la educación superior puede deberse a la complejidad de los conceptos tratados y a la preparación previa que se espera de los estudiantes en este nivel educativo.

C. Dificultades y oportunidades de aprendizaje de la DOP

Dentro de este conjunto de investigaciones, surge una problemática que tiene que ver con cómo los estudiantes interpretan la teoría cuántica cuando sus docentes no adoptan de manera explícita una postura interpretativa de la durante la enseñanza. Por ejemplo, Baily y Finkelstein (2010) concluyen que los estudiantes universitarios hacen interpretaciones propias (mayoritariamente realistas) sobre la naturaleza de los fenómenos cuánticos al explicar el experimento de la doble rendija. También que suelen vacilar en sus respuestas cuando lo que para ellos tiene sentido intuitivo y no coincide con lo que consideran una respuesta correcta, lo que subraya la necesidad de distinguir entre la perspectiva personal y otra la pública sobre los aspectos interpretativos de la mecánica cuántica. Relacionado con esta cuestión, algunos estudios también muestran discrepancias interpretativas entre los instructores de física cuántica a nivel universitario. Por ejemplo, McKagan, Perkins y Wieman (2010) encontraron que el 40% de los especialistas consideran a la función de onda de Schrodinger una onda de información y un 30% una onda de materia. El resto tienen una versión mixta entre estas dos. Por otra parte, estos autores también reportan una dificultad ampliamente mencionada en los artículos revisados tanto en el nivel secundario como el universitario: los estudiantes creen que tanto los fotones como los electrones recorren trayectorias sinusoidales. Esta parece ser una imagen que les permite dar sentido a la DOP.

Otros artículos revelan que los estudiantes universitarios suelen recurrir, en distintos grados, a las nociones clásicas para entender la DOP. Por ejemplo, Ayene *et al.* (2011), identificaron tres categorías cualitativamente diferentes para las representaciones de DOP de los estudiantes: (1) descripción clásica; (2) descripción mixta clásica-cuántica; y (3) descripción cuasi cuántica.

En la primera categoría consideran que los objetos cuánticos son ondas o partículas, pero de manera exclusiva (una o la otra). Las partículas y las ondas se conciben como lo hace la física clásica. Consideran que la emisión fotoeléctrica se debe a la absorción continua de fotones y que la intensidad de la luz es el factor determinante para la emisión de un electrón durante el efecto fotoeléctrico. La segunda categoría contempla que tanto los objetos macroscópicos como los microscópicos se representan como objetos con propiedades ondulatorias. Los fotones se consideran objetos con propiedades de partículas y de ondas clásicas. Los electrones se describen como objetos localizados pero que no poseen la propiedad de la posición y refieren a las notas del libro de texto como la explicación experimental para asociar propiedades ondulatorias a los electrones. Un haz de fotones se concibe como objetos que poseen una energía $h\nu$ y un momento mv , considerándolos como partículas clásicas perfectamente localizadas y con posición definida. La formación de franjas de interferencia se describe correctamente como una propiedad ondulatoria de los objetos, pero como una función de la intensidad (por ejemplo, si la intensidad disminuye, la franja de interferencia en la pantalla también disminuye). En la categoría 3, para el experimento de la doble rendija, se espera que los electrones formen una franja de interferencia y al aumentar la velocidad se espera que se estrechen los

máximos y mínimos de interferencia. La longitud de onda de de Broglie se considera una idea clave para describir la propiedad ondulatoria de la materia. La interferencia y la difracción se utilizan para caracterizar la propiedad ondulatoria de los electrones y los fotones. Las interacciones de los fotones con la pantalla se describen como una propiedad de las partículas; la naturaleza ondulatoria de la luz se demuestra mediante las propiedades de interferencia y difracción. La emisión de electrones en el experimento fotoeléctrico se interpreta en función de la frecuencia y no de la intensidad de la luz incidente. Los electrones se describen como entidades cuánticas que presentan fenómenos ondulatorios típicos como la superposición y la interferencia, pero también trayectorias para localizar su camino. A los fotones se les asocian propiedades cuánticas, diferentes de las propiedades clásicas de las partículas. El momento del fotón se describe en términos de longitud de onda y constante de Planck. Relacionado con estos resultados, Hoehn y Finkelstein (2018) encontraron que las ontologías de los objetos cuánticos (como las descritas anteriormente) no eran estáticas y variaba según el contexto de uso.

Por último, varios autores aseguran que una inigualable oportunidad para el aprendizaje de la noción de dualidad es trabajarla desde la Naturaleza de la Ciencia (NdC). Esta oportunidad surge principalmente (aunque no exclusivamente) en el contexto de la enseñanza secundaria, donde deben excluirse los aspectos matemáticos formales de la teoría. Bajo esta modalidad, los estudiantes aprenden de física y sobre la física simultáneamente. Por ejemplo, Stadermann y Goedhart (2021b) sostienen que mientras que el rol de las evidencias empíricas o el uso de observaciones e inferencias pueden abordarse habitualmente en clases de física orientadas hacia la indagación, otros aspectos como el papel de los modelos científicos, la provisionalidad del conocimiento científico o la existencia de controversias en la ciencia, sólo pueden trabajarse desde un abordaje de la NdC. Abordar la NdC en el contexto de la física cuántica cautiva a los estudiantes y los involucra en mayor medida hacia el aprendizaje de los conceptos cuánticos. Existe una relación muy productiva entre la NdC y la física cuántica: la NdC es un inigualable vehículo para el aprendizaje de conceptos cuánticos y la física cuántica es un excelente escenario para trabajar la NdC (Stadermann y Goedhart, 2021a).

D. Historia y Epistemología de la DOP

Los artículos incorporados a esta categoría son relevantes para comprender el desarrollo de la noción de dualidad y por lo tanto relevantes también para secuenciar contenidos alrededor de la DOP. Por ejemplo, Klassen (2011) realiza una reconstrucción histórica del efecto fotoeléctrico, mostrando cómo: 1) Ciertos mitos perduran en los libros de texto, como lo es la supuesta necesidad de la hipótesis del fotón, para explicar el efecto fotoeléctrico; y 2) Cómo aparecen de manera clara muchos aspectos de la Naturaleza de la Ciencia.

Otro significativo conjunto de artículos aborda las diversas interpretaciones de la física cuántica, y su influencia en la enseñanza-aprendizaje de la DOP. Un aspecto que se encontró en forma recurrente en estos artículos es la predominancia de la interpretación de Copenhague en los textos universitarios para la enseñanza de la cuántica (Mohan, 2020). Sin embargo, algunos trabajos sugieren la necesidad de ir más allá de esta interpretación, introduciendo conceptos alternativos como el “Quanton” que lo usan para describir objetos que exhiben propiedades tanto de partículas discretas como de ondas continuas. Por un lado, Lautesse, Vila Valls, Ferlin, Héraud y Chabot (2015) distinguen dos posiciones en la cuántica: una conservadora, que se alinea con la escuela de Copenhague, y otra innovadora, que incorpora el término “Quanton”. En su análisis sobre cómo se reflejan estas perspectivas en los libros de textos franceses, los autores observan que, aunque predominan los enfoques conservadores, hay una incorporación gradual de enfoques más innovadores que emplean el término “Quanton”. Por su parte, Qureshi (2016) demuestra cómo los “Quantons” pueden manifestar, en el experimento de doble rendija, patrones de interferencia (una propiedad de onda) y, al mismo tiempo, impactos discretos (una propiedad de partícula). En este sentido, un “Quanton” es una entidad que no se describe adecuada ni exclusivamente como partícula ni como onda, sino que posee características de ambas.

Norsen (2013) propone un análisis de la dualidad onda-partícula a través de la Teoría Onda-Piloto de de Broglie-Bohm, presentándola como una alternativa a la Interpretación de Copenhague. Esta teoría propone que las trayectorias de las partículas explican de manera efectiva los resultados observados en experimentos de dispersión y túnel cuántico, eliminando la necesidad de considerar el colapso de la función de onda. En el artículo se muestra que estas trayectorias coinciden con las expectativas de la mecánica cuántica tradicional, ofreciendo un enfoque alternativo que es coherente con las observaciones en los experimentos. Según el autor, este enfoque mejora la comprensión de estos fenómenos complejos al proporcionar una interpretación más intuitiva y menos ambigua.

Por otro lado, Cheong y Song (2014) plantean una mirada interesante en relación a la dimensión interpretativa y la enseñanza de la DOP. Ellos presentan un marco para el análisis en el que sugieren tres diferentes niveles de significado de la dualidad, así como una nueva perspectiva suspensiva. La idea clave de estas nociones es distinguir entre la regla de predicción y la interpretación de la realidad, en lugar de la división tradicional entre formalismo e

interpretación de la realidad. Este trabajo ilumina bien la diferencia sobre qué aspectos están bien consensuados y cuáles están aún en debate en lo que refiere a la DOP.

IV. CONCLUSIONES

Dado que al momento de escribir este trabajo no estaba concluido el proceso de análisis, estas conclusiones son también preliminares. No obstante, se advierten lineamientos relevantes que permiten responder, parcialmente, a las preguntas de investigación planteadas.

En relación a P1: ¿Cuáles son las características de los recursos que la literatura ofrece para la enseñanza de la DOP?, una característica distintiva es la existencia de variados experimentos simulados disponibles en la web. También se reporta a la NdC como un recurso clave para la enseñanza de la DOP en el nivel secundario, donde son escasos los recursos matemáticos formales para abordar la noción de dualidad. Estos hallazgos son positivos para tener en cuenta en el diseño de una propuesta de enseñanza sobre la DOP. Aunque es sabido que los recursos no promueven aprendizajes *per se*, sí pueden ser puentes cognitivos indispensables para el aprendizaje cuando están insertos en una propuesta pedagógica basada en resultados de investigación didáctica.

En respuesta a la P2: ¿En qué contexto y con qué fundamentos pedagógicos y didácticos se han publicado propuestas para la enseñanza de la DOP?, surgen varias cuestiones. En primer lugar, las propuestas se conciben mayoritariamente más centradas en el contenido y su secuenciación lógica como aparece en los libros de texto, que centradas en el progreso de las ideas de los estudiantes. En los pocos casos en los que la propuesta se centra en las ideas de los estudiantes, no se advierten procesos de evaluación claros que permitan valorar los aprendizajes logrados, lo que limita la potencialidad de la propuesta. En segundo lugar, y con escasas excepciones como la de Baily y Finkelstein (2010), las propuestas no problematizan la dimensión interpretativa de la DOP. En general se sitúan, de manera implícita, en la interpretación de Copenhague como lo hacen mayoritariamente los libros de texto. Esto representa, como se ha argumentado en la introducción, una dificultad para la comprensión de los aspectos fundamentales de la teoría cuántica y de la DOP. Por último, la mayoría de las propuestas encontradas son para el nivel superior. Hay escasas propuestas para trabajar la DOP en la escuela secundaria-

En relación a esta pregunta P3: ¿Cuáles son las principales dificultades y/u oportunidades de aprendizaje de la DOP para distintos niveles educativos? coincidimos con los de Krijtenburg-Lewerissa y otros (2017) en que las ideas clásicas sobre ondas y partículas permean, en distintos grados, la comprensión de los estudiantes universitarios sobre la naturaleza de los objetos cuánticos y por lo tanto, la noción de dualidad. También en una idea que se repite tanto en estudiantes secundarios como universitarios, que los objetos cuánticos recorren una trayectoria sinusoidal. Pensamos que muchas de estas dificultades pueden representar oportunidades (al menos en parte) si se incorpora la discusión sobre la dimensión interpretativa de la DOP en la enseñanza.

Lo indagado en relación a la P4: ¿Qué diálogos se pueden establecer entre las reflexiones históricas y epistemológicas sobre la DOP y la enseñanza de ese contenido? permite advertir el importante rol que juegan las reconstrucciones históricas para seleccionar los contenidos a enseñar. También se destaca que estas reconstrucciones han sido ignoradas en la gran mayoría de lo que usualmente presentan los libros de texto. Esto presenta un desafío importante a tener en cuenta para el diseño de una propuesta de enseñanza que incluya la complejidad intrínseca del desarrollo del conocimiento a enseñar. En segundo lugar, surge la importancia de incluir la dimensión interpretativa de la teoría cuántica al momento de su enseñanza. Varios artículos discuten interpretaciones alternativas a la de Copenhague, todas en acuerdo con los resultados experimentales de los fenómenos cuánticos, y surge el cuestionamiento sobre hasta qué punto la “corriente principal de la cuántica” es la única a tener en cuenta en la enseñanza.

Un análisis más pormenorizado ayudará a refinar y completar las conclusiones anteriores, no obstante, se valoran estos hallazgos preliminares como herramientas básicas a tener en cuenta en el diseño de una propuesta de enseñanza para la DOP.

REFERENCIAS

Ayene, M., Kriek, J. y Dامتie, B. (2011). Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 7(2), 020113.

Baily, C. y Finkelstein, N. D. (2010). Refined characterization of student perspectives on quantum physics. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 6(2), 020113.

Bitzenbauer, P. (2021). Practitioners' views on new teaching material for introducing quantum optics in secondary schools. *Physics Education*, 56(5), 055008. doi: 10.1088/1361-6552/ac0809

Bitzenbauer, P. y Meyn, J. P. (2020). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. *Physics Education*, 55(5), 055031. doi: 10.1088/1361-6552/aba208

Bitzenbauer, P. y Zenger, T. (2022). Online course on quantum physics: reading primary sources with secondary school students. *The Physics Teacher*, 60(7), 572-577.

Cavalcanti, C. J. D. H., Ostermann, F., Netto, J. D. S. y Lima, N. W. (2020). Teaching wave-particle complementarity using the Virtual Mach-Zehnder Interferometer. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42, e20190283. doi: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0283>

Cheong, Y. W. y Song, J. (2014). Different levels of the meaning of wave-particle duality and a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. *Science & Education*, 23, 1011-1030.

Fanaro, M. D. L. Á., Otero, M. R. y Arlego, M. (2012). Teaching basic quantum mechanics in secondary school using concepts of Feynman path integrals method. *The Physics Teacher*, 50(3), 156-158.

Garritz, A. (2013). Teaching the philosophical interpretations of quantum mechanics and quantum chemistry through controversies. *Science & Education*, 22, 1787-1807.

Hoehn, J. R. y Finkelstein, N. D. (2018). Students' flexible use of ontologies and the value of tentative reasoning: Examples of conceptual understanding in three canonical topics of quantum mechanics. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010122.

Jammer, M. (1989). *The conceptual development of quantum mechanics*. Los Angeles: Tomash Publishers.

Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J. y Zadnik, M. (2017). Teaching Einsteinian physics at schools: part 2, models and analogies for quantum physics. *Physics Education*, 52(6), 065013.

Klassen, S. (2011). The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom. *Science & Education*, 20, 719-731.

Kragh, H. (2002). *Quantum generation*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.

Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A. y Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical review physics education research*, 13(1), 010109.

Lautesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J. L. y Chabot, H. (2015). Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France: 'Quanton' Versus 'Wave-Particle' Duality, Two Approaches of the Problem of Reference. *Science & Education*, 24, 937-955.

Malgieri, M., Onorato, P. y De Ambrosis, A. (2017). Test on the effectiveness of the sum over paths approach in favoring the construction of an integrated knowledge of quantum physics in high school. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010101.

Marshman, E. y Singh, C. (2017). Investigating and improving student understanding of quantum mechanics in the context of single photon interference. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010117.

McKagan, S. B., Perkins, K. K. y Wieman, C. E. (2010). Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey. *Physical Review Special Topics—Physics Education Research*, 6(2), 020121.

Melhorato, R. L. y Nicoli, G. T. (2012). Da física clássica à moderna: o simples toque de uma sirene. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34, 3311.

- Mohan, A. K. (2020). Philosophical standpoints of textbooks in quantum mechanics. *Science & Education*, 29(3), 549-569.
- Norsen, T. (2013). The pilot-wave perspective on quantum scattering and tunneling. *American Journal of Physics*, 81(4), 258-266.
- Qureshi, T. (2016). Quantitative wave-particle duality. *American Journal of Physics*, 84(7), 517-521.
- Silva Neto, J. D., Ostermann, F. y Prado, S. D. (2011). O tema da dualidade onda-partícula na educação profissional em radiologia médica a partir da simulação do interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33, 1401.
- Solbes, J. y Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 23(1-2), 57-84.
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E. y Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010130.
- Stadermann, H. K. E. y Goedhart, M. J. (2021a). 'Why don't you just tell us what light really is? Easy-to-implement teaching materials that link quantum physics to nature of science. *Physics Education*, 57(2), 025014.
- Stadermann, H. K. E. y Goedhart, M. J. (2021b). Why and how teachers use nature of science in teaching quantum physics: Research on the use of an ecological teaching intervention in upper secondary schools. *Physical review physics education research*, 17(2), 020132.
- Velentzas, A. (2014). Teaching diffraction of light and electrons: Classroom analogies to classic experiments. *The Physics Teacher*, 52(8), 493-496.
- Wittmann, M. C. y Morgan, J. T. (2020). Foregrounding epistemology and everyday intuitions in a quantum physics course for nonscience majors. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020159.