

## GENERANDO VÍAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA FORMACIÓN DOCENTE EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA CUÁNTICA

### GENERATING WAYS TO IMPROVE TEACHER TRAINING IN THE TEACHING OF QUANTUM PHYSICS

### GERANDO CAMINHOS PARA MELHORAR A FORMAÇÃO DE PROFESSORES NO ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA

Eduardo González \* , Patricia Fernández \*\* 

Jordi Solbes \*\*\* 

Como citar este artículo: González, E., Fernández, P., Solbes, J. (2024). Generando vías para el mejoramiento de la formación docente en la enseñanza de la física cuántica. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 19 (1), pp. 54-70 DOI: <https://doi.org/10.14483/23464712.20659>

#### Resumen

Se plantean algunos interrogantes actuales sobre las orientaciones de Enseñanza de la Física Cuántica en un marco teórico de construcción social de conocimientos. Se presentan resultados de avances provenientes de diferentes investigaciones que permitieron encontrar tanto nudos de dificultad como posibilidades de superación de lo que serían una suerte de concepciones previas en Física Cuántica, mostrando resultados de avance en aspectos conceptuales y metodológicos. Estos estudios se basan en encuestas, entrevistas, demandas y producciones didácticas de docentes en formación. Se trazan perspectivas de investigación sobre diferentes vías de acceso o ejes de desarrollo. No se trata de aspectos excluyentes y separados, sino más bien de un complejo de procesos que deben ser adecuadamente entrelazados y secuenciados. Ellas son: a) la utilización de la Historia de la Física Cuántica, con sus componentes epistémicos, ontológicos, contextuales y sociales, b) el tratamiento de las cuestiones tecnológicas y experimentales junto a una visión crítica sobre su impacto social y, c) los aspectos formales y matemáticos. Se plantea la trasposición didáctica tomando en cuenta los contextos, la evolución de los modelos tratados, la utilización de múltiples recursos y la formación docente.

**Palabras-Clave:** preconcepciones, cuantón, estados cuantizados, evolución de conceptos.

---

Recibido: Marzo 2023; Aprobado: Diciembre 2023

\* Dr. en Física, Universidad Nacional de Córdoba y Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), Argentina, [edumgonza@yahoo.com.ar](mailto:edumgonza@yahoo.com.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5560-1709>

\*\* Dra. en Física, Universidad Nacional de Rosario, [patricia@fceia.unr.edu.ar](mailto:patricia@fceia.unr.edu.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9295-0625>

\*\*\* Dr. en Física, Universidad de Valencia, España, [jordi.solbes@uv.es](mailto:jordi.solbes@uv.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8220-209X>

### **Abstract**

Some current questions are raised about the orientations of Teaching Quantum Physics in the theoretical framework of social construction of knowledge. Results of advances from different investigations are presented that allowed us to find both knots of difficulty and possibilities of overcoming what would be a kind of previous conceptions in Quantum Physics, showing advance results in aspects conceptual and methodological. These studies are based on surveys, interviews, demands and didactic productions of teachers in training. Research perspectives are outlined on different access routes or development axes. It is not about exclusive and separate aspects, but rather a complex of processes that must be properly intertwined and sequenced. They are: a) the use of the History of Quantum Physics, with its epistemic, ontological, contextual and social components, b) the treatment of technological and experimental issues together with a critical view of their social impact and, c) the formal and mathematical aspects. The resolution of the didactic transposition is proposed taking into account the contexts, the evolution of the treated models, the use of multiple resources and teacher training.

**Keywords:** preconceptions, quanton, quantized states, evolution of concepts

### **Resumo**

Algumas questões atuais são levantadas sobre as orientações do Ensino de Física Quântica em um referencial teórico da construção social do conhecimento. São apresentados resultados de avanços de diferentes investigações que nos permitiram encontrar tanto nós de dificuldade quanto possibilidades de superação do que seria uma espécie de concepções anteriores em Física Quântica, mostrando resultados avançados em aspectos conceituais e metodológico. Esses estudos são baseados em pesquisas, entrevistas, demandas e produções didáticas de professores em formação. Perspectivas de pesquisa são delineadas em diferentes vias de acesso ou eixos de desenvolvimento. Não se trata de aspectos exclusivos e separados, mas sim de um complexo de processos que devem ser devidamente entrelaçados e sequenciados. São eles: a) o uso da História da Física Quântica, com seus componentes epistêmicos, ontológicos, contextuais e sociais, b) o tratamento de questões tecnológicas e experimentais juntamente com uma visão crítica de seu impacto social e, c) a aspectos matemáticos. A resolução da transposição didática é proposta levando em consideração os contextos, a evolução dos modelos tratados, o uso de múltiplos recursos e a formação de professores.

**Palavras-Chave:** preconceitos, quanton, estados quantizados, evolução de conceitos

## **1. El enorme interés por la enseñanza de la Física Cuántica**

Existe hoy una potente demanda de divulgación y de enseñanza de la Física Cuántica (FQ). Tan es así que incluso el tema se ha instalado en la vida

cotidiana y en la cultura (películas, arte, comentarios de actualidad). Ello tiene diversas fuentes:

La revolución tecnológica actual (Revtech o Revolución 4.0; Schwab, 2016), está centrada

mayormente, aunque no de modo exclusivo, en la FQ y sus ramificaciones. Podemos mencionar algunos de esos avances y sus enormes impactos reconociendo una prolongada historia de más de un siglo de dispositivos: la célula fotoeléctrica, el transistor y toda la microelectrónica posterior, los aceleradores de partículas, los reactores nucleares y los radioisótopos, el láser, el microscopio electrónico, las nanotecnologías y sus aplicaciones particularmente biológicas, los nuevos materiales y los avances en la computación cuántica.

Estos procesos están vinculados también al avance de la digitalización. La Inteligencia Artificial (IA) está presente por doquier, desde el *machine learnig*, las redes neuronales, vehículos que se conducen solos y drones hasta asistentes virtuales. La IA impulsada por el aumento exponencial de la potencia de cálculo y por la disponibilidad de grandes cantidades de datos puede generar software capaz del reconocimiento de patrones faciales, de objetos en imágenes, la prestación de servicios bancarios, en la realización de determinados diagnósticos y análisis de imágenes, la producción agropecuaria, el comercio electrónico, traductores virtuales, entre muchas otras aplicaciones (Villareal, 2022). Su proyección en el Internet de las cosas está configurando una incidencia muy potente en nuestras vidas tal y cómo las concebimos.

Nos sentimos muy reconfortados cuando mencionamos los artefactos de aplicación medicinal, como las cámaras gama, las TAC y las resonancias, los estudios Doppler, los estudios con positrones, los radio isótopos, las nuevas prótesis, las impresoras 3d para usos medicinales; todo ello para no hablar de los avances en medicinas personalizadas especialmente en el tratamiento del cáncer, etc. En todos esos casos se evidencia la presencia de aspectos propios de la FQ junto a otros más de corte clásico.

Pero debe reconocerse que las aplicaciones y efectos de estos desarrollos pueden tener muy

diferentes sentidos, dependiendo de quiénes y con cuáles orientaciones tomen el control y lo lleven a cabo. Las posibilidades van desde grandes avances en la realización de tareas que permitan liberar de pesadas cargas a los humanos, prolongar y mejorar sus vidas o el descubrimiento de nuevos medios de transformación de la energía para facilitar la sustentabilidad, pasando por una potenciación de las grandes corporaciones, hasta proyectos de sustitución de lo humano por máquinas en todos los planos o por un súper control de los mismos. Esta potente realidad ha hecho plantear a muchos pensadores si estamos ante un trans humanismo o ante un anti humanismo (Srnicsek, 2018; Sadin, 2022; Costa, 2021).

Otra razón de esta demanda son los avances de nuevos fenómenos que aparecen en la FQ que no encuentran referencias y que contradicen al mundo clásico (no localidad, entrelazamiento, teleportación, etc.).

Precisamente, los avances en la “segunda revolución cuántica” han tenido un reconocimiento resonante con el Premio Nobel de Física de 2022 a Alain Aspect, a John Clauser y a Anton Zeilinger, por sus trabajos pioneros en la ciencia de la comunicación cuántica, realizados hace 30 o incluso 40 años, pero sólo premiados actualmente por el auge de la computación cuántica.

También se han extrapolado las ideas cuánticas para dar apoyo científico al “misticismo, la teología o la educación cuántica” y, después, a la curación cuántica, que no se corresponden con la teoría cuántica, aunque se encubren con ese nombre para darse legitimidad. Si bien las primeras corresponden al ámbito de las creencias, las propuestas de curación son pseudociencias peligrosas porque han hecho que enfermos graves abandonen los tratamientos prescritos por los médicos (Solbes, 2019).

Finalmente, y para nada asunto menor, se hace cada vez más necesario acercar la física del siglo

XX y XXI a las aulas del secundario. De lo contrario la Enseñanza de las Ciencias y de la Física deja fuera a temas de alta circulación en las redes, medios y en la vida misma, que está inundada de estos aspectos por las más diversas vías.

En tal sentido debemos mencionar los avances en los diseños curriculares en diferentes países. España y Francia, por ejemplo, llevan ya una larga tradición de haber incluido en sus currículos esta temática en la educación secundaria. En Latinoamérica diferentes países están tomando el mismo camino. Aquí debemos desatacar la desigualdad de estos avances y el hecho de que, a pesar del tiempo que llevan en marcha no se han consolidado (González, Muñoz, Solbes, 2020; Lautesse, 2015).

Ya no es tan razonable la vieja consigna de enseñar apelando a la pura matemática que daba buenos resultados y evitar así los debates sin salida. Ese fue el modo del “calla y computa”, que denuncia Johansson (2018), el cual tuvo alcance universal.

## **2. ¿Qué sucede en las aulas de nivel secundario y de formación docente?**

Esta presentación no intentará realizar un “estado del arte”, pero sí mostrar algunos problemas que han sido señalados reiteradamente. Disponemos de un amplio panorama de investigaciones en enseñanza de la FQ en el nivel medio, en el de formación docente e incluso en los primeros cursos de universidad. El tema de las licenciaturas en Física o Química requeriría de otra mirada y no entrará en estas consideraciones.

Según algunas investigaciones (Kalkanis, Hadzidaki, Stavrou, 2003; Kragh, 2007; Solbes, Sinarcas, 2009), parece que una de las principales dificultades que tienen los estudiantes en el aprendizaje de la física cuántica es ontológica: tienen dificultades para comprender que los electrones, fotones, etc., no son “ni

partícula clásica ni campo clásico sino una entidad sui generis que, en circunstancias extremas, se asemeja a una partícula y, en otras, a un campo [...] las teorías cuánticas deberían desembarazarse de aquellos análogos clásicos y reconocer que se ocupan de cosas sui generis que merecen un nuevo nombre genérico, digamos, cuantones” (Bunge, 1973).

Por su parte Lévy-Leblond (2003) sugiere el uso de la dicotomía discreto/continuo para comprender su naturaleza. Los cuantones son discretos en el sentido de que vienen en unidades y se pueden contar. Por otra parte, son continuos en el sentido de que pueden estar sujetos a interferencias y superposiciones. Las partículas clásicas son discretas en ambos aspectos; se pueden contar y se localizan en puntos del espacio. Los campos clásicos son continuos en ambos aspectos; no se pueden contar y están esparcidos en el espacio. Los cuantones se diferencian de las entidades clásicas en que son discretos en número y continuos en extensión (Pereira, Solbes, 2022).

En la mecánica clásica, la aguda distinción entre estos dos conceptos está justificada por el hecho de que la materia y las ondas son consideradas y tratadas en un modo completamente diferente. Por su parte Auletta, Fortunato y Parisi (2009) afirman: “Los conceptos de partícula y onda son de origen clásico y representan los dos casos extremos de un espectro de comportamientos de los sistemas cuánticos”.

Entre esos problemas están las limitaciones de los formatos de enseñanza y la carencia de libros de texto que sepan expresar las ideas de la cuántica más allá de las técnicas de manipulación a la que a menudo son reducidas (Lévy-Leblond, 1990). Dichos textos, se apegan a una matemática muy compleja distrayendo la atención de las discusiones epistemológicas de los conceptos físicos (Ohanian, 1995). Quantics, el texto de Lévy-Leblond y Balibar (1990), se propone tratar la cuántica tal como es hecha y entendida y va en el mismo sentido que los libros de Feynman

(1987) y Wichman (1986), quienes han generado aproximaciones más conceptuales donde se debaten los vínculos con los hechos experimentales.

Según Johnston et al. (1998), hay al menos dos dificultades que enfrenta la investigación educativa en física cuántica: (1) el contenido está estructurado en un formalismo altamente matemático y no hay consenso sobre cómo puede enseñarse de manera menos abstracta; (2) las preguntas sobre cómo debe interpretarse el formalismo cuántico todavía se discuten en la literatura científica (Pereira, Solbes, 2022).

Por otro lado, el profesorado, que mayoritariamente ha recibido en la universidad una enseñanza muy formalista, rígida e, incluso dogmática de la FQ, sin apenas trabajo experimental o relaciones CTS, se limita a utilizar la enseñanza teórica y libresco de los textos escolares introduciendo interpretaciones incorrectas y errores (González, Muñoz, Solbes 2020).

Debe agregarse que dicha formación docente, al menos en la Argentina, también tiene dificultades para realizar la transición de la Física Clásica (FC) a la FQ pues dicho tránsito requiere de un conocimiento específico en temas de la FC, como las ondas, que los docentes utilizan menos en su enseñanza habitual.

Estudios previos han demostrado que la postura filosófica del instructor durante la instrucción impacta en las perspectivas de los estudiantes y que los mismos tienden a preferir una perspectiva local realista cuando los instructores no son explícitos al abordar cuestiones de ontología cuántica (Baily, Finkelstein, 2015).

Es decir, que la introducción de la FQ en las aulas, que ahora es reconocida en muchos diseños curriculares de secundaria, es un verdadero problema multidimensional cuya resolución debe ser abordada en todos esos planos.

### **3. Algunos resultados de la investigación educativa en ciencias**

Veamos algunos resultados de las investigaciones educativas recientes. En una revisión reciente de la literatura, Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) muestran que los estudios sobre la enseñanza de la FQ se ocupan principalmente de las dificultades de los estudiantes que suelen interpretar las ideas cuánticas en términos clásicos y se centran en las estrategias de enseñanza, las aplicaciones multimedia y las herramientas de investigación.

Fernández (2014) ha realizado un estudio de evolución de conceptos de la Física Cuántica utilizando un curso de formación para docentes de física de secundario en la Universidad Nacional de Rosario. La misma se basó en una aproximación a los contenidos ligada la historia, a la utilización de textos muy conocidos y a la realización de actividades. La secuencia de enseñanza-aprendizaje se basaba en la discusión de los modelos clásicos de ondas y partículas, sus límites de validez y las contribuciones de cada uno al modelo actual de estructura de la materia, en que no se habla de ondas, ni partículas, sino de características diferentes a las de la física clásica. Particularmente, se analizó la evolución del pensamiento del profesor con relación a algunos tópicos que se consideraron fundamentales para una buena interpretación de la física cuántica y que resultaron ser de difícil comprensión para los profesores según investigaciones anteriores. Estos fueron (Fernández, González, Solbes, 2021):

- Visión dual de la materia y la radiación, relaciones de indeterminación de Heisenberg, ecuación de De Broglie y principios fundamentales de la cuántica;
- Interpretación probabilística vs determinista;
- Superposición de estados;

- Concepción de un nuevo objeto o modelo de estructura de la materia a nivel cuántico.

En general, pueden interpretarse los resultados como visiones reduccionistas, donde los conceptos cuánticos aparecen asociados, y no del todo diferenciados, con ideas clásicas, obviamente mejor conocidas por los profesores.

A las relaciones de Heisenberg se las entiende básicamente como una incerteza o desconocimiento de la posición y alguna otra magnitud (que algunos docentes logran identificar con el momento). Esta visión probabilística devendría entonces, más bien de problemas de medición que de una visión enteramente cuántica (reduccionismo descripción probabilística / descripciones exactas).

En el manejo del formalismo, este es visto como simples ejercicios que no guardan relación con problemas físicos concretos. Se reproducen también los resultados ya conocidos (Solbes et al., 1988) respecto de significar los orbitales como órbitas o regiones donde pueden colocarse los electrones. Es decir, el formalismo no es pensado como una herramienta capaz de dar interpretaciones de los fenómenos cuánticos (reduccionismo formalismo / resolución mecánica o ejercitación).

La permanencia de imágenes de ondas o partículas, levemente modificadas, en las explicaciones del comportamiento de los fenómenos cuánticos, señala la sobrevivencia de la FC, e incluso de las visiones coloquiales o de sentido común de la realidad (“clásica”) en los profesores que debieran enseñar las nuevas ideas. En consecuencia, esto sugiere que la adquisición de conocimientos de FQ, debiera concebirse como un obstáculo a superar y no como una mera acumulación de conocimientos (González, Muñoz, Solbes, 2020).

Por otro lado, el término dualidad se limita casi exclusivamente a la luz, a la que puede

asociársele ciertos cuantos de intercambio (los fotones), que no poseen realmente las propiedades de las partículas ya que no tienen masa. Así, el fotón “se comportaría” como partícula en el efecto Compton y por eso se le asocia una cantidad de movimiento  $p=E/c$ , “pero no puede mover otra partícula luego de un choque, ni ser atraído por un campo gravitatorio, ya que no posee masa” -comentario de los docentes asistentes- (reduccionismo objeto cuántico / ondas de fotones sin masa). En el caso de los electrones, se acepta que llevan una onda asociada pues así lo estableció De Broglie, y se expresa también en fenómenos de difracción, pero no se reconoce el fenómeno en electrones libres. También aparece la idea de un electrón “difuminado” sin una ubicación espacial definida, lo cual podría ser una forma parcial o ambigua de aproximarse al objeto cuántico (González, Fernández y Solbes, 2020).

Otros estudios han dado evidencias similares. Los estudios sobre la enseñanza de la dualidad onda-partícula son particularmente relevantes porque este tema generalmente se enseña en las primeras etapas de la instrucción de la física cuántica (Cheong, Song, 2014).

En el caso de los estudiantes, la existencia de dificultades no superadas, de preconcepciones o visiones deformadas que persisten aún después del proceso de enseñanza aprendizaje de la física cuántica han sido señaladas por Solbes et al. (1988), Fischler y Lichtfeldt (1992); Petri y Niedderer (1998); Johnston, Crawford y Fletcher (1998); Greca y Freire (2003), entre otros.

Greca y Herscovitz (2002) han utilizado discusiones conceptuales en la universidad nivel con temas como computación cuántica, teletransportación, tunelización cuántica, autointerferencia, saltos cuánticos y la paradoja del gato de Schrödinger. Estos autores trabajan en un entorno colaborativo con grupos de 3 a 4 alumnos a los que se les da un escrito ensayo para ser leído, que también contiene preguntas y problemas para hacerlo interactivo. Al parecer,

más de la mitad de los estudiantes consiguieron una comprensión razonable de los conceptos discutidos.

Greca y Freire (2003) utilizaron una estrategia didáctica que enfatiza el concepto de estado cuántico como representante de la realidad de un sistema físico independiente de los procesos de medición. En un estudio cualitativo involucrando a tres grupos de estudiantes de ingeniería en Brasil, identificaron cuatro categorías en las que los estudiantes van desde: a) explicar los fenómenos cuánticos a partir de principios generales, b) entender el principio de incertidumbre y probabilidades, pero mostrar dificultades con la superposición lineal de estados, c) visualizar fenómenos cuánticos y, d) es imposible encontrar cualquier patrón.

Es claro entonces que el abandono de las representaciones mentales de onda y partícula y su reemplazo por un modelo en el cual los entes cuánticos no responden a ninguno de ellos pero que a la vez sintetizan aspectos de ambos e incorporan otros completamente desconocidos clásicamente, como el espín, es un proceso largo y complejo y que ofrece gran resistencia (Fernández, González, Solbes, 2021).

Es razonable pensar que el proceso de enseñanza habitual no logra superar estas limitaciones. En ese sentido, los textos universitarios de física básica discuten en los capítulos de física moderna el problema de la radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico para presentar el comportamiento corpuscular de la luz, que clásicamente se consideraba como onda. Luego, en el apartado sobre De Broglie y la dualidad se explica la difracción de electrones a partir de un comportamiento ondulatorio de los mismos. Se mantienen así dos modelos independientes: "fotones de luz" que se comportan como partículas y "electrones" que se comportan como ondas, pero no enfatizan la construcción de un modelo nuevo y original en el que partículas y ondas son sólo aproximaciones que se pueden utilizar en algunos casos en que hay un gran

número de cuantones (Fernández, González, Solbes, 2021).

En Sinarcas y Solbes (2013) se encuentra que los alumnos muestran un aprendizaje escasamente significativo y se consolidan poco las nuevas concepciones en los estudiantes. Esta proposición se fundamenta en los resultados obtenidos en un cuestionario a los estudiantes, que resumimos en los siguientes puntos: menos del 20% de los alumnos es capaz de explicar satisfactoriamente los espectros discontinuos a partir del modelo de Bohr, lo que puede entorpecer la comprensión de la cuantificación; el 0% de los estudiantes ve los electrones, protones, neutrones, fotones, etc. como objetos de tipo nuevo, es decir, distintos de los modelos clásicos de partícula y onda; este patrón se repite tanto en profesores como en textos; menos del 16% de los estudiantes entiende adecuadamente el significado de las relaciones de indeterminación de Heisenberg; un bajísimo porcentaje (6,4%) caracteriza de forma adecuada el estado de un electrón basándose en un modelo más general que el clásico para describir su comportamiento a partir de la función de ondas o de estado; solo un 9% de los alumnos es capaz de señalar dos diferencias correctas entre la Física clásica y la Cuántica; tan solo el 10,3% de los alumnos es capaz de dar tres ejemplos de implicaciones tecnológicas de la Cuántica, y ninguno de ellos los da de implicaciones sociales.

Esta limitación se encuentra también en libros y profesores. De los resultados obtenidos con la aplicación de la red de análisis de textos, se puede concluir que los libros, considerados globalmente, no tienen en cuenta las dificultades del alumnado lo que no favorece su correcto aprendizaje de la Física Cuántica e, incluso, introducen algunas ideas incorrectas sobre temas como la dualidad (por ejemplo, parece que esta se aplica a los electrones, pero no a los fotones), las relaciones de Heisenberg, etc. (Solbes, Sinarcas, 2013).

Bungum et al. (2018) investigó cómo las discusiones en grupos pequeños mejoran la comprensión de los estudiantes de los dilemas de la física cuántica, como la dualidad onda-partícula de la luz y el experimento mental del gato de Schrödinger. El análisis muestra que la mayoría de las discusiones grupales son productivas en el sentido de que los estudiantes se basan en las declaraciones de los demás y cuestionan lo que se dijo. En cuanto a los potenciales de aprendizaje, los autores identificaron tres funciones amplias de las discusiones grupales: articular las dificultades conceptuales, profundizar la comprensión mediante el intercambio de puntos de vista y desarrollar nuevas preguntas.

En un estudio reciente Pereira y Solbes (2022) presentan resultados de experiencias donde se han estudiado debates grupales grabados de alumnado del master de formación de profesorado de secundaria. El estudio se realiza utilizando la teoría del discurso, donde se aprecian los avances y sus limitaciones apoyándose en las teorías socioculturales de Wertsch (1991). En el estudio no se aprecia que los estudiantes tengan un compromiso muy profundo con una interpretación particular de la mecánica cuántica. Y el hecho de que las perspectivas de los estudiantes varíen sugiere que los estudiantes tampoco tienen concepciones internamente consistentes (aquellas que están profundamente arraigadas y son difíciles de cambiar). Así, en lugar de referirse a concepción o interpretación, utilizan en su estudio la noción más general de perspectiva, o punto de vista, que se espera que difiera de un contexto a otro (Pereira, Solbes, 2022). Se define una posición conservadora cuando se refiere a objetos de la física cuántica usando términos clásicos familiares, como onda o partícula. Por otra parte, la posición innovadora, se asocia con los trabajos de Bunge y Lévy-Leblond, enfatizando que no son ni partículas ni ondas, sino nuevas entidades físicas, los cuantones. El estudio mostró un predominio de la posición conservadora, en la que las palabras partícula y dualidad onda-

partícula están presentes en la mayoría de los debates (Pereira, Solbes, 2022).

Un análisis cuidadoso de la explicación de los estudiantes sobre la dualidad onda-partícula revela que los cambios de perspectiva a menudo implican un cambio sutil en el contenido referencialmente semántico del enunciado. Este cambio sutil equivale a una transición de un nivel de descripción ontológico a uno fenomenológico. Esto es algo consistente con la distinción de Cheong y Song (2014) entre las reglas de predicción y las interpretaciones relacionadas con la realidad y los distintos niveles de significado de la dualidad onda-partícula. Mientras que el nivel ontológico de descripción involucra interpretaciones relacionadas con la realidad (el electrón es una masa puntual que tiene una trayectoria), el nivel fenomenológico involucra interpretaciones de experimentos, que corresponden al primer nivel del significado de la dualidad (los electrones se comportan como una ola (Pereira, Solbes, 2022).

Es interesante notar lo que sucede cuando los estudiantes adhieren a una perspectiva dual sin cambiar el contenido referencialmente semántico. Algún alumno adoptó un punto de vista que combina propiedades de ondas y partículas cuando afirmó que “el electrón tiene masa y, por lo tanto, es una partícula, pero esta masa tiene una longitud de onda asociada”. Al mantener su enfoque en el nivel ontológico de descripción, llegó a la conclusión de que es “un tema que aún es una controversia general” y “es difícil de interpretar”. En un estudio reciente, Henriksen et al. (2018) informaron que algunos estudiantes de física de secundaria superior en Noruega muestran una dualidad acrítica en el sentido de que aceptan la descripción de la dualidad onda-partícula sin reflexionar sobre el hecho de que las partículas y las ondas son conceptos contradictorios. Tal contradicción solo surge cuando los estudiantes no logran cambiar el contenido referencialmente semántico. Siempre que se centren en un nivel de descripción fenomenológico (el comportamiento

del electrón), la conciliación entre las propiedades de onda y de partícula es un hecho empírico: en algunos experimentos, actúa como una onda; en otros, actúa como una partícula (Pereira Solbes 2022).

Con respecto a las discusiones relacionadas con el experimento de Stern-Gerlach, la mayoría de los estudiantes lograron predecir correctamente la probabilidad de medir el espín del átomo en un determinado estado, incluso cuando la situación involucraba más de un imán. El enfoque en los sistemas de dos estados parece proporcionar un contexto en el que los conceptos de estado cuántico, superposición, colapso de la función de estado y probabilidad surgieron de manera más intuitiva (Pereira, Solbes, 2022).

#### 4. Las vías de acceso al conocimiento

A partir de los puntos anteriores nos parece conveniente avanzar en el análisis de las diferentes fuentes sobre las que puede asentarse la Enseñanza de la Física Cuántica en los niveles de secundario, en la formación docente y, como perspectiva, en cursos introductorios de la Universidad.

No se trata de algo trivial pues a pesar de los años de validación de dichos conocimientos, existen diferentes criterios sobre cómo utilizarlos. Esta es la exploración que realizaremos en los siguientes ítems.

##### 4.1. La Historia de la ciencia y de los modelos científicos

La utilización de la Historia de la FQ, con sus componentes contextuales, sociales y personales es un punto en debate.

Existen defensores y detractores. De un lado están Garritz (2013), Kragh (1992), y otros que la defienden; del otro están Fischler (1992), Greca y Herscovich (2002) y otros que la cuestionan. Así Solbes y Sinarcas (2009) y Kalkanis et al (2003) reivindican la utilización en la enseñanza del

modelo de Bohr, pues ello tiene que ver con el proceso real de la actividad científica. La idea es que, para enfrentar los peligros de fijaciones incorrectas o preconcepciones, es necesario plantear la evolución de los modelos y de la tecnología asumiendo debates y argumentaciones, algo que es señalado como muy importante por muchos autores (Erduran, Jiménez-Aleixandre, 2008).

Estas tentativas reconocen múltiples razones: a) ofrecer una imagen más correcta de cómo se desarrolla la ciencia, b) porque la física cuántica (FQ) es necesaria para una interpretación adecuada de la estructura de la materia, la evolución de los fenómenos microscópicos y entender el mundo que nos rodea, c) asumir la creciente importancia de las aplicaciones de la física cuántica en nuestra sociedad y, d) a nivel actitudinal, porque a los alumnos les interesan no solo las aplicaciones de la cuántica, sino también aspectos más teóricos que les llaman la atención (Solbes, Sinarcas, 2010).

A partir de allí es imprescindible hacer aparecer los modelos axiomáticos, como un modo de ligar con la episteme y la ontología, cercarnos a los aspectos “extraños” más propiamente cuánticos (no localidad, interferencia de amplitud, entrelazamiento o colapso) de la FQ y del objeto cuántico (el cuantón). La idea sería que para superar las preconcepciones clásicas y acercarse a las cuánticas anti intuitivas es necesario dar ocasión de realizar una confrontación amplia entre ellas.

Sin referirse específicamente a la física cuántica, diversos autores se proponen trabajar sobre el cambio conceptual a partir de la evolución de modelos. En todos estos casos, podemos recuperar sus ideas y aplicarlos a la enseñanza de la FQ. Así, Nancy Neressian (2002) resalta la importancia de recurrir al uso de analogías, imágenes y simulaciones como estrategias para elaborar modelos en la enseñanza de la ciencia. Su propuesta se basa en la investigación “histórico cognitiva” sobre el modo en que

razonaban los grandes científicos de la historia, para quienes los modelos ya vigentes eran el punto de partida para la explicación de nuevos fenómenos. Petri y Niedderer (1998) describen una alternativa didáctica en la que a partir de un estudio de caso analizan la evolución de los modelos que sostiene un alumno sobre el átomo. En este sentido Clement (2000, 2008) propone la co-construcción de modelos entre el estudiante y el docente partiendo de modelos conocidos y de las propias ideas de los estudiantes, para evolucionar hacia modelos validados pudiendo recorrer modelos híbridos intermedios, que no necesariamente son los modelos científicos, pero que superan con creces las creencias intuitivas iniciales (Fernández, González, Solbes, 2021).

Para superar las dificultades del objeto cuántico debe entenderse que se trata de un cambio de modelo. De esto ya advierten historiadores de la ciencia como Kragh (2007):

A escala ontológica, los cambios han sido sin duda muy profundos, en la mayor parte como resultado de la revolución cuántica... La mecánica cuántica nos ha proporcionado estructuras fundamentales que no tienen similitud ninguna con todo lo que puede ser percibido o medido directamente. Nuestras creencias actuales sobre lo que en última medida constituye el mundo distan mucho de las de la década de 1890, cuando todavía tenía sentido pensar en la materia como una colección de bloques en miniatura.

Es decir, debe buscarse si parte del problema no está en las filosofías dominantes. Se ha vinculado las mismas al hecho de que el positivismo, entre otras cosas, no aclara la diferencia entre enunciados con significación objetiva y con significación empírica. Los primeros hacen referencia a objetos autónomos no perturbados por medición, como un átomo en estado estacionario (que no absorbe e irradia energía) o un fotón que viaja por un espacio vacío, en el que ningún dispositivo puede detectarlo, absorbiéndolo. Los segundos se refieren a objetos

en observación, medición o, en general, interacción con sistemas macroscópicos, como un haz de electrones que atraviesa un sistema de ranuras. Los positivistas y los que atribuyen la indeterminación únicamente a la observación, intentan reducir la teoría cuántica a enunciados del segundo tipo, lo cual, si fuera cierto, impediría la aplicación de esta a objetos como los mencionados en el primer tipo de enunciados y, por lo tanto, a la astrofísica o la cosmología (Solbes, Sinarcas 2009).

También están las reflexiones de Sánchez Ron a lo largo de su *Historia de la Física Cuántica* (2001) que muestra como los nuevos modelos eran resistidos una y otra vez por la comunidad científica. Estas dificultades forman parte también de las dificultades de la enseñanza aprendizaje de la FQ, son nudos a resolver. Debemos abandonar los caminos sencillos, debemos imaginar nuevas vías para poder adentrarnos en tales debates.

En síntesis, sería razonable hacer una combinación entre una parte histórica y una versión que prescindiera de los antecedentes clásicos y se apoye en alguna axiomática. En todos los casos, será necesario realizar una comparación entre ambos para que el aprendizaje sea significativo.

#### *4.2. Los experimentos y los desarrollos científico tecnológicos*

Aunque forman parte de la historia de la disciplina, vamos a considerar por separado el tratamiento de las cuestiones tecnológicas y experimentales que van asociados al desarrollo de la FQ. Ello incluye no sólo el desarrollo de experimentos históricos sino también los importantes desarrollos tecnológicos que abrió la nueva física, o las relaciones CTS que en el desarrollo de la cuántica han adquirido tal volumen y vinculaciones que ameritan un desarrollo propio (González, Muñoz, Solbes, 2020).

Estos experimentos, como la radiación de cuerpo negro, el de Frank y Hertz, el de Stern-Gerlach, el efecto fotoeléctrico, el efecto Zeeman o el efecto Compton, los espectros atómicos y moleculares, son parte inseparable de la historia de la FQ y de sus debates conceptuales.

Del mismo modo deber ser parte de alguna forma de inclusión en los programas de enseñanza y de formación docente. Como parte del proceso formativo, sería conveniente realizar experiencias sencillas o cualitativas con espectros de emisión (Savall, Domènech, Martínez-Torregrosa, 2014) o con el efecto fotoeléctrico.

En caso de no disponer de equipamiento adecuado se pueden utilizar videos o dispositivos informáticos de simulación. Como ejemplos están los experimentos de Stern Gerlach, la difracción de electrones, el efecto túnel, la interferometría de Mach Zender, etc. (Pereira, Ostermann, Cavalcanti, 2009; González, Muñoz, Solbes, 2020).

La cuestión didáctica o de trasposición didáctica con todas estas experiencias es cómo vincularlas a la situación problemática que está en el origen del experimento.

En cuanto al modo de vincular estos aspectos con las orientaciones CTS no debemos olvidar que nuestros países han iniciado un camino de avance en estas temáticas. Son grandes los esfuerzos realizados en temas de biotecnológicas, radioisótopos, radares, coherencia y un largo etcétera, a veces envueltos en fuertes controversias. Todo ello debe estar presente en nuestras propuestas de enseñanza y en una concepción de currículum abierto.

#### 4.3. *La formalización, teorización*

La elaboración de desarrollos conceptuales y formales (matemáticos), enfrentando sus complejidades y dificultades es otra vía de análisis. ¿En qué cursos se pueden usar los

formalismos en la EFQ? ¿Cómo encarar la enseñanza cuando se plantea a niveles donde no es posible trabajar el formalismo en profundidad?

Disentimos de algunos autores que sostienen que la FQ sólo puede ser formulada en términos de conceptos matemáticos (Lind, 1980) o que su plausibilidad y su potencialidad explicativa sólo podrá apreciarse a través de un buen manejo del formalismo (Fischler, Lichtfeldt, 1992).

Hay que estudiar vías alternativas que se desarrollan desde lo cualitativo a lo formal. La estrategia usual de muchos textos es dar explicaciones cualitativas semiclásicas y completar con algunos ejercicios que dan una visión de los órdenes de magnitud de los conceptos en juego. A ello debe sumarse una noción de las ecuaciones matemáticas que implican las aproximaciones cuánticas y de las diferencias entre uno y otro tratamiento.

Como ejemplo podemos plantear el caso del tratamiento cuántico de las partículas libres. En tal caso la exponencial imaginaria no es tan difícil de manejar, al menos no debería serlo en el nivel de formación docente. El punto es que pueda ser asumida conceptualmente como la representación de un fenómeno con características de onda, duales o como se quiera llamar. Ello permitirá luego abordar con mayores posibilidades el tratamiento de potenciales constantes, p.e., barreras, efecto túnel o pozos cuadrados, donde pueden aplicarse además las desigualdades de Heisenberg. Cuando se pueda hay que aproximarse a lo cualitativo que expresa el formalismo.

### 5. **La trasposición didáctica**

El paso siguiente es señalar como transformar estos conocimientos en instrumentos educativos o, dicho en otras palabras, como realizar la trasposición didáctica (Chevalard, 1997). Entendemos la misma como una articulación entre los aspectos diversos pero relacionados que hemos denominado las vías de acceso.

Sabemos que estos contenidos no llegan a los textos ni a la formación docente. A esos fines vamos a partir de una estrategia didáctica que ha funcionado en la enseñanza de la ciencia y de la física en particular. Dicha estrategia se basa en problematizar, dialogar, conceptualizar – modelar, procesar y contextualizar en todo el proceso de enseñanza aprendizaje. En un sentido más específico, la idea es la de inmersión en una cultura científica (Bybee, 1994).

Estas propuestas se insertan plenamente en un constructivismo social y entendemos que mantienen su vigencia en la Cuántica. Tal vez porque la FQ requiere, más aún que la Clásica, de estos instrumentos complejos para tomar en cuenta las visiones del que aprende, la realidad social y una concepción no idealizada de la ciencia, para enfrentarse con problemas anti intuitivos, complejos y no lineales.

### 5.1. Las secuencias didácticas

La estrategia elegida requiere de algunos instrumentos para ser aplicada. En nuestra particular tradición nos valemos de programas de actividades, los que forman una secuencia didáctica, subrayando así la dimensión temporal de los procesos de enseñanza y de los procesos de aprendizaje. “Una secuencia de actividades es una actividad de investigación a la vez que un producto de intervención, un paquete de unidad curricular tradicional, que incluye actividades de enseñanza-aprendizaje contrastadas mediante la investigación, y empíricamente adaptadas al razonamiento del estudiante. A veces también se incluyen las pautas de enseñanza que cubren las reacciones esperadas de los estudiantes” (Meheut, Psillos, 2004).

Dichas actividades deben ser participativas y favorecer la argumentación y el debate. Recordemos que las discusiones en torno a las interpretaciones de la física cuántica han motivado un renovado interés de los estudiantes para representar fenómenos cuánticos en la secundaria alta y la licenciatura baja (Baily,

Finkelstein, 2015; Henriksen et al., 2018). Al respecto disponemos de la propuesta de Fernández, González y Solbes (2005), y de un desarrollo más elaborado en Solbes y Sinarcas (2009).

Las secuencias o programas de actividades deben establecer vínculos o pasos (puentes) entre las dos formulaciones, la clásica y la cuántica. Para ello se deben considerar aquellas cuestiones que vuelven críticos los conceptos clásicos en determinados temas. Debemos entonces reconocer cuales pueden ser esas tramas o nudos de dificultad para elaborar propuestas que puedan favorecer la superación del paradigma clásico. Ejemplos de estas realidades encontramos en la noción de objeto cuántico, en las relaciones de Heisenberg, o en la adecuada interpretación probabilística de las ecuaciones de Schrödinger. Es necesario encarar la investigación de estos desarrollos a lo largo de la presentación de la materia.

Muchos profesores de Ciencias invierten la mayor parte de su tiempo de planeación en la identificación del contenido a abordar, en la selección de problemas a resolver y en la preparación de actividades por implementar. En pocas ocasiones sus decisiones se ven influenciadas por resultados de investigaciones educativas sobre las dificultades de los estudiantes para aprender un tema dado, o por consideraciones sobre la naturaleza de la disciplina o el desarrollo del saber científico (Talanquer, 2015).

Es necesario revisar entonces nuestras propuestas, sobre distintos temas de la Física Cuántica, para encontrar las relaciones entre los diferentes aspectos, las dificultades, los indicadores de avance y validarlas o para ampliar el campo de acción de las mismas en el proceso de enseñanza aprendizaje.

Finalmente, debe considerarse que al incluir en las propuestas educativas aspectos que capten la emoción de los estudiantes se está favoreciendo

la educación científica “la cual debe centrarse, al menos en parte, en la creación de culturas emocionales inspiradoras en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias” Zembylas (2004).

### 5.2. La formación docente

Los docentes se sienten muchas veces superados por las preguntas de sus estudiantes, por las carencias de medios y por sus propias debilidades de formación para enfrentar la enseñanza de la Física Cuántica. Ello no se supera ofreciendo simplemente algunas herramientas conceptuales y disciplinares. Es necesario que se avance más en el involucramiento de los mismos en el proceso formativo.

Por ello, planteamos que es necesaria una formación inicial y permanente del profesorado que a nivel conceptual muestre que las ideas de cuantificación, comportamiento de los cuantos y probabilismo constituyen las principales características de la física cuántica, y que ayude a dar respuesta a sus preguntas básicas (González, Muñoz, Solbes, 2020).

La elaboración de los programas de actividades puede relacionarse con el llamado conocimiento didáctico del contenido (CDC) de los docentes (Shulman, 1987). En una versión más desarrollada se propone el Conocimiento Profesional de los docentes que involucra el conocimiento disciplinar, el pedagógico y CDC, cada uno de los cuales abraza diversos aspectos (Solbes et al 2018).

Se trata finalmente de favorecer esta formación en la propia acción educativa. Los docentes cuestionan muchas veces las escasas posibilidades que tienen de llevar estos contenidos al aula de secundaria, a veces en contextos muy desfavorecidos. Es necesario generar instancias de formación continua que pongan en evidencia que existen estrategias que lo hacen posible, que de ese modo es posible capturar la atención de los estudiantes y que los

propios docentes pueden participar en el desarrollo de tales estrategias.

### 5.3. Aportes para la elaboración de material didáctico

Del texto de Feynman (1987) tenemos muchas aportaciones valiosas a una secuencia o programa de actividades actualizada, por ejemplo, el experimento de doble rendija que luego se proyecta con criterios afines al experimento de Stern Gerlach (interferencias de amplitud) y muchísimas afirmaciones donde lo conceptual se vincula fuertemente con lo empírico y lo matemático o cuando se ponen en evidencia las extrañas implicancias de la teoría. En Wichmann (1986) aparecen los estudios dimensionales, o las consideraciones sobre las relaciones de indeterminación o sobre la naturaleza de un fotón. Levy-Leblond (2001) esclarece con ciudadanía el significado de las ecuaciones de Planck - Einstein y de De Broglie - Compton como un cambio de paradigma y lo mismo hace con otros temas. Aunque no trata las cuestiones atómicas, sí aborda los momentos angulares, desde perspectivas cualitativas muy bien planteadas en la conceptualización física.

Pero no se trata tanto de elaborar libros de texto, como de realizar una investigación sobre los que se utilizan en los cursos introductorios de la universidad para establecer en qué medida responden a orientaciones que permitan el debate y la visión crítica entre los que aprenden. En ese sentido, una tarea puede estar en la reformulación de los textos conocidos que circulan de acuerdo a pautas u orientaciones que tomen en cuenta los resultados de la investigación didáctica. Al mismo tiempo, se trata de ampliar el campo de los videos y simulaciones con los mismos criterios.

### 5.4. Elaborar el currículo

Decíamos al comienzo que hay dificultades para sostener los avances curriculares que se han definido. Como hemos sostenido con relación a

las secuencias didácticas, propiciamos que en cada tema se deben señalar los aportes de la cuántica para terminar de asumir su verdadera naturaleza. De ese modo se avanzaría con un currículo concebida como un proceso en espiral ampliada.

Por ejemplo, la fotónica, que usualmente toma por senderos de la radiación de cuerpo negro (con sus enormes dificultades) y el efecto fotoeléctrico, podría completarse con las consideraciones sobre el carácter indivisible del fotón al interactuar con la materia y con simulaciones del experimento de Mach-Zender, pues es allí donde puede exponerse con mayor amplitud su naturaleza cuántica. En cuanto a los espectros, todo el desarrollo habitual que pasa por Bohr y eventualmente Sommerfeld para llegar a los orbitales, que son muy difíciles de tratar en detalle, se puede enriquecer y completar en diferentes direcciones, con el láser, con los momentos angulares, el spin y simulaciones del experimento de Stern-Gerlach. En otro plano podría pasarse de las ecuaciones heurísticas de Planck - Einstein y de De Broglie - Compton a las ecuaciones de Schrödinger, para la onda plana y de allí en la barrera, al efecto túnel y al microscopio electrónico. Estas aproximaciones requieren de elaboración e investigación para pulirlas y ubicarlas en los diferentes contextos.

## 6. Conclusiones y perspectivas

Los resultados analizados son convergentes en la definición de la problemática, pero no existe suficiente consenso respecto de las propuestas. Si hay coincidencias en la importancia de utilizar debates como estrategia didáctica. Queda mucho por investigar sobre la estabilidad y profundidad de los avances logrados en los aprendizajes de estudiantes y docentes.

Intentamos tomar en cuenta en la formación docente las dificultades de enseñanza/aprendizaje señaladas. Se ha avanzado en propuestas destinadas a que la enseñanza de la parte heurística de la Física

Cuántica no actúe fijando o validando concepciones semiclásicas que se convertirían en verdaderas preconcepciones contrarias a los conceptos cuánticos. Para ello proponemos la realización de prácticos y de ejercicios que favorezcan tanto los debates en aspectos de la interpretación de los fenómenos como en la elaboración de propuestas didácticas por los cursantes.

Para concluir con esta problematización de la elaboración curricular nos preguntamos ¿Cuáles serían las metas más altas de esta inclusión de la Física Cuántica en la enseñanza de las ciencias?

Debemos redefinir el sentido de la Alfabetización Científica para que sirva al ciudadano común en el siglo XXI, accediendo a una concepción de ciencia en permanente cambio, impregnado del conocimiento de las más avanzadas tecnologías y apuntando a una toma de conciencia crítica que propenda a la superación de la brecha tecnológica entre los países. De tal modo, debemos acompañar el debate sobre las utopías o las nuevas promesas de futuro para la humanidad.

## 7. Referencias

- Auletta, G.; Fortunato, M.; Parisi, G. (2009). *Quantum Mechanics*. Cambridge University Press. Cambridge: UK.
- Baily, C.; Finkelstein, N. D. (2015). Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, v. 11, n. 2, pp. 1–14.. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.02.0124>
- Bunge, M. (1973). Quantum mechanics in search of its referent. In *Philosophy of Physics*, pp. 87–105. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht: The Netherlands.
- Bunge, M. (2003). Twenty-five centuries of quantum physics: From Pythagoras to us, and from subjectivism to realism. *Science & Education*,

- 12, pp. 445–466. <https://doi.org/10.1023/A:1025336332476>
- Bungum, B.; Bøe, M. V.; Henriksen, E. K. (2018). Quantum talk: How small-group discussions may enhance students' understanding in quantum physics. *Science Education*, v. 102, n. 4, pp. 856–877. <https://doi.org/10.1002/sce.21447>
- Bybee, R.; DeBoer G. E. (1994). Research on goals for the science curriculum. En Gabel, D. L. (Ed.). *Handbook of Research in Science Teaching and Learning*. McMillan. New York: USA.
- Cheong, Y. W.; Song, J. (2014). Different levels of the meaning of wave-particle duality and a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. *Science & Education*, v. 23, n. 5, pp. 1011–1030. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9633-2>
- Chevalard, I. (1997). *La transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado*. Aique. Buenos Aires: Argentina.
- Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, v. 22, n. 9, pp.1041–1053.
- Clement, J. (2008). Co-construction estudiante/maestro de modelos visualizables en grandes discusiones grupales. En J.J. Clement and M. A. Rea-Ramirez (Eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science*, pp. 11–22. Springer. Salt Lake City: USA.
- Costa, F. (2021). *Tecnoceno, algoritmos biohackers y nuevas formas de vida*. Taurus. Buenos Aires: Argentina.
- Erduran, S.; Jiménez-Aleixandre, M. P. (Eds.). (2008). *Argumentation in science education: Perspectives from classroom-based research*. Springer. Berlin: Germany.
- Fernández, P. (2014). *Teorías y modelos en la enseñanza-aprendizaje de la Física Moderna*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba. <http://hdl.handle.net/11086/5472>
- Fernández, P.; González, E.; Solbes, J. (2005). De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. Una propuesta didáctica con base en la discusión de modelos. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 18, n. 1, pp. 69–80. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/808>
- Fernández, P.; González, E.; Solbes, J. (2021). La evolución de las concepciones de los docentes de ciencias sobre dualidad en la FQ. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 33, n. 1, pp. 35–46. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/33275>
- Feynman, R.; Leighton, R.; Sands, M. (1987). *Física. V. III: Mecánica Cuántica*. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington: USA.
- Fischler, H.; Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science and Education*, v. 14, n. 2, pp. 181–190. <https://doi.org/10.1080/0950069920140206>
- Garriz, A. (2013). Teaching the philosophical interpretations of quantum mechanics and quantum chemistry through controversies. *Science & Education*, v. 22, n. 7, pp. 1787–1807. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9444-x>
- González, E.; Fernández, P.; Solbes, J. Dificultades de docentes de ciencias en la conceptualización de temas de física actual. V *Simposio de Investigadores en Educación en Física, CD*; Santa Fe, del 18 al 20 de octubre de 2000.
- González, E.; Muñoz-Burbano, Z.; Solbes, J. (2020). La enseñanza de la física cuántica: una comparativa de tres países. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, v. 15, n. 2, pp. 239-250 <https://doi.org/10.14483/23464712.15619>
- Greca, I. M.; Freire, O. (2003). Does an emphasis on the concept of quantum states enhance students' understanding of quantum mechanics? *Science & Education*, 12, pp. 541–557. <https://doi.org/10.1023/A:1025385609694>
- Greca, I. M.; Herscovitz, V. E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 20, n. 2, pp. 327–338.
- Henriksen, E. K.; Angell, C.; Vistnes, A. I.; Bungum, B. (2018). What is light? Students' reflections on the wave-particle duality of light and the nature of physics. *Science & Education*, v. 27, n. 1–2, pp. 81–111. <https://doi.org/10.1007/s11191-018-9963-1>
- Johansson, A.; Andersson, S.; Salminen-Karlsson, M.; Elmgren, M. (2018). "Shut up and calculate": The available discursive positions in quantum physics courses. *Cultural Studies of Science*

- Education*, v. 13, n. 1, pp. 205–226. <https://doi.org/10.1080/0950069980200404>
- Johnston, I.D.; Crawford, K.; Fletcher, P. R. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, v. 20, n. 4, pp. 427–446. <https://doi.org/10.1080/0950069980200404>
- Kalkanis, G.; Hadzidaki, P.; Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, v. 87, n. 2, pp. 257–280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>
- Kragh, H. A. (1992). Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory. *Science & Education*, 1, pp. 349–363. <https://doi.org/10.1007/BF00430962>
- Kragh, H. (2007). *Generaciones Cuánticas. Una historia de la Física en el siglo XX*. Akal. Madrid: España.
- Krijtenburg–Lewerissa, K.; Pol, H. J.; Brinkman, A.; Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, v. 13, n. 1, pp. 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>
- Lautesse, P.; Vila-Valls, A.; Ferlin, F.; Héraud, J. L.; 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, pp. 937–955. <https://doi.org/10.1007/s11191-015-9755-9>
- Lévy–Leblond, J. M. (2003). On the Nature of Quanta. *Science & Education*, 12, pp. 495–502. <https://doi.org/10.1023/A:1025382113814>
- Lévy–Leblond, J. M.; Balibar, F. (1990). *Quantics: Rudiments of quantum physics*. North–Holland/Elsevier. Amsterdam: Nederland.
- Lind, G. (1980). Models in Physics: Some pedagogical reflections based on the history of science, *European Journal of Science Education*, v. 2, n. 1, pp. 15–23.
- Méheut, M.; Psillos, D. (2004). Teaching–learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, v. 26, n. 5, pp. 515–535.
- Nersessian, N. (2002). The cognitive basis of model–based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Skitch y M. Siegal (eds.), *The cognitive basis of science*. Cambridge University Press. Cambridge: USA.
- Ohanian, H. (1995). *Principles of Quantum Mechanics*. Prentice Hall. Hoboken: USA.
- Pereira, A.; Ostermann, F.; Cavalcanti, C. (2009). On the use of a virtual Mach–Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, 44, pp. 281–291.
- Pereira, A.; Solbes, J. (2022). The Dynamics of Perspective in Quantum Physics. An Analysis in the Context of Teacher Education. *Science & Education*, v. 31, n. 2, pp. 427–450. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00252-9>
- Petri, J.; Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, v. 20, n. 9, pp. 1075–1088.
- Sadin, E. (2022). *La inteligencia artificial o el desafío del siglo. Anatomía de un antihumanismo radical*. Caja Negra. Buenos Aires: Argentina.
- Sánchez Rón, J. M. (2001). *Historia de la Física Cuántica*. Critica. Barcelona: España.
- Savall, F.; Doménech, J. L.; Martínez, J. (2014). El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica. *Revista Brasileira de Ensino de física*, 36, pp. 4302.
- Schwab, K. (2016). *La cuarta revolución industrial*. Debate. Buenos Aires: Argentina.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and Teaching: Foundation of the New Reform. *Harvard Educational Review*, v. 57, n. 1, pp. 1–22.
- Sinarcas, V.; Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 31, n. 3, pp. 9–25. <https://doi.org/10.5565/rev/enscien/v31n3.768>
- Solbes, J. (2019). Cuestiones socio–científicas y pensamiento crítico: Una propuesta contra las pseudociencias. *Tecné, Episteme y Didaxis*, 46, pp. 81–99. <https://doi.org/10.17227/ted.num46-10541>
- Solbes, J.; Bernabeu, J.; Navarro, J.; Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza aprendizaje de la física cuántica. *Revista Española de Física*,

v. 2, n. 1, pp. 22–27.

<https://roderic.uv.es/handle/10550/36207>

Solbes, J.; Fernandez-Sanchez, J.; Dominguez-Sales, M. C.; Furio, C.; Canto, J. y Guisasola, G. (2018). Influencia de la formación y la investigación didáctica del profesorado de ciencias sobre su práctica docente. *Enseñanza de las ciencias*, v. 36 n. 1, pp. 25–44.

<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2355>

Solbes, J.; Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 23, n. 1 y 2, pp. 57–84.

<https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/7995>

Solbes, J.; Sinarcas, V. (2009). Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 23, pp. 123–151.

<https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2404>

Srniczek, N. (2018). *Capitalismo de plataformas*. Caja Negra. Buenos Aires: Argentina.

Talanquer, V. (2015). La promesa del conocimiento didáctico del contenido. Prólogo de Parga, L. E. (Ed.) *El conocimiento didáctico del contenido (CDC) en química*. Editorial Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá: Colombia.

Villareal, V. La Inteligencia Artificial desde una óptica social. *Página 12*, Buenos Aires: Argentina. 30/9/2022.

Wertsch, J. V. (1991). *Voices of the mind: A sociocultural approach to mediated action*. Harvard University Press. Cambridge: USA.

Wichmann, E. H. (1986). *Física Cuántica*. 4. Reverté. Buenos Aires: Argentina.

Zembylas, M. (2004). Emotion Metaphors and Emotional Labor in Science Teaching. *Science Education*, 88, pp. 301–324. <https://doi.org/10.1002/sce.10116>

