

# *El uso de los textos originales de los científicos y sus dificultades en el caso de la enseñanza de la mecánica cuántica.*

**Frechina Andreu, J.V.**

*Colegio Hispano-norteamericano.  
València*

## **Resumen**

La mecánica cuántica es una disciplina de didáctica compleja. Sus fundamentos se tratan habitualmente de forma superficial, sin prestar atención a los profundos cambios que supone respecto a la mecánica clásica y a sus implicaciones filosóficas. En el presente artículo se sugiere el uso de los textos originales de sus fundadores para introducir en su estudio un elemento humano que estimule la reflexión y el análisis en los estudiantes, y evite, en la medida de lo posible, las interpretaciones erróneas y las falacias conceptuales contenidas en algunos libros de texto.

## **Summary**

The teaching of quantum mechanics

is a complex matter. its theoretical premises are usually not treated in depth, and due attention is not paid to the profound changes that differentiate quantum mechanics from classical approaches and their philosophical implications. In the present article it is suggested that original texts by the founders of quantum mechanics be used in order to introduce, in their study, the human element which stimulates analysis and reflection by the students and which also avoids as much as possible, any wrong interpretations and conceptual fallacies which sometimes accompany certain text-books.

## ***La mecánica cuántica: una disciplina "difícil".***

En uno de los muchos aforismos que

se le atribuyen, Richard Feynmann afirmaba: “Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica” (Hey y Walters 1987). Tal vez el brillante físico se excedía en la generalización, pero hemos de reconocer que la disciplina desarrollada por Schrödinger y Heisenberg durante la primera mitad de este siglo es cuanto menos “incómoda”, y que su enseñanza en el nivel secundario entraña dificultades de muy ardua superación. Esto se debe fundamentalmente a dos razones. La primera es su complejidad intrínseca: requiere un bagaje matemático importante, introduce una serie de conceptos y fenómenos sobre los que carecemos de experiencia cotidiana que permita una aproximación intuitiva y produce algunas conclusiones desconcertantes que confunden hasta a sus más conspicuos impulsores. Por ejemplo, J.S. Bell (1987) que escribía “tal vez la Naturaleza no es tan extraña como la mecánica cuántica, pero la situación experimental no es muy alentadora desde este punto de vista”. Se trata, en definitiva, de la paradoja que apuntaba Ferrero (1988): “sin el postulado cuántico no se entiende la experiencia ordinaria, pero la experiencia ordinaria no entiende el postulado cuántico”. La segunda razón es una consecuencia de la primera: los autores de los libros de texto no “han comprendido” en profundidad la mecánica cuántica e introducen muchos errores conceptuales (Solbes, Calatayud, Climent y Navarro 1987), que por un pro-

ceso acrítico repetitivo se transmiten entre los libros de texto y de éstos a los profesores (Espinosa 1993). Son particularmente relevantes, por ejemplo, las interpretaciones erróneas del principio de indeterminación de Heisenberg (Hofstadter 1981, Trefil 1980).

En estas condiciones la didáctica se orienta habitualmente a una pequeña aproximación al aparato matemático desvestido de toda reflexión en lo que se refiere a sus implicaciones filosóficas y/o a un tratamiento superficial de las bases sobre las que se construye el edificio cuántico (dualidad onda-corpúsculo, principio de indeterminación, ecuación de onda), para detenerse después en los números cuánticos y las configuraciones electrónicas, que parecen surgidos de la nada y en cuyo uso se ejercitan los alumnos como autómatas, de manera que una de las teorías más importantes que has elaborado la humanidad pasa ante los ojos adormecidos del estudiante sin despertar en él el menor atisbo de fascinación. Así, las palabras de Bachelard (1938) siguen plenamente vigentes: “resulta sorprendente que los profesores de ciencias no comprendan que los alumnos no comprendan”.

A lo largo de los años se han venido proponiendo diversas formas para motivar a los alumnos en el estudio de la mecánica cuántica. G. Gamow (1965) trató, por ejemplo, de suponer las consecuencias que tendría en la experiencia cotidiana el hecho de que la constante de Plank poseyera un valor elevado y escribió un libro encantador de utilizá-

ma aplicación didáctica. Balibar y Lévy-Leblond (1985) han propuesto recurrir a la heurística natural de la física, los resultados experimentales, aunque, lamentablemente, su aplicación al nivel secundario no es posible. Finalmente, Hey y Walters (1987) han tratado de mostrar el universo cuántico como una fuente continua de sorpresas a través de sus aplicaciones prácticas más espectaculares. Son tres ejemplos, escogidos entre otros muchos, de cómo hacer más atractiva la enseñanza de la física cuántica. Un cuarto ejemplo puede ser el que me voy a permitir sugerir a continuación: la aproximación histórica al momento álgido de la concepción y el desarrollo de la nueva mecánica a través de los textos originales de sus creadores, introduciendo un elemento humano cuyo contraste haga la física cuántica más comprensible y llena de significado (Selleri, 1986).

### ***Bondades del uso de la historia en la enseñanza de las ciencias.***

En los últimos tiempos la investigación didáctica ha dirigido su atención hacia las aportaciones de la historia y la filosofía de las ciencias (Gil 1994). Matthews (1994) ha destacado algunas de sus bondades: pueden humanizar las ciencias, pueden hacer las clases más estimulantes y reflexivas, pueden contribuir a una comprensión mayor de los contenidos científicos, etc., a las cuales

podemos añadir lo argumentado por Schwartz (1977): “la historia de la ciencia nos hace plantearnos preguntas. La educación tradicional sólo produce respuestas”. El propio Schrödinger (1983) señalaba la ineludible necesidad de recurrir a la historia: “la historia es la ciencia más fundamental porque todo conocimiento humano pierde su carácter científico cuando los hombres olvidan las condiciones en las que se originó, las preguntas que venía a contestar y las funciones al servicio de las cuales se creó”.

El uso de la historia de la ciencia en la enseñanza ha tenido y tiene, sin embargo, algunos detractores que sostienen como Sánchez Ron (1988) que incluso “puede llegar a ser perjudicial”, ya que “la manera en que se comportan -según los historiadores- los científicos puede no ser un buen modelo para los estudiantes”. Argumentaciones tan discutibles como ésta ya han sido rebatidas ampliamente (Matthews 1994, por ejemplo) y no nos detendremos más. Únicamente añadiremos que el uso de la historia de la ciencia en la enseñanza de la mecánica cuántica, concretamente el estudio de los debates entre Einstein, Bohr, Heisenberg, Pauli, etc., ya se ha llevado a cabo con resultados pedagógicos notables (Morris 1990) y que la utilidad de recurrir a textos científicos originales se ha subrayado en diversas ocasiones en los últimos tiempos (Solaz 1990, Galache, Camacho y Rodríguez 1991, Pessoa de Carvalho y Castro 1992).

## **Los textos.**

Disponemos en edición castellana de muchos de los textos de los fundadores, impulsores o críticos de la mecánica cuántica: Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Born, Dirac, Einstein, De Broglie, etc. y las posibilidades que se nos ofrecen son múltiples y sugerentes. Me limitaré pues a citar unos cuantos ejemplos de entre los muchos posibles que podríamos escoger para utilizar en los dos últimos años de bachillerato, momento en que se presenta por primera vez la nueva mecánica a los estudiantes.

El plan de estudios reserva para Bohr un papel muy por debajo del que en realidad representó: se limita a presentarlo como el autor de unos postulados surgidos de la necesidad de explicar el origen de los espectros atómicos a partir del modelo de Rutherford, y omite su importantísima labor de interpretación de la nueva mecánica nacida de los trabajos de Heisenberg y Schrödinger, el fundamental y todavía actual principio de complementariedad (Englert, Scully y Walther 1995) que constituye su mayor aportación científica y filosófica, y su propia crítica de los postulados y su prudencia a la hora de evaluar su validez. Podemos recurrir a sus trabajos para subsanar estas deficiencias. Por ejemplo, respecto al último punto escribía en el artículo “La teoría atómica y la mecánica” un fragmento que puede debatirse en clase una vez introducidos sus tres postulados y que nos puede servir para aclarar el concep-

to de “modelo” tan difícil de asumir por los alumnos:

“El hecho de que en el estado normal no se emita radiación a pesar de que según la imagen mecánica el electrón está aún moviéndose, acentúa de la manera más clara posible el carácter simbólico de estas imágenes” (Bohr 1925).

Un aspecto fundamental de la nueva mecánica es, sin lugar a dudas, el principio de indeterminación de Heisenberg. Lamentablemente, este principio es muy susceptible de ser tergiversado, tanto en su contenido como en sus implicaciones. Sin embargo, Heisenberg lo expone sin que quepan interpretaciones incorrectas, por lo que pueden sustituirse los capítulos del libro de texto que lo introducen por sus palabras originales:

“(…) la desviación respecto a la Física precedente puede simbolizarse en las llamadas relaciones de indeterminación. Se demostró que no es posible determinar a la vez la posición y la velocidad de una partícula atómica con un grado de precisión arbitrariamente fijado. Puede señalarse muy precisamente la posición, pero entonces la influencia del instrumento de observación imposibilita hasta cierto grado el conocimiento de la velocidad; e inversamente, se desvanece el conocimiento de la posición al medir precisamente la velocidad; en forma tal, que la constante de Plank constituye un coto inferior del producto de ambas imprecisiones. Esta formulación sirve desde luego para poner de

manifiesto con toda claridad que a partir de la Mecánica newtoniana no se alcanza gran cosa, ya que para calcular un proceso mecánico, justamente, hay que conocer a la vez con precisión la posición y la velocidad en determinado instante” (Heisenberg 1955).

Como el instrumento de medida interfiere en la observación, una de las implicaciones filosóficas de mayor importancia del principio de indeterminación es el papel que desempeña el observador ¿Existe un mundo objetivo que evoluciona ajeno al observador o por el contrario hemos de regresar a la máxima de Protágoras: el hombre es la medida de todas las cosas?. Schrödinger (1958) reflexionaba ampliamente al respecto, reflexión que puede hacer extensiva a los alumnos si se comentan los siguientes pensamientos del físico austríaco:

“¿Estamos acaso dispuestos a creer que esta circunstancia de los animales superiores, circunstancia que muy bien podría no haberse dado, fue condición necesaria para que el mundo se iluminase a sí mismo a la luz de la conciencia? Si las cosas hubiesen ido de otro modo, ¿no se hubiera quedado todo en una representación en un teatro vacío, en algo para todos inexistente o, mejor dicho, en algo simplemente inexistente?”

Heisenberg (1955) también dedicó a este punto muchas de sus reflexiones que pueden añadirse a las anteriores:

“La cuestión de si las partículas existen en si en el espacio y en el tiem-

po, no puede ya plantearse en esta forma, puesto que en todo caso no podemos hablar más que de los procesos que tienen lugar cuando la interacción entre la partícula y algún otro sistema físico, por ejemplo los aparatos de medición, revela el comportamiento de la partícula. La noción de la realidad objetiva de las partículas elementales se ha disuelto por consiguiente en forma muy significativa, y no en la niebla de alguna noción nueva de la realidad, oscura o todavía no comprendida, sino en la transparente claridad de una matemática que describe, no el comportamiento de las partículas elementales, pero sí nuestro conocimiento de dicho comportamiento.

(...) La expansión, ilimitada en apariencia, de su poderío material, ha colocado a la humanidad en el predicamento de un capitán cuyo buque está construido con tanta abundancia de acero y hierro que la aguja de su compás apunta sólo a la masa férrea de su propio buque, y no al Norte”.

Reflexiones a las que volverá una y otra vez:

“Las matemáticas son la forma con la que expresamos nuestra comprensión de la naturaleza; pero las matemáticas no son el contenido de la naturaleza” (Heisenberg 1971).

Finalmente, puede ser muy útil recurrir a aquellos pensamientos en que los autores muestran su desconcierto ante los resultados de la nueva física para, a grandes rasgos, incidir en las diferencias sustanciales que sepa-

ran la mecánica clásica de la mecánica cuántica:

“La naturaleza esta hecha de tal manera (...) que puede ser entendida. Tal vez podría decirlo con mayor exactitud al revés: que nuestra inteligencia está formada de tal manera que puede comprender la naturaleza” (Heisenberg 1969).

“Recuerdo haber sostenido con Bohr discusiones que duraban muchas horas, hasta muy avanzada la noche, y terminaban al borde de la desesperación; y cuando concluida la discusión me iba a caminar a solas por el parque vecino, me repetía a mi mismo una y otra vez la pregunta: ¿puede la naturaleza ser tan absurda como nos parece en estos experimentos atómicos?” (Heisenberg 1962).

“Hoy, en el otoño de mi existencia, aún me preocupa el mismo problema. A pesar de tantos éxitos alcanzados y el camino recorrido, no creo que el enigma haya estado verdaderamente resuelto” (De Broglie citado por Camarasa, 1984).

“Hemos llegado al final de nuestro viaje por los abismos de la materia. Buscábamos un suelo firme y no lo hemos encontrado. Cuanto más profundamente penetramos, tanto más inquieto, más incierto y más borroso se vuelve el Universo” (Born, 1960).

Son, todas ellas, reflexiones altamente estimulantes que pueden seducir positivamente a los alumnos y motivarles en el estudio de esta sorprendente mecánica cuántica, fuente

inagotable de fascinación y desconcierto, lejos de la osamenta algorítmica, superficialmente justificada, que en demasiadas ocasiones aparece en los libros de texto.

## ***Bibliografía***

- BACHELARD, G., 1938, *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin: París.
- BELL, J.S., 1987, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge University Press: Cambridge. Traducción castellana en Alianza Editorial: Madrid, 1990.
- BOHR, N., 1925, “La teoría atómica y la mecánica”, *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Alianza Editorial: Madrid, 1988.
- BORN, M., 1960, *El inquieto Universo*. Eudeba: Buenos Aires.
- CAMARASA, G., 1984, “Louis de Broglie i les ones de matèria”, *Ciència*, **IV (55/56)**, pp. 30-36.
- BALIBAR, F. y LÉVY-LEBLOND, J. M., 1985, “Voulez vous apprendre quantique?”, *Le monde quantique*. Editions du Seuil: París. Trad. cast. en Alianza Editorial: Madrid, 1990.
- ENGLERT, B.G., SCULLY, M.O. y WALTHER, H., 1995, “La dualidad en la materia y en la luz”, *Investigación y Ciencia*, **221**, pp. 46-52.
- ESPINOSA, J., 1993, “Una alternativa para la introducción de los conceptos de cuantización y orbital en la enseñanza secundaria”, *Enseñanza de las Ciencias*, **11(3)**, pp. 362-363.

- FERRERO, M., 1988, "Prólogo", en N. Bohr, *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*. Alianza Editorial: Madrid.
- GALACHE, M.I., CAMACHO, E. y RODRÍGUEZ, A., 1991, "Origen histórico del término ión", *Enseñanza de las ciencias*, **9(2)**, pp. 187-192.
- GAMOW, G., 1965, *Mr. Tompkins in paperback*. Cambridge University Press: Cambridge.
- GIL, D., 1994, "Diez años de investigación en didáctica de las ciencias: realizaciones y perspectivas", *Enseñanza de las ciencias*, **12(2)**, pp. 154-164.
- HEISENBERG, W., 1955, *Das Naturbild der heutigen Physik*. Rowohlt Verlag: Hamburgo. Trad. cast.: *La imagen de la Naturaleza en la Física actual*, Ariel: Barcelona, 1976.
- HEISENBERG, W., 1962, *Physics and Philosophy*. Harper & Row: Nueva York.
- HEISENBERG, W., 1969, *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. Piper & Co. Verlag: Munich. Trad. cast.: *Diálogos sobre física atómica*, BAC: Madrid, 1975.
- HEISENBERG, W., 1971, *Schritte über Grenzen*. Piper & Co. Verlag: Munich. Trad. cast.: *Más allá de la física. Atravesando fronteras*, BAC: Madrid, 1974.
- HEY, T. y WALTERS, P., 1987, *The quantum Universe*. Cambridge University Press: Cambridge. Trad. cast.: Alianza Editorial: Madrid, 1989.
- HOFSTADTER, D.R., 1981, "Falacias del principio de incertidumbre y paradojas de la mecánica cuántica", *Investigación y Ciencia*, **60**, pp. 108-115.
- MATTHEWS, M.R., 1994, "Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual", *Enseñanza de las ciencias*, **12(2)**, pp. 255-277.
- MORRIS, P., 1990, "The History of Physics for Physics Majors", *Journal of College Science Teaching*, **Marzo-Abril**, pp. 274-278.
- PESSOA DE CARVALHO, A.M. y CASTRO, R.S., 1992, "La Historia de la Ciencia como herramienta para la enseñanza de Física en secundaria: un ejemplo en calor y temperatura", *Enseñanza de las Ciencias*, **10(3)**, pp. 289-294.
- SÁNCHEZ RON, J.M., 1988, "Usos y abusos de la Historia de la Física en la enseñanza", *Enseñanza de las Ciencias*, **6(2)**, pp. 179-188.
- SCHRÖDINGER, E., 1983, *¿Qué es la vida?* Tusquets: Barcelona.
- SCHRÖDINGER, E., 1958, *Mind and matter*. Cambridge University Press: Cambridge. Trad. cast.: Tusquets: Barcelona, 1985.
- SELLERI, F., 1986, *El debate de la mecánica cuántica*. Alianza Editorial: Madrid.
- SCHWARTZ, T., 1977, "The History of Chemistry", *Journal of Chemical Education*, **54**, pp. 467-468.
- SOLAZ, J. J., 1990, "El principi de Le Chatelier i la seua abusiva aplicació en la didàctica de l'equilibri químic",

*Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, **4**, pp.27-30.  
SOLBES, J., CALATAYUD, M., CLIMENT, J. y NAVARRO, J., 1987, "Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos", *Enseñanza*

*de las Ciencias*, **5**, pp. 189-195.  
TALBOT, M., 1986, *Más allá de la teoría cuántica*. Gedisa: Barcelona.  
TREFIL, J.S., 1980, *From atoms to quarks*. Charles Scribner's Sons: Nueva York.