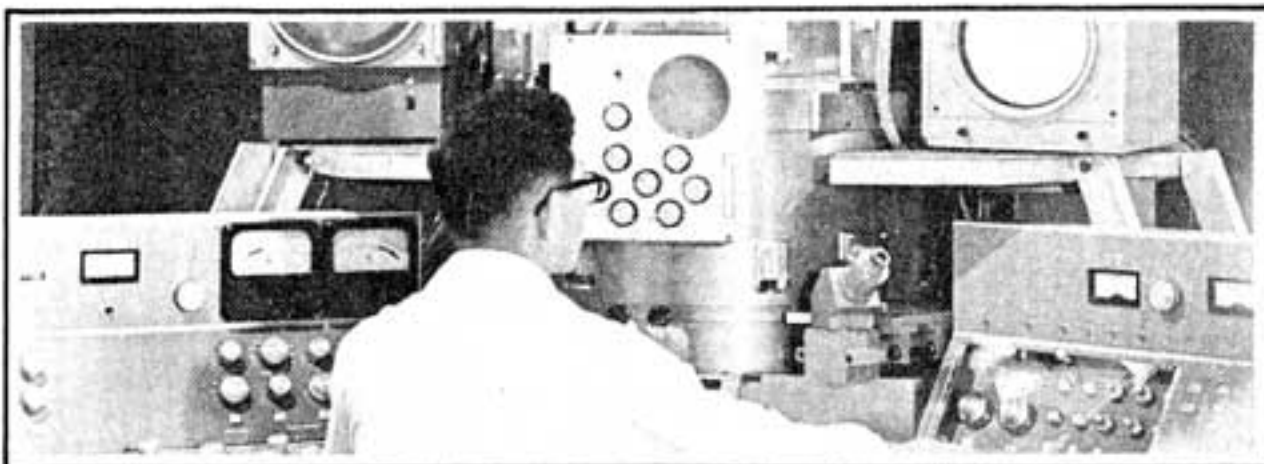


# ¿ES LA MECÁNICA CUÁNTICA UNA TEORÍA COMPLETA?

Luis de la Peña\*

## I. INTRODUCCION

Un fenómeno asombroso y, a la vez, muy interesante se ha venido dando en la mecánica cuántica: mientras que con el tiempo su formalismo se ha consolidado y sus aplicaciones expandido hasta penetrar al campo de la tecnología, su interpretación física ha venido siendo puesta en duda con frecuencia cada vez mayor. Este cuestionamiento, iniciado por algunos de los propios fundadores de la teoría, se refiere a sus aspectos centrales, lo suficientemente medulares como para que sea legítimo afirmar que cualquier teoría científica que sufriera críticas de tal envergadura debería considerarse, por este simple hecho, como aún en una etapa temprana de elaboración. Sin embargo, la mecánica cuántica es considerada (casi) universalmente como una teoría consolidada, incluso acabada, y sirve de fundamento al resto de la microfísica contemporánea. Una visión superficial de esta situación invita a concluir que las críticas a la mecánica cuántica están obviamente mal fundadas y que en todo el asunto debe haber gato encerrado. Esta conclusión, que es a la que llega la mayoría de los físicos —poco o nada interesados en los problemas de fundamentación de su ciencia— surge del argumento de que la mecánica cuántica es muy difícil de entender —o aún, que no se puede entender del todo— ya que el comportamiento de un sistema cuántico no es describible en términos de eventos en el espacio-tiempo y contiene elementos sui generis —como la in-



La mecánica cuántica tiene aplicaciones tecnológicas impresionantes, sin embargo su interpretación física ha sido puesta en duda

evitable referencia al observador, etc.— que rompen con los esquemas conceptuales precuánticos. En estas condiciones, se dice, es natural que haya gente que no pueda entender “la esencia” de la mecánica cuántica y que confundan su propia confusión con aparentes “fallas” de la teoría. Este argumento fue usado, en particular, para descalificar las críticas severas a la mecánica cuántica por Einstein: Einstein, se dijo,<sup>1</sup> fue incapaz de comprender la mecánica cuántica.

Pero un análisis más profundo de la situación, revela que las dudas sobre la legitimidad física de varios planteamientos característicos de la mecánica cuántica, surgieron desde el momento mismo en que se iniciara la construcción de esta teoría y que, aunque ellas han sido acalladas durante varias décadas por el peso psicológico, moral e ideológico de la escuela dominante —la llamada escuela ortodoxa o de Copenhague—, no sólo no se han desvanecido ni recibido respuestas convincentes, sino

que se han agudizado con el tiempo, debido al enriquecimiento de los argumentos. Un ejemplo de este proceso es que en los últimos años han aparecido, no sólo artículos, sino varios libros en los que se revisan algunas de las interpretaciones o alternativas propuestas a la oficial.<sup>2</sup> Con esto no sólo se reconoce su existencia, sino que se les legitima como teorías físicas que merecen atención y estudio, en vez de rechazarlas a priori, como ha sido tradición.

Obviamente, estamos en presencia de un fenómeno social más que científico, pero tan profundamente imbricado con el conocimiento científico que se le toma normalmente como tal. Parece pues, interesante analizar con algún detenimiento estas cuestiones, con la intención de poner al descubierto el juego complejo de ideología, filosofía y ciencia que les da vigencia. Por el momento, en este ensayo trataremos de ejemplificar el

\* Investigador del Instituto de Física de la UNAM y Profesor de la Facultad de Ciencias.

1. The Born-Einstein Letters, 1916-1955, MacMillan, 1971. Ver por ejemplo nota de Born a la carta 106.

2. Entre otros podrían citarse los siguientes: F.J. Belinfante, A Survey of Hidden-variable Theories, Oxford, Pergamon 1973; M. Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, Wiley, N.Y., 1974.

problema con una instancia interesante, tanto por los participantes en la discusión —Born y Einstein—, como por tratarse del problema medular de la mecánica cuántica: ¿qué es lo que describe la función de onda?

## II. LA DISCUSION EINSTEIN-BORN

En 1953 —a escasos dos años de su muerte— Einstein publicó el último trabajo que escribiera sobre la mecánica cuántica. Se trata de un pequeño artículo preparado para ser incluido en el libro **Scientific papers presented to Max Born**, que se le ofreciera a Born con motivo de su retiro de la Universidad de Edinburgo. A Einstein y Born los unía una amistad de muchas décadas y Einstein creyó oportuno festejar a su amigo escribiendo precisamente sobre el descubrimiento que le diera a Born el Premio Nobel, es decir, su interpretación de la función de onda de la mecánica cuántica. Para sorpresa y pesar de Einstein, este opúsculo le condujo a otra inesperada polémica, pues Born reaccionó violentamente contra él, considerando casi una ofensa personal las afir-

maciones de Einstein. La discusión se prolongó varios meses y dio lugar a muchas cartas, que afortunadamente hoy son del dominio público.<sup>3</sup>

En su ensayo, después de una introducción en que argumenta sobre la insuficiencia esencial de la filosofía positivista desde el punto de vista de la ciencia, Einstein apunta el hecho de que a la pregunta sobre qué es lo que describe la física cuántica y a qué objetos se refieren sus leyes, se dan diversas respuestas, mutuamente inconsistentes. Una forma de dar respuesta clara a esta pregunta sería tratar cuánticamente a un sistema pequeño pero **macroscópico**, sobre cuya realidad y forma de comportamiento no hay duda alguna, pues está descrito con suficiente precisión por la física clásica. Sabemos que estos objetos, dice, en cada momento ocupan un lugar determinado y poseen velocidad (momento) definida, es decir, se encuentran en algún estado real. Preguntémosnos ahora: ¿contiene la mecánica cuántica la descripción real

del movimiento de este cuerpo macroscópico proporcionada por la mecánica clásica? Si la respuesta es "no", la teoría sería inadmisible; si la respuesta no es un simple "sí", entonces, ¿en qué forma describe este comportamiento?

Para dar respuesta a estas preguntas, Einstein analiza el sistema compuesto de una pelotita de 1 mm de diámetro que está rebotando elásticamente entre dos paredes rígidas separadas la distancia,  $a$ , que se toma igual a 1 m. El origen del eje de movimiento  $x$  se coloca en medio de las paredes. Se supone que es posible desprestigiar las rotaciones. Puesto que se trata de una partícula libre con energía bien definida  $E$ , la función de onda será la suma de dos ondas monocromáticas, es decir,

$$\psi = \frac{1}{2} A e^{i(\frac{E}{\hbar}t - \frac{p}{\hbar}x)} + \frac{1}{2} A e^{i(\frac{E}{\hbar}t + \frac{p}{\hbar}x)} \quad (1)$$

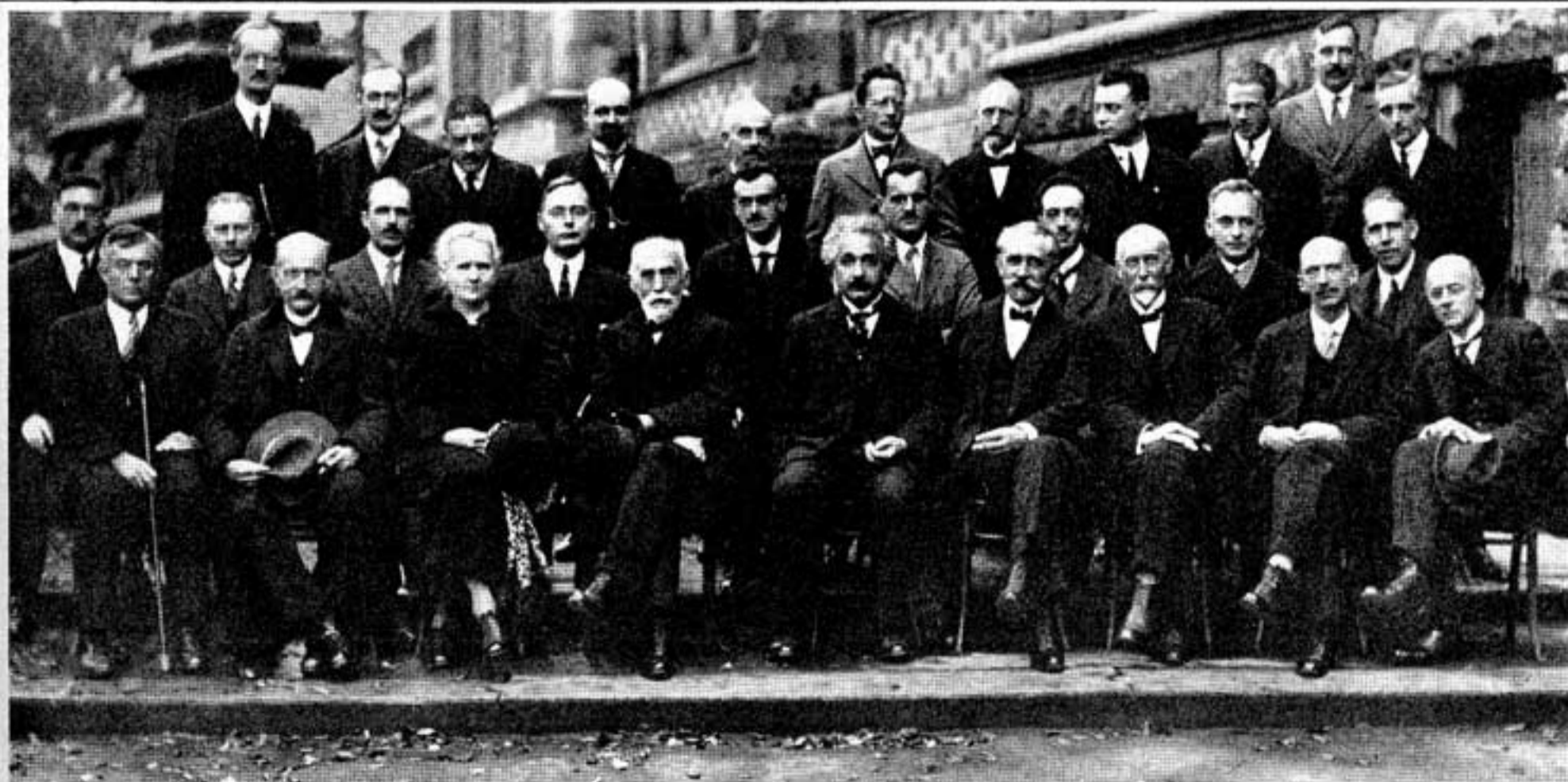
o bien

$$\psi = A e^{i\frac{E}{\hbar}t} \cos \frac{p}{\hbar}x \quad (2)$$

en donde  $p = \sqrt{2mE}$ ; las amplitudes relativas se han fijado para satisfacer las condiciones de frontera del problema. Para que sea legíti-

3. Ver por ejemplo la nota de Born a la carta 116 de la referencia 1.

Conferencia Internacional Solvay de 1927. En esta foto se encuentran la mayoría de los fundadores de la mecánica cuántica



INTERNATIONAL SOLVAY CONFERENCE, BRUSSELS, 23-29 OCTOBER, 1927

A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER	R. H. FOWLER	W. PAULI	W. HEISENBERG	L. BRILLOUIN
F. DERIVE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	F. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROGLIE	M. BORN	N. BOHR
I. LANGMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON	G. W. RICHARDSON



Einstein, se dijo, fue incapaz de comprender la mecánica cuántica

no comparar con la mecánica clásica se supondrá que la longitud de onda de de Broglie  $2\pi\hbar/p$  es pequeña comparada con  $a$ , lo cual garantizamos escogiendo adecuadamente la masa de la partícula. La probabilidad de que el centro de masa de la pelotita se encuentre en un intervalo  $\Delta x$  es entonces

$$\Delta P(\Delta x|x) = \int_x^{x+\Delta x} |\psi|^2 dx = A^2 \int_x^{x+\Delta x} \cos^2 \frac{p}{\hbar} x dx$$

), con  $\Delta x \ll \frac{\hbar}{p}$

$$\Delta P(\Delta x|x) = \frac{1}{2} A^2 (1 + \cos^2 \frac{p}{\hbar} x) \Delta x \quad (3)$$

El factor entre paréntesis oscila rápidamente con  $X$  y representa la estructura fina cuántica; lo esencial de la ecuación (3) es que  $\Delta P$  resulta proporcional a  $\Delta x$ .

Einstein se pregunta ahora sobre la probabilidad de que la pelotita tenga un impulso dado. Si la ecuación (1) fuera válida para toda  $X$ , la teoría predeciría que el impulso es exactamente  $\pm p$  con igual probabilidad en ambos sentidos, pues la función de onda en la representación de impulsos, dada por la transformada de Fourier de  $\psi(x)$  sería:

$$\phi(k, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x, t) e^{ikx} dx$$

$$\psi = \frac{\hbar}{2} A e^{i\frac{E}{\hbar}t} (\delta(p-\hbar k) + \delta(p+\hbar k)) \quad (4)$$

Sin embargo, la integral debe extenderse sólo desde  $-a/2$  hasta  $a/2$ , lo que le da  $\phi(k)$  cierta anchura alrededor de  $\pm p$ .

Por la condición  $2\pi\hbar|p| \ll a$ , esta anchura no es muy grande y podemos considerarla como una estructura cuántica. Luego el resultado esencial es que la función  $\psi(x, t)$  contiene con la misma probabilidad los impulsos  $+p$  y  $-p$ . Ambos resultados, señala Einstein, son totalmente satisfactorios desde un punto de vista estadístico: ellos describen —con precisión de hasta pequeñas desviaciones de carácter cuántico— el comportamiento de un ensemble de pelotitas. En efecto, para el ensemble clásico, la distribución en  $X$  sería uniforme ( $\Delta P \sim \Delta x$ ) y sólo habría dos velocidades ( $\pm p/m$ ) que se realizarían con igual probabilidad, en coincidencia básica con los resultados cuánticos.

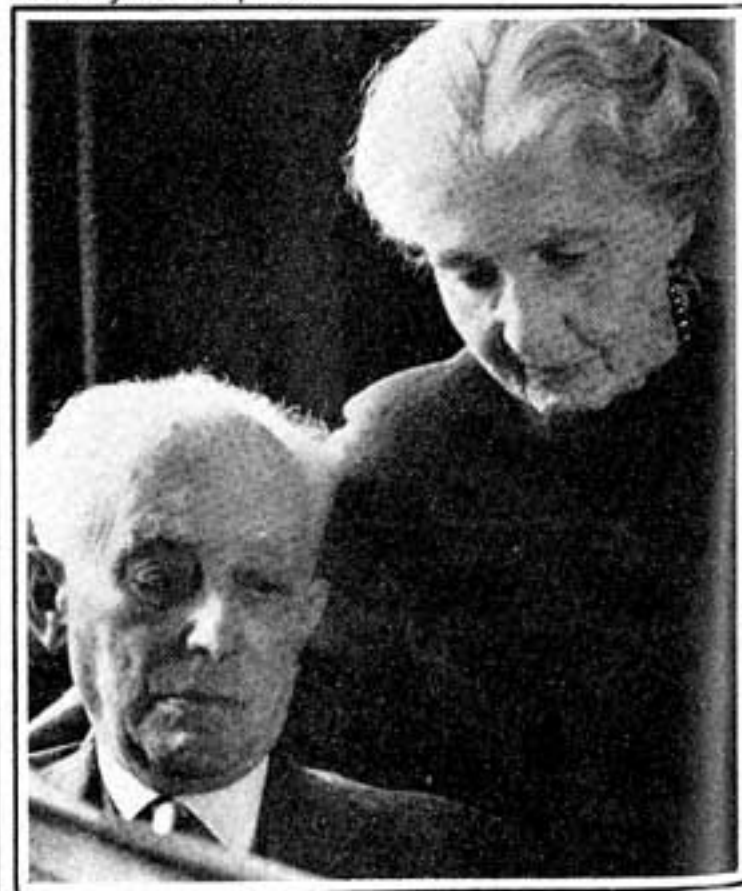
¿Qué pasa ahora si nos preguntamos si la teoría expuesta puede brindar una descripción real de un evento único, es decir, de una sola pelotita? La respuesta es "no", dice Einstein, pues en este caso es esencial el hecho de que se trata de un macrosistema, que se encuentra en un estado real, es decir, que posee, en cada instante, posición de su centro de masa (casi) bien definida y velocidad (al menos en promedio sobre un pequeño intervalo de tiempo) con signo y magnitud definidos. No es posible extraer ninguno de estos dos valores de la función  $\psi(x, t)$  dada por la ecuación (1): a partir de ella pueden obtenerse sólo resultados estadísticos, que se refieren a un ensemble estadístico. Luego, pues, la función de onda describe un ensemble y no un evento singular, concluye Einstein.

La respuesta de Born no se hizo esperar; al día siguiente de recibir el libro, escribió una carta a Einstein quejándose implícitamente de su atrevimiento al escribir un artículo que contradecía las opiniones del homenajeado e insistiendo en que todo estaba basado en un simple error de cálculo. La discusión se prolongó varios meses (de hecho, prácticamente hasta la muerte de Einstein) y fue motivo de muchas cartas y de notas y artículos de Born e incluso de la intervención de Pauli como mediador. El punto central de Born era que el cálculo de Einstein no sigue las reglas de la mecánica cuántica. Sería correcto, dice, si no supiéramos nada más respecto a la par-

tícula; pero como se trata de un cuerpo macroscópico conocemos (aunque sea con cierta aproximación) su posición en un momento dado, información que debe incluirse en la descripción. En otras palabras, debe describirse al sistema macroscópico no con una onda plana estacionaria como lo hace Einstein, sino con un paquete de ondas que rebota periódicamente contra las paredes. Sin embargo, Einstein se había prevenido explícitamente contra este argumento en una observación contenida en su artículo inicial, argumentando que no es sostenible debido al hecho de que el paquete se dispersa con el tiempo, por lo que la posición de la partícula acabará por indefinirse tanto como se quiera; es decir, en el curso del tiempo, se alcanzará una situación equivalente a la descrita por la onda plana.

La polémica se desvanece, pero no se resuelve. Einstein insiste hasta el final en que se trata de un problema de principio, —del que no es posible salir con afirmaciones circunstanciales del tipo "el tiempo para que el paquete se disperse hasta adquirir dimensiones del orden del ancho del pozo es muy grande" o similares—, que debe resolverse en términos **objetivos** (subrayado por Einstein), es decir, independientes de la observación y del observador, dado que la descripción debe ser válida en cualquier circunstancia. Born, por su lado, insiste en la necesidad de principio de introducir la observación, es decir, el observador y su

#### Born y su esposa

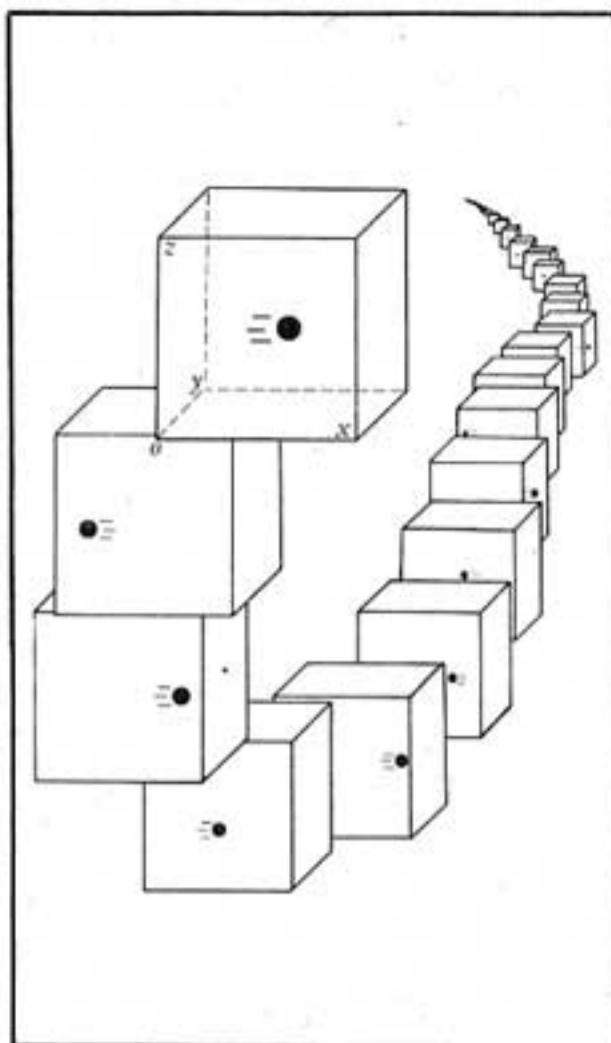


acción cognoscitiva sobre el sistema, por tratarse de un objeto clásico.

### III. DISCUSION

¿Cuál es el contenido fundamental de esta discusión? En forma simple, la podemos expresar como sigue. Einstein maneja el postulado de que **todas** las funciones de onda, soluciones legítimas de la ecuación de Schrodinger, son igualmente aceptables. Luego podemos utilizar **cualquiera** de ellas para analizar su significado. Además, la teoría debe ser igualmente aplicable a un sistema atómico que a un pequeño cuerpo macroscópico, sin que existan diferencias de principio entre estos dos casos. Puesto que la solución estacionaria por él construida es legítima y ella describe un ensemble estadístico, debemos concluir que la función de onda de la mecánica cuántica da sólo una descripción estadística del sistema y, en consecuencia, es incompleta en principio. La cuestión de si es posible o no ir más allá de esta descripción es otro problema, cuya solución científica corresponde al futuro. Cualquier creencia al respecto en la actualidad constituye a lo sumo una hipótesis fundada en consideraciones metafísicas de índole aún más extracientífica. Einstein expresó en más de una ocasión que él personalmente estaba convencido de que debería ser posible dar este paso, aunque también se declaró impotente para señalar algún camino específico para lograr este desideratum filosófico.

Aunque Born utilizó un camino un tanto tortuoso para argumentar —motivado ello en malos entendidos, cuya existencia él mismo reconoce varios años después<sup>3</sup>—, puede percibirse que también defendía un punto de principio. Para Born, soluciones legítimas son sólo aquellas que se construyen empleando **todo** el conocimiento del sistema que es conceptualmente posible obtener a priori, mientras ello no lleve a contradicciones. Aquí se requieren dos aclaraciones. Las contradicciones a que se alude se refieren a las que se podrían generar si se intenta emplear elementos de información cuya coexistencia contradice las leyes de la propia mecánica cuántica. Por ejemplo, aunque en principio podríamos fijar con precisión arbitraria la posición y el impulso iniciales de una partícula macroscópi-



ca, las relaciones de Heisenberg nos previenen de introducir ambos simultáneamente. Este punto es prácticamente obvio y lo podemos dejar para prestar atención a la segunda observación. Para Born existe una diferencia fundamental —de principio, casi podríamos decir— entre un sistema microscópico y uno macroscópico, por pequeño que éste último pueda ser: en el segundo caso podemos conocer con precisión arbitraria (en principio) su posición, pero no podemos **averiguar** la posición de un electrón atómico sin perturbar esencialmente su estado. Luego mientras la función de onda del electrón no requiere ninguna información sobre su posición inicial, estamos **obligados** a introducir esta información en la descripción de la esfera, lo que muestra que la función de onda empleada por Einstein es **ilegítima** y, por lo tanto, sus conclusiones son insostenibles.

Desde esta perspectiva el problema que aparentemente es físico, ha quedado reducido a términos filosóficos: ¿en la descripción de un fenómeno físico, es admisible en principio la introducción de elementos subjetivos, como es el observador y su conocimiento potencial del sistema? Para un físico que adopta una posición materialista y objetiva, la respuesta a priori es "no", por lo contrario, para un físico positivista, por el carácter idealista y subjetivo de sus postu-

lados filosóficos, la respuesta afirmativa es natural y hasta necesaria. De hecho, las cosas han sido llevadas en ocasiones más lejos por el positivismo, hasta afirmar, por ejemplo, que la existencia de la mecánica cuántica es una **demonstración científica** de que el postulado de la existencia independiente de la realidad objetiva es falso.<sup>4</sup>

Es obvio que la polémica entre Einstein y Born no tenía solución: basada en dos concepciones filosóficas del mundo físico mutuamente excluyentes nadie podía convencer a nadie. Lo que creaba la confusión era el ropaje aparentemente físico que Born insistió en utilizar para ocultar —inconscientemente— la naturaleza real de la contradicción. Sin embargo el ejemplo muestra en forma muy ilustrativa la enorme importancia que juegan los postulados filosóficos en la construcción de **cualquier** teoría fundamental de la ciencia y los riesgos y dificultades que se producen si en vez de manejar estos postulados en forma explícita y consciente se les deja pasar inadvertidos o se les oculta por temor a su carácter extracientífico. ⊕

4. N. D'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Benjamin, Cal. 1971.

*Born y Einstein fueron protagonistas de uno de los debates más interesantes de la física, que en el fondo enfrentaba posiciones filosóficas distintas*

