

REALISMO CLÁSICO Y REALISMO CUÁNTICO EN LA MICROFÍSICA

CLASSIC AND QUANTUM REALISM IN MICROPHYSICS

Rafael Alemañ Berenguer¹

Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y a la Tecnología
Universidad de Alicante (España)

Recibido: 14-01-2013

Aceptado: 03-04-2013

Resumen: El carácter fundamentalmente probabilista de la medición de las magnitudes cuánticas, alentó la suposición de que tales valores “no existen” antes de la medida. Una reinterpretación de nuestras ideas sobre las magnitudes físicas, considerándolas formalmente representadas por distribuciones de valores en lugar de valores numéricos concretos, ayudaría a disipar toda sombra de irrealidad física.

Palabras-clave: Objetividad, función, medida, magnitud, distribución.

Abstract: The probabilistic character of quantum measures encouraged the supposition that such values “did not exist” before there being measured. A reformulation of our ideas about physical magnitudes regarding them as formally represented by value distributions instead of sharp numeric values would help to dissipate any irreality shade in physical sciences.

Key-words: Objectivity, function, measurement, magnitude, distribution.

1. Introducción

El realismo, la doctrina que sostiene la existencia de un mundo exterior independiente de nuestra conciencia, ha constituido el supuesto tácito esencial

[1] (raalbe.autor@gmail.com) R.A. Alemañ Berenguer es licenciado en Química (especialidad Bioquímica) por la Universidad de Valencia y en Física (especialidad Fundamental) por la UNED, y doctorando el Dpto. De Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante. Su actividad como investigador colaborador en dicha universidad se desarrolla en el grupo Ciencias Planetarias. Es también autor de diversos libros y artículos, tanto académicos como divulgativos, sobre física, biología evolucionista y filosofía de la ciencia.

de la mayoría de las escuelas filosóficas así como de toda la ciencia empírica. Nadie lo puso seriamente en duda hasta el advenimiento de la teoría cuántica en la primera mitad del siglo XX, con sus extrañas nociones sobre el mundo subatómico. La situación se enturbió notablemente cuando a comienzos de ese mismo siglo la física cuántica reveló propiedades y características insospechadas en la estructura íntima de la materia, poniendo a la vez en entredicho multitud de ideas bien asentadas sobre la naturaleza última del mundo físico.

Las discusiones sobre la interpretación más adecuada de la física cuántica apenas han amainado a lo largo de su historia. Sobre la mejor manera de entender sus fundamentos se han pronunciado muy diversos autores, sin que todavía se haya llegado a un acuerdo general. Desde la concepción estadística propugnada por Alfred Landé hasta la concepción realista del potencial cuántico de David Bohm, pasando por la versión muchos universos de Hugh Everett, o la explicación de Wigner basada en la conciencia del observador (Jammer 1974, Wheeler y Zurek 1986, Jammer 1996).

Quizás por ello muchos físicos suelen adoptar una posición de duplicidad pragmática, suscribiendo una opinión realista a efectos heurísticos (exploración de nuevos modelos, discusión de experimentos, uso de imágenes intuitivas de los micro-objetos individuales), y replegándose hacia una interpretación minimalista basada en conceptos estadísticos (según la cual la teoría cuántica no es más que un manual de instrucciones para operar con datos experimentales) cuando habían de afrontar cualquier cuestionamiento epistemológico (D'Espagnat 2006, p. 225).

Tomando partido por una interpretación realista, la física cuántica sería una teoría completa cuyos enunciados tienen como referentes sistemas individuales (no colectivos estadísticos). Se supone que el papel principal de cualquier interpretación en esta controversia consiste en proporcionar una regla que determine, para cada estado, qué cantidades físicas poseen valores definidos que representan propiedades genuinas –o “elementos de realidad”, como veremos más adelante– del sistema cuántico estudiado.

En este artículo se propondrá un punto de vista interpretativo no muy extendido pero que acaso sea digno de una ulterior profundización a causa de sus prometedoras posibilidades explicativas. Según este punto de vista, ha de atribuirse valor ontológico a las superposiciones cuánticas de auto-estados cuánticos en pie de igualdad, aunque en otro sentido, con los autovalores de tales estados.

2. El significado de la función de onda

Suele tomarse como punto de partida en estas discusiones la afirmación de que la función de onda contiene toda la información susceptible de obtenerse en un sistema cuántico. Esta información se obtiene en la práctica aplican-

do a dicha función de onda una determinada operación matemática (operador cuántico) de tal forma que cada dato de nuestro interés (posición, velocidad, energía, etc.) tiene asociado un operador específico (operador de posición, de velocidad, de energía, etc.). Al aplicar, por ejemplo, el operador de energía –llamado hamiltoniano– resulta un conjunto de valores que representan los estados (discretos o continuos) de energía que un sistema cuántico puede poseer según sus condiciones de contorno (Von Neumann 1932). Por ejemplo, $\hat{H}\psi_n = E_n\psi_n$, donde \hat{H} es el operador hamiltoniano y ψ_n es la función representativa de n -ésimo estado cuántico, al cual se asocia una energía E_n .

Si en cierto caso un átomo puede hallarse en dos estados energéticos diferentes, la función de onda del sistema se expresa como la combinación lineal de las funciones representativas de cada uno de esos dos estados, $\Psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$. Esta combinación lineal, o superposición cuántica, (en la cual los coeficientes son números complejos), nos proporciona mediante otro procedimiento matemático la probabilidad de encontrar el átomo en cada uno de esos estados al efectuar una medida experimental. En concreto la probabilidad de que el sistema se halle en el estado descrito por la función ψ_n viene dada por el cuadrado del coeficiente c_n .

Cuando efectuamos una medida del sistema cuántico, la función de onda cambia repentinamente su valor, puesto que entonces sabemos cuál es el estado en que se halla el sistema, y nuestra descripción física ya no puede contener probabilidades. Así, el coeficiente de la función correspondiente al estado en que el sistema no se encuentra se hace cero, con lo que el otro coeficiente se iguala a 1, pues una probabilidad igual a la unidad equivale a la certeza. Los átomos y partículas se ven imprevisiblemente perturbados por la medición, de modo que un instante después de la medida deberíamos reformular una nueva función de onda general, combinación a su vez de funciones de estado más sencillas, para describir de nuevo el sistema. Se suele afirmar que en el ámbito cuántico una partícula no tiene un valor definido de sus propiedades físicas (energía, velocidad, posición,...) hasta que es medida.

Refiriéndonos en concreto a la posición para fijar ideas, no es que la partícula posea una localización definida –aunque esté fuera de nuestro alcance el conocerla– antes de medirla y que tan sólo la perturbemos con la medición. Es que en realidad no tiene una posición definida antes de medirla y vuelve a no tenerla cuando la medición cesa. Lo que perturba el acto de medir, estrictamente hablando, es la distribución de probabilidades de posición, no la posición en sí misma porque no cabe hablar de posición determinada en un ente cuántico.

La cuestión concerniente al significado físico de una función de estado cuántico Ψ resulta harto controvertida, debido a la gran cantidad de interpretaciones propuestas. Todas ellas, de un modo u otro, podrían resumirse en dos:

- 1) Representa algo real, ya se refiera a un sistema cuántico individual (algún tipo de campo físico, o ciertas propiedades objetivas), sea tan solo un conjunto de *potencialidades* –en sentido aristotélico– que podrían ser actualizadas de acuerdo con las condiciones experimentales, o describa meramente el comportamiento estadístico de un conjunto de sistemas (sin resultar por ello aplicable a la conducta de un sistema cuántico individual).
- 2) No representa nada real; puede considerarse simplemente un instrumento matemático para calcular las probabilidades de obtener ciertos resultados en posibles mediciones efectuadas sobre sistemas microfísicos individuales, o tan solo un símbolo para indicar nuestro estado de conocimiento sobre un sistema microfísico.

La concepción de la física cuántica como una teoría estadística con una base subyacente de tipo determinista, puede abandonarse debido a la ingente cantidad de pruebas acumuladas que descartan una interpretación tal. La renuncia a una interpretación estrictamente física de la teoría –que en cierto modo subyace en la llamada “interpretación ortodoxa de Copenhague”– se reduce a un escueto operacionalismo del cual pocas más conclusiones cabe extraer. La interpretación en términos de potencialidades nos sitúa en una posición delicada, por cuanto recobra los problemas tradicionales sobre el carácter metafísico del tránsito de la potencia al acto, y todo ello en un marco cuántico donde esta clase de dificultades son todavía más espinosas.

De acuerdo con la posición realista adoptada en este trabajo, consideraremos en lo sucesivo que la función de estado en la teoría cuántica representa, en algún sentido al menos, ciertas características objetivas de los micro-objetos, a los cuales nos referiremos en adelante como “cuantones” a fin de usar un término tan neutral como resulte posible (Bunge 1967a).

3. El problema de la medida

Uno de los puntos históricamente más debatidos por físicos y filósofos, es el relativo al carácter de los llamados “procesos de medición” en la teoría cuántica. Por medida entendemos la interacción de un sistema S con un entorno M , de modo que a partir de la correlación entre los estados de ambos, podamos deducir el estado de S observando el de M (que generalmente es macroscópico y por ello susceptible de tratamiento clásico). La interpretación ortodoxa considera que el aparato medidor es un objeto macroscópico que obedece con suficiente precisión (no se aclara sin ambigüedades qué significa “suficiente precisión”) las leyes clásicas, pese a estar sometido también a las relaciones de incompatibilidad de Heisenberg.

Von Neumann trató de enmendar el entuerto incorporando en su formulación axiomática lo que él creyó que era una verdadera teoría de la medi-

ción cuántica, cosa que, obviamente, no hizo en realidad. Y no lo hizo porque no existe una teoría universal de la medida, en tanto que tampoco existen dispositivos universales de medida. Hay aparatos destinados a medir ciertas propiedades en determinadas situaciones, mediante un procedimiento concreto y con algún grado de precisión. Las llamadas teorías cuánticas de la medición son meramente teorías genéricas que no describen medición alguna y por ello tampoco pueden someterse a comprobación empírica (Stapp 1971).

La asignación de un valor numérico que cuantifique una cierta propiedad de un sistema físico, puede expresarse como una función M que se aplica sobre el conjunto de todos los intervalos de los reales positivos $C(\mathbb{R}^+)$. En concreto, $M: S \times S \times T \times G \times X \rightarrow C(\mathbb{R}^+)$. Aquí S es el conjunto de los sistemas físicos a los que cabe atribuir la propiedad estudiada, σ es el conjunto de sistemas de unidades aplicables a la medición, τ es el conjunto de técnicas de medición utilizables, γ es el conjunto de posibles dispositivos experimentales, y ξ la serie de posibles operaciones de medición.

Del esquema previo se desprende que no puede haber formalizaciones universales del proceso de medida ya que al menos τ , γ y ξ son conjuntos cuya diversidad de elementos hace indispensable escoger uno de ellos para especificar el dominio de M y concretar el proceso real de la medida.

Von Neumann pareció aceptar implícitamente la existencia de instrumentos capaces de medir cualquier cosa en cualquier situación, y los representó por medio de un solo concepto simple, el operador de proyección. Pero de hecho no efectuó sino una descripción idealizada de la interacción entre un sistema cuántico y un entorno macroscópico —llámese dispositivo de medida, o como se quiera— que, pese a ser macroscópico, se considera representable mediante una función de onda (Busch et al. 1996).

Casos tan extremos como el ejemplificado en la célebre “paradoja del gato del Schrodinger”, servía a los críticos de la ortodoxia cuántica para subrayar una triple dificultad en la teoría; a saber, (a) la controvertida interpretación física atribuible a la función de onda, (b) la carencia de un criterio definido que marque la transición desde el mundo cuántico al mundo clásico, y (c) la posibilidad de que los sistemas físicos posean propiedades bien definidas en contra de las predicciones de la teoría cuántica, que por tanto sería incompleta en el sentido repetidamente expuesto por Einstein.

4. La paradoja EPR y el realismo científico

Podría pensarse que la teoría cuántica no es completa debido a su incapacidad de predecir en todo instante la posición y la velocidad de una partícula, digamos un electrón. Cabría imaginar que el electrón posee en todo instante una posición y una velocidad determinadas, pero que nuestros instrumentos, incluso teóricamente, son demasiado toscos y burdos para medirlas con su-

ficiente exactitud. Ocurriría entonces que el comportamiento aparentemente impredecible del electrón se debería a factores físicos inadvertidos.

Esta podría ser, en síntesis, la postura de quienes defienden las teorías de “variables ocultas”, por oposición a la interpretación convencional de la mecánica cuántica, la cual nos asegura que la conducta del electrón es intrínsecamente fortuita e impredecible. Sin embargo, multitud de experimentos en una serie iniciada por el científico francés Alain Aspect y sus colaboradores (Aspect et al. 1982), parecen respaldar más allá de toda duda razonable esta última opinión.

Estos experimentos se fundamentaron en la medida de la correlación con la que parejas de fotones viajando en direcciones opuestas atravesaban un filtro de polarización. La idea esencial que inspiraba estas experiencias había sido propuesta por Einstein y algunos de sus colaboradores (Einstein et al. 1935), con el ánimo de plantear una prueba que saldara la polémica cuántica de una vez por todas. En honor a ellos, la concepción básica que configuraba esta clase de pruebas se llamó “paradoja EPR”. Las experiencias se llevaron a la práctica, la teoría cuántica se vio confirmada y la paradoja EPR desmentida, lo que confrontó a los físicos con el problema de la *no-localidad* o *no-separabilidad*. En otras palabras, cómo es posible que una medición efectuada sobre un fotón afecte a otro tan alejado del primero que ninguna señal física pueda conectarlos.

La clave del artículo EPR comienza dando un criterio de completitud para cualquier teoría física. Una teoría se juzgará completa si «todo elemento de la realidad física ha de tener una contrapartida en la teoría física» (Ibid., p. 777). Ahora bien, ¿qué consideraban un “elemento de la realidad” Einstein y sus colegas? Se trata de un punto esencial en el debate, y sobre ello se decía unas líneas después: «Si podemos predecir con certeza (es decir, con probabilidad igual a la unidad) al valor de una cantidad física sin perturbar al sistema en modo alguno, entonces existe un elemento de realidad física correspondiente a esa cantidad física».

Semejante afirmación se presenta como una condición suficiente para atribuir realidad a una magnitud física, no como una definición rigurosa de la realidad física en sí misma. Sin embargo, todas las discusiones posteriores sobre el realismo en la teoría cuántica se han llevado a cabo tomando este enunciado como referencia (y muchas de las controversias previas al artículo EPR se reinterpretaron en esos términos), de modo que aquí también lo mantendremos en nuestras consideraciones ulteriores.

5. ¿Es inevitable el idealismo cuántico?

Analizando los referentes del formalismo propio de la teoría cuántica, no hallaremos el menor rastro de “mentes”, “observadores” o “conciencias”,

más allá de la fraseología empleada por algunos autores. Sustituyendo la palabra “observable” –un legado del positivismo lógico dominante a comienzos del siglo XX– por “magnitud física”, el ámbito de aplicación y el poder predictivo de la teoría cuántica quedan intactos. Así se explica el carácter absolutamente prescindible de toda mención a observadores y observaciones (salvo en una teoría de la medida, independiente del núcleo conceptual de la teoría cuántica). Y no puede ser de otra manera, porque ni las referencias al yo ni a sus aptitudes para colapsar estados pertenecen en realidad a la teoría cuántica. Se trata de interpretaciones *adventicias* de los referentes de la física cuántica así como de sus procesos de medición (Bunge 1982, pp. 69-70; 95-100).

El papel desempeñado por los símbolos matemáticos es idéntico en la física clásica y en la cuántica. En ambos casos se trata de conceptos formales cuyos referentes son las propiedades de los objetos físicos que componen el mundo natural (Bunge 1967*b*), aunque en muchos casos tales propiedades nos resulten asombrosas. Tampoco se justifica la opinión de que la teoría cuántica destierra la causalidad del corazón de la física. Únicamente debemos renunciar al determinismo laplaciano, pero no a la existencia de leyes naturales bien definidas (ecuaciones de evolución, como la de Schroedinger, o teoremas de conservación, como el de la energía), que obviamente también se dan en el mundo cuántico (Fock 1958). Las restricciones impuestas por las desigualdades de Heisenberg se refieren sólo a la descripción clásica de los fenómenos subatómicos; la descripción puramente cuántica no está sometida a tales limitaciones. Por ejemplo, las distribuciones de probabilidad –una propiedad específicamente cuántica– pueden calcularse con precisión siempre creciente en proporción directa al refinamiento de nuestras teorías sobre el micromundo (Omelyanovskij et al. 1972).

Entonces, o bien atribuimos a los cuantones nuevas propiedades totalmente distintas de las clásicas (explicación ontológica), o culpamos de nuestras perplejidades al modo particular que estos micro-objetos tienen de presentarse ante el investigador (explicación gnoseológica). Esta segunda opción es la que más comúnmente se escoge, ya que nos permite retener la gran mayoría de los hábitos intelectuales legados por la física clásica, desplazando el peso de la controversia no hacia el ser peculiar de los cuantones, sino hacia las limitaciones de nuestro conocimiento sobre ellos, generalmente imputadas a la inevitable interferencia del observador durante el acto de observación, por emplear la jerga positivista al uso.

Y es en ese momento cuando, para salvar la noción realista clásica, se recurre a la intervención de un presunto sujeto que ocasione las mencionadas limitaciones gnoseológicas. Pero sucede que para señalar los límites de validez en la aplicación de los conceptos clásicos al mundo cuántico, no se necesita de subjetividad alguna, basta con prescripciones puramente físicas sin más referentes que los de la propia teoría (Bunge 1985, pp. 79-95).

La recurrente mención de los observadores o los actos de observación ha arraigado en la literatura especializada hasta el punto de que su improcedencia pasa completamente desapercibida: «El teorema [de Kocher y Specker] que hemos demostrado prueba que las propiedades de los sistemas microscópicos no están definidas hasta que nosotros las observamos. Los proyectores, las magnitudes, permanecen en estado de indefinición hasta que los observamos, los medimos. (...)» (Cassinello 2007, p. 47). Basta con un somero examen del citado teorema (Cabello et al. 1996) para comprobar que en su formulación rigurosa sólo aparecen nociones como la de proyector, espacio n -dimensional o magnitud física. Por ninguna parte aparecen observadores, actos de medida o algo similar.

Ahora bien, sí es posible –y casi diríase que obligatoria desde una epistemología científica responsable (Bunge 1977)– interpretar la teoría cuántica mediante una perspectiva realista y objetiva que no considere su formalismo como un simple artificio matemático para pronosticar datos experimentales, ni como un imparable generador de mundos alternativos, ni como expediente legitimador de una fantasmagórica intervención de la mente sobre la materia. Las desigualdades de Heisenberg no expresan incertidumbres, y la dualidad onda-corpúsculo no pasa de mera analogía formal, fructífera en sus primeros tiempos, que jamás debe convertirse en un lastre intelectual. La física cuántica, en suma, *no es inherentemente positivista*, contra la opinión todavía hoy manifestada en los escritos de algunos de sus expertos².

La ciencia moderna –si como tal entendemos desde los años de Galileo y Newton– se basa en una ontología naturalista (los objetos de su conocimiento pertenecen al mundo natural) y una gnoseología realista (la ciencia se ocupa de objetos y propiedades realmente existentes en la naturaleza). Cuestión aparte es que nos sintamos tentados a suscribir una forzada interpretación positivista de la teoría cuántica cuando tratamos de insertar, infructuosamente, sus conceptos en la horma inapropiada de la física clásica.

La física clásica, es bien cierto, se ha identificado siempre con las cuatro demandas típicas de la filosofía realista (Rescher 1987, pp. 121-125):

Sustancialidad: Identidad permanente de las cosas físicas.

Físicalidad: Todo objeto existente debe ser susceptible de incorporación al esquema físico de la naturaleza.

Accesibilidad: Los objetos físicos pueden ser conocidos, bien que de modo parcial, inexacto y siempre perfectible.

Independencia existencial: la existencia de las cosas físicas es autónoma con respecto al entorno (observadores inteligentes, otros objetos físicos, etc.).

Rehusar los enunciados (R1) y (R3) supondría en la práctica vedar toda posibilidad de discusión racional sobre la naturaleza, por lo cual no insistiremos

[2] Por ejemplo, esa opinión se encuentra, ligada a una asombrosa condena del realismo como trasfondo filosófico de la ciencia, en *Rev. Esp. Fis.*, 19, 1(2005), 49.

en ellos. Por el contrario, el requisito (R2) se ha confundido, tradicionalmente y sin necesidad de ello, con el de *ubicabilidad*; es decir, que todo objeto posee una localización concreta –“puntual”, diríamos– en el espacio y el tiempo. La teoría cuántica renuncia a la ubicabilidad, es cierto, pero en modo alguno abandona también la fisicalidad. Simplemente ocurre que el esquema cuántico del mundo es radicalmente diverso del clásico, aunque no por ello es menos real.

Finalmente, (R4) es el que mayor controversia ha generado, en tanto que los resultados de los experimentos sobre correlaciones EPR se han interpretado, erróneamente, como una negación del mismo. Los observadores someten a prueba las distribuciones probabilísticas pronosticadas por la teoría cuántica con independencia de los observadores; sus experimentos las confirman en todo caso, pero no las crean.

6. Realismo clásico y realismo cuántico

En el corazón de la mayoría de las controversias sobre el realismo y el idealismo en la interpretación de los bien confirmados fenómenos cuánticos, parece hallarse un supuesto implícito al que pocas veces se presta la atención debida. Recordemos que según el criterio EPR existe un elemento de realidad correspondiente a una cierta variable en una teoría física si se puede predecir con probabilidad igual a la unidad –es decir, certeza absoluta– el valor de dicha variable, a la cual suponemos representativa de alguna propiedad física. En otras palabras, una propiedad física se considera “real” si posee un valor concreto expresado formalmente mediante un número real. Ya que la violación experimental del teorema de Bell indica que semejante opinión es insostenible, mediante un silogismo implícito no pocos autores han inferido de ello que la física cuántica refuta el realismo como trasfondo filosófico fundamental de la ciencia física.

Sin duda quienes así piensan tienen razón si reducimos el significado de “realismo” a lo que en verdad deberíamos denominar “realismo clásico”, a saber, la suposición de que las propiedades de los sistemas físicos sólo pueden quedar matemáticamente definidas mediante números reales concretos, negando toda legitimidad a cualquier otra opción. «... Si los proyectores, las magnitudes, no pueden estar completamente definidos, habrá que aceptar una imagen de la realidad microscópica en la que las cosas están en situación de indefinición, de cierta ambigüedad. (...) No puede mantenerse la imagen de un mundo completamente determinado. No podemos pensar que la realidad existe ahí afuera sin que la observemos (Cassinello 2007, p. 47)». Nótese el descarnado salto lógico que se da en la cita precedente, pues de la indefinición de las magnitudes cuánticas se pretende deducir la imposibilidad de una realidad extramental no observada.

Teniendo en cuenta que el realismo clásico suele abarcar otras premisas, como el requisito de localidad (refutada por las correlaciones EPR), sería más adecuado buscar un nombre específico para este aspecto concreto relacionado con la expresión cuantitativa de las propiedades físicas. La clave de la distinción reside en la naturaleza del objeto matemático –números reales– que se hace corresponder necesariamente con cada propiedad física. Esquemáticamente expresado, en el realismo pitagórico se afirma que a cada propiedad p de un objeto físico cualquier a O , corresponde un número real x al que llamamos valor de dicha propiedad, de lo cual deducimos que p sólo tiene existencia objetiva si existe un x con el cual hacerla corresponder. Ello significa asimismo que existe una función capaz de asignar a cada p su x asociado; es decir, $\{p \mapsto x \mid p \in O \text{ y } x \in \mathbb{R}\}$.

Por tanto, con los argumentos previos se nos invita a aceptar subrepticamente una cadena de implicaciones muy determinada: ¡Realismo \Rightarrow Realismo clásico \Rightarrow Asignación de valores concretos (números reales) a las propiedades físicas y. Y ya que las magnitudes cuánticas carecen, en general, de estos valores concretos, se nos exige la renuncia a cualquier forma de realismo.

Sin embargo, hay una alternativa muy clara que surge con naturalidad de la propia teoría cuántica, según la cual bastaría con admitir que las magnitudes físicas sólo pueden asumir distribuciones de valores, continuas o discretas, en lugar de valores únicos y aritméticamente aquilatados (*sharp values*). En este caso no tendríamos una función f sino cualquier otra regla de asignación φ (función, funcional, distribución de Schwarz, función generalizada, etc.) que asociase p con un subconjunto de los números reales S , que bien podría ser un intervalo continuo (cuando las magnitudes cuánticas poseen un espectro continuo de valores permitidos) o un conjunto discreto (si el rango permitido recorre valores discontinuos). Es decir, ahora $\{p \mapsto S \mid p \in O \text{ y } S \subseteq \mathbb{R}\}$.

Es de crucial importancia destacar que con esta decisión estamos otorgando un valor ontológico, no meramente gnoseológico, a los espectros –continuos o discretos– de valores de las magnitudes cuánticas. Una elección tal merece su propia denominación, que cabría llamar “realismo cuántico”, dado que ahora operamos primariamente con conjuntos de valores que pueden ser tanto continuos como discretos.

Por primera vez en la historia de la ciencia, nos topamos con una teoría cuya cuantificación de la naturaleza no se realiza primariamente a través de números individuales. Es decir, si hasta ahora la evolución temporal de cada magnitud clásica se realizaba mediante funciones (a cada instante del tiempo le asignan un valor numérico de la magnitud física en cuestión), en el mundo cuántico a cada instante del tiempo le corresponde toda una función de la cual podemos obtener ulteriormente una distribución de probabilidad. Por eso la teoría cuántica *si es realmente extraña* comparada con la física clásica, porque sus referentes básicos son entidades sin parangón en el mundo macroscópico clásico.

Estas puntualizaciones sirven como defensa del realismo no clásico frente a los intentos de asentar una postura positivista radical en el regazo de la física cuántica (Gleason 1957, Jauch y Piron 1963). Uno de ellos se apoya en el teorema desarrollado en 1967 por Simon Kocher y Ernst Specker, cuya interpretación usual entre los físicos positivistas consiste en afirmar que los resultados de las magnitudes físicas observables en un sistema físico no existen antes de ser medidos (Kocher y Specker 1967). El corazón de la controversia radica, una vez más, en lo que entendamos por “existir antes de ser medido”. Si concebimos únicamente datos clásicos —expresados como números reales— la respuesta es negativa. Pero si atribuimos a las propiedades cuánticas un carácter matemático funcional —no hay valores individuales antes de la medición, sino distribuciones funcionales de esos valores— entonces las magnitudes físicas existen objetivamente en todo momento aunque no siempre como números reales.

Tomemos el caso típicamente idealizado de un cuantón en una caja unidimensional, que pese a su carácter puramente ilustrativo servirá bien a los propósitos de esta discusión. Sea $\psi(x)$ la función de estado de ese cuantón, con las consabidas condiciones de contorno, de cuyo cuadrado obtenemos la densidad de probabilidad de localización $|\psi(x)|^2$. Un positivista diría que el cuantón no posee un valor concreto de la propiedad “posición” hasta que es medido, y a consecuencia de ello infiere que dicha propiedad no es real. Ahora bien, si aceptamos el realismo cuántico debería replicarse que, en efecto, el cuantón carece de una localización concreta —que sería una exigencia típica del realismo clásico— pero aun así a la propiedad “posición” corresponde todo el conjunto continuo de valores matemáticamente representado por $|\psi(x)|^2$. Con ello la teoría cuántica no está diciendo que los objetos cuánticos no poseen localizaciones, formas o energías en el mismo sentido que los entes clásicos.

¿Qué sucede cuando tenemos un sistema cuántico individual en una superposición de dos estados? Escojamos por simplicidad el caso de un cuantón en una combinación lineal de dos estados energéticos discretos, $\psi_E = c_1 f_1 + c_2 f_2$. Tradicionalmente se afirmaría que los cuadrados de los coeficientes de esta combinación, $(c_1)^2$ y $(c_2)^2$, representan tan solo la probabilidad de encontrar el sistema en uno de esos dos estados al efectuar una medición, sin otro significado físico más que el meramente instrumental. Sin embargo, desde la perspectiva del realismo cuántico aquí defendida es la propia superposición la que posee valor ontológico.

7. Repercusiones ontológicas

De acuerdo con los usos habituales, sólo cuando el sistema cuántico se halla en un auto-estado de una cierta magnitud se dice que dicha magnitud guarda correspondencia con un elemento de realidad en el sentido EPR. Esta tesis pone de relieve que el requisito EPR de realidad se satisface de modo na-

tural en la teoría cuántica estipulando que una propiedad física es real si el sistema se encuentra en un auto-estado de dicha propiedad. Si, por ejemplo, una magnitud cuántica A representada por el operador \hat{A} tiene un único auto-valor a , es decir $\hat{A}\psi = a\psi$, entonces cuando el sistema se halla en un auto-estado de A una medida proporcionará el valor a con certeza. En general, y según la interpretación usual, una magnitud física poseerá un valor definido si el sistema se encuentra en uno de sus auto-estados. Sin embargo, siempre habrá otras magnitudes que no tendrán valores definidos de este modo; es la estructura lineal del espacio de Hilbert la responsable de la superposición de valores y de la falta de concreción en las propiedades correspondientes³.

Al considerar la cuestión de qué podría constituir una condición necesaria para que una propiedad fuese juzgada real, no estaría de más detenerse a reflexionar someramente sobre el significado de términos como “real” o “actual” (“en acto”). Una cosa (en latín *res*) posee la facultad de hacerse notar ejerciendo algún tipo de influencia a su alrededor; esto es, actúa de alguna manera sobre su entorno. Por tanto, el carácter real –o “actual”– de una propiedad perteneciente a un objeto, implica la capacidad de influenciar otros objetos (en especial, los aparatos de medida) de una forma típica de esa propiedad. Esta condición necesaria y suficiente para la realidad de los objetos físicos y sus propiedades aquí sugerida, concuerda con ciertos requerimientos de la experiencia objetiva, de espíritu kantiano, basados en las categorías de sustancia, causalidad e interacción (Mittelstaedt 1975, 1994).

En nuestro caso, las propiedades de interés son las magnitudes físicas de un sistema cuántico. En ausencia de una cierta propiedad, la acción del sistema sobre el entorno –su conducta, en suma– será distinta de la que exhibiría con esa propiedad presente. Aplicado al contexto de las mediciones, en el cual la interacción se da entre el sistema y una parte de su entorno (el dispositivo de medida), esto significa que una propiedad se considerará real cuando la medida proporcione el valor de la medida sin ambigüedad. Esta prescripción ha recibido el nombre de condición de calibración (Busch et al. 1996), se adopta como criterio definitivo en el reconocimiento de que un proceso determinado ha sido de hecho la medida de una cierta magnitud cuántica. Su incorporación en la física cuántica se hace posible si el carácter real de una propiedad se identifica con el hecho de que el sistema se halle en el auto-estado asociado (Bunge 1967b).

Los teoremas de irresolubilidad iniciados por Wigner (Busch y Shimony 1996, Busch 1998), recogieron algunas interesantes implicaciones de esta cuestión. Estos teoremas presuponen una dinámica lineal y unitaria para los estados cuánticos, el criterio de realidad suministrado por el vínculo auto-estado-autovalor, y la regla de que todo proceso físico de medida ha de finalizar

[3] Cada estado puro es una combinación lineal no trivial de autovectores de magnitudes cuánticas con las cuales el operador de densidad asociado (la proyección unidimensional) no conmuta. Por ello los valores de esas magnitudes quedan indefinidos.

con un resultado concreto. Y según los teoremas de irresolubilidad, estos tres requisitos tomados conjuntamente desembocan en contradicciones. Una razón más, tal vez, para modificar el criterio de realidad en la dirección señalada por el realismo cuántico.

En síntesis, las ideas que actualmente configuran la teoría cuántica de la medida sugieren la adopción del vínculo auto-valor/auto-estado como el criterio básico de realidad en la física cuántica. Pero se trata precisamente de un criterio legado por el realismo clásico que en modo alguno resulta obligatorio admitir. Aceptando desde una posición realista no clásica que los estados de superposición expresan una ontología propia, es decir, poseen su propio estatus de realidad, se extinguirían los oídos al debate sobre el realismo en los objetos cuánticos aparecería.

Esta alternativa ontológica debe distinguirse con claridad de las versiones remozadas de la dicotomía aristotélica entre “potencia” y “acto”. El término “potencialidad” fue recuperado por Heisenberg (1958, p. 53) para expresar la tendencia de los fenómenos cuánticos a actualizarse durante las medidas. Una idea similar fue defendida por Popper (1957) con la palabra “propensividad”, refiriéndose a las probabilidades cuánticas como tendencias inmanentes de los micro-objetos. Desde el realismo cuántico no hay tendencias ni potencialidades, puesto que las superposiciones lineales de los auto-estados gozan por sí mismas de una consideración ontológica de realidad con pleno derecho, y no remiten aun devenir que convierte las potencias en actos, ni a propensiones inherentes a la intimidad incognoscible de los cuantones.

Según la interpretación propensiva, las probabilidades miden la intensidad de la tendencia de que algo suceda; es decir, se trata tan solo de potencialidad cuantificada que se considera una propiedad objetiva de los sistemas físicos. La interpretación defendida en este artículo, por el contrario, sostiene que las distribuciones de autovalores (aunque mediante la regla de Born puedan proporcionar probabilidades sobre resultados de medidas) poseen un valor ontológico en sí mismas, no como una mera herramienta matemática para el cálculo de las propiedades interpretadas propensivamente. Una interpretación así, sin duda, exige modificar nuestra idea de la correspondencia entre los tipos de números y las realidades físicas que pretenden describir. Como se ha expuesto más arriba, ya no podemos admitir que a cada propiedad física quepa asignar un número real (con su intervalo de error, dependiendo del método de medida). Más bien son las colecciones de autovalores, discretas o continuas, las que describen correctamente las propiedades físicas del micro-mundo real, tal como nos lo presenta la teoría cuántica.

En todo caso, del realismo cuántico también se desprende la capacidad de encajar en su marco interpretativo el indeterminismo de los resultados de las medidas realizadas sobre magnitudes cuánticas. Si una propiedad carece de un valor concreto –en el sentido antes expuesto– todo lo que una medida

puede hacer es inducir el acaecimiento aleatorio de uno de los posibles resultados. Es decir, el resultado individual de la medida no viene impuesto por causa identificable alguna, si bien dicho resultado individual sí obedece una causalidad de tipo estocástico (la regla de Born). Esta idea descansa sobre la premisa de que las medidas y la obtención de sus correspondientes resultados son procesos físicos correctamente descritos y explicados por la propia teoría cuántica, lo cual sigue siendo tema de debate en el momento presente (Mittelsaedt 1998).

8. Cuestiones pendientes

La interpretación expuesta en los epígrafes anteriores deja sin respuesta algunos de los interrogantes esenciales de la teoría cuántica, tres de los cuales –posiblemente los más relevantes– la acompañaron desde sus inicios. El primero de ellos concierne a la naturaleza física de la función de onda, o más objetivamente, función de estado cuántico. Sigue pendiente de esclarecimiento el estatuto ontológico de las propiedades formales de dichas funciones, en buena parte a debido a que las funciones Ψ se consideran pertenecientes a un espacio funcional abstracto (espacio de Hilbert) con el cual nuestro espacio-tiempo físico guarda una relación muy lejana y controvertida. Por ello queda todavía en la penumbra dilucidar cuál es el referente físico de las funciones de estado típicas de la teoría cuántica.

Tampoco se aclara la genuina transición desde el ámbito cuántico al clásico, cuestión ejemplificada por la archiconocida paradoja del gato de Schrodinger. No sabemos cómo se produce el así llamado “colapso” de la función de onda, por la cual una superposición lineal de diversos estados se reduce a uno solo, aquél que de hecho obtenemos en la medida. La apelación continua al acto de medición como juez inapelable en la disputa, es la que ha sugerido interpretaciones subjetivistas de este proceso.

Por último, otra de las dificultades deja irresuelta la adopción de un realismo no clásico como base interpretativa de la física cuántica, involucra la conciliación entre las características propias de los fenómenos cuánticos y los requerimientos derivados de la relatividad especial. Pese a las repetidas afirmaciones de que la teoría cuántica de campos resuelve esta cuestión, lo cierto es que no se llega a trazar una imagen plenamente espacio-temporal de los sistemas físicos en ella tratados (Bohm y Hiley 1993). Sin duda es verdad que diversos teoremas prohíben la transmisión de señales a velocidades hiperlumínicas mediante las correlaciones EPR, pero tampoco cabe dudar que no se ha logrado obtener una genuina descripción covariante del colapso de la función de estado en términos del espacio-tiempo de Minkowski. De hecho, observadores en movimiento mutuamente inercial que participen en un experimento de tipo EPR, aunque no puedan comunicarse a velocidades mayores que c , ob-

tendrán de sus respectivas medidas (y consiguientes colapsos de la función de estado) imágenes del mundo físico difícilmente compatibles entre sí.

La solución a este problema suele esperarse de una futura gravitación cuántica, fundada sobre algún tipo de estructura granular para el espacio-tiempo, de modo que el espacio tiempo clásico y los objetos clásicos emergerían como configuraciones a gran escala. Mediante las álgebras C^* , por ejemplo, las coordenadas espacio-temporales aspiran a convertirse en variables cuántica, dando lugar con ello al concepto de espacio-tiempo cuántico (Doplicher et al. 1995, Bahns et al. 2003). En tanto las coordenadas espacio-temporales devengan no conmutativas, el marco natural para las medidas espacio-temporales podría ser el perfilado por el realismo cuántico.

9. Consideraciones finales

Las interpretaciones idealistas y subjetivistas de la teoría cuántica en cualquiera de sus versiones, suelen apoyarse en un supuesto implícito relacionado con la asignación de valores numéricos unívocos a las propiedades físicas que se juzgan inherentes a cada sistema físico (realismo clásico). Este problema puede soslayarse sin más que aceptar el valor ontológico de los espectros, discretos o continuos, de valores propios de las magnitudes cuánticas (realismo cuántico). De ese modo no resultará obligado considerar irreal una propiedad física por el hecho de que carezca de un valor concreto estipulado mediante un número real. Aun así, permanecen sin resolver los debates relacionados con el significado físico de la función de estado, la reducción o “colapso” de dicha función, así como la incoherencia entre la descripción espacio-temporal de los fenómenos físicos, típica de la relatividad especial, y la descripción estocástica no espacio-temporal, propia de la física cuántica.

Por tanto, es perfectamente posible una interpretación realista y no local de la física cuántica, considerada a su vez como una teoría completa –en el sentido de suponer la inexistencia de variables ocultas subyacentes– si bien no definitiva, pues no permanecerá como la teoría final de los procesos microfísicos, aunque sólo sea porque habrá de modificarse para clarificar el colapso de la función de estado e incorporar la gravitación.

Parece excesivamente presuntuoso pretender que la teoría cuántica en solitario –con su cortejo de problemas interpretativos– es el marco fundamental y último para la explicación de la realidad física. Sin duda, fenómenos tan asombrosos como las correlaciones EPR y otros del mismo jaez, nos obligarán antes o después a modificar nuestra concepción de la naturaleza mucho más radicalmente que la propia revolución cuántica.

Referencias bibliográficas:

- Albert D., Loewer B., “Wanted dead or alive: two attempts to solve Schrödinger’s paradox”, *Proceedings of the Philosophy of Science Association*, vol. 1 (1990), pp. 277-285.
- Aspect A., Dalibard J., Roger G. (1982), “Experimental tests of Bell’s inequalities using time-varying analyzers”, *Physical Review Letters*, vol. 49, pp. 1084-1087.
- Bahns D., Doplicher S., Fredenhagen K., Piacitelli G. (2003), *Commun. Math. Phys.*, vol. 237, pp. 221.
- Bell J.S. (1990), *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, Alianza Universidad, Madrid.
- Birkhoff G., Von Neumann J., “The Logic of Quantum Mechanics”, *Annals of Mathematics*, vol. 37 (1936), pp. 823-843.
- Bohm O., Hiley B. J. (1993), *The Undivided Universe. An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, Routledge, London.
- Bunge M. (1967a), *Foundations of Physics*, Spinger-Verlag, New York.
- Bunge M. (1967b), *Quantum theory and reality*, Spinger-Verlag, New York.
- Bunge, M., *Canadian Journal of Physics*, 48 (1970), 1410.
- Bunge M., ed. (1971), *Problems in the foundations of physics*, Spinger-Verlag, New York.
- Bunge M. (1977), *The Furniture of the World*, Reidel, Dordrecht-Boston.
- Bunge M. (1982), *Filosofía de la Física*, Ariel, Barcelona.
- Bunge M. (1985), *Epistemología*, Ariel, Barcelona.
- Busch P. (1998), *Int. J. Theor. Phys.*, vol. 37, pp. 241.
- Busch P., Lahti P., Mittelstaedt P. (1996), *The Quantum Theory of Measurement* (2nd. ed.), Spinger, Berlin.
- Busch P., Shimony A. (1996), *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, vol. 27, pp. 397.
- Cabello A., Estebaranz J., Garcia G. (1996), “Bell-Kochen-Specker theorem: A proof with 18 vectors”, *Phys. Lett. A*, vol. 212, pp. 183-187
- Cassinello A. (2007), “La indeterminación en mecánica cuántica”, *Revista de la Real Sociedad Española de Física*, vol. , pp. 42-53.
- D’Espagnat, B. (2006), *On Physics and Philosophy*, Princeton University Press, Princeton.
- Dickson M., “Wavefunction tails in the modal interpretation”, *Proceedings of the Philosophy of Science Association*, vol. 1 (1994), pp. 366-376.
- Doplicher S., Fredenhagen K., Roberts J.E. (1995), *Commun. Math. Phys.*, vol. 172, pp. 187.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N. (1935), “Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?”, *Physical Review*, vol. 47, pp. 777-780.

- Elby A., “Why «modal» interpretations of quantum mechanics don’t solve the measurement problem”, *Foundations of Physics Letters*, vol. 6 (1993), pp. 5-19.
- Fock V. A., “Notes on Bohr’s Article Concerning His Discussions With Einstein”, *Usp. Fiz. Nauk*, vol. 66 (1958), pp. 599-607.
- Gleason A.M. (1957), “Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, vol. 6, pp. 885-893.
- Gottfried K., “Does Quantum Mechanics Carry the Seeds of its own Destruction?”, en Amati D., Ellis J. (eds.), *Quantum Reflections*, Cambridge University Press, Cambridge (2000), pp. 165-185.
- Halvorson H., Clifton R., “No Place for Particles in Relativistic Quantum Theory?”, *Philosophy of Science*, vol. 69 (2002), pp. 1-28.
- Heisenberg W. (1958), *Physics and Philosophy*, Harper & Row, New York.
- Hiley B. J., “Foundations of Quantum Mechanics”, *Contemporary Physics*, vol. 18 (1977), pp. 411-414.
- Jammer, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics. An Historical Perspective*, John Wiley & Sons, New York.
- Jammer, M. (1996), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- Jauch M., Piron C. (1963), “Can Hidden variables be Excluded in Quantum Mechanics?”, *Helvetica Physica Acta*, vol. 36, pp. 827-837.
- Kochen S., Specker E. (1967), “The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, vol. 17, pp. 59-87.
- Mackey G., *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Benjamin, New York, (1963).
- Mittelstaedt P. (1975), *Philosophical Problems of Modern Physics*, Reidel, Dordrecht.
- Mittelstaedt P. (1994), “The Constitution of Objects in Kant’s Philosophy and in Modern Physics”, en P. Parrini (ed.), *Kant and Contemporary Epistemology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 115.
- Mittelstaedt, P. (1998), *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Omelyanovskij M.E., Tagliagambe S., Geymonat L., *L’interpretazione Materialistica della Mecánica Quantistica*, Feltrineli, Milán, (1972).
- Popper K., “The Propensity Interpretation of Probability”, *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 10 (1959), pp. 25–42.
- Rescher N. (1987), *Scientific Realism. A Critical Reappraisal*, Reidel, Dordrecht.
- Schroedinger E. (1935), “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Naturwissenschaften*, vol. 23, pp. 807-812; 823-838; 844-849.
- Stapp H.P. (1971), “S-Matrix Interpretation of Quantum Theory”, *Physical Review D*, vol. 3, pp. 1303-1320.

Von Neumann J. (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer-Verlag, Berlin.

Wheeler J.A., Zurek W.H., eds. (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton.