

# Complementariedad y Contextualidad en la Interpretación de la Mecánica Cuántica

Andrea Costa\*

## Introducción

Desde que Bohr formuló, en 1927 en Como, el concepto de complementariedad (*cf.* Jammer, 1974), este concepto representó la noción que recogía en sí lo esencial, paradójico y nodal de la mecánica cuántica. Los diferentes debates acerca de las interpretaciones instrumentalistas y realistas de la teoría, precisamente la discusión acerca de si la teoría era o no completa o si admitía una ampliación sobre la base de variables ocultas, hicieron eje en este concepto. Sin embargo, a pesar de ser una referencia obligada para la fundamentación de la mecánica cuántica, el concepto de complementariedad ha resistido una formulación sistemática en el marco de la física teórica.

El objetivo del trabajo consiste en distinguir dos acepciones del concepto de complementariedad estrechamente relacionadas entre sí, para luego considerar diferentes intentos de brindar una respuesta filosóficamente adecuada a los interrogantes planteados por la complementariedad. Por último, se presentará un programa preliminar de investigación, basado en el intento de resolver los problemas acarreados por la complementariedad mediante la postulación de una ontología de propiedades que disuelve el objeto cuántico como entidad sustancial.

## El concepto de complementariedad

Se pueden reconocer dos acepciones generales del concepto de complementariedad: una caracterización de tipo filosófico y otra más técnica a la que llamaremos *contextualidad*. Si bien esta última tiene implicancias filosóficas, en su enunciación se pretende despojarla de dicha vinculación puesto que, si bien reduce el problema que plantea la noción general, se intenta que resulte operativa para el trabajo disciplinar.

Al referirnos a los sistemas cuánticos, utilizamos necesariamente para describirlos conceptos de la física clásica. Para el movimiento de una partícula, como un electrón por ejemplo, pretendemos conocer su posición y su impulso. Pero si bien una descripción acorde con la física clásica requeriría de tal conocimiento, es, sin embargo, imposible conocer ambas cantidades simultáneamente. Esto último es lo que se entiende por complementariedad de los conceptos cuánticos. De la afirmación de que la posición y el impulso son propiedades complementarias se infiere la imposibilidad de describir en el espacio de las fases la evolución temporal de una partícula.

Bohr, en su formulación, ha insistido en la significación filosófica del concepto de complementariedad al entender que la representación espacio-temporal y el principio de causalidad son mutuamente complementarios. Dar cuenta de un evento de la naturaleza significa

\* Universidad de Buenos Aires. CONICET

ser capaz de experimentarlo directamente o de conectarlo con una experiencia directa de una manera no ambigua, lo cual, a su vez, implica espacio-temporalidad. Pero para Bohr, el conocimiento no ambiguo de una experiencia indirecta implica la existencia de una cadena causal de hechos interconectados; por lo tanto, la descripción espacio-temporal y la causalidad deben ir juntas. Sin referirse explícitamente a Kant, Bohr observa que sólo podemos comunicar las experiencias de la física en términos de una descripción en el espacio-tiempo que se corresponde con la de la física clásica; pero las relaciones causales entre los hechos cuánticos son provistas por la ecuación de Schrödinger. La complementariedad de estas dos descripciones indica que, o bien se localiza un electrón en un instante dado y se pierde toda localización posterior de modo que no se puede dar cuenta de su trayectoria, o bien se tiene una descripción causal pero que se reduce a la evolución del estado cuántico dada por la ecuación de Schrödinger en el espacio de Hilbert. La complementariedad entre la representación espacio-temporal y el principio de causalidad es equivalente a las representaciones alternativas y complementarias de la naturaleza por medio de conceptos clásicos o por medio de la ecuación de Schrödinger. Pero Bohr intenta avanzar aún más allá: en la base del concepto de complementariedad filosófica está el hecho de la imposibilidad de disociar sujeto de objeto, lo cual condiciona todo pensar objetivador aún desde una perspectiva kantiana. Es por este motivo que una definición operativamente precisa sólo se logra para el concepto de contextualidad o para el principio de Heisenberg que es una de sus formas.

### **El concepto de contextualidad**

La formulación habitual de la mecánica cuántica establece una correspondencia entre las propiedades predicables acerca del sistema que se estudia y ciertos objetos matemáticos llamados "observables" que se estructuran de forma definida. Por ello, el conjunto de las propiedades debe ser una adecuada abstracción de esa estructura, que admite por su parte, aunque con reparos, una interpretación lógica, más débil que la lógica booleana y que la contiene como caso particular. Pero, la dificultad que se presenta es la imposibilidad de valuación simultánea de todas las proposiciones, quedando reducida a diferentes subconjuntos booleanos. En efecto, Kochen y Specker (1967) demostraron que el formalismo de la mecánica cuántica impide asignar, de un modo consistente, un valor preciso a cada uno de los observables de un sistema que se encuentra en un cierto estado cuántico. En otras palabras, no es posible construir un espacio de las fases clásico que defina las propiedades de todos los componentes del sistema. Este resultado frustra todo intento de interpretar la probabilidad cuántica como medida de la ignorancia acerca de un microestado clásico subyacente en el que se encontraría el sistema; es en este sentido que muchos autores califican las probabilidades cuánticas como *irreducibles*.

El estado del sistema no puede ser determinable por todas sus propiedades sino sólo por alguno de los subconjuntos de propiedades mutuamente compatibles. Restringida a cada contexto booleano, la asignación de propiedades comparte las condiciones de objetividad clásica por lo que es posible considerarlas también objetivas (*cfr.* Grangier, 2001). Un electrón tendrá propiedades de partícula o de onda dependiendo del contexto en el cual es medido. Sin embargo, se podría afirmar que los objetos clásicos también muestran ciertas propiedades (y otras no) de acuerdo con el arreglo experimental al que son sometidos. Pero,

como se dijo, la diferencia esencial que los distingue de los objetos cuánticos es que, en el caso de estos últimos, no es posible predicar simultáneamente todas sus propiedades. Más bien, estas propiedades se estructuran en distintos subconjuntos del universal, de modo tal que sólo las pertenecientes a un mismo subconjunto (al que llamamos contexto) son determinables a la vez. Podemos entonces afirmar que los objetos cuánticos poseen propiedades contextuales, mientras que los objetos clásicos no, o bien que las poseen trivialmente.

En definitiva, el problema central de la interpretación de la mecánica cuántica consiste en establecer la naturaleza ontológica del objeto cuántico en tanto entidad que invalida el principio ontológico de *determinación omnimoda*, según el cual todas las propiedades de un objeto se encuentran objetivamente determinadas.

### Lógica y principio de complementariedad

Los trabajos de Birkhoff y von Neumann (1936) fueron los primeros que plantearon el problema desde la concepción de una nueva lógica, proponiendo la reconstrucción axiomática de la teoría entendida como el cálculo proposicional de los subespacios del espacio de Hilbert. Si bien la intención de los autores fue formular un cambio de lógica que fuera el único cambio independiente que debía realizarse —de modo que todo otro cambio pudiera entenderse como una consecuencia de éste—, es evidente que esta propuesta no resuelve el problema ontológico y epistemológico acerca del objeto de la mecánica cuántica.

Von Neumann y Birkhoff demostraron que la estructura del espacio de Hilbert es equivalente a la estructura de la geometría proyectiva, la cual puede ser descrita en términos de espacios y subespacios vectoriales. Así, las constantes lógicas deben definirse de modo tal que pierda validez, o bien el principio de tercero excluido, o bien la propiedad distributiva para la disyunción. Posteriormente, otros autores propusieron intentos de reconstrucción lógica basados en lógicas polivalentes. Todas estos programas se caracterizan, sin embargo, por eludir la pregunta básica en el plano ontológico, esto es, la pregunta acerca de la naturaleza del objeto cuántico. En estos primeros enfoques lógicos, las importantes diferencias entre la mecánica clásica y la cuántica son expresadas a partir de las diferencias algebraicas en las lógicas correspondientes, y ello llevó a reformular la teoría cuántica en términos de una lógica de preguntas experimentales. De este modo los objetos de la cuántica fueron descritos por la lógica en términos de propiedades observacionales clásicas o de resultados de experimentos sin establecer, en principio, supuestos de tipo ontológico.

Actualmente pueden reconocerse tres líneas de interpretación diferentes acerca del status de la lógica cuántica: la neoclásica, la ontologicista y la logicista. La versión *neoclásica* supone que la lógica cuántica es más una curiosidad matemática que algo de importancia significativa en el conocimiento del mundo físico. El carácter no booleano de la lógica resulta, para esta versión, una consecuencia de las limitaciones que el ser humano posee para hacer preguntas experimentales. La corriente *ontologicista* pretende que la lógica cuántica dice algo significativo respecto de la estructura del mundo físico, pero que el término "lógica" es inapropiado dado que no debería ser interpretada como una teoría deductiva (cfr. Hughes, 1989, van Fraassen, 1991). El *logicismo* cuántico — que se puede entender como un monismo lógico — afirma, en cambio, que la lógica cuántica es de hecho la forma deductiva correcta para todo razonamiento (Putnam, 1981).

Históricamente, Weizsacker (1954) fue el primero en ir más allá de una lectura instrumentalista de la lógica –buscando implicancias ontológicas–, al proponer que ella representa la formulación de ciertas propiedades del objeto de la cuántica, es decir de “objetivas” relaciones ontológicas, entendiendo la lógica en términos de la complementariedad. Su argumento fue que, si bien la lógica clásica proporciona el léxico con el que podemos interpretar el nivel observacional de la mecánica cuántica, tal léxico no permite interpretar su nivel teórico. En principio, no habría dificultad en aceptar que la estructura lógica del lenguaje objeto (el de la mecánica cuántica) y el del metalenguaje puedan ser diferentes. Sin embargo, el problema consiste en entender la fusión posterior del metalenguaje con el lenguaje objeto, puesto que la física clásica es un caso límite de la cuántica. Sobre esta base, Weizsacker supuso que, dado que esta fusión debe ser posible, ello impondría al lenguaje objeto ciertas condiciones limitativas. Y esto, según el autor, puede también entenderse como el replanteo de la complementariedad en términos filosóficos. Sólo con un lenguaje objetivador se puede comunicar unívocamente algo acontecido fácticamente; pero tal lenguaje presupone la lógica clásica.

### **Identidad e individualidad en mecánica cuántica**

Pero, ¿cuáles son las implicaciones metafísicas de la mecánica cuántica? ¿En qué sentido las partículas de la física, como el electrón, el protón, o el neutrón, son partículas? El principio de individuación presupone que los objetos pueden ser reconocidos como individuados debido a que los diferenciamos por las propiedades que poseen. El principio leibniziano de identidad de los indiscernibles afirma que si dos individuos poseen exactamente las mismas propiedades, ambos son el mismo individuo. Pero puesto que las partículas elementales, como los electrones, no son distinguibles entre sí, según este principio no podría afirmarse que son una multiplicidad. Todavía podría salvarse la noción de individuo afirmando que subsiste una distinción entre objetos idénticos dada por la diferente localización espacio-temporal de conjuntos de propiedades. Sin embargo, las partículas idénticas en un mismo estado bosónico o las llamadas “partículas” del experimento EPR no son discernibles espacio-temporalmente aunque, en este último caso, por otro lado, se les asigna individualidad porque se reconocen localizaciones espacio-temporales diferentes luego de la “interacción”.

Sigue entonces en pie la pregunta acerca de en qué sentido hablamos de partículas. Si se sostiene que las ideas de individualidad y distinguibilidad deben ser pensadas como conceptos separados, es decir, si de un objeto debe poder afirmarse que es un individuo independientemente de su distinguibilidad de otro, entonces el principio de individuación debe entenderse en términos de las propiedades intrínsecas de un objeto. Una alternativa, entonces, para formular el principio de individuación bajo tal restricción consistiría en apelar a la noción de sustancia. La idea de un objeto cuántico, en tanto individuo, concebido como sustancia en la que inhiere propiedades localizables espacio-temporalmente, ha sido históricamente defendida a partir de la medición de la carga del electrón con la gota de Millikan o al describir su trayectoria en una cámara de niebla. Sin embargo, el experimento de Young mostró que es imposible describir el mundo microscópico sin sostener, como dos aspectos complementarios, la idea de que el objeto cuántico debe ser considerado a la vez

como partícula y como onda. Nuevamente el concepto de complementariedad de la mecánica cuántica nos dice que no se puede abandonar la idea de partícula ni la de onda, aunque tampoco su oposición puede suprimirse. Esto pone de manifiesto que, dada la validez del principio de complementariedad, la idea de sustancia como un primitivo metafísico fundamental presenta serias dificultades.

Otra perspectiva desde la cual se ha abordado el problema de la noción de partícula cuántica se basa en adoptar una posición puramente “experimentalista”. Puesto que la descripción de la mecánica cuántica se da en términos de “estados”, una interpretación de la noción de partícula consiste en concebirla como instanciación de propiedades observacionales y asociarla a respuestas de tipo sí-no en un experimento. El electrón se comporta como partícula si el arreglo experimental con el que se lo estudia está diseñado para medir propiedades de partículas, o bien se comporta como onda si el arreglo experimental con el que se lo estudia está diseñado para medir propiedades de ondas. Si bien aceptable desde un punto de vista instrumentalista, tal interpretación elude por completo la pregunta ontológica en la medida en que permanece confinada a lo directamente accesible mediante la experimentación.

Dalla Chiara y Toraldo di Francia (1995) se refieren a la mecánica cuántica como el “mundo del anonimato” debido a que las partículas no pueden ser unívocamente discriminadas. Sugieren que ellas pueden ser interpretadas como entidades intensionales donde las intensiones son representadas por conjuntos de propiedades intrínsecas. Sin embargo, la complementariedad impide utilizar la teoría de conjuntos como universo de interpretación, debido al carácter no booleano de la estructura de las proposiciones cuánticas. Para enfrentar esta dificultad, introducen la noción de *cuasi-conjunto* como colección de elementos indistinguibles: la noción de identidad como concepto primitivo es reemplaza por la de *indistinguibilidad*, lo cual formaliza el hecho de que los objetos puedan ser indistinguibles sin convertirse en idénticos. A su vez, estos autores definen otro concepto primitivo, la *cuasi-cardinalidad*, que permite “contar” elementos indistinguibles y establecer una extensionalidad débil. Los cuasi-conjuntos que tienen la misma cantidad de elementos de la misma clase son indistinguibles (pero no idénticos), aunque resulta imposible la ordenación. Por otro lado, la no individualidad de estas partículas podría entenderse en términos de pérdida de autoidentidad – piénsese, por ejemplo, en el experimento EPR. De esta forma, la teoría de cuasi-conjuntos tendría su semántica en las partículas cuánticas.

Si bien ha sido posible elaborar un sofisticado andamiaje formal para desarrollar la teoría de los cuasi-conjuntos, la pregunta ontológica sigue sin obtener una respuesta convincente. ¿Cómo entender estos individuos que no cumplen con el principio de identidad? ¿Qué significa ontológicamente que, en un mismo corte sincrónico de la realidad, una partícula no es idéntica a sí misma? Aquí debe comprenderse que, en los casos en que la teoría de conjuntos suministra la semántica de una teoría científica, la interpretación se considera adecuada porque la propia teoría de conjuntos encuentra sus modelos en los más diversos ámbitos de lo real. Pero si creamos una nueva teoría formal para brindar la semántica de la mecánica cuántica, estamos comprometidos a describir la ontología que opera como modelo de la nueva teoría formal. Es precisamente en este punto que la propuesta de la semántica de cuasi-conjuntos manifiesta su flanco débil: diseñada deliberadamente para dar

cuenta de las peculiaridades del formalismo cuántico, la teoría de cuasi-conjuntos no brinda argumentos metafísicos adicionales que permitan concebir la ontología a la cual refiere y, en ese sentido, deja sin responder la pregunta central acerca de la naturaleza del objeto cuántico.

### **Perspectivas para un programa de investigación**

Si reducimos el concepto de complementariedad al de contextualidad, podría afirmarse que este concepto no es nuevo para la física. La consideración de un objeto cuántico como contextual sólo constituye una generalización del modo en que la física clásica considera sus objetos. En efecto, tanto en mecánica newtoniana como en relatividad especial y general, ciertas propiedades de los objetos son relativas al sistema de referencia elegido. En este sentido, podría interpretarse que las propiedades dependientes del sistema de referencia elegido son propiedades contextuales. De este modo, la contextualización de las propiedades de un objeto sería el modo natural en el que un objeto es descrito, incluso en las teorías "no cuánticas". No obstante, en tales teorías siempre es posible hallar un invariante que no se modifica frente al cambio de sistema de referencia y que cumple el papel de descripción completa del sistema bajo estudio. Si esta generalización del concepto de contextualidad se aplica a la mecánica cuántica, ¿es posible identificar alguna entidad de la teoría que juegue el papel de descripción completa o de invariante, tal como en mecánica clásica pre-relativista y relativista?, ¿es posible hallar un elemento que permita pasar de una descripción contextual a otra?

Además de poseer propiedades contextuales, los objetos cuánticos son tales que una descripción completa de los mismos sólo es posible si incluimos propiedades asociadas al menos a dos contextos diferentes. De tal modo, el conjunto de las propiedades de un sistema cuántico se organiza como un universal necesariamente dividido en dos partes complementarias. Más precisamente, es posible demostrar que la descripción más general del estado de un sistema cuántico viene dada por un operador denominado "*operador densidad*" que se representa mediante una matriz hermitica de traza unitaria. Dicha matriz, denominada "*matriz densidad*", se caracteriza por el hecho de que sus elementos diagonales contienen información acerca de las propiedades asociadas a un contexto, mientras que los elementos fuera de la diagonal poseen información asociada a otros contextos diferentes. Pero, dado el carácter contextual de la mecánica cuántica, sabemos que no es posible adjudicar de un modo consistente todas las propiedades correspondientes a los distintos contextos a un mismo objeto cuántico.

Hemos visto las dificultades a las que se enfrentan los intentos de construir una ontología que dé cuenta de la contextualidad: los objetos cuánticos pierden las características básicas que caracterizan a la categoría ontológica de individuo. Sobre esta base cabe preguntarse si, tal vez, la respuesta al problema ontológico podría hallarse, no ya en una modificación de la lógica de la teoría o de la teoría de conjuntos que juega el papel de su semántica, sino en una *reformulación de la estructura de la ontología que constituye el referente de la mecánica cuántica*.

Es precisamente esta línea de investigación la que hemos iniciado. Si la naturaleza del objeto cuántico, concebido como individuo con propiedades, se escurre cada vez que in-

tenta ser asido, tal vez la mejor estrategia sea dejarlo de lado. El núcleo central del programa de investigación propuesto consiste en prescindir del objeto cuántico como entidad fundamental, para adoptar una *ontología de propiedades* donde los individuos cuánticos se constituyen como haces de propiedades. Podría argumentarse que dar cuenta de propiedades y asignarlas a individuos o describir objetos exclusivamente en términos de propiedades son opciones alternativas cuya elección sólo depende de preferencias metafísicas. Sin duda, éste sería el caso en la medida en que pudiera suponerse que las propiedades inhiere en un sustrato invariante, esto es, que las propiedades convergen en un individuo único para todas las descripciones que brinda la teoría. Pero la peculiaridad de la mecánica cuántica es que las propiedades convergen de manera diferente según sea el contexto considerado, y no existe modo alguno en que la convergencia de propiedades pueda sustraerse a la contextualidad.

Sobre esta base, la *tesis principal* en favor de la cual se argumenta en este trabajo se expresa a través de la siguientes afirmación:

Los elementos básicos de la ontología que constituye la referencia de la mecánica cuántica son propiedades. El objeto cuántico no existe como entidad básica puesto que no es más que una entidad contextual.

Si bien esta concepción metafísica no es novedosa en la historia de la filosofía, no hemos hallado esta línea interpretativa en la numerosa bibliografía consultada. Por este motivo, el desafío consistirá en hallar un sistema ontológico que, debidamente adaptado, permita brindar una interpretación metafísica a la teoría. Hasta el momento, el candidato que más parece ajustarse a este propósito es la teoría de las guisas de Héctor Neri Castañeda (1972), según la cual los individuos se manifiestan a través de diferentes aspectos o *guisas* en tanto haces parciales de propiedades, y los individuos resultan ser haces de guisas, esto es, haces de haces de propiedades. No es difícil conjeturar que la teoría de Neri Castañeda deberá ser ajustada para dar cuenta de la contextualidad cuántica: no todas las guisas correspondientes a un mismo sistema cuántico pueden converger en la constitución de un objeto concebido como individuo. No obstante, este sistema parece brindar elementos para abordar una interpretación de la mecánica cuántica genuinamente ontológica y formalmente adecuada.

A principios del siglo XIX la idea de un éter luminífero que debía servir de sustrato a las ondas electromagnéticas continuaba resistiéndose a una caracterización física y filosóficamente adecuada: Einstein cortó el nudo gordiano postulando la inexistencia del éter. La presente propuesta se inspira en la exitosa estrategia einsteniana: si el objeto cuántico se resiste insistentemente a una caracterización que respete los condicionamientos teóricos y que resulte metafísicamente inteligible, tal vez el mejor camino consista en acostumbrarnos, de una vez por todas, a prescindir de él.

### **Bibliografía**

- Birkhoff, G.; y Von Neumann, J. (1936), "The Logic of Quantum Mechanics", *Annals of Mathematics*, 37, pp. 823-843.
- Bohr, N (1935), "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review*, 48, pp. 696-702.
- Bohr, N (1948), "On the Notions of Causality and Complementarity", *Dialectica*, 2, pp. 312-319.

- Castañeda, H.N. (1972), "Thinking and the Structure of the World", *Critica*, 6, pp. 43-86.
- Dalla Chiara, M.L. y Toraldo di Francia, "Quantum Logics". (2001), *Los Alamos National Laboratory*, arXiv:quant-ph/0101028v2. 1-101
- Einstein, A., Podolsky, B., y Rosen, N. (1935), "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review*, 47, pp. 777-780
- Grangier, P. (2001), "Reconstructing the formalism of Quantum Mechanics in the 'contextual objectivity' point of view", *Los Alamos National Laboratory*, arXiv:quant-ph/0111154v1.
- Hughes, R.I.G. (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Jammer, M. (1974), *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York: John Wiley & Sons.
- Kochen, S.; y Specker, E.P. (1967), "The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics", *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, pp. 59-87.
- Popper, K. (1982), *Teoría Cuántica y el Cisma en Física*, Madrid: Tecnos.
- Putnam, H. (1981), "Quantum Mechanics and the Observer", *Erkenntnis*, 16, pp. 193-219.
- Van Fraassen, B.C. (1991), *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, Oxford: Clarendon Press.