

Elementos de mereología cuántica¹

Elements of Quantum Mereology

Martín Narvaja²

RESUMEN

En este artículo se argumenta que la aproximación mereológica a los fenómenos cuánticos ofrece un punto de vista interesante en un doble sentido. Por una parte, permite plantear más claramente la cuestión del holismo o no separabilidad cuánticos desde una perspectiva ontológica. Por otra parte, pone en evidencia cómo algunas de las principales críticas al enfoque mereológico clásico se basan en un prejuicio ontológico. Se argumenta que, en buena medida, los problemas de ambas teorías residen en un supuesto acrítico, que consiste en dar prioridad absoluta a la noción de individuo en la ontología.

Palabras clave: mereología cuántica, holismo cuántico, ontología

ABSTRACT

In this paper we argue that the mereological approach to quantum phenomena supplies an interesting viewpoint in two senses. On the one hand, it allows us to formulate the questions of quantum holism or non-separability more clearly from an ontological viewpoint. On the other hand, it makes clear how some of the main criticisms to the classical mereological approach are based on an ontological prejudice. We argue that, to a large extent, the problems of both theories rely on an uncritical assumption, which consists in endowing the notion of individual with absolute priority in the ontology.

Keywords: Quantum Mereology, Quantum Holism, Ontology.

¹ Fecha de recibido: 11 de marzo de 2012. Fecha de aceptación: 20 de abril de 2012.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) - Universidad de Buenos Aires. Correo electrónico: martinnarvaja@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN

En una de sus infrecuentes visitas a Buenos Aires, el filósofo brasileño Décio Krause expresó la idea de que la formulación de los principios de una teoría involucra siempre un compromiso implícito con un conjunto de principios no formulados. Una serie de reglas, que llamamos lenguaje, algunas teorías matemáticas, y una ontología que brinda significados o referencias físicas — es decir, una cosmovisión o metafísica acerca de la realidad a la que la teoría pretende referirse— subyacen siempre a toda formulación teórica.

Interpretar una teoría no es otra cosa que articular sus distintos niveles, superficiales y subyacentes, generando un conjunto armónico entre las diversas esferas implicadas en su formulación. El tema general de este ensayo es la interpretación de la mecánica cuántica, teoría física que se ocupa de la naturaleza elemental de la materia, su composición y leyes fundamentales. El capítulo particular que nos ocupará es el aporte que puede brindar el enfoque mereológico a la comprensión de la cuestión ontológica de dicha teoría.

La *mereología*, o teoría formal de los todos y las partes, tiene como precursores al propio Aristóteles, en particular en su *Metafísica* (V 25 y 26; 1023b 15-1024a 12), y a Husserl ([1900-1901] 1985, vol. II), quien se ocupó de los conceptos de «parte» y «todo» en su *Tercera Investigación Lógica*. El objetivo central de la mereología, para estos autores, era analizar la relación parte-todo, omnipresente en nuestros conceptos y prácticas lingüísticas. Posteriormente llegarían los desarrollos de Stanislaw Lesniewski (1927-1931), y los trabajos más sistemáticos de Alfred Tarski ([1929] 1969; [1935] 1969; 1941), y Henry Leonard y Nelson Goodman (1940) y con ellos el intento de una caracterización formal de tal noción.

La aproximación mereológica a los fenómenos cuánticos ofrecerá, si no me equivoco, un punto de vista interesante tanto para plantear la cuestión del holismo o no separabilidad cuánticos, como para evidenciar cómo algunas de las principales críticas al enfoque mereológico clásico se basan en un prejuicio ontológico. Argumentaré que, en buena medida, los problemas de ambas teorías residen en el prejuicio de dar prioridad absoluta a la noción de individuo en la ontología.

El artículo está estructurado en tres secciones seguidas de una conclusión. La primera está dedicada a presentar los rasgos fundamentales de la mereología. El segundo apartado plantea dos problemas en la interpretación ontológica de la mecánica cuántica: no localidad e indistinguibilidad. La tercera sección, finalmente, ofrece una doble perspectiva: por un lado, un

enfoque mereológico sobre los mencionados problemas cuánticos; por otro, algunas reflexiones sobre la mereología clásica.

MEREOLOGÍA CLÁSICA

Aunque es difícil poner una fecha exacta al origen de la lógica moderna, parece razonable datarlo en 1854, año de publicación de *An Investigation on the Laws of Thought*, celeberrimo trabajo de George Boole (1854). Desde entonces, el enfoque simbólico de la lógica y su filiación con la matemática no ha hecho sino profundizarse. La mereología surgió contemporáneamente y con igual espíritu: proveer una fundamentación de la matemática, las leyes de la argumentación y del pensamiento.

La idea particular que interesa a la mereología es la de fundamentar sus contenidos mediante un desarrollo estricto de la relación «parte-todo». La moderna mereología comienza con los trabajos lógicos de Lesniewski ([1927-1931] 1992). Para este autor, la mereología sería una imagen, un espejo semántico, de la lógica, a la que denominaba «ontología». Mucho más cercano a la concepción de Frege que a la de Hilbert, los principios de la ontología expresarían relaciones de necesidad entre hechos y la mereología constituiría una teoría en sentido estricto referida a las propiedades de entidades reales. Ni ontología ni mereología eran concebidas como meros juegos formales.

Ya en el siglo XX se formulan dos desarrollos de la teoría originalmente presentada por Lesniewski: el de Tarski ([1929] 1969; [1935] 1969; 1941) y el de Henry Leonard y Nelson Goodman (1940). Ambos trabajos se insertan en el contexto del éxito y la aceptación universal de la lógica clásica de primer orden y de órdenes superiores, así como de la teoría de conjuntos en alguna de las cautas formulaciones de Zermelo.

La motivación para el desarrollo de la mereología era clara, en palabras de Tarski: “Toda la lógica de Aristóteles no nos permite, a partir del hecho de que un caballo es un animal, concluir que la cabeza de un caballo es la cabeza de un animal”³ (1941, 73). En palabras de Leonard y Goodman: “[...] ¿cuál es la relación de la clase de ventanas con la clase de edificios? Ningún miembro de una de las clases lo es de la otra [...]. Aun así, las clases mismas tienen una relación muy definida

³ “All the logic of Aristotle does not permit us, from the fact that a horse is an animal, to conclude that the head of a horse is the head of an animal.”

puesto que cada ventana es parte de algún edificio. No podemos expresar este hecho en una lógica que carece de una relación parte-todo [...]”⁴ (1940, 45).

Como se desprende de los pasajes recién mencionados, las formulaciones modernas, conciben a la mereología como un capítulo dentro del marco lógico-matemático usual; un capítulo en el que se introduce la relación parte-todo como nueva noción. En esta línea se formula la llamada «mereología extensional» o «mereología clásica», cuyos principios presentaremos a continuación siguiendo a Peter Simons (2000, 9-37). La exposición es enteramente informal y procura la claridad conceptual más que el rigor lógico o la economía simbólica.

La única noción primitiva de la teoría es la de *parte propia*: « x es parte propia de y » se escribe « $x \ll y$ ». Así, la trompa es una parte propia del elefante y los dedos lo son de la mano. A partir de esta noción puede definirse la de *parte*: x es parte de y sii_{def} x es parte propia de y o x es idéntico a y . En nuestra notación, « $x \ll y$ sii_{def} $x \ll y$ o $x=y$ ». La segunda noción definida es la de solapamiento. Se dice que dos individuos *solapan* sii_{def} tienen alguna parte en común. Dos individuos son *disjuntos* sii_{def} no solapan. Suelen definirse también tres operaciones: el llamado *producto*, que es el mayor individuo que puede formarse con las partes comunes de dos o más individuos dados; la *suma*, que es el individuo que solapa con todo individuo que sea parte al menos de alguno de los individuos involucrados, y la *diferencia* entre x e y , que es el mayor individuo que es parte de x y no tiene partes comunes con y . Se llama *universo* al individuo del cual todos los individuos son parte. A partir de la aceptación del universo, puede definirse el *complemento* de un individuo como la diferencia entre el universo y dicho individuo. Finalmente, se llama *átomo* a un individuo sin partes propias.

Los principios básicos de la mereología establecen que la relación « x es parte propia de y » es irreflexiva, antisimétrica y transitiva. Esto es: « $\neg(x \ll x)$ », « $x \ll y \rightarrow \rightarrow(y \ll x)$ » y « $(x \ll y \rightarrow y \ll z) \rightarrow x \ll z$ ». Así, por ejemplo, un dedo no es parte propia de ese mismo dedo; si los dedos son parte propia de la mano, la mano no es parte propia de los dedos; y siendo la mano parte del cuerpo, los dedos lo serán también. A partir de estos solos principios puede desarrollarse una mereología extensional clásica. No obstante, siendo estos principios excesivamente débiles, es usual complementarlos con algún principio de suplementación para eliminar realizaciones indeseables de la teoría. El más aceptado es el llamado *principio de suplementación débil* (WSP en inglés), el cual postula que si un individuo tiene

⁴ “For example, what is the relation of the class of windows to the class of buildings? No member of either class is a member of the other... Yet, the classes themselves have a very definite relation in that each window is a part of some building. We cannot express this fact in a logic which lacks a part-whole relation between individuals...”

una parte propia, tiene también una parte propia disjunta de la primera. Con este principio se excluye la mayor parte de los modelos bizarros e indeseables. A su vez, dicho principio permite la existencia de individuos distintos con exactamente las mismas partes propias, lo que permite modelar, por ejemplo, casos donde las mismas partes poseen configuraciones diversas.

Resumiendo lo dicho, la mereología presentada pretende ser un desarrollo formal de la relación parte-todo. Definiciones, operaciones y principios tienen como intención hacerla útil a la labor metafísica u ontológica. Sin embargo, esta última intención ha sido objeto de críticas. Como observa Peter Simons (2001, i) en su libro *Parts*, la mereología clásica desarrollada sobre la base de los recién mencionados principios y nociones ha sido objetada fundamentalmente por su inadecuación a las nociones comúnmente aceptadas de individuo, las cuales serían previas a la noción parte-todo. Se ha criticado, por una parte, que las denominadas sumas mereológicas no poseen existencia real desde el punto de vista empírico, y ni siquiera constituyen individuos legítimos desde el punto de vista teórico-conceptual. Por otra parte, se ha argumentado que la teoría no es aplicable a la clase de objetos de la experiencia cotidiana —mesas, sillas, jirafas—, y por ello no es de utilidad para la reconstrucción formal precisa de la relación parte-todo del sentido común. Estas últimas críticas se basan parcialmente en la incapacidad de la mereología para dar cuenta de la duración de los individuos a través del cambio⁵. Así, ya por falta o por exceso, la teoría no parece ser satisfactoria. Volveremos sobre esta cuestión en la sección *Mereología y mecánica cuántica*.

MECÁNICA CUÁNTICA: DOS PROBLEMAS

Afirmé en la introducción que la clave del problema de la interpretación de la mecánica cuántica consiste en armonizar las diversas nociones y componentes teóricos implicados en ella. El capítulo ontológico no es la excepción, y aunque no puede esperarse encontrar qué ontología se oculta detrás de la práctica y teoría físicas, sí es cierto que la teoría ofrece ciertos indicios, límites y algunas condiciones para el aporte filosófico. Presentaré a continuación dos problemas: la *indistinguibilidad* y la *no separabilidad*. Ambos ilustran una característica central de la mecánica cuántica: el *holismo*.

⁵ Esta clase de crítica es análoga a la que se formula a las caracterizaciones conjuntistas de los individuos y la posible respuesta a las mismas es análoga. Es posible caracterizar partes esenciales, o definir individuos como sucesiones de partes indexadas temporalmente.

De acuerdo con su planteo usual (Post 1963; Teller 1998; van Fraassen 1998; entre otros), el problema de la «indistinguibilidad cuántica» puede resumirse en estos términos: las entidades cuánticas del mismo tipo son distintas sólo número, *i. e.*, violan la «ley de Leibniz».

Se dice que dos partículas son «idénticas» (van Fraassen 1998) cuando comparten sus propiedades intrínsecas o características. En este sentido, dos átomos de cobre, o dos electrones (se los entienda clásicamente o no) son *idénticos*. Las partículas «idénticas» de la física clásica son *distinguibles* por sus propiedades extrínsecas o dinámicas, esto es, sus estados, y pueden ser identificadas por sus propiedades espacio-temporales (Jauch 1968, 276).

De acuerdo con la estadística clásica (Boltzmann), dadas N partículas a distribuirse en M niveles de energía, existen $W_c = M^N$ posibles distribuciones. En particular, dadas dos partículas a y b que pueden encontrarse en dos niveles de energía E_1 y E_2 , existen cuatro posibles distribuciones, esto es, cuatro microestados posibles (Tabla 1).

	E_1	E_2
1	ab	
2	A	b
3	b	a
4		ab

Tabla 1: distribución de dos partículas discernibles en dos niveles de energía.

En el caso de la radiación de cuerpo negro, Max Planck supuso, desarrollando las ideas de Gustav Kirchhoff (McMahon 2006), que la energía total se encontraba cuantizada debido a que era absorbida/emitada por osciladores en las paredes de la cavidad, los cuales sólo podían intercambiar cantidades finitas de energía (Singh 2005). Planck debía calcular el número de modos de distribuir P elementos de energía entre N osciladores, y encontró que, en lugar del valor utilizado en la estadística clásica, convenía usar el valor W_Q :

$$W_Q = \frac{(N + P - 1)!}{P!(N - 1)!} \quad (3.A)$$

De acuerdo con (A) sólo hay tres posibles distribuciones para distribuir dos elementos de energía entre dos osciladores O_1 y O_2 (Tabla 2).

	O1	O2
1	**	
2	*	*
3		**

Tabla 2: distribución de dos elementos de energía entre dos osciladores.

En 1924, inspirado en un trabajo que le había enviado Satyendra Bose, Einstein desarrolló el modo de contar los estados posibles de agregación de fotones que conduce a la *estadística de Bose-Einstein*, que hace uso de la fórmula (A). Einstein además amplió el resultado llevándolo más allá de los fotones⁶. La consecuencia fundamental que extrajo Einstein del trabajo de Bose fue que hablar de entidades que responden a las estadísticas cuánticas es hablar de entidades que son estrictamente indiscernibles: *distintas sólo número* (Krause 2006).

En la física estadística clásica, las posibilidades 2 y 3 (Tabla 1) cuentan como distintas posibilidades, asignándoseles igual probabilidad. De este modo se obtiene $P(1)=P(2)=P(3)=P(4)=1/4$. Como hemos visto, este caso es diferente al cuántico. De acuerdo con la estadística de Bose-Einstein, las situaciones 2 y 3 deben contarse como una sola. Siendo las posibilidades equiprobables, llegamos a que $P(1)=P(2-3)=P(4)=1/3$. Ahora bien: ¿qué implica o supone que las estadísticas cuánticas sean como son? La lectura aparentemente ineludible es que la utilización de nombres propios o etiquetas para las entidades cuánticas es superflua desde el punto de vista de la mecánica cuántica. Los nombres se introducen por cuestiones enteramente formales, pero luego se «borran» o ignoran (Krause 2006). Se dice «sean *a* y *b* dos sistemas cuánticos a distribuir en dos posibles estados individuales 1 y 2», pero luego se afirma que *a* en 1 y *b* en 2 es la misma situación que la que obtendríamos de su permutación. En algún sentido, al convertirse en partes de un sistema compuesto, *a* y *b* han perdido su individualidad.

Esta perspectiva sobre la pérdida de la «identidad» de las entidades cuánticas conduce a lo que Steven French y Décio Krause (2006) han denominado «concepción heredada». La misma justifica el carácter superfluo de nombres o etiquetas para partículas cuánticas sobre la base ontológica de que en mecánica cuántica no tiene sentido hablar de individuos que pudieran ser nombrados

⁶ En 1926, Fermi y Dirac dedujeron, en el contexto del formalismo cuántico, un segundo tipo de estadística cuántica que se aplica a sistemas de spin semi-entero. Tal estadística obedece a lo que se denomina «Principio de Exclusión de Pauli». En este caso no se obtienen diferencias significativas asignando nombres (*cf.* Krause 2006).

o identificados (Post 1963; Teller 1998). No se afirma que el Principio de Leibniz falle, sino que ni siquiera debe aplicarse (French & Krause 2006).

¿Cómo entender, entonces, las estadísticas cuánticas? Mary Hesse ([1963] 1966) y Paul Teller (1998) proponen una analogía: la distribución de los sistemas cuánticos en estados es como la del dinero en cuentas bancarias: si uno se pregunta cómo puede distribuir 2 pesos en dos cuentas bancarias, sólo tiene tres posibilidades, un peso en cada cuenta, ambos en una o ambos en la otra; no tendría sentido decir «este peso está acá y aquél está allá». El obvio problema con la analogía es que la indistinguibilidad del dinero depende de que estamos hablando de cantidades abstractas y no de ejemplares concretos. No tiene sentido decir éste o aquél porque se trata de cuánto independientemente de cuál y de dónde. Lo que no puede evitarse es afirmar que, en los denominados sistemas de varias partículas, se plantea un ejemplo claro de holismo, en el que las propiedades cuánticas relevantes del todo se adjudican a costa de la disolución de los componentes. Si podemos utilizar las estadísticas que utilizamos es porque, una vez vinculados los sistemas presuntamente indistinguibles, ya no podemos referirnos a ellos como entidades independientes.

Un segundo ejemplo de holismo cuántico está vinculado, no ya con la indistinguibilidad de sistemas cuánticos, sino con su no separabilidad. Del mismo modo en que las estadísticas cuánticas nos muestran que no podemos referirnos en términos de individuos independientes a sistemas cuánticos que forman un sistema compuesto, la no separabilidad nos muestra que, una vez que han interactuado, los sistemas cuánticos manifiestan correlaciones intrínsecas que no pueden ser eliminadas.

En 1927, Heisenberg publicaba su trabajo sobre las relaciones de indeterminación. Allí mostraba, sobre la base de su formulación de la mecánica cuántica, que la descripción teórica de los sistemas cuánticos no podía dar lugar simultáneamente a predicciones certeras sobre la totalidad de los observables —esto es, magnitudes físicas tales como la posición y la velocidad— de un sistema. En 1935 era publicado el célebre artículo “Can quantum mechanical description of reality be considered complete?” (Einstein, Podolsky & Rosen 1935), conocido como *EPR*, donde se proponía un argumento que, haciendo uso de un experimento pensado, procuraba concluir que la mecánica cuántica no proveía una descripción completa de la realidad de la que pretendía dar cuenta.

El mencionado artículo comenzaba con lo que Jammer (1974, 181) ha denominado *preámbulo epistemológico-metafísico*, en el cual se precisan algunas nociones referidas a las condiciones de satisfactoriedad de una teoría y el denominado «criterio de realidad» einsteniano. Respecto de lo primero, los autores

de *EPR* plantean dos condiciones que, de ser satisfechas, permiten catalogar a una teoría como satisfactoria: la corrección (su adecuación a la evidencia experimental) y la completud (que cada elemento de realidad física posea una contraparte en la teoría). El argumento *EPR* procuraba demostrar entonces que, aunque correcta, la mecánica cuántica es incompleta y, en consecuencia, no es una teoría satisfactoria. En cuanto a la realidad física y sus elementos, los autores proponen un «criterio de realidad» que será determinante para responder a la cuestión de la completud de la teoría.

La primera cuestión que debe aquí destacarse es que los candidatos a elementos de la realidad física son observables, esto es, magnitudes físicas. En consecuencia, la cuestión de definir qué elementos pertenecen a la realidad física no es otra que la de determinar qué observables (magnitudes) existen realmente⁷. La segunda cuestión es que esta determinación no se fundamentará en la mecánica clásica (de acuerdo con la cual todas las magnitudes poseen realidad simultánea) ni *a priori* (sobre la base de algún criterio metafísico último), sino en la propia teoría. En tal sentido, el criterio de realidad establece que los elementos de la realidad son *aquellas magnitudes de un sistema cuyo valor pueden predecirse con certeza sin afectar de modo alguno al sistema*. Los elementos de realidad dependerán, así, de la teoría en cuestión y de aquello que permita predecir con certeza sus valores.

El experimento pensado para poner a prueba la completud de la mecánica cuántica sobre la base de los criterios presentados respondía al siguiente esquema: en un sistema compuesto de dos partículas cuánticas, S_1 y S_2 , con una correlación debida a una cierta interacción previa (por ejemplo, una molécula diatómica que se ha desintegrado) que ya ha concluido, las dos partículas o subsistemas evolucionan sin interacción ulterior hasta encontrarse a una cierta distancia (hasta estar separadas); en ese momento se efectúa un proceso de medición sobre una de ellas. La clave de esta parte de la argumentación es que se basa en la idea, propia de la modernidad, de que los elementos básicos de la ontología deben ser individuos; que los sistemas complejos son producto de ciertos intercambios entre sistemas cuya naturaleza es, en última instancia, independiente.

A fin de presentar el argumento es necesario estipular dos condiciones más. En primer lugar, se considerarán dos observables, A y B que no conmutan (que no pueden poseer simultáneamente valores definidos) y tales que A sólo

⁷ Es importante señalar que el realismo implicado en *EPR* no puede identificarse con el realismo metafísico en general. La cuestión aquí de la realidad de los observables cuánticos (en particular, de los que no conmutan, aquéllos que de acuerdo con la mecánica cuántica no poseen valor definido simultáneamente) y no de la realidad cuántica en general.

puede tomar dos valores, a_1 y a_2 y B sólo puede tomar dos valores, b_1 y b_2 . En segundo lugar, por hipótesis, se considerará que existe una correlación debida a la interacción inicial tal que (a) si el observable A posee un valor definido a_1 para el subsistema S_1 (una de las partículas), posee el valor a_2 para S_2 (el otro subsistema) y viceversa (a_1 para S_2 y a_2 para S_1), y (b) si el observable B posee un valor definido b_1 para el subsistema S_1 (una de las partículas), posee el valor b_2 para S_2 (el otro subsistema) y viceversa (b_1 para S_2 y b_2 para S_1).

El argumento entonces, haciendo uso del colapso y de la condición inicial, afirma lo siguiente:

(i) Si la medición se efectúa sobre el observable A de S_1 y se encuentra que posee un valor definido a_1 , puede inferirse con certeza que S_2 posee el valor a_2 sin haber perturbado S_2 . En consecuencia, el observable A pertenece a la realidad física y al sistema S_2 .

(ii) Por otra parte, si la medición se efectúa sobre el observable B de S_1 y se encuentra que posee un valor definido b_1 , puede inferirse con certeza que S_2 posee el valor b_2 , sin haber perturbado S_2 . En consecuencia, el observable B pertenece a la realidad física y al sistema S_2 .

De (i) y (ii) se sigue que tanto el observable A como el B poseen realidad física. En consecuencia, puesto que la mecánica cuántica no permite predecir los valores de ambos simultáneamente (por los motivos señalados en la sección previa), se trata de una teoría incompleta y, de acuerdo con dicho más arriba, insatisfactoria.

Ante este argumento, algunos autores, como Niels Bohr (1949), señalaron que no es cierto que las mediciones sobre S_1 no perturben a S_2 . De hecho, la evolución dinámica de S_2 se ve afectada por las mediciones en S_1 debido al colapso de la función de onda y, en consecuencia, la parte crucial del argumento EPR se basa en premisas falsas. La discusión, sin embargo y como veremos a continuación, tomó un giro diferente. Como bien observa John Bell: “La paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen (*EPR*) fue tomada como argumento de que la mecánica cuántica no es una teoría completa y debería ser suplementada con variables adicionales para restaurar la localidad y la causalidad” (1964).

Tomando esta idea como punto de partida, Bell desarrolló el cálculo de sus famosas desigualdades a partir del formalismo de la teoría y basándose en una versión de EPR semejante a la que presentamos más arriba. Posteriormente y haciendo uso de los cálculos de Bell, los trabajos de Aspect (1982), y

más recientemente Rowe (2001) y Gröblacher (2007), mostraron en el terreno experimental la corrección de las predicciones cuánticas. Así, irónicamente, la realización del experimento *EPR* condujo a rebatir el supuesto de partida de Einstein: en el caso de sistemas que no interactúan, e incluso se hallan espacialmente separados, los valores de sus observables continúan correlacionados.

La consecuencia ontológica de negar la posibilidad experimental de separar dos sistemas físicamente y afectarlos de modo independiente es que los sistemas cuánticos, en muchos casos, no son individuos distintos, sino un único individuo que puede encontrarse extendido en partes disjuntas del espacio y que reacciona como una unidad inescindible. Como observara Husserl: “La separabilidad no quiere decir sino que podemos mantener idéntico este contenido en la representación, aunque variemos sin límites (con variación caprichosa, no impedida por ninguna ley fundada en la esencia del contenido) los contenidos unidos y en general dados conjuntamente” ([1900-1901] 1985, 393). La no separabilidad cuántica significa que esto no es posible: variando los valores de uno de los «contenidos» o subsistemas entrelazados, el otro es modificado instantáneamente. Es posible además entrelazar arbitrariamente sistemas cuánticos hasta ese entonces independientes formando físicamente un nuevo individuo «uno» donde antes había dos o más.

MEREOLÓGÍA Y MECÁNICA CUÁNTICA

En las secciones precedentes he procurado presentar algunos de los principales rasgos de la mereología clásica y de la mecánica cuántica. En ambos casos intenté poner algún énfasis en las consecuencias ontológicas de ambas teorías, las restricciones ontológicas que imponen a sus posibles realizaciones. Un punto de confluencia entre ambos grupos de problemas se encuentra en su común dificultad para combinarse con ciertas ideas vinculadas a la noción de individuo. A continuación trataremos esto con mayor detalle.

En su formulación clásica, la mereología da lugar a una serie de aparentes absurdos. Permite, mediante sumas y productos mereológicos, formar toda clase de entidades que difícilmente poseen la cohesión que exigimos de los individuos: entidades con partes comunes, entidades con partes separadas espacial o temporalmente, entidades de categorías desconocidas o que no parecen tener más que una unión casual. Además, por cierto, la teoría enfrenta el mismo tipo de dificultad que las teorías conjuntistas y las teorías del haz en general para dar cuenta de la identidad a través del cambio.

Siendo innegable que la mereología plantea dificultades para dar cuenta de la noción de individuo y de sus partes, dos preguntas resultan inevitables. La primera es si estos problemas resultan de la mereología en sí o residen en la propia noción de individuo; la segunda, es qué tan central es para la mereología dar cuenta de tal noción. Creo que la respuesta al primer interrogante es evidente: la noción de individuo es intrínsecamente problemática, veinticinco siglos de filosofía no han llevado a un acuerdo acerca de los problemas sobre la identidad a través del tiempo y de qué es lo que define a un individuo. Naturalmente, si la noción de individuo fuera esencial a la mereología, el problema sería legítimo. Pero, pasando a la segunda pregunta, la respuesta parece ser que esto no es así: la teoría de todos y partes no necesita de la noción de individuo, ni para reducirse a ella, ni para aplicársele. Lo esencial aquí es la relación de partes con totalidades, y en ello los individuos son casos puramente eventuales. Si tenemos un individuo específico, y sus partes y las partes de sus partes, la mereología es útil. Pero debemos saber cómo usarla.

Lo esencial es que podemos hablar de todos y partes sin hacer la menor referencia a individuos. Ejemplos abundantes de ello se encuentran en la cocina. Veamos uno: la harina, la sal y la levadura son partes de la masa, la integran. Es perfectamente posible hablar de partes de la masa, partes de la harina y de la sal, y en ningún caso hacemos referencia a individuos. Un gin-tonic lleva dos partes de agua tónica y una de ginebra: aquí tampoco hablamos de individuos pero sí de todos y partes. Lo mismo cuando hacemos referencia no ya a términos de masa, sino a entidades abstractas. Si pensamos en el tiempo y sus partes, en volúmenes de espacio, en cantidades monetarias, ocurre lo mismo. La fortuna de un hombre puede tener partes, partes intercambiables o idénticas, partes que no necesitan ser contiguas. Se ha puesto excesivo énfasis en la noción de individuo por prejuicio metafísico. La relación parte-todo quizás no sea anterior a la de individuo, pero sí es independiente de ésta. Para la mereología, las nociones esenciales son la de todo y parte. Y no es necesario que ni las totalidades ni las partes sean caracterizadas como individuos para referirnos a su relación.

Pasando ahora a la mecánica cuántica, hemos señalado dos cuestiones fundamentales, aunque no las únicas, que suponen dificultades para su interpretación: la no separabilidad y la indistinguibilidad. Ambas muestran el carácter holista de muchos sistemas cuánticos. Respecto de la no separabilidad, las consecuencias holistas han sido reconocidas. Sin embargo, se ha puesto más énfasis en la dificultad para referirse a los sistemas entrelazados como individuos independientes que como totalidades articuladas. En este sentido, el análisis y desarrollo del problema del holismo cuántico ha sido llevado a cabo de un modo excesivamente intuitivo (*cf.* Maudlin 1998).

En cuanto a la indistinguibilidad, el debate sigue girando alrededor de la cuestión de individuos y/o no individuos, más que de holismo. Así, el problema ha dado lugar a una clase de lógicas cuánticas enfocadas a ofrecer una nueva matemática o semántica alternativa a las teorías de conjuntos clásicas. Los trabajos en esta línea caen bajo el denominador común de «teorías de cuasi-conjuntos», en las que no valen los criterios clásicos de identidad. En este ámbito pueden distinguirse dos aproximaciones. Por un lado, se encuentran los trabajos de Steven French, Newton da Costa y Decio Krause, por otro, los de Maria Luisa Dalla Chiara y Giuliano Toraldo di Francia (*cf.* Dalla Chiara, Giuntini & Krause 1998). La primera de ellas propone la distinción entre micro-objetos cuánticos y macro-objetos clásicos, y explora la posibilidad de ampliar la base de la teoría clásica de conjuntos en una teoría más amplia en la cual la indistinguibilidad sólo implique identidad para los macro-objetos. La segunda, en cambio, propone un enfoque a partir de la aplicación e incorporación de semánticas intensionales.

La metafísica y los desarrollos ontológicos tradicionales y contemporáneos han tomado como noción central la de individuo, vinculada estrechamente a los nombres propios de nuestro lenguaje. Tanto la mecánica cuántica como la mereología han sido víctimas de este verdadero obstáculo epistemológico, por usar el término de Bachelard (1948). Las nociones de totalidad y de evento son quizás las centrales, junto a la de simetría, para la ontología cuántica no la de individuo. Las operaciones fundamentales para una mereología cuántica sean quizás las basadas en el análisis y no en la composición. Esto no quiere decir, desde luego, descartar los productos y las sumas mereológicas, sino más bien verlas desde el punto de vista de totalidades ya dadas, cuyas partes pueden ser caracterizadas como componentes integrados *al modo de* sumas o productos. Desde este punto de vista, despojadas de la imagen usual basada en individuos (átomos individuales) que se componen de diferentes modos, tanto la mereología como la ontología cuántica parecen ganar en autonomía y sencillez. Desde este punto de vista, es probable que la mereología constituya una mejor guía para el análisis formal de los sistemas cuánticos que la teoría de conjuntos o las perspectivas ontológicas usuales. Asimismo, es probable que el análisis de los sistemas cuánticos provea una aproximación a la relación entre todos y partes que subraye su utilidad con independencia de la noción de individuo y de los problemas clásicos sobre la individualidad.

Una dificultad, sin embargo, se hace aquí presente para proseguir en lo que sería un análisis mereológico de los sistemas cuánticos como totalidades. Este problema está vinculado a la denominada contextualidad cuántica, de la que no hemos hablado aquí sino tangencialmente.

En la sección tercera hice referencia a observables, magnitudes físicas que «no conmutan», esto es, que no pueden adquirir valores definidos simultáneamente. Señalé allí que la descripción original de este fenómeno se encontraba en el trabajo de Heisenberg sobre las relaciones de indeterminación (1927) y que el artículo *EPR* era, en gran medida, un intento de poner al descubierto la supuesta incompletitud de la descripción cuántica. Lo que no se mencionó entonces fue que la interpretación «clásica» de la mecánica cuántica, en la que se fundamentaba *EPR*, se enfrentó a un escollo formal, y no sólo al descrédito empírico. En 1967, Simon Kochen y Ernst Specker (1967) demostraron que el formalismo de la mecánica cuántica impide asignar simultáneamente un valor preciso a todos y cada uno de los observables de un sistema que se encuentra en un cierto estado cuántico. Las relaciones de indeterminación no afirmaban que tal asignación fuera imposible idealmente, sino sólo que no podía deducirse de los axiomas existentes. El teorema de Kochen y Specker demuestra, en cambio, que cualquier asignación de propiedades correspondientes a contextos diferentes es *contradictoria* con la teoría (Lombardi 2011).

Lo dicho implica que la estructura algebraica de las proposiciones cuánticas difiere de la estructura clásica o booleana: el teorema de Kochen y Specker impide la asignación de valores de verdad simultáneos a todos los enunciados atómicos de la teoría, algo impensable desde la lógica clásica, en la que siempre es posible asignar valores de verdad a la totalidad de proposiciones atómicas (aunque sea arbitrariamente). En consecuencia, las operaciones habituales del álgebra de clases no pueden ser definidas como es usual.

¿Por qué supone esto un problema para la mereología cuántica? Porque, en palabras de Tarski:

El sistema extendido del álgebra de Boole está íntimamente relacionado con la teoría desarrollada por Stanislaw Lesniewski y llamada por él mereología. La relación de la parte con el todo, que puede ser vista como la única noción primitiva de la mereología, es el correlato de la inclusión en el álgebra de Boole. [...] La diferencia formal entre la mereología y el sistema extendido del álgebra de Boole se reduce a un punto: los axiomas de la mereología implican (bajo el supuesto de la existencia de al menos dos individuos) que no hay un individuo que corresponda al cero del álgebra de Boole, es decir, un individuo que es parte de cualquier otro individuo. Si un conjunto B de elementos (junto con la relación de inclusión) constituye un modelo del sistema extendido del álgebra de Boole, entonces, removiendo el elemento cero de B, obtenemos un modelo para la mereología; si, inversamente, un conjunto

C es un modelo de la mereología, entonces, mediante la adición de un nuevo elemento a C y postulando que ese elemento se encuentra en la relación de inclusión respecto de todo elemento de C, obtenemos un modelo para el sistema extendido del álgebra de Boole. Más allá de estas diferencias y similitudes, debe ser enfatizado que la mereología, tal como fue concebida por su autor, no debe ser vista como una teoría formal donde las nociones primitivas pueden admitir muchas interpretaciones diferentes ([1935] 1969, nota 1)⁸.

Siendo así, parece difícil poner a la par la mereología y la mecánica cuántica desde el punto de vista formal. Y aunque el problema no parece insoluble, y es probable que la mereología pueda ser formulada de manera compatible con los requisitos de las denominadas lógicas cuánticas o álgebras de von Neumann (Mittelstaedt 1998), aún no queda claro cómo puede resolverse este problema de manera satisfactoria.

CONCLUSIONES

¿Qué conclusiones podemos extraer, entonces, de lo dicho? Dos, si no me equivoco. En primer lugar, que tanto la mecánica cuántica como la mereología tienen mucho por ganar desligándose de una noción de individuo heredada de una filosofía y ciencia natural pretéritas y que nunca careció de problemas intrínsecos. Desde este punto de vista, el holismo cuántico parece ser *conceptualmente* compatible con el planteo mereológico. Sin embargo, y en segundo lugar, desde un punto de vista estrictamente *formal*, el maridaje entre mereología y mecánica cuántica no resulta sencillo debido a la similitud formal entre la mereología y el álgebra de Boole y la incompatibilidad de esta última con el álgebra cuántica. Creo, no obstante, que desde un

⁸ “The extended system of Boolean algebra is closely related to the theory developed by S. Lesniewski and called by him mereology [...] The relation of the part to the whole, which can be regarded as the only primitive notion of mereology, is the correlate of Boolean-algebraic inclusion. [...] The formal difference between mereology and the extended system of Boolean algebra reduces to one point: the axioms of mereology imply (under the assumption of the existence of at least two individuals) that there is no individual corresponding to the Boolean-algebraic zero, i.e. an individual which is a part of every other individual. If a set of B elements (together with the relation of inclusion) constitutes a model of the extended system of Boolean algebra, then, by removing the zero element from B, we obtain a model for mereology; if, conversely, a set C is a model for mereology, then, by adding a new element to C and by postulating that this element is in the relation of inclusion to every element of C, we obtain a model for the extended system of Boolean algebra. Apart from these differences and similarities, it should be emphasized that mereology, as it was conceived by his author, is not to be regarded as a formal theory where primitive notions may admit many different interpretations”.

enfoque modal, en la línea de los trabajos de Lombardi y Castagnino (2008), estas dificultades formales pueden ser superadas.

TRABAJOS CITADOS

- Aristóteles. *Metafísica*. Introd., trad. y notas T. Calvo M. Madrid: Gredos, 1994.
- Aspect, A. et ál.. “Experimental test of Bell’s inequalities using time-varying analyzers”. *Physical Review Letters*, 49 (1982): 1804.
- Bachelard, G. *La formación del espíritu científico*. México: Siglo XXI, 1948.
- Bell, J. “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”. *Physics*, 1 (1964): 195-200.
- Bohr, N. “Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics”. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Cambridge: Cambridge University Press, 1949.
- Boole, G. *An Investigation on the Laws of Thought*. Nueva York: Dover Publications, [1854] 1958.
- Dalla Chiara, M. L., Giuntini, R. & Krause, D. “Quasiset theories for micro objects: a comparison”. *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. Ed. E. Castellani. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”. *Physical Review*, 47 (1935): 777-780.
- French, S. & Krause, D. *Identity in Physics: A Formal, Historical and Philosophical Approach*. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- Gröblacher, S. et ál. “An experimental test of non-local realism”, *Nature*, 446 (2007): 871.
- Hesse, M. *Models and Analogies in Science*. Londres: Sheed and Ward, [1963] 1966.
- Heisenberg, W. “Über den anschaulichen Inhalt der Quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927): 172-198.
- Husserl, E. *Investigaciones Lógicas*, 2 vol. Traducción de Manuel García Morente y José Gaos. Madrid: Alianza, [1900-1901] 1985.
- Jammer, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. Nueva York: John Wiley, 1974.

- Jauch, J. *Foundations of Quantum Mechanics*. Reading MA: Addison Wesley, 1968.
- Kochen, S. & Specker, E. “The problem of hidden variables in quantum mechanics”. *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17 (1967): 59-87.
- Krause, D. “Einstein y la indiscernibilidad”. *Praxis Filosófica*, 22 (2006): 13-130.
- Leonard, H. & Goodman, N. “The calculus of individuals and its uses”. *Journal of Symbolic Logic*, 5 (1940): 45-55.
- Lesniewski, S. “On the foundations of mathematics”. *Collected Works*. Eds. S. J. Surma, J. T. Srzednicki, D. I. Barnett & V. F. Riskey. Dordrecht: Kluwer, [1927-1931] 1992.
- Lombardi, O. “Mecánica cuántica: ontología, lenguaje y racionalidad”. *Racionalidad en Ciencia y Tecnología. Nuevas Perspectivas Iberoamericanas*. Ed. A. R. Pérez Ransanz & A. Velasco Gómez. México: UNAM, 2011.
- Lombardi, O. & Castagnino, M. “A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39 (2008): 380-443.
- Maudlin, T. “Part and whole in quantum mechanics”. *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. Ed. E. Castellani. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- McMahon, D. *Quantum Mechanics Demystified*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- Mittelstaedt, P. *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- Post, H. “Individuality and physics”. *Listener*, 70 (1963): 534-537.
- Rowe, M. et ál. “Experimental violation of a Bell’s inequality with efficient detection”. *Nature*, 409 (2001): 791.
- Simons, P. *Parts. A Study in Ontology*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- Singh, V. “Einstein and the quantum”. *Current Science*, 89 (2005): 2101-2112.
- Tarski, A.. “Foundations of the geometry of solids”, *Logic, Semantics and Metamathematics*. Oxford: Oxford University Press, [1929] 1969.
- . “On the foundations of Boolean algebra” *Logic, Semantics and Metamathematics*. Oxford: Oxford University Press [1935] 1969.

- . “On the calculus of relations”. *The Journal of Symbolic Logic*. 6 (1941): 73-89.
- Teller, P. “Quantum mechanics and *haecceities*”. *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. Ed. E. Castellani. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- Van Fraassen, B. “The problem of indistinguishable particles”. *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*. Ed. E. Castellani. Princeton: Princeton University Press, 1998.