



La noción de potencialidad ontológica en la interpretación modal de la mecánica cuántica

Christian DE RONDE



RESUMEN

En este artículo, nos interesa discutir la pertinencia del concepto de *potencialidad* en el contexto de las interpretaciones modales (IM) de la mecánica cuántica. Para ello, analizaremos el significado de la noción de *posibilidad cuántica* en el formalismo ortodoxo de la teoría siguiendo la distinción entre *interpretaciones modales que comienzan por principios metafísicos* (IMPM) y aquellas *interpretaciones modales que comienzan por el formalismo ortodoxo* (IMFO). Discutimos, en este contexto, la pertinencia de las posiciones empiristas y realistas, y avanzamos en el desarrollo de una posición que denominamos *constructivismo metafísico*. Finalmente, proponemos introducir la noción de *potencialidad ontológica* – basada en el concepto aristotélico de *potencialidad racional* – como un marco conceptual que nos permita dar cuenta de manera coherente de la idea no estándar de posibilidad que se encuentra presente en la IM.

PALABRAS-CLAVE • Mecánica cuántica. Posibilidad. Potencialidad ontológica.

INTRODUCCIÓN

La interpretación de la mecánica cuántica se encuentra signada desde su origen por las nociones de probabilidad, posibilidad y potencia. Ya sea desde un análisis gnoseológico, lógico u ontológico, el carácter modal de la teoría aparece como un aspecto central que debe ser especialmente considerado a la hora de avanzar respecto de la comprensión y del significado del formalismo cuántico. Ya en 1926, la interpretación de la función de onda cuántica de Max Born había introducido subrepticamente la pregunta sobre el significado de la *probabilidad* en la nueva teoría atómica. También Werner Heisenberg (1958) y Wolfgang Pauli (cf. Enz & Meyenn, 1994) discutieron la importancia del concepto de *potencia* en la fundamentación ontológica de la mecánica cuántica. Por su parte, desde el punto de vista lógico, Bas van Fraassen (1973, 1981) fue uno de los precursores, a comienzo de los años setenta, en introducir las lógicas modales con el objetivo de avanzar en el análisis formal de la noción de *posibilidad*. El camino desandado, primero por van Fraassen y luego por autores como Simon Kochen (1985) y Dennis Dieks (1988a, 1988b, 1989), se enmarca en lo que ha sido dado

en llamar la interpretación modal (IM) de la mecánica cuántica. Si bien este enfoque puede considerarse en su origen como un intento (antirealista) de continuar formalmente el análisis realizado por Niels Bohr,¹ más adelante, las versiones de la IM propuestas por Jeffrey Bub (1992, 1997) y por Guido Bacciagaluppi junto con Michael Dickson (1997) continuaron su desarrollo siguiendo los lineamientos (realistas) del programa de variables ocultas.²

En este artículo nos interesa principalmente discutir y analizar la interpretación brindada por las diferentes versiones de la IM a la noción de *posibilidad cuántica*. En la primera sección, presentamos brevemente el formalismo ortodoxo de la mecánica cuántica así como también el desarrollo propuesto por la IM a partir de las lógicas modales. En la sección 2, analizamos la importancia de los principios metafísicos, por un lado, y del formalismo de la teoría, por otro. Distinguimos, a partir de estas consideraciones, aquellas IM que *comienzan por los principios metafísicos* (IMPM) y aquellas que *comienzan por el formalismo ortodoxo* (IMFO) (cf. de Ronde, 2010). En la sección 3, discutimos el significado de la noción de posibilidad dentro de la IM, tomando en cuenta tanto el teorema de Kochen-Specker (1967) como su versión modal (KSM) desarrollada en Domenech, Freytes y de Ronde (2006). Consideramos además la interpretación provista por las posiciones empiristas y realistas, y proponemos una tercera vía que denominamos *constructivismo metafísico*. En la sección 4, desarrollamos algunos argumentos en favor de la interpretación de la *posibilidad cuántica* en términos del concepto de *potencialidad ontológica* (cf. Ronde, 2005, 2011a), concepto que remite originalmente a la noción aristotélica de *potencialidad racional*.

I LA INTERPRETACIÓN MODAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

En la tradición de la lógica cuántica, las propiedades (o proposiciones) de un sistema cuántico están relacionadas a los subespacios cerrados del espacio de Hilbert o,

¹ Van Fraassen es explícito en este sentido al llamar su interpretación “variante de Copenhagen”. Respecto de la interpretación de Kochen antes mencionada, Theodor Gornitz y el mismo Carl Friedrich von Weizsäcker (1987, p. 357) escriben: “La consideramos como una exposición clasificadora de la estructura matemática de la teoría, especialmente apta para describir el proceso de medición. Sentimos, de cualquier modo, que esta no significa una alternativa sino una continuación a la interpretación de Copenhagen (Bohr y, hasta cierto punto, Heisenberg).” Por su parte, también Dieks atribuye a Niels Bohr la inspiración de sus desarrollos en la IM. Discusiones privadas, Utrecht 2009 (cf. Dieks 1988a, 1989).

² La discusión respecto de la necesidad de agregar variables ocultas a las magnitudes físicas, con el objetivo de brindar un esquema completo de la realidad física de acuerdo a la teoría cuántica, se remonta a la discusión del famoso “artículo EPR” (Einstein *et al.*, 1935). Una posible lectura de la conclusión del artículo fue llevada a cabo por Bell y el programa de variables ocultas, el cual intentaba completar la descripción cuántica con magnitudes que permitirían, por lo menos “en principio”, predecir los resultados de las observaciones en forma causal.

análogamente, con los operadores de proyección sobre esos subespacios. Cada proyector se encuentra asociado a una pregunta dicotómica referida a la actualidad de las propiedades (cf. von Neumann 1955, p. 247). Una magnitud física M se representa por un operador \mathbf{M} que actúa sobre el espacio de estados. Para operadores acotados y autoadjuntos, se satisfacen las condiciones para la existencia de la descomposición espectral $\mathbf{M} = \sum c_i |a_i\rangle\langle a_i|$. Los proyectores $P_{a_j} = |a_j\rangle\langle a_j|$ se interpretan como las propiedades del sistema, mientras que los números reales c_j se relacionan con la probabilidad de que se obtenga como resultado de la medición la propiedad P_{a_j} . Las propiedades físicas del sistema se organizan en el retículo de los subespacios cerrados L_H que, para el caso de dimensión finita resulta un retículo modular, mientras que, para el caso de dimensión infinita, uno ortomodular (cf. Maeda & Maeda, 1970). Cada conjunto completo de operadores autoadjuntos pueden ser puestos en correspondencia con un operador maximal \mathbf{M} , este operador tiene asociado un retículo booleano \mathcal{W}_M de L_H que remite a un conjunto completo de observables que conmutan (CCOC) al cual nos referiremos como “el álgebra espectral del operador \mathbf{M} ”. En ese enfoque, los estados puros se pueden pensar como medidas sobre el retículo de proyectores (cf. Rédei, 1998, cap. 3), esto es, un estado s es una función:

$$s : L(H) \rightarrow [0; \infty],$$

tal que:

- (1) $s(\mathbf{0}) = 0$ ($\mathbf{0}$ es el espacio nulo).
- (2) Para toda familia ortogonal de proyectores P_j , $s(\sum_j P_j) = \sum_j s(P_j)$.

Los estados puros se encuentran representados por la conjunción de todas las propiedades actuales (esto es, el ínfimo en el retículo). Para el caso finito, los estados puros pueden ser puestos en correspondencia biyectiva a los átomos de LH . Asignar valores a una magnitud física \mathbf{M} junto con la especificación del CCOC es equivalente a establecer un homomorfismo booleano a la estructura booleana $\{0,1\}$, $v: \mathcal{W}_M \rightarrow \mathbf{2}$. Dentro del contexto dado por \mathbf{M} , tiene sentido utilizar el “discurso clásico”; o sea, que las leyes de la lógica clásica son válidas para referirse a esas propiedades. Se puede definir, entonces, una *valuación global* de las magnitudes físicas sobre L_H como una familia de homomorfismos booleanos $v_i: \mathcal{W}_i \rightarrow \mathbf{2}$. Esta valuación global proporcionaría, en principio, valores a todas las magnitudes en forma simultánea manteniendo la siguiente *condición de compatibilidad*: cuando dos magnitudes comparten uno o más proyectores, los valores asignados a esos proyectores serán los mismos independientemente del contexto en el que sean considerados.

Definición. Sea $(\mathbb{W}_i)_{i \in I}$ una familia de subretículos booleanos de $L(H)$. Una valuación global sobre $L(H)$ es una familia de homomorfismos booleanos $(v_i: \mathbb{W}_i \rightarrow \mathbb{2})_{i \in I}$, tal que $v_i|_{\mathbb{W}_i \cap \mathbb{W}_j} = v_j|_{\mathbb{W}_i \cap \mathbb{W}_j}$ para cada $i, j \in I$.

El teorema de KS muestra que, para la estructura ortomodular del retículo de proposiciones cuánticas, no es posible respetar esta condición de compatibilidad.³ En términos algebraicos de la definición previa y siguiendo el desarrollo propuesto en Domenech y Freytes (2005), el teorema de KS puede ser escrito del siguiente modo:

Teorema. Si H es un espacio de Hilbert tal que $\dim(H) > 2$, entonces no es posible realizar una familia de valuaciones parciales compatibles sobre $L(H)$.

Este teorema tiene como consecuencia la imposibilidad de interpretar a las propiedades de los estados cuánticos como poseyendo valores *preexistentes*; es decir, como teniendo “valores determinados” independientemente de la elección del contexto.

Podría pensarse que si bien la mecánica cuántica nos impide referirnos a las propiedades actuales en forma inequívoca, tal vez sea el modo de lo posible aquél capaz de proveer una articulación coherente del discurso acerca del formalismo cuántico. En los años 1970 y 1980 Bas van Fraassen (1973, 1981) incluyó el razonamiento de las lógicas modales en la lógica cuántica permitiendo considerar formalmente el ámbito de la posibilidad y brindando, al mismo tiempo, una respuesta original al problema de la medición.

La pregunta interpretacional con que debemos enfrentarnos es la siguiente: ¿cuales valores de atribución son verdaderos? La respuesta a esta pregunta puede ser muy conservadora o muy liberal. Ambas respuestas plantean nuevas cuestiones. Considero que la interpretación de Copenhague – en realidad un conjunto más o menos correlacionado de actitudes expresadas por los miembros de la escuela de Copenhague y no una interpretación precisa – introduce, en este sentido, un gran conservadurismo. Los científicos de Copenhague parecían o bien dudar o bien negar que los observables tengan valores definidos, a menos que fuese el estado el que forzase a decir tal cosa. Me referiré a esta respuesta en extremo cautelosa como la *variante de Copenhague* de la interpretación modal. Ésta es la variante que yo prefiero (van Fraassen, 1991, p. 280).

³ En la lógica cuántica, como señala Michael Dickson (2001), el teorema de KS y la ausencia de una valuación del retículo ortomodular al $\mathbb{2}$ puede ser también entendida como consecuencia de la no distributividad de L_H .

Considerando explícitamente el ámbito de la posibilidad, la IM busca resolver la coexistencia, en la formulación ortodoxa de la teoría, entre dos tipos de evolución aparentemente incompatibles. Por un lado, la *evolución determinista* comandada por la ecuación de Schrödinger que da cuenta de la evolución del estado cuántico “en tanto no es observado”, es decir, en tanto no se realizan mediciones. Y por otro lado, la *evolución indeterminista*, expresada por el “colapso”⁴ del estado cuántico ($\Psi = \sum c_i |\alpha_k\rangle$) en uno de los términos ($|\alpha_k\rangle$) correspondientes al resultado observado en el aparato de medición ($|R_k\rangle$). La justificación del “colapso cuántico” ha dado lugar a numerosas discusiones en la literatura (cf. van Fraassen, 1991, cap. 9; Dickson, 1998, cap. 6). Dieks señala al respecto:

ahora bien, en la antigua literatura, se suele decir que, en algún momento durante la medición, el estado “colapsa”, que de pronto todos los términos desaparecen excepto aquél correspondiente al resultado actualmente observado. El colapso *determinaría* entonces, de entre los valores meramente posibles, cual es el valor actual. Sin embargo, los colapsos constituyen un proceso que entra en conflicto con la evolución dada por la ecuación de Schrödinger. Esto plantea la pregunta de cuando, durante el proceso de medición, tal colapso puede ocurrir o, en otras palabras, en qué momento debe suspenderse la validez de la ecuación de Schrödinger. Esta pregunta ha devenido en extremo importante en las últimas décadas, en las cuales se han realizado experimentos muy sofisticados a partir de los cuales se ha demostrado claramente que, en la interacción de procesos en la escala sub-microscópica, microscópica y mesoscópica, tales colapsos nunca han sido observados (Dieks, 2010, p. 120).

La IM pretende desarticular el problema que presenta la conjunción de estas dos evoluciones evitando considerar al “colapso” como un proceso físico. De acuerdo a Dieks,

no hay necesidad del postulado de proyección. En el nivel teórico, la superposición total de los estados siempre se mantiene y la evolución temporal es unitaria. Uno podría decir que la ‘proyección’ ha sido transportada del nivel del formalismo teórico a la semántica: es sólo en la interpretación empírica de la superposición que los términos que la componen algunas veces, y hasta cierto grado, reciben un estatus independiente (1988a, p. 182).

⁴ En la formulación ortodoxa, se asume que una función de onda ($\Psi = \sum c_i |\alpha_i\rangle$) interactúa con un aparato “listo para medir”, donde el puntero marca o ($|R_o\rangle$), de modo tal que, luego de la interacción descrita por la mecánica cuántica, ambos sistemas se encuentran entrelazados ($\sum c_i |\alpha_i\rangle |R_o\rangle \rightarrow \sum c_i |\alpha_i\rangle |R_i\rangle$). En cuanto se produce la medición, uno de los términos particulares del sistema cuántico ($|\alpha_k\rangle$) “colapsa” y se observa el término correspondiente en el aparato de medición ($|R_k\rangle$).

De este modo, el pasaje de lo posible a lo actual se encuentra determinado por una *regla interpretacional* que difiere según las diferentes versiones de la IM (cf. Dieks, 1988b; Bub, 1992; Bacciagaluppi & Dickson, 1997; Vermaas, 1999). En este sentido, mientras que en la versión de Bub, como en la versión atómica – introduciendo el programa de variables ocultas –, se recupera una noción clásica de probabilidad,⁵ en las versiones de van Fraassen, Kochen y Dieks – donde se pretende respetar el formalismo ortodoxo – la relación entre lo posible y lo actual resulta en extremo problemática.⁶ Estos mismos inconvenientes han llevado a señalar a van Fraassen que las modalidades son un constructo teórico carente de contenido ontológico.

2 PRINCIPIOS METAFÍSICOS Y FORMALISMO CUÁNTICO

Tanto el positivismo lógico como el empirismo lógico dejaron a la filosofía analítica de la segunda mitad del siglo xx un legado, un conjunto de problemáticas e ideas directrices que fueron desarrolladas principalmente en el marco de la filosofía de la ciencia. Sin embargo, como enfatiza van Fraassen, las posiciones antimetafísicas propias de esas escuelas filosóficas fueron rápidamente subvertidas por sus propios integrantes:

⁵ Este enfoque es paradigmático de la posición bohmiana, la cual busca evitar el carácter dual de la probabilidad cuántica y recuperar una noción clásica que soporte una interpretación en términos de ignorancia. Según el mismo Bohm, “(...) en la interpretación ordinaria son necesarias dos estadísticas completamente diferentes. Primero, está la mecánica estadística ordinaria, que trata la distorsión de los sistemas entre los estados cuánticos, resultantes de varios factores caóticos tales como colisiones. La necesidad de este tipo de estadística podría ser, en principio, evitada a partir de mediciones más precisas que proporcionen información detallada del estado cuántico, pero en sistemas de una complejidad considerable, tales mediciones serían, debido a las dificultades intrínsecas, completamente impracticables. En segundo lugar existe la distribución de probabilidad, fundamental e irreductible, dada por $P(x) = |\Psi(x)|^2$ (...). La necesidad de este tipo de estadística no puede ser evitada, siquiera en principio, a través de mejores mediciones, ni puede ser explicada a partir de los efectos de las colisiones azarosas. (...) la interpretación causal solo requiere un tipo de probabilidad. Porque, como hemos visto, podemos deducir la distribución de probabilidad $P(x) = |\Psi(x)|^2$ como consecuencia de los mismos procesos de colisiones azarosas que dan lugar a las distribuciones estadísticas entre los estados cuánticos” (Bohm, 1953, p. 465).

⁶ En el caso de la versión de Copenhague propuesta por van Fraassen, los niveles discursivos se encuentran claramente diferenciados a través de los llamados *dynamic states* y *value states*. Las proposiciones respecto de los eventos son proposiciones que atribuyen valor, $\langle A, \sigma \rangle$, dice que el “observable **A** tiene un cierto valor que pertenece a σ ”. Las proposiciones sobre los estados son de la forma “El sistema se encuentra en un estado de este o aquel tipo”. Una proposición del estado de atribución $[A, \sigma]$ da una probabilidad de los valores de atribución y sostiene que las mediciones de **A** deben tener un resultado en σ . Mientras que los *dynamic states* señalan cómo evolucionará el sistema cuando se encuentra aislado, los *value states* se encuentran especificados por cuál es el conjunto de observables con valores determinados. En la misma línea interpretativa, Pieter Vermaas y Dennis Dieks (1995, p. 155) distinguen entre *mathematical states* y *physical states*. Según ellos, si bien los “estados matemáticos”, puesto que resultan de *mezclas impropias*, no pueden ser interpretados en términos de ignorancia (cf. D’Espagnat, 1976, cap. 6), los “estados físicos” deben ser considerados como *mezclas propias* o mezclas estadísticas, permitiendo, de este modo, recuperar una “interpretación por ignorancia” de los valores obtenidos en las mediciones.

(...) con la aparición de la filosofía analítica algo paradójico sucedió. Ese movimiento comenzó en un conjunto de revueltas, tanto en Europa como en América, contra toda forma de metafísica. Pero bien, justo antes de la mitad del siglo, sus más fervientes detractores comenzaron a hacer del mundo un lugar otra vez seguro para la metafísica. Desde entonces, hemos observado el crecimiento de la ontología analítica, la analítica metafísica y sus símiles.

Yo digo que la metafísica está muerta. Lo que veo es falsa conciencia, una filosofía que avanzó verdaderamente en el pasado, pero una filosofía que hoy no se comprende a si misma (van Fraseen, 2002, p. 3-4).

Desde esa perspectiva crítica, resulta también en extremo llamativo que en el contexto de la filosofía analítica de la ciencia se haya dado tanta importancia a las interpretaciones de Bohm y de muchos mundos; interpretaciones fundadas en fuertes principios metafísicos basados en la concepción clásica del mundo. Michel Bitbol señala, en ese sentido, que “la teoría original de Bohm de 1952 es probablemente la más metafísica (en el sentido más fuerte y especulativo) de todas las lecturas de la mecánica cuántica. Ella plantea la trayectoria de partículas libres en el espacio-tiempo, inobservables en virtud de la teoría misma” (2010, p. 68). Por su parte, Dieks, entre muchos otros, también ha criticado el costo metafísico al que nos somete la interpretación de muchos mundos.

La carga metafísica agregada [a partir de la reificación de las modalidades en la forma de mundos posibles] resulta enorme, mientras que las virtudes teóricas que deberían compensar ese movimiento permanecen poco claras. En particular, si bien es cierto que la noción de que todas las posibilidades son igualmente reales y que no existe una distinción ontológica entre lo actual y lo posible (el punto central de la popular interpretación de muchos mundos) resuena muy bien con la democracia de los términos que hacen a la superposición cuántica, esta misma simetría hace difícil explicar o acomodar el carácter indeterminista de la teoría (Dieks, 2010, p. 134).

Consideramos, como sostiene Einstein, que la física es en sí misma un desarrollo metafísico,⁷ un modo del pensamiento que intenta expresar lo real en tanto determinación física. Brindar una interpretación coherente de la mecánica cuántica nos empuja entonces a reconsiderar el significado mismo de aquello que entendemos por

⁷ Einstein le escribe en el verano de 1935 una carta a Schödinger en la que le señala que “el problema es que la física es una especie de metafísica; la física describe la ‘realidad’, pero no sabemos lo que la ‘realidad’ es. Lo sabemos solo a través de la descripción física” (*apud* Curd & Cover, 1998, p. 1196).

“realidad física”. En este sentido, creemos, siguiendo a Einstein, que la noción de realidad no debe ser un presupuesto dogmático del pensamiento, sino más bien un concepto guía que debe ser continuamente revisado y desarrollado. Como señala Wolfgang Pauli, uno de los más radicales pensadores de la revolución cuántica,

cuando el hombre común dice “realidad” usualmente piensa que se refiere a algo auto-evidente y conocido; para mí, por el contrario, elaborar una nueva idea de realidad me parece específicamente la tarea más difícil e importante de nuestro tiempo (Pauli *apud* Laurikainen, 1998, p. 193).

Respecto del mapa interpretativo de la mecánica cuántica y dejando de lado las posiciones instrumentalistas que niegan la necesidad de una interpretación,⁸ un posible trazo, que permite distinguir entre el aglutinado conjunto de interpretaciones encontradas en la literatura, remite a la prioridad e importancia asignada al “formalismo de la teoría”, por un lado, o a “los principios metafísicos”, por otro (cf. de Ronde, 2010). Según qué estrategia se elija, tenemos entonces aquellas interpretaciones que sostienen una preeminencia del formalismo ortodoxo por sobre los principios metafísicos, por ejemplo, espacio-temporalidad, objetividad, causalidad etc., y aquellas interpretaciones que prefieren, implícita o explícitamente, partir de un cierto conjunto de principios metafísicos y avanzar sobre el formalismo de modo tal que éstos sean respetados. En el primer caso, el formalismo ortodoxo es tomado como punto de partida en el análisis de las condiciones bajo las cuales es posible desarrollar una interpretación coherente de la teoría. Según esa posición, debemos ser capaces de desarrollar un esquema metafísico que nos permita señalar qué es aquello de lo que nos habla la mecánica cuántica. Este camino ha sido desarrollado fundamentalmente por las diversas líneas interpretativas que se derivan de aquello que fue dado en llamar, por Birkhoff y von Neumann (1936), la lógica cuántica. Algunos ejemplos son: el desarrollo propuesto por von Weizsäcker, la escuela de Ginebra de Jauch y Piron o la misma IM, representada sobre todo en las versiones de van Fraassen, Kochen y Dieks. En el segundo caso, el punto de partida resulta de una concepción particular, presentada como “autoevidente”, de la realidad física. Son entonces los principios de la metafísica clásica los que determinan explícitamente las condiciones bajo las cuales el formalismo de la teoría debe ser comprendido y desarrollado. Ejemplos paradigmáticos de tales interpretacio-

⁸ Por ejemplo, Christopher Fuchs junto con Asher Peres han señalado lo siguiente: “(...) la teoría cuántica no describe la realidad física. Lo que hace es proveer un algoritmo para computar las probabilidades de los eventos macroscópicos (‘clicks detectados’) que son consecuencias de intervenciones experimentales. Esta definición estricta del alcance de la teoría cuántica es la única interpretación que jamás será necesitada, ya sea por experimentalistas o teóricos” (2000, p. 71).

nes son las propuestas de Bohm (1953), la interpretación de muchos mundos de DeWitt (DeWitt & Graham, 1973) o la interpretación de GRW (Ghirardi; Rimini & Weber, 1986). Esta dualidad de orden metodológico que acabamos de señalar se encuentra también presente dentro de las IM y permite separarlas en dos grandes grupos (cf. de Ronde, 2010), aquellas *interpretaciones modales que comienzan por el formalismo ortodoxo* (IMFO) y aquellas *interpretaciones modales que comienzan por principios metafísicos* (IMPM).

El primer ejemplo de IMFO es la versión de Copenhague propuesta por van Fraassen en la que se sostiene una posición agnóstica respecto de las condiciones aplicables a las propiedades del formalismo cuántico. Según van Fraassen, y de acuerdo a su constructivismo empirista, hay que salvar el fenómeno.

Ser un empirista es sostener la creencia de que no existe nada más allá de lo actual, de los fenómenos observables. Es también reconocer que no existe ninguna modalidad objetiva en la naturaleza. Desarrollar una posición empirista de la ciencia es participar de la búsqueda de la verdad sólo respecto del mundo empírico, de lo que es actual y observable (van Fraassen, 1980, p. 202-3).

Sin embargo, más allá de las observaciones actuales, aún desde un punto de vista pragmático, cualquier desarrollo metafísico puede resultar interesante a la hora de responder a la pregunta ¿cómo es el mundo cuántico, si la mecánica cuántica es una teoría verdadera?⁹ Como señala Mauro Dorato “la interpretación de la ‘interpretación de la física’ (que ha sido defendida por van Fraassen, Giere e Lange) no requiere la verdad de nuestras teorías físicas, y puede ser también desarrollada por los instrumentalistas, puesto que toda la tarea interpretativa descansa en la proposición condicional (‘si las teorías son por lo menos aproximadamente verdaderas’)” (Dorato, en prensa, p. 8). La metafísica aparece entonces, fundamentada desde la pragmática, como una estructura regulativa que permite el desarrollo de la ciencia. Tanto van Fraassen como Dieks sostienen la posición ortodoxa de que el estado cuántico brinda toda la información disponible y no hay necesidad de completarla con variables ocultas o agregar “a mano” condiciones *ad hoc*. Si bien Dieks comenzó por presentar una interpretación “realista” en la que se pretende discutir respecto de “sistemas físicos” con “propiedades” (cf. Dieks, 1988a, 1988b, 1989), ha demostrado, en sus desarrollos posteriores (Bene & Dieks, 2002), que no se encuentra en contra de la idea de cambiar sus presupuestos metafísicos hacia posiciones menos ortodoxas. La justificación de esta posición parece encontrarse en sus trabajos más tempranos, donde señala que:

⁹ En ese sentido, resulta interesante mencionar un artículo reciente de van Fraassen (2010) en el que se hace evidente que tal desarrollo metafísico no se limita a la concepción clásica del mundo.

(...) no existe un modelo visualizable que tome en cuenta toda la estructura [de la teoría cuántica], la demanda de que debería existir un tal modelo sería equivalente a pedir que la física clásica debe determinar las herramientas conceptuales de toda nueva teoría. Esto iría en contra de la posibilidad de desarrollar teorías fundamentalmente nuevas y conceptualmente independientes de la física clásica (Dieks, 1989, p. 1417).

Por otra parte, claros ejemplos de IMPM son la versión bohmiana de Jeffrey Bub (1992) y la versión atómica de Guido Bacciagaluppi y Michael Dickson (1997). Estos enfoques intentan desarrollar el formalismo basándose, desde el comienzo, en el esquema metafísico clásico propio del programa de variables ocultas, en donde las partículas existen y las trayectorias se encuentran bien definidas.¹⁰ Sin embargo, como señala Richard Healey, estos intentos pueden ser entendidos no sólo como intentos de desarrollar una nueva interpretación, sino más bien como estructurando una nueva teoría en sí misma. “No puedo aceptar a las teorías de variables ocultas como una interpretación de la mecánica cuántica. Una teoría de variables ocultas es, fundamentalmente, una teoría separada y distinta de la mecánica cuántica. Ofrecer una teoría semejante no es presentar una interpretación de la mecánica cuántica, sino cambiar el tema de la discusión” (Healey, 1989, p. 24). Ciertamente, en el ojo de la tormenta, se encuentra otra vez la noción de “posibilidad cuántica” y su significado.

3 LA NOCIÓN DE “POSIBILIDAD” EN LA INTERPRETACIÓN MODAL

Separando entre los niveles de *posibilidad* y *actualidad*, las IM son capaces de proveer un esquema interpretacional capaz de dar cuenta de los resultados observacionales obtenidos a partir de las mediciones. Como señalamos anteriormente, ambos niveles, así como su relación, deben ser considerados atentamente si buscamos dar al formalismo cuántico una interpretación coherente que trascienda las meras “observaciones actuales”. En contraposición al tratamiento desarrollado por van Fraassen, en el que las proposiciones “actuales” y “posibles” son consideradas a partir de estructuras diferentes, en Domenech, Freytes y de Ronde (2006, 2008), respetando el formalismo ortodoxo cuántico y utilizando herramientas algebraicas y topológicas, fuimos capaces de embeber el sistema ortomodular en uno modal, lo que nos permitió considerar dentro de la misma estructura tanto las proposiciones actuales como las posibles. Toman-

¹⁰ En el caso particular de la versión atómica, se realiza un intento explícito por desarrollar el formalismo en términos de un esquema estocástico (cf. Bacciagaluppi & Dickson, 1997).

do en cuenta esta nueva estructura modal, avanzamos en la discusión respecto del significado de la posibilidad cuántica y la actualización de las propiedades posibles.¹¹

Para considerar las proposiciones posibles, consideramos el siguiente esquema. Sea P una proposición respecto de un sistema, y consideremos a P como un elemento del retículo ortomodular L . Si nos referimos a $\Diamond P$ como la posibilidad de P , entonces $\Diamond P$ será un elemento central de L . Esta interpretación de la posibilidad en términos del álgebra booleana de los elementos centrales de L refleja el hecho de que uno puede predicar simultáneamente respecto de todas las posibilidades. Esto es así puesto que siempre se puede establecer un homomorfismo booleano de la forma $\nu: Z(L) \rightarrow \mathbf{2}$. En Domenech, Freytes y de Ronde, (2006), expandimos la estructura ortomodular de forma tal a incluir las proposiciones respecto de la posibilidad de la siguiente manera. Si P es una proposición respecto del sistema y P ocurre, entonces es trivialmente posible que P ocurra ($P \leq \Diamond P$). Si identificamos P con la atribución de valores de proposiciones $\langle \mathbf{A}, \sigma \rangle$ como se encuentra definido en van Fraassen (1991), podemos decir que las consecuencias clásicas de P coinciden con aquellas de sus correspondientes proposiciones de atribución de estado $[\mathbf{A}, \sigma]$. Dada una propiedad actual y un conjunto completo de propiedades compatibles con ella, queda determinado un contexto en el que se mantiene el discurso clásico. Las consecuencias clásicas, que son compatibles con una propiedad dada, son las mismas que se obtendrían considerando la propiedad actual como una propiedad posible (si P es una propiedad de un sistema, $\Diamond P$ es el más pequeño *elemento central* mayor que P). Recordemos ahora algunos de los resultados obtenidos. Como es sabido, dada una proposición, es posible definir un contexto en el que se puede predicar la certeza de esa proposición, como así también la certeza de un conjunto de proposiciones compatibles con ella. Del resto de las propiedades tan sólo puede predicarse la posibilidad. Sea L un retículo ortomodular, dados a, b, c en L , escribimos $(a, b, c)D$ si y sólo si $(a \vee b) \wedge c = (a \wedge c) \vee (b \wedge c)$; $(a, b, c)D^*$ si y sólo si $(a \wedge b) \vee c = (a \vee c) \wedge (b \vee c)$ y $(a, b, c)T$ si y sólo si $(a, b, c)D$, $(a, b, c)D^*$ se mantienen las permutaciones de a, b, c . Un elemento z en L se llama *central* si y sólo si para todos los elementos a, b en L tenemos $(a, b, z)T$. Denotamos por $Z(L)$ el conjunto de todos los elementos centrales de L y lo llamamos el centro de L . $Z(L)$ es un sub-retículo booleano de L (cf. Maeda & Maeda, 1970, teorema 4.15). Con esas herramientas y agregando un operador posibilidad, que cumple con los requerimientos antes mencionados, podemos dar una extensión de la estructura ortomodular. Tal extensión es una clase de álgebras, llamadas retículos booleanos ortomodulares saturados, que ad-

¹¹ Este esquema también nos permite representar la regla de Born que da cuenta de la probabilidad de actualización de las propiedades posibles, algo que ha sido discutido por Dieks (2007).

miten la estructura ortomodular como un reducto.¹² Si L es un retículo ortomodular y L^\diamond un retículo booleano ortomodular saturado, tal que L puede ser embebido en L^\diamond , decimos que L^\diamond es una extensión modal de L . Dados L y L^\diamond , definimos el espacio de posibilidad que representa el contenido modal agregado al discurso respecto de las propiedades del sistema como la sub-álgebra de L^\diamond generada por $\{\diamond P: P \in L\}$. Denotamos a ese espacio como $\diamond L$ y se puede probar que es una sub-álgebra booleana de la extensión modal. Dentro de tal esquema, la actualización de propiedades adquiere un significado riguroso.

Teorema. Sea L un retículo ortomodular, $(W_i)_{i \in I}$ la familia de los sub-retículos booleanos de L , L^\diamond una extensión modal de L y $f: W \rightarrow \mathbf{2}$ un homomorfismo booleano. Si consideramos la extensión modal L^\diamond de L entonces existe un homomorfismo booleano $f: \langle W \cup \diamond L \rangle_{L^\diamond} \rightarrow \mathbf{2}$ tal que $f^*|_W = f$.

Tomando en cuenta las actualizaciones compatibles desde diferentes contextos, hemos desarrollado un teorema análogo al de KS para las *propiedades posibles*, al cual hemos llamado teorema de KS modal (KSM).

Teorema. Sea L un retículo ortomodular. Entonces L admite una valuación global si y sólo si para cada espacio de probabilidad existe un homomorfismo booleano $f: \diamond L \rightarrow \mathbf{2}$ que admite una actualización compatible.

El teorema de KSM demuestra que el enriquecimiento del retículo ortomodular con proposiciones modales no permite evitar el carácter contextual del lenguaje cuántico. Esto determina límites explícitos a la interpretación de la posibilidad cuántica en relación a la estructura formal subyacente a la teoría. La conclusión que se deriva entonces es que la *posibilidad cuántica* resulta una noción completamente diferente a la de *posibilidad clásica*.

El significado e interpretación de la noción de “posibilidad” en la IM difiere profundamente según las diferentes versiones. Según las IMPM, siguiendo la idea del programa de variables ocultas de “restaurar la forma clásica de pensar respecto de *lo que hay*” (Bacciagaluppi, 1996, p. 74), la posibilidad cuántica debe considerarse en tanto posibilidad clásica. Puesto que estas interpretaciones permiten configurar un nuevo formalismo, son capaces de evitar tanto el teorema de KS como el teorema de KSM.

¹² Hemos demostrado además que son una variedad, o sea, definidos por ecuaciones; y desarrollamos un sistema lógico para esta estructura, obteniendo completitud algebraica y completitud respecto de las semántica de tipo Kripke (cf. Domenech; Freytes & de Ronde, 2009).

Las versiones IMPM consideran tan sólo el nivel actual, a partir de una *factorización preferencial*, que determina asimismo la base del espacio de Hilbert en que se representa el sistema cuántico, en el caso de la versión atómica (cf. Bacciagaluppi & Dickson, 1997), y de un *observable preferencial* en el caso de la versión propuesta por Bub. De este modo, se recupera una noción de posibilidad que refiere a un conjunto de valores actuales desconocidos permitiendo al mismo tiempo, una interpretación en términos de ignorancia. Por el contrario, en las IMFO, estos niveles son tomados en cuenta explícitamente a partir de la distinción entre los “estados dinámicos” y los “estados valuados” en el caso de van Fraassen, y los “estados matemáticos” y “estados físicos” en el caso de Dieks y Vermaas. Subrayamos que, mientras las IMPM intentan evitar la cuestión referida a la interpretación de la posibilidad en el formalismo ortodoxo, las IMFO deben responder, si pretenden brindar una interpretación realista de la teoría, por el lugar que ocupa la “posibilidad” respecto del formalismo cuántico. Un aspecto central que debe ser considerado respecto del pasaje de lo posible a lo actual es que, mientras que las IMPM consideran todas las propiedades como actuales, las IMFO mantienen las superposiciones cuánticas¹³ al nivel de la “posibilidad”, independientemente de cualquier actualización particular observada. En este caso, la evolución del estado cuántico no se renueva con cada observación, el estado cuántico nunca colapsa a uno de los términos, sino que continúa evolucionando según la ecuación de Schrödinger en forma unitaria. Como sostiene Pieter Vermaas,

el nombre “modal” es, en mi opinión, apropiado puesto que puede entenderse como apuntando al hecho de que las interpretaciones modales interpretan a la mecánica cuántica cambiando sutilmente el significado estándar de las modalidades “actualidad” y “posibilidad”. (...) [En las teorías estadísticas,] las posibilidades no actualizadas son removidas de los estados. En las interpretaciones modales, el estado no se actualiza en cuanto lo hace un cierto estado de cosas. Las posibilidades no-actualizadas no son removidas de la descripción del sistema y, de ese modo, el estado codifica, no solo lo que es actual en el presente, sino también lo que es posible. Esas posibilidades no actualizadas pueden todavía, como consecuencia de esto, afectar en principio el curso de eventos futuros (Vermaas, 1999, p. 295).

¹³ Una de las características más importantes del espacio de Hilbert es que es un espacio cerrado en las combinaciones lineales. Esto significa que, si tenemos dos vectores normalizados, sean $|\mu\rangle$ y $|\nu\rangle$, que representan dos estados físicos, siempre podemos formar una combinación lineal y obtener un nuevo estado, $|\psi\rangle$ ($|\psi\rangle = \alpha|\mu\rangle + \beta|\nu\rangle$). La estructura del espacio de Hilbert junto con el principio de superposición implican, a su vez, que dado cualquier estado, es posible expresarlo como una combinación lineal de una infinidad de vectores que pertenecen a los subespacios de los que el estado es un elemento: $|\psi\rangle = \sum \alpha_i |\phi_i\rangle$ donde los $\{|\phi_i\rangle\}_i$ representan un conjunto infinito de bases ortonormales y los $\{\alpha_i\}_i$ son las coordenadas de $|\psi\rangle$ en las distintas bases.

Aún más importante resulta el hecho, sin análogo clásico, de que las posibilidades *interactúan* en tanto existentes físicos independientemente de lo acontecido en el nivel actual.

En la física clásica, la descripción más fundamental de un sistema físico (un punto en el espacio de fases) refleja solo lo actual, y nada que pueda ser considerado como meramente posible. Es verdad que a veces los estados que contienen probabilidades son utilizados en la física clásica. Pensemos en la distribución \tilde{n} de probabilidades en la mecánica estadística. Pero la ocurrencia de posibilidades en estos casos solamente refleja nuestra ignorancia respecto de lo que es actual. Los estados estadísticos no se corresponden con características del sistema actual (contrariamente al caso de las superposiciones cuánticas), sino que cualifican nuestro grado de ignorancia respecto de las características actuales. Esto se relaciona con el punto esencial de la diferencia entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica que ya hemos señalado. *En la mecánica cuántica, las posibilidades contenidas en el estado de superposición pueden interferir entre ellas*. No existe nada comparable en la física clásica. En la mecánica estadística, las posibilidades contenidas en \tilde{n} evolucionan cada una de modo separado y no tienen entre ellas ningún tipo de influencia mutua. Solo una de estas posibilidades corresponde a la situación real (Dieks, 2010, p. 124-5, énfasis mio).

De este modo queda en evidencia que, para las IMFO, (i) *existen dos niveles independientes determinados por lo posible y por lo actual*; y más importante aún que (ii) *los posibles interfieren e interactúan en tanto existentes físicos* de un modo que no encuentra análogo clásico. Como hemos señalado, existen diferentes desarrollos en la interpretación modal que buscan resolver este esquema. Sin embargo, si bien las IMFO observan el carácter no-clásico de los estados cuánticos e inclusive de la posibilidad cuántica, como resulta evidente a partir de la distinción entre los *dynamic states* y los *value states* en van Fraassen y los *physical states* y *mathematical states* en Dieks, tanto Dieks como van Fraassen han tomado una posición empirista que disuelve, en gran medida, la necesidad de desarrollar una conceptualización adecuada de la noción de posibilidad cuántica. La posición empirista de van Fraassen sostiene que la física sólo debe ocuparse de lo actualmente observado y que la posibilidad es una estructura teórica creada para tal fin. La idea de que la posibilidad cuántica es tan sólo un constructo teórico carente de contenido ontológico se retrotrae a la interpretación de Bohr de la mecánica cuántica, en donde la función de onda cuántica Ψ sólo debe ser pensada en términos algorítmicos. Como discutimos anteriormente (de Ronde, 2010), esta posición extendida en forma radical parece concluir en un instrumentalismo, aceptado implícitamente por

muchos y expresado explícitamente por pocos (cf. Fuchs & Peres, 2000). Bas van Fraassen, a quien consideramos un seguidor de la línea de pensamiento de Bohr, también ha tomado una posición antimetafísica con respecto a la interpretación de la función de onda cuántica. Su justificación se sostiene en su enfoque empirista, el cual le permite señalar que *las modalidades sólo se encuentran en nuestras teorías y no en el mundo*. Dieks, otro seguidor de Bohr, ha desarrollado una posición humeana cercana al empirismo de van Fraassen.

La posición humeana sostiene que necesitamos asumir la existencia de un único mundo, a saber, el mundo actual ordinario, que las regularidades de este mundo se encuentran expresadas en nuestras leyes y teorías, y que introducimos otros mundos posibles y circunstancias contrafácticas como construcciones del pensamiento, para poner de manifiesto las peculiaridades de las leyes que hemos formulado. Los mundos posibles son herramientas mentales y no entidades realmente existentes. Las modalidades, como la posibilidad y la necesidad, son conceptos que introducimos sobre la base de nuestras teorías y no corresponden a características de la realidad que trascienden la descripción ordinaria en términos de eventos actuales (Dieks, 2010, p. 126, énfasis mio).

En el caso de sostener una posición empirista donde lo real se reduce a lo “actualmente observado”, como sostiene van Fraassen, podríamos argumentar que no existe, salvo por cuestiones pragmáticas, necesidad alguna de dar cuenta del formalismo de la teoría en términos interpretativos.¹⁴ Evitando los esquemas metafísicos clásicos, pero asumiendo la necesidad de entrelazar estructuras conceptuales a los formalismos matemáticos para articular las teorías físicas, hemos caracterizado una posición que denominamos *constructivismo metafísico* que considera que la física no debe ser pensada en tanto estructura pragmática, en tanto algoritmo que permite dar cuenta de lo meramente observado, sino, más bien, como configurando internamente la experiencia a partir de conceptos y estructuras formales (cf. de Ronde, 2009, 2011a). Independientemente de la importancia de la metafísica y dejando de lado el debate realismo-antirealismo, sostenemos que debemos considerar el rol dominante de los esquemas metafísicos en la configuración interna de la experiencia. Siguiendo la máxima de Einstein “es tan sólo la teoría la que nos permite decir qué es aquello que puede ser observado”,¹⁵ hemos argumentado que la posición empirista deja de lado la cuestión de brindar una respuesta a la pregunta ¿de qué habla la teoría cuántica? Puesto

¹⁴ De cualquier modo, un problema central que parece no encontrar una solución adecuada resulta de la imposibilidad de determinar claramente el significado de “observación actual” (cf. Curd & Cover, 1998, p. 1088-113).

¹⁵ Máxima que según relata el propio Heisenberg (1971) le permitió desarrollar el llamado *principio de indeterminación*.

que no existen “hechos desnudos”, la respuesta a esta pregunta debe brindar, de acuerdo a nuestro constructivismo metafísico, una relación coherente entre la estructura formal de la teoría y los conceptos, de modo tal que permitan explicar acabadamente la experiencia cuántica. Esto significa también brindar necesariamente una respuesta al significado de la posibilidad cuántica.¹⁶

La física se encuentra desde un comienzo necesariamente intrincada con esquemas (metafísicos) que *constituyen* nuestra configuración de la experiencia. Permaneciendo en los límites de la evidencia empírica, uno no puede acceder a la representación física puesto que para describir la “actualidad observada” nos encontramos, desde un comienzo, imbricados y sostenidos por estructuras conceptuales. La representación conceptual de lo actualmente dado *hic et nunc*, se encuentra siempre, implícita o explícitamente, como una estructura necesariamente presupuesta para describir un estado de cosas. Desde nuestro constructivismo metafísico consideramos a los conceptos como *creaciones*, creaciones a través de las cuales la física es capaz de expresar experiencias singulares (cf. de Ronde, 2009).

La transición, propia de la ciencia, desde campos de experiencia previamente investigados hacia nuevos campos de experiencia jamás consistirá en la simple aplicación de leyes ya conocidas. Por el contrario, un nuevo campo de experiencia siempre llevará a la cristalización de un nuevo sistema de conceptos y leyes (...) El avance desde aquellas piezas ya terminadas hacia aquellas recién descubiertas, a ser concebidas de un modo original, demanda en cada momento un salto intelectual que no puede lograrse a partir del simple desarrollo del conocimiento existente (Heisenberg *apud* Bokulich, 2006, p. 90).

El problema, desde esta perspectiva, deviene la creación de *conceptos adecuados* que permitan considerar el formalismo cuántico y su experiencia de modo coherente. Una posibilidad para avanzar en este desarrollo propiamente metafísico, independiente de la consideración de mundos posibles *à la Lewis* (1973), es la de volver sobre el desarrollo aristotélico y considerar la noción de potencia. En la próxima sección, avanzaremos en esta dirección ya transitada por muchos autores continuando con el desarrollo de un concepto que hemos denominado anteriormente *potencialidad ontológica* (cf. de Ronde, 2005).

¹⁶ La cuestión no puede ser evadida a partir de reglas interpretativas que distinguen entre una estructura matemática y una física, o una dinámica y una de valores. Evidentemente tanto unos estados como otros son parte constitutiva del formalismo, por lo cual consideramos que resulta impropio llamar a unos “físicos” y otros “matemáticos”. Si el pasaje se restringe a una regla *ad hoc* introducida para sobrellevar el problema de la interpretación, lo único que se logra es cambiarlo de lugar, esconderlo o restringirlo a un ámbito supuestamente abstracto.

4 POTENCIALIDAD ONTOLÓGICA E INTERPRETACIÓN MODAL

Inaugurando la tradición hilemórfica, Aristóteles desarrolló un esquema metafísico en el que, a través de las nociones de *actualidad* y *potencialidad*, fue capaz de articular una solución al problema del movimiento que había quedado planteado en la filosofía presocrática (cf. Simondon, 2005). Dentro del ámbito de la potencia, Aristóteles distinguió entre *potencialidad irracional* y *potencialidad racional*.¹⁷ La potencialidad irracional da cuenta del proceso a través del cual la *materia* deviene *forma*, siendo la materia de una sustancia aquello de lo que está compuesta y la forma, la manera en que eso se une para que el todo que la constituye pueda desarrollar sus funciones características (cf. Met., 2000, 1050a17-23). Esa noción permite considerar la transformación de una semilla en un árbol, o de un niño en un hombre. La potencialidad racional, por su parte, se encuentra caracterizada por Aristóteles en relación al problema de poseer una facultad (Met., 1046b5-24). ¿Qué significa cuando digo “puedo”? Mientras en la potencialidad irracional la actualización resulta su *telos* y fin último,¹⁸ la potencialidad racional, como se encuentra discutido en *Acerca del alma* y en el libro Θ de la *Metafísica*, puede ser considerada como un ámbito independiente de la actualidad. La potencialidad racional, como señala Aristóteles, es el lugar, el *topos*, en que los contrarios se encuentran, puesto que “todas las potencias racionales, ellas mismas, se extienden a ambos contrarios, mientras que las irracionales son cada una de un contrario solamente” (Met., 1046b5-10). Aristóteles explica este carácter *paraconsistente* remarcando que una capacidad se encuentra siempre ligada a la *contradicción*, su *ser al no ser*. La contradicción del ser y del no ser se encuentra presente en la potencialidad racional disolviéndose tan sólo cuando, considerando el ámbito de lo actual, uno de los términos resulta forzado a efectuarse. Criticando a los megáricos que “identifican potencia y acto, con lo que tratan de suprimir algo de no escasa importancia”, Aristóteles admite que “cabe que algo pueda ser, pero no sea, y pueda no ser, pero sea. E igual en las demás categorías: que siendo capaz de andar, no ande, y que no esté andando, aun siendo capaz de caminar” (Met., 1047a20-5).

¹⁷ Tal vez en lugar de la expresión utilizada por Calvo Martínez de *potencialidad irracional* podría también considerarse el término *potencialidad no racional*, pues pertenece a esta especie de potencialidad todo lo que es automático y por naturaleza, como el respirar y el nutrirse en los animales y plantas, y no convendría decir que eso es *irracional*, sino más bien que *no pertenece al dominio de lo racional*, o bien, para mantener la acepción aristotélica, decir que no tienen alma racional. Teniendo en cuenta esta salvedad y para ser consistentes con la traducción, continuaremos utilizando la terminología elegida por Calvo Martínez.

¹⁸ Como señala Smets (2005, p. 44) “la transición del ser potencial [irracional] al actual debe ser ubicada dentro del contexto de la teoría de movimiento y cambio [aristotélica], el cual se encuentra dentro de su concepción teleológica de la causalidad”.

Tanto para Giorgio Agamben (1999) como para Gilbert Simondon (2005), quienes discuten la independencia ontológica de la potencia respecto del ámbito actual, la importancia de la potencialidad en la historia del pensamiento occidental fue relegada al lugar accesorio de la *posibilidad lógica*. Como conclusión de este desarrollo metafísico, en el que la potencialidad en tanto modo de existencia fue dejada de lado, podemos considerar cómo, en la física clásica, todo sistema puede ser descripto a partir de las *propiedades actuales*. En este caso, un punto en el espacio de fases Γ permite mostrar el conjunto de los valores de las propiedades que caracterizan al sistema, o sea, cuales son las propiedades actuales que lo determinan (cf. Karakostas & Hadzidaki, 2005, p. 609). La mecánica clásica nos dice entonces, *vía* la ecuación de movimiento, cómo es que, a partir de las condiciones iniciales, el sistema (determinado por las propiedades actuales que lo caracterizan) evoluciona, o sea, cuales son aquellas propiedades que devendrán actuales en el futuro. En la mecánica clásica, puesto que la descripción física se encuentra completamente determinada por el conjunto de propiedades actuales, la potencialidad, en términos ontológicos, termina ocupando el lugar vacío de aquello que *no es* en el presente y que tan sólo podría llegar a *ser* en un futuro promisorio. En la mecánica cuántica por el contrario, el ámbito de la potencialidad parece exceder de manera no trivial la descripción en términos exclusivos de la actualidad propuesta por la física clásica.

Si bien la mecánica cuántica se relacionó con la modalidad desde su origen, resultaba también evidente que la posibilidad y probabilidad cuántica eran algo completamente diferentes a la posibilidad o probabilidad consideradas en las teorías clásicas. Según señala Heisenberg,

el concepto de onda de probabilidad [en mecánica cuántica] era algo enteramente nuevo en la física teórica desde Newton. La probabilidad en matemática o en mecánica estadística se concibe como una proposición respecto de nuestro grado de desconocimiento de la situación actual. Cuando tiramos el dado, no conocemos los finos detalles del movimiento de nuestras manos que determinan la caída del dado y, por ello, decimos que la probabilidad de obtener un número determinado es una en seis. Por su parte, la función de onda de probabilidad significaba algo completamente diferente, significaba una tendencia hacia algo (Heisenberg, 1958, p. 42).

Fue el mismo Heisenberg quien intentó desarrollar una interpretación en términos de la noción de potencia aristotélica. Según él, el concepto de onda de probabilidad, “era una versión cuantitativa del concepto de potencia de la filosofía de Aristóteles. Introducía algo entre la idea de un evento y el evento actual, una extraña idea

especial de realidad física justo entre lo posible y lo real. [En particular], los físicos han comenzado gradualmente a concebir las órbitas electrónicas etc., no como una realidad, sino como una extraña forma de *potencia*” (Heisenberg, 1958, p. 156). En este sentido, uno de los ejemplos más interesantes es tal vez el enfoque formal de la integral de camino propuesto por Richard Feynman (cf. Feynman & Hibbs, 1965). Cuando Feynman habla aquí de calcular probabilidades, piensa implícitamente en términos de potencialidades existentes. ¿Por qué sino deberíamos tomar en cuenta caminos incompatibles en el pasaje del electrón en el experimento de la doble rendija? Su enfoque toma en cuenta todos los caminos mutuamente incompatibles en el modo de ser de la potencialidad, allí donde los límites de la actualidad no pueden ser impuestos.

Pese a que el desarrollo propuesto por Heisenberg retoma la noción de potencia, sus intentos se han encontrado siempre con el límite de la actualidad, considerada en tanto “realidad”. Autores como Henry Margenau, Constantin Piron, Diederik Aerts, Mauricio Suárez, Vassilios Karakostas y Mauro Dorato (cf. de Ronde 2011a) han desarrollado diversos esquemas para dar cuenta de las propiedades cuánticas como “potencialidades”, “propensidades” o “latencias”. Sostenemos que esas líneas interpretativas, implícita o explícitamente, se han encargado, sosteniéndose sobre la noción de *potencialidad irracional*, de restringir la potencia al ámbito actual. Entendida como *proceso*, como *posibilidad lógica*, la potencialidad irracional no permite un verdadero desarrollo ontológico independiente de lo actual, y termina apareciendo siempre como accesoria de aquello que es considerado real, o sea, la “actualidad”. Subvirtiendo estos elementos y basándonos en la noción aristotélica de *potencialidad racional*, creemos que es posible desarrollar un concepto, que denominaremos *potencialidad ontológica* (cf. de Ronde, 2005, 2011a, en prensa), capaz de brindar un marco conceptual adecuado que permita interpretar el formalismo cuántico más allá e independientemente de la actualidad.

Dentro de la mecánica cuántica, existen elementos que nos permiten comenzar a concebir un puente entre esa noción de potencialidad ontológica que pretendemos desarrollar y el formalismo de la teoría. En particular, la noción de *superposición cuántica* contiene ya en sí misma una estructura que responde a características que pueden ser pensadas en forma original a partir de dicha noción. Como señala Paul Dirac, el principio de superposición determina una distancia insalvable respecto de las teorías clásicas.

La naturaleza de las relaciones que el principio de superposición requiere que existan entre los estados de un sistema es de un tipo que no puede ser explicado en términos de conceptos físicos familiares. Uno no puede en ningún sentido imaginar un sistema estando al mismo tiempo en dos sistemas y ver la equivalencia de esto como el sistema encontrándose en otro estado completamente di-

ferente. Existe aquí una nueva idea a la cual debemos acostumbrarnos, y a partir de la que debemos, sin tener en absoluto una imagen clásica en donde apoyarnos, desarrollar también una teoría matemática (Dirac, 1974, p. 12).

Como señalamos anteriormente, desde el punto de vista formal, la superposición cuántica se expresa en términos de una combinación lineal en que la función de onda Ψ puede ser representada a partir de una base ortonormal: $\Psi = \sum c_i |\alpha_i\rangle$. Cada uno de los términos puede ser observado según la probabilidad relacionada con los números reales c_i . Sin embargo, como señala Dieks “la superposición corresponde a los posibles indicadores del aparato (a los diferentes ‘punteros’), esto es, a los diferentes resultados posibles de la medición. Claramente, todos los resultados posibles ocurren en igualdad de condiciones en la superposición del estado final, con lo cual no parece haber una señal que nos permita considerar a alguno de ellos como más real que otro” (2010, p. 120). Otro indicador que expresa la distancia respecto de las superposiciones clásicas se encuentra dado por la constitución de la superposición cuántica a partir de *términos contradictorios*, por ejemplo, “gato vivo” y “gato muerto”, “*spin* para arriba” y “*spin* para abajo”. De este modo, si tomamos en cuenta la superposición cuántica más allá de su expresión formal, se nos presenta entonces como fundamental la consideración de la *contradicción* tanto en términos formales como conceptuales o interpretativos. ¿Cómo puede ser pensada la contradicción? Hoy contamos con las lógicas *paraconsistentes*, que ciertamente podrían ser consideradas con el objetivo de avanzar en el camino de un desarrollo de la estructura formal de la teoría (cf. da Costa & de Ronde, en prensa).¹⁹ Como hemos señalado anteriormente, la relación no estándar entre la posibilidad y la actualidad en la teoría cuántica se encuentra también expuesta a partir del teorema de KSM. La posibilidad que surge de la estructura formal de la teoría cuántica no puede ser considerada en términos del esquema lógico clásico. También los físicos han observado en el laboratorio el extraño comportamiento cuántico expuesto por las superposiciones de estados mutuamente contradictorios. Hoy, diferentes versiones de gatos de Schrödinger (1935) dan lugar a un sinnúmero de experiencias y desarrollos tecnológicos,²⁰ y todo parece indicar, según la evidencia empírica, que esos estados imaginados alguna vez por Schrödinger (en algún sentido) ¡existen!

Según la IM, es en el nivel de la posibilidad donde se encuentran e interactúan las superposiciones de estados no actualizados con propiedades contradictorias. La pregunta resulta en primer término si este nivel puede ser considerado como un modo

¹⁹ Discusión personal con Newton da Costa y Décio Krause, Canela, mayo de 2010.

²⁰ Los estados gatos de Schrödinger son fundamentales en la computación, teleportación y comunicación cuánticas (cf. Leibfried *et al.*, 2005; Ourjoumtsev *et al.*, 2007).

constitutivo de la realidad física y, no en tanto, mero esquema lógico-algorítmico. Contrariamente a Dieks y van Fraassen, quienes han sostenido que no es necesario considerar este ámbito en términos ontológicos, nuestra intención es proveer de un esquema conceptual a la superposición cuántica. Entendemos que tanto las estructuras matemáticas como las conceptuales configuran el ámbito de la experiencia y resulta por tanto necesario dar cuenta de ellas de modo coherente, es decir, respecto de la propia experiencia, en las teorías físicas (cf. de Ronde, 2009). Damos ahora los siguientes argumentos que refieren a la relación pensable entre el formalismo cuántico y una idea de potencia en tanto modo de lo existente independiente de lo actual.

(1) La potencialidad ontológica determina un ámbito *independiente de la actualidad*. Este modo del ser potencial puede considerarse como un ámbito de la existencia con caracteres disimiles al de la actualidad, puesto que, como bien señala Aristóteles, “el ser se dice de distintas maneras”. En el caso de la IM, la idea no estándar de posibilidad resulta independiente de la actualización, la superposición jamás se actualiza y permanece siempre en el ámbito de la posibilidad, evolucionando según la ecuación de Schrödinger en forma unitaria, independiente de las observaciones actuales. La potencialidad ontológica puede pensarse, entonces, como el modo de ser en que una *facultad*, constituida por un *poder* determinado con una cierta *potencia* y representada formalmente en tanto *superposición*, existe de manera análoga a como existen los objetos físicos, determinados a partir de los principios lógicos y ontológicos de *existencia, no-contradicción e identidad* (cf. Verelst & Coecke, 1999, p. 167), en el modo de ser actual.

(2) La potencialidad ontológica da cuenta de un ámbito de *existentes contradictorios*. Una facultad se encuentra determinada por la tensión entre poderes mutuamente contradictorios (cf. de Ronde, 2011a). Al igual que en el caso de las superposiciones cuánticas, en el caso de las facultades, resulta por lo menos complicado no considerar a estos términos contradictorios como existentes físicos. Como señala Dieks, no existe en el formalismo cuántico elemento alguno que permita distinguir a uno de los términos en la superposición como más real que algún otro; muy por el contrario, todos y cada uno de los términos en la superposición determinan la evolución de la función de onda cuántica y deben ser tomados en cuenta en los fenómenos de interferencia de posibilidades, por ejemplo, experimentos *welcher-weg*.

(3) La potencialidad ontológica permite considerar a los poderes como existentes, de modo tal que la *interacción entre superposiciones* deviene un problema no trivial. Asimismo, permite pensar de un modo original el problema del holismo cuántico: la suma de los poderes no puede ser considerada aditivamente en términos reduccionistas. El ejemplo que toma Aristóteles en *Acerca del alma* para discutir el ámbito de lo potencial es la facultad del pensamiento (De An., III, cap. 3-5). Este ejemplo remite a estructuras no reduccionistas, puesto que resulta evidente que la interacción del pensamiento puede dar lugar a ideas no contenidas en las partes; usando el lenguaje coloquial, podemos decir que el pensamiento de dos personas puede tanto *interferir* como *potenciarse* en una interacción particular. En la mecánica cuántica, de modo análogo, las superposiciones cuánticas interactúan en el ámbito potencial de un modo no reduccionista que excede la descripción actual.

(4) La potencialidad ontológica permite considerar un ámbito *independiente del espacio-tiempo*. Todo parece indicar, como señalan también Aerts (1981) y van Fraassen (2002), que la interacción entre superposiciones cuánticas, como en el caso del pensamiento, no tiene lugar en el espacio-tiempo. Las superposiciones cuánticas no parecen ser susceptibles de ser interpretadas en términos del espacio y el tiempo, conceptos por demás problemáticos en el formalismo ortodoxo.

Creemos que, desde una perspectiva eminentemente metafísica, la noción de *potencialidad racional* podría proveer un esquema conceptual que aporte nuevos puntos de acceso al problema del nivel no actualizado de lo posible. Si bien todavía nos encontramos en la búsqueda de un concepto adecuado que caracterice en forma cerrada a las superposiciones cuánticas, la experiencia, en los laboratorios, parece indicar a todas luces que las superposiciones deben ser consideradas como ontológicamente robustas. En lugar de negar su existencia, como lo hacen la teoría de Bohm, la GRW y las interpretaciones empiristas o instrumentalistas, nuestra propuesta resalta la necesidad de interpretar a las superposiciones cuánticas en términos de un modo de ser independiente de la actualidad. La independencia de ambos niveles, o modos de la existencia, no niega en absoluto la relación entre lo potencial y lo actual, sino más bien, permite invertir la relación gnoseológica entre lo actual y lo potencial. En nuestro esquema, no es lo potencial aquello que debe explicar lo actual sino más bien lo actual aquello que permite vislumbrar lo potencial. De hecho, los elementos que parecen constituir la estructura formal de la superposición, a saber, su existencia independiente de

la efectuación de uno de los términos, como se muestra a partir de la interferencia de posibilidades en los diferentes experimentos de tipo *welcher-weg*, su referencia a propiedades contradictorias como el caso del famoso gato de Schrödinger y, finalmente, su pasaje no clásico hacia la actualidad, como se muestra en el teorema de KSM; pueden ser todos ellos pensados a partir de los *poderes no causales*²¹ que existen en el modo de ser de la potencialidad ontológica.

Un *poder* puede ser pensado en términos de un sentido, por ejemplo, la visión, el tacto etc., una capacidad. Pero, si bien Aristóteles restringe este ámbito a la razón, no resulta evidente que sólo las cosas animadas tengan poderes, puesto que tanto el vidrio tiene la capacidad de quebrarse o no, como el río posee la capacidad de fluir por un curso u otro. Respecto de la contradicción Aristóteles señala que “las potencias irracionales producen, cada una de ellas, una sola cosa, mientras que las racionales producen ambos contrarios” (Met., 1048a5), sin embargo, en tanto la potencialidad racional no atraviesa el paso hacia lo actual, la contradicción permanece y se desarrolla en ella.

La privación por su parte, es un tipo de contradicción. Pues lo que no puede tener algo en absoluto, y lo que no lo tiene correspondiéndole naturalmente tenerlo, están privados, respectivamente (y esto lo decimos también en muchos sentidos, como expusimos en otro lugar), por consiguiente, la privación es un tipo de contradicción, incapacidad determinada o tomada conjuntamente con su sujeto receptor (Met., 1055b5).

Queremos habilitar la posibilidad de pensar radicalmente la máxima aristotélica, *el ser se dice de distintas maneras*. Una facultad debe ser pensada entonces, dentro del ámbito de la potencialidad ontológica, independientemente de la actualidad (cf. de Ronde, en prensa). Siendo un ámbito de la existencia, uno podría, entonces, pensar en “cosas que suceden” independientemente de la actualidad, o sea, pensar la posibilidad de *efectuaciones potenciales*. Tal idea quiebra la relación *causal-teleológica* entre lo potencial y lo actual, puesto que la efectuación de un poder no es entendida como su completitud o finalidad última, sino más bien como una expresión o emanación de aquello ya contenido en el poder mismo. Al mismo tiempo, se rompe la ecuación: “actual” = “real”. Una facultad puede ser pensada como existiendo independientemente de su efectuación. Esta idea abre las puertas para considerar existentes no necesariamente actuales, para una ontología de facultades, que debe ser considerada en modo análogo a la ontología de entidades propia de la física clásica. Esta idea se encuentre en

²¹ Hacemos referencia explícita aquí a la no causalidad para tomar distancia de los enfoques desarrollados a partir del trabajo de Nancy Cartwright por autores como Mauricio Suarez, Mauro Dorato o Michael Esfeld, así como también para negar la preeminencia del ámbito de lo actual por sobre lo potencial.

línea con la idea de Heisenberg de considerar las teorías físicas como “cerradas” (cf. Bokulich, 2006). Contrariamente al caso de la potencialidad irracional, donde existe una *causalidad teleológica* que guía el pasaje entre lo potencial y lo actual, donde lo actual es implícitamente considerado como “más real”, en el ámbito de la potencialidad ontológica, la actualización particular de un poder determinado no cambia en absoluto la facultad, que permanece idéntica a sí misma. Es a partir de lo actual que aprehendemos lo potencial y no es lo potencial el ámbito que debe explicar lo actual. Todos estos aspectos nos recuerdan algunos elementos propios de la interpretación modal leídos ahora desde una perspectiva ontológica.

Como señalamos anteriormente, las IM son interpretaciones de no colapso, esto es, interpretaciones que no consideran el colapso de la función de onda como una *interacción física* (cf. van Fraassen 1991, sección 7.3). La relación indeterminista entre las superposiciones cuánticas y la efectuación de uno de los términos deja de lado la relación causal propia de las teorías clásicas. Contrariamente a las interpretaciones ortodoxas, las IM mantienen la superposición en el nivel de la posibilidad independientemente de cualquier actualización particular. Como señala Vermaas (cf. 1999, p. 295), en las interpretaciones modales, el estado no se actualiza en cuanto lo hace un cierto estado de cosas, y las posibilidades no actualizadas pueden afectar el curso de eventos futuros. Negar el colapso, no sólo rompe la relación causal entre lo posible y lo actual sino que también determina el corte entre dos niveles descriptivos: lo posible y lo actual (Estos niveles se encuentran explícitamente tomados en cuenta tanto de la interpretación modal de van Fraassen, a partir de la distinción entre *estados dinámicos* y *estados valor*, mientras Dieks y Vermaas distinguen entre *estados físicos* y *estados matemáticos*). Es esta distinción la que crea un espacio para considerar a lo posible en términos ontológicos y, al mismo tiempo, permite pensar a las superposiciones como expresando un aspecto de la realidad física, y no como un mero algoritmo que da cuenta de los resultados experimentales. Esta interpretación ontológica parece ir en línea, no sólo con nuestra noción de potencialidad ontológica, sino también con los experimentos que se realizan hoy en los laboratorios relacionados con las superposiciones y el entrelazamiento cuántico, donde aquello que sucede de acuerdo a la teoría, parece no hacerlo en el ámbito actual (cf. Coecke, 2004).

Creemos que nuestra noción de potencialidad ontológica puede permitirnos pensar, de un modo original, la fenomenología de la mecánica cuántica y su relación con el mundo. Esto no significa necesariamente evadir el ámbito actual, sino más bien entender la relación entre lo posible y lo actual de un modo diferente. De acuerdo a nuestra posición, las superposiciones son expresiones matemáticas de un existente en la teoría que debe ser explicado a partir de un *concepto adecuado* (cf. de Ronde, 2009, en prensa). Sostenemos que, así como la actualidad, la potencialidad remite a un modo

de existencia del mundo. Lo actual puede entenderse, entonces, como una expresión particular de lo potencial donde cada efectuación nos explica o nos da a conocer algo sobre aquello que existe en el modo de ser potencial. Creemos que el ámbito de lo potencial puede permitir la consideración y el desarrollo de conceptos que posibilitan dar cuenta del formalismo cuántico en forma coherente. Si nos encontramos en lo cierto, estos mismos conceptos podrían permitirnos pensar *nuevas experiencias*, aún vedadas por consideraciones eminentemente clásicas. Fue Schrödinger quien nos enseñó que no es posible pensar en términos de un “objeto clásico” a las superposiciones cuánticas; deberíamos comprender que esto no significaría, en modo alguno, que la superposición no pueda o deba ser pensada a partir de un concepto nuevo.

En uno de sus seminarios sobre el desarrollo de la física, Max Plank dijo “En la historia de la ciencia, un nuevo concepto nunca surge en modo completo y definitivo, como, en el antiguo mito griego, lo hizo Palas Atenea al surgir de la cabeza de Zeus.” La historia de la física no es sólo una secuencia de descubrimientos experimentales y observaciones, seguidas por su descripción matemática; ella es también la historia de los conceptos. Para una comprensión de los fenómenos, la primera condición es la introducción de conceptos adecuados. Sólo con la ayuda de conceptos correctos es que podemos saber qué es lo que ha sido observado (Heisenberg, 1973, p. 264).☞

AGRADECIMIENTOS. El autor quisiera agradecer a la doctora Graciela Domenech por comentarios que ayudaron al texto, así como a Dennis Dieks por numerosas discusiones respecto de la interpretación de la mecánica cuántica en general y de la interpretación modal en particular. También agradece al subsidio provisto por el proyecto FWO G.040508N de la Vrije Universiteit Brussel.

Christian DE RONDE

Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina.
Center Leo Apostel y Foundations of the Exact Sciences,
Vrije Universiteit Brussel, Bélgica.
cderonde@vub.ac.be

ABSTRACT

In this article we attempt to discuss the notion of *potentiality* in the context of modal interpretations (MI) of quantum mechanics. For this purpose we shall analyze the meaning of the notion of *quantum possibility* in the orthodox formalism of quantum mechanics following the distinction between *modal interpretations which start from metaphysical principles* (MIMP) and *modal interpretations which start from the mathematical formalism* (MIMF). Within this context we discuss the importance of empiricist and realist positions, and propose to advance towards a position that we name *metaphysical constructivism*. Finally, we propose the introduction of the notion of *ontological potentiality*—based on the Aristotelian concept of *rational potentiality*—as a conceptual scheme which can allow us to provide a coherent account of the non-standard idea of possibility present within the MI.

KEYWORDS • Quantum mechanics. Possibility. Ontological potentiality.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AERTS, D. *The one and the many: towards a unification of the quantum a classical description of one and many physical entities*. Brussels, 1981. Dissertação (Doutorado). Brussels Free University.
- AERTS, D. (Ed.). *The blue book of Einstein meets Magritte*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- AGAMBEN, G. *Potentialities*. Stanford: Stanford University Press, 1999.
- ARISTÓTELES, *Metafísica*. Traducción C. Martínez. Madrid: Gredos, 2000. (Met.).
- _____. *Acerca del alma*. Traducción C. Martínez. Madrid: Gredos, 2000. (De An.).
- BACCIAGALUPPI, G. *Topics in the modal interpretation of quantum mechanics*. Cambridge, 1996. Dissertação (Doutorado, Física). University of Cambridge.
- BACCIAGALUPPI, G. y DICKSON, W. M. Dynamics for density operator interpretations of quantum theory. *Los Alamos National Archive*, quantph/9711048, 1997.
- BELTRAMETTI, G. & VAN FRAASSEN, B. C. (Ed.). *Current issues in quantum logic*. New York: E. Plenum, 1981.
- BENE, G. & DIEKS, D. A perspectival version of the modal interpretation of quantum mechanics and the origin of macroscopic behavior. *Foundations of Physics*, 32, p. 645-71, 2002.
- BIRKHOFF, G. & VON NEUMANN J. The logic of quantum mechanics. *Annals of Mathematics*, 37, p. 823-43, 1936.
- BITBOL, M., Reflective metaphysics: understanding quantum mechanics from a kantian standpoint. *Philosophica*, 83, p. 53-83, 2010.
- BOKULICH, A., Heisenberg meets Kuhn: closed theories and paradigms. *Philosophy of Science*, 73, p. 90-107, 2006.
- BOHM, D. Proof that probability density approaches $|\psi(x)|^2$ in causal interpretation of the quantum theory. *Physical Review*, 89, p. 458-66, 1953.
- BUB, J. Quantum mechanics without the projection postulate. *Foundations of Physics*, 22, p. 737-54, 1992.
- _____. *Interpreting the quantum world*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- COECKE, B. The logic of entanglement. *Los Alamos National Archive*, quant-ph/0402014, 2004.
- CURD, M. & COVER, J. A., *Philosophy of Science. The central issues*. Cambridge: Norton and Company/Cambridge University Press, 1998.
- DA COSTA, N. & DE RONDE, C. The paraconsistent logic of quantum superpositions. En prensa.
- DE RONDE, C. Potencialidad ontológica y teoría cuántica. In: RODRÍGUEZ, V. & SALVATICO, L. (Ed.). *Epistemología e Historia de la Ciencia*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, v. 11. p. 204-11, 2005.

- DE RONDE, C. El enfoque de descripciones complementarias: en búsqueda de un desarrollo expresivo de la realidad física. *Perspectivas Metodológicas*, 9, p. 126-38, 2009.
- _____. For and against metaphysics in the modal interpretation of quantum mechanics. *Philosophica*, 83, p. 85-117, 2010.
- _____. *The contextual and modal character of quantum mechanics: a formal and philosophical analysis in the foundation of physics*. Utrecht, 2011a. Dissertação (Doutorado, Física). Utrecht University.
- _____. Potencialidad ontológica y teoría cuántica II. *Epistemología e Historia de la Ciencia*, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 17. En prensa.
- D'ESPAGNAT, B. *Conceptual foundations of quantum mechanics*. Massachusetts: Benjamin Reading, 1976.
- DEWITT, B. & GRAHAM, N. *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton: Princeton University Press, 1973.
- DICKSON, W. M. *Quantum chance and nonlocality: probability and nonlocality in the interpretations of quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- _____. Quantum logic is alive h (it is true g it is false). *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, 3, p. S274-87, 2001.
- DIEKS, D. The formalism of quantum theory: an objective description of reality. *Annalen der Physik*, 7, p. 174-90, 1988a.
- _____. Quantum mechanics and realism. *Conceptus*, 22, 57, p. 31-47, 1988b.
- _____. Quantum mechanics without the projection postulate and its realistic interpretation. *Foundations of Physics*, 19, p. 1397-423, 1989.
- _____. Probability in the modal interpretation of quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, p. 292-310, 2007.
- _____. Quantum mechanics, chance and modality. *Philosophica*, 83, p. 117-37, 2010.
- DIRAC, P. A. M., *The principles of quantum mechanics*, 4 ed. London: Oxford University Press, 1974.
- DOMENECH, G. & FREYTES, H. Contextual logic for quantum systems. *Journal of Mathematical Physics*, 46, p. 012102-1-9, 2005.
- DOMENECH, G.; FREYTES, H. & DE RONDE, C. Scopes and limits of modality in quantum mechanics. *Annalen der Physik*, 15, p. 853-60, 2006.
- _____. A topological study of contextuality and modality in quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 47, p. 168-74, 2008.
- _____. Modal-type orthomodular logic. *Mathematical Logic Quarterly*, 3, p. 307-19, 2009.
- DORATO, M. Physics and metaphysics: interaction or autonomy? *HumanaMente*. En prensa.
- EINSTEIN, A. et al. Can Quantum-Mechanical Description be Considered Complete? *Physical Review*, 47, P. 777-80, 1935.
- ENZ, C. & MEYENN, K. (Ed.). *Writings on physics and philosophy of Pauli*, W. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- FEYNMAN, R. P. & HIBBS, A. R. *Quantum mechanics and path integrals*. New York McGraw-Hill, 1965.
- FUCHS, C. & PERES, A. Quantum theory needs no "interpretation". *Physics Today*, 53, 3 p. 70-1, 2000.
- GHIRARDI, G.; RIMINI, A. & WEBER, T. A model for a unified quantum description of macroscopic and microscopic systems. *Physical Review D*, 34, p. 470-91, 1986.
- GORNITZ, T. & VON WEISZÄCKER, C. F. Remarks on S. Kochen's interpretation of quantum mechanics. In: LATHI, P. & MITTELSLAEDT, P. (Ed.). *Symposium on the foundations of modern physics 1987*. Singapore: World Scientific, 1987. p. 365-7.
- HEALEY, R. *The philosophy of quantum mechanics: an interactive interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- HEISENBERG, W. *Physics and philosophy*. London: George Allen and Unwin Ltd, London, 1958.
- _____. *Physics and beyond*. New York: Harper & Row, 1971.

- HEISENBERG, W. Development of concepts in the history of quantum theory. In: MEHRA, J. (Ed.). *The physicist's conception of nature*. Dordrecht: Reidel, 1973. p. 264-75.
- HOOKE, C. A. (Ed.). *Contemporary research in the foundations and philosophy of quantum theory*. Dordrecht: Reidel, 1973.
- KARAKOSTAS, V. & HADZIDAKI, P. Realism vs. constructivism in contemporary physics: the impact of the debate on the understanding of quantum theory and its instructional process. *Science & Education*, 14, p. 607-29, 2005.
- KOCHEN, S. A new interpretation of quantum mechanics. In: LATHI, P. & MITTELSLAEDT, P. (Ed.). *Symposium on the foundations of modern physics 1985*. Singapore: World Scientific, Johensuu, 1985. p. 151-69.
- KOCHEN, S. & SPECKER, E. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, p. 59-87, 1967.
- LAURIKAINEN, K. V. *The message of the atoms, essays on Wolfgang Pauli and the unspeakable*. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- LATHI, P. & MITTELSLAEDT, P. (Ed.). *Symposium on the foundations of modern physics 1985*. Singapore: World Scientific, 1985.
- _____. *Symposium on the foundations of modern physics 1987*. Singapore: World Scientific, 1987.
- LEIBFRIED, D. et al. Creation of a six-atom "Schrödinger cat" state. *Nature*, 438, p. 639-42, 2005.
- LEWIS, D. *Counterfactuals*. Harvard: Blackwell Publishers, 1973.
- MAEDA, F. & MAEDA, S. *Theory of symmetric lattices*. Berlin: Springer-Verlag, 1970.
- MEHRA, J. (Ed.). *The physicist's conception of nature*. Dordrecht: Reidel, 1973.
- OURJOUNTSEV, A., et al. Generation of optical "Schrödinger cats" from photon number states. *Nature*, 448, p. 784-6, 2007.
- RÉDEI, M. *Quantum logic in algebraic approach*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- RODRÍGUEZ, V. & SALVATICO, L. (Ed.). *Epistemología e Historia de la Ciencia*. Cordoba: Universidad Nacional de Cordoba, 2005. V. 11.
- SCHRÖDINGER, E. The present situation in quantum mechanics. *Naturwiss*, 23, p. 807, 1935.
- SIMONDON, G. *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Paris: Jérôme Millon, 2005.
- SMETS, S. The modes of physical properties in the logical foundations of physics. *Logic and Logical Philosophy*, 14, p. 37-53, 2005.
- VAN FRAASSEN, B. C. Semantic analysis of quantum logic. In: HOOKE, C. A. (Ed.). *Contemporary research in the foundations and philosophy of quantum theory*. Dordrecht: Reidel, 1973. p. 80-113.
- _____. *The scientific image*. Oxford: Clarendon, 1980.
- _____. A modal interpretation of quantum mechanics. In: BELTRAMETTI, G. & VAN FRAASSEN, B. C. (Ed.). *Current issues in quantum logic*. New York: E. Plenum, 1981. p. 229-58.
- _____. *Quantum mechanics: an empiricist view*. Oxford: Clarendon, 1991.
- _____. *The empirical stance*. New Haven: Yale University Press, 2002.
- _____. Rovelli's World. *Foundations of Physics*, 40, p. 390-417, 2010.
- VERELST, K. & COECKE, B. 1999, Early greek thought and perspectives for the interpretation of quantum mechanics: preliminaries to an ontological approach. In: AERTS, D. (Ed.). *The blue book of Einstein meets Magritte*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 163-96.
- VERMAAS, P. E. *A philosophers understanding of quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- VERMAAS, P. E. & DIEKS, D. The modal interpretation of quantum mechanics and its generalization to density operators. *Foundations of Physics*, 25, p. 145-58, 1995.
- VON NEUMANN, J. *Mathematical foundations of quantum mechanics*. 12 ed. Princeton: Princeton University Press, 1955.