

¿En qué puntos de la historia de la mecánica cuántica el realismo científico ha enfrentado amenazas reales (y por qué razones)?*

SILVIO SENO CHIBENI**

Resumen

En la literatura acerca de los fundamentos de la mecánica cuántica hay una extendida creencia acerca de que esta teoría representa una seria amenaza para el realismo científico. Este punto de vista ha sido sostenido, efectivamente, por muchos de los padres fundadores de la mecánica cuántica y, más recientemente, por varios filósofos influyentes de la ciencia. En este trabajo intento proporcionar una descripción general y una evaluación del debate sobre las posibles razones de esta creencia. Mi tesis principal es que la mecánica cuántica seguramente lleva nuevos elementos a la discusión en torno al realismo científico pero que, finalmente, no hay objeciones directas o insalvables para el realismo científico que se deriven de la teoría misma, ni aun cuando se tomen en consideración una serie de resultados teóricos y experimentales importantes en contra de las teorías alternativas en microfísica.

* Este artículo derivó de una ponencia presentada por el autor en el IV Workshop sobre Filosofía, Lógica e Historia de la Mecánica Cuántica que tuvo lugar en el marco del IX Encuentro AFHIC (Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur) conjuntamente con las XXV Jornadas de Epistemología e Historia de las Ciencias de la Universidad Nacional de Córdoba. El evento tuvo lugar en Los Cocos, Córdoba, Argentina, del 15 al 19 de septiembre de 2014. Me gustaría agradecer a Christian de Ronde por invitarme a participar del Workshop. Asimismo, agradezco a Bruno Borge y Nélide Gentile por haberme invitado a participar en esta colección de textos sobre realismo científico.

** Departamento de Filosofía, Universidad Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil.

Palabras clave: realismo científico, mecánica cuántica, Bas van Fraassen, explicación científica, ontologías cuánticas.

“Allá lejos había un mundo enorme, que existe independientemente de nosotros los seres humanos, y que se nos presenta como un eterno y gran enigma, al menos parcialmente accesible a nuestro pensamiento e inspección” (Einstein, 1949: 5).

1. Introducción

Aunque en general no se hallan nominalmente comprometidos en la controversia filosófica sobre el realismo científico —la que se convirtió en un tema de análisis explícito, específico, solo en la segunda mitad del siglo pasado—, los científicos y filósofos naturales han estado efectivamente discutiendo la cuestión, al menos desde los inicios de la ciencia moderna, en los siglos XVI y XVII. El problema deriva de la vieja y eterna esperanza de los filósofos por captar la realidad, concebida como existiendo independientemente de la mente humana, y en un sentido creciente, independiente de nuestras inmensas limitaciones cognitivas. Esta tensión se hizo especialmente aguda en la época moderna, que fue testigo, por un lado, de un éxito sin precedentes de las ciencias naturales en la supuesta revelación de la composición y la estructura del mundo natural, y, por otro, el abandono para la epistemología del viejo marco teórico, sobre todo el de Aristóteles, en el que había amplios fundamentos para una actitud optimista hacia el conocimiento en general. Aunque adoptando en apariencia enfoques filosóficos muy diferentes, las dos figuras más influyentes de la epistemología del siglo XVII, Descartes y Locke, han efectivamente coincidido en la opinión de que al menos en el importantísimo y particular dominio de la filosofía natural, el alcance del conocimiento humano —en el sentido estricto y moderno del conocimiento *cierto*— no es tan amplio como tradicionalmente se había supuesto. En este dominio, argumentaron, las hipótesis deben desempeñar un papel central en la investigación y, por lo general, su estado epistémico no va más allá de la creencia bien fundada, o de la probabilidad.

Cuando se la lleva al extremo, tal línea de pensamiento podría conducir a la conclusión de que más allá de los estrechos límites de la experiencia sensorial no es posible ningún conocimiento —o tal vez ninguna creencia razonable— sobre el mundo natural. He sostenido en otro lugar

que ni Descartes ni Locke han llegado a este extremo. En su lugar, han adoptado una actitud optimista *cualificada* hacia el tema de los límites del conocimiento científico; y en este sentido, ambos pueden ser vistos como precursores de las mejores formas contemporáneas de realismo científico.¹

El realismo científico fue uno de los principales temas en la filosofía de la ciencia en las últimas décadas del siglo XX. El trabajo que más contribuyó individualmente a llevar este tema a la vanguardia de la atención filosófica fue *The Scientific Image* (1980), de Bas van Fraassen. De modo preliminar a la defensa de una nueva forma de antirrealismo científico, en el capítulo 2, el libro ofrece un mapa de varias propuestas ofrecidas en la literatura para la propia caracterización del realismo científico. Independientemente de la opinión que merezcan los argumentos y tesis específicas de van Fraassen, debe reconocerse que este mapa ha sido una valiosa contribución para la clarificación del contorno conceptual de la discusión. En particular, su definición de realismo científico captura adecuadamente el corazón de esta doctrina, sin cargarla con accesorios engañosos.

De acuerdo con van Fraassen, por realismo científico entendemos la concepción de que “la ciencia tiene como objetivo darnos, en sus teorías, una historia literalmente verdadera de cómo es mundo; y la aceptación de una teoría científica involucra la creencia de que ella es verdadera (van Fraassen, 1980: 12). Esta definición tiene el mérito de centrarse en el objetivo de la ciencia –supuestamente, la verdad– y no sobre las credenciales epistémicas de cualquiera de sus teorías particulares para afirmar que este objetivo se ha alcanzado. Van Fraassen rechaza aun esta versión moderada (y por lo tanto más plausible) del realismo científico; él cree, en su lugar, que “la ciencia tiende a darnos teorías que son empíricamente adecuadas, y la aceptación de una teoría implica como creencia solo que es empíricamente adecuada (van Fraassen, 1980: 12). Nótese que la adecuación empírica es *menos* que la verdad: es verdad solo con respecto a lo que es observable, en el sentido ingenuo de ser capaz de ser sensorialmente percibido, bajo circunstancias favorables, por un ser humano corriente.

Van Fraassen denominó a su posición “empirismo constructivo”, y convincentemente defendió su superioridad con respecto a las otras dos formas de antirrealismo científico: el antirrealismo reduccionista típico del positivismo lógico y el instrumentalismo, que es el punto de vista aparentemente defendido por primera vez por Andreas Osiander en su polémico

1. Para un análisis de este punto véase Chibeni (1993 y 2005c).

prefacio a *De Revolutionibus Orbium Coelestium*,² de Copérnico. La primera posición sostiene que debemos reinterpretar las oraciones sobre entidades y procesos no observables de tal manera que su contenido proposicional sea reducido, por medio de “traducciones” apropiadas, a afirmaciones acerca de lo que es observable. Por el contrario, el instrumentalismo es la concepción aún más extrema, según la cual las oraciones de las teorías científicas que, a primera vista, refieren a inobservables, de hecho no expresan ninguna proposición en absoluto, y son meros instrumentos teórico-lingüísticos útiles en la estructuración de las genuinas proposiciones de la teoría, es decir, aquellas que refieren a ítems observables.

2. Los contornos del debate

El famoso comentario de Thomas Kuhn en la *Estructura de las revoluciones científicas*, de que en períodos de crisis y revolución los científicos suelen dirigir su atención a la filosofía –incluso hasta el punto en que muchos de ellos se convierten en filósofos aficionados– está particularmente bien corroborado por la historia del realismo científico. Como ya he señalado en la introducción, el tema de los límites del conocimiento científico era uno de los principales tópicos en el comienzo de la ciencia moderna. Cuando el corpus principal de la nueva ciencia se estabilizó, en los siglos XVIII y XIX, el interés en el tema claramente disminuyó, a punto tal que es tentador decir que, con pocas excepciones, cualquiera comprometido con la ciencia era, en ese momento, un realista científico, al menos con respecto a las principales teorías de la época (la mecánica de Newton y sus diversas extensiones, y, más tarde, la teoría electromagnética de Maxwell).³

Pero cuando este escenario científico color de rosa comenzó a romperse, en los últimos años del siglo XIX y comienzos del siguiente, la disputa sobre las credenciales epistémicas de las teorías científicas como pretendidas

2. Debemos ser cuidadosos, sin embargo, en calificar la propuesta de Osiander como “instrumentalista” (un término acuñado por Popper [1972: capítulo 3]), ya que el alcance de su análisis se limita expresamente a la astronomía. Para una traducción al portugués, acompañada de un comentario histórico y filosófico de gran utilidad, véase Loparic (1980).

3. Las notables excepciones son, por supuesto, George Berkeley y Ernst Mach, quienes se atrevieron a poner en cuestión la interpretación corriente, realista, de un ingrediente básico de la ciencia moderna, a saber, el concepto de fuerza. Para un análisis de la teoría de Berkeley acerca de la ciencia, véase Chibeni (2008b, 2010, 2013).

candidatas para representar la realidad física resurgió, y alcanzó su ápice en el famoso y prolongado debate entre Einstein y Bohr. No pertenece al ámbito de este trabajo examinar este debate, ya que este tema ha sido ampliamente cubierto en la literatura especializada.⁴ Pero intentaré una identificación en parte histórica, en parte pedagógica, de los principales factores que fueron ofrecidos en apoyo de la conceptualización antirrealista de la nueva física cuántica. Este material será examinado filosóficamente, con el fin de mostrar –así espero– que ninguno de estos factores representa un motivo irresistible para la adopción de una postura antirrealista hacia la física cuántica.

Antes de comenzar, sin embargo, permítanme esbozar los principales puntos de vista en disputa en este prolongado e importantísimo episodio de la historia de la física. Comienzo con la posición realista. Como es bien sabido, su defensor principal fue Albert Einstein. La frase que sirve como el lema del presente artículo es una buena y compacta afirmación de su concepción realista. Nótese que cuadra muy bien con la definición de van Fraassen del realismo científico, en la medida en que abarca tanto la dimensión metafísica de la doctrina –la existencia objetiva de la realidad física– y su dimensión epistemológica –la accesibilidad cognitiva parcial de dicha realidad.

En el campo antirrealista, los protagonistas son muchos –casi todos los padres fundadores de la física cuántica, con la excepción calificada de De Broglie y Schrödinger–⁵ y sus opiniones no se pueden encapsular en una sola fórmula. De hecho, es posible encontrar diversas formas distintas de antirrealismo científico en sus escritos. La figura principal en el campo fue, por supuesto, Niels Bohr. Es tentador decir que la posición que él sostuvo más consistentemente a lo largo del debate con Einstein era instrumentista, como lo indica esta cita de un artículo publicado en 1949:

La interpretación física apropiada del formalismo simbólico mecánico-cuántico asciende únicamente a las predicciones, de carácter estadístico o determinista, perteneciente a fenómenos individuales

4. Véase, por ejemplo, Jammer (1966), d'Espagnat (1976), Pais (1982), Brown (1981), Paty (1993a y 1995).

5. Curiosamente, estos dos físicos han pasado de una fase realista inicial (en el momento en que hicieron sus principales contribuciones teóricas) a una fase antirrealista (en la década de 1940), y luego, nuevamente, a un segundo período realista, en sus últimos años.

que aparecen en las condiciones *definidas* por los conceptos de la física clásica (Bohr, 1949: 238).

A veces, sin embargo, Bohr se ha inclinado hacia un cierto tipo de antirrealismo subjetivista, en el que la misma objetividad del mundo cuántico se pone en duda. Veamos, por ejemplo, estas palabras de su respuesta al famoso argumento ofrecido por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) en 1935:

La aparente contradicción [señalada por EPR], de hecho, solo revela una inadecuación esencial del punto de vista corriente de la filosofía natural respecto a una explicación racional de los fenómenos físicos del tipo con los que estamos ocupados en la mecánica cuántica. De hecho, la *interacción finita entre el objeto y las actividades de medición* condicionados por la existencia del cuanto de acción implica [...] la necesidad de una renuncia definitiva del ideal clásico de la causalidad y una revisión radical de nuestra actitud hacia el problema de la realidad física (Bohr, 1935: 696-697; el destacado es del original).

Lo que aquí es, tal vez, un simple toque de subjetividad ontológica (“una revisión radical de nuestra actitud hacia el problema de la realidad física”), en Heisenberg se convierte en una inconfundible declaración explícita. Al comparar las rupturas teóricas ocasionadas por la relatividad con aquellas debidas a la física cuántica, refiriéndose a las últimas expresa:

[...] Es ahora beneficioso revisar las discusiones fundamentales, tan importantes para la epistemología, sobre la dificultad de separar los aspectos subjetivos y objetivos del mundo. Muchas de las abstracciones que son características de la física teórica moderna han sido discutidas en la filosofía de los siglos pasados. En ese momento estas abstracciones pudieron ser consideradas como meros ejercicios mentales de aquellos científicos cuya única preocupación era la realidad, pero hoy en día por los refinamientos del arte experimental se ven obligados a considerarlas seriamente (Heisenberg, 1949: 65)

Tomemos ahora un ejemplo más reciente de esta interpretación, y consideremos el caso de Hilary Putnam. Después de ser un fuerte e influyente defensor del realismo científico durante varias décadas, a fines de los setenta cambió de opinión, y en un acreditado trabajo relacionado

con el notorio problema de la relación observador-objeto observado en la mecánica cuántica, propuso la siguiente posición objetivista o relativista del mundo cuántico:

Relativas a *este* observador *estas* propiedades son “reales” (es decir, existen y pueden ser descubiertas); pero con respecto a un observador diferente distintas propiedades serían “reales”. [...] [Rechazo] la idea de Einstein de un ‘observador separado’ (*detached observer*). Hay entidades reales; *pero lo que ellas son es relativo al observador* (Putnam 1981: 209; el destacado es del original).

3. El argumento en contra del realismo basado en la mecánica cuántica

3.1. *El problema fundamental: la falta de una ontología unificada para la mecánica cuántica*

En la base de muchos de los desafíos teóricos que la mecánica cuántica (MC)⁶ sin duda plantea al realismo científico –si no de todos– está la aparente falta de un marco ontológico coherente, unificado, capaz de incrustar los conceptos y leyes de la teoría. Como conoce cualquiera que esté familiarizado con las ciencias físicas, una teoría típica de la física, con la excepción de algunas pocas cuyas proposiciones se limitan al nivel de lo observable –las llamadas “teorías fenomenológicas”⁷ implica una ontología, es decir, un

6. En este artículo trato específicamente de la mecánica cuántica no relativista, no de todo el conjunto más amplio de teorías ahora comprendidas bajo la denominación de “física cuántica”. Esta elección está dictada no solo por la tendencia general de la literatura especializada, sino también por mi creencia de que el principal aspecto de la cuestión de las implicaciones filosóficas de la física cuántica para la disputa sobre el realismo científico no será por ello sustancialmente alterado.

7. En física, los ejemplos más importantes de teorías fenomenológicas son la termodinámica clásica y la teoría especial de la relatividad. En un texto semipopular conocido, Einstein (1954) llamó a estas teorías “teorías de principios”. Señaló sus variadas virtudes y desventajas con respecto a la clase más amplia de teorías “constructivas”, cuyo objetivo no es únicamente correlacionar fenómenos de modo superficial, sino también explicarlos por medio de la postulación de causas más profundas. El hecho de que Einstein desarrollara la relatividad especial como una teoría de principio no fue casual, sino el resultado de una deliberación consciente de suyo, como lo explica en ese interesante documento.

sistema de objetos que se cree que forman el ámbito particular de cosas sobre el que la teoría hace sus afirmaciones. Tales objetos pueden ser observables o no observables. La ganancia de introducir una ontología es hacer de la teoría una herramienta intelectual para explicar los fenómenos naturales, ya que, según una tradición filosófica milenaria, *explicar* un fenómeno es mostrar cómo se origina a partir de la operación natural de ciertas causas naturales. Pero el precio de esta acción es dejar incierta parte de las afirmaciones teóricas, dado que la ontología por lo general involucra entidades y procesos inobservables que tienen que ser introducidos mediante *hipótesis*; y las hipótesis no son el tipo de cosas que pueden probarse por medios lógicos o establecidos por evidencia empírica directa, incontrovertible.

Nos guste o no –y en toda la época moderna ha habido muy pocos filósofos o científicos importantes que no lo hayan hecho–,⁸ este es el *modus operandi* de la ciencia básica, por lo menos desde el comienzo de la ciencia moderna. Y funcionó muy bien durante casi trescientos años. A pesar de que todo este período fue testigo de muchos cambios teóricos y ontológicos, en todos los casos hubo un par teoría-ontología coherente para reemplazar el par sustituido. Tomemos, por ejemplo, la historia de las teorías de la luz. En los albores de la ciencia moderna, la primera teoría mínimamente completa de la luz fue formulada por Descartes. En su teoría, el fenómeno de la luz era concebido como causado por una especie de “presión” ejercida por un sutil “elemento” material hipotético que impregna todos los cuerpos transparentes. En el mismo siglo, sin embargo, esta fue rechazada por la teoría de Huygens, de acuerdo con la cual la luz es generada por la vibración longitudinal de un cierto fluido etéreo, nuevamente, no observable. Pero, a su vez, esta teoría llegó a ser eclipsada por la teoría corpuscular de la luz de Newton, tal como se expone en su *Optiks* (1704), que dominó todo el siglo XVIII. A principios del siglo siguiente, sin embargo, la observación por parte de Thomas Young de los fenómenos de interferencia representó un golpe mortal para la teoría corpuscular de la luz, y condujo al desarrollo y la amplia aceptación de una alternativa radicalmente diferente, la teoría ondulatoria de Fresnel, según la cual la luz fue considerada como el resultado de las ondas transversales en un éter invisible. Posteriormente, esta teoría recibió un apoyo inesperado por su subsunción en la teoría electromagnética de Maxwell.

8. El caso más prestigioso es el de Ernst Mach, quien defendía la tesis radical de que la ciencia (o por lo menos, la física y la química) tiene que ser íntegramente fenomenológica.

Sin embargo, en los primeros años del siglo XX, esta exitosa historia de la búsqueda de mejores y mejores teorías-con-ontologías en la física de la luz entró en un callejón sin salida. Como suele suceder, nuevos fenómenos fueron descubiertos –los más importantes fueron el “efecto” fotoeléctrico y el “efecto” Compton–, los cuales no pueden ubicarse en la reinante concepción ondulatoria de la luz, lo que requiere, en su lugar, la restitución de una u otra concepción corpuscular. Hasta aquí, todo bien. El problema fue que una serie de otros fenómenos bien establecidos –como la interferencia de la luz– no podían, por supuesto, ser explicados sin presuponer que la luz era causada por algún movimiento ondulatorio.

Más aún, una dificultad ontológica similar pronto se descubrió en la física del electrón. La postulación de la existencia de electrones –permítanosos recordar– llega a lo largo de ciertos experimentos sobre la electricidad llevados a cabo en la última década del siglo XIX, que apoyan firmemente la hipótesis de que los llamados “rayos catódicos” estaban compuestos de un enjambre de diminutas partículas que se mueven a alta velocidad y llevan carga eléctrica. En la década de 1920, esta ontología corpuscular de la electricidad era aceptada como verdadera más allá de cualquier duda razonable. Pero, una vez más, un nuevo tipo de fenómeno se descubrió –la difracción y la interferencia de electrones– que no podía explicarse excepto que se concibieran los electrones como algún tipo de onda, o al menos, la involucraran.⁹

Constituye uno de los hechos más intrigantes de la historia de la ciencia que una teoría fundamental completamente nueva se generara de una maraña ontológica y teórica tan fea: la mecánica cuántica. Se produjo en dos versiones empíricamente equivalentes: la mecánica matricial de Heisenberg (1925) y la mecánica ondulatoria de Schrödinger (1926). Para los fines del presente comentario, el hecho importante es que el inicio de esta teoría no resuelve el rompecabezas ontológico mencionado. A pesar de un gran éxito en predecir correctamente todos los fenómenos conocidos (viejos y nuevos) que implica la luz y la materia ponderable, la MC no viene acompañada de una ontología clara y consistente. Esta parece ser una situación totalmente única en toda la historia de la física. Y yo creo que está detrás de todas las propuestas antirrealistas en esta área de la física.

9. Mucho más tarde, el fenómeno de interferencia fue observado con otras “partículas”, como los neutrones, por lo que hoy en día se cree que es característico de cualquier constituyente fundamental de la materia.

3.2. “Complementariedad”

Incluso antes de que todos los ingredientes del enigma ontológico-teórico de la MC se pusieran sobre la mesa, a Bohr se le ocurrió la idea de “complementariedad”: a pesar de ser incompatibles entre sí, las ontologías de partículas y de ondas son “complementarias”, en el sentido de que, en función de los fenómenos en discusión, debe elegirse, si así lo deseamos, una de ellas, a los efectos de obtener una comprensión intuitiva de los fenómenos. Pero tal recurso oportunista de apelar caso por caso a ciertos marcos ontológicos clásicos no debe tomarse en ningún sentido realista robusto, ya que un mismo objeto real no puede cambiar su estatus ontológico de un contexto a otro.

Esta fue, tanto histórica y como conceptualmente, la primera reacción antirrealista de la maraña ontológica que implica la MC. En consecuencia, encontramos en los escritos de Bohr y de sus muchos discípulos intelectuales la asociación de la doctrina de la “complementariedad” a la defensa explícita de una interpretación instrumentista de la teoría. Una cita que ilustra tal postura ya fue dada previamente en la Sección 2. Hemos visto también que bajo la dirección de Heisenberg se propuso otro tipo de interpretación antirrealista de la “complementariedad”, lo que podríamos llamar la interpretación subjetivista de la MC. Ambas formas de antirrealismo llegaron a ser adoptadas por la mayoría de los padres fundadores de la teoría, y rápidamente se convirtieron en la ortodoxia dentro del campo de la física cuántica. Curiosamente, ni ellos ni sus discípulos, a la fecha, parecen haber sido claramente conscientes de las amplias diferencias entre estas dos versiones del antirrealismo cuántico. La interpretación ortodoxa de la MC, o interpretación de “Copenhague”, suele presentarse como un solo paquete filosófico; o, peor aún, como un paquete de *física* pura, ya que sus proponentes también suelen asumir que nos la impone solo la física, y no un análisis filosófico de un problema complejo en los fundamentos de la física.

Lo que también merece más investigación histórica es el hecho de que nadie en el campo antirrealista ha adoptado, o incluso sido consciente, de la existencia de una tercera posibilidad, el antirrealismo de corte positivista inventado por un grupo líder de filósofos de la ciencia exactamente en el mismo momento en que se estaba creando la MC. La propuesta fue, recordemos, reducir por medio de ciertas maniobras lingüísticas las afirmaciones “teóricas” de una teoría a afirmaciones

puramente “observacionales”. Tal vez esta propuesta parecía demasiado sofisticada a los ojos de un físico; o podría haber sido percibida como algo que todavía estaba en elaboración y que tal vez nunca se implementaría efectivamente. El instrumentalismo, por el contrario, era una solución mucho más simple, más vieja y bien conocida, y así fue preferida (si alguna vez, después de todo, se ha hecho una comparación). Además, las concepciones subjetivistas del conocimiento y la realidad han tenido una larga historia, sobre todo en el continente, así que tal vez han sido pensadas para proporcionar una solución más “profunda” de los enigmas cuánticos.¹⁰

No es mi intención, sin embargo, analizar este rompecabezas histórico. Yo solo propongo que la interpretación de Copenhague (en cualquiera de sus dos versiones) es una ruptura tan radical con la tradición científica –la cual ubica la búsqueda de la verdad objetiva acerca del mundo en el centro de cualquier empresa científica– que, a pesar de la seriedad del desafío cuántico, uno no debería renunciar a la esperanza de encontrar una ontología unificada, única y coherente compatible con los conceptos y las leyes de la MC. Fue esta esperanza que inspiró los esfuerzos teóricos sostenidos de Einstein, en primer lugar, luego los de Schrödinger y de Broglie, y más tarde, de otras figuras destacadas, como David Bohm y John Bell.

La historia de estos esfuerzos fuera de la corriente principal de la física cuántica es fascinante y está bien cubierta en la literatura; no será, por tanto, narrada aquí. Sin embargo, creo que pueden verse como involucrando, en el período “clásico” (a partir de mediados de los años veinte hasta los años cincuenta), dos episodios principales: los intentos iniciales de Schrödinger para desarrollar una interpretación realista de su propia versión de la teoría, y la aplicación efectiva de Bohm, en la década de 1950, de la idea de una ontología “dual” presentada (pero prontamente abandonada) por Louis de Broglie, al mismo tiempo en el que se estaba generando la propia teoría. Este sofisticado e impresionante logro de Bohm –al que llamó “la interpretación causal de la MC” (Bohm, 1952), pero que más tarde se hizo conocido por la denominación más apropiada de la “teoría de variables ocultas”– tuvo poca atención en ese momento.

10. Nótese que, por cierto, esta idea ofrece (aunque falsamente) mucho combustible a una amplia gama de doctrinas de “misticismo cuántico”.

Es justo decir que la propuesta de Schrödinger, dadas las diversas dificultades que él mismo notó, no ha tenido un final feliz.¹¹ Sin embargo, el destino de la teoría de Bohm fue más afortunado; no en el sentido de que ganara una amplia aceptación entre los físicos, pues nunca lo hizo, sino porque, como veremos a continuación, jugó un papel muy importante en el avance de la investigación en la microfísica en las décadas siguientes. Con total independencia de este hecho, lo que me gustaría subrayar es que la *mera disponibilidad de una teoría-con-ontología para el dominio cuántico*, una teoría, además, capaz de reproducir todo el éxito predictivo experimental de la MC, constituye, por sí misma, una réplica efectiva a la opinión habitual de que la MC-con-instrumentalismo (o subjetivismo) *es la única opción en la microfísica, y por lo tanto ineludible*. No. Existe una pequeña pero concreta gama de opciones aquí, y la elección no puede ser informada solo por la física; ella es fundamentalmente filosófica.

Esto, efectivamente, nos retrotrae al viejo y rico debate sobre las propuestas de Andreas Osiander y de George Berkeley. Sin embargo, aunque estos autores han estado evidentemente *motivados* para proponer una interpretación instrumental de ciertas partes de la ciencia por los recientes (para ellos) desarrollos en astronomía y física, nunca han argumentado —como lo hicieron sus seguidores en el siglo XX— que el instrumentalismo se *impone* sobre nosotros por la ciencia misma. Esto es un error. El hecho de que una ontología cuántica no esté fácilmente a la mano no constituye, *per se*, un argumento suficiente para la defensa del instrumentalismo, o para cualquier otra forma de antirrealismo científico. Por otra parte, como ya he señalado, al menos desde principios del 1950 hay una teoría bien desarrollada, que llega con su propia ontología cuántica y es, por tanto, susceptible de una interpretación realista: la teoría de variables ocultas de Bohm (TVO). La mera existencia de esta alternativa desplaza la carga del debate sobre el antirrealista, quien debe demostrar que esta teoría no es sostenible por razones distintas a la adecuación empírica o la consistencia. Esto nos lleva a la próxima sección.

3.3. No localidad

Desde el inicio, la teoría de Bohm ha sido fuertemente rechazada (o, peor aún, ignorada) por la comunidad de físicos, con muy pocas excepciones.

11. La idea de Schrödinger fue que la ontología cuántica estaría formada por las ondas no clásicas, en correspondencia casi literal con las “funciones de onda”. Para los análisis históricos y conceptuales de esta propuesta, véase Dorling (1987) y Paty (1993b).

Incluso después de haber recibido varias ampliaciones y mejoras importantes, y de haber motivado indirectamente avances muy importantes en la microfísica, la teoría rara vez recibió la atención que merece.¹² Hay dos objeciones principales en contra de la teoría, una metodológica y otra física. La primera es que la teoría introduce algunas variables “extra”, con respecto a la MC, pero sin ninguna ganancia empírica, ya que la teoría expresamente ha sido ideada para reproducir todas las predicciones empíricas de la mecánica cuántica. La teoría, por lo tanto, cae aparentemente bajo la navaja de Occam. En respuesta, hay por lo menos dos cosas que decir. Primero, en la formulación original de 1952, la teoría dejaba espacio para el desacuerdo empírico con la MC, si las variables “ocultas” de alguna manera llegaran a ser experimentalmente controlables. Pero esta esperanza no se ha sustanciado, y está ahora en gran parte ignorada incluso por los defensores de la teoría. Por otro lado, incluso si se hace que la teoría sea empíricamente equivalente a la MC, tiene nuevamente por construcción, un aspecto que podría, en principio, contar en su favor: el hecho de que representa una alternativa concreta en microfísica para los que no están convencidos, por argumentos *filosóficos*, de que en este ámbito el ideal clásico de la ciencia para predecir y *explicar* los fenómenos naturales debe ser abandonado.

La segunda objeción principal a la TVO de Bohm es que implica interacciones físicas no locales. Tales interacciones son el resultado del denominado “potencial cuántico”, que es una consecuencia matemáticamente bien definida del formalismo. En la ontología de la TVO, hay partículas (por ejemplo, electrones), pero también hay “fuerzas cuánticas” peculiares que, actuando conjuntamente con las fuerzas físicas ordinarias, conducen a los efectos cuánticos paradójicos (interferencia de electrones, por ejemplo). Desde el punto de vista matemático, todo esto es claro y funciona bien. Pero los físicos desde hace mucho tiempo han rechazado firmemente todo tipo de interacciones no locales. Newton, por ejemplo, al comentar su propia hipótesis polémica –la existencia de una “fuerza de gravedad”– confesó, como es sabido, que consideraba totalmente inconcebible que esa fuerza pudiera actuar a distancia, sin la intermediación de cuerpos. En un contexto diferente, Einstein sostuvo explícitamente que el principio de las acciones locales (“localidad”, para abreviar) es un principio físico al que “debemos aferrarnos incondicionalmente” (Einstein, 1949: 84-87). El contexto en el que expresó este punto de vista era el de su debate con Bohr sobre si la MC

12. Véase, por ejemplo, Bohm y Hiley (1975, 1984), Bohm, Hiley y Kaloyerou (1987).

debe considerarse “completa”, es decir, si dice todo lo que, en principio, hay que decir acerca de los fenómenos cuánticos. Este no es el lugar para volver a examinar, o incluso revisar esta famosa controversia, cuyo episodio más importante fue la publicación, en 1935, del documento antes mencionado por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR, 1935), seguido poco después por la respuesta de Bohr (Bohr, 1935).¹³ Solo señalo que la premisa física central del argumento es la localidad. El hecho, pues, de que la TVO de Bohm sea *no* local constituye una notable pieza de ironía histórica, ya que la principal motivación para la elaboración de un TVO es precisamente cumplir con la conclusión del argumento EPR de que, en principio, hay algo más que decir con respecto a la MC, acerca de los fenómenos cuánticos, a saber, una especificación de sus mecanismos causales.

¿Qué puede hacer un realista con este rompecabezas teórico? Él puede, o bien pagar el alto costo de rechazar la localidad, o bien tener la esperanza de idear otro tipo de teoría para la microfísica capaz de unirse con una ontología más plausible. Pero aquí viene una de las principales sorpresas de la física teórica contemporánea. A principios de la década del sesenta, un físico desconocido, llamado John S. Bell, al reflexionar sobre estos temas (hasta entonces marginales) en sus horas libres (ya que estaba ocupado en la investigación más mundana en el CERN), logró demostrar que no solo la teoría de Bohm es *no*-local, sino también que *cualquier* otra TVO *tiene* que ser *no* local, *si* debe coincidir con la MC en ciertas predicciones aún no examinadas sobre el mismo tipo de sistemas físicos que EPR habían considerado en su argumento.

Pasada de moda como era la cuestión, desconocido como era Bell, inadvertida como era la revista en la que publicó su artículo, el hecho es que media docena de físicos encontraron el asunto interesante y, en menos de una década, la primera prueba experimental de las predicciones cruciales se llevó a cabo.¹⁴ Este fue el primero de una serie de más y más refinados

13. He ofrecido un análisis detallado del argumento original de Einstein, Podolsky y Rosen en Chibeni (2005b). Otros desarrollos que implican el argumento se pueden encontrar en Chibeni (1997, 2001). En este punto, vale la pena comentar que el argumento del “gato” de Schrödinger, que apareció en el mismo año que el artículo de EPR (Schrödinger, 1935), también tuvo como objetivo principal sostener la incompletitud de la MC. Para este punto, véase Howard (1985). El argumento final de Schrödinger se toma generalmente como exponiendo el llamado “problema de la medición”; y esto también es cierto, por supuesto.

14. Las principales figuras de esta parte de la historia fueron John Clauser y Abner Shimony. Véase Clauser, Horne, Shimony y Holt (1969), Clauser y Horne (1974), Clauser y Shimony (1978).

experimentos para poner a prueba las predicciones de la ya famosa “desigualdad de Bell”, que culminó en el experimento de Alain Aspect y sus colaboradores (Aspect, Dalibard y Roger, 1982). El resultado de esta serie de experimentos ha sido una rotunda confirmación de las predicciones de la mecánica cuántica, y por lo tanto, de la refutación de toda la clase de TVO local. La búsqueda de una teoría satisfactoria de esta clase es, por lo tanto, inútil.

El dilema antes mencionado del realista científico llegó a ser, por lo tanto, mucho más dramático: el costo de la sustitución de la MC por una teoría susceptible de una interpretación realista es, obligadamente, que tal teoría sea *no* local. Ruego al lector que no ha tenido la oportunidad de profundizar en los detalles técnicos, que crea que esta es la consecuencia correcta de estos trabajos teóricos y experimentales, a pesar de su aparentemente excesiva generalidad y fuerza. Una de las características más notables del teorema de Bell es, de hecho, que no requiere prácticamente nada de la TVO, excepto que proporciona una asignación completa de valores a las variables de la mecánica cuántica, y que dichos valores no pueden cambiar “a distancia”. Por otra parte, las versiones generalizadas del teorema prescinden incluso de la asignación del valor “determinista” (es decir, preciso); descansan exclusivamente en una condición débil de “factorabilidad” de la asignación de valor probabilístico.¹⁵ Pero en este punto, la discusión se está volviendo demasiado técnica para la audiencia general destinataria de este artículo.

En resumen, teniendo en cuenta estos resultados, un realista científico que opta por una TVO (en el sentido débil de una teoría “más completa que la MC”) como una teoría-con-ontología básica en microfísica tendrá que aceptar la no-localidad como una característica fundamental de la realidad. Sin lugar a dudas, en la etapa actual de la física, esta es una elección muy difícil de hacer.¹⁶ Pero se puede hacer, y esto es suficiente para mostrar que es un error afirmar, como se hace a menudo en la literatura, que la localidad *descarta* el realismo científico.¹⁷ Por otra parte, en la

15. La primera versión probabilística de la desigualdad fue derivada en 1974 por Clauser y Horne (1974). Una aclaración importante de las premisas de esta desigualdad generalizada fue hecha por Jarrett (1984).

16. Para un análisis perspicaz del programa HVT en microfísica, véase Paty (1993c). Para un estudio técnico un tanto añejo, pero aún útil, véase Belinfante (1973).

17. En un artículo semipopular y muy influyente sobre las desigualdades de Bell, Bernard d'Espagnat (1979) afirma que las desigualdades de Bell se derivan de tres “premisas”: realismo, inducción y localidad. Pero este es un argumento peculiar y, con toda probabilidad,

siguiente sección veremos que, curiosamente, hay al menos dos opciones para el realista cuántico.

3.4 Incertidumbre e indeterminación

Uno de los rasgos más fundamentales de la MC es que no proporciona una asignación completa de valores (ACV) a las magnitudes físicas clásicamente consideradas como pertenecientes a los objetos físicos. Esto condujo, como acabamos de ver, al debate histórico acerca de la “completitud” de la teoría. De hecho, en vista de ello, la falta de dicha ACV sugiere fuertemente que la teoría no describe completamente las propiedades de los objetos, *ya que estas propiedades pueden, no obstante, ser determinadas por medio de mediciones comunes*. Pero la reacción de Bohr ante este sencillo argumento fue poner en tela de juicio la tesis realista ordinaria acerca de que la teoría tiene como objetivo describir la realidad física (si existe tal cosa, después de todo).¹⁸ Jugando un rol central en su complejo y autoproclamado oscuro argumento, estaba la afirmación de que, debido a las relaciones de Heisenberg, es imposible determinar simultáneamente por medio de mediciones los valores de todas las magnitudes físicas que el realista asume como pertenecientes al objeto cuántico; y que por lo tanto, no tiene sentido reclamar una teoría para proporcionar tales valores. Por consiguiente, la MC es tan completa como cualquier teoría podría serlo en el dominio cuántico.

Hay un laberinto para desenredar aquí. En primer lugar, incluso si damos por sentada, por mor del argumento, la interpretación de Bohr de las relaciones de Heisenberg, no se sigue de ello que las propiedades físicas cuyos valores son supuestamente indeterminables experimentalmente no existen. Esta inferencia requiere un compromiso previo con un dudoso

inválido, ya que sus premisas son una mezcla extraña de una tesis epistemológica, una regla de inferencia y un principio físico. Además, incluso si el argumento fuera válido, el autor no justifica suficientemente su elección para proteger la inducción y la localidad del supuesto *modus tollens* experimental de la violación de la desigualdad de Bell. En cualquier caso, el subtítulo del documento es otra pieza singular de precipitancia filosófica (por decir lo menos): “La doctrina de que el mundo está hecho de objetos cuya existencia es independiente de la conciencia humana resulta estar en conflicto con la mecánica cuántica y con hechos establecidos por experimentos”.

18. De hecho, de acuerdo con Aage Petersen (1963: 12), Bohr habría dicho en cierta ocasión: “No hay un mundo cuántico. Solo hay una descripción abstracta físico-cuántica. Es un error pensar que la tarea de la física es averiguar cómo es la naturaleza. La física se refiere a lo que podemos decir sobre la naturaleza”.

enlace entre lo incognoscible y lo inexistente, una aplicación distorsionada y tardía del principio de Berkeley “*esse est percipi*”.

En segundo lugar, y más importante aún, el realista puede estar abierto a la posibilidad de que, de hecho, la realidad cuántica sea “lacunaria”, en comparación con la realidad clásica. No debemos en principio descartar esta posibilidad; después de todo, el dominio cuántico involucra diminutas dimensiones espaciales y otras características peculiares, por lo que bien podría requerir una nueva concepción de lo que constituye un objeto físico. Este es un punto relativamente poco explorado en la literatura, pero es uno en el que me gustaría insistir. He sostenido en la última sección que, dadas las desigualdades de Bell y su violación experimental, el realista podría morder la bala y adoptar una TVO no-local (por ejemplo, la teoría de Bohm). Ahora estoy sugiriendo que *tiene una opción muy diferente, a saber, tomar la MC como una guía más o menos literal para acuñar un nuevo tipo de ontología no clásica*. En esta ontología –que aún no se ha articulado–¹⁹ los objetos físicos no “poseen” todas las propiedades clásicas al mismo tiempo, sino solo un subconjunto limitado de ellas, tal como está permitido y pronosticado por el formalismo cuántico.²⁰

Además de esto –y este es el tema metafísico más original de esta propuesta, que está inspirada en el realismo científico, pero va más allá de la MC– los objetos también poseerían ciertas propiedades “potenciales” o “latentes”, capaces de “actualizarse” en determinadas circunstancias físicas (y no, como han sugerido algunos representantes de la escuela de Copenhague, como resultado de un “acto de observación” subjetivo). Tal proceso sería (o podría ser) indeterminista, es decir, el valor a ser actualizado sería intrínsecamente azaroso. Según este punto de vista, las relaciones de Heisenberg no serían acerca de “incertidumbres” –un concepto epistemológico– sino acerca de “indeterminación” ontológica. Esto está totalmente de acuerdo con un análisis riguroso de las relaciones, que son simplemente consecuencias matemáticas de la forma en que se caracterizan los *ensambles* de la mecánica cuántica.²¹

19. Algunas propuestas rudimentarias, pero muy significativas ya se han hecho en la literatura, como la que se encuentra en Maxwell 1982 y 1988. También hay bonitas piezas de trabajo matemático que podrían resultar útiles algún día, si este programa ganara más aceptación. Para referencias y comentarios, véase Chibeni (1997: cap. 7).

20. Es decir, las propiedades representadas por los operadores para los cuales el vector de estado del objeto es un vector propio.

21. Para detalles y referencias, véase Chibeni (2005a).

Este análisis muestra que la tradicional interpretación “epistemológica” de las relaciones de Heisenberg es una *adición filosófica*, y de dudosa validez, si vamos al caso. Por lo tanto, apelar a las relaciones, bajo esta interpretación, para criticar el realismo científico –como, por ejemplo, lo hizo Bohr (véase más arriba)– no es argumentar desde la MC en favor del antirrealismo científico, sino desde la MC más un conjunto de suposiciones filosóficas en favor de una tesis filosófica.

Por cierto, el análisis anterior también expone la fragilidad de la afirmación de que los aspectos indeterministas –o, de modo más general, probabilísticos– de la MC *implican, por sí mismos*, una interpretación subjetivista de la teoría. Esto es un error. Es perfectamente concebible que ciertos procesos en el ámbito cuántico sean intrínsecamente indeterministas –i.e., que conduzcan a un resultado aleatorio– y físicamente reales. La mejor explicación de por qué se ha establecido un vínculo tan absurdo entre el indeterminismo cuántico y el subjetivismo ha sido sugerida por Nicholas Maxwell en un artículo publicado en 1988, del cual cito las siguientes líneas:

“Todo el mundo en aquel momento [la década del treinta] tendía sin pensar a dar por sentada una interpretación subjetivista de la probabilidad. Tanto los seguidores de Bohr como los de Einstein tendían a asumir que una teoría física probabilística no podría ser acerca de la realidad, sino solo acerca de nuestro conocimiento incompleto de la realidad. Por lo tanto, el abandono del determinismo parecía [...] llevar consigo la consecuencia de que aquel micro-realismo [el realismo científico] debía ser abandonado también” (Maxwell, 1988: 41)

Como una aclaración adicional respecto del programa realista cuántico que he estado comentando en esta sección, quisiera hacer hincapié en que se trata de una interpretación realista de la propia MC, que intenta tener en cuenta las características de esta teoría que a menudo se han asociado con el antirrealismo científico.²² En contraste con el programa de variables ocultas, no recupera las características clásicas de una ACV teórica y del determinismo. Propone, en cambio, que hay cantidades físicas reales sin va-

22. Para una defensa original de la idea general de que hay que tomar la MC en sí misma, sin modificaciones u adiciones, como una guía para el desarrollo de una nueva visión del mundo, véase Paty (1986 y 1988).

lores bien definidos (o con valores meramente “potenciales”, si se prefiere).²³ Y el proceso por el cual se obtiene un valor bien definido (por ejemplo, en una medición) sería, o podría ser, indeterminista, lo que lleva a un valor que es intrínsecamente aleatorio.

Una observación importante sobre este programa es que, aunque difiere en gran medida del programa de variables ocultas, *no* evita la no-localidad. Pero, como muchos autores han demostrado, el *tipo* de no-localidad involucrado en la presente interpretación realista de la MC es diferente del que puede encontrarse en la TVO de Bohm y otras posibles teorías de la misma clase (bajo el supuesto de que las variables ocultas de alguna manera resulten empíricamente accesibles). En la nomenclatura introducida en Shimony (1984), la primera es “incontrolable”, para el propósito de enviar señales superlumínicas, mientras que la segunda es “controlable” (bajo el supuesto mencionado). Esta diferencia es importante, ya que en todo respecto la no-localidad controlable confronta con ciertas consecuencias de otra teoría básica de la física contemporánea, la relatividad especial.

En aras de la exhaustividad, no debería pasar a la siguiente sección sin mencionar que todavía hay una *tercera* opción para un realista científico en busca de una ontología cuántica: la llamada “interpretación de muchos-mundos de la MC”. Su historia se remonta a 1957, cuando Hugh Everett propuso una interpretación en términos de un “estado relativo”, que ganó la simpatía de su prestigioso supervisor, John Wheeler. Muchos años más tarde, en manos de Brian DeWitt, dio lugar a una versión “ontologizada”, la interpretación de “muchos-mundos” propiamente dicha. Más recientemente, varios teóricos de renombre, especialmente David Deutsch, en Oxford, la han defendido hábilmente, mientras que otros han establecido con claridad la existencia de varias dificultades en esta propuesta.²⁴ En dicha

23. La idea general de la existencia de “potencialidades” en la naturaleza es muy antigua, como cualquier lector de Aristóteles ha de saber. En el siglo pasado, un importante defensor de la idea (en una versión actualizada, por supuesto) fue Karl Popper, quien, después de haber sido, en sus primeros años académicos, tal como Einstein, un defensor de la restauración del determinismo en la microfísica, cambió de opinión y propuso interpretar en términos de “propensiones” la probabilidad en general, y las probabilidades cuánticas en particular. Para las primeras posiciones de Popper, véase Popper (1968), cap. 9, y los Nuevos Apéndices. Para su posición posterior, véanse los ensayos recogidos en Popper (1982a y 1982b), así como la primera parte de su *A World of Propensities* (1990). Para un análisis comparado de Einstein y la visión de Popper sobre los cimientos de la MC, véase Paty (1989).

24. Everett (1957), DeWitt (1970, 1971), Healey (1984), Deutsch (1985), Geroch (1984), Stein (1984), Foster y Brown (1988).

interpretación, la función de onda cuántica es, en cierto sentido, “reificada”, y tomada como la realidad cuántica completa. Dado que las funciones de onda típicamente contienen una multiplicidad de posibles valores para las magnitudes físicas del objeto que representan, lo que se propone es que todos estos valores existen simultáneamente, uno para cada “copia” del objeto existente en un “mundo” diferente. Está claro, por tanto, que la presente interpretación implica una violación extrema del principio de parsimonia de Occam: entidades –universos enteros– se multiplican *hasta el infinito*, y tal vez “sin necesidad” (ya que hay otras opciones en la microfísica). Pero esto es discutible, como todo lo demás en física cuántica. A su favor, la interpretación de muchos-mundos tiene para ofrecer una solución muy clara para algunos de los grandes problemas cuánticos, tales como, por ejemplo, el famoso “problema de la medición”. No voy a ahondar en este tema aquí, ya que ha sido cubierto adecuadamente en la literatura.²⁵ Solo quisiera remarcar, una vez más, que la existencia de esta posibilidad debería llevar al menos a un debilitamiento de la opinión de que la MC no se presta a una interpretación realista.

3.5 El teorema de Kochen-Specker

Tan pronto como surgió la sospecha de que la MC podía ser incompleta como descripción de la realidad física, comenzó a ser explorada la idea de “completarla”. De hecho, como ya he señalado, tal vez el primer teórico en sugerir que debía completarse no fue otro que Louis de Broglie, quien había concebido ciertos elementos fundamentales para el desarrollo inicial de la misma MC. Su propuesta era que el aparente carácter dual de los objetos del mundo cuántico se debe a una verdadera mezcla ontológica de partículas y ondas, las “ondas piloto”. Cuando se propuso por primera vez esta idea no fue tomada en cuenta, por varias razones; pero fue más adelante fundamental para el surgimiento de la TVO de Bohm, que tuvo éxito en la conformación de una mezcla adecuada de estos dos componentes ontológicos aparentemente incompatibles.

Curiosamente, sin embargo, la posibilidad misma de formular una teoría más completa que la MC pronto fue condenada por un teorema demostrado por John von Neumann, en su influyente libro sobre los

25. Véase, por ejemplo, el interesante conjunto de artículos publicados en la edición especial de *Noûs* que contiene algunos de los trabajos citados en la nota anterior.

fundamentos matemáticos de la MC (von Neumann, 1955 [1932]). Este teorema parece mostrar que cualquier adición de más información al formalismo cuántico conduce a inconsistencias algebraicas. Pero veinte años después, Bohm hizo lo imposible. En su original par de artículos de 1952, Bohm ofreció una explicación plausible de por qué su teoría no estaba limitada por el resultado de von Neumann. La clarificación completa de lo que estaba ocurriendo, sin embargo, solo fue proporcionada por John Bell, quien presentó su análisis de la cuestión a publicación antes de obtener su desigualdad. Por desgracia, el documento solo se publicó en 1966 (Bell, 1966). Antes, Andrew Gleason había obtenido otro teorema algebraico contra las TVO (Gleason, 1957). El artículo de Bell de 1966 contenía también una prueba del mismo tipo, presentada como un reemplazo para el teorema de von Neumann, que depende de una premisa físicamente problemática. Diez años más tarde, otro resultado algebraico limitante fue obtenido por Kochen y Specker (1967). Esta prueba es clara y está particularmente bien formulada (a pesar de su complejidad matemática), por lo que en la literatura se la ha usado como el nombre común para toda la clase de pruebas algebraicas contra las TVO.

Aunque son mucho menos discutidos que las desigualdades de Bell, varios autores han afirmado que estos resultados algebraicos constituyen un serio obstáculo adicional para el realismo científico en la microfísica. La razón es que ellos mostrarían que, en tanto es matemáticamente imposible de completar la MC con “variables” extra, deberíamos tomarla como nuestra teoría básica y definitiva de la materia; y esta teoría no podría ser objeto de una interpretación realista, por las razones habituales ya comentadas en las secciones anteriores de este trabajo.

Este argumento aparentemente convincente puede, sin embargo, ser rebatido en dos frentes principales. En primer lugar, el realista puede insistir en que definitivamente *no* es cierto que los teoremas Kochen-Specker *prueben* que las TVO son *imposibles*. La existencia misma de una TVO respetable, matemáticamente consistente, muestra que esto no puede ser la conclusión de los resultados algebraicos. Como cualquier teorema, estos tienen premisas y, dado su carácter complejo, hay margen para cuestionar algunas de ellas. Eso es exactamente lo que Bohm y Bell han hecho con respecto a la prueba de von Neumann. En el caso de los resultados más recientes, sus premisas son más difíciles de rechazar; pero el punto sigue en pie: un realista ingenioso puede encontrar razones para no aceptar una o varias de ellas. Y, de nuevo, es precisamente

esto lo que protege la teoría de Bohm de los más recientes resultados algebraicos negativos.²⁶

En segundo lugar, como he estado sosteniendo en este artículo, no es cierto que la MC no pueda ser concebida como siendo, *en principio*, compatible con una ontología *no* clásica, tal como la ontología de “propensiones”, o la de “muchos-mundos”. Como señalé al comentar estas dos posibilidades, en su estado actual de desarrollo, ambas pueden ser (y tal vez debieran ser) rechazadas por ser demasiado programáticas (en un caso), o demasiado bizarras (en el otro). Sin embargo, examinada en el largo plazo, la historia de la física está en gran parte impulsada por los desafíos y las ideas audaces. Recordemos, por ejemplo, los predicamentos de los realistas del siglo XVI y principios del siglo XVII acerca de la teoría astronómica de Copérnico. Tenían, como todos sabemos, que idear una física enteramente nueva con el fin de sostener su creencia de que la teoría de Copérnico representaba el mecanismo real de los cielos. Les llevó casi cien años lograr esta hazaña científica colosal; y esto es, quizás, una muestra del gran poder heurístico de la postura realista.²⁷

3.6 El argumento de van Fraassen a partir de la microfísica

En *The Scientific Image* (1980), van Fraassen lanzó un ataque sistemático contra algunos de los principales argumentos utilizados por los realistas científicos para defender su posición. El foco de atención eran los llamados “argumentos abductivos”, o “inferencias a la mejor explicación”, que exploran una supuesta relación entre el poder explicativo de una teoría y su verdad.²⁸ Van Fraassen comienza por rechazar la validez de este tipo de inferencia en general, siempre que la inferencia lleve a afirmaciones acerca de entidades no observables. Emprende además, en el segundo capítulo del libro, un análisis de dos aplicaciones refinadas del razonamiento abductivo en la defensa del realismo científico, a saber, “el argumento de la coincidencia cósmica”, de J. J. C. Smart, el argumento del “no-milagro”, de Hilary Putnam

26. Para un análisis detallado del asunto, véase Chibeni (1997: cap. 4).

27. Este punto ha sido señalado, entre otros, por el gran matemático-físico-filósofo contemporáneo Herman Weil, que una vez dijo: “Y sin embargo, la ciencia parecería si no estuviera sostenida por una fe trascendental en la verdad y la realidad” (Weyl, 1963: vi).

28. Para una discusión general y referencias, véase Chibeni (1996 y 1997: cap. 2); también Psillos (1999) y Lipton (2004).

(Smart, 1968; Putnam, 1975). He sostenido en otro lugar que van Fraassen no interpreta correctamente esos argumentos (Chibeni, 1996, 1997: cap. 2, 2006). Mi objetivo aquí no es reanudar esta crítica, sino brindar un relato simplificado acerca de lo que en una publicación más técnica (Chibeni, 2008a) he llamado “el argumento de van Fraassen a partir de la microfísica”. Con esta expresión me refiero a un argumento –de hecho, un complejo de varios argumentos relacionados– que pretende demostrar que en la MC, o, más en general, en la microfísica, nos encontramos con fuertes razones para rechazar el realismo científico. Como hemos visto a lo largo de este trabajo, esta afirmación general no es nueva. Lo que es nuevo es la manera específica en que van Fraassen intenta defenderla.

En una inspección más cercana, el argumento de van Fraassen presenta una considerable complejidad: implica muchas suposiciones y teorías, y ha sido formulado de varias maneras en los diversos escritos publicados por el autor. En el citado artículo he intentado, en primer lugar, explicar en detalle el argumento, y luego, ofrecer una crítica igualmente detallada. No voy a retomar este trabajo aquí, por supuesto. Me contentaré con sintetizar el núcleo de la argumentación de van Fraassen y de mi respuesta.

El argumento de van Fraassen a partir de la microfísica se expone de una manera relativamente simple en el cap. 2 de *The Scientific Image*, y luego, en versiones refinadas, en varias publicaciones posteriores.²⁹ No contento con dismantelar (o al menos así lo cree van Fraassen) los argumentos abductivos a favor del realismo científico, afirma que incluso si estos fuesen válidos, no podrían ser *empleados* en ciertas situaciones específicas en la microfísica. Por lo tanto, el realista se vería privado de la oportunidad de hacer sus pretendidas “inferencias a la mejor explicación”. Antes de explicar brevemente esta interesante afirmación (que constituye el núcleo del argumento de van Fraassen), quisiera hacer notar, en la misma vena contrafáctica adoptada por el autor, que incluso si *fuera* cierto que las inferencias abductivas no pueden hacerse en algunos casos específicos, esto *no implicaría* que no se pudiesen hacer en *general*. En la ciencia, e incluso en la física, hay muchas otras circunstancias en las que el realista puede razonar abductivamente, y esto debería ser suficiente para mantener su tesis general de que el conocimiento científico *puede*, al menos en ciertos casos, ir más allá del nivel empírico.

29. Van Fraassen (1982, 1985b, 1989 y 1991). Estoy utilizando esta forma de hablar en aras de la simplicidad; no estoy afirmando que todas estas versiones sean equivalentes; para sus importantes diferencias, véase Chibeni (2008a).

Dejando de lado este importante punto, van Fraassen sostiene que la situación específica en la que no tendríamos ocasión propicia para inferir la mejor explicación en microfísica se vincula con el fenómeno de los pares de objetos correlacionados que fueron estudiados por EPR y, más tarde, por John Bell. En pocas palabras, dicha configuración física consiste en pares de objetos cuánticos preparados de tal manera que, una vez separados por una distancia arbitraria suficientemente grande, las mediciones de ciertas magnitudes físicas en cada uno de los objetos proporcionarían resultados correlacionados. Esta correlación, predicha por la MC, se ha confirmado experimentalmente en las ya mencionadas pruebas de las desigualdades de Bell. Esta sería una situación trivial desde el punto de vista de las teorías de la física clásica, ya que este tipo de correlación se puede explicar trivialmente por las leyes de conservación (por ejemplo, la del momento angular). El problema es que, como EPR han notado por primera vez, la MC *no* es compatible con esta explicación clásica, bajo el supuesto de que la teoría sea “completa” –y esta fue, recordemos, la principal cuestión en juego en el debate entre Einstein y Bohr–. La razón es simple para cualquier persona mínimamente familiarizada con el formalismo cuántico: la descripción de la MC de estos pares “entrelazados” de objetos *no* proporciona los valores de las magnitudes correlacionadas antes de que la medición se lleve a cabo.

Esta es una situación bastante desconcertante desde un punto de vista clásico. La solución de EPR para la “paradoja” consistió en afirmar que ella resulta precisamente de la incompletitud de la descripción teórica del estado cuántico. En efecto, si esta descripción se pudiese completar, de manera que pudieran atribuírseles a los objetos valores determinados para las propiedades correlacionadas en cada momento, el misterio se disolvería inmediatamente. Desafortunadamente, sin embargo, la respuesta de Bohr a este argumento sencillo estaba lejos de ser simple (como él mismo llegó a reconocer), y la cuestión continuó siendo muy poco comprendida hasta mucho tiempo después.

En la larga historia posterior sobre las correlaciones EPR, el siguiente y más importante episodio fue la derivación de la desigualdad de Bell. Este resultado explora el mismo tipo de correlación investigado por EPR, con la diferencia de que la situación en la que Bell muestra que las predicciones de la mecánica cuántica entran en conflicto con las de las TVO locales es aquella en la que la correlación *no* es absoluta, sino meramente estadística. Como ya he mencionado, el veredicto experimental, es decir, la determinación empírica efectiva de estas correlaciones estadísticas, confirmó

espectacularmente la MC. Por lo tanto –y este es el punto al que quería llegar aquí– la esperanza de explicar las peculiares correlaciones EPR-Bell por medio de una teoría “más completa que la MC” (en otras palabras, una TVO) ha demostrado ser vana.

Dicho más crudamente, el argumento de van Fraassen consiste básicamente en afirmar que, teniendo en cuenta este hecho, *no hay* explicación posible, *de ninguna naturaleza*, para las correlaciones EPR-Bell. En *The Scientific Image* este argumento aparece, sorprendentemente, en una versión muy débil: la búsqueda de explicaciones en la ciencia (el material típico en el que el realista científico elabora sus argumentos) “va en contra de al menos una de las principales escuelas de pensamiento de la física del siglo XX” (1980: 23). No se hace ninguna referencia directa a las desigualdades de Bell. Se refiere, suponemos, a la escuela de Copenhague. Pero ya que esta no es la única “escuela” de pensamiento en física cuántica, el argumento es, bajo esta forma, muy pobre.

Sin embargo, van Fraassen tiene para ofrecer algo más que un mero conflicto con una escuela de pensamiento. Como alguien que en sus primeras y más técnicas obras ha contribuido a la discusión sobre el programa de TVO –especialmente respecto de las bases e importancia del teorema de Kochen-Specker– es consciente, por supuesto, de que el problema con este programa no era simplemente su oposición a escuela de Copenhague. En consecuencia, encontramos mejores versiones del argumento en sus escritos técnicos posteriores a la publicación de su libro más influyente. De particular interés son los artículos “EPR: When is a correlation not a mystery?” (1985b), que reapareció en una versión ampliada como el capítulo 10 de *Quantum Mechanics* (1991); y “The charybdis of Realism: Epistemological implications of Bell’s inequality” (1982), que fue también republicado, con adiciones relevantes en 1989. Una de estas adiciones fue la propuesta de que en la historia de la ciencia y la filosofía se pueden encontrar seis, y solo seis tipos de explicaciones que pueden convertir las correlaciones físicas en un fenómeno no misterioso: *azar*, *coincidencia*, *coordinación*, *armonía preestablecida*, *identidad lógica* y *causa común*.

Van Fraassen procede entonces a excluir una por una estas posibilidades para el caso de las correlaciones EPR-Bell. Aquí, los motivos para rechazar el azar y la coincidencia son obvios. Con cierta simplificación, podemos decir que van Fraassen basa su rechazo de la explicación por “identidad lógica” en el teorema de Kochen-Specker; el de la explicación por “coordinación”, en la localidad; y el de la explicación por “causa común”, en la

violación experimental de las desigualdades de Bell. En Chibeni (2008a) he examinado críticamente todas estas afirmaciones, y llegué a la conclusión de que tienen algunas deficiencias importantes. Aquí quiero simplemente observar que por este razonamiento van Fraassen llega a una conclusión a primera vista sorprendente: ilas correlaciones EPR-Bell deben tomarse como un caso de “armonía preestablecida”! Por desgracia, no parece haber sido más astuto que Leibniz para convencernos de la razonabilidad de esta tesis. Estoy bromeando, por supuesto; van Fraassen no reclama la evidente asociación de su propuesta con la específica doctrina leibniziana, y es por lo tanto injusto criticar la primera a través de esta última. En cualquier caso, cuando va más allá de la mera utilización de una expresión para explicar lo que de hecho está proponiendo aquí, encontramos una asociación explícita de la postura que recomienda con “los nominalistas medievales”:

[Q]ue los fenómenos observables exhiben estas regularidades, por las cuales se ajustan a la teoría [cuántica], no es más que un hecho bruto, que puede, o no, tener una explicación en términos de hechos inobservables ‘detrás de los fenómenos’. Una tal explicación no es relevante para la corrección de la teoría, ni para nuestra comprensión del mundo (van Fraassen, 1980: 24).

Esta *no* es una observación metafórica o hecha al pasar. La misma opinión se expone de nuevo, en un contexto más técnico, en su libro de 1991, donde la probable perplejidad del lector es alimentada por la afirmación adicional de que la demanda de explicación científica es parte de la “propaganda filosófica” de la época. Y que “[c]uando la propaganda se mete en problemas, tal objetivo se hace más fácil de alcanzar si se bajan los estándares, y se descartan algunas preguntas acerca de por qué” (1991: 372). He aquí la moraleja de toda esta historia: tomemos las correlaciones cuánticas como “hechos brutos” que no necesitan ninguna explicación.³⁰

Me abstengo de seguir este consejo. Tampoco creo que la gran mayoría de los físicos estuvieran dispuestos a seguirlo. Afortunadamente, los ecos de “la noble búsqueda de los presocráticos” (Maxwell, 1988: 43) –la búsqueda

30. Arthur Fine llega a esta misma conclusión en un artículo de su fase posrealista (Fine, 1989). Paul Teller (1989) y Bernard d’Espagnat (1983) se cuentan entre los pocos filósofos de la ciencia que han expresado simpatía por esta posición “nominalista”.

de una verdadera comprensión del mundo natural— todavía resuenan en la comunidad científica. Y, espero, al menos en parte de la comunidad filosófica.

4. Observaciones finales

Cualquier esfuerzo tendiente a restablecer los prácticamente ignorados vínculos entre la filosofía y la ciencia debería ser bienvenido por los estudiantes en ambos campos. Dado su origen común en la Antigua Grecia, la filosofía y la ciencia parecen involucrar muchas cuestiones intelectuales que no pueden ser exploradas de manera fructífera sin una sólida cooperación mutua. El realismo científico es quizás uno de los mejores ejemplos de tal problema. Desde sus inicios, en los albores de la Modernidad, la ciencia ha sido ampliamente considerada como una de las áreas en las cuales el esfuerzo del hombre por obtener conocimiento ha sido coronado con éxito concreto e inequívoco. No obstante, pronto surgieron dudas, entre filósofos y científicos, de que tal vez la ciencia no estaba completamente libre de ciertos límites epistemológicos intrínsecos. En otras palabras, argumentaron que había preguntas que, *en principio*, parecían estar más allá del alcance del conocimiento humano, incluso en el dominio privilegiado de la ciencia.

El realismo científico, tal como se lo concibe hoy en día, lidia con una única versión específica de este problema epistemológico general. ¿Está el conocimiento humano limitado por los estrechos límites de la percepción humana? En otras palabras, ¿podemos efectivamente conocer, en condiciones epistémicas ideales, las entidades y procesos inobservables a los que refieren la mayoría de las teorías científicas? El conocimiento de tales ítems que presuntamente nos ofrece la ciencia, ¿es conocimiento genuino? ¿O deberían dichos ítems ser reinterpretados filosóficamente como algo más (por ejemplo, dispositivos de cálculo o referencias abreviadas a entidades observables)? Dado el tremendo éxito práctico de la ciencia, y dado el abismo introducido por la educación científica contemporánea entre la ciencia y la filosofía, tales preguntas probablemente sonarán ridículas para la mayoría de los científicos que trabajan hoy en día. Pero es un hecho histórico que han sido consideradas seriamente por los principales creadores de la ciencia, tanto modernos como contemporáneos, en todas sus ramas, y han atraído fuertemente la atención de los filósofos de la ciencia en el último medio siglo.

Cualquier discusión fructífera sobre este tema debería, entonces, estar bien informada tanto por lo que la ciencia es y hace efectivamente, como

por los métodos y estándares de investigación filosófica establecidos. En el caso particular del debate sobre el realismo científico, no se puede esperar ningún avance sin un conocimiento sólido de la naturaleza de nuestras mejores teorías científicas y sus fundamentos empíricos, y de los muchos temas filosóficos concernientes a la lógica del razonamiento científico y la relación entre los hechos empíricos y la teoría.

La tesis específica analizada en este trabajo es que en una rama particular de la ciencia contemporánea, la física cuántica, se pueden encontrar razones sin precedentes para mantener una postura escéptica frente a las afirmaciones de la teoría que pretenden describir las capas inobservables de la realidad. De nuevo, esto puede sonar paradójico para la mayoría de los científicos contemporáneos, incluidos los físicos cuánticos, dado el impresionante poder predictivo y explicativo de la mecánica cuántica, las teorías cuánticas de campos, etc. Pero toda una generación de filósofos e incluso de científicos (a saber, los padres fundadores de la física cuántica), se han involucrado explícitamente en un debate filosófico sobre este punto. Como cualquier buena discusión filosófica, esta no ha sido definitivamente resuelta a favor de uno de los bandos, y con suerte nunca lo será. No obstante, entre los físicos cuánticos que se dedicaron al tema hay, podría decirse, una tendencia general hacia la posición escéptica y antirrealista, o más bien un grupo de posiciones aglutinadas en torno a la llamada “interpretación de Copenhague” de la mecánica cuántica.

En este trabajo, me esforcé por mostrar, mediante un análisis directo de los principales argumentos antirrealistas basados en la mecánica cuántica, que hay un amplio margen para *resistir* esta tendencia. Reconozco, por supuesto, que la mecánica cuántica ha cambiado profundamente nuestra concepción de la materia. También, que las características teóricas específicas de la mecánica cuántica representan un nuevo tipo de desafío para cualquier persona interesada en las supuestas credenciales de esta teoría para ofrecer una descripción de cómo es realmente el (micro)mundo. Dando por hecho todo esto, argumenté que, a fin de cuentas, no existe una implicación directa e inevitable entre la mecánica cuántica y cualquier forma de antirrealismo científico. Como una consecuencia positiva, creo que los aspectos peculiares de la mecánica cuántica que motivaron, por buenas o malas razones, la creencia de que existe esta implicación, pueden y deben ser explorados con el objetivo de enriquecer nuestra comprensión de la filosofía, la ciencia, y su relación de toda la vida.

Referencias bibliográficas

- Aspect, A., Dalibard, J. y Roger, G. 1982. Experimental test of the Bell's Inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25): 1804-1807.
- Belinfante, F. J. 1973. *A Survey of Hidden Variables Theories*. Oxford: Pergamon Press.
- Bell, J. S. 1966. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Review of Modern Physics*, 38: 447-452.
- Bohm, D. 1952. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables" – parts I and II. *Physical Review*, 85(2): 166-79 y 180-193.
- Bohm, D. y Hiley, B. J. 1975. On the intuitive understanding of nonlocality as implied by quantum theory. *Foundations of Physics*, 5(1): 93-109.
- Bohm, D. y Hiley, B. J. 1984. Measurement understood through the quantum potential approach. *Foundations of Physics*, 14(3): 255-274.
- Bohm, D., Hiley, B. J. y Kaloyerou, P. N. 1987. An ontological basis for the quantum theory. *Physics Reports*, 144(6): 321-375.
- Bohr, N. 1935. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 48: 696-702.
- Bohr, N. 1949. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. En P. Schilpp (Ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. 3rd. ed. La Salle: Open Court, pp. 201-241.
- Bouveresse, R. (Ed.) 1989. *Karl Popper et la science d'aujourd'hui* (Actes du Colloque de Cerisy, 1981.) París: Aubier.
- Brown, H. R. 1981. O debate Einstein-Bohr sobre a mecânica quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 2: 51-89.
- Chibeni, S. S. 1996. A inferência abductiva e o realismo científico. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, série 3, 6(1): 45-73.
- Chibeni, S. S. 1997. *Aspectos da Descrição Física da Realidade*. (Coleção CLE, v. 21). Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, Unicamp. Recuperado de www.unicamp.br/~chibeni.
- Chibeni, S. S. 2001. Indeterminacy, EPR and Bell. *European Journal of Physics*, 22: 9-15.
- Chibeni, S. S. 2005a. Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(2): 181-192.
- Chibeni, S. S. 2005b. A logico-conceptual analysis of the Einstein-Podolsky-Rosen argument. En M. Pietrocola y O. Freire Jr. (Eds.). *Filosofia*,

- Ciência e História: Michel Paty e o Brasil, uma homenagem aos 40 anos de colaboração*. San Pablo: Discurso Editorial, pp. 115-135.
- Chibeni, S. S. 2005c. Locke on the epistemological status of scientific laws. *Principia*, 9(1-2): 19-41.
- Chibeni, S. S. 2006. Afirmando o conseqüente: Uma defesa do realismo científico (!). *Scientiae Studia* 4(2): 221-249.
- Chibeni, S. S. 2008a. Explanations in microphysics: A response to van Fraassen's argument. *Principia*, 12(1): 49-71.
- Chibeni, S. S. 2008b. Berkeley: Uma física sem causas eficientes. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Série 3, 18(2): 357-390.
- Chibeni, S. S. 2010. Berkeley e o papel das hipóteses na filosofia natural. *Scientiae Studia*, 8(3): 389-419.
- Chibeni, S. S. 2013. As posições de Newton, Locke e Berkeley sobre a natureza da gravitação. *Scientiae Studia*, 11(4): 811-839.
- Clauser, J. F. y Horne, M. A. 1974. Experimental consequences of objective local theories. *Physical Review, D* 10: 526-535.
- Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A. y Holt, R. A. 1969. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters*, 23: 880-884.
- Clauser, J. F. y Shimony, A. 1978. Bell's theorem: Experimental tests and implications. *Reports on Progress in Physics*, 41: 1881-1927.
- D'Espagnat, B. 1976. *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. 2da. ed. Londres: W. A. Benjamin.
- D'Espagnat, B. 1979. The quantum theory and reality. *Scientific American*, November 1979: 128-140.
- D'Espagnat, B. 1983. *In Search of Reality*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Deutsch, D. 1985. Quantum theory as a universal physical theory. *International Journal of Theoretical Physics*, 54(1): 1-41.
- Dewitt, B. S. 1970. Quantum mechanics and reality. *Physics Today*, septiembre: 30-35.
- Dewitt, B. S. 1971. The many-universes interpretation of quantum mechanics. En: d'Espagnat 1971 *Foundations of Quantum Mechanics. Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi', Course 49*, pp. 211-262.
- Dorling, J. 1987. Schrödinger's original interpretation of the Schrödinger's equation: A rescue attempt. En C. Kilmister (Ed.). *Schrödinger. Centenary Celebration of a Polymath*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 16-40.

- Einstein, A., Podolsky, B. y Rosen, N. 1935. Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? *Physical Review*, 47: 777-780.
- Einstein, A. 1949. *Autobiographical notes*. Trad. P. A. Schilpp. En P. Schilpp (Ed.) *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Illinois: Open Court, pp. 3-94.
- Einstein, A. 1954. What is the theory of relativity. En *Ideas and Opinions*. Trad. S. Bargmann, Nueva York: Wings Books, pp. 228-230.
- Everett III, H. 1957. "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29(3): 454-462.
- Fine, A. 1989. Do correlations need to be explained? En J. Cushing y E. McMullin (Eds.). *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. Notre Dame: University of Notre Dame Press, pp. 175-194.
- Foster, S. y Brown, H. R. 1988. On a recent attempt to define the interpretation basis in the many worlds interpretation of quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 27(12): 1507-1531.
- Geroch, R. 1984. The Everett interpretation. *Noûs*, 18(4): 617-633.
- Gleason, A. M. 1957. Measures on the closed subspaces of a Hilbert space. *Journal of Mathematics and Mechanics*, 6: 885-893.
- Healey, R. 1984. How many worlds? *Noûs*, 18(4): 591-616.
- Heisenberg, W. 1949. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Nueva York: Dover.
- Howard, D. 1985. Einstein on locality and separability. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16: 171-201.
- Jammer, M. 1966. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Nueva York: Mc-Graw Hill.
- Jarrett, J. P. 1984. On the physical significance of the locality conditions in the Bell arguments. *Noûs*, 18: 569-589.
- Kochen, S. y Specker, E. P. 1967. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17: 59-87.
- Lipton, P. 2004. *Inference to the Best Explanation*. 2da. ed. Londres: Routledge.
- Loparic, Z. 1980. Andreas Osiander: Prefácio ao *De Revolutionibus Orbium Coelestium de Copérnico*. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 1: 44-61.
- Maxwell, N. 1982. Instead of particles and fields: A micro-realistic quantum "smearon" theory. *Foundations of Physics*, 12(6): 607-631.
- Maxwell, N. 1988. Quantum propensiton theory: A testable resolution of the wave/particle dilemma. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 39: 1-50.
- Pais, A. 1982. "Subtle is the Lord". *The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

- Paty, M. 1986. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique. *Fundamenta Scientiae*, 7(1): 47-87.
- Paty, M. 1988. *La matière dérobée*. Paris: Archives Contemporaines.
- Paty, M. 1989. Einstein, Popper et le débat quantique aujourd'hui. En R. Bouveresse (Ed.), *Karl Popper et la science d'aujourd'hui*. (Actes du Colloque de Cerisy, 1981.) Paris: Aubier, pp. 255-272.
- Paty, M. 1993a. *Einstein philosophe*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Paty, M. 1993b. Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger. En M. Bitbol y O. Darrigol (Eds.) *Erwin Schrödinger: philosophy and the birth of quantum mechanics. Philosophie et naissance de la mécanique quantique*. Paris: Editions Frontières, pp. 161-190.
- Paty, M. 1993c. Sur les 'variables cachées' de la mécanique quantique. *La Pensée* 292, mars-avril 1993, pp. 93-115.
- Paty, M. 1995. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 25(1): 183-204.
- Petersen, A. 1963. The philosophy of Niels Bohr. *The Bulletin of the Atomic Scientists*, 19(7): 8-14.
- Popper, K. R. 1968. *The Logic of Scientific Discovery (segunda edición)*. Londres: Hutchinson.
- Popper, K. R. 1972. *Conjectures and Refutations*. 4ta. ed., revisada. Londres: Routledge and Kegan Paul.
- Popper, K. R. 1982a. *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Londres: Hutchinson.
- Popper, K. R. 1982b. *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*. Londres: Routledge.
- Popper, K. R. 1990. *A World of Propensities*. Bristol: Thoemmes.
- Psillos, S. 1999. *Scientific Realism. How Science Tracks Truth*. Londres: Routledge.
- Putnam, H. 1975. What is mathematical truth. En *Mathematics, Matter and Method*. (Philosophical Papers, v.1.) Cambridge: Cambridge University Press, pp. 60-78.
- Putnam, H. 1978. *Meaning and the Moral Sciences*. Boston: Routledge and Kegan Paul.
- Putnam, H. 1981. Quantum mechanics and the observer. *Erkenntnis*, 16(2), 193-219.
- Smart, J. J. C. 1968. *Between Science and Philosophy*. Nueva York: Random House.
- Shimony, A. 1984. Controllable and uncontrollable non-locality. En *Proceedings of the International Symposium on the Foundations of Quantum*

- Mechanics*. Physical Society of Japan. (Reproduced in Shimony 1993, vol. II, pp. 130-139.)
- Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical review*, 28(6), 1049-1070.
- Schrodinger, E. 1935. Die Gegenwartige Situation in der Quantenmechanik, *Die Wissenschaften* 23: 807-12, 824-8, 844-9.
- Stein, H. 1984. The Everett interpretation of quantum mechanics: Many worlds or none? *Noûs*, 18 (4): 635-652.
- Teller, P. 1989. Relativity, relational holism, and the Bell inequalities. En J. Cushing y E. McMullin (Eds.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. Notre Dame: University of Notre Dame Press, pp. 208-23.
- van Fraassen, B. C. 1980. *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.
- van Fraassen, B. C. 1982. The Charybdis of realism: Epistemological implications of Bell's inequality. *Synthese*, 52: 25-38.
- van Fraassen, B. C. 1985b. EPR: When is a correlation not a mystery? En P. Lahti y P. Mittelstaedt. *Symposium on the Foundations of Modern Physics. 50 Years of the Einstein-Podolsky-Rosen Gedankenexperiment*. Singapore, World Scientific, pp. 113-128.
- van Fraassen, B. C. 1989. *Laws and Symmetry*. Oxford: Clarendon Press.
- van Fraassen, B. C. 1991. *Quantum Mechanics: An Empiricist View*. Oxford: Clarendon Press.
- von Neumann, J. 1955. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Trad. R. T. Beyer. Princeton: Princeton University Press.
- Weyl, H. 1963. *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Nueva York: Atheneum.

