

El enfoque de descripciones complementarias: ¿qué significa comprender la mecánica cuántica?

En búsqueda de un desarrollo expresivo de la realidad física

Christian de Ronde*
cderonde@vub.ac.be

Resumen

En este trabajo nos proponemos discutir la pregunta respecto de la comprensión de la mecánica cuántica. En primer lugar, analizamos el concepto de complementariedad de Bohr y buscamos avanzar en un desarrollo, más allá de la mera función regulativa de los fenómenos. En segundo término, consideramos la noción misma de física, adentrándonos para ello en el problema de la representación, el problema de la interpretación de los fenómenos y la adecuación de los problemas físicos. En tercer lugar, nos proponemos presentar el enfoque de descripciones complementarias a partir de la relación entre física clásica y física cuántica, así como también respecto de la necesidad del desarrollo de nuevos esquemas conceptuales. Finalmente, buscamos determinar claramente cuál es, según el enfoque de descripciones complementarias, el problema que se desprende a partir de la interpretación de la mecánica cuántica, esto es, responder la pregunta ¿qué significa comprender la mecánica cuántica?

Palabras clave: *complementariedad- representación- límite cuántico-clásico*

Abstract

In this work we attempt to discuss with respect to the question regarding the comprehension of quantum mechanics. In first place we analyze the concept of complementarity of Bohr and attempt to advance in a development beyond the mere regulative function of phenomena. Secondly, we consider the notion of 'physics' itself, for which we take into account the problem of representation, the problem of interpreting phenomena and the adequacy of physical problems. In third place, we intend to present the complementary descriptions approach from the relation between classical physics and quantum physics, as well as with

*Christian de Ronde es Licenciado en Física (UBA) y doctorando en Center Leo Apostel (CLEA) and Foundations of the Exact Sciences (FUND) Vrije Universiteit Brussel - Krijkundestraat 33, 1160 Brussel. El autor le agradece a la doctora Graciela Domenech por comentarios que ayudaron al texto, también al subsidio provisto por el proyecto FWO G.040508N de la Vrije Universiteit Brussel.

respect to the necessity of new conceptual schemes. Finally, we intend to point clearly which is, according to the complementary descriptions approach, the problem which appears in the interpretation of quantum mechanics, this is, to answer the question: What does it mean to understand quantum mechanics?

Keywords: *complementarity- representation- quantum to classical limit.*

*Autorizar nuevamente a que el destino
del pensamiento sea el absoluto.*

Alain Badiou¹

1. La física clásica como una teoría de entidades

El nacimiento de la física en Occidente debe ser inscripto en la problemática del pensamiento presocrático y especialmente en el desarrollo metafísico en término de entidades propuesto por Platón y Aristóteles. Fue Aristóteles quien a partir de sus principios lógicos,² dio una respuesta al problema del movimiento y el cambio tal como había sido presentado por los presocráticos.³ Muchos siglos más tarde, Isaac Newton logró desarrollar una estructura matemática, basada en su cálculo diferencial, capaz de responder aquellas preguntas que habían permanecido sin respuesta durante siglos –como lo eran el movimiento de los planetas o la trayectoria de una bala de cañón. En esta formulación, la noción de *entidad* aparece –como lo hacía en la de Aristóteles– como presupuesto y fundamento central en la comprensión de los fenómenos. Es por ello que sostenemos que la historia de la física clásica ha sido ante todo, la historia de las entidades físicas.⁴

En el siglo XVII la física aparecía como la madre de las ciencias, la mecánica newtoniana respondía todas aquellas preguntas pensables y sólo quedaba encontrar las soluciones a sus ecuaciones. Sin embargo, desde la filosofía, aparecía la cuestión respecto de la justificación posible de aquel conocimiento. ¿Como podíamos estar seguros de que el conocimiento brindado por la física newtoniana era “buen conocimiento”, *episteme*, y no mera *doxa*? ¿Como podíamos saber si no estábamos siendo engañados por un “genio maligno”? Las críticas al cono-

¹ Aquí como en el resto del artículo, tanto del francés como del inglés, todas las traducciones me corresponden.

² Nos referimos aquí a la existencia de objetos de conocimiento, el principio de identidad y el principio de no contradicción.

³ Para una discusión detallada del desarrollo propuesto por Platón y Aristóteles en relación al problema del movimiento ver Verelst, K. y Coecke, B., “Early Greek Thought and perspectives for the Interpretation of Quantum Mechanics: Preliminaries to an Ontological Approach”, en *The Blue Book of Einstein Meets Magritte*, D. Aerts (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999, pp. 163-196.

⁴ Entidades físicas como partículas, ondas, campos, etcetera. Para una discusión ver de Ronde, C., *The Contextual and Modal Character of Quantum Mechanics: A Formal and Philosophical Analysis in the Foundations of Physics*, Tesis Doctoral, Universidad Libre de Bruselas y Universidad de Utrecht, 2009.

cimiento científico y la justificación misma del conocimiento posible, habían aparecido como cuestiones centrales en la disputa entre racionalistas y empiristas –disputa que tuvo lugar bajo los nombres de Descartes, Leibniz, Berkley, Locke y Hume. Sin embargo, fue Immanuel Kant quién logró resolver los problemas de la metafísica de la época al reinscribir el fundamento del conocimiento posible, no en una exterioridad imposible de acceder y justificar, sino en la interioridad del *sujeto trascendental*, sus categorías *a priori* y sus formas de la intuición.⁵ Pero si bien Kant había logrado justificar el conocimiento de la física en su *Crítica de la razón pura*, lo había hecho al precio de instalar la noción de *finitud*. El hombre, sostenía Kant, es finito, y por ende, no puede en forma alguna acceder a lo *absoluto*, a lo *infinito*, a la *cosa en sí*, más bien, debe restringirse al conocimiento objetivo tal como se encuentra expuesto en la arquitectónica de la *Crítica*.⁶ Aquellas preguntas y respuestas que los griegos habían dejado planteadas respecto del ser eran ahora excluidas y calificadas como “metafísicas”.

El objeto entonces, no es ya una exterioridad que meramente contemplamos en tanto científicos, una entidad perteneciente a la naturaleza que investigamos de forma imparcial, sino que más bien, el objeto se encuentra constituido en sí mismo por categorías y formas de la intuición que el sujeto imprime en el caos de sensaciones. En este caso, la pregunta respecto de la relación entre los fenómenos y el ser, la cosa en sí, no puede ser justificada, y cualquier desarrollo en este sentido conduce a aporías y contradicciones. La *cosa en sí* permanece como una *X* de la cuál nada puede ser dicho, el objeto, como parte de la estructura del conocimiento posible, la física como una teoría del conocimiento.

2. El fin de la metafísica, el nacimiento de la cuántica y el objeto perdido

A fines del siglo XIX las críticas a las categorías *a priori* y a las formas de intuición habían dado lugar a profundas grietas en la arquitectónica kantiana. La crítica y la reconstrucción respecto de la metafísica y de la estructura del conocimiento moderno, que comenzó con autores como Friedrich Nietzsche a mediados del siglo XIX, fue acompañada por revoluciones en los fundamentos de la física y de la matemática. En física, la teoría de la relatividad presentaba una nueva relación entre espacio y tiempo dejando de lado no sólo la interdependencia de estos conceptos,⁷ sino también la geometría euclídea,⁸ aquélla que Kant había considerado como parte de la estructura *a priori* del conocimiento posible. Sin embargo, fue la mecánica

⁵ Las categorías están basadas en la lógica aristotélica mientras que las formas de intuición son el espacio euclídeo y el tiempo absoluto.

⁶ Como sostiene Quentin Meillassoux la consecuencia que tuvo la revolución (copernicana) de Kant fue la de restringir el poder de la física: “El giro copernico-galileano inherente a la ciencia moderna ha dado lugar a una contra-revolución ptolemaica en filosofía.”

⁷ En la teoría de la relatividad el espacio y el tiempo no son conceptos absolutos ni independientes uno de otro sino que forman parte de un nuevo ente matemático y sus roles son intercambiables al cambiar el sistema de referencia.

⁸ En la teoría de la relatividad la geometría euclídea es reemplazada por una geometría riemanniana en la cual el espacio es curvo.

cuántica la que produjo un quiebre de gravedad aún mayor. La teoría cuántica apareció deconstruyendo no solo los fundamentos de la objetividad clásica, sino también los fundamentos mismos del conocimiento moderno. Como señala Pauli:

En muchos sentidos el presente aparece como un tiempo de inseguridad en los fundamentos, un tiempo de fundaciones inestables. Ni siquiera el desarrollo de las ciencias exactas ha escapado enteramente este estado particular de inseguridad, como se expresa, por ejemplo, en las frases ‘crisis en los fundamentos’ de la matemática, o ‘revolución en nuestra vision del mundo’ en física. Efectivamente, muchos conceptos derivados aparentemente en forma directa de estructuras intuitivas, desarrolladas a su vez a partir de percepciones sensoriales y formalmente tomados como supuestos hechos, triviales o directamente obvios, son para el físico moderno de limitada aplicabilidad. El físico moderno observa con escepticismo a los sistemas filosoficos que, imaginando haber reconocido las condiciones *a priori* del entendimiento humano en sí mismas, sólo han logrado desarrollar las condiciones *a priori* de los sistemas de la matemática y de las ciencias naturales de una epoca particular.⁹

En particular, la estructura formal que subyace a la lógica intrínseca de la mecánica cuántica difiere de la que corresponde a la estructura de la mecánica clásica.¹⁰ La cuántica puede ser desarrollada en su estructura formal a partir de principios lógicos independientes de aquellos desarrollados por Aristóteles.¹¹ Las consecuencias interpretativas que se desprenden de este hecho, resultan devastadoras. No sólo son restringidos el principio de identidad¹² y el principio de no-contradicción,¹³ sino que aún el principio de existencia se encuentra limitado, o por lo menos cuestionado, a partir del principio de indeterminación de Heisenberg.¹⁴ Respecto de la física clásica y de su concepción del mundo en términos de entidades, la cuántica aparece como una teoría sin objeto, en donde las categorías clásicas carecen de referente.

⁹ Pauli, W., *Writings on Physics and Philosophy*, Enz, C., and von Meyenn, K., (eds), Springer Verlag, 1994, p. 95.

¹⁰ Birkhoff y von Neumann llamaron lógica cuántica a la estructura proposicional que subyace a la mecánica cuántica.

¹¹ Para un desarrollo de la estructura formal de la mecánica cuántica a partir de los principios lógicos de indeterminación, superposición y complementariedad ver Lahti, P., "Uncertainty and Complementarity in Axiomatic Quantum Mechanics", *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 19, 1980, pp. 789-842.

¹² Especialmente a través de la noción de superposición e indistinguibilidad cuánticas. Para un análisis detallado ver French, S. y Krause, D., *Identity in Physics: A historical, Philosophical, and Formal Analysis*, London, Oxford University Press, 2006.

¹³ Newton da Costa y Décio Krause sostienen que la lógica intrínseca de la complementariedad es paracosistente.

¹⁴ El principio de indeterminación de Heisenberg sostiene que en la estructura formal de la mecánica cuántica los observables incompatibles, como lo son por ejemplo la posición y el momento, no pueden ser simultáneamente perfectamente determinados, existiendo una cota definida por la constante de Planck: $\Delta x \cdot \Delta p < \hbar$. Heisenberg sostiene entonces en su artículo: "Creo que uno puede formular aceptablemente la emergencia del 'camino' clásico de una partícula del siguiente modo: el 'camino' deviene en ser sólo porque lo observamos".

3. El giro lingüístico, Niels Bohr y el concepto de complementariedad

A partir de la crítica a los *a priori* kantianos y el quiebre de la metafísica hacia finales del siglo XIX y comienzos del XX,¹⁵ el desarrollo de la filosofía, en términos del llamado giro lingüístico,¹⁶ presenta una crítica certera a la concepción metafísica del mundo, ubicando al lenguaje como fundamento de toda forma de pensamiento. De este modo, el sujeto aparece, no en tanto fundamento, sino como mero “resultado” del lenguaje. Heidegger dirá entonces que “el hombre es hablado por el lenguaje”, dando primacía al lenguaje por sobre el sujeto, mientras que Wittgenstein escribe en su *Tractatus* “los límites de mi lenguaje significa los límites de mi mundo”, presentando de este modo al lenguaje como condición de posibilidad para acceder a la experiencia posible. Lo real, aquello que había quedado entre paréntesis en el esquema kantiano, –y respecto de lo cual se centraron las filosofías posteriores– como una *X* que permanecería por siempre vedada, debía ser ahora olvidado, enterrado como un problema del pasado, puesto que respecto de aquello que no podemos hablar, debemos mantener silencio.

El giro lingüístico plantea el problema aún más acuciante para la física, puesto que la representación se encuentra determinada por el lenguaje, y siendo el lenguaje aquél que determina lo pensable, no existe “algo” por fuera del lenguaje. El objeto y el mundo no son más que una creación lingüística y la pregunta por el ser, la pregunta ontológica, no puede evitar quedar atrapada en la representación misma. De este modo, como señalará Gadamer en su libro *Verdad y método*, para la hermenéutica no existe otra posibilidad que hacer epistemología. La física aparece entonces como un mero discurso, como aquello que Wittgenstein llama un “juego del lenguaje”, y será Rorty quien señale que “los físicos son poetas vigorosos” que crean esquemas metafísicos a través de sus teorías.

Dentro de las problemáticas de la física contemporánea, podemos sostener que, quien logrará instaurar los desarrollos filosóficos respecto del lenguaje no es otro que el físico danés Niels Bohr.¹⁷ Bohr no sólo fue partícipe del desarrollo de la teoría atómica en sus comienzos,¹⁸ sino que fue además quién reunió a los físicos que desarrollaron, bajo su mirada crítica, el formalismo mismo de la teoría. Más adelante, luego de la constitución formal de la teoría cuántica, las problemáticas del pensamiento bohriano girarán en torno a la cuestión del conocimiento y de la objetividad en la física contemporánea, temas en su origen esencialmente kantianos.

Como hemos señalado con anterioridad, en la mecánica cuántica la noción de objeto se resiste a ser interpretada consistentemente dentro del formalismo matemático.¹⁹ De acuer-

¹⁵ Para un análisis de este período y su relación particular con la física ver Cacciari, M., *Ensayo sobre la crisis del pensamiento negativo. De Nietzsche a Wittgenstein*, DF, Siglo XXI Editores, 1982.

¹⁶ El desarrollo de la filosofía en términos del lenguaje a partir de la crítica nietzscheana a la metafísica fue desarrollada principalmente en el siglo XX a partir de diferentes líneas de pensamiento que incluyen a la hermenéutica heideggeriana, el pragmatismo wittgensteniano o el post-estructuralismo derridiano.

¹⁷ Para un desarrollo exhaustivo de estas ideas ver de Ronde, C., op. cit., capítulo 5.

¹⁸ Proponiendo por ejemplo su modelo del átomo en 1913.

¹⁹ En efecto, el teorema de Kochen-Specker sostiene que no es posible valorar consistentemente conjuntos de propiedades compatibles que pertenecen a diferentes contextos experimentales.

do a Bohr, para la descripción de ciertos fenómenos atómicos necesitamos una ‘imagen de partícula’ mientras que para otros necesitamos una ‘imagen de onda’. Puesto que cada experimento determina propiedades mutuamente incompatibles, utilizar ambas descripciones al mismo tiempo lleva a contradicciones respecto de experimentos contrafácticos. El *principio de complementariedad*, desarrollado por Bohr, es una búsqueda para recuperar la objetividad en términos de las posibles ‘representaciones clásicas’, comenzando directamente por los experimentos pensados desde la física clásica y evitando al mismo tiempo la pregunta respecto del mundo representado por el formalismo cuántico. La complementariedad aparece entonces como un *principio regulativo* que evade la discusión en términos de objetos cuánticos y remite la discusión al campo de los fenómenos mutuamente complementarios. El concepto de complementariedad es aquél que logra recobrar, a costa de perder al ‘objeto cuántico’, la consistencia del *conocimiento intersubjetivo*. En este caso, la importancia pasa a ser la consistencia de la discursividad impuesta por los resultados experimentales.

La descripción de los fenómenos tiene a este respecto un carácter perfectamente objetivo, en el sentido de que no existe referencia explícita a ningún observador individual y por ende... no existe ambigüedad alguna en la comunicación de la observación.²⁰

El conocimiento físico, que había sido fundado en la época de los griegos en la *physis*, que luego había sido transmutado –a partir de Kant– en términos de un *sujeto trascendental*, aparecía ahora, para Bohr, fundado en el *lenguaje* mismo de la física clásica.

Aún cuando los fenómenos trascienden el alcance de las teorías físicas clásicas, el dar cuenta de los arreglos experimentales y de los resultados de las observaciones debe ser hecho en un lenguaje simple, apropiadamente suplementado por la terminología técnica propia de la física. Ésta es una demanda lógica evidente, puesto que la palabra experimento refiere a una situación en la cual podemos decirles a otros aquello que hemos hecho y aquello que hemos aprendido.²¹

La relación entre los fenómenos sería entonces asegurada por este esquema lingüístico estático y cerrado. De acuerdo a Bohr: “[...] la interpretación inambigua de cualquier medición debe ser enmarcada esencialmente en término de las teorías físicas clásicas, y podríamos decir también en este sentido, que el lenguaje de Newton y Maxwell permanecerán por siempre como el lenguaje propio de los físicos”.²² Bohr había encontrado un nuevo *a priori*, el lenguaje clásico, que serviría para asegurar la nueva noción de objetividad en términos de *comunicación*

²⁰ Bohr, N., citado en D’Espagnat, Bernard, *Physics and Philosophy*, Princeton, Princeton University Press, 2006, p. 98.

²¹ Bohr, N., citado en Wheeler, J. A.; Zurek, W. (Eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983, p.7.

²² Citado de Wheeler y Zurek, 1981, p. 7.

intersubjetiva. Esta objetividad que remite a la discursividad acerca los diferentes fenómenos clásicos, aparece al precio de perder al objeto mismo. Por otra parte, Bohr necesitaba todavía cerrar el círculo, que ningún tipo de lenguaje fuese “agregado”, y con esta intención sostenía que: “sería un error creer que las dificultades de la teoría atómica podrían tal vez evitarse al reemplazar los conceptos de la física clásica por nuevas formas conceptuales.” Bohr no sólo había obturado de este modo las puertas de cualquier desarrollo conceptual futuro, sino que era conciente de que la descripción física se transformaba en un desarrollo meramente epistemológico, y nunca en relación a una pregunta de orden ontológica. Para Bohr, como para muchos físicos que si bien hoy día utilizan, pero no reconocen concientemente este carácter de la física contemporánea, la física se relaciona no con el mundo, sino más bien con el orden pragmático y discursivo del lenguaje:

No existe el mundo cuántico. Sólo hay una descripción cuántica abstracta. Es erróneo pensar que la física tiene la tarea de encontrar cómo *es* la naturaleza. *La física se preocupa por determinar qué es aquello que podemos decir acerca de la naturaleza.*²³

En este marco el mundo se desvanece en el discurso. Si la física no se encuentra determinada por la comprensión de la naturaleza, podría ser entonces que tan sólo cuestiones pragmáticas determinen su camino. En este caso, parece difícil justificar el significado de una teoría más allá de su mera funcionalidad y puesto que no hay una algo por fuera del lenguaje, la comprensión no parece ser un elemento constitutivo propio de la física. Podría ser entonces la física, como parece señalar Rorty, tan sólo un poema, una interpretación sin referente alguno.

La física no debe ser entendida tanto como el estudio de algo dado *a priori*, sino como el desarrollo de aquellos *métodos para ordenar e inspeccionar la experiencia humana*. En este respecto nuestra tarea debe ser dar cuenta de tal experiencia en una manera independiente de los juicios individuales y subjetivos, y de este modo objetiva en el sentido de que *pueda ser comunicada sin ambigüedades en el lenguaje ordinario.*²⁴

4. Descripciones complementarias: más allá de los fenómenos complementarios

Nos interesa aquí avanzar en el concepto de complementariedad y relacionarlo, no con los fenómenos clásicos, sino con las múltiples descripciones que se desprenden de las teorías físicas. El enfoque de descripciones complementarias es un intento por comprender cada teoría física respecto de los conceptos que la constituyen, así como de los límites que los conceptos impo-

²³ Bohr, N., Op. Cit. p.8, las cursivas son nuestras.

²⁴ N. Bohr, 1960, el énfasis es nuestro.

nen, buscando desarrollar un equilibrio entre la experiencia y la interpretación, entre la creación y el descubrimiento. Por sobre todo, el enfoque es una búsqueda por reconstituir la relación entre la física y la ontología, más allá del giro lingüístico y el problema de la representación.

Una descripción es un esquema en el cual cierto número de conceptos se relacionan para constituir las precondiciones que determinan una observación experimental, una región del pensamiento bajo la cual una experiencia física puede ser interpretada. La descripción no está *representado* nada, más bien determina las condiciones bajo las cuales una singularidad puede ser *expresada*. La descripción y la experiencia están mutuamente intrincadas, sin supremacía de una sobre la otra. El hecho de que la descripción se encuentre determinada por los conceptos, también hace que a partir de las inconmensurabilidades propias (de los conceptos) existan incompatibilidades que no pueden ser resueltas entre diferentes descripciones. La mecánica cuántica es una descripción así como lo son la mecánica clásica o la relatividad. Cada una de estas teorías relaciona conceptos que no son necesariamente compatibles entre sí.²⁵ El enfoque permite analizar los límites del conocimiento y, al mismo tiempo, expone la inconmensurabilidad de cada descripción particular. Las descripciones y los conceptos son entonces tomados como complementarios en este mismo sentido. La mecánica cuántica aparece, desde esta perspectiva, como una descripción independiente e inconmensurable respecto de la descripción clásica.

El enfoque de descripciones complementarias es un desarrollo ontológico. La ontología debe entenderse aquí a partir de la *expresión* del ser, entonces, en relación a las descripciones, siempre como una expresión particular y singular del ser. Así como lo *uno* se expresa a través de lo *múltiple*, el ser, en tanto uno, es expresado a través de las diferentes descripciones mutuamente complementarias que entran en contacto con la experiencia física. Como veremos, no sólo los esquemas conceptuales determinan la singularidad a través de la cual la física puede expresar al ser, las expresiones matemáticas así como la interpretación de la experiencia juegan también un rol central en este esquema.

5. Qué entendemos por física

A partir del enfoque de descripciones complementarias uno de los problemas centrales que intentamos discutir es el de la representación y el lenguaje. Sin embargo, antes de avanzar respecto de esta problemática debemos ser capaces de restringir los elementos que nos permitan determinar el significado mismo de la física. Esto resulta evidente si tenemos en cuenta el hecho de que sólo a partir de la concepción común del término 'física' podemos avanzar respecto de las preguntas que nos son pertinentes: ¿Cómo escapar de una pragmática carente de ontología? ¿Cómo ir más allá del giro lingüístico sin caer en realismos ingenuos? ¿Cómo recuperar el fundamento de la física misma –la *physis*– sin entrar en el problema de la representación?

²⁵ El enfoque de descripciones complementarias se ubica también en continuación de las ideas de Heisenberg respecto de las teorías cerradas como una relación de conceptos interconectados, definiciones y leyes a través de las cuales un gran conjunto de fenómenos pueden ser descripto.

Trazaremos la configuración de la física a partir de tres elementos constitutivos: los *esquemas conceptuales*, la *expresión matemática* y la *interpretación de la experiencia física*. Estos elementos configuran una región del pensamiento a partir de la cual un problema adecuado puede ser determinado y una singularidad, expresada.

5.1 Sobre la necesidad de interpretar o de cómo los conceptos determinan la realidad física

Desde Galileo la física se escribe en lenguaje matemático, sin embargo los físicos no trabajamos tan sólo con ecuaciones matemáticas, sino también con *interpretaciones*. Nos encontramos obligados a *dar sentido* a los términos de una ecuación y a relacionarlos con la experiencia, esto sólo puede ser efectuado a través de un esquema conceptual que permita, por un lado, hacer contacto con los términos provistos en las ecuaciones, y por otro, configure las condiciones de posibilidad del acceso a la experiencia misma. Podríamos decir entonces que un esquema matemático necesita de la interpretación para referirse a la experiencia, y que por ende, no existe la física sin interpretación. Aunque es común escuchar hablar en la literatura de la teoría cuántica como una teoría sin interpretación,²⁶ como señala Sunny Auyang:

No hay aplicación de una teoría sin interpretación. La mecánica cuántica es una teoría física, no matemática pura dotada de significado mediante reglas de correspondencia. Por ello mismo, no hay un formalismo cuántico puro, no existe una presentación 'neutral' de la estructura de la mecánica cuántica.²⁷

Cada proposición física es *adecuada* en relación a las condiciones bajo las cuales se encuentra inmersa, en relación al sentido que intenta desarrollar. Asimismo, se nos demuestra claramente que la experiencia de lo considerado "físicamente real", no se nos aparece como autoevidente, más bien, la experiencia misma se encuentra sujeta a determinadas formas de justificación, presupuestos y límites del lenguaje. En este sentido, tanto la física clásica como el llamado lenguaje natural, son en sí mismos interpretaciones metafísicas del mundo.

Hemos sostenido con anterioridad que una caracterización pertinente de la física clásica puede darse como "el estudio de las entidades que preexisten". Sin embargo, uno jamás se encuentra con una "entidad", la entidad es más bien el presupuesto bajo el cual la multiplicidad de fenómenos es unificada en un *uno*. Éste es el presupuesto metafísico básico de la física clásica que debemos reconocer para comprender, no sólo su poder, sino también sus limitaciones. La mecánica cuántica es la primera teoría física que se resiste a ser pensada en términos de entidades. Sólo a partir de esta comprensión podemos entender por qué interpretar el formalismo cuántico puede resultar una tarea en extremo dificultosa, puesto que ir más allá del pensamiento de las entidades significa ir más allá de los límites, no sólo de la física clásica, sino de nuestra concepción metafísica del mundo.

²⁶ Ver Fuchs, Ch., y Peres, A., "Quantum theory needs no 'interpretation'", *Physics Today*, vol. 53, 2000.

²⁷ Auyang, S., *How is Quantum Field Theory Possible?*, Oxford, Oxford University Press, 1995, p. 61.

La interpretación no significa en ningún sentido forzar un formalismo matemático en un esquema metafísico presupuesto, muy por el contrario, la interpretación soporta un campo creativo que determina un esquema conceptual que hace contacto tanto con el formalismo como con la experiencia. Interpretar la mecánica cuántica sería entonces crear un esquema conceptual bajo el cual el formalismo adquiriera un sentido determinado, una consistencia respecto de los conceptos, la formulación matemática y la experiencia.

5.2 Sobre el lenguaje de la física: más allá de la representación

El problema que determina la interpretación –a nivel ontológico– aparece en términos de la representación, esto es, en la imposibilidad de ir más allá del discurso. Todo lenguaje que busca representar “algo” necesariamente permanece *externo* a ese “algo”, y en este sentido no puede haber un “por afuera” del discurso, no hay un más allá del lenguaje de una comunidad. Sin embargo, la física no se encuentra tan sólo enmarcada en el lenguaje de una comunidad específica, sino que también utiliza el lenguaje *universal y necesario* de la matemática.

La importancia del lenguaje matemático en la física se remonta a Tales y Pitágoras, sin embargo, su relación más directa con la física se dio a partir del Renacimiento y la revolución científica que tuvo lugar en el siglo XVI. Galileo escribe:

La Filosofía está escrita en este vasto libro que siempre está abierto ante nuestros ojos: me refiero al universo; pero no puede ser leído hasta que hayamos aprendido el lenguaje y nos hayamos familiarizado con las letras en que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, y las letras son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible entender una sola palabra.²⁸

La física utiliza las estructuras matemáticas como elementos constitutivos de su desarrollo. Pero un carácter esencial del lenguaje matemático es que es un *lenguaje no representacional*. La matemática –contraria a cualquier otro lenguaje que conocemos– no contiene referente alguno, no hace referencia a un ‘algo’ externo a su propio discurso.²⁹ De este modo, cuando escribimos en física una ecuación, como puede serlo $F = m \cdot a$, no existe un referente inmediato. Si bien existe una interpretación a través de la cual esta ecuación se conecta con la experiencia, no hay nada “siendo representado”, y la ecuación permanece de este modo a-histórica, a-cultural y a-lingüística.³⁰ Como señala claramente Dardo Scavino:

²⁸ Galilei, G., *El ensayador*, José Manuel Revuelta (trad. y Ed.), Buenos Aires, Aguilar, 1984.

²⁹ Alain Badiou es uno de los filósofos que ha llamado fuertemente la atención de este aspecto de la matemática.

³⁰ Como señala Michel Serres en su libro *Los orígenes de la geometría*, no todo es interpretación, el teorema de Tales por ejemplo, se mantiene invariable más allá de sus interpretaciones. Si bien existen diferentes historias y anécdotas –probablemente todas ellas falsas– de cómo Tales fue capaz de medir la altura de las pirámides de Egipto con su propio cuerpo, con un bastón, etcetera. “Es aquí la matemática la que provee la clave de la historia, y no la historia la clave de la matemática. El esquema dice

Cuando el científico calcula la masa de una partícula, en sus fórmulas no aparece en ningún momento una variable que sea la extensión o la corporalidad, no aparece ni siquiera la dichosa partícula. Cuando Newton escribe la fórmula $F=m.a$, es decir, la fuerza es directamente proporcional al producto de la masa por la aceleración, ninguno de los términos hace referencia a cosas tales como las partículas u otras entidades imaginables (existen, digamos, masas inextensas). Es más: nos hemos acostumbrado a hablar de fuerza, de masa y de aceleración, pero difícilmente podamos imaginarnos qué son todas esas “cosas”.³¹

Si bien en la física buscamos hacer contacto entre ecuaciones matemáticas e interpretaciones determinadas por conceptos lingüísticos, esto no significa que la física se desarrolle exclusivamente a partir del lenguaje. El contacto entre las ecuaciones y estructuras matemáticas complejas en que se desarrollan las teorías por un lado, y los conceptos insertos en cierto universo lingüístico por otro, dan también lugar a nuevas experiencias pensables. Sin embargo estas experiencias no buscan develar, traer a la presencia un “algo” escondido, siguiendo nuevamente a Scavino:

La ciencia no cesa de pensar a partir de esas variables o factores que se definen matemáticamente por sus relaciones recíprocas. La ciencia, en este aspecto, nunca concibió el ser de las cosas como presentable o lo imaginable; al contrario, el ser de las cosas resulta, desde una perspectiva científica, radicalmente impresentable o inimaginable: la ciencia no habla de lo que aparece, no habla acerca de la apariencia, y esto fue lo que siempre intentó determinar la metafísica desde los tiempos de Platón: ¿cómo puede pensarse el ser de las cosas sin confundirlo con su apariencia? Por eso no existe una incompatibilidad entre física y metafísica: la primera piensa aquello que no se presenta mediante fórmulas matemáticas; la segunda intenta pensar qué es, al fin de cuentas, eso que no se presenta (y que la tradición filosófica llamo “ser”).³²

5.3 Sobre la configuración de la experiencia física: problemas adecuados

Un problema nuevo siempre comienza con una paradoja, con una contradicción que se encuentra en los límites de lo incomprensible, esto significa ir más allá de las evidencias cotidianas y de las significaciones establecidas. En este sentido resulta caprichoso pensar que la interpretación de los sistemas matemáticos debería ser restringida a los conceptos utilizados en la física clásica –tal como Bohr había sostenido. El hecho de que hemos desarrollado

la finalidad del relato y no el relato el origen del esquema. [...] La demostración pura se expande sin que una diferencia ocupe, por sí sola, el lugar de las otras. Al contrario, sin ser dominante ella resulta universal.” Ver también Scavino para una discusión pertinente.

³¹ Scavino, Dardo, *La filosofía actual*, Buenos Aires, Paidós, 2000, p. 228.

³² *Ibid.*

conceptos capaces de dar cuenta de la mecánica newtoniana no significa en modo alguno que estos conceptos se relacionan en forma unívoca a la estructura matemática que soporta a la teoría. Los conceptos no se encuentran ocultos en las estructuras matemáticas que desarrollamos sino que deben ser creados para hacer contacto con ellas, y *viceversa*, son también los conceptos nuevos aquéllos que permiten pensar nuevas experiencias y estructuras.³³ Estos dos regímenes, el de la creación y el descubrimiento, se intersecan sin preponderancia de uno por sobre el otro.

En particular, la mecánica cuántica nos fuerza a dar cuenta en forma explícita de las limitaciones de los conceptos clásicos. Como señala Heisenberg:

No podemos evitar utilizar un lenguaje delimitado por la filosofía tradicional. Nos preguntamos, ¿de qué partes consiste un protón? ¿Puede un electrón ser dividido o es indivisible? ¿Un fotón es simple o compuesto? Pero todas estas preguntas se encuentran mal planteadas, porque tales palabras como ‘dividir’ o ‘consistir de’ han perdido en gran medida su significado. Debe ser nuestra tarea adaptar nuestro pensar y nuestro discurso –ciertamente, nuestra filosofía científica– a la nueva situación creada por la evidencia experimental. Desafortunadamente esto resulta en extremo dificultoso. Preguntas incorrectas e imágenes inadecuadas aparecen automáticamente en la física de partículas y llevan a desarrollos que no se adecuan con la real situación de la naturaleza.³⁴

Sin embargo debemos también sostener –si queremos ir más allá de la mera representación– que existe lo que es *dado* en la experiencia, algo que excede las presuposiciones utilizadas para arribar a la experiencia misma. Los *problemas adecuados* son aquéllos bajo los cuales lo dado en la experiencia es expresado consistentemente a través de la relación entre el esquema conceptual que soporta la interpretación de los hechos y la estructura matemática. Debemos entender que interpretar también significa encontrar los límites bajo los cuales las proposiciones físicas son *adecuadas*. La noción de adecuación, como fue discutida por Spinoza, nos resulta entonces imprescindible para atacar el problema de la representación, puesto que bajo estas coordenadas, un problema adecuado determina una *expresión* particular del ser. No hay nada siendo representado, no hay “conceptos verdaderos” que capturan lo real, o que descubren el velo de Maya.

Ya Spinoza decía que una opinión no es necesariamente ‘falsa’ sino más bien ‘inadecuada’, ya que ignora bajo qué condiciones sus proposiciones resultan verdaderas, es decir, a qué problema responde. Claro que el trozo de plomo cae más rá-

³³ Por ejemplo, el experimento pensado de Galileo de movimiento sin rozamiento, es una experiencia imposible. Aunque también cabría destacar que desde esta perspectiva toda experiencia resulta imposible.

³⁴ Heisenberg, W., citado en Castellani, Elisa, *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, Princeton, Princeton University Press, 1998, p. 218.

pido que la pluma, pero afirmamos esto simplemente porque la experiencia nos lo dice: en realidad, no sabemos cuáles son las condiciones para que esto se produzca. Por eso solemos creer que esto se produce siempre. Si hay algo ‘falso’ en la opinión, es más bien su falsa universalidad. Por el contrario, la teoría de Galileo especifica bajo que condiciones su enunciado es verdadero: *la verdadera universalidad está en el caso perfectamente determinado, es decir, en la singularidad concreta.*³⁵

Las expresiones matemáticas, en cuanto determinadas y limitadas por esquemas conceptuales, dan lugar a una experiencia particular. Cada nuevo problema adecuado, comienza por preguntar algo que escapa a lo pensable en los esquemas antes conocidos, por encontrar determinaciones que escapen a las experiencias conocidas y de “este modo crear nuevas experiencia físicas”. Es a través de limitar una región particular del pensamiento que la física es capaz de expresar adecuadamente al ser, es de este modo que lo particular puede expresar lo necesario y universal.

6. El enfoque de descripciones complementarias: la física como *expresión del Ser*

Entendemos que el esquema metafísico desarrollado por Spinoza es extremadamente apropiado para reconsiderar el “entendimiento físico” –en especial si queremos avanzar más allá del giro lingüístico y el problema de la representación. Spinoza nos provee de un esquema en el que es posible sostener que la física da cuenta del ser en términos *expresivos*. La filosofía de Spinoza no sólo nos permite escapar de las condiciones bajo las cuales se presenta el problema de la representación sino que también, al reconfigurar la relación con el ser, nos permite elaborar una respuesta pertinente al significado de la física.

El problema de relacionar la física con la filosofía de Spinoza presenta por supuesto muchas dificultades que exceden por mucho los límites de este trabajo, sin embargo nos interesa aquí marcar algunos de los aspectos del pensamiento de Spinoza que creemos merecerían ser considerados si buscamos desarrollar un enfoque alternativo respecto de la comprensión de la física en términos ontológicos. En primer lugar, la idea de *unicidad del ser*, como una sustancia de infinitos modos, resulta de gran importancia para sostener la relación entre dos descripciones incommensurables, como por ejemplo lo son aquéllas determinadas por la física clásica y la cuántica. Nos interesa ser capaces de discutir ambas descripciones –clásica y cuántica– como expresiones particulares de una sustancia singular y única, escapando al problema del relativismo que nos presentan los pluralismos ontológicos a la *Putnam*. En segundo lugar, la noción de *idea adecuada* presenta una revolución gnoseológica en relación al problema de la verdad, el cual es ahora reconfigurado en relación a la adecuación de los problemas involucrados y no en función de la representación de un estado de cosas particular. Tercero,

³⁵ Scavino, D., op. cit. pp. 208-209. Las cursivas son nuestras.

sostenemos que el problema de la representación encuentra una respuesta en extremo original pensado en el marco del pensamiento spinoziano y su noción de *expresión*. En este sentido, la física debería entenderse a sí misma como una *expresión* del ser en tanto ser, y no como una disciplina que *representa* la evolución de un estado de cosas particular.

El enfoque de descripciones complementarias debe ser considerado como perteneciente al linaje del pensamiento de Spinoza, como una reconsideración de su esquema metafísico en relación a las teorías físicas contemporáneas. Spinoza fue capaz de proveer una filosofía puramente ontológica antes de Kant, creemos que debemos retornar a Spinoza si queremos ir más allá de los límites impuestos por la filosofía crítica. En este punto debemos hacer clara nuestra posición y recuperar las preguntas y los problemas propios de la física, así como también olvidarnos de los problemas de orden técnico con que hoy día se confunde.

Un físico, creemos, es alguien que permanece con una admiración ingenua respecto del mundo, como un niño que no deja de preguntarse por qué. Sostenemos que la física, contrariamente a la visión pragmática a la que esta hoy día asimilada,³⁶ se encuentra determinada por las preguntas respecto de la comprensión de la *physis*, estas preguntas tienen un carácter tanto ontológico como epistemológico. La física no es tan solo un *discurso* respecto de la Naturaleza, la física no solo provee *modelos* de una realidad ya presupuesta, la física no es una *estructura algorítmica* que predice resultados de mediciones. La búsqueda de la física es *expresar* la naturaleza.

Comprender en física significa tener un esquema conceptual, una interpretación de la experiencia y un formalismo matemático, los cuales entran en contacto para brindar una expresión particular del ser. La física se preocupa por la pregunta por el ser en tanto ser y es por ello que su historia y su futuro, se encuentran indisolublemente unidos al de la metafísica. La física es la región del pensamiento que se encuentra justo entre *la expresión matemática, el esquema conceptual y la interpretación de la experiencia física*. Solamente juntos, estos tres términos permiten discutir consistentemente un *problema adecuado*. La física no representa, sino que expresa, a través de las condiciones impuestas en un problema adecuado, una *singularidad*.

6.1 Completitud en descripciones cerradas

Existe un presupuesto que va en contra de las ideas que hemos estado presentando, a saber, la idea de que la ciencia se encuentra convergiendo hacia una representación cada vez “más verdadera” del mundo. Esta idea presupone, por un lado, que una teoría *representa*, trae a la presencia la naturaleza, tal como es, y por otro, que pueden existir *conceptos verdaderos* de forma tal que uno se acerca a ellos cada vez más.³⁷ En este caso *completitud* no significa solamente consistencia dentro, sino también respecto de otras teorías. La idea que subyace es que todas las teorías deberían encontrarse ‘interconectadas’, de forma tal que al final del camino

³⁶ Ver Díaz, E., *Posmodernidad*, Buenos Aires, Biblos, 2005.

³⁷ Richard Feynman aparece en la segunda mitad del siglo XX como un expositor de esta visión. Por ejemplo, en sus lecciones para la BBC señala: “La época en que vivimos es la época en que nos encontramos descubriendo las leyes fundamentales de la naturaleza, y esa época no volverá jamás. Resulta muy excitante, es maravillosa, pero esta excitación deberá dejarnos.”

uno llega por fin a “La Teoría Verdadera”. La mecánica clásica es en este sentido “peor” que la relatividad porque ésta observa los conceptos de la primera como límites y al mismo tiempo permite exponer nuevas experiencias. Sin embargo, tales conceptos no son límites, sino aproximaciones que funcionan sólo dentro de condiciones muy específicas. Cuando estas condiciones son extendidas a los esquemas generales en los cuales los conceptos propios adquieren sentido, aparecen incompatibilidades e inconsistencias tanto como entre la descripción clásica y la descripción cuántica.³⁸ Encontrar un límite entre la relatividad y la mecánica newtoniana es en este punto equivalente a encontrar una relación directa entre el concepto físico de espacio y el concepto de espacio en psicología.

Si bien ciertos conceptos pueden ser usados en diferentes esquemas –como pueden serlo la teoría freudiana y la física clásica– una vez que generalizamos estos conceptos a los esquemas completos –de cada una de las descripciones– encontramos que los conceptos se alejan en direcciones diferentes, haciendo imposible retener la consistencia del comienzo. Es por ello que resulta tan importante definir correctamente un problema, esto es, determinar un problema adecuado. La mecánica cuántica se encuentra atestada de estas inconsistencias que aparecen en la mayoría de los casos por usar conceptos y símbolos que son parte de presupuestos clásicos que no responden en forma alguna a la descripción cuántica. Al mezclar conceptos que pertenecen a diferentes descripciones, en muchos casos se termina en pseudos-problemas y paradojas. Por ello, para llegar más cerca del misterio necesitamos en primer lugar demistificar y aclarar los límites así como el correcto uso de las diferentes descripciones.

Entendemos a la mecánica cuántica como una *teoría completa*, en el sentido desarrollado por Pauli: “que ninguna nueva ley puede ser agregada al sistema de las leyes naturales en cierto dominio sin alterar parcialmente el contenido de aquéllas que ya estaban en él.”³⁹ Por otro lado, entendemos que toda descripción es esencialmente *incompleta*, en el sentido de que debe elegir una cierta estructura formal, un conjunto de conceptos, una experiencia que la defina. A partir de esta elección se determinan los límites bajo los cuales la descripción es adecuada para definir un problema, siempre específico, siempre particular. Pero un límite es siempre una definición de algo que queda por fuera. Por ejemplo, los conceptos clásicos como separabilidad, identidad y determinación, no son conceptos adecuados para comprender la experiencia cuántica ni su formalismo, la cuántica se encuentra por fuera de los límites del pensamiento clásico. Al mismo tiempo, la incompletitud de la mecánica cuántica, también nos presenta con sus límites, con la imposibilidad de describir entidades separadas, de concebir propiedades determinadas, identidades y existencias actuales –elementos que aparecen como presupuesto en la física clásica. Deberíamos entender que la mecánica clásica también

³⁸ No es posible dar cuenta de la ontología de la física newtoniana a través de los conceptos de espacio y tiempo de la relatividad.

³⁹ Éste es el mismo sentido en que Heisenberg consideraba a la mecánica cuántica como una teoría *cerrada*, como señala von Weizsäcker: “Para Heisenberg ‘cerrada’ no resultaba un término idéntico a ‘final’, sino más bien que la secuencia de teorías cerradas indicaba a la idea de física como una empresa abierta, sin fin.” Ver Pauli, W., *Writings on Physics and Philosophy*, Enz, C. and von Meyenn, K. (Eds.), Springer Verlag, 1994, p.96.

es incompleta, puesto que no puede tomar en cuenta la no-separabilidad y el carácter esencialmente no objetual de la formulación cuántica. El problema sería entonces, no, cómo pensar el formalismo de la cuántica en términos de separabilidad, identidad y determinación, sino más bien, cuáles son los conceptos que pueden expresar el carácter no-separable, no-identitario, indeterminado de la teoría.

6.2 Creación de nuevos conceptos

Tal vez no tan extrañamente, los esquemas metafísicos exitosos, aquéllos que logran imponerse por razones siempre diversas, tienden a ser transformados rápidamente en dogma, pasan de ser creaciones que nos abren las puertas a la expresión del mundo a esculturas estáticas y fijas de un mundo tal vez demasiado humano. En estos períodos de estaticidad, parece siempre inimaginable que una revolución en el esquema del pensamiento pueda tomar lugar. Pero esto, tarde o temprano siempre sucede.

Interpretar la mecánica cuántica significa confrontar aquello que Pauli consideró uno de los problemas más importantes de nuestro tiempo: el problema de constituir una nueva noción de realidad.

Quando el hombre común dice “realidad” generalmente piensa que se encuentra hablando respecto de algo que se conoce en forma autoevidente; sin embargo para mí ésta aparece como la tarea más importante y en extremo dificultosa de nuestro tiempo, la de trabajar en la elaboración de una nueva idea de realidad.⁴⁰

En la física, cada nueva teoría que ha sido desarrollada –desde la física aristotélica a la relatividad general– ha sido fundada en nuevos sistemas, en nuevos conceptos. El físico debería ser un creador de conceptos físicos, conceptos que permitan, dentro de una teoría, atrapar, expresar, un cierto carácter de la naturaleza, de la *physis*. La física clásica describe un mundo de entidades a través de un formalismo matemático que mediante la interpretación hace contacto con la experiencia. En la mecánica cuántica el formalismo matemático hace contacto con la realidad a través de un conjunto de reglas que no constituyen una interpretación consistente de la teoría. Necesitamos encontrar los conceptos que nos permitan pensar la experiencia que nos presenta la teoría cuántica fuera de los presupuestos impuestos por el pensamiento clásico.

6.3 ¿Qué significa “comprender la mecánica cuántica”?

Desde la segunda mitad del siglo XX la actitud ortodoxa ha sido, o bien simplemente evitar el problema justificando la teoría a través de su mera praxis instrumental, o bien forzar el formalismo dentro del esquema conceptual clásico. Estas segundas propuestas presuponen

⁴⁰ Pauli, W., citado en Laurikainen, K., *The Message of the Atoms, Essays on Wolfgang Pauli and the Unspeakable*, Berlin Springer-Verlag, 1998, p. 193.

categorías de nuestra concepción clásica del mundo, y luego intentan cambiar el formalismo para que pueda sostener esta pre-concepción de lo real.

Sostenemos que la noción de ‘realidad’ es esencial en la física, sin embargo no debería ser tomada como un elemento presupuesto, muy por el contrario, debería tomarse como un fin creativo. Lo real no debería ser un concepto preestablecido, o un prejuicio para observar y relacionar datos de la experiencia. No deberíamos esperar que la realidad fuese... como deseamos que sea, debemos revisar constantemente nuestros esquemas conceptuales a través de los cuales esta noción es expresada. El único presupuesto que debe guiarnos en la comprensión de la realidad física es que no sabemos demasiado al respecto. Debemos crear nuevas experiencias así como también nuevas estructuras conceptuales y formalismos matemáticos que permitan expresar lo real. Debemos recordar que somos científicos que se sorprenden con el mundo, un mundo misterioso. La pregunta es si estamos preparados para ir más allá de los límites impuestos por nuestra concepción clásica del mundo. Una concepción que si bien ha sido ampliamente criticada continúa limitando nuestro acceso a las experiencias posibles.

Dentro de las coordenadas que hemos buscado desarrollar en este trabajo, comprender la mecánica cuántica significa entonces encontrar un esquema conceptual que logre dar cuenta en forma consistente de la experiencia cuántica. Debemos ser capaces de responder consistentemente a la pregunta *de qué habla la mecánica cuántica*.

Bibliografía

- Auyang, Sunny, *How is Quantum Field Theory Possible?*, Oxford, Oxford University Press, 1995.
- Badiou, Alain, *L'être-là*, preprint de la Universidad de París VIII, 2003.
- Bohr, Niels, “The Unity of Human Knowledge”, en *Philosophical writings of Neils Bohr*, vol. 3. Woodbridge, CT: Ox Bow Press, 1987.
- Bokulich, Alisa, “Open or Closed? Dirac, Heisenberg, and the Relation between Classical and Quantum Mechanics”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 35, 2004.
- Cacciari, Massimo, *Ensayo sobre la crisis del pensamiento negativo. De Nietzsche a Wittgenstein*, DE, Siglo XXI Editores, 1982.
- Castellani, Elisa, *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, Princeton, Princeton University Press, 1998.
- Christiaens, Wim, de Ronde, Christian, “Fysika en Wiskunde”, en *Deleuze Compendium*, Ed Romein, Marc Schuilenburg, Sjoerd van Tuinen (Eds.) , 2009.
- da Costa, Newton, Krause, Décio, “The logic of complementarity”, preprint, 2003.
- Domenech, Graciela, Freytes, Hector, de Ronde, Christian, “Scopes and limits of modality in quantum mechanics”, *Annalen der Physik*, vol. 15, 2006.
- Deleuze, Gilles, *Spinoza et le problème de l'expression*, Paris, Les éditions de Minuit, 1990.
- D'Espagnat, Bernard, *Physics and Philosophy*, Princeton, Princeton University Press, 2006.
- Díaz, Esther, *Postmodernidad*, Buenos Aires, Biblos, 2005.

- French, Steven and Krause, Décio, *Identity in Physics: A historical, Philosophical, and Formal Analysis*, London, Oxford University Press, 2006.
- Friedman, Michael, *A Parting of the Ways: Carnap, Cassirer, and Heidegger*, Chicago, Open Court, 2000.
- Fuchs, Christopher, Peres, Asher, “Quantum theory needs no ‘interpretation’”, *Physics Today*, vol. 53, 2000.
- Heisenberg, Werner, 1927, “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 43; reinpreso como “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics, traducción de J.A. Wheeler y W.H. Zurek, en *Quantum Theory and Measurement*, J.A. Wheeler and W.H. Zurek (Eds.), 1983.
- Hilgevoord, Jan, Uffink, Joos, “The Uncertainty Principle”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2001 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.).
- Kant, Immanuel, *Crítica de la razón pura*, (Traducción Mario Caimi), Buenos Aires, Colihue, 2007.
- Kochen, Simon, Specker, Ernst, “On the problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, vol. 17, 1967.
- Lahti, Pekka, “Uncertainty and Complementarity in Axiomatic Quantum Mechanics”, *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 19, 1980.
- Laurikainen, Kalervo, *The Message of the Atoms, Essays on Wolfgang Pauli and the Unspeakable*, Berlin Springer-Verlag, 1998.
- Pauli, Wolfgang, *Writings on Physics and Philosophy*, Enz, C. and von Meyenn, K. (Eds.), Springer Verlag, 1994.
- Primas, Hans, *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism*, Berlin, Springer-Verlag, 1983.
- de Ronde, Christian, *The Contextual and Modal Character of Quantum Mechanics: A Formal and Philosophical Analysis in the Foundations of Physics*, Tesis Doctoral, Universidad Libre de Bruselas y Universidad de Utrecht, 2009.
- de Ronde, Christian, Domenech, Graciela, Holik, Federico, “Entities, Identity and the Formal Structure of Quantum Mechanics”, en *Contactforum Structure and Identity at the Koninklijke Vlaamse Academie van België*, 7-8 December, W. Christiaens and K. Verelst (Eds.), 2007.
- Meillassoux, Quentin, *Après la finitude. Essai sur la nécessité de la contingence*, Paris, Editions du Seuil, 2006.
- Scavino, Dardo, *La filosofía actual*, Buenos Aires, Paidós, 2000.
- Serres, Michel, *Les origines de la géométrie*, Paris, Flammarion, 1993.
- Van Bunge, Wiep, “Spinoza” en *Deleuze Compendium*, Ed Romein, Marc Schuilenburg, Sjoerd van Tuinen (Eds.), 2009.
- Vattimo, Gianni, *El fin de la modernidad*, Barcelona, Gedisa, 1987.
- Verelst, Karin, Coecke, Bob, “Early Greek Thought and perspectives for the Interpretation of Quantum Mechanics: Preliminaries to an Ontological Approach”, en *The Blue Book of Einstein Meets Magritte*, D. Aerts (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.

Christian de Ronde / El enfoque de descripciones complementarias: ¿qué significa comprender [...]

Von Weizsäcker, Carl Friedrich, “Heisenberg’s philosophy”, en Symposium on the Foundations of Modern Physics 1985, P. Lathi and P. Mittelstaedt (Ed.), World Scientific, Singapore, 1985.

Wheeler, John Archibald, Zurek, Wojciech (Eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983.