

Hacia una revisión del modelo tradicional de cambio teórico: coexistencia entre física cuántica y relatividad general¹

Towards a Review of the Theory Change Traditional Model:
Coexistence Between Quantum Physics and General Relativity

Mariana Córdoba²

RESUMEN

En la filosofía de la ciencia del siglo XX tuvo lugar un aguerido debate entre realistas científicos y antirrealistas, en el que se ha prestado especial atención a la cuestión del cambio teórico. En el presente trabajo argumentaremos que la imagen lineal de cambio teórico, como sucesión por reemplazo de teorías, sobre la cual se monta aquel debate, es un modelo demasiado simplificado. En efecto, no puede dar cuenta del caso de *bifurcación teórica*, que conduce a la convivencia entre teorías científicas consideradas fundamentales pero incompatibles entre sí, como es el caso de física cuántica y relatividad general.

Palabras clave: física cuántica, relatividad general, bifurcación teórica.

ABSTRACT

In the strong debate in the philosophy of science of the 20th century between scientific realists and anti-realists, the issue of theoretical change was particularly considered. In this work, I will argue that the lineal picture of theoretic change as succession by replacement, on which that debate is based, is an oversimplified model. In fact, it cannot account for the case of *theory bifurcation*, which leads to the coexistence of supposedly fundamental but incompatible theories, as the case of quantum physics and general relativity.

Keywords: Quantum Physics, General Relativity, Theory Bifurcation.

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

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) - Universidad de Buenos Aires. Correo electrónico: marianacordoba16@yahoo.com.ar.

INTRODUCCIÓN

En la filosofía de la ciencia del siglo XX tuvo lugar un aguerrido debate entre realistas científicos y antirrealistas. Uno de los aspectos de la ciencia que más ha sido discutido y trabajado tanto por realistas como por antirrealistas fue el del cambio teórico, esto es, el fenómeno que tiene lugar cuando una teoría científica es abandonada y una nueva teoría viene a reemplazarla. Los realistas científicos intentaron mostrar que hay continuidad a través del cambio teórico, que esta continuidad es característica de la historia de la ciencia, y que esto último brinda apoyo a la idea de progreso latente en el pensamiento realista. Algunos antirrealistas, por su parte, pretendieron mostrar lo contrario, esto es, que no hay tal continuidad; y sus argumentos subrayaron la ruptura que se manifiesta cuando una teoría científica cede lugar a otra teoría que la sucede en el tiempo.

En el presente trabajo argumentaremos que la imagen de cambio teórico sobre la cual se montan las argumentaciones tanto realistas como antirrealistas es inadecuada: constituye un modelo demasiado simplificado. Lejos de ajustarse a lo que sucede en la historia de la ciencia, esta imagen de cambio teórico no puede dar cuenta de eventos bien conocidos de la historia de la física del siglo XX. Argumentaremos que existen casos de *bifurcación teórica* que conducen a la convivencia entre teorías científicas consideradas fundamentales que son incompatibles entre sí. Este es el caso configurado por la coexistencia entre física cuántica y relatividad general. Se señalará, asimismo, en qué consiste dicha incompatibilidad, con el objetivo de argumentar que esta situación pone en cuestión la imagen lineal de sucesión por reemplazo y exige una revisión crítica de aquel modelo.

EL MODELO TRADICIONAL DE CAMBIO TEÓRICO VERSUS LA BIFURCACIÓN TEÓRICA

En el debate entre realistas y antirrealistas, el cambio teórico es pensado en el marco de la *sucesión* de teorías: el devenir histórico de una disciplina científica se reconstruye como una secuencia de teorías $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$, cada una de las cuales reemplaza a la anterior, que es abandonada. Esta serie de teorías se desenvuelve en el tiempo histórico. El cambio teórico comprendido como sucesión por reemplazo de teorías aparece en la imagen tradicional, desarrollada por algunos filósofos del Círculo de Viena, de una ciencia que progresa lineal y acumulativamente subsumiendo teorías previas en nuevas teorías más abarcadoras y más correctas. De acuerdo con esta imagen, en el reemplazo de una teoría por otra, los logros de la teoría

anterior son de algún modo recuperados por la teoría sucesora: esta última mantiene el contenido no refutado de la teoría anterior, corrige sus errores y a la vez proporciona contenido más adecuado y preciso.

Algunos realistas científicos actuales, como Niiniluoto (1999) y Psillos (1999), sostienen que no es posible adoptar una imagen de la ciencia de acuerdo con la cual tiene lugar un progreso acumulativo lineal. Ya desde Karl Popper (1934) se acepta ampliamente que aquella imagen ingenua no se adapta a la verdadera historia de la ciencia. Según los realistas críticos, no puede adoptarse razonablemente una visión acumulativa del progreso científico: puede no haber acumulación en el sentido de que cierto contenido de una teoría pasada no tiene por qué mantenerse en la siguiente teoría de la serie. Sin embargo, en algún sentido, los realistas que han intervenido en los debates recientes no se distancian de la ingenua imagen tradicional del cambio teórico. Por ejemplo, Niiniluoto (1999) y Psillos (1999) afirman que la ciencia va logrando una *progresiva aproximación a la verdad*. Y las posiciones de ambos comparten con la visión tradicional una intuición fundamental: las teorías que se suceden explican o pretenden explicar el mundo real, intentan hallar la verdad respecto de algún sector de la realidad, sector de la realidad que es *el mismo* a través del cambio científico. Es sobre esta intuición que se erige la imagen según la cual las nuevas teorías *pasan a ocupar* el lugar de sus antecesoras.

La imagen de una ciencia que se desenvuelve a través de sucesiones por reemplazos de teorías también se encuentra en el pensamiento de quienes más han combatido aquel modelo de progreso acumulativo. Filósofos que se han enfrentado radicalmente a este modelo, como Feyerabend (1962) y Kuhn (1962) no se alejan, empero, de la idea de que el desarrollo de la ciencia consiste en ir supliendo una teoría por otra, distinta de su predecesora, que viene a «ocupar su lugar» en el devenir histórico de la ciencia.

Lo que está en juego en estas posiciones antagónicas —por un lado, la posición realista que adopta la creencia en un progreso científico lineal (sea este acumulativo o no), que se manifiesta como una progresiva aproximación a la verdad y, por otro lado, la concepción de quienes impugnan radicalmente toda idea de progreso lineal apelando a la tesis de la inconmensurabilidad— es el mismo modelo de cambio teórico, sobre la base del cual argumentan para defender sus distintas visiones del desarrollo científico. Cabe preguntarse aquí si esta imagen se adecúa a lo efectivamente sucedido en el ámbito de la física de la primera mitad del siglo XX.

La imagen del cambio teórico entendido como sucesión por reemplazo constituye una simplificación que desatiende eventos históricos bien cono-

cidos. Por ejemplo, en la misma época en la cual entra en escena la mecánica relativista, lo hace la mecánica cuántica que, en cierto sentido, se propone también como alternativa a la mecánica clásica. Es evidente que este caso no responde a la imagen del cambio teórico de acuerdo con la cual ocurre una sucesión de teorías por reemplazo. Pone de manifiesto, por el contrario, una suerte de «bifurcación» teórica: una teoría es supuestamente reemplazada por teorías diferentes. Este panorama se torna aún más complejo cuando se considera la —supuesta— unificación entre mecánica cuántica y relatividad especial, que conduce a la actual coexistencia entre teoría cuántica de campos y relatividad general, teorías no sólo diferentes sino incompatibles.

Para que la reflexión filosófica sobre estos problemas sea fecunda, es necesario ofrecer una mirada del desarrollo de la ciencia que, si se ciñe a la cuestión del cambio científico, atienda a la manera en que *efectivamente* cambian las teorías científicas, que no es siempre la sucesión por reemplazo. Es necesario comprender los fenómenos de bifurcación teórica y coexistencia de teorías.

CUÁNTICA Y RELATIVIDAD: INCOMPATIBILIDAD ENTRE TEORÍAS «FUNDAMENTALES»

Hemos señalado que, a pesar de que ciertas discusiones en filosofía de la ciencia ponen el acento en el fenómeno del cambio teórico caracterizado como sucesión por reemplazo de teorías, la historia de la ciencia muestra, sin embargo, casos de *bifurcación* teórica. Un ejemplo paradigmático de esta situación es el que conduce a la coexistencia entre física cuántica y relatividad. Analicemos este caso con detalle.

Como es bien sabido, a comienzos del siglo XX se produce una gran revolución teórica en el seno de la física. La mecánica clásica había sido considerada como la teoría fundamental durante más de doscientos años, aquella que describía la realidad en todos sus aspectos físicos, tanto en los cielos como en los movimientos de los objetos terrestres, y sus enormes éxitos empíricos justificaban tales pretensiones. No obstante, ya en el siglo XIX, esa misma mecánica comenzaba a mostrar sus limitaciones, tanto en su aplicación a la cosmología como en la descripción de fenómenos de escala microscópica. Esta situación desemboca en la aparición, en no mucho más de dos décadas a comienzos del siglo XX, de dos teorías, la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, que se presentan como las nuevas teorías fundamentales de la física.

La mecánica cuántica, fruto del esfuerzo combinado de grandes físicos como Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Louis

de Broglie y el propio Albert Einstein, entre otros, alcanza su forma teórica definitiva en la década de los 30. Pero ya desde sus primeras formulaciones muestra su capacidad de describir los fenómenos subatómicos. Como ejemplo de ello puede mencionarse el éxito del modelo atómico de Bohr, basado en la cuantización de la energía de las órbitas atómicas, para explicar el comportamiento general de algunos elementos químicos.

La teoría de la relatividad, por el contrario, fue obra casi exclusiva de un único autor, Einstein, quien en 1905 presenta la teoría especial de la relatividad, una teoría que pone de manifiesto que no existe ningún experimento físico, ni mecánico ni electromagnético, que pueda diferenciar entre sistemas de referencia inerciales. Con esta teoría, de la cual podían deducirse las ecuaciones que Hendrik Lorentz había formulado de manera puramente heurística, podían explicarse los resultados negativos del experimento de Albert Michelson y Edward Morley en su búsqueda de medir la velocidad de la Tierra respecto del éter. No obstante, la relatividad especial dejaba aún fuera de su alcance los sistemas acelerados. Einstein necesitó varios años y la colaboración de notables matemáticos de la época, como Tullio Levi-Civita, para formular la teoría general de la relatividad, que incorpora los sistemas acelerados dentro de su alcance a costa de introducir el concepto de curvatura del espacio-tiempo y convertir la interacción gravitatoria en la consecuencia del movimiento de los cuerpos en el espacio-tiempo curvado como consecuencia de la presencia de masa.

Puesto que ambos enfoques teóricos se presentaban como «fundamentales», los intentos de unificación aparecieron de inmediato. El primer resultado fue la teoría cuántica de campos, que se propone como unificación entre mecánica cuántica y relatividad especial. Si bien con un enorme éxito experimental, la discusión filosófica actual pone de manifiesto que la teoría cuántica de campos presenta ciertas características que le son propias y no pueden pensarse en términos de mera unificación entre mecánica cuántica y relatividad especial (cf. Brown & Harré 1988; Auyang 1995). No obstante, la situación resultó ser aún más difícil cuando se intentó la unificación de la física cuántica con la relatividad general. El mismo Einstein dedicó los últimos años de su vida a la infructuosa búsqueda de una teoría del campo unificado, que permitiera dar cuenta de la gravitación junto con las restantes interacciones elementales bajo un mismo marco teórico. Diferentes propuestas de unificación han sido formuladas desde entonces, pero o bien han tenido escaso éxito, o bien han resultado de un alcance parcial. Por lo tanto, actualmente debe aceptarse la coexistencia de dos marcos teóricos, el de la física cuántica y el de la relatividad

general, que coexisten en el corpus teórico de la física. Aquí nos limitaremos a las diferencias entre mecánica cuántica y relatividad general.

Desde una perspectiva realista, mecánica cuántica y relatividad general son teorías no sólo diferentes, sino incompatibles en un sentido profundo, en la medida en que incorporan conceptos completamente irreductibles. Los principales motivos de la incompatibilidad entre ambas teorías pueden agruparse en tres grandes grupos, que se refieren a las siguientes tres cuestiones: el problema del determinismo, el problema del concepto de tiempo, y el problema de la no-separabilidad.

EL PROBLEMA DEL DETERMINISMO

Una diferencia esencial entre mecánica cuántica y relatividad general radica en una idea ampliamente aceptada según la cual la mecánica cuántica es probabilística mientras la relatividad general es determinista. Para comprender esta profunda diferencia es necesario, en primer lugar, caracterizar brevemente qué se entiende, en este contexto, por determinismo, sin detenernos en las discusiones filosóficas que conllevaría un exhaustivo análisis de esta noción. La idea básica subyacente a cualquier tesis determinista es que el futuro no está abierto a la posibilidad: el presente fija unívocamente el devenir futuro (James [1897] 1956). Esta idea apunta a la sucesión temporal unívoca de eventos, esto es, a un aspecto dinámico de la realidad. Desde un punto de vista ontológico, un sistema es determinista si, dadas sus propiedades en un instante, quedan fijadas sus propiedades en todo tiempo posterior. Esta caracterización *ontológica* de determinismo se corresponde a una acepción *semántica*, según la cual el predicado «determinista» se aplica a ecuaciones dinámicas: se afirma que una ecuación dinámica es determinista si el valor de las variables dependientes en un determinado instante fija unívocamente el valor de esas variables en cualquier instante posterior. Puesto que, en física, la evolución temporal de un sistema se representa por medio de ecuaciones diferenciales que rigen el modo en que ciertas magnitudes varían con el tiempo, el problema del determinismo suele abordarse mediante el análisis de tales ecuaciones diferenciales, a fin de determinar si poseen solución única para cualquier instante futuro, a partir de las condiciones iniciales. No obstante, como veremos, la mecánica cuántica obliga a revisar tal enfoque.

A partir del siglo XVII, la noción de determinismo halla su fundamento teórico en la mecánica clásica. La ley dinámica de la mecánica clásica es la segunda ley de Newton, que nos dice que la fuerza ejercida sobre un cuerpo es

igual al producto entre su masa y su aceleración. De este modo, el conocimiento de la masa del cuerpo y de la fuerza que actúa sobre él ofrece la posibilidad de calcular el movimiento del cuerpo a partir de su estado inicial. Teniendo, entonces, el estado en un instante, se tiene el estado en todo instante. Curiosamente, la mecánica cuántica no se diferencia de la clásica en este sentido. Tal como en el caso de la mecánica clásica, la mecánica cuántica también posee una ley dinámica que describe la evolución de los estados de un sistema a través del tiempo. En este caso es la ecuación de Schrödinger la que rige la evolución temporal de los estados. Esta ecuación dinámica puede expresarse mediante un operador de evolución U_t , donde el subíndice t indica que es función del tiempo. Por lo tanto, el estado $|\Psi(t)\rangle$ en cualquier instante t se obtiene a partir del estado inicial $|\Psi(0)\rangle$ en $t = 0$ del siguiente modo:

$$|\Psi(t)\rangle = U_t |\Psi(0)\rangle$$

El operador U_t es *unitario*, esto es, posee inversa $U_t^{-1} = U_{-t}$ tal que $U_t U_t^{-1} = U_t^{-1} U_t = I$, y conserva el módulo de los vectores sobre los que actúa, $|U_t |\varphi\rangle| = \|\varphi\rangle|$. Esta formulación evidencia que, dado el estado de un sistema cuántico en el instante $t = 0$, la ecuación de Schrödinger fija unívocamente el estado de dicho sistema en cualquier instante posterior t . En otras palabras, en tanto ecuación, la ecuación de Schrödinger es semánticamente determinista, pues posee solución única para cualquier instante futuro, a partir del estado inicial. Por lo tanto, si se asume que el determinismo semántico es la manifestación de un determinismo ontológico, deberíamos concluir que la mecánica cuántica es tan determinista como la clásica. En efecto, Nagel (1961), entre otros, se basa en esta característica de la ecuación de Schrödinger para afirmar que el universo entero, concebido como un sistema cuántico aislado, evoluciona de un modo determinista. Sostiene que la mecánica cuántica es determinista en el mismo sentido en que lo es mecánica clásica, puesto las leyes dinámicas de ambas teorías establecen la sucesión unívoca entre estados a través del tiempo.

Ahora bien, a pesar del carácter semánticamente determinista de la ecuación de Schrödinger, se considera que la mecánica cuántica es una teoría indeterminista. Para comprender esta postura, es necesario remitirse al significado del estado cuántico: ¿a qué refiere el vector de estado $|\Psi\rangle$? Cuando Erwin Schrödinger, uno de los padres fundadores de la teoría, formuló su mecánica ondulatoria, creyó que con ello los fenómenos cuánticos podían describirse

de un modo análogo a los casos de vibración de cuerdas (cf. Jammer 1974, 24-33). Pero esta interpretación se desvaneció cuando, en su encuentro con Niels Bohr en Copenhague, el análisis de la teoría puso de manifiesto que no podía tratarse de ondas en el espacio físico, esto es, ondas que habitan el espacio físico tridimensional: en cuántica, por el contrario, cada partícula requiere para su descripción sus propias tres dimensiones, de modo tal que un sistema de n partículas debe ser descrito mediante una «onda» en un espacio $3n$ -dimensional. En la actualidad, el formalismo estándar pone claramente de manifiesto que el vector de estado no representa una onda en el espacio físico sino que es un vector en un espacio de Hilbert; por lo tanto, la sucesión temporal unívoca entre los vectores de estado no asegura la ausencia de bifurcaciones en la historia de un universo entendido como el conjunto de todos los eventos inscriptos en el espacio-tiempo.

Resulta más sencillo comprender la naturaleza de los estados cuánticos al compararlos con los estados clásicos. En mecánica clásica, dado un conjunto de partículas, es posible identificar ciertas propiedades del sistema, comúnmente llamadas «observables». Algunas de estas propiedades, como la masa, son constantes, mientras otras, por ejemplo, la posición, varían con el tiempo. El estado del sistema clásico en el instante t es el conjunto de las propiedades variables de las partículas en t . Especialmente relevantes son la posición y el momento cinético de cada partícula, dado que a partir de ellas es posible obtener las restantes propiedades del sistema. Matemáticamente, cada estado del sistema queda representado por un punto en el espacio de las fases Γ asociado al sistema: para un sistema de n partículas, el espacio de las fases es un espacio de $6n$ dimensiones, una por cada componente de la posición y una por cada componente del momento cinético. Cada observable A se asocia a una función f_A que hace corresponder a cada punto del espacio de las fases un número real ($f_A: \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$), de modo tal que la función f_A fija el valor de todas las propiedades de las partículas en el instante considerado.

En mecánica cuántica, por el contrario, el estado del sistema se representa por medio de un vector en el espacio de Hilbert correspondiente al sistema, y a cada observable A se asocia un *operador* A en dicho espacio. Pero la diferencia más importante respecto del caso clásico radica en que *el vector de estado no determina el valor de los observables* en cada instante, sino que sólo permite asociar una *probabilidad* a cada uno de los valores posibles. Mientras en el caso clásico, entonces, el estado de un sistema en un instante t queda completamente definido por las propiedades de sus partículas componentes en t , el estado cuántico en el cual se encuentra un sistema en un instante t no determina unívocamente las propiedades de sus elementos en dicho instante,

y esto es válido incluso en el caso de una única partícula. R. I. G. Hughes (1989) afirma que el estado clásico es *descriptivo* porque puede pensarse como una «lista» de las propiedades de los componentes del sistema, y es también *disposicional*, porque permite especificar la tendencia del sistema a comportarse de un cierto modo; pero el estado cuántico no tiene carácter descriptivo y sólo mantiene el aspecto *disposicional*: permite calcular la disposición del sistema a manifestar ciertos valores de sus observables a través de la medición, lo cual ha sido exitosamente confirmado por vía empírica. En definitiva, a pesar del carácter semánticamente determinista de la ecuación de Schrödinger, la mecánica cuántica es profundamente indeterminista, ya que el estado cuántico ni siquiera permite fijar unívocamente las propiedades de un sistema en el instante presente y, por tanto, menos aún en todo instante futuro.

A diferencia del caso de la cuántica, se suele afirmar que la relatividad general es una teoría determinista. No obstante, esta afirmación exige ciertas calificaciones. En primer lugar, la caracterización de determinismo introducida más arriba hace alusión al estado del sistema considerado. Pero, en relatividad general, el objeto de estudio es el universo como un todo. Por lo tanto, la cuestión del determinismo en este caso requiere incorporar la idea del estado del universo completo en un dado instante, y esto, a su vez, supone que puede hablarse de las propiedades del universo completo en un dado instante, es decir, las propiedades que se dan en un plano de simultaneidad del universo. El problema consiste en que, en un universo relativista, la simultaneidad no es absoluta sino relativa a cada sistema de referencia. La estructura espacio-temporal relativista exige modificar la caracterización de determinismo ontológico, reemplazando el concepto de instante por el de «tajada de tiempo» (*time slice*) y relativizando la noción de futuro: el universo es determinista si su estado en una feta de tiempo T_1 fija unívocamente los estados correspondientes al futuro de T_1 , para cualquier T_1 .

Sobre la base de esta caracterización de determinismo, ahora adecuada al caso de la relatividad general, puede decirse que, salvo para casos muy peculiares (ver el «*hole argument*» en Earman & Norton 1987), la relatividad general es determinista, ya que las ecuaciones de campo de Einstein permiten reconstruir el universo a todo tiempo a partir de las propiedades geométricas de cualquier hipersuperficie tipo-espacio. No obstante, esta afirmación incluye la noción de «tiempo del universo», pero en relatividad general la existencia del tiempo del universo como un todo no puede asegurarse para cualquier universo relativista; por el contrario, el espacio-tiempo debe cumplir ciertas condiciones geométricas muy precisas para que tal tiempo pueda definirse.

Como es bien sabido, el concepto de espacio-tiempo de la relatividad general impide hablar de «espacio a través del tiempo»: el tiempo ya no es un parámetro de evolución, como en física clásica, sino que se convierte en una dimensión de una variedad cuatridimensional que se curva a gran escala como consecuencia de la presencia de masas. Tal curvatura puede conducir a topologías del espacio-tiempo muy diferentes. Por ejemplo, si el espacio-tiempo se curva a lo largo de la dimensión espacial, sus secciones espaciales se conviertan en análogos tridimensionales de una cinta de Moebius: el espacio-tiempo es no temporalmente orientable. Esto implica que la distinción entre semiconos pasados y futuros no puede establecerse a nivel global (cf. Castagnino & Lombardi 2004; 2004a).

Pero aun si el espacio-tiempo es temporalmente orientable, puede poseer curvas temporales cerradas o cuasi cerradas que impiden particionar el conjunto de todos los eventos en hipersuperficies de simultaneidad que pueden ser ordenadas temporalmente. (cf. Sklar 1974). Cuando dicha partición existe, se dice que el espacio-tiempo posee un *tiempo global* (cf. Hawking & Ellis 1973): existe una función cuyo valor aumenta en el mismo sentido a lo largo de cualquier curva temporal. La existencia de tal función garantiza que el espacio-tiempo es particionable o foliable en hipersuperficies de simultaneidad ($t=const.$) que definen una *foliación* (cf. Schutz 1980).

Resulta claro que la existencia de tiempo global y, por tanto, la posibilidad de foliación impone restricciones topológicas significativas al espacio-tiempo. Pero sólo en estos casos puede hablarse significativamente de determinismo. Estas consideraciones nos conducen al segundo motivo de incompatibilidad entre mecánica cuántica y relatividad general: el concepto de tiempo de cada una de las dos teorías.

EL PROBLEMA DEL CONCEPTO DE TIEMPO

Según diversos autores, en particular físicos especialistas en gravedad cuántica —esto es, el ámbito teórico donde se aspira a unificar cuántica y relatividad general— (cf. Kuchař 1991, Isham 1993, Butterfield e Isham 1999), el principal escollo para una verdadera unificación teórica reside en la diferencia en los conceptos de tiempo involucrados en las dos teorías. La mecánica cuántica incorpora un concepto clásico de tiempo. En efecto, el tiempo de la mecánica cuántica es el mismo tiempo de la mecánica clásica: ambas teorías son invariantes bajo un grupo de simetrías espacio-temporales de Galileo. El tiempo cuántico es un parámetro de evolución externo al sistema: el estado del sistema evoluciona en

un tiempo independiente del propio sistema, el sistema modifica su estado *en el tiempo*.

En la teoría especial de la relatividad, las leyes físicas son invariantes en todo sistema de referencia inercial. Con la formulación de esta teoría aparece en escena una nueva entidad, denominada «espacio-tiempo de Minkowski», dado que este autor formuló su representación matemática. Con esta noción, surgieron los resultados más anti-intuitivos de la teoría: la relatividad de los intervalos espaciales y temporales respecto del sistema de referencia considerado. Esta teoría relativiza ciertas magnitudes consideradas absolutas en teorías anteriores, e introduce nuevos absolutos, como la velocidad de la luz en el vacío. En relatividad especial, además, el grupo de simetrías espacio-temporales ya no es el de Galileo sino el de Poincaré, lo cual indica la profunda diferencia entre las teorías «galileanas» y las relativistas: en relatividad especial desaparecen espacio y tiempo como ítems independientes para venir a ser reemplazados por el espacio-tiempo, donde espacio y tiempo se encuentran inescindiblemente imbricados. No obstante, todavía podría correlacionarse el tiempo galileano de la mecánica cuántica con la dimensión temporal del espacio-tiempo plano de la relatividad especial para incorporarse, así, a la teoría cuántica de campos. Pero esto ya no es posible, de un modo genérico, en la relatividad general.

En la teoría general de la relatividad, desaparecen los sistemas de referencia privilegiados, siendo las leyes invariantes en todo sistema de referencia. Pero el costo de este logro es que el espacio-tiempo adquiera la peculiaridad de curvarse ante la presencia de cuerpos con masa. En este marco conceptual, desaparece de escena la fuerza gravitatoria: los cuerpos ya no se mueven como consecuencia de su interacción gravitatoria con otros cuerpos, sino que se mueven siguiendo el camino más corto —la geodésica— sobre un espacio-tiempo curvo. Esta entidad, entonces, tiene la peculiar característica de deformarse a causa de los cuerpos con masa que lo ocupan. Este espacio-tiempo no es homogéneo ni isótropo, puesto que su curvatura varía en cada uno de sus puntos. El espacio-tiempo ejerce, además, una particular acción sobre los cuerpos dado que estos modifican su estado de movimiento frente a la curvatura de aquel.

En definitiva, la relatividad general reemplaza la concepción de «espacio a través del tiempo» por el concepto de espacio-tiempo, donde el tiempo se convierte en una dimensión de una variedad cuatridimensional que se curva a gran escala como consecuencia de la presencia de masas. Por lo tanto, el concepto de tiempo como parámetro de evolución es totalmente ajeno a la relatividad general, donde el tiempo pasa a ser una dimensión del objeto espacio-temporal que es el universo como un todo. Además, es precisamente por la curvatura del espacio-tiempo que las ecuaciones de campo de Einstein pueden tener soluciones

que representan espacio-tiempos con topologías completamente inconcebibles desde un punto de vista clásico. Como ya he señalado, hay modelos de la teoría general de la relatividad donde no es posible definir un tiempo global, es decir, no es posible particionar el conjunto de todos los eventos en clases de equivalencia tales que: (i) cada una de las clases sea una hipersuperficie espacial, y (ii) las hipersuperficies puedan ser ordenadas temporalmente (*cf.* Castagnino, Lombardi & Lara 2003; Aiello, Castagnino & Lombardi 2008; Castagnino & Lombardi 2009). En estos casos, no es posible hablar de «el tiempo» del universo: sólo existen los «tiempos propios» medidos por los relojes solidarios a cada uno de los objetos, pero no es posible hallar un tiempo que permita coordinar los relojes de todos los objetos del universo.

EL PROBLEMA DE LA NO-SEPARABILIDAD

Finalmente, otro de los motivos que conducen a la incompatibilidad entre mecánica cuántica y relatividad general se funda en la no-separabilidad cuántica. En mecánica cuántica, sistemas no interactuantes y separados espacialmente pueden manifestar correlaciones entre los valores de sus observables; en este sentido, se dice que los sistemas cuánticos son no-separables: el resultado de una medición sobre un subsistema puede depender de las mediciones efectuadas sobre otro subsistema, esto es, existen correlaciones entre los valores que adoptan, en un mismo instante, los observables correspondientes a subsistemas espacialmente separados. Este es el resultado que se pone de manifiesto en el llamado experimento EPR (Einstein, Podolsky & Rosen 1935). Tradicionalmente, esta no-separabilidad cuántica ha sido interpretada como no-localidad: las correlaciones entre sistemas espacialmente separados se explicarían por la propagación de señales a una velocidad superior a la velocidad de la luz, en abierta contradicción con las teorías de la relatividad según las cuales ninguna señal puede propagarse a mayor velocidad que la de la luz.

En la actualidad algunos autores comienzan a señalar la inadecuada asociación entre no-separabilidad y violación de la relatividad. En efecto, la mera correlación entre propiedades de sistemas espacialmente separados no permite enviar información entre ambos a una velocidad superior a la de la luz. John Earman (1986) señala que la no-separabilidad no implica la presencia de *señales superlumínicas*, sino que requiere únicamente una dependencia semántica entre observables correspondientes a subsistemas diferentes. En definitiva, la no-separabilidad no implica acción a distancia: es lógicamente posible la existencia de correlaciones entre sistemas espacialmente separados sin la propagación de señales instantáneas. Pero si se extraen todas las impli-

caciones de la no-separabilidad así concebida, incluso la formulación original del problema que surge del experimento EPR se presenta bajo una nueva luz. El problema ya no consiste en explicar las correlaciones entre las propiedades de *dos* subsistemas espacialmente separados, lo cual exigiría una comunicación instantánea entre ambos violando las limitaciones relativistas. Se trata simplemente de dar cuenta de las correlaciones entre las propiedades de un *único sistema irreductible*, que conserva su unicidad aun cuando se encuentra extendido en el espacio. Estas reflexiones ponen de manifiesto la importancia de diferenciar entre una violación de la localidad en sentido relativista —esto es, de la imposibilidad de señales superluminarias— y la no-separabilidad que implica el carácter *holista* de los sistemas cuánticos.

No obstante, la no-separabilidad así entendida no permite evitar la incompatibilidad entre mecánica cuántica y relatividad general, ya que tal característica se encuentra totalmente reñida con un enfoque como el relativista, donde los objetos y los eventos se identifican por su posición espacio-temporal. El propio Einstein subrayaba esta incompatibilidad cuando, en una de sus cartas a Max Born, afirmaba:

Es una característica de los objetos físicos que sean pensados como dispuestos en el continuo espacio-temporal. Un aspecto esencial de tal disposición de los objetos de la física es que, en un cierto instante, posean existencia independiente entre sí, dado que tales objetos se encuentran situados en diferentes partes del espacio. Salvo que se adopte este tipo de supuesto acerca de la independencia de la existencia de objetos espacialmente separados, el pensamiento físico en el sentido familiar no sería posible (Born 1969, 170).

Es precisamente esta «independencia de la existencia de objetos espacialmente separados» lo que niega la no-separabilidad cuántica. Algunos autores (*cf.* Earman 1986; Loewer 1998) coinciden en afirmar que, a diferencia de lo que suele suponerse, no es el indeterminismo sino la no-separabilidad de la mecánica cuántica la razón por la cual Einstein consideraba la teoría profundamente insatisfactoria.

CONCLUSIONES: EL ENCIERRO DEL REALISTA

Todas las diferencias señaladas entre mecánica cuántica y relatividad general indican claramente la ruptura conceptual entre ambas teorías, ruptura que pone en cuestión tanto la mirada realista sobre la ciencia, de acuerdo con la cual existe continuidad a través del cambio teórico, así como

la imagen misma de cambio teórico sobre la que basan sus análisis, tanto los realistas como los antirrealistas.

Hemos señalado que, desde una perspectiva realista que pretende dar cuenta de un desarrollo unificado de la ciencia atendiendo fundamentalmente a las relaciones que entre sí establecen teorías científicas que se suceden en el tiempo, estas dos teorías son incompatibles en el sentido de que involucran afirmaciones que no pueden ser a la vez verdaderas respecto *de un mismo dominio*. No obstante, algunos de los realistas más tradicionales pueden intentar negar incluso la propia incompatibilidad. Por ejemplo, en un debate con Olimpia Lombardi, recientemente Mario Bunge ha sostenido que “Estas dos teorías son compatibles entre sí, sobre todo cuando se las aplica a cosas diferentes, tales como átomos y campos gravitatorios” (Bunge 2011, 46). Como bien se sabe, dos afirmaciones son compatibles cuando pueden ser ambas verdaderas; por lo tanto, si dos afirmaciones no refieren a lo mismo, son trivialmente compatibles. No obstante, parece curioso que un realista considere que mecánica cuántica y relatividad general se aplican a ámbitos diferentes, pues esto equivale a suponer que, por ejemplo, la palabra «tiempo» denota entidades diferentes en ambas teorías, lo cual significa que existe un tiempo para los átomos y un tiempo diferente para los campos gravitatorios, para delicias del antirrealismo relativista. Sin embargo, tampoco es cierto que las dos teorías no posean un dominio común: en el amplio campo de investigación teórica designado bajo el nombre general de «gravedad cuántica», ambas teorías se aplican al mismo objeto, el universo.

La estrategia realista más coherente consiste en admitir la incompatibilidad pero conservar la esperanza de una futura unificación: la coexistencia de teorías supuestamente «fundamentales», incompatibles entre sí pero simultáneamente aceptadas por la comunidad científica, sería un fenómeno provisorio, puesto que tales teorías serán superadas por una nueva teoría unificadora. Pero esta esperanza no se encuentra fundada en lo que la ciencia *es*, sino en lo que los propios realistas creen que debe *ser*.

Frente a esta situación de coexistencia de teorías incompatibles y supuestamente fundamentales, el realismo no ofrece una herramienta filosófica suficientemente potente como para dar cuenta de ella. El realista queda perplejo frente a un escenario que no responde al modelo lineal de cambio teórico, escenario en el cual no es cierto que una teoría diferente viene a reemplazar a una teoría preexistente, sino que la bifurcación teórica permite la coexistencia entre teorías incompatibles. El realista queda encerrado: o bien no tiene nada que decir y debe suspender el juicio hasta aquel día soñado en que ambas teorías serán superadas por una teoría unificadora, o bien se contradice al afirmar

que cuántica y relatividad general son dos teorías que hablan de cosas diferentes al aplicarse a dominios distintos, dando así razones a los argumentos de los antirrealistas inconmensurabilistas o instrumentalistas. Esta situación pone de manifiesto que es necesario romper con ciertas obstinaciones filosóficas que han terminado por ponerse delante de —y por oscurecer— aquello que se pretende analizar y precisamente sobre lo cual el filósofo debe arrojar luz. La obstinación por el realismo ha mostrado su infertilidad para pensar el verdadero desarrollo de la ciencia, al menos en casos como el analizado aquí. Sostenemos que esto debe resultar suficiente para buscar enfoques filosóficos más promisorios, comprometidos con la efectiva historia de la ciencia.

TRABAJOS CITADOS

- Aiello, M., Castagnino, M. & Lombardi, O. "The arrow of time: from universe timeasymmetry to local irreversible processes". *Foundations of Physics* 38 (2008): 257-292.
- Auyang, S. *How is Quantum Field Theory Possible?* Oxford-New York: Oxford University Press, 1995.
- Born, M. *The Born-Einstein Letters*, London: Macmillan, 1969.
- Brown, H. & Harré, R., eds. *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*. Oxford: Oxford University Press, 1988.
- Bunge, M. "Sobre Thomas Kuhn y teorías incompatibles". *Exactamente*, 47 (2011): 46.
- Butterfield, J. & Isham, C. "On the emergence of time in quantum gravity". J. Butterfield, ed. *The Arguments of Time*. Oxford: British Academy - Oxford University Press, 1999, 111-168.
- Castagnino, M. & Lombardi, O., "Time asymmetry as universe asymmetry". O. Descalzi, J. Martínez y S. Rica, eds. *Instabilities and Nonequilibrium Structures IX*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004, 11-15.
- . "The generic nature of the global and non-entropic arrow of time and the double role of the energy-momentum tensor". *Journal of Physics A (Mathematical and General)* 37 (2004a): 4445-4463.
- . "The global non-entropic arrow of time: from global geometrical asymmetry to local energy flow". *Synthese* 169 (2009): 1-25.

- Castagnino, M., Lombardi, O. & Lara, L. (2003), "The global arrow of time as a geometrical property of the universe". *Foundations of Physics* 33: 877-912.
- Córdoba, M. & Lombardi, O. "Realismo y referencia: hacia un enfoque sincrónico desde la práctica científica". *Diálogos* 92 (2012), en prensa.
- Earman, J. *A Primer on Determinism*. Dordrecht: Reidel, 1986.
- Earman, J. & Norton, J. "What price spacetime substantivalism?". *British Journal for the Philosophy of Science* 38 (1987): 515-525.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?". *Physical Review* 47 (1935): 777-780.
- Feyerabend, P. K. "Explanation, reduction, and empiricism". H. Feigl y G. Maxwell, eds. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 3. Dordrecht: Reidel, 1962, 28-97. Reimpreso en *Realism, Rationalism & Scientific Method. Philosophical Papers, Vol. 1*, Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- Hawking, S. & Ellis, G. *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
- Hughes, R. I. G. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge MA: Harvard University Press, 1989.
- Isham, C. J. "Canonical quantum gravity and the problem of time". L. A. Ibort y M. A. Rodríguez, eds. *Integrable Systems, Quantum Groups, and Quantum Field Theories*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993, 157-288.
- Jammer, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- James, W. "The dilemma of determinism". *The Will to Believe*, New York: Dover Publications, [1897] 1956.
- Kuchař, K. "The problem of time in canonical quantization". A. Ashtekar y J. Stachel, eds. *Conceptual Problems of Quantum Gravity*, Boston: Birkhäuser, 1991, 141-171.
- Kuhn, T. S. *The Structure of Scientific Revolutions*, 2ª. ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1962.

- Loewer, B. "Copenhagen versus Bohmian interpretations of quantum theory".
The British Journal for the Philosophy of Science 49 (1998): 317-331.
- Nagel E. *The Structure of Science*. New York: Hartcourt, Brace & World, 1961.
- Niiniluoto, I. *Critical Scientific Realism*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- Popper, K. *Logik der Forschung*. Viena: Springer Verlag, 1934. Versión inglesa:
The Logic of Scientific Discovery. Londres: Hutchinson, 1959.
- Psillos, S. *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. New York-London:
Routledge, 1999.
- Schutz, B. *Geometrical Methods of Mathematical Physics*. Cambridge:
Cambridge University Press, 1980.
- Sklar, L. *Space, Time and Spacetime*. Berkeley - Los Angeles - Londres: Univer-
sity of California Press, 1974.