RUPTURA Y CONTINUIDAD EN LA HISTORIA DE LA FÍSICA

Roberto Torretti

En el prólogo a la segunda edición de la *Crítica de la razón pura*, Kant habla del momento en que la física emprendió por fin "la marcha segura de una ciencia", después de siglos de "mero tanteo". Ocurrió, según él, a plena luz de la historia, en la primera mitad del siglo XVII, con los experimentos de Galileo y Torricelli. Estos estudiosos de la naturaleza percibieron "que la razón sólo comprende lo que ella misma produce según su propio proyecto; que, adelantándose con los principios de sus juicios conforme a leyes constantes, tiene que constreñir a la naturaleza a responder a sus preguntas, y no dejarse llevar con andadores por ella. [...] La razón debe acercarse a la naturaleza teniendo en una mano sus principios [...] y en la otra el experimento diseñado con arreglo a éstos, ciertamente para aprender de ella, mas no en la calidad de un discípulo que se deja decir todo lo que al maestro se le antoja, sino como un juez competente que compele a los testigos a contestar las preguntas que les hace" (Kant, 1787, p. xiii). Kant pensaba, al parecer, que tras esta "revolución en la manera de pensar" la física progresaría continuamente, sin retrocesos. No hay constancia de que haya considerado alguna vez la cuestión evidentemente implícita en su metáfora judicial: ¿qué sería del seguro progreso de la ciencia si la razón juez, por iniciativa propia o de quien quiera que sea su soberano, alterase los términos de sus preguntas o los criterios de evaluación de las respuestas? En la administración de justicia, una pequeña reforma en el procedimiento puede cambiar un veredicto de culpabilidad en uno de inocencia, o viceversa. Pero, aunque la razón empezó a blandir sus principios de súbito, en una época y una región determinadas, Kant los tenía por ahistóricos: el interrogatorio al cual la razón sometía a la naturaleza, en los siglos XVII y XVIII de la era cristiana, entre el Arno y el Clyde, el Elba y el Ebro, era para él sólo una manifestación de la intemporal naturaleza de la razón.

Como es sabido, los principios inalterables con arreglo a los cuales, según Kant, el entendimiento humano tiene que "deletrear los fenómenos para poder leerlos como experiencia" (1781, p. 314) incluyen la geometría del espacio euclidiano y la cronometría del tiempo newtoniano (cada uno de cuyos instantes "se difunde indivisible a través de todos los espacios"—Newton ca. 1667 en Hall y Hall, 1962, p. 104), la conservación de la materia ponderable, el estricto determinismo causal y la interacción instantánea a distancia. Como también es sabido, en el primer tercio del siglo XX las teorías de la Relatividad y la Mecánica Cuántica, que siguen siendo hoy los dos grandes pilares de la física, dieron al traste con estos principios. Era razonable considerar este hecho como una refutación práctica de la filosofía de Kant, y así lo entendieron muchos filósofos. En particular, el influyente movimiento del empirismo lógico, en que militaban ex kantianos como Carnap y Reichenbach, se afanó en separar el contenido informativo de la ciencia, suministrado exclusivamente por los sentidos, de su estructura conceptual. Desdeñando la enseñanza kantiana de que los sentidos sin conceptos son ciegos, vieron en éstos solamente un instrumento de diseño arbitrario, para codificar la información sensorial de un modo económico y así facilitar su manejo. Una vez fracasado en su empeño inicial de traducir el lenguaje científico a la pura descripción de vivencias, Carnap, a instancias de Neurath, aceptó como vehículo de información básica una versión simplificada del lenguaje corriente, utilizada en los protocolos de laboratorio, y acometió la tarea de mostrar cómo su vocabulario "observacional" era capaz de expresar todo el contenido cognitivo de las teorías físicas. La permanencia de dicho vocabulario a pesar del drástico cambio en las teorías tendía un puente entre éstas y permitía compararlas. Si Carnap y sus correligionarios veían en el habla cotidiana del laboratorio un factor de continuidad de la física, ciertamente no andaban descaminados. Pero su distingo entre términos *observacionales* —aplicables a objetos y situaciones reales— y términos *teóricos* —palabras sin referencia, utilizables sólo como fichas en un cálculo— los condujo a un callejón sin salida, pues las observaciones de mayor interés para la física actual sólo pueden describirse con precisión e interpretarse con provecho en un lenguaje cargado de términos —y supuestos— teóricos.

El redescubrimiento de la "cargazón teórica" de la observación por Hanson (1958) y Feyerabend (1958, 1962) fue un factor decisivo en la crítica devastadora del empirismo lógico emprendida por ellos y otros autores hacia 1960. Por esos mismos años Thomas Kuhn desarrollaba su visión de la historia de toda ciencia como una sucesión de fases de ruptura o "revolución" y fases de continuidad o "ciencia normal". Según Kuhn (1962), la continuidad sólo puede reinar entre revolución y revolución, pues el cambio en la manera de pensar que entrañan las revoluciones científicas implica que cada teoría postrevolucionaria es "inconmensurable" con la correspondiente teoría prerrevolucionaria. Esta conclusión radical es inevitable si los hechos observados sólo pueden articularse como tales en el contexto y bajo la perspectiva de una o la otra teoría, porque entonces no hay una base independiente de datos con los cuales contrastarlas. Por otra parte, como agudamente señaló Dudley Shapere (1966; cf. Shapere, 1964), si las teorías sucesivas son inconmensurables por la razón antedicha, ni siquiera podrá decirse que hablan de un mismo tema: la ruptura con el antiguo sistema de conceptos traería consigo la pérdida de todas las referencias.

Sacudido por esta enormidad, Hilary Putnam propuso en esos años su doctrina de la referencia sin sentido (1970, 1973, 1975). En contraste con la semántica clásica de Frege, según la cual el concepto que uno piensa fija la clase de cosas que uno mienta, la semántica de Putnam asienta la referencia de cada término en un bautismo original —por ejemplo, Adán apunta a un río del Paraíso y dice: 'eso es *agua*'— conectado con el uso presente del vocablo por una cadena causal de comunicaciones. Nótese que esta doctrina va más lejos que la popular concepción de los nombres propios de individuos como designadores rígidos, pues se extiende a los nombres y descripciones de *clases naturales*. De ser aceptable, las revoluciones científicas no afectarían el significado de los términos principales de la ciencia y las teorías sucesivas podrían sin gran dificultad ser comparadas entre sí y con la experiencia. Pero la doctrina de la referencia sin sentido, viable quizás en el caso de los nombres propios de individuos, es inaplicable a los términos genéricos, por cuanto la identificación de diferentes individuos como ejemplares de una misma clase depende del concepto bajo el cual se los capta. Así, por ejemplo, reconocemos como manifestaciones de una misma potencia natural tanto la caída de los graves hacia el centro de la tierra como el movimiento circular de los planetas y el alejamiento recíproco de las galaxias gracias a que nuestro concepto de 'gravedad' ya no es el de Aristóteles.

Pero no se trata aquí de combatir una doctrina semántica que su propio autor ha descartado. Me he referido a ella sólo para mostrar cuán en serio se ha tomado la alegada inconmensurabilidad de las teorías científicas y a qué extremos se ha podido llegar para esquivarla. Por mi parte, pienso que la tesis de la inconmensurabilidad reposa sobre un malentendido y que en la historia de la física hay rupturas, sí, como no podría menos de haberlas si hay genuina novedad del pensamiento, pero que las rupturas cicatrizan, por cuanto los mismos factores que las promueven y posibilitan contribuyen luego a restablecer la continuidad. Intentaré explicar y justificar esta opinión mediante ejemplos. Pero antes debo prevenir contra una posible fuente de error. En la abundante literatura que provocó el libro de Kuhn, especialmente en la literatura sociológica, suelen tratarse a la par tanto la revolución científica por antonomasia del siglo XVII y las grandes innovaciones en la física del siglo XX a que aludí arriba, como las minirrevoluciones que, según se dice, ocurren a cada rato en cada pequeña especialidad científica. Este enfoque nivelador, ajustado al antielitismo de moda en los años 60, ha contribuido a arrojar luz sobre semejanzas que seguramente existen entre ciencias grandes y chicas, pero confunde las cosas cuando se trata de apreciar el alcance de las rupturas que marcan su respectiva historia. En la vida del pensamiento no es lo mismo que se rompa una arteria o un capilar. El dicho de Kuhn de que "después de una revolución los científicos enfrentan un mundo diferente" (1962, p. 110) resulta francamente exagerado si la revolución de que se trata concierne, por ejemplo, la causa de una enfermedad contagiosa que afecta al uno por mil de los ejemplares de una especie que puebla la quinta parte de la superficie de un planeta pequeñito (aunque sea la misma especie que ha inventado las ciencias). O, para dar un ejemplo menos emotivo, tomado de una revolución que ha solido atraer la atención de los filósofos (cf. Laudan, 1980; Giere, 1988, cap. 8): cuando los geólogos, abandonando toda idea de "tierra firme", ven a los continentes deslizarse como tablones de patinaje sobre el magma terrestre, alteran, sí, radicalmente la interpretación de innumerables fenómenos en su esfera de competencia, pero pueden seguir describiéndolos en los mismos términos de la física, de la química y del lenguaje ordinario que utilizaban sus predecesores; el desplazamiento de las placas continentales transcurre en el mismo mundo en que antes se pensaba que América, Eurasia y África estaban fijas sobre la tierra.

Esta posibilidad de que dos teorías sucesivas se comuniquen a través del discurso, científico y extracientífico, en que están inmersas no está disponible, sin embargo, si la revolución que lleva de la primera a la segunda compromete todo nuestro modo de pensar. Si tuviésemos, como sostuvo Kant, un sistema principal único, coherente y global, de organizar nuestra experiencia de los fenómenos, y éste fuese trastornado por una mutación, las teorías compuestas antes y después de ella no sólo serían inconmensurables sino que además no se reconocerían mutuamente como teorías. Porque un sistema de la razón como el ideado por Kant es un absoluto para sí y —como atinadamente observó Davidson en su alocución "Sobre la idea misma de esquema conceptual" (1974)— no podría siquiera concebir como tal una forma de pensamiento distinta de la suya. El malentendido que alimenta la tesis de la inconmensurabilidad entre teorías científicas separadas por una revolución consiste en que sus partidarios han seguido atribuyendo al pensamiento humano, o, por lo menos, al pensamiento científico el carácter unitario y totalitario de la razón kantiana, aunque lo ven como fruto de la historia y capaz de mutaciones *à la* Darwin. El hecho es que si —como enseñaba Kant— la razón tiene una arquitectura, ésta no es la del Escorial, edificado de una sola vez conforme a un diseño claro y definitivo, sino más bien la de la catedral de Santiago, construida a pedazos durante muchos siglos, con drásticos cambios de estilo, que sin embargo no estropean, sino más bien magnifican la grandeza del conjunto. Una comparación arquitectónica más iluminadora es la que hace Wittgenstein entre lo que él llama 'lenguaje' (y los griegos llamaban 'logos') y una ciudad —parecida a Viena— con un centro antiguo de callejuelas tortuosas y llenas de recovecos, que asimila al habla cotidiana, y una periferia de urbanizaciones y suburbios, con calles rectas y amplias avenidas, que compara con los lenguajes especializados de las ciencias. Nótese que esta comparación no implica que los lenguajes especializados sean exhaustivamente traducibles al lenguaje corriente o deriven de éste su sentido, como sostuvo el empirismo lógico; sólo que el lenguaje precientífico es más antiguo y estable que las jergas técnicas, y permanece en pie cuando una de éstas es remodelada o demolida, manteniendo una conexión que de otro modo quedaría interrumpida. En particular, la física, aunque sus *teorías* sólo pueden expresarse adecuadamente en idiolectos cargados de términos y fórmulas matemáticas, en la *práctica* no llega a prescindir del lenguaje ordinario, el cual obviamente tiene que emplearse cada vez que se dan instrucciones para armar o manipular un experimento.

Consideremos un ejemplo. En 1880 Albert Michelson diseñó un aparato, conocido hasta hoy como el interferómetro de Michelson, para medir la velocidad de la tierra en el éter, esto es, en el medio imponderable en que la física de entonces suponía que se transmiten —por vibración— las señales ópticas. El aparato estaba concebido de acuerdo con dicha teoría física para generar un patrón de franjas blancas y oscuras debido a la interferencia de dos rayos de luz salidos de una misma fuente, trasmitidos a lo largo de dos brazos perpendiculares y reunidos finalmente bajo un microscopio (fig. 1). El patrón de franjas tenía que variar al alinearse uno u otro brazo con el movimiento de traslación de la tierra, si, como preveía la teoría, la luz viajaba a distinta velocidad en esa dirección y en la dirección perpendicular a ella. Como es fama, el experimento, repetido ocho años más tarde con mayor precisión por Michelson y Morley, dio un resultado negativo: como quiera que se orientaran los brazos del aparato, y aun repitiendo la prueba en distintas épocas del año, no se observaba una variación significativa en el patrón de franjas de interferencia. Fitzgerald y Lorentz atribuyeron este resultado negativo a una supuesta contracción de los cuerpos sólidos en la dirección en que se mueven en el éter, la cual sería un efecto electromagnético —desconocido hasta entonces— de dicho movimiento. Por esto, aunque la velocidad de cada rayo de luz varíe al intercambiar la orientación de los brazos del aparato, el efecto de esta variación sobre las franjas de interferencia se ve exactamente compensado porque el cambio de orientación altera también la longitud de cada brazo y con

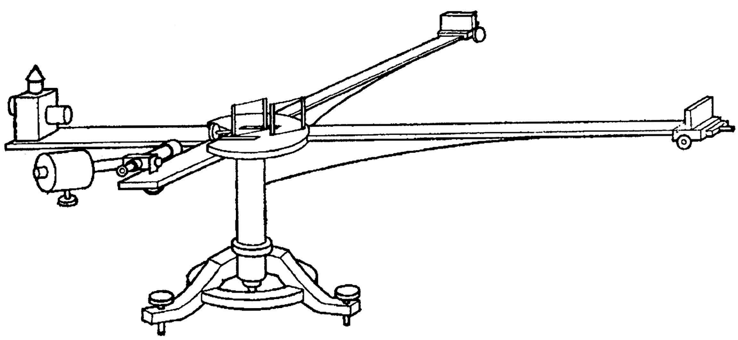

Figura 1. Interferómetro de Michelson (1881).

ello la distancia recorrida por la luz a lo largo de él. Por otra parte, conforme a la teoría revolucionaria propuesta por Einstein en su artículo "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" (1905), el experimento de Michelson y Morley debe concebirse en términos completamente diferentes. Desde luego, no servirá para determinar la velocidad de la tierra en el éter, pues ahora la suposición de que existe un éter luminífero resulta completamente superflua. Según la nueva teoría, lo que se compara mediante el interferómetro son las velocidades de trasmisión de la luz a lo largo de dos trayectos mutuamente perpendiculares en reposo en un laboratorio terrestre que constituye un sistema (prácticamente) inercial, y si no se detecta ninguna diferencia entre ellas es porque lisa y llanamente no la hay ni tendría por qué haberla. Con la revolución de Einstein el experimento de Michelson y Morley se torna inocuo y banal, pero al precio de un cambio drástico en los conceptos fundamentales de la física: tiempo, distancia, masa, fuerza. Pero, si ha cambiado el sentido de los términos, ¿cómo saber que todavía se refieren al mismo fenómeno? Si el físico hablase exclusivamente de lo que capta con los conceptos de sus teorías, el salto entre teorías conceptualmente incompatibles dejaría completamente en el aire sus referencias. Pero, felizmente, no es así. Las teorías físicas captan sólo un aspecto abstracto e idealizado de la vida, pero el físico se está refiriendo todo el tiempo a otros aspectos menos decantados, mas no por ello menos "objetivos", por ejemplo, cuando compra jamón y queso en el mercado, o cuando pide que le saquen el polvo al interferómetro en su laboratorio. Para esto último dispone de formas de referirse al aparato independientes de toda intelección de lo que ocurre en él cuando se lo echa a andar. Estos modos de referencia son compartidos, ciertamente, por los físicos de la escuela de Lorentz y los de la escuela de Einstein. Emplean expresiones del lenguaje ordinario y también de esos papiamentos de que habla Peter Galison (1995) —las jergas utilizadas en manuales sobre "grupos de Lie para físicos" o "teoría electrodébil para laboratoristas" —que crecen en las fronteras de las diferentes especialidades y prácticas científicas y se usan para trasmitir información e instrucciones entre ellas.

La situación puede presentarse muy sencillamente con ayuda del esquema descriptivo de las teorías físicas propuesto por los estructuralistas de Colorado y Munich. Bajo este esquema, una teoría física consta de una especie de estructura matemática, en el sentido de Bourbaki, y un conjunto de aplicaciones deseadas, esto es, de fragmentos o aspectos de la realidad vivida que se pretende concebir como modelos de dicha especie de estructura. Si tal pretensión tiene éxito la teoría capta y comprende el fragmento o aspecto en cuestión y los conceptos de la teoría se refieren efectivamente a él. Pero tiene que haber una forma extrateórica de referirse a dicho fragmento o aspecto para siquiera designarlo como candidato a modelo de la teoría. Esta forma de referencia probablemente es confusa y no lo deslinda bien, ni su sentido aporta nada que contribuya a entenderlo, pero da un asidero semántico para tenerlo cogido aunque fracase el intento de aplicarle la teoría y los conceptos de ésta le resbalen por encima. Es claro que el físico tiene que poder hablar de lo que no entiende. De otro modo, la observación incomprensible, el resultado experimental contrario a lo previsto caerían fuera del alcance del discurso y no podrían actuar como catalizadores de la innovación conceptual. La insuficiencia de la teoría vigente, la anomalía que provoca la ruptura, sólo puede señalarse en un lenguaje parateórico que constituye, a la vez, un factor de continuidad.

Pero hay además otro factor de continuidad en la historia de la física, el cual, me parece, es responsable de que la física matemática moderna sea en definitiva una sola desde Galileo hasta nuestros días, no obstante todas las variaciones en sus conceptos y sus métodos. Incide en su mismo núcleo teórico y resulta de la propia índole de éste, a saber, de que en el corazón —o, si ustedes prefieren, en el cerebro— de toda teoría física haya una especie de estructura matemática. Ésta tiene su lugar en el universo ideal de tales estructuras y se relaciona de modos bien definidos con otras. Por ejemplo, los modelos de la Relatividad General son variedades diferenciables de 4 dimensiones con una métrica de Riemann de signatura (–+++) que satisface las ecuaciones de campo de Einstein y también otras condiciones —como la llamada condición de causalidad estable— que suelen prescribirse para evitar monstruosidades físicas. Por lo tanto, forman una subespecie de la especie mucho más general de los espacios de Riemann de *n* dimensiones, subespecie a su vez de las variedades diferenciables, que a su vez pueden considerarse un género muy particular de espacios topológicos. Este es un ejemplo excepcionalmente claro, porque las citadas especies de estructura, de que los modelos de la Relatividad General son casos particularísimos, son de por sí tema de estudio de importantes disciplinas matemáticas. En la mayoría de los casos el núcleo conceptual de una teoría física es una estructura matemática *sui generis* que combina subespecies de especies de estructura reconocidas, en un sistema que no es fácil de hacer explícito. De hecho, la reconstrucción racional de estos sistemas es un tema favorito de investigación en la escuela estructuralista (cf. Moulines, 1975; Bartelborth, 1987). Pero tanto en el caso simple de la Relatividad General, que se inserta naturalmente en una jerarquía de estructuras matemáticas más abstractas, como en otros casos más complicados, en que la teoría física forma una encrucijada o nudo inextricable de tales estructuras, el rico inventario disponible de estructuras estudiadas con gran generalidad por la matemática pura no sólo ha procurado a los físicos una fuente prácticamente inagotable de conceptos revolucionarios, sino que además ha facilitado inmediatamente la comparación de las teorías nuevas con sus predecesoras. Así, frecuentemente, el mismo factor que ha hecho posible la ruptura innovadora ha permitido precisar el vínculo intelectual entre lo que había antes y lo que vino después, y tomar clara conciencia de la continuidad que los une.

Tal como he procedido hasta aquí, ilustraré mis asertos con ejemplos. El primero será modesto, lo que me permitirá explicarlo concisamente con bastante precisión. Compararé el concepto central de la electrodinámica prerrelativista de Lorentz con el concepto homólogo de la electrodinámica relativista de Minkowski.

Maxwell creó la electrodinámica clásica alrededor de 1860, basándose principalmente en los hallazgos e ideas de Faraday. Hacia 1900 la teoría había alcanzado su madurez en la obra de Lorentz. Para Lorentz, el universo entero está lleno de una sustancia imponderable, el éter, ninguna de cuyas partes se desplaza nunca respecto de otras partes suyas, y que penetra y traspasa lo más recóndito de la materia ponderable. El éter es sede de fuerzas que actúan sobre las partículas materiales eléctricamente cargadas que reposan o se mueven en él. Dichas fuerzas obedecen, naturalmente, a la Segunda Ley de Newton, esto es, imprimen a cada partícula una aceleración con la misma dirección de la fuerza e inversamente proporcional a la masa de la partícula. La fuerza eléctrica, representada por el vector **E**, que actúa sobre cualquier carga eléctrica q, es proporcional a $|q\mathbf{E}|$ y, dependiendo del signo de q, tiene la misma direccíon que **E** o la dirección opuesta. La fuerza magnética, representada por el vector **B**, actúa sólo sobre cargas que se mueven en el éter; es proporcional al producto de las cuatro cantidades siguientes: el tamaño del vector **B**, la carga eléctrica en movimiento, la velocidad con que se mueve y el seno del ángulo entre la dirección en que se mueve y la dirección de **B**; y su dirección es perpendicular al movimiento y al vector **B** (hay dos direcciones que satisfacen esta descripción; la dirección aplicable depende del signo de la carga). Así, la fuerza total **F** ejercida sobre una partícula con carga q que se mueve en el éter con velocidad **v** está dada por:

$$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \tag{1}$$

La magnitud y dirección de **E** y **B** varían de punto en punto y de instante en instante, dependiendo —con retardo— de la posición y movimiento de todas las cargas eléctricas del mundo. Las relaciones entre **E**, **B** y la distribución de cargas y corrientes eléctricas obedecen a las célebres ecuaciones de Maxwell. Si x, y, z designan coordenadas cartesianas para un marco de referencia en reposo en el éter, los vectores **E** y **B** pueden analizarse, del modo habitual, en componentes relativos a dicho sistema de coordenadas:

$$\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z) \text{ y } \mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z) \tag{2}$$

El valor numérico de tales componentes puede obtenerse midiendo en el laboratorio distintos efectos eléctricos y magnéticos.

En la electrodinámica relativista —como ya se vio— no hay éter y las ecuaciones de Maxwell toman la misma forma con respecto a cualquier sistema de referencia inercial. Esto no puede significar, por cierto, que una partícula cargada de masa m

experimente la misma aceleración **F**/*m* respecto a un sistema inercial en que reposa y respecto a otro en el que se mueve con velocidad uniforme **v**. Tampoco los vectores **E** y **B** pueden ser iguales en dos sistemas inerciales en movimiento recíproco, ya que, obviamente, la distribución de corrientes eléctricas no puede ser la misma en ambos. Por lo tanto, el campo eléctrico y el campo magnético dependen de la elección arbitraria de un sistema de referencia y no representan realidades físicas subsistentes de por sí. Sin embargo, como demostró Minkowski, los componentes de **E** y **B** relativos a un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) anclado en un marco de referencia inercial son también los componentes de un objeto geométrico definido en el continuo espacio-temporal, relativos al sistema espacio-temporal de coordenadas (x, y, z, t) anclado en el mismo marco inercial y formado por las mismas coordenadas cartesianas, más el tiempo de Einstein t. Un objeto geométrico es, como tal, independiente del marco de referencia elegido, aunque, como es obvio, su análisis en componentes relativos a un sistema de coordenadas varía con éste según reglas fijas, características del tipo de objeto en cuestión. El objeto de que hablamos viene a ser entonces la representación matemática apropiada de una única realidad física, el campo electromagnético, cuya descomposición tradicional en un campo eléctrico y un campo magnético es un efecto del punto de vista humano, atado a tal o cual marco de referencia inercial. Minkowski concibió el campo electromagnético como un campo de lo que entonces se llamaban vectores polares, el cual, sobre un continuo de cuatro dimensiones, tiene justamente 6 componentes. Hoy se lo concibe, de un modo matemáticamente equivalente, como un campo de tensores antisimétricos de tipo (0,2), que tiene, en cuatro dimensiones, 16 componentes, pero no más de 6 significativamente distintos. Concretamente, si designamos este objeto con $\mathscr{F}$ y sus 16 componentes relativos a (x, y, z, t) con $\mathscr{F}_{xx}$, $\mathscr{F}_{xy}$, etc., tenemos que —con las convenciones de signo adoptadas por Feynman en sus *Lecciones de Fisica* (1964)—.

$$\begin{array}{lll} \mathscr{F}_{xy} = -\mathscr{F}_{yx} = -B_z & \mathscr{F}_{yz} = -\mathscr{F}_{zy} = -B_x & \mathscr{F}_{zx} = -\mathscr{F}_{xz} = -B_y \\ \mathscr{F}_{xt} = -\mathscr{F}_{tx} = E_x & \mathscr{F}_{yt} = -\mathscr{F}_{ty} = E_y & \mathscr{F}_{xt} = -\mathscr{F}_{tx} = E_z \\ & \mathscr{F}_{xx} = \mathscr{F}_{yy} = \mathscr{F}_{zz} = \mathscr{F}_{tt} = 0 & \end{array} \tag{3}$$

Así, los 16 componentes del campo electromagnético $\mathscr{F}$ relativos al sistema de coordenadas (x, y, z, t) están dados por:

$$\mathscr{F} = \begin{bmatrix} 0 & -B_z & B_y & E_x \\ B_z & 0 & -B_x & E_y \\ -B_y & B_x & 0 & E_z \\ -E_x & -E_y & -E_z & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

De este modo, aunque las concepciones relativista y prerrelativista de la realidad física y en particular de la electrodinámica son radicalmente diversas, los números que determinan el acontecer electrodinámico según las ecuaciones de Maxwell ocupan un lugar preciso en cada teoría; medidos con los mismos métodos en los mismos laboratorios, serán los mismos números aunque representen cantidades físicas concebidas de muy distinta manera. A la luz de este ejemplo parecería que, entre los adjetivos disponibles para describir la relación entre una teoría física revolucionaria y aquella que reemplaza, 'inconmensurable' es justamente el menos apropiado.

Mi segundo ejemplo es más ambicioso e interesante, pero, por lo mismo, tendré que limitarme a esbozarlo. Dije que los modelos de la teoría de la gravitación de Einstein son una subespecie de los espacios de Riemann. Ahora bien, este último concepto fue introducido por Riemann en 1854 con el propósito expreso de suministrar a los físicos una generalización del espacio euclidiano a la cual recurrir si, como Riemann anticipaba, los datos obtenidos con mediciones de precisión creciente no se dejaban insertar en el lecho de Procrusto de la geometría tradicional. Riemann estaba convencido de que las relaciones métricas en un continuo físico dependen de las fuerzas naturales que actúan en éste, por lo cual es inverosímil que la geometría que ha prestado tan buenos servicios a la escala humana sea también adecuada, con el grado de aproximación deseable, a la escala cósmica o a la escala molecular. Como un primer paso más allá de Euclides, Riemann propuso una familia de métricas que concuerdan óptimamente con la euclidiana cerca de cada punto. El uso que hizo Einstein de estas métricas de Riemann supone además la sustitución de la métrica espacial de Euclides y temporal de Newton, por la métrica combinada espacio-temporal de Minkowski: ésta es el límite con que las métricas de Einstein concuerdan óptimamente cerca de cada punto (del espacio-tiempo). La teoría de la gravitación de Einstein es una teoría geometrodinámica. Una partícula que se mueve bajo la sola influencia de la gravitación traza una geodésica (una línea de dirección constante) en el espacio-tiempo: su trayectoria cósmica depende de la pura geometría. Pero la geometría, por su parte, depende, como creía Riemann, de las fuerzas naturales: la métrica está determinada por la distribución de la materia. A primera vista, esta teoría no tiene nada que ver con la teoría de la gravitación de Newton y parece incomparable con ella. Sin embargo, a los pocos años de publicada la teoría de Einstein (1915, 1916), el matemático francés Élie Cartan (1923) propuso una formulación geometrodinámica de la teoría de Newton, lógicamente equivalente a la formulación original. La formulación de Cartan fue luego elaborada por Friedrichs (1927) y Havas (1964). En ella, como en la teoría de Einstein, una partícula material influida solamente por la gravitación, traza una geodésica en el espacio-tiempo, y la métrica que determina cuáles líneas son geodésicas depende de la distribución de la materia; pero, por cierto, la ley que rige esta dependencia equivale a la ley de gravitación de Newton. No puedo dar más detalles. Para una explicación más accesible que los trabajos originales, puede consultarse el artículo de Earman y Friedman (1972). El ejemplo tiene interés para nosotros porque concierne a un tipo de estructura matemática flexible, deliberadamente ideado por su inventor para facilitarle a los físicos el ajuste fino de sus teorías a la experiencia, y que, gracias a su misma flexibilidad, ha permitido verter una teoría física a términos que permiten compararla con su revolucionaria sucesora. La nueva versión es por cierto anacrónica, pero guarda con la original una correspondencia exacta —de una exactitud inimaginable, digamos, en una traducción de Homero— gracias a la precisión de los conceptos matemáticos de ambas.

Vemos así cómo la física matemático-experimental es capaz de sostener, a través de sus rupturas, la continuidad de su historia, porque los mismos factores que promueven y hacen posible las innovaciones que de cuando en cuando la trastornan tienden puentes y facilitan la comparación entre sus fases sucesivas. Con todo, la unidad de la tradición histórica de la física no implica que avance con "marcha segura" hacia una meta preestablecida, ni que sea imposible otra física, matemática y experimental como la nuestra pero incompatible y aun inconmensurable con ella. Para vindicar la posibilidad de una física alternativa no tengo que aducir la conocida tesis de Duhem y Quine, según la cual una provisión dada de información empírica puede acomodarse a infinitas teorías diferentes. A mí esta tesis me parece sumamente cuestionable, ya que no puedo siquiera decir que exista una provisión de datos aparte del modo de pensar que la articula. Pero los modos de pensar no salen armados de pies a cabeza del cerebro de Zeus, sino que se van formando en las contingencias de la historia. Una física alternativa puede crecer en otra galaxia o surgir de una desviación heterodoxa de la nuestra. Al cabo de algunas generaciones y varias vueltas del camino, dos tradiciones intelectuales pueden llegar a ser mutuamente incomprensibles aunque tengan un tronco común.

Que ésta no es una especulación ociosa, lo prueba el caso estudiado por James Cushing en su libro Mecánica cuántica: Contingencia histórica y la hegemonía de Copenhague (1994). Como es sabido, la evolución de un sistema cuántico (no-relativista) está gobernada por la ecuación de Schrödinger que, para un sistema formado por una sola partícula, puede escribirse así:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(\mathbf{x})\psi \tag{5}$$

donde $\hbar$ es la constante de Planck dividida por 2π, m es la masa de la partícula y V el potencial. Comúnmente se entiende que ψ es un vector en un espacio de Hilbert que encapsula información sobre la probabilidad de que tal o cual medición arroje tal o cual resultado. (Específicamente, si A es un observable con valores propios discretos y exclusivos de cada vector propio, la probabilidad de que una medición de A arroje el valor propio a es igual al cuadrado de la proyección de ψ sobre el vector propio de A correspondiente al valor propio a.) Esta interpretación se debe en último término a Max Born (1926a, 1926b), y ha sido adoptada por la gran mayoría de los físicos gracias a la influencia ejercida por Niels Bohr desde su instituto en Copenhague. Pero hay una interpretación diferente, propuesta por David Bohm (1952). Recordemos que la función compleja ψ puede siempre expresarse en términos de dos funciones reales R y S:

$$\psi = R \exp(iS/\hbar) \tag{6}$$

Entonces, en virtud de (4), R y S satisfacen las ecuaciones

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{2m}\,[R\nabla^2 S + 2\nabla R\cdot\nabla S] \tag{7}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \left[\frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}) - \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R}\right] \tag{8}$$

Si escribimos $P(\mathbf{x})$ por $R^2(\mathbf{x})$, (6) y (7) pueden escribirse así:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\cdot\left(P\frac{\nabla S}{m}\right) = 0 \tag{7'}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}) - \frac{\hbar^2}{4m}\left[\frac{\nabla^2 P}{P} - \frac{1}{2}\frac{(\nabla P)^2}{P^2}\right] = 0 \tag{8'}$$

Bohm señala que, en el límite $\hbar \to 0$, la ecuación (8′) se convierte en la clásica ecuación de Hamilton-Jacobi, con solución S. Si consideramos un *ensemble* de trayectorias de partículas que son soluciones de las ecuaciones del movimiento de la mecánica clásica e intersectan perpendicularmente a cualquier superficie en que S es constante, entonces, según un conocido teorema, dichas trayectorias son perpendiculares también a todas las superficies con S constante. Por lo tanto el gradiente de $S(\mathbf{x})$ representa el momento cinético $\mathbf{p(x)}$ de una partícula que pase por el punto $\mathbf{x}$. Dividiendo el momento por la masa m, tenemos que la velocidad de la partícula está dada por

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{p}(\mathbf{x})}{m} = \frac{\nabla S(\mathbf{x})}{m} \tag{9}$$

y que la ecuación (7′) puede escribirse así:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\cdot(P\mathbf{v}) = 0 \tag{7''}$$

Es lícito pues interpretar a P como la densidad de probabilidad del *ensemble*, cuya conservación expresa la ecuación (7″). ¿Qué ocurre si la constante de Planck es mayor que 0? Podemos seguir considerando a (8′) como la ecuación de Hamilton-Jacobi para un *ensemble* de partículas clásicas, a $\nabla S(\mathbf{x})/m$ como la velocidad de una partícula dada, y a (7″) como la ley de conservación de probabilidad, si suponemos que en cada punto $\mathbf{x}$ actúa, además del potencial clásico $V(\mathbf{x})$, un "potencial cuántico".

$$U(\mathbf{x}) = -\frac{\hbar^2}{4m}\left[\frac{\nabla^2 P}{P} - \frac{1}{2}\frac{(\nabla P)^2}{2P^2}\right] = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R} \tag{10}$$

Por cierto, para suponer que existe tal potencial cuántico, Bohm no tiene otra base empírica que las predicciones estadísticas, famosamente acertadas, de la mecánica cuántica, las cuales, en la interpretación de Copenhague, se explican sin él. Por esto, la mayoría de los físicos no se ha interesado por la interpretación de Bohm. En la medida en que la conocen, suelen descartarla como un intento, ideológicamente motivado, por mantener vivo el determinismo y una idea de la materia más propia del siglo XVII que del nuestro. Von Weizsäcker y Görnitz expresan bien este enfoque: la interpretación de Bohm sufre de "exceso de equipaje", pues observacionalmente es indiscernible de la interpretación de Copenhague y agrega "supuestos ontológicos que, dentro de lo que la teoría cuántica puede decirnos hoy, trascienden el dominio del conocimiento humano y no pueden probarse ni refutarse con nuestros medios" (1991, p. 320; citado por Cushing, 1994, p. 156). Pero cabe preguntarse qué hubiera sucedido si la interpretación de Bohm hubiera estado disponible desde 1927 y la de Copenhague no se le hubiera ocurrido a nadie hasta 1952[1]. ¿Acaso no habría sido repudiada por desmantelar innecesariamente una concepción de la materia y el movimiento coronada de triunfos y que la mecánica cuántica entendida *à la* Bohm permitía preservar en lo esencial? Sea de ello lo que fuere, lo que interesa destacar

1 La siguiente información histórica —que tomo de Cushing, 1994— permite darle un giro más concreto a esta pregunta especulativa: i) El enfoque general de Bohm había sido anticipado en los años 20 por Louis De Broglie (aunque Bohm no lo supo hasta después de 1952); ii) en el Congreso Solvay de 1927 De Broglie hizo frente a los prohombres de Copenhague, pero acabó plegándoseles —intimidado, parece, por una alegada refutación de Pauli— hasta la publicación de los trabajos de Bohm, un cuarto de siglo más tarde; iii) la ecuación (5) de Schrödinger fue traducida ya en 1926 por Madelung a las ecuaciones (7) y (8), pero la interpretación propuesta por él tropezó con dificultades que no supo resolver. Cushing nos hace ver que la interpretación de Bohm ha de parecer más viable hoy que en 1927 o aun que en 1952, desde que Bell (1966) exhibió *(a)* la petición de principio en el argumento de von Neumann (1932) contra las llamadas "variables ocultas" y estableció *(b)* el carácter ineludiblemente no-local de cualquier teoría que concuerde con las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica. La teoría de Bohm es, por cierto, no-local —por lo cual no fue recibida con simpatía con Einstein, a pesar de que preserva el realismo y el determinismo de la física clásica— y constituye una *realización* de eso mismo que von Neumann supuestamente había probado imposible.

aquí es la posibilidad de entender de dos maneras profundamente distintas el significado físico de un formalismo matemático aplicado con éxito a la experiencia. Recurriendo al controvertido término de Kuhn, me atrevería a decir que Bohm y Copenhague proponen *paradigmas* diferentes que inicialmente comparten una misma base de datos empíricos así como la estructura matemática con que la organizan. La adopción de uno u otro paradigma, aunque epistémicamente indiferente en un comienzo, encaminaría la evolución ulterior del pensamiento científico —en la elaboración de detalles, el diseño de experimentos, el planteamiento y la solución de problemas, la superación de dificultades— por sendas divergentes, que verosímilmente acabarían de separarse de forma irrevocable al cabo de unas pocas rupturas innovadoras.

REFERENCIAS

Bartelborth, T. (1988). *Eine logische Rekonstruktion der klassichen Elektrodynamik.* Frankfurt a.M.: Peter Lang.

Bell, J.S. (1966). "On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics". *Reviews of Modern Physics.* **38**: 447-452.

Bohm, D. (1952). "A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of 'hidden' variables, I and II". *Physical Review.* **85**: 166-179, 180-193.

Born, M. (1926a). "Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge". *Zeitschrift für Physik.* **37**: 863-867.

Born, M. (1926b). "Quantenmechanik der Stossvorgänge". *Zeitschrift für Physik.* **38**: 803-827.

Buchwald, J.Z., ed. (1995). *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics.* Chicago: University of Chicago Press.

Cartan, E. (1923). "Sur les varietés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée (première partie)". *Annales de l'École Normale Supérieure.* **40**: 325-412.

Cushing, J.T (1994). *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony.* Chicago: University of Chicago Press.

Davidson, D. (1974). "On the very idea of a conceptual scheme". *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Society.* **47**: 5-20.

Earman, J. y M. Friedman (1973). "The meaning and status of Newton's law of inertia and the nature of gravitational forces". *Philosophy of Science.* **40**: 329-359.

Einstein, A. (1905). "Zur Elektrodynamik bewegter Körper". *Annalen der Physik.* (4) **17**: 891-921.

Einstein, A. (1915). "Die Feldgleichungen der Gravitation". *K. Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, pp. 844-847.

Einstein, A. (1916). "Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie". *Annalen der Physik.* (4) **49**: 769-822.

Feyerabend, P.K. (PP). *Philosophical Papers.* Cambridge: Cambridge University Press. 1981. 2 vols.

Feyerabend, P.K. (1958). "An attempt at a realistic interpretation of experience". En P.K.

Feyerabend, PP, vol. 1, pp. 17-36. (Publicado originalmente en *Proceeding of the Aristotelean Society*. **58**: 143ff.)

Feyerabend, P.K. (1962). "Explanation, reduction and empiricism". En P.K. Feyerabend, PP, vol. 1, pp. 44-96. (Publicado originalmente en *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 3.)

Feynman, R.P., R.B. Leighton y M. Sands (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. Volume II. Reading, MA: Addison-Wesley.

Friedrichs, K. (1927). "Eine invariante Formulierung des Newtonschen Gravitationsgesetzes und des Grenzüberganges vom Einsteinschen zum Newtonschen Gesetz". *Mathematische Annalen*. **98**: 566-575.

Galison, P. (1995). "Context and constraints". En J.Z. Buchwald, 1995, pp. 13-41.

Giere, Ronald N. (1988). *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: University of Chicago Press.

Gutting, G., ed. (1980). *Paradigms and Revolutions: Aplications and Appraisals of Thomas Kuhn's Philosophy of Science*. Notre Dame, In: University of Notre Dame Press.

Hall, A.R. y M.B. Hall, eds. (1962). *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. A Selection from the Portsmouth Collection in the University Library, Cambridge. Cambridge: Cambridge University Press.

Hanson, N.R. (1958). *Patterns of Discovery*. Cambridge: Cambridge University Press.

Havas, P. (1964). "Four-dimensional formulations of Newtonian mechanics and their relation to the special and the general theory of relativity". *Reviews of Moderns Physics*. **36**: 938-965.

Kant, I. (1781). *Critik der reinen Vernunft*. Riga: Johann Friedrich Hartknoch.

Kant, I. (1787). *Critik der reinen Vernunft*. Zweyte hin und wieder verbesserte Auflage. Riga: Johann Friedrich Hartknoch.

Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.

Laudan, R. (1980). "The recent revolution in biology and Kuhn's theory of scientific change". En G. Gutting, 1980, pp. 284-296.

Madelung, E. (1926). "Quantentheorie in hydrodynamischer Form". *Zeitschrift für Physik*. **40**: 322-326.

Moulines, C. U. (1975). "A logical reconstruction of simple equilibrium thermodynamics". *Erkenntnis*. **9**: 101-130.

Putnam, H. (PP). *Philosophical Papers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1975-83. 3 vols.

Putnam, H. (1970). "Is semantics possible?". En H. Putnam, PP. Vol. 2, pp. 139-152. (Publicado originalmente en H. Kiefer and M. Munitz, eds. *Language, Belief and Metaphysics*, Albany: State University of New York Press).

Putnam, H. (1973). "Explanation and reference". En H. Putnam, PP. Vol. 2, pp. 196-214. (Publicado originalmente en Pearce and Maynard, *Conceptual Change*, Dordrecht: D. Reidel, 1973, pp.199-221).

Putnam, H. (1975). "The meaning of 'meaning'". En H. Putnam, PP. Vol. 2, pp. 215-271. (Publicado originalmente en *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 7).

Riemann, B. (1854). "Uber die Hypothesen, welche der Geometrie zugrunde liegen". *Göttinger Abhandlungen*. **13**: 133-152 (1867).
Shapere, D. (1964). "The structure of scientific revolutions". *Philosophical Review*. **73**: 382-394.
Shapere, D. (1966). "Meaning and scientific change". En R. Colodný, ed., *Mind and Cosmos*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 41-85.
von Neumann, J. (1932). Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin: Springer.
von Weizsäcker, C. F. y T. Görnitz (1991). "Quantum-realistic interpretation". *Foundations of Physics*. **21**: 311-321.