Simetría y ruptura de la simetría

Katherine Brading y Elena Castellani
Modo de citar:
Brading, Katherine y Castellani, Elena. 2017. "Simetría y ruptura de la simetría". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck.
URL=https://dia.austral.edu.ar/Simetría_y_ruptura_de_la_simetría

Versión española de Symmetry and Symmetry Breaking, de la Stanford Encyclopedia of Philosophy.

Traducción: Leonardo Vanni

Publicado por primera vez el jueves 24 de julio de 2004; revisión substancial el martes 22 de enero de 2013

Diversas consideraciones sobre la simetría predominan en la física fundamental moderna, tanto en la teoría cuántica como en la relatividad. Los filósofos han comenzado a prestarle más atención a cuestiones tales como el significado de la simetría de gauge, la identidad de las partículas cuánticas según las permutaciones de simetría, la comprensión de la violación de la paridad, el rol de la ruptura de simetría, el estado empírico de los principios de la simetría, entre otros. Estos temas se relacionan directamente con problemas tradicionales de la filosofía de la ciencia, que incluyen el estatus de las leyes de la naturaleza, las relaciones entre la matemática, la teoría física y el mundo, y hasta qué punto la matemática sugiere una nueva física.

Esta entrada comienza con una breve descripción de las raíces históricas y el surgimiento del concepto de simetría que está actualmente vigente en la ciencia. La comprensión de la violación de la paridad: los principios de simetría y los argumentos de simetría. Se analizan las diferentes variedades de simetrías físicas, y se explica la forma en la que fueron introducidas en la física. Luego, se aleja de las diferentes nociones de simetrías para realizar algunas observaciones generales acerca del estatus y la relevancia de las simetrías en la física.

1 El concepto de simetría ↑

El término “simetría” proviene de las palabras griegas *sun* (“con” o “junto”) y *metron* (“medida”), que dan como resultado *summetria*, y originalmente indicaba una relación de conmensurabilidad (tal es el significado explicado en *Los elementos* de Euclides, por ejemplo). Este término adoptó rápidamente un significado más general: una relación o proporción basada en números (enteros) y con la función de combinar y armonizar los *diferentes* elementos en un *todo unitario*. Desde un principio, la palabra simetría estuvo relacionada a la armonía, la belleza y la unidad, y esto sería de suma importancia para su rol en las teorías de la naturaleza. En el *Timeo* de Platón, por ejemplo, a los poliedros regulares se les otorga un lugar central en la doctrina de los elementos naturales por las proporciones que ellos contienen y por la belleza de sus formas: el fuego tiene la forma del tetraedro regular, la tierra la forma de un cubo, el aire la forma de un octaedro regular, el agua la forma de un icosaedro regular, mientras que la forma del dodecaedro es utilizada para describir la forma de todo el universo. La historia de la ciencia provee otro ejemplo paradigmático del uso de esas figuras como ingredientes básicos en las descripciones físicas: en *Mysterium Cosmographicum* de Kepler, se presenta una arquitectura planetaria basada en esos cinco sólidos regulares.

Desde una perspectiva moderna, las figuras regulares utilizadas en la física de Platón y Kepler debido a las proporciones matemáticas y armonías que ellas contienen, (y las propiedades y belleza relacionadas de su forma) son simétricas en un sentido distinto que no se asemeja con las proporciones. En el lenguaje de la ciencia moderna, la simetría de las figuras geométricas –como por ejemplo los polígonos y los poliedros regulares– se define en términos de su invariancia en grupos específicos de rotaciones y reflexiones. ¿De dónde proviene esta definición? A partir de la antigua noción de simetría utilizada por los griegos y romanos (vigente hasta fines del Renacimiento), una noción diferente de simetría surgió en el siglo diecisiete, basada no en proporciones sino en una relación de igualdad entre elementos que son opuestos, tales como las partes derecha e izquierda de una figura. En forma concluyente, son intercambiables con respecto a la totalidad, es decir, estas pueden intercambiarse unas con otras mientras se preserve la figura original. Esta última noción de simetría se desarrolló en diferentes etapas hasta llegar al concepto que hoy encontramos en la ciencia moderna. Una etapa crucial fue la introducción de operaciones matemáticas específicas, tales como reflexiones, rotaciones y traslaciones, las cuales son utilizadas para describir con precisión cómo las partes deben ser intercambiadas. Como resultado, llegamos a la definición de simetría de una figura geométrica en términos de su *invariancia* cuando ciertas partes componentes iguales son intercambiadas acorde a una de las operaciones especificadas. Por consiguiente, cuando dos mitades de una figura bilateralmente simétrica son intercambiadas por reflexión, recobramos la figura original. En ese caso la figura se dice que es invariante bajo reflexiones derecha-izquierda. Esto se conoce como la "noción de simetría cristalográfica", debido a que fue en el contexto de los primeros desarrollos de la cristalografía que la noción de simetría fue definida y aplicada [1]. El siguiente paso clave fue la generalización de esta noción hacia la definición de simetría de grupos, la cual surgió, en el siglo diecinueve, a partir del desarrollo de concepto algebraico de un grupo, y a partir del hecho de que se encontró que las operaciones de simetrías de una figura satisfacen las condiciones para formar un grupo[2]. Por ejemplo, la simetría de reflexión posee ahora una definición precisa en términos de invariancia bajo el grupo de reflexiones. Finalmente, nos encontramos con una estrecha conexión resultante entre las nociones de simetría, equivalencia y grupo: un grupo de simetría sugiere una partición en clases de equivalencia. Los elementos que son intercambiados unos con otros por transformaciones de simetría de la figura (o lo que sea la "totalidad" considerada) son conectados por una *relación de equivalencia*, y por ende componen una clase de equivalencia[3].

La noción de simetría según la teoría de grupo es la que ha resultado ser tan exitosa en la ciencia moderna.

Cabe notar, sin embargo, que la simetría permanece ligada a la belleza (regularidad) y a la unidad: por medio de transformaciones de simetría, distintos (pero "iguales", o en forma más general "equivalentes") elementos se relacionan unos con otros y con la totalidad, formando de este modo una "unidad regular", la que ha resultado ser tan exitosa en la ciencia moderna. En síntesis, *una unidad de elementos diferentes e iguales* siempre se asocia con la noción de simetría, en su significado antiguo y moderno. La manera en la cual se llega a esa unidad, por un lado, y cómo los elementos diferentes e iguales son elegidos, por el otro, determina la simetría resultante y en qué esta simetría consiste exactamente.

La definición de simetría como "invariancia bajo una transformación específica de grupo" permitió aplicar el concepto mucho más ampliamente, no sólo a figuras espaciales sino también a objetos abstractos tales como expresiones matemáticas –en particular, expresiones de relevancia física tales como ecuaciones dinámicas. Más aun, el aparato técnico de la teoría de grupo puede entonces transferirse e utilizarse de manera muy conveniente dentro de las teorías físicas[4].

Al considerar el rol de la simetría en la física desde un punto de vista histórico, es útil tener en cuenta dos distinciones preliminares.

- La primera distinción es entre los usos implícitos y explícitos de la noción de simetría. Las consideraciones sobre la simetría han sido siempre aplicadas a descripciones de la naturaleza, pero durante mucho tiempo de manera implícita solamente. Como hemos visto, la noción científica de simetría (la que nos interesa aquí) es una noción más reciente. Si hablamos sobre algún rol de esta noción de simetría en las antiguas teorías de la naturaleza, tenemos que tener claro que dicha noción no se utilizó de forma explícita en este sentido como se utiliza actualmente.
- La segunda distinción es entre las dos formas principales de utilizar la noción de simetría. En primer lugar, podemos atribuir propiedades específicas de simetría a fenómenos o a leyes (*principios de simetría*). Es la aplicación con respecto a las leyes, más que a los objetos o los fenómenos, la que se ha convertido en fundamental para la física moderna, como veremos más adelante. En segundo lugar, podemos derivar consecuencias específicas con respecto a situaciones o fenómenos físicos particulares sobre la base de sus propiedades de simetría (*argumentos de simetría*).

2 Principios de simetría ↑

El primer estudio explícito de las propiedades de invariancia de las ecuaciones en la física está vinculado con la introducción, en la primera mitad del siglo diecinueve, del enfoque transformacional al problema del movimiento en el marco de la mecánica analítica. Al utilizar la formulación de las ecuaciones dinámicas de la mecánica de W.R. Hamilton (conocida como la formulación hamiltoniana o canónica), C.G. Jacobi desarrolló un procedimiento para llegar a la solución de las ecuaciones de movimiento basado en la estrategia de aplicar transformaciones de las variables que dejan las ecuaciones de Hamilton invariantes, y de este modo transformando paso a paso el problema original en otros nuevos que son más sencillos pero perfectamente equivalentes (para más detalles, ver Lanczos 1949)[5]. La teoría de transformación canónica de Jacobi, aunque introducida con el propósito “meramente instrumental” de resolver problemas dinámicos, condujo a una línea de investigación trascendente: el estudio general de las teorías físicas en términos de sus propiedades de transformación. Algunos ejemplos para mencionar son los estudios sobre las cantidades invariantes bajo transformaciones canónicas, como es el paréntesis de Poisson, o los invariantes integrales de Poincaré; la teoría de transformaciones canónicas continuas desarrollada por S. Lie; y, por último, el estudio de la conexión entre los invariantes físicos y la teoría geométrica de invariantes, que surgió en la segunda mitad del siglo diecinueve y sentó las bases para el enfoque geométrico de los problemas dinámicos. El uso de la matemática de la teoría de grupos para estudiar las teorías físicas fue central en los trabajos, a principios del siglo veinte en Göttingen, del grupo liderado por F. Klein (que anteriormente colaboró con Lie) y D. Hilbert, y que también contaba con H. Weyl y posteriormente con E. Noether. Retornaremos más adelante en esta sección a Weyl (ver las secciones 2.1.2, 2.2, 2.5) y Noether (ver Sección 2.1.2). Para más detalles ver Brading Castellani (2007).

En el enfoque anterior, las ecuaciones de interés físico están ya dadas, y la estrategia es estudiar sus propiedades de simetría. Existe, sin embargo, una forma alternativa de procedimiento, básicamente la inversa: comenzar con simetrías específicas y de ahí buscar las ecuaciones dinámicas que posean esas propiedades. En otras palabras, *postula* que ciertas simetrías son físicamente significativas, en lugar de derivarlas desde las ecuaciones dinámicas. La suposición de la existencia de ciertas simetrías en la naturaleza no es, por supuesto, una novedad. Aunque no se expresen explícitamente como principios de simetría, la homogeneidad e isotropía del espacio físico, y la uniformidad de tiempo (que forman junto a la invariancia bajo transformaciones de Galileo, “los principios más antiguos de invariancia” –ver Wigner 1967, 4-5[6]) se han asumido como prerrequisitos en la descripción física del mundo desde el comienzo de la ciencia moderna. Posiblemente el primer y más famoso ejemplo del uso deliberado de este tipo de principio de simetría es la discusión de Galileo sobre el movimiento de la Tierra su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* de 1632. Galileo trató de refutar los argumentos que pretendían mostrar que con sólo mirar a nuestro alrededor cómo se comportan las cosas en la Tierra –cómo caen las piedras, cómo vuelan los pájaros– podemos concluir que la Tierra está en reposo y no en rotación, argumentando que esas observaciones no nos permiten determinar el estado de movimiento de la Tierra. Su enfoque utilizaba una analogía con un barco: nos invita a observar el comportamiento de los objetos, animados e inanimados, dentro de la cabina de un barco, y sostiene que no hay experimentos llevados a cabo dentro de la cabina sin referencia alguna a cualquier cosa fuera del barco, que nos permitiría decir si el barco está en reposo o en movimiento. La *suposición* de una simetría entre el reposo y un cierto tipo de movimiento conduce a la predicción de este resultado sin la necesidad de conocer los detalles de las leyes que gobiernan los experimentos a bordo del barco. El “principio de relatividad de Galileo” (según el cual las leyes de la física son invariantes bajo transformaciones de Galileo, en donde los estados de movimiento considerados son aquellos con velocidad uniforme) fue rápidamente adoptado como un axioma y ampliamente utilizado en el siglo diecisiete, en particular por Huygens en su solución al problema de los cuerpos en colisión, y por Newton en sus primeros trabajos sobre el movimiento. Huygens tomó el principio de relatividad como su tercera hipótesis o axioma, pero en los *Principios* de Newton ésta se redujo a un corolario a las leyes de movimiento, y su estatus en la física newtoniana a una consecuencia de las leyes, si bien, no obstante continúa siendo un supuesto independiente.

Aunque la invariancia espacial y temporal de las leyes de la mecánica fue conocida y utilizada durante mucho tiempo en la física, y el grupo de las simetrías espacio-temporales globales para la electrodinámica fue derivado por H. Poincaré[7] antes del famoso artículo de Einstein sobre su teoría especial de la relatividad (1905), no fue antes de este estudio de Einstein que el estatus de las simetrías con respecto a las leyes se revirtió. E. P. Wigner (1967, 5) escribe que “el significado y validez general de estos principios fueron reconocidos sólo por Einstein”, y que el trabajo de Einstein sobre la relatividad especial señala “la reversión de una tendencia: hasta entonces, los principios de invariancia se derivaron de las leyes del movimiento ... ahora es natural para nosotros derivar las leyes de la naturaleza y poner a prueba su validez por medio de las leyes de invariancia, en lugar de derivar las leyes de la invariancia de lo que creemos que son las leyes de la naturaleza". Al postular la universalidad de simetrías continuas y globales del espacio-tiempo, la construcción de la Teoría especial de la relatividad de Einstein representa el primer punto de inflexión en la aplicación de la simetría de la física del siglo veinte[8].

2.1 Relatividad ↑

2.1.1 Teoría especial de la relatividad ↑

La Teoría especial de la relatividad (TER) de Einstein se construyó sobre la base de dos postulados fundamentales. Uno de ellos es el postulado de la luz (que sostiene que la velocidad de la luz, en "reposo", es independiente de la velocidad de la fuente), y el otro postulado es el principio de la relatividad. El último fue adoptado por Einstein explícitamente como un medio para restringir la forma de las leyes, cualquiera pueda ser su estructura detallada. Por lo tanto, tenemos la diferencia entre una teoría "constructiva" y una teoría de "principios": en el primer caso construimos nuestra teoría sobre la base de los hechos conocidos acerca de la constitución y el comportamiento de los cuerpos materiales; en el segundo caso, por el contrario, se comienza por la restricción de la posible forma de esa teoría mediante la adopción de ciertos principios[9].

El principio de la relatividad adoptado por Einstein (1905, 395 de la traducción del inglés) se limita a afirmar que:

"Las leyes por las cuales los estados de los sistemas físicos experimentan ciertos cambios son independientes de si tales cambios se refieren a uno u otro sistema de coordenadas que se mueven relativamente uno hacia otro con un movimiento de traslación uniforme."

Este principio, cuando se combina con el postulado sobre la luz (con algunos otros supuestos), conduce a las transformaciones de Lorentz, que son las transformaciones entre sistemas de coordenadas que se mueven uniformemente unos con respecto a otros según la TER. Según TER, las leyes de la física son invariantes bajo transformaciones de Lorentz, de hecho lo son bajo transformaciones más generales del grupo de Poincaré. Estas transformaciones se diferencian de las transformaciones de Galileo de la mecánica newtoniana. H. Minkowski reformuló la TER, al demostrar que el espacio y el tiempo son parte de una única geometría de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo de Minkowski. De esta manera, el grupo de transformaciones de simetría de Poincaré es parte de la estructura del espacio-tiempo en la TER, y por esta razón estas simetrías han sido nombradas como "simetrías geométricas" por Wigner (1967, específicamente pp. 15 y 17-19).

Existe un debate en la literatura con respecto a cómo deberían entenderse el principio de relatividad y en un sentido más general las simetrías del espacio-tiempo globales. Según una postura, la importancia de las simetrías del espacio-tiempo es capturada teniendo en cuenta la estructura de una teoría a través de ciertas transformaciones en sus modelos, modelos que consisten en variedades diferenciables dotadas de diversos objetos geométricos con ciertas relaciones (ver Anderson 1967, y Norton 1989). De acuerdo con Brown y Sypel (1995) y Budden (1997), este enfoque no toma en cuenta la importancia fundamental de los subsistemas aislados, pues la importancia empírica de las simetrías descansa sobre la posibilidad de transformar tales subsistemas (en lugar de aplicar la transformación a la totalidad del universo). Para avances en este debate que incluyen las aplicaciones de simetrías locales y teorías de gauge, ver Kosso (2000), Brading y Brown (2004), Healey (2007), Healey (2009), Greaves y Wallace a continuación.

Se pretende que los principios de invariancia global del espacio-tiempo sean válidos para todas las leyes de la naturaleza, para todos los procesos que se desarrollan en el espacio-tiempo. Este carácter universal no es compartido por las simetrías físicas que fueron posteriormente introducidas en la física. La mayoría de ellas pertenecían a una categoría totalmente nueva, sin raíces en la historia de la ciencia, y en algunos casos expresamente introducidas para describir formas específicas de interacción –de ahí el nombre de "simetrías dinámicas", nombre provisto por Wigner (1967, ver especialmente pp.15, 17-18, 22-27, 33).

2.1.2 La teoría general de la relatividad ↑

La Teoría general de la relatividad (TGR) de Einstein también se construyó utilizando como elemento primordial un principio de simetría: el principio de covariancia general. Se ha hablado extensamente sobre la importancia y la función del principio de covariancia general en TGR, incluso el mismo Einstein ha hecho lo propio[10]. Durante mucho tiempo Einstein consideró este principio como una extensión del principio de la relatividad que se encuentra tanto en la mecánica clásica como en la TGR, opinión que sigue provocando un intenso debate[11]. Lo que está claro es que el simple requerimiento de covariancia general de una teoría no representa restricción alguna con respecto a la forma de la teoría; se deben agregar especificaciones adicionales, tales como el requisito de que no existan "objetos absolutos" (esto constituye en sí una noción problemática). Una vez que se incluyen algunas de las especificaciones adicionales, el principio de covariancia general se convierte en una herramienta poderosa. Para una revisión y análisis reciente de este debate, ver Pitts (2006).

En manos de Einstein el principio de covariancia general fue un postulado fundamental en el desarrollo de la teoría general de la relatividad[12]. La libertad de *difeomorfismo* en la TGR, es decir, la invariancia de la forma de las leyes bajo las transformaciones de las coordenadas que dependen de funciones arbitrarias del espacio y tiempo, constituye una simetría del espacio-tiempo "local", en contraste con las simetrías del espacio-tiempo "globales" (que dependen, por el contrario, de parámetros constantes). Estas simetrías locales son simetrías "dinámicas" en el sentido dado por Wigner, ya que describen una interacción particular, en este caso la gravedad. Como es bien sabido, la métrica del espacio-tiempo en la TGR ya no es un campo de "fondo" o un "objeto absoluto", sino que es un actor dinámico, donde el campo gravitacional se manifiesta como una curvatura del espacio-tiempo.

La extensión del concepto de simetrías continuas de simetrías "globales" (tal como el grupo de Galileo de las transformaciones del espacio-tiempo) a simetrías "locales" es uno de los avances más importantes en el concepto de simetría en la física que tuvo lugar en el siglo veinte. Impulsada por la TGR, la "teoría unificada de la gravitación y el electromagnetismo" de Weyl (1918) amplió la idea de simetrías locales (ver Ryckman 2003, y Martin 2003), y aunque esta teoría en general se considera fallida, esta contiene las semillas de un éxito posterior en el contexto de la mecánica cuántica (ver más adelante, sección 2.5).

Mientras tanto, Hilbert y Klein emprendieron investigaciones detalladas relativas a la función de covariancia general de las teorías de la gravitación, e incorporaron la colaboración de Noether en su debate sobre el estatus de la conservación de la energía en tales teorías. Esto nos condujo al famoso trabajo de Noether de 1918 en el que demuestra dos teoremas. El primer teorema conduce a una conexión entre las simetrías globales y las leyes de conservación, y el segundo conduce a una serie de resultados asociado con simetrías locales, que incluyen una demostración de los diferentes roles de las leyes de conservación cuando el grupo de simetría global es un subgrupo de algún grupo de simetría local de la teoría en cuestión (ver Brading y Brown 2003).

2.2 Simetría y mecánica cuántica ↑

La aplicación de la teoría de grupos y sus representaciones para la explotación de simetrías en la mecánica cuántica en la década de los años veinte representa, sin duda, el segundo punto de inflexión en la historia de los estudios de simetrías físicas del siglo veinte. En realidad, es en el contexto cuántico donde los principios de simetría son más efectivos. Wigner y Weyl fueron unos de los primeros en reconocer la enorme importancia que los grupos de simetría revisten para la física cuántica y los primeros en reflexionar sobre su significado. Como Wigner recalcó varias veces, una de las razones esenciales para "la eficacia de los principios de invariancia en la teoría cuántica" (Wigner 1967, 47) es la naturaleza lineal del espacio de estados de un sistema cuántico, que se corresponde con la posibilidad de la superposición de los estados cuánticos. Esto da lugar, entre otras cosas, a la posibilidad de definir estados con propiedades de transformación particularmente simples en presencia de simetrías.

En general, si G es un grupo de simetría de una teoría que describe un sistema físico (es decir, las ecuaciones dinámicas de la teoría son invariantes bajo las transformaciones de G), esto significa que los estados del sistema se transforman unos en otros de acuerdo con alguna "representación" del grupo G. En otras palabras, las transformaciones de grupo son matemáticamente representadas en el espacio de estados por operaciones entre los estados. En la mecánica cuántica, estas operaciones se implementan a través de los operadores que actúan en el espacio de estados y corresponden a observables físicos, y cualquier estado de un sistema físico puede ser descripto como una superposición de estados de sistemas elementales, es decir, de sistemas de estados de los cuales deriva según las representaciones "irreductibles" del grupo de simetría. De este modo, la mecánica cuántica ofrece un marco particularmente favorable para la aplicación de los principios de simetría. Los observables que representan la acción de las simetrías de la teoría en el espacio de estados, y que, por ende, conmutan con el hamiltoniano del sistema, desempeñan el papel de las cantidades conservadas. Además, los espectros de los invariantes de un grupo de simetría proporcionan etiquetas para clasificar las representaciones irreducibles de dicho grupo, hecho que se basa en la posibilidad de asociar los valores de las propiedades invariantes que caracterizan a los sistemas físicos, con las etiquetas de las representaciones irreducibles de los grupos de simetría, es decir, de clasificar los sistemas físicos elementales mediante el estudio de las representaciones irreducibles.

2.3 Simetría de permutaciones ↑

La primera simetría no espacio temporal introducida en física y también la primera en ser tratada con las técnicas de la teoría de grupos en el contexto de la mecánica cuántica, fue la *simetría de permutaciones* (o invariancia bajo las transformaciones del grupo de permutaciones). Esta simetría fue "descubierta" por W. Heisenberg en 1926 en relación con la indistinguibilidad de los electrones de un sistema atómico[13], la cual es una simetría *discreta* (es decir, basada en grupos con un conjunto discreto de elementos). Dicha simetría se halla en el núcleo de las llamadas estadísticas cuánticas (la estadística de Bose-Einstein y de Fermi-Dirac), las cuales rigen el comportamiento estadístico de ensambles de determinados tipos de partículas cuánticas indistinguibles (por ejemplo, bosones y fermiones). La simetría de permutaciones establece que si un ensamble es invariante bajo permutaciones de sus partículas constitutivas, entonces no se tomarán en cuenta aquellas permutaciones que solamente intercambian partículas indistinguibles, es decir, que el estado con las partículas intercambiadas se identifica con el estado original. (Ver French y Rickles 2003, Sección 1).

Filosóficamente, la simetría de permutaciones ha dado lugar a dos clases importantes de preguntas. Por un lado, vista como una condición de indistinguibilidad física de partículas idénticas (es decir, partículas del mismo tipo en el mismo sistema atómico), esta simetría ha motivado un intenso debate sobre el significado de las nociones de identidad, individualidad e indistinguibilidad en el dominio cuántico. ¿Las partículas cuánticas no son individuos? ¿La existencia de entidades que son físicamente indistinguibles aunque "numéricamente distintas" (el llamado problema de partículas idénticas) implica que el principio de identidad de los indiscernibles del Leibniz es violado en la física cuántica? Por otra parte, ¿cuál es el status teórico y empírico de este principio de simetría? ¿Debería considerarse este principio como un axioma de la mecánica cuántica, o debe pensarse como justificado empíricamente? Actualmente esto es utilizado para explicar la naturaleza de la estadísticas cuánticas: fermiónicas y bosónicas, pero ¿por qué parece que existen sólo bosones y fermiones en el mundo cuando el grupo de permutaciones permite la posibilidad de la existencia de otras clases más generales? French y Rickles (2003) ofrecen una perspectiva general de lo mencionado anteriormente como también de temas relacionados, y podemos encontrar un nuevo giro en el tema en Saunders (2006). Saunders discute la simetría de permutaciones en la física clásica, y argumenta a favor de las partículas clásicas indistinguibles que obedecen a la estadística clásica. Sostiene que las diferencias entre la estadística cuántica y clásica, para ciertas clases de partículas, por ende no pueden explicarse únicamente en términos de indistinguibilidad. Para una discusión y referencias más detalladas ver Frenchy Krause (2006), Ladyman y Bigaj (2010), Caulton y Butterfield (2012) y la voz relacionada "Identidad e individualidad en la teoría cuántica" en la SEP.

2.4 C, P, T ↑

Debido a propiedades específicas de las descripciones cuánticas, las simetrías discretas de reflexión espacial o *paridad* (*P*) y de *inversión temporal* (*T*), fueron "redescubiertas" en el contexto cuántico, adoptando un nuevo significado. La paridad fue introducida en la física cuántica en 1927 en un artículo de Wigner, donde por primera vez se explicaban resultados espectroscópicos sobre la base de un tratamiento teórico del grupo de simetrías de permutaciones, rotaciones y reflexiones. La invariancia ante la inversión temporal, surgió una vez más en el contexto cuántico por obra de Wigner, en un artículo de 1932[14]. A todo esto se le sumó la nueva simetría de partícula-antipartícula o de *conjugación de carga* (*C*). La conjugación de carga fue introducida en 1931 por Dirac en su famoso artículo "Quantized singularities in the electromagnetic field".

Las leyes que rigen la gravedad, el electromagnetismo y la interacción fuerte son invariantes con respecto a *C*, *P* y *T* en forma independiente. Sin embargo, en 1956 T. D. Lee y C. N. Yang señalaron que en la desintegración beta, regida por la interacción débil, aún no se habían realizado pruebas de invariancia bajo *P*. Poco después, C. S. Wu y sus colegas realizaron un experimento que demuestra que la interacción débil viola la paridad. Sin embargo, la desintegración beta respeta la combinación de *C* y *P* como una simetría. Las simetrías discretas *C*, *P* y *T* están conectadas por el llamado teorema *CPT*, demostrado por Lüders en 1952, el cual establece que la combinación de *C*, *P* y *T* es una simetría general de las leyes físicas. Para una discusión de la simetría y la antimateria, ver Wallace (2009) y, desde el punto de vista algebraico, Baker y Halvorson (2010). Para una base conceptual del teorema CPT, ver Greaves (2010).

La existencia de la violación de la paridad en nuestras leyes fundamentales ha dado lugar a un nuevo capítulo en un viejo debate filosófico en referencia a objetos quirales (o "izquierdos") y la naturaleza del espacio. Una descripción de una "mano izquierda" y otra de una "mano derecha" no diferirán una de otra, siempre y cuando no se haga referencia a algo más allá de la mano correspondiente. Sin embargo, la mano izquierda sí se diferencia de la mano derecha –un guante izquierdo no es adecuado para una mano derecha. Durante un breve período, Kant vio en esto una razón para preferir una perspectiva sustantivista del espacio, en lugar de una relacionista, tomando en consideración que la diferencia entre las manos derecha e izquierda se evidenciaba en su relación con el espacio absoluto.

Independientemente de si esta solución sustantivista tiene éxito, aún permanece el reto de la visión relacionalista para dar cuenta de la diferencia entre lo que Kant denomina "homólogos incongruentes" –objetos que son imagen especular uno del otro y que sin embargo no se pueden hacer coincidir con ningún movimiento rígido. El relacionalista puede responder negando que exista alguna diferencia *intrínseca* entre una mano izquierda y una mano derecha, y que la incongruencia ha de considerarse en términos de las relaciones entre las dos manos (si un universo hubiera sido creado con una sola mano en él, esta no sería ni izquierda ni derecha, pero una segunda mano que se creara sería congruente o incongruente con la primera). Esta respuesta se vuelve problemática de cara a la violación de paridad, donde un posible resultado experimental es mucho más probable que su imagen especular. Puesto que los dos posibles resultados no difieren intrínsecamente, ¿cómo deberíamos representar la diferencia en su probabilidad? Este problema sigue siendo discutido en el contexto del debate entre sustantivismo y relacionismo. Para más detalles, ver Pooley (2003) y Saunders (2007).

2.5 Simetrías de Gauge ↑

El punto de partida para la idea de *simetrías internas continuas* fue la interpretación de la presencia de partículas con (aproximadamente) el mismo valor de masa como los componentes (*estados*) de un sistema físico único, conectados entre sí por las transformaciones de un grupo de simetría subyacente. Esta idea surgió por analogía con lo que ocurrió en el caso de la simetría de permutación, y de hecho fue debido a Heisenberg (el descubridor de las simetrías de permutación), que en un artículo de 1932 introdujo la simetría SU(2) y así relacionar el protón con el neutrón (interpretando a éstos como los dos estados de un mismo sistema). Esta simetría fue estudiada con mayor profundidad por Wigner, quien en 1937 introdujo el término *spin isotópico* (más tarde denominado *isospín*). Las diversas simetrías internas son invariantes bajo transformaciones de fase de los estados cuánticos y se describen en términos de grupos unitarios SU(N). El término "gauge" se utiliza a veces para todas las simetrías internas continuas, pero otras veces es reservado para las versiones locales (constituyendo las mismas el núcleo del Modelo Estándar de las partículas elementales[15]).

La fase de la función de onda codifica grados de libertad internos. Con el requisito de que una teoría sea invariante bajo *transformaciones de gauge locales* que incluyen la fase de la función de onda, las ideas de Weyl de 1918 encontraron un campo exitoso en la teoría cuántica (ver O'Raifeartaigh 1997). La nueva teoría de Weyl era una teoría del electromagnetismo acoplado a la materia. La historia de esta teoría fue examinada por Martin (2003), quien pone de relieve diversas cuestiones relacionadas con el llamado "principio de gauge", propuesto por primera vez por Weyl. Los principales pasos en el desarrollo de la teoría de gauge son las teorías de gauge no abelianas de Yang y Millsen de 1954 y los problemas relacionados con el desarrollo de las teorías de gauge de corto alcance para interacciones débiles y fuertes.

Las principales cuestiones filosóficas planteadas por la teoría de gauge dependen –todas ellas– de cómo deberíamos entender la relación entre las matemáticas y la física. Existen dos grandes categorías de discusión. La primera se refiere al principio de gauge, ya mencionado; la cuestión aquí es de qué manera el escribir nuestras teorías en forma localmente simétrica nos permite derivar una nueva física. El análisis implica elaborar un listado de las premisas que componen el principio de gauge, examinar el estatus de estas premisas y qué motivación se les podría adjudicar, determinar con precisión qué podemos obtener basándonos en estas premisas, y qué más es necesario añadir para llegar a una teoría física exitosa. Para más detalles ver, por ejemplo, Teller (2000) y Martin (2003). La segunda categoría se refiere a la cuestión de qué cantidades en una teoría de gauge representan las propiedades físicas "reales". Esta cuestión se plantea con intensidad en las teorías de gauge, debido a la aparente falta de determinismo. El problema se encontró por primera vez en la TGR (que, en este sentido, es una teoría de gauge). Y para profundizar sobre el tema, el mejor lugar para comenzar es en relación con la literatura relacionada con el "argumento del agujero" de Einstein (ver Earman y Norton 1987; Earman 1989, capítulo 9, y, más recientemente, Norton 1993; Rynasiewicz 1999; Saunders 2002). En la práctica, encontramos que sólo cantidades invariante de gauge son observables, y esto parece ser una solución para nosotros. Sin embargo, este no es el final de la historia. El otro ejemplo canónico es el efecto Aharanov-Bohm, y podemos utilizar esto para ilustrar el problema de interpretación que se asocia con las teorías de gauge, a veces descrito como un dilema: el fracaso del determinismo o la acción a distancia (ver Healey 2001). La restauración del determinismo depende únicamente de cantidades invariantes de gauge consideradas como la representación de cantidades "físicamente reales". Sin embargo la aceptación de esta solución nos deja aparentemente con alguna forma de no-localidad entre causas y efectos. Más aún, nos enfrentamos a la cuestión de cómo entender el papel de las cantidades no invariantes de gauge que aparecen en la teoría, y el problema de cómo interpretar lo que M. Redhead denomina "estructura excedente" (ver Redhead 2003). Para más detalles ver por ejemplo Belot (1998) y Nounou (2003), y las referencias allí citadas; para una aproximación a estas preguntas utilizando la teoría de los sistemas hamiltonianos ligados, consultar Earman (2003b) y Castellani (2003, sección 4). Para una caracterización intuitiva de las simetrías de gauge, una descripción que es más general que las formulaciones lagrangiana y hamiltoniana, ver Belot (2008). La interpretación adecuada de las teorías de gauge es un tema abierto en la filosofía de la física. Healey (2007) discute los fundamentos conceptuales de las teorías de gauge, argumentando a favor de una interpretación *holonómica* no separable de las teorías clásicas de gauge de Yang-Mills sobre interacciones fundamentales. Catren (2008) aborda las implicaciones ontológicas de la teoría de Yang-Mills mediante el formalismo de haz de fibras. Podemos encontrar referencias útiles en el simposio de revisión sobre Healey en Metascience (2007) (Rickles, Smeenk, Lira y Healey 2009), y en la "Sinopsis y Discusión" del taller "Filosofía de la teoría gauge", en el Centro para la Filosofía de la Ciencia de la Universidad de Pittsburgh, 18-19 de abril de 2009.

3 Argumentos de simetría ↑

Consideremos las siguientes situaciones:

• El asno de Buridán: un asno situado entre lo que son, para él, dos fardos de heno completamente idénticos. El asno no tiene ninguna razón para elegir el que está situado a su izquierda sobre el que está situado a su derecha, y, por ende, no es capaz de elegir y muere por inanición.

• La ley de equilibrio de Arquímedes: si se cuelgan pesos iguales a distancias iguales a lo largo de los brazos de una balanza, ésta permanecerá en equilibrio ya que no existe razón para que incline en un sentido u otro desde el punto de equilibrio.

• El argumento de Anaximandro de la inmovilidad de la Tierra según lo informado por Aristóteles: la Tierra permanece en reposo, dado que, al estar en el centro de un cosmos esférico (y en la misma relación con los límites del cosmos en todas las direcciones), no existe razón alguna por la que deba moverse en una dirección y no en otra.

¿Qué tienen en común estas situaciones descriptas?

En primer lugar, estas pueden entenderse como ejemplos de la aplicación del principio de razón suficiente de Leibniz: si no existe una razón suficiente para que una cosa suceda en lugar de otra, el principio sostiene que nada ocurre (la situación inicial no cambia). Pero hay algo más que los casos anteriores tienen en común: en cada uno de ellos se aplica el principio de razón suficiente sobre la base de que la situación de partida tiene una simetría dada: en los dos primeros casos, la simetría bilateral; en el tercero, simetría de rotación. La simetría de la situación inicial conlleva la equivalencia completa entre las alternativas existentes (el manojo de heno de la izquierda con respecto al de la derecha, entre otras.). Si las alternativas son completamente equivalentes, entonces no existe razón suficiente para elegir una de ellas y la situación inicial debe permanecer sin cambios.

Argumentos como los mencionados anteriormente –es decir, argumentos que conducen a conclusiones precisas sobre la base de una simetría inicial, más el principio de razón suficiente– se han utilizado en la ciencia desde la antigüedad (como el argumento de Anaximandro). La forma que más frecuentemente adoptan estos argumentos es la siguiente: se presenta una situación con una cierta simetría que evoluciona de una manera tal que, en ausencia de una causa asimétrica, se conserva la simetría inicial. Una ruptura de la simetría inicial no puede ocurrir sin una razón, o *una asimetría no puede originarse espontáneamente*. Van Fraassen (1989) dedica un capítulo a considerar la forma en que estos tipos de argumentos de simetría pueden utilizarse en la resolución de problemas en general.

Históricamente, la primera formulación explícita de este tipo de argumento en términos de simetría se debe al físico Pierre Curie hacia fines del siglo diecinueve. Curie fue llevado a reflexionar sobre la cuestión de la relación entre las *propiedades físicas* y *las propiedades de simetría* de un sistema físico por sus estudios sobre las propiedades térmicas, eléctricas y magnéticas de los cristales, a la vez que estas propiedades están directamente relacionadas con la estructura, por ende, con la simetría de los cristales estudiados. Más precisamente, la cuestión que Curie analizó fue la siguiente: en un medio físico determinado (por ejemplo, un medio cristalino) que tiene propiedades de simetría especificados, ¿qué fenómenos físicos (por ejemplo, qué fenómenos eléctricos y magnéticos) pueden ocurrir? Sus conclusiones, que se presentan de manera sistemática en su obra del año 1894 “Sur la symétrie dans les phénomènes physiques”, pueden sintetizarse de la siguiente manera:

a. Un fenómeno puede existir en un medio que posee su simetría característica o la de uno de sus subgrupos. Lo que se necesita para su ocurrencia (es decir, para que algo más que “nada” suceda) no es la presencia, sino más bien la ausencia de ciertas simetrías: “La asimetría es lo que crea un fenómeno”.

b. Los elementos de simetría de las causas deben encontrarse en sus efectos, pero lo contrario no resulta verdadero; es decir, los efectos pueden ser más simétricos que las causas.

La conclusión (a) indica claramente que Curie reconoció la importante función que desempeña el concepto de ruptura de la simetría en la física. La conclusión (b) es lo que normalmente se denomina “principio de Curie” en la literatura, aunque notamos que (a) y (b) no son independientes entre sí.

Para que el principio de Curie pueda aplicarse, varias condiciones deben ser satisfechas: la conexión causal debe ser válida, la causa y el efecto deben estar bien definidos, y las simetrías de la causa como del efecto también deben estar bien definidas (esto implica tanto las propiedades físicas como las geométricas de los sistemas físicos considerados). El principio de Curie proporciona una condición necesaria para que determinados fenómenos sucedan: sólo pueden ocurrir aquellos fenómenos que sean compatibles con las condiciones de simetría establecidas por el principio.

El principio de Curie tiene por ende una importante función metodológica: por un lado, se proporciona un tipo de regla de selección (dada una situación inicial con una simetría especificada, solamente ciertos fenómenos pueden ocurrir); por otro lado, ofrece un criterio de falsación de las teorías físicas (una violación al principio de Curie puede indicar que hay algo incorrecto en la descripción física en cuestión)[16].

Este tipo de aplicaciones del principio de Curie dependen, por supuesto, de nuestra aceptación de su validez, y esto es algo que ha sido cuestionado en la literatura, especialmente en relación con la ruptura espontánea de simetría (ver la sección siguiente). Diferentes propuestas se han ofrecido para justificar el principio. Aquí lo hemos presentado como un ejemplo de consideraciones de simetría en base al principio de razón suficiente de Leibniz, mientras que el propio Curie parece haberlo considerado como una forma del principio de causalidad. En la literatura actual, se ha vuelto común comprender dicho principio como derivado de propiedades de invariancia de leyes físicas deterministas. De acuerdo con esta "visión recibida", tal como primero la formuló Chalmers (1970) y luego en literatura más reciente (Ismael 1997, Belot 2003, Earman 2002), el principio de Curie se expresa en términos de la relación entre las simetrías antes y después de los estados de un sistema. Sin embargo, además de ser una tergiversación del principio original de Curie, se podría cuestionar si esta formulación es de interés alguno: la conexión pertinente entre simetrías de sistemas físicos y simetrías de leyes guarda relación no con las simetrías de estados de esos sistemas, pero sí con las simetrías de soluciones (más precisamente, de conjuntos de soluciones). Para más detalles, ver Castellani (más adelante).

4 Ruptura de Simetría ↑

Una simetría puede ser exacta, aproximada o rota. Simetría exacta significa que es válida incondicionalmente; aproximada significa que es válida en determinadas condiciones; y rota puede tener diversos significados, dependiendo del objeto en cuestión y su contexto.

El estudio de la ruptura de simetría se remonta también a Pierre Curie. Según Curie, la ruptura de simetría tiene la siguiente función: para que suceda un fenómeno en un medio, el grupo de simetría original se reduce (se "rompe", en la terminología de hoy en día) al nivel del grupo de simetría del fenómeno (o a un subgrupo del grupo de simetría del fenómeno) por la acción de alguna causa. En este sentido la ruptura de simetría es lo que "crea el fenómeno". En general, la ruptura de una cierta simetría no implica que no exista simetría, sino que la situación en la que se rompe esta simetría se caracteriza por una simetría más baja que la original. En términos de la teoría de grupos, esto significa que el grupo de simetría inicial se "rompe" en uno de sus subgrupos. Por lo tanto, es posible describir la ruptura de la simetría en términos de las relaciones entre grupos de transformación, en particular entre un grupo (el grupo de simetría original) y sus subgrupos. Como claramente se ilustra en el tomo de 1992 escrito por I. Stewart y M. Golubitsky, a partir de este punto de vista la ruptura de la simetría puede desarrollarse para abordar preguntas tales como "¿qué subgrupos pueden surgir?", "¿Cuándo surge un subgrupo determinado?"

La ruptura de simetría se estudió por primera vez de forma explícita en la física con respecto a objetos y fenómenos físicos. Esto no nos debe sorprender, ya que la teoría de la simetría se originó en el estudio de propiedades de simetría de figuras espaciales y objetos cotidianos. Sin embargo, es con respecto a las leyes que la ruptura de simetría ha adquirido un significado especial en física. Hay dos tipos diferentes de ruptura de simetría de las leyes físicas: "explícita" y "espontánea", y se considera el caso de ruptura espontánea de simetría el más interesante desde el punto de vista físico y filosófico.

4.1 Ruptura explicita de simetría ↑

La ruptura explícita de simetría es indicativa de situaciones donde las ecuaciones dinámicas no son manifiestamente invariantes bajo el grupo de simetría en cuestión. Esto significa, en la formulación de Lagrange (o de Hamilton), que el lagrangiano (hamiltoniano) del sistema contiene uno o más términos que rompen la simetría de forma explícita. Estos términos pueden tener diferentes orígenes:

(a) Los términos de ruptura de simetría pueden ser introducidos a mano en la teoría si se toman como base los resultados teóricos o experimentales, como en el caso de la teoría cuántica de las interacciones débiles, que expresamente se construye de una manera que claramente viola la simetría de paridad. El resultado subyacente, en este caso, es la falta de conservación de la paridad en la interacción débil, predicha por primera vez en 1956 en el famoso trabajo (ganador del premio Nobel) de T.D. Lee y C.N. Yang.

(b) Los términos de ruptura de simetría pueden aparecer en la teoría debido a los efectos de la mecánica cuántica. Una razón para la presencia de tales términos –conocidos como "anomalías"– es que al pasar del nivel clásico al cuántico (debido al posible operador que ordena ambigüedades para cantidades compuestas tales como las corrientes y cargas de Noether), puede suceder que el álgebra de la simetría clásica (generada a través de la estructura de los corchetes de Poisson) deje de ser válida en términos de las relaciones de conmutación de las cargas de Noether. Por otra parte, la utilización de un "regulador" (o "corte") requerido en el procedimiento de renormalización para evitar cantidades infinitas puede ser en sí misma una fuente de anomalías. Puede violar una simetría de la teoría, y las consecuencias de esta ruptura pueden permanecer incluso después de que el "regulador" se remueve al final de los cálculos. Históricamente, el primer ejemplo de una anomalía derivada de la renormalización es la denominada anomalía quiral, que es la anomalía que viola la simetría quiral de la interacción fuerte (ver Weinberg 1996, capítulo 22).

(c) Por último, los términos de ruptura de simetría pueden aparecer a causa de efectos no renormalizables. Los físicos poseen buenas razones para considerar las teorías de campo renormalizables actuales como las *teorías de campo efectivas*, es decir, como aproximaciones de baja energía de una teoría más general (cada teoría efectiva hace referencia explícita únicamente a aquellas partículas que son de importancia en el espectro de energías consideradas). Los efectos de las interacciones no renormalizables (debido a las partículas pesadas no incluidas en la teoría) son mínimos, y por lo tanto pueden ser ignorados en el régimen de baja energía. Puede suceder, por ende, que la descripción de "grano grueso" que se obtiene de esta manera posea más simetrías que la teoría general subyacente. Es decir, la lagrangiana efectiva obedece a simetrías que no son simetrías de la teoría subyacente. Estas simetrías "accidentales", como las ha denominado Weinberg, pueden ser violadas por los términos no renormalizables surgidos de escalas de mayor masa y suprimidas en la lagrangiana efectiva (ver Weinberg 1995, 529-531).

4.2 Ruptura espontánea de simetría ↑

La ruptura espontánea de simetría se produce en situaciones en las que, dada una simetría de las ecuaciones de movimiento, existen soluciones que no son invariantes bajo la acción de esa simetría sin ningún termino asimétrico explícito (de ahí el atributo "espontánea")[17]. Una situación de este tipo se puede ilustrar primero por medio de casos tomados de la física clásica. Consideremos por ejemplo el caso de una varilla vertical con una fuerza de compresión aplicada en la parte superior y dirigida a lo largo de su eje. La descripción física es obviamente invariante para todas las rotaciones alrededor de este eje. Mientras la fuerza aplicada es lo suficientemente suave, la varilla no se dobla y la configuración de equilibrio (la configuración de energía más baja) es invariante bajo esta simetría. Cuando la fuerza alcanza un valor crítico, la configuración de equilibrio simétrica se vuelve inestable y surgen un número infinito de estados más estables, los cuales no son más rotacionalmente simétricos sino que están relacionados entre sí por una rotación. La ruptura real de la simetría puede entonces ocurrir fácilmente por efecto de una (aunque sea pequeña) causa asimétrica externa, y la varilla se dobla para alcanzar una de las infinitas configuraciones de equilibrio asimétrico estable[18]. En esencia, lo que sucede en el ejemplo anterior es lo siguiente: cuando algún parámetro alcanza un valor crítico, la solución de menor energía que respeta la simetría de la teoría deja de ser estable bajo pequeñas perturbaciones, y, por consiguiente nuevas (pero estables) soluciones de energía surgen. Las nuevas soluciones de energía son asimétricas, pero están todas relacionadas con la acción de las transformaciones de simetría. En otras palabras, existe una degeneración (finita o infinita, en función de si la simetría es continua o discreta) de soluciones asimétricas distintas pero de energías idénticas, el conjunto de las cuales mantiene la simetría de la teoría.

En la *física cuántica* la ruptura espontánea de simetría no ocurre en el caso de los sistemas finitos: se llevan a cabo transiciones entre los diversos estados degenerados, y el estado de energía más bajo, o "estado fundamental" resulta ser una superposición lineal de los estados degenerados. De hecho, la ruptura espontánea de simetría es aplicable sólo a sistemas infinitos –sistemas de muchos cuerpos (como ferromagnetos, superfluidos y superconductores) y campos –los estados degenerados fundamentales alternativos son todos ortogonales entre sí en el límite de volumen infinito y, por ende, separado por una "regla de superselección" (ver, por ejemplo, Weinberg 1996, 164-165).

Históricamente, el concepto de ruptura espontánea de simetría surgió por primera vez en la física de la materia condensada. El caso de estudio fue la teoría de Heisenberg del ferromagnetismo, en la cual se considera un material ferromagnético como una matriz infinita de dipolos magnéticos de espin 1/2, con las interacciones entre primeros vecinos. Aunque la teoría es invariante ante rotaciones, por debajo de una temperatura critica, llamada temperatura de Curie, el estado fundamental del material ferromagnético tiene todos los espines alineados en alguna dirección en particular (es decir, apuntan en la dirección de magnetización), por lo tanto deja de respetar la simetría de rotación. Lo que sucede es que por debajo de la temperatura de Curie existe un conjunto infinitamente degenerado de estados fundamentales, en cada uno de los cuales los espines se alinean en una dirección dada. Un conjunto completo de estados cuánticos puede construirse sobre cada estado fundamental. Por ende, tenemos una gran cantidad de "mundos posibles" (conjuntos de soluciones a las mismas ecuaciones), cada uno construido sobre uno de los posibles estados fundamentales ortogonales. Podemos utilizar una imagen famosa de S. Coleman: un hombrecito que viviera dentro de uno de estos mundos posibles asimétricos tendría dificultades para detectar la simetría rotacional de las leyes de la naturaleza (pues todos sus experimentos están bajo la influencia del campo magnético de fondo). Sin embargo, la simetría está todavía allí –el hamiltoniano no deja de ser invariante ante rotaciones– pero esa simetría permanece "oculta" para nuestro hombrecito. Además, no habría manera de que el hombrecito detectara directamente que el estado fundamental de su mundo es parte de un multiplete infinitamente degenerado. Para pasar de un estado fundamental del material ferromagnético infinito a otro, sería necesario cambiar las direcciones de un número infinito de dipolos, una tarea imposible para el hombrecito (Coleman 1975, 141-142). Como ya ha dicho, en el límite de volumen infinito, todos los estados fundamentales están separados por una regla de superselección. (Ruetsche (2006) discute la ruptura de la simetría y el ferromagnetismo desde una perspectiva algebraica. Liu y Emch (2005) encaran los problemas de interpretación al explicar la ruptura espontánea de simetría en la mecánica cuántica no relativista.)

La misma imagen de Coleman se puede utilizar en la *teoría cuántica de campos*, convirtiéndose el estado fundamental en el *estado de vacío*, y el papel del hombrecito siendo jugado por nosotros mismos. Esto significa que pueden existir simetrías de las leyes de la naturaleza que no se nos manifiestan porque el mundo físico en el que vivimos se basa en un estado de vacío que no es invariante bajo tales simetrías. En otras palabras, el mundo físico de nuestra experiencia puede parecer muy asimétrico, pero esto no significa necesariamente que esta asimetría pertenece a las leyes fundamentales de la naturaleza. La ruptura espontánea de simetría ofrece una clave para entender (y utilizar) esta posibilidad física.

El concepto de ruptura espontánea de simetría fue trasladado de la física de la materia condensada a la teoría cuántica de campos a principios de los años sesenta, gracias, en especial, a los trabajos de Y. Nambu y G. Jona-Lasinio. Jona-Lasinio (2003) ofrece un relato de primera mano de cómo la ruptura espontánea de simetría fue introducida y formalizada en la física de partículas sobre la base de la analogía de la ruptura de simetría de gauge (electromagnética) en la teoría de superconductividad de J. Bardeen, L.N. Cooper y J. R.. Schrieffer (la teoría Bardeen-Cooper-Schrieffer o teoría de superconductividad). La aplicación de la ruptura espontánea de simetría a la física de partículas en la década del sesenta y los años sucesivos llevó a profundas consecuencias físicas y desempeñó un papel fundamental en la construcción del actual modelo estándar de las partículas elementales. En particular, mencionaremos los siguientes principales resultados que se obtienen en el caso de la ruptura espontánea de una simetría interna continua en la teoría cuántica de campos.

Teorema de Goldstone. En el caso de una simetría continua global, bosones sin masa (conocidos como "bosones de Goldstone") aparecen en la ruptura espontánea de la simetría de acuerdo con un teorema enunciado por primera vez por J. Goldstone en 1960. La presencia de estos bosones sin masa, originalmente considerados un serio problema, ya que no se habían observado partículas de este tipo en el contexto considerado, resultó ser de hecho la base de la solución –por medio del llamado mecanismo de Higgs (ver el siguiente punto)– para otro problema similar: en 1954 la teoría de Yang-Mills de campos gauge no abelianos, basada en este mecanismo, predijo la existencia partículas sin masa no observables: los bosones gauge.

Mecanismo de Higgs. De acuerdo con un "mecanismo" establecido de manera general en 1964 y de forma independiente por (i) P. Higgs, (ii) R. Brout y F. Englert, y (iii) GS Guralnik, CR Hagen y T.W.B. Kibble, la simetría interna es promovida a una simetría local, los bosones de Goldstone "desaparecen" y los bosones de gauge adquieran masa. Los bosones de Goldstone son "devorados" para dar masa a los bosones gauge, y esto ocurre sin una ruptura (explícita) de la invariancia de gauge de la teoría. Cabe notar que este mecanismo para la generación masiva de campos de gauge es también lo que asegura la renormalización de las teorías que involucran campos de gauge masivos (como la teoría electro-débil Glashow-Weinberg-Salam desarrollada en la segunda mitad de la década del sesenta), como fue probada por primera vez por M. Veltman y G. 't Hooft a principios de los setenta. (El mecanismo de Higgs está en el centro de un intenso debate entre los filósofos de la física: ver, por ejemplo, Smeenk 2006; Lira 2008; Struyve 2011. Para un análisis histórico-filosófico, ver Borrelli 2012).

''*Ruptura dinámica de simetría*. En algunas teorías como, por ejemplo, la del modelo unificado de la interacción electro-débil, la ruptura espontánea de simetría responsable (a través del mecanismo de Higgs) de las masas de los bosones de gauge se debe a la violación de la simetría de los valores de expectación de vacío de campos escalares (los llamados campos de Higgs) introducidas *ad hoc* en la teoría. Por diferentes razones –principalmente por el carácter *ad hoc* de dichos campos para los que no había evidencia experimental hasta los resultados obtenidos en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en julio de 2012– se ha llamado la atención sobre la posibilidad de que los campos de Higgs pudieran ser más bien fenomenológicos en vez de fundamentales, es decir estados ligados resultantes de un mecanismo dinámico de ruptura de simetría especifica. La ruptura espontánea de simetría así realizada ha sido llamada ruptura dinámica de simetría[19].

La ruptura de simetría plantea una serie de cuestiones *filosóficas*. Algunas de ellas se refieren sólo a la ruptura de determinados tipos de simetría, como la cuestión de la importancia de la violación de la paridad en el problema de la naturaleza del espacio (ver la sección 2.4, más arriba). Otras cuestiones como, por ejemplo, la conexión entre la ruptura de simetría y la observabilidad, son aspectos particulares del problema que involucra el estatus y la importancia de las simetrías físicas, pero en el caso de la ruptura espontánea de simetría adquieren una mayor fuerza: ¿cuál es el estatus epistemológico de una teoría basada en simetrías "ocultas"? Teniendo en cuenta que lo que observamos directamente –la situación física, el fenómeno– es asimétrica, ¿cuál es la evidencia que sustenta la simetría "subyacente"? (ver por ejemplo Morrison 2003, y Kosso 2000).

En ausencia de evidencia empírica directa, ¿hasta qué punto el poder predictivo y explicativo de las teorías basadas en la ruptura espontánea de simetría proporciona buenas razones para creer en la existencia de las simetrías ocultas? Por último, existen cuestiones planteadas por la motivación y el rol de la ruptura de simetría (ver, por ejemplo Earman 2003a, quien utiliza la formulación algebraica de la teoría cuántica de campos para explicar el mecanismo de ruptura de simetría. Para discusiones más filosóficas sobre la teoría cuántica de campos y ruptura de simetría, ver Ruetsche 2011). La ruptura espontánea de simetría permite a las teorías de simetría describir la realidad asimétrica. En resumidas cuentas la ruptura espontánea de simetría proporciona una vía para entender la complejidad de la naturaleza sin renunciar a las simetrías fundamentales. Pero, ¿por qué deberíamos preferir leyes fundamentales simétricas por sobre las asimétricas? En otras palabras, ¿por qué suponer que una asimetría observada requiere una causa, que puede ser una ruptura explícita de simetría de las leyes, condiciones iniciales asimétricas, o una ruptura espontánea de simetría? Tengamos en cuenta que esta suposición es muy similar a la expresada por Curie en su famoso artículo de 1894. El principio de Curie (las simetrías de las causas se deben encontrar en los efectos; o, de igual manera, las asimetrías de los efectos se deben encontrar en las causas) cuando se extiende para incluir el caso de ruptura espontánea de simetría, es equivalente a un principio metodológico según el cual una asimetría de los fenómenos debe venir de la ruptura (explícita o espontánea) de la simetría de las leyes fundamentales. La naturaleza real de este principio sigue siendo una cuestión abierta, y se halla en el centro de un debate en desarrollo (ver la sección 3, más arriba).

Finalmente, cabe mencionar el argumento que a veces se menciona en la literatura respecto a que la ruptura espontánea de simetría implica que el principio de Curie es violado debido a que una simetría se rompe "espontáneamente", es decir sin la presencia de causa asimétrica alguna. Es cierto que la ruptura espontánea de simetría señala una situación en la que existen soluciones que no son invariantes bajo la simetría de las ecuaciones dinámicas, sin ningún tipo de ruptura explícita de esta simetría. Pero como ya hemos visto, no se pierde la simetría de la "causa", la cual se conserva en el conjunto de las soluciones[20].

5 Cuestiones filosóficas ↑

En gran parte de la literatura filosófica sobre simetrías en física se discuten las simetrías específicas y las cuestiones interpretativas a las que las mismas conducen. La amplia variedad de simetrías pone de relieve que las cuestiones relativas a la situación y la importancia de las simetrías en la física, en general no son fáciles de abordar. Sin embargo, se pueden esbozar algunas ideas en términos generales y ofrecemos algunas observaciones aquí.

Uno de los roles más importantes que juega la simetría es el de *clasificación* –por ejemplo, la clasificación de los cristales utilizando sus asombrosas y variadas propiedades de simetría. En la física contemporánea, el mejor ejemplo de este rol de la simetría es la clasificación de las partículas elementales por medio de las representaciones irreducibles de los grupos de simetría fundamentales, resultado obtenido por primera vez por Wigner en su famoso artículo de 1939 sobre las representaciones unitarias del grupo no homogéneo de Lorentz. Cuando una clasificación de simetría incluye todas las propiedades necesarias para la caracterización de un tipo dado de objeto físico (por ejemplo, todos los números cuánticos necesarios para la caracterización de un tipo determinado de partícula), se tiene la posibilidad de definir tipos de entidades sobre la base de sus propiedades de transformación. Esto ha llevado a los filósofos de la ciencia a explorar un enfoque estructuralista de las entidades de la física moderna (ver, por ejemplo, las contribuciones en Castellani 1998, Parte II).

Las simetrías también tienen un rol *normativo*, que se utiliza como limitaciones a las teorías físicas. El requisito de invariancia con respecto a un grupo de transformaciones impone severas restricciones sobre la forma que una teoría puede adoptar, lo que limita los tipos de cantidades que puedan aparecer en la teoría así como la forma de sus ecuaciones fundamentales. Un caso famoso es la utilización de la covariancia general por parte de Einstein en la búsqueda de sus ecuaciones gravitacionales.

El tratamiento teórico de grupo de las simetrías físicas, con la consiguiente posibilidad de unificar los diferentes tipos de simetrías por medio de una unificación de sus grupos de transformación correspondientes, ha proporcionado los recursos técnicos para permitir que la simetría juegue un importante rol en la posibilidad de una *unificación* teórica. Esto se ilustra en el programa de investigación actual de la física teórica que apunta a llegar a una descripción unificada de todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza (gravitatoria, débil, electromagnética y fuerte) en términos de grupos de simetría locales subyacentes.

Con frecuencia se sostiene que muchos fenómenos físicos pueden explicarse como consecuencias (más o menos directas) de principios de simetría o argumentos de simetría. En el caso de los principios de simetría, el papel *explicativo* de las simetrías surge de su lugar en la jerarquía de la estructura de la teoría física. Como Wigner (1967, 28 ss.) describe las jerarquías, las simetrías son vistas como propiedades de las leyes. Las simetrías pueden utilizarse para explicar (i) la forma de las leyes, y (ii) la ocurrencia (o no) de ciertos eventos (estos últimos en una manera análoga a la forma en la cual las leyes explican por qué ocurren ciertos hechos y no otros). En el caso de los argumentos de simetría, es posible por ejemplo, apelar al principio de Curie para explicar la aparición de ciertos fenómenos sobre la base de las simetrías (o asimetrías) de la situación, como se discutió con anterioridad en la sección 3. Más aún, en la medida que un mayor poder explicativo puede derivarse de la unificación, la función unificadora de las simetrías también conlleva a su rol explicativo.

A partir de estos diferentes roles podemos sacar algunas conclusiones preliminares sobre el rol de las simetrías. Es evidente que las simetrías tienen una importante función heurística, lo que indica un destacado papel metodológico. ¿Está este poder metodológico conectado a un estatus ontológico o epistemológico para las simetrías?

Según un punto de vista *ontológico*, las simetrías son vistas como una parte sustancial del mundo físico: las simetrías de las teorías representan las propiedades existentes en la naturaleza, o que caracterizan la estructura del mundo físico. Podría decirse que el estatus ontológico de las simetrías proporciona la razón del éxito metodológico de las simetrías en la física. Un ejemplo concreto es el uso de simetrías para predecir la existencia de nuevas partículas. Esto puede ocurrir a través de la función de clasificación, sobre la base de lugares vacantes en los esquemas de clasificación producto de las simetrías, como en el famoso caso de la predicción de la partícula Omega en el contexto del esquema de clasificación hadrónica. (Ver Bangu 2008, para un análisis crítico del razonamiento que conduce a esta predicción.) O, como en casos más recientes, a través de la función unificadora: el ejemplo paradigmático de la predicción de las partículas *W* y *Z* (que se encontraron en forma experimental en 1983) en el contexto de la teoría de gauge de Glashow-Weinberg-Salam propuesta en el año 1967 para unificar las interacciones débiles y electromagnéticas. Estos casos extraordinarios de predicción de nuevos fenómenos podrían entonces utilizarse para argumentar a favor de un estatus ontológico de simetrías.

Otra de las razones para atribuir simetrías a la naturaleza es la llamada interpretación geométrica de las simetrías espacio-temporales, según la cual las simetrías espacio-temporales de las leyes físicas se interpretan como simetrías del propio espacio-tiempo, la “estructura geométrica” del mundo físico. Más aún, esta manera de ver las simetrías se puede extender a simetrías no externas al considerarlas como propiedades de otros tipos de espacios, generalmente conocidos como “espacios interiores”. El tema de a qué un realista se comprometería basándose en esta postura de espacios internos permanece abierta y constituye un tema interesante a discutir.

Un enfoque interesante para investigar los límites de una postura ontológica con respecto a las simetrías, sería investigar su estatus empírico u observacional: ¿pueden las simetrías en cuestión ser observadas directamente? En primer lugar, se debe esclarecer qué significa que una simetría sea observable, y también por cierto, si todas las simetrías poseen el mismo estatus observacional. Kosso (2000) llega a la conclusión de que existen importantes diferencias en el estatus empírico de los diferentes tipos de simetrías. En particular, mientras que las simetrías continuas globales pueden ser observadas directamente –a través de determinados experimentos tales como los experimentos del barco de Galileo– una simetría continua local puede tener sólo evidencia empírica indirecta. Brading y Brown (2004) abogan por una interpretación diferente de los ejemplos de Kosso[21], y, por ende, por una comprensión diferente de por qué las simetrías locales de las teorías de gauge y la TGR tienen un estatus empírico distinto de las simetrías espacio-temporales globales. El punto fundamental es el siguiente: en las teorías con simetría de gauge locales, los campos de materia están embebidos en un campo de gauge, y la simetría local es una característica de ambos campos de manera conjunta. Debido a esto, no existe en general, ningún análogo a los experimentos del barco de Galileo para transformaciones de simetría locales; según Brading y Brown, las simetrías continuas espacio-temporales globales tienen un estatus empírico especial.

El estado de observación directa de las simetrías espacio-tiempo globales conocidas nos conduce a un aspecto *epistemológico* de las simetrías. Según Wigner, los principios de invariancia espacio-temporales desempeñan el papel de un requisito previo para la posibilidad misma de descubrir las leyes de la naturaleza: “si las correlaciones entre los eventos se modificaran día a día, y fueran diferentes para diferentes puntos del espacio, sería imposible descubrirlas” (Wigner 1967, 29). Para Wigner, esta concepción de los principios de simetría está esencialmente relacionada con nuestra ignorancia (si pudiéramos conocer directamente todas las leyes de la naturaleza, no habría necesidad de utilizar principios de simetría en su búsqueda). Otros autores, por el contrario, han adoptado una postura según la cual los principio de simetría funcionan como “principios trascendentales” en el sentido kantiano (ver, por ejemplo, Mainzer 1996). Cabe señalar a este respecto que el punto de partida de Wigner, como se cita anteriormente, no implica simetrías exactas –todo lo que se necesita epistemológicamente es que las simetrías globales se mantengan aproximadamente para ciertas regiones espacio-temporales, de manera que exista suficiente regularidad en los eventos para que las leyes de la naturaleza puedan ser descubiertas.

Existe otra razón por la cual las simetrías podrían considerarse como una cuestión principalmente epistemológica. Como ya hemos mencionado, existe una estrecha relación entre los conceptos de simetría y de equivalencia, y esto conduce también a una noción de “irrelevancia”: la equivalencia entre distintos puntos del espacio (simetría de traslación), por ejemplo, puede ser entendida en el sentido de la irrelevancia de una posición absoluta a la descripción física. Existen dos formas en que se podría interpretar su significado epistemológico: por un lado, podríamos decir que las simetrías están asociadas con una redundancia inevitable en nuestras descripciones del mundo, mientras que por otro lado podríamos sostener que las simetrías indican una limitación a nuestro acceso epistémico –existen ciertas propiedades de los objetos, tales como sus posiciones absolutas, que no son observables.

Por último, nos agradaría mencionar un aspecto de las simetrías que podría utilizarse naturalmente para respaldar ya sea la postura ontológica o la epistemológica. Está ampliamente aceptado que existe una estrecha relación entre la simetría y la *objetividad*, y una vez más el punto de partida está dado por las simetrías espaciotemporales: las leyes por medio de las cuales describimos la evolución de los sistemas físicos tienen una validez objetiva, dado que son las mismas para todos los observadores. La idea antigua y natural de que lo que es objetivo no debe depender de la perspectiva particular bajo la cual esta idea se toma en consideración es reformulada en términos de grupos: lo que es objetivo es lo que es invariante con respecto al grupo de transformación de los sistemas de referencia o, si citamos a Hermann Weyl (1952, 132), "la objetividad significa invariancia con respecto al grupo de *automorfismos* [del espacio-tiempo]".[22] Debs y Redhead (2007) llamaron "*invariantismo*" a la visión que sostiene que "invariancia bajo un determinado grupo de automorfismos es una condición necesaria y suficiente para la objetividad" (2007, 60). Ellos señalan (p. 73, y véase también p. 66) que hay una conexión natural entre el "invariantismo" y el realismo estructural.

El creciente interés en la metafísica incluye el interés por las simetrías. Baker (2010) ofrece una introducción accesible; y Livanios (2010), al relacionar las discusiones sobre simetrías con las disposiciones y esencias, es un ejemplo de este trabajo.

En conclusión: las simetrías en la física ofrecen muchas posibilidades de interpretación, y la manera de entender el estado y la importancia de las simetrías físicas presenta claramente un desafío tanto para los físicos, como para los filósofos.

6 Notas ↑

1.- R. J. Hauy aplicó consideraciones de simetría para caracterizar y clasificar la estructura del cristal y su formación (ver su trabajo de 1801, *Traité de minéralogie*, Volumen 1) y con esto surgió la cristalografía como disciplina distinta a la mineralogía. Volver al texto

2.-Un grupo se define como un conjunto G, con una operación producto (.), tal que para todo par de elementos g1 y g2 de G, g1.g2 es también un elemento de G; la operación del grupo es asociativa; el grupo contiene el elemento identidad; y para cada elemento existe un inverso. Volver al texto

3.- Una relación de equivalencia es una relación que es reflexiva, simétrica y transitiva. Para detalles adicionales sobre la relación entre simetría, equivalencia y grupo en matemáticas y física, ver Olver (1995). Castellani (2003) se dedica a explorar la relevancia de esas relaciones en relación al problema del significado de las simetrías físicas. Sobre la relación entre grupos y clases de equivalencia, cuando se generalizan a grupoides, y en general para una discusión de la relación entre el concepto de simetría y su formalismo, ver Guay y Hepburn (2009). Un análisis exhaustivo de la relación entre la noción de una simetría de una teoría física y la equivalencia física de dos soluciones o modelos de tal teoría, se proporciona en Belot (2012). Volver al texto

4.- Una referencia clásica para la teoría general de las configuraciones simétricas es Shubnikov y Koptsik 1974. También se proporciona una visión general en Mainzer 1996. Más información sobre el material en esta sección se puede encontrar en Castellani (2000, capítulos 1-3). Hon y Goldstein (2008) ofrecen un estudio histórico detallado del término "simetría" y de sus conceptos asociados hasta principios de los años mil ochocientos (en este libro, ver Brading 2010). Volver al texto

5.- Este es un ejemplo del uso metodológico de las propiedades de simetría: sobre la base de las propiedades de invariancia de una situación considerada (en este caso, el problema dinámico en la mecánica clásica), se aplica una estrategia para derivar determinadas consecuencias. El principio subyacente es que los problemas equivalentes tienen soluciones equivalentes. Este tipo de argumento de simetría (ver la sección 3, más adelante) también es discutido por van Fraassen (1989, capítulo 10). Volver al texto

6.- Wigner (1967) es una colección de veinticuatro artículos reimpresos que cubren varias décadas. Volver al texto

7.- De ahí el nombre de "grupo de Poincaré", introducido más tarde por Wigner, mientras que Poincaré nombró el grupo en honor a Lorentz. Hoy en día el nombre "grupo de Poincaré" está reservado para el grupo de Lorentz inhomogéneo; es decir, el grupo de Lorentz con traslaciones espaciales. Volver al texto

8.- La relatividad general marca una etapa más importante en el desarrollo, como veremos más adelante. Volver al texto

9.- Un ejemplo de tal principio es la inexistencia de máquinas de movimiento perpetuo en la termodinámica. Volver al texto

10.- Para las referencias ver la literatura sobre el “argumento del agujero” de Einstein, detallado en la sección 2.5, a continuación. Volver al texto

11.- Ver Norton (2003) sobre la “objeción de Kretschmann” al significado físico de la covarianza general. Ver también Anderson (1967); Brown y Brading (2002); y también Martin (2003, Sección 2.2), sobre la invarianza versus la covarianza. Volver al texto

12.- Para más información sobre el camino de Einstein a la TGR y las distintas vicisitudes de la covarianza general como uno de sus postulados, ver Norton (1993). Ver también las referencias sobre el “argumento del agujero” de Einstein en la Sección 2.5, a continuación. Volver al texto

13.- El problema que condujo a Heisenberg a introducir esta simetría (y a conectarla con el comportamiento estadístico de las partículas cuánticas) en Heisenberg (1926) fue obtener una descripción cuántica de los sistemas atómicos –vistos como conjuntos de electrones idénticos sujetos a la interacción coulombiana– de acuerdo con los resultados espectroscópicos de la época. Volver al texto

14.- En este artículo, titulado “Über die Operation der Zeitumkehr in der Quantenmechanik”, Wigner introdujo la invariancia de la inversión temporal con el fin de reinterpretar los resultados obtenidos previamente por H. Kramers. Volver al texto

15.- Posteriormente, simetrías nuevas adquirieron relevancia en la física teórica, como la *supersimetría* (la simetría que relaciona bosones y fermiones y que conduce, cuando se transforma en local, a las teorías de la *supergravedad*) y las diversas formas de *dualidad* utilizadas en las teorías de supercuerdas actuales. Volver al texto

16.- Ver, por ejemplo, la discusión de Mach sobre el efecto de Oersted en su *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch--kritisch dargestellt* del año 1883. Volver al texto

17.- Strocchi (2012) critica esta descripción demasiado simplificada. Ver su artículo para una formulación precisa y Strocchi (2008) para un tratamiento completo y riguroso de la ruptura de simetría en la física clásica y cuántica. Obsérvese que existen tanto analogías como faltas de analogías entre los casos clásico y cuántico de la ruptura espontánea de simetría. Éstos son tema de discusión en la literatura filosófica emergente sobre la ruptura espontánea de simetría, e incluyen el rol de causas asimétricas y la transición de una situación simétrica a otra asimétrica. Volver al texto

18.- Otro ejemplo de la física clásica que se utiliza a menudo en la literatura para ilustrar la ruptura espontánea de simetría es el caso de una bola que se mueve sin fricción en un aro restringido a un movimiento de giro con una velocidad angular dada. Este caso se discute en detalle por Liu (2003). Volver al texto

19.- Cabe señalar que, en realidad, la ruptura espontánea de simetría se introdujo por primera vez en la forma de una ruptura de simetría dinámica. En la teoría la teoría Bardeen-Cooper-Schrieffer de la superconductividad, así como en la teoría de 1961 de la ruptura de simetría quiral por Nambu y Jona-Lasino, la ruptura espontánea de simetría se realiza dinámicamente a través de un condensado fermiónico. En la teoría de Bardeen-Cooper-Schrieffer, por ejemplo, la invariancia de gauge del electromagnetismo se rompe espontáneamente por pares de electrones que se condensan –formando un estado unido– en el estado fundamental de un metal. Aunque la ruptura de simetría dinámica no ha tenido éxito (hasta ahora) como un camino alternativa al problema planteado por los campos de Higgs en el Modelo Estándar, se ha aplicado con éxito a casos específicos: por ejemplo, además del ya mencionado caso de la teoría de Bardeen-Cooper-Schrieffer. La teoría actual de campo cuántica para la interacción fuerte (cromodinámica cuántica), en la aproximación donde las masas de quarks son muy pequeñas, posee simetrías quirales que se rompen espontáneamente por una condensación de pares quark-antiquark. Para un análisis histórico-filosófico de la noción de que el bosón de Higgs es una partícula compuesta, ver Borrelli (2012). Volver al texto

20.- Stewart y Golubitsky (1992), por ejemplo, mencionan un “Principio del Curie Extendido” para señalar esta situación. Volver al texto

21.- El análisis de Kosso comienza de un conjunto de ejemplos ofrecidos por 't Hooft (1980). Volver al texto

22.- La importancia de la noción de invariancia y su tratamiento en la teoría de grupos para el problema de la objetividad se explora en Born (1953), por ejemplo. Para discusiones más recientes ver Kosso (2003) y Earman (2002, 2004, secciones 6 y 7). Volver al texto

7 Bibliografia ↑

Anderson, J. L. 1967. *Principles of Relativity Physics*. New York: Academic Press.

Baker, D. y Halvorson, H. 2010. "Antimatter". *British Journal for the Philosophy of Science* 61: 93–121.

Baker, D. 2010. "Symmetry and the Metaphysics of Physics". *Philosophy Compass* 5(12): 157–1166.

Bangu, S. 2008. "Reifying mathematics? Prediction and symmetry classification". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39: 239–258.

Belot, G. 1998. "Understanding electromagnetism". *British Journal for the Philosophy of Science* 49: 531–555.

Belot, G. 2003. "Notes on symmetries". En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 391–409. Cambridge: Cambridge University Press.

Belot, G. 2008. "An Elementary Notion of Gauge Equivalence". *General Relativity and Gravitation* 40: 199–215.

Belot, G. 2012. "Symmetry and equivalence". En *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*, editado por R. Batterman, capítulo 9. New York: Oxford University Press.

Born, M. 1953. "Physical Reality". *Philosophical Quarterly* 3: 139–149. Reimpreso en *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physic*, editado por E. Castellani, 155-167. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998.

Borrelli, A. 2012. "The case of the composite Higgs: The model as a "Rosetta stone" in contemporary high-energy physics". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 43: 195–214.

Brading, K. A. 2002. "Which symmetry? Noether, Weyl and conservation of electric charge". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 33: 3–22.

Brading, K. A. 2010, "Mathematical and aesthetic aspects of symmetry" (rev. of Hon and Goldstein, 2008). *Metascience* 19: 277–280.

Brading, K. y Brown, H. R. 2003. "Symmetries and Noether's theorems". En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 89-109. Cambridge: Cambridge University Press.

Brading, K. y Brown, H. R. 2004. "Are gauge symmetry transformations observable?". *British Journal for the Philosophy of Science* 55: 645–665.

Brading, K. y Castellani, E. 2007. "Symmetries and Invariances in Classical Physics". En *Handbook of the Philosophy of Science. Philosophy of Physics*, editado por J. Butterfield y J. Earman, 1331-1367. Amsterdam: Elsevier.

Brading, K. y Castellani, E. (eds.). 2003. *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*. Cambridge: Cambridge University Press.

Brown, H. R. y Brading, K. 2002. "General covariance from the perspective of Noether's theorems". *Diálogos* 79:

59–86.

Castellani, E. 2000. *Simmetria e natura*. Roma-Bari: Laterza.

Castellani, E. 2003. “Symmetry and equivalence”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 422-433. Cambridge: Cambridge University Press.

Castellani, E. *próximamente*. “Brisures de symétrie et théories physiques”. En *La philosophie de la physique, d'aujourd'hui à demain*, editado por S. Le Bihan. Paris: Vuibert.

Castellani, E. (ed.). 1998. *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physic*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Catren, G. 2008. “Geometric Foundations of Classical Yang-Mills Theory”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39: 511–531.

Caulton, A. y Butterfield, J. 2012. “On Kinds of Indiscernibility in Logic and Metaphysics”. *British Journal for the Philosophy of Science* 63: 233–285.

Chalmers, A. F. 1970. “Curie’s principle”. *British Journal for the Philosophy of Science* 21: 133–148.

Coleman, S. 1975. “Secret symmetry: an introduction to spontaneous symmetry breakdown and gauge fields”. En *Laws of hadronic matter*, editado por A. Zichichi, 138-215. New York: Academic Press.

Curie, P. 1894. “Sur la symétrie dans les phénomènes physiques. Symétrie d’un champ électrique et d’un champ magnétique”. *Journal de Physique*, 3rd series, vol.3, 393–417.

Debs, T. y Redhead, M. 2007. *Objectivity, Invariance, and Convention: Symmetry in Physical Science*. Cambridge MA: Harvard University Press.

Dirac, P. A. M. 1931. “Quantized Singularities in the Electromagnetic Field”. *Proceedings of the Royal Society* A 133: 60–72.

Earman, J. 1989. *World enough and spacetime*. Cambridge MA - London: Massachusetts Institute of Technology Press.

Earman, J. 2002. “Laws, Symmetry, and Symmetry Breaking; Invariance, Conservation Principles, and Objectivity” (PSA 2002 Presidential Address). *Philosophy of Science* 71 (2004): 1227–1241.

Earman, J. 2003a. “Rough guide to spontaneous symmetry breaking”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 334-345. Cambridge: Cambridge University Press.

Earman, J. 2003b. “Tracking down gauge: an ode to the constrained Hamiltonian formalism”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 140-162. Cambridge: Cambridge University Press.

Earman, J. 2004. “Curie’s Principle and Spontaneous Symmetry Breaking”. *International Studies in the Philosophy of Science*, 18: 173–198.

Earman, J. y Norton, J. 1987. “What price spacetime substantivalism? The hole story”. *British Journal for the Philosophy of Science* 38: 515–525.

Fraser, D. *próximamente*. “SSB: QSM vs. QFT”. *Philosophy of Science* (PSA 2010 symposia). (Versión preliminar disponible en: http://philsci-archive.pitt.edu/9258/1/PSA2010final.pdf)

French, S. y Rickles, D. 2003. “Understanding permutation symmetry”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 212-238. Cambridge: Cambridge University Press.

French, S. y Krause, D. 2006. *Identity in Physics: A Formal, Historical and Philosophical Approach*. Oxford: Oxford University Press.

Friederich, S. *próximamente*. "Gauge Symmetry Breaking in Gauge Theories—In Search of Clarification". *European Journal for Philosophy of Science*. (Versión premilinar disponible en: https://arxiv.org/pdf/1107.4664v2.pdf)

Greaves, H. 2010. "Towards a Geometrical Understanding of the Cpt Theorem". *British Journal for the Philosophy of Science* 61: 27–50.

Greaves, H. y Wallace, D. *próximamente*. "Empirical Consequences of Symmetries". *British Journal for the Philosophy of Science*. (Versión preliminar disponible en: https://arxiv.org/pdf/1111.4309v1.pdf)

Guay, A. y Hepburn, B. 2009. "Symmetry and Its Formalisms: Mathematical Aspects". *Philosophy of Science* 76: 160–178.

Healey, R. 2001. "On the Reality of Gauge Potentials". *Philosophy of Science* 68: 432–455.

Healey, R. 2007. *Gauging What's Real*. Oxford: Oxford University Press.

Healey, R. 2009. "Perfect symmetries". *British Journal for the Philosophy of Science* 60: 697–720.

Heisenberg, W. 1926. "Mehrkörperprobleme und Resonanz in der Quantenmechanik". *Zeitschrift für Physik* 38: 411–426.

Heisenberg, W. 1932. "Über den Bau der Atomkerne. I". *Zeitschrift für Physik* 77: 1–11.

Hon, G. y Goldstein, B. R. 2008. *From Summetria to Symmetry: The Making of a Revolutionary Scientific Concept*. London: Springer.

Ismael, J. 1997. "Curie's principle". *Synthese* 110: 167–190.

Jona-Lasinio, G. 2003. "Cross fertilization in theoretical physics". En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 315-320. Cambridge: Cambridge University Press.

Kosso, P. 2000. "The empirical status of symmetries in physics". *British Journal for the Philosophy of Science* 51: 81–98.

Kosso, P. 2003. "Symmetry, objectivity, and design". En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 410-421. Cambridge: Cambridge University Press.

Ladyman, J. y Bigaj, T. 2010. "The Principle of the Identity of Indiscernibles and Quantum Mechanics". *Philosophy of Science* 77: 117–136.

Lanczos, C. 1949. *The variational principles of mechanics*. Toronto: University of Toronto Press.

Lee, T. D. y Yang, C. N. 1956. "Questions of Parity Conservations in Weak Interactions". *Physical Review* 104: 254–258.

Liu, C. 2003. "Spontaneous symmetry breaking and chance in a classical world". *Philosophy of Science* 70: 590–608.

Liu, C. y Emch, G. G. 2005. "Explaining quantum spontaneous symmetry breaking". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 36: 137–163.

Livanios, V. 2003. "Symmetries, dispositions and essences". *Philosophical Studies* 148: 295–305.

Lyre, H. 2008. "Does the Higgs Mechanism Exist?". *International Studies in the Philosophy of Science* 22: 119–133.

Mainzer, K. 1996. *Symmetries of nature*. Berlin: Walter de Gruyter.

Martin, C. 2003. “On continuous symmetries and the foundations of modern physics”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 29-60. Cambridge: Cambridge University Press.

Morrison, M. 2003. “Spontaneous symmetry breaking: theoretical arguments and philosophical problems”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 346-362. Cambridge: Cambridge University Press.

Norton, J. 1989. “Coordinates and Covariance: Einstein’s view of space-time and the modern view”. *Foundations of Physics* 19: 1215–1263.

Norton, J. 1993, “General covariance and the foundations of general relativity: eight decades of dispute”. *Rep. Prog. Phys.* 56: 791–858.

Norton, J. 2003. “General covariance, gauge theories, and the Kretschmann objection”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 110-123. Cambridge: Cambridge University Press

Nounou, A. 2003. “A fourth way to the Aharonov-Bohm effect”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 174-200. Cambridge: Cambridge University Press.

Olver, P. J. 1995. *Equivalence, Invariants, and Symmetry*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pitts, B. 2006. “Absolute Objects and Counterexamples: Jones-Geroch Dust, Torretti Constant Curvature, Tetrad-Spinor, and Scalar Density”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37: 347–371.

Pooley, O. 2003. “Handedness, parity violation, and the reality of space”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 250-280. Cambridge: Cambridge University Press.

O'Raifeartaigh, L. 1997. *The dawning of gauge theory*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Redhead, M. 2003. “The interpretation of gauge symmetry”. En *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, editado por M. Kuhlmann, H. Lyre, and A. Wayne. Singapore: World Scientific. Reimpreso en *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 124-139. Cambridge: Cambridge University Press.

Rickles, D., Smeenk, C., Lyre, H. y Healey, R. 2009. “Gauge Pressure” (rev. symposium of Healey, 2007). *Metascience* 18: 5–41.

Ryckman, T. A. 2003. “The philosophical roots of the gauge principle: Weyl and transcendental phenomenological idealism”. En *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, editado por K. Brading y E. Castellani, 61-88. Cambridge: Cambridge University Press.

Rynasiewicz, R. 1999. “Kretschmann's analysis of covariance and relativity principles”. En *The expanding worlds of general relativity*(*Einstein Studies* 7), editado por H. Goenner, J. Renn, J. Ritter y T. Sauer, 431-462. The Centre for Einstein Studies, Boston: Birkhauser.

Ruetsche, L. 2006. “Johnny's So Long at the Ferromagnet”. *Philosophy of Science* 73: 473–486.

Ruetsche, L. 2011. *Interpreting quantum theories*. New York: Oxford University Press.

Saunders, S. 2002. “Indiscernibles, general covariance, and other symmetries”. En *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics: Festschrift in Honour of John Stachel*, editado por A. Ashtekar, D. Howard, J. Renn, S. Sarkar y A.Shimony, 151-173. Dordrecht: Kluwer.

Saunders, S. 2006. “Are quantum particles objects?”. *Analysis* 66: 52–63.

Saunders, S. 2007. “Mirroring as an A Priori Symmetry”. *Philosophy of Science* 74: 452–480.

Shubnikov, A. V. y Koptsik, V. A. 1974. *Symmetry in science and art*. London: Plenum Press.

Smeenk, S. 2006. “The Elusive Higgs Mechanism”. *Philosophy of Science* 73: 487–499.

Stewart, I. y Golubitsky, M. 1992. *Fearful symmetry. Is God a geometer?* Oxford: Blackwell.

Strocchi, F. 2008. *Symmetry Breaking*. Berlin-Heidelberg: Springer.

Strocchi, F. 2012. “Spontaneous Symmetry Breaking in Quantum Systems. A review for Scholarpedia”. arXiv: 1201. 5459v1 [physics.hist-ph].

Struyve, W. 2011. “Gauge Invariant Accounts of the Higgs Mechanism”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 42: 226–236.

Teller, P. 2000. “The gauge argument”. *Philosophy of Science* 67: S466-S481.

‘t Hooft, G. 1980. “Gauge theories and the forces between elementary particles”. *Scientific American* 242 (June): 90–166.

van Fraassen, B. C. 1989. *Laws and symmetry*. Oxford: Oxford University Press.

Wallace, D. 2009. “QFT, Antimatter, and Symmetry”. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 40: 209–222.

Weyl, H. 1952. *Symmetry*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Wigner, E. P. 1927. “Einige Folgerungen aus der Schrödingerschen Theorie für die Termstrukturen”. *Zeitschrift für Physik* 43: 624–652.

Wigner, E. P. 1937. “On the Consequences of the Symmetry of the Nuclear Hamiltonian on the Spectroscopy of Nuclei”. *Physical Review* 51: 106–119.

Wigner, E. P. 1939. “On Unitary Representations of the Inhomogeneous Lorentz Group”. *Annals of Mathematics* 40: 149–204.

Wigner, E. P. 1967. *Symmetries and reflections*. Bloomington, Indiana: Indiana University Press.

8 Cómo Citar ↑

Brading, Katherine y Castellani, Elena. 2017. "Simetría y ruptura de la simetría". En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Simetría_y_ruptura_de_la_simetría

9 Derechos de autor ↑

ISSN: 2524-941X