

Simetría y leyes en la conservación de la física

Por Luis de la PEÑA AUERBACH

Nuestra experiencia cotidiana, aun en sus formas meramente primarias, nos muestra que en la naturaleza se suceden ininterrumpidamente unos cambios a otros. La observación más atenta tiende a confirmar la existencia de este incesante suceder de cambios: aun aquello que en el primer análisis pudo parecer estático se manifiesta, bajo un estudio más atento, sumido en un complejo enjambre de relaciones y condiciones que lo afectan y modifican constantemente.

La validez de esta afirmación elemental fue reconocida desde el inicio del estudio de la naturaleza. Así, Heráclito afirmó que en el mundo nada es eterno, que todo se encuentra en un "fluir" constante. Concebido este principio en el curso de los siglos con diferencias, sustanciales o de matiz por las diversas escuelas y corrientes filosóficas, sin embargo, enunciados como el de Heráclito llegan hasta nosotros conservando su validez esencial. El científico moderno está dispuesto a aceptar que lo que tiene frente a sí, sea lo que sea, necesariamente dejará de ser lo que es hoy, a través de una serie de procesos de transformación.

La física —como lo hace cualquier otra ciencia— recoge este hecho observacional y se impone como parte esencial de sus tareas encontrar una adecuada descripción de los cambios que se operan en la naturaleza en sus diversos niveles de organización —en lo que concierne naturalmente a esta ciencia— y establecer las leyes que rigen dichos cambios, tratando de determinar, en primer lugar, las relaciones de causa a efecto y el papel que juegan los diversos elementos del sistema estudiado. Así, por ejemplo, la física contemporánea se preocupa tanto de los procesos de transformación de las partículas elementales —los constituyentes primarios de la materia, según los conocimientos actuales—, como de la evolución de las estructuras cósmicas —los aglomerados de materia más grandes conocidos por la ciencia de nuestros días—, pasando por los diversos niveles de organización o estadios estructurales de la materia que nos son conocidos.

1. *Principios de conservación.* Pero el paulatino desarrollo de nuestros conocimientos nos ha demostrado que no basta estudiar lo variable para obtener una adecuada comprensión de los fenómenos que ocurren en la naturaleza: Paralelamente al análisis de lo cambiante, es importante el conocimiento de lo que se conserva. Más aún, el estudio de lo que se conserva —de los invariantes, en el lenguaje de la física— se ha manifestado esencial para el desarrollo científico contemporáneo. Baste señalar el hecho de que *toda* teoría física posee entre sus leyes fundamentales al menos un principio de conservación, para evidenciar el enlace y la importancia de estos principios.

Por una parte, se afirma que el científico contemporáneo reconoce que todo cambia y, por otra, que acepta la existencia de invariantes en la naturaleza. Entre estas afirmaciones no existe ninguna contradicción una vez que se precisa y limita el sentido y alcance de cada una de ellas.

Cuando se afirma que todo cambia, se tiene en mente a los *objetos* de la naturaleza y a periodos de tiempo suficientemente largos para asegurar la validez de la afirmación en cada caso. Un ejemplo permitirá aclarar estas ideas. El electrón es una partícula estable; esto quiere decir que en forma "espontánea" un electrón no se transforma en otras partículas diferentes y que tiene, por lo tanto, una vida media infinita. ¿Significa esto, sin embargo, que un electrón "libre" sumergido en el espacio cósmico permanecerá en él indefinidamente sin alteración alguna? No, no significa esto. La probabilidad de que dicho electrón, se encuentre donde se encuentre, participe en *cualquier* reacción entre partículas elementales y se transforme en otro objeto es diferente de cero; por tanto, tarde o temprano, pero dentro de un tiempo finito por extraordinariamente grande que nos pueda parecer, participará en alguna reacción y se transformará.

Cuando, por otra parte, se habla de invariantes, se tiene en mente no necesariamente a objetos —aunque tampoco se les excluya terminantemente—, sino a cosas diversas como son, di-



...cuando se afirma que todo cambia, se tiene en mente a los objetos de la naturaleza...

gamos, algunas propiedades de objetos. Precisaremos un tanto estas ideas mediante ejemplos.

Probablemente el principio de conservación de la energía que establece que durante un proceso cualquiera la energía total del sistema se conserva, sea el principio más general conocido por la ciencia de nuestros días. He aquí un principio de conservación que se refiere no a objetos, sino al estado de dichos objetos y de sus interacciones. Pero también se pueden tener en mente objetos cuando se habla de leyes de conservación; en este caso, sin embargo, dichas leyes tienen un contenido tal que no entran en conflicto con las afirmaciones anteriores. Veamos, para aclarar, el significado de una de estas leyes, la que establece que el número de ciertas partículas llamadas leptones —el electrón es una de ellas— se conserva en las reacciones entre partículas. Se considera normalmente que esta ley es exacta, es decir, que se cumple en todas las circunstancias, aunque no está totalmente excluido un eventual cambio de este punto de vista en el futuro. Si aplicamos esta ley al electrón libre en el espacio cósmico y tomamos en cuenta a su vez la ley de conservación de la carga eléctrica —el electrón, como es bien sabido, posee carga -1 —, concluimos que *mientras* dicho electrón se encuentre libre, es decir, aislado del resto del universo, subsistirá como electrón, o, lo que es lo mismo, no sufrirá transformación alguna. Así pues, cuando se asegura que este electrón más tarde o más temprano se transformará, lo que se está afirmando de hecho es que dicho electrón no puede permanecer indefinidamente “libre”, sino que en algún momento entrará necesariamente en interacción con el resto del universo y se transformará. La justa combinación de ambos principios equivale a afirmar la imposibilidad de aislar absoluta y permanentemente una parte del universo del resto.

Veamos otro aspecto de esta misma cuestión. Supóngase que el proceso que transforma al electrón es una interacción con un electrón positivo o positrón; como producto de esta reacción podríamos obtener radiación gamma, es decir, partículas que no son leptones. Esto es debido a que la ley establece sólo la conservación del número leptónico, es decir, del número de leptones *menos* el número de antileptones (el positrón es un antileptón). En nuestro ejemplo, este número es cero y como producto de la reacción electrón + positrón no necesariamente deberán producirse leptones, de acuerdo con esta misma ley (de hecho, debido a esto se trata de una ley de conservación de propiedades, más que de objetos).

Probablemente, situaciones de este género se puedan aclarar mejor recurriendo a un ejemplo de la física elemental, la cual encierra entre sus leyes la de la conservación de la carga eléctrica. Supóngase que con las partículas mencionadas (positrón con carga $+1$ y electrón con carga -1) se construye un átomo (el llamado positronio, el átomo más ligero conocido). La carga eléctrica neta de este átomo sería nula. Pero la anulación de la carga eléctrica neta no implica que durante el proceso de producción del positronio, las propiedades eléctricas de sus constituyentes se hayan perdido, sino simplemente que sus efectos se han neutralizado mutuamente. La existencia *latente* de la carga eléctrica la podemos verificar no sólo por la existencia misma del positronio —ya que éste no se formaría sin cargas eléctricas—, sino también descomponiéndolo una vez más en sus elementos constituyentes, cada uno de los cuales manifestaría nuevamente sus propiedades eléctricas originales. Algo enteramente análogo sucede con el número leptónico.

Esta idea, hoy simple, de visualizar por el conocimiento que tenemos de la estructura atómica de la materia, requirió de más de un centenar de años para ser aceptada como parte del sistema de la física. En efecto, desde los trabajos iniciales de Franklin, la idea de la “conservación de la electricidad” fue unánimemente aceptada y sirvió de principio rector en las investigaciones posteriores. Esta fe en la conservación de la electricidad, según Franklin y muchos otros investigadores de primera línea, eliminaba la posibilidad de la existencia de una electricidad positiva y otra negativa, pues es imposible entender, se afirmaba, cómo dos fluidos diferentes se aniquilan mutuamente al entrar en contacto. Vemos que en realidad no se trata de aniquilación de fluidos diferentes, sino simplemente de compensación de efectos, manteniéndose en forma latente ambas electricidades, para emplear el lenguaje original. Precisamente porque se trata sólo de compensación de efectos y no de aniquilación de propiedades, tiene lugar la ley de conservación de la carga eléctrica.

2. En forma elemental, los principios o leyes de conservación pueden ser definidos como la exigencia de la constancia de algo que forma parte del sistema de la teoría. Habitualmente se considera la existencia de leyes de conservación de objetos, propiedades y relaciones.

Entre las primeras se catalogan leyes tales como las de con-

servación del número de leptones y del número de bariones, pero no existe ninguna ley de conservación del número total de partículas; estrictamente, debemos considerar que el número leptónico, el número bariónico, etcétera, análogamente a lo que sucede con la carga eléctrica, representan *propiedades* de las partículas y por ello, estas leyes más que de conservación de objetos, lo son de propiedades. Como ejemplos de leyes de conservación de propiedades, se tienen, dentro de los marcos de la física prerrelativista, los que se refieren a la masa y a la carga totales del sistema estudiado. Finalmente, quizás el ejemplo más importante de ley de conservación de relaciones, sea el llamado principio de invariancia relativista, que establece que la *forma* de las ecuaciones que describen los fenómenos físicos es la misma, independientemente del sistema inercial en que se expresan.

La física clásica logró establecer varias leyes de conservación: del impulso o momentum lineal, del momento del impulso o momentum angular, de la energía, de la masa y de la carga eléctrica. Dentro de los marcos de las teorías clásicas, a las tres últimas se les asignaba carácter de absolutas o exactas. La física contemporánea ha ampliado el número de las leyes de conservación conocidas y ha reformulado en cierta medida alguna de las viejas leyes. Por ejemplo, es bien conocido en la actualidad el fenómeno de transformación de masa en energía y viceversa; evidentemente, la existencia de estos procesos implica la necesidad de revisar las anteriores leyes *independientes* de conservación de la masa y la energía y de sintetizarlas en una sola ley más general, la que deberá desdoblarse en las viejas leyes al introducir ciertas aproximaciones (en concreto, la aproximación no relativista). Entre las nuevas leyes de conservación podemos recordar, a título de ejemplo, las que se refieren a la invariancia de los números leptónico y bariónico, de la extrañeza, del espín isobárico o isotópico, de la paridad, etc. Todas estas leyes se refieren a propiedades de los elementos de la materia y, con excepción de las dos primeras, son sólo aproximadas, es decir, se satisfacen únicamente bajo ciertas condiciones.

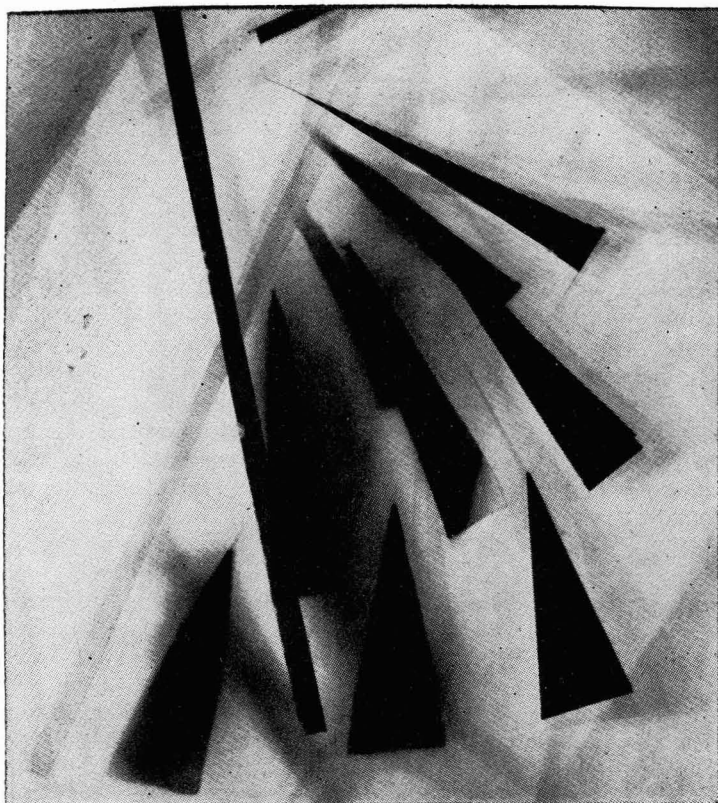
De lo que se ha dicho queda claro que un principio o ley de conservación establece que algo permanece invariante, mientras que sus elementos constituyentes pueden cambiar: es en general, por lo tanto, un principio de conservación y transformación. Poco sentido tendría para un físico establecer que cinco, digamos, se mantiene igual a cinco. Pero sí es importante saber que si se tienen, sea el caso, tres cantidades que varían constantemente, su suma es, sin embargo, siempre la misma e igual a cinco. Esto es precisamente lo que sucede con las leyes de conservación. Así por ejemplo, el principio de conservación de la energía establece que la suma de diversas cantidades, muy diferentemente medidas unas de otras y las cuales varían constantemente transformándose unas en otras (energía cinética, térmica, gravitacional, etc.), permanece invariable en todos los procesos naturales.

Es así como las leyes de conservación asocian lo invariante, lo que se conserva, a lo que varía, a lo que cambia.

3. *Relaciones de simetría.* Siguiendo su propio camino, las nociones de simetría surgieron y se consolidaron en el dominio de la ciencia. De hecho, argumentos de simetría fueron empleados antes que se conocieran los principios de conservación, aunque frecuentemente en forma asaz ingenua. Baste recordar a guisa de ejemplo, las afirmaciones ya seculares respecto de la armonía del universo, los intentos de sustituir las explicaciones más variadas —por ejemplo, sobre la estructura del sistema planetario— por relaciones simples entre figuras geométricas elementales, las consideraciones del número como esencia de las cosas, etcétera.

Como en el caso de las leyes de conservación, se distinguen habitualmente tres tipos de simetrías —aunque otras clasificaciones son posibles y útiles—: simetrías de los objetos, de las propiedades y de las relaciones. La física clásica hizo uso extensivo pero circunstancial de estos dos primeros tipos de simetría, pero se limitó sólo a registrar la existencia de ciertas simetrías de relaciones, sin hacer uso explícito de ellas. Sin embargo, son precisamente estas últimas las que se han manifestado de importancia fundamental para la física contemporánea, la que pretende explotarlas a fondo.

El concepto de simetría asocia el cambio a la invariancia: descubrimos la existencia de una simetría mediante un movimiento determinado o, en términos más generales y adecuados, mediante una transformación apropiada, la que, una vez realizada, revela al existencia de dicha simetría a través de la conservación de ciertas características del sistema considerado. Tomemos como ejemplo un cuadrado —entendido como figura geométrica, no como cuerpo físico. Si realizamos una rotación



...el vínculo entre simetría e invariancia...

de 90° en torno a un eje perpendicular al plano de la figura y que pasa por el punto en que se cruzan sus diagonales, la posición del cuadrado, es decir, su descripción completa, no varía en lo absoluto. He aquí cómo el cambio nos conduce a la invariancia en presencia de simetrías y como ellas son reveladas por la invariancia frente al cambio.

Cuando se procede siguiendo el método anterior, se dice que la invariancia debida a la simetría se descubre mediante una transformación *activa*, es decir, efectuando cambios en el sistema (se ha hecho girar al cuadrado). En muchos casos también es posible descubrir la existencia de invariancias mediante transformaciones pasivas, es decir, observando al sistema, sin alterarlo, desde diversos marcos de referencia (en nuestro ejemplo, girando nosotros en torno del cuadrado mientras éste permanece en reposo). Para descubrir la simetría es enteramente indiferente si la transformación que se realiza es activa o pasiva.

4. *Simetría y leyes de conservación.* El vínculo entre simetría e invariancia en forma alguna está limitado al terreno de la geometría —donde es trivial la existencia de dicho vínculo— sino que, por lo contrario, es perfectamente general: a cada simetría, cualquiera que sea su naturaleza, está asociado un determinado invariante. Esto es válido, naturalmente, también en la física: a cada simetría de una teoría física corresponde un determinado invariante. Esta íntima conexión entre simetría e invariancia hace plausible la existencia de vínculos estrechos entre las propiedades de simetría de una teoría física y sus leyes de conservación. Esta posibilidad ha sido estudiada ampliamente desde principios de nuestro siglo; se pudo demostrar, mediante el empleo de métodos matemáticos sumamente generales, que a cada simetría de una teoría física corresponde una cierta ley de conservación y que cada ley de conservación refleja la existencia de una simetría.

Este elegante teorema ha resultado un arma sumamente poderosa —en ocasiones incluso esencial— de la física contemporánea. Con él se explica, por ejemplo, el porqué del uso cada vez más extenso que de la teoría de grupos —la teoría matemática de las simetrías— hace la física de frontera: los problemas que el físico de hoy trata de resolver son sumamente complejos y en ocasiones no cuenta para iniciar sus investigaciones con más información que la que se refiere a algunas de las simetrías del sistema.

Veamos con dos ejemplos simples de la física clásica cómo opera este teorema. El primero se refiere a los fenómenos electromagnéticos: si se analizan las ecuaciones de Maxwell, es decir, las leyes básicas de la electrodinámica, pronto se descubre que ellas poseen una simetría interna muy particular —entre otras, naturalmente— que los físicos llaman invariancia de calibre o de norma. La aplicación del teorema en cuestión permite demostrar que la existencia de esta simetría particular implica la conservación de la carga eléctrica. Puede parecer esto sólo de interés académico, pero para el físico ha resultado muy importante, pues ha aprendido a construir teorías diversas —

muchas se investigan actualmente— que, por su forma, garantizan desde el inicio la validez del principio de conservación de la carga eléctrica: son teorías con invariancia de norma.

El segundo ejemplo se refiere a la mecánica clásica de la partícula. Si se analiza la segunda ley de Newton, es decir, la ley fundamental de la mecánica newtoniana, se encuentra que ella posee varias simetrías de relaciones; en concreto, se demuestra que la *forma* de dicha ley permanece invariable: a) si el sistema de referencia se *desplaza* arbitrariamente una distancia fija o proporcional al tiempo; b) si el sistema de referencia se *gira* en un ángulo dado, pero arbitrario, y c) si el origen del *tiempo* se desplaza arbitrariamente. Estas tres invariancias son simplemente una consecuencia de tres propiedades de simetría que se asignan clásicamente al espacio — tiempo: a) el espacio es homogéneo, es decir, todos sus puntos son de igual categoría; b) el espacio es isotrópico, o bien, todas sus direcciones tienen la misma categoría, y c) el tiempo es “uniforme” o si se quiere, a todos los “puntos” de la escala del tiempo se les debe asignar igual categoría. En este caso, el teorema discutido permite demostrar que a cada una de estas simetrías del espacio-tiempo, reflejadas en las correspondientes invariancias de la segunda ley de Newton, corresponde uno de los tres invariantes fundamentales de la mecánica clásica. En concreto, se demuestran las siguientes correspondencias:

homogeneidad del espacio $\leftrightarrow$ invariancia ante rotaciones espaciales $\leftrightarrow$ ley de conservación del impulso o momentum lineal

isotropía del espacio $\leftrightarrow$ invariancia ante rotaciones espaciales $\leftrightarrow$ ley de conservación del impulso angular o momento del momentum

uniformidad del tiempo $\leftrightarrow$ invariancia ante desplazamientos del origen de la escala de tiempo $\leftrightarrow$ ley de conservación de la energía

Así, por ejemplo, si una teoría clásica ha de satisfacer el principio de conservación de la energía, necesariamente dicha teoría ha de ser insensible a la colocación del origen de la escala de tiempo, o, lo que es lo mismo, ha de ser invariante ante desplazamientos de la coordenada temporal.

En los ejemplos anteriores se ha hecho referencia sólo a simetrías continuas —es decir, simetrías que se identifican mediante transformaciones continuas: translación, rotación, etcétera—; pero un sistema puede poseer también simetrías discretas, como es, por ejemplo, la simetría especular. Naturalmente, a estas últimas corresponden invariantes discretos, mientras que a las primeras se asocian invariantes continuos. Sirva como ejemplo el caso citado de la simetría especular: a ella deberá corresponder un invariante que puede tomar uno de sólo dos valores posibles, puesto que la reflexión especular produce sólo dos sistemas (el objeto mismo y su imagen especular); esta cantidad con sólo dos posibles valores (que se toman arbitrariamente como $+1$ y -1) es la llamada paridad del sistema. De lo dicho anteriormente, se infiere que aquellos sistemas que posean simetría especular deberán conservar su paridad, pero que tan pronto sea violada dicha simetría por cualquier causa, automáticamente el sistema dejará de conservar su paridad. Así, la reciente predicción teórica de los físicos chinos Lee y Yang y su posterior comprobación experimental por la Sra. Wu y colaboradores, respecto a que en ciertas reacciones entre partículas elementales la paridad no necesariamente se conserva, pese a nuestra anterior experimentalmente injustificada creencia de lo contrario, conduce directamente a afirmar que dichos sistemas no poseen simetría especular. Este simple dato, en apariencia poco importante, permitió establecer un conjunto de propiedades de los neutrinos — partículas especialmente difíciles de observar. Con ello, la teoría de las interacciones en cuestión —las llamadas interacciones débiles— pudo salir de un largo periodo de estancamiento.

Otra consecuencia general del teorema sobre simetrías y leyes de conservación es que dado que algunas leyes de conservación son —o, al menos aparentan ser— exactas y otras sólo aproximadas, deben existir en la naturaleza simetrías “inviolables” y simetrías que pueden ser violadas, al menos en ciertas condiciones.

La validez simultánea de las relaciones de simetría y de las leyes de conservación, permite afirmar que en la naturaleza lo que cambia, cambia porque algo se conserva y lo que se conserva, se conserva en virtud de lo que cambia. Existe una profunda unidad de lo que varía y lo invariante, unidad que corresponde a la relación biunívoca entre simetría y ley de conservación.