

**Quinta parte**  
Contribuciones  
a la ciencia



## Introducción

Por Valentine Bargmann, profesor de Física Matemática, de la Universidad de Princeton.

### I

La siguiente es una breve sinopsis del desarrollo de las principales teorías físicas de Einstein. En cada caso citamos la fecha de publicación de las ideas fundamentales y la fecha de publicación de la forma definitiva de la teoría, al tiempo que dejamos de lado muchos artículos —no poco importantes— que describen aplicaciones y retoques de las teorías básicas.

#### 1. Teoría de la relatividad.

##### *a)* Teoría restringida.

El primer documento de la teoría de la relatividad restringida (escrito en 1905, cuando Einstein era un empleado de la Oficina de Patentes Suiza, en Berna) presenta ya la teoría en su forma final. En un segundo escrito publicado poco tiempo después, Einstein señaló la más importante conclusión de esta teoría, es decir, la equivalencia de energía y masa, expresada en la conocida ecuación:  $E = mc^2$ .

##### *b)* Teoría general.

La historia de la teoría de la relatividad general es mucho más larga. En un estudio acerca de la teoría de la relatividad restringida,

que había aparecido en el año 1907, Einstein señalaba la necesidad de una generalización y presentaba la idea fundamental de que la generalización ha de estar basada en la equivalencia de la masa inercial y la gravitatoria. Un trabajo escrito en 1911 discute algunas de las conclusiones de la teoría general referidas a la influencia de la gravedad sobre la luz: 1) la influencia de un campo gravitatorio sobre la frecuencia de las líneas espectrales (desviación gravitatoria roja); 2) la curvatura de los rayos luminosos por obra del campo gravitatorio del sol. (Algunos detalles fueron modificados más tarde.)

Después de mucho más trabajo de investigación —en especial en el campo de la fundamentación matemática de la teoría— la forma definitiva de la relatividad general fue publicada en 1916. (Por esos días Einstein había deducido el tercer «efecto astronómico» de la relatividad general, o sea, el movimiento del perihelio de Mercurio.)

c) Otros trabajos sobre la teoría general.

Los problemas de la relatividad general han ocupado a Einstein hasta el presente. Hacemos mención de tres de ellos que, al parecer, poseen una particular importancia: 1) cosmología, 2) el problema del movimiento, 3) la teoría del campo unificado.

1) Toda la cosmología moderna está relacionada con el trabajo que Einstein publicara en 1917, donde por primera vez aplicó la relatividad general a los problemas de la cosmología y de este modo situó la especulación cosmológica sobre una base firme. (Si bien por entonces Einstein consideraba la idea de un universo estático, el desarrollo posterior ha dado primacía al concepto de un «universo en expansión», en vista de los datos astronómicos. La cosmología es activamente estudiada por muchos científicos que tratan de hallar una teoría coherente y relacionada con la constante aparición de nuevos datos.)

2) La relatividad general estaba basada, en su origen, en dos hipótesis independientes: las ecuaciones de campo para el campo gravitatorio y la ley del movimiento de las partículas materiales. En 1927 Einstein ya había considerado el problema de deducir la ley del movimiento a partir de las ecuaciones de campo y volvió sobre ello de manera reiterada. La solución definitiva surgiría en 1949 (fue obtenida en colaboración con L. Infeld). Así quedó demostrado que las ecuaciones de campo, en sí mismas, bastaban como base de la teoría.

3) Desde el comienzo, la teoría de la relatividad general fue fundamentalmente una teoría del campo gravitatorio, en la medida en que las ecuaciones de campo para el campo gravitatorio surgieron, de un modo en esencia preciso, de las ideas básicas de la relatividad general. Otros campos pueden ser incorporados al esquema de la relatividad general, de un modo igualmente en esencia preciso, en el momento en que su estructura llegue a ser conocida. Pero la conexión era en cierta medida «suelta», toda vez que la relatividad general no podía predecir ni la existencia ni la estructura de cualquier otro campo (por ejemplo, la del campo electromagnético). Por lo tanto, muchos científicos (Weyl, Kaluza y Eddington, entre otros) intentaron desde un primer momento extender o generalizar la teoría, para lograr que abarcara todos los campos o, cuando menos, los campos gravitatorio y electromagnético. Por diversos motivos los intentos iniciales no fueron satisfactorios. Einstein ha trabajado sin descanso en este problema a partir del año 1923 y ha modificado una y otra vez la forma de la teoría. La versión más reciente fue iniciada en 1945 y recibió su forma definitiva en 1953 (fue publicada como Apéndice II a la cuarta edición de *The Meaning of Relativity*).

## 2. Teoría Cuántica.

En 1900, tan pronto como Max Planck planteó la teoría cuántica, Einstein se convirtió en el principal pionero del nuevo campo. Su primera contribución apareció en el mismo año (1905) —incluso en el mismo número de los *Annalen der Physik*— en que apareciera su primer trabajo sobre la relatividad. Allí introdujo el concepto de los cuantos de luz o fotones y proporcionó una base para la mayor parte de los trabajos posteriores acerca de la teoría del cuanto, en especial para la teoría de Bohr acerca del átomo. En 1917 aparecería uno de los escritos tardíos más importantes sobre este tema, en el cual Einstein, sobre la base del concepto de las probabilidades de transición, y además de un penetrante análisis de las propiedades de los fotones, proporcionaría una nueva derivación de la ley de la radiación de Planck. Aquel concepto ha sido considerado básico a partir de entonces.

Entre las distintas contribuciones de Einstein, mencionamos la primera aplicación de la teoría cuántica a la teoría del calor especí-

fico (1907) y los particularmente importantes escritos sobre la teoría cuántica de los gases (1924-25). Con estos se impusieron el nuevo tipo de estadística conocida como estadística de Bose-Einstein y también en ellos están contenidas ideas de amplio alcance sobre las ondas de electrones, ideas que sirvieron de guía a Schrödinger en sus trabajos sobre mecánica ondulatoria.

### 3. Teoría cinética de la materia.

Entre 1902 y 1904, Einstein escribió varios trabajos en los que establecía en forma independiente la teoría de la mecánica estadística, de un modo análogo al que había empleado el gran físico norteamericano J. W. Gibbs. (La mecánica estadística o teoría cinética de la materia determina que las propiedades térmicas de la materia en su conjunto provienen de su naturaleza, compuesta por átomos [partículas últimas] que se mueven según las leyes mecánicas.) La secuela de significación mayor ha sido un tercer trabajo, muy importante, escrito en 1905: el que trata sobre el movimiento browniano. En ese estudio, y sobre la base de la teoría cinética, Einstein predijo el movimiento de partículas minúsculas suspendidas en un líquido. (Ese movimiento había sido observado unos cien años antes por el botánico inglés Robert Brown.) A la inversa, la investigación experimental de esos movimientos (en especial el trabajo del físico francés Perrin, que se había inspirado en la teoría de Einstein) condujo a la verificación de las hipótesis básicas de la teoría cinética de la materia.

### **Principios de física teórica**

Discurso inaugural ante la Academia Prusiana de Ciencias en 1914. Einstein había sido nombrado miembro de la Academia en el año 1913. En 1933, después del surgimiento del régimen de Hitler, renunció a su puesto en la Academia. (Véase la correspondencia, pp. 207 y ss. de este volumen.) Publicado por la Academia Prusiana de Ciencias, 1914.

Caballeros:

En primer lugar debo dar a ustedes mis más sinceras gracias por haberme concedido el mayor honor que se puede conferir a un hom-

bre como yo. Al elegirme miembro de esta Academia, me han liberado ustedes de las distracciones y exigencias de una vida profesional y han hecho posible mi entera dedicación a los estudios científicos. Sólo les pido que continúen creyendo en mi gratitud y en mi celo, aun cuando mis esfuerzos puedan parecerles pobres.

Tal vez se me permitirá ahora hacer algunas consideraciones generales acerca de mi esfera de actividad, la física teórica, en relación con la física experimental. Hace unos días, un amigo mío, matemático, me comentaba en tono de broma: «Un matemático es capaz de hacer muchas cosas, pero nunca lo que tú quieres que haga en aquel momentos». A menudo esta misma observación puede aplicarse al físico teórico, cuando el físico experimental acude a él. ¿Cuál es la causa de esta peculiar falta de adaptabilidad?

El método del teórico significa partir de la base de postulados generales o «principios» para deducir de ellos conclusiones. O sea que el trabajo se divide en dos partes. En primer lugar, ha de descubrir sus principios y después tendrá que extraer las conclusiones que se desprendan de ellos. Para esta segunda tarea, el físico ha recibido una excelente formación en la universidad. Por lo tanto, si el primer estadio de los problemas está ya resuelto para cierto campo o para cierto conjunto de fenómenos correlacionados, este científico puede estar seguro de su éxito, siempre y cuando su inteligencia y su capacidad de trabajo sean adecuadas. La primera de estas tareas, es decir, la de establecer los principios que deberán servir como punto de partida de sus deducciones, tiene una naturaleza muy especial. En este caso no existe un método que pueda aprenderse y aplicarse sistemáticamente para llegar al objetivo previsto. El científico debe extraer esos principios con habilidad de la naturaleza, percibiendo a partir de amplios conjuntos de hechos empíricos, ciertos rasgos generales que le permitan una formulación precisa.

Una vez cumplida con éxito esa formulación, una deducción seguirá a otra deducción y así, a menudo, se revelarán relaciones imprevistas, que se extienden mucho más allá del ámbito de la realidad que brindaran los principios iniciales. Pero en tanto no se descubran los principios que sirven de base para extraer deducciones, el hecho empírico individual no tiene valor para el teórico, quien en rigor tampoco puede hacer nada con leyes generales aisladas descubiertas empíricamente. El físico teórico se hallará impotente frente a unos resultados inconexos, ofrecidos por la investigación empíri-

ca, hasta que no se le hayan revelado los principios que le servirán como base para el razonamiento deductivo.

Esta es la posición en que se encuentra la teoría, de momento, ante las leyes de la radiación térmica y del movimiento molecular a bajas temperaturas. Hasta hace unos quince años, nadie dudaba de la posibilidad de dar una explicación correcta de las propiedades eléctricas, ópticas y térmicas de la materia sobre la base de la mecánica de Galileo-Newton, aplicada al movimiento molecular; y de la teoría de Maxwell sobre el campo electromagnético. Pero Planck demostraría que, para establecer una ley de radiación térmica acorde con la experiencia, era necesario emplear un método de cálculo cuya incompatibilidad con los principios de la física clásica se hacía a cada instante más evidente. Con ese método de cálculo, Planck introdujo en la física la hipótesis cuántica, que ya ha recibido una brillante confirmación. Con esta hipótesis cuántica, Planck ha destronado la aplicación de la física clásica en los casos en que masas suficientemente pequeñas se muevan a velocidades lo bastante bajas y con niveles de aceleración lo bastante elevados; en consecuencia, las leyes del movimiento propuestas por Galileo y Newton sólo pueden ser aceptadas como leyes de limitada validez. A pesar de sus esfuerzos perseverantes, los teóricos aún no han logrado reemplazar los principios de la mecánica por otros que concuerden con la ley de la radiación térmica, de Planck, o hipótesis cuántica. Por muy definitivamente que se haya establecido que el calor ha de ser explicado por el movimiento molecular, tendremos que reconocer que hoy nuestra posición ante las leyes fundamentales de este movimiento se asemeja a la de los astrónomos anteriores a Newton ante los movimientos de los planetas.

Me he referido a un grupo de hechos para cuyo análisis teórico carecemos de principios básicos. Pero bien podría ocurrir que unos principios claramente formulados nos condujeran a conclusiones que entera o casi enteramente fueran a dar fuera del ámbito de la realidad que hoy es accesible a nuestra experiencia. En este caso, se necesitaría quizás un largo período de investigación empírica para corroborar si los principios teóricos se corresponden con la realidad. De esto tenemos un ejemplo en la teoría de la relatividad.

Un análisis de los conceptos fundamentales de espacio y tiempo nos ha demostrado que el principio de la velocidad constante de la luz en el vacío, que surge de la óptica de los cuerpos en movimiento,



no nos obliga a aceptar la teoría de un éter luminífero estático. Por el contrario, ha sido posible estructurar una teoría general que da cuenta de que los experimentos que se llevan a cabo sobre la tierra nunca revelan el movimiento de traslación de nuestro planeta. Esto implica la utilización del principio de la relatividad, que dice que las leyes de la naturaleza no alteran su forma cuando se pasa del sistema original (admisible) de coordenadas a uno nuevo por un movimiento de traslación uniforme con respecto al primero. Esta teoría ha logrado una confirmación sustancial por la experiencia y nos ha llevado a una simplificación de la descripción teórica de grupos de hechos vinculados entre sí.

Por otra parte, desde el punto de vista teórico, esta teoría no es completamente satisfactoria, porque el principio de la relatividad que hemos formulado habla de un movimiento *uniforme*. Si es verdad que no se debe adjudicar un significado absoluto al movimiento *uniforme* desde el punto de vista físico, se plantea el problema de si esta aseveración debe o no ser extendida a los movimientos no uniformes. Pues bien, se ha comprobado que se llega a una extensión de la teoría de la relatividad si se parte del principio de relatividad ampliado en este sentido. De esta manera, llegamos a una teoría general de la gravedad, que incluye la dinámica. En el momento presente, no obstante, no poseemos el conjunto necesario de hechos que nos permitan comprobar la legitimidad de la introducción del principio postulado.

Hemos afirmado que la física inductiva plantea preguntas a la deductiva y viceversa y para responder a esas preguntas debemos poner en juego todas nuestras energías. ¡Hago votos para que logremos un progreso permanente gracias a nuestros esfuerzos unidos!

## Principios de investigación

Discurso pronunciado durante la celebración del sexagésimo aniversario de Max Planck (1918), en la Sociedad de Física de Berlín. Publicado en *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934. Max Planck (1858-1947) durante muchos años fue catedrático de física teórica en la Universidad de Berlín. Su más importante contribución a la física es su teoría cuántica, que había formulado en 1900 y que constituyó la base para todo el desarrollo de la moderna física atómica. Junto con Planck, Einstein fue el primero que trabajó en el nuevo campo, en particular en su teoría de los cuantos de luz

o fotones (1905) y en la del calor específico (1907). Y fue él quien, más que otros científicos, comprendió el carácter fundamental y profundo del concepto de cuanto en todas sus proyecciones.

En el templo de la ciencia hay muchos tabernáculos y muy distintos entre sí son, por cierto, quienes a ellos acuden, acuciados por motivos bien diversos. Muchos obtienen de la ciencia un gozoso sentimiento de poderío y superioridad intelectual; la ciencia es su deporte favorito y en ella buscan experiencias vívidas y la satisfacción de sus ambiciones. En ese mismo templo, habrá otros que ofrecerán los productos de sus cerebros para sacrificarlos con propósitos utilitarios. Si un ángel del Señor llegara para arrojar del templo a todos los que pertenecen a esas dos categorías, quedarían sólo unos pocos hombres, tanto del tiempo presente como del pasado. Nuestro homenajado, Max Planck, sería uno de ellos y por tal motivo le estimamos profundamente.

Soy consciente de que con esta imagen he expulsado a la ligera a muchos hombres excelentes que han sido responsables —importantes y hasta casi totales— de la construcción del templo de la ciencia. Y en muchos casos el ángel se encontraría con que le resulta muy difícil decidirse. Pero de algo estoy seguro: si los tipos de científicos a los que hemos arrojado fueran los únicos existentes, el templo jamás habría llegado a existir, tal como no podría haber un bosque donde sólo crecen enredaderas. Para estas personas cualquier esfera de la actividad humana sería válida, llegado el caso. Que se conviertan en ingenieros, militares, comerciantes o científicos sólo dependerá de las circunstancias. Pero echemos una mirada a aquellos que fueron favorecidos por el ángel. La mayoría de ellos son en cierta medida extravagantes, poco comunicativos y solitarios, muy poco parecidos entre sí, a pesar de estas características comunes y a diferencia de quienes fueron arrojados del templo. ¿Qué los ha llevado al templo? Esta es una pregunta muy difícil y no puede ser respondida con una única contestación. En principio, creo, junto con Schopenhauer, que una de las más fuertes motivaciones de los hombres para entregarse al arte y a la ciencia es el ansia de huir de la vida de cada día, con su dolorosa crudeza y su horrible monotonía, el deseo de escapar de las cadenas con que nos atan nuestros deseos siempre cambiantes. Una naturaleza de fino temple anhela huir de la vida personal para refugiarse en el mundo de la percepción objetiva y

el pensamiento. Este deseo puede ser comparado con el ansia que experimenta el hombre de la ciudad por escapar de un entorno ruidoso y estrecho y dirigirse hacia el silencio de las altas montañas, donde los ojos pueden vagar en el aire tranquilo y puro y apreciar el paisaje sereno, que parece hecho de eternidad.

Junto a esta motivación negativa surge otra, positiva. El hombre intenta crear para sí mismo, del modo que más le convenga, una imagen del mundo simplificada e inteligible; después, y hasta cierto punto, intenta que su cosmos reemplace al mundo de la experiencia, porque cree que así se hará dueño de este. Así lo hacen, cada uno a su manera, el pintor, el poeta, el filósofo especulativo y el científico de la naturaleza. Cada uno hace que ese cosmos y su construcción sean el eje de su vida emotiva, para hallar a través de ese camino la paz y la seguridad que no es posible encontrar en el venero de la experiencia personal.

Entre todas esas posibles representaciones del mundo, ¿qué lugar ocupa la imagen del mundo que elabora el físico teórico? En primer lugar, esa imagen exige el nivel más alto posible de precisión y rigor en la descripción de las relaciones, un rigor que sólo el lenguaje matemático puede brindar. Por otra parte, en lo que se refiere al tema en sí, el físico ha de autolimitarse con severidad: tendrá que contentarse con la descripción de los hechos más simples que puedan presentarse en el campo de nuestra experiencia. Cualquier evento de índole compleja exigiría un poder intelectual mucho mayor que el del hombre para emprender una reconstrucción que posea la sutil precisión y la perfección lógica que exige la física teórica. Pureza suprema, claridad y certeza a expensas del conjunto. ¿Pero cuál puede ser el interés de llegar a conocer una porción de la naturaleza tan pequeña en forma exhaustiva, mientras se deja de lado, con cautela y timidez, todo lo que implique mayor sutileza y complejidad? ¿El producto de tales esfuerzos modestos puede recibir la orgullosa denominación de teoría del universo?

Creo que esta denominación está justificada, porque las leyes generales sobre las que se basa la estructura de la física teórica se definen como válidas para toda clase de fenómeno natural. Mediante esas leyes sería posible llegar a la descripción —o sea, a la teoría— de todo proceso natural, incluyendo la vida, a través de la pura deducción, si ese proceso de deducción no estuviera más allá de la capacidad del intelecto humano. Es decir, que la renuncia del físico

a la totalidad de su cosmos no es una cuestión de principio fundamental.

La tarea fundamental del físico consiste en llegar hasta esas leyes elementales y universales que permiten construir el cosmos mediante pura deducción. No hay un camino lógico hacia esas leyes: sólo la intuición, fundamentada en una comprensión de la experiencia, puede llevarnos a ellas. Ante esta incertidumbre metodológica, cualquiera podría suponer que existen un elevado número de sistemas posibles de física teórica, todos bien justificados por igual. Y, en teoría, esta opinión es correcta, sin duda. Pero el desarrollo de la física ha demostrado que en todo momento, más allá de todas las construcciones concebibles, un único sistema ha resultado ser superior a todos los demás. Ninguna persona que haya entrado en la materia con profundidad podrá negar que, en la práctica, el mundo de los fenómenos determina unívocamente el sistema teórico, a pesar de que no existe puente lógico entre los fenómenos y sus principios teóricos. Esto es lo que Leibnitz, con una feliz expresión, ha definido como «armonía preestablecida». A menudo los físicos acusan a los epistemólogos de no prestar la atención suficiente a este hecho. Según mi criterio, aquí está la raíz de la controversia que, hace algunos años, se desarrolló entre Mach y Planck.

El anhelo de abarcar esta armonía preestablecida es la fuente de una inagotable paciencia y perseverancia, que Planck ha puesto en su dedicación a los más generales problemas de nuestra ciencia, como bien lo sabemos, negándose a ser distraído hacia fines más gratos y más fáciles de obtener. Muchas veces he oído que algunos colegas tratan de atribuir esta actitud a la extraordinaria fuerza de voluntad y a la gran disciplina de nuestro homenajado. En mi opinión, se equivocan. El estado mental que capacita a un hombre para llevar a cabo una tarea de esa índole es similar al del que profesa una religión o al del hombre enamorado. El esfuerzo cotidiano no proviene de una intención deliberada, ni de un programa, sino del corazón, en forma directa.

Aquí está nuestro querido Planck, y se sonríe para sí mismo al ver mis infantiles jugueteos con la linterna de Diógenes. Nuestro afecto por él no necesita de explicaciones gastadas. Que el amor por la ciencia continúe iluminando su sendero, en el futuro, y que le conduzca a la solución del más importante problema de la física de hoy, ese problema que él mismo ha planteado y que tanto ha hecho

por resolver. ¡Que tenga éxito en la empresa de unir la teoría del cuanto con la electrodinámica y la mecánica, en un único sistema lógico!

### **¿Qué es la teoría de la relatividad?**

Escrito a petición del *London Times*. Publicado el 28 de noviembre de 1919.

He aceptado con gusto la petición que me formulara su colega para escribir unas líneas sobre la relatividad, para ser publicadas por el *Times*. Después de la lamentable interrupción del antiguo y activo intercambio de ideas entre los hombres de ciencia, me resulta grata esta oportunidad de expresar mis sentimientos de alegría y agradecimiento para los astrónomos y físicos de Inglaterra.

Con total respeto por las solemnes tradiciones del trabajo científico en ese país, los más eminentes hombres de ciencia han entregado su tiempo y su esfuerzo, y las instituciones científicas no han ahorrado para demostrar el alcance de una teoría que fue perfeccionada y publicada, durante la guerra, en el país de sus enemigos. Aun cuando la investigación de la influencia del campo gravitatorio del sol en los rayos de luz es un tema puramente objetivo, no puedo menos que expresar las gracias, de manera personal, a mis colegas ingleses por su trabajo. Sin esa labor es poco probable que se hubiera obtenido durante el curso de mi vida la comprobación de la más importante inferencia de mi teoría.

En física podemos diferenciar varias clases de teorías. La mayor parte de ellas son constructivas e intentan organizar un cuadro de los fenómenos más complejos a partir de materiales que provienen de un esquema formal relativamente simple, que sirve de punto de partida.

Así, la teoría cinética de los gases trata de reducir los procesos mecánico, térmico y de difusión al movimiento de las moléculas, o sea que intenta reproducirlos a partir de la hipótesis del movimiento molecular. Cuando decimos que hemos logrado comprender un grupo de procesos naturales, siempre queremos significar que hemos hallado una teoría constructiva que abarca el proceso en cuestión.

Junto con esta clase de teorías principales, existe un segundo tipo al que llamaré «teorías de principios». En estas se emplea el método analítico, no el sintético. Los elementos que configuran su base y punto de partida no se construyen por vía de hipótesis, sino que se descubren empíricamente; son características generales de procesos naturales, principios que dan origen a criterios formulados de modo matemático, que los distintos procesos o sus representaciones teóricas tendrán que satisfacer. La termodinámica, por ejemplo, por medios analíticos, a partir de la experiencia universalmente probada de que el movimiento perpetuo es imposible, trata de deducir las condiciones necesarias que habrán de satisfacer los distintos hechos.

Las ventajas de la teoría constructiva son la integridad, la adaptabilidad y la claridad; en el caso de la teoría de principios, nos encontramos con las ventajas de la perfección lógica y la seguridad de los fundamentos.

La teoría de la relatividad pertenece a esta segunda clase. Para captar su naturaleza es necesario, en primer lugar, conocer los principios en los que está fundamentada. Sin embargo, antes de referirme a ellos, debo recordar que la teoría de la relatividad reúne dos elementos distintos: la teoría especial y la teoría general. La teoría especial, sobre la que se apoya la teoría general, se aplica a todos los fenómenos físicos, exceptuada sólo la gravitación. La teoría general ofrece la ley de la gravitación y sus relaciones con las otras fuerzas de la naturaleza.

Desde los tiempos de los antiguos griegos se sabe que, para describir el movimiento de un cuerpo, es preciso utilizar un segundo cuerpo al cual se ha de referir el movimiento del primero. El movimiento de un vehículo es considerado con referencia a la superficie de la Tierra, el de un planeta con respecto a la totalidad de las estrellas fijas visibles. En física, este cuerpo de referencia recibe el nombre de sistema de coordenadas. Las leyes mecánicas de Galileo y Newton, por ejemplo, sólo pueden ser formuladas con la ayuda de un sistema de coordenadas.

No obstante, el movimiento de este sistema de coordenadas no puede ser elegido de modo arbitrario. Para que las leyes de la mecánica sean válidas, tendrá que estar libre de rotación y aceleración. Un sistema de coordenadas admitido en mecánica se denomina «sistema inercial». El estado de movimiento de un sistema inercial,

según la mecánica, no está, sin embargo, determinado unívocamente por la naturaleza. Por el contrario, todo sistema de coordenadas que se mueve uniformemente y en línea recta con respecto a un sistema inercial es, asimismo, un sistema inercial. Con el nombre de «principio de relatividad restringida», se indica la generalización de esta definición a cualquier fenómeno natural: es decir, que toda ley universal válida en relación con un sistema de coordenadas  $C$ , también ha de ser válida en relación con un sistema de coordenadas  $C'$ , siempre que este esté dotado de un movimiento uniforme de traslación con respecto a  $C$ .

El segundo principio en que se apoya la teoría de la relatividad restringida es «el principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío». Este principio afirma que la luz en el vacío siempre tiene una determinada velocidad de propagación, independiente del estado de movimiento del observador o de la fuente de luz. La confianza que los físicos depositan en este principio surge de los éxitos obtenidos por la electrodinámica de Maxwell y Lorentz.

Estos dos principios están poderosamente apoyados por la experiencia, pero no parecen ser lógicamente conciliables. La teoría de la relatividad restringida, por fin, ha logrado unificarlos lógicamente, a través de una modificación de la cinemática, o sea, mediante la doctrina de las leyes que relacionan el espacio y el tiempo (desde el punto de vista de la física). Se comprobó que hablar de la simultaneidad de dos hechos no tiene sentido sino con relación a un sistema de coordenadas dado y que el tamaño de los patrones de medida y la velocidad a que da vueltas el reloj dependen de su estado de movimiento con respecto del sistema de coordenadas.

Pero la antigua física, incluidas las leyes del movimiento de Galileo y Newton, no encajan en la cinemática relativista. De esta última han surgido condiciones matemáticas generales a las que deben adecuarse las leyes naturales, si los dos principios antes mencionados son correctos. La física ha tenido, pues, que adaptarse. En particular, los científicos han llegado a una nueva ley de movimiento para puntos de masa a grandes velocidades, que ha sido confirmada de un modo admirable en el caso de las partículas con carga eléctrica. El resultado más importante de la teoría de la relatividad restringida se refiere a las masas inertes de los sistemas corpóreos. Se ha determinado que la inercia de un sistema depende necesariamente de su contenido de energía y esto conduce en forma directa a la no-

ción de que la masa inerte es energía latente. El principio de conservación de la masa pierde su independencia y se fusiona con el de conservación de la energía.

La teoría de la relatividad restringida, que es simplemente un desarrollo sistemático de la electrodinámica de Lorentz y Maxwell, apunta hacia más allá de sí misma. ¿La independencia de las leyes físicas del estado de movimiento del sistema de coordenadas ha de restringirse al movimiento uniforme de traslación de cada sistema de coordenadas? ¿Qué relación guarda la naturaleza con nuestros sistemas de coordenadas y su estado de movimiento? Si a fin de describir la naturaleza fuera necesario utilizar un sistema de coordenadas arbitrariamente introducido por nosotros, su estado de movimiento no tendría que estar sujeto a ninguna restricción. Las leyes tendrían que ser por completo independientes de esta elección (principio de la relatividad general).

Este principio de la relatividad general se ha establecido con cierta facilidad gracias a un hecho de la experiencia, conocido desde hace mucho tiempo: el peso y la inercia de un cuerpo se expresan por la misma constante (igualdad de la masa inerte y de la masa pesante). Imaginemos un sistema de coordenadas que mantiene un movimiento de rotación uniforme con respecto a un sistema inercial a la manera newtoniana. Las fuerzas centrífugas que se manifiestan en relación con este sistema, de acuerdo con las conclusiones de Newton, deben ser consideradas como efecto de la inercia. Pero estas fuerzas centrífugas son proporcionales a las masas de los cuerpos, tal como las fuerzas de la gravedad. ¿No sería posible en este caso considerar que el sistema de coordenadas está en reposo y que las fuerzas centrífugas son fuerzas gravitatorias? Esta interpretación parece muy clara, pero la mecánica clásica la prohíbe.

Esta rápida descripción deja entrever que una teoría de la relatividad general debe proporcionar las leyes de la gravitación, y la perseverancia en esta idea ha justificado nuestras esperanzas.

Pero el camino era más arduo de lo que habíamos supuesto, porque ha exigido el abandono de la geometría euclidiana; es decir, que las leyes según las cuales los cuerpos sólidos pueden estar dispuestos en el espacio no concuerdan por completo con las leyes espaciales atribuidas a los cuerpos por la geometría euclidiana. A esto nos referimos al hablar de «curvatura del espacio». Los conceptos fundamentales de «recta», de «plano», etcétera, pierden, por lo tanto, su significado preciso en física.



En la teoría de la relatividad general la ciencia del espacio y del tiempo, o cinemática, ya no se presenta como fundamento independiente del resto de la física. El comportamiento geométrico de los cuerpos y la marcha de los relojes dependen de los campos gravitatorios, que a su vez son producidos por la materia.

La nueva teoría de la gravitación, en lo que se refiere a principios, se diferencia considerablemente de la de Newton. Pero sus resultados prácticos concuerdan tan de cerca con los de la teoría de Newton que es difícil hallar criterios de diferenciación accesibles a la experiencia. Hasta el presente se han descubierto:

1. En la revolución de las elipses de las órbitas planetarias en torno al sol (confirmado en el caso de Mercurio).
2. En la curvatura de los rayos de luz por la acción de los campos gravitatorios (confirmado por las fotografías del eclipse solar de la expedición inglesa).
3. En un desplazamiento de las líneas espectrales hacia el extremo rojo del espectro en el caso de la luz transmitida a nosotros desde estrellas de considerable masa (no confirmado hasta el presente)\*.

El atractivo fundamental de la teoría radica en el hecho de que es completa desde el punto de vista lógico. Si una sola de las conclusiones que se extraigan de ella resulta ser errada, tendremos que abandonarla, pues modificarla sin destruir toda su estructura parece ser imposible.

Que nadie suponga, sin embargo, que el importante trabajo de Newton puede ser invalidado por esta o por cualquier otra teoría. Sus grandes y lúcidas ideas retendrán para siempre su significación única como fundamentos de toda nuestra moderna estructura conceptual dentro de la esfera de la filosofía natural.

*Nota:* algunas de las afirmaciones aparecidas en su periódico y concernientes a mi vida y mi persona tienen origen en la vívida imaginación del articulista. Aquí también encontramos una aplicación más del principio de la relatividad, para gozo del lector: hoy, en

---

\* Este criterio ha sido confirmado posteriormente.

Alemania, se me describe como «sabio alemán», en tanto que en Inglaterra se dice que soy un «judío suizo». Si mi destino me llevara a ser definido como una *bête noire*, me convertiría en un «judío suizo» para los alemanes y en un «sabio alemán» para los ingleses.

## Geometría y experiencia

Conferencia pronunciada ante la Academia Prusiana de Ciencias, el 27 de enero de 1921. La última parte apareció por primera vez en una reimpresión de Springer, Berlín, 1921.

Una de las causas de la especial estima de que goza la matemática, por encima de todas las otras ciencias, es el hecho de que sus proposiciones son absolutamente ciertas e indiscutibles, en tanto que las de todas las otras ciencias son, hasta cierto punto, debatibles y corren el riesgo constante de ser invalidadas por el descubrimiento de nuevos hechos. A pesar de esto, el investigador de otro ámbito de la ciencia no tendría que envidiar al matemático si las proposiciones de la matemática se refiriesen a objetos de nuestra imaginación y no a objetos de la realidad. Porque no puede sorprender a nadie que personas distintas lleguen a las mismas conclusiones lógicas cuando ya se han puesto de acuerdo en cuanto a las proposiciones fundamentales (axiomas) y a los métodos mediante los que habrán de deducirse nuevos axiomas. Pero existe otra razón más que sustenta la elevada reputación de la matemática: esta ciencia es la que proporciona a las ciencias naturales exactas una cierta medida de certeza, a la que no podrían llegar sin la matemática.

En este punto surge por sí mismo un enigma que en todos los tiempos ha preocupado a las mentes inquisitivas. ¿Cómo puede ser que la matemática —un producto del pensamiento humano independiente de la experiencia— se adecúe tan admirablemente a los objetos de la realidad? ¿La razón humana, pues, sin acudir a la experiencia, con sólo entregarse al pensamiento, es capaz de desentrañar las propiedades de los objetos reales?

En mi opinión, la respuesta a esa pregunta es, brevemente, la siguiente: en la medida en que se refieren a la realidad, las proposiciones de la matemática no son seguras y, viceversa, en la medida en que son seguras, no se refieren a la realidad. Creo que esto no estu-

vo totalmente claro para todos hasta la llegada de esta formulación de las matemáticas que recibe el nombre de «axiomática». El progreso alcanzado por la axiomática consiste en haber logrado una neta separación entre lo lógico-formal y su objetivo o contenido intuitivo; de acuerdo con la axiomática, sólo lo lógico-formal constituye el objeto de la matemática, que no tiene que ver con lo intuitivo ni con otro contenido asociado con lo lógico-formal.

Consideremos ahora, desde este punto de vista, cualquier axioma de la geometría; el siguiente, por ejemplo: por dos puntos en el espacio pasa siempre una recta y sólo una. ¿Cómo debe interpretarse este axioma en el antiguo sentido y en el más moderno?

La interpretación antigua: todos saben qué es una recta y qué es un punto. No es el matemático quien ha de decidir si este conocimiento nace de una habilidad de la mente humana o de la experiencia, de algún tipo de unión de ambas o de alguna otra fuente. Este problema queda en manos del filósofo. Al basarse en el conocimiento que precede a toda matemática, el axioma precitado es, como todos los axiomas, evidente de por sí, o sea que constituye la expresión de una parte de ese conocimiento apriorístico.

La interpretación más moderna: la geometría trata de objetos que son denominados por las expresiones recta, punto, etcétera. No se presupone ni conocimiento ni intuición de estos objetos, sino la validez de los axiomas, tal como el precitado, que deben ser considerados en un sentido puramente formal, es decir, vacíos de todo contenido de intuición o experiencia. Estos axiomas son creación libre de la mente humana. Todas las otras proposiciones de la geometría son inferencias lógicas de los axiomas (que deben ser tomados sólo en su sentido nominal). Los axiomas *definen* los objetos acerca de los cuales trata la geometría. En su tratado de epistemología, Schlick ha caracterizado los axiomas como «definiciones implícitas», con una expresión muy adecuada.

Este criterio acerca de los axiomas, sostenido por la axiomática moderna, libera a la matemática de todos los elementos extraños y así disipa la oscuridad mística que antes rodeaba la base de la ciencia matemática. Pero esta expurgada visión de la matemática también pone en evidencia que esta disciplina científica, como tal, no puede enunciar nada acerca de objetos de la intuición o de objetos reales. En la geometría axiomática las palabras «punto», «recta», etc., sólo aluden a esquemas conceptuales vacíos. Aquello que les otorga contenido no es relevante para la matemática.

Por otra parte, sin embargo, es innegable que la matemática, por lo general y la geometría en especial, debe su existencia a la sentida necesidad de conocer algo acerca del comportamiento de los objetos reales. La misma palabra geometría —que, como sabemos, significa medición de la Tierra— es prueba de ello. La medición de la Tierra se fundamenta en las posibilidades de localización de ciertos objetos físicos en relación con otros: partes de la Tierra, jalones, elementos de medición, etc. Sin duda el sistema de conceptos de la geometría axiomática por sí solo no permite afirmación alguna en cuanto al comportamiento de los objetos reales de esta clase, es decir, de lo que denominaremos cuerpos prácticamente rígidos. Para poder hacer alguna afirmación, la geometría debe ser desprovista de su carácter meramente lógico-formal mediante la coordinación de los objetos reales de la experiencia con los esquemas conceptuales vacíos de la geometría axiomática. Para lograrlo, sólo debemos agregar la siguiente proposición: los cuerpos rígidos están relacionados, con respecto a su posible localización, tal como lo están los cuerpos en la geometría euclidiana de tres dimensiones. Y ahora, las proposiciones de Euclides ya contienen afirmaciones en cuanto al comportamiento de los cuerpos prácticamente rígidos.

Así completada, la geometría es evidentemente una ciencia natural y, de hecho, debemos considerarla la más antigua rama de la física. Sus afirmaciones descansan esencialmente en la inducción a partir de la experiencia y no tan sólo en inferencias lógicas. Denominaremos «geometría práctica» a esta geometría completada a la que distinguiremos en adelante de la «geometría puramente axiomática». La pregunta acerca de si la geometría práctica del universo es o no euclidiana tiene un sentido claro y la respuesta sólo puede proporcionárnosla la experiencia. Todas las mediciones de longitud en física constituyen una aplicación de la geometría práctica en este sentido, así como también las mediciones de longitud en geodesia y astronomía, si se utiliza la ley empírica que dice que la luz se propaga en línea recta, entendiendo la línea recta en el sentido de la geometría práctica.

Concedo especial importancia a la visión de la geometría que acabo de esbozar, porque sin ella no me hubiera sido posible formular la teoría de la relatividad. Sin ella hubiera sido imposible la siguiente reflexión: en un sistema de referencia que posee un movimiento de rotación con respecto a un sistema inercial, las leyes de

la localización de los cuerpos rígidos no corresponden a las reglas de la geometría euclidiana, de acuerdo con la contracción de Lorentz. De modo que si admitimos los sistemas no inerciales en un pie de igualdad, debemos abandonar la geometría euclidiana. Sin la interpretación anterior, el paso decisivo en la transición hacia las ecuaciones generalmente covariantes no se hubiera seguramente producido. Si rechazamos la relación entre el cuerpo axiomático de la geometría euclidiana y el cuerpo prácticamente rígido de la realidad, llegaremos de inmediato, como el agudo y profundo pensador Henry Poincaré, al siguiente enunciado: la geometría euclidiana se distingue por encima de toda otra geometría axiomática concebible gracias a su simplicidad. Dado que la geometría axiomática en sí misma no contiene afirmaciones sobre la realidad, que sólo pueden experimentarse en combinación con las leyes de la física, debe ser posible y razonable —sea cual fuere la naturaleza de la realidad— conservar la geometría euclidiana. Porque si aparecen contradicciones entre la teoría y la experiencia, tendremos que decidarnos a cambiar las leyes físicas antes que a cambiar la geometría euclidiana axiomática. Si rechazamos la relación entre el cuerpo prácticamente rígido y la geometría, no nos liberaremos con facilidad de la convención que considera que la geometría euclidiana debe conservarse por ser la más simple.

¿Por qué la equivalencia del cuerpo prácticamente rígido y del cuerpo de la geometría —que surge tan fácilmente— es rechazada por Poincaré y otros investigadores? Simplemente porque una mirada de inspección revela que los cuerpos sólidos en la naturaleza no son rígidos, puesto que su comportamiento geométrico —es decir, sus posibilidades de localización relativa— depende de la temperatura, las fuerzas externas, etc. De esta manera, la relación original e inmediata entre la geometría y la realidad física se ve destruida y así nos vemos impulsados a aceptar otro punto de vista, más general, que caracteriza la posición de Poincaré. Dicho punto de vista es el siguiente: la geometría (G) no predica nada acerca del comportamiento de las cosas reales y sólo la geometría unida a la totalidad (F) de las leyes físicas puede hacerlo. Si utilizamos los símbolos, podemos decir que sólo la suma de (G) + (F) está sujeta a verificación experimental. Puede elegirse (G) de manera arbitraria y otro tanto puede hacerse con partes de (F); todas estas leyes son convenciones. Para evitar contradicciones lo único que se necesita es elegir el resto de (F), de modo tal

que (G) y todo el conjunto de (F) estén de acuerdo con la experiencia. Enfocadas así, la geometría axiomática y las leyes naturales convencionales se nos muestran como epistemológicamente equivalentes.

*Sub specie aeterni*, en mi opinión, Poincaré está en lo cierto. La idea de la vara de medición y la idea del reloj coordinado con ella en la teoría de la relatividad no encuentran su correspondencia exacta en el mundo real. También está claro que el sólido rígido y el reloj, dentro del edificio conceptual de la física, no juegan el papel de elementos irreducibles, sino el de estructuras compuestas, que no deben desempeñar ningún papel independiente en la física teórica. Con todo, es mi convicción que en el actual estadio de desarrollo de la física teórica estos conceptos aún pueden emplearse como conceptos independientes. Estamos todavía muy lejos de poseer un conocimiento tan seguro de los principios teóricos de la estructura atómica que nos capacite para construir teóricamente cuerpos sólidos y relojes a partir de conceptos elementales.

Además, en cuanto a la objeción de que no existen cuerpos realmente rígidos en la naturaleza y de que por ello las propiedades predicadas acerca de los cuerpos rígidos no se corresponden con la realidad física, se puede decir que no es tan radical como podría parecer luego de una consideración precipitada. En rigor, no es una tarea difícil determinar el estado físico de un cuerpo de medición, con la exactitud necesaria para que su comportamiento con respecto a otros cuerpos de medición esté tan libre de ambigüedad que le permita ser sustituido por el cuerpo «rígido». Las afirmaciones acerca de los cuerpos rígidos deben estar referidas a cuerpos de medición de este tipo.

Toda la geometría práctica está basada en un principio accesible a la experiencia y que ahora intentaremos abordar. Supongamos que tenemos dos señales en un cuerpo prácticamente rígido. Llamaremos a este par de señales distancia. Imaginemos dos cuerpos prácticamente rígidos, cada uno con una distancia marcada en él. Esas dos distancias serán «una igual a la otra» si las señales de una distancia pueden hacerse coincidir permanentemente con las señales de la otra. Ahora supondremos que:

Si dos distancias han sido halladas iguales una vez y en alguna circunstancia, son iguales siempre y en todas las circunstancias.

No sólo la geometría práctica de Euclides, sino también su más reciente generalización, la geometría práctica de Riemann, y la teo-

ría general de la relatividad descansan sobre esta afirmación. Mencionaré sólo una de las razones experimentales que fundamentan esta afirmación. El fenómeno de la propagación de la luz en el vacío determina una distancia (el correspondiente camino de la luz) para cada intervalo de tiempo local. De aquí se sigue que el supuesto sobre distancias antes señalado debe ser válido también para intervalos de tiempo de reloj en la teoría de la relatividad. Por lo tanto, podemos establecer la siguiente formulación: si dos relojes ideales marchan a igual velocidad en cualquier momento y en cualquier lugar (próximos el uno del otro) siempre funcionarán a igual velocidad, sin que importe cuándo y dónde vuelvan a ser comparados. Si esta ley no fuera válida para los relojes naturales, las frecuencias propias de los distintos átomos de un mismo elemento químico no estarían en tan perfecta relación como lo demuestra la experiencia. La existencia de líneas espectrales agudas es una convincente prueba experimental del principio antes mencionado de geometría práctica. En último análisis, esta es la razón que nos permite hablar con propiedad de una métrica riemanniana del continuo cuatridimensional espacio-tiempo.

Según el punto de vista aquí invocado, el problema de si el continuo tiene una estructura euclidiana, riemanniana u otra de naturaleza distinta, es una cuestión estricta de la física, que ha de ser contestada por la experiencia y no una cuestión de convención elegida sobre la base de la mera conveniencia. La geometría de Riemann tendrá validez si las leyes de localización de los sólidos prácticamente rígidos se acercan a las de la geometría euclidiana tanto más de cerca cuanto menores sean las dimensiones de la región de espacio-tiempo que se tome en consideración.

Es verdad que esta interpretación física de la geometría se desbata cuando se la aplica inmediatamente a espacios de orden de magnitud submolecular. Pero no obstante, aun en cuestiones tales como la constitución de partículas elementales, retiene una parte de su significación. Porque incluso cuando se trata de describir las partículas elementales eléctricas que constituyen la materia, se puede hacer el intento de otorgar significado físico a esos conceptos de campo, que han sido definidos físicamente con el fin de describir el comportamiento geométrico de los cuerpos que son grandes en comparación con la molécula. Sólo el éxito puede justificar ese intento, que postula realidad física para los principios fundamentales

de la geometría de Riemann, fuera del dominio de sus definiciones físicas. Es posible que se descubra que esta extrapolación no tiene más fundamento que la extrapolación del concepto de temperatura a partes de un cuerpo de orden de magnitud molecular.

Resulta menos problemático extender los conceptos de geometría práctica a espacios de orden cósmico de magnitud. Por supuesto, se podría objetar que una construcción compuesta de varas sólidas se aparta de la rigidez ideal tanto más cuanto más grande sea su extensión espacial. Pero creo que sería poco posible asignar un significado fundamental a esta objeción. Por ende, la pregunta acerca de si el universo es espacialmente finito o no me parece una pregunta plena de significación en el sentido de la geometría práctica. Ni siquiera considero imposible que la astronomía dé respuesta a esta pregunta dentro de un plazo no muy largo. Recordemos aquí lo que la teoría de la relatividad general nos dice al respecto. Las posibilidades que ofrece son dos:

1. El universo es espacialmente infinito. Esto es posible sólo si en el universo la densidad espacial media de la materia, concentrada en las estrellas, se anula, es decir, si la razón entre la masa total de las estrellas y el volumen del espacio en el cual estos cuerpos están dispersos se aproxima a cero indefinidamente, cuanto mayores sean los volúmenes considerados.

2. El universo es espacialmente finito. Esto ha de ser así si la densidad media de la materia ponderable en el universo es distinta de cero. Cuanto menor sea esta densidad media, mayor será el volumen del universo.

Estoy en la obligación de mencionar que se puede aducir un argumento teórico en favor de la hipótesis de un universo finito. La teoría de la relatividad general enseña que la inercia de un cuerpo dado es mayor cuando existen en su proximidad mayores masas ponderables. De modo que parece muy natural reducir la inercia total de un cuerpo a la interacción entre este y los otros cuerpos en el universo; así es como, desde los tiempos de Newton, la gravedad ha sido reducida por completo a la interacción entre los cuerpos. A partir de las ecuaciones de la teoría de la relatividad general se puede deducir que esta reducción de la inercia a interacción entre masas —tal como lo exigía E. Mach, por ejemplo— sólo es posible si el universo es espacialmente finito.



Muchos físicos y astrónomos no se dejan impresionar por este argumento. En un último análisis, sólo la experiencia será la que decida cuál de las dos posibilidades tiene cumplimiento en la naturaleza. ¿Cómo puede proporcionar una respuesta la experiencia? En principio, puede parecer posible determinar la densidad media de la materia observando la porción de universo que nos es accesible. Esta es una esperanza ilusoria. La distribución de las estrellas visibles es extremadamente irregular, de modo que de ninguna manera podríamos aventurarnos a determinar que la densidad media de la materia estelar en el universo es igual, digamos, a la densidad media en nuestra galaxia. En cualquier caso, por muy grande que pueda ser el espacio examinado, no podemos abrigar la convicción de que existen otras estrellas más allá de ese espacio. O sea que parece imposible arriesgar una estimación de esa densidad media.

Pero existe otro camino, que considero más practicable, aun cuando presente grandes dificultades. Observemos las consecuencias de la teoría de la relatividad general (aquellas accesibles a la experiencia) y analicemos cuánto se han desviado de las consecuencias de la teoría de Newton. En primer lugar, hallaremos una desviación que se manifiesta en la proximidad de una masa gravitante y que ha sido confirmada en el caso del planeta Mercurio. Pero si el universo es espacialmente finito, ha de existir una segunda desviación de la teoría newtoniana que, dentro del lenguaje de esta misma teoría, podrá expresarse así: el campo gravitatorio es de índole tal que se le puede considerar producido no sólo por las masas ponderables, sino además por una densidad de masa de signo negativo, distribuida uniformemente en el espacio. Dado que esta densidad de masa tendría que ser en extremo pequeña, sólo podría ser captada en sistemas gravitatorios de enorme extensión.

Dado el caso de que conociéramos, por ejemplo, la distribución estadística y las masas de las estrellas en nuestra galaxia, podríamos calcular, según la ley de Newton, el campo gravitatorio y las velocidades medias que han de tener las estrellas, para que la galaxia no se desintegre bajo la atracción mutua de sus estrellas y continúe manteniendo su actual extensión. Si las velocidades reales de las estrellas —que pueden ser medidas— fueran menores que las velocidades calculadas, tendríamos una prueba de que las atracciones a grandes distancias son menores que las previstas por la ley de Newton. A partir de esta desviación, se puede demostrar indirecta-

mente que el universo es finito. Incluso se podrían llegar a estimar sus dimensiones espaciales.

¿Somos capaces de visualizar un universo tridimensional que sea finito y, a pesar de ello, sin límites?

La respuesta habitual a esta pregunta es «no», pero no se trata de la respuesta correcta. El propósito de las siguientes reflexiones es demostrar que la respuesta tendría que ser «sí». Quiero demostrar que sin ninguna dificultad extraordinaria podemos ilustrar la teoría de un universo finito a través de una representación mental a la que, con un poco de práctica, pronto podremos acostumbrarnos.

En primer término, corresponde hacer una observación de naturaleza epistemológica. Una teoría geométrico-física como tal no puede ser directamente ilustrada, toda vez que se trata meramente de un sistema de conceptos. Pero estos conceptos tienen por objetivo aportar a la mente una multiplicidad de experiencias sensoriales reales o imaginarias. Por lo tanto, «visualizar» una teoría significa proporcionar a la mente esa abundancia de experiencias sensibles con respecto a las cuales la teoría ofrece una ordenación esquemática. En el presente caso hemos de preguntarnos cómo podemos representar ese comportamiento de los cuerpos sólidos con respecto a su mutua disposición (contacto) que corresponde a la teoría de un universo finito. En realidad no hay nada nuevo en lo que he de decir sobre este tema, pero las innumerables preguntas que he recibido en diversas ocasiones prueban que la curiosidad de quienes están interesados en estas cuestiones no ha sido satisfecha por completo todavía. De modo que pido disculpas a los iniciados, porque incurriré en la repetición de cosas que son conocidas desde hace ya mucho tiempo.

¿Qué queremos expresar al decir que nuestro espacio es infinito? Tan sólo que podríamos disponer cualquier cantidad de cuerpos de igual tamaño, unos junto a otros, sin llegar a cubrir ese espacio. Figurémonos que disponemos de un gran número de cajas cúbicas, todas del mismo tamaño. De acuerdo con la geometría euclidiana, podemos ponerlas unas por encima, por debajo y junto a las otras hasta cubrir, arbitrariamente, una amplia parte del espacio. Pero esta construcción jamás llegaría a estar terminada: podríamos seguir y seguir agregando cubos sin encontrarnos jamás con que no nos queda ya lugar. Esto es lo que queremos significar al decir que el espacio es infinito. Sería mejor decir que el espacio es infinito en

relación con los cuerpos prácticamente rígidos, suponiendo que la geometría euclidiana proporciona las leyes de localización de estos cuerpos.

Otro ejemplo de un continuo infinito es el plano. Sobre una superficie plana podemos colocar cuadrados de cartón de modo tal que cada lado de cada cuadrado sea adyacente a otro lado de otro cuadrado. La construcción nunca terminará; siempre podremos continuar colocando cuadrados, si sus leyes de localización se corresponden con las que la geometría euclidiana postula para las figuras planas. El plano es infinito, por lo tanto, con respecto a los cuadrados de cartón. Por consiguiente, decimos que el plano es un continuo infinito de dos dimensiones y que el espacio es un continuo infinito de tres dimensiones. Creo que puedo dar por sabido el significado del número de dimensiones aquí aludido.

Ahora elijamos un ejemplo de un continuo bidimensional que es finito pero sin límites. Imaginemos la superficie de un gran globo y una cantidad de pequeños discos de papel, todos del mismo tamaño. A continuación, ponemos uno de los discos en cualquier parte, sobre la superficie del globo. Si movemos el disco hacia cualquier dirección, sobre la superficie del globo, no tropezaremos con ningún límite en ningún momento. Por consiguiente, decimos que la superficie de la esfera es un continuo sin límites. Por otra parte, la superficie esférica es un continuo finito. Lo podemos comprobar colocando discos de papel sobre la esfera, de modo que ningún disco se superponga a otro; la superficie de la esfera llegará a estar tan cubierta que será ya imposible situar otro disco. Esto significa exactamente que la superficie esférica del globo es finita en relación con los discos de papel. Por otra parte, la superficie esférica es un continuo no euclidiano de dos dimensiones, es decir, que las leyes de localización de figuras rígidas puestas sobre ella no concuerdan con las del plano euclidiano. Esto puede demostrarse de la siguiente forma: tomemos un disco y rodeémoslo, en círculo, por otros seis discos, cada uno de los cuales debe estar rodeado, a su vez, por otros seis discos y así sucesivamente. Si esta construcción se realiza sobre una superficie plana, se obtendrá una colocación ininterrumpida en la que hay seis discos que tocan a cada disco, con excepción de los que estén en la parte externa.

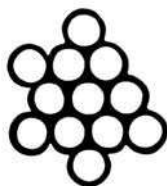


Figura 1

Sobre una superficie esférica esta construcción también promete un cierto éxito en el primer momento y cuanto menor sea el radio del círculo en proporción al de la esfera, tanto más posible parecerá la tarea. Pero en la medida en que progresa la construcción, más claro se verá que la colocación de los discos según la localización indicada, sin interrupción, no es posible como lo era en el caso de la geometría euclidiana del plano. Así, quienes no puedan abandonar la superficie esférica y ni siquiera puedan echar una mirada fuera de la superficie esférica hacia el espacio tridimensional, podrían llegar a descubrir, por simple experimentación con los discos, que su «espacio» bidimensional no es euclidiano, sino esférico.

Según los últimos resultados de la teoría de la relatividad, es probable que nuestro espacio tridimensional sea también aproximadamente esférico, o sea que las leyes de localización en él de cuerpos rígidos no están dadas por la geometría euclidiana, sino, y en forma aproximada, por la geometría esférica, si consideramos partes del espacio que sean suficientemente extensas. Este es el momento en que la imaginación del lector vacila. «Nadie puede imaginar semejante cosa» nos dirá, lleno de indignación. «Se puede decir una cosa así, pero no es posible pensarla. Puedo imaginar bastante bien una superficie esférica, pero nada análogo a ella que posea tres dimensiones.»

Debemos hacer el intento de superar esta barrera mental y el lector paciente verá que no se trata de una tarea de excepcional dificultad. Con este fin, en primer lugar atenderemos una vez más a la geometría de las superficies esféricas bidimensionales. En la figura adjunta,  $K$  representa la superficie esférica, que en  $S$  toca al plano  $E$ , en este caso representado como una superficie limitada, por razones de facilidad de presentación. Denominemos  $L$  un disco sobre la superficie esférica. Ahora imaginemos que en el punto  $N$  de la superficie esférica, diametralmente opuesto a  $S$ , existe un punto luminoso que proyecta una sombra  $L'$  (la del disco  $L$ ) sobre el plano  $E$ .

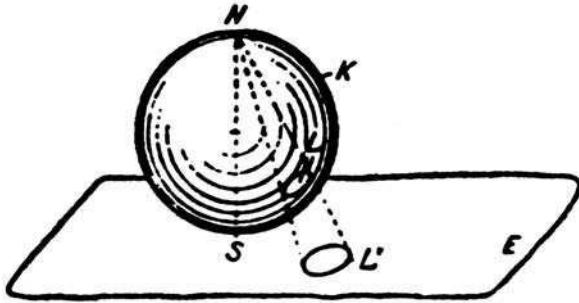


Figura 2

Si el disco sobre la esfera  $K$  es movido, también se moverá su sombra  $L'$  sobre el plano  $E$ . Cuando el disco  $L$  está en  $S$ , coincide casi exactamente con su sombra. Si se mueve sobre la superficie esférica alejándose de  $S$  hacia arriba, la sombra del disco,  $L'$ , sobre el plano también se aleja de  $S$ , hacia la parte externa del plano y se agranda a medida que se aleja del punto citado. Si el disco  $L$  se aproxima al punto luminoso  $N$ , la sombra se desplaza hacia el infinito y se agranda infinitamente.

Ahora nos planteamos una pregunta: ¿cuáles son las leyes de localización de las sombras  $L'$  sobre el plano  $E$ ? Es evidente que son las mismas que las leyes de localización de los discos  $L$  sobre la superficie esférica. Para cada figura original sobre  $K$  existe una sombra, una figura correspondiente sobre  $E$ . Si sobre  $K$  dos discos se tocan, sus sombras sobre  $E$  también se tocan. La geometría de la sombra sobre el plano concuerda con la geometría del disco sobre la esfera. Si denominamos a los discos-sombra figuras rígidas, la geometría esférica es válida sobre el plano  $E$  con respecto a estas figuras rígidas. En particular, el plano es finito con respecto a los discos-sombra, porque sólo un número finito de sombras puede tener lugar dentro del plano.

En este punto, alguien dirá: «Eso no tiene sentido. Los círculos proyectados no son figuras rígidas. Con sólo colocar una regla sobre el plano  $E$  podremos convencernos de que las sombras aumentan de tamaño constantemente, a medida que se alejan, sobre el plano, del punto  $S$  hacia el infinito». ¿Pero qué sucedería si la regla en cuestión se comportara sobre el plano  $E$  de la misma manera que los discos-sombra  $L'$ ? Sería imposible, en ese caso, demostrar que las sombras crecen de tamaño a medida que se alejan de  $S$ . Tal aseveración no

tendría, pues, ninguna significación. En realidad, la única afirmación objetiva que se puede enunciar acerca de los discos-sombra es la siguiente: estos discos están relacionados exactamente de la misma manera en que lo están los discos rígidos sobre la superficie esférica, en el sentido de la geometría euclidiana.

Debemos tener bien claro que nuestra afirmación con respecto al crecimiento de los discos-sombra a medida que se alejan de  $S$  hacia el infinito no tiene en sí significación objetiva, en cuanto no seamos capaces de comparar los discos-sombra con los cuerpos rígidos euclidianos que se pueden mover sobre el plano  $E$ . Con respecto a las leyes de localización de las sombras  $L$ , el punto  $S$  no tiene privilegios especiales sobre el plano ni sobre la superficie esférica.

La representación que hemos visto de la geometría esférica sobre el plano es importante para nosotros, porque nos permite fácilmente transferirla al ámbito tridimensional.

Imaginemos un punto  $S$  de nuestro espacio y una gran cantidad de pequeñas esferas  $L$ , a las que es posible hacer coincidir las unas con las otras. Pero estas esferas no han de ser rígidas en el sentido de la geometría euclidiana; sus radios han de aumentar (en el sentido de la geometría euclidiana) cuando se muevan alejándose de  $S$  y hacia el infinito; ese aumento se ha de producir de acuerdo con la misma ley que determinaba el crecimiento de los radios de los discos-sombra  $L$  sobre el plano.

Después de habernos forjado una imagen vívida del comportamiento geométrico de las esferas  $L$ , supongamos que en nuestro espacio no existen cuerpos rígidos en el sentido de la geometría euclidiana, sino sólo cuerpos que se comportan como las esferas  $L$ . Así tendremos una clara imagen del espacio esférico tridimensional o, mejor aún, de la geometría esférica tridimensional. Ahora, las esferas deben ser llamadas «rígidas». Su aumento de tamaño a medida que se alejan de  $S$  no puede ser detectado mediante mediciones realizadas con reglas de medición, tal como en el caso de los discos-sombra sobre el plano  $E$ , porque los patrones de medida se comportan del mismo modo que las esferas. El espacio es homogéneo, lo que equivale a decir que las mismas configuraciones esféricas son posibles en las cercanías de cada punto\*. Nuestro espacio es finito

---

\* Esto es comprensible sin necesidad de cálculos —pero sólo para el caso bidimensional— si volvemos una vez más al caso del disco sobre la superficie de la esfera.

porque, a causa del «crecimiento» de las esferas sólo un número finito de ellas puede tener cabida en el espacio.

De esta manera, utilizando como punto de apoyo la práctica que para pensar y para visualizar nos ha dado la geometría euclidiana, hemos configurado una imagen mental de la geometría esférica. Nos sería posible, sin demasiadas dificultades, otorgar mayor profundidad y vigor a estas ideas realizando construcciones imaginarias especiales. Tampoco sería difícil representar, de una manera análoga, lo que se ha denominado geometría elíptica. Hoy, mi único objetivo ha sido demostrar que la facultad humana de visualización no está condenada a rendirse ante la geometría no euclidiana.

### **Sobre la teoría de la relatividad**

Conferencia en el King's College, Londres, 1921. Publicada en *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934.

Constituye para mí un gran placer tener el privilegio de hablar en la capital del país en el que han surgido las más importantes nociones fundamentales de física teórica. Me refiero a la teoría de los movimientos de masas y a la gravitación, estudiadas por Newton, y al concepto de campo electromagnético, que sirviera a Faraday y a Maxwell para situar la física sobre una nueva base. La teoría de la relatividad, bien puede decirse, ha puesto algo así como un toque final al importante edificio intelectual construido por Maxwell y Lorentz, intentando extender la teoría de campos a todos los fenómenos, incluido el de la gravitación.

Sobre el tema específico de esta charla, la teoría de la relatividad, quiero recalcar que esta teoría no tiene un origen especulativo, sino que debe por entero su nacimiento al deseo de hacer que la teoría física concuerde en la mayor medida posible con los hechos observados. No tenemos en ella un acto revolucionario, sino la continuación natural de una línea que puede trazarse a través de varios siglos. El abandono de ciertos conceptos de espacio, tiempo y movimiento, hasta el presente considerados como fundamentales, no ha de considerarse arbitrario, porque ha sido condicionado por hechos observados.

La ley de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, que ha sido confirmada por el desarrollo de la electrodinámica y la óp-

tica, y la equivalencia de todos los sistemas inerciales (principio de la relatividad restringida), que ha sido demostrada por el famoso experimento de Michelson, han hecho necesario, en primer lugar, que el concepto de tiempo se convierta en relativo, toda vez que a cada sistema inercial se le adjudica su propio tiempo especial. En la medida en que esta noción se ha desarrollado, ha quedado patente que la conexión entre experiencia inmediata por una parte y coordenadas y tiempo por la otra no ha sido pensada hasta el momento presente con la precisión suficiente.

Dicho de modo general, uno de los rasgos esenciales de la teoría de la relatividad es el esfuerzo que en ella se hace para descubrir las relaciones entre los conceptos generales y los hechos empíricos de una manera más precisa. El principio fundamental, en este caso, es que la justificación de un concepto físico estriba exclusivamente en su clara y precisa relación con hechos que pueden ser experimentados. De acuerdo con la teoría de la relatividad restringida, las coordenadas espaciales y el tiempo aún conservan un carácter absoluto, en tanto en cuanto son medibles por relojes estáticos y cuerpos rígidos. Pero son relativos en la medida en que dependen del estado de movimiento del sistema inercial seleccionado. Según la teoría de la relatividad restringida, el continuo cuatridimensional formado por la unión del espacio y del tiempo (Minkowski) retiene el carácter absoluto que, de acuerdo con la anterior teoría, pertenecía al espacio y al tiempo de manera separada. La influencia del movimiento, relativo al sistema de coordenadas, en la forma de los cuerpos y en la marcha de los relojes, así como la equivalencia de la energía y la masa inerte, surge de la interpretación de las coordenadas y el tiempo como productos de una medición.

En primer término, la teoría de la relatividad general debe su existencia al hecho empírico de la igualdad numérica entre la masa inerte y el peso de los cuerpos, un hecho fundamental para el que la mecánica clásica no proporciona ninguna interpretación. A su interpretación se ha llegado por una extensión del principio de la relatividad a sistemas de coordenadas acelerados los unos respecto de los otros. La introducción de sistemas de coordenadas acelerados respecto a un sistema inercial significa la aparición de campos gravitatorios respecto a este último. Como resultado de esto, la teoría general de la relatividad, que está basada sobre la igualdad de inercia y peso, proporciona una teoría del campo gravitatorio.



La introducción de los sistemas de coordenadas acelerados unos respecto a otros como sistemas igualmente legítimos, tal como exige la identidad de la inercia y del peso, en conjunción con los resultados de la teoría de la relatividad restringida, condujo a la conclusión de que las leyes que gobiernan la localización de los cuerpos rígidos en el espacio, cuando los campos gravitatorios están presentes, no guardan correspondencia con las leyes de la geometría euclidiana. Un resultado análogo ocurre con la marcha de los relojes. Esto nos lleva a la necesidad de una nueva generalización, aún, de la teoría del espacio y el tiempo, porque la interpretación directa de las coordenadas espaciales y temporales a través de mediciones obtenidas mediante reglas y relojes se desbarata. Esta generalización de la métrica, que ya ha sido realizada en la esfera de la matemática pura gracias a las investigaciones de Gauss y de Riemann, se basa esencialmente en el hecho de que la métrica de la teoría de la relatividad restringida, puede todavía reivindicar su validez para pequeñas regiones en el caso general.

El proceso de desarrollo aquí esbozado despoja a las coordenadas de espacio y tiempo de toda realidad independiente. Lo métricamente real ahora sólo está dado mediante la combinación de las coordenadas de espacio-tiempo con las magnitudes matemáticas que describen el campo gravitatorio.

Existe, empero, un segundo origen del proceso de creación de la teoría de la relatividad general. Tal como señaló con insistencia Ernst Mach, la teoría newtoniana es insatisfactoria en lo siguiente: si se considera el movimiento desde un punto de vista puramente descriptivo y no desde un punto de vista causal, sólo existe como movimiento relativo de las cosas, las unas con respecto de las otras. Pero la aceleración que aparece en las ecuaciones del movimiento de Newton es incomprensible si se parte del concepto del movimiento relativo. Esto obligó a Newton a inventar un espacio físico en relación con el cual se supone que existe la aceleración. Esta introducción *ad hoc* del concepto de espacio absoluto, en tanto que es lógicamente irrecusable, resulta en rigor poco satisfactoria. De aquí surgió el intento de Mach, que se propuso alterar las ecuaciones de la mecánica de tal manera que la inercia de los cuerpos pudiera reducirse a los propios movimientos relativos de estos, no con referencia al espacio absoluto, sino respecto a la totalidad de los demás cuerpos ponderables. En razón del estado del conocimiento por entonces existente, su intento estaba destinado al fracaso.

El planteamiento del problema, sin embargo, parece razonable por completo. Esta línea de argumentación se impone por sí misma con mayor fuerza en relación con la teoría de la relatividad general, toda vez que, de acuerdo con esa teoría, las propiedades físicas del espacio están afectadas por la materia ponderable. En mi opinión, la teoría de la relatividad general puede resolver este problema de modo satisfactorio sólo si concibe al mundo como espacialmente cerrado. Los resultados matemáticos de la teoría son los que nos compelen a adoptar este punto de vista, si aceptamos que la densidad media de materia ponderable en el mundo posee cierto valor finito, por pequeño que sea.

### **La causa de la formación de meandros en los cursos de los ríos y la denominada ley de Baer**

Conferencia leída ante la Academia Prusiana el 7 de enero de 1926. Publicada en el periódico alemán *Die Naturwissenschaften*, volumen 14, 1926.

Es conocido por todos el hecho de que las corrientes de agua tienden a curvarse en líneas sinuosas, en lugar de seguir la línea de máxima pendiente del terreno. También es bien sabido por los geógrafos que los ríos del hemisferio norte tienden a erosionar, en especial, su ribera derecha. Los ríos del hemisferio sur se comportan de la manera opuesta (ley de Baer). Se han llevado a cabo muchos intentos de explicar este fenómeno y no estoy seguro de que lo que he de decir a continuación sea nuevo para el experto: algunas de mis consideraciones son, por cierto, conocidas. No obstante, dado que he visto que no es fácil cruzarse con alguien que conozca a fondo las relaciones causales de estos hechos, creo que no está fuera de lugar hacer una breve exposición cualitativa de ellos.

En primer término, está claro que la erosión ha de ser mayor cuanto mayor sea la velocidad de la corriente en la orilla correspondiente, o cuantos más sean los obstáculos que la hagan caer a cero en algún punto particular de esta orilla. Esto es cierto por igual en todas las circunstancias, ya se trate de una erosión que dependa de factores mecánicos o de otros, de naturaleza físico-química (disolución del suelo). Por lo tanto, debemos concentrar nuestra atención en las circunstancias que afectan la rapidez con que disminuye la velocidad en la orilla.

En ambos casos, la asimetría en la caída de la velocidad se debe, en forma indirecta, a la formación de un movimiento circular al que hemos de dirigir nuestra atención de inmediato.

Comenzaré refiriéndome a un pequeño experimento que cualquiera puede repetir con facilidad. Imaginemos una taza de fondo plano, llena de té. En el fondo hay algunas hojas de té, que permanecen allí porque son más pesadas que el líquido al que han desplazado. Si se imprime un movimiento de rotación al líquido, mediante una cuchara, las hojas se agruparán rápidamente en el centro del fondo de la taza. La explicación de este fenómeno es la siguiente: la rotación del líquido genera una fuerza centrífuga que actúa sobre él. En sí mismo, esto no originaría ningún cambio en la corriente del líquido, si la rotación de los líquidos fuera igual a la de los sólidos. Pero en la cercanía de las paredes de la taza, el líquido es frenado por la fricción, con lo que su velocidad angular es menor allí que en otros lugares cercanos al centro.

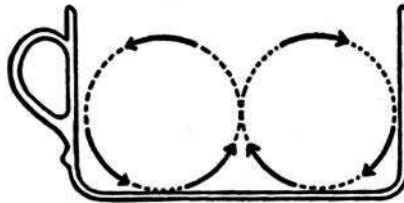


Figura 1

En particular, la velocidad angular y por consiguiente la fuerza centrífuga, cerca del fondo será menor que en las zonas superiores. El resultado será un movimiento circular del líquido, del tipo del que se ilustra en la figura 1, que va en aumento hasta que, bajo la influencia de la fricción del fondo, queda frenado. Las hojas de té son barridas hacia el centro por el movimiento circular y prueban la existencia de dicho movimiento.

Algo similar ocurre con una corriente de forma curva (fig. 2). En cada sección transversal de su curso, donde este se curva, opera una fuerza centrífuga en dirección a la parte exterior de la curva (desde *A* hacia *B*). Cerca del fondo, donde la velocidad de la corriente es reducida por la fricción, esta fuerza tiene menos intensidad que en la parte superior. A partir de tal hecho, se origina un movimiento

circular, del tipo ilustrado en el diagrama. Aun cuando no haya curvas en el río, se producirá un movimiento circular del tipo ilustrado en la figura 2, siquiera en pequeña escala, a causa del movimiento de rotación de la Tierra. Este movimiento produce una fuerza de Coriolis, transversal con respecto a la dirección de la corriente, cuya componente derecha horizontal equivale a  $2 v \Omega \sin \phi$  por unidad de masa del líquido, donde  $v$  es la velocidad de la corriente,  $\Omega$  la velocidad de rotación de la Tierra y  $\phi$  la latitud geográfica. Así como la fricción del suelo reduce esta fuerza en la parte del fondo, del mismo modo esta fuerza da origen a un movimiento circular del tipo indicado en la figura 2.

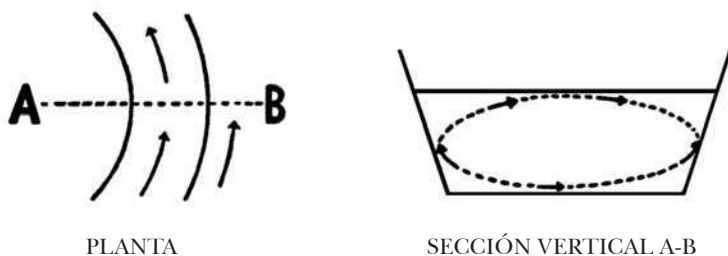


Figura 2

Después de estas discusiones preliminares volvemos al problema de la distribución de las velocidades sobre la sección transversal de la corriente, que es el factor de control en la erosión. A este fin, debemos comprender en primer lugar cómo se origina y se mantiene la (turbulenta) distribución de las velocidades. Si el agua en reposo de un río fuera puesta de pronto en movimiento por la acción de una fuerza de aceleración uniformemente distribuida, la distribución de las velocidades sobre la sección transversal sería uniforme en un primer momento. Sólo al cabo de un cierto tiempo, bajo la influencia de la fricción en las orillas, se establecería por sí misma una distribución de las velocidades, gradualmente creciente desde las paredes laterales hacia el centro de la sección transversal. Tras la perturbación, la distribución (más o menos) estacionaria de las velocidades sobre la sección transversal sólo se restablecería en forma gradual, una vez más, bajo la influencia de la fricción del fluido.

La hidrodinámica representa el proceso por el cual se restablece esta distribución estacionaria de las velocidades del siguiente modo:

en un flujo plano (potencial) todos los remolinos están concentrados en las paredes del lecho. De allí se separan y se mueven con lentitud hacia el centro de la sección transversal de la corriente, distribuyéndose por sí mismos en una capa de creciente grosor. Disminuye, con ello, la caída de velocidad en las proximidades de las paredes. Bajo la acción de la fricción interna del líquido, los remolinos en el interior de la sección transversal son gradualmente absorbidos y su puesto es ocupado por otros nuevos, que se forman junto a las paredes. Se produce de esta manera una distribución de las velocidades casi-estacionaria. Lo importante para nosotros es que la distribución estacionaria de velocidades se alcanza lentamente. Por esta razón, causas relativamente insignificantes, operando constantemente, son capaces de ejercer una considerable influencia sobre la distribución de velocidades en la sección transversal. Consideremos ahora qué influencia está destinada a ejercer sobre la distribución de velocidades en la sección transversal del río el movimiento circular debido a una curva del río o a la fuerza de Coriolis, tal como está ilustrado en la figura 2. Las partículas del líquido que se mueven con mayor rapidez estarán más alejadas de las paredes, es decir, en la parte superior del centro del fondo. Estas partículas de agua que se mueven a mayor velocidad serán llevadas por la circulación hacia la orilla derecha, en tanto que la orilla izquierda recibe el agua que viene de la región cercana al fondo y tiene una velocidad menor. Así, en el caso representado en la figura 2, la erosión es necesariamente más fuerte sobre el lado derecho que sobre el izquierdo. Es de notar que esta explicación está basada, de modo esencial, en el hecho de que el movimiento lento de circulación del agua ejerce una considerable influencia sobre la distribución de velocidades, porque la igualación de las velocidades por la fricción interna, que neutraliza esta consecuencia del movimiento de circulación, es también un proceso lento.

Aquí tenemos, pues, explicadas las causas de la formación de los meandros. Con todo, ciertos detalles podrían ser deducidos sin dificultad de estos hechos. La erosión, no sólo será comparativamente mayor en la orilla derecha, sino también en todo lado derecho del cauce, de modo que existirá una tendencia a que se produzca un perfil como el ilustrado en la figura 3.

Además, el agua de la superficie proviene de la orilla izquierda y por lo tanto, y especialmente en el lado izquierdo, se moverá con

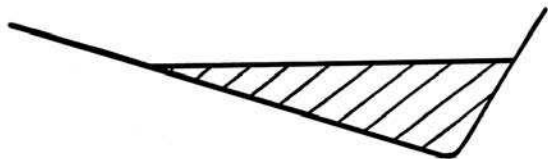


Figura 3

menor velocidad que el agua que fluya a mayor profundidad. Esto ha sido observado en la realidad. Hay que indicar, por otra parte, que el movimiento circular posee una inercia. La circulación sólo alcanzará su máximo, pues, más allá del punto de mayor curvatura y esto mismo se aplica, naturalmente, a la asimetría de la erosión. En el curso de la erosión, pues, se ha de producir un avance de la línea ondulatoria de la formación de los meandros en el sentido de la corriente. Por último, cuanto más amplia sea la sección transversal del río, más lentamente será absorbido el movimiento circular por la fricción. La línea ondulatoria de la formación de meandros aumentará, por lo tanto, con la sección transversal del río.

### **La mecánica de newton y su influencia en el desarrollo de la física teórica**

Con ocasión del bicentenario de la muerte de Newton. Publicado en el volumen 15 de la revista alemana *Die Naturwissenschaften*, 1927.

Hace doscientos años moría Isaac Newton. En este momento nos sentimos obligados a recordar a este brillante genio, que ha determinado el curso del pensamiento y la investigación en Occidente como nadie lo había hecho antes ni nadie lo ha hecho después. No sólo fue genial como inventor de ciertos métodos claves, sino que poseyó una maestría única sobre el material empírico conocido en sus días y también fue dueño de una maravillosa inventiva en lo que se refiere a métodos de demostración matemáticos y físicos. Por todos estos motivos Newton merece nuestro más profundo respeto. No obstante, su figura tiene una importancia mayor que la que sus cualidades le podían haber acordado porque el destino le situó en un punto crucial en la historia de la civilización. Para comprenderlo de mane-

ra clara, hemos de tomar en cuenta que antes de Newton no existía un sistema completo de causalidad física, capaz de representar cualquiera de las características profundas del mundo empírico.

Sin duda, los grandes materialistas de la antigua Grecia habían insistido en que todos los sucesos materiales pueden explicarse por el movimiento estrictamente regulado de los átomos, sin admitir como una causa independiente la voluntad de ninguna criatura viva. Y sin duda, a su modo, Descartes había recogido una vez más esa tradición. Pero sólo se trataba de una ambición audaz, del ideal problemático de una escuela de filósofos. Unos resultados objetivos que permitieran creer en la existencia de una cadena completa de causalidad física apenas existieron antes de Newton.

La finalidad de Newton estribaba en responder a esta pregunta: ¿existe alguna regla simple por la que sea posible calcular por completo los movimientos de los cuerpos celestes en nuestro sistema planetario, si se conoce, en un determinado momento, su estado dinámico? Newton sólo tenía ante sí las leyes empíricas de Kepler sobre el movimiento planetario, deducidas de las observaciones de Tycho Brahe, y esas leyes exigían explicación. Hoy todos sabemos qué prodigiosa habilidad fue necesaria para descubrir estas leyes a partir de las órbitas fijadas de modo empírico. Pero son pocos los que se detienen a reflexionar acerca del brillante método gracias al cual Kepler dedujo las órbitas reales a partir de la observación de las aparentes, es decir, a partir de los movimientos tal como eran observados desde la Tierra. Es bien cierto que estas leyes brindaron una respuesta completa a la pregunta de *cómo* se mueven los planetas en torno al sol: la forma elíptica de la órbita, igualdad de las áreas recorridas por los radios en tiempos iguales, la relación entre los semi-ejes mayores y los períodos de revolución. Pero estas normas no aportan una explicación causal. Son tres reglas lógicamente independientes que no revelan ninguna conexión interna entre sí. La tercera ley no puede ser simplemente transferida, en términos cuantitativos, a otros cuerpos centrales que no sean el sol (por ejemplo, no existe relación entre el período de revolución de un planeta en torno al sol y el de la luna alrededor de su planeta). Sin embargo, lo más importante es lo siguiente: estas leyes se refieren al movimiento como conjunto y no a la manera en que el estado dinámico de un sistema da origen al estado dinámico inmediatamente posterior. Ahora podríamos decir que estas son leyes integrales y no leyes diferenciales.

La ley diferencial es la única forma que brinda completa satisfacción a las exigencias de causalidad del físico moderno. La clara concepción de la ley diferencial es uno de los más grandes logros intelectuales de Newton. No se necesitaba tan sólo este concepto, sino también un formalismo matemático, que tenía ya una existencia rudimentaria, pero debía adquirir una forma sistemática. Newton la halló en el ámbito del cálculo diferencial e integral. No es imprescindible que nos detengamos aquí en el problema de si Leibnitz recurrió o no a los mismos métodos, independientemente de Newton. En cualquier caso, era por completo necesario que Newton los perfeccionara, toda vez que sólo así podía expresar sus ideas.

Galileo ya había avanzado brillantemente hacia el conocimiento de las leyes del movimiento; había descubierto las leyes de inercia y la ley de caída libre de los cuerpos en el campo gravitatorio de la Tierra, es decir, que una masa (con mayor precisión, un punto material) que no esté afectada por otras masas se mueve de manera uniforme y en línea recta. La velocidad vertical de un cuerpo libre en el campo gravitatorio aumenta proporcionalmente con el tiempo. Es posible que hoy nos parezca muy pequeña la distancia que separa los descubrimientos de Galileo de las leyes del movimiento de Newton. Pero ha de tenerse en cuenta que las dos proposiciones anteriores están formuladas de manera tal que se refieren al movimiento como un todo, en tanto que las leyes del movimiento de Newton proporcionan una respuesta a la siguiente pregunta: ¿cómo cambia, en un tiempo infinitamente breve, el estado dinámico de un punto material bajo la influencia de una fuerza externa? Sólo al considerar lo que ocurría durante un tiempo infinitamente breve (ley diferencial), pudo Newton llegar a la formulación de leyes válidas para cualquier tipo de movimiento. Tomó el concepto de fuerza de la estática, que ya había alcanzado un nivel muy alto de desarrollo. Estuvo en condiciones de conectar fuerza y aceleración sólo al introducir el nuevo concepto de masa que, por extraño que parezca, se basaba en una definición ilusoria. Hoy estamos tan habituados a formar conceptos que corresponden a cocientes diferenciales, que apenas si somos capaces de llegar a comprender qué enorme poder de abstracción era necesario para obtener la ley diferencial general del movimiento mediante un doble proceso al límite, en el curso del cual debía inventarse por añadidura el concepto de masa.



Pero aún estaba muy lejano el instante en que se alcanzaría una concepción causal de movimiento. Porque el movimiento sólo era determinado por su ecuación en los casos en que se conocía la fuerza. Sin duda inspirado por las leyes de los movimientos planetarios, Newton concibió la idea de que la fuerza que opera sobre una masa está determinada por la posición de todas las masas situadas a una distancia lo suficientemente pequeña de la masa en cuestión. Sólo se llegaría a la formulación de una concepción completamente causal del movimiento al establecer dicha conexión. Es bien conocida la forma en que Newton, a partir de las leyes de Kepler referidas al movimiento de los planetas, investigó la gravitación y llegó a descubrir que las fuerzas motrices que actúan sobre los astros y la gravedad son de igual naturaleza. La combinación

#### Ley del movimiento + Ley de atracción

es lo que constituye esa maravillosa construcción intelectual que permite el cálculo de los estados pasados y futuros de un sistema, a partir de su estado en un momento particular, en la medida en que los hechos se produzcan bajo la influencia única de la fuerza de la gravedad. La completud lógica del sistema conceptual de Newton estriba en que las únicas causas de la aceleración de las masas de un sistema son las propias masas.

Sobre la base que hemos brevemente esbozado aquí, Newton logró explicar los movimientos de los planetas, lunas y cometas hasta en sus menores detalles, así como las mareas y el movimiento de la Tierra que origina la precesión de los equinoccios: una proeza deductiva de extraordinaria magnificencia. Tuvo que haber sido muy impresionante descubrir que la causa del movimiento de los cuerpos celestes es idéntica a la gravedad, con la que todos estamos tan familiarizados en la vida cotidiana.

Pero la importancia de la obra de Newton no se reduce al hecho de haber creado una base útil y lógicamente satisfactoria de la mecánica. Hasta fines del siglo XIX, esos descubrimientos fueron parte del programa de todo investigador en el campo de la física teórica. Todos los fenómenos físicos debían ser referidos a masas sujetas a las leyes del movimiento descubiertas por Newton. La ley de la fuerza debía ser simplemente extendida y adaptada al tipo de fenómeno que se fuera a estudiar. El mismo Newton trató de aplicar

este programa a la óptica, suponiendo que la luz está compuesta por corpúsculos inertes. Incluso la teoría ondulatoria ha hecho uso de la ley del movimiento de Newton, aplicándola a masas distribuidas continuamente. Las ecuaciones del movimiento de Newton fueron la base única de la teoría cinética del calor que, si por una parte preparó a la gente para el descubrimiento de la ley de la conservación de la energía, por otra condujo a una teoría de los gases que ha sido posteriormente confirmada hasta su último detalle y, por fin, nos ha permitido una visión más profunda de la naturaleza de la segunda ley de la termodinámica.

El desarrollo de la electricidad y el magnetismo ha seguido hasta los tiempos modernos las indicaciones newtonianas (sustancia eléctrica y magnética, fuerzas que actúan a distancia). Incluso la revolución que propiciaron Faraday y Maxwell en la electrodinámica y la óptica, y que ha constituido el primer gran avance fundamental en la física teórica después de Newton, se originó por completo a la sombra de las ideas de Newton. Maxwell, Boltzmann y Lord Kelvin jamás dejaron de referir los campos electromagnéticos y sus interacciones dinámicas a la acción mecánica de hipotéticas masas de distribución continua. No obstante, como resultado de la falta de éxito, o de la falta de éxitos visibles como coronación de todos aquellos esfuerzos, a partir de fines del siglo XIX se produjo un cambio en nuestras nociones fundamentales. La física teórica ha sobrepasado el marco newtoniano que le había otorgado estabilidad y había servido de guía intelectual a la ciencia durante casi doscientos años.

Los principios fundamentales de Newton eran tan satisfactorios desde el punto de vista lógico que el estímulo necesario para revisarlos sólo pudo nacer de los hechos empíricos. Antes de proseguir, quiero insistir en que Newton conocía las debilidades de su edificio intelectual mejor que las generaciones de científicos que le siguieron. Este hecho siempre ha provocado mi más profunda admiración y por ello querría ahora demorarme en este tema por unos momentos.

I. Son evidentes los esfuerzos de Newton por representar su sistema como necesariamente condicionado por la experiencia y por introducir el menor número posible de conceptos no directamente referidos a objetos empíricos. A pesar de esto, establecería los conceptos de espacio absoluto y tiempo absoluto, cosa por la que a menudo ha sido criticado en estos últimos años. Pero en este punto Newton es particularmente consistente. Había comprendido que las

cantidades geométricas observables (distancias entre puntos materiales) y su curso en el tiempo no caracterizan por completo el movimiento en sus aspectos físicos, tal como demostró con su famoso experimento del cubo de agua rotatorio. Por ello, además de las masas y sus distancias, debe de existir algo más que determina el movimiento. Newton consideró que ese «algo» debía ser la relación con el «espacio absoluto»; sabía que el espacio debe poseer una especie de realidad física si sus leyes del movimiento poseen algún significado, una realidad de la misma clase que la de los puntos materiales y sus distancias.

Comprender a fondo todo esto nos llevará a advertir la sabiduría de Newton y, al mismo tiempo, el lado débil de su teoría, cuya estructura lógica sería más satisfactoria, sin duda, si pudiera prescindir de este concepto tan vago; en tal caso, sólo los conceptos relacionados de manera más clara con la percepción (puntos de masa, distancias) entrarían en sus leyes.

II. La introducción de fuerzas que actúan en forma directa e instantánea a distancia para representar los efectos de la gravedad, no concuerdan con la mayoría de los procesos que nos son familiares en la vida cotidiana. Newton confronta esta objeción señalando el hecho de que su ley de la interacción gravitatoria no constituye una explicación final, sino una regla derivada de la experiencia por un proceso de inducción.

III. La teoría de Newton no proporciona ninguna explicación para el curioso hecho de que el peso y la inercia de un cuerpo están determinados por la misma magnitud (su masa). Aunque el propio Newton había reparado en la peculiaridad de este hecho.

Ninguno de estos tres puntos puede clasificarse como una objeción lógica a la teoría. En cierto sentido, sólo significan unos deseos insatisfechos de la mente científica, en su lucha por una visión conceptual uniforme y completa de los fenómenos naturales.

Considerada como un programa de todo el conjunto de la física teórica, la teoría del movimiento de Newton recibió su primer golpe de la teoría de la electricidad de Maxwell. Se había llegado a comprender con claridad que las interacciones eléctricas y magnéticas entre los cuerpos no eran debidas a fuerzas que operaran de modo instantáneo y a distancia, sino a procesos que se propagan a través del espacio a una velocidad finita. Junto con el punto de masa y su movimiento, aquí surgió, de acuerdo con el concepto de Faraday,

una nueva especie de realidad física, es decir, «el campo». En una primera instancia, bajo la influencia del punto de vista de la mecánica se intentó interpretar el campo como un estado mecánico (de movimiento o tensión) de un medio hipotético (el éter) que llena el espacio. Pero cuando esta interpretación no resultó adecuada, a pesar de los más obstinados esfuerzos, se fue gradualmente adoptando la idea de considerar que el «campo electromagnético» es el elemento final irreducible de la realidad física. Debemos agradecer a H. Hertz por haber liberado definitivamente el concepto de campo de todos los impedimentos derivados del arsenal conceptual de la mecánica, y a H. A. Lorentz por liberarlo de su sustrato material. De acuerdo con este último, el único sustrato del campo es el espacio físico vacío (o éter), que incluso en la mecánica de Newton no estaba desprovisto de toda función física. Llegados a este punto, nadie creía ya en la acción inmediata a distancia ni siquiera en la esfera de la gravitación, aunque ninguna teoría de campo de esta última estaba perfilada con claridad, en razón de la carencia de un conocimiento empírico suficiente. El desarrollo de la teoría del campo electromagnético —una vez que fueron abandonadas las hipótesis de Newton de las fuerzas actuando a distancia— condujo también al intento de explicar las leyes newtonianas del movimiento a través de electromagnetismo o bien reemplazarlas por otras más precisas, basadas en la teoría de campos. A pesar de que estos esfuerzos no alcanzaron un éxito completo, los conceptos fundamentales de la mecánica dejaron de ser considerados como los elementos fundamentales del cosmos físico.

La teoría de Maxwell y Lorentz condujo en forma inevitable a la teoría de la relatividad restringida que, al abandonar la noción de absoluta simultaneidad, excluía la existencia de fuerzas que actúan instantáneamente a distancia. Se deduce de esta teoría que la masa no es una magnitud constante, sino que depende de (en rigor, es equivalente a) la cantidad de energía. También demostró esta teoría que las leyes del movimiento de Newton sólo eran válidas para pequeñas velocidades; en su lugar, estableció una nueva ley del movimiento en la cual la velocidad de la luz en el vacío aparece como velocidad límite.

La teoría de la relatividad general constituyó el último paso en el desarrollo del programa de la teoría de campos. Desde el punto de vista cuantitativo, sólo modifica la teoría de Newton en forma míni-

ma, pero desde el punto de vista cualitativo, en cambio, la modificación es profunda. La inercia, la gravitación y el comportamiento métrico de los cuerpos y relojes fueron reducidos a una única cualidad del campo. Dicho campo, a su vez, fue definido como dependiente de los cuerpos (generalización de la ley de la gravedad de Newton, o mejor aún, de la ley de campo que corresponde a ella, tal como la formulara Poisson). El espacio y el tiempo quedaban, pues, despojados no de su realidad, sino de su capacidad causal absoluta —es decir, que pasaron de ser afectantes a afectados— que Newton se había visto obligado a atribuirles para poder formular las leyes conocidas entonces. La ley generalizada de la inercia asume la función de la ley newtoniana del movimiento. Esta breve sinopsis es bastante para mostrar que los elementos de la teoría de Newton pasaron a la teoría de la relatividad general, con lo que los tres defectos que antes he mencionado quedaron salvados. Al parecer, dentro del esquema de la teoría de la relatividad general, las leyes del movimiento pueden ser deducidas de las leyes de campo correspondientes a la ley newtoniana de fuerzas. Sólo cuando se haya alcanzado por completo este objetivo será posible hablar de una teoría de campos pura.

En un sentido más formal, también la mecánica de Newton ha preparado el camino para la teoría de campos. La aplicación de la mecánica de Newton a las masas distribuidas de manera continua llevaba inevitablemente al descubrimiento y aplicación de las ecuaciones diferenciales parciales, que a su vez proporcionaron por primera vez el lenguaje para enunciar las leyes de la teoría de campos. En este sentido formal, la concepción de Newton acerca de la ley diferencial constituye el primer paso decisivo en el desarrollo posterior.

Toda la evolución de nuestras ideas acerca de los procesos de la naturaleza —los que hasta el presente nos han preocupado— puede ser considerada como un desarrollo orgánico del pensamiento de Newton. No obstante, en pleno proceso de perfeccionamiento de la teoría de campos, la radiación térmica, los espectros, la radiactividad, etcétera, revelaron los límites de aplicabilidad de este sistema conceptual, límites que todavía hoy nos parecen imposibles de superar, a pesar de los muchos éxitos obtenidos. No son pocos los físicos que sostienen —y esgrimen argumentos de peso en su favor— que ante estos hechos se ha derrumbado no sólo la ley diferencial, sino también la misma ley de causación, que hasta el presente ha sido el postulado básico final de las ciencias de la naturaleza. Incluso se

ha negado la posibilidad de una construcción espacio-temporal, que pueda ser coordinada sin ambigüedades con los fenómenos físicos. A primera vista parece difícil deducir de la teoría de campos, que opera con ecuaciones diferenciales, un sistema mecánico con sólo valores discretos o estados de energía, como lo demuestra la experiencia. El método de Broglie-Schrödinger, que en cierto sentido tiene el carácter de una teoría de campos, deduce ciertamente la existencia exclusiva de estados discretos, en sorprendente acuerdo con los hechos empíricos, sobre la base de ecuaciones diferenciales que utilizan un tipo de argumento de resonancia, aunque esto exija renunciar a la localización de las partículas y a leyes estrictamente causales. ¿Quién podría tener hoy la presunción de decidir que han de ser definitivamente abandonadas la ley de causación y la ley diferencial, primeras premisas en la visión newtoniana de la naturaleza?

### **Sobre la verdad científica**

Respuestas a las preguntas de un investigador japonés. Publicadas en *Gelegentliches*, 1929, publicación que apareció en una edición limitada con motivo de los cincuenta años de Einstein.

I. Es difícil adjudicar una significación exacta a la expresión «verdad científica». Bien se sabe que el significado de la palabra «verdad» varía según nos enfrentemos con un hecho de la experiencia, un postulado matemático o una teoría científica. La frase «verdad religiosa» tampoco me aporta ningún significado claro.

II. La investigación científica puede reducir la superstición, al estimular a la gente a que piense y considere las cosas en términos de causas y efectos. Es verdad que, detrás de todo trabajo científico de elevado nivel, subyace una convicción —cercana al sentimiento religioso— de la racionalidad o inteligibilidad del mundo.

III. Dentro de esta firme creencia, una creencia que está unida a un profundo sentimiento de la existencia de una mente superior que se revela en el mundo de la experiencia, se arraiga mi concepción de Dios. En un lenguaje corriente esto podría describirse como «panteísmo» (Spinoza).

IV. Las tradiciones confesionales sólo me interesan desde un punto de vista histórico y psicológico; para mí no llegan a tener ninguna otra significación.

## Johannes Kepler

En ocasión del tricentenario de la muerte de Kepler. Publicado en el *Frankfurter Zeitung* (Alemania), el 9 de noviembre de 1930.

En tiempos de ansiedad e incertidumbre como los nuestros, cuando tan difícil es sentir satisfacción por el curso de la humanidad, resulta particularmente consolador pensar en un hombre tan excepcional y sereno como Kepler. Johannes Kepler vivió en una época en la que aún no se consideraba seguro el reino de la ley en la naturaleza. La profundidad de su fe en la existencia de una ley natural ha de haberle brindado la fuerza necesaria para dedicar décadas de duro y paciente trabajo a la investigación empírica de los movimientos planetarios y de las leyes matemáticas de esos movimientos; todo ello, sin ningún apoyo y con la comprensión de pocos. Si hemos de honrar dignamente su memoria, tendremos que describir de la manera más clara su problema y las etapas necesarias para su solución.

Copérnico había abierto los ojos de los más inteligentes al hecho de que la mejor manera de lograr una clara comprensión de los movimientos aparentes de los planetas en el cielo era interpretarlos como movimientos en torno al sol, al que concebía como un cuerpo inmóvil. Si los planetas se hubieran desplazado de modo uniforme, en círculo en torno al sol, hubiera sido comparativamente fácil descubrir qué aspecto debían tener estos movimientos vistos desde la Tierra. Sin embargo, como estos fenómenos son mucho más complejos, la tarea resultaba mucho más ardua. En primer lugar, había que determinar los movimientos empíricamente a partir de las observaciones de Tycho Brahe. Sólo entonces podía pensarse en el descubrimiento de leyes generales acordes con esos movimientos.

Constituía una tarea de extraordinaria dificultad determinar los verdaderos movimientos en torno al sol; para percatarnos de esto con exactitud, debemos comprender que nunca se ve la posición verdadera de un planeta en un momento determinado, y que sólo se advierte en qué dirección puede ser visto en ese momento desde la Tierra, que también se está moviendo en torno al sol, de una manera desconocida. Las dificultades parecían, pues, insuperables.

Kepler tenía que descubrir un método por el cual se pudiera poner orden en semejante caos. Desde el primer momento advirtió que era necesario, antes que nada, determinar el movimiento de

la propia Tierra. Esto habría resultado sencillamente imposible si sólo hubiera existido el Sol, la Tierra, las estrellas fijas y ningún otro planeta. En tal caso, por la vía empírica, sólo se hubiera podido determinar el cambio de dirección de la línea recta Sol-Tierra durante el curso del año (movimiento aparente del Sol con respecto a las estrellas fijas). De esta forma, fue posible descubrir que las direcciones Sol-Tierra eran todas trazables dentro de un plano estacionario con referencia a las estrellas fijas, al menos según las observaciones de aquellos tiempos en que no existían los telescopios. De esta misma manera también se pudo determinar de qué modo la línea Sol-Tierra gira en torno al Sol. Se comprobó que la velocidad angular de este movimiento varía en forma regular a lo largo del transcurso del año. Pero esto no servía de mucho, toda vez que por entonces se ignoraba en cuánto se altera la distancia entre la Tierra y el Sol en el curso del año. Sólo cuando estos cambios fueron conocidos se pudo determinar la verdadera forma de la órbita de la Tierra y del recorrido de este planeta.

Kepler halló una maravillosa forma de solucionar este problema. En primer lugar, de sus observaciones del Sol dedujo que la aparente trayectoria solar con respecto a las estrellas fijas cambiaba de velocidad en las distintas épocas del año, pero que la velocidad de ese movimiento era siempre la misma en el mismo momento del año astronómico y, por consiguiente, que la velocidad de rotación de la recta Tierra-Sol era siempre la misma cuando apuntaba a la misma zona de las estrellas fijas. Es decir, que resultaba lícito suponer que la órbita de la Tierra era cerrada y descrita por nuestro planeta del mismo modo cada año, cosa que de ningún modo era evidente *a priori*. Para quienes se adherían al sistema de Copérnico esta explicación debía aplicarse con toda seguridad a las órbitas del resto de los planetas.

Lo cual, sin duda, fue una gran simplificación. ¿Pero cómo determinar la verdadera forma de la órbita de la Tierra? Imaginemos una linterna, *M*, encendida, y brillando en algún punto del plano de la órbita. Supongamos que sabemos que esta linterna permanece permanentemente en su lugar y que, de ese modo, constituye una especie de punto de triangulación para determinar la órbita de la Tierra, un punto que los habitantes de la Tierra pueden observar en cualquier momento del año. Y también supongamos que esta linterna *M* está más lejos del Sol que de la Tierra. Con la ayuda de este



punto, era posible determinar la órbita de la Tierra de la siguiente manera:

En primer término, cada año llega un momento en que la Tierra  $T$  pasa exactamente por la línea que une el Sol  $S$  y la linterna  $M$ . Si en ese momento miramos desde la Tierra,  $T$ , hacia la linterna  $M$ , nuestra línea de visión coincidirá con la línea  $SM$  (Sol-linterna). Supongamos que esta última está visible en el firmamento. Ahora imaginemos la Tierra en una posición diferente y en un momento diferente. Dado que el sol  $S$  y la linterna  $M$  pueden ser vistos desde la Tierra, el ángulo  $T$  del triángulo  $STM$  es conocido. Pero también conocemos la dirección de  $ST$  en relación con las estrellas fijas, a través de observaciones solares directas, en tanto que la dirección de la línea  $SM$  en relación con las estrellas fijas ha sido previamente obtenida en forma definitiva. En el triángulo  $STM$ , también nos es conocido el ángulo  $S$ . Por lo tanto, con la base  $SM$  arbitrariamente dibujada sobre un trozo de papel, en virtud de nuestro conocimiento de los ángulos de los vértices  $T$  y  $S$ , podemos construir el triángulo  $STM$ . Debemos hacer esto mismo en varias ocasiones durante el año; cada vez obtendremos una posición de la Tierra,  $T$ , con su correspondiente fecha y una determinada posición con respecto a la base  $SM$  permanentemente fija. La órbita de la Tierra quedará, así, determinada de manera empírica, dejando de lado su tamaño absoluto, desde luego.

Sin duda, habrá quien pregunte: ¿pero de dónde podía sacar Kepler esa linterna  $M$ ? Su genio y naturaleza —benévola en este caso— se la proporcionaron. Por ejemplo, allí estaba el planeta Marte y la duración del año marciano (o sea, una rotación del planeta en torno al Sol) era conocida. En cierto punto, puede ocurrir que el Sol, la Tierra y Marte se hallen casi en una línea recta. Esta posición de Marte se repite con regularidad después de uno, dos, y más años marcianos, porque Marte se mueve en una órbita cerrada. En esos momentos conocidos, pues,  $SM$  siempre presenta la misma base, en tanto que la Tierra siempre está en un punto diferente en su órbita. Las observaciones del Sol y de Marte en esos momentos constituyen así un medio para determinar la verdadera órbita de la Tierra, en vista de que Marte juega en esos momentos el papel de nuestra linterna imaginaria. De esta manera Kepler descubrió la verdadera forma de la órbita de la Tierra y el modo en que la Tierra la describe, y nosotros, los que hemos venido detrás de él —europeos, alemanes o suavos—, debemos admirarle y rendirle honores.

Una vez que la órbita de la Tierra ha sido empíricamente determinada, conocida la verdadera posición y longitud de la línea *ST* en cualquier momento, ya no le resulta a Kepler tan terriblemente difícil calcular las órbitas y movimientos del resto de los planetas a partir de la observación. No obstante, se trataba de una inmensa tarea, en especial si se considera el desarrollo de la matemática en esos tiempos.

Así se iniciaría la segunda parte, y no la menos ardua, de la vida de investigador de Kepler. Las órbitas eran empíricamente conocidas, pero sus leyes debían ser deducidas de los datos empíricos. En primer lugar tenía que conjeturar la naturaleza matemática de la curva descrita por la órbita y después contrastarla con un inmenso número de datos. Si este intento fallaba, era preciso plantear una nueva hipótesis y verificarla de nuevo. Después de una vasta investigación, se comprobó que la conjetura de que la órbita era una elipse con el Sol en uno de sus focos era la adecuada. Kepler también descubrió la ley de la variación de la velocidad a lo largo de cada revolución, según la cual la línea Sol-planeta recorre áreas iguales en iguales períodos de tiempo. Por fin, descubrió asimismo que los cuadrados de los períodos de revolución en torno al Sol son proporcionales a las terceras potencias de los ejes mayores de las elipses.

Nuestra admiración por este hombre está acompañada por otro sentimiento de admiración y respeto producido no por un hombre, sino por la misteriosa armonía de la naturaleza dentro de la cual hemos nacido. Los antiguos ya habían ideado las regularidades más simples. Entre estas, junto a la recta y a la circunferencia, las más importantes eran la elipse y la hipérbola. Estas dos últimas las vemos realizadas —o muy poco menos— en las órbitas de los cuerpos celestes.

Al parecer, la mente humana ha de construir primero las formas de modo independiente, para luego poder hallarlas en las cosas. Las verdaderas proezas de Kepler son un ejemplo magnífico de esta aserción: el conocimiento no puede surgir de la experiencia tan sólo, sino de la comparación de las invenciones del intelecto con los hechos observados.

## **La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de la realidad física**

En ocasión del centenario del nacimiento de Maxwell. Publicado en 1931, en *James Clerk Maxwell: A Commemoration Volume*, Cambridge University Press.

La creencia en un mundo exterior, independiente del sujeto perceptor, es la base de toda la ciencia natural. No obstante, dado que la percepción sensorial sólo brinda una información indirecta de ese mundo exterior o «realidad física», únicamente podemos captar a esta última por medios especulativos. De aquí se concluye que nuestras nociones de la realidad física nunca podrán ser definitivas. Debemos estar siempre preparados para cambiar esas nociones —es decir, la base axiomática de la física— para mantener una relación adecuada con los hechos percibidos, de la manera más lógicamente perfecta. Por cierto que una mirada al desarrollo de la física nos muestra que esta ciencia ha pasado por cambios profundos a lo largo del tiempo.

El cambio mayor en la base axiomática de la física —en otras palabras: de nuestra concepción de la estructura de la realidad—, desde el momento en que Newton sentara las bases de la física teórica, fue provocado por los trabajos de Faraday y Maxwell en el campo de los fenómenos electromagnéticos. Trataremos de explicarlo en las siguientes líneas, manteniendo a la vista tanto los desarrollos iniciales como los posteriores.

Según el sistema de Newton, la realidad física se caracteriza por los conceptos de espacio, tiempo, punto material y fuerza (acción recíproca de los puntos materiales). Los fenómenos físicos, según el punto de vista de Newton, deben ser considerados como movimientos, gobernados por leyes fijas, de puntos materiales en el espacio. El punto material es nuestro único modo de representar la realidad cuando nos enfrentamos con cambios que se producen en ella; es el representante solitario de lo real, en la medida en que lo real es capaz de cambiar. Los cuerpos perceptibles son el origen evidente del concepto de punto material; este, por lo común, es concebido como análogo a los cuerpos móviles, a los que se despoja de las características de extensión, forma, orientación en el espacio y de todas las cualidades «internas» y se les concede tan sólo la inercia y la trasla-

ción, añadiendo el concepto de fuerza. Los cuerpos materiales, que psicológicamente nos condujeron a la formación de nuestro concepto del «punto material», deben ser considerados, en sí mismos, como sistemas de puntos materiales. Hay que subrayar que este esquema teórico es, en esencia, un esquema atomístico y mecánico. Todos los hechos debían ser interpretados de una manera puramente mecánica, es decir, como movimientos de puntos materiales según las leyes newtonianas del movimiento.

El aspecto menos satisfactorio de este sistema —aparte de las dificultades ínsitas en el concepto de «espacio absoluto», que hace muy poco se han planteado una vez más— está en su descripción de la luz, que Newton también concibió como compuesta por puntos materiales, de acuerdo con su sistema. Ya en el momento en que se planteara la teoría inquietaba la cuestión acerca de lo que ocurriría con los puntos materiales que componen la luz, en el caso de que la luz fuera absorbida. Por otra parte, es sin duda poco satisfactorio introducir en la discusión puntos materiales de naturaleza muy distinta, como los que deben ser utilizados para la representación de la materia ponderable y de luz. Más tarde, a estas dos clases se sumaron los corpúsculos eléctricos, con lo cual se constituía una tercera de características por completo diferentes. Por otra parte, constituía también una debilidad fundamental el hecho de que las fuerzas de acción recíproca, por las cuales se determinan los fenómenos, debieran suponerse hipotéticamente de una manera perfectamente arbitraria. Con todo, esa concepción de la realidad dio mucho de sí. ¿Cómo se llegó a tener la impresión de que había que abandonarla?

Con el fin de expresar matemáticamente su sistema, Newton tuvo que crear el concepto de cocientes diferenciales y expresar las leyes del movimiento en la forma de ecuaciones diferenciales totales: quizás el mayor avance intelectual realizado por una sola persona. Las ecuaciones diferenciales parciales no eran necesarias para estos fines, y tampoco Newton hizo un uso sistemático de ellas, pero fueron necesarias para la formulación de la mecánica de los cuerpos deformables. Esto está conectado con el hecho de que, en principio, no es importante, en estos problemas, la manera como se supone que los cuerpos están contruidos a partir de los puntos materiales.

Así fue como la ecuación diferencial parcial entró en la física teórica como un elemento ancilar, aunque gradualmente se ha ido con-

virtiéndose en soberana. Esto tuvo su inicio en el siglo XIX, al imponerse la teoría ondulatoria bajo la presión de los hechos observados. La luz en el espacio vacío fue explicada como un fenómeno ondulatorio del éter y por lo tanto parecía innecesario considerarla como un conglomerado de puntos materiales. En este momento, por primera vez, la ecuación diferencial parcial se mostró como la expresión natural de las realidades primarias de la física. En este ámbito particular de la física teórica, el campo continuo se convertía junto al punto material, en representante de la realidad física. Este dualismo persiste aún hoy, por muy molesto que resulte para cualquier mentalidad ordenada.

Aun cuando la idea de la realidad física había dejado de ser puramente atómica, continuaba siendo, de momento, puramente mecánica; en general, todavía se seguía intentando explicar todos los fenómenos como movimientos de masas inertes y, por cierto, ningún otro enfoque de los hechos parecía concebible. Se produce entonces el gran cambio, que para siempre estará asociado a los nombres de Faraday, Maxwell y Hertz. En esta revolución, la parte del león corresponde a Maxwell. Demostró que el conjunto de lo que por entonces era conocido acerca de la luz y de los fenómenos electromagnéticos se podía expresar mediante su conocido doble sistema de ecuaciones diferenciales parciales, en las que los campos eléctrico y magnético aparecen como las variables dependientes. Maxwell trató, por cierto, de explicar o justificar esas ecuaciones mediante la construcción de un modelo mecánico.

Construyó varios pero sin tomarse demasiado en serio ninguno de ellos, y al final quedaron las ecuaciones como lo esencial y las intensidades de campo como las entidades irreducibles. Hacia fines del siglo, la concepción del campo electromagnético como entidad última había sido aceptada de manera general y muchos científicos serios habían abandonado los intentos de dar una explicación mecánica a las ecuaciones de Maxwell. Y antes de que transcurriera mucho tiempo ocurrió, al contrario, que se intentaron explicar los puntos materiales y su inercia por medio de la teoría de campo de Maxwell; no obstante, este intento no alcanzó un éxito total.

Si dejamos a un lado los importantes resultados individuales que produjo la investigación de Maxwell a lo largo de toda su vida en importantes ámbitos de la física y si nos concentramos en los cambios que él aportara a la concepción de la naturaleza de la realidad físi-

ca, podemos decir lo siguiente: antes de Maxwell, los investigadores concebían la realidad física —en la medida en que se supone que representa los fenómenos naturales— como puntos materiales, cuyos cambios sólo consisten en movimientos que pueden formularse mediante ecuaciones diferenciales totales. Después de Maxwell, se concibió la realidad física como representada por campos continuos, que no podían ser explicados mecánicamente, que debían representarse mediante ecuaciones diferenciales parciales.

Este cambio en la concepción de la realidad es el más profundo y fructífero que se ha producido en la física desde los tiempos de Newton; con todo, debemos admitir al mismo tiempo, que el programa no ha sido desarrollado aún en todas sus partes. Los sistemas satisfactorios de la física que a partir de entonces se han desarrollado representan compromisos entre estos dos esquemas, que por esta misma razón ofrecen un carácter provisional, lógicamente incompleto, a pesar de que han facilitado grandes adelantos en algunos de los aspectos investigados.

En primer lugar, llama la atención el trabajo que realizara Lorentz para establecer su teoría de los electrones, en la cual el campo y los corpúsculos eléctricos se revelan como elementos de idéntico valor para la comprensión de la realidad. A continuación han surgido las teorías especial y general de la relatividad que, a pesar de estar basadas por completo en ideas que se conectan con la teoría de campo, hasta el presente parecen incapaces de evitar la introducción independiente de los puntos materiales de las ecuaciones diferenciales totales.

La última creación de la física teórica, y la de mayor éxito, es decir, la mecánica cuántica, difiere de manera fundamental tanto del esquema newtoniano como del esquema maxwelliano, si se nos permite el uso de estos neologismos en aras de la concisión. La diferencia estriba en que las magnitudes que figuran en las leyes de la teoría cuántica no pretenden describir la misma realidad física, sino tan sólo las probabilidades de que se produzca una determinada realidad física. Dirac, a quien en mi opinión debemos la exposición más perfecta —desde el punto de vista lógico— de esta teoría, señala con acierto que quizá sería difícil, por ejemplo, proporcionar una descripción teórica de un fotón tal que nos brindara la información necesaria para decidir si pasará por un polarizador situado (oblicuamente) en su camino, o no.

Todavía me siento proclive a sostener el criterio de que los físicos no se contentarán, a largo plazo, con este tipo de descripción indirecta de la realidad, aun cuando la teoría pueda ser adaptada al postulado de la relatividad general de una forma satisfactoria. Estoy seguro de que en esas circunstancias nos veremos obligados a volver a intentar la realización del programa que bien podría definirse como maxwelliano: la descripción de la realidad física en términos de campos que satisfagan, sin singularidades, a ecuaciones diferenciales parciales.

### **Sobre el método de la física teórica**

Disertación Herbert Spencer, pronunciada en Oxford, el 10 de junio de 1933. Publicada en *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934.

Si alguien quisiera averiguar algo acerca de los métodos que los físicos teóricos utilizan, tendrá que seguir al pie de la letra este consejo: no escuchar sus palabras, sino prestar total atención a lo que los investigadores hagan. Para quien es un descubridor en este campo, los productos de su imaginación se le presentan como tan necesarios y naturales que él mismo los considera —y querría que los demás los consideraran— como realidades dadas y no como creaciones del pensamiento.

Estas palabras casi parecen una invitación a que todos ustedes se marchen sin escuchar esta conferencia. Cada uno de ustedes bien se podrá decir a sí mismo que el conferenciante es un físico investigador y que, por lo tanto, tendría que dejar la reflexión sobre la estructura de la ciencia teórica en manos de los epistemólogos.

Ante tales críticas, puedo defenderme desde un punto de vista personal asegurando a ustedes que no se debe a mi propia iniciativa, sino a la gentil invitación de otras personas, mi presencia en esta sala, que hoy nos alberga para conmemorar a un hombre que luchó durante toda su vida, y con bravura, en bien de la unidad del conocimiento. No obstante, desde un punto de vista objetivo, mi empresa puede justificarse sobre la base de que, después de todo, bien podría ser de interés llegar a saber cómo ve su ciencia una persona que ha pasado su vida entregada a aclarar y perfeccionar sus fundamentos. La forma en que ese investigador vea la evolución pasada

y presente puede que dependa demasiado de lo que él espera del futuro y de lo que busca en el presente; pero ese es el destino inevitable de cualquier persona que se haya entregado con intensidad al trabajo, en el mundo de las ideas. Otro tanto le ocurre al historiador que, del mismo modo, aunque tal vez en forma inconsciente, agrupa los hechos reales en torno a ideales que se ha formulado a sí mismo acerca de la sociedad humana.

Arrojemos ahora una mirada al desarrollo del sistema teórico y prestemos una especial atención a las relaciones entre el contenido de la teoría y el conjunto de los hechos empíricos. En nuestro ámbito de trabajo, nos vemos afectados por la eterna antítesis entre los dos componentes inseparables de nuestro conocimiento: lo empírico y lo racional.

Reverenciamos a la antigua Grecia como cuna de la ciencia occidental. Allí, por primera vez, el mundo fue testigo del milagro de un sistema lógico que avanzaba paso a paso con tal precisión que cada una de sus proposiciones era absolutamente cierta: me refiero a la geometría de Euclides. Este admirable triunfo de la razón dio al intelecto humano la confianza en sí mismo necesaria para sus realizaciones posteriores. Si Euclides no ha logrado inflamar vuestro entusiasmo juvenil, esto significa que no habéis nacido para convertirnos en pensador científico.

Pero antes de que la humanidad estuviera madura para una ciencia que abarca el conjunto de la realidad, era necesaria una segunda verdad fundamental, que sólo llegaría a ser propiedad común de todos los filósofos con el advenimiento de Kepler y Galileo. El puro pensamiento lógico no puede brindarnos ningún conocimiento del mundo empírico; todo conocimiento de la realidad comienza en la experiencia y desemboca en ella. Las leyes descubiertas mediante el uso de la lógica son completamente vacías en lo que respecta a la realidad. Galileo comprendió esto y lo proclamó a voz en cuello en el mundo científico, motivo por el cual se ha convertido en el padre de la física moderna y, por cierto, de toda la ciencia moderna.

Si la experiencia, pues, es el alfa y el omega de todo nuestro conocimiento de la realidad, ¿cuál es la función de la razón pura en la ciencia?

Un sistema completo de física teórica está compuesto por conceptos, por leyes fundamentales aplicables a esos conceptos y de las conclusiones alcanzables por deducción lógica. Y estas conclusiones deben corresponder con nuestra experiencia individual. En cual-



quier tratado teórico la deducción lógica de esas conclusiones ocupa casi toda la obra.

Esto es exactamente lo que ocurre en la geometría euclidiana, si bien en ella las leyes fundamentales son llamadas axiomas y no se plantea que las conclusiones deban corresponder a ninguna clase de experiencia. Sin embargo, si se toma la geometría euclidiana como la ciencia de las posibles relaciones mutuas de los cuerpos prácticamente rígidos en el espacio —es decir, si se la considera una ciencia física, sin salirse de su contenido original empírico—, la homogeneidad lógica de la geometría y de la física teórica se llega a advertir en toda su extensión.

Hemos visto, pues, cuáles son los puestos de la razón pura de la experiencia dentro de un sistema teórico de física. La estructura del sistema es resultado del trabajo de la razón; el contenido empírico y sus mutuas relaciones deben hallar su representación en las conclusiones de la teoría. En la posibilidad de tal representación está contenido el único valor y la justificación de todo el sistema, en especial la de los conceptos y principios fundamentales que lo sustentan. Más allá de esto, dichos principios fundamentales son invenciones libres del intelecto humano, que no pueden ser justificadas ni por la naturaleza de ese intelecto ni de ninguna otra manera apriorística.

Estos conceptos y postulados fundamentales, que no pueden ser reducidos lógicamente, forman la parte esencial de una teoría, un núcleo que la razón no alcanza a comprender. El objetivo principal de toda teoría es lograr que esos elementos irreducibles sean tan simples y tan pocos en cantidad como sea posible, sin tener que renunciar a la representación adecuada de ningún contenido empírico.

El panorama que aquí he delineado, del carácter puramente ficticio de los fundamentos de la teoría científica, no era el que prevalecía sin discusión durante los siglos XVIII y XIX. Pero en forma pausada e ininterrumpida hoy va ganando terreno: la distancia que en el pensamiento media entre, por una parte, los conceptos fundamentales y las leyes y, por la otra, las conclusiones que deben ser relacionadas con nuestras experiencias crece día a día, en la medida en que la estructura lógica se vuelve más simple, es decir, cuanto menor es el número de elementos conceptuales lógicamente independientes, considerados necesarios para sostener la estructura.

Newton, el primer creador de un sistema de vastos alcances y viable en el ámbito de la física teórica, creía aún que los conceptos y le-

yes básicos de su sistema podían ser derivados de la experiencia. Sin duda, ese es el significado de su conocida frase *hypotheses non fingo*.

En rigor, los conceptos de tiempo y espacio en esos momentos no parecían presentar dificultades. Los conceptos de masa, inercia y fuerza y las leyes sobre su interrelación parecían surgir de la experiencia en forma directa. Una vez que se ha aceptado esta base, la expresión para la fuerza gravitatoria parece derivable de la experiencia y es razonable esperar otro tanto con respecto a las demás fuerzas.

De la formulación de Newton podemos ver que el concepto de espacio absoluto, que incluye el de reposo absoluto, le producía una sensación poco confortable. Comprendía que en la experiencia no parecía existir nada que correspondiese a este último concepto. Tampoco estaba satisfecho por completo con la introducción de fuerzas que operan a distancia. Pero el tremendo éxito práctico de sus doctrinas bien pudo haber sido lo que impidió a él tanto como a los físicos de los siglos XVIII y XIX reconocer el carácter ficticio de los fundamentos de ese sistema.

Por el contrario, los filósofos naturales de aquellos días, en su mayoría, estaban poseídos por la idea de que los conceptos fundamentales y los postulados de la física no eran, en sentido lógico, libres invenciones de la mente humana y que eran deducibles a partir de la experiencia por «abstracción», es decir, por medios lógicos. Un completo reconocimiento del carácter erróneo de esta noción aparecería sólo con la teoría de la relatividad general, que demostró que, a partir de una base bien distinta de la newtoniana, es posible dar cuenta de una mayor cantidad de hechos empíricos. Pero más allá de la cuestión de la superioridad de uno u otro punto de partida, el carácter ficticio de los principios fundamentales es muy evidente, toda vez que podemos señalar dos principios esencialmente diferentes que concuerdan, ambos, ampliamente con la experiencia. Esto, a la vez, demuestra que todo intento de deducción lógica de los conceptos básicos y postulados de la mecánica a partir de las experiencias elementales está condenado al fracaso.

Si es verdad, pues, que la base axiomática de la física teórica no puede ser extraída de la experiencia y debe ser inventada con libertad, ¿podemos esperar que alguna vez hallemos el camino correcto? Y, lo que es más, ¿este camino correcto existe más allá de nuestras ilusiones? ¿Podemos confiar en que la experiencia sea una guía segura cuando existen teorías (tal como la mecánica clásica) que en

gran medida hacen justicia a la experiencia pero sin comprender los hechos en toda su profundidad? Sin ninguna vacilación responderé que, según mi opinión, existe un camino correcto y que nosotros somos capaces de hallarlo.

Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones puramente matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero estos, sin duda ninguna, no pueden ser deducidos de ella.

Por supuesto que la experiencia retiene su cualidad de criterio último de la utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. Por lo tanto, en cierto sentido, considero que el pensamiento puro puede captar la realidad, tal como los antiguos lo habían soñado.

Con el fin de justificar esta confianza, me veo compelido a utilizar un concepto matemático. El mundo físico es representado como un continuo de cuatro dimensiones. Si introduzco en él una métrica riemanniana y pregunto cuáles son las leyes más simples que esa métrica puede satisfacer, llegaré a la teoría relativista de la gravitación en el espacio vacío. Si en ese espacio supongo la existencia de un campo vectorial o de un campo tensorial antisimétrico que puede ser derivado de aquél y pregunto cuáles son las leyes más simples que ese campo puede satisfacer, llegaré a las ecuaciones de Maxwell para el espacio vacío.

En estos momentos carecemos aún de una teoría adecuada para esas partes del espacio en las que la densidad de la carga eléctrica no desaparece. De Broglie ha conjeturado la existencia de un campo ondulatorio, que sirvió para explicar, tiempo después, ciertas propiedades cuánticas de la materia. Dirac ha hallado en los spinors magnitudes de campo de un nuevo tipo, cuyas ecuaciones más simples nos autorizan en gran medida a deducir las propiedades del electrón. Después de esto, yo mismo, junto con mi colega el doctor Walter Mayer, he descubierto que esos spinors configuran un caso especial de un nuevo tipo de campo, matemáticamente conectado con el sistema cuatridimensional, al que hemos llamado «semivec-

tores». La ecuación más simple que esos semivectores pueden satisfacer proporciona una clave para la comprensión de la existencia de dos tipos de partículas elementales, de distinta masa ponderable y de igual pero opuesta carga eléctrica. Estos semivectores son, después de los vectores comunes, los campos matemáticos más simples que son posibles en un continuo métrico de cuatro dimensiones y, al parecer, describen, de un modo natural, ciertas propiedades esenciales de las partículas eléctricas.

Para nosotros, lo importante es observar que todas estas construcciones y las leyes que las conectan pueden ser alcanzadas por el método de buscar los conceptos matemáticamente más simples y el nexo entre ellos. Es en el limitado número de campos y de ecuaciones simples que pueden existir matemáticamente donde descansa la esperanza del teórico de captar lo real en toda su profundidad.

Entre tanto, el mayor inconveniente que se opone a una teoría de campos de esta clase reside en la concepción de la estructura atómica de la materia y la energía. Esto ocurre porque la teoría no es atómica en sus fundamentos, en la medida en que opera en forma exclusiva con funciones continuas del espacio, en contraste con la mecánica clásica, cuyo elemento más importante —el punto material— justifica por sí mismo la estructura atómica de la materia.

La moderna teoría cuántica en la forma caracterizada por de Broglie, Schrödinger y Dirac, que opera con funciones continuas, ha superado estas dificultades gracias a una atrevida interpretación que fue formulada, por primera vez, por Max Born. Según dicha interpretación, las funciones espaciales que aparecen en las ecuaciones no pretenden ser un modelo matemático de la estructura atómica. Esas funciones, se supone, sólo determinan las probabilidades matemáticas de hallar tales estructuras, si se han hecho las correspondientes mediciones en un punto particular en cierto estado dinámico.

Esta interpretación no admite objeciones desde el punto de vista lógico y tiene a su favor importantes éxitos. Sin embargo y por desdicha, obliga a utilizar un continuo con un número de dimensiones (cuatro) que la física hasta ahora no atribuye al espacio y que se eleva indefinidamente con el número de las partículas que constituyen el sistema considerado. No puedo menos que confesar que sólo confiero una importancia transitoria a esta interpretación. Aún creo que es posible un modelo de la realidad, o sea, una teoría que

represente las cosas en sí mismas y no tan sólo la probabilidad de su aparición.

Por otra parte, estoy seguro que debemos abandonar la idea de describir la localización completa de las partículas en un modelo teórico. Según mi punto de vista, esta es la secuela permanente del principio de incertidumbre de Heisenberg. Pero una teoría atómica en el verdadero sentido de la expresión (no meramente sobre la base de una interpretación), sin localización de las partículas en un modelo matemático, es perfectamente concebible. Por ejemplo, para fundamentar el carácter atómico de la electricidad, las ecuaciones de campo tan sólo deben conducir a las siguientes conclusiones: una región del espacio tridimensional, en cuyo contorno la densidad eléctrica desaparece en forma sistemática, siempre contiene una carga eléctrica total cuya dimensión está representada por un número entero. Por lo tanto, en una teoría del continuo las características atómicas se expresarían de una manera satisfactoria a través de leyes integrales sin determinar la localización de las entidades que constituyen la estructura atómica.

No consideraré resuelto el enigma cuántico hasta que una estructura atómica haya sido representada de esa manera.

### **El problema del espacio, el éter y el campo, en la física**

*Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934.

El pensamiento científico es un desarrollo del pensamiento pre-científico. Toda vez que el concepto del espacio ya era fundamental para este, empezaremos con el concepto del espacio en el pensamiento pre-científico. Existen dos modos de considerar los conceptos, y ambos son indispensables para la comprensión. El primero es el análisis lógico, que responde a la pregunta: ¿en qué situación de dependencia mutua se encuentran los juicios y los conceptos? Al contestar, nos hallaremos en un terreno relativamente seguro: es la seguridad que tanto nos impresiona de la matemática. Pero esta certidumbre se obtiene al precio de la vaciedad de contenido. Los conceptos sólo pueden adquirir contenido cuando están conectados con la experiencia sensorial, aunque sea de una forma indirecta. Pero ninguna investigación lógica puede revelar esta conexión, que

únicamente puede advertirse a través de la experimentación. No obstante, esta conexión es la que determina el valor cognoscitivo de los sistemas conceptuales.

Analicemos un ejemplo. Supongamos que un arqueólogo de una cultura posterior a la nuestra descubre un texto que explica la geometría euclidiana sin figuras. El arqueólogo descubrirá cuál es el uso de las palabras «punto», «recta» o «plano» en los enunciados. También advertirá de qué manera cada uno de los conceptos es deducido del anterior. Incluso llegará a ser capaz de establecer nuevos enunciados de acuerdo con las reglas descubiertas. Pero la estructura de esos enunciados será un juego de palabras vacío, porque las expresiones «punto», «recta» o «plano» no significan nada para él. Tan sólo en el momento en que esas expresiones signifiquen algo, la geometría llegará a tener un contenido para ese hipotético arqueólogo. Otro tanto ocurriría con la mecánica analítica y con cualquier otra exposición de una ciencia lógicamente deductiva.

¿Qué quiere decir que expresiones o palabras como «recta», «punto» o «intersección» signifiquen algo? Quiere decir que con ellas se indican experiencias sensoriales a las que esas palabras están referidas. Este problema extra-lógico es el problema de la naturaleza de la geometría, que el arqueólogo podrá resolver de manera intuitiva tratando de encontrar en el conjunto de su experiencia algo que se corresponda con esos términos primarios de la teoría y de los axiomas formulados. Sólo en este sentido se puede proponer en forma razonable la cuestión de la naturaleza de una entidad descrita mediante conceptos.

Frente a nuestros conceptos pre-científicos estamos en una posición muy similar a la que ocupa nuestro arqueólogo con respecto al problema ontológico. Por así decirlo, hemos olvidado los rasgos del mundo de la experiencia que nos han inducido a estructurar esos conceptos y tenemos muchas dificultades para recordar el mundo de la experiencia sin los cristales de la interpretación conceptual establecida desde antiguo. La subsiguiente dificultad estriba en que nuestro lenguaje está obligado a operar con palabras que están inseparablemente conectadas con aquellos conceptos primitivos. Nos enfrentamos, pues, con estos obstáculos cuando intentamos describir la naturaleza del concepto pre-científico de espacio.

Antes de entregarnos al análisis del problema del espacio, he de señalar algo más acerca de los conceptos en general. Los conceptos tienen la experiencia sensorial como punto de referencia, pero, en un sentido lógico, jamás pueden ser deducidos a partir de ella. Por

este motivo, jamás me ha sido posible comprender la búsqueda de un *a priori* en el sentido kantiano. En cualquier problema ontológico nuestro único interés estará en descubrir, dentro del conjunto de las experiencias sensoriales, aquellas características a las cuales se refieren los conceptos.

Por lo que respecta al concepto de espacio, al parecer, este presupone el concepto de objeto material. La naturaleza de las complejas impresiones sensoriales que, posiblemente, son responsables de tal concepto ha sido descrita a menudo. La correspondencia entre ciertas impresiones visuales y táctiles, el hecho de que puedan ser seguidas a través del tiempo en forma continua y de que puedan ser repetidas en cualquier momento (tacto, vista) son algunas de sus características. A partir del momento en que el concepto de objeto material ha adquirido forma en conexión con las experiencias antes mencionadas —concepto que de ninguna manera presupone el de espacio o el de relación espacial—, el deseo de lograr una captación intelectual de las relaciones de esos objetos dará origen a conceptos que correspondan a las relaciones espaciales existentes entre ellos. Dos cuerpos sólidos pueden tocarse entre sí o estar distantes el uno del otro. En el segundo caso, un tercer cuerpo puede ser situado entre los dos primeros sin alterarlos de ninguna manera; en el primer caso, eso es imposible.

Estas relaciones espaciales son obviamente reales, tal como los objetos en sí mismos. Si dos cuerpos son equivalentes para llenar uno de esos espacios intermedios, también resultarán equivalentes para otros intervalos distintos. Así vemos que el intervalo es independiente del cuerpo elegido para llenarlo. Esto mismo es universalmente verdadero en lo que respecta a las relaciones espaciales. Es evidente que esta independencia que constituye una condición principal de la utilidad de establecer conceptos puramente geométricos, no es *a priori* necesaria. Según mi opinión, este concepto de intervalo, independiente del tipo de cuerpo que lo llene, es el punto de partida del concepto del espacio.

Por lo tanto, considerado desde el punto de vista de la experiencia sensorial, el desarrollo del concepto de espacio, después de estas breves indicaciones, parece estar referido al esquema: objeto material, relaciones espaciales de los objetos materiales, intervalo, espacio. Así considerado, el espacio se nos muestra como algo real, en el mismo sentido en que lo son los objetos materiales.

Está claro que el concepto de espacio como un algo real ya existía en el mundo conceptual extra-científico. Sin embargo, la matemática de Euclides no tenía conocimiento de este concepto como tal y se limitaba a los conceptos de objeto y de las relaciones espaciales entre objetos. El punto, el plano, la recta, el segmento, son objetos sólidos idealizados. Todas las relaciones espaciales se originan a partir del concepto de contacto (la intersección de rectas y planos, los puntos que están sobre una recta, etc.). El espacio como un continuo no aparece en ningún momento dentro del sistema conceptual. El concepto de espacio fue introducido por Descartes, al describir un punto en el espacio mediante sus coordenadas. Aquí, por primera vez, las figuras geométricas aparecen, en cierto modo, como partes de un espacio infinito, que es concebido como un continuo de tres dimensiones.

La gran superioridad del tratamiento cartesiano del espacio no está en absoluto limitada al hecho de que aplica el análisis con fines geométricos. Pero la cuestión fundamental estriba en lo siguiente: en sus descripciones geométricas, los griegos privilegiaron objetos particulares (la recta, el plano); otros objetos (por ejemplo, la elipse) sólo son accesibles para esa descripción a través de su construcción o definición con la ayuda del punto, la recta y el plano. Por otra parte, en el tratamiento cartesiano, todas las superficies, por ejemplo, aparecen en principio en un pie de igualdad, sin ninguna preferencia arbitraria para las estructuras lineales.

En la medida en que la geometría ha sido concebida como la ciencia de las leyes que gobiernan las relaciones espaciales mutuas de los cuerpos prácticamente rígidos, debe ser considerada como la rama más antigua de la física. Como ya lo he mencionado, esta ciencia ha sido capaz de avanzar sin disponer del concepto de espacio como tal: fueron suficientes para sus necesidades las formas corpóreas ideales, como el punto, la recta, el plano, el segmento. Por otra parte, el espacio como conjunto, tal como fuera concebido por Descartes, constituía una necesidad absoluta para la física newtoniana. Ya sabemos que la dinámica no puede trabajar sólo con los conceptos de punto de masa y de distancia variable entre puntos de masa. En las ecuaciones newtonianas del movimiento, el concepto de aceleración desempeña un papel fundamental, que no puede ser definido sólo por las distancias variables con el tiempo entre los puntos. La aceleración de Newton sólo puede concebirse o definirse



en relación con el espacio como un todo. Así hubo de agregarse a la realidad geométrica del concepto de espacio una nueva función determinadora de la inercia del espacio. Cuando Newton describía el espacio como absoluto, sin duda se refería a esta significación real del espacio, que le obligó a atribuirle un estado de movimiento definido, que todavía no estaba por completo determinado por los fenómenos de la mecánica. Este espacio era concebido como un absoluto también en otro sentido; su efecto inercial era concebido como autónomo, o sea, como no influenciado por ninguna clase de circunstancia física; el espacio, pues, afectaba a las masas, pero, por su parte, no era afectado por nada.

En las mentes de los físicos el espacio ha seguido siendo, hasta tiempos muy recientes, el receptáculo pasivo de todos los fenómenos, y que por sí mismo no participaba en los hechos físicos. Nuestro esquema de pensamiento sólo comenzó a tomar una nueva vertiente con la teoría ondulatoria de la luz y con la teoría del campo electromagnético de Faraday y Maxwell. A través de ellas se comprobó que existían en el espacio libre estados que se propagan en ondas, y asimismo campos localizados que eran capaces de ejercer fuerzas sobre masas eléctricas o polos magnéticos que se situaran en el punto exacto. En razón de que a los físicos del siglo XIX les hubiera resultado por completo absurdo atribuir funciones o estados físicos al espacio mismo, se inventó un medio que ocupaba todo el espacio, según el modelo de la materia ponderable: el éter, al que se consideraba como un vehículo de los fenómenos electromagnéticos y, por ende, también de los fenómenos luminosos. Los estados de este medio, que se suponían ser los de los campos electromagnéticos, en un primer momento fueron concebidos desde un punto de vista mecánico, sobre la base del modelo de las deformaciones elásticas de los cuerpos sólidos. Pero esta teoría mecánica del éter nunca obtuvo una aceptación total, y así se fue dejando de lado como interpretación detallada de la naturaleza de los campos etéreos. De este modo, el éter se convirtió en una especie de materia a la que se adjudicaba una única función: la de actuar como de sustrato de los campos eléctricos que por la índole de su naturaleza no resultaban analizables. El cuadro general era el que sigue: el espacio está invadido por el éter; en este flotan los corpúsculos materiales o átomos de la materia ponderable, cuya estructura atómica había sido firmemente establecida a finales de siglo.

En vista de que se suponía que la interacción de los cuerpos se realizaba a través de los campos, también debía existir un campo gravitatorio en el éter, cuya ley de campo no había tomado aún por entonces una forma clara. Se imaginaba que el éter era sólo asiento de todas las fuerzas que actúan en el espacio. La inercia también era vista como una acción de campo localizada en el éter, porque se había comprobado que las masas eléctricas en movimiento producen un campo magnético cuya energía proporciona un modelo de la inercia.

Hasta el gran descubrimiento de H. A. Lorentz, las propiedades mecánicas del éter constituían un misterio. Todos los fenómenos del electromagnetismo por entonces conocidos podían ser explicados sobre la base de dos supuestos; el primero afirma que el éter está firmemente fijado en el espacio, es decir, que no es capaz de ningún movimiento, y el segundo sostiene que la electricidad está firmemente fijada en las partículas elementales móviles. Hoy el descubrimiento de Lorentz puede ser expresado de la siguiente forma: el espacio físico y el éter son sólo términos diferentes para referirse a una misma cosa; los campos son los estados físicos del espacio. Si no es posible adjudicar al éter un estado de movimiento, no existe ningún motivo para introducirlo como una entidad especial junto al espacio. Pero los físicos estaban aún muy lejos de esa forma de pensar; para ellos el espacio seguía siendo algo rígido, homogéneo, incapaz de cambiar o de asumir estados distintos. Tan sólo el genio de Riemann, solitario e incomprendido, había marcado un camino, a mediados del siglo pasado, hacia una nueva concepción del espacio, en la cual este resultaba despojado de su rigidez y así se reconocía la posibilidad de su participación en los fenómenos físicos. Esta verdadera proeza intelectual es acreedora de nuestra admiración, muy en especial porque ha precedido a la teoría del campo eléctrico de Faraday y Maxwell. Más tarde surgió la teoría de la relatividad restringida, con su reconocimiento de la equivalencia física de todos los sistemas inerciales. El carácter inseparable del tiempo y el espacio emergió en conexión con la electrodinámica, con la ley de la propagación de la luz. Hasta entonces se había supuesto sin mayor análisis que el continuo cuatridimensional de los hechos puede ser dividido en tiempo y espacio de una manera objetiva, es decir, que se había adjudicado una significación absoluta al «ahora» en el mundo de los hechos. Con el descubrimiento de la relatividad de la simultanei-

dad, el tiempo y el espacio fueron fusionados en un único continuo, de un modo similar al empleado anteriormente para fusionar en un único continuo las tres dimensiones del espacio. Así, el espacio físico fue extendido a un espacio de cuatro dimensiones que también incluye la dimensión del tiempo. El espacio cuatridimensional de la teoría de la relatividad restringida es tan rígido y absoluto como lo fuera en su momento aquel espacio concebido por Newton.

La teoría de la relatividad constituye un excelente ejemplo del carácter fundamental del desarrollo moderno de la ciencia teórica. Las hipótesis iniciales se van haciendo cada vez más abstractas y más alejadas de la experiencia. Por otro lado, nos vamos acercando al gran objetivo de toda ciencia, que consiste en abarcar por deducción lógica el mayor número posible de hechos empíricos a partir del menor número de hipótesis o axiomas. Entre tanto, la cadena de pensamiento que procede desde los axiomas hacia los hechos empíricos o hacia las consecuencias verificables va alargándose y adquiere un carácter más sutil. En su búsqueda de una teoría, el científico teórico se ve compelido a guiarse, en grado creciente, por consideraciones puramente matemáticas, formales, porque la experiencia física del experimentador no puede conducirlo hasta las más elevadas regiones de la abstracción. Los métodos predominantemente inductivos, apropiados para una etapa temprana de la ciencia, están dejando paso libre al tanteo deductivo. Una estructura teórica de este tipo necesita haber tenido una profunda elaboración antes de estar en condiciones de conducirnos a conclusiones que puedan ser comparadas con la experiencia. También en este caso el hecho observado es el árbitro supremo, aunque no podrá pronunciar sentencia hasta tanto no se haya construido un puente de intensa y sostenida actividad pensante para atravesar la amplia brecha que separa los axiomas de sus consecuencias verificables. El teórico habrá de emprender esta tarea hercúlea con la plena convicción de que sus esfuerzos sólo pueden estar destinados a asestar un golpe de muerte a su propia teoría. El teórico que emprenda esa labor no tendrá que ser acusado de «caprichoso», sino que, por el contrario, se le tendrá que garantizar su derecho a dar rienda suelta a su capricho, porque no existe otro camino hacia su objetivo. De todas maneras, su trabajo no será una ensoñación vana, sino una búsqueda de las posibilidades de mayor simplicidad lógica y de sus consecuencias. Este *captatio benevolentiae* era imprescindible para que el oyente o el

lector de estas palabras se sintiera más inclinado a seguir con atención el hilo argumental que se expondrá a continuación. Este hilo argumental es el que ha conducido desde la teoría de la relatividad restringida a la general y desde esta hasta su más reciente retoño, la teoría de campo unificado. En esta exposición no es posible evitar por completo la utilización de símbolos matemáticos.

En primer término, nos detendremos en el examen de la teoría de la relatividad restringida, una teoría que todavía está basada directamente en una ley empírica: la de la constancia de la velocidad de la luz. Consideremos que  $P$  es un punto en el espacio vacío y que  $P'$  es otro punto infinitamente cercano, a una distancia  $d\sigma$ . Supongamos que se emite un haz de luz desde  $P$  en el tiempo  $t$  y que llega a  $P'$  en un tiempo  $t + dt$ . Luego:

$$d\sigma^2 = c^2 dt^2.$$

Si  $dx_1, dx_2, dx_3$  son las proyecciones ortogonales de  $d\sigma$  y se introduce la coordenada de tiempo imaginaria  $\sqrt{-1} ct = x_4$ , entonces la ley de la constancia de la velocidad de la propagación de la luz adquiere esta forma:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = 0.$$

Dado que esta fórmula expresa una situación real, podemos atribuir un significado real a la cantidad  $ds$ , aun cuando los puntos cercanos del continuo cuatridimensional estén elegidos de tal modo que el correspondiente valor  $ds$  no sea cero. Tal vez esto podría expresarse diciendo que el espacio de cuatro dimensiones (con una coordenada de tiempo imaginaria) de la teoría de la relatividad restringida posee una métrica euclidiana.

El hecho de que esta métrica reciba el nombre de euclidiana está relacionado con lo siguiente: la postulación de tal métrica dentro de un continuo de tres dimensiones es completamente equivalente a la postulación de los axiomas de la geometría euclidiana. Por lo tanto, la ecuación definitoria de esta métrica no es sino el teorema de Pitágoras aplicado a las diferenciales de las coordenadas.

En la teoría de la relatividad restringida esos cambios de coordenadas (por transformación) están permitidos porque también en el nuevo sistema de coordenadas la cantidad  $ds^2$  (invariante fundamental) es igual a la suma de los cuadrados de las coordenadas diferen-

ciales. Estas transformaciones reciben el nombre de transformaciones de Lorentz.

El método práctico de la teoría de la relatividad restringida está caracterizado por el siguiente principio: sólo son admisibles como expresión de las leyes naturales aquellas ecuaciones que no alteran su forma al cambiar las coordenadas usando una transformación de Lorentz (covarianza de las ecuaciones con respecto a las transformaciones de Lorentz).

Este método condujo al descubrimiento de la conexión necesaria entre impulso y energía, entre potencia del campo eléctrico y del magnético, entre fuerzas electrostáticas y electrodinámicas, entre masa inerte y energía. Con esto, el número de conceptos independientes y de ecuaciones fundamentales en física se ha reducido.

Este método apuntaba más lejos. ¿Es verdad que las ecuaciones que expresan leyes naturales son covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz solamente y no con respecto a otras transformaciones? Pues bien: formulada en esos términos, la pregunta realmente carece de sentido, porque cada sistema de ecuaciones puede ser expresado en coordenadas generales. Lo que hemos de preguntar es esto: ¿no están constituidas las leyes de la naturaleza de tal modo que no se simplifican por la elección de un conjunto *particular* de coordenadas?

Dicho sea de paso, nuestra ley empírica de la igualdad de la masa inercial y pesante nos empuja a responder a esa pregunta de manera afirmativa. Si convertimos en principio la equivalencia de todos los sistemas de coordenadas para la formulación de las leyes naturales, llegaremos a la teoría de la relatividad general, a condición de que consideremos que la ley de la constancia de la velocidad de la luz es inamovible o, en otras palabras, que lo es la hipótesis de la significación objetiva de la métrica euclidiana al menos para porciones infinitamente pequeñas del espacio de cuatro dimensiones.

Esto quiere decir que para regiones finitas del espacio la existencia (físicamente significativa) de una métrica general riemanniana es postulada de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu},$$

donde el sumatorio abarca todas las combinaciones de índices, desde 1,1 hasta 4,4.

La estructura de ese espacio presenta una diferencia básica con respecto a la del espacio euclidiano. Los coeficientes  $g_{\mu\nu}$ , de momento, representan funciones arbitrarias de las coordenadas  $x_1$  hasta  $x_4$ , y la estructura del espacio no está determinada de verdad hasta tanto lleguen a conocerse estas funciones  $g_{\mu\nu}$ . También se puede decir que la estructura de ese espacio como tal es completamente indeterminada. Sólo puede ser determinada de manera más exacta mediante leyes específicas que satisfacen el campo métrico de  $g_{\mu\nu}$ . Sobre bases físicas se llegó al convencimiento de que el campo métrico era al mismo tiempo el campo gravitatorio.

En razón de que el campo gravitatorio está determinado por la configuración de las masas y de sus correspondientes cambios, la estructura geométrica de ese espacio también depende de factores físicos. Es decir que, de acuerdo con esta teoría —y tal como lo había conjeturado Riemann—, el espacio ya no es absoluto: su estructura depende de influencias físicas. La geometría (física) ya ha dejado de ser una ciencia encerrada y completa en sí misma, como lo era la geometría de Euclides.

Así, el problema de la gravitación se vio reducido a un problema matemático: se requería hallar las ecuaciones fundamentales más simples que fueran covariantes con respecto a una transformación arbitraria de coordenadas. Este era un problema claramente definido que, al menos, podía ser resuelto.

Aquí no hablaré de la confirmación experimental de esta teoría, pero he de explicar los motivos por los cuales esta teoría no se podía dar definitivamente por satisfecha con tal éxito. Es verdad que la gravitación había sido deducida de la estructura del espacio, pero además del campo gravitacional existe el campo electromagnético. En primer lugar, este debió ser introducido en la teoría como una entidad independiente de la gravitación. Hubo que agregar a las ecuaciones fundamentales de campo unos términos que dieran cuenta de la existencia del campo electromagnético. Pero resulta intolerable para el espíritu teórico la idea de que existan dos estructuras espaciales que sean independientes la una de la otra, la métrico-gravitacional y la electromagnética. Uno se siente impulsado a creer que ambos tipos de campos deben corresponder a una estructura unificada del espacio.

## Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general

*Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934.

Accedo gustosamente al ruego de que diga algo acerca de la historia de mi propio trabajo científico. No es que conceda un gran valor a mis esfuerzos personales, pero escribir la historia del trabajo de otras personas exige un grado de profundización en el pensamiento ajeno más propio de la clase de tarea que desarrolla un historiador. En cambio, arrojar un poco de luz sobre las primeras ideas que uno mismo ha sustentado parece muy sencillo. En este caso, gozo de una enorme ventaja frente a cualquier otra persona y no es lícito desear tal oportunidad por un prurito de modestia.

En el año 1905 había llegado yo, gracias a la teoría de la relatividad restringida, a la equivalencia de todos los llamados sistemas inerciales para la formulación de las leyes de la naturaleza. En esos momentos surgió de modo natural el problema de si no existiría una equivalencia adicional para los sistemas de coordenadas. Para expresarlo con otras palabras: si sólo se puede adjudicar un significado relativo al concepto de velocidad, ¿debemos, con todo, seguir considerando la aceleración como un concepto absoluto?

Desde el punto de vista puramente cinemático no existe ninguna clase de duda en cuanto al carácter relativo de todos los movimientos; pero hablando desde el punto de vista de la física, el sistema inercial parecía ocupar una posición privilegiada, lo que daba un aire artificial al uso de sistemas coordenados en movimiento.

Desde luego que yo estaba familiarizado con la posición de Mach, según la cual la resistencia inercial contrarresta no a la aceleración como tal, sino a la aceleración con respecto a las masas de otros cuerpos que existen en el mundo. En esa idea había algo que me resultaba fascinante, pero a pesar de ello no surgió de allí una base de trabajo adecuada para formular una nueva teoría.

Logré avanzar un paso hacia la solución cuando traté de trabajar con la ley de la gravedad dentro del esquema fundamental de la teoría de la relatividad restringida. Como la mayoría de escritores de aquel tiempo, intenté enunciar una ley de campo para la gravitación, en vista de que no resultaba posible —al menos de manera natural— introducir la acción directa a distancia a causa de la abolición del concepto de simultaneidad absoluta.

Lo más sencillo, desde luego, era mantener el potencial escalar de la gravitación de Laplace y completar la ecuación de Poisson de una manera obvia, mediante un término diferenciado con respecto al tiempo, de tal modo que quedara satisfecha la teoría especial de la relatividad. La ley del movimiento de un punto de masa en un campo gravitatorio también debía ser adaptada a la teoría especial de la relatividad. El sendero no estaba marcado de una forma inequívoca, en este caso, porque la masa inerte de un cuerpo puede depender del potencial gravitatorio. En rigor era de esperar en vista del principio de inercia de la energía.

Estas investigaciones, sin embargo, desembocaron en unos resultados que despertaron mis más fuertes sospechas. De acuerdo con la mecánica clásica, la aceleración vertical de un cuerpo en un campo gravitatorio vertical es independiente de la componente horizontal de su velocidad. En tal campo gravitatorio, pues, la aceleración vertical de un sistema mecánico o de su centro de gravedad opera en forma independiente de su energía cinética interna. Pero en la teoría que yo he presentado, la aceleración de un cuerpo que cae no es independiente de su velocidad horizontal o energía interna del sistema.

Esto no encajaba con el antiguo hecho experimental que demuestra que todos los cuerpos sometidos a un mismo campo gravitatorio adquieren la misma aceleración. Esta ley, que también puede formularse como la ley de la igualdad de las masas inerte y pesante, adquirió entonces para mí su plena significación. Mi asombro ante la existencia de esta ley era máximo y conjeturaba yo que en ella debía estar encerrada la clave para una profunda y total comprensión de la gravitación y la inercia. No experimenté por entonces serias dudas acerca de su estricta validez, incluso sin saber de los resultados del admirable experimento de Eötvös que —si mi memoria no falla— sólo llegaría a conocer más tarde. Abandoné, pues, considerando inadecuado, el intento de tratar el problema de la gravitación —tal como lo he aludido antes— dentro de la estructura de la teoría de la relatividad restringida. Era claro que fallaba en cuanto a la propiedad fundamental de la gravitación. El principio de la igualdad de las masas inerte y pesante podía formularse tal como sigue: en un campo gravitatorio homogéneo todos los movimientos referidos a un sistema de coordenadas uniformemente acelerado son equivalentes a los movimientos que se efectúan en ausencia de



campo gravitatorio. Si este principio era adecuado para todos los fenómenos posibles (el «principio de equivalencia»), eso constituía un indicio de que el principio de relatividad debía ser extendido a los sistemas coordinados con aceleración variable entre sí, para llegar a una teoría natural de los campos gravitatorios. Estas reflexiones me mantuvieron ocupado desde 1908 hasta 1911 e intenté derivar de ellas ciertas conclusiones especiales, de las que no me propongo tratar aquí. De momento, lo importante era haber descubierto que una teoría de la gravitación razonable sólo podría conseguirse a través de una extensión del principio de la relatividad.

Por todo esto, era necesario forjar una teoría cuyas ecuaciones conservaran su forma en el caso de transformaciones no lineales de las coordenadas. En aquellos momentos me era imposible determinar si esta teoría se podría aplicar para transformaciones arbitrarias (continuas) de las coordenadas o si sólo se aplicaría para algunas de ellas.

Pronto llegué a comprender que la inclusión de las transformaciones no lineales —tal como lo exigía el principio de la equivalencia— era inevitablemente fatal para la interpretación física simple de las coordenadas. Ya no podía exigirse que las diferencias de coordenadas reflejaran resultados directos de medición con patrones o relojes ideales. Mi perplejidad ante esto fue muy grande, porque me llevó un tiempo largo llegar a descubrir cuál era el significado de las coordenadas en la física. Y no encontré la salida de este dilema hasta el año 1912, cuando se me presentó después de las siguientes consideraciones:

Era necesario hallar una nueva formulación de la ley de la inercia, que en caso de ausencia de un «campo real de gravitación» pudiera transformarse en la formulación de Galileo del principio de la inercia, si un sistema inercial se utilizaba como sistema de coordenadas. La formulación de Galileo es como sigue: un punto material sobre el que no actúa ninguna fuerza, será representado en el espacio de cuatro dimensiones mediante una línea recta, es decir, por la línea más corta o, dicho de un modo más correcto, por una línea extrema. Este concepto presupone el de la longitud de un elemento lineal, o sea, una métrica. En la teoría de la relatividad restringida, como lo ha demostrado Minkowski, esta métrica era casi-euclidiana, lo que significa que el cuadrado de la «longitud»  $ds^2$  de un elemento lineal era una cierta función cuadrática de las diferenciales de las coordenadas.

Si se introducen otras coordenadas por medio de una transformación no lineal  $ds^2$  sigue siendo una función homogénea de las diferenciales de las coordenadas, pero los coeficientes de esta función dejan de ser constantes y se convierten en funciones de las coordenadas. En términos matemáticos, esto significa que el espacio físico (de cuatro dimensiones) tiene una métrica riemanniana. Las líneas extremas temporales de esta métrica proporcionan la ley de movimiento de un punto material sobre el cual no actúa fuerza alguna distinta de la fuerza de gravedad. Los coeficientes ( $g_{\mu\nu}$ ) de esta métrica, al mismo tiempo describen el campo gravitatorio con referencia al sistema de coordenadas elegido. Así, se ha hallado una formulación natural del principio de equivalencia, cuya extensión a cualquier campo gravitatorio constituye una hipótesis perfectamente natural.

La solución del dilema al que me he referido antes debía ser, pues, la siguiente: no se adjudica significado físico a las diferenciales de las coordenadas, sino tan sólo a la métrica riemanniana que les corresponde. De este modo se obtiene una base de trabajo adecuada para la teoría de la relatividad general. Sin embargo, aún restaba resolver otros dos problemas.

1. Si una ley de campo se expresa en términos de la teoría de la relatividad restringida, ¿cómo puede ser transferida al caso de una métrica riemanniana?

2. ¿Cuáles son las leyes diferenciales que determinan la propia métrica riemanniana (es decir,  $g_{\mu\nu}$ )?

Me entregué al estudio de estos problemas desde 1912 hasta 1914, junto con mi amigo Marcel Grossmann. Comprendimos que los métodos matemáticos para resolver el problema número 1 ya estaban en nuestras manos: el cálculo diferencial absoluto de Ricci y Levi-Civita.

Por lo que se refiere al problema número 2, era obvio que su solución requería la construcción de las ecuaciones diferenciales de segundo orden de las  $g_{\mu\nu}$ . Pronto vimos que estas ya habían sido establecidas por Riemann (el tensor de curvatura). Ya habíamos obtenido las ecuaciones de campo para la gravitación dos años antes de la publicación de la teoría de la relatividad general, pero nos era imposible determinar cómo se podrían utilizar en física. Además,

mi intuición me decía que su contrastación empírica sería un fracaso. Por otra parte, creí que me resultaría posible demostrar, sobre la base de consideraciones generales, que una ley de la gravitación invariante con respecto a transformaciones arbitrarias de las coordenadas no era compatible con el principio de causalidad. Estos fueron errores que me costaron dos años de trabajo excesivamente duro, hasta que me decidí a reconocerlo así, hacia fines de 1915; después de haber retornado con cierta tristeza a la curvatura de Riemann pude establecer la conexión entre teoría y los hechos de la experiencia astronómica.

A la luz del conocimiento obtenido, ese feliz logro parece casi evidente, de ahí que cualquier estudiante inteligente pueda entenderlo sin demasiados problemas. Pero habían sido muchos los años de ansiosa búsqueda en la oscuridad, años llenos de intensa ansiedad, de fases de plena confianza y de total agotamiento antes de llegar a emerger a la luz. Y esto sólo puede comprenderlo quien también lo haya vivido.

## **Física y realidad**

Tomado del *Journal of the Franklin Institute*, volumen 221, N.º 3, marzo de 1936.

### *I. Consideraciones generales sobre el método de la ciencia*

A menudo se ha dicho, y no sin justificación por cierto, que el hombre de ciencia es un filósofo de mala calidad. ¿Por qué el físico no deja, pues, que el filósofo se entregue a la tarea de filosofar? Esto bien puede ser lo correcto en momentos en que el físico cree tener a su disposición un sistema rígido de conceptos y leyes fundamentales, tan bien establecidos que ninguna duda puede tocarlos. Pero puede no serlo en un momento en que las bases mismas de la física se han vuelto tan problemáticas como lo son hoy. En tiempos como el presente, cuando la experiencia nos compele a buscar una nueva y más sólida fundamentación, el físico no puede simplemente entregar al filósofo la contemplación crítica de los fundamentos teóricos, porque nadie mejor que él puede explicar con mayor acierto dónde le aprieta el zapato. En su búsqueda de un nuevo fundamento, el

físico se verá obligado a poner bien en claro hasta qué punto están justificados y constituyen verdaderas necesidades los conceptos que utiliza.

El conjunto de la ciencia es, tan sólo, un refinamiento del pensamiento de cada día. Por este motivo el pensamiento crítico del físico no ha de ser restringido, en lo posible, al mero examen de los conceptos que pertenecen a su propio campo de acción. Resultará imposible para el científico avanzar sin la previa consideración crítica de un problema verdaderamente arduo: el problema de analizar la naturaleza del pensamiento de cada día.

Nuestra experiencia psicológica nos ofrece experiencias sensoriales, imágenes de ellas, recuerdos y sentimientos. A diferencia de la psicología, la física se ocupa en forma directa sólo de las experiencias sensoriales y de la «comprensión» de sus conexiones. Pero con todo, el concepto de «mundo real externo» que existe en el pensamiento de cada día reposa en forma exclusiva sobre impresiones sensoriales.

En primer término debemos subrayar que la diferenciación entre impresiones sensoriales e imágenes no es posible o, al menos, no es posible establecerla con absoluta seguridad. Con la discusión de este problema, que también afecta a nuestra noción de la realidad, no adelantaremos mucho, de modo que consideraremos como un hecho dado la existencia de experiencias sensoriales, o sea, unas experiencias psíquicas de tipo especial.

Creo que el primer paso para el establecimiento de un «mundo exterior real» es la formación del concepto de objetos materiales y de objetos materiales de distintos tipos. De entre la multitud de nuestras experiencias sensoriales, mental y arbitrariamente, escogemos ciertos conjuntos de impresiones sensoriales que se repiten (en parte en conjunción con impresiones sensoriales que son interpretadas como signos de experiencias sensoriales de otros) y relacionamos con ellos un concepto: el concepto de objeto material. Si lo consideramos desde el punto de vista lógico, veremos que este concepto no es idéntico a la totalidad de las impresiones sensoriales que a él se refieren; se trata de una libre creación de la mente humana (o animal). Por otra parte, este concepto debe su significado y su justificación, en forma exclusiva, a la totalidad de las impresiones sensoriales que asociamos con él.

El segundo paso nos lleva a considerar que, en nuestro pensamiento (que es el que determina nuestras expectativas), atribuimos

a ese concepto de objeto material una significación que en muy alto grado es independiente de las impresiones sensoriales que originalmente lo han conformado. A esto hacemos referencia cuando atribuimos al objeto material «una existencia real». El proceso hasta aquí descrito se justifica en forma exclusiva por el hecho de que, mediante esos conceptos y las relaciones mentales existentes entre ellos, nos hallamos en condiciones adecuadas para orientarnos en el laberinto de las impresiones sensoriales. Aun cuando son creaciones mentales libres, estas nociones y relaciones nos parecen más sólidas y más inalterables que la experiencia sensorial individual en sí misma, a la que jamás se le puede garantizar por completo que no sea una ilusión o fruto de una alucinación. Además, estos conceptos y relaciones, y también la postulación de objetos reales y, hablando de manera general, de la existencia del «mundo real», están justificados exclusivamente en la medida en que se conecten con impresiones sensoriales entre las cuales configuran una conexión mental.

La totalidad de nuestras experiencias sensoriales (uso de conceptos, creación y empleo de relaciones funcionales definidas entre ellos y la coordinación de las experiencias sensoriales con esos conceptos) pueden ser puestas en orden mediante un proceso mental: este hecho en sí tiene una naturaleza que nos llena de reverente temor, porque jamás seremos capaces de comprenderlo por completo. Bien se podría decir que «el eterno misterio del mundo es su comprensibilidad». Uno de los más importantes logros de Emmanuel Kant ha sido postular que el mundo externo real carecería de sentido si careciera de comprensibilidad.

Aquí, al hablar de comprensibilidad, la expresión está utilizada en su sentido más modesto. En este caso, la palabra implica la creación de cierto orden en las impresiones sensoriales; un orden que se produce por la creación de conceptos generales, de relaciones entre dichos conceptos y de relaciones definidas de cierta clase entre los conceptos y la experiencia sensorial. En este sentido es comprensible el mundo de nuestras experiencias sensoriales. El hecho de que sea comprensible es un milagro.

En mi opinión no se puede decir nada *a priori* con respecto al modo en que deben formarse y conectarse los conceptos ni a la manera en que debemos coordinarlos con las experiencias sensoriales. La única guía posible en la creación de ese orden, el único factor determinante, es el éxito. Todo lo que se necesita es fijar un con-

junto de normas, porque sin esas normas sería imposible adquirir el conocimiento orientado en el sentido en que nos interesa. Se puede establecer una comparación entre esas reglas y las reglas de un juego en el que, si bien las normas en sí mismas son arbitrarias, su rigidez es lo único que hace posible el juego. Sin embargo, el establecimiento de las normas nunca podrá ser definitivo. Tendrá que tener validez tan sólo para un campo especial de aplicación (es decir, que no existen categorías últimas en el sentido que Kant adjudicara a este término).

La conexión de los conceptos elementales del pensamiento cotidiano con los conjuntos de experiencias sensoriales sólo puede ser comprendido por vía intuitiva y no puede fijarse científicamente. La totalidad de estas conexiones —ninguna de las cuales es expresable en términos conceptuales— es lo único que diferencia el gran edificio de la ciencia de un esquema de conceptos lógico pero vacío. Gracias a esas conexiones, las proposiciones puramente conceptuales de la ciencia se convierten en enunciados generales acerca de conjuntos de experiencias sensoriales.

Denominaremos «conceptos primarios» a aquellos conceptos que están directa e intuitivamente conectados con conjuntos típicos de experiencias sensoriales. Desde el punto de vista de la física, todas las demás nociones adquieren significado sólo en la medida en que estén conectadas con las nociones primarias a través de proposiciones. Hasta cierto punto, estas proposiciones son definiciones de los conceptos (y de los enunciados derivados de ellos por vía lógica) y hasta cierto punto proposiciones que no derivan de las definiciones, hecho que expresa al menos relaciones indirectas entre los «conceptos primarios» y, en este sentido, entre las experiencias sensoriales. Las proposiciones de esta segunda clase son «enunciados acerca de la realidad» o leyes de la naturaleza, es decir, proposiciones que deben demostrar su validez cuando son aplicadas a las experiencias sensoriales a las que se puede aludir a través de conceptos primarios. Determinar cuáles de esas proposiciones habrán de ser consideradas definiciones y cuáles leyes naturales dependerá en forma concreta de la representación elegida. Establecer esta diferenciación se convierte en una necesidad absoluta cuando se examina el grado hasta el cual no está vacío, desde el punto de vista físico, todo el sistema de conceptos considerados.

*La estratificación del sistema científico*

El objetivo de la ciencia es una comprensión tan *completa* como sea posible de la conexión entre las experiencias sensoriales en totalidad y el logro de ese objetivo *mediante el uso de un mínimo de conceptos primarios y de relaciones*. (Mientras se busca, en la medida de lo posible, una unidad lógica en la imagen del mundo, es decir, parvedad en los elementos lógicos.)

La ciencia utiliza la totalidad de los conceptos primarios, o sea, conceptos conectados en forma directa con las experiencias sensoriales, y de las proposiciones que los relacionan. En su primera etapa de desarrollo, la ciencia no contiene nada más. Nuestro pensamiento de cada día se contenta, en términos generales, con este nivel. No obstante, una situación así no puede resultar satisfactoria para quien posea una verdadera mentalidad científica, porque la totalidad de los conceptos y las relaciones obtenidos de esta manera carece por completo de unidad lógica. Con la finalidad de cubrir esta deficiencia, se inventa un sistema más pobre en conceptos y relaciones, un sistema que considera que los conceptos y relaciones del «primer estrato» son conceptos y relaciones derivados lógicamente. En bien de su más elevada unidad lógica, este nuevo «sistema secundario» paga el precio de operar con conceptos elementales (conceptos del segundo estrato) que ya no están conectados de modo directo con las experiencias sensoriales. Una posterior búsqueda de la unidad lógica nos conduce a un sistema terciario, más pobre aún en conceptos y relaciones, mediante la deducción de los conceptos y relaciones del estrato secundario (y de modo indirecto de los del primario). Y el proceso continúa en estos términos, hasta el momento en que hemos llegado a un sistema dueño de la mayor unidad concebible y de la mayor pobreza de conceptos en materia de fundamentos lógicos, que todavía es compatible con las observaciones realizadas por nuestros sentidos. No sabemos si esta ambición será o no capaz de forjar alguna vez un sistema definitivo. Si se recabara una opinión al respecto, lo más probable sería obtener una respuesta negativa. No obstante, mientras se lucha con los problemas, jamás se pierde la esperanza de acercarse a ese objetivo.

Un adepto de la teoría de la abstracción o de la inducción llamará a nuestros estratos «grados de abstracción», pero no considero justificable encubrir la independencia lógica del concepto con res-

pecto a las experiencias sensoriales. No se trata de la relación que existe entre la sopa y el pollo, sino, más bien, de la del número del guardarropa y el abrigo.

Los estratos además no están tan claramente separados. No está absolutamente claro qué conceptos pertenecen al estrato primario. En rigor, estamos manejando conceptos formados libremente que, con un grado de certeza suficiente en la práctica, son conectados de manera intuitiva con los conjuntos de experiencias sensoriales de tal modo que, en cualquier experiencia, no se produce ninguna incertidumbre en lo que respecta a la validez de una aserción. El hecho fundamental es el intento de representar la multitud de conceptos y de proposiciones cercanos a la experiencia bajo la forma de proposiciones, deducidas por un proceso lógico a partir de una base —tan estrecha como sea posible— de conceptos y de relaciones fundamentales que pueden ser elegidas con libertad (axiomas). La libertad de elección, sin embargo, pertenece a una clase muy especial; no se asemeja a la libertad de un escritor de obras de ficción. En rigor, se parece a la de un hombre empeñado en resolver un crucigrama bien pensado: aunque podría proponer cualquier palabra como posible solución, sólo *una* palabra es la que le permitirá resolver el crucigrama con acierto. Es materia de fe que la naturaleza —tal como la percibimos a través de nuestros cinco sentidos— asume las características de un crucigrama bien pensado. Los éxitos que hasta el presente ha cosechado la ciencia otorgan una cierta base para mantener esa fe, sin duda alguna.

La multitud de estratos a los que nos hemos referido corresponde a las diversas etapas que se han recorrido en la lucha por la unidad. En lo que respecta al objetivo final, los estratos intermedios sólo tienen una naturaleza provisional. En su momento, habrán de desaparecer por falta de pertinencia. Sin embargo, tenemos que trabajar con la ciencia de hoy, en la que esos estratos representan logros parciales y problemáticos, que sirven de base los unos para los otros, pero que también se amenazan mutuamente, porque el sistema de conceptos presente contiene incongruencias muy arraigadas que encontraremos más adelante.

La finalidad de las siguientes líneas ha de ser la de mostrar cuáles son los caminos por los que ha penetrado la mente humana, para llegar a una base de la física que sea tan uniforme como se pueda desde punto de vista lógico.



## *II. La mecánica y los intentos de considerarla como base para toda la física*

Una importante propiedad de nuestras experiencias sensoriales y, de modo más general, de todas nuestras experiencias, es su orden temporal. Este tipo de orden conduce a la concepción de un tiempo subjetivo, un esquema ordenador de nuestra experiencia. El tiempo subjetivo, por vía del concepto de objeto material y de espacio, nos lleva hacia el concepto de tiempo objetivo, tal como lo veremos más adelante.

Por delante de la noción de tiempo objetivo, sin embargo, se alza el concepto de espacio y por delante de este hallamos el concepto de objeto material, que está directamente conectado con los conjuntos de experiencias sensoriales. Ya se ha señalado que una propiedad característica de la noción de «objeto material» es la de que le asignemos existencia, independiente del tiempo (subjetivo) e independiente del hecho de que sea percibido por nuestros sentidos. Y esto es así a pesar de que percibimos alteraciones temporales en dicho objeto. Con exactitud Poincaré ha señalado en forma enfática el hecho de que distingamos dos clases de alteraciones del objeto corpóreo: «cambios de estado» y «cambios de posición». Estos últimos, señala este autor, son alteraciones que podemos contrarrestar mediante movimientos voluntarios.

Existen objetos materiales a los cuales, dentro de cierta esfera de percepción, no adjudicamos alteraciones de estado, sino sólo alteraciones de posición; este hecho tiene una importancia fundamental para la formación del concepto de espacio (en cierto sentido, incluso para la justificación de la misma noción de objeto material). A este tipo de objetos le aplicaremos la denominación de «prácticamente rígidos».

Si como objeto de nuestra percepción consideramos en forma simultánea (o sea, como una única unidad) dos cuerpos prácticamente rígidos, existirán para ese conjunto unas alteraciones tales que posiblemente *no* puedan ser consideradas como cambios de posición del conjunto, a pesar de que sea así para cada uno de los dos elementos constituyentes. Esto nos lleva a la noción de «cambio de posición relativa» de los dos objetos y también de esta manera arribamos a la noción de «posición relativa» de los dos objetos. Además se ha demostrado que entre las posiciones relativas existe una,

de un tipo especial, a la que denominamos «contacto»\*. El contacto permanente de dos cuerpos en tres o más «puntos» significa que se han unido en un cuerpo compuesto casi-rígido. Es lícito afirmar que el segundo cuerpo constituye en ese caso una continuación (casi-rígida) del primer cuerpo y que, a su vez, podría recibir otra continuación casi-rígida. La posibilidad de la continuación casi-rígida de un cuerpo es ilimitada. La totalidad de todas las continuaciones casi-rígidas concebibles de un cuerpo  $B_0$  es el «espacio» infinito determinado por él.

Todo objeto corpóreo situado arbitrariamente puede ser puesto en contacto con la continuación casi-rígida de un cuerpo dado  $B_0$  (cuerpo de referencia). En mi opinión, este hecho es la base empírica de nuestra concepción del espacio. En el pensamiento precientífico, la corteza sólida de la Tierra asume el papel de  $B_0$  y su continuación. La misma palabra geometría indica que el concepto de espacio está psicológicamente conectado con la tierra como un cuerpo de referencia siempre presente.

La atrevida noción de «espacio» que precedió a toda la geometría científica transformó nuestro concepto de las relaciones entre posiciones de los objetos materiales en la noción de posición de esos objetos en el «espacio». Esto, por sí mismo, representa una gran simplificación formal. A través de ese concepto de espacio llegamos, además, a una actitud en la que cualquier descripción de posición es implícitamente una descripción de contacto; el enunciado que dice que un punto de un objeto material está situado en un punto  $P$  del espacio significa que el objeto toca el punto  $P$  del cuerpo de referencia  $B_0$  (al que se supone apropiadamente continuado) en el punto considerado.

En la geometría de los griegos, el espacio sólo asume un papel cualitativo, porque si bien se considera como dada la posición de los cuerpos en relación con el espacio, no se la describe mediante números. Descartes fue el primero que introdujo ese método. En su lenguaje todo el contenido de la geometría euclidiana puede estar

---

\* Está en la naturaleza de las cosas la posibilidad de que seamos capaces de hablar de esos objetos sólo mediante conceptos de nuestra creación, conceptos que en sí mismos no son objeto de definición. Sin embargo, es esencial que hagamos uso exclusivo de conceptos acerca de cuya relación con nuestra experiencia no se abriguen dudas.

axiomáticamente fundado en los siguientes postulados: 1) dos puntos definidos de un cuerpo rígido determinan un segmento; 2) podemos asignar números triples,  $X_1, X_2, X_3$  a los puntos del espacio de tal modo que para cada segmento  $P' - P''$ , las coordenadas de cuyos extremos sean  $X'_1, X'_2, X'_3; X''_1, X''_2, X''_3$ , resulte que la expresión

$$s^2 = (X''_1 - X'_1)^2 + (X''_2 - X'_2)^2 + (X''_3 - X'_3)^2$$

sea independiente de la posición del objeto, y de las posiciones de todos y cualquiera de los demás objetos.

El número (positivo)  $s$  representa la longitud del segmento o la distancia entre los dos puntos  $P'$  y  $P''$  del espacio (que son coincidentes con los puntos  $P'$  y  $P''$  del segmento).

De manera intencional se ha elegido una formulación que exprese con claridad no sólo el contenido lógico y axiomático de la geometría euclidiana, sino también su contenido empírico. La representación puramente lógica (axiomática) de la geometría euclidiana tiene, es verdad, la ventaja de una gran simplicidad y claridad. Sin embargo, el precio ha sido renunciar a la representación de la conexión entre el modelo conceptual y las experiencias sensoriales, sobre cuya conexión, tan sólo, descansa la significación de la geometría para la física. Se ha incurrido, con el tiempo, en el error de considerar que la necesidad lógica —anterior a toda experiencia— era la base de la geometría euclidiana y del concepto de espacio perteneciente a ella; ese fatal error surgió del hecho de que la base empírica, sobre la cual descansa la construcción axiomática de la geometría euclidiana, cayó en el olvido.

En la medida en que se puede hablar de la existencia de cuerpos rígidos en la naturaleza, la geometría de Euclides es una ciencia física, que debe ser confirmada por experiencias sensoriales. Abarca la totalidad de las leyes que deben dar cuenta de las posiciones relativas de los cuerpos rígidos, en forma independiente del tiempo. Vemos, pues, que la noción física de espacio, tal como fuera originalmente utilizada en la física, también está relacionada con la existencia de los cuerpos rígidos.

Desde el punto de vista del físico, la importancia central de la geometría euclidiana descansa en el hecho de que sus leyes son independientes de la naturaleza concreta de los objetos cuyas posiciones relativas trata. Su simplicidad formal está caracterizada por

las propiedades de homogeneidad e isotropía (y la existencia de entidades similares).

El concepto de espacio es útil, por cierto, pero no indispensable para la geometría, es decir, para la formulación de las reglas referidas a las posiciones relativas de los cuerpos rígidos. Por contraste, el concepto de tiempo objetivo, sin el cual la formulación de los fundamentos de la mecánica clásica resulta imposible, está ligado con el concepto de continuo espacial.

La introducción del tiempo objetivo implica dos postulados que son independientes entre sí.

1. La introducción del tiempo objetivo local mediante la conexión de la sucesión temporal de experiencias con las lecturas de un «reloj», es decir, de un sistema cerrado recurrente en forma periódica.

2. La introducción de la noción de tiempo objetivo para los fenómenos en todo el conjunto del espacio, noción por la cual, exclusivamente, la idea de tiempo local se extiende a la idea de tiempo en física.

Nota al postulado 1: según mi punto de vista, no sería una *petitio principii* poner el concepto de recurrencia periódica por delante del concepto de tiempo, en la medida en que la preocupación principal sea la clarificación del origen y del contenido empírico del concepto de tiempo. Esta concepción corresponde con exactitud a la precedencia del concepto de cuerpo rígido (o casi-rígido) en la interpretación del concepto de espacio.

Discusión adicional del postulado 2: antes de la enunciación de la teoría de la relatividad, prevalecía la ilusión de que, desde el punto de vista de la experiencia, el significado de la simultaneidad en relación con los fenómenos distantes en el espacio y, en consecuencia, el significado del tiempo físico, estaba claro en forma apriorística; esta ilusión tuvo su origen en el hecho de que en nuestra experiencia de cada día podemos ignorar el tiempo que tarda la luz en propagarse. A causa de esto, estamos acostumbrados a confundir lo «simultáneamente visto» con lo «simultáneamente sucedido» y como resultado se confunde la diferencia entre tiempo y tiempo local.

La falta de precisión que, desde el punto de vista empírico, tiene la noción de tiempo en la mecánica clásica, estaba oculta por la representación axiomática del espacio y del tiempo como

independientes de nuestras experiencias sensoriales. No representa necesariamente un daño para la ciencia el uso de los conceptos con independencia de la base empírica que les ha dado origen. Sin embargo, sería fácil caer en el error de creer que esas nociones, cuyo origen se ha olvidado, son necesarias desde el punto de vista lógico y por lo tanto inalterables; este error puede llegar a constituir un serio peligro para el progreso de la ciencia.

Para el desarrollo de la mecánica y, por ende, también para el desarrollo de la física en general, ha sido un hecho afortunado el que la falta de precisión en el concepto de tiempo objetivo permaneciera oculta para los primeros filósofos, en lo que se refiere a su interpretación empírica. Llenos de confianza en el significado real del espacio-tiempo, desarrollaron los fundamentos de la mecánica que, esquemáticamente, es posible caracterizar del siguiente modo:

(a) Concepto de punto material: un objeto material que —en lo que se refiere a su posición y movimiento— puede ser descrito con suficiente exactitud como un punto con las coordenadas  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ . Su movimiento se describe (en relación con el «espacio»  $B_0$ ) considerando  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  como funciones del tiempo.

(b) Ley de la inercia: la desaparición de los componentes de la aceleración en un punto material que esté suficientemente alejado de todos los demás puntos.

(c) Ley del movimiento (para el punto material): fuerza = masa  $\times$  aceleración.

(d) Leyes de fuerza (interacciones entre puntos materiales).

Aquí (b) no es sino un importante caso especial de (c). Una teoría real existe sólo cuando las leyes de fuerza están dadas. Las fuerzas, en primer lugar, deben obedecer únicamente a la ley de la igualdad de la acción y reacción para que un sistema de puntos —permanentemente conectados los unos con los otros mediante fuerzas— se pueda comportar como punto material.

Estas leyes fundamentales, junto con la ley de Newton sobre la fuerza de la gravedad, constituyen la base de la mecánica de los cuerpos celestes. En esta mecánica de Newton y en contraste con las precitadas concepciones del espacio derivadas de los cuerpos rígidos, el espacio  $B_0$  aparece con una novedad. No se adjudica validez a todo  $B_0$  (para una ley de fuerza dada) a través de (b) y (c), sino para un  $B_0$

en un estado de movimiento apropiado (sistema inercial). A causa de este hecho el espacio de coordenadas adquirió una propiedad física independiente que no está contenida en la noción de espacio puramente geométrica, una circunstancia que dio a Newton mucho que pensar (experimento del cubo)\*.

La mecánica clásica no es más que un esquema general; se convierte en una teoría sólo a través de la indicación explícita de las leyes de fuerza (*d*), tal como Newton lo hiciera, con éxito, en el ámbito de la mecánica celeste. Desde el punto de vista del objetivo de conseguir la mayor simplicidad posible de los fundamentos, este método teórico es deficiente en la medida en que las leyes de fuerza no pueden ser obtenidas mediante consideraciones lógicas y formales, de modo que su elección *a priori* es arbitraria hasta cierto punto. Hay que decir también que la ley de la gravedad de Newton se distingue de otras leyes de fuerza concebibles exclusivamente por su *éxito*.

A pesar del hecho de que, hoy, sabemos positivamente que la mecánica clásica fracasa como fundamento de toda la física, esa disciplina ocupa todavía el centro de la física. Y es que, más allá del importante progreso realizado a partir de los tiempos de Newton, todavía no hemos llegado a una nueva fundamentación de la física, con respecto de la cual tengamos la certidumbre de que la multiplicidad de todos los fenómenos investigados, y de los sistemas teóricos parciales que han alcanzado éxito, pueda ser deducida de ella por vía lógica. A continuación describiré con brevedad la situación actual del tema.

En primer término intentemos hacernos una idea muy clara de hasta qué punto el sistema de la mecánica clásica ha resultado adecuado para servir de base a toda la física. Toda vez que aquí sólo nos importan los fundamentos de la física y su desarrollo, no es necesario que nos preocupemos por los progresos puramente *formales* de la mecánica (ecuaciones de Lagrange, ecuaciones canónicas y demás). Una observación parece ser indispensable, sin embargo. La noción

---

\* Este defecto de la teoría sólo podría ser eliminado por una formulación de la mecánica que adjudicara validez a todo  $B_0$ . Este es uno de los pasos que conducen a la teoría de la relatividad general. Un segundo defecto, también eliminado sólo por la introducción de la teoría de la relatividad general, estriba en que no existe ninguna razón dada por la mecánica para la igualdad de la masa pesante e inercial del punto material.

de «punto material» es básica en mecánica. Si tratamos de desarrollar la mecánica de un objeto corpóreo que en sí mismo *no* puede ser tratado como un punto material —y hablando de manera estricta todo objeto «perceptible a nuestros sentidos» pertenece a esta categoría— surge una pregunta: ¿cómo imaginar el objeto constituido por puntos materiales y qué fuerzas debemos suponer que actúan entre ellos? La formulación de esta pregunta es indispensable, si se pretende que la mecánica describa el objeto de *forma completa*.

Dentro de la tendencia natural de la mecánica corresponde suponer que estos puntos materiales, y las leyes de fuerzas que actúan entre ellos, son invariables, porque los cambios temporales quedarían fuera del alcance de una explicación mecánica. A partir de todo esto podemos ver que la mecánica clásica debe conducirnos a una interpretación atómica de la materia. Ahora, con especial claridad, comprendemos cuán equivocados están aquellos teóricos que creen que la teoría surge de la experiencia por vía inductiva. Aun el gran Newton no pudo liberarse de ese error (*«Hypotheses non fingo»*).

Con el fin de salvarse a sí misma del peligro de hallarse perdida sin esperanza dentro de esa forma de pensamiento (el atomismo), la ciencia dio los siguientes pasos. La mecánica de un sistema está determinada si su energía potencial está dada como una función de su configuración. Si las fuerzas actuantes son capaces de garantizar el mantenimiento de ciertas propiedades estructurales de la configuración del sistema, esta puede ser descrita con suficiente exactitud por un número relativamente pequeño de configuraciones variables  $q_i$ ; la energía potencial es considerada sólo en la medida en que depende de *esas* variables (por ejemplo, la descripción de la configuración de un cuerpo prácticamente rígido mediante seis variables).

Un segundo método de aplicación de la mecánica, que evita la subdivisión de la materia en puntos materiales «reales», es la mecánica de los llamados medios continuos. Esta mecánica se caracteriza por la ficción de que la densidad y la velocidad de la materia dependen continuamente de coordenadas y tiempo y de que la parte de las interacciones no explícitamente dadas puede considerarse como fuerzas de superficie (fuerzas de presión) que una vez más son funciones continuas de posición. Aquí nos encontramos con la teoría hidrodinámica y la teoría de la elasticidad de los cuerpos sólidos. Estas teorías evitan la introducción explícita de puntos materiales

mediante ficciones que, a la luz de los fundamentos de la mecánica clásica, sólo pueden tener una significación aproximada.

Además de su gran significado *práctico*, estas categorías de la ciencia —al desarrollar nuevos conceptos matemáticos— han creado las herramientas formales (las ecuaciones diferenciales parciales) que han sido necesarias para los posteriores intentos de establecer una nueva base de toda la física.

Estas modalidades de aplicación de la mecánica pertenecen a la llamada física «fenomenológica». Es característico de esta clase de física el hecho de que utilice en la mayor medida posible conceptos que están cercanos a la experiencia, aunque esto la ha llevado a renunciar, en gran parte, a la unidad de sus fundamentos. El calor, la electricidad y la luz son descritos por distintas variables de estado y por constantes materiales distintas de las cantidades mecánicas. Determinar todas estas variables en su dependencia mutua y temporal constituía una tarea que, en general, sólo podía ser resuelta por la vía empírica. Muchos contemporáneos de Maxwell vieron en esta forma de presentación el objetivo último de la física, al que creyeron poder llegar de una manera puramente inductiva a partir de la experiencia, dada la relativa cercanía de los conceptos utilizados con respecto a ella. Desde la óptica de las teorías del conocimiento, St. Mill y E. Mach adoptaron más o menos este punto de vista.

Desde el mío, el mayor logro de la mecánica de Newton estaba en que su aplicación consistente nos ha llevado más allá de ese punto de vista fenomenológico, en particular dentro del ámbito de los fenómenos térmicos. Así ha sucedido en la teoría cinética de los gases y en la mecánica estadística en general. La primera relaciona la ecuación de estado de los gases ideales, la viscosidad, la difusión y la conductividad del calor de los gases y los fenómenos radiométricos de los gases y presenta la conexión lógica de fenómenos que, desde el punto de vista de la experiencia directa, ninguna relación guardan los unos con los otros. La segunda proporciona una interpretación de las ideas termodinámicas y de las leyes que han llevado al descubrimiento del límite de aplicabilidad de las nociones y leyes de la teoría clásica del calor. Esta teoría cinética ha superado ampliamente a la física fenomenológica en lo que respecta a la unidad lógica de sus fundamentos y, además, ha obtenido valores precisos de las magnitudes verdaderas de los átomos y las moléculas por métodos independientes y que por lo tanto los sitúan más allá del ám-



bito de la duda razonable. Estos progresos decisivos fueron pagados por la coordinación de las entidades atómicas con los puntos materiales, siendo obvio —como lo era— el carácter especulativo de esas entidades. Nadie podrá pensar jamás en «percibir en forma directa» un átomo. Las leyes referidas a las variables que se conectan en forma más directa con los hechos experimentales (por ejemplo, temperatura, presión, velocidad) han sido deducidas de las ideas fundamentales por medio de complicados procesos de cálculo. Y por este camino la física (o al menos parte de ella), construida en sus orígenes de un modo más fenomenológico, al basarse en la mecánica de Newton para los átomos y las moléculas, se ha reducido a una base más alejada de la experimentación directa, pero más uniforme en su carácter.

### *III. El concepto de campo*

Al explicar los fenómenos eléctricos y ópticos, la mecánica de Newton ha tenido menos éxito que en los ámbitos de los que hemos hablado antes. En efecto: Newton, en su teoría corpuscular de la luz, trató de reducirla a un movimiento de puntos materiales. Más tarde, sin embargo, cuando los fenómenos de la polarización, difracción e interferencia de la luz obligaron a realizar modificaciones cada vez más incompatibles con esta teoría, se impuso la teoría ondulatoria de la luz de Huygens. Es probable que esta teoría deba su origen, en esencia, a los fenómenos de la óptica de cristales y a la teoría del sonido, que por entonces ya había alcanzado cierto nivel de elaboración. También hemos de admitir que la teoría de Huygens se basaba en primera instancia en la mecánica clásica. El éter que todo lo penetraba hubo de ser considerado como el conductor de las ondas, pero ningún fenómeno conocido podía explicar el éter a partir de puntos materiales. Jamás se pudo lograr una clara descripción de las fuerzas internas que gobernaban el éter ni de las fuerzas que actuaban entre el éter y la materia «ponderable». Por lo tanto, los fundamentos de esta teoría permanecieron eternamente en la oscuridad. La verdadera base era una ecuación diferencial parcial, cuya reducción a elementos mecánicos fue siempre problemática.

Para la concepción teórica de los fenómenos eléctricos y magnéticos se introdujeron, una vez más, unas masas de un tipo especial y se conjeturó que entre esas masas existían fuerzas que actuaban a dis-

tancia, similares a las fuerzas gravitatorias de Newton. Sin embargo, este tipo especial de materia carecía de la propiedad fundamental de la inercia. Y las fuerzas que actuaban entre esas masas y la materia ponderable permanecieron en la oscuridad. A estas dificultades hubo que agregar el carácter polar de esta clase de materia que no se adecuaba al esquema de la mecánica clásica. La base de la teoría se hizo aún más insatisfactoria cuando se conocieron los fenómenos electrodinámicos, a pesar de que estos fenómenos permitieron a los físicos la explicación de los fenómenos magnéticos con lo que se hizo innecesario el supuesto de masas magnéticas. Por cierto que estos progresos hubieron de pagarse aumentando la complejidad de las fuerzas de interacción, cuya existencia debía suponerse, entre las masas eléctricas en movimiento.

La salida de esta situación poco satisfactoria, gracias a la teoría de campo eléctrico de Faraday y Maxwell, representa probablemente la más profunda transformación en los fundamentos de la física desde los tiempos de Newton. Una vez más, se trata de un paso dado en el sentido de la especulación constructiva que aumenta la distancia entre los fundamentos de la teoría y las experiencias sensoriales. La existencia del campo se manifiesta, por cierto, sólo cuando son introducidos en este cuerpos con carga eléctrica. Las ecuaciones diferenciales de Maxwell conectan los coeficientes diferenciales espaciales y temporales de los campos eléctricos y magnéticos. Las masas eléctricas no son otra cosa que lugares en que la divergencia del campo eléctrico no desaparece. Las ondas luminosas se presentan como procesos de un campo ondulatorio electromagnético en el espacio.

Para cerciorarse, Maxwell intentó una interpretación mecánica de su teoría de campo, a través de modelos mecánicos del éter. Pero gradualmente estos intentos fueron quedando marginados por la interpretación (despojada de todos los accesorios innecesarios) de Heinrich Hertz. De este modo, el campo ocupó dentro de esta teoría la posición fundamental que en la mecánica de Newton habían ocupado los puntos materiales. Sin embargo, en un primer momento, sólo fue aplicada a los campos electromagnéticos en el espacio vacío.

En su etapa inicial de desarrollo, la teoría resultaba aún poco satisfactoria para el interior de la materia porque, en este caso, había que introducir dos vectores eléctricos que estaban enlazados

por relaciones dependientes de la naturaleza del medio, relaciones inaccesibles a cualquier análisis teórico. Se produjo una situación análoga con respecto al campo magnético, y en la relación entre la densidad de la corriente eléctrica y el campo.

Fue H. A. Lorentz quien halló la solución que apuntaba, además, hacia una teoría electrodinámica de los cuerpos en movimiento, una teoría que estaba más o menos libre de supuestos arbitrarios. Su teoría estaba construida sobre la base de las siguientes hipótesis fundamentales:

En cualquier parte (incluido el interior de los cuerpos ponderables) el asiento del campo es el espacio vacío. La participación de la materia en los fenómenos electromagnéticos tiene su origen sólo en el hecho de que las partículas elementales de la materia llevan cargas eléctricas inalterables y, por este motivo, están sujetas, por una parte, a las acciones de las fuerzas ponderomotoras y, por otra, poseen la propiedad de generar un campo. Las partículas elementales obedecen a la ley del movimiento de Newton para los puntos materiales.

Sobre esta base H. A. Lorentz obtuvo su síntesis de la mecánica de Newton y la teoría de campo de Maxwell. La debilidad de esta teoría reside en el hecho de que trataba de determinar los fenómenos mediante una combinación de ecuaciones diferenciales parciales (las ecuaciones de campo de Maxwell, para el espacio vacío) y ecuaciones diferenciales totales (ecuaciones de movimiento de puntos), procedimiento que era obviamente artificial. Las insuficiencias de este punto de vista se manifestaron por sí mismas en la necesidad de suponer dimensiones finitas para las partículas, a fin de evitar que el campo electromagnético que existe en sus superficies llegara a ser infinitamente grande. Además, la teoría era incapaz de dar una explicación de las tremendas fuerzas que conservan las cargas eléctricas de las partículas individuales. H. A. Lorentz aceptaba estas debilidades de su teoría, y las conocía muy bien, a cambio de poder explicar los fenómenos de una manera correcta, al menos en términos generales.

Por otra parte, había un aspecto que apuntaba más allá del marco de la teoría de Lorentz. En las inmediaciones de un cuerpo eléctricamente cargado existe un campo magnético que contribuye, aparentemente, a su inercia. ¿No sería posible explicar la inercia *to-*

*tal* de las partículas desde un punto de vista electromagnético? Está claro que este problema sólo puede ser analizado en forma satisfactoria si las partículas pueden ser consideradas como soluciones regulares de las ecuaciones diferenciales parciales electromagnéticas. En su forma original, sin embargo, las ecuaciones de Maxwell no admiten tal descripción de las partículas porque sus correspondientes soluciones contienen una singularidad. Por ello los físicos teóricos han tratado durante mucho tiempo de lograr su objetivo modificando las ecuaciones de Maxwell. Con todo, estos intentos no han sido coronados con el éxito. Así comprobamos que el objetivo de erigir una pura teoría de campo electromagnético de la materia, de momento continúa siendo un objetivo inalcanzado, aunque en principio no existan objeciones contra la posibilidad de lograrlo. La falta de un método sistemático que nos lleve a una solución ha sido un obstáculo para nuevos intentos. No obstante, me parece innegable que en la fundamentación de cualquier teoría de campo consistente, el concepto de partícula no debe aparecer junto al concepto de campo. Toda la teoría ha de estar basada, en forma exclusiva, en las ecuaciones diferenciales parciales y en sus soluciones desprovistas de singularidades.

#### *IV. La teoría de la relatividad*

No existe un método inductivo que nos conduzca a los conceptos fundamentales de la física. La imposibilidad de comprender este hecho constituyó la base del error filosófico de muchos investigadores del siglo pasado. Tal vez también haya sido el motivo por el cual la teoría molecular y la teoría de Maxwell sólo pudieron quedar establecidas en una fecha relativamente tardía. El pensamiento lógico es necesariamente deductivo; se basa en conceptos hipotéticos y en axiomas. ¿Cómo seleccionar estos, con la esperanza de que se confirmen las consecuencias que de ellos se derivan?

La situación más satisfactoria, es evidente, se hallará en los casos en que las nuevas hipótesis fundamentales sean sugeridas por el propio mundo de la experiencia. La hipótesis de la inexistencia de un movimiento perpetuo como base de la termodinámica proporciona el ejemplo de una hipótesis fundamental sugerida por la experiencia; otro tanto ocurre con el principio de inercia de Galileo. También dentro de la misma categoría hallamos la hipótesis funda-

mental de la teoría de la relatividad, teoría que nos ha conducido a una inesperada extensión de la teoría de campo y a la sustitución de los fundamentos de la mecánica clásica.

El éxito de la teoría de Maxwell-Lorentz ha dado gran confianza en la validez de las ecuaciones electromagnéticas para el espacio vacío, y por lo tanto y en especial, en la afirmación de que la luz se mueve «en el espacio» con una determinada velocidad constante  $c$ . Esta afirmación del valor constante de la velocidad de la luz, ¿es válida para todo sistema inercial? Si así no fuera, un sistema inercial específico o, por mayor precisión, un estado de movimiento concreto (de un cuerpo de referencia) tendría que distinguirse de todos los demás. Sin embargo, esto parecía contradecir todos los hechos experimentales mecánicos y electromagnéticos.

Por estas razones era necesario elevar al rango de principio la validez de la ley de la constancia de la velocidad de la luz para todos los sistemas inerciales. A partir de esto se sigue que las coordenadas espaciales  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y el tiempo  $X_4$  deben ser transformados de acuerdo con la «transformación de Lorentz» que se caracteriza por el carácter invariable de la expresión

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

(si la unidad de tiempo está elegida de tal modo que la velocidad de la luz  $c = 1$ ).

Por este procedimiento, el tiempo pierde su carácter absoluto y se asocia a las coordenadas «espaciales» como si tuviera un carácter (casi) similar algebraicamente. El carácter absoluto del tiempo y en particular el concepto de simultaneidad fueron destruidos, quedando la descripción cuatridimensional como la única adecuada.

Con el fin de explicar también la equivalencia de todos los sistemas inerciales con respecto a todos los fenómenos de la naturaleza, es necesario postular el carácter invariable de todos los sistemas de ecuaciones físicas que expresan leyes generales con respecto a la transformación de Lorentz. La elaboración de esta exigencia forma el contenido de la teoría de la relatividad restringida.

Esta teoría es compatible con las ecuaciones de Maxwell, pero es incompatible con la base de la mecánica clásica. Es verdad que las ecuaciones de movimiento del punto material pueden ser modificadas (y con ellas las expresiones del momento y la energía cinética

del punto material), de modo tal que lleguen a satisfacer la teoría. Pero el concepto de la fuerza de interacción y con él el concepto de energía potencial de un sistema pierde su base, porque estos conceptos se apoyan en la idea de la simultaneidad absoluta. El campo, determinado por ecuaciones diferenciales, ocupa el lugar de la fuerza.

En razón de que la teoría anterior permite la interacción sólo por campos, se requiere una teoría de campo de la gravedad. Y por cierto que no es difícil formular una teoría en la que, tal como en la de Newton, los campos gravitatorios puedan ser reducidos a un escalar, que es la solución de una ecuación diferencial parcial. Sin embargo, los hechos experimentales expresados en la teoría de la gravedad de Newton apuntan hacia otra dirección: la de la teoría de la relatividad general.

Una característica poco satisfactoria de la mecánica clásica es la de que en sus leyes fundamentales la misma masa constante aparece en dos papeles diferentes: como «masa inercial» en la ley del movimiento y como «masa pesante» en la ley de la gravedad. Como resultado, la aceleración de un cuerpo en un campo gravitatorio puro es independiente de su material; de modo que en un sistema de coordenadas uniformemente acelerado (acelerado en relación con un «sistema inercial») los movimientos ocurren como en un campo gravitatorio homogéneo (en relación con un sistema «inmóvil» de coordenadas). Si suponemos que la equivalencia de estos dos casos es completa, obtenemos una adaptación de nuestro pensamiento teórico al hecho de que la masa inercial y pesante son iguales.

De aquí se deduce que ya no hay motivos para privilegiar, como cuestión de principio, los «sistemas inerciales»; y debemos admitir en un pie de igualdad las transformaciones *no lineales* de las coordenadas  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$ . Si realizamos esta transformación de un sistema de coordenadas de la teoría de la relatividad restringida, la métrica

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

pasa a una métrica (riemanniana) general de la forma

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu} \text{ (sumados para } \mu \text{ y } \nu)$$

donde los  $g_{\mu\nu}$  simétricos en  $\mu$  y  $\nu$ , son funciones de  $x_1 \dots x_4$  que describen tanto las propiedades métricas como el campo gravitatorio, en relación con el nuevo sistema de coordenadas.

Esa mejora en la interpretación de la base mecánica, con todo, y tal como se muestra ante un escrutinio minucioso, hubo de pagarse: las nuevas coordenadas ya no podían ser interpretadas como resultados de las mediciones con cuerpos rígidos y relojes, tal como ocurría en el sistema original (un sistema inercial con un campo gravitatorio que desaparecía).

El paso a la teoría de la relatividad general se lleva a cabo mediante el supuesto de que la representación de las propiedades de campo del espacio ya mencionadas a través de las funciones (o sea, a través de una métrica riemanniana), también está justificado en el caso *general*, en el que no existe ningún sistema de coordenadas en relación con el cual la métrica adquiera la simple forma casi euclidiana de la teoría de la relatividad especial.

Ahora las coordenadas, por sí mismas, ya no expresan relaciones métricas, sino tan sólo la «cercanía» de los objetos cuyas coordenadas difieren muy poco las unas de las otras. Todas las transformaciones de las coordenadas deben ser admitidas en la medida en que esas transformaciones están libres de singularidades. Sólo las ecuaciones que son covariantes en relación con transformaciones arbitrarias, en este sentido, tienen significado como expresiones de leyes generales de la naturaleza (postulado de la covarianza general).

El primer objetivo de la teoría de la relatividad general era una versión preliminar que, aunque no cumpliera los requisitos de un sistema cerrado, podía enlazarse de manera muy simple con los «hechos directamente observables». Si la teoría se restringía a la pura mecánica gravitatoria, la teoría de la gravedad de Newton podía servir como modelo. Esta versión preliminar puede caracterizarse así:

1. El concepto de punto material y el de su masa se conservan. Una ley del movimiento es formulada para dicho punto y esta ley resulta ser la traducción de la ley de la inercia al lenguaje de la teoría de la relatividad general. Esta ley es un sistema de ecuaciones diferenciales totales, el sistema característico de la línea geodésica.

2. La ley de Newton de la interacción por la gravedad es reemplazada por el sistema de las ecuaciones diferenciales covariantes gene-

rales más simples que pueden establecerse para el tensor  $g_{\mu\nu}$ . Se forma igualando a cero el tensor de la curvatura riemanniana ( $R_{\mu\nu} = 0$ ).

Esta formulación permite el tratamiento del problema de los planetas. Para decirlo con mayor precisión, permite el tratamiento del problema del movimiento de puntos materiales de masa prácticamente despreciable en el campo gravitatorio (simétrico con respecto al centro) producido por un punto material que, se supone, está «en descanso». No toma en cuenta la reacción de los puntos materiales «en movimiento» en el campo gravitatorio ni se para a considerar cómo produce ese campo gravitatorio la masa central.

Por analogía con la mecánica clásica se observa que la siguiente es una forma de completar la teoría; se establecen como ecuaciones de campo

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = -T_{ik},$$

donde  $R$  representa el escalar de la curvatura de Riemann,  $T_{ik}$  el tensor de energía de la materia en una representación fenomenológica. El miembro izquierdo de la ecuación ha sido elegido de tal modo que su divergencia desaparece idénticamente. La desaparición correspondiente de la divergencia del miembro derecho produce las «ecuaciones de movimiento» de la materia, en forma de ecuaciones diferenciales parciales para el caso en que  $T_{ik}$  introduce, para la descripción de la materia, sólo *cuatro* funciones independientes más (por ejemplo, componentes de densidad, presión y velocidad, donde entre los últimos existe una identidad y entre la presión y la densidad una ecuación de condición).

Con esta formulación toda la mecánica gravitatoria se reduce a la solución de un único sistema de ecuaciones diferenciales parciales covariantes. Esta teoría evita todos los defectos que hemos atribuido a la base de la mecánica clásica. Por lo que sabemos, esta teoría es suficiente para la representación de los hechos observados de la mecánica celestial. Pero es similar a un edificio, una de cuyas alas está construida con fino mármol (miembro izquierdo de la ecuación), en tanto que la otra ha sido hecha con madera de mala calidad (miembro derecho de la ecuación). La representación fenomenológica de la materia es, en realidad, sólo un rústico sustituto de una representación que hiciera justicia a todas las propiedades conocidas de la materia.



No existe dificultad para conectar la teoría de Maxwell de campo electromagnético con la teoría de campo gravitatorio en la medida en que nos restrinjamos al espacio libre de materia ponderable y libre de densidad eléctrica. Todo lo que se necesita es poner en el miembro derecho de la anterior ecuación en lugar de  $T_{ik}$ , el tensor de energía del campo electromagnético en el espacio libre y unir al sistema de ecuaciones así modificado la ecuación de Maxwell para el espacio libre, escrita en forma covariante general. Bajo estas condiciones, entre todas estas ecuaciones existirá un número suficiente de identidades diferenciales para garantizar su consistencia. Podemos agregar que esta propiedad formal necesaria del sistema total de ecuaciones permite elegir en forma arbitraria el signo del miembro  $T_{ik}$ , un hecho que más tarde ha resultado ser importante.

El deseo de obtener, en los fundamentos de la teoría, la mayor unidad posible ha desembocado en diversos intentos de incluir el campo gravitatorio y el campo electromagnético en un todo formal unificado. Aquí hemos de mencionar en particular la teoría de las cinco dimensiones de Kaluza y Klein. Después de haber estudiado esta posibilidad con especial cuidado, considero que es preferible aceptar la carencia de uniformidad interna que presenta la teoría original, porque no creo que la totalidad de las hipótesis de la teoría de cinco dimensiones contenga menos elementos arbitrarios que la teoría original. La misma afirmación se podría hacer respecto a la versión proyectiva de la teoría, que ha sido elaborada con gran cuidado, en especial por von Dantzig y por Pauli.

Las anteriores consideraciones se refieren, en forma exclusiva, a la teoría de campo, libre de materia. A partir de ahí, ¿qué hemos de hacer para obtener una teoría completa de la materia atómica? En una teoría ideal las singularidades tendrán que estar excluidas, sin duda, porque sin esa exclusión las ecuaciones diferenciales no determinan por completo el campo total. Aquí, en la teoría de campo de la relatividad general, nos enfrentamos con el mismo problema de la representación teórica de campo de la materia, tal como lo habíamos visto en relación con la teoría pura de Maxwell.

Y una vez más el intento de obtener una construcción teórica de campo de las partículas nos lleva, en apariencia, a ciertas singularidades. También en este caso se ha realizado un esfuerzo para superar este defecto mediante la introducción de nuevas variables de campo y la elaboración y extensión del sistema de ecuaciones de campo. Sin

embargo, hace poco tiempo, en colaboración con el doctor Rosen, hemos descubierto que la combinación más simple de ecuaciones de campo de la gravedad y electricidad mencionada anteriormente produce soluciones centralmente simétricas, libres de cualquier singularidad (las conocidas soluciones centralmente simétricas de Schwarzschild para el campo gravitatorio puro y las de Reissner para el campo eléctrico con consideración de su acción gravitatoria). A esto nos referiremos en un párrafo siguiente, en forma breve. Por este camino parece posible establecer, para la materia y sus interacciones, una teoría de campo pura, libre de hipótesis adicionales, una teoría que al ser sometida a verificación empírica no nos cree más dificultades que las puramente matemáticas (que, desde luego, son muy serias).

#### *V. Teoría cuántica y los fundamentos de la física*

Los físicos teóricos de nuestra generación están esperando que se erija una nueva base teórica para la física que usaría conceptos distintos por completo de los que utiliza la teoría de campo considerada hasta el presente. El motivo es que se ha demostrado que es necesario emplear —para la representación matemática de los fenómenos llamados cuánticos— unos métodos enteramente nuevos.

En tanto que, tal como lo ha mostrado la teoría de la relatividad, el fracaso de la mecánica clásica está vinculado al carácter finito de la velocidad de la luz, se ha descubierto a comienzos de este siglo que existen otras clases de incongruencias entre las deducciones de la mecánica y los hechos experimentales, incongruencias que están relacionadas con el carácter finito (no nulo) de la constante  $h$  de Planck. En particular, mientras que la mecánica molecular requiere que tanto la cantidad de calor y la densidad (monocromática) de radiación de los cuerpos sólidos disminuyan *en proporción* con la disminución de la temperatura absoluta, la experiencia ha demostrado que disminuyen mucho más rápidamente que la temperatura absoluta. Para una explicación teórica de este comportamiento era necesario suponer que la energía de un sistema mecánico no puede tomar valores arbitrarios, sino sólo ciertos valores discretos cuyas expresiones matemáticas son siempre dependientes de la constante  $h$  de Planck. Además, esta concepción era esencial a la teoría del átomo (teoría de Bohr). Para la transición de estos estados en otros

—con o sin emisión o absorción de radiación— no podían establecerse leyes causales, sino exclusivamente leyes estadísticas; y una conclusión similar es válida para la descomposición radiactiva de los átomos, que fue investigada con sumo cuidado por ese mismo tiempo. A lo largo de más de dos décadas, los físicos han tratado en vano de encontrar una interpretación uniforme de este «carácter cuántico» de los sistemas y los fenómenos. Esta empresa tuvo éxito hace unos diez años, gracias a dos métodos teóricos diferentes por completo entre sí. Uno de esos métodos ha sido obra de Heisenberg y Dirac y el otro ha surgido del trabajo de de Broglie y Schrödinger. La equivalencia matemática de ambos métodos fue reconocida muy prontamente por Schrödinger. Aquí trataré de bosquejar la línea de pensamiento de de Broglie y Schrödinger, que está más cercana al método que utiliza el físico, y acompañaré esa descripción con algunas consideraciones generales.

La cuestión es, en primer lugar: ¿cómo se puede asignar una sucesión discreta de valores de energía  $H_\sigma$  a un sistema concreto en el sentido de la mecánica clásica? (La función de energía es una función dada de las coordenadas  $q_r$  y los momentos correspondientes  $p_r$ .) La constante  $h$  de Planck relaciona la frecuencia  $H_\sigma/h$  con los valores de la energía  $H_\sigma$ . Por lo tanto, es suficiente asignar al sistema una sucesión de *frecuencias* discretas. Esto nos recuerda el hecho de que en acústica una serie de frecuencias discretas está vinculada a una ecuación diferencial parcial de primer grado (para condiciones límite fijadas), es decir, a soluciones sinusoidales periódicas. De la misma manera, Schrödinger se fijó la tarea de asociar una ecuación diferencial parcial para una función escalar  $\psi$  a la función de energía dada  $\varepsilon(q_r, p_r)$ , donde  $q_r$  y el tiempo  $t$  son variables independientes. En esto tuvo éxito (para una función compleja  $\psi$ ), de modo que los valores teóricos de la energía  $H_\sigma$ , como lo requiere la teoría estadística, se pudieron obtener satisfactoriamente a partir de las soluciones periódicas de la ecuación.

A decir verdad, no resultó posible asociar un movimiento definido, en el sentido de la mecánica de los puntos materiales, con una solución definida  $\psi(q_r, t)$  de la ecuación de Schrödinger. Esto significa que la función  $\psi$  no determina, al menos *exactamente*, la historia de los  $q_r$  como funciones del tiempo  $t$ . De acuerdo con Born, sin embargo, se ha demostrado que es posible una interpretación del significado físico de las funciones  $\psi$ , de la siguiente forma:  $\psi \psi$  (el

cuadrado del valor absoluto de la función compleja  $\psi$ ) es la densidad de probabilidad en el punto bajo consideración, en el espacio de configuración de  $q_r$  en el tiempo  $t$ . Es posible, pues, caracterizar el contenido de la ecuación de Schrödinger de una manera fácilmente comprensible aunque no muy precisa. Se trata de lo siguiente: ese contenido determina cómo varía la densidad de probabilidad de un conjunto estadístico de sistemas en el espacio de configuración con el tiempo. En pocas palabras: la ecuación de Schrödinger determina el cambio de la función  $\psi$  de  $q_r$  con el tiempo.

Ha de mencionarse que los resultados de esta teoría contienen —como valores límite— los resultados de la mecánica de partículas, si las longitudes de onda halladas en la solución del problema de Schrödinger son siempre tan pequeñas, que la energía potencial varía por acción de una cantidad prácticamente infinitesimal, para una distancia de una longitud de onda en el espacio de configuración. Bajo estas condiciones se puede demostrar lo siguiente: elegimos una región  $G_0$  en el espacio de configuración que, aunque muy amplia (en todas las direcciones) en relación con la longitud de onda, es pequeña en relación con las dimensiones relevantes del espacio de configuración. Bajo estas condiciones es posible elegir una función  $\psi$  para un tiempo inicial  $t_0$ , de tal modo que se anule fuera de la región  $G_0$  y se comporte, según la ecuación de Schrödinger, reteniendo esa propiedad —al menos aproximadamente— también para un tiempo posterior,  $t$ , en el que la región  $G_0$  se ha convertido en otra región  $G$ . De esta forma, con cierto grado de aproximación, se puede hablar del movimiento de la región  $G$  como un conjunto y es posible aproximarse a este movimiento mediante el movimiento de un punto en el espacio de configuración. Este movimiento coincide, pues, con el movimiento requerido por las ecuaciones de la mecánica clásica.

Los experimentos sobre interferencias realizados con rayos de partículas han proporcionado una brillante verificación de la correspondencia con los hechos del carácter ondulatorio de los fenómenos del movimiento, tal como lo supone la teoría. Además de esto, la teoría ha logrado demostrar con facilidad las leyes estadísticas de la transición de un sistema de un estado cuántico a otro bajo la acción de fuerzas externas, lo que, desde el punto de vista de la mecánica clásica, parece un milagro. Las fuerzas externas estaban representadas en este caso por aumentos de la energía potencial

durante períodos breves de tiempo. Mientras que en la mecánica clásica esos aumentos pueden producir sólo cambios relativamente pequeños del sistema, en la mecánica cuántica los producen de cualquier magnitud, incluso grandes, pero con una probabilidad pequeña, resultado que se halla en perfecta armonía con la experiencia. Incluso la comprensión de las leyes de la radiactividad, al menos en líneas generales, surgió de esta teoría.

Probablemente nunca antes se había desarrollado una teoría que proporcionara la clave para la interpretación y cálculo de un grupo de fenómenos empíricos tan heterogéneo como el que abarca la teoría cuántica. A pesar de esto, con todo, creo que la teoría es capaz de inducirnos a error en nuestra búsqueda de una base uniforme para la física porque, a mi entender, es una representación *incompleta* de la realidad, aunque es la única que puede construirse a partir de los conceptos fundamentales de fuerza y punto material (correcciones cuánticas a la mecánica clásica). Su carácter incompleto necesariamente conduce a la naturaleza estadística (carácter incompleto) de las leyes. Ahora expondré las razones de esta opinión.

En primer lugar pregunto lo siguiente: ¿hasta qué punto la función  $\psi$  describe un estado real de un sistema mecánico? Supongamos que  $\psi_r$  son las soluciones periódicas (ordenadas según valores de energía crecientes) de la ecuación de Schrödinger. De momento dejaré abierta la pregunta de hasta qué punto los  $\psi_r$  individuales son descripciones *completas* de estados físicos. Un sistema está primero en el estado  $\psi_1$  de la energía más baja  $\varepsilon_1$ . Después, durante un tiempo finito, una pequeña fuerza perturbadora actúa sobre el sistema. Un momento más tarde, a partir de la ecuación de Schrödinger se obtiene una función  $\psi$  de la forma:

$$\psi = \sum c_r \psi_r$$

donde  $c_r$  son constantes (complejas). Si las  $\psi$  están «normalizadas»,  $|c_1|$  es casi igual a 1,  $|c_2|$ , etc., es pequeño comparado con 1. Ahora corresponde preguntar: ¿ $\psi$  describe un estado real del sistema? Si la respuesta es afirmativa, no podremos por menos que adscribir a este estado\* una energía  $\varepsilon$  y, en particular, una energía que excede  $\varepsilon_1$  por

---

\* Porque de acuerdo con una consecuencia de la teoría de la relatividad la energía de un sistema completo (en reposo) es igual a su inercia (como conjunto). Esta, sin embargo, ha de tener un valor preciso.

un poco (en cualquier caso  $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$ ). No obstante, esa suposición no concuerda con los experimentos sobre impactos del electrón, tal como los realizaron J. Franck y G. Hertz, si se toma en cuenta la demostración de Millikan sobre la naturaleza discreta de la electricidad. En realidad, estos experimentos nos llevan a la conclusión de que no existen valores de energía situados entre los valores cuánticos. De aquí podemos deducir que nuestra función  $\psi$  de ninguna manera describe un estado homogéneo del sistema, sino que es más bien una descripción estadística en la que los  $C_r$  representan las probabilidades de los valores individuales de energía. Por lo tanto, parece claro que la interpretación estadística que Born hiciera con respecto a la teoría cuántica es la única posible. La función  $\psi$  de ningún modo describe un estado que pudiera ser el de un sistema único; se refiere a muchos sistemas, a «un conjunto de sistemas» en el sentido de la mecánica estadística. Si, con excepción de ciertos casos especiales, la función  $\psi$  provee tan sólo datos *estadísticos* de magnitudes mensurables, el motivo está no sólo en el hecho de que la *operación de medición* introduce elementos desconocidos, sino también en el hecho de que la función  $\psi$  en ningún sentido, describe el estado de *un* sistema único. La ecuación de Schrödinger determina las variaciones en el tiempo que ocurren en el conjunto de sistemas que pueden existir independientemente de cualquier acción externa sobre el sistema único.

Esta interpretación también elimina la paradoja que no hace mucho he demostrado con la ayuda de dos colaboradores y que se relaciona con el siguiente problema:

Consideremos un sistema mecánico que consiste en dos sistemas parciales  $A$  y  $B$  que se mantienen en interacción durante un tiempo limitado. Supongamos que la función  $\psi$  antes de la interacción es conocida. Entonces la ecuación de Schrödinger tendrá que darnos la función  $\psi$  después de que se haya producido la interacción. Determinemos ahora el estado físico del sistema parcial  $A$  tan completamente como nos sea posible mediante mediciones. A continuación, la mecánica cuántica nos permite determinar la función  $\psi$  del sistema parcial  $B$  a partir de las mediciones realizadas y de la función  $\psi$  del sistema total. Sin embargo, esta determinación nos dará un resultado que depende de *cuál* de las cantidades físicas (observables) de  $A$  haya sido medida (por ejemplo, coordenadas o momentos). Toda vez que sólo puede haber *un* estado físico de  $B$  después

de la interacción, que puede ser razonablemente considerado independiente de la medición que hayamos realizado en el sistema  $A$  separado de  $B$ , se puede concluir que la función  $\psi$  no representa sin ambigüedad el estado físico. El que diversas funciones  $\psi$  representen el mismo estado físico del sistema  $B$  demuestra una vez más que la función  $\psi$  no puede ser interpretada como una descripción (completa) de un estado físico de un único sistema. También en este caso la referencia de la función  $\psi$  a un conjunto de sistemas elimina toda dificultad.\*

La mecánica cuántica proporciona, de esta manera tan simple, teoremas sobre transiciones (aparentemente) discontinuas de un estado a otro, sin brindar en rigor una descripción del proceso concreto; este hecho está conectado con otro: la teoría, en realidad, no opera con el sistema único, sino con una totalidad de sistemas.

Los coeficientes  $c_r$  de nuestro primer ejemplo son apenas alterados por la acción de la fuerza externa. Con esta interpretación de la mecánica cuántica es posible comprender el motivo por el cual esta teoría puede explicar con facilidad el hecho de que unas fuerzas perturbadoras débiles sean capaces de producir cambios de cualquier magnitud en el estado físico de un sistema. Estas fuerzas perturbadoras, por cierto, producen sólo cambios pequeños de la *densidad estadística* del conjunto de los sistemas y en consecuencia sólo cambios infinitesimales en las funciones  $\psi$ , cuya descripción matemática ofrece muchas menos dificultades que las que se presentarían en la descripción matemática de cambios finitos experimentados por parte de los sistemas únicos. Es verdad, no obstante, que lo que ocurre con el sistema único permanece totalmente sin clarificar cuando se utiliza esta interpretación. El enfoque estadístico elimina por completo de la descripción ese suceso enigmático.

Pero ahora yo pregunto: ¿existe realmente algún físico que crea que jamás llegaremos a tener una percepción de estos importantes cambios que se producen en los sistemas únicos, de su estructura y de sus conexiones causales, sin considerar el hecho de que los sucesos únicos han llegado a estar tan cerca de nosotros, gracias a la

---

\* Una medición sobre  $A$ , por ejemplo, implica una transición hacia un conjunto menor de sistemas. Este (su función  $\psi$  también, en consecuencia) depende del punto de vista según el cual se lleve a cabo esa reducción del conjunto de sistemas.

maravillosa invención de la cámara de Wilson y al contador Geiger? Es posible creer esto, sin incurrir en contradicción desde el punto de vista lógico, pero resulta tan contrario a mi instinto científico que no puedo abandonar la búsqueda de una concepción más completa.

A estas consideraciones debemos agregar las de otra clase, que también parecen indicar que los métodos introducidos por la mecánica cuántica no están en condiciones de proporcionar una base útil para la totalidad de la física. En la ecuación de Schrödinger, el tiempo absoluto y la energía potencial desempeñan un papel decisivo, en tanto que estos dos conceptos han sido considerados como inadmisibles en principio por la teoría de la relatividad. Si queremos escapar a esta dificultad, tendremos que basar toda teoría en el campo y en las leyes de campo, y no en las fuerzas de interacción. Esto nos lleva a aplicar los métodos estadísticos de la mecánica cuántica a los campos, es decir, a sistemas con un número infinito de grados de libertad. Aunque los intentos que hasta aquí se han realizado han estado restringidos a ecuaciones de primer grado que, tal como indica la teoría de la relatividad general, son insuficientes, las complicaciones con las que se ha tropezado resultan ya aterradoras. Y se multiplicarían si quisiéramos obedecer las exigencias de la teoría de la relatividad general, de cuya justificación nadie duda, en principio.

Es cierto que se ha señalado que la introducción de un continuo espacio-tiempo puede ser contraria a la naturaleza en razón de la estructura molecular de todo aquello que ocurre en pequeña escala. Se ha afirmado que tal vez el éxito del método de Heisenberg apunta a un método puramente algebraico de descripción de la naturaleza, es decir, a la eliminación de las funciones continuas del ámbito de la física. De modo que, a pesar de todo, también debería renunciarse al continuo espacio-tiempo. Es concebible que el ingenio humano logre algún día hallar métodos que hagan posible avanzar por ese sendero. En el momento actual, sin embargo, un programa como este se asemeja al intento de respirar en el vacío.

No cabe duda de que la mecánica cuántica ha logrado explicar una buena proporción de la verdad, y de que ha de ser piedra de toque de cualquier fundamento teórico futuro, porque debe ser deducible de él como un caso límite, tal como la electrostática es deducible de las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético



o como la termodinámica es deducible de la mecánica clásica. No obstante, no creo que la mecánica cuántica pueda servir como *punto de partida* en la búsqueda de este fundamento del mismo modo que, viceversa, no pueden hallarse a partir de la termodinámica (o respectivamente la mecánica estadística) los fundamentos de la mecánica.

A la vista de esta situación, parece ser enteramente justificable considerar con seriedad el problema de si se puede o no, de *alguna* manera, armonizar los fundamentos de la física de campo con los fenómenos cuánticos. ¿No es esta la única base que, con los instrumentos matemáticos de que se dispone en el presente, puede ser adaptada a las exigencias de la teoría de la relatividad general? Los físicos de hoy, en su mayoría, creen que ese intento es vano. Esta creencia puede tener sus raíces en el supuesto no justificado de que esa teoría, en una primera aproximación, tendría que llevarnos a las ecuaciones de la mecánica clásica para el movimiento de los corpúsculos o, al menos, a las ecuaciones diferenciales totales. En términos objetivos, hasta hoy no hemos llegado jamás a obtener una adecuada descripción teórica de campo de los corpúsculos libre de singularidades y *a priori* nada podemos decir acerca del comportamiento de esas entidades. Sin embargo, *una cosa* es segura: si una teoría de campo proporciona una representación de los corpúsculos libre de singularidades, en ese caso el comportamiento de los corpúsculos en el tiempo está determinado únicamente por las ecuaciones diferenciales del campo.

## VI. La teoría de la relatividad y los corpúsculos

Demostraré ahora, de acuerdo con la teoría de la relatividad general, que existen soluciones libres de singularidades para las ecuaciones de campo que pueden ser interpretadas como representando los corpúsculos. Aquí me limitaré a las partículas neutras porque, en otra publicación reciente, escrita en colaboración con el doctor Rosen, he tratado ya este problema en detalle y porque los elementos esenciales del problema pueden ser descritos por entero en el caso de dichas partículas.

El campo gravitatorio está descrito por completo mediante el tensor  $g_{\mu\nu}$ . En los símbolos de tres índices  $\Gamma_{\mu\nu}^{\sigma}$  aparecen también las contravariantes  $g^{\mu\nu}$  que se definen como los menores de  $g_{\mu\nu}$  divididos

por el determinante  $g(= |g_{\alpha\beta}|)$ . Con el fin de que los  $R_{ik}$  estén definidos y sean finitos, no es suficiente que haya en el entorno de todo punto del continuo un sistema de coordenadas en el que los  $g_{\nu\nu}$  y sus primeros cocientes diferenciales sean continuos y diferenciables, sino que también es necesario que el determinante  $g$  no adquiera valor nulo. Sin embargo, esta última restricción desaparece si se reemplazan las ecuaciones diferenciales  $R_{ik} = 0$  por  $g^2 R_{ik} = 0$ , cuyos miembros izquierdos son funciones racionales enteras de  $g_{ik}$  y de sus derivadas.

Estas ecuaciones tienen la solución centralmente simétrica dada por Schwarzschild

$$ds^2 = - \frac{1}{1 - 2m/r} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) + \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2.$$

Esta solución posee una singularidad en  $r = 2m$ , porque el coeficiente de  $dr^2$  (es decir,  $g_{11}$ ) se vuelve infinito sobre esta hipersuperficie. Sin embargo, si reemplazamos la variable  $r$  por  $\rho$  definida por la ecuación

$$\rho^2 = r - 2m$$

obtenemos

$$ds^2 = - 4(2m + \rho^2)d\rho^2 - (2m + \rho^2)^2(d\theta + \sin^2\theta d\varphi^2) + \frac{\rho^2}{2m + \rho^2} dt^2.$$

Esta solución se comporta con regularidad para todos los valores de  $\rho$ . La anulación del coeficiente de  $dt^2$  (es decir,  $g_{44}$ ) para  $\rho = 0$  resulta —es verdad— en la consecuencia siguiente: el determinante  $g$  se anula para ese valor. Pero con los métodos adoptados para escribir las ecuaciones de campo, esto no constituye una singularidad.

Si  $\rho$  varía de  $-\infty$  a  $+\infty$ ,  $r$  varía de  $+\infty$  a  $r = 2m$  y después otra vez a  $+\infty$ , en tanto que para los valores de  $r$  correspondientes a  $r < 2m$  no existen valores reales correspondientes de  $\rho$ . Por consiguiente, la solución de Schwarzschild se convierte en una solución regular mediante la representación del espacio físico como compuesto por dos «láminas» idénticas en contacto en toda la hipersuperficie  $\rho = 0$  (es decir,  $r = 2m$ ), sobre la cual el determinante  $g$  se anula. Denomi-

naremos «puente» a esa conexión entre las dos láminas (idénticas). De modo que la existencia de ese puente entre las dos láminas en el ámbito finito corresponde a la existencia de una partícula material neutra que se describe libre de singularidades.

La solución al problema del movimiento de las partículas neutras evidentemente equivale al descubrimiento de soluciones de las ecuaciones gravitatorias (escritas libres de denominadores), en cuanto contienen varios puentes.

La concepción esbozada aquí corresponde, *a priori*, a la estructura atómica de la materia en la medida en que el «puente» es por su naturaleza un elemento discreto. Además, vemos que la masa constante  $m$  de las partículas neutras debe necesariamente ser positiva, dado que ninguna solución libre de singularidades puede corresponder a la solución de Schwarzschild para un valor negativo de  $m$ . Sólo el examen de los distintos problemas de puente puede demostrar si este método teórico proporciona o no una explicación de la igualdad empíricamente demostrada de las masas de las partículas halladas en la naturaleza, y si toma en cuenta los hechos que la mecánica cuántica ha explicado de un modo tan extraordinario.

De una manera análoga es posible demostrar que las ecuaciones combinadas de la gravedad y la electricidad (con la elección adecuada del signo del miembro eléctrico en las ecuaciones gravitatorias) producen una representación-puente libre de singularidades del corpúsculo eléctrico. La más simple de las soluciones de este tipo es la que sirve para una partícula eléctrica sin masa pesante.

Hasta que no se consigan vencer las considerables dificultades matemáticas propias de la solución de los problemas de varios puentes, nada se puede decir respecto a la utilidad de la teoría desde el punto de vista físico. Sin embargo, este es en realidad el primer intento de elaboración consistente de una teoría de campo, que tiene la posibilidad de explicar las propiedades de la materia. A favor de este intento se puede agregar que se ha basado en las ecuaciones de campo relativistas más simples conocidas.

### *Resumen*

La física constituye un sistema lógico de pensamiento que está en estado de evolución, cuyas bases no pueden destilarse —por así decirlo— de la experiencia mediante un método inductivo, sino que

sólo pueden ser obtenidas por libre invención. La justificación (contenido de verdad) del sistema reside en la verificación de sus conclusiones por los sentidos, motivo por el cual la relación de estos con aquellas sólo puede ser captada en forma intuitiva. La evolución de la ciencia avanza en la dirección de una creciente simplicidad de la base lógica. Con el fin de lograr una mayor aproximación a ese objetivo tenemos que aceptar que la base lógica se separe más y más de los hechos de la experiencia y que el camino mental que une los fundamentos de la física con sus conclusiones, que se correlacionan con las experiencias sensoriales, se alargue y se dificulte de modo continuo.

Nuestra finalidad ha sido esbozar, tan brevemente como fuera posible, el desarrollo de los conceptos fundamentales en su dependencia de los hechos de la experiencia y del esfuerzo por lograr la perfección interna del sistema. Estas consideraciones pretenden iluminar el estado presente del problema, tal como yo lo veo. (Es inevitable que una exposición histórica esquemática esté teñida de subjetivismo.)

Trato de demostrar de qué manera están conectados entre sí y con la naturaleza de nuestra experiencia los conceptos de objeto material, espacio y tiempo objetivo y subjetivo. En la mecánica clásica los conceptos de espacio y tiempo se independizaron. El concepto de objeto material es reemplazado en los fundamentos de la física por el concepto de punto material, medio por el cual la mecánica se convierte fundamentalmente en atomista. La luz y la electricidad producen dificultades insuperables cuando se intenta erigir a la mecánica en base de toda la física. Así nos vemos llevados a la teoría de campo de la electricidad y, más adelante, a procurar que la base de la física entera sea el concepto de campo (después de una tentativa de compromiso con la mecánica clásica). Este esfuerzo conduce a la teoría de la relatividad (evolución de la noción de espacio y de tiempo hacia la de continuo con una estructura métrica).

Trato de demostrar, además, por qué en mi opinión la teoría cuántica no parece capaz de aportar una fundamentación adecuada de la física: tan pronto como se intenta considerar a la descripción teórica cuántica como una descripción *completa* del sistema o del fenómeno físico individual, surgen contradicciones.

Por otra parte, la teoría de campo es todavía incapaz de explicar la estructura molecular de la materia y de los fenómenos cuánticos.

Sin embargo, he mostrado que la convicción en la incapacidad de la teoría de campo para resolver estos problemas a través de sus métodos está basada en un prejuicio.

### **Los fundamentos de la física teórica**

Tomado de *Science*, Washington, D. C., 24 de mayo de 1940.

La ciencia es un intento de lograr que la diversidad caótica de nuestras experiencias sensoriales corresponda a un sistema de pensamiento lógicamente uniforme. En este sistema cada experiencia debe estar en correlación con la estructura teórica de tal modo que la relación resultante sea única y convincente.

Las experiencias sensoriales representan lo dado. Pero la teoría que tendrá que interpretarlas está hecha por el hombre. Se trata del resultado de un proceso de adaptación de carácter extremadamente arduo: hipotético, nunca definitivo, siempre sujeto a la crítica y a la duda.

La manera científica de formar conceptos se distingue de la que utilizamos en la vida de cada día no sustancialmente, sino sólo en la mayor precisión de las definiciones de los conceptos y las conclusiones; una elección más esmerada y sistemática del material experimental; una mayor economía lógica. Esto último significa el esfuerzo por reducir todos los conceptos y correlaciones a la menor cantidad posible de conceptos y axiomas básicos lógicamente independientes.

Lo que denominamos física abarca ese grupo de ciencias naturales que fundamentan sus conceptos en mediciones, y cuyos conceptos y proposiciones se prestan a una formulación matemática. Por consiguiente, su campo se define como aquella parte de la suma total de nuestro conocimiento que es capaz de ser expresada en términos matemáticos. Con el progreso de la ciencia, el campo de la física se ha expandido tanto que sólo parece estar limitado por las limitaciones del propio método.

La mayor parte de la investigación física está dedicada al desarrollo de las diversas ramas de la física, en cada una de las cuales el objeto es la comprensión teórica de campos de experiencia más o menos restringidos, y en cada una de las cuales las leyes y los conceptos

permanecen unidos a la experiencia lo más estrechamente posible. Esta disciplina científica, con su siempre creciente especialización, es la que ha evolucionado la vida práctica en los últimos siglos y ha dado nacimiento a la posibilidad de que el hombre se haya visto liberado, por fin, del duro peso del esfuerzo físico.

Por otra parte, desde el comienzo mismo, siempre ha estado presente el intento de hallar una base teórica unificadora de todas estas ramas, que consista en un mínimo de conceptos y relaciones fundamentales, y de la que todos los conceptos y las relaciones de cada rama puedan ser derivados por un proceso lógico. A esto nos referimos al hablar de la búsqueda de un fundamento para toda la física. La firme creencia de que ese objetivo último puede ser alcanzado es la fuente principal de la devoción apasionada que siempre ha animado al investigador. En este sentido están dedicadas las siguientes observaciones sobre los fundamentos de la física.

De lo ya dicho surge con claridad que la palabra fundamentos en este contexto no tiene exactamente el mismo significado que los fundamentos de un edificio. Desde el punto de vista lógico, por supuesto, las diversas leyes de la física se asientan sobre esos fundamentos. Pero en tanto que un edificio puede verse seriamente dañado por una fuerte tormenta o unas inundaciones y, sin embargo, sus fundamentos permanecen intactos, en el ámbito de la ciencia el fundamento lógico está siempre expuesto al gran peligro que proviene de las nuevas experiencias o del nuevo conocimiento; este peligro es mucho mayor que el que corren las distintas ramas, a causa del mayor contacto que estas guardan con la experiencia. En la conexión entre el fundamento y cada una de las partes se asienta su gran significación y, asimismo, el mayor de los peligros ante cualquier nuevo factor. Cuando comprendemos esto, nos sorprende que las llamadas épocas revolucionarias de la física no hayan cambiado sus fundamentos más a menudo de un modo más integral.

El primer esfuerzo por establecer una fundamentación teórica uniforme fue la obra de Newton. En su sistema todo se reduce a los siguientes conceptos: 1) puntos de masa con masa invariable; 2) acción a distancia entre cualquier par de puntos de masa; 3) ley del movimiento para el punto de masa. Si hablamos en términos estrictos, no se trata de un fundamento que lo abarque todo, porque se formuló una ley explícita sólo para las acciones a distancia de la gravedad; en tanto que nada se estableció *a priori* por otras acciones

a distancia, a excepción de la ley de igualdad de acción y reacción. Además, el mismo Newton comprendió en todo su alcance que el tiempo y el espacio eran elementos esenciales de su sistema, como factores efectivos desde el punto de vista físico, aunque sólo lo fueran por inferencia.

Esta base newtoniana resultó muy fructífera y fue considerada definitiva hasta fines del siglo XIX. No sólo proporcionó resultados precisos en el caso de los movimientos de los cuerpos celestes, sino que también proporcionó una teoría de la mecánica de masas discretas y continuas, una explicación simple del principio de conservación de la energía y una teoría térmica completa y brillante. La explicación de los fenómenos electrodinámicos dentro de los límites del sistema de Newton era más forzada. Y lo menos convincente, desde un primer momento, fue la teoría de la luz.

No es sorprendente que Newton prestara oídos sordos a una teoría ondulatoria de la luz, porque tal teoría resultaba poco acorde con sus fundamentos teóricos. El supuesto de que el espacio estaba ocupado por un medio formado por puntos materiales que propagaban las ondas luminosas, sin exhibir ninguna otra propiedad mecánica, debe de haberle parecido muy artificial. Los argumentos empíricos más poderosos en favor de la naturaleza ondulatoria de la luz, velocidades de propagación fijas, interferencia, difracción, polarización, o bien eran desconocidos o bien no se conocían en una síntesis bien ordenada. La adhesión de Newton a su teoría corpuscular de la luz estaba justificada.

A lo largo del siglo XIX la disputa fue dirimida en favor de la teoría ondulatoria; sin embargo, no surgió ninguna seria duda con respecto a los fundamentos mecánicos de la física, en primer lugar porque nadie sabía dónde hallar un fundamento de otro tipo. Sólo con mucha lentitud, bajo la irresistible presión de los hechos, se desarrolló una nueva fundamentación: la física de campos.

A partir de la época de Newton, la teoría de la acción a distancia fue constantemente puesta en entredicho. No faltaron los esfuerzos para explicar la gravedad mediante una teoría cinética, es decir, una teoría basada en las fuerzas de colisión de partículas de masa hipotéticas. Pero los intentos fueron superficiales y no rindieron frutos. El extraño papel desempeñado por el espacio (o sistema inercial) dentro del fundamento mecánico fue también claramente reconocido y criticado con especial lucidez para Ernst Mach.

El gran cambio lo aportaron Faraday, Maxwell y Hertz, en realidad de una manera casi inconsciente e incluso en contra de sus voluntades. Los tres investigadores, durante sus vidas, se consideraron adherentes de la teoría mecánica. Hertz halló la forma más simple de las ecuaciones del campo electromagnético y declaró que toda teoría que llevara a esas ecuaciones era una teoría maxwelliana. Sin embargo, hacia el fin de su breve vida, escribió un ensayo en el que presentaba como fundamento de la física una teoría mecánica liberada del concepto de fuerza.

Para nosotros, los que —por así decirlo— mamamos las ideas de Faraday junto con la leche materna, es difícil apreciar la grandeza y audacia de esos hombres. Faraday debe haber comprendido con un instinto infalible la naturaleza artificial de todos los intentos de referir los fenómenos electromagnéticos a acciones a distancia entre partículas que reaccionen entre sí. En un papel cubierto de limaduras de hierro, ¿cómo podía saber cada una de ellas de la existencia de partículas eléctricas moviéndose en un conductor cercano? Todas esas partículas eléctricas unidas parecían crear a su alrededor un estado que a su vez producía cierto ordenamiento de las limaduras. Estos estados espaciales, hoy llamados campos, en el caso de ser correctamente conocidos en su estructura geométrica y en su acción interdependiente, proporcionarían la clave para comprender las misteriosas interacciones electromagnéticas. Y de esto Faraday estaba convencido. Concibió, pues, estos campos como estados de tensión mecánica en un medio que llenaba el espacio, similar a los estados de tensión en un cuerpo elásticamente distendido. Por aquel tiempo esta era la única manera de concebir estados que estaban aparentemente distribuidos de modo continuo en el espacio. La peculiar interpretación mecánica de estos campos permaneció en un segundo plano: una especie de aplacamiento de la conciencia científica en vista de la tradición mecánica de la época de Faraday. Con el auxilio de estos nuevos conceptos de campo, Faraday estuvo en condiciones de formar un concepto cualitativo de todo el conjunto de efectos electromagnéticos descubiertos por él y sus predecesores. La formulación precisa de las leyes de espacio-tiempo de esos campos fue obra de Maxwell. ¡Los sentimientos que debió experimentar al comprobar que las ecuaciones diferenciales que él había formulado indicaban que los campos electromagnéticos se expandían en forma de ondas polarizadas y a la velocidad de la luz! A muy



pocos hombres en el mundo les ha sido concedida una experiencia de esa índole. En ese momento crucial seguro que no se le ocurrió que la enigmática naturaleza de la luz, en apariencia resuelta por completo, seguiría desconcertando a las generaciones posteriores. Entre tanto, llevó todavía varias décadas comprender el pleno significado del descubrimiento de Maxwell: tan enorme era el salto que su genio había obligado a dar a la física. Sólo después de que Hertz hubo demostrado experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas de Maxwell, se quebrantó la resistencia ante la nueva teoría.

Pero si el campo electromagnético puede existir como una onda independiente de la fuente material, la interacción electrostática ya no puede ser explicada como acción a distancia. Y lo que era verdad para la acción eléctrica no podía ser negado para la gravedad. En todas partes, las acciones a distancia de Newton daban origen a campos que se expandían a velocidad finita.

De los fundamentos de Newton quedaban ahora sólo los puntos materiales de masa, sujetos a las leyes del movimiento. Pero J. J. Thomson señaló que un cuerpo en movimiento que lleva una carga eléctrica, según la teoría de Maxwell, posee un campo magnético cuya energía se comporta precisamente como un aumento de energía cinética sobre el cuerpo. Si una parte de la energía cinética, consiste, pues, en energía de campo, ¿no podría ser esto verdad de toda la energía cinética? ¿Tal vez sería posible explicar dentro de la teoría de campos la propiedad básica de la materia, su inercia? Esta pregunta condujo hacia una interpretación de la materia en términos de la teoría de campos, que habría de proporcionar una explicación de la estructura atómica de la materia. Prontamente se advirtió que la teoría de Maxwell no podía cumplir con ese programa. A partir de entonces, muchos científicos han empeñado todo su esfuerzo en tratar de completar la teoría de campos mediante alguna generalización que incluyera una teoría de la materia. Pero hasta el presente esos esfuerzos no han sido coronados con el éxito. Cuando se trata de forjar una teoría, no basta tener una clara concepción del objetivo. También se ha de fijar un punto de vista formal que restrinja suficientemente la ilimitada variedad de posibilidades. Hasta estos momentos no se ha hallado; por ello, la teoría de campos no ha podido proporcionar una fundamentación de toda la física.

A lo largo de varias décadas, la mayoría de físicos se aferraron a la convicción de que se encontraría una subestructura mecánica a la

teoría de Maxwell. Pero los resultados insatisfactorios de sus esfuerzos condujeron a una gradual aceptación de los nuevos conceptos de campo como fundamentales e irreducibles; en otras palabras: los físicos se resignaron a dejar de lado la idea de una fundamentación mecánica.

Y así, los físicos se remitieron a un programa basado en la teoría de campos. Pero no podía llamarse un fundamento, en razón de que nadie podía decir si una teoría de campos consistente podría llegar a explicar la gravedad, por un lado, y los componentes elementales de la materia, por otro. En ese estado de cosas, era necesario considerar las partículas materiales como puntos de masa sujetos a las leyes del movimiento de Newton. Este fue el procedimiento seguido por Lorentz al crear su teoría del electrón y la teoría de los fenómenos electromagnéticos de los cuerpos en movimiento.

A este punto habían llegado las concepciones fundamentales a fines del siglo pasado. Se había logrado un inmenso progreso en la penetración y comprensión de importantes grupos de fenómenos nuevos; pero la erección de un fundamento unificado para la física parecía, sin duda, muy remota. Y esto se ha visto agravado, incluso, por los avances posteriores. Lo ocurrido en este siglo se caracteriza por dos sistemas teóricos esencialmente independientes el uno del otro: la teoría de la relatividad y la teoría cuántica. Los dos sistemas no se contradicen entre sí en forma directa, pero parecen estar muy alejados de poderse fundir en una teoría unificada. Debemos discutir las ideas básicas de esos dos sistemas.

La teoría de la relatividad ha surgido de los esfuerzos realizados para mejorar, en el ámbito de la economía lógica, los fundamentos de la física tal como existían a fines del siglo pasado. La llamada teoría de la relatividad especial o restringida está basada en el hecho de que las ecuaciones de Maxwell (y así la ley de la propagación de la luz en el espacio vacío) se convierten en ecuaciones de la misma forma cuando son sometidas a la transformación de Lorentz. Esta propiedad formal de las ecuaciones de Maxwell se complementa con el buen conocimiento empírico de que las leyes de la física son las mismas con respecto a todos los sistemas inerciales. Por esta vía se llega al siguiente resultado: la transformación de Lorentz —aplicada a las coordenadas de espacio y tiempo— debe regir la transición de un sistema inercial a otro. El contenido de la teoría de la relatividad restringida puede, en consecuencia, resumirse en una sola expre-

sión: todas las leyes naturales deben estar condicionadas de tal manera que resulten covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz. De esto se concluye que la simultaneidad de los sucesos distantes no es un concepto invariante y que las dimensiones de los cuerpos rígidos y la marcha de los relojes dependen de sus estados dinámicos respectivos. Otra consecuencia posterior fue la modificación de las leyes del movimiento de Newton, en los casos en que la velocidad de un cuerpo dado no era pequeña comparada con la velocidad de la luz. De aquí se dedujo el principio de la equivalencia de masa y energía; las leyes de conservación de la masa y de la energía se convirtieron en una sola y la misma. Una vez que se hubo demostrado que la simultaneidad era relativa y dependía del marco de referencia, desapareció toda posibilidad de mantener las acciones a distancia dentro de los fundamentos de la física, porque ese concepto suponía el carácter absoluto de la simultaneidad (debe ser posible establecer la posición de dos puntos de masa que estén en interacción «al mismo tiempo»).

La teoría de la relatividad general debe su origen al esfuerzo por explicar un hecho conocido desde los tiempos de Galileo y Newton pero que hasta el presente eludía toda interpretación teórica: la inercia y el peso de un cuerpo, dos cosas en sí mismas por completo distintas, son medidas por una misma constante, la masa. A partir de esta correspondencia se sigue que es imposible descubrir por medios experimentales si un sistema dado de coordenadas es acelerado o si su movimiento es recto y uniforme y los efectos observados deben su origen al campo gravitatorio (este es el principio de equivalencia de la teoría de la relatividad general). Esto destruye los conceptos del sistema inercial, tan pronto como aparece la gravedad. Debemos señalar aquí que el sistema inercial es un punto débil de la mecánica galileico-newtoniana. Se presupone en ella una misteriosa propiedad del espacio físico, que condiciona el tipo de sistemas de coordenadas para el que resultan válidas la ley de la inercia y las leyes newtonianas del movimiento.

Estas dificultades son evitables gracias al siguiente postulado: las leyes naturales deben formularse de tal manera que su forma sea idéntica para sistemas de coordenadas de cualquier clase de estados dinámicos. Llevar esto a cabo es la tarea de la teoría de la relatividad general. Por otra parte, deducimos de la teoría restringida la existencia de una métrica de Riemann dentro del continuo espacio-

tiempo que, de acuerdo con el principio de equivalencia, describe tanto el campo gravitatorio como las propiedades métricas del espacio. Si suponemos que las ecuaciones de campo de la gravedad son diferenciales de segundo orden, la ley de campos quedará determinada de un modo claro.

Además de este resultado, la teoría libera a la física de campos de los problemas —en común con la mecánica de Newton— derivados de la adscripción al espacio de aquellas propiedades físicas independientes que hasta entonces habían quedado ocultas por el uso de un sistema inercial. Pero no se puede aducir que estas partes de la teoría de la relatividad general, que hoy pueden ser consideradas definitivas, hayan aportado a la física una fundamentación completa y satisfactoria. En primer lugar, el campo total aparece en ella compuesto por dos partes lógicamente inconexas, la gravitatoria y la electromagnética. Y en segundo término esta teoría, tal como las primeras teorías de campos, de momento no ha proporcionado una explicación de la estructura atómica de la materia. Este fracaso está, quizá, conectado con el hecho de que hasta el presente no haya contribuido en nada a la comprensión de los fenómenos cuánticos. Para abarcar estos fenómenos, los físicos se han visto obligados a adoptar métodos enteramente nuevos, cuyas características básicas analizaremos a continuación.

En el año 1900, en el curso de una investigación puramente teórica, Max Planck hizo un descubrimiento muy importante: la ley de la radiación de los cuerpos como función de la temperatura no podía ser derivada en forma exclusiva de las leyes de la electrodinámica de Maxwell. Para llegar a resultados coherentes con la experiencia, la radiación de una frecuencia dada debía ser tratada como si estuviera integrada por átomos de energía con energía  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante universal de Planck. Durante los años posteriores, se demostró que la luz era siempre producida y absorbida en esos cuantos de energía. En particular, Niels Bohr fue capaz de comprender la estructura del átomo, bajo el supuesto de que los átomos sólo pueden poseer valores discretos de energía y de que las transiciones discontinuas entre ellos están conectadas con la emisión o la absorción de esos cuantos de energía. Esto arrojó alguna luz sobre el hecho de que en su estado gaseoso los elementos y sus componentes sólo irradian y absorben luz de ciertas frecuencias muy definidas. Esto era por completo inexplicable dentro del esquema de las teo-

rías que existían por entonces. Estaba claro que, al menos dentro del campo de los fenómenos atómicos, el carácter de todo lo que sucede está determinado por estados discretos y por transiciones aparentemente discontinuas entre ellos, donde la constante  $h$  de Planck jugaba un papel decisivo.

El siguiente paso fue dado por de Broglie, quien se preguntó cómo podían entenderse los estados discretos mediante la ayuda de los conceptos corrientes, encontrando un paralelo con las ondas estacionarias, como por ejemplo en el caso de las frecuencias adecuadas de los tubos de órgano y de las cuerdas, en acústica. Es cierto que las acciones de las ondas del tipo aquí requerido eran desconocidas, pero podían ser construidas y sus leyes matemáticas formuladas mediante el uso de la constante  $h$  de Planck. De Broglie concibió un electrón que giraba en torno al núcleo atómico como si estuviera conectado con un hipotético tren de ondas y así hizo comprensible, hasta cierto punto, el carácter discreto de las trayectorias «permitidas» de Bohr por el carácter estacionario de las ondas correspondientes.

Ahora bien, en la mecánica, el movimiento de los puntos materiales está determinado por fuerzas o campos de fuerza que actúan sobre ellos. Debía esperarse, pues, que esos campos de fuerza también influenciaran los campos ondulatorios de de Broglie de una manera análoga. Erwin Schrödinger demostró de qué modo debía ser tomada en cuenta esta influencia, volviendo a interpretar ciertas formulaciones de la mecánica clásica con un ingenioso método. Incluso consiguió extender la teoría ondulatoria mecánica hasta el punto que, sin la introducción de ninguna hipótesis adicional, se hizo aplicable a cualquier sistema mecánico compuesto por un número arbitrario de puntos de masa, es decir, poseedor de un número arbitrario de grados de libertad. Esto era posible porque un sistema mecánico que consista en  $n$  puntos de masa es matemáticamente equivalente, en un grado considerable, a un único punto de masa que se mueva en un espacio de  $3n$  dimensiones.

Sobre la base de esta teoría fue posible obtener una representación sorprendentemente buena de una inmensa variedad de hechos que, de otro modo, se mostraban incomprensibles por completo. Pero curiosamente, se fracasó en un punto: se comprobó que era imposible asociar con estas ondas de Schrödinger movimientos precisos de los puntos de masa; y esto, después de todo, había sido el objetivo original de todo el esfuerzo.

La dificultad parecía insuperable, hasta el momento en que fue solucionada por Born, con un método tan simple como inesperado. Los campos ondulatorios de de Broglie-Schrödinger no debían interpretarse como descripciones matemáticas de cómo se produce de verdad un hecho en el tiempo y el espacio, aun cuando —por supuesto— tienen que ver con ese hecho. En realidad, esos campos son una descripción matemática de lo que podemos realmente saber acerca del sistema, y sólo sirven para hacer afirmaciones estadísticas y predicciones de los resultados de todas las mediciones que podamos llevar a cabo sobre el sistema.

Ilustraré ahora estas características generales de la mecánica cuántica por medio de un ejemplo sencillo. Consideraremos un punto de masa que está dentro de una región restringida  $G$  porque sobre él se ejercen fuerzas de valor finito. Si la energía cinética de ese punto de masa está por debajo de cierto límite, de acuerdo con los principios de la mecánica clásica, nunca podrá salir de la región  $G$ . Pero de acuerdo con la mecánica cuántica, el punto en cuestión, después de un período que no es predecible inmediatamente, está en condiciones de abandonar la región  $G$  en una dirección impredecible y huir hacia el espacio lindante. De acuerdo con Gamow, este es un modelo simplificado de la desintegración radiactiva.

El tratamiento teórico cuántico de este caso es el siguiente: en el tiempo  $t_0$  tenemos un sistema de ondas de Schrödinger dentro por completo de  $G$ . Pero a partir del tiempo  $t_0$  y en adelante, las ondas abandonan el interior de la región  $G$  en todas las direcciones, de tal manera que la amplitud de la onda de salida es pequeña si se la compara con la amplitud inicial del sistema de ondas dentro de  $G$ . Cuanto más se extienden estas ondas, tanto más disminuye la amplitud de las ondas que se hallan dentro de  $G$  y, por tanto, la intensidad de las últimas ondas que salen de  $G$ . Sólo después de que haya transcurrido un tiempo infinito se agotará la provisión de ondas dentro de  $G$ , ya que las ondas exteriores se habrán extendido sobre un espacio creciente.

¿Pero qué relación guarda este proceso ondulatorio con el primer objeto de nuestro interés, la partícula originalmente encerrada en  $G$ ? Para responder a esta pregunta debemos imaginar algún sistema que nos permita efectuar mediciones sobre la partícula. Por ejemplo: imaginemos que en algún punto del espacio circundante hay una pantalla de tal naturaleza que la partícula, al ponerse en

contacto con ella queda adherida. Después, a partir de la intensidad de las ondas que choquen contra la pantalla en determinado punto, extraeremos conclusiones acerca de la probabilidad de que la partícula haya chocado contra la pantalla en ese lugar y en ese momento. Tan pronto como la partícula ha chocado contra algún punto particular de la pantalla, la totalidad del campo ondulatorio pierde toda su significación física; su único fin era hacer predicciones en términos de probabilidad del lugar y del momento en que la partícula chocaría contra la pantalla (o, por ejemplo, de su momento en el instante en que chocara contra la pantalla).

Todos los demás casos son análogos. El objetivo de la teoría es determinar la probabilidad de los resultados de la medición sobre un sistema en un momento determinado. Por otra parte, no pretende proporcionar una representación matemática de lo que realmente está presente o sucede en el espacio y el tiempo. En este punto, la teoría cuántica de hoy difiere en forma fundamental de todas las teorías previas de la física, tanto las mecánicas como las de campos. En lugar de un modelo de los hechos espacio-temporales reales, brinda las distribuciones de probabilidad de posibles mediciones como funciones del tiempo.

Debe admitirse que la nueva concepción teórica se debió no a la fantasía de unos científicos, sino al peso de los hechos empíricos. Todos los esfuerzos por representar las características ondulatorias de partícula observados en la luz y la materia, recurriendo en forma directa al modelo espacio-tiempo, hasta el presente han desembocado en el fracaso. Y Heisenberg ha demostrado de modo convincente, desde un punto de vista empírico, que cualquier decisión en cuanto a una estructura de la naturaleza rigurosamente determinista está descartada de una manera definitiva, en razón de la estructura atómica de nuestro aparato experimental. Por ello es probable que esté descartado que algún conocimiento futuro pueda obligar a la física a abandonar su fundamento actual teórico de carácter estadístico, en favor de otro determinista, que tratara con la realidad física en forma directa. Desde el punto de vista lógico, el problema parece ofrecer dos posibilidades, frente a las cuales, en principio, estamos en condiciones de elegir. En última instancia, la elección se hará de acuerdo con el tipo de descripción que produzca la formulación más simple de los fundamentos, hablando en términos de lógica. De momento, carecemos de toda teoría determinista

que describa directamente los propios sucesos y esté en consonancia con los hechos.

Tal como están las cosas, debemos admitir que no poseemos ninguna base teórica para la física, ninguna base a la que se pueda considerar el fundamento lógico de esta disciplina. La teoría de campos, hasta el momento presente, ha fracasado en la esfera molecular. Comúnmente se acepta que el único principio que podría servir de base a la teoría cuántica sería el que representara una translación de la teoría de campos a un esquema de la estadística cuántica. Nadie está hoy en condiciones de aventurarse a asegurar si tal cosa podrá producirse de una manera satisfactoria.

Algunos físicos, y yo mismo entre ellos, no pueden creer que debamos abandonar para siempre la idea de una representación directa de la realidad física en el espacio y en el tiempo; o que tengamos que aceptar el criterio que sostiene que los sucesos naturales son análogos a un juego de azar. Cada hombre debe elegir la dirección de sus esfuerzos; y también cada hombre puede encontrar solaz en la magnífica frase de Lessing que asegura que la búsqueda de la verdad es más preciosa que su posesión.

## **El lenguaje común de la ciencia**

Grabación emitida por radio en ocasión de la Conferencia científica de Londres, el 28 de septiembre de 1941. Publicada en *Advancement of Science*, Londres, volumen 2, N.º 5.

El primer paso hacia el lenguaje consistió en unir acústicamente, o de cualquier otra manera, las impresiones sensoriales con unos signos conmutables. Casi todos los animales sociales han llegado a ese primitivo tipo de comunicación, al menos hasta cierto grado. Un desarrollo de mayor nivel se alcanza cuando son establecidos y comprendidos unos signos adicionales, que establecen relaciones con los primeros signos que señalaban impresiones sensoriales. En este estado ya es posible dar noticia de algunas series complejas de impresiones; podemos decir que el lenguaje ha nacido. Si la función del lenguaje es producir un entendimiento, han de existir reglas sobre las relaciones entre los signos, por una parte, y debe haber una correspondencia estable entre los signos y las impresiones, por otra



parte. En su infancia, los individuos con un mismo lenguaje asimilan estas reglas y estas relaciones, fundamentalmente gracias a la intuición. Cuando el hombre adquiere conciencia de las reglas sobre las relaciones entre signos, queda establecida la denominada gramática de la lengua.

En una etapa muy primaria, las palabras pueden corresponder en forma directa a las impresiones. En otra etapa, más tardía, esta conexión directa se pierde, en la medida en que algunas palabras se relacionan con alguna percepción sólo en el caso de utilizarse junto con otras palabras (por ejemplo, vocablos como «es», «o», «cosa»). En esta situación, son los grupos de palabras, más que las palabras aisladas, los que se refieren a las percepciones. Así, cuando el lenguaje se independiza parcialmente del trasfondo de impresiones, se ha ganado una mayor coherencia interna.

Tan sólo en este desarrollo posterior, en el que muy a menudo se hace uso de los comúnmente denominados conceptos abstractos, el lenguaje se convierte en un verdadero instrumento del razonamiento en el exacto sentido de la palabra. Pero, asimismo, este desarrollo convierte al lenguaje en una peligrosa fuente de error y engaño. Todo depende del grado en que las palabras y las combinaciones de palabras se correspondan con el mundo de las impresiones.

¿Qué es lo que determina que exista una conexión tan íntima entre el lenguaje y el pensamiento? ¿No hay pensamiento sin el uso del lenguaje, es decir, mediante conceptos y combinaciones de conceptos para los cuales no haya necesariamente que pensar en palabras? ¿No hemos luchado cada uno de nosotros, alguna vez, por encontrar las palabras, a pesar de que la conexión entre las «cosas» ya se mostraba por completo clara?

Podríamos decidarnos a atribuir al acto del pensar una independencia total ante el lenguaje, si el individuo formara o fuera capaz de formar sus conceptos sin la guía verbal de su entorno. Sin embargo, en la mayoría de casos, la estructura mental de una persona que hubiera crecido en tales condiciones, sería muy pobre. Por consiguiente, debemos concluir que el desarrollo mental del individuo y su modo de formar los conceptos depende del lenguaje hasta un nivel muy elevado. Esto nos hace comprender hasta qué punto un mismo lenguaje significa una misma mentalidad. En este sentido, pensamiento y lenguaje están unidos entre sí.

¿Cuál es la diferencia que existe entre el lenguaje de la ciencia y el lenguaje tal como habitualmente entendemos la palabra? ¿Cómo

puede ser que el lenguaje científico sea internacional? La ciencia se esfuerza por lograr una extremada agudeza y claridad de conceptos con respecto a la relación de estos entre sí y a su correspondencia con los datos sensoriales. A modo de ilustración, analicemos la geometría de Euclides y el álgebra. Ambas disciplinas operan con un pequeño número de conceptos y símbolos, respectivamente, independientemente introducidos, tales como el número entero, la recta, el punto, así como los signos de las operaciones fundamentales, es decir, las conexiones entre esos conceptos fundamentales. Esta es la base para la construcción y la definición, respectivamente, de todos los demás enunciados y conceptos. La conexión entre conceptos y enunciados por una parte y por otra los datos sensoriales, se establece ejecutando acciones como contar y medir, cuyo resultado está suficientemente bien determinado.

El carácter supranacional de los conceptos científicos y del lenguaje científico está fundamentado en el hecho de que hayan sido establecidos por los mejores cerebros de todos los países y de todos los tiempos. En solitario, y sin embargo a través de un cooperativo en lo que se refiere al efecto final, esos hombres han creado las herramientas espirituales para las revoluciones técnicas que han transformado la vida de la humanidad en los últimos siglos. Su sistema de conceptos ha servido de guía en medio del enorme caos de percepciones, y así hemos sido capaces de aprender a captar verdades generales a partir de observaciones particulares.

¿Qué esperanzas y qué temores aporta el método científico a la humanidad? Creo que esta no es la forma correcta de plantear la pregunta. Lo que esta herramienta haya de producir en las manos del hombre depende por completo de la naturaleza de los objetivos que permanecen vivos en esta humanidad. Una vez fijado el objetivo, el método científico proporciona los medios para realizarlo. Pero no puede brindar los objetivos mismos. El método científico en sí no nos hubiera conducido a ninguna parte y ni siquiera hubiera visto la luz sin una lucha apasionada para alcanzar un entendimiento claro.

En mi opinión, la perfección de los medios y la confusión de los objetivos parece ser la característica de nuestros tiempos. Si deseamos con sinceridad y apasionamiento la seguridad, el bienestar y el libre desarrollo del talento de todos los hombres, no hemos de carecer de los medios necesarios para llegar a conseguirlo. Aun cuando

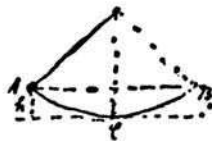
sólo una pequeña parte de la humanidad luche por esos fines, su superioridad terminará por imponerse, con el transcurso del tiempo.

## **$E = MC^2$**

Tomado de *Science Illustrated*, Nueva York, abril de 1946.

Con el fin de comprender la ley de la equivalencia de la masa y la energía, debemos remontarnos a dos principios de conservación o «equilibrio» que, independientes el uno del otro, han ocupado un elevado lugar en la física anterior a la teoría de la relatividad. Se trata del principio de la conservación de la energía y del principio de la conservación de la masa. El primero, enunciado por Leibnitz en tiempos tan lejanos como el siglo XVII, fue desarrollado en el siglo XIX esencialmente como corolario de un principio de la mecánica.

Consideremos, por ejemplo, un péndulo cuya masa oscila entre los puntos *A* y *B*. En esos puntos la masa *m* es mayor que en *C* por la cantidad *h*; *C* (véase el dibujo) es el punto más bajo del recorrido.



Dibujo del manuscrito de Albert Einstein.

En *C*, por otra parte, la altura de elevación es cero y la masa tiene una velocidad *v*. Es como si la altura de elevación pudiera ser convertida por completo en velocidad y viceversa. La relación exacta se expresaría así:  $mgh = \frac{m}{2} v^2$ , con *g* representando la aceleración de la gravedad. Aquí es interesante señalar que esta relación es independiente tanto de la longitud del péndulo como de la forma de la trayectoria que describe la masa.

El significado es que algo permanece constante a través del proceso y que ese algo es la energía. En *A* y *B* se trata de una energía de posición o «potencial»; en *C* tenemos una energía de movimiento o energía «cinética». Si este concepto es correcto, la suma  $mgh + m \frac{v^2}{2}$

tendrá que tener el mismo valor para cualquier posición del péndulo, si se determina que  $h$  representa la altura por encima de  $C$  y  $v$  representa la velocidad en ese punto de la trayectoria del péndulo. Se ha demostrado que esa es, precisamente, la situación. Al generalizar este principio se ha obtenido la ley de la conservación de la energía mecánica. ¿Pero qué sucede cuando la fricción detiene al péndulo?

La respuesta a tal pregunta fue obtenida en el estudio de los fenómenos térmicos. Basado sobre el supuesto de que el calor es una sustancia indestructible que fluye desde un objeto más caliente hacia otro más frío, este estudio nos proporcionó un principio de «conservación del calor». Por otra parte, desde tiempos inmemoriales se sabe que el calor puede ser producido por fricción, tal como lo hacían los indios con un par de palos. Durante largo tiempo los físicos han sido incapaces de dar cuenta de este tipo de «producción» de calor. Sus dificultades fueron superadas cuando se estableció en forma satisfactoria que, para cada cantidad de calor producida por fricción, una cantidad exactamente proporcional de energía debe ser consumida. Así se ha llegado al principio de la «equivalencia de trabajo y calor». Con nuestro péndulo, por ejemplo, la energía mecánica se convierte en calor merced a la fricción, y de manera gradual.

De esta forma los principios de la conservación de las energías mecánica y térmica se fundieron en uno solo. A raíz de esto, los físicos se convencieron de que el principio de conservación podía ser extendido aún más, para llegar a abarcar los procesos químicos y electromagnéticos, es decir, que podía ser aplicado a todos los campos. Se supuso que en nuestro sistema físico existía una suma total de energías, que se mantenía constante a través de todos los cambios que se produjeran.

Por lo que respecta al principio de conservación de la masa, esta se define como la resistencia que un cuerpo opone a su aceleración (masa inerte). También se la puede medir por el peso del cuerpo (masa pesante). Que estas dos definiciones, tan radicalmente diferentes, conduzcan a un mismo valor de la masa de un cuerpo es un hecho de verdad asombroso. De acuerdo con aquel principio —es decir, que las masas permanecen invariables a través de los cambios químicos o físicos— la masa representa la cualidad esencial (por invariable) de la materia. El calentamiento, la fusión, la vaporización

o las combinaciones en compuestos químicos no llegarán a alterar la masa total.

Los físicos habían aceptado este principio hasta hace unas pocas décadas. Pero frente a la teoría de la relatividad especial este principio resultó poco satisfactorio. Por consiguiente, fue fusionado con el principio de energía, tal como, hace unos sesenta años, el principio de conservación de la energía mecánica se había combinado con el principio de la conservación del calor. Podemos decir que el principio de conservación de la energía, después de haberse tragado el de conservación del calor, ahora se disponía a tragar el de conservación de la masa y erigirse en único señor.

Es muy corriente expresar la equivalencia de masa y energía (aunque un tanto inexactamente) mediante la fórmula  $E = mc^2$ , donde  $c$  representa la velocidad de la luz, sobre unos 300.000 kilómetros por segundo.  $E$  es la energía que está contenida en un cuerpo fijo;  $m$  es la masa. La energía que pertenece a la masa  $m$  es igual a esta masa, multiplicada por el cuadrado de la enorme velocidad de la luz, lo que equivale a decir una enorme cantidad de energía para cada unidad de masa.

Pero si cada gramo de materia contiene esa tremenda energía, ¿por qué no ha sido advertida durante tanto tiempo? La respuesta es bastante simple: en la medida en que la energía no se pierde externamente, es imposible que sea observada. Es como si un hombre dueño de grandes riquezas no pudiera jamás gastar ni dar un céntimo; nadie sabría cuán rico es.

Ahora podemos invertir la relación y decir que un aumento de  $E$  en la cantidad de energía debe estar acompañado por un aumento de  $\frac{E}{c^2}$  en la masa. Es posible suministrar energía a la masa con facilidad: por ejemplo, calentándola diez grados. ¿Y por qué no medir el aumento de la masa, o el aumento del peso, relacionado con este cambio? El problema estriba en que en el aumento de la masa el enorme factor  $c^2$  se presenta en el denominador de la fracción. En tal caso, el aumento es demasiado pequeño para ser medido en forma directa, incluso con la más sensible de las balanzas.

Para que un aumento de masa sea detectable, el cambio de energía por unidad de masa tendrá que ser enormemente grande. Sabemos sólo de una esfera en la que tales cantidades de energía por unidad de masa son liberadas: la desintegración radiactiva. Para

describirlo de manera esquemática, podemos decir que el proceso es así: un átomo de masa  $M$  se divide en dos átomos de masas  $M'$  y  $M''$ , que se separan con una tremenda energía cinética. Si imaginamos a esas dos masas en reposo —es decir, si extraemos de ellas esa energía de movimiento—, entonces, consideradas en conjunto, son esencialmente más pobres en energía que el átomo original. De acuerdo con el principio de equivalencia, la suma de las masas  $M' + M''$ , de los productos de la desintegración, debe también ser algo más pequeña que la masa original,  $M$ , del átomo a punto de desintegrarse, en contradicción con el viejo principio de la conservación de la masa. La diferencia relativa de los dos está dentro del orden de un décimo del uno por ciento.

En realidad, no estamos en condiciones de pesar los átomos en forma individual. Sin embargo, hay métodos indirectos para medir sus pesos con exactitud. Asimismo, estamos en condiciones de determinar las energías cinéticas que son transferidas a los productos  $M'$  y  $M''$  de la desintegración. De esta manera ha sido posible comprobar y confirmar la fórmula de la equivalencia. También la ley nos permite calcular con anticipación, a partir de pesos atómicos determinados en forma precisa, qué cantidad exacta de energía será liberada con cualquier desintegración atómica. Las leyes, desde luego, nada dicen acerca de si se producirá la reacción de desintegración o acerca de cómo se producirá.

Lo que ocurre puede ser ilustrado con la ayuda del ejemplo de nuestro hombre rico. El átomo  $M$  es un rico avaro que, durante el transcurso de su vida, no gasta dinero (*energía*). Pero en su testamento lega su fortuna a sus hijos  $M'$  y  $M''$ , con la condición de que ellos entreguen a la comunidad una suma mínima, menos de la milésima parte de todos los bienes (*energía o masa*). En conjunto, los hijos tendrán algo menos que lo que tenía el padre (*la suma de masas  $M' + M''$  es algo menor que la masa  $M$  del átomo radiactivo*). Pero la parte entregada a la comunidad, aun cuando es relativamente pequeña, es aún tan tremendamente grande (*considerada como energía cinética*), que conlleva una gran amenaza. Evitar esta amenaza se ha convertido en el problema más urgente de nuestro tiempo.

## Acerca de la teoría de la gravedad generalizada

Tomado de *Scientific American*, vol. 182, N.º 4, abril de 1950.

Los directores de *Scientific American* me han pedido que escriba un comentario acerca de mi último trabajo, que acaba de ser publicado. Es una investigación matemática sobre los fundamentos de la física de campos.

Algunos lectores, quizá, se pregunten asombrados: ¿no lo aprendimos todo ya, sobre los fundamentos de la física, cuando estábamos en el colegio? La respuesta puede ser «sí» o «no», según la interpretación que se adopte. Nos hemos ido habituando a trabajar con conceptos y relaciones generales que nos capacitan para comprender un inmenso espectro de experiencias y las hacen accesibles a un tratamiento matemático. En un cierto sentido esos conceptos y relaciones son probablemente incluso definitivos. Esto, por ejemplo, es verdad en lo que se refiere a las leyes de la refracción de la luz, a las relaciones de la termodinámica clásica en cuanto está basada sobre los conceptos de presión, volumen, temperatura, calor y trabajo, y a la hipótesis de la inexistencia de una máquina de movimiento perpetuo.

¿Qué es lo que nos impele, pues, a forjar teoría tras teoría? ¿Por qué inventamos teorías? La respuesta a esta última pregunta es sencilla: porque nos complacemos en «comprender», es decir, en reducir los fenómenos mediante un proceso lógico a algo ya conocido o (aparentemente) evidente. En primer término, son necesarias nuevas teorías cuando nos enfrentamos con hechos que no pueden ser «explicados» por las teorías existentes. Pero esta motivación para establecer nuevas teorías es, por así decirlo, trivial, impuesta desde fuera. Existe otra motivación, más sutil, y de importancia no menor. Se trata del esfuerzo por la unificación y simplificación de las premisas de la teoría en su conjunto (es decir, el principio de economía de Mach, interpretado como principio lógico).

Podemos decir que existe una pasión por el entendimiento, de la misma manera que existe una pasión por la música. Entre los niños, el apasionamiento es un hecho corriente, pero se pierde, con el tiempo, en la mayoría de casos. Sin esta pasión no existirían ni las matemáticas ni las ciencias de la naturaleza. Una y otra vez, la pasión por comprender ha dado lugar a la ilusión de que el hombre

es capaz de aprehender el mundo objetivo por la vía racional, por el puro pensamiento, sin fundamentaciones empíricas: en una palabra, a través de la metafísica. Según mi opinión, cada teórico verdadero es una especie de metafísico domesticado, por mucho que él mismo fantasee acerca de su «positivismo». El metafísico cree que lo lógicamente simple es también lo real. El metafísico domesticado cree que no todo lo que es lógicamente simple es realidad empírica, sino que la totalidad de toda la experiencia sensorial puede ser «comprendida» sobre la base de un sistema conceptual, construido con el apoyo de premisas de gran simplicidad. El escéptico dirá que esto es «fe en el milagro». Admitámoslo así, pero se trata de un credo que, con el desarrollo de la ciencia, ha resultado de manera asombrosa.

El surgimiento del atomismo es un buen ejemplo. ¿Cómo pudo concebir Leucipo esta atrevida idea? Cuando el agua se congela y se convierte en hielo —algo que parece totalmente distinto del agua—, ¿cómo puede ser que el hielo al fundirse da algo que no parece diferenciarse del agua? Leucipo estaba perplejo e intentó dar con una «explicación». Sus consideraciones lo llevaron a la conclusión de que en estas transiciones la «esencia» del objeto no ha sufrido ninguna clase de cambio. Quizás el objeto esté compuesto por partículas inmutables y el cambio sólo sea un cambio en el ordenamiento espacial de esas partículas. ¿No podría ser esto cierto de todos los objetos que emergen una y otra vez con cualidades casi idénticas?

Esta idea no se perdió por completo durante la larga hibernación del pensamiento occidental. Dos mil años después de Leucipo, Bernouilli se pregunta por qué el gas ejerce presión sobre las paredes de un recipiente. ¿Sería posible «explicar» este hecho por la repulsión mutua de las partes del gas, en el sentido de la mecánica de Newton? Esta hipótesis parece absurda, dado que la presión del gas depende de la temperatura, mientras todo lo demás se mantenga constante. Suponer que las fuerzas newtonianas de interacción dependen de la temperatura va en contra del espíritu de la mecánica de Newton. Bernouilli conoce el concepto de atomismo y por lo tanto se siente obligado a concluir que los átomos (o moléculas) chocan contra las paredes del recipiente y al hacerlo así ejercen una presión. Después de todo, es preciso suponer que los átomos están en movimiento: ¿de qué otra forma sería posible dar razón de los cambios de temperatura de los gases?



Una simple consideración mecánica demuestra que esta presión depende, de manera exclusiva, de la energía cinética de las partículas y de su densidad en el espacio. Esto tendría que haber conducido a los físicos de aquel tiempo a la conclusión de que el calor consiste en el movimiento aleatorio de los átomos. De haberse tomado esta conclusión con la seriedad que se merecía, el desarrollo de la teoría térmica —de modo especial el descubrimiento de la equivalencia de calor y energía mecánica— se habría visto considerablemente facilitado.

Este ejemplo pretende ilustrar dos cosas. La idea teórica (en este caso el atomismo) no surge como un hecho alejado e independiente de la experiencia; tampoco puede ser derivada de la experiencia a través de un procedimiento meramente lógico. En realidad, es el producto de un acto creativo. Una vez que se ha formulado una idea teórica, es preciso aferrarse a ella hasta el momento en que nos conduzca a una conclusión insostenible.

En lo que respecta a mi último trabajo teórico, no estimo que sea justificado exponer en detalle su contenido ante un grupo amplio de lectores que se interesen por la ciencia, porque esto sólo debe hacerse con las teorías que hayan sido confirmadas por la experiencia. De momento, lo que habla en favor de la teoría que discutiremos aquí es, en principio, la simplicidad de sus premisas y su estrecha conexión con lo que ya es conocido (a saber, las leyes del campo gravitatorio puro). No obstante, podría ser de interés para un amplio grupo de lectores familiarizarse con el proceso mental que conduce a empresas de naturaleza tan especulativa. Además, se indicará el tipo de dificultades con las que nos tropezamos y en qué sentido han sido superadas.

En la física de Newton, el concepto teórico elemental sobre el cual está fundamentada la descripción teórica de los cuerpos materiales es el punto material o partícula. Por consiguiente, la materia es considerada como discontinua, de forma apriorística. Esto exige que la acción que los puntos materiales ejercen los unos sobre los otros sea denominada «acción a distancia». Este último concepto parece contrario por completo a nuestra experiencia de cada día; por lo tanto, es natural que los contemporáneos de Newton —y por cierto el propio Newton— encontraran difícil aceptarlo. Sin embargo, debido al casi milagroso éxito del sistema newtoniano, las generaciones sucesivas de físicos se habituaron a la idea de acción a distancia. Toda duda fue enterrada durante un largo tiempo.

Pero en la segunda mitad del siglo XIX, cuando las leyes de la electrodinámica fueron enunciadas resultó que no pudieron ser incorporadas al sistema de Newton en forma satisfactoria. Es interesante preguntarse si Faraday hubiera logrado descubrir la ley de la inducción electromagnética en el caso de haber recibido una educación académica normal. Sin estar atado a la manera tradicional de pensar, advirtió que la introducción del «campo» como un elemento independiente de la realidad le ayudaba a coordinar los hechos experimentales. Fue Maxwell quien logró comprender en profundidad la significación del concepto de campo y llevó a cabo el descubrimiento fundamental de que las leyes de la electrodinámica hallan su expresión natural en las ecuaciones diferenciales de los campos eléctricos y magnéticos. Estas ecuaciones implicaban la existencia de ondas, cuyas propiedades correspondían a las de la luz, en la medida en que estas eran conocidas en esta época.

Esta incorporación de la óptica a la teoría del electromagnetismo representa una de las más grandes victorias en la batalla hacia la unificación de los fundamentos de la física. Maxwell consiguió esa unificación mediante argumentos puramente teóricos, mucho antes de que fuera corroborada por la labor experimental de Hertz. El nuevo enfoque permitió prescindir de la hipótesis de acción a distancia, al menos en el ámbito de los fenómenos electromagnéticos. El campo intermediario pasaba a ser el único portador de la interacción electromagnética entre los cuerpos y el comportamiento del campo quedaba completamente determinado por unos procesos contiguos, expresados por ecuaciones diferenciales.

En ese momento surgió una pregunta: tomando en cuenta que el campo existe incluso en el vacío, ¿habrá que concebir el campo como un estado de un «portador» o habrá que atribuirle una existencia independiente, no reducible a ninguna otra cosa? En otras palabras: ¿existe un «éter» portador del campo; un éter en estado ondulatorio, por ejemplo, cuando lleva ondas luminosas?

La pregunta tiene una respuesta natural: al no poderse prescindir del concepto de campo, es preferible no introducir, además, un portador con propiedades hipotéticas. Sin embargo, los investigadores que primero reconocieron la indispensabilidad del concepto de campo todavía conservaban arraigada con fuerza la tradición mecánica de pensamiento y no estaban preparados para aceptar sin vacilaciones este punto de vista más simple. Pero en el curso de las décadas siguientes este enfoque comenzó a ganar terreno.

La introducción del campo como un concepto elemental dio origen a una inconsistencia de la teoría como conjunto. La teoría de Maxwell, aunque describa de manera adecuada el comportamiento de las partículas con carga eléctrica en su interacción mutua, no explica el comportamiento de las densidades eléctricas, es decir, que no proporciona una teoría de las partículas en sí mismas. Por consiguiente, estas deben ser tratadas como puntos de masa sobre la base de la antigua teoría. La combinación de la idea de un campo continuo con la de los puntos materiales discontinuos en el espacio parece inconsistente. Una teoría de campo consistente requiere una continuidad de todos los elementos de su teoría, no sólo en el tiempo, sino también en el espacio, y en todos los puntos del espacio. De aquí que la partícula material no tenga lugar como concepto fundamental en una teoría de campo. O sea que, incluso más allá del hecho de que la gravedad no esté comprendida en ella, la electrodinámica de Maxwell no puede ser considerada una teoría completa.

Las ecuaciones de Maxwell para el espacio vacío no experimentan cambios si las coordenadas espaciales y el tiempo están sujetos a una transformación lineal especial: la transformación de Lorentz («covarianza» con respecto a las transformaciones de Lorentz). La covarianza se cumple, por supuesto, para una transformación compuesta por dos o más transformaciones de esa índole; esto es lo que recibe el nombre de propiedad de «grupo» de las transformaciones de Lorentz. Las ecuaciones de Maxwell implican el «grupo de Lorentz», pero el grupo de Lorentz no implica las ecuaciones de Maxwell. El grupo de Lorentz puede ser definido en forma independiente de las ecuaciones de Maxwell como un grupo de transformaciones lineales que dejan invariante un valor particular de la velocidad: la velocidad de la luz. Estas transformaciones se cumplen en la transición de un «sistema inercial» a otro que esté en movimiento uniforme con respecto al primero. La propiedad nueva más importante de este grupo transformacional es que suprime el carácter absoluto del concepto de simultaneidad de los sucesos distantes unos de otros en el espacio. Sobre esta base, hay que esperar que todas las ecuaciones de la física sean covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz (*teoría de la relatividad especial*). De esta forma ocurrió que las ecuaciones de Maxwell condujeron a un principio heurístico válido mucho más allá del campo de aplicabilidad o incluso de validez de las propias ecuaciones.

La relatividad especial tiene algo en común con la mecánica de Newton: las leyes de ambas teorías se suponen válidas sólo con respecto a ciertos sistemas de coordenadas, los que conocemos bajo el nombre de «sistemas inerciales». Un sistema inercial es un sistema en un estado dinámico tal que los puntos materiales «libres de fuerzas» que contiene no están acelerados con respecto al sistema de coordenadas. Sin embargo, esta definición es vacua si no hay medios independientes para reconocer la ausencia de fuerzas. Pero estos medios de reconocimiento no existen si se considera a la gravedad como un «campo».

Denominemos  $A$  a un sistema uniformemente acelerado con respecto a un «sistema inercial»  $I$ . Los puntos materiales, no acelerados con respecto a  $I$ , están acelerados con respecto a  $A$ , siendo la aceleración de todos los puntos igual en magnitud y en dirección. Estos puntos se comportan como si un campo gravitatorio existiera con respecto a  $A$ , porque una propiedad característica del campo gravitatorio es que la aceleración es independiente de la naturaleza particular del cuerpo.

No existe ningún motivo para excluir la posibilidad de interpretar este comportamiento como el efecto de un «verdadero» campo gravitatorio (*principio de equivalencia*). Esta interpretación trae como resultado el hecho de considerar que  $A$  es un «sistema inercial», incluso cuando es acelerado con respecto a otro sistema inercial. (Para este argumento, lo esencial es que la introducción de campos gravitatorios independientes se considere justificada aunque ninguna masa generadora del campo esté definida. Por consiguiente, para Newton este argumento no hubiera resultado convincente.) Así, a los conceptos de sistema inercial, a la ley de la inercia y a la ley del movimiento se les priva de su significación concreta, no sólo en la mecánica clásica, sino también en la relatividad especial. Además, siguiendo con esta idea, observamos que con respecto a  $A$  el tiempo no puede ser medido por relojes idénticos; en realidad incluso la significación física inmediata de diferencias de coordenadas se pierde, por lo general. En vista de todas estas dificultades, ¿no sería necesario, después de todo, asirse con firmeza al concepto del sistema inercial, abandonando el esfuerzo por explicar el carácter fundamental de los fenómenos gravitatorios que se manifiestan en el sistema newtoniano como la equivalencia de la masa inerte y pesante? Aquellos que tengan confianza en la comprensibilidad de la naturaleza deberán responder «no».

He aquí la médula del principio de equivalencia: con el fin de dar razón de la igualdad entre masa inerte y masa pesante dentro de la teoría, es necesario admitir transformaciones no lineales de las cuatro coordenadas. Es decir, que debe extenderse el grupo de las transformaciones de Lorentz y, por ende, el conjunto de sistemas de coordenadas «permitidos».

¿Qué grupo de transformaciones de coordenadas puede sustituir, pues, el grupo de las transformaciones de Lorentz? La matemática sugiere una respuesta que se basa en las investigaciones fundamentales de Gauss y Riemann, a saber, que el sustituto apropiado es el grupo de todas las transformaciones de coordenadas (analíticas) continuas. Bajo el efecto de estas transformaciones lo único que permanece invariable es el hecho de que los puntos cercanos tienen casi las mismas coordenadas; el sistema de coordenadas expresa solamente el orden topológico de los puntos del espacio (incluido su carácter cuatridimensional). Las ecuaciones que expresan las leyes de la naturaleza deben ser covariantes con respecto a todas las transformaciones continuas de las coordenadas. Este es el principio de la *relatividad general*.

El procedimiento que acabo de describir supera una deficiencia en los fundamentos de la mecánica, que ya había sido advertida por Newton y fue criticada por Leibnitz, como también por Mach, dos siglos más tarde. Se decía que la inercia resiste a la aceleración, ¿pero a su aceleración relativa a qué? Dentro del marco de la mecánica clásica la única respuesta posible es: la inercia resiste a la aceleración *relativa al espacio*. Una de las propiedades físicas del espacio es esa: el espacio actúa sobre los objetos, pero los objetos no actúan sobre el espacio. Es probable que en esto resida la significación profunda de la afirmación de Newton *spatium est absolutum*. Pero la idea no gustó a todos, en particular a Leibnitz, que no otorgó existencia independiente al espacio, considerándolo como mera propiedad de las «cosas» (contigüidad de los objetos físicos). De haber ganado terreno en aquellos días estas justificadas dudas, poco beneficio habrían reportado a la física, porque los fundamentos empíricos y teóricos necesarios para llevar hasta sus últimas consecuencias la idea de Leibnitz no eran accesibles en el siglo XVII.

De acuerdo con la relatividad general, el concepto de espacio desprendido de todo contenido físico no existe. La realidad física del espacio está representada por un campo cuyos componentes

son funciones continuas de las cuatro variables independientes: las coordenadas de espacio y tiempo. Es precisamente esta clase particular de dependencia lo que expresa el carácter espacial de la realidad física.

Dado que la teoría de la relatividad general implica la representación de la realidad física mediante un campo *continuo*, el concepto de partículas o puntos materiales no puede desempeñar un papel fundamental como tampoco lo puede hacer el concepto de movimiento. La partícula sólo puede aparecer como una región limitada del espacio en la que la fuerza del campo o la densidad de energía son particularmente elevadas.

Una teoría relativista habrá de contestar a dos preguntas: 1)¿Cuál es el carácter matemático del campo? 2)¿Qué ecuaciones representan este campo?

Con respecto a la primera pregunta: desde el punto de vista matemático el campo se caracteriza, en esencia, por la forma en que sus componentes se transforman si se aplica una transformación de coordenadas. Con respecto a la segunda pregunta: las ecuaciones deben determinar el campo *de forma suficiente*, cumpliendo al mismo tiempo los postulados de la relatividad general. De la elección del tipo de campo dependerá que este requisito pueda o no ser satisfecho.

El intento por comprender las correlaciones entre los datos empíricos sobre la base de un programa de índole tan abstracta podría parecer, en un primer momento, casi sin esperanzas. De hecho, el procedimiento equivale a plantearse la siguiente pregunta: ¿cuál es la propiedad más simple que puede exigirse de *qué* objeto de simpleza máxima (campo) mientras se cumple el principio general de la relatividad? Considerado desde el punto de vista de la lógica formal, el carácter dual de la pregunta parece, de por sí, una verdadera calamidad, sin tomar en cuenta la vaguedad del concepto «simpleza». Además, desde el punto de vista de la física no existe nada que garantice el supuesto de que una teoría que es «lógicamente simple» deba ser también «verdadera».

Toda teoría es especulativa. Cuando los conceptos básicos de una teoría son comparativamente «ceranos a la experiencia» (por ejemplo, los conceptos de fuerza, presión, masa), su carácter especulativo no es discernible con tanta facilidad. No obstante, si una teoría posee una índole tal que requiera la aplicación de unos procesos lógi-

cos complicados, con el fin de extraer conclusiones a partir de unas premisas que pueden ser confrontadas con la observación, todo el mundo es consciente de la naturaleza especulativa de la teoría. En tal caso, un sentimiento casi irresistible de aversión nace en quienes no están familiarizados con el análisis epistemológico y en quienes no tienen una clara idea de la naturaleza precaria del pensamiento teórico en aquellos campos en los que ellos trabajan habitualmente.

Por otra parte, se ha de conceder que una teoría tiene una importante ventaja si sus conceptos básicos y sus hipótesis fundamentales se hallan «ceranos a la experiencia». Una mayor confianza acordada a esta clase de teorías está justificada. Existe menor riesgo de coger por mal camino, en particular porque exige menor cantidad de tiempo y de esfuerzo rechazar esas teorías experimentalmente. Sin embargo, cada vez más, a medida que nuestros conocimientos ganan profundidad, debemos renunciar a esta ventaja en nuestra búsqueda de simplicidad lógica y de uniformidad en los fundamentos de la teoría física. Hay que admitir que la relatividad general ha avanzado más que las anteriores teorías físicas, al abandonar «la proximidad a la experiencia» de los conceptos fundamentales con el fin de obtener una simplicidad lógica. Esto es ya cierto de la teoría de la gravedad, e incluso más de la nueva generalización, que es un intento de abarcar las propiedades del campo total. En la teoría generalizada, el procedimiento de derivar de las premisas de la teoría unas conclusiones que puedan ser confrontadas con los datos empíricos es tan difícil que hasta el presente no ha sido posible obtener ese resultado. En estas circunstancias, en favor de esta teoría cuentan su simplicidad lógica y su «rigidez». Rigidez, en este caso, significa que la teoría puede ser verdadera o falsa, pero no modificable.

La mayor dificultad interna que impide el desarrollo de la teoría de la relatividad es la naturaleza dual del problema, indicada por las dos preguntas que he planteado antes. Esta dualidad es el motivo por el cual el desarrollo de la teoría se ha producido en dos etapas tan distantes entre sí. El primer paso, la teoría de la gravedad, está basado en el principio de la equivalencia discutido antes y descansa sobre la siguiente consideración: de acuerdo con la teoría de la relatividad especial, la luz tiene una velocidad de propagación constante. Si un rayo de luz en el vacío arranca desde un punto, designado por las coordenadas  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ , en un sistema tridimensional de coordenadas, en el tiempo  $x_4$ , se expande como una onda esférica y

alcanza un punto cercano  $(x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, x_3 + dx_3)$  en el tiempo  $x_4 + dx_4$ . Si introducimos la velocidad de la luz,  $c$ , escribimos la expresión:

$$\sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2} = c dx_4.$$

Esto también puede escribirse de la forma:

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dx_4^2 = 0.$$

Esta expresión representa una relación objetiva entre puntos cercanos del espacio y del tiempo en cuatro dimensiones, y tiene validez para todos los sistemas inerciales, con la condición de que las transformaciones de coordenadas estén restringidas a las de la relatividad especial. Sin embargo, la relación pierde esta forma si son admitidas transformaciones continuas de las coordenadas, de acuerdo con el principio de la relatividad general. Entonces la relación asume la forma más general:

$$\sum_{ik} g_{ik} dx_i dx_k = 0.$$

Las  $g_{ik}$  son funciones de las coordenadas que se transforman de una manera definida si se aplica una transformación continua de coordenadas. De acuerdo con el principio de equivalencia, estas funciones describen una clase particular de campo gravitatorio: un campo que se puede obtener mediante la transformación del espacio «libre de campo». Las satisfacen una ley particular de transformación. Si hablamos en términos matemáticos, son los componentes de un «tensor» con una propiedad de simetría que se mantiene en todas las transformaciones; la propiedad simétrica se expresa de la siguiente forma:

$$g_{ik} = g_{ki}.$$

La idea surge por sí sola: ¿no podemos adjudicar una significación objetiva a este tensor simétrico, aun cuando el campo *no pueda* ser obtenido a partir del espacio vacío de la relatividad especial por una mera transformación de coordenadas? A pesar de que no cabe esperar que este tensor simétrico describa el campo más gene-



ral, bien podría describir el caso particular del «campo gravitatorio puro». De manera que resulta evidente cuál es el tipo de campo que, al menos para un caso especial, tiene que postular la relatividad general: un campo de tensor simétrico.

En consecuencia, sólo nos queda la segunda pregunta: ¿qué clase de campo general covariante puede ser postulado para un campo de tensor simétrico?

No ha resultado difícil responder a esta pregunta en la actualidad, porque las concepciones matemáticas necesarias ya estaban a nuestro alcance, bajo la forma de la teoría métrica de superficies, creada hace un siglo por Gauss y ampliada por Riemann a variedades de un número arbitrario de dimensiones. El resultado de esta investigación puramente formal ha sido asombroso en muchos aspectos. Las ecuaciones diferenciales que pueden ser postuladas como leyes de campo para  $g_{ik}$  deben ser por lo menos de segundo orden, es decir, que deben contener, al menos, las segundas derivadas de  $g_{ik}$  con respecto a las coordenadas. En el caso de suponer que en las leyes de campo no aparecen órdenes mayores que el de las segundas derivadas, *aquellas están matemáticamente determinadas por el principio de la relatividad general*. El sistema de ecuaciones puede ser escrito en la forma:

$$R_{ik} = 0.$$

Las  $R_{ik}$  se transforman del mismo modo que las  $g_{ik}$ , o sea, que también forman un tensor simétrico.

Estas ecuaciones diferenciales sustituyen por completo la teoría de Newton del movimiento de los cuerpos celestes, a condición de que las masas estén representadas como singularidades del campo. En otras palabras: esas ecuaciones contienen al mismo tiempo las leyes de fuerza y las leyes del movimiento, y quedan eliminados los «sistemas inerciales».

El hecho de que las masas aparezcan como singularidades indica que estas masas en sí mismas no pueden ser explicadas por campos simétricos, o «campos gravitatorios». Ni siquiera el hecho de que existen sólo masas gravitatorias *positivas* puede ser deducido de esta teoría. Evidentemente, una teoría relativista de campos completa debe estar basada en un campo de naturaleza más compleja, es decir, en una generalización del campo de tensor simétrico.

Antes de considerar esta generalización, son esenciales para la explicación siguiente dos observaciones atinentes a la teoría gravitatoria.

La primera observación es que el principio de la relatividad general impone serias restricciones a las posibilidades teóricas. Sin este principio restrictivo sería prácticamente imposible que alguien acertara con las ecuaciones gravitatorias, ni siquiera utilizando el principio de la relatividad especial, aun sabiendo que el campo debe ser descrito por un tensor simétrico. Ni por muchos datos empíricos que se poseyeran se podría llegar a estas ecuaciones sin hacer uso del principio de la relatividad general. Por este motivo todos los esfuerzos por obtener un conocimiento más profundo de los fundamentos de la física me parecen destinados al fracaso a menos que los conceptos básicos estén en concordancia con la relatividad general ya desde un principio. Esta situación hace que sea difícil utilizar nuestro conocimiento empírico, a pesar de su gran amplitud, en la búsqueda de los conceptos y relaciones fundamentales de la física y nos obliga a especular con una libertad mucho mayor de la que, de momento, acepta la mayoría de físicos. No veo ninguna razón para suponer que el significado intuitivo del principio de la relatividad general esté restringida a la gravedad y que el resto de la física pueda estudiarse por separado sobre la base de una relatividad especial, con la esperanza de que más adelante todo el conjunto pueda ser consistentemente acomodado dentro de un esquema relativista general. Aun cuando sea comprensible desde el punto de vista histórico, no creo que tal actitud pueda ser justificada de un modo objetivo. La comparativa pequeñez de lo que hoy conocemos como efectos gravitatorios no es una razón concluyente para ignorar el principio de la relatividad general en las investigaciones teóricas de carácter fundamental. En otras palabras, no creo que esté justificado preguntar: ¿cómo sería la física sin la gravedad?

El segundo punto que hemos de considerar es que las ecuaciones gravitatorias son diez ecuaciones diferenciales para los diez componentes del tensor simétrico  $g_{ik}$ . En el caso de una teoría relativista no general, un sistema no está, normalmente, sobredeterminado si el número de ecuaciones es igual al número de funciones desconocidas. La variedad de soluciones es tal que dentro de la solución general es posible elegir de manera arbitraria un cierto número de funciones de tres variables. Esto no puede esperarse sin más en una

teoría relativista general. La libre elección con respecto al sistema de coordenadas implica que, de las diez funciones de una solución, o componentes del campo, cuatro pueden fijarse de modo que asuman valores prescritos, mediante una elección adecuada del sistema de coordenadas. Dicho con otras palabras, el principio de la relatividad general implica que el número de las funciones a ser determinadas por las ecuaciones diferenciales no es 10, sino  $10 - 4 = 6$ . Para estas seis funciones sólo seis ecuaciones diferenciales independientes pueden ser postuladas. Del total de diez ecuaciones diferenciales del campo gravitatorio, seis tan sólo deben ser independientes unas de otras, en tanto que las cuatro restantes deben estar conectadas con estas seis por medio de cuatro relaciones (identidades). Y, realmente, en los miembros izquierdos,  $R_{ik}$ , de las diez ecuaciones gravitatorias existen cuatro identidades —las «identidades de Bianchi»— que aseguran su «compatibilidad».

En un caso como este —en el que el número de variables de campo es igual al número de ecuaciones diferenciales— siempre está asegurada la compatibilidad si las ecuaciones pueden ser obtenidas a partir de un principio variacional. Este es, ciertamente, el caso de las ecuaciones gravitatorias.

Sin embargo, las diez ecuaciones diferenciales no pueden ser totalmente sustituidas por seis. El sistema de ecuaciones está, sin duda, «sobredeterminado», pero debido a la existencia de las identidades, está sobredeterminado de una manera tal que su compatibilidad no se pierde, lo que equivale a decir que la variedad de soluciones no está críticamente restringida. El hecho de que las ecuaciones gravitatorias impliquen las leyes del movimiento para las masas está conectado de un modo íntimo con esta (permisible) sobredeterminación.

Después de esta explicación preliminar resultará fácil comprender la naturaleza de la investigación actual, sin entrar en detalles matemáticos. El problema consiste en establecer una teoría relativista del campo total. La clave más importante para hallar la solución está en el hecho de que ya existe una solución para el caso especial del campo gravitatorio puro. La teoría que estamos buscando, por consiguiente, debe ser una generalización de la teoría del campo gravitatorio. La primera pregunta es la siguiente: ¿cuál es la generalización natural de un campo de tensor simétrico?

Esta pregunta no podrá ser contestada por sí misma, sino sólo en conexión con la otra pregunta: ¿qué generalización del campo

proporcionará el sistema teórico más natural? La respuesta que sirve de fundamento a la teoría que aquí se discute afirma que el campo de tensor simétrico debe ser reemplazado por otro no simétrico. Esto significa que la condición  $g_{ik} = g_{ki}$  para los componentes del campo ha de ser desechada. En tal caso, el campo tiene dieciséis en lugar de diez componentes independientes.

Y así, lo que persiste es la labor de establecer las ecuaciones diferenciales relativistas para un campo de tensor no simétrico. Cuando se intenta resolver este problema, hay que enfrentarse con una dificultad que no surge en el caso del campo simétrico. El principio de la relatividad general no basta para determinar de manera completa las ecuaciones de campo, en especial porque la ley de transformación de la parte simétrica del campo no afecta a los componentes de la parte antisimétrica o *viceversa*. Es probable que por esta causa nunca, o casi nunca, antes se haya intentado este tipo de generalización del campo. La combinación de las dos partes del campo sólo puede ser demostrada como un procedimiento natural si en el formalismo de la teoría sólo el campo total desempeña un papel y no las partes simétrica y antisimétrica por separado.

Se ha comprobado que este requisito puede llegar a ser satisfecho de una manera natural. Pero incluso este requisito, junto con el principio de la relatividad general, no basta para determinar unívocamente las ecuaciones de campo. Recordemos aquí que el sistema de ecuaciones debe satisfacer una condición más todavía: las ecuaciones han de ser compatibles. Ya hemos señalado más arriba que esta condición queda satisfecha si las ecuaciones pueden ser derivadas de un principio variacional.

Ya se ha obtenido este resultado, aun cuando no por una vía tan natural como en el caso del campo simétrico. Ha sido inquietante hallar que esto se puede lograr de dos formas distintas. Los principios variacionales proporcionan dos sistemas de ecuaciones —a los que denominaremos  $E_1$  y  $E_2$ — que son distintos entre sí (aunque sólo mínimamente) y que muestran, ambos, imperfecciones concretas. Consecuentemente, incluso la condición de compatibilidad ha sido insuficiente para determinar de manera unívoca el sistema de ecuaciones.

En realidad, fueron los defectos formales de los sistemas  $E_1$  y  $E_2$  los que indicaron una posible solución. Existe un tercer sistema de ecuaciones,  $E_3$ , que está libre de los defectos formales de los sistemas  $E_1$  y  $E_2$  y representa una combinación de ellos en el sentido de

que cada solución de  $E_3$  es una solución de  $E_1$  tanto como de  $E_2$ . Esto sugiere que  $E_3$  puede ser el sistema que estábamos buscando. ¿Por qué no postular, pues,  $E_3$  como el sistema de ecuaciones? Tal procedimiento no está justificado sin más análisis, dado que la compatibilidad de  $E_1$  y la de  $E_2$  no implica la compatibilidad del sistema más fuerte  $E_3$ , donde el número de ecuaciones excede en cuatro el número de componentes del campo.

Una consideración independiente muestra que, prescindiendo de la cuestión de compatibilidad, el sistema más fuerte,  $E_3$ , es la única generalización realmente natural de las ecuaciones gravitatorias.

Pero  $E_3$  no es un sistema compatible en el mismo sentido en que lo son los sistemas  $E_1$  y  $E_2$ , cuya compatibilidad está asegurada por un número suficiente de identidades, lo que significa que cada campo que satisface las ecuaciones para un valor definido del tiempo tiene una extensión continua, que representa una solución en el espacio cuatridimensional. El sistema  $E_3$ , sin embargo, no es extensible del mismo modo. Haciendo uso del lenguaje de la mecánica clásica, podríamos decir: en el caso del sistema  $E_3$  la «condición inicial» no puede ser elegida con libertad. Lo que de verdad importa es la respuesta a esta pregunta: ¿es la variedad de soluciones del sistema  $E_3$  tan extensiva como requiere una teoría física? Este problema de índole puramente matemática está sin resolver hasta el presente.

El escéptico dirá: «Bien puede ser que este sistema de ecuaciones resulte razonable desde un punto de vista lógico, pero eso no prueba que se corresponda con la naturaleza». Tiene usted razón, estimado escéptico. Sólo la experiencia puede decidir acerca de la verdad. Y con todo algo habremos logrado en el caso de que, siquiera, hayamos podido formular una pregunta significativa y precisa. La afirmación o la refutación no serán fáciles, a pesar de la abundancia de hechos empíricos conocidos. Derivar de las ecuaciones unas conclusiones que puedan ser confrontadas con la experiencia requerirá duros esfuerzos y, tal vez, nuevos métodos matemáticos.

## **Mensaje a la Sociedad Italiana para el Progreso de la Ciencia**

Enviado al cuadragésimo segundo encuentro de la «Società Italiana per il Progresso della Scienza», Lucca (Italia), 1950. Publicado en inglés en la revista *Impact*, de la Unesco, en el número de otoño de 1950.

En primer lugar, permítanme agradecerles con toda sinceridad la gentileza que han tenido al invitarme al encuentro de la «Sociedad para el Progreso de la Ciencia». Habría aceptado la invitación con sumo placer si mi salud me hubiera permitido hacerlo. Pero en las presentes circunstancias lo único que puedo hacer es dirigirme a ustedes en forma breve, desde mi casa al otro lado del océano. Al hacerlo, no me hago ilusiones con respecto a la posibilidad de que realmente tenga algo que decir que de verdad pueda ampliar el conocimiento y la comprensión de ustedes. No obstante, estamos viviendo en un período de tanta inseguridad externa e interna y con tal carencia de objetivos firmes, que la mera confesión de nuestras convicciones puede tener un significado, aun cuando estas convicciones, como todos los juicios de valor, no puedan ser demostradas a través de deducciones lógicas.

En este punto, surge de inmediato la pregunta: ¿debemos considerar que la búsqueda de la verdad o, para decirlo de una manera más modesta, nuestro esfuerzo por comprender el universo cognoscible mediante el pensamiento lógico constructivo, es un objetivo autónomo de nuestro trabajo? ¿O, más bien, la búsqueda de la verdad tendría que estar subordinada a algún otro objetivo, por ejemplo a algún objetivo «práctico»? Esta pregunta no puede contestarse sobre una base lógica. No obstante, la decisión al respecto tendrá una influencia considerable en nuestro pensamiento y en nuestro criterio y juicio moral, a condición de que haya nacido de una profunda e inamovible convicción. Permítanme ustedes hacer una confesión: para mí, la lucha por saber más es uno de aquellos objetivos independientes sin los cuales un individuo pensante encontraría imposible tener una actitud consciente y positiva frente a la vida.

La esencia misma de nuestro batallar por una comprensión mayor es que, por una parte, intentamos abarcar la gran y compleja variedad de experiencias del hombre y que, por otra parte, buscamos la simplicidad y la economía de nuestros supuestos básicos. La creencia de que estos dos objetivos pueden existir el uno junto al

otro, en vista del estado primitivo de nuestro conocimiento científico, es cuestión de fe. Sin esta fe, yo no podría haber abrigado mi convicción poderosa e incommovible acerca del valor independiente del conocimiento.

Esta actitud en cierto sentido religiosa del científico tiene cierta influencia sobre toda su personalidad. Aparte del conocimiento obtenido de la experiencia acumulada y aparte de las reglas del pensamiento lógico, no existen, en principio, para el hombre de ciencia, autoridades cuyas decisiones y afirmaciones puedan significar por sí mismas una apelación a la «Verdad». Esto conduce a la paradójica situación de que una persona que entrega todas sus energías a cuestiones objetivas, se convertirá, desde un punto de vista social, en un individualista absoluto que, al menos en principio, no tiene fe en nada que no sea su propio juicio. Es muy posible que el individualismo intelectual y las épocas científicas hayan emergido en forma simultánea en la historia y hayan permanecido inseparables desde entonces.

Se podría sugerir que el hombre de ciencia que está apenas esbozado en estas palabras no es más que una abstracción que no tiene existencia verdadera en este mundo, tal como no existe el *homo oeconomicus* de la economía clásica. Sin embargo, me parece que la ciencia tal como hoy la conocemos no podría haber surgido y no podría haber perdurado con vida si muchos individuos, a lo largo de muchos siglos, no hubieran llegado muy cerca del ideal.

Desde luego que para mí no es un hombre de ciencia cualquiera que haya aprendido a utilizar los instrumentos y los métodos que en forma directa o indirecta parecen ser «científicos». Sólo estoy aludiendo a esos individuos en quienes está verdaderamente viva la mentalidad científica.

¿Cuál es hoy, pues, la posición del hombre de ciencia como miembro de la sociedad? Es obvio que estará muy orgulloso de que el trabajo de los científicos haya contribuido a cambiar en forma radical la vida económica de los hombres por medio de la eliminación casi completa del trabajo muscular. Pero al mismo tiempo se sentirá inquieto por el hecho de que su trabajo científico haya originado una amenaza para la humanidad, desde que cayera en manos de exponentes del poder político moralmente ciegos. También será consciente del hecho de que los métodos tecnológicos han dado lugar a que su trabajo haya desembocado en una concentración del

poder económico y también del político en manos de pequeñas minorías que han llegado a dominar por completo las vidas de las masas populares que parecen cada día más y más amorfas. Pero aún hay algo peor: la concentración del poder económico y político en unas pocas manos no sólo ha hecho dependiente al hombre de ciencia en el campo económico, que también representa una amenaza interna. Las sagaces formas de influencia intelectual y psíquica que esta situación conlleva han de impedir el desarrollo de personalidades verdaderamente independientes.

De modo que el hombre de ciencia, tal como podemos comprobarlo con nuestros propios ojos, es presa de un destino trágico. En su lucha sincera por la claridad y la independencia interior, él mismo, a través de sus esfuerzos sobrehumanos, ha construido los instrumentos que están siendo utilizados para convertirlo en un esclavo y para destruirlo incluso por dentro. No puede evitar que lo amordacen quienes tienen entre sus manos el poder político. Como un soldado, se ve en la obligación de sacrificar su propia vida y de destruir las vidas de otros, aun cuando está convencido de la índole absurda de esos sacrificios. Tiene plena conciencia de que la destrucción universal es ineludible, en razón de que el desarrollo histórico ha concentrado todo el poder económico, político y militar en manos de los estados nacionales. Asimismo, el científico comprende que la humanidad puede ser salvada sólo si un sistema supranacional, basado en la ley, fuera creado para eliminar para siempre la fuerza bruta. Pero el hombre de ciencia ha descendido tanto, que acepta la esclavitud que le han infligido los estados nacionales, como si se tratara de su destino inevitable. Incluso se degrada a sí mismo hasta el punto de contribuir, obediente, a perfeccionar los medios de destrucción de la humanidad.

¿Existe escapatoria alguna para el hombre de ciencia? ¿Realmente, ha de tolerar y sufrir todas estas indignidades? ¿Ha pasado para siempre el tiempo en el que, inspirado por su libertad interior y por la independencia de su pensamiento y de su trabajo, tenía la posibilidad de iluminar y enriquecer las vidas de sus congéneres? ¿Al situar su trabajo sobre una base excesivamente intelectual, no ha olvidado su responsabilidad y su dignidad? Mi respuesta es: si bien es verdad que una persona dueña de un sentido inherente de la libertad y escrupulosa puede ser destruida, este individuo nunca será esclavizado ni utilizado como herramienta ciega.



Si el hombre de ciencia de nuestros días puede hallar el tiempo necesario, y el valor, para pensar con honestidad y sentido crítico acerca de su situación y de las tareas que le competen, y si es capaz de actuar de acuerdo con sus reflexiones, las posibilidades de hallar una solución sensata y satisfactoria de la presente y peligrosa situación internacional aumentarán de forma considerable.

### **En el aniversario de la muerte de Copérnico**

En ocasión de la velada conmemorativa que se celebrara en la Columbia University, Nueva York, en diciembre de 1953.

Con regocijo y gratitud honramos hoy la memoria de un hombre que, más que ningún otro, contribuyó a la liberación de la mente esclavizada por las cadenas del dominio clerical y científico en Occidente.

Es verdad que en el período clásico griego algunos pensadores habían llegado a la convicción de que la Tierra no era el centro natural del universo. Pero esta visión del universo no logró obtener un reconocimiento real en la antigüedad. Aristóteles y la escuela griega de astronomía continuaron sustentando la concepción geocéntrica y casi nadie dudó de ella.

Una rara independencia de pensamiento, una gran intuición y también un profundo conocimiento de los hechos astronómicos —poco accesibles en aquellos tiempos— fueron necesarios para exponer la superioridad de la concepción heliocéntrica de un modo convincente. Esta verdadera proeza de Copérnico no sólo allanó la vía hacia la astronomía moderna, sino que también contribuyó a que se operara un cambio decisivo en la actitud del hombre hacia el cosmos. Una vez que se hubo reconocido que la Tierra no era el centro del mundo, sino sólo uno de los más pequeños planetas, la ilusión del papel central del hombre se hizo insostenible. De ahí que Copérnico, merced a su trabajo y a la grandeza de su personalidad, enseñara al hombre a ser modesto.

Ninguna nación debería arrogarse el derecho a sentirse orgullosa de que ese hombre hubiera surgido en su seno. El orgullo nacionalista es una mezquina debilidad que difícilmente podría justificarse ante un hombre dueño de la profunda independencia que caracterizó a Copérnico.

## La relatividad y el problema del espacio

Tomado de la edición revisada de *Una exposición simple de la teoría de la relatividad restringida y general*.

Una de las características de la física newtoniana es su necesidad de adjudicar una existencia independiente y real al espacio y al tiempo así como a la materia, porque en las leyes del movimiento de Newton aparece el concepto de aceleración. Pero en esta teoría, la palabra aceleración sólo puede denotar «aceleración con respecto al espacio». Por consiguiente, el espacio de Newton debe ser concebido «en reposo» o, al menos, «no acelerado», con el fin de que sea posible considerar que la aceleración que aparece en las leyes del movimiento es una magnitud con algún significado. Algo similar ocurre con el tiempo que, desde luego, está relacionado con el concepto de aceleración. El mismo Newton y los más críticos de sus contemporáneos consideraban un tanto embarazoso tener que atribuir una realidad física tanto al espacio como a su estado dinámico, pero por entonces no existía otra alternativa, si lo que se quería era otorgar una significación clara a la mecánica.

Es un requisito muy exigente el de tener que adjudicar una realidad física al espacio y, en especial, al espacio vacío. Una y otra vez, desde los tiempos más remotos, los filósofos se han resistido a esa presunción. Descartes propuso, poco más o menos, lo siguiente: el espacio es idéntico a la extensión, pero la extensión está conectada con los objetos materiales; en consecuencia no hay espacio sin objetos y, por consiguiente, no existe el espacio vacío. La debilidad de este argumento estriba, en primer término, en que si bien es cierto que el concepto de extensión debe su origen a nuestra experiencia con los objetos materiales, no es posible deducir que el concepto de extensión no pueda estar justificado en aquellos casos que, por sí mismos, no hayan dado origen a la formación de este concepto. Esta ampliación conceptual podrá ser justificada de manera indirecta por su papel en la comprensión de los resultados empíricos. La afirmación de que la extensión está limitada a los objetos es, por tanto, infundada. Más adelante veremos, sin embargo, que la teoría de la relatividad general confirma la concepción de Descartes de una manera indirecta. Descartes elucubró su extraño punto de vista llevado, sin duda, por la idea de que, sin una necesidad urgentísi-

ma, no es preciso adjudicar carácter real a algo como el espacio, que no es posible «experimentar en forma directa»\*.

El origen psicológico de la idea de espacio, o de su necesidad, está lejos de ser todo lo evidente que puede parecer desde el punto de vista de nuestros hábitos actuales de pensamiento. Los antiguos geómetras manejaban objetos conceptuales (la recta, el punto, la superficie), pero no el espacio como tal, como ocurriría tiempo después en la geometría analítica. Sin embargo, la idea de espacio está sugerida por ciertas experiencias primitivas. Supongamos que se ha construido una caja; dentro de ella es posible acomodar objetos de forma que se llene. La posibilidad de que esto ocurra es una propiedad del objeto material «caja», algo que va con la caja, el «espacio encerrado» por la caja. Esto es algo que será distinto para distintas cajas, algo que, en forma natural, es pensado como un hecho independiente de que, en algún momento, haya o no objetos dentro de la caja. Cuando dentro de la caja no hay objetos, el espacio está «vacío».

Hasta aquí nuestro concepto de espacio se ha asociado con la caja. Sin embargo, ocurre que las posibilidades de almacenaje que ofrece el espacio de la caja son independientes del espesor de las paredes de la caja. ¿No será posible reducir a cero el espesor de las paredes, sin que se pierda el «espacio» como resultado? El carácter natural de esta reducción al límite es evidente y ahora, ante nuestro pensamiento, ha quedado el espacio sin la caja, algo evidente de por sí, aun cuando resulta irreal por completo, si olvidamos el origen de este concepto. Es comprensible que a Descartes no le gustara considerar el espacio como independiente de los objetos materiales, como algo que podía existir sin materia\*\*. (Al mismo tiempo, esto no le impide utilizar como concepto fundamental de su geometría analítica el concepto de espacio.) El vacío que se forma en un barómetro de mercurio acabó, sin duda, con el último de los cartesianos. Pero no es posible negar que, incluso durante esa primitiva etapa, hay algo poco satisfactorio adherido al concepto de espacio, o al espacio entendido como algo real e independiente.

---

\* Esta expresión ha de entenderse *cum grano salis*.

\*\* Kant intentó superar la dificultad negando el carácter objetivo del espacio, aunque esto difícilmente puede tomarse en serio. Las posibilidades de almacenaje del espacio interno de una caja son objetivas, en el mismo sentido en que lo es la propia caja y lo son los objetos que pueden ser acomodados dentro de ella.

Las formas en que pueden ser almacenados los cuerpos en el espacio (caja) son el tema de la geometría euclidiana tridimensional, cuya estructura axiomática nos induce fácilmente al error de olvidar que se refiere a situaciones realizables.

Si el concepto de espacio se forma tal como lo hemos sugerido antes, y según lo comprobado en la experiencia de «llenar» la caja, podemos decir que ese espacio es, en primera instancia, un espacio *acotado*. *Esta limitación no parece ser esencial* porque, como es sabido, siempre es posible conseguir una caja mayor que sirva para contener a la anterior. De esta manera, el espacio se nos mostrará como ilimitado.

No he de recordar aquí la forma en que se podrían rastrear los conceptos de la naturaleza tridimensional y euclidiana del espacio hasta remontarnos a experiencias relativamente antiguas. Prefiero considerar, en primer término, desde otros puntos de vista, el papel del concepto de espacio en el desarrollo del pensamiento físico.

Cuando una pequeña caja  $s$  está situada, en reposo relativo, dentro del hueco de una caja mayor,  $S$ , el espacio hueco de  $s$  es parte del espacio hueco de  $S$ , y el mismo «espacio» que las contiene a ambas pertenece a cada una de las cajas. Cuando  $s$  está en movimiento con respecto a  $S$ , sin embargo, el concepto es menos simple. Entonces el observador se siente inclinado a pensar que  $s$  encierra siempre el mismo espacio, pero una parte variable del espacio de  $S$ . Se hace necesario, pues, adjudicar a cada caja su espacio particular, no pensándolo como acotado, y suponer que esos dos espacios están en movimiento el uno con respecto al otro.

Antes de caer en esta complicación, el espacio parece ser un medio sin límites o un recipiente en el que están flotando los objetos. Pero se ha de recordar que existe un número infinito de espacios que están en movimiento los unos con respecto de los otros. El concepto de espacio como algo que tiene existencia objetiva e independiente de las cosas pertenece al ámbito del pensamiento precientífico, pero no ocurre lo mismo con la idea de la existencia de un número infinito de espacios en movimiento los unos con respecto de los otros. Esta última idea es inevitable desde el punto de vista lógico, pero está muy lejos de haber desempeñado un papel importante ni siquiera en el pensamiento científico.

¿Pero qué ocurre con el origen psicológico del concepto de tiempo? Este concepto está indudablemente asociado a la «memoria»,

así como a la diferencia entre experiencias sensoriales y su posterior recuerdo. Por sí mismo, es difícil determinar si la diferencia entre experiencias sensoriales y recuerdo (o una mera imagen mental) es algo que psicológicamente nos es dado en forma directa.

Todos hemos tenido alguna vez la duda: ¿hemos experimentado algo de verdad o lo hemos soñado? Es probable que la capacidad para discriminar entre estas alternativas se produzca, en primer lugar, como resultado de una actividad ordenadora de la mente.

Una experiencia está relacionada con un «recuerdo» y de aquella se dice que es «anterior» a las «experiencias presentes». Este es un principio de ordenamiento conceptual de las experiencias recordadas y su posibilidad da origen al concepto subjetivo de tiempo, es decir, al concepto de tiempo que se refiere al orden de las experiencias individuales.

¿Qué queremos decir cuando hablamos de convertir el concepto de tiempo en un concepto objetivo? Analicemos el siguiente ejemplo. Una persona *A* tiene la experiencia «está relampagueando». Al mismo tiempo, esta persona *A* también tiene la experiencia de cierto comportamiento de la persona *B*, que pone en relación ese comportamiento de *B* con su propia experiencia «está relampagueando». De esta manera, se produce una situación tal que para *A* la experiencia «está relampagueando» queda asociada con *B*. Y así, esta persona *A* llega a pensar que otras personas también participan de la experiencia «está relampagueando». A partir de ese momento, «está relampagueando» ya no es interpretada como una experiencia exclusivamente personal, sino como una experiencia de otras personas (o, en todo caso, sólo como una «experiencia potencial»). De esta forma surge la interpretación siguiente: «está relampagueando», que originalmente ingresaba en la conciencia como una «experiencia», ahora también es interpretada como un «suceso» (objetivo). Cuando hablamos del «mundo exterior real» nos estamos refiriendo a la suma total de todos los sucesos.

Hemos visto que tendemos a adjudicar un orden temporal a nuestras experiencias, poco más o menos de la manera que paso a explicar. Si  $\beta$  es posterior a  $\alpha$ , y  $\gamma$  posterior a  $\beta$ , por consiguiente  $\gamma$  también será posterior a  $\alpha$  (sucesión de experiencias): ¿qué ocurre con los «sucesos» relacionados con estas experiencias? A primera vista parece muy claro suponer que existe un orden temporal de los sucesos, acorde con el orden temporal de las experiencias. En gene-

ral, y de manera inconsciente, así sucede o sucedía hasta que empezó a cundir cierto escepticismo.\* Con el fin de llegar a la idea de un mundo objetivo, todavía necesitamos de un concepto constructivo adicional: el suceso está localizado no sólo en el tiempo, sino también en el espacio.

En los párrafos anteriores hemos tratado de describir cómo pueden relacionarse con las experiencias, desde el punto de vista psicológico, los conceptos de espacio, tiempo y suceso. Considerados lógicamente, son creaciones libres de la inteligencia humana, instrumentos mentales que han de servir para establecer relaciones entre las experiencias, con el fin de que puedan ser mejor estudiadas. El intento de cobrar conciencia de las fuentes empíricas de estos conceptos fundamentales nos demostrará hasta qué punto estamos vinculados a esos conceptos. Por este camino nos hacemos sabedores de nuestra libertad, la cual, en caso de ser necesario, siempre nos resulta difícil utilizar con sensatez.

Todavía hemos de agregar algo esencial a este bosquejo del origen psicológico de los conceptos espacio-tiempo-suceso (a los que denominaremos «de tipo espacial», para abreviar, en contraste con los conceptos de la esfera psicológica). Hemos vinculado el concepto de espacio con las experiencias de las cajas y del acomodamiento de objetos materiales dentro de ellas. Así pues, esta elaboración de conceptos ya presupone el concepto de objetos materiales (por ejemplo, las «cajas»). De igual manera, las personas que introducimos en la formación del concepto objetivo de tiempo, también desempeñan el papel de objetos materiales. Por consiguiente, creo que está bien claro que la formación del concepto de objeto material debe preceder nuestros conceptos de tiempo y de espacio.

Todos estos conceptos de tipo espacial ya pertenecen al pensamiento pre-científico, junto con conceptos como dolor, finalidad, intención, etc., del campo de la psicología. Una de las características del pensamiento en física —tal como ocurre en general en el campo de las ciencias naturales— es que, en principio, pretende trabajar con conceptos del tipo espacial *solamente*, y se esfuerza por expresar

---

\* Por ejemplo, el orden temporal de las experiencias obtenido por medios acústicos, puede diferir con respecto al orden temporal obtenido visualmente, de tal modo que no se puede simplemente identificar la sucesión temporal de los sucesos con la sucesión temporal de las experiencias.

con la ayuda de ellos todas las relaciones que tengan forma de leyes. El físico trata de reducir los colores y los tonos a vibraciones; el fisiólogo considera que pensamiento y dolor son procesos nerviosos, de tal modo que el elemento psíquico es eliminado del nexo causal de existencia y con ello desaparece como vínculo independiente en las asociaciones causales. Esta actitud considera que la comprensión de todas las relaciones mediante el uso exclusivo de conceptos de tipo espacial es posible en principio; y sin duda es a esta actitud a la que hoy se denomina a menudo «materialismo» (puesto que «materia» ha perdido su papel de concepto fundamental).

¿Por qué es necesario arrastrar desde las cimas olímpicas las ideas fundamentales platónicas pertenecientes al pensamiento de las ciencias naturales y por qué revelar su linaje terrenal? Respuesta: con el fin de liberar estas ideas del tabú que las acompaña, y así conquistar una mayor libertad en la formación de ideas o conceptos. Uno de los méritos perdurables de D. Hume y de E. Mach consiste en que ellos, con más ahínco que otros, introdujeron esta actitud crítica.

La ciencia ha adoptado del pensamiento pre-científico los conceptos de espacio, tiempo y objeto material (con el importante caso especial de «cuerpo sólido») y los ha modificado, los ha hecho más exactos. Su primer logro importante ha sido el desarrollo de la geometría euclidiana, cuya formulación axiomática no debe cegarnos e inducirnos a error en cuanto a su origen empírico (las posibilidades de acomodar o yuxtaponer cuerpos sólidos). En particular, la naturaleza tridimensional del espacio tanto como su carácter euclidiano tienen un origen empírico (puede ser llenado por completo por «cubos» concebidos de la misma manera).

La sutileza del concepto de espacio fue realzada por el descubrimiento de que no existen cuerpos completamente rígidos. Todos los cuerpos son elásticamente deformables y alteran su volumen con un cambio de temperatura. Las estructuras, cuyas posibles configuraciones habrían de ser descritas por la geometría euclidiana, no pueden ser caracterizadas, por consiguiente, sin referencia a la física. Pero toda vez que la física, después de todo, debe echar mano de la geometría para la configuración de sus conceptos, el contenido empírico de la geometría puede ser establecido y comprobado sólo dentro del marco del conjunto de la física.

Dentro de esta situación debemos pensar en los atomistas y en su concepto de divisibilidad finita, porque los espacios de exten-

sión subatómica no pueden ser medidos. Los atomistas también nos fuerzan, en principio, a abandonar la idea de superficies de cuerpos sólidos exacta y estáticamente definidos. Para hablar con exactitud, no existen leyes *precisas* ni siquiera en la macroregión, para las posibles configuraciones de cuerpos sólidos que se tocan los unos a los otros.

A pesar de esto, nadie pensó en renunciar al concepto de espacio, porque se lo consideraba indispensable dentro del conjunto del satisfactorio sistema de la ciencia natural. En el siglo XIX, Mach fue el único que pensó con seriedad en la eliminación del concepto de espacio, cuando quiso reemplazarlo por la noción de la totalidad de las distancias instantáneas entre todos los puntos materiales. (Mach llevó a cabo este intento con el fin de llegar a una comprensión satisfactoria de la inercia.)

### *El campo*

En la mecánica de Newton el espacio y el tiempo desempeñan un doble papel. En primer lugar, desempeñan las funciones de portador o de marco de las cosas que ocurren en física, con respecto a la cual los fenómenos son descritos mediante las coordenadas de espacio y tiempo. En principio, la materia es concebida como algo que está compuesto por «puntos materiales», puntos cuyos movimientos constituyen un hecho físico. Cuando se considera la materia como continua, se suele suponer de manera provisional, cuando no se quiere o no resulta posible describir su estructura discreta. En este caso unas pequeñas partes (elementos de volumen) de la materia son tratadas en forma similar a puntos materiales, al menos en la medida en que estamos interesados sólo por los movimientos y no por las circunstancias que, de momento, no queremos o no nos sirve de nada atribuir a los movimientos (por ejemplo, los cambios de temperatura, los procesos químicos). El segundo papel del espacio y del tiempo es el de constituir un «sistema inercial». Los sistemas inerciales eran considerados distintos de todos los concebibles sistemas de referencia porque con respecto a ellos la ley de la inercia tenía validez.

Aquí, lo esencial es que la «realidad física», considerada independiente de los sujetos que la experimentan, fue concebida como algo que, en principio, consistía en espacio y tiempo por una parte y por



otra en puntos materiales de existencia permanente, en movimiento continuo con respecto al espacio y al tiempo. La idea de la existencia independiente del espacio y del tiempo puede ser expresada de una manera drástica así: si la materia tuviera que desaparecer, sólo quedarían tras ella el espacio y el tiempo (algo así como un escenario de las acciones físicas).

Este punto de vista ha sido superado a lo largo de un proceso que, en primer lugar, y en apariencia, nada tiene que ver con el problema del espacio y del tiempo; se trata del surgimiento del *concepto de campo* y su pretensión de reemplazar, en principio, la idea de partícula (punto material). Dentro de la estructura de la física clásica, el concepto de campo aparece como un concepto auxiliar en casos en los que la materia era tratada como un continuo. Por ejemplo, en la conducción térmica de un cuerpo sólido, el estado del cuerpo es descrito mediante la determinación de la temperatura en cada punto del cuerpo y en cada momento del tiempo. Desde el punto de vista matemático, esto significa que la temperatura  $T$  está representada como una expresión matemática (función) de las coordenadas de espacio y tiempo  $t$  (campo de temperatura). La ley de la conducción del calor es representada como una relación local (ecuación diferencial), que abarca todos los casos especiales de conducción del calor. La temperatura aquí no es más que un simple ejemplo del concepto de campo. Es decir, que se trata de una magnitud (o bien de un conjunto de magnitudes) que es función de las coordenadas y del tiempo. Otro ejemplo más es la descripción del movimiento de un líquido. En cada punto de ese líquido existe en cualquier momento una velocidad que, desde el punto de vista cuantitativo, es descrita por sus tres «componentes» con respecto a los ejes de un sistema de coordenadas (vector). Los componentes de la velocidad en un punto (componentes de campo) aquí también son funciones de las coordenadas  $(x, y, z)$  y del tiempo  $(t)$ .

Una de las características de los campos mencionados es la de que se presenten tan sólo dentro de una masa ponderable; sirven en forma exclusiva para describir un estado de esta materia. Según el desarrollo histórico del concepto de campo, donde no había materia tampoco podía existir campo. Pero durante el primer cuarto del siglo XIX se demostró que los fenómenos de la interferencia y de la difracción de la luz podían ser explicados, con una exactitud asombrosa, considerando la luz como un campo ondulatorio, análogo

go por completo al campo mecánico de vibraciones en los cuerpos sólidos elásticos. Fue así como se comenzó a sentir la necesidad de introducir un campo, que también podía existir en el «espacio vacío», en ausencia de materia ponderable.

Tal estado de cosas creaba una situación paradójica, porque, de acuerdo con su origen, el concepto de campo parecía quedar restringido a la descripción de estados en el interior de un cuerpo ponderable. Esto parecía tanto más cierto cuanto que se sostenía la convicción de que todo campo ha de ser considerado como un estado capaz de aceptar una interpretación mecánica, y esto presuponía la presencia de la materia. Y por ello se llegó a suponer que en todas partes, incluido el espacio que hasta ese momento había sido definido como vacío, existía una forma de materia a la que se denominó «éter».

La emancipación del concepto de campo de su base mecánica se sitúa entre los sucesos psicológicamente más interesantes registrados a lo largo del desarrollo del pensamiento físico. Durante el transcurso de la segunda mitad del siglo pasado, en relación con las investigaciones de Faraday y Maxwell, adquirió cada día mayor fuerza la convicción de que la descripción de los procesos electromagnéticos en términos de campo resultaba muy superior al tratamiento hasta entonces empleado, que se fundamentaba en los conceptos mecánicos de puntos materiales. Gracias a la introducción del concepto de campo en la electrodinámica, Maxwell logró predecir con éxito la existencia de ondas electromagnéticas, de cuya identidad esencial con la luz no se podía dudar, siquiera porque estaba probada la igualdad de su velocidad de propagación. Como consecuencia de ello, la óptica fue absorbida, en principio, por la electrodinámica. Un efecto psicológico de este enorme éxito fue que el concepto de campo ganó en forma gradual una mayor independencia con respecto a la armadura mecánica de la física clásica.

No obstante, en un primer momento se dio por sentado que los campos electromagnéticos debían ser interpretados como estados del éter y se trató de explicar, con gran empeño, dichos estados como mecánicos. Pero a medida que estos esfuerzos iban fracasando, la ciencia se acostumbró gradualmente a la idea de renunciar a esa interpretación mecánica. Sin embargo, aún perduraba la convicción de que los campos electromagnéticos debían ser estados del éter y esta era la situación hacia fines del siglo.

La teoría del éter trajo consigo una pregunta: ¿cómo se comporta el éter desde el punto de vista mecánico con respecto a los cuerpos ponderables? ¿Acompaña los movimientos de los cuerpos, o sus partes permanecen en reposo las unas con respecto a las otras? Muchos fueron los experimentos ingeniosos que se llevaron a cabo para decidir esta cuestión. En relación con esto, debemos mencionar los siguientes hechos importantes: la «aberración» de las estrellas fijas a consecuencia del movimiento anual de la tierra y el «efecto Doppler», es decir, la influencia del movimiento relativo de las estrellas fijas sobre la frecuencia de la luz que nos llega desde ellas, con frecuencias de emisión conocidas. Con excepción del experimento de Michelson-Morley, los resultados de todos estos hechos y experimentos fueron explicados por H. A. Lorentz partiendo del supuesto básico de que el éter no toma parte en los movimientos de los cuerpos ponderables y de que las partes del éter no tienen movimientos relativos las unas con respecto de las otras. De esta manera el éter apareció, por así decirlo, como la encarnación de un espacio absolutamente en reposo. Pero la investigación de Lorentz logró aún algo más. Explicó todos los procesos internos electromagnéticos y ópticos de los cuerpos ponderables conocidos en aquellos tiempos, a partir del supuesto de que la influencia de la materia ponderable sobre el campo eléctrico —e inversamente— se debe en forma exclusiva al hecho de que las partículas constitutivas de la materia llevan cargas eléctricas, que comparten los movimientos de esas partículas. Con respecto al experimento de Michelson y Morley, H. A. Lorentz demostró que el resultado obtenido al menos no contradice la teoría de un éter en reposo.

A pesar de todos estos hermosos éxitos, el estado de la teoría no era por completo satisfactorio, por varias razones. Por una parte, la mecánica clásica, de cuyo grado de aproximación a la realidad no se dudaba, enseña la equivalencia de todos los sistemas inerciales o «espacios» inerciales en la formulación de las leyes naturales, es decir, la invariancia de las leyes naturales con respecto a la transición de un sistema inercial a otro. Los *experimentos* electromagnéticos y ópticos, por otra parte, nos muestran lo mismo con notable exactitud. Pero los fundamentos de la *teoría* electromagnética nos han enseñado que hay un sistema inercial particular preferente, a saber, el del éter luminífero en reposo. Esta fundamentación teórica resultaba demasiado insatisfactoria. ¿No existía una modificación que,

como la mecánica clásica, conservara la equivalencia de los sistemas inerciales (principio de la relatividad especial)?

La respuesta a esta pregunta es la teoría de la relatividad especial. Esta teoría toma de la de Maxwell-Lorentz el supuesto de la constancia de la velocidad de la luz en el espacio vacío. Para que esto esté en armonía con la equivalencia de los sistemas inerciales (principio de la relatividad especial), debe abandonarse el carácter absoluto de la simultaneidad; además, las transformaciones de Lorentz para las coordenadas de tiempo y espacio valen para la transición de un sistema inercial a otro. El contenido total de la teoría de la relatividad especial está incluido en el siguiente postulado: las leyes de la naturaleza son invariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz. La importancia de este requisito estriba en el hecho de que limita las posibles leyes naturales de una manera definida.

¿Cuál es la posición de la teoría de la relatividad especial con respecto al problema del espacio? En primer lugar, tenemos que desterrar la opinión de que el carácter cuatridimensional de la realidad ha sido introducido por primera vez por esta teoría. Incluso en la física clásica un fenómeno es localizado por cuatro números, tres coordenadas espaciales y una coordenada temporal; de modo que se considera a la totalidad de los «sucesos» físicos inmersa en una variedad continua de cuatro dimensiones. Pero de acuerdo con la mecánica clásica, este continuo de cuatro dimensiones se fracciona objetivamente en el tiempo unidimensional y en el espacio tridimensional, espacio que sólo abarca los sucesos simultáneos. Esto ocurre con todos los sistemas inerciales. La simultaneidad de dos sucesos definidos con referencia a un sistema inercial implica la simultaneidad de estos sucesos con referencia a todos los sistemas inerciales. A esto aludimos al decir que el tiempo de la mecánica clásica es absoluto. De acuerdo con la teoría de la relatividad especial la cuestión es distinta. La totalidad de los sucesos que son simultáneos con un suceso seleccionado existe, es verdad, con relación a un sistema inercial particular, pero ya no en forma independiente de la elección del sistema inercial. El continuo de cuatro dimensiones ya no puede fraccionarse de manera objetiva en secciones que contengan todos los sucesos simultáneos. El «ahora» pierde para el mundo de extensión espacial su significado objetivo. Por este motivo el tiempo y el espacio han de ser considerados como un continuo de cuatro dimensiones que, desde un punto de vista objetivo, es irresoluble, si

lo que se desea es expresar la sustancia de las relaciones objetivas sin tener que recurrir a innecesarias arbitrariedades convencionales.

Al revelar la equivalencia física de todos los sistemas inerciales, la teoría de la relatividad especial demostró el carácter insostenible de la hipótesis de un éter en reposo. Por consiguiente, fue necesario renunciar a la idea de que el campo electromagnético debe ser considerado como el estado de un portador material. Por esta vía, el campo se convirtió en un elemento irreducible de la descripción física, irreducible en el mismo sentido en que lo era el concepto de materia en la teoría de Newton.

Hasta este momento hemos dirigido nuestra atención a describir en qué sentido los conceptos de espacio y de tiempo fueron *modificados* por la teoría de la relatividad especial. Ahora, enfoquemos nuestra atención en los elementos de la mecánica clásica adoptados por la teoría de la relatividad especial. También en este caso, las leyes naturales son válidas sólo cuando un sistema inercial está tomado como base de la descripción espacio-temporal. El principio de inercia y el principio de la constancia de la velocidad de la luz son válidos exclusivamente con respecto a un *sistema inercial*. Las leyes de campo tampoco tienen significado y validez más que en relación con un sistema inercial. De este modo, como en la mecánica clásica, el espacio es también un componente independiente en la representación de la realidad física. Si imaginamos que la materia y el campo han sido eliminados, el espacio inercial o, para decirlo con mayor exactitud, ese espacio junto con su correspondiente tiempo, permanecerá. La estructura cuatridimensional (espacio de Minkowski) es considerada portadora de la materia y del campo. Los espacios inerciales, junto con sus correspondientes tiempos, no son más que sistemas cuatridimensionales de coordenadas privilegiados que están enlazados entre sí por las transformaciones lineales de Lorentz. En razón de que en esta estructura cuatridimensional ya no existen secciones que representen el «ahora» en forma objetiva, los conceptos de ocurrencia y de devenir no están por completo en suspenso, pero resultan complicados. Por lo tanto, parece más natural considerar la realidad física como un ente cuatridimensional y no, como se ha hecho hasta ahora, como la *evolución* de un ente tridimensional.

Este espacio rígido de cuatro dimensiones de la teoría de la relatividad especial es, hasta cierto punto, un análogo cuatridimensional del éter tridimensional rígido de Lorentz. También para esta

teoría es válida la siguiente enunciación: la descripción de los estados físicos postula al espacio como dado inicialmente y como dueño de una existencia independiente. Es decir, que tampoco esta teoría disipa el desasosiego de Descartes ante la existencia independiente, o incluso apriorística, del «espacio vacío». La verdadera finalidad de la discusión elemental reseñada en estas líneas es demostrar hasta qué punto estas dudas han sido superadas por la teoría de la relatividad general.

*El concepto de espacio en la teoría de la relatividad general*

En un primer momento esta teoría surgió del esfuerzo por comprender la igualdad de las masas inercial y pesante. Escogemos como punto de partida un sistema inercial  $S_1$ , cuyo espacio —desde el punto de vista físico— está vacío. En otras palabras, en esta parte del espacio por nosotros contemplada no existen ni materia (en el sentido habitual) ni un campo (en el sentido de la teoría de la relatividad especial). Con respecto a  $S_1$  existe un segundo sistema de referencia,  $S_2$ , en aceleración uniforme. Por consiguiente,  $S_2$  no es un sistema inercial. Con respecto a  $S_2$  toda masa testigo se ha de mover con una aceleración que es independiente de su naturaleza física y química. Por lo tanto, con respecto a  $S_2$  existe un estado que, al menos en una primera aproximación, no puede distinguirse de un campo gravitatorio. El siguiente concepto, pues, es compatible con los hechos observables:  $S_2$  también es equivalente a un «sistema inercial»; pero con respecto a  $S_2$  comprobamos que existe un campo gravitatorio (homogéneo), cuyo origen no nos preocupa. Así pues, cuando el campo gravitatorio pasa a ser incluido en nuestro modelo, el sistema inercial pierde su significado objetivo, suponiendo que este «principio de equivalencia» puede extenderse a cualquier movimiento relativo de los sistemas de referencia. Si es posible edificar una teoría consistente sobre la base de estas ideas fundamentales, tal teoría satisfará por sí misma la igualdad de las masas inercial y pesante, igualdad que ha sido sólidamente confirmada por vía empírica.

Considerada desde el punto de vista cuatridimensional, una transformación no lineal de las cuatro coordenadas corresponde a la transición de  $S_1$  a  $S_2$ . Y aquí surge una pregunta: ¿qué tipo de transformaciones no lineales serán las permitidas o cómo se han

de generalizar las transformaciones de Lorentz? Para responder a esta pregunta es decisiva la siguiente consideración:

Adjudicamos al sistema inercial de la teoría primitiva esta propiedad: las diferencias de coordenadas son medidas por reglas «rígidas» estacionarias y las diferencias de tiempo por relojes en reposo. Este primer supuesto se complementa con otro: para la colocación relativa y el ajuste de las reglas de medición en reposo, son válidos los teoremas de «longitudes» de Euclides. De los resultados de la teoría de la relatividad especial se concluye, pues, a través de consideraciones elementales, que esta interpretación física directa de las coordenadas se pierde para los sistemas de referencia ( $S_2$ ) acelerados con respecto a los sistemas inerciales ( $S_1$ ). Pero si esto es así, ahora las coordenadas sólo expresan el orden o el rango de «contigüidad» y, en consecuencia, el número de dimensiones del espacio, pero no expresan ninguna de sus propiedades métricas. Nos vemos pues llevados a extender las transformaciones hasta incluir las transformaciones continuas\*. Esto conduce al principio de la relatividad general: las leyes naturales deben ser covariantes con respecto a transformaciones continuas arbitrarias de las coordenadas. Este requisito (combinado con el de la mayor simplicidad lógica posible de las leyes) limita las leyes naturales relevantes con una fuerza incomparablemente mayor que la del principio de la relatividad especial.

Este encadenamiento de ideas está basado, en esencia, en el campo como concepto independiente, porque las condiciones que prevalecen con respecto a  $S_2$  son interpretadas como un campo gravitatorio, sin que la cuestión de la existencia de las masas que producen este campo sea planteada. En virtud de estos razonamientos, también se puede llegar a captar el motivo por el cual las leyes de campo gravitatorio puro están más directamente enlazadas con la idea de la relatividad general que las leyes de campos generales (cuando, por ejemplo, está presente un campo electromagnético). Es decir, que tenemos un buen fundamento para suponer que el espacio «libre de campo» de Minkowski representa un caso especial posible de las leyes de la naturaleza; de hecho, el más simple de los casos especiales concebibles. Con respecto a su carácter métrico, ese espacio está caracterizado por el hecho de que  $dx_1^2 + dx_2^2 +$

---

\* Esta forma poco exacta de expresarse quizá baste en este caso.

$dx_3^2$  es el cuadrado de la separación espacial, medida con un cierto patrón, de dos puntos infinitesimalmente cercanos de una sección transversal de un «espacio» tridimensional (teorema de Pitágoras) donde  $dx_4$  es la separación temporal, medida con una unidad de tiempo adecuada, de dos sucesos con  $(x_1, x_2, x_3)$  comunes. Todo esto simplemente significa que se adjudica un significado métrico objetivo a la cantidad

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2, \quad (1)$$

como se puede demostrar fácilmente con la ayuda de las transformaciones de Lorentz. Desde el punto de vista matemático, este hecho corresponde a la condición de que es invariante con respecto a las transformaciones de Lorentz.

Si ahora, en el sentido del principio de la relatividad general, este espacio (véase la ecuación 1) quedara sujeto a una transformación continua arbitraria de coordenadas, entonces la cantidad  $ds$  estaría expresada en el nuevo sistema de coordenadas por la relación

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k \quad (1a)$$

sumada para todos valores de los índices  $i$  y  $k$  desde 1,1; 1,2; ... hasta 4,4. Los términos  $g_{ik}$  ahora no son constantes, sino funciones de las coordenadas, que están determinadas por la transformación elegida arbitrariamente. Sin embargo, los términos  $g_{ik}$  no son funciones arbitrarias de las nuevas coordenadas, sino funciones tales que la forma (1a) puede volver a transformarse en la forma (1) mediante una transformación continua de las cuatro coordenadas. Para que esto sea posible, las funciones  $g_{ik}$  deben satisfacer ciertas ecuaciones covariantes generales de condición, que fueron derivadas por B. Riemann más de medio siglo antes de que se formulara la teoría de la relatividad general («condición de Riemann»). De acuerdo con el principio de equivalencia, (1a) describe en una forma covariante general un campo gravitatorio de un tipo especial cuando las funciones satisfacen la condición de Riemann.

Por consiguiente, de aquí se deduce que las leyes del campo gravitatorio puro de tipo general deben satisfacerse cuando la condición de Riemann queda satisfecha; pero ha de ser más débil o menos restrictiva que la condición de Riemann. De esta manera, las



leyes del campo gravitatorio puro están prácticamente determinadas por completo, un resultado que aquí no hemos de justificar en forma más detallada.

Ahora nos hallamos en posición de ver hasta qué punto la transición hacia la teoría de la relatividad general modifica el concepto de espacio. De acuerdo con la mecánica clásica y de acuerdo con la teoría de la relatividad especial, el espacio (el espacio-tiempo) tiene una existencia independiente tanto de la materia como del campo. Con el fin de estar en condiciones de describir lo que llena el espacio y es dependiente de las coordenadas, ha de creerse en la existencia previa del espacio-tiempo o del sistema inercial con sus propiedades métricas, porque de otra manera la descripción de «lo que llena el espacio» carecería de sentido\*. Sobre la base de la teoría de la relatividad general, por otra parte, el espacio, por oposición a «lo que llena el espacio» que depende de las coordenadas, no tiene existencia separada. Es decir, que un campo gravitatorio puro podría haber sido descrito en términos de las  $g_{ik}$  (como funciones de las coordenadas), mediante la solución de las ecuaciones gravitatorias. Si imaginamos que el campo gravitatorio, es decir, las funciones  $g_{ik}$ , es eliminado, ya no quedará un espacio del tipo (1), sino absolutamente *nada*, ni siquiera un «espacio topológico». Y esto porque las funciones  $g_{ik}$  describen no sólo el campo, sino también —y al mismo tiempo— las propiedades estructurales topológicas y métricas de la variedad. Un espacio del tipo (1), juzgado desde el punto de vista de la teoría de la relatividad general, no es un espacio sin un campo, sino un caso especial del campo  $g_{ik}$ , para el cual —para el sistema de coordenadas que se haya utilizado que, en sí mismo no tiene significación objetiva— las funciones  $g_{ik}$  tienen valores que no dependen de las coordenadas. No existe algo que se pueda denominar espacio vacío, es decir, un espacio sin campo. El espacio-tiempo no reivindica para sí una existencia propia, sino que reclama la categoría de cualidad estructural del campo.

De modo que Descartes no se hallaba tan lejos de la verdad cuando creía que era necesario excluir la existencia de un espacio vacío.

---

\* Si consideramos que todo lo que llena el espacio (por ejemplo, el campo), debe ser eliminado, aún quedará el espacio métrico de acuerdo con (1), que también podría determinar el comportamiento inercial de un cuerpo testigo que fuera introducido en él.

La noción, por cierto, parece absurda, en la medida en que la realidad física sólo es vista en los cuerpos ponderables. Hace falta la idea de campo como representante de la realidad, en combinación con el principio de la relatividad general para mostrar cuál era el verdadero meollo de la idea de Descartes: no existe espacio «vacío de campo».

### *Teoría gravitatoria generalizada*

Por todo lo visto hasta aquí, comprendemos que puede obtenerse fácilmente la teoría del campo gravitatorio puro, sobre la base de la teoría de la relatividad general, porque podemos confiar en que el espacio «libre de campo» de Minkowski con su métrica, en conformidad con (1) debe satisfacer las leyes generales de campo. A partir de este caso especial se siguen las leyes de la gravitación mediante una generalización que está prácticamente libre de arbitrariedad. El posterior desarrollo de la teoría no está determinado de manera tan inequívoca por el principio de la relatividad general. Este desarrollo ha sido abordado en diversas direcciones a lo largo de las últimas décadas. El factor común de todos esos intentos es concebir la realidad física como un campo y, lo que es más, como un campo que es una generalización del campo gravitatorio y en el que la ley de campo es una generalización de la ley del campo gravitatorio puro. Después de largas investigaciones, ahora creo haber hallado la forma más natural de esta generalización, pero todavía no he podido comprobar si esta ley generalizada es acorde con los datos empíricos\*.

La cuestión de la ley de campo concreta es secundaria en las consideraciones generales precedentes. En el momento actual, el problema principal está en determinar si una teoría de campo, de la índole de la que aquí contemplamos, está en condiciones de llevarnos hasta nuestro objetivo. Para esto será necesario obtener una

---

\* La generalización puede caracterizarse de la siguiente manera: según su derivación del «espacio vacío de Minkowski», el campo gravitatorio puro de las funciones  $g_{ik}$  tiene la propiedad de la simetría, expresada por  $g_{ik} = g_{ki}$  ( $g_{12} = g_{21}$ , etc.). El campo generalizado es del mismo tipo, pero sin esta propiedad de simetría. La derivación de la ley de campo es completamente análoga a la del caso especial de la gravedad pura.

teoría que describa en forma exhaustiva la realidad física, incluido en ella el espacio de cuatro dimensiones, por medio de un campo. La actual generación de físicos se inclina por responder en forma negativa a esta pregunta.

De acuerdo con la forma actual de la teoría cuántica, se cree que el estado de un sistema no puede especificarse de manera directa, sino sólo de un modo indirecto por la descripción estadística de los resultados de las mediciones que se hayan obtenido sobre el sistema. En términos generales prevalece la convicción de que la dualidad experimental (estructura corpuscular y estructura ondulatoria) puede ser comprendida tan sólo mediante un debilitamiento del concepto de realidad. Por mi parte, creo que una renuncia teórica de tan largo alcance no está justificada, de momento, por el estado actual de nuestros conocimientos y que no hay motivos para no continuar hasta el final del camino abierto por la teoría de campo relativista.