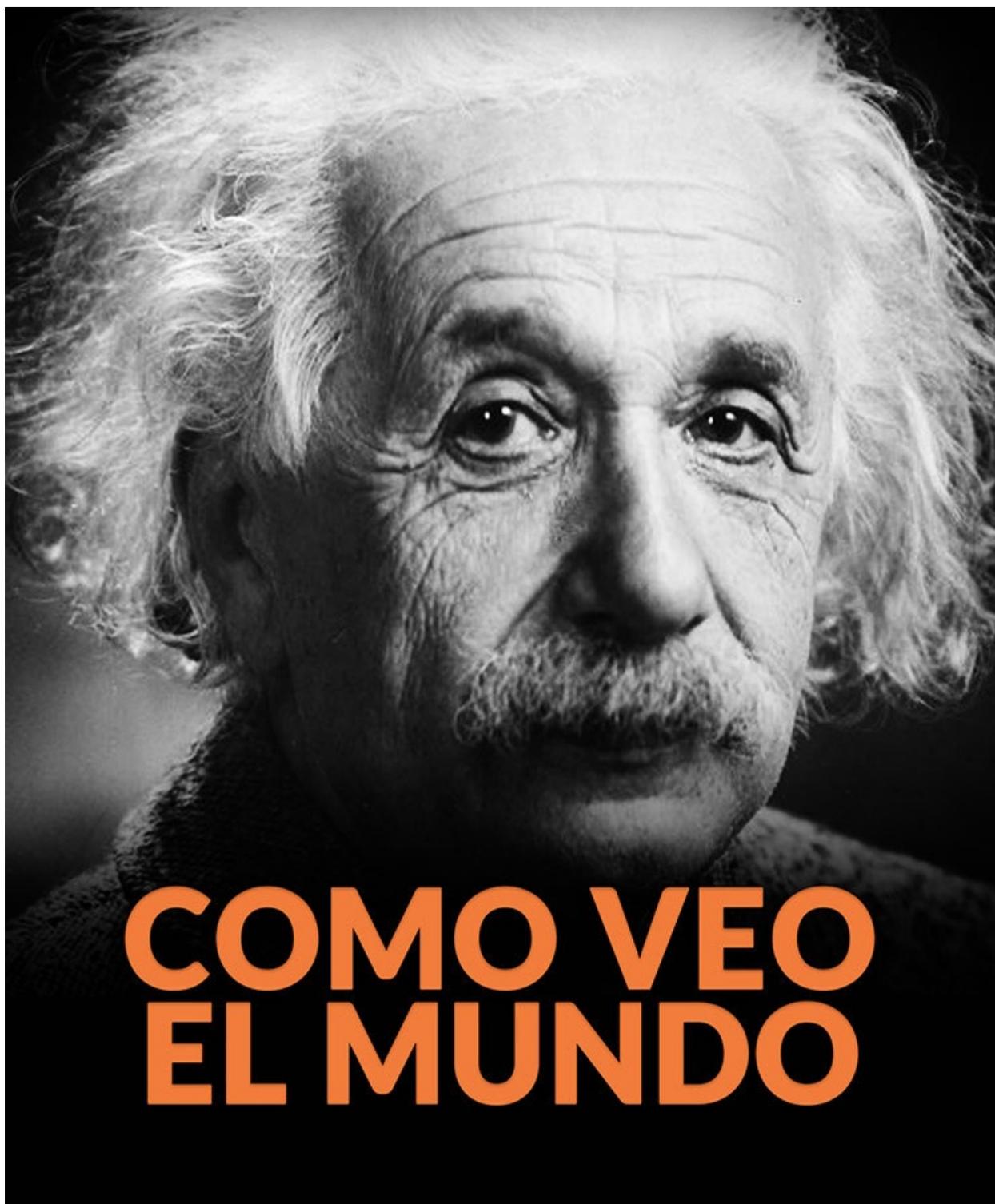


COMO VEO EL MUNDO

ALBERT EINSTEIN



COMO VEO EL MUNDO

ALBERT EINSTEIN

ALBERT EINSTEIN

COMO VEO

EL MUNDO

Traducción y edición 2021 de ©David De Angelis

Todos los derechos reservados

ÍNDICE

[PREFACIO](#)

[CIENCIA ETERNA Y CIENCIA DE LOS HOMBRES](#)

[SOCIEDAD Y PERSONALIDAD](#)

[Libertad espiritual de los individuos y unidad social](#)

[Decadencia de la dignidad humana](#)

[El sistema económico obstaculiza la libre evolución](#)

[Valor social de la riqueza](#)

[Por qué vivimos](#)

[Límites de nuestra libertad](#)

Bienestar y felicidad

Un caballo que tira de sí mismo

Todos deben ser respetados

La guerra

RELIGIÓN Y CIENCIA

El sentido de la vida

Religiosidad cósmica

La base humana de la moral

Ids de forma humana

La religiosidad cósmica no conoce dogmas

Demócrito Francisco de Asís y Spinoza se acercan

[Antagonismo entre la religión del terror y la ciencia](#)

[Maravilloso acuerdo entre la religiosidad cósmica y la ciencia](#)

[Elevar a los hombres](#)

[Paz](#)

[La Internacional de la Ciencia](#)

[INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA](#)

[La verdad científica y no](#)

[Fundamentos de la investigación](#)

[Cuantos de Planck](#)

[LA CUESTIÓN DEL MÉTODO](#)

EVOLUCIÓN DE LA FÍSICA: KEPLER Y NEWTON

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE REALIDAD FÍSICA

CARACTERES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

¿QUÉ ES LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD?

EL ESPACIO, EL ÉTER Y EL CAMPO

ORIGEN DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERALIZADA

PREFACIO

Me parece que sólo he sido como un niño en la orilla del mar, divirtiéndome al encontrar de vez en cuando un guijarro más liso o una concha más graciosa de lo habitual, mientras el gran océano de la verdad seguía sin ser explorado ante mí.

ISAAC NEWTON, "Memorias de Brewster".

El objetivo de este libro es ofrecer, a través de una diligente selección de los escritos de Einstein, una representación concisa pero clara y unificada de sus doctrinas científicas y concepciones filosóficas. Sus escritos no son muchos: unas breves memorias, algunos ensayos bastante sucintos, conferencias y entrevistas son todo lo que se puede extraer para formarse una imagen concreta de su filosofía y su actitud ante la vida.

Para que el lector no especializado pueda comprender la esencia y el valor de las teorías de la relatividad, hemos reproducido en su texto original algunos escritos y discursos de Einstein destinados a un público no matemático y que exponen brevemente la génesis y el carácter de estas teorías. Escritos en un lenguaje conciso y claro, sin referencias, salvo raras excepciones, a símbolos y fórmulas de alta matemática, darán a cualquier lector de educación media una visión clara de las teorías de Einstein y de la evolución lógica del pensamiento que las concibió y condujo.

Dado que este libro pretende tener un carácter eminentemente divulgativo, hemos omitido las obras que Einstein dedicó a los especialistas: el análisis de los conceptos que componen estos escritos toca las cimas más altas de las

matemáticas y el lector se encontraría con dificultades insuperables.

Preocupados por no alterar en lo más mínimo la formulación genuina de las ideas del gran físico, hemos mantenido deliberadamente cierta dureza de lenguaje y de forma, necesariamente seca y sin adornos en la parte científica. El resultado es una traducción fiel, pero quizá ingrata para las exigencias musicales de la mentalidad latina. Sin embargo, incluso la forma de su prosa, que aquí está llena de altisonancias, contribuye a resaltar uno de los rasgos fundamentales de Einstein: su gran sencillez y su absoluta ausencia de formalismos externos. Toda su vida es un ejemplo de sencillez y modestia.

Albert Einstein nació en Ulm (Wüttemberg) el 14 de marzo de 1879. En su niñez no hubo ningún signo de facultades extraordinarias: en vano se buscarían los signos premonitorios de ese genio que luego estalló, poderoso y vigoroso, en su juventud. Comenzó sus estudios en Múnich en la escuela de gramática de Liutpold y recibió su primera educación matemática de un tío ingeniero. Aunque mostró una marcada aptitud para las ciencias exactas, en las que superaba con creces a sus compañeros, no se distinguió por méritos singulares. "Parece tener muy buenas cualidades, pero no es muy proclive al estudio", fue la opinión de uno de sus profesores.

En 1894, tras un cambio de fortuna, la familia Einstein abandonó Alemania y se trasladó a Italia, donde su padre trabajó como ingeniero eléctrico en Milán, Pavía, Isola della Scala y otros lugares de la región del Véneto. El joven Albert llegó hasta Génova, desde donde emigró a Suiza y, en medio de no pocas dificultades económicas, se matriculó en la escuela cantonal de Aarau, donde obtuvo un certificado de admisión en la famosa escuela politécnica de Zúrich. Aquí recibió clases de Herman Minkowski, que más tarde se convertiría en uno de los partidarios más tenaces e influyentes de la teoría de la relatividad para la que el poderoso pensamiento de Einstein había sentado las bases. En 1910 se licenció y obtuvo el título de profesor de matemáticas y física. En 1911 obtuvo la nacionalidad suiza y trabajó como experto técnico en la Oficina Federal de Patentes de Berna.

Los años que van de 1902 a 1909 representan el periodo de su más intensa producción científica. Su descubrimiento de los fundamentos de la teoría especial de la relatividad (relatividad en sentido estricto o del movimiento uniforme y rectilíneo) le valió un nombramiento como profesor titular de matemáticas superiores en la Politécnica de Zúrich en 1912. En noviembre de 1913 obtuvo una cátedra de física en la Academia Prusiana de Ciencias de Berlín y en la primavera de 1914, sucediendo a Enrico Van't Hoff, fue llamado a dirigir el Instituto Kaiser-Wilhelm de física.

En 1933, la persecución política y racial de los nazis obligó a Einstein a abandonar Europa. Emigró a los Estados Unidos de América y se incorporó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde permanece en la actualidad.

Albert Einstein aportó una ingeniosa creación a la física moderna que permanecerá durante siglos como uno de los hitos de la historia del pensamiento humano. En 1905, sentó las bases de la teoría especial de la relatividad basada en la constancia de la velocidad de la luz en el vacío en su libro *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Al reexaminar los conceptos de espacio y tiempo y la simultaneidad de dos acontecimientos que ocurren en puntos distantes, pudo establecer, mediante una lógica extremadamente sutil, la inercia de la energía y la interpretación geométrica de las fuerzas de gravitación.

Uno de los resultados que Einstein había deducido de esta teoría, a saber, que la masa y la energía son equivalentes, iba a tener una confirmación aterradora cuarenta años después, con una fuerza de destrucción sin precedentes: la detonación de la primera bomba atómica. Pocos saben que Einstein desempeñó un papel clave en este acontecimiento. Fue gracias a su intervención directa que el presidente Roosevelt puso a disposición las colosales sumas de dinero necesarias para la investigación que conduciría a la bomba de Hiroshima e, implícitamente, al fin de la guerra. En 1939, los físicos Fermi y Szilard habían logrado importantes resultados en el campo de la física atómica, especialmente en la desintegración del uranio, y se habían dado cuenta de las enormes

posibilidades de utilizar la energía atómica con fines bélicos. Sin embargo, sabían que no serían escuchados a menos que el asunto fuera presentado directamente a una alta figura mundial, Fermi y Szilard conferenciaron con Einstein. Einstein no deseaba inmiscuirse en asuntos militares, ni quería fomentar la construcción del arma más terrible jamás fabricada por el hombre. Sin embargo, sabía que si Alemania era la primera en poseer energía atómica, no dudaría en utilizarla como instrumento de dominación mundial. Unos días más tarde, Einstein escribió al presidente Roosevelt: "Los recientes trabajos de E. Fermi y L. Szilard, que me fueron presentados en forma de manuscrito, me convencen de que el elemento uranio puede ser utilizado como una nueva e importante fuente de energía en un futuro próximo.... Una sola bomba de este tipo... explotando en un puerto... podría destruir muy fácilmente todo el puerto junto con el territorio circundante. Las consecuencias de esta carta son bien conocidas.

Dejando a un lado los notables trabajos que realizó sobre la teoría de los movimientos brownianos, sobre la teoría estadística de los campos gravitatorios y la poderosa contribución que hizo a la teoría cuántica (a Einstein se le atribuye la introducción del fotón en la ciencia, corroborada por los descubrimientos posteriores de los últimos años), no se puede pasar por alto, por su inmenso alcance, la memoria ya clásica que apareció en 1916, Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie. Incluye una nueva e ingeniosa teoría de la gravitación con sus más brillantes consecuencias y predicciones: explicación de la aceleración secular en la perihelia de los planetas; desviación de los rayos de luz en un campo gravitatorio; desplazamiento de las líneas del espectro hacia el rojo, etc. Esta teoría iba a tener una rotunda confirmación por los hechos en 1919. Y he aquí cómo.

En su teoría, Einstein predijo el desplazamiento de las imágenes de las estrellas durante un eclipse total de sol (desviación de los rayos de luz en un campo gravitatorio). El 29 de marzo de 1919 se produciría un eclipse total de sol, que podría proporcionar condiciones favorables para la verificación de la teoría de Einstein. La Royal Society y la Real Sociedad Astronómica de Londres nombraron un comité presidido por el distinguido físico Sir Arthur Eddington para que realizara los preparativos de una expedición a la zona donde el sol

aparecería totalmente oscurecido. Se enviaron dos expediciones a dos puntos muy distantes dentro de la zona del eclipse total: una a Sobral, en el norte de Brasil, y la otra a las Islas Príncipe, en el Golfo de Guinea. El 6 de noviembre de 1919, la Royal Society y la Royal Astronomic Society anunciaron que los rayos de luz se desvían efectivamente en el campo gravitatorio del sol y precisamente en la cantidad predicha por la nueva teoría de Einstein. A. N. Whitehead, distinguido filósofo y matemático contemporáneo, que estuvo presente en esa sesión, dice entre otras cosas: "Tuve la suerte de estar presente en la reunión de la Royal Society de Londres cuando el Astrónomo Real anunció que las placas fotográficas del famoso eclipse, medidas por sus colegas del Observatorio de Greenwich, habían confirmado la predicción de Einstein de que los rayos se desvían al pasar cerca del sol. Había una atmósfera de drama griego. Éramos el coro que comentaba los decretos del destino, revelados por el desarrollo de acontecimientos excepcionales... en el fondo el retrato de Newton nos recordaba que la mayor generalización científica estaba ahora, después de más de dos siglos, a punto de recibir su primera modificación... La gran aventura del pensamiento había llegado por fin a la orilla. La esencia dramática de la tragedia no es la desgracia: reside en el progreso inexorable de las cosas... esta inexorabilidad es la que impregna el pensamiento científico. Las leyes de la física son los decretos del destino".

En aquella época, Sir J. Thomson, el famoso físico, era presidente de la Royal Society. En la apertura de la sesión calificó la teoría de Einstein como "uno de los mayores logros en la historia del pensamiento humano". Y añadió: "No es el descubrimiento de una isla apartada, sino de todo un continente de nuevas ideas científicas". Los científicos de la Royal Society tuvieron que reconocer ahora que la observación directa de la naturaleza había confirmado la teoría de la curvatura del espacio y la invalidez de la geometría euclidiana en el campo gravitatorio.

El trabajo de Einstein continúa: hace unos meses anunció que había llegado a una "Teoría Generalizada de la Gravitación" que tiende a vincular las dos teorías de la relatividad y la cuántica en una única relación, lo que significa todos los fenómenos físicos conocidos. Es posible que se necesiten muchos años para comprobar esta teoría de forma experimental. Al hacer el anuncio, el gran físico

dijo: "Debido a las dificultades matemáticas, todavía no he encontrado una forma práctica de comprobar los resultados de mi teoría mediante la demostración experimental.

Para concluir estas breves consideraciones, nos gustaría citar la opinión sobre la obra de Einstein de un gran físico francés, Louis de Broglie, a quien debemos, entre otras cosas, las nuevas ideas que subyacen a la mecánica ondulatoria: "Para todos los hombres cultos, se dediquen o no a alguna rama de la Ciencia, el nombre de Albert Einstein evoca el ingenioso esfuerzo intelectual que, trastocando los datos más tradicionales de la física, logró establecer la relatividad de las nociones de espacio y tiempo, la inercia de la energía y la interpretación un tanto puramente geométrica de las fuerzas de gravitación. Se trata, en efecto, de una obra admirable, comparable a las más grandes obras encontradas en la historia de la ciencia, como la de Newton; por sí misma, bastaría para asegurar a su autor una gloria imperecedera".

Remo Valori

CIENCIA ETERNA Y CIENCIA DE LOS HOMBRES

El mito que más fascina al hombre, que siempre vuelve a él con fábulas inocentes, con los relatos fantásticos de las religiones "reveladas", con la ciencia "metafísica", es el del paraíso terrenal perdido, el de la legendaria edad de oro. Una época sin tiempo y quizás sin espacio, en la que el hombre estaba inmerso en "todo" y "comprendía" las cosas y todos los seres.

Pero si el mito es realmente fascinante, parece ensombrecer, incluso en las mentes de los "más grandes", una especie de sordo resentimiento contra el peso, aunque "claro y distinto" pero atormentador, de un conocimiento basado dramáticamente en la razón humana, basada a su vez sólo en sí misma y en su historia.

¿Es el deseo de apoderarse de las llaves de la "ciencia eterna", como gritó Fausto? ¿Aprehender de una vez por todas la ciencia "absoluta", captar el "universo" en su inmutabilidad? Y así, en cierto sentido, mientras se tienen los medios para fabricar más máquinas y llegar a otros planetas y quizás a otros sistemas solares, ¿poner en su lugar nuestra razón?

Esta "emboscada" mística y metafísica de nuestro intelecto, absit injuria verbis, nos recuerda extrañamente al mismo tiempo la Hiperurania de Platón, un objetivo bimilenario que los humoristas casi nunca aciertan, y la "emboscada" de las mejillas de la joven, que también asegura la continuación de la especie. Lo que quiero decir es que aunque es un planteamiento teórico muy peligroso, tiene un enorme valor "práctico" que nadie puede negar y mucho menos ignorar.

¿Qué importa, en efecto, si mañana estas fórmulas que hoy enmarcan el mundo y

lo cierran en las garras de su círculo cerrado se verán entonces como ilusorias, o al menos limitadas? Ahora son toda la verdad, ahora nos sirven. Igual que la astronomía de Ptolomeo nos sirvió en su día para guiar nuestras naves, igual que la alquimia de Ramon Llull y la "magia" de Paracelso, e igual que el sistema copernicano y la física de Galileo y Newton. Ahí radica la grandeza y el dramatismo del pensamiento: en aferrarse continuamente a la verdad y ver cómo se escapa continuamente en la búsqueda de una verdad más verdadera, de una realidad aún más real que encontrará infinitamente otras verdades "más verdaderas" y otras realidades "más reales".

La ciencia, con sus "descubrimientos objetivos" y sus logros, es una gran parte, pero sólo una parte de la historia de nuestro pensamiento.

"Las matemáticas son una ciencia en la que no se sabe de qué se habla y no se sabe si lo que se dice es cierto". Estas son las palabras de Bertrand Russell, un distinguido matemático contemporáneo.

¿Es una mera paradoja irónica o tiene una base de verdad? Veamos sus dos caras. Primero: los números son creaciones libres del espíritu humano y, por lo tanto, ellos, y todas las verdades matemáticas, no tienen ningún valor fuera de nuestro propio pensamiento. Las matemáticas no son verdaderas ni falsas porque la verdad o la falsedad de sus conceptos sólo depende de nuestra deliberación para aceptar o no la hipótesis de la que se derivan deductivamente. ¿Puede decirnos la verdad una ciencia que se basa sistemáticamente en hipótesis?

El mundo matemático se rige, pues, por nuestra voluntad, y aunque los conceptos matemáticos son universales no son concretos porque ignoran la realidad de las cosas y están vacíos de contenido representativo.

Ponemos símbolos en lugar de las cosas que hay que numerar, pero ¿puede la

sustitución de la cosa por un símbolo darnos una mejor comprensión de la misma?

Simia philosophiae también fue llamada matemática y promotora de "superstición": ¿no están los conceptos de tiempo y espacio, en el gran Newton, cargados de nieblas metafísicas, que él considera como absolutas, como "sensores de Dios"? ¿Y acaso Lorentz, que nos introduce en la teoría de la relatividad, no considera también la "velocidad constante de la luz" como un absoluto, como una "especie de rayo que parte del ojo divino"? Una especie de misterio inalcanzable. En aras de la brevedad, nos hemos limitado a dos ejemplos ilustres más cercanos a la teoría de la relatividad.

El espacio y el tiempo también son ficciones conceptuales, construcciones del intelecto. Y ya ni siquiera se consideran "formas" de intuición. La intuición, nos dice el filósofo, está desprovista de toda determinación espacial y temporal. Y, entonces, ¿la cuestión de las famosas dimensiones del espacio? El filósofo responde: dado que el espacio es una ficción conceptual, las dimensiones (una, dos, tres, cuatro, n dimensiones) no son inherentes a la "espacialidad", sino que dependen únicamente de la regla arbitraria que se decida seguir para determinarla. De hecho, el propio Einstein habla de su incertidumbre a la hora de atribuir cuatro o más dimensiones al espacio, y que finalmente se decidió por cuatro dimensiones porque era lo más "práctico". Algunos matemáticos también han construido una teoría de campo de grado fraccionario, en la que el número n de dimensiones del espacio puede tener valores fraccionarios. Esto asombró mucho, como relata Albèrgamo, a los propios ideadores, pero no al filósofo: "quien tiene que ver con el puro vacío puede hacer lo que quiera". Por lo tanto, "el proyecto de una ciencia matemática de la naturaleza es bastante inexorable y, por lo tanto, tal ciencia debe ser considerada por su impracticabilidad, no como un ideal de las ciencias naturales, como su fin y su alma, sino como una ilusión y un espejismo, que nunca podrá realizarse ni siquiera parcialmente, ya que el concepto empírico no puede convertirse en matemático si no es anulando precisamente su carácter empírico, su concreción cualitativa".

La maravillosa "armonía" del universo, la posibilidad misma de comprenderlo racionalmente no son más que la "armonía" de nuestro espíritu, que tiende irresistiblemente a coordinar el caos. El niño (o el hombre primitivo), cuando adquiere por primera vez la conciencia de sí mismo, regula el mundo caótico de las cosas interiores y exteriores según las leyes del espíritu, las reglas de sus órganos. Todo, por supuesto, incluso la experiencia más "científica". El hombre proyecta ineludiblemente todo su espíritu en el universo hasta donde puede investigarlo y penetrarlo, de modo que, en cierto sentido, podemos decir que la gran investigación científica, como el arte, es la autobiografía de la especie humana, es decir, la historia y la profundización de nosotros mismos, que sólo se diferencia del arte en que éste es la autobiografía de la humanidad en sus personas individuales pero universales, mientras que la ciencia es la autobiografía de la especie. "El Todo no es ni espacio ni tiempo, sino historia" son palabras de un físico relativista, Weyl.

Segunda cara. Pero el filósofo debe reconocer: "de alguna manera se empieza a contar sumando restando, no sólo en los brazos de la nodriza, sino en el mismo instante en que se ha empezado a vivir. No se puede no calcular, tanto que se calcula siempre y por todos". No sólo eso, sino que la matematización no es sólo cosa de los humanos, sino de todos los seres que tienen el más mínimo atisbo espiritual. Así, los pájaros, los perros y los insectos aritmizan cuando buscan, por ejemplo, una casa, o la araña cuando construye su tela con figuras geométricas perfectas. Y las propias plantas: ¿quién no ha observado, por ejemplo, las acrobacias de las plantas trepadoras para agarrarse a un soporte válido? O, de forma más sencilla y general, ¿las contorsiones "conscientes" de cualquier planta en busca de luz o humedad? Y finalmente, ¿por qué no? ¿Organismos unicelulares microscópicos que arrebatan sus presas y viven y se mueven según su propio plan?

El científico, apoyándose en la persistencia y universalidad de las matemáticas, afirma que son "objetivas" no sólo de nuestro espíritu sino de la "materia". Y que, por tanto, la naturaleza está verdaderamente escrita en "triángulos, círculos, esferas, conos, pirámides y otras figuras matemáticas" (Galilei) y que éste es, en efecto, su verdadero y único "lenguaje". El "lenguaje" incluso de los protones-neutrones. Al fin y al cabo, ¿no postuló el filósofo y gran matemático Leibnitz

que las mónadas -es decir, la sustancia más simple e incluso inextensa, que constituye la estructura del universo (algo así como, por ejemplo, nuestros protones neutrones)- pensaban y matematizaban las cosas?

¿Y si, entonces, la supuesta abstracción de las fórmulas matemáticas fuera una verdadera esencialidad? ¿Si no fuera imprescindible implicar las múltiples realidades individuales contingentes? ¿Y si las cosas y la vida misma fueran números, es decir, relaciones matemáticas de una matemática muy elevada, de las que sólo vislumbraríamos por el momento algunos elementos y en las que, por tanto, todos los fenómenos de la vida no encontrarían un lugar en relativa libertad: nacimiento amor odio pensamiento muerte y nacimiento de nuevo?

Comprenderíamos el universo en su verdadera esencia al margen de los esquemas intelectuales: las leyes de nuestra razón matemática serían idénticas a las que rigen el universo, lo "real físico". La realidad interna de nuestro pensamiento matemático sería el modelo de la realidad absoluta. Resolveríamos el universo dentro de nosotros mismos sin residuos nouménicos. Y lo gobernaríamos desde dentro.

"Tenemos derecho", dice Einstein, "a estar convencidos de que la naturaleza es la realización de lo que puede imaginarse como lo más simple desde el punto de vista matemático. La construcción puramente matemática nos permite descubrir estos conceptos que nos dan la clave para entender los fenómenos naturales y los principios que los unen". Y añade: "También creo en la posibilidad de un modelo matemático de la realidad, es decir, una teoría que presente las cosas en sí mismas y no sólo la probabilidad de su aparición". Y de nuevo: "Las leyes generales que sirven de base a las construcciones del pensamiento del físico teórico tienen la pretensión de ser válidas para todos los acontecimientos naturales. Basándonos en ellas y utilizando deducciones rigurosamente lógicas, deberíamos llegar a una imagen rigurosamente exacta: es decir, una teoría de los fenómenos naturales, incluidos los de la vida.

Está claro que la teoría de la relatividad de Einstein es ante todo una teoría científica y que "se hace un flaco favor a esta doctrina intentando convertir sus datos de forma demasiado inmediata en resultados filosóficos y metafísicos".

Pero también está claro que la teoría de la relatividad vuelve a plantear, aunque sea de forma indirecta pero sin embargo con una viva actualidad, problemas capitales del conocimiento induciendo a los filósofos y, lo que es mucho más significativo como carácter de una época, también a los científicos, a nuevos y más profundos planteamientos filosóficos de esos problemas. ¿Acaso el largo camino que lleva a la formulación de la teoría de la relatividad no está enteramente hecho de experiencias, reflexiones y logros filosóficos? Y si por un lado contribuyeron a ello científicos como Maxwell, Lorentz, Riemann, Ricci y Minkowski, por otro, como reconoce el propio Einstein, el pensamiento tan original de los griegos e italianos del sur de Italia y de Sicilia, como Pitágoras, Protágoras, Demócrito, Empédocles y Arquitas, y finalmente el pensamiento de Descartes, Kant y Schopenhauer.

La ciencia y la filosofía vuelven a constituir una dualidad ideal: unidas y a la vez distintas, cada una "en su oficio".

Creemos que la teoría de la relatividad en particular, y sobre todo la lucha de siglos para formularla, puede ser un poderoso estímulo para que la cultura de nuestro país amplíe sus horizontes filosóficos y, por tanto, prácticos. Porque, y esto debería ser obvio a estas alturas, la vida de un pueblo, así como la vida de los individuos, incluso los más incultos y que desprecian verbalmente la filosofía (el escepticismo vulgar también es una forma de filosofar) está condicionada por su visión del mundo, por muy cruda que sea, y por el método que, tal vez inconscientemente, adoptan para afrontarlo y hacerlo suyo.

SOCIEDAD Y PERSONALIDAD

Si observamos nuestra existencia y nuestros esfuerzos, vemos inmediatamente que todas nuestras acciones y deseos están vinculados a la existencia de otros hombres y que, por nuestra propia naturaleza, somos similares a los animales que viven en comunidad. Comemos alimentos producidos por otros hombres, llevamos ropa hecha por otros, habitamos casas construidas por el trabajo de otros. La mayor parte de lo que sabemos y creemos nos lo han enseñado otros a través de un lenguaje que otros han creado. Sin el lenguaje, nuestra facultad de pensar sería muy mezquina y comparable a la de los animales superiores; por lo tanto, nuestra prioridad sobre los animales consiste en primer lugar -hay que confesarlo- en nuestra forma de vivir en sociedad. El individuo dejado solo desde su nacimiento seguiría siendo, en sus pensamientos y sentimientos, similar a los animales hasta un punto que es muy difícil de imaginar. Lo que el individuo es y lo que representa no es como individuo, sino como miembro de una gran sociedad humana que guía su ser material y moral desde el nacimiento hasta la muerte.

El valor de un hombre para la comunidad en la que vive depende sobre todo de la medida en que sus sentimientos, pensamientos y acciones contribuyen al desarrollo de la existencia de otros individuos.

De hecho, tenemos la costumbre de juzgar a un hombre como bueno o malo desde este punto de vista. Las cualidades sociales de un hombre aparecen en el primer encuentro, las únicas que determinan nuestro juicio sobre él.

Pero aun así, esta teoría no es estrictamente exacta. No es difícil comprender que todos los bienes materiales, intelectuales y morales recibidos por la sociedad han llegado a nosotros en el curso de innumerables generaciones de individualidades creativas. El individuo de hoy es un individuo que ha descubierto de golpe el uso

del fuego, un individuo que ha descubierto el cultivo de plantas nutritivas, un individuo que ha descubierto la máquina de vapor.

Libertad espiritual de los individuos y unidad social

Sin embargo, sólo el individuo libre puede meditar y, en consecuencia, crear nuevos valores sociales y establecer nuevos valores éticos a través de los cuales se perfecciona la sociedad. Sin personalidades creativas capaces de pensar y juzgar libremente, el desarrollo de la sociedad en un sentido progresivo es tan inimaginable como el desarrollo de la personalidad individual sin la ayuda vital de la sociedad.

Por tanto, una comunidad sana está vinculada tanto a la libertad de los individuos como a su unión social. Se ha dicho con mucha razón que la civilización greco-europea-americana, y en particular el renacimiento de la cultura en el Renacimiento italiano que tomó el relevo del estancamiento de la Edad Media en Europa, encontró su fundamento sobre todo en la libertad y el relativo aislamiento del individuo.

Consideremos ahora nuestra época. ¿Cuál es el estado de la sociedad y de las personalidades hoy en día? En comparación con el pasado, la población de los países civilizados es extremadamente densa; Europa tiene aproximadamente tres veces la población de hace cien años. Pero el número de hombres dotados de un temperamento genial ha disminuido de forma desproporcionada. Sólo un pequeño número de hombres, por sus facultades creativas, son conocidos por las masas como personalidades. En cierta medida, la organización ha sustituido a las cualidades del genio en el campo de la tecnología, pero también, y en gran medida, en el de la ciencia.

La escasez de personalidades es especialmente notable en el ámbito artístico. La pintura y la música han degenerado claramente, y tocan una fibra mucho menos intensa en el pueblo. La política no sólo carece de líderes: la independencia intelectual y el sentido del derecho han decaído profundamente entre la burguesía, y la organización democrática y parlamentaria basada en esa independencia se ha desbaratado en muchos países; las dictaduras han surgido y se han soportado porque el sentido de la dignidad y del derecho ya no está suficientemente vivo.

Decadencia de la dignidad humana

Los periódicos de un país pueden, en quince días, llevar a la turba ciega e ignorante a tal estado de exasperación y excitación que los hombres se pondrán el traje militar para matar y morir con el fin de permitir que empresarios desconocidos lleven a cabo sus despreciables planes. El servicio militar obligatorio me parece el síntoma más vergonzoso de la falta de dignidad personal que sufre hoy nuestra humanidad civilizada. En relación con este estado de cosas, no faltan los profetas que predicen el inminente colapso de nuestra civilización. No soy uno de esos pesimistas: creo en un futuro mejor.

El sistema económico obstaculiza la libre evolución

En mi opinión, la actual decadencia social se debe a que el desarrollo de la economía y de la tecnología ha agravado gravemente la lucha por la existencia, por lo que la libre evolución de los individuos ha recibido un duro golpe. Pero para satisfacer las necesidades de la comunidad, el progreso de la tecnología exige hoy en día mucha menos actividad por parte de los individuos. La división racional del trabajo se convertirá en una necesidad cada vez más imperiosa y conducirá a la seguridad material de los hombres. Y esta seguridad, junto con el tiempo y la energía que quedarán disponibles, puede ser un elemento favorable para el desarrollo de la personalidad. De este modo, la sociedad aún puede sanar,

y nos gustaría esperar que los historiadores del futuro presenten las manifestaciones patológicas de nuestro tiempo como las enfermedades infantiles de una humanidad con aspiraciones poderosas, causadas por la precipitación demasiado rápida de la civilización.

Valor social de la riqueza

Estoy firmemente convencido de que todas las riquezas del mundo no podrían impulsar más a la humanidad aunque estuvieran en manos de un hombre totalmente dedicado a la evolución de la humanidad. Sólo el ejemplo de personalidades grandes y puras puede conducir a pensamientos nobles y acciones electivas. El dinero sólo despierta el egoísmo y siempre conduce irresistiblemente a su mal uso.

¿Se puede imaginar a Moisés, Jesús o Gandhi armados con la bolsa de Carnegie?

Por qué vivimos

La situación de nosotros, los mortales, es bastante singular. Cada uno de nosotros está en esta tierra para una corta visita; no sabe por qué, pero muy a menudo cree haberlo entendido. Estamos aquí por los demás hombres, en primer lugar por aquellos de cuya sonrisa y bienestar depende nuestra felicidad, pero también por la multitud de extraños a cuyo destino nos une un vínculo de simpatía. Este es mi pensamiento constante de cada día: la vida exterior e interior depende de la obra de los contemporáneos y de la de los predecesores; debo esforzarme por darles, en igual medida, lo que he recibido y lo que aún recibo. Siento la necesidad de llevar una vida sencilla y, a menudo, soy dolorosamente consciente de que pido a mis compañeros más trabajo del necesario. Me doy cuenta de que las diferencias de clase social no están

justificadas y que, al final, encuentran su base en la violencia; pero también creo que una vida modesta es adecuada para todos, para el cuerpo y el espíritu.

Límites de nuestra libertad

No creo en la libertad humana en el sentido filosófico de la palabra. Cada uno actúa no sólo bajo el impulso de un imperativo exterior, sino también según una necesidad interior. El aforismo de Schopenhauer: "Es cierto que un hombre puede hacer lo que quiere, pero no puede querer lo que quiere" me ha impresionado fuertemente desde mi juventud; en el torbellino de acontecimientos y pruebas que impone la dureza de la vida, esas palabras han sido siempre un consuelo para mí y una fuente inagotable de tolerancia. La conciencia de esto ayuda a suavizar el sentido de la responsabilidad que nos mortifica fácilmente y nos impide tomarnos a nosotros mismos y a los demás demasiado en serio; conduce a una concepción de la vida que da un lugar único al humor.

Bienestar y felicidad

Desde un punto de vista objetivo, preocuparse por el sentido o la finalidad de nuestra existencia y la de otras criaturas siempre me ha parecido absolutamente carente de sentido. Sin embargo, todo hombre está ligado a ciertos ideales que le sirven de guía en sus acciones y pensamientos. En este sentido, el bienestar y la felicidad nunca me han parecido la meta absoluta (llamo a esta base de la moral el ideal de los cerdos). Los ideales que han iluminado mi camino y me han dado valor constante han sido la bondad, la belleza y la verdad. Sin la conciencia de estar en armonía con quienes comparten mis convicciones, sin la ardua búsqueda del derecho eternamente esquivo, el dominio del arte y la investigación científica, la vida me habría parecido absolutamente vacía. Desde mi juventud, siempre he considerado despreciables los objetivos vulgares a los que la humanidad dirige sus esfuerzos: la posesión de bienes, el éxito aparente y el lujo.

Un caballo que tira de sí mismo

En singular contraste con mi ardiente sentido de la justicia y el deber social, nunca he sentido la necesidad de acercarme a la gente y a la sociedad en general. Nunca me he entregado plenamente al Estado, ni a la tierra que me vio nacer, ni a mis amigos, ni siquiera a mis relaciones más cercanas; por el contrario, siempre he tenido la clara sensación de ser un extraño frente a estos vínculos, y siempre he sentido la necesidad de la soledad. Siento firmemente, pero sin lamentarlo, que he llegado al límite del entendimiento y la armonía con mi vecino. Por supuesto, un hombre de este carácter pierde así una parte de su candor y de su serenidad, pero gana con ello una gran independencia de las opiniones, de las costumbres y de los juicios de sus semejantes; tampoco tendrá la tentación de establecer su equilibrio sobre una base tan inestable.

Todos deben ser respetados

Mi ideal político es el ideal democrático. Hay que respetar la personalidad de cada uno y no idolatrar a nadie. Para mí, el elemento precioso en la maquinaria de la humanidad no es el Estado, sino el individuo creativo y sensible, en definitiva, la personalidad; sólo ésta crea lo noble y lo sublime, mientras que las masas son necias en su pensamiento y limitadas en sus sentimientos.

La guerra

Este tema me lleva a hablar de la peor de todas las creaciones, la de las masas armadas, del régimen militar, quiero decir, que odio con todo mi corazón.

Desprecio profundamente a los que se contentan con marchar en filas y formaciones al son de la música: sólo se les ha dado un cerebro por error; una médula espinal sería más que suficiente. Esta vergüenza para la civilización debe ser abolida lo antes posible. El heroísmo mandado, el estúpido combate cuerpo a cuerpo, el nefasto espíritu nacionalista, ¡cómo lo odio todo! ¡Y qué innoble y despreciable me parece la guerra! Prefiero que me corten en pedazos a participar en una acción tan miserable. Y sin embargo, a pesar de todo, estimo tanto a la humanidad que estoy convencido de que este malvado fantasma habría desaparecido hace tiempo si el sentido común del pueblo no hubiera sido corrompido sistemáticamente, a través de la escuela y la prensa, por los especuladores del mundo político y empresarial.

RELIGIÓN Y CIENCIA

El sentido de la vida

¿Cuál es el sentido de nuestra existencia, cuál es el sentido de la existencia de todos los seres vivos en general? Ser capaz de responder a esa pregunta es tener sentimientos religiosos. Usted dirá: ¿tiene sentido hacer esta pregunta? Yo te respondo: quien cree que su propia vida y la de sus semejantes no tienen sentido, no sólo es infeliz, sino que apenas es capaz de vivir.

Religiosidad cósmica

El sentimiento más hermoso es el lado misterioso de la vida. Es el sentimiento profundo que siempre se encuentra en la cuna del arte y la ciencia puros. El que ya no es capaz de sentir asombro o sorpresa está, por así decirlo, muerto; sus ojos están apagados. La impresión de lo misterioso, aunque mezclada con el asombro, ha dado lugar, entre otras cosas, a la religión. Saber que existe algo impenetrable, conocer las manifestaciones del intelecto más profundo y de la belleza más brillante, que sólo son accesibles a nuestra razón en las formas más primitivas, este conocimiento y este sentimiento, esto es la verdadera devoción: en este sentido, y sólo en este sentido, me encuentro entre los hombres más profundamente religiosos. No puedo imaginar un Dios que premie y castigue al objeto de su creación, un Dios que sobre todo ejerza su voluntad de la misma manera que nosotros la ejercemos sobre nosotros mismos.

No quiero ni puedo imaginar que un individuo sobreviva a su muerte corporal: ¡cuántas almas débiles, por miedo y ridículo egoísmo, se alimentan de tales

ideas! Me basta con sentir el misterio de la eternidad de la vida, tener la conciencia y la intuición de todo lo que es, esforzarme activamente por captar una partícula, incluso la más pequeña, de la inteligencia que se manifiesta en la naturaleza.

Difícilmente se encontrará un espíritu profundo en la investigación científica sin su característica religiosidad. Pero esta religiosidad difiere de la del hombre sencillo: para éste, Dios es un ser del que espera protección y cuyo castigo teme, un ser con el que tiene, hasta cierto punto, relaciones personales, por muy respetuosas que sean: es un sentimiento elevado de la misma naturaleza que las relaciones entre hijo y padre.

La base humana de la moral

Por el contrario, el sabio está imbuido de un sentido de causalidad para todo lo que sucede. Para él, el futuro no implica menos decisión ni menos compromiso que el pasado; la moral no tiene nada de divino, es una cuestión puramente humana. Su religiosidad consiste en la admiración extática de las leyes de la naturaleza; se le revela una mente tan superior que toda la inteligencia puesta por los hombres en sus pensamientos es en presencia de ella sólo un reflejo absolutamente nulo. Este sentimiento es el leitmotiv de la vida y los esfuerzos del científico en la medida en que puede liberarse de la tiranía de sus deseos egoístas. Sin duda, este sentimiento es un pariente cercano del sentimiento experimentado por las mentes creativas religiosas a lo largo de los tiempos.

Todo lo que hacen e imaginan los hombres sirve para satisfacer sus necesidades y apaciguar sus dolores. Debemos tener siempre presente esta verdad si queremos entender los movimientos intelectuales y su desarrollo, porque los sentimientos y las aspiraciones son el motor de todos los esfuerzos y creaciones humanas, por muy sublimes que parezcan. ¿Cuáles son, pues, las necesidades y los sentimientos que han llevado al hombre a la idea religiosa y a la fe, en el

sentido más amplio de estas palabras? Si reflexionamos sobre esta cuestión, vemos enseñada que en el origen del pensamiento y de la vida religiosa se encuentran los más diversos sentimientos. En el hombre primitivo es principalmente el miedo lo que da lugar a la idea religiosa; miedo al hambre, a las fieras, a la enfermedad, a la muerte. Como en este estadio inferior las ideas sobre las relaciones causales son, por regla general, muy limitadas, el espíritu humano imagina seres más o menos semejantes a nosotros de cuya voluntad y acción dependen los acontecimientos adversos y temibles, y cree poder disponer favorablemente de estos seres mediante acciones y ofrendas que, según la fe transmitida de tiempo en tiempo, deberían apaciguarlos y hacerlos benignos. Y en este sentido llamo a esta religión la religión del terror; la cual, si no ha sido creada, al menos ha sido reforzada y estabilizada por la formación de una casta sacerdotal particular, que se llama intermediaria entre estos seres temidos y el pueblo, y basa su posición dominante en este privilegio. A menudo, el rey o jefe de Estado, que deriva su autoridad de otros factores, o incluso de una clase privilegiada, une las funciones sacerdotales a su soberanía para dar mayor firmeza al régimen existente; o se determina una coincidencia de intereses entre la casta que ostenta el poder político y la casta sacerdotal.

Hay otro origen de la organización religiosa: los sentimientos sociales. Los líderes paternos y maternos de las grandes comunidades humanas son mortales y falibles. La ardiente aspiración de amor, apoyo y guía genera la idea divina social y moral. Es el Dios-Providencia quien protege, hace actuar, premia y castiga. Es ese Dios que, según el horizonte del hombre, ama y alienta la vida de la tribu, la humanidad y la vida misma; ese Dios que consuela en las catástrofes y en las esperanzas defraudadas, protector de las almas de los difuntos. Tal es la idea de Dios considerada bajo el aspecto moral y social.

En las escrituras sagradas del pueblo judío, se puede seguir muy bien la evolución de la religión-terror a la religión moral, que luego continúa en el Nuevo Testamento. Las religiones de todos los pueblos civilizados, y en particular de los pueblos orientales, son esencialmente religiones morales. La transición de la religión-terror a la religión moral es un paso importante en la vida de los pueblos. Debemos cuidarnos del prejuicio que consiste en creer que las religiones de las razas primitivas son sólo religiones de terror y las de los

pueblos civilizados sólo religiones morales. Toda religión es, después de todo, una mezcla de una y otra, con un mayor porcentaje, sin embargo, de religión moral en los grados más altos de la vida social.

Ids de forma humana

Todas estas religiones tienen, sin embargo, un punto en común, y es el carácter antropomórfico de la idea de Dios: más allá de este nivel sólo se encuentran individualidades particularmente nobles. Pero, en cualquier caso, todavía existe un tercer grado de vida religiosa, aunque muy raro en su expresión pura, y es el de la religiosidad cósmica. No puede ser plenamente comprendida por quienes no la sienten, porque no existe la correspondiente idea de un Dios antropomórfico.

El individuo es consciente de la vanidad de las aspiraciones y objetivos humanos y, por otra parte, reconoce la impronta sublime y el orden admirable que se manifiestan tanto en la naturaleza como en el mundo del pensamiento. La existencia individual le da la impresión de ser una prisión y quiere vivir en el pleno conocimiento de todo lo que es, en su unidad universal y en su sentido profundo. Ya en las primeras etapas de la evolución de la religión, por ejemplo en varios salmos de David y en algunos de los Profetas, encontramos los primeros indicios de la religión cósmica: pero los elementos de esta religión son más fuertes en el budismo, como hemos aprendido en particular de los admirables escritos de Schopenhauer.

La religiosidad cósmica no conoce dogmas

Los genios religiosos de todos los tiempos están afectados por esta religiosidad cósmica que no conoce ni el dogma ni los dioses concebidos a imagen del

hombre. Por tanto, no hay ninguna Iglesia que base su enseñanza fundamental en la religión cósmica. En consecuencia, es precisamente entre los herejes de todos los tiempos donde encontramos hombres que han sido penetrados por esta religiosidad superior y que fueron considerados por sus contemporáneos la mayoría de las veces como ateos, pero a menudo también como santos.

Demócrito Francisco de Asís y Spinoza se acercan

En este sentido, hombres como Demócrito, Francisco de Asís y Spinoza pueden estar al lado.

¿Cómo puede comunicarse la religiosidad cósmica de hombre a hombre, si no conduce a ninguna idea formal de Dios ni a ninguna teoría? Me parece que es precisamente la función capital del arte y la ciencia despertar y mantener vivo este sentimiento entre quienes tienen el poder de recogerlo.

Antagonismo entre la religión del terror y la ciencia

Llegamos así a una concepción de la relación entre la ciencia y la religión muy diferente de la concepción habitual. Según las consideraciones históricas, uno se inclina a considerar a la ciencia y a la religión como antagonistas irreconciliables, y esto se entiende fácilmente. El hombre que cree en las leyes causales, árbitros de todos los acontecimientos, si toma en serio la hipótesis de la causalidad, no puede concebir la idea de un Ser que intervenga en los asuntos humanos, y por lo tanto la religión-terror, como la religión social o moral, no tiene ningún crédito para él; un Dios que premie y castigue es inconcebible para él porque el hombre actúa según leyes externas e internas ineludibles y, en consecuencia, no podría ser responsable ante Dios, del mismo modo que un objeto inanimado no es responsable de sus movimientos. Se ha acusado

erróneamente a la ciencia de socavar la moral. En efecto, la conducta ética del hombre debe basarse en la compasión, la educación y los vínculos sociales, sin recurrir a ningún principio religioso. Habría que compadecer a los hombres si se dejaran frenar por el miedo al castigo o por la esperanza de la recompensa después de la muerte. Por lo tanto, es comprensible que la Iglesia haya combatido en todo momento a la ciencia y perseguido a sus seguidores.

Maravilloso acuerdo entre la religiosidad cósmica y la ciencia

Por otro lado, sostengo que la región cósmica es el impulso más poderoso y noble para la investigación científica. Sólo quien sabe apreciar los esfuerzos y, sobre todo, los enormes sacrificios realizados para llegar a esos descubrimientos científicos que abren nuevos caminos, es capaz de darse cuenta de la fuerza del sentimiento que sólo puede suscitar una obra así, libre de todo vínculo con la vida práctica inmediata. Qué profunda alegría a la vista del edificio del mundo y qué ardiente deseo de conocer -aunque se limitara a unos tenues rayos del esplendor revelado por el admirable orden del universo- debieron poseer Kepler y Newton para haber podido, en una labor solitaria de largos años, desentrañar el mecanismo celeste! Quien sólo conoce la investigación científica por sus efectos prácticos no puede formarse una opinión adecuada del estado de ánimo de estos hombres que, rodeados de contemporáneos escépticos, prepararon el camino para los que, comprendiendo sus ideas, se extendieron de siglo en siglo por todos los países del mundo. Sólo aquellos que han dedicado su vida a objetivos similares pueden formarse una imagen vívida de lo que motivó a estos hombres y de lo que les dio la fuerza para mantenerse fieles a su objetivo a pesar de los innumerables fracasos. Es la religiosidad cósmica la que da esa fuerza. No en vano un autor contemporáneo ha dicho que en nuestra época, generalmente entregada al materialismo, los científicos son las únicas personas profundamente religiosas.

Elevar a los hombres

Es justo, en principio, dar un testimonio solemne de afecto a quienes más han contribuido a ennoblecer a los hombres y a la existencia humana. Pero si también se quiere investigar su naturaleza, entonces se encuentran dificultades considerables. Con respecto a los líderes políticos e incluso religiosos, a menudo es muy difícil determinar si han hecho más bien que mal. En consecuencia, creo sinceramente que dirigir a los hombres a la cultura de las disciplinas nobles y luego elevarlos indirectamente es el mejor servicio que se puede prestar a la humanidad. Este método lo confirman, en primer lugar, los amantes de la literatura, la filosofía y las artes, pero también, después de ellos, los científicos. No son, es cierto, los resultados de sus investigaciones los que elevan y enriquecen moralmente a los hombres, sino que es su esfuerzo por comprender, es su fecundo y capaz trabajo intelectual.

El verdadero valor de un hombre se determina examinando hasta qué punto y en qué sentido ha llegado a liberarse del ego.

Paz

Los hombres verdaderamente superiores de las generaciones pasadas reconocieron la importancia de los esfuerzos para asegurar la paz internacional. Pero en nuestra época, el desarrollo de la tecnología ha hecho de este postulado ético una cuestión de existencia para la humanidad civilizada de hoy, y la participación activa en la solución del problema de la paz se considera una cuestión de conciencia que ningún hombre consciente puede ignorar.

Hay que saber que los poderosos grupos industriales interesados en la fabricación de armas se oponen, en todos los países, a la solución pacífica de los conflictos internacionales y que los gobernantes no podrán alcanzar este importante objetivo sin el apoyo enérgico de la mayoría de la población. En esta

época de regímenes democráticos, el destino de los pueblos depende de ellos mismos; este hecho debe estar presente en la mente de todos en todo momento.

La Internacional de la Ciencia

Cuando la ceguera nacionalista y política alcanzó su punto álgido durante la guerra, Emilio Fischer, el famoso químico, pronunció enérgicamente las siguientes palabras durante una sesión en la Academia: "No pueden hacer nada, señores, la ciencia es y sigue siendo internacional". Los grandes entre los hombres de ciencia siempre lo han sabido y lo han sentido con pasión, aunque en tiempos de complicaciones políticas permanecieran aislados en medio de sus colegas de pequeño intelecto. Durante la guerra y en todos los ámbitos, la plebe con derecho a voto traicionó el bien inviolable que se le había confiado.

La Asociación Internacional de Academias se disolvió. Los congresos se han organizado y se siguen organizando con la exclusión de los colegas de los antiguos países enemigos. Ciertas consideraciones políticas, que se esgrimen con gran importancia, impiden el establecimiento de puntos de vista puramente objetivos, lo que, sin embargo, es indispensable para lograr resultados elevados.

¿Qué pueden hacer los hombres de buena voluntad, los que no ceden a las tentaciones de la pasión del momento, para recuperar lo perdido? Los congresos verdaderamente internacionales y de gran envergadura no pueden todavía, a causa de la actual agitación, dar cabida a la mayoría de los trabajadores intelectuales, y la resistencia psicológica al restablecimiento de las asociaciones científicas internacionales es todavía demasiado poderosa para ser vencida por esa minoría animada por opiniones y sentimientos superiores a estas contingencias. Quienes pertenecen a esta minoría pueden contribuir al restablecimiento de las comunidades internacionales manteniendo estrechas relaciones con científicos afines de otros países e interviniendo tenazmente en su propio círculo de acción en favor de los intereses internacionales. El éxito a lo

grande tendrá que esperar, pero seguro que llegará. No quiero dejar pasar esta oportunidad sin destacar, con gran placer, la singular acción de un notable número de colegas británicos que han expresado activamente, durante estos dolorosos años, aspiraciones para el mantenimiento de la comunidad intelectual.

En todas partes, las declaraciones oficiales son peores que la opinión del individuo. Estas personas que piensan correctamente no deben olvidarlo, ni dejarse irritar o engañar: "Senatores boni viri, senatus autem bestia".

Si estoy lleno de esperanza y confianza con respecto a la organización internacional general, esta esperanza, más que en el juicio y la nobleza de los sentimientos, se basa en la presión imperiosa del desarrollo económico. Y como esto se deriva en gran medida del trabajo intelectual, incluido el de los científicos con ideas reaccionarias, estos últimos contribuirán, incluso a su pesar, a la creación de la organización internacional.

Nuestro continente sólo podrá alcanzar una nueva prosperidad si se pone fin a la lucha latente entre las formas tradicionales de Estado. La organización política de Europa debe orientarse decididamente hacia la eliminación de las incómodas barreras aduaneras. Este objetivo superior no puede alcanzarse exclusivamente mediante convenios entre Estados. La preparación previa de los espíritus es, en primer lugar, indispensable. Debemos esforzarnos por despertar poco a poco entre los hombres un sentimiento de solidaridad que no se detenga, como ha sucedido hasta ahora, en las fronteras de los Estados. Es una misión difícil, pues hay que confesar, muy a mi pesar, que, al menos en los países que conozco mejor, los científicos y los artistas se dejan llevar más por las pequeñas tendencias nacionales que los hombres de acción.

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La verdad científica y no

I. - No es fácil definir con claridad el término "verdad científica": del mismo modo, el significado de la palabra "verdad" es diferente según se refiera a hechos psicológicos, a una proposición matemática o a una teoría de la ciencia natural. Pero no consigo hacerme una idea clara de lo que se entiende por "verdad religiosa".

II. - La investigación científica puede disminuir la superstición al fomentar el razonamiento y la exploración causal. Es cierto que en la base de todo trabajo científico algo sensible se encuentra la convicción, análoga al sentimiento religioso, de que el mundo se fundamenta en la razón y puede ser comprendido.

III. - Esta convicción, unida al profundo sentimiento de la existencia de una mente superior que se manifiesta en el mundo de la experiencia, constituye para mí la idea de Dios; en el lenguaje actual puede llamarse "panteísmo" (Spinoza).

IV. - Sólo puedo considerar las tradiciones confesionales desde un punto de vista histórico y psicológico: no tengo ninguna otra relación con ellas.

Fundamentos de la investigación

Qué variedad de estilos en el templo de la ciencia! Y ¡qué diferentes son los hombres que la frecuentan y qué diferentes las fuerzas morales que los han llevado hasta allí! Más de uno se dedica a la ciencia con la alegría de realizar sus propias facultades intelectuales superiores: para él la ciencia es el deporte favorito que le permite vivir una vida intensa y realizar sus ambiciones. También hay muchos que, sólo con fines utilitarios, quieren llevar su ofrenda a la efervescencia del cerebro. Bastaría con que un ángel divino expulsara del templo a los hombres de estas dos categorías, y el edificio quedaría inquietantemente vacío, si no permanecieran en él algunos hombres del pasado y del presente: nuestro Plank pertenece a este número, y ésta es la razón por la que le amamos.

Soy muy consciente de que, al hacerlo, habríamos expulsado a la ligera del templo a algunos hombres que habían construido una gran parte del mismo, quizá la más grande: para muchos, la decisión tomada probablemente habría parecido amarga al propio ángel del cielo. Pero sólo una cosa me parece cierta: si no hubiera habido hombres de esa clase, el templo no habría podido levantarse, del mismo modo que unas pocas plantas trepadoras por sí solas no podrían dar vida a un bosque. En realidad, para estos hombres, cualquier lugar en la actividad humana es suficiente; las circunstancias externas decidirán si son ingenieros, oficiales, comerciantes o científicos. Pero volvamos ahora la mirada a los que han encontrado el favor del ángel: aquí vemos individuos en su mayoría singulares, cerrados, aislados, y que, a pesar de estos rasgos comunes, se parecen mucho menos a los excluidos. ¿Qué impulso les llevó al templo? La respuesta no es fácil y ciertamente no puede aplicarse a todos por igual. Creo con Schopenhauer que el impulso más poderoso que les lleva hacia el arte y la ciencia es el deseo de escapar de la vida cotidiana con su dolorosa dureza y su desesperante vacío para escapar de las cadenas de los deseos individuales eternamente cambiantes; impulsa a los seres más sensibles fuera de su yo individual, hacia el mundo de la contemplación y el juicio objetivo. Este impulso es comparable al ardiente deseo que atrae irresistiblemente a la gente fuera de su entorno ardiente y confuso a las plácidas regiones de las altas montañas, donde la mirada se pierde suavemente a través de la calma y la pureza de la atmósfera y acaricia contornos reposados que parecen creados para la eternidad. Pero a este motivo, por así decirlo negativo, se añade otro positivo. El hombre busca, de manera adecuada a sus necesidades, formarse una imagen del mundo, clara y sencilla, y triunfar así sobre el mundo de la existencia, esforzándose por sustituirlo, en cierta medida, por esta imagen, y actuar así, cada uno a su manera,

el pintor, el poeta, el filósofo especulativo, el naturalista. Hace de esta imagen y de su conformación el centro de gravedad de su vida sentimental para buscar en ella el sosiego y la solidez que se le escapan en el círculo demasiado estrecho de su existencia personal y arrebatada.

De todas estas posibles imágenes del mundo, ¿qué lugar ocupa la creada por el físico teórico? Esta imagen exige el máximo rigor y exactitud en la representación de las relaciones recíprocas, como sólo puede lograrse utilizando el lenguaje matemático. Pero, por otra parte, el físico debe resignarse a ello tanto más categóricamente cuanto que debe contentarse con representar los fenómenos más simples, los que pueden hacerse perceptibles por nuestros sentidos, mientras que todos los fenómenos más complejos no pueden ser reconstruidos por el espíritu humano con esa precisión y ese espíritu de sutil coherencia que invoca el físico teórico. La nitidez extrema, la claridad, la certeza, sólo pueden obtenerse a expensas de la totalidad. Pero, ¿qué atractivo puede haber en captar exactamente una parte tan pequeña de la naturaleza, dejando de lado, tímidamente y sin valor, todo lo que es más complicado y más delicado? ¿Merece el resultado de un esfuerzo tan resignado este nombre lleno de orgullo, la "Imagen del Mundo"?

Sí! Creo que este nombre es merecido, porque las leyes generales, que sirven de base a las construcciones del pensamiento del físico teórico, tienen la pretensión de ser válidas para todos los acontecimientos de deducciones rigurosamente lógicas, habría que llegar a una imagen rigurosamente exacta, es decir, a una teoría de los fenómenos naturales, incluidos los de la vida, si este proceso de deducción no superara con mucho la capacidad del cerebro humano. Por tanto, no se renuncia en principio a la totalidad de la imagen física del mundo.

La misión más elevada del físico es, pues, la búsqueda de estas leyes elementales, las más generales, de las que parte para alcanzar, mediante simples deducciones, la imagen del mundo. Ningún camino lógico conduce a estas leyes elementales: sólo la intuición, basada en la experiencia, puede llevarnos a ellas. Esta incertidumbre en el método a seguir podría hacer pensar que sería posible establecer a voluntad un gran número de sistemas de física teórica de valor

equivalente: incluso como principio esta opinión está ciertamente bien fundada. Pero el desarrollo de la cuestión ha demostrado que, de todas las construcciones imaginables, sólo una, por el momento, ha surgido como absolutamente superior a todas las demás. Ninguno de los que han estudiado realmente el problema podría negar que el mundo de las observaciones determina prácticamente, sin ambigüedad, el sistema teórico y que, sin embargo, toda vía lógica aporta datos de observación a los principios de la teoría: es lo que Leibniz ha llamado tan felizmente la armonía "preestablecida". Precisamente por no tener suficientemente en cuenta esta circunstancia, los físicos han reprendido duramente a muchos teóricos del conocimiento. Y es también en esto donde me parece identificar los orígenes de la controversia entre Mach y Planck hace unos años.

El ardiente deseo de una visión de esta armonía preestablecida es la fuente de la perseverancia y la inagotable paciencia con la que vemos a Planck dedicarse a los problemas más generales de nuestra ciencia sin dejarse desviar de objetivos más fácilmente alcanzables y más utilitarios. A menudo he oído decir que algunos colegas atribuyen esta forma de actuar a una energía y una disciplina extraordinarias. Creo que están completamente equivocados. El estado sentimental que le hace a uno apto para tales acciones se asemeja al de los religiosos o los enamorados: el esfuerzo diario no deriva de un cálculo o un programa, sino de una necesidad inmediata. En este punto veo a nuestro querido Planck riéndose para sí mismo de mi uso infantil de la linterna de Diógenes. Nuestra simpatía por él no tiene por qué basarse en argumentos endebles. Que su amor por la ciencia embellezca también su vida en el futuro y le lleve a la solución de ese importantísimo problema de la física que él mismo ha planteado y desarrollado con fuerza: que consiga unir la teoría cuántica con la electrodinámica y la mecánica en un sistema que constituya lógicamente un todo.

Cuantos de Planck

Planck demostró que para establecer una ley sobre la radiación térmica acorde

con la experiencia, es necesario utilizar un método de cálculo cuya incompatibilidad con los principios de la mecánica clásica se hace cada vez más evidente. Gracias a este método, Planck introdujo en la física la hipótesis cuántica, que posteriormente fue objeto de una brillante verificación. Con esta hipótesis cuántica, dio la vuelta a la mecánica clásica, en la que masas suficientemente pequeñas se mueven con velocidades que alcanzan valores muy pequeños y aceleraciones suficientemente grandes. De modo que hoy ya no podemos considerar válidas las leyes del movimiento de Galileo y de Newton, salvo como leyes límite. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos más tenaces de los teóricos, no ha sido posible hasta ahora sustituir los principios de la mecánica por otros que correspondan a la ley de Planck de la radiación térmica, o a la hipótesis cuántica. Aunque ya no hay duda de que hemos rastreado el calor hasta un movimiento molecular, debemos confesar, sin embargo, que nos encontramos hoy ante las leyes fundamentales de este movimiento en la misma situación que los astrónomos antes de Newton ante los movimientos de los planetas.

He aludido a un conjunto de hechos en cuyo estudio teórico fallan los principios. También puede ocurrir que unos principios claramente formulados conduzcan a consecuencias que queden total o casi totalmente fuera del ámbito de los hechos actualmente accesibles a nuestra experiencia. Puede que, en tal caso, sean necesarios años de investigación empírica para saber si los principios se corresponden con la teoría de la realidad. La teoría de la relatividad nos ofrece un ejemplo de ello.

El análisis de las ideas fundamentales del tiempo y del espacio nos ha mostrado que el teorema de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, que se deduce de la óptica de los cuerpos en movimiento, no nos obliga en absoluto a aceptar la teoría general que tiene en cuenta la circunstancia de que, en las experiencias realizadas en la tierra, nunca notamos nada del movimiento de traslación de la tierra. Nos servimos, en este caso, del principio de relatividad que dice: las leyes naturales no cambian de forma, cuando pasamos del sistema de coordenadas inicial (reconocido como correcto) a un nuevo sistema concebido como animado por un movimiento de traslación uniforme respecto a sí mismo. Esta teoría ya ha recibido una considerable verificación por parte de la experiencia y ha conducido, junto con el conjunto de hechos recogidos, a una

simplificación de la representación teórica.

Pero, por otra parte, desde el punto de vista teórico, esta teoría no da una satisfacción completa, porque el principio de relatividad antes expuesto da preferencia al movimiento uniforme. Si es cierto que desde el punto de vista físico no se puede atribuir un sentido absoluto al movimiento uniforme, se plantea la cuestión de si esta afirmación debe extenderse igualmente a los movimientos no uniformes. Se ha demostrado que si se toma como base el principio de relatividad ampliado en este sentido, se obtiene una extensión muy caracterizada de la teoría de la relatividad y se llega así a una teoría general de la gravitación, incluyendo la dinámica.

Hemos establecido que la física inductiva plantea preguntas a la física deductiva y viceversa, y que la respuesta a estas preguntas requiere la tensión de todos los esfuerzos.

LA CUESTIÓN DEL MÉTODO

Si quiere aprender algo de los físicos teóricos sobre los métodos que emplean, le aconsejo que observe este principio: no escuche sus discursos, sino atégase a sus acciones. Porque a quien crea, los productos de su propia imaginación le parecen tan necesarios y naturales que no los considera, ni quiere que se consideren, como invenciones del pensamiento, sino como realidades concretas.

Estas palabras parecen hechas a propósito para inducirle a abandonar este tema, pues usted dirá: he aquí un científico que es él mismo un físico experimental; por lo tanto, debería dejar toda reflexión sobre la estructura de la ciencia teórica a los teóricos del conocimiento.

Objetivamente, para justificar mi esfuerzo, digo que puede ser interesante saber lo que piensa de su ciencia un hombre que ha dedicado toda su vida a aclarar y perfeccionar sus principios. La forma en que ve el pasado y el presente del campo al que se dedica puede depender en gran medida de lo que espera del futuro y de lo que espera obtener del presente. Lo que le ocurre es lo que le ocurre al historiador, que combina el futuro real (aunque quizás inconscientemente) con los ideales que se ha formado sobre la sociedad humana.

Aquí queremos echar un rápido vistazo a la evolución del sistema teórico y, en este sentido, centrar nuestra atención en la relación entre los antecedentes teóricos y el conjunto de hechos experimentales. Es la eterna oposición entre dos elementos inseparables de nuestro conocimiento, el empirismo y el razonamiento.

Honramos a la antigua Grecia como cuna de la ciencia occidental. Allí se creó

por primera vez un sistema lógico, una maravilla del pensamiento, cuyos enunciados se deducen tan claramente unos de otros que cada una de las proposiciones demostradas no plantea la menor duda: es la geometría de Euclides. Este admirable trabajo de la razón ha dado al cerebro humano la mayor confianza en sus esfuerzos posteriores. Quien en su primera juventud no sintió entusiasmo ante este trabajo no nació para ser un científico teórico.

Pero para que el pensamiento lógico esté maduro para una ciencia que abarque la realidad, era necesario un segundo conocimiento fundamental, que hasta Kleper y Galileo no era propiedad común de los filósofos. El pensamiento lógico por sí solo no puede proporcionarnos conocimiento sobre el mundo de la experiencia y los fines en él. Las proposiciones puramente lógicas son vacías frente a la realidad. Gracias a estos conocimientos, y sobre todo a haberlos introducido en el mundo de la ciencia, Galileo se convirtió en el padre de la física moderna y, sobre todo, de la ciencia natural moderna.

Pero entonces, si la experiencia es el alfa y el omega de todo nuestro conocimiento de la realidad, ¿cuál es el lugar de la razón en la ciencia?

Un sistema completo de física teórica consta de ideas, de leyes fundamentales que deben ser aplicables a estas ideas y de proposiciones consecuentes que se derivan de ellas por deducción lógica. Son estas proposiciones las que deben corresponder a nuestras experiencias individuales; su deducción lógica ocupa necesariamente casi todas las páginas de una obra de teoría.

Al fin y al cabo, es exactamente lo mismo en la geometría de Euclides, salvo que en ésta los principios fundamentales se llaman axiomas y no se plantea la cuestión de que las proposiciones consecuentes deban corresponder a ninguna experiencia. Pero si la geometría euclidiana se concibe como la doctrina de las posibilidades de la posición recíproca de los cuerpos prácticamente rígidos, y si, en consecuencia, se interpreta como una ciencia física sin abstracción de su fundamento empírico inicial, la identidad lógica de la geometría y la física

teórica es completa.

Por lo tanto, hemos asignado a la razón y a la experiencia su lugar en el sistema de la física teórica. La razón proporciona la estructura del sistema: el contenido de las experiencias y sus relaciones recíprocas deben, gracias a las proposiciones consecuentes de la teoría, encontrar su representación. En la posibilidad de tal representación reside únicamente el valor y la justificación de todo el sistema y, en particular, de los conceptos y principios que lo fundamentan. Por otra parte, estos conceptos y principios son creaciones libres del espíritu humano, que no pueden justificarse a priori ni por la naturaleza del espíritu humano ni de ninguna otra manera.

Las ideas y principios fundamentales, que lógicamente no pueden hacerse más elementales, constituyen la parte inevitable y racionalmente elusiva de la teoría. El objetivo capital de toda teoría es hacer que estos elementos fundamentales irreductibles sean lo más simples y numerosos posible, sin estar obligados a renunciar a la representación adecuada de cualquier tema experimental.

La concepción que he esbozado del carácter puramente ficticio de los principios de la teoría no estaba en absoluto en boga en los siglos XVIII y XIX. Pero va ganando terreno día a día, de modo que la distancia entre las leyes y conceptos fundamentales, por un lado, y las consecuencias que hay que relacionar con nuestras experiencias, por otro, va aumentando cada vez más a medida que la construcción lógica se va unificando, es decir, que todo el edificio puede apoyarse en un número menor de elementos conceptuales lógicamente independientes entre sí. Newton, el primer creador de un extenso y poderoso sistema de física teórica, seguía creyendo, en este sentido, que las ideas y leyes fundamentales de su sistema se derivaban de la experiencia. Es probable que sus "hipótesis non fingo" deban interpretarse en este sentido.

De hecho, en esta época, no apareció nada problemático en las ideas de espacio y tiempo. Los conceptos de masa, inercia, fuerza y sus relaciones

interdependientes parecían basarse directamente en la experiencia. Una vez aceptada esta base, la expresión de la fuerza de gravitación se deriva efectivamente de la experiencia, y lo mismo puede decirse de las demás fuerzas.

Sin embargo, observamos que la idea de espacio absoluto, que implica la de reposo absoluto, era para Newton una fuente de inquietud; de hecho, estaba convencido de que nada en la experiencia parecía corresponder a este último concepto. También le preocupaba la introducción de acciones a distancia. Pero el prodigioso éxito práctico de su doctrina puede haber impedido que él y los físicos de los siglos XVIII y XIX se dieran cuenta del carácter ficticio de los principios de su sistema.

Por el contrario, la mayoría de los científicos de esta época que estudiaban la naturaleza estaban imbuidos de la idea de que los conceptos y las leyes fundamentales de la física no eran, desde el punto de vista de la lógica, creaciones del espíritu humano, sino que era posible deducirlos de la experiencia por "abstracción", es decir, por lógica. A decir verdad, sólo la teoría de la relatividad generalizada ha permitido reconocer claramente la falsedad de esta concepción: en efecto, esta teoría ha mostrado que era posible, con fundamentos muy alejados de los de Newton, concordar, de manera más satisfactoria y más completa de lo que permitían los principios de Newton, con todos los hechos correlativos en el campo de la experiencia. Pero, dejando de lado la cuestión de la superioridad, el carácter ficticio de los principios se hizo bastante evidente, de modo que se pudieron presentar dos principios esencialmente diferentes que concuerdan en gran medida con la experiencia; esto demuestra, sin embargo, que todo intento de deducir lógicamente de la experiencia elemental las ideas y leyes fundamentales de la mecánica está destinado a fracasar.

Pero si es cierto que el fundamento axiomático de la física teórica no desciende de la experiencia y, en cambio, debe ser creado libremente, ¿hay alguna esperanza de encontrar el camino correcto? O, a fortiori, ¿este camino correcto sólo existe en nuestra imaginación? Y, sobre todo, ¿podemos esperar encontrar en la experiencia una guía segura, si hay teorías (como la mecánica clásica) que

dan en gran medida la razón a la experiencia, sin captar el fondo de la cuestión? A esto respondo con confianza que, en mi opinión, el camino correcto existe y que podemos encontrarlo. Según nuestra experiencia hasta ahora, tenemos derecho a estar convencidos de que la naturaleza es la realización de todo lo que puede imaginarse como matemáticamente simple. Estoy convencido de que la construcción puramente matemática nos permite descubrir estos conceptos que nos dan la clave para entender los fenómenos naturales y los principios que los unen. Los conceptos matemáticos que se pueden utilizar pueden ser sugeridos por la experiencia, pero nunca deducidos de ella. La experiencia es, por supuesto, el único criterio para utilizar una construcción matemática para la física; pero es en las matemáticas donde se encuentra el principio verdaderamente creativo. Desde cierto punto de vista, reconozco que el pensamiento puro es capaz de captar la realidad, como pensaban los antiguos.

Para justificar esta confianza me veo obligado a utilizar conceptos matemáticos. El mundo físico está representado por un continuo de cuatro dimensiones. Si tomo en ella una métrica de Riemann y busco las leyes más simples a las que obedece esta métrica, llego a la teoría relativista de la gravitación del espacio vacío. Si en este espacio tomo un campo de vectores o el campo antisimétrico derivado de él y busco las leyes más simples a las que este campo pueda obedecer, llego a las ecuaciones de Maxwell del espacio vacío.

En este punto, todavía carecemos de una teoría sobre las zonas del espacio en las que la densidad eléctrica no desaparece. De Broglie tuvo la intuición de la existencia de un campo de ondas que servía para explicar ciertas propiedades cuánticas de la materia. Dirac encontró, con sus "espinas", unos nuevos valores del campo, a partir de los cuales, con ecuaciones muy sencillas, es posible deducir en gran medida las propiedades de los electrones. Ahora he descubierto, con mi colaborador, que estos "espines" constituyen un caso particular de una clase de campo de un nuevo tipo, relacionado matemáticamente con el sistema de cuatro dimensiones, que hemos llamado "semivectores". Las ecuaciones más sencillas a las que se pueden someter estos semivectores permiten comprender la existencia de dos partículas elementales de masas ponderables diferentes y de igual peso, pero de signos opuestos. Después de los vectores conocidos, estos semivectores son los elementos matemáticos más simples posibles del campo en

un continuo métrico de cuatro dimensiones y parece que pueden caracterizar, de forma natural, las propiedades características de las partículas eléctricas elementales.

Para abordar esta cuestión es imprescindible que todas estas estructuras y su conexión con las leyes fundamentales puedan obtenerse según el principio de la búsqueda de los conceptos matemáticos más simples y su conexión. Es en la delimitación de las especies simples de los campos matemáticamente existentes, y de las ecuaciones simples que pueden establecerse entre ellos, donde el teórico basa su esperanza de captar la realidad en toda su profundidad.

El punto más difícil de una teoría de campo de esta naturaleza reside por el momento en la comprensión de la estructura atómica de la materia y la energía. La teoría, en sus principios, no es, en verdad, atómica en tanto que opera con funciones espaciales continuas, al contrario de lo que ocurre en la mecánica clásica cuyo elemento más importante, el punto material, ya da razón de la estructura atómica de la materia.

La teoría cuántica moderna, en su forma caracterizada por los nombres de De Broglie, Schroedinger, Dirac, la que opera con funciones continuas, ha triunfado sobre esta dificultad gracias a una interpretación audaz que Max Born, el primero, expresó con claridad; las funciones espaciales que intervienen en las ecuaciones atómicas no pretenden ser un modelo matemático de las formaciones atómicas; sólo tienen que determinar por cálculo la probabilidad que hay de encontrar tales formaciones en el caso de una medición sobre una zona dada o en un estado de movimiento dado. Lógicamente esta concepción es irrecusable y ha tenido importantes resultados. Desgraciadamente, nos obliga a utilizar un continuo cuyo número de dimensiones no es el del espacio tal y como los físicos lo han considerado hasta ahora (es decir, cuatro), sino que crece de forma ilimitada con el número de moléculas que constituyen el sistema considerado. No puedo evitar confesar que doy a esta interpretación sólo un sentido provisional. Sigo creyendo en la posibilidad de un modelo de la realidad, es decir, de una teoría que presente las cosas en sí mismas y no simplemente la

probabilidad de su aparición.

Por otra parte, me parece seguro que debemos, en un modelo teórico, abandonar la idea de una localización completa de las moléculas. Esto, si no me equivoco, es lo que queda del resultado de la relación de incertidumbre de Heisenberg. Se puede concebir muy bien una teoría atómica en sentido propio (y no según una simple interpretación), sin localización de moléculas en un modelo matemático. Por ejemplo, para estar de acuerdo con el carácter atómico de la electricidad, basta con que las ecuaciones de campo conduzcan a esta consecuencia: una porción de espacio (en tres dimensiones), en cuyo límite la densidad eléctrica desaparece por todas partes, contiene siempre una carga eléctrica total de valor entero. En una teoría del continuo, el carácter atómico de las expresiones integrales podría, en consecuencia, expresarse satisfactoriamente sin la localización de las formaciones que constituyen la estructura atómica.

Sólo si fuéramos capaces de establecer tal representación de la estructura atómica, consideraría que el problema cuántico está resuelto.

EVOLUCIÓN DE LA FÍSICA: KEPLER Y NEWTON

Copérnico había llamado la atención de las mentes más selectas sobre el hecho de que se podía tener una noción clara del movimiento aparente de los planetas considerando estos movimientos como revoluciones alrededor del sol supuestamente inmóvil. Si el movimiento de un planeta fuera un movimiento circular uniforme alrededor del sol como centro, habría sido relativamente fácil establecer cómo eran esos movimientos vistos desde la tierra. Pero al manifestarse en fenómenos mucho más complejos, la tarea era mucho más difícil. Primero fue necesario determinar estos movimientos empíricamente según las observaciones de los planetas de Tycho-Brahé. Sólo después se podría pensar en encontrar las leyes generales a las que obedecen estos movimientos.

Para entender lo difícil que era la tarea de determinar el movimiento real de rotación, hay que entender lo siguiente. Nunca podemos ver dónde está realmente un planeta en un momento dado; sólo podemos ver en qué dirección lo ve la Tierra, que a su vez describe una curva de naturaleza desconocida alrededor del Sol. Por tanto, las dificultades parecían insuperables.

Kepler encontró un medio para poner orden en este caos. En primer lugar, reconoció la necesidad de determinar el movimiento de la Tierra. Esto habría sido sencillamente imposible si sólo existieran el sol, la tierra y las estrellas, fijos sin ningún otro planeta. En este caso no se podía determinar nada más que la variación en el curso del año de la línea recta Tierra-Sol (movimiento aparente del sol en relación con las estrellas fijas). De este modo, era posible saber que todas estas direcciones se encontraban en un plano fijo en relación con las estrellas fijas, al menos en la medida en que lo permitían las imprecisas observaciones realizadas en la época sin telescopio. También fue necesario determinar, del mismo modo, cómo gira la línea Tierra-Sol alrededor del Sol, y se comprobó que la velocidad angular de este movimiento cambia regularmente en el transcurso del año. Pero esto todavía no podía ser de mucha ayuda, ya que no se conocía la variación anual de la distancia Tierra-Sol.

Sólo cuando se conocieran los cambios anuales de esta distancia sería posible trazar la trayectoria correcta de la Tierra y determinar su ley.

Kepler encontró una admirable salida a este dilema. En primer lugar, de las observaciones solares se desprendía que la velocidad de la trayectoria aparente del sol sobre el fondo de las estrellas fijas era diferente en diferentes épocas del año, pero que la velocidad angular de este movimiento era siempre la misma en la misma época del año astronómico, y en consecuencia la velocidad de rotación de la línea Tierra-Sol, examinada en relación con la misma región de las estrellas fijas, tenía siempre el mismo valor. Por lo tanto, se podría admitir que la órbita de la Tierra se cerraba sobre sí misma y que la Tierra la recorría de la misma manera todos los años. Esto no era en absoluto evidente a priori. Por tanto, los seguidores de Copérnico estaban casi seguros de que este procedimiento podía aplicarse también a las órbitas de los demás planetas.

Esto ya era una mejora. Pero, ¿cómo determinar la verdadera forma de la órbita terrestre? Admitamos, en algún lugar del plano de esta órbita, la presencia de una poderosa linterna M. Sabemos que esta linterna es fija, y que por lo tanto constituye para la determinación de la órbita terrestre una especie de punto fijo de triangulación sobre el que los habitantes de la tierra pueden apuntar en cualquier momento del año. Admitamos además que esta linterna se encuentra a una distancia mayor del sol que de la tierra. Así es como, con la ayuda de esta linterna, se puede determinar la órbita de la Tierra.

En primer lugar, cada año hay un momento en el que la tierra T se encuentra exactamente en la línea que une el sol S con la linterna M; si en este momento apuntamos desde la tierra a la linterna, la dirección así obtenida es también la dirección SM (sol-linterna).

Supongamos que esta dirección está trazada en el cielo. Tomemos ahora otra posición de la tierra en otro momento. Como el sol y la linterna se pueden observar igualmente desde la tierra, se conoce el ángulo en T del triángulo S T M. Por otro lado, una observación directa del sol da la dirección S T y anteriormente la dirección S M se determinaba de una vez por todas sobre el fondo de las estrellas fijas. También se conoce el ángulo en S. Eligiendo a voluntad una base S M, se puede entonces dibujar en el mapa el triángulo S T M. Haciendo esta construcción varias veces durante el año, se obtendrá cada vez en el mapa un punto para la Tierra T en relación con la base S M definida una vez para todas, correspondiente a una fecha fija. La órbita de la Tierra estaría así determinada empíricamente, excepto, claro está, por su tamaño absoluto.

Pero, diréis, ¿de dónde sacó Kepler la linterna M? Su genio, ayudado en este caso por la naturaleza benigna, le hizo encontrarlo. Por ejemplo, el planeta Marte, del que se conocía su revolución anual, es decir, el tiempo que tarda este planeta en dar la vuelta al sol. Puede ocurrir que el sol, la tierra y Marte en un momento dado estén exactamente en línea recta, y que esta posición de Marte se repita cada vez después de uno, dos, etc. años marcianos, porque Marte viaja por una trayectoria cerrada. En ese momento, S M presenta siempre la misma base, mientras que la Tierra se encuentra siempre en un punto diferente de su órbita. Las observaciones de Marte y del Sol, en las fechas en cuestión, proporcionan, en consecuencia, un medio para determinar la verdadera órbita de la Tierra, teniendo el planeta Marte, en esos momentos, la parte de la linterna ficticia de ahora. Fue en esta época cuando Kepler encontró la verdadera forma de la órbita de la Tierra y las leyes que la rigen: los demás, que vinimos después, debemos honrarle y admirarle por ello.

Una vez determinada empíricamente la órbita de la Tierra, se conocía en todo momento la verdadera magnitud y dirección de la línea S T; entonces ya no era difícil para Kepler, en principio, calcular, a partir de las observaciones de los planetas, sus órbitas y movimientos: una tarea inmensa, dado el desarrollo de las matemáticas en aquella época.

Ahora quedaba la segunda parte, no menos difícil que el trabajo que llenó la vida de Kepler. Las órbitas se conocían empíricamente; pero, a partir de estos resultados empíricos, había que derivar leyes. Primero había que establecer una hipótesis sobre la naturaleza matemática de la curva y verificarla mediante enormes cálculos, cuyos datos ya se conocían; si el resultado no coincidía, hacer otra hipótesis y verificarla de nuevo. Tras una investigación, cuya inmensidad se puede adivinar, Kepler encontró un resultado concordante: la órbita es una elipse de la que el sol ocupa uno de los focos. También encontró la ley de variación de la velocidad en la órbita, según la cual la línea planeta-sol recorre superficies iguales en tiempos iguales. Finalmente, Kepler también encontró que los cuadrados de los tiempos de revolución son proporcionales a las terceras potencias de los grandes ejes de la elipse.

En nuestros tiempos agitados y angustiados, en los que es difícil encontrar la alegría en los seres humanos y en el curso de los acontecimientos humanos, es especialmente consolador evocar el recuerdo de un hombre tan grande y tan sereno como Kepler. Vivió en una época en la que la existencia de leyes generales para los fenómenos naturales no estaba en absoluto establecida con certeza. Qué grande debió ser su fe en estas leyes para darle la fuerza de dedicar decenas de años de trabajo paciente y difícil, en solitario, sin ningún apoyo, poco comprendido por sus contemporáneos, a la búsqueda empírica del movimiento de los planetas y de las leyes matemáticas de este movimiento.

A la admiración por este hombre sublime hay que añadir otro sentimiento de admiración y veneración que ya no se dirige a un ser humano, sino a la misteriosa armonía de la naturaleza en la que nacemos. Desde la antigüedad los hombres han imaginado curvas que responden a leyes lo más sencillas posibles: entre ellas, junto a la línea recta y el círculo, la elipse y la hipérbola. Ahora vemos estas formas realizadas en las trayectorias descritas por los cuerpos celestes, al menos con gran aproximación.

Parece que la naturaleza humana está obligada a construir formas de forma independiente antes de poder demostrar la existencia de la naturaleza. De los

admirables trabajos a los que Kepler dedicó su vida se desprende maravillosamente bien que el conocimiento no puede derivarse sólo de la experiencia, sino que es necesaria la comparación entre lo que el espíritu humano ha concebido y lo que ha observado.

No cabe duda de que los grandes materialistas de la antigüedad griega habían establecido que todos los hechos relativos a la materia debían referirse a una sucesión de átomos estrictamente regulada por leyes, sin intervención de la voluntad de los vivos, como causa independiente. Descartes retomó este postulado a su manera. Pero permaneció en el estado de un deseo audaz, el ideal problemático de una escuela filosófica. Antes de Newton no había ningún resultado fáctico que pudiera basarse en la creencia de una causalidad física perfecta.

Como nadie antes ni después, Newton ha mostrado el camino del pensamiento, el estudio y la formación práctica de Occidente. No sólo es el creador ingenioso de métodos particulares de dirección, sino que también ha dominado de manera singular los elementos empíricos conocidos en su época y su espíritu ha aparecido maravillosamente ingenioso en la argumentación matemática y física. Por todas estas razones es digno de nuestra alta veneración. Pero esta noble figura tiene una importancia aún mayor que la debida a su autoridad como maestro, porque el destino le situó en un punto de inflexión en el desarrollo del espíritu humano. Para darse cuenta de ello, no debemos olvidar que, antes de Newton, no existía ningún sistema de causalidad física bien definido capaz de captar las características más profundas del mundo de la experiencia.

El objetivo que perseguía Newton era responder a la siguiente pregunta: ¿existe una regla sencilla por la que se pueda calcular completamente el movimiento de los cuerpos celestes de nuestro sistema planetario, si se conoce el estado de movimiento de todos estos cuerpos en un momento dado? Estábamos en presencia de las leyes empíricas del movimiento planetario de Kepler, tomadas de las observaciones de Tycho-Brahè, que exigían una explicación. Ciertamente, estas leyes explicaban plenamente el movimiento de los planetas alrededor del

sol (forma elíptica de la órbita, igualdad de las áreas descritas en tiempos iguales, relación entre los grandes semiejes y la duración de la trayectoria). Pero estas reglas no satisfacen la condición necesaria de causalidad. Se trata de tres reglas, lógicamente independientes entre sí, que permiten constatar la falta de correlación interna. La tercera ley no puede aplicarse con inmediatez, numéricamente, a ningún otro cuerpo central que no sea el sol (por ejemplo, no hay relación entre la duración de la trayectoria alrededor del sol y la de un satélite alrededor del planeta). Pero el punto más importante es éste: estas leyes se refieren al movimiento tomado como un todo y no a la forma en que el estado de movimiento de un sistema en un momento dado se deriva del estado de movimiento que lo precedió inmediatamente: en nuestro lenguaje moderno diremos que son leyes integrales y no diferenciales.

La ley diferencial es la única forma que satisface plenamente la condición necesaria de causalidad del físico moderno. Haber tenido una concepción clara de la ley diferencial es uno de los mayores méritos del genio de Newton. Para llegar a esto, no sólo era necesaria la intervención del pensamiento, sino que también era necesario disponer de un método matemático de fórmulas, que existía, es cierto, en los rudimentos, pero al que había que dar una forma sistemática; Newton también descubrió esta forma en el cálculo diferencial y en el cálculo integral. Aquí se puede dejar de lado la cuestión de si Leibniz llegó a estos mismos procedimientos matemáticos independientemente de Newton o no; pero en cualquier caso, se puede decir que fueron para Newton una necesidad, porque sólo ellos podían dar a su pensamiento un medio de expresión.

Galileo ya había dado un paso importante en el camino hacia el descubrimiento de la ley del movimiento. Fue él quien encontró la ley de la inercia y la ley de la caída libre de los cuerpos en el campo de la gravitación terrestre: una masa (más exactamente, un punto material), no afectada por otras masas, se mueve en línea recta y con movimiento uniforme; en el campo de la gravedad, la velocidad vertical de un cuerpo libre aumenta en proporción al tiempo. Hoy puede parecer que se ha avanzado poco desde los descubrimientos de Galileo hasta la ley del movimiento de Newton. Es necesario, sin embargo, señalar que las dos proposiciones mencionadas se refieren, según su forma, al movimiento de un conjunto, mientras que la ley del movimiento de Newton da respuesta a la

siguiente pregunta: ¿cómo se manifiesta el estado de movimiento de un punto material, en un tiempo infinitamente pequeño, bajo la influencia de una fuerza exterior? Sólo observando el fenómeno en un tiempo infinitamente pequeño (ley diferencial) llegó Newton a fórmulas aplicables a cualquier movimiento. La idea de fuerza la extrajo de la estática, que ya estaba bien desarrollada. Sólo pudo establecer el vínculo entre fuerza y aceleración introduciendo el nuevo concepto de masa, que, cabe decir, se apoya curiosamente en una definición que sólo lo es en apariencia. Hoy estamos tan acostumbrados a la formación de ideas correspondientes a cocientes diferenciales que ya no podemos apreciar qué poderosa capacidad de abstracción fue necesaria para llegar, mediante una doble derivación, a la ley general diferencial del movimiento cuando aún no se había inventado el concepto de masa.

Pero esto no era en absoluto suficiente para obtener una ley causal de los fenómenos del movimiento.

Porque la ecuación del movimiento sólo determinaba el movimiento cuando se conocía la fuerza. Newton tenía bien presente la idea (probablemente teniendo en cuenta las leyes del movimiento de los planetas) de que la fuerza que actúa sobre una masa está determinada por la posición de todas las masas que se encuentran a una distancia suficientemente pequeña de la masa en cuestión. Sólo cuando se conoció esta relación surgió una concepción causal completa de los fenómenos del movimiento. Todo el mundo sabe cómo Newton, partiendo de las leyes del movimiento planetario de Kepler, resolvió el problema de la gravitación y descubrió así la identidad entre las fuerzas motrices que actúan sobre los astros y la gravedad. Sólo la asociación entre la ley del movimiento y la ley de la atracción constituye este admirable edificio del pensamiento, que permite calcular, a partir del estado de un sistema existente en un instante dado, los estados anterior y posterior, siempre que los fenómenos se produzcan únicamente por efecto de las fuerzas de gravitación. Lo que hace que el sistema newtoniano sea lógico y armonioso es que todas las causas de la aceleración de las masas de un sistema actúan sólo sobre estas masas.

Sobre esta base, Newton pudo explicar los movimientos de los planetas, los satélites y los cometas hasta los detalles más minúsculos, así como el flujo y el reflujo, la precesión de la Tierra: un trabajo de deducción de una magnitud única. La observación de que la causa de los movimientos de los cuerpos celestes es idéntica a la gravedad, este fenómeno familiar del que tenemos experiencia diaria, también tuvo un efecto admirable.

La importancia de la obra de Newton no sólo radica en que creó una base utilizable y lógicamente satisfactoria para la mecánica propiamente dicha, sino que representó hasta finales del siglo XIX el programa de todos los científicos que se dedicaron a la investigación de la física teórica. Todos los fenómenos físicos debían referirse a masas, que obedecían a la ley del movimiento de Newton. Sin embargo, la ley de las fuerzas tuvo que desarrollarse y adaptarse a la naturaleza de los hechos. En este sentido, el propio Newton llevó a cabo sus investigaciones en el campo de la óptica, cuando supuso que la luz estaba compuesta por corpúsculos inertes.

La teoría de la óptica ondulatoria también utilizó la ley del movimiento de Newton, después de haberla aplicado a masas distribuidas de forma continua. Sólo en las ecuaciones del movimiento de Newton se ha basado la teoría cinética del calor, que no sólo ha preparado las mentes para la ley de la conservación de la energía, sino que también ha proporcionado una teoría de los gases verificada en sus más mínimos detalles, y una concepción completa de la naturaleza del segundo principio de la termodinámica. La teoría de la electricidad y el magnetismo también se ha desarrollado, en los tiempos modernos, bajo la guía de las ideas fundamentales newtonianas (sustancia eléctrica y magnética, fuerzas que actúan a distancia). E incluso el cambio radical introducido por Faraday y Maxwell en la electrodinámica y la óptica -que representa, después de Newton, el primer gran progreso en los fundamentos de la física teórica- se ha llevado a cabo, totalmente, bajo la guía de las ideas de Newton. Maxwell, Boltzmann, Lord Kelvin no se cansaron de trazar campos electromagnéticos y sus acciones dinámicas recíprocas a fenómenos mecánicos de hipotéticas masas uniformemente distribuidas. Hasta finales del siglo XIX, la física teórica no se desmarcó del marco newtoniano que había servido de guía intelectual a la ciencia durante casi dos siglos y le proporcionó un apoyo considerable.

Los principios fundamentales de Newton eran tan satisfactorios desde el punto de vista de la lógica que se necesitaban hechos experimentales para dar nuevos impulsos. Antes de abordar este tema, debo señalar que el propio Newton conocía los puntos débiles de su construcción mejor que los científicos que le siguieron. Esta circunstancia siempre me ha llenado de admiración y veneración, y es por ello que quiero detenerme un poco en el asunto.

I. Aunque se reconocen los esfuerzos de Newton por presentar su sistema como necesariamente condicionado por la experiencia, y por introducir en él el menor número posible de conceptos que no pudieran referirse a los datos directos de la experiencia, sin embargo formuló el principio del Espacio y del Tiempo. Esto se le ha reprochado a menudo estos días. Pero precisamente en este punto Newton es especialmente coherente consigo mismo. Había reconocido que las cantidades geométricas observables (distancias de los puntos materiales entre sí) y su movimiento en el tiempo no caracterizan completamente los movimientos desde el punto de vista físico. Demostró esta deducción con la famosa experiencia del cubo. Por consiguiente, aparte de las masas y sus distancias variables en el tiempo, sigue habiendo algo que es decisivo para los acontecimientos: concibe este "algo" en relación con el "espacio absoluto". También reconoce, si sus leyes del movimiento tienen sentido, que el espacio debe tener una especie de realidad física, una realidad de la misma naturaleza que los puntos materiales y sus distancias.

Este conocimiento preciso prueba también la sabiduría de Newton y la existencia de un lado débil de su teoría; pues el encuadre lógico de la misma sería ciertamente más satisfactorio sin este vago concepto: en este caso encontraríamos en la ley sólo elementos cuya relación con las percepciones es bastante evidente.

II - La introducción de fuerzas directas, que actúan instantáneamente a distancia, para representar los efectos de la gravitación, no corresponden al carácter de la mayoría de los fenómenos que conocemos por la experiencia cotidiana. Newton

responde a esta objeción señalando que su ley de la acción recíproca no pretende ser una explicación definitiva, sino una regla inducida por la experiencia.

III - La teoría de Newton no dio ninguna explicación al hecho extremadamente notable de que el peso y la inercia de un cuerpo están determinados por la misma magnitud (masa). La singularidad de este hecho no se le escapó a Newton en absoluto.

Ninguno de estos tres puntos constituye una objeción lógica contra la teoría: son, hasta cierto punto, deseos insatisfechos del espíritu científico que lucha por penetrar en los hechos de la naturaleza de forma completa y con un concepto unitario.

La teoría del movimiento de Newton, tomada como base de toda la física teórica, recibió su primer golpe con la teoría de la electricidad de Maxwell. Se comprobó que las acciones recíprocas ejercidas entre los cuerpos por los cuerpos eléctricos y magnéticos no están determinadas por fuerzas que actúan instantáneamente a distancia, sino por fenómenos que se transfieren en el espacio a una velocidad determinada. Al punto material y a su movimiento, según la concepción de Faraday, se ha añadido un elemento físico, el "campo". En primer lugar, se intentó formular este nuevo concepto, basado en concepciones mecánicas, como un estado mecánico (de movimiento o represión) de un hipotético medio (el éter) que llenaría el espacio. Pero como, a pesar de los esfuerzos perseverantes, esta interpretación mecánica no logró sus objetivos, nos acostumbramos gradualmente a concebir el "campo electromagnético" como la piedra angular última e irreductible de la realidad física. Estamos en deuda con H. Hertz por haber liberado a sabiendas la idea de campo de cualquier accesorio extraído del fondo de los conceptos de la mecánica, con H.-A. Lorentz por haberlo liberado de su soporte material; según esta última idea, el único soporte del campo seguía siendo el espacio vacío de la física (o éter) que, en la mecánica de Newton, no había sido despojado de ninguna función física. Una vez realizada esta evolución, ya nadie creía en las fuerzas directas instantáneas que actúan a distancia, ni siquiera en el campo de la gravitación. El desarrollo de la teoría del

campo electromagnético permitió, tras el abandono de las fuerzas a distancia de Newton, intentar explicar con el electromagnetismo la ley del movimiento newtoniana o sustituirla por una ley más exacta basada en la teoría del campo. Pero si estos intentos no fueron del todo exitosos, las ideas fundamentales de la mecánica dejaron de ser consideradas como la piedra fundamental en la construcción de la imagen del mundo físico.

La teoría de Lorentz-Maxwell conduce necesariamente a la teoría de la relatividad especial, que, para eliminar la idea de simultaneidad absoluta, excluye la existencia de fuerzas que actúan a distancia. Según esta teoría, la masa no es una cantidad inmutable, sino que depende del contenido energético (que también es equivalente). Demostró que la ley del movimiento de Newton debía concebirse como una ley límite aplicable a pequeñas velocidades y la sustituyó por una nueva ley del movimiento en la que la velocidad de la luz en el vacío interviene como velocidad límite.

Finalmente, el último paso en la evolución de la teoría de campos lo dio la teoría de la relatividad generalizada. Cuantitativamente, sólo modifica ligeramente la teoría de Newton, pero cualitativamente aporta cambios mucho más profundos. La inercia, la gravitación y el comportamiento métrico de los cuerpos y los relojes se han reducido a una cualidad unitaria del campo. Este campo se dio como dependiente de los cuerpos (generalización de la ley de gravitación de Newton o de la correspondiente ley de campo, tal como la había formulado Poisson). De este modo, el espacio y el tiempo se vaciaron no de su realidad, sino de su carácter de absolutos causales (que influyen en el absoluto, pero no son influidos por él) que Newton había tenido que atribuirles para poder enunciar las leyes entonces conocidas. La ley de la inercia generalizada tiene la función de la ley del movimiento de Newton. Esta breve explicación basta para mostrar cómo los elementos de la teoría de Newton han pasado a la teoría de la relatividad generalizada, gracias a la cual han desaparecido los tres puntos defectuosos antes mencionados. Parece que, en el marco de esta última teoría, la ley del movimiento puede derivarse de la ley del campo correspondiente a la ley de fuerzas de Newton. Una vez conseguido esto, se podrá hablar de una teoría de campo pura.

La mecánica de Newton abrió finalmente el camino a la teoría de campos en un sentido más formal. La aplicación de la mecánica de Newton a masas uniformemente distribuidas condujo necesariamente al descubrimiento y uso de ecuaciones con derivadas parciales, gracias a las cuales la teoría de campos pudo encontrar una expresión adecuada. Desde este punto de vista formal, la concepción de Newton de la ley diferencial es el primer paso decisivo en el desarrollo posterior.

La evolución de nuestras ideas sobre los hechos naturales, que hemos tratado hasta aquí, puede concebirse como un refinamiento orgánico del pensamiento de Newton. Mientras el establecimiento de la teoría del campo alcanzaba su plenitud, algunos hechos de irradiación térmica, de espectros, de radiactividad, etc., revelaron un límite de utilización de toda la teoría que, incluso ahora, nos parecería casi inalcanzable a pesar de los gigantescos resultados obtenidos en los detalles. No sin argumentos de peso, muchos físicos han declarado que con respecto a estos hechos no sólo ha fallado la ley diferencial, sino la propia ley de la causalidad (hasta ahora el último postulado básico de toda ciencia natural). También se ha negado la posibilidad de una construcción del espacio-tiempo que pueda ajustarse unívocamente a las leyes físicas. A partir de una teoría del campo, que opera mediante ecuaciones diferenciales, no parece a primera vista plausible deducir que un sistema mecánico, como confirma la experiencia, sólo es capaz permanentemente de valores discretos de energía o de estado. Sin duda, el método de De Broglie y Schrödinger, que en cierto sentido tiene el carácter de una teoría de campo, conduce a la deducción, sobre la base de ecuaciones diferenciales, de la existencia de estados discretos, lo que concuerda de manera sorprendente con los hechos de la experiencia; pero este método debe renunciar a una localización de las partículas materiales y a leyes rigurosamente causales. ¿Quién se atrevería hoy a resolver el problema de saber si la ley causal y la ley diferencial, estas últimas primicias de la teoría newtoniana, deben ser abandonadas definitivamente?

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE REALIDAD FÍSICA

La creencia en un mundo exterior independiente del individuo que lo explora es la base de toda ciencia natural. Pero como las percepciones sensoriales sólo dan pistas indirectas de este mundo externo, de este "real físico", sólo podemos captarlo especulativamente. De ello se deduce que nuestras concepciones de lo real físico nunca pueden ser definitivas. Si queremos estar de acuerdo, según una lógica lo más perfecta posible, con los hechos perceptibles, debemos estar siempre dispuestos a modificar estas concepciones, también conocidas como el fundamento axiomático de la física. De hecho, un vistazo a la evolución de la física nos permite ver que esta base ha sufrido profundos cambios a lo largo del tiempo.

La modificación más importante de los fundamentos axiomáticos de la física o de nuestra concepción de la estructura real, después del advenimiento de la física teórica por Newton, ha sido aportada por las investigaciones de Faraday y Maxwell sobre los fenómenos electromagnéticos. A continuación intentaremos exponer estos conceptos con mayor exactitud, examinando la evolución antes y después de estas investigaciones.

Según el sistema de Newton, la realidad física se caracteriza por los conceptos de espacio, tiempo, punto material y fuerza (equivalente a la acción recíproca entre puntos materiales). Según Newton, los fenómenos físicos deben entenderse como movimientos de puntos materiales en el espacio, movimientos regidos por leyes. El punto material es el único representante de la realidad, aunque ésta sea variable. Los cuerpos perceptibles han dado lugar a la idea de punto material; el punto material ha sido imaginado como el análogo de los cuerpos móviles desprovistos de las características de forma, extensión, orientación en el espacio, de todas las propiedades intrínsecas, en definitiva, aparte de la inercia y la traslación, e introduciendo la idea de fuerza. Por lo tanto, estos cuerpos materiales, que provocaron psicológicamente la formación del concepto de "punto material", deben considerarse, a su vez, sistemas de puntos materiales.

Nótese que este sistema teórico es, en su esencia, un sistema atómico y mecánico. Todo hecho debía concebirse como puramente mecánico, es decir, como el simple movimiento de puntos materiales sujetos a la ley del movimiento de Newton.

El punto menos satisfactorio de este sistema teórico (aparte de la dificultad, de nuevo discutida en los últimos tiempos, del espacio absoluto) se encontraba sobre todo en la teoría de la luz, que Newton, consecuente con él mismo, concebía también como constituida por puntos materiales. Pero ya en ese momento la siguiente pregunta quemaba los labios: ¿qué ocurre con los puntos materiales que componen la luz cuando ésta es absorbida? Por no hablar del hecho de que es muy difícil para la mente considerar puntos materiales de naturaleza tan diferente como los que hay que admitir que representan sustancias ponderables de un lado y de otro. A esto se añadieron más tarde los corpúsculos eléctricos, como una tercera especie de puntos materiales, con propiedades fundamentalmente diferentes. Por último, la base seguía presentando un punto débil: hay que admitir de forma totalmente hipotética y arbitraria las fuerzas de acción recíproca que determinan el devenir. Sin embargo, esta concepción de la realidad fue fuertemente fructífera: ¿cómo pudo ocurrir que se pensara que estaba abandonada?

Para dar una forma matemática a su sistema, Newton tuvo que recurrir necesariamente a la idea de las derivadas y establecer las leyes del movimiento en forma de ecuaciones diferenciales totales; éste es quizá el mayor avance que se le ha permitido a un hombre en el dominio del pensamiento. Las ecuaciones diferenciales parciales no eran necesarias y Newton no hizo un uso metódico de ellas. Pero las ecuaciones diferenciales parciales fueron indispensables para la formulación de la mecánica de los cuerpos deformables; esto se debe a que en estos problemas la concepción de tales cuerpos como formados por puntos materiales no tenía al principio ninguna función.

Pero si la ecuación diferencial parcial se presentaba como una sirvienta en la física teórica, poco a poco ha ido ocupando un lugar dominante en ella. Esto

comenzó en el siglo XIX cuando, bajo la presión de los hechos observados, se impuso la teoría ondulatoria de la luz. La luz en el espacio vacío se concebía como un fenómeno de vibración del éter y necesariamente parecía ocioso considerar a éste como un conglomerado de puntos materiales. Aquí, por primera vez, se consideró la ecuación diferencial parcial como la expresión natural de los fenómenos elementales de la física. Es así como el campo continuo ha intervenido en un área particular de la física teórica, cerca del punto material para representar lo real físico. Este dualismo no ha desaparecido hasta el día de hoy, por muy vergonzoso que pueda parecer a cualquier mente sistemática.

Pero si la idea de la realidad física había dejado de ser puramente atómica, al principio siguió siendo puramente mecánica; siempre se intentó interpretar todo hecho como un movimiento de masas inertes, y ni siquiera se podía imaginar otra forma de concebirlo. Fue entonces cuando se produjo la gran convulsión a la que los nombres de Faraday, Maxwell y Hertz quedarán ligados para siempre; pero fue Maxwell quien se llevó la parte del león de esta revolución. Demostró que lo que entonces se sabía sobre la luz y los fenómenos electromagnéticos está representado por su conocido sistema dual de ecuaciones diferenciales parciales, en el que intervienen los campos eléctrico y magnético como variables dependientes. En realidad, Maxwell intentó dar una base a estas ecuaciones o justificarlas mediante las ideas de la mecánica.

Pero hizo uso de varias construcciones de este tipo y no se tomó ninguna de ellas realmente en serio, de modo que sus propias ecuaciones diferenciales aparecían como lo esencial y las fuerzas de campo en ellas como entidades elementales no susceptibles de ser referidas a nada más. A finales de siglo, la concepción del campo electromagnético como entidad irreductible ya se había impuesto universalmente y las teorías más serias no daban crédito a la justificación o a la posibilidad de un Maxwell. Por otra parte, también se intentó dar una base mecánica a las ecuaciones de las carreras con la teoría de campos y con la ayuda de la teoría de Maxwell, los puntos materiales y su inercia. Pero estos esfuerzos no tuvieron, finalmente, éxito.

Si, dejando de lado los importantes resultados particulares que la obra de Maxwell obtuvo en los principales dominios de la física, nos centramos más particularmente en los cambios que provocó en la concepción de la naturaleza de la realidad física, esto es lo que podemos decir: antes de Maxwell, la realidad física se imaginaba (como representación de los fenómenos de la naturaleza) como puntos materiales cuyas modificaciones consistían únicamente en movimientos, regulados por ecuaciones diferenciales parciales. Después de Maxwell, la realidad física se concibió como representada por campos continuos, no explicables mecánicamente, gobernados por ecuaciones diferenciales parciales. Este cambio en la concepción de la realidad es el más profundo y fructífero que ha experimentado la física desde Newton; pero también hay que confesar que, por el momento, el programa abordado no se ha realizado definitivamente. Los sistemas físicos establecidos posteriormente, que se han visto coronados por el éxito, constituyen más bien compromisos entre los dos programas y, precisamente por su carácter de compromiso, llevan la marca de lo provisional y de lo lógicamente imperfecto, aunque cada uno de ellos haya logrado grandes progresos.

En primer lugar hay que mencionar la teoría del electrón de Lorentz, en la que el campo y los corpúsculos eléctricos intervienen conjuntamente como elementos de igual valor en la concepción de la realidad. Luego vino la teoría de la relatividad especial y la relatividad generalizada, que, aunque se basa enteramente en consideraciones de la teoría de campos, no ha podido evitar hasta ahora la intervención independiente de los puntos materiales y las ecuaciones diferenciales totales.

La última creación, extremadamente fértil, de la física teórica, la mecánica de los quanta, está absolutamente alejada, en su principio, de los dos programas a los que por simplicidad daremos el nombre de programa de Newton y programa de Maxwell. De hecho, las cantidades que aparecen en las leyes de la nueva teoría no pretenden representar la realidad física en sí, sino sólo las probabilidades de intervención de la realidad física considerada. Dirac, a quien debemos, en mi opinión, la presentación más perfecta, desde el punto de vista de la lógica, de esta teoría, advierte con razón que no sería fácil describir teóricamente, por ejemplo, un fotón de tal manera que esta descripción sea concluyente y permita

decir si el fotón pasará o no por un polarizador colocado (transversalmente) en su trayectoria.

Sin embargo, me inclino a pensar que los físicos no estarán satisfechos por mucho tiempo con una descripción tan indirecta de la realidad, incluso si fuera posible reconciliar la teoría con el postulado de la relatividad generalizada de manera satisfactoria. En este caso habrá que volver a intentar realizar este programa que es correcto llamar programa de Maxwell: la descripción de la realidad física mediante campos que satisfagan las ecuaciones diferenciales parciales sin singularidades.

CARACTERES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Al considerar la naturaleza específica de la teoría de la relatividad, quisiera subrayar que esta teoría no es de origen especulativo, sino que su descubrimiento se debe completa y únicamente al deseo de adaptar, lo mejor posible, la teoría física a los hechos observados. No se trata de un acto revolucionario, sino de la evolución natural de una línea que se ha seguido durante siglos. No se abandonaron a la ligera ciertas ideas, consideradas hasta entonces como fundamentales, sobre el espacio, el tiempo y el movimiento; esto fue impuesto únicamente por la observación de ciertos hechos.

La ley de la constancia de la velocidad de la luz en el espacio vacío, reforzada por los desarrollos de la electrodinámica y la óptica, junto con la igualdad de derechos de todos los sistemas de inercia (principio de la relatividad especial), tan claramente puesta de manifiesto por Michelson, condujeron inmediatamente a la idea de que el concepto de tiempo debía ser relativo porque cada sistema de inercia debía tener su propio tiempo particular. El progreso de esta idea puso de manifiesto entonces que la relación recíproca entre las acciones que se producen en el instante, por un lado, y las coordenadas y el tiempo, por otro, no había sido suficientemente considerada antes.

En efecto, uno de los rasgos esenciales de la teoría de la relatividad es el esfuerzo por elaborar con mayor precisión las relaciones entre los conceptos generales y los hechos de la experiencia; ha mantenido el principio de que la justificación de un concepto físico se basa exclusivamente en su relación clara e inequívoca con estos hechos. Según la teoría de la relatividad especial, las coordenadas del espacio y del tiempo siguen teniendo un carácter absoluto en las dimensiones en las que son directamente medibles con cuerpos rígidos y relojes. Pero son relativos en la medida en que dependen del estado de movimiento del sistema de inercia elegido. El continuo cuatridimensional constituido por la unión del espacio y el tiempo tiene, según la teoría de la relatividad especial, el mismo carácter absoluto que tenían el espacio y el tiempo, según la teoría

anterior, cada uno por separado (Minkowski). A partir de la interpretación de las coordenadas y del tiempo como resultado de las mediciones, se llega a la influencia del movimiento (relativo al sistema de coordenadas) sobre la forma de los cuerpos y el curso de los relojes, así como a la equivalencia de la energía y la masa inerte.

La teoría de la relatividad generalizada debe su creación, en primer lugar, a la igualdad numérica, constatada por la experiencia, de la masa inerte y la masa pesada de los cuerpos, hecho fundamental al que la mecánica clásica no había dado ninguna interpretación. Se llegó a esta interpretación extendiendo el principio de relatividad a sistemas de coordenadas con aceleración relativa entre sí. La introducción de sistemas de coordenadas con una aceleración negativa respecto a los sistemas de inercia conduce necesariamente a la aparición de campos de gravitación respecto a estos últimos. Como resultado, la teoría de la relatividad general basada en la igualdad de la inercia y el peso da lugar a una teoría del campo de la gravitación.

La introducción de los sistemas de coordenadas animados por un movimiento acelerado uno respecto del otro como sistemas de coordenadas equivalentes, como parece hacer necesaria la identidad de la inercia y el peso, conduce, en conjunción con los resultados de la teoría de la relatividad especial, a la siguiente consecuencia: las leyes espaciales de los cuerpos sólidos, en presencia de campos gravitatorios, no responden a las reglas de la geometría de Euclides. Se llega a un resultado similar con respecto al movimiento de los relojes. De ello se deriva la necesidad de una nueva generalización de la teoría del espacio y del tiempo, porque ahora ya no es válida la interpretación directa de las coordenadas espaciales y temporales con los resultados de las mediciones por medio de metros y relojes. Esta generalización de la métrica, que, gracias a los trabajos de Gauss y Riemann, ya existía en un ámbito puramente matemático, se basa esencialmente en el hecho de que la métrica de la teoría de la relatividad especial para campos pequeños puede seguir pretendiendo ser válida en el caso general.

La evolución que hemos descrito elimina cualquier realidad independiente de las

coordenadas espacio-temporales. La realidad métrica viene dada ahora sólo por la unión de estas coordenadas con los valores que delimitan el campo de gravitación.

La evolución en el mundo del pensamiento de la teoría de la relatividad generalizada tiene otro origen. Como ya ha señalado Ernst Mach, hay en la teoría de Newton el siguiente punto que no satisface. Si se considera el movimiento no desde el punto de vista causal, sino desde el punto de vista puramente descriptivo, no hay más movimiento que el movimiento relativo de las cosas entre sí. Pero la aceleración que aparece en las ecuaciones del movimiento de Newton no es concebible a partir de la idea de movimiento relativo; ello obligó a Newton a imaginar un espacio físico en relación con el cual debía existir una aceleración. Esta idea de un espacio absoluto introducido ad hoc es, a decir verdad, lógicamente correcta, pero no parece satisfactoria. Posteriormente, se intentó modificar las ecuaciones de la mecánica de forma que la inercia de los cuerpos se trazara a un movimiento relativo no en relación con el espacio absoluto, sino en relación con la totalidad de otros cuerpos ponderables. Dado el estado de los conocimientos de la época, su intento debió de fracasar.

Haber planteado este problema parece totalmente racional. Esta evolución del pensamiento se impuso, frente a la teoría de la relatividad general, con una intensidad poderosamente reforzada, porque, según esta teoría, las propiedades físicas del espacio están influidas por la materia ponderable. Estoy convencido de que la teoría de la relatividad general sólo puede resolver este problema considerando el mundo como un espacio cerrado. Los resultados matemáticos de la teoría conducen necesariamente a esta concepción, si se admite que la densidad media de la materia ponderable en el mundo posee un valor finito, aunque pequeño.

¿QUÉ ES LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD?

En la física se pueden distinguir teorías de distinta naturaleza. La mayoría de ellas son teorías constructivas: mediante un sistema relativamente sencillo de fórmulas situadas en la base, intentan construir una imagen de fenómenos relativamente complejos. Así es como la teoría cinética de los gases intenta relacionar los fenómenos mecánicos, térmicos y de difusión con los movimientos de las moléculas, es decir, construir a partir de la hipótesis del movimiento molecular. Cuando se dice que se ha logrado comprender un grupo de fenómenos naturales, siempre se quiere decir que se ha encontrado una teoría constructiva que engloba los fenómenos en cuestión.

Pero junto a esta importante clase de teorías hay una segunda que, en lugar del método sintético, emplea el método analítico. Aquí el punto de partida y la base no están constituidos por elementos de construcción hipotética, sino por propiedades generales de los fenómenos naturales determinadas empíricamente de las que se derivan posteriormente criterios formulados matemáticamente, a los que deben responder los fenómenos particulares o sus imágenes teóricas. Es así como la termodinámica, partiendo del resultado general de la experiencia según el cual el movimiento perpetuo es imposible, trata de determinar, por medios analíticos, las relaciones a las que deben ajustarse los fenómenos particulares.

La teoría de la relatividad pertenece a la segunda categoría. Por lo tanto, para entender su esencia, hay que conocer primero los principios en los que se basa. Pero, antes de examinarlas, debo señalar que la teoría de la relatividad se parece a un edificio de dos pisos, que son la teoría de la relatividad restringida y la teoría de la relatividad generalizada. La primera, que es el fundamento de la segunda, se refiere a todos los fenómenos físicos excepto la gravitación; la teoría de la relatividad generalizada conduce a la ley de la gravitación y a sus relaciones con otras fuerzas naturales.

Desde la antigüedad griega se sabe que para describir el movimiento de un cuerpo hay que referirse al movimiento de otro cuerpo al que se refiere el movimiento del primero. El movimiento de un coche se refiere al sol, el movimiento de un planeta a todas las estrellas fijas visibles. En física, los cuerpos a los que se refieren espacialmente los fenómenos se denominan sistemas de coordenadas. Las leyes de la mecánica de Galileo y Newton sólo pueden formularse mediante un sistema de coordenadas.

Sin embargo, para que las leyes de la mecánica sean válidas, el estado de movimiento del sistema de coordenadas no puede elegirse a voluntad (debe ser sin rotación y sin aceleración). Un sistema de coordenadas admisible en mecánica se denomina "sistema de inercia". Sin embargo, el estado de movimiento de un sistema de inercia no está, según la mecánica, claramente determinado por la naturaleza. Más bien hay que decir: un sistema de coordenadas que se mueve en línea recta y con movimiento uniforme respecto a un sistema de inercia es también un sistema de inercia. Por "principio de relatividad especial" se entiende la extensión de esta proposición a cualquier fenómeno natural: cualquier ley general de la naturaleza, válida para un sistema de coordenadas, debe ser válida sin cambios para un sistema de coordenadas K_1 animado por un movimiento uniforme de traslación en relación con K .

El segundo principio en el que se basa la teoría de la relatividad especial es "el principio de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío". Este principio dice: la luz siempre tiene una velocidad de difusión determinada con precisión en el vacío (independientemente del estado de movimiento y de la fuente de luz). El mérito de este principio de la física se debe a los éxitos de la electrodinámica de Lorentz y Maxwell.

Los dos principios enunciados se apoyan poderosamente en la experiencia, pero no parecen lógicamente compatibles entre sí. La teoría de la relatividad especial ha logrado finalmente esta unión lógica modificando la cinemática, es decir, la doctrina de las leyes del espacio y del tiempo (desde el punto de vista físico). Lo

ha demostrado: decir que dos acontecimientos son simultáneos no tiene ningún sentido sino en relación con un sistema de coordenadas, y es evidente que la forma de los metros y el funcionamiento de los relojes deben depender de su estado de movimiento en relación con el sistema de coordenadas.

Pero la física antigua, incluidas las leyes de Galileo y Newton, no se ajustaban a esta cinemática relativista que ahora hemos discutido. De este último descendían las condiciones matemáticas generales a las que debían corresponder las leyes naturales si los dos principios generales enunciados eran ciertos. La física tuvo que adaptarse a ellos. En particular, se llegó a una nueva ley de movimiento para los puntos materiales (que se mueven rápidamente), que también se verificó exactamente para las partículas cargadas eléctricamente. El resultado más importante de la teoría de la relatividad especial se refería a las masas inertes de un sistema de cuerpos. Se demostró que la inercia de un sistema debe depender de su contenido energético, y se llegó al concepto de que las masas inertes no son más que energía latente, por así decirlo. El principio de conservación de la masa ha perdido su autonomía, se ha fusionado con el de conservación de la energía.

La teoría de la relatividad especial, que no es más que la extensión sistemática de los sistemas de coordenadas introducidos por nosotros y con su estado de movimiento abrió nuevas vías para superar sus propias limitaciones. ¿La independencia de las leyes físicas en relación con el estado de movimiento de los sistemas de coordenadas no debía limitarse a los movimientos uniformes de traslación de los sistemas de coordenadas entre sí? ¿Qué tiene que ver entonces la naturaleza con los sistemas de coordenadas introducidos por nosotros y su estado de movimiento? Incluso si para describir la naturaleza es necesario emplear un sistema de coordenadas elegido a voluntad, la elección de su estado de movimiento no debería, al menos, estar sujeta a ninguna limitación; las leyes deberían ser absolutamente independientes de esta elección (principio de la relatividad generalizada). La aplicación de este principio de la relatividad generalizada puede entenderse fácilmente a través de una experiencia largamente conocida, según la cual el peso y la inercia de un cuerpo se rigen por la misma constante (igualdad de masas pesadas e inertes). Imaginemos, por ejemplo, un sistema de coordenadas animado por un movimiento de rotación uniforme

respecto a un sistema de inercia en el sentido newtoniano. Las fuerzas centrífugas que intervienen, en relación con este sistema, deben concebirse, según la teoría de Newton, como efectos de la inercia. Pero estas fuerzas centrífugas son proporcionales a la masa de los cuerpos, al igual que las fuerzas de la gravedad. ¿No sería posible, en determinadas circunstancias, concebir el sistema de coordenadas como inmóvil y las fuerzas centrífugas como fuerzas gravitatorias? Esto es fácil de concebir, pero la mecánica clásica se opone a ello.

Esta consideración incidental significa que una teoría generalizada de la relatividad debe proporcionarnos las leyes de la gravitación, y la continuidad lógica de la idea para justificar esta esperanza. Pero el camino era más difícil de lo que se podía prever porque requería abandonar la geometría de Euclides. Es decir: las leyes según las cuales los cuerpos sólidos se disponen en el espacio no coinciden exactamente con las leyes espaciales de la geometría euclidiana. A esto nos referimos cuando hablamos de la "curvatura del espacio". Los conceptos fundamentales de "línea", "plano", etc., pierden así su significado exacto en la física.

En la teoría de la relatividad generalizada, la doctrina del espacio y el tiempo, la cinemática, ya no es un fundamento independiente del resto de la física.

Más bien, el comportamiento de los cuerpos y el funcionamiento de los relojes dependen de los campos gravitatorios, que a su vez son producidos por la materia.

La nueva teoría de la gravitación se aparta considerablemente en principio de la teoría de Newton; pero sus resultados prácticos coinciden tanto con los de esta teoría que es difícil encontrar pruebas experimentales de diferencias apreciables.

Aquí están los encontrados hasta ahora:

1. - La rotación de las elipses de las órbitas planetarias alrededor del sol (observada en Mercurio);

2. - La curvatura de los rayos de luz a través de los campos gravitatorios (observada en las fotografías de los eclipses solares);

3. - Desplazamiento al rojo de los rayos espectrales de la luz que nos envían las estrellas de masa significativa.

El principal mérito de la teoría es que constituye un conjunto lógico.

Si una sola de sus consecuencias resultara incorrecta, habría que abandonarla; cualquier cambio sería imposible sin hacer tambalear todo el edificio.

Pero que nadie piense que la gran creación de Newton puede ser realmente sustituida por esta teoría u otra similar. Sus grandes y claras ideas conservarán siempre su eminente importancia en el futuro, y en ellas basamos todas nuestras especulaciones modernas sobre la naturaleza del mundo.

EL ESPACIO, EL ÉTER Y EL CAMPO

El razonamiento científico es el perfeccionamiento del pensamiento precientífico. Dado que, en este último, la idea de espacio ya tiene una función fundamental, debemos empezar por estudiar esta idea tal y como era en sus orígenes antes de la ciencia. Hay dos maneras de considerar las ideas; ambas son indispensables para comprenderlas. El primero es el método analítico lógico; responde a la pregunta: ¿cómo dependen las ideas y los juicios entre sí? Al responder a esta pregunta, nos encontramos en un terreno relativamente seguro; es esta seguridad la que inspira tanto respeto por las matemáticas. Pero esta seguridad sólo puede adquirirse al precio de un contenido profundo. Los conceptos no adquieren una profundidad interior si no están ligados, aunque sea indirectamente, a las experiencias de los sentidos. Pero este vínculo no puede descubrirse a través de la investigación lógica, sólo puede ser el objetivo de una acción vital; y sin embargo, es precisamente esta unión la que determina el valor del conocimiento de los sistemas conceptuales.

Ejemplo: un arqueólogo de una civilización futura encuentra un manual de geometría euclidiana sin figuras. Comprenderá bien cómo se utilizan las palabras "punto", "línea", "plano" en los teoremas; también se dará cuenta del proceso de deducción de estos teoremas entre sí y también será capaz de establecer nuevos teoremas según las reglas conocidas. Pero la formación de teoremas seguirá siendo para él un vano juego de palabras, mientras no pueda imaginar algo correspondiente a las palabras "punto", "línea", "plano", etc. Sólo entonces la geometría se convertirá para él en un vano juego de palabras. Sólo entonces la geometría tendrá una base real para él. Lo mismo ocurrirá con la mecánica analítica y en general con las ciencias lógico-deductivas. ¿Qué queremos decir con la expresión "poder imaginar algo" con respecto a las palabras "punto", "línea", "intersección", etc.? Significa representar el contenido de la experiencia al que corresponden estas palabras. Este problema ajeno a la lógica constituye el problema de la existencia real, que el arqueólogo sólo puede resolver por medio de la intuición, clasificando y examinando sus experiencias para ver si puede descubrir en ellas algo que se corresponda con estas palabras primitivas de la

teoría y los axiomas para los que fueron establecidas. Sólo entonces puede plantear racionalmente la cuestión de la existencia de una cosa representada en abstracto.

Con los conceptos precientíficos de nuestro pensamiento, nos encontramos, en cuanto a la realidad, más o menos en la misma situación que el arqueólogo. Por así decirlo, hemos olvidado qué rasgos del mundo de la experiencia nos llevaron a formar estas ideas, y tenemos una dificultad considerable para representar el mundo de las percepciones vitales sin las gafas de interpretación abstracta a las que hemos estado acostumbrados durante mucho tiempo. También existe la dificultad de que nuestro lenguaje debe utilizar palabras que están inextricablemente ligadas a estas ideas primitivas. Tales son los obstáculos que se interponen en nuestro camino cuando queremos exponer la realidad de la idea precientífica del espacio.

Antes de abordar el problema del espacio, hagamos una afirmación preliminar sobre las ideas en general: las ideas se refieren a las experiencias sensoriales, pero nunca pueden derivarse lógicamente de ellas. Por eso nunca he podido entender la cuestión del a priori en el sentido de Kant. En cuestiones de realidad, sólo puede tratarse de una cosa, a saber, buscar los caracteres del complejo de experiencias sensoriales al que se refieren las ideas.

En lo que respecta a la idea de espacio, la del objeto corpóreo parece tener que precederla. A menudo se ha descrito la formación de los complejos e impresiones de los sentidos que pueden haber dado lugar a esta idea. La correspondencia de ciertas impresiones del tacto y de la vista, la posibilidad de una sucesión continua en el tiempo y de la repetición de las sensaciones (tacto, vista) siempre que se quiera, constituyen algunas de estas características. Si hemos llegado, con la ayuda de experiencias tan precisas, a la idea de un objeto corpóreo (cuya idea no supone en absoluto la relación de espacio y tiempo), la necesidad de crear con el pensamiento las relaciones recíprocas entre los objetos corpóreos de esta naturaleza debe dar lugar inevitablemente a ideas correspondientes a sus relaciones de espacio. Dos cuerpos pueden tocarse o

separarse: en este último caso es posible, sin cambiarlos en absoluto, colocar un tercer cuerpo entre ellos; en el primero es imposible. Estas relaciones espaciales son tan manifiestamente reales como los propios cuerpos. Si dos cuerpos son equivalentes para llenar un intervalo de este tipo, son igualmente equivalentes para llenar otro intervalo. El intervalo es, pues, independiente de la elección concreta del cuerpo destinado a llenarlo; y esto se aplica en general a las relaciones del espacio. Es evidente que esta independencia, que es una condición previa a la utilidad de la formación de ideas puramente geométricas, no es una necesidad a priori. Me parece que sobre todo esta idea del intervalo, deducida de la elección especial del cuerpo destinado a llenarlo, constituye el punto de partida de la idea de espacio.

Según estas breves reflexiones, el desarrollo de la idea de espacio, considerado desde el punto de vista de la experiencia sensorial, parece estar representado por el siguiente esquema: cuerpo objeto - relación de posición de los objetos corporales - intervalo - espacio. Desde este punto de vista, aparece algo tan real como los objetos corporales.

Está claro que en el mundo de las ideas, fuera de la ciencia, la idea de espacio existía como concepto de cosa real, pero las matemáticas de Euclides no conocían esta idea como tal y la suplían utilizando las ideas de cosa, de relaciones entre cosas, sólo como ideas auxiliares. El punto, el plano, la línea y la distancia son objetos corpóreos idealizados. Todas las relaciones de posición se reducen a relaciones de contacto (intersecciones de líneas, planos, posiciones de puntos sobre líneas, etc.). En este concepto no aparece el espacio como un continuo. Fue Descartes quien introdujo por primera vez este concepto al describir el punto-espacio mediante sus coordenadas: sólo entonces vemos aparecer las formas geométricas, como porciones de espacio infinito, concebidas como continuas en tres dimensiones.

La gran superioridad de la teoría cartesiana no consiste únicamente en el hecho de haber puesto el análisis al servicio de la geometría. En mi opinión, el punto capital es éste, la geometría de los griegos da preferencia a ciertas formas (línea,

plano); otras, por ejemplo la elipse, no le son accesibles sino en la medida en que se construyen o definen con la ayuda de formas como el punto, la línea y el plano. En cambio, en la doctrina cartesiana todas las superficies, por ejemplo, son equivalentes en principio, y en la construcción geométrica no se da deliberadamente preferencia a la forma lineal.

Si consideramos la geometría como la doctrina de las leyes de la posición recíproca de los cuerpos prácticamente rígidos, esta ciencia debe considerarse la rama más antigua de la física. Podía desarrollarse, como ya hemos señalado, sin la idea de espacio como espacio, ya que se contentaba con formas ideales, cuerpos, puntos, líneas, planos, distancias. Por el contrario, la física de Newton necesitaba necesariamente el espacio como un todo en el sentido de Descartes. Ya que los conceptos de punto material, de distancia entre puntos materiales (que varían con el tiempo) no eran suficientes para la dinámica. En particular, en las ecuaciones de movimiento de Newton, el concepto de aceleración desempeña un papel fundamental que no puede definirse únicamente por las distancias entre puntos que varían en el tiempo. La aceleración de Newton no puede concebirse ni definirse como aceleración en relación con el conjunto espacial. A la realidad geométrica del concepto de espacio se añade, por tanto, una nueva función del espacio que determina la inercia. Cuando Newton afirmó que el espacio es absoluto, probablemente apuntaba a este significado real del espacio, que para él implicaba la necesidad de un estado de movimiento bien definido, que no estaba totalmente determinado por los fenómenos de la mecánica. Por otra parte, este espacio se concebía como absoluto desde otro punto de vista: su efecto determinante de la inercia se consideraba independiente, es decir, no estaba influido por ninguna circunstancia física: actuaba sobre las masas pero, a la inversa, nada actuaba sobre él.

Y sin embargo, en la conciencia de los físicos, el espacio, hasta hace poco, permanecía exclusivamente como un receptor pasivo de todos los acontecimientos, sin participar de ninguna manera. Hizo falta la teoría ondulatoria de la luz de Maxwell y Faraday y la del campo electromagnético para dar una nueva orientación a las ideas. Entonces se puso de manifiesto que, en el espacio desprovisto de cuerpos materiales, existen estados que se propagan mediante ondulaciones y campos localizados susceptibles de ejercer acciones

dinámicas sobre las masas eléctricas o los polos magnéticos allí situados. Pero como a los físicos del siglo XIX les parecía bastante absurdo atribuir funciones o estados físicos al propio espacio, imaginaron, sobre el modelo de la materia ponderable, un medio que impregnaba todo el espacio y era el soporte de los fenómenos luminosos: el éter. Los estados de este medio, que se suponían campos electromagnéticos, se imaginaban de naturaleza mecánica, comparables a las deformaciones elásticas de los cuerpos sólidos. Pero el desarrollo de esta teoría mecánica del éter no dio del todo buenos resultados, por lo que poco a poco la gente se acostumbró a renunciar a interpretar de forma más precisa la naturaleza de los campos del éter. De este modo, el éter se convirtió en un quid cuya única función consistía en servir de soporte a los campos eléctricos que no podían analizarse más. La imagen era, pues, la siguiente: el éter llena el espacio y en el éter vagan los corpúsculos materiales, es decir, los átomos de la materia ponderable. (La estructura atómica de la materia se había convertido ya, a principios de siglo, en un resultado definitivamente adquirido).) Puesto que la acción recíproca de los cuerpos debía tener lugar a través de los campos, tenía que haber también en el éter un campo de gravitación, pero la ley de este campo no había tomado todavía una forma definida en esta época: el éter era considerado como la sede de todas las acciones dinámicas capaces de hacerse sentir a distancia a través del espacio. Desde que se reconoció que las masas eléctricas en movimiento producían un campo magnético, del que la energía daba un modelo para la inercia, la inercia también como acción de campo situada en el éter.

Pero fue sobre todo en las propiedades mecánicas del éter donde hubo puntos oscuros y fue entonces cuando el gran descubrimiento de H.-A. Lorentz. Todos los fenómenos del electromagnetismo conocidos hasta entonces se justificaban por dos hipótesis: el éter está rígidamente ligado al espacio, es decir, en esencia, no puede moverse; la electricidad está rígidamente ligada a las partículas elementales en movimiento. Así es como se puede enunciar hoy el descubrimiento de Lorentz: el espacio físico y el éter son simplemente dos expresiones diferentes de una misma cosa; los campos son estados físicos del espacio. De hecho, si no se atribuye al éter ningún estado de movimiento particular, no hay razón para hacerlo aparecer junto al espacio como una entidad de naturaleza especial. Pero esta forma de ver estaba todavía lejos del pensamiento de los físicos: porque consideraban el espacio como algo rígido, homogéneo, no susceptible de ningún cambio. Sólo el genio de Riemann, aislado

e incomprensido, llegó, hacia mediados del siglo pasado, a la concepción de una nueva idea del espacio que negaba su rigidez y reconocía como posible su participación en los acontecimientos físicos. Esta creación del pensamiento, debida a Riemann, es tanto más digna de admiración cuanto que es anterior a la teoría del campo eléctrico de Faraday y Maxwell. Más tarde llegó la teoría de la relatividad especial, que reconoció la equivalencia física de todos los sistemas inertes, demostrando, junto con la electrodinámica o la ley de la propagación de la luz, la indisolubilidad del espacio y el tiempo. Hasta entonces se había admitido implícitamente que el continuo cuatridimensional, en el ámbito de la experiencia, puede dividirse objetivamente en espacio y tiempo, es decir, que la palabra "ahora", en el mundo de los hechos, tiene un significado absoluto. En el momento en que la relatividad había reconocido la simultaneidad, el espacio y el tiempo se habían fundido en un continuo indivisible, al igual que las tres dimensiones del espacio se habían fundido previamente en dicho continuo. El espacio físico se completaba así convirtiéndose en un espacio de cuatro dimensiones que incluía también la dimensión del tiempo. El espacio cuatridimensional de la teoría de la relatividad especial es tan rígido y absoluto como el espacio de Newton.

La teoría de la relatividad es un magnífico y peculiar ejemplo del desarrollo del pensamiento científico moderno. El hecho es que las hipótesis no unitarias son cada vez más abstractas, más alejadas de la experiencia. Con la teoría de la relatividad se acerca más al objetivo científico por excelencia, que es abarcar por deducción lógica, mediante un mínimo de hipótesis y axiomas, un máximo de contenido experimental. De este modo, el pensamiento que, partiendo de los axiomas, penetra en el contenido de las experiencias o verifica sus propias conclusiones, se vuelve cada vez más lógico y sutil. En la búsqueda de teorías, el teórico se ve obligado a guiarse cada vez más por formulaciones puramente matemáticas porque el físico experimental como tal no puede elevarse a estos dominios de máxima abstracción. En lugar del método predominantemente inductivo de la ciencia, que corresponde a su juventud, aparece, a tientas, la deducción. Pero un edificio teórico de este tipo debe ser extremadamente perfeccionado hasta en los más mínimos detalles si se quiere llegar a resultados comparables con los de la experiencia. Sin duda, incluso aquí, el hecho experimental es la guía omnipresente; pero su veredicto sólo es aplicable sobre la base de un trabajo poderoso y delicado, que ha establecido primero los vínculos entre los axiomas y los efectos verificables. Y el teórico debe llevar a

cabo esta gigantesca tarea con la clara conciencia de que puede ser llamado a justificar la sentencia de muerte de su teoría. Al teórico que emprende este estudio no se le puede reprochar que sea demasiado imaginativo; al contrario, su imaginación debe ser probada, ya que, teniendo en cuenta todo esto, no hay otra manera de que llegue a su objetivo: en cualquier caso, no se trata de una imaginación sin diseño, sino de una investigación llevada a cabo con vistas a posibilidades lógicamente más simples y sus consecuencias. Esta apelación a la benevolencia era necesaria para disponer mejor al lector a seguir con interés la concatenación de las ideas que siguen, es decir, el curso de las ideas que llevaron de la teoría de la relatividad restringida a la teoría de la relatividad generalizada y más allá del último paso de esta teoría, a la teoría del campo unitario. En esta exposición me resulta absolutamente imposible evitar el uso de símbolos matemáticos por completo.

Empecemos por la relatividad especial. Esto también se basa directamente en una ley empírica, la de la constancia de la velocidad de la luz. Sea P un punto en el vacío, P' un punto cuya distancia a P , $d\sigma$, es infinitamente pequeña. Admitamos que una emisión de luz parte de P en el instante t y llega a P' en el tiempo $t + dt$. Se tiene entonces:

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

Lo son:

$$dx_1, dx_2, dx_3,$$

las proyecciones ortogonales de $d\sigma$; si se introduce la coordenada temporal imaginaria:

$$ct\sqrt{-1} = x_4,$$

la ley de la constancia de la propagación de la luz toma forma:

$$d\sigma^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2 = 0$$

Dado que esta fórmula expresa un significado real, es necesario dar a $d\sigma$ un significado real, incluso si los puntos vecinos del continuo cuatridimensional se eligen de tal manera que la $d\sigma$ correspondiente no se cancela. Esto se expresa a grandes rasgos como sigue: el espacio cuatridimensional (con la coordenada imaginaria del tiempo) de la teoría de la relatividad especial tiene una métrica euclidiana.

Así se explica que esta métrica sea euclidiana. Introducir una métrica de este tipo en un continuo tridimensional lleva a remitirse a los axiomas de la geometría de Euclides. En este caso, la ecuación que expresa la métrica no es otra que el teorema de Pitágoras aplicado a las diferenciales de coordenadas.

En la teoría de la relatividad especial, las coordenadas pueden modificarse (mediante una transformación) hasta el punto de que el valor $d\sigma$ (constante fundamental) se exprese también en las nuevas diferenciales de coordenadas, con la suma de cuadrados: estas transformaciones se llaman transformaciones de Lorentz.

El método heurístico empleado por la teoría de la relatividad especial se caracteriza por la siguiente proposición: Para expresar las leyes naturales, sólo hay que admitir ecuaciones cuya forma no cambie cuando se modifican las coordenadas mediante una transformación de Lorentz. (Covarianza de las

ecuaciones en relación con las transformaciones de Lorentz).

Gracias a este método se ha conocido el vínculo ineludible entre el impulso y la energía, entre las intensidades de los campos magnéticos y eléctricos, entre las fuerzas electrostáticas y electrodinámicas, entre la masa inerte y la energía: con este hecho se ha reducido el número de nociones independientes y de ecuaciones fundamentales de la física.

Este método ha superado sus propios límites: ¿es cierto que las ecuaciones de las leyes naturales sólo son covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz y no con respecto a otras transformaciones? Planteada en estos términos, la pregunta no tiene realmente ningún sentido, porque todo sistema de ecuaciones puede expresarse con coordenadas generales. La pregunta debe plantearse así: ¿son las leyes naturales tales que la elección de unas coordenadas determinadas no conduce a simplificaciones esenciales?

Por cierto, nuestro axioma, basado en la experiencia, de la identidad de las masas inertes y pesadas, facilita la respuesta afirmativa a esta pregunta. Si se eleva a principio la equivalencia de actitud de todos los sistemas de coordenadas al permitir la formulación de las leyes de la naturaleza, se llega a la teoría de la relatividad generalizada, siempre que se mantenga el principio de la constancia de la velocidad de la luz o la hipótesis del sentido objetivo de la métrica euclidiana, al menos para porciones infinitamente pequeñas del espacio cuatridimensional.

Esto significa que, para porciones finitas del espacio, suponemos la existencia (en el sentido físico del término) de una métrica general de Riemann de acuerdo con la fórmula

$$ds^2 = \sum g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

en la que la suma lleva en todos los índices de combinaciones de 1,1 a 4,4.

En un solo punto, que es esencial, la estructura de tal espacio difiere del espacio euclidiano: los coeficientes $g_{\mu\nu}$ son provisionalmente funciones cualesquiera de las coordenadas $X^1 - x^4$ y la estructura del espacio no está realmente determinada sino cuando estas funciones $g_{\mu\nu}$ son realmente conocidas. En sí misma, la estructura de dicho espacio es completamente indeterminada, y sólo queda determinada cuando se indican las tres funciones a las que satisface el campo métrico de la $g_{\mu\nu}$. Es así como, por razones de orden físico, se mantuvo la convicción de que el campo métrico era al mismo tiempo un campo de gravitación.

Como el campo de gravitación está determinado por la configuración de las masas y varía con ellas, la estructura geométrica de este espacio también depende de factores relacionados con la física. Según esta teoría, el espacio ya no es absoluto (tal como predijo Riemann), sino que su estructura depende de influencias físicas. La geometría (física) ya no es una ciencia aislada y autónoma como la geometría de Euclides.

El problema de la gravitación se ha reducido así a un problema matemático: hay que buscar las ecuaciones de condición más sencillas, invariables respecto a cualquier transformación de coordenadas. Es un problema bien definido, cuya solución es posible.

No diré nada aquí sobre la verificación experimental de esta teoría, pero quiero decir de inmediato por qué la teoría no pudo declararse definitivamente satisfecha con el resultado. Indudablemente la gravitación ha sido devuelta a la estructura del espacio; pero, fuera del campo de gravitación, existe todavía el campo electromagnético; ha sido necesario introducir este último en la teoría, como una formación independiente de la gravitación. En la ecuación de

condición para el campo, fue necesario introducir algunos términos adicionales correspondientes a la existencia del campo electromagnético. Pero el pensamiento teórico no podía soportar la idea de que existan dos estructuras del espacio independientes entre sí: una de gravitación métrica y otra electromagnética. Se impone la convicción de que estas dos especies de campo deben corresponder a una estructura unitaria del espacio.

Ahora, la "teoría del campo unitario", que se presenta como una extensión matemáticamente independiente de la teoría de la relatividad generalizada, intenta responder a este último postulado. Formalmente, el problema debe plantearse en estos términos: ¿existe una teoría del continuo en la que, junto a la métrica, haya un nuevo elemento de estructura que forme un todo con la métrica? Si es así, ¿cuáles son las leyes más simples del campo a las que puede someterse un continuo de esta naturaleza? Y, por último, ¿pueden coincidir estas leyes de campo para representar las propiedades del campo gravitatorio y del campo electromagnético? Además, está la cuestión de si se pueden concebir los corpúsculos (electrones y protones) como zonas de campo especialmente densas, cuyos movimientos están determinados por las ecuaciones de campo. En esta expectativa, sólo hay una respuesta a las tres primeras preguntas: la estructura espacial fundamental se describe como sigue y se aplica a un espacio de cualquier número de dimensiones.

El espacio tiene una métrica de Riemann: esto significa que en el entorno infinitesimal de cada punto P se aplica la geometría euclidiana. En consecuencia, en el entorno de cada punto P existe un sistema local de coordenadas cartesianas en relación con el cual se calcula la métrica según el teorema de Pitágoras. Si suponemos llevar la longitud sobre los ejes positivos de este sistema local, tendremos el "n-hedro" local ortogonal, y también hay un n-hedro local de cada otro punto P' del espacio. Si, partiendo de los puntos P y P' , trazamos una sección de línea (PG o $P'G'$), podemos, mediante un n-hedro local correspondiente, partiendo de sus coordenadas locales, calcular, con el teorema de Pitágoras, el valor de cada una de estas secciones de línea. En consecuencia, hablar de igualdad numérica de las secciones de línea PG y $P'G'$ tiene un significado definido.

Ahora es esencial observar que las n -edras locales ortogonales no están completamente determinadas por la métrica, ya que todavía se puede elegir libremente la orientación de las n -edras locales individuales sin cambiar el resultado en el cálculo de los valores de los segmentos de línea según el teorema de Pitágoras. De ello se deduce, en un espacio cuya estructura existe exclusivamente en una métrica de Riemann, que dos líneas PG y $P'G'$ pueden compararse entre sí en magnitud, pero no en dirección: en particular, declarar que dos elementos son paralelos entre sí carece de sentido. Desde este punto de vista, el espacio métrico puro (el de Riemann) es más pobre en estructura que el de Euclides.

Dado que buscamos un espacio más rico en estructura que el espacio de Riemann, es fácil enriquecer este último con la estructura de la relación de dirección, o paralelismo. A cada dirección que pasa por P , le corresponde una determinada dirección que pasa por P' , con una relación recíproca unívoca. Estas dos direcciones referidas entre sí se denominan paralelas. También aplicamos la condición de conservación de los ángulos a esta relación de paralelismo: sean PG o PR dos direcciones que pasan por P , y sean $P'G'$ y $P'R'$ las correspondientes direcciones paralelas que pasan por P' ; entonces los ángulos RPG y $R'P'G'$ (medibles en sistemas locales según la teoría euclidiana) son iguales entre sí.

De este modo, la estructura del espacio tomada como base queda completamente definida. La descripción matemática más sencilla de esta estructura es la siguiente: hacemos pasar por el punto P un n -hedro ortogonal local de una orientación determinada, elegida a voluntad. En cualquier otro punto P' del espacio orientamos el n -hedro local, de modo que sus ejes sean paralelos a los ejes correspondientes al punto P . De este modo, con la estructura dada del espacio y la orientación libremente elegida del n -hedro que pasa por un solo punto P , todos los n -hedros quedan completamente determinados. Imaginemos ahora en el espacio P un sistema de coordenadas de Gauss cualquiera y sobre este sistema, en cada punto, proyectemos el eje del n -hedro en cuestión. El conjunto de estos n^2 componentes describe completamente la estructura del espacio.

Esta estructura del espacio se encuentra, por así decirlo, entre las estructuras de Riemann y Euclides. A diferencia de la primera, nos encontramos con una línea recta, es decir, una línea en la que todos los segmentos son paralelos entre sí dos a dos.

La teoría descrita difiere de la teoría euclidiana en que el paralelogramo no existe. Si dos rectas iguales y paralelas PP' y GG' pasan por los extremos P y G de una recta PG , $P'G'$ no es, en general, ni igual ni paralela a PG .

El problema matemático que se ha resuelto hasta ahora es el siguiente: ¿cuáles son las condiciones más sencillas a las que puede someterse una estructura espacial de la naturaleza descrita? La cuestión principal que hay que estudiar sigue siendo la siguiente: ¿hasta qué punto pueden representarse los campos y formas físicas elementales mediante soluciones sin singularidad de las ecuaciones que responden a esta pregunta?

ORIGEN DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERALIZADA

Algunos datos históricos sobre mi trabajo científico. No es que sobrestime indebidamente la importancia de mi esfuerzo; pero describir la historia de la obra de otros supone una investigación del pensamiento ajeno, que es más bien la tarea de las personalidades ejercitadas en el trabajo histórico, mientras que dar explicaciones de los propios pensamientos anteriores parecería incomparablemente más fácil; uno se encuentra aquí en una situación mucho más favorable, y no debe, por modestia, dejar escapar la oportunidad.

Cuando, con la teoría de la relatividad especial, se logró la equivalencia de todos los sistemas de inercia para formular las leyes de la naturaleza (1905), surgió casi espontáneamente la pregunta de si existía una equivalencia más amplia entre los sistemas de coordenadas. En otras palabras: si sólo podemos atribuir un sentido relativo a la idea de velocidad, ¿debemos insistir, no obstante, en considerar la aceleración como un concepto absoluto?

Desde un punto de vista puramente cinemático, no se podía dudar de la relatividad de cualquier movimiento, pero físicamente parecía concederse una importancia especial al sistema de inercia, y este significado privilegiado hacía que el uso de sistemas de coordenadas que se mueven de forma diferente pareciera artificial.

Sin duda estaba familiarizado con la concepción de Mach de que parecía razonable suponer que la resistencia de la inercia no se oponía a una aceleración en sí misma, sino a una aceleración relacionada con las masas de otros cuerpos en el mundo. Esta idea ejerció cierta fascinación en mi mente, pero no ofreció ningún principio útil para una nueva teoría.

La primera vez que di un paso hacia la solución del problema fue cuando intenté considerar la ley de la gravitación en el marco de la teoría de la relatividad especial. Al igual que la mayoría de los autores de esta época, intenté establecer una ley de campo para la gravitación, puesto que ya no era posible, tras la supresión de la idea de simultaneidad absoluta, introducir una acción inmediata a distancia, o al menos ya no era posible de ninguna manera natural.

Lo más sencillo era, por supuesto, mantener el potencial escalar de gravitación de Laplace y completar la ecuación de Poisson, de forma fácil de concebir, con un término diferenciado con respecto al tiempo, de forma que se cumpliera la ley de la relatividad especial. También era necesario adaptar a esta teoría la ley del movimiento del punto material en el campo de la gravitación: para ello el camino a seguir estaba menos claramente indicado, porque la masa inerte de un cuerpo podía depender del potencial de gravitación; también era necesario tenerlo en cuenta en homenaje al teorema de la inercia de la energía.

Pero dicha investigación me llevó a un resultado que me hizo sospechar en grado sumo. Según la mecánica clásica, la aceleración vertical de un cuerpo en el campo de pesos vertical es independiente de la componente horizontal de la velocidad. Además, la aceleración vertical de un sistema mecánico, o de su centro de gravedad en este campo de pesos, se produce independientemente de su energía cinética interna. Pero, según la teoría estudiada, no se trataba de la aceleración de la caída en relación con la velocidad horizontal o la energía interna de un sistema.

Esto no concuerda con la experiencia antigua, a saber, que los cuerpos en un campo de gravitación sufren todos la misma aceleración. Este axioma, que también puede formularse como el de la igualdad de las masas inertes y pesadas, me pareció entonces en su profundo significado. Me sorprendió enormemente su existencia e imaginé que debía contener la clave para una penetración más profunda de la inercia y la gravitación. Aunque ignoraba los resultados de los magníficos experimentos de Eötvös (a quien, si no recuerdo mal, no conocí hasta más tarde) no dudé seriamente de la fuerte validez de este axioma.

Fue entonces cuando rechacé por inadecuado el intento, mencionado anteriormente, de tratar el problema de la gravitación en el marco de la relatividad especial. Este marco manifiestamente no estaba de acuerdo con la propiedad más importante de la gravitación. El axioma de la igualdad de las masas inertes y pesadas podría ahora formularse de forma muy expresiva, de esta manera: en un campo de gravitación homogénea se producen todos los movimientos de forma análoga a lo que ocurre en ausencia de un campo de gravitación uniforme. Si este principio era válido para cualquier fenómeno (principio de equivalencia), era una prueba de que el principio de relatividad debía extenderse a los sistemas de coordenadas en movimiento relativo no uniforme, si se quería llegar a una teoría de la gravitación sin mayores dificultades. Estas reflexiones me ocuparon desde 1908 hasta 1911 y traté de extraer de ellas ciertas consecuencias especiales, de las que no hablaré aquí. Lo único importante, en primer lugar, era haber reconocido que no se podía llegar a una teoría racional de la gravitación sino ampliando el principio de la relatividad.

Por tanto, era conveniente establecer una teoría cuyas ecuaciones conservaran su forma incluso con transformaciones no lineales de las coordenadas. Ahora bien, en aquel momento no sabía si esto debía aplicarse a cualquier transformación (continua) o sólo a algunas.

Pronto me di cuenta de que al admitir, de acuerdo con las exigencias del principio de equivalencia, transformaciones no lineales, la interpretación puramente física de las coordenadas estaba destinada a desaparecer, es decir, que ya no se podía esperar que las diferencias de coordenadas representaran resultados inmediatos de mediciones por medio de metros o relojes ideales. Esta observación me causó una gran vergüenza, porque ya no me era posible entender, en esencia, qué significado debía atribuirse entonces a las coordenadas en la física. No resolví este dilema hasta 1912, según las siguientes consideraciones:

Sin embargo, hubo que encontrar una nueva forma de formular la ley de la inercia que, en el caso de la ausencia de "un campo gravitatorio efectivo cuando se utiliza un sistema de inercia", se transformó, como sistema de coordenadas, en la definición galileana del principio de inercia. Este último dice: un punto material sobre el que no actúa ninguna fuerza está representado en el sistema cuatridimensional por una línea recta, es decir, por la línea más fuerte o, más correctamente, por una línea extrema. Este concepto supone la idea de la longitud de un segmento de línea, es decir, una métrica. En la teoría de la relatividad especial, esta métrica era, como había demostrado Minkowski, una métrica cuasi-euclidiana en el sentido de que el cuadrado de la longitud desde del segmento de línea era una función cuadrática determinada por las diferenciales de las coordenadas.

Ahora bien, si introducimos, con una transformación no lineal, otras coordenadas, ds^2 sigue siendo una función homogénea de las diferenciales de las coordenadas, pero los coeficientes de esta función ($g_{\mu\nu}$) ya no son constantes; son funciones de las coordenadas. En lenguaje matemático diremos: el espacio físico (con cuatro dimensiones) tiene una métrica de Riemann. Las líneas extremas de esta métrica, que tienen afinidad con el tiempo, dan la ley del movimiento de un punto material que no sufre, aparte de las fuerzas de gravitación, la acción de ninguna fuerza.

Los coeficientes $g_{\mu\nu}$ de esta métrica describen al mismo tiempo, en relación con el sistema de coordenadas elegido, el campo de gravitación. De este modo se encontró un enunciado natural del principio de equivalencia, cuya extensión a cualquier campo de gravitación constituía una hipótesis absolutamente natural.

Así que aquí estaba la solución al dilema anterior: no son las diferenciales de coordenadas, es sólo la métrica de Riemann, a la que se refieren, la que tiene un significado físico. De este modo, teníamos un principio que podía utilizarse para la teoría de la relatividad generalizada. Pero quedaban dos problemas por resolver:

1) Cuando una ley de campo se expresa según la teoría de la relatividad especial, ¿cómo debemos trasladarla al caso de una métrica de Riemann?

2) ¿Cómo enunciar las leyes diferenciales que determinan la propia métrica de Riemann (es decir, $g_{\mu\nu}$)?

Trabajé en estos problemas de 1912 a 1914 con mi amigo Grossmann. Encontramos que los procedimientos matemáticos para resolver el problema 1) fueron enunciados en el cálculo diferencial infinitesimal de Ricci y Levi-Civita.

Para resolver el problema 2) eran claramente necesarias las formas diferenciales invariantes de segundo orden de $g_{\mu\nu}$. Pronto vimos que éstas ya habían sido establecidas por Riemann. Dos años antes de la publicación de la teoría de la relatividad general ya habíamos considerado las ecuaciones correctas de la gravitación, pero no pudimos afrontar su uso desde el punto de vista físico. Pensé que sabía que, por el contrario, no podían estar de acuerdo con la experiencia.

A este respecto, también creí poder demostrar, basándome en consideraciones generales, que una ley invariable de la gravitación, relativa a las transformaciones de coordenadas elegidas a voluntad, no está de acuerdo con el principio de causalidad. Tales fueron los errores que me costaron dos años de trabajo muy duro hasta que, hacia finales de 1915, me di cuenta de estos errores y descubrí la conexión con los hechos de la experiencia astronómica después de haber vuelto, descorazonado y confundido, a la curvatura de Riemann.

Iluminado por los conocimientos ya reunidos, el objetivo felizmente alcanzado parecía casi evidente y todo estudioso inteligente lo comprendía sin mucho esfuerzo. Pero esas búsquedas, llenas de presentimientos, perseguidas en la sombra durante largos años, ese ardiente deseo de alcanzar la meta, esas

alternativas de confianza y cansancio, ese súbito avance de la verdad luminosa, todo esto en definitiva sólo puede conocerlo verdaderamente quien lo ha experimentado.