

IMPRIMIR

**EINSTEIN
SU OBRA Y SU INFLUENCIA EN EL
MUNDO DE HOY**

LEOPOLD INFELD

Editado por
elaleph.com

© 2000 – Copyright www.elaleph.com
Todos los Derechos Reservados

AGRADECIMIENTO

Al escribir este libro me propuse no consultar más fuente que los escritos de Einstein. Por consiguiente, agradezco a mi alumno graduado Charles Duff, por su lectura crítica del manuscrito y por su revisión para evitar errores u omisiones; a Helen, a Beulah Harris y al profesor Coxeter, quienes leyeron el manuscrito e hicieron útiles comentarios. Mi agradecimiento especial al señor Charles Scribner, Jr., quien editó el libro con cuidado, simpatía y comprensión.

PALABRAS PRELIMINARES

Me complace mucho que mi libro sobre Einstein haya sido editado en español. Lo he escrito en Canadá, cuando Einstein aún vivía y yo me hallaba lejos de mi país natal. El libro no está redactado en lenguaje técnico y confío en que pueda comprenderlo todo lector que desee leerlo detenidamente y con atención.

El propósito de este libro es el de presentar algunos aspectos de la influencia de las ideas de Einstein sobre la ciencia moderna, que sigue siendo tan viva y lozano en la actualidad, como lo fuera hace cincuenta años.

LEOPOLD INFELD

CAPITULO PRIMERO

SUPERACION DE PREJUICIOS

En 1955 la teoría de la relatividad ha cumplido medio siglo. Hoy los físicos la consideran una teoría clásica, y las épocas turbulentas en que se la discutía y atacaba parecen lejanas y definitivamente superadas. Sin embargo, aun en 1921, un distinguido físico, Von Laue, escribió en el prefacio de su erudita obra: "La teoría de la relatividad es hoy día tan admirada como maldecida. Los más vocingleros de ambos bandos tienen un solo punto en común: una magnífica ignorancia del tema que discuten."

Actualmente, sin embargo, el griterío se ha apaciguado, la teoría de la relatividad se ha vuelto respetable y ocupa su sitio como piedra angular de la estructura de la física moderna. Su creador es considerado el "más grande científico viviente" y su fama es más vasta que la de los reyes y los presidentes. El tiempo de volver la mirada hacia el pasado para contemplar las revoluciones einstenianas tal como se desarrollaron y observar cuál ha sido su gravitación en nuestra época.

Procuremos en primer término despejar los efectos de los prejuicios, de los estribillos sin sentido repetidos millares de veces en las conversaciones, por la radio y por la prensa.

Uno de éstos pretende que - para el hombre común es imposible comprender las ideas de Einstein. Este sería el sumo sacerdote del conocimiento matemático, y solamente habría doce personas que en verdad pueden interpretarlo.

No es fácil luchar contra los prejuicios. Ni siquiera puedo decir que es falsa la afirmación de que solamente doce personas comprenden la teoría de la relatividad. Esto es tan insensato como sostener que "sólo doce personas comprenden realmente a Beethoven". En verdad la analogía entre las matemáticas y la música, entre Einstein y Beethoven, tiene sentido para todo aquel que ama las matemáticas y la música.

Como la música, las matemáticas y la física matemática son creaciones artísticas. Como en la música, debemos distinguir entre la técnica y las ideas. Nadie puede interpretar bien a Beethoven, así como nadie puede escribir un trabajo científico sobre la teoría de la relatividad, sin dominar primero la técnica. Con todo, así como se puede sentir una honda emoción al escuchar a Beethoven aun cuando se ignore por completo la técnica de la interpretación, así se puede experimentar un profundo placer al captar las ideas básicas de la teoría de la relatividad, incluso si se desconoce la técnica matemática.

En realidad, en ciencia no existe una comprensión única; hay diversos niveles. Quizá podemos establecer un nivel suficientemente elevado, al cual puedan llegar sólo unas pocas personas. ¿Pero quiénes serían esas pocas personas? Uno de mis colegas (y se trata de un matemático distinguido) ha expresado serias dudas sobre si Einstein es una de las tres personas que mejor entienden a Einstein.

Por lo general se supone que una persona sabe o no sabe matemáticas. La verdad es que existen diferentes niveles de técnica matemática, y éstos determinan el nivel de deducción que puede ser alcanzado por las diversas personas que estudian la teoría de la Relatividad.

Generalmente se distingue, además, entre la teoría especial y general de la relatividad. Para conocer la teoría general de la relatividad hace falta un conocimiento más elevado que el necesario para la teoría especial. Sin embargo, la técnica se puede aprender, y con el correr del tiempo irá aumentando el número de los iniciados en las complejidades de la relatividad matemática.

En el plano científico hay centenares de personas que han escrito trabajos sobre la teoría de la relatividad o sobre temas que se le vinculan estrechamente. Como cualquier otro campo de la ciencia, se trata de un libro abierto. Aunque el número de nuevas contribuciones es mucho menor que en la teoría de los cuantos, con todo, sigue siendo considerable. En el plano de la educación, toda buena universidad forma anualmente nuevos estudiantes que conocen los principios y los implementos matemáticos esenciales de la teoría de la relatividad. En

mis tiempos de estudiante esta teoría no formaba parte del plan de estudios. Hoy día, por lo menos en algunas universidades, los estudiantes del tercer año aprenden las ecuaciones básicas de la teoría espacial de la relatividad, y, en el cuarto año, la teoría matemática de la relatividad. Este año, veinticinco estudiantes se graduarán en mi universidad con un conocimiento bastante bueno de los principios de la teoría especial y general de la relatividad y de su técnica matemática.

Lo que quiero dejar establecido aquí me parece importante. Einstein no habría podido ser uno de los que más intensamente han influido en nuestro siglo, si sus ideas en física hubieran sido comprendidas sólo por unas pocas personas. Con el tiempo incluso podrán llegar a enseñarse en la escuela secundaria los principios de la teoría de la relatividad. Las ideas básicas son simples y esenciales, aunque el proceso de trasladar los resultados al lenguaje corriente requiere tiempo. Aumenta el número de personas que han asimilado algunas de las ideas de la teoría de la relatividad, y seguirá aumentando durante mucho tiempo. Esta es la razón por la cual Einstein ha influido sobre nuestra cultura moderna. La teoría de la relatividad no está reservada sólo para los pontífices de la sabiduría. Más adelante veremos cómo esta trama abstracta del pensamiento ha influido sobre la totalidad de nuestro vivir. Es cierto que hubo un tiempo, alrededor de 1917, en que sólo unas pocas personas entendían a la perfección la teoría de la relatividad. En aquellos días un físico observó al profesor Eddington: "Usted es uno de los tres hombres que comprenden la teoría de la relatividad". Como el rostro de Eddington reflejara un gesto apenado, el físico agregó: "Profesor Eddington, no tiene por qué sentirse desconcertado. Es usted excesivamente modesto". Sir Arthur replicó: "No, no me siento turbado; sólo me pregunto quién es el tercero."

Como todas las ciencias, la teoría de la relatividad se basa en suposiciones compatibles con la experimentación. A partir de estas suposiciones deducimos, y las matemáticas constituyen la herramienta por medio de la cual realizamos las deducciones. Si los desarrollos más avanzados de esta herramienta son desconocidos para el lector, como hemos de suponer, entonces debemos omitir la mayor parte de estas

deducciones. A pesar de ello, podremos captar algunas de las ideas básicas y algunos de los resultados, incluso si tenemos que dejar de lado la cadena de razonamientos que conducen desde las suposiciones básicas hasta las conclusiones finales que pueden ser verificadas por la experimentación. Tendremos que traducir a veces las suposiciones y los resultados, mediante analogías e imágenes, del lenguaje abstracto de las matemáticas al habla corriente.

Todo esto significa "popularizar". Y cuando llegamos al problema de la popularización de la teoría de la relatividad, entonces enfrentamos otro prejuicio profundamente arraigado, que vale la pena discutir.

Muchos creen que la teoría de la relatividad nos enseña que nuestro universo es algo así como el de Alicia en el País de las Maravillas; que ese universo nos fue revelado por el matemático Einstein, quien descubrió que existe una cuarta dimensión, que los objetos se acortan o se alargan, que nuestro mundo se encoge o se expande como un globo; que, en pocas palabras, todo es relativo y misterioso. Que no es el tren de usted, el que se detiene en Princeton, sino que es Princeton la que se detiene ante el tren. Y que de este mundo fantástico y relativo creado, por Einstein surgió bruscamente la bomba atómica.

Los métodos científicos del razonamiento parece tan diferentes de los utilizados en nuestra vida corriente, en razón de que son más refinados, elaborados y sofisticados. Con todo, en lo esencial, son los mismos. Si no cruzamos la calle porque se aproxima un coche, estamos utilizando teorías, estamos razonando y deduciendo. La cadena de deducción es en este caso tan corta, que casi podemos llamarla instinto. En ciencia, la cadena es incomparablemente más larga; lo es mucho más en la teoría de la relatividad que en la mecánica clásica. A medida que la ciencia progresa, la cadena se hace cada vez más larga y, por consiguiente, más difícil de asir. Pero el árbol de la ciencia crece del suelo de nuestras experiencias. Esto es válido también para la teoría de la relatividad.

¿Cómo, entonces, surgió el prejuicio sobre el misterioso universo relativo de Alicia en, el País de las Maravillas?

En 1916, cuando la teoría de la relatividad era conocida principalmente entre los físicos y matemáticos :alemanes, pero muy poco entre el público en general, Einstein escribió un librito no técnico acerca de la teoría especial y general de la relatividad. He aquí algunos extractos de su prefacio; casi exactamente lo que me gustaría escribir como introducción para este libro: " ... este libro está escrito para aquellos que... se interesan en el punto de vista filosófico general... y no poseen el conocimiento del formalismo matemático...; presupone mucha paciencia y fuerza de voluntad de parte del lector. El autor realizó grandes esfuerzos para presentar las ideas en forma clara y simple ... :En aras de la claridad, no he vacilado en repetirme y no he prestarlo la menor atención a la elegancia de la presentación: me ajusté a la prescripción del gran teórico L. Boltzmann, de que la cuestión de la elegancia hay que dejarla para los sastres y los zapateros". (Relatividad, teoría especial y general) .

El librito de Einstein se convirtió en un clásico. Más tarde, alrededor de 1920, cuando la fama de la relatividad y de su creador se habían extendido por todo el mundo, aparecieron centenares de libros, folletos, artículos de revistas y periódicos acerca de Einstein y la relatividad, que iniciaron una era de mercachifles de la ciencia popular.

Pronto se descubrió que los libros que sobresaltan al lector, mezclando la ciencia con el misterio y el (trama, ejercen una atracción mayor que aquellos que, como el de Einstein, presentan las ideas básicas de una manera directa y casi exenta de matices. De esta manera, los ejemplos introducidos por Einstein fueron interminablemente rehechos por otros, que al mismo tiempo les agregaron innecesarios atavíos se hizo todo lo posible para presentar el escenario de la manera irás sorprendente, y para que el sabio apareciera ahí como un sujeto de una astucia diabólica, que arrebatara los misterios que la naturaleza celosamente se esfuerza por ocultar a sus ojos. Esos libros provocaban estremecimientos metafísicos; su lectura engendraba excitación, sentimientos dramáticos, pero no se comprendía nada. algunos de los popularizadores escribían con gran destreza artística y se desarrolló un nuevo estilo de divulgación (que, según creo, se está extinguiendo) , y

esto es lo que hizo nacer el prejuicio acerca de los misterios del universo y la ciencia.

La ciencia es una estructura racional; el mayor placer del estudio consiste en entender. Sin esto el conocimiento poco significa. La existencia de la ciencia y su progreso tienen como base la convicción de que el universo no es caprichoso ni misterioso. Como lo dijo el gran matemático Poincaré (dicho sea de paso, él estuvo muy cerca del descubrimiento de la teoría especial de la relatividad), el mayor milagro consiste en que los milagros no ocurren.

El objeto de nuestro razonamiento es el mismo en la vida y en la ciencia: ordenar y predecir los acontecimientos; entender el inundo de nuestras impresiones sensoriales. Las dificultades inherentes a la teoría de la relatividad existen por doquier en la física moderna. En este caso no tratamos asuntos tan familiares y tangibles como la temperatura de ebullición del agua, o el movimiento de un péndulo, o a presión que hay en el interior de un cilindro. Pero incluso estos fenómenos simples fueron tan abstractos y difíciles de captar para el ciudadano común, hacia el tiempo en que fueron descubiertos, como lo es hoy el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales o la desviación de los rayos de luz.

Los fenómenos que la física moderna explica son en esencia los producidos en los laboratorios modernos con sus ciclotrones, espectrógrafos de masa y contadores Geiger; o los fenómenos astronómicos como la curvatura de los rayos de luz de las estrellas cuando pasan por el borde del sol durante un eclipse; o los fenómenos de las nuevas partículas creadas por los rayos cósmicos.

Incluso los fenómenos que ocurren en el laboratorio del universo son captados, medidos y analizados por los instrumentos más sensibles ideados por el hombre. Cada teoría científica, a pesar de su carácter especulativo, tiene sentido solamente si puede ser verificada por la experiencia. Muere si fracasa en esas pruebas.

Así, pues, abordaremos la teoría de Einstein teniendo en cuenta la estructura racional que la constituye: el] parte filosófica y especulativa,

pero capaz de afrontar la verificación experimental. No es ni metafísica ni misteriosa.

Hace años la teoría de la relatividad parecía una trama abstracta del pensamiento, muy distante de los fenómenos que los hombres pueden presenciar o experimentar. Hoy no ocurre lo mismo. No ocurre lo mismo desde que murieron ochenta mil personas en Hiroshima. La relación relativista entre masa y energía, descubierta por Einstein en 1905, ya no es más un raro fenómeno de laboratorio. Para todos nosotros se ha convertido en cuestión de vida y muerte.

La relatividad no nació exclusivamente a causa del genio de Einstein, pero fue él quien llevó a cabo la revolución para la cual la ciencia había madurado. Elegido para dirigir la revolución, fue el más pacífico de los hombres, un forastero, ni siquiera miembro de la profesión académica. En 1905 era un joven doctor en filosofía, de veintiséis años, recién casado y empleado en la oficina de patentes de Berna, Suiza; de carácter tímido, bondadoso y cordial. Estudiaba poco pero pensaba mucho; tenía una gran capacidad para la meditación y no aceptaba dogmas de nadie. No creo que haya tenido los méritos de un buen empleado, pero Suiza no lo expulsó del servicio civil. Se le permitió pensar, soñar y escribir trabajos que cambiaron la faz de la ciencia.

CAPITULO II

ANTES DE LA REVOLUCION EINSTENIANA

El origen del concepto del éter

Las revoluciones en la ciencia, como todas las grandes conmociones históricas, estallan cuando ha llegado el tiempo de que ocurran. Para comprender qué son y por qué han sobrevenido es necesario analizar la época en que tienen lugar.

La primera revolución einsteniana se produjo mucho antes, nada más que porque Einstein existió. Sin embargo, en la física de fines del siglo XIX hallamos los gérmenes de los cuales se desarrolló su gran trabajo de clarificación. Para comprender su obra tenemos que examinar el estado de la física al comenzar nuestro siglo. Lo contemplaremos desde las alturas alcanzadas por la ciencia moderna, y la imagen será necesariamente imprecisa, porque trataremos de observar una vasta región, en la cual los detalles serán borrosos. En relación con este fondo general analizaremos unos pocos primos aislados, que más tarde se convirtieron en los focos de la revolución. Parecían mucho menos importantes antes de que fuera formulada la teoría de la relatividad, porque sólo esta teoría iluminó tales puntos y permitió entender las graves dificultades inherentes a la física clásica.

Comenzaremos, por consiguiente, con un cuadro muy general de la física del siglo XIX. Para concretar, tendremos que pensar acerca de éste considerando dos ramas principales. Las llamaremos brevemente teoría mecánica y teoría del campo.

Relacionaremos cada una de estas ramas con el nombre de alguien. Esto implica una simplificación tan grande, que casi llega a falsear todo el cuadro, porque si llamamos alternativamente física newtoniana a la rama mecánica, no hacemos más que mantener la ilusión de que una doctrina puede surgir en forma completa de la

mente de un solo hombre. En rigor, las bases de la teoría de Newton están en la obra de Galileo, y aunque al remontarnos más allá en el pasado los eslabones de la cadena histórica se van haciendo más débiles, aun subsisten, con todo, las conexiones con el pasado. Pero en cuanto tomamos nota de esta importante continuidad histórica en la ciencia, no es mucha la impropiedad en que se incurre al relacionar la física mecanicista con el nombre de Newton, cuya célebre obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) constituyó una formulación trascendental acerca de la visión mecánica del mundo.

De modo similar vincularemos la teoría del campo con el nombre de Maxwell, aunque las ideas de Maxwell, por su parte, se basaron en los trabajos de Faraday y fueron experimentalmente confirmadas más tarde por Hertz. James Clerk Maxwell falleció en 1879, año en que nació Einstein.

Los diferentes elementos de la concepción mecánica y la del campo tienen orígenes que se remontan incluso a las filosofías antiguas. Sin embargo, sólo la ciencia del siglo XIX desarrolló estas dos concepciones en toda la plenitud de su belleza matemática. Las dos ramas de la física que existen a la par representan el resultado final de un prolongado y dinámico crecimiento.

No es difícil distinguir entre la concepción mecánica y la del campo. En la actualidad estos dos conceptos de la ciencia lán llegado incluso a introducirse en nuestro lenguaje corriente, y cuando hablamos del mundo que nos rodea describimos fragmentos de éste como si los interpretáramos de acuerdo con la teoría mecánica o la del campo.

Así, por ejemplo, si decimos que a causa de la atracción gravitacional la tierra se mueve en torno al sol siguiendo una trayectoria que llamamos elipse, estamos empleando la concepción newtoniana, el lenguaje mecánico. Semejante afirmación habría podido resultar artificiosa en tiempos de Newton, pero es un lugar común en la actualidad. Para ser explícitos: señalamos un punto -el sol, en el foco de una elipse- y otro punto, la tierra, en su periferia. Los dos cuerpos -la tierra y el sol- están representados por estos dos puntos o partículas, que se atraen mutuamente por la fuerza gravitacional. Estos son los rasgos caracte-

rísticos de la concepción mecánica o newtoniana: partículas y fuerzas simples que actúan entre sí. Fue precisamente esta concepción la que resultó más afortunada en la región de la mecánica y la astronomía, e invadió luego otras ramas de la física.

No resulta sorprendente que el siglo XIX haya tratado de aplicar una interpretación mecánica a todos los dominios de los fenómenos naturales. En tiempos de Newton la mecánica era el miembro más antiguo, conocido y afortunado de la familia científica. De este modo, explicar los fenómenos del calor, la luz y el movimiento de los fluidos significaba inventar una imagen mecánica apropiada. Esto es lo que se quiere significar con la afirmación de que la concepción mecánica reinaba sobre la física. Hasta el siglo XIX nadie imaginaba que este régimen mecánico podía ser derribado. El desarrollo de la ciencia parecía delineado según un trazado mecanicista para todo el futuro de nuestra civilización. El célebre matemático Lagrange, que murió a comienzos del siglo XIX, señaló que Newton fue no sólo el más grande, sino también el más afortunado de los científicos, porque la ciencia de nuestro mundo puede ser creada solamente una vez, y fue Newton quien la creó. Desde nuestra presente posición aventajada resulta evidente que los fundamentos de la ciencia han sido creados y recreados, y que la gran obra de Newton consistió en crear solamente el primer eslabón de una cadena de revoluciones científicas. Sin embargo, mientras vivió Lagrange, e incluso más tarde, durante casi toda la primera mitad del siglo XIX, la concepción mecánica avanzó en extensión y profundidad hasta tomar estado de dogma filosófico. Laplace, y más tarde Helmholtz, la formularon con mucha imaginación, llegando mucho más allá de las regiones conocidas y exploradas.

En aquellos tiempos los científicos suponían que todo el universo, incluidos nosotros, constituye una máquina gigantesca que obedece a las leyes newtonianas.

Si conocemos el estado presente de un sistema mecánico, es decir, las posiciones y velocidades de todas las partículas, si conocemos también las fuerzas que actúan entre dichas partículas, entonces podemos predecir el futuro cae ese sistema, o descubrir su pasado. En reali-

dad, resolver un problema mecánico significa hacer precisamente esto. Por consiguiente, si el universo mismo es una gigantesca y complicada máquina, y si conocemos su estado en cierto momento y la naturaleza de todas las fuerzas, entonces podemos predecir el futuro cae nuestro universo hasta los menores detalles y en un momento arbitrariamente distante. Con la sustitución de los diferentes valores de tiempo en las formulas resultantes, podemos igualmente descubrir su pasado. EL científico del siglo XIX comprendía que estaba lejos de semejante objetivo final. Tenía noción de que sabía poco acerca del estado de nuestro universo, poco también sobre las leyes que gobiernan la materia, y mucho menos acerca de las que gobiernan la vida y el pensamiento. Con todo, parecía que nada podía impedir la aplicación cada vez más amplia de la concepción mecánica, de modo que se consideraba una meta finalmente alcanzable la idea de que todos los fenómenos naturales podían ser explicados a la larga por la física newtoniana.

¿Qué ocurría con la otra rama de la física, la teoría del campo? El desarrollo de la concepción del campo durante la segunda mitad del siglo XIX introdujo ideas cruciales que determinaron al cabo la declinación de la concepción mecánica.

El concepto del campo también ha penetrado en nuestro lenguaje cotidiano. Así, si afirmamos que las ondas electromagnéticas se expanden desde una antena y actúan sobre los receptores de radio, estamos empleando (por lo menos hasta cierto grado) el lenguaje del campo. Una frase como ésta, que hoy día es un lugar común, habría carecido de sentido para los físicos de comienzos del siglo XIX.

La teoría de Maxwell, que gobierna los fenómenos eléctricos y ópticos, es una teoría del campo porque en ella el elemento esencial es la descripción de cambios que se expanden continuamente a través del espacio en el tiempo. De este modo el concepto del campo está en contraste con el concepto de partículas simples de la concepción mecánica. (Las diferencias entre ambas teorías se reflejan también matemáticamente: las ecuaciones de la mecánica son ecuaciones diferenciales ordinarias, mientras que las ecuaciones del campo son ecuaciones diferenciales parciales.)

Una antena envía ondas electromagnéticas, ante las cuales reaccionan nuestras radios. Los átomos del sol, o de un tubo de neón, o de una lámpara eléctrica, emiten luz ante la cual reaccionan nuestros ojos. ¡Cuán disímiles son estos dos ejemplos! En un caso tenemos una antena y un receptor de radio. En el otro el átomo que es en sí mismo una pequeña antena- emite ondas electromagnéticas, y el detector -el ojo- las analiza, revelando los colores y las formas del mundo visible. Pero estos dos fenómenos diferentes están gobernados por las mismas leyes: las ecuaciones de Maxwell. Tanto las ondas emitidas desde una antena como desde un átomo son ondas electromagnéticas que se expanden a través del espacio a la velocidad de 300.000 kilómetros por segundo. Aquí puede establecerse el origen de grandes progresos científicos, partiendo del descubrimiento de similitudes inesperadas, e incluso de identidades, existentes por debajo de la superficie de las diferencias externas.

La concepción del campo resultó tan afortunada en el dominio de los fenómenos eléctricos y ópticos, como lo fue la concepción mecánica de la astronomía. Desde los rayos X hasta las ondas radiales, incluyendo las ondas visibles de la luz, todo este rico y extenso campo de la radiación está gobernado por las leyes del campo que parecen tener poco en común con la concepción mecánica.

Ningún físico ortodoxo del siglo XIX Habría estado de acuerdo con semejante interpretación. La idea de dos físicas diferentes, dos métodos alternados del pensamiento, le habría resultado inaceptable. Habría insistido en que la concepción del campo no es diferente en esencia de la concepción mecánica, y que para los fenómenos electromagnéticos podría establecerse una explicación mecánica coherente y enteramente satisfactoria. Habría argüido que:

La teoría de Maxwell describe las ondas electromagnéticas y las leyes de su propagación. Esta afirmación por sí sola demuestra que la explicación es de naturaleza mecánica. ¿Qué es una onda? Pensemos en una onda de sonido: es producida por las partículas del aire. Así, pues, en una onda de sonido tenemos una imagen mecánica de partículas y su movimiento. O pensemos en las ondas del agua. Las partí-

culas del agua oscilan, obligando a las partículas próximas a oscilar también. Es así como se expanden las ondas, o mejor dicho, como aparentan expandirse. Pero la realidad básica es de naturaleza mecánica, de partículas en movimiento y de las fuerzas que actúan entre éstas. Lo mismo es válido para las ondas de la luz o las electromagnéticas. Cada onda electromagnética puede ser descrita por una longitud de onda, como en el caso de las ondas del agua. Por longitud de onda quiero significar la distancia entre una cresta y la cresta próxima en un momento dado. La longitud de onda de la radiación visible, es decir, de la luz, es pequeña comparada con las longitudes de las ondas radiales (incluso las ondas cortas) . Pero tanto para las ondas radiales como las luminosas es posible establecer una imagen mecánica de partículas que oscilan y un medio -la base material- a través del cual viajan las ondas.

Supondremos que nuestro físico imaginario del siglo XIX concluye su argumentación en este preciso momento, y le formularemos una pregunta que ha de suscitar serias dificultades.

Argüimos: usted ha dicho que la concepción undulatoria es de naturaleza mecánica porque siempre existe un medio, una base material, a través de la cual las ondas se propagan. ¿Cuál es entonces la base material a través de la cual se expanden las ondas electromagnéticas? Por supuesto que no es el aire, como en el caso de la onda de sonido. No existe aire alguno entre los astros y nuestra tierra. Extraigamos el aire de esta habitación y yo, permaneciendo afuera, seguiré viendo a través de las ventanas exactamente lo mismo que veía antes. El aire, el agua o cualquier otro medio material, no tiene relación con la propagación de las ondas electromagnéticas. A diferencia de cualquier otra onda, no tienen necesidad de una base material. Este es precisamente el rasgo característico que las distingue de todas las otras ondas. ¿Dónde está, pues, esa base mecánica, si no existe ningún medio material por el cual se propagan las ondas? -Por supuesto que estos argumentos no darían fin a la discusión. Nuestro físico del siglo XIX defendería su punto de vista, y durante esa controversia aparecería una palabra de importancia histórica: éter, concepto totalmente superfluo para la comprensión de la física moderna, pero indispensable, sin em-

bargo, para entender la historia de ésta. Porque el fracaso de dicho concepto dio nacimiento a la teoría de la relatividad de Einstein.

El físico del siglo XIX argüía que, en razón de que las ondas mecánicas (y para él no había ondas de otra clase) pueden expandirse sólo en un medio material, entonces debe existir un medio material a través del cual las ondas magnéticas se propagan. A este medio lo llamó éter y supuso que nuestro universo entero está sumergido en esta sustancia imponderable, de la cual conocía por lo menos una propiedad: la de transmitir las ondas electromagnéticas. El mismo físico nos aseguraría que, con el tiempo, otras propiedades serían descubiertas y el éter se tornaría tan real como cualquier objeto material. Así, pues, su idea es que hay dos ramas en la física, con el concepto del éter como lazo de unión entre ambas, vinculando la teoría mecánica con la del campo y salvando el apreciado principio de la unidad.

Recordemos esta imagen y tengamos presente cuánto esfuerzo fue necesario para formar, perfeccionar y justificar el concepto del éter, porque sólo entonces podremos entender la revolución que destruyó toda la estructura teórica, la revolución que comenzó cuando un joven empleado de, una oficina de patentes en Suiza publicó una comunicación en los primeros años de nuestro siglo.

El fracaso del concepto del éter

En toda exposición de la teoría de la relatividad se consideran los sistemas de referencia, o sistemas de coordenadas, o, como diremos por razones de brevedad, sistemas. Estos sistemas de referencia son discutidos tanto en los problemas mecánicos como en los de los campos. Pero sólo el concepto del éter, y posteriormente la teoría de la relatividad, atrajo toda la atención sobre su importancia. Muchos de los problemas del éter, y más tarde muchos de la relatividad, están vinculados a dos o más sistemas.

Así, pues, en las exposiciones no técnicas resulta útil pensar acerca de los experimentos que se realizan en tierra, y luego sobre los que

se realizan, por ejemplo, en un tren en movimiento. En todos estos ejemplos nuestra superficie terrestre, y todos los objetos fijos que se encuentran sobre ésta, forman un sistema, y el tren constituye otro sistema. Los dos sistemas se mueven relativamente el uno con respecto al otro, y cada sistema tiene su propio observador. u observadores. Así, pues, habrá un grupo de hombres (todos los que se necesiten) realizando experimentos en tierra, y también observadores que están experimentando en el tren. Estos dos equipos de observadores de ambos sistemas pueden comparar sus anotaciones entre sí, si es necesario, y conversarán sobre sus resultados. Algunos de nuestros, argumentos surgirán de esas discusiones. En realidad, si podemos anticiparnos en nuestra exposición, éste es uno de los métodos importantes de razonamiento en la teoría de la relatividad. Los dos sistemas se mueven relativamente el uno con respecto al otro; los observadores que trabajan en sus respectivos sistemas encontrarán resultados que son válidos relativamente a sus sistemas; de ahí el nombre: teoría de la relatividad.

Ahora formularemos el principio de la relatividad de Galileo.

Imaginemos dos sistemas en movimiento uniforme el uno con relación al otro; es decir, a velocidad constante, no acelerada, en línea recta. Si se quiere imaginar el movimiento como el de un tren, es necesario representarse uno en el cual los baúles no caigan y donde no haya sacudones que hagan chocar a los pasajeros entre sí; o un barco que navegue con tan deliciosa suavidad, que ni siquiera los pasajeros más sensibles se mareen. ¡Hemos supuesto el movimiento uniforme!

Ahora preguntamos: ¿son válidas las leyes de la mecánica para los observadores de ambos sistemas, si son válidas para uno de éstos? La respuesta es evidente: sí. En verdad, es esto precisamente lo implícito en el movimiento perfectamente uniforme. Cúbranse las ventanillas, y no habrá medio de percibir ese movimiento uniforme. Así, pues, si nuestros observadores comparan las anotaciones sobre sus experimentos físicos en los dos sistemas, hallarán que han formulado leyes idénticas.

Es éste un concepto simple, y si lo entendemos, también entenderemos el significado del principio de la relatividad de Galileo. Este

dice: Si las leyes de la mecánica son válidas para cualquier SISTEMA, entonces son válidas para cualquier otro SISTEMA en movimiento uniforme relativo al original.

Uno cualquiera de estos sistemas en movimiento uniforme es tan apropiado para los experimentos físicos como cualquier otro, y, podemos referirnos a cualquiera de éstos al describir los movimientos, velocidades, aceleraciones o fuerzas.

El punto esencial no es que tenemos dos o más sistemas, con observadores en cada uno de éstos, sino que podemos transferir la descripción de un sistema, a, otro. Todo esto es simple, pero la simplicidad es engañosa, porque pronto descubriremos cómo se ocultan dificultades profundas detrás de estos argumentos en apariencia triviales.

Un hombre me dice que su coche marcha a ochenta kilómetros por hora. Si quiero ser preciso, puedo preguntarle: ¿En relación con qué? En relación con la casa de usted y con la columna del alumbrado, o en relación con la luna y el sol? Preguntas de esta clase son exasperantes, porque es evidente que el hombre que describía la velocidad de su automóvil se refería a su velocidad en relación con la tierra o los objetos (casa, columna de alumbrado) rígidamente unidos a nuestra tierra. El movimiento sólo puede ser descrito en relación con algún sistema de referencia, y mi interlocutor emitió la información sólo porque era evidente a qué sistema se refería.

Cuando el tren de usted se pone en marcha y una persona corre tras él, su velocidad en relación con la estación es considerable, aunque la velocidad relativa con respecto a usted es casi cero. Si usted corre dentro de su tren con la velocidad a , y su tren avanza con la velocidad b , entonces la velocidad de usted con relación a las vías será $a + b$, o $a - b$, según el sentido en que usted corra.

Ahora formularemos el resultado de una manera más abstracta. Tenemos dos sistemas O (el suelo) y O' (el tren). El sistema O' avanza a la velocidad a en relación con O . Una partícula se mueve a la velocidad b en relación con el sistema O' . Para hallar la velocidad de esta partícula en relación con el sistema O , hay que sumar las dos velocidades.

des, si la partícula se mueve en el mismo sentido que O' (en relación con O), y restarlas si se mueve en el sentido contrario.

Esta regla, que relaciona el resultado de las mediciones de velocidades en dos sistemas, es a la vez simple y evidente. Tan evidente, en verdad, que al parecer apenas si vale la pena confirmarla por medio de la experimentación. Con todo, si queremos podemos hacerlo, y podemos repetir ese experimento todas las veces que se nos ocurra. Así, pues, tenemos una ley a la cual nos referiremos en el futuro como la ley de suma de las velocidades.

Acabamos de formular:

1. El principio de la relatividad de Galileo.
2. La ley de suma de las velocidades.

Otro ejemplo más antes de abandonar estos principios fundamentales de la concepción mecánica: imaginemos que un hombre sentado en medio de un largo tren pronuncia una conferencia, o, para expresarlo en términos físicos, produce ondas de sonido. Ahora formularemos a un observador que está en el tren, y a otro situado fuera de él, la siguiente pregunta:

¿Cuál es la velocidad de estas ondas sonoras en el sistema de usted?

El observador que está en el tren dirá:

La velocidad de las ondas sonoras es la misma en todos los sentidos. El movimiento uniforme del tren en relación con la estación no importa. Mi sistema es tan bueno como el del jefe de la estación. El tren lleva consigo su propio aire, y, por consiguiente, las ondas sonoras se propagan con la misma velocidad en todas las direcciones.

El observador que está afuera dirá:

Las ondas sonoras que se producen en el tren se mueven en relación a mí con distintas velocidades en diferentes sentidos. En el sentido del movimiento del tren, el sonido se expande a una velocidad menor. De hecho, esta velocidad en relación conmigo será menor, en la medida de la velocidad del tren.

Recordemos estas respuestas, porque pronto tendremos que referirnos a ellas.

Ahora podemos abandonar la teoría mecánica y, con la guía del físico del siglo XIX, iniciar una serie de investigaciones a fin de establecer la realidad del éter. Nuestro guía está resuelto a conservar el concepto del éter, que unifica la concepción mecánica y la del campo. Le gustaría que las ondas electromagnéticas fueran tan reales y tan mecánicas como las ondas sonoras.

Siguiendo a nuestro guía, cuya teoría del éter aceptamos en carácter de ensayo, imaginamos a las ondas luminosas nada más que como ondas del éter. Para ser concretos imaginaremos que un faro, que envía señales luminosas, es encendido y apagado. Si lo preferimos, podemos optar por pensar en señales radiales, puesto que tanto las ondas radiales como las luminosas se expanden por el éter con la misma velocidad.

Así pues, estamos realizando un experimento similar al descrito anteriormente, en el caso de las ondas sonoras. Investigamos las señales luminosas enviadas desde el medio del tren y preguntamos a los observadores que están dentro y fuera de él acerca de la velocidad de la luz en relación con sus sistemas. Por supuesto, podemos imaginar que nos es posible medir estas velocidades, pero preferimos formular nuestra pregunta antes de que los observadores hayan tenido la oportunidad de hacerlo. Dejemos que éstos predigan y prevean las posibles respuestas.

El observador que está en el tren diría:

Es evidente que mi sistema es tan bueno como el sistema del jefe de la estación. Las ventanillas de mi tren están cerradas, es razonable suponer que el éter es transportado con mi sistema, así como es transportado el aire en el caso de las ondas sonoras. Así, pues, la velocidad de la luz en mi sistema seguirá siendo de 300.000 kilómetros por segundo, en todas partes y en todos los sentidos.

El observador que está fuera del tren diría:

La velocidad de esta señal luminosa será diferente en diferentes sentidos. Será mayor que la normal en el sentido del movimiento del

tren en relación conmigo. En este sentido será igual a la suma de la velocidad normal de la luz y la velocidad del tren. En el sentido opuesto será igual a la velocidad normal de la luz menos la velocidad del tren.

De esta manera los dos hombres han hecho sus predicciones, que ahora pueden ser verificadas por la experiencia, después de la cual en ciencia no cabe apelación.

Si realizáramos el experimento, la predicción del observador que está fuera del tren resultaría inesperadamente equivocada. En verdad, el observador que se encuentra dentro del tren hallaría que la velocidad de la luz es la misma en todos los sentidos. Su predicción resultaría correcta, pero el observador que está fuera estaría indiscutiblemente equivocado. Observaría que también para él la velocidad de la señal luminosa es la misma en todos los sentidos, siempre de 300.000 kilómetros por segundo, nunca menor ni mayor. Hallaría que para él la luz se comporta como si su fuente y el éter estuvieran en reposo; y el hecho de que el foco de luz se mueve juntamente con el tren no tiene para él ninguna importancia. (El resultado de este experimento teórico ha sido establecido en forma indirecta, aunque incontrovertible, por las observaciones científicas.) Así, pues, la experimentación pronuncia su veredicto: la velocidad de la luz es la misma para el que está dentro como para el que está fuera.

Por lo tanto, la ley de suma de las velocidades se ha derrumbado. ¿En qué consiste, entonces, la ventaja de suponer la existencia del éter, si éste no actúa como lo haría un medio apropiado; si en vez de ayudarnos a predecir los acontecimientos, nos conduce hacia nuevas dificultades? El 'éter, que debería establecer el nexo entre la teoría mecánica y la del campo, ha violado la mecánica al violar la ley de la suma de las velocidades.

Los prejuicios arraigados profundamente se resisten a morir. El físico del siglo XIX no estaba preparado para sacrificar el concepto del éter. No podía negar la evidencia de la experimentación, pero podía cambiar sus argumentos. En verdad, podía valerse de una explicación plausible para su fracaso. Podía decir, y lo dijo: el tren no transporta el

éter, como lo hace el medio del aire, sino que, en cambio, flota a través del mar etéreo como lo haría un vapor que surca las aguas en calma; también la tierra, en su viaje alrededor del sol, flota en este sereno mar etéreo. Entonces, nuestro cuadro anterior fue erróneo y debemos reiniciar nuestro experimento desde el comienzo, pidiendo a nuestros observadores que predigan los resultados y que comparen sus predicciones con los experimentos. Al hacerlo, nos estamos acercando a la culminación de nuestro tema. De nuevo hay dos observadores, el uno afuera, en el tranquilo mar del éter, y el otro flotando a través de ese mar. Una vez más registramos las predicciones, pero ahora, para ser más coherentes, hemos cambiado ligeramente nuestro cuadro. Imaginamos un observador vinculado, no con la tierra sino con algún sistema; digamos el sol o las estrellas, quizás: el sistema en el cual el mar del éter está en reposo. Este sistema es el único en el cual el éter reposa, y todos los otros cuerpos flotan en relación a él. El observador "universal" -es decir, el observador para el cual el éter está en reposo-, diría:

Para mí la velocidad de la luz es la misma en todos los sentidos, porque el medio a través del cual viajan las ondas luminosas se encuentra en reposo.

¿Qué ocurre con el observador que flota a través de ese mar etéreo? Imaginemos que viaja en un sistema en movimiento, como por ejemplo un tren, y que, como antes, envía una señal en el sentido del movimiento y otra en el sentido opuesto. Diría ahora:

Si envío una señal -es decir, una onda luminosa- en el sentido del movimiento del tren, entonces la onda luminosa se moverá a través del inmóvil mar del éter, pero la pared hacia la cual se mueve la onda se irá alejando de ésta. La pared opuesta avanzará hacia la onda. De esta manera, las dos paredes no serán alcanzadas simultáneamente por las señales luminosas. La pared que huye alejándose será alcanzada más tarde; las ondas luminosas llegarán primero a la pared opuesta. Por consiguiente, la velocidad de la luz no será la misma en ambos sentidos. Será menor que la velocidad normal de la luz en dirección a la pared que se aleja, y mayor que la velocidad normal de la luz en direc-

ción a la pared opuesta. Llamemos c a la velocidad normal de la luz; es decir que c equivale a 300.000 kilómetros por segundo. Para mí la velocidad de la luz será menor que c en el sentido del movimiento, y mayor que c en el sentido opuesto.

Estas son predicciones claras. Antes de verificarlas experimentalmente, detengámonos un momento para subrayar la importancia del cuadro que hemos bosquejado.

De acuerdo con este nuevo cuadro existe un sistema, y sólo uno, en el cual el éter está en reposo. Tal sistema se distingue de todos los demás. Es, como lo hemos dicho, el sistema. Así, pues, estamos atrapados en nuestros propios argumentos. Al tratar de formular un concepto del éter que unifique la teoría mecánica y la del campo, el físico que acepta el concepto del éter se ve obligado a socavar la teoría mecánica en sí misma. Está dispuesto a sacrificar el principio de la relatividad de Galileo, parte esencialísima de la concepción mecánica. Porque el principio de la relatividad de Galileo declara que son equivalentes todos los sistemas que se hallan en movimiento uniforme los unos en relación con los otros. Pero esto no es así de acuerdo con el físico que cree en el éter. Entre los sistemas hay uno que se distingue entre todos los demás, el sistema en el cual el éter está en reposo, el único en el cual la velocidad de la luz es c . De tal manera, el principio de la relatividad de Galileo ya no puede ser considerado válido. El éter lo, reemplaza por una teoría absoluta. AL tiempo que se esfuerza por salvar la concepción mecánica, el físico del siglo XIX la compromete al abandonar su principio básico de la relatividad.

¿Qué dice el experimento? Todas nuestras observaciones astronómicas indican con claridad que si existe un mar de éter en reposo, entonces nuestra tierra, en su viaje alrededor del sol, se mueve en relación a éste. Así, pues, nuestro ejemplo del tren que flota a través del éter está bien representado por nuestra tierra, con su movimiento de una velocidad de unos 32 kilómetros por segundo alrededor del sol. Por consiguiente, en nuestra tierra, la velocidad de la luz en el sentido del movimiento del globo terrestre debería ser ligeramente menor que la velocidad en el sentido opuesto. El famoso experimento de Michel-

son-Morley, realizado en 1887, estuvo destinado a averiguar esa diferencia. El resultado fue negativo. ¡Esto demostró en forma concluyente que no hay diferentes velocidades de la luz! Son la misma en todos los sentidos y su valor, es c , la velocidad de la luz que, cosa extraña, siempre permanece fiel a sí misma, siempre constante, siempre inmutable.

Para el mecanicista el resultado es catastrófico. El concepto del éter, que había brindado la promesa de unificar la concepción mecánica y la del campo condujo a inevitables incongruencias. Un éter que no se mueve ni está en reposo, que no es transportado por los cuerpos ni permite que los cuerpos floten a través de él, implica un fiasco lamentable. Todos los esfuerzos por considerar el éter como una base material para las ondas han fracasado por completo, y de nuevo nos vemos frente a dos ramas aparentemente contradictorias de la física, sin ningún concepto que las unifique.

Como ya lo hemos dicho, los prejuicios científicos se resisten a morir. El afán de inventar un medio para la propagación de las ondas electromagnéticas fue tan fuerte, que incluso después de haber demostrado que el éter no se mueve ni está en reposo, aun se realizaron esfuerzos por aferrarse al concepto de un éter, por medio de la introducción de nuevas suposiciones, que tornaron más complicada, más artificial y menos convincente la estructura de la física teórica.

Demos una vez más una ojeada al estado de la física, o más bien sus fundamentos, a comienzos de este siglo.

La concepción mecánica aceptaba:

El principio de la relatividad de Galileo y La regla de la suma de las velocidades.

Los experimentos sobre la luz y las ondas electromagnéticas nos condujeron a la conclusión de que:

La velocidad de las ondas electromagnéticas, o la luz, es siempre la misma, y no importa que la fuente o el observador estén en movimiento.

Este último resultado era incompatible con el concepto del éter. Por otra parte, no estaba de acuerdo con la regla de la suma de las

velocidades. ¡La velocidad de la luz, juntamente con la velocidad de un sistema, viene a dar como resultado la velocidad inmutable de la luz!

No sólo se derrumbaba el concepto del éter, sino que la concepción mecánica y la del campo se contradecían entre sí. Los experimentos habían revelado incongruencias aparentemente ilevantables en la imagen científica del mundo exterior.

La física estaba madura para la revolución de Einstein.

¿A qué nos referimos cuando hablamos de una revolución en la física? A una repentina clarificación de nuestros conceptos, a la formación de una nueva imagen, a una inesperada resolución de contradicciones y dificultades. Han ocurrido muchas revoluciones en la ciencia, pero la de Einstein resultó la más famosa. Entre sus resultados existe uno que durante los años próximos constituirá un importante factor en la conformación de la vida y la muerte en nuestro planeta.

CAPITULO III

LA PRIMERA REVOLUCION DE EINSTEIN

El primero y el segundo, pero no el tercero

Annalen der Physik es una revista alemana, encuadrada en gruesos volúmenes repletos de artículos científicos; por lo común muy técnicos y eruditos y ricamente salpimentados con notas y referencias. El volumen decimoséptimo de Annalen der Physik, impreso en 1905, incluye la comunicación de Einstein, de treinta páginas, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento." El título es de apariencia modesta, pero a medida que lo vamos leyendo advertimos casi de inmediato que es diferente de otros artículos. No hay referencias, ni citas de autoridades, y las pocas notas al pie son de carácter explicativo. El estilo es simple, y una gran parte de este artículo puede leerse sin necesidad de conocimientos técnicos superiores. Pero su plena comprensión requiere una madurez de mente y de gusto que es más rara y valiosa que el conocimiento pedantesco, porque el trabajo de Einstein trata de los problemas más fundamentales; analiza los significados de conceptos que podrían parecer demasiado simples como para ser investigados.

Recientemente, cuando releía el trabajo de Einstein, volví a sentirme impresionado por lo acabado de su forma. Incluso hoy día, su presentación y su estilo no han perdido nada de su frescura. Sigue siendo la mejor fuente para el estudio de la teoría de la relatividad.

En la segunda sección del artículo de Einstein leemos:

1. Las leyes según las cuales cambian los estados de un sistema físico no dependen de cuál de los dos sistemas de coordenadas en movimiento uniforme relativo consideran estas leyes.

2. Cada rayo luminoso se mueve en un sistema de coordenadas "en reposo" a una velocidad definida c , ya sea que lo emita una fuente fija o en movimiento.

Estos son los fundamentos sobre los que se levanta la teoría de la relatividad. Se trata de suposiciones simples, que al mismo tiempo están basadas en la experiencia. Como lo descubriremos luego, la solución de nuestras dificultades se consigue aceptando lo inevitable. Como en un buen cuento de misterio, la solución más evidente es la que más consecuentemente nos hemos negado a aceptar.

Pero si queremos entender la teoría de la relatividad, debemos entender a fondo esas suposiciones sobre las cuales se basa. Todo lo demás es deducción lógica, y en los resultados deducidos no puede haber más que en las hipótesis de las cuales provienen.

La primera suposición constituye una nueva exposición del principio de la relatividad de Galileo, que hemos descrito en el capítulo precedente. Aquél postula que todas las leyes de la naturaleza son las mismas en dos sistemas en movimiento relativo uniforme; que ni a través de los fenómenos mecánicos ni de los electromagnéticos podremos percibir el movimiento uniforme. El físico del siglo XIX pensaba que existía un éter, y que el sistema en que ese éter estaba en reposo se distinguía de los demás. Pero esta suposición se contradecía claramente con la experimentación, y Einstein sugiere que aceptemos sin apelación el veredicto del experimento. Ya sea que investiguemos los fenómenos mecánicos o los electromagnéticos, todos ellos están gobernados por el principio de la relatividad: no hay manera de distinguir entre dos sistemas en movimiento relativo uniforme. Pero si esto es cierto, se puede demostrar entonces que el concepto del éter es superfluo. Ha creado bastante confusión, y no hay manera de percibir su presencia. No logró introducir los fenómenos que gobiernan los fenómenos electromagnéticos dentro de la estructura teórica de la mecánica clásica; esta estructura resultó demasiado fantástica y artificial como para establecer una conexión real entre estas dos ramas de la física.

Por lo tanto, podemos señalar como cualidad de la obra de Einstein, la de haber destruido de una vez por todas el concepto del éter, que había sido inventado para unificar las leyes del campo y de la mecánica. Pero al hacer esto, no cortó los vínculos entre estos dos dominios de la física; por el contrario, los aproximó aún más. Porque ahora tenemos un concepto unificador en el contenido físico del principio de la relatividad de Galileo, que gobierna tanto los fenómenos mecánicos como los de los campos.

Retornamos al segundo postulado básico de la relatividad especial. Es igualmente simple, y tan sólo expresa en forma explícita que la velocidad de la luz es siempre la misma, no importa cuál sea el sistema en que la medimos: si dentro o fuera del tren.

Podemos sentirnos decepcionados. ¿En qué consiste, entonces, la gran revolución de Einstein? Estos dos principios parecen meramente una formulación de resultados experimentales, y todo lo que parece haber hecho Einstein es aceptar lo inevitable. ¿Dónde está, entonces, la originalidad de la teoría de Einstein?

El segundo paso en nuestro análisis es importante. A pesar de la simplicidad de los postulados fundamentales de Einstein, éstos tomados en su conjunto, son revolucionarios. Hasta la época de Einstein, estos principios parecían contradecirse. Einstein suprimió la contradicción, pero al hacerlo se vio obligado a cambiar nuestros conceptos más fundamentales sobre el espacio y el tiempo.

Los dos principios parecían contradecirse de modo inevitable. Porque si la velocidad de la luz en un tren en movimiento es c , ¿entonces cómo puede ser también c fuera de él? ¿Será mayor en el sentido del movimiento del tren y menor en el sentido opuesto? O, invirtiendo el argumento, si la velocidad de la luz para el observador que está fuera del tren es c , ¿será entonces diferente dentro de él? Antes de la teoría de la relatividad parecía imposible eludir una conclusión semejante, puesto que provenía de un capítulo ya consagrado por el tiempo sobre la combinación de velocidades en dos sistemas diferentes. El principio simple de una velocidad constante de la luz contradice el principio igualmente simple de una suma o resta de las velocidades, de la com-

binación de la velocidad de la luz (o cualquier otra velocidad) con la velocidad del sistema.

En homenaje a la claridad, transcribiremos los tres principios:

Primero: Principio de la relatividad.

Segundo: Constancia de la velocidad de la luz.

Tercero: Suma de las velocidades.

No podemos aceptarlos a todos. Debemos rechazar el segundo si queremos aceptar el primero y el tercero. La solución de Einstein consistió en aceptar el primero y el segundo y establecer las conclusiones propias. Se comprobará que para hacer esto, el tercero no puede ser aceptado como rigurosamente válido. Por consiguiente, no es rigurosamente válido, y la experimentación lo ha de demostrar. Debemos construir una nueva física, basada en los principios fundamentales primero y segundo. En verdad, una física semejante puede ser construida.

Se trata de una física lógicamente coherente y acorde con el experimento; una nueva física relativista, para la cual la antigua física newtoniana constituye sólo una aproximación, útil y válida para los cuerpos que se mueven a velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, pero no para las velocidades de cuerpos en movimiento que se aproximan a la de la luz. Así, pues, cuando nos referimos a automóviles o aviones supersónicos, o incluso a los planetas de nuestro sistema solar, podemos emplear aún los principios de la mecánica clásica. Pero si considerando electrones que se mueven a velocidades, digamos, sólo un diez por ciento menor que la de la luz, entonces se derrumba la mecánica newtoniana y hay que emplear una nueva mecánica; la mecánica relativista de Einstein. No es del todo correcto afirmar que Einstein demostró que la mecánica de Newton es inaplicable. Más correcto es sostener que demostró sus limitaciones. Pero la región en que ésta actúa es aún vasta; y durante largo tiempo se la seguirá enseñando en nuestras escuelas y aplicando en nuestra vida cotidiana.

El reloj en movimiento

A fin de construir una física coherente, basada en los dos principios de Einstein, debemos revisar en forma radical nuestros conceptos fundamentales del espacio y el tiempo. Es casi increíble que estos conceptos básicos, intuitivos, no hayan sido definidos jamás, hasta entonces, en física. Equivocadamente se los consideró demasiado evidentes como para que necesitaran clarificación o análisis. Sin embargo, si intentamos definirlos, nos encontramos de inmediato con dificultades imprevistas, que sólo pueden ser resueltas dentro de la teoría de la relatividad de Einstein.

El sencillo interrogante suscitado y respondido por Einstein es: ¿cuál es el significado de la frase: "dos acontecimientos simultáneos"? Aunque en aquel tiempo (1905) la física había llegado a ser bastante sutil, el concepto de dos acontecimientos simultáneos parecía tan exento de ambigüedad, que nadie antes de Einstein se había molestado en investigarlo. Einstein hizo precisamente esto e inició su análisis con la frase más sencilla que jamás haya encontrado yo en un trabajo científico: "Todos nuestros juicios en los cuales el tiempo desempeña un papel, son juicios acerca de acontecimientos simultáneos. Si decimos, por ejemplo que «el tren llega a las 7», esto significa que la coincidencia de la aguja de mi reloj con el número 7 y la llegada del tren son acontecimientos simultáneos."

Aquí le hemos conferido significación a una situación muy simple de dos acontecimientos simultáneos (coincidencia de la aguja del reloj con el número 7 y llegada del tren), que ocurren en recíproca vecindad. ¿Pero qué significa afirmar que son simultáneos dos acontecimientos que ocurren en Nueva York y San Francisco? Ahora la pregunta se hace más difícil y debemos reflexionar un poco antes de contestarla. La respuesta más sencilla sería la de que los dos acontecimientos son simultáneos si dos relojes, uno en Nueva York y otro en San Francisco, muestran que lo son. Esta respuesta puede resultar correcta después que hayamos agregado unos pocos requisitos. Primero,

debemos saber que los dos son buenos relojes, y para simplificar las cosas, supondremos que son de la misma estructura, o, como diremos, relojes idénticos. No es fácil decir qué es un buen reloj, pero vamos a prescindir de esta dificultad, desde el momento en que no hay mayor peligro en ignorarla. Por supuesto, si uno marca la hora del Este y el otro la del Pacífica, los dos acontecimientos no serían simultáneos cuando los dos señalasen el mismo tiempo. No sólo tienen que tener el mismo ritmo, sino que simultáneamente tienen que señalar el mismo tiempo, o, en pocas palabras, tienen que estar sincronizados. ¿Qué significa afirmar que los relojes están sincronizados? Imaginemos que son las siete en punto en Nueva York, y que enviamos una señal radial a un observador que se encuentra en San Francisco a fin de que ponga su reloj a las siete. Si lo hace, ¿estarán sincronizados los dos relojes? No exactamente. La señal radial viaja a una velocidad grande pero finita: la de la luz. Así, pues, si el observador que está en San Francisco recibe la señal de que son las siete, debe poner su reloj ligeramente después de las siete; para ser exactos, las siete más el tiempo que tardó la señal en su viaje entre las dos ciudades.

Sin embargo, podemos imaginar un simple experimento que nos muestre si los dos relojes, que están en las dos ciudades, están sincronizados o no. Supongamos un punto que esté exactamente a mitad de camino entre Nueva York y San Francisco. En este sitio, miramos una imagen por televisión de los dos relojes. Si en esta imagen, los dos relojes enarcan la misma hora en todo momento, entonces están sincronizados. Así, y sólo así, pueden ser utilizados para determinar acontecimientos simultáneos. De modo similar, podemos imaginar ahora relojes sincronizados dispersos por el globo entero. Cualquier par de éstos nos dará imágenes idénticas por televisión en el punto medio entre ellos.

Solamente, ahora, con todas estas estipulaciones, poderosos juzgar si dos acontecimientos que ocurren en dos sitios diferentes son simultáneos o no. Si un acontecimiento ocurrido en Nueva York a las 7 en punto, y otro ocurrido en San Francisco a la misma hora, son juzgados por un par de estos relojes sincronizados, entonces se los puede

describir como dos acontecimientos simultáneos. Pero nuestro análisis sobre la simultaneidad no ha concluido. Todo lo que hemos afirmado hasta aquí acerca de dos acontecimientos simultáneos es tan cierto en la mecánica clásica como en la teoría de la relatividad.

La física clásica no se molestó en formular estas hipótesis, en razón de que parecía que se iba a ganar poco con un análisis tan escrupuloso.

La divergencia entre los conceptos clásicos y relativistas sobre la simultaneidad sólo se hace evidente si consideramos acontecimientos simultáneos en dos sistemas. Hemos señalado cuán decisivo resulta en la teoría de la relatividad considerar dos sistemas diferentes y permitir a los observadores de ambos que discutan los experimentos que han realizado. Así, pues, ahora pensaremos acerca de dos sistemas, por ejemplo, la tierra con sus objetos fijos, y un tren en movimiento. Cada observador que está en tierra tiene tantos relojes sincronizados como los que necesita para determinar la hora de los acontecimientos en diferentes sitios, y el observador que se encuentra en el tren tiene también sus propios relojes sincronizados. Cada sistema posee, pues, sus propios relojes sincronizados para juzgar el tiempo en que ocurren los acontecimientos.

Ahora viene el punto esencial: imaginemos dos sucesos. Podemos pensar acerca de dos que sean muy simples, como por ejemplo dos señales luminosas enviadas en momentos diferentes desde distintos puntos del espacio. Un faro es encendido y apagado, en un cierto momento, en cierto punto del espacio: éste es un suceso. Ahora consideramos dos sucesos de esta índole y preguntamos si son simultáneos o no. Supongamos que el observador que está en tierra halla que estos dos hechos son simultáneos a juzgar por sus relojes. ¿Qué ocurre con el observador que se encuentra en el tren? ¿También él verá que son simultáneos?

Este es un punto crucial. Es aquí donde las respuestas de la física clásica y de la teoría de la relatividad difieren radicalmente. Como lo veremos, la teoría de la relatividad, al definir en forma rigurosamente y

por primera vez el concepto de la simultaneidad, obtuvo de ahí conclusiones de un valor esencial para el desarrollo ulterior de la ciencia.

El físico clásico respondería:

Por supuesto, dos hechos simultáneos en un sistema (la tierra) son simultáneos en otro sistema (el tren) . Yo de he permitido emplear relojes diferentes en distintos puntos, e incluso relojes diversos en diferentes sistemas. He coincidido con la definición que usted da de la sincronización y la he aceptado en toda su extensión, pero nada de esto puede modificar mi conclusión de que dos hechos, simultáneos en un sistema, son simultáneos en el otro. ¡Los relojes no cambian su ritmo cuando se trasladan! Poco importa que se consulte un reloj en reposo o uno en movimiento, o que los observadores empleen relojes exclusivos que reposan en cada uno de los sistemas, o relojes universales para todos los sistemas.

Corno lo sostuvo Newton, el tiempo es absoluto y esto significa precisamente que el tiempo no varía de un Sistema a otro, y que podemos emplear un equipo de relojes para todos los sistemas. El tiempo fluye uniformemente para todos los observadores. Por consiguiente, dos hechos simultáneos en un sistema deben ser simultáneos en otro. No hay ninguna pizca de evidencia de que los relojes modifiquen su ritmo mientras están en movimiento. Iníciase una rápida travesía en Southampton, y el reloj del barco indicará la misma hora que el reloj de Nueva York, si los dos relojes hubieran sido sincronizados al comenzar el viaje.

De esta manera el físico clásico insiste en que el tiempo es absoluto, que el reloj en movimiento no modifica su ritmo. Aquí el relativista formularía una simple pregunta:

"¿Cómo sabe usted que un reloj no modifica su ritmo mientras está en movimiento?"

Las discusiones vacías y prolongadas son raras en física. Pronto la consistencia intrínseca de una teoría y la evidencia del experimento conducen a un veredicto final. La posterior apelación al sentido común es engañosa, puesto que el pronunciamiento del sentido común en una cuestión de esta índole sólo puede reflejar un prejuicio universal, que

no es capaz de resistir el análisis riguroso, y que debe ser posteriormente desarraigado si se quiere asegurar el progreso del pensamiento científico. Por otra parte, a la larga, la invocación a una autoridad, incluso tan alta como la de Newton, puede ofrecer poca ayuda. Las teorías de Newton tenían coherencia en su tiempo, porque la ciencia en la era newtoniana aún no estaba madura para la teoría de la relatividad. La hipótesis del tiempo absoluto no condujo a contradicciones mientras se la aplicó a los hechos conocidos hasta el siglo XIX. En verdad habría resultado fútil suponer que un reloj modifica su ritmo en su viaje de Southampton a Nueva York. Ningún experimento habría podido recibir este cambio. ¿Pero qué ocurriría si el mismo vapor viajara a una velocidad apenas algo menor que la de la luz? ¿Aún se mantendría inmutable el ritmo de este reloj? A comienzos del siglo XIX esto hubiera resultado una cuestión puramente académica, pero no ocurre lo mismo en el presente. En la actualidad, podernos obligar a las partículas a moverse a una velocidad apenas algo menor que la de la luz.

Volvemos a nuestro interrogante:

"¿Se modifica el ritmo de un reloj mientras está en movimiento?"

Sí, responde la teoría de la relatividad. Dos hechos, simultáneos en un sistema, no son simultáneos en otro, y no hay un tiempo absoluto. El hecho de que el concepto del tiempo es relativo constituye una hipótesis necesaria para la coherencia intrínseca de nuestra teoría, y para que ésta concuerde con la experimentación.

Aquí hemos llegado a un punto esencial de nuestro análisis. Hemos visto dónde difieren las concepciones clásicas y relativistas. EL concepto del tiempo es modificado; un tenia sobre el cual han escrito volúmenes los filósofos ha sido cambiado por consideraciones que surgen del campo de la física.

El carácter relativista del tiempo y del concepto de la simultaneidad puede ser deducido de los dos principios básicos de la teoría de la relatividad: (1) la equivalencia de sistema en movimiento uniforme relativo y (2) la constancia de la velocidad de la luz.

Ahora explicaremos por qué el carácter absoluto de la simultaneidad debe ser sacrificado si se quieren aceptar estos dos principios de la teoría de la relatividad.

Desde la mitad de un tren (sistema en movimiento) enviemos, en un instante dado, dos rayos luminosos en sentidos opuestos. Puesto que la velocidad de la luz (c) es constante para el observador que está en el interior, en su sistema estos dos rayos luminosos alcanzarán las dos paredes opuestas al mismo tiempo, y para él estos dos hechos (los rayos luminosos que llegan a las dos paredes opuestas) serán simultáneos. ¿Qué ocurre con el observador que está afuera (en tierra) ? También, para él, la velocidad de la luz es la constante c en su sistema; pero, mirando hacia el tren, observa que una pared se aleja de la luz y que la pared opuesta se le acerca. De esta manera, para él, un rayo luminoso llegará primero a la pared que avanza hacia el rayo, y un poco más tarde la luz alcanzará la pared que se aleja. Esto conduce a la inevitable conclusión de que dos hechos simultáneos para los observadores de un sistema no son simultáneos para los observadores de un segundo sistema que se mueve uniformemente en relación con el primero.

He aquí, en realidad, una revolución en nuestro hábito de pensamiento y en nuestro empleo del lenguaje. La frase: "dos hechos ocurridos al mismo tiempo", carece de sentido si no especificamos, o por lo menos damos a entender con claridad a qué sistema nos estamos refiriendo. La diferencia de juicio entre el observador interno y el externo (tren-tierra) debe atribuirse a su empleo de diferentes relojes, puesto que ambos sistemas tienen sus relojes propios. Sacamos en conclusión que un reloj que está en movimiento varía su ritmo mientras este movimiento perdura.

Galileo y Lorentz

No podemos seguir avanzando sin el empleo de las matemáticas. Lo que hizo Einstein fue formular sus dos postulados en una forma

matemática rigurosa que le permitió obtener nuevas conclusiones. No resultaría excesivamente difícil seguir el razonamiento de Einstein, pero requeriría el empleo de la técnica matemática, y en cierto punto de una investigación de esta índole deben participar tanto los que están familiarizados con esa técnica como los que no lo están. Para los que no están familiarizados, la deducción debe concluir, y todo lo que puede hacerse es explicarles los resultados de esas deducciones matemáticas en términos de nuestro lenguaje corriente.

Sin embargo, nos veremos obligados a emplear un término que sólo puede ser comprendido de modo cabal con la ayuda de las matemáticas. No lo definiremos rigurosamente, pero introduciremos en forma más bien imprecisa este importante término de la teoría de la relatividad: la transformación de Lorentz. Constituye el pilar sobre el cual se apoya la teoría de la relatividad.

Para dar una idea de cómo se utiliza la transformación II - de Lorentz, consideramos, como antes, la situación de dos sistemas en movimiento relativo uniforme. Para una imagen concreta de esto, imaginemos, por ejemplo, un ómnibus que corre por la Quinta Avenida. El ómnibus tiene cuatro cuadras de largo, es muy estrecho, y podemos lograr que se desplace a cualquier velocidad que se nos ocurra, en tanto avance uniformemente. La posición de cualquier observador que está en reposo en este ómnibus puede ser indicada por un número (recordemos que el ómnibus es muy angosto) que representa la distancia desde su centro, y llamaremos positiva a la distancia que se encuentra en el sentido del movimiento y negativa a la otra. Si queremos emplear la terminología de las matemáticas, podemos decir que cada observador o cada partícula tiene una coordenada que representa su posición en el ómnibus, en relación con éste. Ahora bien: para el observador externo que permanece en la Quinta Avenida, el centro del ómnibus varía su posición con el tiempo. En relación con la estructura rígida de las manzanas de la Quinta Avenida, la posición del centro del ómnibus será ahora la Calle Cuarenta y dos, la Calle Sesenta y nueve, etc. Si la posición del centro del ómnibus está en la Calle Cuarenta y dos la del conductor estará en la Calle Cuarenta y cuatro. y la del últi-

mo pasajero estará en la Calle Cuarenta, puesto que el ómnibus tiene cuatro cuabras de largo. Todo esto es simple y significa que podemos determinar las coordenadas de cualquier observador que está en el ómnibus, en relación con el sistema de la Quinta Avenida, en cualquier momento, si conocemos la coordenada del observador en relación al ómnibus, la velocidad de éste, y si sabemos desde dónde y cuándo ha partido. En lenguaje científico tenemos, de acuerdo con la mecánica clásica: la coordenada del sistema de la Quinta Avenida es igual a la velocidad del ómnibus, multiplicada por el tiempo de viaje más la coordenada del sistema del ómnibus.

Supongamos que ocurre algún hecho en el ómnibus, como por ejemplo el encendido de una señal luminosa. Para describir este hecho, debemos saber cuándo y cómo ha ocurrido. Necesitamos emplear para su descripción (los números, uno de los cuales denota la coordenada del espacio y el otro la coordenada del tiempo. Mientras que la coordenada del espacio será diferente para el observador que está en la Quinta Avenida y para el que está en el ómnibus, el otro número, que indica el tiempo, de acuerdo con la mecánica clásica, será el mismo para todos los observadores, puesto que el tiempo es absoluto y un reloj no modifica su ritmo mientras está en movimiento. Así, pues, conociendo las coordenadas del espacio y el tiempo de un hecho dentro de un sistema, y la velocidad relativa de estos dos sistemas, podemos hallar las coordenadas del espacio y del tiempo en el otro sistema. La regla para la coordenada del espacio ya fue expuesta antes; la regla para la coordenada del tiempo es muy simple: las coordenadas del tiempo son las mismas. Así, pues, dos sistemas que están en movimiento uniforme relativo el uno con respecto al otro, dos sistemas en los cuales las leyes de la física son las mismas, están vinculados entre sí, en la física clásica, por lo que llamamos una transformación de Galileo, una regla que nos permite hallar las coordenadas de hechos que se producen en un sistema si se las conoce en el otro.

Lo que la teoría de la relatividad sostiene, o más bien lo que deduce de sus dos principios, es que la transformación de Galileo no es válida. Podemos expresar esto de una manera más adecuada, diciendo

que es prácticamente válido si las velocidades relativas son muy pequeñas respecto de la velocidad de la luz. Fracasa por completo si las velocidades relativas se acercan a la de la luz. De modo, pues, que podemos emplear la mecánica clásica y la transformación de Galileo mientras hablamos de automóviles, aviones supersónicos, incluso cohetes; mientras, en realidad, estamos tratando los fenómenos de la mecánica clásica. Pero, por ejemplo, en un campo que se amplía con rapidez, como lo es la física atómica moderna, donde la naturaleza o la técnica frecuentemente nos ofrecen velocidades que no son pequeñas comparadas con la de la luz, la transformación de Galileo fracasa y debe ser remplazada por la transformación de Lorentz. Con ésta se cumple de modo satisfactorio lo que resulta imposible con la transformación de Galileo para esas velocidades. Nos ofrece un medio para determinar las coordenadas del espacio y el tiempo de fenómenos de un sistema si se conoce las del otro, y si la velocidad relativa de estos dos sistemas es conocida. ¿Cuál es la diferencia esencial entre la transformación de Galileo y la de Lorentz? Mientras que en la transformación de Galileo la coordenada del tiempo de un fenómeno es la misma para todos los sistemas, no lo es en la transformación de Lorentz. El ritmo del reloj varía de acuerdo con la relatividad del tiempo, y dos hechos simultáneos en un sistema no son simultáneos en otro. No sería correcto decir que la transformación de Lorentz se adapta bien a las grandes velocidades y la de Galileo a las pequeñas. Más exacto sería decir que la transformación de Lorentz es válida siempre. Para las velocidades pequeñas no hay diferencias prácticas entre la transformación de Galileo y la de Lorentz, pero estas diferencias se vuelven importantes y accesibles a la verificación experimental cuando las velocidades se aproximan a la de la luz.

No vamos a transcribir la transformación de Lorentz, aunque un conocimiento de álgebra bastaría para interpretarla. Es suficiente decir que esta transformación vincula de una nueva manera las coordenadas del espacio y el tiempo de un fenómeno de un sistema con las coordenadas del mismo fenómeno producido en otro, y que esta vinculación puede ser deducida de las dos hipótesis fundamentales que Einstein

formuló en su famoso trabajo. Esta transformación nos traslada de un sistema al otro, si ambos se desplazan en un movimiento uniforme el uno relativo al otro. Puesto que las leyes de la naturaleza en esos dos sistemas son las mismas, podemos decir que es la transformación de Lorentz y no la de Galileo la que deja inmutables las leyes de la física.

Por lo tanto, ¡tuvo lugar una revolución; un nuevo y poderoso principio había nacido, una estructura teórica general a la cual debían ajustarse todas las leyes de la naturaleza. Si se formula cualquier nueva ley, preguntamos: ¿satisface esta ley al principio de la teoría de la relatividad? Es decir, ¿es la ley la misma para todos los sistemas en movimiento uniforme relativo? O, matemáticamente, ¿permanece esta ley inmutable bajo la transformación de Lorentz (que reconoce el carácter relativo, no sólo del espacio, sino también del tiempo)? Si aplicamos este criterio a las leyes de la teoría de Maxwell, como lo hizo Einstein en su artículo, vemos que la teoría de Maxwell que gobierna los fenómenos de las ondas electromagnéticas es admisible en virtud de que satisface el principio de la invariancia; es decir, debido a que la estructura de las ecuaciones de Maxwell no varía bajo la transformación de Lorentz.

¿Qué ocurre con la mecánica de Newton? No, no es invariante bajo la transformación de Lorentz; lo es sólo bajo la transformación de Galileo. Así, pues, hay que crear una nueva mecánica: una mecánica que pueda aplicarse a las partículas que se desplazan a grandes velocidades, y que sea invariante con respecto a la transformación de Lorentz. Esta nueva Física que satisface el nuevo principio de la teoría de la relatividad, el principio de la invariancia con respecto a la transformación de Lorentz, fue creada por Einstein en su famoso trabajo publicado en 1905. Las dos ramas principales de la física, la teoría mecánica y la del campo quedaron vinculadas, no por la hipótesis de un éter, sino por el nuevo principio de la relatividad de Einstein, al cual debían satisfacer ambas; y así surge la mecánica clásica como una buena y útil aproximación a la nueva mecánica, cuando las velocidades son pequeñas comparadas con la de la luz.

Esta nueva estructura relativista se convirtió en una de las más importantes guías de la física moderna. La cosecha de las ideas de Einstein en este siglo fue una de las más ricas que hombre alguno haya aportado jamás a la ciencia. A partir de la teoría de la relatividad tal como fue formulada en 1905, se abrió un nuevo camino de progreso, y gran parte de éste fue recorrido posteriormente bajo la dirección de Einstein. Se ha tornado inconcebible la retirada hacia las antiguas posiciones de la física clásica. Nunca podrá exagerarse la gravitación de la teoría de la relatividad sobre todo el desarrollo de la física moderna; pero esa gravitación no se limita a la física moderna solamente, porque la teoría de la relatividad ha llegado a influir sobre toda nuestra vida. Ya ha ejercido su influencia sobre nuestras concepciones filosóficas acerca del espacio y el tiempo, y sin duda gravitará en el desarrollo tecnológico del futuro.

Un principio en vez de dos

¿Por qué nos hemos referido a la velocidad de luz o a una un poco menor, pero nunca a una velocidad mayor que aquella? La razón consiste en que, de acuerdo con la teoría de la relatividad, no puede haber una velocidad mayor que la de la luz. Según la mecánica clásica, si una partícula se desplaza a cierta velocidad en el ómnibus de la Quinta Avenida, entonces su velocidad relativa al observador externo es igual a su velocidad en relación con el ómnibus, más la velocidad de este último. De esta manera, toda velocidad puede ser incrementada. Pero, como lo hemos visto, la ley clásica de la suma de las velocidades es incompatible con las hipótesis sobre las cuales se apoya la teoría de la relatividad. En verdad, si la luz avanza con la velocidad c , en relación con el ómnibus, entonces su velocidad relativa con respecto al exterior -es decir, el observador de la Quinta Avenida- seguirá siendo la constante c , sin que importe cuán lenta o rápidamente avance el ómnibus. La ley clásica de la suma de las velocidades debe ser cambiada, y este

cambio puede deducirse de la transformación de Lorentz, que reemplaza a la transformación clásica de Galileo.

Existe una deducción importante, obtenida de la teoría de la relatividad, que Einstein menciona en su primera comunicación, y a la cual vuelve luego en un breve trabajo aparecido en el volumen siguiente de *Annalen der Physik*. Su título es: "¿Depende la inercia de un cuerpo de su energía?" Si dijera que las ideas expresadas en este trabajo iban a conmover al mundo, no incurriría en exageración, pues aquí encontramos por primera vez una formulación teórica de un posible nuevo fenómeno que ha abierto ilimitadas perspectivas en el campo de la ciencia y la tecnología de la guerra y la paz. Este breve trabajo sostiene que el uso de la energía atómica es, en principio, posible. Cuarenta años más tarde, el trabajo de muchos hombres de ciencia demostró que el uso de la energía atómica es practicable, como quedó demostrado en forma tan clara como pueden hacerlo las fotografías de la explosión en el desierto de Nuevo México y la devastación de Hiroshima. Es en verdad una ironía que las semillas de la futura utilización de la energía atómica hayan sido sembradas por el más pacífico de los hombres, por un hombre solitario que aborrece la violencia y que siente desprecio por la fuerza bruta.

Einstein demostró que el uso de la energía atómica es posible en teoría, pero nadie, ni siquiera él mismo, sabía si algún día resultaría posible en la práctica. Este conocimiento sólo fue adquirido en fecha reciente, y podría imaginarse igualmente la respuesta de que el uso de la energía atómica era sólo posible en teoría. En tal caso el nombre de Einstein no habría estado unido a la bomba atómica, y en muy pequeña escala a la tecnología. Sin embargo, su nombre hubiera tenido la misma importancia en la historia de nuestra civilización. La creación de la teoría de la relatividad representa el nacimiento de la física moderna; determinó un cambio profundo en nuestras ideas filosóficas básicas y una revisión total de los fundamentos sobre los cuales se levanta la ciencia moderna.

El final del breve trabajo de Einstein contiene las siguientes líneas: "La masa de un cuerpo es la medida de su energía. Si su energía

varía en L, entonces su masa varía en $L/9$. 10 20, si la energía es medida en ergios y la masa en gramos.

"¿No será posible que, tratándose de cuerpos con un contenido de energía cambiante en alto grado (por ejemplo, las sales de radium pueda tener éxito una prueba de esa teoría?"

En estas palabras no solamente se extrae una importante conclusión de la teoría de la relatividad, sino que también se predice la posibilidad de su verificación.

¿Puede deducirse tal conclusión de los dos principios abstractos en los que se basa esta teoría? Sí, porque ningún principio nuevo entra en el análisis.

Dividiremos la tarea de explicar esta deducción fundamental en dos partes: en primer lugar, queremos exponer todo lo que implica; luego examinaremos su relación con los principios de la teoría de la relatividad.

El físico clásico del siglo XIX creía en dos leyes de conservación: (1) la ley de conservación de la masa; (2) la ley de conservación de la energía. La ley de conservación de la masa sostiene que se puede calentar un cuerpo, cambiarlo de forma, modificarlo químicamente, pero la masa total seguirá siendo la misma. La energía, por otra parte, es algo que puede realizar un trabajo pero que carece de masa. En una máquina de vapor, por ejemplo, el calor se transforma en trabajo, pero en todo esto no participa la masa, porque, de acuerdo con la física clásica, el calor no tiene ni peso ni masa. El sol envía hacia el espacio sus radiaciones, de las cuales una pequeña fracción llega a nuestra tierra, transportando consigo la energía de la radiación, que se transforma en calor en la energía química almacenada por las plantas. Pero esa radiación no transporta masa. Por lo tanto, tenemos, una junto a la otra, dos cantidades diferentes: la masa y la energía. Aparecen ante el físico clásico como algo distinto, tanto cualitativa como cuantitativamente. La masa se mide en gramos, y la energía, al igual que el trabajo, en ergios. (Un ergio es igual al trabajo realizado por la fuerza de una dina a lo largo de un centímetro. Una dina es la fuerza que imprime a un gramo de aceleración de un centímetro por segundo. Todo esto

constituye una definición técnica. Es suficiente saber que un ergio es una pequeña unidad de trabajo y energía). Si se calienta un vaso de agua, su temperatura y su cantidad de calor varían. Varía la masa de este vaso de agua? El físico clásico sostendría que no.

Pero la teoría de la relatividad conduce a una respuesta totalmente diferente. Deduce que la energía no es imponderable, sino que tiene una masa definida. Si varía la cantidad de energía, ocurre lo mismo con su masa. La energía tiene masa y ésta tiene energía. No hay dos principios de conservación. Existe sólo uno, y éste es el principio de la conservación de la masa-energía. La masa y la energía son tan diferentes como lo son los centavos y los dólares, pero así como se pueden convertir los centavos en dólares y viceversa, así, por lo menos en principio, se puede transformar la masa en energía y la energía en masa. La teoría de la relatividad permite determinar la proporción de este cambio. El hecho de que esta proporción sea extremadamente baja es lo que mantuvo oculto ante la ciencia el principio único de la conservación e hizo que la energía pareciera imponderable, perpetuando así el empleo de dos principios en vez de uno.

El cambio de masa anticipado por la teoría de la relatividad cuando se calienta un vaso de agua es en verdad tan pequeño, que no se lo podría percibir ni aun pesándolo en la balanza más sensible. Supongamos que se agregan a un vaso de agua o a cualquier otro sistema unos ergios de energía. ¿Cuántos gramos pesa esa energía, o en cuantos gramos se ha incrementado la masa original? En verdad, se trata de una cantidad muy pequeña. Es menor aún que si se agregara un dracma devaluado a la cuenta bancaria de un millonario en dólares. La energía representa un circulante extremadamente desvalorizado en comparación con la masa expresada en gramos. Pero no deja de ser un circulante, tiene su fluidez, y puede ser utilizado para el trabajo. La masa está almacenada en un circulante valiosísimo, que sólo ahora estamos aprendiendo a utilizar, mediante la transformación de sus colosales y otrora inaccesibles reservas en el circulante de la energía, fluido pero muy devaluado. Así, pues, la tasa del cambio entre el signo muy valio-

so de la masa y el devaluado de la energía, está dada por una cifra muy grande: ¡un gramo es igual a 00.000.000.000.000.000.000 de ergios!

Medido en ergios, un gramo equivale a la velocidad de la luz elevada al cuadro, si esta velocidad está expresada en centímetros por segundo. (Expresada de esta manera, la velocidad de la luz equivale a 30.000.000.000 de centímetros por segundo.)

De este modo, la masa de la energía, en gramos; se obtiene dividiendo esta energía en ergios por la cifra colosal que hemos mencionado. Para dar un ejemplo: la cantidad de calor necesaria para convertir totalmente un millar de toneladas de agua en vapor no llegaría a pesar un trigésimo de gramo. Lo insignificante de esta masa de la energía ha sido la razón por la cual durante tanto tiempo se la consideró imponderable.

En resumen: la teoría de la relatividad rechaza la distinción entre masa y energía. Cada unidad de masa representa una enorme reserva de energía, y cada unidad de energía posee una masa muy pequeña. Los dos principios de conservación, el de la masa y el de la energía, fueron combinados por la teoría de la relatividad en uno solo, que podemos llamar el principio de conservación de la masa o de la energía. Se establece la proporción del intercambio entre estas dos cantidades y los dos conceptos, el de masa y el de energía, quedan unificados. Constituyen dos términos para la misma realidad básica.

¿Cómo surge la relación entre masa y energía de los principios de la teoría de la relatividad? Aunque no podemos deducir aquí este resultado, ya hemos cubierto un campo lo bastante amplio como para que la gran deducción de Einstein se torne plausible.

Las bases de la mecánica clásica están en la ley del movimiento de Newton. Para cambiar una velocidad, para producir una aceleración, se necesita una fuerza. Por otra parte, la masa, como lo hemos dicho ya, es considerada por la mecánica clásica como algo constante e inmutable. Si se quiere incrementar la velocidad de una masa dada en un metro por segundo, es preciso hacer actuar una fuerza específica, y no importa en absoluto que esa velocidad sea cero o que se aproxime a la de la luz. No es la velocidad lo que interesa, sino la aceleración.

Cuanto mayor es la masa, mayor es la inercia, o la resistencia del cuerpo a la aceleración. Esto es tan sencillo y familiar como el hecho de que resulte más difícil imprimir una aceleración a una piedra grande que a una pequeña. De acuerdo con la física clásica, la inercia (es decir, la masa) no varía con la velocidad. Es exactamente tan fácil, o tan difícil, incrementar la velocidad en un metro por segundo cuando el cuerpo se desplaza con la rapidez de la luz, como lo es cuando ese mismo cuerpo está en reposo. Evidentemente que esto no puede ser así de acuerdo con la teoría de la relatividad, que no admite velocidades mayores que la de la luz. ¡Pero entonces, para explicar la imposibilidad de una aceleración ilimitada, debemos deducir que la masa aumenta con la velocidad! En verdad, si la velocidad es muy próxima a la de la luz, la masa inercial debe ser tan grande, que no haya fuerza capaz de lograr que la velocidad sea mayor que la de la luz. ¡De acuerdo con la teoría de la realidad, la masa debe tornarse infinitamente grande a medida que la velocidad del cuerpo se va aproximando a la de la luz! ¿De qué otra manera puede interpretarse el hecho de que ningún cuerpo puede ser acelerado hasta alcanzar una velocidad mayor que la de la luz?

De acuerdo con la física clásica, la masa es invariable y no depende de la velocidad; pero es variable y depende de la velocidad según la teoría de la relatividad. No sólo conocemos la ley cualitativa, sino también la cuantitativa de ese cambio.

De acuerdo con la física clásica, un cuerpo en movimiento posee energía cinética precisamente porque se mueve. Esta energía, como toda energía, es imponderable; o, para decirlo de otra manera: la masa de un cuerpo en movimiento no varía.

Pero en la teoría de la relatividad la masa debe variar con la velocidad, o en otras palabras, la energía cinética debe poseer una masa, aunque sea pequeña. Y la relación del cambio entre la masa y la energía cinética es exactamente la misma que ya hemos citado antes: la proporción que existe entre la moneda depreciada de la energía y la moneda fuerte de la masa. Einstein también demostró que la relación

fundamental masa-energía es cálida no sólo para la energía cinética sino para toda clase de energía.

Vemos cuán lejos se extienden las ramificaciones de la teoría de la relatividad. Desde que iniciamos nuestra exposición hemos cubierto un amplio campo, y ahora podemos observar una nueva física que surge con las deducciones obtenidas a partir de sus principios básicos. Los cimientos de esta nueva física fueron establecidos por Einstein con gran claridad, en dos artículos, y en menos páginas que las que empleamos aquí para indicar algunos de los resultados.

"¿Una paradoja? ¡Una paradoja!
¡Una paradoja ingeniosísima!"

Desde que Einstein cumplió los quince o dieciséis años (me lo contaba a menudo) le intrigaba un problema: ¿qué ocurriría si un hombre tratara de asir un rayo luminoso? Durante años estuvo meditando sobre este mismo problema. Su solución condujo a la teoría de la relatividad. Podemos ver en este ejemplo aislado algunos rasgos del genio de Einstein. Primero, y sobre todo, su capacidad para lo maravilloso. Segundo, el poder pensar durante años acerca del mismo problema hasta que al fin la oscuridad se transforma en la luz del entendimiento. Y tercero, la capacidad de formular experimentos simples, ideales, que jamás podrían ser llevados a la práctica, pero que, si se los analiza correctamente, clarifican y transforman nuestra comprensión del mundo circundante.

En verdad, en el caso del hombre que logra asir un rayo de luz y corre con éste, advertimos el gran problema que condujo a la teoría de la relatividad. Para ese hombre, en razón de que se desplaza uniformemente, todos los fenómenos han de ser los mismos que para el Hombre que permanece quieto; pero, por la otra parte, siempre permanece frente a la onda luminosa, y para él la luz está inmóvil. Algo parece oscilar, pero la onda no se extiende. La teoría de la relatividad y el rechazo de la transformación de Galileo es la respuesta a este enigma. Ningún cuerpo material puede moverse con tanta velocidad como la

luz. Para cualquier observador la velocidad de la luz seguirá siendo el valor constante c . Nadie puede llegar a cazar un rayo luminoso.

Puesto que ahora entendemos la importancia de la simultaneidad en la teoría de la relatividad, observemos más de cerca el concepto de los relojes que modifican su ritmo y consideremos otras conclusiones que pueden extraerse de esto. Volvemos al concepto del ómnibus que corre por la Quinta Avenida. Si en determinado momento del viaje el conductor encuentra que su reloj indica la misma hora que el reloj externo más próximo, descubrirá más tarde que su reloj difiere de los muchos que ve en su camino por la Quinta Avenida; el ritmo de su reloj es más lento, y cuanto mayor sea la velocidad, más lento será ese ritmo. El reloj en movimiento permanecería inmóvil si la velocidad del ómnibus fuera la de la luz. Pero recordemos: comparamos el ritmo de un reloj del ómnibus con el ritmo de muchos relojes de la Quinta Avenida.

El hecho de que esta conclusión pueda ser deducida de la teoría de la relatividad, y más específicamente de la transformación de Lorentz, pareció tan fantástico, que la gente empezó a tomarla en broma, convencida de que tal teoría debía ser un disparate si daba lugar a semejantes conclusiones. Estas objeciones fueron formuladas con frecuencia en la forma de la paradoja de los gemelos. Imaginemos que dos mellizos idénticos nacen en la Quinta Avenida, y que a uno se lo coloca en el ómnibus, mientras que el otro permanece en la calle. Ahora el ómnibus avanza a gran velocidad, y un reloj que se desplace con él tendrá un ritmo lento en comparación con los que se encuentran en la Quinta Avenida. Podemos imaginar que la Quinta Avenida sigue por las lejanías del espacio estelar, que uno de los gemelos inicia su viaje a una velocidad próxima a la de la luz, y que el viaje por el espacio es largo. Ahora consideramos el corazón de nuestro mellizo del ómnibus como si fuera un reloj, y suponemos que sus latidos siguen a un ritmo muy lento en comparación con todos los corazones humanos junto a los cuales pasa. En algún punto lejano el ómnibus se detiene y emprende su regreso a la tierra. En su viaje de retorno vuelve a ganar tiempo, porque el retardo de su ritmo depende solamente de su velocidad y no

del sentido del movimiento. (Suponemos que tanto en el alejamiento de la tierra como en la aproximación a ésta el movimiento es uniforme. La única no uniformidad ocurre cuando el ómnibus da la vuelta, pero la influencia de ese movimiento no uniforme puede suponerse tan pequeña como se quiera, en razón de que podemos ir tan lejos como se nos ocurra y ahorrar todo el tiempo que deseemos.) De esta manera, el mellizo regresa adonde está su hermano. Pero en virtud de la teoría de la relatividad, el que ha viajado está en la flor de la vida, tiene toda la dentadura y el cabello, mientras que el otro es un anciano con un pie en la tumba. Los dos mellizos idénticos tendrán aspectos muy diferentes de acuerdo con la teoría de la relatividad, porque lo que hemos dicho es una conclusión que surge de sus dos principios. ¿Cuál es la respuesta a la paradoja de los dos gemelos idénticos?

Ha sido arrojada repetidamente al rostro de la teoría de la relatividad para demostrar cuán absurdas son sus conclusiones. Pero en realidad no están en contradicción con la experiencia, sino tan sólo con nuestras nociones tradicionales del tiempo absoluto. No hemos estado nunca en condiciones de realizar semejante experimento, pero si pudiéramos hacerlo, la respuesta, según creo, sería precisamente la que predice la teoría de la relatividad.

Sin embargo, sería convincente contar con un experimento directo que demostrara que un reloj en movimiento cambia su ritmo. Hay una cantidad colosal de pruebas en favor de la teoría de la relatividad, pero son irás bien de un tipo indirecto. La verificación experimental directa no es fácil en razón de que, como ocurre siempre en la teoría de la relatividad, cualquier diferencia entre la mecánica clásica y dicha teoría puede notarse sólo cuando las velocidades se aproximan a la de la luz. Sin embargo, en 1938, mucho tiempo después de haber sido formulada la teoría de la relatividad, Ives realizó un interesante experimento, que demostraba directamente el cambio de ritmo con la velocidad. EL experimento se valía del átomo de hidrógeno, que puede ser considerado como un reloj natural cuyo ritmo es revelado por su línea espectral. El sutil experimento de Ives demostró no sólo que un átomo de hidrógeno en movimiento varía su ritmo; sino que, cosa mucho más

importante, esa variación es exactamente la anticipada por la teoría de la relatividad.

Como lo hemos visto, la revolución iniciada por la teoría de la relatividad modifica nuestros conceptos tradicionales del tiempo y la masa. Otro concepto que cambió en forma radical es el de longitud. Una vez más nos limitaremos a describir los resultados obtenidos.

Volvamos a nuestro ómnibus de la Quinta Avenida. Como ya lo hemos dicho, este ómnibus tiene una longitud de cuatro cuerdas mientras está en reposo ¿Pero qué longitud tiene cuando está en movimiento? Debemos desconfiar de nuestros prejuicios y cuidarnos de afirmar lo que parece evidente a primera vista. En vez de responder que, "por supuesto, tiene siempre cuatro cuerdas de largo", como lo haría el físico clásico, hemos de ser más cautos. Preguntemos, en cambio: "¿a qué se refiere usted cuando pregunta qué longitud tiene cuando está en movimiento?" Yo sugeriría la siguiente respuesta: Usted sabe que el ómnibus avanza a una velocidad que es, digamos, la mitad de la de la luz. Por consiguiente, se sitúa con un cronómetro y oprime el botón cuando la parte delantera del ómnibus pasa junto a usted. Vuelve a oprimirlo luego cuando pasa la parte trasera. De esta manera llega a saber cuánto tarda el ómnibus en pasar junto a usted. Multiplique este breve período por la velocidad del ómnibus, y obtendrá su longitud mientras está en movimiento. Se pueden concebir otros recursos, pero no se hallará ningún experimento razonable que no implique el empleo de un reloj. Pero el tiempo es relativo y los relojes varían su ritmo mientras están en movimiento. Por consiguiente, no resultaría sorprendente que el resultado de ese experimento demostrara que la longitud también es relativa. En verdad, en nuestro caso, en que el ómnibus avanza a la mitad de la velocidad de la luz, su Longitud se acortaría en un quince por ciento aproximadamente. Sus dimensiones se reducirían a cero en el sentirlo del movimiento, si la velocidad fuera la de la luz. La longitud, como el tiempo, es relativa.

He tratado de esbozar aquí los cambios revolucionarios provocados por los dos artículos de Einstein. ¿Cuál fue la gravitación de estas nuevas ideas. Al principio, muy pequeña, en la actualidad, quizás, los

resultados importantes obtienen un reconocimiento irás rápido, una nueva comunicación revolucionaria con frecuencia produce un diluvio de diversas contribuciones, escritas por autores que expresan esas ideas en forma más detallada y las desarrollan matemáticamente. Pero ese diluvio de publicaciones no se produjo inmediatamente después de la aparición de los artículos de Einstein. Comenzó unos cuatro años más tarde, intervalo prolongado para el reconocimiento científico. Sin embargo, sé que hubo físicos que leyeron con sumo cuidado el trabajo de Einstein en el ínterin, y que advirtieron en éste el nacimiento de una nueva ciencia. Mi amigo el profesor Loria me contó cómo el profesor Witkowski, de Cracovia (que fue un notabilísimo maestro) leyó el artículo de Einstein y exclamó ante Loria: "¡Ha nacido un nuevo Copérnico! Leo el trabajo de Einstein." En fecha posterior, cuando el profesor Loria se encontró con el profesor Born en una asamblea de físicos, le habló de Einstein y le preguntó si había leído su trabajo. Resultó que ni Born, ni ningún otro habían oído hablar de Einstein. Fueron a la biblioteca, retiraron el septuagésimo volumen de *Annalen der Physik* y empezaron a leer el artículo de Einstein. Inmediatamente Max Born reconoció su grandeza y también la necesidad de generalizaciones formales. Después, el trabajo del mismo Born sobre la teoría de la relatividad se convirtió en una de las más importantes entre las primeras contribuciones a este campo de la ciencia.

Pero sólo hacia 1908 ó 1909 fue atraída la atención de gran número de científicos por los resultados de Einstein. Uno de los factores que más contribuyeron a difundir la relatividad fue la conferencia de Minkowski sobre "Espacio y Tiempo", en 1908. Herman Minkowski era un gran matemático, a la sazón profesor en Gotinga. La famosa conferencia que dio en la octogésima reunión de la Asociación de Científicos y Doctores (*Naturforscher und Ärzte*), fue, según creo, su última conferencia, porque falleció prematuramente muy poco tiempo después. Las primeras palabras de la conferencia de Minkowski constituyeron una profética afirmación de la profunda influencia que las ideas de Einstein habrían de ejercer sobre el pensamiento moderno: "Señores: Las concepciones del tiempo y el espacio que quiero desarrollar ante ustedes

han crecido en el suelo de los experimentos físicos. Ahí reside su fuerza. Su tendencia es radical. A partir de ahora, el espacio en sí y el tiempo en sí se confundirán en una sombra, y solamente una unión de ambos conservará su independencia.”

El genio matemático de Minkowski dio alas ideas de Einstein una nueva forma matemática que reveló plenamente su belleza y simplicidad. A veces oímos que "el tiempo es una cuarta dimensión en la teoría de la relatividad", y nos impresiona el sonido místico de estas palabras. Pero no hay nada de místico en ellas. Los hechos que ocurren en el mundo deben ser descritos por cuatro cifras, tres de las cuales se refieren a posiciones y una al tiempo. Minkowski demostró que es mucho más conveniente no considerar sólo el espacio como ámbito de nuestros acontecimientos, sino el espacio-tiempo. La división de ese espacio-tiempo en espacio y tiempo depende del sistema de observación. Aquí no podemos extendernos más acerca de la obra matemática de Minkowski sobre la teoría de la relatividad, porque no es posible describir un formalismo matemático sin el empleo de los símbolos matemáticos.

Entre 1908 y 1918 la teoría de la relatividad pasó a ser conocida entre los físicos y matemáticos. Muchos de ellos advirtieron que había ocurrido una revolución. Pero tanto el entusiasmo como las dudas se mantuvieron reprimidos. Sólo posteriormente fueron proclamadas ambas reacciones en forma tan ruidosa, como jamás se había dado el caso en la historia de la ciencia.

CAPITULO IV

LA SEGUNDA REVOLUCION EINSTENIANA

El ascensor que cae

La primera revolución einsteniana se había completado. Quizás el hombre menos satisfecho con los resultados fue el mismo Einstein. Pronto advirtió que la revolución no había ido bastante lejos, que las dificultades profundas seguían estando presentes en la física.

¡Muchos años más tarde, en Princeton, le dije una vez a Einstein que, en mi opinión, la teoría especial de la relatividad habría sido formulada de todos modos, con muy poca demora, aun cuando no lo hubiera hecho él, en razón de que el tiempo ya estaba maduro para ello. Einstein respondió que esto era cierto, pero no en lo que respecta a la teoría general de la relatividad; que dudaba que se la hubiera conocido aun ahora. Creo que esta respuesta caracteriza bien el papel de Einstein en la segunda revolución.

Corno anticipación de los hechos, vamos a introducir dos términos que se emplean actualmente en la discusión de la relatividad: especial (o restringida) y general. Utilizaremos la designación de teoría especial de la relatividad cuando nos refiramos a las ideas descritas en el capítulo precedente, y relatividad general cuando hablemos del desarrollo posterior, que. ;abordaremos ahora.

La teoría especial de la relatividad estaba en el ambiente. Las contradicciones que suprimía eran conocidas por los físicos, porque las llagas que presentaba el cuerpo de la física resultaban visibles para muchos; pero no era éste el caso de la teoría general de la relatividad. Einstein fue el único hombre que aún veía contradicciones y dificultades, y que trabajaba por su solución. En el caso de la teoría especial de la relatividad, era conocida la enfermedad; solamente se desconocía la fórmula para curarla. La teoría general de la relatividad se parecía más

a un remedio para una grave enfermedad de la cual nadie tenía noción, excepto Einstein y, hasta cierto punto, un filósofo vienés, Ernst Mach. Incluso Planck, el gran Planck, que inició el desarrollo de la teoría de los cuantos, le dijo a Einstein: "Todo está ahora tan próximo a la solución; ¿por qué se preocupa por estos otros problemas?" Sin embargo Einstein lo hizo, y lo llevó a cabo por sí mismo. Ocho años separan la teoría especial de la general; ocho años de meditaciones constantes, que al cabo dieron su fruto en la nueva solución del gran problema de la gravitación.

Tengo a la vista un trabajo que Einstein escribió en 1911, siendo profesor en Praga. Apareció en *Annalen der Physik* bajo el título de "La influencia de la gravitación sobre la propagación de la luz". Se trata de un artículo interesantísimo porque, más que ningún otro, revela la senda de las meditaciones de Einstein. En parte es erróneo: contiene verdades a medias, conjeturas, una dramática vislumbre de que la verdad real no se encuentra muy distante, pero que, con todo, es muy diferente. Muestra el primer centelleo de una luz que irrumpe en la oscuridad. Refleja también la pasión de Einstein por los experimentos idealizados y su capacidad infantil de maravillarse ante cosas simples; -tan simples y familiares, que pasan tan inadvertidas ante los demás, como el cartero de uno de los cuentos del Padre Brown.

Desde Galileo, los físicos han sabido que todos los cuerpos caen con la misma aceleración. Todos los cuerpos soltados desde la misma altura llegarán al suelo después de transcurrido el mismo intervalo de tiempo, si podemos no tener en cuenta la resistencia del aire. Galileo demostró cómo se podía deducir esta ley de sencillos experimentos idealizados, y cómo los experimentos del tipo de los realizados con piedras que caen o con péndulos confirman esa ley. Con la excepción de Einstein, nadie en nuestro siglo tuvo dudas acerca de esta ley. La experiencia había demostrado que, hasta donde nos es posible determinarlo, la ley es rigurosamente válida. No existe la menor diferencia entre la aceleración de diversos cuerpos que caen en el mismo sitio en nuestra tierra.

La educación destruye en nosotros la capacidad para lo extraordinario. Sólo el genio puede conservarla intacta. Durante los últimos trescientos años del desarrollo de la ciencia, Einstein fue el primero que vio en esta igualdad de las aceleraciones la ausencia de una importante clave inadvertida. Podemos imaginar un mundo en que esa ley no es válida; un mundo en que los elefantes caen con tanta lentitud que casi parecen flotar por el aire mientras que los niños caen con una aceleración peligrosamente grande hacia la tierra. Pero el campo de gravitación de nuestra tierra obliga a los niños y a los elefantes a caer con la misma aceleración. ¿Cuál es la significación de esta importante clave? ¿En la estructura de la mecánica clásica aparece como un mero accidente!

Einstein me contó cómo, desde su niñez, había cavilado acerca del hombre que perseguía un rayo luminoso, y también sobre el que se hallaba encerrado en un ascensor que cae. La imagen del que corría tras un rayo de luz condujo a la teoría especial de la relatividad; la del que se hallaba en el ascensor, a la teoría general de la relatividad. En el artículo de Einstein que acabamos de citar hallamos implícitamente la imagen de una persona que está en un ascensor que cae. Debemos discutir esta imagen.

Imaginemos un rascacielos. Un ascensor es elevado hasta lo alto, y luego se lo suelta de manera que cae libremente, con un movimiento uniformemente acelerado. Los observadores que están adentro no se atemorizan por el choque inminente contra el piso, sino que prosiguen con valentía sus investigaciones. Para perfeccionar nuestro cuadro, imaginemos que el ascensor está lecho de cristal, de modo que los observadores que se encuentran fuera de él pueden mirar hacia el interior, así como comparar sus anotaciones con las que realizan los que están adentro. Existe una similitud entre la técnica de razonamiento que hemos empleado antes y la de ahora. Otra vez tenemos dos sistemas -el ascensor y la tierra-, pero hay también una diferencia crucial. El movimiento relativo de los dos sistemas ya no es uniforme, sino que ahora es acelerado. Con todo, la técnica de nuestra explicación seguirá siendo similar. Una vez más formularemos las preguntas de los obser-

vadores que están dentro y fuera del ascensor, y una vez más el razonamiento simple nos conducirá a conclusiones de largo alcance.

La ascensorista utiliza su neceser y su lápiz de labios, y en seguida los suelta. Preguntamos: ¿qué ocurre con el lápiz de labios y el neceser? Esta no es una pregunta trivial. La respuesta es ésta: si se mira desde adentro del ascensor, ambos objetos permanecen en reposo ahí donde ella los ha soltado. ¿Por qué no habría de ser así? Todos los objetos caen con la misma aceleración en relación con la tierra. Así, pues, están inmóviles en relación los unos con los otros. Los objetos soltados en el ascensor que cae libremente no caen a su piso ni se levantan hacia el techo. Permanecen donde estaban cuando se los soltó. ¿Qué ocurre si la ascensorista empuja su neceser? Este se moverá entonces con un movimiento uniforme en el sentido en el cual fue empujado, hasta que un choque con la pared del ascensor lo detenga. Después de algunos experimentos, el observador que está dentro del ascensor ha de formular la siguiente ley: todos los cuerpos de mi sistema permanecen en reposo o se mueven uniformemente hasta ser perturbados por fuerzas, o por las paredes de mi sistema, o por el próximo fin de nuestro mundo, es decir, el inminente choque de nuestro ascensor con el piso de la estructura. Esto es casi la ley newtoniana de la inercia, que hemos aprendido en la escuela. He dicho "casi" ya que en las escuelas no hemos hablado ni de restricciones de paredes, ni del fin del mundo.

Debemos detenernos ahora para insistir en la importancia de nuestra imagen.

De acuerdo con la ley de la inercia de Newton (la primera de sus tres famosas leyes) todos los cuerpos se encuentran en reposo o en movimiento uniforme, mientras no los perturba la acción de fuerzas externas. ¿Es verdadera esta ley? Si se suelta un cuerpo hacia la tierra, no permanecerá en reposo, sino que caerá. Ninguna madre tratará de verificar la ley de inercia soltando a su niño desde la ventana. La mecánica newtoniana nos explica que la ley de la inercia no es válida debido a que existe una fuerza en nuestro sistema: la de la gravitación. Para eludir los efectos de esta fuerza, uno puede empujar unas esferas

sobre un plano horizontal; por ejemplo, en una tabla lisa. AL cabo de algún tiempo, estas esferas dejarán de moverse. La mecánica newtoniana explica que no se desplazaron uniformemente porque hubo fricción; para verificar la ley de inercia, también es necesario eliminar la fricción. Pero ahora se nos presenta una dificultad mayor aún. Supongamos que realizamos nuestros experimentos en un tiovivo. Ahí todas las partículas han de ser despedidas hacia afuera, alejándose de su centro. Por lo tanto, las leyes newtonianas de la mecánica no son válidas en un tiovivo, porque el observador verá ahí que las partículas no permanecen en reposo, sino que tratan de alejarse todo lo posible desde el centro. Pero si la ley de la inercia no es válida en un tiovivo, tampoco lo es en nuestra tierra, que también tiene un movimiento de rotación.

Creo que resulta justificado que todo esto nos deje perplejos y que formulemos al mecanicista newtoniano una pregunta simple:

¿Donde está por Dios, su sistema en el cual la inercia es válida?

Si es honesto, responderá:

-No lo sé; tengo que buscarlo. La tierra es a veces una buena aproximación a ese sistema, y otras veces no, Depende de cuál sea el problema y del grado de precisión de los experimentos. 'Lo único que sé es que si usted llega a encontrar un solo sistema bueno dispondrá entonces de una cantidad infinita de éstos, porque también será bueno todo sistema que se desplace en movimiento uniforme relativo con respecto al primero.

Nuestra exposición ha revelado un punto desastrosamente débil de la doctrina de la mecánica clásica. Conocemos las leyes, pero no el sistema al cual se refieren. Puesto que el recurso habitual para eludir una dificultad es la invención de un nuevo nombre, designamos con el nombre de sistema inercial al sistema en el cual son válidas las leyes de la mecánica; pero no podemos decir que "éste o aquél sea un sistema inercial." Sólo sabemos teóricamente qué es un sistema inercial; es aquel en el que son válidas las leyes de la mecánica. Pero no sabemos si tales sistemas existen, o dónde se encuentran.

Hubo un tiempo en que era de mal gusto criticar a Newton: casi constituía un crimen. Incluso en la segunda mitad del siglo XIX se necesitaba una gran independencia de espíritu para considerar críticamente la estructura de Newton, magnífica pero en cierto modo superada. El hombre que lo hizo por primera vez fue el filósofo vienés Ernst Mach. Einstein sintió la influencia de Mach, aunque su propia crítica fue incomparablemente más aguda. La ironía está en que cuando Einstein desembarazó a la física de estas dificultades, Mach ya era demasiado viejo como para entender la importancia del trabajo de aquél.

Retornamos a nuestros observadores del ascensor que cae. Como lo señaló Einstein, tenemos aquí un modelo de un sistema, casi inercial. Es inercial, pero no inmóvil. Su carácter inercial está restringido en el espacio. El sistema no es totalmente inercial ya que tarde o temprano el lápiz de la operadora, si recibe un impulso, chocará con la pared. Construir un ascensor más y más grande no constituye una solución, porque sabemos que todos los cuerpos caen con la misma aceleración, sólo si están en el mismo punto del espacio o en la inmediata vecindad de un punto. Así, pues, nuestro ascensor no debe ser excesivamente grande. Por consiguiente, nuestro sistema inercial está, como es natural, restringido en el tiempo, porque el mundo del observador que está en el interior llegará a su fin a causa de la inevitable catástrofe del choque. A un sistema de esta clase, como el que representa el ascensor, lo llamamos un sistema casi inercial. Por lo tanto, podemos decir que el experimento idealizado de Einstein indicaba la existencia de un sistema casi inercial.

Hasta ahora hemos hablado solamente de los observadores que están en el interior del ascensor. El observador externo tiene muy poco que decir que sea nuevo o interesante. Resulta evidente que su sistema no es inercial, en razón de la fuerza de la gravedad. Para él, el ascensor, la ascensorista, su lápiz de labios, su neceser, todo ello cae con la misma aceleración en el campo de gravitación de la tierra.

En el raciocinio de Einstein advertimos un molde familiar: conclusiones importantes que se obtienen de sencillos experimentos idealizados. Seguiremos el desarrollo de algunos de éstos.

Tenemos dos sistemas (el ascensor y la tierra con el pozo del ascensor) en movimiento acelerado relativo. Un sistema, el ascensor, es casi inercial. En tal sistema, las leyes de la mecánica son casi rigurosamente válidas; no existe ahí la gravitación, porque ha sido eliminado por el movimiento libre del ascensor. (Pero el observador que está en el exterior dirá que su sistema no es inercial en razón del campo gravitacional en el que todos los cuerpos caen con la misma aceleración.) Al mirar a través del piso transparente de su ascensor, sus ocupantes verán que un cuerpo inmenso se precipita hacia ellos. Como no saben nada sobre fuerzas de gravitación y como aceptan la validez de la mecánica de Newton, verán el movimiento acelerado de ese cuerpo, y con horror dirán que alguna fuerza constante lo empuja hacia ellos a fin de destruir su mundo. Así, pues, estos observadores, en un espacio y un tiempo limitados, pueden describir en forma coherente sus observaciones, empleando la mecánica de Newton y prescindiendo de que exista un campo de gravitación.

Anteriormente, al discutir la teoría especial de la relatividad, hemos visto que era posible una descripción coherente de fenómenos que ocurren en dos sistemas, si estos dos sistemas se hallaban en movimiento uniforme relativo. La transición de un sistema al otro está gobernada por la transformación de Lorentz. Pero ahora teníamos dos sistemas que, el uno con respecto al otro, se desplazan en un movimiento acelerado relativo. Cualquier transición de un sistema hacia el otro trae aparejada la aparición del campo gravitacional en uno de ellos y su desaparición en el otro. Por lo tanto, si queremos ampliar nuestras consideraciones con la inclusión de sistemas cuyo movimiento relativo no es uniforme, debemos tener en cuenta el importantísimo fenómeno de la gravitación. Este es el eslabón que une los sistemas en movimiento no uniforme. ¡El campo gravitacional puede ser eliminado o creado (por lo menos localmente) por medio de la elección de un adecuado sistema de referencia! Esto es cierto sólo porque en un campo gravitacional todos los cuerpos tienen la misma aceleración en un punto dado. Sin este simple indicio, ignorado durante trescientos años, todo lo dicho hasta ahora hubiera carecido de sentido, y habría sido

imposible la aparición de la teoría general de la relatividad, tal como la conocemos. Nuestras simples consideraciones nos muestran que esta clave olvidada no es accidental sino fundamental, cuando se la comprende correctamente. En verdad, nos conduce hacia la teoría general de la relatividad.

Nuestra argumentación fue sencilla, y no se requirieron las matemáticas. Pero incluso estos argumentos cualitativos nos conducirán a una nueva conclusión, que tanto puede ser confirmada como rechazada por la experimentación.

Antes, al discutir la teoría especial de la relatividad, obtuvimos una conclusión importantísima; hallamos la conexión entre masa y energía. Para valernos de un clisé, este resultado, condujo al más importante de los descubrimientos desde el hallazgo del fuego. Ahora, partiendo de nuestro ejemplo del ascensor que cae, deduciremos una conclusión que desempeñó un papel importantísimo en el sentido de lograr que la gente del mundo entero tuviera noción de la teoría de la relatividad y su creador.

Imaginemos dos agujeritos practicados en paredes opuestas de nuestro ascensor, exactamente a la misma altura. En uno de estos agujeros colocamos una linterna, y, apagándola y encendiéndola, enviamos señales luminosas hacia la pared opuesta de ese ascensor. Es evidente que, debido a que el ascensor que cae libremente es un sistema casi inercial, la luz en su interior se propagará en línea recta, a una velocidad constante, y después de un brevísimo intervalo llegará al agujero perforado en la pared opuesta. Este razonamiento es convincente. Todo lo que hemos hecho fue aplicar las leyes de la propagación de la luz, aceptando que son válidas en un sistema inercial. ¿Pero qué ocurre con el observador que está fuera, en tierra, para el cual el campo gravitacional existe? A través de las paredes de vidrio verá la señal luminosa que sale de una pared y llega hasta la opuesta. Pero durante el breve intervalo de tiempo imaginemos todo esto como si fuera una película filmada con cámara lenta, mientras la señal luminosa avanza hacia la segunda pared, el ascensor entero va bajando para el observador situado afuera. Esto es válido incluso si el ascensor inicia su viaje descen-

dente exactamente en el momento en que es enviada la señal luminosa. Incluso si la velocidad inicial del ascensor es cero, su aceleración no es cero, y el ascensor descenderá ligeramente mientras el rayo luminoso completa su recorrido hasta la pared opuesta. La luz aparecerá partiendo del ascensor a un nivel más bajo que el de su entrada.

¿Qué dirá este observador externo? Sin duda, dirá que el rayo de luz se curva en un campo gravitacional, que el campo gravitacional deforma la trayectoria recta de un rayo luminoso. De hecho, si el observador conoce la teoría especial de la relatividad, no se sentirá conmovido ni asombrado. Sabe, por la teoría especial de la relatividad, que la energía tiene masa y que toda masa tiene energía. El rayo luminoso en movimiento transporta energía, y por consiguiente es natural que se desvíe en el campo gravitacional, de la misma manera que observamos una curvatura en un proyectil enviado horizontalmente. Este efecto será muy pequeño, pero un rayo luminoso enviado desde una estrella y que pasa por el borde del sol, se desviará de una manera que quizás pueda ser percibida por la observación. Durante un eclipse solar podemos fotografiar estrellas que se encuentran en la vecindad del sol oscurecido. Esto significa que los rayos luminosos enviados por estas estrellas pasan cerca del borde del sol, -en su recorrido hacia la tierra. Comparemos una de aquellas fotografías con otra tomada del mismo fragmento del cielo cuando el sol está en una posición diferente. Las dos imágenes deben ser ligeramente diferentes en razón de que en un caso los rayos luminosos fueron desviados por el campo gravitatorio del sol, mientras que en el otro caso no ocurrió lo mismo. En su comunicación de 1911, Einstein calculó la desviación y predijo el fenómeno de la curvatura de la luz bajo la influencia del campo gravitacional. Este cálculo no fue exactamente correcto. El resultado numérico señalado por Einstein fue demasiado pequeño.

No tenía aún el pleno conocimiento de la teoría general de la relatividad. Había de adquirir ese conocimiento durante los cuatro años siguientes, al volver a sus cálculos y revisarlos. Pero la predicción de esta consecuencia ya apareció en su trabajo de 1911. Lo concluyó con estas notables palabras: "Sería deseable que los astrónomos se interesa-

ran urgentemente en este problema, aun cuando las consideraciones expuestas aquí parezcan muy poco fundadas e incluso aventuradas. Con prescindencia de cualquier teoría, hay que preguntarse si con nuestros medios presentes podemos descubrir alguna influencia del campo gravitatorio sobre la propagación de la luz.”

¿Qué resultó del desafío de Einstein a los astrónomos? Pasaron ocho años. En el ínterin Einstein se trasladó de Praga a Zurich, y luego de Zurich a Berlín. Allí lo sorprendió la primera guerra mundial y allí concluyó su trabajo sobre la teoría general de la relatividad.

El reconocimiento de la teoría de la relatividad se extendió con lentitud, de los físicos teóricos a los físicos experimentales, astrónomos, matemáticos y filósofos. Se consideró que era un tema muy difícil, que requería el conocimiento de métodos matemáticos que en aquel tiempo ni eran ampliamente conocidos ni estaban lo bastante desarrollados. En verdad la geometría de Riemann, y más tarde la llamada geometría no riemanniana, fueron desarrolladas a fondo en razón de la necesidad que tenían los físicos de recursos matemáticos adecuados. La teoría de la relatividad estimuló en alto grado el desarrollo de esta rama de las matemáticas, que en la actualidad se enseña en toda universidad importante, incluso en cursos para estudiantes no graduados.

Sólo después de la guerra pasó el conocimiento de la teoría general de la relatividad a Inglaterra y otros países aliados. En 1919 los ingleses despacharon dos expediciones, una a Sobral, en el Brasil, y la otra a Príncipe, en la costa de África. Cuando la luna eclipsó al sol y la noche interrumpió al día, los científicos fotografiaron las estrellas visibles en la vecindad del sol. Luego, durante meses, realizaron tediosos cálculos, y mediciones para descubrir si los rayos luminosos se curvan en un campo gravitacional, y si este efecto coincide cuantitativamente con el que preveía la teoría general de la relatividad. Cuando fueron anunciados en aquel entonces, los resultados parecieron confirmar espléndidamente la predicción de Einstein. (Las mediciones posteriores demostraron que esta coincidencia no era tan absoluta. Pero en la actualidad quedan pocas dudas de que los rayos luminosos son modificados por el campo gravitacional.)

No se sabe por qué, pero de repente este fenómeno de la curvatura de los rayos luminosos se apoderó de la imaginación de todo el mundo civilizado. ¿Sería a causa de su escenario romántico? ¿O por el deseo de escapar a los pensamientos abstractos y olvidar el sabor amargo de la victoria y la derrota? ¿O sería la convicción de que esta confirmación de la obra de un científico alemán, por parte de los científicos ingleses, significaba el comienzo de una nueva era, en la que los hombres habrían de perdonar, olvidar y trabajar unidos? Sé de sobra cuán difícil es contestar a estas preguntas. Queda en pie el hecho de que de pronto, poco después de 1920, el inundo entero tuvo noción de la teoría de la relatividad y de su creador. Un hombre solitario, que jamás había buscado la publicidad, se convirtió en el más famoso del mundo, el más ensalzado y el más ridiculizado. Se mostró tan indiferente hacia todo ello como hacia muchos otros detalles de la vida exterior. Es posible que tuviera menos noción de su fama repentina que cualquier otro.

Tres temas

Hemos bosquejado los comienzos de la teoría de la relatividad general tal como apareció en la obra de Einstein de 1911. Luego, en pocos años se llegó a su estructura definitiva, basada en nuevas ideas; podemos captarlas, aun cuando no estemos en condiciones de seguir su formulación matemática. Están vinculadas con los tres temas siguientes:

Primero: La gravitación.

Segundo: La invariancia.

Tercero: La relación entre la geometría y la física.

Los analizaremos por turno.

Quizás el más grande triunfo de la mecánica de Newton fue su solución del problema de la gravitación. Una ingenua leyenda sostiene que Newton vio cómo de un árbol caía una manzana; si bien ésta no dio en su cabeza, le proporcionó en cambio, de pronto, la idea de las fuerzas de la gravitación. Un cuento de esta clase está lejos de la situación verdadera. Newton halló la teoría de la gravitación debido a que había pensado acerca de ésta consciente e inconscientemente durante años y años. Un científico puede ver de repente la luz, o mejor dicho su primer destello, pero sólo después de largas e incesantes meditaciones.

Durante el siglo XIX, el desarrollo de la astronomía culminó en la gran obra de Laplace, *Mécanique célesie*, basada en la ley newtoniana de la gravitación. Sin embargo, a medida que pasaba el tiempo, esta ley de Newton fue resultando cada vez menos satisfactoria. Según Nemon, el movimiento de la tierra, la luna, las estrellas, los planetas y el sol está gobernado por la misma ley. La luna gira alrededor de la tierra porque ésta la atrae. La tierra y otros planetas giran alrededor del sol porque son atraídos por éste, y esta atracción disminuye a medida que la distancia aumenta, puesto que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esta imagen, de partículas con fuerzas de gravitación que actúan entre ellas, corresponde a la concepción newtoniana, y constituye su punto culminante.

Pero, como lo sabemos ahora, la concepción del campo fue por lo menos tan afortunada en la descripción de los fenómenos electromagnéticos y luminosos, como lo fue la concepción mecánica en la astronomía. La teoría de campo introdujo un nuevo punto de vista en la física. Para el físico moderno, toda acción o fuerza se expande desde la fuente hacia el recipiente a una velocidad definida: la velocidad de la luz en el caso del campo electromagnético. La fuerza varía en el tiempo y en el espacio. Resulta artificial imaginar que la fuerza de la gravitación, en cambio, no depende del tiempo; que si en algún punto del universo fuera creada una nueva estrella, el universo entero sentiría su presencia en el momento mismo de su creación. La teoría del campo sostiene que las acciones se expanden a una velocidad finita, y que las

leyes que gobiernan estos cambios en el espacio y en el tiempo son las leyes del campo. Por consiguiente, la teoría newtoniana de la gravitación, que no formula tales leyes del campo, aparece, en contraste, como insatisfactoria y artificial. Por otra parte, se adapta sólo a la estructura de la física clásica, donde el tiempo y el espacio son absolutos y donde se acepta como cierta la existencia de un sistema inercial. Pero sabemos en la actualidad que el tiempo no es absoluto. Incluso si el tiempo no forma parte de un sistema inercial, debe estar en otro sistema inercial, de acuerdo con la transformación de Lorentz. La antigua ley de Newton es apropiada para la estrecha estructura de la mecánica clásica, pero no para la otra, más amplia, de la teoría de la relatividad especial. La ley de la gravitación de Newton acepta, por otra parte, la existencia de un sistema inercial, a pesar de que la mecánica clásica es incapaz de explicarnos cómo hallar tal sistema. Confrontado con un resultado que contradice la observación, un mecanicista clásico, puede elegir entre dos alternativas: la de sostener que las leyes de Newton no son válidas, o que ha elegido un sistema no-inercial. Realmente, si cree en la física clásica, entonces la primera explicación, la de que las leyes de Newton no son válidas, está prohibida por sus creencias. Pero entonces la totalidad del problema de confirmar o rechazar las leyes de Newton pierde todo su sentido.

Las críticas que aquí se discuten se deben en parte a Mach y en parte a Einstein. En síntesis, son las siguientes:

La ley de la gravitación de Newton acepta la existencia de un sistema inercial.

La ley de la gravitación de Newton no se adapta a la estructura de la teoría especial de la relatividad.

La ley de la gravitación de Newton no es la ley del campo de la gravitación que varía en el espacio y en el tiempo.

En la ley de la gravitación de Newton, la igualdad de las aceleraciones en un punto dado del espacio aparece como un accidente, al cual no se puede atribuir ningún significado más profundo.

Cada una de estas objeciones es grave 1y hay cuatro!

La teoría general de la relatividad abordó el problema de la gravitación de una manera enteramente nueva, y de un solo golpe audaz eliminó todas estas dificultades. El modo en que lo hace es un problema diferente, y de respuesta no fácil. Con todo, trataremos de explicar algunas de las nuevas y revolucionarias ideas en las que Einstein basó su teoría general de la relatividad.

La teoría especial de la relatividad amplía la estructura de la física clásica. La teoría general de la relatividad, a su vez, amplía la estructura de la teoría especial; debe ser utilizada siempre que las fuerzas de la gravitación no pueden ser ignoradas. Podemos derivar la teoría especial de la relatividad a partir de la concepción superior de la teoría general, si las fuerzas de la gravitación pueden ser ignoradas. Dentro del ascensor que cae tenemos un sistema que, en cierta medida, es casi el sistema inercial de la teoría especial de la relatividad. Pero mientras realizamos mediciones en áreas extensas, a lo largo de intervalos de tiempo prolongados, no podemos dar por sobrentendida la validez de la teoría especial de la relatividad dentro de un gigantesco ascensor que cae.

Así, pues, escalamos más y más alto para liberarnos de las restricciones que son cada vez más numerosas. El camino se hace cada vez más dificultoso, pero a cada paso que avanzamos debemos estar en condiciones de conservar las ventajas de nuestra concepción antigua.

Si queremos hallar una nueva teoría de la gravitación, libre de las deficiencias de la antigua, debemos recordar, y esto es importante, el enorme caudal de experiencias explicadas de manera satisfactoria por la teoría antigua. La nueva teoría, lógicamente más consistente y simple, debe explicar igualmente bien los hechos conocidos. La tierra se desliza en una elipse en torno al sol. Esto surge de la ley de Newton del movimiento y de su teoría de la gravitación. Se deduce también de la teoría de la gravitación de Einstein. Pero en verdad esperamos algunos pequeños desacuerdos entre la teoría antigua y la nueva. Esos desacuerdos deben ser pequeños, porque de lo contrario ya habrían sido advertidos desde hace mucho tiempo. Pero siempre que se encuentren más allá del error experimental, deben ser confirmados por la observa-

ción. Una conclusión de esta índole, nueva y desconocida por la mecánica clásica, fue la de que la luz se desvía en un campo gravitatorio.

A menudo se subraya en exceso la importancia de la evidencia experimental en el caso de la teoría general de la relatividad. A decir verdad, la evidencia es aún bastante tenue, aunque hay pocas dudas de que la teoría general de la relatividad se ajusta mejor a los hechos conocidos que la mecánica de Newton. Pero no es ahí donde reside la fortaleza de la teoría general de la relatividad, sino más bien en su consistencia intrínseca, en la superación de las antiguas dificultades y en su mayor simplicidad lógica.

Si recordamos el papel de la astronomía y la ley de la gravitación de Newton en la historia de nuestra civilización, comprenderemos la importancia de la revolución de Einstein, que, por primera vez en la historia de la ciencia, revisó el problema de la gravitación. Pero quizá »más importante que esto es la revolución que esta teoría ha producido en nuestro pensamiento físico y filosófico.

Hemos dicho que la teoría de Einstein sobre la gravitación es de una mayor simplicidad lógica que la teoría de Newton. Esto exige ser aclararlo, porque por lo común la teoría general de la relatividad es considerada muy dificultosa en comparación con la teoría de Newton. Incluso reconociendo que es ridícula la afirmación de que sólo doce personas comprenden la teoría de la relatividad, no puede negarse que técnicamente la teoría general de la relatividad es mucho más difícil de captar que la mecánica clásica. Lo cierto es que esa afirmación es formulada con frecuencia por quienes no entienden ninguna de las dos. No es en absoluto fácil deducir, de la teoría de Newton de la gravitación, que la tierra sigue una trayectoria elíptica alrededor del sol. Junto al conocimiento de la mecánica de Newton, para una deducción como ésta se necesitan algunas nociones de cálculo y ecuaciones diferenciales. Deducir el mismo resultado por la teoría general de la relatividad es aún más difícil. Se requiere para ello conocer y comprender la estructura matemática de la teoría de la relatividad, y esto, a su vez, exige el conocimiento de la geometría de Riemann y el cálculo tensorial,

ramas de las matemáticas desarrolladas bajo la influencia de la teoría de la relatividad.

La deducción en sí es mucho más larga, más tediosa, y en el caso de nuestra tierra encontramos complicadas ecuaciones de movimiento que, en la primera aproximación, nos dan las antiguas ecuaciones de Newton. Sin embargo, podemos sostener aún que la teoría de Einstein es lógicamente irás sencilla que la antigua teoría de Newton, si distinguimos entre simplicidad lógica y técnica. al superar suposiciones artificiales e innecesarias, alcanzamos una mayor simplicidad lógica. Pero entonces nuestras deducciones se hacen más largas y más tediosas. Hemos supuesto menos, y por consiguiente tenemos que deducir irás. Parece paradójal, pero la teoría general de la relatividad parece tan difícil precisamente porque es tan sencilla y porque es tan poco lo que da por sobrentendido.

Si dos cuerpos, A y B -por ejemplo, la tierra y el sol- están en movimiento relativo, entonces, como es natural, no tiene sentido suponer que A está en reposo y B en movimiento, o que A está en movimiento y B en reposo. Todo lo que podemos observar es el movimiento de un cuerpo en relación con el otro. Por ejemplo, discutir el movimiento de un cuerpo en el universo entero carece por completo de sentido, dado que el movimiento significa cambio en la posición relativa. En la actualidad todo esto parece de buen sentido común, y es lamentable que la mecánica clásica se haya alejado alguna vez de este punto de vista.

La teoría de Ptolomeo, defendida durante mucho tiempo por la iglesia, sostenía que la tierra está en reposo y el sol se mueve. Copérnico, en cambio, afirmó que la tierra se mueve y el sol está en reposo. Pero desde el punto de vista del sentido común, arriba afirmaciones parecen vacías. Incluso si aceptamos que el sol se detuvo cuando se lo ordenó Josué, es evidente que esta orden implicaba que el sol debía quedar inmóvil en relación con la tierra. Esto equivale en un todo a ordenar que la tierra permanezca en reposo en relación con el sol. Me pregunto si esta argumentación convencería a los que enviaron a Gior-dano Bruno a la hoguera y encarcelaron a Galileo. Lo dudo, porque

ésta fue casi exactamente la defensa de Galileo. Sostuvo éste que hipotéticamente consideraba un sistema en el cual el sol está en reposo. Pero entonces surge la duda sobre si estaba en condiciones de ser sincero al hallarse frente a los príncipes de la iglesia.

¿Cuál fue, entonces, la causa de todo el alboroto? La respuesta es que la mecánica clásica se aleja del "punto de vista del sentido común", con lo cual significamos que solamente existe el movimiento relativo. De acuerdo con la mecánica clásica existe sólo un sistema, o más bien un grupo de sistemas en movimiento uniforme, en el cual son válidas las leyes de la física. A este sistema (o más bien a estos sistemas) debemos referir el movimiento y podemos aplicar las leyes de la mecánica clásica en toda su belleza y simplicidad. Así, pues, de acuerdo con la mecánica clásica, podemos hablar acerca del movimiento de un cuerpo, incluso si se trata del único cuerpo de nuestro universo. Imagínese la habitación en la que se encuentra, con todas sus ventanas cerradas hacia el mundo exterior. Si una nueva fuerza comenzara a empujar todos los objetos de la habitación alejándolos del centro, usted deduciría, de acuerdo con la mecánica clásica, que su sistema ha dejado de ser inercial en razón de que la habitación en que se encuentra ha comenzado a rotar.

De esta manera, la mecánica clásica hace tambalear nuestros conceptos inspirados en el sentido común. Podemos percibir el movimiento incluso cuando se trata de un solo cuerpo; es decir, podemos percibir el movimiento absoluto si las leyes de la mecánica, tal como fueron formuladas para un sistema inercial, no son válidas en el sistema vinculado a ese cuerpo.

Esta desviación de la mecánica clásica en relación con el punto de vista del sentido común fue criticada por Mach. Vemos cómo esto se encuentra en relación con el concepto de un sistema inercial. La teoría de la relatividad retorna al punto de vista del sentido común. Formula un principio que no sólo ha de ser válido para los fenómenos de la gravitación, sino para todos los fenómenos de la naturaleza. Es el principio de la invariancia:

las leyes de la naturaleza deben ser válidas en cualquier sistema.

Mientras que en la teoría especial de la relatividad- discutimos sistemas que se encuentran en movimiento - uniforme relativo entre sí, en la teoría general de la relatividad consideramos sistemas que están en movimiento relativo arbitrario. No existe el movimiento absoluto. La afirmación de que se mueve la tierra o que se mueve el sol carece de sentido. Tenemos nuevas leyes que ora podemos aplicar a un sistema vinculado con el sol, ora a un sistema vinculado con la tierra. Para algunos problemas especiales puede resultar más conveniente vincular nuestro sistema con el sol, pero la diferencia es sólo de naturaleza técnica. Lógicamente, ambos sistemas son equivalentes, y cualquiera de ellos es admisible.

Puede pensarse que la teoría general de la relatividad abordó los problemas diferentes, el de la gravedad y el de la formulación de las leyes de la naturaleza para un sistema arbitrario. Pero estos dos problemas constituyen uno solo en lo fundamental. Ha de recordarse el importante ejemplo del ascensor que cae, donde consideramos dos sistemas en movimiento no uniforme relativo el uno con respecto al otro. Uno era casi inercial y en el otro teníamos un campo gravitacional. Este campo gravitacional es el que aparece y desaparece en pequeñas regiones, si pasamos de un sistema a otro (si queremos excluir la gravitación entonces tenemos que restringir los sistemas a los de movimiento uniforme) . El campo gravitatorio es el que nos permite formular leyes válidas para cualquier sistema. Repito que el campo gravitacional puede ser creado o aniquilado en pequeñas regiones por el proceso de la transformación. De este modo la discusión del ascensor que cae nos da la clave exacta. El resultado final de una larga serie de argumentos que derivan de esta clave es el siguiente:

1. La formulación de las leyes del campo en lo que respecta a la gravitación. AL igual que las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético, las ecuaciones de los campos de Einstein nos describen cambios en el campo gravitacional a través del espacio y el tiempo. Estas ecuaciones, en toda su generalidad y su belleza, fueron formuladas por Einstein. Parecen simples, pero resulta muy difícil trabajar con ellas. Pero si el campo gravitacional es débil, podemos demostrar con

relativa facilidad que en la primera aproximación estas ecuaciones se reducen a las antiguas ecuaciones de Newton. Siento la tentación de transcribir la ecuación de los campos de Einstein para el vacío, y puedo hacerlo en una parte de una línea. Son: $R_{k1} = 0$; pero para saber qué significa R_{k1} y cuál es la estructura de estas ecuaciones debe contarse con el conocimiento técnico adecuado. Este conocimiento puede ser adquirido en dos o tres años de estudio, más o menos, por cualquiera a quien le gusten las matemáticas (por lo común, los que sienten afición a las matemáticas tienen la capacidad suficiente para comprenderlas). Pero una vez que llegamos a entender estas ecuaciones, conocemos la parte fundamental de la teoría general de la relatividad.

2. La teoría general de la relatividad permite formular las leyes de la naturaleza para un sistema arbitrario. De esta manera, el fantasma inquietante del sistema inercial ha desaparecido de la física, y estamos en libertad de elegir cualquier sistema que deseemos. Nuestras leyes son válidas para todos ellos. En lenguaje más técnico decimos: las leyes de la física son invariantes con respecto a una transformación arbitraria.

Vemos cuán profundamente modifica nuestros conceptos físicos la teoría general de la relatividad. En verdad se trata de una revolución sólo comparable con las realizaciones por Newton y Maxwell. También ilumina la relación entre la física y la geometría, modificando nuestras concepciones acerca de este antiguo problema filosófico.

El físico clásico partía del supuesto de que nuestro espacio tridimensional era euclidiano y, que el tiempo era absoluto. En la teoría especial de la relatividad consideramos al espacio y el tiempo como un ámbito tetradimensional de nuestros sucesos. De acuerdo con la teoría general de la relatividad, ese ámbito es de carácter no euclidiano. A fin de resolver el problema de la gravitación de acuerdo con nuestras concepciones del campo, y para introducir leyes válidas en cualquier sistema, nos vemos obligados a considerar la geometría tiempo-espacial de una nueva manera. Es aquí adonde aparece la conexión entre la geometría y la física.

Esta parte de la estructura, la parte matemática, fue la que ocupó la mayor parte del tiempo y los esfuerzos en la obra de Einstein. Éste nunca se consideró un matemático. Se considera justamente un filósofo, porque los problemas físicos que abordó se hallan en estrecha relación con los que han preocupado a los pensadores durante todo el transcurso de la historia de nuestra civilización. Pero estos problemas, tales como el del tiempo, el espacio, la geometría, fueron trasladados por Einstein desde el campo de la especulación hacia el de la física, hacia el campo de la ciencia, del razonamiento riguroso, cuya herramienta la constituyen las matemáticas. Einstein aprendió las matemáticas cuando las necesitó, y para los propósitos por los cuales le fueron necesarias. ¿Las aprendió? Yo preferiría decir que las reintentó, prefiriendo siempre pensar por sí mismo antes que leer libros. En el caso de la teoría general de la relatividad, el aparato matemático que necesitó al principio se hallaba aún en estado rudimentario, apenas en su infancia. Después creció rápidamente, debido a las crecientes necesidades de la teoría general de la relatividad.

Mientras yo estaba en Berlín, Einstein dio una conferencia en la Academia de Ciencias de Prusia acerca de la relación entre la geometría y la experiencia. Posteriormente volvió a pronunciarla para los estudiantes universitarios. Yo era uno de los asistentes, y nadie que estudiara la teoría de la relatividad podía dejar de sentirse impresionado por la profundidad y la sencillez de las ideas filosóficas de Einstein, y el encanto con que las explicaba. Luego llegó el momento de las preguntas, y muchos filósofos estúpidos empezaron a preguntar tonterías. "¿Qué hay de Kant?" "Lo que usted ha dicho, señor profesor, contradice a Kant." ¡Realmente! ¡Cómo puede contradecirse a Kant, y tan luego en Berlín! Einstein, como siempre, disfrutaba del espectáculo. No se mostró enojado ni impaciente cuando escuchó las palabras "trascendental", "a priori" Weltanschauung, y toda la escoria que la teoría de la relatividad ha barrido y que todavía asoma en muchos volúmenes y en muchas ramas de la filosofía especulativa. ¡Las palabras vacías tardan en morir!

¿Cuál es, pues, el vínculo entre la geometría y la física? Para comprenderlo, simplifiquemos nuestro problema.

Imaginemos criaturas pensantes que viven en un plano bidimensional. Podemos observar sus acciones e incluso sentirnos conmovidos por ello, como lo sabe todo aquel que alguna vez ha vertido lágrimas en un cine. Pero no debemos tomar demasiado en serio la comparación con la película. Imaginamos una pantalla infinitamente grande, olvidarnos la perspectiva y visualizamos criaturas chatas, que tienen solamente un perfil, como las de una pintura egipcia. Suponemos también que estas criaturas tienen cerebros y que actúan de acuerdo con su propia voluntad. Para ellas el plano bidimensional será lo que para nosotros el espacio tridimensional. Si son inteligentes, pueden a su debido tiempo desarrollar el conocimiento de la geometría plana euclidiana; es decir, la misma geometría que nosotros conocemos desde nuestros días de la escuela secundaria. Una vez que inician un viaje a lo largo de una línea recta, jamás retornarán a su punto de partida; dos líneas paralelas jamás se encontrarán y la circunferencia de un círculo será 2π veces el radio de este círculo. Estas criaturas -podemos imaginarlo- incluso pueden conocer una especie rudimentaria de física. Es posible que hayan experimentado con los rayos luminosos y desarrollado los conceptos del tiempo y la velocidad; y pueden haber descubierto que la velocidad de la luz -lo mismo que en nuestro espacio tridimensional- es de 300.000 kilómetros por segundo.

Después de haber iniciado nuestro relato acerca de las criaturas bidimensionales, pasemos a su segundo capítulo. Imaginamos que en cierto momento, cuando todas estas criaturas estaban dormidas, alguien las trasladó hacia la superficie de una esfera; digamos, una esfera muy grande. ¿Qué queremos expresar cuando decimos que una esfera es muy grande? Queremos decir que estas criaturas no percibirán ninguna diferencia al despertar. Sus comunicaciones no están suficientemente desarrolladas como para descubrir que cuando inician un viaje, ¿avanzando en línea recta, finalmente han de retornar a su punto de partida. Al dibujar un pequeño círculo, no descubrirán que su circunferencia es ligeramente menor que 2π veces el radio del círculo. Pero a medida

que se van sucediendo las generaciones de criaturas bidimensionales, y que su ciencia y su técnica se van haciendo cada vez más perfectas, irán descubriendo que hay algo erróneo en su herencia de geometría euclidiana. Llegarán a la conclusión de que es más conveniente y más acorde con sus observaciones el empleo, no ya de la geometría euclidiana de un plano, sino el de la geometría no euclidiana de una esfera. Durante algún tiempo los elementos más conservadores de su comunidad se resistirán a esas innovaciones, y quizás quemarán en un fuego bidimensional a las criaturas que predicán la geometría no euclidiana. Estas criaturas conservadoras podrán decir que las varas empleadas no fueron lo bastante rígidas, que había algunas diferencias de temperatura, para explicar el evidente fracaso de la geometría euclidiana. Pero, como ocurre siempre, la ciencia por fin vencerá en esa lucha. Lentamente los habitantes bidimensionales de esa esfera han de reconocer que es mucho más conveniente aceptar la geometría esférica no euclidiana. De esta manera aprenderán que una "línea recta" (un gran círculo para usted) es siempre cerrada, que un rayo luminoso enviado desde cualquier punto P vuelve a su punto de partida. Proclamarán los últimos resultados aun cuando no puedan viajar alrededor de la esfera, aunque deba nacer y morir un centenar de generaciones antes de que puedan descubrir por medio de un experimento real que un rayo de luz retorna a su punto de partida. Deducirán estos resultados en razón de que ahora, en su proximidad, la geometría de un carácter no euclidiano describe los fenómenos mejor y más económicamente que la antigua geometría euclidiana. ¡Se habrá producido una revolución científica entre estas criaturas bidimensionales!

Este relato no es tan fantástico como parece. En verdad, algunos de sus rasgos nos recuerdan lo que ocurrió con nuestra tierra y como fue reconocida su forma esférica.

Volvemos a nuestras criaturas bidimensionales para narrar el tercero y último capítulo de nuestro relato. Imaginemos que se ha producido un nuevo cambio. Otra vez les sucedió algo a esas criaturas, de pronto mientras se hallaban durmiendo. Esta vez el acontecimiento no perteneció a los dominios de la geometría sino más bien de la física (si

tiene algún sentido una distinción definida entre la geometría y la física). Se pueden señalar dos puntos opuestos en esta esfera, que llamaremos el Polo Norte y el Polo Sur. La temperatura de la esfera, que suponemos uniforme, experimenta un súbito cambio. Es fría en los polos, más cálida al alejarnos de éstos, y el ecuador es la línea más calurosa. Es tan fría en los polos, que la temperatura allí es el cero absoluto. Esto significa que las dimensiones de todas las criaturas vivientes, de todas las varas rígidas, así suponemos, se encogen hasta reducirse a cero a medida que se van acercando a estos polos. De este modo, las criaturas que viajan hacia los polos se tornan más pequeñas, sus dimensiones y sus pasos se van haciendo cada vez más reducidos, y será imposible que puedan llegar a esos polos. Si viajan a lo largo de los círculos de latitud, pueden hallar, si las temperaturas están correctamente ajustadas, que cada uno de esos círculos es tan largo como el ecuador, porque sus varas de medir y sus propias dimensiones se han empequeñecido tanto como para explicar exactamente este hecho; los círculos se hacen más pequeños, pero lo mismo ocurre con las varas empleadas para medirlos.

De esta manera, nuestras inteligentes criaturas bidimensionales se hallan frente a una situación enteramente nueva, y tienen dos maneras de ajustar su ciencia a su mundo cambiado. Si sus cuerpos bidimensionales no son sensibles al cambio de temperatura, entonces ahora pueden suponer que ya no viven en un plano, ni en una esfera, sino en un cilindro infinito. Será infinito para ellos, porque jamás podrán alcanzar su fin mientras vayan hacia el norte o hacia el sur. Pero será finito si viajan a lo largo de círculos paralelos, y todos esos círculos tendrán los mismos radios, porque ellos nada saben acerca del cambio de escala que hemos advertido nosotros, mientras contemplábamos su esfera con la ventaja de seres humanos tridimensionales.

En cambio, si son susceptibles al frío y el calor, preferirán suponer que aún viven en una esfera, y que en esa esfera hay ahora dos puntos muy singulares que jamás podrán alcanzar, porque la temperatura es ahí el cero absoluto.

No puede saberse cuál será la elección que harán estas criaturas. Depende de muchas circunstancias que no queremos analizar. Incluso pueden tener dos teorías rivales.

Nuestra narración contiene una enseñanza profunda. Muestra cuán íntimamente está vinculada la física con la geometría. Recordemos que las criaturas bidimensionales pueden elegir entre la suposición de que hay diferencias de temperatura y la geometría esférica, por una parte, o, por la otra, no admitir que existan tales diferencias de temperatura y preferir la geometría de un cilindro (que es esencialmente una geometría euclidiana) .

Nosotros, criaturas tridimensionales, estamos en una situación similar. Debemos considerar la geometría y la física como un solo sistema de conocimiento. Nuestra tarea científica consiste en formular ese sistema único, más coherente y conveniente para la descripción de los fenómenos de la naturaleza. El sistema es bueno si marcha en la práctica.

La teoría de la relatividad nos ha enseñado que si queremos abandonar los conceptos vacíos acerca de un sistema inercial, si queremos formular las leyes del campo para la gravitación, si tenemos el propósito de formular leyes invariantes que sean válidas en cualquier sistema, si queremos hacer todo esto, entonces debemos aceptar una geometría no euclidiana de nuestro tiempo-espacio tetradimensional. Es el campo gravitatorio el que caracteriza la geometría de nuestro mundo. Un plano de goma puede ser deformado por las tensiones de fuerzas externas. De manera similar, masas en movimiento deforman nuestro espacio-tiempo. Estas determinan si nuestro tiempo-espacio es o no es no-euclidiano, y hasta qué punto lo es. Las dos preguntas, "¿Qué es la geometría de nuestro mundo?" y "¿Qué es el campo gravitatorio de nuestro mundo?" son preguntas idénticas. Geometría y gravitación se convierten en sinónimos. Están determinadas por la distribución de las masas y sus velocidades. He expuesto anteriormente las ecuaciones de la teoría general de la relatividad para el espacio vacío. Estas son las ecuaciones que describen la geometría y el campo

gravitatorio de nuestro inundo en regiones en las que la materia está ausente.

Tengo clara noción de que estas ideas son dificultosas. En algunos aspectos, entender la teoría de la relatividad utilizando las matemáticas es más sencillo que entenderlas prescindiendo de éstas. Con todo, tengo la esperanza de haber logrado demostrar cuán fundamentales son los nuevos conceptos, cuán profundas son sus consecuencias filosóficas y cuán radicalmente cambió esta teoría la ciencia de nuestro mundo.

Entre las conclusiones que se pueden obtener de la Teoría general de la relatividad, y que son diferentes de las que surgen de la mecánica clásica, existe una que es bien conocida: el movimiento en el perihelio de Mercurio. En 1916 constituyó la primera confirmación de la teoría de la relatividad. Esta conclusión fue rigurosamente deducida en aquel tiempo, a partir de las ecuaciones de Einstein, por un famoso astrónomo, Schwarzschild. Sin embargo, en algunos aspectos esta afirmación constituye una simplificación excesiva, y la historia completa de este problema es mucho más complicada. La explicaré brevemente.

La estructura de la teoría general de la relatividad progresó en forma relativamente lenta, formulada y reformulada en trabajos por Einstein en las actas de la Academia Prusiana. Más de una vez tuvo que volver Einstein sobre sus pasos, corregir errores, a medida que iba penetrando más profundamente en el problema de la gravitación. Alrededor de 1916 la estructura de la teoría general de la relatividad quedó concluida y resumida una vez más en un extenso trabajo que apareció *Annalen der Physik* bajo el título de "Fundamentos de la Teoría General de la Relatividad". No hubo después cambios esenciales, si bien se agregaron y desarrollaron muchos resultados.

La teoría general de la relatividad, tal como fue formulada en 1916, se apoyaba en dos pilares. Uno de éstos representaba las ecuaciones del campo; es decir, las ecuaciones que describen el cambio en el espacio y en el tiempo gravitatorio, o, si se prefiere, del campo geométrico. El otro representaba las ecuaciones del movimiento, que nos dicen cómo se mueve una partícula en ese campo gravitatorio. Estas

ecuaciones reemplazaban a las antiguas ecuaciones newtonianas del movimiento, en las cuales la fuerza gravitacional es proporcional a la aceleración. Pero ahora, en la teoría general de la relatividad, las ecuaciones del movimiento, como todas las leyes de la naturaleza, eran válidas no solamente en un sistema inercial sino en uno arbitrario.

De esta manera, si queremos hallar, por ejemplo, el movimiento de un planeta en el campo gravitatorio del sol, debemos hallar primero el campo gravitatorio del sol, partiendo de las ecuaciones del campo, de la teoría general de la relatividad. Después tenemos que aplicar las ecuaciones del movimiento en este campo conocido y hallar el movimiento de un planeta. Esto es precisamente lo que Schwarzschild hizo con gran habilidad matemática. Pero el resultado obtenido es válido sólo si el planeta es pequeño en comparación con el sol. Los astrónomos conocen la existencia de muchas estrellas dobles (dos cuerpos que giran el uno en torno al otro como dos soles) . No podemos partir del supuesto de que uno es pequeño comparado con el otro. No podemos considerar ese movimiento de estrellas dobles por el método de Schwarzschild a causa de que, en lo que concierne a la ecuación del movimiento dentro de la teoría general de relatividad, todo lo que sabemos es que esta ecuación sólo puede ser aplicada a un cuerpo pequeño (un planeta) en un campo que no está demasiado perturbado por la presencia de ese cuerpo pequeño.

Tenemos las ecuaciones del campo y las ecuaciones del movimiento; pero las ecuaciones de movimiento, como se sabe explícitamente por la teoría general de la relatividad, sólo tienen una validez restringida. Hasta 1938 no sabíamos cómo resolver este problema del movimiento de estrellas dobles de acuerdo con la teoría general de la relatividad aunque sabíamos cómo hacerlo según la mecánica clásica. Presenta aproximadamente la misma dificultad que el problema de un sol pesado y un planeta pequeño.

Durante mucho tiempo Einstein creyó que las ecuaciones del movimiento son innecesarias en la teoría general de la relatividad, que no nos resulta imprescindible contar con ellas, que pueden ser deducidas de las ecuaciones del campo, que podemos seguir de largo y olvidar las

ecuaciones de movimiento, que el Único pilar sobre el cual se apoya la teoría general de la relatividad está construido con la teoría del campo exclusivamente.

Esto resultó cierto, pero se necesitó mucho tiempo para demostrarlo. Hacia 1916, todos los medios técnicos estaban en manos de los matemáticos y los físicos. Estos conocían las ecuaciones del campo. Lo único que se necesitaba era demostrar que estas ecuaciones del campo incluían las de movimiento. Era como cavar en busca de un tesoro profundamente enterrado, cuando sabemos el sitio en que está escondido. En repetidas ocasiones abordó Einstein este problema; lo dejó en mano., de muchos otros, para volver luego a él. Otros científicos también meditaban acerca de lo mismo. en el ínterin Hitler llegó al poder. Einstein partió de Alemania y se instaló en Princeton en 1933, como profesor del Instituto de Estudios Superiores. Este trabajo sobre los problemas del movimiento comenzó hace más o menos veintidós años, pero una teoría lógicamente satisfactoria sólo fue expuesta en fecha reciente (1949) . Es éste el problema en el cual he colaborar con Einstein hace doce años aproximadamente, y una vez más durante el año actual.

Dos enseñanzas pueden extraerse de esta exposición. Primero, demuestra cuán difíciles son las deducciones matemáticas, cuán complicadas son las ecuaciones de la teoría general de la relatividad y cuán profundamente ,pueden ocultar sus secretos. La segunda enseñanza es de alguna significación filosófica, se relaciona estrechamente con la idea que hemos expresado antes. Como es lógico, resulta más sencillo considerar sólo ecuaciones de los campos y no tener en cuenta las ecuaciones de movimiento, pero es preciso pagar con mayores dificultades técnicas por la simplicidad lógica.

Apliquemos las ecuaciones de movimiento, tal como se deducen de las ecuaciones del campo (o de su forma explícita) al movimiento de un pequeño planeta. Por supuesto, en la primera aproximación esperamos el movimiento newtoniano, en razón de que la teoría de Newton surge de la teoría general de la relatividad como su primera aproximación. Pero, si nos internamos más profundamente, hallamos diferencias

entre la teoría general de la relatividad y la de Newton, diferencias que pueden ser confirmadas por la observación.

Tales desviaciones de las leyes newtonianas pueden ser esperadas sólo cuando se trata de fuertes campos gravitacionales. Los planetas, entre ellos la tierra, se desplazan por trayectorias elípticas en torno al sol, y la atracción entre Mercurio y el sol (empleando el lenguaje clásico) es por consiguiente más poderosa que entre el sol y cualquier otro planeta. Si existe alguna esperanza de hallar una desviación con respecto a la teoría de Newton, tenemos la mejor oportunidad para ello en el caso de Mercurio. Resulta de la teoría de Newton que Mercurio, como cualquier otro planeta, se desplaza por una elipse, pero ésta es la más pequeña. Si se la compara con las trayectorias de otros planetas de nuestro sistema solar. Pero de acuerdo con la teoría general de la relatividad, el movimiento habría de ser ligeramente diferente. No se trata sólo de que Mercurio se desplazaría alrededor del sol, sino que la elipse que describe rotaría con suma lentitud en relación al sistema vinculado con el sol. Esta rotación de la elipse es la que expresa el nuevo efecto de la teoría de la relatividad y, su desviación con respecto a la teoría de Newton. La teoría de la relatividad también predice la magnitud de este efecto: ¡la elipse de Mercurio realizaría una rotación completa en tres millones de años! Vemos cuán pequeño es este efecto, y cuánto más difícil sería hallar un efecto similar pero aún más pequeño para otros planetas.

La desviación del movimiento de Mercurio con respecto a la elipse era conocida antes de que se formulara la teoría general de la relatividad, pero no podía hallarse ninguna explicación para ello. Por otra parte, Einstein desarrolló los principios de la teoría general de la relatividad sin prestar atención alguna a este problema especial. Su única finalidad fue la de eliminar inconsistencias y dificultades lógicas de la antigua teoría. En el caso de Mercurio, la teoría general de la relatividad explica en forma satisfactoria, no sólo cualitativa sino también cuantitativamente, la desviación de su movimiento con respecto a las leyes de Newton.

Junto a los dos efectos que hemos mencionado -es decir, la desviación de los rayos luminosos y el movimiento de Mercurio- existe otro más: el llamado corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales que provienen del sol o de estrellas con un fuerte campo gravitatorio. Este efecto, si bien puede ser deducido matemáticamente con facilidad, es más difícil de explicar que los otros. Omitiremos una exposición más detallada, y nos limitaremos a señalar al pasar que también aquí el veredicto de la experimentación, aunque no es claro y, decisivo, parece favorecer a la teoría general de la relatividad. Pero por encima de todo debemos recordar que la fuerza de esta teoría no reside en tales confirmaciones. Aunque no existieran diferencias registrables entre la física clásica y la teoría general de la relatividad, elegiríamos de todos modos esta última sin ninguna reserva.

Negar esto significaría no comprender la importancia de la revolución einsteiniana y el gran esclarecimiento, la simplificación lógica y filosófica que introdujo en la física.

El universo

Las especulaciones acerca del universo en el cual viven los hombres son tan antiguas como el pensamiento y el arte humanos, y tanto como la visión de las estrellas resplandecientes en una noche clara. Sin embargo, fue la teoría general de la relatividad la que apenas hace treinta años trasladó los problemas cosmológicos, de la poesía o la filosofía especulativa a la física. Podemos incluso fiar el alio en que nació la cosmología moderna. Fue en 1917, cuando apareció el trabajo de Einstein en las Actas de la Academia de Prusia bajo el título de "Consideraciones Cosmológicas en la Teoría General de la Relatividad".

Aunque resulta difícil exagerar la importancia de ese trabajo, y a pesar de que dio origen a un alud de diversos trabajos y especulaciones, las ideas originales de Einstein, vistas desde la perspectiva de los

días actuales, resaltan anticuadas si no erróneas. Creo que Einstein sería el primero en admitirlo.

A pesar de esto, la aparición de este trabajo es de tina gran importancia en la historia de la física teórica. En verdad constituye otro ejemplo más que demuestra cómo una solución errónea de un problema fundamental puede ser incomparablemente más importante que una correcta solución de un problema trivial, carente de todo interés.

¿Porqué es tan importante la comunicación de Einstein? Porque formula un problema totalmente nuevo, el de la estructura de nuestro universo; porque demuestra que la teoría general de la relatividad puede arrojar nueva luz sobre este problema.

El físico clásico pensaba que nuestro espacio físico es tridimensional, que nuestro tiempo físico es común a todos los observadores, sin que importara si están en movimiento relativo o no. Estos conceptos fueron modificados en 1905, cuando Einstein formuló la teoría especial de la relatividad. El físico aprendió que para ordenar los fenómenos físicos es mucho más conveniente y sencillo considerarlos en un ámbito tetradimensional espacio-temporal. Luego, en 1916, advirtió que para entender los fenómenos de la gravitación debía generalizar sus conceptos una vez más. En la teoría general de la relatividad, el universo está representado por un ámbito tetradimensional no euclidiano, con su métrica moldearla por masas y sus movimientos.

Las nuevas ideas nacen en la física teórica en virtud del genio y la imaginación de hombres capaces de considerar un problema antiguo desde un punto de vista totalmente nuevo e inesperado. Así nacieron las teorías especial y general de la relatividad; así se incorporó a la física la teoría de los cuantos. En el trabajo de Einstein sobre cosmología advertimos la misma capacidad para considerar problemas antiguos de una manera nueva. Sin embargo, como lo sabemos actualmente, existe una diferencia esencial. Mientras que las teorías especial general de la relatividad se mantienen en nuestros días casi tan lozanas y completas como en el tiempo en que fueron formuladas, mientras que en los últimos treinta años se agregó nada de importancia fundamental a la estructura einsteniana, el problema de la cosmología presenta una apa-

riencia muy diferente de la que tenía en los tiempos en que Einstein escribió su célebre comunicación.

El trabajo sobre cosmología -es decir, sobre la estructura de nuestro universo- aparece más que cualquier otro, dentro de la relatividad, como una aventura realizada en cooperación. Junto al nombre de Einstein hay otros igualmente importantes. Mencionemos aquí al astrónomo holandés de Sitter, el ruso Friedmann, el belga Lemaitre, el norteamericano Robertson. Pero hay también muchos otros; la ciencia no reconoce límites nacionales o raciales, y los científicos de todo el mundo pueden colaborar con todo éxito, si se les permite hacerlo.

Las ideas originales de Einstein dieron comienzo a la ciencia de la estructura de nuestro universo. En manos de otros, estas ideas fueron posteriormente modificarlas y desarrollarlas bajo el peso de nuevas observaciones y nuevas especulaciones basadas en la teoría general de la relatividad.

¿Cual es nuestra visión de conjunto, en la actualidad?

Al sintetizar el resultado de tres décadas de investigaciones experimentales y teóricas, diremos: Nuestro universo es mi universo de islas. Esta constituido por islas de materia, o nebulosas, en un mar de vacío.

Supongamos que viajarnos a través del espacio con la mayor velocidad conocida y posible; es decir, con la velocidad de la luz. En cuestión de minutos dejamos atrás el sol. En unas horas, abandonamos todo nuestro sistema solar; en algunos años llegamos a las primeras estrellas. De esta manera, juzgarnos ahora las distancias por año-luz, por los años que tardaríamos en recorrer estas distancias viajando a la velocidad de la luz.

Nuestro sistema solar y, todas las estrellas que vemos en una noche brillante desde nuestra vecindad más próxima, forman parte de nuestra galaxia, de nuestra nebulosa; constituyen una parte de la isla en que vivimos. Pero esta galaxia (de la cual forman parte el sol, los planetas, las estrellas visibles a simple vista) es sólo una de las numerosas islas, una de las muchísimas nebulosas de nuestro universo. Como islas lejanamente dispersas en un mar, así las nebulosas, los

grandes conglomerados de estrellas, son islas de materia, y el finar es espacio vacío. Nuestra galaxia es una de éstas. Después ele millares de años de viajar a la velocidad de la luz, nos encontraríamos fuera de nuestra galaxia; ;entonces, para llegar a la isla más próxima, el más cercano conglomerado de estrellas, tendríamos que viajar casi un millón de años más! No hay nada de fantástico en todo esto; y no hay razón alguna para sentirse desconcertado por la extensión del vacío y la rareza de la materia en nuestro universo. Hay incluso menos motivo para sentirse trastornado por esto que por la escasez de estaciones de servicio en una carretera del desierto, ya que jamás viajaremos por esos caminos del universo. Los rayos luminosos que llegan a nuestros ojos desde, las nebulosas distantes son los únicos mensajeros que realizan esta travesía; y no les importa el vacío. Por el contrario, no podrían llegar hasta nuestra tierra si encontrara demasiada sustancia absorbente en su largo viaje.

Examinemos las evidencias que nos traen estos mensajeros luminosos y que captan nuestros más potentes reflectores.

Centenas de millares de estas islas-nebulosas han sido fotografiadas. Las más distantes que aún nos resultan visibles, si bien muy tenuemente, se encuentran aproximadamente a medio millar de millones de años luz de nosotros. Esta es la mayor distancia que podemos penetrar en la actualidad. Por medio de la construcción de reflectores mejores (como el de seis metros que ha sido terminado hace poco) podremos penetrar aún más profundamente en el espacio.

La nebulosa media tiene un diámetro de alrededor de veinte mil años-luz, y la distancia media entre las nebulosas es de alrededor de dos millones de años-luz. Lo repito: las nebulosas son islas en un mar de vacío.

El gran astrónomo E. Hubble hace la siguiente comparación pintoresca: imaginemos pelotas de tenis separadas por distancias de quince metros, dispersas a través de una esfera de ocho kilómetros de diámetro. En esta comparación una pelota de tenis representa una nebulosa constituida por muchos millones de estrellas. Los ocho kilómetros representan la distancia que podemos penetrar actualmente. Los

quince metros que separan las pelotas de tenis entre sí nos indican cuán rara es la materia y cuán común el vacío en nuestro universo.

Tal es la estructura del universo en su conjunto, revelada por medio de la observación y la simple interpretación teórica de los resultados de tales observaciones.

Nos interesa la estructura del universo en su conjunto, es decir, en sus características generales, en promedios, y hacemos caso omiso de las irregularidades pequeñas y las desviaciones cosmológicas sin importancia. De manera similar, cuando proyectamos un viaje en avión alrededor de nuestra tierra, nos interesa la distribución de las pistas de aterrizaje, y muy poco nos preocupan las aldeas que hay entre éstas. Para ese propósito consideramos la tierra como una esfera, con puntos que representan los campos de aterrizaje. Pero en otras circunstancias, mientras atendemos los asuntos de nuestra vida cotidiana, nos preocupamos, y debemos hacerlo, acerca de nuestros vecinos y de lo que ocurre en nuestros patios traseros.

Mientras contemplamos el universo en su conjunto nos interesan poco las pequeñas irregularidades, el hecho de que cada isla-nebulosa tenga su propia forma, dimensión, edad e historia peculiares. Las consideramos a todas por igual y no tomamos en cuenta las diferencias de tamaño y las distancias que las separan. Nuestra imagen de nebulosas equidistantes, de tamaños iguales, es idealizada en alto grado. Como se hace siempre en ciencias, aquí también, simplificamos e idealizamos; luego, a medida que pasa el tiempo, habitualmente complicamos nuestra imagen original simple, bajo la influencia de nuevas observaciones. Más adelante estas crecientes complicaciones hacen que la imagen se torne tan espantosa en su complejidad, que tiene que ser rechazada y debe buscarse otra nueva, más simple. Pero en la ciencia aún joven de la cosmología no hemos progresado más allá de unos primeros pocos pasos. Nuestro cuadro es aún muy simple; ¡quizá lo sea en exceso!

Ahora llegamos al rasgo más característica y desconcertante de nuestro universo insular. También nos ha sido revelado por la observación. Expondré primero el resultado en lenguaje técnico. Los espectros

dé las nebulosas muestran un corrimiento hacia el rojo. O, en lenguaje menos científico, las nebulosas parecen huir de nosotros.

Una explicación de nuestros dos juicios equivalentes solamente puede darse en términos de la física. El sonido del silbato de una locomotora que se aproxima a la estación, parece más agudo, para el observador que está situado en el andén, que el tono del mismo silbato cuando la máquina está inmóvil. Por otra parte, el silbato parece más grave cuando el tren se aleja de la estación ferroviaria. Este efecto, bien conocido en acústica, se llama efecto Doppler.

Encontramos también un fenómeno algo similar en la vida cotidiana: Imagine un grupo de personas que viaja en automóvil, y cada hora despacha en dirección a usted un mensajero en motocicleta. Usted recibirá el mensajero cada hora, si el grupo está descansando en alguna casa de turistas. Pero si el automóvil se va alejando, entonces recibirá al mensajero con intervalos de más de una hora; si el automóvil se acerca, lo irá recibiendo con intervalos de menos de una hora. De hecho, a partir de la frecuencia con que llegan los mensajeros, usted podrá deducir la velocidad con que el grupo del automóvil se acerca o se aleja, si conoce la velocidad de los mensajeros y la frecuencia con que le son enviados. Lo mismo vale para el silbato de la locomotora. El tono mide la frecuencia con que llegan los mensajeros sonoros, y es más alto (es decir, la frecuencia es más alta) si la máquina avanza hacia la estación, más bajo si se aleja de ésta.

Un efecto muy similar, también perfectamente conocido para los físicos, es el efecto Doppler en el campo de la óptica.

Un espectroscopio es un aparato que analiza la luz. Por ejemplo, si la fuente luminosa es un gas a través del cual pasa una corriente eléctrica (como, por ejemplo, en el caso del tubo neón) entonces lo que veremos, mirando a la fuente a través de un espectroscopio, son franjas brillantes sobre un fondo oscuro. Los vapores de diferentes elementos dan diferentes sistemas de líneas. No existen dos elementos con dos idénticos sistemas de líneas, así como no hay dos hombres con impresiones digitales idénticas. De esta manera, el sistema de líneas caracte-

riza únicamente el elemento al cual pertenece, y cada elemento está caracterizado por su sistema de líneas.

Al analizar la luz que llega desde las estrellas o nebulosas podemos notar la presencia de los mismos elementos que conocemos y que hemos analizado en nuestra tierra. Las líneas del hidrógeno o del helio tienen la misma estructura, ya sea que provengan de nuestra tierra, del sol, de las estrellas de nuestra galaxia o de las nebulosas.

Sin embargo, si comparamos el espectro de un elemento que está en nuestra tierra con el espectro del mismo elemento que se encuentra en una nebulosa, N euros la misma estructura (de otra manera no podríamos decir que se trata del mismo elemento) , pero también reconocemos algunas diferencias. EL conjunto del espectro -es decir, todas las líneas que caracterizan al elemento- está ligeramente corrido. Esto, por su parte, como lo sabemos por la teoría y el experimento, debiera ocurrir y ocurre si la fuente de la luz (tubo de neón, estrella, nebulosa) se mueve alejándose de nosotros o acercándose. Es el mismo efecto, el efecto Doppler, que hemos reconocido hace un instante en el ejemplo de los mensajeros o el silbato de la locomotora: el sistema de líneas se corre hacia el extremo rojo del espectro. si la fuente de luz se aleja del observador; las líneas se corren hacia el extremo violeta del espectro si la fuente se acerca al observador. El corrimiento hacia el extremo rojo indica una frecuencia disminuida de los mensajeros luminosos, y un corrimiento hacia el violeta señala una frecuencia aumentada de los mismos mensajeros. Como antes, en el caso del silbato y los mensajeros, podemos calcular ahora, partiendo de tal corrimiento hacia el rojo o el violeta, la velocidad con que la fuente de luz se aleja de nosotros o se nos acerca.

Surge el interrogante: ¿por qué se comportan las nebulosas como si huyeran de nuestra galaxia? Por supuesto, la respuesta más simple sería que las nebulosas se comportan como si huyeran de nosotros, sencillamente porque en verdad huyen de nuestra galaxia. Pero la pregunta es ésta: ¿por qué huyen?

Si el corrimiento hacia el rojo y la huida de las nebulosas hubieran sido descubiertas en tiempos bíblicos, habríamos podido contar con

alguna explicación que pareciera satisfactoria. (¡No se me escapa lo disparatado de esta afirmación!) Habríamos podido suponer que en cada galaxia hay algunos sistemas planetarios, y que nuestro sistema no es el único poblado por los llamados seres inteligentes. Puesto que nuestro planeta es el único en el que pecó Adán y el único donde los hombres matan a los hombres, por consiguiente todas las otras nebulosas tienen un complejo profundamente arraigado con respecto a nuestra galaxia y tratan de estar lo más lejos posible de nosotros.

Sin embargo, es difícil que podamos quedar satisfechos con esta explicación. Incluso si los habitantes de otras nebulosas pudieran ver lo que está ocurriendo en nuestra tierra, verían ahora lo que ha ocurrido hace millones de años, debido a que la luz tardaría millones de años en llegar hasta ellos. En segundo lugar, existe otro punto curioso, en verdad muy curioso. La desviación hacia el rojo aumenta con la distancia. Esto significa que cuanto mayor es la distancia que las separa de nuestra galaxia, tanto mayor parece la velocidad de las nebulosas que huyen. ¡Esto es desconcertante! ¿Por qué habría de aumentar la aversión con la distancia? La ley del incremento de este corrimiento hacia el rojo es, en sí misma, en extremo sencilla: cuanto mayor la distancia, tanto mayor, proporcionalmente, ese corrimiento. Una nebulosa que está a una distancia de cien millones de años luz parece huir de nosotros con una rapidez diez veces mayor que una que se encuentra a diez millones de años luz de distancia. Esta ley que relaciona el corrimiento hacia el rojo con la distancia parece ser bastante precisa, si bien en apariencia existen algunas pequeñas desviaciones sistemáticas. Sin embargo la ley es lo bastante útil como para permitirnos determinar las distancias de nebulosas lejanas, por la misma ley del corrimiento hacia el rojo.

Volvemos a nuestro interrogante. ¿Cuál es la explicación para la ley del corrimiento hacia el rojo?

En busca de una respuesta, abandonamos la región de las observaciones y entramos en la de la especulación, la de la teoría general de la relatividad. Existe un puente que conduce hacia esta región de la especulación; esto significa que hay un importante principio que perte-

nece en parte al campo de la observación y en parte al de la especulación.

Si miramos con nuestros reflectores en diferentes direcciones, vemos que estadísticamente no hay direcciones que se distingan. Encontramos, por lo general, tantas nebulosas en una dirección como en cualquier otra. Vemos también que el número de nebulosas por unidad de volumen permanece constante hasta cualquier profundidad donde logren penetrar nuestros reflectores.

Nuestro universo parece contener la materia distribuida en forma bastante uniforme. Por supuesto que hay algunas irregularidades, pero bastante pequeñas como para permitirnos aceptar, con buena aproximación, que dirección ni tampoco punto alguno del espacio se distinguen de los demás.

De esta manera, sacamos en conclusión que nuestro universo es uniforme. Quizá nos hayamos precipitado con excesiva rapidez a esta conclusión. Al parecer todo lo que conocemos es no más que un fragmento de nuestro universo, y el nuevo reflector más amplio puede revelar algunas irregularidades, algunas desviaciones sistemáticas de la uniformidad. Por cierto que esto es posible. Sin embargo, si partimos del supuesto de que el universo no es uniforme, deberíamos saber cómo varía en dirección y profundidad. Resulta evidente que, afirmar que nuestro universo es uniforme, no es denegar de las suposiciones posibles. Así, pues, aceptarnos (y ésta es una hipótesis fundamental) la uniformidad de nuestro universo, y al hacerlo no contradecemos la experiencia.

Este supuesto, adquirido esencialmente de la observación, fue tomado y aguzado en alto grado por la teoría. Se convirtió, por así decirlo, en un mandamiento moral para nuestro universo. Sostenemos que la historia de nuestro universo, tomada en su conjunto, debe ser la misma, ya fuera escrita desde nuestra galaxia o desde cualquier otra nebulosa. Imaginemos, desde que no hay límites para nuestra imaginación, que hacia cada nebulosa enviamos un observador, con su cerebro y sus instrumentos adecuados. La historia de nuestro universo será la misma para cada uno de estos observadores. Esto es lo que significa-

mos con el principio de la uniformidad. Habrá pequeñas irregularidades, por supuesto, pero un universo parejo e idealizado quedará reflejado en la misma forma en las descripciones científicas de todos estos investigadores situados en distintos globos de diferentes nebulosas. .

Ahora tenemos un principio poderoso que restringe las posibilidades para la estructura de nuestro universo. ¡El modelo de nuestro universo debe conformarse al principio de la uniformidad!

Retornamos a nuestra pregunta anterior. ¿Cómo explicamos el corrimiento hacia el rojo? Ahora nuestro interrogante se hace más general y más difícil. ¡Si aceptamos el principio de la uniformidad, entonces esto significa que el observador que está en una nebulosa fuera de nuestra galaxia también advierte el corrimiento hacia el rojo! Por lo tanto, no sólo huyen de nosotros, sino que también lo hacen recíprocamente entre sí.

Pero incluso esta conclusión es un tanto prematura. Quizá el corrimiento hacia el rojo pueda ser explicado también de una manera diferente, y no solamente por la suposición de que las nebulosas huyen. unas de otras.

Lo único que aceptamos en este momento es que cada observador, en cada una de estas nebulosas, confirmaría la existencia del corrimiento hacia el rojo y hallaría que el mismo es proporcional a la distancia.

De esta manera nos vemos conducidos hacia otro interrogante: ¿cuáles son las posibles estructuras de nuestro universo, compatibles con el principio de la uniformidad? Es aquí donde el tema de la estructura de nuestro universo se entremezcla con el de la teoría de la relatividad, y más específicamente con el de la teoría general de la relatividad. Preguntamos: ¿cuáles son los posibles modelos de nuestro universo, acordes con los principios de la teoría general de la relatividad, con el principio de la uniformidad y con el observado corrimiento hacia el rojo?

Cierto es que el principio de la uniformidad y la ley del corrimiento hacia el rojo restringen los posibles modelos relativistas de nuestro universo. Con todo, aún quedan muchos modelos posibles, y la

evidencia de la observación no es lo bastante concluyente como para conceder una única elección. Pero cualquiera sea la índole del universo en que vivimos, sabemos por lo menos que todos los universos posibles pueden ser divididos en dos clases. O nuestro universo es abierto, o es cerrado. Esta importante afirmación no parece excesivamente impresionante. Puede recordar el hecho trivial de que una puerta también suele estar abierta o cerrada. Sin embargo, el reconocimiento de estas dos posibilidades constituye un gran descubrimiento. A principios del siglo XIX la afirmación de que el universo es cerrado habría carecido de sentido. Un espacio euclidiano era entonces la única posibilidad.

¿Cuáles son los riesgos característicos de un universo abierto y de uno cerrado?

Comencemos con un universo cerrado. El universo de las criaturas bidimensionales que viven en una esfera sería cerrado: Recordemos que para ellos un rayo luminoso, después de ser emitido, vuelve finalmente a su punto de partida.

De modo similar, es posible que nuestro universo sea un universo cerrado, aunque es más difícil dar la imagen que describir matemáticamente un espacio esférico tridimensional. Con todo, podemos por lo menos imaginar en principio un experimento crucial que nos indique si nuestro universo es cerrado o no. Envíese un rayo de luz hacia el espacio abierto. Si, después de algún tiempo, el rayo luminoso regresa, significa entonces que el universo es cerrado. Si jamás retorna, entonces el universo es abierto. Hay, por supuesto, algunas dificultades técnicas en relación con este experimento, pero podemos ignorarlas. La mayor dificultad está en que tenemos demasiado poco tiempo; de acuerdo con nuestro conocimiento presente, la luz tardaría miles de millones de años en navegar nuestro mundo y retornar hasta nosotros. Sin embargo, existe una posibilidad de que con el nuevo reflector de seis metros podamos descubrir, de una manera indirecta, si nuestro universo es abierto o cerrado.

Podemos representarnos a nuestro universo como cerrado, si suprimimos una dimensión y lo comparamos con el universo de las cria-

turas bidimensionales que viven en una esfera. Prosiguiendo con nuestra comparación, imaginemos que a través de esa esfera hay puntos áureos distribuidos en forma no densa, pero uniforme; representan para nosotros las nebulosas de nuestro mundo. ¿Qué hay del corrimiento hacia el rojo? Al responder a esta pregunta, podemos complicar ligeramente nuestra imagen bidimensional. Imaginemos que una esfera se expande como un globo bajo un aumento de presión. ¡Esta esfera que se expande, más bien que una esfera con un radio invariable, constituye el modelo bidimensional de nuestro universo! Vemos que tal modelo satisface tanto el principio de la uniformidad como la ley del corrimiento hacia el rojo. En verdad: nuestras nebulosas, los puntos áureos del globo que se expande, permanecerán uniformes en virtud de que han sido distribuirlos en un punteado uniforme, y en razón de que la expansión conserva la forma de la esfera y sólo modifica su radio. Las distancias entre las nebulosas, medidas sobre el globo, han de aumentar. Un observador que esté situado en cualquiera de estas nebulosas verá que las otras se alejan de él. También es evidente que, muy próximamente a cualquier nebulosa dada, la velocidad de la expansión aparecerá, para el observador, proporcional a la distancia.

Examinaremos ahora la otra posibilidad, la de un universo abierto. Aquí es innecesario suprimir una dimensión, y podemos retornar a la imagen tridimensional de nuestro espacio. Es lo más conveniente para comprender este tipo abierto de universo desde una perspectiva histórica.

En algún tiempo lejano toda la materia de nuestro universo estuvo concentrada en un volumen muy pequeño. En nuestro idealizado modelo matemático podemos decir que estuvo concentrado en un punto. De esta manera, todas las nebulosas estaban apretadamente juntas. Luego algo ocurrió, y el mundo entero de la materia estalló como una granada. Las nebulosas comenzaron a huir unas de otras con una velocidad constante. De esta manera, a juzgar desde nuestra galaxia, por ejemplo, las nebulosas que tenían mayor velocidad que las otras se alejaron a una distancia mayor. En la actualidad aún siguen desplazándose uniformemente.

Vemos por qué esta historia de nuestro universo nos da la ley del corrimiento hacia el rojo (proporcional a la distancia) y también satisface el principio de la uniformidad. Cuanto más distantes están las nebulosas, mayor es su velocidad, porque tenían esta velocidad mayor cuando el universo fue creado, y la mantienen en razón de que se desplazan uniformemente. Las nebulosas más próximas, a nosotros tienen velocidades menores, ya que tenían velocidades menores en el momento de su creación, y porque las mantienen actualmente. Advertimos también, aunque esto es un poco más dificultoso, que el principio de la uniformidad no ha sido violado. En verdad, todas las nebulosas estuvieron juntas otrora. y aunque podemos decir que comenzaron a huir de nuestra galaxia, lo mismo puede ser afirmado por los habitantes de cualquiera de estas nebulosas. La más veloz de ellas tendría una velocidad próxima a la de la luz, y toda la materia del universo quedaría encerrada dentro de una esfera con una radio igual a la velocidad de la luz c por el tiempo t^o que ha pasado desde el momento de la creación. Cada observador puede dibujar semejante esfera para sí, y tal afirmación sería válida para todos los observadores. La transición de un sistema (es decir de una nebulosa) a otro está gobernada por la transformación formulada por la teoría especial de la relatividad, la transformación de Lorentz. Ésta nos dice cómo describir los fenómenos en un sistema si conocemos la descripción en otro sistema. Tomemos, por ejemplo, nuestra galaxia como punto O y una nebulosa muy distante como punto P . Entonces P estará próximo al borde de S de la esfera con el radio c trazados a O . Pero el observador situado en P también se imaginará a sí mismo en el centro de esa esfera. Todas las nebulosas que están entre P y S tendrán la apariencia de estar situadas en un casco contraído ante el observador situado en O , en comparación con el que se encuentra ubicado en P . Esto es porque se mueven rápidamente. Es el resultado de la contracción de la longitud en el sentido del movimiento, como lo requiere la teoría especial de la relatividad. Por la misma razón, todas las nebulosas que están más allá de O parecerán estar en un casco contraído para el observador de la nebulosa P .

La historia de tal universo abierto sería la misma para cualquier observador de cualquier nebulosa.

Solamente por medio de un cálculo detallado podemos demostrar más explícitamente cómo surgen, de un cuadro como el que hemos expuesto, la ley del corrimiento hacia el rojo y el principio de la uniformidad.

¿Cuándo fue creado nuestro universo? Partiendo de la observación del actual corrimiento hacia el rojo, podemos deducir que la expansión comenzó hace algunos miles de millones de años.

Ahora, puesto que conocemos por lo menos en esbozo las dos posibles características de nuestro universo, podemos preguntar: ¿es nuestro universo abierto o cerrado? Como lo he dicho antes, no hay pruebas suficientes para responder a esta pregunta. Podemos formular otra más modesta: ¿preferiríamos un universo abierto o uno cerrado? Este, por supuesto, es un interrogante subjetivo, y científicos diferentes podrían dar respuestas distintas. Sin embargo, creo que una gran mayoría de los que trabajan en problemas cosmológicos preferirían' que nuestro universo fuera cerrado. Hay más belleza matemática en un universo cerrado; tal universo es finito aunque no tenga límite. (La pregunta sobre "que hay más allá de una esfera tridimensional" no tiene sentido; no hay un más allá, así como no hay más allá para las criaturas dimensionales que viven en una esfera) . La superioridad matemática de un universo cerrado se hace evidente si consideramos cualquier problema físico sobre esta base cosmológica. En el universo abierto tenemos que preocuparnos acerca de sucesos al infinito, porque hay infinito de tiempo y espacio en tal universo; no los tenemos en un universo cerrado, y, si se nos permite entrar en tecnicismo por un momento, el problema de un campo electromagnético, por ejemplo, se convierte en un atrayente problema de valor límite, que se adapta mucho mejor al esquema general de las teorías de la física moderna, que cuando se lo considera sobre la base de un universo abierto.

Este siglo ha cambiado la imagen de nuestro mundo. Desde los átomos hasta la estructura de nuestro universo observamos cambios

revolucionarios, un rápido desarrollo que difícilmente tenga parangón en la breve historia de la humanidad. Este desarrollo ha surgido en parte de las necesidades, y si lo observamos retrospectivamente parece determinado en esencia por el estado previo de la ciencia. Pero sería erróneo suponer que todo el desarrollo de la ciencia sea de un carácter utilitario. No es así. Muchas de las especulaciones sobre los átomos y sobre nuestro universo fueron creadas por la curiosidad del hombre, por su deseo de penetrar cada vez más profundamente en lo desconocido. El valor utilitario de muchas de nuestras teorías puede ser nulo, pero nos ayudan a comprender el mundo en que vivimos.

He tratado de bosquejar de manera sintética los esfuerzos de los científicos por comprender la estructura de nuestro universo. Estos esfuerzos, si bien están unidos a la observación, tienen esencialmente un carácter especulativo. En los últimos treinta años hemos tenido éxito en la formulación de un nuevo problema, en la consideración de algunas de sus posibles soluciones, pero nuestras respuestas no son ni decisivas ni concluyentes. En verdad, no hay en ciencia respuestas concluyentes o decisivas.

Todas nuestras especulaciones cosmológicas, si bien han avanzado más allá de la comunicación original de Einstein, surgieron de las ideas de la teoría de la relatividad. En la historia del pensamiento humano, representan uno de los muchos senderos que parten de un origen común: la teoría de la relatividad, creación de un solo hombre.

CAPÍTULO V

EL PAPEL DE EINSTEIN EN LA GRAN REVOLUCION INCONCLUSA

El nacimiento de la teoría de los cuantos

La teoría de la relatividad fue creada en todos sus rasgos esenciales por un solo hombre, y sus principios permanecen invariables en la actualidad. Pero la teoría de la relatividad sólo constituye una parte relativamente pequeña del esfuerzo común de todos los físicos que tratan de establecer una teoría coherente de los fenómenos de la naturaleza. Casi todos los físicos estarían de acuerdo en que la gran revolución que reconstruyó la física de nuestro siglo no reside en la teoría de la relatividad sino en la de los cuantos. Su historia es la Historia de nuestros esfuerzos por comprender la materia y la radiación, es decir, la naturaleza y composición de las partículas elementales a partir de las cuales el mundo de la materia y la radiación puede ser reconstruido. Sabemos ahora que nuestro mundo material, el lápiz con que escribo, mi pupitre, mi cuerpo, la tierra, el sol, los planetas; las estrellas, las nebulosas, están todos ellos contruidos con ladrillos de materia de unas pocas clases: electrones, protones, positrones, neutrones y mesones. La teoría de los cuantos trata de las leyes que describen cómo es construida la materia a partir de estas partículas elementales y qué fuerzas actúan entre ellas, tal como se revelan en las líneas espectrales, en los fenómenos radiactivos o en el proceso de la fisión. La historia de la física moderna es en gran parte la de la teoría de los cuantos.

Mientras que la teoría de la relatividad es casi exclusivamente la obra de un solo hombre que avanza por su sendero solitario, la teoría de los cuantos es la realización de muchos hombres que trabajan en forma independiente o en conjunto, avanzado paso a paso en nuestro conocimiento aún incompleto de la materia, la radiación, y su interac-

ción recíproca. Se trata de una historia fascinante y complicada. Si se le pidiera a un físico que citara el nombre más importante dentro de este proceso, le resultaría difícil y preferiría ofrecer una lista de nombres. Si se le solicitara, por ejemplo, que mencionase ocho físicos cuyas contribuciones a la teoría de los cuantos sobresalen entre todas las demás, quizá presentaría la siguiente lista: Planck, Einstein, Bohr, De Broglie, Schroedinger, Heisenberg, Dirac y Pauli. Cada uno de estos hombres ha recibido el premio Nobel por su trabajo teórico sobre la teoría de los cuantos.

De esta manera, si decimos que la teoría de los cuantos es la gran revolución científica de nuestro siglo, advertimos que Einstein desempeñó en ella un papel importante, aunque no único. No podemos describir aquí en su totalidad la revolución producida en la física por la teoría de los cuantos. Sobre este tema se han escrito y se escribirán muchos libros de diferente nivel. Aquí nos dedicaremos principalmente al papel de Einstein en esta revolución. Pero incluso este tema es demasiado amplio, y nos limitaremos a discutir sólo la más importante de las contribuciones de Einstein.

Antes de hacerlo debemos aclarar nuestro cuadro, porque lo que he dicho puede haber dado la impresión de que hay, por así decirlo, dos corrientes distintas en la física moderna: una, más bien estrecha, representada por la teoría de la relatividad, y otra, ancha, representada por la teoría de los cuantos. Una imagen semejante sería en todo sentido errónea. La teoría de los cuantos no es independiente de la relatividad, y es imposible imaginarla sin considerar el papel que la teoría de la relatividad tuvo en su desarrollo.

Es cierto que los comienzos de la teoría de los cuantos fueron independientes de la teoría de la relatividad. Estos comienzos están en la obra de Planck, al principio, de nuestro siglo, cinco años antes de que naciera la Relatividad Especial. La más importante contribución de Einstein a la teoría de los cuantos fue formulada en una comunicación que apareció ya en 1905; en el mismo año y en el mismo volumen de *Annalen der Physik* en que se publicó su artículo sobre la teoría de la relatividad. (Por otra parte, como veremos, éstos no fueron los únicos

trabajos de Einstein que aparecieron en dicho volumen. La oficina de patentes de Suiza debe de haber sido un lugar excelente para trabajar.)

Sólo hasta 1905, por consiguiente, podemos considerar la historia de la teoría de los cuantos en forma independiente de la relatividad. Posteriormente ambas historias se entremezclan; los importantes trabajos de De Broglie y Dirac en la física de los cuantos están vinculados de manera tan estrecha con la teoría de la relatividad, que se los puede considerar en libros que traten cualquiera de los dos temas. Si pudiera emplear por un momento el lenguaje técnico, podría decir que se logró un gran progreso en la teoría de los cuantos al hacerla invariante con respecto a la transformación de Lorentz. Esto se realizó en 1928 por Dirac. Otro ejemplo importante del entrelazamiento de la teoría de los cuantos y la relatividad lo constituye la energía atómica y su utilización. Aquí las ideas cruciales comienzan con la teoría de la relatividad, en la conexión entre masa y energía, pero fue la teoría de los cuantos la que reveló las propiedades de la materia y la desintegración de los elementos que hizo posible la energía atómica. La influencia de la relatividad sobre la teoría de los cuantos constituye en verdad un capítulo muy importante de la historia de la física. Cuando se juzga la gravitación de las ideas de Einstein, no puede ser olvidada esta fase de su vasta influencia sobre la ciencia moderna.

Al considerar el propio papel de Einstein en la gran revolución de los cuantos, debemos retornar una vez más al comienzo de nuestra historia, al año 1905. Pero incluso antes de esto, tenemos que esbozar la historia de los experimentos científicos y las ideas teóricas que condujeron al descubrimiento de Einstein. Por un breve instante tenemos que remontarnos al siglo XIX, a la obra de Newton y Huygens.

En el siglo XVII dos grandes hombres, Newton y Huygens, formularon dos teorías distintas de la luz. Eran la teoría corpuscular y la ondulatoria.

La gran obra de Newton, *óptica*, contiene descripciones de sus experimentos sobre la dispersión de la luz, y una cautelosa formulación de su teoría corpuscular. De acuerdo con Newton, la luz se comporta como si contara de corpúsculos: partículas imponderables que viajan

con la velocidad de la luz. Hay diferentes clases de partículas que corresponden a distintos colores, pero en el vacío todas ellas se mueven uniformemente, a lo largo de una línea recta, con la velocidad de la luz. En la teoría de Newton el fenómeno de la luz es explicado por una imagen mecánica. Sus ingredientes son las partículas imponderables y su movimiento.

Pero la teoría rival de Huygens también es de índole mecánica. Formulada al mismo tiempo, compitió con la de Newton por la supremacía en los dominios de los fenómenos ópticos. De acuerdo con Huygens, la luz es una onda. Cuando hablamos de una onda, debemos distinguir entre la propagación de la onda, y el movimiento de las partículas de materia que forman el medio material a través del cual la onda se desplaza. De modo similar, cuando analizamos las rutas por las que se esparce el chisme, debemos distinguir entre la difusión de éste y los movimientos de una chismosa; ésta puede ir desde su casa hasta la de los vecinos y volver, pero el chisme mismo puede difundirse radialmente en todos los sentidos, desde su fuente. De modo similar, las partículas del agua, en el caso de una onda acuática, se desplazan en un movimiento de vaivén, pero la onda producida por una piedra que cae en el agua se mueve radialmente desde su origen. ¿Cuál es el medio por el que se desplazan las ondas luminosas, según Huygens? Es un medio imponderable, trasparente, que está difundido por todo el universo; el éter. Así es como nació el éter.

Debemos volver una vez más a los conceptos que nos sirvieron de punto de partida. Debemos hacerlo en razón de que la gran obra de Einstein sobre la teoría de los cuantos concierne a la física de la luz, mientras que su gran obra sobre la teoría de la relatividad concierne más bien a la geometría de la luz. Esto resultará claro cuando consideremos los cuantos de luz o fotones, pero antes de hacerlo debemos internarnos más profundamente en el pasado.

Siempre que nos referimos a una onda, los conceptos importantes por los cuales la describimos son: la velocidad con que la onda viaja y la longitud de onda. Esto significa la distancia en cierto momento desde una cresta hasta la cresta más próxima, o desde un valle hasta el

inmediato. De acuerdo con la teoría ondulatoria, los diferentes colores simples se caracterizan por distintas longitudes de onda.

De esta manera tenemos dos teorías diferentes, la corpuscular y la ondulatoria. En la región de nuestras impresiones sensoriales encontramos luces de distintos colores. En el lenguaje corpuscular esto significa partículas de diferentes clases. En el lenguaje ondulatorio, esto quiere decir luces de distintas longitudes de onda.

Es desconcertante que existan dos teorías diferentes, porque parecería que la luz puede ser una onda o una lluvia de partículas, pero que no puede ser ambas cosas a la vez. Filosóficamente tal afirmación carece de sentido. El objeto de una teoría consiste en disponer y explicar los sucesos para formar una imagen sencilla, a partir de la cual puedan ser deducidos los fenómenos y las leyes de la naturaleza. Si en tiempos de Newton los fenómenos conocidos podían ser explicados en forma igualmente correcta por ambas teorías, no existía entonces fundamento para una elección definitiva entre las dos; y ésta era en esencia la situación en aquella época. (La última frase constituye en cierto modo una simplificación excesiva, pero debemos perder la imagen de conjunto si tratamos de ser demasiado escrupulosamente exactos.) Así, pues, ambas teorías podían ser consideradas igualmente verdaderas durante los siglos XVII y XVIII. Pero no fue así en el siglo XIX, porque entonces la situación cambió de manera radical a causa de la obra de Young y Fresnel. Se conoció e investigó exhaustivamente un nuevo fenómeno y una de las teorías dejó de ser aceptable. Fue la teoría de Huygens la que emergió victoriosa durante el siglo XIX.

¿Por qué?

Porque un nuevo fenómeno entró en escena: la difracción de la luz.

Vamos a describir un experimento simple, y pediremos a los defensores de la teoría corpuscular y de la ondulatoria que predigan su resultado. Si sus predicciones difieren, sólo en tal caso, tendremos a nuestro alcance los medios para elegir entre la teoría corpuscular de Newton y la ondulatoria de Huygens.

De los numerosísimos experimentos de esta clase. elegimos uno. Tenemos una fuente luminosa, delante de la cual colocamos una pequeña abertura circular. ¿Qué es lo que aparecerá en una pantalla sobre la cual incide la luz después de haber pasado a través de esta abertura circular?

La respuesta del defensor de la teoría corpuscular de Newton sería más o menos como ésta:

Las partículas de la luz se desplazan en línea recta. Pasarán a través del agujero circular y viajarán dentro de un cono formado por la fuente luminosa (suponemos que esta fuente es un punto) y las líneas que la unen con la abertura circular. Sobre la pantalla veremos una sombra allí donde los rayos luminosos no pueden penetrar; y donde puedan llegar, habrá luz. La transición de la luz a la sombra será brusca.

Recordemos esta predicción, que establece que, por pequeña que sea la abertura circular, habrá siempre una transición violenta de la luz a la oscuridad.

Pero la predicción del defensor de la teoría ondulatoria de Huygens sería diferente; sostendría lo siguiente:

Imaginemos ondas cortas en un río que avanzan hacia ti» barco grande. No podrán llegar al otro lado del barco, el cual, por consiguiente, formará una sombra. Pero reemplacemos el barco por un bote pequeño o un tronco de madera, y las ondas se curvarán y penetrarán hasta el otro lado del obstáculo. De esta manera se tendrá distintamente sombra y falta de sombra, y esto dependerá de que los obstáculos sean muy grandes o no lo sean, en comparación con la longitud de onda. Si esto es cierto, entonces algo similar ocurrirá con el experimento de la proyección de la luz a través de una abertura circular. Si se va haciendo la abertura más y más pequeña, entonces llegará el momento en que la sombra no aparecerá. De acuerdo con mis cálculos, con los cuales no quiero incomodarlos, se verán alternadamente anillos de oscuridad y de luz, en vez de una zona de luz, una sombra. La transición de la luz a la oscuridad se verificará a través de esos anillos oscuros y luminosos, o quizá coloreados, si la fuente emite luz de diferentes colores; es decir,

de distintas longitudes de onda. Una vez que podemos percibir tal fenómeno, estaré en condiciones de deducir, a partir de éste y de mis cálculos, cuán grande, o más bien cuán pequeña, es la longitud de onda de la luz enviada por la fuente. De esta manera, mientras mi colega que cree en la teoría newtoniana predice la aparición de luz y sombra, yo predigo, para aberturas suficientemente pequeñas, la aparición de anillos de luz y sombra, o quizá coloreados. Aquí reside una diferencia esencial entre nuestras dos teorías.

Esta predicción fue la que resultó ser justa y la que estableció el reinado de la teoría ondulatoria en el siglo XIX. El fenómeno de la difracción nos permite medir la longitud de onda de la luz. Por supuesto, en comparación con las dimensiones humanas, es pequeña de onda es pequeña, y fue solamente ésta la razón por la cual pudo ser aceptada durante tanto tiempo, la validez de la teoría corpuscular de Newton. Sin embargo, no olvidemos del todo el cuadro de Newton, porque más tarde veremos que Einstein volvió a él e infundió nuevo aliento a la teoría extinguida.

Los experimentos sobre la difracción de la luz nos permiten medir las longitudes de onda del espectro visible. De todos los colores del arco iris, el violeta tiene la longitud de onda más corta y el rojo la más larga. Durante los siglos XIX y XX este campo se extendió. Se descubrieron los rayos X, que son mucho más cortos (en su longitud de onda) que las radiaciones visibles, y los rayos gamma, mucho más cortos que los rayos X. Ahora también tenemos las ondas radiales, mucho más largas que las radiaciones visibles. Esta gran variedad de las radiaciones es abarcada por una teoría: la del campo, de ¡Maxwell. Tal era el estado de nuestro conocimiento al comenzar nuestro siglo. Las grandes ideas y las nuevas teorías nacen a través de los conflictos, a causa de las dificultades y contradicciones para las que no parece posible ninguna solución satisfactoria. Tales fueron las condiciones que condujeron a las más importantes teorías físicas del siglo XX: los cuantos y la relatividad.

Las dificultades que existen en la base de la teoría de los cuantos son menos espectaculares y parecieron al principio de una menor pro-

fundidad filosófica que las que condujeron a la teoría de la relatividad. Los rasgos más profundos de la teoría de los cuantos aparecen más bien en una etapa posterior. AL presentar la teoría de los cuantos desde un punto de vista lógico, sería conveniente ignorar y soslayar en parte el desarrollo histórico que, en contraste con la teoría de la relatividad, aparece más bien accidental. Pero aquí seguiremos el modelo histórico, puesto que las primeras dificultades influyeron sobre el modo de pensar de Einstein y condujeron a su teoría de los fotones.

¿Qué problema de la física dio origen a la teoría de los cuantos? Pensemos en el espectro visible del sol. La luz que emite el sol es blanca, una mezcla de todos los colores visibles. Podemos dividir esta luz blanca en más componentes, haciéndola pasar a través de un prisma. La naturaleza hace lo mismo para nosotros en el fenómeno magnífico del arco iris. En el lenguaje de la teoría ondulatoria, podemos decir que en el espectro visible del sol tenemos presentes todas las longitudes de onda, comenzando por la más corta, la que corresponde al violeta, hasta la más larga, la que pertenece al rojo.

El sol es la fuente de energía, y esta energía se dispersa a través de ondas de diferentes longitudes. Cada parte de espectro -es decir, cada color- lleva consigo determinada porción de esta energía.

Dividamos este espectro, por ejemplo, en diez partes; esto es, en diez intervalos más pequeños, de acuerdo con las longitudes de onda. ¿Cuánta energía contendrá cada una de esas secciones? ¿Transportará cada una de éstas un décimo de la energía total? Incluso un experimento superficial demuestra que no es así. La energía está desigualmente dividida entre estas secciones. ¿Pero cuál es, entonces, la ley que gobierna todo esto? ¿Cuánto transportará, por ejemplo, la tercera sección, y cuánto la séptima? ¿Cuál es la distribución de la energía radiante del sol en cuanto a las diferentes partes del espectro? Si queremos tener un conocimiento más preciso de la distribución de la energía en el espectro, tendríamos que dividirlo en un número mayor de partes; por ejemplo, en centenares o millares, en vez de diez. Nuestro interrogante puede ser resuelto entonces por la experimentación; esto se hizo en el siglo XIX. El medio mejor para resumir esta respuesta es

un gráfico. En una línea horizontal indicamos todas las posibles longitudes de onda, desde cero hasta el infinito. Luego una curva nos mostrará la energía que corresponde a cada pequeño intervalo. Las partes sombreadas representan las energías en dos intervalos diferentes de igual longitud. En la proximidad de la longitud de onda del azul -4.800 Å- la energía es relativamente la más abundante (10 millones Å [es decir Angstroms] = 1 milímetro.) El extremo rojo del espectro es relativamente pobre en energía.

Surgió entonces el interrogante: ¿cómo se modificaría la distribución de la energía si cayera la temperatura del cuerpo que emite las radiaciones? Este interrogante fue contestado también por la experimentación. Podemos producir soles en miniatura que, si bien son más fríos que el sol mismo, emiten sin embargo toda especie de radiaciones. Podemos investigar la distribución de la energía en sus espectros y descubrir cómo varía tal distribución a medida que disminuye la temperatura. Del mismo modo que antes, podemos trazar distintas curvas referentes a distintas temperaturas, y que nos muestran cómo varía la distribución de la energía con la temperatura. Vemos a través de nuestras curvas que la energía emitida disminuye a medida que disminuye la temperatura. Esto es evidente. Pero hay otro fenómeno más interesante y más sorprendente. Las franjas que transportan la cantidad relativamente mayor de energía se mueven hacia las partes rojas del espectro; es decir, hacia las longitudes de onda mayores. A una temperatura de 6.000° C, la energía mayor está alrededor del color azul. A 3.000° C, sin embargo, está marcadamente más próxima al extremo rojo. La energía en cualquier parte del espectro depende de dos factores: la longitud de onda y la temperatura del cuerpo que emiten las radiaciones; o, expresándolo matemáticamente, la energía es una función de longitud de onda y la temperatura.

Hasta ahora no hemos hecho más que describir los resultados de los experimentos y las mediciones. ¿Pero cómo podemos explicar en forma teórica estos resultados?

Sabíamos bastante -así pensaban los físicos del siglo XIX- sobre la materia que emite las radiaciones, acerca de la radiación misma,

como para deducir la fórmula teórica que nos daría, la distribución justa de la energía. Sí, podíamos deducir una fórmula, pero era errónea. Todas las deducciones, todas las derivaciones teóricas --y había muchas de ellas-- conducían a resultados que estaban en contradicción con la experimentación. Los físicos no podían explicar teóricamente los distintos máximos de las curvas experimentales, y el corrimiento de estos máximos hacia el extremo rojo del espectro al disminuir la temperatura.

Esta dificultad dio origen a la teoría de los cuantos.

El día de su nacimiento fue el 14 de diciembre de 1900, cuando Max Planck leyó un trabajo sobre este tema en la Asociación Germana de Física, en Berlín. Dedujo la fórmula justa de la radiación, pero tan sólo partiendo de supuestos que parecían nuevos, extraños y desconcertantes desde el punto de vista de la física clásica.

Los cuantos

En la vida y en la ciencia nos ocupamos de dos clases de cantidades, las continuas y las discontinuas. Si se habla del número de estudiantes de una clase, se emplean solamente números enteros; el número de estudiantes puede variar sólo según números enteros. La afirmación de que "hoy tuve 25,687 alumnos en mi clase" carece de sentido en absoluto, la riqueza que posee usted o cualquier otro también es una cantidad discontinua. Los ahorros que tiene pueden variar en un centavo, pero no en medio centavo. Podemos decir, empleando un lenguaje más erudito, que un centavo es el cuanto elemental de moneda en los EE.UU. Una vez que establecemos este cuanto, toda la moneda norteamericana puede ser expresada mediante un número entero que indica la cantidad de estos cuantos elementales. No podemos cambiar el número de estudiantes o el monto de moneda mediante un número arbitrario. Podemos modificarlos sólo según los cuantos. Un estudiante es el cuanto elemental en el primer caso, y un centavo en el segundo.

Estas cantidades (número de estudiantes y moneda) no pueden variar continuamente. Solamente pueden variar en forma discontinua.

Si viajamos en tren desde Nueva York, elegimos la estación donde concluimos nuestro viaje; pero nuestras posibilidades de elección, expresadas en términos de las distancias a partir de la Grand Central Station, variarán discontinuamente. En cambio, si vamos en automóvil, podemos ir dondequiera se nos ocurra. Todos los puntos que ahora nos resultan accesibles por medio del automóvil, a lo largo de una carretera, varían de modo continuo. Podemos variar las distancias donde nos detenemos, hasta hacerlas tan pequeñas como se nos ocurra.

De esta manera, en la vida práctica tenemos cantidades continuas y discontinuas. Preguntamos entonces: ¿qué son las cantidades continuas y qué las discontinuas? EL interrogante no tiene sentido. La misma cantidad que era considerada como continua en un caso, puede ser tomada después como discontinua. O quizá podamos decirlo mejor de esta manera: el mismo concepto puede ser considerado como continuo en la descripción de algunos fenómenos y como discontinuo cuando se trata de otros, más sutiles. Esto no debe resultar muy sorprendente. Si se vende la arena del desierto del Sahara por tonelada, puede considerársela como continua; pero si se compara la forma de dos granos de arena bajo el microscopio, difícilmente podrá considerárselos continuos. Algo similar ocurre en la ciencia. Cantidades que eran contempladas como continuas en un caso, resultaban discontinuas en otro. La teoría de los cuantos nos enseñó a mirar como discontinuos ciertos conceptos que anteriormente eran considerados como continuos.

Discutiremos ahora el carácter continuo o discontinuo de los principales conceptos físicos.

El *tiempo* es un concepto continuo. Los períodos de tiempo pueden variar en un número arbitrariamente pequeño.

El *espacio* es continuo. Las distancias pueden variar en un número arbitrariamente pequeño.

La *energía* es continua, de acuerdo con la mecánica clásica. Puede aumentar o disminuir en un número arbitrariamente pequeño.

De paso, recuérdese que la unidad elegida de energía es un ergio, el trabajo realizado por una dina en un recorrido de un centímetro. Una dina es la fuerza que imprime a un gramo la aceleración de un centímetro por segundo por segundo. Quizá sea suficiente recordar, prescindiendo de los mencionados tecnicismos, que un ergio es una unidad muy pequeña de trabajo, que se adapta muy bien a la descripción de la labor cumplida por las hormigas y las moscas, pero que no es apropiada cuando se trata del trabajo de un caballo, o del agua que cae en la represa del valle del Tennessee. Con esto quiero decir que en estos casos el trabajo, si se lo describe en ergios, estaría representado por cifras tan grandes que su manejo resultaría incómodo.

Así, pues, a fines del siglo XIX, el tiempo, el espacio y la energía eran considerados continuos.

¿Qué ocurre con la masa? Por supuesto, en la mecánica clásica la masa también era considerada continua. En la experiencia cotidiana, en nuestra economía doméstica, podemos representarnos, por ejemplo, cambios arbitrarios en la cantidad de manteca que hay en nuestra mesa. Sin embargo, el gran progreso de la ciencia durante el siglo XIX consiste en el reconocimiento de la estructura atómica de la materia; en comprender que cada elemento está compuesto por átomos, que un átomo es el cuanto elemental para ese elemento. Así, por ejemplo, el átomo de hidrógeno tiene la masa de 0,000000 000000 000000 0000017 gramos.

Y no podemos modificar la masa del hidrógeno en una cantidad menor que ésa. Así, pues, el cuanto elemental del hidrógeno es pequeño, pero finito. Este fue un gran descubrimiento, una imagen muy diferente de la newtoniana, donde la masa era considerada como continua.

Desde su primera juventud Einstein se sintió muy impresionado por la nueva imagen atómica que había surgido durante el siglo XIX. AL tratar la estructura atómica de la materia resulta oportuno salir del tema para mencionar, aunque sea brevemente, otra de las contribuciones de Einstein, que no tiene nada que ver con la relatividad ni con la teoría de los cuantos. Me refiero al trabajo de Einstein aparecido en

1905, en el mismo volumen XVII de *Annalen der Physik*, que incluye tres de las comunicaciones de Einstein; la de la teoría de la relatividad, la que trata del efecto fotoeléctrico, al que volveremos brevemente, y la tercera, acerca del movimiento browniano. Este último trabajo es menos importante que los otros dos. En este artículo sobre el movimiento browniano. Einstein buscó algún fenómeno que demostrara con tanta claridad la estructura atómica de la materia, que incluso el más grande escéptico quedara convencido. De esta manera previó y describió el fenómeno del movimiento browniano, fenómeno que debe aparecer si la materia tiene estructura granular. Einstein no sabía que este fenómeno se conocía desde hace ochenta años. De esta manera expuso la teoría del movimiento browniano, sin saber que éste ya había sido observado.

En 1827 Brown advirtió que los gránulos de plantas, las partículas orgánicas o inorgánicas, o cualquier sustancia pulverizada de modo que la longitud de cada partícula es aproximadamente de 1/5000 de pulgada, aparecen agitadas si se las arroja al agua y se las observa por medio del microscopio. Estas partículas, o, como se las llama, las partículas brownianas, se mueven sin cesar, siguiendo unos recorridos fantásticamente irregulares. Nunca se detienen; su movimiento jamás se extingue.

Einstein previó que tal fenómeno debe ocurrir a causa de la estructura atómica de la materia. El agua, o cualquier otro medio al cual son arrojadas estas partículas, está constituida por cuantos elementales de materia en movimiento constante, que impulsan a las partículas brownianas. El movimiento browniano constituye, por así decirlo, una magnificación de la inquietud de las pequeñas partículas de agua, de modo que podemos ver a través del microscopio el resultado de la estructura granular del agua y del bombardeo constante de las partículas brownianas por las partículas del agua. En verdad el estudio del movimiento browniano y el conocimiento de su teoría, tal como fue desarrollada por Einstein, nos permite saber algo acerca de la masa de las partículas que realizan el bombardeo. Hace un instante hemos señalando cuál es la masa del átomo de hidrógeno. ¡Los experimentos

sobre el movimiento browniano y la teoría, tal como fue formulada por Einstein, nos permiten hallar este valor!

Aquí sólo menciono brevemente la historia del movimiento browniano y su teoría tal como fue formulada en el hermoso trabajo de Einstein. Mi propósito es el de destacar la influencia de Einstein sobre nuestra civilización moderna, y en este sentido la historia del movimiento browniano no es muy importante. Independientemente de Einstein, y casi al mismo tiempo que éste, un gran científico polaco, Smoluchowski, mi profesor en Cracovia, formuló la teoría del movimiento browniano. Este científico dedicó una gran parte de su corta existencia al estudio de la estructura atómica de la materia.

Sin embargo, lo importante de esta historia es que, además de los problemas generales, casi filosóficos, que condujeron a la teoría de la relatividad y las teorías acerca de la estructura del universo, Einstein se sintió fascinado por la estructura atómica de la materia. Si bien, como lo hemos visto, los trabajos de Einstein sobre diferentes temas aparecieron en un solo año, es evidente para todo científico que fueron el resultado de años de trabajo y meditación.

Para concluir con la estructura discontinua de la materia, afirmaremos simplemente que a fines del siglo XIX las teorías atómicas eran por lo general aceptadas por los científicos.

¿Es continua o discontinua la electricidad? Al igual que la masa, la electricidad fue considerada continua durante los primeros desarrollos de la ciencia. Pero una vez más, en las postrimerías del siglo XIX, el descubrimiento del electrón nos obligó a cambiar nuestro cuadro. Los electrones son los cuantos más pequeños de electricidad negativa. Por desgracia, para la electricidad positiva tenemos dos cuantos elementales, los pesados protones y los livianos positrones. Estos cuantos de electricidad constituyen al mismo tiempo los ladrillos de los cuales se componen los átomos. Durante el siglo XX descubrimos que el átomo no es un cuanto elemental de materia, que está construido de ladrillos elementales: electrones, protones, positrones, neutrones y mesones. La historia de cómo estos átomos están compuestos de tales ladrillos es en esencia la de la teoría de los cuantos.

Hemos mencionado antes tres cantidades consideradas continuas en la física clásica: el tiempo, el espacio, la energía.. La teoría de los cuantos, que luego se convirtió en la teoría de la estructura de los átomos, comenzó con el descubrimiento de Planck. Podemos formular ahora la gran proeza de Planck: sacó a la energía de la clase de los conceptos continuos y la desplazó hacia la clase de los conceptos discontinuos.

¡La energía, como la masa, como la electricidad, tiene una estructura granular!

Se recordará que el propósito de Planck fue el de hallar la ley justa para la radiación, que todos los supuestos clásicos invariablemente conducían a la ley errónea. Al suponer que la energía sólo puede ser emitida o absorbida en cuantos, Planck dedujo la ley justa para la radiación, espléndidamente confirmada por el experimento. Este éxito dio comienzo a la teoría de los cuantos. Más tarde los fenómenos que confirmaron la estructura granular de la energía fueron tan numerosos, que la teoría de los cuantos se convirtió en la herramienta cotidiana de todo físico.

Preguntamos ahora: ¿qué es el cuanto elemental de energía? El interrogante no es de fácil respuesta. En los EE. UU. el cuanto elemental de la moneda es un centavo. La afirmación de que tengo un centésimo de centavo en un banco carece de sentido. Sin embargo, en Grecia, el cuanto elemental es un dracma, que en este momento equivale a un centésimo de un centavo. Así, pues, un griego que ha ahorrado un dracma puede afirmar que tiene un diez milésimo de un dólar.

¿Ha leído usted el cuento de Robert Luis Stevenson "El diablo de la botella"? Para salvar la vida de su mujer, un hombre compra una botella. Puede realizar milagros con ésta, pero si aún la conserva al morir, su alma pertenecerá al diablo. Así, pues, tiene que realizar rápidamente su milagro y vender la botella. También debe venderla a un precio menor que el que pagó. Estas son las reglas del juego, y si las viola la botella lo apresará. Toda la trama está basada en el hecho de que existe un cuanto elemental de moneda, y esa trama no tendría sentido si la moneda fuera una cantidad continua. El pobre hombre que

quiere salvar la vida de su mujer enferma compra la botella por un "farthing" (moneda que vale un cuarto de penique) , vendiendo su alma al diablo. Confía sus cuitas a su culta esposa, quien halla una solución. Se mudan a Francia, donde cinco centésimos franceses equivalen a un "farthing" y se libran de la botella. Puesto que Stevenson vivía en un inundo estable, aquí concluye la historia.

De modo similar, en el caso de la energía, no existe un solo cuanto de energía, sino muchos. El sol o cualquier otro cuerpo emite o absorbe radiaciones. Cierto es que lo hace en cuantos, pero la dimensión del cuanto dependerá de la longitud de onda de la radiación que aquél emite o absorbe. Cuanto más corta sea la longitud de onda, más grande será el cuanto. La radiación roja tiene una longitud de onda dos veces mayor que la violeta. De esta manera, la materia emite o absorbe la radiación violeta en porciones -es decir, en cuantos- dos veces más grandes que los que corresponden a la roja. Los cuantos de energía de los rayos X (de pequeña longitud de onda) son mayores que los del espectro visible. De esta manera, si determinamos ahora la dimensión del cuanto, por ejemplo, para el extremo rojo del espectro sabremos cuán grande, o mejor dicho cuán pequeño es éste para cualquier otra radiación. Por supuesto que el cuanto de energía será muy pequeño, porque de otra manera la estructura granular de la radiación no habría podido permanecer oculta durante tanto tiempo. El ergio, una pequeñísima unidad de energía, contiene 400.000 millones de cuantos correspondientes a la radiación roja, y 200.000 millones de cuantos que pertenecen a la radiación violeta. En verdad, los cuantos son pequeños.

¿Cómo se determina el cuanto de energía que corresponde a la radiación de una longitud de onda determinada? He aquí las instrucciones de Planck: dividir la velocidad de la luz (30.000.000.000.000 de centímetros por segundo) por la longitud de onda expresada en centímetros y multiplicar por la constante de Planck, expresada siempre y doquier por h. Se obtendrá así el cuanto elemental de energía en ergios correspondiente a esta radiación determinada ¿Qué es h? La respuesta es:

$$h = 0,000000\ 000000\ 000000\ 000000\ 00655$$

Por supuesto, es un número pequeño en razón de que los cuantos de energía son pequeños. (La constante de Planck (h) tiene las dimensiones del ergio x segundo. La "dimensión" nos indica cómo cambiar el número que representa h si cambiamos las unidades de energía y tiempo.)

De esta manera se introdujo una nueva idea revolucionaria en la física, y con ella se puso fin a una discrepancia entre la teoría y el experimento. Fue una de las ideas más fructíferas de toda la historia de la ciencia.

Antes de pasar de este tema a la obra de Einstein, digamos unas palabras acerca de las consecuencias filosóficas implícitas en el descubrimiento de Planck. Como ocurrió siempre en la historia de la física, tuvimos que modificar nuestros supuestos fundamentales en razón de que queríamos responder a la creciente riqueza de nuestras experiencias. Una larga cadena de razonamientos conduce desde estos supuestos hasta la derivación de la fórmula correcta de la radiación. En la física moderna se hace cada vez más larga la cadena de las deducciones que conducen desde los supuestos hasta las conclusiones que pueden ser verificadas por la observación. El desarrollo de la ciencia constituye un proceso biológico. Continuamente nos vemos obligados a cambiar nuestras suposiciones si queremos comprender el mundo en que vivimos

Los fotones

A las ideas de Planck les faltó decisión. Fueron el comienzo de un movimiento al que Einstein imprimió un nuevo ímpetu, en razón de que tuvo el coraje y la independencia necesarios para obtener conclusiones nuevas, de largo alcance:

En el trabajo de Einstein sobre la teoría de los cuantos, reconocemos el mismo rasgo característico que hemos, advertido antes: la

originalidad. Las revoluciones son realizadas por hombres de visión, que ven claramente las grietas del orden antiguo y que tienen la valentía de romper con la tradición; por hombres que se preocupan mucho más de la comprensión que del conocimiento. La teoría de Planck era conocida por Einstein. Si bien éste reconoció su importancia, advirtió que era una especie de artificio, nada más que para obtener una fórmula: la dependencia de la energía de la radiación con respecto a la longitud de onda y la temperatura. Esto es lo que Einstein realizó espléndidamente.

La teoría ondulatoria de la luz se ocupa de la radiación. En su forma inicial la teoría de los cuantos de Planck trata de la emisión y la absorción. Imaginemos que una radiación con una longitud de onda definida cae sobre un cuerpo que la absorbe; esta absorción, entonces, ocurre en cuantos. El cuerpo ingiere bocados de esa radiación, cada uno de un tamaño definido. Lo que hizo Einstein fue cambiar fundamentalmente la imagen de la radiación misma. Descartemos, por lo menos por el momento, la teoría ondulatoria de la luz. Supongamos con Einstein que la luz misma posee una estructura granular, que está constituida por granos, por balas, por cuantos que se precipitan por el espacio con la velocidad de la luz. ¡Cuán similar es esta imagen a la de la teoría corpuscular de Newton! En cierto sentido Einstein revivió la teoría corpuscular de Newton, aunque sus conceptos actualmente tienen una profundidad que no podían haber tenido en tiempos de Newton. La forma primitiva, original, de la teoría de Newton ha de ser modificada, se profundizará su contenido. Con todo, las ideas esenciales serán muy similares. Los granos de energía de la luz, los llamados fotones, ocuparán el lugar de los corpúsculos de Newton. De esta manera la luz, de acuerdo con Einstein, es una lluvia de fotones, y el fotón es el cuanto elemental de energía.

Sin embargo Einstein, si bien revive la teoría de Newton, no abandona la teoría ondulatoria de la luz. El fenómeno de la difracción y los éxitos de la teoría ondulatoria de la luz son demasiado importantes como para que pudiera hacerlo. Einstein no sólo revive la teoría newtoniana, sino que también establece un puente entre la teoría de Hu-

ygens y la de Newton. Es como si Einstein reconciliara a los dos antiguos enemigos, permitiéndoles considerar los fenómenos desde un más elevado nivel de comprensión.

Este período de la obra de Einstein sobre la teoría de los cuantos acerca de la radiación es revolucionario, pero al mismo tiempo conciliatorio. No hay contradicción en esto. Esta teoría de la luz reconcilia las ideas de Huygens y Newton, pero esta reconciliación es realizada mediante la introducción de ideas nuevas y revolucionarias. Lo que Einstein afirma en esencia es que podemos describir satisfactoriamente algunos fenómenos luminosos por medio de la terminología ondulatoria, pero que algunos otros podemos describirlos muy bien en una terminología corpuscular, o de los fotones. Podemos verter ciertas oraciones de una terminología a otra, del mismo modo que podemos traducir la Biblia de un lenguaje a otro. He aquí algunos ejemplos.

*Terminología de la teoría
ondulatoria*

1. El espectro visible contiene ondas de diversas longitudes..
2. La longitud de onda del extremo rojo del espectro es dos veces mayor que la longitud de onda del extremo violeta.
3. La radiación homogénea tiene una longitud de onda definida.

*Terminología de la teoría de
los cuantos*

1. El espectro visible contiene fotones de diversas energías.
2. La energía de un fotón del extremo rojo del espectro es la mitad de la de un fotón del extremo violeta.
3. La radiación homogénea está constituida por fotones de energía igual y definida

En el lado izquierdo de nuestro diccionario en miniatura tenemos la expresión "longitud de onda"; la longitud de onda se mide en centí-

metros. En el lado derecho se habla de la "energía del fotón". La energía-fotón se mide en ergios. El elemento esencial de la teoría de Einstein no es solamente la nueva imagen corpuscular, o más bien de los fotones, sino también el puente, la transición entre el concepto de longitud de onda y el de energía del fotón. Para cada longitud de onda hay una correspondiente energía de fotón, para cada energía de fotón hay una correspondiente longitud de onda. La fórmula para esta transición es la misma que fuera dada antes por Planck, pero Einstein la aplica ahora a los fotones; sigue siendo, incluso en la actualidad, la más elemental e importante fórmula en la teoría de los cuantos: la velocidad de la luz dividida por la longitud de onda y multiplicada por la constante de Planck da la energía del fotón correspondiente. Esta fórmula establece un puente entre la teoría cuántica y la ondulatoria de la radiación.

Revisemos rápidamente la región de la radiación y olvidemos la teoría ondulatoria. Consideremos la radiación como una lluvia de fotones. Las ondas radiales están compuestas por fotones de muy pequeña energía (en el lenguaje de la teoría ondulatoria, la longitud de onda es relativamente grande). Se los puede comparar con bolitas de algodón o lana. Después está el espectro visible. Sus fotones son como balas de revólver. Los fotones de la radiación ultravioleta son como balas de rifle. Luego, los rayos X son como una lluvia de granadas de grandes cañones.

¿Cuál es la justificación para esta nueva imagen corpuscular? ¿Hay hechos experimentales que puedan ser explicados por la teoría de la radiación de Einstein pero no por la teoría ondulatoria? ¡Los hay! Aquí sólo nos ocuparemos del sencillo fenómeno conocido como el efecto fotoeléctrico.

Imaginemos un muro construido a lo largo de la orilla del mar. Una ola marina choca contra la pared, arrastra al retirarse un poco de su superficie, y llega una nueva ola. La masa de la pared va disminuyendo, y podemos preguntar qué parte ha sido arrastrada en un año, por ejemplo. Pero cambiemos la imagen y supongamos que alguien envía disparos hacia el muro, haciendo caer trozos de éste cada vez que una bala lo alcanza. Una vez más la masa de la pared disminuye y bien

podemos imaginar, digamos, que en un año puede alcanzarse la misma reducción de masa por medio de los disparos que por el lavado de las olas. Sin embargo, por la apariencia de la pared podríamos notar fácilmente por cuál de estos dos procesos ha sido reducida la masa de la pared: si por las olas marinas o por la lluvia de balas. Resultará útil tener presente estas dos imágenes mientras discutimos el efecto fotoeléctrico.

Ahora bien: el efecto fotoeléctrico puede ser descrito en el lenguaje de la teoría ondulatoria o en el lenguaje de los fotones. ¿Cuál de éstos es más conveniente? ¿Cuál de éstos conduce a resultados compatibles con la experimentación? Probaremos los dos y veremos. Comencemos con el lenguaje de las ondas.

Una onda luminosa de una longitud de onda definida -digamos, la luz ultravioleta- incide sobre una superficie de metal. La experimentación nos dice que los electrones -es decir, los cuantos elementales de electricidad (y también los ladrillos de los cuales está construida la materia) - son despedidos de la lámina de metal; la energía de la radiación es transformada parcialmente en la energía cinética de los electrones expelidos. En esto consiste el efecto fotoeléctrico: las ondas luminosas despiden electrones desde una lámina de metal.

Supongamos que un físico no conoce la teoría de los cuantos de Planck, ni la teoría de los fotones de Einstein, pero sí la teoría ondulatoria de la luz. Podemos formularle algunas preguntas:

P. ¿Cree usted que todos los electrones tienen la misma energía, es decir, la misma velocidad cuando salen de la lámina de metal?

R. No lo sé, pero no veo por qué habría de ser así. Todo lo que sé es que la energía de los electrones expelidos no puede ser mayor que la de la radiación incidente. Esto lo sé porque creo en la ley de la conservación de la energía.

P. ¿Qué ocurriría si envío más radiaciones, sin incremento la intensidad de la onda incidente? ¿Variará la velocidad de los electrones expelidos?

R. Es posible. Llega más energía, por consiguiente es mayor la energía que puede salir. O serán expelidos más electrones, o aumentarán sus velocidades

P. ¿Se producirá el efecto fotoeléctrico si envío luz violeta en vez de luz ultravioleta?

R. Creo que sí. ¿Por qué no? Si llega la misma energía, debe salir la misma energía en una forma o en otra.

Vemos que las respuestas son vagas, indecisas e incluso erróneas, como veremos después. Cambiemos ahora el cuadro. Nuestra guía será la teoría de los fotones de Einstein, y formularemos otra vez las mismas preguntas.

P. ¿Cree usted que todos los electrones tienen la misma energía, es decir, la misma velocidad cuando salen de la lámina de metal?

R. Decididamente. Bombardeamos la lámina de metal con balas idénticas; un tiro acertado despiden un electrón, transformando la energía de una bala de fotón en la energía cinética de una bala de electrón. Puesto que todas las balas de fotones tienen la misma energía, todas las balas de fotones deben tener la misma energía, y también, por consiguiente la misma velocidad.

P. ¿Qué ocurrirá si envío más radiaciones, si incremento la intensidad de la onda incidente? ¿Variará la velocidad de los electrones expelidos?

R. Usted incrementará el número de tiros acertados, por consiguiente llegarán más electrones, pero cada uno de éstos tendrá la misma energía, es decir, la misma velocidad.

P. ¿Se producirá el efecto fotoeléctrico si envío luz violeta en vez de luz ultravioleta?

R. Esto significa que usted bombardeará la lámina metálica con balas más pequeñas. Nuevamente, cada tiro arrancará un electrón, pero cada uno de estos electrones tendrá una energía menor a causa de que los fotones que efectúan el bombardeo tienen una energía menor. En cambio, si se reemplaza la luz ultravioleta por rayos X, cada uno de estos electrones tendrá una velocidad mayor.

Vemos que de acuerdo con la teoría corpuscular de Einstein se pueden dar respuestas definidas a cada una de estas preguntas. ¿Qué afirmó la experimentación? Confirmó espléndidamente todas estas respuestas. La teoría de los fotones de Einstein quedó demostrada en la ciencia.

La experimentación no sólo confirmó la teoría de Einstein, sino que también permitió medir con exactitud la constante de Planck (h), tan importante en la teoría de los cuantos. Esto se hizo en 1915, diez años después de aparecer la comunicación de Einstein. No es fácil realizar tal medición, pero es fácil explicar la ideal en que se funda. De acuerdo con la teoría de Einstein, la energía del fotón es igual a la del electrón expelido. La energía del electrón y, por consiguiente, la del fotón, pueden ser medidas. Pero la energía del fotón es igual a la constante de Planck multiplicada por la velocidad de la luz y dividida por la longitud de onda. La longitud de onda puede ser medida por el fenómeno de la difracción, y, de esta manera, la única incógnita es la constante de Planck. Así determinó Millikan esta constante, y por este hermoso trabajo experimental recibió el premio Nobel dos años después de que Einstein recibiera esta distinción por la teoría del efecto fotoeléctrico.

La historia de las contribuciones de Einstein a la teoría de los cuantos no está desprovista de rasgos irónicos. En su trabajo sobre la teoría de la relatividad, Einstein estuvo bajo una intensa influencia de la teoría del campo, más precisamente de la teoría del campo de Maxwell, que gobierna los fenómenos ópticos y electromagnéticos. Creía, y sigue creyendo, que la concepción del campo es quizá la más grande proeza humana en la ciencia. Más de una vez Einstein me señaló cuánta mayor importancia asignaba a la realización de Maxwell que a la suya propia. Estoy seguro de que la historia demostrará que la autovaloración de Einstein ha resultado excesivamente modesta. Parece extraño que por una parte admirara la teoría del campo, que basara en ésta sus ideas sobre la relatividad, y que, por la otra parte, pareciera haber realizado los máximos esfuerzos por destruir esta concepción del campo en su teoría del efecto fotoeléctrico. Pero extraer esta conclu-

sión significa algo peor que una simplificación excesiva. Implica una falsificación.

Los principales hitos en el desarrollo de la teoría de la luz fueron éstos:

1. Las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz (Huygens y Newton).
2. El fenómeno de la difracción y la victoria de la teoría ondulatoria (Fresnel, Young)
3. La teoría electromagnética de la luz (Maxwell)
4. La teoría cuántica de la radiación (Einstein) .

¿Puede la física moderna descartar la teoría ondulatoria y aceptar sólo la teoría cuántica de la radiación? Es evidente que no. Podríamos entonces explicar el efecto fotoeléctrico pero no la difracción de la luz. No podríamos explicar la aparición de anillos alternados de sombra y de luz cuando la luz pasa por pequeñas aberturas y cuando se curva en torno a pequeños obstáculos. Esto parece ser un estado de cosas crítico. Tenemos dos teorías -de las ondas y de los fotones-, cada una de las cuales explica ciertos hechos. El fenómeno de la difracción parece estar en contradicción con la teoría de los fotones. El efecto fotoeléctrico parece contradecir la teoría ondulatoria. ¿Cuál es el camino para salir de este dilema? ¿Qué es realmente la luz? ¿Es una lluvia de fotones o son ondas del éter?

Estos son interrogantes nuevos y profundos. Fueron provocados por el gran descubrimiento de Einstein y condujeron directamente al corazón de la teoría de los cuantos, al problema de su carácter estadístico, a la cuestión del determinismo o indeterminismo. Surgió una amplia literatura en torno a estos temas, importante tanto desde el punto de vista científico como filosófico. Se expresaron distintas concepciones, y es imposible aclararlas sin internarse profundamente en toda la estructura conceptual de la teoría de los cuantos.

Sentimos la tentación de insistir en que la luz puede ser una onda o una lluvia de fotones. Pero el interrogante "¿Qué es realmente la

luz?" no tiene sentido. Su significado aparente estuvo basado en la convicción, en la actualidad refutada, de que una sola imagen, una teoría, resulta suficiente para explicar todos los fenómenos. Por el presente, por lo menos, tenemos que valeroso de dos imágenes, la corpuscular y la ondulatoria.

No hay ninguna razón para trastornarse por esto, o para caer en algún misticismo. Podemos imaginar una situación de la vida común en la cual resulte conveniente emplear dos teorías diferentes para la descripción de una misma "realidad".

Imaginemos un hombre que alternativamente se vuelve por completo ciego o sordo, pero sin que nunca le ocurran ambas cosas a la vez. Lo llevan con regularidad al cine. Si ve la película en el período de su sordera, asiste a una película muda. Si concurre en el período de su ceguera, puede suponer que está escuchando discos fonográficos. Puede explicar coherentemente el mundo de sus impresiones sensoriales por medio de dos mecanismos en todo sentido diferentes, que quizá algún día combine en una sola imagen. Reconocerá entonces que la razón de estas dos impresiones distintas reside en sus propias limitaciones, en el hecho de que tiene a su disposición uno solo de los dos sentidos del oído y de la visión.

El descubrimiento de Einstein influyó sobre el desarrollo posterior de la teoría de los cuantos. En la imagen del átomo de Bohr, un electrón salta de un estado a otro, y en cada salto emite un fotón. Este concepto, que utiliza la teoría de los fotones de Einstein, constituye en la actualidad una de las bases de la teoría de los cuantos, junto con otras ideas enteramente nuevas y de suma importancia. Más tarde, la obra de De Broglie fue inspirada e influida por la de Einstein. Si la luz revela su aspecto corpuscular y ondulatorio, ¿no es válido esto para una lluvia de electrones? Aquí conocemos el aspecto corpuscular, pero, siguiendo el argumento de Einstein, deberíamos buscar los fenómenos en los cuales la materia revelara su aspecto ondulatorio. Esta idea fue la que condujo a la predicción y el descubrimiento de las ondas de materia. No sólo estuvo inspirada por Einstein la obra de De Broglie, sino que, más que esto, Einstein fue el primero en reconocer la impor-

tancia y originalidad de las ideas de De Broglie. La obra de Schroedinger está vinculada lógicamente con la de De Broglie, como lo indica la designación de "mecánica ondulatoria". Pero la obra de Schroedinger sólo se adapta a la estructura de la mecánica clásica. De acuerdo con la teoría especial de la relatividad, toda ley de la física debe ser formulada en una estructura inercial, y todas estas estructuras están vinculadas por la transformación de Lorentz. Para expresarlo en forma más técnica, las leyes de la física deben ser invariantes, no sólo con respecto a la transformación de Galileo, sino también en relación con la transformación de Lorentz. Con todo, la mecánica ondulatoria de Schroedinger no fue invariante con respecto a la transformación de Lorentz. Una comprensión más profunda fue la que logró Dirac, quien reconcilió la teoría de los cuantos con la de la relatividad, logrando al mismo tiempo un acuerdo mejor entre la teoría y el experimento. Su teoría condujo al descubrimiento de nuevos ladrillos de materia: el positrón, con una masa igual a la de un electrón y con una carga de signo opuesto. El positrón es un hijo de un matrimonio legítimo celebrado entre la teoría de los cuantos y la de la relatividad.

Mientras escribo estas páginas, yo mismo me siento sorprendido ante la gran influencia de la obra de Einstein sobre la teoría de los cuantos. Su fuente es simultáneamente la teoría corpuscular de la luz de Einstein y su teoría de la relatividad. Con todo, he dejado de lado muchas de las contribuciones de Einstein a la teoría de los cuantos, tales como la estadística de Einstein-Bose, la teoría cuántica del calor específico, y otras. Y todo aquel que siga el desarrollo actual de la teoría de los cuantos sabe que esta influencia está lejos de haberse agotado. Se encuentra aún en crecimiento.

Hay también una ironía en la dirección de Einstein de la gran revolución, porque posteriormente volvió la espalda a la revolución que había contribuido a realizar. Con el correr del tiempo se va sintiendo cada vez más alejado de la joven generación de científicos, la mayor parte de los cuales trabajan en la teoría de los cuantos. En su vida, como en su obra científica, se mantiene apartado. No hay amargura en él, pero no resultan de su gusto los frutos de la gran revolución.

Desde el punto de vista de Einstein, la revolución se le fue de las manos. Para comprender su actitud, debemos entender su obra y su gusto por la ciencia. Las concepciones de Einstein son siempre dignas del mayor respeto, pero no son, sin embargo, las únicas concepciones posibles, y no son compartidas por la mayoría de los científicos de hoy.

Si consideramos la obra de Einstein, advertimos en ésta el intento de desarrollar una teoría general a partir de unos pocos principios. Esto es evidente en las teorías especial y general de la relatividad, donde la estructura lógica es simple y las hipótesis pueden ser expuestas en forma clara y explícita. Una vez que estas teorías fueron construidas, hubo poco que cambiar. Las comunicaciones de Einstein sobre la relatividad no resultan anticuadas en la actualidad.

La situación es diferente en la teoría de los cuantos. Aquí conocemos un número colosal de hechos. La física experimental se encuentra al frente de la teoría. Especialmente en el campo de los fenómenos nucleares no tenemos una sola teoría, sino más bien un mosaico formado por numerosas imágenes contradictorias en parte. Aún estamos procurando establecer una estructura teórica general a la cual puedan corresponder todos los hechos conocidos. No nos rehusamos a hacer nuevas y rápidas suposiciones, a formular teorías que mueren con más rapidez que las flores. Einstein cree que el moderno desarrollo de la teoría de los cuantos es transitorio y que será reemplazado por una teoría construida según líneas diferentes, considera que la gran revolución está inconclusa.

Una vez pregunté a Einstein por qué se sentía tan insatisfecho con la teoría de los cuantos, en especial con el desarrollo que comenzó con su propia obra. Me respondió que él puede haberle dado comienzo, pero que siempre consideró a estas ideas como temporarias; que nunca pensó que otros las tomarían tanto más seriamente que él mismo.

A Einstein le disgusta el carácter estadístico de la teoría de los cuantos, el supuesto de que la teoría de los cuantos se ocupa de leyes que se refieren a muchedumbres y no a individuos. Este carácter estadístico de la moderna teoría de los cuantos es considerado por muchos físicos como esencial, y les parece muy improbable que se modifique

en el futuro. Einstein está casi solo en su convicción de que se modificará. Durante los años recientes ha proseguido aún su trabajo, siguiendo solo por su propio camino, y su influencia sobre el desarrollo contemporáneo de la teoría de los cuantos es casi inexistente. Nadie sabe qué ocurrirá en el futuro. Pero ningún físico duda de que en el porvenir, durante muchos años, el historiador de la ciencia no tendrá dificultad alguna en señalar las huellas dejadas por el genio de Einstein en el dramático desarrollo de la teoría de los cuantos.

CAPÍTULO VI

MAS ALLÁ DE LAS REVOLUCIONES

La búsqueda de la unidad

Hemos visto cómo la teoría de la relatividad, en esencia la obra de un solo hombre, modificó nuestros conceptos del espacio, el tiempo, la masa, la energía, la gravitación y la geometría del mundo. En cambio, la teoría de los cuantos es la obra de muchos hombres, de los cuales Einstein es uno de los más ilustres; sus contribuciones, especialmente su teoría de los fotones, no se han marchitado con el tiempo.

He tratado de explicar con palabras sencillas algunas de las ideas de Einstein: aquellas que pueden ser explicadas en forma sencilla, y aquellas que, más que otras, han influido sobre la ciencia de nuestro siglo.

Puede llamar la atención el hecho de que sólo excepcionalmente nos hayamos referido a la obra de Einstein después de 1921. Todas las ideas básicas de Einstein sobre la relatividad y la teoría de los cuantos fueron los frutos de sus años más jóvenes. Sin embargo, ha trabajado, meditado y escrito trabajos científicos durante toda su vida. Piensa incesantemente acerca de los problemas de la física.

Lo cierto es que después de 1921 y hasta el presente, Einstein ha abordado repetidas veces un problema nuevo y difícil, construyendo y reconstruyendo teorías, rechazándolas y comenzando de nuevo, transitoriamente satisfecho con sus resultados y descartándolos cuando no se mantenían a la altura de sus elevadas normas de simplicidad y belleza. En la actualidad aún trabaja en este problema. Su tenacidad en aferrarse durante años a un problema, en volver a éste una y otra vez, es lo que constituye el rasgo característico del genio de Einstein.

Como lo mencioné, Einstein retornó muchas veces al problema del movimiento durante veinte años, hasta que al cabo quedó resuelto. El otro problema sobre el cual caviló durante veinticinco años permanece aún sin resolver. ¿Será resuelto algún día?

En la teoría general de la relatividad hemos visto que el campo geométrico es también el campo gravitacional. Las ecuaciones del campo de la teoría general de la relatividad son también las ecuaciones del campo de este campo gravitacional o geométrico. Ese campo está determinado por masas, dadas sus velocidades conocidas, y también por el campo electromagnético. En la teoría general de la relatividad las masas, sus velocidades y el campo electromagnético, producido por el movimiento de partículas cargadas, aparecen todos como parte de la física. Pero el campo gravitacional es diferente. Este, y solamente éste, caracteriza la geometría de nuestro mundo. Einstein y, quizá aun antes, Hermann Weyl, uno de los más grandes matemáticos contemporáneos, consideraba esta diferencia entre los campos gravitacional y electromagnético como algo artificial. La teoría general de la relatividad trata estos dos campos de manera enteramente diferentes. El campo gravitacional es también un campo geométrico. Existe, por así decirlo, un aspecto físico y otro geométrico del campo gravitacional, pero está solamente el aspecto físico del campo electromagnético.

El campo electromagnético es un campo, y también tendría que ser posible interpretarlo geoméricamente. Por otra parte, las masas y sus velocidades constituyen conceptos extraños, que se adaptan mal a la estructura de una teoría de campo. Constituyen los restos de la antigua física newtoniana. Desde el punto de vista de la teoría del campo, en vez de decir "he aquí una partícula", debería decirse más bien: "he aquí una región donde el campo es muy fuerte". En vez de afirmar que "una partícula se mueve", debiera decirse más bien que "el campo varía en el tiempo y se mueve la región donde el campo es fuerte". No hay lugar para el concepto de partículas y su movimiento en una teoría pura del campo, y tampoco hay lugar para el campo electromagnético que no pueda ser interpretado igualmente como un campo geométrico. Así, pues, la teoría general de la relatividad, que mezcla sus aspectos de

campo y materia, que considera en forma diferente los campos gravitacional y electromagnético, debería ser contemplada sólo como una estructura temporaria. Una teoría del campo verdaderamente unitaria debería incluir en un sistema unitario del campo las ecuaciones del campo gravitacional y las del campo electromagnético, todas ellas necesarias para la caracterización de la geometría de nuestro mundo. Los conceptos de partículas y su movimiento debieran ser conservadas en una teoría unitaria del campo, como conceptos acerca de regiones en las que el campo es fuerte, y los cambios de tales regiones en el tiempo y el espacio.

A medida que pasaba el tiempo, las exigencias acerca de la teoría unitaria del campo se fueron haciendo cada vez más apremiantes. Cuando el desarrollo histórico destacó luego la importancia de la teoría de los cuantos, el programa de una teoría unitaria general se tornó más y, más amplio. En la actualidad, deberíamos recuperar de una teoría coherente del campo, no sólo las ecuaciones gravitacionales y las del campo electromagnético, sino también las ecuaciones de partículas elementales gobernadas por la teoría de los cuantos. ¿Es realizable ;,se plan ambicioso? Muchos físicos piensan que no, pero Einstein cree que lo es. Si bien Einstein no está del todo solo en sus convicciones también las comparte Schroedinger, por ejemplo), la mayoría de los físicos considera esos esfuerzos demasiado formales y especulativos.

Sin embargo, éste es el problema en el cual ha trabajado Einstein, con unos pocos colaboradores, durante el último cuarto de siglo, siguiendo siempre sus propios caminos, no reconciliados con el viraje que ha dado recientemente la física hacia el logro de resultados rápidos, al tiempo que ignora los grandes problemas cósmicos.

Si observamos la influencia de la obra de Einstein sobre nuestro pensamiento moderno, podemos advertir cuán importante es. Sin embargo, si consideramos todos los trabajos de Einstein, toda su producción científica, quedamos sorprendidos de que sólo una parte relativamente pequeña de su obra haya influido en el desarrollo de la ciencia. ¡Cuántas publicaciones escribió Einstein; colmadas de ingenio, resultado de su trabajo, su pensamiento, de trabajo y más trabajo! ¡Sin

embargo, él mismo consideraría algunas de éstas como anticuadas, erróneas o artificiales! Cuando discutí este mismo problema con Einstein, éste afirmó: "El hombre tiene pocas oportunidades". Un científico es como el que envía disparos al azar y queda atónito cuando acierta un tiro. Pocos, si hubo alguno, han acertado tantos disparos como Einstein, en toda la historia de la física. Pero suponer que los hombres como Einstein no desperdician la pólvora, significa comprender final el carácter de la creación científica y la pequeñez de las oportunidades del hombre.

El filósofo y el hombre

Einstein es considerado no sólo un gran hombre sino también un gran filósofo. Él también se considera un filósofo. A menudo me ha dicho: "soy más filósofo que físico". Hace unos años asistí en Praga a una conferencia del profesor Sommerfeld en la Asociación Física. Dijo ante un numeroso auditorio: "Pregunté a Einstein, a quien considero el más grande filósofo viviente: ¿Existe una realidad fuera de nosotros? Y Einstein respondió: sí, creo en su existencia".

Decir que Einstein es un filósofo no es suficiente. La afirmación puede inducir a error, porque la palabra filosofía es empleada a menudo en dos significados diferentes, por lo menos. En primer lugar se aplica a la filosofía especulativa, que fue la única filosofía hasta el siglo XIX, y su historia está vinculada a nombres como Kant, Hegel y Bergson. Esta filosofía tiene que ver muy poco, o nada, con Einstein. Se funda en la convicción de que algunos interrogantes acerca de la existencia y naturaleza de nuestro mundo externo no son insensatos, que tiene sentido hablar acerca del ser, no ser, que algunos juicios son "sintéticos a priori". Estos filósofos emplean largas palabras para discutir la intuición, la imaginación, la cosa en sí, tratando de expresar en palabras el mundo inexpresable de las experiencias y las creencias.

Pero existe también otro significado de la palabra filosofía, aceptado por la escuela de filósofos modernos conocidos bajo el nombre de

positivistas lógicos, o empiristas lógicos. De acuerdo con esta escuela, la filosofía no es una ciencia en sí, sino una actividad de clarificación, y no existen los problemas puramente filosóficos. O corresponden a otras regiones del pensamiento humano, o carecen de sentido. La filosofía tradicional, es decir, la filosofía especulativa, trataba en tiempos de antaño esos problemas que más tarde fueron absorbidos por la ciencia, por la física, las matemáticas, la biología, la psicología. Para el positivista lógico, un filósofo en su significado moderno es un hombre a quien interesan las bases de nuestro conocimiento, la clarificación de sus conceptos fundamentales.

Sólo en este sentido puede Einstein ser llamado filósofo, y desde este punto de vista es uno de los más grandes que hayan existido jamás. Problemas sobre los cuales los filósofos habían especulado vanamente, problemas del tiempo, el espacio y la geometría, fueron absorbidos dentro del campo de la física en virtud de la obra de Einstein. Los fundamentos de la física se hicieron más claros; fueron descartados conceptos sin sentido como el del éter y de un sistema inercial de coordenadas. La física se hizo más racional, y fueron puestas al descubierto las especulaciones filosóficas vacías. En este sentido la obra de Einstein corresponde a la filosofía, y en este sentido difícilmente pueda señalarse una línea definida de demarcación entre la física y la filosofía.

Einstein considera todos los conceptos físicos como creaciones libres de la mente humana. La ciencia es una creación de la mente humana, una libre invención. Esta libertad sólo está restringida por nuestro deseo de disponer cada vez mejor la creciente riqueza de nuestras experiencias en un esquema más y más satisfactorio según los principios de la lógica. Este esfuerzo dramático por comprender parece proseguir eternamente. La historia de la ciencia nos enseña que, si bien por medio del progreso revolucionario podemos resolver nuestras antiguas facultades, a la larga siempre creamos otras nuevas. Avanzamos desde la complejidad hacia la simplicidad en virtud de nuevas e inesperadas ideas. Luego el proceso evolutivo vuelve a empezar, y conduce a nuevas dificultades y nuevas contradicciones. De esta manera vemos

en la historia de la ciencia una cadena de revoluciones y evoluciones. ¡Pero no hay retrocesos! Como si viajáramos en espiral, alcanzamos niveles cada vez más altos de comprensión, mediante los pasos consecutivos de los cambios revolucionarios y evolutivos.

¿Qué es lo que expresa nuestra ciencia? ¿Es la estructura de nuestro mundo externo? ¿Existe un mundo externo? El idealista diría: "No, el mundo externo irradia de mi mente". El realista diría: "Sí, un mundo externo existe". El positivista lógico afirmarí: "La pregunta no tiene sentido, y me niego a responder a preguntas insensatas". ¿Cuál sería la respuesta de Einstein? No necesitamos conjeturarla, porque la tenemos en sus propias palabras. En su ensayo *El mundo tal como lo veo* Einstein escribió en 1929:

"Lo más hermoso que podemos experimentar es el misterio. Es la fuente de todo arte y toda ciencia de verdad. Aquel para quien esta emoción es desconocida, aquel que ya es incapaz de detenerse para maravillarse y sentirse transportado por un sentimiento reverente, vale tanto como un muerto: sus ojos están cerrados. Esta vislumbre del misterio de la vida, bien que unida al temor, ha dado también origen a la religión. El saber que lo que es impenetrable para nosotros realmente existe, manifestándose como la más alta sabiduría y la más radiante belleza, que nuestros torpes sentidos sólo pueden captar en sus formas más primitivas: este conocimiento, este sentimiento, está en el centro de la verdadera religiosidad. En este sentido, y sólo en este sentido, pertenezco a las filas de los hombres devotamente religiosos."

Einstein tiene clara noción de que desde el punto de vista puramente racional la oración "lo que es impenetrable para nosotros realmente existe", carece de sentido. Pero esa afirmación adquiere sentido si se la eleva del nivel racional de las creencias y convicciones al nivel emocional de las experiencias y los sentimientos religiosos. Es imposible -hablar racionalmente en este plano, y todo lo que puedo hacer es citar las palabras de Einstein. Representan, por cierto, las creencias religiosas de Einstein, que tienen alguna afinidad con las de Spinoza.

Einstein influyó sobre nuestro mundo contemporáneo en virtud de su doctrina, su pensamiento y su palabra escrita. No nació para hombre de acción. Con todo, dudo que haya en la historia de la ciencia algún otro hombre que haya excitado tanto la imaginación de la gente en el mundo entero como lo hiciera Einstein. Si queremos tener una imagen completa de la influencia de Einstein en nuestro mundo, no debemos omitir la que ejerciera como hombre.

Einstein nació el 14 de marzo de 1879, en Alemania, nueve años después de que Bismarck derrotó a Francia y unificó a su país, nueve años después de la Comuna francesa. Vivió durante el florecimiento del imperialismo germano y durante su derrota. Lo vio florecer nuevamente y luego ser derrotado una vez más.

¿Cuál es la importancia del relato de la vida de Einstein para comprender a Einstein? Se han escrito libros acerca del genio. Se han hecho discusiones interminables para decidir en qué grado un genio se forma por la herencia o por el medio. Aunque no conozco la literatura sobre este tema, me inclino a pensar que el problema en gran medida carece de sentido. Aun cuando fuera posible distinguir entre herencia y ambiente, no veo cómo puede ser aplicada a un genio una regla cualquiera. Me parece igualmente tonto tratar de dar una definición del genio. El genio es un fenómeno rarísimo. Se caracteriza justamente por el hecho de que escapa a la clasificación. No existe ningún otro denominador común para el genio. Este es, tal como lo veo yo, su único rasgo característico. Para ser más preciso: he trabajado durante unos pocos años con Einstein, y durante ese tiempo tuve la experiencia inolvidable de observarlo y admirarlo. Creo que lo conozco y lo comprendo tan bien como cualquiera. Durante otros cuatro años, a través de las páginas de la historia, estudié y traté de comprender la obra de otro genio, Evariste Galois. Cualquiera fuera la definición del genio, hay pocas dudas de que tanto Galois como Einstein serían considerados por todo científico como genios. Sin embargo, parecen tan diferentes como pueden serlo dos hombres entre sí. En la trágica vida de Galois vemos las fuertes ataduras con que estuvo amarrado a la sociedad en cuyo seno vivió. Fue atrapado como por una telaraña mortal de

la cual no había escapatoria. Sufrió el impacto del mundo exterior, su injusticia; sangró su corazón y su vida se quemó rápidamente. ¡Cuán diferente de él es Einstein! Su corazón jamás sangra, y marcha por la vida con un suave deleite y una indiferencia emocional. Para Einstein, la vida es un interesante espectáculo que contempla con sólo discreto interés, sin que lo desgaren jamás las emociones del amor o del odio. Es un espectador objetivo de la locura humana, y los sentimientos no dañan sus juicios. Su interés es intelectual y cuando toma partido (¡y lo hace!) se puede confiar en él más que en cualquiera, en razón de que en su decisión el "yo" no está implicado. La gran intensidad del pensamiento de Einstein se proyecta hacia el exterior, hace el mundo de los fenómenos. Nadie expresó con más claridad este apartamiento con respecto al mundo de los asuntos humanos, que el mismo Einstein en *El mundo tal como lo veo*:

"Mi apasionado interés por la justicia social y la responsabilidad social ha estado siempre en curioso contraste con una marcada falta del deseo de asociación directa con hombres y mujeres. Soy caballo para un solo recado, no estoy hecho para el tándem ni el trabajo en equipo. Nunca he pertenecido de todo corazón a un país o un Estado, a mi círculo de amigos, o siquiera a mi propia familia. Estos vínculos siempre han estado acompañados de un vago apartamiento, y el deseo de encerrarme dentro de mí mismo aumenta con los años.

"Ese aislamiento resulta a veces amargo, pero no lamento estar separado de la comprensión y la simpatía de los otros hombres. Sin duda que pierdo algo por ello, pero me compensa de ello el hecho de volverme independiente de las costumbres, las opiniones y los prejuicios de los demás, y no siento la tentación de afirmar la paz de mi espíritu sobre bases tan cambiantes."

Por consiguiente, el escenario exterior de la vida de Einstein tiene poca importancia.

Debe de haber sido tímido y retraído cuando niño. Su capacidad de asombro debe de haber aparecido tempranamente. En los recuerdos de Einstein, la mayor impresión que le quedó en la niñez fue la obser-

vacación de una aguja magnética. Este es el hecho que con tanta frecuencia recuerda cuando habla de sus primeros años. \o fue excepcionalmente brillante como estudiante, ni en la escuela secundaria ni en la universidad. Si no supiera esto por boca de Einstein, podría haberlo deducido con facilidad por mí mismo. El rasgo más característico de su obra es la originalidad y la obstinación, !a capacidad de recorrer un camino solitario durante años y años, no la capacidad de estudio, sino la del pensamiento y la comprensión. Las escuelas y universidades de todo el mundo premian al hombre que puede marchar fácilmente por un camino trillado. El que sabe tiene una ventaja sobre el que cavila.

Cuando niño y cuando joven anhelaba que lo dejaran solo. La vida ideal era, para él, la menos perturbada por las interferencias del mundo exterior. Fue relativamente feliz en Suiza en razón de que ahí se permite a los hombres vivir en soledad y se respeta la vida privada. Los resultados de sus meditaciones, que comenzaron a los dieciséis años, fueron publicados en 1905. Este fue el año en que aparecieron sus cuatro famosos artículos. Su fama entre los físicos se inició cuatro años después. Einstein me dijo -que antes de cumplir los treinta años jamás había conocido un verdadero físico. En el caso de Einstein, esto fue una suerte. No hubo nadie que lo desalentara, aunque de todos modos dudo de que alguien pudiera haberlo logrado.

El resto es la historia del éxito creciente y la fama en ascenso. Para dar unos pocos datos: se graduó en la Escuela Politécnica de Zurich, en Suiza, en 1905, y luego trabajó en la Oficina de Patentes de Suiza. Cuatro años después de formulada la teoría especial de la relatividad fue designado profesor adjunto en la Universidad de Zurich; luego, en rápida sucesión, profesor titular en Praga y nuevamente profesor en Zurich. En 1913 pasó a ser miembro de la Academia de Ciencias de Prusia y se trasladó a Berlín. Ahí permaneció durante los diecisiete años siguientes. Desde 1933 ha vivido en Princeton, Nueva Jersey. Se casó dos veces; una vez se divorció y otra enviudó.

Por supuesto, la fama creciente resultó fastidiosa para Einstein. Le quitó gran parte de su tiempo, pero no tuvo excesiva importancia en

razón de que nada fue jamás importante para él, excepto la comprensión de los fenómenos de la naturaleza.

En 1921, cuando fui a estudiar a Berlín, vi con sorpresa el desdichado espectáculo que acompañaba a la fama de Einstein. Era todavía doce años antes de Hitler. Vi diarios conservadores con editoriales que atacaban la teoría de Einstein: "Si cree en su teoría, que conteste a nuestros argumentos. Seremos justos y publicaremos su respuesta." Pude ver carteles que anunciaban conferencias contra la teoría de Einstein en una de las más grandes salas de concierto de Berlín. Tuve la curiosidad suficiente como para comprar una entrada y asistir al espectáculo. Era un programa en dos partes, con dos profesores como oradores. Un hombre de barbita y voz monótona leyó un manuscrito ante una sala repleta, explicando cuán disparatada era la teoría especial de la relatividad, con su paradoja de los mellizos, que era la más grande farsa en la historia de la ciencia, que la atención prestada a este tema era extraña al verdadero espíritu germano. En aquel tiempo todavía no era oportuno atacar a Einstein abiertamente en su condición de judío, y sin embargo esto se hizo, no una, sino centenares de veces en una forma más velada. En la superficie estaba en Alemania la República de Weimar, pero debajo de esta delgada y mísera superficie podían advertirse los comienzos del inminente torbellino.

Recuerdo, también, que durante el intervalo entre las dos conferencias consecutivas, todo el mundo miraba hacia el paleo donde estaba sentado Einstein. No sé por qué había venido, pero parecía estar pasando un rato magnífico, sonreía ampliamente, prorrumpía en carcajadas, convertido en centro de la reunión por su sola presencia.

Se desarrolló un espectáculo sorprendente. En todo el inundo se pronunciaron conferencias populares sobre la teoría de la relatividad. Incluso hubo dinero en ello. Una revista norteamericana -no recuerdo su nombre anunció un premio de algunos millares de dólares para un artículo sobre la teoría de la relatividad que la explicara .en tres mil palabras. Para estudiantes de un país con inflación, una suma semejante estaba casi más allá de toda imaginación. Ayudé a mi amigo en su participación, y en mi mísera habitación dimos los toques finales a

un ensayo. Mientras contábamos las palabras, soñábamos con la lluvia de oro que la teoría de la relatividad y los EE. UU. nos brindarían. Pero no, no ganamos.

Cuando posteriormente volví a Polonia, encontré, para mi sorpresa, la misma atmósfera. La fama de la relatividad cruzaba las fronteras nacionales. Era tan amplia y apasionadamente debatida como lo es el comunismo .en la actualidad. Mi profesor de matemáticas, Zaremba -y por cierto que fue un matemático muy distinguido- dio una clase para graduados y muchas conferencias populares contra la teoría de la relatividad. Sostenía que ésta es incompatible con la definición de un cuerpo rígido. Un cuerpo rígido es un cuerpo que no se contrae. Por consiguiente, ¿cómo puede una vara rígida contraerse cuando está en movimiento? Por supuesto, era un argumento trivial, a pesar de que mi profesor lo expresó en lenguaje pesado y erudito. El hecho simple de que los mismos cuerpos que consideramos rígidos se comporten de manera diferente de acuerdo a la física clásica y a la teoría especial de la relatividad, no fue comprendido por el anciano profesor, ni yo me habría atrevido a explicárselo. Fue atacado de una manera muy brutal por otro profesor, también un matemático y astrónomo distinguido (su nombre era Bonachiewicz) , quien llamó ciego a Zaremba y dijo que sus argumentos eran tontos. Lo que ocurrió en Cracovia, mi pequeña ciudad universitaria, es interesante sólo en razón de que hechos similares ocurrieron por todo el mundo. Las conferencias populares acerca de la teoría de la relatividad atraían grandes muchedumbres, y perplejos auditorios escuchaban los argumentos en favor y en contra. Incluso persuadieron a Einstein a que diera disertaciones públicas sobre la teoría de la relatividad. No fue un popularizador muy bueno de su propia doctrina, y sin embargo el público se sentía encantado de ver a Einstein y escuchar su agradable voz. Durante una de sus clases jugaba con una varilla que estaba sobre la mesa. Una dama preguntó a otra: "¿Por qué no deja en paz la varilla?" Pero pronto se dio cuenta de qué se trataba. Cuando Einstein mostraba por medio de gestos cómo una varilla se mueve y se contrae, la aliviada dama susurró a su vecina: "No sabía que ésta es la varilla que se contrae."

Yo mismo me sentía dispuesto y deseoso de participar en tales discusiones, y sufría cuando no me invitaban a hacerlo. Un año después, en 1922, era profesor de una escuela secundaria en una pequeña ciudad polaca. La excitación de la teoría de la relatividad llegó incluso allí, y tuve la rara distinción de ser el único de ese pueblo que sabía algo acerca de la teoría de la relatividad. Di una serie de cuatro conferencias, y hubo que ordenar a muchos que salieran de la sala, porque era imposible ubicar a todo el gentío. Después de una de mis disertaciones, uno de mis amigos observó agudamente: "Hubiera preferido mucho más escuchar una conferencia de Einstein acerca de Infeld".

Poco a poco los argumentos contra la teoría de la relatividad fueron apaciguándose. En la actualidad nadie duda de que los axiomas de la teoría especial y general de la relatividad son superiores a los de la física clásica. Puede dudarse de que la revolución sea lo bastante profunda, pero nadie que esté en su sano juicio creerá que es posible una retirada hacia la posición de la física clásica. Incluso después, cuando Hitler llegó al poder, aún siguieron imprimiéndose en Alemania trabajos sobre la teoría de la relatividad. Esto era considerado correcto, en tanto se omitiera el nombre del creador de la teoría de la relatividad.

Incluso cuando se comprende por qué la fama de Einstein comenzó bruscamente, no se advierte con tanta facilidad por qué perdura aún. Hay diferentes razones. Creo que una es que algunos de los Herren Professoren lo combatieron un poco demasiado encarnizadamente como para que ellos mismos resultaran beneficiados. La otra razón es que la personalidad de Einstein presenta atrayentes matices. Se advierte esto cuando se mira alguna de sus fotografías. Si Einstein entrara a un salón donde se celebra una reunión y se lo presentaran a usted como el señor Einstein de quien usted no tenía ninguna noticia, quedaría fascinado por el brillo de sus ojos, por su recato y delicadeza, por su delicioso sentido del humor, por el hecho de que puede convertir una trivialidad en sabiduría, y porque todo lo que pudiera decir sería el producto de su propia mente, no influido por el griterío del mundo exterior. Uno siente que se encuentra frente a un hombre que piensa

por sí mismo. Ha ejercido su influencia sobre millones de personas, pero, en un sentido más profundo, nadie puede influir sobre él.

Durante la primera guerra mundial, y posteriormente, se vio a Einstein entrar en la arena política, o más bien ser empujado hacia ésta. Toma partido. Siente desprecio por la violencia, la bravuconería, la agresión, la injusticia. Creo que "desprecio" es la palabra justa. Sería erróneo emplear en su lugar la palabra "odio". Es siempre bondadoso, y en virtud del fuerte impacto del mundo exterior aprende los gestos necesarios para demostrar interés y ocultar su íntimo alejamiento. Su apariencia ayuda. Su notable rostro de gran artista o profeta, sus ojos que parecen irradiar pueden inducir a engaño cuando se habla con Einstein. Su radiación se dirige allá lejos, hacia el mundo y las leyes que lo gobiernan, y no hacia los problemas personales del interlocutor. Sin embargo, firmará gustoso una carta de recomendación, con una aguda observación y una sonora carcajada, mientras no tenga una prueba definida de que se trató de un pícaro o un incapaz. Cree en lo que se le dice porque es bondadoso, porque quiere serlo, y porque es mucho más sencillo creer que desconfiar. Se puede pensar que es posible convencer a Einstein de cualquier cosa, pero se volverá empecinado e inflexible cuando advierte que está tratando con un fascista. Se tornará suspicaz si en 189 le traen un proyecto que parece beneficiarlo a él y no al que se lo presenta.

En 1914 se negó a firmar el Manifiesto de los científicos alemanes. Después de la segunda guerra mundial fue el primer científico alemán invitado a Francia.

Su más importante participación en las cuestiones mundiales se produjo en 1939. La historia de cómo los físicos trataron sin éxito de interesar a la Marina y al Ejército en el Proyecto Atómico está relatada en el informe Smyth, con sutiles reducciones y omisiones. Fue la famosa carta de Einstein a Roosevelt la que rompió la rigidez de la mentalidad militar. Einstein, que siente desprecio por la violencia y las guerras, es considerado el padre de la Bomba Atómica. Esto es así en razón de que la historia moderna del desarrollo de la energía atómica comienza con la relación de equivalencia de Einstein entre masa y

energía. Esto es así también a causa de que la historia de la Bomba Atómica comienza con la carta de Einstein.

En estos tiempos oscuros, cuando el aire está colmado de vacías trivialidades, argumentos tontos, embustes de hombres minúsculos, resulta refrescante escuchar la voz clara que apela a la razón. Es la lejana conciencia del mundo que nos dice (Sólo entonces seremos libres)

"La ciencia ha puesto de manifiesto este peligro, pero el problema real está en las mentes y los corazones de los hombres. No cambiaremos los corazones de los otros hombres por medio de mecanismos, sino cambiando nuestros corazones y hablando con valor.

"Debemos ser generosos brindando al mundo el conocimiento que tenemos acerca de las fuerzas de la naturaleza, después de establecer resguardos contra el abuso.

"No debemos tener meramente la disposición, sino el afán activo de someternos a la autoridad valedera para todos, necesaria para la seguridad mundial.

"Debemos comprender que no podemos planear simultáneamente para la paz y para la guerra.

"Cuando tengamos claridad en el corazón y la mente, sólo entonces hallaremos el coraje necesario para remontar el miedo que acosa al mundo."

Al tratar de comprender por qué Einstein atrae la imaginación de tantos de .sus semejantes, acude a mi mente una extraña comparación. En una aldea de la India hay un sabio y anciano santo. Está sentado bajo un árbol y nunca habla. La gente observa sus ojos dirigidos hacia el cielo. No conocen los pensamientos de ese anciano, porque siempre permanece silencioso. Pero se forman su propia imagen del santo, una representación que los conforta. Perciben una profunda sabiduría y bondad en sus ojos. Traen alimentos hasta el árbol donde está sentado el hombre, felices de que en virtud de este pequeño sacrificio puedan formar una comunión con los elevados pensamientos de su santo.

En nuestra civilización no tenemos aldeanos primitivos ni santos silenciosos y contemplativos. Sin embargo, vemos en nuestros diarios

la figura de un hombre que no va a la peluquería, que no usa corbata ni medias, cuyos ojos parecen mirar apartados de las pequeñeces de nuestro mundo. No brega por la comodidad personal. Se preocupa poco por todas las cosas que tanto significan en nuestras vidas. Si habla en defensa de una causa, no lo hace por su gloria personal. Es alentador para nosotros saber que un hombre así aún existe, un hombre cuyos pensamientos están dirigidos hacia las estrellas. Le otorgamos la admiración en virtud de que al admirarlo nos demostramos que también nosotros anhelamos las estrellas lejanas.

Einstein se ha convertido en un símbolo para muchos, un monumento que los hombres han construido, un símbolo que necesitan para su propia confortación.

Y quizás, en último análisis, estos hombres están en lo justo. Tal vez la real grandeza de Einstein reside en el hecho simple de que, si bien durante su vida ha estado observando las estrellas, también ha tratado, sin embargo, de contemplar a sus semejantes con bondad y compasión.

SUCESOS DE LA VIDA DE EINSTEIN

- 1879 - Nace en Ulm, Baviera (Alemania).
- 1880-1894 - Transcurridos en Munich, donde asiste a la escuela secundaria.
- 1894 - La familia se traslada a Milán, Italia.
- 1896-1901 - Estudia en Suiza, en la Escuela Politécnica de Zurich.
- 1901 - Se convierte en ciudadano suizo; trabaja en la Oficina de Patentes de Berna; primer matrimonio.
- 1905 - Aparición de trabajos sobre la Teoría de los Cuantos, Teoría de la Relatividad, Movimiento Browniano. Dicta conferencias (como Privat Dozent) en la Universidad de Berna.
- 1909 - Profesor extraordinario (Ausserordentlicher) en la Universidad de Zurich.
- 1910 - Profesor de física teórica en la Universidad Alemana de Praga.
- 1912 - Profesor de física teórica en la Escuela Politécnica de Zurich.
- 1913 - Miembro de la Academia Prusiana; se traslada a Berlín.
- 1916 - Concluye esencialmente su trabajo sobre la Relatividad General; segundo matrimonio.
- 1919 - Confirmación de la teoría de la Relatividad General, por la observación de la desviación de la luz en un campo gravitacional.
- 1919-1932 - Visita los Estados Unidos, Inglaterra, Francia, China, Japón, Palestina, España. En 1922 recibió el Premio Nobel por su teoría del efecto fotoeléctrico.
- 1933 - Renuncia a la Academia Prusiana; es nombrado profesor del Instituto de Estudios Superiores, Princeton, Nueva Jersey.
- 1945 - Retiro oficial.

BIBLIOGRAFÍA

Hay una imponente acumulación de literatura que trata de la Teoría de la Relatividad, en todos los planos posibles. Mencionaré los libros que fueron escritos por lo menos en forma parcial por Einstein. Este me parece aquí el único método razonable de selección, a fin de evitar páginas de bibliografía.

Libros no técnicos

A. Einstein: *Relativity; the special and general theory*, 138 págs., Nueva York (Holt), 1920.

Este es el libro popular de Einstein sobre la relatividad, mencionado en el Capítulo I.

A. Einstein: *Sidelights on relativity*, 56 págs., Londres (Methuen), 1922. Incluye las clases sobre "Eter y relatividad" y "Geometría y experiencia".

A. Einstein: *The world as I see it*, 290 págs., Nueva York (Covici Friede), 1934.

Una colección de cartas, artículos, conferencias sobre diferentes temas.

A. Einstein y L. Infeld: *The evolution of physics*, 313 págs., Nueva York (Simon and Schuster), 1938.

Libros de un nivel más técnico.

A. Einstein: *The meaning of relativity*, 135 págs. (Princeton University Press), 1945.

Una segunda edición de las conferencias de Einstein sobre la teoría de la relatividad pronunciadas en 1921.

A. Einstein: The principle of relativity, 186 págs., Calcuta (Universidad de Calcuta), 1920.

Contiene reimpresiones de los trabajos originales de Einstein y los de Minkowski.