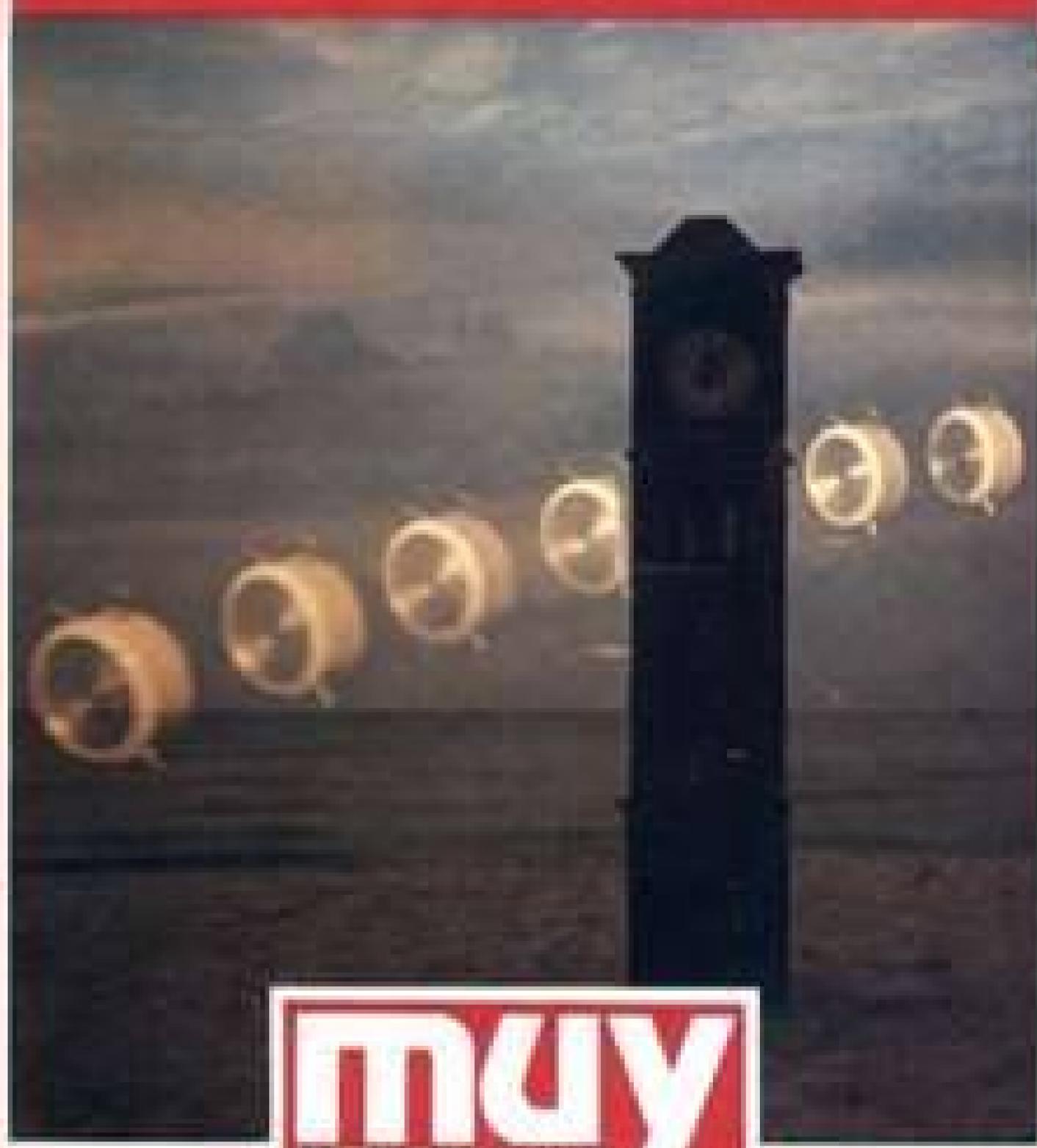


# ABC DE LA RELATIVIDAD

---

Bertrand Russell



**muy**  
INTERESANTE

BIBLIOTECA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

# El ABC de la Relatividad

---

Bertrand Russell

Digitalización: [maplewhite@gmail.com](mailto:maplewhite@gmail.com)

## Índice

1. Tacto y vista: la tierra y los cielos	1
2. Lo que sucede y lo que se observa	7
3. La velocidad de la luz	15
4. Medidas de tiempo y de longitud	23
5. Espacio-Tiempo	31
6. La teoría especial de la relatividad	38
7. Intervalos en espacio-tiempo	49
8. La ley de gravitación de Einstein	60
9. Las pruebas de la ley de la gravitación de Einstein	71
10. Masa, momento, energía y acción	78
11. El universo en expansión	89
12. Convencionalismos y leyes naturales	99
13. La abolición de la «fuerza»	107
14. ¿Qué es la materia?	114
15. Consecuencias filosóficas	120

## 1. Tacto y vista: la tierra y los cielos

Todo el mundo sabe que Einstein hizo algo asombroso, pero muy pocos saben con exactitud qué fue lo que hizo. Todos reconocen que revolucionó nuestra concepción del mundo físico, pero las nuevas concepciones están envueltas en tecnicismos matemáticos. Es cierto que hay innumerables exposiciones de tipo popular de la teoría de la relatividad, pero en general dejan de ser inteligibles en el momento en que empiezan a decir algo importante. Apenas si podemos reprochar a sus autores por ello. Muchas de las nuevas ideas se pueden expresar en un lenguaje no matemático, pero no por ello dejan de ser menos difíciles. Lo que se pide es un cambio en nuestra concepción del mundo, concepción que viene de muy atrás, de nuestros antepasados prehumanos quizá, y que cada uno de nosotros hemos aprendido desde nuestra más tierna infancia. Un cambio en nuestra imaginación es siempre difícil, especialmente cuando ya no somos jóvenes. Copérnico pedía esta misma clase de cambio cuando enseñó que la tierra no está quieta y que los cielos no giran a su alrededor una vez al día. Esta idea no es difícil para nosotros, porque la hemos aprendido antes de que se fijaran nuestros hábitos mentales. De la misma manera, las ideas de Einstein parecerán más fáciles a las generaciones que crezcan con ellas. De todos modos, nos es inevitable cierto esfuerzo de reconstrucción imaginativa.

Para la exploración de la superficie de la tierra nos servimos de todos nuestros sentidos, y más particularmente de los sentidos del tacto y de la vista. En épocas precientíficas, se empleaban partes del cuerpo humano para medir la longitud: un «pie», un «codo», un «palmo» están definidos en este sentido. Para mayores distancias pensamos en el tiempo que se tarda en ir de un lugar a otro. Gradualmente aprendemos a juzgar la distancia de modo general a ojo, y para mayor precisión nos apoyamos en el tacto.

Es el tacto, además, el que nos da el sentido de la «realidad». Ciertas cosas no se pueden tocar: el arco iris, los reflejos en nuestros espejos, etc. Son las cosas que dejan perplejos a los niños cuyas especulaciones metafísicas se detienen porque se les ha enseñado que lo que hay en el espejo no es «real». El puñal de Macbeth era irreal porque no era «tan sensible al tacto como a la vista». No sólo nuestra geometría y nuestra física, sino también toda nuestra concepción de lo que existe fuera de nosotros están basadas en el sentido del

tacto. Llevamos esto hasta nuestras metáforas: una buena conversación es «sólida», una mala conversación es «vaporosa», porque creemos que un gas no es completamente «real».

Al estudiar los cielos nos vemos privados de todos los sentidos, a excepción de la vista. No podemos tocar el sol, o viajar hasta él. Tampoco podemos caminar alrededor de la luna, ni aplicar la medida del pie a las Pléyades. Sin embargo, los astrónomos han aplicado constantemente a ellos la geometría y la física que creían válida para la superficie de la tierra y que se basaba en el tacto y en el camino. Al obrar así, no dejaban de tener sus dudas y quebraderos de cabeza, que Einstein había de aclarar. El resultado es que mucho de lo que aprendimos por el sentido del tacto no era más que un prejuicio acientífico, que debemos rechazar si queremos tener una idea verdadera del mundo.

Un ejemplo nos puede ayudar a comprender la imposibilidad que tiene el astrónomo de aplicar estos métodos cuando se le compara con el hombre interesado por cosas que están en la superficie de la tierra. Imagínate que acabas de tomar una píldora que te deja temporalmente inconsciente y que, al volver en ti, has perdido la memoria, pero no la facultad de razonar. Supón también que mientras te encontrabas inconsciente te montaron en un globo que, empujado por el viento, navega contigo hacia una noche oscura: la noche del 5 de noviembre, si estás en Inglaterra, o la del 14 de julio, si estás en América. Desde el globo puedes ver los fuegos artificiales lanzados desde tierra, desde los trenes y aeroplanos que marchan en todas direcciones, pero no puedes ver el suelo, ni los trenes o aeroplanos a causa de la oscuridad. ¿Qué tipo de visión del mundo te formarás? Puedes pensar que nada está fijo: sólo hay breves ráfagas de luz que, durante su corta existencia, caminan a través del vacío, formando las curvas más variadas y extrañas. Tampoco puedes tocar estas ráfagas de luz, solamente puedes verlas. Evidentemente, tu geometría y tu física serán completamente diferentes de las de los simples mortales. Si un simple mortal estuviera contigo en el globo, encontrarías ininteligible su conversación. Pero si estuviera Einstein, le comprenderías más fácilmente que el común de los mortales. Te verías libre de una serie de prejuicios que impiden a la mayoría de las personas poder entenderle.

La teoría de la relatividad consiste, en buena parte, en desprenderse de

las nociones que son útiles en la vida ordinaria, pero que no sirven a nuestro drogado hombre del globo. Circunstancias de la superficie de la tierra, por varias razones más o menos accidentales, sugieren concepciones que luego resultan inadecuadas, aunque se hayan llegado a considerar como exigencias del conocimiento. La más importante de estas circunstancias es que la mayoría de los objetos de la superficie de la tierra están totalmente firmes y casi estacionarios desde un punto de vista terrestre. Si esto no fuera así, la idea de emprender un viaje no parecería tan concreta y definida cómo es. Si quieres viajar de King's Cross a Edimburgo, sabes que encontrarás a King's Cross donde ha estado siempre, que la línea del ferrocarril seguirá el mismo trayecto del último viaje que hiciste y que la Waverley Station de Edimburgo no se ha desplazado al castillo. Sabes, pues, y lo crees, que has viajado a Edimburgo, no que Edimburgo ha venido a ti, si bien esta última afirmación sería al menos tan exacta como la primera. El éxito de este punto de vista del sentido común depende de una serie de cosas que caen dentro de lo que llamamos suerte. Supón que todas las casas de Londres estuvieran girando constantemente, como un enjambre de abejas. Imagínate que los ferrocarriles se movieran y adoptaran unas formas semejantes a avalanchas. Finalmente, puedes figurarte que los objetos estuvieran en perpetuo movimiento formándose y disolviéndose como las nubes. No hay nada imposible en estas suposiciones. Pero, naturalmente, lo que llamamos un viaje a Edimburgo, no tiene sentido en esta clase de mundo. Comenzarías sin duda a preguntar al taxista: «¿Dónde cae esta mañana King's Cross?» En la estación tendrías que hacer una pregunta semejante respecto a Edimburgo. Pero el empleado de la oficina respondería: «¿A qué parte de Edimburgo se refiere, señor?». Prince's Street se ha desplazado a Glasgow, el castillo subió a las Highlands y Waverley Station está bajo el agua en medio del Firth of Forth». Aparte de esto, durante el viaje, las estaciones no habrían permanecido quietas, pues unas se habrían desplazado al norte, otras al sur, otras al este o al oeste, quizás mucho más rápidas que el mismo tren. En estas condiciones ya no podrías decir dónde te encontrabas en un momento dado. En realidad la noción completa de que se está siempre en un lugar «concreto», se debe a la feliz inmovilidad de la mayoría de los objetos sólidos que cubren la superficie de la tierra. La idea de «lugar» es sólo una aproximación práctica y burda: lógicamente, no existe ese lugar necesario, ni tampoco puede precisarse.

Si no fuéramos más anchos que un electrón, no tendríamos esta impresión de estabilidad, debida únicamente a la rudeza de nuestros sentidos. King's Cross, que nos parece sólido, sería demasiado vasto para que lo pudiéramos concebir. Sólo lo podrían hacer algunos matemáticos excéntricos. Los trozos que podríamos ver de este mundo consistirían en leves puntos de materia, sin llegar nunca a estar en contacto entre sí, ya que giran zumbando en un baile-danza inconcebiblemente rápido. El mundo de nuestra experiencia sería tan loco como aquel en que fueron a parar las diferentes partes de Edimburgo en todas direcciones. Si —por tomar el extremo opuesto— fueras tan grande como el sol y vivieras tan lejos como él, con una correspondiente lentitud de percepción, te volverías a encontrar nuevamente con un universo confuso y revuelto; las estrellas y los planetas irían y vendrían como la niebla de la mañana. Nada permanecería en una posición fija en relación a otra cosa. La noción de estabilidad comparada, que forma parte de nuestra visión ordinaria de las cosas, se debe a nuestro tamaño y a que vivimos en un planeta cuya superficie no es muy caliente. De no ser así, nos encontraríamos una física de la prerrelatividad, intelectualmente satisfactoria. Tendríamos que habernos parado en un punto de la física de la relatividad, o permanecer ignorantes de las leyes científicas. Por fortuna para nosotros, no estamos abocados a esta alternativa, ya que es casi inconcebible que un solo hombre pueda hacer la obra de Euclides, Galileo, Newton y Einstein. No obstante, sin un genio increíble, apenas se habría podido descubrir la física en un mundo en que el flujo universal era obvio a la observación no-científica.

Aunque en astronomía, el sol, la luna y las estrellas siguen existiendo año tras año, no obstante, en otros aspectos, el mundo que debemos tratar es muy distinto al de la vida diaria. Como ya hemos observado, dependemos exclusivamente de la vista: no podemos tocar, oír, oler o gustar los cuerpos celestes. Todo se mueve en los cielos en relación a todo lo demás. La tierra gira alrededor del sol, el sol se mueve mucho más rápido que un tren expreso hacia un punto de la constelación Hércules, las estrellas fijas danzan de acá para allá como bandada de gallinas asustadas. En el cielo no hay lugares perfectamente delimitados, como King's Cross y Edimburgo. Cuando viajamos de un lugar a otro de la tierra, decimos que el tren se mueve y que las estaciones están quietas, porque las estaciones conservan sus relaciones topográficas entre sí y el paisaje que las rodea. Pero, en astronomía,

es arbitrario eso que llamamos tren y estación: la cuestión se ha de decidir simplemente por conveniencia o por convencionalismo.

A este respecto es interesante el contraste entre Einstein y Copérnico. Antes de Copérnico, la gente creía que la tierra estaba quieta y que los cielos giraban en torno a ella una vez al día. Copérnico enseñó que es «realmente» la tierra la que gira una vez al día, y que la rotación diaria del sol y de las estrellas es solamente «aparente». Galileo y Newton apoyaron esta idea e inventaron muchas cosas para probarla: por ejemplo, el achatamiento de la tierra en los polos y el hecho de que los cuerpos son más pesados allí que en el ecuador. Pero en la teoría moderna la cuestión entre Copérnico y sus predecesores es simplemente una cuestión convencional: todo movimiento es relativo y no hay diferencia entre las dos afirmaciones: «la tierra gira una vez al día» y «el cielo se mueve alrededor de la tierra diariamente». Las dos significan exactamente la misma cosa, como significa lo mismo si digo que cierta longitud es de seis pies o de dos yardas. La astronomía es más fácil si consideramos que el sol está fijo que si consideramos fija a la tierra, de la misma manera que son más fáciles las cuentas en el sistema monetario internacional. Pero decir más sería para Copérnico suponer el movimiento absoluto, lo cual es una ficción. Todo movimiento es relativo. Y es simplemente convencional considerar un cuerpo en reposo. Todos estos convencionalismos son igualmente legítimos, si bien no todos son igualmente convenientes.

Hay otro problema de gran importancia en el que la astronomía difiere de la física terrestre por su exclusiva dependencia de la luz. Tanto el pensamiento popular como la antigua física empleaban una noción de «fuerza» que parecía inteligible por su asociación con las sensaciones ya conocidas. Cuando caminamos, tenemos sensaciones que van unidas a nuestros músculos y que no experimentamos cuando estamos parados. Antes de la tracción mecánica, cuando la gente viajaba en sus carruajes, podía ver el ejercicio de los caballos y cómo realizaban una «fuerza» en el mismo sentido en que lo hacen los seres humanos. Todos sabían por experiencia lo que es empujar o tirar, ser empujado o ser arrastrado. Estos hechos conocidos, compuestos de «fuerza», parecen una base natural para la dinámica. Pero la ley de la gravitación de Newton introdujo una dificultad. La fuerza entre dos bolas de billar aparecía inteligible porque sabemos lo que es chocar con otra per-

sona. Pero la fuerza entre el cielo y la tierra, separados por 150 millones de kilómetros, era misteriosa. El mismo Newton consideraba esta «acción a distancia» como imposible y creía que existía un mecanismo todavía no descubierto hasta entonces por el que se transmitía la influencia del sol a los planetas. Sin embargo, no se descubrió tal mecanismo y la gravitación seguirá siendo un enigma. La realidad es que toda la idea de «fuerza» es un error. El sol no ejerce ninguna fuerza sobre los planetas. En la ley de la gravitación de Einstein, el planeta sólo está atento a lo que encuentra en su propia proximidad. La forma en que ésta opera se explicará en un capítulo posterior. De momento, sólo nos interesa la necesidad de abandonar la noción de «fuerza», debido a conceptos erróneos derivados del sentido del tacto.

A medida que avanza la física se ve con mayor claridad que la vista, como fuente de nociones fundamentales sobre la materia, es menos engañosa que el tacto. La aparente simplicidad de la colisión de las bolas de billar es totalmente ilusoria. En realidad, las dos bolas de billar nunca llegan a tocarse del todo. Lo que sucede es inconcebiblemente complicado, pero es más parecido de lo que supone el sentido común a lo que sucede cuando un cometa penetra en el sistema solar y vuelve a salir.

La mayor parte de lo dicho hasta aquí ya fue reconocido por los físicos antes de que Einstein inventara la teoría de la relatividad. Se reconocía que la «fuerza» era una ficción matemática y generalmente se sostenía que el movimiento era simplemente un fenómeno relativo; es decir, cuando dos cuerpos cambian su posición relativa, no podemos decir que uno se mueve y que otro está en reposo, ya que el suceso es un simple cambio en su relación mutua. Pero fue necesario un gran trabajo para armonizar el procedimiento real de la física con estas nuevas convicciones. Newton creía en la fuerza y en el espacio y tiempo absolutos. Incorporó estas creencias a sus métodos técnicos y sus métodos fueron idénticos a los de los físicos posteriores. Einstein inventó una nueva técnica, libre de los supuestos de Newton. Pero para llegar a ello tuvo que cambiar definitivamente las viejas ideas de espacio y tiempo, que habían permanecido inmutables desde tiempo inmemorial. En ello reside tanto la dificultad como el interés de su teoría. Pero antes de explicarla son indispensables algunos preliminares. De ellos nos ocuparemos en los dos capítulos siguientes.

## 2. Lo que sucede y lo que se observa

Cierto tipo de hombre superior se siente orgulloso de afirmar que «todo es relativo». Esto, naturalmente, es absurdo, ya que si *todo* fuera relativo, no habría nada relativo a ese todo. No obstante, sin caer en absurdos metafísicos, es posible sostener que todo en el mundo físico es relativo a un observador. Esta idea, verdadera o no, no ha sido adoptada por la «teoría de la relatividad». Quizás el nombre no sea lo más afortunado. Pero lo cierto es que ha llevado a confusión tanto a filósofos como a personas poco instruidas. Creen que la nueva teoría prueba que *todo* en el mundo físico es relativo, cuando la verdad es todo lo contrario. Intenta excluir lo relativo y llegar a una formulación de las leyes físicas que no dependan en ningún sentido de las circunstancias del observador. Es cierto que estas circunstancias, según se ha comprobado, tienen mayor efecto de lo que parece y de lo que anteriormente se creía sobre el observador. Pero, al mismo tiempo, Einstein demostró la manera de anular totalmente este efecto. Aquí está el origen de casi todo lo que hay de sorprendente en su teoría.

Cuando dos observadores perciben lo que ambos consideran como un suceso, entre sus percepciones hay ciertas semejanzas y también ciertas diferencias. Las diferencias quedan oscurecidas por las exigencias de la vida diaria, ya que desde un punto de vista del problema, como norma general, carecen de importancia. Pero tanto la psicología como la física, desde sus ángulos respectivos, se ven obligadas a resaltar en qué aspectos la percepción que un hombre tiene de determinado acontecimiento difiere de la de otro. Algunas de estas diferencias se deben a la diversidad de talento o de talante de los propios observadores. Otras veces, a las diferencias de sus órganos sensoriales. Y otras, finalmente, a las diferencias de su situación física. Estas tres clases de diferencias las podemos llamar respectivamente, psicológicas, fisiológicas y físicas.

Una observación hecha en una lengua que conocemos, se captará bien. Por el contrario, otra observación hecha en voz alta, pero en una lengua desconocida, puede pasar totalmente inadvertida. De dos hombres en los Alpes, uno percibirá la belleza del paisaje, mientras que el otro se fijará en las cascadas, de las cuales se podría obtener energía. Estas diferencias son psicológicas. Las diferencias entre un hombre que tiene una vista de largo

alcance y la de un miope, o entre un sordo y uno que oye bien, son fisiológicas. Ninguna de estas diferencias nos interesa. Las he mencionado solamente para poderlas excluir. El tipo de diferencias que nos interesa es el puramente físico. Las diferencias físicas entre dos observadores seguirán existiendo si dichos observadores son reemplazados por la cámara o el magnetófono y pueden reproducirse en un film o en un gramófono. Si los dos hombres oyen hablar a un tercero y uno de ellos está más cerca del que habla, oirá los sonidos más altos y un poco antes de que pueda oírlos el otro. Si dos hombres ven caer un árbol, lo ven desde ángulos diferentes. Tales diferencias podrían hacerse igualmente patentes mediante instrumentos de grabación: no se deben a la idiosincrasia de los observadores, sino que forman parte del curso ordinario de la naturaleza física, tal como nosotros la experimentamos.

El físico, lo mismo que el hombre común, cree que sus percepciones le dan un conocimiento de lo que sucede en el mundo físico, y no sólo en sus experiencias privadas. Profesionalmente, considera al mundo físico como «real», no simplemente como algo que los seres humanos sueñan. Un eclipse de sol, por ejemplo, puede ser observado por cualquier persona que esté en una posición conveniente. Y al mismo tiempo es observado por las cámaras fotográficas colocadas al efecto. El físico está persuadido de que algo ha sucedido realmente además y por encima de la experiencia de cuantos han observado el sol o sus fotografías. He puesto de relieve este punto que pudiera parecer una nimiedad, ya que algunos suponen que Einstein estableció alguna diferencia a este respecto. En realidad no fue así.

Pero si el físico queda justificado en esta creencia de que una serie de personas pueden observar el «mismo» hecho físico, también, por el mismo hecho, está ligado a los mismos aspectos que el suceso presenta a todos los observadores. Los demás no pueden considerarse, lógicamente, como integrantes del hecho mismo. Por lo menos, el físico ha de limitarse a aquellos aspectos comunes a todos los observadores considerados «como igualmente buenos». Se prefiere al observador que usa un microscopio o un telescopio a quien no los usa, ya que ve lo mismo que este último y más todavía. Una cámara fotográfica sensible puede «ver» todavía más, y por lo mismo, se la prefiere a cualquier ojo. Pero cosas como las diferencias de perspectiva o de tamaño aparente, debidas a la diferencia de distancia, no son atribuibles al objeto. Pertenecen solamente al punto de vista del espectador. El sentido

común las elimina al juzgar los objetos. La física tiene que llevar el mismo proceso mucho más lejos, pero el principio es el mismo.

Quiero dejar bien claro que no estoy dispuesto a que pueda atribuírseme el calificativo de imprecisión. Mi interés se ciñe a las diferencias físicas auténticas entre hechos, cada una de las cuales es una marca perfecta de cierto acontecimiento, desde el punto de vista del mismo. Cuando un hombre dispara un fusil, las personas que no están muy próximas a él ven el fogonazo antes de oír la detonación. Ello no se debe a ningún defecto de los sentidos sino a que el sonido avanza más despacio que la luz. La velocidad de la luz es tan rápida que, desde el punto de vista de los fenómenos de la superficie de la tierra, se puede considerar como instantánea. Todo lo que podemos ver en la tierra sucede prácticamente en el momento en que lo vemos. En un segundo la luz recorre 300.000 kilómetros. Tarda desde el sol a la tierra unos ocho minutos. Y desde las estrellas, algo así como desde cuatro años a varios miles de millones.

Pero, naturalmente, no podemos poner un reloj en el sol, y enviar desde él un rayo de luz a las doce en punto, según el meridiano de Greenwich, para recibirlo en Greenwich a las 12:08. Nuestros métodos de estimación de la velocidad de la luz han de ser más o menos indirectos. El método más directo es el que aplicamos al sonido cuando nos valemos de un eco. Podríamos enviar un rayo a un espejo y observar lo que tarda su reflejo en llegar de nuevo hasta nosotros. Así obtendríamos el tiempo del recorrido de ida y vuelta al espejo. En la tierra, sin embargo, este tiempo sería inconvenientemente corto. Por eso, en la práctica, los físicos tienen que usar un método más complicado, pero el principio subyacente sigue siendo el del eco.

El mismo principio se usa, para otro propósito, en el radar. Se emiten ondas muy cortas de radio (cuya velocidad es la misma que la de la luz) y se reflejan desde un objeto distante. Entonces, la distancia del objeto puede deducirse por el tiempo que las ondas tardan en ir y volver.

El problema de hacerse cargo del punto de vista del espectador, por decirlo así, es algo de lo cual ha sido plenamente consciente la física de todos los tiempos. En realidad, ha dominado la astronomía desde el tiempo de Copérnico. Esto es cierto. Pero con frecuencia los principios son admitidos mucho antes de deducir todas sus consecuencias. Gran parte de la física

tradicional es incompatible con el principio, a pesar de que éste era admitido teóricamente por todos los físicos.

Había una serie de reglas que incomodaban a quienes se inclinaban por la filosofía, pero que eran aceptadas por los físicos, puesto que en la práctica funcionaban. Locke había distinguido las cualidades secundarias —colores, ruidos, gustos, olores, etc.— como subjetivas. A las cualidades «primarias», por el contrario —formas, posiciones y tamaños—, las consideraba como propiedades genuinas de los objetos físicos. Las reglas del físico podrían deducirse, en consecuencia, de esta doctrina. Se admitía que los colores y los sonidos eran subjetivos, pero debidos a ondas emitidas a una velocidad determinada —de la luz o del sonido, según fuera el caso— desde su origen hasta el ojo o el oído de quien los percibe. Las formas aparentes varían según las leyes de la perspectiva. Pero estas leyes son sencillas y nos permiten inferir con facilidad las formas «reales» partiendo de diversas formas visuales aparentes. Además, tratándose de los cuerpos que nos rodean, podemos captar las formas «reales» por el tacto. El tiempo objetivo de un hecho físico se puede deducir desde el momento en que lo percibimos dándonos cuenta de la velocidad de transmisión de la luz o del sonido o de corrientes nerviosas, según las circunstancias. Tal era el punto de vista adoptado en la práctica por los físicos, a pesar de las dudas que pudieran tener cuando no actuaban profesionalmente.

Esta idea fue bastante válida hasta que los físicos empezaron a interesarse por velocidades mucho mayores que las normales en la superficie de la tierra. Un tren expreso se desplaza a un kilómetro por minuto. Los planetas se desplazan a varios kilómetros por segundo. Cuando los cometas están cerca del sol, avanzan mucho más rápidamente pero a causa de sus formas en continuo cambio, es imposible determinar su posición con toda exactitud. Prácticamente, los planetas eran los cuerpos de mayor velocidad de desplazamiento a los que se podía aplicar adecuadamente la dinámica. Con el descubrimiento de la radioactividad y los rayos cósmicos, y recientemente con la construcción de máquinas aceleradoras de alta energía, han sido posibles nuevos avances en la observación. Pueden observarse las partículas subatómicas individuales moviéndose a velocidades no muy inferiores a las de la luz. El comportamiento de los cuerpos que se mueven a velocidades tan elevadas no es el que podían esperar de las viejas teorías. Porque, en

primer lugar, la masa parece aumentar con la velocidad, de una manera perfectamente definida. Cuando un electrón se mueve a gran velocidad, se requiere una fuerza mayor para conseguir un determinado efecto que cuando se mueve a poca velocidad. Después se encontraron razones para suponer que el tamaño de un cuerpo se ve afectado por su movimiento. Por ejemplo, si se toma un cubo y se mueve a gran velocidad, se hace más pequeño en la dirección de su movimiento desde el punto de vista de una persona que no se mueve con él, si bien desde su propio punto de vista (es decir, para un observador que se moviese como él), se mantiene tal cual era.

Más asombroso todavía fue el descubrimiento de que el lapso de tiempo depende del movimiento. Es decir, dos relojes que marcan exactamente la misma hora, uno de los cuales se mueve muy rápidamente en relación al otro, no continuarán señalando la misma hora si se comparan de nuevo al cabo de un día. Es éste un efecto demasiado pequeño para poderlo experimentar directamente a tanta distancia, pero sería posible hacer una prueba si se consiguiera algún día desarrollar los viajes espaciales. Entonces, podremos hacer viajes lo suficientemente largos para poder apreciar esta «dilatación del tiempo», como se la llama.

Tenemos algunas pruebas directas de la dilatación del tiempo, pero son de distinta naturaleza. Estas pruebas proceden de la observación de los rayos cósmicos, formados por una variedad de partículas atómicas que vienen del espacio exterior y se mueven muy velozmente a través de la atmósfera de la tierra.

Algunas de estas partículas, llamadas mesones, se desintegran durante el vuelo, y es posible observar dicha desintegración. Se descubrió que cuanto más velozmente se mueve el mesón, más tarda en desintegrarse, desde el punto de vista de un científico en la tierra. De este tipo de resultados se sigue que lo que descubrimos por medio de relojes y marcapasos, empleados y considerados como la perfección de la ciencia impersonal, depende en parte de nuestras circunstancias particulares, es decir, del modo en que nos movemos en relación a los cuerpos medidos.

Esto demuestra que debemos trazar una línea diferente de la que ha sido habitual para distinguir entre lo que pertenece al observador y lo que es propio del hecho observado. Si un hombre lleva anteojos azules sabe que el

color azul de todo lo que ve se debe a los anteojos y que no pertenece a lo que está observando. Pero si observa dos relámpagos y anota el intervalo de tiempo entre sus observaciones; si sabe dónde tuvieron lugar los relámpagos y, en ambos casos, puede controlar el tiempo que la luz tardó en llegar a él, en tal caso, si su cronómetro es exacto, piensa naturalmente que ha descubierto el intervalo real de tiempo entre los dos relámpagos, y no algo meramente personal. Le confirma en esta idea el hecho de que otros observadores cuidadosos a los que tiene acceso concuerdan con sus apreciaciones. Ello, no obstante, es debido a que todos estos observadores están en la tierra y comparten el movimiento de la misma. Incluso dos observadores que se movieran en aeroplanos y en direcciones opuestas, tendrían a lo sumo una velocidad relativa de 13.000 kilómetros por hora, velocidad insignificante si la comparamos con los 300.000 km por segundo, que es la velocidad de la luz. Si un electrón con una velocidad de 270.000 km por segundo pudiera observar el tiempo que media entre los dos relámpagos, llegaría a una estimación completamente diferente, después de constatar la velocidad de la luz. ¿Cómo sabe usted esto?, puede preguntar el lector. Usted no es un electrón, no puede moverse a esas velocidades de vértigo. Ningún hombre de ciencia ha podido hacer las observaciones que probarían la verdad de su afirmación. No obstante, como veremos enseguida, hay buena base para hacer tal afirmación. Fundamentada, sobre todo, en la experiencia y —lo que es digno de notarse— en los razonamientos que se pudieran haber hecho en cualquier tiempo, pero que no se hicieron hasta que los experimentos demostraron que los antiguos razonamientos debían estar equivocados.

Hay un principio general que invoca la teoría de la relatividad y que resulta más sólido de lo que podría suponerse. Si sabes que un hombre es dos veces más rico que otro, este hecho tiene que aparecer igual tanto si consideras la riqueza de ambos en dólares, libras, francos, o en cualquier otra moneda. Los números que representan sus fortunas cambiarán, pero uno de ellos será siempre el doble que el otro. Si todo movimiento es relativo, puedes tomar el cuerpo que quieras como cuerpo de referencia y valorar los demás movimientos en relación al de aquél. Si estás en un tren y te diriges hacia el vagón restaurante, de momento piensas que el tren está fijo y valoras tu movimiento en relación a él. Pero cuando piensas en el viaje que estás haciendo juzgas a la tierra como fija y afirmas que te estás moviendo a una media de

noventa kilómetros por hora. Un astrónomo interesado en el sistema solar considera al sol como fijo y piensa que tú realizas los movimientos de rotación y traslación alrededor del sol. Si comparas dicho movimiento con el del tren, éste es tan lento que apenas cuenta. Un astrónomo interesado en el universo estelar puede añadir a este movimiento el del sol en relación con el movimiento medio de las estrellas. No se puede afirmar que una de estas formas de estimar tu movimiento sea más correcta que la otra. Cada una es perfectamente correcta desde el momento en que se le asigna un cuerpo de referencia. Ahora bien, así como se puede apreciar la fortuna de un hombre en diferentes valores monetarios sin alterar su relación con la fortuna de otros hombres, de la misma manera se puede valorar el movimiento de un cuerpo por medio de diferentes cuerpos de referencia sin alterar su relación con otros movimientos. Y si la física es un conjunto de relaciones, ha de ser posible expresar sus leyes refiriendo todos los movimientos a cualquier cuerpo como principio de referencia.

Podemos exponer el problema de otro modo. La física intenta informar sobre lo que ocurre en el mundo físico, y no sólo sobre las percepciones privadas de cada uno de los observadores. La física, pues, ha de interesarse por aquellos aspectos que un proceso físico presenta a todos los observadores. Tales aspectos sólo pueden considerarse como pertenecientes al mismo hecho físico. Ello exige que las *leyes* de los fenómenos hayan de ser las mismas, tanto si se describen tal como aparecen ante un observador o como ante otro. Este único principio es el motivo generador de toda la teoría de la relatividad.

Ahora bien, lo que hasta aquí hemos considerado como propiedades espaciales y temporales de los hechos físicos resultan ser en gran parte dependientes del observador. Sólo una pequeña parte puede atribuirse a los hechos mismos. Y ésta únicamente puede introducirse en la formulación de cualquier ley física que haya de tener a priori una oportunidad de ser cierta. Einstein encontró a mano un instrumento de la matemática pura, llamado la teoría de los tensores. Ésta le permitió descubrir leyes expresadas en función del resto objetivo y que aproximadamente estaban de acuerdo con las antiguas leyes. Donde las leyes de Einstein se apartan de las antiguas, se ha comprobado que hasta la fecha son más acordes con la observación.

Si en el mundo físico no hubiera realidad sino una serie de sueños imagi-

nados por diferentes personas, no esperaríamos poder encontrar ninguna ley que uniera los sueños de un hombre con los de otro. Es la conexión íntima entre las percepciones de un hombre y (de modo general) las percepciones simultáneas de otro, lo que nos lleva a creer en un origen externo común a las diferentes percepciones a que nos estamos refiriendo. La física explica tanto las semejanzas como las diferencias entre las percepciones de las distintas personas de lo que llamamos el «mismo» hecho. Pero para llegar a ello, es necesario primero que el físico encuentre cuáles son estas semejanzas. No son precisamente las que tradicionalmente se suponía, pues ni el espacio ni el tiempo por separado se pueden tomar como estrictamente objetivos. Lo objetivo es una especie de mezcla de los dos llamada «espacio-tiempo». Explicar esto no es fácil, pero debemos intentarlo. Lo haremos en el capítulo siguiente.

### 3. La velocidad de la luz

La mayoría de curiosidades que presenta la teoría de la relatividad están relacionadas con la velocidad de la luz. Si el lector quiere captar las razones de una reconstrucción teórica tan seria, ha de tener alguna idea de los hechos que hicieron resquebrajar el viejo sistema.

El hecho de la transmisión de la luz a una velocidad determinada se estableció por primera vez mediante observaciones astronómicas. Los satélites de Júpiter son eclipsados a veces por el mismo Júpiter. Y es fácil calcular las veces que esto debería suceder. Se comprobó que cuando Júpiter estaba más cerca de lo normal de la tierra, se podía observar un eclipse de uno de sus satélites unos minutos antes de lo esperado. Y cuando Júpiter estaba más alejado de lo normal, el eclipse se producía unos minutos después. Se concluyó que estas desviaciones podían registrarse partiendo de que la luz tenía cierta velocidad. Por lo tanto, lo que observamos que está sucediendo en Júpiter, ha sucedido realmente un poco antes; mucho antes cuando Júpiter está distante que cuando está cerca. La misma velocidad de la luz se debía tener en cuenta para explicar hechos similares con respecto a otras partes del sistema solar. Se aceptó, pues, que la luz *in vacuo* viaja siempre a una velocidad constante, casi exactamente 300.000 kilómetros por segundo. Cuando se verificó que la luz está formada por ondas, esta velocidad fue la de la propagación de las ondas en el éter; al menos solían estar en el éter. Pero ahora el éter se ha convertido en algo indefinido, si bien las ondas permanecen. Esta misma velocidad es la de las ondas de la radio (que son como ondas-luz, pero más largas) y las de los rayos X (que son como ondas-luz, pero más cortas). Hoy se afirma generalmente que es la velocidad con que se propaga la gravitación (antes del descubrimiento de la teoría de la relatividad, se creía que la gravitación se propagaba instantáneamente, pero esta idea es hoy insostenible).

Hasta aquí, pues, todo va viento en popa. Pero las dificultades empezaron a acumularse cuando fue posible establecer medidas más precisas. Se suponía que las ondas estaban en el éter y que, por tanto, su velocidad debía ser relativa al mismo. Ahora bien, si el éter (si es que existe) no ofrece clara resistencia a los movimientos de los cuerpos celestes, parecería natural suponer que no participaba en su movimiento. Si la tierra tenía que empujar

un volumen de éter delante de sí, de forma parecida a como un barco de vapor empuja el agua ante él, sería lógico esperar una resistencia por parte del éter análoga a la que ofrecía el agua al barco. Por tanto, la idea general era que el éter podía atravesar los cuerpos sin dificultad, lo mismo que el aire a través de un inmenso cedazo, sólo que con mayor facilidad. Si éste era el caso, entonces, la tierra en su órbita había de tener una velocidad relativa al éter. Si en un punto de su órbita llegaba a moverse exactamente con el éter, en otros puntos se movería con mucha mayor rapidez. Si das un paseo circular un día de viento, has de ir contra el viento parte del camino, cualquiera que sea el viento que sople. El principio, en este caso, es el mismo. La conclusión es que si se eligen dos días en seis meses separados, cuando la tierra se mueve en su órbita en direcciones exactamente opuestas, por fuerza habrá de moverse contra el éter-viento, al menos uno de estos días.

Ahora bien, si existe un éter-viento, es claro que en relación a un observador de la tierra, las señales luminosas parecerá que caminan más rápido con el viento que a su través, y más rápido a través del viento que contra él. Es lo que Michelson y Morley trataron de probar con sus famosos experimentos. Emitieron rayos de luz en dos direcciones, formando ángulos rectos. Cada uno de ellos se reflejaba en un espejo, volviendo al lugar de donde habían sido emitidos. Cualquiera puede comprobar ahora, sea por una prueba sea por una simple operación aritmética, que un rayo tarda más en surcar cierta distancia corriente arriba de un río y luego hacia abajo, que en surcar la misma distancia atravesando la corriente y volviendo a repasarla. Por tanto, si existiera un éter-viento, uno de los dos rayos integrado por ondas de éter debería haber avanzado hacia el espejo y vuelto de él a una velocidad media más baja que el otro. Michelson y Morley probaron el experimento, y lo experimentaron en varias posiciones, volviéndolo a experimentar más tarde. Su aparato era suficientemente preciso para detectar la diferencia esperada de velocidad o incluso una diferencia mucho más pequeña, de haber existido, pero no se pudo observar la más mínima diferencia. El resultado fue una sorpresa, tanto para ellos como para cualquier otro. Cuidadosas repeticiones hicieron imposible la duda. El experimento se efectuó ya en 1881 y se repitió con mayor minuciosidad en 1887. Pero ya se había podido interpretar correctamente muchos años antes.

Por una serie de razones se comprobó que era imposible la suposición de

que la tierra arrastra en su movimiento al éter que la circunda. Pareció surgir entonces un punto muerto lógico del cual los físicos trataron de liberarse mediante hipótesis muy arbitrarias. La más importante fue la de Fitzgerald, desarrollada por Lorentz y conocida como hipótesis de contracción de Fitzgerald.

Según esta hipótesis, cuando un cuerpo está en movimiento se hace más pequeño en la dirección movimiento, en virtud de cierta proporción que depende de su velocidad. El montante de la contracción fue suficiente para comprobar el resultado negativo del experimento de Michelson-Morley. El desplazamiento de la luz hacia arriba y hacia abajo de la corriente tenía que ser efectivamente más corto que el avance a través de la corriente. Y había de ser tanto más corto que permitiera a la onda-luz más lenta atravesar la corriente al mismo tiempo. El acortamiento, naturalmente, no podría ser medido nunca a base de medidas, ya que nuestros baremos compararían este mismo acortamiento. Un marcapasos situado en la línea del movimiento de la tierra sería mas corto que el mismo marcapasos colocado en ángulo recto en dirección al movimiento de la tierra. Este punto de vista a nada se parece tanto como al «plan del Caballero Blanco que se teñía la barba de verde y siempre empleaba un abanico tan ancho que nadie podía ver». Lo extraño fue que el plan funcionó bastante bien. Más tarde, cuando Einstein volvió a repensar su teoría especial de la relatividad (1905), se comprobó que la hipótesis era cierta en algún sentido, pero sólo en algún sentido. Es decir, la supuesta contracción no es un hecho físico, sino el resultado de ciertos convencionalismos en las medidas, que, cuando se ha alcanzado el punto de vista correcto, nos vemos como obligados a adoptar. Pero no quisiera adelantar la solución de Einstein a este rompecabezas. De momento, lo que quiero dejar claro es la naturaleza del mismo rompecabezas.

A primera vista, y prescindiendo de las hipótesis *ad hoc*, el experimento de Michelson-Morley (en conjunción con otros) demostraba que, en relación a la tierra, la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones. Es igualmente cierto que la velocidad de la luz es la misma en todas las estaciones del año, aun cuando la dirección del movimiento de la tierra cambie siempre a medida que gira alrededor del sol. Se hizo evidente además que ésta no es una peculiaridad de la tierra, sino que se aplica a todos los movimientos. Si un cuerpo emite un rayo de luz, ese cuerpo seguirá siendo el centro emisor

de las ondas a medida que éstas se dirijan hacia fuera, cualquiera que sea la forma de su movimiento; al menos tal será la idea de los observadores que se mueven con el cuerpo. Éste era el significado simple y natural de los experimentos y Einstein consiguió elaborar una teoría que lo aceptaba. Pero al principio se creyó lógicamente imposible la aceptación de este significado simple y natural.

Unos ejemplos nos aclararán la singularidad de estos hechos. Cuando se dispara un proyectil, su velocidad es mayor que la del sonido. Las personas contra las que se ha disparado ven primero el fogonazo, luego (con un poco de suerte) ven salir el proyectil, y finalmente oyen la detonación. Es evidente que si se pudiera colocar un observador científico dentro del proyectil, nunca oiría la detonación, pues éste estallaría y le mataría antes de que le hubiera llegado el sonido. Pero si el sonido actuara con los mismos principios que la luz, nuestro observador lo oiría todo, lo mismo que si se encontrara en reposo. En tal caso, si se acoplara al proyectil una pantalla, capaz de reproducir los ecos, y avanzara con ella unos cien metros, por ejemplo, nuestro observador oiría el eco de la detonación desde la pantalla exactamente después del mismo intervalo de tiempo que si él y el proyectil estuvieran en reposo. Este experimento, naturalmente, no puede realizarse, pero otros que sí pueden realizarse mostrarán la diferencia. Podríamos encontrar un punto en una vía férrea, en el cual se detecta un eco procedente de un lugar más lejano sobre la misma vía —pongamos por caso, cuando ésta entra en un túnel—; hagamos que, mientras el tren va avanzando por la vía, un hombre desde la orilla dispare un fusil. Si el tren marcha en la dirección del eco, los pasajeros oirán el eco antes que el hombre de la orilla. Si marcha en dirección opuesta, lo oirán más tarde. Pero no son éstas precisamente las circunstancias del experimento de Michelson-Morley. Los espejos, en dicho experimento, corresponden al eco y se mueven con la tierra; por lo tanto el eco debería moverse con el tren. Supongamos que el disparo se ha producido desde el furgón de cola y que el eco proviene de una pantalla situada en la locomotora. Supongamos que la distancia del furgón de cola a la locomotora sea idéntica a la que el sonido recorre en un segundo (331 metros por segundo), y que la velocidad del tren es una duodécima parte de la velocidad del sonido (unos 90 km por hora). Tenemos así un experimento que puede realizar cualquier persona que va en el tren. Si el tren estuviera parado, el

guarda oiría el eco en dos segundos; tal como va, lo oirá en  $2/143$  segundos. Por esta diferencia, si conoce la velocidad del sonido, puede calcular la velocidad del tren, aun cuando sea noche de niebla y no puedan verse los lados. Si el sonido se comportara como la luz, oiría el eco en dos segundos por veloz que corriese el tren.

Otros ejemplos distintos ayudarán a demostrar lo extraordinario de los hechos sobre la velocidad de la luz desde el punto de vista de la tradición y el sentido común. Todo el mundo sabe que si se está en una escalera mecánica se llega antes arriba caminando que estando parado. Si la escalera mecánica se moviera con la velocidad de la luz (lo cual no sucede ni en Nueva York) se podría llegar a la cima exactamente en el mismo momento, tanto caminando como estando parado. Otro ejemplo: Si vas andando por un camino a una velocidad de cuatro kilómetros por hora y un automóvil te adelanta en la misma dirección a una media de cuarenta kilómetros por hora, si tú y el automóvil mantenéis la distancia, al cabo de una hora ésta será de treinta y seis kilómetros. Pero si el coche se cruza contigo, yendo en dirección opuesta, al cabo de una hora la distancia sería de cuarenta y cuatro kilómetros. Ahora bien, si el automóvil corriera a la velocidad de la luz no habría diferencia entre el momento de cruzarse contigo o el de adelantarte: en ambos casos, al cabo de un segundo, estaría a 300.000 kilómetros de ti. Estaría también a 300.000 kilómetros de cualquier otro automóvil que tratara de adelantarte o encontrarte a menor velocidad en el segundo anterior. Esto parece imposible: ¿cómo puede el coche estar a la misma distancia de una serie de diferentes puntos a lo largo de la carretera?

Pongamos otro ejemplo: Cuando una mosca toca la superficie de un estanque, provoca ondas que se mueven hacia fuera en círculos cada vez más anchos. En todo momento el centro del círculo es el punto del estanque tocado por el insecto. Si éste se mueve sobre la superficie del estanque, no permanece en el centro de las ondas. Si fueran ondas-luz y la mosca fuera un físico experto, se daría cuenta de que siempre se encontraba en el centro de las ondas, por mucho que se moviera. Mientras tanto, un físico experto sentado junto al estanque podría juzgar, como en el caso de las ondas ordinarias, que el centro no era la mosca sino el punto del estanque tocado por ella. Si otra mosca tocara el agua en el mismo sitio y en el mismo momento, también se daría cuenta de que permanecía en el centro de las

ondas, aun cuando se separase mucho de la primera mosca. Este experimento es exactamente análogo al de Michelson-Morley. El estanque corresponde al éter, la mosca a la tierra; el contacto de la mosca y del estanque corresponde a los rayos emitidos por los señores Michelson y Morley. Y las ondas del estanque corresponden a las ondas-luz.

Tal estado de cosas parece, a primera vista, imposible. Nada tiene de extraño, pues, que aunque el experimento de Michelson-Morley se hiciera en 1881, no fuera correctamente interpretado hasta 1905. Veamos, pues, con exactitud lo que hemos venido diciendo. Tenemos a un hombre que camina por una carretera y es adelantado por un automóvil. Supongamos que hay una serie de personas en el mismo punto de la carretera, unas caminando, otras en coche. Figurémonos que van en varias direcciones, unas en una dirección y otras en otra. Digo, pues, que si en este momento se emitiera un rayo de luz desde el lugar en que están todos ellos, las ondas-luz estarían a 300.000 kilómetros de cada uno de ellos al cabo de un segundo de su reloj, aunque los viajeros ya no estuviesen en el mismo lugar. Después de un segundo de tu reloj el rayo de luz estará a 300.000 kilómetros de distancia de ti, y también, después de un segundo en su reloj, a 300.000 kilómetros de la persona que se encontró contigo cuando el rayo fue emitido, pero que iba en dirección opuesta; suponemos, naturalmente, que ambos relojes son perfectos. ¿Cómo puede ser esto?

Sólo hay una manera de explicar estos hechos. Y es suponer que los relojes —los de pulsera y los de pared— se ven afectados por el movimiento. Con ello no quiero dar a entender que se vean afectados de forma que se haya de cuidar con más exactitud su fabricación. Quiero expresar algo mucho más fundamental. Entiendo que si se dice que ha pasado una hora entre dos hechos y que si esta afirmación se basa en medidas de precisión ideal —por ejemplo, en cronómetros idealmente exactos—, otra persona con iguales medidas de precisión, que se ha estado moviendo con rapidez en relación a ti, puede juzgar que el tiempo fue más o menos de una hora. No se puede afirmar que una persona está en lo cierto y que la otra se equivoca. Ni tan sólo en el caso de que una de ellas se hubiera servido de un reloj que marcara la hora de Greenwich y la otra de un reloj con la hora de Nueva York. En el próximo capítulo se explicará cómo sucede esto.

Existen otros hechos curiosos acerca de la velocidad de la luz. Uno de ellos es que ningún cuerpo material puede caminar tan rápido como la luz, por grande que sea la fuerza a la que se halle sometido y por mucho que pueda durar dicha fuerza. Un ejemplo nos puede ayudar a aclarar esto. A veces se ve en las exposiciones una serie de plataformas móviles que giran y giran en torno a un círculo. La exterior se mueve a cuatro kilómetros por hora. La siguiente se mueve a cuatro kilómetros por hora más rápida que la primera. Y así sucesivamente. Puedes cruzar de la primera a la siguiente hasta encontrarte de repente avanzando a una velocidad tremenda. Ahora bien, podrías pensar que si la primera plataforma se mueve a cuatro kilómetros por hora y la segunda a cuatro kilómetros por hora en relación con la primera, entonces esta segunda se mueve a ocho kilómetros por hora en relación con el suelo. Es un error. Se mueve a un poco menos, aunque tan poco que ni siquiera las medidas más exactas podrían detectar la diferencia. Quiero dejar claro que esto es lo que yo pienso. Voy a suponer que por la mañana, cuando dicho aparato acaba de ponerse en marcha, tres hombres con cronómetros de una precisión ideal se ponen alineados uno en el suelo, otro en la primera plataforma y otro en la segunda. La primera plataforma se mueve a una velocidad media de cuatro kilómetros por hora con respecto al suelo. Cuatro kilómetros por hora son 66 metros al minuto. El hombre que está en el suelo, después de un minuto de su reloj, anota el lugar del suelo opuesto al hombre de la primera plataforma que ha estado quieto de pie mientras la plataforma daba vueltas. El hombre del suelo mide la distancia que hay desde el suelo donde está él al punto opuesto al hombre de la primera plataforma y comprueba que es de 66 metros. El hombre de la primera plataforma, después de un minuto de su reloj, anota el punto de su plataforma opuesto al hombre que se encuentra en la segunda. El hombre de la primera plataforma mide la distancia que hay desde él al punto opuesto en que se encuentra el hombre de la segunda. Una vez más, hay 66 metros. Problema: ¿Cuánto creará el hombre que está en el suelo que ha andado en un minuto el hombre de la segunda plataforma? Es decir, si el hombre que está en el suelo, después de un minuto de su reloj, anota el lugar opuesto al hombre de la segunda plataforma, ¿a qué distancia se encontrará éste del hombre en el suelo? Responderías que el doble de 66 metros, es decir, 132 metros. Pero en realidad sería un poco menos, aunque tan poco que sería inapreciable. La discrepancia se debe a que los dos relojes no marcan la

misma hora, a pesar de la precisión de ambos desde el punto de vista de su dueño. Si tuviéramos una serie de estas plataformas moviéndose cada una de ellas a cuatro kilómetros por hora en relación a su inmediata anterior, nunca se llegaría a alcanzar un punto en que la última que se moviera lo hiciera con la velocidad de la luz en relación con el suelo, incluso a pesar de que tuviéramos millones de plataformas. La discrepancia, pequeña para velocidades pequeñas, se hace mayor a medida que aumenta la velocidad, y hace de la velocidad de la luz un límite inalcanzable. Cómo sucede esto, es el tema que vamos a tratar ahora.

## 4. Medidas de tiempo y de longitud

Hasta la aparición de la teoría especial de la relatividad nadie había pensado que pudiera existir ambigüedad en la afirmación de que dos sucesos en lugares diferentes sucedían al mismo tiempo. Se podría admitir que si los lugares estaban muy alejados, hubiese dificultad en averiguar si los sucesos eran simultáneos. Pero todos creían que el significado de la cuestión era muy concreto. Resultaba, sin embargo, que era un error. Dos hechos en lugares distantes pueden parecer simultáneos a un observador que ha tomado todas las precauciones para asegurar la exactitud (y, en particular, ha registrado la velocidad de la luz). Al mismo tiempo, otro observador, igualmente cuidadoso, puede juzgar que el primer acontecimiento fue anterior al segundo. Y un tercero puede estimar que el segundo precedió al primero. Tal sucedería si cada uno de los tres observadores se moviera velozmente con relación a los otros dos. No se daría el caso de que uno de ellos estuviera en lo cierto y los otros dos equivocados: los tres estarían igualmente en lo cierto. El orden-tiempo de los acontecimientos depende en parte del observador. No siempre se da una relación intrínseca entre los hechos mismos. Einstein demostró que no solamente cuenta esta idea para los fenómenos, sino que es la única que debiera haber resultado de un cuidadoso razonamiento basado en los antiguos datos. En la realidad, sin embargo, nadie se dio cuenta de la base lógica de la teoría de la relatividad hasta que los extraños resultados del experimento hubieron dado un empujón a las facultades de razonamiento de la gente.

¿Cómo decidiríamos nosotros si dos hechos en diferentes lugares fueron simultáneos? Uno diría, naturalmente: son simultáneos si son vistos simultáneamente por una persona que esta situada a igual distancia de los dos. (No hay dificultad en cuanto a la simultaneidad de los dos sucesos en el mismo lugar, como, por ejemplo, ver una luz y oír un ruido.) Supongamos que dos rayos caen en dos lugares diferentes, por ejemplo, en el Greenwich Observatory y en el Kew Observatory. Supongamos que San Pablo está a la misma distancia de ambos y que los rayos aparecen simultáneos a un observador que se encuentra en la cúpula de San Pablo. En ese caso, un hombre que se encontrara en Kew veía primero el rayo de Kew. Por el contrario, el hombre de Greenwich vería primero el rayo de Greenwich, a causa del tiem-

po empleado por la luz en recorrer la distancia intermedia. Pero si los tres fueran observadores idealmente exactos, juzgarán que los dos rayos fueron simultáneos, ya que harían la constatación necesaria del tiempo de transmisión de la luz (Estoy suponiendo un grado de precisión por encima de las fuerzas humanas.) Así, por lo que respecta a los observadores que están en la tierra, la definición de simultaneidad será bastante adecuada siempre que se trate de sucesos acaecidos en la superficie de la misma. Los resultados serán coherentes entre sí y podrán aplicarse en la física terrestre a todos los problemas en que podemos pasar por alto el hecho de que la tierra se mueve.

Pero nuestra definición deja de ser satisfactoria cuando tenemos dos series de observadores que se mueven rápidamente unos con relación a otros. Supongamos que vemos lo que sucedería sustituyendo el sonido por la luz y definiendo los dos hechos como simultáneos al ser oídos simultáneamente por un hombre a medio camino entre ambos. Ello no altera en nada el principio, sino que hace el problema más fácil debido a la velocidad mucho más lenta del sonido. Supongamos que en una noche de niebla dos hombres pertenecientes a una banda de salteadores disparan al guarda y al maquinista de un tren. El guarda se encuentra en el furgón de cola, los salteadores están en el trayecto y disparan a sus víctimas en una encrucijada. Un anciano caballero que se encuentra exactamente en la mitad del tren oye los dos disparos simultáneamente. Se podría decir, pues, que ambos disparos fueron simultáneos. Pero un jefe de estación que está exactamente a mitad de camino entre los dos bandidos oye primero el disparo que mata al guarda. Un millonario australiano, tío del guarda y del maquinista (que son primos) ha dejado toda su fortuna al guarda, o si muere el primero, al maquinista. Hay de por medio gruesas sumas de dinero en el problema de quién ha muerto primero. El caso llega a la Cámara de los Lores y los abogados de ambas partes, educados en Oxford, se ponen de acuerdo en que el viejo caballero o el jefe de estación deben de estar equivocados. En realidad, los dos pueden muy bien estar en lo cierto. El tren avanza alejándose del punto en que se ha disparado al guarda y acercándose al punto en que se ha disparado al maquinista. Por tanto, el ruido del disparo hecho al guarda tarda más en llegar al anciano que el del disparo contra el maquinista. En consecuencia, si el anciano está en lo cierto al decir que oyó las dos detonaciones simultáneamente, el jefe de estación debe estar en lo cierto al afirmar que oyó primero

el disparo contra el guarda.

Nosotros, que vivimos en la tierra, preferiríamos, en tal caso, la idea de simultaneidad obtenida por una persona quieta sobre el suelo a la idea de una persona que viaja en tren. Pero en la física teórica no se permiten prejuicios de miras tan estrechas. Un físico en un cometa, pongamos por caso, tendría tanto derecho a su idea de simultaneidad como lo tiene cualquier físico situado en la tierra. Pero los resultados serían distintos en el mismo sentido que acabamos de ilustrar en el ejemplo del tren y los disparos. El movimiento del tren no es más «real» que el de la tierra; no hay «real» que valga. Podrías imaginar a un conejo y a un hipopótamo discutiendo sobre si el hombre es «realmente» un animal grande. Cada uno de ellos juzgaría su punto de vista como el único lógico y el otro como un puro juego de la fantasía. El mismo fundamento tiene la discusión sobre si la tierra o el tren se mueven «realmente». Y por lo tanto, al definir la simultaneidad entre sucesos distintos, no tenemos derecho a seleccionar y elegir entre los diferentes cuerpos que se han de usar para definir el punto medio entre los sucesos. Todos los cuerpos tienen igual derecho a ser elegidos. Pero si para un cuerpo los dos hechos son simultáneos según la definición, entonces habrá otros cuerpos para los que el primero precede al segundo, y otros para los que el segundo precede al primero. No podemos, pues, decir ambiguamente que dos sucesos en distintos lugares son simultáneos. Tal afirmación sólo adquiere un significado concreto en relación a un observador determinado. Pertenece a la parte subjetiva de nuestra observación de los fenómenos físicos, no a la parte objetiva que es entrar en las leyes físicas.

Esta cuestión del tiempo en diferentes lugares es quizá, para la imaginación, el aspecto más difícil de la teoría de la relatividad. Estamos acostumbrados a la idea de que todo puede tener una fecha. Los historiadores se sirven del hecho de un eclipse de sol en China el 29 de agosto del año 776 antes de Cristo<sup>1</sup>. Sin duda los astrónomos nos podrían decir la hora exacta y el minuto en que dicho eclipse comenzó a ser total en un lugar dado del

---

<sup>1</sup>Una oda china contemporánea, después de dar correctamente el día del año, prosigue:

Para la luna eclipsarse  
no es sino algo normal.  
Ahora que el sol se ha eclipsado,  
¡qué maldición!

norte de China. Y parece obvio que podamos hablar de las posiciones de los planetas en un momento dado. La teoría newtoniana nos permite calcular la distancia entre la tierra y Júpiter, por ejemplo, a una hora determinada según los relojes de Greenwich. Esta circunstancia nos permite conocer lo que tarda la luz en ese tiempo desde Júpiter a la tierra; por ejemplo, media hora. Ello nos permite concluir que hace media hora Júpiter estaba donde nosotros lo vemos ahora. Todo esto parece obvio. Pero, en realidad, sólo actúa en la práctica porque las velocidades relativas de los planetas son pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. Cuando juzgamos que un suceso en la tierra y un suceso en Júpiter han sucedido al mismo tiempo —por ejemplo, que Júpiter ha eclipsado a uno de sus satélites cuando los relojes de Greenwich señalaban las doce de la noche— una persona que se moviera velozmente en relación a la tierra, lo juzgaría de modo diferente, suponiendo que ambos, él y nosotros, hubiésemos tenido en cuenta la velocidad de la luz. Y, por supuesto, el desacuerdo sobre la simultaneidad supone también un desacuerdo sobre los períodos de tiempo. Si creemos que dos hechos acaecidos en Júpiter estaban separados por un intervalo de veinticuatro horas, otra persona podría juzgar que estaban separados por un período de tiempo mayor, si se moviera rápidamente en relación a Júpiter y a la tierra.

El tiempo cósmico universal que se acostumbraba a dar por supuesto, ya no se puede seguir admitiendo. Para cada cuerpo existe un orden de tiempo concreto que marca los sucesos de su contorno. Éste puede llamarse el tiempo «propio» para ese cuerpo. Nuestra propia experiencia está gobernada por el tiempo propio para nuestro propio cuerpo. Como quiera que en la tierra todos nosotros permanecemos muy próximos unos de otros, los tiempos propios de los diferentes seres humanos coinciden y se pueden agrupar en el llamado tiempo terrestre. Pero éste es solamente el tiempo apropiado para los cuerpos *mayores* de la tierra. Para las partículas  $\beta$  (electrones) de los laboratorios, serían deseables tiempos completamente diferentes. Por eso, la razón de insistencia al usar nuestro propio tiempo es que estas partículas parecen aumentar en masa con un movimiento rápido. Desde su punto de vista, su masa permanece constante y somos nosotros los que de repente adelgazamos o engordamos. La historia de un físico vista por una partícula  $\beta$  semejaría a los viajes de Gulliver.

Surge ahora la pregunta: ¿Qué es, entonces, lo que mide un reloj? Cuan-

do hablamos de un reloj en la teoría de la relatividad, no sólo indicamos los relojes hechos por manos humanas. Entendemos todo aquello que pasa a través de un proceso periódico regular. La tierra es un reloj porque gira sobre sí misma cada veintitrés horas y cincuenta y seis minutos. Un átomo es un reloj, porque emite ondas-luz de frecuencias muy definidas. Son visibles como líneas luminosas en el espectro del átomo. El mundo está lleno de hechos periódicos y mecanismos fundamentales, como los átomos muestran una semejanza extraordinaria en las diferentes partes del universo. Cualquiera de estos acontecimientos periódicos puede usarse para medir el tiempo. La única ventaja de los relojes hechos a mano por el hombre es que son especialmente fáciles de observar. Sin embargo, algunos de los otros son más exactos. Hoy día las ondas cortas de radio emitidas en ciertas condiciones por átomos de cesio y moléculas de amoníaco están siendo empleadas para establecer bases de medida del tiempo más uniformes que las basadas en la rotación de la tierra. Pero la cuestión sigue en pie: si se abandona el tiempo cósmico, ¿qué es realmente lo medido por un reloj en el amplio sentido que acabamos de dar al término?

Cada reloj da una medida correcta de su «propio» tiempo, que, como veremos en seguida, es una cantidad física importante. Pero no da una medida exacta de ninguna cantidad física conectada con los sucesos de los cuerpos que se mueven velozmente en relación a ella. Da un dato para el descubrimiento de una cantidad física vinculada a tales sucesos, pero se requiere otro dato, y éste se ha de derivar de la medida de las distancias en el espacio. Las distancias en el espacio, lo mismo que los períodos de tiempo, no son en general hechos físicos objetivos, sino en parte dependientes de un observador. Vamos a explicar ahora cómo sucede esto.

Ante todo hemos de pensar en la distancia entre dos sucesos, no entre dos cuerpos. Es una consecuencia inmediata de lo que ya comprobamos con respecto al tiempo. Si los cuerpos se mueven unos con relación a otros —y éste es siempre el caso— la distancia entre ellos estará cambiando siempre, de tal forma que sólo podemos hablar de la distancia entre ellos en un tiempo determinado. Si viajas en un tren que se dirige a Edimburgo, podemos hablar de la distancia que te separa de Edimburgo en un momento dado. Pero, como ya dijimos, diferentes observadores juzgarán de manera diferente lo que es el «mismo tiempo» para un suceso en el tren y otro en Edimburgo. Esto

hace que la medida de las distancias sea relativa, precisamente en el mismo sentido en que la medida de los diferentes tiempos se ha comprobado que es relativa. Comúnmente pensamos que hay dos clases separadas de intervalo entre dos hechos, un intervalo de espacio y otro intervalo de tiempo. Entre tu salida de Londres y tu llegada a Edimburgo hay 640 kilómetros y diez horas. Ya vimos que otro observador juzgaría el tiempo de manera diferente. Un observador desde el sol juzgaría el movimiento del tren completamente insignificante. Y pensará que has andado la distancia recorrida por la tierra en su órbita y en su rotación diurna. Por otra parte, una pulga en un vagón de ferrocarril pensará que tú no te has movido en el espacio, pero que le has proporcionado un período de placer que medirá por su propio tiempo, no por el observatorio de Greenwich. No se puede decir que tú, el habitante del sol o la pulga estéis equivocados. Cada uno está igualmente justificado, y yerra si atribuye una validez objetiva a sus medidas subjetivas. Esta distancia en espacio entre dos hechos es, pues, un hecho físico en sí mismo. Pero, como veremos, existe un hecho físico que se puede deducir de la distancia en tiempo junto con la distancia en espacio. Es lo que se llama el «intervalo» en el espacio-tiempo.

Tomando dos hechos cualesquiera del universo, hay dos diferentes posibilidades con respecto a su relación mutua. Para un cuerpo puede ser físicamente posible desplazarse y estar presente en ambos hechos o puede no serlo. Ello depende del hecho que ningún cuerpo puede desplazarse tan rápido como la luz. Supongamos, por ejemplo, que fuera posible enviar un rayo luz desde la tierra y que se reflejara desde la luna. (Es un experimento que se ha realizado prácticamente con los rayos láser y con las ondas de radar que viajan a la misma velocidad.) El tiempo entre el envío del rayo y su vuelta de reflexión sería de dos segundos y medio aproximadamente. Ningún cuerpo podría desplazarse tan rápidamente que pudiera estar en la tierra durante cualquier parte de estos dos segundos y medio y al mismo tiempo estar presente en la luna en el momento de la llegada del rayo. En tal caso, el cuerpo debería moverse a mayor velocidad que la luz. Pero teóricamente un cuerpo podría estar presente en la tierra en cualquier momento antes o después de estos dos segundos y medio y también presente en la luna a la hora de llegar el rayo. Cuando es físicamente imposible que un cuerpo pueda desplazarse y estar presente en los dos sucesos, diremos que el intervalo entre los mismos

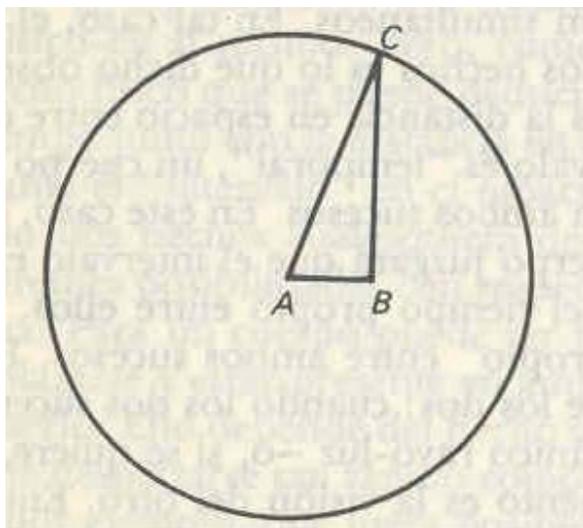
es «espacial». Cuando es físicamente posible para un cuerpo estar presente en los dos sucesos, diremos que el intervalo entre los mismos es «temporal». Cuando el intervalo es «espacial» es posible que un cuerpo se mueva de tal manera que un observador del mismo juzgará que los dos acontecimientos son simultáneos. En tal caso, el «intervalo» entre los dos hechos es lo que dicho observador juzgará que es la distancia en espacio entre ellos. Cuando el intervalo es «temporal», un cuerpo puede estar presente en ambos sucesos. En este caso, un observador del cuerpo juzgará que el intervalo entre los dos hechos es el tiempo propio entre ellos, es decir, su tiempo «propio» entre ambos sucesos. Hay un caso límite entre los dos: cuando los dos sucesos son partes de un único rayo-luz —o, si se quiere, cuando un acontecimiento es la visión del otro. Entonces el intervalo entre los dos sucesos es cero.

Tenemos, pues, tres casos:

- 1) Puede ser posible que un rayo-luz esté presente en ambos sucesos; esto acontece siempre que el uno es la visión o cara del otro. En este caso el intervalo entre los dos es cero.
- 2) Puede suceder que ningún cuerpo pueda desplazarse de un suceso a otro, ya que para hacerlo tendría que viajar a mayor velocidad que la luz. En este caso, es siempre posible físicamente para un cuerpo desplazarse de tal forma que un observador del mismo juzgaría los dos hechos simultáneos. El intervalo es lo que él estimaría como la distancia en el espacio entre los dos sucesos. Tal intervalo se llama «espacial».
- 3) Puede ser posible físicamente para un cuerpo desplazarse y estar presente en ambos acontecimientos. En ese caso, el intervalo entre ellos es lo que un observador de tal cuerpo juzgará como el tiempo entre ellos. Tal intervalo se llama «temporal».

El intervalo entre dos sucesos es un hecho físico sobre los mismos, que no depende de las circunstancias particulares del observador.

La teoría de la relatividad, se presenta en dos formas: la especial y la general. La primera es generalmente sólo una aproximación, pero es casi



exacta en grandes distancias si se tiene en cuenta el problema de la gravitación. Cuando se puede prescindir de la gravitación, es aplicable la teoría especial. Entonces, el intervalo entre dos sucesos se puede calcular cuando sabemos la distancia en espacio y en tiempo entre ellos, estimada por cualquier observador. Si la distancia en espacio es mayor que la distancia que la luz hubiera recorrido en el tiempo, entonces la separación es espacial. La siguiente hipótesis nos da el intervalo entre dos sucesos: trazar una línea  $AB$  de longitud igual a la distancia que la luz recorrería en el tiempo. Describir alrededor de  $A$  un círculo cuyo radio sea la distancia en el espacio entre los dos sucesos. Partiendo de  $B$  trazar  $BC$  perpendicularmente a  $AB$  encontrando el círculo en  $C$ . Entonces  $BC$  es la duración del intervalo entre los dos sucesos.

Cuando la distancia es temporal, se usa la misma figura, pero  $AC$  es entonces la distancia que la luz emplearía en el tiempo, mientras que  $AB$  es la distancia en el espacio entre los dos sucesos. El intervalo entre ellos es ahora el tiempo que la luz tardaría en recorrer la distancia  $AB$ .

Aunque  $AB$  y  $AC$  son distintos para distintos observadores,  $BC$  tiene la misma duración para todos los observadores, según las correcciones hechas por la teoría general. Representa el único intervalo en «espacio-tiempo» que constituye a los dos intervalos en espacio y en el tiempo de la física más antigua. Además, esta noción de intervalo puede parecer un tanto misteriosa, pero a medida que vayamos adelantando, lo será menos. Y aparecerá gra-

dualmente su razón de ser en la naturaleza de las cosas.

## 5. Espacio-Tiempo

Todo el que haya oído hablar alguna vez de la teoría de la relatividad conoce la frase «espacio-tiempo». Y sabe además que lo correcto es emplear esta frase, ya que primitivamente deberíamos haber dicho «espacio *y* tiempo». Pero pocos que no sean matemáticos tienen una idea clara de lo que se quiere decir con este cambio en los términos. Antes de entrar a fondo en la teoría especial de la relatividad, quiero tratar de mostrar al lector lo que se encierra en la frase «espacio-tiempo», ya que es, desde un punto de vista filosófico e imaginario, la más importante quizá de todas las novedades introducidas por Einstein.

Supongamos que quieres determinar dónde y cuándo tuvieron lugar ciertos hechos —por ejemplo, una explosión en una aeronave—. Para ello tendrás que mencionar cuatro dimensiones, esto es, la latitud y la longitud, la altura sobre el suelo y el tiempo. Según la idea tradicional, las tres primeras dan la posición en el espacio, mientras que la cuarta da la posición en el tiempo. Las tres dimensiones que dan la posición en el espacio pueden señalarse con toda clase de formas. Se podría, por ejemplo tomar el plano del ecuador, el plano del meridiano de Greenwich y el plano del meridiano 90, y expresar la distancia del avión desde cada uno de estos planos. Estas tres distancias serían lo que se ha llamado después de Descartes «coordenadas cartesianas». Se podría tomar cualquiera de los otros tres planos que forman ángulo recto entre sí, y se tendrían nuevamente las «coordenadas cartesianas». O se podría tomar la distancia desde Londres a un punto en el suelo, perpendicular a la aeronave; la dirección de esta distancia (nordeste, oeste-sudoeste, o cualquiera que fuese) y la altura del avión por encima del suelo. Hay un número infinito de maneras para fijar la posición en el espacio, todas igualmente legítimas. La elección entre ellas es de simple conveniencia.

Cuando la gente decía que el espacio tenía tres dimensiones quería decir exactamente esto: que las tres dimensiones eran necesarias para poder especificar la posición de un punto en el espacio, pero que el método para señalar estas dimensiones era totalmente arbitrario.

Con respecto al tiempo, se creía que el problema era totalmente diferente. Los únicos elementos arbitrarios en el cómputo del tiempo eran la unidad y el punto del tiempo desde el que comenzaba dicho cómputo. Se podía medir según la hora de Greenwich, de París o de Nueva York. Esto constituía una diferencia en cuanto al punto de partida. Se podía medir en segundos, minutos, horas, días o años. Era una diferencia de unidad. No existía nada relativo a la libertad de elección por lo que respecta al método de fijar la posición en el espacio. Y, en particular, se creía que el método de fijar la posición en el espacio y el método de fijar la posición en el tiempo podía hacerse de forma totalmente independiente el uno del otro. Por estas razones, la gente consideraba que el tiempo y el espacio eran dos cosas completamente distintas.

La teoría de la relatividad ha cambiado esto. Existe ahora una serie de medios diferentes para fijar la posición en el tiempo, que no difieren tan sólo en lo referente a la unidad y al punto de partida. En realidad, como hemos visto, si un suceso es simultáneo a otro en un cálculo o medida, lo precederá en otro y lo seguirá en un tercero. Además, los cálculos de espacio y tiempo ya no son independientes entre sí. Si se altera la forma de cómputo de la posición en espacio, se puede alterar también el intervalo-tiempo entre los dos hechos. Si se altera la forma de cómputo de tiempo, se puede alterar también la distancia en espacio entre dos acontecimientos. De este modo, espacio y tiempo ya no son independientes, como tampoco lo son las tres dimensiones de espacio. Seguimos necesitando las cuatro dimensiones para determinar la posición de un hecho. Pero ya no podemos, como antes, separar una de las cuatro como totalmente independientes de las otras tres.

No es del todo cierta la afirmación de que ya no existe distinción entre tiempo y espacio. Como vimos, hay intervalos temporales e intervalos espaciales. Pero la distinción es de un tipo diferente al que anteriormente se suponía. Ya no existe un tiempo universal que se pueda aplicar sin ambigüedad a cualquier parte del universo. Sólo existen diversos tiempos «propios» de los diversos cuerpos del universo que coinciden aproximadamente en dos cuerpos que no tienen un movimiento rápido, pero que no coinciden exactamente nunca, a no ser que sean dos cuerpos en reposo y en relación mutua.

La descripción del mundo exigida para este nuevo estado de cosas es como sigue: supongamos que me ocurre un suceso  $E$  y que simultáneamente parte de mí un rayo-luz en todas direcciones. Todo lo que suceda a cualquiera después que el rayo luz haya llegado hasta él se sitúa definitivamente después del suceso  $E$  en cualquier sistema de cómputo del tiempo. Cualquier suceso que yo haya podido presenciar en cualquier parte antes de que me ocurriera el suceso  $E$  se sitúa definitivamente *antes* del suceso  $E$  en cualquier sistema de cómputo del tiempo. Pero cualquier suceso acaecido en el tiempo intermedio no está definitivamente ni antes ni después del suceso  $E$ . Pongamos un caso concreto: supongamos que yo pudiera observar a una persona en Sirio y que ella pudiera observarme a mí. Lo que ella hace y lo que yo veo antes de que el suceso  $E$  me ocurra, se sitúa definitivamente antes de  $E$ . Lo que haga después de haber visto el hecho  $E$  está definitivamente después de  $E$ . Pero todo lo que hace antes de haber visto el suceso  $E$ , aun cuando yo lo vea después de haber sucedido el hecho  $E$ . Si la luz tarda muchos años desde Sirio a la tierra, crea un período del doble de años en Sirio que podemos calificar de «contemporáneo» de  $E$ , ya que estos años no están situados definitivamente antes o después de  $E$ .

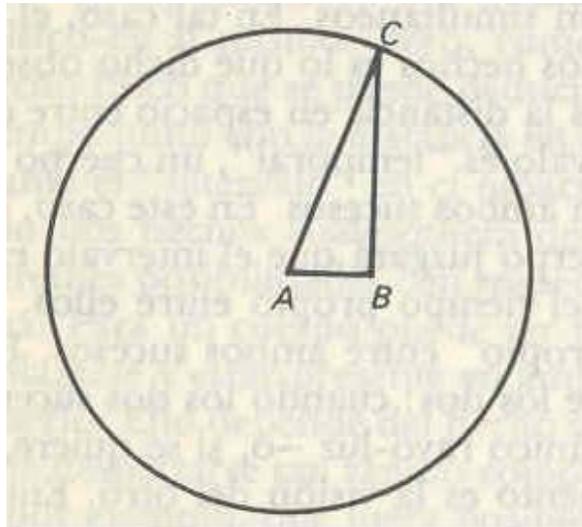
El doctor A. A. Robb en su *Theory of Time and Space* sugirió un punto de vista que puede ser o no ser filosóficamente fundamental, pero que, en cualquier caso, nos ayuda a comprender el nudo de los problemas que hemos estado describiendo. Sostenía que un suceso sólo se puede decir que está definitivamente antes que otro, si en algún sentido puede influir sobre él. Ahora bien, las influencias se difunden desde un centro de diversas formas. Los periódicos ejercen una influencia que emana de Londres a una velocidad media de 30 kilómetros por hora, bastante más para largas distancias. Todo lo que un hombre hace a causa de lo que lee en el periódico es consecuencia clara de la impresión del periódico. El sonido avanza mucho más rápido: sería posible disponer una serie de altavoces a lo largo de las principales carreteras y vocear los periódicos de un altavoz a otro. Pero el telégrafo es más rápido y la telegrafía sin hilos se transmite a la velocidad de la luz, de manera que no se puede esperar nada más rápido. Pues bien, lo que un hombre hace como consecuencia de recibir un mensaje radiado, lo hace *después* de haber sido enviado el mensaje. El significado aquí es independiente de los convencionalismos relativos a la medida del tiempo. Pero todo lo que hace mientras

el mensaje se está transmitiendo no puede estar influido por el envío. Y no puede influir sobre el emisor hasta un tiempo después de haber enviado el mensaje, es decir, si dos cuerpos están muy separados ninguno de los dos puede influir en el otro a no ser después de un lapso de tiempo. Lo que sucede antes de que haya pasado el tiempo no puede afectar al cuerpo distante. Supongamos, por ejemplo, que sucede un hecho notable en el sol. Hay un período de dieciséis minutos en la tierra durante los cuales ningún suceso de ésta puede haber influido o ser influido por el mencionado hecho notable ocurrido en el sol. Esto da una base sólida para considerar ese período de dieciséis minutos en la tierra como ni antes ni después del suceso acaecido en el sol.

Las paradojas de la teoría especial de la relatividad son sólo paradojas, porque estamos acostumbrados al punto de vista y a la costumbre de dar las cosas por supuestas cuando no tenemos derecho a hacerlo.

Esto es especialmente cierto en lo que respecta a la medida de las longitudes. En la vida diaria, nuestra manera de medir las longitudes es aplicar una medida de metros o alguna otra medida. En el momento en que se aplica, el metro-medida está en reposo en relación al cuerpo que se va a medir. En consecuencia, la longitud a la que llegamos por la medida es la longitud «propia», es decir, la longitud estimada por un observador que comparte el movimiento del cuerpo. En la vida ordinaria jamás hemos de abordar el problema de medir un cuerpo que esté en continuo movimiento. Y en caso de hacerlo, las velocidades de los cuerpos visibles de la tierra son tan pequeñas en relación a la misma que las anomalías descubiertas por la teoría de la relatividad no aparecerían. Pero en astronomía o en la investigación de la estructura atómica nos hallamos ante problemas que no pueden abordarse de esta manera. Como no somos Josué, no podemos detener el sol mientras lo medimos. Si hemos de valorar su tamaño, hemos de hacerlo así, mientras se mueve con relación a nosotros. De modo parecido, si se quiere apreciar el tamaño de un electrón, debe hacerse mientras está en movimiento rápido, puesto que no está quieto ni un momento. Éste es el tipo de problemas vinculados a la teoría de la relatividad.

Cuando es posible medir con un metro-medida, se obtiene siempre el mismo resultado, pues da la longitud «propia» de un cuerpo. Pero cuando



no es posible utilizar este método, podemos comprobar que suceden cosas curiosas, particularmente si el cuerpo que se ha de medir se mueve muy velozmente con respecto al observador. Una figura como la del final del capítulo anterior nos ayudará a comprender el problema.

Supongamos que el cuerpo cuya longitud queremos medir se mueve con relación a nosotros, y que en un segundo recorre la distancia  $OM$ . Tracemos ahora un círculo alrededor de  $O$ , cuyo radio es la distancia que recorre la luz en un segundo. Desde  $M$  tracemos  $MP$ , perpendicular a  $MO$ , encontrando el círculo en  $P$ . Así,  $OP$  es la distancia que recorre la luz en un segundo. La relación de  $OP$  a  $OM$  es la relación de la velocidad de la luz a la velocidad del cuerpo. La relación de  $OP$  a  $MP$  es la relación en que las longitudes aparentes están alteradas por el movimiento. Es decir, si el observador juzga que dos puntos de la línea de movimiento del cuerpo que se mueve están a una distancia mutua representada por  $MP$ , una persona que se moviera con el cuerpo juzgaría que estaban a la distancia representada (a la misma escala) por  $OP$ . Las distancias del cuerpo que se mueve en los ángulos rectos de la línea del movimiento no se ven afectadas por el movimiento. Todo el conjunto es recíproco; es decir, si un observador que se mueve con el cuerpo fuera a medir la longitud del cuerpo del anterior observador, quedaría alterado, precisamente en la misma proporción. Cuando dos cuerpos se mueven en relación mutua, sus longitudes aparecen más cortas a un tercero que a ellos mismos. Tal es la contracción de Fitzgerald, creada fundamentalmente para

determinar el resultado del experimento de Michelson Morley. Pero ahora se plantea naturalmente por el hecho de que los dos observadores no hacen el mismo juicio de simultaneidad.

Veamos la manera de producirse esta simultaneidad: decimos que dos puntos de un cuerpo distan un metro entre sí cuando podemos aplicar *simultáneamente* un extremo del metro-medida a uno y el otro extremo al otro. Si, por tanto, dos personas no están de acuerdo sobre la simultaneidad y el cuerpo está en movimiento, lógicamente obtendrán diferentes resultados en sus medidas. El problema del tiempo está, pues, en el fondo del problema de la distancia.

La relación de  $OP$  a  $MP$  es esencial en todos estos problemas. Tiempos, longitudes y masas se alteran en esta proporción cuando el cuerpo en cuestión está en movimiento con relación al observador. Se podrá ver que, si  $OM$  es mucho más pequeño que  $OP$ , es decir, si el cuerpo se mueve mucho más despacio que la luz,  $MP$  y  $OP$  son casi iguales, de forma que las alteraciones producidas por el movimiento son muy pequeñas. Pero si  $OM$  es casi tan grande como  $OP$ , es decir, si el cuerpo que se mueve lo hace casi a la misma velocidad que la luz, entonces  $MP$  resulta muy pequeño comparado con  $OP$  y los efectos resultan muy grandes. El aparente aumento de volumen de las partículas que se mueven vertiginosamente había sido observado y se había hallado la verdadera fórmula antes de que Einstein inventara su teoría especial de la relatividad. De hecho, Lorentz había llegado a las fórmulas llamadas de «transformación de Lorentz», que comprenden toda la esencia matemática de la teoría especial de la relatividad. Pero fue Einstein quien demostró que todo ello no difería de lo que era de esperar, y no una serie de trucos rápidos para dar cuenta de sorprendentes resultados experimentales. No obstante, no hay que olvidar que los resultados experimentales fueron el motivo original de toda la teoría, y siguen siendo la base para emprender la tremenda reconstrucción lógica que suponen las teorías de Einstein.

Podemos ahora recapitular las razones que hicieron necesario sustituir «espacio-tiempo» por espacio y tiempo. La antigua separación de espacio y tiempo se basaba en la creencia de que no había ambigüedad en afirmar que dos hechos en lugares distintos sucedían al mismo tiempo. En consecuencia se pensaba que podíamos describir la topografía del universo en un momento

dato y en términos puramente espaciales. Pero ahora que la simultaneidad resulta relativa a un observador particular, ello ya no es posible. Lo que para un observador es una descripción del estado del mundo en un momento dado, para otro es una serie de sucesos en varios tiempos distintos, cuyas relaciones no son simplemente espaciales sino también temporales. Por la misma razón, estamos vinculados a los hechos más que a los cuerpos. En la vieja teoría era posible considerar un número de cuerpos en el mismo instante, y puesto que el tiempo era el mismo para todos, podía prescindirse de él. Pero ahora no podemos hacer eso si queremos obtener un resultado objetivo de los hechos físicos. Hemos de mencionar la fecha en que se ha de considerar un cuerpo, y llegar así a un «suceso», es decir, a algo que sucede al mismo tiempo. Cuando conocemos el tiempo y el lugar de un suceso en un sistema de cómputo de un observador, podemos calcular su tiempo y lugar, según otro observador. Pero debemos conocer el tiempo tanto como el lugar, puesto que ya no podemos preguntar cuál es su lugar tanto para el nuevo observador al «mismo» tiempo que para el viejo. No existe algo así como el «mismo» tiempo para diferentes observadores, a menos que se encuentren en reposo y en relación mutua. Necesitamos cuatro medidas para fijar una posición. Y cuatro medidas fijan la posición de un hecho en espacio-tiempo, no simplemente de un cuerpo en el espacio. Tres medidas no son suficientes para fijar una posición. Ésta es en esencia lo que queremos dar a entender con la sustitución de espacio-tiempo por espacio y tiempo.

## 6. La teoría especial de la relatividad

La teoría especial de la relatividad surgió como una explicación de los hechos del electromagnetismo. Tenemos aquí una historia un tanto curiosa. Durante el siglo XVIII y principios del XIX, la teoría de la electricidad estaba totalmente dominada por la analogía newtoniana. Dos cargas eléctricas se atraen mutuamente si son de polos diferentes, uno positivo y otro negativo, pero se repelen si son del mismo polo. En cada caso, la fuerza varía en razón inversa al cuadrado de la distancia, lo mismo que en el caso de la gravitación.

Se concebía esta fuerza como una acción a distancia, hasta que Faraday, después de una serie de notables experimentos, demostró el efecto del medio que intervenía. Faraday no era matemático. Fue Clerk Maxwell el primero que dio forma matemática a los resultados sugeridos por los experimentos de Faraday. Además, Clerk Maxwell sentó las bases para considerar que la luz es un fenómeno electromagnético, que consiste en ondas electromagnéticas. El medio para transmitir los efectos electromagnéticos podía ser, pues, el éter, que durante mucho tiempo se había supuesto trasmisor de la luz. La exactitud de la teoría de Maxwell sobre la luz quedó probada por los experimentos de Hertz en la manufactura de las ondas magnéticas. Tales experimentos aportan la base para la telegrafía sin hilos. Por el momento, tenemos constancia del progreso triunfante en el que teoría y experimento asumen alternativamente el papel rector. En la época de los experimentos de Hertz el éter parecía algo firmemente establecido y en posición tan fuerte como la de cualquier otra hipótesis científica cuya verificación directa no es posible. Pero comenzaron a descubrirse una serie de hechos, y gradualmente fue cambiado todo el panorama.

El movimiento que culminó con Hertz era un movimiento para establecer la continuidad de todas las cosas. El éter era continuo, las ondas dentro de él eran continuas, y se esperaba que la materia pudiera estar constituida por una estructura continua en el éter. Pero vino luego el descubrimiento de la estructura atómica de la materia, y de la estructura discreta de los átomos mismos. Se creyó que los átomos estaban compuestos de electrones, protones y neutrones. El electrón es la partícula más pequeña con una carga determinada de electricidad negativa. El protón lleva una carga de electricidad positiva. El neutrón, en cambio, no está cargado. (Es tan sólo una cuestión

de hábito llamar negativa a la carga del electrón y positiva a la del protón, pues se podría afirmar lo contrario.) Parecía probable la imposibilidad de encontrar la electricidad más que en forma de cargas en el electrón y el protón. Todos los electrones tienen exactamente la misma carga negativa, igual a la de los protones, pero la de éstos es positiva y opuesta. Más tarde se descubrieron las partículas subatómicas; la mayoría de ellas se llaman mesones e hiperones. Todos los protones tienen exactamente el mismo peso, que es de unas ochocientas veces el peso de los electrones. Todos los neutrones tienen también el mismo peso. Son ligeramente más pesados que los protones. Los mesones, de los que existen diferentes clases, pesan más que los electrones, pero menos que los protones. Los hiperones, por el contrario, son más pesados que los protones y que los neutrones.

Algunas de las partículas llevan carga eléctrica, mientras que otras no la llevan. Se ha comprobado que todas las de carga positiva tienen exactamente la misma carga que el protón. Las de carga negativa, en cambio, tienen la misma carga que el electrón, si bien sus demás propiedades son totalmente diferentes. Para complicar más las cosas, hay una partícula que es idéntica al electrón, a excepción de la carga, que es positiva en vez de negativa: se llama positrón. Un descubrimiento muy reciente es el de una partícula idéntica al protón, aunque se diferencia por su carga negativa: se la llama antiprotón.

Estos descubrimientos sobre la estructura discreta de la materia son inseparables de los hallazgos de otros fenómenos llamados cuánticos, tales como las líneas luminosas del espectro de un átomo. Parece que todos los procesos naturales muestran una discontinuidad fundamental siempre que pueden ser medidos con suficiente precisión.

De este modo, la física ha tenido que asimilar nuevos hechos y hacer frente a nuevos problemas. Aunque la teoría cuántica ha existido más o menos en su forma actual desde hace cuarenta años, y la teoría especial de la relatividad desde unos sesenta, hasta hace veinte años pocos pasos se dieron para unir a las dos. Las nuevas interpretaciones de la teoría cuántica la han hecho más acorde con la relatividad. Tales mejoras han ayudado en gran manera a nuestra comprensión de las partículas subatómicas, pero todavía quedan muchas y serias dificultades por resolver.

Los problemas solucionados por la teoría especial de la relatividad en

su propio campo, independientemente de la teoría cuántica, quedan tipificados en el experimento de Michelson-Morley. Si aceptamos como correcta la teoría del electromagnetismo de Maxwell, debería haber ciertos efectos del movimiento detectables por medio del éter. En realidad, no se ha descubierto ninguno. Estaba también el hecho observado de que un cuerpo en movimiento muy acelerado parece incrementar su masa. El aumento está en la relación de  $OP$  a  $MP$  en la figura del capítulo precedente. Poco a poco se fueron acumulando hechos de este género, hasta que se hizo necesario encontrar una teoría que pudiera englobarlos a todos.

La teoría de Maxwell se reducía a ecuaciones ciertas, conocidas como «ecuaciones de Maxwell». Éstas permanecieron inalterables a pesar de las revoluciones operadas en la física a lo largo del siglo pasado. De hecho, tuvieron cada vez más importancia y mayor certeza; los argumentos de Maxwell en su favor eran tan débiles que la exactitud de los resultados casi hay que atribuirlos a la intuición. Ahora bien, estas ecuaciones se basaban en experimentos de laboratorios terrestres; además, existía la suposición tácita de que podía pasarse por alto el movimiento de la tierra a través del éter. En ciertos casos, como en el experimento de Michelson-Morley, esto no debiera haber sido posible sin error comprobable. Pero resultaba que siempre era posible. Los físicos se enfrentaban a una extraña dificultad: las ecuaciones de Maxwell resultaban más exactas de lo que en sí deberían ser. Galileo explicó una dificultad semejante en los primeros albores de la física moderna. Muchas personas creen que si se suelta un peso, caerá verticalmente. Pero si se realiza el experimento en el camarote de un barco en movimiento, el peso cae, en relación al camarote, exactamente igual que si el barco estuviera parado. Si el peso parte, por ejemplo, de la mitad del techo, caerá en la mitad del suelo. Es decir, desde el punto de vista de un observador de la orilla, no cae verticalmente, ya que comparte el movimiento del barco. En la medida en que el movimiento del barco es estable, todo sucede dentro del barco como si no se moviera. Ya Galileo explicó esto, con gran indignación de los discípulos de Aristóteles. En la física ortodoxa derivada de Galileo, un movimiento uniforme en línea recta no tiene efectos perceptibles. Esto fue en su día una forma de la relatividad tan asombrosa como la de Einstein lo es para nosotros. Einstein, en la teoría especial de la relatividad, trató de demostrar cómo los fenómenos electromagnéticos podían no verse afectados

por el movimiento uniforme a través del éter, caso de existir el éter. Éste era el problema más difícil, que no se podía resolver con sólo acudir a los principios de Galileo.

El arduo esfuerzo requerido para solucionar este problema estaba relacionado con el tiempo. Era necesario introducir la noción del tiempo «propio» que ya hemos considerado y abandonar la vieja creencia de un único tiempo universal. Las leyes cuantitativas de los fenómenos electromagnéticos se expresan en las ecuaciones de Maxwell. Y se comprueba que estas ecuaciones son ciertas para cualquier observador, aun cuando éste se pueda hallar en movimiento. Es un problema directamente matemático hallar qué diferencia debe haber entre las medidas aplicadas por un observador o por otro, si es que, a pesar de su movimiento relativo, han de poder verificar las mismas ecuaciones. La respuesta la tenemos en la «transformación de Lorentz», comprobada como fórmula por Lorentz, pero interpretada y hecha inteligible por Einstein.

La transformación de Lorentz nos dice qué estimación de distancias y períodos de tiempo habrá de hacer un observador cuyo movimiento relativo es conocido, si sabemos los de otro observador. Podemos suponer que viajas en un tren en una línea que se dirige al este. Has estado viajando un tiempo que por los relojes de la estación de que partiste es  $t$ . A una distancia  $x$  del punto de partida, según la gente que viaja en el tren, ocurre un accidente en este momento; por ejemplo, la destrucción de la línea por un rayo. Has estado viajando todo el tiempo a una velocidad uniforme  $v$ . La pregunta es: ¿a qué distancia de ti crees que ha tenido lugar este hecho, y cuánto tiempo habrá pasado por tu reloj, desde que partiste, suponiendo que tu reloj es exacto desde el punto de vista de un observador que va en el tren?

Nuestra solución de este problema ha de cumplir ciertas condiciones. Ha de aceptar el resultado de que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, aunque puedan estar moviéndose. Ha de aceptar también que los fenómenos físicos —en particular los del electromagnetismo— obedecen a las mismas leyes para los mismos observadores, aun cuando puedan comprobar que sus medidas de distancias y tiempos se ven afectadas por su movimiento. Es decir, si vas en un tren y tu movimiento afecta a tu apreciación de la distancia fuera del tren, ha de haber exactamente un cambio

similar en la estimación que personas que están fuera del tren hagan de las distancias dentro del mismo. Estas condiciones son suficientes para determinar la solución del problema, pero la solución exige más matemáticas de las que puedo presentar en este libro.

Antes de presentar el problema en términos generales, pongamos un ejemplo. Supongamos que vas en tren en una línea larga y recta y que te diriges en dirección este a una velocidad equivalente a las tres quintas partes la de la luz; mides la longitud del tren y compruebas que es de cien metros. Supongamos que la gente que te mira al pasar, sirviéndose de métodos científicos de precisión, llegara a hacer con exactitud las observaciones necesarias para calcular la longitud del tren. Si operan correctamente, comprobarán que el tren tiene ochenta metros de largo. Todo en el tren les parecerá más corto si mira en la dirección que sigue el tren de lo que te parece a ti. Los platos de la comida, que tú ves como platos ordinarios circulares, parecerán al que está fuera ligeramente ovales: le parecerán solamente las cuatro quintas partes de ancho vistos tanto en la dirección en que se mueve el tren como en la dirección de la anchura del mismo. Y todo esto es recíproco. Imagínate que miras por la ventanilla y ves a un hombre que lleva una caña de pescar, que, según su medida, es de una longitud de quince palmos. En seguida podrás ver si la lleva recta. Basta con que te fijas si forma ángulo recto con los rieles. Pero si está paralela al trazado del ferrocarril, te parecerá que solamente tiene doce palmos de longitud. Al describir lo que se ve, he supuesto que todos tienen el debido sentido de la perspectiva. No obstante, todas las longitudes de los objetos del tren habrá que disminuirlas en un veinte por ciento, en la dirección del movimiento, para las personas que están fuera, así como las longitudes de los objetos exteriores, para ti que estás dentro del tren.

Pero los efectos con respecto al tiempo son todavía más extraños. Edington en *Space, Time and Gravitation* ha expuesto el problema con lucidez casi ideal. Imagina que un aviador vuela, en relación a la tierra, a una velocidad de 161.000 millas por segundo y dice:

Si observamos atentamente al aviador deduciremos que es des-acostumbradamente lento en sus movimientos. De modo parecido, los sucesos que durante la conducción se mueven con él

parecerían también retardados como si el tiempo se hubiera olvidado de seguir adelante. Su cigarro dura dos veces más que uno de los nuestros. He dicho “deducir” deliberadamente. Veríamos que el tiempo, de una manera insólita, se hace más lento todavía. Pero esto se explica fácilmente porque el aviador va aumentando su distancia con respecto a nosotros y las impresiones de la luz tardan cada vez más en llegarnos. El retraso más moderado a que he aludido se produce una vez que hemos medido el tiempo de la transmisión de la luz. Pero una vez más nos volvemos a encontrar aquí con la reciprocidad, ya que en opinión del aviador somos nosotros los que volamos a 161.000 millas por segundo. Al hacer la cuenta, comprueba que somos nosotros los que vamos lentos. Nuestro cigarro dura lo mismo que el suyo.

¡Qué situación tan envidiable! Cada hombre cree que el cigarro del otro dura el doble que el suyo. Puede, sin embargo, servir de consuelo el pensar que las visitas del otro hombre al dentista durarán también el doble.

Esta cuestión del tiempo es bastante complicada, debido al hecho que los acontecimientos que uno juzga simultáneos, otro los considera separados por un lapso de tiempo. Para aclarar cómo se ve afectado el tiempo por ello, volvamos a nuestro tren que se desplaza en línea recta hacia el este a una velocidad media de las tres quintas partes de la luz. En aras de una mayor claridad de la ilustración concibo la tierra grande y llana, en vez de pequeña y redonda.

Si tomamos los hechos que suceden en un punto fijo de la tierra y nos preguntamos en qué tiempo le parece al viajero que se produjeron desde que se inició el viaje, la respuesta es que habrá ese retraso de que nos habla Eddington. En tal caso significa que lo que parece una hora en la vida de una persona estacionaria, es considerada como hora y cuarto por el hombre que la observa desde el tren. Recíprocamente, lo que parece una hora en la vida de la persona que va en el tren es juzgada por el hombre que la observa desde fuera como una hora y cuarto. Cada uno de ellos forma períodos de tiempo observados en la vida del otro superiores en un cuarto a lo que en realidad son para la persona que los está viviendo. La proporción es la misma respecto al tiempo que respecto a la longitud.

Pero si en lugar de comparar los sucesos en el mismo lugar de la tierra, los comparamos en lugares muy separados, los resultados son todavía mucho más sorprendentes. Tomemos ahora los sucesos acontecidos a lo largo del trayecto. Desde el punto de vista de la persona que está en tierra suceden en un momento dado, por ejemplo, el momento en que el observador que va en el tren pasa ante la persona estacionada. De tales sucesos, los que ocurren en puntos hacia los que el tren se dirige parecerá al viajero que han sucedido ya. Por el contrario, aquellos que ocurran en puntos que se encuentran detrás del tren, serán para él todavía futuros. Cuando digo que los sucesos que acaecen en la dirección que sigue el tren parecen haber sucedido ya, estoy afirmando algo no del todo exacto, puesto que todavía no los habrá visto. Pero cuando los haya visto llegará a la conclusión, después de haber anotado la velocidad de la luz, de que han debido suceder antes del momento en cuestión. Un hecho que sucede en la dirección del tren en su recorrido a lo largo del trayecto y que el observador estacionario juzga que está sucediendo ahora (o mejor, juzgará que ha sido ahora cuando llega a conocerlo), si ocurre a una distancia a lo largo de la línea que la luz podría recorrer en un segundo, el viajero juzgará que ha ocurrido hace tres cuartos de segundo. Si ocurre a una distancia de los dos observadores que el hombre que está en tierra juzga que la luz recorrería en un año, el viajero juzgará (cuando se dé cuenta de ello) que sucedió nueve meses antes del momento en que pasa al habitante de la tierra. Y de un modo general, adelantará los acontecimientos sucedidos en el mismo sentido del trayecto en tres cuartos de hora-tiempo que tardaría la luz desde los sucesos hasta el hombre de la tierra ante el que acaba de pasar y que juzga que estos hechos están sucediendo ahora. O mejor, afirmará que sucedían en el momento en que le llega la luz de ellos. Los sucesos que tienen lugar en la línea férrea detrás del tren habrá que fecharlos con posterioridad en una proporción exactameme igual.

De este modo tenemos que hacer una doble corrección en la fecha de un acontecimiento cuando pasamos del observador de tierra al observador viajero. Debemos tomar las cinco cuartas partes del tiempo tal como las juzga el habitante de tierra y después restar las tres cuartas partes del tiempo que tardaría la luz en recorrer desde el hecho en cuestión al habitante de tierra.

Tomemos cualquier hecho en una parte distante del universo, que sea

visible tanto para quien está en tierra como para el viajero en el momento en que ambos se cruzan. Si el primero sabe a qué distancia ha ocurrido el suceso, puede juzgar a qué hora tuvo lugar, puesto que conoce la velocidad de la luz. Si el hecho ocurrió en la dirección del viajero, éste deducirá que sucedió hace más del doble de tiempo de lo que cree el hombre que está en tierra. Pero si ocurrió en la dirección de donde procede, concluirá que sucedió hace sólo la mitad del tiempo de lo que piensa el hombre que está en tierra. Si el viajero se mueve a una velocidad diferente, las proporciones serán también diferentes.

Supongamos ahora que (como ocurre a veces) aparecen de repente dos nuevas estrellas y acaban de hacerse visibles al viajero y a nuestro hombre de a pie a quien está adelantando ahora. Imaginemos que una de ellas se halla en la misma dirección en que se mueve el tren y la otra en dirección contraria, es decir, de donde el tren procede. Supongamos que el hombre de a pie es capaz, en alguna forma, de apreciar la distancia de las dos estrellas y de deducir que la luz de una de ellas, que se mueve en la misma dirección del viajero, tarda cincuenta años en llegar hasta él, y cien años la otra. Podrá concluir, pues, que la explosión que originó la nueva estrella en dirección hacia adelante tuvo lugar hace cincuenta años. En cambio, la explosión que originó la otra tuvo lugar hace cien años. El viajero no tendrá más que cambiar estas cifras: deducirá que la explosión ocurrida en la estrella anterior al tren tuvo lugar hace cien años, y la producida en la parte posterior del mismo hace cincuenta años. Supongo que ambos discurren correctamente a base de datos físicos exactos. En realidad, los dos están en lo cierto, a menos que piensen que el otro debe estar equivocado. Se debería observar que los dos tendrán la misma apreciación de la velocidad de la luz. Su apreciación de las distancias de las dos nuevas estrellas variará exactamente en la misma proporción a su apreciación del tiempo transcurrido desde las explosiones. Ciertamente, uno de los principales motivos de toda esta teoría es asegurar que la velocidad de la luz será la misma para todos los observadores, aun cuando estén en movimiento. Este hecho, establecido por experiencia, era incompatible con las viejas teorías e hizo absolutamente necesario admitir algo asombroso. La teoría de la relatividad es tan poco asombrosa como compatible con los hechos. En realidad, después de algún tiempo, deja de parecer asombrosa.

Hay otro aspecto de grandísima importancia en la teoría que estamos

estudiando. Y es que, si bien las distancias y los tiempos varían para los diferentes observadores, podemos deducir de ellos la dimensión llamada «intervalo», que es el mismo para todos los observadores. El «intervalo» en la teoría especial de la relatividad se obtiene de la manera siguiente: se toma el cuadrado de la distancia entre dos sucesos, y el cuadrado de la distancia recorrida por la luz en el tiempo transcurrido entre ambos hechos. Se resta el cuadrado menor del cuadrado mayor y el resultado queda definido como el cuadrado del intervalo entre los dos sucesos. El intervalo es el mismo para todos los observadores y representa una relación física genuina entre los dos hechos, cosa que el tiempo y la distancia no hacen. Hemos dado ya una hipótesis geométrica para el intervalo al final del capítulo 4. Lleva al mismo resultado que la regla que acabamos de formular. El intervalo es «temporal» cuando el tiempo entre dos sucesos es superior a lo que la luz tardaría en recorrer desde el lugar de un suceso al lugar de otro. En caso contrario, el intervalo es «espacial». Cuando el tiempo entre dos sucesos es exactamente igual al tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre ambos puntos, el intervalo es cero. Los dos hechos se sitúan, pues, en las partes de un rayo de luz, a no ser que no pase ninguna luz por ese camino.

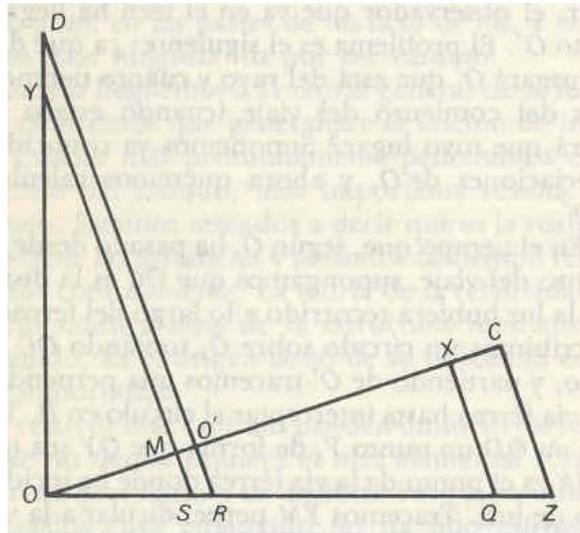
Cuando llegemos a la teoría general de la relatividad tendremos que generalizar la noción de intervalo. Cuanto más profundamente penetramos en la estructura del mundo, más importante resulta este concepto. Estamos tentados a decir que es la realidad la que tiene las distancias y períodos de tiempo representados confusamente. La teoría de la relatividad ha alterado nuestra idea de la estructura fundamental del mundo. Es el origen tanto de su dificultad como de su importancia.

El resto de este capítulo pueden omitirlo los lectores que no tienen siquiera el más elemental conocimiento de geometría o de álgebra. Pero para utilidad de aquellos cuya educación no ha sido enteramente descuidada, añadiré unas explicaciones de la fórmula general de la que hasta ahora he dado solamente ejemplos particulares. La fórmula general en cuestión es la «transformación de Lorentz» que explica cómo deducir las medidas de longitud y tiempo propias de un cuerpo de las que son propias de otro cuando un cuerpo se mueve de una manera determinada en relación a otro. Antes de dar la fórmula algebraica, presentaré una hipótesis geométrica. Como anteriormente, supondremos que hay dos observadores a quienes llamaremos

$O$  y  $O'$ . Uno de ellos está inmóvil en tierra, mientras que el otro viaja a una velocidad uniforme por un trazado de ferrocarril en línea recta. Al inicio del tiempo considerado, ambos observadores se encontraban en el mismo punto de la vía férrea, pero ahora están separados por cierta distancia. Un rayo de luz se proyecta sobre un punto  $X$  del ferrocarril y  $O$  juzga que en el momento en que el rayo tiene lugar, el observador que va en el tren ha llegado al punto  $O'$ . El problema es el siguiente: ¿a qué distancia juzgará  $O'$  que está del rayo y cuánto tiempo después del comienzo del viaje (cuando estaba en  $O$ ) creerá que tuvo lugar? Suponemos ya conocidas las apreciaciones de  $O$ , y ahora queremos calcular las de  $O'$ .

En el tiempo que, según  $O$ , ha pasado desde el comienzo del viaje, supongamos que  $OC$  es la distancia que la luz hubiera recorrido a lo largo del ferrocarril. Describimos un círculo sobre  $O$ , tomando  $OC$  como radio, y partiendo de  $O'$  tracemos una perpendicular a la vía férrea hasta interceptar el círculo en  $D$ . Tomemos en  $OD$  un punto  $Y$ , de forma que  $OY$  sea igual a  $OX$  ( $X$  es el punto de la vía férrea donde ha incidido el rayo de luz). Tracemos  $YM$  perpendicular a la vía del ferrocarril y  $OS$  perpendicular a  $OD$ , y hagamos coincidir a  $YM$  y  $OS$  en  $S$ . Asimismo, hagamos que  $DO'$  juntas y  $OS$  juntas se encuentren en  $R$ . Desde  $X$  y  $C$  tracemos perpendiculares a la vía del ferrocarril hasta encontrar a  $OS$  juntas en  $Q$  y  $Z$  respectivamente. Por lo tanto,  $RQ$  (medido por  $O$ ) es la distancia en la que  $O'$  creerá estar desde que cayó el rayo, no  $O'X$ , como sucedería según la vieja teoría. Y mientras  $O$  piensa que en el tiempo transcurrido desde el comienzo del viaje hasta la caída del rayo la luz habría recorrido una distancia  $OC$ ,  $O'$  cree que el mismo tiempo transcurrido es el que se requiere para que la luz recorra la distancia  $SZ$  (medida por  $O$ ). El intervalo, tal como ha sido medido por  $O$ , se ha obtenido restando el cuadrado de  $OX$  del cuadrado de  $OC$ . El intervalo medido por  $O'$  se obtiene restando el cuadrado de  $RQ$  del cuadrado de  $SZ$ . Una elementalísima geometría demuestra que son iguales.

Las fórmulas algebraicas comprendidas en la hipótesis que acabamos de presentar son como siguen: desde el punto de vista de  $O$  supongamos que un hecho ocurre a la distancia  $x$  a lo largo de la vía férrea, y en un tiempo  $t$  después del comienzo del viaje (cuando  $O'$  estaba en  $O$ ). Desde el punto de vista de  $O'$  supongamos que ocurre el mismo suceso a una distancia  $x'$  a lo largo de la vía férrea, y en un tiempo  $t'$ , después del comienzo del viaje.



Supongamos que la velocidad de la luz sea  $c'$  y la velocidad de  $O'$  en relación a  $O$ . Así,

$$\beta = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Por lo tanto:

$$x' = \beta(x - vt) \quad t' = \beta\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Ésta es la transformación de Lorentz, de la que se puede deducir todo el contenido de este capítulo.

## 7. Intervalos en espacio-tiempo

La teoría especial de la relatividad que hemos venido estudiando hasta ahora, solucionó totalmente un determinado problema. Explicó cierto hecho experimental consistente en que cuando dos cuerpos están en movimiento relativo uniforme, todas las leyes físicas, tanto las de la dinámica ordinaria como las vinculadas a la electricidad y al magnetismo, son exactamente iguales para los dos cuerpos. Movimiento “uniforme” significa aquí movimiento en línea recta con velocidad constante. Pero si se solucionó un problema mediante la teoría especial, inmediatamente surgió otro. ¿Qué sucede si el movimiento de los dos cuerpos no es uniforme? Supongamos, por ejemplo, que un cuerpo es la tierra y el otro una piedra que cae. La piedra tiene un movimiento acelerado: cada vez cae con mayor velocidad. Nada nos permite afirmar en la teoría especial que las leyes de los fenómenos físicos sean las mismas para un observador que estuviera sobre la piedra que para otro situado en tierra. Éste es un ejemplo muy poco preciso, ya que la tierra en sí misma, en un sentido amplio, es un cuerpo que cae. En todo momento tiene una aceleración hacia el sol<sup>2</sup> que la hace girar en torno a él en vez de moverse en línea recta. Comoquiera que nuestros conocimientos de física se derivan de los experimentos hechos en la tierra, no podemos darnos por satisfechos con una teoría en que se parte de que el observador no tiene aceleración. La teoría general de la relatividad elimina esta restricción y permite al observador moverse en cualquier sentido, recto o curvo, uniforme o acelerado. Al tratar de eliminar esta restricción, Einstein se vio impelido a formular su nueva ley de la gravedad que vamos a estudiar ahora. El trabajo fue sumamente difícil y le ocupó diez años. La teoría especial data de 1905, la general de 1915.

Por las experiencias que a todos nos son familiares, es evidente que un movimiento acelerado es mucho más difícil de estudiar que un movimiento uniforme. Cuando se viaja en un tren que avanza a una velocidad fija y estable, el movimiento no se nota si no se mira por la ventana. Pero cuando frena, nos vemos lanzados de repente hacia adelante. Entonces nos damos cuenta de que algo está sucediendo, sin que advirtamos nada en el exterior.

---

<sup>2</sup>Entendemos por «aceleración» no sólo un aumento de velocidad sino cualquier cambio de velocidad o de dirección. La única forma de movimiento llamado «desacelerado» es el movimiento con velocidad constante *en una línea recta*

De modo parecido, en un ascensor todo parece quieto cuando se mueve establemente, pero al arrancar y al parar, cuando su movimiento se acelera, se tienen extrañas sensaciones en la boca del estómago. (Llamamos “acelerado” a un movimiento cuando se va haciendo más lento o más rápido; si se hace más lento, la aceleración es negativa.) Lo mismo hay que aplicar a la caída de un peso en la cabina de un barco. Mientras el barco se mueva uniformemente, el peso se comportará en relación a la cabina como si el barco estuviera en reposo: si parte de la mitad del techo, caerá en medio del suelo. Pero todo cambia si hay aceleración. Si el barco aumenta su velocidad muy rápidamente, a un observador que se encuentre en la cabina, le parecerá que el peso cae formando una curva en dirección a popa. Si la velocidad disminuye rápidamente la curva se dirigirá hacia proa. Todos estos hechos son conocidos y llevaron a Galileo y Newton a considerar un movimiento acelerado como algo radicalmente diferente, por su propia naturaleza, del movimiento uniforme. Pero esta distinción sólo se podía mantener considerando al movimiento como algo absoluto, no relativo. Si todo movimiento es relativo, la tierra está acelerada en relación al ascensor de la misma manera que el ascensor lo está en relación a la tierra. Sin embargo, la gente que está en el suelo no tiene sensaciones cuando el ascensor arranca para subir. Esto ilustra la dificultad de nuestro problema. De hecho, aunque pocos físicos de los tiempos modernos han creído en el movimiento absoluto, la técnica de la física matemática seguía incorporando todavía la creencia de Newton. Y era necesaria una revolución en el método para obtener una técnica libre de este supuesto. Esta revolución tuvo su cumplimiento en la teoría general de la relatividad de Einstein.

Es un tanto optativo por dónde hay que comenzar a explicar las nuevas ideas introducidas por Einstein. A nuestro modo de ver, quizá lo mejor sea empezar por el concepto de «intervalo». Esta concepción, tal cual aparece en la teoría especial de la relatividad, es ya una divulgación de la noción tradicional de distancia en espacio y tiempo. Pero es necesario divulgarla todavía más. Con todo, es necesario explicar primero un poco de historia, y para ello debemos llegar hasta Pitágoras.

Pitágoras, como los grandes personajes de la historia, quizá no existió nunca. Es un personaje semimítico que combinó las matemáticas y las artes sacerdotales en proporciones desconocidas. No obstante, voy a suponer

que existió y que descubrió el teorema que se le atribuye. Fue contemporáneo más o menos de Confucio y de Buda. Fundó una secta religiosa, que creía inmoral comer judías, y una escuela de matemáticas que ponía particular interés en los triángulos rectángulos. El teorema de Pitágoras (la proposición 47 de Euclides) afirma que la suma de los cuadrados de los catetos de un triángulo rectángulo es igual al cuadrado de la hipotenusa. Ninguna proposición ha tenido en la historia de las matemáticas tanto éxito como ésta. Todos aprendimos a «demostrarla» en nuestra juventud. Ciertamente que la «demostración» no probaba nada y que la única manera de probar algo es por medio del experimento. Se da también el caso de que la proposición no es totalmente cierta, es sólo aproximadamente cierta. Pero en geometría y, por consiguiente en física, todo se ha derivado de ella mediante sucesivas explicaciones. La última de éstas es la teoría general de la relatividad.

El mismo teorema de Pitágoras era, con toda probabilidad, una explicación de una regla egipcia del dedo pulgar. Desde edades remotas se sabía en Egipto que un triángulo cuyos lados son tres, cuatro y cinco unidades de longitud es un triángulo rectángulo. Los egipcios empleaban este conocimiento práctico para medir sus campos. Si los lados de un triángulo miden tres, cuatro y cinco metros, los cuadrados de estos lados contendrán respectivamente 9, 16 y 25 metros cuadrados, y 9 y 16 sumados hacen 25. Tres veces tres se escribe:  $3^2$ ; cuatro veces cuatro:  $4^2$ ; cinco veces cinco,  $5^2$ . Así, pues, tenemos:

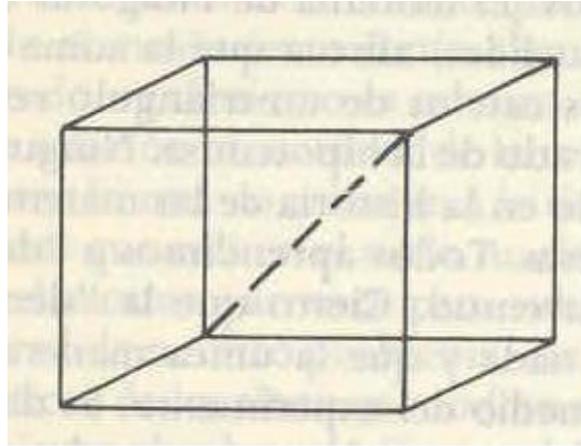
$$3^2 + 4^2 = 5^2$$

Se supone que Pitágoras advirtió este hecho después de haber aprendido de los egipcios que un triángulo cuyos lados miden 3, 4 y 5 tienen un ángulo recto. Se dio cuenta de que se podía generalizar y así llegó a su famoso teorema: «En un triángulo rectángulo el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos».

Algo parecido sucede en tres dimensiones: si se toma un bloque sólido rectángulo, el cuadrado de la diagonal (la línea punteada de la figura) es igual a la suma de los cuadrados de los tres lados.

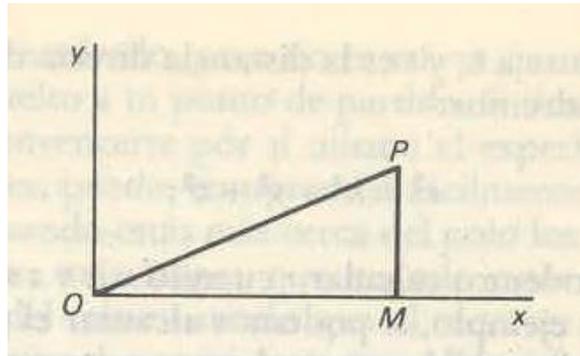
Hasta aquí llegaron los antiguos en esta materia.

El siguiente paso de importancia se debe a Descartes, que hizo del teore-



ma de Pitágoras la base de su método de geometría analítica. Supongamos que quieres situar sistemáticamente todos los sitios en una llanura (debemos suponerla lo suficientemente pequeña para que nos haga posible el hecho de que la tierra es redonda). Podemos suponer que vives en medio de la llanura. Una de las formas más sencillas de describir la posición de un lugar es decir: partiendo de mí casa, hago primero tal distancia hacia el este, luego otra distancia hacia el norte (puede ser el oeste en el primer caso, y el sur en el segundo). Ello te dice exactamente dónde está situado el lugar. En las ciudades rectangulares de América es el método natural adoptado: en Nueva York te dirán que camines tantas manzanas al este (o al oeste) y luego otras tantas al norte. La distancia que tienes que recorrer hacia el este se llama  $X$  y la distancia que has de recorrer hacia el norte  $Y$ . (Si tienes que ir hacia el oeste,  $X$  es negativa, si has de ir al sur,  $Y$  es negativa.) Supongamos que  $O$  es tu punto de partida (el «origen»); que  $OM$  es la distancia que recorres hacia el este, y  $MP$  la distancia recorrida hacia el norte. ¿A qué distancia estás de tu casa, en línea recta, cuando llegas a  $P$ ? El teorema de Pitágoras da la solución. El cuadrado de  $OP$  es la suma de los cuadrados de  $OM$  y  $MP$ . Si  $OM$  tiene una longitud de cuatro kilómetros y  $MP$  de tres,  $OP$  tiene cinco. Si  $OM$  tiene doce kilómetros y  $MP$  cinco,  $OP$  tendrá trece, porque  $12^2 + 5^2 = 13^2$ . Pero si aceptas el método de Descartes, para localizar un punto es esencial el teorema de Pitágoras, ya que te da la distancia entre lugar y lugar. Lo mismo sucede exactamente en tres dimensiones.

Imaginemos que en lugar de querer fijar simplemente las posiciones en una llanura, queremos fijar las posiciones de globos cautivos que están en-



cima de ella. Entonces habrá que añadir una tercera dimensión: la altura a que se halla situado el globo. Si llamamos altura a  $z$ , y  $r$  es la distancia directa desde  $O$  al globo, tendremos:

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

por ello podemos calcular  $r$  cuando  $x$ ,  $y$  y  $z$  son conocidos. Por ejemplo, si podemos alcanzar el globo caminando doce kilómetros al este, cuatro al norte y luego tres hacia arriba, la distancia del globo en línea recta es de trece kilómetros, puesto que

$$\begin{aligned} 12 \times 12 &= 144 & 4 \times 4 &= 16 & 3 \times 3 &= 9 \\ 144 + 16 + 9 &= 169 = 13 \times 13 \end{aligned}$$

Supongamos ahora que en lugar de tomar un pequeño trozo de la superficie de la tierra, que se puede considerar como plana, queremos hacer un mapa del mundo. Un mapa exacto del mundo sobre una superficie plana de papel es imposible. Un globo puede ser más exacto en el sentido de que todo se realiza a escala, pero en un mapa plano no puede ser. No hablo de las dificultades prácticas, estoy hablando de imposibilidad teórica. Por ejemplo: las mitades norte del meridiano de Greenwich y del meridiano 90 de longitud oeste, forman un triángulo con el segmento del ecuador que está comprendido entre ellos; los lados de este triángulo son iguales y sus ángulos rectos. En una superficie plana un triángulo de esta especie sería imposible. Por otro lado, es posible hacer un cuadrado en una superficie plana, pero en una esfera es imposible. Supongamos que tratas de hacerlo en la tierra: caminas cien kilómetros al oeste, luego otros cien al norte, después cien kilómetros al

este, y finalmente cien kilómetros al sur. Se podría creer que esto formaría un cuadrado, pero no es así, ya que al final no habrías vuelto a tu punto de partida. Si tienes tiempo puedes convencerte por ti mismo el experimento. Si no lo tienes, puedes comprender fácilmente que debe ser así. Cuando estás más cerca del polo los cien kilómetros son más largos que cuando estás cerca del ecuador, del mismo modo que al recorrer cien kilómetros hacia el este (si estás en el hemisferio norte) llegas a un punto más al este de aquel de donde partiste. Si luego te diriges en línea recta hacia el sur, te mantienes más al este que tu punto de partida, y terminarás en un punto distinto de aquel de donde comenzaste. Supongamos, para poner otro ejemplo, que sales del ecuador, a 6.000 kilómetros al este del meridiano de Greenwich; caminas hasta dicho meridiano y luego subes hacia el norte otros 6.000 kilómetros siguiendo la línea del meridiano, desde Greenwich hasta las inmediaciones de las islas Shetland; luego vas 6.000 kilómetros en dirección este y finalmente otros 6.000 en dirección sur. El viaje terminará en el ecuador a unos 6.000 kilómetros al este más allá del punto de partida.

En cierto sentido, lo que acabamos de decir no es totalmente exacto, ya que, si exceptuamos en el ecuador, la línea recta en dirección este no es el camino más corto de un lugar a otro. Un barco que navegara de Nueva York a Lisboa, que se encuentra casi en dirección este, comenzará por desplazarse cierta distancia hacia el norte. Navegará en un «gran círculo», es decir, en un círculo cuyo centro es el centro de la tierra. Es ésta la aproximación más cercana a una línea recta que se puede trazar en la superficie de la tierra. Los meridianos de longitud son grandes círculos, y así es el ecuador, pero no los demás paralelos de latitud. Deberíamos, pues, haber supuesto que al llegar a las islas Shetland, tú caminabas 6.000 millas, no en dirección este, sino a lo largo de un gran círculo, que te dejaría en un punto situado al este de las islas Shetland. Sin embargo, ello no hace más que reforzar nuestra conclusión: terminarás en un punto incluso más al este de tu punto de partida anterior.

¿Cuáles son las diferencias entre la geometría de una esfera y la geometría de un plano? Si se forma un triángulo en la tierra cuyos lados sean grandes circunferencias, no se comprobará que los ángulos del triángulo equivalen a dos ángulos rectos: equivaldrán a bastante más. La medida en que exceden a los dos ángulos rectos es proporcional al tamaño del triángulo. En un

pequeño triángulo como el que podrías trazar con cuerdas en el campo, o incluso en el triángulo formado por tres buques que apenas pueden verse mutuamente, los ángulos equivaldrán a tan poco más de dos ángulos rectos que no serás capaz de descubrir la diferencia. Pero si formas un triángulo hecho por el ecuador, el meridiano de Greenwich y el meridiano 90, los ángulos equivaldrán a tres ángulos rectos. Y puedes obtener triángulos cuyos ángulos sumen algo más de seis ángulos rectos. Todo esto se podría descubrir tomando las medidas de la superficie de la tierra, sin tener en cuenta para nada el resto del espacio.

El teorema de Pitágoras fallará también para las distancias de una esfera. Desde el punto de vista de un viajero en la superficie de la tierra, la distancia entre dos lugares es su gran distancia circular, es decir, el viaje más corto que un hombre puede hacer sin dejar la superficie de la tierra. Supongamos ahora que tomamos tres trozos de grandes circunferencias que forman un triángulo. Y supongamos que uno de ellos forma ángulos rectos con el otro. Para ser todavía más concretos, supongamos que uno es el ecuador y el otro un trozo del meridiano de Greenwich que va del ecuador hacia el norte. Supongamos que recorremos 3.000 kilómetros sobre la línea del ecuador y luego 4.000 kilómetros en dirección norte. ¿A qué distancia nos hallaremos del punto de partida, estimando la distancia, a lo largo de una gran circunferencia? Si estuviéramos en un plano, la distancia sería de 5.000 kilómetros, como vimos antes. En realidad, sin embargo, la distancia en circunferencia será considerablemente menor. En un triángulo rectángulo de una esfera, el cuadrado del lado opuesto al ángulo recto es menor que la suma de los cuadrados de los catetos.

Estas diferencias entre la geometría de una esfera y la geometría de un plano son diferencias intrínsecas. Te permiten hallar si la superficie en que vives es un plano o una esfera, sin tener en cuenta nada de lo que está fuera de la superficie. Tales consideraciones llevaron al siguiente paso importante en nuestro tema. Lo dio Gauss, quien descolló hace ciento cincuenta años. Estudió la teoría de las superficies y enseñó la manera de desarrollarla por medio de medidas sobre las superficies mismas, sin salir de ellas. Para fijar la posición de un punto en el espacio, necesitamos tres medidas. Pero para fijar la posición en una superficie sólo necesitamos dos: por ejemplo, la situación de un punto sobre la superficie de la tierra queda establecida cuando sabemos

su latitud y su longitud.

Ahora bien, Gauss comprobó que cualquiera que sea el sistema de medida que se adopte y cualquiera que sea la naturaleza de la superficie, siempre hay un medio de calcular la distancia entre dos puntos no muy distantes de la superficie, si se conocen las dimensiones que fijan su situación. La fórmula para la distancia es una generalización de la fórmula de Pitágoras: da el cuadrado de la distancia en función de los cuadrados de las diferencias entre las dimensiones medidas que fijan los puntos y también el producto de estas dos dimensiones. Cuando se sabe esta fórmula se pueden descubrir todas las propiedades intrínsecas de la superficie, es decir, todas las que no dependen de sus relaciones con los puntos exteriores de la superficie. Se puede descubrir, por ejemplo, si los ángulos de un triángulo equivalen a dos ángulos rectos, o más o menos, o más en unos casos y menos en otros.

Pero cuando hablamos de un «triángulo» hemos de explicar lo que entendemos por tal, ya que en la mayoría de las superficies no hay líneas rectas. En una esfera tendremos que sustituir las líneas rectas por grandes circunferencias que se acercan lo más posible a las líneas rectas. En general, en lugar de líneas rectas, pondremos aquellas líneas que dan una vuelta más corta a la superficie de un lugar a otro. Tales líneas se llaman «geodésicas». En la tierra las geodésicas son grandes circunferencias. Hablando en general, son el medio más corto de viajar de un punto a otro si no se puede dejar la superficie. Toman el lugar de las líneas rectas en la geometría intrínseca de una superficie. Cuando nos preguntamos si los ángulos de un triángulo equivalen a dos rectos o no, hablamos de un triángulo cuyos lados son geodésicos. Y cuando hablamos de la distancia entre dos puntos, entendemos la distancia en una geodésica.

El siguiente paso en nuestro proceso generalizador es bastante difícil: es la transición a la geometría no euclidiana. Vivimos en un mundo en que el espacio tiene tres dimensiones. Y nuestro conocimiento empírico del espacio está basado en la medida de las pequeñas distancias y de los ángulos. (Al hablar de pequeñas distancias entiendo que éstas son pequeñas en comparación con las astronómicas; en este sentido todas las distancias de la tierra son pequeñas.) Antes se creía que a priori se podía dar por sentado que el espacio era euclidiano; por ejemplo, que los ángulos de un triángulo equivalen

a dos rectos. Pero se llegó a reconocer que no lo podíamos probar por razonamiento. Si se llegaba a saber, se sabría como consecuencia de las medidas. Antes de Einstein, se creía que las medidas confirmaban la geometría euclidiana dentro de los límites de exactitud alcanzable. Actualmente ya no se piensa lo mismo. Sigue siendo cierto que, por medio de lo que podríamos llamar un artificio natural, podemos hacer que la geometría euclidiana parezca cierta en una pequeña región como la tierra. Pero al explicar la gravitación Einstein se vio obligado a pensar que en extensas regiones donde no existe materia, no podemos considerar el espacio como euclidiano. Vamos a ocuparnos más adelante de las razones de este hecho. Lo que ahora nos interesa es la dirección que adopta la geometría no euclidiana desde la difusión de la obra de Gauss.

No hay razón por la que en el espacio tridimensional no deban darse las mismas circunstancias que conocemos, por ejemplo, en la superficie de una esfera. Pudiera suceder que los ángulos de un triángulo equivaliesen siempre a más de dos rectos y que el exceso fuese proporcional al tamaño del triángulo. Quizá también la distancia entre dos puntos nos fuera dada por una fórmula análoga a la que aplicamos a la superficie de la esfera, pero comprendiendo las tres dimensiones en vez de las dos. Si esto sucede o no en realidad, sólo podemos comprobarlo por medidas reales. Existe un número infinito de tales posibilidades.

Este tipo de argumentación fue empleado por Riemann en su disertación «Sobre las hipótesis que sirven de base a la geometría» (1854). En ella aplicó los trabajos de Gauss sobre las superficies a los diferentes tipos de espacios tridimensionales. Demostró que todas las características esenciales de un tipo de espacio podrían deducirse de la fórmula aplicable a las pequeñas distancias. Partiendo de pequeñas distancias en tres direcciones determinadas que podrían llevar de un punto a otro no lejos del mismo, supuso que se podían calcular las distancias entre los dos puntos. Si sabemos, por ejemplo, que se puede llegar de un punto a otro recorriendo primero cierta distancia hacia el este, luego hacia el norte y finalmente otra determinada distancia subiendo perpendicularmente desde el suelo, se puede calcular la distancia de un punto a otro. Y la regla para el cálculo será una ampliación del teorema de Pitágoras, en el sentido de que se llega al cuadrado de la distancia añadiendo los múltiplos de los cuadrados de las distancias inte-

grantes, juntamente con los posibles múltiplos de sus productos. Por ciertas características de la fórmula se puede expresar la clase de espacio que hay que tratar. Tales características no dependen del método particular que se haya adoptado para determinar las posiciones de los puntos.

Para llegar a lo que nos proponemos en la teoría de la relatividad, es necesario hacer todavía otra generalización: hemos de sustituir el «intervalo» entre sucesos por la distancia entre puntos. Ello nos lleva al espacio-tiempo. Ya hemos visto que en la teoría especial de la relatividad el cuadrado de un intervalo se halla restando el cuadrado de la distancia entre sucesos del cuadrado de la distancia que la luz recorrería en el tiempo que pasa entre un suceso y otro. En la teoría general no suponemos esta forma especial de intervalo. Preferimos comenzar con una forma general, como la que Riemann usaba para las distancias. Además, Einstein, como Riemann, sólo aplica su fórmula para los hechos que nos rodean, es decir, sucesos o hechos que sólo tienen un pequeño intervalo entre sí. Lo que excede estas suposiciones iniciales depende de la observación del movimiento real de los cuerpos, en sentidos que explicaremos en capítulos siguientes.

Podemos resumir ahora y reafirmar el proceso que venimos describiendo. La posición de un punto, en tres dimensiones, en relación a un punto fijo (el «origen»), se puede determinar asignando tres dimensiones («coordenadas»). La posición, por ejemplo, de un globo en relación a tu casa se puede fijar si sabes que llegarás a ella caminando primero una determinada distancia en dirección este, luego otra hacia el norte, y finalmente en línea recta hacia arriba. Cuando, como en este caso, las tres coordenadas son tres distancias y las tres están en ángulo recto unas con otras, las cuales, tomadas sucesivamente, te llevan desde el punto de origen al punto en cuestión, entonces el cuadrado de la distancia en línea recta al punto en cuestión se halla sumando los cuadrados de las tres coordenadas. En cualquier caso, sean o no los espacios euclidianos, se halla sumando los múltiplos de los cuadrados y los productos de las coordenadas según una regla determinada. Las coordenadas pueden ser cualquier dimensión que fije la posición de un punto, con tal que los puntos próximos tengan dimensiones aproximadas para sus coordenadas. En la teoría general de la relatividad, añadimos una cuarta coordenada para dar el tiempo. Y nuestra fórmula da el «intervalo» en lugar de la distancia espacial. Además, suponemos solamente la exactitud de

nuestra fórmula para las pequeñas distancias.

Ahora ya estamos en disposición de abordar la teoría de la gravitación de Einstein.

## 8. La ley de gravitación de Einstein

Antes de abordar la nueva ley de Einstein, será necesario que nos convenzamos a nosotros mismos de que la ley de la gravitación de Newton no puede ser totalmente cierta.

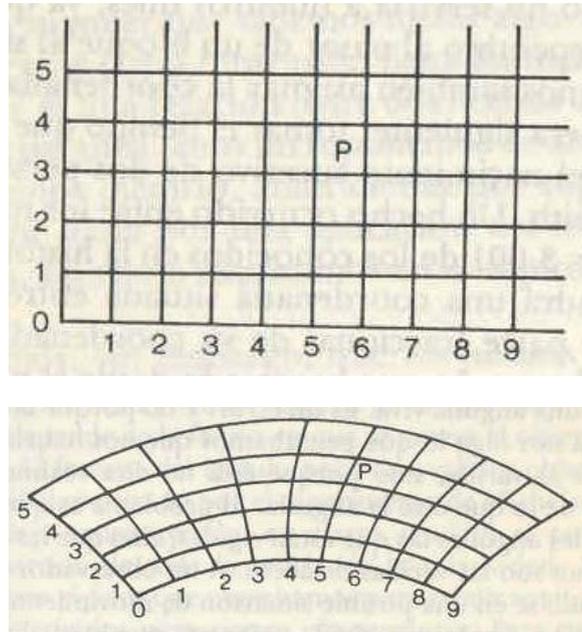
Newton afirmó que entre dos partículas cualesquiera de materia hay una fuerza que es proporcional producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Es decir, dejando a un lado de momento la cuestión de la masa, si hay cierta atracción cuando las partículas están separadas un kilómetro, habrá un cuarto a lo más de atracción cuando estén separadas dos kilómetros, un noveno cuando estén separadas tres kilómetros, y así sucesivamente: la atracción disminuye tanto más rápidamente cuanto más aumenta la distancia. Ahora bien, Newton al hablar de la distancia, la entendía en un momento dado: pensaba que no podía haber ambigüedad sobre el tiempo. Pero acabamos de ver que estaba en un error. Lo que un observador juzga que es el mismo tiempo en la tierra que en el sol, otro juzgará que son dos momentos diferentes. «La distancia en un tiempo dado» es pues, una concepción subjetiva que apenas si puede entrar en una ley cósmica. Por supuesto, podríamos hacer ambigua nuestra ley diciendo que vamos a estimar los tiempos según la valoración del observatorio de Greenwich. Pero apenas podemos creer que las circunstancias accidentales de la tierra permiten que se las tome tan seriamente. No podemos, pues, conceder que la forma newtoniana de la ley de gravitación pueda ser totalmente correcta. Dará diferentes resultados según los muchos convencionalismos que adoptemos ante ella, todos igualmente legítimos. Ello sería tan absurdo como discutir si el que un hombre ha matado a otro ha de depender de si hay que describirlos por su nombre o por sus apellidos. Es evidente que las leyes físicas han de ser las mismas, sea que las distancias se midan en millas o en kilómetros. Y a nosotros sólo nos interesa lo que es una extensión esencial del mismo principio.

Nuestras medidas son convencionales incluso en una amplitud mayor de lo que se admite por la teoría especial de la relatividad. Además, cada medida es un proceso físico realizado con material físico. El resultado es ciertamente un dato experimental, pero bien puede no ser susceptible de la simple interpretación que comúnmente le atribuimos. Para empezar, no

vamos, pues, a suponer que sabemos medir algo. Suponemos que existe cierta dimensión física llamada “intervalo”, que es una relación entre dos hechos que no están muy separados. Pero no suponemos de antemano que sabemos medirlo, antes de dar por supuesto que nos viene dado por una aplicación del teorema de Pitágoras, tal como explicamos en el capítulo anterior.

Suponemos, sin embargo, que los hechos tienen un orden, y que este orden es cuatridimensional. Suponemos, es decir, afirmamos que sabemos lo que entendemos al decir que cierto suceso está más próximo a otro que a un tercero, de manera que antes de tomar medidas exactas podemos hablar de la «proximidad» o vecindad de un hecho. Y suponemos que, para asignar la posición de un hecho en el espacio-tiempo, son necesarias cuatro dimensiones (coordenadas) —por ejemplo, en nuestro anterior caso de una explosión en una aeronave: latitud, longitud, altitud y tiempo—. Pero no suponemos nada respecto al modo de asignación de estas coordenadas, excepto que las coordenadas próximas se asignan a hechos próximos.

La forma en que estos números, llamados coordenadas, hayan de asignarse no es totalmente arbitraria ni tampoco el resultado de una medida exacta; está en una región intermedia. Mientras estás haciendo un trabajo continuo, tus coordenadas no deben alterarse nunca por saltos repentinos. En América, por ejemplo, encontramos que las casas entre la calle 14 y la calle 15, han de tener probablemente los números entre 1.400 y 1.500. En cambio, las casas de las calles 15 y 16 tienen los números entre 1.500 y 1.600, aun cuando no se hayan usado los correspondientes a 1.400. Esto no serviría a nuestros fines, ya que existe un salto repentino al pasar de un bloque al siguiente. O podríamos también asignar la coordenada-tiempo de la manera siguiente: tomar el tiempo que transcurre entre el nacimiento sucesivo de dos personas llamadas Smith. Un hecho ocurrido entre los nacimientos 3.000 y 3.001 de los conocidos en la historia como Smith tendrá una coordenada situada entre 3.000 y 3.001. La parte fraccional de su coordenada será la fracción de un año que ha pasado desde el nacimiento del Smith 3.000. (Obviamente, nunca habría más de un año entre dos adiciones sucesivas a la familia Smith.) Esta manera de asignar la coordenada-tiempo es perfectamente definida, pero no es admisible para nuestros propósitos, ya que habría saltos repentinos entre unos hechos inmediatamente anteriores al nacimiento de Smith y otros posteriores. En un trayecto continuo tu coordenada-tiempo no puede cambiar



continuamente. Se supone que, independientemente de la medida, sabemos lo que es un trayecto continuo. Y cuando nuestra posición en espacio-tiempo cambia continuamente, cada una de tus cuatro coordenadas ha de cambiar también continuamente. Una, dos o tres de ellas pueden quizá no cambiar. Pero si ocurre algún cambio ha de ser suave, sin ningún salto repentino. Esto explica que no sea admisible en la asignación de coordenadas.

Para explicar todos esos cambios, que son legítimos en tus coordenadas, imagínate que tomas en tus manos una pieza grande de goma suave y elástica. Antes de extenderla, divídela en pequeños cuadrados, cada uno de ellos de cuatro milímetros por cada lado. Pon pequeños alfileres en las esquinas de los cuadrados. Podemos tomar como dos de las coordenadas de uno de estos alfileres la serie de los mismos que hemos de atravesar yendo hacia nuestra derecha. Para ello partiremos desde un determinado alfiler hasta llegar exactamente debajo del alfiler en cuestión. Y después pasamos la serie de alfileres en dirección al alfiler de arriba. Supongamos que en la figura,  $O$  es el alfiler de que partimos y  $P$  el alfiler al que vamos a asignar las coordenadas.  $P$  está en la quinta columna y en la tercera fila, por eso sus coordenadas en el plano de goma elástica han de ser 5 y 3.

Toma ahora la goma y estírala y dóblala cuanto quieras. Haz que los

alfileres estén en la forma que tienen en la segunda figura. Ahora las divisiones ya no representan distancias según nuestras nociones usuales, pero seguirán funcionando como coordenadas. Podemos, pues, tomar  $P$  que tiene las coordenadas 5 y 3 en el plano de la goma elástica. Y podemos seguir considerando la goma como si fuera un plano, a pesar de haberla doblado de forma distinta a lo que normalmente llamamos un plano. Tales distorsiones continuas no importan.

Pongamos otro ejemplo: en vez de usar una varilla de acero para fijar nuestras coordenadas, sirvámonos de una anguila viva que esté coleando todo el tiempo. La distancia de la cola a la cabeza de la anguila se ha de contar como 1 desde el punto de vista de las coordenadas, cualquiera que sea la forma que el bicho pueda tomar en ese momento. La anguila es continua y sus coletazos son continuos, de tal forma que se pueden tomar como unidad de distancia al asignar las coordenadas. Además del requisito de continuidad, el método de asignación de coordenadas es puramente convencional. Por lo mismo, una anguila viva es tan válida como una varilla de acero.

Somos propensos a pensar que para unas medidas realmente exactas, es mejor usar una varilla de acero que una anguila viva. Es un error. Y no porque la anguila nos diga lo que pensábamos que nos habría de decir la varilla, sino porque ésta no dice realmente más de lo que dice la anguila. El problema es que no son las anguilas las que están rígidas, sino que las que colean son las varillas de acero. A un observador que se hallase en una posible situación de movimiento, la anguila le parecería rígida, mientras que la varilla de acero le parecería ondularse, lo mismo que nos parece a nosotros la anguila. Para todo el que se mueva de manera diferente tanto de nosotros como de este observador, la anguila y la varilla le parecerán ondularse. Y no se puede decir que un observador esté en lo cierto y el otro equivocado. En tales materias lo que se ve no sólo pertenece al proceso físico observado, sino también al punto de vista del observador. Las medidas de distancia y tiempo no revelan directamente las propiedades de las cosas medidas, sino las relaciones de las cosas con quien las mide. Cualquier observación que nos pueda hacer sobre el mundo físico es, por tanto, más abstracta de lo que hemos creído hasta aquí.

Es importante comprender que la geometría, tal como se enseñaba en

las escuelas desde los tiempos de la antigua Grecia, deja de existir como ciencia separada y se sumerge en la física. Las dos nociones fundamentales de geometría elemental eran la línea recta y el círculo. Lo que a ti te parece un camino recto, cuyas partes existen todas simultáneamente, a otro observador le pueden parecer como el vuelo de un cohete, una especie de curva, cuyas partes comienzan a existir sucesivamente. El círculo depende de la medida de las distancias, ya que consta de todos los puntos a una distancia dada de su centro. La medida de las distancias, como hemos visto, es un asunto subjetivo, que depende de la forma en que se mueva el observador. El fracaso del círculo para una validez objetiva quedó demostrado por el experimento de Michelson-Morley, constituyendo, en cierto sentido, el punto de partida de toda la teoría de la relatividad. Los cuerpos rígidos que necesitamos para medir son solamente rígidos para ciertos observadores. Para otros estarán cambiando constantemente en todas sus dimensiones. Es sólo nuestra imaginación, atada obstinadamente a la tierra, la que nos hace suponer la posibilidad de una geometría separada de la física.

Ésta es la razón por la que no nos preocupa dar desde el principio significación física a nuestras coordenadas. Antes se suponía que las coordenadas empleadas en física habían de ser distancias cuidadosamente medidas. Ahora nos damos cuenta que esta preocupación ha sido eliminada desde el comienzo. La preocupación o cuidado se requiere en un estadio ulterior. Ahora nuestras coordenadas apenas si son más que una forma sistemática de catalogar hechos. Pero las matemáticas proporcionan, con el método de los tensores, una técnica tan inmensamente poderosa, que podemos usar coordenadas asignadas en esta forma aparentemente descuidada. Y tan efectiva como si aplicáramos todo el aparato de medidas de precisión al llegar a ellas. La ventaja de ir un poco al azar al comienzo es que evitamos hacer presupuestos físicos subrepticios, cosa que apenas podemos dejar de hacer si suponemos que nuestras coordenadas tienen una significación física particular.

No podemos tratar de seguir ignorando todos los fenómenos físicos observados. Conocemos algunas cosas. Sabemos que la antigua física newtoniana es casi exacta cuando nuestras coordenadas han sido elegidas en determinado sentido. Sabemos que la teoría de la relatividad es casi más exacta todavía en coordenadas buscadas a propósito. De tales hechos podemos deducir cier-

tas cosas sobre las coordenadas, que en una deducción lógica aparecen como postulados de la nueva teoría.

Como tales postulados consideramos los siguientes:

1. El intervalo entre dos acontecimientos próximos adopta una forma general, como la empleada por Riemann para las distancias.
2. Todo cuerpo avanza en una geodésica del espacio-tiempo, excepto cuando actúan sobre él fuerzas no gravitacionales.
3. Un rayo-luz se desplaza en una geodésica en la cual el intervalo entre dos de sus partes cualesquiera es cero.

Cada uno de estos postulados requiere cierta explicación.

Nuestro primer postulado exige que si dos acontecimientos están unidos entre sí (pero por otra parte no necesariamente), hay un intervalo entre ellos, que se puede calcular por las diferencias entre sus coordenadas. Para ello se puede emplear cualquiera de las fórmulas estudiadas en el capítulo precedente. Es decir, tomamos los cuadrados y productos de las diferencias de las coordenadas, las multiplicamos por cantidades convenientes (que en general variarán de lugar a lugar) y sumaremos los resultados. La suma obtenida es el cuadrado del intervalo. No se supone de antemano que conocemos las cantidades por las que han de multiplicarse los cuadrados y los productos. Habrá que ir descubriéndolo por la observación de los fenómenos físicos. Pero sabemos, porque las matemáticas de Riemann demuestran que es así, que en cualquier pequeña región de espacio-tiempo podemos elegir las coordenadas. Vemos, pues, que el intervalo tiene casi exactamente la forma especial que ya encontramos en la teoría especial de la relatividad. No es necesario para la aplicación de la teoría especial a una región limitada que no haya gravitación en ella. Es suficiente que la intensidad de la gravitación sea prácticamente la misma a través de la región. Ello nos permite aplicar la teoría especial en cualquier pequeña región. La pequeñez que haya de tener depende de la proximidad. En la superficie de la tierra tendría que ser lo suficientemente pequeña como para poder pasar por alto la curvatura de la tierra. En los espacios interplanetarios sólo necesita ser lo bastante pequeña como para que la atracción del sol y de los planetas sea sensiblemente constante a través de

la región. En los espacios entre las estrellas debería ser enorme —por ejemplo, la mitad de la distancia de una estrella a la próxima— sin introducir inexactitudes mensurables.

Así, a gran distancia del tema de la gravitación, podemos elegir nuestras coordenadas, obteniendo casi un espacio euclidiano. Es sólo otra manera de decir que se cumple la teoría especial de la relatividad. En las inmediaciones de la materia, si bien podemos hacer nuestro espacio muy semejante al euclidiano en una región muy pequeña, no lo podemos hacer a través de una región en la que la gravitación varía sensiblemente. Y de hacerlo tendremos que abandonar la idea expresada en el segundo postulado, a saber, que los cuerpos que se mueven bajo fuerzas gravitacionales sólo se mueven en geodésicas.

Ya vimos que una geodésica en la superficie es la línea más corta que se puede trazar en la superficie desde un punto a otro. En la tierra, por ejemplo, las geodésicas, son los grandes círculos. Cuando llegamos al espacio-tiempo, las matemáticas son las mismas, pero las explicaciones verbales tienen que ser bastante diferentes. En la teoría general de la relatividad, únicamente los hechos próximos tienen un intervalo definido, independientemente de la ruta por que caminemos de uno a otro. El intervalo entre sucesos distantes depende de la ruta seguida. Y se ha de calcular dividiendo la ruta en una serie de pequeñas partes y sumando los intervalos para las diversas pequeñas partes. Si el intervalo es espacial, un cuerpo no puede trasladarse de un suceso a otro. Por tanto, cuando estudiamos el sentido del movimiento de los cuerpos, nos limitamos a los intervalos temporales. Cuando el intervalo entre hechos próximos es temporal, aparecerá a un observador que se desplaza de un suceso a otro como el tiempo que media entre ellos. Y por eso el intervalo completo entre dos sucesos será juzgado por una persona que se desplaza de uno a otro como lo que su reloj muestra que es: el tiempo empleado en el trayecto. En ciertas rutas este tiempo será más largo, en otras más corto. Cuanto más despacio camine nuestro hombre, más creerá que ha tardado en el trayecto. Esto no debe tomarse como una perogrullada. No afirmo que si vas de Londres a Edimburgo tardarás más si viajas más despacio, sino algo mucho más singular. Digo que si sales de Londres a las diez de la mañana y llegas a Edimburgo a las seis y media de la tarde, según la hora de Greenwich, cuanto más despacio vayas más tardarás —si cuentas el tiempo

con tu reloj—. Ésta es una afirmación muy diferente. Desde el punto de vista de una persona que se encuentra en la tierra, tu viaje dura ocho horas y media. Pero si hubieras sido un rayo de luz que se desplaza alrededor del sistema solar, partiendo de Londres a las diez de la mañana, reflejado de Júpiter a Saturno, de éste a otro, hasta que por fin hubieras sido reflejado de vuelta a Edimburgo y hubieras llegado allí a las seis y media de la tarde, pensarías que el trayecto no te había llevado tiempo alguno. Y si hubieras ido por una ruta circular que te permitiera llegar a esta hora viajando más rápidamente, juzgarías que cuanto más larga hubiera sido la ruta menos tiempo habías tardado. La disminución del tiempo hubiera sido continua a medida que tu velocidad se aproximara a la de la luz. Lo que afirmo ahora es que cuando un cuerpo se desplaza, si se abandona a sí mismo, elige la ruta más larga posible entre dos puntos del trayecto. De haber ido de un suceso a otro por cualquier otra ruta, el tiempo, puesto que se medía por sus propios relojes, hubiera sido más corto. Es una manera de decir que los cuerpos abandonados a sí mismos hacen su camino tan lentamente como pueden. Es una especie de ley de la pereza cósmica. Su expresión matemática es que se desplazan en geodésicas; en ellos el intervalo total entre dos hechos cualesquiera del trayecto es mayor que por cualquiera otra ruta. (El hecho de que sea mayor y no menor se debe a que la clase de intervalo que estamos considerando se parece más al tiempo que a la distancia.) Si una persona, por ejemplo, dejara la tierra y caminara a su alrededor volviendo después a su punto de origen, el tiempo entre su partida y su vuelta sería menor por su reloj que por los de la tierra: la tierra en su trayecto alrededor del sol elige la ruta que, según los relojes terrestres, emplea más tiempo en cualquiera de los tramos de su recorrido, que el tiempo juzgado por los relojes que se mueven en una órbita diferente. Esto es lo que quiero decir al afirmar que los cuerpos abandonados a sí mismos se mueven en geodésicas de espacio-tiempo.

Es importante recordar que no se supone que el espacio-tiempo sea euclidiano. Por lo que respecta a las geodésicas, hace el efecto de que el espacio-tiempo es como un paisaje montañoso. En la proximidad de una pieza de materia hay, como si dijéramos, una montaña en espacio-tiempo, que se hace más pendiente a medida que se acerca a la cumbre, en forma de cuello de botella y termina en un precipicio escarpado. Ahora bien, por la ley de la pereza cósmica que mencionamos arriba, un cuerpo que entra en las proximidades

de la montaña no intentará ir derecho a la cima, sino que lo hará dando la vuelta. Ésta es en esencia la idea de Einstein sobre la gravitación. Lo que hace un cuerpo, lo hace en definitiva a causa de la naturaleza del espacio-tiempo en su proximidad, no por cierta fuerza misteriosa que emana de un cuerpo distante.

Vamos a servirnos de una analogía para aclarar este punto. Supongamos que en una noche oscura cierto número de hombres provistos de antorchas camina en varias direcciones a través de una extensa llanura. En una parte de la llanura hay una montaña con un faro resplandeciente en la cima. Nuestra montaña es como la que hemos descrito, cada vez más pendiente y termina en un precipicio. Supondremos también que existen varias aldeas dispersas en la llanura y que los hombres con las antorchas van de una a otra. Se han hecho sendas que muestran el camino más fácil de una a otra aldea; éstas serán más o menos curvas para evitar alejarse demasiado de la montaña. Dichas curvas serán más pronunciadas al pasar junto a la cima de la montaña que cuando están en un camino alejado de ella. Supongamos ahora que observas todo esto lo mejor que puedes desde un sitio alto en un globo, de forma que no puedes ver el suelo pero sí las antorchas y el faro. No sabes que hay una montaña, ni que el faro está en la cumbre de la misma. Ves que la gente cambia su curso recto al acercarse al faro, y que cuanto más cerca están de él más se desvían. Es posible que lo atribuyas a un efecto del faro. Puedes pensar que la gente tiene mucho calor o que tiene miedo a quemarse. Pero si esperas a que amanezca verás la montaña y comprobarás que el faro marca simplemente la cumbre de la montaña y no influye en ningún sentido en quienes llevan las antorchas.

Ahora bien, en esta analogía el faro corresponde al sol, la gente con antorchas corresponde a los planetas, las sendas a sus órbitas y el amanecer a Einstein. Einstein dice que el sol está en la cumbre de una montaña, y que la montaña está en el espacio-tiempo, no en el espacio (aconsejo al lector que no intente imaginárselo, porque es imposible). Cada cuerpo, en cada momento, adopta el curso más fácil que se le presenta, pero debido a la montaña, el curso más fácil no es la línea recta. Cada pequeño trozo de materia está en la cumbre de su pequeña montaña como el gallo en su gallinero. Lo que llamamos un gran trozo de materia es un trozo que se encuentra en la cima de una gran montaña. La montaña es lo que conocemos. El trozo de materia

de la cumbre se supone por conveniencia. Quizá no sea necesario suponerlo y pudiéramos hacerlo con la montaña sola. Nunca podemos alcanzar la cumbre de la montaña de ningún otro, de la misma manera que el aguerrido gallo no puede luchar con el irritante pájaro que ve en el espejo.

Acabo de dar tan sólo una descripción cualitativa de la ley de la gravitación de Einstein. Es imposible dar su exacta formulación cuantitativa sin mayores planteamientos matemáticos de los que me he propuesto. El punto más interesante de la misma es que ya no hace que la ley sea el resultado de la acción a distancia. El sol no ejerce fuerza de ninguna clase sobre los planetas. Así como la geometría se ha convertido en física, también en cierto sentido, la física se ha hecho geometría. La ley de la gravitación se ha convertido en la ley geométrica de que todo cuerpo sigue el curso más fácil de un lugar a otro. Pero este curso se ve afectado por las montañas y valles que rodean el camino.

Hemos estado suponiendo que el cuerpo en cuestión entra en acción solamente por fuerzas gravitativas. Ahora nos interesa la ley de la gravitación, no los efectos de las fuerzas electromagnéticas o de las fuerzas que se encuentran entre las partículas subatómicas. Ha habido muchos intentos de reducir todas estas fuerzas al marco de la relatividad general. Einstein mismo, Weyl, Kaluza y Klein, por no citar más que unos pocos, lo han intentado. Ninguno de estos intentos, sin embargo, ha sido enteramente satisfactorio. De momento, podemos ignorar este trabajo, ya que los planetas no están sujetos, como conjuntos, a fuerzas electromagnéticas o subatómicas apreciables. Sólo la gravitación ha de ser considerada en relación a sus movimientos, de los que nos ocupamos en este capítulo.

Nuestro tercer postulado: «un rayo-luz avanza de forma que el intervalo entre dos de sus partes es cero», tiene la ventaja de que no es solamente para las pequeñas distancias. Si cada pequeña parte del intervalo es cero, la suma de todos ellos será cero. Por lo tanto, incluso las partes más distantes del mismo rayo-luz tienen un intervalo cero. El curso de un rayo-luz es también una geodésica según este postulado. Así tenemos ahora dos formas empíricas de descubrir lo que son las geodésicas en espacio-tiempo, y, en concreto, los rayos-luz y los cuerpos que se mueven libremente. Entre los cuerpos que se mueven libremente quedan incluidos todos lo que no están sujetos, como

conjuntos, a fuerzas electromagnéticas o subatómicas especiales. Se trata del sol, las estrellas, los planetas y satélites y también de los cuerpos que caen en la tierra, al menos cuando caen en un vacío. Cuando uno está en la tierra, está sujeto a las fuerzas electromagnéticas: los electrones y protones de las proximidades de tus pies ejercen una repulsión sobre tus pies suficiente para vencer la gravitación de la tierra. Esto es lo que impide que caigas en tierra que, aunque parece sólida, es en gran parte un espacio vacío.

## 9. Las pruebas de la ley de la gravitación de Einstein

Las razones para aceptar la ley de la gravitación de Einstein y no la de Newton son en parte empíricas y en parte lógicas.

La ley de la gravitación de Einstein da casi los mismos resultados que la de Newton cuando se aplica al cálculo de las órbitas de los planetas y sus satélites. De no ser así, no podría ser cierta, ya que se ha comprobado que las consecuencias deducidas por la ley de Newton han sido verificadas casi exactamente por la observación. Cuando, en 1915, Einstein publicó por primera vez su nueva ley, sólo había un hecho empírico que señalar para demostrar que su teoría era mejor que la de Newton. Tal era el llamado movimiento del perihelio de Mercurio.

El planeta Mercurio, como los demás planetas, gira alrededor del sol formando una elipse, con el sol en uno de los focos. En algunos puntos de su órbita está más cerca del sol que en otros. El punto en que se halla más cerca del sol se llama su “perihelio”. Ahora bien, se pudo comprobar por observación que desde el momento en que Mercurio está más próximo al sol hasta la próxima vez, no da una vuelta exacta alrededor del sol, sino un poco más. La diferencia es muy pequeña: supone un ángulo de cuarenta y dos segundos en un siglo. Por tanto, si Mercurio gira alrededor del sol más de cuatrocientas veces en un siglo, lógicamente se debe mover una décima parte de segundo de ángulo más de una revolución completa para llegar de un perihelio al siguiente. Esta minúscula discrepancia de la teoría newtoniana había desorientado a los astrónomos. Había un efecto calculado debido a las perturbaciones causadas por otros planetas, pero esta pequeña discrepancia era el residuo después de admitir estas perturbaciones. Existe un efecto similar en el caso de otros planetas, pero es mucho más pequeño y más difícil de observar. Desde que Einstein publicó su nueva ley, el efecto ha sido también observado en la órbita de la tierra, y con muchas probabilidades de certeza, en Marte. Este efecto del perihelio fue, en principio, la única ventaja empírica de Einstein sobre Newton.

Su segundo éxito fue más sensacional. Según la opinión ortodoxa, la luz en el vacío debería siempre avanzar en línea recta. Al no estar compuesta por

partículas materiales, no debería verse afectada por la gravitación universal. Sin embargo, fue posible admitir sin ninguna contradicción seria con las viejas ideas, que al pasar cerca del sol, la luz tenía que desviarse de la línea recta como si estuviera compuesta de partículas materiales. Einstein, sin embargo, sostuvo, como deducción de su ley de la gravitación, que la luz debería desviarse el doble de esto. Es decir, si la luz de una estrella pasaba muy cerca del sol, Einstein sostenía que el rayo de la estrella debería haber girado un ángulo de casi un segundo y tres cuartos. Sus opositores estaban dispuestos a concederle la mitad de esta cifra. Por desgracia, las estrellas que están casi en línea con el sol solamente se pueden ver durante un eclipse total, y aun entonces quizá no haya suficientes estrellas brillantes cerca del sol. Eddington señala que, desde su punto de vista, el día mejor del año es el 29 de mayo, porque entonces hay una serie de estrellas brillantes cerca del sol. El 29 de mayo de 1919, por una buena suerte increíble, hubo eclipse total de sol. Dos expediciones británicas fotografiaron las estrellas cercanas al sol durante el eclipse. Los resultados parecieron confirmar la predicción de Einstein. Este hecho suscitó gran entusiasmo en aquella época. Muchos eclipses posteriores han permitido obtener por observación argumentos en apoyo de esta teoría, y la predicción de Einstein ha sido generalmente aceptada. Sin embargo, hay muchas posibles fuentes de error en tales observaciones. Algunos astrónomos siguen dudando todavía de que los resultados sean totalmente concluyentes.

La tercera prueba experimental es favorable en conjunto a Einstein. Pero las dimensiones afectadas son tan pequeñas que apenas es posible medirlas, y, por lo mismo, el resultado no es decisivo. Antes de explicar el efecto en cuestión es necesario hacer algunas aclaraciones preliminares. El espectro de un elemento consta de ciertas líneas de diversos tipos de luz emitidas al brillar dicho elemento y que se pueden separar mediante un prisma. Son las mismas (muy aproximadamente) tanto si el elemento está en la tierra, en el sol, o en una estrella. Cada línea es de un matiz definido de color, con una determinada longitud de onda. Las longitudes de onda más largas están hacia el rojo, el final del espectro, las más cortas hacia el violeta. Cuando disminuye la distancia entre nosotros y la fuente de luz, las longitudes de onda visibles se hacen más cortas, lo mismo que las ondas del mar son más rápidas a medida que se avanza contra el viento. Al aumentar la distancia las longitudes de onda visibles se hacen, por la misma razón, más largas.

Esto nos permite conocer si las estrellas se están acercando o si se alejan de nosotros. Si la separación disminuye, todas las líneas del espectro de un elemento se desplazan un poco hacia el violeta; si aumenta, hacia el rojo. Análogo efecto se puede advertir diariamente en el sonido. Si estás en una estación y llega un tren silbando, la nota del silbido parece mucho más aguda cuando el tren se acerca que cuando ha pasado: Probablemente mucha gente piensa que la nota ha cambiado “realmente”, pero en realidad el cambio del sonido se debe a que el tren primero se acercaba y luego se alejaba. Para los viajeros que van en el tren no hay tal cambio de nota. No es éste el efecto que interesa a Einstein. La distancia desde la tierra al sol no cambia mucho. Para nuestros propósitos presentes la podemos considerar constante. Einstein deduce de su ley de la gravitación que cualquier proceso periódico que tiene lugar en un átomo en el sol (cuya gravitación es muy intensa), al ser medido por nuestros relojes, debe tener lugar en una proporción más baja que en un átomo similar de la tierra. Pero el mismo intervalo en diferentes regiones no corresponde exactamente al mismo tiempo. Ello se debe al carácter «montañoso» del espacio-tiempo que constituye la gravitación. En consecuencia, cualquier línea del espectro, cuando la luz procede del sol, debería parecer un poco más cercana al rojo al final del espectro que si la luz viniera de una causa en la tierra. La teoría de Einstein predice que un efecto similar se debería observar en el campo gravitatorio de cada estrella y en realidad de cualquier cuerpo con masa. Pero el efecto es tan pequeño y la dificultad de medirlo tan grande que después de cincuenta años de observación sigue incierto si el sol o cualquier estrella presentan o no dicho efecto. Sin embargo, los recientes avances de la física nuclear han hecho posible observar el efecto producido por la tierra misma, si bien el efecto de la tierra es mucho más pequeño que el del sol. La nueva observación depende del hecho que en condiciones experimentales apropiadas, ciertos núcleos en estado de excitación emiten radiación electromagnética cuya longitud de onda se puede determinar con inmensa precisión. Al mismo tiempo, se pueden detectar pequeñísimos cambios en la longitud de onda. Dichos cambios de longitud debidos a la gravitación acaban de observarse entre dos estaciones, una en la cumbre y otra en la base de una torre de sólo 20 metros de altura.

Existen otras diferencias entre las consecuencias que se derivan de la ley de Einstein y la de Newton. Pero, hasta el momento, no ha habido

ninguna otra observación decisiva, al menos dentro de los límites del sistema solar. Pero las pruebas experimentales que acabamos de dar son suficientes para convencer a los astrónomos de que si Einstein y Newton difieren en lo relativo al movimiento de los cuerpos celestes, es la ley de Einstein la que da resultados ciertos. Aun cuando sólo tuviéramos a favor de Einstein las bases empíricas, éstas serían concluyentes. Dejando a un lado si su ley representa la verdad exacta o no, lo cierto es que es bastante más exacta que la de Newton, si bien las inexactitudes de Newton eran todas pequeñísimas.

Pero las consideraciones que originalmente llevaron a Einstein a formular su ley no fueron de este tipo. Incluso la consecuencia sobre el perihelio de Mercurio, que se pudo verificar inmediatamente por observaciones anteriores, sólo se pudo deducir después que la teoría estuvo completa. Y no pudo formar parte de las bases originales del descubrimiento de tal teoría. Dichas bases eran de un carácter lógico más abstracto. No quiero decir que no estuvieran fundamentadas en la observación de los hechos. Ni que fueran fantasías *a priori* como las que cultivaban antiguamente los filósofos. Lo que digo es que se derivaban de ciertas características generales de la experiencia física que demostraban que Newton debía estar equivocado y que debía ser sustituido por algo parecido a la ley de Einstein.

Los argumentos en favor de la relatividad del movimiento son, como vimos en los primeros capítulos, totalmente concluyentes. Cuando en la vida diaria decimos que algo se mueve, entendemos que se mueve con relación a la tierra. Al tratar de los movimientos de los planetas, consideramos su movimiento con relación al sol o al centro de la masa del sistema solar. Cuando decimos que el sistema solar también se mueve, queremos decir que se mueve en relación a las estrellas. No hay ningún «hecho físico» que se pueda llamar «movimiento absoluto». En consecuencia, las leyes físicas deben afectar a los movimientos relativos, ya que éstos son los únicos que existen.

Concebimos aquí la relatividad del movimiento en conjunción con el hecho experimental de que la velocidad de la luz es la misma relativamente a un cuerpo que a otro, aun cuando los dos puedan estar en movimiento. Esto nos lleva a la relatividad de distancias y tiempos. A su vez muestra que no hay hecho físico objetivo que se pueda calificar de «distancia entre

dos cuerpos en un tiempo dado», ya que el tiempo y la distancia dependerán del observador. Por tanto, la ley de la gravitación de Newton es insostenible lógicamente, pues se sirve de la «distancia en un tiempo dado».

Esto demuestra que no podemos quedarnos satisfechos con Newton, pero no nos muestra qué es lo que debemos poner en su lugar. Entran aquí varias consideraciones. Tenemos, en primer lugar lo que se llama «la igualdad de la masa gravitatoria e inercial». Significa lo siguiente: cuando se aplica una determinada fuerza<sup>3</sup> a un cuerpo pesado no se le imprime tanta aceleración como a un cuerpo ligero. Lo que se llama «masa inercial» de un cuerpo se mide por la cantidad requerida para producir una aceleración determinada. En un punto dado de la superficie de la tierra, la «masa» es proporcional al «peso». Lo que se mide por la balanza es más bien la «masa» que el «peso»: el peso se define como la fuerza con que la tierra atrae al cuerpo. Ahora bien, esta fuerza es mayor en los polos que en el ecuador, ya que en el ecuador la rotación de la tierra produce una «fuerza centrífuga» que impide parcialmente la gravitación. La fuerza de atracción de la tierra es también mayor en la superficie que en una gran altura o en lo hondo de una mina muy profunda. Las balanzas no expresan ninguna de estas variaciones, porque afectan a las medidas de peso usadas como al cuerpo pesado. Pero las variaciones aparecen si usamos una balanza de resorte. La masa no varía en el curso de estos cambios de peso.

La masa «gravitatoria» se define de manera diferente. Puede tener dos significados: 1) el modo de responder de un cuerpo en una situación en que la gravitación tiene una intensidad conocida, por ejemplo en la superficie de la tierra o en la superficie del sol; 2) la intensidad de la fuerza gravitatoria producida por un cuerpo, por ejemplo el sol, produce mayores fuerzas gravitatorias que la tierra. Ahora bien, Newton dice que la fuerza de la gravitación entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas. Consideremos ahora la atracción de diferentes cuerpos hacia un único y mismo cuerpo, por ejemplo el sol. Los diferentes cuerpos son atraídos por fuerzas proporcionales a las masas y, por tanto, producen exactamente la misma aceleración en todos ellos. Así, si entendemos «masa gravitatoria» en el sentido del número

---

<sup>3</sup>Aunque la «fuerza» ya no se considera como uno de los conceptos fundamentales de la dinámica, sino tan sólo como una forma conveniente de expresarse, todavía se puede emplear, lo mismo que «amanecer» u «ocaso», con tal que entendamos lo que significan. Con frecuencia se requerirían circunlocuciones para evitar el término «fuerza».

1, es decir, la forma de responder un cuerpo a la gravitación, comprobamos que «la igualdad de la masa de inercia y la masa de gravitación», lo cual suena formidable, se reduce a esto: en una situación gravitativa dada, todos los cuerpos se comportan exactamente igual. Por lo que se refiere a la superficie de la tierra, fue ése uno de los primeros descubrimientos de Galileo. Aristóteles creía que los cuerpos pesados caen con más rapidez que los ligeros. Galileo demostró que no era tal el caso, si se elimina la resistencia del aire. En el vacío una pluma cae a la misma velocidad que un trozo de plomo. Por lo que respecta a los planetas, fue Newton quien estableció los hechos correspondientes. A una distancia determinada del sol, un cometa, con una masa muy pequeña, experimenta exactamente la misma aceleración hacia el sol que la experimentada por un planeta a la misma distancia. Así, pues, la forma en que la gravitación afecta a un cuerpo depende únicamente del lugar donde dicho cuerpo está situado y en manera alguna de la naturaleza del mismo. Esto sugiere que el efecto gravitatorio es una característica de su situación, que es lo que tiene en cuenta Einstein.

Por lo que respecta a la masa gravitatoria, en el sentido del número 2, esto es, a la intensidad de la fuerza producida por un cuerpo, ya no es exactamente proporcional a su masa inercial. La cuestión supone cierta matemática complicada y no vamos a entrar ahora en ella.

Hemos de hacer otra indicación sobre lo que ha de ser la ley de la gravitación, si ha de ser una característica de la proximidad, pues hemos visto que había razón para suponerlo así. Y ha de expresarse en una ley que sea inmutable, a la hora de adoptar un tipo diferente de coordenadas. Ya vimos, para comenzar, que debemos considerar a nuestras coordenadas sin significación física alguna: son simplemente formas sistemáticas de nombrar las diferentes partes del espacio-tiempo. Puesto que son convencionales, no pueden entrar en las leyes físicas. Equivale a decir que, si hemos expresado correctamente una ley en función de una serie de coordenadas, ésta debe ser expresada por la misma fórmula en función de otra serie de coordenadas. O más exactamente, ha de ser posible encontrar una fórmula que exprese la ley y que sea inmutable aunque cambiemos las coordenadas. A la teoría de los tensores le corresponde arbitrar tales fórmulas.

Y la teoría de los tensores demuestra que existe una fórmula que sugiere

como naturalmente posible la ley de la gravitación. Al examinar esta posibilidad se llega a los resultados correctos. Es aquí donde entran en juego las confirmaciones empíricas. Pero si no se hubiera comprobado que la ley de Einstein concordaba con la experiencia, no por ello podríamos retroceder a la ley de Newton. Nos hubiéramos visto empujados por la lógica a buscar una ley expresada en función de los “tensores” y, por tanto, independientemente de nuestra elección de las coordenadas. Es imposible sin matemáticas explicar la teoría de los tensores. Quien no sea matemático habrá de contentarse con saber que existe un método técnico por el que eliminamos el elemento convencional de nuestras medidas y leyes. Y así llegamos a las leyes físicas que son independientes del punto de vista del observador. El ejemplo más espléndido de este método es la ley de la gravitación de Einstein.

## 10. Masa, momento, energía y acción

La búsqueda de la exactitud cuantitativa es tan ardua como importante. Las medidas físicas están hechas con exactitud física. Si estuvieran hechas con menos precisión, esas pequeñas discrepancias como las que forman los datos experimentales para la teoría de la relatividad, nunca podrían revelarse. Antes de la aparición de la relatividad la física matemática usaba una serie de conceptos que se suponían tan exactos como las medidas físicas. Pero se ha comprobado después que eran lógicamente deficientes, y que esta deficiencia aparecía en pequeñísimas desviaciones de las expectativas basadas en el cálculo. En este capítulo quiero mostrar cómo quedan afectadas las ideas fundamentales de la física de la prerrelatividad y qué modificaciones han tenido que sufrir.

Ya hemos tenido ocasión de hablar de la masa. En cuanto se refiere a la vida diaria, masa se identifica con peso. Las medidas usuales de peso —onzas, gramos, etc.— son en realidad medidas de masa. Pero tan pronto como comenzamos a hacer medidas exactas nos vemos obligados a distinguir entre masa y peso. En el uso ordinario hay dos formas diferentes de pesar: con la balanza de platillos y con la balanza de resorte elástico. Cuando vas de viaje y pesas tu maleta, no la pones en una balanza de platillos, sino en una balanza de resorte o báscula. El peso oprime o presiona el resorte elástico hasta un cierto punto y el resultado queda señalado por una aguja en el disco. El mismo principio se usa en las máquinas automáticas cuando quieres saber tu peso. La balanza de resorte elástico indica el peso, la balanza de platillos la masa. La diferencia no varía en cualquier parte del mundo que estés. Pero si pruebas dos tipos diferentes de máquinas de pesar en una serie de lugares distintos comprobarás, si son exactas, que sus resultados no siempre concuerdan. Las balanzas de platillos te darán siempre el mismo resultado en cualquier parte, pero no así la de resorte o báscula. Es decir, si tienes un trozo de plomo que pesa diez kilos en una balanza, pesará también diez kilos en la balanza en cualquier parte del mundo. Pero si pesa diez kilos en una balanza de resorte o báscula en Londres, pesará más en el Polo Norte, menos en el Ecuador, menos en un aeroplano, y menos todavía en una mina de carbón. Suponiendo que se pesa en todos estos lugares con la misma báscula.

El hecho es que dos instrumentos miden cantidades completamente diferentes. Las balanzas de platillos miden lo que se puede llamar (prescindiendo de los matices que ahora nos puedan interesar) «cantidad de materia». Existe la misma cantidad de materia en una libra de plumas que en una libra de plomo. Los «pesos patrón», que son realmente «masas patrón», medirán la cantidad de masa de cualquier sustancia que pongamos en la otra balanza. Pero el peso es una propiedad debida a la gravitación de la tierra: es la cantidad de fuerza con que la tierra atrae a un cuerpo. Esta fuerza varía de un lugar a otro. En primer lugar, en cualquier parte fuera de la tierra la atracción varía inversamente al cuadrado de la distancia del centro de la tierra. Es, por tanto, menor en las grandes alturas. En segundo lugar, cuando bajas a una mina de carbón, parte de la tierra está encima de ti y atrae la materia hacia arriba y no hacia abajo. Por eso la atracción hacia abajo es menor que en la superficie de la tierra. En tercer lugar, debido a la rotación de la tierra, existe lo que se llama «fuerza centrífuga», que actúa contra la gravitación. Ésta es mayor en el ecuador, porque allí la rotación de la tierra supone un movimiento más rápido. En los polos no existe, porque están en el eje de rotación. Por todas estas razones, la fuerza con que un determinado cuerpo es atraído hacia la tierra es mensurablemente diferente en lugares distintos. Es esta fuerza la que es medida por la balanza de resorte elástico o báscula. Y ésta es la razón por la que una balanza de resorte dé diferentes resultados en lugares distintos. En el caso de las balanzas de platillos, los «pesos-patrón» se alteran lo mismo que el cuerpo que se ha de pesar, de forma que el resultado es el mismo en todas partes. Pero el resultado es la «masa», no el «peso». Un «peso-patrón» tiene la misma «masa» en todas partes, pero no el mismo «peso». En realidad, es una unidad de masa no de peso. Para fines teóricos, la masa, que es casi invariable para un cuerpo determinado, es más importante que el peso, por decirlo de alguna manera, como «la cantidad de materia». Veremos que esta idea no es del todo correcta, pero servirá como punto de partida para las precisiones siguientes.

Para fines teóricos, la masa se define como algo determinado por la cantidad de fuerza requerida para producir una aceleración determinada: cuanto mayor sea la masa de un cuerpo, mayor será la fuerza requerida para alterar su velocidad por una cantidad determinada y en un tiempo dado. Tarda más una potente locomotora en poner a diez kilómetros por hora un largo tren

al cabo de medio minuto de arrancar, que lo que tarda en poner a la misma velocidad a un tren corto. O puede haber circunstancias en que la fuerza es la misma para una serie de cuerpos diferentes. En tal caso, si podemos medir las aceleraciones producidas en ellos, podemos indicar las relaciones de sus masas: cuanto mayor es la masa, menor es la aceleración. Como ilustración de este método, podemos tomar un ejemplo que es importante en relación con la relatividad. Los cuerpos radiactivos emiten partículas  $\beta$  (electrones) a enormes velocidades. Podemos observar su recorrido haciéndolos pasar a través de vapor de agua. Podemos observar, asimismo, cómo a medida que van pasando forman una nube. Al propio tiempo, podemos someterlos a fuerzas eléctricas y magnéticas conocidas y observar en qué proporción están dirigidos por estas fuerzas en línea recta. Esto permite comparar sus masas. Se ha comprobado que cuanto más rápidamente avanzan, mayores son sus masas, medidas por un observador inmóvil. Se sabe, por otra parte, que, además del efecto del movimiento, todos los electrones tienen la misma masa.

Todo esto era conocido antes de que se inventara la teoría de la relatividad, pero estaba demostrado que la concepción tradicional de masa no tenía precisamente la exactitud que se le había atribuido. Se acostumbraba a considerar la masa como «cantidad de materia» y se suponía completamente invariable. Luego se comprobó que la masa era relativa respecto al observador, así como la longitud y el tiempo, y que se alteraba con el movimiento exactamente en la misma proporción. Sin embargo, esto podía remediarse. Podíamos tomar la «masa propiamente dicha», la masa en cuanto medida por un observador que comparte el movimiento con el cuerpo. Esto se deducía fácilmente de la masa medida, tomando la misma proporción que en el caso de las longitudes y tiempos.

Pero existe todavía un hecho más curioso: que una vez hecha esta corrección, seguíamos sin obtener una cantidad que fuera exactamente la misma para el mismo cuerpo. Cuando un cuerpo absorbe energía —por ejemplo, al calentarse más— su «masa propiamente dicha» aumenta ligeramente. El aumento es muy leve, ya que se mide dividiendo el aumento de energía por el cuadrado de la velocidad de la luz. Por otro lado, cuando un cuerpo parte con energía pierde masa. El caso más notable de ello es que cuatro átomos de hidrógeno pueden unirse para formar un átomo de helio. Pero un áto-

mo de helio tiene bastante menos de cuatro veces la masa de un átomo de hidrógeno. Este fenómeno es de la mayor importancia práctica. Se pensó que esto sucedía en el interior de las estrellas, y que así se liberaba la energía que llega hasta nosotros como luz estelar y que, en el caso del sol, hace posible la vida terrestre. Lo mismo se puede provocar también en los laboratorios terrestres produciendo una enorme liberación de energía en forma de luz y calor. Ello hace posible la fabricación de las bombas de hidrógeno, que son virtualmente ilimitadas en cuanto a tamaño y poder destructivo. Las bombas atómicas ordinarias, que operan por la desintegración del uranio, tienen una limitación natural: si se congrega demasiado uranio en un lugar, existe el riesgo de que explote por sí mismo, sin esperar que se provoque la explosión, de forma que las bombas de uranio sólo pueden fabricarse dentro de un determinado tamaño máximo. Pero una bomba de hidrógeno puede contener cuanto hidrógeno queramos, puesto que el hidrógeno por sí mismo no es explosivo. Sólo cuando se hace explotar el hidrógeno por una bomba de uranio convencional se combina con él para formar helio y liberar energía. Y es porque la combinación sólo puede tener lugar a una temperatura muy alta.

Hay, además, otra ventaja: el abastecimiento de uranio en el planeta es muy limitado y podría suceder que se gastara antes de que el género humano quedara exterminado. Pero ahora que se puede usar una cantidad prácticamente ilimitada de hidrógeno hay bastantes razones para esperar que el homo sapiens se pueda exterminar a sí mismo, con la gran ventaja de que puedan sobrevivir algunos animales menos feroces.

Pero es hora ya de volver a tópicos menos divertidos.

Tenemos, pues, dos clases de masa, ninguna de las cuales realiza plenamente el viejo ideal. La masa medida por un observador en movimiento en relación al cuerpo en cuestión, es una cantidad relativa y no tiene significación física como propiedad del cuerpo. La «masa propiamente dicha» es una propiedad genuina del cuerpo y no depende del observador, pero tampoco es estrictamente constante. Como veremos en seguida, la noción de masa queda absorbida dentro de la noción de energía. Representa, por decirlo así, la energía que el cuerpo gasta internamente, por cuanto es opuesta a la que despliega hacia el mundo exterior.

Conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía fueron los tres grandes principios de la mecánica clásica. Estudiemos ahora la conservación del momento.

El momento de un cuerpo en una dirección determinada es su velocidad en esa misma dirección multiplicada por su masa. Por lo tanto, un cuerpo pesado que se mueve lentamente puede tener el mismo momento que un cuerpo ligero que se mueve con rapidez. Cuando una serie de cuerpos interactúa en cualquier dirección, por ejemplo, por colisión o por gravitación mutua, de forma que no interviene ninguna fuerza externa, el impulso total de todos los cuerpos en cualquier dirección se mantiene inalterado. Esta ley sigue siendo válida en la teoría de la relatividad. Para diferentes observadores, la masa será diferente, pero también la velocidad. Estas dos diferencias se neutralizan mutuamente, y resulta que el principio sigue siendo verdadero.

El momento de un cuerpo es distinto en direcciones distintas. La forma ordinaria de medirlo es tomar la velocidad de una dirección determinada (medida por el observador). Ahora bien, la velocidad en una dirección determinada es la distancia recorrida en esa misma dirección en unidad «tiempo». Imaginemos que tomamos la distancia recorrida en esa dirección mientras el cuerpo se mueve en una unidad «intervalo». (En casos ordinarios se trata solamente de un ligero cambio, ya que para las velocidades considerablemente inferiores a las de la luz, el intervalo es casi igual al lapso de tiempo.) Supongamos ahora que en lugar de la masa medida por el observador tomamos la masa propia. Estos dos cambios aumentan la velocidad y disminuyen la masa, ambas cosas en la misma proporción. Así, el momento sigue siendo el mismo, pero las cantidades, que varían según el observador, han sido reemplazadas por cantidades que se fijan independientemente del observador, con la excepción de la distancia recorrida por el cuerpo en la dirección dada. Cuando sustituimos el espacio-tiempo por tiempo, nos damos cuenta que la masa medida (en cuanto opuesta a la masa propiamente dicha) es una cantidad de la misma clase que el impulso en una dirección dada. Se podría llamar el momento en el tiempo-dirección. La masa medida se obtiene multiplicando la masa invariable por el tiempo transcurrido en recorrer la unidad «intervalo». El momento se obtiene multiplicando la misma masa invariable por la distancia recorrida (en la dirección dada) al atravesar la unidad intervalo. Desde el punto de vista espacio-tiempo, éstos naturalmente

se identifican.

Aunque la masa medida de un cuerpo depende de la dirección en que se mueve el observador con respecto al cuerpo, no deja de ser una cantidad muy importante. La conservación de la masa medida es lo mismo que la conservación de la energía. Esto puede parecer sorprendente, ya que a primera vista, masa y energía son cosas muy distintas. Pero resulta que la energía es lo mismo que la masa medida. Explicar cómo sucede esto, no es fácil; no obstante, lo intentaremos.

En el lenguaje popular, «masa» y «energía» no significan la misma cosa. Asociamos la «masa» con la idea de un hombre gordo en un sillón, de movimientos lentos, mientras que la «energía» nos sugiere una persona delgada, llena de empuje y de «vida». El lenguaje popular asocia «masa» con «inercia»; pero su idea de la inercia es unilateral: incluye la lentitud para ponerse en movimiento, pero no la prontitud para parar, que va igualmente incluida. Todos estos términos tienen significados técnicos en física, más o menos análogos al significado de los términos del lenguaje popular. De momento nos interesa el significado técnico de «energía».

A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX se habló mucho de la «conservación de la energía» o de la «persistencia de la fuerza», como prefería llamarla Herbert Spencer. No fue fácil establecer de manera sencilla este principio, a causa de las diferentes formas de energía. Pero el punto esencial era que la energía no se crea ni se destruye nunca, aunque se pueda transformar de una forma a otra. El principio adquirió validez a través del descubrimiento de Joule del «equivalente mecánico del calor», que demostró la existencia de una proporción constante entre el esfuerzo requerido para producir una determinada cantidad de calor y el esfuerzo requerido para levantar un peso a una altura determinada. En realidad, la misma clase de esfuerzo se podría emplear para los dos fines según el mecanismo. Cuando se comprobó que el calor consistía en el movimiento de las moléculas, pareció natural que fuera análogo a otras formas de energía. Hablando en general, con la ayuda de cierta base teórica, todas las formas de energía quedaron reducidas a dos, llamadas respectivamente «cinética» y «potencial». Se pueden definir de la siguiente manera:

La energía «cinética» de una partícula es la mitad de la masa multiplicada

por el cuadrado de la velocidad. La energía cinética de una serie de partículas es la suma de las energías cinéticas de las partículas separadas.

Más difícil de definir es la energía potencial. Representa cualquier estado de tensión que solamente se puede mantener por la aplicación de fuerza. Hagamos el caso más fácil: si un peso se levanta a cierta altura y queda suspendido, tiene energía potencial porque dejado a sí mismo caerá. Su energía potencial es igual a la energía cinética que adquiriría al caer recorriendo la misma distancia que se recorrió al levantarlo. De forma parecida, cuando un cometa gira alrededor del sol en una órbita muy excéntrica, se mueve mucho más rápidamente cuando está cerca del sol que cuando está lejos, de manera que su energía cinética es mucho mayor cuando está más cerca del sol. Por otra parte, su energía potencial es máxima cuando está en el punto más alejado del sol, ya que es entonces como la piedra levantada en alto. La suma de las energías cinética y potencial del cometa es constante a menos que sufra colisiones o pierda algo de su material. Podemos determinar con exactitud el cambio de energía potencial al pasar de una posición a otra, pero la suma total de la misma es en cierto modo arbitraria, ya que podemos fijar el nivel cero donde queramos. La energía potencial de nuestra piedra, por ejemplo, se puede considerar que es la energía cinética que adquiriría al caer sobre la superficie de la tierra. O la que adquiriría al caer al fondo de un pozo en el centro de la tierra, o en cualquier distancia menor que se le asigne. Puede ser cualquiera, con tal que nos mantengamos fijos en nuestra decisión. Nos encontrarnos frente a una suma de pérdidas y ganancias que no se altera por el aumento de cantidades con que comencemos.

Tanto la energía cinética como la potencial de una serie de cuerpos serán diferentes para diferentes observadores. En la dinámica clásica, la energía cinética variaba según el estado de movimiento del observador, pero sólo en una cantidad constante. La energía potencial no difería en absoluto. En consecuencia, la energía total era constante para cada observador, suponiendo siempre que los observadores interesados se mueven en línea recta con velocidades uniformes. O, en caso contrario, suponiendo que son capaces de referir sus movimientos en relación a los cuerpos que se mueven de esta manera. Pero en la dinámica de la relatividad el problema resulta más complicado. Las ideas newtonianas de la energía cinética y potencial se pueden adaptar sin mucha dificultad a la teoría especial de la relatividad. Pero

no podemos adaptar con provecho la idea de energía potencial a la teoría general de la relatividad, ni podemos extender la idea de energía cinética, a no ser a un caso concreto. Por tanto, la conservación de la energía en el sentido usual newtoniano no puede seguir manteniéndose. La razón es que la energía cinética y potencial de un sistema de cuerpos son ideas íntimamente unidas que se refieren a extensas regiones del espacio-tiempo. La misma extensa amplitud en la elección de coordenadas y el carácter montañoso del espacio-tiempo, tal como se explicaron en el capítulo 8, se combinan para hacer muy confusa la introducción de ideas de esta clase en la teoría general. Existe en la teoría general una ley de la conservación, pero no es tan útil como las leyes de la conservación de la mecánica newtoniana y de la teoría especial. Todo depende de la elección de coordenadas en un sentido difícil de entender. Hemos visto que la independencia de la elección de coordenadas es un principio-guía en la teoría general de la relatividad. Y la ley de la conservación es sospechosa porque choca con este principio. Sigue siendo una cuestión por resolver si esto significa que la conservación es de importancia fundamental menor de lo que se ha creído hasta aquí, o si una ley satisfactoria de conservación sigue estando oculta en las complejidades matemáticas de la teoría. Mientras tanto, debemos contentarnos dentro de la teoría general con la idea de la energía cinética para un solo cuerpo. Es lo único que necesitaremos en el razonamiento que sigue. Habría que recordar que estas dificultades sobre la conservación de la energía surgen solamente en la teoría general y no en la especial. Siempre que se pueda prescindir de la gravitación y resulte aplicable la teoría especial, puede mantenerse la conservación de la energía.

El significado de «conservación» en la práctica no es exactamente el mismo que en teoría. En teoría decimos que se conserva una cantidad cuando la suma de ésta en el mundo es la misma en cualquier tiempo. Pero en la práctica no podemos comprobar la de todo el mundo; por eso hemos de entender algo más manejable. Queremos significar que, al tomar cualquier región determinada, si la cantidad total de la región ha cambiado, es porque alguna cantidad ha traspasado los límites de la región. Si no hubiera nacimientos ni muertes, la población se conservaría. En tal caso, la población de una región podría variar tan sólo por emigración o inmigración, es decir, traspasando las fronteras. Quizá no fuéramos capaces de hacer un censo exacto

de China o de África Central, y por lo mismo no podríamos estar seguros de la población total del mundo. Pero podríamos justificarnos en nuestra suposición de que eran constantes, diciendo que siempre que las estadísticas fueron posibles, la población nunca cambió, a no ser por la gente que traspasó la frontera. En realidad la población no se ha conservado. Un fisiólogo amigo mío puso en cierta ocasión cuatro ratas en un termo. Algunas horas después, cuando vino a recogerlas, había once. Pero la masa no está sujeta a estas fluctuaciones: la masa de las once ratas al final del tiempo no era mayor que la masa de las cuatro del principio.

Esto nos vuelve a llevar al problema que ha suscitado la discusión sobre la energía. Dijimos que en la teoría de la relatividad, la masa medida y la energía se consideran la misma cosa y nos pusimos a explicar el porqué. Pero aquí, lo mismo que al final del capítulo 6, el lector no matemático hará bien en saltárselo y comenzar en el párrafo siguiente.

Tomemos la velocidad de la luz como unidad de la velocidad. Esto es siempre conveniente en la teoría de la relatividad. Supongamos que  $m$  sea la masa propia de una partícula,  $v$  su velocidad relativa al observador. Entonces, su masa medida será

$$\frac{m}{\sqrt{1-v^2}}$$

mientras que su energía cinética, según la fórmula usual, será

$$\frac{1}{2}mv^2$$

Como vimos anteriormente, la energía sólo se da en una cuenta de pérdidas y ganancias, de forma que podemos añadir cualquier cantidad constante que queramos. Podemos, pues, suponer que la energía es

$$m + \frac{1}{2}mv^2$$

Ahora bien, si  $v$  es una pequeña fracción de la velocidad de la luz,

$$m + \frac{1}{2}mv^2$$

es casi exactamente igual a

$$\frac{m}{\sqrt{1-v^2}}$$

En consecuencia, para velocidades tan importantes como las de los cuerpos, la energía y la masa medida resultan indistinguibles dentro de los límites de la exactitud alcanzable. En realidad, en mejor alterar nuestra definición de energía y suponer que es

$$\frac{m}{\sqrt{1-v^2}}$$

ya que ésta es la dimensión por la que se mantiene la ley análoga a la conservación. Y cuando la velocidad es muy grande, da una medida mejor de la energía que la fórmula tradicional. La fórmula tradicional se ha de considerar, pues, como una aproximación, cuya versión exacta da la nueva fórmula. En este sentido, energía y masa medida resultan identificadas.

Paso ahora a la noción de «acción», que es menos familiar al público general que la de energía. Pero ha venido a ser más importante en la física de la relatividad así como en la teoría del quantum. (El quantum es una pequeña cantidad de acción.) La palabra «acción» se usa para denotar energía multiplicada por tiempo. Es decir, si hay una unidad de energía en un sistema, ejercerá una unidad de acción en un segundo, 100 unidades de acción en 100 segundos, y así sucesivamente. Un sistema que tiene 100 unidades de energía ejercerá 100 unidades de acción en un segundo, y 10.000 en 100 segundos, etc. Acción es, pues, en un sentido difuso, una medida de cuanto se ha realizado: se aumenta tanto por el desarrollo de una energía como por una prolongación mayor del trabajo. Dado que la energía se identifica con la masa medida, podemos afirmar también que la acción es la masa medida multiplicada por el tiempo. En la mecánica clásica, la «densidad» de materia en cualquier tema es la masa dividida por el volumen. Es decir, si se sabe la densidad de una pequeña parte, se puede descubrir la cantidad total de materia, multiplicando la densidad por el volumen de la pequeña parte. En la mecánica de la relatividad, necesitamos sustituir siempre espacio-tiempo por espacio. Por tanto, una «región» ya no se debe tomar como un simple volumen, sino como volumen que dura un tiempo. Una pequeña región será un pequeño volumen que dura un tiempo pequeño. La consecuencia es que, dada la densidad, una pequeña región en el nuevo sentido contiene no una pequeña masa simplemente, sino una pequeña masa multiplicada por un pequeño tiempo, es decir, por una pequeña cantidad de «acción». Esto explica por qué se ha de esperar que la «acción» sea de importancia fundamental en la mecánica de la relatividad. Y así es en realidad.

El postulado de que una partícula que se mueve libremente sigue una geodésica se puede sustituir por un supuesto equivalente sobre la «acción» de la partícula. Tal principio se llama «principio de la mínima acción». Y afirma que un cuerpo al pasar de un estado a otro elige una ruta que supone una acción menor que cualquiera otra ruta ligeramente diferente —!una vez más, la ley de la pereza cósmica!—. Los principios de la acción menor no quedan restringidos a los cuerpos únicos. Es posible hacer una suposición similar que nos lleve a una descripción del espacio-tiempo como conjunto completo con montañas y valles. Tales principios, que desempeñan una parte central en la teoría cuántica, lo mismo que en la relatividad, son los medios más completos de establecer la parte puramente formal de la mecánica.

## 11. El universo en expansión

Hasta este momento hemos venido estudiando los experimentos y observaciones que en su mayor parte afectan a la tierra o al sistema solar. Sólo ocasionalmente nos hemos alejado hasta las estrellas. En este capítulo nos situaremos mucho más lejos: veremos lo que la relatividad tiene que decir sobre el universo en general.

Las observaciones astronómicas que vamos a estudiar deben considerarse como resultados científicos ya conseguidos. Sin embargo, las explicaciones teóricas de estos resultados tienen un carácter más especulativo. Y hay que suponer que tratamos materias teóricas que tienen la misma solidez que las tratadas hasta aquí. Necesitan ciertamente que se las perfeccione. La ciencia no aspira a establecer verdades inmutables ni dogmas eternos: su aspiración es llegar a la verdad por aproximaciones sucesivas, sin pretender que se ha conseguido ninguna etapa final ni exactitud completa.

Son necesarias unas explicaciones sobre la apariencia general del universo. Hoy se conoce mucho sobre la distribución de la materia en una amplia escala. Nuestro sol es una estrella dentro de un sistema de cerca de 100.000 estrellas, conocidas con el nombre de «galaxia». La galaxia tiene forma de una rueda catalina gigante, con brazos espirales de estrellas que parten de un brillante eje central. Las siluetas de las galaxias no son muy definidas, pero el cuerpo principal de las estrellas tarda en aparecer unos 100.000 años luz y en una tercera parte de su espesor (un año luz es la distancia que la luz recorre en un año: unos mil millones de kilómetros). El sol está en uno de estos brazos espirales, alejado del centro del eje unos 30.000 años luz. La Vía Láctea, senda brillante de estrellas que atraviesa el firmamento y fácilmente visible en una noche clara, es precisamente nuestro ángulo de mira del resto de la galaxia por su posición en el brazo espiral.

Además de estrellas, la galaxia contiene gran cantidad de gas, en su mayor parte hidrógeno y polvo. La masa total del gas y el polvo es probablemente una cuarta parte del total de la masa de todas las estrellas juntas. La acumulación total de estrellas, polvo y gas gira despacio alrededor del eje. La velocidad de rotación varía en relación a la distancia del eje: el sol tarda unos 250 millones de años en dar una vuelta alrededor de él.

La galaxia no está sola en el universo. Es una entre muchos millones de sistemas similares esparcidos a lo largo de la región que pueden observar nuestros telescopios. Los otros sistemas también se llaman galaxias (o a veces «nebulosas»). Algunas galaxias son achatadas, con brazos en espiral como la nuestra. Otras son redondas como balones de fútbol u ovales como los de rugby. E incluso otras de forma totalmente irregular. Las galaxias presentan distinta tendencia a reunirse en grupos. Estos grupos se llaman «racimos». Un solo racimo puede contener mil galaxias, cada una de las cuales es un inmenso sistema de estrellas lo mismo que el nuestro. Nuestra propia galaxia pertenece a un racimo, llamado pequeño «grupo local» que tiene alrededor de otras diecisiete galaxias (no podemos estar totalmente ciertos de su número, ya que varios de los que se sospecha que son miembros son relativamente pequeños y muy tenues.) Nuestro vecino mejor conocido del grupo local es la galaxia de Andrómeda, que está a dos millones de años luz. Es ligeramente visible a simple vista.

Los racimos de galaxias son las mayores unidades de materia fácilmente identificables del universo. Hay algunas pruebas de agrupaciones en unidades mayores —en racimos de racimos— pero esto no se sabe con certeza. Aparte de esto, la distribución de racimos parece ser bastante uniforme. Hay tantos en una parte del firmamento como en otra, y parecen distribuidos uniformemente en profundidad. No están, por supuesto, regularmente espaciados como filas de puntos. Están distribuidos al azar como las gotas de agua en el cristal de una ventana cuando comienza a llover. La distribución de racimos es uniforme en el mismo sentido que lo es la distribución de las gotas de agua: no se puede decir que el número de gotas en cada panel de ventana sea el mismo, pero no variará mucho de un panel a otro.

Puesto que los racimos de galaxias son las mayores unidades naturales, y porque podemos ver gran número de estas unidades, es razonable pensar que la parte del universo visible a través del telescopio es algo típico del universo como conjunto. No sería razonable suponer que la región uniforme se extiende solamente hasta donde alcanzan a ver los telescopios (que es 3.500 millones de años luz). Ni tampoco que el próximo adelanto en materia de observación llegará a descubrir regiones más distantes de un carácter completamente distinto. No sería imposible que fuera así, pero significaría que el grupo local, u otra parte cercana a él, se había escogido como centro

especial de la región uniforme. Y no hay pruebas científicas para suponer que haya de ser elegido en este sentido.

La idea de que el universo es uniforme a gran escala fue sugerido mucho antes de que existieran pruebas astronómicas de ello y ha adquirido ahora el carácter de un postulado fundamental. Se denomina el «principio cosmológico». El principio cosmológico es en realidad sólo una extensión de las ideas de Copérnico. Tan pronto como abandonamos la noción egoísta de que la tierra es el centro de todas las cosas, nos vemos obligados a aceptar que el sol, que es una estrella común, no tiene más derecho que la tierra a ocupar un lugar especial en nuestra descripción del universo. Cuando comprobamos que nuestra galaxia y el racimo al que pertenece son también ejemplares típicos, entonces también ellos deben ser colocados lógicamente a la par con otros objetos similares. Ni existe una razón empírica para suponer que las leyes de la física varían sistemáticamente de un racimo a otro de galaxias.

De tales argumentaciones concluimos que el universo es uniforme a gran escala. En otras palabras, se conforma al principio cosmológico.

Las implicaciones de esto se pueden expresar de una manera ligeramente diferente. Supón que estás dentro de un cajón sin ventanas y que te trasladan a una parte lejana del universo. Al salir del cajón no verías, naturalmente, la distribución particular de las estrellas y galaxias que se ve desde la tierra —los detalles geográficos de tu nuevo entorno serían diferentes—. Pero, según el principio cosmológico, la apariencia general del universo sería la misma. Aparte de estos detalles, no podrías decir en qué parte del universo te encuentras.

Existe un fenómeno muy notable que podría llevarnos a suponer que nuestro racimo local de galaxias tiene después de todo una posición especial en el universo. Es el llamado «corrimiento al rojo» en los espectros de las galaxias distantes. Como vamos a ver en seguida, por este fenómeno se dice que el universo está en expansión.

Nos interesa aquí un efecto que se explicó ya en el capítulo 9, si bien en ese capítulo no nos atañía directamente. Se recordará la analogía con el sonido que introdujimos entonces: Si un tren se mueve hacia ti, la nota aguda de su silbato es más alta que si estuviera en reposo. Si, en cambio, se mueve

en sentido contrario de donde tú estás, el tono es más bajo. Los efectos son muy similares en el caso de la luz. Si el origen de la luz se va acercando hacia ti, todo el espectro de la luz se desplaza hacia el violeta. Si la causa de la luz se aleja de ti, el espectro se desplaza hacia el rojo. Estos desplazamientos del espectro corresponden a los cambios de tono del silbato del tren. La cantidad del desplazamiento depende de la proporción de cambio de la distancia entre nosotros y el origen de la luz. (Esto no tiene nada que ver con la velocidad de la luz misma que, como hemos visto, es independiente del movimiento de su causa.) Este desplazamiento del espectro nos da un medio para determinar las velocidades de las estrellas y de las galaxias, comparando los espectros de la luz que transmiten con espectros similares producidos en laboratorios de la tierra. Las velocidades de las galaxias del grupo local, medidas de esta manera, ascienden a unos 500 kilómetros por segundo. Resulta una velocidad muy rápida tratándose de distancias comunes, pero cuando se trata de grandes distancias entre las galaxias, pasarían millones de años antes de que se produjera un cambio notable en sus posiciones.

Algunas de las galaxias de los grupos locales se dirigen hacia nosotros, otras se apartan. No hay nada realmente extraño en este movimiento, que podría compararse al de las abejas en un enjambre. Las abejas se mueven unas con relación a otras, pero el enjambre como tal se mantiene unido. La situación es bastante diferente cuando llegamos a examinar racimos distintos a los nuestros. En cada uno de ellos volvemos a encontrar movimientos internos, pero todos los demás racimos parecen alejarse del nuestro. Y cuanto más lejos están, más rápidamente parecen moverse. Es un fenómeno importante que sugiere que el universo está en expansión.

Puesto que todos los demás racimos parecen alejarse del nuestro, podríamos inclinarnos a pensar que el grupo local está en cierto sentido en el centro del universo en expansión. Sería un disparate, ya que se olvida el carácter relativo del movimiento que con tanta insistencia hemos señalado en este libro. Volvamos una vez más a la analogía del enjambre de abejas. Supongamos que hay enjambres muy bien amaestrados, que vuelan alrededor del campo unos diez metros en una línea que va de oeste a este. Supongamos después que uno de los enjambres se mantiene quieto en relación al suelo, mientras que el enjambre que se encuentra diez metros al este de él se mueve hacia el este a razón de un metro por minuto. El enjambre que está a veinte metros

al este se mueve fácilmente a dos metros por minuto, y así sucesivamente. Mientras tanto, los enjambres situados al oeste del enjambre que está quieto se mueven hacia el oeste a velocidades similares. En estas circunstancias, a una abeja que se encuentre en cualquiera de los enjambres, fijos o moviéndose, le parecerá que todos los demás enjambres se apartan del suyo a velocidades proporcionales a sus distancias. Si el suelo no sirviera como modelo de reposo, entonces no habría razón para pensar que cualquiera de los enjambres fue escogido en un sentido especial.

El comportamiento de los racimos de galaxias es totalmente similar. Por supuesto que están distribuidos irregularmente en todas las direcciones, en lugar de estar alineados como nuestros bien amaestrados enjambres. Pero, como en el caso de éstos, a un observador que estuviese en cualquiera de los racimos, le parecería que todos los demás se alejan del suyo. Dado que no hay un principio absoluto de reposo en el universo, la apariencia de expansión es la misma para todos los racimos.

El racimo más próximo, a una distancia de 43 millones de años luz y que contiene unas 2.500 galaxias, tiene un desplazamiento al rojo correspondiente a una velocidad de recesión de nosotros de 1.200 kilómetros por segundo. El racimo más distante estudiado hasta el momento tiene un desplazamiento al rojo cien veces mayor, correspondiente a la velocidad de recesión, que es casi la mitad de la velocidad de la luz. (Las velocidades de recesión correspondientes a los desplazamientos al rojo tan grandes como éste se han de calcular sobre la base de las fórmulas de transformación de Lorentz que dimos en el capítulo 6.)

Los mayores desplazamientos al rojo descubiertos hasta el presente no son los de los racimos distantes, sino los de los llamados «objetos cuasiestelares» (quasars) cuyos desplazamientos al rojo corresponden a las velocidades de recesión superiores a las cuatro quintas partes de la velocidad de la luz. La naturaleza de estos objetos, sin embargo, no se ha llegado a comprender todavía. Por lo mismo, no se pueden tomar propiamente en cuenta a la hora de usar los datos astronómicos para construir un modelo teórico.

Veamos ahora cómo se puede acoplar esta información del universo dentro de la teoría general de la relatividad. Ya hemos visto que los efectos gravitatorios del sol pueden describirse como los de una montaña en espacio-

tiempo. Una galaxia o un racimo de galaxias puede representarse de la misma manera, pero por una montaña mucho mayor, a causa de su mayor masa. (La masa de un racimo típico es aproximadamente de mil millones de veces la masa del sol.) Si quisiéramos incorporar en esta descripción detalles de la distribución de las estrellas en cada galaxia y de las galaxias en cada racimo, tendríamos una montaña muy complicada con muchos precipicios y valles. Tendríamos entonces que describir el conjunto del universo de forma que pudiera representarse por un espacio-tiempo con montañas que representan los racimos, esparcidas en él. Tal descripción sería matemáticamente muy complicada, ya que incluiría muchos detalles «geográficos» no esenciales para una descripción de la apariencia superficial del universo. Para simplificar la descripción, construimos modelos que mantienen los que parecen ser los aspectos esenciales, dejando a un lado los detalles geográficos. Los aspectos que mantenemos son la uniformidad a gran escala y la expansión. Los detalles desechados son las posiciones exactas, los tamaños y las composiciones de los racimos individuales.

De esta manera construimos modelos de espacio-tiempo que representan el universo, suponiéndolo exactamente uniforme, en lugar de aproximadamente uniforme. En estos modelos simplificados imaginamos la materia alisada en continua distribución en vez de estar recogida en racimos con amplios espacios entre ellos.

La acumulación de materia en un racimo se puede describir diciendo que es una gran montaña en espacio-tiempo, donde vemos el racimo. O también diciendo que el espacio-tiempo se encorva muy próximo al racimo. De la misma manera, la distribución uniforme de la materia en un modelo alisado del universo se puede describir diciendo que el espacio-tiempo se encorva uniformemente. El efecto de alisar la materia que compone los diferentes racimos es suavizar la correspondiente curvatura con el fin de producir una ligera curvatura general. Esta curvatura general del universo es algo parecido a la curvatura de una esfera en el espacio ordinario, pero no llevaremos más adelante la analogía de la curvatura con las montañas de espacio-tiempo. La comparación de la curvatura general del espacio-tiempo con la curvatura de la tierra podría resultar fácilmente equívoca.

La ley de la gravitación de Einstein, combinada con el supuesto de alisa-

miento —el supuesto de la uniformidad exacta—, nos permite construir una variedad de modelos del universo en los que la curvatura general adquiere una variedad de formas. El efecto principal de esta curvatura general es que supone, en algunos de los modelos, que los espectros de los objetos distantes se desplazarán hacia el rojo. Es en gran parte una cuestión de gusto si este desplazamiento al rojo se ha de atribuir a un movimiento recesivo o a la curvatura espacio-tiempo. El efecto aparecerá de una manera u otra, según dependa del sistema de coordenadas que se emplee para describir el universo. Lo que la relatividad predice no depende, por supuesto, de la elección del sistema de coordenadas.

Los universos modelo que acabamos de estudiar concuerdan más o menos bien con las observaciones de las propiedades generales de nuestro propio universo. Hay otros, igualmente coherentes con la ley de Einstein y con el supuesto de uniformidad, en que se da un desplazamiento hacia el azul, correspondiente a una contracción del universo, en vez de darse un desplazamiento hacia el rojo. La existencia de tales modelos no es razón suficiente para rechazar la teoría de Einstein. Supone que la teoría no es completa; se requiere algún supuesto adicional que excluya los modelos no deseados. Se han sugerido varios supuestos, pero sin encontrar hasta el momento uno que satisfaga.

Examinemos un poco más detenidamente las consecuencias de la expansión. Y recordemos que lo dicho se puede volver a formular en función de la curvatura de espacio-tiempo si llega a ser necesario. La consecuencia más obvia es que si el universo, por decirlo de alguna manera, se está haciendo menos denso —si los racimos de las galaxias se están separando más y más— es porque en el pasado debieron estar más juntos de lo que ahora están. Supongamos que hemos filmado una película del universo en expansión, durante un período de muchos millones de años, para dejar constancia de toda la historia de la expansión. Si esta película se proyectara hacia atrás, mostraría la historia del universo al revés. En vez de apartarse los racimos de galaxias unos de otros, aparecerían moviéndose unos hacia otros. A medida que el film fuera corriendo hacia atrás, se irían juntando cada vez más, hasta estar tan juntos que posiblemente no hubiera entre ellos separación alguna. Más tarde todavía —podemos seguir suponiendo— incluso los espacios entre las estrellas estarían apretadísimos, ya que todo espacio disponible estaría

lleno de gas caliente, altamente condensado, del que podrían haber evolucionado las estrellas. Recientes observaciones astronómicas de ondas cortas de radio parecen confirmar la existencia de este estado de alta condensación. Sin embargo, las predicciones de modelos teóricos de este estado de condensación no pueden llevarse demasiado lejos. Lo que se conoce de las propiedades cuánticas de la materia sugiere que en un tiempo determinado en los orígenes estas propiedades podrían haber tenido importantes efectos. No hay acuerdo general sobre la época en que esto pudo haber sucedido exactamente, pero parece probable al menos que los efectos quantum no podrían desprejarse en una época en que el conjunto del mundo hoy observable estaba comprimido, digamos, al tamaño de un protón. Hemos visto que la teoría de Einstein es incapaz de describir tales efectos, de manera que no hay información fidedigna acerca de la naturaleza del universo en esta etapa de su expansión. Además, la posibilidad de los efectos quantum supone que nada de lo que ocurrió antes de un estado de tan alta condensación pudo influir posiblemente en el comportamiento ulterior del universo. Todo esto es bastante especulativo. Sólo podemos concluir de ello que si el universo ha evolucionado de hecho a partir de un estado de alta condensación, ese estado de alta condensación representa el tiempo más primitivo sobre el cual jamás se podrá tener con probabilidad ninguna información científica. Si tal estado se dio realmente o no todavía está en discusión. Los datos astronómicos de que disponemos no son lo bastante precisos para decidir la cuestión. Los que creen que este estado tuvo lugar se inclinan a vincular el estado de alta condensación al «principio del universo» o «al tiempo en que el universo fue creado», o algo por el estilo. Estas frases no significan más que «el tiempo más primitivo sobre el cual jamás se podrá tener probablemente información científica alguna», y es mejor evitarlas, porque acarrearán consecuencias metafísicas no deseables.

Hay otros modelos del universo coherentes con la ley de la gravitación de Einstein en los cuales el estado de alta concentración no figura para nada. El más conocido es el llamado modelo de estado-firme. Hemos visto que según el principio cosmológico, no se puede decir dónde te encuentras en el universo. Pero dos astrónomos que estuvieran en planetas de diferentes galaxias pueden decir dónde están; ambos, por ejemplo, observarán que el universo se va haciendo menos denso en el curso de la expansión. Y pueden

estar de acuerdo sobre el tiempo en que respectivamente han observado que han perdido espesor en una extensión determinada. En el modelo de estado firme, sin embargo, no se puede decir ni dónde ni cuándo se está. Es decir, se supone que, en el modelo de estado firme, presenta la misma apariencia general tanto a los astrónomos situados en diferentes lugares, como a los que se sitúan en los mismos o diferentes lugares en tiempos diferentes. La división en espacio y tiempo que parece estar jugando aquí no está en conflicto con la relatividad; se aplica solamente a los astrónomos que se mueven con los racimos de galaxias. Un astrónomo a una velocidad substancialmente diferente haría una descripción más complicada del universo. Nosotros preferimos, naturalmente, considerar aquellos cuyas descripciones son las más simples.

Para que la apariencia general del universo no cambie con el tiempo, a pesar de la expansión, es necesario que a medida que los racimos de galaxias se van aclarando, aparezcan otros nuevos en medio de ellos, para llenar los vacíos. ¿De dónde proceden los nuevos racimos? Según la teoría de estado firme, la materia debió aparecer en el espacio intergaláctico en una proporción suficiente para suprimir el adelgazamiento por expansión. Podemos suponer a esta materia en su forma inicial de gas hidrógeno, que sucesivamente se transforma en estrellas, galaxias y racimos. La proporción de esta presencia del hidrógeno se supone que fue muy pequeña: un átomo en el espacio del tamaño de la catedral de Londres cada mil años. Demasiado pequeña para quedar excluida en las observaciones directas, pero lo suficientemente grande para compensar el adelgazamiento por expansión. El proceso de la aparición del hidrógeno se llama con frecuencia “creación continua”. Pero éste es otro término que comporta connotaciones metafísicas y es mejor prescindir de él. A primera vista pudiera parecer que este proceso es contrario a las leyes de la conservación de la energía que forman parte de la teoría de Einstein. Si se tiene en cuenta la curvatura general del universo, resulta, sin embargo, que el proceso sugerido es perfectamente coherente con la relatividad. Naturalmente que la proporción en que aparecen los nuevos átomos no puede ser despreciable. Los nuevos átomos aparecen en la proporción exacta requerida para compensar la expansión.

Tal como están las cosas en el presente, algunos de los universos modelo que pronostican la expansión desde un estado de alta condensación son los

más fáciles de reconciliar con los datos astronómicos. Todos ellos tienen defectos. Y el más obvio es que sólo dan una representación plana que no tiene en cuenta el tamaño o la composición de las galaxias y racimos. El modelo de estado firme puede en alguna medida superar este defecto, pero falla en dar una explicación satisfactoria de algunos otros datos, por ejemplo, los que sugieren un estado de alta condensación en el pasado remoto.

La construcción de un modelo totalmente satisfactorio depende de la solución de algunas dificultades matemáticas serias. Cuál de los modelos disponibles se haya de preferir en un tiempo concreto ha de depender de los datos astronómicos.

## 12. Convencionalismos y leyes naturales

Uno de los problemas más difíciles en toda controversia es distinguir las discusiones sobre palabras de las discusiones sobre hechos: no debería ser difícil, pero en la práctica lo es. Esto es tan cierto en física como en otros campos. En el siglo XVII hubo un debate tremendo acerca del significado de «fuerza». Para nosotros, hoy, era obviamente un debate sobre cómo se había de definir la palabra «fuerza», pero en aquella época se pensaba que era mucho más. Uno de los fines del método de los tensores, empleado en las matemáticas de la relatividad, es eliminar lo que es puramente verbal (en un sentido amplio) dentro de las leyes físicas. Es, por supuesto, obvio que lo que depende de la elección de las coordenadas es «verbal» en el sentido establecido. Un hombre que rema avanza junto con la embarcación, pero mantiene una posición constante con relación al lecho del río mientras no levante el remo. Los liliputienses podrían discutir indefinidamente si este hombre se mueve o está quieto. La discusión sería sobre palabras no sobre hechos. Si elegimos coordenadas fijas en relación a la embarcación, el hombre avanza. Si elegimos coordenadas fijas en relación al lecho del río, está parado. Necesitamos expresar las leyes físicas de tal manera que aparezca cuándo queremos expresar la misma ley en relación a dos sistemas de coordenadas. Así, no nos desorientaremos al suponer que tenemos diferentes leyes cuando en realidad sólo tenemos una con diferentes palabras. Esto se lleva a cabo por el método de los tensores. Ciertas leyes que parecen plausibles en un lenguaje no pueden ser traducidas a otro. Son imponderables como leyes de la naturaleza. Las leyes que pueden traducirse a cualquier lenguaje de coordenadas tienen ciertas características: es una ayuda sustancial a la hora de buscar tales leyes de la naturaleza como la teoría de la relatividad el poder admitir que sea posible. De las leyes posibles, nosotros elegimos la más real de los cuerpos: la lógica y la experiencia se combinan en iguales proporciones para obtener esta expresión.

Pero el problema de llegar a las leyes auténticas de la naturaleza no se ha de resolver solamente por el método de los tensores. Se ha de poner en la tarea una buena dosis de cuidadosa reflexión. Algo de esto se hizo ya, especialmente por Eddington; pero queda todavía mucho más por hacer.

Pongamos una simple ilustración: imaginemos, como en la hipótesis de

la concentración de Fitzgerald, que las longitudes en una dirección son más cortas que en otra. Supongamos que un metro-medida que apunta hacia el norte tiene una longitud correspondiente a la mitad de otro que apunta al este. Supongamos también que lo mismo pueda aplicarse a todos los demás cuerpos. ¿Tiene esta hipótesis algún significado? Si tienes una caña de pescar de tres metros de longitud cuando apunta hacia el oeste, y la vuelves hacia el norte, seguirá midiendo tres metros, pues tu metro-medida habrá variado también. No «parecerá» más corta, porque tu ojo habrá quedado afectado en el mismo sentido. Si quieres comprobar el cambio, no ha de ser mediante una medida ordinaria, sino por un método como el experimento de Michelson-Morley, en el cual se utiliza la velocidad de la luz para medir longitudes. En tal caso, todavía debes decidir si es más fácil suponer un cambio de longitud o un cambio en la velocidad de la luz. El hecho experimental consistiría en que la luz emplea más tiempo en atravesar lo que según tu metro-medida es una distancia determinada en una u otra dirección, o, como sucede en el experimento de Michelson-Morley, que ésta debería ser más larga pero no lo es. Puedes acoplar tus medidas a tal hecho de varias maneras. En cualquier forma que las adoptes, siempre habrá un elemento convencional. Este elemento convencional se mantiene en las leyes que has adoptado después de haberte decidido por las medidas y con frecuencia adquiere formas sutiles y evasivas. Eliminar el elemento convencional es, en realidad, extraordinariamente difícil. Cuanto más se estudia el tema, mayor parece ser la dificultad.

Un ejemplo más importante es la cuestión del tamaño del electrón. Comprobamos experimentalmente que todos los electrones tienen el mismo tamaño. Hasta qué punto es esto un hecho genuino ratificado por la experiencia y hasta qué punto es el resultado de nuestros convencionalismos de medición? Debemos hacer aquí dos comparaciones diferentes: 1) en relación a un electrón en diferentes momentos; 2) en relación a dos electrones en el mismo tiempo. Podemos, pues, llegar a la comparación de dos electrones en diferentes tiempos combinando 1 y 2. Podemos desechar cualquier hipótesis que afecta a todos los electrones por igual. Sería inútil, por ejemplo, suponer que en una región de espacio-tiempo fueran mayores que en otra. Tal cambio afectaría tanto a los instrumentos de medición como a las cosas medidas, y, por tanto, no llevaría a descubrir ningún fenómeno. Equivale a decir que no habría cambio alguno. Pero el hecho de que dos electrones tengan la

misma masa, por ejemplo, no puede considerarse como algo simplemente convencional. Dada la suficiente minuciosidad y precisión, podríamos comparar los efectos de dos electrones diferentes con un tercero: si fueran iguales en parecidas circunstancias, podríamos deducir la igualdad en un sentido no puramente convencional.

Eddington describe el proceso vinculado a las partes más avanzadas de la teoría de la relatividad y lo llama «edificación del mundo». La estructura que se ha de construir es el mundo físico tal como lo conocemos. El arquitecto económico lo trata de construir con la menor cantidad posible de material. Es una cuestión de lógica y de matemáticas. Cuanto mayor sea nuestra habilidad técnica en estas dos disciplinas, más real será el mando que hagamos y menos contentos estaremos con los montones de piedras. Pero antes de que podamos emplear en nuestro edificio las piedras que suministra la naturaleza las tenemos que cortar en formas rectas: todo ello forma parte del proceso de edificación. Para que esto pueda ser posible, la materia prima ha de tener cierta estructura (que podemos concebir como análoga a la veta de la madera), pero casi cualquier estructura podrá servir. Por sucesivas precisiones matemáticas, vamos cortando nuestras exigencias iniciales hasta que su monto es muy pequeño. Dado este mínimo necesario de estructura en la materia prima, comprobaremos que podemos construir a partir de ella una expresión matemática que tendrá las propiedades necesarias para describir el mundo que percibimos —en particular, las propiedades de conservación que son características del impulso y de la energía (o de la masa). Nuestra materia prima constaba simplemente de sucesos. Pero cuando nos damos cuenta que podemos construir algo a partir de ella que, una vez medido, parece que no puede ser creado ni destruido nunca, no ha de sorprender que lleguemos a creer en los «cuerpos». En realidad son simples construcciones matemáticas más allá de los hechos. Pero debido a su permanencia son importantes en la práctica. Y nuestros sentidos (que probablemente se han desarrollado por necesidades biológicas) están adaptados para captarlos, más bien que el simple continuo de sucesos que teóricamente es más fundamental. Desde este punto de vista, asombra lo poco que la ciencia física nos revela acerca del mundo real: nuestro conocimiento está limitado no sólo por el elemento convencional sino también por la selectividad de nuestro aparato perceptivo.

En particular, se pueden crear totalmente las condiciones de simetría

por convencionalismos tales como la medida. Y no hay razón para suponer que representan cualquier propiedad del mundo real. La misma ley de la gravitación, según Eddington, puede ser considerada como expresión de convencionalismos de medida. «Los convencionalismos de medida —dice— introducen una isotropía<sup>4</sup> y homogeneidad en el espacio medido, que originalmente no necesita tener una contrapartida en la relación-estructura que está siendo estudiada. Esta isotropía y homogeneidad están expresadas exactamente en la ley de la gravitación de Einstein».

Las limitaciones del saber introducido por la selectividad de nuestro aparato perceptivo pueden ilustrarse por la indestructibilidad de la energía. Esto se ha ido descubriendo gradualmente por experiencia, y pareció una ley de la naturaleza empírica con buen fundamento. Ahora resulta que, desde nuestro continuo espacio-tiempo original, podemos construir una expresión matemática con propiedades que la hagan aparecer indestructible. La afirmación de que la energía es indestructible deja entonces de ser una proposición de la física para convertirse, por el contrario, en una proposición de la lingüística y de la psicología. Como proposición de la lingüística, «energía» es el nombre de la expresión matemática en cuestión. Como proposición de la psicología, nuestros sentidos son tales que nos damos cuenta de manera general de cuál es la expresión matemática en cuestión. Y nos estamos acercando cada vez más a ella a medida que vamos aquilatando nuestras percepciones de bulto por la observación científica. Es mucho menos de lo que los físicos solían creer que conocían sobre la energía.

El lector puede decir: ¿Qué queda entonces de la física? ¿Qué conocemos realmente en torno al mundo de la materia? Podemos distinguir tres secciones en la física. Hay una primera, incluida dentro de la teoría de la relatividad y divulgada lo más ampliamente posible. En segundo lugar, hay leyes que no pueden encuadrarse dentro de los fines de la relatividad. En tercer lugar, está lo que podemos llamar geografía. Veamos cada uno de ellos.

La teoría de la relatividad, prescindiendo de su convencionalismo, nos dice que los hechos del universo tienen un orden cuatridimensional. Afirma también que entre dos hechos que están próximos en este orden, hay una

---

<sup>4</sup>«Isotropía» significa que es similar en todas las direcciones, por ejemplo, que un metro-medida tiene la misma longitud tanto si señala al norte como si señala al este.

relación llamada «intervalo» que es capaz de ser medido si se toman las precauciones convenientes. Nos dice además que el «movimiento absoluto», el «espacio absoluto» y el «tiempo absoluto» no pueden tener significación física alguna. No son aceptables las leyes de la física que suponen estos conceptos. En sí mismo, esto difícilmente es una ley física. Se trata más bien de una regla práctica que nos permite rechazar como insatisfactorias algunas leyes físicas propuestas.

Además de esto, pocas cosas hay en la teoría de la relatividad que puedan considerarse como leyes físicas. Hay muchas matemáticas, que demuestran que ciertas cantidades matemáticamente elaboradas deben comportarse como las cosas que percibimos. Y se sugiere la existencia de un puente entre la psicología y la física. Para esta sugerencia las dimensiones construidas matemáticamente son lo que nuestros sentidos se adaptan a percibir. Pero ninguna de estas cosas es física en sentido estricto.

La parte de la física que, al presente, no puede reducirse a los fines de la relatividad es amplia e importante. No hay nada en la relatividad que muestre las razones de la existencia de electrones y protones. La relatividad no puede dar ninguna razón de por qué la materia existe en pequeñas masas. Éste es el campo de la teoría cuántica, que estudia muchas de las propiedades de la materia a pequeña escala. La teoría cuántica se ha hecho coherente con la teoría especial de la relatividad. Pero hasta el momento todos los intentos de realizar una síntesis de la teoría cuántica y de la relatividad general no han tenido éxito. Parece que existen dificultades muy serias en la forma de adaptar esta parte de la física dentro del marco de la relatividad general. En la actualidad hay igualmente serias dificultades en la propia teoría cuántica. Y muchos físicos piensan que una síntesis de la teoría cuántica y la de la relatividad general podría resolver algunas de estas dificultades. La situación presente, como hemos visto, es que la relatividad general tiene en cuenta bastante satisfactoriamente las propiedades de la materia a gran escala. La teoría cuántica, en cambio, se adapta de forma bastante satisfactoria a las propiedades de la materia a escala muy pequeña. Sin embargo, no hay conexión aparente entre las dos teorías, a no ser de cara a su campo común de la teoría especial de la relatividad. Esta situación no es satisfactoria y no es probable que sea permanente. Algunos piensan que la relatividad general debería extenderse de tal forma que explicara todos

los resultados que explica la teoría cuántica, pero de una manera más satisfactoria que la teoría cuántica actual. Hacia el final de su vida, Einstein era una de las personas que pensaban así. Sin embargo, muchos de los físicos de hoy piensan que esta idea es equivocada.

La teoría general de la relatividad es el ejemplo más extremo de lo que podríamos llamar métodos directos. La gravitación ya no necesita ser considerada como el efecto del sol sobre un planeta. Puede concebirse como la expresión de las características de la región en que se encuentre el planeta. Se supone que estas características se alteran poco a poco, gradualmente, continuamente, y no a saltos repentinos, como cuando uno se mueve de una a otra parte del espacio-tiempo. Los efectos del electromagnetismo pueden considerarse de manera similar, pero su carácter cambia totalmente tan pronto como se le fuerza a concordar con la teoría cuántica. A pesar de ello, si tratamos de aplicar a la gravitación estas ideas de la teoría quantum comprobamos que no se acoplan propiamente, y que es necesaria una alteración considerable en una teoría u otra o en las dos. Qué modificación sea necesaria, no lo sabemos todavía.

La dificultad puede explicarse de una manera un tanto diferente. Cuando un astrónomo observa el sol, éste mantiene una arrogante indiferencia ante sus procedimientos. Pero cuando un físico trata de averiguar lo que sucede en un átomo, el aparato que emplea es mucho mayor que la cosa que observa en vez de mucho más pequeño, y probablemente tendrá algún efecto sobre él.

Se ha comprobado que el tipo de aparato más adecuado para determinar la posición de un átomo se ve obligado a afectar a su velocidad, y el tipo de aparato más adecuado para determinar la velocidad afecta necesariamente a su posición. Esto no supone problema alguno cuando a la teoría cuántica de los átomos se la hace concordar con la teoría especial de la relatividad. Entonces se deja a un lado la gravitación, y se supone que el espacio-tiempo es plano tanto si los átomos están moviéndose en él o como si no. Pero si tratamos de acoplar la teoría cuántica a la teoría general de la relatividad, entonces, no se puede despreciar la gravitación, de manera que la curvatura del espacio-tiempo dependerá de la ubicación de los átomos. Sin embargo, como acabamos de ver, la teoría cuántica deja claro que no podemos saber

siempre dónde están los átomos. Aquí está la raíz de la dificultad. Llegamos finalmente a la geografía, en la que incluimos la historia. La separación de la geografía de la historia se apoya en la separación del tiempo del espacio cuando unimos los dos en espacio-tiempo, necesitamos una palabra para describir la combinación de geografía e historia. Por mor de la simplicidad, usaré únicamente la palabra geografía en este sentido amplio.

La geografía, en este sentido, incluye todo lo que, como materia sin acabar, distingue una parte del espacio-tiempo de otra. Una parte está ocupada por el sol, otra por la tierra. Las regiones intermedias contienen ondas luminosas, pero no materia (a excepción de una poca aquí y allá). Se da un cierto grado de conexión teórica entre los diferentes hechos geográficos. Establecerlo es la finalidad de las leyes físicas.

Todavía estamos en disposición de calcular los hechos importantes sobre el sistema solar, hacia atrás hacia adelante durante vastos períodos de tiempo. Pero en semejantes cálculos necesitamos una base de hechos elementales. Los hechos están entrelazados y sólo se pueden deducir de otros hechos, no solamente de leyes generales. Así, los hechos de la geografía tienen cierto status independiente en física. Ningún número de leyes físicas nos permitirá inferir un hecho físico a menos que conozcamos otros hechos como datos de nuestra inferencia. Y cuando hablo aquí de «hechos» estoy pensando en hechos concretos de geografía, en el sentido amplio en que vengo empleando el término.

En la teoría de la relatividad, nos interesa la estructura, no el material de que está compuesta la estructura. En geografía, por el contrario, el material es importante. Si hay diferencia entre un lugar y otro, ha de haber diferencias también entre el material de un lugar y de otro, o lugares en que hay material y lugares en que no lo hay. La primera de estas alternativas parece la más satisfactoria. Podríamos intentar expresarlo así: hay electrones y protones y otras partículas subatómicas, y el resto está vacío. Pero en las regiones vacías hay ondas luminosas, de forma que no podemos decir que allí no hay nada. Según la teoría cuántica, ni siquiera podemos decir exactamente dónde hay cosas, sino solamente que es más probable encontrar un electrón en un lugar que en otro. Algunos sostienen que las ondas luminosas, y también las partículas, son solamente perturbaciones del éter.

Pero en todo caso, los sucesos siguen ocurriendo allí donde hay o pueda haber ondas luminosas o partículas. Es todo lo que se puede decir respecto a los lugares donde probablemente hay energía en una forma u otra, ya que la energía es el resultado de una construcción matemática levantada sobre hechos. Podemos decir, pues, que hay sucesos en todas partes del espacio-tiempo. Pero deben ser de un tipo un tanto diferente según se trate de una región en que es probable que exista un electrón o protón, o con el tipo de región que comúnmente llamaríamos vacía. Pero en lo que se refiere a la naturaleza intrínseca de estos sucesos no podemos saber nada, a no ser que se conviertan en hechos de nuestra propia vida. Nuestras propias percepciones y sentimientos han de ser parte de la materia bruta de los acontecimientos que la física ordena dentro de un modelo, o más bien, que la física comprueba que están ordenados en un modelo. Por lo que respecta a los sucesos que no forman parte de nuestra vida, la física nos habla de su modelo, pero no nos puede decir nada de su naturaleza íntima. Ni parece posible que pueda ser descubierta por cualquier otro método.

### 13. La abolición de la «fuerza»

En el sistema newtoniano, los cuerpos no sometidos a la acción de ninguna fuerza, se mueven en línea recta con velocidad uniforme. Cuando los cuerpos no se mueven en este sentido, su cambio de movimiento se ha de atribuir a una «fuerza». Algunas fuerzas parecen inteligibles a nuestra imaginación. Tales son las que se ejercen por medio de una maroma o cuerda, por la colisión de cuerpos, o por cualquier otro tipo de empuje o arrastre. Como se explicó en uno de los primeros capítulos, nuestra evidente comprensión imaginativa de estos procesos es totalmente engañosa. Lo que realmente significa es que la experiencia pasada nos permite prever más o menos lo que va a suceder sin tener que acudir a cálculos matemáticos. Pero las «fuerzas» implicadas en la gravitación y en las formas menos conocidas de la acción eléctrica no parecen en este sentido «naturales» a nuestra imaginación. Parece extraño que la tierra pueda flotar en el vacío: lo natural sería suponer que debe caer. Por eso tiene que apoyarse en un elefante, y el elefante en una tortuga, según algunos sabios primitivos. La teoría newtoniana, además de la acción a distancia, introdujo otras dos novedades imaginarias. La primera fue que la gravitación no está siempre y esencialmente dirigida «hacia abajo», por llamarlo de alguna manera, es decir, hacia el centro de la tierra. La segunda fue que un cuerpo girando en un círculo con velocidad uniforme «no se mueve uniformemente» en el sentido en que esa frase se aplica al movimiento de los cuerpos que no están bajo ninguna fuerza. Dicho cuerpo gira fuera del curso recto hacia el centro del círculo, que requiere una fuerza que le empuja en esa dirección. De aquí que Newton llegara a la idea de que los planetas son atraídos hacia el sol por una fuerza llamada gravitación.

Todo este punto de vista, como hemos visto, ha sido superado por la relatividad. Ya no hay «líneas rectas» en el viejo sentido geométrico. Hay «líneas rectísimas», o geodésicas, pero éstas suponen tiempo y espacio. Un rayo-luz que atraviesa el sistema solar lo describe la misma órbita que un cometa, desde un punto de vista geométrico; no obstante, cada uno se mueve en una geodésica. Ha cambiado todo el panorama imaginario. Un poeta podría decir que el agua se despeña monte abajo porque es atraída por el mar. Pero un físico o un pobre mortal diría que en cualquier momento se mueve de una manera determinada a causa de la naturaleza del suelo, sin

mirar qué hay delante de él. Así como el mar no hace que el agua corra hacia él, de la misma manera el sol no es la causa de que los planetas giren a su alrededor. Los planetas se mueven alrededor del sol porque es lo más fácil —en el sentido técnico de la «menor acción». Lo más fácil a causa de la región en que están, no a causa de una influencia que emana del sol.

La supuesta necesidad de atribuir gravitación a una «fuerza» que atraiga los planetas hacia el sol, ha surgido de la determinación de mantener a toda costa la geometría euclidiana. Si suponemos que nuestro espacio es euclidiano, cuando en realidad no lo es, deberemos hacer que la física rectifique los errores de nuestra geometría. Encontraremos cuerpos que no se mueven en lo que nos empeñamos en llamar líneas rectas y exigiremos una causa de este comportamiento. Eddington ha tratado esta materia con lucidez admirable. Se imagina a un físico que ha supuesto la fórmula para el intervalo usada en la teoría especial de la relatividad, una fórmula que supone todavía que el espacio del observador es euclidiano. Prosigue:

Dado que los intervalos se pueden comparar por métodos experimentales, debería descubrir pronto que su fórmula para el intervalo no se puede conciliar con los resultados observables, y darse cuenta de su error. Pero la mente no se libera fácilmente de una obsesión. Es más probable que nuestro observador continúe en su opinión y atribuya la discrepancia de las observaciones a alguna influencia que está presente y que influye en el comportamiento de sus cuerpos-test. Introducirá, por hablar de alguna manera, un agente sobrenatural a quien culpará de las consecuencias de su error. [...] El nombre dado a ese agente que cause desviación del movimiento uniforme en una línea recta es la fuerza, según la definición newtoniana de fuerza. De aquí que el agente invocado a través del error de nuestro observador sea descrito como un «campo de fuerza» [...] Un campo de fuerza representa la discrepancia entre la geometría natural de un sistema de coordenadas y la geometría abstracta arbitrariamente adscrita al mismo.

Si la gente tuviera que aprender a concebir el mundo en el nuevo sentido, sin la antigua noción de «fuerza», alteraría no sólo su imaginación física, sino

también su moral y su política. El último efecto sería completamente ilógico, pero es, no obstante, probable en ese supuesto. En la teoría newtoniana del sistema solar, el sol semeja un monarca cuyos súbditos, los planetas, tienen que obedecer. En el mundo de Einstein hay más individualismo y menos gobierno que en el de Newton. Hay también menos agitación: ya hemos visto que la pereza es la ley fundamental del universo de Einstein. La palabra «dinámico» ha venido a significar, en lenguaje periodístico, «enérgico y vigoroso». Pero si se empleara para «ilustrar los principios de la dinámica», debería aplicarse a los habitantes de los climas cálidos que están tumbados bajo los plátanos esperando a que el fruto caiga hasta la boca. Espero que los periodistas del futuro, al hablar de una «personalidad dinámica», querrán indicar una persona que hace el menor esfuerzo en un momento dado, sin pensar en las consecuencias futuras. Si puedo contribuir a este resultado, no habré escrito en vano.

La gente acostumbra a sacar argumentos de las leyes de la naturaleza en torno a lo que debemos hacer. Tales argumentos me parecen un disparate: imitar a la naturaleza puede ser simplemente servil. Pero si la naturaleza, tal como la describe Einstein, ha de ser nuestro modelo, me parece que los anarquistas tienen el mejor de los argumentos. El universo físico es ordenado, no porque haya un gobierno central, sino porque cada cuerpo cuida su propio interés. Jamás dos partículas de materia entran en contacto. Cuando se aproximan mucho, las dos se apartan. Si un hombre estuviera a punto de derribar en tierra a otro, se mostraría científicamente correcto confesando que nunca le había tocado. Sucedió que había una montaña en el espacio-tiempo en la región de la nariz del otro hombre, y se cayó la montaña.

La abolición de «fuerza» parece estar vinculada con la sustitución de la vista por el tacto como fuente de las ideas físicas, como se explicó en el capítulo 1. Cuando una imagen se mueve en un espejo, nadie piensa que algo la ha empujado. En los lugares donde hay dos espejos opuestos uno frente a otro, se pueden ver innumerables reflejos del mismo objeto. Imaginemos a un caballero con un sombrero de copa frente a los espejos. En los reflejos fácilmente puede haber veinte o treinta sombreros de copa. Supongamos que alguien llega y hace saltar el sombrero del caballero con un bastón: los veinte o treinta sombreros de copa del caballero caerán al suelo al mismo tiempo. Pensamos que se necesita una fuerza para hacer saltar el sombrero de copa

«real», pero creemos que los veinte o treinta restantes se tambalean y caen, por así decirlo, por un simple capricho de imitación. Tratemos de abordar este tema un poco más seriamente.

Evidentemente, algo sucede cuando se mueve una imagen en un espejo. Desde el punto de vista de la visión, los hechos parecen tan reales como si no estuvieran en un espejo. Pero nada ha sucedido desde el punto de vista del tacto ni del oído. Cuando cae el sombrero de copa «real», hace un ruido. Los veinte o treinta del reflejo caen sin ruido. Si cae en el dedo de tu pie, lo sientes. Pero nosotros creemos que veinte o treinta personas en los espejos no sienten nada, aunque los sombreros de copa caigan sobre los dedos de sus pies. Todo esto es igualmente cierto en el mundo astronómico. No hace ruido, porque el sonido no puede caminar a través del vacío. En cuanto sabemos, no causa «sentimientos», puesto que no hay nadie en el sitio capaz de «sentir». El mundo astronómico, pues, apenas si parece más «real» o «sólido» que el mundo del espejo, y necesita menos «fuerza» para hacerlo mover.

El lector puede creer que me estoy entregando a una vaga sofistería. «Después de todo —puede decir—, la imagen en un espejo es el reflejo de algo sólido, y el sombrero de copa sólo se tambalea por la fuerza aplicada al sombrero real. El sombrero de copa del espejo no puede adoptar un comportamiento propio, tiene que copiar el real. Esto demuestra lo diferente que es la imagen del sol y de los planetas porque éstos no están obligados a imitar perpetuamente al prototipo. Por eso, sería mejor abandonar la idea de que una imagen es tan real como la de los cuerpos celestes.»

Hay, por supuesto, cierta verdad en ello. El problema está en descubrir exactamente qué verdad. En primer lugar, las imágenes no son imaginarias. Cuando ves una imagen, ciertas ondas luminosas perfectamente reales llegan a tus ojos. Y si cuelgas una tela sobre el espejo, estas ondas luminosas dejan de existir. Hay, sin embargo, una diferencia puramente óptica entre una «imagen» y una cosa «real». La diferencia óptica va ligada a esta cuestión de imitación. Cuando cuelgas una tela sobre el espejo no se distingue del objeto «real». Pero si apartas el objeto «real», la imagen desaparece también. Esto nos obliga a decir que los rayos-luz que forman la imagen sólo se reflejan en la superficie del espejo y que no proceden de un punto situado detrás de él, sino del objeto «real». Tenemos aquí un ejemplo de un principio general de gran

importancia. La mayoría de los sucesos del mundo no son hechos aislados, sino partes de grupos de hechos más o menos similares, tales que cada grupo está vinculado de una manera que se puede asignar a determinada pequeña región del espacio-tiempo. Tal es el caso de los rayos-luz que nos hace ver tanto el objeto como su reflejo en el espejo: todos emanan de un centro que es el objeto. Si pones un globo opaco alrededor del objeto y a una cierta distancia, el objeto y su reflejo son invisibles en cualquier punto fuera del globo.

Hemos visto que la gravitación, si bien ya no se considera como una acción a distancia, sigue estando vinculada a un centro: hay, por así decirlo, una montaña simétricamente dispuesta en torno a su cumbre. Y la cumbre es el lugar donde concebimos el cuerpo que se ha de unir con el campo gravitativo que estamos considerando. De una manera más sencilla, el sentido común agrupa todos los hechos pertenecientes a un mismo grupo y conectados con el mismo centro. Lo mismo puede decirse de dos personas, por ejemplo, que oyen el mismo ruido. Y por eso el reflejo en un espejo es menos «real» que el objeto reflejado, incluso desde el punto de vista o óptico, ya que los rayos-luz no se extienden en todas direcciones desde el punto donde la imagen parece estar, sino solamente en dirección frente al espejo, y sólo mientras el objeto reflejado permanece en posición. Esto ilustra la conveniencia de agrupar hechos unidos entre sí en torno a un centro, en el sentido que estudiamos más arriba.

Cuando examinamos los cambios en un grupo de objetos de esta naturaleza, comprobamos que son de dos clases. Los hay que afectan sólo a un miembro del grupo. Y hay otros que causan alteraciones conjuntas a todos los miembros del grupo. Si pones una vela frente a un espejo, y luego cuelgas una tela negra sobre el mismo, alteras solamente el reflejo de la vela vista desde varios sitios. Si cierras tus ojos, alteras su apariencia sólo para ti, pero no para los demás. Si colocas un globo rojo alrededor de él y a la distancia de un metro, alteras su apariencia en una distancia superior a un metro, pero no inferior a un metro. En todos estos casos, no piensas que la vela pueda haber cambiado. En realidad, en todos ellos, te das cuentas de que hay grupos de cambios unidos a un centro diferente o a una serie de centros diferentes. Cuando cierras los ojos, por ejemplo, tus ojos, no la vela, aparecen diferentes a cualquier otro observador: el centro de los cambios que están ocurriendo

son tus ojos. Pero cuando apagas la vela, su apariencia cambia por todas partes. En este caso dices que el cambio ha acaecido en la vela. Los cambios que acaecen en un objeto son los que afectan a todo el grupo de sucesos que tienen su centro en el objeto. Todo esto es solamente una interpretación del sentido común y un intento de explicar lo que queremos dar a entender cuando decimos que la imagen de la vela en el espejo es menos «real» que la vela. No hay un grupo unido de hechos situados en torno al lugar en que la imagen parece estar. Y cambios en la imagen que se centran en la vela, no en un punto del espejo. Esto da un significado profundamente verificable a la afirmación de que la imagen es «solamente» un reflejo. Nos permite, al mismo tiempo, concebir los cuerpos celestes, aunque sólo podemos verlos y no tocarlos, como más «reales» que una imagen en el espejo.

Ahora ya podemos comenzar a interpretar la sensata noción de un cuerpo que tiene «efecto» sobre otro, cosa que debemos hacer si queremos entender realmente el significado de abolición de fuerza. Supongamos que entras en un cuarto oscuro y que enciendes la luz: al instante ha cambiado la apariencia de todo lo que hay en el cuarto. Si todo lo del cuarto es visible porque refleja la luz eléctrica, este caso es en realidad análogo a la imagen del espejo. La luz eléctrica es el centro del que emanan todos los cambios. En este caso, el efecto se explica por lo que hemos dicho. El caso más importante es si el efecto es un movimiento. Imagina que sueltas un tigre en medio de una multitud en un día de fiesta. Todos se moverían y el tigre sería el centro de sus diversos movimientos. Una persona que pudiese ver a la gente pero no al tigre deduciría que en aquel lugar hay algo repulsivo. Decimos que en este caso el tigre produce un efecto sobre la gente. Y podríamos describir la acción del tigre sobre ella, caracterizándola de repulsiva. Sabemos, sin embargo, que huyen de algo que les está sucediendo, no simplemente porque el tigre esté donde está. Huyen porque pueden verle y oírle, es decir, porque ciertas ondas llegan a sus ojos y oídos. Si se pudieran hacer llegar hasta ellos estas ondas sin que hubiera tigre alguno, huirían con la misma rapidez, porque la proximidad les parecería igualmente desagradable.

Apliquemos ahora consideraciones similares a la gravitación del sol. La «fuerza» ejercida por el sol sólo difiere de la ejercida por un tigre, en que la una es atractiva y la otra repulsiva. En vez de actuar a través de ondas de luz o de sonido, el sol adquiere su fuerza aparente a través de las mo-

dificaciones del espacio-tiempo alrededor del sol. Como el rugido del tigre, son más intensas cuanto más cerca están de su causa. A medida que nos alejamos van disminuyendo más y más. Decir que el sol causa estas modificaciones de espacio es no añadir nada a lo que ya sabemos. Y lo que sabemos es que las modificaciones proceden según ciertas reglas, y que se agrupan simétricamente en torno al sol como centro. El lenguaje de causa y efecto sólo añade una serie de figuraciones sin relevancia, vinculadas al deseo, tensión muscular y cosas parecidas. Lo que podemos más o menos asegurar es simplemente la fórmula según la cual el espacio-tiempo queda modificado por la presencia de la materia de la gravitación. Más correctamente: podemos asegurar qué tipo de espacio-tiempo es la presencia de la materia de la gravitación. Cuando el espacio-tiempo no es exactamente euclidiano en una determinada región, sino que tiene un carácter no euclidiano que se hace cada vez más marcado a medida que nos acercamos a determinado centro; y cuando, además, el punto de partida desde Euclides obedece a cierta ley, entonces describimos este estado de cosas diciendo que en el centro hay una materia de gravitación. Pero esto es solamente una expresión compendiada de lo que ya conocemos. Lo que conocemos es acerca de los lugares donde no hay materia de gravitación, pero no sobre los lugares donde hay. El lenguaje de causa y efecto (del que «fuerza» es un caso particular) es de este modo un resumen de simple conveniencia para determinados fines. No representa nada que se pueda comprobar como auténtico en el mundo físico.

Y ¿qué decir de la materia? ¿Es también la materia tan sólo una simplificación de utilidad? Esta cuestión, por su amplitud, exige un capítulo aparte.

## 14. ¿Qué es la materia?

¿Qué es la materia? He aquí uno de los problemas constantemente planteados por los metafísicos y a los que se contesta en extensos libros de una oscuridad increíble. Yo no me planteo el problema como metafísico. Lo hago como persona que quiere buscar el talante de la física moderna y especialmente el de la teoría de la relatividad. Es evidente que, según lo aprendido de esta teoría, la materia no puede concebirse como se venía haciendo hasta ahora. Creo que estamos ya en disposición de decir más o menos lo que ha de ser la nueva concepción.

Tradicionalmente hubo dos concepciones de la materia; cada una de ellas ha tenido sus defensores desde que comenzó la especulación científica. Por una parte, estaban los atomistas, que pensaban que la materia constaba de pequeños corpúsculos incapaces de dividirse. Se suponía que chocaban entre sí para después rebotar en diversas direcciones. Después de Newton ya nadie creyó realmente que entraban en contacto, sino que se atraían y repelían mutuamente, moviéndose en órbitas alrededor unos de otros. Venían después los que creían que la materia es algo que se encuentra por todas partes, y que el verdadero vacío es imposible. Descartes difundió esta idea y atribuía los movimientos de los planetas a los vórtices del éter. La teoría newtoniana de la gravitación hizo que la idea de que existe materia por todas partes cayera en descrédito. Tanto más que Newton y sus discípulos pensaban que la luz se debía a las partículas reales que se desprenden de su fuente originaria. Pero cuando esta idea de la luz quedó desautorizada y se demostró que la luz constaba de ondas, renació la idea del éter como instrumento de la ondulación. Esta idea se hizo todavía más respetable al comprobarse que el éter jugaba el mismo papel en los fenómenos electromagnéticos que en la propagación de la luz. Se esperaba incluso que los átomos pudieran convertirse en una especie de movimiento del éter. En esta etapa, la concepción atómica de la materia, en conjunto, llevaba las de perder.

Dejando de momento la relatividad, la física moderna ha dado pruebas de la estructura atómica de la materia ordinaria, sin negar los argumentos en favor del éter, al que no se atribuye semejante estructura. El resultado fue una especie de compromiso entre dos concepciones, una de ellas aplicada a lo que se llamó materia «gruesa», la otra al éter. No cabe ninguna duda en

cuanto a los electrones y protones, si bien, como veremos enseguida, no deben concebirse como se concebían tradicionalmente. La verdad es que, según creo, la relatividad exige que se abandone la vieja concepción de «materia», que está infectada por la metafísica vinculada al concepto de «substancia». Y representa un punto de vista no realmente necesario a la hora de tratar los fenómenos. Es lo que ahora hemos de investigar.

En la vieja concepción, un trozo de materia era algo que sobrevivía a todo a través del tiempo. Por el contrario, ningún ser podía tener más que un lugar y un tiempo dado. Esta forma de contemplar las cosas evidentemente va unida a la completa separación entre espacio y tiempo en que la gente creía al principio. Cuando sustituimos espacio-tiempo por espacio y tiempo, es que esperamos naturalmente derivar el mundo físico de constituyentes igualmente limitados en el tiempo que en el espacio. Tales constituyentes son los llamados «sucesos». Un suceso no subsiste ni se mueve como el trozo tradicional de materia. Simplemente existe en un breve momento y después cesa. Un trozo de materia puede reducirse, de esta manera, a una serie de sucesos. Así como en la antigua concepción, un cuerpo extenso se componía de un número de partículas, ahora, cada partícula, siendo extensa en el tiempo, se ha de considerar como compuesta de lo que podemos calificar «partículas-suceso». La serie completa de estos sucesos cierra la historia de la partícula y la partícula se considera como si fuera su historia, no cierta entidad metafísica en la que se dan los sucesos. Esta idea se ha hecho necesaria porque la relatividad nos obliga a colocar tiempo y espacio en un nivel superior al que estaban en la vieja física.

Esta exigencia abstracta debe ponerse en relación con los hechos conocidos del mundo físico. Ahora bien, ¿cuáles son estos hechos conocidos? Concedemos que la luz consta de ondas que se desplazan con la velocidad recibida. Sabemos entonces mucho de lo que sucede en las partes del espacio-tiempo donde no hay materia. Es decir, sabemos que hay sucesos periódicos (ondas-luz) que obedecen a ciertas leyes. Estas ondas luminosas parten de los átomos. Y la moderna teoría de la estructura del átomo nos permite tener un amplio conocimiento acerca de las circunstancias en que parten y las razones que determinan su longitud de onda. No sólo podemos comprobar cómo se desplaza una onda-luz, sino también cómo se mueve su causa respecto a nosotros. Al decir esto, estoy suponiendo que podemos reconocer

una causa de la luz como idéntica en dos tiempos ligeramente diferentes.

En el capítulo anterior vimos cómo se puede formar un grupo de hechos unidos, todos ellos relacionados unos a otros por una ley, y todos ordenados en torno a un centro en el espacio-tiempo. Un grupo de hechos de esta naturaleza será la llegada a varios lugares de las ondas-luz emitidas por un breve relámpago de luz. No necesitamos suponer que algo particular está sucediendo en el centro. Ciertamente, no necesitamos suponer que sabemos lo que sucede allí. Lo que sabemos es que, como tema de geometría, el grupo de sucesos en cuestión está ordenado en torno a un centro, como las ondas que se ensanchan en un estanque cuando una mosca las ha tocado. Hipotéticamente podemos inventar un hecho que haya de suceder en el centro, y establecer leyes por las que se trasmite la perturbación consecuente. Este hecho hipotético aparecerá, pues, al sentido común como la «causa» de la perturbación. Contará también como un suceso en la biografía de la partícula de la materia que se supone ocupa el centro de la perturbación.

Descubrimos ahora no sólo que una onda-luz se desplaza desde un centro según cierta ley, sino también que, en general, va seguida muy de cerca por otras ondas-luz similares. El sol, por ejemplo, no cambia su apariencia de repente. Aun cuando una nube le atraviere durante un fuerte viento, la transición es gradual, aunque veloz. En este sentido, un grupo de hechos unidos a un centro en un punto del espacio-tiempo se sitúa en relación con otros grupos muy similares cuyos centros están en puntos próximos del espacio-tiempo. Para cada uno de estos otros grupos el sentido común inventa hechos hipotéticos similares, con el fin de que ocupen sus centros, y afirma que todos estos hechos hipotéticos son parte de una única historia. Es decir, inventa una «partícula» hipotética a la que han de ocurrir hechos hipotéticos. Sólo con este doble uso de la hipótesis, perfectamente innecesario en cada caso, podemos llegar a algo que se puede llamar «materia» en el viejo sentido de la palabra.

Para evitar hipótesis innecesarias, afirmamos que un átomo en un momento dado es las diversas perturbaciones del medio que le circunda y que en lenguaje ordinario podríamos decir que son «causadas» por él. Pero no tomaremos estas perturbaciones en el momento en cuestión para nosotros, ya que las haría depender del observador. Nos desplazaremos del átomo con

la velocidad de la luz y tomaremos la perturbación que encontramos en cada lugar a medida que lleguemos. La serie de perturbaciones muy similares, con casi exactamente el mismo centro, que encontramos existiendo poco antes o poco después, quedará definida como átomo, en un momento ligeramente anterior o ligeramente posterior. En este sentido, mantenemos todas las leyes de la física sin tener que recurrir a hipótesis innecesarias o entidades deducidas. Y nos mantenemos acordes con el principio general de economía que ha permitido a la teoría de la relatividad arrumbar tantos trastos inútiles.

El sentido común imagina que cuando ve una mesa, ve una mesa. Y es una gran alucinación. Cuando el sentido común ve una mesa, ciertas ondas luminosas llegan a sus ojos. Éstos, por su misma naturaleza y por su experiencia anterior, las asocian a ciertas sensaciones del tacto, así como al testimonio de otras personas que han visto también la mesa. Pero nada de esto nos llevó a la mesa misma. Las ondas luminosas causaban sensaciones en nuestros ojos, éstos causaban sensaciones en el nervio óptico, y a su vez éstos producían sensaciones en el cerebro. Cualquiera de ellos, al suceder sin los acostumbrados preliminares, nos habría llevado a tener las sensaciones que llamamos «visión de la mesa», aun cuando no hubiera habido mesa. (Por supuesto, que si la materia en general se ha de interpretar como grupo de sucesos, esto hay que aplicarlo también al ojo, al nervio óptico y al cerebro.) Por lo que respecta al sentido del tacto, cuando apretamos la mesa con nuestros dedos, hay que reconocer que hay una perturbación eléctrica en los electrones y protones de las puntas de nuestros dedos, producida, según la física moderna, por la proximidad de los electrones y protones de la mesa. Si la misma perturbación de la punta de nuestros dedos surgiera en cualquier otra forma, tendríamos las sensaciones, a pesar de no haber mesa. El testimonio de otras personas es un documento de segunda mano. Si a un testigo, en un tribunal de justicia, se le preguntase si había visto algún hecho, no se le permitiría responder diciendo que creía que sí basándose en el testimonio de otros a este respecto. En cualquier caso, el testimonio consta de ondas sonoras y exige una interpretación tanto psicológica como física. Su conexión con el objeto es, pues, muy indirecta. Por todas estas razones, cuando decimos que un hombre «ve una mesa», empleamos una forma ligeramente abreviada le expresión, que supone deducciones complicadas y difíciles, cuya validez bien puede ser sometida a revisión.

Pero corremos el peligro de vernos envueltos en cuestiones psicológicas, que debemos evitar cuanto podamos. Volvamos, pues, al punto de vista puramente físico.

Lo que deseo sugerir se puede expresar de la manera siguiente: Todo lo que sucede en cualquier parte, fruto de la existencia de un átomo, se puede explorar experimentalmente, al menos en teoría, a menos que se produzca de manera oculta. Pero lo que ocurre dentro del átomo (si es que algo ocurre allí) nos es absolutamente imposible de conocer: no existe un aparato imaginable que nos permita echar al menos una mirada a su interior. Un átomo es conocido por sus «efectos». Pero la palabra «efectos» da una idea de causa que no encaja en la física moderna, y en particular en la relatividad. Todo lo que estamos en condiciones de afirmar es que ciertos grupos de sucesos acaecen juntos, es decir, en partes correlativas del espacio-tiempo. Un determinado observador considerará a un miembro del grupo tan primero como al otro. En cambio, otro observador puede juzgar el tiempo-orden de distinta manera. Y aun cuando el tiempo-orden sea el mismo para todos los observadores, todo lo que en realidad tenemos es una conexión entre dos hechos, que actúa igualmente hacia atrás que hacia adelante. No es cierto que el pasado determine el futuro en sentido distinto al que el futuro determina el pasado: la diferencia aparente se debe solamente a nuestra ignorancia, ya que sabemos menos del futuro que del pasado. Es algo meramente accidental: podría haber seres que recordasen el futuro y tuvieran que deducir el pasado. Los sentimientos de tales seres en estas materias serían exactamente opuestas, pero no menos falaces.

Parece bastante claro que todos los hechos y leyes de la física pueden interpretarse sin suponer que la «materia» es algo más que grupos de sucesos, cuya naturaleza podríamos considerar de una manera natural como «causada» por la materia en cuestión. Ello no supone ningún cambio en los símbolos o fórmulas de la física: es simplemente una cuestión de interpretación de los símbolos.

Esta amplitud en la interpretación es una característica de la física matemática. Lo que conocemos son ciertas relaciones lógicas muy abstractas, que expresamos en fórmulas matemáticas. Sabemos también que en ciertos puntos llegamos a resultados que es posible demostrar experimentalmente.

Tomemos, por ejemplo, las observaciones del eclipse por las que se estableció la teoría de Einstein en lo relativo a la curvatura de la luz. La observación real constaba de medidas meticulosas de ciertas distancias sobre láminas fotográficas. Las fórmulas que se habían de verificar se referían al curso de la luz al pasar cerca del sol. Si bien la parte de estas fórmulas que da el resultado observado debe interpretarse siempre en el mismo sentido, la otra parte de las fórmulas puede ser susceptible de una gran variedad de interpretaciones. Las fórmulas que dan los movimientos de los planetas son casi exactamente las mismas en la teoría de Einstein que en la de Newton, pero el significado de las fórmulas es completamente distinto. Se puede decir de modo general que en el movimiento matemático de la naturaleza podemos asegurar con mucha mayor certeza que nuestras fórmulas son aproximadamente correctas, de lo que podamos asegurar acerca de la corrección de ésta o aquella interpretación de las mismas. Y éste es el caso de que se trata en este capítulo. La cuestión sobre la naturaleza de un electrón o de un protón no se resuelve en modo alguno porque sepamos todo lo que la física matemática tiene que decir en relación a las leyes de su movimiento y a las leyes de su interacción con el entorno. No es posible dar una respuesta concreta y concluyente a nuestra cuestión, precisamente porque hay gran variedad de respuestas compatibles con la verdad de la física matemática. No obstante, algunas respuestas son preferibles a otras, porque algunas tienen mayor probabilidad a su favor. En este capítulo, hemos tratado de definir la materia en el caso que haya de existir tal cosa, si es que las fórmulas de la física son verdaderas. Si en nuestra definición hubiéramos asegurado que una partícula de materia es lo que se concibe como trozo concreto, duro y substancial, no estaríamos seguros de que existiera tal cosa. Ésta es la razón de que nuestra definición, aunque pudiera parecer complicada, sea preferible desde el punto de vista de la economía lógica y de la cautela científica.

## 15. Consecuencias filosóficas

Las consecuencias filosóficas de la relatividad no son tan grandes ni tan desconcertantes como se ha pensado a veces. Arrojan poca luz sobre controversias un tiempo famosas, tales como entre realismo e idealismo. Algunos creen que apoyan la idea de Kant de que el espacio y el tiempo son «subjetivos» y que son formas de la intuición. Pienso que tales personas se han desorientado por la forma en que los escritores de la relatividad hablan del «observador». Es natural suponer que el observador es un ser humano, o al menos un espíritu. Pero es probable que sea también una cámara fotográfica o un reloj. Es decir, los extraños resultados relativos a la diferencia entre un «punto de vista» y otro están en relación con el punto de vista en un sentido aplicable tanto a los instrumentos físicos como a las personas con percepciones. La «subjetividad» aplicada a la teoría de la relatividad es una subjetividad física, que existiría igualmente caso de que no hubiera en el mundo cosas como la inteligencia o los sentidos.

Es, además, una subjetividad estrictamente limitada. La teoría no dice que todo es relativo. Por el contrario, da una técnica para distinguir lo que es relativo de lo que pertenece al hecho físico. Si dijéramos que la teoría apoya a Kant en su concepción del espacio y del tiempo, tendríamos también que decir que le rechaza en la de espacio-tiempo. Desde mi punto de vista, ninguna de las dos afirmaciones es correcta. No veo la razón de por qué, en tales cuestiones, los filósofos no hayan de mantener las ideas que mantenían anteriormente. Ni antes había argumentos concluyentes en ambos bandos, ni los hay ahora. Aferrarse a una de las dos ideas demuestra un talante dogmático más que científico.

No obstante, cuando las ideas que integran la obra de Einstein se hayan hecho familiares, como sucederá cuando se enseñen en las escuelas, reportarán probablemente ciertos cambios en nuestros hábitos mentales y tendrán una gran importancia a largo plazo.

De todo esto se desprende que la física nos dice mucho menos sobre el mundo físico de lo que hubiéramos pensado. Casi todos los «grandes principios» de la física tradicional resultan ser como la «gran ley» de que siempre hay mil metros en un kilómetro. Otros, en cambio, resultan totalmente falsos.

La conservación de la masa puede servir para ilustrar estas dos desventajas a que da lugar una «ley». Se solía definir la masa como «cantidad de materia» que sometida a experimento demostraba no aumentar ni disminuir nunca. Pero con la mayor precisión de las medidas modernas se llegaron a averiguar cosas curiosas. En primer lugar, se comprobó que al ser medida, la masa aumentaba con la velocidad. Se pudo comprobar también que este tipo de masa equivalía a energía. Además, este tipo de masa no es constante para un cuerpo determinado. La propia ley, sin embargo, se ha de considerar como una perogrullada, lo mismo que la «ley» de que mil metros hacen un kilómetro. Es un resultado de nuestros métodos de medida y no expresa una verdadera propiedad de la materia. Hay otro tipo de masa, que podemos llamar «masa propia de un cuerpo». Es la que un observador que se mueve con el cuerpo comprueba que es la masa de éste. Es el caso normal en la tierra de que el cuerpo que pesamos no vuela a través del aire. La «masa propia» de un cuerpo es casi constante, pero no totalmente. Se podría suponer que si tienes cuatro pesas de un kilo y las pones juntas en una balanza, pesarán cuatro kilos. Es una decepción dolorosa: pesan bastante menos, aunque no lo suficiente para ser descubierto por las medidas más exactas. En el caso de nuestros cuatro átomos de hidrógeno, sin embargo, cuando se juntan para formar un átomo de helio, la diferencia es detectable. El átomo de helio podemos comprobar que pesa menos que los cuatro átomos separados de hidrógeno.

Hablando de manera general, la física tradicional se ha desgajado en dos partes: perogrulladas y geografía.

El mundo que presenta la teoría de la relatividad a nuestra imaginación no es tanto un mundo de «cosas» en «movimiento» como un mundo de sucesos. Es cierto que sigue habiendo partículas que parecen persistir, pero éstas (como vimos en el capítulo anterior) se han de concebir como eslabones de hechos unidos, como las sucesivas notas de un canto. Los sucesos son el material de la teoría de la relatividad. Entre dos hechos que no estén demasiado alejados entre sí existe en la teoría general, y en la especial, una relación mensurable llamada «intervalo» que parece ser la realidad física de cuyo lapso de tiempo y distancia en el espacio son dos representaciones más o menos confusas. Entre dos hechos distantes, no hay ningún intervalo definido. Pero hay una forma de movimiento de un suceso a otro que hace la

suma de todos los pequeños intervalos a lo largo de la ruta mayor que cualquier otra ruta. Esta ruta se llama «geodésica» y es la ruta que elegirá un cuerpo si se le deja abandonado a sí mismo.

El conjunto de la física de la relatividad es una materia que se ha de recorrer paso a paso mucho más que la física y la geometría de los primeros tiempos. Las líneas rectas de Euclides deben reemplazarse por rayos-luz, que no se identifican con el modelo euclidiano de línea recta cuando pasan cerca del sol o de cualquier otro cuerpo muy pesado. La suma de los ángulos de un triángulo se piensa que es todavía dos ángulos rectos en regiones muy pequeñas del espacio vacío, pero no en una región extensa. Proposiciones que se solían demostrar por razonamiento se han convertido ahora en convencionalismos o simplemente en la aproximación de verdades verificadas por la observación.

Es un hecho curioso —del que la relatividad no es el único ejemplo— que, a medida que aumenta el razonamiento, sus títulos en cuanto a la capacidad de probar los hechos disminuyen cada vez más. Se solía pensar que la lógica nos enseñaba a sacar conclusiones; ahora nos enseña más bien a no sacarlas. Los animales y los niños están terriblemente inclinados a la inferencia o deducción: un caballo queda sorprendido sobremanera si se le somete a una carrera no habitual. Cuando los hombres comenzaron a razonar, trataron de justificar las deducciones que habían sacado irreflexivamente en los primeros tiempos. Buena parte de la mala filosofía y de la mala ciencia fueron el resultado de esta propensión. Los «grandes principios», tales como la «uniformidad de la naturaleza», la ley de la «causalidad universal», etc., son intentos de apoyar nuestra creencia de que lo que sucede con frecuencia volverá a suceder otra vez. Principio no mejor fundado que la creencia del caballo de que le llevarás por el camino que acostumbras. No es fácil en conjunto ver cómo se han de reemplazar en la práctica de la ciencia estos pseudoprincipios. Pero quizá la teoría de la relatividad nos da un destello del género de cosas que esperamos. La causalidad, en el viejo sentido, ha dejado de ocupar un lugar en la física teórica. Hay, por supuesto, otra cosa que toma su lugar, pero el sustituto parece tener una mejor base empírica que el viejo principio desplazado.

El colapso de la noción de tiempo que comprende todo, en el que caben

todos los sucesos del universo, ha de afectar a la larga a nuestras ideas, lo mismo que causa y efecto, evolución y muchos otros conceptos. La cuestión, por ejemplo, de si en conjunto hay progreso en el universo, puede depender de nuestra elección de la medida del tiempo. Si elegimos una serie de relojes igualmente buenos, podemos comprobar que el universo progresa tanto como cree el más optimista de los americanos. Si elegimos otros relojes igualmente buenos, podemos llegar a creer que el mundo va de mal en peor, tal como podría imaginar el más melancólico de los eslavos. De esta manera el optimismo y pesimismo no son ni verdaderos ni falsos, sino que dependen de la elección que hagamos de los relojes. El efecto de esto sobre cierto tipo de emoción es desolador. El poeta habla de

Un suceso divino lejano  
en torno al cual se mueve toda la creación.

Pero si el suceso está lo suficientemente lejano, y la creación se mueve con la suficiente rapidez, algunas partes seguirán juzgando que el acontecimiento ha sucedido ya, mientras que otros juzgarán que está todavía en el futuro. Esto es destrozar la poesía. El segundo verso debería ser:

Al que siguen algunas partes del universo,  
mientras que otras se alejan de él.

Pero no es éste mi propósito. Lo que sugiero es que una emoción que se puede destruir por una pequeña operación matemática no es ni genuina ni muy válida. Esta argumentación nos llevaría a la crítica de la época victoriana, lo cual cae fuera de mi propósito.

Lo que sabemos del mundo físico, repito, es mucho más abstracto de lo que antes se creía. Entre los cuerpos hay incidentes, tales como las ondas luminosas. De las leyes de estas incidencias sabemos algo —más de lo que se puede expresar en fórmulas matemáticas—, pero de su naturaleza no conocemos nada. De los cuerpos mismos, como vimos en el capítulo anterior, sabemos tan poco que ni siquiera podemos estar seguros de que son algo: pueden ser simples grupos de sucesos en otros lugares, sucesos que podríamos considerar naturalmente cómo sus efectos. Por supuesto que interpretamos

el mundo de un modo gráfico. Es decir, imaginamos lo que pasa más o menos como lo que vemos. Pero en realidad esta semejanza sólo se puede extender a ciertas propiedades lógicas formales que expresan la estructura, de tal forma que lo que conocemos son ciertas características generales de sus cambios. Quizás una ilustración nos haga ver claro este punto. Entre una pieza de música orquestal interpretada y la misma pieza de música escrita en el pentagrama hay cierta semejanza, que se puede describir como semejanza de estructura. La semejanza es de tal naturaleza que, cuando se conocen las reglas, se puede deducir la música de la notación o la notación de la música. Pero supongamos que hubieras sido de nacimiento sordo como una tapia, pero que hubieras vivido entre músicos. Podrías entender, si hubieras aprendido a hablar y a deletrear, que las notas musicales representaban algo totalmente diferente de ellas mismas en cuanto a calidad intrínseca, si bien similar en cuanto a estructura. El valor de la música sería para ti algo inimaginable, aun cuando pudieras deducir todas sus características matemáticas, puesto que son las mismas que las de las notas. Ahora bien, nuestro conocimiento de la naturaleza es algo parecido a esto. Podemos leer las notas y deducir lo mismo que nuestro hombre, sordo como una tapia, pudo haber deducido sobre la música. Pero no tenemos las ventajas que el sacó de su vinculación con personas dedicadas a la música. No podemos saber si la música representada por las notas es bella o estridente. En última instancia, quizá, ni siquiera podemos estar seguros de que las notas representen algo más que a sí mismas. Pero esto es una duda que el físico, en su capacidad profesional, no puede permitirse.

Suponiendo a lo sumo que se pueda tener por física, no nos dice nada sobre qué es lo que cambia, o cuáles son sus diversos estados. Sólo nos dice cosas como los cambios que se suceden periódicamente, o se extienden con determinada rapidez. Incluso ahora no estamos probablemente al final del proceso de desnudación de lo que es simple imaginación, para poder llegar a la meta del verdadero conocimiento científico. La teoría de la relatividad ha constituido un verdadero progreso a este respecto, y al proceder de esta manera nos ha acercado más y más a la estructura desnuda, que es la meta del matemático; no porque sea la única cosa en que está interesado como ser humano, sino porque es la única cosa que puede expresar en fórmulas matemáticas. Pero aunque hayamos llegado muy lejos en el sentido de la

abstracción, quizá tengamos que llegar más lejos todavía.

En el capítulo anterior sugerí lo que puede llamarse una definición mínima de materia, es decir, aquella en que la materia tiene, por así decirlo, la mínima «substancia» compatible con la verdad de la física. Al adoptar una definición de este género, nos estamos curando en salud: nuestra tenue materia existirá, a pesar de que exista también algo más succulento. Tratamos de efectuar nuestra definición de materia, como las gachas de Isabel en Jane Austen: «ligeras, pero no tanto». Caeríamos, sin embargo, en un error si dijéramos positivamente que la materia no es más que esto. Leibniz pensaba que un trozo de materia era realmente una colonia de almas. No hay nada que demuestre que estuviera equivocado, como tampoco que estuviera en lo cierto: no sabemos más sobre esto de lo que sabemos respecto a la flora y fauna de Marte.

Para el espíritu no matemático, el carácter abstracto de nuestro conocimiento físico puede parecerle poco satisfactorio. Desde un punto de vista artístico o imaginativo, es quizá doloroso, pero desde un punto de vista práctico no tiene consecuencias. La abstracción, a pesar de su dificultad, es la fuente del poder práctico. Un financiero, cuyos tratos con el mundo son más abstractos que los de cualquier otro hombre “práctico”, es también más poderoso que cualquier hombre práctico. Puede tratar en trigo o algodón sin necesidad siquiera de haberlos visto: todo lo que necesita saber es si subirán o bajarán. Tal es el conocimiento matemático abstracto, al menos cuando se le compara con el conocimiento del agricultor. De modo semejante, el físico que no conoce nada de la materia a excepción de ciertas leyes de sus movimientos, conoce no obstante lo suficiente para permitirle su manipulación. Después de pasar por una sucesión de ecuaciones en que los símbolos representan cosas cuya intrínseca naturaleza jamás nos será conocida, llega por fin a un resultado que se puede interpretar en función de nuestras propias percepciones y ser utilizado para poner en práctica efectos deseados en nuestras propias vidas. Lo que sabemos sobre la materia, por abstracto y esquemático que sea, es suficiente en principio para decirnos las reglas según las cuales produce percepciones y sentimientos en nosotros. Y los usos prácticos de la física dependen de estas reglas.

La conclusión final es que sabemos muy poco, y sin embargo, es asombro-

so lo mucho que conocemos. Y más asombroso todavía que un conocimiento tan pequeño nos pueda dar tanto poder.