JAMES R. NEWMAN

LA GRAN IDEA DE EINSTEIN

Libros Tauro

JAMES R. NEWMAN

LA GRAN IDEA DE EINSTEIN

James R. Newman se ha distinguido por igual como jurista y como autor de libros sobre matemáticas. En el ejercicio de la primera de esas aptitudes enseñó en la Escuela de Derecho de Yale y sirvió como asesor de la Casa Blanca en materia de legislación científica y como consejero de la Comisión Especial de Energía Atómica. Entre sus libros cabe mencionar: Las matemáticas y la imaginación (escrito en colaboración con Edward Kasner), El control de la energía atómica (con Byron Milner) y, recientemente, la monumental obra en cuatro volúmenes El mundo de las matemáticas. Actualmente trabaja en una biografía sobre Miguel Faraday.

*To the eyes of the man of imagination,
nature is imagination itself¹.*

WILLIAM BLAKE

¹ A los ojos del hombre de imaginación, la naturaleza misma es imaginación.
(N. del T.).

Einstein murió hace cuatro años. Cincuenta años antes, a la edad de veintiséis años, expuso una idea que sacudió el mundo: una idea que revolucionó nuestra concepción del universo físico y cuyas consecuencias conmovieron a la sociedad humana. Desde que la ciencia adquirió impulso en el siglo XVII, solamente otros dos hombres, Newton y Darwin, han producido un estremecimiento semejante en el mundo del pensamiento.

Todos saben que Einstein realizó algo notable; pero ¿en qué consiste, exactamente, su proeza? Aun entre los hombres y mujeres cultos, pocos son los que pueden contestar. Nos conformamos con saber de la importancia de su teoría, aunque sin comprenderla. Es esta circunstancia la responsable en gran medida del aislamiento de la ciencia moderna. Lo cual es malo para nosotros y malo para la ciencia; por consiguiente, en el deseo que existe de comprender a Einstein se halla en juego algo más que la mera curiosidad.

La relatividad es un concepto difícil, erizado de asperezas matemáticas. Se han hecho de ella muchos resúmenes con carácter de divulgación, algunos de ellos buenos; pero es erróneo esperar que esas exposiciones transporten cómodamente al lector a lo largo de la teoría, como a un príncipe tendido en su palanquín. Sin embargo, la relatividad es, en algunos respectos, más simple que la teoría a la cual reemplazó. La estructura del mundo físico es en ella más susceptible de prueba por el experimento; ella reemplaza a un esquema grandioso de espacio y de tiempo con un esquema más práctico. El sistema mayestático de Newton era digno de los dioses; el sistema de Einstein se aviene mejor con criaturas como nosotros, de inteligencia limitada y débiles ojos.

Pero la relatividad es esencialmente algo nuevo. Ella nos fuerza a cambiar hábitos mentales profundamente enraizados. Exige que nos liberemos a nosotros mismos de una perspectiva provincial. Reclama que abandonemos convicciones durante mucho tiempo mantenidas y que se han hecho sinónimo de sentido común; y es como si renunciáramos a una imagen del mundo que parece tan natural y tan obvia como el hecho de que las estrellas están encima de nosotros. Podría ser que con el tiempo las ideas de Einstein llegaran a parecer sencillas; pero nuestra generación tiene la pesada tarea de ser la primera en hacer a un lado lo viejo y emprender lo nuevo. Quienquiera que desee comprender el mundo del siglo XX está obligado a realizar este esfuerzo.

En 1905, cuando trabajaba de inspector en la Oficina de Patentes de Suiza, Einstein publicó en los *Annalen der Physik* un trabajo de treinta páginas intitulado "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento". Este artículo encerraba una visión. No sólo los poetas y los profetas tienen sus visiones; también un científico joven -ocurre principalmente con los jóvenes- puede vislumbrar en un relámpago una cima distante que ningún otro ha visto. Tal vez no vuelva a verla nunca, pero ya el paisaje ha cambiado para siempre. Ese solo relámpago ha sido suficiente; el hombre de ciencia empleará su vida describiendo lo que ha visto, interpretando y elaborando su visión, abriendo nuevas avenidas para otros exploradores.

En el núcleo de la teoría de la relatividad se encuentran problemas relacionados con la velocidad de la luz. El joven Einstein comenzó a rumiarlos mientras era aún un estudiante del colegio. Suponed -preguntóse a sí mismo- que una persona pudiera correr tan rápido como un rayo de luz; ¿cómo se le aparecerían los objetos? Imaginad que pudiera ir cabalgando sobre el rayo de luz, con un espejo delante. En tal caso, como un vampiro de un mundo imaginario, no produciría imagen alguna, porque como la luz y el espejo viajan en la misma dirección y a la misma velocidad, la luz no puede herir jamás al espejo y por lo tanto no puede haber reflexión.

Pero esto vale sólo para su espejo. Imaginad ahora un observador inmóvil, igualmente provisto de un espejo, atento al viajero que pasa en un destello. Es obvio que el espejo del observador captará la imagen del viajero. En otras palabras, los fenómenos ópticos que rodean a este hecho son puramente relativos. Existen para el observador; no existen para el viajero. Esto era una paradoja desconcertante, que contradecía en forma abierta las ideas vigentes sobre los fenómenos ópticos. Tenemos que ver por qué.

La velocidad de la luz había ocupado por mucho tiempo la atención de físicos y astrónomos. En el siglo XVII, el astrónomo danés Römer descubrió que la luz necesitaba tiempo para propagarse. Se efectuaron posteriormente mediciones cada vez más precisas de esa velocidad y, hacia el final del siglo XIX, la opinión establecida era que la luz viajaba siempre en el espacio a una velocidad constante de aproximadamente 300.000 kilómetros por segundo.

Pero surgía entonces un nuevo problema. En la mecánica de Galileo y Newton se considera que el reposo y el movimiento uniforme (es decir, la velocidad constante) no pueden distinguirse. De dos cuerpos, A y B, sólo puede decirse que uno de ellos está, en movimiento relativo al otro. El tren se desliza por la plataforma; o la plataforma se desliza por el tren. La Tierra se aproxima a las estrellas fijas; o éstas se aproximan a ella. No hay manera de decidir cuál de estas alternativas es la verdadera. Y en la ciencia de la mecánica, la decisión es indiferente.

Por consiguiente, una de las cuestiones que se planteaban era si, en lo que respecta al movimiento, la luz misma era como un cuerpo físico; o sea, si su movimiento era relativista en el sentido newtoniano, o absoluto.

Para contestar esta pregunta apareció la teoría ondulatoria de la luz. La onda es un movimiento progresivo en un medio determinado; una onda sonora, por ejemplo, es un movimiento de partículas de aire. Las ondas luminosas se movían -tal era la hipótesis- en un medio

omnipervasivo llamado éter. Suponíase que el éter era como una gelatina sutil dotada de maravillosas propiedades. Era incolora, inodora, sin notas perceptibles de ninguna clase. Podía penetrar toda la materia. Vibraba al transmitir la luz. Se afirmaba, además, que el éter en su conjunto era estacionario. Para el físico, esta propiedad era la más importante, puesto que, estando en reposo absoluto, el éter ofrecía un marco singular de referencia para determinar la velocidad de la luz. Por consiguiente, mientras era vano el intento de determinar la velocidad absoluta de un objeto físico debido a que no podía disponerse de un marco absolutamente inmóvil de referencia contra el cual medirla, no ocurría lo mismo para el caso de la luz; el éter, según se pensaba, satisfacía el requisito.

El éter, sin embargo, no llenaba esa necesidad. Sus mágicas propiedades lo convertían en el terror de los experimentadores. ¿Cómo podía medirse el movimiento contra un ectoplasma, contra una sustancia no más sustantiva que una idea? Hasta que al final dos físicos norteamericanos, A. A. Michelson y E. W. Morley, aparejaron un instrumento de magnífica precisión, llamado interferómetro, con el cual esperaban descubrir alguna prueba de la relación entre la luz y el éter hipotético. Si la Tierra se mueve a través del éter, un rayo de luz viajando en la dirección del movimiento de la Tierra debería moverse a través del éter a mayor velocidad que un rayo de luz que viajare en la dirección opuesta. Además, así como una persona puede cruzar un río y volver, más rápido que otra persona que nadare la misma distancia aguas arriba y aguas abajo, de igual modo podría esperarse que un rayo de luz, en análogos desplazamientos a través del éter, completaría el cruce de ida y vuelta más rápido que el viaje de arriba-abajo.

Este razonamiento constituía la base del experimento Michelson-Morley. Realizaron éstos un número de pruebas en que compararon la velocidad de un rayo de luz moviéndose a través del éter en la dirección del movimiento de la Tierra y otro rayo luminoso viajando en dirección perpendicular a este movimiento. Existía toda razón para creer que estas velocidades serían diferentes. Sin embargo, no se observó ninguna

diferencia. La posibilidad de que la Tierra arrastrara el éter consigo fue eliminada, con lo que la investigación llegaba a un punto muerto. Tal vez no había diferencia; tal vez no había éter. Los hallazgos de Michelson-Morley eran una verdadera paradoja.

Varias ideas se arbitraron para resolverla. La más imaginativa, y también la más fantástica, fue adelantada por el físico irlandés G. F. Fitzgerald. Sugirió éste que siendo la materia, en esencia, eléctrica; y manteniéndose su cohesión por fuerzas eléctricas, podía contraerse en la dirección de sus movimientos a medida que se desplazaba a través del éter. La contracción sería muy pequeña; sin embargo, en la dirección del movimiento la unidad de longitud sería más corta. Esta hipótesis explicaría el resultado del experimento Michelson-Morley. Los brazos de los interferómetros de éstos podrían contraerse a medida que la Tierra rotara; esto acortaría la unidad de medida y anularía el aumento de velocidad impartido a la luz por la rotación de la Tierra. Las velocidades de los dos rayos -en la dirección del movimiento de la Tierra y en ángulo recto con éste - aparecerían iguales. La idea de Fitzgerald fue elaborada por el famoso físico holandés H. A. Lorentz, quien le dio una forma matemática y relacionó la contracción causada por el movimiento con la velocidad de la luz. De acuerdo con su aritmética, la contracción era justo lo suficiente para explicar los resultados negativos del experimento Michelson-Morley. Ahí quedó el problema hasta que Einstein vino a retomarlo.

Einstein conocía las comprobaciones de Michelson-Morley. Conocía además otras inconsistencias del esquema contemporáneo del mundo físico. Una de ellas era la leve pero continua desviación (considerado el fenómeno según los conceptos clásicos) del planeta Mercurio en movimiento dentro de su órbita; perdía velocidad (a un ritmo insignificante, es verdad: cuarenta y tres segundos de arco cada siglo), pero la teoría de su movimiento, establecida por Newton, era exacta, y no había forma de explicar la discrepancia. Otra era la bizarra bufonada de los electrones que, según lo descubrieron W. Kaufmann y J. J. Thomson, aumentaban su masa en la medida de su velocidad. La

pregunta que se planteaba era la siguiente: ¿podían superarse estas incongruencias con parches y remiendos de las teorías clásicas? ¿O había llegado el momento para una renovación copernicana?

Yendo por su propio camino, Einstein se volvió hacia otro aspecto del problema de la velocidad. Las mediciones de velocidad involucran mediciones de tiempo; y las mediciones de tiempo, según él percibía, involucraban el concepto de simultaneidad. ¿Es este concepto simple e intuitivamente claro? Nadie ponía en duda que lo era; pero Einstein exigió pruebas.

Entro en mi estudio por la mañana en el momento en que el reloj de pared comienza a dar la hora. Es obvio que estos hechos son simultáneos. Suponed, no obstante, que al entrar en el estudio escucho la primera campanada del reloj de la ciudad, ubicado a una milla de distancia. Ha transcurrido cierto tiempo para que el sonido llegara hasta mí; por lo tanto, aunque la onda sonora ha golpeado en mis oídos en el momento en que yo entraba en el estudio, el hecho productor de la misma no ha sido simultáneo con mi entrada.

Considerad ahora otro tipo de señal. Veo la luz que llega de una estrella distante. Un astrónomo me explica que la imagen vista por mí no es la de la estrella en el momento actual, sino la de la estrella tal como era en el año en que Bruto asesinó a César. ¿Qué significa la simultaneidad en este caso? ¿Es mi *aquí y ahora* simultáneo con el *allá y entonces* de la estrella? ¿Puede tener sentido hablar de la estrella tal como era cuando Juana de Arco fue quemada, aun cuando deberán transcurrir diez generaciones antes de que la luz emitida aquel día por la estrella llegue a la Tierra? ¿Cómo puedo estar seguro de que llegará alguna vez? En una palabra, ¿el concepto de simultaneidad para diferentes lugares es exactamente equivalente al concepto de simultaneidad para uno y el mismo lugar?

No tardó Einstein en convencerse de que la respuesta es no. La simultaneidad, a su juicio, depende de las señales; la velocidad de la luz (u otra señal) debe, por consiguiente, incluirse en el contenido

significativo del concepto. No solamente la separación de los hechos en el *espacio* oscurece el problema de la simultaneidad en el *tiempo*, sino que también puede hacerlo el movimiento relativo. Un par de hechos que un observador declara simultáneos puede aparecer como habiéndose producido en tiempos diferentes para otro observador en movimiento respecto del primero. En su propia reseña popular de la relatividad (véase págs. 244-5), Einstein ha dado un ejemplo fácil y convincente para demostrar que toda medida de tiempo es medida con respecto a un observador determinado. Una medida válida para un observador puede no ser válida para otro. En rigor, la medida no es válida si se intenta extraerla del sistema dentro del cual fue tomada para aplicarla a un sistema en movimiento relativo al primero.

Einstein se hallaba, pues, en posesión de los hechos siguientes. Medir la velocidad de la luz requiere una medida de tiempo. Esto involucra un juicio de simultaneidad. La simultaneidad no es un hecho absoluto, idéntico para todos los observadores. El juicio de cada observador depende del movimiento relativo.

Pero no terminan aquí las consecuencias. Otra inferencia surge por sí misma: a saber, que la simultaneidad pueda hallarse implicada también en la medición de distancias. El pasajero de un tren en movimiento que desee medir la longitud de su coche no tiene dificultades para hacerlo. Provisto de un metro, puede realizar la tarea con la misma facilidad que si estuviera midiendo su habitación en casa. No ocurre lo mismo con un observador en reposo que mira pasar el tren. El coche se halla en movimiento y él no podrá medirlo por el simple expediente de aplicar la vara de punta a punta. Tendrá que usar señales luminosas, las cuales le dirán el momento en que los extremos del coche coinciden con determinados puntos arbitrariamente elegidos. Se plantean entonces problemas de tiempo. Suponed que el objeto a medirse sea un electrón, que está en un movimiento continuo a alta velocidad. Las señales luminosas entrarán en el experimento, tendrán que pronunciarse juicios de simultaneidad, y resulta obvio, una vez más, que observadores del electrón que se encuentren en movimiento relativo

el uno con el otro, obtendrán resultados diferentes. Toda la cómoda imagen de la realidad comienza así a desintegrarse: ni el espacio ni el tiempo son lo que parecen.

EJEMPLO DE EINSTEIN SOBRE LA RELATIVIDAD DEL TIEMPO

El diagrama representa un largo tren que corre sobre sus rieles a una velocidad V en dirección hacia el lado derecho de la página. La línea de abajo indica el terraplén paralelo a los rieles. Las letras A y B señalan dos lugares en los rieles, y la letra M marca un punto del terraplén exactamente a mitad de camino entre A y B. En M está un observador provisto de un par de espejos dispuestos en forma de V y con una inclinación de 90° . Por medio de este dispositivo, puede observar ambos lugares, A y B, al mismo tiempo. Imaginemos los hechos en A y B, digamos dos resplandores de relámpago, que el observador percibe en su espejo al mismo tiempo. Cuando él declara que éstos son simultáneos, significa con ello que los rayos de luz emitidos a A y B por la descarga se encuentran en el punto medio M de la línea AB paralela al terraplén. Consideremos ahora el tren en movimiento e imaginemos en él a un pasajero sentado. Avanzando el tren sobre las vías, el pasajero llegará a un punto M', directamente opuesto a M, y por lo tanto exactamente a mitad de la línea AB de los rieles. Supongamos además que el pasajero llega a M', justamente al producirse los resplandores del relámpago. Hemos visto que el observador M ha calificado correctamente como simultáneas las dos descargas luminosas; la pregunta que se plantea es: ¿enunciará el pasajero en M' el mismo juicio? Fácilmente se ve que no. Evidentemente, si el punto M' fuera estacionario con respecto a M, el pasajero tendría la misma impresión de simultaneidad de los

resplandores que el observador situado sobre el terraplén. Pero M' no es estacionario; se mueve hacia la derecha con la velocidad V del tren. Por lo tanto (considerado con referencia el terraplén), el pasajero se mueve hacia el rayo de luz que viene de B y se aleja del rayo que viene de A. Parece claro entonces que verá el rayo emitido por el resplandor en B antes que el rayo emitido por el resplandor en A. Consecuentemente, afirmará que el resplandor en B es *anterior en el tiempo* al resplandor en A.

¿Cuál de los dos juicios es el correcto, el del observador o el del pasajero? La respuesta es que cada cual tiene razón dentro de su propio sistema. El observador tiene razón con respecto al terraplén; el pasajero, con respecto al tren. El observador podrá decir que sólo él tiene razón porque está en reposo, mientras que el pasajero se mueve, por lo que sus impresiones están deformadas. A esto podrá contestar el pasajero que el movimiento no deforma las señales y que, en todo caso, no hay más razón para creer que él se mueve y el observador permanece en reposo que para creer que el pasajero está en reposo y el observador en movimiento.

No se trata en manera alguna de elegir entre estos dos juicios, los cuales sólo pueden conciliarse lógicamente aceptando el principio de que la simultaneidad tiene sentido únicamente en relación con un determinado sistema de referencia; además, que cada uno de dichos sistemas tiene su propio tiempo particular y que, según dice Einstein, un mero juicio de tiempo sobre un acontecimiento carecerá de sentido si no se nos dice con qué sistema de referencia se vincula.

La necesidad de clarificar el concepto de simultaneidad arroja sobre los hombros de Einstein la tarea de impugnar dos supuestos protegidos por la divinidad de Isaac Newton. "El tiempo absoluto,

verdadero y matemático, por sí mismo y por su propia naturaleza, fluye homogéneo sin relación con ningún objeto exterior..." Esta era la sonora definición de Newton en su gran libro, *Principia Mathematica*. A la cual agregaba otra definición igualmente mayestática: "El espacio absoluto, por su propia naturaleza sin relación alguna con ningún objeto exterior, permanece siempre idéntico e inmóvil". Estos postulados, según Einstein, eran espléndidos pero insostenibles. Ellos estaban en el fondo de las paradojas de la física contemporánea. Era necesario descartarlos. Tiempo absoluto y espacio absoluto eran conceptos pertenecientes a una metafísica gastada. Iban más allá de la observación y del experimento; en realidad, resultaban refutados por hechos desagradables. Los físicos tenían que convivir con estos hechos.

Convivir significaba en este caso nada menos que aceptar la paradoja de Michelson-Morley, incorporarla a la física antes que tratar de explicarla fuera de su contexto. Desde el punto de vista del sentido común, los resultados eran extraordinarios, pero habían sido verificados. No era la primera vez que la ciencia había tenido que desechar el sentido común. Las pruebas demostraban que la velocidad de la luz medida por cualquier observador, sea en reposo o en movimiento relativo a la fuente luminosa, es la misma. Einstein incorporó este hecho en un principio del cual podía derivar una teoría satisfactoria de la interacción entre el movimiento de los cuerpos y la propagación de la luz. Este principio, o primer postulado de su Teoría Especial de la Relatividad, declara que *la velocidad de la luz en el espacio es una constante de la naturaleza no afectada por el movimiento del observador o de la fuente luminosa.*

La hipótesis del éter resultaba innecesaria. No había ya por qué tratar de medir la velocidad de la luz contra un marco imaginario de referencia por la simple razón de que, medida la luz contra *cualquier* sistema de referencia, su velocidad es siempre la misma. ¿A qué invocar, entonces, la etérea gelatina? El éter simplemente perdía su razón de ser.

Era necesario un segundo postulado. La relatividad newtoniana se aplicaba al movimiento de cuerpos materiales; pero considerábase, según dije antes, que las ondas luminosas no eran gobernadas por este principio. Einstein cortó el nudo de un solo golpe. Amplió simplemente la relatividad newtoniana de modo de incluir los fenómenos ópticos. El segundo postulado dice: *En cualquier experimento con fenómenos mecánicos u ópticos es indiferente si el laboratorio en que el experimento se efectúa está en reposo o en movimiento uniforme; los resultados del experimento serán los mismos.* Generalizando más, no se puede por ningún método distinguir entre reposo y movimiento uniforme, excepto en relación el uno con el otro.

¿Es esto todo para la teoría especial de la relatividad? Sus postulados son engañosamente simples. Más aún, para el lector crítico pueden parecer contradictorios. Las contradicciones, sin embargo, son ilusorias; y las consecuencias, revolucionarias.

Consideremos el primer punto. De los postulados podría inferirse que por un lado la luz tiene la velocidad c y, por otro lado, aun cuando según nuestro método tradicional de cálculo debería tener la velocidad $c + q$ (en que q es la velocidad de la fuente), su velocidad sigue siendo c . Concretamente, la luz de una fuente en movimiento respecto de un marco dado de referencia tiene la misma velocidad que la luz de una fuente en reposo respecto del mismo marco. (Como lo ha sugerido un físico, esto es como si dijéramos que un hombre que caminara hacia arriba por una escalera mecánica en movimiento no llegaría a lo alto antes del tiempo que emplearía otro hombre que permaneciera en reposo sobre la misma escalera). Esto parece absurdo. Pero la razón por la cual parece absurdo es que damos por cierto que la velocidad de la fuente móvil debe sumarse a la velocidad normal de la luz para obtener la velocidad exacta del rayo emitido por la fuente. Supóngase que abandonemos esta hipótesis. Después de todo, hemos visto ya que el movimiento tiene un efecto extraño sobre las mediciones de espacio y tiempo. Se sigue de aquí que las nociones de velocidad vigentes deben ser reconsideradas. Los postulados no eran en sí mismos

contradictorios; la dificultad era con las leyes de la física clásica. Era necesario cambiar éstas. Einstein no vaciló. Para conservar sus postulados, arrojó a las llamas el viejo sistema. En ellas se consumieron las máspreciadas nociones de espacio, tiempo y materia.

Uno de los clisés sobre la teoría de Einstein es que ella demuestra que todo es relativo. La afirmación de que todo es relativo tiene tanto sentido como la afirmación de que todo es más grande. Como ha observado Bertrand Russell, si todo fuera relativo no habría nada a lo cual ser relativo. La palabra relatividad es equívoca. De hecho, Einstein se preocupó de encontrar algo que *no* es relativo, algo que los matemáticos llaman una invariante. Con ésta como punto fijo, existiría la posibilidad de formular leyes físicas capaces de incorporar el "residuo objetivo" de la experiencia de un observador; o sea, aquella parte de las características de espacio y tiempo de un hecho físico que, aunque percibidas por él, son independientes del observador, pudiendo esperarse de ellas, por consiguiente, que se presenten idénticas para todos los observadores. El principio de la constancia de la velocidad de la luz suministró a Einstein la invariante que necesitaba. Sin embargo, tal principio sólo podía mantenerse a expensas de la noción tradicional de tiempo. Y aun esta posibilidad no era suficiente. Espacio y tiempo están inextricablemente unidos. Ambos forman parte de la misma realidad. Trabajar con la medida del tiempo significa necesariamente afectar la medida del espacio.

Einstein, como podréis observar, llegó a la misma conclusión que Fitzgerald y Lorentz sin adoptar sus hipótesis sobre la electricidad. Era una consecuencia de sus postulados el que relojes y metros producían mediciones diferentes estando en movimiento relativo o estando en reposo. ¿Se debe esto a un cambio físico efectivo operado en los instrumentos? La pregunta puede considerarse irrelevante. El físico se interesa exclusivamente en la diferencia de las mediciones. Si el reloj se estira y el metro se encoge, ¿por qué no es posible detectar el cambio? Porque cualquier escala que se use para medirlo experimentará la misma

contracción. Lo que está en juego es nada menos que los fundamentos de la creencia racional.

Mencioné anteriormente el hallazgo de Kaufmann y Thomson de que un electrón en movimiento aumenta su masa con la velocidad. El primer postulado establece un límite máximo a la velocidad de la luz y permite la deducción de que ningún objeto material puede superar este límite. En el sistema de Newton no había tales límites; más aún, considerábase que la masa de un cuerpo -definida por él como su "cantidad de materia"- era la misma, estuviera el cuerpo en reposo o en movimiento. Pero del mismo modo que sus leyes del movimiento resultaron no ser universalmente verdaderas, su concepto de la constancia de la masa resultó defectuoso. De acuerdo con la Teoría Especial de Einstein, la resistencia de un cuerpo a los cambios de velocidad aumenta con la velocidad misma. Así, por ejemplo, para aumentar la velocidad de un cuerpo de 100.000 a 100.001 kilómetros por hora se requiere más fuerza que para llevarla de 200 a 201 kilómetros por hora. El nombre científico de esta resistencia es *inercia*, y la medida de la inercia es la masa. (Esto armoniza con la noción intuitiva de que la cantidad de fuerza que se necesita para acelerar un cuerpo depende de su "cantidad de materia"). Todas las ideas se ordenan así cabalmente: con el aumento de velocidad aumenta la inercia; el incremento de velocidad se revela como incremento de masa. El aumento de masa es, a decir verdad, muy pequeño a las velocidades ordinarias, y por consiguiente irregistrable, lo cual explica por qué Newton y sus sucesores, siendo como eran un brillante equipo, no lo descubrieron. La misma circunstancia explica por qué las leyes de Newton son perfectamente válidas para todos los casos ordinarios de materia en movimiento: aun un cohete a 18.000 kilómetros por hora es una tortuga comparado con un rayo de luz a 300.000 kilómetros por segundo. Pero el aumento de masa se convierte en un factor principal ahí donde intervienen partículas nucleares de alta velocidad; por ejemplo, los electrones en un dispositivo de rayos X de hospital se mueven a una velocidad tal que su masa normal aumenta al doble, y en

un tubo ordinario de TV los electrones tienen un 5 % más de masa, debido a la misma causa. Y a la velocidad de la luz, la acción de una fuerza aceleratriz, así sea ilimitada, contra un cuerpo, resulta totalmente anulada, ya que la masa del cuerpo, en rigor, se hace infinita.

De aquí sólo hay un paso a la histórica ecuación masa-energía de Einstein.

La cantidad de la masa adicional multiplicada por un número enorme -a saber, el cuadrado de la velocidad de la luz- es equivalente a la energía que se ha transformado en masa. Pero ¿es esta equivalencia de masa y energía un hecho especial concomitante con el movimiento? ¿Qué ocurre con el cuerpo en reposo? ¿También su masa representa energía? Einstein afirma audazmente que sí. "La masa de un cuerpo es una medida de la energía que el mismo contiene" -escribió en 1905, dando su fórmula ahora famosa $E = mc^2$, en la cual E es la energía contenida, m la masa (variable con la velocidad) y c la velocidad de la luz.

"No es imposible -dice Einstein en el mismo artículo- que la teoría pueda ponerse exitosamente a prueba con cuerpos cuyo contenido de energía es variable en un alto grado (por ejemplo, con sales de radium)". En el año 1930 muchos físicos hicieron la prueba, midiendo masas atómicas y energías resultantes de muchas reacciones nucleares. Todos los resultados corroboraron la hipótesis. Un conocido físico, el Dr. E. U. Condon, refiere una encantadora anécdota sobre la reacción de Einstein ante este triunfo: "Uno de mis más vívidos recuerdos es el de un seminario en Princeton (1934) donde un graduado informaba sobre investigaciones de este tipo contándose Einstein entre los asistentes. Einstein había andado tan preocupado con otros estudios que no había caído en la cuenta de que la confirmación de sus primeras teorías era asunto cotidiano en los laboratorios de física. Sonrió como un muchacho y se mantuvo diciendo: *¿Ist das wirklich so?* ¿Es

realmente así?, a medida que se ofrecían más y más pruebas concretas de lo correcto de la ecuación $E = MC^2$.

Durante diez años, después de la formulación de su Teoría Especial, Einstein forcejeó con la tarea de generalizar la relatividad de modo de incluir en ella el movimiento acelerado. Me referiré al tema brevemente, ya que este artículo no permite una detallada exposición.

Mientras resulta imposible distinguir entre el reposo y el movimiento uniforme sobre la base de observaciones efectuadas dentro de un sistema, parece perfectamente posible, en las mismas circunstancias, determinar los cambios de velocidad o dirección, es decir, la aceleración. En un tren que se mueve suavemente en línea recta, a una velocidad constante, no se siente el movimiento. Pero si el tren acelera, disminuye su velocidad o toma una curva, el cambio se percibe inmediatamente. El pasajero tiene que hacer un esfuerzo para mantenerse en pie, para evitar que la sopa se derrame, etc. Estos efectos se adscriben a las llamadas *fuerzas de la inercia*, productoras de aceleración, nombre con el cual se quiere significar que las fuerzas provienen de la inercia de una masa, esto es, de su resistencia a cambiar de estado. Parecería, por consiguiente, que todo experimento simple debería suministrar la prueba de dicha aceleración y distinguirla del movimiento uniforme o del reposo. Además, debería ser posible determinar, inclusive, el efecto de la aceleración sobre un rayo de luz. Por ejemplo, si se lanzara un rayo de luz paralelo al piso de un laboratorio en reposo o en movimiento uniforme, y se imprimiera al laboratorio una velocidad acelerada hacia arriba o hacia abajo, la luz no sería ya paralela al piso, y midiendo la desviación podría calcularse la aceleración.

Cuando Einstein revolvió en su cabeza todos estos puntos, descubrió un cabo suelto, que había pasado inadvertido a otros, en el razonamiento. ¿Cómo es posible, ya sea en un experimento mecánico o en un experimento óptico, distinguir entre los efectos de la gravedad y los de la aceleración producida por la inercia? Consideremos el

experimento del rayo de luz. En un punto el rayo es paralelo al piso del laboratorio; luego se desvía súbitamente. El observador explica la desviación por la aceleración causada por las fuerzas de la inercia, pero ¿cómo puede estar seguro de ello? Está obligado a llegar a esta conclusión exclusivamente sobre la base de lo que ve *dentro* del laboratorio, y, por lo tanto, no está en condiciones de decir si hay fuerzas de inercia que actúan -como en el tren en movimiento- o si los efectos observados son producidos por una gran (aunque no visible) masa gravitatoria.

Ahí estaba, pues -pensó Einstein-, la clave del problema de la relatividad generalizada. Así como no pueden distinguirse el reposo y el movimiento acelerado, no cabe tampoco distinguir entre la aceleración y los efectos de la gravitación. Ni los experimentos mecánicos ni los experimentos ópticos realizados en un laboratorio pueden suministrar la decisión de si un sistema es acelerado o si está en movimiento uniforme y sujeto a un campo gravitacional. (El pobre diablo viajero en la nave espacial del mañana, arrojado de repente contra el piso, no estará en condiciones de decir si han comenzado a funcionar los motores impulsores de su vehículo o si ha aparecido de repente, para divertirse con éste, una enorme masa gravitacional). Einstein formuló su conclusión en 1911 con su "principio de la equivalencia de las fuerzas gravitacionales y de las fuerzas de la inercia".

Sus ideas tenían, invariablemente, sorprendentes consecuencias. Del principio de la equivalencia dedujo, entre otras conclusiones, que la gravedad debía de ejercer un efecto sobre el trayecto del rayo luminoso. Esta conclusión surge del hecho de que la aceleración afectaría al rayo de luz y de que la gravedad no puede distinguirse de la aceleración. Einstein predijo que este efecto de la gravedad podría comprobarse en la desviación de la luz de las estrellas fijas cuyos rayos pasan cerca de la enorme masa del Sol. No se le escapó, por cierto, que sería difícil observar la curvatura debido a que en las condiciones normales la brillante luz del Sol absorbe la luz de las estrellas. Pero durante un eclipse total las estrellas próximas al Sol serían visibles, y las

circunstancias serían más favorables a la comprobación de la hipótesis. "Sería altamente deseable -escribió Einstein en el artículo en que enunciaba el principio de la equivalencia- que los astrónomos estudiaran el problema que aquí se plantea, aun cuando las consideraciones expuestas parezcan insuficientemente fundadas o aun extrañas". Ocho años después, en 1919, un grupo británico para el estudio de un eclipse, bajo la dirección del famoso astrónomo Arthur Eddington, confirmó la asombrosa predicción de Einstein.

En 1916, Einstein dio a conocer su Teoría General de la Relatividad, síntesis superior en que se incluye tanto la Teoría Especial como el principio de la equivalencia. Dos profundas ideas se desarrollan en la Teoría General: la asociación de tiempo y espacio en un continuo cuatridimensional (una consecuencia de la Teoría Especial) y la curvatura del espacio.

La idea de la asociación de tiempo y espacio la debía Einstein a uno de sus ex profesores de Zurich, el matemático ruso Hermann Minkowski. "De aquí en adelante -había dicho Minkowski en 1908- el espacio en sí y el tiempo en sí pasan a ser meras sombras, y sólo una especie de unión de ambos conserva una existencia independiente". A las tres conocidas dimensiones del espacio había que agregar una cuarta dimensión, el tiempo, con lo cual un nuevo medio único, el espacio-tiempo, reemplazaba el marco tradicional de espacio absoluto y tiempo absoluto. Un hecho producido dentro de este medio -un "hecho" sería, por ejemplo, un objeto en movimiento es reconocido no solamente por tres coordenadas espaciales que nos dicen *dónde* está, sino también por una coordenada de tiempo que nos indica el *cuándo*. *Dónde* y *cuándo* son, como ya hemos visto, juicios enunciados por un observador y que dependen de determinados intercambios de señales luminosas. Por esta razón es que la coordenada de tiempo incluye como uno de sus elementos el número correspondiente a la velocidad de la luz.

Descartados el espacio y el tiempo absolutos, la antigua imagen de un universo que a través de momentos sucesivos viene del pasado por el

presente y va hacia el futuro, también debe descartarse. En el nuevo universo de Minkowski y Einstein no hay pasado absoluto ni futuro absoluto; tampoco hay un presente absoluto que divida el pasado del futuro y "que se extienda en el mismo momento por todos los puntos del espacio". El movimiento de un objeto se representa ahora por una línea en el espacio-tiempo llamada "línea del universo". El hecho fabrica su propia historia. Las señales que emite toman un tiempo para llegar al observador; y como éste sólo puede registrar lo que ve, un hecho que es presente para un observador puede ser pasado para otro y futuro para un tercero. Según palabras de Eddington, el "aquíahora" absoluto de la imagen antigua ha pasado a ser simplemente un "visto-ahora" relativo.

Pero esto no debe tomarse en el sentido de que cada observador sólo puede captar su propio mundo y de que, en lugar del orden newtoniano, tenemos ahora la anarquía einsteiniana. Así como era posible en el sentido tradicional determinar con exactitud la distancia entre dos puntos del espacio tridimensional, es posible igualmente establecer y medir la distancia entre los hechos del continuo cuatridimensional. Esta distancia recibe el nombre de "intervalo" y tiene un "valor verdadero, absoluto", idéntico para todos los que la miden. Así, después de todo, "hemos encontrado algo firme en un universo cambiante".

¿Cómo se relaciona con esta imagen el concepto de la curvatura del espacio? El concepto mismo de un espacio curvo desconcierta. Un vaso, un bastón, una línea pueden curvarse. Pero ¿cómo puede curvarse el espacio vacío? Una vez más debemos pensar no en términos de abstracciones metafísicas sino de conceptos verificables por el experimento.

Los rayos de luz en el espacio vacío se desplazan en línea recta. Pero en algunas circunstancias (verbigracia, cuando el rayo de luz está próximo al Sol) la trayectoria del movimiento aparece curvada. Hay más de una explicación para elegir. Podríamos decir, por ejemplo, que

el rayo de luz ha sido curvado por una masa gravitacional de su vecindad; o podríamos decir que esta masa gravitacional ha producido la curvatura del espacio a través del cual el rayo se desplaza. No existe razón lógica para preferir una explicación a la otra. El concepto de los campos gravitacionales no es menos imaginario que el del espacio-tiempo. La única prueba concreta la suministra la medición del trayecto de la luz misma, no la del campo o del espacio-tiempo. Más fructífero resulta explicar la curvatura del trayecto del rayo luminoso como un efecto del espacio-tiempo curvo que como una consecuencia de la acción directa de la gravedad sobre la luz.

Permítaseme una comparación. Una delgada lámina de caucho se extiende sobre un gran timbal. Tomo una bolilla liviana y la dejo rodar sobre la lámina. Observe que la trayectoria de su movimiento es una línea recta. Tomo ahora varios pesos de plomo y los coloco en diferentes puntos de la lámina de caucho. Estos pesos forman en la superficie pequeñas inclinaciones y depresiones. Si ahora impulso nuevamente la bolilla, la trayectoria de su movimiento no será ya una línea recta, sino que se curvará en los declives y eventualmente caerá en una de las partes deprimidas. Pensad ahora que el espaciotiempo corresponde a la lámina de caucho, y las grandes masas gravitacionales a los pesos de plomo; pensad igualmente en un "hecho" cualquiera -una partícula en movimiento, un rayo de luz, un planeta- como réplica de la bolilla rondando sobre la membrana. Donde no hay masas, el espacio-tiempo es "llano" y las trayectorias del movimiento son líneas rectas. Pero en la vecindad de grandes masas, el espacio-tiempo se distorsiona en "elevaciones" y "depresiones" que afectan la trayectoria de los objetos que pasan por ellas.

Esto es lo que se ha acostumbrado llamar la atracción de la gravitación. Pero la gravitación en la teoría de Einstein es simplemente un aspecto del espacio-tiempo. La luz estelar se curva hacia las "depresiones" del Sol en las "elevaciones" que lo rodean, pero posee energía suficiente para no ser atrapada en la "cavidad"; la Tierra, que gira alrededor del Sol, se desplaza sobre el "horde" de la "cavidad"

perteneciente a éste tal como un ciclista da vueltas a un velódromo; un planeta que entre demasiado profundamente en la "cavidad" podría caer en el fondo. (Esta es una de las hipótesis formuladas por los astrónomos acerca de las colisiones que habrían ocasionado la formación de nuevos planetas en nuestro universo). Hay elevaciones y cavidades dondequiera hay materia; y como los testimonios de la astronomía parecen favorecer la hipótesis de que la materia se halla en general uniformemente distribuida en el universo y de que es además finita -aunque no necesariamente constante-, Einstein sugirió la posibilidad de que todo el espacio-tiempo es ligeramente curvo, finito e ilimitado. No es incongruente con esta hipótesis el hecho de que el universo es expansivo, en cuyo caso la densidad de materia disminuiría. Un universo finito pero ilimitado es aproximadamente semejante -aunque de mayor altura- a la superficie curva bidimensional de la Tierra. El área es finita y sin límites, de tal modo que si alguien va en "línea recta" en una dirección determinada debe, transcurrido un tiempo, regresar al punto original de partida.

La proeza de Einstein es una de las glorias del hombre. Dos puntos son dignos de destacarse a su respecto. El primero es que esta imagen del mundo no es la de una máquina con el hombre fuera de ella como un simple observador e intérprete. El observador es parte de la realidad que observa; además, conforma la realidad al observarla.

El segundo punto es que esta teoría hace mucho más que limitarse a dar respuestas a ciertas preguntas. Como teoría viviente, pone ante nosotros otras nuevas. Einstein tuvo la audacia de discutir dogmas indiscutibles; él sería el último en pretender que sus propios dogmas están fuera de discusión. Einstein ensanchó la perspectiva de la mente humana.

OTRAS LECTURAS:

CONDON, E. U.: *What is physics?* (¿Qué es la física?). En James R. Newman (editor): *What is science?* (¿Qué es la ciencia?). New York, Simon and Schuster, 1955.

DAMPIER, Sir WILLIAM: *A history of science (Historia de la Ciencia)*. New York, Cambridge University Press, 1948.

EDDINGTON, Sir ARTHUR: *The nature of the physical world (La naturaleza del mundo físico)*. New York, Cambridge University Press, 1932.

FRANK, PHILIPP: *Einstein: his life and times (Einstein: su vida y su tiempo)*. New York, Alfred A. Knopf, 1953.

RUSSELL, BERTRAND: *The ABC of relativity (El ABC de la relatividad)*. Edición revisada. New York, Mentor Books, 1959.

WHITHEAD, ALFRED NORTH: *Science and the modern world (La ciencia y el mundo moderno)*. New York, The Macmillan Company, 1925.