

La teoría relativista de la Gravitación de Einstein y la nueva concepción del Universo

POR

MANUEL ALMEYDA A.

La notable confirmación que la Teoría de la Gravitación, desarrollada por el Profesor Alberto Einstein, de la Universidad de Berlín, ha obtenido con los resultados de las observaciones del eclipse total de sol de 29 de Mayo del año recién pasado, ha puesto sobre el tapete de la discusión de los centros científicos europeos y ha hecho trascender al público en general, esta grandiosa doctrina, que constituye, según la opinión manifestada por el más alto representante de la ciencia física en Inglaterra, Sir Joseph John Thomson, «una de las más grandes, talvez la más grande, de las conquistas del espíritu humano».

Si la guerra mundial ha dejado en el ánimo de todos un sentimiento de desaliento por el retroceso que significa en las grandes corrientes de idealismo y confraternidad universal, será un motivo de consuelo saber que es en medio de ella donde han nacido a la vida del pensamiento las trascendentales ideas de Einstein y que el distanciamiento y rencor producidos por la contienda no fueron bastantes para impedir que encontraran, no sólo amplia acogida, sino calurosa admiración de los sabios de las diversas naciones, especialmente de Inglaterra, y que esta admiración fuera tal, que la Universidad de Cambridge y el Observatorio Real de Greenwich acordaran en 1918 enviar dos comisiones de astrónomos a observar en la costa norte del Brasil y en la Isla del Príncipe, en el golfo de Guinea, el desarrollo del eclipse de Mayo último, con el exclusivo objeto de determinar si se comprobaban las predicciones de Einstein respecto a la marcha de los rayos luminosos en el campo de atracción del astro.

Según lo ha reconocido públicamente, hace poco, Einstein, será un timbre de orgullo para la nación inglesa el haber preparado y realizado en medio de las dificultades y zozobras propias de un período tan anormal, esa doble expedición científica, a lejanas y abandonadas regiones, sin otro aliciente, sin otro fin que el de

establecer un hecho cuya influencia será nula en el dominio de la vida material de la especie, pero que, en el reino del pensamiento, marca un acontecimiento de trascendencia imperecedera.

Hace cuatro años tuve el honor de exponer en esta misma tribuna la que se llama actualmente Teoría restringida de la Relatividad, que Einstein dió a conocer en 1905 y posteriormente, y con mayor amplitud, en 1907. Alentado por el éxito obtenido, instigado por las críticas de algunos de sus contrarios que hacían notar que las ideas de Einstein no comprendían a todos los fenómenos naturales ni eran relativistas sino a medias y subyugado por las concepciones filosóficas del gran físico y pensador vienés Ernesto Mach, Einstein se propuso ampliar su doctrina hasta hacerla abarcar toda la naturaleza inanimada y hasta que satisficiera por completo al principio de la relatividad de todos los conceptos fundamentales de la ciencia que aquel pensador sustenta.

Ocho años de una labor tesonera, de que dan muestra las memorias que de tiempo en tiempo han visto la luz en las revistas científicas alemanas, cada una de las cuales señala una nueva etapa hacia el desenvolvimiento completo de la doctrina, han culminado, a fines de 1915, en la publicación de su memoria titulada «Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie» en que la genial concepción ha encontrado su exposición definitiva.

«La primera impresión, dice un crítico inglés, del que se impone del problema que Einstein se propuso resolver, es de que no tiene solución; la segunda es de admiración de que haya podido ser resuelto, y la tercera, de asombro de que sugiera fenómenos capaces de verificación experimental».

La teoría de Einstein exige para su estudio un bagaje de conocimientos matemáticos muy superiores a los que se dan en nuestra Universidad. Su exposición en una conferencia ante un público que no sea constituido por matemáticos de profesión encierra, por tanto, dificultades insalvables. Si no fuera, pues, por el interés que en algunos ingenieros y personas de sólida cultura general, se ha despertado por conocer en sus razgos esenciales esta teoría y el benévolo estímulo que he recibido de algunos colegas universitarios, acrecentado aún más por la afición que tengo por esta clase de estudios, y por la imponderable belleza del tema mismo, no me habría atrevido a traer a este recinto la soberbia concepción del joven y ya célebre físico alemán.

Y desde luego me he visto ante este dilema: ¿He de hacer una conferencia tan altisonante en la forma como vacía en el fondo, cual los artículos en que todos los diarios y revistas de lectura corriente en el mundo han estado los últimos meses comentando las ideas de Einstein, para pasto de su público ansioso siempre de novedades y sensación? ¿O he de procurar, poniendo a contribución vuestra cultura

científica y matemática, hacer una exposición en que sea visible esa rígida sucesión de los razonamientos, ese encadenamiento sólido de las ideas que hacen que la nueva doctrina produzca la impresión de los clásicos monumentos de la antigua Grecia, en que la pureza de las líneas y la sobriedad de los detalles realizan la suprema belleza del conjunto? ¿He de seguir el consejo de Einstein mismo, quien, en carta reciente publicada por el *Times* de Londres le dice al público inglés entusiasmado: «No os preocupeis tanto de averiguar si yo soy realmente alemán o judío suizo, concentrad mejor vuestra atención en la consistencia lógica de la teoría que hace que no pueda modificarse un sólo detalle de ella sin que toda la construcción se derrumbe?»

He creído que el carácter de esta casa y la cultura de mi auditorio me impiden tratar la teoría de Einstein con el aspecto sensacional que se ha acostumbrado revestirla en periódicos y revistas no científicas. Espero, entonces, que mi propósito lo haya alcanzado siquiera en parte, pero en todo caso os aseguro que si encontráis puntos débiles o dudosos en la exposición, ellos son productos de la cortedad de mis alcances y no defectos de la impecable construcción einsteiniana.

La circunstancia de haber expuesto en 1916 las corrientes de ideas que llevaron a Einstein a enunciar su Principio de Relatividad el año 1905 y de haber indicado sus principales consecuencias, me excusarían de volver ahora sobre este mismo asunto si no estuviera cierto de que gran parte de mi actual auditorio no asistió a mis conferencias de aquel año y que talvez no pocos de los que me honraron con su asistencia no conservan presente con bastante precisión las ideas generales que desempeñarán importante papel en el desarrollo posterior de la doctrina relativista. A riesgo, pues, de repetirme, expondré a grandes rasgos el origen y alcance de la Teoría de la Relatividad en su primera fase, que abarca desde la publicación de la memoria «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», por Einstein en 1905, hasta la conferencia dada por Minskowski en 1908, titulada «Raum und Zeit».

La segunda fase, en que Einstein generaliza las ideas dadas a conocer en la primera y las aplica al estudio de la Gravitación, es el objeto primordial de esta Lectura.

Uno de los más hermosos capítulos de la historia de las ciencias exactas en el siglo XIX es el que se refiere a la crítica de los principios de la Mecánica Racional.

Como sabéis, Newton sintetizó las leyes del movimiento dándoles como fundamento inamovible los conceptos de tiempo y espacio absolutos. Dentro de estos conceptos la ley de la Inercia, enunciada por Galileo, encierra una significación bien

precisa. Se comprende por esto que físicos de la talla de Lord Kelvin hayan manifestado que la exposición de las leyes de la Mecánica hecha por Newton es completa y satisfactoria.

Empero, la creencia en un espacio y un tiempo absolutos u objetivos repugna al espíritu cultivado y, en verdad, desde la antigüedad los pensadores han demostrado que esos conceptos encierran contradicción. Para el pensamiento filosófico el espacio y el tiempo son conceptos relativos: son algo como un producto elaborado por la razón con la materia prima que los sentidos extraen del conjunto de los hechos observables.

Ahora bien, si abandonamos los conceptos de espacio y tiempo absolutos ¿qué validez conservan las leyes del movimiento? A esto ha respondido Carl Neumann: «Bajo la forma enunciada por Newton la ley de la Inercia no puede servir como fundamento para ninguna construcción científica ni como punto de partida para ninguna deducción matemática, pues es completamente ininteligible. No sabemos lo que se debe entender por un movimiento en línea recta, o, más bien dicho, sabemos que esas palabras pueden ser interpretadas de muy diversas maneras, son capaces de infinitos significados. En efecto, un movimiento que bajo el punto de vista de la Tierra es rectilíneo, es curvo si se le considerara desde el Sol y será representado cada vez por una línea distinta si se le observa desde Júpiter, Saturno u otro planeta. En otras palabras: todo movimiento que, considerado desde un cuerpo celeste es rectilíneo, parecerá curvilíneo desde otro cuerpo celeste. Aquellas palabras de que un punto abandonado a sí mismo recorre una línea recta, se nos presentan, entonces, como un principio sin significado, como una ley vagando en el aire que, para ser comprendida, necesita un fondo determinado que la sostenga». Neuman admite, en consecuencia, que existe necesariamente en el Universo una entidad especial cuyo único papel es determinar un sistema invariable de referencia para los movimientos de los cuerpos materiales. A esta entidad la llamó «cuerpo Alfa».

Fué esta la primera tentativa formal y científicamente emprendida de poner de acuerdo las leyes de la mecánica con la concepción relativista del tiempo y del espacio. Pero, en su gran mayoría, los hombres de ciencia no se han manifestado inclinados a aceptar la existencia del cuerpo «Alfa» más que como una alta elucubración del espíritu y por esto es que las ideas de Neumann, si bien han contribuido eficazmente a la discusión y conocimiento del fundamental problema de las bases físicas de las leyes de la mecánica, no han acercado al mundo científico a la solución del problema.

El sabio que más profundamente ha estudiado esta cuestión y quien, como ya lo he dicho, ha ejercido una influencia considerable en las ideas de Einstein y,

en general, de todos los hombres de ciencia en el último cuarto de siglo, es el psicofilósofo austriaco Ernesto Mach. Para él la relatividad del Universo es completa y tiene su origen en la naturaleza misma de nuestra capacidad conceptiva. Un pensador cuyo estrecho parentesco intelectual con Mach es manifiesto, ha expresado la concepción relativista del Universo de la siguiente manera (1): «La existencia real de las cosas abarca tanto como su determinación cualitativa y cuantitativa. Ambas son por su propia naturaleza relativas, en cuanto la cualidad resulta de la interacción de unas cosas con otras y la cantidad representa simplemente una relación entre miembros de los cuales ninguno posee una importancia absoluta. Cada cosa que existe objetivamente es por esto un eslabón en una interminable serie de desarrollos estrechamente conexos: otras formas de realidad son desconocidas de la experiencia y de la razón. No existe ninguna cualidad material absoluta, ninguna sustancia material absoluta, ninguna unidad física absoluta, ningún patrón de medida absoluto, ningún reposo absoluto, ningún tiempo absoluto, ningún lugar absoluto. No se conoce ninguna forma de existencia material que sea su propio fundamento o medida y que, sea en sus aspectos cualitativos o cuantitativos, exista de otra manera que en constante oscilación, de otra manera que como un constante flujo de variaciones». Inútil es decir que, para Mach, no sólo el espacio y el tiempo, sino también las velocidades y las aceleraciones y, por consiguiente, los conceptos de fuerza y de inercia, son completamente relativos.

«La mecánica clásica no llena esta exigencia. Ella salvaguarda ciertamente la relatividad de las velocidades, pero concede un sentido absoluto a la noción de aceleración y de inercia, considerada como capacidad de resistencia de un cuerpo a la aceleración. Conforme a sus principios, el movimiento de dos masas aisladas en el espacio y suficientemente aproximadas para poder ejercer acciones recíprocas, sería regido por la ley de atracción newtoniana, independientemente del sistema de estrellas fijas, «porque sería una proposición bien extraña, dice Euler, y contraria a una cantidad de otros dogmas de la metafísica, afirmar que las estrellas fijas dirigen los cuerpos en su inercia». Pero en el hecho, nosotros no percibimos más que las distancias relativas de los cuerpos; no podemos, por tanto, observar y definir más que las velocidades y las aceleraciones relativas de los cuerpos, que son las derivadas primeras y segundas de sus distancias. En consecuencia, la inercia de un cuerpo no puede ser definida más que como su resistencia a las aceleraciones relativas que experimenta con respecto a otros cuerpos que no participan de su estado de movimiento. La masa inerte de un cuerpo aparece entonces como una magnitud relativa, que depende de la distribución de las masas alrede-

(1) Stallo: Die Begriffe und theorien der modernen Physik. Leipzig 1911. Pág. 185.

dor de ese cuerpo y del estado de reposo o movimiento de unas con respecto a otras; la masa inerte será tanto más grande cuanto mayor sea el número de masas que halla a su alrededor y no participen de su estado de aceleración: ella desaparecerá en el caso contrario. Es por estar rodeado de masas por lo que un cuerpo tiene inercia. Esta resulta de la acción media de todas las masas repartidas en el Universo, de suerte que, contrariamente a la afirmación de Euler, las estrellas fijas determinan en parte la inercia y el movimiento de la Tierra. El principio de inercia pierde así todo sentido absoluto y llega a ser un principio relativo y estadístico» (1).

De aquí que, según Mach, las experiencias que pretenden probar la existencia de un movimiento absoluto de rotación, como el vaso rotante de Newton, sólo consiguen demostrar que se desarrollan aceleraciones centrífugas cuando un cuerpo rota con respecto a la bóveda estrellada, es decir, con respecto al Universo en su conjunto; y, por tanto, la experiencia del péndulo de Foucault no puede ser una demostración de la rotación absoluta de la Tierra alrededor de su eje, sino simplemente una comprobación de su rotación con respecto al sistema de estrellas fijas.

Es éste un punto esencial y conviene apartar la duda de que se trate de una discusión cuyo fondo es meramente verbal. Neumann ha planteado la cuestión de esta manera: sea una estrella fluida girando en medio del Universo; por efectos de su movimiento de rotación habrá adquirido la forma achatada de un elipsoide de rotación. Ahora bien, si suponemos que el Universo desaparece y queda sola la estrella flotando en el vacío, ¿perderá por este solo hecho su forma elipsoidal y volverá otra vez a ser esférica? Para Neumann y los partidarios de la existencia de un movimiento absoluto de rotación, nó; la estrella seguiría elipsoidal y este hecho demostraría que ellos se encontraban en la razón. Para Mach, por el contrario, no observándose ningún movimiento relativo sobre la estrella, el concepto mismo de movimiento no tendría significado alguno, y preguntar si rota o no rota sería como preguntar por el color de la belleza o la forma de la bondad.

No debe extrañarse, entonces, que el sabio vienés tenga por equivalente decir que la Tierra gira alrededor del Sol como sostener que es el Sol el que gira alrededor de la Tierra. En la realidad, dice, sólo nos es dado observar un movimiento de rotación relativo de un astro con respecto al otro.

El mérito notable de Mach es el de haber visto mucho antes que nadie que el significado de las leyes de la Mecánica y de la Física en general, debe buscarse nó en las

(1) Rougier: La materialization de l'Energie. Essai sur la théorie de la relativité et sur la théorie des quanta. París 1919. Pág. 92.

relaciones de las cosas o fenómenos con respecto a las presuntas entidades de espacio y de tiempo, sino con respecto a las demás cosas o fenómenos del resto del Universo. Así, por ejemplo, ha dicho: «Si en todas las proposiciones de la dinámica las velocidades juegan un rol preponderante, la causa está en que cada cuerpo se halla en relación con todos los demás cuerpos del Universo y que es, por consiguiente, imposible considerar un solo cuerpo como aislado. Nuestra capacidad para apreciar el todo de una sola vez nos obliga a considerar un número reducido de cuerpos y a hacer provisoriamente abstracción de los restantes. Precisamente esto es lo que realizamos con la introducción de la noción de velocidad, que implica en sí la de tiempo. No es imposible que un día se consiga reemplazar por leyes integrales las leyes elementales que constituyen la mecánica actual y que podamos tener así un conocimiento directo de la dependencia recíproca de los cuerpos: cuando esto se realice, el concepto de fuerza habrá pasado a ser superfluo» (1).

Pues bien, a pesar de la lógica incontrastable con que Mach ha sabido exponer sus ideas, no ha arrastrado tras de sí la unanimidad de las opiniones de los hombres de ciencia, porque se les ha hecho algunas objeciones que no parecen tener una contestación fácilmente accesible que satisfaga los anhelos de causalidad del espíritu humano. Se ha observado, por ejemplo, que si las leyes del movimiento sólo tienen significado tomando en consideración el Universo en su conjunto, sería necesario que la acción de todos los cuerpos celestes se hiciera sentir con suficiente fuerza en un punto cualquiera del espacio para que esos cuerpos puedan regir la marcha de los fenómenos que ahí se desarrollan.

Y entonces, uno se vé impulsado a preguntar, ¿cómo es que esta acción ha escapado hasta ahora a las más precisas observaciones de los físicos? ¿o será necesario admitir a priori, como parece haberlo insinuado alguna vez Mach (2), que los cuerpos tienen la facultad de influir sobre la dirección y velocidad de los movimientos, en relación con la ley de la inercia, en razón directa de las distancias o proporcionalmente a las masas e independientemente de las distancias?

Pero una explicación de esta especie, fuera de contrariar lo que parece ser el resultado evidente de nuestra experiencia inveterada, de que la acción de un cuerpo sobre otro es tanto mayor cuanto más cerca se encuentren, por el hecho de no permitir una verificación experimental, se resolvería en una propiedad de la materia que recordaría la virtud dormitiva del opio y, por pretender atenernos a la sola experiencia, volveríamos a caer en pleno reino de la metafísica medioeval.

(1) Die Mechanik in ihrer Entwicklung, 7.ª ed. Leipzig 1912. Pág. 252.

(2) Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Prag 1872. Reimp. Facsimilar Leipzig 1909. Pág. 50.

Por otra parte, las ideas de Mach implican necesariamente la extensión limitada del Universo, y he aquí otra fuente de dudas respecto a su validez experimental porque las observaciones astronómicas, según opinión corriente, justifican la creencia en un espacio infinitamente extenso. Sin embargo, luego veremos que esa creencia no tiene fundamentos científicos muy sólidos.

El haber dado ocasión para que se discutieran estas cuestiones de tanta trascendencia, lejos de significar un motivo de crítica desfavorable para la concepción relativista del Universo de Mach, es una causal más para acrecentar su importancia, pues las doctrinas científicas no sólo valen por las relaciones que descubren entre hechos anteriormente desligados, sino también por los problemas nuevos que sugieren y las rutas inexploradas del saber que presentan a la vista del investigador.

En esta situación de verdadera e ingrata indecisión respecto de los fundamentos experimentales de sus principios, la Física ha acudido en auxilio de la Mecánica y ha permitido establecer una base para la construcción racional del mundo externo, que ha parecido inamovible para la casi totalidad de los sabios durante el siglo pasado.

Sabido es que las experiencias de difracción e interferencias de la luz realizadas por Young y Fresnel a principios del siglo pasado demostraron que la teoría emisiva de los fenómenos ópticos, que elaborara Newton, no podía ya más competir con la teoría ondulatoria que sustentaron Huygens y Euler. Desde este momento entró a figurar en la Física el éter, o sea, el agente trasmisor de las ondulaciones, especie de fluido extraordinariamente tenue y elástico. Pero el triunfo del éter no fué definitivo hasta que Maxwell explicó los fenómenos eléctricos por medio de deformaciones de un medio elástico aislador que llena todo el espacio, capaz de transmitir por medio de ondas las acciones electromagnéticas, con la velocidad de la luz, y hasta que Hertz hubo realizado experimentalmente en 1885 las predicciones del gran físico de Cambridge, verificando así que la luz y las ondulaciones electromagnéticas son dos fenómenos que difieren entre sí tanto como los rayos rojos del espectro difieren de los ultravioletas. El éter constituyó entonces el lazo de unión entre las dos grandes divisiones de la Física: la óptica y la electricidad.

Se vé inmediatamente que este agente tan íntimamente ligado a todos los fenómenos naturales podría desempeñar en la mecánica el rol que Neumann atribuía al hipotético cuerpo «Alfa» y aunque de pronto faltaba la base experimental que permitiera fijarlo prácticamente como sistema de ejes absolutos de coordenadas, por lo menos dentro de la razón se veía la posibilidad de establecerlos algún día y esto ya bastó para que los espíritus inquietos por la solidez de los principios mecánicos, se sintieran momentáneamente satisfechos.

Ahora bien, una vez encontrado un sistema de ejes con respecto al cual son

válidas las leyes de Galileo y Newton, se demuestra fácilmente que estas leyes también son válidas para todo otro sistema animado de una traslación uniforme con respecto al primero. A un sistema de referencia cualquiera que goce de esta propiedad lo llamaré en lo sucesivo sistema de referencia inercial o, simplemente, sistema inercial.

Después de la prematura muerte de Maxwell, acaecida en 1879, se sucede el corto pero brillante período de sus críticos y continuadores, en que descuellar por sobre una falange de sabios, Hertz en Alemania y J. J. Thomson en Inglaterra, período que culmina en las postrimerías del siglo, con la personalidad sobresaliente del ilustre holandés Lorentz.

Este físico sometió a la teoría de la electricidad de Maxwell a una profunda modificación con la introducción del concepto de carga elemental de electricidad o electrón. Principalmente el éter elástico y dieléctrico del primero sufre una transformación radical. Según Lorentz, el éter no puede poseer ninguna velocidad relativa entre sus diversas partes; es, por tanto, perfectamente rígido, indeformable y se extiende indefinidamente por todo el espacio, abarcando aún los lugares ocupados por la materia. No posee, por otra parte, ninguna propiedad mecánica, ni elasticidad, ni inercia, es decir, ni masa. Su papel en el mundo físico se concreta a servir de campo de desarrollo a los fenómenos; es entonces, por su esencia misma, un sistema de referencia absoluto para las leyes del movimiento.

Basta con lo dicho para comprender la capital importancia teórica del problema de medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter. Desde mediados del siglo XIX, se había intentado encontrar esta velocidad tratando de poner de manifiesto la influencia que tendría en diversos fenómenos ópticos y eléctricos. Pero, invariablemente, resultaba que la influencia que fundamentalmente se esperaba encontrar no aparecía y la velocidad del globo terráqueo, a través del espacio etéreo, permanecía siendo una incógnita inabordable.

Esta situación vino a agravarse con el fracaso de la experiencia llevada a cabo con el mismo objeto por el físico Michelson, de Chicago, pues en ésta el grado de aproximación alcanzado es considerablemente mayor que en todas las anteriores. La experiencia de Michelson consigue comparar de la manera más directa posible, las velocidades de propagación de la luz en el sentido del movimiento de traslación de la Tierra y en el sentido perpendicular a él. Si c es la velocidad de propagación de la luz en el éter y v la velocidad de traslación de la Tierra en el espacio, la luz parecerá tomar la velocidad $c-v$ hacia adelante del movimiento de la Tierra, la velocidad $c+v$ hacia atrás y la velocidad $\sqrt{c^2 - v^2}$ en el sentido normal.

Pues bien, la comparación efectuada por Michelson ha dado por resultado que la luz se propaga en todas direcciones con igual velocidad, cualquiera que sea el

movimiento de la Tierra en el espacio, es decir, cualquiera que sea la época del año en que se efectúe la experiencia.

Una vez establecido este hecho incontrovertible no hay más que dos caminos entre qué elegir:

1.º) o bien la velocidad de la Tierra con respecto al espacio etéreo existe y si no se manifiesta es sólo a consecuencia de que un fenómeno desconocido que viene a interponerse entre esa velocidad y la experiencia de Michelson y eclipsa, si es posible decirlo así, el resultado esperado; o

2.º) sencillamente la velocidad con respecto al éter no existe, es decir, no hay ningún sistema de referencia absoluto en el Universo y, por tanto, el resultado negativo de la experiencia de Michelson es una consecuencia inmediata de la premisa aceptada.

La primera alternativa la siguió Lorentz y postuló entonces como hipótesis ad-hoc, para explicar el resultado de la experiencia de Michelson, que los cuerpos al moverse con respecto al espacio etéreo experimentan una contracción en el sentido del movimiento, función de la velocidad, que tiene por consecuencia anular los efectos que permitirían medir esa velocidad absoluta en el espacio.

La segunda alternativa fué la que adoptó Einstein en su memoria recordada sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, que publicó en 1905. Para Einstein la experiencia de Michelson demuestra que el problema de la velocidad de la Tierra con respecto al éter es un pseudo-problema; en realidad, es simplemente un absurdo y debe ser relegado, junto con el movimiento perpetuo y la cuadratura del círculo a las categorías de las utopías inslubles que una comprensión incompleta y antojadiza de los fenómenos ha hecho albergar durante largo tiempo al espíritu humano.

Aceptada esta conclusión, se desprende que el mundo físico debe presentarse de idéntica manera para cualquier observador, independientemente del movimiento de que se encuentre animado, siempre que para él los fenómenos mecánicos se realicen de acuerdo con las leyes de Newton, es decir, siempre que el observador se encuentre en reposo con respecto a un sistema inercial. Esto es lo que Einstein expresó por medio de un postulado, que llamó Principio de Relatividad, y se enuncia así: «Las leyes que rigen los fenómenos físicos son invariantes con respecto a cualquier sistema de referencia inercial».

Esto quiere decir lo siguiente: supongamos un observador encerrado en una caja, que constituye su laboratorio, y que ejecute todas las experiencias posibles, tanto físicas como mecánicas, con el objeto de determinar el estado de movimiento de su habitación: estas experiencias no podrán jamás indicarle si el sistema en el

que se encuentra el observador tiene, o no tiene, un movimiento de traslación uniforme con respecto a un sistema inercial.

La mecánica clásica establecía ya que ninguna experiencia de movimiento podría llegar a descubrir un movimiento inercial; el principio enunciado por Einstein hace extensiva esta imposibilidad a cualquiera experiencia física. Se ve ahora, inmediatamente, que la imposibilidad de medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter es una consecuencia lógica del Principio de Relatividad. Otra consecuencia inmediata es que, si no existe ningún sistema de referencia absoluto, el éter de Lorentz no existe, es una pura creación de la razón, sin correspondencia en la realidad.

Einstein tuvo la valentía de enunciar desde el primer momento esta conclusión inevitable de sus ideas y esto fué motivo para que un número considerable de físicos se declararan enemigos más o menos irreconciliables de la teoría de la relatividad. El papel verdaderamente preponderante que el éter desempeña en casi todos los capítulos de la física moderna, hizo pensar a algunos sabios que se iba a consumir un trastorno mortal para la ciencia y que era una obra de verdadera salvación afirmar denodadamente la existencia objetiva de ese fluido inmaterial.

Pero la ciencia no se alimenta ni construye con sentimentalismos: la ciencia se edifica sobre principios e hipótesis de trabajo, cuyo valor se aquilata por la cantidad de hechos diversos que reúnen en una sola síntesis, por las relaciones imprevistas que establecen entre fenómenos conocidos de distinta naturaleza y por los nuevos fenómenos, susceptibles de verificación experimental, que descubren. Desde este punto de vista la teoría de Einstein presenta manifiestas ventajas sobre la de Lorentz, pues, sin introducir ninguna hipótesis ad-hoc, llega a explicar todos los fenómenos ópticos y electromagnéticos, deduciendo sus leyes con toda naturalidad y soltura del principio de relatividad, en cambio que el físico holandés, según él mismo lo declara, sólo ha podido llegar a las mismas explicaciones, con no pocas dificultades y no siempre de una manera satisfactoria (1).

Ahora bien, en tanto que Lorentz se apoya en sus deducciones estrictamente sobre las leyes de la mecánica newtoniana, la teoría establecida por Einstein sobre su principio de relatividad de 1905, rompe ya por completo con esos antiguos moldes y los sustituye por otros más amplios que introducen una profunda revolución sobre los conceptos fundamentales de la Física.

En efecto, Lorentz, aceptando el éter indeformable, establece de hecho la existencia objetiva del espacio, y la ley de inercia le permite en seguida definir inter-

(1) The Theory of Electrons. Leipzig, 1907. Pág. 230.

valos de tiempo de una manera general e independiente de cualquier observador, es decir, determinar un transcurso absoluto del tiempo, válido para todo el Universo. Por el contrario, Einstein, al negar el éter introduce en la Física los conceptos de espacio y tiempo relativos al observador. En mis conferencias de 1906 traté de explicar por qué se debía admitir que una misma serie de fenómenos o de sistemas materiales, observados por dos personas animadas de una velocidad relativa uniforme, no determinan para ambos las mismas relaciones de espacio y de tiempo, de manera que la representación que cada uno obtiene del mundo externo es imposible de hacer coincidir con la del otro. Si se comunicaran sus impresiones, cada cual creería que el espacio del otro se habría achatado en dirección del movimiento relativo; así, por ejemplo, si uno observa un cuerpo, lo mide y encuentra que tiene la forma esférica, el otro encontraría que es un elipsoide de revolución cuyo eje menor es paralelo a la velocidad relativa de entrambos observadores. Por otra parte, cada cual se figuraría que el tiempo transcurre más lentamente en los sistemas materiales animados con respecto a él de cierta velocidad relativa, que en aquellos que se encuentran en reposo relativo a su alrededor. Así, por ejemplo, si cada observador lleva consigo un reloj de arena que, colocado uno al lado del otro marchan de acuerdo, le parecerá a cada observador que el reloj que lleva el otro anda más despacio.

Esta discrepancia de resultados en lo que se refiere a las determinaciones espaciales y temporales es recíproca y depende únicamente del movimiento relativo de traslación de los observadores, de manera que es imposible discernir en la naturaleza, un estado de movimiento uniforme que tenga algún privilegio sobre los demás.

El sabio alemán Hermann Minkowski descubrió que estas extrañas deformaciones que el principio de relatividad introducía en los conceptos corrientes de espacio y tiempo podrían eliminarse considerando que los fenómenos físicos se desarrollan no dentro del doble marco del espacio tridimensional y del tiempo unidimensional de nuestra intuición sensible, sino dentro de un continuo geométrico de cuatro dimensiones que llamó el Universo. En el Universo de Minkowski no se distingue el tiempo del espacio: ambos conceptos se sueldan y confunden sus propiedades peculiares para constituir un todo homogéneo, distinto, por tanto, a la vez del espacio y del tiempo intuitivos.

Es interesante tener una idea de cómo llegó el físico matemático mencionado a establecer esta genial interpretación del principio de relatividad, que constituye el progreso más importante, hecho en todo el primer período de la teoría. Es un postulado de la Física clásica la homogeneidad del tiempo y el espacio, lo que se expresa diciendo que la época y lugar en que se verifica un fenómeno no influyen por

si mismos en su desarrollo. Matemáticamente esto se expresa por el resultado de que las leyes físicas son invariantes con respecto a un cambio de origen en la medida del tiempo, y a un cambio de origen y de orientación del sistema de referencia especial. El poder cambiar de orientación a los ejes de coordenadas, sin influir en los fenómenos, es lo que comunmente se enuncia por el aforismo de que, en el espacio, no hay ni arriba ni abajo, y esto proviene de que ese cambio deja invariante la expresión:

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

que da la distancia entre dos puntos del espacio. Como el origen del sistema es arbitrario, tenemos que la expresión:

$$x^2 + y^2 + z^2 \quad (1)$$

es invariante para cualquier transformación lineal ortogonal de las coordenadas, lo mismo que

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (2)$$

que da la distancia entre dos puntos infinitamente próximos del espacio.

Ahora bien, la aplicación del principio de relatividad al fenómeno de propagación de la luz conduce a invariantes distintos de (1) y (2). En efecto, sean dos observadores A y B, animados de una velocidad relativa uniforme. En el instante $t = 0$, en que ambos se encuentran en el mismo lugar, lanzan un destello luminoso y miden la velocidad de la onda de propagación. Ambos encuentran que la luz marcha en todas direcciones con la velocidad constante c y, por consiguiente, cada uno cree encontrarse en el centro de la esfera que forma la ondulación, cuya ecuación es:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

Si el sistema de referencia de A tiene por coordenadas x', y', z', t' y el de B, x'', y'', z'', t'' ; como el fenómeno es completamente análogo para uno y otro se tendrá:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x''^2 + y''^2 + z''^2 - c^2 t''^2$$

o sea, que según el principio de relatividad, se presenta en la naturaleza el invariante:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \quad (3)$$

en lugar de la expresión (1). Pongamos $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$, $-ct = x_4$ en la expresión (3), obtenemos entonces el variante:

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \quad (4)$$

que posee una completa semejanza con (1), salvo en el número de variables, que es ahora 4 en vez de 3.

Pues bien, Minkowski hizo ver que se podían considerar las variables x_1 , x_2 , como las coordenadas de un sistema de referencia en un espacio cuatridimensional y que la invariancia de la expresión (4) expresaba que este espacio era homogéneo, es decir, que los ejes de referencia podrían cambiar de dirección, conjuntamente, alrededor del origen, sin que esta transformación alterase las leyes que rigen los fenómenos. Se ve fácilmente que a dos sistemas de referencia inerciales en el espacio intuitivo, corresponden en el Universo de Minkowski dos sistemas de referencia ortogonales, de mismo origen, pero diversamente orientados, y que, efectivamente, existe completa homogeneidad entre las cuatro coordenadas y se puede, por tanto, afirmar que el espacio y el tiempo intuitivos se esfuman para ceder su lugar a un continuo geométrico único de cuatro dimensiones en el cual no existe ni arriba, ni abajo, ni izquierda, ni derecha.

Es imposible considerar la concepción del Universo de Minkowski, sin sentirse por un momento sobrecogido de admiración, pero esto no impide que no preguntemos: ¿qué significado real, qué valor físico, tiene el continuo cuatridimensional que él crea?

Se ha dicho que esta concepción posee únicamente un valor matemático; mas, si con esto quiere subentenderse que ella no posee ningún lazo de conexión con la realidad objetiva, esta opinión me parece insostenible.

Como las cuestiones relativas a la estructura del espacio y del tiempo desempeñan un papel primordial en la teoría generalizada de la relatividad, me veo obligado a exponer desde luego las ideas modernas sobre esta materia, las que me servirán para dilucidar el punto anterior sobre el alcance real de la teoría de Minkowski y formarán la base para la exposición de más adelante.

Ya he significado que los conceptos de espacio y tiempo intuitivos son el resultado de la libre acción de nuestro espíritu sobre nuestra experiencia. Por consiguiente, no son productos exclusivos de nuestra mente, como lo han sostenido los

contrarios, ni tampoco imposiciones ineludibles del mundo externo sobre ella, como lo han sostenido los espiritistas. La experiencia ancestral ha dado a conocer a la especie humana cierta clase de propiedades de los cuerpos sólidos que permanecen invariables en los fenómenos llamados desplazamientos, y de la abstracción de estas propiedades, que constituyen la esencia del espacio físico, la mente ha extraído el concepto intuitivo de espacio.

Nuestra intuición especial nace de la observación de una pequeña parte del espacio físico, dice un moderno geómetra español, y admitimos por inducción que todas las propiedades en él observadas subsisten más allá de los límites de nuestra percepción sensual. ¿No podrá suceder que esta inducción nos conduzca a resultados falsos? (1). Es muy natural hacerse esta pregunta, pues no cabe duda de que en el concepto intuitivo de espacio se encierra no pequeña dosis de la fantasía ingénita de nuestra mente. En realidad, nosotros no somos capaces de observar el mundo externo sino desde un sólo punto y nos es difícil trasladarnos con suficiente rapidez de un lugar a otro para que los diversos aspectos que así obtenemos de las cosas se contundan en una sola imagen de la naturaleza, puramente objetiva.

Mach, Poincaré y otros sabios han estudiado a fondo la influencia que la textura propia de nuestros sentidos ha tenido en la asignación de tres dimensiones al espacio. «La experiencia, dice Poincaré, no nos prueba que el espacio tiene tres dimensiones, ella nos prueba que es cómodo atribuirle tres, porque así las dificultades que resultan de la interpretación de los fenómenos se reducen a un *mínimum*» (2). Por esto mismo, si nuevos fenómenos vienen a complicar otra vez el problema de la interpretación del mundo externo, nos queda abierto el camino para intentar una modificación en nuestra concepción del espacio, atribuyéndole, por ejemplo, mayor número de dimensiones.

Claro está que nuestra intuición se resistirá a seguir a la razón científica en esta atrevida evolución de las ideas más arraigadas a nuestro ser, puesto que los nuevos fenómenos no formarán seguramente parte de nuestra experiencia diaria y no pueden influir, por tanto, sino después de transcurrido un considerable número de generaciones, en conceptos que se han generado paulatinamente a través de toda la existencia del género humano. Empero, esto mismo nos hace concebir que así nuestra experiencia ancestral hubiera sido distinta a la efectivamente recogida: por ejemplo, si el hombre hubiera tenido la suerte de descubrir, desde los más primitivos tiempos, un medio para trasladarse de un punto a otro

(1) Rey Pastor: Introducción a la Mecánica superior. Madrid, 1916. Pág. 39.

(2) La valeur de la Science. París 1907. Pág. 125

del espacio con una velocidad vertiginosa y que no hubiera sido entonces una simple fantasía para entretener las mentes juveniles, la historia de las botas de de siete leguas, ¿quién se atrevería a asegurar que la concepción del espacio sería para estos hombres igual a la nuestra? ¿No serían, acaso, causales suficientes para alterar sustancialmente la concepción del Universo, el fenómeno del achataamiento de los cuerpos en sentido de la velocidad relativa y la marcha más o menos lenta del tiempo en los diversos sistemas físicos en movimiento, que para este observador tendrían los caracteres de una inveterada experiencia y por consiguiente formarían parte integrante de su manera de percibir el mundo externo?

La interpretación del principio de relatividad, dado por Minkowski, no viene a equivaler a otra cosa, según mi opinión, a que la afirmación de que un ser racional capaz de trasladarse de un punto a otro con velocidades comparables a la de la luz, adquiriría a través de la herencia ancestral, la noción del Universo como un continuo geométrico cuatridimensional, en que no habría distinción entre lo que nosotros llamamos espacio y tiempo.

Ahora bien, este continuo poseería las propiedades de un espacio euclídeo, es decir, de un continuo geométrico de la misma naturaleza interna o estructura que nuestro espacio intuitivo, pues nacería de la yuxtaposición de una cuarta dimensión a las tres de nuestro continuo espacial. Como veremos luego, esto se define matemáticamente por la forma algebraica que toma la expresión de la distancia entre dos puntos infinitamente próximos del continuo, y la que hemos encontrado para el Universo de Minkowski (fórmula 2) es la que conviene a los espacios euclídeos.

(Continuará)
