Las ideas de tiempo y espacio en la física moderna

POR

MANUEL ALMEYDA

(Conferencias dictadas el 26 de Septiembre y 3 de Octubre de 1916).

(*Conclusión*).

Estas ecuaciones nos manifiestan que, para un observador en reposo con ɜspecto a S, los puntos del sistema S' tienen cada uno un tiempo particular, desısado con respecto al tiempo del sistema S de una cantidad igual a $\frac{v}{c^2}x$. Adeıás, creerá el mismo observador que la unidad de tiempo de S' se ha reducido en ı proporción de k: 1, en comparación con la unidad del sistema S, es decir, que i suponemos dos viajantes que marchan juntos y llevan sus relojes de acuerdo y ue en un momento dado se separan con la velocidad relativa v, entonces, si cada no tuviese la facultad de leer en la esfera del reloj de su compañero, con tanta ıcilidad como en la esfera de su propio reloj, le parecería a cada cual que, por ada unidad de tiempo que marca su reloj, el del compañero marcaría sólo k: 1 ınidades. Generalizando, podemos decir que toda persona creerá que los fenómeıos se desarrollan más despacio en los sistemas en movimiento con respecto a ·lla y que cuanto más se acerque la velocidad relativa a la velocidad de la luz, anto más lento será el desarrollo de los hechos en el otro sistema, de modo que, legado el caso límite de un sistema que se separa con la velocidad de la luz, le ɔarecerá al observador que el tiempo ha detenido, en ese sistema, su marcha para ıiempre.

Si fijamos ahora nuestra atención sobre las coordenadas que definen el esɔacio, vemos que y y z, las coordenadas perpendiculares al movimiento, no exɔerimentan variación; en cambio x, coordenada paralela a la velocidad relativa le los sistemas, sufre una alteración semejante al tiempo: una distancia que melida por una persona en reposo con respecto a S resulta igual a la unidad, resulıará igual a k: 1, menor que la unidad, para un observador que se mueve con resɔecto a S.

Se puede expresar este resultado en otra forma. Supongamos dos observadores, A y B, situados respectivamente en S i S'. Si A observa un objeto material y encuentra que está limitado por una superficie esférica, B, observando el mismo objeto, encontrará que está limitado por un elipsoide de revolución, cuyo menor diámetro es paralelo al movimiento relativo de los sistemas. La esfera se ha achatado aparentemente en el sentido del movimiento, según todo observador animado de cierta velocidad, con respecto a ella, y cuanto mayor sea ésta, mayor será el aplastamiento, hasta que en el caso límite de una velocidad relativa, igual a la de la luz, la esfera parecerá reducida a un disco. La teoría de la relatividad conduce, pues, como la teoría de Lorentz, a la contracción en cierto sentido de los cuerpos en movimiento; pero, mientras que según Lorentz, se trataría de una contracción real y mensurable, según la teoría de la relatividad, es sólo una contracción aparente, es el resultado de una apreciación puramente personal. Lo que un observador considera esfera, será considerado, por todo otro observador en movimiento con respecto a él, como elipsoide de revolución; e inversamente, las que a estos últimos parecerán esferas, serán consideradas por el primero, como elipsoides de revolución. Se trata de una disconformidad recíproca de apreciación y no hay base para poder sostener que alguno tenga más razón que los demás en su manera de apreciar la naturaleza externa. Se puede decir, por consiguiente, que la forma no es una cualidad inherente a las cosas del mundo externo, sino simplemente la apreciación personal de un observador determinado. Así como para dos individuos animados de velocidad relativa, dos fenómenos pueden parecer al uno simultáneos y al otro sucesivos, así también, dos longitudes que para el uno parecerán iguales, para el otro serán de distinta magnitud.

La ecuación de transformación de t muestra al mismo momento, que existe una conexión indisoluble entre el tiempo y el espacio relativistas, puesto que t' se encuentra expresado en función de x y de v. Uno de los más eminentes partidarios de la Teoría de la Relatividad, H. Minkowski, ha expresado esta dependencia mutua, en una forma geométrica notable.

Para darse cuenta del alcance de esta representación, veamos primero cuál es la interpretación geométrica equivalente de las ecuaciones del movimiento relativo en la mecánica newtoniana. Sean dos sistemas planos de referencia (x, y) y (x', y'), cuyos ejes son paralelos y los orígenes han coincidido en el momento $t = t' = o$. Si ambos sistemas poseen una velocidad relativa v paralela a x, hemos visto que las ecuaciones de transformación son

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad t' = t$$

Ahora bien, podemos obtener igual sistema de ecuaciones elevando en el origen del sistema (x, y) un tercer eje que represente el tiempo. Si hacemos girar este eje de un ángulo $= arc\ tg\ v$ en el plano de las (t, x) obtendremos las ecuaciones buscadas.

Minkowski demostró que si se refieren las ecuaciones de los fenómenos na-ırales a un sistema de coordenadas tetradimensional (x, y, z, l) en que $l = ict$, iendo $i = \sqrt{-1}$ y c la velocidad de la luz, entonces el paso de un sistema de oordenadas a otro en movimiento de translación uniforme con respecto a él se btiene, como en el caso anterior, haciendo girar el eje de las l (que representa el empo) en el plano de las (x, l). Así mismo, hizo ver Minkowski que todas las cuaciones de la Física adquieren en este sistema de cuatro dimensiones una si-ıetría y sencillez admirables.

Estos notables resultados lo indujeron a decir en su disertación famosa titu-ıda «Raum und Zeit», leída ante el congreso alemán para el avance de las ieıcias reunido en Colonia en 1908 (28), que, «en nuestros días, las nociones de iempo y espacio deben ser abandonadas, pues sólo una especie de unión entre mbas es capaz de poseer una completa independencia».

Según Minkowski, en el mundo, considerado en su más amplia generalidad, s imposible discernir el tiempo del espacio, ambos constituyen un conjunto ho-ıogéneo de cuatro dimensiones, al que llama el «Universo« (Welt). Cada punto ıaterial del espacio intuitivo, considerado en un instante cualquiera, constituye n punto del Universo (Weltpunkt); la serie continua de un punto del Universo través de las etapas del tiempo intuitivo, constituye una «línea del Universo» Weltlinie).

Así como por un punto cualquiera de nuestro espacio intuitivo es posible acer pasar infinitas líneas, así también por cada punto del Universo es posible :azar infinitas líneas del Universo, cada una de las cuales es la representación ıdividual de la historia de un punto material a través de las edades, de cada uno e los infinitos observadores que es posible imaginar situado moviéndose en el spacio. Un individuo aislado desdobla el Universo tetradimensional en dos siste-ıas de referencia: un sistema unidimensional, que llama tiempo, y un sistema tri-imensional, que llama espacio. Proyecta en seguida, separadamente, cada punto el Universo sobre los ejes coordenados de estos dos sistemas; pero de la misma ıanera que en estereometría un punto geométrico se puede proyectar de infinitas ıaneras distintas sobre infinitos sistemas arbitrarios de planos de coordenadas, sí también un punto del Universo se puede proyectar de infinitas maneras sobre ɔs diversos sistemas arbitrarios posibles de tiempo y espacio. Cada observador iseminado en el Universo, elegirá el juego de sistemas que le parezca más con-eniente. Un conjunto de puntos materiales que para uno de los observadores se ıroyecta como una esfera en el triedro que ha escogido como sistema de referen-ia espacial, se proyectará para otro observador como un elipsoide y para otro, alvez, como un disco. Dos puntos del Universo, o sea dos sucesos considerados n un instante dado, que para cierto individuo se proyectan en un mismo punto

(28) Ha sido reimpresa en Lorentz, Einstein, Minkowski: Das Relativitätsprinzip. Eine ıammlung von Abhandlungen. Leipzig, 1913.

del eje del tiempo, se proyectarán para otro en puntos diferentes y lo que el primero consideró como hechos simultáneos, han pasado a ser sucesivos para el segundo.

La concepción de Minkowski nos demuestra, además, que el tiempo y el espacio físico no son otra cosa que concepciones antropocéntricas, nacidas en nuestra conciencia del contraste entre la pequeñez de nuestro sér y la inmensidad de' mundo sensible.

El Universo tetradimensional de Minkowski representa un avance enorm hacia la concepción superhumana integral de la naturaleza, ideal de la Física según Planck (29), es decir, tal como apareceria a una inteligencia semejante a la nuestra, infinitamento extensa y profunda a la vez, capaz de abarcar de un solo golpe de vista tanto lo inmensamente grande como lo extraordinariamente pequeño.

Con esta concepción grandiosa, Minkowski llevó a la Teoría de la Relatividad al punto culminante de su desarrollo. Su muerte prematura, acaecida en 1909, privó a la nueva doctrina de uno de sus más potentes sostenedores. De entonces acá la lucha ha sido tenaz, y a veces agria, entre los partidarios de la Física clásica y los partidarios de la Física nueva. La Teoría de la Relatividad ha debido ceder en parte a los ataques obstinados de los clásicos; en cambio, éstos, por su parte, han debido reconocer el carácter metafísico de sus concepciones del tiempo y del espacio y la necesidad de reformarlas de acuerdo con el principio de relatividad.

La cuestión del éter es hoy dia la manzana de la discordia. Los partidarios de la Física clásica no aciertan a concebir un espacio completamente vacío que no sea el espacio absoluto de Newton; que sea la nada absoluta, y,por consiguiente, la negación de toda realidad, de toda posibilidad de existencia.

Los partidarios de la Física nueva han hecho ver que al éter, como elemento constitutivo del Universo, la Teoría de la Relatividad ha sustituído la Energía; pero no ya como un sér extático e impasible en medio de la naturaleza pletórica de vida, sino como un sér animado, como un espíritu que forma la esencia misma de las cosas, como un raudal de vida que infiltra todo lo existente, como la sangre del Universo que fecundan todos los miembros de su inmenso organismo y se transforma en materia al ponerse en contacto con nuestros sentidos.

Según la nueva doctrina, la Energía poseería una existencia objetiva, por sí misma, independiente de todo substratum material y, lo que es más notable aún, sería inerte, es decir, tendría una cierta masa y la masa de los cuerpos accesibles a nuestros sentidos, no sería más que la resultante de una cantidad fabulosa de energía acumulada en una reducida extensión del espacio. Bajo este punto de vista

---

(29) Según lo ha expuesto en su disertación titulada: Die Einheit des physikalisches Weltbildes-Leipzig, 1909.

a Teoría de la Relatividad coincide con la concepción energética del Universo ustentada, por Ostwald desde hace 25 años.

Sin embargo, considerándola en su aspecto filosófico, la Teoría de la Relati-ridad no satisface plenamente al espíritu y su propio fundador se ha encargado le hacernos visible este defecto. La Teoría basada sobre el principio enunciado or Einstein en 1905, es sólo una teoría relativista a medias: ella nos da una solu-ión al problema de coordinar los fenómenos naturales de manera que sean in-lependientes del estado de movimiento uniforme y constante de los cuerpos en ue se producen; pero nos deja completamente a obscuras respecto a lo que sig-ifica ese movimiento, no nos dice una palabra sobre el origen y el alcance de la ey de la Inercia. El viejo problema del significado de las leyes de la Mecánica o ha dado un solo paso con el Principio de Relatividad, y la Teoría derivada de ste está, por consiguiente, sujeta a las mismas objeciones que hemos visto que Ieumann y Mach han lanzado en contra de toda doctrina construída sobre la me-ánica newtoniana.

Profundamente influenciado por las ideas filosóficas de Mach, Einstein ha bordado últimamente el problema de construir una teoría relativista del Uni-erso, que esté completamente de acuerdo con esas ideas, es decir, una teoría en ue las leyes de los fenómenos sean independientes de los sistemas de coordena-las elegidos.

En esta nueva doctrina, que ha sido calificada de admirable por uno de los ás ilustres partidarios de la existencia objetiva del éter (30) la gravitación ad-uiere un papel preponderante. Según Einstein, la inercia y la gravedad no son ino dos aspectos distintos de una misma y única entidad real: la Energía. Esta no ólo es inerte, no sólo tiene masa, sino posee también peso. La energía gravita, trae a otra porción de energía en razón directa de su cantidad e inversa del cua-rado de la distancia y por consiguiente, la matergia pesante, no es otra cosa que na enorme acumulación de energía. Materia y enería, son exactamente la misma ntidad real. La luz que nos viene del sol, no llegaría a nuestro globo con la velo-idad relativa de 300 000 km. por segundo, sino que caería sobre la tierra con una elocidad creciente, siendo al llegar a la superficie su aceleración la misma que de los cuerpos que caen en el vacío. Una perturbación electromagnética, lan-ada desde un punto a través del espacio, no se propagaría indiferente a las acu ulaciones de energía, o sea, a la materia diseminada por su camino. Igual que un ometa errante, su trayectoria sería un eterno gravitar, ya hacia un astro, ya acia otro, describiendo colosales arcos de paralela, hipérbolas o elipses a su alre-edor, hasta caer absorvida en el centro de atracción de alguno de ellos.

Lorentz: La Gravitation. «Scientia» 1-VII 1914. Para la nueva Teoría de la Relati-dad, véase: Einstein und Grossmann: Entwurf eine verallgemeinerte Relativitätstheorie und ne Theorie der Gravitation. Leipzig, 1913. También el artículo de «Scientia» titulado: Sum lativitäts-problem.

Dada la extrema pequeñez de la masa gravitante de un rayo luminoso, esta acción de la pesantez será imposible de observar sobre la faz de la Tierra; pero Einstein ha calculado que un rayo de luz venido de una estrella y que pasa rozando por la superficie del Sol, deberá experimentar una desviación de 0."83, cantidad de la cual la posición aparente de la estrella sería alejada del Sol. Lorentz admite que este fenómeno talvez puede ser evidenciado en un eclipse total del astro luminoso. Pero de otra manera la teoría de Einstein ha sido ya sometida a la experiencia y los resultados obtenidos parecen confirmar sus afirmaciones (31). Una consecuencia de ella es que si se observa a través de un espectroscopio un rayo luminoso contiguo a un gran centro de fuerza gravitacional y otro rayo alejado de un gran centro de atracción, las rayas espectrales del primero parecerán desplazadas hacia el rojo con respecto a las del segundo. Pues bien, desde muchos años se había observado que las rayas del espectro solar no coincidían con las de una fuente luminosa terrestre, encontrándose desplazadas en el mismo sentido y del mismo orden de magnitud que lo exige la teoría de Einstein. Se atribuía este fenómeno a efectos de presión y de movimiento en la atmósfera luminosa del Sol, pero es muy posible que sea debido a la causa indicada por Einstein.

Si la Teoría de la Relatividad en su nueva forma, que he indicado someramente, es confirmada por la experiencia futura, podremos decir que ha quedado resuelto el problema fundamental de la Física en la forma enunciada hace más de 40 años por Mach: Determinar las leyes que rigen la evolución de un sistema material en función de los estados anteriores del Universo (32). Naturalmente, este problema no alcanzará jamás sino una solución aproximada, puesto que nuestro conocimiento del mundo externo es limitado.

Me parece que con este avance, la Teoría de la Relatividad dará vida fecunda a una concepción del Universo que ha vagado desde hace siglos por el pensamiento de la Humanidad, sin que jamás haya alcanzado la suerte de ser formulada en un cuerpo de doctrina bien definido, seguramente por haber carecido de la base experimental que la nueva Teoría pone hoy día a su disposición: es la que podemos llamar Concepción integral del Universo.

A través de las nuevas ideas, el Universo se nos presenta como un solo todo pleno de Energíamateria en una escala interminable de formas diversas; desde la materia bruta en su máximun de pasividad, hasta la energía pura, que es la acción en toda su plenitud. Un punto del Universo se encuentra unido a todos los demás puntos por la trama indisoluble de las radiaciones electromagnéticas, y el mundo entero gravita por medio de ellas sobre él.

---

(31) Lorentz: loc. cit

(32) Este enunciado no se encuentra textualmente, pero se desprende de diversos pasajes de su famosa disertación titulada: Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit Prag 1872. Reimpresión facsimilar, Leipzig, 1909.

Se puede decir que en el Universo el todo se encuentra en cada una de sus partes, y que cada una de las partes se halla igualmente diseminada en el todo (33). Es sólo la flaqueza de nuestro espíritu la que nos hace creer que vivimos aislados en el conjunto de la Creación y que nosotros, las cosas y los astros que pueblan el campo de nuestra vista, podrían tener una existencia propia independiente de todo el resto del mundo. ¡Vana ilusión! Si nuestra conciencia no se halla en relación sino con los seres inmediatos a nosotros, los átomos de nuestro cúerpo y los átomos de todas las cosas que nos rodean se hallan en relación indisoluble con todos los átomos del Universo, haciendo que su estado actual no sea más que el reflejo de la serie interminable de sus estados pasados.

Nuestra conciencia se ha visto obligada, para poner de acuerdo la realidad de la existencia, con nuestra percepción limitada e incompleta de la naturaleza, a introducir en nuestra concepción del Universo, las nociones de Tiempo y Espacio como dos guías de que el espíritu humano se ha provisto para orientarse en la selva de los fenómenos naturales, haciéndonos caer en la ilusión de que los fenómenos se desarrollan a lo largo del primero, y de que los seres se encuentran incluidos en el segundo, como si en realidad ambos conceptos tuvieran una realidad objetiva. Pero, en el fondo, Tiempo y Espacio no son sino el resultado del contraste entre la naturaleza inanimada, que es toda una e infinita, y nuestro espíritu, capaz sólo de percibir y concebir una extensión reducida e incompleta de ella.

Y bien, toda esta realidad infinita, inconcebible, estaría constituida únicamente por Energía, que no es en último análisis otra cosa que radiaciones electromagnéticas, las que, al caer sobre nuestra piel, nos dan la sensación de calor; al caer sobre nuestros ojos, nos dan la sensación de luz, y al actuar con diversas intensidades sobre sí misma, produce los fenómenos eléctricos, magnéticos y químicos. En otras palabras, todo en el mundo no sería sino luz: luz visible o luz invisible, luz que se transforma en vida en las misteriosas reacciones que tienen su asiento en la célula orgánica, o que se transforma en pensamiento en la célula cerebral, constituyendo una eterna evolución hacia arriba, como una espiral infinita que arrastra al Universo en su colosal torbellino. Me parece, entonces, que ha sido una grandiosa intuición la del poeta que dijo:

Mi ideal es la luz, la luz inmensa
que en raudas ondas sube
del fondo del misterio que comienza,
del fondo del misterio que concluye.

---

(33) Meyerson, en su obra magistral ya citada, reproduce frases de Diderot, D'Alembert y Leibnitz que contienen en germen una concepción integral del Universo. Véase pág. 351. En nuestros días, las mismas ideas se encuentran con frecuencia en los más notables pensadores. Me bastará citar: Poincaré, Dernières Pensées. París, 1913. Artículo L'Espace et le Temps; E. von Hartmann, Die Weltanschaung der modernen Physik. 2.ª ed , Leipzig, 1910.