

XXVII.

ESPACIO, TIEMPO Y MASA

SEGUN LAS IDEAS MODERNAS

CONFERENCIA LEÍDA EN EL SALÓN DE ACTOS EN LA ESCUELA INDUSTRIAL DE LA NACIÓN
EL 16 DE JULIO DE 1910⁽¹⁾

«Anales de la Sociedad Científica Argentina», t. LXIX, págs. 223-243 (*).

I.

Todos sabemos que en estos momentos atravesamos una profunda crisis en el campo de las investigaciones y disciplinas científicas.

El actual período histórico se diferencia de los precedentes en que no sólo algunas hipótesis, sino que también grandes principios - de los cuales algunos universalmente aceptados, no se discutían ya - han sido súbitamente objeto de nuevas discusiones y críticas, mientras viejos sistemas que se reputaban definitivamente desestimados, resurgen de repente.

Puede decirse que hemos presenciado el progreso y difusión de una nueva disciplina en casi todos los campos de las ciencias físicas y biológicas: la *energética*, la que ha conmovido el antiguo fundamento mecánico de los fenómenos naturales creado por la filosofía cartesiana. Hemos visto también nacer nuevas ramas vigorosas de ciencias, como la físico-química, las cuales han dado lugar a las más opuestas tendencias. Al mismo tiempo hemos asistido al descubrimiento de innumerables hechos en los clásicos campos de la ciencia, y tanto en el cielo como en la tierra, han sido reveladas muchas cosas que la filosofía no sospechaba siquiera, desde las nuevas fuentes del calor terrestre hasta la acción de la luz sobre los astros, desde las ondas eléctricas hasta la disociación de los átomos.

Las nuevas orientaciones de la actividad científica, los nuevos hallazgos, sus interesantes aplicaciones, han dado lugar a controversias entre matemáticos, físicos y naturalistas; pero en los últimos tiempos se produjo algo

(1) Versión del italiano por el ingeniero S. E. BARABINO.

(*) Questa conferenza fu tenuta a Buenos Aires in occasione del Congresso scientifico internazionale americano, indetto per la celebrazione del primo centenario della Rivoluzione argentina di Maggio. In quella stessa occasione - precisamente il 15 luglio 1910 - il VOLTERRA tenne un'altra conferenza (dal titolo *Funzioni di linee, equazioni integrali e integrodifferenziali*), della quale soltanto undici anni dopo fu pubblicato un riassunto, in italiano, negli «Anales de la Sociedad Científica Argentina», t. XCII, 1921, pp. 31-43. Poiché il contenuto sostanziale di tale riassunto - di carattere discorsivo e occasionale - è largamente implicito in Memorie e Note, che già hanno trovato posto in questi primi tre volumi delle «Opere», si è ritenuto superfluo ripubblicarlo. [N. d. R.]

muy fundamental que ocasionó una grave revolución en el pensamiento crítico moderno. Esta perturbación constituye la preocupación dominante en los sabios de hoy día, y es precisamente de esto de lo que voy a hablaros.

II.

Los conceptos fundamentales de la filosofía natural son indiscutiblemente los de *espacio, tiempo y materia*. Para convencerse de ello, basta pensar que todas las medidas se resuelven en la determinación de estos tres elementos, y que todas las unidades de medida pueden hacerse depender de las fundamentales, tiempo, espacio y masa; y basta reflexionar que no se alcanza ninguna ley cuantitativa, ni una concepción exacta del mundo, sin la medida; y no puede hacerse ninguna aplicación de las matemáticas - instrumento poderoso y delicado de la mente humana - si las entidades examinadas no entran en el campo de las commensurables.

Ahora bien, estos tres conceptos fundamentales han sufrido en los últimos tiempos una transformación grandísima. Las ideas corrientes hoy se diferencian notablemente de las que hasta hace poco se aceptaban, y principios que parecían no poder removerse del sitio en que los colocara NEWTON, son objeto de una crítica implacable, y admirable a la vez, que los quebranta por completo.

III.

Empecemos por examinar cuáles han sido los factores que impusieron este orden de ideas, comenzando por estudiar del modo más breve posible, por falta de tiempo, la evolución de la teoría de las ondas, los fundamentos de las modernas teorías electrodinámicas y especialmente las consecuencias a que ha conducido recientemente el concepto de los electrones.

Si examinamos el desarrollo de la teoría de las ondas veremos que, a medida que este estudio ha ido extendiéndose bajo la denominación de teoría ondulatoria, se han abarcado categorías más amplias de fenómenos, su sentido se ha hecho más vago, perdiendo fatalmente aquella determinación que inicialmente tenía.

HUYGHENS empieza su tratado sobre la luz observando que el sonido se propaga, alrededor del punto donde se produce, por medio del aire, cuerpo impalpable e invisible, con igual velocidad en todo sentido, por cuya razón deben formarse superficies esféricas cada vez mayores, las cuales llegan a herir nuestro oído; y agrega que la luz debe llegarnos, igualmente, de los cuerpos luminosos, mediante un movimiento impreso a una materia, el éter, el cual debe a su vez propagarse análogamente mediante superficies esféricas, que deben llamarse *ondas esféricas*, por el estilo de las que se forman en el agua cuando se arroja una piedra en ella.

Lo dicho no deja duda alguna sobre la significación que HUYGHENS daba a la teoría de las ondulaciones. En el concepto general de los fenómenos

luminosos le precedieron CARTESIO, HOOKE y otros, pero fué él quien aplicó la palabra *onda*. De modo que con esta sola palabra ha coligado tres clases de fenómenos esencialmente distintos entre sí, es decir, los fenómenos visibles en la superficie de los líquidos, los ocultos en el interior de los flúidos elásticos y, merced a una atrevida hipótesis, los luminosos. La fuerza de una tal coligación debida al empleo acertado de la palabra *onda* es uno de los hechos más memorables en la historia de las ciencias y un ejemplo típico que conviene hacer conocer.

Al crear HUYGHENS la locución *sistema de las ondas*, se refería tan sólo a los flúidos, es decir a los líquidos y gases; limitación que se mantuvo por algún tiempo, pero que dió lugar a insuperables dificultades, pues no era exacto comparar el mecanismo de la propagación de la luz con el del sonido, siendo así que los fenómenos de la polarización de la luz no son compatibles con los movimientos de los gases. Por lo demás, en el sonido no hay ningún fenómeno de polarización.

El doctor YOUNG no consiguió vencer la dificultad; FRESNEL, con un rasgo verdaderamente genial, la superó después de largos años de trabajo y meditación, estableciendo que las vibraciones luminosas deben ser transversales y no longitudinales. Los flúidos elásticos gaseosos no son capaces de transmitir sino vibraciones longitudinales, luego la teoría de las ondas limitada a los flúidos no puede abarcar los fenómenos luminosos. Se hizo necesario ampliarla considerablemente de manera que la teoría de las ondulaciones comprendiera todos los fenómenos de los pequeños movimientos de los cuerpos flúidos y sólidos de modo tal que todo fenómeno que pueda explicarse mediante tales movimientos queda comprendido en esta teoría.

Desde este punto de vista se han desarrollado los célebres trabajos de CAUCHY, LAMÉ, GREEN, NEUMANN, STOCKES, KIRCHHOFF y otros geómetras y físicos que han estudiado en sus diversos aspectos la teoría de los pequeños movimientos. De este modo la teoría elástica de la luz se formó y desarrolló de una manera admirable, mediante el análisis matemático más profundo.

Pero, ¿ qué se entiende por *onda*, en vista de que la simple semejanza entre la de los flúidos y la de los sólidos da lugar, como vimos, a dificultades?

Si examinamos un cuerpo de tres dimensiones, *isótropo*, es decir, igualmente constituido en todos sus sentidos, cualquier perturbación longitudinal o transversal, limitada inicialmente entre dos esferas concéntricas, se propaga con velocidad uniforme conservándose siempre entre dos esferas concéntricas.

La onda esférica simple es, pues, una perturbación que pasa sin dejar rastro tras de sí.

Pero si examinamos un medio isótropo de dos dimensiones, por ejemplo una membrana elástica, no pueden conseguirse ondas circulares que pasen sin dejar tras de sí perturbaciones.

Análogamente, en todo medio elástico que posea una resistencia de rozamiento, las ondas esféricas dejan trazas de su paso. Es, pues, natural, espontánea, la distinción entre ondas con y sin residuo. Para estas vale el

principio de HUYGHENS en su primitivo concepto. Para las otras, no, pues hay que modificar al respecto la forma del principio mismo, o decir, con HADAMARD, que tal principio no subsiste.

Establecido así este punto fundamental, apresurémonos en esta breve noticia histórica a alcanzar el período que pueden caracterizar los dos grandes nombres de MAXWELL y HERTZ.

IV.

Me falta tiempo para indicar aquí cómo se han llegado a coligar entre sí los fenómenos eléctricos con los luminosos. Por una sucesión de esfuerzos, a partir de FARADAY, que han conducido a las bellas experiencias de RIGHI, se llegó a ello y, preciso es convenir, que la parte más brillante de todas estas investigaciones estaba reservada al análisis matemático.

En efecto, las analogías analíticas descubiertas por MAXWELL entre las ecuaciones diferenciales del campo eléctrico-dinámico y las de la óptica, han precedido á todos los otros resultados y dieron lugar a las investigaciones experimentales.

MAXWELL creó así la teoría electromagnética de la luz, monumento grandioso cuya importancia sólo puede equipararse a la de los magnos sistemas de la filosofía natural. HERTZ la comparó con un puente magnífico que une dos campos de la física antes completamente separados.

La impresión que produce este resultado, aun a *prima facie*, es grandísima; pero si se examina más de cerca y se reflexiona, se descubre que la revolución causada por la teoría de MAXWELL todavía es mayor aún de lo que pudo creerse al principio.

En efecto, los fenómenos electromagnéticos no entran en la teoría general de los fenómenos elásticos, y es por esto que la teoría electromagnética de la luz ha hecho retirar la óptica del campo de la elasticidad.

Las palabras, sin embargo, no han cambiado, y se sigue hablando de *vibraciones*, *ondas*, etc.; pero su sentido primitivo ha sido modificado, quedándole tan sólo la interpretación analítica. Como lo ha demostrado magistralmente HERTZ, no hay sino vectores variables con el tiempo y la posición, vinculados por ecuaciones diferenciales.

En otros términos: la teoría de las ondas aplicada a los fenómenos electromagnéticos, en los que se incluye los luminosos, ha perdido su base mecánica.

Lo que queda como vínculo entre los varios fenómenos que entran en la teoría de las ondas, es una ligazón analítica que sólo las ecuaciones pueden explicar, pues tanto las vibraciones de los cuerpos elásticos como las electromagnéticas, dependen de ecuaciones diferenciales, llamadas por los géometras de *tipo hiperbólico*, las cuales tienen propiedades bien netas y definidas. En efecto, lo que domina la teoría analítica son las características reales propias de las ecuaciones diferenciales hiperbólicas, cuya interpretación desde el punto de vista físico puede hacerse de una manera completa y ple-

namente lúcida. Pero debe agregarse que, en tal caso, del campo de la teoría de las ondas quedan eliminadas las que el mismo HUYGHENS había tomado como tipo, más aún, que habían dado nombre a las demás; en una palabra, que eran las generadoras de toda la familia: quiero decir que se eliminan las ondas líquidas.

Estas, en efecto, no dependen de ecuaciones de tipo hiperbólico, ni sus leyes de propagación son semejantes a las elásticas y electromagnéticas. Siguen otras leyes, reveladas y enunciadas por la hidrodinámica.

Singular contraste que, en verdad, no es el primero, ni será el último en la historia de la ciencia, y que es un ejemplo típico de la evolución del lenguaje científico.

V.

Las ecuaciones establecidas por HERTZ como base de la electrodinámica constituyen, por una parte, la síntesis de un gran número de teorías y, por la otra, han marcado nuevos rumbos a las subsiguientes investigaciones. Ellas compendian las leyes de la electrostática y del magnetismo, las de las acciones ponderomotrices de las corrientes, las de la inducción electrodinámica y, en fin, de la óptica.

Si se quisiera enunciar en pocas palabras lo que las mismas ecuaciones nos expresan, se podría decir que el estado de un campo electromagnético está definido en cada instante y lugar por dos vectores que nos dan respectivamente las fuerzas eléctricas y magnéticas. La variación de cada uno de estos elementos se puede calcular mediante el valor de los elementos mismos en los alrededores de los puntos que se consideran. Es de este modo que el estado futuro depende del presente con normas perfectamente determinadas.

Pero las ecuaciones de que hemos hablado se refieren a los medios inmóviles. Las mayores dificultades se presentaron cuando se quiso pasar al caso de un sistema en movimiento. Poco tiempo después de haber publicado HERTZ su primer memorable trabajo sobre electrodinámica, dió a luz otra memoria titulada *La electrodinámica de los sistemas en movimiento*, en la que establecía un postulado fundamental, sumamente simple, mediante el cual podía efectuarse el paso del reposo al movimiento.

Establecido dicho postulado, era fácil para los matemáticos deducir de las conocidas ecuaciones de la electrodinámica de los sistemas en reposo la de los sistemas en movimiento, lo que ocurrió en realidad, dándonos el sistema de ecuaciones de HERTZ para los cuerpos en movimiento.

Antes de pasar adelante hubo que someter estas ecuaciones a un examen minucioso y profundo para ver si correspondían a los hechos que la observación revelaba, como se hace en general en todas las investigaciones físico-matemáticas. En primer término, la inducción nos conduce a las leyes elementales con las que se desea caracterizar el fenómeno (en nuestro caso el postulado que acabamos de enunciar); luego, con un proceso deductivo en el que interviene con toda su eficacia el medio matemático, se reconsti-

tuye el fenómeno y se estudian sus particularidades; por fin, las previsiones del cálculo le someten a un control experimental — directo o indirecto — lo que constituye la verificación de que trataremos en seguida.

Ahora, los principios de la conservación de la electricidad y del magnetismo son comprobados por las ecuaciones de HERTZ; y lo mismo ocurre con los de la conservación de la energía y de la acción y reacción; pero si confrontamos los resultados a que conducen las ecuaciones de HERTZ referentes a la óptica con los que da la observación directa, nos encontramos en completa discrepancia. En efecto, dichas ecuaciones no concuerdan con las experiencias de FIZEAU que prueban el arrastre parcial de las ondas luminosas, o, lo que es lo mismo, de las ondas eléctricas transversales.

Esta fué la causa por la cual el postulado y las ecuaciones de HERTZ fueron abandonados.

VI.

Actualmente existe otra teoría, la más universalmente aplicada al estudio y explicación de los fenómenos de la electrodinámica de la óptica en los cuerpos en movimiento, la establecida y desarrollada por LORENTZ, quien partió de algunos postulados elementales que expresó en forma analítica, mediante las ecuaciones que llevan su nombre.

Si analizamos estas ecuaciones, como hicimos con las de HERTZ, llegamos a la conclusión de que no existe ninguna contradicción con los principios de la conservación de la electricidad, del magnetismo y de la energía. Además, en cuanto los fenómenos ópticos podemos decir que el de ZEEMAN, por lo menos en su forma más simple y primitiva, fué previsto por el mismo LORENTZ, siendo, tal vez éste, el primer triunfo notable de su teoría.

Los fenómenos luminosos de los cuerpos en movimiento (a cuya prueba no resistió la teoría de HERTZ), dieron lugar a un gran número de estudios e investigaciones que condujeron precisamente a los grandes e importantes resultados a que aludí al comenzar esta conferencia, dando origen a las nuevas vistas sobre los fundamentales conceptos de *espacio y tiempo*.

¿Es posible evidenciar el movimiento absoluto mediante fenómenos ópticos o electromagnéticos? Esta es la cuestión que se impuso desde el primer momento.

Primero se reconoció que la teoría de LORENTZ explica bien todos los hechos; pero si se quiere que los fenómenos ópticos no estén influenciados por el movimiento de la tierra, hay que desprestigiar en las fórmulas, términos del orden del cuadrado de la aberración (es decir del orden $1/108$).

La memorable experiencia realizada por MICHELSON y MORLEY, cuyas condiciones debían hacer sensibles los términos del orden del cuadrado de la aberración, dió resultados negativos, contrariamente a lo que la teoría de LORENTZ, y demás teorías ópticas, hacían prever. Entonces LORENTZ imaginó una hipótesis suplementaria: según ella todos los cuerpos sufrían — en el sentido del movimiento de la tierra — un acortamiento de $1/(20 \times 10^9)$ en su longitud.

Esta hipótesis impresionó extraordinariamente; muchos fueron los incrédulos al principio, pero paulatinamente han ido modificándose las ideas y la crítica hizo en este sentido grandes progresos. El postulado de la relatividad, vinculado a la transformación de LORENTZ, es decir, el principio según el cual no puede llegarse al conocimiento del movimiento absoluto, ha sido aceptado casi por todos.

Pasaremos a desarrollar este argumento; pero, abandonando el estudio original de LORENTZ, nos colocaremos en el punto de vista de EINSTEIN, o, mejor aún, nos apoyaremos directamente en las más recientes consideraciones de MINKOWSKY, quien consiguió construir sobre una base geométrica la moderna teoría del espacio y del tiempo, cuya primera exposición figura en una memoria que publicó en las actas de la academia de Gotinga, expuesta más tarde, en forma más simple y divulgativa, en una memorable conferencia que pronunció ante el *Congreso de médicos y naturalistas alemanes* en 1908, pocos meses antes de morir. El fin prematuro de este joven e ilustre sabio ha malogrado el conjunto de ideas que se había formado sobre este punto, ideas que pensaba hacer públicas oportunamente, de las cuales sólo nos queda la iniciación.

Antes de abandonar las ecuaciones de LORENTZ y su confrontación con los hechos reales, hemos de referirnos al punto *débil* de toda su teoría. Vimos ya que las ecuaciones de HERTZ correspondían al principio de la acción y reacción. No puede decirse lo mismo de las ecuaciones de LORENTZ: discrepancia que en esta grandiosa concepción queda aún sin resolver.

VII.

Muchos de vosotros habréis leído, ciertamente, una novela inglesa que tuvo en Europa mucho éxito, suscitando un sentimiento de viva curiosidad; me refiero a *El viaje en el tiempo*, novela de WELLS, inteligencia aguda, bizarra y nutrida de una seria cultura.

Podemos cambiar de posición en la superficie terrestre, bajar a sus profundidades, elevarnos en la atmósfera, en una palabra, podemos cambiar de posición en el espacio.

Según WELLS, un inventor ha ideado una máquina singular mediante la cual podemos retroceder en el tiempo recorriendo las épocas pasadas, pero conservando siempre en el espacio la misma posición, y así, con la misma máquina, invirtiendo su marcha, se puede proseguir y penetrar en los tiempos futuros, con la rapidez que a uno plazca, manteniéndose siempre en la misma posición en el espacio. Los que le circundan la ven desaparecer porque la máquina lo conduce a otros tiempos, anteriores o posteriores y puede ver todo lo que ha sucedido en el pasado, todo lo que sucederá en el porvenir.

El tiempo, pues, está considerado por WELLS como otra coordenada que habrá que agregar a las tres que determinan nuestra posición en el espacio, y yo, respecto a este elemental concepto, sólo puedo repetir lo que él le hace decir al imaginario protagonista de su historia, en sus disputas o conver-

saciones con sus contradictores o amigos. Por otra parte, es éste un concepto familiar desde hace mucho tiempo a las matemáticas, tanto que, poco antes, hablando de las ecuaciones diferenciales que se refieren a las vibraciones elásticas y a las oscilaciones eléctricas (que clasifiqué en el tipo de las *hiperbólicas*), dije que el vínculo entre los hechos y la teoría estaba formado por algunos elementos llamados *características*. No habrían podido imaginar y tratar tales elementos los matemáticos si no hubieran tenido la visión de que el tiempo podía considerarse como una cuarta coordenada.

Pero ¿es posible separar los conceptos de espacio y tiempo? Todo lugar es observado en cierto tiempo y cada tiempo está determinado en un lugar dado; luego el espacio y el tiempo están ligados indisolublemente en nuestro espíritu y en todas nuestras acciones.

Supongamos, como es costumbre en geometría, que fijamos la posición de un punto mediante sus tres coordenadas x, y, z . Llamando t el tiempo, un punto del espacio, considerado en un instante dado, estará determinado por los valores x, y, z y t . A este conjunto de cuatro valores le llamaremos un *punto del mundo*; y a la totalidad de los valores que pueden tener x, y, z y t , *Universo*.

Si seguimos una partícula de materia en el infinito subseguirse de los acontecimientos, es decir, en todos los tiempos que fueron y en todos los que han de venir, tendremos una línea que depende de todos los valores posibles de x, y, z y t relativos a dicha partícula determinada. MINKOWSKY concibe una línea tal, a la que denomina *línea universal*, como la imagen del curso perpetuo de la vida de aquella partícula sustancial en el Universo, y, a este mismo tales como al conjunto de las líneas universales relativas a todas las partículas sustanciales existentes.

Ahora bien: en todo lo dicho he empleado términos propios de la geometría, tales como punto, línea, etc.; pero debe entenderse que tal lenguaje se refiere a un espacio que no es el de tres, sino el de cuatro dimensiones. En efecto, si un punto del mundo está individualizado por los cuatro parámetros x, y, z , y t , y el Universo por todo el conjunto de valores de los mismos, quiere decir que el universo de MINKOWSKY es un espacio de cuatro dimensiones.

Esto no crea dificultades a los matemáticos, que están habituados a tratar las cuestiones geométricas en los espacios de cuatro, de cinco, de un número cualquiera de dimensiones, con la misma facilidad y desenvoltura que en el ordinario de tres. El lenguaje geométrico, más bien, es un medio de facilitar las investigaciones y descubrimientos, así como el de enunciar simple y claramente los resultados obtenidos.

Lo que se observa en el espacio de tres dimensiones, según MINKOWSKY, no es más que la sombra o la proyección de un espacio con una dimensión más, o, mejor aún, una sección de este mismo espacio.

Pero, si queremos vulgarizar los conceptos mismos y volverlos intuitivos, poniéndolos al alcance de todos, es menester recurrir a un artificio que ha servido con notables ventajas en otras circunstancias. HELMHOLTZ y CLIF-

FORD, queriendo aclarar elementalmente el concepto de curvatura del espacio, imaginaron seres de dos dimensiones y de una. El primero, por ejemplo, ideó un ser sumamente chato que podía resbalar sobre una superficie; el segundo, forjó un ser vermiforme que podía escurrirse a lo largo de una línea. El ser chato de HELMHOLTZ tiene dos dimensiones y como suponemos que no puede salir de una determinada superficie, el espacio que puede recorrer debe ser también de dos dimensiones. Análogamente, el ser vermiforme de CLIFFORD tiene una dimensión y el espacio que anda, una sola también.

Ahora bien, ¿qué será para el Universo de MINKOWSKY el ente chato?

Si caracterizamos cada partícula material que puede concebirse por medio de las dos coordenadas relativas a su espacio de dos dimensiones y el tiempo en que se las considera, tendremos que su universo será evidentemente de tres dimensiones. Análogamente el universo del ser vermiforme tendrá dos dimensiones.

Si nos limitamos, pues, a estos seres más simples que nosotros, tendremos universos más simples que, siendo representables por espacios a tres o dos dimensiones, nos darán inmediata y directamente la visión de la marcha de sus eventos, mientras las construcciones geométricas que podremos formar en estos universos serán perfectamente apreciadas por nuestros sentidos. Sólo después, con un esfuerzo mental de abstracción y generalización, podremos pasar de estos espacios a nuestro universo de cuatro dimensiones y formarnos un hábito intelectual capaz de concebir los eventos en el espacio mismo.

Más aún, si principiemos por el ser más simple, como su universo tiene dos dimensiones, podremos trazar efectivamente todas las operaciones geométricas a que nos hemos referido, en una hoja de papel, facilitando muchísimo de este modo las operaciones mismas y teniéndolas constantemente a la vista, completamente materializadas y concretas.

Para familiarizarnos con estos conceptos, consideramos la posición de una dimensión, caracterizada por una coordenada x (por ejemplo, su distancia a un punto dado), mientras el tiempo quedará determinado por otra coordenada t , por consiguiente la imagen del Universo nos será dada por el plano xt . Si la partícula está en reposo, su imagen estará representada por una recta paralela a t , la que nos indicará que, con el cambiar de los tiempos, la posición, o sea, la coordenada x , no cambia. Si la partícula se moviera, su imagen sería una línea, que expresaría como con el cambiar de los tiempos cambiaría x , esto es, su posición en el espacio. Si el movimiento fuera uniforme la línea sería una recta, cuya mayor o menor inclinación respecto del eje de los tiempos, indicaría una mayor o menor velocidad; y que ésta será igual a 1 cuando estuviera igualmente inclinada respecto de los ejes.

Con referencia a cuanto hemos dicho precedentemente, para tener en un instante la imagen o la sombra de lo que ocurre en su espacio, el gusano deberá hacer una sección de estas varias líneas con una recta perpendicular al tiempo y que diste del eje tanto cuanto es el tiempo transcurrido. Tales secciones nos darán las posiciones de la partícula que se observa.

Cada partícula sustancial estando caracterizada por un punto en el eje de las x , por cada uno de estos puntos pasará una línea universal de MIN-KOWSKY que nos dirá la historia o la vida de la partícula. El Universo es el conjunto de estas líneas que se aproximan o se alejan sin intersectarse jamás, puesto que cada partícula sustancial conserva su propia individualidad.

Para el ente vermiforme todas las leyes de la naturaleza se reducen á las mutuas relaciones entre estas líneas, puesto que ellas resumen para él todos los eventos pasados, presentes y futuros del Universo.

Si deseamos pasar al universo del ser chato tendremos que considerar dos ejes de espacio x, y , y un eje del tiempo; y en el universo de tres dimensiones referidas a x, y, t podremos razonar análogamente a lo que hemos hecho hasta aquí. En fin, con un esfuerzo agregamos una dimensión ulterior y llegaremos a nuestro universo y a nuestras leyes físicas.

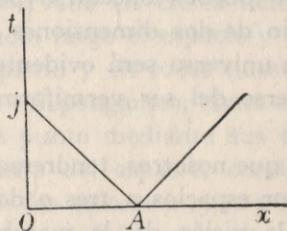


Fig. 1.

Pasemos, ahora, al mecanismo de la propagación de las ondas luminosas o, lo que es lo mismo para nosotros, electromagnéticas.

Tomemos un centro luminoso A (fig. 1) en el universo de dos dimensiones, y supongamos que las unidades de tiempo y longitud se hayan elegido de modo que la velocidad de propagación de la luz sea unitaria. Por A tracemos dos líneas igualmente inclinadas con respecto a los ejes x, t . Las ondas que parten de A y se propagan, tanto de un lado como del otro, son sin residuo; si trazamos desde A dos rectas igualmente inclinadas sobre los ejes, nos darán luego, todos los puntos del universo iluminados por un rayo nacido en dicho centro luminoso.

Si consideremos, en cambio, el universo de tres dimensiones y un centro luminoso A (fig. 2), trazando el cono cuyo vértice es A, cuyo eje es paralelo a t y cuya generatriz está inclinada 45° respecto del eje t , obtendremos en él la imagen de la onda; pero como ésta es de las que dejan residuo, toda la región interna del cono nos indicará la parte iluminada por el rayo partido de A.

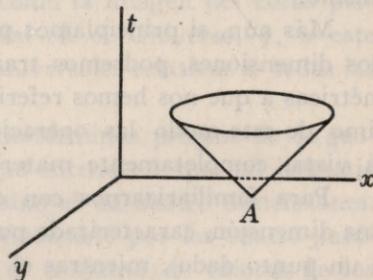


Fig. 2.

Las rectas y el cono trazados en las dos figuras precedentes, no son sino la línea y la superficie características de las cuales hablamos anteriormente.

En fin, queriendo pasar a las ondas luminosas de nuestro espacio, sería necesario imaginar un universo de cuatro dimensiones; y puesto que, como hemos dicho, en este caso las ondas no dejan residuo, el mecanismo de su propagación se aproximará al indicado para el universo de dos dimensiones.

VIII.

Entraremos, ahora, a considerar el movimiento relativo.

¿Qué transformación deberá hacerse, si el observador se mueve con velocidad uniforme?

Bastará evidentemente, según los principios de la mecánica newtoniana, cambiar el eje de las t por otro inclinado t' , conservando el mismo eje x , en la hipótesis más simple del universo de dos dimensiones. En efecto, todos los puntos A de velocidad uniforme igual, estarán representados por una paralela a t y, por consiguiente, parecerán inmóviles al observador. Por otra parte, es sabido que las ecuaciones de la mecánica newtoniana no se modifican cambiando las coordenadas x, t en $x - at, t$, lo cual, según los principios geométricos, equivale a cambiar los ejes x, t por los x, t' .

Pero consideremos la propagación de la luz, para lo cual recordemos las características que hemos considerado anteriormente. Siendo unitaria la velocidad de la luz, ellas constituirán las bisectrices i, j , de los ángulos formados por los ejes.

Establezcamos, ahora, como postulado, en virtud de las leyes ópticas de que hemos hablado ya, que la velocidad de la luz no debe cambiar cualquiera sean los sistemas de referencia.

Es evidente que tal postulado está en contradicción con el principio de relatividad newtoniana, pues al no ser ya las rectas i, j las bisectrices de los ángulos de los ejes x, t' , la velocidad de la luz respecto del nuevo sistema de referencia habrá cambiado. ¿Cómo, pues, se deberá transformar el principio de relatividad, queriendo eliminar esta contradicción?

Se ve inmediatamente que cambiando el eje t por el t' habrá que sustituir el x por el x' de modo que las rectas i, j se conserven bisectrices de los ángulos de los ejes t', x' , lo que equivale a hacer una transformación tal que el binomio $x^2 - t^2$ se cambia en $x'^2 - t'^2$.

Del mismo modo puede reconocerse, pasando del universo de dos dimensiones al de cuatro, que mientras el grupo de transformaciones que representa el principio de relatividad newtoniana es el que cambia a x, y, z, t en $x - at, y - bt, z - ct, t$, el postulado fundamental que hemos establecido se verificará reemplazando dicho grupo por el otro que cambia la expresión cuadrática $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ en sí misma.

Ahora bien: es precisamente este grupo de transformaciones el que no cambia las ecuaciones de LORENTZ de las que nos ocupamos anteriormente.

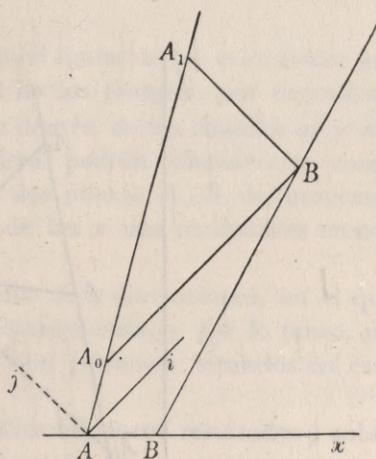


Fig. 3.

Existen, pues, dos principios diversos de relatividad: uno, propio de la mecánica newtoniana; el otro, de la electrodinámica lorentziana. Están en contradicción, por lo que, si aceptamos el segundo, tendremos que modificar los principios de la mecánica para ponerlos de acuerdo con dicho principio. Es lo que muchos autores (en primera línea POINCARÉ y MINKOWSKY) han tratado de hacer.

El nuevo principio de relatividad establece una ligazon más íntima entre el espacio y el tiempo, pues éstos no pueden en manera alguna modificarse sin que la alteración de uno no influya sobre el otro; y, en efecto, el cambio del eje de los tiempos importa la alteración de la dirección del eje de los espacios.

De este conjunto de conceptos, mediante un fácil desarrollo geométrico, se deduce la contracción lorentziana de que hablamos precedentemente.

Las consideraciones expuestas nos conducen a la importante cuestión de la *contemporaneidad de los acontecimientos*.

¿Cuándo pueden decirse contemporáneos dos hechos que acontecen en puntos diversos ?

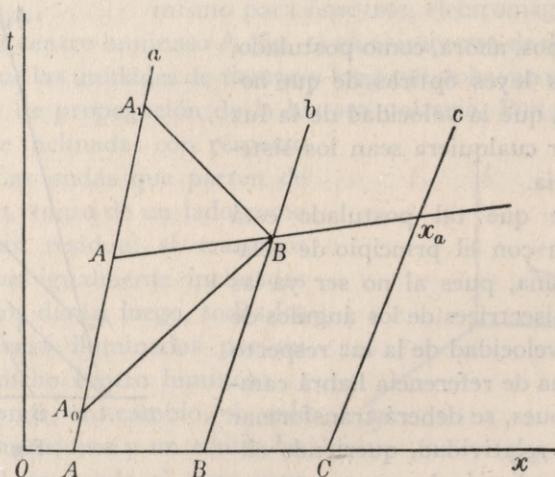


Fig. 4.

La crítica moderna, basada en la teoría que hemos expuesto, responde de una manera nueva y singular a esta fundamental pregunta.

Sean A, B, C , puntos que se mueven según una recta Ox . Según MINKOWSKY las imágenes en el universo de dos dimensiones serán rectas a, b, c . Tracemos las características i, j , las cuales — como hemos visto — representan la propagación de la luz. Supongamos, ahora, que cada observador posea un reloj cuya marcha sea uniforme.

Para arreglar los relojes consideramos como normal el del observador A . Cuando éste se halla en A_0 , en el instante t_0 , hace una señal luminosa que el

segundo observador nota cuando se halla en B. Éste devuelve la señal al primer observador, el cual la percibe cuando ya se halla en A_1 , en el instante t_1 . Las rectas A_0B i BA_1 deben ser respectivamente paralelas a las i y j .

Supóngase que en el momento en que el segundo observador B recibe la señal su reloj marca el tiempo $(t_0+t_1)/2$ se tendrá que la recta AB (siendo A punto medio del segmento $A_0 A_1$), y por consecuencia todas las rectas a ella paralelas, representan puntos de contemporaneidad respecto del reloj normal A.

Ahora, se reconoce fácilmente que si se considera a a como la dirección del eje de los tiempos, la recta AB es la dirección del eje de los espacios (según la construcción que hicimos antes). Luego, si tomamos como reloj normal el de B, los puntos de contemporaneidad estarán determinados por las rectas paralelas a x_b , es decir, a aquella recta que forma el eje de los espacios cuando se considera a b como eje de los tiempos. Pero las direcciones x_a , x_b no coinciden, pues los ángulos $\widehat{x_a x_b}$ y \widehat{ab} deben ser iguales, como es fácil probarlo.

De ello deducimos que fenómenos, contemporáneos respecto del primer reloj, no lo son ya respecto del segundo.

Como conclusión podemos decir:

1° Que la velocidad de la luz representa el límite de las velocidades posibles, puesto que el eje de los espacios y el de los tiempos, por necesidad, siempre deben estar situados respectivamente dentro de los ángulos \widehat{xi} y \widehat{ti} ;

2° Que dos acontecimientos cualesquiera podrán considerarse como contemporáneos, siempre que correspondan a dos puntos A, B, del universo, tales que la recta AB tenga respecto del eje de las x una inclinación menor de 45° .

Es inútil aplicar estos conceptos al universo de 4 dimensiones, en el que conservan formas análogas a las del de dos dimensiones, y por lo tanto, un pequeño esfuerzo de imaginación basta para que podamos situarlos en este espacio más extenso.

Es también inútil insistir sobre la originalidad de estos resultados y sobre la profunda revolución que causan en las ideas de espacio y tiempo a que estamos habituados. En efecto, destruyen los conceptos del *antes* y *después* reduciéndolos a algo que depende de nosotros mismos.

IX.

No podríamos terminar estas consideraciones generales sobre la mudanza ocasionada en los conceptos fundamentales por las más modernas teorías de la física sin hablar de la cuestión de la *masa*, que mencionamos al comenzar.

Por otra parte, todos conocemos la teoría de los electrones y de la masa electromagnética a la que está vinculado el nombre de ABRAHAM.

No me detendré a esponer aquí en detalle cuales fueron las razones que condujeron a establecer la teoría de los electrones. Los fenómenos eléctricos

y las memorables leyes de FARADAY hicieron establecer que a cada átomo de los cuerpos se asociaba una carga eléctrica de magnitud independiente de la del átomo mismo y que sólo dependía de su valencia.

Los fenómenos de la conducción en los gases y sus leyes condujeron a la hipótesis de la yonización, y las célebres experiencias de J. J. THOMSON confirmaron por una vía completamente diversa, la individualidad de aquella carga eléctrica asociada a los átomos de los cuerpos y sugerida por los fenómenos electrolíticos. Finalmente, el estudio de las descargas eléctricas en los gases enrarecidos condujeron a la hipótesis electrónica, esto es, que los rayos catódicos están constituídos por un cúmulo de corpúsculos electrizados negativamente que parten del cátodo con grandísima velocidad. Las desviaciones que sufren en un campo eléctrico y en un campo magnético permitieron calcular la relación entre la carga de cada uno y su masa; relación obtenida y confirmada también por otros medios, que resultó independiente de la naturaleza del gas enrarecido y de la de los electrodos.

Ahora bien, la misma relación entre la carga y la masa en los corpúsculos electrizados, sugerida por los fenómenos de la electrólisis, resultaba mucho más pequeña para el hidrógeno que tiene el menor peso atómico. Se trataba, pues, de determinar la causa que influía sobre la notable diferencia que existe en los dos casos. Las experiencias de LENARD y una larga discusión hicieron necesaria la hipótesis de que la carga eléctrica de cada corpúsculo era la misma en ambos casos; pero que la masa de los corpúsculos catódicos era mucho menor que la de los átomos materiales, como para compensar el valor que se hallaba en la relación mencionada.

Pero entonces se interpuso un nuevo orden de ideas de muchísima importancia al que queremos referirnos más especialmente, el que surgió de la consideración de la masa electromagnética.

Las célebres experiencias de ROWLAND confirmadas por ROENTGEN, CREMIEUX, PONDER, han probado que una carga eléctrica en movimiento es comparable con una corriente eléctrica, engendrando por tanto un campo magnético. Basta esta simple consideración para que los principios energéticos nos hagan pronto prever que un cuerpo electrizado en movimiento se comporta como si su masa fuera mayor. En efecto, el trabajo por realizar para variar la velocidad debe ser igual al incremento de la fuerza viva, es decir, al trabajo que debería realizarse si no estuviera electrizado, más el necesario para cambiar el campo magnético. Un cuerpo electrizado presenta, por consiguiente, respecto del mismo no electrizado, una inercia mayor y, por ende, un aumento aparente de su masa.

Ahora bien, los corpúsculos catódicos estando electrizados negativamente y en movimiento deberán tener por lo menos una parte de su masa de origen electromagnético. Surgió entonces esta idea atrevida: ¿no tendrá tal vez tal origen la masa total de los mismos corpúsculos (ya reconocida tenuísima respecto de las masas atómicas)? Obsérvese que en tal caso se quitaba a dichos corpúsculos toda consistencia material considerándolas, por tanto, como simples cargas eléctricas.

Sería muy largo exponer las razones que militaron en favor de esta hipótesis, aceptada universalmente, que dió origen al concepto del *electrón* o sea del átomo de electricidad constituido por una simple carga eléctrica negativa, sin algún substrato material. Como consecuencia se dedujo que los rayos catódicos están constituidos por electrones móviles con una velocidad (medida directamente por VIECHERT) de un tercio aproximadamente de la de la luz; y que los electrones asociados a los átomos materiales constituyen los *yones* negativos, reconocidos en los fenómenos electrolíticos y en las descargas de los gases y, por fin, que la electricidad está constituida por estos átomos, es decir, por esas porciones elementales definidas respecto de las cuales todas las cargas son múltiples según números enteros.

Pero los electrones no son emitidos tan sólo por el cátodo en los tubos vacíos, son emitidos también por el radio, constituyendo los rayos llamados β .

El primero que calculó la masa aparente de un electrón para diversas velocidades, fundándose en la hipótesis de que toda ella sea de origen electromagnético, fué ABRAHAM en 1902, que pudo reconocer la existencia de dos masas especiales: la longitudinal, esto es, en el sentido del movimiento, y la transversal, en sentido normal al mismo.

Las experiencias de KAUFMANN, hechas en el mismo período de tiempo, sobre los rayos β y su desvío obtenido mediante campos eléctricos y magnéticos, confirmaron la hipótesis electromagnética de la masa.

Aquí conviene ligar la cuestión que tratamos con la desarrollada antes relativa a la contracción debida, según LORENTZ, al movimiento.

ABRAHAM suponía que el electrón era esférico, invariable, no sometido, por lo tanto, a la contracción lorentziana, lo que importaba establecer que la observación de los fenómenos ópticos debía revelar el movimiento absoluto de la tierra; pero hemos demostrado ya que las experiencias han dado resultado negativo, tanto que fuimos conducidos a establecer el postulado de la relatividad, es decir, a enunciar la imposibilidad de reconocer el movimiento absoluto.

Dicho postulado, como vimos, conduce a la contracción lorentziana; el electrón, pues, no es rígido, como lo suponía ABRAHAM; de manera que si es esférico estando en reposo, se deforma puesto en movimiento; y entonces, calculando la ley de la dependencia de su masa relativamente a su velocidad, se halla un resultado diferente del obtenido por ABRAHAM.

Era necesario establecer sobre bases experimentales cual de las dos teorías, de ABRAHAM y LORENTZ, aplicadas al electrón, daba resultados aceptables. KAUFMANN se impuso esta delicada tarea estudiando las desviaciones de los rayos β para diversas velocidades sometidas a la acción de campos electrostáticos y electromagnéticos. Sus experiencias, admirables por su finura y precisión, complementadas con cálculos laboriosos y difíciles, condujeron a resultados que confirmaban las teorías de ABRAHAM.

Pero, en seguida, en 1908, BÜCHERER, empleando un método sumamente ingenioso, sometió las fórmulas de ABRAHAM y LORENTZ a sus pro-

prias experiencias, resultando que las primeras daban errores sistemáticos, mientras las lorentzianas daban resultados completamente exactos.

La teoría de LORENTZ obtuvo, pues, un nuevo triunfo y el postulado fundamental de la relatividad una nueva confirmación.

El principio de la masa electromagnética, establecido como base de la inercia, y las teorías electrónicas han conducido a nuevas y singulares teorías, en las cuales el gran físico inglés J. J. THOMSON introdujo geniales y atrevidas hipótesis.

¿ Puede representarse la materia con un modelo electromagnético ? Los átomos ¿ están constituidos por una nebulosa positiva en la que están sumergidos uno o más electrones negativos ? Los fenómenos químicos e hiperquímicos ¿ pueden explicarse mediante la colisión catastrófica de estos mundos eléctricos infinitesimales ? Los fenómenos de radioactividad ¿ son debidos a la liberación de los electrones de esos microcosmos ?

Arduas y fundamentales cuestiones que, por cierto, no trataré de solucionar, ni siquiera de predecir cómo serán resueltas en el porvenir, pero que fácil es suponer deberán pasar por estados provisionales.

La gloriosa historia de la ciencia nos enseña que ésta avanza merced a una continua, incesante y más o menos rápida sucesión de hipótesis y teorías que se desvanecen unas después de otras, dejando tan sólo un breve recuerdo; pero cuya acción es fecunda, útil. Son ellas las que clasifican y vinculan los diversos fenómenos naturales; son ellas las que crean el lenguaje científico; ellas las que tienen la virtud de dirigir a los hombres de ciencia en el camino de los descubrimientos de nuevos hechos y que los conocimientos humanos se enriquezcan con nuevos resultados positivos y aplicaciones admirables.