

Prof. Leopoldo Muzzioli

El éter cósmico y la luz



En esta disertación me propongo exponer el desenvolvimiento, en el tiempo, del pensamiento científico que se refiere a la propagación en el espacio de la luz y de todas las otras radiaciones que son de la misma naturaleza de la luz y cuyo conjunto constituye lo que se llama energía radiante.

Pasaré revista a las hipótesis, teorías, leyes, y verificaciones experimentales sucesivamente obtenidas, y de este análisis podremos hacer resaltar cuán grande ha sido y es, el esfuerzo y el tormento del pensamiento científico de los hombres de ciencia de la edad media hasta hoy día, para obtener una idea siempre más precisa, siempre más próxima a la realidad de los hechos experimentales sucesivamente descubiertos, del mecanismo (llamémoslo así) de la propagación en el espacio de la energía radiante.

Con mucha razón los más grandes físicos del mundo se ocuparon de la propagación en el espacio de la energía radiante, en cuanto me parece que se pueda afirmar que es a este hecho físico tan importante que debemos no sólo la noción del universo, sino que la vida misma.

Debemos la noción del Universo al hecho físico de la propagación de la energía radiante, en cuanto es esta energía que propagándose en los espacios bajo forma de luz, llegando a nosotros del sol y de las estrellas, nos da noticia de la existencia de los

cuerpos celestes, de sus posiciones, de sus movimientos y de su constitución.

Porque si los astros que componen el universo en vez de emitir energía bajo forma de luz, emitieran energía bajo una forma tal que no pudiera propagarse en el espacio en tales enormes distancias ¿qué concepto tendríamos del Universo? no sólo tendríamos alrededor nuestro la obscuridad física, sino que inexorablemente la obscuridad y la ignorancia completa del conocimiento del universo que nos rodea.

Además, la luz que llega a nosotros de los cuerpos lejanos o vecinos nos da la posibilidad de gozar la visión del maravilloso espectáculo de las formas y de los colores, espectáculo que a veces nos hace permanecer extasiados por su belleza.

Y no sólo debemos la noción del Universo al hecho físico de la propagación de la energía radiante, sino que a este hecho físico debemos también la vida.

En efecto, la energía radiante bajo forma de calor radiante, es el gran medio de transporte de enormes cantidades de energía; y en particular es precisamente la enorme energía que del sol nos llega bajo forma de calor radiante que nos da la vida.

Y es una energía que no puede ser asimilada en las corrientes formas mecánicas de energía cinética y potencial, sino que una energía de una naturaleza completamente diferente; porque si la energía mecánica, cinética o potencial, se manifiesta siempre acompañada por materia, la energía radiante en cambio parece que no tenga necesidad del soporte material para manifestarse: por lo tanto misterioso y complejo es el mecanismo de la propagación de esta energía, y difícil será la tarea del hombre de ciencia que quiera indagar la verdad en este arduo capítulo de la filosofía natural.

* * *

Dejemos el estudio de la física de la luz en el período de formación de la ciencia, por cuanto los conocimientos en este campo

en la antigüedad son muy confusos y de importancia relativa. Busquemos en cambio, de desarrollar las ideas relacionadas con la propagación de la energía radiante sucesivamente obtenidas, hasta exponer las ideas modernas que se tienen al respecto.

* * *

El poco conocido, pero gran físico italiano, Francisco Grimaldi, llevó el método experimental al estudio de la óptica física, como Galileo Galilei lo había llevado a aquel de la mecánica. Me permito reivindicar en Grimaldi el genio que por primera vez señaló el camino para el estudio físico de la luz. Grimaldi, en efecto, fué el precursor de la óptica física, por cuanto desde la primera mitad del 1600 puso en evidencia la difracción de los rayos luminosos, o sea, la desviación del simple comportamiento geométrico que sus predecesores habían conocido.

Los fenómenos de difracción experimentados por Grimaldi, eran aquéllos que consisten en la formación de franjas claras y oscuras en los contornos de la sombra de un objeto bajo adecuadas condiciones de iluminación.

Grimaldi observó, además, experimentalmente, la interferencia que se verifica cuando los conos de luz, provenientes de dos pequeños agujeros vecinos, se sobreponen. Fué el primero en afirmar que la luz sobrepuesta a luz, puede dar obscuridad, expresando esta verdad física, con su sugestiva y audaz (para aquel tiempo) ecuación: luz más luz (en determinadas condiciones) es igual a obscuridad. De modo que después del descubrimiento de estos dos hechos físicos, la óptica queda separada en dos ramas bien distintas: por una parte, la óptica geométrica, que estudia la formación de las imágenes como se obtendrían si los rayos luminosos fuesen simples líneas rectas y sujetas a las simples leyes de la reflexión y de la refracción; por otra parte, la óptica física, que a través de experiencias más refinadas ob-

serva las desviaciones del comportamiento de la óptica geométrica, debidas a la naturaleza de la luz, cuya esencia no se puede reducir a la noción pura y simple de rayos.

Grimaldi comprendió claramente que la difracción y la interferencia por él descubiertas, establecían una naturaleza ondulatoria para la propagación de la luz y formuló una teoría que puede sintetizarse en esta forma: El medio apto a la propagación de la luz, llamado por él, medio luminífero, sería una substancia de peso despreciable, que llenaría todos los espacios interestelares y todos los espacios comprendidos entre los cuerpos y entre las partículas que componen los cuerpos materiales.

La luz, según Grimaldi, sería debida a un doble fenómeno, emisorio y ondulatorio, y precisamente, consistiría en el hecho que las partículas de este medio luminífero estarían dotadas de oscilaciones rapidísimas en torno a los rayos materiales que parten de la fuente luminosa, de tal manera, que la trayectoria resultante de cada partícula del medio luminífero debería considerarse como una línea sinuosa con oscilaciones extremadamente vecinas en torno al rayo emisorio: las luces de los diversos colores habrían que atribuirles a la naturaleza diversa de las vibraciones que se realizan alrededor del rayo.

La contribución que Grimaldi dió al estudio de la luz es muy notable, especialmente por el hecho que con los descubrimientos de la difracción y de la interferencia puede, en verdad, considerársele, como hemos dicho, el creador de la óptica física y además, su teoría sobre la propagación de la luz, a pesar de no satisfacer plenamente (por cuanto se nota en ella una unión bastante artificiosa de las hipótesis emisorio y ondulatorio) en realidad, es una previsión maravillosa de las más modernas teorías donde ondas y corpúsculos en vez de contraponerse se armonizan siendo manifestaciones distintas de un mismo fenómeno.

Más tarde, Cristián Huygens concibió una hipótesis ondulatoria pura, a diferencia de la hipótesis mixta de Grimaldi,

afirmando en forma explícita que las partículas de los cuerpos luminosos encontrándose en un estado de agitación rapidísima pondrían en vibración un medio especial, el éter, que llenaría todos los espacios interestelares, todos los espacios comprendidos entre los cuerpos y las partículas que componen los cuerpos materiales, como el medio luminífero de Grimaldi, dando lugar a la propagación de la luz por ondas.

Huygens no pudiendo anticiparse a los tiempos, no habiendo sido descubiertos otros fenómenos de óptica física, como por ejemplo la polarización de la luz, además de la difracción y la interferencia de Grimaldi, supuso que la perturbación del éter en la propagación de la luz tenía carácter de vibración mecánica longitudinal como la del sonido y fué conducido a admitir el éter como un flúido extremadamente sutil, compuesto de partículas mucho más livianas que las del aire, para explicar el hecho que los astros, los cuerpos, y las partículas que componen los cuerpos, en su movimiento, no deben encontrar una resistencia apreciable.

Pero en el análisis por él desarrollado matemáticamente sobre el movimiento elástico del éter, fué inducido a admitir que las partículas que constituían el éter, además de ser livianísimas por la razón antes dicha, dada la enorme velocidad de propagación de la onda luminosa (velocidad que todavía no se había podido determinar, pero que se preveía grandísima) debían presentar además una rigidez elástica elevadísima, bastante superior a la de los sólidos materiales.

¿Cómo armonizar estas dos propiedades contradictorias del éter? ¿Cómo resolver la dificultad de considerar un éter de gran rigidez elástica superior a la de cualquier cuerpo sólido conocido, apto a transmitir oscilaciones con gran velocidad, y al mismo tiempo de fluidez grandísima a fin de que los cuerpos materiales en el Universo puedan moverse a través de él sin encontrar resistencia?

El mismo Huygens no pudo dar una explicación satisfac-

toria a este dilema; pero se puede afirmar que su genio dió una contribución grandísima en este campo de la filosofía natural y entre otras cosas, en su importante estudio matemático sobre la propagación de la luz obtuvo un resultado notable, esto es, que la velocidad de la luz considerada de naturaleza ondulatoria debía ser menor en los cuerpos refrangibles (por ej. en el agua) que en el vacío.

El gran físico inglés Isaac Newton se opuso siempre a la teoría ondulatoria de la luz intuída anteriormente, en forma genial, por Grimaldi y elaborada después, de modo magistral, por Huygens.

En verdad, Newton encontraba dificultad en poner de acuerdo la teoría ondulatoria con el hecho de la propagación rectilínea de los rayos luminosos.

Se presentaba, en efecto, natural la objeción: si la luz se propaga por ondas como el sonido, y si el sonido se propaga también detrás de un obstáculo ¿por qué los rayos luminosos no hacen lo mismo? ¿por qué no iluminan también detrás de un cuerpo opaco?

Es cierto que los fenómenos de difracción descubiertos por Grimaldi ponían en evidencia que, en ciertos casos, se verifica una desviación del comportamiento rectilíneo, y Newton conocía las experiencias de su predecesor y las repitió, y las prosiguió; pero se trataba siempre de fenómenos despreciables en relación con aquéllos que se verifican con el sonido. Sabemos, ahora, que esto se explica por el hecho del pequeñísimo valor de las longitudes de onda de la luz visible: estas longitudes son todas inferiores al milésimo de milímetro y Newton, no obstante haber descubierto un interesantísimo fenómeno de interferencia con los anillos coloreados que llevan su nombre, no llegó a determinar las longitudes de onda; necesariamente, por lo tanto, a falta de estos datos, fué inducido a dudar de la teoría ondulatoria y prefirió concebir la radiación luminosa como una emisión de corpúsculos especiales, que partiendo de la fuente luminosa, bombardearía el

objeto iluminado. En el análisis matemático que él desarrolló con esta teoría corpuscular, fué inducido a deducir que la velocidad de la luz en un medio refrangible (por ej., en el agua) es mayor que en el vacío; y esto en contradicción con la deducción de Huygens. Se presenta, por lo tanto, en este momento, la importancia enorme de un «experimentum crucis»: las determinaciones de la velocidad de la luz en el vacío y en el agua.

La posibilidad de estas determinaciones no sólo habría proporcionado dos datos experimentales de gran valor científico, sino que habría tenido, además, un valor filosófico científico enorme, porque habría dado una contribución importantísima para establecer cual de las dos teorías debía elegirse para interpretar el hecho físico de la propagación de la energía radiante.

Pero, desgraciadamente, en aquel tiempo, la técnica estaba demasiado atrasada para dar a los físicos la posibilidad de la determinación de la velocidad de la luz en el agua, porque para tal determinación se habría tenido que usar distancias de laboratorio, es decir, relativamente pequeñas, y dada la gran velocidad de la luz, el tiempo infinitamente pequeño empleado en recorrer una distancia relativamente pequeña, no era de posible determinación.

Se trata, en efecto, de la medida de tiempo del orden de magnitud de un diezmillonésimo de segundo para distancias de unos treinta metros.

Solamente un siglo y medio después (1850) el «experimentum crucis» pudo realizarse: pero ya en 1700 aprovechando consideraciones astronómicas Romer y Bradley pudieron dar el primer aporte a esta cuestión determinando la velocidad de la luz en el espacio vacío, y ambas investigaciones no obstante de partir de consideraciones y hechos astronómicos completamente diversos dieron aproximadamente el mismo resultado y precisamente el dato importantísimo que la velocidad de la luz en el vacío es cerca de 300,000 Km/seg. De modo que en la primera

mitad del 1700 ya la ciencia había hecho un notable progreso en lo referente al estudio de la propagación de la energía radiante. En la segunda mitad de dicho siglo se obtuvo un gran perfeccionamiento en la construcción de los anteojos y de los otros instrumentos astronómicos, de los aparatos ópticos, de los cronómetros, etc. La investigación científica podía aprovechar entonces, el gran desarrollo de los métodos experimentales que a los comienzos del 1700 estaban todavía en estado primitivo.

Pero por efecto de una extraña crisis de la física, en la segunda mitad del 1700 no se tuvo ningún progreso en el estudio tan importante de la propagación de la energía radiante.

He dicho, por efecto de una extraña crisis de la física, extraña crisis, por cuanto se verificó justamente en aquel período donde grandísimas fueron las conquistas del genio humano, especialmente, en el campo de la física-matemática.

En efecto, fué precisamente en la segunda mitad del siglo XVIII que fueron desarrollados los medios de investigación matemática, y el cálculo diferencial e integral fueron estudiados y aplicados en todas formas y las ecuaciones diferenciales se revelaron como un arma potente con la cual el hombre puede investigar y deducir las leyes que rigen los fenómenos naturales.

La armonía siempre más perfecta entre los cálculos más complejos y los fenómenos físicos y las observaciones astronómicas siempre más perfeccionadas, llenó el mundo de admiración y dió a los hombres de ciencia un optimismo exagerado y, en verdad, perjudicial al progreso científico, por cuanto fueron conducidos a concebir el Universo como un inmenso sistema mecánico representable esquemáticamente mediante pocas y simples relaciones matemáticas. Y en efecto, fué precisamente en la segunda mitad del 1700 que el gran matemático francés Laplace afirmó, nada menos, que si una persona de intelecto sobrehumano aplicase las tres leyes de la dinámica Galileana y la de la atracción Newtoniana al movimiento de todas las moléculas del Universo, llegaría a escribir sobre el papel, una fórmula con la cual

se resolverían los enigmas del pasado y se podrían preveer inexorablemente las eventualidades del futuro, quizás también en el campo de los hechos históricos y humanos.

De tal manera que toda la ciencia era arrastrada hacia el mecanicismo y el gran físico matemático italiano Lagrange con la construcción de aquel maravilloso edificio conceptual, como es su *Mecánica Analítica*, llevaba a confirmar las optimistas previsiones de Laplace.

Los físicos no se preocuparon más, por lo tanto, en aquel período, de la física del éter y de la naturaleza física de la luz: en efecto ¿qué preocupaciones podía provocar esta cuestión, considerada anteriormente tan importante, cuando podían hacerse la ilusión de haber encuadrado todas las leyes de la naturaleza dentro de tres ecuaciones dinámicas y en una fórmula de acción a distancia?

¡Admirable ilusión! cada vez que parece haberse agotado lo conocible, se abren para las ciencias nuevos horizontes. Y, así, sucedió al pasar del siglo XVIII al XIX. La semilla dejada por el gran físico italiano Grimaldi debía dar nuevos frutos. En efecto, si bien la concepción diría mecánica del Universo había conducido a los físicos a creer nuevamente en la hipótesis corpuscular de Newton en la propagación de la luz, considerando la luz debida a corpúsculos emitidos por los cuerpos luminosos y regidos por leyes mecánicas como pequeñísimos proyectiles, Tomás Young volvió a considerar los experimentos de óptica física iniciados por Grimaldi y volvió atrevidamente, a la teoría ondulatoria. Me he permitido decir atrevidamente, porque después de los maravillosos éxitos del mecanicismo, debido a los hombres de ciencia más autorizados de entonces que lo apoyaban incondicionalmente, la vuelta a la teoría ondulatoria era considerada como un acto de ignorancia o por lo menos, de concepción retrógrada de la naturaleza.

Pero las ideas de Young fueron apoyadas y desarrolladas en forma rigurosa y genial por gran el físico francés Agustín Fresnel,

el cual afirmó que todos los fenómenos de óptica física conocidos podían solamente encuadrarse en una teoría ondulatoria desarrollada con medios matemáticos adecuados. El fenómeno que, más que todos los otros, no podía explicarse sino que con la hipótesis de la naturaleza ondulatoria de la propagación de la luz, era la interferencia.

Fenómenos de interferencia habían sido ya observados y descritos por Grimaldi, el precursor de la óptica física, que enunció por primera vez, como hemos dicho, la genial ecuación: luz más luz es igual (en determinadas condiciones) a obscuridad. Pero en sus experiencias, interferencia y difracción, no se distinguían y difícilmente se podía con semejantes fenómenos extraer conclusiones claras.

Sucesivamente fueron estudiados, por otros físicos, fenómenos de interferencia no acompañados de difracción, pero también aquí los efectos se obtenían usando luz natural, que siendo formada, como se sabe, de tantas longitudes de ondas diferentes, no da lugar a simples franjas claras y oscuras, sino que a complejas franjas coloreadas con todos los colores del arco iris. Las deducciones que también en este caso los físicos pudieron obtener, no fueron claras, al contrario dada la complejidad del fenómeno, también en esta forma fueron alejados de la verdadera vía.

En efecto, Newton que descubrió un interesantísimo fenómeno de interferencia denominado «los anillos de Newton», fué, como se sabe, uno de los más fieles partidarios de la teoría mecánica corpuscular.

Fresnel, en cambio, obtuvo fenómenos de interferencia pura y reconoció, por primera vez, que solamente cuando dos rayos son monocromáticos (de un solo color), provienen de un mismo origen y difieren por haber recorrido distancias ligeramente desiguales, pueden dar lugar al tipo de interferencia más característico que consiste en el hecho que la superposición de dos rayos, en estas condiciones, puede dar lugar a luz o bien, obscuridad.

En efecto, con su clásica y conocida experiencia de los espejos de Fresnel, pudo observar claramente una sucesión de franjas o rayas alternativamente negras y luminosas.

Estas verificaciones experimentales, no sólo confirmaron los desarrollos matemáticos de Fresnel, sino que como aplicaciones de aquéllos, daban los valores de las longitudes de ondas correspondientes a los diversos rayos del espectro. ¡Este resultado era verdaderamente maravilloso! La genialidad humana que ya había podido dominar con la medida, las distancias astronómicas enormes, calculando con relativa precisión las distancias entre los cuerpos celestes y la tierra, lograba dominar con la medida, las pequeñísimas longitudes de ondas de los diferentes colores de la luz, con una precisión verdaderamente inesperada.

Resultó, en efecto, que estas longitudes, para los rayos visibles, son todas inferiores al micrón (milésimo de milímetro) y precisamente, las longitudes de onda de los rayos visibles varían de las más largas correspondientes al rojo, para las cuales es 0,7 micrones, a las más cortas correspondientes al violeta, para las cuales es 0,4 micrones.

Fresnel, además, estudiando la formación de las sombras refutó la objeción principal de Newton contra la propagación por ondas, demostrando que la extremada pequeñez de las ondas luminosas en comparación con las sonoras, explicaba que los rayos luminosos no giran detrás de los obstáculos y se propagan de modo prácticamente rectilíneo.

Después de estos maravillosos éxitos, el desarrollo científico de la teoría ondulatoria de la luz según la concepción mecánica elástica del éter sufrió una nueva gran modificación que se presentaba como revolucionaria.

Esta modificación se imponía para la interpretación de un nuevo hecho importantísimo ya descubierto por Malus y Brewster, la polarización de la luz.

La luz que atraviesa ciertos cristales llamados birefringentes tiene propiedades diferentes en los diversos planos que pasan

por la dirección de la propagación. La luz que ha atravesado dichos cristales, es, como se dice, polarizada. La polarización de la luz se puede obtener también por reflexión, refracción y difusión y cuando un rayo de luz es polarizado, a diferencia de un rayo de luz natural, tiene propiedades diversas, como antes hemos señalado, en los diversos planos que pasan por la dirección de la propagación. Para explicar este hecho no se puede seguir más que un camino: hay que suponer que las oscilaciones que constituyen la luz no se verifican longitudinalmente, es decir, en la dirección de la propagación, como las sonoras en el aire, sino que se realizan transversalmente, esto es, en dirección perpendicular a la propagación. De manera que, si los fenómenos de interferencia y difracción imponían una naturaleza ondulatoria a la propagación de la luz que se supuso longitudinal como la del sonido, los fenómenos de polarización, establecían que la propagación de la luz debía ser, además, de naturaleza ondulatoria, de naturaleza ondulatoria transversal.

Después de todas estas confirmaciones experimentales la teoría mecánica ondulatoria transversal del éter tuvo una nueva confirmación por efecto de la realización en 1850 del «experimentum crucis», o sea, de la determinación comparativa de la velocidad de la luz en el aire y en el agua. Dos físicos franceses Luis Fizeau y León Foucault consiguieron determinar la velocidad de la luz en el aire y en el agua y demostraron que la velocidad de la luz en el agua es menor que la velocidad en el aire como lo exigía la hipótesis ondulatoria en contradicción a la hipótesis corpuscular que requería lo contrario. De manera que parecía establecido en el año 1850 que la luz se propaga con un mecanismo bien preciso y determinado, es decir, por ondas debidas a vibraciones mecánico-elásticas transversales del medio luminífero o éter.

Pero, en verdad, esta afirmación, si bien estaba admirablemente de acuerdo (como me parece haber dejado en claro) con todos los fenómenos conocidos: reflexión, refracción, interferen-

cia, difracción y polarización y fuese además, confirmada brillantemente por el «Experimentum Crucis», implicaba, a pesar de todo, graves consecuencias conceptuales.

En efecto, solamente en un sólido elástico se pueden propagar vibraciones transversales, por lo tanto, el éter no se podía concebir más como un fluido tenuísimo y de gran movilidad, sino que por el contrario, como un cuerpo elástico sólido. Además el valor tan elevado de la velocidad de la luz (cerca de 300,000 Km./seg.) conducía a afirmar que la rigidez del éter debía ser muy superior a la de cualquier otro cuerpo sólido conocido.

¡Qué modificación más revolucionaria a la concepción del medio luminífero de los precursores de la hipótesis ondulatoria, para los cuales el nombre de «éter» había sido dado a este medio pensando en una fluidez grandísima y en una movilidad excepcional!

¿Pero cómo pueden los cuerpos sólidos ordinarios moverse en el éter sin encontrar resistencia? Los planetas, por ejemplo, han siempre realizado y continúan realizando sus revoluciones en torno del sol y los satélites en torno a los planetas: si encontraran una resistencia al movimiento, aunque pequeña, su movimiento se retardaría, sus órbitas se estrecharían gradualmente hasta terminar con la caída sobre el centro de atracción. Y las observaciones astronómicas ya bastante precisas en aquel tiempo no revelaban el más mínimo indicio de perturbación en ese sentido.

Así que bien se comprende cuán grande debió haber sido el tormento de los físicos de hace noventa años para explicar este enigma. Y el misterio que envolvía el hecho importantísimo de la propagación de la energía radiante, aumentó precisamente cuando parecía haberse definido con precisión las características de la propagación misma.

Numerosos físicos y matemáticos a fines de la primera mitad del siglo XIX buscaron de explicar el misterio y se originaron elevadas y fecundas discusiones entre los grandes pensadores de

aquel tiempo que contribuyeron sobre todo al progreso de las ciencias matemáticas; pero los resultados desde el punto de vista físico no fueron apreciables y la concepción del éter vibrante a semejanza de un cuerpo elástico, después de los éxitos iniciales tan brillantes conducía a un callejón sin salida.

Se necesitaba considerar una física del éter que no fuera de carácter mecánico, pero esta evolución debía llegar a través del estudio de otras categorías de fenómenos, estudio, que por obra de los más grandes genios físicos del siglo XIX dió lugar a una admirable como inesperada unión en la interpretación de fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos en apariencia completamente diferentes.

* * *

Como Galileo Galilei introduciendo el método experimental en la física, marcó una nueva era en el estudio de la mecánica: como Francisco Grimaldi, con el descubrimiento de los fenómenos de interferencia y difracción, marcó una nueva era en el estudio de la óptica creando la óptica física; así Alejandro Volta, otro grandísimo genio italiano, con el maravilloso descubrimiento de la corriente eléctrica marcó una nueva era en el estudio de la electricidad creando la electrodinámica.

No es este el momento de exponer el desarrollo genial de su pensamiento que lo condujo no por casualidad, sino que, racionalmente a uno de los más grandes descubrimientos humanos, baste afirmar que este descubrimiento fué la base, la materia prima indispensable, no solamente para las aplicaciones técnicas maravillosas sucesivamente realizadas: del dínamo de Antonio Pacinotti al motor de Galileo Ferraris, al teléfono de Antonio Meucci, a las radiocomunicaciones de Guillermo Marconi, sino que fué, sobre todo, la base necesaria para los sucesivos descubrimientos del electromagnetismo de Ampère y de la inducción electromagnética de Faraday que dieron, al genio de Maxwell, la posibili-

dad, con una interpretación más general de estos dos fenómenos, de crear la teoría electromagnética del éter cósmico.

Para poder comprender la teoría electromagnética del éter cósmico concebida y desarrollada matemáticamente, en forma magistral, por Maxwell, antes de exponer la interpretación de los fenómenos del electromagnetismo y de la inducción electromagnética relacionados con la electrodinámica de Volta, me parece ante todo indispensable esclarecer el concepto de campo intuído y verificado experimentalmente por Faraday.

* * *

Dos masas materiales cualesquiera puestas a una determinada distancia se atraen. Newton determinó la ley matemática fija, precisa que guía esta atracción que (como todos saben) establece que la fuerza de atracción es proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Aplicando esta ley al caso de los cuerpos celestes se vino a establecer y a calcular con una precisión impresionante el movimiento de los cuerpos mismos, en particular, se vino a determinar el movimiento de los planetas y a calcular y preveer, con extrema precisión, los eclipses de sol y de luna, etc.

Así que la ley de la atracción universal Newtoniana se consideró un ideal de interpretación científica de la naturaleza.

Coulomb encontró la ley, según la cual, actúan entre sí las masas eléctricas y los imanes y esta ley..... era la de Newton. La formulación matemática de estas leyes, en efecto, es absolutamente idéntica.

Pero todo esto que aparece tan sencillo y claro es, en cambio, (y deseo bien decirlo explícitamente) uno de los misterios más impenetrables de la naturaleza.

¿Por qué se verifican estas acciones? Generalmente se habla de las leyes de Newton y de Coulomb, no sólo sin buscar de explicar, de hacer hipótesis, sobre la esencia de los fenómenos

correspondientes, sino que también, sin aludir a una interpretación física de estos hechos, como si las leyes (que en verdad, son de una sencillez y perfección maravillosas) fueran suficientes para satisfacer a la mente para la comprensión de los fenómenos.

Me parece, en cambio, que cualquiera aún dotado de un limitado espíritu filosófico, no pueda satisfacerse con esto. Viene, en efecto, espontánea la pregunta ¿por qué se verifican estas acciones?

Miguel Faraday fué el hombre en cuyo espíritu se formó por primera vez la idea audaz de campo.

Faraday no era un matemático pero demostró tener toda la precisión y la fecundidad de conceptos de un gran cultor de las ciencias exactas.

Faraday buscó de adquirir luz sobre la naturaleza de la atracción gravitacional y sobre la naturaleza de la atracción y repulsión eléctrica y magnética (acciones que como es sabido se verifican también en el vacío) investigando lo que sucede en el espacio que separa los cuerpos que actúan entre ellos y llegó a la conclusión que en cada punto del espacio interpuesto entre los cuerpos que actúan existe un particular estado diferente del normal.

Sobre un cuerpo (adecuado, según los casos) que se encuentra en dicho espacio en un punto cualquiera actúa una fuerza cuya intensidad y dirección son determinadas. De modo que un cuerpo adecuado, libre de moverse, y que se encuentre en dicho espacio (que Faraday llamó campo) se mueve según dicha fuerza.

Se puede representar el campo trazando sus líneas de fuerza: esto se realiza señalando en cada punto del espacio la dirección de la fuerza. Se vería entonces aquel cuerpo adecuado, puesto en el campo, moverse a lo largo de una línea de fuerza, la que pasa por el punto correspondiente a su posición inicial.

¿Qué es un cuerpo adecuado? Evidentemente para el campo gravitacional, un cuerpo pesado; para el campo eléctrico, un

cuerpo electrizado y para el campo magnético, un cuerpo magnetizado.

Lo que nos interesa en esta disertación son los hechos y las ideas relacionadas con los campos eléctricos y magnéticos; nos limitaremos, por tanto, al análisis de éstos; y en los fenómenos eléctricos y magnéticos Faraday con la intuición propia del genio y exclusivamente por vía experimental reconoció en forma explícita y segura la importancia en dichos fenómenos del espacio vacío de materia interpuesto entre los cuerpos sobre los cuales se ejercía la acción.

Esta concepción lo indujo a considerar el espacio vacío no solamente como un ente de puras características geométricas sino que como un algo mucho más substancial, esto es, como un medio físico que puede entrar en un estado particular de modificación cuando transmite particulares acciones.

En otros términos, en un espacio vacío de materia donde se transmiten acciones eléctricas o magnéticas se tiene un estado particular de modificación diverso del normal; y este estado de modificación (deseo afirmararlo bien explícitamente) no es una hipótesis física sino que es un hecho real controlable por la experiencia (Fig. 1).

Limaduras de hierro o cristalitos de yeso respectivamente en los casos del campo magnético y del campo eléctrico pueden poner en evidencia, por ej., (si bien, en forma grosera, pero bien expresiva) un campo magnético o eléctrico, formándose con estos cuerpos adecuados las líneas de fuerza del campo que puede, así, ser representado en forma clara y explícita.

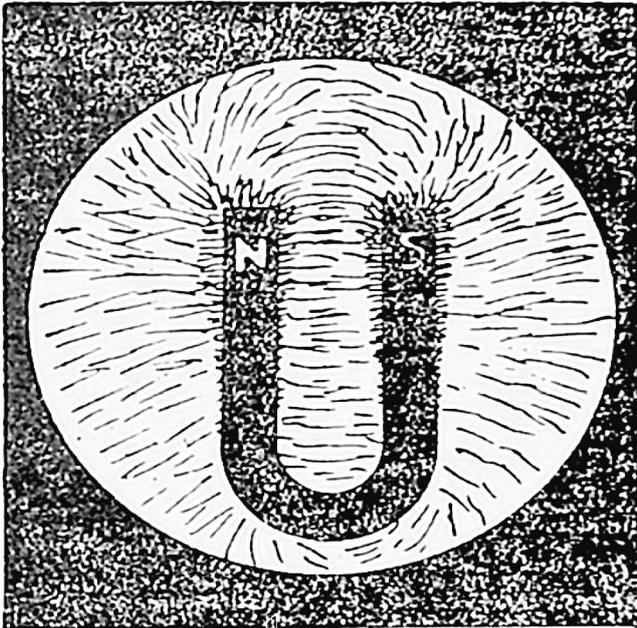
Faraday intuyó las leyes según las cuales el estado del campo (eléctrico o magnético) en un punto depende del estado en los puntos vecinos y las leyes de la vieja teoría de la acción a distancia debían considerarse como leyes integrales que expresaban el resultado final de todas las perturbaciones.

Las leyes que intuyó Faraday son leyes elementales (dife-

renciales) en comparación a las leyes globales (integrales) de Newton y Coulomb.

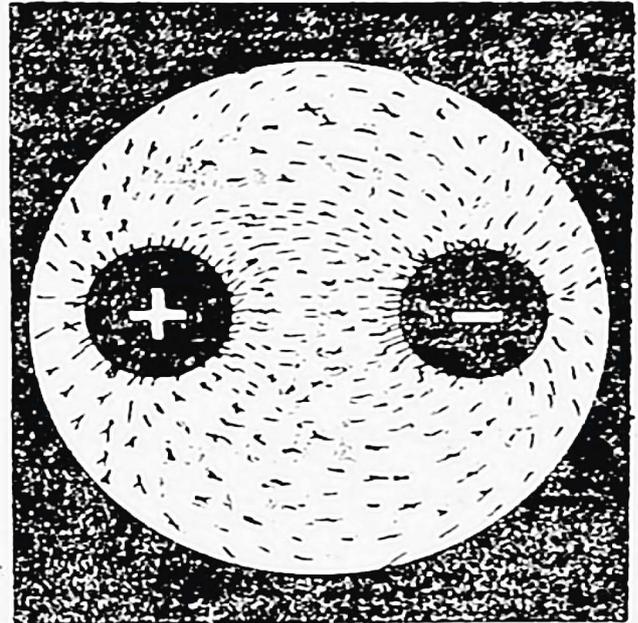
En verdad, habiendo puesto en evidencia la posibilidad de dichas leyes elementales o diferenciales Faraday efectuó un paso decisivo hacia la explicación de los fenómenos eléctricos y mag-

Vidrio



Líneas de fuerza de un campo magnético evidenciadas por limaduras de hierro

vidrio



Líneas de fuerza de un campo eléctrico evidenciadas por cristallitos de yeso.

Fig. 1

néticos al descomponer en sus elementos constitutivos aquellas acciones que los físicos de la vieja escuela consideraron como hechos primordiales no analizables y dependientes exclusivamente de las masas que reaccionaban a distancia.

Así que las acciones que se verifican entre las masas eléctricas y magnéticas, según la nueva concepción, no son puras acciones a distancia, el medio interpuesto tiene una importancia decisiva; en él se genera un campo que transmite las acciones. Meditando sobre la concepción de campo se puede deducir, como habíamos señalado, que el espacio vacío de materia no puede, no

debe considerarse como un ente de puras características geométricas sino que un algo mucho más substancial, un algo que puede ser el soporte (séame permitida la palabra) de campos eléctricos o magnéticos.

Por mucho tiempo la única parte de los trabajos de Faraday que atrajo la atención fué la relación positiva de experiencias ejecutadas: la parte especulativa, en cambio, profunda de concepto y expresada solamente en lenguaje descriptivo sin fórmulas, se presentaba demasiado difícil para seguir y comprender, en su significado íntimo, y fué despreciada por los contemporáneos y superficialmente juzgada como no matemática e imprecisa.

En cambio, me atrevería a decir que todos, he dicho todos, los fenómenos físicos más importantes que dan lugar a la existencia y a la vida del Universo residen precisamente en el espacio vacío.

En efecto, es en el espacio vacío donde actúan y se propagan las acciones y las fuerzas que unen los componentes de los átomos y que dan lugar a la formación y a la existencia de los átomos mismos; es en el espacio vacío donde actúan y se propagan las acciones y las fuerzas que unen los átomos y que dan lugar a la formación, a la existencia de las moléculas; es en el espacio vacío donde actúan y se propagan las acciones y las fuerzas que unen las moléculas y que dan lugar a la formación, a la existencia de los cuerpos materiales, y la propagación misma de la energía radiante como veremos mejor en seguida es en el espacio vacío donde se manifiesta, donde reside, donde reina: el campo es, por lo tanto, el «no materia» en un estado particular de modificación y es de suma importancia para la vida y la existencia del Universo.

Ahora, que me parece haber dado una idea de que cosas son: un campo eléctrico y un campo magnético me parece que estamos en situación de interpretar los fenómenos del electromagnetismo de Ampère y de la inducción electromagnética de Faraday por lo demás, de todos conocidos; y buscaré de exponer estos dos hechos en los aspectos más oportunos para los fines de esta disertación (Fig. 2).

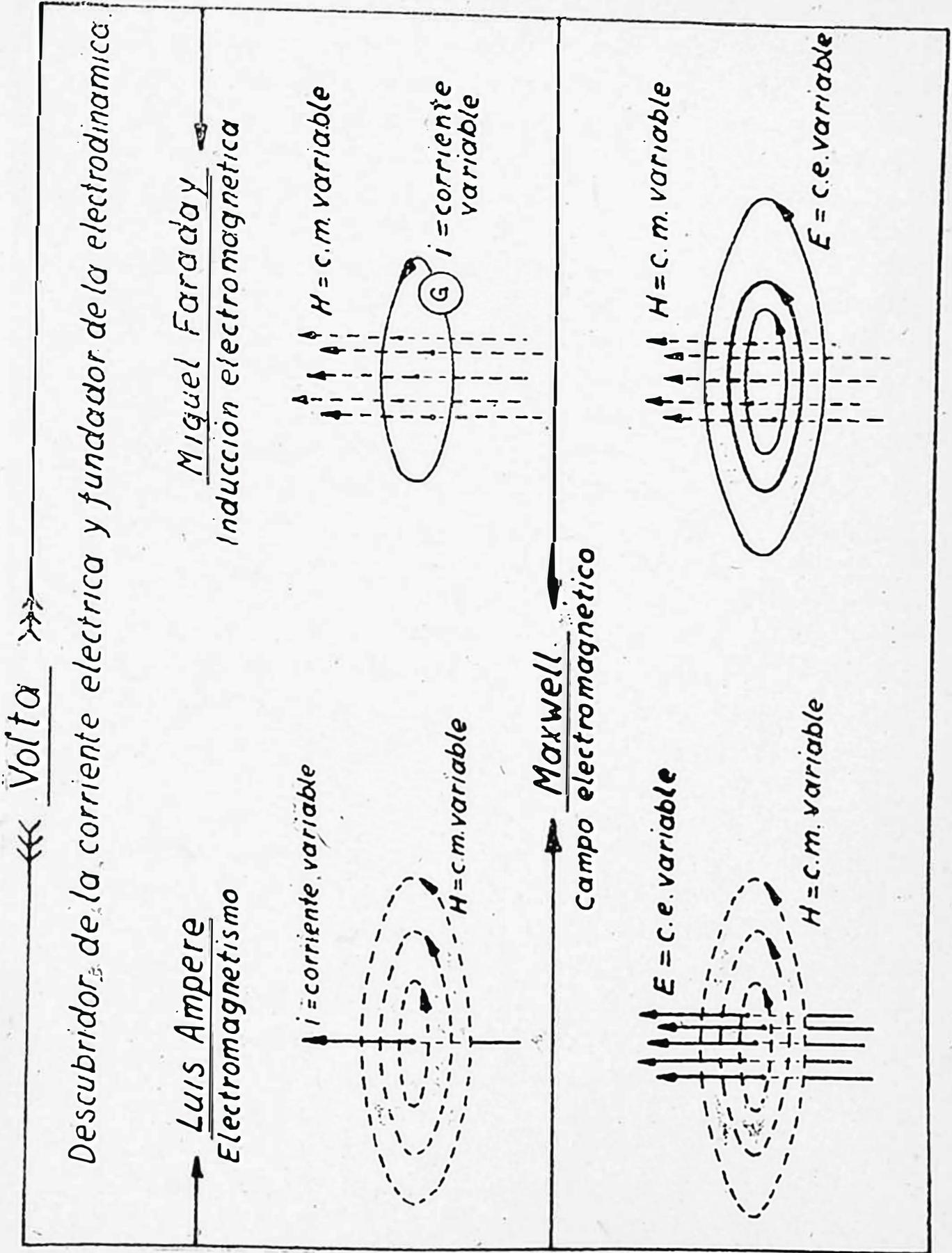


Fig. 2

Electromagnetismo de Ampère: en el espacio (que podemos suponer vacío de materia ordinaria) que rodea un conductor rectilíneo en el cual circula una corriente eléctrica, se forma por efecto de la corriente un campo magnético cuyas líneas de fuerza son de forma circular, esto es, se forman líneas de fuerzas a modo de circunferencias cuyos centros se encuentran todos en el eje del conductor.

Y si la corriente que circula por el conductor es variable en el tiempo también el campo magnético generado en el espacio que rodea el conductor es variable, con el tiempo.

Inducción electromagnética de Faraday: un campo magnético variable, representado por ejemplo por líneas de fuerzas paralelas, genera en un conductor cerrado concatenado con él una corriente eléctrica también variable que puede ser manifestada por la indicación de un Galvanómetro intercalado en el conductor.

* * *

Tomando por base estos dos hechos relacionados con la electrodinámica de Volta y brevemente expuestos me parece que se puede obtener una idea de la teoría electromagnética del Eter cósmico de Maxwell.

* * *

El gran físico inglés, Santiago Maxwell por medio de un análisis matemático maravilloso dió a los fenómenos eléctricos y magnéticos y, en particular, al electromagnetismo y a la inducción electromagnética una interpretación nueva y genial que entusiasma y sorprende al mismo tiempo.

Si dice que Maxwell fué filósofo, poeta, matemático y físico. Era necesario que su intelecto tuviera esta cuádruple posibilidad para escribir páginas como se leen en su «Tratado de electricidad y magnetismo» donde se notan sintetizados: el pro-

fundo razonamiento en la discusión de los hechos, la férvida fantasía hacia horizontes completamente nuevos, el rigor matemático en la extrema dificultad de las complicadas deducciones analíticas, y el sentido continuo de la realidad física.

Buscar de explicar, sin el auxilio matemático, la teoría de Maxwell no es tarea muy fácil, y nunca sin el auxilio matemático se podrá poner en relieve plenamente toda su profundidad, además, es, quizás, en el aspecto matemático que la teoría electromagnética refleja también toda su belleza. Pocas cosas, en efecto, en la física alcanzan la perfección de las ecuaciones Maxwellianas, su precisión y elegancia clásicas, su profundidad.

¡Un mundo entero está encerrado en dos líneas! Buscaré de todas maneras, sirviéndome solamente del razonamiento físico de dar una idea de la teoría de Maxwell, por cuanto, para los fines de esta disertación es indispensable la comprensión de la teoría electromagnética porque solamente así, se tendrá la posibilidad de entrever una nueva interpretación del éter cósmico, que, como hemos visto, considerado desde un punto de vista mecánico material conducía a dificultades conceptuales insuperables.

* * *

Maxwell partiendo del fenómeno del electromagnetismo, que acabo de exponer, intuyó que, como una corriente eléctrica variable genera en el espacio un campo magnético variable concatenado con aquélla, también un campo eléctrico variable puede generar un campo magnético variable.

Maxwell, en otros términos, eliminó el conductor en el cual circulaba corriente variable y lo substituyó por un campo eléctrico variable. Este campo eléctrico variable, para fijar las ideas, podría por ejemplo ser obtenido por medio de un condensador cuyas armaduras podrían ser unidas con un generador de tensión variable, por ej., un alternador. ¿Cuáles razonamientos ha-

brán llevado a Maxwell a considerar verdadera esta generalización del fenómeno del electromagnetismo?

Según la intuición Maxweliana, cuando un generador eléctrico, por ej., un alternador tiene sus polos conectados a las dos armaduras de un condensador, la corriente eléctrica no se detiene en las superficies de las armaduras del condensador sino que atraviesa el espacio interpuesto, esto es, se cierra a través del aislante, y este aislante (también si es espacio vacío) toma una parte predominante en el fenómeno. En la intuición de Maxwell esta corriente que atraviesa el aislante o el espacio vacío tiene que tener los mismos efectos magnéticos que las corrientes ordinarias conducidas por los hilos conductores, lo que equivale a afirmar que cuando en el espacio vacío, por ej., se tiene una variación de campo eléctrico, tal espacio se comporta como un conductor recorrido por una corriente.

¡Y esta manera de ver debía aparecer bien extraña a los físicos acostumbrados a las concepciones clásicas de la electricidad!

Pero Maxwell no se detuvo con esta primera generalización; en efecto, partiendo después del fenómeno de la inducción electromagnética intuyó que el conductor en el cual se generaba, como hemos visto anteriormente, una corriente eléctrica variable, por efecto de un campo magnético variable concatenado, era de secundaria importancia en lo que respecta a la íntima esencia del fenómeno. El generalizó, en otros términos, también el fenómeno de la inducción electromagnética afirmando que el fenómeno intrínseco es debido al hecho que un campo magnético variable produce un campo eléctrico también variable cuyas líneas de fuerza son cerradas a modo de anillos y abrazan el campo magnético variable.

La espira conductora, que en el fenómeno de la inducción electromagnética indicaba una corriente, es de importancia puramente casual y secundaria, es únicamente el indicador que sirve para verificar la creación del campo eléctrico.

La corriente eléctrica que se genera en el conductor en el fenómeno de la inducción electromagnética es debida al movimiento de los átomos de electricidad que ya se encuentran en la materia del conductor mismo, y el movimiento de dichos átomos de electricidad es debido al campo eléctrico generado por efecto del campo magnético variable.

En otros términos, se pasa de los fenómenos del electromagnetismo y de la inducción electromagnética a la interpretación más profunda y generalizada de Maxwell, eliminando (me permitiría decir) la materia; y en síntesis, podemos expresarnos en esta forma.:

1.º Si en el espacio vacío de materia se tiene un campo eléctrico variable, este campo genera también en el espacio vacío un campo magnético variable (primera generalización de Maxwell del fenómeno del electromagnetismo sintetizada en la primera ecuación de Maxwell) (Fig. 2).

2.º Si en el espacio vacío de materia se tiene un campo magnético variable, este campo genera también en el espacio vacío un campo eléctrico variable (segunda generalización de Maxwell del fenómeno de la inducción electromagnética sintetizada en la segunda ecuación de Maxwell) (Fig. 2).

Las dos ecuaciones de Maxwell que representan analíticamente las relaciones cuantitativas entre el campo eléctrico variable y el correspondiente campo magnético variable generado, y el campo magnético variable y el correspondiente campo eléctrico variable generado conducen a la previsión de las ondas electromagnéticas (Fig. 3).

En efecto, si en un punto del espacio se tiene un campo eléctrico variable, como consecuencia de la primera generalización de Maxwell, se generará un campo magnético también variable concatenado. Este campo magnético variable así generado, como consecuencia de la segunda generalización de Maxwell, generará un campo eléctrico también variable concatenado, tal

Ondas electromagnéticas

previstas por Maxwell: verificadas por Hertz: estudiadas por Righi:
aplicadas por Marconi.

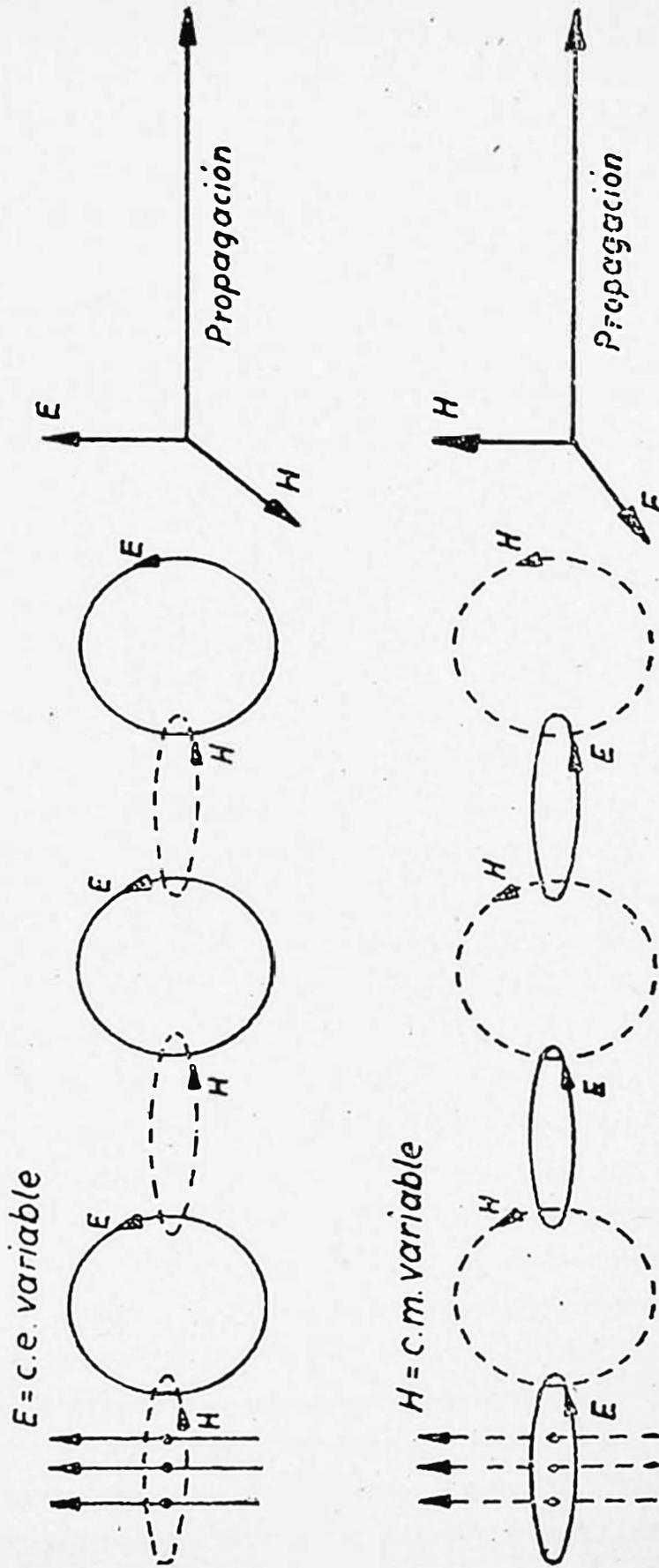


Fig. 3

campo eléctrico variable generará, a su vez, un campo magnético variable también y así en seguida.

Se ve, por consiguiente, que si en un punto del espacio se produce un campo eléctrico variable, se modifica el estado de todo el espacio circundante, creándose un campo electromagnético. En un punto determinado y en un instante determinado se tendrá un determinado valor para el campo eléctrico y un determinado valor para el campo magnético. Se podría verificar que estos dos campos resultan siempre perpendiculares entre sí, y perpendiculares a la dirección de la propagación.

Se puede repetir el mismo razonamiento y demostrar que se puede generar un campo electromagnético partiendo de un campo magnético variable, en vez de partir de un campo eléctrico variable.

Además, la investigación matemática de Maxwell, como ya hemos admitido implícitamente, induce a considerar los efectos eléctricos y magnéticos como no transmitidos instantáneamente, sino que propagándose a través del medio interpuesto con una velocidad determinada y finita. De modo que el estado electromagnético, una vez generado, se transporta a través del espacio hacia el infinito con una velocidad determinada y finita.

¿Qué valor tiene esta velocidad de propagación?

Maxwell dedujo también analíticamente y calculó esta velocidad de propagación en el espacio de las ondas electromagnéticas y encontró que esta velocidad depende de las dos constantes, electrostática y magnetostática del espacio vacío, ya conocidas experimentalmente. Substituyendo en la expresión analítica deducida estos dos datos experimentales conocidos, encontró que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio vacío resulta ser igual a la velocidad de la luz.

He aquí la grandiosa conclusión de Maxwell: la luz es un fenómeno electromagnético, las ondas luminosas no son otra cosa que un caso particular de las ondas electromagnéticas a altísimas frecuencias. Una onda luminosa plana monocromática

está caracterizada en el vacío por dos vectores; el campo eléctrico y el campo magnético que vibran con la frecuencia de la onda y se propagan en la dirección de la propagación. Estos dos campos son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación y tienen la misma fase.

¡Qué transformación revolucionaria y admirable de la concepción del éter cósmico!

Hemos visto anteriormente como por efecto de los hechos experimentales conocidos, reflexión, refracción, difracción, interferencia, polarización, la luz debía considerarse de naturaleza ondulatoria transversal, pero también hemos visto las enormes dificultades a que daba lugar esta concepción en lo que se refiere a las propiedades que debía tener el medio luminífero que debía transmitir las ondas luminosas. ¡Nada menos que este medio debía ser de naturaleza elástico sólida!

Se necesitaba considerar, como dije anteriormente, una física del éter que no fuera de carácter mecánico y esta evolución debía desprenderse a través del estudio de otras categorías de fenómenos. Esta evolución resultó, en efecto, como consecuencia de la teoría electromagnética.

En la teoría electromagnética las perturbaciones alternativas no tienen más el carácter de oscilaciones mecánicas, sino que son modificaciones eléctricas y magnéticas del estado neutro y la unión entre un estrato y el otro del medio no es de carácter elástico mecánico sino que es substituída por la inducción mutua eléctrica o magnética.

El éter cósmico que en su infancia con Grimaldi era un flúido tenuísimo; en su juventud con Fresnel, era un cuerpo sólido, elástico de altísima rigidez; es ahora, en su madurez con Maxwell, ni más ni menos, que el mismo espacio vacío provisto de particulares propiedades eléctricas y magnéticas.

Pero, (deseo afirmarlo bien claramente y explícitamente) este nuevo éter cósmico no puede, no debe considerarse el espacio vacío de materia de puras características geométricas, debe con-

siderarse como el espacio vacío de materia que tiene la posibilidad, la propiedad de ser el soporte de campos eléctricos y magnéticos.

El espacio vacío podría asimilarse, quizás, a la nada y aquí se caería en un error de interpretación fundamental, porque la nada no tendría en sí las posibilidades, las propiedades necesarias para modificarse.

Después de la interpretación de Maxwell, se ha dicho, que hablar de éter cósmico no tendría ya más ningún sentido, estoy quizás de acuerdo con esta afirmación, pero deseo bien insistir que no se puede, a mi parecer, substituir la denominación éter cósmico con espacio vacío o simplemente, espacio, en cuanto, en estas dos denominaciones se tiene una idea puramente geométrica del espacio: me parece que quizás podría, en cambio, substituirse la denominación éter cósmico por la de espacio físico.

En estas dos palabras me parece, en efecto, que esté encerrada toda la esencia del medio apto a transmitir la luz.

La teoría de las ondas electromagnéticas explica inmediatamente muchos hechos que antes eran oscuros. Por ejemplo ¿os habéis nunca preguntado por qué hay cuerpos transparentes y opacos a la luz?

No ciertamente en todos los libros de física se encontrará respuesta a una pregunta tan fundamental. En verdad, no se encontrará, en dichos libros, con toda probabilidad tampoco la pregunta. En cambio, la teoría electromagnética de la luz explica inmediatamente que la opacidad de todos los metales es consecuencia de su conductibilidad eléctrica. La transparencia absoluta es solamente característica del éter cósmico puro: los aislantes o dieléctricos materiales deben, en general, ser transparentes a diferencia de los conductores, la opacidad que presentan a menudo estos cuerpos puede depender de heterogeneidad, de conductibilidad de partículas separadas y de otros fenómenos como reflexiones irregulares, dispersiones o transformaciones locales de energía radiante en calor. Así, también, muchos otros

fenómenos, por ejemplo, la propagación de la luz en los cristales, etc... se explican satisfactoriamente por medio de la teoría electromagnética.

La óptica, el estudio de la luz, está por transformarse en un corolario, en un capítulo de la electrodinámica.

De todo lo que precede vemos que la teoría electromagnética puede explicar muchos fenómenos, pero todavía no estamos en posesión de una confirmación experimental decisiva y cierta.

La teoría de las ondas electromagnéticas había sido edificada por Maxwell solamente con el razonamiento; él, sobre todo, físico teórico, no pudo llegar a la verificación experimental. De sus contemporáneos bien pocos la comprendieron, aquellos que estaban acostumbrados a la vieja escuela dijeron que su teoría era construída solamente sobre el papel y podía, al máximo, tener un valor teórico-matemático. Se trataba, en efecto, de una teoría bien revolucionaria. Afirmar que la luz, no era más que una expresión de la electricidad y del magnetismo y establecer esta expresión con teorías matemáticas difíciles y complejas daba lugar a una transformación tan radical en la interpretación de los hechos que debía naturalmente encontrar opositores.

Pero todo cambio de orientación científica requiere tiempo, y verificaciones decisivas son necesarias para convencer a los escépticos, tanto más que, solamente cuando una teoría está verificada por las pruebas de la experiencia directa adquiere una eficacia, una potencia de convicción tales de disipar cualquier duda y ser fuente de nuevos progresos y fértil de frutos insospechados.

También cuando la teoría precede a la experiencia, como en este caso de genial inspiración, adquiere vida verdadera y se hace seguro instrumento de investigación solamente cuando encuentra la confirmación en pruebas experimentales bien seguras e indiscutibles.

Y las pruebas llegaron, claras y explícitas, con el descubrimiento experimental de las ondas electromagnéticas de parte

del gran físico alemán Enrique Hertz. No es el caso de exponer aquí los dispositivos experimentales con los que Hertz logró producir y propagar en el espacio ondas electromagnéticas, baste decir que el gran físico italiano Augusto Righi en un genial y poderoso trabajo experimental logró demostrar que las ondas electromagnéticas se comportan exactamente como las ondas luminosas.

Righi logró, en efecto reproducir con las ondas electromagnéticas todos los fenómenos ópticos hasta entonces conocidos, reflexión, refracción, interferencia, difracción y polarización y comprobó para las ondas electromagnéticas las mismas leyes que se verifican para las ondas luminosas. Los hombres de ciencia de aquel tiempo que fueron reacios a creer en las teorías Maxwellianas las aceptaron plenamente después de todos los resultados experimentales obtenidos.

Las ondas electromagnéticas experimentadas por Hertz y por Righi eran de una gama de longitudes de onda bien limitada, siempre alrededor de algunos metros de longitud: un abismo las separaba de las ondas luminosas cuyas longitudes de onda, como ya se ha dicho, son siempre inferiores al milésimo de milímetro.

También este abismo fué colmado; y en este campo puedo afirmar que en pocos años, con un trabajo poderoso y admirable, los físicos experimentales sobrepasaron las más optimistas previsiones, realizando experimentalmente toda la gran familia de las ondas electromagnéticas, que de las ondas Marconianas van a las ondas Hertzianas, caloríficas, luminosas, hasta los rayos X y gama.

Y aquí los nombres de Melloni, Rubens, Righi, Sebedew, Lampa, Nichels, Tear, Lymann, Shumann, Helweck, Skadewia, etc., encabezan estas pacientes y geniales investigaciones.

No es el caso de exponer las investigaciones experimentales ejecutadas, baste afirmar que después de estas investigaciones, y después de los descubrimientos del efecto Faraday y del efecto Kerr sobre la acción que los campos eléctrico y los campos mag-

néticos ejercen sobre la dirección de vibración del vector luminoso, el éter es, por todos considerado, como un medio cuyas propiedades son descritas por las ecuaciones Maxwellianas del campo electromagnético y la óptica se le considera como un capítulo de la electrodinámica Voltiana.

Así que a fines del 1900 los físicos pensaron de haber interpretado plenamente la energía radiante considerándola de naturaleza ondulatoria transversal y electromagnética.

* * *

¡Pero la ciencia no se detiene!

Inexorablemente (me permito usar esta palabra) después de una conquista de valor excepcional la investigación de la verdad física, en cambio de disminuir su campo de acción parece que aumente sus incógnitas, y ulteriores investigaciones, ulteriores esfuerzos son necesarios para poder acercarse siempre más a la verdad, para acercarse siempre más al conocimiento de la esencia de la naturaleza.

Las idealizaciones más o menos esquemáticas que construye nuestro espíritu y que son el producto de nuestras meditaciones son susceptibles de representar ciertos aspectos de las cosas, pero contienen, en su esencia, limitaciones de modo que no pueden encerrar toda la riqueza y la complejidad de la realidad física de la naturaleza.

Y en efecto, el dualismo de la energía radiante, la lucha entre las hipótesis corpuscular y ondulatoria, parecía eliminado en lo que se refiere a la propagación, ¿pero cuál era la esencia de la emisión y de la recepción de la energía radiante?

Los físicos hasta fines del ochocientos se habían ocupado como hemos visto de estudiar el comportamiento de la radiación cuando tal radiación está lejos de su fuente, pero a comienzos del novecientos se sabe muy poco, y me atrevería decir nada, sobre lo que sucede en el momento que la radiación parte de la

materia y en el momento de llegada de la radiación sobre la materia.

Con el espectroscopio y el fotómetro en los últimos años del ochocientos se encontraron algunos hechos importantes en lo que se refiere al espectro continuo emitido por los cuerpos incandescentes y que son enunciados por las leyes experimentales de Wien y de Stefan en la siguiente forma:

1.º La intensidad de la energía radiante para las diversas longitudes de onda del espectro continuo no es constante, sino que pasando desde las longitudes de onda más largas (equivalentes al rojo) a las más cortas (equivalentes al violeta) se alcanza un máximo. Tal máximo sólo depende de la temperatura y no de la naturaleza del cuerpo incandescente. Simultáneamente con el aumento de la temperatura el máximo se transporta hacia las longitudes de ondas más cortas (Ley de Wien).

2.º La energía total irradiada es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo incandescente. (Ley de Stefan).

Era necesario explicar estas leyes experimentales (Fig. 4).

Si la luz fuese una propagación de ondas electromagnéticas semejantes a las que provienen de un oscilador eléctrico de Hertz, en las fuentes luminosas deberían existir muchos pequeños osciladores semejantes al de Hertz. Por otra parte, una carga eléctrica que vibra con movimiento armónico simple (pendular) alrededor de una posición de reposo, representa tal oscilador; es en consecuencia fácil imaginar que en las moléculas existan justamente elementos eléctricos, sin o con una masa material que se comportan de este modo.

Es así como con esta hipótesis Rayleigh llegó en el 1900 a una expresión matemática de la intensidad de radiación localizada en una frecuencia dada, intensidad que es proporcional a la frecuencia y a la temperatura del cuerpo.

Tal expresión matemática no satisface las leyes experimentales de Wien y de Stefan.

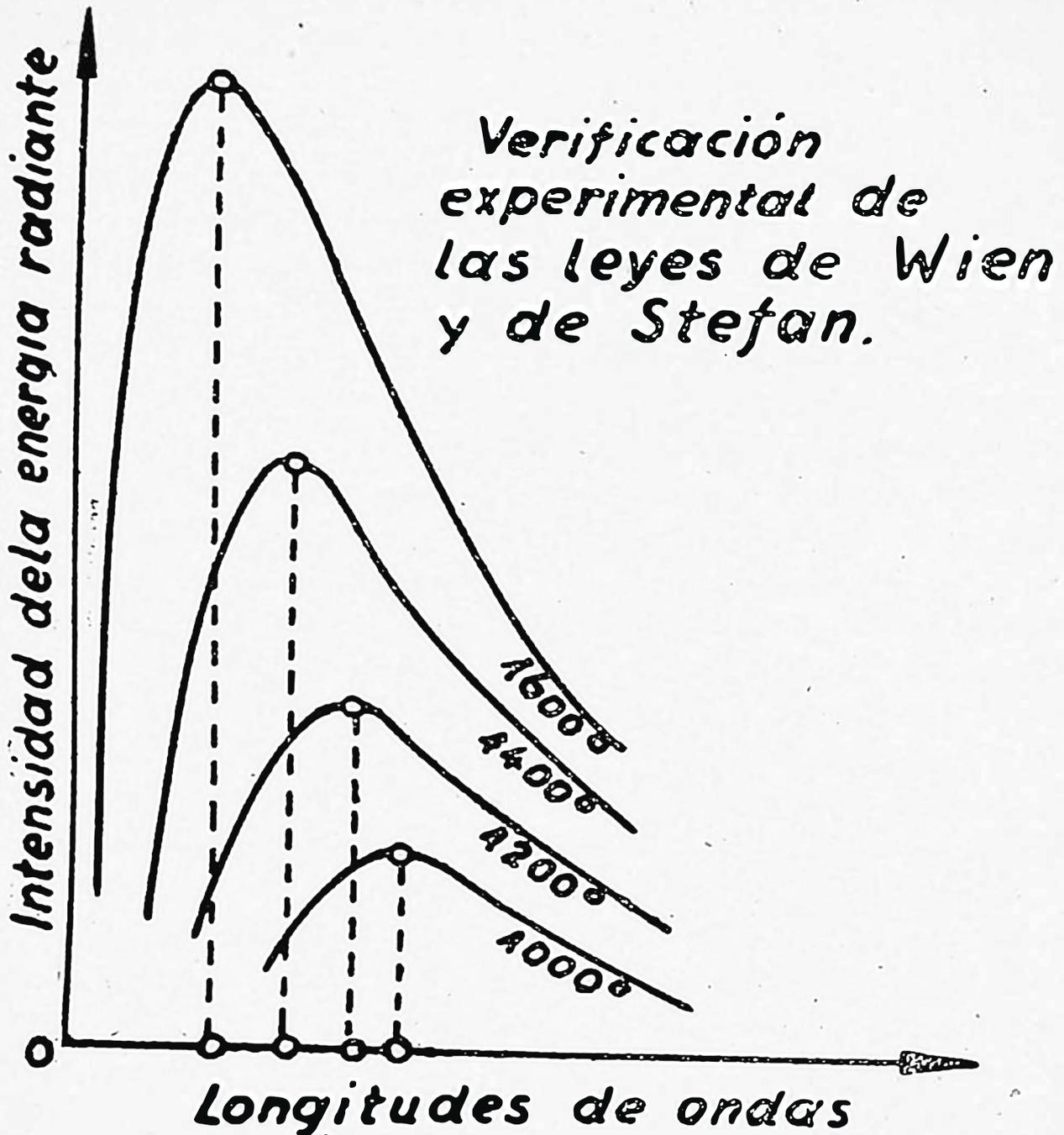


Fig. 4

Si se substituye un oscilador por un rotor, o sea por un sistema cargado que recorre con velocidad uniforme un círculo alrededor de un eje fijo, se llega al mismo resultado matemático.

Perfeccionamientos ulteriores introducidos en los razonamientos matemáticos de Rayleigh por Wien y otros físicos, no mejoraron mayormente esta situación y los físicos teóricos de ese momento se ven sometidos a dura prueba.

Quien resuelve la cuestión es Planck.

En una célebre memoria escrita en 1902 propone una hipótesis que tendrá después el más grande éxito, aunque en un comienzo encuentre numerosos opositores y deba sostener muchas batallas.

La luz, y en general la energía radiante de los átomos o moléculas excitadas, no es emitida en forma continua, o, como se diría en matemáticas, por infinitesimales arbitrarios, sino que la radiación es emitida sólo en el instante de alcanzar en el interior del centro emisor un valor bien determinado aunque extremadamente pequeño.

El valor de esta cantidad de energía se denomina «quanta» y está dado por el producto de una constante llamada constante universal de Planck (que tiene el valor de $6,55 \times 10^{-27}$ erg/seg) por la frecuencia de la radiación que se considera.

Con esta hipótesis como fundamento y con la ayuda de razonamientos estadísticos, Planck obtiene una expresión matemática de la intensidad de energía radiante emitida a una cierta frecuencia y a una cierta temperatura, expresión ésta, que coincide en modo admirable con los datos experimentales, esto es con las leyes de Wien y de Stefan.

Pero cabe una pregunta ¿este «quanta» de Planck es un ente físico real o es más bien un simple artificio del cálculo? En efecto debido a esta pregunta, la hipótesis de Planck como ya hemos dicho fué acogida con recelo.

Para que el «quanta» pueda vencer esta hostilidad, que adquiera una individualidad propia, es necesario verlo actuar, para saber los efectos que produce y adquirir confianza en él.

La ocasión para admirar las proezas del «quanta» es dada en un primer momento por el llamado efecto, fotoeléctrico. (Fig. 5).

Si bombardeamos por medio de un rayo luminoso una placa metálica, ésta emite cargas negativas, electrones y se carga por lo tanto de electricidad positiva. Este fenómeno que se

puede verificarse experimentalmente con gran sencillez es utilizado prácticamente en la actualidad.

En efecto, con dispositivos convenientes (células fotoeléctricas) la corriente de electrones emitida por el efecto fotoeléctrico es utilizada prácticamente en varios campos de la técnica como ser: el cine hablado, la telfotografía, la televisión.

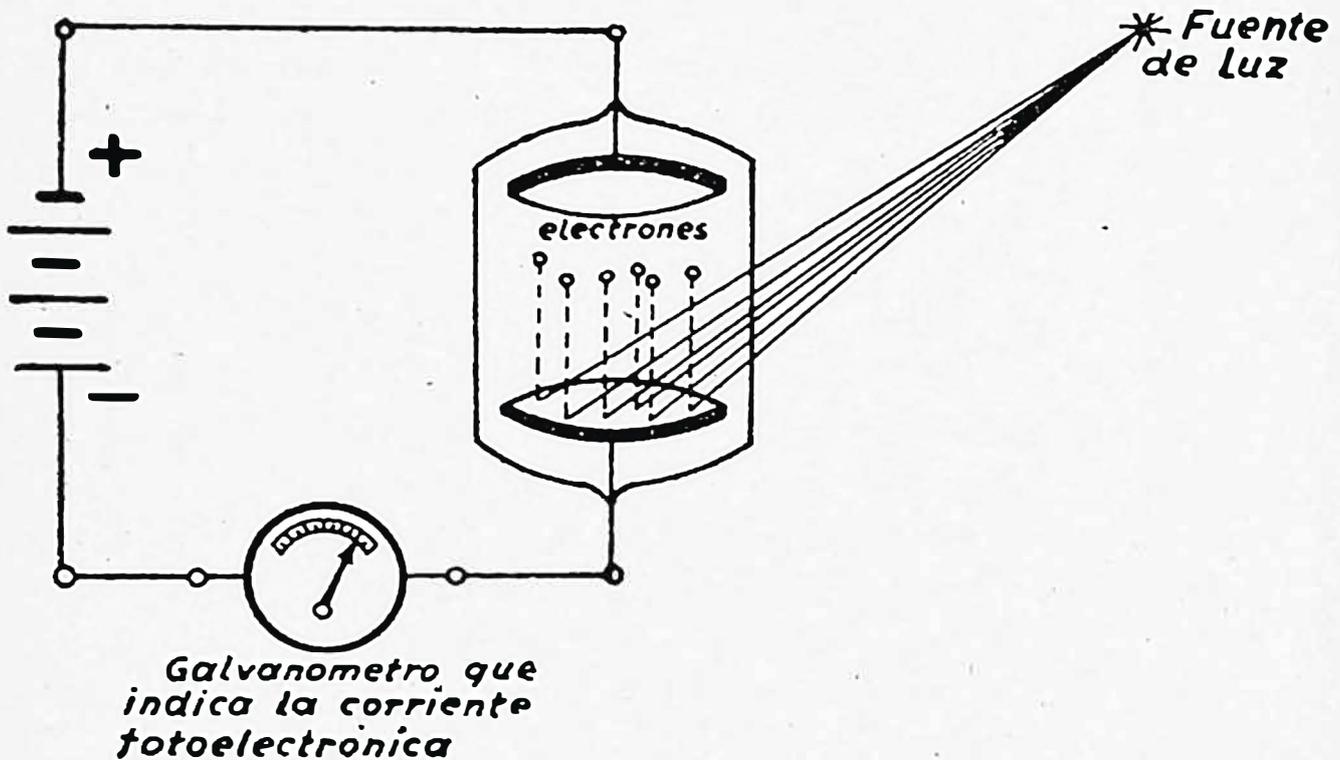


Fig. 5

Profundizando el estudio del efecto fotoeléctrico descubrieron ya en 1880 los físicos observaron al iniciarse el 1900 que para aquellas radiaciones que poseen una frecuencia inferior a una frecuencia bien determinada, un metal no da lugar al efecto fotoeléctrico, en otros términos, éste emite electrones sólo a partir de una determinada frecuencia límite que varía de metal a metal.

Los electrones fotoeléctricos para esta frecuencia mínima salen con velocidad nula y su velocidad aumenta con la frecuencia de la radiación que bombardea el metal.

Estos electrones tienen poca velocidad cuando se bombardea el metal con luz visible, se vuelven en cambio velocísimos por excitaciones con rayos X.

Además, la intensidad de la luz incidente no tiene importancia: la energía de los electrones emitidos por el metal es la misma, sea que esos vengan expulsados por medio de una potente lámpara eléctrica por medio de una pequeña linterna de bolsillo. En ambos casos sólo cambia el número de electrones fotoeléctricos; tal número es pequeño con la linterna de bolsillo y es muy grande con la potente lámpara eléctrica, pero la energía de cada electrón expulsado es la misma, cuando como es fácil comprender, la luz posee en ambos casos la misma composición y tenga por lo tanto colores idénticos en proporciones idénticas.

Fué Einstein quien, en 1907, intuyó que en el juego del efecto fotoeléctrico debían intervenir los «quantas» de Planck.

Para esto, podemos imaginar la superficie del metal constituida por tantos mecanismos diminutos (pequeñas máquinas) capaces de efectuar un trabajo: los átomos (Fig. 6).

Estos mecanismos, estas maquinitas, no se ponen en movimiento hasta que no hayan recibido del exterior una oportuna cantidad de energía.

Si el átomo, el mecanismo infinitesimal, recibe un «quanta», dos cosas pueden suceder: o el «quanta» posee la energía necesaria para hacer funcionar el mecanismo y entonces se dispara, o el «quanta» tiene energía inferior a la mínima necesaria para poner en movimiento el mecanismo y entonces éste permanece inerte. En el primer caso se libera un electrón, en el segundo caso no sucede nada.

Si el «quanta» posee más energía que la necesaria para hacer partir el mecanismo elemental, entonces el exceso de energía es absorbido por el electrón que sale del átomo y éste poseerá una velocidad tanto mayor cuanto más grande ha sido el «quanta» liberador.

Este razonamiento fué expresado por Einstein en forma matemática y puede ser enunciado con las siguientes palabras:

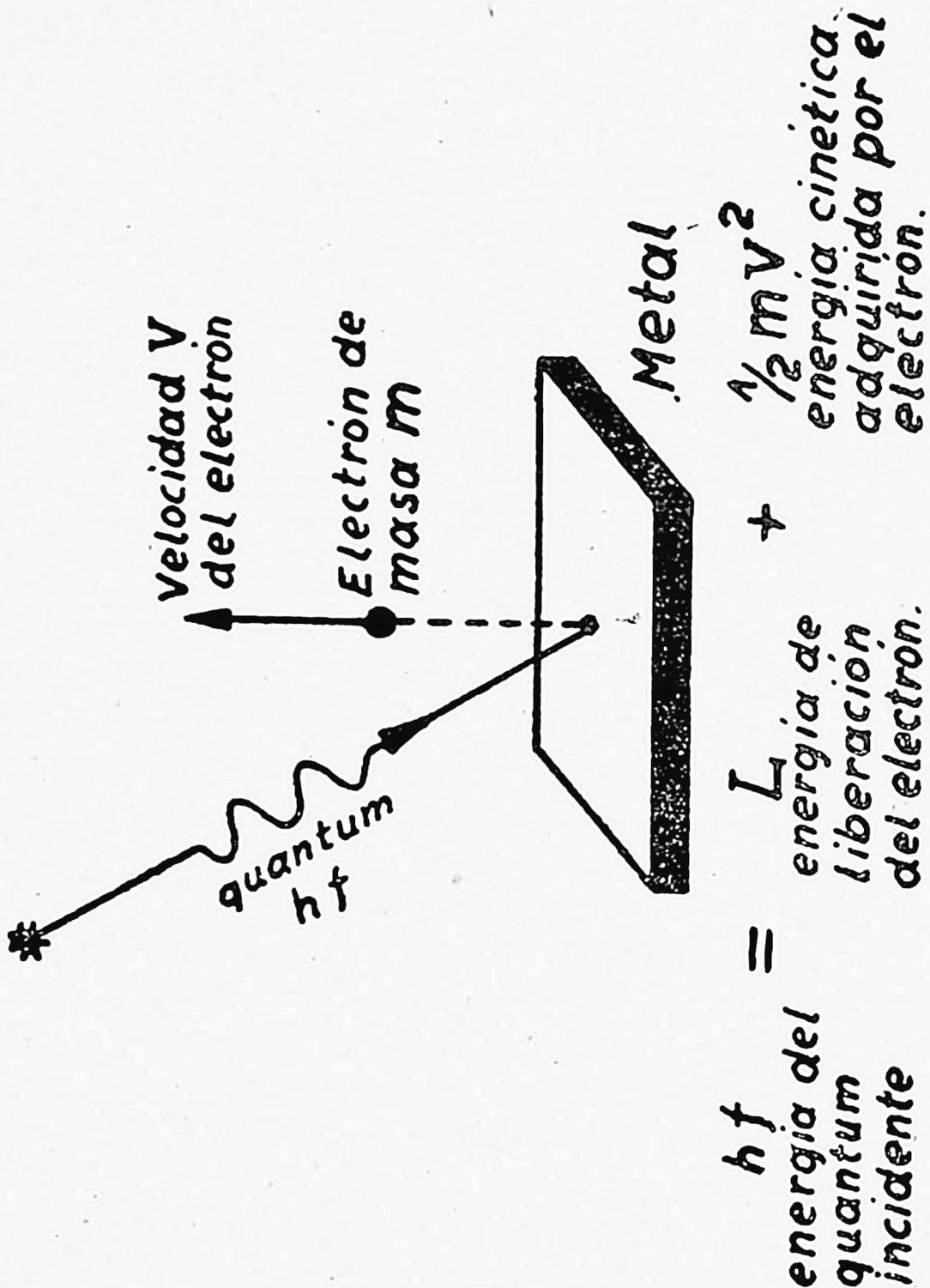


Fig. 6

«La energía del «quanta» incidente es igual a la energía de liberación del electrón, más la energía cinética adquirida por el electrón que se ha liberado de la materia».

La relación de Einstein se refiere al efecto producido por un solo «quanta» separándolo así del resto de los «quantas» irradiados por la fuente emisora.

Vemos entonces funcionar el «quanta» independientemente de los que le acompañan, lo observamos como individuo propiamente tal, adquiriendo así una personalidad; en otros términos se transforma en un real ente físico.

Por todo lo que hasta aquí se ha dicho el «quanta» puede considerarse como un gránulo de energía, pero siempre es energía.

Desde el momento que Compton puso en evidencia un efecto, que le valió el Premio Nobel y que se denomina efecto Compton, el «quanta» llegó a ser comparable propiamente a un corpúsculo: el fotón:

Esto significa que el «quanta» debería poseer cierta masa, y que al chocar con cuerpos de sus mismas dimensiones debería comportarse como una bola de billar cuando choca con otra.

Desde hace tiempo había sido observado que cuando un haz de rayos X atraviesa un extracto material la radiación que emana del extracto, lateralmente a la dirección de propagación del haz primario es menos dura que ése. En otros términos, el haz difundido por el material atravesado, tiene una frecuencia media más baja que la del haz incidente.

Compton profundizó este fenómeno y obtuvo la prueba espectroscópica directa analizando la radiación monocromática del molibdeno difundida por varios metales.

¿Cómo explicó Compton este hecho no previsto por ninguna forma de las teorías clásicas?

De manera muy simple: El «quanta» de una radiación cualquiera, en particular de una luz violeta es como una bolita de marfil. (Fig. 7).

Si el «quanta» choca con otra bolita, por ejemplo un electrón, le imprime movimiento en una dirección determinada; pierde así una parte de su energía y se transforma en un «quanta» más pequeño de lo que era antes. En estas condiciones se difunde y se difundirá por consiguiente bajo forma de un «quanta» más pequeño, esto es bajo forma de radiación a menor frecuencia, esto es, de luz de longitud de onda mayor, por ejemplo luz roja.

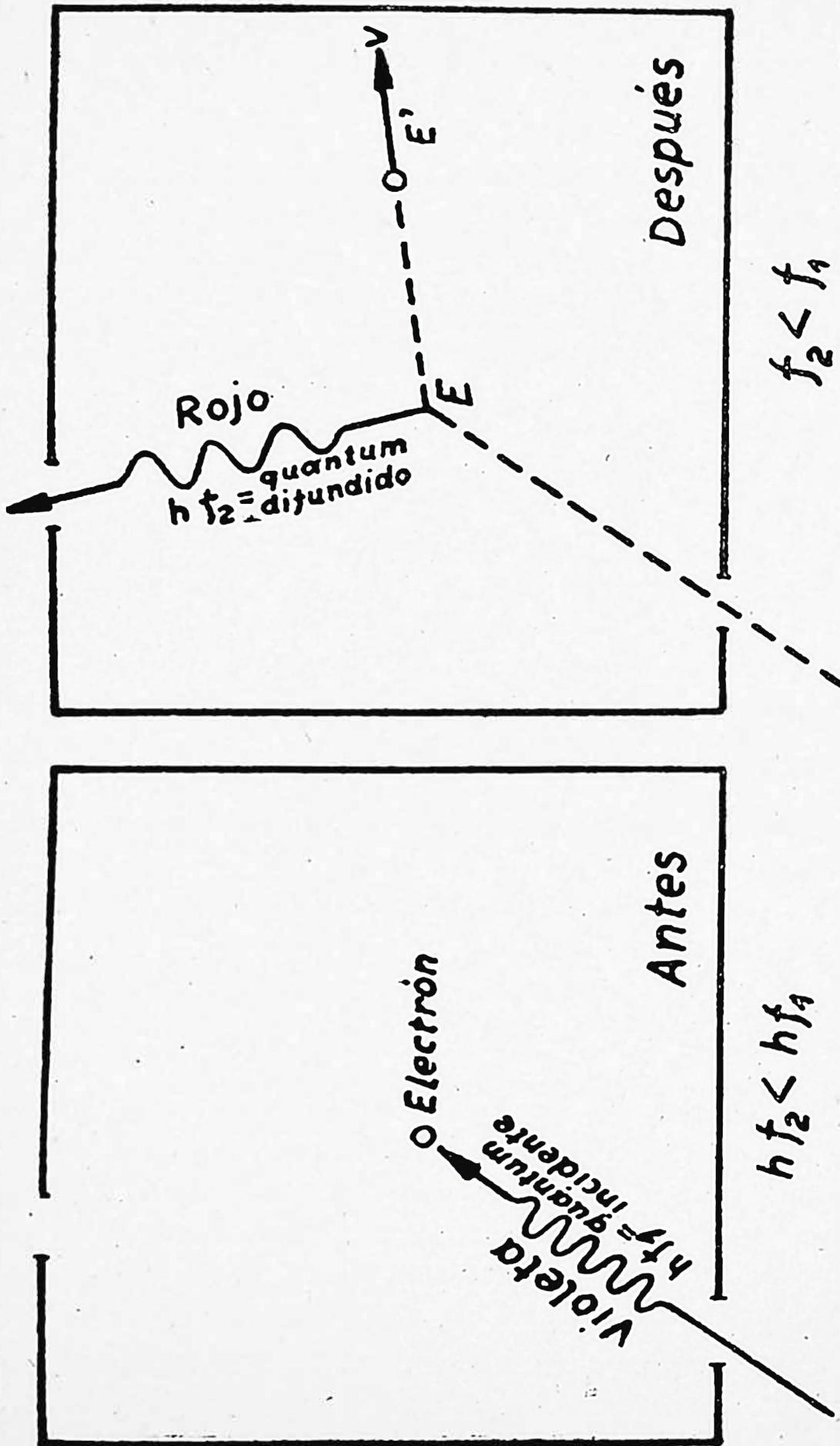


Fig. 7

La hipótesis de Compton, explica en modo perfecto los fenómenos espectroscópicos experimentales.

Pero Compton (y esto es maravilloso) ha ido más allá de la explicación de este proceso físico hipotético. El lo ha querido ver.

Por esto, junto con Simón, produjo la difusión de los rayos X en el gas de la cámara de condensación de Wilson (maravilloso aparato de la física del novecientos) que permite hacer visible la trayectoria de partículas cargadas eléctricamente. (Fig. 8).

Según lo previsto por Compton, cuando un «quanta» de los rayos X por ejemplo, encuentra un electrón perteneciente a un átomo o a una molécula, debe ponerlo en movimiento.

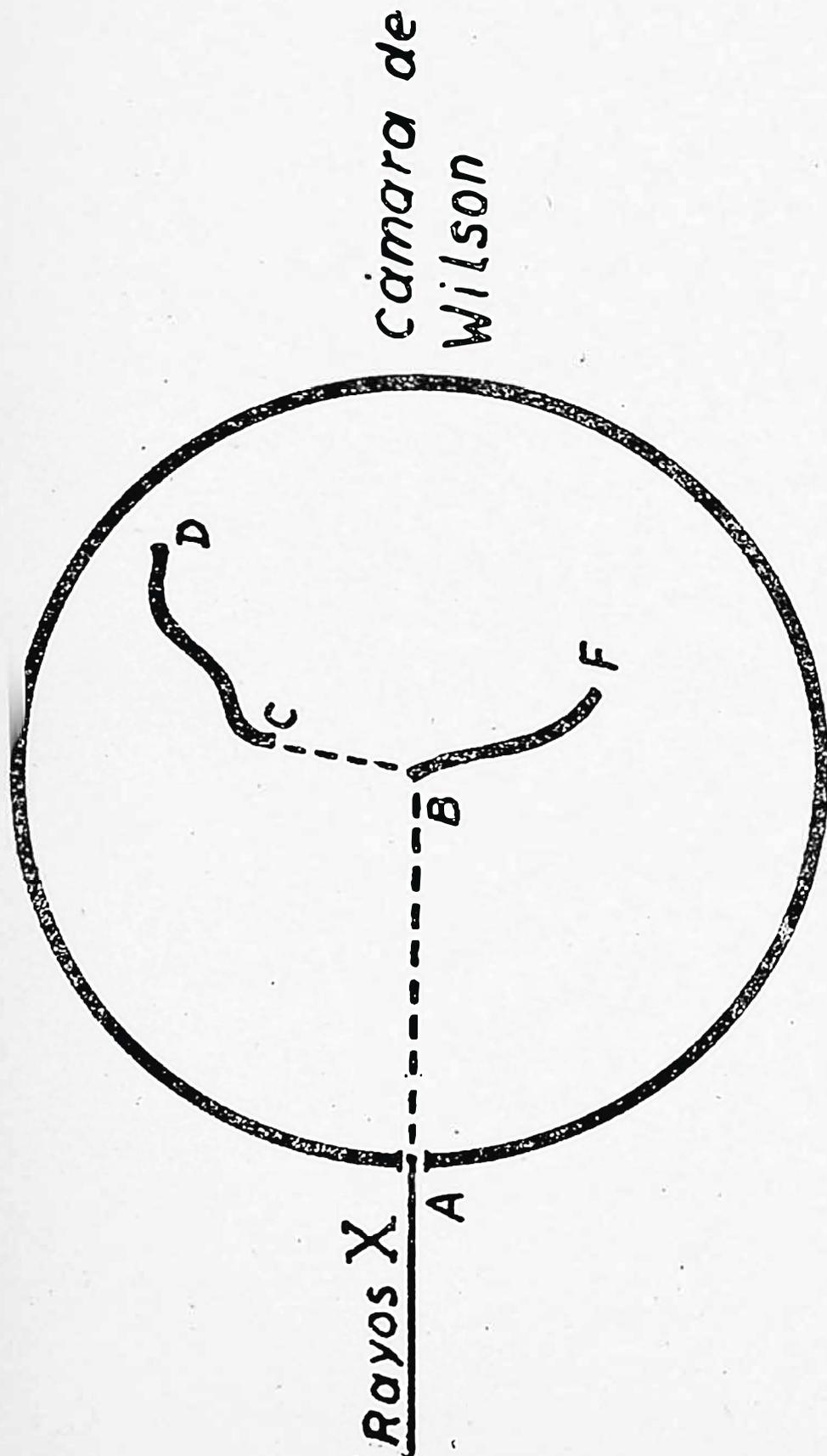
Ahora bien, el «quanta» que camina a través del gas de la cámara de Wilson, no deja traza alguna de sí, pues en esta cámara como se ha dicho, sólo es posible ver las trayectorias de partículas cargadas eléctricamente; pero si no se ve el fotón (ya podemos llamarlo así), podrá verse en cambio la trayectoria del electrón chocado, que atravesando el gas de la cámara de Wilson, lo ioniza hasta perder su energía. Lo que resta del fotón se va en otra dirección y no es posible volver a observarlo en la cámara de Wilson.

Todavía podrá suceder que el resto del fotón encuentre en un momento cualquiera un átomo o una molécula del gas y produzca el efecto fotoeléctrico que producen los «quantas» si encuentran un átomo metálico o no.

Entonces el fotón deja de existir, pues cede su energía por entero al electrón fotoeléctrico el cual dejará una trayectoria visible en la cámara de Wilson.

En definitiva, puede obtenerse la prueba experimental fotográfica de un electrón, debido al choque producido por el «quanta» primario y la del electrón fotoeléctrico producido por el «fotón» difundido, el cual cesa de existir en ese instante porque entrega toda su energía al electrón fotoeléctrico mismo.

Existen por lo tanto todos los elementos necesarios para



AB = Fotón incidente (no se puede observar)

BC = Fotón difundido (no se puede observar)

BF = Trazas electrón primario (se puede observar)

CD = Trazas electrón fotoeléctrico (se puede observar)

efectuar el cálculo y verificar si corresponde a la realidad cuanto dice la teoría.

(La cosa y aun esto es maravilloso) es verificada con una precisión tal, que era difícil esperar en una experiencia de ejecución tan compleja.

El juego del billar que Compton jugó con los fotones y electrones resultó magníficamente.

A la individualidad del corpúsculo energético que resulta del fenómeno fotoeléctrico y de la relativa ley de Einstein podemos por lo tanto agregarle su materialización.

* * *

Y hemos llegado aquí al estado actual de la ciencia. He buscado de exponer en la forma más clara posible una rápida síntesis que aún siendo imperfecta espero haya dado una idea del esfuerzo del pensamiento y de la meditación de los hombres la ciencia de la Edad Media hasta nuestros días, para adquirir una concepción siempre más próxima a la realidad de la naturaleza de la energía radiante.

Hemos recorrido con una rápida visión las etapas grandiosas a través de las cuales el pensamiento humano ha pasado y hemos llegado al estado actual de la Ciencia donde la cuestión lejos de estar resuelta, ha adquirido aspectos mucho más complejos y difíciles que al comienzo de las investigaciones.

Hemos llegado a un punto donde estamos obligados a afirmar que un gran número de fenómenos naturales verificados experimentalmente sobre los cuales no podemos, no debemos, tener alguna duda, pueden ser interpretados sólo invocando la naturaleza corpuscular de la energía radiante, pero por otra parte, existe también un gran número de fenómenos naturales verificados experimentalmente sobre los cuales no podemos, no debemos, tener alguna duda, que pueden ser interpretados sólo invocando la naturaleza ondulatoria de la energía radiante.

Los tiempos de Grimaldi y de Newton están ya bien lejanos y, sin embargo, hemos vuelto a una concepción dualística del fenómeno luminoso, en particular, y de la energía radiante en general. En aquellos tiempos, de la concepción corpuscular, se pasó a la concepción ondulatoria; hoy día, además de las ondas, debemos admitir también los corpúsculos.

¿Cómo podemos armonizar estas dos concepciones tan contradictorias inherentes a un mismo fenómeno? Una contribución admirable en este sentido ha sido hecha por la genial «Mecánica Ondulatoria» de Schrodinger y De Broglie cuya interpretación física da lugar a admitir que el dualismo en la concepción de la energía radiante se verifica también en la concepción de la materia. Esta extrapelación, tan bella como atrevida, ha obtenido recientemente una confirmación experimental con el descubrimiento del fenómeno de la difracción de los electrones. Así que no sólo la energía radiante se manifiesta a veces como onda y a veces como corpúsculo, sino que también la materia tiene la posibilidad de manifestarse bajo este doble aspecto. Parece, entonces, poderse afirmar que este dualismo no es debido a una interpretación humana de los hechos, sino que a un principio general ínsito en la naturaleza misma.

Nadie podía preveer los resultados universales y de importancia transcendental alcanzados. Las ondas electromagnéticas, la luz invisible, la luz visible, los rayos X, las emisiones de las sustancias radioactivas, los electrones, los átomos, resultan tener propiedades comunes y ser unificados de un modo que nosotros hasta ahora no logramos comprender perfectamente.

Estamos, por desgracia, en un momento en el cual vemos la limitación de nuestra intuición, para comprender, interpretar la esencia de este dualismo que los fenómenos experimentales y las expresiones analíticas dan por cierto y verdadero. Probablemente, hemos llegado a un punto, en el cual las inclinaciones personales determinan la elección de las maneras de expresarnos y es por esto, que me atrevo a manifestar mis ideas al respecto.

Me parece que la luz se manifieste, se deba considerar de naturaleza corpuscular, granular, material en el momento de la partida de la fuente luminosa y en el momento de la llegada al cuerpo que la recibe; se manifieste, se deba considerar, en cambio de naturaleza ondulatoria en la propagación.

Si la propagación se verifica, pues, en el espacio vacío de materia, donde la naturaleza de la luz no puede sufrir modificaciones como en la propagación en los medios materiales transparentes en los cuales reacciona inevitablemente con la materia, la luz debe considerarse de naturaleza ondulatoria electromagnética por cuanto en este caso no se puede no tomar en cuenta la teoría de Maxwell después de todas las maravillosas y convincentes pruebas experimentales que la confirmaron. Por otra parte, si se considera toda la gama de las longitudes de onda según la cual se manifiesta toda la gran familia de las ondas electromagnéticas, me parece que en los diferentes casos el predominio de las ondas y de los corpúsculos varía de caso a caso en función de la longitud de onda.

Para las ondas que podemos llamar largas desde las Marconianas a los rayos caloríficos es la naturaleza ondulatoria, con toda probabilidad, la que domina, para las ondas que podemos llamar cortas de la luz visible, de los rayos ultravioletas hasta los rayos X y gama las dos manifestaciones corpusculares y ondulatorias dominan ambas en el fenómeno y la importancia de la una o de la otra manifestación varía con toda probabilidad con la longitud de onda de estas radiaciones y precisamente, para las ondas menos cortas es la naturaleza ondulatoria la que domina, para las ondas más cortas es la naturaleza corpuscular, en cambio, que tiene predominio, aun debiéndose, en este caso, tomar en cuenta los dos aspectos del fenómeno.

Mas, (deseo bien afirmararlo explícitamente) he expuesto ideas personales por el momento no demostrables y, quizás, discutibles en cuanto como ya he dicho, por el momento, la esencia del dualismo de la energía radiante se halla fuera del campo de

nuestra comprensión. Pero, lo que por el momento puede estar más allá de nuestra comprensión puede llegar a ser más claro en el futuro, no sólo a través de la conquista de nuevos descubrimientos experimentales sino que también acostumbrando nuestra mente a las nuevas orientaciones del pensamiento científico. Se puede tener plena confianza que las investigaciones del porvenir basadas en la combinación de las dos viejas teorías serán otro tanto fecundas como lo fueron las del pasado que vivieron y prosperaron por sobre su rivalidad.