

Prof. Leopoldo Muzzioli

## Aspectos de la energía radiante



L gran físico inglés Isaac Newton consideraba que un cuerpo que emite luz propia, proyecta pequeñísimos corpúsculos, gránulos o partículas de luz; estas partículas «su i g e n e r i s» bombardeando nuestro órgano visual daban lugar a la percepción luminosa.

Mientras se considera solamente el fenómeno de la reflexión, tal hipótesis puede mantenerse. Puede servir igualmente bien, si consideramos los fenómenos de la refracción de la luz. Pero en el caso de la refracción (por ejemplo: para el aire y el agua) era necesario admitir que la velocidad de las partículas en el agua fuese mayor que la relativa en el aire.

Esto no es verdad, pero por mucho tiempo fué imposible demostrarlo, dadas las dificultades técnicas de la época para determinar la velocidad de la luz en el aire y aun más en el agua.

Para medir una velocidad del orden de millares de kilómetros por segundo, son necesarias bases astronómicas o artificios complicados.

La teoría de la emisión, podría por lo tanto, bajo este punto de vista, permanecer tranquila por mucho tiempo.

Sin embargo existían en la misma época de Newton algunos físicos que interpretaban diversamente el fenómeno de la propagación luminosa.

Un sacerdote italiano Francesco Grimaldi, que vivió entre 1618 y 1663, había ya sostenido que la propagación de la luz es de naturaleza ondulatoria, tal hipótesis era aceptada en la época de Newton, aun por el holandés Cristian Huyghens y por el inglés Roberto Hooke.

Isaac Newton entre los años 1666 y 1669 efectuó su famosa experiencia sobre la dispersión de la luz y más tarde la también famosa experiencia denominada «los anillos de Newton» debida a la interferencia de los rayos luminosos. Aunque estas experiencias se podían explicar con gran facilidad en base a la hipótesis de la naturaleza ondulatoria de la propagación de la luz, Newton fiel a su hipótesis corpuscular, para explicar más o menos bien estos dos nuevos hechos físicos, se vió obligado a atribuir propiedades especiales a sus corpúsculos y a valerse de artificios matemáticos complejos.

Además, el fenómeno de la difracción de la luz, descubierto por Grimaldi, no se alcanzó a explicar en modo alguno mediante la naturaleza granular de la propagación, pero la autoridad de Newton era tal, que

casi todos los físicos de su tiempo estaban inclinados hacia su hipótesis.

Pero la semilla dejada por Grimaldi debía dar sus frutos y es así como al comienzo de 1800 los físicos piensan que la naturaleza ondulatoria de la propagación de la luz, es la hipótesis más apta para explicar los fenómenos de la reflexión, refracción y sobre todo los fenómenos de la dispersión, interferencia y difracción.

La nueva hipótesis ondulatoria aplicada al fenómeno de la refracción (por ejemplo para el aire y el agua) daba, para la velocidad de propagación de la luz, un valor mayor en el aire que en el agua mientras que la hipótesis corpuscular, como ya hemos dicho, daba una velocidad mayor en el agua que en el aire.

Las determinaciones de la velocidad de la luz en el aire y en el agua eran por lo tanto de capital importancia para establecer con seguridad absoluta la naturaleza de la propagación.

La primera tentativa para medir la velocidad de la luz fué hecha por Galileo Galilei. Los antiguos opinaban que tal velocidad era infinita. El gran físico italiano dudó también de este dogma de la ciencia de entonces, como de tantos otros. Quiso hacer el experimento. Pero los resultados de la experiencia debido a los medios de que disponía, fueron negativos. Sólo pudo deducir que la velocidad de la luz era grandemente superior a la del sonido.

Mucho más tarde, en 1675, Olaf Romer, del pe-

riodo de eclipse de uno de los satélites de Júpiter, dedujo que la luz en el aire posee una velocidad finita aproximadamente de trescientos mil kilómetros por segundo.

Posteriormente, en 1727, Santiago Bradley, estudiando la aberración de la luz de las estrellas fijas llegó a idéntico resultado.

Pero estas eran medidas de la velocidad de la luz en los espacios cósmicos y en la atmósfera terrestre; mucho tiempo debía pasar antes que se construyesen los complejos aparatos experimentales para determinar la velocidad de la luz (por ejemplo) en el agua.

Fué en 1850, cuando Foucault probó experimentalmente que la velocidad de la luz en el agua es inferior a aquella del aire, en conformidad a la teoría ondulatoria y en contradicción a la teoría corpuscular de la propagación.

Más tarde Fizeau y últimamente Michelson confirmaron con medidas exactísimas los resultados de Foucault.

Entonces, en el 1850 el primer dualismo en la concepción de la naturaleza de la propagación de la luz y en general de la energía radiante es eliminado, y se puede, desde ese momento, hablar únicamente de la naturaleza ondulatoria de la energía radiante.

El fenómeno de la polarización de la luz estudiado por Malus en 1808 establece que el proceso vibratorio de la luz consiste en oscilaciones transversales, esto es, perpendiculares a la dirección de propagación.

El efecto Faraday y el efecto Kerr, sobre la acción que los campos eléctricos y magnéticos ejercen sobre la dirección de vibraciones del vector luminoso y la reproducción de los fenómenos ópticos obtenida por Righi con las ondas electromagnéticas de Hertz; confirmaban plenamente las relaciones matemáticas de Maxwell y establecían que la propagación de la luz además de poseer naturaleza ondulatoria transversal es de naturaleza electromagnética.

Hasta el año 1900 los físicos pensaron de este modo haber interpretado plenamente la energía radiante considerándola de naturaleza ondulatoria transversal y electromagnética.

El dualismo de la energía radiante quedaba así eliminado, en lo que respecta 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 intensamente de estudiar el comportamiento de la radiación cuando tal radiación está lejos de su fuente, pero a comienzos del novecientos se sabe muy poco 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 frecuencias del espectro continuo no es constante, pero pasando desde las frecuencias más bajas (equivalentes al rojo) a las más elevadas (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 frecuencias más altas. (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.

Si la luz fuese una propagación de ondas electromagnéticas semejantes a las que provienen del 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 en esta hipótesis Lord 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.

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 Lord Reyleigh 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  $6,55 \times 10^{-27} \frac{\text{erg}}{\text{seg}}$ ) por la frecuencia de la radiación que se considera.

El proceso de emisión imaginado por Planck se puede comparar al proceso que antecede a la caída de una gota de agua desde la boca de una llave cualquiera.

Hasta que la gota no alcanza un peso determinado no puede separarse del borde de la llave.

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 «cuanta» 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 «cuanta» pueda vencer esta hostilidad, que adquiriera 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 «cuanta» es dada en un primer momento por el llamado efecto fotoeléctrico.

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 verificar 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 viene utilizada prácticamente en varios campos de la técnica como ser: el cine hablado, la telefotografía, la televisión.

Profundizando el estudio del efecto fotoeléctrico descubierto 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 bombardean con luz visible, volviéndose en cambio velosísimos 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 vengán expulsados por medio de una potente lámpara eléctrica o por me-

dio 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.

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:

«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 cuan-

do 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 «cuanta» de una radiación cualquiera, en particular de la radiación X es como una bolita de marfil.

Si el «cuanta» 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 «cuanta» más pequeño de lo que era antes. En estas condiciones se difunde y se difundirá por consiguiente bajo forma de un «cuanta» más pequeño, esto es bajo forma de radiación a menor frecuencia.

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 Simon, 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.

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

Ahora bien, el «cuanta» 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 «cuanta» 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 «cuanta» 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 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.

He creído oportuno compilar un cuadro que en forma sintética represente todo el desarrollo de las ideas y de los hechos referentes al estudio de la energía radiante desde Newton hasta hoy en día.

En este cuadro se observa claramente como en el estudio de la propagación; desde la naturaleza granular de Newton se pasa a la naturaleza ondulatoria de Huyghens, debido al estudio profundizado de fenómenos y realidades experimentales; y de la naturaleza ondulatoria de Huyghens se pasa a una concepción también ondulatoria pero más perfecta y determinada: naturaleza ondulatoria, transversal y electromagnética, debido al estudio profundizado de otros fenómenos y

de otras realidades experimentales posteriormente descubiertas.

En el estudio de la Emisión y Recepción, desde la naturaleza ondulatoria de Rayleigh se pasa a la naturaleza granular fotónica, y también aquí todo esto se debe al estudio profundizado de otros fenómenos y de otras realidades experimentales.

En definitiva podemos decir que la luz y en general la energía radiante, es de naturaleza ondulatoria transversal electromagnética en la propagación, y de naturaleza granular fotónica, en la emisión y recepción.

En otros términos la energía radiante se manifiesta como una onda electromagnética cuando ha partido del cuerpo que la emite y antes de llegar al cuerpo que la recibe. En cambio se manifiesta como materia en el momento de abandonar la fuente emisora y en el instante de bombardear el obstáculo.

Los tiempos de Newton están ya bien lejanos y sin embargo nosotros hemos vuelto a una concepción dualística del fenómeno luminoso en particular y de la energía radiante en general. En los tiempos de Newton del concepto corpuscular se pasó al ondulatorio. Hoy día, además de las ondulaciones se admite el corpúsculo.

El dualismo en la concepción de la energía radiante, dualismo que se verifica igualmente en la concepción de la materia es por lo tanto susceptible de ser considerado, no como un dualismo debido a una interpretación humana de los hechos, sino como un principio general ínsito en la naturaleza misma.

# Hombres, Fenómenos, Teorías, relacionados con la Energía Radiante

## PROPAGACION

Naturaleza Granular (Newton).	Naturaleza Ondulatoria (Huyghens).
-------------------------------	------------------------------------

Hechos por explicar: Reflexión - Refracción - Dispersión - Interferencia - Difracción,  
Determinaciones por ejecutar: Velocidad de la luz, en el aire y en el agua.—Römer, Bradley, Foucault, Fizeau y Michelson.

Se deduce: Naturaleza Ondulatoria.

Fenómeno de Polarización (Malus) Naturaleza Ondulatoria Transversal	Efectos Faraday-Kerr (Maxwell-Hertz-Righi) Naturaleza Electromagnética
--	---

Se deduce: Naturaleza Ondulatoria Transversal Electromagnética.

## EMISION Y RECEPCION

Naturaleza Ondulatoria (Raiyleigh-Wien)	Naturaleza Granular (Planck-Einstein)
---	---------------------------------------

Hechos por explicar: Leyes de Wien-Stefan.—Efectos: Fotoeléctrico - Compton.

Se deduce: Naturaleza Granular Fotónica.

## ESTADO ACTUAL

En la emisión y recepción: Naturaleza Granular Fotónica.

En la propagación: Naturaleza Ondulatoria Transversal Electromagnética.