LA OPTICA ASTRONOMICA DE GARAVITO

EXPLICACION PRELIMINAR REFERENTE AL FOLLETO "NOTA SOBRE OPTICA MATEMATICA"

JORGE ALVAREZ LLERAS
Director del Observatorio Astronómico Nacional.

En el número anterior de esta Revista se insertó como introducción al escrito de Garavito titulado: "*Teoría de la aberración de la luz*", una "explicación preliminar", que complementamos hoy con esta otra relativa a una de las cuestiones que tratamos entonces de modo general al exponer brevemente cuál fue la labor del astrónomo colombiano en el campo de la Optica. Se trata ahora del punto concreto a que da lugar la interpretación de Huyghens respecto de la onda en la propagación ondulatoria de la luz.

Pero como escribimos para quienes no estén al corriente de estas cuestiones, vamos a empezar por recordar algunas nociones referentes a la propagación de los movimientos periódicos en un medio isótropo ilimitado, entendiendo por éste el medio en el cual toda propiedad física válida para un punto, en una dirección determinada, es válida para todos los otros puntos, y en la misma dirección. Así, por ejemplo, un cuerpo que vibra en un medio isótropo indefinido transmite en todas las direcciones un estremecimiento que se propaga con una velocidad definida, en todas direcciones. (*)

Según una dirección determinada que parte del centro donde tiene lugar el estremecimiento (origen O del estremecimiento), el tal, causado en el origen O, se reproducirá en las mismas condiciones a una distancia OA, al cabo de la unidad de tiempo. Se tendrá por consiguiente: $V = OA$ en donde V será la velocidad de propagación que dependerá de las propiedades del medio y no de la naturaleza del movimiento.

El fenómeno de la propagación ondulatoria se puede representar de esta suerte:

Sea OM el eje de propagación. A partir del origen O tomemos un período VT. Evidentemente al cabo del tiempo T, duración de un período, la propagación del movimiento se representará por la abcisa VT. (Figura 1ª). Pero en este mismo tiempo el movimiento vibratorio en O habrá pasado por una faz entera y todo estará en este punto O, como lo estuvo al principio del movimiento. Esta longitud VT es lo que se llama longitud de onda λ o sea el camino recorrido por el estremecimiento dicho, en el medio que rodea al punto O, durante un período.

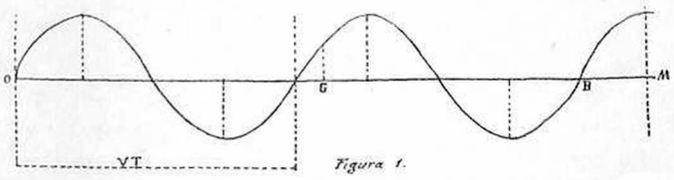


Figura 1.

Para un punto B que dista de O una longitud $OB = K\lambda$ (siendo K un número entero), el movimiento está en faz con el de O. A una distancia $K\lambda + \frac{\lambda}{2}$ la faz es opuesta a la de O, y a una distancia $K\lambda + \frac{\lambda}{4}$ la faz está en cuadratura con la de O.

Se podría representar el movimiento para un punto C tal que $OC = K\lambda + \frac{\lambda}{n} = x$. Esta representación sería semejante a la de O, pero los fenómenos observados en O se reproducirían en C con un retardo de $\frac{1}{n}$ de período.

Si el movimiento vibratorio en O está representado por $y_o = f(t)$ el movimiento en C será de mismo período y de misma amplitud, y se expresará así:

$$y_c = f\left[\frac{T}{t} - \frac{x}{\lambda} + K\right] \qquad \left[\text{ siendo } n = \frac{T}{t}\right]$$

Evidentemente en un medio isótropo lo que pasa según la línea OM debe tener lugar en todas las direcciones y de la misma manera, lo que quiere decir que el estremecimiento en O se propaga en todo sentido, reproduciéndose los fenómenos vibratorios del origen O exactamente iguales, a las distancias $\lambda\ 2\lambda \ldots n\lambda \ldots$

El conjunto de los puntos distantes $n\lambda$ del origen forma una superficie esférica que se llama superficie de onda. Hé aquí una explicación esencialmente elemental de la propagación ondulatoria.

Esta propagación puede tener lugar en un cuerpo sólido, en un líquido, en un gas y en el éter. Pero por lo que vimos en la explicación inserta en el primer número de esta Revista, el fenómeno de la propagación ondulatoria en el éter debe tener lugar como si se tratara de un sólido, para efecto de las vibraciones trasversales y longitudinales.

De modo general esto es lo que deduce Garavito en el estudio que se inserta a continuación, al establecer la ecuación diferencial a que obede-

(*) Physique Générale de M. Prince et M. Prédhumeau. Ecole Speciale des Travaux Publics.—París.

ce la propagación de la luz en el éter, pero sin hacer hipótesis alguna referente a la intimidad de este fenómeno, como se sentó en el número anterior de esta Revista, a que acabamos de hacer referencia, y sin caer en el error a que da lugar el concepto Huyghens.

Según este concepto, cada punto de un medio en movimiento vibratorio es el sitio de un estremecimiento oscilatorio que se transmite por radiación, absolutamente como sucede para el punto central causa del fenómeno de propagación.

Así los estremecimientos producidos en un número infinito de puntos, sobre toda la superficie de la onda, se propagan aisladamente, pero lo único que nos es perceptible es el movimiento del conjunto, mientras no haya manera, por medio de una superficie de discontinuidad, de analizar un movimiento elemental. Las ondas sensibles que se propagan en un medio indefinido son las envolventes de esas pequeñas ondas elementales. Hé aquí simplemente enunciado el principio de Huyghens o de las ondas envolventes.

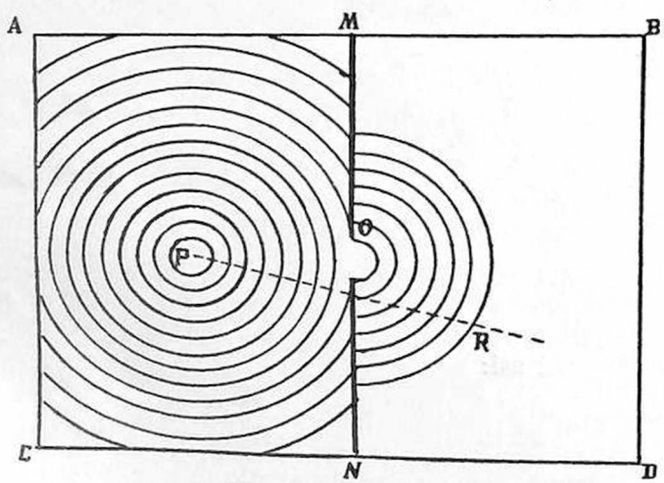


Figura 2.

Este principio, en lo que se refiere a los medios elásticos conocidos directamente en la Física y en relación con los movimientos lentos, no deja lugar a duda: es obvio por sí mismo. Así, si consideramos (Figura 2ª), por ejemplo, un depósito de agua *ABCD*, dividido en dos partes por un tabique *MN*, que se encuentra perforado por una abertura *O*, al nivel del líquido observamos lo siguiente:

Si se produce en *P* un choque sobre la superficie del líquido, o se hace vibrar en ese punto un diapasón, el estremecimiento producido se propaga en ondas esféricas que se manifiestan en la superficie por circunferencias concéntricas de radio creciente. En el momento en que la onda llega al punto *O*, este punto se convierte en el centro de un nuevo movimiento absolutamente idéntico al que tiene lugar antes del tabique *MN* y que proviene de *P*. Así de *O* parten ondas esféricas, que en la superficie del líquido aparecen como circunferencias concéntricas, con centro en *O*.

Como se dijo, esto que la sencilla experiencia enseña, en este ejemplo, se verifica para todos los movimientos periódicos que se propagan en medios elásticos: tal sucede con el fenómeno de la propagación del sonido en el aire.

Pero ello no tiene lugar en el fenómeno de la propagación de la luz, pues una ventanilla estrecha, por donde pasa un rayo luminoso, constituye una sección cualquiera del tubo de flujo de luz que ella limita, y nunca podrá considerar-

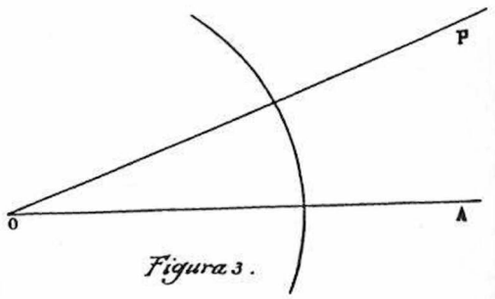


Figura 3.

se como centro de propagación del fenómeno, como superficie luminosa, en sí, tal como sucede en la abertura del ejemplo anterior.

Así, según lo que hemos dicho sobre la propagación del movimiento vibratorio, pudiera parecer insensato decir que el tal se transmite en línea recta (el caso de la luz) y admitir que esta transmisión se hace según los radios *OA*, *OP*, etc. de acuerdo con la hipótesis ondulatoria, tal como lo apunta Garavito, en el estudio que comentamos aquí. (Figura 3ª).

Por este motivo algunos expositores anteriores a nuestro sabio astrónomo, idearon una explicación que justifica la teoría de la transmisión radial según una línea recta, explicación considerada no como una realidad, sino como un procedimiento cómodo y que conduce a resultados exactos para el estudio de las cuestiones referentes a

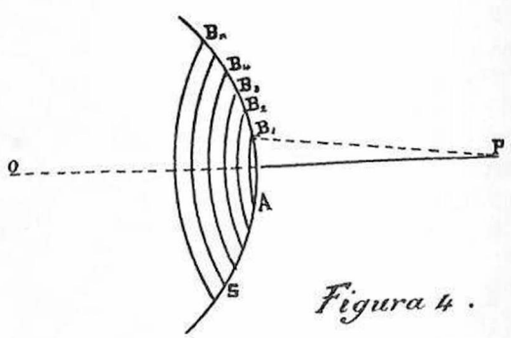


Figura 4.

la teoría ondulatoria y que sean independientes de la naturaleza de las vibraciones o movimientos periódicos, que se transmiten libremente.

Sean una superficie (Figura 4ª) de onda *S* y un punto *P*. Si el movimiento vibratorio se transmitiera en línea recta, según el radio *OAP*, esto querría decir que el punto *P* quedaría influencia-

do solamente por el movimiento del punto A, que llegaría al cabo de un tiempo $\frac{AP}{V}$.

Cortemos la superficie de la onda por esferas de radios: $PA = m$; $PB_1 = m + \frac{\lambda}{2}$; $PB_2 = m + \lambda$; $PB_3 = m + \frac{3\lambda}{2}$ ..... etc .... [creciendo en $\frac{\lambda}{2}$], y hagamos a m muy grande en relación con la longitud de onda λ.

Según esto, se puede considerar que los planos de las circunferencias de intersección están igualmente alejados unos de otros, y, por consiguiente, se puede concluír que las zonas esféricas definidas sobre la misma onda esférica, tienen todas igual área o superficie.

Así a un punto M situado sobre la zona n corresponderán dos puntos M_1 y M_2 sobre las zonas $(n-1)$ y $(n+1)$, para las cuales se tendrá:

$$PM_2 - PM = PM - PM_1 = \frac{\lambda}{2}$$

Las vibraciones recibidas de cada uno de estos puntos en el punto P producen en ese punto un

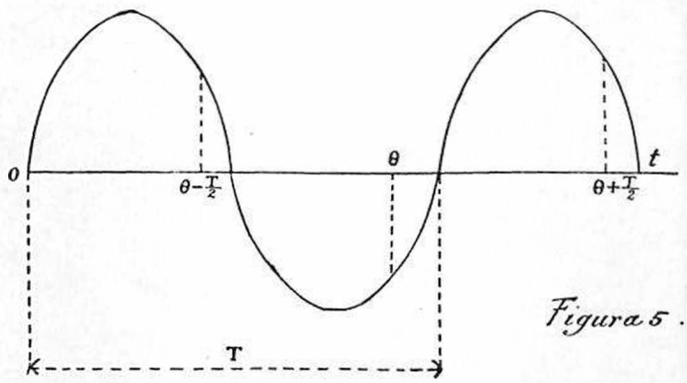


Figura 5.

efecto simultáneo y son entonces para M la elongación en el tiempo θ y para M_1 la elongación en el tiempo $\theta - \frac{T}{2}$ y para M_2 la elongación en el tiempo $\theta + \frac{T}{2}$ (Figura 5ª).

La resultante será la suma geométrica, y como las elongaciones son iguales y sucesivamente de signo contrario, se puede decir que M anula la mitad del efecto de los otros. Y como las zonas esféricas tienen la misma superficie habrá tantos puntos M como puntos M_1 y M_2.

Así se puede concluír que cada zona anula el efecto de la mitad de la zona precedente y de la mitad de la zona siguiente, hasta que esta anulación sucesiva no deje subsistir sino la mitad de la zona central o *polo* de la onda con relación al punto P. Todo debe pasarse, pues, como si P no recibiera sino las vibraciones transmitidas por un pequeñísimo casquete esférico que rodea al polo, siendo el conjunto de puntos tales como el punto A, lo que constituye el rayo de luz OP.

A esta explicación, más o menos artificiosa, conviene observar con Garavito: "El supuesto plano de la onda ha sido sugerido por el concepto hipotético de Huyghens, según el cual la onda es todo en la propagación, mientras el rayo luminoso no es sino un simple lugar geométrico; concepto erróneo, pues es precisamente lo contrario".

En el estudio que comentamos ahora, Garavito establece la ecuación diferencial de la propagación en los movimientos periódicos y da una interpretación de ella, que denomina *solución radial*, dejando a la solución corriente sugerida por la hipótesis de Huyghens, la designación de *solución ondulatoria*.

Más adelante agrega: "La experiencia prueba que la luz tiene una velocidad definida, dependiente de las condiciones físicas del medio, lo cual nos induce a pensar que ella es una forma de energía que se transmite continua y sucesivamente de unas masas a otras en el interior de los medios diáfanos. A este respecto Huyghens tiene razón: no hay transporte de materia sino de energía. Esto es lo que se puede admitir de la teoría de Huyghens; pero ella tiene un defecto que la experiencia no confirma, el cual consiste en que hace, además, otra hipótesis, la de transmisión esférica y no radial. Al contrario, la hipótesis de Newton supone la materialidad de la luz, el transporte real de materia, lo cual no es admisible; pero en cambio acepta la transmisión rectilínea de conformidad con la experiencia".

"Explanemos las razones que nos inducen a desechar la transmisión esférica. Resumiremos la hipótesis ondulatoria:

"Las vibraciones del éter en un punto del espacio pueden ser consideradas, dice Huyghens, como resultantes de los movimientos elementales que producirían aisladamente, al mismo instante, todas las partes de la superficie de las ondas en una cualquiera de sus posiciones anteriores.

"Según este concepto, la onda es todo, mientras el rayo luminoso no es la trayectoria de la energía luminosa sino un simple lugar geométrico: la línea tal que las vibraciones comunicadas por las ondas anteriores en la región vecina de cada uno de sus puntos están en el más alto grado de concordancia.

"Ahora bien: la experiencia prueba que la onda puede ser fragmentada por pantallas, sin que deje de propagarse la luz, mientras el rayo no puede ser fragmentado sin interrumpir la propagación. Así, la onda no es sino un simple lugar geométrico, el lugar a donde llega a cada instante la luz emanada de un foco. Es una esfera en los medios isótropos; un elipsoide en los cristales, etc.; mientras el rayo luminoso es la trayectoria real de la energía.

"Supongamos una ventanilla de un centímetro cuadrado de sección, por la cual pasa un rayo de luz procedente de un punto luminoso muy lejano. El rayo de luz será un cilindro de un centímetro cuadrado de sección y el flujo luminoso

es constante a través de las varias secciones transversales. Huyghens explica la razón por la cual la luz debe verse en la dirección del rayo a causa de que la tangencia común de las ondas nacientes en cada punto de la onda que llega a la ventanilla, es un plano paralelo a dicha onda. Pero no podría explicar cómo siendo la propagación esférica con centro en los varios puntos de la sección de la ventanilla, se conserva la intensidad luminosa en las varias secciones del tubo de luz".

En la explicación preliminar que dimos del primer folleto de Garavito sobre Optica astronómica, hicimos notar que el concepto de tubo de flujo de energía para explicar la aberración y la refracción de la luz en las primeras capas atmosféricas, puede conducirnos a la idea, absurda al parecer, de que la hipótesis ondulatoria es susceptible de asociarse con la de la emisión suponiendo que esta última sirva para darnos idea de la propagación luminosa fuéra de la atmósfera de la tierra, y que la primera sea más apropiada para explicarnos todos los fenómenos ópticos que observamos en los medios diáfanos materiales que nos rodean y que estudiamos directamente con la experiencia.

Ahora creemos, al entrar en explicaciones más concretas al respecto, que aun para el examen de la propagación rectilínea de la luz, en forma de tubos de flujo, a lo largo de los cuales el flujo de energía es constante, la hipótesis ondulatoria tropieza fundamentalmente con el hecho anotado atrás, cuando se dio una idea elemental de cómo se manejan las ondas esféricas en los movimientos ondulatorios lentos, totalmente distintos y separados de lo que debe suceder en el mecanismo íntimo de la propagación de la luz.

Evidentemente, dentro de la teoría clásica de la propagación ondulatoria, la solución de Garavito es admirable: ella da la clave para resolver mecánicamente los fenómenos de la reflexión y de la refracción de la luz en los medios diáfanos en movimiento, y para explicar, por ende, el fenómeno de la aberración; pero como presupone, de acuerdo con la teoría ondulatoria clásica, la existencia del éter, necesita que se acepte el arrastre total del éter por la atmósfera de la tierra, estando esta consecuencia de acuerdo con los experimentos de Michelson y Morley.

Además de esto, como la Mecánica ondulatoria de Broglie nos suministra hoy una representación radial de la propagación de la energía, suponiendo que, en realidad, el electrón es una sucesión de ondas, podemos asociar a lo largo de un tubo de flujo de energía, el movimiento periódico con el desalojamiento de masas mecánicas que se desalojan con la velocidad V.

Esta velocidad, para el fenómeno de la propagación de la luz, lo mismo que para las ondas electromagnéticas, es la máxima posible a, que corresponde, según la teoría ondulatoria, a la transmisión del estremecimiento en un medio infinitamente elástico e incomprensible, como el éter.

Así, si prescindimos de la necesidad del éter, dentro de la solución radial de Garavito, y admitimos una idea semejante a lo que sugiere la hipótesis de Broglie, la interpretación artificiosa de la figura 4ª no se requeriría ni habría contradicción entre las experiencias de Michelson y Morley y el fenómeno de la aberración interpretado por Fresnel con el arrastre parcial del éter.

En estas dudas quedamos al prologar el segundo opósculo de Garavito sobre Optica astronómica, opúsculo en donde su espíritu analítico poderoso descubre el error de interpretación, en que, desde tiempos de Huyghens, se vino incurriendo cuando se ha considerado la transmisión esférica de los movimientos periódicos.

NOTA SOBRE OPTICA MATEMATICA

JULIO GARAVITO ARMERO
Director del Observatorio Astronómico Nacional, de 1893 a 1919.

(SEGUNDO ESCRITO DE LA SERIE SOBRE OPTICA MATEMATICA)

EXPLICACION DE ALGUNOS FENOMENOS OPTICOS QUE SE RELACIONAN CON LA ASTRONOMIA

I

Generalidades

El movimiento intelectual moderno sigue dos rutas opuestas, en lo que respecta a la Física.

La una, la de la ciencia clásica, continúa en su derrotero y no confiere a las teorías otro papel que el de resumir en unas pocas ecuaciones diferenciales el conjunto de leyes que se refieren al orden de fenómenos que estudia la teoría. A este respecto la Termodinámica no deja qué desear; es el modelo de lo que deben ser las teorías físicas. En la Optica y en la Electricidad se ha necesitado, desgraciadamente, del auxilio de hipótesis destinadas a guiar el pensamiento en el planteo de las ecuaciones que resumen las leyes que rigen los fenómenos concernientes a esos ramos; pero los verdaderos sabios no ven en tales hipótesis otra cosa que simples metáforas, y sólo confieren valor a las relaciones cuantitativas expresadas en las ecuaciones.

La corriente opuesta pretende adivinar el mecanismo íntimo de los fenómenos físicos a fin de hacer en esta ciencia lo que se realizó en Astronomía con la gravitación; pero si se atiende a que los fenómenos relativos a los movimientos celestes están al alcance de nuestros sentidos y de nuestros instrumentos, y son infinitamente más sencillos que los que corresponden a la materia *atómica*, se comprenderá que el fin perseguido en la Física por la tendencia modernista, es de éxito improbable. Una derivación de esta corriente intelectual se ha encargado de maravillar al público con los más extravagantes descubrimientos, hasta el punto de alarmar a ciertas gentes impresionables, quienes deducen de esto la decadencia de la civilización actual. El alarma es infundado, porque nada más benéfico para la ciencia clásica que las exageraciones de la tendencia opuesta.

En la Optica matemática clásica, han quedado dos puntos defectuosos: lo que respecta a la propagación de la luz en los medios en movimiento relativo. El objeto que nos hemos propuesto en el presente opúsculo es el de demostrar que toda la dificultad reside en una hipótesis que se ha conservado implícita en la teoría, descartada la cual, desaparece la paradoja sin que las ecuaciones de la Optica sufran modificación sustancial que impida deducir de ellas lo que se ha deducido siempre.

No es posible sustraer el estudio de los fenómenos naturales de toda hipótesis, pero hay que distinguir entre éstas, las que son naturales de las circunstanciales, de las metafóricas y de las que corresponden a conceptos más o menos concretos sobre la manera de ser de los hechos que se estudian. Estas últimas son evidentemente las más peligrosas cuando no pertenecen a las hipótesis de la segunda clase.

Las radiaciones solares impresionan nuestra retina y se manifiestan bajo distintas formas: colorífica, mecánica, química y biológica, las cuales, sabemos, pueden transformarse mutuamente. Esta propiedad permite conceptuarlas todas como manifestaciones distintas de una misma entidad cuantitativa, expresable de la misma manera que su forma mecánica, esto es, por ML^2T^{-2} mediante las magnitudes, masa, longitud y tiempo. Esta hipótesis, por ser forzosa para el objeto que nos hemos propuesto, es circunstancial. En efecto, si los fenómenos concernientes a la transmisión luminosa no obedecieran a las leyes mecánicas, por ser la luz una entidad de naturaleza distinta totalmente de las cantidades mecánicas,