

OPTICA ASTRONOMICA

(TEORIA DE LA REFRACCION Y DE LA ABERRACION ANUAL)

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

(CUARTO ESCRITO DE LA SERIE SOBRE OPTICA MATEMATICA)

Antecedentes de la cuestión.

La Optica experimental suministra las siguientes leyes:

- 1.^a *Propagación rectilínea de la luz.*—En todo medio homogéneo la luz se propaga en línea recta. Sobre esta ley funda la Física la teoría geométrica de las sombras y de las imágenes a través de pequeñas aberturas.
- 2.^a *La luz no se propaga instantáneamente.*—Su velocidad es cerca de 300.000 kilómetros por segundo. Roemer fue el primero que puso de manifiesto la velocidad de la luz en el espacio, y determinó el tiempo que gasta en atravesar el diámetro de la órbita terrestre.
- 3.^a *La velocidad de la luz varía de un medio a otro.*—Foucault demostró que la velocidad de la luz es menor en el agua que en el aire.
- 4.^a *La cantidad de luz recibida normalmente en una superficie dada varía en razón inversa del cuadrado de su distancia al foco luminoso.*
Lo propio acontece con las radiaciones caloríficas y químicas de la luz.
- 5.^a *Reflexión de la luz.*—Cuando un rayo luminoso incide sobre una superficie pulida, se refleja de manera tal que los rayos incidente y reflejado están en un mismo plano normal a la superficie, y son iguales los ángulos de incidencia y de reflexión que hacen estos rayos con la normal a la superficie.
- 6.^a *Refracción de la luz de un medio a otro en reposo relativo.*—Cuando un rayo de luz incide sobre la superficie que separa los medios diáfanos que están en reposo relativo, se desvía de su dirección en el segundo medio de manera que los rayos incidente y refractado permanecen en un mismo plano normal a la superficie de separación, y los senos de los ángulos de incidencia y de refracción están en relación constante, llamada índice de refracción.
- 7.^a *El índice de refracción es independiente de la inclinación del rayo incidente y de la intensidad de la luz.*
- 8.^a *Cuando la luz pasa de un medio A al medio B el índice de refracción es inverso del que corresponde al paso de la luz del medio B al medio A.*

Además de estas leyes existen los siguientes hechos experimentales:

- a) *La luz es energía.*—Ella impresiona la retina produciendo una sensación, esto es, un trabajo fisiológico; ella forma la parte central del espectro solar cuyas regiones roja e infra roja afectan el termómetro, mientras la morada y la ultra morada impresionan las placas fotográficas. Y es evidente que la naturaleza íntima de esas radiaciones debe ser una misma.
- b) *La velocidad de la luz sobre la superficie de la tierra es igual en toda dirección horizontal.*—Esto resulta de las experiencias de Michelson repetidas en diversas ocasiones con el auxilio del Profesor Morley. El resultado de esta experiencia, interpretada según la hipótesis ondulatoria, corresponde al arrastre total del éter por la atmósfera de la tierra.
- c) *Experiencia de Fizeau.*—Si se hace recorrer a un rayo luminoso, bifurcado en dos, una corriente de agua a lo largo de dos tubos paralelos empalmados por sus extremos, el rayo que descende la corriente y el que asciende por ella gastan tiempos desiguales en recorrer el circuito. La diferencia de tiempo es tal, como si la velocidad de la luz fuese arrastrada no total sino parcialmente por el agua, siendo el coeficiente de arrastre igual a la velocidad del agua multiplicada por la unidad disminuída del inverso del cuadrado del índice de refracción de la luz al pasar del aire al agua.
- Experiencia ésta que aunque parece estar en contradicción con la de Michelson no lo está en realidad, como lo veremos más adelante.
- d) *La refrangibilidad de los rayos luminosos de las estrellas es independiente del movimiento de la tierra.*—Es la misma para una estrella hacia la cual la tierra se mueve, que para una estrella de la cual se aleja.

Este hecho experimental se deduce de las observaciones que han servido a los astrónomos para calcular las tablas experimentales de la refracción astronómica.

Fresnel mismo se dio cuenta del hecho y trató de explicarlo con el arrastre parcial del éter, puesto que las estrellas presentan el fenómeno de la aberración.

e) *La luz produce un empuje o impulsión en el sentido en que se propaga.*—Los físicos americanos Nichols y Hull han puesto de manifiesto el empuje de las radiaciones luminosas en condiciones satisfactorias. Sus observaciones fueron presentadas a la Sociedad Física Americana el año de 1908.

Tales son las leyes y hechos experimentales conocidos de la Física que se relacionan directa o indirectamente con la refracción simple de la luz, y de los cuales me serviré en este estudio.

En la presente exposición es preciso emplear símbolos y convenciones que faciliten el lenguaje y la claridad de las ideas.

Consideremos, para mayor sencillez, rayos cilíndricos de luz procedentes de focos muy lejanos, a fin de evitar circunloquios relativos a los cambios de las secciones normales del rayo; y supongamos que una pantalla provista de ventanilla con obturador de sección igual a la unidad de área intercepta la luz procedente del foco. Si se abre el obturador y se deja pasar un rayo de luz durante la unidad de tiempo, tendremos así un *proyector luminoso* o segmento cilíndrico de luz de sección unitaria y de longitud igual a la velocidad de propagación de la luz en ese medio.

La energía o cantidad de luz contenida en el proyectil será constante durante su movimiento si el medio es perfectamente diáfano. A dicha cantidad de energía luminosa llamaré *flujo unitario absoluto*.

Si la pantalla está animada de movimiento de traslación y la ventanilla se halla orientada normalmente a la velocidad relativa, el flujo de energía del proyectil lo llamaré, en este caso, *flujo unitario relativo*.

Sea (fig. 1.^a) AA la ventanilla del obturador y L un punto luminoso muy lejano, de manera que la luz que incide sobre la pantalla se propague paralelamente a LBA . Se abre el obturador y se deja penetrar la luz desde el instante t hasta el instante $t+1$. La cantidad de luz contenida en el cilindro recto $ABBA$ al instante t pasará por AA en el intervalo transcurrido de t a $t+1$ siendo AB igual a la velocidad (v) de la luz; esto es $AB=v$.

Al hablar de cantidad de luz quiero significar de una manera general cualquiera de las manifestaciones cuantitativas de la luz, sea energía, cantidad de movimiento, etc., en donde figure como factor, explícita o implícitamente, el volumen del cilindro $ABBA$.

Si la ventanilla está animada de una velocidad u igual a DD' en magnitud y dirección, el flujo que pasará en la unidad de tiempo no será ya el contenido dentro del cilindro recto $BBAA$ sino el contenido dentro del cilindro oblicuo $B'B'AA$ según se ve en la figura.

Si, pues, llamamos F el flujo al través de la ventanilla cuando ésta está en reposo, o flujo unitario absoluto, y F_r el flujo a través de la sección AA cuando ésta está animada de la velocidad u los flujos estarán entre sí como los cilindros respectivos; esto es, como sus alturas, puesto que sus bases son comunes.

Por tanto
$$\frac{F_r}{F} = \frac{B'B'AA}{BBAA} = \frac{C'D \cos \alpha}{AB} = \frac{v_r \cos \alpha}{v} \quad \text{en donde} \quad \alpha = DC'D' = \text{ángulo de la}$$

velocidad absoluta con la velocidad relativa; $v = C'D'$ y $v_r = C'D$. Se tendrá, pues, $F_r = F \frac{v_r}{v} \cos \alpha$

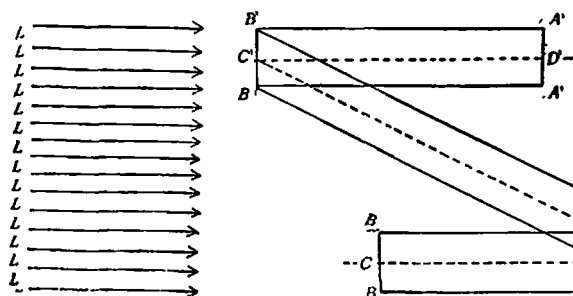


Figura 1

Pero F_r no es el flujo unitario relativo, pues el área AA que es igual a la unidad, es sin embargo oblicua respecto del cilindro $B'B'AA$.

Tracemos AH perpendicular a la velocidad relativa $C'D$. En este caso AH representará la sección normal. Por tanto, llamando como antes, F_r el flujo unitario relativo, esto es, a través de la unidad de área normal a la propagación relativa de la luz, se tendrá:

$$F_r = F' \frac{AA}{AH} \quad \text{Pero} \quad AH = AA \cos \alpha$$

Por tanto
$$F_r = F' \frac{1}{\cos \alpha} \quad \text{Y sustituyendo el valor de } F' \text{ se tendrá:} \quad F_r = \frac{v_r}{v} F \quad (I)$$

Así, pues, el flujo unitario relativo es igual al absoluto multiplicado por la relación de la velocidad relativa a la absoluta. Además, la dirección según la cual se propaga el flujo relativo respecto del sistema móvil es la dirección y sentido de la velocidad relativa.

Tal es la fórmula de transformación del flujo del rayo incidente de luz en el caso de reposo de ambos medios, al caso de movimiento de uno de ellos con relación al otro.

Esta es una fórmula de gran importancia y fundamental en este estudio.

Al flujo de luz unitario, sea absoluto o relativo, lo llamaré segmento de luz o proyectil luminoso.

Aberración anual.

Consideremos (fig. 2.^a) una gran cámara oscura $MNANM$ provista de un obturador objetivo en A y orientada, para fijar las ideas, hacia el polo norte de la eclíptica, en cuya dirección se halla una estrella.

La base de esta cámara MM está en el plano de la eclíptica, en la órbita de la tierra; supongamos que recorre esta órbita en el mismo sentido y en igual tiempo que aquella, a menos que se indique lo contrario; pero el medio diáfano que la circunda y que llena su interior es el mismo interplanetario. No se trata, pues, aquí, de ningún arrastre del éter por dicho medio.

Hago esta indicación a fin de reforzar la explicación de Bradley primeramente.

Si la cámara permanece en reposo, al abrir el obturador durante la unidad de tiempo, penetrará un proyectil o segmento luminoso de flujo unitario, el cual se transportará de A a A_0 y tendría su imagen en A_0 . La energía luminosa dejaría marcada la imagen de la ventanilla en el centro A_0 sobre una placa fotográfica que ocupase la base de la cámara.

Supongamos que la altura AA_0 de la cámara sea de diez mil metros; como la velocidad de la tierra es la diezmilésima parte de la de la luz, mientras el proyectil luminoso recorre los 10000 metros de altura de la cámara, la base de ésta se habrá desalojado en el plano de la eclíptica, esto es, perpendicularmente al rayo AA_0 en un metro; y la imagen de la ventanilla no será ya A sino que ésta se hallará sobre una circunferencia que tenga un metro de radio y cuyo centro es A_0 en una dirección igual y contraria a la de la velocidad de la cámara.

Sea (fig. 2 b) S el sol; $T_1 T_2 T_3 T_4$ la órbita casi circular de la tierra; Sγ la línea que va al equinoccio; T_1 la posición de la cámara a 90° de longitud, esto es, en la posición que ocupa la tierra el 23 de diciembre. En dicha posición de la cámara se abre la ventanilla y mientras la luz recorre los diez mil metros de altura de A a A_0 , la cámara avanzará en el sentido $T_1 u_1$ de la velocidad en ese momento en la magnitud de un metro, y la imagen de la ventanilla en vez de ser A_0 será B_1 siendo $A_0 B_1$ igual a un metro (fig. 2 c).

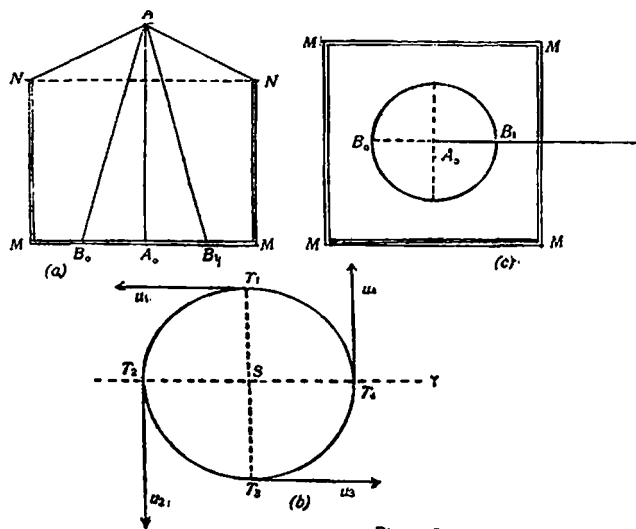


Figura 2*

La trayectoria relativa del segmento luminoso será AB_1 en el interior de la cámara. Tres meses después la cámara se hallará en T_2 a los 180° de longitud heliocéntrica. Si se abre la ventanilla, la luz recorre diez mil metros de altura de la cámara mientras ésta se mueve un metro paralelamente a su velocidad $T_2 u_2$ y la imagen de la ventanilla será B_2 y así sucesivamente: después B_3 y finalmente B_4 .

Todas estas imágenes están, pues, como se dijo, situadas sobre una circunferencia de un metro de radio; la cual representaría la trayectoria anual de aberración de la estrella, de conformidad con la explicación cinematográfica de Bradley.

Si en vez de estar la estrella en el polo de la eclíptica estuviera a una latitud ι su trayectoria anual sería un círculo; pero su sección normal al eje sería una elipse cuyo semi-eje mayor sería de un metro y el menor de un metro multiplicado por el seno de la latitud de la estrella.

Si en vez de una cámara obscura fuese el ojo de un observador, la estrella, que se vería como se ven todas las imágenes visuales según la línea que une el punto de la retina con el centro óptico del cristalino, describiría en el primer caso, cuando está en el polo de la eclíptica, una circunferencia anual de $20''$ de radio, y una elipse en el segundo caso; todo de acuerdo con las observaciones astronómicas.

Refacción de la luz de un medio a otro en reposo relativo.

Sea (fig. 3) SS' la traza sobre el plano de figura de la superficie de separación del medio M_1 y del medio M_2 . Sea A una ventanilla provista de un obturador por donde se deja pasar un rayo de luz durante la unidad de tiempo. Supongamos los medios perfectamente diáfanos, esto es, desprovistos de polvo, de vapores y demás materias opacas en suspensión, las que harían las veces de pantallas interceptando cierta cantidad de luz.

Supongamos que la sección de la ventanilla normal al rayo luminoso sea tal que permita pasar un flujo de luz suficiente para que restando de él la porción de luz que se refleja y la que se difunde, quede una cantidad L de luz igual al flujo luminoso al través de la unidad de sección en la unidad de tiempo, la cual se refracta y pasa íntegra al medio M_2 .

Según la ley de Descartes el proyectil L de luz recorre un camino quebrado compuesto de dos trayectos rectilíneos, a saber: AC en el primer medio y CB en el segundo. Estos dos trayectos están situados en un mismo plano normal a la superficie SS' que separa los dos medios y de tal manera que trazando por el punto C en donde la luz pasa del medio M_1 al medio M_2 una normal $N_1 CN_2$ los ángulos de incidencia $I_1 = \angle ACN_1$ y de refracción $R_2 = \angle BCN_2$ guardan la relación constante $\frac{\sin I_1}{\sin R_2} = n_{1,2}$.

La cantidad $n_{1,2}$ llamada índice de refracción es una constante que depende de los dos medios M_1 y M_2 .

La experiencia prueba que los índices de refracción son reversibles, así: cuando la luz pasa de M_1 a M_2 el índice es $n_{1,2}$ y cuando pasa de M_2 a M_1 es $n_{2,1}$ igual al inverso de $n_{1,2}$ esto es $n_{1,2} n_{2,1} = 1$.

Además, si M_3 es un tercer medio y llamamos $n_{1,3}$ $n_{2,3}$ los índices de refracción al pasar la luz de M_1 a M_3 y de M_2 a M_3 se tendrá: $n_{1,2} n_{2,3} = n_{1,3}$ $n_{1,3} n_{3,2} = n_{1,2}$ etc.

El índice de refracción debe ser una función de alguna de las cantidades mecánicas que entran en juego en la propagación de la luz en cada medio.

Llamemos q_1 la cantidad mecánica en cuestión en el medio M_1 procedente de un flujo unitario o proyectil de energía L . Sea q_2 la homónima correspondiente al mismo proyectil L después de pasar al medio M_2 . En general $q_3 \dots q_4 \dots q_1 \dots q_k$ en los medios $M_3 \dots M_4 \dots M_1 \dots M_k$ Se tendrá:

$$n_{1,2} = f(q_1, q_2) \quad n_{2,1} = f(q_2, q_1) = \frac{1}{f(q_1, q_2)}$$

$$\text{Además, como } n_{1,2} \cdot n_{2,3} = n_{1,3} \quad \text{se tendrá: } f(q_1, q_2) \cdot f(q_2, q_3) = f(q_1, q_3)$$

Se satisfacen estas condiciones haciendo figurar una de las cantidades como factor y la otra como divisor así: $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1}$ y en general $n_{j,k} = \frac{q_k}{q_j}$

Podremos siempre poner $n_{j,k} = \frac{q_k}{q_j}$ en vez de $n_{j,k} = \frac{q_j}{q_k}$ pues éste último caso se reduce al primero con sólo llamar q_k a su inverso $\frac{1}{q_k}$ y lo propio con q_j . Pongamos pues $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\text{sen } I_1}{\text{sen } R_2}$

$$\text{De donde} \quad q_1 \text{ sen } I_1 = q_2 \text{ sen } R_2 \quad (2)$$

La fórmula (2) pone de manifiesto que hay una cantidad de carácter vectorial de las que entran en juego en la propagación de la luz, la cual cumple la condición de que al pasar la luz de un medio a otro la componente $q_1 \text{ sen } I_1$ del vector q según la superficie de separación de los dos medios, es igual a la componente $q_2 \text{ sen } R_2$ de la cantidad homónima en el segundo medio sobre la misma superficie.

A la cantidad vectorial q designaremos con el nombre de vector equiproyectante para distinguirla de todas las otras cantidades.

Para determinado proyectil de luz (de energía L) el vector equiproyectante q_1 en un medio diáfano M es el mismo siempre que el proyectil atraviese un mismo medio en varias refracciones sucesivas.

Dispongamos un cierto número de medios transparentes $M_1, M_2, \dots, M_k$ y M_1 de manera de volver al medio inicial M_1 .

El proyectil de luz atravesará, sin consumo de energía por causa de la transmisión, todos los medios y formará en los puntos de paso con las normales respectivas ángulos $I_1, R_2, I_2, R_3, I_3, R_4, \dots, I_k, R_1$ así:

$$n_{j,1} = \frac{q_1}{q_j} \quad n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1} \quad n_{2,3} = \frac{q_3}{q_2} \dots n_{k,1} = \frac{q'_1}{q_k} \quad \text{de donde y como} \quad n_{j,1} \cdot n_{1,2} \cdot n_{2,3} \dots n_{k,1} = n_{j,1} = 1$$

$$\text{se tendrá} \quad \frac{q_1}{q_1} \cdot \frac{q_2}{q_1} \cdot \frac{q_3}{q_2} \dots \frac{q'_1}{q_k} = \frac{q'_1}{q_1} = 1 \quad \text{de donde} \quad q'_1 = q_1$$

El vector equiproyectante q depende, pues, del medio diáfano que atraviesa el rayo de luz, puesto que cuando el proyectil de luz vuelve al mismo medio el vector tomará el mismo valor. Por otra parte, depende también del proyectil, pues al menos su orientación es la dirección según la cual se propaga el proyectil de luz.

Estudio del vector equiproyectante q .

1.º La energía del flujo unitario de luz es constante cuando se transporta en un medio homogéneo. En efecto, la intensidad de la luz obedece a la ley newtoniana del inverso del cuadrado de la distancia, condición necesaria y suficiente para la conservación del flujo luminoso. Esto requiere, no obstante, que el medio sea perfectamente diáfano, pues la intensidad de la luz decrecería de una manera más rápida por causa de la opacidad de los cuerpos en suspensión, los cuales desempeñan el papel de verdaderas pantallas. Pero tal circunstancia no importa al caso: dichos cuerpos opacos no entran en juego en la transmisión de la luz, sino que simplemente desempeñan el papel de reductores de la sección del rayo luminoso.

2.º El tensor del vector q es igual antes y después de reflejarse y es constante cuando el segmento de luz se transporta en un mismo medio. En efecto, cuando la luz pasa del medio más refringente al menos refringente se separa de la normal, pues el índice de refracción es, en este caso, menor que la unidad.

Si el ángulo de incidencia tomara un valor tal que el seno del ángulo de refracción se hiciera igual a uno, a partir de este ángulo en adelante, la luz no podría pasar al otro medio, pues el vector q no puede dar una proyección ortogonal mayor que su propio valor.

Desde este ángulo en adelante la luz se refleja totalmente, formando ángulos iguales con la normal, de donde resulta que llamando q_1 y q'_1 los valores del vector q antes y después de la reflexión total, se tendrá $q_1 \text{ sen } I = q'_1 \text{ sen } R$ y como $R = I$ se tendrá $q'_1 = q_1$.

Las cantidades vectoriales q_1 y q'_1 antes y después de reflejarse el proyectil de luz, son pues iguales en valor; pero es claro que su dirección ha cambiado.

Lo que acabamos de ver para la reflexión total puede generalizarse a la reflexión de la luz sobre una superficie pulida cualquiera, puesto que los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales.

Por tanto, si el vector q conserva su valor (tensor) antes y después de ser reflejado, con mayor razón podemos admitir que se conserva constante cuando el segmento de rayo se transporta en un mismo medio diáfano sin reflejarse.

3.º La trayectoria de un segmento de luz entre dos puntos A y B correspondientes a un mismo medio o a medios diferentes, es la que hace mínima la integral

$$J = \int_B^A q ds \quad (1)$$

a) *Caso de transporte ordinario.*—Cuando el proyectil de luz se transporta en un medio homogéneo, q es constante como se ha visto; por tanto $J = q(S_B - S_A) = q(BA)$, (1) Puesto que la trayectoria es rectilínea y el trayecto $S_B - S_A$ será la distancia AB que es la misma entre dos puntos.

b) *Caso de reflexión.*—Cuando el segmento de luz se desaloja en un mismo medio homogéneo como antes, pero se refleja en una superficie pulida, la trayectoria se compone de dos segmentos rectilíneos, cada uno de los cuales S_1 y S_2 verifica la condición de mínimo; lo cual no basta, pues $J = q(S_1 + S_2)$. La suma $S_1 + S_2$ debe, por tanto, ser mínima.

Ahora bien, es sabido que la ley física de la reflexión cumple la condición de mínima suma para los trayectos S_1 y S_2 , lo cual nos excusa de mayores explicaciones.

c) *Caso de refracción.*—Consideremos el plano $yo x$ (fig. 4) que separa los dos medios (M_1) y (M_2). Imaginemos sobre el eje oz la ventanilla A por donde pasa la luz, y, en el plano zox su imagen B en el medio (M_2).

Sea C^n el punto por donde pasa la luz de un medio a otro; $AC^n = S_1$ y $C^n B = S_2$.

Por último, sean $X=0$ $Y=0$ $Z=a$ las coordenadas de la ventanilla A ; $X=0C$ $Y=CQ$ $Z=0$ las del punto C^n y $X=OB_0=b$ $Y=0$ $Z=B_0B=c$ las del punto B .

$$\text{Tendremos: } J = \int_A^B q ds = \int_A^{C^n} q ds + \int_{C^n}^B q ds = q_1 S_1 + q_2 S_2$$

Para que esta integral sea mínima es necesario que su diferencial total con relación a las coordenadas del punto C^n sea nula. Ahora bien, se tiene

$$\delta J = \left[q_1 \frac{X}{S_1} - q_2 \frac{b-X}{S_2} \right] \delta x + \left[q_1 \frac{Y}{S_1} + q_2 \frac{Y}{S_2} \right] \delta y \quad \text{de donde } Y=0 \text{ y el punto } C^n \text{ coincidirá con } C.$$

Por tanto $q_1 \frac{X}{S_1} = q_1 \sin I = q_2 \frac{b-X}{S_2} = q_2 \sin R_2$ y $q_1 \sin I = q_2 \sin R_2$ de donde $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1}$ que es la ley de la refracción.

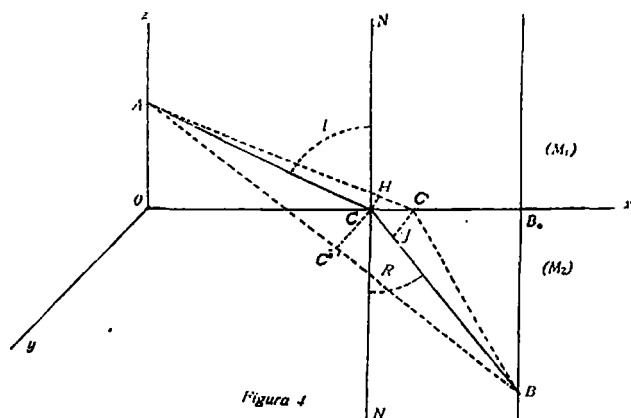


Figura 4

4.º El vector q es una de las cantidades mecánicas que componen la energía del flujo unitario. En efecto, los valores de dicha cantidad vectorial q_1 y q_2 correspondientes a los medios M_1 y M_2 cuando la luz pasa del medio M_1 a M_2 , definen la dirección según la cual habrá de propagarse la luz en el medio M_2 cuando se da la dirección de ella en M_1 . Es cantidad mecánica todo aquello que determina la dirección de un movimiento, como lo es el de la dirección de propagación de la luz.

Por lo dicho en el número anterior se ve la importancia que tiene este vector en la transmisión de la luz. La propiedad a que alude ese número parece ser verificación del principio de Mapertius.

5.º El vector q no es energía: la cantidad q es vectorial como lo es una fuerza, una cantidad de movimiento, etc., puesto que está orientado según la dirección en que se propaga la luz. La energía por el con-

trario, es una cantidad simplemente numérica.

6.º Si el valor p del flujo luminoso de la energía de un proyectil de luz, es igual en dos medios diferentes, los valores del vector q son por el contrario, distintos en dichos dos medios.

La fórmula de la homogeneidad de la energía P es: $[P] = [ML^2T^{-2}]$

Como q es distinto de p su fórmula será diferente.

$$\text{Pongamos: } [q] = [M_\alpha L_\beta T_\gamma]$$

Los medios diáfanos tienen condiciones físicas de valor diferente uno de otros (densidad, presión, etc.). La energía luminosa debe estar sustentada por un vehículo de condiciones físicas especiales en cada medio diáfano.

Supongamos que supiésemos traducir las cantidades mecánicas por medio de los valores de las cantidades físicas del vehículo de la luz en sus diversas condiciones; y sean A B y C dichas cantidades en general. Sean A_1 B_1 y C_1 los valores de éstas cuando se trata del medio M_1 y A_2 B_2 C_2 los valores de esas cantidades en el medio M_2 .

Tendríamos, por ejemplo, para la energía p en los dos medios: $p = A^a B^b C^c = A_1^a B_1^b C_1^c = A_2^a B_2^b C_2^c$ y para el vector q llamando q_1 su valor en el medio M_1 $q_1 = A_1^a B_1^b C_1^c$. De lo cual se deduce que para cada valor de p en un medio corresponde un valor único de q para ese mismo medio.

El valor q en el medio M_2 será: $q_2 = A_2^a B_2^b C_2^c$. Si, pues, los dos valores de p en los dos medios son iguales, los de q serán diferentes.

El índice de refracción del medio M_1 al M_2 será: $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1} = \left[\frac{A_2}{A_1} \right]^a \left[\frac{B_2}{B_1} \right]^b \left[\frac{C_2}{C_1} \right]^c$ Depende por

tanto, este índice de las condiciones físicas de los medios, conclusión ésta que está de acuerdo con la experiencia misma.

Por tanto: la relación entre p y q es una cantidad que depende de las condiciones físicas del medio en el cual se propaga la luz, y es constante para cada medio, pero varía de un medio a otro.

7.º La condición de que se conserve la energía luminosa cuando la luz pasa de un medio diáfano a otro, es suficiente para que el índice de refracción sea independiente del ángulo de incidencia; pero no es forzosa.

Supongamos que un flujo unitario de luz de potencia p se desaloje en el medio diáfano M_1 y encuentre a su paso la superficie de separación de este medio con otro diferente M_2 diáfano también.

Al chocar, podemos decirlo así, con dicha superficie, el flujo se divide en tres porciones p_1 p'_1 p''_1 cuya suma es p . La porción p'_1 conserva su valor porque en la reflexión hay conservación de energía lumino-

sa como puede verificarse fotométricamente, y lo propio acontece con la porción p_1 puesto que la difusión no es otra cosa que un conjunto de reflexiones diversas debidas a las irregularidades de la superficie que separa los dos medios.

En cuanto al flujo p incidente que se refracta, pasa al rayo refractado; pero puede acontecer que la energía del rayo refractado no sea igual a p_1 sino que sea un valor p_2 menor que p_1 a causa de una absorción del medio M_2 sin que por ello deje de cumplirse la ley cartesiana de la constancia del índice de refracción.

En efecto, el índice de refracción del medio M_1 al M_2 es $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1}$. Ahora bien, a un flujo incidente p_1 de energía corresponderá en valor $q_1 = \alpha_1 p_1$ del vector *equiproyectante* en el primer medio en donde α_1 es un factor que depende de las condiciones físicas del medio M_1 .

Si se conservase intacto el flujo de energía refractado, de modo que el proyectil de luz tuviese en el medio M_2 el mismo valor p_1 el vector q_2 tendría en M_2 el valor $q_2 = \alpha_2 p_1$ en donde α_2 es un factor dependiente de las condiciones físicas de M_2 . Por tanto $M_{1,2} = \frac{\alpha_2 p_1}{\alpha_1 p_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \text{constante}$.

Si no se conserva el flujo de energía refractado de manera que el proyectil de luz tuviese en el medio M_2 un valor p_2 diferente del p_1 y tal que $p_2 = \beta p_1$ se tendría que en el medio M_1 el vector *equiproyectante* tendría el valor $q_1 = \alpha_1 p_1$. En el medio M_2 el vector tendría el valor $q_2 = \alpha_2 p_2 = \alpha_2 \beta p_1$ y el índice de refracción sería $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\alpha_2 \beta p_1}{\alpha_1 p_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \beta$.

Para que $n_{1,2}$ sea independiente de la dirección del rayo luminoso es necesario que β lo sea; para que $n_{1,2}$ se conserve constante con el tiempo es necesario que lo propio acontezca con β puesto que $\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$ es constante para los medios M_1 y M_2 .

Así pues: la conservación del flujo de energía antes y después de la refracción, es condición suficiente para la existencia del índice de refracción entre dos medios; pero no es condición necesaria. La condición necesaria es la de que la relación entre la energía del flujo incidente y la del refractado sea constante.

8.° La reversibilidad del índice de refracción implica la conservación del flujo de energía.

En efecto, cuando uno de los medios, M_2 por ejemplo, no está en equilibrio interno, parte del flujo de luz puede ser absorbido para aumentar la energía interna del medio. Ahora bien, si dicho rayo es devuelto del medio M_2 al M_1 por reflexión, no hay razón para que aquel medio devuelva la energía consumida, y el flujo saliente será menor que el que entra.

La constancia y la reversibilidad del índice de refracción implica, pues, como condición necesaria y suficiente la conservación de la energía del flujo total. Esta propiedad hace recordar el principio de la menor acción que, a su vez, es consecuencia de la conservación de la energía de un sistema material.

Refracción de la luz de un medio a otro en movimiento relativo.

El estudio del vector q efectuado en el párrafo anterior por criterio inductivo nos pone en condiciones de abordar el problema de la refracción de la luz de un medio a otro en movimiento relativo.

Para fijar las ideas supongamos que el medio M_2 está animado de movimiento en el espacio como acontece con la atmósfera de la tierra, la cual arrastra totalmente el vehículo de la luz, puesto que según la experiencia de Michelson la velocidad de ésta es igual en todo sentido horizontal conforme se dijo atrás.

Tomemos la superficie que separa los dos medios e imaginemos en el superior una pantalla con su ventanilla ligada invariablemente al medio inferior de cuyo movimiento participa.

Se trata de inquirir cuál es el índice de refracción de la luz en estas condiciones.

A) Supongamos primeramente que los dos medios están en reposo relativo. Al abrir la ventanilla durante la unidad de tiempo penetrará un flujo de energía luminoso p que se propaga en línea recta; al encontrar la superficie que separa los dos medios una cantidad p_1 de energía pasa por refracción al segundo medio, mientras otras dos p'_1 y p''_1 permanecen en el primero a causa de que p'_1 se refleja y otra se difunde (reflexión irregular).

Como las cantidades de luz que se reflejan y se difunden dependen de la inclinación del rayo luminoso respecto de la superficie que separa los dos medios, resultará que la cantidad p_1 que se refracta depende igualmente de dicha inclinación, o mejor dicho, del ángulo de incidencia y como debe ser proporcional a p el factor de proporcionalidad será función del ángulo de incidencia. Así: $p_1 = j \varphi(i)$ (1)

Con el vector q que es la cantidad mecánica que define la reflexión y la refracción, sucederá lo propio que con el flujo de energía; y aunque esta circunstancia no tuviera lugar, siempre acontecería al vector q lo que se verifica con p pues estas dos cantidades guardan una relación definida cuyo valor

depende de las condiciones físicas del medio. Así: $\alpha_1 = \frac{q}{p} = \frac{q_1}{p_1}$

Dos casos pueden ocurrir, y que consideramos separadamente según que haya o no conservación de la energía del flujo refractado.

Primer caso. Puede acontecer que la presión p_1 del flujo p de energía que pasa al segundo medio se conserve intacta en el rayo refractado.

Sabemos que el índice de refracción al pasar la luz de M_1 a M_2 será: $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1}$. Ahora bien, se tiene $q_1 = \alpha_1 p_1 = \alpha_1 \varphi(i) p$ y $q_2 = \alpha_2 p_2 = \alpha_2 \varphi(i) p$. Por tanto el índice de refracción será: $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\alpha_2 \varphi(i) p}{\alpha_1 \varphi(i) p} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$

Según esto el índice de refracción es independiente tanto de la intensidad de la luz como del ángulo de incidencia, pues los factores p y $\varphi(i)$ se compensan.

Esta conclusión a que se llega como resultado de las indicaciones dichas es una propiedad característica del índice de refracción; lo cual es una verificación de la legitimidad de este razonamiento.

Segundo caso. Cuando el medio M_2 absorbe para su equilibrio interno una porción definida del flujo de energía incidente, el rayo refractado no tendrá ya la energía p_1 que proviene del primer medio.

Llamemos β un factor menor que la unidad, el cual expresa la cantidad proporcional de energía absorbida en la unidad de tiempo.

Tendremos, como en el caso anterior $n_{1,2} = \frac{q_2}{q_1}$ En donde $q_1 = \alpha_1 p_1 = \alpha_1 \varphi(i) p$ y

$q_2 = \alpha_2 p_2 = \alpha \beta p_1 = \alpha \beta \varphi(i) p$ Por tanto $n_{1,2} = \frac{\alpha \beta}{\alpha_1}$ En donde aparece β en el numerador;

pero $\varphi(i)$ que afecta el flujo inicial ha desaparecido en la relación.

Este sería el caso de irreversibilidad del índice de refracción, el cual aunque posible, no se ha comprobado experimentalmente.

B) Pasemos al caso de movimiento relativo de dos medios.

Después de lo dicho poco tendremos que agregar para determinar el índice de refracción cuando uno de los medios está en movimiento relativo respecto del otro.

En efecto, el flujo de luz a través de la ventanilla móvil sufre una modificación en valor y dirección conforme a lo establecido antes. Su valor queda multiplicado por la relación $\frac{v_r}{v_1}$ siendo v_r la velocidad relativa y v_1 la velocidad absoluta de la luz en el primer medio (M_1) con relación al segundo (M_2) según que éste se halle en movimiento o en reposo. Y en cuanto a la dirección, ésta toma la de la velocidad relativa.

La luz se maneja, pues, como si el flujo p inicial fuese multiplicado por $\frac{v_r}{v_1}$ y su propagación tomase la dirección de la velocidad relativa.

Llamemos $n'_{1,2}$ el índice de refracción en este caso; p' el flujo de energía en la unidad de tiempo; q'_1 y q'_2 los valores del vector q en M_1 y M_2 . Tendremos en el caso de conservación de la

energía del flujo incidente $n'_{1,2} = \frac{q'_2}{q'_1}$ Pero $q'_1 = \alpha_1 \varphi(i_r) p' = \alpha_1 \varphi(i_r) \frac{v_r}{v_1} p = \frac{v_r}{v_1} q_1$ y

$$q'_2 = \alpha_2 \varphi(i_r) \frac{v_r}{v_1} p = \frac{v_r}{v_1} q_2 \quad \text{De donde} \quad n'_{1,2} = \frac{q'_2}{q'_1} = \frac{\frac{v_r}{v_1} q_2}{\frac{v_r}{v_1} q_1} = \frac{q_2}{q_1} = n_{1,2}$$

Así, pues, cuando hay conservación del flujo luminoso, se tiene $n_{1,2} = n'_{1,2}$.

Cuando el medio M_2 absorbe para su equilibrio interno parte de la energía incidente, se tendrá:

$$n'_{1,2} = \frac{q'_2}{q'_1} \quad \text{siendo} \quad q'_2 = \alpha \varphi(i_r) \beta \frac{v_r}{v_1} p' = \frac{v_r}{v_1} q_2 \quad \text{y} \quad q'_1 = \alpha_1 \varphi(i_r) \frac{v_r}{v_1} p' = \frac{v_r}{v_1} q_1$$

$$\text{Por tanto} \quad n'_{1,2} = \frac{\frac{v_r}{v_1} q_2}{\frac{v_r}{v_1} q_1} = \frac{q_2}{q_1} = n_{1,2}$$

Luego el índice de refracción en caso del arrastre total del vehículo de la luz por los medios diáfanos es uno mismo, sea que estos medios se hallen en reposo o en movimiento el uno con relación al otro; pero el ángulo de incidencia es el que hace el rayo luminoso que incide del medio M_1 al M_2 afectado de la composición cinemática de la velocidad de la luz y de la del medio M_2 con relación al M_1 . Esto es del rayo luminoso afectado de la aberración bradleriana.

Esta conclusión está de acuerdo con el hecho experimental marcado con la letra d (pág. 334), puesto que la fórmula de Descartes es la que sirve de fundamento a la de la refracción astronómica.

Se puede expresar de otro modo la anterior demostración.

La experiencia demuestra que el índice de refracción de la luz cuando pasa de un medio a otro es independiente de la intensidad de la luz, esto es, del valor del flujo unitario, y también independiente del ángulo de incidencia.

Ahora bien, el movimiento relativo de dos medios diáfanos afecta únicamente la magnitud del flujo de luz que pasa del primer medio al segundo y la dirección del rayo, la cual es la de la velocidad relativa de la luz en el primer medio con relación al segundo. Por tanto, considerando el ángulo de incidencia del rayo relativo, esto es, del rayo afectado de aberración y llamando I_r el ángulo que este rayo hace con la normal a la superficie de separación de los dos medios se tendrá: $\frac{\sin I_r}{\sin R_r} = n = \text{índice de refracción en caso de reposo de los dos medios.}$

Interpretación mecánica de la refracción.

Es un hecho fuera de duda que la luz es energía y como esta energía se transmite de unas masas a otras al través de un medio, la forma que podemos admitir para expresarla es la forma cinética.

Como la energía luminosa se transporta incesantemente con una velocidad v estará a cada instante sustentada por una masa m la cual se halla animada de la velocidad v y la energía podrá simbolizarse cinéticamente por $\varepsilon = \frac{1}{2} m v^2$ en donde m es una suma de masas de la materia que sirve de vehículo a la luz. La cantidad ε podrá representar el flujo de energía luminosa al través de la unidad de área en la unidad de tiempo.

La impulsión o cantidad de movimiento de ese mismo flujo estará entonces representada por $C = mv$. Supongamos que la luz pasa del medio (M_1) en donde su velocidad es v_1 al medio (M_2) en donde es v_2 . Supondremos primero que los dos medios están en reposo relativo.

Consideremos un proyectil de luz de flujo unitario que incide de M_1 a M_2 bajo un ángulo I de incidencia.

El principio de la menor acción se expresa por la igualdad de las componentes tangenciales de la cantidad de movimiento de la luz en los dos medios. Por tanto se tendrá (a) $m_1 v_1 \sin I = m_2 v_2 \sin R$. Siendo m_2 la masa que sirve de vehículo a la luz en el segundo medio y v_2 la velocidad de la luz en ese segundo medio. Como la energía luminosa incidente, que suponemos se refracta toda es $\frac{1}{2} m_1 v_1^2$ se tendrá su expresión en el segundo medio $\frac{1}{2} m_2 v_2^2$ y, por tanto

$$m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2 \quad \text{De (a) se saca} \quad n = \frac{\sin I}{\sin R} = \frac{m_2 v_2}{m_1 v_1} \quad \text{Multiplicando ambos miembros por } \frac{v_2}{v_1}$$

$$\text{se tendrá:} \quad n \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2 \sin I}{v_1 \sin R} = \frac{m_2 v_2^2}{m_1 v_1^2} = 1 \quad \text{De donde} \quad n = \frac{\sin I}{\sin R} = \frac{v_1}{v_2} \quad (b)$$

Caso del movimiento relativo del medio M_2 con relación a M_1 . La energía del proyectil relativo de luz es en este caso $\epsilon' = \epsilon \frac{v_r}{v_1} = \frac{1}{2} m_1 v_1 v_r$ y la cantidad de movimiento será:

$$C' = C \frac{v_r}{v_1} = m_1 v_1 \frac{v_r}{v_1} = m_1 v_r \quad \text{La luz incide según la dirección relativa, esto es, afectada de aberración.}$$

La expresión de la energía luminosa en el medio M_2 será: $\epsilon' = \frac{1}{2} m'_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1 v_r$ y la de la cantidad de movimiento será: $m'_2 v_2$.

El principio de la mínima acción dará pues $m_1 v_r \sin I_r = m'_2 v_2 \sin R_r$. De donde $n' = \frac{\sin I_r}{\sin R_r} = \frac{m'_2 v_2}{m_1 v_r}$

Multiplicando por $\frac{v_2}{v_1}$ tendremos: $n' \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2 \sin I_r}{v_1 \sin R_r} = \frac{m'_2 v_2^2}{m_1 v_r v_1} = 1$ Por tanto $n' = \frac{\sin I_r}{\sin R_r} = \frac{v_1}{v_2} = n = \text{índice de refracción, como en caso de reposo.}$

Nota importante.—El índice de refracción es independiente de la velocidad relativa de la luz en el espacio con relación a la tierra; pero al tratarse de los rayos solares cuando estos rayos hacen crecer la temperatura del aire, como acontece durante la mañana, parte de la energía incidente en el interior del aire, esto es, después de la refracción, es empleada no ya en la propagación de la luz sino también en el aumento de temperatura, lo que hace que la demostración que hemos dado, la cual se funda en la conservación de la energía de transporte, no sea ya completamente rigurosa. Se debe, pues, hacer un estudio experimental de las refracciones del sol durante las horas de la mañana con el fin de dilucidar el asunto para este caso particular.

CAPITULO II

Aberración anual y refracción astronómica según la teoría ondulatoria.—Hipótesis del arrastre parcial del éter.

§ 1.º La teoría ondulatoria se funda en las siguientes hipótesis:

- 1.º Existe en el universo un fluido eminentemente sutil, al cual se ha dado el nombre de éter.
- 2.º Ese fluido está extendido en todos los cuerpos ponderables.
- 3.º Es perfectamente elástico.
- 4.º Sus propiedades físicas pueden variar según la manera como estén agrupadas las moléculas en cada punto del cuerpo ponderable que penetra.
- 5.º Los cuerpos luminosos comunican al éter vibraciones rectilíneas.
- 6.º Un estremecimiento en un punto cualquiera del fluido se transmite en el vacío o en un cuerpo isótropo, con una misma velocidad en todas las direcciones, y llega en un mismo instante a todos los puntos de la superficie de una esfera cuyo centro es el origen del movimiento. Esta superficie es una onda que a una distancia suficientemente grande del centro de estremecimiento, puede ser considerada como plana.
- 7.º Que la onda sea esférica o plana, el movimiento vibratorio es perpendicular al rayo.

Dando extensión a ese hecho experimental Huyghens formuló el principio siguiente:

- 8.º Las vibraciones del éter en un punto cualquiera del espacio pueden ser consideradas como resultantes de la unión de los movimientos elementales que producirían aisladamente al mismo instante todas las partes de las superficies de las ondas en cualquiera de sus posiciones anteriores (1).

Con el auxilio de las ocho hipótesis que hemos transcrito, Fresnel logró explicar la doble refracción, las interferencias, la difracción y la polarización. La aberración anual y la refracción astronómica quedaron sin embargo, sin explicación y una nueva hipótesis — el arrastre parcial o deslizamiento del éter — se hizo indispensable para tal efecto.

§ 2.º Arago no pudo explicar el fenómeno de la aberración astronómica en la teoría ondulatoria y dio traslado del problema a Fresnel. Este joven matemático se dio cuenta de que las observaciones astronómicas habían demostrado que la refracción atmosférica era independiente del ángulo de la velocidad de la luz y de la tierra (Vade-Mecum de l'Astronomie par Houzeau, págs. 310 y 311). Además sabía que al corregir de refracción la posición aparente de una estrella se obtenía, no la posición real, sino la afectada de la aberración anual.

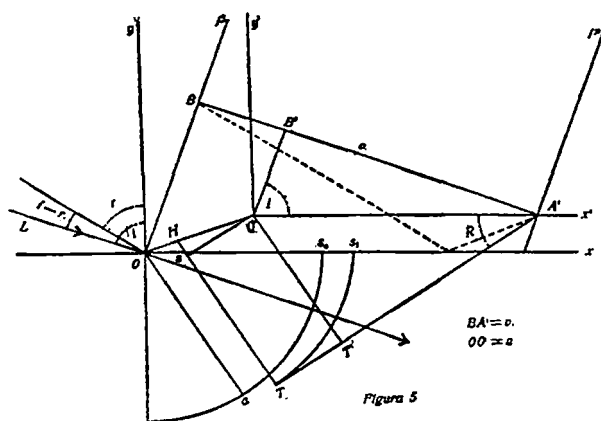
Fresnel estudió la cuestión tanto en la hipótesis de un arrastre total de éter por la atmósfera de la tierra como en la de un deslizamiento total. Al notar que las dos hipótesis conducían a índices de refracción diferentes entre sí, de manera que la refracción en un caso y otro difería en un valor mayor que el

(1) Tratado de Física Matemática de H. M. Resal — Cap. III.

ángulo de aberración, se propuso hallar el valor de un hipotético arrastre parcial capaz de explicar la aberración como un efecto de la refracción misma. El valor hallado por Fresnel para ese arrastre fue $\xi = u \left[1 - \frac{1}{n^2} \right]$ en donde ξ es el arrastre parcial fresneliano, u la velocidad de la tierra y n el índice de refracción del aire, siendo uno el índice de refracción del medio interplanetario.

Haremos un bosquejo del análisis que condujo a Fresnel a hallar el coeficiente de arrastre.

Tomemos (fig. 5) por eje Ox la intersección del plano tangente a la superficie de separación del éter interplanetario y el aire atmosférico con el plano vertical que pasa por el rayo luminoso, y por eje Oy la normal trazada por el punto por donde pasa el rayo luminoso de un medio a otro. Se trata de hallar, llamando $u = OO'$ la velocidad de la tierra, un valor $\xi = OH$ en que debería ser arrastrado el éter por el aire atmosférico de manera que al corregir la refracción astronómica con un índice medio independiente del ángulo de la velocidad de la tierra y de la luz se obtenga, según la *teoría ondulatoria de la refracción*, un ángulo de incidencia de un ficticio rayo luminoso que forma con la perpendicular a la onda el ángulo de aberración, esto es, que se obtenga el ángulo de incidencia del rayo relativo según Bradley.



Sea, a un instante t la onda OP luminosa plana la cual corta la superficie Ox que separa los dos medios, según una recta normal al plano de figura y cuya traza es O . Después de ese instante, la onda OP continúa desalojándose hacia la derecha con una velocidad normal v y continuará cortando la superficie que separa los dos medios según una recta normal al plano de figura, recta que será el núcleo de una onda cilíndrica, o mejor hemisilíndrica, cuyo radio crece con la velocidad a de la luz en el medio inferior, todo de conformidad con la hipótesis ondulatoria. Hemos supuesto que $u = OO'$ represente la velocidad de la tierra en magnitud y dirección de manera que al fin del tiempo $t+1$ los ejes coordenados serán $y'O'x'$ y la onda que está en $A'P'$ distante $v = BA'$ de su posición al instante t cortará a la superficie Ox' según una recta normal al plano de figura y cuya traza es A' .

La onda, que en el instante t estaba reducida a una recta de traza O se convertirá dentro del aire, según la teoría ondulatoria, en un hemisilindro de radio a la cual onda al fin del tiempo $t+1$ tendrá por radio $a = \text{velocidad de la luz en el aire}$.

Si la atmósfera no arrastrara al éter, la onda del instante t tendría por traza al instante $t+1$ un círculo o semicírculo de radio a con centro en O .

Si, al contrario, el aire arrastrara totalmente al éter, la onda tendría el mismo radio a al fin de $t+1$ pero su centro sería O' en vez de ser O . Finalmente si el arrastre no fuese total sino parcial, esto es, fuese $\xi = OH$ en vez de $u = OO'$ el centro de la onda al fin de $t+1$ estaría en H .

Supongamos esto último, esto es, que el centro de la onda instantánea en la época t haya sido arrastrado a H a la época $t+1$. Como la onda instantánea procedente en el aire de la onda móvil OP es una recta cuya traza se desaloja sobre la superficie de separación de los dos medios, se hallará reducida a su traza A' al instante $t+1$. Resultará que la onda en el aire procedente de la onda OP será según la teoría ondulatoria, la superficie envolvente de todos los cilindros de radio variable, la cual se reduce al plano tangente común; esto es, al plano cuya traza en el plano de figura es la tangente al círculo de radio a con centro en H y trazada desde A' . La onda fresneliana, siendo un plano normal al de figura que tiene por traza $A'T$ la propagación de la luz refractada tendría según Huyghens la dirección HT igual y paralela a aO .

En el triángulo $O'A'B'$ tendremos: (α) $A'B' = A'O' \sin I = v - u \cos(u, v) = v_r$ En el triángulo $O'A'T'$ tendremos: (β) $O'T' = O'A' \sin R = a - (u - \xi) \cos(u, a)$ pues $O'T' = HT - HS = a - HO' \cos O'HT = a - (u - \xi) \cos(u, a)$ siendo $HO' = OO' - OH = u - \xi$

Si el ángulo (u, a) que hace la velocidad de la tierra con la velocidad de la luz dentro del aire fuese recto $O'T'$ tendría el valor a hubiese o no arrastre total o parcial del éter. La modificación es pues debida únicamente a la componente de la velocidad de la tierra según la dirección de la velocidad de la luz dentro del aire. Al descomponer la velocidad de la tierra según la velocidad de la luz dentro del aire y según la perpendicular, vemos que la primera es la sola que influye en la dirección de la onda dentro del aire mientras la segunda no tiene influencia alguna. Continuaremos, sin embargo, nuestro estudio conservando el valor total de u hasta el fin y haremos después el ángulo $a, u = 0$.

Dividiendo (α) por (β) tendremos: $\frac{\sin I}{\sin R} = \frac{v_r}{a - (u - \xi) \cos(u, a)}$ De donde

$$v_r \sin R = a \sin I - (u - \xi) \cos(u, a) \sin I.$$

Imponiendo la condición $\sin R = \frac{1}{n} \sin I, = \frac{a}{v} \sin I$, (1) la cual nos servirá para hallar el

coeficiente de arrastre del éter capaz de hacer depender de la refracción el fenómeno de la aberración, nos

dará (γ) $\frac{a \sin I - (u - \xi) \cos(u, a) \sin I}{v_r} = \frac{a}{v} \sin I$ De la cual debemos despejar el arrastre parcial ξ .

Sean $LO = v$ (fig. 6) la velocidad de la luz en el vacío; $OO' = -u = \text{velocidad igual y contraria a la de la tierra}$; de donde $LO = v_r = \text{velocidad relativa de la luz en el espacio interplanetario con relación a la tierra}$. Se tendrá, puesto que

$$I_r = LO_1G \quad LK = v \sin I = v_r \sin I_r + GK = v_r \sin I_r + O_1N = v_r \sin I + u \sin(u, y)$$

de donde $(u, y) = v O_1G - v O O' = \pi - I - (u, v)$ Pero $(u, v) = v O O' = O' O a - v O a = (u, a) - (I - R)$

Se tendrá pues $(u, y) = \pi - I - (u, a) - (I - R) = \pi - R - (u, a)$. Teníamos de (1) y (7)

$$a \sin I - (u - \xi) \cos(u, a) \sin I = \frac{a}{v} v_r \sin I_r = \frac{a}{v} (LG) = \frac{a}{v} (LK - GK) = \frac{a}{v} [v \sin I - u \sin(u, y)]$$

$$= a \sin I - \frac{au}{v} \sin(v, y) \quad \text{Suprimiendo los términos iguales de ambos miembros y cambiando signos}$$

se obtiene, siendo
$$n = \frac{\sin I}{\sin R}$$

$$(u - \xi) \cos(u, a) \sin I = \frac{u}{n} \sin(v, y) \quad \text{O bien} \quad (u - \xi) \cos(u, a) \sin I = \frac{u}{n} \sin[R + (u, a)]$$

Podemos poner muy aproximadamente $\sin I = n \sin R$ de donde pasando a n a dividir:

$$(u - \xi) \cos(u, a) \sin R = \frac{u}{n^2} \sin[R + (u, a)]$$

Para hallar el coeficiente de arrastre hagamos el ángulo $(a, u) = 0$ Lo cual equivale a no considerar sino la componente de la velocidad de la tierra según la dirección de la velocidad de la luz, como se ha indicado atrás. Se tendrá:

$$(u - \xi) \sin R = \frac{u}{n^2} \sin R$$

O bien

$$\xi = u - \frac{u}{n^2} = u \left[1 - \frac{1}{n^2} \right]$$

En este estudio se ha reemplazado la componente de la velocidad relativa sobre la velocidad absoluta por la misma velocidad relativa, lo que daría un error de segundo orden.

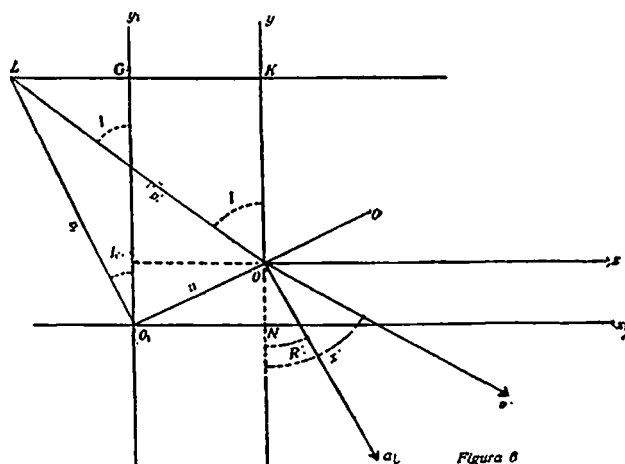


Figura 6

CAPITULO III

Experiencia de Fizeau.

Consiste esta experiencia en la determinación interferencial de la diferencia de tiempos gastados por dos rayos de luz, el uno que desciende y el otro que asciende una rapidísima corriente de agua que recorre dos tubos paralelos convenientemente empalmados en sus extremos y mediante reflectores convenientemente dispuestos. La luz incide primeramente sobre la cubierta de vidrio y luego muy oblicuamente sobre la corriente de agua.

Llamando u la velocidad del agua, la experiencia demuestra que la componente de la velocidad de la luz en sentido del movimiento crece en $u \left[1 - \frac{1}{n^2} \right]$ para el rayo que desciende de la corriente y decrece al contrario en ese mismo valor para el rayo que asciende. De esta experiencia han concluido que el agua arrastra parcialmente al éter, siendo $\frac{u}{n^2}$ el deslizamiento.

En el folleto intitulado «Paradoja de la Óptica matemática» hice el análisis riguroso de esta experiencia y demostré que el coeficiente de deslizamiento no es otra cosa que el efecto de la aberración. Como mi propósito en la actual publicación es el de presentar las conclusiones bajo la forma más sencilla y elemental, sólo reproduciré la explicación más sencilla que es posible dar de tal cuestión. Tal explicación es la siguiente:

Consideremos el rayo luminoso incidente y el refractado, I y R los ángulos de incidencia y refracción, a_0 y a_1 las velocidades de la luz en el aire y en el agua, y finalmente $n_{0,1} = \frac{a_0}{a_1}$ el índice de re-

fracción del agua con relación al aire. Tenemos $\frac{a_0}{a_1} = n_{0,1} \quad \frac{\sin I}{\sin R} = n_{0,1} \quad \text{De donde}$

$a_0 \sin I = n_{0,1}^2 a_1 \sin R$ Llamando $X'_0 = a_0 \sin I$ la velocidad tangencial incidente de la luz y X'_1 la velocidad tangencial refractada, se tendrá: $X'_0 = n_{0,1}^2 X'_1$. (a)

Consideremos el caso del movimiento del agua, la cual suponemos animada de una velocidad u en sentido de las x . Apliquemos a la energía luminosa incidente, esto es, al foco luminoso y al medio sobre el cual actúa directamente la luz, la velocidad $-u$ igual y opuesta a la del agua, de manera que el agua quede en reposo y el foco de luz tome la velocidad tangencial opuesta. La componente tangencial de la velocidad de la luz será entonces $X'_0 - u$. La componente tangencial de la luz dentro del agua no podrá ser ya X'_1 sino $X'_1 - W$. Así (a') $X'_0 - u = n_{0,1}^2 (X'_1 - W)$ Restando de (a) la (a') se tendrá: $u = n_{0,1}^2 W$ O bien $W = \frac{u}{n_{0,1}^2}$ La componente, pues, de la velocidad relativa sobre la

dirección de la velocidad del agua será: $X'_1 - \frac{u}{n_{o,1}^2}$ Y si el agua arrastra totalmente el vehículo de la luz, la componente de la velocidad de la luz a lo largo de la corriente de agua será: $v_1 = X'_1 + u - \frac{u}{n_{o,1}^2}$ cuando desciende la corriente.

En el caso de ascender la corriente, la misma demostración podrá servir con sólo considerar negativa la velocidad u y todo será lo mismo y se tendrá para la velocidad de ascenso $v_2 = X'_1 - u + \frac{u}{n_{o,1}^2}$

Los tiempos que gasta la luz en recorrer el agua serán inversos de v_1 y de v_2 según descienda o ascienda la corriente. Esto es lo que confirma la experiencia de Fizeau y esto sin que haya el pretendido deslizamiento del éter.

En el caso de aire se tiene $n_{o,1}^2 = 1$ próximamente, y por tanto $v_1 = v_2 = X'_1$ O insensible el arrastre.

CAPITULO IV

Crítica de la teoría ondulatoria.

Esta crítica está implícitamente hecha en los folletos anteriores, especialmente en el titulado «*Nota sobre la Óptica matemática*». Sólo consignaré aquí un resumen de las objeciones más importantes a dicha hipótesis.

1.º Primeramente se eligió entre dos hipótesis: la de emisión de Newton y la ondulatoria de Huyghens tomada en su pleno desarrollo, como si no hubiera una infinidad de modos posibles de transmisión de la luz.

2.º La teoría ondulatoria considera el éter como un sólido elástico, susceptible de atravesar los cuerpos materiales sin resistencia alguna y adaptándose, sin embargo, más o menos a las condiciones físicas de tales cuerpos.

3.º El deseo de hallar la explicación de tal o cual fenómeno, verbigracia la polarización de la luz, condujo a Fresnel a la consideración de un plano normal a la propagación de la luz, plano sobre el cual se consideran vibraciones rectilíneas en diverso sentido.

La importancia que confirió Fresnel a semejante plano ha tenido una trascendencia tal, que ha falseado la solución de la ecuación diferencial de propagación de la luz.

En efecto, la ecuación de la propagación de la luz, tal como ha sido planteada por diversos autores, tiene la misma forma que la del sonido, a saber: $\frac{d^2u}{dt^2} = a^2 \frac{d^2u}{ds^2}$

La cantidad u tiene diferentes significados según la hipótesis que ha servido de base a la teoría, pero ella representa el desalojamiento de la energía luminosa o un efecto característico de ésta; esto es, una modalidad definida de la luz.

Si ponemos $s = \alpha(x - x_0) + \beta(y - y_0) + \gamma(z - z_0)$ de manera que s represente el segmento de recta comprendido entre los puntos (x, y, z) y (x_0, y_0, z_0) homólogos de dos secciones normales al rayo luminoso, y α, β, γ los cosenos de los ángulos que hace el rayo luminoso con tres ejes coordenados

fijos, la ecuación propuesta podrá transformarse en la siguiente: $\frac{d^2u}{dt^2} = a^2 \left[\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right]$ forma

en la cual se expresa ordinariamente. Ecuación diferencial cuya integral es la siguiente: $u = \varphi(s + at) + \psi(s - at)$ en donde φ y ψ son funciones arbitrarias.

La solución demuestra que la cantidad u se propaga con la velocidad a en el sentido del segmento; puesto que cuando $s - at$ tiene un valor constante u será constante. Lo propio acontece con la otra solución.

Esta interpretación es la correcta.

Otra es la que se ha dado bajo la influencia del plano de la onda. Consiste en imaginar un plano cuyos cosenos directores sean α, β, γ esto es, normal al rayo luminoso que parte por un punto A_0 y en llamar s la distancia entre A_0 y el supuesto plano.

Si $M(x, y, z)$ es un punto cualquiera de dicho plano, pero no forzosamente el homólogo de A_0 en otra sección del rayo luminoso, se tendrá:

$$s = A_0M \cos(s, A_0M) = A_0M [\cos(A_0M, x) \cos(s, x) + \cos(A_0M, y) \cos(s, y) + \cos(A_0M, z) \cos(s, z)]$$

$$= A_0M \left[\frac{x - x_0}{A_0M} \alpha + \frac{y - y_0}{A_0M} \beta + \frac{z - z_0}{A_0M} \gamma \right] \quad \text{puesto que} \quad \frac{x - x_0}{A_0M} = \cos(A_0M, x) \text{ etc.}$$

Así, pues, se tiene: $s = \alpha(x - x_0) + \beta(y - y_0) + \gamma(z - z_0)$ Evidentemente, la ecuación diferencial se satisface para ambas interpretaciones; pero esta última no resiste la crítica. La perpendicular s es el espacio recorrido por la luz en el tiempo t y con la velocidad a . Pero ¿por qué razón ha de llegar la luz a un mismo tiempo a todos los puntos de ese plano? Es evidente que siendo M un punto cualquiera del plano, la distancia A_0M está sujeta a la sola condición $A_0M \geq s$ pudiendo ser tan grande como se quiera, pues la extensión del supuesto plano es ilimitada. Si el punto A_0 fuese el punto luminoso, la luz llegaría al fin del tiempo t a todos los puntos de una esfera cuyo centro es A_0 y no a todos los puntos de un plano.

La causa que ha motivado esta lamentable equivocación, consiste en que la ecuación

$$\frac{d^2u}{dt^2} = a^2 \left[\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} \right] \quad \text{y, en general, la ecuación} \quad \frac{du}{dt} + a \frac{du}{ds} = 0 \quad \text{admite la solución}$$

$\psi(s - at)$ En la cual s puede tomar cualquiera de las dos interpretaciones; pero cuando se ha llegado a la ecuación diferencial por consideraciones hipotéticas, y mediante largos y laboriosos desarrollos, no es posible juzgar cuál es la correcta interpretación que deba darse a las soluciones de dicha ecuación, y menos aún bajo la influencia que ha ejercido el concepto ondulatorio de Huyghens.

De todos modos, la distancia de los puntos de coordenados x, y, z y x_0, y_0, z_0 no puede ser sino s y, por tanto, el punto A_0 del rayo luminoso corresponde, según la dirección cuyos ángulos con los ejes tienen por cosenos α, β y γ un punto A y no cualquier punto del plano normal a la propagación.

4.° Esta objeción está resumida en la nota citada y que aquí reproduciré:

Según 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, a un 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 isotropos; 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 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. Según el concepto de Huyghens el flujo de luz a través de la sección del rayo distante un metro solamente de la ventanilla, debiera ser $\frac{1}{2\pi r^2} = \frac{1}{62832}$ del que penetra por el tragaluz. Lo cual es inadmisibile en atención a que las varias secciones del rayo luminoso se conservan igualmente iluminadas.

Cabe observar que, en resumen, la teoría ondulatoria es un conjunto de hipótesis no justificadas previamente, por ningún hecho experimental directo, sino solamente por las conclusiones que sus creadores deseaban deducir.

CAPITULO V

Importancia de este estudio.

La mayoría de las gentes de estudio no saben distinguir entre una teoría de ciencia pura y una hipótesis cualquiera de un ramo que está por desarrollarse.

En presencia de dos interpretaciones distintas de un mismo fenómeno, se encuentran perplejas porque no saben apreciar cuál es la verdadera. Esto conduce al escepticismo con detrimento de la Ciencia.

Hay gentes que se revelan contra las leyes naturales como si fuesen disposiciones de un poder caprichoso. Para ellas la realidad de los hechos es odiosa y quisieran abolir la Ciencia.

Para otros muchos, la contradicción entre dos teorías de carácter científico, lejos de mortificar su espíritu, es ocasión propicia para ejercitar la imaginación con originales teorías basadas en hipótesis sorprendentes.

En estos últimos tiempos hemos tenido ocasión de presenciar gran número de estas lucubraciones. Moda lamentable que, al continuar, produciría lo que pudiera llamarse confusión de ideas, y haría cada vez más dificultosa la investigación de la verdad y la conservación de los conocimientos positivos adquiridos anteriormente.

Se hace hoy, por tanto, de gran importancia la unificación de la Ciencia, puesto que la verdad es una. El esfuerzo de todo hombre de estudio debe tender a ese fin.

Tres han sido los puntos de desacuerdo anotados por la crítica entre la Ciencia y lo que está por desarrollar, a saber:

- 1.° La contradicción entre las teorías *bradleriana* y *fresneliana* de la aberración astronómica;
- 2.° La mala interpretación a que se ha prestado el postulado de la Mecánica racional, llamado de la independencia de los efectos de las fuerzas entre sí y con el movimiento anteriormente adquirido; y
- 3.° Finalmente, el llamado movimiento *browniano*.

De este último, referente a la Termodinámica, no he tenido ocasión de ocuparme. El segundo está estudiado en el folleto intitulado *Nota sobre la Dinámica de los electrones*, que publiqué el año de 1911. La primera de estas objeciones ha sido motivo de mi especial atención y constituye el tema de este trabajo.

La Ciencia que nos legaron los antiguos: la Astronomía y la Geometría, no ha dado lugar a crítica; y si en Astronomía subsistía el error de la inmovilidad de la tierra, él era explicable por estar de acuerdo con las apariencias y por ignorarse en aquella época las distancias a que se hallan los cuerpos celestes. Se trataba de un ramo en evolución no definitivamente concluída.

Lo que realizó la civilización antigua debe realizarlo también la moderna respecto del porvenir: legar a las generaciones futuras, no una confusión de doctrinas, sino un cuerpo de conocimientos definitivamente establecidos.

Tal ha sido el fin que he perseguido en esta labor respecto de la Astronomía y de la Mecánica.

COMENTARIO REFERENTE AL CUARTO ESCRITO DE GARAVITO SOBRE OPTICA MATEMATICA

En el trabajo anterior, que su autor no alcanzó a dar a la publicidad y que fue escrito un poco antes de la muerte del ilustre astrónomo colombiano, se

trata primeramente de exponer una serie de explicaciones que pongan la cuestión contradictoria existente entre la teoría ondulatoria clásica de la propa-

gación de la luz y el fenómeno de la aberración astronómica al alcance de quienes no estén familiarizados con esta clase de estudios. Para ello Garavito recurre, en primer término, a una concepción original que nos va a permitir darnos cuenta objetiva del fenómeno de la aberración, fenómeno del cual nos ocupamos pormenorizadamente en la nota explicativa con que acompañamos el primer escrito suyo sobre estos tópicos, y que escribimos con el propósito de refrescar las ideas respecto del descubrimiento de Bradley efectuado circunstancialmente por el astrónomo inglés cuando se ocupaba en la determinación de paralajes estelares.

Realmente, y por brevedad, hubiérase podido omitir en el presente número de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias, la explicación, hasta cierto punto elemental, hecha por medio de la cámara oscura gigantesca de Garavito colocada en el plano de la eclíptica de manera que su eje óptico sea paralelo al eje de la misma, y moviéndose en el espacio con la velocidad de la tierra, por cuanto la explicación clásica del fenómeno de la aberración parecemos que se impone fácilmente al espíritu y no tiene necesidad de mayores comentarios, cuando se pretende examinar la posibilidad cinemática elemental de la composición de dos velocidades: la de la tierra en su órbita y la de la luz.

Pero como se trata de una explicación originalísima y de valor didáctico importante, se reproduce en este número de la Revista de Ciencias tal como salió de la pluma del maestro cuando éste se hallaba obsesionado por la idea de dejar sus escritos anteriores sobre Óptica astronómica perfectamente al alcance de aquellos que aún no se habían ocupado entre nosotros de esos asuntos.

En segundo término propúsose Garavito, en su cuarto y último escrito sobre Óptica, aclarar, aún más, sus conceptos referentes a la propagación de la luz, como una forma de la energía, y que ya, en su primer folleto: "La aberración de la luz", la había explicado con el símbolo material y objetivísimo, que él llamó *grosero*, de la serie de bolas de billar, perfectamente elásticas, que, puestas en fila, propagan el choque que se comunica a la primera de ellas y que se recibe por la última mediante impactos sucesivos de bola a bola.

Habiendo iniciado sus ideas al respecto de esa suerte y logrado establecer claramente que *la luz es energía, que tiene dirección definida de propagación y que se propaga en determinado sentido*, Garavito logra precisar en el escrito anterior, aún más, su concepto de que *la luz es una cantidad vectorial*, y que así debemos considerarla, desde el punto de vista estrictamente matemático, sin preocuparnos para nada de su naturaleza ni del mecanismo íntimo de su propagación cuando se trata de resolver la paradoja propuesta por Gill, examinada en presencia de los experimentos de Michelson y Morley y de Fizeau, aparentemente contradictorios, pero admirablemente concordantes dentro de una interpretación mecánica correcta.

Desde luego se ve que siendo la luz una cantidad vectorial, los efectos de su energía dependen —semejantemente a como se interpreta la inducción electromagnética— del flujo de ese vector, o sea, dependen de la cantidad de luz que pasa normalmente por una sección dada, a lo largo de un tubo de flujo y en un tiempo determinado. Así puede llamarse *flujo de luz unitario*, o simplemente, *flujo unitario*, el determinado por la unidad de sección en la unidad de tiempo, y que tiene una representación objetiva cuando nos imaginamos un cilindro recto del agente que llamamos luz, cilindro cuyas bases son iguales a la unidad de superficie y cuyo eje tiene la dirección de la propagación del fenómeno luminoso.

De acuerdo con Garavito, el flujo unitario puede ser concebido también como un *cilindro de energía* engendrado por una sección unidad al moverse paralelamente a sí misma en el sentido y dirección de la luz y con la velocidad de propagación de ésta.

Nos encontramos con este concepto ante el proceso matemático de representación que sirvió admirablemente para fundamentar la Termodinámica y las deducciones mecánicas y geométricas de Faraday y Maxwell en Electromagnetismo, según lo insinuamos en la conferencia que se publica en este mismo número de la Revista de nuestra Academia. Y esto sin compromisos ulteriores respecto de que pueda ser la luz, íntimamente considerada.

De lo expuesto por Garavito en el escrito anterior se deduce que si la sección llamada luminosa (la sección engendradora del cilindro de luz dicho) se mueve según la dirección y el sentido de la luz, engendrará un cilindro que puede recibir el nombre de *flujo unitario absoluto* para distinguirlo del que podemos llamar *flujo relativo* cuando el cilindro de luz considerado es engendrado por una sección que tiene, además del movimiento rectilíneo de la luz, otro movimiento rectilíneo, bastando para esta consideración tomar el tiempo tan pequeño como se quiera, para que se trate de desalojamientos elementales.

En el caso de la luz, e introduciendo el concepto de índice de refracción, cuando el transporte de energía luminosa se hace a través de medios heterogéneos, se puede decir "que hay una cantidad de carácter vectorial, de las que entran en juego en la propagación de la luz, que cumple la condición de que al pasar ésta de un medio a otro, la componente del vector, según la superficie de separación de los dos medios, es igual a la componente de la cantidad homónima en el segundo medio sobre la misma superficie". Así, propiamente, designa Garavito esta cantidad vectorial con el nombre de *vector equiproyectante*.

Cuando el transporte se verifica en un medio homogéneo, la energía del flujo unitario de luz será constante, de acuerdo con la ley newtoniana del inverso del cuadrado de la distancia; y en el caso de la reflexión el tensor del vector equiproyectante es igual antes y después de la reflexión. Estos hechos, pues, de carácter experimental, manifiestan la con-

servación del flujo luminoso a lo largo de un tubo de flujo cuando el medio es homogéneo y la dirección rectilínea se conserva y cuando existen en el medio superficies de discontinuidad y se presenta refracción o reflexión de los rayos de luz.

Así, del estudio del vector equiproyectante en la refracción, deduce Garavito que la conservación del flujo de energía antes y después de la refracción, es condición suficiente para la existencia del índice de refracción entre dos medios diferentes, pero que no es condición necesaria; que la reversibilidad del índice de refracción implica la conservación del flujo de energía, y que para tal conservación la sola condición necesaria es la de que la relación entre la energía del flujo incidente y la del flujo refractado sea constante.

Hé ahí, juntamente con la explicación perfecta del fenómeno de la aberración, la Óptica toda comprendida en un análisis matemático riguroso, de lógica irrestricta y de sencillez admirable, que merece detenido examen, para comprender, con el doctor Darío Rozo, miembro distinguidísimo de nuestra Academia, cómo Garavito ha sido entre nosotros el verdadero iniciador de las corrientes nuevas científicas, a pesar de que aparentemente se mostrara irreductible en lo que respecta a la Mecánica clásica.

Por ello podemos acoger, hasta cierto punto, como nuestros los siguientes conceptos del doctor Rozo: "El doctor Julio Garavito fue el primero entre nosotros, y quizá entre los extraños también, que vio claro en estos asuntos; él apenas dejó esbozadas sus ideas, y le faltó la vida cuando aún no se conocía aquí el cuerpo de doctrina de los einstenianos; de modo, pues, que a nuestro modo de ver, no debe buscarse en la obra de Garavito una refutación a las teorías novísimas... Si Garavito rechazó en bloque ciertas aseveraciones contrarias a las nociones clásicas, fue porque no le alcanzó la vida para poner las cosas en su justo lugar y valor, y separar de un conglomerado abstracto hasta el presente, lo que debe estar bajo el dominio de las leyes clásicas y lo que corresponde a las modernas".

En el escrito anterior de esta serie (Nota sobre la Óptica matemática) ya había presentado Garavito su objeción fundamental a la teoría ondulatoria de la propagación de la luz, de Huyghens, estableciendo, primero, la ecuación general de propagación ondulatoria de cualquier clase de fenómenos vibratorios, y demostrando, en seguida, que la solución del plano de la onda indicada por Huyghens, desde un principio, no puede considerarse como correcta. Para presentar al lector en este cuarto escrito un resumen de sus conclusiones anteriores, dice así Garavito: "Las objeciones más importantes que pueden formularse a la teoría ondulatoria se basan en los hechos siguientes: 1º Primeramente se eligió entre dos hipótesis: la de la emisión de Newton y la ondulatoria de Huyghens tomada en su pleno desarrollo, como si no hubiera una infinidad de modos posibles de transmisión de la luz; 2º La teoría ondulatoria considera el éter como un sólido elástico, sus-

ceptible de atravesar los cuerpos materiales sin resistencia alguna y adaptándose, sin embargo, más o menos, a las condiciones físicas de tales cuerpos. 3º El deseo de hallar la explicación de tal o cual fenómeno, verbigracia, la polarización de la luz, condujo a Fresnel a la consideración de un plano normal a la propagación de la luz, plano sobre el cual se consideran vibraciones rectilíneas de diverso sentido. La importancia que confirió Fresnel a semejante plano ha tenido una trascendencia tal que ha falsado la solución de la ecuación diferencial de propagación de la luz".

Este resumen de Garavito, formulado al terminar el sabio astrónomo colombiano sus estudios referentes a la Óptica relacionada con la Astronomía, y cuando él creyó, antes de morir, que sus conclusiones eran cosa definitiva, y que había logrado en su cuarto escrito sobre estos tópicos hacerlos accesibles para la generalidad de los lectores, nos debe servir no sólo para hacer la historia de su labor en este campo de la investigación, sino también para introducir a quienes hayan seguido hasta aquí las enseñanzas del maestro, en las nuevas especulaciones que irá publicando progresivamente esta Revista, y que pretenderán modestamente llevar su grano de arena a la solución de los grandes problemas de la Física moderna.

Entre tales especulaciones figuran, en primer término, los trabajos del académico de número doctor Darío Rozo M., de quien ya se hizo mención atrás, y de los cuales nos ocuparemos en tiempo oportuno.

Estos trabajos representan un esfuerzo de gran valor en la tarea de conciliación que se propuso Garavito y en la demarcación acertada que debe buscarse entre la Mecánica clásica y las ideas modernas para ver de hallar fórmulas de transformación, que de modo general permitan la interpretación de muchos fenómenos, cosa que se ha propuesto el doctor Rozo desde tiempo atrás, cuando inició su estudio: "Alcances de la teoría de Einstein", con un programa como el siguiente: fórmulas nuevas; razonamiento clasicista; las fórmulas nuevas según la teoría antigua, y conceptos nuevos.

Por este aspecto puede considerarse que la labor del doctor Rozo es una continuación de la de Garavito y que al darle cabida en las páginas de esta Revista de la Academia Colombiana de Ciencias, en seguida de la serie sobre Óptica que termina con el escrito anterior que comentamos, nos ceñimos a un plan de enseñanza y divulgación enteramente armónico y de acuerdo con lo que nos hemos propuesto al ordenar la orientación general de esta publicación.

Y para tal ordenación armónica queremos terminar el presente comentario relativo al conjunto de los escritos de Garavito sobre Óptica, aun incurriendo en repeticiones inevitables, con las siguientes palabras del doctor Rozo:

"Bradley, descubridor de la aberración de los astros, la explicó por la teoría newtoniana; pero rechazada esta teoría cuando se notó que la velocidad

de la luz en el agua era menor que en el aire, hubo de buscarse su explicación por la teoría ondulatoria o de las vibraciones, y fue Young quien eso se propuso; pero para poder explicar la aberración, se vio obligado a admitir que el vehículo de la luz, o sea el éter, está en reposo, es decir, que no es arrastrado ni impedido por los cuerpos cuando se mueven. Mas vino luego el experimento que lleva el nombre de su autor, Fizeau, y que consiste en hacer correr agua en sentidos opuestos por dos tubos paralelos y observar la diferente velocidad de dos rayos de luz: uno que remonta el agua y otro que va en la misma dirección de ella; entonces se vio que para dar razón de los resultados obtenidos era menester convenir con Fresnel en el arrastre parcial del éter. Pero la hipótesis del arrastre, ya sea total o parcial, hace inexplicable la aberración; y esto es de tal modo, que algunos físicos, como el eminente matemático Lorentz, han optado por agregar nuevas hipótesis, dejando el éter en reposo".

"Maxwell fue el primero en indicar que la velocidad de la luz en la superficie de la tierra debe ser más pequeña en la dirección del movimiento terrestre que en la dirección normal a él, si el éter está inmóvil. En 1887 Michelson y Morely quisieron comprobar esto, pero la serie de sus célebres experiencias dio resultado negativo: no se pudo notar la menor diferencia de velocidad; de esto debía deducirse que el éter era llevado por la tierra, pero tal hecho, repetimos, dejaba de nuevo sin explicación la aberración; Lorentz y Fitzgerald supusieron entonces que el éter está quieto con relación a la tierra, y que los cuerpos al moverse al través de él experimentan un cambio de dimensión lineal, lo que explicaría la negación de las pruebas de Michelson; empero, Lord Rayleigh hizo notar que, de ser esto cierto, los cuerpos isótropos deberían hacerse anisótropos, y, por tanto, manifestarse en ellos la doble refracción; los experimentos de él y los de Bracke en 1904, pusieron de manifiesto que la doble refracción no se presenta".

"Quedó, pues, planteado un problema que ha intrigado grandemente a los físicos y a los matemáticos modernos, problema que don Julio Garavito llamó acertadamente "paradoja de la óptica matemática". En términos claros, aunque no académicos, diremos que las distintas y cuidadosas experiencias probaron tres cosas en entero desacuerdo: que el éter está en reposo; que el éter es parcialmente arrastrado, y que el éter es llevado totalmente".

"El éter mismo es un supuesto, pero sin él no se pueden explicar las ondas luminosas".

"Permanecía este problema sin solución, este interrogante, más significativo, más enigmático que el de la misma Esfinge de las antiguas leyendas; y aquí que dos soluciones se presentan: la de Einstein que, tomando pie en las hipótesis de Lorentz, lo satisface, pero cambia las viejas nociones del tiempo y del espacio, de la masa y de la velocidad, y da forma a una teoría que resuena hoy por todos los ámbitos del mundo científico. La otra solución es la de nuestro desconocido maestro, quien con las antiguas fórmulas y las vetustas nociones sobre el tiempo y el espacio, explicó a sus amigos —a la manera de los antiguos hombres de Atenas— cómo los resultados de las opuestas experiencias concordaban; y le bastó para ello considerar la luz como energía radiante; pensó que el éter es totalmente arrastrado porque es dieléctrico, y con ayuda del teorema de la menor acción explicó la refracción y el cambio de velocidad de la luz en los medios de distinta densidad; estimó las velocidades tangenciales y halló la explicación de la aberración y del fenómeno de Fizeau; criticó y modificó el concepto de onda de Huyghens y logró hacer ver que no hay tal arrastre parcial; por último, selló todos estos asertos con la interpretación de los experimentos de Michelson, que están sencillamente de acuerdo con la teoría del arrastre total; en una palabra, sin hipótesis extrañas y atrevidas, nuestro compatriota hace concordar las opuestas experiencias".

La Dirección

VOCABULARIO DE TERMINOS VULGARES EN HISTORIA NATURAL COLOMBIANA

HERMANO APOLINAR MARIA

Profesor en el Instituto de la Salle, de Bogotá.

(Continuación)

65.—*Acónito*.

Aconitum napellus Lin.—Familia de las *Ranunculáceas*.

El género *Aconitum* (del gr. *acone*, piedra; planta que crece entre las rocas) consta de unas 19 especies de Europa, Asia y América boreal.

A. napellus es originario de las montañas de Europa. Es una planta de unos 65 cms. a un metro de altura; el tallo es recto y terminado por una espiga o panículo de lindas flores azules; las hojas, de un bello color verde, están profundamente divididas en lobos palmados; el fruto es una cápsula trilocular. La raíz afecta la forma de un nabo de dimensiones reducidas; de ahí el nombre específico de la planta.

Es planta venenosa; su principio activo es la aconitina. El veneno se encuentra concentrado en las hojas adultas, las flores y sobre todo en las raíces. Los cogollos tiernos preparados con manteca (grasa) son comestibles; por lo menos los Lapones los consumen así preparados (1).

Según observaciones hechas, todas las partes de la planta son más activas en las regiones cálidas que en las frías; más en las montañas que en las regiones bajas y húmedas; más en el estado silvestre que en el estado cultivado; más antes de la florescencia que después.

Los acónitos son conocidos desde muy remotos tiempos. La fábula griega dice que el Acónito nació de la baba del *can Cerbero*. Ovidio cuenta que el Acónito entraba en la composición de la famosa bebida de la hechicera Medea.

Tratándose de una planta muy venenosa se debe dejar al médico que regularice la administración de un remedio tan peligroso.

Los síntomas de intoxicación son: escozor en todos los miembros del cuerpo y picazón en la lengua. Al notar estos síntomas es preciso dejar inmediatamente este remedio.

66.—*Acuapa*; *Arenillero*; *Castañeto*; *Ceiba amarilla*; *Ceiba de leche*; *Ceibo*; *Habilla*; *Milpesos*; *Salvadera*; *Trovador*, etc.

Hura crepitans D. C.—Familia: *Euforbiáceas*.

(1) Parece que en los países templados y calientes el consumo de las yemas tiernas produciría los más terribles envenenamientos.

El género *Hura* (nombre americano) consta de dos o tres especies propias de las tierras calientes de la América tropical.

H. crepitans es la especie principal. En Honda la llaman *Acuapar*; en la Costa Atlántica, *Arenillero*; *Ceibo* y *Milpesos*, en Antioquia; *Habilla*, en Ocaña, y *Castañeto* en el Socorro.

Es común en todas las tierras calientes. Es una de las *euforbiáceas* más venenosas.

Según C. Cuervo M. ("Trat. elem. de Botán.", p. 429), Boussingault obtuvo del análisis de la leche de esta planta los resultados siguientes: 1.—Gluten; 2.—Un aceite esencial cáustico, que parece ser el principio activo; 3.—Un principio acre, alcalino y cristizable; 4.—Malato ácido de cal; 5.—Nitrato de potasa, y 6.—Ozomazona, principio azoado de los más nutritivos que produce el reino vegetal.

El sabio francés, al analizar la leche del *Acuapa*, recibió en la cara los vapores que despedía la vasija en que la manipulaba, lo que le ocasionó ceguera y una inflamación erisipelatosa que le duró algunos días. El peón que trajo la leche desde Guaduas sufrió también graves accidentes.

El extracto de corteza se emplea en el Brasil contra la lepra a la dosis de 1 a 15 centigr. en píldoras.

Las semillas tienen un sabor dulce seguido bien pronto de una sensación de acritud extraordinaria e insoportable; son demasiado tóxicas, lo que hace prácticamente imposible su empleo en medicina.

67.—*Acuasía*; *Quasia*.

Quassia amara Lin.—Familia de las *Simarubáceas*.

El presente género no consta sino de 2 especies, propias de las regiones tropicales de América y de África.

El nombre genérico recuerda el esclavo Quassi, quien dio a conocer a los europeos las virtudes medicinales de la planta.

Quassia amara, que la gente del campo llama *Acuasía*, pero cuyo nombre vulgar legítimo es *Cuasía*, es un arbolito de 6 a 7 metros; las flores son muy ornamentales, dispuestas en racimos alargados.

Es una planta medicinal de la cual se utiliza la madera despojada de su corteza; esta última la uti-