TYNDALE

LAST CLASS

LECTURES

LA LUZ.

Chamartin de la Rosa : 1873.—Imp. de C. Bailly-Bailliere.

LECCIONES
SOBRE LA LUZ

EXPLICADAS EN EL

INSTITUTO REAL DE LA GRAN BRETAÑA

Del 8 de Abril al 3 de Junio de 1869

POR

JOHN TYNDALL, LL.D, F.R.S.

Traducidas de la segunda edicion

POR EL CONDE DE MIRASOL.

MADRID
CÁRLOS BAILLY-BAILLIERE
LIBRERÍA EXTRANJERA Y NACIONAL, CIENTÍFICA Y LITERARIA,
Plaza de Topete, núm. 10.
1873.

PREFACIO.

Estos apuntes fueron preparados para el uso de los que asistian á mis Lecciones sobre la Luz el año pasado y sin intencion de darles mayor publicidad. Las preguntas y peticiones que respecto á ellos me dirigen los maestros y discípulos que los han leido, me hacen pensar que su utilidad puede extenderse mas allá de los límites fijados al principio. Los Sres. Longman han tomado por su cuenta la publicacion en una forma muy económica.

Debo y doy las mas expresivas gracias á mi amigo el profesor Goodeve que ha tenido la bondad de revisar las pruebas.

Instituto real. Mayo de 1870.

LECCIONES

SOBRE

LA LUZ.

CONSIDERACIONES GENERALES. — PROPAGACION RECTILÍNEA DE LA LUZ.

1. Suponian los antiguos que se excitaba la vision y se producia la luz por una *cosa* emitida por el ojo. Los modernos consideran que la vision es excitada por un agente exterior que hiere al ojo. Culá sea este *agente* ó *cosa,* es lo que consideraremos mas detenidamente en lo que sigue.

2. Los cuerpos *luminosos* son independientes de los manantiales de luz. La engendran, la emiten y no reciben su luz de otros cuerpos; por ejemplo: el sol, las estrellas y la llama de una vela.

3. Son cuerpos iluminados los que reciben la luz que los hace visibles de los cuerpos luminosos, por ejemplo: una casa,

un árbol, un hombre. Estos cuerpos esparcen en todas direcciones la luz que reciben; esta luz llega al ojo, y por la accion de este se hacen visibles los cuerpos iluminados.

4. Todos los cuerpos iluminados esparcen ó reflejan luz y se distinguen unos de otros por el exceso ó falta de luz que envian al ojo. Una nube blanca en un cielo azul se distingue de él por su exceso de luz; un pino oscuro que se proyecte sobre la misma nube se hace visible por su falta de luz.

5. Mírese á cualquier punto de un objeto visible. La luz viene desde el punto al ojo en línea recta. Las líneas de luz, ó rayos como se llaman, que llegan al ojo, forman un *cono* cuya base es la pupila, y el punto el vértice. El punto se ve siempre en el lugar donde se cortan los rayos que forman la superficie de este cono; ó, como veremos en breve, donde *parece* que se cortan.

6. La luz, acabamos de decir, se mueve en línea recta; se ve un objeto luminoso por efecto de los rayos que envia al ojo, pero no puede verse si está detrás de una esquina. Un obstáculo pequeño que intercepte la vista

de un punto que emita la luz, está siempre en la línea recta que lo une con el ojo. Si en la ventana de un cuarto oscuro se hace un pequeño agujero por donde pueda pasar la luz del sol, un haz luminoso estrecho marcará su paso iluminando el polvo en suspension y esta traza del haz de luz será perfectamente recta.

7. Supongamos que la abertura disminuye gradualmente de tamaño hasta que el haz que la atraviesa y que ilumina el polvo de la habitacion, se reduzca en grueso á una línea matemática. En este estado constituye lo que llamamos un *rayo* de luz.

FORMACION DE LAS IMÁGENES Á TRAVÉS DE LAS PEQUEÑAS ABERTURAS.

8. En lugar de dejar entrar directamente en la habitacion por la pequeña abertura la luz solar, que entre la luz procedente de algun cuerpo iluminado por el sol, por ejemplo: un árbol, una casa ó un hombre. Supongamos que esta luz se recibe sobre una pantalla blanca colocada en el cuarto oscuro.

Cada punto visible del objeto envia un rayo recto á través de la abertura. La suma total de estos rayos recogidos así sobre la pantalla producen una imágen invertida del objeto. La imágen es invertida porque los rayos se cruzan recíprocamente en la abertura.

9. *Experimento.*—Se coloca una vela encendida en una cámara pequeña que tenga un pequeño orificio en uno de sus lados, ó uno grande cubierto con papel de estaño. Se pincha el papel de estaño con una aguja y la imágen invertida de la vela aparecerá sobre cualquier pantalla que se coloque para recibirla. Aproximando la pantalla á la cámara ó al contrario, el tamaño de la imágen disminuye; y aumentando la distancia entre ambos objetos, aumenta el tamaño de la imágen.

10. El perímetro de la imágen se forma tirando una línea recta desde cada punto del perímetro del objeto al orificio, y prolongándolas hasta que la pantalla las corta. Esto no podria tener lugar si las líneas rectas y los rayos de luz no coincidieran.

11. Algunos cuerpos tienen la facultad de dejarse atravesar por la luz; son los *llamados*

trasparentes. Otros tienen la facultad de interceptar rápidamente la luz que entra en ellos; son los cuerpos *opacos*. No existen ni la perfecta trasparencia ni la perfecta opacidad.

El vídrio y el cristal mas puros interceptan algunos rayos; el metal mas opaco, en hojas suficientemente delgadas, deja pasar algunos rayos. El color rojizo del sol de Lóndres en tiempo de nieblas es debido á la trasparencia parcial del hollin para la luz roja. El agua pura á grandes profundidades es azul, porque anula mas ó menos los rayos rojos. El hielo visto en grandes masas en los ventisqueros de los Alpes es tambien azul.

SOMBRAS.

12. Por consecuencia del movimiento rectilíneo de la luz, los cuerpos opacos arrojan sombras. Si el foco luminoso es un punto, la sombra resulta perfectamente limitada; si el foco es una superficie luminosa, la sombra perfecta está rodeada por una sombra imperfecta que se llama *penumbra*.

13. Cuando la luz emana de un punto, la

sombra de una esfera expuesta á la luz es un *cono divergente* perfectamente limitado.

14. Cuando la luz emana de un globo luminoso, la sombra perfecta de una esfera de igual tamaño que el globo será un *cilindro* que estará rodeado por una penumbra.

15. Si la esfera luminosa fuese la mayor de las dos, la sombra perfecta será un *cono convergente* rodeado por una penumbra. Este es el carácter de las sombras arrojadas sobre el espacio por la tierra y la luna, por ser el sol una esfera mayor que cualquiera de ellas.

16. Para un ojo colocado en la sombra cónica verdadera de la luna, el sol está totalmente eclipsado; para un ojo colocado en la penumbra, el sol aparece en forma de media luna; mientras que para un ojo colocado mas allá del vértice de la sombra cónica y dentro del espacio comprendido por la prolongacion del cono, el eclipse es *anular*. Todos estos eclipses son efectivamente visibles de cuando en cuando desde la superficie de la tierra.

17. La influencia de la dimension sobre las sombras, puede comprobarse experimentalmente por medio de la llama de un mechero

plano de gas, aceite ó parafina. Colocando una varilla opaca entre la llama y una pantalla blanca, la sombra resulta bien definida, cuando el filo de la llama mira hácia la varilla. Cuando la superficie ancha de la llama está vuelta hácia aquella, la sombra real está rodeada por una penumbra.

18. A medida que crece la distancia á la pantalla, la penumbra va ocupando el lugar de la sombra perfecta hasta que finalmente la borra.

19. La magnitud angular del sol es la causa que hace poco distintos los límites de las sombras solares. A la luz del sol, por ejemplo, la sombra de un cabello se borra sensiblemente de la superficie donde se recibe á pocas pulgadas de distancia. La luz eléctrica, por el contrario, como emana de unas pequeñas puntas de carbon, arroja una sombra bien definida sobre una pantalla colocada á muchos piés de distancia.

PÉRDIDA DE INTENSIDAD DE LA LUZ POR LA DISTANCIA; LEY DE LOS CUADRADOS INVERSOS.

20. La intensidad de la luz disminuye á medida que nos alejamos del foco luminoso. Siendo este un punto, la intensidad disminuye tanto como aumenta el cuadrado de la distancia. Si tomamos por unidad la cantidad de luz recibida por una superficie determinada á la distancia de 1 pié ó 1 vara, la cantidad de luz recibida á la distancia de dos piés ó 2 varas es $\frac{1}{4}$; á la distancia de 3 piés ó 3 varas $\frac{1}{9}$, á la distancia de 10 piés ó 10 varas de $\frac{1}{100}$ y así sucesivamente. Esta ley es la que se llama de los cuadrados inversos aplicada á la luz.

21. *Comprobacion experimental.*—Se coloca el foco luminoso que puede ser la llama de una vela; á pesar de que la ley solo es rigorosamente exacta para los *puntos* luminosos á la distancia, supongamos, de 9 piés de una pantalla blanca. Se pone un cuadrado de carton ó cualquier otro objeto apropiado á la distancia de 2 $\frac{1}{4}$ piés de la llama, ó sea á

la cuarta parte de la distancia de esta á la pantalla. El cuadradito arrojará sobre esta una sombra.

22. Se comprueba que el área de esta sombra es 16 veces mayor que la del cuadrado que la arroja; para un geómetra es claro que así debe ser, y los que no lo sean pueden satisfacerse haciendo la medicion. Dividiendo, por ejemplo, cada lado de una hoja cuadrada de papel en cuatro partes iguales y doblándola por los puntos opuestos de division, se obtiene un cuadradito cuyo arco es 16 veces menor que la del grande. Sea este cuadradito ú otro del mismo tamaño el cuerpo que arroje la sombra. Colocando á $2\frac{1}{4}$ piés de la llama, su sombra sobre la pantalla, distante 9 piés, será cubierta exactamente por la hoja entera de papel. Cuando quitamos el cuadradito, la luz interceptada por él se esparce sobre una superficie 16 veces mayor sobre la pantalla; su intensidad, por consiguiente, se ha hecho 16 veces menor. Es decir, que multiplicando la distancia por 4, disminuimos la luz á $\frac{1}{16}$.

23. Hágase la misma experiencia colocan-

do el cuadradito á 3 piés de la llama y 6 de la pantalla. La sombra arrojada en este caso tendrá nueve veces el área del cuadrado, y por consiguiente, la luz recibida por este se difunde en la pantalla sobre 9 veces su superficie y su intensidad se reduce á $\frac{1}{9}$. Es decir, que triplicando la distancia, la luz se hace nueve veces menor.

24. Repítase la experiencia á 4 piés y medio de la luz. La sombra en este caso tendrá cuatro veces el área del cuadrado que arroje la sombra, y la luz difundida sobre un cuadrado mayor se reducirá á $\frac{1}{4}$ de su primitiva intensidad. Así, pues, duplicando la distancia del foco luminoso reducimos la intensidad á la cuarta parte.

25. En lugar de empezar con una distancia de $2\frac{1}{4}$ piés del foco, podriamos haber empezado con la de un pié. El área de la sombra hubiese sido en este caso 81 veces la del cuadradito que la arroja; probándose que á 9 piés de distancia la intensidad de la luz es 81 veces menor que á 1 pié.

26. Así, pues, cuando las distancias son

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, etc.,

las intensidades relativas son :

$$1, \frac{1}{4}, \frac{1}{9}, \frac{1}{16}, \frac{1}{25}, \frac{1}{36}, \frac{1}{9}, \frac{1}{64}, \frac{1}{81}, \text{etc.}$$

Esta es la expresion numérica de la ley de los cuadrados inversos.

FOTOMETRÍA Ó MEDICION DE LA LUZ.

27. La ley que acabamos de establecer, nos permite comparar una luz con otra y expresar numéricamente su potencia lumínica relativa.

28. Cuanto más intensa es una luz, mas oscura es la sombra que arroja; ó de otro modo, mayor es el contraste entre la superficie iluminada y la que no lo está.

29. Colóquese una varilla vertical en frente de una pantalla blanca, y la llama de una vela á alguna distancia detrás de la varilla; esta arroja una sombra sobre la pantalla.

30. Colóquese una segunda llama al lado de la primera, aparecerá una segunda sombra, y es fácil arreglar las cosas de tal manera que las dos sombras estén próximas una á otra, permitiendo á la simple vista el hacer

fácilmente la comparacion entre ellas. Si cuando las luces están á la misma distancia de la pantalla las dos sombras son igualmente oscuras, entonces las dos luces tienen la misma potencia lumínica.

31. Pero si una de las sombras es mas oscura que la otra, es porque una de las luces es mas brillante que la otra. Aléjese la luz mas brillante de la pantalla, y las dos sombras se irán igualando hasta qne al fin la vista no percibe diferencia entre ellas. La sombra correspondiente á cada luz está ahora iluminada por la otra luz, y si las sombras son iguales es porque las cantidades de luz que las dos arrojan sobre la pantalla son idénticas.

32. Mídanse las distancias de las dos luces á la pantalla y elévense al cuadrado. Estos dos cuadrados expresan la potencia lumínica relativa de las dos luces. Suponiendo que una distancia sea 3 y la otra 5, las potencias lumínicas relativas son como 9 á 25.

INTENSIDAD.

33. Pero si la luz disminuye tan rápidamente con la distancia, si, por ejemplo, la

luz de una vela á la distancia de 1 vara es 100 veces mas intensa que á la distancia de 10 varas, ¿cómo es que mirando á las luces de las iglesias, de los teatros, de los grandes salones ó á los faroles de las calles, una luz á 10 varas parece casi tan brillante como una que esté á nuestro lado?

34. Para responder á esta pregunta tengo que anticipar las ideas y decir que en el fondo del ojo hay una pantalla formada por un tejido de filamentos nerviosos llamada retina; y que cuando vemos distintamente una luz se forma su imágen en esta pantalla. Este punto le desarrollaré por completo cuando tratemos del ojo. Ahora la sensacion del brillo exterior depende de la intensidad de esta imágen interna de la retina y no de su tamaño. A medida que nos separamos de una luz, su imágen sobre la retina se hace menor y es fácil demostrar que esta disminucion sigue la ley de los cuadrados inversos; que á una distancia doble la imágen retinal se reduce á la cuarta parte, á una triple, á la novena parte y así sucesivamente. La concentracion de luz que acompaña á esta disminu-

cion de tamaño, compensa exactamente la disminucion de intensidad debida á la distancia; y de aquí, que estando claro el aire, la luz á distancias variables entre límites extensos aparezca igualmente intensa para el observador.

35. Si se pudiese colocar un ojo detrás de la retina, se podria observar de hecho el aumento y disminucion de la imágen al disminuir ó aumentar la distancia Un aparato extremadamente sencillo nos permite comprobar este punto. Se toma un tubo de carton ó de lata de 3 ó 4 pulgadas de diámetro y otro tanto de largo, y se cubre una de sus bases con papel ú hoja de estaño y el otro con papel de calcar ó papel comun humedecido con aceite ó trementina. Se pincha el estaño con una aguja y se vuelve la abertura hácia la llama de una vela. Colocando el ojo detrás del papel traslúcido, se verá en él una imágen invertida de la llama. Aproximando la luz á la imágen aparece mayor, y alejándola menor, pero la intensidad permanece constante siempre. Lo mismo sucede con las imágenes en la retina.

36. Si á través de una pequeña abertura se deja entrar en un cuarto un rayo de sol, el lunar de luz que se formará sobre una pantalla distante será redondo, cualquiera que sea la forma de la abertura; este curioso fenómeno se debe á la magnitud angular del sol. Si el sol fuera un punto, el lunar de luz tendria exactamente la misma forma que la abertura. Supongamos que esta sea cuadrada, cada punto de la periferia del sol arroja sobre la pantalla un pequeño cuadrado. Estos cuadraditos se colocan sobre un círculo correspondiente á la periferia del sol, y mezclándose y sobreponiéndose unos á otros producen un perímetro redondo. Por la misma razon, son redondos los puntos iluminados que resultan en el suelo por el paso del sol á través de los huecos que dejan entre sí las hojas de los árboles.

LA LUZ NECESITA TIEMPO PARA ATRAVESAR EL ESPACIO.

37. Esto fué demostrado en 1675 y 1676 por un eminente dinamarqués llamado Olaf

Roemer, ocupado en aquella época en Paris en compañía de Cassini en observar los eclipses de los satélites de Júpiter. Este planeta, cuya distancia al sol es de 475,693.000 millas, tiene cuatro satélites. Ahora solo tenemos que ocuparnos del que está mas próximo al planeta. Roemer vigilaba esta luna, la vió moverse por delante de aquel, pasar al otro lado, y entonces sumergirse en la sombra de Júpiter pareciendo una lámpara que se apaga de pronto; al otro lado de la sombra, la vió reaparecer como una lámpara encendida de pronto. De este modo, la luna misma servia de señal al astrónomo, permitiéndole fijar exactamente el tiempo que empleaba en su revolucion. El período trascurrido entre dos apariciones luminosas de esta luna, daba este tiempo, que se encontró ser cuarenta y dos horas, veinte y ocho minutos y treinta y cinco segundos.

38. Esta observacion era tan exacta que habiendo determinado el momento en que la luna salia de la sombra, podia fijarse el momento preciso de su centésima aparicion, que seria 100 veces cuarenta y dos horas, veinte

y ocho minutos y treinta y cinco segundos despues de su primera aparicion.

39. La primera observacion de Roemer fué hecha cuando la tierra se hallaba en la parte de su órbita que está mas próxima á Júpiter. Como seis meses despues, cuando la pequeña luna debia hacer su centésima aparicion, no ocurrió puntualmente, retrasándose quince minutos cumplidos mas del tiempo calculado. Su aparicion, además, habia ido retrasándose gradualmente á medida que la tierra se retiraba hácia la parte de su órbita mas distante de Júpiter.

40. Roemer razonó del modo siguiente: Si yo hubiese podido permanecer al otro lado de la órbita terrestre, la luna hubiese aparecido en el momento justo; un observador colocado allí probablemente habria visto la luna hace quince minutos, el retardo en mi caso se debe al hecho de que la luz necesita quince minutos para viajar desde el punto donde hice mi primera observacion al que ocupo en la actualidad.

41. Este rasgo de genio fué inmediatamente seguido de otro. «Si este supuesto es exac-

to, razonó Roemer, entonces al aproximarme yo á Júpiter por el otro lado de la órbita terrestre, el retardo será cada vez menor, y cuando llegue al punto de mi primera observacion no deberá haber retraso ninguno.» Encontró que esto era así, y de este modo, no solo demostró que la luz necesitaba tiempo para recorrer el espacio, sino que determinó la velocidad con que se propaga.

42. La velocidad de la luz determinada por Roemer, es de 192.500 millas por segundo.

ABERRACION DE LA LUZ.

La sorprendente velocidad atribuida á la luz en vista de las observaciones de Roemer, fué curiosamente confirmada por el astrónomo inglés Bradley en el año de 1725. Hasta el dia de hoy se conserva en los jardines de Kew un reloj de sol que señala el sitio donde Bradley descubrió la aberracion de la luz.

43. Si marchamos rápidamente en medio de un aguacero que cae verticalmente, nos parece que las gotas no traen la direccion vertical sino que al parecer se inclinan á

nuestro encuentro. Una desviacion semejante de los rayos luminosos de las estrellas por el movimiento de la tierra en su órbita es lo que se llama *aberracion de la luz.*

44. Conocida la velocidad con que marchamos en un aguacero y el ángulo con que parece que descienden las gotas de lluvia, podemos fácilmente calcular la velocidad que traen las gotas de agua. Del mismo modo, conocida la velocidad con que la tierra recorre su órbita y la desviacion de los rayos de luz producida por el movimiento de la tierra podemos calcular inmediatamente la velocidad de la luz.

45. La velocidad de la luz, determinada por Bradley, es de 191.515 millas por segundo, que concuerda notablemente con los resultados de Roemer.

46. Esta velocidad ha sido tambien determinada por medio de experiencias sobre distancias terrestres. M. Fizeau encontró de este modo que era de 194.677 millas por segundo, mientras que las experiencias posteriores de M. Foucault dieron por resultado 185.177 millas por segundo.

47. Una bala de cañon, dice Sir John Herschel, necesitaria diez y siete años para llegar al sol, y la luz atraviesa este mismo espacio en ocho minutos. El ave mas ligera con su vuelo mas rápido, necesitaria cerca de tres semanas para dar la vuelta á la tierra, y la luz anda esta misma distancia en menos tiempo que el que aquella necesita para abrir sus alas; su velocidad, no obstante, es solo proporcionada á las distancias que tienen que recorrer. Puede demostrarse que la luz no puede llegar á nuestro sistema desde la mas próxima de las estrellas fijas en menos de cinco años, y el telescopio nos hace descubrir objetos que probablemente están á muchas veces esta distancia.

REFLEXION DE LA LUZ (CATÓPTRICA).— ESPEJOS PLANOS.

48. Cuando la luz pasa de un medio óptico á otro, una parte de ella es rechazada ó reflejada.

49. La luz es reflejada de un modo *regular* por las superficies pulimentadas; pero si la

superficie no está pulimentada, la luz es reflejada *irregularmente* ó dispersada.

50. Por ejemplo: un pedazo de papel blanco, del que ordinariamente se usa para dibujar, dispersará un rayo de luz que caiga sobre él de tal modo que podrá iluminar una habitacion. Un espejo plano que reciba el rayo de sol lo reflejará en una direccion determinada é iluminará intensamente una pequeña porcion de la habitacion.

51. Si el pulimento del espejo fuese perfecto, seria este invisible y solo veriamos en él las imágenes de los demás objetos; si en la habitacion no hubiese partículas de polvo, el rayo de sol que atravesase el aire seria tambien invisible. La luz dispersada por el espejo y por las partículas en suspension en el aire es la que los hace visibles.

52. Un rayo de luz que choca normalmente sobre una superficie reflejante es reflejado á lo largo de la perpendicular; sencillamente vuelve por el camino que trajo. Si hiere á la superficie en direccion oblícua es reflejado oblícuamente.

53. Si levantamos una perpendicular á la

superficie en el mismo sitio en que la toca el rayo de luz, el ángulo comprendido entre el rayo *directo* y esta perpendicular se llama *ángulo de incidencia*. El ángulo comprendido entre el rayo *reflejado* y la normal se llama *ángulo de reflexion*.

54. Es una ley fundamental de la óptica que *el ángulo de incidencia es igual al de reflexion*.

VERIFICACION DE LA LEY DE LA REFLEXION.

55. Llénese una jofaina hasta el mismo borde de agua ennegrecida con un poco de tinta y suspéndase una plomada, una bala pequeña colgada de un hilo por ejemplo, de modo que cuelgue dentro del agua. El agua va á ser nuestro espejo horizontal y la plomada la normal: se hace colgar la plomada del centro de una regla dividida en pulgadas á derecha é izquierda del centro de suspension que ha de ser el 0 de la escala, se coloca una vela encendida á un lado de la plomada y el ojo del observador al otro lado.

56. La cuestion que hay que resolver, es

la siguiente: Cómo se refleja el rayo que toca á la superficie del líquido al pié de la vertical que marca la plomada. Moviendo la vela á lo largo de la escala, de modo que la punta de la llama esté enfrente de los diferentes números, se halla que para ver la punta de la llama reflejada en direccion del pié de la plomada, la visual tiene que cortar á la escala en un punto equidistante al que por la parte opuesta ocupa la vela. En otras palabras, el rayo reflejado al pié de la perpendicular corta á la escala exactamente á la distancia que está la vela, pero por el lado opuesto. De esto se sigue inmediatamente que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexion.

57. Con un horizonte artificial de esta clase y empleando un teodolito para medir los ángulos, se ha demostrado esta ley con la exactitud mas escrupulosa. Tomado con el instrumento el ángulo de elevacion de una estrella, se apuntaba despues el telescopio hácia abajo á la imágen de la estrella reflejada por el horizonte artificial. Se encuentra siempre que los rayos directo y reflejado forman ángulos iguales con el eje horizontal del te-

lescopio, hallándose el rayo reflejado tan apartado por debajo de la horizontal como el rayo directo por encima. A causa de la distancia á que está la estrella, el rayo que hiere la superficie reflejante es paralelo al que viene directamente al telescopio y de esto se sigue por una demostracion breve y exacta la ley antes enunciada.

58. El camino seguido por los rayos directo y reflejado es el mas corto posible.

59. Cuando la superficie reflejante es áspera, llegan al ojo rayos que parten de distintos puntos mas ó menos distantes unos de otros. De este modo la brisa que irisa la superficie del Támesis ó de la laguna *Serpentina*, envia al ojo, en lugar de imágenes aisladas de los faroles que hay en sus márgenes, columnas de luz. Soplando sobre nuestra palangana de agua, convertimos tambien la luz reflejada de la vela en una columna luminosa.

60. La luz es reflejada con distinta energía por las diferentes sustancias. Recibiéndola normalmente el agua, solo refleja 18 rayos de cada 1000 y el cristal 25, mientras que el mercurio refleja 666 de cada 1000.

61. Cuando los rayos chocan oblícuamente, el agua y el cristal reflejan una cantidad de luz mucho mayor que la que expresa el párrafo 60. Así, por ejemplo, con una incidencia de 40°, el agua refleja 22 rayos; por 60°, 65 rayos; por 80°, 333 rayos, y por 89 $\frac{1}{2}$ (casi rasando la superficie) refleja 721 rayos por 1000. Esto es, casi tanto como el mercurio á igual ángulo de incidencia.

62. El aumento de luz reflejada por el de oblicuidad de la incidencia puede demostrarse con nuestra palangana de agua. Póngase la vela de modo que sus rayos formen un ángulo grande con la superficie del líquido y obsérvese la intensidad de la imágen. Bajando la vela y el ojo hasta que el rayo directo y el reflejado se acerquen lo posible á la superficie del líquido se verá la imágen de la llama mucho mas brillante que antes.

Reflexion de los espejos.—Con un espejo pueden hacerse y explicarse varias experiencias instructivas.

63. Obsérvese primero que colocando una vela entre el ojo y el espejo, de modo que la línea que pasa por el ojo y la llama sea per-

pendicular al cristal, solo se ve una imágen bien definida de la vela.

64. Moviendo ahora el ojo de manera que reciba una reflexion oblícua, veremos que la imágen ya no es única, se presenta una série de imágenes que al principio se sobreponen unas á otras. Haciendo la incidencia suficientemente oblícua si el cristal es bastante grueso, se llegan á separar estas imágenes unas de otras.

65. La primera imágen de la série procede de la reflexion de la luz en la superficie anterior del cristal.

66. La segunda, que generalmente es la mas brillante con mucho, procede de la reflexion en la superficie azogada del cristal. Con grandes incidencias, como ya sabemos, la reflexion de los metales supera mucho á la del cristal.

67. Las demás imágenes de la série son producidas por la reverberacion de la luz de una superficie á otra del cristal. A cada retorno de la superficie azogada, una parte de la luz abandona el cristal y llega al ojo formando una imágen; otra parte es reflejada á

la superficie azogada, donde es reflejada otra vez. Parte de este haz reflejado llega tambien al ojo y da otra imágen. Este fenómeno continúa, haciéndose cada vez menor la cantidad de luz que llega al ojo, y por consecuencia las imágenes sucesivas van siendo mas vagas, hasta que finalmente son demasiado ténues para ser visibles.

68. Aumentando la oblicuidad, puede hacerse un experimento muy instructivo que comprueba el aumento del poder reflector del cristal cuando crece el ángulo de incidencia. Haciendo que el ojo y la llama se vayan aproximando al espejo, la primera imágen se va haciendo cada vez mas brillante y se acaba por hacer que la imágen reflejada por el cristal sea mas brillante y luminosa que la reflejada por el metal. A menudo se presentan irregularidades en la reflexion de los espejos, pero con uno bueno, y hay pocos tan defectuosos que no tengan en todo caso algun buen pedazo, la sucesion de las imágenes es la que aquí se ha indicado.

69. *Posicion y carácter de las imágenes en los espejos planos.*—La imágen aparece en los

espejos planos á la misma distancia á espaldas del espejo que hay entre este y el objeto. Esto es consecuencia inmediata de la ley que establece la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexion. Tírese una línea que represente la seccion de un espejo plano; colóquese un punto enfrente. Los rayos que parten de este punto son reflejados por el espejo y vienen á herir la pupila del ojo que viene á ser la base de un cono de rayos. Prolongando los rayos vienen á cortarse detrás del espejo, y el punto se verá como si estuviese en la interseccion. Este punto de interseccion se demuestra fácilmente que está igualmente distante por detrás del espejo que el otro por delante.

70. Conviene ejercitarse en determinar la posicion de las imágenes en un espejo plano, dadas las posiciones de los objetos. La imágen se construye siempre con facilidad bajando una perpendicular desde cada punto del objeto y prolongándole por detrás del espejo hasta una distancia igual á la que separa esta del punto. De este modo vemos que la imágen es del mismo tamaño y figura que el ob-

jeto; reproduciéndolo en todos conceptos excepto uno, la imágen es una *inversion lateral* del objeto.

71. Esta inversion facilita el poder leer por medio de un espejo los papeles escritos al revés como si estuvieran escritos en la forma usual. Los cajistas arreglan los tipos en esta forma invertida y se vuelve despues por la operacion de imprimir. Con un espejo podemos leer los tipos lo mismo que la página impresa.

72. La inversion lateral tiene lugar cuando nos miramos en un espejo. La mejilla derecha de la persona, por ejemplo, es la izquierda de la imágen; la mano derecha la izquierda, etc. El cabello partido á la izquierda en la persona se ve partido á la derecha en la imágen, etc.

73. Un espejo plano de la mitad de la altura de un objeto da una imágen total del mismo. Esto se deduce fácilmente de lo que antecede.

74. Si un espejo plano se mueve paralelamente á sí mismo, el movimiento de la imágen reproducida por él tiene lugar con una velocidad doble.

75. Lo mismo se verifica con un espejo giratorio; cuando se hace girar un espejo plano, el ángulo descrito por las imágenes es doble del descrito por el espejo.

76. En un espejo inclinado 45° sobre el horizonte, la imágen de un objeto vertical aparece horizontal, y recíprocamente.

77. Un objeto colocado entre dos espejos que forman ángulo da lugar á una porcion de imágenes cuyo número depende del ángulo formado por los espejos. Cuanto menor es el ángulo, mayor es el número de imágenes. Para determinar el número de estas, se dividen 360° por el número de grados abrazados por el ángulo que forman los espejos, el cociente dará el número de imágenes mas una, ó lo que es lo mismo, contendrá las imágenes y el objeto. En esto se funda la construccion del kaleidoscopo.

78. Cuando el ángulo es 0, ó en otras palabras, cuando los espejos son paralelos, el número de imágenes es infinito. En la práctica, no obstante, vemos entre los espejos paralelos una larga sucesion de imágenes que se van debilitando gradualmente, y final-

mente cesan de causar sensacion en el ojo.

REFLEXION EN LAS SUPERFICIES CURVAS: ESPEJOS CÓNCAVOS.

79. Ya se ha dicho y demostrado, que la luz se propaga en líneas rectas que reciben el nombre de rayos. Estos rayos pueden ser divergentes, paralelos ó convergentes.

80. Los rayos emitidos por puntos luminosos terrestres son necesariamente divergentes. Los rayos emitidos por el sol y las estrellas son por causa de la inmensa distancia de estos objetos sensiblemente paralelos.

81. Reflejándolos debidamente, podemos hacer paralelos ó convergentes los rayos procedentes de focos terrestres. Esto se consigue por medio de espejos *cóncavos*.

82. Al ser reflejado por esta clase de espejos, la luz obedece á la ley enunciada para los espejos planos. El ángulo de incidencia es igual al de reflexion.

83. Sea MN una parte pequeña de la circunferencia de un círculo cuyo centro es O. Supongamos que la línea *ax*, que pasa por

el centro, corta el arco MN en dos partes iguales en el punto *a*; imaginemos ahora que la curva MN gira al rededor de *ax* como eje fijo; la curva engendrará parte de una superficie esférica. Si suponemos azogada la superficie que mira hácia *x*, tendremos un reflector esférico cóncavo, y tenemos ahora que

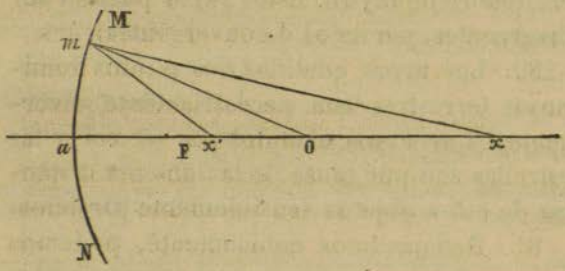

Fig. 1.

conocer la accion de este reflector sobre la luz.

84. La línea *ax* es el eje principal del espejo.

85. Todos los rayos que partan de un punto luminoso colocado en O, hieren normalmente la superficie del espejo, y despues de la reflexion vuelven á O.

86. Un punto luminoso colocado mas allá de O, por ejemplo en x, arroja un cono divergente sobre el espejo. Estos rayos, por la reflexion, se hacen convergentes y se cortan mútuamente en un punto del eje comprendido entre el centro O y el espejo. En todos los casos los rayos directo y reflejado ($x\ m$ y $x'm$, por ejemplo) forman ángulos iguales con el rádio Om que va al punto de incidencia.

87. Suponiendo que x estuviese muy lejos, por ejemplo, á la distancia del sol al pequeño espejo, ó mas exactamente qne estuviese á una distancia infinita, entonces los rayos que llegarian al espejo serian paralelos. Despues de la reflexion estos rayos coinciden *en un punto que* está á la mitad de la *distancia del espejo á su centro.*

88. Este punto marcado con la letra F en la figura, es el *foco principal* del espejo; es decir, el foco principal es el foco de los *rayos paralelos.*

89. La distancia entre la superficie del espejo y el foco principal se llama *distancia focal.*

90. En óptica la posicion de un objeto y

su imágen pueden siempre cambiarse. Si se coloca un punto luminoso en el foco principal, sus rayos, despues de reflejados, serán paralelos. Si el punto luminoso se coloca en cualquiera intermedio entre el foco principal y el centro *o*, los rayos despues de reflejados irán á cortar al eje en un punto mas allá del centro.

91. Si el punto luminoso se coloca entre el foco principal F y el espejo, los rayos, despues de la reflexion, serán *divergentes*, no se cortarán y no habrá foco *real*.

92. Pero si estos rayos se prolongan en sentido opuesto se cortarán detrás del espejo y formarán allí lo que se llama un foco *virtual* ó imaginario.

Antes de continuar es necesario que se dominen completamente todos estos detalles. Dada la posicion de un punto sobre el eje de un espejo cóncavo, no debe encontrarse dificultad alguna para hallar la posicion de su imágen ni para determinar si el foco es real ó virtual.

93. De este modo llegará á ser evidente que mientras un punto se mueve desde una

distancia infinita hasta el centro de un espejo cóncavo, su imágen solo recorre la distancia que hay entre el foco principal y el centro. Inversamente se verá que durante el paso de un punto luminoso desde el centro al foco principal, la imágen de este punto recorre desde el centro hasta una distancia infinita.

94. El punto y su imágen ocupan los que se llaman focos conjugados. Si se ha entendido el párrafo anterior, se verá que los focos conjugados se mueven en direcciones opuestas y que coinciden en el centro del espejo.

95. Si en lugar de un punto fuese un objeto de dimensiones sensibles lo que se colocase mas allá del centro del espejo, se formaria entre el centro y el foco principal una imágen disminuida é invertida del objeto.

96. Si se coloca el objeto entre el centro y el foco principal, se forma mas allá del centro una imágen invertida y magnificada del objeto. Se recordará que las posiciones respectivas del objeto y su imágen pueden invertirse.

97. En los dos casos mencionados en los párrafos 95 y 96 la imágen se forma en el aire en frente del espejo y es una imágen

real; pero si el objeto se coloca entre el foco principal y el espejo, se ve detrás del espejo una imágen directa y magnificada del objeto. En este caso, la imágen es virtual, puesto que los rayos llegan al ojo como si vinieran de un objeto colocado detrás del espejo.

98. Es claro que las imágenes que se ven en los espejos comunes son todas imágenes virtuales.

99. Debe observarse ahora, que cuanto se ha dicho respecto á la reunion de los rayos en un foco único por medio de los espejos esféricos, es solo cierto cuando el espejo está formado por una pequeña porcion de la superficie esférica. Aun en este caso es cierto solo bajo el punto de vista práctico, pero no exacta y teóricamente.

CAUSTICAS POR REFLEXION (CATACAUSTICAS).

100. Cuando se emplea como espejo una porcion considerable de la superficie esférica, los rayos no se reunen en un punto; sus intersecciones, por el contrario, forman una superficie luminosa que recibe en la óptica el

nombre de *cáustica* (en aleman, *brennflache*).

101. La superficie interior de un vaso comun de beber es un reflector curvo. Llénese el vaso de leche casi del todo, y colocando una vela cerca de él, se dibujará una curva cáustica sobre la superficie de la leche; un gancho doblado con cuidado y azogado interiormente, tambien deja ver una cáustica bellísima. El foco de un espejo esférico es la *cúspide* ó punta de su cáustica.

102. *Aberracion.*—Se llama *aberracion* del rayo su desviacion de esta cúspide. La imposibilidad de que un espejo esférico reuna en un solo punto todos los rayos que recibe se llama *aberracion esférica* del espejo.

103. Las imágenes reales, segun hemos dicho ya, se formaban en el aire en frente de un espejo cóncavo y pueden verse en el mismo colocando el ojo entre los rayos divergentes mas allá de la imágen. Si se intercepta la imágen con una pantalla opaca de papel grueso por ejemplo, se proyecta sobre esta y puede verse desde todos los puntos que estén en frente de la pantalla. Si la pantalla es semitransparente como las que se hacen de cristal

raspado ó papel de calcar, se ve la imágen tanto por delante como por detrás de la pantalla. Así se forman las imágenes en la fantasmagoría. Las superficies esféricas cóncavas se emplean generalmente como espejos ustorios. Condensando los rayos solares con un espejo de 3 piés de diámetro y cuya distancia focal sea 2 piés, se obtienen grandes resultados. En el foco el agua hierve en seguida y se incendian inmediatamente las materias combustibles. El papel grueso arde con violencia explosiva y se agujerea una tabla como si se atravesase con un hierro candente.

ESPEJOS CONVEXOS.

104. En el caso de un espejo esférico convexo, las posiciones de sus focos y de las imágenes se buscan como en el espejo cóncavo; pero tanto los focos como las imágenes en el convexo son virtuales.

105. Así para hallar el foco principal, se tiran rayos paralelos que al reflejarse forman con el rádio ángulos iguales á los que forman los rayos directos. Los rayos reflejados son

en este caso divergentes, pero prolongándolos en sentido contrario se cortan en el foco principal *detrás del espejo.*

106. Para fijar la posicion de la imágen de un punto tanto en los espejos cóncavos como en los convexos, basta tirar dos líneas. Un rayo tirado desde el punto y que pase por el centro del espejo se reflejará sobre el mismo centro; un rayo paralelo al eje del espejo despues de la reflexion, pasará él ó su prolongacion por el foco principal. La interseccion de estos dos rayos reflejados determina la posicion de la imágen del punto. Aplicando esta construccion á objetos de magnitud sensible se sigue que la imágen de un objeto en un espejo convexo es siempre *derecha* y *menor que el objeto.*

107. Si el espejo fuese parabólico en lugar de esférico, todos los rayos paralelos que chocan en el espejo se reunen en un punto, en su foco; inversamente un punto luminoso colocado en el foco emite rayos paralelos; no hay aberracion. Si el espejo fuese elíptico, todos los rayos emitidos por uno de los focos del elipsoide se reunen en el otro. Los re-

flectores parabólicos se emplean en los faros en los que el objeto es enviar un haz luminoso intenso á larga distancia sobre el mar compuesto en lo posible de rayos paralelos. En este caso se coloca el centro de la llama en el foco del espejo, pero como la llama tiene una magnitud sensible, los rayos del haz reflejado no son exactamente paralelos.

REFRACCION DE LA LUZ (DIÓPTRICA.)

108. Hasta ahora hemos limitado nuestra atencion á la parte del haz luminoso que rebota de la superficie reflectora. Pero en general, una parte del haz *penetra* las sustancias reflectoras, siendo anulada rápidamente cuando la sustancia es opaca (§ 11), y *trasmitida* libremente cuando la sustancia es transparente.

109. Así por ejemplo, en el agua mencionada en el párrafo 60, cuando la incidencia es perpendicular, todos los rayos se trasmiten excepto los 18 que dijimos que eran reflejados. Es decir, que de cada 1000 rayos, 982 penetran en el agua y la atraviesan.

110. Del mismo modo en el caso del mer-

curio, citado en el mismo párrafo, 334 rayos de cada 1000 que caigan perpendicularmente sobre su superficie penetran en el metal y se anulan á una mínima distancia de aquella. Ahora tenemos que considerar la parte del haz luminoso que penetra en la sustancia reflectora tomando como ejemplo el paso del aire al agua.

111. Si el haz cae sobre el agua perpendicularmente, sigue su direccion recta á través de este medio; si la incidencia es oblícua, la direccion del haz cambia en el punto en que penetra en el agua.

112. Esta desviacion del haz se llama *refraccion*, y no es la misma para todas las sustancias.

113. La refraccion de la luz obedece á una ley perfectamente exacta y que debe ser claramente comprendida. Sea ABCD (fig. 2) la seccion de un vaso cilíndrico lleno hasta su mitad de agua, cuya superficie sea AC. E es el centro de la seccion circular del cilindro, y BD es una perpendicular á la superficie del agua en E. Supongamos que la envuelta cilíndrica del vaso sea opaca, de bronce ó estaño

por ejemplo, é imaginemos una abertura en B por la cual pase un delgado haz luminoso al punto E. El haz seguirá una direccion recta hasta D sin desviarse á derecha ni izquierda.

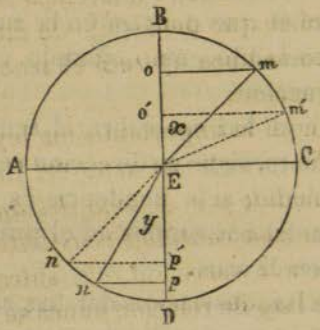

Fig. 2.

114. Imaginemos ahora la abertura en *m* y que el haz choque en la superficie del agua oblícuamente en E. Su direccion cambiará al entrar en el líquido; seguirá la direccion E*n*.

115. Tirando las líneas *mo* y *np* perpendiculares á BD, se halla siempre que *mo* dividido por *np* es siempre una cantidad constante, cualquiera que sea la inclinacion con que el rayo penetre en el agua.

116. El ángulo señalado con una x sobre la superficie, se llama el ángulo de incidencia; el ángulo y debajo de la superficie se llama el ángulo de refraccion; y si tomamos por unidad el rádio de la circunferencia ABCD, la línea *mo* será el *seno* del ángulo de incidencia, mientras que la línea *np* será el *seno* del ángulo de refraccion.

117. De aquí la importantísima ley óptica siguiente: *El cociente del seno del ángulo de incidencia dividido por el seno del ángulo de refraccion, es una cantidad constante.* Cualquiera que sea la variacion que sufran estos ángulos, este lazo de relacion nunca se rompe. Si uno de ellos es aumentado ó disminuido, el otro disminuirá ó aumentará de modo que obedezca á esta ley. Así, por ejemplo, si la incidencia tuviera lugar segun las líneas de puntos m'E, la refraccion se verificaria segun En', pero la relacion entre $m'o'$ y $n'p'$ seria precisamente la misma que entre *mo* y *np*.

118. Esta cantidad constante de que hablamos se llama *índice* de refraccion.

119. Aquí es necesario añadir algunas palabras para la completa inteligencia del térmi-

no *seno* y la demostracion práctica de la ley de la refraccion. Cuando un número se divide por otro, el cociente se llama la *razon* de un número al otro. Así 1 dividido por 2 da $\frac{1}{2}$, y esta es la razon de 1 á 2. Tambien 2 dividido por 1 da 2, y esta es la razon de 2 á 1. Del mismo modo 12 dividido por 3 da 4, y esta es la razon de 12 á 3. Inversamente 3 dividido por 12 da $\frac{1}{4}$, que es la razon de 3 á 12.

120. En un triángulo rectángulo la razon de un lado á la hipotenusa se encuentra dividiendo el lado por la hipotenusa. *Esta razon es el seno del ángulo opuesto al lado*, cualesquiera que sean las dimensiones del triángulo, grandes ó pequeñas. Así en la figura 2.ª el seno del ángulo x en el triángulo rectángulo Eom, es efectivamente la razon de la línea om á la hipotenusa Em, que se expresan en forma de fraccion así: $\frac{om}{\mathrm{E}m}$. Del mismo modo el seno de y es la razon entre la línea np y la hipotenusa En, que expresada en forma de fraccion, es $\frac{np}{\mathrm{E}n}$. Estas fracciones son los senos de los ángulos respectivos, cual-

quiera que sea la longitud de las líneas E*m* y E*n*. En el caso particular á que nos hemos referido en el que estas líneas se consideran como unidades, las fracciones $\frac{mo}{1}$ y $\frac{np}{1}$, ó de otro modo *mo* y *np* vienen á ser, como se ha dicho, los senos de los ángulos respectivos. Ahora ya estamos preparados para comprender una demostracion sencilla, pero completa de la ley de la refraccion.

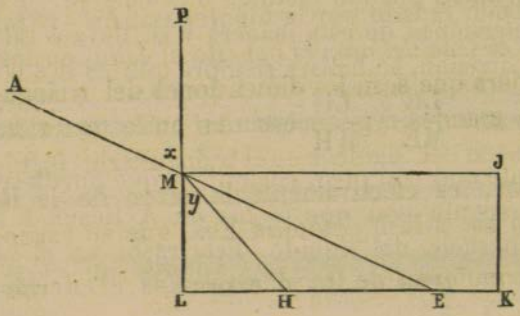

Fig. 3.

121. MLJK es un vaso con lados paralelos de cristal y un extremo opaco ML. La luz de una vela colocada en A, cae sobre el vaso, y el extremo de ML arrojará una som-

bra que llega hasta el punto E. Llénese de agua el vaso, y la sombra se retira á H, á causa de la refraccion de la luz en el punto en que penetra en el agua.

122. El ángulo comprendido entre ME y ML es igual al ángulo de incidencia x, y con arreglo á la definicion dada en el párrafo 120, $\frac{LM}{ME}$ es su seno, mientras que $\frac{LH}{MH}$ es el seno del ángulo de refraccion y. Todas estas líneas pueden medirse ó calcularse. Si se determinan de esta manera y se lleva á cabo la division, se hallará siempre que los dos cocientes $\frac{LE}{ME}$ y $\frac{LH}{MH}$ están en una razon constante uno con otro, cualquiera que pueda ser el ángulo con que la luz de A llegue á la superficie del líquido. Esta razon en el caso del agua es $\frac{4}{3}$, ó expresada en decimales, 1.333 (¹).

123. Cuando la luz pasa del aire al agua, el rayo refractado se desvia *hácia* la normal. Esto sucede generalmente, *aunque no siem-*

(¹) Mas exactamente 1.336.

pre, cuando la luz pasa de un medio mas raro á otro mas denso.

124. El principio de reversion que se observa en toda la óptica se manifiesta en este caso. Cuando el rayo pasa del agua al aire se desvia *de* la normal, sigue un camino exactamente inverso.

125. Si en lugar de agua empleamos vinagre, la razon será 1 344; con aguardiente será 1.360; con espíritu de vino rectificado, 1.372; con aceite de almendras ó de olivos, 1.470; con espíritu de trementina, 1.605; con aceite de anís, 1.538; con aceite de almendras amargas, 1.471; con bisulfuro de carbono, 1.678; con fósforo, 2.24.

126. Estos números expresan los índices de refraccion de las varias sustancias mencionadas; todas ellas refractan la luz mas fuertemente que el agua, y es digno de notarse que todas ellas, excepto el vinagre, son sustancias combustibles.

127. La observacion hecha por Newton de que teniendo en cuenta su densidad, las *sustancias untuosas* por regla general refractaban poderosamente la luz, combinada con

el hecho de que el índice de refraccion del diamante alcanzaba, segun su medida, la elevada cifra de 2.439, fué lo que le hizo presumir la posible naturaleza combustible del diamante. La atrevida profecía de Newton se ha verificado, y la combustion del diamante es uno de los experimentos mas comunes de la química moderna.

128. Es digno de notar aquí que la refraccion en el espíritu de trementina es mayor que en el agua, á pesar de que la densidad del espíritu es á la del agua como 874 es á 1.000. Un rayo que pase oblícuamente de la trementina al agua se desvia de la perpendicular, aunque pase de un medio mas raro á otro mas denso; mientras que un rayo de luz al pasar del agua á la trementina, se desvia *hácia* la perpendicular, aunque pase de un medio mas denso á otro mas raro. Se ve, pues, la necesidad de las palabras *aunque no siempre* empleadas en el párrafo 123.

129. Si un rayo de luz pasa á través de una plancha refractora con superficies paralelas, ó á través de un número cualquiera de planchas cuyas superficies sean paralelas, al

salir al medio de donde partió, vuelve á tomar su direccion primitiva. Esto es consecuencia del principio de reversion de que ya hemos hecho mencion.

130. Al atravesar un cuerpo refractor ó un número cualquiera de cuerpos refractores, la luz recorre su camino en el *mínimum de tiempo*, es decir, que, dada la velocidad de la luz en los varios medios, la direccion tomada por el rayo, ó en otras palabras, la direccion que le impone la refraccion le permite recorrer su camino de la manera mas rápida posible.

131. La refraccion hace que el agua aparezca con menos profundidad y las planchas transparentes con menos grueso del que realmente tienen. La elevacion de la superficie inferior de un cubo de cristal es, por esta causa, muy notable.

132. Para entender por qué el agua aparece con menos profundidad, fíjese la atencion sobre un punto del fondo y supóngase que la visual desde este punto al ojo sea perpendicular á la superficie del agua. De todos los rayos que son emitidos por el punto, el

normal es el único que llega al ojo sin refraccion. Los que están próximos á la normal, al salir del agua se desvian cada vez más de aquella, por efecto de la refraccion. Prolongando estos rayos divergentes en sentido contrario, se cortan en un punto que está mas arriba del fondo real, y en este punto es donde se ve el fondo.

133. Esta menor profundidad aparente se aumenta mirando al agua oblícuamente.

134. A consecuencia de esta aparente elevacion del fondo, un baston recto metido en el agua aparece doblado en la superficie del agua desviándose de la normal.

Nótese la diferencia entre lo que sucede con el baston y con el haz luminoso. Este al penetrar en el agua se desvia *hácia* la normal.

135. Esta elevacion aparente del fondo, cuando se echa agua en una vasija, hace que se haga visible un objeto colocado en el fondo, que no se veia cuando la vasija estaba vacía.

OPACIDAD DE LAS MEZCLAS TRANSPARENTES.

136. La reflexion siempre acompaña á la refraccion, y si desaparece la una, desaparecerá tambien la otra. Un cuerpo sólido sumergido en un líquido que tenga el mismo índice de refraccion que el sólido, desaparece y no se le ve mas que si fuera una porcion del mismo líquido de igual tamaño.

137. Pero al pasar de un medio á otro de distinto índice de refraccion, la luz siempre es reflejada, y esta reflexion puede repetirse tantas veces que haga perfectamente impermeable á la luz la mezcla de dos sustancias transparentes. La frecuencia de las reflexiones en la superficie de contacto del aire y el agua es lo que hace que la espuma sea opaca. Las nubes mas negras deben sus tintas á las repetidas reflexiones que disminuyen su luz *trasmitida*. De aquí tambien su blancura por efecto de la luz reflejada. A una causa semejante se debe la blancura y falta de transparencia de la sal comun y en general de los cuerpos transparentes reducidos á polvo. Las partículas individuales trasmiten libremente la luz;

pero las reflexiones en su superficie son tan numerosas que la luz se consume en repercusiones antes de poder penetrar en el polvo á una profundidad sensible.

138. La blancura y opacidad del papel de escribir se deben principalmente á la misma causa. Es una red de fibras transparentes que no están en contacto óptico y que interceptan la luz reflejándola con repeticion.

139. Pero si los intersticios entre las fibras se llenan con un cuerpo cuyo índice de refraccion sea el mismo de las fibras, se destruye la reflexion en las superficies que los limitan, y el papel se hace transparente. Este es el fundamento del papel de calcar que usan los dibujantes. Está saturado con un aceite, y á través de él pueden copiarse fácilmente las líneas de los mapas y dibujos. El agua aumenta la transparencia del papel, del mismo modo que oscurece una tohalla blanca; pero su índice de refraccion es demasiado bajo para poder dar á ninguno de ellos una gran transparencia. Convierte, sin embargo, en traslúcidos ciertos minerales que cuando están secos son opacos.

140. Cuanto mayor es el índice de refraccion, mayor es la reflexion. Por ejemplo, el índice de refraccion del agua, es 1.336; el del cristal 1.5. De aquí la diferente cantidad de luz reflejada por el agua y el cristal cuando la incidencia es normal, como se dijo en el párrafo 60. Su enorme potencia refractora es la que da al diamante su brillo.

REFLEXION TOTAL.

Léanse los párrafos 123 y 124, y continúese aquí.

141. Cuando el ángulo de incidencia de la luz, al pasar del aire al agua, es precisamente de 90°, es decir, cuando el rayo antes de entrar en el agua casi toca á su superficie, el ángulo de refraccion es de 48 $\frac{1}{2}$°. Inversamente, cuando un rayo al pasar del agua al aire choque á la superficie bajo un ángulo de 48 $\frac{1}{2}$°, al salir tocará casi á la superficie del agua.

142. Si el ángulo que el rayo forma en el agua con la normal fuese mayor de 48 $\frac{1}{2}$° no saldrá del agua, será *reflejado totalmente* en su superficie.

143. El ángulo que señala el límite donde

empieza la reflexion total, se llama el *ángulo límite* del medio. Para el agua, este ángulo es de 48°,27′, para el flintglass es de 38°,41′, mientras que para el diamante es de 23°,42′.

144. Compréndese bien que una reunion de rayos de luz que llenen un espacio angular de 90° antes de entrar en el agua, son comprimidos en un espacio angular de 48°,27′ dentro del agua, y que en el caso del diamante la condensacion es de 90° á 23°,42′.

145. Para un ojo que esté dentro de agua tranquila sus márgenes deben aparecerle elevadas. Un pez, por ejemplo, ve los objetos como á través de una abertura circular de cerca de 97° (dos veces 48°,27′) sobre su cabeza. En este espacio serán visibles todos los objetos hasta el horizonte, pero los próximos á este aparecerán dislocados y contraidos en sus dimensiones, especialmente en altura. Mas allá de los límites de este círculo se verá el fondo del agua reflejado totalmente y, por consiguiente, representado con la misma claridad que si se mirase por vision directa [1].

[1] Sir John Herschel.

146. Un efecto semejante que tiene lugar en la atmósfera (cuando no la cruzan nubes), da á la luna y al sol, al salir y al ponerse, una apariencia ligeramente achatada.

147. Experiencias prácticas. Se coloca una moneda en un vaso de mesa, se cubre con una pulgada próximamente de agua y elévase el vaso hasta obtener la oblicuidad necesaria de la incidencia en la superficie. Mirando hácia arriba á la superficie, se verá allí brillando la imágen de la moneda, y como la reflexion es total, la imágen será tan brillante como la misma moneda. Una cuchara metida en debida forma en el vaso tambien produce una imágen debida á la reflexion total.

148. Sumérjase el extremo cerrado de un tubo-probeta en un vaso de agua. Inclínese el tubo hasta que la luz horizontal que reciba sea reflejada totalmente hácia arriba. Mirando de arriba abajo, el tubo aparece brillante como la plata bruñida. Echando un poco de agua en el tubo, á medida que sube el nivel, anula la reflexion total y con ella el brillo, dejando una zona brillante que va disminuyendo y desaparece completamente cuan-

do el nivel del agua en el tubo se iguala ó se eleva sobre el del agua en que este está sumergido. Cualquier tubo cerrado para que no pueda entrar el agua, sirve para esta experiencia tan bella como instructiva.

149. Si un rayo de luz choca normalmente contra la cara de un prisma rectángulo isósceles de cristal, penetrará el cristal y chocará en la hipotenusa con un ángulo de 45°. Este ángulo excede al límite del cristal; por consiguiente, el rayo será reflejado, y con arreglo á la ley mencionada en el párrafo 54, el rayo directo y el reflejado se cortarán en ángulo recto. Cuando en los instrumentos ópticos se necesita un cambio de direccion perpendicular, se emplea generalmente un prisma isósceles rectángulo.

150. Cuando el rayo éntre en el prisma paralelo á la hipotenusa, será refractado y chocará en esta con un ángulo mayor que el ángulo límite. Por consiguiente, será reflejado totalmente. Si el objeto, en lugar de ser un punto, tuviese un tamaño sensible, los rayos de sus extremidades se cortarán dentro del prisma, y de aquí que el objeto aparece-

rá *invertido* mirándolo á través del prisma. Dove ha aplicado el prisma de inversion para rectificar las imágenes invertidas del telescopio astronómico.

151. El miraje del desierto y otras apariciones fantasmagóricas de la atmósfera son debidos en parte á la reflexion total. Cuando el sol calienta un espacio grande de arena, la capa de aire en contacto con el suelo se hace mas ligera que el resto del aire que la cubre. Los rayos que proceden de un objeto distante, un árbol, por ejemplo, chocando con mucha oblicuidad contra esta capa, pueden ser reflejados totalmente, presentando imágenes semejantes á las producidas en la superficie del agua. Los soldados sedientos del ejército francés en Egipto fueron atormentados con estas apariencias engañosas.

152. Los gases como los líquidos y los sólidos pueden refractar y reflejar la luz, pero á causa de la pequeñez de sus índices de refraccion, tanto esta como la reflexion son muy débiles. No obstante, la refraccion atmosférica tiene que ser tomada en cuenta por el astrónomo y por los que se ocupan en trabajos

trigonométricos. La refraccion de la atmósfera hace que se vea el sol antes de que salga y despues de haberse puesto realmente.

153. La oscilacion de los objetos que se ven á través del aire que se eleva sobre una superficie caliente, es debida á la refraccion irregular que incesantemente altera la direccion de los rayos de luz. En el aire esta alteracion de los rayos nunca deja de existir enteramente y produce á menudo grandes molestias al astrónomo que necesita para sus observaciones una atmósfera homogénea.

154. La llama de una vela ó de un mechero de gas y la columna de aire caliente que esté sobre la llama; el aire que se eleva de un hierro candente; el derramar un gas pesado, como, por ejemplo, ácido carbónico, sobre el aire, y el desprendimiento y ascension de uno mas ligero, como el hidrógeno, son fenómenos que pueden revelarse por su accion sobre una luz de suficiente intensidad. Los gases transparentes interpuestos entre esta luz y una pantalla blanca se ven elevarse en esta á manera de humo, por efecto de la refraccion.

LENTES.

155. Un lente en óptica es un pedazo de cualquier sustancia refractora, como el cristal, limitado por superficies curvas. Si una de las superficies es esférica se llama lente esférico.

156. Los lentes se dividen en dos clases, una los que convierten en convergentes los rayos paralelos, y otra que los convierte en divergentes. Cada una de estas clases comprende tres especies que reciben los nombres siguientes:

LENTES CONVERGENTES.

1.° Bi-convexos, con ambas superficies convexas.

2.° Plano-convexos, los que tienen una superficie convexa y otra plana.

3.° Cóncavo-convexos (Meniscos), con una superficie cóncava y otra convexa, siendo esta última la mas encorvada.

LENTES DIVERGENTES.

1.° Bi-cóncavos, los que tienen dos superficies cóncavas.

2.° Plano-cóncavos, con una superficie plana y otra cóncava.

3.° Convexo-cóncavos, con una superficie convexa y otra cóncava, siendo esta la de mayor curvatura.

157. La línea recta que pasa por el centro del lente y es normal á sus dos superficies curvas es el eje principal del lente.

158. Los rayos de un haz luminoso que choca sobre un lente convexo paralelamente al eje vienen á reunirse en un punto del eje detrás del lente. Este punto es el foco principal del lente. Como siempre el foco principal es el foco de los rayos paralelos.

159. Los rayos de un punto luminoso colocado mas allá del foco, se interceptan en un punto del eje, al lado opuesto de aquel, y en el punto de interseccion se forma una imágen del punto. A medida que el punto se acerca al foco, su imágen se retira, y cuando el punto llega á estar en el foco principal, su

imágen se encuentra á una distancia infinita.

160. Si pasando del foco principal, el punto se coloca entre aquel y el lente, los rayos despues de atravesar el lente serán todavía divergentes. Prolongándolos hácia atrás se cortarán por el lado del lente donde está el punto luminoso. En este caso el foco es *virtual*. Un cuerpo de tamaño sensible colocado entre el foco y el lente dará lugar á una imágen virtual.

161. Cuando se coloca un cuerpo de dimensiones sensibles en cualquier punto mas allá del foco principal, se forma una imágen real en el aire detrás del lente. Esta imágen puede ser mayor ó menor que el objeto en tamaño, pero estará siempre invertida.

162. Las posiciones relativas del objeto y su imágen son como antes convertibles recíprocamente.

163. En los lentes cóncavos las imágenes son siempre virtuales.

164. Un lente esférico no permite á todos los rayos que chocan en él, coincidir en el mismo foco. Los rayos que lo atraviesan cerca de la circunferencia sufren una refrac-

cion mayor que los que pasan por la parte central y se cortan mas pronto. Cuando se necesitan imágenes bien definidas se acostumbra por esta causa emplear únicamente los rayos centrales aunque á expensas de la iluminacion.

165. Esta diferencia en la distancia focal entre los rayos centrales y los de la circunferencia, es lo que se llama *aberracion esférica* del lente. Un lente cuya curvatura sea tal, que haga coincidir todos los rayos en el mismo foco, se llama *aplanático*; los lentes esféricos no pueden ser aplanáticos.

166. Como en el caso de los espejos esféricos los lentes esféricos tienen sus curvas cáusticas y superficies (diacáusticas) formadas por la interseccion de los rayos refractados.

DE LA VISION Y EL OJO.

167. El ojo humano es un lente compuesto que consta de tres partes principales: el humor acuoso, el lente cristalino y el humor vítreo.

168. El humor acuoso está contenido en el

exterior del ojo por la *córnea*, que es una cápsula córnea trasparente semejante en la forma al cristal de un reloj. Detrás del humor acuoso é inmediatamente delante del lente cristalino está el *íris* que rodea á la *pupila*. Despues siguen el lente y el humor vítreo, el último de los cuales constituye la masa principal del ojo. El diámetro medio del ojo humano es de 10,9 líneas.

169. El nervio óptico que entra en el ojo por detrás se divide en una multitud de filamentos que se entrelazan entre sí para formar la retina, malla delicada extendida como una pantalla detrás del ojo. La retina descansa sobre un pigmento negro que reduce al mínimum toda reflexion interior.

170. Por medio del íris puede hacerse variar entre ciertos límites el tamaño de la pupila. Cuando la luz es débil, la pupila se dilata; cuando es intensa la pupila se contrae; de este modo se regula hasta cierto punto la cantidad de luz que admite el ojo. Tambien se contrae la pupila cuando se fija la vista sobre un objeto próximo, y se dilata cuando se fija en un objeto distante.

171. La pupila parece negra, en parte por efecto de la capa negra interior, pero principalmente por otra causa. Si pudiéramos iluminar la retina y ver al mismo tiempo el sitio iluminado, la pupila apareceria brillante. Pero el principio de la reversion de que hemos hablado á menudo, se pone en accion en este caso. La luz del punto iluminado, al volver á salir, sigue su primer curso, y finalmente va á parar en el orígen de la iluminacion; de aquí que para percibir los rayos de retorno, el ojo del observador tendria que estar colocado entre dicho orígen y la retina. Pero en esta posicion cortaria el paso á la luz. Si se hace llegar la luz al ojo por medio de un espejo que tenga un taladro pequeño ó en el que se haya quitado un poco de amalgama, entonces el ojo del observador colocado detrás del espejo y mirando por el orificio, puede ver la retina iluminada. La pupila en estas circunstancias brilla como un carbon encendido. Este es el principio en que se funda el *oftalmóscopo* (Augenspiegel, Helmholtz), instrumento por medio del cual puede escudriñarse el interior del ojo y no-

tarse su estado de salud ó de enfermedad.

172. En los albinos y en los conejos blancos falta el pigmento negro, y la pupila se ve roja á causa de la luz que pasa á través de la *esclerótica* ó blanco del ojo: interceptando esta luz, la pupila de los albinos parece negra. En algunos animales el pigmento negro está reemplazado por una membrana reflectora, el *tapetum*. La luz reflejada por el tapetum, es lo que hace brillar los ojos de los gatos en una oscuridad parcial. La luz en este caso no es intensa, porque cuando la oscuridad es total, los ojos de los gatos no brillan.

173. En la cámara oscura de los fotógrafos las imágenes de los objetos exteriores formadas por un lente convexo, se reciben sobre una placa de cristal raspado, separando ó acercando el lente hasta que la imágen, sobre el cristal resulta bien definida.

174. El ojo es una cámara oscura, con su lente refractor y en la que la retina hace el mismo papel que la placa de cristal raspado en la cámara ordinaria. Para que la vision sea perfectamente distinta, es indispensable que la imágen que se forma en la retina esté

bien definida; en otras palabras, que todos los rayos que parten de un punto del objeto que se mira, vayan á coincidir en un *punto* de la retina.

175. La imágen sobre la retina es *invertida*.

ADAPTACION DEL OJO: USO DE LOS ANTEOJOS.

176. Si se miran las letras de un libro colocado á cierta distancia del ojo á través de un velo de gasa colocado mas cerca, se notará, que cuando se distinguen claramente las letras, no se distingue bien el velo; inversamente, si se ve distintamente el velo, no se ven claramente las letras. Esto demuestra que las imágenes de los objetos á distintas distancias del ojo, no pueden definirse al mismo tiempo en la retina.

177. Si el ojo fuese una masa rígida como un lente de cristal incapaz de cambiar de forma, la vision distinta solo seria posible á una distancia determinada. Sabemos, no obstante, que el ojo tiene la facultad de adaptarse á diferentes distancias. Esta adaptacion se efectúa no impulsando hácia adelante ó hácia atrás la

parte exterior del ojo, sino cambiando la curvatura del lente cristalino.

178. La imágen de una vela reflejada por la superficie exterior ó interior del lente, se ve que disminuye cuando el ojo cambia de la vision distante á la próxima, demostrando de esta manera que la curvatura del lente es mayor para la vision próxima que para la distante.

179. La principal refraccion que sufren los rayos de luz al atravesar el ojo, tiene lugar en la superficie de la córnea, donde pasan del aire á un medio mucho mas denso. La refraccion en la córnea por sí sola haria que los rayos se cruzaran en un punto colocado próximamente media pulgada detras de la retina. La convergencia es aumentada por el lente cristalino que adelanta el punto de interseccion hasta la misma retina.

180. Se llama eje del ojo la línea que va por el centro de la córnea y del ojo á la retina. La longitud de este eje es á veces demasiado pequeña aun en los jóvenes, ó en otras palabras, la retina está algunas veces demasiado cerca de la córnea; de modo que la

parte refractora del órgano no puede dar tal convergencia á los rayos que proceden de un punto luminoso que vengan á reunirse en un punto sobre la retina. En los viejos, del mismo modo, las superficies refractoras del ojo se encuentran ligeramente achatadas; la facultad de adaptacion del lente se disminuye, y de este modo el ojo llega á no poder refractar los rayos lo suficiente. En ambos casos la imágen se formaria detrás de la retina y no *sobre* ella, y por consiguiente la vision no seria distinta.

181. Este defecto se remedia colocando el objeto distante del ojo, para disminuir la divergencia de los rayos, ó colocando delante del ojo un lente convexo que ayude al ojo á producir la convergencia necesaria. Este es el objeto de los anteojos.

182. Otras veces el ojo es demasiado largo en direccion de su eje, ó es demasiada la curvatura de las superficies refractoras. En cualquiera de estos casos los rayos que atraviesan la pupila convergen de modo que se cortan antes de llegar á la retina. Este defecto se remedia, ó poniendo el objeto muy cerca

del ojo para aumentar la divergencia de los rayos, atrasando así el punto de su interseccion, ó colocando delante del ojo un lente cóncavo que produzca la divergencia necesaria.

183. El ojo no se ajusta al mismo tiempo para los objetos verticales y horizontales igualmente distantes. La distancia de la vision distinta es mayor para las líneas horizontales que para las verticales. Si se dibujan con tinta dos líneas perpendiculares, la una vertical y la otra horizontal; cuando se ve una de ellas negra y viva, la otra aparece poco distinta como si estuviera dibujada con tinta mas clara. Si se adapta el ojo á esta última, la primera aparece entonces poco distinta. Esta diferencia en la curvatura del ojo en dos direcciones puede llegar algunas veces á ser tan grande que sea necesario para corregirla el uso de lentes cilíndricos.

EL PUNCTUM COECUM.

184. El sitio por donde el nervio óptico entra en el ojo y desde el cual se ramifica

para formar la red que constituye la retina, es insensible á la accion de la luz. Un objeto cuya imágen se forma sobre este sitio no se ve. Puede hacerse que la imágen de una esfera de reloj, de una cabeza humana ó de la luna, resulte sobre este «punto ciego,» y cuando esto sucede, el objeto deja de ser visible.

185. Para demostrar este punto se procede del modo siguiente: Se pegan dos obleas blancas sobre papel negro, ó dos negras sobre papel blanco con un intervalo entre sí de 3 pulgadas. Se coloca el ojo derecho á la altura de 10 ú 11 pulgadas exactamente en la vertical de la oblea de la izquierda, de modo que la línea que une los dos ojos sea paralela á la que une las dos obleas. Cerrando el ojo izquierdo y mirando fijamente con el derecho á la oblea de la izquierda, la de la derecha deja de verse. En esta posicion la imágen se forma sobre el punto ciego del ojo derecho. Si se vuelve el ojo á derecha é izquierda lo mas mínimo ó se aumenta ó disminuye su distancia al papel, inmediatamente se ve la oblea. Conservando estas proporcio-

nes respecto al tamaño y la distancia, pueden formarse sobre el punto ciego imágenes de objetos de dimensiones mucho mayores que la oblea, y perderse de vista.

PERSISTENCIA DE LAS IMPRESIONES

186. La impresion hecha una vez sobre la retina no desaparece instantáneamente. La chispa eléctrica es sensiblemente instantánea; pero la impresion que hace en el ojo permanece por algun tiempo despues de que ha pasado la chispa. La duracion de esta persistencia varía en cada indivíduo y llega á ser una fraccion sensible de segundo.

187. Por lo tanto, si una série de chispas se suceden unas á otras con intervalos menores que el tiempo que dure esta impresion, las imágenes se unirán para formar una luz *contínua*. Si á un punto luminoso se le hace describir un círculo en un tiempo menor que dicho intervalo, el círculo aparecerá como una curva cerrada luminosa y contínua. Por esta causa tambien los rayos de una rueda que gira con gran rapidez, se confunden para ar-

rojar una sombra unida. El fotómetro de Wheatstone se funda en esta persistencia. Así se explica tambien la accion de ciertos instrumentos en los cuales una série de objetos en posiciones diferentes que sucesiva y rápidamente se van presentando delante del ojo, producen el efecto del *movimiento*.

188. Un chorro de agua cuando sale de un orificio abierto en el fondo de una vasija se divide en dos partes distintas; la una, diáfana y tranquila, próxima al orificio, y la otra, turbia ó agitada, mas abajo. Ambas partes del chorro parecen igualmente contínuas; pero cuando en un cuarto oscuro se ilumina el chorro por medio de la chispa eléctrica, toda la parte turbia aparece como una cadena de gotas separadas, que permanecen en perfecta quietud. La rápida sucesion es la que produce la impresion de continuidad. La bala de cañon que lleve mayor velocidad, iluminada por un relámpago, se verá durante una fraccion de segundo perfectamente inmóvil en el aire.

189. El ojo no es en manera alguna un instrumento óptico perfecto. Está sujeto á la

aberracion esférica, rodeando siempre á las imágenes definidas de los objetos luminosos sobre la retina cierta luz dispersa, mas ó menos fuerte. Esta luminosidad hace aumentar sensiblemente el tamaño de la imágen del objeto; pero con la iluminacion ordinaria la luz dispersada es demasiado débil para hacerse notar. Sin embargo, cuando los cuerpos están intensamente iluminados y mas especialmente cuando son pequeños, de modo que una pequeña extension de sus imágenes sobre la retina se hace sensible, aparecen los objetos mayores de lo que son realmente, por ejemplo, un alambre de platino elevado al calor blanco por una corriente voltáica se ve con un diámetro aparente enormemente mayor. Del mismo modo los cuartos de la luna parecen como pertenecientes á una esfera mayor que la masa mas opaca del satélite que abrazan parcialmente. Por esto tambien á distancia considerable, los rayos que despiden varias lámparas y reflectores separados, en los faros, se sobreponen unos á otros y se reunen para formar una sola luz. Las partículas de carbon, calentadas hasta el blanco en una

llama, describen *rayas* de luz á causa de su rápido movimiento ascensional. Estas *rayas* las *ensancha* el ojo, y la llama adquiere una *solidez* aparente, mayor de la que realmente le corresponde.

189*a*. Este aumento del verdadero tamaño de la imágen óptica, se llama *irradiacion*.

CUERPOS QUE SE VEN DENTRO DEL OJO.

190. Casi todos los ojos contienen distribuidos en sus humores, cuerpos mas ó menos opacos. De esta clase son los llamados *muscæ volitantes* como tambien los puntos negros, líneas serpenteadas, bolitas y anillos que se ven con admiracion en muchos ojos. Si el área de la pupila se contrajera hasta tener el tamaño de un punto, estos cuerpecillos podrian producir considerable molestia; pero á causa del diámetro de la pupila, las sombras que en otro caso arrojarian estos cuerpos sobre la retina, prácticamente quedan borradas, excepto cuando están muy próximos á la parte posterior del ojo (¹). Basta mirar hácia el

(¹) Véanse los párrafos 18 y 19.

firmamento á través del agujero abierto por un alfiler, para que estas sombras se definan mejor sobre la retina.

191. Las venas y arterias de la misma retina arrojan tambien sus sombras sobre la superficie interior de esta; pero los espacios cubiertos por ellas, adquieren pronto una sensibilidad para la luz, que compensa la menor cantidad de luz que reciben. Así es que en las circunstancias ordinarias no se ven estas sombras. Pero si se las trasporta á una parte menos sensible de la retina, se hacen distintamente visibles las imágenes de aquellos vasos.

192. El mejor modo de lograr la trasferencia de estas sombras, es concentrar en un cuarto oscuro sobre el blanco del ojo por medio de un lente de foco corto, una imágen reducida del sol ó la luz eléctrica. Hay que tener cuidado de que no pase el haz por la pupila. Moviendo de una parte á otra el lente, se hace que las sombras se trasladen á distintos puntos de la retina y se ve proyectada sobre la oscuridad en frente del ojo una imágen perfectamente definida de las venas y arterias.

193. Mirando hácia un espacio oscuro y moviendo una luz al lado del ojo de modo que los rayos entren en la pupila muy oblícuamente, se obtiene tambien la sombra de los vasos retinales. En algunos ojos la prontitud y vigor con que se presenta la imágen espectral son extraordinarios; otros encuentran muy difícil el obtener este efecto.

194. Finalmente, puede obtenerse una imágen muy delicada de los vasos mirando á un cielo brillante á través del agujero que abra un alfiler y moviendo la abertura á un lado y otro.

EL ESTEREÓSCOPO.

195. Mírese con un ojo al canto de la mano de modo que el dedo mas próximo cubra todos los demás. Abrase entonces el otro ojo y se verán los demás dedos recortados. Esto demuestra que las imágenes de la mano en los dos ojos son diferentes.

196. Estas dos imágenes se proyectan sobre las dos retinas: si por un medio cualquiera pudieramos combinar dos dibujos ejecutados sobre una superficie plana, de modo

que produjesen dentro de los dos ojos, dos dibujos semejantes á las dos imágenes de la mano sólida, obtendriamos la impresion del relieve. Esto se consigue por medio del estereóscopo.

197. La primera forma de este instrumento fué inventada por sir Charles Wheatstone. Tomó dibujos de objetos sólidos segun se veian en los dos ojos y miraba á las imágenes de estos dibujos en dos espejos planos. Cada ojo miraba á la imágen que le correspondia, y los espejos estaban dispuestos de manera que las imágenes se sobreponian como si procediesen de un mismo objeto. Por medio de esta combinacion de sus dos proyecciones planas, el objeto dibujado se le hacia resaltar como si fuera sólido.

198. Al mirar y combinar dos dibujos de esta especie, los ojos reciben la misma impresion y emplean el mismo procedimiento que cuando miran al objeto real. Vemos distintamente y á la vez únicamente un punto del objeto. Si los diferentes puntos de un objeto están á diferentes distancias de los ojos, el ver los puntos mas próximos distintamen-

te, exige una convergencia de los ejes de los ojos, mayor que el ver los mas distantes. Ahora bien, además de la identidad de las imágenes retinales de los dibujos estereoscópicos con las del objeto real, los ojos para hacer coincidir los puntos correspondientes de ambos dibujos, tienen que pasar por las mismas variaciones de convergencia que son necesarias para ver distintamente los varios puntos del objeto mismo. De aquí la impresion del relieve producida por la combinacion de tales dibujos.

199. Midiendo la distancia entre *dos pares* de puntos que cuando los reune el estereóscopo, presentan dos *puntos sencillos* á distancias diferentes de los ojos, se ve que la distancia entre un *par* es mayor que entre el otro par de puntos. Por consiguiente, para combinar los dos pares de puntos, necesitan los ojos distintos grados de convergencia. Debe observarse que la coincidencia producida en un momento dado por el estereóscopo es solo *parcial*. Si un par de puntos correspondientes se ve como uno solo, los demas deben aparecer dobles. Esto mismo sucede

cuando se mira á un cuerpo con los dos ojos; de los puntos del cuerpo que estan á diferentes distancias de los ojos, únicamente uno se ve sin duplicacion á la vez.

200. La impresion del relieve puede producirse de una manera admirable, sin necesidad de estereóscopo. Es sumamente fácil del modo siguiente: Se toman dos dibujos ó proyecciones, como se llaman, de un cono; la una segun la ve el ojo derecho, y la otra segun la ve el izquierdo. Manteniéndolas á alguna distancia de los ojos, diríjase el ojo derecho al dibujo de la izquierda y el izquierdo al de la derecha. Las visuales de los dos ojos se cortan en este caso, y es fácil, despues de algunos ensayos colocando la punta de un lápiz en frente de los ojos, hacer coincidir dos puntos correspondientes de ambas proyecciones. En el momento en que coinciden, las dos proyecciones combinadas aparecen como un solo cuerpo sólido, suspendido en el aire en el punto de interseccion de las visuales. Del carácter del dibujo depende que se vea el interior ó el exterior del cono, y que la base ó la cúspide aparezcan mas cerca de los ojos.

Para esta experiencia es mejor que los dibujos solo marquen el perímetro, y pueden ser mucho mayores que las vistas estereoscópicas ordinarias.

Nótese que en este caso tambien los diferentes pares de puntos correspondientes están separados por distancias diferentes. Dos puntos correspondientes, por ejemplo, en el vértice no están separados por la misma distancia que dos puntos de la base.

201. El primer instrumento inventado por Wheatstone se llamó el estereóscopo de reflexion; pero los métodos de conseguir la superposicion de las dos proyecciones para producir efectos estereoscópicos, son casi innumerables. El instrumento mas conocido del publico es el estereóscopo lenticular de sir David Brewster. En él se combinan las proyecciones por medio de dos medios lentes cuyos filos están vueltos hácia dentro. El estereóscopo lenticular tiene tambien la propiedad de aumentar el tamaño de los objetos (¹).

(¹) En el *Diario de la Sociedad Fotográfica*, vol. III, páginas 96, 116 y 167, se encontrarán noticias mas claras y completas respecto al estereóscopo.

202. Se ha dicho en el párrafo 198 que para obtener la vision distinta de un objeto próximo, es necesaria una convergencia mayor de las visuales de los dos ojos que para obtener la de un objeto lejano. Por medio de un instrumento en cuya composicion entran dos prismas rectangulares (¹), puede hacerse que los rayos procedentes de dos puntos se crucen antes de penetrar en el ojo, haciendo en este caso la convergencia mayor para el objeto distante que para el próximo. La consecuencia de esto es que el objeto distante parece próximo, y el próximo lejano. En este principio se funda el pseudóscopo de Wheatstone. Por medio de este instrumento, las superficies convexas aparecen cóncavas y las cóncavas convexas. El interior de un sombrero ó de una taza se convierte en exterior, y un globo se ve como si fuera una superficie esférica cóncava.

(¹) Véase el párrafo 150.

NATURALEZA DE LA LUZ.—TEORÍA FÍSICA DE LA REFLEXION Y REFRACCION.

Tiempo es ya de cumplir la promesa de nuestro primer párrafo, y de que esta *cosa* que excita la sensacion de luz sea examinada en adelante mas de cerca.

203. Toda sensacion corresponde á un movimiento producido en nuestros nervios. En el sentido del tacto los nervios se ponen en movimiento por el contacto del cuerpo que produce la sensacion; en el olfato son conmovidos por las partículas infinitesimales del cuerpo oloroso; en el oido se conmueven por las vibraciones del aire.

TEORÍA DE LA EMISION.

204. Newton supuso que la luz consistia en partículas pequeñísimas, despedidas con rapidez inconcebible por los cuerpos luminosos y suficientemente ténues para pasar por los poros de los medios transparentes. Atravesando los humores del ojo, se suponia que estas partículas excitaban la vision,

chocando con el nervio óptico detrás del ojo.

205. Esta es la teoría de la emision ó teoría corpuscular de la luz.

206. Teniendo en cuenta la velocidad de la luz, las partículas, si es que existen, tienen que ser inconcebiblemente pequeñas; porque si tuvieran el mas mínimo peso, destruirian infaliblemente un órgano tan delicado como el ojo. Un pedacito de materia ordinaria de peso de un grano que se moviese, con la velocidad de la luz, llevaria la misma fuerza viva que una bala de cañon de 150 libras, animada de una velocidad de 1.000 piés por segundo.

207. Suponiendo que existian estas partículas, se han proyectado millones de ellas concentradas por medio de lentes y espejos contra una balanza suspendida por un solo hilo de araña; este hilo, á pesar de haberlo retorcido 18.000 veces, no manifestaba tendencia á destorcerse; por consiguiente, estaba completamente desprovisto de fuerza de torsion. A pesar de esto en ningun caso se observó el menor movimiento debido al impacto de las partículas (¹).

(¹) Bennet, *Philosophical Transactions*, 1792.

208. Si la luz está constituida por partículas diminutas, deben ser proyectadas por todos los cuerpos celestes con igual velocidad. Esto parece sumamente inverosímil cuando se toman en cuenta la fuerzas de gravitacion, tan diferentes que corresponden á las diferencias en sus masas. La atraccion de masas tan diversas detendria, segun toda probabilidad, á las partículas con diferentes grados de fuerza.

209. Si, por ejemplo, una estrella fija de la misma densidad que el sol tuviese un diámetro 200 veces mayor, su atraccion, suponiendo que la luz estuviera sujeta á las leyes de la materia ordinaria, seria suficiente para detener completamente las partículas de luz que de ella se desprendieran. Las masas mas pequeñas ejercerian una fuerza retardatriz proporcionada; y por consiguiente, la luz emitida por distintos cuerpos, se moveria con distintas velocidades. El que esto no suceda y que la luz, cualquiera que sea su origen, se mueva siempre con la misma velocidad, hace probable que no esté constituida por partículas proyectadas de esta manera.

Pero despues de conocida la explicacion que da la teoría de la emision de los fenómenos de la reflexion y refraccion, puede hacérsele una objecion mas definida y formidable.

210. En la reflexion directa, segun la teoría de la emision, las partículas de luz son detenidas primero en su carrera por una fuerza repelente ejercida por el cuerpo reflejante, y despues despedidas en direccion contraria por la misma fuerza.

211. Esta repulsion es, no obstante, *selectiva*. La sustancia reflejante separa una porcion del grupo de partículas que componen un haz luminoso y las rechaza; pero atrae las partículas restantes del grupo y las trasmite.

212. Cuando una partícula ligera se acerca oblícuamente á una superficie refractora, si la partícula es de las atraidas, es llevada hácia la superficie á la manera que un proyectil es atraido por la tierra. Así se explica la refraccion. Del mismo modo que el proyectil, la velocidad de la ligera partícula se aumenta durante su derivacion; entra en el medio refractor con esta velocidad aumentada y una vez dentro del medio, neutralizándose las

atracciones delante y detrás de la partícula, se mantiene constante la velocidad aumentada.

213. De este modo es consecuencia ineludible de la teoría de Newton que la inclinacion de un rayo hácia la vertical va acompañada de un aumento de velocidad; que la luz en el agua se mueve con mas rapidez que en el aire, en el cristal mas rápidamente que en el agua, y en el diamante mas rápidamente que en el cristal. En una palabra, que cuanto mayor es el índice de refraccion, mayor es la velocidad de la luz.

214. De esta manera se propuso una prueba decisiva de la teoría de la emision, y sometida á ella ha sucumbido; porque se ha demostrado, por medio de las experiencias mas rigorosas, que la velocidad de la luz *disminuye* á medida que aumenta el índice de refraccion. La teoría, sin embargo, habia cedido á los ataques que se le habian dirigido mucho antes de que se hiciese este experimento especial.

TEORÍA DE LAS ONDULACIONES.

215. Los primeros opositores á la teoría de la emision fueron el célebre astrónomo Huygens y el no menos célebre matemático Euler, los cuales sostuvieron ambos, que la luz, como el sonido, era producto de un movimiento ondulante. Laplace, Malus, Biot y Brewster apoyaron á Newton, y la teoría de la emision se sostuvo hasta que fué finalmente echada abajo por los trabajos de Thomas Young (¹) y Augustin Fresnel.

116. Estos dos eminentes filósofos, mien-

(¹) El doctor Young fué nombrado Profesor de Física del Instituto Real, el 3 de agosto de 1801. De una lápida de mármol que existe en la iglesia de Farnborough, cerca de Bromley, Kent, copió el 11 de abril la siguiente inscripcion: «Próximo á este lugar, están depositados los restos de Thomas Young, M. D., miembro y Secretario para el extranjero de la Sociedad Real, miembro del Instituto nacional de Francia, hombre igualmente eminente en casi todos los ramos del saber humano, cuyos muchos descubrimientos ensancharon los límites de las ciencias naturales, y que por primera vez penetró la oscuridad que por muchas edades habian ocultado los geroglíficos de Egipto.

»Caro á sus parientes por sus virtudes domésticas, honra-

tras que aducian grupos enteros de hechos, inexplicables por la teoría de la emision, lograron establecer el paralelismo mas completo entre los fenómenos ópticos y los del movimiento ondulatorio. La comprobacion de una teoría consiste en su exclusiva competencia para explicar los fenómenos. En esta base descansa ahora la teoría de las ondas ó teoría ondulatoria de la luz, y la experiencia diaria hace cada vez mas firmes sus fundamentos. Esta teoría tiene que ser en adelante objeto principal de nuestra atencion.

217. En el sonido, la velocidad depende de la relacion que existe entre la elasticidad y la densidad del cuerpo que lo trasmite. Cuanto mayor es la elasticidad, mayor es la velocidad, y cuanto menor es la densidad, mayor es la velocidad. Para explicar la enorme velocidad de propagacion de la luz, se supone que la

do por el mundo por sus conocimientos sin rival, murió con la esperanza de la resurreccion de los justos.

»Nacido en Milverton, en Somersetshire, el 13 de junio de 1773.

»Murió en Park Square, Lóndres, el 29 de mayo de 1829, á la edad de 56 años.»

sustancia que la trasmite está dotada de una elasticidad y una tenuidad extremas. Esta sustancia recibe el nombre de *éter luminífero*.

218. Llena el espacio; rodea los átomos de los cuerpos; se extiende sin solucion de continuidad á través de los humores del ojo. Las moléculas de los cuerpos luminosos están en estado de vibracion. Estas vibraciones son recogidas por el éter, y trasmitidas, á través del mismo, en ondas. Estas ondas, chocando sobre la retina, excitan la sensacion de la luz.

219. En el caso del sonido las partículas aéreas oscilan de un lado á otro en la misma direccion en que aquel se trasmite; en el caso de la luz las partículas del *éter* oscilan de una parte á otra transversalmente á la direccion en que la luz se propaga. En lenguaje científico, las vibraciones del sonido son *longitudinales*, mientras que las vibraciones de la luz son *trasversales*. En realidad las propiedades mecánicas del éter son mas bien las de un cuerpo sólido que las de un cuerpo aeriforme.

220. La *intensidad* de la luz depende de la distancia á que á un lado y otro se separan

las partículas etéreas. Esta distancia se llama *amplitud* de la vibracion. La intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud; tambien es proporcional al cuadrado de la velocidad máxima de la partícula vibrante.

221. La amplitud de las vibraciones disminuye en la misma medida que crece la distancia; por consiguiente, la intensidad que se expresa por el cuadrado de la amplitud, debe disminuir en razon inversa del cuadrado de la distancia. Esta es, en el lenguaje propio de la teoría de las ondulaciones, la ley de los cuadrados inversos.

222. La reflexion de las ondas etéreas obedece á la ley establecida para la luz. Se demuestra que el ángulo de incidencia es igual al de reflexion.

223. Para explicar la refraccion, tomemos para simplificar una parte de una onda circular emitida por el sol ú otro cuerpo distante. Una parte muy pequeña de esta onda puede tomarse como una recta. Supongamos que desde el aire venga á chocar sobre una plancha de cristal, siendo la onda primero paralela á la superficie del cristal. Esta onda pasa-

ria á través del cristal sin cambiar de direccion.

224. Pero como la velocidad en el cristal es menor que la velocidad en el aire, la onda se *retardaria* al pasar á un medio mas denso.

225. Supongamos ahora que la onda, antes del impacto, fuera oblícua á la superficie del cristal; el extremo de la onda que primero llega al cristal es el primero que se retarda, siendo detenidas las demas partes sucesivamente. Este atraso de un extremo de la onda le hace girar; de modo que cuando la onda ha penetrado por completo en el cristal, el curso que lleva es oblícuo respecto á su primera direccion. Está refractada.

226. Si el cristal en que entra la onda es una plancha de caras paralelas, la parte de onda que primero tocó á la superficie superior y sufrió primero el retardo, llegará tambien la primera á la superficie inferior y saldrá antes del medio que la contiene. Esto produce un segundo giro de la onda que recobra su primera direccion. De esta manera tan sencilla explica la teoría ondulatoria la refraccion.

227. La convergencia ó divergencia de los haces de luz por medio de los lentes se deduce inmediatamente del hecho de que los diferentes puntos de la onda de éter llegan y son retardados sucesivamente por el lente.

228. La densidad del éter es mayor en los líquidos y sólidos que en los gases, y mayor en los gases que en el vacío. Parece como que las moléculas de estos cuerpos ejercen sobre el éter una fuerza compresora. Ahora bien, si la elasticidad del éter creciera en la misma proporcion que su densidad, ambas se neutralizarian mútuamente y no experimentariamos aminoraciones de la velocidad de la luz. Si en los cuerpos que son muy refractores la velocidad disminuye, esto se explica suponiendo que en estos cuerpos, la elasticidad relativa á la densidad es menor que en el vacío. Los fenómenos que se observan se deducen naturalmente de este supuesto.

229. El caso es precisamente el mismo que cuando el sonido se trasmite en un gas ó vapor que no obedece á la ley de Mariotte. La elasticidad de este gas ó de este vapor,

cuando se le comprime, aumenta menos rápidamente que su densidad; y de aquí la menor velocidad del sonido.

230. Pero aun podemos expresar de una manera mas clara la influencia que ejercen los cuerpos refractores sobre la velocidad de a luz. Obsérvense las líneas *om* y *np* de la figura 2.ª, párrafo 113. Estas dos líneas *representan las velocidades de la luz* en el medio que se tomaba en consideracion, ó en términos mas generales, el seno del ángulo de incidencia representa la velocidad de la luz en el primer medio, en tanto que el seno del ángulo de refraccion representa la velocidad en el segundo. *El índice de refraccion por lo tanto no es otra cosa que la relacion entre las dos velocidades.* Así, pues, en el caso del agua cuyo índice de refraccion es $\frac{4}{3}$, la velocidad en el aire es á la velocidad en el agua como 4 es á 3. En el cristal, cuyo índice de refraccion es $\frac{3}{2}$, la velocidad en el aire es á la velocidad en el cristal como 3 es á 2. En otras palabras, la velocidad de la luz en el aire es 1 y $\frac{1}{3}$ veces la velocidad en el agua y 1 $\frac{1}{2}$ veces la velocidad en el cristal. La velocidad de

la luz en el aire es cerca de 2 $\frac{1}{2}$ veces mayor que en el diamante y cerca de 3 veces mayor que en el cromato de potasa, la sustancia de mas potencia refractora que hasta ahora se ha descubierto. Hablando con precision, el índice de refraccion se refiere al paso de la luz, no del *aire*, sino del vacío [1] al cuerpo refractor. Dividiendo la velocidad de la luz en el vacío por su velocidad en la sustancia refractora, el cociente es el índice de refraccion de esta sustancia.

231. En la teoría de las ondulaciones, los rayos de luz son perpendiculares á las ondas de éter. Al contrario de la onda el rayo no tiene existencia material, y es puramente una direccion.

PRISMAS.

232. Se ha dicho en el párrafo 129 que empleando una plancha de cristal *con superficies paralelas*, la direccion que traia un rayo oblícuo antes de encontrar al cristal, era la

[1] Es decir, el vacío, excepto en lo tocante al éter mismo.

que volvia á tomar cuando lo abandonaba. No sucede esto cuando las superficies de entrada y salida no son paralelas.

233. Cuando el rayo pasa á través de una sustancia transparente que tenga forma de cuña, en direccion perpendicular al eje de la cuña, la refraccion es permanente. Los cuerpos que tienen esta figura se llaman en óptica *prismas*, y el ángulo que forman los dos lados oblícuos de la cuña se llama *ángulo refringente*.

234. Cuanto mayor es el ángulo refringente, mayor es la desviacion del rayo de su direccion primitiva; pero aun con el mismo prisma el valor de la refraccion varía con la direccion que sigue el rayo dentro del prisma.

235. Cuando esta direccion es tal que la parte del rayo que está dentro del prisma, forma ángulos iguales con los dos lados del prisma, ó lo que es lo mismo, con la direccion primitiva del rayo y la que lleva despues de salir de aquel, entonces la refraccion es el mínimum. Esto se demuestra experimental y matemáticamente; y en este resultado se funda

el método para determinar los índices de refraccion.

236. No alterándose la direccion del rayo refractado cuando atraviesa planchas de cristal con superficies paralelas, podemos emplear vasijas huecas compuestas de estas planchas y llenas de líquidos, y obtener de este modo prismas líquidos.

ANÁLISIS PRISMÁTICO DE LA LUZ.—DISPERSION.

237. Newton fué el primero que descompuso la luz solar, demostrando que estaba compuesta de un número infinito de rayos, cada uno con distinto grado de refrangibilidad; haciendo pasar esta luz á través de un prisma, sus rayos componentes son separados unos de otros. Este acto de apartarse los rayos se llama *dispersion*.

238. Las ondas de éter engendradas por los cuerpos luminosos, no son todas de la misma longitud, unas son mas largas que otras. En las sustancias refringentes, las ondas mas cortas sufren mayor retardo que las largas, y de aquí que las ondas cortas sufran

mayor refraccion que las largas. Esta es la causa de la dispersion.

239. La imágen luminosa que se forma cuando un haz de luz blanca es descompuesto de esta manera por un prisma, se llama *espectro*. Si la luz empleada es la del sol, la imágen se llama *espectro solar*.

240. El espectro solar consiste en una série de colores vivos, que cuando se vuelven á reunir producen el color blanco primitivo. Empezando por el que sufre menor refraccion tenemos en el espectro solar los colores en el órden siguiente: rojo, naranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta.

241. *El color de la luz depende únicamente de la longitud de la onda.*—Las ondas de éter disminuyen gradualmente en longitud desde el rojo al violado. La longitud de la onda de luz roja es próximamente $\frac{1}{39000}$ de pulgada; la de una onda de luz violada es $\frac{1}{57500}$ de pulgada. Las ondas que producen los demas colores están comprendidas entre estos dos extremos.

242. Siendo la velocidad de la luz 192,000 millas por segundo, si multiplicamos

este número por 39,000 (¹), tendremos el número de ondas de luz roja en 192,000 millas: el producto es 474.439,680.000,000. Todas estas ondas penetran en el ojo en un segundo. En el mismo intervalo entran en el ojo 699.000,000.000,000 ondas de un rayo violado. Tal es la prodigiosa velocidad con que las ondas de luz hieren la retina.

243. El color de hecho es en la luz lo que la *altura* en el sonido. La altura de una nota depende exclusivamente del número de ondas aéreas que chocan en el oido en un segundo. El color de la luz depende del número de ondas etéreas que entran en el ojo en un segundo. Así la sensacion del rojo es producida comunicando al nervio óptico 474 millones de millones de impulsos por segundo, en tanto que la sensacion del violado es producida comunicando al nervio 699 millones de millones de impulsos por segundo. Números no menos extraordinarios se desprenden de la teoría de la emision, y no hay modo de concebir este asunto que no nos lleve á

(¹) El autor aquí comete el error de no añadir: «y por el número de pulgadas que tiene una milla.»

admitir el ejercicio de fuerzas mecánicas que bien pueden llamarse infinitas (¹).

RAYOS INVISIBLES.—CALORESCENCIA Y FLUORESCENCIA.

244. El espectro se extiende por ambos lados mas allá de sus límites visibles. Mas allá de los rayos rojos visibles tenemos rayos que poseen una potencia calórica considerable, aunque son impotentes para excitar la vision; mas allá del violado tenemos una masa considerable de rayos, que, aunque débiles para producir calor é incapaces de producir luz, son de la mayor importancia por su facultad de producir acciones químicas.

245. En la luz eléctrica, la energía de los rayos caloríficos, no luminosos, emitidos por los puntos de carbon, es cerca de ocho veces mayor que la de todos los demas rayos reunidos. Probablemente los rayos oscuros del sol exceden en potencia colórica á los rayos solares luminosos. Es posible dividir el haz solar ó eléctrico de modo que queden intercep-

(¹) Sir John Herschel.

tados los rayos luminosos y se deje libre la trasmision de los no luminosos.

246. Por este medio pueden obtenerse focos perfectamente oscuros, en los cuales pueden quemarse los cuerpos combustibles, fundirse los metales no refractarios y elevar los refractarios á la temperatura del blanco. De este modo los rayos caloríficos oscuros pueden transformarse en luminosos que dan todos los colores del espectro. Esta transformacion de los rayos del estado opaco al luminoso por la intervencion de un cuerpo refractario, es lo que se llama *calorescencia*.

247. Del mismo modo respecto á los rayos que están mas allá del violado cuando se le deja caer sobre ciertas sustancias, por ejemplo, el bisulfato de quinina, hacen luminosa á esta sustancia, y los *rayos invisibles se hacen por este procedimiento visibles*. El cambio en este caso recibe el nombre de *fluorescencia*.

248. En la calorescencia, los átomos del cuerpo refractario adquieren una vibracion mas rápida que las ondas que caen sobre él, y los períodos de la ondulacion son acelerados por el choque con los átomos. La refrangibi-

lidad de los rayos, de hecho se *exalta*. En la fluorescencia, al contrario, el impacto de las ondas produce en las moléculas del cuerpo fluorescente, vibraciones de períodos mas lentas que las de las ondas incidentes; la refrangibilidad de los rayos *se calma*. De este modo, exaltando la refrangibilidad de los rayos ultra-rojos y calmando la de los ultra-violados, ambas clases de rayos adquieren la facultad de excitar la vision.

249. Aunque la expresion no sea perfecta, estos rayos, tanto los ultra-rojos como los ultra-violados, que no tienen la facultad de excitar la vision, se llaman *rayos invisibles*. En realidad no podemos hablar de si los rayos son ó no visibles; puesto que no son los rayos mismos, sino los objetos que ellos iluminan los que se hacen visibles. El *espacio*, aunque atravesado por los rayos de todos los soles y estrellas, no se ve. Ni aun el éter que llena el espacio y cuyos movimientos son la luz del mundo, es por sí mismo visible (1).

(1) Trabajos del Instituto Real, vol. V, pág. 456.

OPINION RESPECTO Á LOS PERÍODOS VISUALES.

250. Una cuerda templada para producir una nota musical determinada, resuena cuando se hace sonar la misma nota. Si se canta dentro de un piano abierto, la cuerda cuya nota está acorde con la voz, experimentará vibraciones sonoras. Si no hay acorde entre la nota y la cuerda, no hay resonancia, por poderosa que sea la nota. A veces se rompe una vidriera de iglesia por efecto de determinados sonidos del órgano, por la coincidencia de su período de vibracion con el del órgano.

251. De este modo se concibe que una nota débil, á causa de la coincidencia del período de sus vibraciones con los de un cuerpo resonante, pueda producir efectos que á causa de la falta de coincidencia no pueden ser producidos por otra mas poderosa.

252. Este fenómeno conocido del sonido, nos ayuda á concebir el comportamiento de la retina con respecto á la luz. La retina ó mas bien el cerebro, que es donde van á pasar sus fibras, está, como si dijéramos, templado ó entonado para las vibraciones compren-

didas entre ciertos límites, y es insensible á todas las vibraciones que están fuera de estos límites por mas poderosas que sean.

253. La cantidad de movimiento ondulante que envia al ojo por la noche una vela distante una milla, es suficiente para hacerla visible. Empleando los poderosos rayos ultrarojos del sol ó de la luz eléctrica, puede demostrarse que ondas etéreas que poseen muchos millones de veces la energía mecánica de las que producen la luz de una vela, pueden chocar sobre la retina sin excitar ningun género de sensacion. Lo que influye en este caso no es la *fuerza* de las ondas, sino los *períodos de sucesion*.

254. Cuando en la música, dos notas están separadas entre sí por una octava, la nota mas alta vibra con doble rapidez que la mas baja. En el párrafo 241 se han fijado las longitudes de las ondas de luz roja y luz violada en $\frac{1}{39000}$ de pulgada y $\frac{1}{57500}$ respectivamente; pero estos números hacen referencia al *término medio* rojo y al *término medio* violado. Las ondas del extremo violado son próximamente de la mitad de longitud de las del ex-

tremo rojo, y chocan contra la retina con doble rapidez que las rojas. Vemos, pues, que en tanto que el alcance del oido se sabe que abraza cerca de once octavas, la escala óptica ó alcance del ojo está comprendido en una sola octava.

OPINION RESPECTO Á LOS COLORES.

255. Los cuerpos de la naturaleza tienen la propiedad de apagar ó, segun la expresion vulgar, *absorber* la luz que los penetra. Esta facultad de absorcion es *selectiva* y de ella en su parte principal nace el fenómeno del color.

256. Cuando la luz que penetra en un cuerpo es absorbida totalmente, el cuerpo es negro; un cuerpo que absorbe igualmente todas las ondas, pero no totalmente, es gris; mientras que un cuerpo que absorbe desigualmente las distintas ondas, tiene *color*. El color es debido á la extincion de ciertos constituyentes de la luz blanca dentro del cuerpo; el resto de los constituyentes que vuelven al ojo, comunica al cuerpo su color.

257. Debe tenerse presente que los cuerpos de todos colores, iluminados por la luz blanca, reflejan luz blanca *de sus superficies exteriores*. La luz que ha penetrado hasta cierta profundidad en el cuerpo, que ha sido descompuesta allí por la absorcion electiva y despues expulsada del cuerpo por la reflexion interior, es la que generalmente da á este su color.

258. Un cristal rojo puro, colocado en el paso de un haz descompuesto por un prisma, antes ó despues de su descomposicion, intercepta todos los colores del espectro excepto el rojo. Un cristal de otro cualquiera color puro, interpuesto de un modo semejante, interceptaria todo el espectro, excepto la parte que da su color al cristal. Es, sin embargo, sumamente difícil, si no imposible, obtener ninguno de los colores puros. Por eso un cristal amarillo no solo deja pasar la luz amarilla del espectro, sino ademas una parte del verde y naranjado adyacentes, mientras que un cristal azul, no solo da paso al azul, sino tambien á una parte del verde y al añil que son los adyacentes.

259. De aquí se deduce que si se hace pasar un rayo de luz blanca á través de dos cristales, uno azul y otro amarillo, el único color trasmisible por ambos es el verde. Esto explica por qué los polvos azules y amarillos mezclados producen el verde. La luz blanca penetra en el polvo hasta cierta profundidad, y es emitida por la reflexion interior, privada de su amarillo y su azul. Queda solo el verde.

260. El efecto es completamente diferente cuando en lugar de mezclar los *colores* (pigmentos), amarillo y azul, reunimos la *luz* azul y la *luz* amarilla. La mezcla es de un blanco puro. El azul y el amarillo son colores complementarios.

261. Dos colores cualesquiera, cuya mezcla produce el blanco, se llaman *colores complementarios*. En el espectro tenemos los siguientes pares de colores complementarios.

El rojo y el azul verdoso.

El naranjado y el azul cianógeno.

El amarillo y el añil.

El amarillo verdoso y el violado,

262. Un cuerpo iluminado por una luz que

no puede trasmitir, aparece negro por intensa que sea la iluminacion. Así una barra de lacre roja colocada en el verde vivo del espectro aparece perfectamente negra. Una disolucion de un color rojo brillante, colocada en iguales condiciones, no se distingue de la tinta negra, y si se hace caer el espectro sobre la grana, el color de este se aviva en el sitio donde cae la luz roja, pero lo demas del paño aparece negro.

263. Hasta ahora nos hemos ocupado del *análisis* de la luz blanca. Reuniendo los colores constituyentes, de modo que produzcan el primitivo, demostramos *por la síntesis* la composicion de la luz blanca.

264. Sea el haz analizado de seccion rectangular. Por medio de un lente cilíndrico podemos volver á combinar los colores y producir, mezclándolos, el blanco primitivo. Es tambien posible combinando los colores del espectro reconstruir la imágen perfecta del foco luminoso. La persistencia de las impresiones en la retina proporcionà tambien medios fáciles de reunir los colores.

ABERRACION CROMÁTICA.—ACROMATISMO.

265. A causa de la diferente refrangibilidad de los distintos rayos del espectro, es imposible reunirlos todos al mismo tiempo en un foco con un solo lente esférico. Los rayos azules, por ejemplo, son mas refractados que los rojos, y se cortan mas pronto que estos.

266. Por esto cuando por medio de un lente se hace convergente un cono divergente de luz blanca, el haz convergente estará rodeado por una envoltura de rayos rojos, hasta el punto de interseccion de los rayos, en tanto que mas allá del foco el cono divergente estará rodeado de una envuelta azul. De aquí que cuando los rayos son refractados sobre una pantalla colocada entre el lente y el foco de los rayos azules, se obtenga un círculo blanco con el borde encarnado, y si se colocase la pantalla mas allá del foco de los rayos rojos, el círculo blanco tendrá un borde azul. Es imposible lograr en estas posiciones de la pantalla una imágen que no tenga color.

267 Esta dificultad que tiene el lente de no poder reunir las partes constituyentes de distinto color de la luz en un foco comun, se llama *aberracion cromática del lente.*

268. Newton creyó imposible evitar la aberracion cromática; porque suponia la dispersion del prisma ó lente proporcional á su refraccion, y que si se destruia la una, se anulaba la otra. Esto, no obstante, era un error.

269. En efecto, dos prismas que produzcan la misma refraccion media, pueden producir distintos grados de dispersion. Disminuyendo el ángulo del prisma que mas dispersa, podemos hacer su dispersion sensiblemente igual á la del otro; y podemos neutralizar los colores de ambos prismas, colocándolos en oposicion el uno del otro, sin neutralizar la refraccion.

270. Cuando se opone, por ejemplo, un prisma de agua á otro de flint-glass, despues de anulada la dispersion del agua, que es pequeña, aun el haz es refractado. Si se sustituye con un prisma de crown-glass el de agua, se logra sustancialmente el mismo efec-

to. El flint-glass tiene la facultad de neutralizar la dispersion del crown-glass antes de neutralizar su refraccion.

271. Lo que hemos dicho de los prismas, es igualmente aplicable á los lentes. Oponiendo un lente convexo de crown-glass á uno cóncavo de flint-glass, se destruye su dispersion, y á pesar de eso se forman imágenes con la combinacion de los dos lentes, á causa de la refraccion *remanente*.

272. Las combinaciones de lentes en que, anulado el color, se conserva cierta cantidad de refraccion, se llaman combinaciones acromáticas, ó mas breve, *lentes acromáticos*.

273. El ojo humano no es acromático. Está sujeto á la aberracion cromática como á la aberracion esférica.

COLORES SUBJETIVOS.

274. El nervio óptico se hace menos sensible por la accion de la luz. Cuando desde la luz de un dia claro entramos en una habitacion donde la luz es moderada, nos parece que está á oscuras.

275. Esto se verifica tambien con los colores; en particular cuando el ojo recibe luz de un color determinado, el nervio óptico se hace menos sensible al mismo color. Hasta cierto punto queda como incapacitado de percibirlo.

276. Si se fijan con constancia los ojos en una oblea roja, colocada sobre un papel blanco, despues de algun tiempo la oblea aparece rodeada por un cerco verdoso, y si se quita la oblea, el lugar en que estaba parece verde.

277. Esto se explica del modo siguiente: el ojo, al mirar la oblea, pierde parte de su aptitud para percibir la luz roja; por consiguiente, cuando se quita la oblea, la luz blanca que da sobre el lugar de la retina en que descansaba la imágen de la oblea, queda virtualmente privada de sus rayos rojos, y aparece, por consiguiente, con el color complementario. El cerco de luz verde que se observa primero, es debido á una ligera extension de la luz roja de la oblea mas allá de las dimensiones geométricas de la imágen formada en la retina á consecuencia de la aberracion esférica del ojo.

278. Las sombras con color se atribuyen á la misma causa. Supongamos que una luz roja viva, por ejemplo, da en una pantalla blanca. Un cuerpo interpuesto entre la luz y la pantalla arrojará una sombra, y si esta sombra se la ilumina moderadamente por una segunda luz blanca, aparecerá verde. Si la luz primera fuese azul, la sombra aparecerá amarilla; si fuese verde, la sombra será roja. La razon es, que el ojo, en el primer caso, ciega parcialmente para la percepcion del color proyectado sobre la pantalla; por consiguiente, á la luz blanca que llega al ojo procedente de la sombra, le falta parcialmente aquel color, y la sombra parece del color complementario.

279. Estos colores se llaman *colores subjetivos*; dependen de un estado particular del ojo y no expresan fenómenos externos del color.

ANÁLISIS ESPECTRAL.

280. Los metales y sus combinaciones comunican á las llamas colores peculiares y que son característicos á cada metal. Así, pues,

la llama privada casi de luz de la lámpara ó quemador de Bunsen, adquiere un brillante color amarillo por el metal llamado sodio, ó por cualquiera de los compuestos volatilizables de este metal, como, por ejemplo, el cloruro de sodio ó sal comun. La llama se hace verde por medio del cobre, purpúrea por el zinc, y roja por el estroncio.

281. Estos colores son debidos á los vapores metálicos que quedan libres en la llama.

282. Cuando estos vapores metálicos incandescentes son examinados por medio del prisma, se encuentra que en lugar de emitir rayos que formen un espectro *contínuo*, en el cual se pase gradualmente de un color á otro, emiten grupos distintos de rayos de refrangibilidad definida, pero distinta. El espectro correspondiente á estos rayos es una série de fajas coloradas, separadas unas de otras por intervalos de oscuridad. Estas fajas son características en toda clase de gases luminosos.

283. Así vemos que el espectro del vapor incandescente de sodio está formado por una faja brillante en los límites del amarillo y

el naranjado; y que este vapòr no es capaz de arrojar ninguno de los demas colores del espectro. Analizando esta faja con mas exactitud, se resuelve en dos fajas distintas: un análisis mas delicado aun produce un grupo de fajas con cinco intervalos oscuros intermedios. El espectro del vapor de cobre se distingue por una série de fajas verdes, en tanto que el vapor incandescente del zinc produce fajas brillantes de azul y rojo.

284. La luz de las fajas producidas por los vapores metálicos, es muy intensa, concentrándose su totalidad en unas pocas rayas estrechas y escapando en gran parte á la atenuacion que produce la dispersion.

285. Estas fajas coloreadas caracterizan perfectamente al vapor: de su posicion y número puede inferirse sin error alguno la sustancia que las produce.

286. Si se combinan en una llama al mismo tiempo dos ó mas metales, el análisis prímitivo hace ver las fajas correspondientes á cada metal, como si los otros no existieran en la llama. Esto se verifica tambien cuando se introduce en la llama un mineral que con-

tiene varios metales. Cada uno de los metales constituyentes dará sus fajas características.

287. Por consiguiente, conociendo las fajas, producidas por todos los metales conocidos, si se presentan nuevas fajas, es prueba de que en la llama hay un metal enteramente nuevo. Por este medio Bunsen y Kirchoff, fundadores del análisis espectral, descubrieron el Rubidium y el Cesium; y Mr. Crookes descubrió el Thallium con su soberbia faja verde.

288. Los *gases permanentes*, calentados á una temperatura suficiente como pueden serlo por la descarga eléctrica, tambien presentan en sus espectros fajas características. Por estas fajas pueden ser reconocidos aun á las distancias astronómicas.

289. La accion de la luz sobre el ojo es una prueba cuya delicadeza no conoce rival, y es la que se pone en juego en el *análisis espectral*; de aquí el gran alcance de este método analítico [1].

[1] Hay muchas personas que no pueden distinguir un color del espectro de otro; á menudo confunden el verde y

DEFINICION ULTERIOR DE LA RADIACION Y ABSORCION.

290. Los términos rayo, radiacion y absorcion se emplearon mucho antes de ser conocidas las teorías admitidas hoy respecto á la naturaleza de la luz. Es necesario fijar con mas claridad la significacion de estas palabras segun la teoría de las ondulaciones.

291. Para completar nuestros conocimientos es necesario saber que todos los cuerpos, sean luminosos ú opacos, son *radiantes*; si no iradian luz, iradian calor.

292. Es necesario tambien saber que los rayos luminosos son tambien rayos caloríficos; que las mismas ondas de éter, chocando en un termómetro, producen los efectos del calor; y dando sobre la retina, producen la sensacion de la luz. Los rayos, sin embargo,

el rojo. Dalton, el célebre fundador de la teoría atómica, no distinguia las cerezas maduras encarnadas de las hojas verdes mas que por la forma. En el dia se tiene esto presente para escoger los maquinistas de los ferro-carriles que tienen que distinguir las señales por sus colores. Este defecto se llama *acromatopsia* y algunas veces *daltonismo*.

de mayor calor, como ya se ha explicado, caen completamente fuera del espectro visible.

293. La radiacion tanto de la luz como del calor consiste en la *comunicacion* del movimiento de los átomos en vibracion de los cuerpos al éter que los rodea. La absorcion del calor consiste en la *admision* por parte de los átomos del cuerpo del movimiento procedente del éter que ya ha sido agitado por un foco de luz ó de calor. En la radiacion, pues, se comunica movimiento al éter, en la absorcion se recibe movimiento del éter.

294. Cuando un rayo de luz ó de calor atraviesa un cuerpo sin pérdida; ó en otras palabras, cuando las ondas se trasmiten á través del éter que rodea á los átomos del cuerpo, sin comunicar sensiblemente movimiento á los átomos mismos, el cuerpo es transparente. Si el movimiento se trasmite en cualquier grado á los átomos, el cuerpo es *opaco* en el mismo grado.

295. Si la luz ó el calor son absorbidos, el cuerpo absorbente se *calienta*, si no hay absorcion, la luz ó el calor pasan á través del cuerpo sin afectar á su temperatura.

296. De este modo en los focos oscuros á que nos referimos en el párrafo 246, ó en el foco del espejo ardiente mas poderoso que concentra los rayos del sol, el *aire* puede estar á la temperatura del hielo, porque la absórcion de calor por el aire es casi insensible. Ademas, un pedazo de sal gemma, colocado en el foco, apenas se calienta sensiblemente, porque la absorcion es muy poca; en tanto que una plancha de cristal se hace pedazos, y una de platino se pone al rojo blanco, y aun se funde á causa de su potencia absorbente.

297. Merece hacerse notar en este lugar que todos los cálculos relativos á la temperatura de los cometas, fundados en sus distancias al sol, pueden ser, y son probablemente enteramente erróneos. El cometa, aun cuando esté mas cerca del sol, puede estar intensamente frio. Puede llevar consigo al rededor de su perihelio el frio de las regiones mas distantes del espacio. Si es transparente á los rayos solares, no será afectado por el calor del sol, en tanto que este calor se mantenga en *forma radiante.*

EL ESPECTRO PURO.—RAYAS DE FRAUNHOFER.

298. Cuando el haz de luz blanca que pasa por una hendidura, es descompuesto, el espectro consiste realmente en una série de imágenes de la abertura de distintos colores colocadas unas al lado de otras. Si la abertura es ancha, estas imágenes se sobreponen unas á otras en parte, pero en el espectro puro esto no debe suceder.

299. Se obtiene el espectro puro haciendo muy estrecha la abertura por donde pasa el haz descompuesto, y haciendo pasar á este por varios prismas sucesivamente para aumentar la dispersion.

300. Operando de este modo con la luz del sol, se encuentra que el espectro solar no es perfectamente contínuo; notándose á través de él innumerables rayas oscuras, faltando los rayos correspondientes á estos intervalos. El Dr. Wollaston fué el primero que observó algunas de estas rayas. Mas adelante fueron estudiadas con suma habilidad por Fraunhofer que las clasificó é hizo de

ellas mapas exactos, por lo que de su nombre se llaman *rayas de Fraunhofer*.

RECIPROCIDAD DE LA RADIACION Y LA ABSORCION.

301. Por mucho tiempo fué un enigma para los filósofos la desaparicion de los rayos correspondientes á las rayas de Fraunhofer. El génio de Kirchhoff resolvió este problema. Su solucion llevaba consigo una nueva teoría sobre la constitucion del sol y la demostracion de un método que nos permite determinar la composicion química del sol, las estrellas y las nebulosas. Las aplicaciones de las teorías de Kirchhoff hechas por Huggins, Miller, Secchi, Janssen y Lockyer, son sumamente interesantes y de gran importancia.

302. La explicacion que da Kirchhoff de las rayas de Fraunhofer está basada en el principio de que todo cuerpo es especialmente opaco para aquellos rayos que él mismo puede emitir cuando se pone en incandescencia.

303. De este modo la radiacion de una llama de óxido de carbono que contiene ácido carbónico á alta temperatura, es intercep-

tada de un modo asombroso por el ácido carbónico. Si se hacen pasar los rayos procedentes de una llama de sodio á través de una segunda llama de sodio, serán interceptados por esta con extraordinaria energía. Los rayos procedentes del vapor de thalliun incandescente son interceptados por el vapor de thallium; los del vapor de lithium, por el mismo vapor, y lo mismo sucede con otros metales.

304. En el lenguaje propio de la teoría de las ondulaciones, las ondas de éter son absorbidas con especial energía; su movimiento es recogido con especial facilidad por los átomos cuyos períodos de vibracion, son isócronos con los períodos de las ondas. Este es otro modo de expresar que un cuerpo absorbe con especial energía los rayos que él mismo puede emitir.

305. Si se hace pasar un haz de luz blanca á través de la llama intensamente amarilla del vapor de sodio, el amarillo que entra en la composicion del haz, es interceptado por la llama, mientras que se trasmiten libremente los rayos de distinta refrangibilidad.

306. De aquí que cuando se recoge sobre

una pantalla blanca el espectro de la luz eléctrica, si se introduce una llama de sodio en el paso de los rayos, intercepta el componente amarillo de la luz, y el espectro aparece surcado por una faja oscura en el lugar del amarillo.

307. Colocando otras llamas del mismo modo en el paso del haz, si la cantidad del vapor metálico contenido en la llama es suficiente, cada llama interceptará su faja propia. Y si la llama, á través de la cual pasa la luz, contiene vapores de distintos metales, obtendremos sobre la pantalla las fajas oscuras características de todos ellos.

308. Dilatando mentalmente nuestra luz eléctrica hasta formar un globo del tamaño del sol, y envolviendo este globo incandescente en una atmósfera de llamas, esta atmósfera interceptará los rayos del globo que ella misma puede emitir; manifestándose esta interceptacion por rayas oscuras en el espectro.

309. De este modo llegamos á una explicacion completa de las rayas de Fraunhofer y á una nueva teoría de la constitucion del sol. La esfera está formada por un núcleo sólido

ó fundido en estado de violenta incandescencia, pero está rodeada por una fotoesfera gaseosa que contiene vapores que absorben los rayos del núcleo que ellos mismos pueden emitir. De este modo se producen las rayas de Fraunhofer.

310. Las rayas de Fraunhofer son fajas estrechas de oscuridad *parcial*; realmente están iluminadas por la luz de la envuelta gaseosa del sol; pero esta es tan débil en comparacion con la luz del núcleo interceptada por la envuelta, que las fajas aparecen oscuras comparadas con la brillantez adyacente.

311. Si desapareciese el núcleo central, las fajas de Fraunhofer *sobre un campo perfectamente oscuro* se transformarian en una série de fajas brillantes. Esto se asemejaria al espectro que se obtiene de una llama cargada de vapores metálicos. Constituirian el espectro de la atmósfera solar.

312. No es indispensable que la fotoesfera deba estar compuesta de *vapor puro*. Indudablemente contiene grandes masas de materia nebulosa incandescente, compuesta de partículas fundidas á la temperatura del blan-

co. Estas nubes, calientes hasta el blanco é intensamente luminosas, pueden ser el orígen de la luz que la tierra recibe del sol y con ellas puede estar mezclado mas ó menos confusamente el verdadero vapor de la fotoesfera. Esto, no obstante, como lo supuso Kirchhoff, el vapor que produce las rayas de Fraunhofer debe existir *á la parte exterior* de estas nubes.

QUÍMICA SOLAR.

313. De las fajas oscuras del espectro podemos deducir las sustancias que entran en la composicion de la atmósfera solar.

314. Esta posibilidad la comprobaremos por medio de un ejemplo. Hagamos que la luz solar y la luz del vapor de sodio incandescente pasen una junto á otra á través de la misma abertura y que sean descompuestas por el mismo prisma. La luz solar producirá su espectro, y la luz de sodio su faja amarilla. Esta faja amarilla coincidirá exactamente en posicion con una faja oscura característica del espectro solar, que Fraunhofer distingue con la letra D.

315. Si no existiese el núcleo solar y solo la fotoesfera vaporosa emitiese la luz, la raya oscura D seria una raya brillante. Su carácter y su posicion prueban que es la luz emitida por el sodio. Este metal, por consiguiente, existe en la atmósfera del sol (¹).

316. El resultado es aun mas convincente cuando operando con un metal que dé una numerosa série de rayas brillantes, se encuentra que cada una de sus fajas coincide con una faja oscura del espectro solar. Por este método Kirchhoff, á quien debemos en todo su desarrollo esta expléndida generalizacion, demostró que existian en la atmósfera solar el hierro, el calcio, el magnesio, el sodio, el cromo y otros metales; y Mr. Huggins ha extendido la aplicacion de este método á la

(¹) Consultando el párrafo 283 se verá que la raya del sodio se resuelve por el análisis delicado en un grupo de rayas. La raya oscura D de Fraunhofer se resuelve del mismo modo. Debe hacerse mencion de que tanto Mr. Talbot como sir Jhon Herschell previeron claramente la posibilidad de emplear el análisis espectral para descubrir la menor traza de los cuerpos.

luz de los planetas, estrellas fijas y nebulosas [1].

QUÍMICA PLANETARIA.

317. La luz reflejada por la luna y los planetas, es luz solar; y á no estar afectada por la atmósfera del planeta, el espectro de esta luz planetaria debia presentar las mismas rayas que el espectro solar.

318. La luz de la luna no presenta otras rayas. No hay por lo tanto evidencia de que exista una atmósfera alrededor de la luna.

319. Las rayas que se observan en el espectro de Júpiter, indican una absorcion poderosa por parte de la atmósfera de este planeta. La atmósfera de Júpiter contiene algunos de los gases y vapores que hay en la atmósfera terrestre. En el espectro de Saturno se ven rayas débiles, algunas de las cuales son idénticas á las de Júpiter.

320. Las rayas que caracterizan las atmósferas de Júpiter y Saturno, no se presentan

[1] El profesor Stokes previó la aplicacion posible del análisis espectral á la química solar.

en el espectro de Marte. En la parte azul del espectro es donde principalmente se nota la absorcion, y esto dando predominio á los rayos rojos, puede ser la causa del color rojo de Marte.

321. En el espectro de Vénus se encuentran todas las rayas mas fuertes del espectro solar, pero no las adicionales.

QUÍMICA DE LAS ESTRELLAS.

322. La atmósfera de la estrella Aldebaran contiene hidrógeno, sodio, magnesio, calcio, hierro, telurio, antimonio y mercurio. La atmósfera de la estrella Alfa en Orion, contiene sodio, magnesio, calcio, hierro y bismuto.

323. Ninguna estrella, bastante brillante para producir un espectro, ha dejado de presentar rayas en él. Unas estrellas solo se diferencian de otras en la manera de estar agrupadas y el órden de las numerosas rayas muy finas que cruzan sus espectros.

324. Las rayas oscuras de absorcion son mas fuertes en los espectros de las estrellas amarillas y rojas. En las estrellas blancas,

las rayas, aunque igualmente numerosas, son pobres y débiles.

325. La comparacion de los espectros de las estrellas de distintos colores sugiere la idea de que los colores de las estrellas pueden ser debidos á la accion de sus atmósferas. Los componentes de la luz blanca de la estrella sobre los cuales caen mas espesas las rayas de absorcion son anulados, y la estrella aparece teñida por el color restante. El padre Secchi de Roma ha estudiado la luz de muchos cientos de estrellas y las ha dividido en cuatro clases.

QUÍMICA DE LAS NEBULOSAS.

326. Algunas nebulosas dan espectros con fajas brillantes, y otras dan espectros contínuos. La luz de las primeras emana de una materia intensamente caliente y que existe en *estado gaseoso*. Esto puede explicar hasta cierto punto la debilidad de la luz de estas nebulosas.

327. Es probable que dos de los componentes de las nebulosas gaseosas sean el hidrógeno y el ázoe.

LAS PROMINENCIAS ROJAS Y LA ENVUELTA DEL SOL.

328. Los astrónomos han observado durante los eclipses totales del sol grandes prominencias rojas que, partiendo del limbo solar, se extendian muchas millas por el espacio. La iluminacion intensa de la region circunsolar de nuestra atmósfera oculta en circunstancias ordinarias las prominencias rojas que son apagadas en cierto modo por el exceso de la luz.

329. Cuando se intercepta esta luz por la intervencion de la masa opaca de la luna, se ven distintamente las prominencias.

330. M. de la Rue y otros han probado que la materia roja de las prominencias estaba arrollada alrededor de una gran porcion de la superficie del sol. Segun las observaciones de M. Lockyer, la materia roja forma una envuelta completa alrededor del sol.

331. Examinada con espectróscopo la materia que constituye las prominencias, manifiesta ser en su mayor parte hidrógeno incan-

descente con el cual están mezclados los vapores de sodio y magnesio.

332. M. Janssen en la India, y despues, pero independientemente, M. Lockyer en Inglaterra, demostraron que las fajas brillantes de las prominencias podrian verse sin necesidad de esperar un eclipse total. La explicacion de este descubrimiento se vislumbra en el párrafo 284, en el cual se atribuye á que prácticamente no hay dispersion, la intensidad de las fajas brillantes de los gases incandescentes.

333. Haciendo pasar la luz que en circunstancias ordinarias oculta las fajas del hidrógeno, á través de un número suficiente de prismas, puede dispersársela y debilitarla hasta el extremo que sea necesario Cuando la luz es ya bastante débil, la luz no dispersada del hidrógeno incandescente domina sobre la del espectro contínuo. Recorriendo completamente la periferia del sol, M. Lockyer halla en todas partes esta atmósfera de hidrógeno, cuyo espesor generalmente de unas 5,000 millas era indicado por la longitud de sus rayas brillantes características. Allí donde este océano de

hidrógeno es poco profundo, las fajas brillantes son cortas; allí donde se levantan las prominencias como enormes olas sobre el nivel del Océano, las fajas brillantes son largas. Las prominencias llegan algunas veces á tener una altura de 70,000 millas.

DEL ARCO ÍRIS.

334. Un rayo de luz solar que choca oblícuamente con la superficie de una gota de lluvia es refractado al penetrar en la gota; es reflejado en parte en la parte opuesta de la gota, y sufre una nueva refraccion al salir de la gota.

335. Estas dos refracciones á la entrada y salida descomponen la luz que abandona la gota disuelta en sus colores constitutivos. En esta disposicion la recibe el ojo de un observador que dé frente á la gota y vuelva la espalda al sol.

336. En general los rayos solares, cuando abandonan la gota, son *divergentes*, y por lo tanto producen un efecto débil sobre el ojo. Pero cuando entran con un *cierto ángulo* par-

ticular despues de haber sido refractados dos veces y reflejados una, salen de la gota casi perfectamente paralelos. En este caso, conservan su intensidad como los rayos reflejados por un espejo parabólico y producen sobre el ojo el efecto correspondiente. El ángulo bajo el cual se establece este paralelismo, varía con la refrangibilidad de la luz.

337. Trácese una línea desde el sol hasta el ojo del observador y prolónguese por detrás de este. Concibamos otra línea que partiendo del ojo forme con la que va al sol un ángulo de 42° 30′. La gota de lluvia que se encuentre en esta línea, enviará al ojo un haz paralelo de *luz roja*. Cualquiera otra gota colocada de un modo semejante, es decir, que esté á la distancia angular de 42° 30′ de la línea que va al sol, hará lo mismo. Así obtenemos una *faja circular* de luz roja que forma parte de la base de un cono cuyo vértice está en el ojo del observador. A causa de la magnitud angular del sol, el ancho de esta faja será de medio grado.

338. Concíbase ahora otra línea que partiendo del ojo del observador forma con la

que va al sol un ángulo de 40° 30′. La gota atravesada por esta línea, enviará al ojo á lo largo de ella un haz casi perfectamente paralelo de luz violeta. Todas las gotas colocadas á la misma distancia angular harán lo mismo, y obtendremos una faja de luz violada del mismo ancho que la roja. Estas dos fajas constituyen los colores que limitan el arco-íris, y entre ellas se encuentran las fajas correspondientes á los demas colores.

339. El arco-íris es de hecho un espectro en el cual las gotas de agua hacen el papel de prismas. El ancho del arco, desde el rojo al violado, es próximamente de dos grados. La extension del arco visible en un momento dado, depende evidentemente de la posicion del sol. El arco mas grandioso se forma á la salida ó puesta del sol. En este caso si el observador está en una llanura, ve un semicírculo completo, y si está sobre una montaña puede ver un arco todavía mayor.

340. Las distancias angulares y el órden de los colores que hemos expresado, corresponden al *arco primario*, pero ademas de este, vemos generalmente un arco secundario de

tintas mas débiles y en el cual está invertido el órden de los colores del primario. En este la faja roja forma la convexidad del arco y es la mas ancha; en el secundario, la faja violada está en la parte exterior, y el rojo forma la concavidad del arco.

341. El arco secundario es producido por rayos que han sufrido dos reflexiones dentro de la gota, así como dos refracciones en su superficie. Esta doble reflexion interna es la que debilita el color. En el arco primario los rayos incidentes entran por el hemisferio superior de la gota, y salen por el inferior; en el arco secundario los rayos incidentes entran por el hemisferio inferior de la gota, salen por el superior y cortan á los rayos incidentes para llegar á los ojos del observador. El arco secundario tiene $3\frac{1}{2}$ grados de ancho y está $7\frac{1}{2}$ grados mas alto que el primario. Del espacio entre los dos arcos, llega al ojo parte de la luz reflejada por las superficies anteriores de las gotas de lluvia; pero de la luz que penetra en las gotas en este espacio, ninguna parte es reflejada al ojo. Por eso esta region de los aguaceros es mas oscura.

INTERFERENCIA DE LA LUZ.

342. En el movimiento ondulatorio debemos distinguir claramente el movimiento de la onda del movimiento de las *partículas* individuales que en un momento dado constituyen la onda; puesto que mientras la onda se adelanta á través de grandes distancias, las partículas individuales del agua que toman parte en su propagacion, solo llevan á cabo una corta excursion de ida y venida. Un ave acuática, por ejemplo, cuando la olas la pasan, no es arrastrada hácia adelante, sino que se mueve arriba y abajo (¹).

343. Ahora, como en otros casos, la distancia en que oscilan las partículas individuales del agua ó que recorre el ave meciéndose verticalmente, se llama la amplitud de la oscilacion.

344. Cuando la luz que procede de dos orígenes ó focos diferentes, pasa por el mismo éter, las ondas de un foco tienen que ser

(¹) Hablando propiamente, las partículas del agua describen curvas cerradas y no líneas rectas verticales.

afectadas mas ó menos por las ondas del otro. Esta accion se explica del modo mas fácil, haciendo referencia á las ondas de agua.

345. Déjense caer dos piedras al mismo tiempo sobre agua en reposo. Al rededor de cada una se extenderá una série de ondas circulares. Fijemos nuestra atencion sobre un punto A del agua, igualmente distante de los dos centros de perturbacion. Las dos primeras crestas de ambos sistemas de ondas llegan á este punto en el mismo momento, y por su accion unida es elevado á doble altura de la que hubiese adquirido por la accion de cada una de las ondas por sí sola.

346. La primera depresion ó *seno*, como se le llama, de un sistema de ondas, llega tambien al punto A al mismo tiempo que el primer seno del otro, y por su accion combinada, el punto es deprimido á una profundidad doble de la que hubiera adquirido por la accion de uno solo de los senos.

347. Lo que es cierto respecto al primer seno y á la primera cresta, es tambien cierto para todos los que le suceden. En el punto A coincidirán las crestas y las depresiones su-

cesivas, y la agitacion del punto será doble de lo que hubiera sido, sometido á la accion de uno solo de los sistemas de ondas.

348. La *longitud de una onda* es la distancia de una cresta ó seno á la cresta ó seno mas próximo que le precede ó le sigue. En el caso de las dos piedras dejadas caer en el mismo instante en el agua en reposo, es evidente que la coincidencia de las crestas ó de los senos tendria lugar, si la distancia del punto de caida de una piedra al punto A excediese á la distancia de este mismo punto al de inmersion de la otra piedra en una *longitud completa de onda.* La única diferencia seria que la segunda onda de la piedra mas próxima coincidirá con la primera de la mas distante. Uno de los sistemas de ondas estaria aquí retrasado del otro la longitud completa de una onda.

349. Reflexionando un poco, veremos claramente que la coincidencia de las crestas y de los senos tendrá lugar en el punto A siempre que el retraso de un sistema respecto á otro esté representado por un número cualquiera de *longitudes completas de onda.*

350. Pero si suponemos que el punto A está mas distante de una piedra que de otra, la mitad de la longitud de una onda, entonces al pasar las ondas por el punto A, las crestas de un sistema coincidirán siempre con los senos del otro. Cuando una onda de uno de los sistemas tiende á elevar el punto A, una onda del otro tenderá en el mismo instante á deprimirlo. Como consecuencia de esto, el punto ni se elevará ni bajará, como lo haria si solo obrase sobre él cada uno de los sistemas de ondas aisladamente. Esta misma neutralizacion del movimiento ocurre donde la diferencia del intervalo entre las dos piedras y el punto A es igual á cualquier número impar *de semilongitudes de onda*.

351. En este caso, pues, añadiendo movimiento á movimiento, lo destruimos y producimos el equilibrio. Del mismo modo podemos, añadiendo sonido á sonido, producir el silencio, haciendo que un sistema de ondas sonoras neutralice á otro. Del mismo modo tambien añadiendo calor al calor, podemos producir el frio, mientras que añadiendo luz á la luz, podemos producir la oscuridad. Esta

perfecta identidad en la manera de comportarse la luz y el calórico radiante con el fenómeno del movimiento ondulatorio, es lo que constituye el mas fuerte fundamento de la teoría de las ondulaciones.

352. Esta accion de un sistema de ondas sobre otro, en virtud del cual el movimiento oscilatorio es unas veces aumentado y otras disminuido, se llama *interferencia*. Con relacion á los fenómenos ópticos recibe el nombre de interferencia de la luz. Mas adelante tendremos ocasiones frecuentes de aplicar este principio.

DIFRACCION Ó INFLEXION DE LA LUZ.

353. Newton á quien era familiar la idea del éter y que realmente la introdujo en alguna de sus especulaciones, objetó que si la luz se propagase en ondas, no podian existir las sombras, porque las ondas se doblarian alrededor de los cuerpos opacos y destruirian la sombra detrás de ellos. Con arreglo á la teoría ondulatoria, esta encorvadura de las ondas tiene efectivamente lugar, pero las

distintas porciones de las ondas encorvadas se destruyen unas á otras por su interferencia.

354. Este encorvado de las ondas de luz alrededor de las esquinas de los cuerpos opacos, recibe el nombre de *difraccion ó inflexion* (en aleman beugung). Ahora tenemos que considerar alguno de los efectos de la difraccion.

355. Para este objeto es necesario que nuestro foco luminoso sea un punto físico ó una línea muy fina; porque cuando se emplea una superficie luminosa extensa, los efectos de sus distintos puntos en los fenómenos de la difraccion se neutralizan unos á otros.

356. Un *punto* luminoso puede obtenerse haciendo converger por medio de un lente de foco corto los rayos paralelos del sol admitidos en una habitacion oscura á través de una abertura pequeña. La pequeña imágen del sol que se forma en el foco es en este caso nuestro punto luminoso La imágen del sol que se forma en la superficie de una cuenta plateada, ó sobre la superficie convexa de un lente de cristal ó de un cristal de

reloj ennegrecido por dentro, puede tambien servir para el objeto.

357. Una línea luminosa se obtiene admitiendo la luz del sol por una hendidura y haciéndola pasar por un lente cilíndrico. El haz rectangular se contrae para aparecer como una línea física en el foco del lente. Un tubo de vídrio ennegrecido por dentro y colocado á la luz, refleja en su superficie una línea luminosa que tambien sirve para el objeto. Realmente para muchas experiencias sirven la abertura circular ó la hendidura sin necesidad de condensacion por medio del lente.

358. En el experimento que ahora vamos á describir se coloca una hendidura de ancho variable enfrente de la lámpara eléctrica y se mira á esta hendidura desde cierta distancia á través de otra hendidura tambien de ancho variable. La luz de la lámpara se hace monocromática colocando enfrente de la hendidura un cristal rojo puro.

359. Colocado el ojo en la línea recta que desde las puntas incandescentes de carbon de la lámpara eléctrica pasa por ambas hendiduras se observa una cosa extraordinaria. En

primer lugar, la hendidura próxima á la lámpara se ve como un rectángulo de luz viva; pero á derecha é izquierda hay una larga série de rectángulos que van disminuyendo en intensidad y separados unos de otros por intervalos de oscuridad absoluta.

360. El ancho de las bandas varía con el de la hendidura colocada enfrente del ojo. Si se hace esta mas ancha, las imágenes se hacen mas estrechas y se reunen unas á otras; si se estrecha la hendidura, las imágenes se ensanchan y se separan unas de otras.

361. Puede demostrarse que el ancho de las bandas es inversamente proporcional al ancho de la hendidura colocada enfrente del ojo.

362. Dejando todo lo demas igual, intercéptese la luz con un cristal ó con una disolucion de sulfato amoniacal de cobre que da un color azul muy puro. De este modo se obtiene una série de bandas azules exactamente como las anteriores en todo, excepto en que son *mas estrechas* y que están mas reunidas que las rojas.

363. Si empleamos luces cuya refrangi-

bilidad sea intermedia entre la del rojo y el azul, lo que podemos conseguir haciendo que pasen por la hendidura los distintos colores de sus espectros, obtendriamos bandas de color de ancho intermedio y que ocuparan posiciones intermedias entre las del rojo y el azul. Por consecuencia de todo esto cuando la luz blanca pasa á través de la hendidura, los distintos colores no están superpuestos, y en lugar de una série de fajas monocromáticas separadas unas de otras por intervalos de oscuridad, tenemos una série de espectros colorados colocados unos al lado de otros, siendo el color mas refrangible de cada una el mas próximo á la hendidura.

364. Cuando en lugar de la luz eléctrica intensa la hendidura por donde entra la luz en la cámara se ilumina con una vela, se observan los mismos efectos en sustancia aunque menos brillantes.

365. ¿Cuál es la significacion de esta experiencia y cómo se producen las imágenes laterales de la hendidura? La teoría de la emision no puede explicar estos hechos y otros que los acompañan. Veamos de qué manera

se explican por la teoría de las ondulaciones.

366. Para mayor sencillez tomaremos en consideracion el caso de la luz monocromática. Concibamos una onda de éter que se adelante desde la primera hendidura hasta la segunda, y que finalmente llene esta última. Cuando la onda la atraviesa, no solamente continúa su camino directo á la retina, sino que diverge á derecha é izquierda con tendencia á poner en movimiento toda la masa de éter que existe detrás de la hendidura. En realidad *cada punto de la onda que llena la hendidura es en sí mismo un centro de nuevos sistemas de ondas, que se trasmiten en todas direcciones por medio del éter que existe detrás de la hendidura.* Tenemos ahora que examinar la accion recíproca de estas ondas secundarias.

367. Examinemos primero el rectángulo central de la série. Es evidente que las diferentes partes de cada seccion transversal de la onda que en este caso llena la hendidura llegan á la retina en el mismo momento. Estan en completa correspondencia, porque ninguna

porcion se retarda con relacion á otra. Los rayos que vienen de este modo directamente del foco á través de la hendidura á la retina produce la faja central de la série.

368. Pero consideremos ahora las ondas que se separan oblícuamente de la hendidura. En este caso las ondas que proceden de los dos bordes de la hendidura tienen para llegar á la retina que recorrer *distancias desiguales*. Supongamos que la diferencia en las distancias recorridas por dos rayos marginales sea igual á la totalidad de la longitud de una onda de luz roja; ¿cómo deberá afectar esta diferencia á la iluminacion final de la retina?

369. Fíjese la atencion sobre el rayo especial ó línea de luz que va á la retina pasando exactamente por el centro de la hendidura. La diferencia entre el curso de este rayo y el de los dos rayos marginales es, en el caso que suponemos, *la mitad de la longitud de una onda*. A poco que se reflexione se comprende claramente que para cada rayo de un lado de la línea central, hay otro al lado contrario que recorre una distancia que se diferencia de la suya en media ondulacion, y

con el cual, por consiguiente, está en completa discordancia. La consecuencia de esto es que la luz de un lado de la línea central apagará completamente la luz del otro lado, y que la oscuridad absoluta sea el resultado de esta anulacion mútua. De esta manera se explica el primer intervalo oscuro de nuestra série de fajas. Es producido por una oblicuidad que hace que las distancias recorridas por los rayos marginales se diferencien una de otra en *la longitud total de una onda.*

370. Cuando la diferencia entre los trayectos de los rayos marginales es la *mitad de la longitud de una onda*, tiene lugar una destruccion parcial de luz. La intensidad luminosa que corresponde á esta oblicuidad es poco menos de la mitad (exactamente 0,4) de la de la luz no difractada.

371. Si los trayectos de los rayos marginales difieren en tres semi-ondulaciones; y si el haz total se divide en tres partes iguales, dos de estas partes se neutralizarán completamente una á otra, y solo la tercera será efectiva. Tenemos, pues, una faja luminosa correspondiente á una oblicuidad que produ-

ce una diferencia de tres semi-ondulaciones en los rayos marginales, pero de una intensidad considerablemente menor que la faja central no difractada.

372. Con una diferencia marginal de cuatro semi-ondulaciones tenemos una segunda extincion del haz total, correspondiendo á esta oblicuidad un espacio de absoluta oscuridad. De este modo podiamos proseguir, siendo el resultado general, que siempre que la oblicuidad es tal que produce una diferencia marginal de trayectos igual á un número par de semi-ondulaciones, tenemos oscuridad completa; mientras que cuando la diferencia marginal es un número impar de semi-ondulaciones, tenemos solo apagamiento parcial y queda una parte del haz como una faja luminosa.

373. Basta un momento de reflexion para hacer evidente que cuanto mas corta sea la onda, menor será la oblicuidad necesaria para producir el retraso necesario. La máxima y la mínima de la luz azul deben, por consiguiente, caer mas cerca del centro que la máxima y mínima de la luz roja. La máxima y

la mínima de los demas colores cae entre estos dos extremos. De esta manera tan sencilla explica satisfactoriamente la teoría ondulatoria el fenómeno extraordinario referido en el párrafo 359. Cuando en lugar de la hendidura y el ojo desnudo se hace uso de la hendidura y un telescopio, los efectos se amplifican y se hacen mas brillantes.

MEDICION DE LAS ONDAS LUMINOSAS.

374. Ya estamos ahora en el caso de resolver el problema importante de medir la *longitud* de una onda luminosa.

375. La primera de nuestras fajas oscuras corresponde, segun se ha explicado ya, á una diferencia, en el trayecto marginal, igual á una ondulacion, la segunda faja oscura, á una diferencia de dos ondulaciones; la tercera faja oscura, á una diferencia de tres ondulaciones, y así sucesivamente. Con una hendidura de 1,35 milímetros de anchura, Schwerd halla que la distancia angular de la primera faja oscura al centro del campo visual era de 1 minuto y 38″. Las distancias angulares de

las otras fajas oscuras son, dos, tres, cuatro veces, etc., esta cantidad, es decir que están en progresion aritmética.

376. Dibújese una figura que represente la hendidura EC con el haz pasando por ella con la oblicuidad correspondiente á la primera faja oscura. Trácese desde el lado E de la hendidura una perpendicular al rayo marginal que pasa por el otro lado *d*. La distancia *cd*, entre el pié de esta perpendicular y el otro lado, es la longitud de la onda luminosa. Tomando por centro á E y con el ancho EC por rádio, descríbase un semi-círculo; siendo su rádio 1,35, la longitud de este semi-círculo se halla fácilmente que es de 4,248 milímetros. Ahora la longitud de este semi-círculo es á la longitud de la onda como 180° es á 1'38'' ó como 648,000'' es á 98. Tenemos pues la proporcion:

648,000 : 98 : : 4,248 : á la longitud *Cd* de la onda [1].

Hecho el cálculo encontraremos que la lon-

[1] *Cd* es tan pequeño que prácticamente coincide con el arco de círculo cuyo centro es E.

gitud de la onda en esta clase particular de luz (la roja) es de 0,000643 de milímetro ó 0,000026 de pulgada.

377. En lugar de recibir directamente en la retina las fajas coloreadas, se pueden recoger sobre una pantalla. En este caso es conveniente emplear un lente de gran fuerza convergente para reunir en un foco el haz que pasa por la primera hendidura, y colocar la segunda hendidura ó cualquier otro filo que cause la difraccion entre el foco y la pantalla. En este caso la luz emana virtualmente del foco.

378. Si se coloca el filo de un cuchillo en el haz paralelo á la hendidura, la sombra del filo estará limitada por una série de fajas paralelas de color. Si la luz es monocromática, las fajas serán solamente brillantes y oscuras. El lomo del cuchillo produce el mismo efecto que el filo. Un cuchillo de cortar papel, de madera ó de marfil, produce el mismo efecto que uno de acero. Las franjas son absolutamente independientes de la clase de materia alrededor de cuyo filo es difractada la luz.

379. Un alambre grueso, colocado en el

haz, produce franjas de colores por ambos lados de su sombra. Si el alambre es *fino*, ó si se emplea un cabello humano, la misma sombra geométrica se verá ocupada por rayas paralelas. Las primeras se llaman las *franjas exteriores*, y las últimas las franjas interiores. Todos estos fenómenos fueron explicados por Young y Fresnel como efectos de la interferencia.

380. Una hendidura está formada por dos filos que se dan frente uno á otro. Cuando se coloca una hendidura en el haz entre el foco y la pantalla, el espacio entre los dos filos está ocupado por fajas de color.

381. Mirando á un punto distante á través de una pequeña abertura circular se ve el punto rodeado por una série de bandas de color. Si la luz es monocromática, las bandas son sencillamente brillantes y oscuras; pero con la luz blanca los círculos presentan los colores del arco-iris.

382. Estos resultados son susceptibles de un sin fin de variaciones cambiando el tamaño, la figura y el número de las aberturas por donde se observa el punto luminoso. Los

faroles de las calles, mirados á través del tejido de un pañuelo, dan lugar á fenómenos de difraccion. Los efectos de difraccion obtenidos por Schwerd mirando á través de una pluma de pájaro son muy vistosos. La irisacion de las nubes en los Alpes es tambien un efecto de difraccion ([1]).

383. Siguiendo las indicaciones de la teoría Poison llegó al resultado paradógico de que en el caso de un *disco circular opaco* la iluminacion del centro de la sombra, producida

([1]) Esto puede imitarse con esporos de licopodio. Los fenómenos de difraccion de las *nubes actínicas* son extraordinariamente exp'éndidas. Uno de los casos mas interesantes de difraccion por las partículas pequeñas que han tenido ocasion de observarse, fué el de un artista cuya vista era perturbada por círculos vivamente colorados. Cuando vino á verme temia mucho perder la vista; atribuyendo como causa de su temor el que los círculos aumentaban en diámetro, y sus colores en intensidad. Atribuí los colores á partícu'as diminutas en los humores del ojo, y lo alenté asegurándole que el aumento de tamaño y de viveza en los colores indicaba que las partículas difractoras se hacian mas pequeñas y que acaso finalmente fueran absorbidas completamente. La prediccion se verificó. No es necesario decir una palabra respecto á la necesidad de los conocimientos ópticos para el oculista práctico.

por la difraccion en el canto del disco, es precisamente la misma que si no existiese el disco. Esta asombrosa consecuencia fué mas tarde confirmada experimentalmente por Arago.

COLORES DE LAS LÁMINAS DELGADAS.

384. Cuando un rayo de luz monocromática, por ejemplo, de luz roja pura, que es la que se obtiene mas fácilmente por absorcion, da en una película delgada y transparente, una parte de la luz es reflejada en la superficie exterior de la película, otra parte penetra y en parte es reflejada por la superficie interior.

385. Esta segunda porcion que ha atravesado en uno y otro sentido la película se retrasa con relacion á la luz que ha sido reflejada primero. Este caso se asemeja al de nuestras dos piedras sumergidas en agua en reposo á distintas distancias del punto A (párrafo 345).

386. Si el espesor de la película es tal que retrasa el haz reflejado en la segunda superficie una ondulacion completa ó un número cualquiera de ondulaciones completas, ó en otras palabras, un número par de semi-osci-

laciones, los dos haces reflejados trasmitiéndose por el mismo éter estarán en su *correspondencia completa ó acordes*; por consiguiente, se ayudarán mútuamente y harán que la película aparezca mas brillante de lo que lo haria cualquiera de ellas aisladamente.

387. Pero si el espesor de la película es tal que retrasa el haz reflejado por la segunda superficie, media ondulacion ó un número cualquiera impar de semi-ondulaciones, los dos haces reflejados estarán *completamente discordes*, y se seguirá una destruccion de luz. Por medio de la adicion de luz que haya sufrido mas de una reflexion en la segunda superficie á la luz que solo ha sufrido una reflexion, el haz reflejado por la primera superficie puede ser destruido *totalmente*. Allí donde tiene lugar esta destruccion total de la luz, la película aparece negra.

388. Si la película es de espesor variable, sus distintas partes aparecen brillantes ú oscuras segun el espesor favorece la correspondencia ó discordancia de los rayos reflejados.

389. A causa de las diferentes longitudes de las ondas luminosas, los distintos colores

requieren distintos espesores para producir correspondencia ó discordancia; cuanto mayor sea la onda, mayor debe ser el espesor de la película. Por consiguiente los espesores que efectuan la extincion de un color no destruyen los demás, y por lo tanto cuando una película de espesor variable está iluminada por la luz *blanca*, despliega una porcion de colores.

390. Estos colores son llamados colores de las láminas delgadas.

391. Los colores de una bola de jabon, del aceite ó la brea sobre el agua, del acero templado, los brillantes colores de las escorias de plomo, los metalocromos de Nobili, los relucientes colores de las alas de ciertos insectos, todos son colores de láminas delgadas. Los colores son producidos por películas transparentes de todas clases. En el cuerpo de algunos cristales vemos á menudo colores irisados debidos á películas vacías producidas por fracturas interiores. Al cortar el hielo oscuro en los marjales de los ventisqueros, á menudo tiene lugar la fractura interior, y los colores de las láminas delgadas relucen sobre el hielo con extraordinaria brillantez.

392. Newton colocó un lente de pequeña curvatura en contacto óptico con una superficie plana de cristal. Entre el lente y la superficie tenia una película de aire que aumentaba de espesor desde el punto de contacto hácia la parte exterior. De este modo obtuvo con la luz monocromática una série de anillos negros y brillantes, correspondientes á los diferentes espesores de la película de aire que producian alternativamente la correspondencia y la discordancia.

393. Los anillos producidos por la luz violada, eran menores que los producidos por la roja, mientras que los anillos producidos por los demas colores estaban entre estos dos extremos. De aquí que cuando se emplea la luz blanca, los *anillos de Newton* aparecen como una sucesion de círculos de colores. Con la luz monocromática se ve un número mucho mayor de anillos que con la luz blanca, porque los anillos de distintos colores pasado cierto espesor de la película se sobreponen y se vuelven á combinar para formar la luz blanca.

394. Newton midió con maravillosa exactitud atendidos los medios con que contaba

los diámetros de sus anillos: determinó tambien deduciéndolo de su longitud focal y su índice de refraccion, el diámetro de la esfera de que era parte el lente que usaba. Halló que los cuadrados de los diámetros de los anillos crecian en progresion aritmética y por consecuencia que los espesores de la película de aire correspondientes á los diámetros de los anillos, crecian tambien en proporcion aritmética.

395. Determinó tambien el espesor absoluto de las capas de aire en que se formaban los anillos. Empleando los rayos mas luminosos del espectro, á saber, los rayos limítrofes del amarillo y el naranjado, encontró que el espesor correspondiente al primer anillo brillante era $\frac{1}{178000}$ de pulgada.

396. La série completa de los anillos brillantes se formaba sucesivamente á los espesores siguientes:

$$\frac{1}{178000}, \frac{3}{178000}, \frac{5}{178000}, \frac{7}{178000}, \text{etc.},$$

y la série de anillos oscuros que separan á los brillantes, cuando los espesores eran

$$\frac{2}{178000}, \frac{4}{178000}, \frac{6}{178000}, \frac{8}{178000}, \text{etc.}$$

397. Para explicar los anillos, Newton supuso que las partículas luminosas estaban sujetas á *paroxismos* ó *convulsiones de fácil trasmision* y *fácil reflexion*. Probablemente se imaginó que las partículas estaban dotadas al mismo tiempo de un movimiento de traslacion por el espacio y un movimiento de rotacion sobre sus propios ejes. Si suponemos que estas partículas se asemejan á pequeños imanes que presentan alternativamente polos atractivos ó repulsivos á la superficie á que se acercan, tendremos una idea conforme á las nociones de Newton.

398. Con arreglo á este supuesto, la reflexion y refraccion ordinarias dependerian de que se presentan los polos atractivos ó repulsivos de las partículas á la superficie refractiva ó refractora.

399. Imagínense, pues, las partículas luminosas rotatorias, penetrando en la película de aire contenida entre el lente y el plano de Newton. Si la distancia entre estos es bastante para que tenga tiempo la partícula de verificar *una rotacion completa*, presentará á la segunda superficie el mismo polo que pre-

sentó á la primera. Por consiguiente, será trasmitida y no volverá al ojo.

400. Este mismo efecto tendrá lugar si la distancia entre la placa y el lente fuese tal que permitiese á la partícula de luz, dar dos, tres, cuatro ó mas vueltas completas. *De esta manera se explicaron los anillos oscuros de Newton.* Se presentaban en aquellos sitios donde las partículas de luz, en lugar de ser devueltas al ojo desde la segunda superficie de la película, eran trasmitidas á través de aquella superficie.

401. Pero si el espesor de la película era tal que solo permitia á la partícula de luz que habia atravesado la primera superficie verificar *media vuelta* antes de llegar á la segunda superficie; entonces se presentaba á esta última un polo repulsivo, y las partículas eran rechazadas al ojo. Lo mismo ocurrirá si la distancia es tal que permite á la partícula de luz dar tres, cinco, siete, ú otro número impar de medias vueltas. *De este modo se explicaron los anillos brillantes de Newton*; se presentaban en los sitios en que las partículas de luz al llegar á la segunda superfi-

cie de la película era reflejada hácia el ojo.

402. La teoría de la emision queda aquí batida completamente por la teoría de las ondulaciones. Newton supone que la accion que produce los anillos alternados brillantes y oscuros, se verifica en una sola superficie, ó sea en la segunda superficie de la película. La teoría ondulatoria afirma que los anillos se producen por la interferencia de rayos reflejados por ambas superficies. Así se ha demostrado que sucede. Empleando la luz polarizada (que mas adelante se describirá y explicará) podemos destruir la reflexion en la primera superficie de la película, y cuando esto se ha hecho, los anillos desaparecen completamente.

403. Es, no obstante, evidente la belleza y sutilidad de la concepcion de Newton cuya teoría es comprobada en apariencia con el hecho de que la *luz trasmitida* forma anillos de muy poca intensidad y que los anillos brillantes formados por la luz trasmitida, corresponden á espesores que producen anillos oscuros con la luz reflejada.

404. Los anillos trasmitidos son atribuidos

en la teoría ondulatoria á la interferencia de rayos que han pasado directamente á través de la película con otros que han sufrido dos reflexiones dentro de esta. De este modo se explican completamente.

NOTA.—El espesor $\frac{1}{178000}$ á que se hace referencia en el párrafo 396 como correspondiente al primer anillo brillante *es la cuarta parte* de la longitud de una ondulacion de la luz empleada por Newton. Por consiguiente, al pasar en uno y otro sentido á través de la película los rayos reflejados en la segunda superficie quedan *media* ondulacion detras de los reflejados en la primera superficie. Con este espesor, por lo tanto, con arreglo á las leyes de la interferencia, el anillo deberia ser *oscuro* en lugar de *brillante*. La misma observacion se puede aplicar á los espesores $\frac{3}{178000}$, $\frac{5}{178000}$, etc., que corresponden: el primero á un retraso de tres, y el segundo á uno de cinco semi-ondulaciones. Con respecto á los anillos oscuros, el primero ocurre con un espesor que es la mitad de la longitud de una ondulacion; el segundo con un espesor que duplicado es igual á dos ondulaciones; el ter-

cero con un espesor que duplicado es igual á tres ondulaciones. Por lo tanto, si *solo tomamos en cuenta el espesor de la película*, los anillos brillantes deberian ser oscuros y los oscuros brillantes.

Pero hay que tener en cuenta en esto algo mas que el espesor. En el caso de la primera superficie de la película la onda pasa del éter denso del cristal al éter raro del aire. En el caso de la segunda superficie de la película la onda pasa del éter raro del aire al éter denso del cristal. Esta diferencia en las dos superficies reflectoras de la película puede demostrarse que es equivalente al *aumento de la longitud de media ondulacion* al espesor de la película. Al espesor absoluto medido por Newton, hay que añadir en cada caso la longitud de una semi-ondulacion; hecho esto, los anillos se siguen unos á otros en completo acuerdo con la ley de la interferencia enunciada en los párrafos 348 al 350.

DOBLE REFRACCION.

405. En el aire, en el agua y en el cristal bien templado, el éter luminífero tiene en to-

dos sentidos la misma elasticidad. No hay nada en la agrupacion molecular de estas sustancias que trastorne la perfecta homogeneidad del éter.

406. Pero cuando el agua cristaliza y forma el hielo, no sucede lo mismo; entonces las moléculas se ven obligadas por fuerzas propias á agruparse de cierta manera determinada. Están, por ejemplo, mas reunidas en unas direcciones que en otras. Esta colocacion de las moléculas lleva consigo una nueva distribucion del éter que las rodea, que hace que tenga *distintos grados de elasticidad segun las distintas direcciones.*

407. En una plancha de hielo, por ejemplo, la elasticidad del éter en direccion perpendicular á la superficie de congelacion es diferente de la elasticidad que tiene en direccion paralela á la misma superficie.

408. Esta diferencia se hace sensible de un modo peculiarmente notable en el espato de Islandia, que es carbonato de cal cristalizado, en el cual á consecuencia de estas dos elasticidades diferentes la onda de luz al atravesar el espato *se divide en dos*: la una rápi-

da, correspondiente á la mayor elasticidad, y la otra, lenta, correspondiente á la elasticidad menor.

409. Donde la velocidad es mayor, la refraccion es menor; y donde la velocidad es menor, la refraccion es mayor. De aquí que en el espato de Islandia, como tenemos dos ondas que se mueven con diferentes velocidades, tengamos *doble refraccion*.

410. Esto es tambien cierto en la mayor parte de los cuerpos cristalizados. Si el agrupamiento de las moléculas no es semejante en todas direcciones, el éter no tendrá igual elasticidad en todas direcciones y resultará infaliblemente la doble refraccion.

411. En la sal gemma, el alumbre y otros cristales tiene lugar el agrupamiento homogéneo de las moléculas y estos cristales se comportan como el cristal, el agua ó el aire.

412. En ciertos cristales que presentan la doble refraccion, las moléculas están coordinadas del mismo modo por todos los lados de cierta direccion. Por ejemplo, en el hielo la colocacion molecular es la misma alrededor

de las perpendiculares á la superficie de congelacion.

413. Del mismo modo, en el espato de Islandia las moléculas están colocadas simétricamente respecto al eje cristalográfico, esto es, respecto á la diagonal mas corta del romboedro que forman los planos del clivaje [1].

414. Cuando un haz luminoso pasa á través del hielo perpendicularmente al plano de congelacion, ó á través del espato de Islandia paralelamente al eje de cristalizacion, *no hay doble refraccion*. Estos casos sirven de ejemplo, es decir, que no hay doble refraccion en la direccion respecto de la cual la colocacion molecular es idéntica en todos sentidos.

415. Esta direccion en la cual no hay do-

[1] La colocacion de las moléculas en el espato de Islandia es tal que puede ser rajado ó clivado con la misma y gran facilidad en tres direcciones diferentes. Los planos de clivaje son en este caso oblícuos unos á otros. La sal gemma tambien se divide igual y facilmente en tres direcciones, pero los planos de clivaje son perpendiculares unos á otros. De aquí que mientras la sal gemma se divide en *cubos* el espato de Islandia lo haga en romboedros. Muchos cristales se dividen con distinta facilidad en diferentes direcciones; por ejemplo, la selenita y azúcar cande.

ble refraccion, se llama el eje óptico del cristal.

Nota.—Siendo las vibraciones del éter transversales á la direccion del rayo, la elasticidad que determina la rapidez de la trasmision, es la *perpendicular* á la direccion del rayo. En el espato de Islandia la velocidad es la menor en direccion del eje, y por consiguiente, la elasticidad perpendicular al eje es el *mínimum*. El rayo, por otra parte, cuyas vibraciones se ejecutan á lo largo del eje, es el mas rápido; luego la elasticidad del éter en direccion del eje, es el *máximum*. En los cuerpos perfectamente homogéneos la superficie de elasticidad seria una esfera; tendria por medida una misma longitud de rádio en todas direcciones. En el espato de Islandia la superficie de elasticidad es un elipsoide cuyo eje mayor coincide con el eje del cristal.

FENÓMENOS QUE PRESENTA EL ESPATO DE ISLANDIA.

416. Los dos haces en que el espato divide el haz incidente, no se comportan del mismo modo. Uno de ellos obedece á la ley

ordinaria de la refraccion; su índice de refraccion es perfectamente constante é independiente de su direccion á través del cristal. Los ángulos de incidencia y refraccion están en el mismo plano como en el caso de la refraccion ordinaria. Este rayo recibe el nombre de *rayo ordinario*. Respecto á él, el seno del ángulo de incidencia es al seno del ángulo de refraccion, ó la velocidad de la luz en el aire es á la velocidad en el cristal, como la razon constante de 1,654 á 1. El número 1,654 *es el índice ordinario* del espato de Islandia.

417. Pero el otro haz obra de distinto modo. Su índice de refraccion no es constante, ni el ángulo de refraccion por regla general está en el mismo plano que el ángulo de incidencia. El rayo que así se comporta se llama el *rayo extraordinario*. Si se hace un prisma de espato con un ángulo refringente paralelo al eje óptico, cuando el haz incidente atraviesa el prisma *perpendicularmente* al eje óptico la separacion de sus dos partes es el máximum. En este caso se pone en juego la diferencia total entre la elasticidad

en direccion del eje y la perpendicular, y el rayo extraordinario sufre el *mínimum* de retraso y, por consiguiente, su refraccion es la mínima tambien. En este caso su índice de refraccion es 1,483.

418. El índice de refraccion del rayo extraordinario varía con su direccion á través del cristal entre 1,483 y 1,654. El *valor mínimo* de la relacion entre los dos senos ó entre las dos velocidades, ó sea 1,483, se llama el *índice extraordinario*.

419. Cuando se mira á una abertura pequeña á través de un romboedro de espato de Islandia se ven dos aberturas. Si se coloca el rombo sobre una hoja de papel blanco en que haya una tilde negra, se ven dos tildes; y si se da la vuelta al espato, una de las imágenes de la tilde girará alrededor de la otra.

420. La imágen que gira es la formada por el rayo extraordinario.

421. Una de las dos imágenes de la tilde está ademas mas próxima que la otra. El rayo ordinario se comporta como si procediese de un medio mas refringente, y cuanto mayor es la refraccion, mas cerca debe aparecer la imá-

gen. En los párrafos 131 y 132 hemos hablado de la poca profundidad aparente del agua. Es aun mas pronunciada con el bisulfuro de carbono á causa de la mayor refraccion. En el espato de Islandia el índice ordinario está, respecto al extraordinario, en la misma relacion que el índice del bisulfuro de carbono al del agua; luego la imágen ordinaria debe aparecer mas próxima que la extraordinaria.

422. Brewster hizo ver que un gran número de cristales poseian dos ejes ópticos ó dos direcciones en las cuales un haz luminoso pasa sin dividirse. El azúcar cristalizada, la mica, el espato pesado, el sulfato de cal y el topacio, son ejemplos de esto.

423. Los cristales se dividen por lo tanto en

I. *Cristales de refraccion simple*, como la sal gemma, el alumbre y el espato fluor;

II. Cristales de refraccion doble, de los cuales tenemos dos clases.

a. Cristales de un eje ó los que tienen un solo eje óptico, como el espato de Islandia, el cristal de roca y la turmalina; y

b. Cristales de dos ejes que tienen dos ejes ópticos, como la aragonita, el feldespato y los mencionados en el párrafo 422.

424. Cuando un haz de luz cae oblícuamente sobre una placa de espato de Islandia cortada perpendicularmente al eje, el rayo ordinario por ser el mas refractado está mas próximo al eje que el extraordinario. El rayo extraordinario es en cierto modo *repelido* por el eje. Pero Biot hizo ver que hay muchos cristales en los cuales ocurre lo contrario, á saber, que el rayo extraordinario está mas cerca del eje que el ordinario siendo en cierto modo *atraido*. A los de la primera clase llamó cristales repulsivos ó *negativos*; el espato de Islandia, el rubí, el záfiro, la esmeralda, el berilo y la turmalina, son negativos. A la segunda clase llamó cristales atractivos ó *positivos*, y entre ellos están el cristal de roca, el hielo y el zirconio.

POLARIZACION DE LA LUZ.

425. La doble refraccion del espato de Islandia fué descubierta por Erasmo Bartolino

y la describió por primera vez en una obra que publicó en Copenhagen en 1669. El célebre Huygens trató de explicar este fenómeno con arreglo á los fundamentos de la teoría ondulatoria, y lo logró.

426. En sus experiencias sobre este asunto, Huygens halló que cuando un haz ordinario de luz atraviesa el espato de Islandia en cualquiera direccion que no sea la del eje óptico, se divide siempre en dos haces de *igual intensidad*; pero que cuando se hace pasar cualquiera de estos dos medios haces á través de un segundo pedazo de espato, generalmente se divide en dos partes de *intensidad desigual*, y que hay dos posiciones del espato en que uno de los haces desaparece completamente.

427. Haciendo girar el espato alrededor de esta posicion en que desaparece completamente uno de los haces, vuelve este á aparecer; haciéndose mas turbio su compañero, ambos pasan por una fase de intensidad igual, y continuando la rotacion el primer rayo trasmitido desaparece á su vez.

428. Reflexionando Newton sobre este ex-

perimento concluyó que el haz dividido habia adquirido *lados* al atravesar el espato de Islandia y que su interceptacion y trasmision dependia del modo con que estos lados se presentaban á las moléculas del segundo cristal. Comparaba los *dos lados* de un rayo de luz á los dos extremos de un iman que constituyen sus polos ó sea su polarizacion; y mas adelante cuando un haz de luz presentaba esta propiedad de tener dos *lados*, se dijo que estaba polarizado.

429. En 1808 Malus, mirando á través de un prisma birefringente á una de las ventanas del Palacio de Luxembourg, en la que se reflejaba la luz solar, encontró que en cierta posicion del espato casi desaparecia la imágen ordinaria de la ventana; en tanto que en una posicion perpendicular á la primera, desaparecia la imágen extraordinaria. Concibió la analogía entre este hecho y el descubierto por Huygens en el espato de Islandia, y sacó la consecuencia de que el efecto era debido á alguna propiedad nueva, adquirida por la luz al ser reflejada por el cristal.

430. ¿Qué propiedad es esta? Puede com-

prenderse y estudiarse de un modo muy sencillo por medio del cristal llamado turmalina. Este cristal es birefringente; divide al haz de luz incidente en dos, pero su agrupacion molecular y consiguiente disposicion del éter, es tal que uno de estos haces es anulado rápidamente, en tanto que el otro es trasmitido con facilidad relativa.

431. Debe tenerse presente que los movimientos individuales de las partículas del éter son transversales á la direccion en que se propaga la luz (léase el párrafo 219). *En un haz de luz ordinaria las vibraciones tienen lugar en todas direcciones alrededor de la línea de propagacion.*

432. El cambio que sufre la luz al atravesar una placa de turmalina de suficiente espesor y cortada paralelamente al eje, es el siguiente: Todas las vibraciones, excepto las ejecutadas en direccion paralela al eje, son anuladas dentro del cristal, de donde se deduce que el haz emergente de la placa de turmalina tiene todas sus vibraciones reducidas á un solo plano. En este estado es un haz de *luz polarizada plana.*

433. Imagínese un haz cilíndrico de luz con todas sus partículas etéreas vibrando en la misma direccion, por ejemplo, horizontalmente; mirándolo verticalmente, las partículas etéreas, si fuesen suficientemente grandes, se verian haciendo sus excursiones de un lado á otro de la direccion del haz. Mirándolo atravesado y horizontalmente, se verian las partículas adelantándose y retirándose; pero sus trayectos serian invisibles porque cada una cubriria el suyo. En el un caso veriamos las líneas de excursion; en el otro solo los *extremos* de estas líneas. En esto consiste, segun la teoría ondulatoria, la propiedad de tener *dos lados*, descubierta por Huygens y comentada por Newton.

POLARIZACION DE LA LUZ POR LA REFLEXION.

434. Esta cualidad de polarizarse se imprime tambien á la luz por la reflexion. Este es el gran descubrimiento de Malus. Un haz reflejado por un cristal, es polarizado en parte para todas las incidencias oblícuas, reducién-

dose á un plano comun una parte de sus vibraciones. Con cierta incidencia particular el haz es *completamente polarizado*, reduciéndose *todas* sus vibraciones al mismo plano. El ángulo de incidencia que corresponde á esta polarizacion completa se llama *ángulo de polarizacion*.

435. El ángulo de polarizacion está relacionado con el índice de refraccion del medio por una curiosa ley descubierta por sir David Brewster (1). Un haz luminoso incidente sobre una sustantacia transparente, es reflejado en parte y en parte refractado. Hay un ángulo particular de incidencia que hace que las dos partes del haz, la reflejada y la refractada, sean recíprocamente perpendiculares. Este ángulo de incidencia es en este caso el ángulo de polarizacion. Esta es la expresion geométrica de la ley de Brewster.

436. El ángulo de polarizacion aumenta con el índice de refraccion del medio. Para el agua es de 53°, para el cristal 58° y para el diamante 68°.

(1) El índice de refraccion del medio es la tangente del ángulo de polarizacion.

437. Así, pues, un haz de luz ordinaria, cuyas vibraciones se verifican en todas direcciones, chocando sobre un plano de cristal con un ángulo de incidencia igual al de polarizacion, despues de la reflexion, tiene todas sus vibraciones reducidas á un plano comun. La direccion de las vibraciones del haz polarizado *es paralela á la superficie polarizante.*

438. Hagamos que un haz de luz polarizada de este modo por la reflexion sobre la superficie de un plano de cristal choque con otro segundo plano formando el ángulo de polarizacion. En cierta posicion de este plano el haz sufre el máximum de reflexion. En otra posicion determinada, el haz es *trasmitido en totalidad*, no hay reflexion. En este experimento el ángulo de incidencia no varía, nada se altera sino el *lado* del rayo que choca con la superficie reflectora.

439. La reflexion del haz polarizado es el máximum cuando las líneas á lo largo de las cuales vibran las partículas etéreas, son paralelas á la superficie reflectora. Se trasmite totalmente cuando las líneas de vibracion chocan en la superficie reflectora con el ángulo

de polarizacion. Entonces la reflexion es *cero*. Aprovechando este hecho ha podido anularse la reflexion de la primera superficie de una película delgada, y se ha hecho imposible la formacion de los anillos de Newton segun se dijo en el párrafo 402.

440. Un haz que encuentra á la primera superficie de una placa de cristal de caras paralelas bajo el ángulo de polarizacion, encuentra tambien á la segunda superficie con su ángulo de polarizacion y es allí en parte reflejada y perfectamente polarizada. De aquí que aumentando el número de placas las reflexiones repetidas en las superficies de contacto proporcionen un haz polarizado de mayor intensidad que el obtenido por la reflexion sobre una sola superficie.

POLARIZACION DE LA LUZ POR LA REFRACCION.

441. Hasta ahora hemos fijado nuestra atencion sobre la parte reflejada del haz; pero la parte refractada que penetra en el cristal tambien es polarizada parcialmente. Las can-

tidades de luz polarizada en los haces reflejado y refractado *son siempre iguales una á otra.*

442. El plano de vibracion del haz refractado es *perpendicular* al del haz reflejado.

443. Cuando se colocan varias placas de cristal paralelas unas á otras y se deja caer sobre ellas con el ángulo de polarizacion un haz de luz, cada vez que este pasa de una á otra, se refleja una cantidad de luz polarizada y otra igual penetra en el cristal al mismo tiempo. Aumentando debidamente el número de placas, la polarizacion por las refracciones sucesivas puede hacerse sensiblemente *perfecta*. Cuando llega este caso, si se añaden mas placas, *cesa enteramente* la reflexion en las superficies de contacto y el haz despues de esto es trasmitido en totalidad.

POLARIZACION DE LA LUZ POR LA DOBLE REFRACCION.

444. Nuestras últimas consideraciones han tenido por objeto la luz polarizada por la refraccion ordinaria. Ya hemos hablado de la

polarizacion de la luz por la doble refraccion en los párrafos 432 y 433. Ahora extenderémos nuestro exámen del cristal de turmalina, y de él sacarémos partido para examinar otros cristales.

445. Si un haz de luz que ha atravesado una placa de turmalina choca sobre una segunda placa, atravesará las dos si los ejes de las dos placas son *paralelas*. Pero si son *perpendiculares* uno ú otro, entonces la luz trasmitida por la una es anulada por la otra, quedando en la oscuridad el espacio donde las dos placas están sobrepuestas.

446. Si los dos ejes son *oblícuos*, uno respecto al otro, una parte de la luz atravesará las dos placas. Porque de un modo análogo á la descomposicion de las fuerzas mecánicas, una vibracion oblícua puede descomponerse en dos, una paralela y la otra perpendicular al eje de la turmalina. Esta última componente es *anulada*, pero la primera es *trasmitida*.

447. De esto se sigue que si los ejes de dos placas de turmalina son perpendiculares uno á otro, una tercera placa de turmalina

introducida *oblícuamente* entre ellas, ó una placa de cualquier otro cristal que obre de una manera semejante á la turmalina, trasmitirá una parte de la luz emergente del primer cristal. Siendo el plano de vibracion de esa luz oblícuo respecto al eje del cristal, tambien pasará por esta parte de la luz. Introduciendo por lo tanto un tercer cristal cuyo eje sea oblícuo, iluminamos parcialmente el espacio donde están sobrepuestas las dos placas perpendiculares.

EXÁMEN DE LA LUZ TRASMITIDA Á TRAVÉS DEL ESPATO DE ISLANDIA.

448. Tenemos que examinar ahora por medio de la placa de turmalina las dos partes en que se divide un haz luminoso al atravesar el espato de Islandia.

449. Limitando nuestra atencion á uno de los dos haces, hallamos inmediatamente que en cierta posicion de la placa la luz es trasmitida libremente en tanto que en otro perpendicular es completamente interceptada.

Esto prueba que el haz emergente del espato está polarizado.

450. De la posicion de la turmalina podemos inferir inmediatamente la direccion de las vibraciones en el haz polarizado. Si la trasmision tiene lugar cuando el eje de la placa de turmalina es vertical, las vibraciones son verticales; si la trasmision tiene lugar cuando la turmalina esté horizontal, son horizontales. El mismo procedimiento aplicado al segundo haz nos demuestra que este tambien está polarizado.

451. Las vibraciones de las partículas de éter en los dos haces se verifican en planos que son perpendiculares entre sí. Si en uno de los haces las vibraciones son verticales, en el otro son horizontales. Una placa de turmalina con un eje vertical trasmite el primero é intercepta el segundo, en tanto que la misma placa en posicion horizontal intercepta el primero y trasmite el segundo.

452. Una placa de turmalina colocada con su eje vertical en frente de la lámpara eléctrica, produce, por medio de un lente, una imágen que puede recogerse en una pantalla.

Colocando un pedazo de espato de Islandia en frente del lente con uno de sus planos de vibracion horizontal y el otro vertical, divide el haz en dos y produce *dos imágenes* de la turmalina. Una de estas dos imágenes es *brillante*, y la otra *oscura*. La razon de esto es que en la luz emergente de la turmalina las vibraciones son verticales y solo pueden ser trasmitidas á través del espato en compañía del haz que vibra verticalmente. En el haz que vibra horizontalmente la turmalina tiene que aparecer negra.

453. Tambien es negra si la luz que de ella procede y que la rodea encuentra, con el ángulo de polarizacion, una placa de cristal cuyo plano de reflexion sea vertical; y es brillante cuando la luz es reflejada horizontalmente. Estos efectos son consecuencia de la ley de la polarizacion por reflexión.

454. No son solo los cuerpos cristalizados los que poseen esta facultad de la doble refraccion y la polarizacion, sino que la tienen tambien todos los cuerpos cuya agrupacion atómica es tal que hace que el éter que existe dentro de ellos posea dife-

rentes elasticidades en distintas direcciones.

455. Así se observa que las estructuras orgánicas son generalmente birefringentes. Tambien puede hacerse birefringente el cristal ordinario por medio de la presion ó la dilatacion. Las dilataciones y presiones debidas á un calentamiento irregular, producen la doble refraccion. El vídrio sin recocer se comporta como un cristal. Un plano de vídrio de ventana que en las circunstancias ordinarias no presenta señales de la de doble refraccion, si se le calienta por un solo punto, se hace birefringente por efecto de los esfuerzos y presiones que se propagan alrededor del punto calentado. La introduccion de cualquiera de estos cuerpos entre las *placas cruzadas* de turmalina destruye en parte la oscuridad producida por la posicion de las placas.

456. Dos placas de turmalina, entre las cuales pueden introducirse los cuerpos para examinarlos por medio de la luz polarizada, constituyen la forma mas sencilla del *polariscopo*. La placa en la que penetre primero la luz se llama el *polarizador* y la otra el *analizador*.

457. Pero las turmalinas son pequeñas, generalmente con color y nunca suficientes para proporcionar un haz intenso de luz polarizada. Si se pudiese anular uno de los dos haces en que el espato de Islandia divide la luz, el otro estaria polarizado, y á causa de la transparencia del espato seria mas intenso que ningun haz de los que pueden obtenerse de la turmalina.

458. Esto fué llevado á cabo por Nicol con gran habilidad. Cortó un paralelipípedo largo de espato en dos secciones muy oblícuas, pulimentó las dos superficies y las reunió por medio de bálsamo del Canadá. La refrangibilidad del bálsamo es intermedia entre la de los rayos ordinario y extraordinario del espato, siendo menor que la del primero y mayor que la del segundo. Por lo tanto, cuando un haz de luz atraviesa el paralelipípedo, el rayo ordinario al penetrar en el bálsamo, pasa de un medio *mas denso á uno mas raro.* A causa de la oblicuidad de su incidencia es *reflejado totalmente* y de esta manera se sale de él. El rayo extraordinario, por el contrario, al pasar del espato al bálsamo,

pasa de un *medio mas raro á otro mas denso*, y, por consiguiente, es *trasmitido*. De este modo obtenemos un haz solo de luz polarizada intensa. (Léanse los párrafos 123, 141 y 142).

459. Un paralelipípedo preparado en la forma que se ha descrito, es lo que se llama un *prisma de Nicol*.

460. Los prismas de Nicol son de inmensa utilidad en las experiencias sobre polarizacion. Con ellos se construyen los mejores polaríscopos. Tambien se construyen polaríscopos de reflexion, que consisten en dos planos de cristal, uno de los cuales polariza la luz por reflexion y el otro examina la luz polarizada de este modo. En este caso la luz reflejada por el polarizador, es reflejada ó anulada por el analizador: segun los planos de reflexion de los dos espejos son paralelos ó perpendiculares entre sí.

COLORES DE LOS CRISTALES BIREFRINGENTES Á LA LUZ POLARIZADA.

461. Un gran grupo de estos colores pueden demostrarse y explicarse refiriéndolos á lo que sucede con las láminas delgadas de yeso cristalizado (sulfato de cal cristalizado, llamado vulgarmente *selenita*) interpuestas entre el polarizador y el analizador del polariscopo.

462. Estos cristales se dividen fácilmente en una direccion y mas difícilmente en otras dos, siendo desiguales estos dos últimos clivajes. En otras palabras, el yeso posee tres planos de clivaje de distinto valor, pero uno de los cuales se distingue por su perfeccion.

463. Siguiendo estos clivajes, es fácil obtener de un cristal laminitas romboidales del espesor que se necesiten.

464. Como podria esperarse del carácter de sus clivajes, estos cristales son birefringentes. Un haz de luz ordinaria entrando perpendicularmente en una placa de yeso, cuyas superficies sean los planos perfectos de facetacion ó clivaje, tiene reducidas sus vibra-

ciones á dos planos perpendiculares entre sí; esto es, el haz cuyo éter antes de entrar en el yeso vibra en todas las direcciones trasversales, despues de penetrar en el yeso y despues de salir de él, vibra solo en dos direcciones perpendiculares.

465. La elasticidad del éter es diferente en cada una de estas dos direcciones perpendiculares; por consiguiente un haz atraviesa el yeso con mas velocidad que el otro.

466. En los cuerpos refractores el retraso de la luz consiste generalmente en una disminucion de la *longitud de las ondas* de la luz. La *velocidad de vibracion* no cambia durante el paso de la luz á través del cuerpo. El caso es exactamente semejante al de un sonido músico trasmitido del agua al aire. La velocidad se reduce á la cuarta parte en la trasmision, porque la longitud de las ondas se reduce á la cuarta parte. Pero la *altura* ó *elevacion* que depende del número de ondas que llegan al oido en un segundo no sufre alteracion.

467. A causa de la diferencia de elasticidad entre las dos direcciones perpendiculares de

la vibracion en el yeso, las ondas del éter se acortan mas en una direccion que en otra.

468. En las experiencias que se hacen con un pedazo de yeso cristalizado y que vamos á describir y explicar, emplearemos como polarizador un pedazo de espato de Islandia, uno de cuyos haces se intercepta con un diafragma. Nuestro analizador será un prisma de Nicol.

469. Cuando los planos de vibracion del espato y del Nicol coinciden, la luz atraviêsa á ambos y puede recogerse sobre una pantalla. Cuando los planos de vibracion son perpendiculares entre sí, la luz emergente del espato es interceptada por el Nicol y la pantalla está oscura.

470. Si se coloca una placa de selenita entre el polarizador y el analizador, de modo que uno de sus planos de vibracion coincida con el del polarizador ó el del analizador, no produce ningun cambio en la pantalla. Si la pantalla está iluminada, iluminada se queda; si oscura, oscura despues de introducir el yeso que en este caso se comporta como un plano ordinario de vidrio.

471. Supongamos que la pantalla esté oscura. Interponiendo una placa *gruesa* de yeso con sus direcciones de vibracion *oblícuas* con respecto á la del polarizador y la del analizador, la luz *blanca* llega á la pantalla. Si la placa es delgada, la luz que llega á la pantalla tiene color. Si la placa es de un grueso uniforme, el color es tambien uniforme. Si es de distintos gruesos, ó al hacer el clivaje quedan escamas delgadas unidas á la superficie, algunas partes de la pantalla tendrán distinto color que el resto.

472. Cuando se emplean placas gruesas, los diferentes colores, como en el caso de las láminas delgadas, se sobreponen y reconstituyen la luz blanca.

473. La cantidad de luz que llega al ojo es el máximum cuando los planos de vibracion del yeso forman un ángulo de 45° con los del polarizador y el analizador.

474. Si la placa de selenita es una cuña delgada y la luz es monocromática, por ejemplo roja, se ven en la pantalla fajas alternadas rojas y oscuras.

475. Si en lugar de la luz roja se emplea

lá *azul*, se encuentra que las fajas azules se producen con espesores menores que las que producen las rojas, los demas colores se producen en los espesores intermedios. De aquí que, cuando se emplea la luz *blanca* en lugar de fajas brillantes separadas unas de otras por intervalos oscuros, obtenemos una série de fajas irisadas.

476. Si en lugar de una cuña que aumenta gradualmente de espesor desde el filo hasta la cabeza, empleamos un disco que vaya aumentando gradualmente en grueso desde el centro á la circunferencia; en lugar de una série de fajas paralelas, obtenemos, á igualdad de circunstancias, con la luz *blanca* una série de círculos concéntricos con los colores del arco-íris.

477. Tenemos aquí en primer lugar un haz de luz plana polarizada que penetra en la selenita. La direccion de la vibracion de este haz se descompone en otras dos perpendiculares entre sí, á saber: en las dos direcciones en que el éter vibra dentro del cristal. Uno de estos sistemas de ondas se *retrasa* con relacion al otro.

478. Pero en tanto que los rayos vibran perpendicularmente unos á otros no puede haber interferencia que aumente ó disminuya la intensidad. Para que se verifique la interferencia, los rayos deben vibrar en el mismo plano.

479. La funcion del analizador es reunir en un solo plano los dos sistemas de ondas perpendiculares. Aquí ya se hace sensible el efecto del retraso y las ondas se ayudan ó se oponen unas á otras segun sus vibraciones están en la *misma fase* ó en *fases opuestas*.

480. Cuando los planos de vibracion del polarizador y del analizador son paralelos, un grueso del cristal de yeso que produzca un retraso de *media ondulacion* hace que el analizador anule la luz.

481. Cuando el polarizador y el analizador están *cruzados*, un retraso de media ondulacion ó de cualquier número impar de semi-ondulaciones dentro del cristal no produce la anulacion cuando estas vibraciones son combinadas por el analizador. Un retraso de una ondulacion entera, ó de cualquier número de ondulaciones completas produce en este caso

la extincion de la luz. Esto, en sus resultados, es una consecuencia clara de la composicion de las vibraciones.

482. Hablando en general, los fenómenos á que dan lugar el polarizador y el analizador paralelos ó cruzados, son *complementarios*. Si el campo de la pantalla está oscuro cuando están cruzados, estará brillante cuando estén paralelos. Si el campo está verde cuando están cruzados, estará rojo cuando estén paralelos; si amarillo cuando están cruzados, azul cuando son paralelos. De este modo una rotacion de 90° hace presentarse el color complementario.

483. Si en lugar del Nicol empleamos un prisma birefringente de espato de Islandia, los colores de la selenita producidos por los dos rayos polarizados en sentido opuesto serán complementarios. La superposicion de los dos colores produce siempre el *blanco*. Cualquiera otra sustancia birefringente, sea cristalizada, organizada, comprimida ó dilatada mecánicamente, presenta, examinándola con la luz polarizada, fenómenos análogos á los del yeso.

484. Un haz de luz ordinaria es equivalente en todos sus efectos á dos haces que vibran en dos planos perpendiculares. Como entre dos haces de esta clase no puede haber interferencia, no podemos obtener los colores de la selenita con la luz ordinaria.

ANILLOS QUE RODEAN EL EJE DE LOS CRISTALES CON LA LUZ POLARIZADA.

485. Un pincel de rayos que pasa á lo largo del eje del espato de Islandia no se divide; pero si se inclina con respecto al eje, por poco que sea, se divide en dos, que vibran en planos perpendiculares y uno de los cuales se atrasa con respecto al otro.

486. Si la luz incidente está polarizada, al abandonar el espato oblícuamente á su eje, estará en un estado semejante á la luz emergente de las placas de yeso de que ya hemos hablado. Cuando dos vibraciones perpendiculares que atraviesan el mismo éter se reducen por el analizador á un mismo plano, la interferencia tiene lugar concurriendo los

dos rayos ó contraponiéndose uno á otro.

487. El que concurran ó no, depende de la importancia del retraso, y esto á su vez depende del espesor del espato atravesado por los dos rayos. Si concurren con cierto espesor, concurrirán tambien con espesores dobles, triples, etc. Estos espesores que producen la concurrencia están separados por otros que producen la contraposicion.

488. Con un haz cónico cuyo rayo central pase por el eje, los efectos son simétricos alrededor del eje; y cuando se examina el cristal iluminado de este modo por medio de la luz polarizada monocromática, obtenemos una série de círculos brillantes y oscuros que rodean el eje.

489. Cuando la luz es roja, los círculos son mayores que cuando es azul; cuanto menor es la longitud de la onda, menores son los círculos. De aquí que, no estando los colores superpuestos, cuando se emplea la luz *blanca*, se obtienen, en lugar de círculos alternados brillantes y oscuros, una série de *círculos con los colores del arco-iris*.

Cuando el polarizador y el analizador están

cruzados, el sistema de fajas está cortado por una *cruz negra* cuyos brazos son paralelos á los planos de vibracion del polarizador y el analizador. Los rayos cuyos planos de vibracion dentro del cristal coinciden con los respectivos planos del polarizador y del analizador no pueden ninguno de ellos ser trasmitido, y su interceptacion produce los dos brazos de la cruz. Los rayos cuyos planos de vibracion forman un ángulo de 45° con los del polarizador ó el analizador son los que producen los mayores efectos cuando concurren. Con esta inclinacion se logra el máximum de brillantez del anillo y desde este punto á derecha é izquierda se va haciendo mas débil hasta perderse en la oscuridad de la cruz.

490. Una rotacion de 90° produce en este, como en otros casos, el fenómeno complementario; la cruz negra se hace blanca y los círculos cambian sus tintas por las complementarias.

491. En los cristales que tienen dos ejes ópticos ambos están rodeados por una série de fajas irisadas, formando cada faja una cur-

va que Jacobo Bernoulli, su descubridor, llamó *lemniscata*.

POLARIZACION ELÍPTICA Y CIRCULAR.

492. Dos rayos de luz vibrando perpendicularmente el uno al otro, cualquiera que sea el retraso de un sistema de vibraciones con respecto al otro no pueden como ya se ha dicho, dar lugar á interferencia que produzca un aumento ó disminucion de luz.

493. Pero aunque la intensidad permanezca sin alteracion, los rayos reaccionan uno sobre otro. Si uno de ellos difiere del otro en un número exacto de semi-ondulaciones, los dos rayos se combinan en una sola vibracion *rectilínea*. En todos los demas casos la vibracion resultante es *elíptica*; en un caso particular la elipse en que se mueven las partículas individuales del éter se convierte en un círculo. Esto sucede cuando uno de los sistemas de ondas se atrasa respecto al otro exactamente en una cuarta parte de ondulacion; entonces se tiene la *polarizacion circular*.

494. Esta composicion de las vibraciones etéreas es mecánicamente igual á la composicion de las vibraciones de un péndulo ordinario, ó como la composicion de las vibraciones de dos diapasones por el método de Lissajous (1).

495. La polarizacion elíptica es la *general* y no la excepcional. Se manifiesta particularmente en la reflexion por los metales y por los cuerpos transparentes cuyo índice de refraccion es elevado. Jamin la ha descubierto en la luz reflejada por todos los cuerpos.

POLARIZACION GIRATORIA.

496. Un rayo polarizado de luz monocromática, no sufre alteracion, segun ya hemos dicho, al trasmitirse á través del espato de Islandia en la direccion de su eje óptico.

497. Pero si la trasmision tiene lugar á través del cristal de roca (cuarzo) en direccion

(1) Véase la obra del mismo autor *Lecciones sobre el sonido*, 1.ª edic., p. 307.

del eje óptico, el cristal hace girar el plano de vibracion del rayo. Suponiendo que el polarizador y el analizador del polaríscopo esten cruzados de modo que produzcan la oscuridad perfecta antes de introducir el cristal entre los dos, al hacerlo la luz pasará, y para anularla es preciso hacer girar al analizador hasta que tome una nueva posicion. El ángulo que tiene que recorrer el analizador mide la *rotacion del plano de vibracion*.

498. Algunos ejemplares de cristal de roca hacen girar el plano de vibracion á la derecha y otros á la izquierda. Los primeros se llaman *dextrógiros* y los últimos *levógiros*. Sir John Herschell enlazó esta diferencia óptica con una diferencia visible de la forma cristalina.

499. En un experimento célebre de Faraday con una barra de cristal pesado, se hizo girar el plano de vibracion por medio de un iman y por la corriente eléctrica, guardando la direccion de la rotacion una relacion constante con la polarizacion del iman y con la direccion de la corriente.

500. La polarizacion rotatoria fué estudiada cuidadosamente y de una manera muy com-

pleta por Biot, que estableció sus leyes, de las cuales podemos citar aquí dos.

1.ª El arco recorrido es proporcional al espesor de la placa de cristal de roca.

2.ª La rotacion del plano de vibracion es diferente para cada rayo del espectro, aumentando con la refrangibilidad de la luz.

Así con una placa de cristal de roca, de un milímetro de grueso, obtuvo las siguientes rotaciones para los rayos medios de los respectivos colores del espectro:

Rojo,	19°	Azul,	32°
Naranjado,	21°	Añil,	36°
Amarillo,	23°	Violado,	41°
Verde,	28°		

Con una placa de dos milímetros la rotacion es para el rojo 38°, y para el violado 82°.

501. Puesto que los rayos de distintos colores salen del cristal de roca vibrando en planos diferentes, cuando esta luz cae sobre el analizador, solo será trasmitido el color cuyo plano de vibracion coincide con el del analizador. Haciendo girar al analizador dejarémos pasar sucesivamente todos los colores.

502. Los fenómenos de la polarizacion giratoria se producen por la interferencia de dos haces delgados polarizados circularmente, que se propagan á lo largo del eje con velocidades desiguales, girando el uno de izquierda á derecha y el otro en direccion opuesta (1).

CONCLUSION.

He procurado en estas lecciones dar á conocer el modo con que se miran en la actualidad por todos los pensadores científicos mas eminentes las cuestiones relativas á la naturaleza de la luz. He tratado de explicar del modo mas claro posible la atrevida teoría, segun la cual el espacio está lleno por una sustancia elástica capaz de trasmitir los movimientos de la luz y el calor. Considérese que es imposible escapar de esta ú otra teoría semejante, si se ha de evitar el atribuir á luz en el espacio *una base material*. La luz y el calor solares necesitan próximamente ocho minutos para llegar del sol á la tierra. Durante este

(1) Véase Lloyd, *Wave theory*, pág. 199.

tiempo la luz y el calor están separados de ambos. Imagínese cerrada una parte del espacio intermedio; por ejemplo, una milla cúbica, ocupada momentáneamente por la luz y el calor. Pregúntese despues cada cual qué son estas dos cosas. La primera cuestion para llegar á una solucion es: *¿Qué pueden hacer?* Solo tenemos conocimiento de las cosas por sus *efectos*. ¿Cuáles son pues los efectos que puede producir esta milla cúbica de luz y calórico? En la tierra, donde podemos operar sobre ellos, hallamos que son susceptibles de producir el *movimiento*. Podemos con ellos levantar pesos; hacer girar ruedas; impulsar locomotoras; disparar proyectiles. ¿Qué otra conclusion puede sacarse de estos hechos sino que la luz y el calor que así producen el movimiento *son ellos mismos movimientos* (1)?

Nuestra milla cúbica de espacio, en este caso, es por un tiempo comensurable el vehículo del movimiento. Pero ¿puede el entendimiento humano imaginar el movimiento sin

(1) Sir Williams Thomson ha intentado calcular el valor mecánico de una milla cúbica de luz solar.

imaginar al mismo tiempo alguna cosa movida? Ciertamente que no. La idea misma de movimiento lleva necesariamente consigo la de un cuerpo que se mueve. ¿Qué es, pues, lo que se mueve en el caso de nuestra milla cúbica de luz solar? La teoría ondulatoria responde que es una sustancia de propiedades mecánicas determinadas, un cuerpo que puede ó no ser una forma de la materia ordinaria; pero al cual, séalo ó no, damos el nombre de *éter*. No toleremos en esto vaguedad alguna; porque el mayor perjuicio que podemos hacer á la ciencia, el camino mas seguro de asegurar larga vida al error, es envolver en vaguedades las teorías científicas. El movimiento del éter comunicado á las sustancias materiales las pone en movimiento. Es por lo tanto él mismo una *sustancia material*, porque no conocemos en la naturaleza nada que no sea una sustancia material y que pueda poner en movimiento á otras sustancias materiales. Dos clases de movimiento son posibles en el éter. Ó es lanzado como un *proyectil* á través del espacio, ó es el vehículo del *movimiento ondulatorio*. La teoría proyectiva, aunque enun-

ciada por Newton y sostenida por hombres de la talla de Laplace, Biot, Brewster y Malus, se ha desacreditado sin esperanza. Por lo tanto, tenemos que atenernos al movimiento ondulatorio de una clase ó de otra. ¿Pero cómo explica los fenómenos la teoría de las ondulaciones? En la mayor parte de estas lecciones hemos ido respondiendo á esta pregunta. Los casos que se han citado son ejemplos. Miles de hechos podrian referirse para demostrar cada uno de ellos; y ninguno de estos hechos queda sin explicacion por la teoría ondulatoría. Explica todos los fenómenos de la reflexion; los de la refraccion simple y doble; todos los fenómenos de la dispersion; los fenómenos de difraccion; los colores de las placas gruesas y delgadas, así como los colores de los cuerpos naturales. Explica todos los fenómenos de la polarizacion y todas esas impresiones maravillosas y esos explendores cromáticos que presentan los cristales á la luz polarizada. Millares de hechos aislados pueden como he dicho comprenderse en esta enumeracion; la teoría ondulatoria los explica todos. Señala claras sen-

das para penetrar en lo que de otra manera seria el mas desesperante laberinto de fenómenos en que podia verse envuelto el entendimiento humano. Por esto los hombres que van á la cabeza del siglo, aceptan el éter, no como un sueño vago, sino como una entidad real, una sustancia dotada de *mercia* y susceptible de comunicar sus conmociones á otras sustancias con arreglo á las leyes conocidas del movimiento. Si hay una idea mas arraigada que otra en la opinion científica moderna, esta es que el calórico es una forma del movimiento. Pregúntese cada cual á sí mismo de qué manera llega á la tierra desde el sol la inmensa cantidad de energía mecánica que se trasmite realmente en forma de calor. Es preciso que su vehículo sea la *materia*, y esta materia, segun la teoría, es el éter luminífero.

Jamás vió Tomás Young con sus propios ojos las ondas sonoras; pero tuvo el poder de imaginacion para describirlas y el de la inteligencia para estudiarlas. Del estudio de las ondas invisibles de aire se elevó al de las ondas invisibles del éter; siendo su fé en las unas

poco, si en algo inferior á su fé en las otras. Una frase suya probará que sus ideas eran perfectamente definidas. Para explicar la aberracion de la luz creyó necesario admitir que el éter que rodea á la tierra no participa de su movimiento á través del espacio. Sus palabras son: «El éter pasa á través de la masa sólida de la tierra, como el viento á través de una arboleda.» Este supuesto atrevido háse demostrado que no es necesario por el profesor Stokes, el cual prueba, que atribuyendo al éter propiedades análogas á las de un sólido elástico, se puede explicar la aberracion, sin necesidad de suponer semejante permeabilidad en la tierra. Stokes cree en el éter tan firmemente como Young.

Puedo añadir que uno de los experimentadores mas minuciosos de Francia, M. Fizeau, que es tambien miembro del Instituto, trató de investigar, hace algunos años, si un cuerpo en movimiento arrastraba consigo al éter. Su opinion es que *parte del éter* se adhiere á las moléculas del cuerpo y se traslada con ellas. Esta conclusion puede ó no ser correcta; pero

el solo hecho de que un hombre como este emprendiese tales experimentos, comprueba la claridad con la cual esta idea de un éter es concebida por los mas eminentes obreros de la ciencia en la época presente.

Pero al mismo tiempo que he tratado de presentar con la mayor claridad posible las bases de la teoría ondulatoria, ¿quiero por eso que se cierren los ojos contra cualquier argumento que pueda hacerse contra su exactitud? Muy lejos de ello. Puede decirse con justicia que hace un siglo los hombres mas eminentes sostenian otra teoría, y que así como aquella teoría tuvo que ceder, tambien puede tener que declararse vencida la teoría ondulatoria. Esto es perfectamente lógico. Del mismo modo una persona del tiempo de Newton ó de nuestro tiempo podia tambien razonar de esta manera: El gran Ptolomeo y un gran número de grandes hombres despues de él creyeron que la tierra era el centro del sistema solar. La teoría de Ptolomeo tuvo que rendirse, y la teoría de la gravitacion puede á su vez tener que rendirse tambien. Tan lógico es este como el primer argumento.

La fortaleza de la teoría de la gravitacion consiste en su competencia para explicar todos los fenómenos del sistema solar, y lo firme de esta teoría será bien comprendido por los que hayan oido la brillante relacion hecha por el profesor Grant de todo lo que ella explica. Precisamente semejante es la base en que descansa la teoría ondulatoria de la luz; solo que los fenómenos que esta explica son mucho mas variados y complejos que los fenómenos de la gravitacion. Se mira y con justicia el descubrimiento de Neptuno como un triunfo de la teoría. Guiados por ella Adams y Leverrier calcularon la posicion de una masa planetaria capaz de producir las perturbaciones de Urano. Leverrier comunicó el resultado de sus cálculos á Galle de Berlin; y aquella misma noche Galle apuntó el telescopio del observatorio de Berlin á la parte del cielo indicada por Leverrier, y encontró allí un planeta de 36,000 millas de diámetro.

Es el caso, que la teoría ondulatoria tiene tambien su Neptuno. Fresnel habia determinado la expresion matemática de la superficie

ondulante en los cristales que poseian dos ejes ópticos; pero no parece tenia ninguna idea de otra refraccion en estos cristales mas que la doble refraccion. Estando el asunto en este estado el difunto sir William Hamilton de Dublin, matemático profundo, se apoderó de él y probó que la teoría llevaba á concluir que en cuatro puntos de la superficie ondulante el rayo no se dividia en *dos* partes, sino en un *número infinito de partes*; formando en estos puntos una *envuelta cónica* contínua en lugar de dos imágenes. Ningun ojo humano habia visto semejante envuelta cuando sir William Hamilton inferia su existencia. Si la teoría de la gravitacion es cierta, decia en resúmen Leverrier al Dr. Galle, debe haber allí un planeta; si la teoría de las ondulaciones es cierta, dijo sir William Hamilton al Dr. Lloyd, debe existir una envuelta luminosa. Lloyd tomó un cristal de aragonita y siguiendo con la exactitud mas escrupulosa las indicaciones de la teoría, descubrió la envuelta que préviamente habia sido solo una idea en el entendimiento del matemático. Cualquiera que sea la fuerza que la teoría de

la gravitacion derive del descubrimiento de Neptuno, con ella compite la que la teoría ondulatoria adquiere con el descubrimiento de la *refraccion cónica*.

FIN.

NOTA.

Recomiendo encarecidamente la lectura del ensayo sobre la luz, publicado en las Lecturas familiares sobre asuntos científicos por sir John Herschel.

J. T.

INDICE.

FIN DEL ÍNDICE DE MATERIAS.