

chos casos, sin embargo, basta con el calor que desarrolla la llama no luminosa del mechero de Bunsen para volatilizar las substancias que se someten al análisis, y para que emitan suficiente luz, presentando un espectro brillante. Los cuerpos que han de analizarse se reducen al estado de cloruros disueltos, y de ellos se toma una perla, con un alambre de platino, masticado en un tubito de cristal que le sirve de mango; se coloca el alambre de platino con la gota de la disolución en la llama, como indica la figura 173, y al volatilizarse, se examina el espectro rápidamente, pues la substancia se evapora de seguida. Hay, sin embargo, procedimientos como el que representa la disposición de la figura 174, que permiten obtener espectros permanentes.

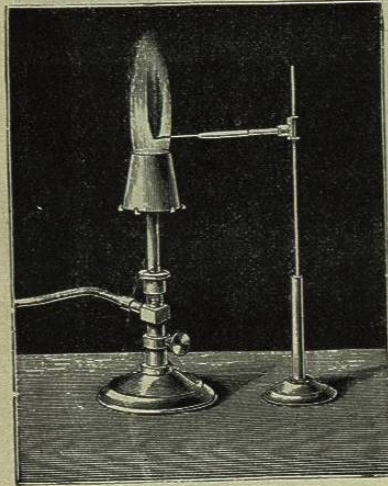


Fig. 173. - Mechero de Bunsen dispuesto para el análisis espectral

ma un vivo color, produciendo su espectro una sola línea amarilla, característica; el potasio da una raya roja, que es la principal de su espectro; el talio, metal descubierto con este sistema analítico, ofrece una hermosa línea verde.

Los gases presentan espectros con líneas y bandas brillantes; en el hidrógeno se ven seis grupos de líneas verdes, que se modifican según varía la presión; el oxígeno, con presión débil, da un espectro de bandas, y con presión fuerte, lineal, que se extingue por completo con presión aún más fuerte.

Estas líneas se llaman características por ser muy adecuadas para reconocer los cuerpos que las producen, y según su brillo se les designa por las letras del alfabeto griego y el símbolo químico; así, H alfa se refiere á la línea roja, que es la más intensa del espectro del hidrógeno.

Gracias al estudio cuidadoso y prolijo que se ha hecho de las líneas espectrales de todas las substancias conocidas, no sólo en cuanto á su brillo, sino también á la medición exacta de sus distancias relativas, se han podido ejecutar dibujos en los que se señala con todo esmero la posición y número de las rayas y todos los caracteres peculiares de cada espectro.

Cuando los cuerpos que se trata de analizar sólo se volatilizan á temperaturas muy elevadas, se acude al empleo de corrientes eléctricas poderosas, bien producidas en el laboratorio con una batería de pilas y carrete de inducción y condensadores, como se ve en la figura 175, bien tomándolas de la distribución pública. Este método se emplea preferentemente con los metales.

Para investigar el espectro de los gases, se hace uso generalmente de los tubos representados en la figura 176; cada tubo está lleno de un gas distinto en extremo rarificado; se hace pasar una corriente eléctrica por el tubo, el gas se ilumina, y se analiza en la porción estrecha comprendida entre *a* y *b*.

Si se quema en un mechero de Bunsen un poco de sal común, emite la llama un poco de sal común, emite la llama

Con preferencia al sistema de proyección de una escala de que antes hablamos, se usa un ingenioso artificio, que consiste en producir dos espectros yuxtapuestos en el mismo anteojo analizador; uno el de la substancia que se estudia, y el otro, el de un cuerpo conocido; para esto, la mitad superior de la ranura del espectroscopio permanece libre, y la mitad inferior lleva un prisma de reflexión total que envía al prisma analizador la luz de la substancia conocida que va á servir de comparación, como muestra la figura 177, en la que F es el foco luminoso de donde parten los rayos que atraviesan los prismas, pasando por la mitad superior de la ranura, por encima del pequeño prisma; á un lado, y á la misma altura que este último, se coloca la llama

L, bien de un mechero de Bunsen, ó de una lámpara de alcohol, en la cual se volatiliza la substancia cuyo espectro se necesita para compararlo con el que forma la luz F. Los rayos de L hieren en ángulo recto la superficie *d f* y se reflejan en totalidad, como en un espejo,

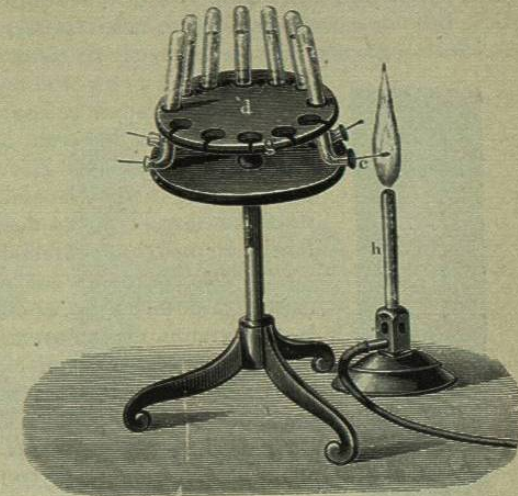


Fig. 174. - Aparato de Mitscherlich para obtener espectros permanentes

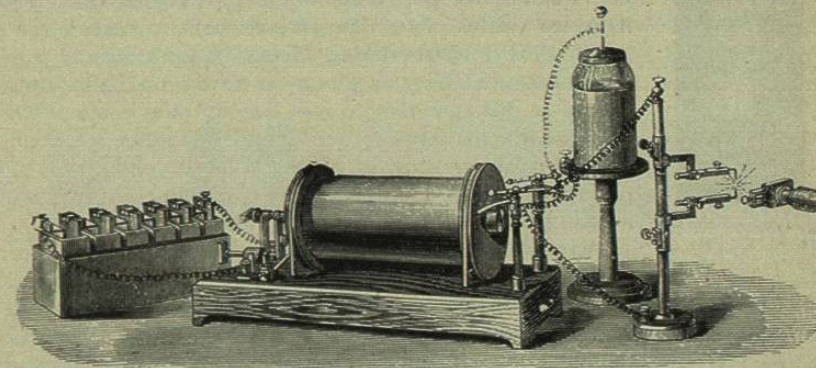


Fig. 175. - Aparato eléctrico dispuesto para el análisis espectral de los metales

en el prisma pequeño; pasan por la mitad inferior de la ranura, y se descomponen al atravesar el prisma de refracción. De este modo, los espectros *o* y *u* de las dos llamas F y L se ven yuxtapuestos en el mismo campo, como indica el grabado, en el que para mayor claridad se representan proyectados en una pantalla. Si se

volatiliza la misma substancia en las dos llamas F y L, las líneas correspondientes de uno de los espectros se encontrarán en la prolongación exacta de las del otro, porque dos haces luminosos de igual constitución producen espectros idénticos con una misma abertura, un mismo prisma y la misma posición del antejo.

Si se sospecha, pues, la existencia de cierta substancia en una de las llamas, verbigracia, en F, y por el espectro que se recibe por la mitad superior de la ranura se conciben dudas acerca de su naturaleza, se volatiliza una corta cantidad de la substancia supuesta en la segunda llama L, y se comparan los dos espectros yuxtapuestos. Si hay coincidencia completa entre las líneas de ambos espectros, los dos pertenecen á una misma substancia; en otro caso se trata de cuerpos de distinta naturaleza.

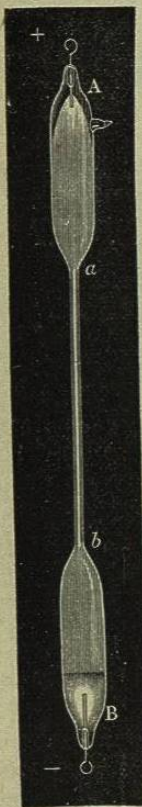
La delicadeza del análisis espectral para determinar la existencia de un cuerpo es extraordinaria, si bien exige elegir la temperatura más conveniente en cada caso, lo cual se demuestra, verbigracia, con el estroncio; si tomamos $\frac{1}{100}$ de milígramo de este metal, cantidad que es posible apreciar por el método analítico químico ordinario, empleando el mechero de Bunsen podremos obtener su espectro con $\frac{1}{500}$ de esta insignificante fracción; pero con la chispa eléctrica tan sólo necesitamos $\frac{1}{5000}$ parte para que el espectro nos revele con toda certidumbre la existencia de la substancia.

Si examinamos con el espectroscopio la luz transmitida por cristales de colores, rojos, verdes, azules, etc., se verá en seguida que el cristal encarnado, verbigracia, deja pasar algunos rayos anaranjados y aun amarillos, además de los rojos, pero que absorbe por completo los rayos verdes, azules y violetas; los vidrios azules, llamados de cobalto, transmiten algunos rayos violetas y verdes, además de los azules. Si se juntan ambos cristales y se mira á su través una llama de gas, apenas se distingue ningún rayo simple, pues como el vidrio rojo absorbe los rayos verdes, azules y violetas, y el vidrio azul los rojos, tan sólo percibimos la llama con un tono amarillo muy débil, producido por el escaso número de rayos que no han sido absorbidos ni por un vidrio, ni por otro.

Fig. 176. - Tubo para el análisis espectral de los gases.

El poder absorbente de los líquidos coloreados es, por lo general, mucho más marcado que en los vidrios de color. No se ha encontrado ninguno, hasta el presente, que absorba ó transmita una sola clase de rayos de color. Gran número de físicos se han ocupado en averiguar en qué proporción afectan los líquidos coloreados las varias regiones del espectro continuo. Los experimentos se hacen colocando las disoluciones de los cuerpos, cuya absorción se quiere estudiar, en unas cápsulas rectangulares de caras planas y paralelas de cristal, y sobre ellas se concentra la luz por los medios ya conocidos.

El espectro de absorción de una disolución de sangre se compone de dos bandas muy oscuras en la parte más luminosa, ó sea en el amarillo (fig. 178).



Los gases coloreados obran de un modo análogo á los líquidos; colocando en el trayecto de los rayos luminosos, entre la fuente de luz y el prisma, una pequeña cantidad de ácido hiponítrico, el cual, en el momento en que se pone en contacto con el aire, da origen á un humo denso y rutilante, aparecen en el espectro multitud de líneas negras muy finas (fig. 179, n.º 2). El yodo es una

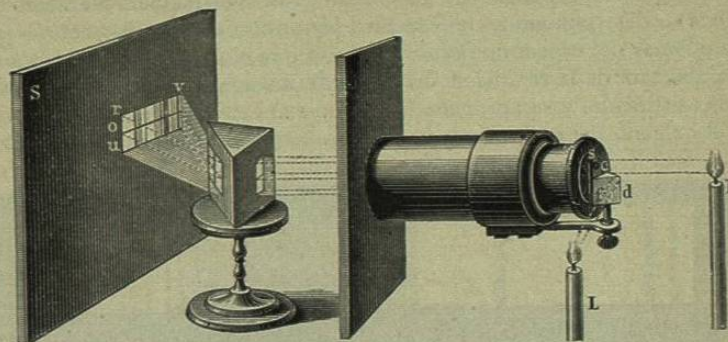


Fig. 177. - Espectro doble y prisma de reflexión total

substancia que también emite vapor coloreado cuyo espectro se representa en el n.º 1 de la citada figura 179.

Los gases incoloros sólo se manifiestan debilitando la intensidad de la luz que los atraviesa, sin ejercer absorción alguna sobre ningún rayo particular, á menos de que su espesor no sea muy considerable. El vapor de agua ejerce también acción absorbente sobre la luz, y sus líneas de absorción son muy notables en el espectro solar y en la luz difusa del día.

Resumiendo los trabajos y teorías de varios físicos, enunció Kirchhoff una proposición afirmando que la relación entre el poder emisor y el de absorción de una misma clase de rayos es igual para todos los cuerpos á una misma tem-



Fig. 178. - Espectro de absorción de la sangre

peratura; de esta ley se desprende, como consecuencia necesaria, que los gases y vapores, al transmitir la luz, absorben ó separan precisamente aquellos rayos coloreados que ellos mismos emiten cuando se les hace luminosos, al paso que permanecen transparentes en absoluto para todos los demás rayos de color. El vapor de sodio luminoso da en circunstancias ordinarias, como sabemos, un espectro que consiste en una línea doble amarilla muy brillante, y, por lo tanto, la luz que emite es exclusivamente amarilla. Si la luz blanca del Sol, del arco eléctrico ó de la lámpara oxhídrica se hace pasar á través del vapor de sodio, este gas extinguirá ó absorberá de la luz blanca, precisamente los rayos lumino-

son amarillos que emita; mientras que la mayor parte de estos rayos amarillos son absorbidos por el vapor de sodio, todos los demás rayos, rojos, anaranjados, verdes, azules y violetas, pasan sin modificación.

El método de que se valió Kirchhoff para realizar sus experimentos, se indica suficientemente en la fig. 180; el aparato está dispuesto de igual manera que para demostrar los espectros de absorción. L es una lámpara de aceite, cuya luz blanca se descompone en un espectro continuo de todos los colores por el tren de prismas del espectroscopio S; después que el ocular del anteojo analizador y la abertura de la rendija se disponen de manera que el espectro aparezca con toda distinción, y se aproxima la ranura s al tubo de cristal N, del que se expelen el oxígeno del aire introduciendo gas hidrógeno y unos pedacitos de so-

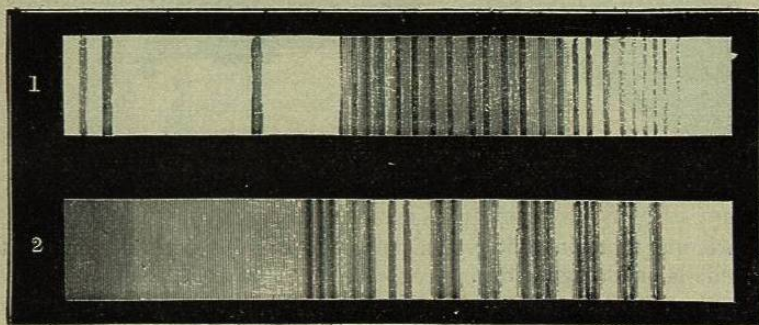


Fig. 179. - Espectros de absorción del yodo y de los vapores nitrosos

dio metálico, se caldea el tubo con el mechero de gas G, y una parte del sodio se convierte en vapor; aparece una línea negra en la parte amarilla brillante del espectro continuo de la lámpara de aceite, en el lugar precisamente en que se muestra la raya brillante del vapor de sodio luminoso; para probar esto, basta con substituir el tubo N por una lamparilla de alcohol, cuya mecha se haya empapado en salmuera, ocultando al propio tiempo la luz de la lámpara; el vapor luminoso del sodio da lugar á la línea amarilla, en el mismo sitio precisamente en que antes era absorbida la luz de este color del espectro continuo, formándose la línea negra, que se ve doble, empleando un espectroscopio de cierta potencia, lo mismo que la línea amarilla brillante.

De igual manera, con el empleo de los vapores de litio, potasio, estroncio y bario, consiguieron Kirchhoff y Bunsen extinguir en el espectro continuo las rayas brillantes que emiten los gases de estos metales en estado luminoso.

El vapor incandescente del litio da una raya roja muy intensa y otra más débil anaranjada, las cuales pasan á ser negras en el espectro de absorción de esta misma substancia. Si se repite el experimento de Kirchhoff con el litio, de igual manera que con el sodio, aparecerán dos líneas negras de distinta profundidad en el espectro continuo de la luz de la lámpara, precisamente en las mismas posiciones que ocupaban las rayas brillantes del vapor luminoso de este metal.

El resultado más importante de estas investigaciones consiste, pues, en que las líneas brillantes características del sodio, litio, etc., se convierten en líneas negras cuando la intensa luz blanca de un cuerpo sólido ó líquido incandescente pasa á través del vapor de estos metales. Como las líneas brillantes del espectro de los gases se convierten en estos experimentos en rayas negras, mientras que las porciones oscuras del espectro se cambian en colores brillantes por el espectro continuo de la luz blanca, parece que los espectros gaseosos se invierten en su iluminación respectiva; por tal motivo se llama este fenómeno *inversión del espectro*, según propuso Kirchhoff.

Demostró este mismo físico que la diferencia entre la temperatura de los cuerpos sólidos ó líquidos que producen los espectros continuos, y la de los vapores absorbentes á cuyo través pasa la luz blanca, ejerce un gran influjo en la inversión del espectro, y que todo el fenómeno depende de la relación que exis-

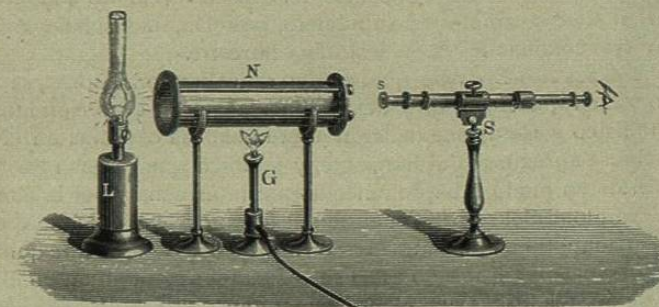


Fig. 180. - Inversión de la línea del sodio

te entre los poderes emisor y absorbente del vapor, cuya relación se determina por la diferencia de temperatura. Los experimentos de inversión, por lo tanto, tienen lugar únicamente cuando hay una gran diferencia de temperatura entre el cuerpo sólido en estado de incandescencia y el vapor absorbente.

Podemos ahora predecir el aspecto que presentará en el espectroscopio la luz de un cuerpo sólido ó líquido incandescente, si antes de penetrar por la ranura del instrumento pasa á través de una atmósfera relativamente fría de tal ó cual vapor, como, verbigracia, de sodio, litio, hierro, etc. El cuerpo incandescente produciría un espectro continuo, si su luz no experimentase modificación alguna en su camino; mas en la atmósfera vaporosa por que deben pasar sus rayos, cada vapor absorbe precisamente aquellos rayos que hubiera emitido en estado luminoso, extinguendo, por consecuencia, estos colores particulares y substituyéndolos por bandas oscuras en los mismos puntos del espectro continuo en que se hubieran manifestado líneas brillantes. De modo que el espectroscopio nos muestra un espectro continuo que se extiende del rojo al violeta, pasando por todos los colores intermedios, cruzado perpendicularmente por numerosas líneas negras; la del sodio, las dos del litio, las infinitas del hierro, etc., aparecen en el fondo coloreado del espectro continuo como otras tantas rayas negras.

Los espectros de esta clase son, sin duda alguna, espectros de absorción, y,

por lo tanto, se llaman espectros compuestos ó invertidos. Si se llega á establecer una coincidencia perfecta en esta clase de espectros por medio del prisma de comparación ó de la escala dividida, entre las líneas características brillantes del espectro gaseoso de ciertas substancias, con igual número de rayas negras, puede admitirse como conclusión que en la atmósfera absorbente que produce las líneas negras se encierra la misma substancia en estado de vapor.

La importancia capital de este resultado de los trabajos de Kirchhoff en las investigaciones sobre la constitución física de los cuerpos celestes, apenas hay necesidad de demostrarla, si se considera que, así como es posible determinar la naturaleza de tal ó cual substancia terrestre por la calidad de su espectro gaseoso, del propio modo, el espectro invertido de los gases nos da la clave para reconocer la naturaleza y composición de los cuerpos celestes.

El físico italiano Zantedeschi, de quien antes hicimos mención, fué el primero en notar que todas las líneas oscuras del espectro solar no son invariables, y que ocurren ciertos cambios en su número, posición, intensidad y anchura, según las diversas condiciones de la atmósfera terrestre.

En 1832 descubrió Brewster que, en determinadas condiciones, se veían en el espectro solar varias líneas oscuras producidas por la absorción atmosférica. Este mismo físico y Gladstone hallaron nuevas bandas oscuras en el espectro cuando el Sol se aproximaba al horizonte, y también que ciertas rayas oscuras se marcaban de un modo más pronunciado por la mañana y por la tarde que al mediodía, cuando el Sol se hallaba en mitad de su carrera; como al estar el Sol cerca del horizonte tienen que atravesar sus rayos una capa de aire quince veces más densa que cuando el mismo astro se encuentra á gran altura en el meridiano, ocurrióse á estos físicos que el aire, aunque incoloro, podía ejercer cierto influjo absorbente sobre la luz y detener el paso de los rayos, lo propio que sucede con los vapores, en proporción con el espesor y la densidad de la capa atmosférica.

El espectro solar publicado por Brewster y Gladstone en 1860, de unos dos metros de longitud, contiene más de 2.000 líneas ó bandas oscuras visibles, y que con facilidad se distinguen unas de otras. La extremidad violeta tiene igual extensión que en el mapa de Fraunhofer, pero la región del rojo es mucho más grande que en el de este último; las líneas de Fraunhofer conservan su denominación original de A, *a*, B, etc., al paso que las líneas y bandas interpuestas entre ellas, y que fácilmente se separan unas de otras, se señalan con números detrás de las letras A, B, C, etc., sucesivamente hacia el violeta. El espectro solar que representa la figura 181 es una copia reducida del mapa que publicó Brewster, é indica, no sólo las líneas de Fraunhofer, sino también todas las rayas y bandas variables de más ó menos importancia, que se perciben sin grande esfuerzo y que en la figura se marcan con caracteres griegos; los números se han omitido para evitar confusión. El grabado representa el espectro solar cuando el astro del día se halla muy cerca del horizonte; todas las líneas y bandas marcadas con caracteres griegos desaparecen del espectro, ó se debilitan mucho cuando menos, á medida que el Sol se eleva; Brewster y Gladstone dieron á estas bandas el nombre de líneas atmosféricas, para indicar que estaban formadas por la absorción de la atmósfera terrestre sobre los rayos luminosos; no llegaron es-

tos observadores á descubrir á qué elementos del aire atmosférico se debía esta cualidad absorbente.

En la porción menos refrangible del espectro aparecen, á la salida del Sol, dos rayas negras muy intensas al lado de A, y muy cerca de éstas se ven otras dos líneas finas Y Z; A conserva su ancho aunque el Sol obtenga bastante altura, y al mediodía aparece como una línea doble, ó más bien como dos espacios oscuros separados por una estrecha banda luminosa; á la puesta del Sol desaparece la banda brillante y vuelve á verse la línea como una banda de ancho é intensidad uniformes. La intensidad del grupo *a* crece hacia el ocaso, pero las líneas individuales no llegan á reunirse en una sola banda.

La absorción más enérgica tiene efecto muy cerca de B; C y muchas de las líneas comprendidas entre C y C₆ se hacen más oscuras, siendo notable sobre todo C₉ (en el anaranjado), pues sigue siendo muy profunda aunque el Sol alcance una elevación considerable sobre el horizonte. En los países de la Europa central se ve esta línea durante todo el día en el invierno, pero no en el verano; al orto y al ocaso aparece como una de las más profundas y mejor dibujadas de todo el espectro. C₁₅ crece por la tarde y se convierte en una banda negra, al mismo tiempo que la doble línea D se acentúa señaladamente. Más allá de D₂ se percibe una banda que principia en *delta*, característica, particularmente del espectro de la luz que ha atravesado una densa capa de aire. Esta banda se distingue, aun con un espectroscopio pequeño, á cualquiera hora, en la luz difusa de un día nublado, pero es excesivamente negra y detallada en tiempo muy lluvioso y á la postura del Sol.

Otro tanto se observa en las bandas *epsilon* y *zeta* y también en la línea *eta*, que es muy distinta por la tarde; su proximidad á la raya E puede hacer que ambas se confundan, toda vez que sobre esta última no ejerce la atmósfera influjo alguno. Al otro lado de *b* se ven otras muchas líneas y bandas atmosféricas muy notables, en particular *i* y *x*. F pierde su detalle á la puesta del Sol, y siete bandas de *lambda* á *sigma* son visibles entre F y G; en esta última letra el único cambio que se observa es una pérdida de brillo á medida que descende el Sol hacia el horizonte, pero en la región violeta se nota una absorción mucho más pronunciada.

El cielo occidental, inmediatamente después de la postura del Sol, presenta la ocasión más favorable para observar estas líneas oscuras atmosféricas, en particular las bandas *delta* y *zeta*, en las regiones brillantes del espectro; cuando el cielo toma un color de fuego, aparecen, por lo general, las líneas C, C₆, D, y *delta*, como cuatro



Fig. 181. — Espectro solar de Brewster y Gladstone con las líneas de absorción atmosférica

bandas muy oscuras, las cuales se marcan con mucha menor distinción si el tono del cielo es amarillo.

De las investigaciones de Brewster y Gladstone se ocupó con grande esmero el físico francés Janssen en 1864, con objeto de descubrir qué cuerpo de la atmósfera producía estas rayas de absorción del espectro solar. Con un instrumento que él mismo ideó, compuesto de cinco prismas, consiguió reducir las bandas oscuras observadas por los físicos ingleses, á líneas muy finas, averiguando, al propio tiempo, que su intensidad era en extremo variable. Halló también que eran más profundas al orto y al ocaso del Sol que en medio del día, pero que nunca llegaban á desaparecer completamente del espectro, cambio periódico que demostraba su origen atmosférico. Para obtener pruebas aún más

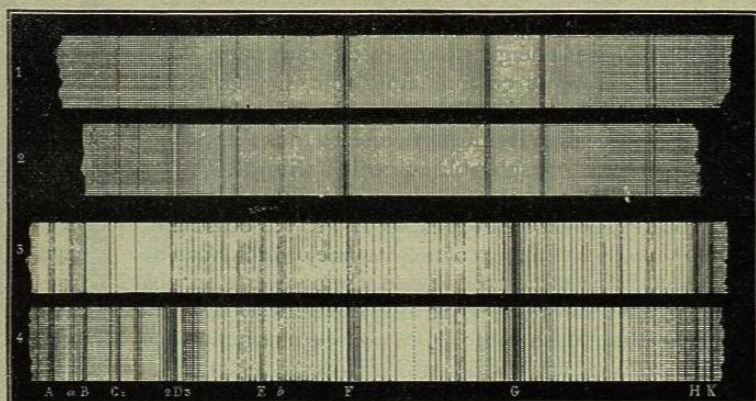


Fig. 182. - Bandas telúricas según Janssen: 1, Espectro de Sirio en el meridiano; 2, ídem en el horizonte; 3, espectro del Sol en el meridiano; 4, ídem en el horizonte

decisivas sobre este punto, resolvió Janssen proseguir sus observaciones del espectro solar en la cumbre de alguna elevada montaña, donde el influjo absorbente del estrato inferior y más denso de la atmósfera quedase excluído, y donde, por consiguiente, se manifestasen los fenómenos de absorción en grado mucho menor que en el llano.

Con tal objeto, en el año de 1864, permaneció Janssen durante una semana en la cúspide del Faulhorn, á una altura de tres mil metros sobre el nivel del mar; sus observaciones le demostraron que las líneas oscuras variables del espectro solar eran mucho más débiles que las que se distinguían en el valle.

En el mes de octubre de 1864 se incendió casualmente una gran cantidad de madera de pino, apilada en las inmediaciones de Ginebra, á una distancia de 21 kilómetros del puesto de observación de Janssen, cuyo accidente le permitió analizar el espectro de esta gigantesca llama; en las inmediaciones de la hoguera se observaba un espectro continuo, sin líneas oscuras, pero á la distancia que hemos mencionado aparecían algunas de las líneas señaladas por Brewster en el espectro del Sol poniente.

Todas estas pruebas demostraban, pues, la acción evidente de nuestra at-

mósfera y el doble origen de las líneas del espectro solar, y trató Janssen de determinar los elementos que producían este efecto.

Sospechó que el vapor de agua disuelto en nuestra atmósfera desempeñaba una parte muy importante, si no total, en la producción de las rayas telúricas del espectro solar; en efecto, las continuadas observaciones verificadas en diversas épocas del año, como llevamos dicho, indicaban claramente que para unas mismas alturas de Sol ciertas rayas del espectro eran tanto más profundas cuanto más elevado era el punto de condensación del rocío.

También extendió sus investigaciones á la luz de la Luna y de las estrellas fijas con objeto de averiguar si la luz estelar, distinta de la del Sol, se hallaba sujeta á cambios semejantes al atravesar la atmósfera de la Tierra. Con tal propósito adaptó un pequeño espectroscopio de visión directa á un antejo astronómico de gran potencia, y examinó el espectro de Sirio en el momento en que esta estrella aparecía sobre el horizonte, distinguiendo varias bandas oscuras que, según demostraron las medidas, ocupaban exactamente el mismo lugar que las bandas del espectro del Sol, á su orto y á su ocaso. A medida que aumentaba la altura de Sirio, disminuía la intensidad de estas líneas telúricas de un modo gradual, desapareciendo completamente cuando la estrella cruzaba el meridiano.

La fig. 182 representa los espectros del Sol y de Sirio según se ven en el pequeño espectroscopio cuando estos astros se encuentran cerca del horizonte y en el meridiano. Las bandas telúricas se reconocen en seguida comparando los dos espectros del mismo objeto; las bandas oscuras señaladas 1, 2 y 3 corresponden evidentemente al espectro de absorción y son comunes al Sol y á Sirio, cuando están cerca del horizonte.