

## **2.05. Fraunhofer, Bunsen y Kirchhoff.**

### **2.05.1. Introducción:**

El filósofo francés Auguste Comte (1798–1857) fundador del positivismo, escribió en su libro *“Cours de Philosophie Positive”* en 1835:

*“Concebimos la posibilidad de determinar sus formas [de las estrellas], sus distancias, sus magnitudes y sus movimientos pero nunca podremos, por ningún medio, investigar sus composiciones químicas o sus estructuras mineralógicas, menos aún la naturaleza de los seres orgánicos que viven en sus superficies, etc. En resumen, para poner el asunto en términos científicos, el conocimiento positivo que podemos tener acerca de las estrellas se limita solamente a fenómenos geométricos y mecánicos y nunca podrá ser extendido hacia investigaciones físicas, químicas, fisiológicas o sociológicas tal como puede expandirse sobre entidades accesibles a todos los diversos medios de observación.”*

Unas páginas más adelante Comte las emprende en contra de los estudios de Herschel acerca de la estructura de la Vía Láctea diciendo:

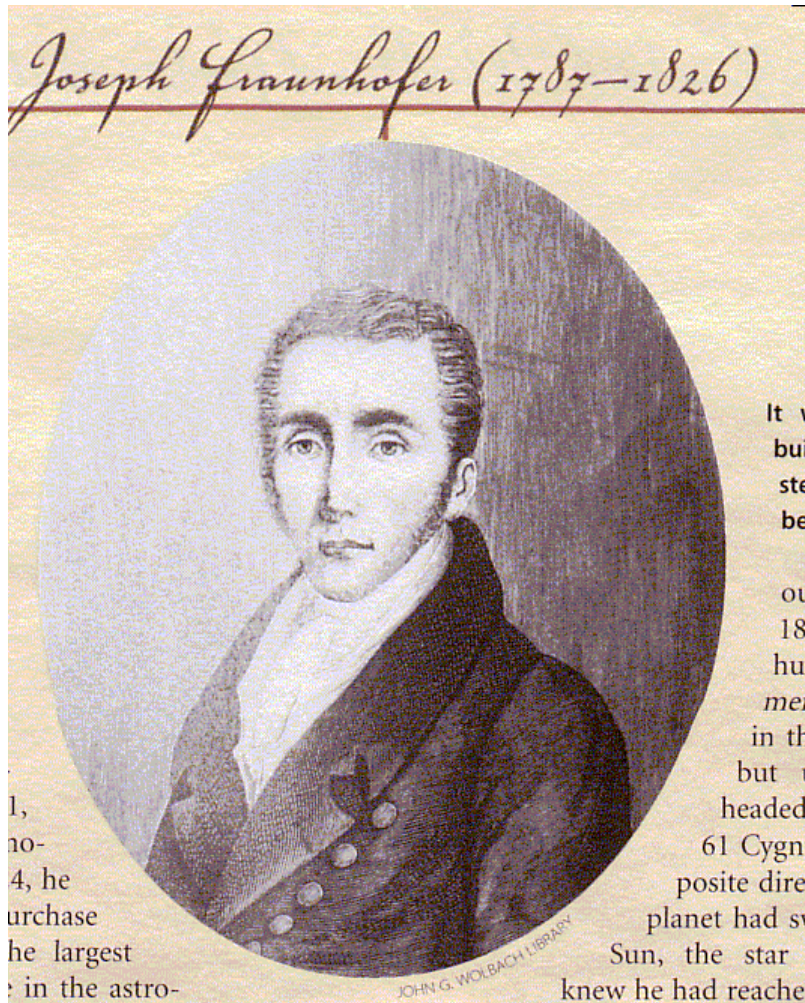
*“Es por lo tanto en vano que por medio siglo se haya hecho un serio intento de distinguir dos astronomías, una solar y otra sideral. A los ojos de aquellos para los cuales la ciencia consiste de leyes reales y no de hechos incoherentes, la segunda existe sólo de nombre y sólo la primera constituye la verdadera astronomía; y no tengo miedo de afirmar que siempre será así”.*

Comte no alcanzó a ver el claro desmentido de sus categóricas afirmaciones; tan sólo dos años después de su muerte, Bunsen y Kirchhoff publicaron las leyes de la espectroscopía que abrieron las grandes avenidas de la astrofísica contemporánea y con ello no tan sólo el estudio de la Vía Láctea sino del cosmos en su totalidad; hoy conocemos sobre el Universo lo que jamás imaginó Comte. El siglo XIX abrió las puertas de la ciencia a la astronomía sideral y el siglo XX a la cosmología. ¡Poca visión tuvo el pensador francés!

### **2.05.2. Joseph Fraunhofer (1787 – 1826):**

Hijo de un vidriero nació en Strubing, en Bavaria, el 6 de Marzo de 1787. Su padre murió en 1798. Mientras era aprendiz en un taller de espejos Fraunhofer tuvo la fortuna, a los catorce años, de ser salvado como el único sobreviviente del derrumbe de la casa que habitaba. El elector de Baviera, Maximilian Joseph, se enteró de la

catástrofe e impresionado por el casi milagroso salvamento del joven le regaló una bolsa con dinero que le permitió realizar su deseo de estudiar óptica. En 1806 entró a trabajar en Munich en los talleres de la firma de Utzschneider y Reinchenbach, donde pronto llegó a ser el jefe de la parte óptica. En 1817 los departamentos se separaron y se asoció con Utzschneider, un rico financista con fuertes intereses científicos para fundar el Instituto de Óptica de Munich.



Dos grandes problemas debían ser enfrentados para la construcción de refractores acromáticos de calidad. En primer lugar era necesario conocer mejor los valores de los índices de refracción de los diversos cristales, como función de la longitud de onda. Eso era un gran impedimento a la hora de diseñar un doblete acromático. Adicionalmente los materiales a utilizar, en particular el cristal de tipo *flint* siempre tenía imperfecciones. Fraunhofer fue iniciado en el arte de la fabricación de cristales por su colega Pierre Louis Guinand (1744-1824) un suizo francés muy capaz en la fabricación de cristales. Guinand, después de veinte años de experimentación había tenido éxito en 1799 en la fabricación de cristales tipo

*flint* en discos de 10 a 15 centímetros de diámetro; posteriormente fue capaz de producir discos aún mayores de 30 a 35 cm de diámetro, soldando piezas pequeñas. Estos discos de cristal *flint* de buena calidad y de grandes diámetros permitieron abordar la fabricación de telescopios acromáticos de dimensiones cada vez mayores y de mejor calidad.

En 1814 Joseph estudiaba el comportamiento de la luz utilizando un prisma de calidad excepcional; examinando la descomposición de la luz hecha por el prisma, mediante el telescopio de un teodolito notó que el espectro solar (el arco-iris de colores) estaba interrumpido por líneas oscuras, zona (colores) donde la intensidad de la luz es notoriamente menor. Fraunhofer se interesó en este fenómeno pues le permitiría

identificar zonas en el amarillo y en el rojo con mucha precisión para determinar índices de refracción.

Fraunhofer no era el primero en notar las líneas oscuras del espectro solar. El químico inglés William Hyde Wollaston (1766–1828) había repetido el experimento de Newton de descomposición de la luz solar en un prisma pero había reemplazado el orificio de entrada de luz al prisma por una delgada ranura, de tan sólo 1/20 de pulgada (algo así como un milímetro). El espectro solar, ahora con un menor traslapo entre los colores le mostró siete líneas oscuras. Wollaston publicó sus resultados en un artículo en las *“Philosophical Transactions”* de la Royal Society en 1802. Wollaston las interpretó como líneas divisorias que separan un color de otro o un matiz de otro y no les atribuyó importancia alguna. Fraunhofer sin embargo dedicó a ellas toda su atención. Contó primero 354 y luego, con un telescopio más poderoso, 700 líneas, designando a las más prominentes con las letras del alfabeto: A, B, C, D, etc. Desde el rojo hacia el azul, creando de este modo las bases de una nomenclatura que sus sucesores no tuvieron más que ampliar. Reconoció que a cada línea corresponde un refrangibilidad exactamente determinada y al examinarlas con distintas posiciones del aparato y distintas posiciones del Sol se dio cuenta que no se movían con respecto a los colores y que eran inherentes a la fuente de luz, esto es al Sol.

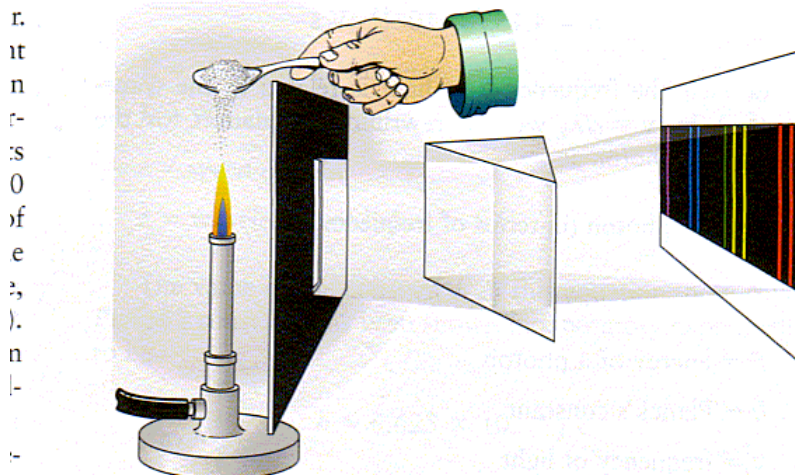
A partir de ese momento el interés de Fraunhofer por las líneas oscuras del espectro solar fue aún mayor. Descompuso en su prisma la luz de la Luna y Venus, comprobando que están presentes las mismas líneas oscuras que en el espectro solar. Observó también diversas estrellas; algunas, como Capela, reproducen débilmente el espectro solar mientras otras tienen diseños de líneas oscuras totalmente distintos. Esto lo explica en memorias escritas en 1814 y 1815. En otra serie de observaciones reemplaza el prisma por placas de cristal sobre la cual ha trazado líneas muy próximas entre sí, hasta 300 por milímetro. Estas *“redes de difracción”* le permiten medir la longitud de ondas de las líneas oscuras del espectro con una exactitud tan admirables que sus errores son menores al uno por mil.

Fraunhofer no se limitó a observar fuentes luminosas celestes; las llamas de las bujías y lámparas de aceite le ofrecen espectros continuos sin líneas. Introdujo sal común en una llama lo que hacía aparecer una intensa línea amarilla, en emisión, que al ser observada con mayor resolución resultó ser una línea doble. Esta intensa línea amarilla de la llama había sido descubierta a mediados del siglo XVIII por un joven físico escocés Thomas Melville (1726-1753), quien murió en 1753 a la temprana edad de 27 años. Desgraciadamente Melville publicó su descubrimiento en una oscura colección de ensayos que nadie prestó atención. Fraunhofer la buscó en el espectro solar y estaba exactamente en el mismo lugar donde hay dos líneas negras (oscuras) que había llamado línea D. Desgraciadamente no reparó en la coincidencia ni supo interpretarla. Utilizó las líneas para medir índices de refracción de diversos cristales. Con mejores valores para los índices de refracción de cristales Fraunhofer diseñó y construyó los mejores refractores de la primera mitad del siglo XIX. Por décadas *“un refractor de Fraunhofer”* fue sinónimo de un excelente telescopio, tanto en su óptica como en su mecánica.

Fraunhofer publicó varios trabajos científicos en la revista "*Astronomischen Nachrichten*" que le hicieron merecedor de una gran reputación en los medios científicos alemanes y europeos. La Academia de Munich lo incorpora como miembro y fue designado profesor de la Universidad. Falleció prematuramente a los 39 años de edad, el 7 de Junio de 1826, y transcurrieron tres decenios antes que Bunsen y Kirchhoff descifrarán el enigma de las líneas oscuras del espectro solar, conocido hoy como "*espectro de Fraunhofer*", creando con ello la astrofísica.

### **2.05.3. Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899).**

La idea que el color de la llama podría revelar la naturaleza de la sustancia que arde en ella se remonta al siglo XVI y se encuentra mencionada en "*De re metallica*" de Georg Bauer -latinizado como Georgius Agricola- (1494–1555) pero solamente dos siglos más tarde, en 1752, se le ocurre a Thomas Melville (1726-1753) someter a la descomposición por un prisma las llamas coloreadas comprobando la diferencia de algunos espectros así obtenidos y descubriendo la línea amarilla en muchas llamas. Un paso adelante es el dado por el geómetra Julius Plücker (1801-1868), que obtuvo los espectros de varios gases mediante descargas eléctricas en tubos de vacío reconociendo que el espectro es una característica fija del gas que lo engendra. Sin embargo Plücker se limitó a comprobar este promisorio resultado sin intentar desarrollarlo. Propuso que las líneas C y F de Fraunhofer se debían al Hidrógeno. También el coinventor de la fotografía William Fox Talbot (1800–1877) así como el astrónomo John Herschel, los físicos Wheatstone y Foucault y otros, se ocuparon en el estudio de los espectros de las llamas. Foucault reconoce en 1849 el fenómeno de la inversión de la línea D del Sodio que diez años más tarde será vital en el descubrimiento del análisis espectral. Por su parte David Brewster (1781-1868) descubre que ciertas líneas oscuras del espectro solar son engendradas por la absorción de los rayos por la atmósfera terrestre. Pero mientras todos estos inventores sólo logran hallazgos aislados e inconexos, en 1859 surge el capital descubrimiento de Kirchhoff y Bunsen.



**Figure 5-13**

**The Kirchhoff-Bunsen Experiment** In the mid-1850s, Gustav Kirchhoff and Robert Bunsen discovered that when a chemical substance is heated and vaporized, the spectrum of the emitted light exhibits a series of bright spectral lines. They also found that each chemical element produces its own characteristic pattern of spectral lines. (In an actual laboratory experiment, lenses would be needed to focus the image of the slit onto the screen.)

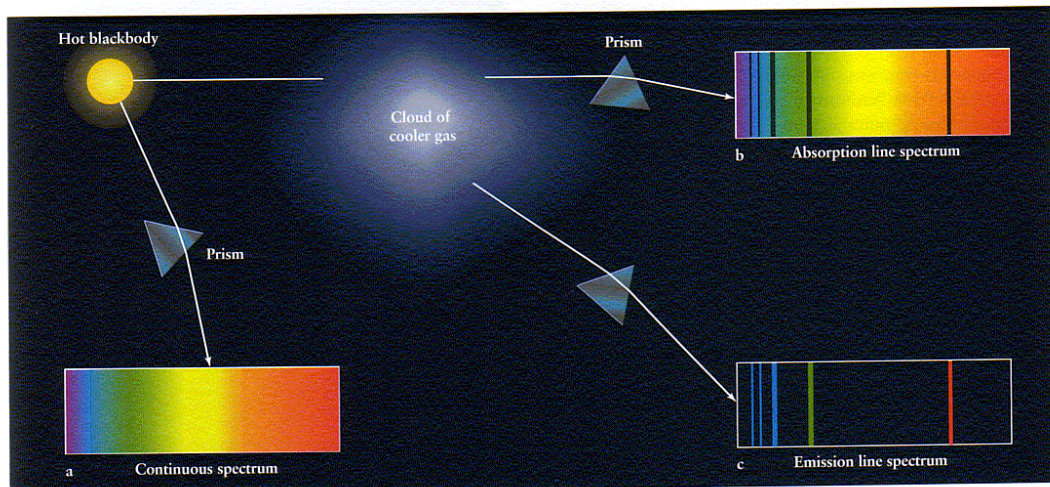
El químico **Robert Wilhelm Bunsen** (1811–1899) experimentador tan lleno de inventiva como incansable y el brillante teórico **Gustav Kirchhoff** (1824–1887), ambos profesores de la Universidad de Heidelberg, se complementaron en una gran colaboración. Las llamas coloreadas por ciertas sustancias atrajeron la atención de Bunsen que se esforzó en obtener de ellas un medio seguro para identificar los elementos químicos. Siguiendo el consejo de Kirchhoff observó esas llamas a través de prismas y los resultados lo condujeron muy pronto al reconocimiento que las líneas brillantes emitidas por vapores metálicos incandescentes son independientes de la temperatura así como de los elementos con los cuales esos metales están combinados ofreciendo características constantes y fijas de los elementos químicos aunque estén presentes en cantidades mínimas. Así basta con una cantidad tan pequeña como un diez millonésimo de miligramo para obtener la doble línea amarilla del Sodio que delata la presencia de dicho elemento cuando la química analítica no logra revelar ningún vestigio del elemento. El estudio de las líneas de colores emitidas por varios cuerpos ya sea en la llama [Bunsen inventó el mechero que lleva su nombre], el arco voltaico o en la chispa eléctrica convenció a Bunsen de la seguridad de su método, que fue confirmado, en 1860 y 1861, con el descubrimiento del **Rubidio** y el **Cesio**. Posteriormente, 1861 William Crookes (1832-1919) descubrió el **Talio** y en 1863 Ferdinand Reich (1799-1882) y Theodor Richter (1824-1898) descubrieron el **Indio**. El análisis espectral por emisión estaba fundado. Faltaba solamente quien articulara en un corpus coherente la gran cantidad de conocimiento empírico que se encontraba disperso; esta fue la tarea de Kirchhoff.



#### 2.05.4 Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887):

Gustav Robert Kirchhoff nació en Königsberg, (la ciudad de Kant y Bessel) Alemania, en 1824. Estudió en Berlín y Marburgo; fue nombrado profesor de Física en la Universidad de Heidelberg.

Producir artificialmente en el laboratorio las líneas de Fraunhofer fue lo que dio la clave del problema. Kirchhoff realizó esta hazaña de una manera que, una vez conocida, parece muy simple. Encendió una intensa llama engendradora de las dos líneas amarillas del Sodio y en el trayecto colocó una lámpara de alcohol con una solución de sales de sodio. Instantáneamente las líneas amarillas y brillantes se convirtieron en las líneas oscuras D, idénticas a las del espectro solar. Si en lugar de sales de Sodio utilizaba cloruro de Litio, era la línea roja característica del Litio la que se tornaba oscura. Reconoció que las llamas coloreadas, fuentes de líneas brillantes si están colocadas entre una fuente luminosa bastante intensa y el prisma, absorben los rayos de la misma longitud de onda que emite introduciendo en el espectro rayas negras en su lugar. *“Podemos admitir – escribe Kirchhoff en Octubre de 1859 en su breve comunicación a la Academia de Berlín – que las líneas brillantes del espectro de una llama, que coinciden con las líneas D se deben siempre al contenido de Sodio de las mismas. Las líneas oscuras D en el espectro solar permiten por lo tanto concluir que se encuentra Sodio en la atmósfera solar”.*



**Figure 5-14**

**Continuous, Absorption Line, and Emission Line Spectra** A hot, glowing object such as a blackbody emits a continuous spectrum of light (spectrum a). If this light is passed through a cloud of a cooler gas, the cloud absorbs light of certain specific wavelengths. Hence, the light from the hot, glowing object that passes directly through the cloud is depleted in these wavelengths, and the spectrum of this light has dark absorption lines (spectrum b). The cloud does not retain all the light energy that it absorbs but radiates it outward in all directions. The spectrum of this reradiated light contains bright emission lines (spectrum c). The dark absorption lines in spectrum b have exactly the same wavelengths as the bright emission lines in spectrum c. The specific wavelengths observed depend on the chemical composition of the cloud.

Como los gases de la envoltura del Sol son más fríos que el astro, un elemento dado en la atmósfera solar es incapaz de reemplazar con su propia radiación los rayos que ha absorbido. Así nacen las líneas oscuras en el espectro solar como lagunas que se traducen en la ausencia, en la luz, de rayos de elementos dados presentes en el Sol.

El enigma de las líneas de Fraunhofer estaba resuelto y con ello abierta la posibilidad del análisis químico del Sol, tarea calificada dos décadas antes como absolutamente imposible por el filósofo Augusto Comte.

En el mismo año de 1859 Kirchhoff envía una segunda comunicación a la Academia de Berlín, generalizando su ley. Introdujo una nueva noción: la de un cuerpo perfectamente negro, es decir un cuerpo susceptible de absorber totalmente los rayos de todas las longitudes de onda y no reflejar ninguno. Tal cuerpo fue sólo una exigencia teórica de Kirchhoff; sin embargo algo más tarde, en 1895, fue realizado técnicamente por Wilhelm Wien (1864–1928) y por Otto Lummer (1870–1925). Una vez definido el cuerpo negro Kirchhoff demostró la validez de la proporción  $e : a = E : A$  donde  $e$  y  $a$  son el poder de emisión y de absorción de un cuerpo cualquiera y  $E$  y  $A$  son esos poderes para un cuerpo negro, de ahí que el primer miembro de esa proporción es una constante bien determinada, de manera que en los “*Poggendorfs Annalen*” de 1860 Kirchhoff enuncia su ley: para las radiaciones de una misma longitud de onda a la misma temperatura, la razón entre el poder de emisión y el poder de absorción es siempre la misma.

Las leyes de Kirchhoff de la espectroscopía pueden enunciarse de la siguiente manera:

1. *Un sólido o un líquido [o un gas muy denso] incandescente produce siempre un espectro continuo.*
2. *Un gas [enrarecido] incandescente produce un espectro de líneas brillantes de emisión, sin continuo.*
3. *Un espectro continuo cuando pasa a través de un gas se transforma en un espectro con líneas oscuras.*
4. *Las posiciones de las líneas tanto de emisión como de absorción son características de la constitución química de la materia que las produce. Cada elemento y cada compuesto tiene sus líneas características. Los elementos absorben o emiten luz sólo de ciertas longitudes de onda. En consecuencia el estudio de un espectro permite la identificación de los elementos químicos que lo produjeron.*

Kirchhoff reunió los resultados de sus investigaciones emprendidas en colaboración con Bunsen sobre los espectros solares y terrestres, en un célebre ensayo “*Untersuchungen über das Sonnenspektrum und die Spektren der Chemischen Elemente*” de 1861 y del cual la Academia prusiana preparó una edición especial al año siguiente, en vista de los alcances excepcionales del mismo. El ensayo de Kirchhoff elimina definitivamente la antigua hipótesis de Alexander Wilson (1766-1813) y de William Herschel que concebían al Sol como una masa fría y oscura envuelta por gases incandescentes. Kirchhoff sustituyó esta hipótesis, incompatible con el concepto de equilibrio térmico, por la concepción del Sol como un globo de temperatura elevada cuyas capas externas de temperatura inferior son semi líquidas o gaseosas. En tales capas se encuentran, de acuerdo al análisis espectroscópico, Hierro, Calcio, Magnesio, Sodio y Cromo, en grandes cantidades. Por su parte, afirma Kirchhoff, las manchas solares, lejos de ser huecos o aberturas en la atmósfera del Sol, representarían productos locales de enfriamiento, escorias que flotan en la superficie de la fotósfera

solar. Sin duda esta hipótesis de Kirchhoff sobre la naturaleza de las manchas solares no pudo resistir mucho tiempo a la crítica, pero representa el primer intento de explicar los fenómenos solares en términos de la física y de la química terrestres, ofreciendo así un punto de partida para todas las teorías posteriores sobre el Sol.

Con las investigaciones de Kirchhoff la interpretación de los espectros recibió una sólida base y pudo iniciarse el desciframiento de las señales espectrales, apoyado en parte por el conocimiento cada vez más profundo de los espectros de emisión de los cuerpos químicos y en parte por el poder creciente de los instrumentos. Kirchhoff midió varios miles de líneas del espectro de Fraunhofer en una escala arbitraria y las comparó con las líneas emitidas por muchas sustancias que entonces identificó en el Sol como el Hidrógeno, el Calcio, el Sodio, el Hierro, el Magnesio, etc. El físico sueco de Uppsala, **Anders Jonas Ångström** (1814–1874) en 1868 reemplazó la escala arbitraria de Kirchhoff por una en que la unidad era el diez millonésimo de milímetro; esa unidad ha llegado a ser llamada *Angstrom* ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  metros). El espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen se asoció pronto con la red de difracción, logrando el físico estadounidense **Henry August Rowland** (1848–1901), gracias a los progresos de la máquina de dividir, crear en 1882 redes formadas por estrías de sorprendente finura, hasta de 1.100 líneas por milímetro. Rowland talla las redes en espejos cóncavos; en 1895 publica tablas que contienen las longitudes de onda de más de 20.000 líneas del espectro de Fraunhofer.

El análisis espectral dio nacimiento a toda una nueva rama de la astronomía, cuyo extraordinario desarrollo en las últimas cuatro décadas del siglo XIX abrió las puertas a la astrofísica del siglo XX. El descubrimiento de Kirchhoff y Bunsen convirtió en realidad la posibilidad que el hombre penetrara en el conocimiento químico de cuerpos a distancias estelares. Esto no tan sólo le pareció increíble y utópico a Comte, sino a mucho otros testigos de la época. Kirchhof en una carta que dirige a su hermano Otto, en 1859 le cuenta: *“Mi intento, el análisis químico del Sol, parece a mucho muy atrevido. No estoy enojado con un filósofo de la Universidad por haberme contado mientras paseábamos, que un loco pretende haber descubierto Sodio en el Sol. No pude resistir la tentación de revelar que ese loco era yo”*.



Figure 22.1 This portrait was taken in 1862 and shows, from left to right, G. Kirchhoff, R. W. Bunsen (seated), and H. E. Roscoe. Reproduced from the latter's *The Life and Experiences of Sir Henry Enfield Roscoe* (London, 1906).



### Bibliografía:

- Berry, A. "A Short History of Astronomy", Dover, N. York, 1961; pp.320–353.
- Crowe, M.J. "Modern Theories of the Universe, from Herschel to Hubble", Dover, N. York, 1994.
- Papp, D. Y Babini, J. "Panorama General de la Historia de la Ciencia", Vol. X; B. Aires, 1964; pp 96–110.
- Pannekoek, A. "A History of Astronomy", Dover, N. York, 1989.
- "The Cambridge Concise History of Astronomy", M. Hoskin (Ed.), Cambridge University Press, Cambridge, 1999.