

# Introducción a la Física Experimental

## Guía de la experiencia

### Espectros de emisión atómicos

*Departamento de Física Aplicada*  
Universidad de Cantabria

Febrero 28, 2005

*Tenga en cuenta que la lectura previa de esta guía y la comprobación de las ecuaciones le llevará del orden de tres horas, incluyendo la consulta de las palabras clave, y que la lectura de la bibliografía específica le llevará entre una y dos horas.*

#### Resumen

Este experimento permite observar espectros de emisión atómicos y moleculares, así como determinar la longitud de onda de las líneas espectrales mediante un montaje sencillo. En el caso del átomo de hidrógeno es posible medir la longitud de onda de las líneas espectrales de Balmer situadas en la región visible del espectro y obtener experimentalmente el valor de la constante de Rydberg.

## Introducción

El fenómeno del *arco iris*<sup>1</sup> es conocido desde la antigüedad y sus posibles causas llamaron la atención de los observadores. También se conocía el hecho de que cuando la luz atraviesa un *prisma* aparecen zonas coloreadas similares a las del arco iris. Isaac Newton también se interesó por la teoría del color, si bien su interés se centraba en eliminar los contornos coloreados que aparecían en las imágenes formadas por las lentes de los telescopios. Newton observó que cuando un rayo de sol proveniente de un orificio circular atravesaba un prisma se formaba en la pared opuesta una mancha de luz coloreada de violeta a rojo desde un extremo a otro pasando por una graduación continua de colores. Newton llamó a esta figura *espectro* de la luz blanca.

En 1802, William Hyde Wollaston observó que el espectro solar estaba cruzado por siete líneas negras aunque no le dio importancia al considerar que estas rayas no eran más que la separación entre los distintos colores. En 1814, Joseph van Fraunhofer contó 600 líneas (en la actualidad son más de 10000). Fraunhofer, óptico profesional, en su afán por entender estas líneas, situó un

---

<sup>1</sup>Consulte el significado físico de las palabras en itálica



Figura 1: Isaac Newton (Woolsthorpe, 1642- Londres, 1727). En su libro *Optiks* Newton describe experimentos con prismas para obtener el espectro de la luz blanca y expone su teoría de los colores. William Wollaston (Norfolk, 1766- Londres, 1828), contribuyó a perfeccionar el microscopio con el invento de la cámara lúcida.

prisma en la focal de un telescopio (punto donde coinciden todos los rayos luminosos recogidos por las lentes del telescopio) con la idea de hacer pasar la luz procedente de las estrellas a través de él. Fraunhofer observó que las rayas de las estrellas no aparecían en la misma posición que las del Sol, y que su posición cambiaba de estrella a estrella. No supo dar explicación a estas observaciones y sus informes fueron ignorados en su época.

En 1854, cuando Phillip von Jolly dejó su cátedra de física en Heidelberg, Gustav Kirchhoff le sucedió. Tras dedicarse al estudio de la electricidad y elasticidad, Kirchhoff comenzó a interesarse por el análisis del espectro. Hacia 1859, investigando junto a Robert Bunsen, comenzó a analizar la luz procedente de ciertas reacciones químicas a través de un prisma. Kirchhoff estudió la llama producida en la combustión de distintos productos químicos, utilizando un mechero y un espectroscopio. Un estudio sistemático de distintos compuestos condujo a Kirchhoff a la conclusión de que cada elemento producía líneas luminosas, responsables del color de la llama. De esta manera cada elemento tenía su “huella dactilar”. Ya se sabía, gracias a los trabajos de León Foucault en 1849, que las líneas oscuras (líneas D) observadas en el espectro solar por Fraunhofer coincidían con las líneas brillantes detectadas en las llamas que contenían sodio.

El hallazgo de Kirchhoff fue darse cuenta de que las líneas del sodio se hacían oscuras al anteponer una llama de sodio al espectro solar. La explicación, que pronto fue confirmada, era que una sustancia capaz de emitir una línea espectral posee también una gran capacidad para absorber la misma línea, por eso esas líneas se hacían más oscuras cuando al espectro solar se le antepone una llama de sodio. Esto llevó a proponer la existencia de sodio en la atmósfera del Sol, el cuál, mediante absorción, originaba las mencionadas líneas



Figura 2: Gustav R Kirchhoff (Königsberg, 1824-Berlín, 1887) Físico alemán que partiendo de los descubrimientos de Fraunhofer, en 1859 colaboró con Bunsen en la invención del espectroscopio, que aprovechaba el hecho de que cada elemento químico emite, al volverse luminoso por efecto del calor, ciertas frecuencias, colores, características, empezando así el campo del análisis espectral.

negras y a identificar dos nuevos elementos, el cesio y el rubidio. Posteriormente llegó a identificar un buen número de las líneas oscuras que aparecían en el espectro solar, como ejemplo baste decir que fue capaz de asignar 72 líneas oscuras debidas al hierro. El espectro solar es uno de los más complejos y, en la actualidad, se han identificado en él más de 3000 líneas espectrales. Las implicaciones son claras, Kirchhoff hizo posible estudiar la composición de los cuerpos celestes sin más que estudiar la luz que recibimos de ellos.

Las líneas espectrales producidas por los distintos elementos no sólo planteaban el problema de cuál era su origen sino que también se resistían a ser descritas mediante una expresión matemática que englobase las líneas de algunas series de elementos individuales. Fue un maestro de escuela suizo, Johann Jacob Balmer, quién, en 1885, descubrió de forma empírica una relación matemática sencilla que proporcionaba las longitudes de onda de las líneas del espectro del hidrógeno:

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R_H \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

donde  $\lambda_0$  es una constante,  $n$  y  $m > n$  son enteros y  $R_H = 1,09709 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$  es la denominada constante de Rydberg. Valores altos de  $n$  corresponden a líneas de longitud de onda corta y, por tanto, líneas en la región violeta del espectro. Las líneas espectrales que corresponden a  $n = 2$ , llamadas series de Balmer, están en la región visible. La serie de Lyman ( $n = 1$ ) en el ultravioleta, la de Paschen ( $n = 3$ ) y la de Brackett ( $n = 4$ ) están en el infrarrojo. Independientemente, cinco años después Robert Rydberg expresó cada serie mediante una ecuación más general.

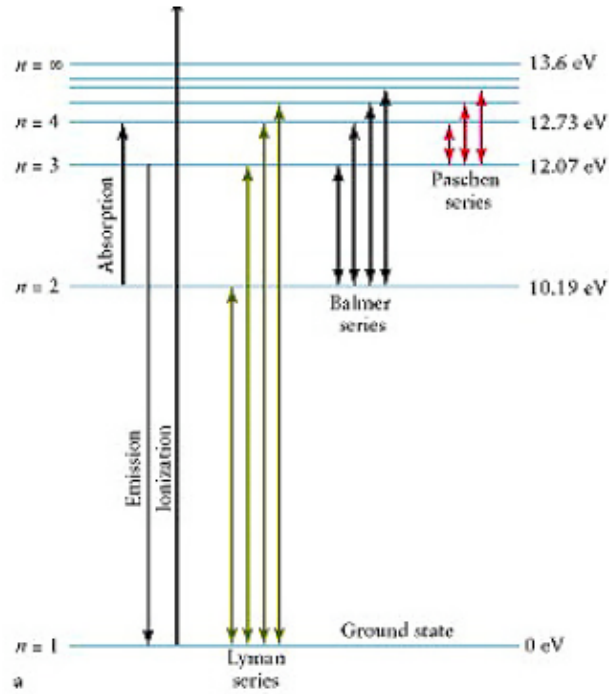


Figura 3: Diagrama de niveles de energía del átomo de hidrógeno. Las transiciones entre niveles dan lugar a las diferentes series de líneas del espectro.

La espectroscopía es una ciencia experimental y como tal muy necesitada de mejoras instrumentales. Las *redes de difracción*, superficies atravesadas por miles de líneas paralelas, dan lugar a *fenómenos de interferencia*. Su utilización fue esencial para el estudio del dominio de las zonas de infrarrojo o ultravioleta. Las primeras redes de difracción fueron construidas por el ingeniero Henry A. Rowland consiguiendo  $10000 \text{ líneas} \cdot \text{mm}^{-1}$ . La superioridad de tales redes sobre los prismas quedó de manifiesto de modo inmediato. Sus redes de difracción eran de tal calidad que establecieron el estándar durante medio siglo.

La luz de longitud de onda  $\lambda$  que incide sobre una red de difracción de constante  $a$  (distancia entre líneas) se difracta. Los máximos de intensidad tienen lugar para ángulos que satisfacen la condición:

$$m \cdot \lambda = a \cdot \text{sen}\theta_m, \tag{2}$$

donde  $m$  es el orden de difracción (ver Fig. 5). Para la difracción de orden  $m$ , las líneas aparecen si se verifica

$$m \cdot \lambda = a \frac{d_m}{\sqrt{d_m^2 + D^2}} \tag{3}$$



Figura 4: Niels Bohr (Copenhague, 1885- Copenhague, 1962) Físico danés que combinó la teoría de Rutherford de un núcleo atómico de carga positiva, pequeño y denso, rodeado de electrones con la teoría cuántica de Planck.

En 1913, Niels Bohr enunció su modelo, estableciendo varias hipótesis. Supuso que un electrón no puede describir cualquier órbita en torno al núcleo atómico, sino sólo ciertas órbitas discretas. No puede radiar energía mientras está en una de ellas, sólo lo hace cuando cambia a otra órbita, emitiendo o absorbiendo un fotón (quanto de luz) y dando lugar a transiciones abruptas entre órbitas con distinta energía. En el modelo de Bohr, cuando un electrón efectúa una transición desde la órbita  $m$  a la  $n$ , se emite un fotón de energía  $h/\lambda_{nm}$ . Mediante la mecánica clásica (newtoniana), Bohr demostró que cada órbita corresponde a un valor dado del momento angular del electrón cuantizado. Dedujo la ecuación empírica de Balmer para el hidrógeno sin más que suponer que el momento angular toma valores que son múltiplos de un cuanto fundamental  $h$ .

De acuerdo con el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, la energía de cada nivel cuántico viene dada por:

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}, \quad (4)$$

donde  $e$  es la carga del electrón,  $m_e$  es la masa del electrón,  $h$  es la constante de Planck y  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío.

## Descripción del material

Se dispone del siguiente material (Fig. 6):

1. Red de difracción tipo Rowland [(1) en Fig. 6].

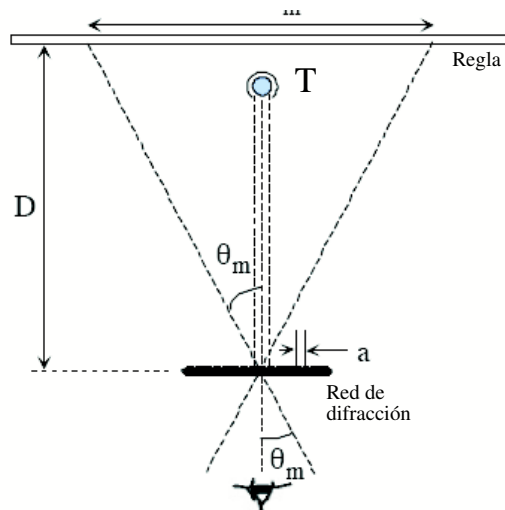


Figura 5: Esquema de un sencillo espectroscopio empleando una red de difracción.  $a$  es la distancia entre líneas de la red de difracción,  $D$  es la distancia a la regla de medida,  $2d_m$  es la distancia entre las dos líneas espectrales del mismo color situadas simétricamente a izquierda y derecha del tubo espectral T y  $\theta_m$  es el ángulo que forma la dirección en la que se encuentra la línea del espectro, cuya longitud de onda se quiere medir, y la normal a la red de difracción.

2. Tubos espectrales: H<sub>2</sub>, Hg, He, Ne, etc.) [(2) en Fig. 6].
3. Generador de 7 kV [(3) en Fig. 6].
4. Regla graduada [(4) en Fig. 6].
5. Trípode con bornes aisladores y portatubos espectrales [(5) en Fig. 6].
6. Soporte para red [(6) en Fig. 6].

## Reflexiones previas a la realización del experimento

1. Describa el modelo atómico de Bohr, deduzca la ecuación de Balmer y exprese la constante de Rydberg en función de constantes universales.
2. ¿Cómo interpretaría físicamente el potencial de ionización de un átomo?
3. ¿Qué es una red de difracción y como se le ocurriría construirla? ¿Qué ventajas y desventajas puede presentar una red de difracción frente a un prisma?
4. Obtenga la Ec. (2) considerando la difracción que se produce en dos rendijas consecutivas de la red de difracción.
5. Infórmese de cómo se obtiene la Ec. (4).

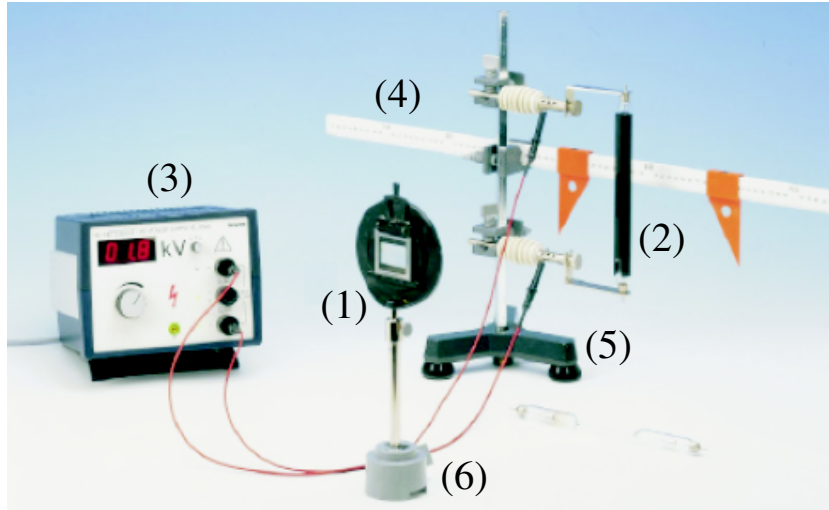


Figura 6: Montaje experimental para obtener y medir líneas espectrales. (1) Red de difracción, (2) Tubos espectrales, (3) Generador de alto voltaje, (4) Regla graduada, (5) Trípode con bornes aislantes y portatubos espectrales, (6) Pie de la red de difracción

6. Busque en la bibliografía qué es un espectro de emisión y qué es uno de absorción.
7. ¿Qué ventajas y qué desventajas tiene trabajar con  $m = 2$  frente a  $m = 1$ ? [Ver Ec. (3)]
8. ¿En qué consiste el error de paralaje?

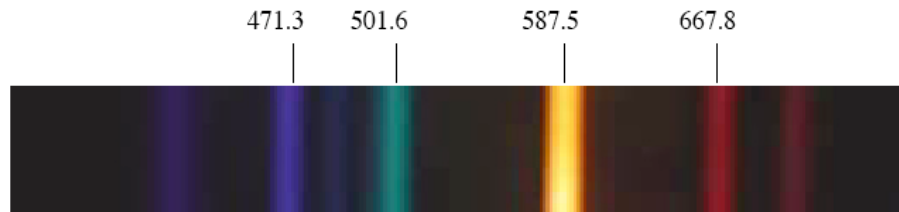


Figura 7: Espectro de emisión del tubo de He y longitud de onda (en nm) de las líneas más brillantes.

## Modo operativo

En general, hay tres clases de espectros: espectros de línea brillante, espectros continuos (por ejemplo, una lámpara de filamento) y espectros de absorción (tal como ha podido averiguar en sus reflexiones previas). Los del primer tipo son aquellos con los que usted va a trabajar en este experimento. Se

originan en gases incandescentes a baja presión como los que contienen los tubos de descarga parcialmente evacuados (tubos o lámparas espectrales). En la mayoría de los casos corresponden a gases monoatómicos, aunque algunos corresponden a moléculas (espectro de bandas).

## SEGURIDAD

1. Los tubos espectrales son muy delicados y se rompen con facilidad, manéjelos cuidadosamente.

No toque las ampollas de vidrio con los dedos, ni tampoco la red de difracción. Conecte una sola vez cada lámpara, asegurándose de que ha finalizado las medidas con ella antes de desconectarla. Espere un cierto tiempo a que se estabilice la iluminación, una vez que ha encendido una lámpara.

2. Los tubos alcanzan altas temperaturas: ¡nunca los toque mientras funcionan!
3. Nunca toque los terminales de alto voltaje cuando la fuente esté encendida.
4. Para reemplazar el tubo espectral siga los siguientes pasos:
  - (a) Pregunte al profesor si tiene alguna duda
  - (b) Apague la fuente y espere unos minutos a que el tubo se enfríe
  - (c) Retire el tubo con cuidado, cogiéndolo por los extremos metálicos
  - (d) Instale el tubo nuevo y encienda la fuente de alto voltaje.

a) *Montaje del espectroscopio de red de difracción.* En la Fig. 6, se muestra el montaje de un espectroscopio sencillo utilizando una red de difracción. Procure que la distancia,  $D$ , entre la red de difracción y la regla sea de aproximadamente  $D = 1$  m. Conecte el tubo espectral al generador de alto voltaje y gire el mando suavemente hasta que el tubo espectral emita luz ( $\approx 5\text{kV}$ )(Fig. 6). Sitúe la regla lo más próxima posible al tubo espectral con objeto de reducir al máximo los errores de paralaje. La red de difracción, la regla y la ventana del tubo espectral deben estar a la misma altura, mientras que la regla y la red deben situarse paralelamente (ver fig. 5). Tenga cuidado de no tocar ni de acercarse a los bornes con el generador en marcha.

b) *Observación del espectro de emisión.* Observe la luz que emite el tubo espectral a través de la red de difracción. Observará como ésta descompone la luz en las llamadas líneas espectrales, que son características de cada elemento. La experiencia debe realizarse en penumbra, buscando la observación simultánea de las líneas espectrales y de las divisiones de la regla.



- c) *Determinación de la longitud de onda de las líneas espectrales.* Mida la distancia ( $2d_m$ ) entre las dos líneas espectrales del mismo color situadas simétricamente a izquierda y derecha del tubo, sin mover la cabeza. Mida también la distancia entre la regla y la red,  $D$ . A partir de la Ec. (3), trabajando en primer orden de difracción ( $m = 1$ ) y teniendo en cuenta que la red que usted utiliza tiene  $570 \text{ líneas} \cdot \text{mm}^{-1}$  (constante de red), calcule las distintas longitudes de onda de las líneas espectrales, con su error. En la Fig. 7 se muestran las líneas espectrales para el tubo de He con las correspondientes longitudes de onda expresadas en nanómetros ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Utilice varios tubos espectrales (diferentes gases).
- d) *Determinación de la constante de Rydberg.* Con el tubo de hidrógeno es posible, una vez conocidas las longitudes de onda, determinar la constante de Rydberg mediante la ecuación de Balmer (1), única situada en la región visible del espectro. Calcule dicha constante y compare su resultado con el teórico.
- e) *Cálculo de energías* Utilizando la expresión teórica del modelo de Bohr (Ec. (4), obtenga los valores de la energía para  $n = 2, 3, 4$  y  $5$ , expresadas en J. Calcule la diferencia de energía entre los diferentes pares de niveles de energía involucrados en la serie de Balmer, teniendo en cuenta que

$$E_2 - E_n = \frac{hc}{\lambda}.$$

¿Concuerdan estos valores con los obtenidos teóricamente a través de la Ec. (4)?

## Preguntas adicionales relacionadas con el experimento

1. ¿Se podría aplicar el modelo de Bohr al resto de elementos estudiados, He, N<sub>2</sub>?
2. ¿Se le ocurre algún método para calibrar la red de difracción, es decir, conocer el número de líneas por mm? ¿Cómo lo haría?
3. ¿Cómo se le ocurriría obtener el espectro de absorción de cada elemento? ¿Qué cree que observaría?

Busque en bibliografía los valores de las longitudes de onda correspondientes a las principales líneas espectrales del espectro de los gases que ha utilizado.

## Referencias

- [1] *Física*, P. A. Tipler, Vol. 2, Ed. Reverté (1999)

- [2] *Física 2. La naturaleza de las cosas*, S. M. Lea y J. R. Burke, Vol. 2, Ed. Paraninfo-Thomson Learning, pp. 1112-1143 (1998)
- [3] *Espectroscopia*, A. Requena y J. Zúñiga, Ed. Pearson Education, pp. 113-118 (2004)
- [4] *Óptica*, J. Casas, 6<sup>o</sup> edición, pp 253-258 (1985)
- [5] *Historia de la Física Cuántica*, J. M. Sánchez Ron, Vol. 1. Ed. Crítica, Barcelona (2001)
- [6] <http://www.avogadro.co.uk/light/bohr/spectra.htm>
- [7] Meiners, Eppenstein y Moore, *Experimentos de Física*, Ed. LIMUSA, México (1980).