

SESIÓN 7:

ESPECTROSCOPIA. REDES DE DIFRACCIÓN

TRABAJO PREVIO

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Difracción**

La difracción es un fenómeno óptico que se produce cuando la luz encuentra un obstáculo en su paso. Es observable cuando el obstáculo es lo suficientemente pequeño. Grimaldi, en 1648, realizó un experimento en el que dejó que la luz del sol penetrara en un cuarto oscuro a través de un pequeño agujero en una cartulina. Hizo pasar esta luz a través de otra cartulina perforada. Descubrió que la luz proyectaba una mancha mayor que la esperada si la propagación de la luz fuera rectilínea. En otros experimentos observó que el borde de la sombra en lugar de estar bien definida, mostraba algunas franjas claras y oscuras. No consiguió explicar el fenómeno, cuyo estudio quedó pospuesto hasta que Fresnel lo relacionó con la teoría ondulatoria de la luz y la superposición de las ondas generadas en los bordes del obstáculo. En la figura 7.1 puede ver el patrón de difracción generado por un orificio circular.

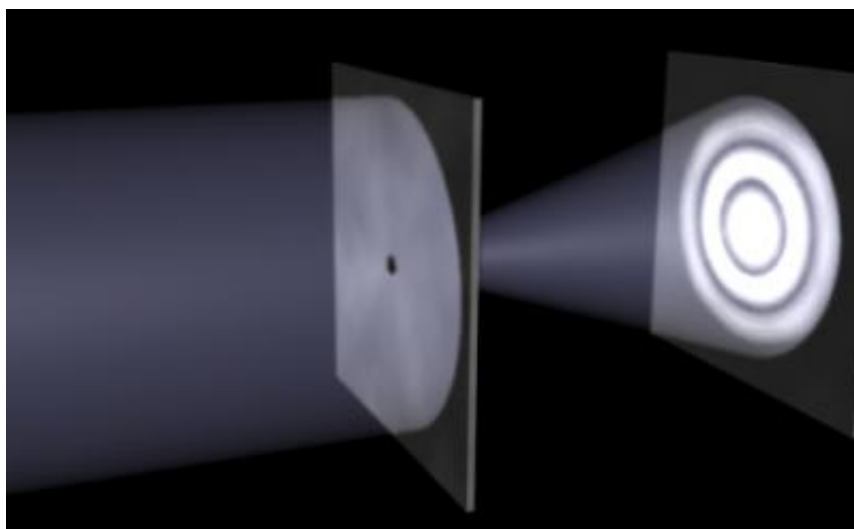


Figura 7.1. Patrón de difracción por un orificio circular.

- **Difracción: Experiencia sencilla**

Para observar la difracción, basta con dos lápices bien afilados y una linterna pequeña. Colocando la linterna sobre una mesa y juntando los lápices hasta que entre las dos puntas quede un espacio muy pequeño, mirando hacia la linterna a través de este espacio se observa un patrón difraccional (figura 7.2). También hay otros fenómenos cotidianos en los que pueden observarse efectos de difracción, como los halos creados alrededor de las fuentes de luz cuando se observan con cristales empañados, o los patrones en forma de estrella que se obtienen en algunas fotografías de fuentes de luz.



Figura 7.2. Experiencia para observar la difracción.

- **Difracción de Fraunhofer**

Según los parámetros del experimento de difracción se consideran dos casos diferentes de difracción: *aproximación de campo cercano* o *difracción de Fresnel* y *aproximación de campo lejano* o *difracción de Fraunhofer*. Por tanto se tiene difracción de Fraunhofer cuando tanto la fuente de luz como la pantalla donde se observa el patrón están muy alejados del objeto difractante, o bien el número de Fresnel, F , es mucho menor que la unidad, siendo F :

$$F = \frac{a^2}{\lambda D} \quad (7.1)$$

donde a es el tamaño del objeto difractante, λ la longitud de onda de la luz incidente, y D la distancia entre el objeto difractante y el plano donde se observa el fenómeno.

Si $F \ll 1$ (del orden de 0.001 o menor) se puede realizar la aproximación de campo lejano. Si $F > 1$ se aplica la aproximación de campo cercano o difracción de Fresnel.

Si además consideramos que la fuente puede describirse como una magnitud escalar, el tratamiento teórico del fenómeno se simplifica bastante, dando lugar a la teoría escalar de la difracción. En el caso de la difracción de Fraunhofer, la teoría escalar establece que la amplitud observada en la pantalla

es la *transformada de Fourier* de la función que describe el objeto difractante:

$$E_p = Q \int_{\Sigma} G(\xi, \eta) e^{-ik((\alpha-\alpha')\xi + (\beta-\beta')\eta)} d\xi d\eta \quad (7.2)$$

donde ξ y η son las coordenadas de los ejes en el plano del objeto difractante, α y α' son los senos directores en la dirección x' , β y β' los senos directores en la dirección y' , siendo x' e y' los ejes de coordenadas en el plano de observación, como podemos ver en el esquema de la figura 7.3.

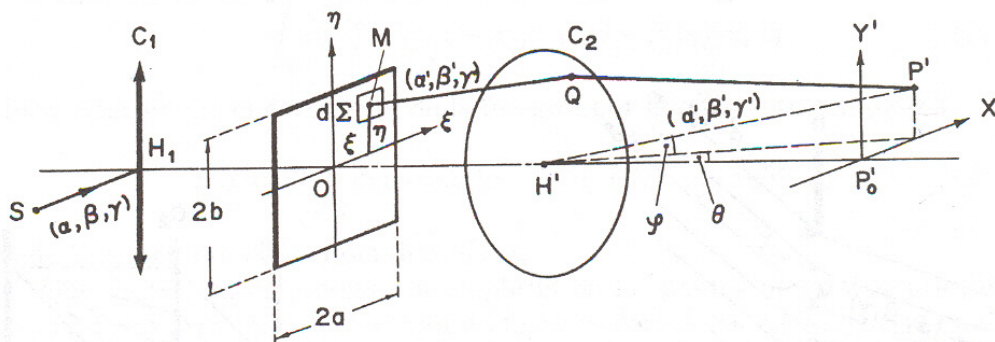


Figura 7.3. Esquema para la difracción escalar de Fraunhofer.

• Difracción de Fraunhofer. Abertura rectangular y rendija

Aplicando la difracción de Fraunhofer a una abertura rectangular de lados $2a$ (horizontal) y $2b$ (vertical), en el caso de que el eje óptico del colimador utilizado para situar la fuente en el infinito sea normal al plano de la abertura y la fuente esté en dicho eje, se obtiene sobre la pantalla una distribución de intensidades de la forma que viene dada por:

$$I_p = Ca^2b^2 \left[\frac{\text{sen}(k\alpha'a)}{k\alpha'a} \right]^2 \left[\frac{\text{sen}(k\beta'b)}{k\beta'b} \right]^2 \quad (7.3)$$

donde k es el número de onda y α' y β' son los senos directores en los ejes x' e y' del plano de observación.

La función de intensidad (ecuación (7.3)) presenta mínimos nulos en x' cuando $\text{sen}(k\alpha'a) = m\pi$, o $\alpha' = m\lambda/a$, excepto para $m=0$ donde hay un máximo central. A m se denomina *orden difraccional*.

Entre cada dos mínimos hay un máximo. De la distribución de intensidad en la pantalla se deduce que cuanto más pequeña sea la abertura más se separan los mínimos y máximos sobre la pantalla, y por tanto el patrón se observa más claramente. También podemos deducir que a mayor longitud de onda, mayor separación entre mínimos, y por tanto también se observa mejor el patrón difraccional.

En el caso de una rendija, podemos suponer $a \ll b$, con lo cual el patrón correspondiente al eje vertical está muy concentrado, y sólo observamos claramente separados los máximos y mínimos en la dirección donde la rendija

tiene la dimensión menor. Entonces, el patrón observado será una serie de bandas de pequeña altura correspondientes a los máximos de distintos órdenes. La anchura de un máximo dado vendrá dada por la separación angular entre los mínimos adyacentes a él. La anchura del máximo central ($m=0$) es la separación angular entre los mínimos correspondientes a $m=1$ y $m=-1$ y será:

$$\text{Anchura max. central} = \frac{2\lambda}{a} \quad (7.4)$$

Para los otros máximos, la anchura es la mitad del máximo central.

En la Figura 7.4 podemos ver patrones de difracción correspondientes a rendijas con diferentes aberturas (dimensión a), apreciándose cómo crece la anchura de los máximos a medida que a disminuye. En la figura 7.5, vemos la función de distribución espacial de la intensidad relativa a la del máximo central correspondiente a varias rendijas de distinto tamaño en relación a la longitud de onda que las ilumina.

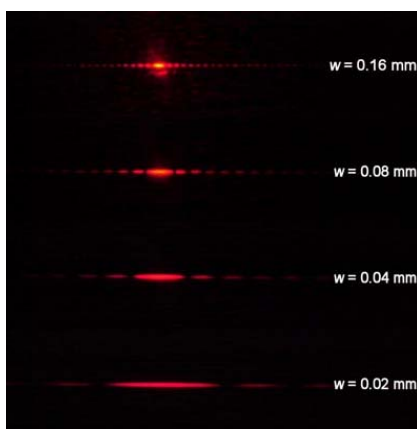


Figura 7.4. Patrones de difracción para diferentes rendijas.

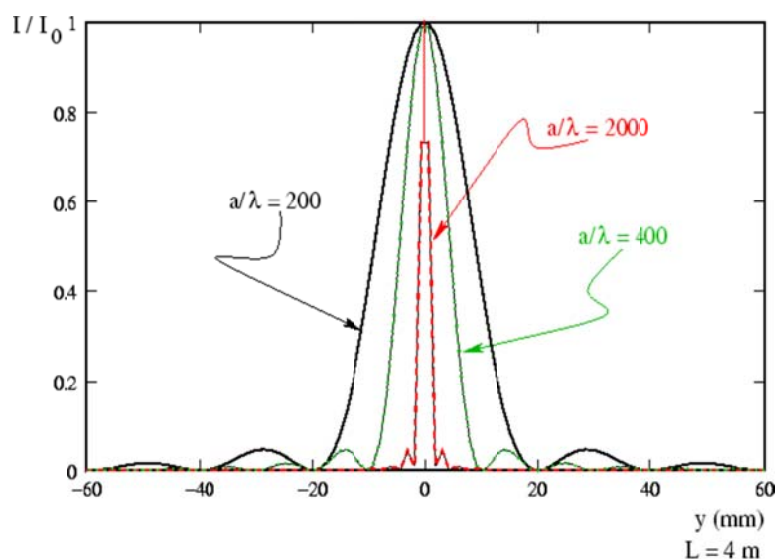


Figura 7.5. Distribución espacial de la intensidad de varias rendijas para distintas longitudes de onda.

• Difracción de Fraunhofer. Múltiples rendijas y red de difracción

Si tenemos un número N de rendijas como objeto difractante, cada una de ellas con abertura a y separadas una distancia $2d$, la intensidad resultante sobre el plano de observación se obtiene integrando sobre las N rendijas y sumando sus contribuciones. El resultado es:



$$I_p = C \left[\frac{\text{sen}(k\alpha'a)}{k\alpha'a} \right]^2 \left[\frac{\text{sen}(Nk\alpha'd)}{\text{sen}k\alpha'd} \right]^2 \quad (7.5)$$

El término que depende de la anchura de las rendijas tiene una frecuencia menor que el que depende de su separación, así que actúa como envolvente moduladora de la intensidad de los máximos del término en d . En el caso de que N es muy grande y d pequeño, tenemos una *red de difracción*. En la figura 7.6 se pueden observar ambos términos y el resultado de su superposición.

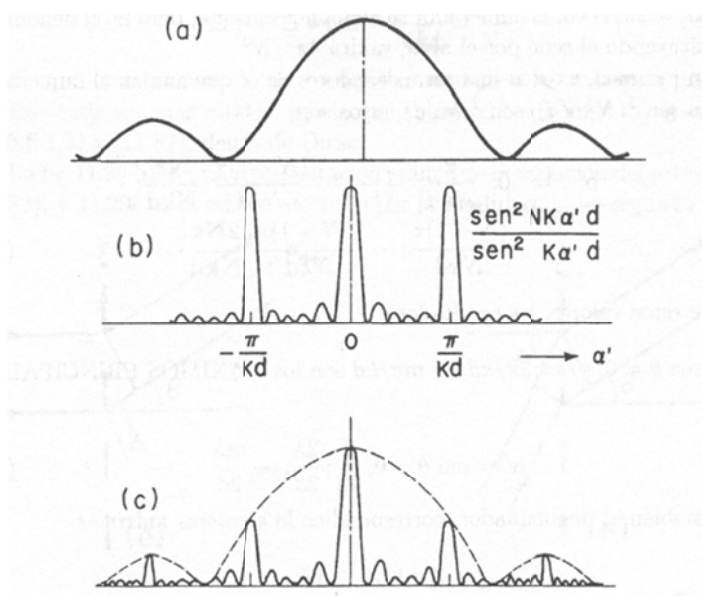


Figura 7.6. Intensidad de una red de difracción.

Sobre el plano de observación veremos entonces una serie de máximos de menor intensidad conforme aumenta su orden, es decir conforme nos alejamos del máximo central correspondiente a $\alpha'=0$. Examinando el término en d , vemos que presenta dos tipos de máximos, los *máximos principales*, que ocurren si numerador y denominador se anulan simultáneamente, y los *máximos secundarios*, que ocurren cuando el numerador se hace máximo. Los máximos secundarios tienen una intensidad mucho menor que los principales, por lo que generalmente se apreciarán los principales solamente.

Los máximos principales se obtienen cuando:

$$\alpha'_{\max \text{ principal}} = \frac{m\lambda}{2d} \quad (7.6)$$

Los máximos secundarios están situados entre dos mínimos del numerador, es decir en la posición angular:

$$\alpha'_{\text{max secundario}} = \frac{3\lambda}{4Nd}, \frac{5\lambda}{4Nd}, \dots, \frac{(2N-3)\lambda}{4Nd} \quad (7.7)$$

La separación entre los máximos principales depende, como puede suponerse, del número de rendijas presentes en la red, como puede observarse en la figura 7.7.

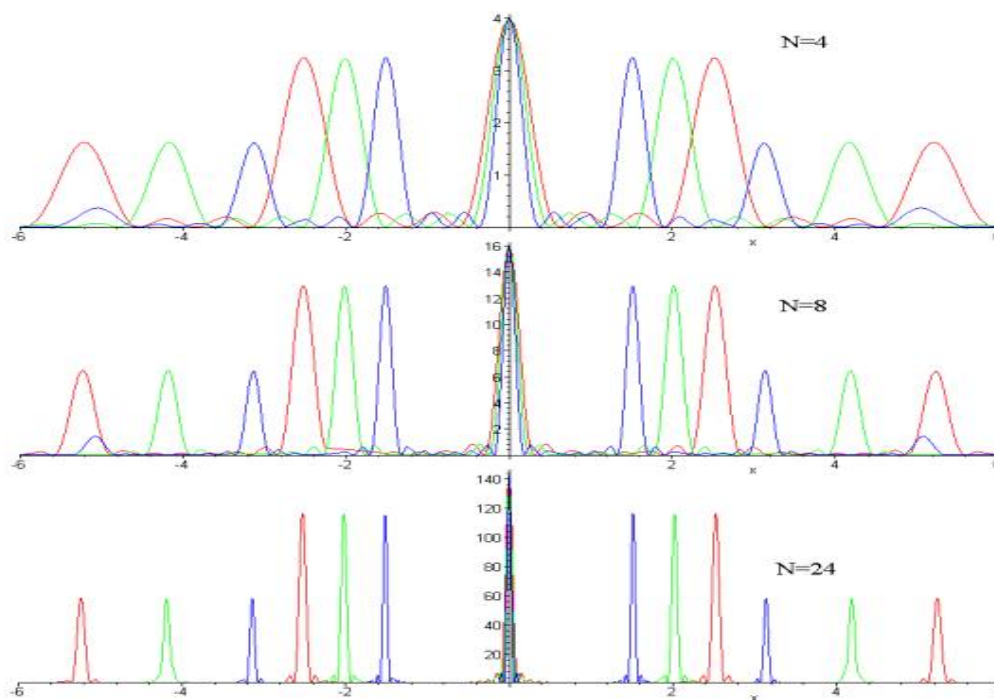


Figura 7.7. Separación entre los máximos principales para distintas redes de difracción.

• Ecuación de la red

Para los máximos principales, según se ha explicado en el apartado anterior, se tiene que:

$$\alpha' = \sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} \quad (7.8)$$

Que se puede escribir en la forma:

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (7.9)$$

A la ecuación (7.9) se le denomina *ecuación de la red*, y relaciona la dispersión angular con respecto al orden 0 con la longitud de onda y la separación entre rendijas.

• Parámetros característicos: constante de red y poder resolutivo

La *constante de red* es la inversa de la separación entre rendijas, o sea, el número de líneas que contiene la red por mm. El número de líneas total de la red es su constante de red por la longitud de la misma.

El *poder resolutivo* indica la capacidad de separar longitudes de onda muy próximas entre sí. Para una red de difracción con N líneas, el poder resolutivo se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN \quad (7.10)$$

donde $\delta\lambda$ es la mínima diferencia de longitudes de onda que es capaz de separar la red para una longitud de onda determinada y m es el orden difraccional.

Se puede observar que si la constante de red es elevada y la longitud de la red hace que N sea muy alto, la red será capaz de separar longitudes de onda muy próximas incluso para primer orden. La utilidad fundamental de una red de difracción es separar las distintas longitudes de onda que contiene un haz de luz y forman parte de los espectroscopios modernos.

• **Aplicaciones de la red de difracción en espectroscopia. Ventajas sobre los prismas**

El poder resolutivo de las redes de difracción y sus cualidades de escaso espesor y menor peso en relación a los prismas hacen que sean en la actualidad el dispositivo más utilizado para realizar espectroscopia. La espectroscopia consiste en la identificación de los elementos a partir de sus espectros de emisión (figura 7.8) o absorción.

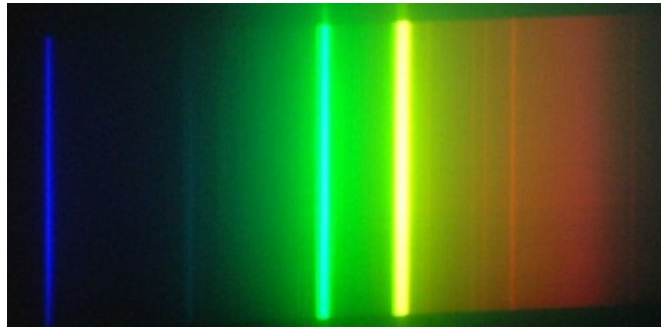


Figura 7.8. Espectro de emisión.

En los prismas, el poder resolutivo es directamente proporcional a la longitud del lado de la base y a la dispersión espectral del vidrio, con lo que al final resulta bastante inferior al que se puede alcanzar con las redes de difracción.

○ **CUESTIONES**

- 1.- Observe una fuente de luz (farola, bombilla) a través de un vidrio empañado con vaho, y describa el fenómeno observado. ¿Presenta dispersión cromática? ¿cuál es el orden de los colores? ¿depende de la densidad de vaho sobre el vidrio?

- 2.- Calcule la anchura del máximo central (en grados, minutos y segundos) para difracción de Fraunhofer a través de una apertura cuadrada ($a=b$) en los siguientes casos:
 - a) $\lambda=500$ nm, $a=0.05$ cm.
 - b) $\lambda=600$ nm, $a=0.05$ cm.
- 3.- Para una luz monocromática de 632 nm, calcule la posición angular del mínimo de orden 2 si la luz se difracta a través de una rendija vertical de 0.005 mm. Si doblamos la anchura de la rendija, determine el efecto sobre el patrón difraccional: anchura del máximo central, posición relativa de los mínimos más cerca o más lejos del centro.
- 4.- Compare las siguientes redes de difracción en relación a su poder de dispersión (es decir, la separación desde el centro del máximo de orden 2) y su poder resolutivo para orden 2. Ambas trabajan con luz de $\lambda=500$ nm:
 - a) red de 300 líneas/mm y 3 cm de largo.
 - b) red de 600 líneas/mm y 1 cm de largo.
- 5.- En una red de difracción, ¿se podrían superponer, de diferentes órdenes, longitudes de onda del rango visible?
- 6.- En un experimento de Young con $d=1$ mm, $\lambda=589$ nm y $D=5$ m, calcule la separación desde el centro del máximo de orden 12.

GUIÓN DE LA SESIÓN

○ OBJETIVO

La práctica tiene un doble objetivo: por un lado, el estudio de una red de difracción y la determinación de su constante $2d$. Para ello, trabajará en condiciones de *Difracción de Fraunhofer*. Por otro lado, la utilización de un espectroscopio de red para identificar las líneas espectrales de una sustancia problema.

○ PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO

Lo primero que tiene que hacer es ajustar el ocular del espectrogoniómetro de modo que el retículo quede enfocado y a continuación enfocar el anteojo al infinito. A continuación se coloca el anteojo alineado con el colimador y enfocado a la rendija del aparato (que debe ser lo más estrecha posible) cambie la longitud del tubo colimador hasta ver la rendija lo más nítida posible.

En la plataforma del espectrogoniómetro coloque la red de difracción lo más perpendicular posible al eje del colimador. Si gira el brazo móvil del espectrogoniómetro (anteojo) observará el espectro de la lámpara, similar a la figura 7.8.

El siguiente paso es colocar la red en condiciones de incidencia normal respecto del haz que sale del colimador. Para ello, coloque el anteojo y el colimador a 90° entre sí. El colimador carece de referencias para medir su ángulo en el nonius, por lo que tiene que obtener su posición indirectamente. Primero, enfrente el anteojo con el colimador y lea sobre el nonius la posición del primero; en esa posición están exactamente a 180° respecto de la posición que necesita, por lo que sólo tiene que girar el anteojo 90° a partir de ese punto. Después coloque la red de forma que en la línea vertical del retículo del anteojo observe, por reflexión en la red, la imagen de la rendija del colimador. En ese momento el ángulo de incidencia en la red es de 45° , con lo cual para conseguir incidencia normal hay que girar la platina del espectrogoniómetro 45° para que la red quede perpendicular al haz. Cuando busque la imagen por reflexión de la rendija, ha de tener en cuenta que el vértice de todos los ángulos que se miden con el goniómetro está definido respecto del centro de la platina, por lo que debe cuidar que la red esté siempre sobre el centro de la misma. Una vez que la red esté en esta posición, vuelva a enfrente el colimador y el anteojo, debiendo encontrar el máximo principal de difracción, de orden cero. Todos los ángulos deben medirse respecto a la posición del máximo central.

- ❖ Una forma de comprobar que ha situado la red correctamente es midiendo la distancia angular entre el orden cero y una línea dada hacia la izquierda y hacia la derecha. Recuerde que ha de restar la posición del centro (máximo central). La diferencia ha de ser menor de 3 minutos de arco.

Es muy importante asegurarse de que se mantenga la incidencia normal a lo largo de todo el experimento, por lo cual nunca gire la plataforma o el soporte para evitar desplazamientos angulares de la red.

○ CALIBRADO DE LA RED DE DIFRACCIÓN

Consiste en la determinación de la constante de red o número de líneas por mm, que es la inversa de la separación entre rendijas de la red. Para el calibrado, basta medir la desviación que introduce la red para varios órdenes de una serie de longitudes de onda conocidas. A partir de esas medidas la constante de red se calcula fácilmente de la pendiente obtenida tras ajustar por mínimos cuadrados el seno del ángulo de desviación θ en función del producto del orden de difracción por la longitud de onda ($m\lambda$). Las longitudes de onda conocidas corresponden al espectro de emisión de una lámpara de descarga de Cd, y se encuentran tabuladas en el laboratorio.

Para cada longitud de onda, mida la desviación angular, θ , de las longitudes de onda de la lámpara al menos para los órdenes $m=1$ y $m=2$. Tras calcular θ para cada longitud de onda y orden, con su incertidumbre asociada, represente el $\sin \theta$ en función de $m\lambda$ y realice el ajuste por mínimos cuadrados. La constante de red es la pendiente del ajuste, que ha de obtener con su incertidumbre correspondiente. Calcule también su inversa, que corresponde la separación entre rendijas de la red.

○ ESPECTROSCOPIA

Una vez obtenida la constante de red, puede utilizar la ecuación de la red (ecuación (7.9)) para obtener las longitudes de onda características emitidas por una lámpara de descarga que contiene un elemento desconocido. El elemento de dicha lámpara ha de identificarlo a partir de sus longitudes de onda características de emisión con la ayuda de las tablas correspondientes.

Basta entonces con sustituir la lámpara de Cd por la del elemento desconocido, comprobar que se mantiene la incidencia normal y proceder a la medida de desviaciones de aquellas líneas visibles emitidas por la fuente problema, al menos en primer orden y cuando sea posible también en segundo orden. Aplicamos entonces la ecuación de la red, con la constante de red conocida, para determinar las longitudes de onda correspondientes a la fuente problema, y su correspondiente error. Para aquellas líneas que hayamos podido medir en varios órdenes, compararemos los resultados obtenidos para asegurar que no haya diferencias significativas entre los valores de longitud de onda correspondientes a una misma línea. La determinación de la fuente

problema se realiza con ayuda de las tablas contenidas en el libro Handbook of Chemistry and Physics (Ed. David R. Lide, CRC Press, 2003), estando restringida la selección a tres elementos posibles: He, Xe y Hg. En cada tabla, encontramos tres columnas que corresponden a la intensidad de cada línea del espectro de emisión, su longitud de onda correspondiente en Armstrong (10^{-10} m) y el estado de ionización del átomo observado (I para átomos neutros, II para ionización simple, III para ionización doble). Procuramos fijarnos en las líneas de mayor intensidad, que serán las que podamos apreciar a través del espectrogoniómetro, y vemos cuáles de ellas resultan compatibles con los valores de longitudes de onda obtenidos para la fuente problema (teniendo en cuenta el intervalo de error de cada medida), procediendo entonces a su identificación.

- ❖ En el anexo I se muestran las tablas correspondientes a los tres elementos mencionados restringiendo los valores mostrados al espectro visible.

ANEXO I: TABLAS.

(Extracto del Handbook of Chemistry, Ed. 1995.)

| He (Z=2) | | | Xe (Z=54) | | | Hg (Z=80) | | |
|----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|
| I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado |
| 10 | 3819.607 | I | 100 | 3841.5 | III | 30 | 3801.66 | I |
| 1 | 3819.76 | I | 200 | 3877.8 | III | 15 | 3803.51 | III |
| 500 | 3888.65 | I | 60 | 3880.5 | III | 100 | 3806.38 | II |
| 20 | 3964.729 | I | 100 | 3907.91 | II | 20 | 3901.87 | I |
| 1 | 4009.27 | I | 500 | 3922.55 | III | 60 | 3906.37 | I |
| 50 | 4026.191 | I | 300 | 3950.59 | III | 100 | 3918.92 | II |
| 5 | 4026.36 | I | 100 | 4037.59 | II | 200 | 3983.96 | II |
| 12 | 4120.82 | I | 200 | 4050.07 | III | 1800 | 4046.56 | I |
| 2 | 4120.99 | I | 200 | 4057.46 | II | 150 | 4077.83 | I |
| 3 | 4143.76 | I | 60 | 4060.4 | III | 40 | 4108.05 | I |
| 10 | 4387.929 | I | 100 | 4098.89 | II | 70 | 4122.07 | III |
| 3 | 4437.55 | I | 100 | 4109.1 | III | 10 | 4140.34 | III |
| 200 | 4471.479 | I | 100 | 4145.7 | III | 100 | 4216.74 | III |
| 25 | 4471.68 | I | 200 | 4158.04 | II | 250 | 4339.22 | I |
| 6 | 4685.4 | II | 1000 | 4180.10 | II | 400 | 4397.49 | I |
| 30 | 4685.7 | II | 500 | 4193.15 | II | 4000 | 4358.33 | I |
| 30 | 4713.146 | I | 300 | 4208.48 | II | 100 | 4398.62 | II |
| 4 | 4713.38 | I | 100 | 4209.47 | II | 15 | 4470.58 | III |
| 20 | 4921.931 | I | 300 | 4123.72 | II | 12 | 4552.84 | III |
| 100 | 5015.678 | I | 100 | 4215.60 | II | 90 | 4660.28 | II |
| 10 | 5047.74 | I | 300 | 4223.00 | II | 50 | 4797.01 | III |
| 5 | 5411.52 | II | 400 | 4238.25 | II | 80 | 4855.72 | II |
| 500 | 5875.62 | I | 500 | 4245.38 | II | 10 | 4869.85 | III |
| 100 | 5875.97 | I | 100 | 4251.57 | II | 5 | 4883.00 | I |
| 8 | 6560.10 | II | 30 | 4285.9 | III | 5 | 4889.91 | I |
| 100 | 6678.15 | I | 500 | 4296.40 | II | 80 | 4916.07 | I |
| 3 | 6867.48 | I | 500 | 4310.51 | II | 5 | 4970.37 | I |
| 200 | 7065.19 | I | 1000 | 4330.52 | II | 80 | 4973.57 | III |
| 30 | 7065.71 | I | 200 | 4369.20 | II | 5 | 4980.64 | I |
| 50 | 7281.35 | I | 100 | 4373.78 | II | 20 | 55102.70 | I |

| He (Z=2) | | | Xe (Z=54) | | | Hg (Z=80) | | |
|----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|
| I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado |
| 1 | 7816.15 | I | 500 | 4393.20 | II | 40 | 5120.64 | I |
| | | | 500 | 4395.77 | II | 100 | 5128.45 | II |
| | | | 200 | 4406.88 | II | 20 | 5137.94 | I |
| | | | 150 | 4416.07 | II | 30 | 5210.82 | III |
| | | | 50 | 4434.2 | III | 20 | 5290.74 | I |
| | | | 500 | 4448.13 | II | 5 | 5316.78 | I |
| | | | 100 | 4462.1 | III | 60 | 5354.05 | I |
| | | | 1000 | 4462.19 | II | 30 | 5384.63 | I |
| | | | 500 | 4480.86 | II | 1100 | 5460.74 | I |
| | | | 100 | 4521.86 | II | 30 | 5549.63 | I |
| | | | 100 | 4569.1 | III | 160 | 5675.86 | I |
| | | | 100 | 4570.1 | III | 6 | 5695.71 | III |
| | | | 100 | 4641.4 | III | 240 | 5768.60 | I |
| | | | 30 | 4673.7 | III | 100 | 5789.66 | I |
| | | | 60 | 4683.57 | III | 280 | 5790.66 | |
| | | | 30 | 4723.60 | III | 140 | 5803.78 | I |
| | | | 600 | 4734.152 | I | 60 | 5839.25 | I |
| | | | 100 | 4757.3 | III | 60 | 5871.73 | II |
| | | | 150 | 4792.619 | I | 20 | 5871.98 | I |
| | | | 500 | 4807.02 | I | 20 | 6072.72 | I |
| | | | 400 | 4289.71 | I | 1000 | 6149.50 | II |
| | | | 300 | 4843.29 | I | 25 | 6220.35 | III |
| | | | 40 | 4869.5 | III | 30 | 6234.40 | I |
| | | | 500 | 4916.51 | I | 35 | 6418.98 | III |
| | | | 500 | 4923.152 | I | 40 | 6501.38 | III |
| | | | 200 | 4971.71 | II | 80 | 6521.13 | II |
| | | | 400 | 4972.71 | II | 10 | 6584.26 | III |
| | | | 300 | 4988.77 | II | 6 | 6610.12 | III |
| | | | 100 | 4991.17 | II | 30 | 6709.29 | III |
| | | | 200 | 5028.280 | I | 160 | 6719.43 | I |
| | | | 200 | 5044.92 | II | 250 | 6907.52 | I |
| | | | 1000 | 5080.62 | II | 250 | 7081.90 | I |
| | | | 300 | 5122.42 | II | 200 | 7091.86 | I |
| | | | 100 | 5125.70 | II | 40 | 7346.37 | II |
| | | | 100 | 5178.82 | II | 100 | 7485.87 | II |

| He (Z=2) | | | Xe (Z=54) | | | Hg (Z=80) | | |
|----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|
| I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado |
| | | | 300 | 5188.04 | II | 12 | 7517.46 | III |
| | | | 400 | 5191.37 | II | 20 | 7728.82 | I |
| | | | 100 | 5192.10 | II | 7 | 7808.10 | III |
| | | | 60 | 5239.0 | III | | | |
| | | | 500 | 5260.44 | II | | | |
| | | | 500 | 5261.95 | II | | | |
| | | | 2000 | 5292.22 | II | | | |
| | | | 300 | 5309.27 | II | | | |
| | | | 1000 | 5313.87 | II | | | |
| | | | 2000 | 5339.33 | II | | | |
| | | | 200 | 5363.20 | II | | | |
| | | | 30 | 5367.1 | III | | | |
| | | | 200 | 5368.07 | II | | | |
| | | | 500 | 5372.39 | II | | | |
| | | | 100 | 5392.80 | I | | | |
| | | | 50 | 5401.0 | III | | | |
| | | | 3000 | 5419.15 | II | | | |
| | | | 800 | 5438.96 | II | | | |
| | | | 300 | 5445.45 | II | | | |
| | | | 200 | 5450.45 | II | | | |
| | | | 400 | 4560.39 | II | | | |
| | | | 1000 | 5472.61 | II | | | |
| | | | 100 | 5494.86 | II | | | |
| | | | 40 | 5524.4 | III | | | |
| | | | 200 | 5525.53 | II | | | |
| | | | 600 | 5531.07 | II | | | |
| | | | 100 | 5566.62 | I | | | |
| | | | 300 | 5616.67 | II | | | |
| | | | 300 | 5659.38 | II | | | |
| | | | 600 | 5667.56 | II | | | |
| | | | 150 | 5670.91 | II | | | |
| | | | 100 | 5695.75 | I | | | |
| | | | 200 | 5699.61 | II | | | |
| 200 | 5716.10 | II | 100 | 6397.99 | II | 60 | 7787.04 | II |
| 500 | 5726.91 | II | 300 | 6469.70 | I | 100 | 7802.65 | I |

| He (Z=2) | | | Xe (Z=54) | | | Hg (Z=80) | | |
|----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|
| I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado |
| 500 | 5751.03 | II | 150 | 6472.84 | I | | | |
| 300 | 5758.65 | II | 120 | 6487.76 | I | | | |
| 300 | 5776.39 | II | 100 | 6498.72 | I | | | |
| 100 | 5815.96 | II | 200 | 6504.18 | I | | | |
| 300 | 5823.89 | I | 300 | 6512.83 | II | | | |
| 150 | 5824.80 | I | 200 | 6528.65 | II | | | |
| 100 | 5875.02 | I | 100 | 6533.16 | I | | | |
| 300 | 5893.29 | II | 1000 | 6595.01 | II | | | |
| 100 | 5894.99 | I | 100 | 6595.56 | I | | | |
| 200 | 5905.13 | II | 400 | 6597.25 | II | | | |
| 100 | 5934.17 | I | 100 | 6598.84 | II | | | |
| 500 | 5945.53 | II | 150 | 6688.92 | I | | | |
| 300 | 5971.13 | II | 300 | 6694.32 | II | | | |
| 2000 | 5976.46 | II | 200 | 6728.01 | I | | | |
| 200 | 6008.92 | II | 150 | 6788.71 | II | | | |
| 1000 | 6036.20 | II | 100 | 6790.37 | II | | | |
| 2000 | 6051.15 | II | 1000 | 6805.74 | II | | | |
| 600 | 6093.50 | II | 200 | 66827.32 | I | | | |
| 1500 | 6097.59 | II | 100 | 6872.11 | I | | | |
| 400 | 6101.43 | II | 300 | 6882.16 | I | | | |
| 100 | 6115.08 | II | 80 | 6910.22 | II | | | |
| 100 | 6146.45 | II | 100 | 6925.53 | I | | | |
| 150 | 6178.30 | I | 800 | 6942.11 | II | | | |
| 120 | 6179.66 | I | 100 | 6976.18 | I | | | |
| 300 | 6182.42 | I | 2000 | 6990.88 | II | | | |
| 500 | 6194.07 | II | 150 | 7082.15 | II | | | |
| 100 | 6198.26 | I | 500 | 7119.60 | I | | | |
| 60 | 6205.97 | III | 50 | 7147.50 | II | | | |
| 100 | 6220.02 | II | 200 | 7149.03 | II | | | |
| 25 | 6221.7 | III | 500 | 7164.83 | II | | | |
| 60 | 6238.2 | III | 100 | 7284.34 | II | | | |
| 60 | 6259.05 | III | 200 | 7301.80 | II | | | |
| 500 | 6270.82 | II | 200 | 7339.30 | II | | | |
| 400 | 6277.54 | II | 100 | 7386.00 | I | | | |
| 100 | 6284.41 | II | 150 | 7393.79 | I | | | |

| He (Z=2) | | | Xe (Z=54) | | | Hg (Z=80) | | |
|----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|-----------|----------------------|--------|
| I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado | I | λ (Amstrong) | Estado |
| 100 | 6286.01 | I | 300 | 7548.45 | II | | | |
| 250 | 6300.86 | II | 200 | 7584.68 | I | | | |
| 500 | 6318.06 | I | 80 | 7618.57 | II | | | |
| 400 | 6343.96 | II | 500 | 7642.02 | I | | | |
| 600 | 6356.35 | II | 100 | 7643.91 | I | | | |
| 200 | 6375.28 | II | 200 | 7670.66 | II | | | |