

## SESIÓN N° 8: REDES DE DIFRACCIÓN. ESPECTROSCOPIA.



### TRABAJO PREVIO

1. Conceptos fundamentales
2. Cuestiones

#### 1. 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.

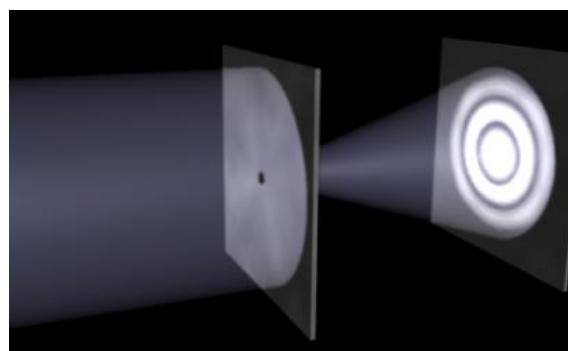


Figura 8.1

En algunos otros experimentos observó que la orilla 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 8.1 podemos ver el patrón de difracción generado por un orificio circular.

##### • Observación de la 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 8.2). 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, y los patrones de difracción que producen los discos compactos y DVD cuando se iluminan.



Figura 8.2

- **Difracción de Fraunhöfer.**

Es el caso más sencillo de tratar teóricamente de difracción, que se produce 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 es  $F$  es mucho menor que la unidad, siendo  $F$ :

$$F = \frac{a^2}{\lambda D} \quad (8.1)$$

donde  $a$  es el tamaño del objeto difractante,  $\lambda$  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 además consideramos que la fuente puede describirse como una magnitud escalar, el tratamiento teórico del fenómeno se simplifica bastante (teoría escalar de la difracción). En el caso de la difracción de Fraunhöfer, la teoría escalar establece que la amplitud observada en la pantalla es la transformada de Fourier de la función que describe el objeto difractante:

$$E_p = Q \int_{\Sigma} G(\xi, \eta) e^{[-ik((\alpha - \alpha')\xi + (\beta - \beta')\eta)]} d\xi d\eta \quad (8.2)$$

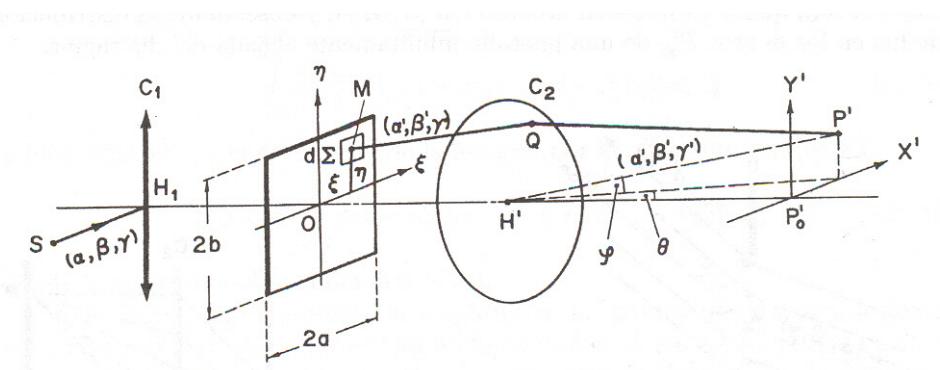


Figura 8.3

donde  $\xi$  y  $\eta$  son las coordenadas de los ejes en el plano del objeto difractante,  $\alpha$  y  $\alpha'$  son los senos directores en la dirección  $x'$  y  $\beta$ ,  $\beta'$  los senos directores en la dirección  $y'$ , siendo  $x'$  e  $y'$  ejes coordenados en el plano de observación, como podemos ver en el esquema de la Figura 8.3.

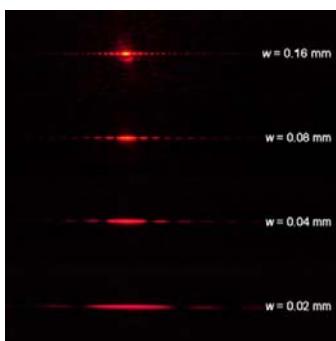


Figura 8.4

- **Difracción de Fraunhöfer. Abertura rectangular y rendija.**

Aplicando la difracción de Fraunhöfer 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:

$$I_p = Ca^2 b^2 \left[ \frac{\sin(k\alpha' a)}{k\alpha' a} \right]^2 \left[ \frac{\sin(k\beta' b)}{k\beta' b} \right]^2 \quad (8.3)$$

donde  $k$  es el número de onda y  $\alpha'$ y  $\beta'$ los senos directores en los ejes  $x'$  e  $y'$  del plano de observación. La función de intensidad presenta mínimos nulos en  $x'$  cuando  $\sin(k\alpha' a) = m\pi$ , o  $\alpha' = m\lambda/a$ , excepto para  $m=0$  que 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

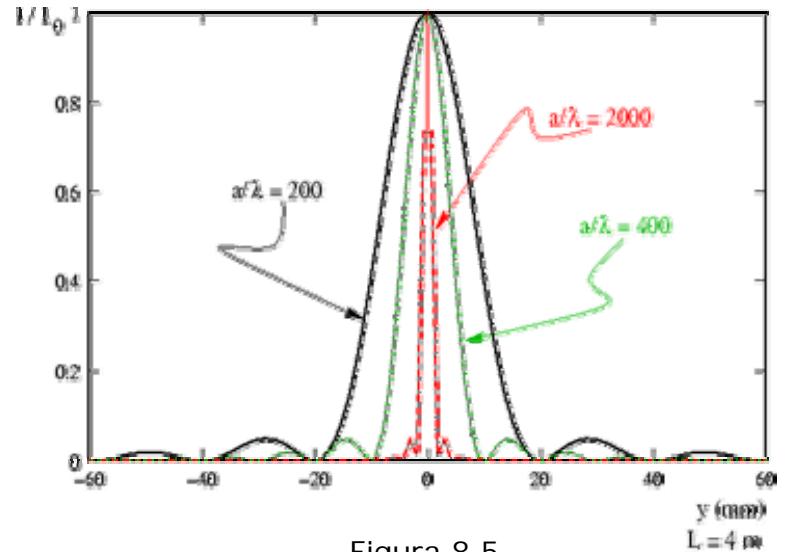


Figura 8.5

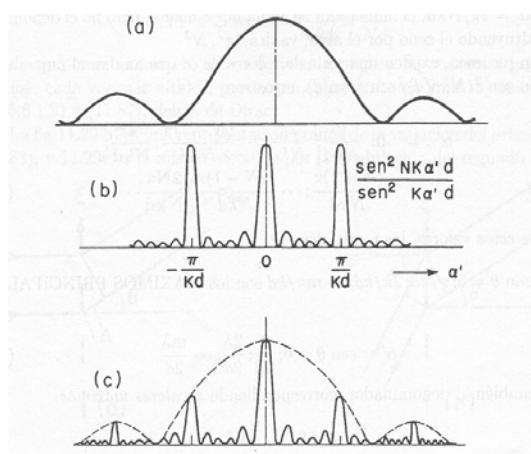


Figura 8.6

pantalla, y por tanto el patrón se alarga y 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 de menores dimensiones de la rendija. 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. Así, la anchura del máximo central ( $m=0$ ) es la separación angular entre los mínimos correspondientes a  $m=1$  y  $m=-1$  ( $2\lambda/a$ ). Para los otros máximos, la anchura es la mitad ( $\lambda/a$ ). En la Figura 8.4 podemos ver patrones de difracción correspondientes a rendijas con diferentes aberturas  $a$ , apreciándose cómo crece la anchura de los máximos a medida que  $a$  disminuye. En la figura 8.5, 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 de la luz que las ilumina.

- Difracción de Fraunhöfer. Múltiples rendijas y red de difracción.**

Si tenemos un número  $N$  de rendijas como objeto difractante, cada una de una 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:

$$I_p = C \left[ \frac{\operatorname{sen}(k\alpha' a)}{k\alpha' a} \right]^2 \left[ \frac{\operatorname{sen}(Nk\alpha' d)}{\operatorname{sen} k\alpha' d} \right]^2 \quad (8.4)$$

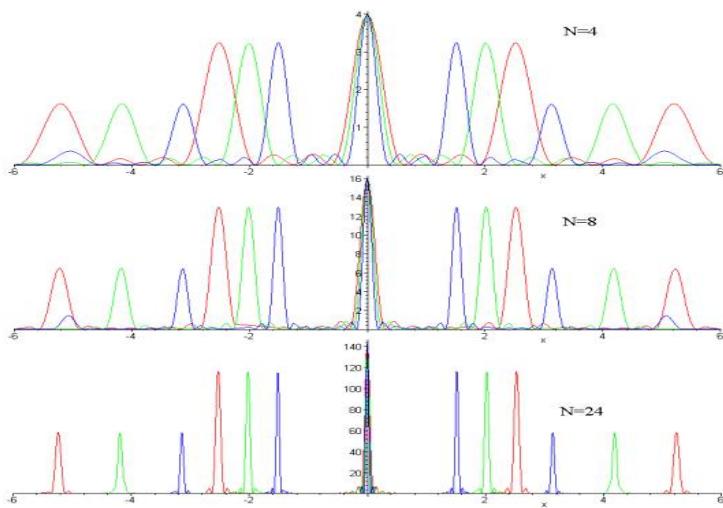


Figura 8.7

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  $d$ . Si  $N$  es muy grande y  $d$  pequeño, tenemos entonces una red de difracción. En la figura 8.6 vemos ambos términos y el resultado de su superposición.

Sobre el plano de observación, veremos entonces una serie de máximos de menor intensidad conforme aumenta su orden (conforme nos alejamos del máximo central correspondiente a  $\alpha'=0$ ). Examinando el término en  $d$ , vemos que presenta dos tipos de máximos, los llamados *principales*, que ocurren si numerador y denominador se anulan simultáneamente, y los secundarios, cuando el numerador se hace máximo. Los máximos principales se dan para valores de  $\alpha'=m\lambda/2d$ , y los secundarios están situados entre dos mínimos del numerador, o sea para  $\alpha'=3\lambda/4Nd, 5\lambda/4Nd\dots(2N-3)\lambda/4Nd$ . Estos máximos secundarios tienen una intensidad mucho menor que los principales, por lo que generalmente se apreciarán los principales solamente. La separación entre los máximos principales depende, como puede suponerse, del número de rendijas presentes en la red (figura 8.7)

- Ecuación de la red.**

Para los máximos principales, según se ha explicado en el apartado anterior, tenemos que  $\alpha'=\operatorname{sen}\theta=m\lambda/2d$ , o bien:

$$2d \cdot \operatorname{sen}\theta = m\lambda \quad (8.5)$$

Esta es la ecuación de la red, que 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 será entonces 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:

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = mN \quad (8.6)$$

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

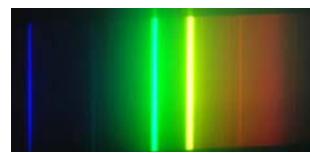


Figura 8.8

• **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 espectroscopía (identificación de los elementos a partir de sus espectros de emisión (figura 8.8) o absorción). En el prisma, el poder resolutivo es directamente proporcional a la longitud del lado de la base y a la dispersiónpectral del vidrio, con lo que al final resulta bastante inferior al que alcanzan las redes de difracción.

## 2. Cuestiones.

1. Observa una fuente de luz (farola, bombilla) a través de un cristal empañado con vaho, y describe el fenómeno observado (¿presenta dispersión cromática? ¿orden de los colores? ¿depende de la densidad de vaho sobre el cristal?).
2. Calcula la anchura del máximo central (en grados, minutos y segundos) para difracción de Fraunhöfer 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, calcula 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, determina el efecto sobre el patrón difraccional (anchura del máximo central, posición relativa de los mínimos más cerca o más lejos del centro).
4. Compara las siguientes redes de difracción en relación a su poder de dispersión (es decir, separación del máximo de orden 2 del centro) y poder resolutivo para orden 2, si 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 longitudes de onda en el visible (de los diferentes órdenes)?

# GUIÓN DE LA SESIÓN DE PRÁCTICAS N° 8



## Objetivo de la práctica

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, realizamos la "*Difracción de Fraunhofer*". Por otro lado, utilización de un espectroscopio de red para identificar las líneas espectrales de una sustancia problema.

## Realización del experimento

### A) Puesta a punto del dispositivo y calibrado de la red de difracción.

#### A.1) Puesta a punto del dispositivo.

Lo primero que tenemos que hacer es ajustar el ocular del espectrogoniómetro de modo que el retículo quede enfocado y a continuación enfocar el anteojos al infinito. Se coloca el anteojos alineado con el colimador y enfocado a la rendija del aparato (que debe ser lo más estrecha posible) variando la longitud del tubo colimador.

En la plataforma del espectrogoniómetro colocamos la red de difracción lo más perpendicular posible al eje del colimador. Si giramos el brazo móvil del espectrogoniómetro (anteojos) observaremos el espectro de la lámpara, una figura más o menos similar a las figuras 8.8 y 8.10.

Vamos ahora a colocar la red en condiciones de incidencia normal del haz que sale del colimador. Para ello, colocamos el anteojos y el colimador a  $90^\circ$  entre sí. El colimador carece de referencias para medir su ángulo en el nonius, por lo que tenemos que obtener su posición indirectamente. Primero, enfrentamos el anteojos con el colimador y leemos sobre el nonius la posición del primero; allí están exactamente a  $180^\circ$  de la posición que necesitamos conocer, por lo que sólo tendremos que girar el anteojos  $90^\circ$  a partir de ese punto. Despues, ponemos la red de forma que en el hilo vertical del anteojos, se obtenga por reflexión en la red la imagen de la rendija del colimador. Entonces, el ángulo de incidencia en la red es de  $45^\circ$ , con lo cual para conseguir incidencia normal hay que girar la platina del espectrogoniómetro  $45^\circ$  para que la red quede perpendicular al haz. Cuando busquemos la imagen por reflexión de la rendija, hay que tener en cuenta que el vértice de todos los ángulos que se miden con el goniómetro está definido el centro de la platina, por lo que debemos cuidar que la red esté siempre sobre él.

Una vez que esté la red en posición, volvemos a enfrentar colimador y anteojos y deberemos encontrar el máximo principal de difracción, el orden cero. Todos los ángulos deben medirse respecto de esa posición. Una forma de comprobar que hemos situado la red correctamente es que para una línea dada, la distancia angular entre el orden cero y la línea medida con el espectrogoniómetro hacia la izquierda y hacia la derecha no difieren más de 2-3 minutos de arco.

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

**A.2) Calibrado de la red.** 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, e interviene en la ecuación (8.5) del trabajo previo. Para el calibrado, basta medir la desviación que introduce la red para varios órdenes de una serie de longitudes de onda conocidas, y la constante de red se deduce fácilmente de la pendiente obtenida tras ajustar por mínimos cuadrados el seno del ángulo de desviación  $\theta$  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 (figura 8.9), y se encuentran tabuladas en el laboratorio. Para cada longitud de onda, se medirá la desviación  $\theta$  al menos para los órdenes  $m=1$  y  $m=2$ . Tras calcular  $\theta$  para cada longitud de onda y orden, con su error asociado correspondiente, se representará  $\sin \theta$  en función de  $m\lambda$  y se realizará el ajuste por mínimos cuadrados, obteniéndose la constante de red (pendiente del ajuste) con su error correspondiente y también su inversa, que es la separación entre rendijas de la red.



Figura 8.9

## B) Espectroscopía.

Una vez obtenida la constante de red, podemos utilizar la ecuación de la red (ec. (8.5) del trabajo previo) para obtener las longitudes de onda características emitidas por una lámpara de descarga que contiene un elemento desconocido, que identificaremos con ayuda de las tablas

correspondientes de longitudes de onda características. 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

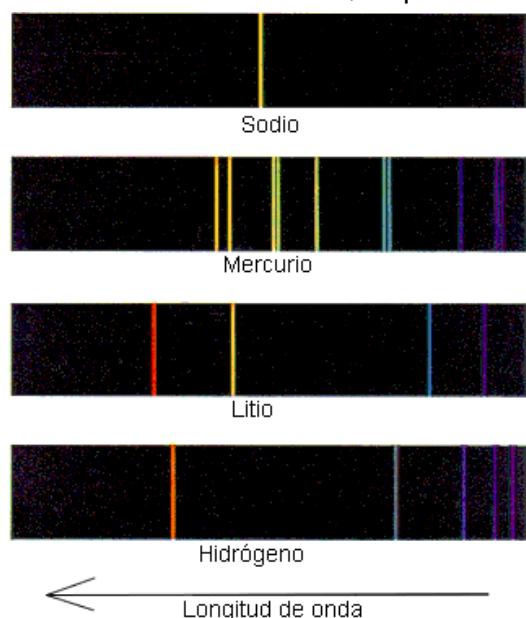


Figura 8.10

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 al guión se muestran las tablas correspondientes a los tres elementos mencionados restringiendo los valores mostrados al espectro visible.

**Anexo.** Extracto del Handbook of Chemistry, Ed. 1995.

He (Z=2)			Xe (Z=54)			Hg (Z=80)		
I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado	I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado	I	$\lambda$ (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
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

			Xe (Z=54)			Hg (Z=80)		
			I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado	I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado
		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
		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			

Xe (Z=54)			Xe (Z=54)			Xe (Z=54)		
I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado	I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado	I	$\lambda$ (Amstrong)	Estado
200	5716.10	II	100	6397.99	II	60	7787.04	II
500	5726.91	II	300	6469.70	I	100	7802.65	I
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			
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			