

Algunas experiencias  
sencillas en torno a la  
Sig: CC 4  
Registre: 60242  
CRP del Segrià



## ALGUNAS EXPERIENCIAS SENCILLAS EN TORNO A LA ESPECTROSCOPIA

G. Bernabeu Pastor, I. Verdú Ferrer, Ll. Garrigós Oltra

### 1.- INTRODUCCION

Un sucinto repaso al «curriculum» de la Asignatura de Física y Química de 3º de B.U.P. nos muestra un tema dedicado al Movimiento Ondulatorio, otro al estudio de la Naturaleza de la Luz y un tercero referente a los Espectros Atómicos, existiendo amplias diferencias en cuanto a la amplitud y profundidad en el tratamiento de cada tema en los distintos textos consultados, y superándose en alguno de ellos con creces el mínimo necesario, creemos, para poder realizar un estudio introductorio a la Espectroscopia Visible.

Es obvio el interés que estos conceptos tienen en cursos elementales de Astronomía, así como para introducir la teoría atómica en los curriculums de Química.

En el presente artículo se describe como construir con materiales ordinarios un espectroscopio y su utilización en algunas experiencias sencillas.

La construcción, con material barato, de aparatos de observación ha sido en los últimos tiempos objeto de una especial atención, (1-2) y en concreto la descripción de como construir espectroscopios se puede encontrar en algunas publicaciones recientes (3-5).

### 2.- ESPECTROS DE ABSORCION Y ESPECTROS DE EMISION

Desde la más remota antigüedad se conocía el fenómeno del Arco Iris y las posibles causas de su existencia había excitado siempre la curiosidad de los científicos. Se conocía también el hecho de que cuando la luz atravesaba un objeto de vidrio de caras no paralelas aparecían zonas coloreadas comparables a las que se observaban cuando se formaba el Arco Iris. Los prismas de vidrio como instrumentos aptos para producir colores habían sido estudiados por todos aquellos científicos que tenían un cierto inte-

(1) E. Averbaj (1981). *Para medir, aparatos y métodos*. Libros Cuadernos de Pedagogía.

(2) E.W. Thulstrup; D. Waddington (1983). *Proceeding of the Workshop on Locally Produced Laboratory Equipment for Chemical Education*. Dpt. Chemistry, Royal Danish School of Educational Studies, Copenhagen.

(3) M. Chapelet (1986). *Bull. Union des Phys.*, 659, pp. 323-327.

(5) L. Stefanini (1977). *Giornale di Astronomia* = (3), pp. 1-9.

uno de ellos absorbe una serie de colores, por ello el espectro solar aparece surcado por una cantidad tan grande de rayas negras.

### 3.— ESPECTRO PRODUCIDO POR UNA RED PLANA DE DIFRACCION

Una descripción detallada de esta cuestión puede consultarse en cualquier texto general de óptica (6-7).

Ya en 1821 Fraunhofer construyó las primeras redes de difracción mediante una serie de hilos tensos fijos en un marco y separados entre sí distancias muy pequeñas.

En la actualidad las redes de difracción se realizan sobre una superficie de vidrio, bien grabando un conjunto de rayas equidistantes mediante corte con diamante (técnica mecánica) o bien impresionando un holograma (técnica óptica), siendo estas últimas de mayor calidad que las primeras.

El efecto de la red es el de cambiar el camino óptico de una manera periódica, bien variando el espesor del cristal (redes de rayado), bien variando la naturaleza del me-

dio (redes holográficas) (Véase Fig. 3). Este hecho se traduce en un cambio periódico de fase conforme se atraviesa la red.

Los rayos pueden formar una figura de interferencia sobre una pantalla situada a una distancia grande en relación con la anchura de la rendija (con ello se evita el uso de lentes de convergencia).

En nuestro caso la distancia entre la red y la pantalla es de unos 40 cm., mientras que la separación de líneas entre la red es de 1/6.000 cm., con lo que la condición inicialmente supuesta se cumple ampliamente.

Los máximos de interferencia para una luz monocromática que *incide normalmente* sobre una red de difracción de rayado aparece según la relación (6):

$$D \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$$

donde  $D$  es la separación entre líneas,  $\alpha$  es el ángulo que forma el rayo refractado con la normal,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación considerada y  $n$  es un número entero denominado orden de espectro.

Si la red es de tipo holográfico y la radiación *incide oblicuamente* como es nuestro

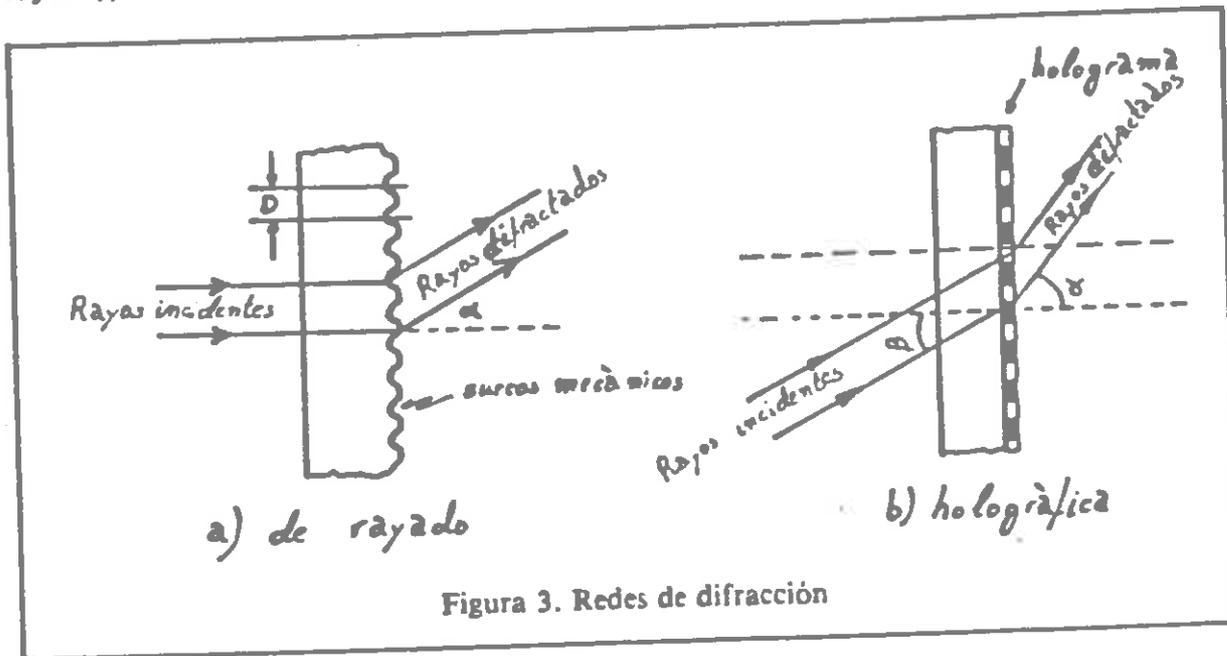


Figura 3. Redes de difracción

(6) a/ F.W. Sears (1974). *Optica*, 4ª reimp. Ed. Aguilar, pp. 214-216, 238-245. b/ D. Halliday; R. Resnick (1976). *Física*, parte 2, 8ª ed. CECSA, pp 1555-1563.

(7) Y.I. Ostrovsky (1980). *Holography and its Application* Ed. Mir, pp. 33-35.

caso entonces los máximos aparecen según la ecuación (7).

$$D \cdot (\sin \beta + \sin \alpha) = n \cdot \lambda$$

donde  $\beta$  es el ángulo del rayo incidente con la normal, y  $\alpha$  es el ángulo del rayo refracta-

do con la normal. Para el caso de que la luz incidente sea de la misma longitud de onda que la de la luz con la que se confeccionó el holograma, se verifica que  $\alpha = \beta$ , por lo que en tal circunstancia la ecuación a considerar sería:

$$2D \sin \alpha = n \cdot \lambda$$

Si la luz incidente es «blanca», la red la separa en sus colores elementales, dando lugar a un espectro o análisis de la luz original. Dicho espectro puede ser tanto de absorción como de emisión así como continuo o de líneas, según los casos estudiados.

#### 4.— CONSTRUCCION DEL ESPECTROSCOPIO

Se ha realizado un espectroscopio similar al descrito por J. Waxman (4) (Fig. 9 y 11) aunque con ligeras modificaciones al objeto de

NOTA.— Tales redes pueden adquirirse a un módico precio —alrededor de 200 pesetas— directamente del laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante.

##### 4.1.— MATERIAL

- Una pieza de cartulina de aproximadamente unos 23 x 28 cm.
- Una hoja de afeitar.
- Red de difracción holográfica de 600 líneas/mm.
- Pegamento.
- Un listón de madera de unos 3 x 50 cm y de 0.5 cm de espesor.
- Dos taquitos de madera (tipo bloques de «Tente»)

##### 4.2.— REALIZACIÓN

- Pegar el patrón de la figura 7 sobre la cartulina y recortar.
- Dibujar la línea discontinua y doblar la cartulina por dicha línea.

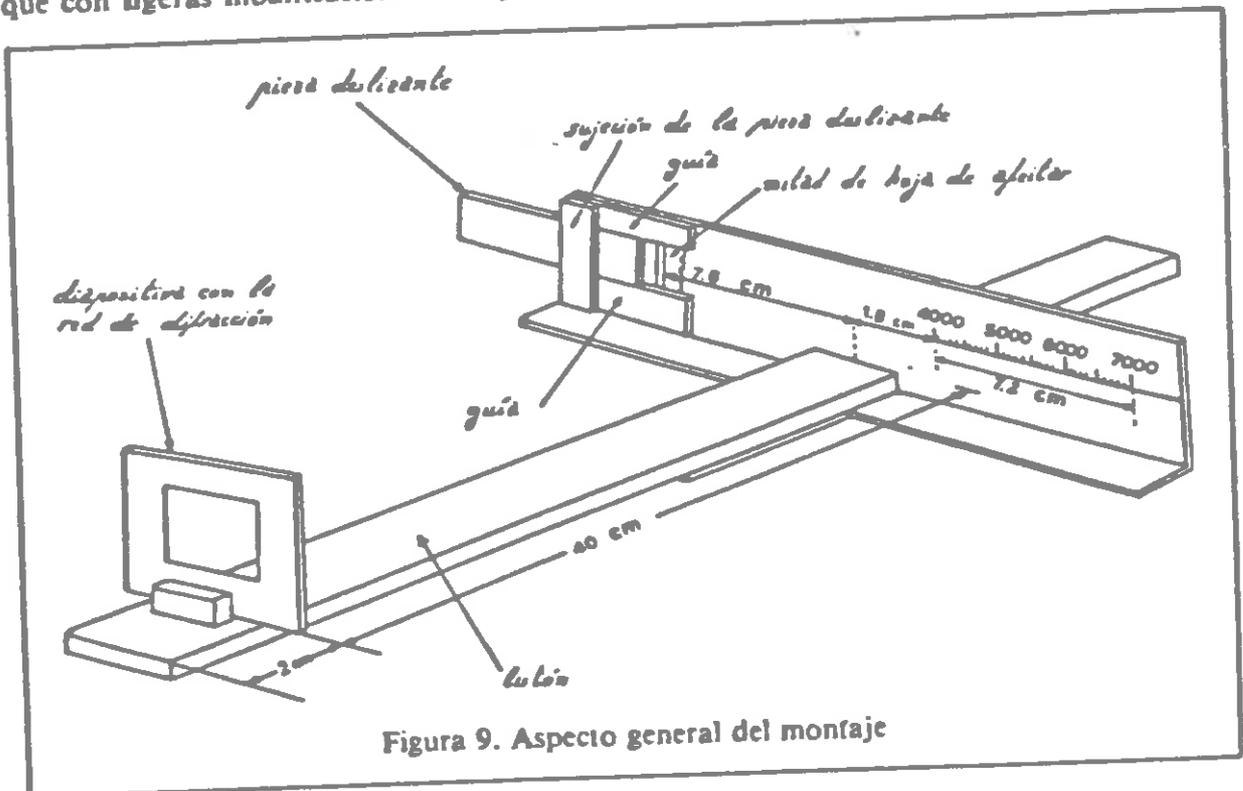


Figura 9. Aspecto general del montaje

utilizar una red holográfica de 600 líneas/mm, la cual se obtuvo con un laser de He-Ne mediante un dispositivo simétrico con un ángulo de incidencia de  $10.9^\circ$  para una longitud de onda de  $6333 \text{ \AA}$ .

(4) J. Waxman (1984). *Astronomy*. Cambridge University Press, pp. 320-323.

Partir la hoja de afeitar por la parte central.

Pegar una de las mitades sobre la línea vertical dibujada en la ventana de la Figura 7.

Pegar la otra mitad sobre un trozo de cartulina (2,5 x 8 cm) tal como se indica en la figura 8.

Cortar otros dos pedazos de cartulina de

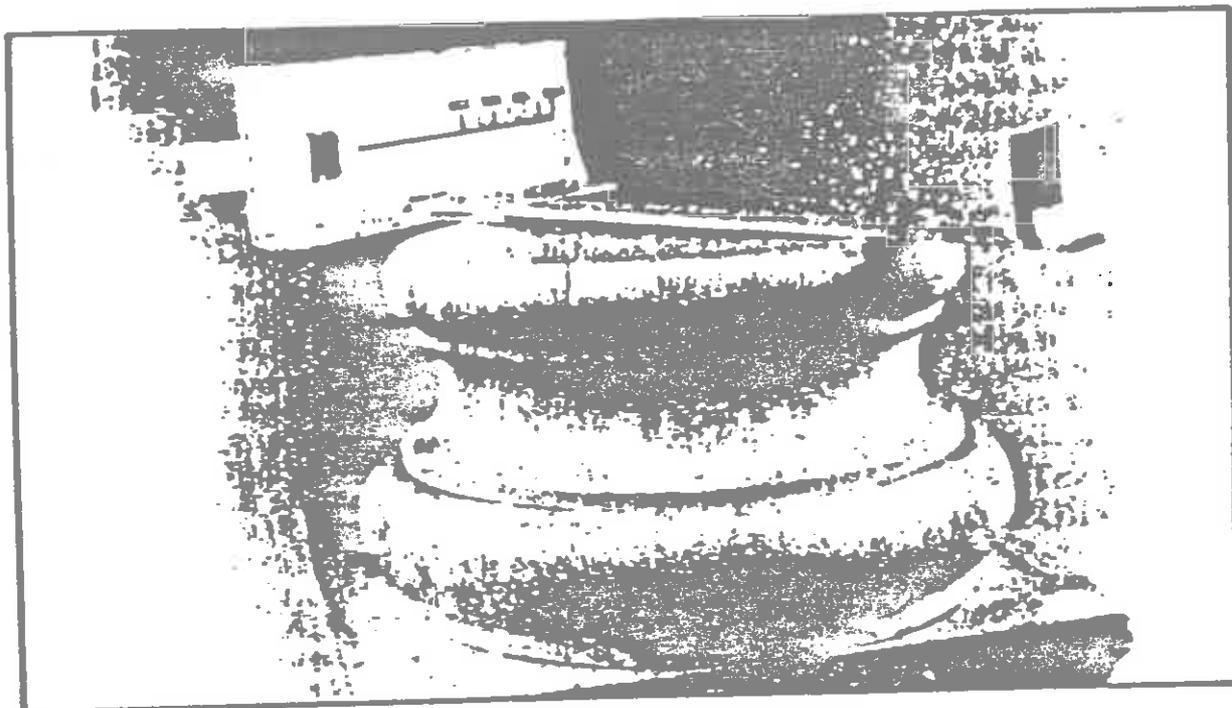


Figura 11. Aspecto del espectroscopio

aproximadamente 2,5 x 8 cm y pegarlos por encima y por debajo de la ventana, de modo que la separación entre ambas coincida con la anchura de la pieza deslizante, actuando de guía de dicha pieza y de manera que junto

con la otra mitad de la hoja de afeitar determinen una rendija de anchura variable.

Cortar otro trozo de cartulina de 2,5 x 8 cm. y pegarlo verticalmente sobre las citadas

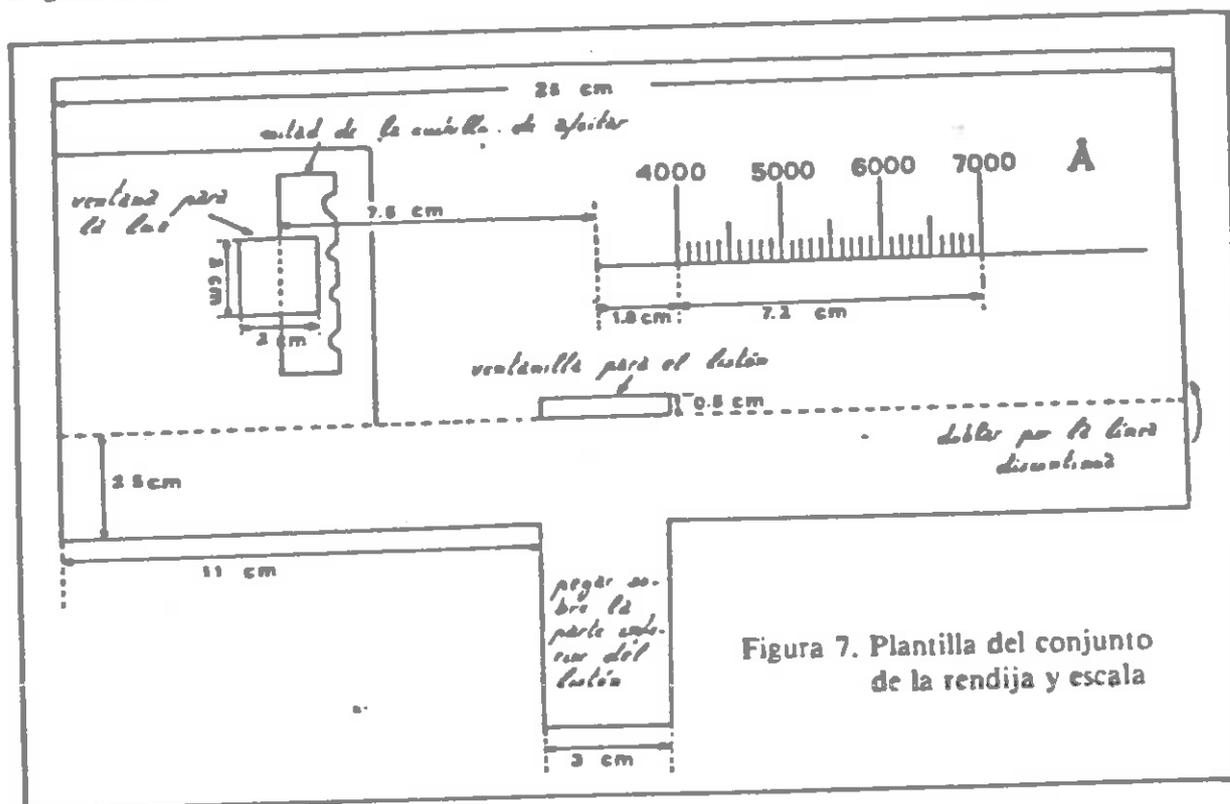


Figura 7. Plantilla del conjunto de la rendija y escala

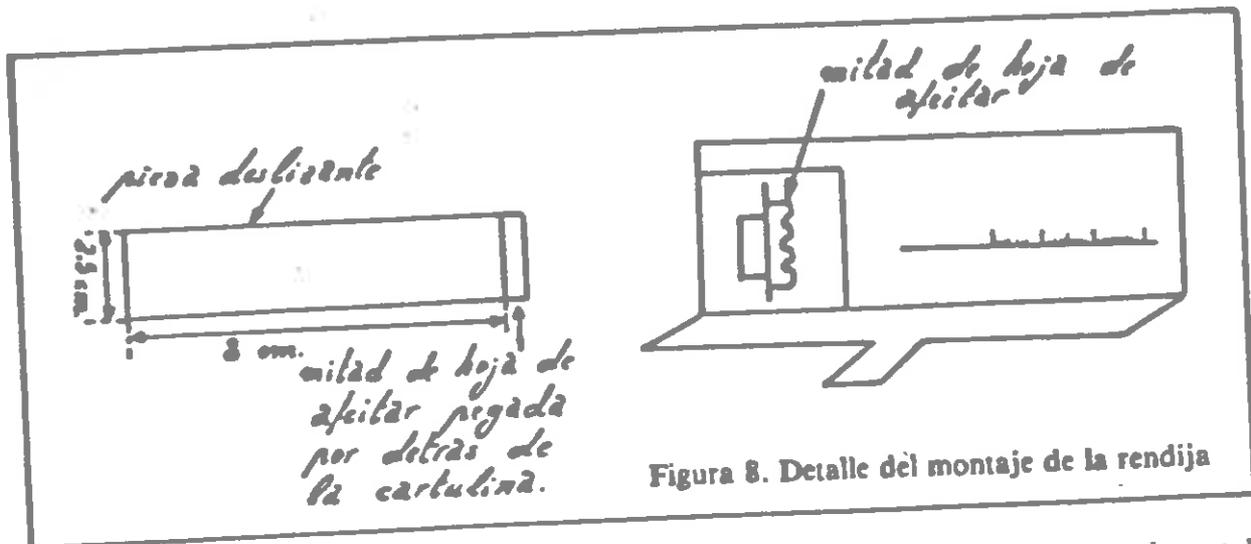


Figura 8. Detalle del montaje de la rendija

guías, de modo que actúe de sujeción de la pieza deslizante (Fig. 9).

Colocar el listón de modo que el conjunto de la rendija y escala queden situados a una distancia de 40 cm. (para ello se pega la parte inferior de dicho conjunto sobre el listón).

Pegar la pieza de apoyo (Fig. 6) a la parte posterior del conjunto de rendija y escala y sobre el listón (Fig. 10). De este modo se consigue dar una mayor rigidez al conjunto.

sobre una pieza de madera diseñada a tal efecto).

## 5.— ESCALA Y CALIBRADO

En nuestro caso hemos situado la parte fija de la rendija a 7,6 cm. del eje que pasa por el centro del eje del listón que sirve de eje de observación.

A 40 cm. de la pantalla y pegada al listón

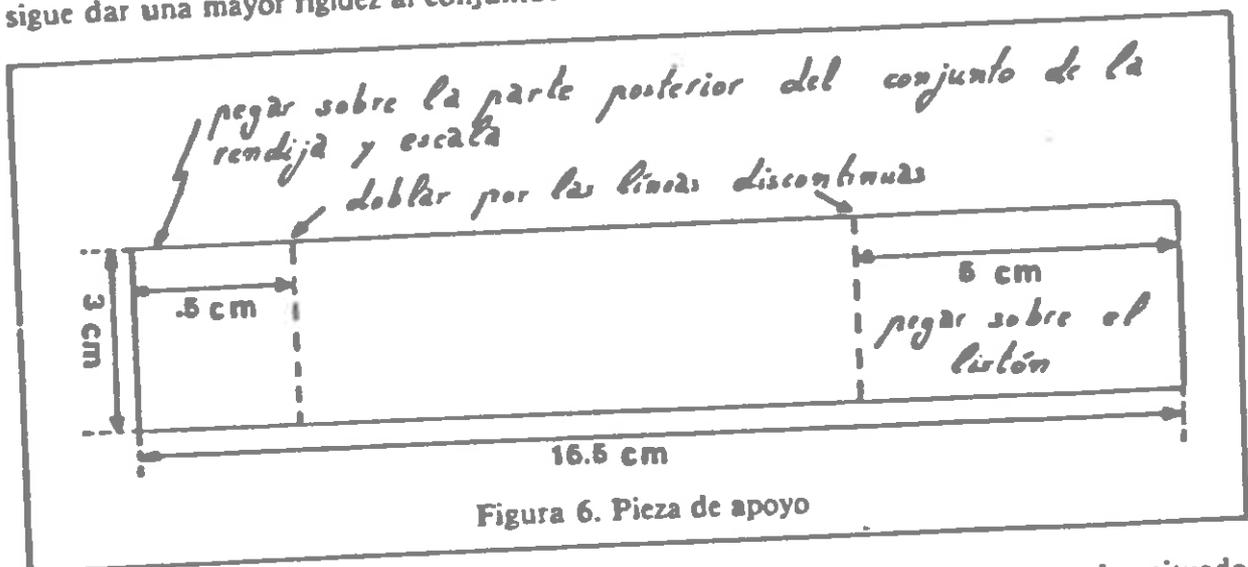


Figura 6. Pieza de apoyo

Pegar la diapositiva conteniendo la red de difracción sobre el listón, de modo que quede perpendicular al mismo y paralelo al conjunto de rendija y escala. Podemos ayudarnos de dos bloques de plástico de los que se utilizan en los «Tentes», pegándolos al listón por delante y por detrás de la diapositiva.

(NOTA.— Para una mayor solidez del espectroscopio es mejor pegar la pieza de cartulina que contiene la rendija y la escala

anteriormente mencionado, se ha situado una red de difracción holográfica de 600 l/mm. obtenida con luz roja de 6333 Å de longitud de onda.

Para confeccionar la escala nos hemos servido de las tres líneas más intensas del espectro de emisión del vapor de mercurio (para ello basta con observar un tubo fluorescente doméstico estandar).

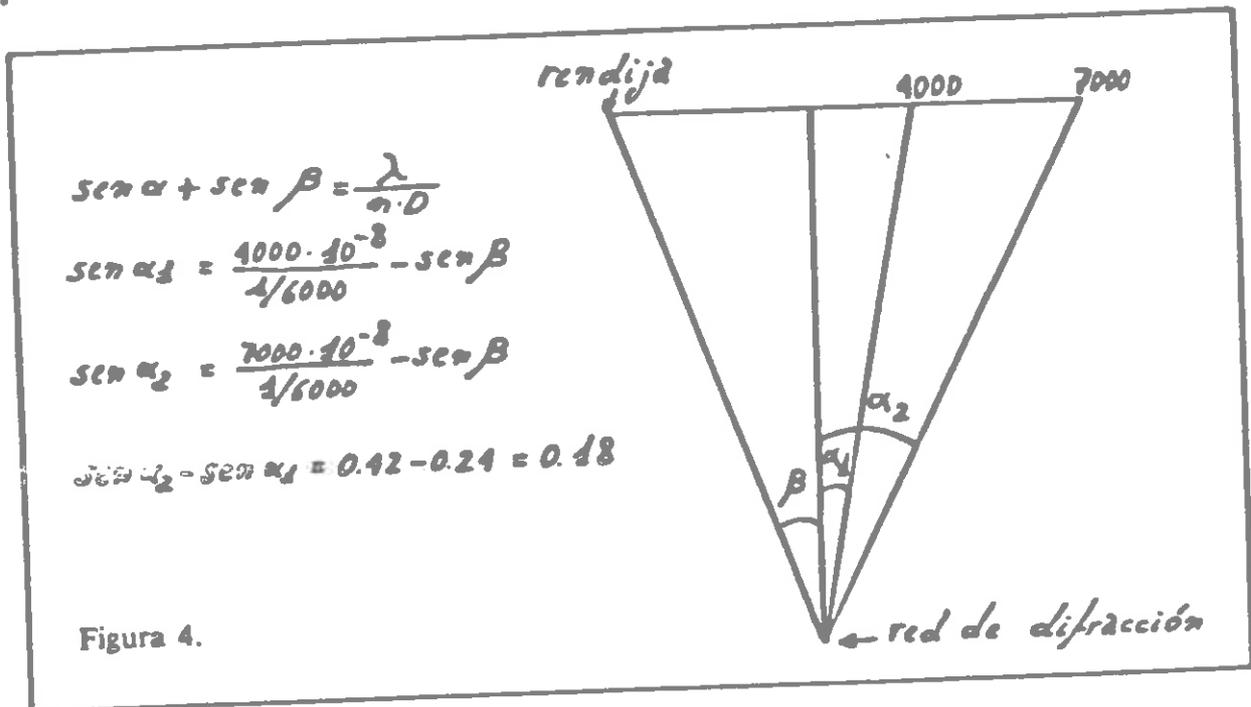
Dichas líneas aparecen a 2,6, 5,2, 5,95 cm.

del eje central del listón soporte y se corresponden con las longitudes de onda siguientes: 4358 Å (azul), 5461 Å (verde) y 5780 Å - el centro del doblete de 5770 y 5790 Å - (anaranjada).

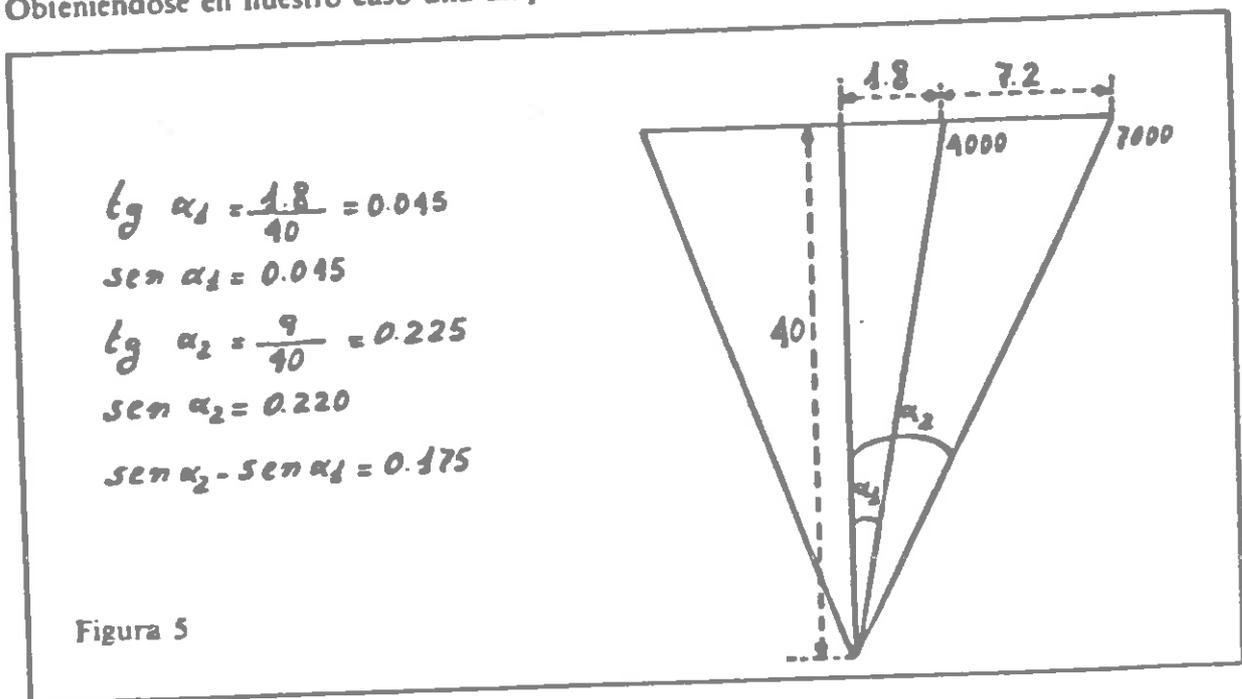
Estas mediciones han posibilitado establecer la correspondencia de 424 Å/cm., o lo que es lo mismo 2,4 cm. por cada 1.000 Å, permitiendo por otra parte fijar la posición

4.000 Å a 1,8 cm. del eje central del listón soporte.

Dicha escala se encuentra en perfecto acuerdo con las precisiones teóricas, ya que la amplitud angular entre 4000 y 7000 Å proporcionada por una red de difracción holográfica de 600 líneas/mm. para un espectro de primer orden vendría dada por las ecuaciones:



Obteniéndose en nuestro caso una amplitud de:



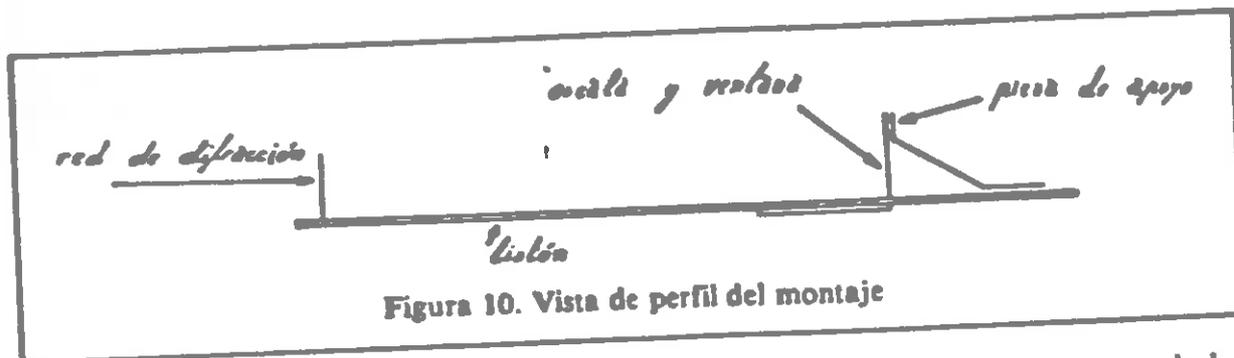


Figura 10. Vista de perfil del montaje

Por otra parte, dado que se trata de una red holográfica, la luz con que se realizó el holograma debe aparecer en una posición simétrica con la de la rendija con respecto al eje del listón central (7.6 cm), lo que nos permite establecer una longitud de onda de 6416 Å (aproximadamente 6400 Å al medir directamente de la escala en Å), frente a los 6333 Å teóricos (7).

NOTA.— Para calcular el valor experimental en Å a partir de la medición directa en cm. basta con aplicar la ecuación siguiente:

$$\lambda (\text{Å}) = \frac{x(\text{cm}) - 1.8}{2.4} 1000 + 4000$$

Una posterior verificación de dicha escala se realizó midiendo la posición del doblete del Sodio (alrededor de 5890 Å) al observarse el espectro de emisión de una lámpara de alumbrado público de vapor de sodio apareciendo dicho doblete a 6,30 cm. del eje del listón, correspondiendo en consecuencia una longitud de onda aproximada de 5925 Å (5875 Å según la ecuación de calibrado en cm).

Por último, y con el objeto de realizar una comprobación con un conjunto de líneas correspondientes a un mismo espectro, se midió la posición de las líneas más intensas del espectro de emisión del Helio obtenido mediante un tubo de descarga de los habituales en cualquier equipo didáctico de Espectroscopia, registrándose los siguientes resultados:

De todas estas medidas, así como de las previsiones teóricas cabe deducir que, en cualquier caso, el error de medida es siempre inferior a 100 Å, lo que equivale a un error relativo entre un 1,5 y un 2,5%, característica ésta que confiere una enorme fiabilidad de medida al aparato, máxime si se considera la sencillez de su construcción.

## 6.— ALGUNAS SUGERENCIAS SOBRE OBSERVACION DE ESPECTROS

Al objeto de realizar el estudio de algunos espectros de fácil observación, se relacionan seguidamente unas cuantas experiencias que no requieren un especial equipamiento:

### 6.1.— ESPECTROS DE EMISION

1.— Tubo fluorescente doméstico convencional o de iluminación viaria (luz azul blanquecina): fundamentalmente se aprecian líneas del mercurio -azul (4358 Å), verde (5461 Å), naranja (5780 Å - centro de una línea doble-).

2.— Iluminación viaria (luz anaranjada): líneas del Sodio - Naranja (sobre 5890 Å). (Aparecen de emisión al conectar la iluminación, y al cabo de un tiempo de funcionamiento pueden aparecer como líneas negras por efecto de autoabsorción si la lámpara adquiere una temperatura suficientemente elevada).

Color línea	Posición (cm)	$\lambda_{\text{exp.}} (\text{Å})$	$\lambda_{\text{teo.}} (\text{Å})$	$\Delta\lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{teo}}$
Azul	2,95	4500 (4479)*	4471	+ 29
Azul	3,55	4725 (4729)	4713	+ 12
Verde	4,1	4950 (4958)	4921	+ 29
Verde	4,3	5050 (5042)	5015	+ 35
Anaranjado	6,3	5850 (5875)	5875	-25
Rojo	8,3	6700 (6708)	6678	+ 28

\*Entre parentesis se dan los valores obtenidos a partir de la ecuación de calibrado en cm.

3.— Tubos de Neón (luz roja de anuncios luminosos): Grupo de líneas en la zona del rojo correspondientes al espectro de emisión del Neón.

4.— Incandescencia de la sal común (luz anaranjada): Básicamente se observa el doblete anaranjado del Sodio.

#### 6.2.— ESPECTROS DE ABSORCIÓN

1.— Espectro solar: Líneas de absorción - rayas negras sobre un fondo continuo-.

2.— Absorción por compuestos químicos coloreados: Entre un foco luminoso (una

bombilla ordinaria) y la rendija del espectroscopio se colocan recipientes transparentes con soluciones diluidas de las siguientes sustancias:

a/ $K_2Cr_2O_7$ : Absorción de una amplia banda desde el azul al verde.

b/ $KMnO_4$ : Absorción de, prácticamente, todo el espectro a excepción del violeta y del rojo.

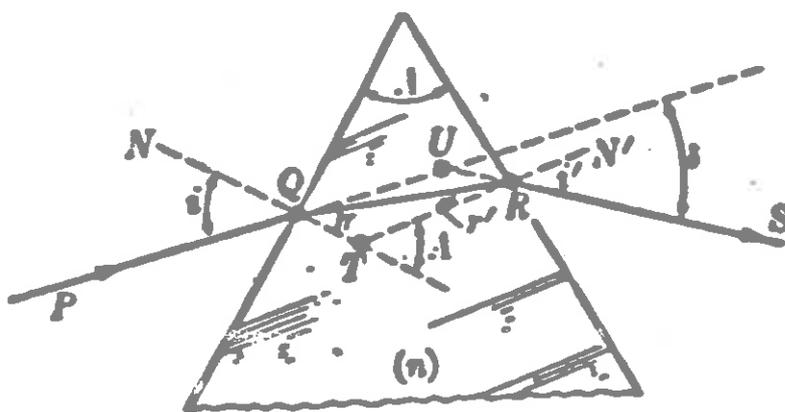
c/ $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ : Absorción de la zona del rojo.



## EL PROBLEMA DEL CALIBRADO DE UN ESPECTROSCOPIO DE PRISMA

La dispersión producida por un prisma es consecuencia de una doble refracción ocasionada por la existencia de dos caras no paralelas de material transparente en contacto con otro medio (atmósfera, generalmente).

(4) Para una luz monocromática las ecuaciones que rigen dicho fenómeno son :



$$\text{sen } i = n \text{ sen } r \quad (1)$$

$$\text{sen } i' = n \text{ sen } r' \quad (2)$$

$$r + r' = A \quad (3)$$

$$\delta = i + i' - A \quad (4)$$

Fig. 1

donde  $n$  es el índice de refracción aire/vidrio y a  $\delta$  se le llama desviación.

Si la luz es policromática, la doble refracción no es idéntica para cada radiación ya que existe una relación entre índice de refracción y longitud de onda dada por la fórmula de Cauchy<sup>(4)</sup> :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (5)$$

Como consecuencia de ello, una luz blanca es descompuesta en sus colores elementales al atravesar un prisma:

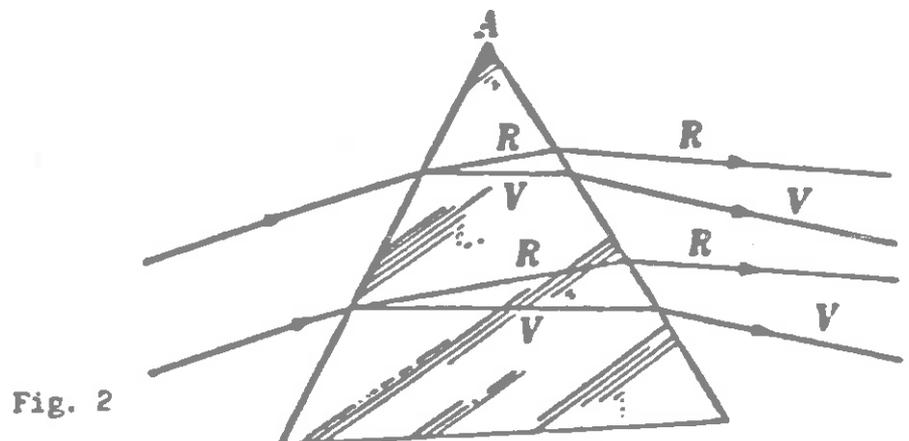


Fig. 2

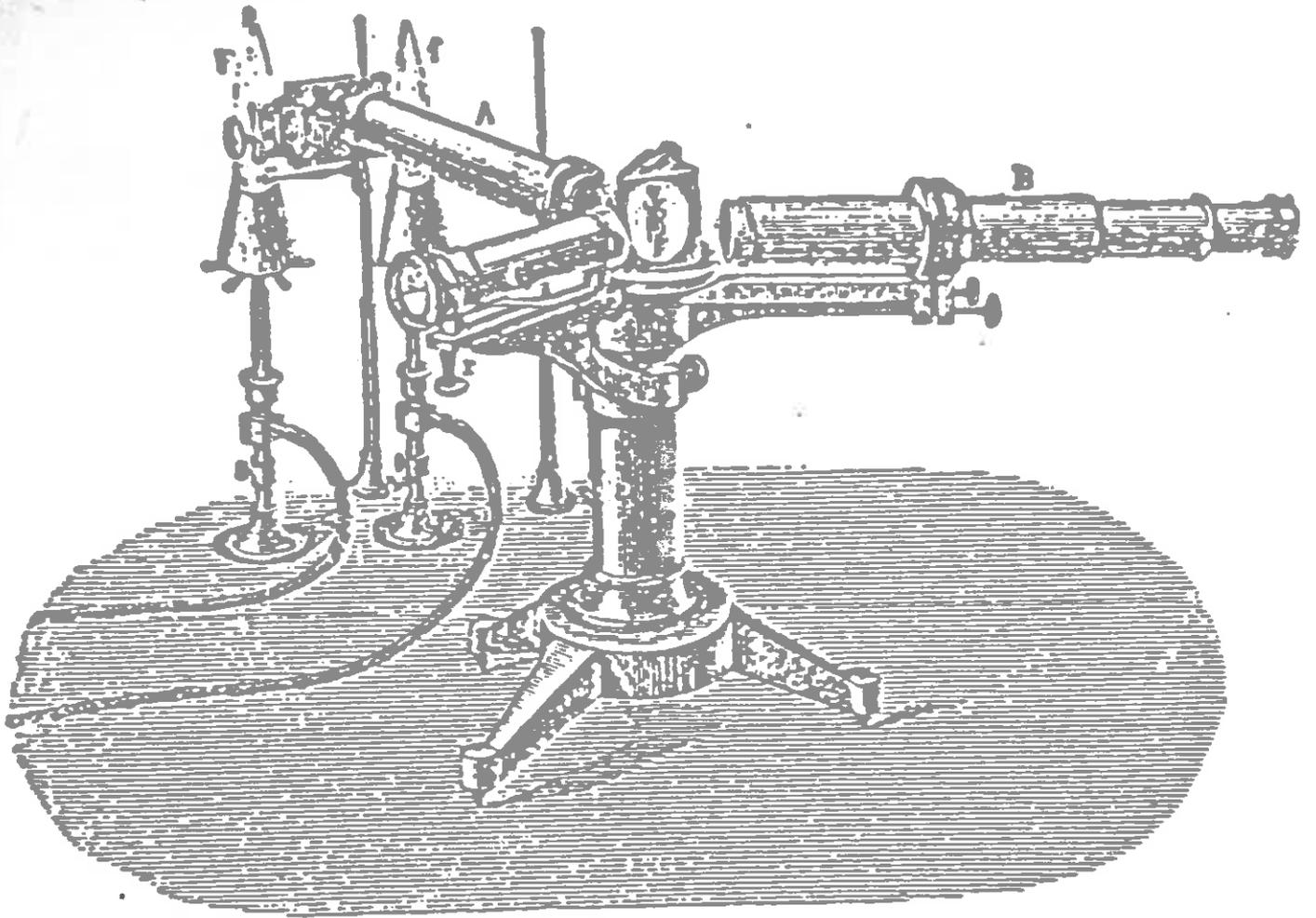


Fig. 3.- a) Espectroscopio de prisma tipo Kirchoff.

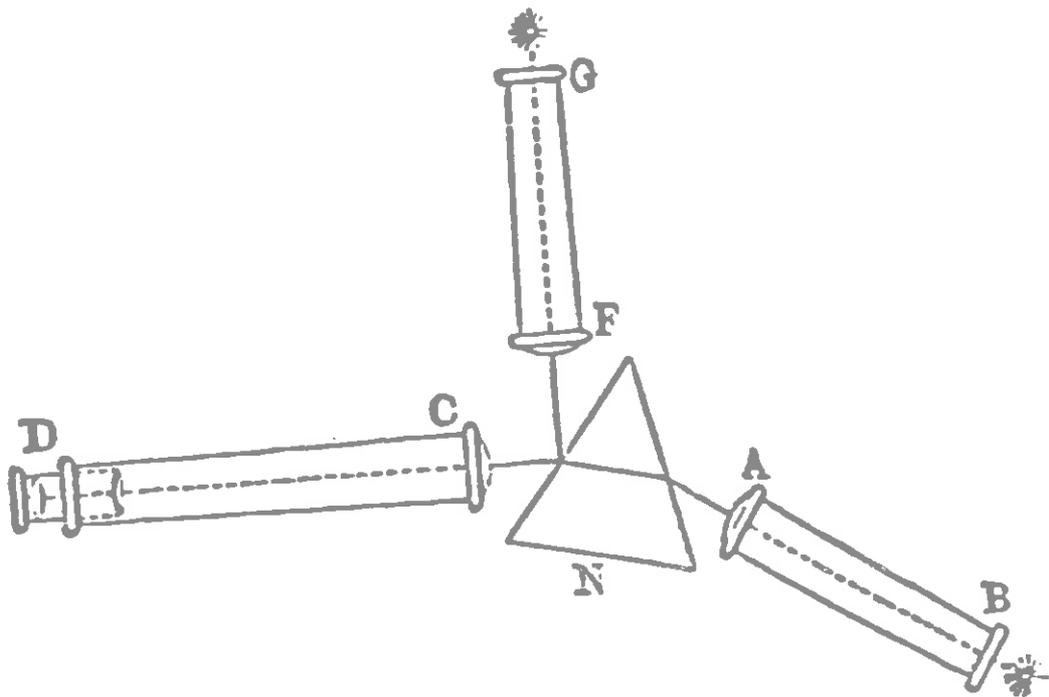


Fig. 3.- b) Esquema de un espectroscopio de prisma.

La figura obtenida se denomina espectro luminoso.

En los espectroscopios convencionales tipo Kirchoff (Fig. 3), los espectros se miden con ayuda de una escala micrométrica de divisiones idénticas (s) siendo la posición en dicha escala aproximadamente proporcional a la desviación, dado el pequeño valor de ésta:

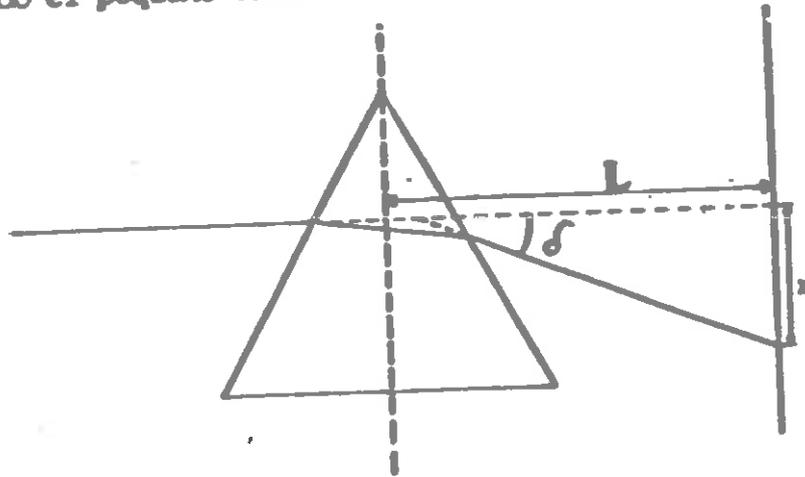


Fig. 4

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta \approx \frac{x}{L} \Rightarrow x \approx L \cdot \delta \quad (6)$$

Por otra parte se define como dispersión de un prisma la magnitud <sup>(4)</sup> :

$$D = \frac{d\delta}{d\lambda} \quad (7)$$

la cual se demuestra que es igual a:

$$D = - \frac{K}{\lambda^B} \quad (8)$$

Combinando las ecuaciones (7) y (8) e integrando se obtiene:

$$[\delta]_1^2 = K' \left[ \frac{1}{\lambda^2} \right]_1^2 \quad (9)$$

y teniendo en cuenta la ecuación (6):

$$\left[ \frac{1}{\lambda^2} \right]_1^2 \approx K'' [x]_1^2 \quad (10)$$

Tomando la posición de una línea como punto de referencia (por ejemplo situando el doblete del sodio en la posición 6), es posible tabular las diferencias dadas por la ecuación (10) (véase tabla 1) con lo que se puede obtener una recta al representar  $[x]_{Na}^i$  frente a  $[4/\lambda^2]_{Na}^i$ , tal y como se comprueba en la Fig. 5.

	$\lambda$	$x$	$[x]_{Na}^i$	$[4/\lambda^2]_{Na}^i$
Na	5890	6	—	—
He	r 6678	4.2	- 1.8	- 0.642
	g 5875	6.1	+ 0.1	0.014
	v 5015	9.2	+ 3.2	1.093
	b 4713	10.6	+ 4.6	1.62
Hg	g 5780	6.2	+ 0.2	0.110
	v 5461	7.4	+ 1.4	0.47
	b 4358	13.0	+ 7.0	2.384
H	r 6563	4.3	- 1.7	- 0.56
	b 4861	10.0	+ 4.0	1.348

Tabla I

La práctica usual, sin embargo, es la de obtener una curva de calibrado representando la posición -  $x$  - frente a la longitud de onda -  $\lambda$  - (2) (Fig. 6).

Mediante cualquiera de los dos métodos, es evidente que el proceso de calibrado no es sencillo y resulta complejo y tedioso para estudiantes de Bachillerato.

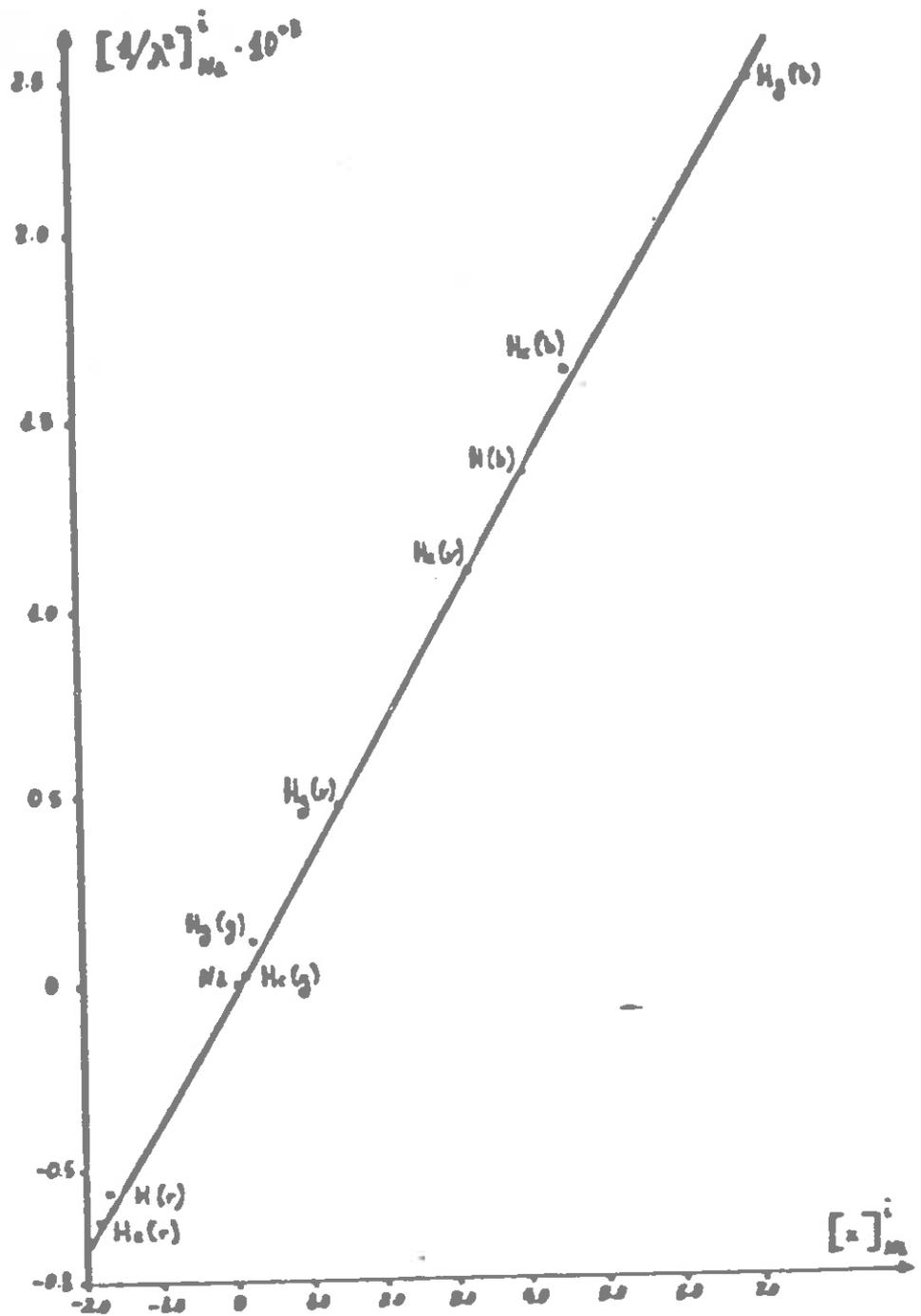


Fig. 5.- Representación de la posición de las líneas espectrales frente a la inversa del cuadrado de la longitud de onda de las mismas al tomar como referencia el doblete del Sodio en la posición 6 de la escala milimétrica de un espectroscopio de prisma.

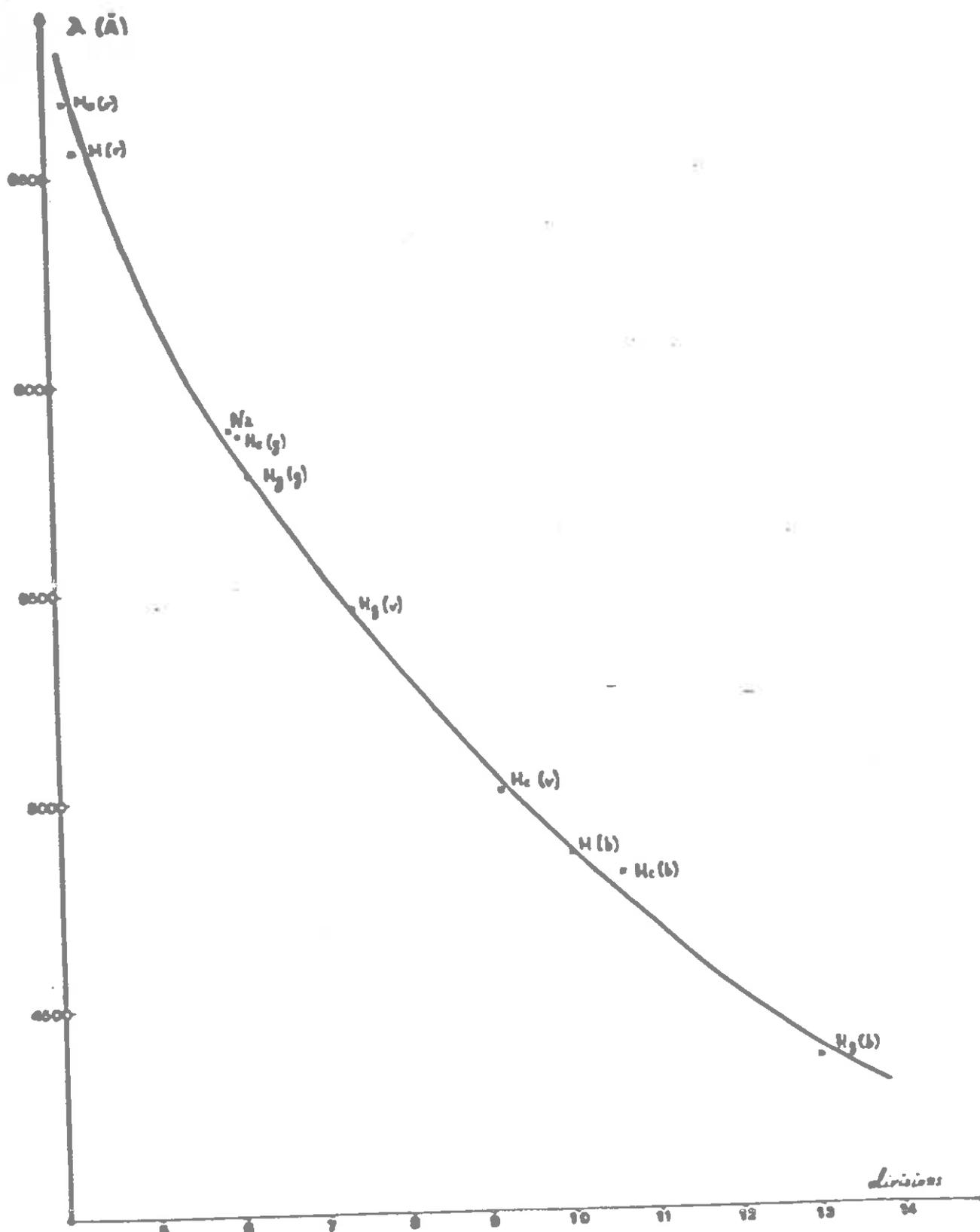


Fig. 6.- Representación de la posición frente a la longitud de onda de las líneas espectrales al fijar el doblete del Sodio en la posición 6 de la escala milimétrica de un espectroscopio de prisma.

## ESPECTRO PRODUCIDO POR UNA RED DE DIFRACCIÓN

La separación de los componentes de una luz blanca puede también realizarse por medio de una red de difracción. En este caso, la aparición de cada uno de los colores elementales no es consecuencia de la dispersión luminosa - por efecto de la refracción sino que es el resultado de un proceso de interferencia entre las ondas difractadas:

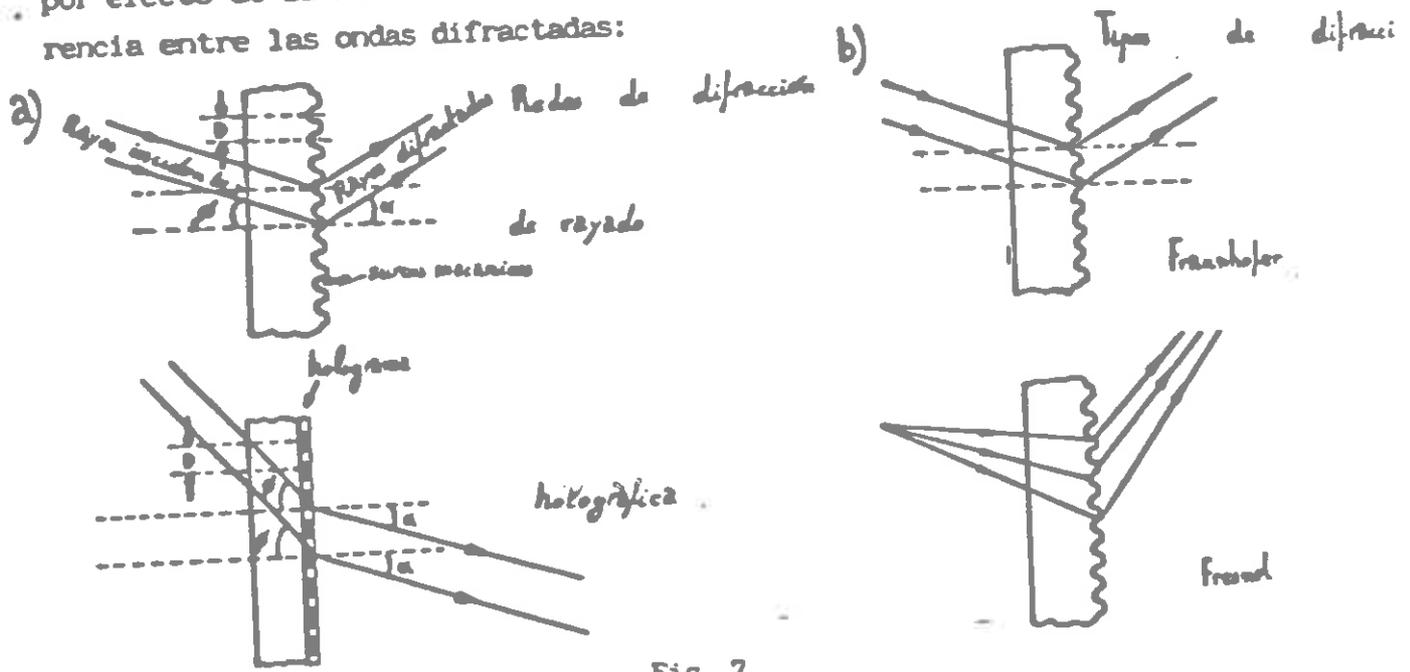


Fig. 7

Existen dos tipos de difracción:

a) Difracción de Fraunhofer, en la que los rayos incidentes son paralelos observándose el patrón de difracción a una distancia suficientemente grande (debe cumplirse la condición:  $L \cdot \lambda \gg (\frac{1}{2} D \cdot \cos \alpha)^2$  para que los rayos emergentes puedan ser considerados también paralelos, lo cual se puede conseguir también mediante el uso de una lente).

b) Difracción de Fresnel, en la que los rayos incidentes tienen su origen en una fuente puntual, o bien los rayos difractados no son paralelos o bien ambas cosas.

El tratamiento matemático de ambas situaciones es radicalmente distinto, resultando mucho más sencillo el estudio de la difracción de Fraunhofer.

fer. En dicha situación la condición para que exista un máximo de interferencia viene dada por la ecuación (4)

$$D \cdot (\text{sen } \alpha - \text{sen } \phi) = n \cdot \lambda \quad (11)$$

donde D es el espaciado entre rendijas y n es un número entero.

Para una incidencia normal y un espectro de orden 1, la ecuación anterior se reduce a:

$$\text{Sen } \alpha = \frac{\lambda}{D} \quad (12)$$

En la actualidad se fabrican dos tipos de redes de difracción:

- a) Mecánicas: se obtienen trazando unos surcos sobre la superficie del cristal.
- b) Holográficas: se impresiona un holograma sobre la superficie del cristal.

Mientras que las redes mecánicas requieren una enorme precisión al realizar los surcos, las holográficas son relativamente sencillas de obtener, con lo que su precio es enormemente inferior. Ello ha posibilitado una difusión del uso de las mismas.

En las redes de difracción, la relación entre longitud de onda y posición de la línea en la pantalla es aproximadamente lineal:

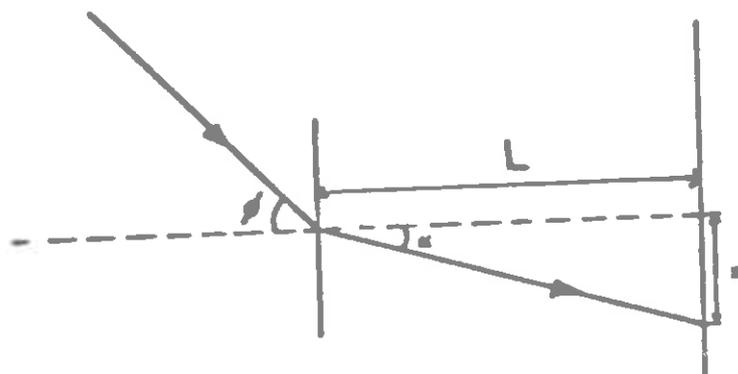


Fig. 8

$$\text{tg } \alpha = \frac{x}{L} \approx \text{Sen } \alpha = \frac{\lambda}{D} + \text{Sen } \phi \quad (13)$$

$$x \approx \frac{L}{D} \cdot \lambda + L \cdot \text{sen } \phi \quad (14)$$

Tomando una línea como posición de referencia, podemos escribir la ecuación (14) en la forma:

$$\Delta\lambda \approx \frac{D}{L} \Delta x \quad (15)$$

En las figuras 9 y 10 se muestran los esquemas de dos modelos de espectroscopios sencillos que utilizan redes de difracción holográficas de 600 líneas/mm. (5) - (6) Los resultados medidos se dan en la tabla II y la dependencia entre posición de línea y longitud de onda se muestra en la figura 11 (se ha considerado como línea de referencia la primera línea verde del espectro del Helio,  $\lambda = 5015 \text{ \AA}$ ,  $x = 4.3 \text{ cm}$  del eje central).

		$\Delta x$ (cm.)	$\Delta \lambda$ (Å)
He	(r)	4.0	1663
	(g)	2.0	860
	(v)	0	0
	(v)	- 0.2	- 94
	(b)	- 0.75	- 302
	(b)	- 1.35	- 544
Hg	(g)	1.65	765
	(v)	0.9	446
	(b)	- 1.7	- 657

Pendiente experimental: 416.3

$$\text{Pendiente teórica: } \frac{D}{L} = \frac{1/6,000}{40} = 416.7$$

Resultan claras desde todos los puntos de vista las ventajas que este tipo de espectroscopios presentan frente a los de prisma para introducir los conceptos fundamentales de la espectroscopia: calibrado, manejabilidad y precio son tres buenas razones para optar por esta posibilidad.

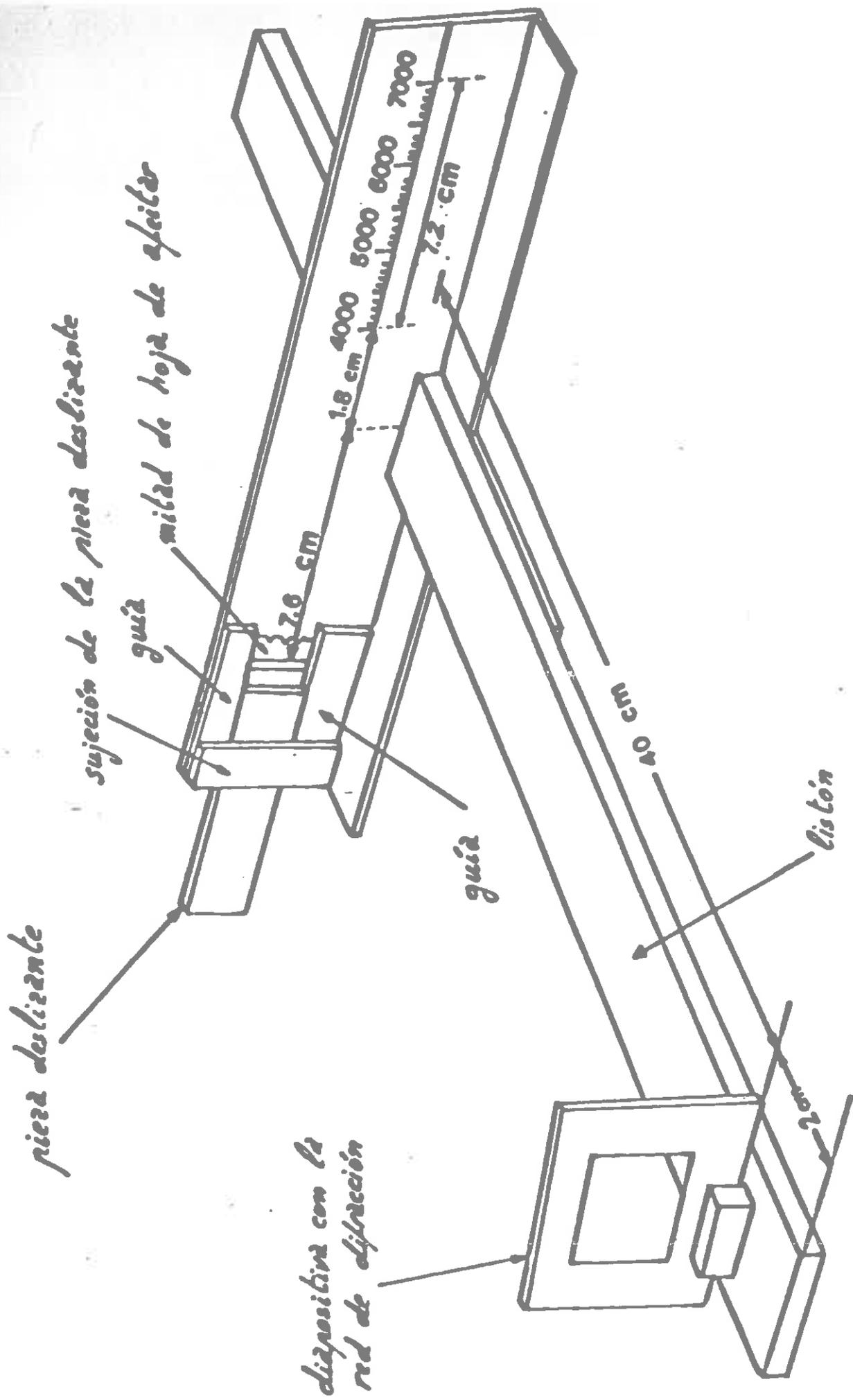
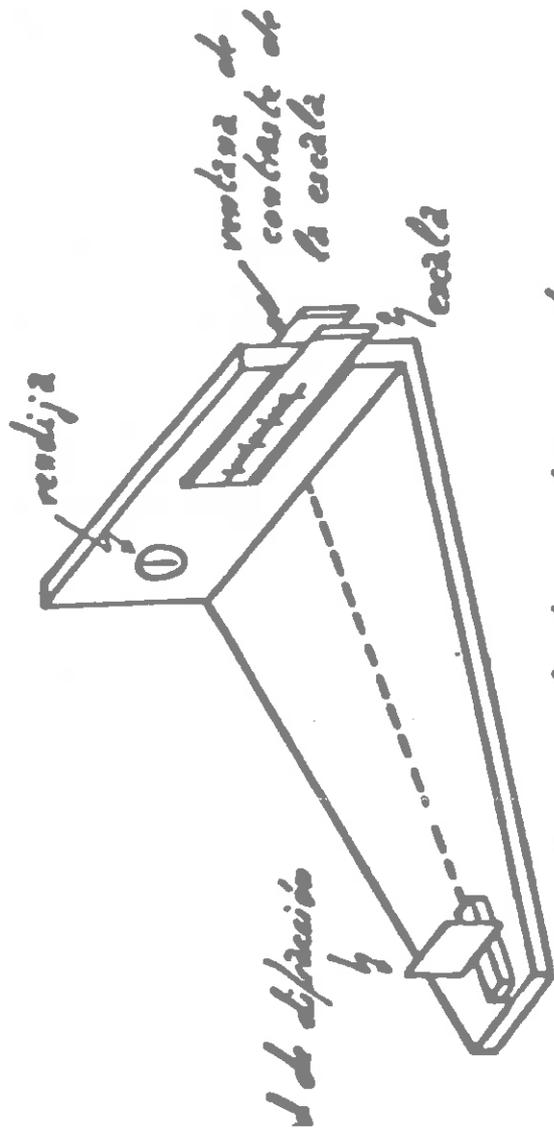
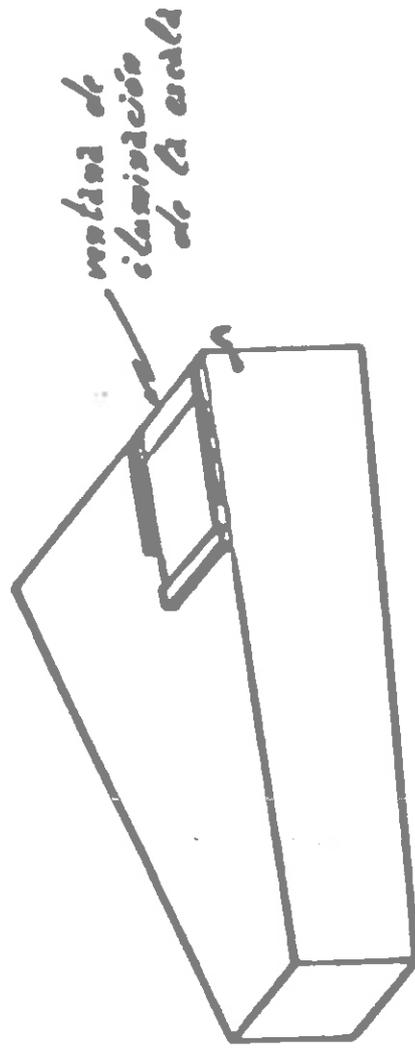


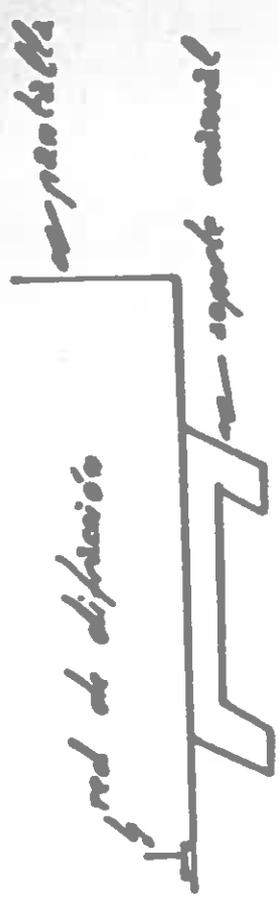
Fig. 9.- Modelo de espectroscopio de red de difracción tipo Maxman.



Vista de la base del espectroscopio

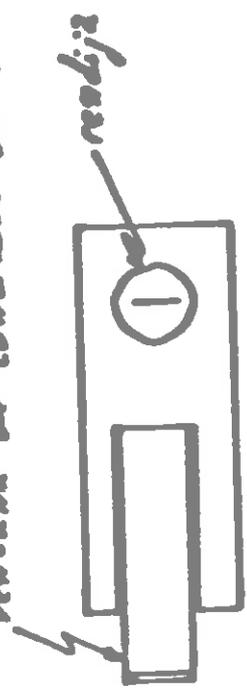


Cámara de contraste



Vista de perfil del montaje

ventana de contraste de la escala



Vista posterior de la pantalla

Fig. 10.- Modelo de espectroscopio de red de difracción con "cámara oscura".

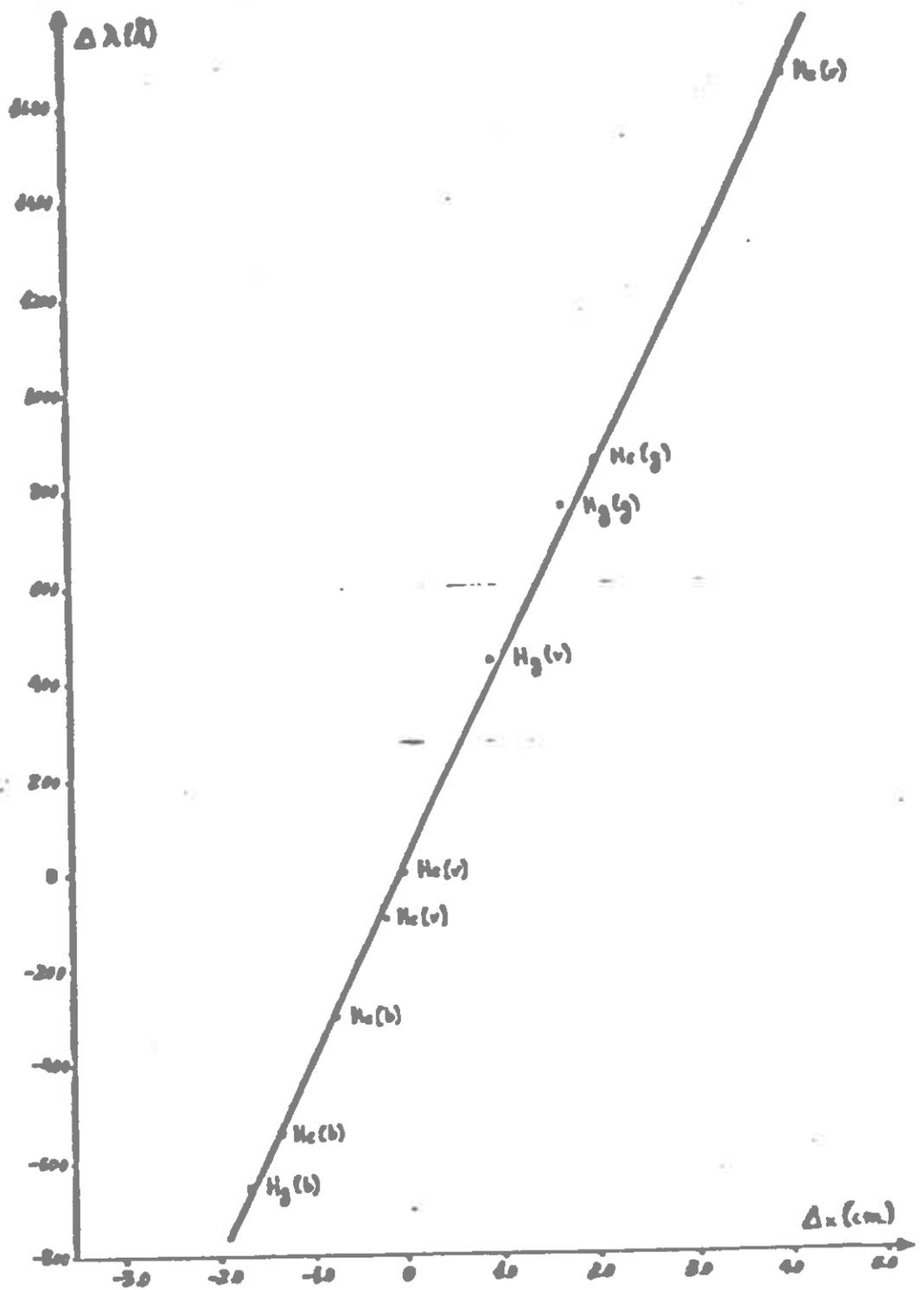


Fig. 11.- Representación de la posición en cm. frente a la longitud de onda de las líneas espectrales obtenidas con un espectroscopio de red de difracción.

Referencias

- (1) M. Alonso; E.J. Finn (1967). Física, Vol. II. Ed. Fondo Ed. Interamericano. pp. 878-885.
- (2) J. Mañas Bonví (1914). Óptica Aplicada. Imp. Francisco J. Allés, pp. 188-192.
- (3) F.S. Crawford (1974). Berkley Physics Course, Vol. 3. Ed. Reverté, pp. 481 y sig.
- (4) M. Chapelet (1986). Bull. Union des Phys. 659, pp. 323-327.
- (5) J. Waxman (1984). Astronomy. Cambridge University Press, pp. 320-323.
- (6) G. Bernabeu, I. Verdú, LL. Garrigós (1987). Eines, Vol. 7/8, pp. 165-174.