

TALLER Y LABORATORIO

UN ESPECTROSCOPIO CASERO DE NOTABLE PERFORMANCE

LORENZO MARCOS IPARRAGUIRRE

Rogelio Martínez y Valparaíso - Ciudad Universitaria
FaMAF - UNC - 5000 Córdoba

Grupo de Enseñanza de la Ciencia y la Tecnología (GECyT)

RESUMEN

Es posible construir un excelente espectroscopio de bajo costo utilizando como red de difracción un trozo de "disco compacto", aprovechando para ello la excelente regularidad y finura de su interlineado. Se indican los detalles constructivos, se analizan algunos aspectos relativos al cálculo de la ubicación de imágenes dadas por una red de difracción, y se sugieren distintas posibilidades de utilización.

ABSTRACT

It is possible to built an excellent low cost spectroscope using a piece of "compact disk" as a diffraction pattern, taking advantage of the excellent regularity and thinness of its lines. We presents in this paper the constructive details, some analysis of aspects related to the calculation of the location of diffraction pattern images, and suggestions about several possibilities of utilization.

INTRODUCCION

Uno de los problemas generalizados de las instituciones en las que se enseña física (en todos los niveles), es la falta de instrumental para que todo el alumnado haga prácticas de laboratorio cómodas.

Cuando se trata de estudiar el espectro de la luz se da la siguiente situación:

- es un tema de riquísimas facetas que se

manifiestan constantemente en la vida diaria, pero pasan desapercibidas, precisamente porque nunca se tiene a mano un espectroscopio, problema del cual nos ocuparemos aquí.

- para estudiar la física de las diversas situaciones que se relacionan con él, suele bastar con el elemento principal del espectroscopio: el prisma, o la red de difracción.

Estos elementos, de buena calidad óptica, son caros. Lo cual no es en sí todo el problema, sino que, cuando una escuela consigue una buena red de difracción, o un buen prisma, generalmente no puede hacer que lo aproveche un gran número de alumnos (ya sea porque son muchos para un único elemento, o porque el encargado de cuidarlos los mezquina para que duren más, o porque alguien los hurta y ya no se reponen, etc).

Aquí se presenta la solución:

Una red de difracción de

- alto poder dispersor
- buena calidad
- bajo precio
- que a nadie interesará hurtar

Este mágico elemento es el DISCO COMPACTO (DC), el cual descompone la luz en hermosos colores, como puede apreciarse directa y simplemente viéndolo en los escaparates.

Su poder dispersor es tal, que una persona entrenada puede estudiar con él un espectro directamente, sin agregar casi ningún artificio, y hasta sin sacarlo fuera de su caja plástica.

Y los no entrenados podrán construir su propio "espectroscopio de bajo costo", que no utiliza más de un trozo de DC y cartones.

Además, puede usarse un DC sin trozarse ni dañarse, adecuando el diseño sin grandes modificaciones.

Tiene la desventaja de actuar por reflexión, lo cual torna algo complicado su uso, se soluciona con algo de práctica.

La clave de esta propuesta está en la extraordinaria proximidad y regularidad de las líneas ("pits") que registran la señal grabada en estos discos ⁽¹⁾.

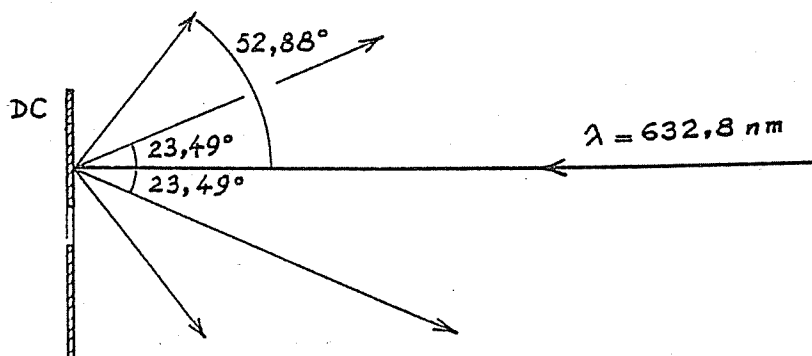


Figura 1

El disco está metalizado en la cara que no se utiliza (la cual está pintada con la identificación del DC). Una zona suficientemente amplia libre de pintura, en esa cara, debería ser ideal para nuestros fines. Pero en la práctica hemos encontrado efectos indeseables observando desde este lado - y tal vez se deban a la capa de laca transparente que la cubre de $30\mu\text{m}$ de espesor ^{(2) (1)}.

De manera que proponemos utilizar la cara "útil" del DC - con el metalizado al fondo.

La curvatura de las líneas no molesta (en los montajes que aquí se proponen), al contrario, permiten efectos muy interesantes si se observa desde la concavidad, a distancia adecuada (4 ó 5cm), por ejemplo, en dos posiciones principales,

Hemos medido para varios discos de distinto sello grabador, y hemos hallado que la densidad de líneas es:

$$(630 \pm 5) \text{ líneas/mm}$$

Para otro disco se halló (655 ± 5) líneas/mm.

La incerteza indicada es una estimación de "máxima" que cubre todas las posibles fallas del montaje de medición pero es de notar que cada disco tiene una variación menor que eso (no detectable) en todo su registro.

Una idea rápida de las posibilidades de utilización del disco se obtiene haciendo incidir un láser HeNe perpendicularmente sobre cualquier parte del disco.

Se obtienen así reflexiones de 1° y 2° orden como se indica en la Figura 1.:

como las indicadas en las Figuras 2 y 3.

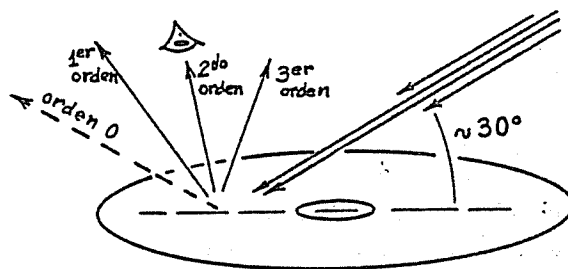


Figura 2

Los montajes que hemos hallado más ventajosos, se basan en estas figuras.

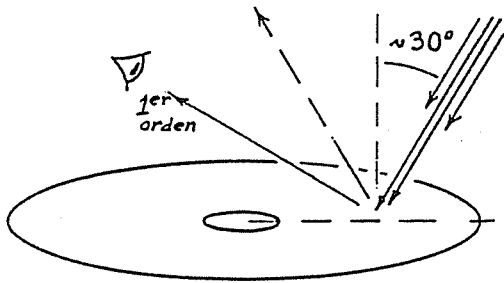


Figura 3

La situación presentada en la Figura 2, permite elegir entre la observación de los espectros de 1°, 2° y 3° orden - pudiendo jugar así con el brillo y el poder separador.

La situación mostrada en la Figura 3 permite observar sólo un espectro, el de 1° orden, más brillante y casi tan amplio como el de 2° orden de la Figura 2, pero tiene algunos inconvenientes que luego describiremos.

Aquí proponemos algunos montajes simples y de bajo costo, es decir: sin más elementos ópticos que la red y el ojo.

MONTAJE PROPUESTO

Se propone el montaje de la Figura 4, para aprovechar la situación que muestra la Figura 2.

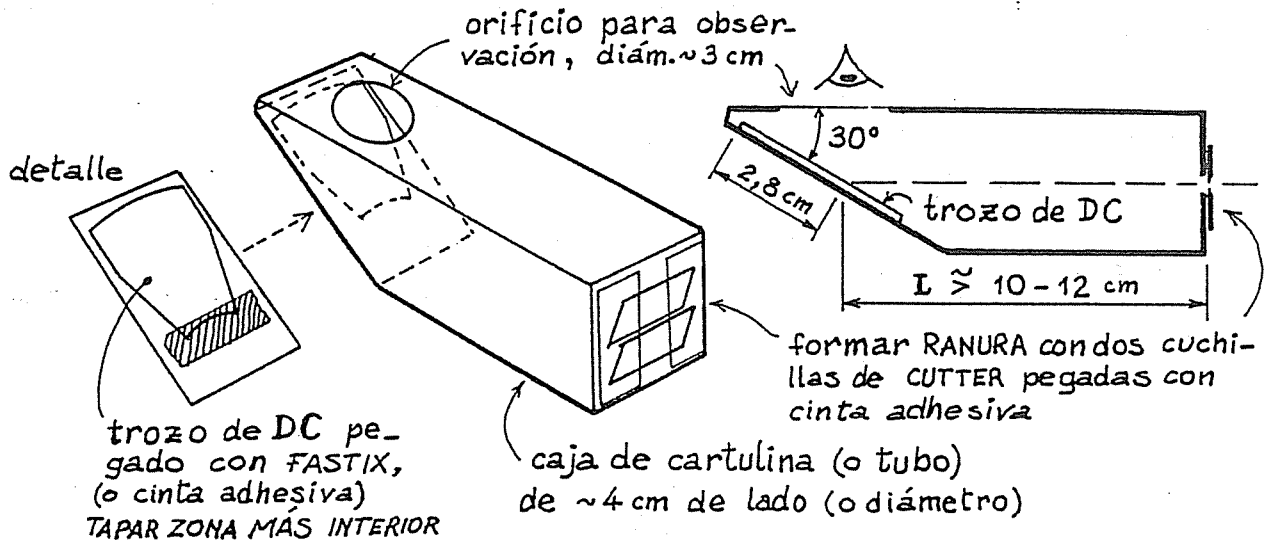


Figura 4

En cuanto a la longitud L , digamos que, en principio, debe ser tal que el ojo pueda enfocar con nitidez las imágenes de cada color de la ranura.

Con esta intención podemos comenzar pensando que $L \geq d_{\min}$, siendo d_{\min} la "distancia mínima de visión distinta" del observador.

Para un joven, $d_{\min} \approx 15$ ó 20cm , para el que escribe esto, $d_{\min} \approx 3\text{cm}$. Personas con d_{\min} mayor que este valor seguramente utilizarán anteojos,

por lo cual no es necesario tenerlas especialmente en cuenta.

Pero veremos luego que, según los ángulos que intervienen en el proceso, la imagen difractada se sitúa a distancias bastante distintas que el objeto (la ranura) de manera que la determinación de L involucra otras dificultades - Por ello el valor que hemos dado, 10 a 12cm resulta bien para casi cualquier observador.

El montaje sugerido para aprovechar la situación

mostrada en la Figura 3, es similar, pero justamente por lo que acabamos de mencionar,

debe ser notablemente más largo:

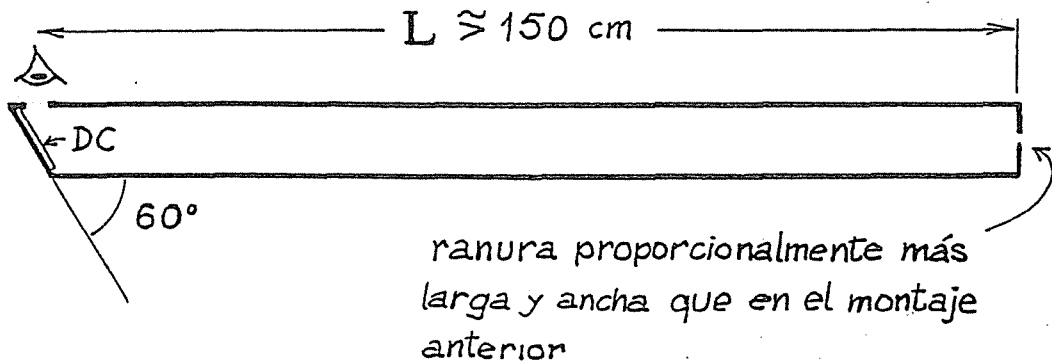


Figura 5

ALGUNAS CONSIDERACIONES CUANTITATIVAS

La fórmula para calcular la ubicación angular de los distintos colores se obtiene a partir de las condiciones habituales de interferencia constructiva, que se muestran en la Figura 6.

Con α designamos el ángulo de emergencia de los haces que se difractan, "hacia atrás", (es decir, en este dibujo, hacia la derecha) del haz de

orden cero (el reflejado directamente), para ellos, la diferencia de caminos vale:

$$\delta = AC - BD = AB (\sin \theta - \sin \alpha)$$

$$\frac{\delta}{d} = \sin \theta - \sin \alpha$$

De manera que:

$$\frac{\delta}{d} = n \frac{\lambda}{d} \quad (\text{Cond. de interf. constructiva})$$

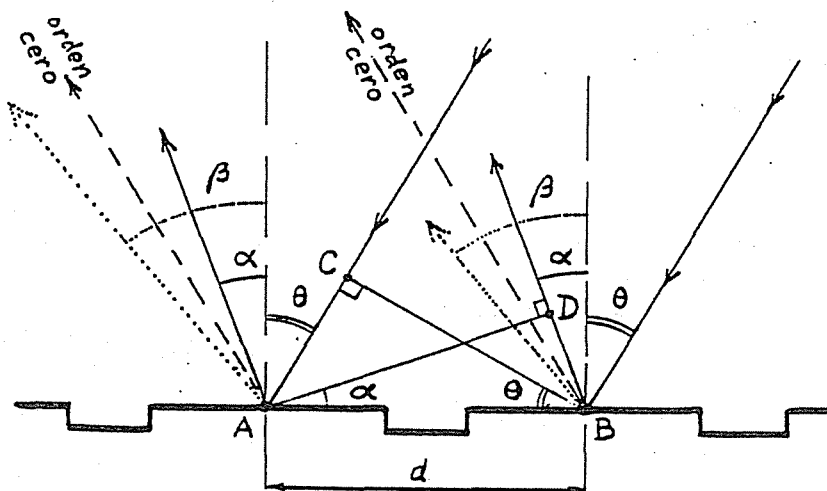


Figura 6

Para los haces que emergen "más allá" del haz reflejado principal (hacia la izquierda en la dibujo), llamamos β al ángulo de emergencia, y vale exactamente el mismo esquema, de manera que:

$$n \frac{\lambda}{d} = \sin \beta - \sin \theta$$

Así tenemos dos expresiones similares para los dos tipos de haces difractados:

$$n \frac{\lambda}{d} = \sin \theta - \sin \alpha \quad (1)$$

$$n \frac{\lambda}{d} = \sin \beta - \sin \theta \quad (1')$$

Estas, además nos permiten calcular la distancia a la que se debe situar la ranura.

Para ello consideremos una determinada longitud de onda, y dos rayos próximos que inciden en A y en B respectivamente, como muestra la Figura 7.

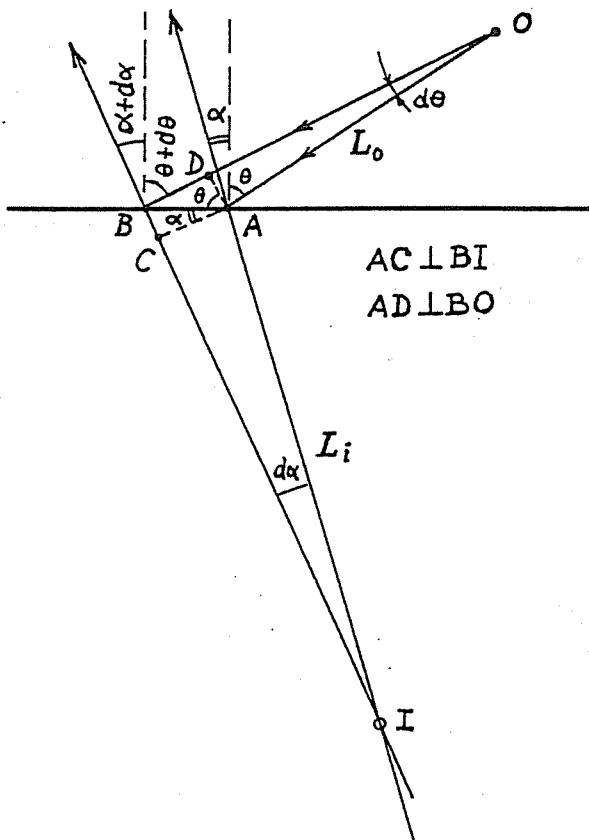


Figura 7

$L_0 = AO$: distancia red-objeto

$L_i = AI$: distancia red-imagen

$$L_0 d\theta \cong AD \cong AB \cos \theta$$

$$L_i d\alpha \cong AC \cong AB \cos \alpha$$

Entonces:

$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{\cos \alpha d\theta}{\cos \theta d\alpha}$$

podemos averiguar fácilmente $\frac{d\theta}{d\alpha}$ a partir de (1):

$$0 = \cos \theta d\theta - \cos \alpha d\alpha$$

$$\frac{d\theta}{d\alpha} = \frac{\cos \alpha}{\cos \theta}$$

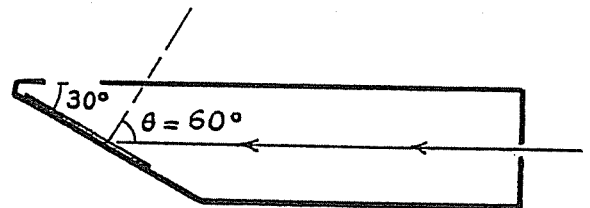
De manera que:

$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \theta} \quad (2)$$

La expresión (2) es idéntica para α o β .

De manera que, si aplicamos esta expresión a nuestros montajes, obtenemos para $\lambda_R = 700\text{nm}$ y $\lambda_V = 400\text{nm}$, para $N = 630$ líneas/mm

1º Montaje:



$$\frac{\lambda_R}{d} = 0.441$$

$$\frac{\lambda_V}{d} = 0.252$$

1º orden

$$\sin \alpha = \sin \theta - \frac{\lambda}{d} = \begin{cases} 0.4250 \rightarrow \alpha_{\text{rojo}} = 25.15^\circ \\ 0.6140 \rightarrow \alpha_{\text{violeta}} = 37.88^\circ \end{cases}$$

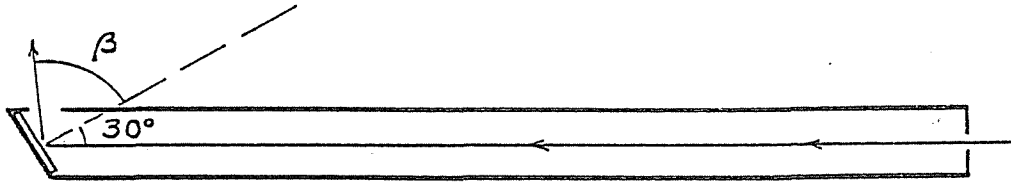
$$\frac{L_i}{L_0} = \begin{cases} 3.3 & \text{(rojo)} \\ 2.5 & \text{(violeta)} \end{cases}$$

$L_{\text{violeta}} < d_{\text{min}}$, se mejora la nitidez en la zona azul violeta.

De manera que para una $d_{\text{min}}=30\text{cm}$, basta con un tubo de $L=10\text{cm}$. En algunos espectroscopios el color azul violeta es mal enfocado por el ojo debido a que por el excesivo índice de refracción se produce una convergencia excesiva de la luz en ese color. En este ejemplo, al haber quedado

Para el espectro de 2° orden, será menor, cercano a 0°, por lo cual L, será mayor y no habrá problemas (excepto posiblemente en la zona violeta, como se mencionó).

Para el 2° montaje:



$$\sin \beta = \frac{\lambda}{d} + \sin \theta$$

$$\sin \beta = 0.5 + \begin{cases} 0.441 = 0.941 \rightarrow \beta_{\text{rojo}} = 70.22^\circ \\ 0.252 = 0.752 \rightarrow \beta_{\text{violeta}} = 48.76^\circ \end{cases}$$

$$\frac{L_i}{L_0} = \begin{cases} 0.15 & \text{(rojo)} \\ 0.58 & \text{(violeta)} \end{cases}$$

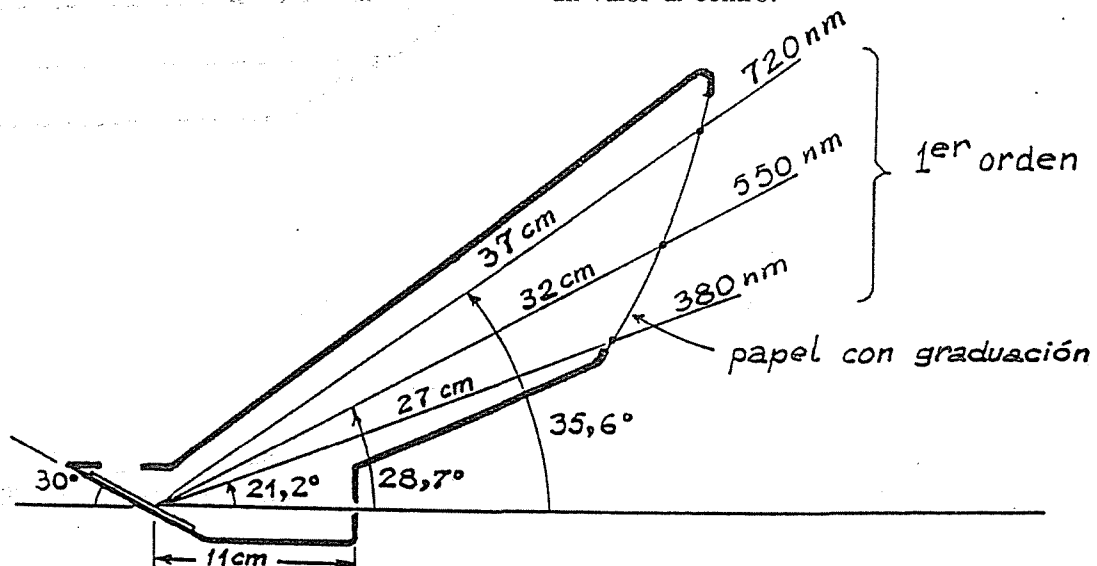
Vemos que en este montaje, el tubo debe ser muy largo. Digamos que si $d_{\text{min}}=30\text{cm}$, para que el rojo se vea nítido, podemos pensar en $L=2\text{m}$.

$\approx 1\text{cm}$ de ancho por el largo que sea necesario en una de las paredes, y se la cubre con un papel graduado.

Esta ranura debe estar ubicada de tal manera que se la vea, por medio de la reflexión directa en el DC, en la misma dirección en que se ve el espectro que nos interesa, y a la *distancia adecuada* para que su imagen especular se sitúe exactamente en donde están las imágenes (difractadas) de la ranura, de cada color, ya que esta coincidencia en distancia es la *única forma de que el espectro no se desplace respecto de la escala* al cambiar la posición del ojo del observador. Es claro que el diseño se complica, pero ya hemos visto aquí los elementos conceptuales necesarios para realizar el montaje que presentamos a continuación: elijamos dos valores de λ como extremos aproximados del espectro, y un valor al centro.

COMO INCORPORAR UNA ESCALA GRADUADA y obtener así un ESPECTROMETRO

Es posible ver el espectro contra el fondo de una escala graduada si se práctica una ranura de



a. para el extremo violeta ($\lambda_v=380\text{nm}$; $N=630$ l/mm; $\lambda_v/d=0,2394$):

$$\sin\alpha_v = \sin 60^\circ - \frac{\lambda}{d} = 0.627 \rightarrow \alpha_v = 38.8^\circ = 60^\circ - 21.2^\circ$$

$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{\cos^2 38.8^\circ}{\cos^2 60^\circ} = 2.43 \rightarrow 2.43 \times 11 = 26.7\text{cm}$$

b. para el centro ($\lambda_c=550\text{nm}$; $\lambda_c/d=0,3465$):

$$\sin \alpha_c = 0.5195 \rightarrow \alpha_c = 31.30^\circ = 60^\circ - 28.70^\circ$$

$$\frac{L_i}{L_0} = 2.92 \rightarrow 2.92 \times 11 = 32.1\text{cm}$$

c. para el rojo ($\lambda_r=720\text{nm}$; $\lambda_r/d=0,4536$):

$$\sin \alpha_r = 0.4124 \rightarrow \alpha_r = 24.36^\circ = 60^\circ - 35.64^\circ$$

$$\frac{L_i}{L_0} = 3.32 \rightarrow 3.32 \times 11 = 36.5\text{cm}$$

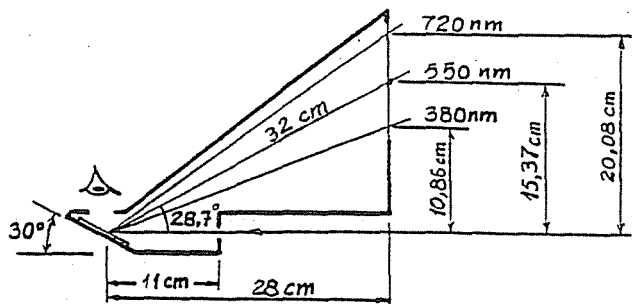


Figura 8

OBSERVACIONES FINALES

- Puede colocarse una tapa de cartón corrediza sobre la escala para anularla cuando moleste su luminosidad. El papel blanco común tiene el grado de opacidad adecuado - pero también puede ser bueno oscurecerlo algo tapándolo con otro papel más.
- El espectro de 2º orden queda demasiado próximo a la normal (al DC), de manera que la escala sólo puede aplicarse al de 1º orden.
- Los reflejos en la superficie anterior del DC pueden producir una doble imagen, pero no es molesta.
- La distancia de la escala al DC no necesita ser definida con excesivo cuidado para cada longitud de onda. Una ubicación aproximadamente correcta también dará buenos resultados. El montaje resulta ser muy tolerante con esta distancia.

Por ejemplo, de la manera que muestra la Figura 8 es más fácil de construir y de graduar.

La tabla de la Figura 9, contiene el cálculo de las graduaciones para este modelo (para $N=630$ líneas/mm).

λ (nm)	grad (mm)	λ (nm)	grad (mm)
380	00	580	52.8
400	5.2	600	58.2
420	10.4	620	63.7
440	15.6	640	69.3
460	20.8	660	74.9
480	26.1	680	80.6
500	31.4	700	86.4
520	36.7	720	92.2
540	42.0	740	98.1
560	47.4	760	104.1

Figura 9

Puede observarse cómo es de uniforme la separación - una escala equiespaciada de 5,4mm de separación cada 20nm, hubiera dado buen resultado práctico.

- No damos aquí detalles acerca de la posibilidad de agregar lentes, pues ya están planteadas las ideas que pueden necesitarse. Se pueden imaginar variantes según la inventiva y los elementos ópticos de que se disponga.
- Este espectroscopio permite observaciones de gran finura. Por ejemplo, se pueden observar una

infinidad de hermosas líneas de absorción en el espectro solar.

- Una desventaja es que observar de costado es incómodo y desconcertante. Requiere entrenamiento. Las cosas mejoran mucho si se monta el

aparato en algún soporte que lo mantenga fijo.

- Para graduar (o chequear la graduación) la escala, pueden utilizarse las siguientes "λ" fáciles de obtener:

Tubo Fluorescente (Hg)	Llama (de una vela) espolvoreada con sal fina
4358.35 Å azul violeta	5892 (Na) es el famoso doblete amarillo del sodio
5460.74 Å verde	
5769,59 Å doblete	
5790,65 Å amarillo	

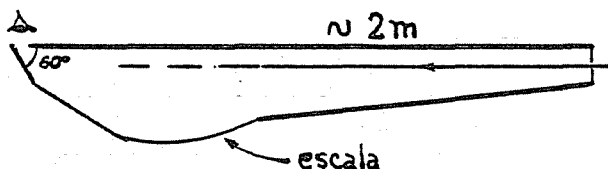
- Al montaje llamado (2) se le puede colocar una escala utilizando las mismas ideas básicas - no es necesario repetir aquí los detalles pero es claro que todo sale mucho más grande que en el (1).

- Una variante muy interesante es construir el modelo aquí sugerido, con la escala graduada como ya se planteó, pero en DOS PARTES separables, como muestra la Figura 10.

La parte (1) debe tener una ranura, o abertura superior con tapa. Cuando se utiliza sola, la tapa garantiza la oscuridad, y para acoplar (1) con (2), se quita la tapa de manera que la luz de la escala pueda ingresar al DC desde (2).

La parte (2) se construye con cierta rigidez, con la escala graduada con cuidado, y se debe tener la precaución de que el asiento en el cual se encajará (1) permita cierto ajuste, para que así cada vez se haga coincidir algunas líneas conocidas (del tubo fluorescente por ejemplo) con las graduaciones correspondientes.

Algo así:



- En los modelos sin escalas, más simples, puede utilizarse un tubo de tipo telescópico, que pueda alargarse o acortarse (una cierta cantidad pequeña) de manera de examinar especialmente, por ejemplo, la parte azul violeta del espectro, que requiere una distancia de enfoque especial.

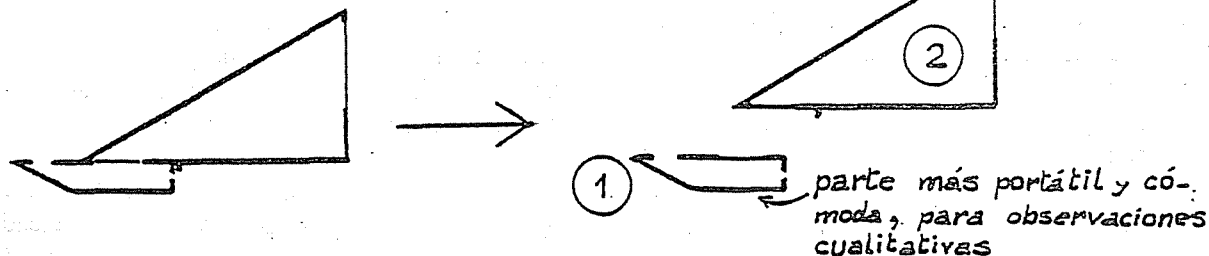


Figura 10

- Cálculos que no interesan aquí pueden mostrar que cada línea espectral que se observe, es decir cada imagen de la ranura en cada λ no

puede permanecer realmente inmóvil contra la escala al mover el ojo. Hay sobre todo una gran variación en la profundidad de estas imágenes

para pequeñas variaciones angulares. En lenguaje más técnico digamos que se desplazan sobre una "cáustica" muy profunda.

Esto tiene la consecuencia de hacer muy tolerante al montaje con la "profundidad" de la ubicación de la escala.

También podría tener la consecuencia desagradable de hacer impracticable la utilización de la escala. Pero **no la tiene**. Afortunadamente, en la práctica, con el modelo que hemos desarrollado aquí el espectro se observa obstinadamente inmóvil contra la escala mientras se desplaza el ojo por toda la extensión útil del disco.

- Acerca del poder separador de este instrumento puede decirse que excede las expectativas más optimistas. El espectro solar se ve surcado por infinidad de líneas de absorción; hay cerca de una veintena de ellas perfectamente identificables con el modelo que hemos propuesto.

Por ejemplo el famoso doblete D del sodio se ve nítidamente resuelto a partir del espectro de segundo orden, lo que indica que el poder

separador puede estimarse en 2 o 3 Å, ya que:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{D1} = 5895,92 \text{ \AA} \\ \lambda_{D2} = 5889,95 \text{ \AA} \end{array} \right\} \Delta = 6,0 \text{ \AA}$$

Es más, el hermoso conjunto de líneas b del hierro y del magnesio en la zona verde se resuelve casi completamente. Estas líneas son ⁽²⁾:

$$\begin{array}{ll} \lambda_{b1} = 5183,62 \text{ \AA} \text{ (Mg)} & \Delta_{12} = 10,9 \text{ \AA} \\ \lambda_{b2} = 5172,70 \text{ \AA} \text{ (Mg)} & \Delta_{23} = 3,8 \text{ \AA} \\ \lambda_{b3} = 5168,90 \text{ \AA} \text{ (Fe)} & \Delta_{24} = 5,3 \text{ \AA} \\ \lambda_{b4} = 5167,49 \text{ \AA} \text{ (Fe)} & \Delta_{34} = 1,5 \text{ \AA} \\ \lambda_{b4} = 5167,34 \text{ \AA} \text{ (Mg)} & \end{array}$$

En el primer orden se resuelve con claridad la separación entre b_1 y el resto; en el 2° y el 3° orden ya se separan con nitidez y sin dificultad b_2 de b_4 .

Como despedida se invita a observar el espectro del sol del atardecer.

Referencias bibliográficas

⁽¹⁾ COPE J., *The physics of the compact disc*; 1993 Phys. Educ. Vol 28

⁽²⁾ KALINOWSKI, DÍAS, GARCÍA, *Uma alternativa econômica para redes de difração no laboratório de ensino*. Caderno Catarinense de Ensino da Física, Vol

7 N°1, 1990.

⁽³⁾ JENKINS & WHITE, *Fundamentals of Optics, Third Ed.*, McGraw-Hill Book Company, INC. 1957.