

LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

POR

MEDIO DE LAS PROYECCIONES

La enseñanza de la Física en los Colegios Nacionales y Escuelas Normales debe ser esencialmente experimental. Esta es una verdad que ya no se discute en teoría. Casi todos los profesores de la materia han leído *L'Education fondée sur la Science* de Laisant y la *Psychologie de l'Education* de Le Bon; los *Archivos de Pedagogía* han publicado ya en el número de Agosto ppdo. algunos de los párrafos más interesantes de esta última obra. Por consiguiente, sería inoficioso reproducir aquí los argumentos y los testimonios acumulados por los citados autores para demostrar la escasa utilidad del estudio de las ciencias físico-naturales, cuando éstas se enseñan doctrinariamente sin la experimentación debida, así como la influencia sumamente favorable que estas mismas ciencias ejercen sobre el desarrollo mental de los alumnos cuando, en lugar de darles un carácter abstracto y memorista, se recurre á la práctica fecunda y disciplinaria de la observación experimental.

En este orden de ideas solo citaré un hecho que me parece en extremo sugerente. A mediados del siglo XVII, Pascal hacía sus memorables experimentos sobre la pesantez del aire y las presiones hidrostáticas. Mientras tanto el P. Noël, imbuido en las tendencias apriorísticas de los escolásticos y desconocedor del lugar preponderante que debe corresponder á la observación en materia científica, *filosofaba* en lugar de *experimentar*; en una obra extravagante titulada *Le plein du vide*, interpretando los hechos con un criterio metafísico y sentimental y dialectizando á destajo sobre premisas erróneas, pretendía refutar las conclusiones, ahora clásicas, del ilustre geómetra, con argumentos como este: « Accuser la Nature de vide, c'est la rabaisser et la calomnier. »

Ahora bien, ¿de qué serviría enseñar á nuestros alumnos los descubrimientos de Pascal, si les dejáramos salir de nuestras aulas con la mentalidad del P. Noël? (1) Lo que más importa, no es que adquieran conocimientos científicos más ó menos superficiales, sino que sepan pensar, investigar y obrar de acuerdo con un criterio científico, robusto, amplio y penetrante. Pero esta orientación mental de la juventud no se consigue ense-

(1) Este P. Noël es el mismo que definía la luz diciendo que era « un movimiento lumínico de los rayos compuestos de los cuerpos lúcidos que llenan los cuerpos transparentes y no son movidos luminosamente sino por otros cuerpos lúcidos. »

ñando las leyes científicas como si fueran mandamientos del decálogo, sino mediante la observación individual realizada conforme á los preceptos formulados por el inmortal Claudio Bernard. (1)

Descartando unos pocos casos de que no conviene ocuparse, puede decirse que si hay profesores que enseñan todavía la física tan teóricamente como si se tratara del sanscrito ó de la metafísica, no es por ignorancia de los métodos apropiados. Habría que hacer experimentos, pero no se puede; el ayudante no es competente, faltan los aparatos necesarios ó éstos están en mal estado, la clase es demasiado numerosa, etc... De manera que el trabajo se reduce á exponer dogmáticamente las leyes, á describir fenómenos intangibles y á menudo inconcebibles, y cuando más á dibujar los experimentos en la pizarra (!). Los alumnos tienen la satisfacción de ver una chispa de tiza que salta entre los polos de una máquina del mismo material; matraces de tiza de los cuales se desprenden chorros simbólicos de vapor; microscopios esquemáticos que producen imágenes ideales de objetos simulados. Con semejante procedimiento todo resulta imaginario, desde los experimentos hasta la preparación de los alumnos, por más conocimientos y buena voluntad que tenga el profesor.

No niego las dificultades con que se tropieza á menudo cuando se quiere hacer experimentos y manipulaciones en las clases de física; he enumerado ya algunas y reconozco que á veces se presentan otras; pero trataré de demostrar que estas dificultades no son invencibles. En otro artículo describiré algunos experimentos sencillos é instructivos que pueden efectuarse sin instrumentos especiales; indicaré también el partido que puede sacarse de algunos aparatos que existen en casi todos los gabinetes, empleándolos para objetos diferentes de los que se acostumbra generalmente. Por ahora, con el propósito de levantar la objeción relativa á la visibilidad de los experimentos en las clases demasiado numerosas, me concretaré al tema que encabeza estas líneas.

El empleo de las proyecciones luminosas, ventajoso para ilustración de todas las clases en general, presta servicios especiales en las de Física experimental. En primer término hay que señalar los que resultan de la amplificación de los fenómenos, cuya observación directa sería difícil ó imposible. Además, trazando sobre la pantalla las líneas esenciales de la imagen proyectada, se podrá dejar constancia de un fenómeno más ó menos fugaz; sobre este dibujo, el estudio de los elementos geométricos se hará con más facilidad que si hubiera sido preciso tomar directamente en el espacio las medidas correspondientes. Para hacer experimentos comparativos, bastará en muchos casos, superponer dos ó más imágenes producidas simultáneamente. Por último, hay fenómenos poco perceptibles por sí mismos que conviene poner de manifiesto indirectamente mediante la observación de los fenómenos ópticos secundarios que los acompañan. He tratado de elegir los ejemplos que doy más adelante, de manera que ilustren estos diferentes casos, en la esperanza de que, con estas bases, cada profesor podrá combinar, por sí solo, experimentos para proyectar otros fenómenos.

(1) Las reglas sentadas por Claudio Bernard se refieren especialmente á la fisiología, pero muchas de ellas son aplicables también á la física, no solamente cuando se trata de llevar á cabo investigaciones originales para descubrir hechos ó leyes nuevas, sino también en la enseñanza experimental, cada vez que pueda ponerse en práctica el método de *rediscovery* preconizado con tanta razón por los pedagogos ingleses.

En los gabinetes bien instalados se emplean linternas con focos eléctricos ú oxhídricos; pero en muchos casos no se requiere una luz muy intensa y puede bastar la que se obtiene con lámparas de kerosene ó de alcohol carburado. Sin embargo, cuando no se disponga de una linterna perfeccionada, creemos que se conseguirá mejores resultados haciendo los experimentos en la *cámara solar*, con tal que el tiempo se preste para su funcionamiento, como ocurre generalmente en la mayor parte de las provincias argentinas. La instalación de una cámara solar es sencilla y poco dispendiosa; con ella se tiene una luz excelente que puede suministrar sin gasto alguno haces paralelos, convergentes ó divergentes, según lo requiera el caso; además los preparativos para hacerla funcionar son mucho más rápidos que cuando se trata de cualquiera de las linternas antes mencionadas. Por estas razones, en todos los experimentos que describiremos á continuación, supondremos que se emplea la luz del sol. Por otra parte, no dudamos que el lector sabrá idear en cada caso las modificaciones poco importantes que implicaría el uso de una linterna en lugar de la cámara solar.

El órgano esencial de la cámara solar es el *helióstato* cuya descripción se encuentra en todos los tratados de física (en el de Ganot, v. g., véase Microscopio solar). En caso de no tenerlo y de no poder hacer construir por un mecánico un aparato equivalente, se podrá emplear con resultados bastante satisfactorios también, la disposición sencillísima que está representada en la fig. 1: AB es

una abertura circular practicada en el postigo P de un cuarto oscuro (en la mayor parte de los experimentos la oscuridad completa no es necesaria tampoco). E es un espejo que se coloca afuera, dándole la inclinación y orientación convenientes para que reciba los rayos CD del sol y los refleje horizontalmente en la dirección DF hacia el interior del cuarto oscuro. Este espejo podrá colocarse sobre una mesa apuntándolo con libros ú otros objetos de manera que el ayudante

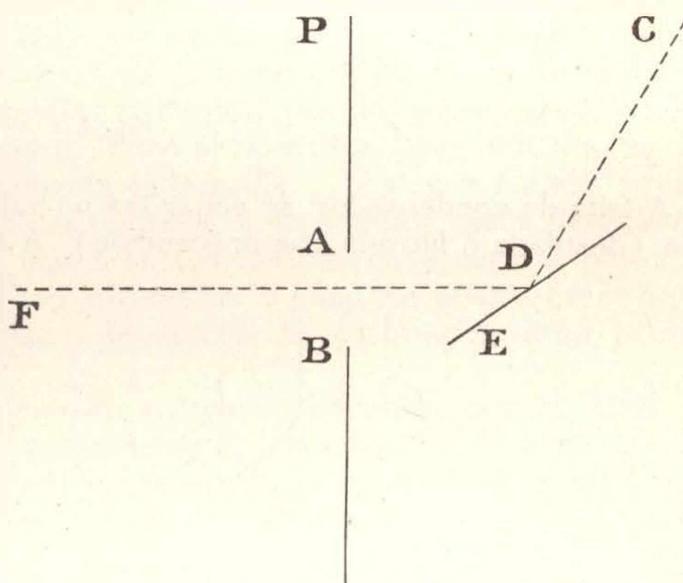


Fig. I

encargado de manejarlo pueda cómodamente modificar su inclinación, consiguiendo así que el haz reflejado no se aleje sensiblemente de la dirección DF a pesar del movimiento aparente del sol.

En algunos experimentos no es necesario obtener en la pantalla una imagen propiamente dicha; basta proyectar la *sombra* de los cuerpos cuyas propiedades se quieren poner de manifiesto. En este caso se colocará los cuerpos en cuestión sobre el trayecto del haz paralelo DF (en F por ejemplo fig. 1). Si se quisiera obtener una sombra *aumentada*, habría que concentrar los rayos por medio de un lente condensador, como se indica en G (fig. 2). En esta figura mn representa un objeto y MN su sombra aumentada en una proporción que se puede hacer variar á voluntad mo-

dificando las distancias de la pantalla ó del objeto al condensador. Esta disposición ofrece además otra ventaja, la de poder proyectar un cuerpo cuyas dimensiones excedan del diámetro del haz de rayos paralelos que penetra en la cámara solar por la abertura AB .

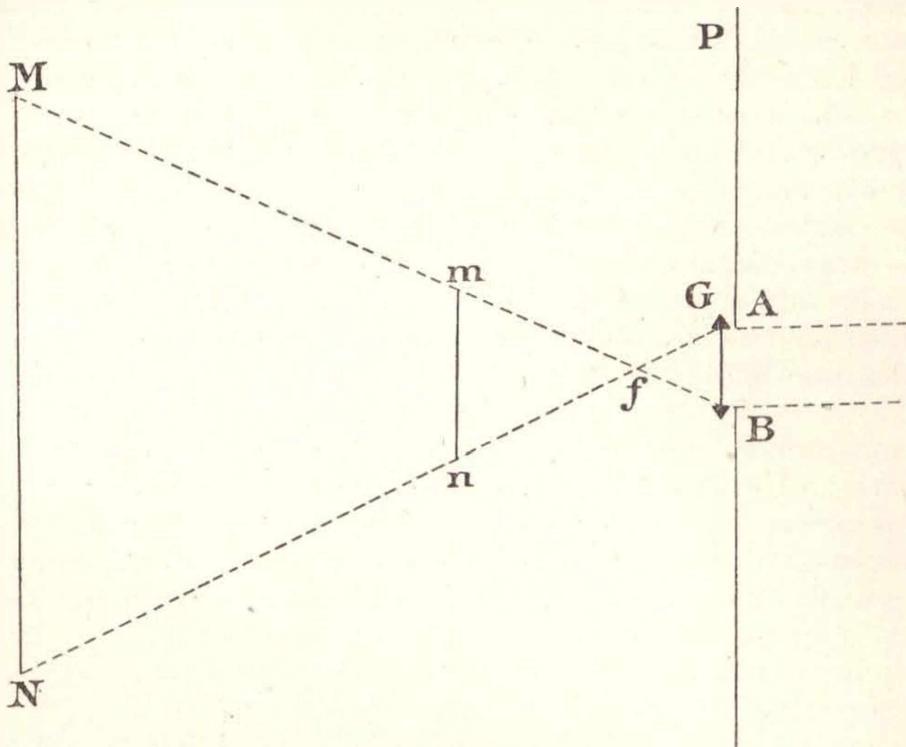


Fig. 2

A falta de condensador, se empleará un balón ó matraz lleno de agua limpia (destilada ó filtrada con precaución). A causa de la aberración de esfericidad debida á los rayos marginales, el foco F (fig. 3) hacia el cual irá á converger el haz solar, no será tan definido en ese caso como cuando se usa un lente; pero con un matraz convenientemente elegido se obtendrá resultados muy satisfactorios todavía. El matraz debe ser esférico, tener paredes delgadas y de espesor uniforme.

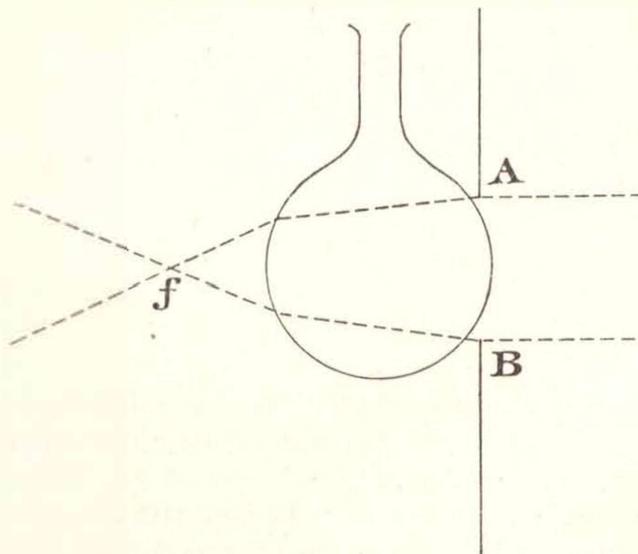


Fig. 3

Cuando se quiere formar en la pantalla una imagen real de los objetos que se proyectan, se adopta la disposición representada en la fig. 4. Más allá del foco de los rayos solares, condensados como queda dicho

más arriba, se coloca el objeto mn de manera que esté convenientemente iluminado. Entre este objeto y la pantalla se coloca un lente convergente L determinando por tanteo la posición que produce el máximo de nitidez en la imagen MN . El aumento será tanto mayor cuanto más convergente

sea el lente, y éste deberá aproximarse al objeto mn tanto más cuanto mayor sea su convergencia. (Probar los lentes de los anteojos, espectroscopios, teodolitos, máquinas fotográficas, etc., que haya en el gabinete).

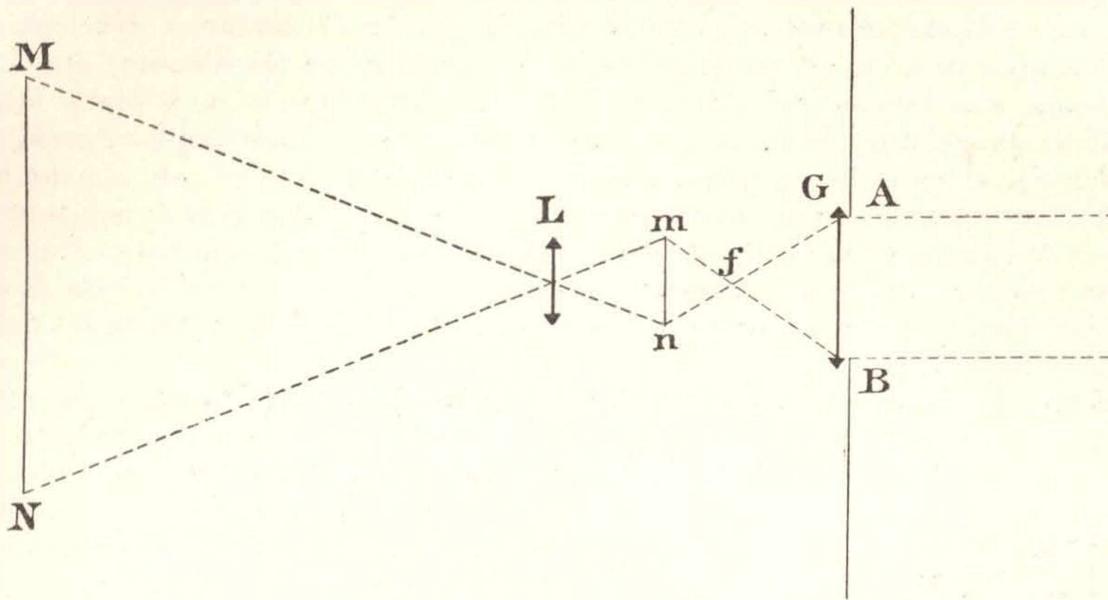


Fig. 4

Si no se tuviera lentes, se podría emplear matraces llenos de agua como para el condensador, pero de diámetro menor y tanto más pequeños cuanto mayor sea el aumento deseado. Con un matraz dado, se obtendrá mayor aumento empleando como líquido refringente, en lugar de agua, sulfuro de carbono cuyo índice es mayor. Pero al manipular este líquido, no habrá que olvidar que es sumamente inflamable y bastante volátil, produciendo vapores muy combustibles también, y en algunos casos detonantes.

Así se obtendrá imágenes más ó menos deformadas; pero á pesar de este inconveniente, que no es tan pronunciado como se podría creer á primera vista, estos lentes de agua ó de sulfuro de carbono podrán prestar grandes servicios.

A veces es necesario determinar el aumento producido por el lente de proyección. Para esto, colocados el lente L y la pantalla MN en la posición que deberán ocupar cuando se efectúe la proyección, se pondrá en el mismo lugar del objeto mn una tarjeta de visita agujereada con la punta de un alfiler en dos puntos cuya distancia d sea conocida. Midiendo sobre la pantalla la distancia D que separa las imágenes de los dos agujeros, se podrá calcular el aumento

$$a = \frac{D}{d}$$

Para la realización de algunos experimentos hay que proyectar diagramas trazados con líneas opacas sobre fondo transparente. Una de las aplicaciones más interesantes de esta clase de proyecciones es la que hizo Amagat para comprobar la exactitud de la ley de Van der Waals relativa á los estados correspondientes de los cuerpos gaseosos (1). Aunque no

(1) Véase L. Poincaré, *La Physique Moderne*. pág. 109.

se presenten á menudo experimentos de esta índole en la enseñanza de la física elemental, creemos ser útil á los profesores de la materia indicándoles uno de los procedimientos más sencillos para la obtención de estos diagramas, en atención á la importancia que tienen para la exposición teórica de muchas cuestiones (representación gráfica de las leyes, descripción de los aparatos cuyos modelos no se encuentran en el gabinete, etc...) Se toma una lámina de vidrio plana, lisa y delgada, p. e. una placa fotográfica sin gelatina (esta se saca fácilmente introduciendo la placa en agua caliente); se moja la placa con saliva; cuando está seca, se calca cualquier dibujo, empleando tinta común ó de copiar, y una pluma más ó menos fina, según los casos (una pluma de dibujo cuando se quiere trazar rasgos finos). Si se disuelve un poco de azúcar en la tinta antes de usarla ó si esta es de copiar, espolvoreando negro de humo sobre las líneas trazadas, se les dará más opacidad (1).

Exp. 1. — Leyes fundamentales de la hidrodinámica. — Se proyecta la *sombra* de una vena líquida producida bajo presión constante al

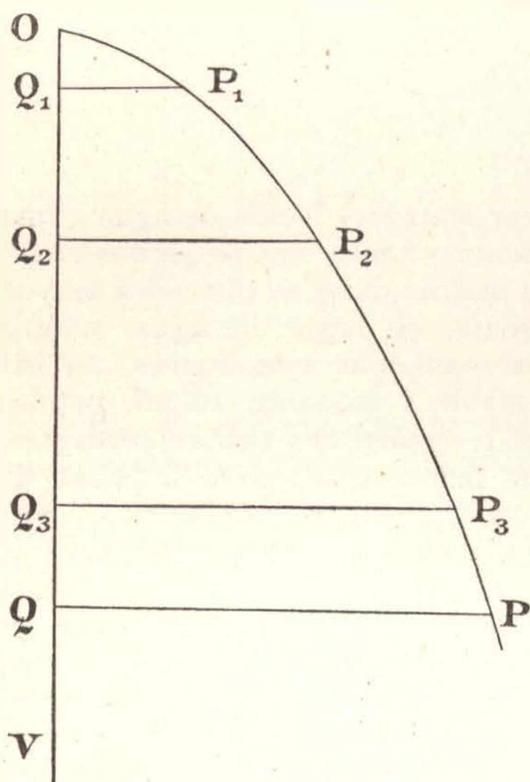


Fig. 5

través de un orificio pequeño colocado de tal manera que la velocidad inicial de las moléculas sea horizontal. Para conseguir la constancia de la presión hidrostática que actúa sobre el líquido en el momento de la salida, se emplea con ventaja un frasco de Mariotte de dimensiones suficientes para que el experimento dure el tiempo necesario.

Se traza sobre la pantalla la trayectoria media del líquido, y con una plomada, la vertical OV que corresponde al origen O de esta curva. Se lleva sobre esta recta, desde O hacia V , longitudes OQ_1, OQ_2, OQ_3, OQ_4 , etc..., proporcionales á los números 1, 4, 9, 16, etc... Desde los puntos Q_1, Q_2, Q_3, \dots se trazan horizontales que encontrarán la curva en P_1, P_2, P_3, \dots . Comprobando que las longitudes $Q_1P_1, Q_2P_2, Q_3P_3, \dots$ son proporcionales á 1, 2, 3, ... se demuestra que la trayectoria estudiada es parabólica.

Además si se admite que la acción de la gravedad sobre las moléculas líquidas tiende solamente á hacerla bajar á lo largo de OV , y que el movimiento resultante es la combinación de esta caída vertical con una traslación horizontal debida exclusivamente á la presión hidrostática inicial, se podrá avaluar la acción ejercida por esta presión en diferentes experimentos sucesivos midiendo en cada caso la longitud de la horizontal trazada desde un punto Q , arbitrario, pero situado siempre á una distancia invariable de O .

(1) Para más detalles sobre este punto consultar v. g. *Optical Projection* by Lewis Wright ó *Sunshine* by Amy Johnson.

Supongamos, por ejemplo, que se haya hecho variar en tres experimentos consecutivos la altura de la carga hidrostática *eficaz* sobre el orificio *O*, dándole sucesivamente los valores *h*, *h'*, *h''*. Las longitudes *QP*, *QP'*, *QP''* serán proporcionales á las velocidades de traslación horizontal de las moléculas líquidas. Ahora bien, estas velocidades, según el principio de Torricelli, deben ser proporcionales á la raíz cuadrada de *h*. Por consiguiente, las medidas tomadas en la forma indicada deberán comprobar que

$$QP : QP' : QP'' :: \sqrt{h} : \sqrt{h'} : \sqrt{h''}$$

En lugar de efectuar directamente esta comprobación que haría necesario el cálculo de las raíces, se puede observar que si, en la fig. 7, se toma $Q, P, = QP'$:

$$\frac{QP}{QP'} = \frac{QP}{Q, P} = \frac{\sqrt{OQ}}{\sqrt{OQ}}$$

$$\therefore \frac{OQ}{OQ'} = \frac{h}{h'}$$

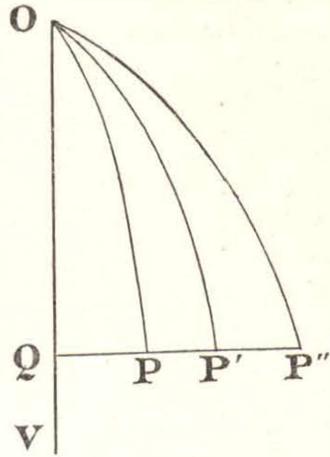


Fig. 6

Por otra parte, la presión hidrostática que equivale á una fuerza instantánea, debe imprimir instantáneamente á las moléculas líquidas un movimiento uniforme. Por consiguiente las rectas $Q_1 P_1, Q_2 P_2, Q_3 P_3 \dots$ de la fig. 5 son proporcionales á los tiempos empleados por una molécula para pasar de *O* á $P_1, P_2, P_3 \dots$, es decir, que los arcos $OP_1, P_1 P_2, P_2 P_3 \dots$ son recorridos en tiempos iguales, en virtud de la convención relativa á las magnitudes $Q_1 P_1, Q_2 P_2 \dots$ (véase más arriba). Ahora bien, si la caída se efectuara solamente bajo la acción de la gravedad, durante los tiempos correspondientes á los arcos $OO_1, OP_2, OP_3 \dots$, los espacios recorridos serían $OQ_1, OQ_2, OQ_3 \dots$. De esto se desprende, para el estudio del movimiento acelerado de los cuerpos graves, un procedimiento más sencillo que los que se describen generalmente en los tratados de Física.

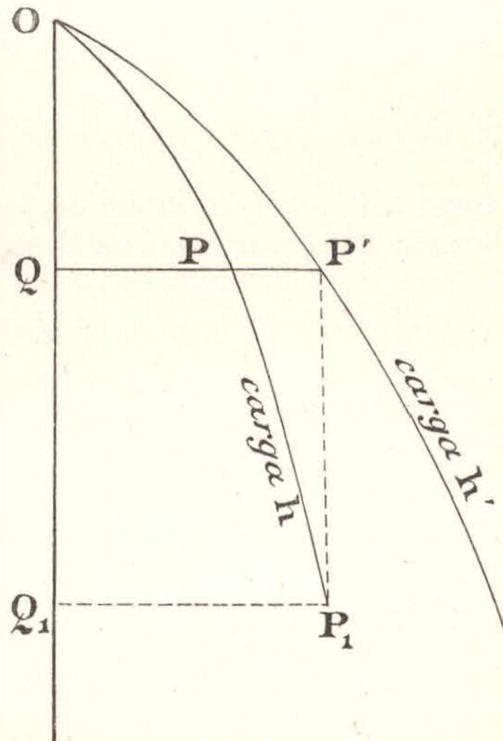


Fig. 7

Convendrá repetir estos experimentos con líquidos de diferentes densidades para comprobar que este factor no influye de una manera sensible sobre la trayectoria (en el vacío no se notaría diferencia alguna).

Podrá completarse el estudio gráfico de las trayectorias parabólicas, determinando el foco, la directriz, las tangentes, etc. . . .

Exp. 2. — Fenómenos capilares. — Muchos de los fenómenos debi-

dos á la capilaridad y á la tensión superficial de los líquidos pueden ser proyectados mediante la disposición representada en la fig. 4.

No habiendo dificultad cuando se trata simplemente de experimentos cualitativos, solo daremos ejemplos de algunas determinaciones cuantitativas sencillas.

Para comprobar la ley de Jurin, se observan las imágenes de dos columnas de un mismo líquido contenidas en dos tubos comunicantes de vidrio, uno de los cuales es capilar ($D < 2$ m/m) p. e. la parte más delgada de una pipeta, mientras que el otro tiene un diámetro de 1 cm. ó más, p. e.: una bureta de Mohr. La comunicación puede establecerse por medio de un tubo de goma (fig. 8), adaptándolo herméticamente á la parte inferior de los dos tubos. El tubo capilar debe estar bien desengrasado. Si el líquido con el cual se quisiera experimentar fuera transparente, sería preciso teñirlo para que la imagen de la columna capilar se destaque mejor de las paredes del tubo; el agua, p. e.: se mezcla con una cantidad conveniente de tinta.

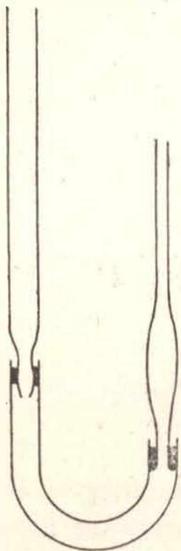


Fig. 8

Sea a el aumento lineal de la lente de proyección determinado como queda dicho más arriba, D el diámetro de la imagen de la columna líquida en el tubo capilar, H la diferencia de nivel entre las dos columnas comunicantes medida sobre la pantalla, d el diámetro verdadero de la columna capilar, h la ascensión ó la depresión producida por la capilaridad. Despreciando la acción poco intensa de las fuerzas capilares en el tubo mayor, tendríamos:

$$\frac{DH}{a^2} = dh$$

y como en virtud de la ley de Jurin el segundo miembro de esta igualdad debe ser constante para un líquido dado, cualquiera que sea el diámetro del tubo capilar, tendremos:

$$DH = \text{const.}$$

lo cual podrá comprobarse haciendo varios experimentos con un mismo líquido en diferentes tubos capilares.

Cuando el líquido moje las paredes del tubo

$$dh = \frac{4S}{b}$$

siendo S la tensión superficial y T la densidad del líquidos. Luego

$$\frac{DH}{a^2} = \frac{4S}{b}$$

$$\therefore S = \frac{bDH}{4a^2}$$

Si D y H están expresados en milímetros, la fórmula precedente dará el valor de la tensión superficial en miligramos por milímetro cuadrado. Haciendo bien los experimentos, se obtendrá aproximadamente:

con el agua.....	$S = 8,$	siendo $b = 1$
» » alcohol.....	$S = 2,3,$	» $b = 0,8$
» » éter.....	$S = 1,7,$	» $b = 0,7$
» la trementina...	$S = 2,8,$	» $b = 0,9$

Este procedimiento para determinar S supone que el ángulo de conjunción α es nulo, lo cual no sucede con el mercurio y en general cuando el líquido no moja las paredes del tubo. En este caso se podrá proceder como sigue: se colocará entre f y L (fig. 4) una placa de vidrio sobre un soporte horizontal, nivelándola con cuñitas de cera blanda, de manera que echando encima una gotita de mercurio, ésta permanezca en equilibrio.

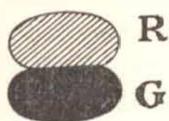


Fig. 9

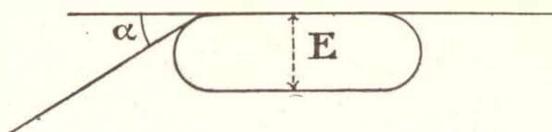


Fig. 10

Se añadirá progresivamente mercurio á esta gota, observando la imagen invertida que se forma en la pantalla. Esta imagen se compondrá de dos partes (fig. 9), una inferior G producida directamente por la gota de mercurio, otra superior más clara R y simétrica con respecto á la primera, producida por los rayos reflejados sobre la placa de vidrio. Se dibujará en la pantalla el contorno de esta imagen, repitiendo la operación cada vez que se añada mercurio á la gota, para poder estudiar las deformaciones consiguientes y las variaciones del ángulo de conjunción. Así se podrá obtener gráficamente (fig. 10) el valor α de este ángulo que corresponde á las gotas de mayor espesor, comprobando que es poco diferente de 45° .

Sea E el espesor de estas gotas (las más espesas), medido sobre la pantalla; el espesor verdadero será:

$$e = \frac{E}{a}$$

Ahora bien, la teoría de la capilaridad indica que, siendo b la densidad del líquido:

$$\frac{e^2 b}{2(1 + \cos \alpha)} = S$$

$$\therefore \frac{E^2 b}{2a^2(1 + \cos \alpha)} = S$$

Esta fórmula podrá servir para el cálculo de S , pero vamos á trasformarla para que este ejercicio pueda hacerse con alumnos que no saben trigonometría. Teniendo en cuenta que:

$$1 + \cos \alpha = 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

resulta:
$$\frac{E^2 b}{4a^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}} = S.$$

Tracemos ahora la bisectriz AB del ángulo α (fig. 11); tomemos $AC = E$ y levantemos la perpendicular CB á AC , tendremos en el triángulo ABC :

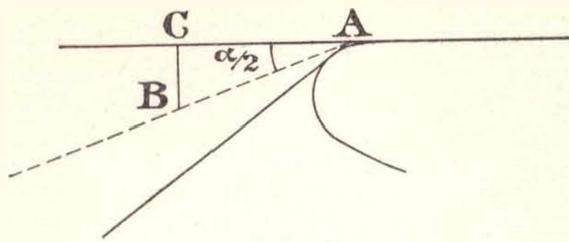


Fig. II

$$\frac{AC}{\cos BAC} = AB$$

$$\frac{E}{\cos \frac{\alpha}{2}} = AB$$

$$\text{Por consiguiente: } S = \frac{AB^2 b}{4 a^2}$$

debiendo medirse AB en milímetros. Con el mercurio, tomando $b = 13,6$, se deberá obtener para S un valor poco diferente de 55.

Recomendamos también el empleo de las proyecciones luminosas para repetir los experimentos fundamentales de Lippmann sobre la electrocapilaridad y para observar los movimientos de la columna mercurial en el electrómetro capilar ideado por dicho sabio. Este aparato no existe en los gabinetes de los colegios, pero reduciéndolo á sus partes esenciales, sin microscopio, su construcción no ofrece grandes dificultades; vale la pena tratar de vencerlas en vista del interés teórico y práctico á la vez de este electrómetro. No pudiendo extendernos sobre este punto, remitimos el lector á los tratados de Física que lo desarrollan detalladamente, como ser los de Jamin y Ganot.

Si se quisiera solamente poner de manifiesto *grosso modo* la influencia del potencial eléctrico sobre los fenómenos capilares, se podría proyectar

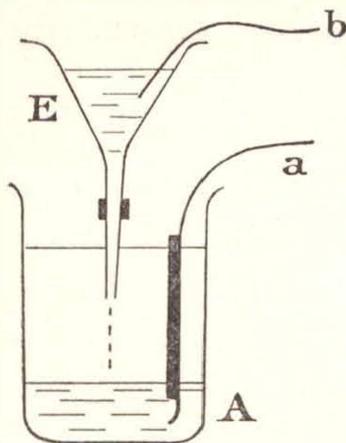


Fig. 15

el experimento indicado en la fig. 15. A es un recipiente de caras planas, paralelas y transparentes, que contiene mercurio en su parte inferior, y encima de este, agua acidulada con $\frac{1}{2}$ de ácido sulfúrico; t es un tubo estirado que penetra en dicho líquido y está adaptado á un embudo E en el cual se echa mercurio en cantidad exactamente suficiente para que baje hasta la extremidad del tubo t sin gotear, pero de manera que el menor aumento de presión de arriba hacia abajo haga caer una gota; a es un alambre de cobre que atraviesa el agua acidulada y llega hasta el mercurio del recipiente A ; este alambre debe estar aislado del agua acidulada por medio de una capa protectora adecuada; b es otro alambre que penetra en el mercurio E . Cuando se pone en contacto los alambres a y b , el mercurio gotea por la extremidad del tubo t , porque, igualándose los potenciales en A y E , se anula la presión electrocapilar que repelía hacia arriba la columna líquida contenida en dicho tubo.

Exp. 3. — Descomposición de una vena líquida en gotas.—Para comprender este fenómeno hay que tener presente que la superficie de los líquidos está sometida á esfuerzos de tensión análogos á los que produciría una membrana elástica que tendiera constantemente á contraerse con mayor ó menor energía, según el valor que posea el coeficiente característico S ya considerado en los experimentos anteriores. En el caso de

una vena líquida, esta membrana superficial tiende á comprimir las moléculas internas y á adelgazar la sección transversal, pero como la cohesión del líquido es limitada, al cabo de algún tiempo la vena se rompe y se divide en gotas. Se comprende que cualquier causa que disminuya la tensión superficial, ha de contrarrestar la producción de este último fenómeno: esto es lo que ocurre cuando se hace caer vapor de éter sobre una vena de agua ⁽¹⁾; este se disuelve en la superficie del líquido y la tensión S , primitivamente igual á 8, adquiere un valor más próximo á 1,7 (coeficiente correspondiente al éter puro; véase exp. anterior).

Otra manera de contrarrestar la presión ejercida de afuera hacia adentro por la capa superficial, sería haciendo intervenir una presión dirigida en sentido contrario, es decir, de adentro hacia afuera. Supongamos, por ejemplo, que se aproxime á la vena líquida una barra de lacre electrizada, las gotas desaparecerán casi por completo, porque en virtud de la influencia electrostática, en la superficie del líquido nacerán cargas eléctricas cuya tensión actuará precisamente de adentro hacia afuera, como lo demuestran los experimentos clásicos sobre las superficies deformables electrizadas (burbuja de jabón, red flexible, etc. . .) y el viento eléctrico.

Como estos fenómenos serían difícilmente perceptibles observándolos directamente, conviene proyectar sobre una pantalla la *sombra* de la vena. A este efecto se toma un tubo de vidrio estirado de manera que el orificio tenga aproximadamente 2 mm de diámetro; poniéndolo en comunicación con un surtidor por medio de un tubo de goma, se produce un chorro casi vertical de 1 m más ó menos de altura. La parte útil de este chorro (aquella donde se forman las gotas) debe ocupar la posición indicada en mn (fig. 2).

Exp. 4. — Deformaciones elásticas de los metales. — Se cuelga verticalmente un alambre, fijando sólidamente su extremidad superior A y poniéndolo en tensión con pesos conocidos P . Cerca de la extremidad inferior se adapta un índice horizontal I que se proyecta sobre la pantalla con un lente cuyo aumento es a para observar los desplazamientos verticales x de su imagen. Los alargamientos ó acortamientos efectivos del alambre AI son iguales á $\frac{x}{a}$. Si D es el diámetro del alambre medido sobre la pantalla, el diámetro verdadero es

$$d = \frac{D}{a}$$

En cuanto á la longitud inicial $l = AI$, puede medirse directamente.

Con estos datos se podrá comprobar las siguientes leyes fundamentales:

1º La variación de longitud es proporcional á la intensidad de la fuerza de tensión.

2º Es proporcional también á la longitud del alambre.

3º Por último, es inversamente proporcional á la sección, es decir, al cuadrado del diámetro.



Fig. 12

(1) El vapor de éter, más denso que el agua, cae realmente como si fuera un líquido.

Estas leyes son exactas dentro del límite de elasticidad del metal empleado, es decir, cuando el peso tensor no es bastante fuerte para producir deformaciones permanentes; más allá de este límite los alargamientos son mayores de lo que indican estas leyes.

Si se emplea un alambre de cobre de $1\text{m}/\text{m}^2$ de sección y 1m de largo, un peso de 3 kg. producirá un alargamiento de $1/4$ de milímetro; por consiguiente si la lente empleada aumenta 20 veces, la imagen del índice sufrirá en ese caso un desplazamiento de $5\text{m}/\text{m}$. Comprobar que pesos de 6 kg., 9 kg., 12 kg. producen alargamientos 2, 3, 4 veces mayores y que dentro de estos límites la deformación no persiste cuando se retira el peso, volviendo entonces el índice á su posición primitiva. Más allá de 12 kg. los alargamientos serán más pronunciados, y una vez que se haya producido la deformación, el índice no podrá volver exactamente á su posición primitiva. Pero no convendrá emplear pesos demasiado fuertes si se quiera evitar la ruptura del alambre. En condiciones normales, un alambre de cobre de $1\text{m}/\text{m}^2$ de sección se rompe bajo la acción de un peso de 42 kg., pero si no están realizadas todas las condiciones que se admiten en la teoría de la resistencia de materiales, la ruptura podrá producirse bajo la acción de un peso menor. Por ejemplo, un alambre *surmené* por una serie de esfuerzos sucesivos superiores al límite de elasticidad se romperá más fácilmente que un alambre que trabaja por primera vez.

Refiriéndonos á la 2ª y 3ª ley, observaremos que en el primer caso citado, si la longitud del alambre fuera 2m , el alargamiento sería de $1/2$ milímetro; y en igualdad de otras condiciones, si el diámetro de la sección fuera 2 veces menor, el alargamiento resultaría 4 veces mayor.

Exp. 5. — Observaciones electroscópicas y electrométricas por medio de las proyecciones. — Proyectando la sombra, ó mejor, la imagen de las hojas de un espectroscopio, se aumentará considerablemente la sensibilidad del instrumento. Para utilizarlo como electrómetro, bastará medir gráficamente los ángulos de desviación, trazando sobre la pantalla los lados de estos ángulos, ó sea las posiciones sucesivas que toman las imágenes de las hojas movibles. La graduación se efectuará llevando sucesivamente al electroscopio una serie de cargas iguales, tomándolas p. e. con un plano de prueba sobre una esfera conductora electrizada y observando las desviaciones correspondientes. La esfera deberá tener dimensiones suficientes para que al tocarla con el plano de prueba, no se extraiga sino una cantidad de electricidad despreciable en comparación con la carga total.

Observando el electroscopio á simple vista, no se obtienen indicaciones bien perceptibles, sino cuando se establece entre las hojas y la armadura de la jaula una diferencia de potencial de 100 volts ó más; pero empleando las proyecciones se aprecian desviaciones mucho menores. Otro artificio conveniente para aumentar la sensibilidad del instrumento, consiste en producir previamente una desviación de unos 30° por medio de una carga auxiliar; estando las hojas en esa posición, una diferencia dada de potencial producirá desviaciones más iniciadas que si la carga inicial hubiera sido nula. El empleo de un platillo condensador permite apreciar diferencias de potencial mucho más pequeñas todavía, hasta de 1 volt, como las que produciría una sola pila.

Gran número de experimentos pueden hacerse con el electroscopio: determinación del signo de una carga, electrización por influencia, comparación de las potenciales en diferentes puntos de una superficie conductora

y más generalmente de un campo electrostático, estudio de las propiedades de los condensadores, demostración de la conductibilidad de los gases ionizados, etc...

Exp. 6.— Líneas de fuerza de los campos eléctricos.— Pegar sobre una lámina de vidrio dos redondeles de papel de estaño, dejando entre ellos un intervalo de unos 15 cm. Colocar la lámina sobre soportes aisladores y unir los discos conductores con los dos polos de una máquina electrostática por medio de dos varillas metálicas. Hacer funcionar la máquina y proyectar sobre la lámina de vidrio crines cortadas en pedacitos de algunos milímetros de largo.

Así se obtendrá un espectro eléctrico análogo al espectro magnético que se forma proyectando limaduras de hierro en el campo engendrado por un imán.

Para proyectar este experimento en el techo del aula, basta hacer llegar debajo de la lámina de vidrio el haz solar divergente que parte del foco f del condensador y reflejarlo por medio de un espejo E inclinado á 45° sobre el horizonte.

Si se quisiera proyectar sobre el piso la sombra de las líneas de fuerza para dibujarlas, habría que colocar el espejo como se ve en E' (fig. 13). Para efectuar la proyección sobre una pantalla vertical, se necesitarían dos espejos colocados sobre el trayecto de los rayos luminosos antes y después de la lámina V .

Convendrá repetir el experimento uniendo solamente una de las redondeles de estaño con un polo de la máquina, y la otra con el suelo. Póngase también las dos redondeles en comunicación con el mismo polo. Obsérvese las modificaciones que experimente el campo cuando se introduce en él un conductor aislado ó en comunicación con el suelo, á consecuencia de los fenómenos de inducción que se producen.

Exp. 7.— Líneas de fuerza de los campos magnéticos.— La disposición que conviene para este experimento es análoga á la anterior, pero en lugar de crines se emplea limadura de hierro, *muy fina y en cantidad muy pequeña*, haciéndola caer al través de un tamiz.

La lámina V se colocará (sin los redondeles del exp. precedente) encima de un imán rectilíneo ó en forma de herradura, paralelo ó perpendicular á su plano.

Para poner de manifiesto los fenómenos de imanación por influencia, se colocará un pedazo de hierro al lado del imán, en contacto inmediato con éste ó á cierta distancia.

Estudiar también los campos producidos por dos ó más imanes, dándoles diferentes orientaciones. Reemplazar los imanes propiamente dichos por electro-imanés.

Para obtener el espectro de un campo electro-magnético, se colocará la

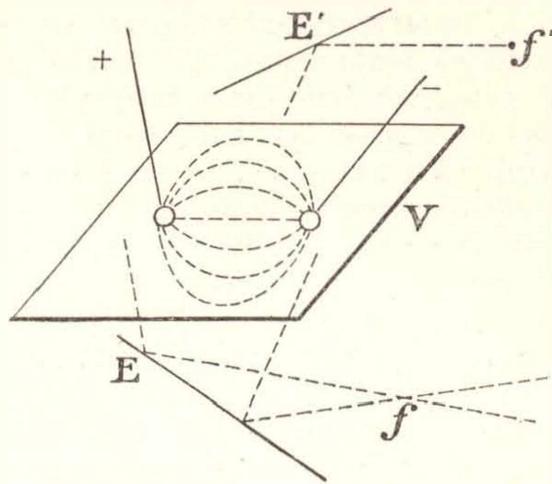


Fig. 13

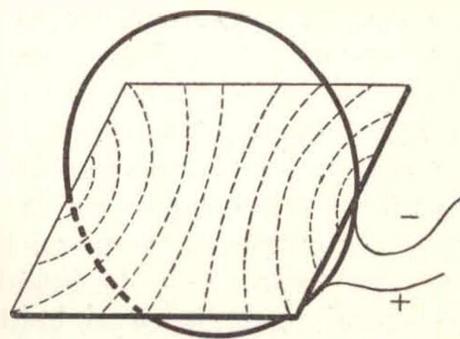


Fig. 14

lámina de vidrio dentro de un aro formado por muchas espiras de alambre conductor, por las cuales se hará pasar una corriente *bastante intensa* (fig. 14).

La proyección de los espectros magnéticos puede hacerse también en otra forma indicada por Molteni. Se coloca en *mn* (fig. 4) una cubeta de vidrio de caras planas y paralelas que contenga glicerina ú otro líquido viscoso. Si se echa limadura de hierro en la glicerina, la viscosidad del líquido contrarrestará en parte la influencia de la gravedad, y la caída se efectuará lentamente. Colocando un imán dentro de la cubeta, la atracción ejercida por éste sobre la limadura, en combinación con la resistencia viscosa de la glicerina, mantendrá en suspensión las partículas de hierro y las agrupará en filas, según las líneas de fuerza del campo. El experimento se efectúa mejor empleando un electro-imán; mientras no pasa la corriente se ve en la pantalla una especie de nieve oscura; pero cuando se cierra el circuito, se observa que la limadura deja de caer y se orienta formando un espectro magnético.

Exp. 8.—Partículas electrizadas en las llamas. — Para demostrar la existencia en las llamas de partículas electrizadas de ambos signos, se hace pasar entre dos platillos (fig. 16) la columna de gases calientes producidos por la combustión y se proyecta sobre

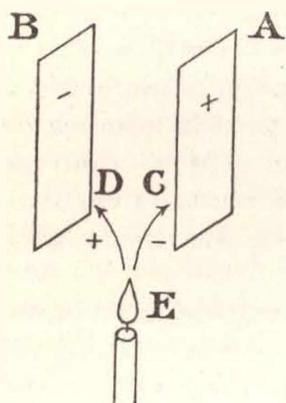


Fig. 16

la pantalla la *sombra* de esta columna. Cuando los platillos no están electrizados, los gases suben verticalmente, pero si se pone uno de los platillos en comunicación con el polo + de una máquina electrostática y el otro con el polo —, la columna se divide en dos ramas *C, D*, como lo indica la figura 16.

Este hecho se explica por las teorías modernas de la *ionización*. En ciertas condiciones, por ejemplo en los fenómenos de combustión y en otras reacciones químicas, los átomos que antes se suponían indivisibles, se comportan en realidad como si fueran disociables parcialmente en dos fracciones, electro-positiva la una y electro-negativa la otra. En consecuencia,

se admite que los átomos neutros están constituidos por la reunión de partículas electrizadas, llamadas *iones* que llevan cargas positivas unas, y negativas otras.

Así la acción de los platillos *A* y *B* sobre los gases producidos en la llama *E*, se reduce á un fenómeno de atracción electrostática.

Exp. 9.—Condensación de los vapores bajo la influencia de los iones. — Por lo que dijimos en el exp. 3 sobre la influencia de la electrización, en la tensión superficial de los líquidos, se comprenderá que la presencia de los iones en un vapor ha de facilitar su condensación. En realidad la formación de una gota líquida á expensas de un vapor no puede tener lugar sin la intervención de un ión ó de una partícula sólida que constituya un núcleo alrededor del cual puedan irse depositando capas sucesivas de líquido. A pesar de lo que generalmente dicen los tratados de física al hablar de este punto, la condensación no se produce espontáneamente, aun cuando está sobresaturado el vapor.

En efecto, la tensión de vapor en equilibrio con un líquido terminado por una superficie cóncava es menor que la tensión máxima del líquido terminado por una superficie plana á la misma temperatura. Para probarlo, consideremos en un recinto cerrado una masa de agua en la que

penetra un tubo que la moja. El líquido sube en el tubo, adquiriendo una superficie terminal superior cóncava. Pero á consecuencia de la diferencia de nivel, la presión del vapor es menor en b que en a (fig. 17). La tensión máxima normal supera, pues, la tensión máxima en b en una cantidad p proporcional á la ascensión $ab = h$, es decir que

$$p = kh$$

Por otra parte, h es inversamente proporcional al radio r del tubo, de manera que

$$h = \frac{k'}{r}$$

$$\therefore p = \frac{kk'}{r}$$

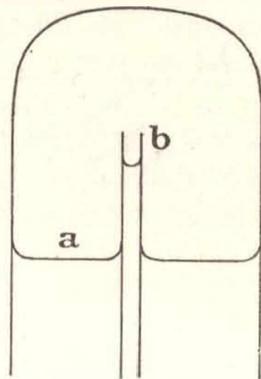


Fig. 17

Pero si el líquido moja perfectamente el tubo, siendo nulo el ángulo de conjunción, r representará el radio de la superficie esférica en b , y podremos decir que en una superficie cóncava la tensión máxima del vapor es inferior á la normal en una cantidad inversamente proporcional al radio de la esfera. Si la superficie, en lugar de ser cóncava, fuera convexa, esta diferencia tendría el mismo valor absoluto, pero sería de signo contrario; en otros términos, en una superficie convexa la tensión máxima del vapor supera la tensión normal en una cantidad inversamente proporcional al radio de la esfera.

Sentado esto, veamos lo que ha de suceder, cuando empieza á formarse una gota; ésta tomará la forma de una esfera infinitamente pequeña, correspondiéndole una tensión infinita, de manera que no podrá haber equilibrio y la condensación será imposible. Para que ésta pueda efectuarse, será necesario que la gota se forme alrededor de un núcleo preexistente que imprima á la primera capa líquida depositada una curvatura tal que la tensión no sea superior á la del vapor sobresaturado que la rodea. No estando realizada esta condición, será preciso que otra fuerza, como las electrostáticas, venga á modificar la tensión superficial, para producir un resultado equivalente. Esto sucederá precisamente cuando el vapor se encuentre *ionizado*.

Para comprobarlo, se proyecta la sombra de un chorro de vapor que sale por un tubo de pequeño diámetro de un matraz en el cual se hace hervir agua. En condiciones normales, cuando no haya muchos polvos en suspensión en la atmósfera del gabinete, esta sombra será apenas visible. Pero produciendo cerca de la extremidad del tubo un efluvio eléctrico por medio de un alambre en comunicación con el polo de un carrete de Ruhmkorff ó de una máquina electrostática, la sombra se volverá mucho más densa á causa de la mayor cantidad de vapor condensado. Igual resultado se obtendrá con los rayos Röntgen y las radiaciones emitidas por las sales de radio, ó colocando una llama debajo del chorro de vapor. Acercándole una barra de fósforo, se obtendrá también una condensación abundante.

Al hacer estos experimentos, se observan á menudo los colores de difracción característicos de las neblinas.

Exp. 10. — Análisis óptico de los sonidos. — En la fig. 18 *T* es un tubo de 3 á 4 cm. de diámetro, abierto en una de sus extremidades y tapado en la otra por una membrana delgada *M* (película de goma con que se hacen los globos para los nenes, ó pedazo de papel engomado).

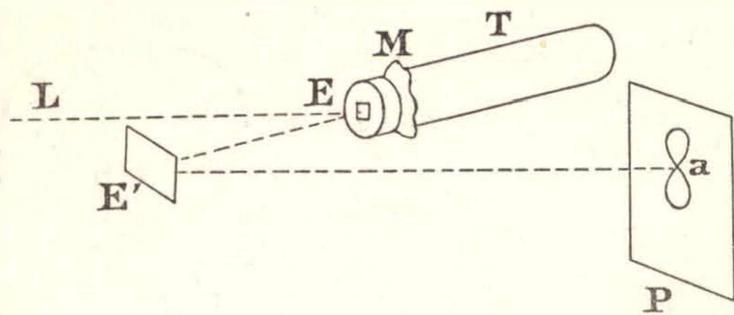


Fig. 18

En el centro de esta membrana se pega un pedacito de espejo *E* de 1 cm. de diámetro. (Podrá tomarse un fragmento de un cobre-objeto para observaciones microscópicas, estañándolo con una aleación compuesta de 100 partes de estaño y 3 partes de zinc; esta aleación se extiende con un

trapo sobre la superficie del vidrio previamente limpiada y desengrasada con cuidado. Si el espejo no fuera muy liviano, dificultaría las vibraciones de la membrana).

L es un pincel delgado de luz que después de haberse reflejado sucesivamente en los espejos *E* y *E'*, produce en la pantalla *P* una mancha luminosa muy pequeña *a*. Se fija el tubo *T* y el espejo *E'* sobre dos soportes, asegurándolos convenientemente para que la mancha *a* esté bien definida y permanezca inmóvil mientras no se haga vibrar la membrana *M*.

Cantando en la extremidad abierta del tubo *T*, cada nota producirá en la pantalla una línea luminosa característica á causa de las vibraciones transmitidas al espejo *E* y de las desviaciones consiguientes del haz luminoso. Para interpretar este fenómeno, hay que recordar la persistencia de las impresiones retinianas muy breves y tener presente que las vibraciones sonoras son muy rápidas.

Exp. 11. — Imitación de algunos fenómenos de acústica y óptica con ondas producidas en la superficie del agua. — Tomar un vidrio

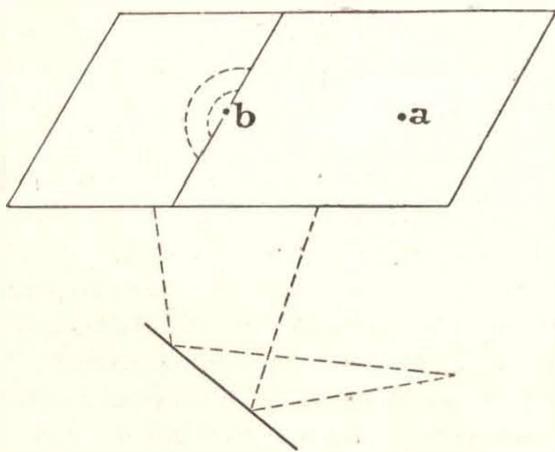


Fig. 19

de ventana; guarnecer el perímetro con una orla de masilla ó cualquier otra sustancia impermeable al agua y adherente al vidrio, para formar una cubeta bastante larga y ancha, pero de unos pocos centímetros de profundidad. Colocar esta cubeta horizontalmente haciéndola descansar en el borde de dos mesas. Echar agua hasta obtener una capa de 1 ó 2 cm. de espesor.

Hacer llegar debajo de la cubeta un haz de luz divergente como queda indicado en la fig. 19, para proyectar en el techo la sombra de las ondas

que se producirán tocando la superficie del líquido con el dedo ó la punta de una lapicera.

Principio de Huyghens: producir en *a* una onda; interceptarla con un obstáculo en el cual se haya practicado una abertura *b* de pequeñas

dimensiones. El punto b se comportará como un nuevo centro de ondulaciones.

Reflexión: interceptar la onda producida en a con una chapa de hojalata plana ó encorvada en forma de cilindro. Si el cilindro tiene su concavidad vuelta hacia el punto a , las ondas reflejadas parecerán salir de un punto situado al otro lado del obstáculo y equivalente al foco virtual de los espejos convexos. En el caso de una lámina plana, se comprueba fácilmente que este centro virtual de emisión es simétrico del centro verdadero a con respecto al obstáculo.

Interferencias: tocar simultáneamente con dos dedos dos puntos a y b (fig. 20) poco distantes en la superficie del agua, repitiendo varias veces esta operación con cierta rapidez, sin destruir el sincronismo ni cambiar la posición de los puntos tocados. Se observa una serie de líneas brillantes dispuestas radialmente, más ó menos como lo demuestra la figura, en A, B, C, D, E , y que se destacan sobre un fondo mucho más sombrío.

He ahí la causa de este fenómeno: la agitación general producida en toda la masa del líquido, tiene por efecto aumentar su poder absorbente para la luz, de manera que ésta no puede transmitirse sino en pequeña cantidad. Sin embargo, hay puntos como los que constituyen las líneas A, B, C, \dots en los cuales el movimiento que produciría la onda a si estuviera sola, se compensa con el que tiende á producir la onda b , por ser éste en cualquier instante igualmente intenso, pero dirigido en sentido contrario. En dichos puntos el agua permanece inmóvil y trasmite mejor la luz.

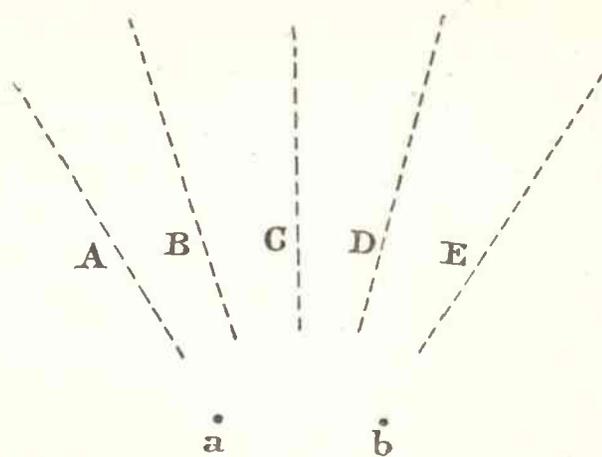


Fig. 20

Refracción: los fenómenos de refracción no pueden imitarse con mucha nitidez. Sin embargo se puede tratar de hacer algunos experimentos de esta índole aumentando la resistencia del agua á la propagación de las ondas en los puntos donde se quiere obtener un efecto análogo al que producen las sustancias refringentes sobre los rayos luminosos. Para esto se sumerge en la cubeta una lámina de vidrio ó de metal convenientemente recortada. Una lámina circular, p. e., produce teóricamente el mismo efecto que una lente cilíndrica.

Exp. 12. — Fatiga de la retina. Contraste de los colores. — Tapar la abertura de la cámara solar con una hoja de cartón negro en cuyo centro se deja un agujero circular de unos 4 á 5 cm. de diámetro. Proyectar sobre la pantalla por medio de una lente la imagen aumentada de este círculo. Fijar la vista durante unos 20 segundos sobre un mismo punto del disco brillante. Retirar el diafragma de cartón para iluminar bruscamente una zona mayor de la pantalla. La parte ocupada precedentemente por el disco brillante parecerá mucho más oscura que el resto de la pantalla.

Repetir el experimento colocando delante del diafragma una lámina de vidrio colorado. Cuando se ilumine toda la pantalla, la parte en que se veía al principio un disco colorado, parecerá verde (color complementario).

tario del rojo). Empleando un vidrio amarillo, se obtendrá al final del experimento una impresión azul; con un vidrio azul, ésta sería amarilla, etc....

A falta de vidrios de color, se puede filtrar la luz al través de líquidos coloreados, con tal que éstos formen una lámina delgada y de caras paralelas. Para fabricar recipientes que satisfagan estas condiciones, se toma dos láminas de vidrio incoloro, separándolas por medio de un tubo de goma doblado en forma de herradura y apretándolas con dos elásticos como se ve en la fig. 21. Con una solución de permanganato de potasio se obtendrá una pantalla de color rosado; con bicromato de potasio, roja; con cromato neutro de potasio, amarilla; con sulfato de cobre, verde; con la misma sustancia en solución amoniacal, azul.

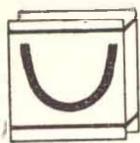


Fig. 21

Tyndall efectuaba este experimento en una forma mucho más brillante todavía, proyectando sobre la pantalla un espectro solar é iluminando después la misma zona con luz blanca uniforme, con lo cual hacía aparecer un espectro complementario del natural. Pero para la producción nítida de este fenómeno se requieren ciertas precauciones.

Exp. 13. — Comprobación de la ley de Descartes y determinación de los índices de refracción. — Aunque no se trate precisamente de una proyección, creemos conveniente dar á conocer este experimento porque presenta bastante interés y se realiza en la cámara solar con los mismos elementos que sirven para efectuar proyecciones propiamente dichas.

En la fig. 22, *R* representa un recipiente de vidrio de caras paralelas; *h* una hoja de papel pegada sobre una de estas caras y en cuyo centro se

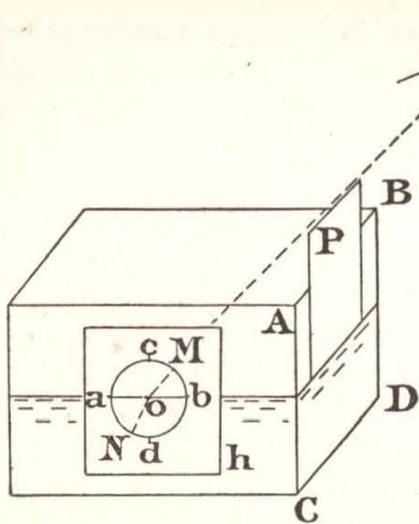


Fig. 22

ha recortado un círculo, *a b c d*, señalando las extremidades del diámetro horizontal *a b* y del vertical *c d*; *E* un espejo que sirve para reflejar más ó menos oblicuamente dentro de *R* el haz de rayos horizontales de la cámara solar.

Se señala de cualquier manera sobre el vidrio del recipiente el centro *o* del círculo *a b c d* (p. e., con una pelotita de cera, una migajita de pan) determinándolo como intersección, de los diámetros *a b* y *c d*.

Estando preparado así el recipiente, se echa el agua ó el líquido con el cual se quiere operar, cuidando que llegue exactamente al nivel de diámetro *a b*, á cuyo efecto se inclina ligeramente el recipiente hacia la derecha ó la izquierda, si es necesario. Se añade algunas gotas de leche para que el agua se vuelva opalescente ó se le comunica fluorescencia por medio de una pequeña cantidad de una sustancia apropiada. Cualquiera de estos dos artificios permite seguir la marcha de los rayos luminosos en el líquido. Muchos colores de anilina son fluorescentes, espe-

cialmente el que se conoce con el nombre de fluoresceína, empleado á veces como tinta colorada.

Limitando el haz de rayos que incide sobre el líquido por medio de una pantalla cuya arista superior sea paralela á la AB de la cuba, se podrá observar al través de la cara ACR una línea de separación muy nítida entre la zona opalescente ó fluorescente y el resto del líquido más oscuro. Habrá que colocar el espejo E y la pantalla P de tal manera que esta línea de separación arranque exactamente del punto o . Para esto se levantará más ó menos la pantalla P , manteniendo su parte inferior aplicada contra la cara $ABCD$ de R .

Señalando sobre el perímetro del círculo $abcd$ el punto N donde empieza la zona brillante del líquido, se tendrá los elementos necesarios para determinar el rayo refractado ON . En cuanto al rayo incidente correspondiente OM , se determina también fijando el punto M por medio de una regla cuyo canto se hace pasar por o , aplicándolo al mismo tiempo, sobre la arista superior de la pantalla P .

Supongamos que se haya transportado sobre una hoja de papel los puntos a, b, c, d, o, M, N ; será fácil demostrar gráficamente la ley de Descartes. Bastará comprobar que el cuo-

ciente $\frac{MM'}{NN'}$ (fig. 23) es inde-

pendiente de la inclinación de los rayos incidentes. Este cuo-

ciente es igual al índice de refracción que en el caso del agua es $\frac{4}{3}$.

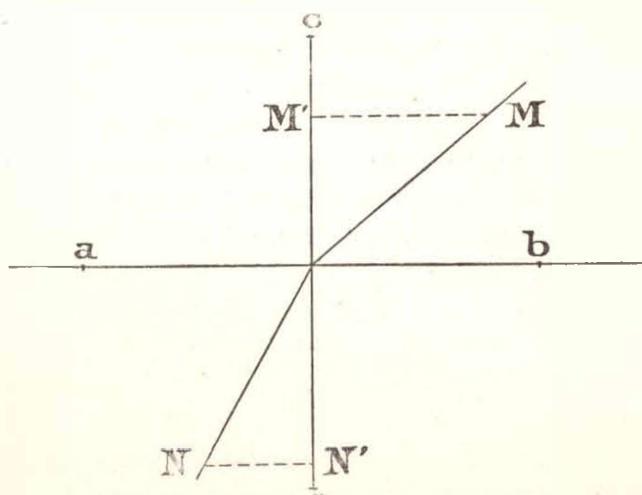


Fig. 23

Exp. 14. Refracción atmosférica irregular. — Tapar la abertura de la cámara solar con un diafragma de 1 á 2 cm. de diámetro. Formar en la pantalla la imagen de este diafragma, enfocando convenientemente con una lente. Entre la lente y la pantalla y debajo del haz de rayos, colocar una placa metálica calentada al rojo. La corriente de aire caliente, que se levantará de la placa, producirá la distorsión de la imagen, haciendo aparecer á veces otro disco, cerca del primero. Este fenómeno es una imitación de la refracción atmosférica irregular.

Exp. 15. — Arco iris. — El arco iris se produce, como es sabido, por la refracción de los rayos solares al través de las gotas de lluvia. La marcha de los rayos que dan lugar al arco es la que indica la fig. 24. Inciden en S desviándose más ó menos según el índice de refracción correspondiente á cada color; los rojos toman la dirección SR , los violetas más refrangibles la SV . Después de una reflexión interna en R y V , emergen de la gota en R y V , donde sufren una nueva refracción, de manera que los rayos rojos emergentes formen con la dirección de incidencia un ángulo de 42° , los violetas de 40° .

La teoría indica que estos resultados son independientes del tamaño de las gotas; por consiguiente deberán obtenerse también con una esfera de agua de diámetro cualquiera. Por ejemplo, en el trayecto del haz

que penetra en la cámara, coloquemos un balón de vidrio lleno de agua (fig. 25). Formaremos así un arco iris que podrá recibirse sobre una pantalla colocada entre el balón y la ventana de la cámara solar, debiendo

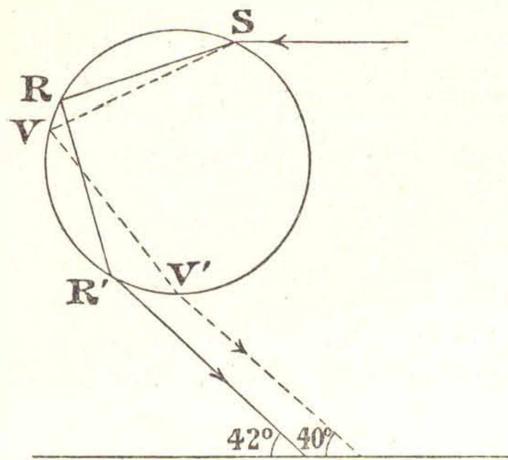


Fig. 24

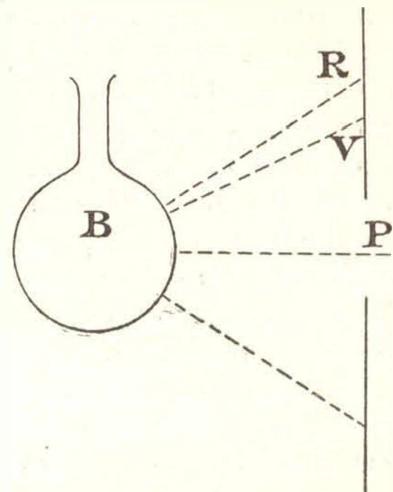


Fig. 25

naturalmente esta pantalla tener una abertura en el medio para no interceptar los rayos incidentes.

Midiendo las distancias BP del balón a la pantalla y RP , del eje del haz incidente a la faja roja del arco, se podrá calcular el ángulo de desviación α de los rayos rojos por la fórmula

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{RP}{BP}$$

comprobando de esta manera que α es próximamente igual a 42° . Una operación análoga para los rayos violetas daría $\alpha = 40^\circ$.

Los rayos que sufren dos reflexiones internas producen á su vez otro arco; pero éste es mucho menos visible que el primero á causa de la pérdida de luz que ocasiona esta doble reflexión. La marcha de los rayos en ese caso es la que indica la fig. 26. La desviación experimentada por los rayos rojos es de 51° , la de los violetas de 54° . Por consiguiente en este segundo arco los colores estarán invertidos, es decir, el rojo adentro y el violado afuera. Para verlo bien es preciso emplear agua muy limpia y alejar bastante el balón de la pantalla, procurando que la zona donde se efectúan las observaciones no esté iluminada por rayos parásitos.

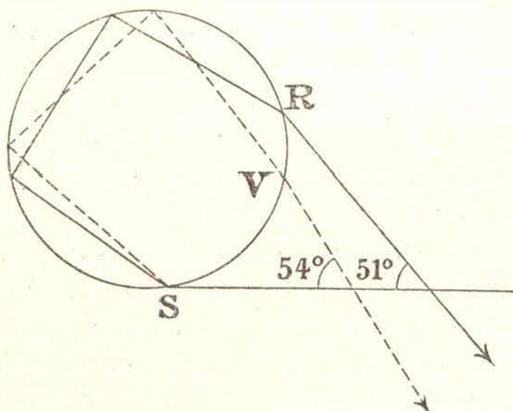


Fig. 26

Convendrá repetir el experimento con balones de diferentes diámetros para comprobar que el tamaño de la esfera refringente no influye en la producción del arco. Se observará también la influencia del índice de refracción del líquido empleado, operando p. e. en otros experimentos con sulfuro de carbono que lo tiene mayor que el agua.

Exp. 16.—Proyección del espectro solar.—Tapar la abertura de la cámara solar con un diafragma en forma de colimador (hendidura rectilínea angosta que se orienta en el sentido vertical). El espectro será tanto más puro cuanto más angosta sea la hendidura del colimador. Para fabricar este accesorio, se tomará p. e. una placa fotográfica desgelatinizada, tiznándola en una llama fuliginosa producida por la combustión de una sustancia rica en carbono (alcanfor, p. e.). Trazando una raya con la punta de un alfiler sobre la superficie tiznada, se obtendrá una línea transparente sobre fondo opaco. La fig. 27 representa en *C* una sección horizontal del colimador.

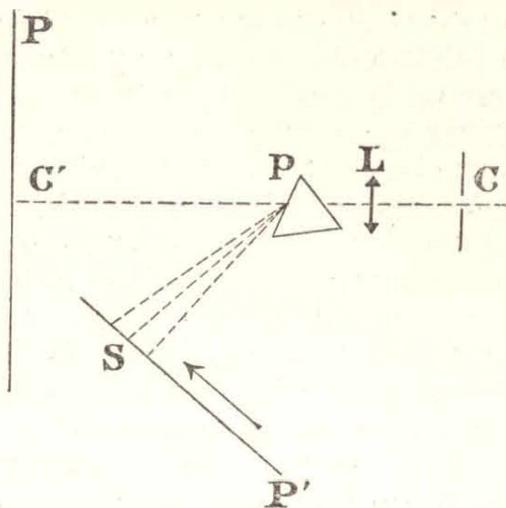


Fig. 27

Producir en la pantalla una imagen *C'* del colimador enfocándola con la lente *L*. Colocar entre *L* y *C'* un prisma (ó mejor todavía una botella prismática llena de sulfuro de carbono (de manera que la arista refringente sea paralela á la hendidura del colimador, es decir, vertical. En la figura el prisma está representado por un triángulo (sección horizontal perpendicular á la arista refringente).

Colocar lateralmente otra pantalla *P'*, de manera que reciba los rayos desviados por el prisma. Si la distancia pS es igual á pC' , se obtendrá en *S* un espectro bastante nítido. Para conseguir más nitidez todavía, hacer girar despacio el prisma alrededor de un eje vertical hasta que la desviación alcance su valor mínimo. Al mover el prisma, el espectro *S* se desplazará, p. e., en el sentido de la flecha y llegará un momento en que parecerá estacionarse para retroceder después. La posición intermedia entre estos movimientos de sentido contrario es la que corresponde al *mínimum de desviación*. En estas condiciones se podrá observar en el espectro *S* algunas de las rayas de Fraunhofer.

Para hacer el análisis de los colores, se pone entre *L* y *p* la substancia transparente que se quiere estudiar (vidrio ó gelatina coloreada, soluciones metálicas, líquidos orgánicos, etc...). Para los líquidos se emplean los recipientes de que hemos hablado en el exp. 12. En la mayor parte de los casos, se obtiene una ó dos fajas oscuras, más ó menos anchas, debidas á la absorción de igual número de series de rayos contiguos en el espectro. Sin embargo el permanganato de potasio da mayor número de fajas de absorción, y éstas son más angostas; empleado en solución diluida produce un espectro muy interesante, mientras que si la solución es concentrada las fajas se ensanchan y llegan á confundirse, produciendo la desaparición completa de una zona extensa del espectro.

Otro espectro de absorción muy interesante también es el de la clorófila en solución alcohólica. Esta se obtiene machacando en un mortero hojas verdes con alcohol y filtrando al abrigo de una luz demasiado viva.

Para demostrar el efecto producido por la combinación de dos colores, Sylvanus Thomson toma una solución de cloruro cúprico en ácido clorhídrico diluido, vertiendo con precaución encima de este líquido una solución de rojo de anilina en alcohol amílico. Esta flota fácilmente en razón de

su menor densidad. El cloruro cúprico no deja pasar sino el verde, y la anilina el rojo. Pero si se agita las dos soluciones para que se mezclen, se obtiene un líquido completamente opaco. Al cabo de algunos minutos las dos soluciones se separan nuevamente, destruyéndose espontáneamente la opacidad del líquido.

El color aparente de un líquido examinado por transparencia suele á veces faltar en el espectro de absorción de dicho líquido, y resulta simplemente de la combinación de otros colores. P. e., la mezcla de una solución de cloruro crómico con bicromato de potasio, parece amarilla, sin embargo, en el espectro de la luz filtrada al través de esta mezcla, solo aparecen el anaranjado y el verde.

Otras veces, al lado del color fundamental perceptible á simple vista, el análisis espectral revela la presencia de un color secundario casi tan intenso como el primero. P. e. las soluciones de ácido pícrico transmiten aparentemente una luz amarilla pura; sin embargo, colocándolas entre L y p se obtiene en S un espectro compuesto de amarillo y verde.

Para producir la recombinación de los colores del espectro, basta colocar en S , en lugar de la pantalla P' , un espejo al que se comunica un movimiento rápido de oscilación. En la pared opuesta á este espejo se proyectará un espectro confuso, que se convertirá en una faja blanca si las oscilaciones son bastante rápidas.

En forma análoga á la que acabamos de explicar, se utilizan las proyecciones para repetir casi todos los experimentos concernientes al espectro (rayas brillantes ú oscuras de los vapores metálicos, etc...), pero no podemos extendernos más sobre este punto.

Exp. 17. — Fenómenos de interferencias observados con láminas de líquido glicérico.—Para preparar el líquido glicérico, se mezcla en proporciones variables según los resultados que se tienen en vista, los líquidos $A B C$ cuya composición es la siguiente:

A — solución saturada de jabón blanco, del más puro, en agua destilada y tibia.

B — agua destilada.

C — glicerina de buena clase.

La solución A se deja enfriar y se filtra antes de usarla. En lugar de jabón propiamente dicho se puede emplear oleato de sodio que da resultados mejores todavía.

Para obtener láminas muy resistentes se toma 1 vol. de A , 2 vol. de B y 1 vol. de C . Para producir colores irisados que cambian rápidamente, 1 vol. de A , 4 vol. de B y $1/4$ vol. de C . Estas proporciones no son enteramente invariables; las propiedades del líquido glicérico dependen del clima y de la clase de jabón empleado, de manera que convendrá en algunos casos modificar el porcentaje de los componentes, teniendo presente que la glicerina aumenta la consistencia de las láminas líquidas, mientras que el agua, por ser fácilmente evaporable, produce cambios de coloración más rápidos.

Abraham ⁽¹⁾ indica otra fórmula muy sencilla con la cual se obtiene un líquido viscoso casi tan bueno como el anterior:

(1) En su *Recueil d'Expériences de Physique*, obra excelente que debería encontrarse en la biblioteca de todos los profesores de la materia.

Agua.....	1000 gr.
Jabón.....	10 »
Azucar blanca....	400 »

Para conservar este líquido que es fermentescible, conviene añadirle algunas gotas de formol ú otro antiséptico.

Las láminas líquidas con las cuales se hacen los experimentos de que nos ocupamos, se obtienen introduciendo en la mezcla glicérica un anillo circular formado por un alambre fino de cobre doblado como se ve en la fig. 28. La juntura *a* se aplana previamente con cuidado de manera que allí la curvatura sea casi tan perfecta como en los otros puntos del círculo; un cambio brusco en la curvatura disminuiría la adherencia de la membrana líquida al anillo, produciendo su ruptura al cabo de poco tiempo. El diámetro de este círculo debe ser de 3 cm. ó más; se tratará de obtener el diámetro máximo compatible con el grado de consistencia del líquido.



Fig. 28

Colocada verticalmente la lámina líquida, como se ve en la fig. 29, se hace incidir sobre ella el haz de rayos paralelos *H* de la cámara solar, con una inclinación de 45° . En el trayecto del haz reflejado *R* se pone una lente *L* para formar sobre una pantalla lateral *P* la imagen *I* del anillo *A*. Esta imagen presenta una serie de franjas irisadas dispuestas horizontalmente y que parecen trasportarse más ó menos rápidamente hacia la parte superior del anillo.

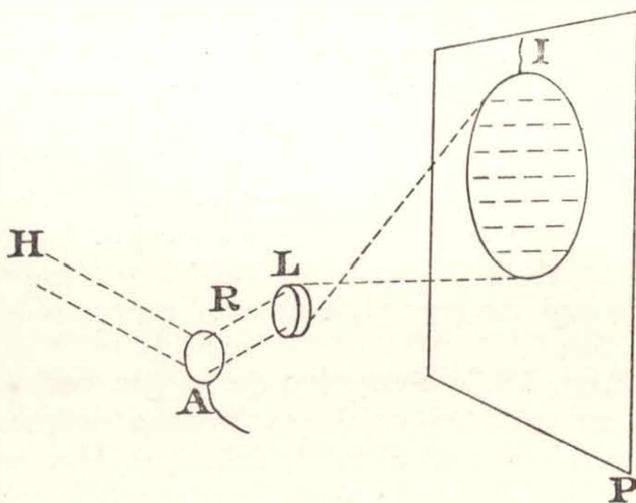


Fig. 29

En realidad ocurre lo siguiente: en el haz reflejado *R* se encuentran rayos reflejados en la superficie anterior de la lámina líquida y otros reflejados en la superficie posterior. Los trayectos recorridos por los rayos de una y otra serie no son iguales; existe entre ellos una diferencia de longitud que depende del espesor de la lámina en el punto de incidencia. Supongamos que este espesor sea tal que dos rayos rojos, en concordancia de fases en el haz incidente *I*, adquieran en el haz reflejado *R* una diferencia de fases exactamente igual á una semi-longitud de onda. Habrá *interferencia*: los efectos de ambos rayos se anularán por completo. Al mismo tiempo dos rayos anaranjados, cuyas ondas tienen una longitud un poco diferente de los precedentes se encontrarán también en *R* con una diferencia de marcha: pero no siendo ésta exactamente de media longitud de onda, la interferencia no será completa; el efecto correspondiente á los rayos anaranjados en el haz reflejado estará simplemente debilitado. Por razones análogas los rayos amarillos estarán debilitados también, pero menos que los precedentes, puesto que sus ondas tienen una longitud más diferente todavía de la de los rayos rojos. En una palabra, en el haz *R* faltarán

los rayos rojos, otros estarán más ó menos debilitados, otros se encontrarán con su intensidad primitiva íntegra. De esto resultará una coloración definida en relación con el espesor de la lámina en el punto de incidencia.

Ahora bien, la lámina no tiene un espesor uniforme; éste decrece de una manera continua desde la parte superior del disco hasta la inferior, á consecuencia de la acción de la gravedad que tiende á acumular mayor cantidad de líquido en la zona más baja. Por eso, si consideramos una serie de puntos sobre una misma vertical, la coloración que les corresponderá, variará de una manera continua, mientras que una serie de puntos situados sobre una misma horizontal producirán coloraciones iguales, debidas á espesores iguales del líquido. Esto nos explica porque vemos en la pantalla una sucesión de franjas irisadas dispuestas horizontalmente.

Por otra parte, el descenso gradual de las partículas líquidas atraídas por la acción de la gravedad, adelgazará continuamente las diferentes zonas de la lámina, con excepción de la zona más baja, cuyo espesor irá aumentando. Todo pasará como si las capas más delgadas de las zonas superiores fueran bajando hacia las zonas inferiores, arrastrando consigo las franjas irisadas que les corresponden. Por eso en la imagen *I*, que es invertida, las franjas parecen subir de un modo continuo.

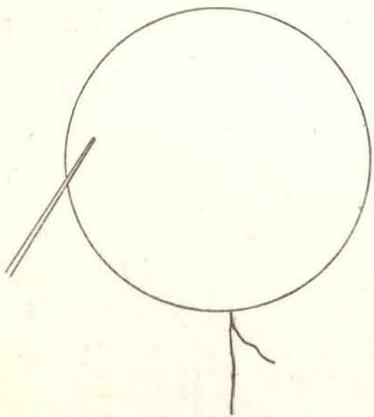


Fig. 30

Si pudiéramos conseguir que el adelgazamiento de la lámina tuviera lugar alrededor de un centro, obtendríamos anillos coloreados concéntricos. Para esto se puede recurrir á un artificio ideado por Lord Raileigh: por medio de un tubo capilar se dirige sobre la lámina de líquido glicérico casi tangencialmente una corriente suave de aire, como lo indica la

fig. 30.

Exp. 18. — Espectro de la luz reflejada por una lámina delgada de mica. — Se dobla una lámina delgada de mica en forma de cilindro vertical de unos 2 cm. de diámetro. Haciendo incidir sobre este cilindro el haz de rayos de la cámara solar, se verá por reflexión una línea vertical angosta y muy brillante. En lugar de observarla directamente, se proyecta su imagen por medio de una lente, más allá de la cual se coloca un prisma, obteniéndose así un espectro *acanalado*, es decir, atravesado por muchas rayas verticales oscuras equidistantes. Este fenómeno es debido á la interferencia de algunos de los rayos reflejados en las superficies externa ó interna del cilindro; desaparecen los rayos cuyas longitudes de ondas son λ , $\lambda + a$, $\lambda + 2a$, etc. . . , dependiendo λ y a del espesor de la lámina de mica, por cuya razón ésta deberá ser determinada por tanteo hasta obtener resultados fácilmente perceptibles. En efecto, si el número de acanaladuras del espectro fuera demasiado considerable, éstas no se distinguirían bien, y para observarlas sería preciso valerse de un espectroscopio; el espectro proyectado en la forma indicada no sería bastante nítido.

Exp. 19. — Difracción. ⁽¹⁾ — Producir un haz de rayos ligeramente divergente, interceptándolo con un diafragma provisto de una hendidura ver-

(1) Extractamos este experimento de la obra ya citada de Abraham.

tical un poco ancha. Más allá del diafragma colocar una lente á una distancia próximamente igual á tres veces y media su distancia focal principal. Proyectar la imagen de la hendidura sobre una regla vertical, determinando la posición de la lente de manera que la imagen cubra exactamente el ancho de la regla, sin que la luz pase lateralmente.

Retirar la regla y colocar entre el diafragma y la lente un pincel abierto en forma de plumero con los pelos separados, en una posición tal que su imagen se forme en la pantalla de proyección donde aparecerá en negro sobre fondo blanco.

Volver á colocar la regla exactamente en la misma posición que antes. Si la luz siguiera propagándose en línea recta como precedentemente,

la pantalla aparecería enteramente oscura, porque la regla interceptaría la totalidad del haz que atraviesa el diafragma. Sin embargo, se ve sobre la pantalla una imagen luminosa del pincel sobre fondo oscuro.

Este fenómeno se explica por la *difracción* que producen los pelos del pincel.

Exp. 20 — Doble refracción y polarización. — Las proyecciones se prestan especialmente para el estudio de los fenómenos de doble refracción y polarización; pero el desarrollo de estos puntos ocuparía demasiado espacio. Por otra parte, la teoría de estos fenómenos se encuentra en casi todos los tratados de Física; conociéndola será fácil idear dispositivos apropiados para efectuar los experimentos de proyección correspondientes. Sin embargo se tropezará á veces con dificultades inherentes á los polarizadores y analizadores, ya sea porque no se tenga los *nicoles* que en las obras clásicas sobre la materia se mencionan casi siempre con exclusión de otros aparatos de la misma índole, sugiriendo así la idea errónea que estos nicoles son irremplazables, ya sea porque dichos instrumentos no presentan una sección suficiente para admitir haces luminosos un poco intensos, como los que se requieren tratándose de proyecciones. Por eso, sin entrar en más detalles, haremos observar que se puede fabricar un buen polarizador ó analizador, muy ancho y bastante transparente, superponiendo una ó dos docenas de placas fotográficas desgelatinizadas (preferiblemente de la marca «Extra-mince»). Como dos placas consecutivas deben estar separadas por una laminita de aire, se intercala tiras de papel en los bordes, apretando la pila con dos elásticos para impedir que éstas se corran.

La acción polarizante de una pila de placas será tanto más intensa cuanto más oblicuos sean los rayos incidentes (1). Los rayos emergentes se encuentran polarizados en un plano perpendicular al de incidencia. En otros términos, si se admite la hipótesis de Fresnel, podrá decirse que las vibra-

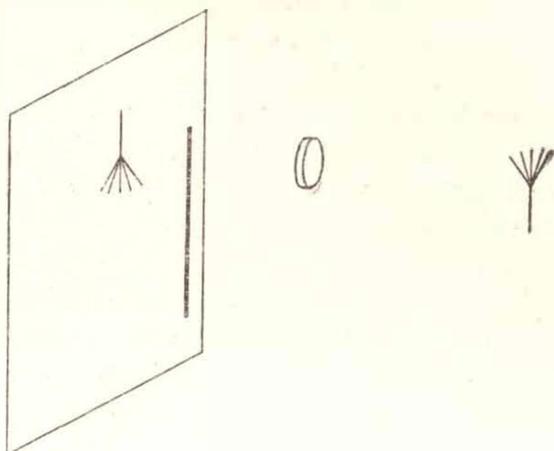


Fig. 31

(1) El *máximum* de luz polarizada por una pila se produce cuando los rayos inciden bajo el ángulo de polarización, pero la *proporción* de la luz polarizada en el haz emergente crece constantemente con el ángulo de incidencia, porque la cantidad de luz natural transmitida disminuye á medida que aumenta la oblicuidad de los rayos.

ciones de un rayo emergente se efectúan en el plano ϕ determinado por dicho rayo y por la normal á la superficie de la última placa en el punto de emergencia, de manera que dicho plano ϕ tendrá las mismas propiedades que la sección principal en los nicoles (1).

Para terminar, describiremos sucintamente un experimento mediante el cual se puede hacer ver en proyección el fenómeno de Kerr. Para realizarlo no bastarían los elementos de que se dispone generalmente en los gabinetes de los Colegios y Escuelas Normales, pero se trata de una propiedad tan curiosa de los líquidos, de tanto alcance para desentrañar los misterios de la física molecular y descubrir las relaciones existentes entre la luz y la electricidad, que si un solo profesor pudiera alguna vez repetir este experimento, no consideraríamos perdido el tiempo que vamos á dedicar á las explicaciones pertinentes.

El aparato representado en la fig. 32 consta de dos cilindros metálicos horizontales, colocados paralelamente en un recipiente de vidrio de caras

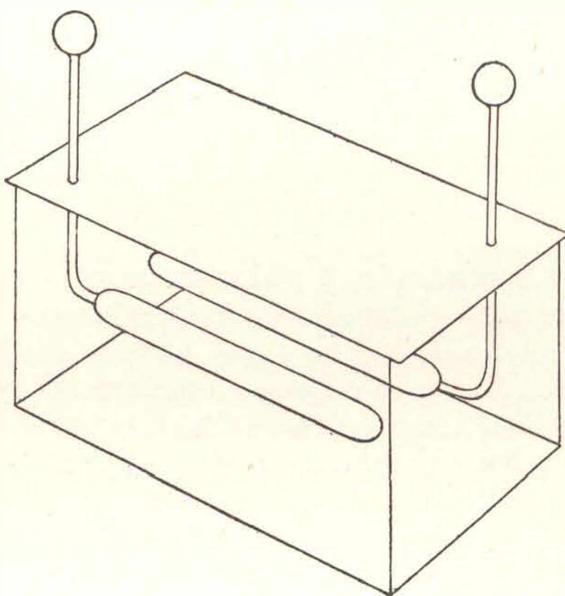


Fig. 32

planas y paralelas, en el cual se echa sulfuro de carbono; cada uno de estos cilindros se pone en comunicación con los polos de una buena máquina electrostática.

Se hace pasar entre los cilindros, en la dirección de sus ejes, un haz de luz polarizada que atraviesa después un analizador. Estos cilindros aparecen en proyección bajo la forma de dos círculos. Estando orientado el analizador para obtener la extinción completa del haz polarizado, si se electriza los cilindros, reaparece una mancha luminosa entre los dos círculos.

Esto significa que bajo la acción del campo electrostático, el sulfuro de carbono ha adquirido propiedades análogas á las de las sustancias birefringentes. La luz polarizada que lo atraviesa pierde su carácter primitivo. Podría creerse á primera vista que se trata simplemente de una rotación del

(1) Unos pocos autores admiten que las vibraciones se producen en un plano perpendicular al precedente; pero esta manera de interpretar los fenómenos de polarización, conforme á la hipótesis de Neumann y Mac-Cullagh, no modifica en nada las conclusiones anteriores sobre las analogías que existen entre el plano ϕ y la sección principal de un nicol.

plano de polarización, pero si así fuera, se podría apagar nuevamente el haz emergente dando vuelta al analizador, mientras que en realidad la extinción total es imposible y todo pasa como si el sulfuro de carbono electrizado desdoblara la luz incidente en dos haces correspondientes al ordinario y extraordinario de las sustancias birefringentes. En efecto, la acción del sulfuro de carbono puede ser compensada interponiendo un compensador de Babinet entre el recipiente y el analizador, como si en lugar del líquido existiera en realidad un cristal birefringente.

Además, si se electriza el sulfuro de carbono entre dos cilindros metálicos *concéntricos* y se emplea luz polarizada *convergente*, se obtendrá en la pantalla una imagen atravesada por una cruz negra ó brillante, según la posición relativa del analizador y del polarizador, como sucedería con un cristal uniaxal tallado perpendicularmente al eje principal.

P. DE LEPINEY

Inspector de Enseñanza Secundaria.
