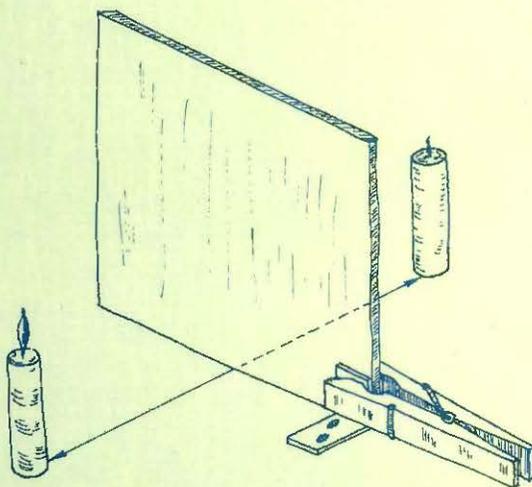


EL LABORATORIO DE FÍSICA EN LA ENSEÑANZA SECUNDARIA

LAS ONDAS. LA LUZ Y EL SONIDO

Adolf Cortel Ortuño



ice
.....

Institut de Ciències de l'Educació
UNIVERSITAT DE BARCELONA

HORSORI
EDITORIAL

**EL LABORATORIO DE FÍSICA
EN LA
ENSEÑANZA SECUNDARIA**

**LAS ONDAS.
LA LUZ Y EL SONIDO.**

Adolf Cortel Ortuño

Todas las ilustraciones han sido realizadas por Jaume Guinot excepto las de las páginas:

- 45, 144 y 145 (J. Estalella «Ciencia Recreativa». Gustavo Gili. 1918)
- 152 y 154 (A. Guillemin «El Mundo Físico». Montaner y Simón. 1882).
- 70 a 72 (Programa EXAO. Adolf Cortel. 1992)

© ICE Universidad de Barcelona

© Adolf Cortel Ortuño

Imprime:

Editorial Gráficas Signo, S.A.
Carretera de Cornellà, 140, 2a. planta
08950 Esplugues de Llobregat (Barcelona)

Depósito Legal: B-36.326-1997

ISBN: 84-85840-66-6

ÍNDICE

Declaración de intenciones	11
El uso del laboratorio de Física en la enseñanza secundaria:	
Estado actual y perspectivas	14
Cómo usar este libro	16
Bibliografía básica	18
Tabla de experimentos	22

Primera parte: LAS ONDAS. SONIDO

Introducción	27
Los materiales básicos	28
Suministradores	29
Materiales generales	31
Precauciones	32
El hilo conductor de las experiencias y demostraciones	33

Experiencias y demostraciones

1.- <i>Una onda transporta energía sin transporte de materia</i>	35
1.1.- Concentración de la luz mediante lentes	35
1.2.- Fotómetro de Bunsen. Distribución de la energía luminosa en el espacio	36
1.3.- Juego de las bolas de «Newton»	37
1.4.- Juego de las tres monedas	38
1.5.- Ondas en un muelle largo o un slinky	39
2.- <i>Simulaciones relacionadas con la propagación de las ondas.</i> <i>La energía se propaga sin que viaje la materia</i>	40
2.1.- Juego de las maderas chinas	40
2.2.- Péndulos acoplados	41
3.- <i>La característica básica de las ondas:</i> <i>Un movimiento vibratorio que se propaga</i>	42
3.1.- Ondas en una cuerda. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia	42
3.2.- Ondas en una goma elástica. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia	43
3.3.- Sonido en copas. Visualización de la longitud de onda	44
3.4.- Ondas longitudinales y transversales. Polarización de una onda	45
3.5.- Teléfono con dos vasos y un cordel	45
3.6.- Cómo oír un disco con un vaso y una aguja	46

4.-	<i>Velocidad de propagación de las ondas. Velocidad del sonido</i>	47
4.1.-	Determinación de la longitud de onda y de la velocidad del sonido, con un osciloscopio	47
4.2.-	La velocidad del sonido depende del medio	49
4.3.-	Velocidad del sonido. Medida con el tubo de Kundt	49
4.4.-	Velocidad del sonido. Resonancia en un tubo parcialmente sumergido en agua	52
4.5.-	Longitud de onda y velocidad de una onda transversal en una goma elástica. Efecto de la tensión y de la densidad lineal	54
4.6.-	Velocidad de una onda en un muelle. Efecto de la tensión y de la densidad lineal	56
4.7.-	El sonido no se propaga en el vacío	57
5.-	<i>Margen de frecuencias audibles de sonido. Tono</i>	58
5.1.-	Margen de frecuencias audibles de sonido. Tono	58
5.2.-	Tono	59
5.3.-	Afinación. Octavas	59
5.4.-	Frecuencias de sonido patrón. Escalas musicales con el generador de señal	60
5.5.-	Frecuencias individuales con el ordenador	61
6.-	<i>La transferencia de energía: Resonancia</i>	62
6.1.-	Resonancia con péndulos	62
6.2.-	Resonancia con dos diapasones	63
6.3.-	Curva de resonancia con un diapasón y una pelota de ping pong	64
6.4.-	Resonancia con tubos de cartón. La música del aire	65
6.5.-	Resonancia de tubos. Una vela para observar la resonancia	66
7.-	<i>Ver el sonido. Timbre. La voz y la música</i>	68
7.1.-	Utilización de un osciloscopio	69
7.2.-	Utilización del ordenador	69
8.-	<i>Principio de superposición: Interferencias y pulsaciones</i>	73
8.1.-	Interferencias con dos altavoces	73
8.2.-	Pulsaciones	75
9.-	<i>Principio de superposición: Ondas estacionarias</i>	76
9.1.-	Ondas estacionarias transversales en un muelle largo	76
9.2.-	Ondas estacionarias longitudinales y transversales	77
9.3.-	Ondas estacionarias en varillas	78

9.4.– Ondas estacionarias en campanas y tapas de cacerolas	81
9.5.– Ondas estacionarias en dos dimensiones: Placas vibrantes	82
9.6.– Los trastes de la guitarra	85
10.– Propiedades generales de las ondas.	
<i>Experimentos con la cubeta de ondas</i>	86
10.1.–Las cubetas	86
10.2.–Los experimentos	87
a) La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia	87
b) Distintos tipos de reflexiones	87
c) Difracción	88
d) Interferencias	88
11.– Otras experiencias asociadas a las propiedades de las ondas individuales: Reflexión	89
11.1.–Reflexión de ondas en muelles y cuerdas	89
11.2.–Reflexión de la radiación infrarroja utilizando estufas de reflectores parabólicos	89
11.3.–Reflexión de los rayos infrarrojos de un mando a distancia	91
11.4.–Reflexión del sonido. Un aparato para medir distancias	91
 Segunda parte: LA LUZ. ÓPTICA	
Introducción	93
Los materiales básicos	94
Suministradores	95
Materiales generales	96
Precauciones	99
El hilo conductor de las experiencias y demostraciones	99
 Experiencias y demostraciones	
1.– Propagación rectilínea de la luz en un medio uniforme	103
1.1.– Construcción y utilización de una caja negra	103
1.2.– «Caja negra» con una bombilla. Imagen del filamento	104
1.3.– Tamaño del Sol	105
 2.– Luz y color. Análisis de la luz	107
2.1.– La luz blanca está formada por un conjunto continuo de frecuencias	107
2.2.– Descomposición de la luz blanca	108

3.-	<i>La luz atraviesa un medio uniforme. Absorción</i>	109
3.1.-	Absorción de la luz. Filtros	109
3.2.-	Mezclas aditivas de colores. Colores complementarios	110
3.3.-	Color blanco en un monitor de ordenador	112
3.4.-	Disco de Newton. Luz blanca y mezcla de colores	113
3.5.-	Sustracción de colores. Colores complementarios	113
3.6.-	Colores complementarios y mensajes ocultos	114
3.7.-	Mensajes con tizas de colores	114
3.8.-	Visión estereoscópica con filtros de colores complementarios	115
4.-	<i>Polarización</i>	116
4.1.-	Demostraciones y experiencias con luz polarizada	116
4.2.-	Otros sistemas de polarización	117
4.3.-	Materiales birrefringentes	119
4.4.-	Simulación de un microscopio petrográfico	120
4.5.-	Efectos de la deformación de los materiales. Polariscopio	122
4.6.-	Funcionamiento de un display de cristal líquido	123
4.7.-	Cine 3D utilizando luz polarizada	124
5.-	<i>La luz interactúa con los electrones de los átomos</i>	127
5.1.-	Construcción de un espectroscopio	127
5.2.-	Espectros de absorción. Líneas de Fraunhofer en el espectro de la luz solar	128
5.3.-	Líneas espectrales de emisión de los elementos químicos. Sales a la llama	128
5.4.-	Líneas de emisión en las descargas eléctricas en gases	129
5.5.-	Triboluminiscencia	131
5.6.-	Luz ultravioleta. Fluorescencia y fosforescencia	131
5.7.-	Simulación de la absorción de luz UV por la capa de ozono	134
5.8.-	Emisión de luz en las reacciones químicas. Quimioluminiscencia	134
5.9.-	Efecto fotoeléctrico	136
6.-	<i>La visión</i>	138
6.1.-	Imágenes estereoscópicas	138
6.2.-	Construcción de un estereoscopio simple	139
6.3.-	Visión 3D. Acertar a una anilla	140
6.4.-	Persistencia de la visión. Una imagen en el aire	140
6.5.-	Persistencia de la visión. El lápiz blando	141

7.-	<i>La luz encuentra una superficie de otro medio.</i>	
	<i>Reflexión en superficies planas</i>	142
7.1.-	Espejos. Ley de la reflexión	142
7.2.-	Ley de la reflexión con un cristal y dos velas	143
7.3.-	La vela que no quema	144
7.4.-	Otro juego basado en la reflexión	144
7.5.-	Un aparato para copiar dibujos	145
7.6.-	La hucha «mágica»	145
7.7.-	Calidoscopios con dos espejos y una vela	146
7.8.-	Túnel de espejos	147
7.9.-	Dos caras en una	148
7.10.-	Reflexiones múltiples en un tubo	148
7.11.-	Espejos de catadióptrico	149
8.-	<i>Reflexión en superficies curvadas</i>	151
8.1.-	Trayectoria de los rayos de luz en los espejos curvados ...	151
8.2.-	Reflexiones en tazas. Cáusticas	152
8.3.-	Imágenes y aumento de los espejos cóncavos y convexos	152
8.4.-	Distancia focal de un espejo cóncavo	152
8.5.-	Trayectoria de los rayos en un espejo curvado, con un láser	153
8.6.-	Espejos cilíndricos	153
9.-	<i>Refracción en superficies planas</i>	155
9.1.-	Porcentaje de luz reflejada y refractada	155
9.2.-	Observación de la refracción con una moneda dentro del agua	156
9.3.-	Observación de la refracción con un lápiz sumergido en agua	156
9.4.-	Observación de la refracción y medida del índice de refracción del agua con una caja y agujas	157
9.5.-	Medida de la profundidad aparente	158
9.6.-	Utilización de equipos didácticos para la observación de la refracción. Cálculo del índice de refracción	159
9.7.-	Reflexión total y ángulo límite. Fracción de luz reflejada y refractada	161
9.8.-	Reflexión y refracción en un prisma, con un láser y una caja de humo	162
9.9.-	Fibras ópticas	162

10.– <i>Refracción de la luz en una superficie curva: Lentes</i>	164
10.1.–Lentes convergentes y divergentes. Utilización de los equipos didácticos	164
10.2.–Estudio de las gafas. ¿Miopía o Hipermetropía?	165
10.3.–Trayectoria de los rayos luminosos con un peine y una lupa	166
10.4.–Lentes de Fresnel	166
10.5.–Distancia focal de una lente. Medida directa	168
10.6.–Imágenes reales y virtuales. Posición de las imágenes formadas por lentes convergentes y divergentes	169
10.7.–Ecuación de una lente	170
10.8.–Aumento de una lente convergente	171
10.9.–Estudio de las lentes de unas gafas mediante su aumento. Detección del astigmatismo	172
10.10.– Medida de la distancia focal de una lente convergente. Método de las imágenes virtuales	173
10.11.– Construcción de una cámara fotográfica simple	173
10.12.– Encadenamiento de imágenes. Simulación de un microscopio	174
10.13.– Simulación del funcionamiento del ojo. Gafas y lentillas	175
10.14.– Medida de la profundidad aparente mediante una lente	176
11.– <i>La luz encuentra pequeñas partículas. Dispersión</i>	178
11.1.–Observación de la dispersión con un láser	178
11.2.–Colores de dispersión. Puesta de Sol artificial	178
11.3.–Dispersión con hojas de papel	179
12.– <i>Difracción e interferencias</i>	180
12.1.–Observaciones simples de la difracción e interferencia con dos bolígrafos.....	180
12.2.–Observación de la difracción e interferencias con tramas de tejidos.....	181
12.3.–Uso de diapositivas de alto contraste y de un proyector para la experiencia de Young	181
12.4.–Utilización de diapositivas de alto contraste para observar la difracción de distintas longitudes de onda en una ranura	183
12.5.–Medida de la longitud de onda de la luz amarilla de una lámpara de sodio	184
12.6.–Observación de franjas de interferencia en dos láminas de vidrio iluminadas con una lámpara de vapor de sodio .	186
12.7.–Franjas de interferencia en películas de jabón.....	187
12.8.–Observación de la difracción. Redes de difracción por reflexión	187

12.9.- Observación de la difracción. Redes de difracción por transparencia	189
12.10.- Franjas de interferencia en una lámina de vidrio, empleando un láser	190
12.11.- Visualización de corrientes de convección	191
12.12.- Difracción de la luz de un láser en rendijas simples y dobles	192
12.13.- Espaciado de las líneas de un compact disc (CD)	193
12.14.- Estudio de la trama de un tejido	194
12.15.- Diámetro de un cabello	195
12.16.- Difracción en una aguja	197
12.17.- Hologramas	197

Leo, olvido.
Veo, recuerdo.
Hago, comprendo.
Proverbio chino

...En el aprendizaje, es difícil superar el efecto de la combinación «Escuchar. Ver. Hacer».....
Earl R. Pinkston en «*The use of demonstrations in teaching introductory physics*». *The Physics Teacher*. Septiembre 1981

DECLARACIÓN DE INTENCIONES

Este libro está escrito desde la convicción de que el aprendizaje de las ciencias resulta más fácil cuando se pueden ver los fenómenos que se estudian, y que todavía resulta más efectivo si los alumnos pueden realizar por sí mismos experimentos sobre estos fenómenos. El libro podrá ser útil a aquellos profesores que compartan esta opinión o que deseen verificar por sí mismos como el uso del laboratorio facilita la enseñanza de las Ciencias. Pretende ser una aportación modesta y específica para hacer más fácil la vida del profesor que desea usar los recursos que ofrece el laboratorio o incluso hacer demostraciones y experimentos en el aula, como si se tratara de una extensión del laboratorio. Es una especie de manual que explica cómo se pueden hacer las experiencias de Física para que funcionen usando los materiales más simples posibles o componentes de equipos comunes en los laboratorios de enseñanza secundaria.

Quién haya trabajado a partir de experiencias de «libros de prácticas» habrá comprobado en carne propia que, a menudo, los materiales disponibles no son los mismos que han usado los autores y, a veces, cuando se hacen no funcionan a la primera o como uno espera. Debido a ello, en este libro se ha incluido, en muchas de las experiencias y demostraciones de tipo cuantitativo, un apartado en el que se indican los resultados realizados con un material específico y los cálculos necesarios; el uso de este material no debe entenderse como una sutil imposición, más bien como una orientación para quienes no deseen hacer demasiadas pruebas. Por lo general, las ideas son simples y las experiencias funcionan sin problemas. Los aspectos más delicados y las posibles precauciones se indican cuando es necesario. Las descripciones de las experiencias deben entenderse como sugerencias que casi siempre son mejorables, no como protocolos rígidos que deben seguirse al pie de la letra. De hecho,

en muchos casos son adaptaciones de experiencias descritas con materiales algo más complejos. Su simplicidad ha sido un objetivo prioritario.

Las experiencias siguen un hilo conductor que permite asociarlas fácilmente al fenómeno que se desea estudiar. La secuencia de experimentos tiene únicamente esta finalidad. Por otro lado los experimentos se han etiquetado como: experiencia, demostración, juego,...y con ello no se pretende sugerir un método de trabajo, simplemente refleja la forma en que personalmente las utilizo. En algunos casos el modo de utilización resulta evidente; por ejemplo, en los experimentos en los que se emplean materiales muy simples y asequibles vale la pena que todos los alumnos trabajen individualmente o en grupos reducidos y, si se trata de algo tan simple, será interesante sugerir que los alumnos lo hagan también en casa. Si sólo hay un aparato difícilmente se encontrará una alternativa a la demostración a cargo del profesor. No se han separado las experiencias que tradicionalmente hacen los grupos reducidos de alumnos, las demostraciones del profesor o las experiencias caseras. Todo es aprovechable. La etiqueta de un tipo u otro es claramente subjetiva y puede depender de hechos tan prosaicos como la cantidad de material disponible (que permita hacer 5 montajes de un experimento o uno solo) o el tiempo disponible de preparación del material.

Las experiencias no se proponen para un nivel concreto. En realidad la misma experiencia puede ser válida para niveles tan distintos como 1º de ESO y el actual COU. La diferencia no está en lo que uno hace ni en los materiales que se utilizan (el fenómeno que se observa es el mismo), sino en lo que se explica, en los conceptos que se utilizan para interpretar el fenómeno y, naturalmente, en el trabajo posterior con los alumnos.

El libro se ha centrado en uno de los campos fundamentales de la Física: el estudio de las ondas, el sonido y la luz. Para mayor comodidad, las experiencias se presentan separadas en dos partes. En la primera se discuten los experimentos asociados a las propiedades generales de las ondas y al sonido. Las experiencias relacionadas con las propiedades de la luz y la óptica se exponen en la segunda parte. Esta división es artificial y, posiblemente, inapropiada desde muchos puntos de vista, sin embargo, puede resultar conveniente si el profesor está interesado en buscar experiencias relacionadas con aspectos concretos de estos temas. Para facilitarle esta tarea, las experiencias de cada una de las partes se han agrupado de acuerdo con un hilo conductor que «recorre» los distintos aspectos del tema.

El libro contiene una Tabla de Experimentos en la que se indica el tipo de experimento (experiencia, demostración, juego...), los materiales necesarios para cada uno de ellos: componentes de los equipos convencionales o materiales muy simples y fáciles de encontrar, otros aparatos de tipo general que se indican u otros materiales más específicos (que se describen en cada experiencia, no en esta tabla). En la Tabla también se

califica cada experimento según los alumnos a los que va dirigida y se indican aquellos que requieren cálculos específicos o, que por su mayor complejidad, deberían dirigirse a los alumnos de los cursos superiores; otros experimentos se sugieren para ESO. Una columna de la Tabla sugiere experimentos que pueden resultar particularmente interesantes o vistosos para todos los niveles. Estas calificaciones, totalmente subjetivas y discutibles, pretenden únicamente facilitar la búsqueda inicial de posibles experiencias. El número de experimentos que se describen es mucho mayor que el que pueda realizar en un curso el profesor más entusiasta. Ello permitirá que cada uno pueda seleccionar aquellas que más le interesen. Por otro lado, muchas de ellas son breves y por ello es fácil poder realizar varias en la misma sesión de laboratorio.

A pesar de las mejores intenciones y de las revisiones es de esperar que el libro aún contenga errores y que algunas experiencias interesantes no se hayan incluido por olvido o ignorancia. En uno u otro caso, las sugerencias serán bien recibidas.

EL USO DEL LABORATORIO DE FÍSICA EN LA ENSEÑANZA SECUNDARIA: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

..... «Ahí mismo, al otro lado del río, hay toda clase de aparatos mágicos, mientras nosotros seguimos viviendo como los burros».....

Gabriel García Márquez en «Cien años de soledad»

A pesar de los esfuerzos de la Administración Educativa para dotar a los laboratorios de los centros públicos de Enseñanza Secundaria de equipos y materiales, de los innumerables cursos relacionados con los trabajos prácticos y de la buena voluntad de un número considerable de profesores, el porcentaje de alumnos de Enseñanza Secundaria que recibe una enseñanza de la Física de tipo práctico es reducido.

Un análisis de las razones que han provocado esta situación lleva a numerosas causas. Por un lado, los equipos didácticos de los fabricantes proponen a menudo experiencias muy alejadas de los programas y las situaciones reales. En varios casos se trata de equipos con excelentes materiales, ajustados a los planteamientos de los países vecinos, cuyo porcentaje de dedicación al laboratorio es mucho mayor. Por lo general, sus fabricantes no proponen experiencias simples, que a menudo son las más eficaces puesto que requieren menos preparación y habilidad. A consecuencia de ello es frecuente, y fácilmente verificable, que los equipos didácticos estén infrautilizados. A menudo, se emplean las piezas y componentes de los equipos para hacer experiencias transmitidas casi por «tradición oral», que raramente son las de los manuales de los fabricantes.

Otro de los problemas que lastra el uso del Laboratorio en la Enseñanza de las Ciencias es el trabajo con grupos de alumnos numerosos. En el laboratorio podemos considerar numerosos más de 20 alumnos, y aún estos son muchos. Esta dificultad suele ser poco menos que insalvable y podría considerarse una de las causas principales de la reticencia de muchos profesores al uso del laboratorio. El desdoblamiento de grupos suele estar fuera del alcance directo del profesor y depende de la organización del Centro y de la normativa vigente en cada comunidad. Debido a ello, la importancia que pueda tener el que una experiencia o demostración sea «transportable» al aula, es especialmente significativa.

Respecto al profesorado, una parte importante de los docentes de Física duda de la eficacia de las «prácticas». Cree que las clases teóricas son más efectivas y, en el caso del BUP y COU, ha sido obligado a preparar al alumnado para un examen con un contenido basado absolutamente en la realización de problemas. Por otro lado, el profesorado (especialmente de Física) ha recibido, en general, una formación muy

poco basada en los aspectos prácticos. Las experiencias de las Facultades han consistido, salvo honrosas excepciones, en unos montajes abrumadores descritos en guiones de diez páginas como mínimo. El soporte esencial ha sido y son las Matemáticas. Los fenómenos reales se aceptan tal como los cuentan los libros o se recurre a un buen vídeo que los muestre. Se considera superfluo observarlos en el laboratorio.

Un buen número de profesores tiene ganas de trabajar en el laboratorio creyendo que interesará a su alumnos. Querrían ir al laboratorio pero no saben exactamente qué hacer allí, o conocen solamente algunas experiencias aisladas. A pesar de su predisposición no saben como usar el laboratorio de un modo eficaz. Naturalmente, también hay profesores que, mediante cursos o con la ayuda de otros compañeros y un cierto esfuerzo personal, han aprendido qué hacer y cómo hacerlo. Son conscientes que el trabajo con los alumnos en el laboratorio es algo más duro que una clase normal. En el laboratorio, los alumnos se sienten más libres, hablan entre ellos, se mueven de un lado a otro y, simplemente, el profesor debe tener más oficio. Estos profesores deben estar dispuestos a preparar y recoger los materiales, reparar los pequeños desperfectos, buscar materiales para nuevas experiencias y otros pequeños inconvenientes fáciles de imaginar.

En estos momentos, la Administración Educativa ha planteado un nuevo sistema educativo que propone una enseñanza de las Ciencias de un modo teóricamente mucho más práctico y relacionado con la vida real. Sin embargo, no hace falta mucha perspicacia para observar como la organización y los medios actuales de los centros no parecen facilitar una enseñanza basada en estos planteamientos. En cualquier caso, la propia realidad se impone y, guste o no, la nueva composición y capacidades del alumnado así como la escolarización obligatoria deben acercar la enseñanza de las Ciencias al estudio de los fenómenos reales. De todo ello podemos sacar algún provecho si, partiendo de la base experimental de la Física, somos capaces de conseguir que el alumnado se interese por la comprensión de aquellos fenómenos que hacen de esta ciencia algo valioso que vale la pena transmitir. Difícilmente lo lograremos si no somos capaces que los alumnos vean estos fenómenos y experimenten con ellos. Este libro pretende facilitar esta tarea aportando al profesorado experiencias y demostraciones fiables, simples y eficaces que permitan un enfoque experimental de la Física a partir de materiales sencillos, de los equipos comunes en los centros o de objetos fáciles de conseguir.

COMO USAR ESTE LIBRO

Si ya ha decidido que utilizar el laboratorio puede resultar interesante para sus alumnos únicamente deberá superar un pequeño obstáculo: debe estar dispuesto a invertir algo de tiempo extra, esencialmente para probar las experiencias y para buscar los materiales necesarios. Este es el punto clave. Si trabaja en un centro más o menos equipado el esfuerzo necesario será bastante menor. Si no tiene gran cosa y ha de buscar materiales, deberá tomárselo con calma, empezando con aquellas experiencias más simples y vistosas.

Hecha esta puntualización, nos centraremos en la parte de la Física relacionada con las ondas, la luz y el sonido. Imaginemos que está impartiendo una asignatura, en cualquier nivel, en la cual va a pasar un cierto tiempo en estos temas. Supondremos que ya ha establecido una programación en la que, de una forma u otra, estará definida una secuencia de hechos, conceptos y teorías que se pretenden enseñar. Esta secuencia es absolutamente prioritaria; las actividades en el laboratorio o las demostraciones que puedan hacerse en clase se deben articular de forma que permitan observar o experimentar aquello que le parezca más importante o que pueda resultar más difícil de comprender, no como simples entretenimientos. La limitación suele ser siempre el tiempo y por ello debe seleccionar experiencias especialmente relevantes por los conceptos que intervienen en ellas, por su vistosidad o su interés para los alumnos. En suma, deberían ser aquellas que permitieran a los alumnos comprender mejor el tema y su importancia.

A continuación, busque en la Tabla de Experimentos aquellas que coincidan con sus intereses. Solamente con el título podrá hacerse una idea rápida sobre el experimento. Las columnas sobre los materiales y el nivel de los alumnos le podrán ayudar en esta selección. Lea las descripciones de las que ha escogido y, si es posible, las de las experiencias de la misma sección (que suelen ser variaciones sobre ideas relacionadas). Si cree que la experiencia puede resultar interesante y dispone de los materiales entonces debe abordar el punto crítico: **HAGA USTED MISMO LA EXPERIENCIA**. Si la experiencia es simple, como la mayor parte de las del libro, hágala varias veces probando variaciones, para ganar consciencia de los factores que pueden afectar el resultado. Puesto que habrá invertido la mayor parte del tiempo en buscar los materiales y prepararlos, aproveche la ocasión y dé vueltas a posibles alternativas. Si no dispone de los materiales intente usar algo parecido que tenga en el laboratorio; si no fuera así, deberá buscarlos aportando algo más de tiempo extra. Los costes y las referencias de algunos materiales se dan únicamente a título orientativo; tenga en cuenta que este tipo de información caduca rápidamente.

Al ir haciendo experiencias, aunque no sean demasiadas, aprenderá a gran velocidad. No se desanime si las cosas no le funcionan a la primera. Comprobará que casi siempre se trata de pequeños fallos; si no resuelve las pegas intente usar materiales lo más parecidos a los que se indican en los ejemplos o consulte a profesores más expertos. Consultar a alguien que conozca el tema es, probablemente, el método más rápido de salir del atasco. Sea siempre consciente que hacer nuevas experiencias a partir de la descripción de un libro es bastante más complicado que reproducirlas después de verlas hacer a otro compañero. No embarque a los alumnos en nada que usted no haya probado previamente, por muy simple que le parezca. En general, no se trata de que haya posibles peligros físicos, simplemente puede ocurrir que la experiencia o demostración no funcione por alguna bobada y esto le va a desanimar si está con los alumnos y no consigue arreglarlo rápidamente. No subestime este consejo.

Si decide hacer un experimento o una demostración en el aula, hágalo únicamente si los materiales son simples, fáciles de transportar y la experiencia muy fiable. No se complique la vida si no lo ve claro. En el laboratorio la metodología a seguir con los alumnos puede ser muy variada pero, en general, está bastante condicionada por la cantidad de material disponible, el tiempo necesario para preparar el material, la tipología de los alumnos y el tipo de experimento que se quiera llevar a cabo. El profesorado que usa el laboratorio de una forma regular suele combinar las demostraciones con los experimentos de los alumnos por grupos. Recuerde que, por lo general, los alumnos mantienen el interés por un tiempo limitado; por ello, no alargue más de la cuenta el tiempo que se dedica a un experimento. Si el experimento es breve vale la pena algo de tiempo extra para asegurar que los alumnos entienden lo que hacen e interpretan correctamente los resultados o para posibles variaciones. El control del tiempo y del ritmo de avance es relativamente fácil si se trata de una demostración, alternando las manipulaciones con el dibujo de esquemas en la pizarra, cálculos, etc. Es particularmente importante conseguir la participación de los alumnos en las demostraciones, para ello vale la pena pedir a distintos alumnos que hagan los montajes y las manipulaciones necesarias o que sugieran posibles modificaciones. En las demostraciones el control de la progresión resulta muy parecido al que tiene lugar en una clase, con el elemento extra que representa el aparato o montaje que esté utilizando. Si los experimentos los hacen grupos de alumnos es más difícil (y más importante) que avancen de un modo paralelo; esencialmente se trata de evitar el aburrimiento de los que ya han acabado y la precipitación de los que quieren acabar rápido. Si los grupos de alumnos se hacen de forma equilibrada, las experiencias son cortas y el profesor controla el avance y las ayudas necesarias a los distintos grupos, la sesión de laboratorio funcionará bien. Es parti-

cularmente importante que, si no se dan por escrito, todas las orientaciones e indicaciones para realizar la experiencia se hagan al principio; si olvida algo y tiene que explicarlo a la mitad de una experiencia, cuando todos los alumnos están atareados, le costará mucho más que lo escuchan.

Las experiencias de laboratorio o las demostraciones pueden ser entretenidas y hasta divertidas, pero no resultan eficaces si no se hace algún tipo de trabajo relacionado con ellas. Del mismo modo que la forma de trabajo en el laboratorio es muy personal, las opciones de trabajo posterior también lo son. Pueden pasarse cuestionarios relacionados con las experiencias, hojas de problemas basados en los experimentos, hacer que los alumnos presenten breves trabajos o que realicen pequeñas investigaciones, introducir preguntas relacionadas con el laboratorio en los exámenes.... Tal como sucede en las clases normales, es totalmente ilusorio que por el hecho que el profesor explique algo, los alumnos lo comprendan de modo automático. No cometa el error de creer que por haber contemplado o realizado experiencias interesantes los alumnos han comprendido automáticamente los fenómenos correspondientes. La eficacia de las experiencias depende de muchos factores que son propios del laboratorio: la vistosidad de los experimentos que capturan la atención y producen un efecto perdurable, el tiempo que dura su realización que puede ser demasiado breve o demasiado largo provocando una pérdida de atención, la complejidad del propio fenómeno que se muestra y la mayor o menor participación de los alumnos en su desarrollo. Sin embargo, el factor que determina en mayor medida la eficacia del uso del laboratorio es la reflexión que se produce en cada alumno ante los fenómenos reales que se observan. Potenciar esta reflexión dentro y fuera del laboratorio es la tarea más importante del profesor.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

El papel de la sección de Bibliografía en cualquier trabajo es doble. Por un lado, se muestran las fuentes de las cuales uno se ha alimentado, dejando claro que se ha utilizado el esfuerzo de otras personas. Por otro, se facilita a quienes puedan estar interesados en ello, un modo de profundizar en el tema. De este modo, las citas que se indican a continuación tienen esta doble finalidad. Sin embargo, deben hacerse algunas puntualizaciones. En primer lugar, la naturaleza de las experiencias de laboratorio hace que, en muchos casos, uno las aprenda viendo como las realizan otros compañeros. Esta difusión «boca a boca» a través del contacto profesional o en cursos es importante ya que, además, actúa como una especie de selección natural, haciendo que se extiendan las experiencias que, en general, se consideran más interesantes. Por todo ello, en el libro

se recogen experiencias que deben de estar publicadas en algún lugar pero que me han llegado a través de estos canales difusos y cuyos autores desconozco.

No es así con muchas otras experiencias, que proceden de colegas que en un momento u otro tuvieron la amabilidad de mostrarme sus experimentos, entre ellos Joan Antó (Escuela Universitaria de Óptica de Terrassa) y Gaspar Orriols (Dep. de Física Fonamental, Universitat Autònoma de Barcelona). Otras experiencias son modificaciones de material elaborado en colaboración con Tomàs Padrosa y Luis Fernández en el Centre de Documentació i Experimentació del Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya. Unas cuantas proceden, directa o indirectamente de Lluís Nadal, del Centre de Documentació y Experimentació, y de Luis Pueyo, compañero en el Instituto El Cairat durante bastantes años.

Entre las fuentes bibliográficas de experiencias de laboratorio que se han utilizado destacan las siguientes:

D.Freier y F.J.Anderson «A demonstration Handbook for Physics». American Association of Physics Teachers (1981). Debe pedirse directamente al departamento de publicaciones de esta asociación (5112 Berwyn Road, College Park, MD 20740, USA). Cada experiencia o demostración se resume en un dibujo y unas cuantas líneas de texto. Las descripciones son brevísimas pero, en general suficientes. Otro libro de la misma asociación es «A potpourri of physics teaching ideas», recopilación de artículos de The Physics Teacher, realizada por Donna A. Berry, que contiene numerosas ideas sobre todos los aspectos de la Física. Las descripciones y, en general los experimentos, son útiles para alumnos de enseñanza secundaria. Varias experiencias se han adaptado de las que aparecen en estos libros y de otros experimentos publicados en The Physics Teacher y School Science Review.

Las siguientes recopilaciones (en castellano) son relativamente fáciles de encontrar:

– Proyecto Nuffield. «Física Básica. Guía de Experimentos» Vol. III y V. Reverté. 1974. Es muy interesante, aunque la colección completa puede resultar algo cara, ya que hay un buen número de volúmenes.

– «Nuevo Manual de la Unesco para la Enseñanza de las Ciencias». Edhasa. (1978). Se trata de una recopilación muy buena y variada, especialmente para el nivel de ESO.

Los manuales de los equipos didácticos (Enosa, Phywe, Distesa,...) que cada uno tenga a mano, resultan imprescindibles. Aunque no se disponga de los equipos, algunos catálogos resultan una buena fuente de ideas (Pasco, Griffinn...)

Algunos libros de texto tienen un enfoque muy práctico y en ellos se describen muchos experimentos, entre ellos: Tom Duncan «Physics. A textbook for advanced level students». John Murray. 1987.

Los libros de «Ciencia Recreativa» suelen contener experimentos de todo tipo entre los cuales no escasean los de óptica y sonido. En general, las experiencias que aparecen en unos y otros son bastante parecidas. Entre ellos vale la pena citar:

José Estalella «Ciencia Recreativa». Gustavo Gili. 1973. El libro está agotado desde hace años. Prácticamente todo el libro describe entretenimientos y experimentos caseros. La primera edición data de 1918 y su mayor interés es comprobar el carácter pionero de Estalella en la enseñanza de las ciencias a través de experimentos. Algunos de sus trabajos didácticos se recopilaron en: Josep Estalella «L'obra dispersa», en una edición patrocinada por la «Caixa d'Estalvis del Penedès». Esta obra contiene unas conferencias de 1920: «La simplificación del material escolar de Física y de Química» perfectamente vigentes.

«Ciencia Recreativa». Planeta-DeAgostini. Se trata de una extensa colección de libros, algunos con materiales para montajes simples. Muchas de las construcciones son utilizables con alumnos de los cursos más elementales. Abarcan toda la Física, entre ellos: Vol 5: El color; Vol 9: El sonido; Vol 12: Escalas de sonidos; Vol 21: Óptica; Vol 22: Las ondas de radio.

Los aspectos teóricos de la naturaleza de la luz y de la óptica, así como de las ondas en general, pueden encontrarse en el texto clásico del proyecto PSSC, a un nivel muy adecuado para el profesorado de enseñanza secundaria: U. Haber-Schaim, J.B.Cross, J.H.Dodge, J.A.Walter. «PSSC. Física». Editorial Reverté. 3a edición. 1980, capítulos 1 a 4 y 8. Para mi gusto, el tratamiento de las interferencias de luz es fenomenal.

A un nivel superior, de un modo especialmente estimulante para aquellos profesores que puedan pensar que el estudio de la óptica es complicado, se recomienda el primer volumen de la trilogía de Feynman: R.P.Feynman, R.B.Leighton y M.Sands. «Física». Fondo Educativo interamericano. Capítulo 26 y siguientes. El sonido se estudia en el capítulo 47 y siguientes, con un enfoque más convencional. Sea precavido. Este libro puede provocar adicción.

La lectura de los textos anteriores pueden convertirle en un forofo de la Óptica. Si busca otros aspectos más inusuales relacionados con sonido u óptica de fenómenos cotidianos (con una bibliografía apabullante) podrá encontrarlos en: Jearl.D.Walker. «La Feria ambulante de la Física». Limusa. 1979.

El libro: J.R.Pierce «Los sonidos de la música». Biblioteca Scientific American. Ed. Labor. 1985, así como la recopilación de artículos de «Acústica Musical». Libros de investigación y Ciencia. 1989, pueden resultar útiles a los que desean profundizar en la física de la voz y la música, aunque pueden resultar algo farragosos si uno no sabe gran cosa de estos temas.

Las Administraciones Educativas de nuestro país han publicado materiales para las distintas etapas de la reforma educativa aunque, en general, estos materiales se conocen y se utilizan únicamente entre el profesorado de la propia comunidad. Únicamente como ejemplo, el Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya ha publicado, en relación con la enseñanza del sonido y la luz, los trabajos:

Jordi Roig; Pere Cuevas. «El so i la llum». (propuesta de crédito variable). Departament d'Ensenyament. Generalitat de Catalunya. 1989.

Jaume Aranda. «Ones i vibracions» (propuesta de crédito variable). Departament d'Ensenyament. Generalitat de Catalunya. 1989.

TABLA DE EXPERIMENTOS

GAA: Generador de señales, amplificador, altavoz; CRONO: cronovibrador; VIBR: vibrador; OSCIL: osciloscopio; ORD: ordenador; UV: lámpara ultravioleta (de luz negra); POLARI: láminas polarizadoras; LASER: puntero láser; REG: regulador de intensidad	Tipo: E experiencia, D demostración, EC experimento casero, J juego	Sólo se usan materiales simples o de los equipos normales	Se necesitan además, otras piezas, de uso general	Deben buscarse otros materiales	Muy interesante o vistosa para todos los niveles	Adecuada para ESO	Son necesarios cálculos, adecuada para cursos superiores
Primera parte: Ondas. Sonido.							
1.1.- Concentración de la luz mediante lentes	E,D	X				X	
1.2.- Fotómetro de Bunsen. Distribución de la energía luminosa en el espacio	D	X			X		
1.3.- Juego de las bolas de «Newton».	D			X			
1.4.- Juego de las tres monedas	E, EC	X				X	
1.5.- Ondas en un muelle largo o un slinky	D			X			
2.1.- Juego de las maderas chinas	EC, J	X				X	
2.2.- Péndulos acoplados	D	X					
3.1.- Ondas en una cuerda. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia	D	X				X	
3.2.- Ondas en una goma elástica. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia	D		VIBR		X		
3.3.- Sonido en copas. Visualización de la longitud de onda	E	X				X	
3.4.- Ondas longitudinales y transversales. Polarización de una onda	D	X					
3.5.- Teléfono con dos vasos y un cordel	EC, J	X				X	
3.6.- Cómo oír un disco con un vaso y una aguja	D, EC	X				X	
4.1.- Longitud de onda y velocidad del sonido, con un osciloscopio	D		OSCIL				X
4.2.- La velocidad del sonido depende del medio	D		OSCIL				X
4.3.- Velocidad del sonido. Medida con el tubo de Kundt	D		GAA		X		
4.4.- Velocidad del sonido. Resonancia en un tubo parcialmente sumergido en agua	E	X				X	
4.5.- Longitud de onda y velocidad de una onda transversal en una goma elástica	D		CRONO		X		
4.6.- Velocidad de una onda en un muelle. Efecto de la tensión y de la densidad lineal	D	X					X
4.7.- El sonido no se propaga en el vacío	E, D			X		X	
5.1.- Margen de frecuencias audibles de sonido. Tono	D		GAA		X		
5.2.- Tono	EC	X					
5.3.- Afinación. Octavas	E,D	X					
5.4.- Frecuencias de sonido patrón. Escalas musicales con el generador de señal	E		GAA				
5.4.- Frecuencias individuales con el ordenador	E		ORD				

6.1.- Resonancia con péndulos	D	X					
6.2.- Resonancia con dos diapasones	D	X			X		
6.3.- Curva de resonancia con un diapasón y una pelota de ping pong	D	X					
6.4.- Resonancia con tubos de cartón. La música del aire	E	X				X	
6.5.- Resonancia de tubos. Una vela para observar la resonancia	D		GAA		X		
7.1.- Ver el sonido. Utilización de un osciloscopio	D		OSCIL				
7.2.- Ver el sonido. Utilización del ordenador	D		ORD			X	
8.1.- Interferencias con dos altavoces	D		GAA				
8.2.- Pulsaciones	E,D	X			X		
9.1.- Ondas estacionarias transversales en un muelle largo	D	X				X	
9.2.- Ondas estacionarias longitudinales y transversales	D	X			X		
9.3.- Ondas estacionarias en varillas	E,D			X	X		
9.4.- Ondas estacionarias en campanas y tapas de cacerolas	E,EC	X			X		
9.5.- Ondas estacionarias en dos dimensiones: Placas vibrantes	D		VIBR		X		
9.6.- Los trastes de la guitarra	D	X					
10.2.- Experimentos con la cubeta de ondas	D	X			X		
11.1.- Reflexión de ondas en muelles y cuerdas	E	X					
11.2.- Reflexión de la radiación infrarroja utilizando estufas de reflectores parabólicos	D			X			
11.3.- Reflexión de los rayos infrarrojos de un mando a distancia	EC	X					
11.4.- Reflexión del sonido. Un aparato para medir distancias	D			X			
Segunda parte: Luz y óptica							
1.1.- Construcción y utilización de una caja negra	E,EC	X				X	
1.2.- «Caja negra» con una bombilla. Imagen del filamento	D	X					
1.3.- Tamaño del Sol	E	X					
2.1.- La luz blanca está formada por un conjunto continuo de frecuencias	D	X			X		
2.1.- Descomposición de la luz blanca	E	X				X	
3.1.- Absorción de la luz. Filtros	E,D	X				X	
3.2.- Mezclas aditivas de colores. Colores complementarios	D			X	X		
3.3.- Color blanco en un monitor de ordenador	EC	X					
3.4.- Disco de Newton. Luz blanca y mezcla de colores	E,J	X					X
3.5.- Sustracción de colores. Colores complementarios	D			X			X

3.6.- Colores complementarios y mensajes ocultos	D	X				X	
3.7.- Mensajes con tizas de colores	D	X				X	
3.8.- Visión estereoscópica con filtros de colores complementarios	D	X					
4.1.- Demostraciones y experiencias con luz polarizada	D		POLARI		X		
4.2.- Otros sistemas de polarización	E	X			X		
4.3.- Materiales birrefringentes	D		POLARI		X		
4.4.- Simulación de un microscopio petrográfico	D		POLARI				X
4.5.- Efectos de la deformación de los materiales. Polariscopio	D	X					
4.6.- Funcionamiento de un display de cristal líquido	D,EC	X			X		
4.7.- Cine 3D utilizando luz polarizada	D		POLARI		X		
5.1.- Construcción de un espectroscopio	E	X			X		
5.2.- Espectros de absorción. Líneas de Fraunhofer en el espectro de la luz solar	E	X					
5.3.- Líneas espectrales de emisión de los elementos químicos. Sales a la llama	E	X			X		
5.4.- Líneas de emisión en las descargas eléctricas en gases	D			X	X		
5.5.- Triboluminiscencia	EC	X				X	
5.6.- Luz ultravioleta. Fluorescencia y fosforescencia	D		UV		X		
5.7.- Simulación de la absorción de luz UV por la capa de ozono	D		UV			X	
5.8.- Emisión de luz en las reacciones químicas. Quimioluminiscencia	D			X			
5.9.- Efecto fotoeléctrico	D			X			X
6.2.- Construcción de un estereoscopio simple	E	X			X		
6.3.- Visión 3D. Acertar a una anilla	EC	X				X	
6.4.- Persistencia de la visión. Una imagen en el aire	D,EC	X			X		
6.5.- Persistencia de la visión. El lápiz blando	J,EC	X				X	
7.2.- Ley de la reflexión con un cristal y dos velas	E	X				X	
7.3.- La vela que no quema	D,J,EC	X				X	
7.4.- Otro juego basado en la reflexión	E	X				X	
7.5.- Un aparato para copiar dibujos	E	X				X	
7.6.- La hucha «mágica»	J	X				X	
7.7.- Calidoscopios con dos espejos y una vela	E	X				X	
7.8.- Túnel de espejos	E	X				X	
7.9.- Dos caras en una	D		REG			X	
7.10.- Reflexiones múltiples en un tubo	E	X					

7.11.- Espejos de catadióptrico	D			X			
8.1.- Trayectoria de los rayos de luz en los espejos curvados	E	X				X	
8.2.- Reflexiones en tazas. Cásticas	EC	X					
8.3.- Imágenes y aumento de los espejos cóncavos y convexos	EC	X					
8.4.- Distancia focal de un espejo cóncavo	EC	X					
8.5.- Trayectoria de los rayos en espejos curvados, con un láser	D		LASER			X	
8.5.- Espejos cilíndricos	J	X				X	
9.1.- Porcentaje de luz reflejada y refractada	E	X				X	
9.2.- Observación de la refracción con una moneda dentro del agua	EC	X				X	
9.3.- Observación de la refracción con un lápiz sumergido en agua	EC	X				X	
9.4.- Medida del índice de refracción del agua con una caja y agujas	E	X			X		
9.5.- Medida de la profundidad aparente	E	X			X		
9.6.- Utilización de equipos didácticos. Cálculo del índice de refracción	E	X			X		
9.7.- Uso de los equipos didácticos para estudiar la reflexión total y el ángulo límite	E	X					
9.8.- Reflexión y refracción en un prisma, con un láser y una caja de humo	D		LASER				
9.9.- Reflexión total y fibras ópticas	D			X			
10.1.- Lentes convergentes y divergentes. Utilización de los equipos didácticos	E	X					
10.2.- Estudio de las gafas. ¿Miopía o Hipermetropía?	E,EC	X			X		
10.3.- Trayectoria de los rayos luminosos con un peine y una lupa	EC	X					
10.4.- Lentes de Fresnel	D			X			
10.5.- Distancia focal de una lente. Medida directa	E	X			X		
10.6.- Imágenes reales y virtuales. Posición de las imágenes	E	X			X		
10.7.- Ecuación de una lente	E	X					X
10.8.- Aumento de una lente convergente	E	X					X
10.9.- Estudio de las lentes de unas gafas	EC	X			X		
10.10.- Distancia focal de una lente convergente. Método de las imágenes virtuales	E	X					
10.11.- Construcción de una cámara fotográfica mejorada	E	X				X	
10.12.- Encadenamiento de imágenes. Simulación de un microscopio	E	X					
10.13.- Simulación del funcionamiento del ojo. Gafas y lentillas	E	X					
10.14.- Medida de la profundidad aparente mediante una lente	E	X					
11.1.- Observación de la dispersión con un láser	D		LASER		X		
11.2.- Colores de dispersión. Puesta de Sol artificial	D	X			X		

11.3.- Dispersión con hojas de papel	D,EC	X					
12.1.- Observaciones simples de la difracción e interferencia con dos bolígrafos	EC	X					
12.2.- Observación de la difracción e interferencias con tramas de tejidos	EC	X					
12.3.- Uso de diapositivas de alto contraste y de un proyector para la experiencia de Young	E	X					
12.4.- Utilización de diapositivas de alto contraste para observar la difracción	E	X					
12.5.- Medida de la longitud de onda de la luz amarilla de una lámpara de sodio	E	X					X
12.6.- Observación de franjas de interferencia en dos láminas de vidrio	E	X					
12.7.- Franjas de interferencia en películas de jabón	E,EC	X				X	
12.8.- Observación de la difracción. Redes de difracción por reflexión.	E	X					
12.9.- Observación de la difracción. Redes de difracción por transparencia	E	X					
12.10.- Franjas de interferencia en una lámina de vidrio, empleando un láser	D		LASER		X		
12.11.- Visualización de corrientes de convección	D		LASER		X		
12.12.- Difracción de la luz de un láser en rendijas simples y dobles	D		LASER				X
12.13.- Espaciado de las líneas de un compact disc	D		LASER				X
12.14.- Estudio de la trama de un tejido	D		LASER				
12.15.- Diámetro de un cabello	D		LASER				X
12.16.- Difracción en una aguja	D		LASER				X
12.17.- Hologramas	D			X	X		

PRIMERA PARTE: LAS ONDAS. SONIDO

INTRODUCCIÓN

El estudio de las ondas presenta algunas características que lo hacen especialmente apropiado para un buen uso del laboratorio, tanto para demostraciones que realiza el profesor como para experiencias o pequeños trabajos prácticos que los alumnos pueden realizar individualmente o en grupos.

Las experiencias relacionadas con las ondas y el sonido suelen ser vistosas, fiables y fáciles. Tienen un carácter interdisciplinar muy acentuado puesto que, como se verá, inciden fuertemente en aspectos básicos de otras materias. Así, el estudio físico del sonido puede ser muy útil a profesores y alumnos de música. Las características físicas de la voz y de la audición tienen un carácter interdisciplinar aún mayor, ya que se relacionan muy de cerca con la fisiología del aparato fonador y del aparato auditivo y con la fonética, estudiada desde el punto de vista de los profesores del área de lengua.

Las consideraciones anteriores hacen que el estudio de las ondas y, especialmente del sonido, pueda tener un interés especial para aquellos alumnos con intereses dirigidos hacia la música y las filologías. Las matemáticas que se emplean para explicar la mayor parte de fenómenos son muy elementales y, por ello, estas experiencias resultan apropiadas tanto para alumnos de los primeros cursos de ESO como para los de cursos superiores.

Comprobará que muchas de las experiencias relacionadas con el sonido son, esencialmente, demostraciones. Por razones evidentes, puede resultar bastante complicado hacer que los alumnos experimenten individualmente con sonido. En las experiencias asociadas a las propiedades generales de las ondas, especialmente cuando se usa la cubeta de ondas, la tónica también suele ser demostrativa. Sin embargo, como verá a continuación, son posibles numerosas propuestas individuales o de grupos reducidos, e incluso experiencias de tipo casero con instrumentos musicales simples, copas, varillas y otros objetos que los alumnos tienen a su alcance.

LOS MATERIALES BÁSICOS

.....Pues ¿no tiene yunque y fragua el herrero, balanzas el panadero, niveles y plomadas el albañil, sierra el carpintero, arados el labrador? ¿No tienen cerraduras las puertas, vigas las casas, arcos los puentes, cuestas los caminos?....

J. Estalella en «*La simplificación del material escolar de Física y Química*» (1920)

Hace bastantes años, los centros de enseñanza secundaria recibían un equipo para el estudio de las ondas, con un repertorio de materiales y una colección de experiencias, en general, bastante interesantes. Los equipos actuales de Mecánica suelen incluir algunos materiales simples, como diapasones o tubos, para poder realizar experiencias sobre ondas.

Muchos centros disponen de cubeta de ondas. En algunas comunidades forma parte del equipamiento estándar en los institutos de la red pública. Basta ojear la mayor parte de fotografías en libros de texto para apreciar que muchas experiencias sobre las propiedades de las ondas pueden realizarse con ayuda de esta cubeta. Por ello, se dedica un apartado completo a su uso, sus pegas y las experiencias que pueden realizarse. Si no la tiene no hay problema, puede hacer muchas otras cosas, la mayoría bastante más interesantes que las que se hacen con la cubeta. Si la tiene, utilícela; con poco esfuerzo tendrá a su disposición un pequeño repertorio de las experiencias básicas sobre ondas.

Algunos afortunados pueden disponer de sistemas de adquisición de datos que permiten que el ordenador almacene y analice sonido. Si este no es su caso tiene alternativas, como el uso de placas SoundBlaster o similares, que permiten visualizar las ondas correspondientes a la voz o a los sonidos de instrumentos. Debido a su mayor especialización, el uso del ordenador para el estudio del sonido es un tema que aquí no se discute en profundidad, sin embargo, se ha dedicado una pequeña sección a los resultados que se obtienen y los análisis que se pueden realizar. De este modo, aquellos profesores que en la actualidad no disponen de estos sistemas tendrán algún material para abordar el estudio de la voz o las diferencias de timbre de los instrumentos musicales. En cualquier caso, a partir de estas «experiencias» podrán evaluar el interés que estos dispositivos puedan tener para sus alumnos y solicitar a la Administración el equipo correspondiente, si se trata de un centro público, o comprarlo si tienen un presupuesto saludable.

Si solamente dispone de ordenador, sin tarjeta de captura de sonido, se puede usar su altavoz para generar frecuencias audibles de distinto valor. En el apartado correspondiente se da el listado de un programa

muy simple en Pascal. Su intención es únicamente mostrar como puede emplearse un ordenador sin tarjeta, en el tema de sonido. Si sabe programar, le será muy fácil generar programas bastante mejores en cualquier lenguaje; si no es así busque ayuda entre sus compañeros o alumnos. No subestime su interés; aún con un ordenador del paleolítico podrá generar la frecuencia de sonido que le apetezca y con un poco de paciencia, comparando, podrá medir la frecuencia con que suena un vaso o una barra.

Si dispone de algún osciloscopio podrá «ver» el sonido y para ello se describen algunas experiencias. Si no tiene osciloscopio ni un sistema de adquisición informatizado, despídase de verlo. Tendrá que conformarse con las diapositivas o fotocopias. Incluso así, el repertorio de experiencias con materiales simples es apabullante, pero sea consciente de que «ver» el sonido es algo importante que sus alumnos se habrán perdido.

Una vez en el terreno de los materiales más asequibles se recomienda encarecidamente disponer de un generador de frecuencias, un amplificador (modesto) y un altavoz. Su coste es razonable y puede encontrarle varios usos. Comprobará que se usa en experiencias particularmente interesantes; por ello, si va corto de presupuesto la compra de estos aparatos podría ser una buena opción. Más adelante se insiste sobre este tema.

La mayor parte de materiales básicos son diapasones, tubos de cartón, tubos y varillas de distintos metales, serrín, copas, etc..El repertorio es sumamente variado así como las fuentes para conseguirlos pero, en general, por muy aislado que uno esté, no tendrá grandes dificultades para encontrarlos. Las tiendas tipo «todo a 100» suelen ser una fuente importante y, sobre todo, barata de estos objetos.

La utilización de instrumentos musicales simples facilita el estudio de bastantes conceptos relacionados con el sonido y las ondas. Los alumnos dispondrán de flautas, guitarras,... que pueden traer si es necesario. Es aconsejable disponer de una guitarra y de un par de flautas.

Además de los materiales anteriores, puede ser conveniente que disponga de otros que se indican más adelante. Es importante, además, que en el laboratorio haya un equipo de herramientas simples para poder hacer pequeñas reparaciones, construcciones o modificaciones, entre ellas: soldador de estaño, sierra de metales, alicates, destornilladores, juego de llaves, cutter y un taladro.

SUMINISTRADORES

Tal como podrá comprobar en la segunda parte del libro, en el apartado correspondiente al estudio de la luz, las tiendas del tipo «todo a 100» y «SERVICIO ESTACIÓN» suelen disponer de un repertorio tremendo de materiales que, con la imaginación oportuna, pueden emplearse en el laboratorio para experiencias de Física. Este tema no es una excepción.

Los diapasones pueden conseguirse en tiendas de instrumentos musicales. Suelen ser pequeños y solo se oyen cuando se apoya su extremo en el hueso de la parte externa de la oreja o sobre una caja de resonancia. Puede ser conveniente disponer de un diapason montado en una caja de resonancia, mucho más grande y con una pieza móvil para ajustar la frecuencia. Sin embargo, le puede costar encontrarlo en tiendas de instrumentos musicales y debería buscar en suministradores de material didáctico. Una fuente interesante de diapasones de frecuencias «exóticas» son los suministradores de material para usos médicos. Los de frecuencias altas (por ejemplo el Do a 2048 Hz) pueden resultar interesantes en algunas experiencias.

El generador de frecuencia forma parte del equipamiento normal de un centro público y, en caso necesario, puede comprarse a suministradores de material electrónico. Si busca un pequeño amplificador intente usar el de un radiocassette o un tocadiscos viejo usando la entrada auxiliar. No compre un amplificador demasiado bueno si no está dispuesto a sufrir viendo como lo maltratan. El altavoz correspondiente debería ser algo grande o un baffle de un equipo viejo. Es fácil conseguir tanto el amplificador como el altavoz de segunda mano o de alguien que se haya comprado uno nuevo. Si pregunta en tiendas de material electrónico es posible que le puedan vender algún modelo anticuado. También es posible que uno mismo se construya el amplificador, de acuerdo con el circuito electrónico que se indica más adelante o a partir de kits fáciles de encontrar; naturalmente, para ello es necesario tener unos conocimientos mínimos de electrónica. El montaje básico consiste en el generador de señal conectado al amplificador y, a este, un altavoz. Lo normal es emplear la salida senoidal del generador, con una amplitud muy baja, conectada a la entrada AUX del amplificador. Si tiene algún compañero en el Centro que entienda del tema pregúntele y se ahorrará molestias; si no fuera así pregunte en alguna tienda especializada en componentes electrónicos, dígales lo que quiere hacer y no tendrá problemas, suele haber grandes expertos. Mantenga bajo control la salida del generador de señal y recuerde que el amplificador y el altavoz tienen límites. Si puede comprar un generador de señal que lleve incorporado un frecuencímetro no dude que le sacará partido. En algunas experiencias es conveniente disponer de frecuencímetro pero si no lo tiene puede bastarle la frecuencia aproximada del dial del generador de señal.

Los tipos de cubetas de ondas y los experimentos básicos que se pueden realizar se describen en la sección 10 de la primera parte. Si desea comprar una, consulte a los suministradores de material didáctico.

Las experiencias sobre las propiedades generales de las ondas y el sonido no requieren materiales demasiado específicos, a excepción de los que se acaban de mencionar, por lo que, en principio, no hará falta acudir a suministradores especiales. El resto de materiales forma parte

de los equipos didácticos (normalmente los de mecánica) o son fáciles de encontrar. Así, en algunas experiencias muy interesantes se utilizan barras y tubos metálicos, esencialmente de latón y aluminio que se pueden conseguir en grandes ferreterías o suministradores de carpintería de aluminio. También se emplean tubos de cartón que se encontrarán en almacenes de mayoristas de tejidos. Prácticamente, el resto de materiales puede conseguirse en tiendas tipo «todo a 100».

MATERIALES GENERALES

En este apartado se describen las características de los materiales de uso más general. Si algún material se necesita únicamente para una experiencia, se describirá en el apartado correspondiente.

Slinkys y muelles largos: Los slinky son juguetes formados por un muelle de gran diámetro, unos 8 cm. Tradicionalmente se han empleado para el estudio de los distintos tipos de ondas y se encuentran en tiendas de juguetes. Cómprelos de acero (también los hay de plástico) y guárdelos cuidadosamente ya que es fácil que se líen si no se manipulan con un poco de cuidado. Personalmente prefiero usar muelles largos y flexibles (o unir varios muelles cortos para formar uno largo), de unos 2 metros y 2 cm de diámetro, que se pueden encontrar en ferreterías algo grandes. Como los slinky, deben guardarse sin que se formen líos entre las vueltas, que son laboriosos de deshacer.

Copas y vasos: Lo más simple es conseguirlos en un «todo a 100» ya que la calidad no importa demasiado. Cuanto más delgado sea el vidrio mejor van a funcionar para todos los experimentos. Vale la pena comprar de varios tipos para ver cuales funcionan mejor y después comprar el resto.

Tubos de vidrio: En varios experimentos se emplean estos tubos para observar ondas estacionarias, con serrín o limaduras de corcho en su interior. En principio, son sustituibles por tubos de PVC, metacrilato u otros plásticos transparentes, pero el de vidrio tiene la ventaja de poderse calentar para comprobar como la velocidad del sonido depende de la temperatura. Otra pega de los de plástico es que fácilmente se cargan con electricidad estática y el serrín queda pegado. Pueden conseguirse en suministradores de material de vidrio de laboratorio, entre 70 cm y 1 metro de longitud y de unos 3-4 cm de diámetro.

Diapasones: En las tiendas de música se encuentra normalmente un único diapasón, el La4 a 440Hz. Los equipos didácticos de mecánica normalmente incluyen este diapasón, sin caja de resonancia. El equipo Phywe (y probablemente algún otro), también incluye un diapasón grande de 1000 Hz, muy apropiado para algunos experimentos. Es conveniente disponer de un diapasón con caja de resonancia y una pieza para variar

ligeramente la frecuencia. Puede buscarlo en los suministradores de material didáctico o en tiendas de instrumentos musicales. Compare precios ya que es algo caro. Si se decide, es interesante tener dos de estos diapasones ajustables. Como ya se ha indicado, los suministradores de material para usos médicos disponen de diapasones de varias frecuencias, que generalmente corresponden a la nota Do en distintas escalas.

Cronovibrador: Es una pieza corriente en los equipos de mecánica de varios fabricantes. Se alimenta con corriente alterna de baja tensión y vibra a 50 Hz. Los de un fabricante nacional se alimentan a una tensión de 220V sin ninguna protección. Si tiene estos tenga cuidado. Si no dispone de este aparato compruebe si puede emplear el vibrador de la cubeta de ondas. Si no lo tiene y lo ve funcionar podrá adaptar fácilmente algún timbre o una bomba de aire de un acuario (cualquier aparatito con un electroimán) para que haga más o menos lo mismo.

Tubos de cartón o PVC: Los tubos de cartón deben ser algo largos (más de 1.5 m) y anchos, de unos 10 cm de diámetro. Se usan para bobinar tejidos o para guardar láminas. Consígalos en almacenes relacionados con estas actividades. Otra posibilidad es emplear trozos de tubería de PVC del tipo usado para desagües, en almacenes de material para la construcción.

PRECAUCIONES

Las experiencias son seguras. Cuesta imaginar que alguien pueda lastimarse realizando estos experimentos. Las excepciones son las siguientes:

a) uso de lentes convergentes para concentrar la luz: Algunos alumnos tienen un sentido del humor bastante peculiar y, a alguno, se le ha ocurrido concentrar la luz sobre la cabeza de algún compañero despistado. Si se trata de una lente de Fresnel convergente el tema es más delicado puesto que se pueden producir quemaduras en cuestión de segundos, sea precavido y después de usarla USTED guárdela bajo llave. Tiene más mala sombra de lo que parece.

b) frecuencias elevadas de sonido: En general, no es necesario trabajar con la potencia máxima de sonido y el volumen puede ser relativamente bajo. Respecto a la frecuencia, hay una experiencia sobre la cual deben hacerse algunas advertencias. Se trata de la prueba de detección del margen de frecuencias audibles, en la que los alumnos comprueban su umbral de audición desde frecuencias bajas a frecuencias altas. Se ha descrito en la bibliografía didáctica que algunos alumnos pueden experimentar molestias (dolor de cabeza, náuseas, etc..) cuando la frecuencia es alta. Realmente a todo el mundo le fastidia un sonido tan agudo pero algunos alumnos (o profesores) lo pueden pasar mal. No subestime sus

posibles quejas y no se confíe al comprobar que la inmensa mayoría de alumnos no tiene ningún problema. Simplemente, sea consciente de este hecho y si algún alumno se queja de molestias hágale caso, exclúyalo del experimento y, en cualquier caso, no alargue la cosa más tiempo del necesario.

EL HILO CONDUCTOR DE LAS EXPERIENCIAS Y DEMOSTRACIONES

Todas las ondas tienen su origen en algún tipo de vibración. El sonido se origina en la vibración de las cuerdas vocales de una persona, de una cuerda de guitarra o de la membrana de un altavoz. Las vibraciones de los electrones en una antena originan las ondas de radio y de televisión y el simple movimiento de vaivén de la mano, sujetando una cuerda, provoca la propagación de una onda. Estas ondas tan distintas comparten muchas características que, generalmente, no se pueden observar con la misma facilidad en cada uno de dichos tipos. Por ejemplo, la longitud de onda resulta evidente cuando las ondas se propagan por una cuerda pero es algo más difícil de observar cuando se trata de sonido o luz. Al contrario, es mucho más fácil observar el comportamiento de la luz que el del sonido cuando se refleja o refracta al pasar de un medio a otro. Por ello, y de un modo totalmente subjetivo, las experiencias se han dividido en dos partes. En la primera, se estudia el comportamiento general de las ondas a partir de experiencias con cuerdas o muelles, con la cubeta de ondas y con sonido. En la segunda parte se estudian las propiedades de la luz; esta división hace que algunas propiedades, como el carácter transversal o longitudinal de una onda, puedan aparecer en ambas partes. A pesar del enorme interés de las ondas de radio o televisión y, en general de las ondas electromagnéticas, únicamente se describen experiencias con luz visible y unas pocas con luz ultravioleta y radiación infrarroja. Esencialmente, se ha querido evitar el entrar en los montajes electrónicos necesarios para explorar las propiedades de aquellas ondas.

Las primeras experiencias describen como las ondas transportan energía de un lugar a otro sin que la materia haga el viaje. Las ondas sólo tienen sentido asociadas al transporte de energía y por ello resulta difícil que una fotografía o un dibujo nos transmitan esta característica básica. También se proponen algunas simulaciones para profundizar algo más en este hecho. A continuación, se estudia el modo como la materia permite que las ondas la atraviesen transportando energía. La materia vibra al paso de la onda y, por ello, las características de las ondas están asociadas a las de un movimiento vibratorio que viaja con velocidad constante a través de un medio. Se ha considerado importante la visualización

de las características asociadas a una onda: amplitud, frecuencia, velocidad y longitud de onda, así como la relación inversamente proporcional entre longitud de onda y frecuencia; a ello se dedican varias experiencias.

El objetivo de las siguientes experiencias y demostraciones es el estudio de algunas características asociadas al modo como tiene lugar la propagación de la onda: el carácter longitudinal y transversal, la polarización y la velocidad de propagación, así como el efecto del medio.

El concepto de frecuencia, tan importante en relación con el sonido y la música, se estudia en unas experiencias y demostraciones elementales y básicas. Este concepto permite comprender la condición básica para que la energía que transporta una onda pueda ser capturada por un objeto y lo haga resonar.

A continuación se plantean diversas experiencias para comprobar el principio de superposición y observar como el encuentro de dos ondas origina unos importantes fenómenos, esencialmente, las interferencias, pulsaciones y ondas estacionarias de distintos tipos.

El hecho de que la amplitud y la frecuencia no basten para caracterizar totalmente a un sonido, puesto que podemos distinguir una nota de la misma frecuencia producida por un piano, una guitarra o una trompeta, introduce el concepto de timbre. El timbre es un concepto complejo, relacionado con los distintos modos de vibración de una onda estacionaria. Su estudio se facilita enormemente si se dispone de algún método para visualizar el sonido, con osciloscopio o, mejor, con ordenador.

Las dos últimas secciones de la primera parte quedan fuera del hilo conductor. En la primera se describe la utilización de la cubeta de ondas. Puesto que este aparato permite comprobar un abanico completo de propiedades de las ondas, ha parecido más conveniente tratar su utilización en un solo bloque, de un modo independiente. La última sección, a modo de apéndice de esta primera parte, describe unas experiencias simples sobre reflexión.

Como ya se ha indicado, en la segunda parte se describen experiencias y demostraciones relacionadas con el estudio de la luz y la óptica, con su propio hilo conductor. La mayor parte de propiedades de las ondas, especialmente las asociadas a cambios de medio se estudian de un modo particularmente efectivo cuando se trata de luz. Téngalo en cuenta si planifica un repertorio de experiencias asociadas a las propiedades de las ondas de un modo más general del que se ha planteado en este libro.

EXPERIENCIAS Y DEMOSTRACIONES

1.- UNA ONDA TRANSPORTA ENERGÍA SIN TRANSPORTE DE MATERIA

.... Consideramos el movimiento de algo que no es materia, sino la propagación de energía a través de la materia...

A.Einstein y L.Infeld en «La evolución de la Física»

Las ondas transportan energía de un punto a otro de modo que la materia solo experimenta vibraciones que empujan, a su vez, a la materia que está más allá. Un caso especial es el de las ondas electromagnéticas, que se pueden propagar incluso en ausencia de materia. Las siguientes experiencias y demostraciones, algo simples, ilustran este aspecto fundamental del comportamiento de las ondas.

1.1.- Experiencia. Demostración. Concentración de la luz mediante lentes

Cada alumno, con una lupa (pueden usarse las lentes de los equipos didácticos, de +5 o +10 dioptrías, o simples lupas) concentra la luz del Sol en una pequeña zona de un trozo de papel de periódico. Si la zona es oscura debido a la tinta el papel se calienta rápidamente, saca humo a los pocos segundos y se va quemando gradualmente (normalmente no se enciende la llama). Si los alumnos son pequeños pueden tratar de mirar la luz del Sol a través de la lupa. Adviértales seriamente y esté alerta a esta eventualidad. Por sus características es muy conveniente que esta experiencia se haga en el patio.

El experimento permite discutir como el Sol emite energía que viaja hasta la Tierra sin que ninguna partícula material haga el viaje desde el Sol hacia la Tierra. La energía se concentra y calienta el papel. Cuanto mayor sea la superficie de la lente más energía se concentrará y más rápidamente se quemará el papel.

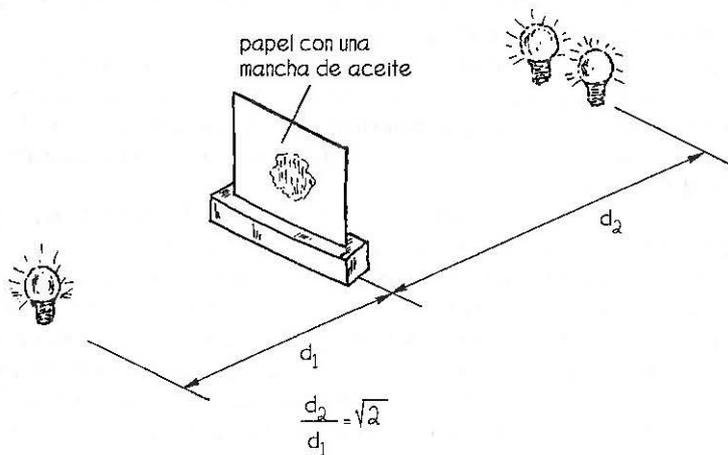
Si en vez de lupas pequeñas se usan lentes de Fresnel convergentes, del tamaño de una hoja de papel, la experiencia resulta mucho más espectacular. Se trata de lentes planas, en las cuales el relieve de la superficie sigue la forma que tendría una lente plano-convexa, como se explica en el apartado 10.4 de la parte de Óptica. Debido a su gran superficie, la energía que concentran es mucho mayor que la que concentra una lupa, a pesar de ser mucho más imperfectas que las lentes de vidrio. Por ello, una vez se enfoca sobre un papel la imagen del Sol, se produce una llama

a los pocos segundos. Tal exhibición de poderío provoca el entusiasmo de los alumnos y, especialmente si son pequeños, quieren manipular este portento. No suelte la lente de Fresnel y, si lo hace, no le quite el ojo de encima. Explique sus razones y guárdela lo antes posible. En general los fabricantes de estas lentes recomiendan extremar las precauciones si se trabaja con la luz solar. Por razones obvias, la lente debe guardarse en un sitio cerrado donde no le pueda dar la luz del Sol.

1.2.- Demostración. Fotómetro de Bunsen y distribución de la energía luminosa en el espacio

Una fuente de ondas puntual, como una bombilla, distribuye la energía de modo que se expande de una forma aproximadamente esférica. Puesto que la superficie de la esfera es proporcional al cuadrado del radio, la energía que llega a una superficie determinada, perpendicular a la dirección de propagación, debe ser inversamente proporcional al radio al cuadrado. Al contrario, si la fuente de ondas es cilíndrica, como sucede con un tubo fluorescente, la energía se distribuye en la superficie de un cilindro que es proporcional al radio. En este caso la energía que recibe una superficie es inversamente proporcional a la distancia, no a su cuadrado.

La demostración se realiza de una forma simple. Se empieza poniendo una gota de aceite en un trozo de papel. Podemos tener dos situaciones. Si la mancha se ve más clara que el resto del papel significa que la iluminación en el lado opuesto es mayor. Si la mancha se ve más oscura que el resto ello se debe a una mayor iluminación desde el lado en que se observa. Lo interesante es que la mancha desaparece cuando la iluminación es la misma a ambos lados. Este sistema tan simple para comparar la intensidad luminosa de dos fuentes se denomina fotómetro de Bunsen.



Si se bajan las persianas de la clase y se encienden los fluorescentes es fácil mostrar estas situaciones. Si hay dos filas de fluorescentes la mancha se verá cuando se acerque a una fila u otra pero desaparecerá en una posición más o menos equidistante entre ambas filas.

Este fotómetro nos permite comparar la intensidad de luz para deducir que la intensidad de una fuente puntual disminuye con el cuadrado de la distancia. El problema es conseguir una fuente puntual. Las velas no funcionan demasiado bien, ya que la llama es alargada y, además, las longitudes de mecha no son las mismas, la llama se mueve, etc.. Es mejor utilizar bombillas pequeñas e iguales, alimentadas a la misma tensión con una única pila o una fuente de alimentación regulable. La mancha en el papel desaparece si su posición es equidistante entre dos bombillas, sin embargo, si se ponen dos bombillas en un lado y una en el otro, el papel debe colocarse más cerca de esta última para que la iluminación sea la misma. Se anotan las distancias y se hace lo mismo con tres bombillas en un lado y una en el otro.

El análisis es muy simple: la energía que sale de un lado es nE (n es el número de bombillas y E la energía que sale de una bombilla), puesto que la energía que llega a la mancha disminuye con la distancia al cuadrado, debe cumplirse:

$$nE/E = d_n^2/d_1^2$$

$$\frac{d_n}{d_1} = \sqrt{n}$$

d_1 es la distancia del papel a la bombilla (única) a un lado y d_n la distancia del papel al grupo de n bombillas. El cociente de las distancias es un valor próximo a 1, 1.4, 1.7.... para valores de $n=1,2,3...$

Si las bombillas se alimentan con una fuente regulable puede hacerse, además, otra observación interesante. Supongamos que hay una bombilla a un lado y dos al otro, y que ha encontrado la posición en que la mancha del papel no se ve. Si aumenta un poco la diferencia de potencial de la fuente de alimentación, la energía de cada bombilla va a aumentar del mismo modo y, globalmente, el papel estará más iluminado; pero la mancha del papel seguirá sin verse.

1.3.– Demostración. Juego de las bolas de «Newton»

Es fácil conseguir un juego que consiste en una pequeña estructura de la que cuelgan 5 bolas de acero mediante un hilo muy fino. Este juguete permite observar como se propaga una onda a través de las bolas. Además, permite comprobar los principios de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía. Puede encontrarse con bastante facilidad bajo distintos nombres en las tiendas de regalos made in «Taiwan». No deje de comprarlo.

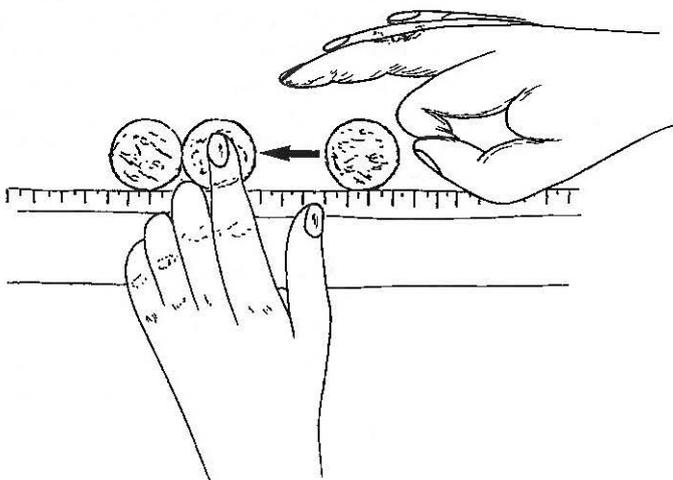
Se aparta una bola hacia un lado y se suelta. Las bolas centrales quedan quietas y la del otro extremo sale disparada hacia el otro lado. Cuando esta vuelve se repite todo hasta que al cabo de unas cuantas veces todas las bolas se revuelven. En los primeros choques es posible comprobar que la energía viaja de un extremo a otro a través de unas bolas inmóviles. La compresión originada en el primer choque se transmite a lo largo de la bola hacia la siguiente y cuando la bola del extremo recibe el impulso, salta hacia un lado. Globalmente, ha habido propagación de la energía de un lado a otro, sin que la materia haya viajado entre ambos extremos.

Suele ser bastante molesto separar las bolas si se han liado los hilos, por ello, guarde el juguete en la posición correcta.

1.4.- Experiencia. Experiencia casera. Juego de las tres monedas

Este juego, muy simple, es análogo a la experiencia anterior. Puede animar a los alumnos para que lo hagan en casa.

Se deben tener tres monedas iguales. Se colocan una al lado de otra, junto al borde de una regla. Tal como muestra la figura, la moneda central se sujeta firmemente con un dedo, apretándola contra la mesa. Se separa una de las monedas (la otra debe seguir en contacto con la moneda que se sujeta) y se empuja, dando un golpe brusco con el dedo para que golpee a la que estamos sujetando. La compresión originada en el choque, una onda longitudinal, se propaga a lo largo de la moneda sujeta, que permanece inmóvil mientras que la moneda del otro extremo sale disparada.



Se puede comprobar que si las dos monedas no están previamente en contacto (se deja una pequeña separación, de 1 mm, más o menos) no se transfiere la energía. Es de destacar la diferencia en la sensación que se tiene en el dedo cuando las dos monedas que reciben el choque están juntas. En este caso, una sale disparada y se lleva la energía del choque. Si están separadas la moneda que está sujeta recibe toda la energía. En el primer caso, la energía atraviesa la moneda inmóvil de un extremo a otro, y se entrega a la tercera moneda, mediante una onda.

El juego permite variaciones interesantes si se usan más de tres monedas o se emplea una moneda mucho mayor para transmitir o para recibir la energía. Puede proponer a los alumnos un pequeño estudio sobre este efecto usando dos monedas de 100 y una de 5, lanzando la de 100 o la de 5.

1.5.- Demostración. Ondas en un muelle largo o un slinky

La experiencia requiere un slinky o un muelle largo. Si se usa un muelle, que sea realmente largo, de unos 2 metros, más bien denso y si es posible que sea algo blando. Puede unir varios muelles iguales más cortos. Evite especialmente los cruces de vueltas en un muelle largo ya que suelen ser nefastos.

Busque un colaborador y extienda el muelle unos 4 o 5 metros. Pellizque su extremo, comprimiéndolo hacia usted y suelte este pulso longitudinal. Los alumnos verán como «algo» se transmite y rebota en el otro extremo. Sujete un clip de color, fácilmente visible, hacia la mitad del muelle. Cuando el pulso pasa por allí no arrastra el clip hacia el otro extremo, simplemente lo hace vibrar. Lo mismo sucede si se provoca un pulso transversal en un extremo, por ejemplo, golpeando el muelle moviendo el dedo índice hacia abajo, cerca de la mano que sujeta el extremo. En este caso, el pulso transversal va y vuelve hacia el otro extremo sin arrastrar la «materia» del muelle de un lado a otro.

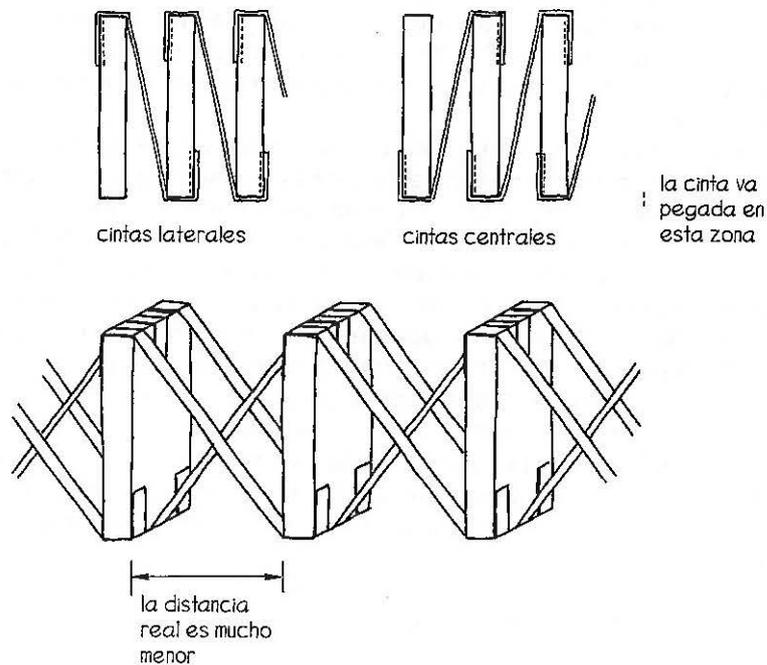
En cada situación la onda viaja de modo que la materia vibra respecto una posición, empujando a la materia que tiene al lado y esta a la siguiente, como si se tratara de fichas de dominó que al caer mueven la ficha siguiente.

Esta experiencia tan simple se cita más adelante ya que permite resaltar la diferencia entre las ondas longitudinales y transversales, la polarización y el efecto de la tensión del muelle en la velocidad.

2.- SIMULACIONES RELACIONADAS CON LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS. LA ENERGÍA SE PROPAGA SIN QUE VIAJE LA MATERIA

2.1.- Juego de las maderas chinas

Este sensacional juego, que todos hemos visto a veces en tiendas de juguetes o en paradas callejeras, consiste en una serie de trozos de madera unidos mediante cintas que constituyen bisagras muy peculiares, formando una tira articulada. Si se sostiene el extremo de la tira y se mueve el primer trozo a un lado y a otro, alternativamente, en cada movimiento hay una «caída» de piezas que se mueven sucesivamente, de modo que la sensación global consiste en el movimiento de una pieza de arriba a abajo. El juego es realmente divertido y tiene más posibilidades (sujetando ambos extremos y la tira horizontal, etc..).



El interés de este juego en el estudio de las ondas radica en el hecho de que las piezas de madera no cambian su posición relativa. Si se numeran sus lados, se comprueba que cualquier pieza siempre sigue en su lugar. La ilusión es debida al genial diseño de las bisagras hechas con

cintas. De este modo, la analogía con las ondas resulta evidente: se propaga la energía de un extremo a otro pero la materia no viaja entre los extremos.

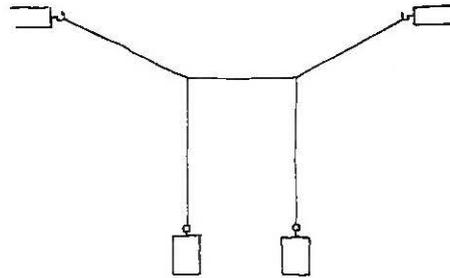
Si su construcción se plantea como una actividad individual de los alumnos (puede encantarles llevarse el juguete a casa) el tiempo empleado en la construcción depende de su habilidad y de su capacidad de trabajar en equipo; unas dos horas es una previsión razonable. Puede ser conveniente hacer grupos que realicen diversas tareas: cortar los trozos de madera, limar los bordes, cortar los trozos de cinta, pegar,.... Los materiales necesarios son: listones rectangulares y largos de madera, de 4.5 cm de anchura y 0.8 cm de grosor o similares, cintas de algodón (preferiblemente de colores. No deben ser demasiado anchas, de 1 cm aproximadamente, pueden encontrarse en mercerías o «todo a 100») pinceles y cola blanca.

Se cortan 6 trozos de listón, de 6 cm cada uno. Se necesitan 10 trozos de cinta de un color y 5 trozos de otro color, todos ellos de 13 cm. Estas tiras se pegan tal como se muestra en la figura empleando la cola blanca. Puesto que el secado es rápido, a los pocos minutos de acabar ya pueden mover el artefacto.

2.2.- Demostración. Péndulos acoplados

Esta demostración, que puede hacerse como experiencia para grupos de alumnos, permite comprobar la transferencia de energía de un cuerpo a otro. Sin embargo, aunque la transferencia de energía resulta evidente, queda algo alejada del comportamiento y de las propiedades de las ondas.

Basta con colgar un hilo de dos soportes, no demasiado tenso. A este hilo se atan otros dos hilos de la misma longitud, de los cuales cuelgan dos masas (no necesariamente iguales), como se muestra en la figura. Se hace oscilar transversalmente una de las masas, con la otra inicialmente parada. La segunda oscilará cada vez con mayor amplitud debido a la energía que captura de la primera masa, que se



irá parando gradualmente. El proceso se invierte y se repite una y otra vez de forma que la energía va pasando de una masa a otra.

3.- LA CARACTERÍSTICA BÁSICA DE LAS ONDAS: UN MOVIMIENTO VIBRATORIO QUE SE PROPAGA

Todas las ondas tienen su origen en un movimiento vibratorio que se propaga. La propagación tiene lugar a una velocidad característica para cada tipo de onda y de medio. La onda tiene cuatro características:

- la amplitud (que en las ondas mecánicas está relacionada con la energía).
- la frecuencia, número de vibraciones de la fuente que origina las ondas cada segundo.
- la velocidad de propagación.
- la longitud de onda, distancia entre dos puntos que vibran del mismo modo.

La velocidad, la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas mediante la ecuación:

$v = \lambda \nu$, en la que v es la velocidad de propagación de la onda, λ la longitud de onda y ν la frecuencia.

Según la dirección de vibración respecto a la de propagación podemos tener ondas longitudinales y transversales. En el caso de las ondas transversales, si la vibración se mantiene en un plano, diremos que la onda está polarizada.

3.1.- Demostración. Ondas en una cuerda. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia

La demostración permite observar todas las características de las ondas a un nivel muy elemental. Basta con disponer de una cuerda larga, de unos 20 metros, y por ello la demostración debe hacerse en el patio. Si la cuerda es demasiado corta la demostración no funciona bien. Una cuerda bastante larga con un alumno que amortigua los rebotes en el otro extremo permite estudiar la propagación de una onda mucho mejor que un muelle, en el cual siempre hay rebotes.

Dos alumnos sujetan la cuerda, algo floja pero sin que toque el suelo. Uno solamente sostiene la cuerda y el otro produce un movimiento vibratorio en el extremo.

a) Se producen unas «olas» que viajan hacia el otro extremo a toda velocidad, mucho mayor que la velocidad de una persona corriendo.

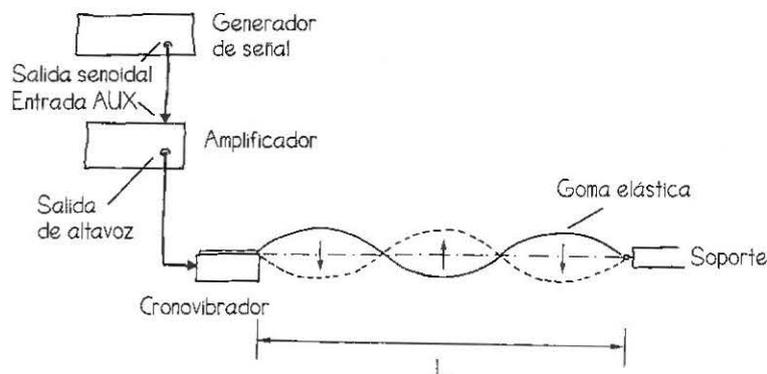
b) Las «crestas» y vientres son simétricos. La distancia al eje que indica la dirección es la amplitud.

c) La distancia entre dos «crestas» sucesivas depende de la frecuencia con que el alumno agita el extremo de la cuerda. Si el movimiento vibra-

torio tiene una frecuencia baja, las crestas están muy espaciadas (unos 8-10 metros). Al aumentar la frecuencia, las crestas viajan mucho más juntas, unos 2 metros. De este modo se comprueba que la frecuencia y la longitud de onda son inversamente proporcionales.

3.2.- Demostración. Ondas en una goma elástica. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia

Para realizar la experiencia es necesario un generador de señal, con su salida senoidal conectada a un amplificador. El montaje de estos aparatos se describe brevemente en la sección «Materiales básicos», al principio de la primera parte y en la experiencia 4.3. (tubo de Kundt). La salida del amplificador se conecta a un cronovibrador. Esta pieza, muy corriente en los equipos didácticos, consiste en una lámina de hierro colocada en el eje de un electroimán que, normalmente, se alimenta con corriente alterna (50 Hz) a baja tensión (unos 6V, los de Phywe). La lámina se magnetiza con una polaridad o la contraria según el sentido de la corriente y es atraída y repelida, alternativamente, hacia un pequeño imán. Una punta en el extremo de la lámina golpea una guía con una frecuencia de 50 Hz, es decir, cada 0.02 s. Generalmente, este aparato se usa para experiencias de Cinemática haciendo que una cinta con papel carbón registre los golpes del vibrador. En esta experiencia no se conecta a la corriente alterna de 50 Hz sino a la salida de un amplificador alimentado con la señal senoidal de frecuencia ajustable de un generador. También puede usarse el vibrador de una cubeta de ondas (este aparato se describe en la experiencia 9.5) que funciona de un modo parecido. En ambos casos se consigue variar la frecuencia de vibración de una varilla mediante el generador de señal.



Se ata un trozo de goma elástica de 1 o 2 metros (fornada con hilo, del tipo que se vende en las mercerías) al extremo de la varilla vibrante; el

otro extremo se ata a un soporte de modo que la goma quede estirada. Se anota la longitud de la goma y, empezando por las frecuencias bajas, se buscan las frecuencias en las cuales aparecen las ondas estacionarias sucesivas (fundamental, segundo armónico, tercero.....). Se anotan los valores que indica el dial del generador de señal (o un frecuencímetro conectado a la salida TTL del generador) en cada armónico. El producto de la frecuencia por la longitud de onda (velocidad de la onda en la goma) es prácticamente el mismo en cada caso. Si se alarga y tensa la goma y se repite el barrido de frecuencias para buscar de nuevo las sucesivas ondas estacionarias, se comprueba que, de nuevo, el producto de la longitud de onda por la frecuencia se mantiene constante, pero el valor que resulta es mayor que en el primer caso ya que la velocidad aumenta con la tensión de la goma.

Ejemplo

Con una goma elástica de 1.34 m aparecen los distintos armónicos, desde el primero al sexto, a las frecuencias siguientes: 9, 16, 24, 32, 40 y 47 Hz. Puesto que la longitud de onda es $2L/n$ (n indica el número del armónico), las longitudes de onda que corresponden a cada situación son: 2.68, 1.34, 0.89, 0.67, 0.54 y 0.45 metros. En todos los casos el producto de la longitud de onda por la frecuencia es prácticamente el mismo, cercano a 21 (m/s).

La misma goma se tensa hasta que su longitud es 1.90 m, las frecuencias de los distintos armónicos resultan ahora: 14, 27, 41, 55, 68, 83 Hz. Las distintas longitudes de ondas son: 3.80, 1.90, 1.26, 0.95, 0.76, 0.63. El producto resulta ahora, en todos los casos, cercano a 52 (m/s).

3.3.- Experiencia. Sonido en copas. Visualización de la longitud de onda

Es posible observar longitudes de onda pequeñas, del orden de unos milímetros, en la vibración de una copa llena de agua. Requiere algo de práctica pero no es difícil. Las copas pueden conseguirse fácilmente en un «todo a 100». Escójalas de vidrio delgado y lo más grandes posible.

Debe emplearse una copa llena de agua hasta un centímetro del borde. Uno se moja el dedo con el agua y describe un movimiento circular frotando el borde de la copa sin apretar demasiado. La copa debe sujetarse por abajo para dejar que la parte superior, cercana al borde, pueda vibrar libremente.

Todo el truco está en descubrir la presión del dedo sobre el borde ya que si se aprieta poco no vibra y si se aprieta demasiado, no se deja vibrar. Una vez se consigue que la copa suene se verán vibraciones en la superficie del agua, que incluso pueden salpicar fuera de la copa. Estas vibraciones tienen una longitud de onda claramente visible en la superficie del agua.

Si la copa esta vacía el sonido es mucho más claro e intenso. Es posible hacer vibrar casi cualquier recipiente aunque el vidrio sea grueso, por ejemplo, copas grandes de cerveza, peceras, cristalizadores. En los casos más reacios hay un buen truco: se frota el borde con un trozo de algodón mojado en alcohol, aunque casi siempre es posible conseguirlo con el dedo mojado, frotando con la presión apropiada. En cualquier caso es fundamental que el borde de la copa esté limpio y sin grasa. Otra posibilidad, algo más aparatosa pero eficaz, consiste en emplear un arco de violín.

La longitud de onda se puede observar claramente en muchos otros experimentos, entre ellos: 4.3 (Velocidad del sonido con el tubo de Kundt); 4.4 (Longitud de onda en una goma elástica) y 9.7 (Ondas estacionarias en dos dimensiones. Placas vibrantes).

3.4.- Demostración. Ondas longitudinales y transversales. Polarización de una onda

La diferencia entre las ondas transversales y longitudinales puede ponerse de manifiesto con toda facilidad usando un slinky o un muelle largo, como el descrito en la experiencia 1.5.

Con el muelle estirado lo suficiente, se comprimen unas cuantas espiras y se sueltan, llegan al extremo y rebotan. Se trata de un pulso de onda longitudinal. De un modo parecido, se golpea el muelle rápidamente hacia abajo con el dedo, cerca del extremo; se produce un pulso de onda transversal que rebota en el otro extremo. Los cambios de fase en la reflexión de una onda que llega al extremo se discuten en el experimento 11.1 (reflexión de ondas en muelles y cuerdas).

Puede usar el muelle para explicar qué es la polarización, mostrando como una onda polarizada vibra en un plano (lo normal en un muelle). Los experimentos sobre polarización de la luz, sumamente interesantes, se describen en la sección 4 de la segunda parte.

3.5.- Juego. Teléfono con dos vasos y un cordel

Este juego clásico demuestra que el sonido se propaga mediante vibraciones longitudinales. Se trata de un experimento simple, rápido y eficaz.



Basta con disponer de dos vasos de plástico y un trozo de cordel algo largo, de unos 5 metros. Se agujerea el fondo de los vasos, por ejemplo con un clavo o un clip estirado calentado en una llama. Se introduce el hilo y se hace un nudo en el interior para que no se suelte. Con el hilo algo tenso uno habla y otro escucha (y viceversa). Si se cruzan los hilos de dos de estos teléfonos las conversaciones se superponen.

3.6.– Experiencia casera. Demostración. Cómo oír un disco con un vaso y una aguja

Esta demostración resulta muy efectiva para alumnos de cursos elementales. Se demuestra que el sonido se origina en las vibraciones de los materiales. Para ello se emplean un disco viejo y un tocadiscos. Es muy fácil conseguir un tocadiscos antiguo si lo pide a los alumnos. En realidad basta con que sea capaz de hacer girar el disco. En los gramófonos antiguos las rugosidades del surco del disco hacían vibrar una aguja de acero; las vibraciones se transmitían a una trompa que las amplificaba. De un modo parecido, podemos usar un vaso de plástico con una aguja en el fondo, pegada con silicona o cualquier otro adhesivo.

Se hace girar el disco en el tocadiscos. Se sostiene el vaso con la mano y se apoya la aguja ligeramente en el disco. Las vibraciones producidas por las irregularidades del surco del disco se transmiten a la aguja y, de esta, al fondo del vaso que a su vez hace vibrar el aire. De este modo, la grabación se oye claramente aunque el sonido resulta algo desagradable y muy sucio.

4.- VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS. VELOCIDAD DEL SONIDO

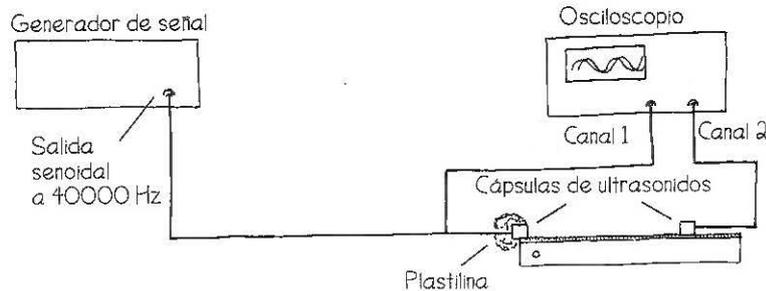
La velocidad es característica de cada tipo de onda en cada medio. El sonido viaja en el aire a unos 343 m/s (a 20 °C) y la velocidad varía con la temperatura, de acuerdo con la fórmula:

$$v(\text{m/s}) = 331 \sqrt{1 + T/273}, \text{ en la que } T \text{ es la temperatura centígrada.}$$

En una cuerda, las ondas viajan a una velocidad igual a la raíz cuadrada del cociente entre la tensión a que está sometida y su densidad lineal (masa de cada metro de cuerda). Además de los experimentos que se indican a continuación, puede emplearse la experiencia 9.4 sobre vibración de varillas para medir la velocidad del sonido en los metales. La última experiencia de la sección anterior (3.7.- La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia) es especialmente interesante para estudiar la variación de la velocidad en una goma elástica.

4.1.- Demostración. Determinación de la longitud de onda y de la velocidad del sonido, con un osciloscopio

La medida indirecta de la velocidad del sonido puede hacerse de varias formas. Una posibilidad, que se describe a continuación, se basa en los emisores y receptores de ultrasonidos. El experimento es simple pero requiere, como acto de fe, suponer que la velocidad de los ultrasonidos es la misma que la de los sonidos audibles. Naturalmente, deberá estar algo familiarizado con el uso del osciloscopio.



Los materiales necesarios son un osciloscopio de dos canales, un generador de señal, dos cápsulas de ultrasonidos y los cables necesarios así como una regla y unos trozos de plastilina. Estas cápsulas son muy asequibles y se pueden conseguir fácilmente en los suministradores de

electrónica. Normalmente funcionan a una frecuencia de 40000 Hz, totalmente inaudible.

Basta conectar el generador de señal (senoidal), con la frecuencia a 40000 Hz y una amplitud moderada, a una de las cápsulas; si la tensión aplicada fuese excesiva podría deteriorarse. Un canal del osciloscopio se conecta a la cápsula para observar en la pantalla la señal que se emite. Con un trozo de plastilina o cinta adhesiva se sujeta la cápsula sobre el origen de una regla, encima de la mesa. Se conecta el otro canal del osciloscopio a una segunda cápsula que funcionará como receptor. Las cápsulas son ligeras y al estar conectadas a las sondas del osciloscopio resultan algo difíciles de orientar si no se pegan de algún modo. Para empezar, y comprobar que todo funciona bien, se coloca el receptor justo delante del emisor y se ajusta la ganancia de los dos canales de forma que los picos de las señales sean comparables. Si se aparta la cápsula receptora las señales se desfasan gradualmente.

La medida de la longitud de onda se realiza colocando la cápsula receptora frente a la cápsula emisora y alejándola gradualmente, de modo que los picos de las señales coincidan al desfasarse sucesivamente 1,2,3.. longitudes de onda. Puesto que esta longitud es pequeña, es preferible calcularla midiendo la distancia que corresponde a un número algo grande de longitudes de onda, por ejemplo 10, tal como muestra el ejemplo, para minimizar el error. Dividiendo el desplazamiento total por las longitudes de ondas desfasadas puede medirse con una cierta exactitud la longitud de onda. Puesto que la frecuencia se conoce (del generador de señal) se puede calcular la velocidad de propagación de los ultrasonidos aplicando la ecuación $v=\lambda \nu$; en la que v es la velocidad, λ la longitud de onda y ν la frecuencia.

Ejemplo

Con el generador ajustado a 40000 Hz (las cápsulas dan una respuesta máxima a esta frecuencia. A unos 35000 Hz prácticamente no hay respuesta) se obtienen las siguientes distancias correspondientes a los desfases de sucesivas longitudes de onda:

longitudes de onda desfasadas	distancia emisor-receptor (cm)
1	1
2	1.9
3	2.7
4	3.5
5	4.4
6	5.3
7	6.2
8	7.1
9	8
10	8.9

La longitud de onda resulta de unos 0.89 cm y la velocidad del sonido (en realidad ultrasonidos) es $0.089 \times 40000 = 356$ m/s

4.2.- Demostración. La velocidad del sonido depende del medio

Un montaje muy parecido al del experimento anterior permite, con muy poco esfuerzo adicional, comprobar que la velocidad del sonido depende de la temperatura del aire. También se puede comprobar que la velocidad varía si se sustituye el aire por otro gas. Se trata de unos experimentos cualitativos pero que resultan simples y efectivos.

Basta colocar el emisor y el receptor en los extremos de un tubo, preferiblemente metálico (un tubo de hierro o aluminio de unos 30 cm de longitud y 2-3 cm de diámetro funciona muy bien). Si se calienta el exterior del tubo con un secador de pelo o, mejor, con una pistola de aire caliente, el osciloscopio muestra como la señal del receptor se desfasa varias longitudes de onda. Esta variación de la longitud de onda sólo puede ser debida, de acuerdo con la ecuación $v = \lambda \nu$, a que la velocidad del sonido ha cambiado al aumentar la temperatura.

El mismo montaje permite comprobar que la velocidad del sonido varía al introducir otro gas. Basta con acercar la salida del gas butano de un mechero Bunsen a un extremo y abrir la llave dejando que algo de gas entre en el tubo. El desfase se modifica en varias longitudes de onda. Dicho desfase no se estabiliza, debido al movimiento del gas dentro del tubo, pero al soplar se restaura el aire, la señal del receptor se desplaza varias longitudes de onda y el desfase se mantiene estable de nuevo.

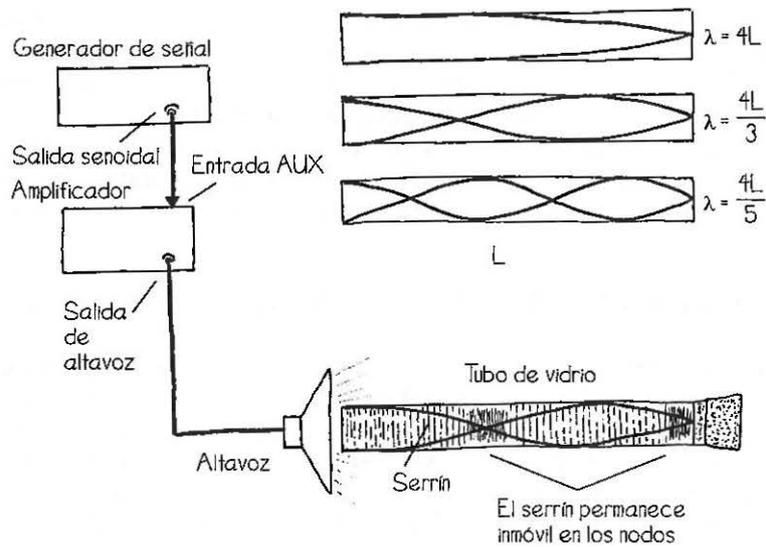
4.3.- Demostración. Velocidad del sonido. Medida con el tubo de Kundt

Las distintas versiones del tubo de Kundt permiten ver las ondas estacionarias de sonido en el aire. Se trata de un tubo transparente con algo de serrín o polvo de corcho, cerrado en un extremo mediante un tapón o un pistón móvil. El sonido que provoca las ondas estacionarias se puede producir de varias maneras. Una posibilidad es hacer vibrar una varilla, con un pistón que cierra el otro extremo del tubo, frotándola. Otra posibilidad es colocar un zumbador piezoeléctrico que vibra a una frecuencia fija. Otra es colocar un altavoz algo potente frente al extremo abierto del tubo. Esta última es la que se describe en esta demostración.

Los materiales necesarios son: un generador de señal del cual se utilizará la salida senoidal, un amplificador (puede tratarse del amplificador de un equipo de sonido viejo, de un radiocassette...), un altavoz pequeño, un tubo de vidrio o plástico transparente de un metro o algo menor y unos 3 o 4 cm de diámetro, tapado por un extremo con un tapón de cor-

cho, y un poco de serrín fino o limaduras de corcho. Es relativamente fácil construir un amplificador con la potencia necesaria, como el que se indica en el esquema de la página siguiente, si se sabe algo sobre montajes electrónicos. Es preferible usar un tubo de vidrio y no de plástico si, además, se quiere calentar para observar como la velocidad del sonido varía con la temperatura. También es conveniente disponer de un par de soportes (trozos de madera, porexpán...) para que el tubo repose en ellos y el extremo abierto del tubo, en posición horizontal, quede a la altura del altavoz. Si se dispone de un frecuencímetro, debe de conectarse a la salida TTL del generador de señal. Si no es así deberá usar la indicación del dial del generador.

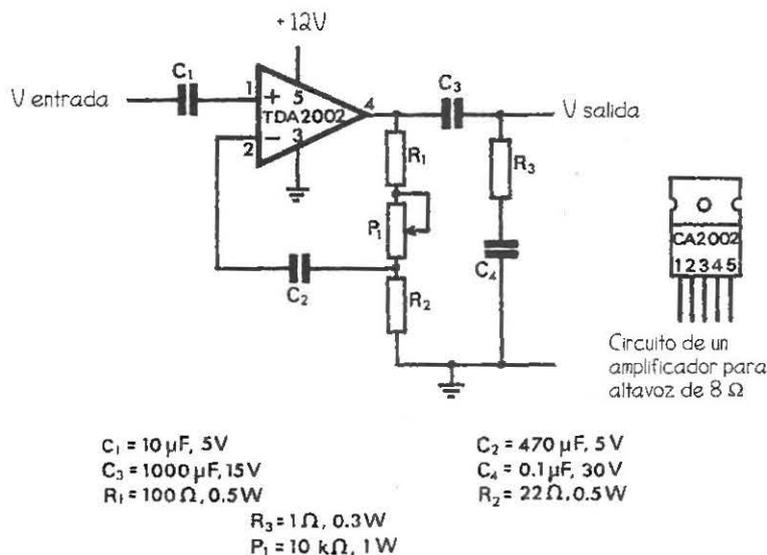
El montaje eléctrico consistente en: generador de señal >> amplificador >> altavoz, se usa en bastantes experiencias, todas ellas bastante interesantes y fáciles. Puede compensarle de sobra el gasto o el pequeño esfuerzo necesario para buscar los materiales y hacer el montaje. Puesto que es fácil sobrepasar la potencia de estos componentes no es mala idea proteger el altavoz con un fusible, si el amplificador no lo lleva incorporado.



El tubo se coloca horizontal, con el serrín bien esparcido en su interior. Con el generador se hace un barrido, lentamente, con las frecuencias de sonido bajas. Es fácil que las frecuencias de resonancia pasen inadvertidas, por ello el barrido debe hacerse sin prisas y conviene hacer algún cálculo previo, para conocer de antemano las frecuencias aproximadas a las que aparecerá la resonancia. Si se tiene un tubo de longitud L, la pri-

mera onda estacionaria se produce, tal como muestra la figura, cuando la longitud de onda es $4L$ (normalmente se ve bastante mal o, simplemente, no se ve, ya que solo hay un nodo en el extremo tapado y un vientre en el extremo abierto), la frecuencia aproximada de esta primera onda estacionaria es $330/4L$ ($82.5/L$). La segunda onda estacionaria posible (segundo armónico) es aquella en que la longitud de onda es $4L/3$. Normalmente se ve bien y aparecerá a una frecuencia de $330/(4L/3)$, es decir a unos $247.5/L$ Hz. El tercer armónico también se verá bien, con una longitud de onda de $4L/5$ y una frecuencia de resonancia de $412.5/L$. Con estas indicaciones puede esperar resonancia a unas frecuencias determinadas y cuando se acerque a ellas, modificando el ajuste del generador, vaya algo más lento.

Cuando se llega a una frecuencia de resonancia exacta el serrín se agita bruscamente de un modo espectacular, formando una especie de nube con laminitas verticales en los vientres de la onda estacionaria, en contraste con los nodos en los que el serrín está inmóvil. Las turbulencias del serrín forman unas curiosas líneas paralelas que quedan fijas una vez que se ha sobrepasado la resonancia. Cuanto mayor sea la intensidad del altavoz más claramente se observará la resonancia.



En cualquier caso, si se desea calcular la velocidad del sonido debe anotarse la frecuencia a la cual se produce (la indicación del propio generador o, mejor aún, la que se mida con un frecuencímetro) y la onda estacionaria (fundamental, segundo armónico, tercero...) que se ha

conseguido, para poder deducir la longitud de onda, tal como se muestra en la figura. Las medidas con el tercer armónico suelen dar un buen resultado ya que una longitud de onda completa está contenida dentro del tubo. En cada situación, la velocidad del sonido se calcula multiplicando la longitud de onda por la frecuencia. Si obtiene un valor muy distinto al valor real, posiblemente ha confundido el armónico.

Otro consejo que puede resultar útil es el siguiente: No fuerce el altavoz. Es preferible que suene algo débil a que suene distorsionado ya que en este último caso no va a emitir una única frecuencia y será complicado interpretar los resultados.

La experiencia se puede completar con una observación interesante. Una vez consiga una onda estacionaria claramente definida, con el serrín agitándose en los vientres, caliente la parte exterior del tubo con un secador de pelo o, mejor aún, con una pistola de aire caliente de las que se usan para sacar pintura. A medida que el tubo y el aire de su interior se calientan el serrín deja de agitarse, ya que la velocidad del sonido ha cambiado y, por ello, la frecuencia de resonancia no es la misma. Haga notar que para llegar a la resonancia de nuevo es preciso aumentar ligeramente la frecuencia. Puesto que la longitud de onda no ha variado, se comprueba que la velocidad del sonido aumenta con la temperatura, (en aire, a 0°C es de 331 m/s, a 100°C de 366 m/s). Haga notar el efecto inverso cuando el tubo se enfríe.

Ejemplo

En un tubo de vidrio de 64.5 cm de longitud la resonancia del tercer armónico se consigue a una frecuencia de 653 Hz. La longitud de onda medida directamente resulta de 49 cm (teóricamente debería ser $4L/5$, es decir 51.6 cm, pero la medida es algo imprecisa ya que los nodos abarcan una zona algo ancha). El producto de la longitud de onda por la frecuencia da un valor de 320 m/s para la velocidad del sonido.

4.4.– Experiencia. Velocidad del sonido. Resonancia en un tubo parcialmente sumergido en agua

La experiencia que se describe a continuación requiere un material especialmente simple y por ello resulta apropiada para que la realicen grupos reducidos de alumnos. Sin embargo, es menos vistosa que las experiencias anteriores.

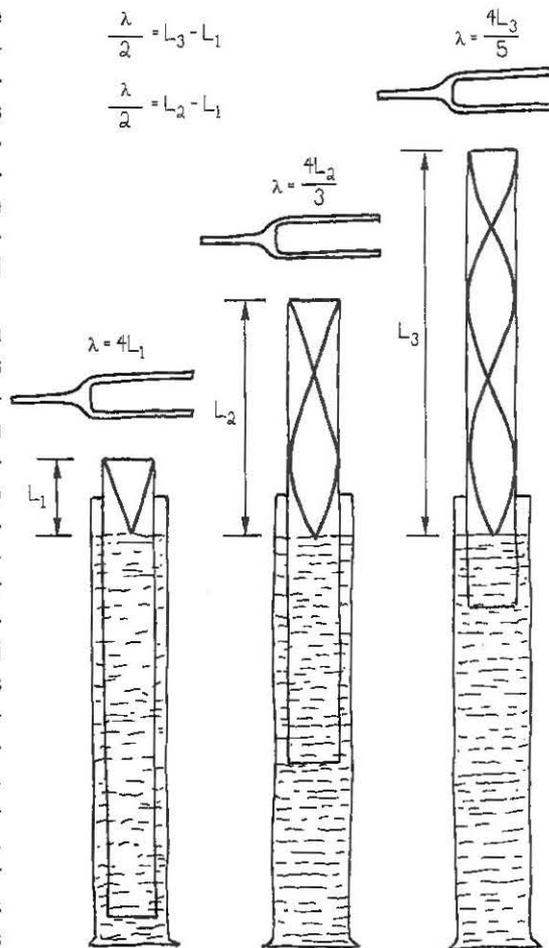
Basta disponer de un recipiente alto, por ejemplo una probeta de 500 mL o de 1 L (o una botella de refresco de plástico transparente, cortada por la parte de arriba) y tubos de plástico (por ejemplo, de PVC, como los que se emplean como tuberías) de unos 40 a 60 cm de longitud y no demasiado estrechos, de unos 3 o 4 cm de diámetro. El recipiente se

llena con agua y el tubo se introduce dentro, sujeto mediante una pinza en un soporte.

En el experimento se determinan las distintas longitudes a las cuales aparece la resonancia, tal como se muestra en la figura, por ello, la altura del agua dentro del recipiente y la longitud de los tubos disponibles debe ser apropiada a la situación. El aumento de intensidad del sonido debido a la resonancia se aprecia muy bien cuando el diapasón se pasa de un lado a otro delante de la abertura del tubo. Es especialmente interesante disponer de diapasones de frecuencias algo altas; por ejemplo, en el equipo Phywe se suministran diapasones grandes de 1000 Hz que funcionan mucho mejor que los diapasones normales, mucho más pequeños, de 440Hz. También funcionan bien los diapasones a 2048 Hz que pueden comprarse en suministradores de material médico.

Tal como muestra la figura, las resonancias aparecen en unas longitudes que corresponden a $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$. Si la longitud de onda es demasiado grande, la longitud del recipiente va a dar poco juego para poder apreciar varias resonancias; se deberán usar varios tubos. Si la longitud de onda es más pequeña, es más fácil encontrar las distintas posiciones de resonancia, sacando el tubo gradualmente. En cualquier caso, es muy conveniente saber de antemano la longitudes aproximadas a las cuales aparecerá la resonancia; si

se usa el diapasón de 1000 Hz (longitud de onda en el aire 0.33m), las longitudes a las cuales es de prever que aparezca la resonancia resultan de 8, 25, 41,... cm, aproximadamente. Con el diapasón de 440 Hz (longi-



tud de onda en el aire 0.75 m) las longitudes de resonancia previsible son 18, 56, 91,... cm; con este diapason se aprecia bien la primera resonancia pero las siguientes son débiles. Por ello, si lo tiene, vale la pena emplear el diapason de 1000 Hz.

Se empieza con el tubo bastante introducido en el recipiente, de forma que sobresalga unos 5 cm de la superficie del agua. Un alumno le atiza al diapason y lo mueve delante del extremo del tubo, de un lado a otro, mientras otro alumno saca el tubo lentamente del agua. La intensidad del sonido aumenta claramente en la posición de resonancia. Cuando se encuentra, se sujeta el tubo con la pinza y se ajusta la posición para tener la máxima resonancia. Se mide la longitud que sobresale del tubo y se anota. Se repite el proceso para encontrar las siguientes posiciones de resonancia. Como muestran las figuras, el desplazamiento del tubo de una posición a la siguiente es la mitad de la longitud de onda. De este modo, conocida la frecuencia (característica del diapason) y medida la longitud de onda se calcula la velocidad del sonido.

Ejemplo

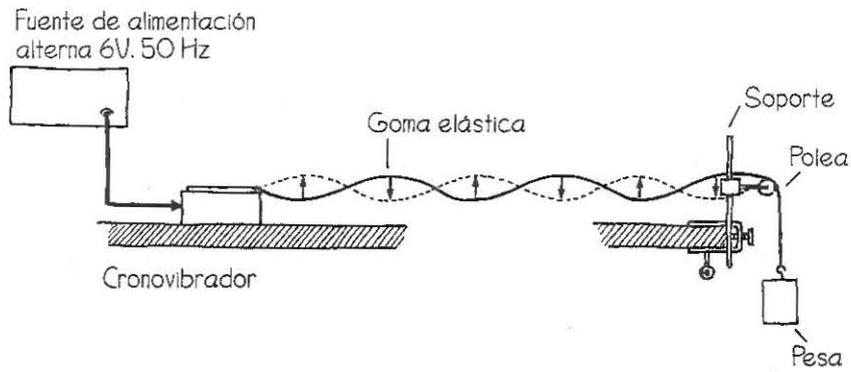
Con el diapason de 1000 Hz se consigue claramente la resonancia de un tubo de PVC (en realidad, en el experimento se usan dos tubos, uno corto y otro largo), de unos 3 cm de diámetro, a longitudes de 6.3, 24.2 y 41.5. La diferencia entre el último valor y el primero (35.2 cm) es la longitud de onda y entre el último y el penúltimo (17.3 cm) media longitud de onda. De este modo la longitud de onda (promedio de 35.2 y 34.6), resulta 0.349 m. La velocidad del sonido, producto de la longitud de onda por la frecuencia, resulta 349 m/s. Vale la pena notar que los valores teóricos a los cuales deberían aparecer las resonancias son 8.2, 24.6 y 41.0 cm y que el primer valor medido es notablemente más corto que el teórico; esto sucede siempre, ya que un tubo abierto se comporta como si fuera algo más largo que su longitud real; el factor de corrección depende del diámetro del tubo.

Si el mismo experimento se hace con un diapason de 440 Hz pequeño, como los que se emplean en música, las resonancias son mucho más tenues aunque se pueden oír claramente a longitudes de 18.1 y 57.0 cm. La diferencia (38.9 cm) corresponde a media longitud de onda y la velocidad del sonido resulta ($440 \times 0.389 \times 2$) 342 m/s.

4.5.- Demostración. Longitud de onda y velocidad de una onda transversal en una goma elástica. Efecto de la tensión y de la densidad lineal

Esencialmente, se trata de generar ondas estacionarias atando un trozo de goma elástica de un par de metros al extremo de la varilla de un cronovibrador, alimentado por corriente alterna de 50 Hz y baja tensión

(6V). Las características de esta pieza se han descrito en la experiencia 3.3. Consulte esta experiencia ya que en ella también se calcula la velocidad de propagación de una onda en una goma elástica. Una alternativa al cronovibrador es el empleo del vibrador de la cubeta de ondas, que se describe en la experiencia 9.7 de la primera parte del libro. También es posible preparar un vibrador pegando un tapón de corcho en el centro de un altavoz; se clava un tornillo al tapón al cual se puede atar el hilo. Tanto el vibrador de la cubeta de ondas como el altavoz deben alimentarse empleando el generador de señales y un amplificador, o corriente alterna de baja tensión.



Si se tensa la goma elástica se obtienen distintas ondas en las que se observa perfectamente la longitud de onda. Cuanto mayor es la tensión mayor es la longitud de onda. Un detalle importante para poder ver bien la onda generada es el color de la goma. Si la mesa es de color claro es conveniente comprar la goma de color negro y viceversa. Es posible hacer el experimento algo más cuantitativo con un montaje más elaborado, en el que la goma se hace pasar por una polea en el extremo de la mesa y se emplean unas pesas para tensar el hilo. En cualquier caso la conclusión es la misma: al tensar la goma la longitud de onda aumenta (la frecuencia es la misma, los 50 Hz del cronovibrador) debido a que la velocidad de propagación aumenta con la tensión.

Ejemplo

Se tensa una goma ligera atada al cronovibrador, mediante una polea y unas pesas. La longitud de la goma que puede vibrar es de 130 cm. Con una pesa de 25 g la longitud de onda resulta de unos 43 cm. Si la pesa es de 50 g la longitud de onda es de 68 cm y si es de 75 g, resulta de 86 cm. Puesto que la frecuencia del cronovibrador es de 50 Hz, las velocidades correspondientes a estas tensiones crecientes son de 21.5, 34 y 43 m/s, respectivamente. De acuerdo con ello, la velocidad de la onda aumenta

con la tensión de la goma. Vale la pena mencionar que la velocidad no depende únicamente de la tensión sino de la densidad lineal, de acuerdo con la ecuación: $v = \sqrt{\text{Tensión/densidad lineal}}$. En este experimento la goma disminuye la densidad lineal a medida que se tensa y ambos efectos actúan en el mismo sentido aumentando la velocidad de las ondas.

4.6.– Demostración. Velocidad de una onda en un muelle. Efecto de la tensión y de la densidad lineal

Esta demostración, especialmente simple, ilustra perfectamente como la velocidad de propagación de una onda en un muelle depende de las propiedades del muelle, es decir, de las propiedades del medio por el cual viaja la onda. Para ello se sujeta un muelle por cada extremo tirando de modo que tenga una longitud bien definida de unos cuantos metros. Esta longitud debe ser la misma en los sucesivos experimentos. Conviene que el muelle sea largo; puede estar formado por varios muelles unidos por los extremos.

Si se pellizca un extremo del muelle y se suelta, el pulso longitudinal rebota en el otro extremo y vuelve varias veces. Se trata de ver como un aumento de la tensión del muelle (manteniendo su longitud constante) hace que el pulso se mueva más rápidamente. Una forma simple (algo ridícula pero efectiva) para notarlo consiste en seguir con la voz la llegada del pulso y sus rebotes en un extremo. Si el muelle está algo flojo, será algo como «Hop.... Hop.... Hop». Si el muelle está tenso: «Hop. Hop. Hop. Hop. Hop». Es fácil notar la diferencia si el muelle es largo y denso, tal como se ha indicado en la experiencia 1.5. Si se sabe escoger el muelle, funciona bastante mejor que un slinky.

Resulta fácil verificar que la velocidad de propagación de la onda en el muelle sigue la relación $v = \sqrt{\text{Tensión/densidad lineal del muelle}}$. Para ello es conveniente usar un muelle hecho con varios trozos unidos entre sí. Un extremo se engancha en un soporte bien sujeto a la mesa; en otro soporte alejado unos 4-5 metros se usa un dinamómetro enganchado a alguna de las espiras del muelle para medir su tensión. Por otro lado, debe medirse la densidad lineal (kilos de cada metro de muelle), que varía de acuerdo con el estiramiento del muelle. Lo más fácil es pesar uno de los muelles individuales que forman el conjunto y medir su longitud en cada experimento. El cociente entre su masa y su longitud en cada situación es la densidad lineal. La velocidad se calcula a partir de la longitud del muelle y el tiempo, medido con un cronómetro, que tarda el pulso en viajar de un extremo a otro. Puesto que esta velocidad es alta resulta conveniente que la distancia sea algo grande y que se mida el tiempo empleado en varios viajes de ida y vuelta. Variando la tensión y midiendo

la densidad lineal en una serie de experiencias puede comprobarse la validez de la fórmula.

Es interesante relacionar el resultado de la experiencia con los sonidos de los instrumentos musicales. Si se considera una guitarra o un piano, las cuerdas más tensas son aquellas en que las ondas viajan más rápido, las cuerdas más densas son aquellas en que las ondas se propagan más lentamente. Una guitarra, que resulta fácil de conseguir, permite confirmar como la frecuencia de una cuerda depende de los distintos grosores y materiales de las cuerdas. Se comprueba fácilmente como un aumento de la tensión provoca un cambio en la afinación. La longitud de onda es fija (doble de la longitud de la cuerda) por ello, un aumento de la tensión hace que aumente la velocidad y, por lo tanto, la frecuencia sea más alta y el sonido más agudo.

4.7.- Experiencia- Demostración. El sonido no se propaga en el vacío

Existen bastantes artilugios para demostrar que el sonido no se propaga en el vacío. Uno de los más simples consiste en emplear una pila de 9V, con el correspondiente adaptador de dos cables y un zumbador piezoeléctrico como fuente de sonido. Estos zumbadores son baratos y se encuentran sin problemas en las tiendas de componentes electrónicos; al comprarlos especifique que deben funcionar a 9V y del mayor volumen posible (algunos suenan como auténticas sirenas). Para extraer el aire se puede emplear un frasco de los que se utilizan para guardar alimentos al vacío. Estos botes llevan una válvula en la tapa y con una especie de jeringa se va extrayendo el aire mediante pistonadas sucesivas. Pueden encontrarse en la sección de útiles de cocina de grandes almacenes y, por lo menos, existen dos tipos de frascos de vacío (p.e. en El Corte Inglés).

El éxito de la experiencia depende de la eficacia con que se pueda extraer el aire del frasco y de la potencia del zumbador. Si es demasiado potente, uno se deja la piel haciendo el vacío. Si su sonido es muy débil al taponar el frasco se oirá muy poco, aún sin hacer el vacío. Otro detalle importante es el siguiente: las vibraciones del zumbador no se pueden propagar por el aire si se hace el vacío, pero si el aparato está en contacto con el plástico del recipiente sus vibraciones se transmiten a este y del plástico al aire del exterior; por lo tanto, coloque el zumbador sobre un trozo de espuma bien blandita y no directamente sobre el fondo del frasco.

A medida que se extrae el aire el volumen de sonido disminuye poco a poco, ya que la extracción es lenta. La variación se percibe mucho más intensa al revés: cuando uno se ha cansado de dar pistonazos se deja entrar el aire apretando la válvula del frasco y la intensidad aumenta claramente.

5.- MARGEN DE FRECUENCIAS AUDIBLES DE SONIDO. TONO

El intervalo de frecuencias audibles está comprendido entre 20 y 20000 Hz, aproximadamente. La mayor sensibilidad suele centrarse en los 3300 Hz y el margen concreto es característico de cada persona aunque, por lo general, cuanto mayor es la edad menor es la frecuencia máxima audible. Raramente alguien puede oír por encima de los 20000 Hz. Dentro del margen audible la sensación de tono de un sonido (tonalidad) esta asociada a la frecuencia. Cuanto más grave es un sonido menor es la frecuencia; al contrario, los sonidos agudos corresponden a frecuencias altas.

5.1.- Demostración. Margen de frecuencias audibles de sonido. Tono

El material necesario para esta interesante demostración es análogo al que se ha descrito en la experiencia 4.3 (tubo de Kundt). Esencialmente, se emplea un generador de señal senoidal que alimenta un amplificador y un altavoz. Se va incrementando la frecuencia hasta que los alumnos dejan de oír el sonido. Después se baja de nuevo la frecuencia comprobando el valor al cual se percibe de nuevo. Es conveniente disponer de un frecuencímetro para que los alumnos puedan leer por sí mismos su margen audible. Si no es así, deberá fiarse de la indicación del cursor del generador de señal indicando, a cada movimiento, el valor de la frecuencia.

Hay varias advertencias. La calidad del sonido depende de la calidad del amplificador y del altavoz. Los sonidos graves requieren un altavoz grande y los agudos uno pequeño. Es conveniente usar el amplificador y el altavoz de un equipo de sonido antiguo o de segunda mano. Cuide especialmente que la señal del generador tenga una amplitud pequeña y no fuerce el altavoz a un volumen excesivo. Lea la experiencia 4.3 para los aspectos relacionados con el montaje.

Las frecuencias elevadas de sonido pueden resultar muy molestas (excepcionalmente) para algunos alumnos. Si alguien le dice que se encuentra mal, no lo tome a broma y detenga el experimento o hágalo salir. Los sonidos tan agudos resultan desagradables, por ello no alargue la experiencia más de lo necesario.

Para hacer el experimento haga que los alumnos se distribuyan frente al altavoz, a unos metros, de forma que cada uno pueda oír el sonido sin que los demás molesten. Use una intensidad moderada y, empezando por unos 20 Hz, suba gradualmente la frecuencia. Al llegar a 440 Hz puede comprobar que el sonido coincide con el de un diapasón. Si tiene dia-

pasiones a otras frecuencias puede verificar sus coincidencias. No se detenga demasiado en las frecuencias bajas y a partir de 10000 Hz aumente la frecuencia en 1000 Hz cada vez, anunciando el valor si no dispone de frecuencímetro. Que cada alumno anote la frecuencia máxima que ha oído. Al llegar a 20000 probablemente nadie oirá nada. Baje de nuevo la frecuencia para que anoten el valor al cual comienzan a oír de nuevo. Normalmente el margen de frecuencias audibles no es el mismo en cada oído, pero no hay grandes diferencias a no ser que haya algún tipo de defecto auditivo.

No hace falta insistir en que a lo largo del experimento resulta evidente que un sonido agudo está asociado a una frecuencia elevada y un sonido grave a una frecuencia baja.

5.2.– Experimento casero. Tono

La frecuencia del sonido es el número de vibraciones que tienen lugar en un segundo. Cuanto mayor sea este número más elevada será la frecuencia y más agudo el sonido. Una experiencia muy simple para comprobarlo consiste en andar al lado de una valla o una verja pasando un bastoncillo como si se frotaran los barrotes. Si uno corre el bastón golpea a una frecuencia mayor y el sonido es más agudo.

Otra posibilidad, más cómoda, es usar dos hojas de sierra de metales. Se frota el borde liso de una con el borde dentado de la otra. La frecuencia del sonido que se produce es proporcional a la rapidez del movimiento.

5.3.– Experiencia-Demostración. Afinación. Octavas

Sabemos que muchas personas afinan correctamente al cantar. Esto significa que son capaces de generar una frecuencia muy parecida o idéntica a otra que usan como modelo. Es fácil comprobar quiénes son los alumnos capaces de afinar correctamente. Basta con hacer sonar el diapasón o usar el generador de señal (en un margen moderado de frecuencias) como se ha indicado en la experiencia 5.1 y pedir a los alumnos que, individualmente, reproduzcan la nota. Es interesante localizar alumnos con buen oído ya que podrán determinar fácilmente frecuencias desconocidas comparándolas con las del generador, en experimentos que se indican más adelante.

Posiblemente notará que algunos alumnos afinan a la octava superior (frecuencia doble) o a la inferior (frecuencia mitad) de la nota que usted genera. La sensación es de afinación, pero no se trata de la misma nota. Aproveche la ocasión para mostrar, con el generador, las octavas que

corresponden a las frecuencias 440, 220,110 Hz. También puede comentar que corresponden a teclas equivalentes en un piano, en distintas escalas.

Con mis alumnos los resultados globales de esta prueba son algo extraños. Los alumnos de primer curso de ESO que afinan bien son aquellos que a nivel académico funcionan mejor, en cambio, el porcentaje de los de Física de COU que son capaces de afinar es horrible.

5.4.- Experiencia. Frecuencias de sonido patrón. Escalas musicales con el generador de señal

Las notas musicales corresponden a unas frecuencias determinadas. Generalmente, se utiliza un diapasón afinado a 440 Hz para definir la nota La (La4). Si el diapasón no tiene caja de resonancia suena muy débil y únicamente se oye si, después de golpearlo contra la mesa, apoya su base en el hueso justo a la salida de la oreja o sobre una superficie que actúe como caja de resonancia. Las octavas de esta nota son múltiplos y submúltiplos de este valor. Las otras notas corresponden a valores intermedios entre estas octavas. La subdivisión puede realizarse de distintas formas y por ello son posibles varias escalas musicales con frecuencias ligeramente distintas. La más corriente es la escala cromática. En esta escala, las frecuencias de las notas comprendidas entre el La4 a su octava superior (La5) son las siguientes:

La4	440.0 Hz	La4#	466.2
Si	493.9		
Do	523.2	Do#	554.4
Re	587.3	Re#	622.2
Mi	659.3		
Fa	698.5	Fa#	740.0
Sol	784.0	Sol#	830.6
La5	880.0		

Las escalas siguientes o anteriores son múltiplos o submúltiplos de estos valores.

Si algún alumno sabe algo de música es relativamente simple traducir un pequeño trozo de una partitura a los valores de las frecuencias correspondientes; por ejemplo, las primeras notas del «Himno a la alegría» de Beethoven son: Mi, Mi, Fa, Sol, Sol, Fa, Mi Re, Do, Do, Re, Mi, Mi, Re. Su traducción a frecuencias sería: 659, 659, 698, 784, 784, 698, 659, 587,523, 523, 587, 659, 659, 587....Esta secuencia, con la duración correcta, se puede «interpretar» de un modo aproximado con el generador de señal, un amplificador y un altavoz.

5.5.- Experiencia. Frecuencias individuales con el ordenador

En algunos experimentos es necesario determinar la frecuencia de un sonido con mayor exactitud que la simple indicación del cursor del generador de señales. Para ello se puede emplear un frecuencímetro. Si la frecuencia que se desea medir con exactitud procede de un generador de señal, basta conectar la salida TTL de este aparato al frecuencímetro (la salida senoidal es la que se conecta al amplificador). Si se quiere captar un sonido cualquiera será necesario un micrófono y un amplificador para que se pueda medir la frecuencia de la señal eléctrica correspondiente.

Una alternativa interesante para medir la frecuencia de un sonido es la comparación con una frecuencia conocida, generada con el ordenador. Un programa simple para generar cualquier frecuencia es el que se indica a continuación, escrito en Pascal. Es muy simple y si usted no conoce el compilador, es probable que algún profesor o alumno de su centro pueda escribirlo o hacer alguno parecido. Al ejecutarlo se escribe el valor de la frecuencia y el programa la hace sonar a lo largo de 1 segundo. Para acabar se escribe el valor 0.

Para buscar una frecuencia por comparación es absolutamente necesario tener buen oído. Esencialmente, se trata de saber reconocer si la frecuencia del ordenador es más alta o más baja que la del sonido que se estudia. Es algo más difícil de lo que parece.

```
program frecuencias;
uses crt;
const t= 1000; {duración del sonido 1000 milisegundos}
var f: word;

begin
  repeat
    clrscr;
    gotoxy(1,24);
    writeln('0 para acabar ');      {introduzca 0 para acabar}
    gotoxy(1,1);
    writeln('¿qué frecuencia?');
    gotoxy(1,2);
    readln(f); {escriba el valor entre 50 y 10000, y ENTER}
    if f>0 then
      begin
        sound(f);
        delay(t);
        nosound;
      end;
  until f=0;
end.
```

6.- LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA: RESONANCIA

La energía que transporta el sonido está relacionada con la amplitud de las vibraciones y con el tamaño del objeto que vibra o, mejor aún, con la cantidad de aire que puede hacer vibrar. De este modo, una cuerda tensa o un pequeño diapasón producen un sonido muy débil a no ser que se les añada una caja de resonancia. Decimos que hay resonancia cuando un objeto provoca la vibración de otro; para que esto suceda es preciso que el objeto que debe resonar pueda vibrar a la misma frecuencia que el que ha originado la vibración. En el caso de los instrumentos de cuerda, sus vibraciones se transmiten a la caja de resonancia mediante los puentes en los que se apoyan las cuerdas. La vibración de la madera se transmite al aire y el sonido resulta enormemente amplificado. En cualquier caso la captura de la energía transportada por una onda debe hacerse mediante un dispositivo capaz de vibrar a la misma frecuencia.

La intensidad del sonido se define como la potencia que atraviesa una superficie de un metro cuadrado (W/m^2). El oído es capaz de detectar intensidades desde $10^{-12} W/m^2$; el valor máximo (umbral de dolor) está situado en $1 W/m^2$. El enorme intervalo que separa un valor de otro ha aconsejado establecer una magnitud de tipo logarítmico, el nivel de intensidad $B = 10 \log(I/I_0)$, en la que I es la intensidad del sonido e I_0 la intensidad umbral (10^{-12}). Las unidades del nivel de intensidad se denominan decibelios (dB).

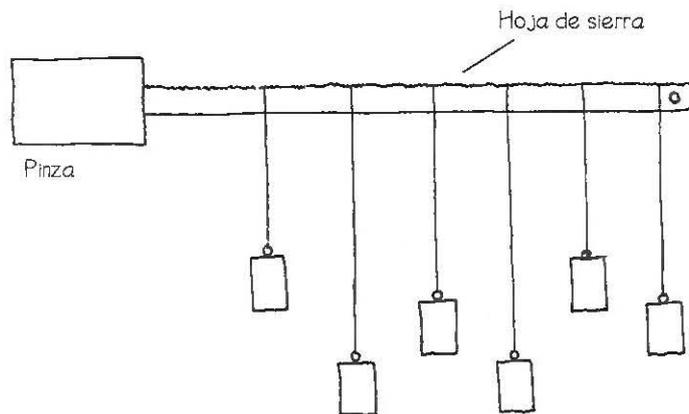
En el caso de la luz y de las ondas electromagnéticas la situación es distinta, la energía es transportada por portadores individuales (fotones) de modo que cada uno acarrea una energía proporcional a la frecuencia.

6.1.- Demostración. Resonancia con péndulos

La condición para que haya resonancia es la siguiente: Un dispositivo podrá recibir la energía que transporta una onda si es capaz de vibrar a la misma frecuencia. En los equipos didácticos de ondas antiguos se incluía una pieza que permitía demostrarlo muy fácilmente. Se trataba de una serie de láminas de acero de distinta longitud, con un aspecto algo parecido a un peine, que se colocaba delante de un electroimán alimentado con corriente alterna; el electroimán hacía vibrar únicamente aquella lámina capaz de vibrar a 100 Hz.

Si no se dispone de esta pieza, otra demostración muy simple para comprobar la resonancia puede hacerse mediante el montaje que se muestra en la figura. Se sujeta una hoja de sierra de cortar metales horizontal en un soporte; de ella cuelgan pesas de hilos de distinta longitud, de modo que haya parejas iguales. Si uno de los péndulos se hace oscilar

lateralmente, se observará que la vibración se transmite únicamente a otro péndulo de la misma longitud, que es el que puede vibrar con la misma frecuencia.



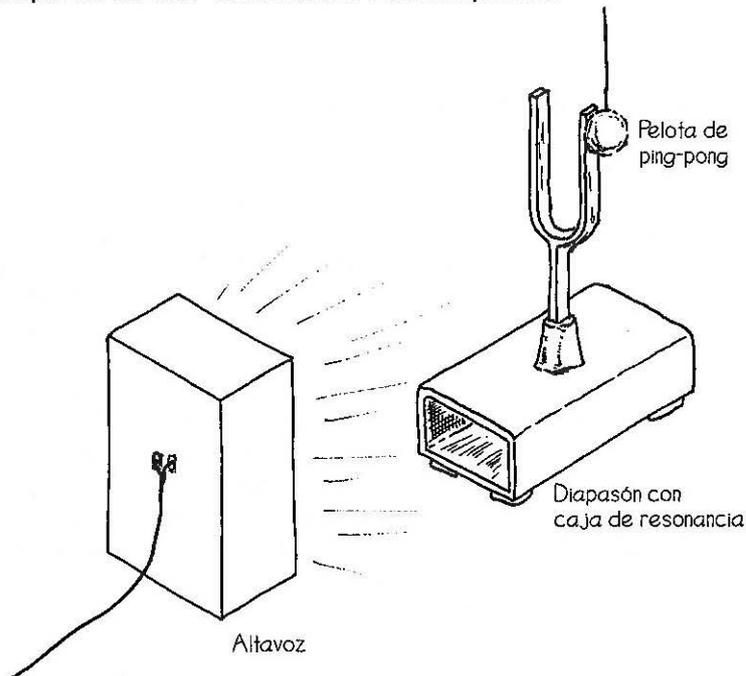
6.2.- Demostración. Resonancia con dos diapasones

Un sonido puede provocar resonancia en un objeto, si dicho objeto es capaz de vibrar a la misma frecuencia. Una demostración simple y efectiva requiere el uso de dos diapasones grandes con caja de resonancia y una pieza para variar ligeramente su frecuencia. Se trata de golpear un diapasón con la abertura de su caja de resonancia dirigida hacia otro diapasón idéntico. Se deja sonar unos instantes y se sujeta con los dedos para detener la vibración. El otro diapasón (el que no se ha golpeado), estará vibrando, mostrando como ha capturado una parte de la energía transportada por el sonido. Si los diapasones se desajustan moviendo las piezas, esta transferencia de energía no ocurrirá. La demostración puede mejorarse mucho si se apoya una pelota de ping-pong, colgada de un hilo de 30-40 cm, ligeramente en el extremo superior del diapasón que recibe la energía. Cuando la resonancia tiene lugar las vibraciones del diapasón hacen que la pelota rebote unos centímetros.

Si sólo se dispone de un diapasón grande con caja de resonancia y pieza de ajuste, y un diapasón pequeño, puede hacerse un experimento parecido. Sin la pieza de ajuste el diapasón vibra a 440 Hz. Se saca esta pieza y se golpea el diapasón pequeño. Rápidamente se apoya su base, sin golpear, en la caja de resonancia del diapasón mayor. Si se saca el diapasón pequeño y se sujeta se oirán las vibraciones que la resonancia ha provocado en el mayor. Si se desajusta mediante la pieza, no tendrá lugar la resonancia, o será mucho más tenue.

6.3.– Demostración. Curva de resonancia con un diapasón y una pelota de ping pong

Esta demostración es una alternativa interesante si se dispone del montaje con el generador de señal, el amplificador, el altavoz y un frecuencímetro, así como de un diapasón con caja de resonancia. Se podrá comprobar que la curva de resonancia del diapasón es estrecha, es decir, que responde únicamente a un margen estrecho de frecuencias. El montaje es el mismo que se ha indicado en varias experiencias anteriores (por ejemplo 4.3.– Tubo de Kundt), con la salida senoidal de un generador de señal (con una amplitud baja) conectada a un amplificador y, a este, un altavoz. El frecuencímetro, si se tiene, se conecta a la salida TTL del generador de señal. El diapasón se coloca con la caja de resonancia orientada hacia el altavoz, a un metro aproximadamente. Con un soporte se deja colgar una pelota de ping-pong a la que se ha pegado un hilo de unos 30 cm, de modo que repose haciendo un leve contacto lateral en la parte superior de uno de los brazos del diapasón.



Se ajusta la frecuencia a unos 440 Hz. Cuando el diapasón resuena la pelota llega a rebotar hasta unos 5 cm debido a los golpes del diapasón. Naturalmente este valor depende de la distancia al altavoz, el ajuste correcto de la frecuencia y el volumen del sonido. Si la pelota no se mueve o se mueve poco, asegúrese que la intensidad del sonido es suficiente.

Si dispone de frecuencímetro podrá buscar la curva de resonancia. Para ello desajuste algo la frecuencia correcta, en unos 10 Hz, y afínela de nuevo, variando la frecuencia 2 Hz anotando, en cada situación, la amplitud aproximada del movimiento de la pelota de ping-pong (1, 2, 3..cm). Sobrepase la frecuencia de resonancia en otros 10 Hz. A partir de los valores anotados se podrá hacer una gráfica aproximada de la curva de resonancia.

6.4.- Experiencia. Resonancia con tubos de cartón. La música del aire

El ruido es una mezcla de frecuencias, por ello, el propio ruido del ambiente contiene la frecuencia que podrá hacer resonar cualquier tubo que nos pongamos al oído. Si disponemos de tubos de distinta longitud cada uno resuena a una frecuencia característica.

Basta con disponer de tubos de cartón algo largos y anchos, del estilo de los que se emplean para bobinar piezas de tejidos. Son fáciles de conseguir y, a malas, se pueden rescatar de los contenedores de la basura. Si se necesita un tubo más largo, puede cortarse de un trozo de tubería de PVC. Vale la pena tener una buena colección con distintas medidas; si es posible, que sean anchos, de unos 10 cm de diámetro o incluso mayores.

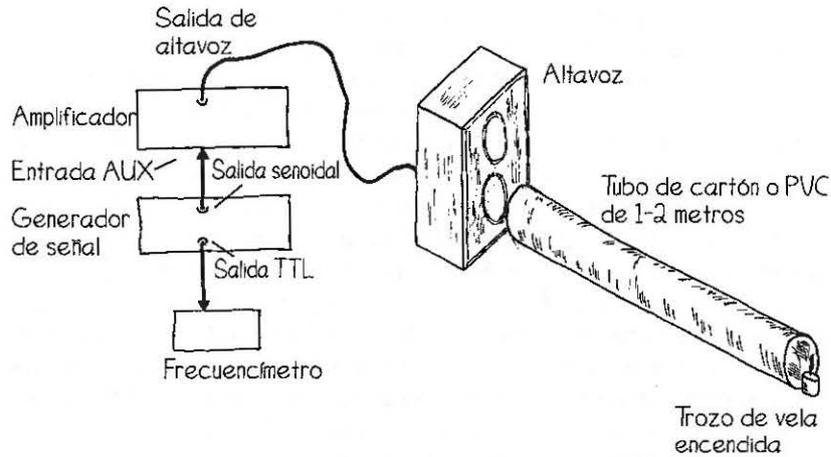
Fácilmente se comprobará que la frecuencia que se percibe es inversamente proporcional a la longitud del tubo. La resonancia es más grave en los tubos más largos. Es interesante disponer de una secuencia de tubos de longitud creciente a la altura del oído e ir pasando por delante. Se oyen las resonancias sucesivas como si se tratara de una escala musical, sin que nadie provoque estas notas. Se trata simplemente de la amplificación de algunas frecuencias del ruido del ambiente.

Es interesante hacer resonar un tubo haciendo la nota apropiada con la boca. Si el tubo es ancho y largo la resonancia es tremenda, como debería sonar la sirena del Titanic, pero es algo difícil de lograr ya que la frecuencia debe ser exactamente la necesaria. Por ello, como se ha indicado en la experiencia 5.3, vale la pena tener localizados a los alumnos que son capaces de afinar correctamente. Primero deberán escuchar atentamente la nota musical con que resuena el tubo a partir del ruido ambiente y a continuación, con la boca en un extremo del tubo deberán reproducirla exactamente. Quienes tengan dificultades para afinar no conseguirán hacer resonar estos tubos jamás. Deberán entrenarse o conformarse con la demostración siguiente.

6.5.- Demostración. Resonancia de tubos. Una vela para observar la resonancia

Una vez más, una parte del montaje es el que ya se ha indicado en varias experiencias, con un generador de señal, amplificador y altavoz (por ejemplo 4.3.- Tubo de Kundt). Si se dispone de un frecuencímetro, mejor, pero si no fuera así la demostración resulta igual de interesante. Se requiere una colección de tubos de cartón o PVC entre 1 y 2 metros y lo más anchos posibles, por ejemplo, de unos 10 cm de diámetro.

Se coloca uno de los tubos delante del altavoz, de forma que esté al mismo nivel y, en el otro extremo, a la salida del tubo, se pone una vela corta, de un par de centímetros, encendida. El montaje debe hacerse de modo que los alumnos puedan ver claramente la vela.



Al variar la frecuencia lentamente se percibe claramente el aumento de intensidad cuando se llega a la frecuencia de resonancia; al mismo tiempo, la llama de la vela tiembla y se apaga. Naturalmente, el altavoz deberá tener la intensidad suficiente, pero se observará que incluso con un sonido débil la llama tiembla fuertemente. Con los tubos más largos es más fácil que se apague. Vale la pena hacer notar que cuando la frecuencia no es exactamente la de resonancia la vela solo tiembla. En la resonancia las vibraciones del aire llegan a ser tan grandes que apagan la vela igual que si se soplara.

Es conveniente (cuando se haya apagado la vela) que los alumnos pongan la mano a la salida del tubo para notar la vibración del aire. En cualquier caso, se anota la longitud del tubo y la frecuencia de resonancia (exacta si se tiene frecuencímetro o aproximada, a partir del dial del generador) y se repite la experiencia con los otros tubos.

Los valores anotados permitirán que los alumnos hagan la representación gráfica de la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tubo.

Si se quiere calcular la velocidad del sonido basta considerar que en todos los casos se consigue la resonancia de la onda fundamental, cuya longitud de onda es el doble de la longitud del tubo. La velocidad será el producto de la frecuencia por el doble de la longitud del tubo. Los valores que resultan no son demasiado buenos, especialmente con los tubos más cortos, ya que al tratarse de tubos algo anchos debería corregirse la longitud del tubo.

También es posible, con un tubo determinado, encontrar las frecuencias de resonancia de los armónicos sucesivos pero la vela solo se llega a apagar con el primero; en los otros llega, como mucho, a temblar. En estos casos la resonancia se detecta por el aumento de volumen del sonido.

Un aspecto interesante que vale la pena hacer notar es que los movimientos del aire tienen la dirección del tubo: la vela oscila longitudinalmente, si ponemos la mano para notar la presión del aire el movimiento es claramente longitudinal. De este modo se confirma el carácter longitudinal de las ondas sonoras.

Ejemplo

La tabla siguiente muestra las frecuencias de resonancia (medidas con un frecuencímetro) correspondientes a tubos de cartón de distinta longitud, de 10 cm de diámetro, y la velocidad del sonido calculada a partir del producto de la longitud de onda (doble de la longitud del tubo) por la frecuencia.

Longitud(m)	f. resonancia (Hz)	velocidad sonido (m/s)
1.30	124	322
1.33	116	308
1.60	100	320
1.74	92	320
2.00(PVC)	83	332

7.- VER EL SONIDO. TIMBRE. LA VOZ Y LA MÚSICA

Todos sabemos distinguir entre el sonido de una guitarra y el de un piano. Se pueden diferenciar las notas de ambos instrumentos aunque tengan la misma amplitud y frecuencia. Algo parecido sucede con la voz de las personas; somos capaces de reconocer a las personas por su voz. La cualidad que nos permite diferenciarlas se denomina timbre. Si podemos visualizar de algún modo las ondas que corresponden a la misma nota musical en distintos instrumentos podremos entender a qué se debe la diferencia. Raramente las ondas sonoras son sinusoides como aparecen dibujadas en los libros. Aunque los diapasones y las flautas originan ondas de este tipo, las de los instrumentos musicales suelen tener formas complejas y bastante distintas entre sí. Ello se debe a que las cuerdas, el aire o la membrana de los instrumentos vibran de una forma compleja, correspondiente a la superposición de numerosas vibraciones simples de distinta frecuencia. Estas vibraciones se denominan armónicos y la de frecuencia más baja se denomina primer armónico o armónico fundamental; muchas veces las frecuencias de los distintos armónicos resultan múltiplos enteros de la frecuencia del armónico fundamental. El número y contribución de los distintos armónicos varía de un instrumento a otro e incluso del principio al final de la misma nota. La voz suele tener una complejidad aún mayor.

El estudio del timbre conduce inevitablemente a la visualización del sonido y a su análisis, es decir, a la separación de los distintos armónicos cuya mezcla es responsable del timbre concreto del sonido. Este análisis puede efectuarse de varios modos. Una posibilidad es el empleo de filtros electrónicos que separan los intervalos sucesivos de frecuencias como si fueran rodajas aunque, en realidad, no separan los armónicos propiamente dichos. Otra posibilidad es el análisis de Fourier, un proceso matemático algo laborioso (y que solo puede realizar rápidamente un ordenador) mediante el cual se exploran los distintos armónicos que forman el sonido.

La comparación elemental del timbre de distintos sonidos solo puede abordarse si se dispone de algún método de visualización del sonido. El estudio posterior dependerá de la posibilidad de tratamiento electrónico o matemático de las señales visualizadas. Para ello hay tres posibilidades simples. En la primera se utiliza un osciloscopio para visualizar la señal de sonido captada por un altavoz. En las otras dos se usan sistemas de adquisición de datos con ordenador.

7.1.– Utilización de un osciloscopio

El sistema clásico para visualizar el sonido consiste en capturarlo mediante un micrófono, amplificar la señal eléctrica e introducirla en un canal de un osciloscopio. La amplificación puede hacerse mediante circuitos electrónicos simples, como el que se indica en la experiencia 4.3 de la primera parte del libro, o algún tipo de amplificador comercial. Otra alternativa consiste en grabar el sonido en un cassette y conectar el osciloscopio a la salida, en paralelo con el altavoz. Si el sonido es regular, como el que procede de un diapasón, una flauta o cualquier instrumento, la señal se podrá mantener más o menos estable en la pantalla y será fácil observar la forma de las ondas y medir su frecuencia. Si se trata de la voz, su carácter más irregular hace que sea más difícil conseguir la sincronización con el barrido; la observación de la señal y las medidas de frecuencias resultaran más difíciles a no ser que el osciloscopio disponga de memoria que permita almacenar la señal eléctrica.

7.2.– Utilización del ordenador

Hace algunos años que se han popularizado las tarjetas de sonido tipo Sound Blaster o similares. Entre sus muchas funciones, permiten capturar el sonido de una fuente externa: micrófono, compact disc o salida de cualquier amplificador. Las tarjetas van acompañadas de los programas necesarios para varias aplicaciones. En el caso que nos ocupa, el programa WaveStudio permite controlar la captura del sonido, su almacenamiento y unas pocas funciones de edición.

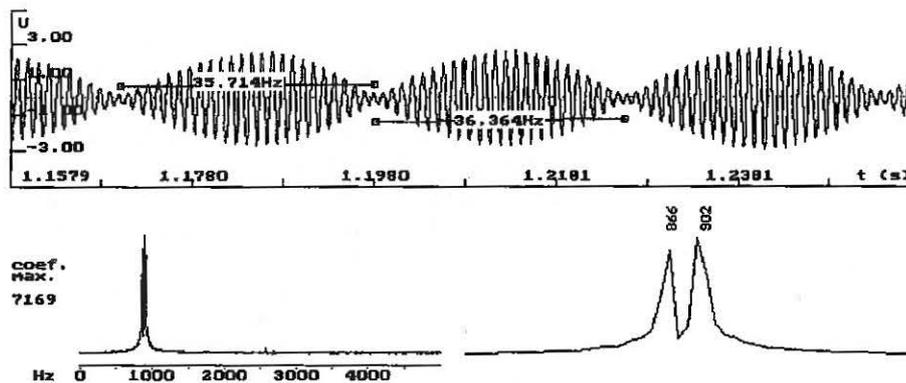
Esencialmente, se consigue visualizar el sonido de una forma algo rudimentaria aunque con este programa no se puede realizar ningún análisis. En cualquier caso, el sonido capturado se puede almacenar en forma de archivos *.wav. Estos archivos no son más que largas ristas de valores que reproducen la forma de la onda. En realidad, contienen toda la información necesaria para poder realizar cualquier tipo de análisis. Para ello es enormemente más cómodo usar algún programa comercial, por malo que sea, que hacerse uno mismo el programa. Es conveniente que consulte a expertos o aficionados a las técnicas de sonido con ordenador para conseguir programas de análisis de dominio público o de tipo shareware.

El sistema más efectivo, de largo, es el uso de algún sistema de adquisición de datos especializado. Los distintos fabricantes comercializan estos equipos, con diversas prestaciones y costes. Por lo general, constan de algún tipo de placa interna (que se instala en el bus del ordenador) y unos circuitos y sensores externos; en el caso que nos ocupa, un micrófono y un pequeño amplificador. Mediante programas especializados in-

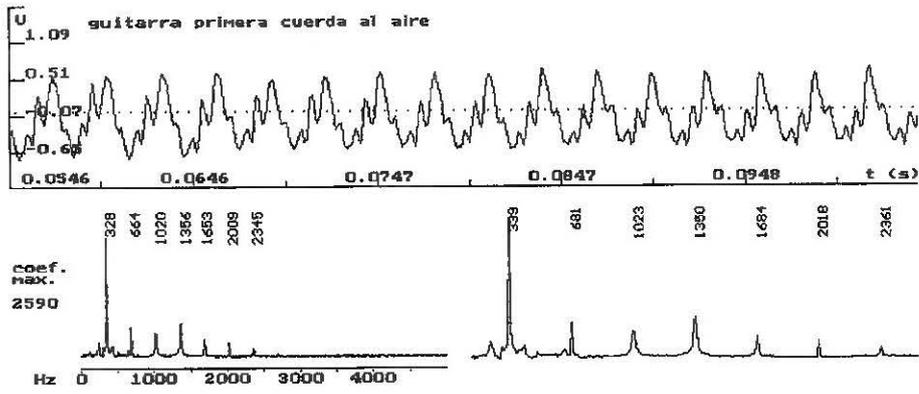
cluidos en los propios equipos se controla la velocidad y el tiempo total de muestreo y, globalmente, se consigue introducir la señal sonora como una secuencia de valores en la memoria del ordenador, tal como lo hacen las tarjetas de sonido. El software especializado contiene todas las utilidades de tratamiento de la señal para obtener los distintos armónicos. Las figuras muestran algunas de las posibilidades que ofrece un sistema de este tipo.

Algunas de las posibles observaciones que pueden realizarse con uno u otro de estos sistemas de almacenamiento son:

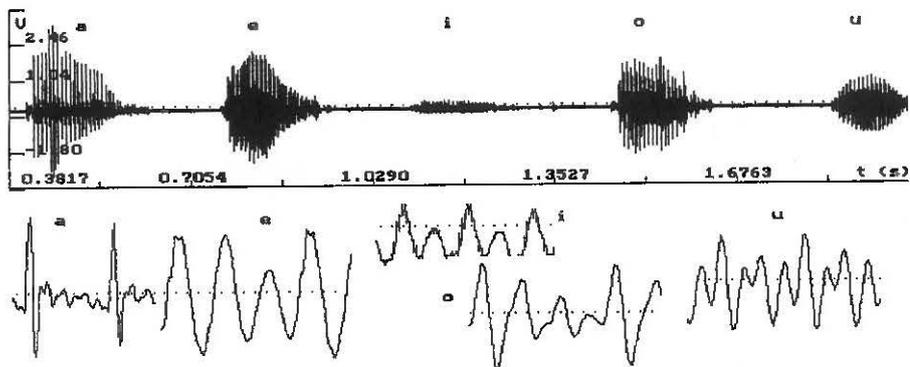
- las fluctuaciones periódicas que constituyen las pulsaciones (con dos flautas, diapasones..).
- diferenciar las vocales fuertes (a,e,o) de las débiles (i,u).
- comprobar como las consonantes oclusivas (p,t,d,b,c..) son breves y poco potentes, tal como corresponde a pequeñas «explosiones» de aire que se libera.
- las vibraciones de la r.
- comprobar como las consonantes fricativas (f,s,z,....) no contienen armónicos. Se trata de ruidos sin frecuencias definidas, producidos por el aire a gran velocidad.
- comprobar como se distribuye la energía en una palabra o frase y la relación que esto tiene con la acentuación y el énfasis.
- comparar los armónicos presentes en los sonidos de distintos instrumentos musicales.
- comparar el tipo de armónicos presentes en el sonido que emiten los tubos abiertos o cerrados.



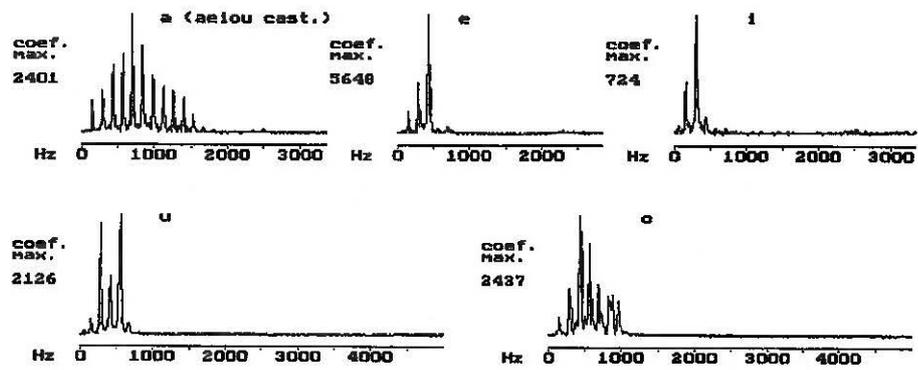
Pulsaciones obtenidas mediante dos flautas ligeramente desajustadas. La frecuencia de pulsación es de unos 36 Hz, igual a la diferencia de las frecuencias de las dos flautas. El Análisis de Fourier, en la parte inferior, muestra cada una de estas frecuencias.



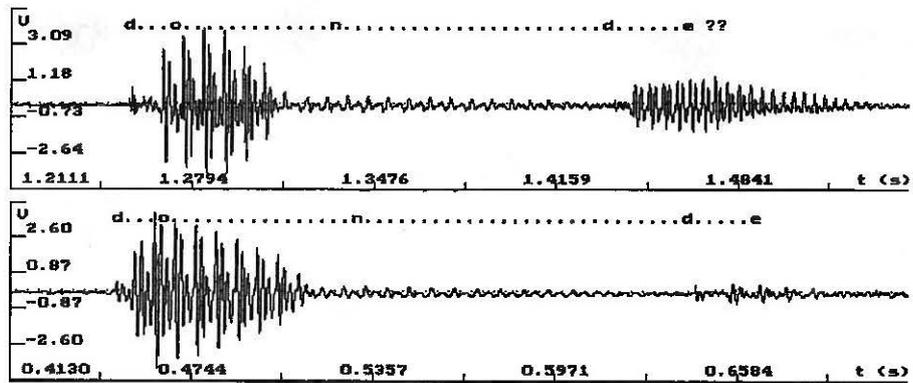
Onda correspondiente al sonido de la 1ª cuerda de una guitarra. El Análisis de Fourier muestra la composición de los armónicos que forman este sonido.



Comparación de la intensidad de las cinco vocales. Se justifica plenamente que las vocales i, u sean débiles. Abajo, se muestran las formas de las ondas correspondientes a cada una.



Análisis de Fourier de las vocales de la figura anterior. Todas ellas tienen un contenido de armónicos complejo, muy alejado de una señal senoidal simple.



Formas de las ondas correspondientes al sonido de las palabras: Dónde? y donde. Se observa como, en el primer caso, una parte importante de la energía aparece al final. En el segundo caso, casi toda la energía aparece al principio.

8.- PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: INTERFERENCIAS Y PULSACIONES

El principio de superposición permite justificar todos los fenómenos que se producen cuando dos ondas se encuentran en un punto o a lo largo de una dirección determinada. Esta sección describe algunos experimentos sobre interferencias y pulsaciones, correspondientes a la superposición de dos ondas en un punto. En la siguiente sección se estudian las ondas estacionarias, debidas a la superposición de ondas en una o dos dimensiones.

Las interferencias con el sonido de dos altavoces no son, sin duda, el mejor experimento para estudiar este fenómeno. Resulta más eficaz observarlas en la cubeta de ondas, tal como se describe en la sección 10 de la primera parte del libro, o en las ondas luminosas, en la sección 12 de la segunda parte.

Las pulsaciones del sonido son uno de los fenómenos más simples para justificar la superposición de las ondas. Aparecen pulsaciones cuando, en un punto, se superponen dos ondas de frecuencia parecida. El resultado es un sonido vibrante o fluctuante que puede ser algo desagradable y que es totalmente distinto al que se percibe cuando los dos sonidos que lo originan se oyen por separado. El fenómeno tiene una importancia notable en el campo de las telecomunicaciones y en la música; por ejemplo, los afinadores de pianos se basan en las pulsaciones para afinar el instrumento, de un modo que requiere unas dosis notable de entrenamiento y de arte.

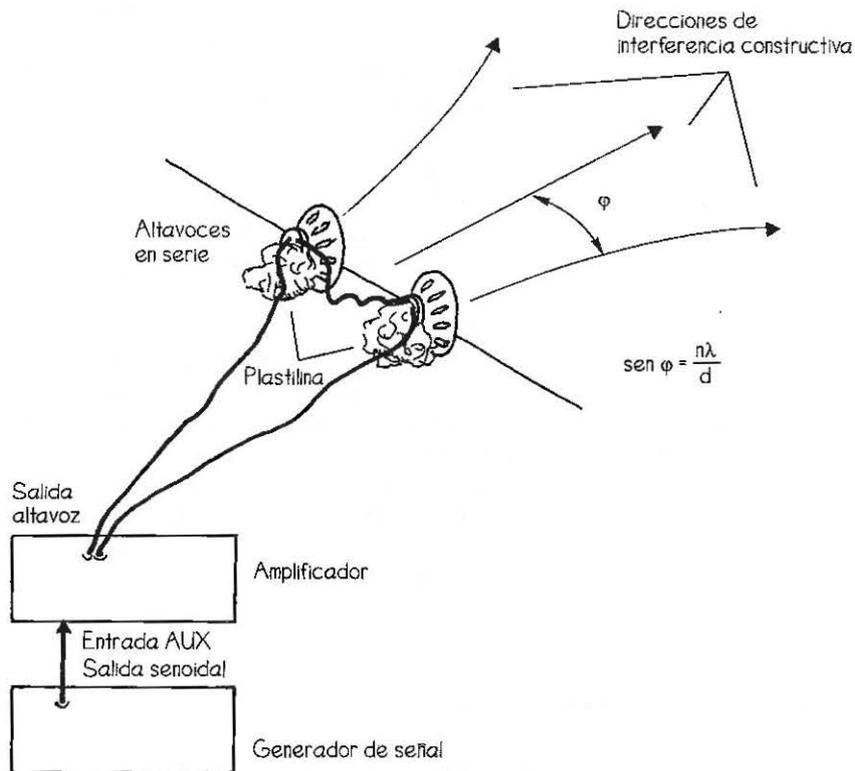
8.1.- Demostración. Interferencias con dos altavoces

El montaje es relativamente simple y el experimento funcionará tanto mejor cuanto más se reduzcan las reflexiones del sonido, especialmente en la mesa en que se encuentre el montaje o las mesas contiguas.

Basta utilizar el generador de señal, un amplificador y dos pequeños altavoces conectados a la salida, tal como indica la figura. Los altavoces pueden conseguirse sin dificultad en suministradores de electrónica. Si las conexiones de cada altavoz son iguales el sonido se emitirá en fase. Si hay tiempo y ganas se puede estudiar el efecto de las conexiones invertidas para que los altavoces emitan en oposición de fase.

Al preparar el montaje tenga en cuenta que si los dos altavoces están en fase, las direcciones de interferencia constructiva son las que corresponden a la ley de Bragg: $\sin \phi = n\lambda/d$, (n es un número entero, d la distancia entre los altavoces y λ la longitud de onda). La ecuación puede escribirse: $\sin \phi = n.v/dv$ (v es la frecuencia y v la velocidad del sonido

(343 m/s a 20°C). Por ello, se podrán observar varias direcciones de interferencia constructiva (y destructiva) si el producto dv es mayor que 343. De este modo, si la frecuencia es de 2000 Hz, una separación de 0.4 metros entre los altavoces dará buen resultado.



Los altavoces se colocan a poca distancia del borde de la mesa (para que, por lo menos, el sonido no rebote en esta mesa). Si la frecuencia es de 2000 Hz aparecen varias líneas nodales y máximos de interferencia que los alumnos podrán apreciar claramente si pasean con un oído tapado paralelamente a la línea que une los altavoces, a un par de metros de distancia. Puede variar la frecuencia para comprobar el efecto sobre el número y proximidad de las líneas de interferencia (de acuerdo con la ley de Bragg). Haga que los alumnos comprueben que la línea mediatriz del segmento que une los altavoces es una dirección de interferencia constructiva (si los altavoces se han conectado del mismo modo, para que emitan en fase). Puede cambiar las conexiones de uno de los altavoces para comprobar que, al estar ambos en oposición de fase, la línea mediatriz se transforma en una línea nodal.

8.2.– Demostración. Pulsaciones

El método normal para observar pulsaciones consiste en disponer de dos diapasones grandes de 440 Hz, montados sobre cajas de resonancia con unas pequeñas piezas que se atornillan para poder variar ligeramente la frecuencia. Si los diapasones están ajustados exactamente a la misma frecuencia el sonido resulta uniforme y continuo. Si uno de los diapasones se desajusta, cambiando la pequeña pieza móvil de posición, el sonido tendrá una fluctuación característica. Una fluctuación muy lenta puede ser difícil de apreciar; si es rápida el sonido global será desagradable, como un campanilleo. Una vez se produzcan las pulsaciones vale la pena destacar que:

- el desajuste de frecuencias es el responsable del fenómeno (varíe de nuevo la posición de la pieza para ver que cambia la frecuencia de pulsación)

- el fenómeno es debido al funcionamiento simultáneo de los dos diapasones. No hay pulsaciones si se golpea uno u otro de modo que únicamente suene un diapasón.

Es posible que no disponga de dos de estos diapasones sino de uno solo. Naturalmente, la solución más fácil es comprar otro, pero suelen ser caros y posiblemente tenga otra ideas para gastar su (probablemente) escasa asignación. Una alternativa es usar el diapasón y un amplificador con un altavoz, al que se conectará el generador de señal, con una frecuencia próxima a 440 Hz, en el montaje que se ha indicado tantas veces (ver, por ejemplo 4.3.– Tubo de Kundt). Regulando el volumen del altavoz para que sea comparable al del diapasón y con el ajuste necesario de frecuencia se oirán claramente las pulsaciones.

Otra posibilidad consiste en usar el diapasón grande, ajustable, y uno pequeño de frecuencia fija 440 Hz, fácil de conseguir en cualquier tienda de música. Se golpea el diapasón pequeño sobre la mesa y se pone sobre la caja de resonancia del grande, este último se pellizca (para que no suene muy fuerte) y si se escucha atentamente se oyen las pulsaciones, aunque el sonido es mucho más débil que si se dispone de dos diapasones grandes.

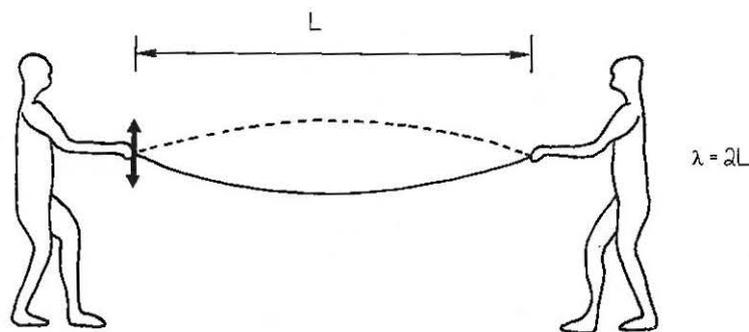
Si no tiene ningún diapasón grande hay una alternativa efectiva, fácil y barata: emplee dos flautas. Por lo menos una de ellas debe poder desajustarse moviendo la pieza superior, que contiene la boquilla por la que se sopla; la otra flauta puede ser fija. Puede buscar estas flautas (por lo menos la fija) en las tiendas «todo a 100». Se trata de hacer sonar la «misma» nota en ambas flautas; una de ellas se habrá desajustado ligeramente. Las pulsaciones se oyen muy claramente y se puede comprobar como varían al cambiar el ajuste. Es importante que las flautas den un sonido con un único armónico, por ello se deben soplar suavemente.

9.- PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: ONDAS ESTACIONARIAS

En realidad, las ondas estacionarias ya se han podido observar en la mayor parte de los experimentos de la sección 4, relacionados con la velocidad del sonido. Los experimentos que se citan en esta sección deben entenderse como complementos de aquellos. Entre ellos deben destacarse, por su facilidad e interés, la experiencia sobre vibración de varillas y la demostración sobre placas vibrantes.

9.1.- Demostración. Ondas estacionarias transversales en un muelle largo

La experiencia permite producir ondas estacionarias en un muelle de una forma especialmente simple. Basta que se superpongan las ondas que viajan en sentido contrario, sea porque hay dos focos de ondas o porque las ondas que emite un foco se reflejan en el otro extremo.



Se necesita un muelle largo, tal como se describe en las experiencias 1.5 o 3.4. Dos alumnos sujetan el muelle, estirado unos 4-5 metros. Sugiera que hagan oscilar el muelle, primero lentamente y después más rápido. Debe hacer notar que el muelle oscila regularmente cuando la frecuencia de los dos focos es la misma. A frecuencias bajas, correspondientes a un movimiento lento de la mano, la sincronización no presenta ningún problema, sin embargo, puede ser algo difícil de conseguir si la frecuencia es algo alta (suele haber problemas para conseguir el cuarto armónico y los superiores).

A continuación un alumno hace oscilar un extremo del muelle, con el otro extremo fijo, enganchado a un soporte bien sujeto a la mesa. Las ondas estacionarias se consiguen del mismo modo ya que el soporte refleja las ondas que se le envían. Debe notarse que únicamente es posible conseguir ondas estacionarias a unas frecuencias bien definidas. Si no se aciertan estas frecuencias no se consiguen ondas estacionarias. Por ello, nuevamente, son difíciles de conseguir los armónicos superiores al cuarto ya que es algo complicado mantener una frecuencia alta y estable.

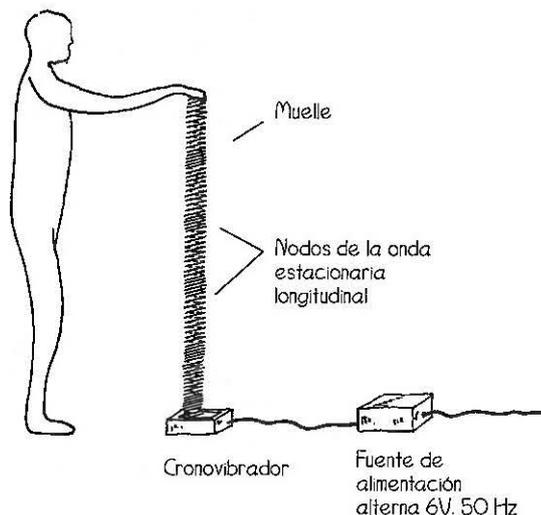
Vale la pena intentar definir el valor de la frecuencia para los distintos armónicos, para ello, puede contarse el tiempo que tarda la mano en provocar 10 oscilaciones, o algo así. La frecuencia será $10/\text{tiempo}$. Se comprobará que las frecuencias correspondientes a los armónicos sucesivos son múltiplos del valor más bajo y que el producto de la frecuencia por la longitud de onda (fácilmente deducible si se mide la longitud del muelle) se mantiene aproximadamente constante (este producto es la velocidad de la onda en el muelle), si se ha tenido la precaución de no variar la tensión ni la longitud del muelle de un armónico a otro.

9.2.- Demostraciones: Ondas estacionarias longitudinales y transversales

Una de las demostraciones más simples y vistosas para observar ondas estacionarias transversales es la que se ha descrito en 4.4. (Longitud de onda y velocidad de una onda transversal en una goma elástica). El carácter transversal de la onda resulta evidente. Las ondas estacionarias longitudinales, al contrario, son algo más difíciles de observar y, aunque en las resonancias de tubos hay ondas longitudinales, el movimiento no es claro y en realidad parece transversal. En este sentido, el carácter longitudinal de las ondas sonoras puede sugerirse en la experiencia 7.5 (Resonancia de tubos. Una vela para observar la resonancia).

Una experiencia distinta para observar ondas estacionarias longitudinales es la siguiente. Se emplea el mismo vibrador que se utiliza para las

ondas en una goma elástica (experiencia 4.4). Se pasa un pequeño lazo de hilo por el tornillo del extremo y se le engancha un muelle formado por varios trozos, más bien ligeros (del tipo de los que se usan en los móviles). Posiblemente alguien tenga que subirse a la mesa para mantener los muelles un poco tensos. Al poner en marcha el vibrador se observarán, a lo largo del muelle, zonas fijas en las que el muelle está quieto (nodos) y zonas de máxima vibración. Variando la tensión cambiará el número de nodos del muelle. Se trata claramente de una onda estacionaria longitudinal.

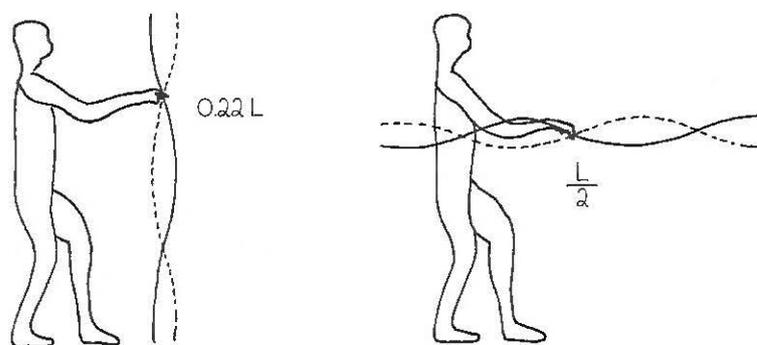
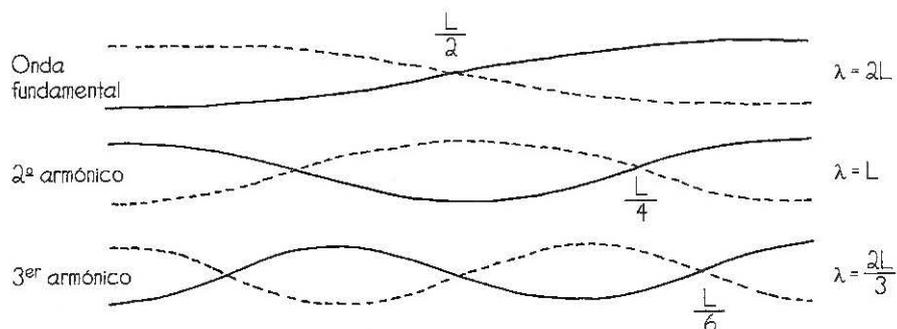


9.3.- Experiencia. Ondas estacionarias en varillas

Esta experiencia permite observar un buen número de las características de las ondas, por ello debería recibir una atención especial, ya que, además, es una de las más interesantes de esta recopilación. Si se puede medir la frecuencia, los aspectos cuantitativos de la experiencia resultan muy interesantes, como se verá a continuación. El material necesario es sumamente simple, basta una colección de varillas metálicas de varias longitudes para repartir a los alumnos. Estas varillas se pueden conseguir en tiendas especializadas en perfiles metálicos o en ferreterías importantes; pueden comprarse cilíndricas, de 1 m de longitud, de varios metales como latón, aluminio, acero o cobre, algo gruesas, de 6 mm a 1 cm de diámetro aproximadamente. Es muy conveniente que disponga también de un pequeño juego de varillas de latón de distintas longitudes (las de latón suelen ser las que mejor suenan), desde 1 a 2 metros y de una varilla de acero de unos 2 metros de longitud. También necesitará

alcohol y papel de filtro (o servilletas de papel) y colofonia. La colofonia tiene aspecto de resina y es fácil de conseguir en droguerías (un cuarto de kilo puede durarle años); si no la encuentra, busque en alguna tienda de música un trozo de pega para arco de violín (incluso puede aprovechar alguna pieza que esté rota).

Antes de embarcarse en la compra de todas las varillas pruebe primero con una varilla de aluminio de las que se usan como soporte en el laboratorio, de unos 70 cm (funcionan mucho mejor que las de hierro). Comprobará lo fácil que resulta la experiencia. La varilla se debe desengrasar con alcohol y un trapo o papel. Con otro trapo mojado en algo de alcohol friegue un trozo de colofonia (se disuelve fácilmente en el alcohol) y, a continuación, frote bien la varilla con el trapo y déjela secar. Una vez seca el tacto debe ser algo pegajoso. Se rompe un trocito de colofonia (se pulveriza muy fácilmente) y se coge algo de polvo con los dedos. Para hacer sonar la varilla se sujeta por su punto medio con dos dedos (sin que el resto de la mano toque la varilla) y se deslizan los dedos de la otra mano, pringados con el polvo de colofonia, por la varilla, apretándola levemente desde la mitad hasta el extremo (la posición de la varilla respecto los dedos que la frotan es parecida a la de un bolígrafo al escri-



bir). Notará un sonido muy agudo (con una varilla corta) y persistente. Repita el movimiento notando que la presión de los dedos debe ser algo mayor en el extremo. Todo el truco está en ejercer una presión algo creciente, a medida que los dedos se acercan al extremo, y conseguir que el movimiento sea suave, sin intermitencias.

Si tiene algo de práctica puede probar con perfiles de aluminio de cualquier forma geométrica. Casi todo es capaz de sonar, con tal que esté limpio. Además, podrá ir pensando en comprar varillas de distintos metales y longitudes. Cada varilla se debe preparar tal como se ha indicado (desengrasándola, frotándola con colofonia, etc..). No hace falta hacer este tratamiento cada vez que se quieran usar, solo la primera vez o si se han ensuciado por el uso. En cambio, deberá pringarse los dedos con polvo de colofonia cada vez. Para limpiarlos, la forma más efectiva es usar alcohol.

Tal como muestra la figura, una varilla que se frota de esta manera contiene una onda estacionaria longitudinal, con un nodo en la mitad, en el punto por donde se sujeta, tal como sucede en un tubo abierto por los dos extremos. Es interesante comprobar la vibración de los extremos del modo siguiente: si la varilla no vibra y se toca una moneda con el extremo, el sonido es sordo; si se hace con la varilla vibrando el sonido es totalmente característico, como una chispa.

La longitud de onda es el doble de la longitud de la varilla. Por ello si se mide la frecuencia, por ejemplo comparando con frecuencias generadas con el ordenador, es posible calcular la velocidad del sonido en el metal correspondiente, tal como se indica en el ejemplo. Puesto que la velocidad del sonido es distinta en cada metal, las frecuencias de las varillas de la misma longitud y distintos metales suenan con una frecuencia distinta. Probando con varillas del mismo metal (funciona especialmente bien el latón) se puede comprobar que a medida que la longitud es mayor, la frecuencia es menor y el sonido más grave. El producto de la frecuencia, si se puede medir, por el doble de la longitud de la varilla se mantiene constante para un metal determinado.

La figura sugiere que es posible excitar armónicos superiores si la varilla se sujeta por los puntos apropiados. Efectivamente, si la varilla se sujeta sucesivamente por la mitad, a una cuarta parte del extremo y a una sexta parte y se frota el extremo libre más corto, se obtienen notas de frecuencias múltiplos de la primera. Esto funciona bien solamente si la varilla es suficientemente larga y, en cualquier caso, hay que frotar algo más fuerte.

La varilla de acero más larga permite además, como demostración, observar los modos de vibración transversales. La forma de hacerlo es la siguiente. Se sujeta la varilla por la mitad y se golpea con la mano libre cerca del punto donde se sujeta. La vibración de la varilla es rápida, con tres nodos, como se indica en la parte inferior de la figura; se puede me-

dir, de un modo aproximado, la longitud de onda. Otra posibilidad es sujetar la varilla vertical, a una distancia de 0.22 veces la longitud y golpearla con la mano, por debajo de este punto. La varilla vibra transversalmente tal como muestra la figura, con dos nodos. La vibración tiene una frecuencia claramente menor que en el caso anterior, como corresponde a una mayor longitud de onda.

Ejemplo

La tabla siguiente muestra las frecuencias de las ondas estacionarias longitudinales (primer armónico) conseguidas con distintas varillas, todas ellas de 1 cm de diámetro. La longitud de onda es, en cada caso, el doble de la longitud de la varilla. En el aluminio, la velocidad del sonido (producto de la longitud de onda por la frecuencia), resulta de 5000-5069 m/s, en el latón la velocidad es 3388-3510 m/s, y en el cobre, de 3830 m/s. Puesto que en los metales la velocidad del sonido es igual a la raíz del cociente entre el módulo de Young y la densidad, la menor densidad del aluminio (2.7 g/cm^3) justifica que en este metal la velocidad del sonido sea mayor que en el latón o el cobre (8.9 g/cm^3).

Longitud	Aluminio	Latón	Duraluminio	Cobre
0.7 m			3570 Hz	
1 m	2500 Hz	1694 Hz(macizo) 1767 Hz (hueco)		
1.8 m	1408 Hz	975 Hz		1064 Hz

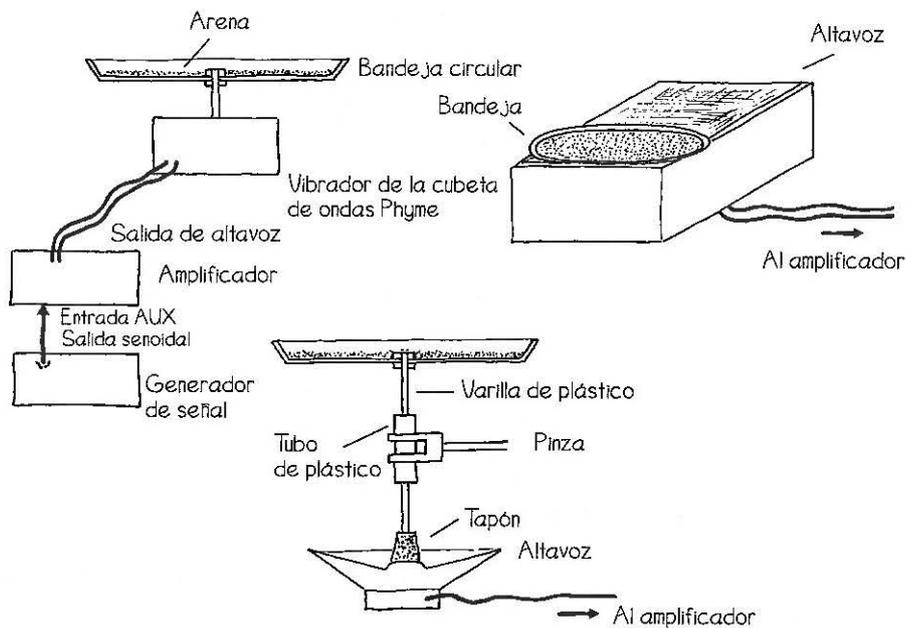
9.4.– Demostración. Experiencia casera. Ondas estacionarias en campanas y tapas de cacerolas

Del mismo modo que es posible obtener ondas estacionarias confinadas en el perímetro de una copa o un vaso (Experiencia 3.3), se pueden conseguir ondas estacionarias en los bordes de campanas, tapas de cacerolas y objetos similares. El método es algo distinto. Debe buscarse una mano de mortero de madera u otra pieza de madera o plástico cilíndrico, como el mango de un destornillador. La campana se sujeta por el mango (o la tapa de cacerola por el asa) de modo que pueda vibrar lo más libremente posible. Con la mano de mortero se golpea la campana y se frota lentamente la parte lateral, apretando al mismo tiempo que se recorre el borde de la campana. De una forma parecida a un vaso, la campana emite un sonido continuo más o menos agudo según su tamaño. Algunos recipientes grandes emiten un sonido grave e impresionante. Si no funciona a la primera tenga paciencia y antes de desistir pruebe varias tapas o campanas, asegurándose que aprieta la mano de mortero frotando contra el lateral. Si acierta verá que es realmente fácil y espectacular. Ponga a sus alumnos que prueben con objetos caseros.

9.5.– Demostración. Ondas estacionarias en dos dimensiones: Placas vibrantes

En las experiencias anteriores se habrán podido observar distintos tipos de ondas estacionarias, todas ellas en una dimensión. En unos casos estas ondas están confinadas entre dos posiciones, como sucede en una goma o un tubo; en otros las ondas aparecen cerradas sobre sí mismas, como sucede en las campanas o tapas de cacerolas.

También es posible observar ondas estacionarias en dos dimensiones. Una de las formas más simples y espectaculares consiste en excitar la vibración de una placa mediante un altavoz o un vibrador; los nodos y vientres de las ondas producidas en la superficie de la placa se ponen de relieve con un poco de arena. La simetría, variedad y belleza de las figuras que se forman justifican sobradamente el pequeño esfuerzo necesario para el montaje, y hacen de esta demostración una de las más vistosas del libro.



La experiencia puede realizarse de varias maneras. A continuación se describen algunas posibilidades, empezando por las que requieren un material más específico. En todas ellas se necesita un generador de señal conectado a un amplificador. Esta parte del equipamiento ya se ha descrito para muchas de las experiencias anteriores (por ejemplo 4.3.– Tubo de Kundt). Si es afortunado, puede que disponga de un vibrador del equi-

po de la cubeta de ondas del tipo Phywe o de otro similar. Se trata de un cilindro con la misma estructura que un altavoz (imán, bobina...) pero sin la membrana y con una pequeña barra vertical a la cual está sujeto el vibrador que golpea el agua. Este vibrador deberá alimentarse con corriente alterna procedente del amplificador. Si dispone de este aparato ya tiene la demostración prácticamente resuelta. Le basta con buscar una bandeja ligera, de forma circular o cuadrada (pruebe en «todo a 100») y hacer un agujero en el centro. La misma pieza que permite acoplar el vibrador para golpear el agua le permitirá, una vez desmontada, sujetar la bandeja a la barra que provocará su vibración. Como puede imaginar, es importante que el agujero esté bien centrado para que la bandeja quede horizontal. A continuación, se esparce un poco de arena por encima, como si se tratara de sal y se buscan las frecuencias en las cuales hay resonancia (puede haber muchas frecuencias posibles). Si la arena no se llega a mover, probablemente sea debido a que la amplitud de las vibraciones no es suficientemente grande. Comprobará la variedad y complejidad de figuras simétricas que se consiguen. Puede ser conveniente pintar de negro la cara interior de la bandeja para que contraste con el color claro de la arena. También se puede usar un disco LP viejo; se ven bien

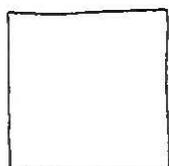
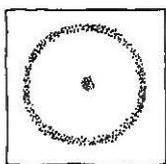


Lámina de baquelita recubierta de aluminio 15.3 x 15.3 cm

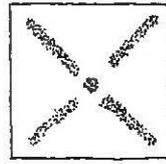
7.5 cm



210 Hz

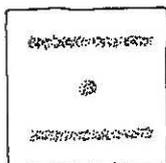


260 Hz

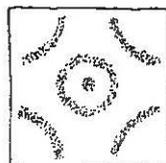


290 Hz

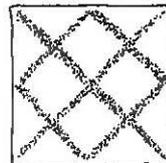
8.5 cm



300 Hz



740 Hz



1600 Hz

las ondas estacionarias, con los nodos y vientres concéntricos, pero hay un problema: rápidamente se carga con electricidad estática y la arena queda «pegada». Si le echa imaginación posiblemente encuentre materiales interesantes. A mí, particularmente, me encantan las bandejas de hojalata de «todo a 100», que tienen muchas frecuencias de resonancia entre 400 y 2000 Hz. Hasta donde he probado, el experimento funciona mejor (se observan más modos de vibración) con láminas metálicas que con láminas de plástico, cartón o madera. Con estos materiales es posible cortar láminas de distintas formas; resultan especialmente interesantes las láminas cuadradas y triangulares. Las figuras muestran algunos de los modos de vibración con una lámina cuadrada.

Si no tiene este vibrador no hay problema. La alternativa más directa consiste en atornillar la bandeja, por el centro, a una pieza cilíndrica de plástico o madera, que se hace pasar por un trozo de tubo, de diámetro algo mayor, bien sujeto mediante una pinza en un soporte. La parte inferior de la pieza se pega a un tapón y este, a su vez, se pega al centro de un altavoz, como muestra la figura. Las vibraciones del altavoz, alimentado por el amplificador, se transmiten a la placa. La pega es que este montaje resulta mucho más ruidoso que el primero, ya que para conseguir unas vibraciones con una amplitud apropiada la intensidad del sonido del altavoz resultará algo molesto.

Otra alternativa interesante consiste en colocar un altavoz, algo pequeño, debajo y cerca de la superficie de la bandeja. Esta puede estar atornillada por el centro a una pieza que permita sujetarla o, simplemente se puede apoyar en uno o más soportes. Ya que la excitación de las vibraciones no se provoca en el centro, aparecen modos de vibración distintos a los de los montajes anteriores. Aunque algunos modos de vibración aparecen con un volumen relativamente bajo del altavoz, muchos otros requieren que el sonido sea fuerte.

Aún son posibles otros montajes. Se coloca un altavoz horizontal, por ejemplo, un baffle de un equipo de sonido, conectado a un amplificador y, a este, la salida senoidal del generador de señal. Si se coloca un tambor encima, apoyado en la caja del baffle, las vibraciones del altavoz excitan distintas ondas estacionarias en la membrana del tambor, claramente visibles con un poco de arena. Si no se tiene un tambor se puede colocar una bandeja algo grande (tipo «todo a 100») centrada sobre el altavoz, con el borde apoyado en la caja del baffle y el fondo arriba, que pueda vibrar libremente (excepto por los bordes). Se pueden observar muchas ondas estacionarias de formas distintas. Esta experiencia resulta muy vistosa aunque también es algo ruidosa.

9.6.- Demostración. Los trastes de la guitarra

Los conceptos asociados a las ondas estacionarias en las cuerdas vibrantes pueden estudiarse utilizando una guitarra. Por varias razones, resulta más conveniente el empleo de una simple guitarra que la construcción o compra de un monocordio. La guitarra tiene la ventaja, frente a otros instrumentos de cuerda, que el mástil ya contiene las divisiones (trastes) que dividen la longitud de la cuerda a la distancia necesaria para que las frecuencias sean las que corresponden a la escala musical.

Supondremos que al pulsar una cuerda se produce únicamente la onda estacionaria fundamental, cuya longitud de onda es el doble de la longitud de la cuerda. Cuanto mayor es la tensión de la cuerda, mayor es la velocidad de las ondas, por ello, para una longitud de onda determinada si la velocidad de las ondas aumenta, debe aumentar la frecuencia. Al tensar la cuerda el sonido es más agudo. Por otro lado, la velocidad es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad lineal de la cuerda y, por ello, las cuerdas más gruesas, envueltas en un hilo metálico, vibran con una frecuencia menor y su sonido es más grave. La misión de los puentes sobre los que se apoyan las cuerdas es transmitir las vibraciones de la cuerda a la caja de resonancia. Una buena guitarra está construida con maderas que amplifiquen bien todas las frecuencias de las cuerdas. En una guitarra eléctrica la amplificación se consigue con unos captadores debajo de las cuerdas y no hay caja de resonancia; prácticamente no se oye si está desenchufada.

Al tocar la guitarra se aprietan las cuerdas contra los trastes haciendo variar su longitud. En una guitarra española, las posiciones de los trastes son las que se indican en la tabla siguiente. Resulta evidente que las octavas se obtienen con la mitad de la longitud; las longitudes $3/4$ y $2/3$ originan la nota subdominante y dominante, respectivamente, de la nota tónica que corresponde a la longitud completa de la cuerda.

Traste	L traste	L traste/L	frecuencia	Nota (1a cuerda)
0	64.9 cm	1	f_0	Mi
1	61.3	0.944		Fa
2	57.9	0.892		Fa sost.
3	54.7	0.843		Sol
4	51.5	0.793		Sol sost
5	48.6	0.749 (3/4)	$4/3f_0$ (1.33 f_0)	La
6	45.9	0.707		La sost
7	43.2	0.666 (2/3)	$3/2f_0$ (1.5 f_0)	Si
8	40.7	0.627		Do
9	38.4	0.592		Do sost.
10	36.3	0.559		Re
11	34.2	0.527		Re sost.
12	32.4	0.499 (1/2)	$2f_0$	Mi
.....				

10.- PROPIEDADES GENERALES DE LAS ONDAS. EXPERIMENTOS CON LA CUBETA DE ONDAS

10.1.- Las cubetas

La cubeta de ondas fue durante mucho tiempo un aparato especialmente valioso para el estudio de la mayor parte de propiedades de las ondas, especialmente la difracción y las interferencias. La utilización cada vez mayor del láser, debido a su bajo coste, ha supuesto una importante alternativa y, por ello, la cubeta ha perdido el papel predominante que tuvo en el estudio de las ondas.

Los centros antiguos posiblemente dispongan de la cubeta de ondas fabricada por Enosa. En este caso la fuente de luz es una lámpara halógena montada dentro de una caja, con un disco rotatorio y un orificio de salida. La cubeta se monta encima y la luz atraviesa un pequeño depósito transparente donde se producen las ondas con un pequeño vibrador; un espejo justo encima proyecta las ondas en una pantalla. Como en todas las cubetas comerciales, el vibrador está sincronizado con la rotación del disco para conseguir la «inmovilidad» de las ondas en la iluminación estroboscópica. Por lo demás, hay vibradores con una punta o dos y láminas planas, para las distintas situaciones que se pretenden estudiar. El punto débil de esta cubeta es la bombilla. Como todas las bombillas halógenas tiene las horas contadas y su sustitución es un poco latosa ya que va soldada. Además se trata de un modelo antiguo (como la propia cubeta) y puede ser algo difícil de encontrar. Otra pega es que la rotación del disco provoca vibraciones que hacen mover la estructura de la cubeta. Es conveniente que la fuente de luz se coloque sobre un trozo de espuma para amortiguar las vibraciones. Aparte de estos inconvenientes funciona bien. Si dispone de una de estas cubetas y la única pega es la bombilla fundida no dude en buscarla y cambiarla. El pequeño esfuerzo valdrá la pena.

Otro de los modelos comunes es la cubeta de Phywe. En este caso la fuente luminosa está situada encima, con un disco estroboscópico de policarbonato cuyos sectores dejan pasar la luz de una bombilla halógena de bajo voltaje. El disco se rompe con una cierta facilidad y debe pedirse uno nuevo al fabricante. La bombilla requiere una fuente con una alimentación de 12 V (de corriente alterna o continua) que en algunos casos el fabricante puede no haber suministrado. Puede solucionarse la papeleta con un transformador de bombillas halógenas. Si lo usa, debe proteger las conexiones con abundante silicona o algún aislante que no se despegue fácilmente. Otra alternativa es el empleo de una fuente de alimentación específica de 12V, con la potencia suficiente. El módulo que

controla la rotación del disco alimenta, a su vez, al vibrador y debe de alimentarse a 12V de tensión continua. Debido a ello, la fuente de alimentación tiene su importancia, especialmente si no va incluida en el equipo. La luz atraviesa la cubeta y se refleja en un espejo situado debajo, hacia una pantalla. El funcionamiento y las experiencias de esta cubeta y la anterior son bastante similares; en ambos casos el laboratorio debe estar a oscuras para poder ver la imagen proyectada. Las zonas claras y oscuras que se observan en la pantalla se deben a que las crestas y cavidades de las ondas actúan como lentes convergentes o divergentes sobre la luz procedente de la fuente.

Si dispone del equipo Phywe o de otro similar, consulte la experiencia «9.5.– Placas vibrantes» ya que tendrá un componente particularmente interesante para poderla realizar de una forma fácil.

10.2.– Los experimentos

a) La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia

Las ondas circulares se producen utilizando una pieza con una sola punta en el vibrador. Si la cubeta tiene un vibrador de frecuencia regulable podrá observar que al aumentar la frecuencia (haga notar a los alumnos que el sonido es más agudo) la separación entre las ondas proyectadas en la pantalla es menor, baje de nuevo la frecuencia para que la longitud de onda aumente. Ello, naturalmente, es debido a que la velocidad de las ondas en el agua es constante y la relación entre la longitud de onda y la frecuencia es inversa, de acuerdo con la ecuación: $\lambda = v/\nu$.

b) Distintos tipos de reflexiones

La cubeta de ondas resulta muy útil para observar algunos fenómenos citados muy a menudo en los libros y que pueden ser algo difíciles de realizar. Uno de estos experimentos consiste en emplear una pieza en forma de elipse, que se suministra con la cubeta, haciendo que el vibrador de una sola punta golpee el agua en uno de los focos. Las reflexiones en las paredes de la elipse se concentran en el otro foco. Un experimento similar, que se exhibe en algunos museos de la ciencia, consiste en una especie de mesa de billar elíptica, con una pequeña rampa y una bola. Uno de los focos tiene un agujero como si se tratara de un campo de golf. Si se suelta la bola desde una rampa situada en el otro foco, la bola rebota en la pared elíptica y va inexorablemente al «hoyo», independientemente de su orientación inicial.

Otra posibilidad consiste en usar una pieza de forma parabólica, con el vibrador de una punta en el foco; las ondas circulares producidas se reflejan en la parábola y salen planas. El efecto inverso también es posible. Si se coloca la pieza plana en el vibrador y las ondas (planas) se

dirigen perpendiculares al eje de la parábola, se reflejan y concentran en el foco. Este experimento tiene su encanto para justificar muchos fenómenos análogos: los reflectores parabólicos en los faros de los coches o estufas y las antenas parabólicas que concentran una señal débil en un punto.

Aún otro experimento sobre reflexión. Si se utiliza el vibrador de una sola punta para enviar ondas circulares que se reflejan en una lámina plana, a unos pocos cm, las ondas reflejadas lo hacen de tal modo que parece como si procedieran de un punto situado simétricamente al otro lado de la lámina plana. De este modo, se demuestra que la «imagen» del vibrador está al otro lado del «espejo» y a la misma distancia.

c) Difracción

La difracción aparece cuando una onda atraviesa una rendija de un tamaño similar a su longitud de onda. La observación de este fenómeno (y de las interferencias) es una de las aplicaciones más interesantes de la cubeta de ondas. Basta poner una pieza para generar ondas planas y, a unos cm, dos piezas que definan una pequeña abertura paralela a las ondas. Al modificar el tamaño de la abertura se observa que las ondas que la atraviesan aparecen curvadas en los bordes. Si el tamaño de la abertura es similar a la longitud de onda, la onda plana incidente pasa al otro lado como una onda circular. Si su cubeta permite regular la frecuencia (y la longitud de onda) podrá apreciar mejor esta condición, comprobando como la difracción depende de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la abertura.

d) Interferencias

Para observarlas, deberá colocar en el vibrador la pieza que dispone de dos puntas separadas unos centímetros. Se observarán claramente las líneas nodales y los máximos de interferencia constructiva. Destaque como la mediatriz del segmento que une los dos puntos es una línea de interferencia constructiva. Modifique la frecuencia para que cambie el patrón de líneas nodales. Es interesante que, a partir de la geometría del montaje (relación aproximada entre la separación de las dos puntas del vibrador y la longitud de onda) los alumnos simulen el experimento utilizando un dibujo realizado con un compás.

11.- OTRAS EXPERIENCIAS ASOCIADAS A LAS PROPIEDADES DE LAS ONDAS INDIVIDUALES: REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Las experiencias más vistosas en relación con las propiedades de las ondas individuales, como la reflexión, refracción, dispersión, polarización.... son las que se realizan con luz. Por ello, encontrará mucho más interesantes los experimentos que se encuentran en la segunda parte del libro, correspondiente al estudio de la luz y la óptica. Las experiencias simples que se indican a continuación pueden resultar interesantes si se desea comprobar que estas propiedades no son exclusivas de la luz.

11.1.- Experiencia. Reflexión de ondas en muelles y cuerdas

La reflexión de las ondas (o los pulsos) que viajan a lo largo de un muelle se ha discutido en varias experiencias (por ejemplo 1.5, de la primera parte). Un aspecto interesante de la reflexión, la fase de la onda que se refleja, puede observarse tal como se indica a continuación.

Cuando una onda se refleja en un obstáculo puede hacerlo en fase o en oposición de fase (con el signo invertido) respecto la onda incidente. Si se trata de ondas en un muelle, hay inversión de fase cuando la onda se refleja en un obstáculo más denso; por ejemplo, esto sucede si el extremo del muelle está unido a un soporte. Esta inversión también puede comprobarse fácilmente cuando se envía un pulso a través de una cuerda algo larga sujeta por un extremo. Si la cuerda o el muelle se dejan colgar con el extremo libre y se envía un pulso, el reflejo regresa sin cambio de fase.

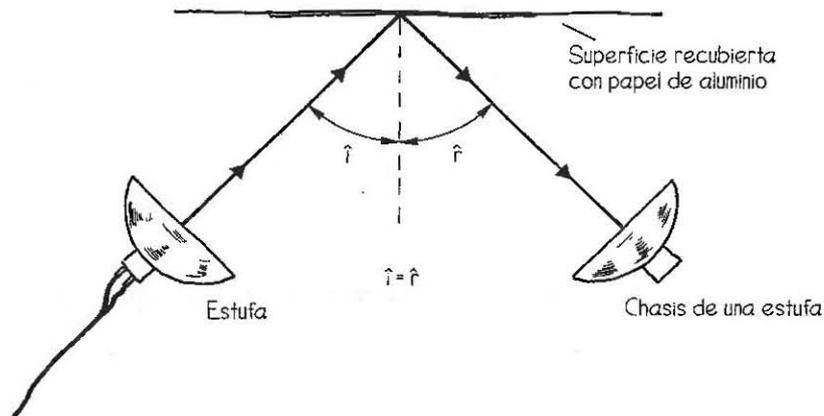
11.2.- Demostración. Reflexión de la radiación infrarroja utilizando estufas de reflectores parabólicos

Esta experiencia tiene su interés si puede conseguir un par de estufas iguales con reflectores parabólicos y la resistencia en el foco. Pueden encontrarse en grandes ferreterías y almacenes de electrodomésticos algo pasados de moda. No son caras pero puede que no compense el gasto ya que no se pueden usar fácilmente para otros experimentos; sin embargo, esta demostración ilustra algunos aspectos interesantes de aplicaciones conocidas por todos. Léala y decida si le conviene buscar los materiales. Si compra las estufas escójalas con el reflector bien brillante; si es así, podrá realizar un experimento extra: comprobar como concentran la luz solar en el foco y llegan a quemar un papel, pero sólo se consigue si los

reflectores son brillantes; los de aluminio, que son la mayoría, no funcionan demasiado bien. Debe cuidar especialmente que no se abollen debido a golpes.

Una de las estufas se usará como emisor de radiación infrarroja. Debido a la temperatura de la resistencia, una pequeña parte de la energía se emite como luz (rojiza) y la mayor parte, como radiación de frecuencia más baja, que corresponde a la parte del infrarrojo más cercana al visible. En la otra estufa se debe desmontar la parte central que contiene la resistencia; se usará para concentrar la radiación de la primera en el foco.

Una demostración simple es la siguiente. La que funciona como estufa se coloca en una mesa, dirigida hacia la otra, a un par de metros, de modo que los ejes de las parábolas coincidan. Al poner en marcha la estufa la radiación se concentrará en el foco de la otra. Se nota claramente el calor si uno pone la mano en el foco. Si las estufas se acercan, lógicamente, el calor se nota mucho más. En esta situación, puede colocar láminas de plástico o un cristal entre las dos estufas para comprobar qué materiales absorben la radiación infrarroja. Es interesante hacer notar que el calor no se debe a aire caliente que viaje de una estufa a la otra, sino a radiación (infrarroja) que viaja a la velocidad de la luz y que puede ser absorbida por el aire o un material si la distancia recorrida es demasiado grande.



La parte de la demostración más interesante es la siguiente. Se trata de reflejar la radiación infrarroja y para hacerlo debe buscar un tablero que pueda mantenerse vertical, algo más grande que las estufas (puede hacerse con el tablero de una mesa girada, o una pared). Este tablero debe cubrirse con papel de aluminio, pegado con cinta adhesiva. Como muestra la figura, la estufa se orienta hacia la superficie, a uno o dos metros, de modo que el reflejo se dirija hacia la parábola receptora. De acuerdo con la ley de la reflexión, al poner la mano en el foco se notará

calor si el eje de la parábola receptora coincide con la dirección de la reflexión. El calor debido a la radiación infrarroja reflejada no se percibe si el tablero no está cubierto con papel de aluminio ya que, en este caso, la superficie absorbe la radiación.

A lo largo de la demostración puede explicar el papel del reflector parabólico en la emisión y captación de radiación, porqué se usan antenas parabólicas para captar señales muy débiles, cómo se usan los espejos cóncavos en los telescopios reflectores y como los metales reflejan la radiación infrarroja del mismo modo que la luz. Una aplicación son las tiendas de campaña tipo iglú metalizadas en la parte interior, capaces de reflejar el calor de los cuerpos de las personas de nuevo hacia el interior, o los materiales metalizados con que envuelven a una persona que ha sufrido un accidente, para que mantenga su temperatura.

11.3.– Experiencias caseras. Reflexión de los rayos infrarrojos de un mando a distancia

Los mandos a distancia de televisores y aparatos similares consisten en emisores de infrarrojos que envían una secuencia de pulsos codificando la instrucción que se pretende transmitir. El receptor recibe la secuencia, mediante un sensor de radiación infrarroja, y la decodifica. El aparato se presta a algunas experiencias caseras simples, como las que se describen a continuación. Debe destacarse que la frecuencia infrarroja de estos emisores es mucho más baja, más alejada de la zona correspondiente a la luz visible, que la radiación IR que emiten las estufas, de frecuencia más alta.

Podemos reflejar la radiación infrarroja del mando en nuestro propio cuerpo. Lo dirigimos hacia nosotros, colocados frente al televisor. También es posible utilizar una cartulina o una libreta en el ángulo apropiado para reflejar la radiación hacia el televisor.

Es posible comprobar la transparencia de ciertos materiales a la radiación infrarroja. Por ejemplo, la radiación atraviesa un vaso con agua e incluso un vaso con café. Esta última situación es interesante ya que la luz visible no lo atraviesa.

11.4.– Demostración. Reflexión del sonido. Un aparato para medir distancias

En las ferreterías y tiendas de pequeños electrodomésticos pueden encontrarse medidores ultrasónicos de distancias. Se trata de unos aparatos que envían pulsos de ultrasonidos hacia una pared y captan el sonido reflejado midiendo el tiempo invertido en el trayecto, como un radar

en miniatura. Naturalmente, solo pueden emplearse para medir distancias si hay superficies que pueden reflejar los ultrasonidos, paredes o similares; si hay cortinas o absorbentes no funcionan correctamente. El aparato ya está calibrado para indicar la distancia a partir de la medida que, internamente, realiza del tiempo entre la emisión y la recepción.

SEGUNDA PARTE: NATURALEZA DE LA LUZ. ÓPTICA

INTRODUCCIÓN

Probablemente, ninguna otra parte de la Física ha sufrido una marginación tan grande ni unas amputaciones tan severas en los programas de enseñanza secundaria, e incluso de Física general, como las que ha recibido la Óptica. Esta situación es lamentable, no sólo por la tremenda incidencia de los fenómenos ópticos en la vida real, sino porque transmite la idea de que la Óptica es una parte complicada de la Física de la cual es conveniente huir.

La realidad es exactamente la contraria. En el estudio de la Óptica es fácil encontrar ejemplos prácticos para cada situación que se trata de comprender y, dentro del laboratorio, pocas experiencias de Física resultan tan agradecidas por su vistosidad y por la sencillez de su montaje. Posiblemente es en los temas asociados al estudio de la luz y la Óptica donde la belleza de la Física, en su vertiente experimental, asoma con más esplendor y menor esfuerzo. El profesor y los alumnos dispuestos al estudio experimental de la luz y de la Óptica podrán utilizar medios extremadamente simples para realizar experiencias excepcionales. Al mismo tiempo, podrán entrar en contacto con aplicaciones realmente modernas de la Física: láser, holografía, comunicación por fibras ópticas, etc. El carácter casi inmediato de las magnitudes que se estudian: color, distancias, ángulos..., permite obtener rápidamente resultados fiables, de un modo muy distinto a lo que sucede en muchas experiencias de Cinemática o Mecánica, en las que no cabe esperar resultados aceptables a no ser que se tenga un cierto cuidado en las medidas y en los montajes.

Por otra parte, el estudio de la luz está estrechamente ligado al de la constitución de la materia y las aplicaciones inmediatas de la Óptica tienen un carácter fuertemente interdisciplinar (Astronomía, Cristalografía, Microscopía, Topografía, Fotografía,...). Debido a ello, su estudio debería tener un interés especial en aquellos cursos en los que se quiera poner de manifiesto el carácter interdisciplinar de la Física y, especialmente, en aquellos cursos dirigidos a alumnos que no desean proseguir estudios de tipo científico. O simplemente para cursos a un nivel muy elemental.

El contenido matemático de la Óptica es bastante limitado y es posible simplificar aún más este contenido perdiendo algo de calidad, pero sin arrastrar el listón. De este modo, se puede estudiar la refracción cualitativamente a base de la regla «se separa de la normal cuando..... y se acerca a la normal cuando.....», o las interferencias en una red de difracción, sin usar la ley de Bragg, simplemente de un modo intuitivo a partir de las diferencias de caminos de los distintos rayos.

Notará que el número de experiencias que se presentan es relativamente grande. Ello se debe, en parte, a que en muchos casos se ofrece la experiencia de tipo «convencional» y, además, experiencias similares con materiales mucho más simples. Otras experiencias se tratan como bloques, como sucede con el análisis de la luz, que en último término conduce a la espectroscopia, que resulta fundamental en la mayor parte de cursos de Química, o la luz polarizada, cuyo estudio conduce a los fenómenos de birrefringencia, especialmente vistosos y de gran interés para los estudiantes de Geología.

LOS MATERIALES BÁSICOS

Los materiales necesarios para la realización de las experiencias que se describen más adelante son sumamente variados y, salvo algunos, fáciles de conseguir. En cualquier caso, resultan más específicos que los descritos en la primera parte del libro.

En primer lugar, es bastante probable que disponga equipos de Óptica de algún fabricante nacional. Si no fuera así, no se preocupe demasiado. A pesar de que las experiencias que se proponen en estos equipos suelen ser interesantes, hay alternativas muy estimulantes. Suponiendo que está de suerte y dispone de los equipos, podrá utilizar las fuentes de iluminación, los soportes, las lentes, los prismas y, muy especialmente, las secciones de lentes y de espejos. A diferencia de otros componentes estas secciones son difícilmente sustituibles por materiales de tipo casero; téngalo en cuenta y cuídelas especialmente. La reposición de las piezas de estos equipos es un tema importante, especialmente si existe la posibilidad de que desaparezca el fabricante o los equipos son algo antiguos. Tenga presente que algunos de los componentes de los equipos pueden funcionar de modo independiente (prismas, lentes, red de difracción, polarizadores, etc) y se usan en muchos experimentos. En suma, si dispone de equipos, tendrá el material para realizar las experiencias de Óptica más convencionales.

Si no tiene equipos o está interesado en experiencias y demostraciones más estimulantes, deberá buscar otros materiales. La búsqueda puede resultar fastidiosa, especialmente si está algo aislado, en una pequeña ciudad o en un pueblo. Aunque viva en una gran ciudad no lo tendrá mucho más fácil, puesto que la mayor parte de estos materiales se encuentran hoy y mañana no. Por todo ello, mi consejo es que sea cosmopolita desde su propio centro. Escriba o llame a los fabricantes, pídale sus catálogos y precios, y solicite los materiales que le interesen vía Correos o mensajeros. Manténgase al corriente desde su propio Centro. Si los fabricantes nacionales no tienen estos materiales acuda, sin dudar, a los extranjeros. Hojear sus catálogos puede ser un motivo de profunda

meditación sobre el estado de la enseñanza de las ciencias en nuestro país. Tenga en cuenta que, en la búsqueda de materiales, puede resultar de gran ayuda consultar a los ópticos locales. Se trata de técnicos universitarios altamente cualificados que, generalmente, tienen unas ganas enormes de colaborar para dignificar la enseñanza de la Óptica. Las consultas con los colegas suelen ser estimulantes y a menudo alguien conoce a otro que ha encontrado algo interesante en una tienda «todo a 100» al lado de casa. Si tiene la suerte de trabajar al lado de una empresa que fabrica lentes, le ha tocado la lotería; basta con que se ponga en contacto con el director técnico y, posiblemente, nunca más le faltarán lentes.

SUMINISTRADORES

Los suministradores que aparecen a continuación son únicamente algunos de los posibles. Se dan simplemente como orientación para que los interesados empiecen a buscar, sin ninguna recomendación especial. En cualquier caso, esta información debe considerarse con una prevención especial puesto que es especialmente volátil. Cualquier sugerencia, en este sentido, será bien recibida.

- Coronel Tapioca. Paseo de la Habana 52 Madrid Tf (91) 562 64 68; Boulevard Rosa, Paseo de Gracia 55, Barcelona Tf (93) 487 24 61.
- Edmund Scientific Company, 101 East Gloucester Pike. Barrington, NJ 08007-1380 USA.
- Grau Luminotecnia. Gran Vía 401, Tf (93) 325 76 11, 08015 Barcelona; Canillas 64, (91) 563 32 60, 28002 Madrid.
- Griffin, Bishop Meadow Road, Loughborough, Leicestershire LE11 0RG, Gran Bretaña.
- Industries Pedret. Cuartel Levante 7, 08150 Parets del Vallès (Barcelona) Tf (93) 562 0808.
- Lumineon Moore. C/Carretes 68-76, 08001. Barcelona. Tf (93) 329 03 01.
- Pasco Scientific. 10101 Foothills Boulevard. P.O.Box 619011, Roseville, California 95678-9011 USA. El representante en España es DISTESA. C/Juan Ignacio Luca de Tena 15, 28027 Madrid. Tf (91) 393 88 00.
- Pierron. 4, rue Gutenberg- B.P. 609, 57206 Sarreguemines. Francia. El representante en España es TAUVI. Borí i Fontestà 18, 08021 Barcelona. Tf. (93) 201 30 09.
- Museu d'Holografia de Barcelona: Jaume I, 1- 08002 Barcelona, Tf (93) 310 21 72.
- Holomagic: en Barcelona en el Centre Comercial Les Glories y en Maremagnum; tienen tiendas en muchas otras ciudades.

MATERIALES

Espejos planos, cristales, etc. Lo más simple es conseguirlos, cortados a la medida que se crea más conveniente, a través de un cristalero. Si no fuera posible, en tiendas del tipo Servicio Estación o «todo a 100»

Filtros de colores: De buena calidad, en especialistas de luminotecnia (por ejemplo, Grau Luminotecnia suministra filtros Rosco y dispone de un catálogo en forma de librito con una colección de filtros y su espectro). En algunos casos pueden sustituirse por papel de celofán de colores.

Filtros polarizadores: Son muy interesantes las láminas grandes. Pueden comprarse a especialistas en luminotecnia (p.e. Luminotecnia Grau) o Edmund.

Cajas de plástico transparente: En tiendas especializadas en plásticos o tiendas tipo «Servicio Estación»

Prismas, lentes: Pueden comprarse a los fabricantes de equipos didácticos o a los fabricantes de componentes ópticos (Industrias Pedret, Edmund, Griffin). En muchos casos es posible utilizar lupas de bajo coste en los experimentos sugeridos para lentes convergentes. Algunas lupas que se encuentran en las tiendas del tipo «todo a 100» suelen ser muy malas, otras son aceptables; compruebe como funcionan antes de comprarlas.

Redes de difracción: Para ver los espectros deben tener por lo menos 500 líneas/mm. Pueden comprarse en Edmund en forma de láminas de plástico que se cortan a la medida deseada. En general son difíciles de conseguir si no se acude a los suministradores de material didáctico. Si busca redes para ver muchos órdenes de difracción, basta con 100-200 líneas/mm. Además de los suministradores generales (Edmund, Griffin, Pierron, etc.) en las experiencias se indican algunas alternativas.

Punteros láser: Se pueden encontrar muy fácilmente en tiendas de electrónica y, últimamente, en tiendas de electrónica de consumo y electrodomésticos, a precios entre 5000 y 10000 ptas. Los punteros láser pueden sustituir a los tubos de He-Ne prácticamente en todos los experimentos de laboratorio en los que se pretende estudiar la difracción y las interferencias. Así como un tubo láser de He-Ne tiene una longitud de onda perfectamente definida de 632.8 nm, los punteros, cuya emisión se debe a un diodo, tienen una longitud de onda entre 630 a 680 nm. A efectos de experimentos cuantitativos puede tomarse el valor medio de 655 nm para la luz procedente de los punteros. Los fabricantes son algo crípticos respecto a su potencia, indican el valor máximo sin que se sepa exactamente en qué condiciones puede obtenerse este valor. En cualquier caso sus potencias, aparentemente, son comparables a los de un láser de gas veinte veces más caro. Un pequeño problema asociado a estos punteros es el consumo de las pilas (no duran más de un par de

horas), por ello puede usar pilas recargables o emplear un adaptador de corriente. En algunos casos las pilas son modelos algo raros y puede ser complicado encontrar equivalentes recargables. En este caso le conviene utilizar un adaptador como el que se emplea para conectar las calculadoras a la corriente de la red y, para ello, deberá hacer algunas modificaciones simples en el puntero.

Imaginemos un puntero que utiliza dos pilas de 1.5V en serie; necesitará un adaptador de corriente continua de 3V del tipo que usan las calculadoras. Basta con desmontar el puntero y prolongar los cables que conectan el circuito con las pilas para soldarlos a un conector RCA macho (esté alerta con la polaridad de los cables). Elimine el conector de salida del adaptador y suéldelo a un conector RCA hembra. En este caso, compruebe con un voltímetro la polaridad, para que corresponda a la que espera en el conector del puntero. Si el puntero, como es de esperar, lleva un pulsador incorporado para encender o apagar el haz, deberá cortocircuitarlo para que funcione cuando se conecte (incluso puede incorporar un interruptor externo en el cable que va del alimentador al puntero). Para ello, puede usar un tester y medir la resistencia entre las patas del pulsador. Si al apretarlo la resistencia se hace cero, debe cortocircuitar estas patas soldando un trocito de cable. Es conveniente mantener la carcasa de los punteros puesto que su forma cilíndrica permite sujetarlos fácilmente y orientarlos con una pinza.

Si cree que todas estas manipulaciones son fastidiosas, busque un puntero con unas pilas de tipo standard que pueda sustituir por pilas recargables y piense en un sistema fácil (puede ser que le sirva un trozo de cinta adhesiva) para mantener el pulsador apretado.

Si el bajo coste le anima a comprar más de un puntero para su uso en grupos de alumnos, recuerde que un láser requiere ciertas precauciones de manejo y que la facilidad con que se mueve el puntero y su potencia relativamente alta, (comparable a la de los tubos de He-Ne de hace algunos años) pueden ocasionar más de un disgusto. A no ser que sus alumnos sean especialmente responsables, se arriesga a un tirón de orejas si tiene demasiados punteros láser sueltos por el laboratorio.

Bombillas de colores y reguladores de potencia: Para el tema de las mezclas de colores funcionan bien las bombillas OSRAM Concentra de 80W de color rojo, azul y verde. Para regular su potencia es conveniente un pequeño regulador a triacs, que se puede conseguir en las propias tiendas de luminotecnia o de electrónica.

Proyector de diapositivas: Se usa para muchísimas experiencias. Basta con que ofrezca el laboratorio para guardar alguno de los proyectores del Centro. Lo tendrá a mano para usarlo cuando sea necesario.

Proyector de transparencias: Se usa en experiencias sobre luz polarizada. Haga como con el proyector de diapositivas: ofrezca el laboratorio para guardarlo y siempre lo tendrá a mano.

Caja de humo: Se usa en algunas experiencias en las que se pretende ver el haz del láser. Puede usar alguna caja algo grande de plástico transparente o hacerla con trozos de metacrilato cortado a medida, pegados con una pistola de silicona.

Lámpara de vapor de sodio: Aunque pueda parecer que el empleo de un puntero láser hace superfluo el uso de esta lámpara, no es así. Se emplea como fuente monocromática en experimentos de interferencias, como fuente para medir la longitud de onda con dos rendijas y para el estudio de los materiales birrefringentes. Debe conseguir la lámpara, de baja presión y potencia moderada (18W bastan) en una tienda especializada en luminotecnia. Funciona con reactancia y en la propia tienda le indicarán el montaje del circuito. Esté alerta con el portalámparas, que puede ser algo difícil de conseguir.

Película fotográfica de alto contraste Kodalith Orto: Se usa para hacer diapositivas en blanco y negro (la película es de alto contraste y no aparecen grises) para distintas experiencias. Búsquela en tiendas especializadas en fotografía, no en simples tiendas de revelado. Siempre se va a usar el negativo, montado como una diapositiva. Con un rotulador negro (tipo Edding 2000) puede tapar los textos o marcas que no desea proyectar. El revelado es muy simple e incluso le puede interesar hacerlo si desea aprender este proceso. En las mismas tiendas le venderán los líquidos y le informarán. La exposición debe buscarla a base del popular método de prueba y error. Para empezar puede que le sirva la siguiente información: Con iluminación de dos bombillas de 60W, iluminando originales de 15x10 cm con diafragma a 11, el tiempo de exposición resulta de 4 a 6 segundos.

Tubos de descarga y fuentes de alta tensión: Pueden conseguirse, de pequeño tamaño, como componentes de equipos didácticos. En este caso debe emplearse un carrete de Ruhmkorff para iluminarlos. Es posible emplear tubos de neón y vapor de mercurio comerciales. Con estos tubos puede emplear el carrete o transformadores de alta tensión que los mismos fabricantes le suministrarán. Las características y precauciones necesarias se indican en las experiencias correspondientes.

Lámparas UV: Para observaciones de fluorescencia y fosforescencia puede usarse una lámpara de 365 nm de longitud de onda (luz negra) de 8 w o 15 w que se puede conseguir en cualquier tienda especializada en bombillas. En la propia tienda le indicarán el montaje. Para experimentar con el efecto fotoeléctrico necesita lámparas UV de longitud de onda corta (germicidas, de 254 nm). En este caso todas las precauciones para proteger los ojos son pocas, por ello, con una potencia pequeña, 8 w, tiene de sobra.

PRECAUCIONES

Afortunadamente, las experiencias de óptica son muy seguras. Las pocas excepciones y las precauciones necesarias se describen brevemente a continuación y, más extensamente, en aquellas experiencias en que son necesarias.

a) Uso de fuentes de alta tensión para los tubos de descarga. En las experiencias correspondientes se hacen las reflexiones oportunas, que pueden resumirse en una: Consulte con profesores más experimentados o expertos de los Centros de Recursos o de Profesorado. No haga estos experimentos con los alumnos si no se siente seguro sobre el manejo de estas fuentes. Aún sin usar tubos de descarga hay alternativas interesantes para estudiar los espectros.

b) Luz ultravioleta. Protéjase y proteja a los alumnos, especialmente los ojos, de la lámpara de onda corta (germicida) haciendo las pantallas, cajas, etc.. que sean necesarias. Estas precauciones pueden relajarse, sin confiarse, con las lámparas de luz negra (365 nm).

c) Láser. Debe evitar que el haz sin expandir incida en el ojo, directamente o reflejado. Sea precavido con las posibles reflexiones si está trabajando con espejos o prismas en la trayectoria del haz. Tenga cuidado, especialmente con los punteros, ya que los alumnos pueden tratar de manipularlos como en la guerra de las galaxias; su potencia es más alta de lo que la seguridad requiere.

d) Precauciones de tipo eléctrico. En general, si usa las fuentes de iluminación de los equipos, que funcionan a baja tensión, no debería tener ningún problema.

e) Precauciones de tipo químico. Sólo se usan productos químicos en contadas experiencias. No hay precauciones destacables.

EL HILO CONDUCTOR DE LAS EXPERIENCIAS Y DEMOSTRACIONES

Las experiencias se han agrupado de acuerdo con los conceptos que se pretenden estudiar, siguiendo un orden de complejidad. En primer lugar, se estudia la propagación de la luz en línea recta cuando atraviesa un medio homogéneo. La aplicación básica, en este contexto, es la caja negra y los posibles cálculos están asociados a la semejanza de triángulos. La construcción y uso de las cajas negras, tal como se describe en las experiencias concretas, son experiencias especialmente apropiada para el trabajo individual de los alumnos, con medios sumamente simples, prácticamente de tipo casero.

A continuación, antes de entrar a estudiar las mezclas de colores, se sugieren demostraciones simples relacionadas con el análisis de la luz mediante prismas o redes de difracción. Ello permite asociar los colores a las frecuencias de las ondas que transportan la luz.

Dentro del estudio de la propagación de la luz en un medio homogéneo, se estudia la absorción que sufre la luz. Las experiencias que se proponen consisten en el estudio de los filtros, que absorben selectivamente algunas frecuencias (colores), el significado de la luz blanca y los colores complementarios. Además, se incluyen experiencias interesantes sobre adición y sustracción de colores. Esta parte es plenamente interdisciplinaria y de hecho puede interesar a muchos profesores de dibujo, puesto que aborda de una forma clara y directa el tema complejo de las mezclas de colores. Se han propuesto varias experiencias sumamente simples, apropiadas para los que no desean grandes preparaciones. Otras experiencias utilizan filtros o bombillas de colores que se tendrán que buscar, ya que no forman parte del equipamiento normal.

En este momento, o más adelante, se puede introducir el tema de la luz polarizada, como si se tratara de un caso particular de absorción selectiva: Los filtros de colores absorben unas frecuencias, los filtros polarizadores absorben la luz que vibra en unas direcciones. El tema es sumamente interesante y vistoso. Se ha planteado como una sucesión de demostraciones empleando láminas polarizadoras grandes, que utiliza el profesor para desarrollar su discurso, en el cual se intercalan breves experiencias de los alumnos. El tema suele interesar al profesorado de Geología, puesto que el estudio de la luz polarizada es fundamental en el microscopio petrográfico y puede resultar bastante confuso si solamente se estudia desde el punto de vista teórico. La dificultad en estas experiencias es conseguir polarizadores grandes. Pídalas a los suministradores que se han indicado en el apartado anterior. Una vez las tenga, son casi para toda la vida y las experiencias son realmente espectaculares.

La interacción de la luz con los electrones de los átomos es un tema básico tanto en Física como en Química. Cualquier profesor que utilice la configuración electrónica en algún curso debería estar interesado en alguna experiencia de espectroscopia como las que se indican en esta sección. Para hacer estas experiencias necesita redes de difracción. En los equipos hay algunas pero resultan claramente insuficientes; pídalas a los suministradores que se han indicado, son baratas y si es posible, tenga una para cada alumno. Si está interesado en el tema busque tubos de descarga y fuentes de alta tensión pero, en cualquier caso, empiece de una forma modesta. Utilice sales a la llama (los cloruros de litio y calcio son esenciales), tubos fluorescentes y, si quiere más emoción, busque más adelante los tubos de descarga. Tenga en cuenta que los equipos de espectroscopia, aunque se trate de espectroscopios de mano, son totalmente sustituibles, a un coste 100 veces menor; sin embargo, si tiene

estos equipos, utilícelos, un buen espectroscopio no es desdeñable. En este apartado se incluyen, además, demostraciones sobre fluorescencia y fosforescencia, para las cuales se necesita únicamente una lámpara ultravioleta que se puede conseguir casi en cualquier tienda de bombillas. Estas demostraciones no son básicas pero son tan vistosas, fáciles y asociadas a fenómenos cotidianos que sería una lástima no hacerlas. Por último se incluyen algunas experiencias sobre efecto fotoeléctrico, quimioluminiscencia, etc... que al margen de su vinculación con las interacciones entre la luz y los electrones de los átomos, pueden resultar interesantes.

En una sección independiente se incluyen las experiencias asociadas al sentido de la visión, excepto las relacionadas con el color, que aparecen en secciones ya mencionadas, y las asociadas a defectos de la visión, que se han incluido en el apartado correspondiente a las lentes. Esencialmente las experiencias se refieren a las imágenes estereoscópicas y la visión 3D, y a la persistencia de la visión; no se han incluido otros aspectos de la percepción. El tema de las imágenes estereoscópicas ha ganado interés estos últimos años con fines puramente recreativos, sin embargo, tiene su importancia en distintos campos de la Ciencia y la Tecnología, de aquí que se le dé un tratamiento especial. No es ajeno a este trato el hecho de que es fácilmente abordable para experiencias, incluso de tipo casero.

Hasta aquí, se han descrito experiencias para estudiar las propiedades de la luz desde un punto de vista muy general. A partir de este punto, las experiencias se inscriben en lo que sería la Óptica tradicional y los fenómenos de interferencias.

Por una parte se estudia la reflexión en superficies planas, esencialmente, espejos y vidrios. Esta parte es fácil, dentro del conjunto de la Óptica, pero algunas experiencias y juegos, ver por ejemplo «la vela que no quema», son muy simples e interesantes. El repertorio es muy variado y hay donde escoger. A continuación, la reflexión en superficies curvas se aborda con unas experiencias más bien convencionales del tipo de las de los equipos didácticos.

En el estudio de la refracción en superficies planas vuelven a aparecer numerosas experiencias simples, con materiales sencillos que pueden conseguirse fácilmente. Nuevamente, el profesor deberá escoger aquellas que le parezcan más apropiadas. En este apartado, la dificultad con los alumnos de niveles más elementales será de tipo matemático, puesto que probablemente no podrá usar la ley de Snell directamente. Un rodeo a la utilización de funciones trigonométricas, particularmente apto para alumnos de los primeros cursos de ESO, se describe en la experiencia 9.4.

El punto de partida para el estudio de las lentes es la refracción en los distintos puntos de una superficie curva, con el resultado de que las superficies convexas concentran la luz hacia el interior y las cóncavas la

envían hacia el exterior. A partir de aquí puede profundizarse bastante en el comportamiento de las lentes y en el estudio de sus imágenes, prácticamente sin ningún tipo de cálculo. Naturalmente, con alumnos más capacitados para el cálculo y la geometría se puede abordar el estudio cuantitativo de las lentes. Le sorprenderá la facilidad con que se llevan a cabo la mayor parte de las experiencias y demostraciones.

Antes de entrar en el importante tema de las interferencias, se estudia la dispersión, de un modo totalmente independiente. Aquí se incluyen experiencias asociadas a fenómenos naturales (el color azul del cielo, el color de las puestas de sol, etc..).

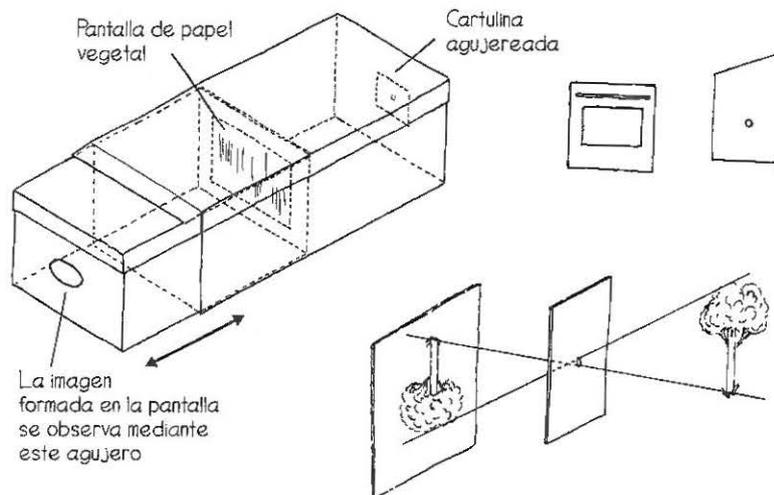
La última sección incluye numerosas experiencias y demostraciones sobre difracción e interferencias. Su orden sigue la complejidad de los conceptos, sin embargo, al principio se encontrarán aquellas experiencias o demostraciones que requieran un material más simple. En muchas de ellas se propone el uso de un láser; ello no debe desanimarle puesto que, como ya se ha indicado, actualmente es mucho más barato y fácil conseguir un puntero láser que una lámpara de vapor de sodio de baja presión. Puesto que el repertorio de materiales simples para observar la difracción y las interferencias es limitado, se indica un método especialmente interesante para hacer rendijas aptas para observar la difracción, utilizando diapositivas de alto contraste. Estas experiencias resultan esenciales para observar la característica básica de las ondas: el principio de superposición y las interferencias. No dude en hacerlas a poco que tenga la oportunidad. Naturalmente, con los alumnos de niveles superiores, únicamente es posible abordar con posibilidades de éxito algunos temas de Física Moderna, como la dualidad onda-partícula, si la difracción y las interferencias, como propiedades esenciales de las ondas, han quedado suficientemente claras. Si tiene ocasión utilice la difracción en tejidos o redes de difracción cruzadas para simular la difracción de Rayos X en un cristal y explicar la importancia de esta técnica.

EXPERIENCIAS Y DEMOSTRACIONES

1.- PROPAGACIÓN RECTILÍNEA DE LA LUZ EN UN MEDIO UNIFORME

1.1.- Experiencia. Construcción y utilización de una caja negra

La propagación rectilínea de la luz permite la formación de la imagen invertida de un objeto. Esto se consigue proyectando la luz que el objeto refleja, a través de un pequeño agujero, hacia una pantalla. Los materiales necesarios son sumamente simples y, por ello, es fácil realizar este experimento de un modo casero. La experiencia permite aplicar, además, las reglas básicas de la semejanza de triángulos.



Para construir la caja negra basta con dos cajas de zapatos, una algo menor que la otra. En un lado de la mayor, como se muestra en la figura, se recorta un pequeño rectángulo y por la cara exterior se pega un marco de diapositivas con una cartulina negra (o un trozo de papel de aluminio, que es muy opaco, fácil de agujerear y de sustituir) que tenga un pequeño orificio circular. El tamaño de este pequeño agujero condiciona la nitidez y la luminosidad de la imagen. Por ello, es conveniente disponer de varios trozos de cartulina intercambiables, con agujeros de distinto tamaño, desde 1 a 3 mm, aproximadamente. En la segunda caja se recorta un rectángulo, tal como muestra la figura y se pega, bien liso, un trozo de papel vegetal que funcionará como pantalla de proyección. En la cara opuesta se recorta un pequeño agujero, de un par de centímetros de

diámetro, para poder ver la imagen formada en la pantalla dentro de la caja. Las dos cajas se acoplan de modo que el movimiento de la menor, resbalando dentro de la caja mayor, permita ajustar el tamaño de la imagen.

Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

– La uniformidad del papel vegetal permite que la imagen se vea con nitidez. Recuérdelo si emplea otro tipo de papel como pantalla y no le funciona bien.

– Deben observarse objetos fuertemente iluminados: un paisaje o un edificio bien iluminado por el sol o algo por el estilo. No espere maravillas en interiores.

– Si el diámetro del agujero es demasiado grande la imagen no será nítida. Si los alumnos dibujan el diagrama con la dirección de los rayos luminosos podrán convencerse por sí mismos. Si el agujero es demasiado pequeño entrará poca luz y la imagen será tenue. Haga que los alumnos comprueben el efecto del diámetro del agujero cambiando la cartulina.

– Si el agujero no es circular la imagen será defectuosa. Un orificio circular se consigue más fácilmente si la cartulina o el papel de aluminio que se quieren taladrar se colocan sobre algo blando, por ejemplo, un periódico. Para hacer el agujero hay muchas alternativas, fácilmente imaginables, desde una aguja a un taladro.

Es posible obtener fotografías usando la caja negra. Si usted es aficionado a la fotografía no tendrá ninguna dificultad, bastará con usar papel fotográfico como pantalla de proyección, exponer el tiempo necesario (haciendo las pruebas oportunas) y revelar el papel. Si no sabe cómo hacerlo es bastante probable que entre el profesorado de su Centro haya aficionados que puedan ayudarle. La falta de nitidez de las imágenes y el largo tiempo de exposición permiten entender rápidamente porqué las cámaras fotográficas tienen lentes, como se verá en la experiencia 10.11 de esta segunda parte del libro.

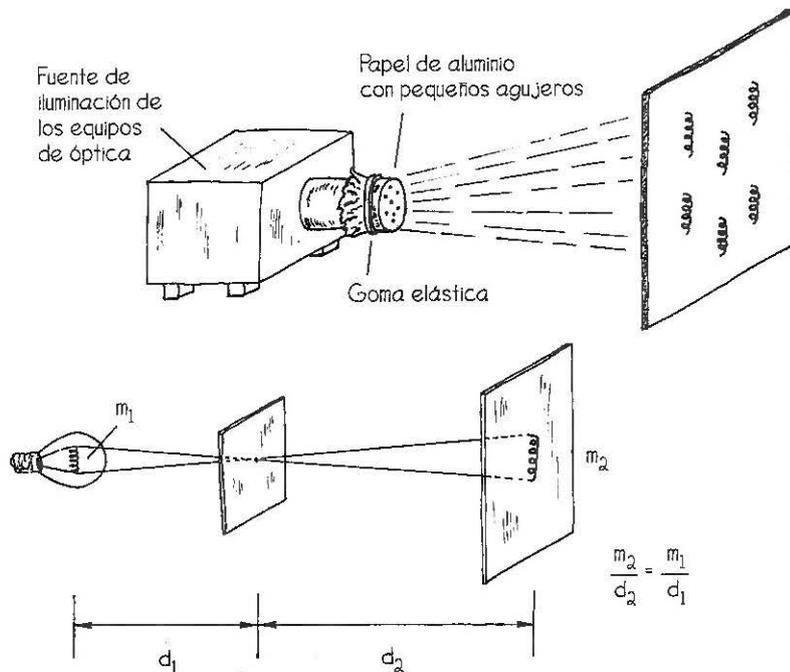
1.2.– Demostración. «Caja negra» con una bombilla. Imagen del filamento

Otro montaje muy simple para observar la formación de imágenes con un simple agujero, consiste en proyectar la imagen del filamento de una bombilla a través de un papel de aluminio con pequeños orificios.

Para ello se puede emplear una lámpara de bajo voltaje como las de los equipos didácticos de Óptica, tapada con un trozo de papel de aluminio, sujeto con una goma elástica o por simple presión. Mediante un hilo metálico (se puede emplear, por ejemplo, hilo de cobre de 0.2 mm de diámetro) o una aguja muy fina se hacen unos cuantos agujeros en el papel de aluminio. Al encender la bombilla de la lámpara las imágenes

de los filamentos se proyectan muy claramente en una pantalla (el fondo de una caja de zapatos) a unos 15 cm de distancia (a mayor distancia las imágenes son mucho menos nítidas).

Es una sorpresa agradable la nitidez con que se observan las espirales del filamento. Si quiere añadir algún cálculo a la experiencia puede medir la distancia del papel de aluminio a la pantalla y el tamaño de la imagen; se apaga la bombilla y una vez fría, se hace una estimación de la longitud del filamento y de su distancia a los pequeños agujeros del papel de aluminio. Estas medidas obedecen a la relación entre triángulos semejantes.

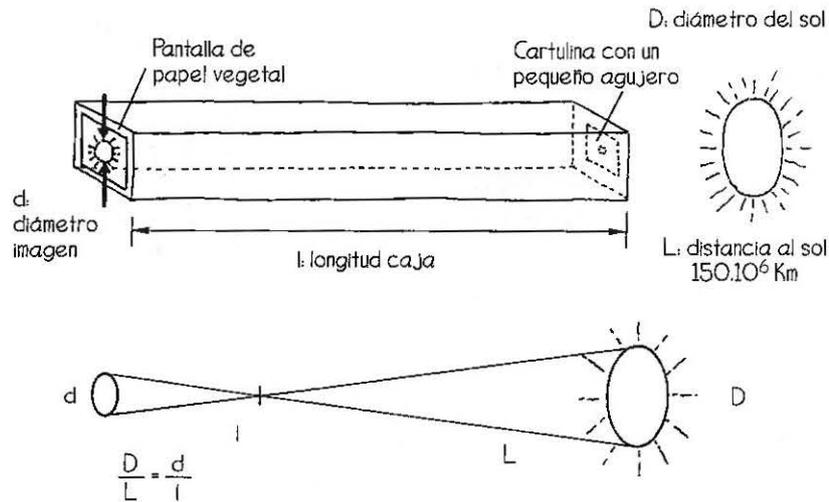


El experimento puede realizarse fácilmente con lámparas distintas a las de los equipos didácticos aunque es muy aconsejable usar bombillas que funcionen a baja tensión para evitar desgracias en caso de posibles contactos eléctricos con el papel de aluminio. Sea precavido.

1.3.- Experiencia. Tamaño del Sol

La utilización de una caja negra permite medir el tamaño del Sol de un modo aproximado a partir de su distancia a la Tierra, unos 150 millones de km. El valor correcto del diámetro del Sol es de unos 1.4 millones de km.

Basta con disponer de una caja cuanto más larga mejor (o un tubo de cartón algo ancho con tapas en los extremos, que es más fácil de sujetar con un soporte y una pinza). En un marco de diapositivas se introduce una cartulina negra o se pega un papel de aluminio, con un agujero circular de menos de 1 mm de diámetro. Esta diapositiva se pega a un agujero en un extremo. En el otro extremo se pega un trozo de papel vegetal como pantalla. Se orienta la caja hacia el sol y se proyecta su imagen. Con un lápiz se dibuja su contorno, repitiendo varias veces la proyección y el dibujo en distintos puntos del papel.



En el laboratorio, se miden con un pie de rey los diámetros de los dibujos de los contornos y se calcula su promedio. Se mide con una regla la longitud de la caja y a continuación se calcula el diámetro del Sol aplicando la fórmula simple de los triángulos semejantes:

diámetro Sol / distancia al Sol = diámetro imagen / longitud de la caja

2.- LUZ Y COLOR. ANÁLISIS DE LA LUZ

2.1.- Demostraciones. La luz blanca está formada por un conjunto continuo de colores

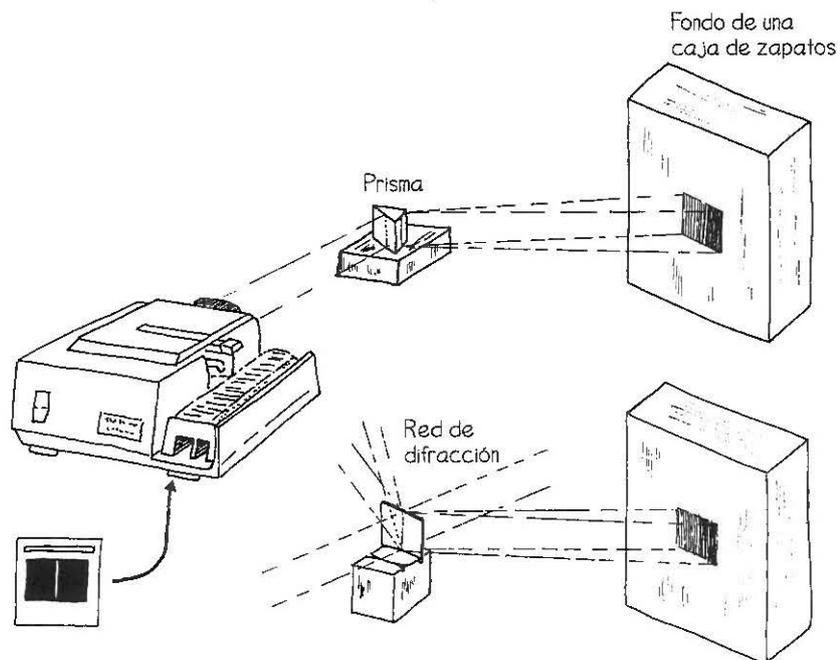
a) con prismas

En el laboratorio, a oscuras, se proyecta una diapositiva con una ranura vertical, hecha con cartulina, tal como muestra la figura, utilizando un proyector de diapositivas normal. Se intercepta el haz con un prisma que se gira lentamente y, con la orientación apropiada, se proyecta el espectro en una pantalla, (pueden usarse una libreta vertical semiabierta, el fondo de una caja de zapatos o algo parecido) perpendicular al haz de luz. Debe tenerse en cuenta que:

– algunos prismas de los equipos son muy poco dispersivos y el espectro que se obtiene es bastante lamentable. Probar los distintos prismas disponibles. Los ricos pueden comprar prismas de vidrio flint.

– Si se proyecta el espectro en una pantalla demasiado alejada los colores son muy tenues. Es preferible que la pantalla esté relativamente cerca del prisma.

– El enfoque del haz del proyector que atraviesa el prisma puede variar notablemente la calidad del espectro.



b) Con redes de difracción

Una alternativa, incluso preferible al uso de un prisma, es hacer incidir el haz procedente de la diapositiva anterior perpendicularmente a una red de difracción. La figura muestra el montaje necesario. Normalmente el espectro es más tenue puesto que en el prisma toda la luz se descompone, mientras que en la red una parte atraviesa sin descomponerse y los espectros de distintos órdenes se llevan su tajada. La ventaja del uso de la red es que no hay problemas de orientación, la red se coloca perpendicularmente al haz y el espectro aparece a los lados. Si el espectro sale arriba y abajo se gira la red 90 grados. Sin embargo, el uso del prisma suele ser más familiar a los alumnos ya que aparece en la mayoría de libros.

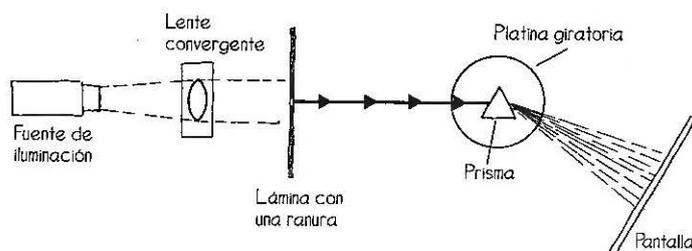
c) Otras alternativas

Si no se tienen prismas ni redes puede hacerse rebotar el haz de luz en la superficie de un compact disc, que funciona como una red de difracción. Puede cortar el compact a trozos con una sierra, como si se tratara de un queso en porciones. Con los trozos, observando por reflexión un fluorescente, los alumnos pueden investigar la orientación de la «trama» de líneas del compact, invisible a simple vista.

Otra posibilidad consiste en observar los colores de interferencia en una película de jabón. Basta con sumergir las patas de unas tijeras o un aro hecho con alambre en agua jabonosa. Al sostener la película vertical va adelgazando y rápidamente aparecen franjas de colores.

2.2.- Experiencias. Descomposición de la luz blanca

De un modo parecido a la demostración anterior, puede hacer que los alumnos, por grupos, utilicen prismas o redes de difracción de los equipos de Óptica para descomponer la luz. Deben usar las fuentes luminosas de los equipos colocando delante una lente convergente, para conseguir un haz de luz paralelo que se hace pasar por una ranura vertical, todo ello en un banco óptico. La figura muestra el montaje. El haz se hace incidir sobre un prisma vertical colocado sobre una platina giratoria o sobre una red de difracción en un soporte (atención a la orientación de la trama de la red). La luz que atraviesa el prisma o la red se proyecta en una pantalla (libreta semiabierta o similar). Tal como ya se ha indicado, es común que los prismas de algunos equipos sean de un vidrio poco dispersivo. Si tiene un buen prisma para comparar, la diferencia resultará evidente.



3.- LA LUZ ATRAVIESA UN MEDIO UNIFORME. ABSORCIÓN

3.1.- Demostración y experiencias. Absorción de la luz. Filtros

La luz transporta energía, que pierde gradualmente a medida que atraviesa un medio capaz de absorberla. La mayor parte de medios absorben las frecuencias luminosas de un modo selectivo; en general, la mayor parte de sólidos y líquidos absorben una banda algo ancha de frecuencias. Así, si observamos una bombilla (de luz blanca), cuya luz contiene todas las frecuencias correspondientes a los colores desde el rojo al violeta, a través de un filtro, algunas de las frecuencias quedarán absorbidas en el colorante y las restantes lo atravesarán. El color que vemos a través del filtro corresponde a la luz blanca sin los colores que han sido absorbidos. El espectro de absorción es la representación gráfica de la intensidad con que son transmitidas o absorbidas las diferentes frecuencias.

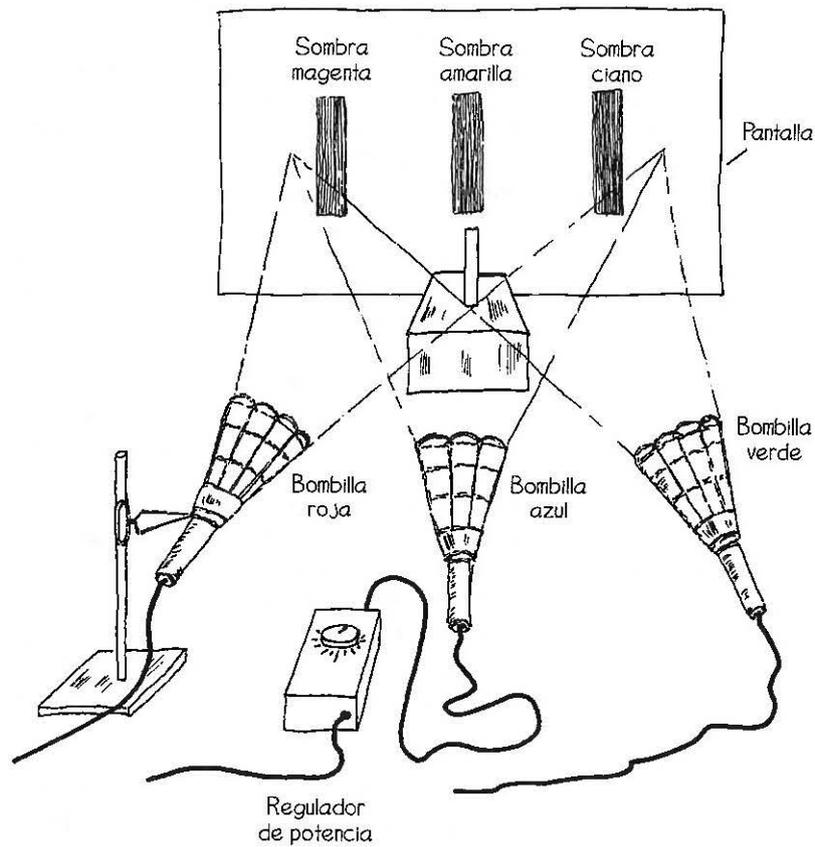
Es relativamente fácil conseguir una colección de filtros de distintos colores. Por ejemplo, el fabricante Rosco dispone de un catálogo en forma de librito con un gran número de muestras, cada una con su espectro de absorción. Si no lo puede conseguir utilice trozos de celofán de colores. Conviene cortar los filtros y enmarcarlos como si se tratara de diapositivas con la referencia de catálogo o algún sistema de identificación. Para observar la absorción basta con tener el montaje descrito en las experiencias anteriores («Análisis de la luz») e intercalar el filtro apropiado en el camino de la luz blanca. En la pantalla de proyección se podrá comprobar que unos colores han sido absorbidos. La comparación resulta fácil si se quita y se pone el filtro varias veces.

Mediante la combinación apropiada de filtros se pueden absorber todos los colores. El «color» negro resultante corresponde a la absorción de la luz de todas las frecuencias. El color blanco corresponde a la presencia de todas las frecuencias en una determinada proporción; el predominio de unos colores puede interpretarse como una carencia de otros. Puede sugerir a los alumnos que expliquen porqué decimos que el cielo es azul. ¿Significa que la luz del cielo, analizada, solo mostrará el color azul?

El montaje también permite abordar el tema de colores complementarios: un filtro amarillo absorbe el color azul, de este modo decimos que el azul y el amarillo son complementarios, como lo son el también el verde y el rojo.

3.2.- Demostración. Mezclas aditivas de colores. Colores complementarios

Del mismo modo que la luz blanca se puede analizar, es decir, separar en componentes, podemos obtener luz blanca a partir de luz de distintos colores, en la proporción apropiada. Un sistema simple consiste en utilizar 3 bombillas (por ejemplo OSRAM Concentra, de 80W, de color azul, verde y rojo) cada una con un portalámparas con un mango, que pueda ser sujetado en los soportes de laboratorio con una pinza. Estos portalámparas son baratos y se consiguen fácilmente en ferreterías o grandes almacenes de bricolage.



Es muy interesante poder variar la intensidad de cada bombilla, para ello pueden comprarse reguladores a triacs. Se encuentran en tiendas de material de iluminación o de electrónica totalmente montados o en kits;

pueden ser algo caros cuando se trata de regular potencias importantes pero son mucho más baratos si, como es el caso, la potencia a regular es de unos 100W en cada bombilla. Si funciona a presupuesto limitado, como la mayor parte de mortales, compre por lo menos uno. Es posible que pueda compartir gastos si habla con el profesorado de Dibujo, que también suele estar interesado en estos temas.

La demostración es simple. En el laboratorio a oscuras, coloque las bombillas separadas un metro y oriéntelas hacia una pantalla o una pared blanca. Enciéndalas y coloque un obstáculo algo grande (un taburete o una silla encima de una mesa), en una posición tal que en la pantalla sean visibles todas las posibles combinaciones de colores (blanco, negro, 3 colores individuales y 3 mezclas de dos colores cada una). Puede empezar de muchas maneras. Una posibilidad es mostrar el repertorio de posibles mezclas, 8 colores distintos, indicando que se obtienen a partir de 3 bombillas. A continuación saque el obstáculo y sustitúyalo por otro muy simple, por ejemplo un soporte de laboratorio (un pie y una barra vertical). Ahora se verá el fondo blanco y tres sombras verticales de color ciano, magenta y amarillo. Mueva la bombilla roja a derecha e izquierda y se moverá la sombra ciano; si mueve la bombilla azul se moverá la sombra amarilla. La semilla de la duda ya está sembrada. La demostración deberá explicar estos hechos aparentemente extraños al mismo tiempo que se introduce el concepto de color complementario. Para ello, una posibilidad consiste en simplificar la situación al máximo: A oscuras. La conclusión es inmediata: el color negro corresponde a la ausencia de luz. Si encendemos cualquiera de las bombillas veremos la pantalla del color correspondiente, excepto una sombra negra en la zona a la que no llega la luz. Todo en orden. Si ahora encendemos cualquier otra bombilla, preferiblemente poco a poco, con el regulador, veremos que:

- la sombra negra adquiere gradualmente el color de la bombilla que encendemos; no llegaba luz y ahora empieza a llegar.
- el fondo de la pantalla adquiere un color distinto al de cada una de las dos bombillas; se trata de su mezcla.
- una zona de la pantalla no ha cambiado de color al encender la segunda bombilla, se trata de la zona donde no llega la luz de la bombilla que estamos encendiendo.

Varíe unas cuantas veces la intensidad de esta segunda bombilla mientras va explicando estos cambios.

A continuación, con dos bombillas funcionando, encienda poco a poco la tercera. Ahora:

- el fondo de la pantalla debe ser blanco (se ha obtenido luz blanca a partir de la mezcla de colores de las tres bombillas).
- en la pantalla aparecerán tres zonas de color: ciano (donde no llega la luz roja, mueva la bombilla roja para comprobar que es así), amarillo

(donde no llega la luz azul) y magenta (donde no llega la luz verde). Cada color corresponde a la superposición de la luz de dos de las bombillas.

Empléese a fondo para explicar qué son los colores complementarios ya que no tendrá una ocasión mejor: los tiene en la pantalla. El color complementario del azul es el amarillo; el amarillo es el resultado de sacarle el color azul a la luz blanca. El color complementario del verde es el magenta, etc...

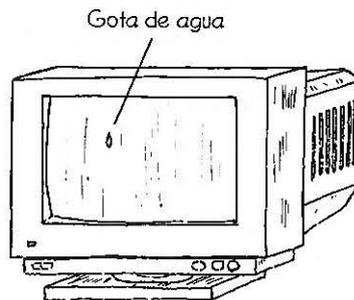
Finalmente, si saca el soporte y coloca una silla o un obstáculo grande observará zonas donde llega la luz de:

- las tres bombillas (blanco)
- dos de las bombillas (ciano, magenta, amarillo)
- una de las bombillas (rojo, azul, verde)
- no llega luz de ninguna bombilla (negro)

Puede asociar esta experiencia a la que se ha indicado sobre absorción de luz y filtros. Un filtro amarillo es el que absorbe la luz azul; un filtro verde el que absorbe la luz roja, etc...

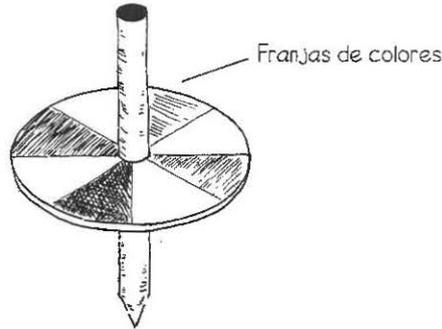
3.3.- Experimento casero. Color blanco en un monitor de ordenador

Las conclusiones de la experiencia anterior se pueden emplear para recordar la formación de los distintos colores en la pantalla del televisor o, mejor, en un monitor de ordenador. En los monitores se utiliza una trama triple de puntos (pixels) de 3 colores (verde, azul y rojo). La imagen estática en una pantalla de ordenador permite hacer un experimento simple para comprobarlo. Si se pone una gota de agua en la pantalla, sobre una zona de color blanco, la gota funciona como una lupa que le permite ver los distintos colores.



3.4.- Experiencia. Disco de Newton. Luz blanca y mezcla de colores

La descomposición de la luz blanca mediante un prisma o una red de difracción revela que está formada por una gama de colores desde el rojo al violeta. Existen distintos experimentos que permiten la recombinación de colores para obtener la luz blanca. A un nivel muy simple, como se ha explicado en el experimento casero anterior, el color blanco en el monitor de un ordenador se obtiene mediante puntos luminosos, muy próximos, de color rojo, verde y azul. Otras posibilidades, más interactivas, son las que se describen a continuación.



Un juego antiguo consiste en hacer girar un disco que contiene bandas de colores de distinta forma. La relativa «lentitud» de la visión hace que los colores se vean superpuestos. De este modo, si se hace girar un disco con porciones alternadas de color azul y amarillo, parece verde. Si el disco contiene porciones de color rojo, azul y verde se verá blanco al hacerlo girar. Es posible comprar juegos basados en ello (por ejemplo el fabricado por Galt Toys), que contienen varios discos con sectores de colores que se colocan sobre una peonza; al girar se percibe el color correspondiente a su mezcla.

3.5.- Demostración. Sustracción de colores. Colores complementarios

Esta demostración está asociada, igual que las anteriores, a los colores complementarios y puede realizarse a continuación de la adición de colores si dispone del montaje de las bombillas en el laboratorio a oscuras.

Puede realizarse de distintos modos. Una posibilidad es disponer de cartulinas, recortes de papel, revistas, etc, con distintos colores impresos. Encienda la luz roja e ilumine el repertorio. No podrá distinguir el color negro de muchas tonalidades del verde, que aparecerán grises o

negras. Algo parecido sucede si enciende la luz verde, todo lo que esté impreso en rojo aparecerá de color negro o gris.

Una alternativa interesante, si hay alumnos con vestidos de diversos colores, consiste en iluminarlos de forma que los demás puedan tratar de identificar estos colores.

En la experiencia de adición de colores la pantalla blanca reflejaba la luz que se proyectaba en ella, procedente de una o más bombillas. Aquí, los materiales de color absorben la luz que reciben, de un modo selectivo. Una camisa verde iluminada con luz blanca se ve verde porque ha absorbido el color complementario del verde (el rojo). Ha llegado la luz blanca, su componente roja ha sido absorbida y los demás colores han sido reflejados dándonos la sensación de color verde. Si iluminamos esta camisa verde con luz roja, toda la luz incidente será absorbida, no reflejará ninguna luz y nos parecerá negra.

Algunas sugerencias:

– si el laboratorio no está totalmente a oscuras, los colores se adivinan fácilmente.

– las bombillas de colores emiten una banda relativamente ancha de color que hace que la experiencia sea algo imprecisa en algunos casos.

– si utiliza una lámpara de sodio de baja presión (luz amarilla) podrá observar muy claramente como todos los objetos azules parecen profundamente negros o grises.

3.6.– Demostración. Colores complementarios y mensajes ocultos

Un experimento muy simple asociado al anterior, que puede utilizar para acabar la sesión, consiste en llevar dibujado, con un rotulador rojo, algún mensaje en el brazo (naturalmente, con la manga bajada para que no se vea). Si el brazo se ilumina con luz roja no se ve, en cambio, se puede leer perfectamente si se ilumina con la bombilla verde. Si no se tienen bombillas de colores, la iluminación puede hacerse mediante un proyector de diapositivas en el que se coloca un filtro rojo o uno verde, por ejemplo, los filtros Rosco #19 y #90.

3.7.– Demostración. Colores complementarios y mensajes con tizas de colores

Más de lo mismo. Y fácil, si dispone de filtros de color, un proyector de diapositivas y una caja de tizas de colores. En un papel blanco habrá escrito un mensaje con la tiza amarilla y otro mensaje con la tiza azul claro. No enseñe el papel. Ponga una diapositiva con el filtro azul (Rosco, #74) e ilumine el papel. Podrá leer el mensaje amarillo pero no el azul. Si a con-

tinuación proyecta el filtro amarillo (Rosco, #15) podrá leer el mensaje azul y no el amarillo.

Los mensajes escritos con la tiza de color rosa no se leen si se iluminan con los filtros rojos (Rosco, #19 o #27) en cambio, iluminados con el #90, verde, se leen bien. Las otras tizas no funcionan tan bien.

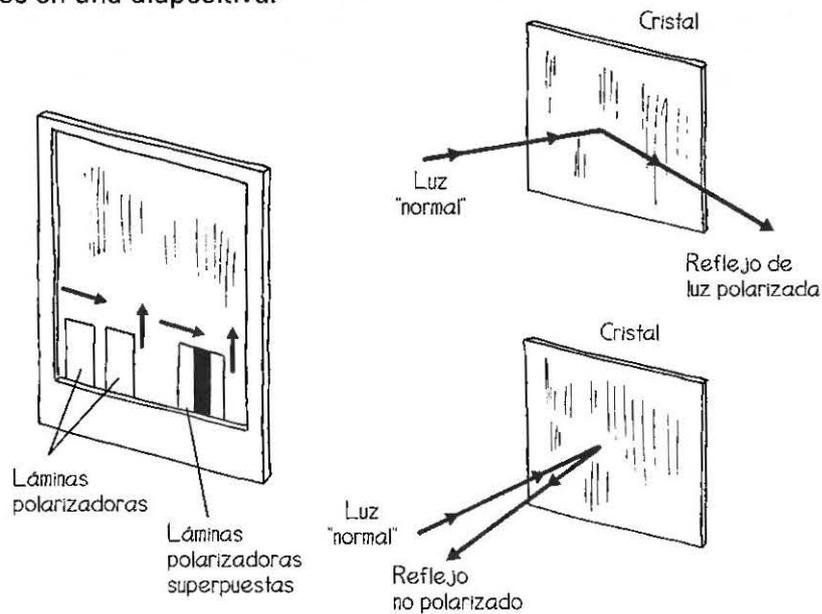
3.8- Demostración. Visión estereoscópica con filtros de colores complementarios

Ocasionalmente, habrá podido encontrar imágenes estereoscópicas consistentes en dos fotografías o dibujos superpuestos, de color rojo y verde, respectivamente. Unas gafas con un filtro rojo y uno verde permiten que cada ojo vea una imagen por separado. Aunque es posible preparar este tipo de dibujos mediante un ordenador y una impresora en color, es mucho más simple y descansado comprarlos cuando aparecen ocasionalmente; por ejemplo, «La Vanguardia» editó hace algunos años un suplemento con una impresionante colección de paisajes estereoscópicos de Barcelona; hace poco aparecieron fascículos con dinosaurios estereoscópicos en rojo y verde, etc. El tema de la visión estereoscópica se trata con mucha más extensión en la sección 6 de esta segunda parte del libro.

4.- POLARIZACIÓN

4.1.- Demostraciones y experiencias con la luz polarizada

Para hacer las demostraciones siguientes necesita dos trozos grandes de lámina polarizadora, por ejemplo, de unos 30 cm de lado. Estas láminas pueden conseguirse en algunos suministradores de luminotecnia, por ejemplo Luminotecnia Grau o en grandes suministradores de material de Óptica, como Edmund, a unos costes razonables. Hay una cierta variedad de grosores y las tonalidades suelen ser marrón o gris. Cualquier grosor y tonalidad le será útil aunque, si piensa hacer una colección de gafas polarizadas para observar diapositivas 3D, debería conseguir un trozo delgado, más fácil de cortar. Recuerde que la mayor parte de equipos didácticos de Óptica contienen una pareja de polarizadores que puede usar en experiencias con grupos de alumnos; si compra lámina polarizadora podrá tener los trozos que quiera, cortándolos y enmarcándolos en una diapositiva.



La demostración más simple y espectacular consiste en tener los dos trozos grandes de lámina polarizadora delante una ventana; su apariencia es de un simple plástico algo oscuro. Sin embargo, cuando un trozo se gira delante del otro, frente a la ventana, es evidente que algo raro sucede. Las dos láminas que, por separado, son transparentes en cualquier orientación pueden aparecer opacas cuando se superponen en una

orientación determinada; la transparencia regresa si una de ellas se gira 90 grados. Este curioso comportamiento sugiere un modelo para el funcionamiento de los polarizadores, que los alumnos llegan a deducir fácilmente. El modelo consiste en considerar a los polarizadores como rejillas que únicamente permiten el paso de la luz que vibra en una dirección. La luz que pasa a través del primero de los polarizadores sale vibrando en una dirección; si el otro polarizador tiene su «trama» paralela al primero, la luz lo atravesará. Si se gira a 90°, la luz procedente del primero no podrá pasar y se verá oscuro.

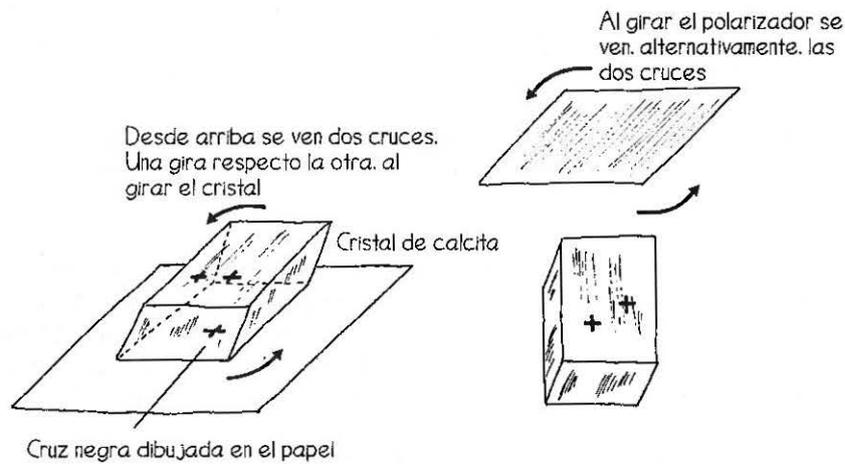
A continuación, con el laboratorio a oscuras, puede continuar la demostración usando el retroproyector. Se coloca una lámina encima del retro y encima de ella se gira un trozo más pequeño de polarizador, recordado de una lámina mayor o uno de los polarizadores de los equipos. Se observarán alternancias de luz y oscuridad cada cuarto de vuelta. Este es un sistema simple para comprobar que algunos objetos de uso «corriente» contienen polarizadores. Por ejemplo, consiga un display de cristal líquido de algún reloj digital averiado (algún relojero se lo podrá regalar) o unas gafas polarizadoras; al girarlos obtendrá alternancias de luminosidad.

En este punto, destaque como nuestros ojos no distinguen la luz normal de la luz polarizada. Ilumine el laboratorio y pida a los alumnos que identifiquen «fuentes» de luz polarizada a simple vista: en los fluorescentes o bombillas, reflejos en cristales, en la pizarra, reflejos metálicos, etc... Naturalmente, a simple vista no hay manera. Reparta trozos pequeños de polarizador o las láminas grandes (para visión panorámica) y pídale de nuevo que identifiquen la luz polarizada. La luz polarizada se distingue mediante las alternancias de luminosidad cuando se observa a través de un polarizador que se gira. Podrán comprobar que los reflejos en superficies que no sean metálicas aparecen polarizados si se observan en ángulos relativamente grandes. Los cristales, la pizarra, las mesas, polarizan la luz que se refleja en un ángulo grande. Haga que estudien la luz del cielo, verán que en una zona la luz está algo polarizada. Si tiene la posibilidad, compruebe que los reflejos en el agua a ángulos grandes, la luz del arco iris, etc. también están polarizadas. Es interesante que destaque el hecho de que la luz polarizada está presente en muchos fenómenos de nuestro entorno.

4.2.- Experiencias: Otros sistemas de polarización

A partir de los experimentos anteriores puede deducirse un sistema para obtener luz polarizada, sin emplear polarizadores. Basta con hacer que la luz se refleje en un cristal (o mejor, una serie de cristales apilados)

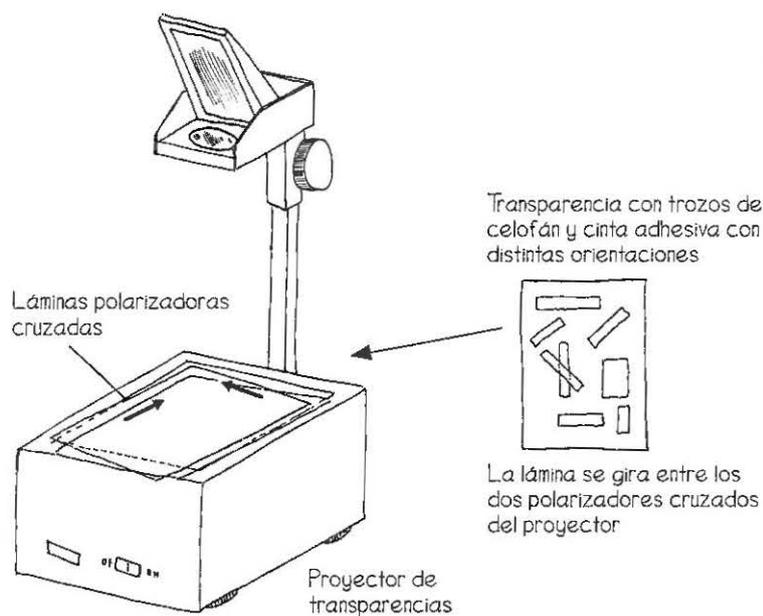
en un ángulo de incidencia grande. Este ángulo, llamado de Brewster, es aquel cuya tangente es igual al índice de refracción del medio (suponiendo que la luz procede del aire). Para el agua el ángulo es de 53° ; para el vidrio depende del índice de refracción concreto, pero podemos imaginar que es por el estilo o algo mayor.



Otro sistema, más complicado, consiste en utilizar cristales de algunos minerales (recuerde, si es lo bastante viejo, las pinzas de turmalina, el prisma de Nicol, etc..de sus años de estudiante). El sistema es muy simple, basta con repartir a cada grupo de alumnos un cristal transparente de calcita y un trozo de polarizador. No hace falta que el cristal sea una pieza de museo, basta con que sea algo transparente. Pueden conseguirse a bajo coste en los suministradores de colecciones de minerales. En primer lugar, se podrá observar el fenómeno de la birrefringencia. Sobre un papel se dibuja una pequeña cruz o un punto; si se coloca el cristal encima se ven dos puntos. Si se gira el cristal, siguen viéndose los dos puntos, pero uno gira respecto el otro (rayo ordinario y extraordinario). La causa de las dos imágenes se discute más adelante. Ahora, lo que interesa es comprobar que cada una de ellas está polarizada. Se deja el cristal de calcita quieto y se observan las dos imágenes a través de un trozo de polarizador. Girándolo se verá como cada 90° aparece y desaparece una de las imágenes. No sólo están polarizadas, sino que sus direcciones de polarización son perpendiculares. Si le parece conveniente la discusión puede utilizar el retroproyector. Se coloca encima una transparencia con una pequeña cruz dibujada y, sobre ella, un cristal de calcita; en la pantalla se verán dos cruces. Se pone encima una lámina polarizadora que se va girando y las dos cruces aparecen y desaparecen alternativamente. La conclusión es que la luz «normal» que atraviesa un cristal de calcita sale polarizada en dos direcciones perpendiculares.

4.3.- Demostración. Materiales birrefringentes

Hay muchos materiales que se comportan como la calcita; los más simples son plásticos que se han tensionado durante el proceso de fabricación, como el celo o cintas similares, el celofán, etc. Las propiedades en la dirección del bobinado o tensionado no son las mismas que en dirección perpendicular; en particular, la velocidad de propagación de la luz polarizada no es la misma si está vibrando en una dirección o en dirección perpendicular. El comportamiento observado en la calcita es de este tipo, sin embargo, no se debe a ninguna tensión interna sino a la disposición «asimétrica» natural de los átomos en su interior. Cuando la luz «normal» atraviesa estos materiales sale polarizada en dos direcciones perpendiculares. Un tratamiento completo del comportamiento de los materiales birrefringentes se describe en el libro: F.Donald Bloss. «Introducción a los métodos de la cristalografía óptica» Ed. Omega. 1970.



Si la luz que atraviesa el material se ha polarizado previamente, se descompondrá según las direcciones de vibración propias, del mismo modo que un vector se descompone en dos direcciones determinadas; estas dos «componentes» de la luz se recombinan a la salida del material. Y aquí viene lo más interesante. Supongamos que la iluminación es monocromática, por ejemplo procedente de una lámpara de vapor de sodio, a 590 nm, y que esta luz se ha polarizado. Puesto que la luz que

vibra en una dirección atraviesa el material con una velocidad ligeramente distinta a la que tiene si lo hace en dirección perpendicular, una de las ondas se retarda respecto la otra. Si el retardo a lo largo de todo el espesor del material es múltiplo de la longitud de onda, globalmente no habrá desfase y cuando se recombinen las dos ondas «componentes» su resultante estará en el mismo plano que a la entrada. Si el grosor del material y la diferencia de velocidad en una dirección u otra es tal que una de las dos ondas se retarda media longitud de onda (o una y media, etc..), la superposición de las dos ondas a la salida origina una onda cuyo plano está a 90° del plano a la entrada del material.

Cuando la luz polarizada penetra en el material birrefringente de modo que su dirección de vibración coincide con una de las «direcciones propias del cristal» no se desdoblará en su interior y, a la salida, el plano de vibración no se habrá desviado; en cambio, si la luz polarizada es oblicua a estas direcciones, habrá un cierto retardo y tendrá lugar una desviación del plano de la luz polarizada en su paso por el material. Únicamente no habrá desviación del plano si el retardo es múltiplo de la longitud de onda.

Si observamos la luz que, procedente del polarizador, atraviesa trozos de celo o celofán no notaremos nada especial, ya que no podemos distinguir el plano de polarización a simple vista ni, por supuesto, si este plano ha girado. La solución consiste en colocar otro polarizador encima, de forma que los materiales queden entre dos polarizadores cruzados. Si el material no cambia el plano de la luz se verá oscuro. Si el material provoca un retardo tal que hay cambio en el plano de vibración, pasará algo de luz por el polarizador superior y aparecerá más o menos claro.

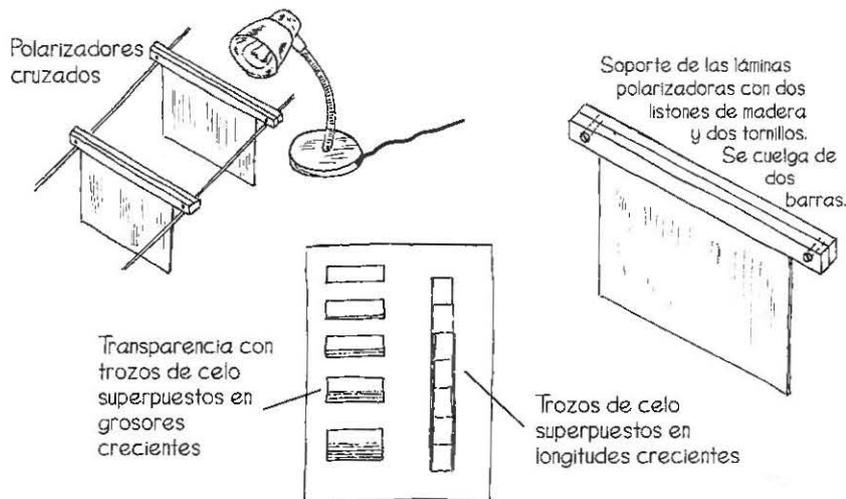
Estas observaciones iniciales, esenciales para comprender el funcionamiento de un microscopio petrográfico, pueden hacerse colocando dos láminas polarizadoras cruzadas encima del retroproyector y, entre ellas, una transparencia que contenga muestras de celo y celofán. Al girar la transparencia se notará que no pasa luz (no se desvía el plano al atravesar el material), en aquellas posiciones en que las direcciones de tensión del material son paralelas a alguno de los polarizadores. Si se gira la hoja, la luz se desdoblará en componentes que se desfazarán al atravesar el material y, a la salida, el plano de la luz habrá girado; pasará algo de luz a través del otro polarizador y el material se verá más o menos claro.

4.4.– Demostración. Simulación de un microscopio petrográfico. Colores de interferencia

La observación de los fenómenos siguientes puede interesar a quienes estudien Geología, puesto que están relacionados con los insólitos colores que aparecen en el microscopio petrográfico; sin embargo, a los

estudiantes de Física les puede parecer un buen embrollo. En realidad, quien se esfuerce en su comprensión se encontrará con un precioso ejemplo del principio de superposición de las ondas y las interferencias.

Los materiales necesarios son relativamente simples. Se necesita una lámpara de sodio de baja presión, una lámpara tipo flexo con una bombilla corriente, dos trozos «grandes» de lámina polarizadora y algún tipo de soporte que permita mantenerlas verticales. En el polarizador de atrás, iluminado por la lámpara, se pega una hoja de papel que actuará como difusor de luz. Por otro lado, es necesaria una transparencia o una lámina de metacrilato que contenga trozos de celo pegados paralelamente a los lados, en franjas de grosor creciente, como muestra la figura; si se desea se puede hacer otra transparencia con trozos de celo superpuestos gradualmente, orientados según un lado de la transparencia y, aún, otra transparencia con trozos de celofán superpuestos (¡cada trozo cortado en la misma dirección!). Es algo laborioso hacer estas transparencias pero, una vez hechas, son para toda la vida.



La lámpara de sodio ilumina por detrás los polarizadores cruzados; los alumnos observarán, desde el lado opuesto a la lámpara, la luz que atraviese los polarizadores. Si se colocan las transparencias con los trozos de celo y celofán entre los polarizadores se observará, tal como se ha hecho con el retroproyector, que hay oscuridad cuando los trozos son paralelos o perpendiculares a las direcciones de los polarizadores, es decir, cuando alguna dirección de vibración del «cristal» es paralela a algún polarizador. Cuando la transparencia se gira, cada una de las piezas deja pasar algo de luz.

La novedad empieza aquí. Con la iluminación monocromática de la lámpara de sodio, se colocan las transparencias con los celos o celofán de grosor creciente entre los polarizadores y se giran a 45° . En general, el plano de vibración de la luz cambia al pasar por el material y, globalmente, pasará luz. Sin embargo, si se observan los grosores cada vez mayores, se notará que en unas zonas el celo parece oscuro, en otras pasa luz, en otras vuelve a aparecer oscuro, etc.. hay una alternancia de zonas claras y oscuras, que corresponden a los grosores en los cuales el retardo de las dos componentes de la luz, en el interior del material, es tal que el plano de vibración gira a 90° o permanece inalterado, respectivamente. Empleando tesa-film hay extinción (no se ve luz debido a que el plano de la luz no ha variado) si el espesor es de 6 y 12 capas. La máxima luminosidad aparece si el grosor es de 3 y 9 capas debido a que, en estos casos, el plano de la luz ha girado cerca de 90 grados a la salida del material. Es interesante observar que si los polarizadores se colocan paralelos, aquellas zonas de la transparencia que aparecían oscuras se muestran claras y viceversa.

Si el fenómeno se entiende con luz monocromática puede abordarse la parte final y más interesante: los colores de interferencia. Se sustituye la iluminación de la lámpara de sodio por la de una bombilla, que emite toda la gama de longitudes de onda correspondientes a la luz visible. Deben observarse aquellos grosores que aparecían claros iluminados por la luz amarilla de la lámpara de sodio (el plano de la luz amarilla giraba 90° al atravesar el material, debido a que había un retardo de media longitud de onda). Ahora su color será amarillento, ya que la luz amarilla hará lo mismo que antes; en cambio, aquellas zonas que aparecían oscuras, debido a que no había retardo y el plano de la luz amarilla no giraba, ahora aparecen azuladas, puesto que los colores distintos al amarillo tendrán un cierto retardo y pasarán en menor o mayor grado y, a fin de cuentas, el azul es el color complementario del amarillo. Si se gira un polarizador 90° , aquellas zonas azules aparecerán amarillas y viceversa.

4.5.– Demostración. Efectos de la deformación de los materiales. Polariscopio

Los cristales de minerales disponen de una asimetría interna; el celo o celofán se han tensionado y también son anisótropos. Podemos comprobar que aquellos materiales homogéneos, como un trozo de plástico (polietileno), muestran colores de interferencia cuando se deforman, debido a la variación de las propiedades ópticas en las distintas direcciones, provocada por la deformación.

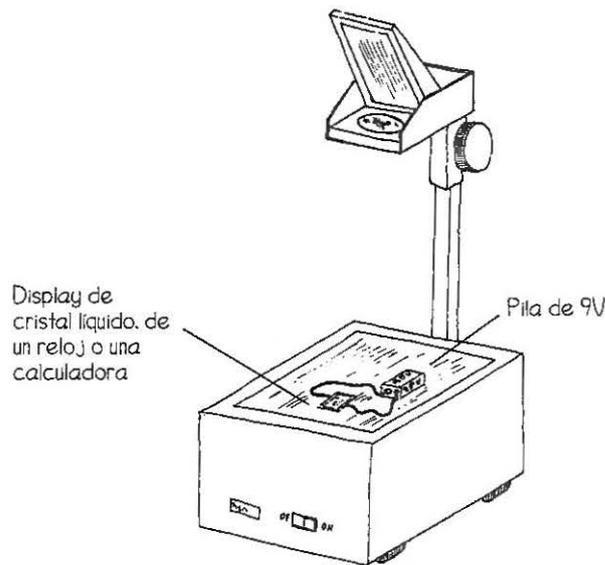
Para ello, se ponen dos polarizadores cruzados sobre el retroproyector y entre ellos, un trozo de plástico transparente. Si el plástico es nuevo

y no se ha castigado previamente no mostrará nada especial. En cambio, cuando se estira fuertemente en una dirección, empezará a mostrar colores de interferencia debido a la alteración de sus propiedades ópticas tal como sucede en el cielo.

Muchísimos materiales que aparentemente son homogéneos muestran colores de interferencia, debidos a tensiones y deformaciones internas, al colocarse entre dos polarizadores. Los más comunes son los objetos de plástico transparente a los que se ha dado forma en una prensa. Así, las escuadras, reglas, transportadores, cajas de cassette, muestran un espectáculo fascinante de colores de interferencia. Los pequeños platos de duralex son un caso especialmente interesante: sus tensiones internas, que se ponen de manifiesto con la luz polarizada, permiten comprender que a veces exploten espontáneamente.

4.6.- Demostración. Funcionamiento de un display de cristal líquido

Esencialmente, un display de cristal líquido, como los de los relojes digitales o calculadoras, consiste en un sandwich construido con dos polarizadores paralelos y, entre ellos, unos canales con un «líquido» formado por moléculas polares que se pueden orientar en un campo eléctrico. El campo eléctrico de cada canal individual (cada una de las rayas que forman las cifras) se regula mediante dos juegos de contactos a cada lado. El conductor es transparente (óxido de estaño). Cuando las moléculas que llenan los canales están desordenadas la luz polarizada los atra-



viesa sin desviarse; al contrario, cuando se aplica un campo eléctrico a un canal hay una orientación de las moléculas y un cambio en las propiedades ópticas, tal como sucede con un celo o un plástico que se haya tensionado. En esta situación la luz polarizada se desvía 90° al atravesar la substancia y no pasa por el siguiente polarizador; el canal se ve oscuro. Globalmente, luz que atraviesa un polarizador puede girar al atravesar el «líquido orientado» y encontrarse con que el otro polarizador le bloquea el paso. De esta forma se consigue la formación de las distintas cifras. La supresión del campo eléctrico hace que la orientación de las moléculas desaparezca y la luz pase de nuevo. La conmutación es rapidísima con un gasto de energía mínimo.

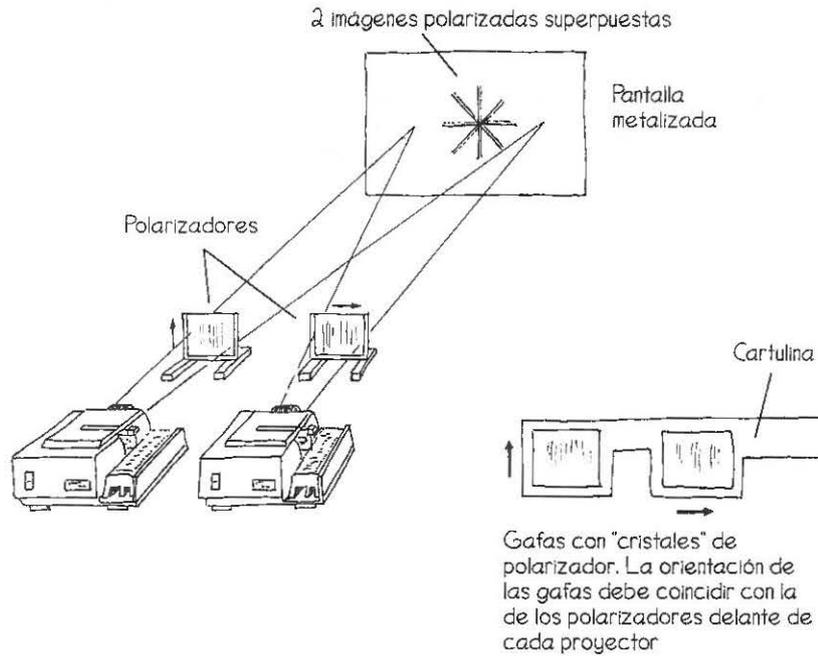
Es muy fácil hacer una demostración de este fenómeno. Basta con sacar el display de un reloj averiado y colocarlo sobre el retroproyector. Con una pila de 9V y un adaptador de dos terminales a esta pila se pasan los dos polos sobre los bordes del display y se observa en la pantalla como se van «encendiendo» los distintos segmentos.

4.7.- Demostración. Cine 3D utilizando luz polarizada

El cine y las proyecciones 3D constituyen una aplicación interesante de la luz polarizada. Se tienen dos proyectores, cada uno de los cuales proyecta una imagen o una película correspondiente a lo que vería cada ojo por separado. Delante de los proyectores se colocan filtros polarizadores en direcciones perpendiculares, de modo que en la pantalla, a simple vista, se reflejan dos imágenes superpuestas, cada una de las cuales está polarizada. El truco es elemental. Si utilizamos unas gafas cuyos cristales sean dos polarizadores cruzados del mismo modo que los de cada proyector, conseguiremos que cada ojo vea una imagen distinta. En realidad estaremos visualizando imágenes estereoscópicas a lo grande. Para que el sistema funcione es necesario que la pantalla de proyección sea metalizada; es fácil de distinguir de las pantallas normales, que tienen una especie de granulado. No sirven todas las pantallas, ni la pared, ni una simple tela, que despolarizan la luz que incide en ellas. Puede usarse (funciona algo peor) un material que los cortinistas denominan OPACITE u otro llamado FOSCURITE, con el cual se hacen las cortinas para dejar las salas a oscuras. Sea cual sea la pantalla, las dos imágenes deben tener una superposición aceptable.

Si se quieren hacer proyecciones de diapositivas estereoscópicas deben usarse dos proyectores iguales. Los filtros, cortados de una lámina, se colocan delante de los proyectores, en los soportes adecuados, hechos de madera o usando los propios soportes de los equipos de Óptica. No tenga los proyectores encendidos más tiempo del necesario para evitar que los polarizadores se calienten por el paso de la luz y se despolariz-

cen gradualmente. Las gafas pueden hacerse fácilmente recortando cartulina y lámina polarizadora fina. Recuerde que la lámina polarizadora debe montarse en las gafas de acuerdo con la orientación de los filtros delante de los proyectores. En realidad, puede ser más fácil hacerse con un paquete de gafas polarizadoras, buscar la orientación correspondiente a cada ojo y preparar los filtros de los proyectores de acuerdo con ello.



Las diapositivas consisten en parejas estereoscópicas (véase la sección correspondiente a la visión, más adelante) fotografiadas, si se trata de imágenes de un libro en blanco y negro, con película de alto contraste. En realidad la preparación de la colección de diapositivas constituye la limitación de esta demostración, que es sumamente interesante. Si es usted aficionado a la fotografía puede usar película Kodalith Orto. Cualquiera puede hacer las fotografías si dispone del soporte especial para fotografiar libros o documentos. El revelado es otro tema. En realidad basta con los negativos, que son los que se proyectan, por ello resulta fácil si uno es aficionado a la fotografía. Si no es así, le conviene acudir a algún fotógrafo o a un amigo aficionado. Naturalmente, el relieve puede verse con parejas de diapositivas en color hechas con película normal de diapositiva. Basta con hacer dos fotografías de la misma escena desde posiciones algo separadas.

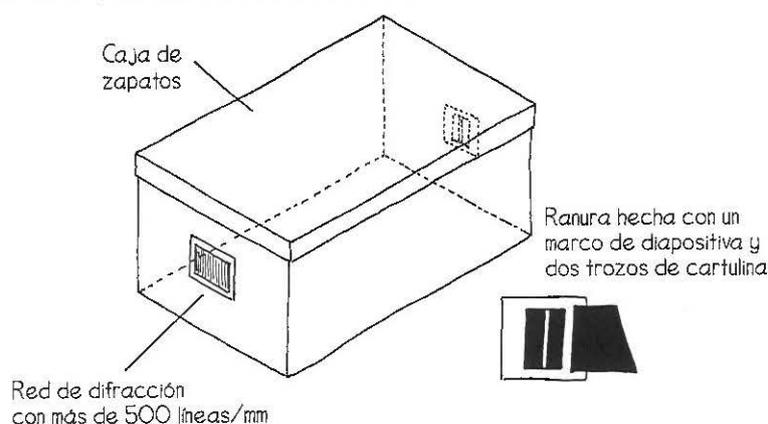
Si está interesado en imágenes estereoscópicas relacionadas con la Química, Bioquímica o Geología (estructuras cristalinas, moléculas, etc..) encontrará una colección interesante en el libro: Brady /Humison. «Química General. Principios y estructura». Ed. Limusa. Algunos programas de visualización molecular, como Rasmol, permiten imprimir parejas estereoscópicas de cualquier molécula (Rasmol es un programa muy común para la visualización molecular en Internet. Consulte, por ejemplo, <http://www.umass.edu/microbio/rasmol>).

Si ya tiene la colección, sea ordenado con las diapositivas y márque-las de alguna manera. Si se mezclan las colecciones correspondientes a cada ojo volverá locos a los que observen las imágenes, ya que deberán girar las gafas para ver las parejas de diapositivas cambiadas.

5.- LA LUZ INTERACCIONA CON LOS ELECTRONES DE LOS ÁTOMOS

5.1.- Experiencia. Construcción de un espectroscopio

La observación individual de los espectros puede realizarse mediante un espectroscopio construido de la forma siguiente. Se hacen dos agujeros rectangulares, algo menores que el tamaño de una diapositiva, en las dos caras opuestas de una caja de zapatos. En un lado se pega con cinta adhesiva una diapositiva, con una ranura regulable hecha de cartulina negra, tal como muestra la figura y en el otro una diapositiva con una red de difracción, que debería tener una trama de más de 500 líneas/mm. Estas redes pueden formar parte de los equipos didácticos, como sucede con el de Enosa y, posiblemente, con otros. Si no tiene redes de difracción o quiere comprar más deberá acudir a los suministradores que se han indicado al principio de la segunda parte del libro.



La ranura del espectroscopio debe tener una anchura de 1 mm o algo menor, de acuerdo con la intensidad de la luz que se quiere analizar. Cuanto más ancha peor será la resolución. El espectro se observa, con el ojo muy cerca de la red, mirando la luz que atraviesa la rendija. Antes de pegarla uno debe asegurarse de que las líneas de la red son paralelas a la rendija; para averiguarlo, basta usar la red para mirar un fluorescente. Si se observan bandas de colores paralelas al fluorescente ello indica que las líneas de la red coinciden con la dirección del fluorescente y todo está en orden; si no fuera así, la red se gira 90 grados. Puesto que el espectroscopio es reciclable y la red de difracción se recupera, es conveniente construir tantos espectroscopios como sea posible para que el mayor número de alumnos pueda observar simultáneamente los espectros.

Una vez pegadas la rendija y la red, debemos asegurar que no entra luz por posibles ranuras o por la tapa de la caja. A continuación se indican las observaciones que se pueden hacer con este espectroscopio tan simple como eficaz.

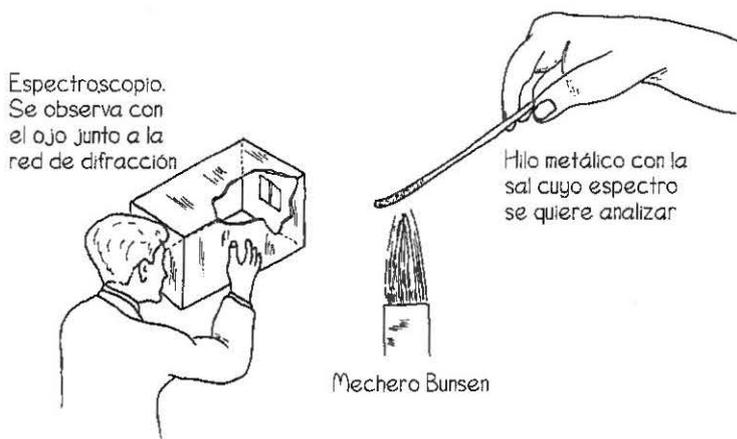
5.2.– Experiencia. Espectros de absorción. Líneas de Fraunhofer en el espectro de la luz solar

La observación de espectros de absorción en el laboratorio no resulta sencilla. La posibilidad más simple y, quizá, la más interesante es la observación de las líneas de Fraunhofer que aparecen en el espectro de la luz solar. No se debe mirar al Sol directamente sino a la luz del cielo en un día claro. El espectro continuo de la luz blanca aparece a ambos lados de la ranura y en él se aprecian, muy tenues, unas líneas oscuras, paralelas a la rendija. Las líneas estarán bien definidas si la rendija está algo cerrada, (menos de un milímetro), pero se verán tenues. Estas líneas son debidas a la absorción selectiva de algunas frecuencias por los elementos químicos presentes en la superficie del Sol. Vale la pena comentar que el análisis espectroscópico permitió el descubrimiento del helio en el Sol antes que en la Tierra.

5.3.– Experiencias. Líneas espectrales de emisión de los elementos químicos. Sales a la llama

Su observación es muy fácil y su interés indiscutible. Basta con disponer de mecheros Bunsen, trozos de hilo de resistencia de hornillos o clips y una pequeña colección de cloruros metálicos, especialmente cloruro de litio y de calcio. Una experiencia preliminar puede ser la observación de los colores característicos de los distintos elementos: cobre, sodio, potasio, litio, etc, a la llama, pero el análisis espectral, especialmente con un dispositivo tan simple, no funciona bien con todos. Los mejores son el cloruro de litio y el cloruro de calcio. Es conveniente guardar muestras de las sales en pequeños frascos. Si alguna sal está en un grano muy grueso conviene triturar en un mortero una pequeña cantidad que se guardará en el frasco. El procedimiento es el siguiente. En el laboratorio a oscuras, los alumnos se distribuyen con sus espectroscopios alrededor de mecheros Bunsen encendidos, a un palmo o dos de la llama, con la rendija vertical para aprovechar al máximo la luz de la llama. Deben buscar la llama y ver su espectro, difuso y muy tenue, a uno de los lados. Otro alumno deberá poner el extremo de un trozo del hilo metálico o de un clip, estirado previamente, al rojo y una vez caliente tocará con él la sal cuyo espectro se quiere observar, que fundirá y se pegará al metal. Poco

a poco introducirá el extremo del hilo en la llama para que la luz se emita gradualmente y sus compañeros tengan tiempo de observar los espectros. Con el cloruro de litio la llama es de un color carmín espectacular y su análisis muestra únicamente dos líneas, una roja y otra amarilla. La llama del cloruro de calcio también es rojiza pero su análisis muestra una colección de líneas que van desde el rojo al verde. No sea demasiado quisquilloso con los hilos, al fin y al cabo no se trata de hilo de platino. Si emplea hilo de resistencia de hornillos eléctricos (se encuentran fácilmente en las ferreterías) córtelo a trozos de unos 10 cm. Esta longitud permite aguantarlos cómodamente con los dedos, sin apenas notar el calor, mientras se calientan en la llama. Conviene emplear un trozo de hilo distinto para cada sal. Resulta más fácil utilizar el alambre de un clip, normalmente de acero inoxidable, mucho más asequible.



5.4.- Demostración. Líneas de emisión en las descargas eléctricas en gases

Un sistema muy conveniente para observar los espectros en el laboratorio consiste en la utilización de tubos de descarga. Se hace pasar una corriente eléctrica por el gas cuya luz se quiere analizar, mediante una fuente de alta tensión. La ventaja sobre la observación de espectros a la llama es la mayor luminosidad, que permite que más alumnos observen el espectro desde mayor distancia. El problema es que estos tubos, sean de un tipo u otro, requieren el empleo de alta tensión procedente de un carrete de Ruhmkorff, una fuente especial o de un transformador de alta tensión. Ello conlleva un cierto peligro, si no de muerte, de un buen chispazo, por lo tanto uno debe andar despierto y mantener a los alumnos a

una distancia prudencial, poner un cuidado especial en la calidad y el buen estado de los cables de conexión y, bajo ningún concepto, tocar cables o conexiones mientras la alimentación esté conectada. Nadie debe asustarse ante estas advertencias, basta con seguir las reglas básicas del sentido común: no tocar el circuito cuando esté conectado, olvidarse de hacer estos experimentos si el suelo o la mesa están húmedos, advertir a los alumnos del peligro, mantenerlos a una distancia adecuada y, por supuesto, no dejarles manipular el sistema eléctrico. En el mercado existen fuentes de alta tensión protegidas que, sin duda, hacen más segura esta experiencia aunque su coste suele ser prohibitivo. En general, se usan carretes de inducción comerciales o de fabricación casera.

Respecto a los tubos de descarga, pueden emplearse los tubos de gas cortos (unos 20 cm) y estrechos, que suministran los fabricantes de material didáctico. Los más interesantes, suponiendo que se quieren ver los espectros y no solamente el color del gas, son: hidrógeno, helio, neón y mercurio. Una advertencia con el tubo de hidrógeno. Si el tubo tiene sus años o hay algún poro ínfimo en la soldadura entre el vidrio y los electrodos, el hidrógeno se habrá escapado y el espectro que verá puede ser del aire que ha entrado en el tubo. Esto es bastante frecuente, por ello, si compra un tubo nuevo compruebe que el espectro que se observa corresponde al hidrógeno y si no es así pida que le cambien el tubo.

Un procedimiento para observar los espectros del mercurio y neón (y helio, si hay suerte) consiste en encargar tubos de unos 60 cm a algún fabricante de tubos de neón para escaparates. Asegúrese de que se trata de un fabricante, si no quiere pagar el doble. Los únicos gases que utilizan son neón y vapor de mercurio (una gota de mercurio dentro del tubo), los otros colores se generan a partir de tubos con pinturas fluorescentes. Algunos fabricantes pueden tener helio (que no se usa comercialmente); como la luz que emite es más tenue, encargue un tubo de helio más corto, de unos 20 cm. Estos tubos son mucho más baratos que los de los equipos didácticos y emiten mucha más luz. Si, además, consigue que le permitan ver como los fabrican gozará de un espectáculo memorable. Un sistema conveniente para almacenar estos tubos consiste en tenerlos sujetos a un tablero de madera aglomerada, con un par de bridas de plástico, colgados en la pared hasta que quiera utilizarlos; entonces se pone el conjunto sobre la mesa y se conecta el tubo apropiado a la fuente.

Sean los tubos de un tipo u otro, puede usar un carrete de Ruhmkorff para ver el espectro. No utilice cables normales, que normalmente no resisten demasiada tensión. Emplee unos cables de conexión de silicona («de televisión», en cualquier tienda de componentes electrónicos) con pinzas cocodrilo soldadas a cada extremo y no toque ni el cable ni las pinzas cuando haya alimentación, por bueno que parezca el aislamiento. Si usa tubos «de escaparate» puede comprar un transformador de alta tensión (lo suministra el mismo fabricante de los tubos), que se conecta a

220V, con una salida de 2000V. Los conectores y las precauciones son los mismos.

Si tiene reparos o no ha usado nunca un Carrete de Ruhmkorff deje que le asesoren en algún Centro de Profesores, Centro de Recursos o compañeros que realmente conozcan el tema. No sobrestime el peligro, que es poco, ni sea demasiado confiado al ver que alguien más experto manipula los aparatos de alta tensión con toda tranquilidad.

5.5.- Experimento casero. Triboluminiscencia

Cuando se despegan algunos tipos de cinta adhesiva (funciona muy bien la cinta Scotch Magic Tape, de 3M) se puede observar, si se está a oscuras (no hace falta que la oscuridad sea absoluta pero conviene), como se emite luz de un color indefinido, en la zona donde la cinta se separa del rollo. Para evitar gastar la cinta inútilmente va muy bien despegar y pegar sucesivamente el mismo trozo, de unos 3-4 cm de cinta.

El fenómeno es algo exótico y, al parecer, tiene su origen en la separación de cargas eléctricas que se provoca al despegar la cinta. La tensión eléctrica entre la parte pegajosa y la cinta de plástico a la que se pega provoca pequeñas descargas que son la causa de la luz emitida, como si se tratara de un minúsculo tubo de descarga.

5.6.- Demostraciones. Luz ultravioleta. Fluorescencia y fosforescencia

La emisión de luz en las sales a la llama o en las descargas a través de gases son dos de los posibles, y más simples, sistemas de excitación de los átomos. Los electrones pasan a estados de energía superior utilizando la energía de los choques entre los átomos debidos al movimiento térmico o los choques con iones acelerados mediante una tensión eléctrica elevada.

Otro método de excitación consiste en irradiar algunos compuestos químicos con radiación de elevada energía, por ejemplo, «luz» ultravioleta. Las moléculas o átomos excitados devuelven la energía en una sola transición electrónica o a través de varios saltos; en este último caso, cada transición liberará una energía menor que la que ha requerido la excitación. Puesto que la energía de la radiación es proporcional a la frecuencia, esta última situación dará lugar a que la substancia emita luz de frecuencia menor a la utilizada para su excitación. De este modo, la irradiación con luz UV, invisible para los ojos, puede dar lugar a la emisión de luz visible. El fenómeno se denomina fluorescencia si la emisión es inmediata a la excitación o, fosforescencia, si hay un cierto retardo. Es evidente que la frontera entre los dos fenómenos es difusa pero hay buenos ejemplos, a nivel experimental, de cada uno de ellos.

El material necesario para observar el fenómeno es muy simple, hace falta un tubo de luz ultravioleta (luz negra, de 365 nm), que puede conseguirse en cualquier tienda de luminotecnia. Basta con una potencia de 15 w. Su montaje, con una reactancia y un cebador como cualquier otro tubo de tipo fluorescente, no tiene ninguna dificultad; en la misma tienda le indicarán el circuito necesario. Es posible que encuentre tubos montados a un coste moderado como los que se emplean para detectar billetes falsos. La luz ultravioleta de esta longitud de onda es perjudicial para la vista; en principio no hace falta protegerse la piel pero debe evitar que los alumnos, y usted mismo, la vean directamente. A pesar de ello, habrá comprobado que en cantidad de bares, discotecas, autos de choque, etc. hay lámparas ultravioleta sin ningún tipo de protección.

Debe disponer de una colección de muestras fluorescentes y fosforescentes para poder mostrar el interés del fenómeno en múltiples campos. A continuación se indican algunas sugerencias. Verá que la inmensa mayoría de materiales son fluorescentes, sólo algunos mostrarán fosforescencia.

a) Muestras fluorescentes

– **Minerales:** los minerales fluorescentes más comunes son: la fluorita (algunas variedades, fluorescencia azul), calcita (fluorescencia roja, algunas variedades), algunos minerales de uranio (fluorescencia amarilla o verde, muy llamativa). Otros minerales más exóticos también son fluorescentes. Podrá comprarlos en tiendas de colecciones de minerales o suministradores de material de Ciencias Naturales. El fenómeno sirve para la identificación de estos minerales.

– **Materiales de uso diario:** el papel «blanco» contiene normalmente aditivos fluorescentes para intensificar la blancura aprovechando la pequeña cantidad de luz ultravioleta presente en la luz solar. Compare el papel «normal» con el papel de filtro, que carece de estos aditivos, bajo la luz UV. Lo mismo sucede con los aditivos de los detergentes que lavan más blanco, la fluorescencia blanca de las camisetas lo indica claramente. Muchísimos papeles utilizados como rótulos o envoltorios contienen pigmentos fluorescentes, especialmente de color amarillo, verde o rojo. Si se irradia una de estas hojas con luz UV la luz visible que emite por fluorescencia basta para «iluminar» el laboratorio.

– **Métodos de clasificación:** los sobres a menudo se reciben con unas rayas fluorescentes (que se ven poco con luz normal y destacan muchísimo con luz UV), utilizadas por el servicio de Correos para la clasificación de la correspondencia de un modo parecido a un código de barras.

– **Billetes de banco:** uno de los sistemas para dificultar las falsificaciones suele ser el empleo de un papel que contiene pequeñas fibras fluorescentes de distintos colores. Los billetes españoles contienen estas fibras.

– Materiales orgánicos: la piel y las uñas a menudo presentan manchas fluorescentes. La fluorescencia se usa para identificar la presencia de ciertos hongos en la piel.

– Bebidas: la tónica contiene una sustancia de fluorescencia azulada, la quinina. Un vaso con tónica tiene un color azul característico bajo la luz UV. Los asiduos de las discotecas lo sabrán de sobra, los demás podrán comprobarlo en el laboratorio.

– La clorofila presenta una fluorescencia roja que, bajo la luz UV, le da un aspecto parecido a la sangre. Un sistema muy simple para observarla consiste en triturar unas hojas bien verdes en un mortero, con un poco de acetato de etilo, hasta que el líquido tenga un color verde intenso. Se vierte (no hace falta filtrar) en una cápsula de Petri y se observa bajo la luz UV.

– La fluoresceína es la reina de las sustancias fluorescentes; aún en trazas sus disoluciones presentan fluorescencia amarilla. Se ha empleado, entre otras cosas, para estudiar cursos de agua subterránea. Para ello, se echan unos sacos de fluoresceína en el sumidero donde el agua desaparece y se observan las posibles salidas, para detectar aquellas en que el agua aparece amarilla. Normalmente se vende su sal sódica. Se disuelve una pequeña cantidad en alcohol y se diluye con agua. La fluorescencia se presenta en la disolución neutra o alcalina.

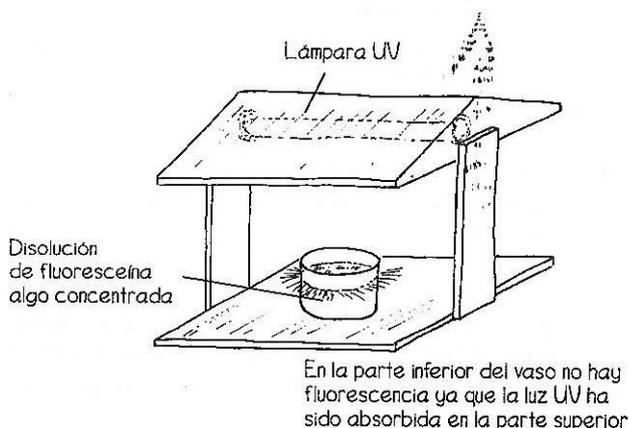
b) Muestras fosforescentes

– Algunos minerales, por ejemplo algunos tipos de calcita y aragonito, presentan fosforescencia amarilla. El mineral se irradia, se saca de la luz UV y emite una luz amarillenta que disminuye rápidamente, como si se «apagara» gradualmente.

– Las mejores muestras fosforescentes son las de productos industriales usados para señalización nocturna o en caso de apagón. Normalmente su color es amarillo. Puede comprar un letrero de señalización en la tienda apropiada y usarlo. Es posible comprar pintura fosforescente (suele ser algo cara) así como tiras fosforescentes. Incluso hay libros fosforescentes que se irradian con la luz del sol o de una lámpara UV y se leen a oscuras. El fenómeno suele impresionar mucho a los alumnos. Es efectivo tener este material guardado a oscuras de forma que la primera vez que lo muestre no emita luz. Póngalo debajo de la lámpara UV con algunos dedos encima. Se observará como el color del material «sube» debido a la excitación gradual de sus átomos (normalmente se trata de sulfuros de zinc o metales alcalinotérreos, con trazas de otros elementos). Si lo saca de la luz ultravioleta emitirá luz, suficiente para leer un texto si acerca el material irradiado al papel, excepto en las zonas donde no se ha irradiado por tener los dedos encima. El color se irá apagando gradualmente debido a la relajación de los átomos excitados.

5.7.- Demostración. Simulación de la absorción de luz UV por la capa de ozono

La disminución de la capa de ozono hace que la luz UV emitida por el Sol llegue a la superficie de la Tierra donde puede provocar alteraciones en los seres vivos. El efecto sobre las cosechas y en el ecosistema puede ser incalculable. El tema tiene una actualidad absoluta y esta disminución es tan notable en algunos países del hemisferio Sur, como Nueva Zelanda, que aquellas personas que se exponen al sol deben protegerse con sombreros y cremas. La absorción que el ozono realiza juega un papel fundamental en la presencia de seres vivos en la superficie de la Tierra. Vale la pena recordar el peligro y advertir a los aficionados a tomar el Sol las precauciones que deben adoptar.



La absorción de la luz ultravioleta puede simularse si se tiene un vaso lleno de disolución de fluoresceína, algo concentrada, debajo de un tubo UV. Se observará que la parte superior del vaso emite una fuerte fluorescencia amarilla, mientras que la parte inferior no la emite. Ello,

como puede deducirse fácilmente, es debido a que a la parte de abajo no llega luz UV ya que ha sido absorbida por las capas superiores.

La absorción de la luz UV por un cristal (y el efecto protector que ello supone, así como el hecho de que uno no se pone moreno si toma el Sol detrás de un cristal) puede observarse si, encima de un vaso con fluoresceína, se coloca un cristal. La fluorescencia disminuye claramente debido a la absorción de la luz UV. Este montaje simple puede emplearse para detectar aquellas sustancias o materiales que son absorbentes de la radiación UV.

5.8.- Demostración. Emisión de luz en las reacciones químicas. Quimioluminiscencia

La energía liberada en algunas reacciones químicas puede hacer que los productos de reacción se formen en estados excitados. La relajación

de los electrones a medida que se forman los productos provoca la emisión de luz y el fenómeno se denomina quimioluminiscencia. Este fenómeno es totalmente distinto a la emisión de luz que se produce en una reacción, cuando la temperatura aumenta tanto que se produce la incandescencia de partículas de las sustancias, como sucede al encender una cinta de magnesio. El interés de la quimioluminiscencia es que la emisión de la luz tiene lugar «en frío».

Este fenómeno se conoce en bacterias y en algunos insectos, especialmente luciérnagas, que liberan luz con un color y unas intermitencias características de cada especie (bioluminiscencia). Los compuestos responsables del fenómeno, las luciferinas, son distintas en cada tipo de organismo.

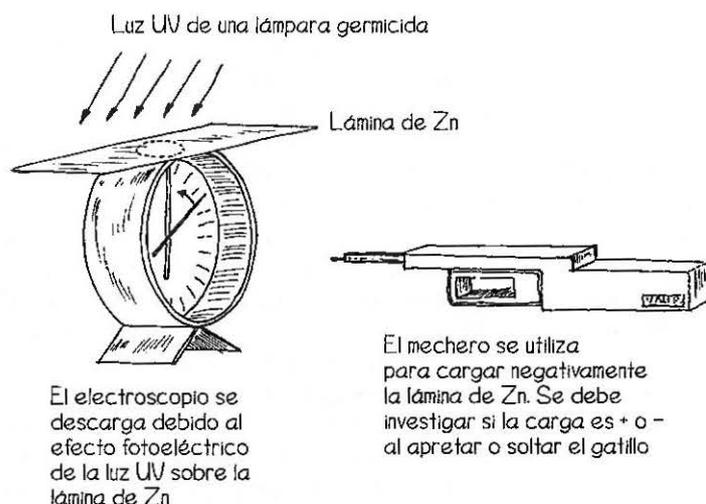
En el laboratorio es posible oxidar distintos tipos de sustancias, la más conocida es el luminol, para observar el fenómeno. El problema es que estas sustancias son bastante caras y su luminiscencia suele ser breve.

Una alternativa interesante es comprar sticks quimioluminiscentes. Consisten en un tubo de plástico transparente con una disolución de una sustancia luminiscente, que contiene otro tubo (frágil) con el oxidante. Basta doblar o apretar para que se rompa el tubo interior y se produzca la reacción (el rendimiento se mejora añadiendo a la mezcla de reacción una sustancia fluorescente y además se consiguen distintos colores). La luz que emiten dura horas. Podrá encontrar estos tubos en tiendas de artículos para alpinistas, expedicionarios o similares, (por ejemplo Coronel Tapioca), o algo más baratos, en algunas tiendas de luminotecnia e incluso en «Servicio Estación». Su coste es bastante más razonable que el de los compuestos luminiscentes puros. Seguramente también habrá tenido ocasión de observar estas reacciones luminiscentes en collares que se venden en fiestas nocturnas. En cualquier caso, cuando se acaba la reacción química se acaba la luz y no hay manera de «recargarlos».

Si es rico y puede comprar luminol (a pesar de ser caro, la ventaja es que se gasta muy poca cantidad) la luminiscencia se puede observar preparando una disolución A con 0.1 g de luminol (Merck o Fluka) en 10 cm³ de NaOH al 10% que se diluye a 1 litro, y una disolución B con 0.5 g de ferricianuro de potasio diluidos hasta 1 litro en agua a la que se añaden 15 cm³ de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) al 3%. La mezcla de partes iguales de estas disoluciones produce la luminiscencia, que se intensifica añadiendo disolución de NaOH y disminuye si se acidifica con disolución de HCl.

5.9.- Demostración. Efecto fotoeléctrico

Los experimentos en los cuales la luz interacciona con los átomos confirman que los portadores de luz (fotones) actúan de una forma individual, transportando cada uno una energía $E = h\nu$. De esta forma, si la frecuencia de la luz es baja, por muchos fotones que lleguen, la energía de cada interacción individual fotón-átomo puede ser insuficiente. Por otro lado, si cada fotón tiene una energía suficiente para producir algún tipo de acción, la «intensidad» del fenómeno será proporcional al número de fotones. Esto es válido tanto para el efecto fotoeléctrico, el más básico de estos fenómenos, como para procesos fotoquímicos en los cuales la luz, si tiene la frecuencia apropiada, es capaz de romper enlaces químicos o suministrar la energía de excitación para que algunas reacciones tengan lugar.



Uno de los sistemas más simples para observar el efecto fotoeléctrico consiste en disponer de una lámina de zinc, bien lijada (la superficie tiene que estar bien limpia), encima de un electroscopio. La lámina se carga negativamente y al irradiarla con luz UV de longitud de onda corta, procedente de un tubo germicida (254 nm, 8 w), el electroscopio indica que la chapa se descarga. El montaje de esta lámpara UV es análogo al de la lámpara de luz negra que se ha explicado en el apartado correspondiente a la fluorescencia, pero en este caso es esencial poner algún tipo de visera o caja que sirva de protección e impida que esta luz vaya a los ojos o la piel.

Para la experiencia pueden usarse los electroscopios de los equipos de electricidad, con una pequeña bandeja sobre la cual se coloca una chapa de zinc de unos 10x10 cm. Puede utilizar un mechero piezoeléctrico de cocina desmontado para cargar la lámina con carga negativa. Para ello, tenga en cuenta que al apretar se consigue carga de un signo y, al soltar, de signo opuesto. Deberá investigar en qué dirección obtiene la carga negativa y para ello puede usar el propio efecto fotoeléctrico. Si se tiene la chapa negativa, la irradiación con luz ultravioleta de longitud de onda corta provoca rápidamente su descarga por expulsión los electrones de la superficie del zinc. Esto no sucede si la chapa es positiva o si usa luz de longitud de onda más larga procedente de la lámpara UV de luz negra o de bombillas. Recuerde que el experimento sólo funciona bien si la superficie del metal está limpia y libre de óxido. Podrá comprobar que el electroscopio, sea cual sea su carga, se descarga si hay una llama cerca. Ello se debe a los iones positivos y electrones que se forman a la alta temperatura de la llama. Si pretende comprobar el efecto fotoeléctrico con la luz UV de una cinta de magnesio encendida o un arco eléctrico, puede suceder que sean los iones y no la luz UV los que descarguen el electroscopio.

6.- LA VISIÓN

6.1.- Imágenes estereoscópicas

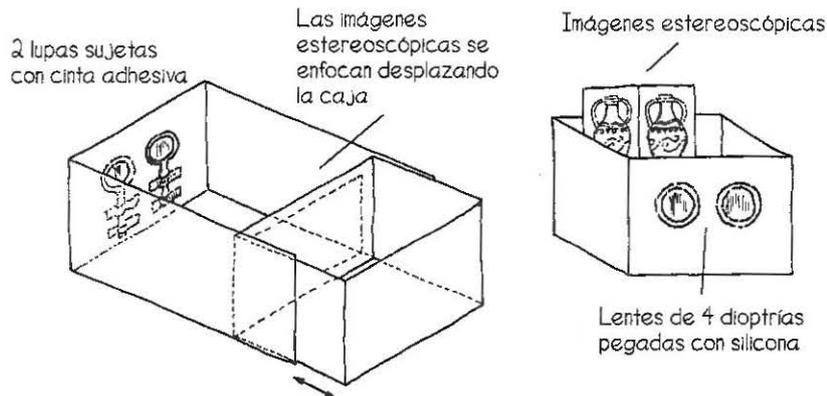
A lo largo de los últimos años el tema de la visión estereoscópica ha tenido un resurgimiento espectacular. Es imposible que los numerosos libros y posters sobre el tema le hayan pasado inadvertidos. La mayor parte de imágenes estereoscópicas de la «última generación», visibles sin ningún tipo de aparato, permiten visualizar objetos muy simples en relieve dentro de imágenes formadas por una granulado aparentemente al azar. El efecto es espectacular aunque la calidad de las imágenes suele ser pobre. A continuación, se describen experiencias con imágenes estereoscópicas «clásicas», es decir, parejas de imágenes dibujadas o fotografiadas desde dos puntos de vista algo separados, como si se vieran con cada uno de los ojos. Observadas con un estereoscopio o directamente (con la práctica suficiente) se tiene la percepción del relieve del objeto como si se tratara del objeto real. Tradicionalmente este sistema se empleó en la fotografía de paisajes y no son raras las colecciones de imágenes estereoscópicas de paisajes a principios de siglo. Si nos restringimos a un ámbito más científico, las imágenes estereoscópicas correspondientes a dos fotografías aéreas hechas desde puntos separados se emplean ampliamente en Cartografía. En Química suelen usarse para poder apreciar la estructura tridimensional de los compuestos, cristales, orbitales, etc. Debido a ello, la construcción y uso de estereoscopios simples permite incidir de un modo importante en el estudio de la estructura tridimensional de los compuestos químicos.

La estereoscopia se basa en la síntesis que el cerebro realiza con las imágenes que se reciben en cada ojo. Si una de las imágenes es defectuosa debido a algún problema de visión, es posible que sea difícil la percepción de volumen; por ello es conveniente que, en las experiencias que se describen a continuación, quien lleve gafas no se las quite. Aún así, es de esperar que incluso empleando un estereoscopio un cierto porcentaje de personas no consigan ver las imágenes. Sin estereoscopio el tema es más complicado, pero aquellos que tengan facilidad y estén entrenados con los nuevos estereogramas, podrán ver relieve de un modo parecido en las parejas estereoscópicas.

Naturalmente, deberá conseguir una colección de imágenes estereoscópicas. En la demostración 4.7. (Cine 3D utilizando luz polarizada), de la segunda parte, se indican dos posibles fuentes de estas imágenes.

6.2.- Experiencia. Construcción de un estereoscopio simple

Esta construcción no ofrece ninguna dificultad. Basta con buscar un par de cajas de zapatos y dos lupas baratitas apropiadas. Debido a esta simplicidad es conveniente plantear la construcción de varios estereoscopios pero, antes de embarcarse, compruebe que las lupas funcionan bien. Esencialmente, se trata de colocar las dos lupas y, enfrente, la pareja de dibujos de forma que cada ojo vea una sola imagen. El cerebro hará el resto. La dificultad está en que la mayor parte de lupas tiene una distancia focal algo corta, por ello, los dibujos deberán estar bastante cerca de las lupas y la periferia del dibujo puede verse desenfocada y deformada.

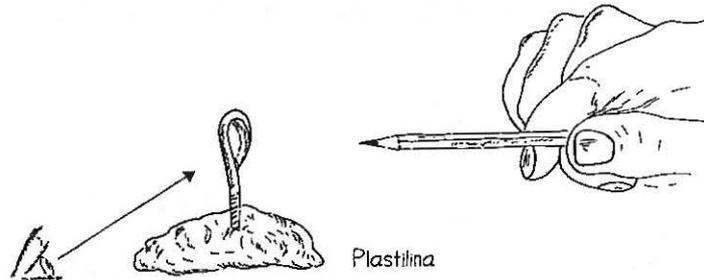


En el extremo de una caja de zapatos se hacen dos agujeros a una distancia similar a la de los ojos y se pegan las lupas con cinta adhesiva. Tal como muestra la figura, una segunda caja permite apoyar los dibujos y debe moverse hasta que su enfoque sea correcto y se perciba el relieve claramente. La iluminación de cada dibujo debe ser similar. Una vez en posición, la segunda caja puede pegarse con cinta adhesiva.

Si está dispuesto a invertir algo más de tiempo y dinero busque en una óptica lentes convergentes de 4 dioptrías. Su distancia focal es de 25 cm y la construcción será algo más fácil puesto que podrá emplear una sola caja de zapatos a lo ancho, tal como se muestra en la figura. Las dos lentes se pegan con una pistola de silicona a dos agujeros circulares algo menores, separados una distancia similar a la de los ojos. Basta con poner los dibujos al otro lado y se verá fácilmente el relieve.

6.3.- Experiencia. Visión 3D. Acertar a una anilla

La estimación de la distancia a un objeto es posible gracias a su tamaño aparente y a la visión en relieve que proporciona el uso de los dos ojos. Por ello, ciertas manipulaciones resultan más complicadas si solo se utiliza un ojo. Para comprobarlo, se clava un tornillo de gancho a un trozo de plastilina de modo que el plano del gancho coincida con la línea de visión. Mirando con los dos ojos es fácil acertar con un lápiz en el agujero del tornillo. Con un solo ojo resulta mucho más difícil.



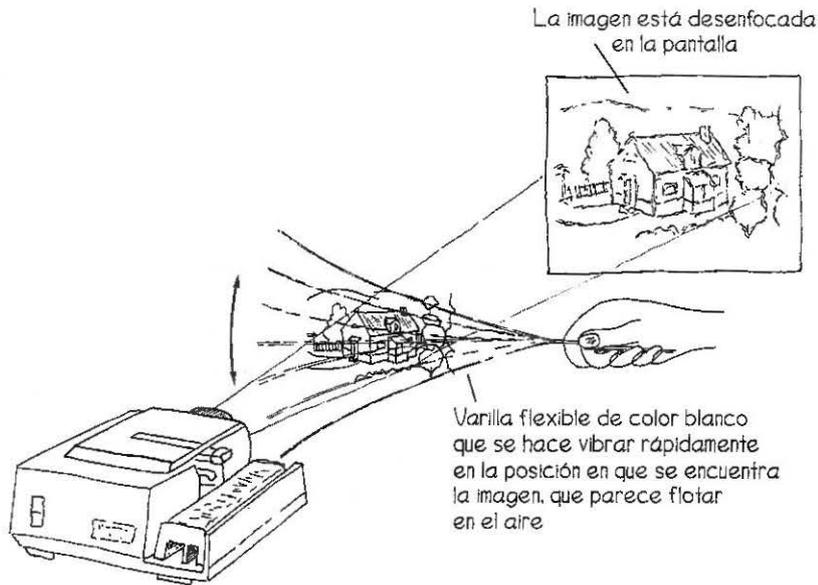
6.4.- Demostración. Persistencia de la visión. Una imagen en el aire

Es de sobra conocido el hecho de que una sucesión rápida de imágenes, tal como se proyectan en el cine o en la televisión, nos da la sensación de continuidad y no de imágenes individuales. Ello es debido a que el cerebro retiene las imágenes más o menos durante 1/30 de segundo; el tiempo exacto depende del brillo.

Esta interesante demostración se realiza proyectando una diapositiva de modo que la imagen esté enfocada en una posición «al aire» no demasiado cerca del proyector, a 1 metro aproximadamente. Interesa especialmente que en el fondo de proyección la imagen se vea fatal.

Deberá disponer de una varilla de plástico blanco muy flexible o algo parecido (funciona muy bien una varilla blanca de fibra de vidrio de 1 metro, que se puede comprar en «Servicio Estación»). Si la varilla se deja quieta en la posición en que la imagen está enfocada sólo se ve una estrechísima franja de la imagen. En cambio, si se hace oscilar muy rápidamente en el plano vertical en el que se encuentra la imagen, esta se ve prácticamente perfecta y completa, debido a la persistencia de la visión. El efecto es espectacular; se puede incluso leer, si la diapositiva tiene texto. Es posible distorsionar la imagen si mueve la varilla describiendo un cilindro o un cono.

Puede recordar a los alumnos un fenómeno familiar. Si estamos detrás de una persiana mirando al exterior, solo vemos estrechas franjas. Al movernos arriba y abajo podemos ver la imagen completa puesto que el cerebro retiene las sucesivas franjas de imágenes para construir la imagen completa.



6.5.- Experiencia Casera. Persistencia de la visión. El lápiz blando

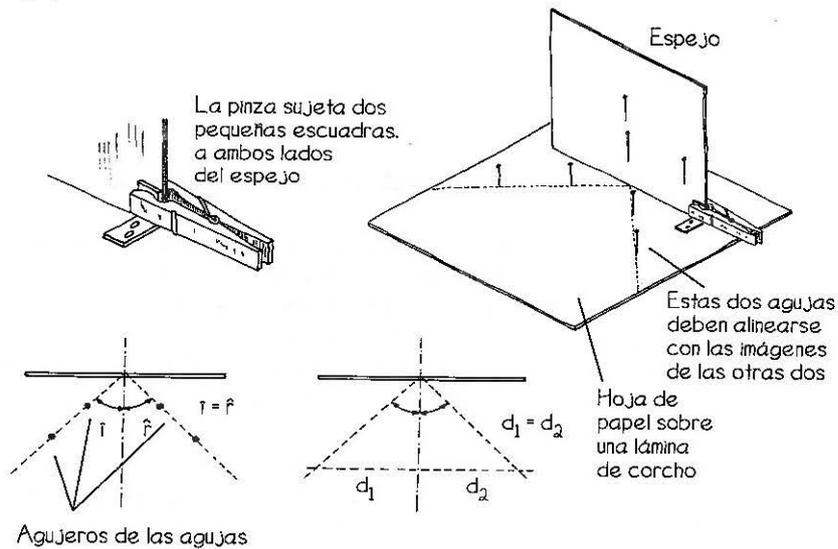
Otro juego interesante sobre la persistencia de la visión es el del «lápiz de goma». Es muy conocido entre los alumnos ociosos. Se trata de coger un lápiz entre dos dedos, algo flojo, más o menos a un tercio del extremo. El lápiz se mueve rápidamente, un centímetro arriba y abajo, sin apretarlo, dejando que gire algo entre los dedos. Parece como si el lápiz fuera blando y se doblara. Si el lápiz no gira, no observará nada especial.

Otro juego de este estilo, algo peor, consiste en tener dos monedas horizontales entre dos dedos. Si se mueven rápidamente a derecha e izquierda frotándolas con los dedos, parecerá que hay una tercera moneda. Si no se mueven bastante rápido no verá nada especial. Para ganar velocidad, una moneda se puede aguantar con un dedo de una mano, moviendo la otra con el dedo de la otra mano.

7.- LA LUZ ENCUENTRA UNA SUPERFICIE DE OTRO MEDIO. REFLEXIÓN EN SUPERFICIES PLANAS

7.1.- Experiencia. Espejos. Ley de la reflexión

Es necesario un espejo rectangular no demasiado pequeño, por ejemplo de 20x10 cm, que puede conseguir en un cristalero o en las tiendas del tipo «todo a 100». Tal como se indica en la figura, el espejo se puede mantener vertical usando dos pequeñas escuadras metálicas y una pinza de ropa. Debe colocarse sobre una hoja de papel que, a su vez, esté sobre una lámina de corcho (de las que se emplean para forrar paredes o suelos) o un trozo de cartón recortado de una caja grande. Con una cierta delicadeza y un lápiz fino se dibuja el borde del espejo en el papel. Se clavan dos agujas de modo que definan una dirección en un ángulo relativamente grande hacia la normal al espejo. Mirando al espejo, deben alinearse otras dos agujas con los reflejos de las dos primeras; para ello, se han de observar desde una altura cercana al nivel de la hoja de papel. Las cuatro agujas han de estar perfectamente alineadas; dos de ellas se verán directamente y las otras corresponderán a los reflejos del otro par de agujas.

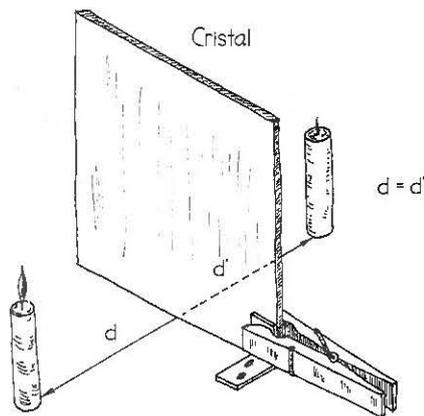


Una vez conseguida la alineación se saca el espejo. Con una regla y un lápiz se dibujan la dirección «incidente» y la «reflejada» definida por cada pareja de agujas. Si se ha hecho la experiencia con un cierto cuidado se observa que las líneas se cruzan, no en el plano delantero del espejo

jo sino unos milímetros más atrás, puesto que la superficie trasera es la que refleja. Con una escuadra (o el propio espejo) se traza la normal, perpendicular al espejo que pasa por el punto de corte de las dos líneas y con un transportador se miden el ángulo de incidencia y el de reflexión. Una alternativa al uso del transportador consiste en trazar la normal, como se ha indicado y una paralela al plano del espejo, como muestra la figura. Con la regla se miden las distancias d_1 y d_2 , que deben ser iguales; de este modo, los dos triángulos son iguales y también lo son los ángulos de incidencia y de reflexión.

7.2.- Experiencia. Ley de la reflexión con un cristal y dos velas. La distancia espejo-objeto es la misma que la distancia espejo-imagen

Esta experiencia, especialmente agradable y fácil de realizar, complementa la anterior. Se puede verificar rápidamente que la distancia del espejo al objeto es la misma que su distancia a la imagen. Para ello se necesita un cristal, de unas medidas similares a las del espejo de la experiencia anterior, dos escuadras y una pinza de ropa para mantener el cristal vertical. Son necesarias además dos velas aproximadamente iguales, cortas, de unos 5 cm de altura. La experiencia es tan simple (como las siguientes) que vale la pena que la hagan el mayor número posible de alumnos; por ello es conveniente tener una buena provisión de estos materiales.



Una de las velas se enciende y se coloca delante del cristal a menos de 20 cm. A oscuras o en penumbra, se mueve la otra vela (apagada) por detrás del cristal, observando desde el lado de la vela encendida, hasta que se superpone con la imagen de esta. Se tendrá la impresión de que ambas están encendidas. Debe observarse desde distintas posiciones para evitar efectos de paralaje. Una vez confundidas ambas velas, se mide su distancia al cristal, que resulta la misma.

7.3.- Juego. Demostración. La vela que no quema

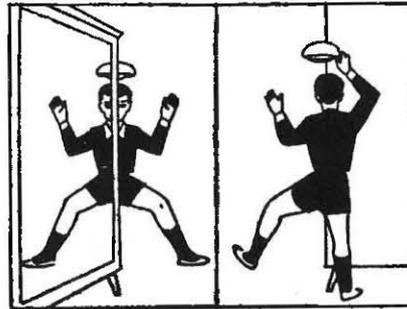
La experiencia anterior permite un pequeño juego, del estilo de muchos juegos de magia en los que se utiliza la reflexión. Debe hacerse en el laboratorio a oscuras. En la primera mesa se coloca el montaje con un cristal tan grande como sea posible y todos los alumnos en el lado opuesto. Se tiene una vela encendida en el lado en que se encuentran los alumnos y otra vela idéntica apagada, en la posición de la imagen, tal como se ha hecho en la experiencia anterior. Usted mismo, o algún compinche, acerca el dedo a la mecha de la vela apagada de detrás (que parece encendida desde el otro lado) como si se quemara. Si se queja y aparta el dedo o se lo friega haciendo algo de teatro, la ilusión de que el dedo se ha metido en la llama es total. Con un poco de práctica parecerá un profesional. Anime a sus alumnos a que hagan el juego en el laboratorio y, después, en casa. Otra posibilidad, más recargada, consiste en simular que la vela apagada quema bajo el agua, colocada dentro de un vaso.

7.4.- Otro juego basado en la reflexión

Con un espejo pequeño puede realizarse una experiencia entretenida parecida a la que suele encontrarse en los museos y casas de la Ciencia. Se tiene un espejo vertical enorme, uno esconde medio cuerpo detrás y asoma una pierna que mueve en el aire. Parece como si estuviera pedaleando suspendido en el aire. Naturalmente el efecto es debido a la propiedad que estamos estudiando: la distancia del espejo al objeto es la misma que la distancia a la imagen: el espejo crea simetría.

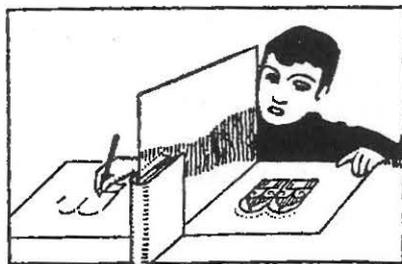
Podemos hacer este juego a escala real, si podemos conseguir un espejo grande de un armario viejo o, si no es así, un juego a escala reducida. En este último caso basta emplear un espejo pequeño, como el que se ha descrito en la experiencia 7.1. Se pone

el espejo entre los dedos de la mano (¡Cuidado con posibles cortes!), de este modo se consiguen manos simétricas de dos, cuatro... ocho dedos.



7.5.- Experiencia. Un aparato para copiar dibujos

La experiencia es muy simple e interesante puesto que en ella se demuestra también que la distancia del «espejo» al objeto es la misma que la distancia a la imagen.

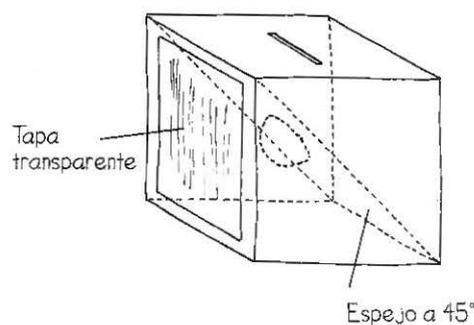


Se sujeta un cristal vertical, con dos escuadras y una pinza, dividiendo una hoja de papel. A la izquierda (los diestros) se dibuja algo con un rotulador negro (el dibujo debe estar bien contrastado). Mirando el dibujo desde la parte superior del lado izquierdo del cristal se ve su reflejo como si estuviera en la parte derecha del papel. Mirando siempre desde

de la izquierda se puede seguir con un rotulador el contorno de la imagen. El resultado es un dibujo simétrico.

7.6.- Demostración con un juguete: La hucha «mágica»

El juguete se encuentra en muchas tiendas de regalos «made in Taiwan». Se trata de una hucha consistente en una caja de plástico con una cara transparente. Si se mira el interior parece como si hubiera una bola brillante flotando. Si se tira una moneda por la ranura de la parte superior de la hucha, ni se ve entrar ni se ve dentro, como si se hubiera esfumado, pero se oye si se agita la hucha. El truco consiste en un espejo que divide la caja en un ángulo de 45 grados sobre el cual está pegada media bola, por ello parece que hay una bola entera flotando y, naturalmente, las monedas caen por la parte de atrás del espejo y por esto no se ven. La gran ventaja del juguetito es que se amortiza al primer día si se pasea un rato por la sala de profesores, especialmente si no deja que los colegas investiguen demasiado.



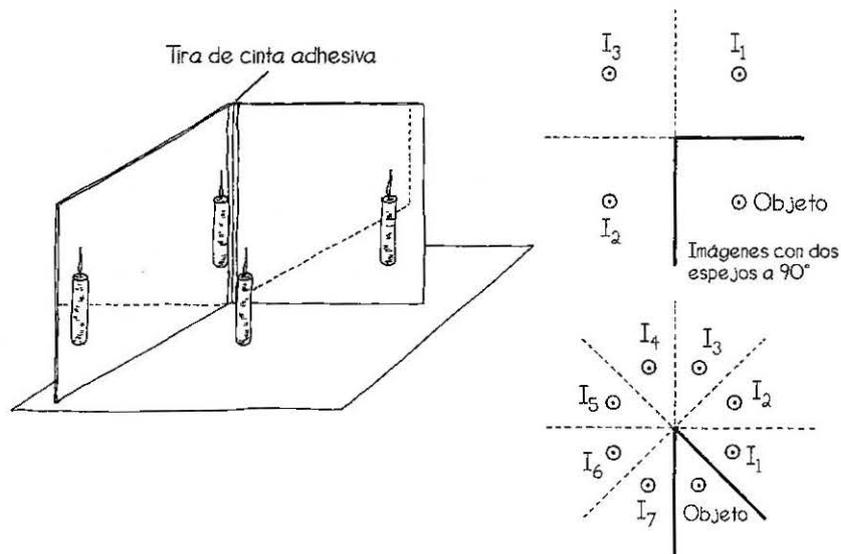
7.7.- Experiencias: Calidoscopios con dos espejos y una vela

Se trata de estudiar las propiedades esenciales de un calidoscopio utilizando dos espejos que formen un cierto ángulo y una vela entre ellos. El gran contraste que da la llama permite contar fácilmente el número de imágenes y comprobar como este número varía al modificar el ángulo entre los espejos.

Basta con buscar dos espejos iguales y pegarlos con un trozo de cinta adhesiva. De este modo, los espejos se mantienen en pie si forman un cierto ángulo. Se colocan sobre una hoja de papel con una vela encendida entre ellos.

Si se empieza con los espejos en ángulo recto puede estudiarse fácilmente el porqué se forman 3 imágenes, tal como muestra la figura. Cada espejo no solo refleja la vela, refleja además el otro espejo y la imagen de la vela en este. Con los espejos a 45 grados se forman 7 imágenes. El montaje es tan simple que se presta a ejercicios simples de geometría y fácilmente los alumnos pueden deducir la regla:

número total de objetos (objeto+imágenes) = $360/\text{ángulo entre los espejos}$, en grados.



Para ello, es conveniente que busquen los ángulos a los cuales aparecen 2,3,4,5,6... objetos (vela+imágenes), tabulen los resultados y hagan la representación gráfica. Basta con girar un espejo hasta que se obtiene el número de imágenes que se desea, se sigue el borde de los espejos con un lápiz y se mide el ángulo con un transportador. Si los espejos son

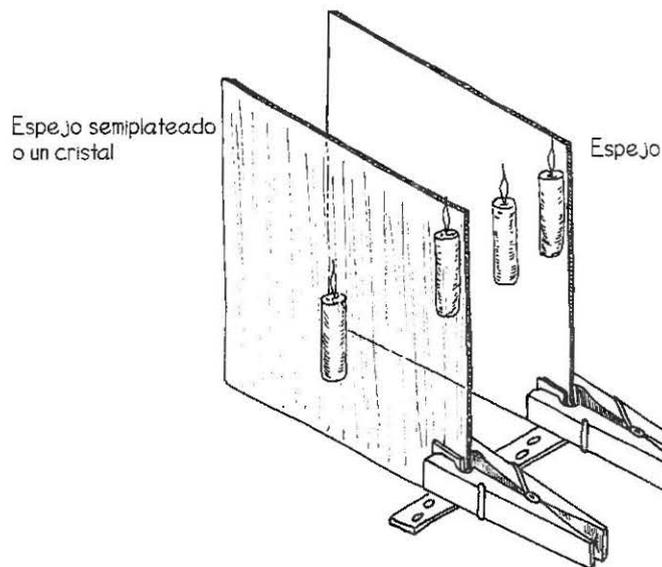
iguales resulta más rápido sacar la vela y utilizar un transportador directamente sobre el borde superior de los espejos.

Cuando el ángulo se hace muy pequeño el número de objetos crece enormemente. En el caso de los espejos paralelos, el número sería infinito, como se discute en la experiencia siguiente.

La experiencia resulta muy interesante por la diversidad de elementos didácticos que contiene (medidas simples, realización de una tabla y de una gráfica, extrapolación a partir de la gráfica, deducción de una ley, posibilidad de realizar investigaciones simples....), por ello es especialmente apropiada para alumnos del primer ciclo de ESO.

7.8.- Experiencia. Túnel de espejos

La experiencia consiste en la extrapolación de un calidoscopio con los espejos paralelos, en el cual se forman infinitas imágenes. Para ello debe usarse un espejo vertical mediante el sistema de las escuadras y la pinza, y otro espejo «semiplateado» paralelo al primero, colocado vertical del mismo modo.



El espejo «semiplateado» es sumamente fácil de construir. Basta con tener un cristal de una medida parecida a la del espejo y un papel adhesivo semiplateado. Este tipo de papel adhesivo (se adhiere con agua) puede comprarse en tiendas especializadas en plásticos, del tipo «Servicio Estación». Se pega, se recortan los bordes y ya está listo para su uso. Si

no encuentra este material semiplateado puede usar una simple lámina de vidrio. Funcionará pero se verá algo peor.

El túnel óptico se consigue enfrentando los dos espejos y colocando en medio una pequeña vela encendida. Mirando por delante del espejo semiplateado se ve un número enorme de imágenes correspondientes a los sucesivos reflejos de la vela, cada vez más tenues y lejanos, como si se tratara de un túnel.

7.9.– Juego. Dos caras en una

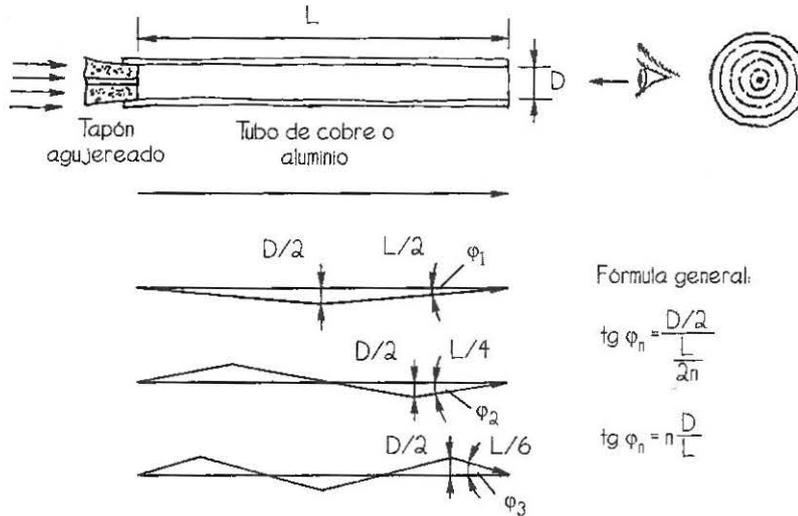
Este juego, que se encuentra en algunos museos de la ciencia, se puede hacer fácilmente en el laboratorio si se dispone de un regulador de potencia del tipo que se ha descrito en la experiencia 3.2 (Mezclas aditivas de colores), una lámpara tipo flexo y un cristal grande. Los alumnos de cualquier nivel se entusiasman con este juego.

El cristal debe colocarse vertical separando una mesa en dos mitades, sujeto con dos soportes. A cada lado y a la misma altura, se colocan los alumnos cuyas caras se van a superponer. A un lado se coloca una lámpara tipo flexo, conectada al regulador de potencia, para iluminar a uno de los alumnos. Para ver como se superponen las caras los demás deben colocarse detrás del que va a recibir la iluminación. En el laboratorio a oscuras y con la luz de la lámpara algo tenue, ambos se colocan simétricamente respecto al cristal. Es fácil si el de atrás se queda quieto y el que está iluminado comprueba la superposición de la imagen de su nariz y sus ojos con los de su compañero. La iluminación es crítica; la lámpara se debe mover y regular para conseguir el porcentaje correcto en ambos lados. Cuando funciona bien, la cara que se ve comparte características de los dos alumnos. Algunas combinaciones resultan divertidas.

7.10.– Experiencia. Reflexiones múltiples en un tubo

Este experimento no aporta nada nuevo al estudio de la ley de la reflexión respecto las experiencias anteriores, sin embargo, su sencillez lo hace especialmente estimulante. Se trata de buscar un tubo de cobre o de aluminio algo largo, más o menos de 1 metro, y de uno o dos centímetros de diámetro. El interior del tubo debe ser brillante (no necesita un tubo especial, simplemente uno que no sea demasiado viejo). Se tapa un extremo con un tapón agujereado y se mira por el otro extremo mientras se apunta hacia algún sitio bien iluminado. Se ven una serie de círculos concéntricos respecto al agujero central del tapón, cada vez más tenues a medida que crece su tamaño.

El origen de estos anillos, tal como se muestra en la figura, consiste en los posibles caminos que la luz puede seguir para llegar al ojo desde el agujero. La luz puede llegar directamente o hacerlo mediante una reflexión, dos, tres, etc, en la pared cilíndrica del tubo. En estos casos veremos la luz bajo ángulos distintos, sólo en algunas zonas del tubo. Es relativamente fácil, y un ejercicio de geometría simple, deducir los ángulos bajo los cuales se observan los círculos, a partir de las dimensiones del tubo.



7.11.- Demostración. Espejos de catadióptrico

Los espejos de catadióptrico no son espejos con una superficie que refleja la luz, sino láminas formadas por minúsculas cavidades esféricas o piramidales. Cuando la luz incide en una de estas láminas, sucesivas reflexiones la devuelven, aproximadamente, en sentido opuesto. Al contrario de los espejos, en los cuales el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, los catadióptricos reflejan la luz en el mismo sentido en que la reciben. Esta propiedad los hace especialmente útiles para señalización, en carreteras, en la parte trasera de bicicletas, en los vestidos de trabajadores o agentes de tráfico que tengan que ser bien visibles de noche. Si los faros de un coche iluminan un catadióptrico la luz se refleja de nuevo hacia el conductor. Si se tratara de un espejo normal la luz solo se reflejaría hacia el conductor al incidir perpendicularmente a la superficie. Una de sus aplicaciones más interesantes la constituye el hecho de que los

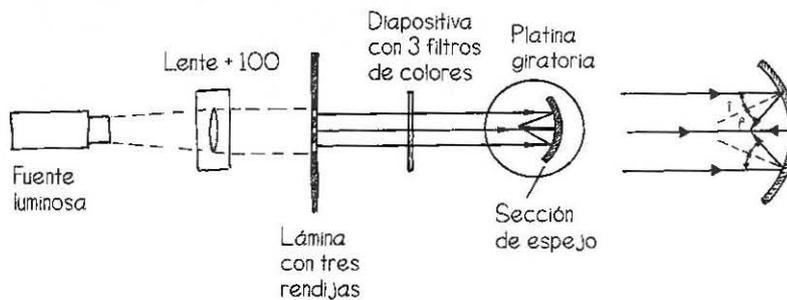
astronautas de la misión Apolo 14 depositaron uno de estos espejos reflectores en la Luna. Desde la Tierra se envía un haz láser potente hacia la Luna, en la zona en que se encuentra el reflector; en el trayecto el haz se ensancha y en la Luna cubre un círculo de unos 3 km de diámetro. Una parte del haz se refleja hacia la tierra y la medida exacta del tiempo empleado en el viaje de ida y vuelta (unos 2.5 s) permite conocer la distancia del trayecto con una precisión de algunos centímetros.

Los reflectores (normalmente de color rojo o amarillo) de las bicicletas, permiten experimentar este fenómeno en el laboratorio, usando como fuente de luz un proyector de diapositivas. Otra posibilidad es comprar, en alguna tienda especializada en señalización, tejido de este tipo, o láminas adhesivas. En cualquier caso, se hace incidir el haz del proyector sobre la lámina. Al girarla se comprueba que, independientemente del ángulo, una parte importante de la luz se refleja de nuevo hacia el proyector.

8.- REFLEXIÓN EN SUPERFICIES CURVADAS

8.1.- Experiencias. Trayectoria de los rayos de luz en los espejos curvados

Si un haz de rayos individuales y paralelos de luz incide en una superficie curva, el ángulo de reflexión será distinto en cada punto. En una superficie convexa los rayos de luz reflejados divergen; al contrario, en una superficie cóncava, los rayos reflejados convergen hacia el eje. Si la superficie tiene forma parabólica, los rayos convergen en el foco.



Las reflexiones de los rayos individuales y el comportamiento de los espejos curvados pueden estudiarse con las secciones de espejos de los equipos didácticos. Basta montar la lámpara de proyección; delante, a unos 10 cm, una lente convergente de $f +100$ y, delante de esta, una lámina con tres rendijas. La lente se coloca de forma que los tres rayos sean paralelos. Con una diapositiva de tres filtros de color en la trayectoria se consiguen tres rayos de colores distintos, que llegan a una sección de espejo curvado, cóncavo o convexo, colocada sobre una platina giratoria.

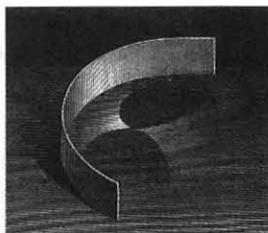
Los alumnos podrán comprobar:

– la convergencia o divergencia de los rayos, según el tipo de superficie.

– en un espejo cóncavo, si los rayos son paralelos al eje de simetría del espejo, sus reflexiones se cruzan en el foco; si no fueran paralelos, el foco queda difuso, ya que los rayos no se cruzan exactamente en un punto.

8.2.– Experiencia casera. Reflexiones en tazas. Cáusticas

Indique a los alumnos que antes de beberse una taza de leche observen, sobre la superficie del líquido, la reflexión de la luz en las paredes de la taza. La imagen característica que se forma se denomina cáustica. Si la superficie fuera parabólica, la luz se concentraría en un punto. Al tratarse de una superficie cilíndrica no hay un foco definido, y de aquí la forma característica del conjunto de reflexiones.



8.3.– Experiencia casera. Imágenes y aumento de los espejos cóncavos y convexos

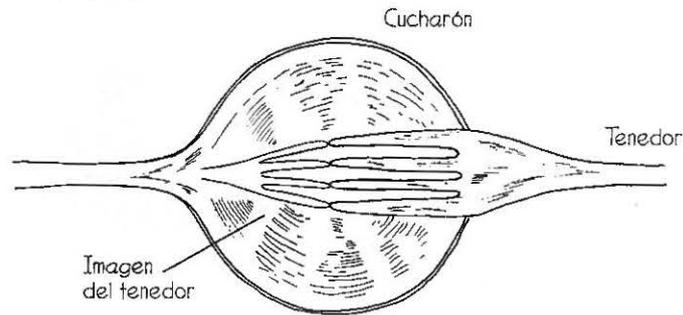
No es fácil conseguir espejos cóncavos o convexos buenos y baratos. En ocasiones podrá encontrar espejos de «tocador» en las tiendas del tipo «todo a 100» pero si quiere un buen espejo, le saldrá caro. Una alternativa eficaz consiste en usar cucharas y cucharones grandes y nuevos (los viejos están muy rayados debido al lavado). Aunque la curvatura de los cucharones es enorme sirve perfectamente para estudiar el comportamiento general de los espejos.

Si nos miramos por el lado convexo o acercamos el dedo a la superficie convexa, vemos la imagen derecha y menor, como si estuviera al otro lado de la superficie, de un modo parecido a un espejo normal. Al contrario, si usamos la parte cóncava veremos nuestra imagen invertida y menor. Si acercamos el dedo al cucharón comprobaremos como su tamaño aumenta hasta hacerse enorme y luego disminuye. El punto de transición está en el foco.

8.4.– Experiencia Casera. Distancia focal de un espejo cóncavo

Tanto si se usan cucharones como espejos de tocador la medida de la distancia focal puede hacerse mediante el método denominado «del punto autoconjugado». Para ello, basta con acercar un tenedor al cucharón, moviéndolo a lo largo del eje hasta que su imagen (real e invertida) sea una prolongación idéntica al tenedor real. Resulta relativamente fácil com-

parar las puntas del tenedor y su imagen de modo que tengan el mismo tamaño. Cuando esto sucede, las puntas del tenedor se encuentran a una distancia igual al radio de curvatura del cucharón. La distancia focal es la mitad de este valor.



8.5.- Demostración. Trayectoria de los rayos en un espejo, con un láser

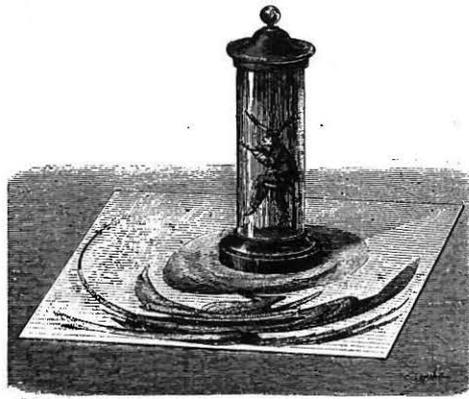
En la experiencia 12.9 «Observación de la difracción», se explica el modo como una red de difracción permite desdoblar el haz de un láser en múltiples rayos que salen divergentes de la red. Para nuestro propósito, la red que se emplee no debe tener demasiadas líneas, unas 100-200 líneas/mm o menos, tal como se indica en la experiencia 12.9. Los rayos en que se subdivide el haz (se puede conseguir un haz paralelo si se emplea una lente, colocada delante de la red) se hacen pasar por una caja transparente, de plástico, llena de humo y, dentro de la caja si su tamaño lo permite o fuera junto a la pared de plástico, se coloca un espejo cóncavo o convexo. Las trayectorias de los rayos reflejados, convergentes o divergentes, aparecen claramente definidas en el humo de la caja.

8.6.- Juego. Espejos cilíndricos

Todo el mundo sabe que los espejos curvados, como los de muchos parques de atracciones, originan imágenes deformadas, a menudo, muy divertidas. A nivel muy simple, puede usarse un espejo cilíndrico y una colección de imágenes, como las del libro: McLoughlin Bros. «The magic Mirror (An antique optical toy)». Dover Publications (0-486-23847-4) para transportar este fenómeno a la clase. El libro contiene una lámina metalizada flexible que se enrolla y pega con un trocito de cinta adhesiva para

formar un espejo cilíndrico. El cilindro se coloca encima de los dibujos, que se observan perfectamente reflejados en el espejo. Es fácil encontrar la lámina flexible que sirve como espejo en tiendas tipo «Servicio Estación».

En la cadena de tiendas «Imaginarium» se vende un juguete parecido. Se trata de un tubo de cartón con una secuencia de dibujos deformados, como si se tratara de un cuento. El tubo se pasa por el eje de un espejo cóncavo y las imágenes se ven reflejadas en el espejo. Puede comprar este juguete si quiere disponer de un espejo cóncavo.



9.- REFRACCIÓN EN SUPERFICIES PLANAS

.....«el cofre dejó escapar un aliento glacial. Dentro sólo había un enorme bloque transparente, con infinitas agujas internas en las cuales se despedazaba en estrellas de colores la claridad del crepúsculo...

José Arcadio Buendía se atrevió a murmurar:

– Es el diamante más grande del mundo

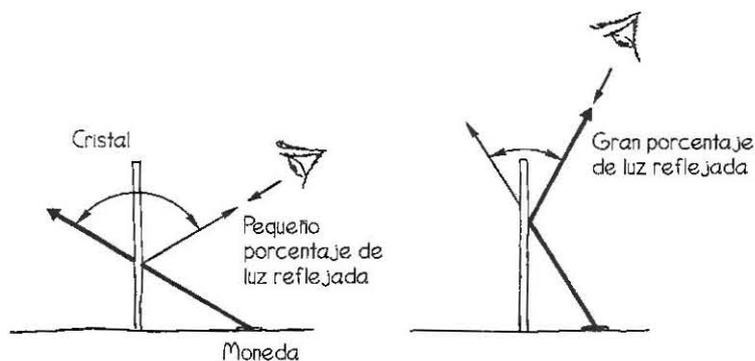
No, corrigió el gitano. Es hielo»

Gabriel García Márquez en «Cien años de soledad»

9.1.- Experiencia. Porcentaje de luz reflejada y refractada

Cuando la luz llega a una superficie transparente una parte se refleja y el resto se refracta penetrando en el nuevo medio. En general, la luz que penetra en el nuevo medio lo hace cambiando su dirección de propagación, a no ser que incida perpendicularmente.

En esta experiencia se comprueba que los porcentajes correspondientes a la reflexión y refracción de la luz en la superficie de un cristal dependen del ángulo de incidencia. Cuanto mayor es el ángulo mayor es el porcentaje de luz reflejada.



Para ello basta con disponer de un cristal vertical, mediante dos escuadras y una pinza. El cristal se coloca sobre una hoja de papel, con una moneda a unos pocos centímetros. El reflejo es intenso si se observa desde una posición cercana a la vertical del cristal. Al contrario, si nos movemos hacia el plano del papel el reflejo es cada vez más tenue. Tal como muestra la figura, el porcentaje de luz reflejada es mayor cuanto mayor es el ángulo de incidencia. El resto de la luz debe refractarse, por ello, la luz penetra en el cristal con mayor facilidad cuanto menor es este ángulo.

9.2.- Experimento casero. Observación de la refracción con una moneda dentro del agua

En esta experiencia, muy conocida, se demuestra que la luz se desvía al pasar de un medio a otro. En particular, la luz que procede del interior del agua se separa de la normal al salir al aire.

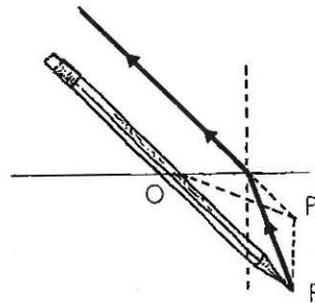


Se coloca una moneda dentro de un recipiente que no sea transparente. Nos movemos gradualmente hasta una posición en la cual no veamos la moneda. Sin movernos, un compañero va añadiendo agua al recipiente (¡sin mover la moneda!). A

medida que sube el nivel del agua vemos como la moneda aparece gradualmente. La figura muestra la situación. Naturalmente, la moneda no emite luz, simplemente refleja en todas direcciones la luz del ambiente.

9.3.- Experimento casero. Observación de la refracción con un lápiz sumergido en agua

A partir del resultado de la experiencia anterior, podemos justificar porqué un lápiz introducido oblicuamente en un recipiente con agua parece que esté doblado hacia arriba.



La imagen del extremo del lápiz P parece estar más arriba, en P', como si el lápiz se hubiera doblado de O a P'

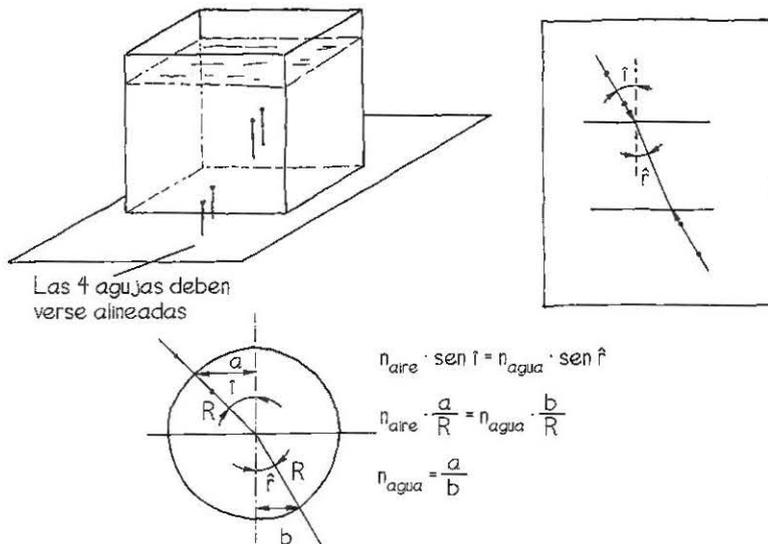
Naturalmente, debemos hacer primero el experimento y comprobar que, efectivamente, el lápiz parece doblarse hacia arriba. Simplemente

se llena un recipiente algo ancho con agua y se sumerge un lápiz oblicuamente. Si el lápiz se sumerge vertical no se ve nada especial.

La explicación es simple, únicamente hemos de considerar la trayectoria de la luz que sale (reflejada del ambiente) del extremo sumergido del lápiz. Esta luz se separará de la normal al salir del agua. Nos parecerá que la luz procede de un punto situado más arriba de su posición real. Este razonamiento, aplicado a todos los puntos del trozo sumergido, nos justifica que el lápiz parezca doblado hacia arriba.

9.4.- Experiencia. Observación de la refracción. Medida del índice de refracción del agua con una caja y agujas

Un método muy simple y eficaz para medir el índice de refracción del agua y de otros líquidos consiste en utilizar agujas para definir líneas de visión, de un modo parecido a como se ha descrito en el experimento 7.1 de la segunda parte (Espejos. Ley de la reflexión). En este caso, se coloca una caja de plástico (del tipo de las cajas de bombones, con caras paralelas, cuanto más grande mejor) llena de agua, encima de una hoja de papel que, a su vez, está sobre una lámina de corcho o de cartón algo grueso.



Con un lápiz se marcan las líneas que definen las caras de la caja y se clavan dos agujas que definan un ángulo relativamente grande con una cara. Se observan las agujas desde el otro lado, a través del agua, y se clavan dos agujas más, cuidadosamente alineadas con las primeras. Se saca la caja y se dibujan los dos rayos; se traza la recta de unión y

se miden los ángulos con un transportador. Aplicando la ley de Snell: $n_{\text{aire}} \times \text{sen } i = n_{\text{agua}} \times \text{sen } r$, se considera el índice de refracción del aire igual a 1 y se calcula el índice de refracción del agua. En general, si los ángulos no son demasiado pequeños, se obtienen valores muy próximos al valor correcto (1.33). Otra posibilidad para calcular el índice de refracción se basa en la utilización de la geometría elemental, sin que tengan que calcularse funciones trigonométricas. Se traza una circunferencia con un compás y se miden los segmentos a y b , en vez de medir ángulos con el transportador. Puesto que $\text{sen } i = a/R$ y $\text{sen } r = b/R$, el índice de refracción del agua resulta ser a/b .

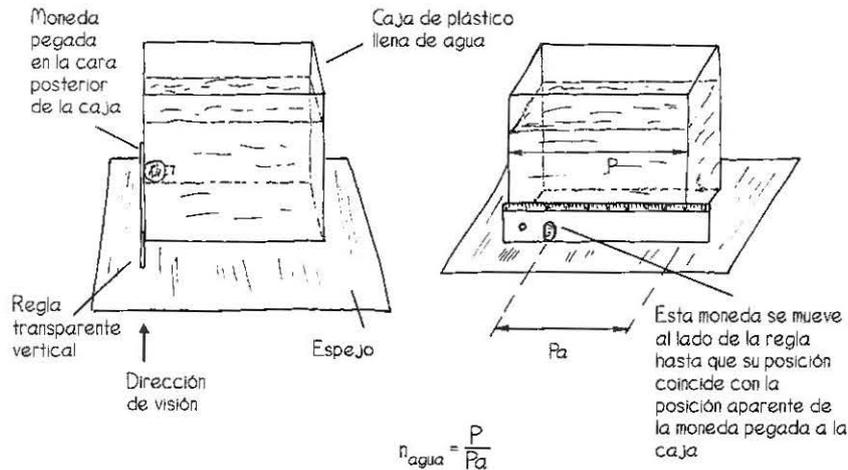
El experimento todavía se puede completar con otra observación interesante. La caja llena con agua y las agujas se colocan de nuevo en su posición inicial. Debajo de la caja habrá un trazo que una el rayo que entra en la caja y el rayo que sale, mostrando el camino de la «luz» al atravesar el agua. Si se ponen dos tornillos sobre este trazo y se mira el conjunto a través del agua se observará como las cuatro agujas y los dos tornillos están alineados, confirmando el camino recorrido por la luz dentro del agua.

Una variación de esta experiencia es la siguiente. Se traza una línea en el papel y se coloca la caja vacía encima, de modo que la línea sea oblicua respecto las caras de la caja. Se colocan cuatro agujas sobre esta línea, dos a cada lado. Al observarlas desde abajo, con la caja vacía en medio, se verán perfectamente alineadas pero al llenar la caja con agua, la alineación desaparece debido a la refracción y las dos parejas de agujas se ven claramente desplazadas.

9.5.– Experiencia. Medida de la profundidad aparente

Todos sabemos que una piscina, vista desde arriba, parece menos profunda de lo que realmente es. Se puede hacer un experimento simple para medir la profundidad aparente de un objeto sumergido utilizando una caja prismática de plástico transparente. Para ello, se pega una moneda con cinta adhesiva en la parte de debajo y atrás. La caja se pone encima de un espejo y, al lado, una regla. Se llena la caja con agua y desde abajo se miran la moneda y su reflejo en el espejo; al lado, por fuera de la caja, se desplaza otra moneda igual, de modo que ella misma y su imagen en el espejo parezcan prolongación de la moneda pegada detrás de la caja y su reflejo. El efecto del paralaje es importante, por lo tanto, se tiene de mirar desde abajo a nivel de la moneda, en la posición correcta, de modo que se vean simultáneamente las dos monedas y sus reflejos en el espejo. El desplazamiento de la moneda al lado de la regla nos permite medir la profundidad aparente a la que se encuentra la moneda del fondo de la caja, es decir, la posición de su imagen.

La fórmula para calcular la profundidad aparente es muy simple: $p_a = p/n$, (Feynman, vol. 1, Cap 27) donde p_a es la profundidad aparente, n el índice de refracción y p la profundidad real. De acuerdo con esta fórmula, la profundidad parece 1.33 veces menor cuando un objeto se sumerge en agua. El procedimiento puede emplearse para medir el índice de refracción de líquidos, con una precisión pobre, de un solo decimal. Puede ser útil para alumnos de los cursos más elementales con los cuales todavía no es posible utilizar la Ley de Snell.



Ejemplo

En una caja de 8 cm de lado llena de agua, la imagen se acerca 1.9 cm y la «profundidad aparente» resulta 6.1 cm (valor teórico 6.0 cm). Si se ponen dos cajas llenas de agua una a continuación de otra, con una «profundidad» de 16 cm de agua, y se repite el experimento, el desplazamiento de la moneda parece de 3.9 cm y la profundidad aparente es de 12.1 cm. (debería ser 12.0 cm, de acuerdo con la fórmula).

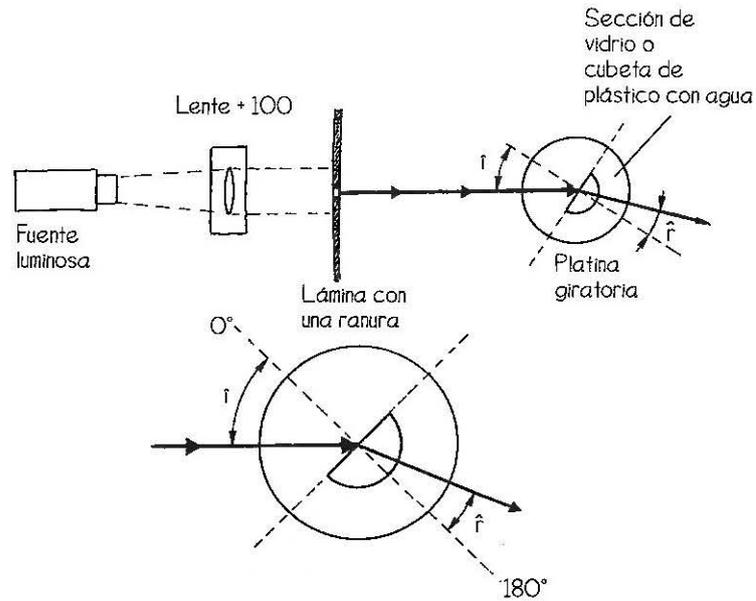
9.6.- Experiencia. Utilización de equipos didácticos para la observación de la refracción. Cálculo del índice de refracción

Los equipos didácticos suelen contener buenas experiencias para la observación y los cálculos relacionados con la refracción. La ventaja de estos montajes es que suelen parecerse bastante a los esquemas que usa el profesor y que aparecen en los libros de texto.

Las piezas necesarias son, además de la fuente de luz, una lente convergente, una rendija, un disco graduado, los soportes necesarios y, como

medio refractante, una pieza semicilíndrica de vidrio o una cubeta de plástico que se puede llenar con un líquido.

La pieza de vidrio o la «cubeta» con agua se colocan de manera que la cara plana coincida con la línea de 90° del disco graduado, de modo que la normal a la superficie corresponda al ángulo 0° . Se hace incidir un único rayo de luz sobre esta cara plana, en el centro del disco. Si se gira, resulta extremadamente simple tabular los valores del ángulo de refracción para distintos valores del de incidencia. A partir de los datos de la tabla, se puede comprobar que el cociente: $\text{sen}(i)/\text{sen}(r)$ tiene un valor constante (igual al índice de refracción del material o del líquido).



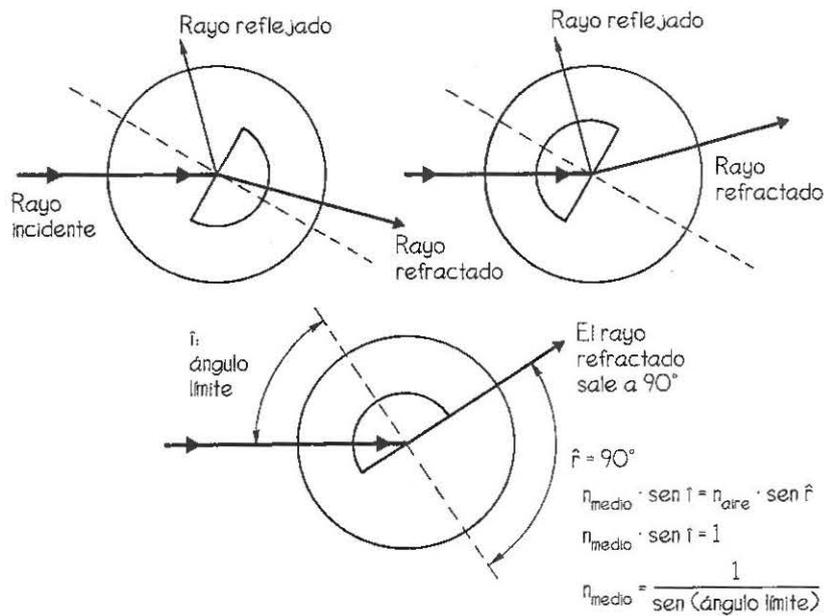
Puesto que el agua interviene en la mayor parte de situaciones en que se observa la refracción, es conveniente que se mida el índice de refracción de este líquido. El uso de otros líquidos, si no está justificado por alguna causa, puede ensuciar enormemente el material. Conviene evitar el sulfuro de carbono, a pesar de su índice de refracción especialmente alto, por su toxicidad y pestilencia.

El montaje permite comprobar fácilmente como, al incidir en una superficie, una parte de la luz se refleja y otra se transmite al nuevo medio por refracción. Cuanto mayor es el ángulo de incidencia mayor es el porcentaje de luz reflejada.

9.7.- Experiencia. Reflexión total y ángulo límite. Fracción de luz reflejada y refractada

El mismo montaje de la experiencia anterior permite observar este fenómeno y medir el ángulo límite con muchísima facilidad. Antes, se debe haber medido el índice de refracción del vidrio o del agua, tal como se ha indicado en la experiencia precedente.

Se trata simplemente de hacer que el rayo de luz incida en la cara curvada, en un cierto ángulo respecto la normal. Puesto que en la cara semicilíndrica el rayo es prolongación del radio, siempre entrará en el material sin desviarse. Al llegar a la cara plana, el rayo de luz se desviará alejándose de la normal. Variando el ángulo se podrá comprobar que el ángulo límite para los medios aire-agua es de unos 49° , tal como puede deducirse a partir de la Ley de Snell; a partir de este ángulo, toda la luz se refleja de nuevo hacia el interior.



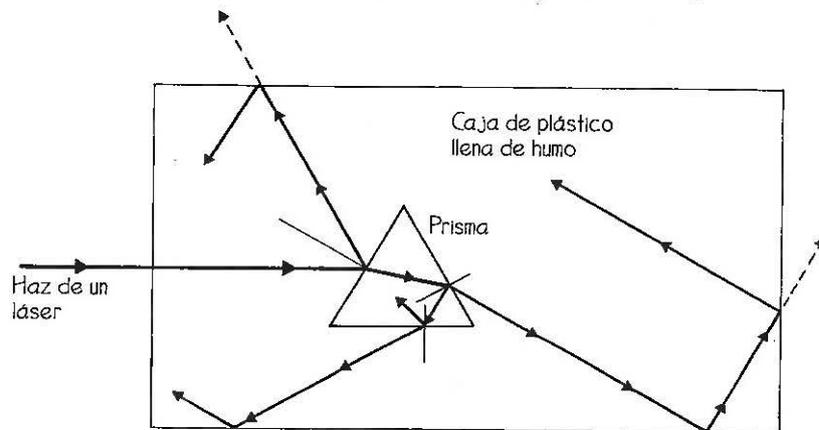
Vale la pena comprobar, si aún no se ha hecho, que el fenómeno de la reflexión total solo aparece cuando la luz pasa de un medio con índice de refracción alto a otro con índice más bajo. Si la luz incide en la cara plana del material siempre penetra en el interior y no hay reflexión total.

Es oportuno observar como en la reflexión total la luz se refleja completamente; en las otras situaciones un porcentaje se refleja y el resto se refracta.

9.8.- Demostración. Reflexión y refracción en un prisma, con un láser y una caja de humo

El uso de un láser permite estudiar las múltiples reflexiones y refracciones que tienen lugar cuando un haz de luz incide en un prisma. Esencialmente, la demostración permite comprobar que cada vez que cambia el medio, una parte de la luz se refracta y otra se refleja. También se comprueba que, bajo ciertos ángulos, dentro del prisma se verifica la reflexión total. Es posible seguir los desdoblamientos y las trayectorias de numerosos rayos originados a partir del haz inicial del láser.

Si se trabaja con un puntero láser, se sujeta horizontal con una pinza y un soporte, de modo que el haz incida en un prisma colocado dentro de una caja de plástico con una tapa transparente. Esta caja se puede construir muy fácilmente usando trozos de metacrilato de unos 2-3 mm de espesor, pegados con una pistola de silicona. Para poder visualizar los rayos luminosos debe llenarse con humo. Lo más simple es poner una colilla encendida dentro de la caja, sobre un trozo de chapa.



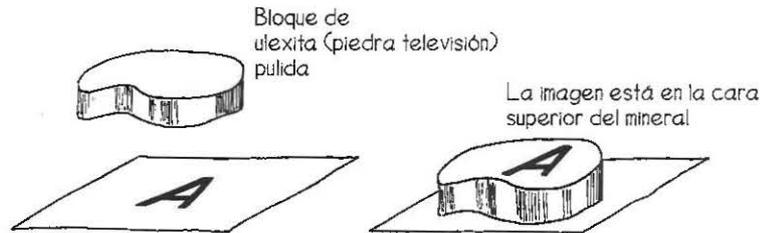
La demostración consiste, básicamente, en estudiar el comportamiento del haz inicial del láser: los sucesivos desdoblamientos en las distintas caras, los ángulos, las posibles reflexiones totales. Se puede girar el prisma para estudiar distintas posibilidades relacionadas con la incidencia inicial (perpendicular a la cara u oblicua).

9.9.- Demostración. Fibras ópticas

Una de las aplicaciones más interesantes de la reflexión total se halla en las fibras ópticas. La luz se introduce en el extremo de una varilla cilíndrica de un plástico delgado, transparente y flexible; en las curvas la

luz incide en un ángulo grande y se dan las condiciones de reflexión total, de modo que no puede escapar a través de las paredes. Si se dispone de haces ordenados de fibras se pueden transmitir imágenes, puesto que cada fibra conduce la luminosidad de un punto del objeto hasta el otro extremo. Si la luz se modula con algún tipo de señal, una fibra puede transportar la información correspondiente a la modulación, sin necesidad de aislar eléctricamente una fibra de otra y sin interferencias a lo largo del trayecto.

Algunos chismes domésticos, consistentes en unos plumeros de fibras con una bombilla debajo del extremo del haz, o unos juguetitos (que se encuentran en tiendas «todo a 100») consistentes en una especie de linterna del extremo de la cual sale un haz de fibras transparentes, pueden emplearse para mostrar las propiedades de las fibras ópticas.



Es especialmente interesante el uso de un mineral denominado Ulexita (o Piedra Televisión) que consiste en unos bloques de fibras paralelas muy compactas. Estos bloques pulidos en las superficies perpendiculares a las fibras tienen una curiosa propiedad. Si el mineral se coloca sobre un texto, la imagen se transmite al otro extremo con una nitidez extraordinaria. Ello es debido, por supuesto, a la estructura fibrosa del material, que se comporta como un haz de fibras ópticas. Este mineral se puede conseguir fácilmente a través de los suministradores de Ciencias Naturales o en tiendas especializadas en minerales para colecciones.

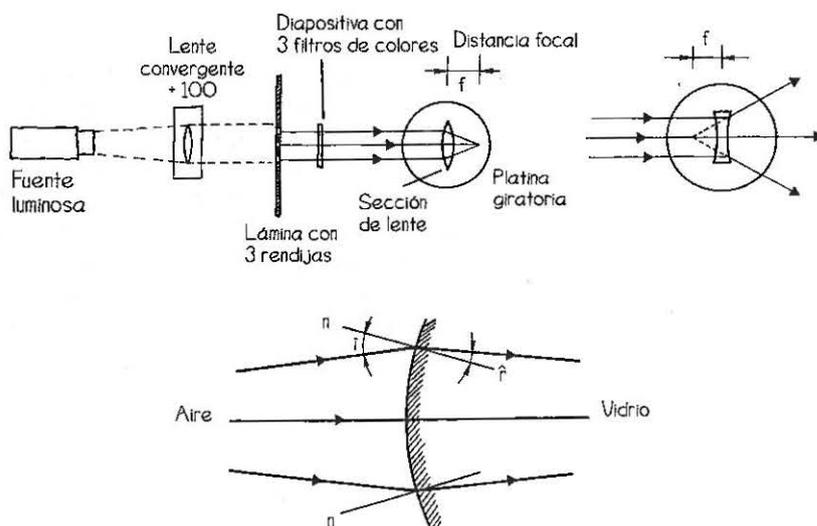
10.- REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA SUPERFICIE CURVA: LENTES

.... «En marzo volvieron los gitanos. Esta vez llevaban un catalejo y una lupa del tamaño de un tambor, que exhibieron como el último descubrimiento de los judíos de Amsterdam».....

Gabriel García Márquez en «Cien años de soledad»

10.1.- Experiencias. Lentes convergentes y divergentes. Utilización de los equipos didácticos

Los rayos luminosos que llegan paralelos a una superficie plana de un medio transparente inciden con el mismo ángulo y, por ello, se refractan y se mueven paralelamente dentro del medio. Al contrario, si un haz de rayos paralelos llega a una superficie curva el ángulo de incidencia varía en cada posición y el ángulo de refracción será distinto para cada rayo. Los rayos refractados convergen si la superficie del medio es convexa y divergen si se trata de una superficie cóncava.



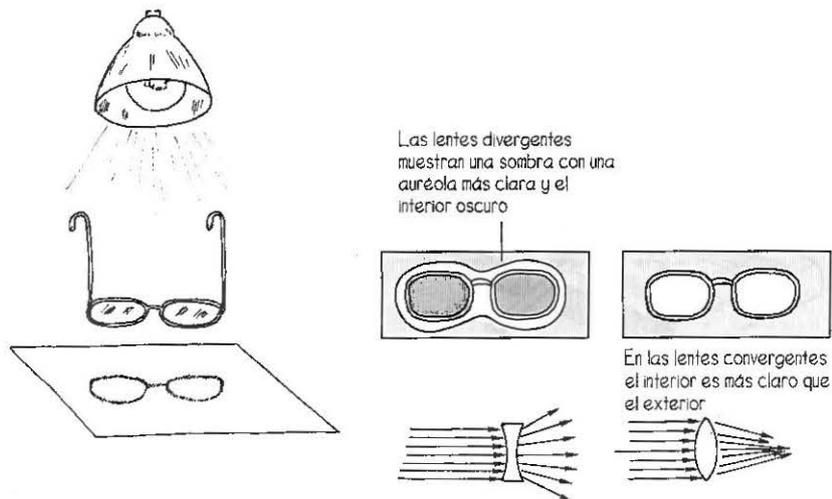
La observación de las trayectorias de los rayos resulta simple si se usan secciones planas de lentes en las que se hacen incidir tres rayos, como se indica en el diagrama representado en la figura. Basta con disponer de un proyector de los equipos didácticos; delante se coloca, a unos 10 cm, una lente de $f=+100$ que permite, ajustando su posición, ob-

tener un haz de luz paralelo. Si, además, se coloca una lámina con tres ranuras verticales y una diapositiva con tres filtros de colores, se definen tres rayos distintos que se harán incidir en las secciones de las lentes. Estas secciones, convergentes o divergentes, se colocan sobre una platina giratoria sobre la que se observa la convergencia o divergencia de los rayos.

La experiencia permite introducir los conceptos de foco y de distancia focal. Es particularmente interesante hacerlo en el caso de las lentes divergentes ya que para las convergentes, como se verá algo más adelante, hay otros métodos eficaces. En la experiencia 12.9 se indica la posibilidad de estudiar el comportamiento de una lente, a partir de un haz de rayos conseguido mediante un láser y una red de difracción.

10.2.- Experiencia. Demostración. Estudio de las gafas. ¿Miopía o Hipermetropía?

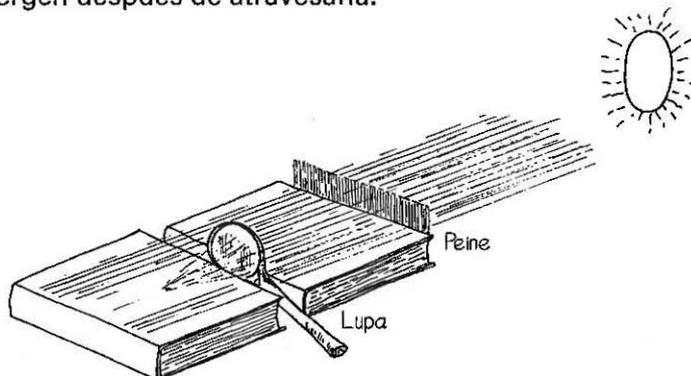
Las gafas son los instrumentos ópticos más próximos y familiares. De acuerdo con la experiencia anterior, la clasificación de las lentes de las gafas en convergentes o divergentes podría parecer algo simple. Y es así si las lentes son gruesas. Basta con pasar los dedos por ambos lados de la lente para detectar su curvatura. Sin embargo, el método no funciona cuando la lente tiene poca curvatura, tal como sucede en la mayoría de gafas. Mediante el procedimiento que se indica a continuación es fácil estudiar gafas de pequeña graduación e incluso comparar la graduación de cada ojo.



Para ello se utilizan las propiedades básicas asociadas a la convergencia o divergencia. La luz se concentra hacia el interior o diverge hacia el exterior. De este modo, basta con sostener las gafas horizontalmente, debajo de la bombilla de una lámpara (no un fluorescente) a un palmo de una hoja de papel. Debe observarse cuidadosamente la sombra de las gafas. Si la parte exterior de la sombra de los cristales aparece más clara, como si se tratara de una aureola, y el interior más oscuro, ello se debe a que se trata de una lente divergente (correspondiente a un miope) que ha enviado la luz hacia el exterior de la lente. Al contrario, si la parte interior, correspondiente a la sombra de los cristales, aparece más clara que la exterior, la lente es convergente y su propietario tiene hipermetropía. En el laboratorio, la experiencia también puede hacerse usando el haz de un proyector de diapositivas, colocando las gafas a un palmo o dos de la pantalla.

10.3.– Experiencia casera. Trayectoria de los rayos luminosos con un peine y una lupa

Se trata de un experimento casero para demostrar que una lupa hace converger los rayos luminosos en un punto y que permite medir su distancia focal. La figura muestra la simplicidad del montaje. Se sujeta un peine en el extremo de un libro mediante un par de tiras de cinta adhesiva. Si el plano del libro se orienta hacia el sol, las puntas del peine proyectan rayos luminosos en la superficie del libro. Basta interceptar la trayectoria de los rayos con una lente para observar como divergen o convergen después de atravesarla.

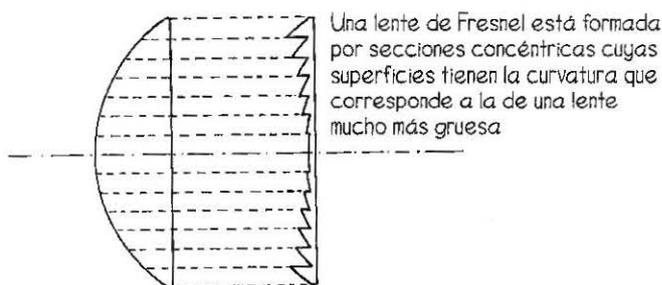


10.4.– Demostración. Lentes de Fresnel

Es complicado fabricar lentes de gran tamaño y, por ello, resultan caras. Cuando la calidad de la imagen no importa demasiado y basta con

que la lente concentre o separe los rayos de luz, se utilizan lentes de Fresnel, formadas por secciones concéntricas cuyas curvaturas corresponden a las que tendría una lente «maciza». Podemos ver estas lentes en los proyectores de transparencias, en las pantallas de algunos juegos de marceanos, etc. Hace algunos años que se fabrican en plástico planas como un disco, a un coste muy bajo, para diversas aplicaciones. A veces, pueden verse pegadas en el cristal trasero de un autobús: se trata de una lente divergente que permite al conductor tener una visión panorámica; otra aplicación consiste en usarlas, grandes como una hoja de papel, para leer textos como si se tratara de lupas gigantes.

Encontrar lentes de Fresnel de plástico puede resultar algo complicado y es una cuestión de suerte. Ocasionalmente se encuentran en las tiendas del tipo «todo a 100», a veces en tiendas especializadas en plásticos o en tiendas de luminotecnia. En cualquier caso, siempre pueden comprarse a los grandes suministradores de material óptico para enseñanza (Edmund Scientific) o intentarlo en suministradores de retroproyectores.



La demostración no da mucho de sí. En frío, uno muestra la lente resaltando que parece totalmente plana. Si nos colocamos la lente (convergente) a unos centímetros de la cara y miramos a los alumnos resulta evidente que la lámina funciona como una lupa. Podemos concentrar la luz del sol, como se ha indicado en la experiencia 1.1 de la primera parte del libro. Con ella se consiguen temperaturas muy elevadas y su uso puede resultar algo peligroso. No es conveniente que los alumnos las manipulen sin una supervisión cuidadosa.

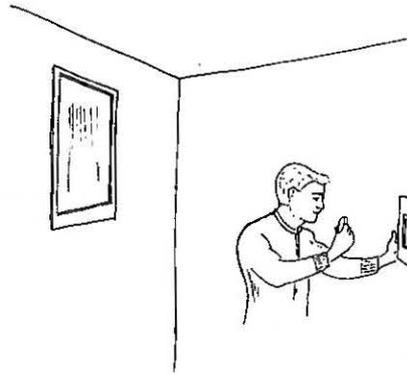
Con las lentes convergentes resulta fácil medir la distancia focal, en realidad es la distancia a la que se enciende el papel cuando se concentra la luz del sol (unos 30 cm). Si se tiene un espejo algo grande, puede emplearse para demostrar a los alumnos el método de las imágenes virtuales, tal como se indica en la experiencia 10.10. Las lentes de Fresnel divergentes resultan menos interesantes aunque son totalmente seguras.

10.5.– Experiencia. Distancia focal de una lente. Medida directa

La distancia focal es el parámetro más importante de una lente. Condiciona totalmente su comportamiento en un sistema óptico y, debido a ello, su medida tiene una importancia especial. En la experiencia sobre lentes convergentes y divergentes, al principio de esta sección, se ha descrito la medida de la distancia focal empleando secciones de lentes en un banco óptico. En esta experiencia se hará con medios mucho más simples y con lentes reales.

Basta con disponer de lentes convergentes de los equipos didácticos o de simples lupas, y de una hoja de papel o una libreta. El laboratorio debe estar en penumbra, con una puerta o una ventana abiertas a una «escena» exterior bien iluminada. Colocados en la zona de penumbra, se proyecta la escena acercando o alejando la lente al papel. Si suponemos que la distancia entre la escena y la lente es muy grande, la imagen formada en el papel se encuentra a la distancia focal. Si la lente y la «pantalla» se colocan sobre una mesa esta distancia se mide fácilmente con una regla. La nitidez de la imagen formada, especialmente si la distancia focal no es demasiado corta, y el hecho de que dicha imagen sea invertida sorprende a los alumnos. Vale la pena indicar que la imagen es casi tangible, algo real que se proyecta sobre el papel y que está en una posición determinada. Es una buena ocasión para definir las imágenes reales como imágenes proyectables. Más adelante, cuando se construyan sistemas ópticos de varias lentes este hecho resulta crucial: la imagen funciona como el objeto verdadero, es decir, está en una posición, a un lado u otro de la lente, tiene un tamaño, etc. La experiencia siguiente es un refuerzo importante en este sentido.

Puestos en ello, vale la pena tomar lentes divergentes y comprobar como no es posible proyectar una imagen del mismo modo que se hace con las lentes convergentes. Un método para medir la distancia focal de las lentes divergentes se ha explicado en una experiencia previa (10.1.– Lentes convergentes y divergentes).

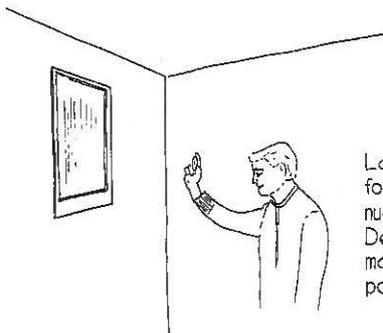


10.6.- Experiencia. Imágenes reales y virtuales. Posición de las imágenes formadas por lentes convergentes y divergentes

Una vez conocida la distancia focal de una lente convergente es posible estudiar, de un modo más amplio, la formación de imágenes y sus características, empleando medios sumamente sencillos.

En primer lugar debe reconocerse un hecho simple: vemos con nitidez aquellos objetos que están a una distancia mayor de unos 20 cm de los ojos. Efectivamente, si pretendemos leer un texto demasiado cerca de los ojos, lo vemos borroso. Haga que los alumnos comprueben esto y tengan la sensación de enfoque del ojo. Podemos acomodar el ojo para enfocar objetos en un margen amplio de distancias, pero el enfoque no es posible si la distancia es demasiado corta. Haga que los alumnos busquen su distancia mínima, que suele rondar los 20 cm.

A continuación proponga a los alumnos la formación de la imagen de una escena exterior, bien iluminada, empleando una lente convergente de los equipos o una lupa. Esta escena



La imagen exterior se forma entre la lente y nuestros ojos. Debemos estar unos 20 cm más allá de su posición para poderla ver.

se puede proyectar en un papel. En cualquier caso, haya o no papel, la imagen está allí, a una cierta distancia de la lente. Si miramos la escena a través de la lente únicamente podremos ver su imagen con nitidez si nos colocamos unos 20 cm más allá de la posición donde se forma la imagen. Cada alumno debe notar que la imagen se observa nítida (invertida y de menor tamaño) cuando está enfocando el ojo para observar algo que está «flotando» entre sus ojos y la lente. Si se acerca poco a poco a la lente dejará de ver la imagen con nitidez porque la tendrá demasiado cerca, igual que cuando trataba de leer un texto demasiado cercano.

Si repiten la experiencia con una lente divergente comprobarán que la imagen se ve nítida cualquiera que sea su posición respecto a la lente, a no ser que se la distancia focal sea muy corta y la imagen esté demasiado cerca de la lente, al otro lado. Se ve más pequeña y derecha pero nítida. Se trata de una imagen virtual que no se puede proyectar ya que está al mismo lado que la escena. Los alumnos que tengan bien definida la sensación de enfoque del ojo podrán hacer una estimación de la distancia a la que se encuentra la imagen, al otro lado de la lente.

Si los alumnos vuelven a las lentes convergentes pero, esta vez, observan un objeto que está demasiado cerca de la lente, a una distancia

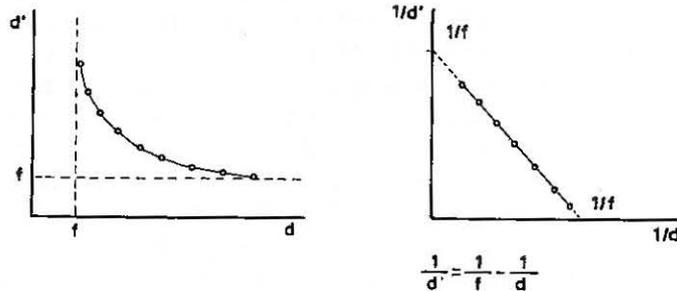
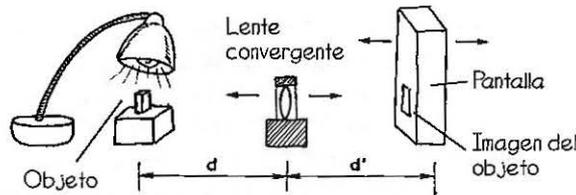
menor que la distancia focal, podrán comprobar como en esta ocasión la imagen se ve con nitidez, derecha y mayor, al mismo lado que el objeto. En este caso se trata del funcionamiento normal como lupa. La posición desde la cual miramos es indiferente, la imagen está al otro lado de la lente y no se puede proyectar. Se trata de una imagen virtual.

Naturalmente, en una lente convergente debe haber un punto de transición entre ambas situaciones y ello resulta fácil de comprobar. Si la distancia del objeto a la lente es menor que la focal, la imagen está al mismo lado que el objeto, derecha y mayor. En esta posición, si alejamos la lente del objeto la imagen crece hasta que cambia de lado. Deja de verse derecha y mayor en el lado del objeto y pasa al del observador, invertida y menor. Es conveniente comprobar, aunque sea de una forma poco rigurosa, que la transición ocurre a la distancia focal.

Puede resultar interesante complementar esta experiencia con la demostración 6.4 de la segunda parte: «Una imagen en el aire».

10.7.- Experiencia. Ecuación de una lente

Esta experiencia permite deducir la ecuación básica de las lentes: $1/d + 1/d' = 1/f$, en la cual d es la imagen del objeto a la lente, d' la distancia de la lente a la imagen y f su distancia focal. En cualquier caso, la experiencia es lo suficientemente simple como para que pueda plantearse como una pequeña investigación por grupos.



El montaje requiere una lámpara de tipo flexo que ilumine un pequeño objeto colocado sobre la mesa, una caja de cerillas o algo por el estilo,

dejando el resto tan a oscuras como sea posible. Mediante una lente convergente se proyecta la imagen enfocándola en una pantalla, por ejemplo el fondo blanco de una caja de zapatos. Este enfoque puede hacerse bien si el laboratorio y la pantalla están a oscuras, de aquí la importancia de una iluminación bien localizada sobre el objeto.

En esta situación, se trata de tabular la distancia de la lente al objeto y la distancia de la lente a la imagen, acercando gradualmente la lente hacia el objeto. Puede hacerse sobre la mesa, empleando una cinta métrica. Suponiendo una lente convergente de distancia focal +100, se puede empezar con el objeto a unos 60 cm de la lente y acercarlo hasta una distancia algo mayor que la focal, p.e. unos 12 cm. Si dispone de equipos didácticos seguramente tendrá bancos ópticos que tienen incorporada una regla. Si no son especialmente largos, olvídense de ellos y proponga la experiencia sobre la mesa.

Una vez los alumnos tengan la tabla de valores deben calcular sus inversos y hacer la representación gráfica $1/d'$ en función de $1/d$. Los puntos siguen una recta de pendiente teórica -1 que corta al eje de ordenadas y de abscisas en el punto $1/f$. A partir del punto de corte (extrapolado en la gráfica), puede deducirse el valor de la distancia focal. Este valor puede confirmarse fácilmente si se trata de una lente de los equipos didácticos y debería haberse medido previamente a esta experiencia, tal como ya se ha indicado, si se trata de una lupa o de otro tipo de lente convergente.

Es interesante realizar, además, la representación gráfica de d' respecto d . Lo más interesante es el significado de las asíntotas de la gráfica. Si d es grande d' tiende a la distancia focal f , y, simétricamente, si d se acerca a la distancia focal d' crece rápidamente.

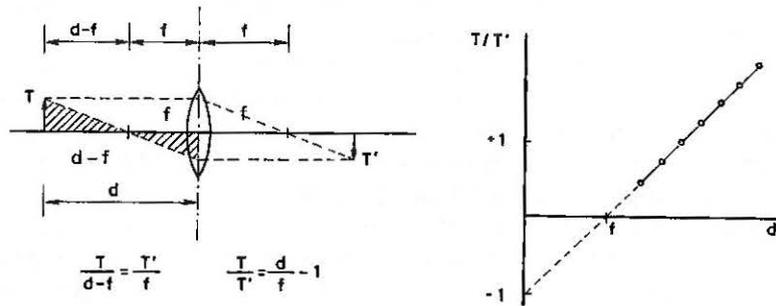
10.8.- Experiencia. Aumento de una lente convergente

La fórmula del aumento de una lente convergente es fácil de deducir teóricamente, tal como muestra la figura, mediante la aplicación de la semejanza de triángulos: $T/T' = d/f - 1$. T y T' son el tamaño del objeto y de la imagen, d la distancia de la lente al objeto y f la distancia focal.

Con el mismo montaje de la experiencia anterior, si el objeto es una caja de cerillas con letras impresas, fáciles de medir, se enfoca la imagen en una pantalla y se miden la distancia de la lente al objeto y el tamaño de la imagen. Se tabulan estos valores a medida que el objeto se acerca a la lente, desde unos 60 cm hasta algo más que la distancia focal. En cualquier caso, resulta evidente que la imagen crece a medida que la lente se acerca al objeto.

A partir de la tabla, se calcula la relación T/T' correspondiente a cada posición d y se hace la representación de T/T' en función de d . Resulta

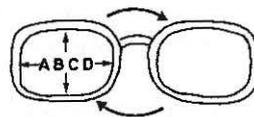
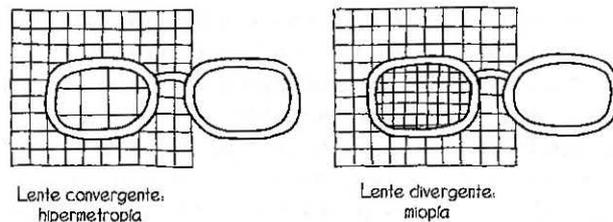
una recta cuya pendiente es $1/f$; su prolongación corta al eje de abscisas a la distancia $d=f$. En este punto la relación T/T' tendría un valor 0 debido a que T' , el tamaño de la imagen, sería infinito.



10.9.- Experiencia Casera. Estudio de las lentes de unas gafas a partir de su aumento. Detección del astigmatismo

El análisis de unas gafas se puede realizar mediante el método indicado en la experiencia 10.2. Una alternativa interesante para detectar el tipo de lente consiste en observar el aumento. Se hace del modo siguiente. Se mantienen las gafas a unos cm de un texto escrito. Si se alejan, levantándolas, y ve que el tamaño de las letras aumenta, se trata de una lente convergente (hipermetropía). Si el tamaño disminuye, la lente es divergente (miopía). Con un poco de entrenamiento, si se conoce la graduación de algunas gafas y han podido usarse como referencia, es bastante fácil detectar la graduación aproximada de las lentes de otras gafas.

La detección del astigmatismo puede hacerse del modo siguiente. Manteniendo las gafas a unos cm de un texto, se giran en los dos sentidos. Hay astigmatismo si las palabras se alargan y acortan deformando el texto.

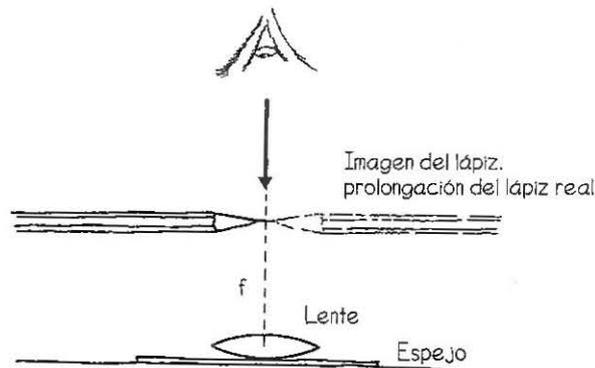


Al girar las gafas el texto se deforma. astigmatismo

10.10.– Experiencia. Medida de la distancia focal de una lente convergente. Método de las imágenes virtuales

En general, tal como se ha indicado en experiencias anteriores, resulta simple medir la distancia focal de una lente convergente, especialmente cuando esta distancia es corta. Otro método para medir la distancia focal es el de las imágenes virtuales.

Se coloca la lente encima de un espejo plano. Por encima, sobre el eje, se acerca horizontalmente un lápiz hasta que se observa que su imagen tiene el mismo tamaño, como si se tratara de su prolongación horizontal. Cuando esto sucede el lápiz se encuentra a la distancia focal de la lente.

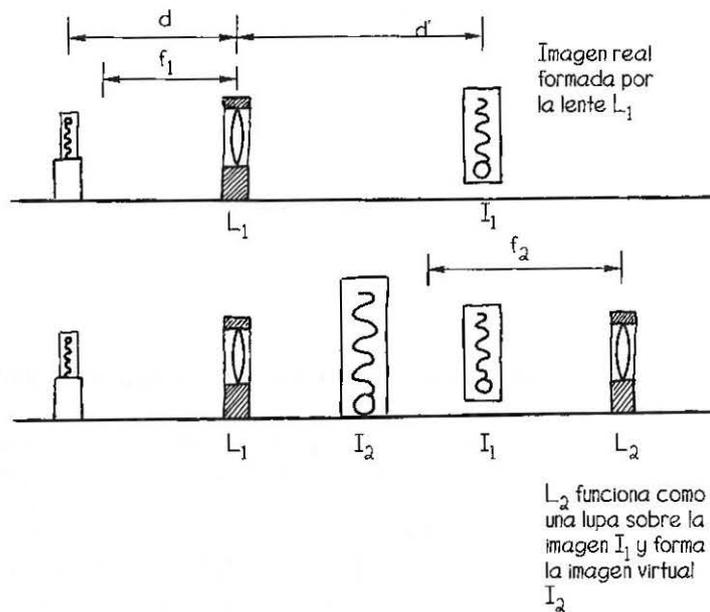


10.11.– Experiencia. Construcción de una cámara fotográfica simple

La nitidez de las imágenes formadas por las lentes permite construir una «cámara fotográfica» muy superior a la que se ha descrito en la experiencia 1.1 (Construcción de una caja negra). No sólo la imagen es más nítida sino que la cantidad de luz que entra es enormemente superior. Por todo ello, la construcción de esta cámara constituye una experiencia interesante, vaya a usarse o no para hacer fotografías. El montaje es casi el mismo que se ha indicado en la experiencia 1.1. Simplemente, en vez de poner una diapositiva con una cartulina agujereada, se hace un agujero circular en la caja y se pega, con cinta adhesiva, una lupa o una lente convergente de los equipos. Una vez colocada la lente, la imagen se forma en la pantalla tal como se ha indicado en la construcción de la caja oscura. Al contrario de una simple caja oscura, el montaje permite comprobar que la posición de la imagen depende de la distancia al objeto que se observa.

10.12.- Experiencia. Encadenamiento de imágenes. Simulación de un microscopio

La comprensión de sistemas ópticos con más de una lente es simple si se parte del objeto, se busca la imagen que forma la primera lente y se supone que esta imagen actúa de objeto para la segunda lente, y así sucesivamente. Imaginemos un microscopio. La lente más cercana al objeto (objetivo) se aproxima hasta una posición algo mayor que la distancia focal. La imagen I_1 formada es real, invertida, mucho mayor y está dentro del tubo del microscopio. La lente L_2 desde la cual se observa (ocular) funciona como una lupa, de modo que la imagen I_1 , a una distancia algo menor que la distancia focal de esta segunda lente, forma una imagen virtual I_2 , aún mayor. El ocular tiene aún otra misión: la imagen I_1 está demasiado cerca del ojo, el ocular hace que I_2 esté un poco más lejos para que pueda verse con nitidez.

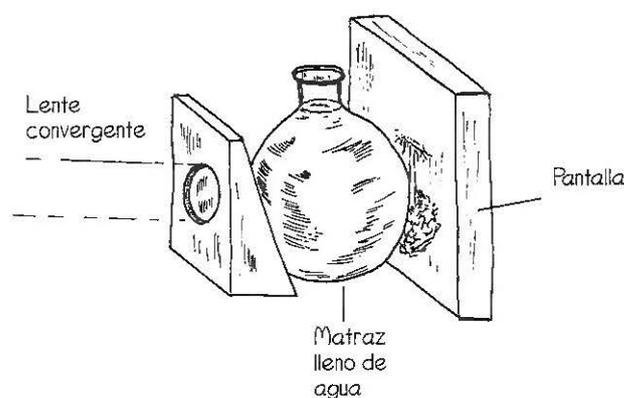


En un microscopio la distancia focal del objetivo es muy corta y, la del ocular, bastante más grande. Si puede conseguir lentes de distancia focal pequeña en algún tipo de soporte, será fácil simular un microscopio. Si no es así, los alumnos deberán conformarse con encadenar imágenes, tal como hacen el objetivo y el ocular, sin que el resultado final sea un gran aumento; pero el sistema es análogo al de un microscopio.

Se coloca alguna diapositiva con un dibujo en un soporte de los equipos, iluminada por detrás mediante una lámpara. Se acerca una lente de distancia focal corta (en los equipos: +50) hasta unos 6 cm y se busca con un papel la posición de la imagen. Unos centímetros más allá de esta posición se coloca otra lente de distancia focal algo más larga, por ejemplo +100, que funcionará como una lupa sobre la imagen de la primera lente.

10.13.- Experiencia. Simulación del funcionamiento del ojo. Gafas y lentes

El ojo es un sistema óptico que consiste básicamente, en una lente (cristalino) delante de un recipiente lleno de agua (globo ocular). Este sistema tiene como misión enfocar en la retina, al fondo del globo ocular, la imagen de un objeto que se encuentre a cualquier distancia. Dicho enfoque se consigue variando la curvatura del cristalino, traccionado o relajado mediante unos músculos. Si el cristalino no consigue curvarse lo suficiente (hipermetropía) deberemos colocar una lente convergente auxiliar delante del ojo. Al contrario, si la curvatura del cristalino es excesiva (miopía), debe compensarse poniendo delante una lente divergente.



La simulación del funcionamiento del ojo puede hacerse con un matraz esférico lleno de agua. La trayectoria de los rayos luminosos dentro del agua se destaca si se añaden unas gotas de disolución de fluoresceína en alcohol. Mediante el matraz, suspendido con un soporte y una pinza, se puede proyectar la imagen correspondiente a una ventana, sobre una pantalla hecha con una hoja de papel. Colocando lentes convergentes o divergentes al otro lado del matraz se comprueba que la imagen se enfoca en distintas posiciones. Por otra parte, si en vez de enfocar la imagen de la ventana se acerca o aleja una lámpara de tipo flexo, comproba-

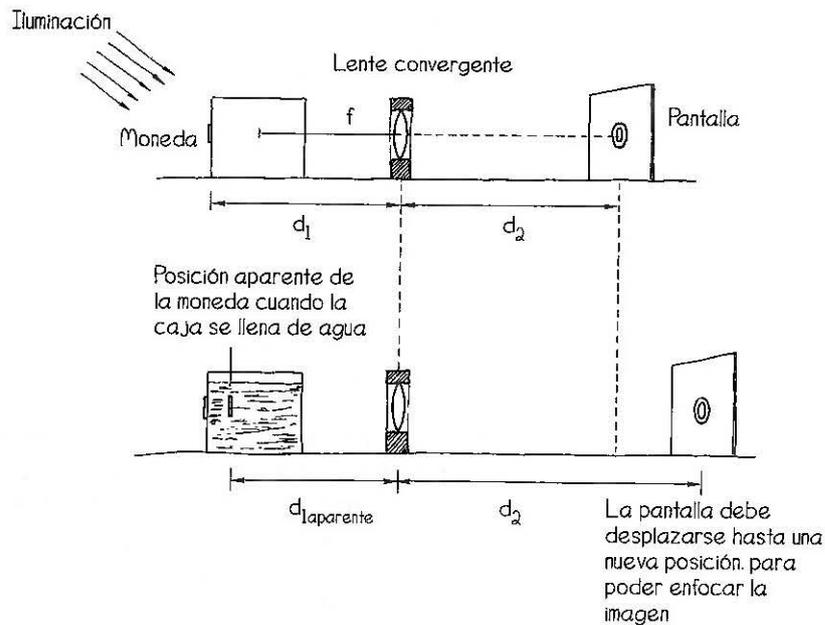
mos que la posición de la imagen varía al cambiar la distancia al objeto que queremos enfocar.

El ojo debe permitir enfocar imágenes de objetos que se encuentren a cualquier distancia sobre la superficie inmóvil de la retina. La solución es el ajuste de la curvatura de la lente (cristalino) que funciona como una lente de distancia focal variable. Cuando la curvatura conseguida es insuficiente debemos añadir lentes auxiliares para poder enfocar correctamente en la retina. Este es el papel de las gafas y las lentes de contacto.

Es posible comprar un «ojo» didáctico en el que se consigue el enfoque variando la curvatura del cristalino. Esto se logra mediante una lente de agua, encerrada por una membrana transparente y flexible, al variar la presión interior mediante una jeringa. Es muy interesante, aunque resulta bastante caro.

10.14.- Experiencia. Medida de la profundidad aparente mediante una lente

En el experimento se utiliza una lente para proyectar la imagen de un objeto. Si se coloca un cierto grosor de agua delante de este objeto cambiará su posición aparente y la imagen formada por la lente se desplazará. De este modo, la nueva posición de la imagen nos permitirá deducir la posición aparente del objeto. La experiencia es muy fácil de realizar si se ha estudiado la ecuación de una lente.



Se tiene una caja de plástico transparente, (por ejemplo una de base cuadrada de 8 cm de lado y 5 cm de altura). En la parte posterior se pega, con cinta adhesiva, una moneda que dé un buen contraste, por ejemplo una de 5 duros nueva, cuyo agujero queda bien contrastado cuando se proyecta. La moneda se ilumina desde atrás con una lámpara tipo flexo y se proyecta su imagen mediante una lente convergente (por ejemplo una de +100 mm de distancia focal) sobre una pantalla. La lente y la pantalla se pueden colocar directamente sobre la mesa. Se mide con un cierto cuidado la distancia de la moneda a la lente y la distancia de la lente a la pantalla en la cual se forma la imagen. A continuación se llena la caja con agua y ello provoca que la moneda se «acerque» a la lente. La imagen se forma en otro lugar y la distancia de la lente a la imagen se mide de nuevo. La ecuación de la lente permite calcular la posición (aparente) del objeto.

Ejemplo

En la tabla siguiente se indican tres medidas (las unidades son cm) usando una lente de distancia focal +100:

d1 moneda-lente	d2 lente-imagen (sin agua)	d2 lente-imagen (con agua)
17.5	21.2	25.5
16.5	22.6	28.2
14.5	28.3	43.3

Se utiliza la ecuación de la lente $1/d_1 + 1/d_2 = 1/f$, con los valores de las dos primeras columnas, en las tres situaciones en que no hay agua en la caja y se obtienen valores de $1/f$ de 0.1042, 0.1048 y 0.1042. De este modo se toma como medida de $1/f$ el valor de 0.1044. La distancia focal resulta de 95.8 mm.

Cuando se llena la caja con agua, la posición de la imagen cambia. Puesto que se conoce con exactitud la distancia focal, la utilización de la ecuación de la lente permite obtener las distancias «aparentes» entre la moneda y la lente a partir de las distancias entre la lente y la imagen en la situación en que la caja esta llena con agua (tercera columna de la tabla anterior). Se deducen los valores de d_1 que se muestran en la tabla siguiente:

d1(aparente) moneda-lente	«desplazamiento moneda»
15.4	2.1
14.4	2.1
12.3	2.2

De esta forma el desplazamiento de la imagen nos permite calcular la posición aparente de la moneda vista a través del agua. Este desplazamiento, hacia la lente, resulta de 2.1 cm en una «profundidad» total de 8 cm (medida de la caja). La profundidad aparente es 5.9 cm. Si se aplica la ecuación $p_a = p/n$ (profundidad aparente p_a , profundidad real p , n índice de refracción) se obtiene un valor del índice de refracción del agua de 1.36 (valor real 1.33).

11.– LA LUZ ENCUENTRA PEQUEÑAS PARTÍCULAS. DISPERSIÓN

La dispersión de la luz tiene lugar cuando atraviesa un medio en el cual encuentra pequeñas partículas distribuidas al azar. Este fenómeno aparece muchas veces en la vida diaria; el color azul del cielo o el rojizo de las puestas de sol son debidos a la dispersión provocada por las moléculas de nitrógeno y oxígeno del aire, el color blanco de las nubes o de la leche también se deben a este fenómeno. La luz de los faros de un coche se dispersa si hay niebla, la luz de un láser se dispersa en una atmósfera llena de humo, el Tippex dispersa la luz de modo que no vemos el texto que hay debajo.

11.1.– Demostración. Observación de la dispersión con un láser

En el laboratorio basta con espolvorear con el borrador en la trayectoria de un láser para que el haz aparezca claramente, como si estuviera formado por una gran cantidad de puntos brillantes, dispersores de la luz. Otra posibilidad es usar un spray pulverizador de agua (lejos del láser para no ensuciar la óptica) para ver como las pequeñas gotas dispersan el haz.

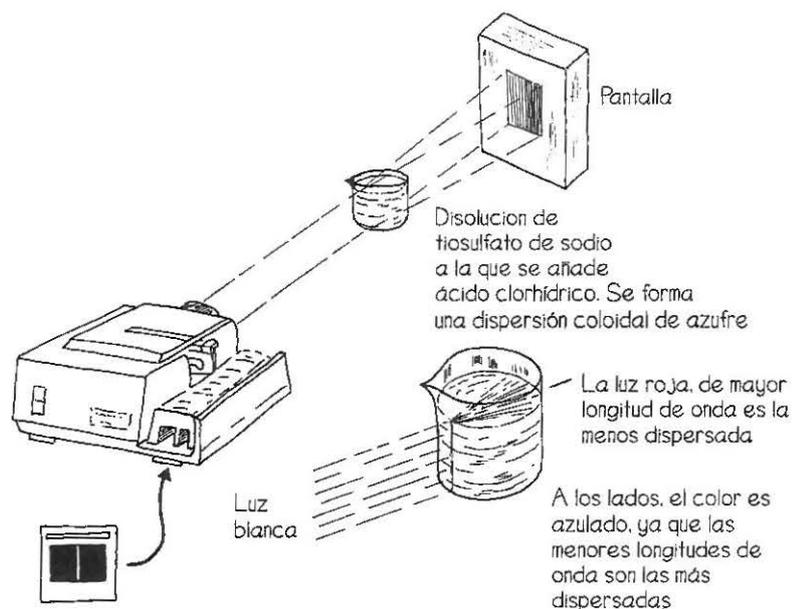
11.2.– Demostración. Colores de dispersión. Puesta de Sol artificial

La atmósfera dispersa preferentemente la luz de longitud de onda menor (azul); la luz de mayor longitud de onda (roja) la atraviesa más fácilmente. Ello es la causa de que la luz del cielo se vea azul, puesto que ha sido dispersada en ángulos grandes. A la puesta o salida del Sol los colores son rojizos ya que en el horizonte vemos la luz que prácticamente no se ha dispersado.

Un experimento fácil para simular los colores de la puesta de Sol y comprobar que, efectivamente, la dispersión depende de la longitud de onda, consiste en hacer que el haz de un proyector en el cual se ha colocado una diapositiva consistente en una ranura vertical, atraviese un líquido en el que crecen agregados cada vez mayores de átomos de azufre. El azufre se forma en la reacción entre el tiosulfato de sodio y el ácido clorhídrico. La luz que atraviesa el vaso, proyectada sobre una pantalla, se verá cada vez más rojiza. La luz desviada a los lados es mucho más blanquecina. El vaso, visto desde encima, muestra claramente la distribución de colores y la menor dispersión de la luz roja.

El líquido para observar el fenómeno consiste en una disolución de tiosulfato de sodio en agua (40 g/litro). Utilice un vaso de forma alta de

250 cm³ y añade 150 cm³ de disolución de tiosulfato y 10 cm³ de ácido clorhídrico de concentración 2M, agite bien, encienda el proyector y apague la luz del laboratorio. Brevemente, el líquido, que era transparente a la luz proyectada, empieza a dispersar una tenue luz blanquecina. Al cabo de unos momentos, la luz dispersada se incrementa notablemente y la luz que atraviesa el líquido se ve rojiza. En unos minutos se habrá completado el experimento. La reacción se puede acelerar o retardar si se aumenta o disminuye, respectivamente, la cantidad de disolución de ácido clorhídrico que se añade a la mezcla.



11.3.- Demostración. Experimento casero. Dispersión con hojas de papel

En el laboratorio a oscuras, encienda una bombilla en una lámpara tipo flexo dirigida a los alumnos, como si se tratara de un interrogatorio. Debe disponer de medio centenar de hojas de papel en blanco. Tome algunas para tapar bien la luz que sale de la bombilla. Aumente el grosor. La luz transmitida por el papel cada vez es más tenue y más roja, debido a la dispersión preferente de la luz azul.

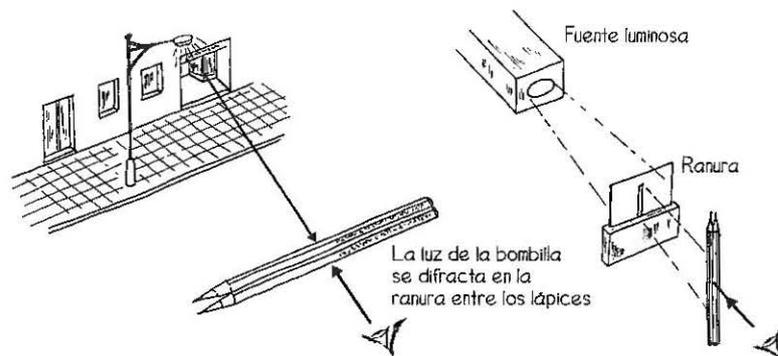
12.- DIFRACCIÓN E INTERFERENCIAS

... «Ignoraba incluso la ley de Bragg, la más fundamental de todas las leyes cristalográficas»...

Jim Watson, descubridor de la estructura del ADN, en «La doble hélice»

12.1.- Experiencias caseras. Observaciones simples de la difracción e interferencias con dos bolígrafos

En general, la observación de la difracción requiere una fuente luminosa puntual. Esto significa que si se quiere emplear una bombilla como fuente de luz tiene que ser una bombilla que esté realmente lejos. No se va a ver claramente la difracción utilizando un fluorescente o una bombilla del techo de la habitación.



Se toman dos lápices o bolígrafos y se ponen juntos. La ranura que definen puede hacerse más o menos estrecha de acuerdo con la presión que se ejerce entre ellos. Si, por la noche, se mira una bombilla muy alejada, con el ojo junto a la ranura entre los lápices, se verán muy claramente las franjas de interferencia. Si se trata de una bombilla de luz blanca aparecen las franjas de interferencia con los colores característicos. Sorprende lo bien que se observan estas franjas con medios tan simples. En el laboratorio se puede hacer lo mismo si se consigue una fuente puntual. Lo más simple es utilizar la fuente de luz de los equipos o un proyector de diapositivas para iluminar una ranura, de los propios equipos o hecha mediante un marco de diapositivas y cartulina negra. Las franjas de interferencia se ven claramente si se observa la ranura a través de la separación entre dos bolígrafos.

12.2.– Experiencias caseras. Observación de la difracción e interferencias con tramas de tejidos

Otro método simple para observar la difracción y las interferencias consiste en utilizar tejidos de trama fina para observar fuentes de luz puntuales. Por la noche, se observa una bombilla lejana utilizando el tejido de una cortina, un paraguas abierto, una media o algo similar. La imagen de difracción consiste en una cruz formada por numerosas franjas de colores, como si se tratara de una red de difracción cruzada. Si se quiere observar la difracción correspondiente a la luz monocromática es conveniente colocar un trozo de filtro de color o celofán sobre el tejido y mirar a través de él.

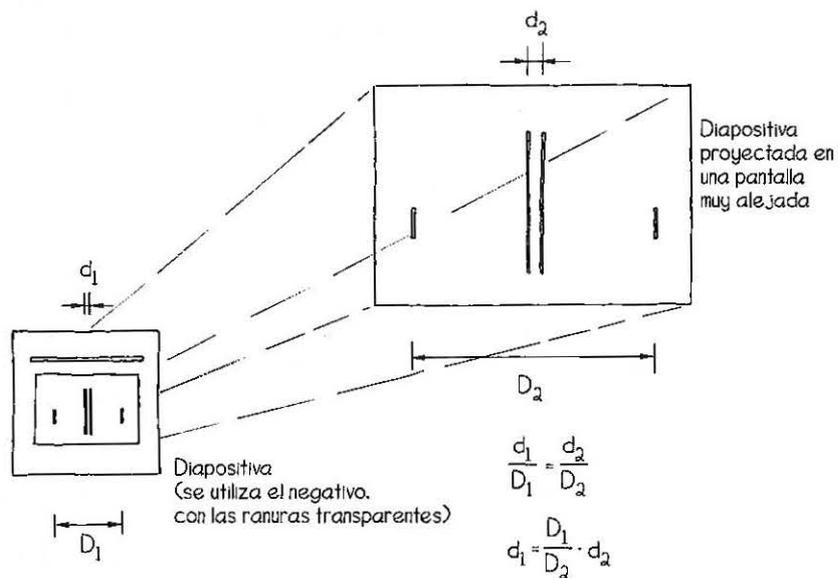
12.3.– Experiencias. Uso de diapositivas de alto contraste y de un proyector para la experiencia de Young

Los experimentos cuantitativos relacionados con la experiencia de Young requieren el uso de dos ranuras separadas una pequeña distancia. Si dicha distancia se conoce, el experimento permite la medida de la longitud de onda de la luz. Un método simple para fabricar estas dobles ranuras consiste en rayar, con dos hojas de afeitar juntas, un porta de microscopio previamente ahumado. Otro sistema, mucho mejor pero algo más laborioso, se basa en la utilización de diapositivas de alto contraste tal como se explica a continuación.

En primer lugar deben dibujarse los modelos en una hoja de papel. Para ello se trazan con un rotulador dos líneas paralelas, muy juntas, separadas menos de dos milímetros, y a cada lado, se hacen dos marcas (que posteriormente permitirán el calibrado de la separación entre las ranuras). Haga también modelos correspondientes a una sola ranura, de diferente anchura. Puede resultar conveniente hacer estos modelos utilizando algún programa informático de dibujo y una impresora de chorro de tinta o láser. Los modelos se fotografían con película Kodalith Orto de alto contraste. Una posibilidad es tener la cámara en un trípode, y pegar con cinta adhesiva los modelos, bien iluminados, en la pared frente a la cámara. Un mismo modelo puede fotografiarse desde varias distancias. En la introducción referente a los materiales, en la segunda parte del libro, se indican algunas sugerencias relativas al tiempo de exposición de esta película. Puesto que se van a utilizar los negativos el revelado es muy simple y, si conoce los rudimentos de la fotografía, puede hacerlo usted mismo. Si no es así, no se desanime y lleve los carretes a un fotógrafo para revelarlos. Recuérdele que se trata de obtener solamente los negativos. En cualquier caso es muy aconsejable usar varios carretes ya que estas diapositivas le serán sumamente útiles y, si le sobran, puede hacer felices a otros colegas.

Una vez disponga de los negativos debe cortarlos y enmarcarlos como si se tratara de diapositivas. El calibrado de la separación entre las dos ranuras se puede hacer mediante la operación siguiente: se mide con el pie de rey la distancia D_1 entre las marcas de la diapositiva; a continuación se proyecta la diapositiva a la mayor distancia posible y se miden la distancia D_2 con un metro y d_2 con un pie de rey. La aplicación de la relación $d_1/D_1 = d_2/D_2$ correspondiente a las dos figuras semejantes permite calcular la distancia d_1 que separa las dos ranuras de la diapositiva. Anote este valor en el marco de la diapositiva. Si se trata de diapositivas que contienen una sola línea, determine su anchura mediante un método similar.

Si conocemos la longitud de onda, como sucede con el láser, podemos determinar de una forma rápida la separación entre las dos ranuras de cada diapositiva; para ello se miden las posiciones de los máximos de interferencia y se aplica la ley de Bragg, tal como se describe en experiencias posteriores. De este modo es posible calibrar rápidamente toda la colección de diapositivas.



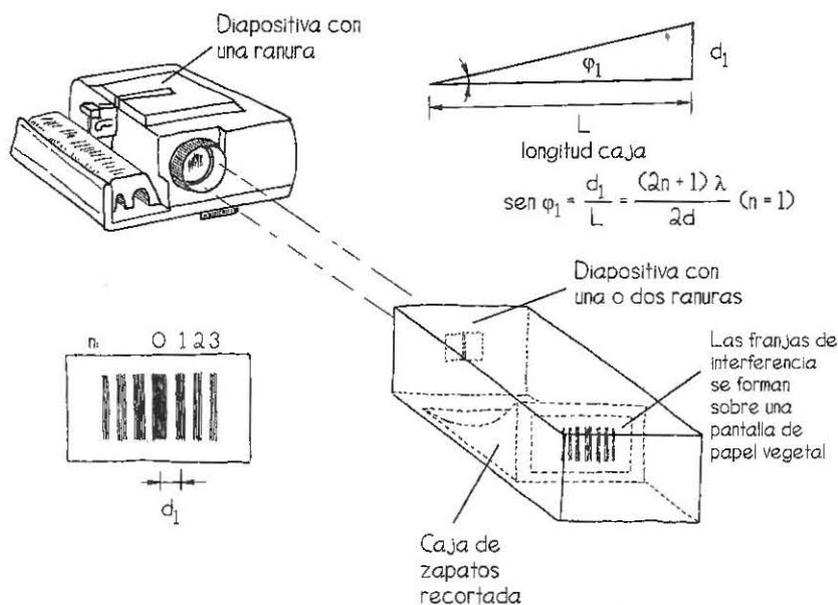
Una vez tengamos las diapositivas, la experiencia de Young resulta simple. En el laboratorio a oscuras, mediante un proyector, se proyecta una diapositiva formada por una ranura simple, vertical, hecha con dos trozos de cartulina negra, sobre una doble ranura pegada en el extremo de una caja de cartón más bien larga, tal como muestra la figura de la

siguiente experiencia. La imagen de difracción en la doble rendija se proyecta sobre una pantalla de papel vegetal pegada a una caja de zapatos, colocada dentro de la caja de cartón grande. La imagen contiene las franjas de interferencia correspondientes a la luz blanca, con el repertorio de colores característicos. Si se quiere observar la imagen correspondiente a luz «monocromática», basta colocar un filtro del color apropiado delante del marco de la diapositiva con las dos ranuras.

12.4.- Experiencias. Utilización de diapositivas de alto contraste para observar la difracción de diferentes longitudes de onda en una única ranura

El sistema del proyector y la caja de cartón descrito en la experiencia anterior, también es muy eficaz para observar la difracción en una sola ranura. En la caja se pega una diapositiva calibrada de una sola ranura y sobre ella se proyecta la luz de una rendija. La imagen de interferencia se obtiene sobre una pantalla de papel vegetal, del mismo modo que se ha explicado en la experiencia anterior. Tenga en cuenta que, en este caso, los sucesivos máximos de interferencia son mucho más tenues que cuando se utilizan dos ranuras. Para verlos bien el laboratorio debe estar realmente a oscuras.

Mediante filtros de color es fácil comprobar que los máximos correspondientes a mayores longitud de onda (luz roja), aparecen más separa-



dos que los que corresponden a luz de longitud de onda menor (azul), de acuerdo con la ecuación correspondiente a la interferencia en una única rendija: $\sin \phi_n = (2n+1)\lambda / 2d$; esta ecuación permite obtener los sucesivos ángulos de interferencia constructiva en función de la longitud de onda y la anchura de la ranura (ver PSSC p. 179-182. Vol. 1)). La ecuación puede verificarse, en cada situación, utilizando colores para marcar en el papel vegetal los trazos correspondientes a los máximos de interferencia. Puesto que la luz roja tiene una mayor longitud de onda que la luz azul, los sucesivos máximos están más separados cuando se emplea un filtro rojo que con uno azul. Este es un aspecto interesante del experimento que no se puede observar si se emplea un láser.

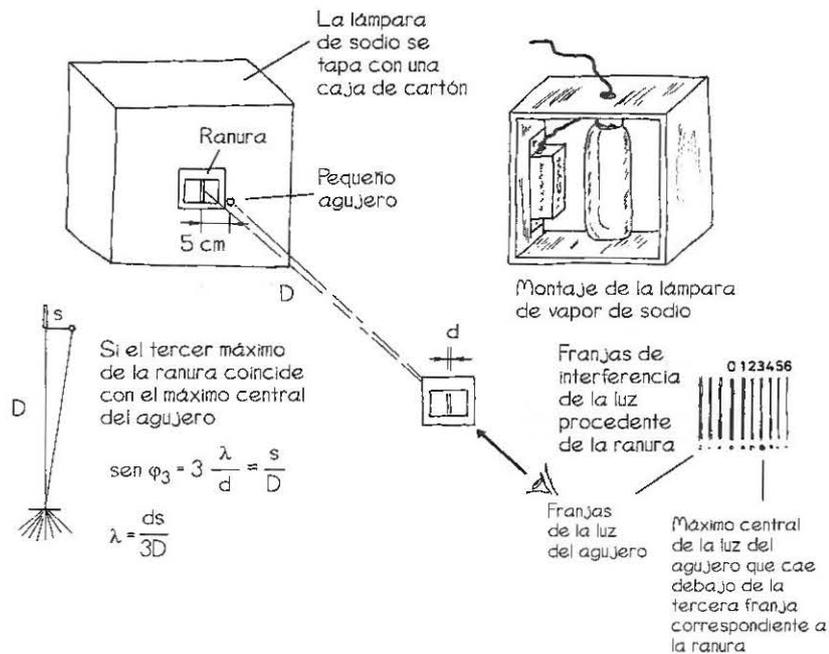
12.5.- Experiencia. Medida de la longitud de onda de la luz amarilla de una lámpara de sodio empleando diapositivas de alto contraste

Las diapositivas de alto contraste con dobles ranuras calibradas pueden emplearse para medir la longitud de onda de la luz de fuentes monocromáticas. El sistema empleado es muy simple pero requiere el uso de una lámpara de vapor de sodio. Este sistema era más interesante cuando un láser costaba un riñón; entonces, el coste mucho más bajo de esta lámpara podía compensar la molestias de su montaje. Actualmente el coste de un puntero láser es menor que el de la lámpara de sodio y su uso es inmediato. A pesar de ello puede ser interesante disponer de una lámpara monocromática en el laboratorio ya que podrá usarla, además, para experiencias sobre luz polarizada, tal como se ha indicado en la sección correspondiente, e incluso para observar el espectro del neón puesto que en la descarga inicial, mientras el sodio aún está frío, la luz que se emite es debida esencialmente al neón que llena el tubo. Para hacer los experimentos debe tener en cuenta que la lámpara tarda unos 5 minutos en calentarse y dar toda su potencia.

Una lámpara de vapor de sodio a baja presión emite luz prácticamente monocromática de 590 nm. Además, se emiten algunas líneas mucho más tenues correspondientes al espectro del neón, que está contenido dentro del tubo para poder iniciar la descarga. Basta con una lámpara de pequeña potencia, por ejemplo, 18w. Estas lámparas se pueden comprar en tiendas especializadas en luminotecnia, donde le indicarán el montaje, que debe hacerse con una reactancia. El tubo se monta vertical, colgando del portalámparas, para evitar que el sodio llegue a los electrodos. Se puede hacer una pequeña estructura de madera para colgar la lámpara y atornillar la reactancia. A veces puede ser difícil encontrar el portalámparas; pida ayuda al vendedor.

Si dispone de la lámpara el resto es fácil. Colóquela dentro de una caja de cartón grande. A la altura del tubo deberá hacer un agujero de unos 2 cm en el cartón. Pegue una diapositiva con una ranura vertical hecha de

cartulina negra en el agujero y no deje que se cuele luz por los lados. Por debajo, a una distancia bien calibrada, por ejemplo 5 cm, haga un agujero de un par de milímetros de diámetro. La ranura y el agujero deberán aparecer bien iluminados por la lámpara del interior cuando se mire la caja desde delante. Distribuya a los alumnos, cada uno con una diapositiva conteniendo una doble ranura calibrada (a ser posible con una separación de unos 0.1 mm), en la zona delante de la caja a distintas distancias (unos cuantos metros). Cuando, con el ojo pegado a la doble ranura, observen la rendija iluminada de la caja verán una serie de franjas de interferencia correspondientes a la luz de la rendija y, debajo, otra serie de franjas más tenues correspondientes a la luz que sale por el agujero. El truco está aquí. Es sencillo saber cual es el máximo central (la franja más brillante), que corresponde a la posición de la rendija y del agujero. Se deben contar el número de franjas de interferencia desde la ranura central hasta el agujero central. Si es necesario, los alumnos se pueden mover, acercándose o alejándose, hasta que una franja de interferencia coincida con la imagen del agujero. Supongamos, tal como muestra la figura, que la tercera franja es la que coincide; si se mide la distancia de la diapositiva a la ranura de la caja, es fácil saber el ángulo bajo el cual hay interferencia constructiva de tercer orden. Conocida la separación entre las dos ranuras, se puede calcular la longitud de onda a partir de la ley de Bragg: $\text{sen } \phi_n = n\lambda/d$, en la cual n es un valor entero, d la separación entre las dos ranuras de la diapositiva y λ la longitud de onda.



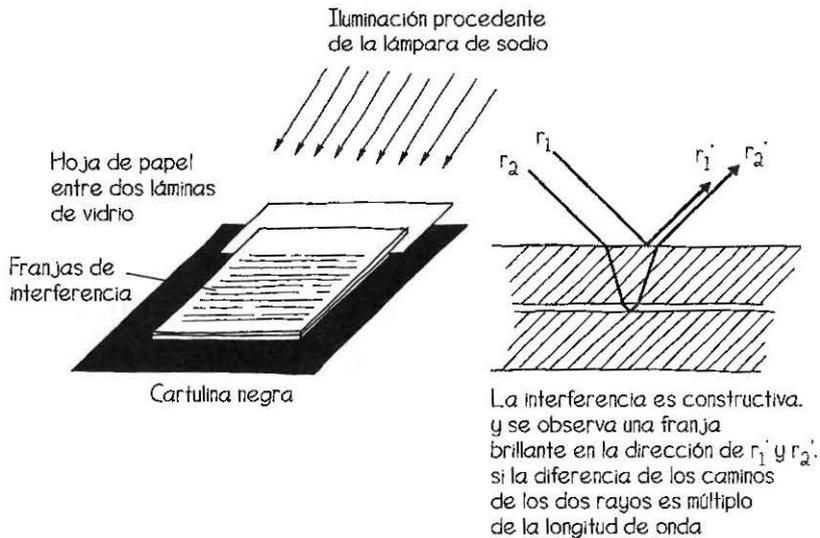
Con alumnos a distintas distancias de la rendija y diapositivas con distintas separaciones se obtendrán distintos valores de la longitud de onda que se pueden promediar.

Otra posibilidad interesante consiste en hacer que un alumno se aleje gradualmente hasta sucesivas posiciones en que las franjas de distinto orden coincidan con la imagen del agujero. Aplicando la ley de Bragg en cada posición se deben obtener valores similares de la longitud de onda.

12.6.- Experiencia. Observación de franjas de interferencia en dos láminas de vidrio iluminadas con una lámpara de vapor de sodio

Si dispone de una lámpara de vapor de sodio podrá hacer que los alumnos observen, individualmente o en grupos reducidos, las franjas de interferencia correspondientes a la luz reflejada en las caras de dos láminas de vidrio.

Para ello basta con superponer dos láminas (por ejemplo, de vidrio corriente, de 15x10 cm, de 3 mm de espesor), sobre un trozo de cartulina negra, iluminadas por una lámpara de sodio (colgada en su soporte, en una pared del laboratorio). Se observan fácilmente las franjas de interferencia amarillas y oscuras de contorno irregular, en contraste con el fondo negro, mirando la luz de la lámpara reflejada en las láminas. Si se pone un trozo de papel entre las dos láminas, como si fuera una cuña, las franjas aparecen muy próximas y paralelas. Si se comprimen las láminas el espaciado entre las líneas se hace mayor.



12.7.– Experiencia casera. Franjas de interferencia en películas de jabón

Es sumamente sencillo observar las franjas de interferencia producidas en una película de jabón. Dichas franjas se deben a la superposición de la luz reflejada en ambas superficies de la película.

En casa, lo más simple es introducir unas tijeras en el agua jabonosa cuando se friegan los platos. Si la película formada en los agujeros de las patas se mantiene vertical, el agua se escurre hacia abajo y a medida que la película adelgaza, aparecen franjas horizontales (correspondientes a las zonas del mismo espesor) con colores muy brillantes. Notar que en la parte más delgada de la película, arriba, no hay ningún color presente y que, hacia abajo, los colores se presentan en forma cíclica, cada vez más difuminados.

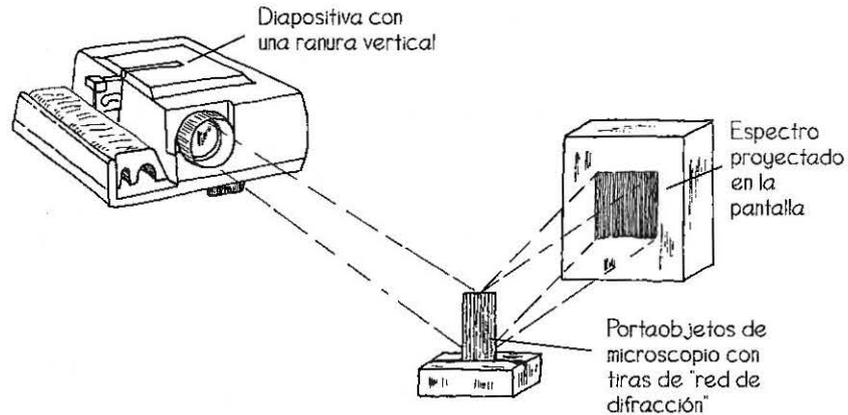
El fenómeno se puede interpretar fácilmente si se usa luz monocromática para observar la película. Para ello, en el laboratorio, puede usarse una lámpara de vapor de sodio como las que se han descrito en las experiencias precedentes. Cuando la película de jabón se ilumina con luz monocromática se ven franjas horizontales amarillas, correspondientes a las zonas de interferencia constructiva, en aquellas direcciones y espesores en los cuales la diferencia de caminos de la luz que se superpone es múltiplo de la longitud de onda amarilla (590 nm). Las franjas negras, debidas a las interferencias destructivas, aparecen en aquellas zonas en las que la diferencia de caminos produce un retardo de media longitud de onda o un número impar de medias longitudes de onda. Si en vez de usar luz monocromática se ilumina la película con luz blanca, la superposición de la luz reflejada en las dos caras de la película tiene lugar con todas las longitudes de onda presentes en la luz blanca. Aquellas zonas en que la luz amarilla experimenta interferencia constructiva tendrán un color amarillento, al contrario, las zonas en que había interferencia destructiva para el color amarillo aparecerán con el color complementario, azul. Este razonamiento es análogo al que permite explicar los colores de interferencia de los materiales birrefringentes entre dos polarizadores, tal como se describe en la experiencia 4.4 (simulación de un microscopio petrográfico) de la segunda parte.

12.8.– Experiencia. Observación de la difracción. Redes de difracción por reflexión

Hace sólo algunas décadas las redes de difracción eran dispositivos exóticos al alcance de pocos mortales. Actualmente las redes o, mejor dicho, sus sucedáneos se encuentran muy fácilmente. Así, en las tiendas especializadas en hologramas, se pueden comprar lápices y varitas (en Holomagic, estas varitas se llaman Rainbow Sparkler, a unas 250-275 pts)

con unos plumeros hechos de unas tiras de red de difracción metalizada. Dichas tiras se pueden cortar a trozos de unos 5 cm, sin tocarlos demasiado con los dedos ya que las huellas quedan marcadas fácilmente. Los trozos se colocan uno al lado de otro, bien paralelos, sobre un portaobjetos de microscopio. Para mantenerlos fijos basta un poco de pega en cada extremo. Se tapa con un segundo porta de microscopio y el «paquete», bien apretado, se envuelve con celo por los extremos.

Si se hace incidir el haz de un proyector (con una diapositiva formada por una única ranura) sobre el portaobjetos, colocado verticalmente en un soporte de los equipos de óptica, el espectro aparecerá nítido a los lados. Este montaje puede emplearse para estudiar la absorción y los filtros, tal como se ha indicado en experiencias precedentes, como 2.1 de esta segunda parte.

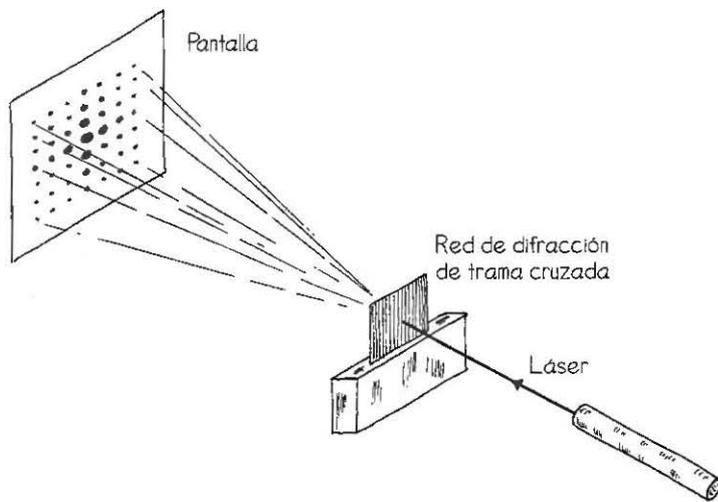


Con esta red puede observarse, no demasiado bien, el espectro de un fluorescente o de una bombilla. Para ello, se pone el porta al lado del ojo, mirando la luz que se refleja.

El material con el que se fabrican estas tiras se puede encontrar, ocasionalmente, en rollos de varios diseños, generalmente círculos o pequeños rectángulos. El tipo de material se llama «Diffraction». Esté alerta cuando lo vea en papelerías, imprentas, tiendas tipo «Servicio Estación», «todo a 100», etc. ya que a veces aparecen diseños con una superficie algo grande de líneas paralelas que pueden emplearse como redes de difracción. Como ya se ha indicado anteriormente, también es posible utilizar un trozo de compact disc como red de difracción pero, puesto que sus líneas son circulares, el espectro aparece distorsionado.

12.9.– Experiencia. Observación de la difracción. Redes de difracción por transparencia

Es relativamente fácil conseguir redes de difracción que funcionen por transparencia. Puede acudir a los grandes distribuidores de materiales didácticos (por ejemplo, Edmund o Griffin) o puede buscarlas en tiendas que comercialicen hologramas. En estas tiendas (como el Museu de l'Holografia o Holomagic, entre muchas otras) puede encontrar unas gafas, llamadas Laser Spex cuyos «cristales», de plástico, son dos redes de difracción de trama cruzada de 1X10 cm aproximadamente, con una luminosidad extraordinaria. Si estas láminas se desmontan y se cortan pueden obtenerse 4 redes, montadas en un marco de diapositiva. En el Museu de l'Holografia venden, además, grandes láminas de red de difracción de trama cruzada (60x30 cm a unas 2000 pts). En ambos casos, las redes son poco apropiadas para espectroscopia, ya que la densidad de líneas es baja pero, por esta misma razón, son muy útiles para experiencias de difracción e interferencias con un láser.



Una observación simple consiste en poner la diapositiva en un soporte, dentro de una caja de humo, tal como se explica en la experiencia 9.8 (Estudio de la reflexión y refracción con un puntero láser y una caja de humo). Cuando el haz del láser incide en la red, se desdobra en un número muy grande de rayos, correspondientes a las direcciones de interferencia constructiva, cuya trayectoria se ve claramente, dispersada por el humo. Si no tiene esta caja, sacuda el polvo de un borrador en los rayos que emergen de la red de difracción. El experimento también se puede hacer usando las redes de difracción de los equipos didácticos, aunque

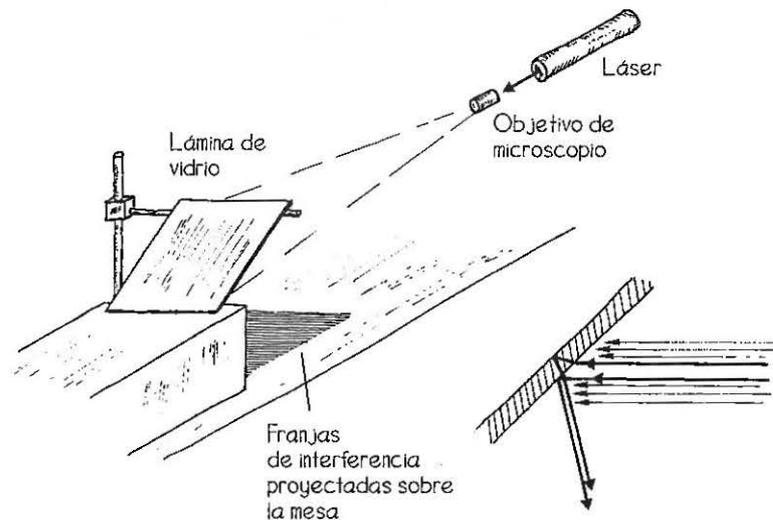
su mayor densidad de líneas hace que se observen pocos órdenes de difracción.

Estas redes pueden resultar útiles para obtener un conjunto de rayos que se hacen incidir en una lente o un espejo curvado dentro de una caja de humo, con el objeto de estudiar la reflexión o refracción en estas superficies. Puesto que los rayos salen divergentes de la red es conveniente emplear una lente de los equipos o, mejor, una lupa algo grande, para conseguir que el haz de rayos sea paralelo.

La medida del espaciado entre las líneas de la red, como aplicación de la ley de Bragg, es sumamente simple. Si un láser se difracta en la lámina de las gafas Laser Spex se obtienen las interferencias correspondientes a una doble retícula igual y perpendicular, con una gran cantidad de órdenes. Con un láser de He-Ne (longitud de onda 632.8 nm) y la lámina a 0.745 m de la pantalla, las manchas de primer orden (medidas con el pie de rey) aparecen a 9.83 cm del máximo central. Si la distancia a la pantalla es de 0.890 m, las manchas de primer orden aparecen a 11.7 cm. Aplicando la ecuación de Bragg, $\text{sen}\phi_n = n\lambda/d$, se obtiene un espaciado entre las líneas de la retícula de 4.8×10^{-6} m (4.8 micras), es decir, de 208 líneas/mm.

12.10.- Demostración. Franjas de interferencia en una lámina de vidrio, empleando un láser

La observación de las franjas de interferencia puede hacerse empleando una única lámina de vidrio, con un láser y un objetivo de microscopio.

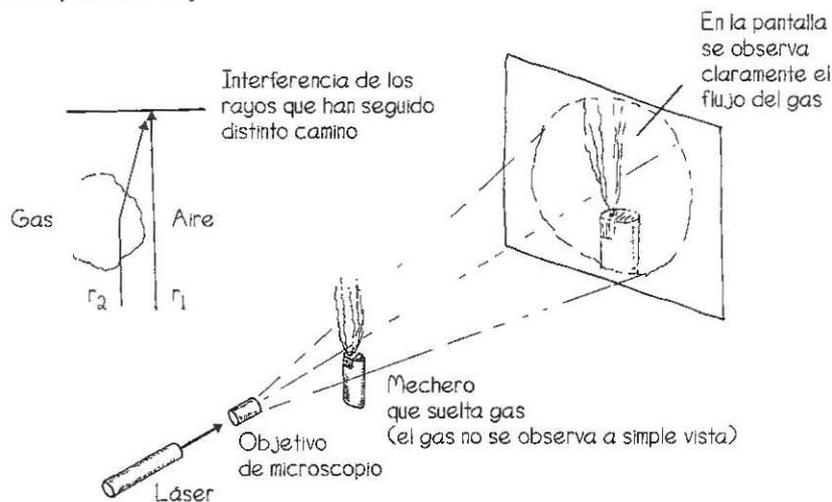


El montaje es común a varios experimentos, se trata de expandir el haz haciéndolo pasar a través de un objetivo de microscopio; funciona bien uno de 20 aumentos. A un par de metros, interceptando el cono de luz, se coloca una lámina de vidrio algo grande, inclinada con la ayuda de una barra en un soporte, de forma que las interferencias provocadas por la reflexión del láser en ambas caras de la lámina, se proyecten sobre la superficie de la mesa, el techo o una pantalla. Las franjas paralelas, rojas y negras, se observan con una nitidez extraordinaria. Las líneas se muestran más separadas cuanto más perpendicularmente incide el haz sobre el cristal y se aproximan a medida que el cristal se inclina. Los resultados son similares a los de la experiencia 12.6.

Si se coloca un espejo en vez de una lámina de cristal, hay mucho menos contraste. Ello es debido a que las ondas que se superponen tienen una amplitud muy distinta, ya que la superficie metalizada del espejo refleja la luz con una intensidad mucho mayor que la superficie delantera del cristal.

12.11.- Demostración. Visualización de corrientes de convección

Si se proyecta en una pantalla la luz del láser, expandida con un objetivo de microscopio, se observarán círculos concéntricos rojos y negros. Son debidos a difracciones en partículas de polvo del objetivo o del orificio de salida del láser. Si estos anillos son muy aparatosos, toca limpieza. Asesórese con sus compañeros de Ciencias Naturales sobre el mejor modo de limpiar un objetivo.



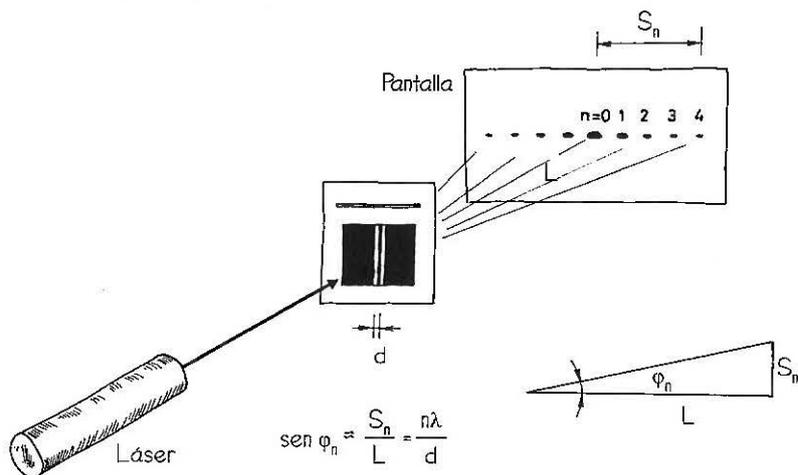
El montaje permite la observación de las corrientes de convección. Basta con poner un objeto caliente, por ejemplo un soldador de estaño, o

dejar escapar un poco de butano de un mechero, dentro del haz luminoso. En la pantalla se observan claramente las corrientes de convección debidas al aire caliente o al gas. Lo mismo sucede si se pone una vela encendida en el haz; se observa, además de la llama, una larga corriente de convección.

Este fenómeno es debido a que el aire caliente, o el gas, tienen un índice de refracción distinto al del aire. Por ello, una parte del haz se desvía debido a la refracción y se superpone, en la pantalla, con la luz que ha seguido otro camino o no se ha desviado. Las zonas claras y oscuras, que muestran las corrientes de convección en la pantalla, son debidas a las interferencias constructivas o destructivas que corresponden a la diferencia de caminos entre los rayos que se superponen.

12.12.- Demostración. Difracción de la luz de un láser en rendijas simples y dobles

El uso de una doble rendija en el haz de un láser permite una interpretación simple de las interferencias, como si se tratara de una cubeta de ondas con dos puntas golpeando el agua. Por ello, las diapositivas de alto contraste, cuyo uso se describía en las primeras experiencias de esta sección (por ejemplo en 12.3), encuentran de nuevo una importante aplicación. Si las diapositivas están calibradas, con la separación entre las



dos rendijas anotada, se puede verificar la ley de Bragg o, al contrario, se puede utilizar esta ley para buscar la longitud de onda de la luz del láser. Basta con medir la distancia de la diapositiva a la pantalla y, sobre la pantalla, con un pie de rey, la distancia de los máximos correspondientes a

los distintos órdenes sucesivos, respecto el máximo central. De acuerdo con la ley de Bragg, $\text{sen}\phi_n = n\lambda/d$, la longitud de onda cumple: $\lambda = d s_n/nD$. D es la distancia de la diapositiva a la pantalla, s_n es la distancia del máximo de orden n al máximo central (este tiene orden 0) y d es la separación entre las dos ranuras de la diapositiva.

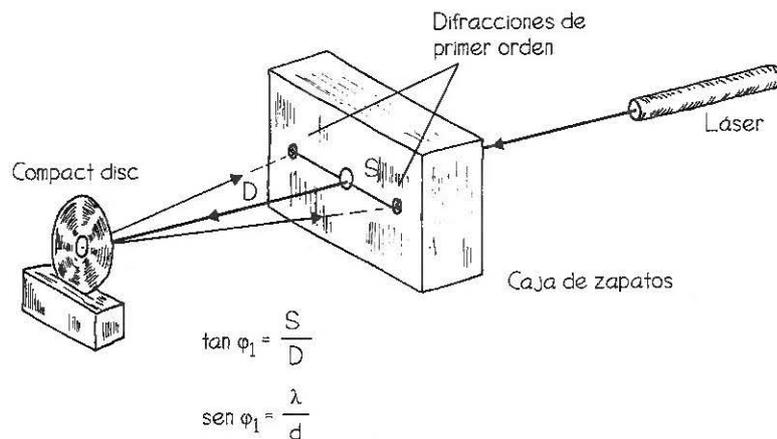
La difracción se observa haciendo incidir el haz original, sin expandir, en la diapositiva; la pantalla se coloca a unos cuantos metros. Es de destacar que, debido a la anchura de cada línea, los sucesivos máximos tienen una intensidad que aparece modulada, de modo que si se cuentan los órdenes, alguno puede aparecer muy débilmente. En general, se pueden contar interferencias hasta órdenes muy altos.

Si en vez de dos ranuras la diapositiva tiene una única ranura de anchura d , calibrada como se ha indicado en la experiencia 12.3, los máximos sucesivos siguen la ecuación:

$\text{sen}\phi_n = (2n+1)\lambda/2d$; los valores de n son 1,2,3.. (esta ecuación también se utiliza en la experiencia 12.15 sobre la medida del grosor de un cabello).

12.13.- Demostración. Espaciado de las líneas de un compact disc

Las líneas de un compact disc (CD) funcionan como una red de difracción; de este modo, resulta simple medir la distancia entre estas líneas. Se sujeta el CD vertical con su superficie perpendicular al haz del láser. Si el haz incide aproximadamente en el diámetro horizontal medio, los máximos de interferencia se formarán en un plano más o menos horizontal.



Un montaje eficaz consiste en utilizar el fondo de una caja de zapatos como pantalla de proyección. Para ello se observa a qué altura incide el

láser y se hace un agujero, por donde atravesará el haz que incidirá en el CD. Las posiciones de los haces correspondientes a las interferencias constructivas se marcan con un lápiz y se miden sus distancias al agujero así como la distancia del compact a la tapa. A partir de estas medidas, la ecuación de Bragg: $\text{sen}\phi_n = n\lambda/d$, permite obtener la separación d entre las líneas del CD.

Debe tener en cuenta que:

– la superficie del compact debe ser paralela al fondo de la caja de cartón y, ambas, perpendiculares al haz del láser. Para comprobar la perpendicularidad entre el haz del láser y la superficie del compact es útil observar el reflejo de orden 0, orientando el CD como si se quisiera devolver esta reflexión de nuevo hacia el láser.

– La falta de paralelismo entre la superficie del CD y la pantalla se detecta fácilmente puesto que las posiciones de las interferencias constructivas aparecerán asimétricas a ambos lados.

Ejemplo

Con la pantalla a 9.2 cm de la superficie del CD, los dos primeros órdenes de difracción se observan a 4.1 y 13.0 cm (no se observan otros órdenes). Los ángulos correspondientes son de 24° y 55° ; sus senos son 0.41 y 0.82. Aplicando la ecuación de Bragg: $\text{sen}\phi_n = n\lambda/d$, el valor de λ/d resulta 0.41, puesto que $\lambda = 632.8$ nm (para un láser He-Ne), la separación d entre las líneas del CD resulta 1.54×10^{-6} m, por lo tanto, el inverso de este valor nos indica que hay unas 650 000 líneas/m o 650 líneas/mm en la superficie del compact.

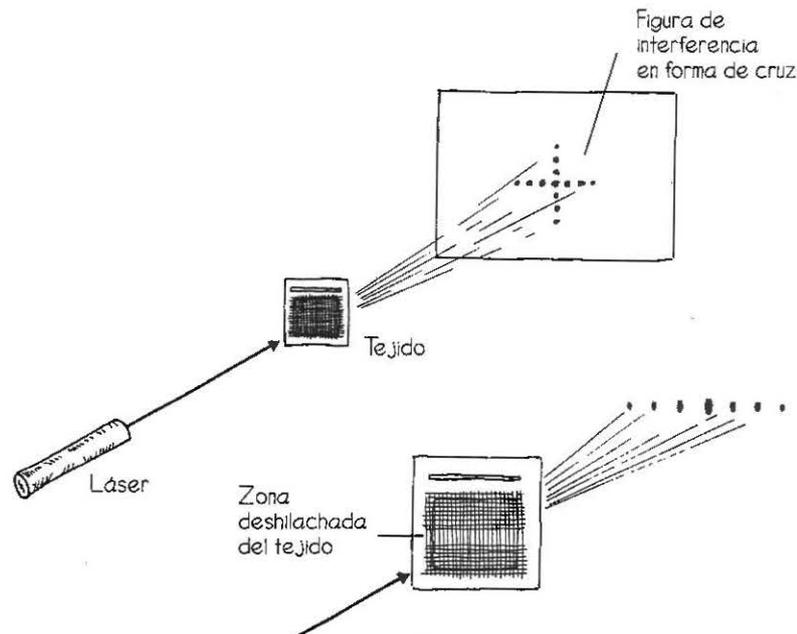
En otro experimento, con la pantalla a 25.4 cm se observó el primer máximo a 11.1 cm. Haciendo los cálculos según el párrafo anterior, el espaciado de las líneas resultó 1.58 micras, con una densidad de 632 líneas/mm.

12.14.- Demostración. Estudio de la trama de un tejido

La trama de un tejido se comporta como una red de difracción y, por ello, es posible estudiar el tamaño y la orientación de la trama, a partir de la imagen de las interferencias que se producen cuando el haz de un láser atraviesa el tejido. Si la trama es simétrica la imagen será parecida a una cruz, con el mismo espaciado entre los máximos en cada brazo de la cruz. Si la trama es asimétrica, la cruz aparecerá distorsionada y los espaciados de los máximos serán distintos en cada dirección. Para hacer la experiencia basta pegar un trozo del tejido a un marco de diapositiva. La medida de su distancia a la pantalla y de las distancias del máximo central a los máximos sucesivos permiten calcular los senos de los ángulos y determinar el tamaño de la trama. Para ello se aplica la ecuación de Bragg:

$\text{sen}\phi_n = n\lambda/d$, de un modo parecido al que se ha descrito en las experiencias sobre redes de difracción. En este caso deben realizarse los cálculos para cada una de las dos direcciones.

Es interesante sacar algunos hilos en una zona del tejido, de forma que aparezca una franja que contenga únicamente unas líneas de la malla. De este modo se puede comparar su imagen de difracción con la que corresponde al tejido completo, con las dos tramas.



Ejemplo

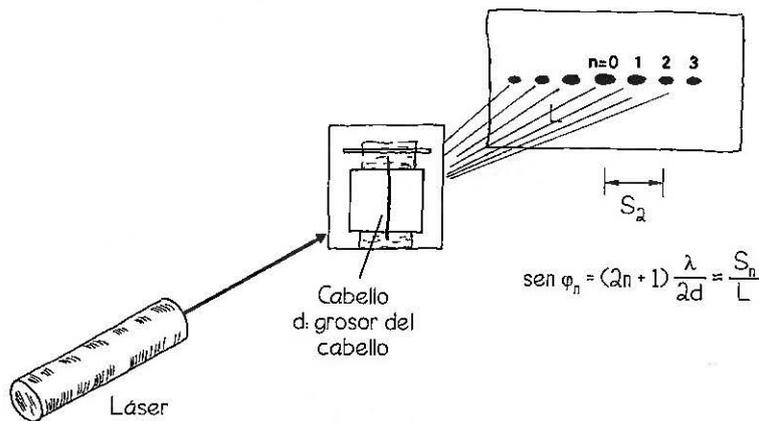
Con un tejido algo espeso, empleando un láser de He-Ne y una pantalla a 2.80 m del tejido, los máximos de interferencia se observan muy próximos; el segundo orden aparece a 8 mm del máximo central, el tercer orden a 13 mm. Si se aplica la ecuación de Bragg, la distancia entre dos líneas de la trama resulta de unos 0.42 mm; esta es la distancia entre los pequeños agujeros que dejan los hilos del tejido. El valor se puede verificar empleando una lupa cuentahilos.

12.15.- Demostración. Diámetro de un cabello

Mediante dos tiras de cinta adhesiva se sujeta un cabello en el marco de una diapositiva. Se proyecta el haz del láser de modo que atraviese el cabello y la imagen de difracción se proyecta en una pantalla. Se miden

las distancias de los máximos de interferencia sucesivos al máximo principal (con un lápiz se marcan sobre la pantalla y después se miden con el pie de rey) y la distancia de la diapositiva a la pantalla. La ecuación: $\text{sen } \phi_n = (2n+1)\lambda/2d$ (ver, PSSC p 179-182. Vol 1), en la cual se obtienen los sucesivos ángulos de interferencia constructiva (valores de n: 1,2,3., ¡no el valor 0!) en función de la longitud de onda permite calcular d, el diámetro del cabello.

Con el montaje anterior es inmediato comparar el grosor de cabellos de distintas personas (hay una variabilidad importante) o comprobar como su forma, en muchos casos, no es cilíndrica. Esto se consigue girando la diapositiva de modo que el cabello tenga una orientación distinta respecto al haz del láser.



Ejemplo

Con la pantalla a 101 cm del cabello, los máximos de interferencia constructiva aparecen a las siguientes distancias del máximo central: 14, 23.5, 33, 42.5 y 52 mm. Notar que la separación de cada máximo al siguiente es de 9.5 mm., excepto la separación del máximo central al siguiente que es 14 mm. Si la distancia a la pantalla es L y la distancia de cada máximo al máximo central es m_n , el diámetro del cabello debe verificar:

$$d = (\lambda L / 2) ((2n+1) / m_n) \quad (n: 1, 2, 3, \dots)$$

La relación $(2n+1)/m_n$ para n: 1, 2, ..., 5, resulta en todos los casos de 212, aproximadamente. La aplicación de la fórmula conduce a un resultado de 6.7×10^{-6} m. De este modo, el diámetro del cabello ha resultado ser unas 6.7 micras.

12.16.– Demostración. Difracción en una aguja

El haz del láser, sin expandir, se hace pasar por una aguja vertical, clavada en un tapón o un trozo de plastilina. En la pantalla aparece un número enorme de franjas de interferencia debidas a la difracción a ambos lados de la aguja. Si se desea, se puede emplear el mismo método de la demostración anterior para calcular su diámetro.

Si se expande el haz con un objetivo de microscopio y se coloca la aguja en la trayectoria, se observan numerosas franjas claras y oscuras a ambos lados. Estas franjas también se observan muy claramente si se coloca en el haz cualquier objeto con cantos bien definidos, como una hoja de afeitar. Toda la silueta aparece envuelta en franjas de interferencia.

12.17.– Demostración. Hologramas

La realización de hologramas está fuera del alcance de un centro de enseñanza secundaria normal. El coste de los materiales, la laboriosidad del proceso y la necesidad de un espacio fijo para el montaje hacen que esta técnica sólo esté al alcance de pocos centros. A pesar de ello, es relativamente fácil conseguir algunos hologramas para que los alumnos vean una aplicación práctica de las interferencias.

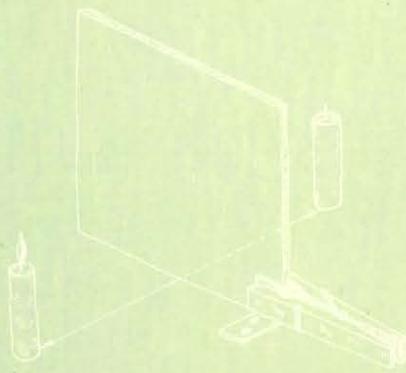
Un holograma es un tipo especial de placa o película fotográfica en la que quedan registradas las franjas de interferencia de la luz. Para conseguirlo, el haz expandido de un láser se desdobra mediante un espejo semiplataado; una parte del haz llega directamente a la placa fotográfica y la otra parte ilumina un objeto. La luz que este objeto refleja llega también a la placa fotográfica donde interfiere con la que ha llegado directamente. Las franjas claras y oscuras quedan registradas en la película. Si el láser no es muy potente los tiempos de exposición son algo largos y por ello deben eliminarse absolutamente las pequeñas vibraciones que provocarían el movimiento de las franjas. La mayor parte de los esfuerzos de los holografistas deben invertirse en la eliminación de vibraciones. La placa se revela de un modo parecido a como se haría con una placa fotográfica normal; sin embargo, el tipo de placa y los líquidos de revelado son especiales.

La placa revelada muestra una trama altamente irregular de líneas claras y oscuras que no tiene nada que ver con el objeto original. Ello no tiene nada de extraño si consideramos que, al contrario de lo que sucede con la fotografía convencional, en un holograma no se registran diferencias de luminosidad de un punto a otro del objeto, sino diferencias de fase.

La parte interesante es la siguiente. Cuando un holograma se ilumina con un haz de láser expandido, la luz se difracta en la trama de líneas de la placa y produce, al otro lado, un patrón de interferencias que reproduce el objeto. Es posible realizar hologramas que reproducen el objeto, con distintos colores según el ángulo, empleando una iluminación de luz blanca procedente de una fuente puntual. Estos hologramas, los más habituales, se observan por reflexión.

Cuando uno mira un holograma lo que más sorprende es la sensación de relieve; si no fuera por la falta de los colores originales, la sensación de la presencia física del objeto sería absoluta. Por otra parte, una porción del holograma contiene toda la información asociada al objeto visto desde aquella posición; un holograma funciona como una ventana que nos permitiera ver, desde distintas posiciones, un objeto exterior. A diferencia de la fotografía, si se corta una parte de un holograma podemos ver aún todo el objeto, pero tenemos que movernos respecto la superficie del trozo de placa como si se tratara de una ventana.

Estas características se pueden mostrar fácilmente a los alumnos. Basta con disponer de una fuente puntual de luz blanca; para ello puede emplearse un pequeño foco de luz halógena o un proyector de diapositivas. Los hologramas se deberán observar por reflexión, es decir, con la fuente de luz a la espalda. Moviéndolos respecto a la dirección de la luz podrán apreciar su carácter tridimensional. Es conveniente comprar hologramas correspondientes a objetos reales, no los del tipo de los cromos de Bollycao. En la actualidad es posible conseguirlos en tiendas especializadas en holografía o en Museos o Casas de la Ciencia. Algunos de estos hologramas deberían poderse cortar. Si es posible, tenga un holograma cortado en diagonal y otro cortado por la mitad. Mantenga las dos partes pegadas con celo (por la parte que no contiene la película sensible) y cuando convenga despéguelas para destacar que una parte del holograma permite observar todo el objeto.



ISBN 84-85840-66-6



9 788485 840663