

## **CONSIDERACIONES ELECTRONICAS Y FENOMENOS ATOMICOS Y NUCLEARES**

### **INTRODUCCION A LA FISICA MODERNA; DESCARGA ELECTRICA EN GASES; RAYOS X; ELECTRONICA; RADIOACTIVIDAD; FISICA NUCLEAR Y EL ESTADO SOLIDO**

**La situación por 1890.** Poco antes del principio del siglo xx, por el final del llamado periodo clásico caracterizado por el punto de vista newtoniano, la física se encontraba en una posición única con respecto a otras ciencias y a los diversos campos del saber. La situación era única porque los físicos, en su intento de estudiar los fenómenos naturales, aparentemente habían tenido un éxito casi completo, ya que prácticamente todo lo que se había observado podía explicarse en términos de conceptos y leyes sencillas, como las leyes de Newton del movimiento, etc.; habían sido tan cuidadosos en sus desarrollos lógicos que los físicos parecían tener la situación completamente en sus manos. De una manera poco menos que milagrosa, las nuevas observaciones se habían ajustado en los lugares aparentemente dispuestos para ellas en las teorías e hipótesis válidas por más de un siglo. Los físicos teóricos percibían que la física se estaba aproximando al estado de un tema clásico ya muerto y tan completamente conocido en detalle que tenía pocas cosas interesantes, si es que las tenía, para que la desenredaran las futuras generaciones. Por esta época los físicos famosos declaraban que todos los descubrimientos importantes en física ya se habían hecho y que gran parte de su aventura había desaparecido; todo lo que se había dejado a las generaciones futuras era la tarea incolora de aumentar la precisión de las medidas de las constantes físicas conocidas y de sus relaciones.

Que este punto de vista estaba completamente equivocado, es la historia de la física moderna, una historia que ha revolucionado por completo la perspectiva total de la física; y que los físicos hayan sido capaces de apreciar este cambio, es aún más significativo. En los capítulos anteriores se ha hecho referencia a la nueva física, es decir, a su desarrollo a partir del año de 1900, aproximadamente. El propósito de este capítulo es considerar algunas de las ideas y conceptos de la física moderna desde un poco antes del descubrimiento del electrón.

**La descarga eléctrica en los gases.** Por 1895, el eminente físico inglés Sir J. J. Thomson, a partir de un trabajo anterior de Crookes, experimentaba la conducción de la electricidad por los gases. Entre otras cosas, observó que el aire seco a la presión atmosférica es un aislador bastante bueno, necesitándose como treinta mil volts por centímetro para perforarlo, es decir, para que pasen cargas eléctricas en formas de chispa; sin embargo, al reducir la presión del aire —por ejemplo, por una máquina neumática— el voltaje necesario para obtener la chispa disminuyó apreciablemente, pero acompañado por un cambio muy notable en el carácter de la descarga. Estos experimentos se llevaron a cabo en una época en que las máquinas neumáticas no sólo eran raras, sino muy ineficaces. En la actualidad, debido a los avances técnicos, máquinas neumáticas muy eficientes se encuentran fácilmente disponibles, lo que hace posible ejecutar estos experimentos ante los ojos de los estudiantes.

**Tubo de descarga de demostración.** Si un tubo de vidrio, de unos 60 o 70 cm de longitud y de 3 o 4 cm de diámetro, con electrodos en sus extremos cerrados, se conecta a una moderna máquina neumática por medio de un tubo unido a uno de sus lados, una sucesión de interesantes fenómenos se observa conforme el aire es gradualmente retirado y una gran diferencia de potencial se mantiene entre los electrodos con una bobina de inducción o alguna otra fuente de varios miles de volts (Fig. 13.1). El experimento se realiza en un cuarto oscuro. Al empezar el experimento a la presión atmosférica no hay descarga visible entre los electrodos, pero poco después aparece una descarga semejante a una chispa larga y rasgada. Al disminuir la presión, la descarga se convierte en filamentos irregulares y de luz color violeta. Poco tiempo después todo el tubo se ve iluminado por un brillo purpúreo, siendo entonces la presión

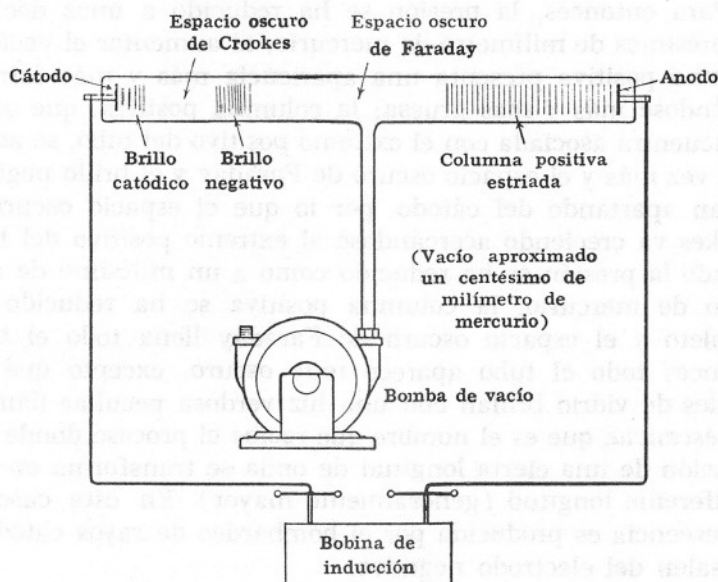


FIG. 13.1. Tubo de descarga

probablemente de sólo unos pocos milímetros de mercurio, o sea, un poco más que algunos milésimos que la presión atmosférica.

Después, el brillo general tiende hacia el rosado y después se vuelve rosado intenso. Mientras tanto, un brillo azul muy definido aparece cerca del electrodo negativo; este brillo se llama el *brillo negativo*. Entre este brillo y la descarga color de rosa se desarrolla un espacio relativamente oscuro, llamado el *espacio oscuro de Faraday*. El brillo color de rosa, que gradualmente se acorta para dejarle lugar al espacio oscuro de Faraday, se conoce como el *brillo positivo* o la *columna positiva*. Pronto esta columna presenta una apariencia especial al fragmentarse en innumerables estrías; simultáneamente el color rosado se debilita transformándose en un color anaranjado pálido, que aun llega a convertirse en blanco. El acortamiento de la columna continúa conforme el espacio oscuro de Faraday y el brillo negativo parecen separarse del cátodo y moverse hacia el electrodo positivo, dejando un segundo espacio oscuro entre el brillo negativo y el cátodo; este espacio oscuro se llama el *espacio oscuro de Crookes*. El mismo cátodo también brilla con una luz violeta llamada *brillo catódico*.

Para entonces, la presión se ha reducido a unos décimos o centésimos de milímetro de mercurio; al aumentar el vacío, la columna positiva presenta una apariencia más y más estriada haciéndose más y más gruesa; la columna positiva, que ahora se encuentra asociada con el extremo positivo del tubo, se acorta cada vez más y el espacio oscuro de Faraday y el brillo negativo se van apartando del cátodo, por lo que el espacio oscuro de Crookes va creciendo acercándose al extremo positivo del tubo. Cuando la presión se ha reducido como a un milésimo de milímetro de mercurio, la columna positiva se ha reducido por completo y el espacio oscuro de Faraday llena todo el tubo. Entonces todo el tubo aparece muy oscuro, excepto que sus paredes de vidrio brillan con una luz verdosa peculiar llamada *fluorescencia*, que es el nombre que recibe el proceso donde una radiación de una cierta longitud de onda se transforma en otra de diferente longitud (generalmente mayor). En este caso, la fluorescencia es producida por el bombardeo de rayos catódicos que salen del electrodo negativo.

**Rayos catódicos.** En esta etapa de vacío se nota que cualquier cuerpo dentro del tubo, y colocado entre los electrodos, proyecta una sombra en el extremo positivo del tubo, lo que indica la existencia de una radiación, que saliendo del cátodo hacia el ánodo se propaga en línea recta ya que forma una sombra definida del cuerpo que está en su camino. Se ha encontrado también que la radiación puede ser enfocada empleando un cátodo en forma de casquete esférico cóncavo. Cuando la radiación es así enfocada en una diana, se genera calor en el punto donde se concentran los rayos; como la radiación emana del cátodo se le ha dado el nombre de *rayos catódicos*. Pronto se demostró que los rayos catódicos pueden ser desviados por los campos magnéticos y eléctricos, lo que prueba que están formados de partículas eléctricamente cargadas, constituyendo así una corriente eléctrica. Debido a que la desviación en un campo magnético es un fenómeno de fuerza lateral, con sentido opuesto al predicho por la regla de los tres dedos de la mano izquierda, se deduce que las partículas que fluyen del cátodo consisten en partículas negativamente cargadas (llamadas ahora *electrones*) que originan una corriente eléctrica de las zonas de bajo potencial a las de alto potencial. Estos electrones son los mismos a los que nos hemos referido en este texto al estudiar la materia y sus



propiedades eléctricas; fue el descubrimiento de los electrones, al experimentar con descargas eléctricas en los gases, lo que abrió la llamada nueva era de la física.

**Rayos X.** Poco después del descubrimiento de los rayos catódicos observó Roentgen que cuando eran enfocados sobre una diana metálica colocada dentro del mismo tubo al vacío, se emitía una radiación secundaria que se llamó la *radiación de rayos X*, la que no debe ser confundida con la radiación catódica (Fig. 13.2). Los rayos X son semejantes a la luz y se caracterizan especialmente porque pueden atravesar sustancias relativamente opacas; no sólo hacen posible las modernas fotografías de sombras de rayos X, sino que en la actualidad son muy empleados en los hospitales con fines de diagnóstico. La naturaleza de los rayos X depende de varios factores, como la caída de potencial a través del tubo, el grado de vacío y la sustancia que forma a la diana. A veces los rayos X se llaman rayos Roentgen, en honor a su descubridor.

**Aplicaciones de los tubos de descarga.** Los tubos con vacío parcial recorridos por una descarga eléctrica, como en el experimento antes descrito, se llaman *tubos de Geissler*. El color de la descarga depende del gas que llena al tubo. Los modernos anuncios de neón no son sino tales tubos de descarga, empleando gas neón en lugar de aire debido al color rojo característico del neón cuando se activa de esta manera.

La moderna iluminación fluorescente representa otra aplicación de los tubos de descarga. En lugar de emplear un filamento incandescente como fuente de luz, se emplea el fenó-

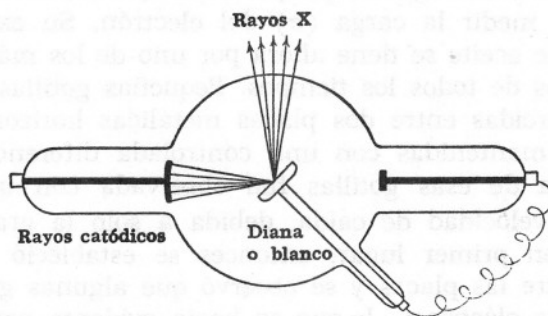


FIG. 13.2. Los rayos X se producen por medio de los rayos catódicos al bombardear una diana

meno de fluorescencia, recubriendo las paredes interiores del tubo con varias sustancias químicas capaces de producir diferentes colores; esas lámparas funcionan más económicamente que las de filamento.

**Aspectos cuantitativos del electrón.** J. J. Thomson no sólo estableció que los rayos catódicos son una corriente de electrones negativamente cargados, sino que también midió muy ingeniosamente una característica del electrón, a saber, la relación entre su carga y su masa. Una corriente de electrones fue sometida primero a un campo magnético transversal de intensidad conocida; en consecuencia, la corriente adquirió un movimiento circular cuyo radio fue medido. Luego, un campo eléctrico de intensidad conocida fue aplicado perpendicularmente, tanto a la corriente electrónica como al campo magnético para equilibrar justamente el efecto de la fuerza lateral debida al campo magnético. Las fuerzas que se equilibran son la fuerza centrípeta (Pág. 57), que puede calcularse en función de la masa de electrón; su carga y el radio de curvatura de su trayectoria cuando sólo estaba aplicado el campo magnético; también las intensidades tanto del campo eléctrico como del magnético; todas las magnitudes directamente medibles, excepto las dos primeras. De este modo se encontró que la relación de la carga a la masa del electrón ( $e/m$ ) vale  $1.76 \times 10^{11}$  coulombs por kilogramo. Así, aunque el electrón es tan pequeño que sólo puede verse con la mente, es, sin embargo, posible para nosotros medir una de sus características físicas.

**Determinación por Millikan de la carga del electrón.** Se hizo referencia en la Pág. 134 que por 1910 el físico americano Millikan pudo medir la carga ( $e$ ) del electrón. Su experimento de la gota de aceite se tiene ahora por uno de los más famosos experimentos de todos los tiempos. Pequeñas gotillas de aceite fueron esparcidas entre dos placas metálicas horizontales que podían ser mantenidas con una controlada diferencia de potencial. Una de esas gotillas fue observada con un microscopio y su velocidad de caída, debida a sólo la gravedad, se determinó en primer lugar; entonces se estableció el campo eléctrico entre las placas y se observó que algunas gotillas llevaban cargas eléctricas, lo que se hacía evidente por un cambio brusco en el movimiento de la gota. En función de magnitudes medibles —como la densidad y viscosidad del aceite,

la velocidad de la gotilla, etc.—, fue posible determinar, de una manera relativa, la carga eléctrica adquirida por la gotilla. El hecho interesante es que cada carga observada es un múltiplo de una cierta carga fundamental y, suponiendo que una gotilla de aceite no pueda adquirir una carga menor, se llega a la conclusión de que esta carga fundamental observada es la carga de un electrón que vale  $1.6 \times 10^{-19}$  coulomb, siendo negativa.

Empleando este valor de  $e$  y el encontrado por J. J. Thomson para  $e/m$  ( $1.76 \times 10^{11}$  coulombs por kilogramo), se deduce que  $m$  (la masa del electrón) es de  $9 \times 10^{-31}$  kg.

Estos dos experimentos son especialmente señalados aquí, no sólo porque ahora son considerados clásicos en la física moderna, sino también porque son un ejemplo de cómo la “nueva” física se extrapola de la “vieja” física. De la primera fue necesario tomar en cuenta los conceptos clásicos de masa, velocidad y la fuerza centrípeta, así como los conceptos de campo eléctrico y magnético, atracción electrostática, fuerza electromagnética lateral, etc., para dar un significado cuantitativo al nuevo concepto del electrón. En el segundo caso fue necesario tomar en cuenta los fenómenos asociados con la caída de los cuerpos, la densidad, la viscosidad, etc., con objeto de interpretar las medidas. Se deduce que un conocimiento real de la física moderna necesita un fondo de física clásica.

**Emisión termoiónica.** Con el descubrimiento del electrón se encontró otro fenómeno que es fundamental en las comunicaciones modernas, el *efecto Edison* o emisión termoiónica de electrones. Un filamento calentado dentro de un bulbo al vacío emite electrones que pueden ser lanzados, por atracción electrostática, hacia una placa positivamente cargada (Fig. 13.3). Este fenómeno es el principio básico de todos los bulbos de la radio y de la multitud de tubos llamados de control que se emplean en innumerables aparatos electrónicos (Fig. 13.4). El tubo de rayos X moderno emplea la emisión termoiónica para producir los electrones obtenidos por la emisión de un filamento caliente, los electrones son dirigidos hacia una diáfragma, donde se emiten los rayos X.

**Efecto fotoeléctrico.** Otro interesante fenómeno electrónico es el de la emisión de electrones por la superficie de ciertas sustancias debida a la acción de la luz o, en general, de la ra-

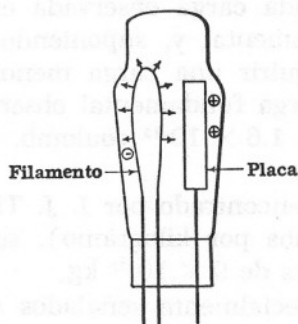


FIG. 13.3. Cuando un filamento se calienta en el vacío emite electrones que luego son atraídos por una placa positivamente cargada, produciéndose así una corriente entre el filamento y la placa. El flujo tiene lugar sólo cuando la placa está positivamente cargada, por lo que el tubo actúa como una válvula eléctrica

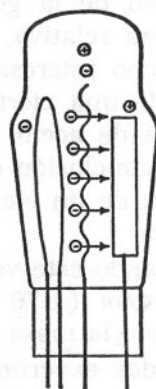


FIG. 13.4. La rejilla sirve para controlar el flujo de electrones a la placa; pequeñas variaciones de su carga provocan grandes variaciones de la corriente (amplificación)

diación, incluyendo los rayos X. Este fenómeno se llama el *efecto fotoeléctrico*; en él se basa el funcionamiento de la celda fotoeléctrica, o como se le llama popularmente, el ojo eléctrico. Cuando la luz ilumina una de estas celdas se establece una corriente eléctrica, pero al dejar de iluminar, la corriente se interrumpe (Fig. 13.5). De este modo, una corriente eléctrica puede controlar regulando la intensidad de la luz que recibe la celda; debido a esto, la celda fotoeléctrica es un aparato muy útil para controlar las corrientes eléctricas, desempeñando un papel muy importante en el funcionamiento de las películas sonoras y de la televisión. En el primer caso, un rayo de luz varía en intensidad o en dirección al pasar por ciertas marcas colocadas a un lado de la película; de este modo una corriente eléctrica es obligada a variar controlando así el mecanismo sonoro. En el caso de la televisión, la luz reflejada por el sujeto se recoge con un mecanismo de exploración en donde la corriente eléctrica varía de acuerdo con las variaciones de intensidad de la luz reflejada. En el receptor de televisión el conjunto de operaciones esencialmente se invierte

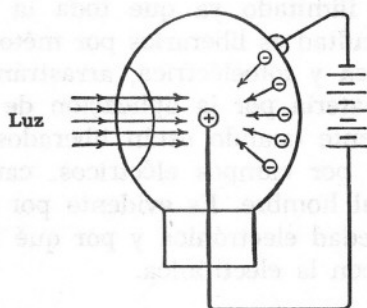


FIG. 13.5. Funcionamiento de la celda fotoeléctrica. La luz que incide en el interior de un bulbo al vacío, recubierto interiormente con ciertas sustancias activas, obliga a que los electrones sean emitidos. Estos electrones son atraídos por el electrodo positivamente cargado, pasando así una corriente eléctrica capaz de ser controlada por las variaciones de la intensidad luminosa

y la variación de la corriente se traduce en una imagen visual proyectada en la pantalla.

La explicación del efecto fotoeléctrico se basa en la teoría cuántica de Planck. Aunque esta teoría fue desarrollada para explicar la naturaleza de la radiación del calor (Pág. 149), Einstein sugirió su empleo para explicar dos aspectos del efecto fotoeléctrico: (1) que la emisión de electrones tiene lugar solamente cuando la frecuencia de la luz incidente excede un cierto valor crítico llamado el umbral de frecuencia y (2) que la velocidad, y por tanto la energía cinética de los electrones emitidos, depende sólo de la frecuencia de la luz y no de su intensidad, como podría esperarse. Esta hipótesis fue posteriormente comprobada en forma experimental por Millikan, aumentándose así la confianza de los físicos en la teoría cuántica.

**Electrónica.** El término "electrónica" se da a todos aquellos fenómenos en donde interviene el nombre "electrón". Las aplicaciones de esta área de la física son numerosas; como muchas de ellas se encuentran en el campo de las comunicaciones —radio, radar, televisión, etc.—, algunas personas creen erróneamente que la electrónica significa sencillamente estas cosas. Actualmente, sin embargo, las aplicaciones médicas e industriales son muy extensas. En realidad, los rayos X forman parte de la electrónica. En verdad, el campo de la electrónica



es prácticamente ilimitado ya que toda la materia contiene electrones; la dificultad es liberarlos por métodos tales como la emisión termoiónica y fotoeléctrica, arrastrándolos, literalmente, fuera de la materia por la aplicación de altos voltajes en el vacío. Únicamente cuando están liberados pueden ser manipulados sin fin por campos eléctricos, campos magnéticos, etc., para servir al hombre. Es evidente por qué esta edad se llama a menudo edad electrónica y por qué la física moderna está involucrada con la electrónica.

**Radiactividad.** Por la época en que Roentgen descubría los rayos X (1905-1906), Becquerel hizo un descubrimiento tan importante como el aislamiento del electrón y el descubrimiento de los rayos X. Becquerel observó que ciertas sales de uranio emiten espontáneamente radiaciones, cuyos efectos pueden ser estudiados cuando se someten a campos eléctricos y magnéticos. Poco después, madame Curie y Pedro Curie concentraron a partir de los minerales de uranio, ciertas sustancias que llamaron polonio y radio, que mostraban el fenómeno de la desintegración espontánea de modo muy marcado. Actualmente a este fenómeno de la desintegración espontánea se le llama *radiactividad*. Las sustancias radiactivas emiten partículas cargadas eléctricamente y una radiación semejante a los rayos X; antes de que su naturaleza fuera conocida se les llamó rayos alfa, beta y gamma. Los rayos *alfa* están formados por partículas que ahora se sabe son núcleos de átomos de helio; como llevan dos cargas positivas se dice que son átomos de helio doblemente ionizados. Los rayos *beta* son una corriente de cargas negativas. Finalmente, los rayos *gamma* son de carácter ondulatorio, más bien que corpuscular, con una longitud de onda muy corta, siendo del mismo tipo que los rayos X (Fig. 13.6).

**Estructura atómica.** El descubrimiento de la desintegración radiactiva sugirió que los átomos, en lugar de ser entidades indivisibles —como se había supuesto hasta entonces—, tenían en realidad una estructura propia, incluyendo componentes subatómicos. Gran parte de la física moderna se dedica a investigar la naturaleza del átomo y de las partes que lo componen. Las partículas alfa son empleadas como balas para bombardear los átomos, intentando así entender cuál es su estructura. Como ya se dijo (Pág. 111), actualmente se considera al átomo formado por un núcleo positivamente cargado,

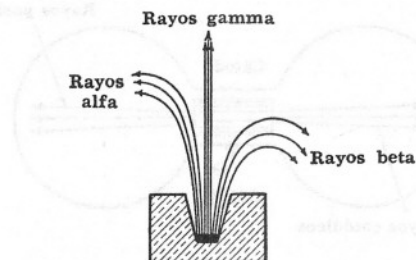


FIG. 13.6. La sustancia radiactiva se encuentra en una cavidad de un bloque de plomo. El efecto de un campo magnético perpendicular al diagrama, es separar entre sí a los rayos alfa, beta y gamma. Los rayos beta son muy desviados hacia un lado, los rayos alfa son menos desviados hacia el otro lado y los rayos gamma no son desviados

rodeado por una distribución de cargas eléctricas negativas. Se ha encontrado posible aun producir sustancias artificialmente radiactivas bombardeándolas, con partículas aceleradas a muy grandes velocidades, por medio de aparatos como el generador de Van de Graaf y el ciclotrón de Lawrence. Estos aparatos son capaces de dotar a las partículas —electrones, protones u otros iones— con energías equivalentes a millones de electrón-volts. (El *electrón-volt* es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por la diferencia de potencial de un volt.) Estos aparatos se han desarrollado con el propósito de romper los átomos y sus núcleos en pedazos, con objeto de que los productos de esta desintegración puedan estudiarse. Se espera que la desintegración del núcleo abra nuevos campos de conocimiento, como sucedió al romperse los átomos hace algunas generaciones.

**Rayos positivos e isótopos.** Junto al descubrimiento de los rayos catódicos, o negativos, se observó una radiación positiva fluyendo del cátodo al ánodo. Esta radiación se descubrió empleando cátodos perforados que permitían a las partículas originadas en el ánodo, pasar por las perforaciones y así ser detectadas en la pared opuesta al ánodo (Fig. 13.7).

Mientras que los rayos catódicos consisten en partículas negativamente cargadas, todas exactamente iguales (como se demuestra por la acción que tiene un campo magnético sobre ellas), se ha encontrado que los rayos positivos consisten en iones positivamente cargados con varias masas y cargas. Es

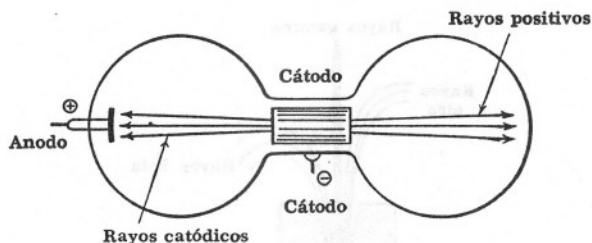


FIG. 13.7. Los rayos positivos son emitidos por el ánodo y los rayos negativos por el cátodo. Los primeros son iones positivos. Tanto los rayos positivos como los negativos se desvían tanto con los campos eléctricos como con los magnéticos

evidente, entonces, que los átomos de un elemento químico dado pueden tener diferentes masas, esto es, pueden tener diferentes propiedades físicas aunque tengan las mismas propiedades químicas. Estas formas diferentes de un elemento se llaman sus *isótopos*. El menos masivo de todos ellos tiene una masa aproximadamente igual a la del átomo de hidrógeno y se llama un *protón*; siendo su carga numéricamente igual a la del electrón, pero con signo positivo en lugar de negativo. Por otra parte, su masa es unas 1845 veces mayor que la del electrón; por consiguiente, resulta que un átomo ordinario de hidrógeno es una combinación de un protón y un electrón. El hidrógeno tiene también un isótopo con doble masa que la del protón, pero con la misma carga eléctrica. Este isótopo se llama *deuterón*. Cuando dos átomos de hidrógeno ordinario se combinan con uno de oxígeno, forman una molécula de agua ordinaria, pero si en lugar de protones entran en la combinación deuterones, se obtiene la llamada *agua pesada*, cuyas propiedades físicas son un poco diferentes de las del agua ordinaria. Prácticamente todos los elementos tienen uno o más isótopos.

**Teoría de Bohr.** Estos hechos elementales relacionados con las partículas eléctricas sirvieron para desarrollar una sucesión de teorías relacionadas con la estructura atómica; probablemente la más famosa de todas ellas es la teoría de Bohr, enunciada en 1913 y que ya hemos mencionado. De acuerdo con esta teoría el átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón girando a su alrededor, así como la Luna gira alrededor de la Tierra (Fig. 13.8.) El átomo de helio tiene un núcleo con dos cargas positivas y dos electrones girando a su

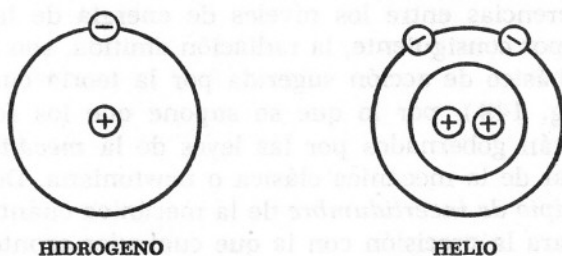


FIG. 13.8. El átomo de hidrógeno y el de helio, según el concepto de Bohr, con cargas eléctricas negativas girando alrededor del núcleo positivamente cargado. El núcleo de helio es la partícula alfa que se obtiene en la desintegración radiactiva; su masa es cuatro veces mayor que la del protón

alrededor, teniendo el núcleo una masa cuatro veces mayor que la del protón. De esta manera, los átomos de todos los elementos están formados por una combinación de cargas eléctricas positivas y negativas configurando sistemas dinámicos de estructura más o menos complicada. El éxito original de esta estructura fue la explicación de los espectros ópticos, de los que hablaremos después. Sin embargo, la teoría se ha encontrado inadecuada en muchos detalles, por lo que actualmente ha sido suplantada por otras teorías que no son adecuadas para una representación pictórica, por lo que la teoría de Bohr aún se explica en muchas discusiones populares sobre la estructura atómica.

El *modelo de Bohr* representa la estructura exterior del átomo como formada por electrones girando en órbitas elípticas alrededor del núcleo —un solo electrón, en el caso del hidrógeno y un número mayor conforme los átomos se complican hasta llegar al Lawrencio, el más complicado de la tabla periódica de los elementos—. En este modelo varias órbitas son posibles dependiendo del estado de excitación del átomo; las órbitas mayores conteniendo más energía que las menores. Por otra parte son más importantes estos discretos *niveles de energía*, que el concepto de órbitas. Los espectros ópticos y de rayos X se explican por la emisión de radiación al caer los electrones de las órbitas exteriores a las interiores, o sea, de un nivel mayor de energía a uno menor. El espectro del hidrógeno se explica así casi por completo, pero se han encontrado discrepancias en los espectros de sustancias más complicadas.

Las diferencias entre los niveles de energía de las órbitas de Bohr, y, por consiguiente, la radiación emitida, son múltiplos del *cuanto* básico de acción sugerida por la teoría cuántica de Planck (Pág. 149), por lo que se supone que los fenómenos atómicos están gobernados por las leyes de la *mecánica cuántica*, en lugar de la mecánica clásica o newtoniana. De acuerdo con el *principio de incertidumbre* de la mecánica cuántica existe un límite para la precisión con la que cualquier acontecimiento puede ser determinado. Estas son incertidumbres fundamentales. Por ejemplo, la posición y el ímpetu no pueden medirse simultáneamente con ilimitada precisión. Conforme la precisión de una determinación aumenta, la certeza de otra disminuye. El producto de las incertidumbres de estas dos cantidades es aproximadamente igual a la constante de Planck,  $h$ , la constante fundamental que aparece en la teoría cuántica de Planck. Este principio es sólo significativo para aquellas partículas de tamaño atómico o menores y queda completamente oscurecido en el caso de los fenómenos en el mundo macroscópico.

Mucho tiempo después del descubrimiento del electrón y del protón, estas partículas eran consideradas las únicas constituyentes de la materia. Hasta por 1940 este número aumentó al descubrirse el neutrón y a los pocos meses por el descubrimiento del electrón positivo. El *neutrón* es una partícula que no tiene carga y cuya masa es aproximadamente igual a la del protón. El *electrón positivo* (o *positrón*) lleva una carga positiva, pero, por otra parte, tiene todas las características del electrón negativo. Es evidente ahora que el núcleo de todos los átomos está compuesto fundamentalmente de protones y neutrones. Gran parte del trabajo actual de investigación está dedicado al posible descubrimiento de otras partículas fundamentales y al estudio del núcleo atómico. Sólo ayer se encontró que el átomo tenía una estructura; hoy la atención de los físicos se enfoca en la estructura de una de sus partes componentes, el núcleo; mañana se harán, probablemente, los más sorprendentes descubrimientos.

**El núcleo del átomo.** El núcleo del átomo parece estar formado de partículas llamadas nucleones que se mantienen reunidas por fuerzas no bien conocidas, por lo que los detalles de su estructura no están aún muy claros. Básicamente hay dos teorías diferentes: el modelo de gota y el modelo de capas.



En el primero se consideran fuerzas nucleares mucho mayores que las de Coulomb (las de atracción y repulsión electrostática) que actúan de manera análoga a las fuerzas de tensión superficial, obligando a los componentes del núcleo a reunirse en algo semejante a una gota de líquido. En el modelo de capas se postulan niveles de energía, semejantes a las capas o niveles de energía asociados con la estructura atómica.

Los componentes nucleares incluyen el *protón*, el *neutrón*, el *positrón*, varios *mesones* (partículas mucho más masivas que los electrones y cargadas positiva o negativamente), y otras innumerables partículas llamadas *piones*, *muones*, *partículas extrañas* y varias clases de las llamadas *antipartículas*.

Los aparatos para detectar los componentes nucleares incluyen a los siguientes:

*El contador de Geiger-Mueller* que consiste en un alambre montado coaxialmente dentro de un cilindro metálico, pero aislado eléctricamente y con un potencial muy alto con respecto a dicho cilindro; el alambre se descarga momentáneamente cuando una partícula cargada (alfa o beta) entra al tubo, penetrando por una ventana de lámina muy delgada.

*La cámara de niebla de Wilson.* Es un aparato donde se condensan las gotillas de vapor de agua sobre diminutas partículas cuando el vapor se dilata, formando trazos que pueden ser observados visual o fotográficamente y los cuales indican la presencia reciente de dichas partículas.

*Las emulsiones fotográficas.* También pueden emplearse para detectar a las partículas.

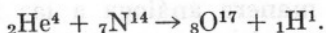
*La cámara de burbujas.* Emplea hidrógeno líquido sobresaturado, para formar las huellas de los trayectos de las partículas.

*Los contadores de centelleo.* Consisten en muchas fotoceldas orientadas de tal forma que pueden multiplicar diminutas corrientes eléctricas.

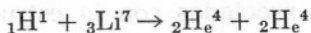
**Rayos cósmicos.** Estos constituyen una fuente de partículas nucleares; se originan en el espacio exterior y se ha descubierto que penetran en la atmósfera de la Tierra. Formadas principalmente por protones, al chocar con la materia producen una radiación cósmica secundaria en chubascos y estallidos.

**Reacciones y transformaciones nucleares.** En 1919 Rutherford demostró que el nitrógeno bombardeado con partículas

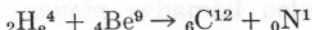
alfa (núcleos de helio) es transformado en oxígeno con liberación de protones, de acuerdo con la siguiente reacción:



También el litio cuando se bombardea con protones se transforma en helio:



Los neutrones fueron producidos por primera vez por Chadwick en 1930, bombardeando berilio con partículas alfa:



*Nota:* El subíndice a la izquierda indica el llamado *número atómico*  $Z$ ; mientras que el índice superior a la derecha indica la llamada *masa atómica*  $A$ . Esta masa vale 16 para el oxígeno, siendo el número entero más próximo a su peso atómico;  $Z$  es el número de protones que contiene en el núcleo, esto es, especifica su carga positiva.

**Decaimiento radiactivo y semivida.** La emisión espontánea de partículas alfa y beta de sustancias naturalmente radiactivas (en contraste con las artificiales) están acompañadas por cambios de posición de la sustancia en la tabla periódica de los elementos. La expulsión de una partícula alfa por un núcleo representa una pérdida de dos protones y de dos neutrones, por lo que el número másico  $A$  *disminuye* en cuatro unidades, mientras que el número atómico *disminuye* en dos. La emisión de una partícula beta corresponde a una pérdida despreciable de masa, pero a un *incremento* en una unidad del número atómico  $Z$ . Por consiguiente, los materiales radiactivos decaen generalmente en etapas bien definidas hasta una sustancia final estable —por lo general algún isótopo— del plomo, si se parte de elementos pesados como el radio, el uranio, el torio, el actinio, etc.

La *semivida* es el tiempo que necesita una sustancia para perder la mitad de su actividad. La semivida varía desde fracciones de segundo hasta millones de años, pero cada isótopo tiene su semivida característica.

**Energía nuclear de enlace.** Cuando tienen lugar las reacciones nucleares y los nucleones se combinan para formar al núcleo (como cuando los neutrones y los protones se combinan

para formar un núcleo de helio), o cuando los núcleos se desintegran naturalmente (radiactividad natural) o en forma artificial por bombardeo por otros nucleones (radiactividad artificial), por lo general la masa del núcleo no es igual a la suma de las masas de los nucleones componentes. Esta diferencia se llama *energía de enlace*, teniendo en cuenta la relación de Einstein entre la masa y la energía,  $E = mc^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. La energía de enlace por nucleón es una función de número másico  $A$ , siendo mayor para los elementos que están cerca del centro de la tabla periódica y menor para los elementos que están en los extremos.

**Fisión.** Al principio de 1939 se hizo el notable descubrimiento de que cuando ciertas sustancias (notablemente el isótopo 235 del uranio) eran bombardeadas por neutrones lentos, bajo condiciones apropiadas, el núcleo se partía en componentes que incluían átomos de bario y de kriptón, es decir, sustancias colocadas cerca del centro de la tabla periódica. Este proceso se llama ahora *fisión nuclear*. Junto con el hendimiento se observó la liberación de una radiación gamma de alta intensidad (ondas electromagnéticas) y de neutrones adicionales que, al chocar con otros isótopos del uranio, producen más componentes, más radiación y más neutrones, prosiguiéndose así la reacción. Este proceso puede controlarse por medio de *moderadores* como el cadmio o el agua (preferiblemente la pesada) o puede permitirse que quede fuera de control.

La energía de la radiación es equivalente a la energía de enlace liberada de acuerdo con la ecuación de Einstein  $E = mc^2$ , que sumada para los miles y miles de millones de átomos que contienen unos pocos kilogramos de uranio, representan una fantástica energía comparable con la energía liberada por la explosión de miles de toneladas de T.N.T.

**La bomba atómica.** Las posibilidades militares de la energía atómica se reconocieron inmediatamente. Esto condujo al desarrollo de la bomba atómica como un secreto de la guerra, a un costo de unos dos mil millones de dólares. Cuando se acumula una cantidad crítica de U 235, una reacción nuclear en cadena, que se sustenta a sí misma, es la consecuencia necesaria. La reacción tiene lugar muy rápidamente con la obtención de una tremenda cantidad de energía. Al romper un neutrón a un átomo de uranio se obtienen neutrones adicionales que, a su vez, rompen otros átomos, prosiguiéndose así la reacción

hasta emplear todo el U 235. Otro importante fenómeno de este proceso es la creación del nuevo elemento plutonio, que también puede ser fisionado. Con métodos, que aún ahora son secretos militares cuidadosamente guardados, en el verano de 1945 se fabricaron devastadoras bombas atómicas, utilizando la fisión nuclear. Aquella fecha marcó la primera ocasión en la que el hombre pudo liberar grandes cantidades de energía atómica y aún no puede predecirse las consecuencias sociales y económicas de este importante evento. Tocó a la Segunda Guerra Mundial estimular la física nuclear acumulando en pocos años tanta investigación como la que normalmente se habría desarrollado probablemente en veintenas de años.

**La fusión y la bomba de hidrógeno (dispositivo termonuclear).** Las temperaturas producidas en el proceso de fisión son suficientemente grandes para producir la *fusión* de los núcleos de hidrógeno (protones) y de los neutrones en núcleos de helio (partículas alfa) con la liberación, en forma de radiación, del exceso de radiación necesaria para reunir estos nucleones (el hidrógeno y el helio están en el extremo inferior de la tabla periódica, donde la energía de enlace no es de las mayores).

Así se volvió posible, después del desarrollo de la bomba atómica, la *bomba de hidrógeno*, de tamaño teóricamente ilimitado. Antes de la bomba atómica la temperatura necesaria para obtener la de hidrógeno no era sólo inasequible, sino inconcebible de obtener. Incidentalmente, se producen menos desechos radiactivos con la bomba H que con la bomba A.

**Enlace molecular.** Las moléculas, siendo agregados de átomos, se mantienen reunidas por varias fuerzas. Para aquellas moléculas que son combinaciones sencillas de iones positivos y negativos, la fuerza de Coulomb parece ser suficiente. Para las moléculas diatómicas como la de  $H_2$ , los átomos parecen repartirse los dos electrones originándose entonces las llamadas *fuerzas de intercambio*. El *principio de exclusión de Pauli*, sugiere que cuando un átomo se aproxima a otro para formar una molécula, los electrones de uno penetran en las capas de energía ocupadas del otro, pero de algún modo son obligadas a pasar a estados superiores de energía, porque no es permitida la acumulación de las capas de energía. Así se explica cómo se desarrollan las fuerzas atractivas que mantienen juntas a las

moléculas, pese a la repulsión de las fuerzas de Coulomb entre los dos núcleos positivos.

**Física del estado sólido.** Los átomos de un sólido se reúnen por medio de fuerzas que dan por resultado una estructura cristalina. En los metales los electrones son libres de moverse dentro del cristal saltando de un átomo a otro, ya que no parecen encontrarse asociados a ningún átomo en particular.

Mientras clásicamente la energía de vibración de las moléculas y de los átomos se supone que vale cero en el cero absoluto, la mecánica cuántica predice un residuo de energía atómica en el 0° de la escala absoluta de temperatura. La cuantización de las ondas vibratorias en las redes cristalinas, origina el concepto del *fonón*, un equivalente elástico del *fotón* electromagnético.

En un sólido los niveles de energía de los átomos componentes se ensanchan para formar las llamadas *bandas de energía*. En el cero absoluto (Pág. 130) los electrones se encuentran en la banda, o nivel, mínimo posibles, esto es, los niveles inferiores de energía se encuentran llenos, pero al elevarse la temperatura los electrones se excitan y tienden a ocupar las bandas más altas. En los metales las bandas llamadas de conducción no están llenas por completo. Los *conductores*, los *semiconductores* y los *aisladores* se diferencian entre sí por la extensión en que se encuentran llenas las bandas de conducción (las superiores). El llamado *nivel de Fermi* de una sustancia es aquel nivel, a una temperatura dada, donde la probabilidad de que un electrón ocupe cualquier estado disponible de energía es del 50%.

Los *semiconductores con impurezas* (o contaminados) se forman cuando se les agregan pequeñas cantidades de otra sustancia (por ejemplo se les agrega arsénico a un cristal de germanio). Esto altera la distribución de los electrones en la banda de valencia y en la de conducción (separadas por el nivel de Fermi). Un átomo de arsénico suministra un electrón extra de conducción, por lo que se llama una *impureza donadora* (donora) y produce el llamado semiconductor tipo *n*. Las *impurezas aceptadoras* (aceptora) originan los llamados semiconductores tipo *p* en donde los electrones faltantes producen las llamadas *cavidades* (u hoyos) disponibles para la conducción.



**El transistor.** Es una unión  $n-p-n$  que tienen importantes aplicaciones como amplificador pudiendo reemplazar a los bulbos de muchos circuitos electrónicos.

**El laser.** Es un aparato del estado sólido en donde los átomos son excitados de un estado de baja energía a uno de alta, por medio de un procedimiento novel en donde la luz de alta frecuencia que es emitida por los átomos regresan a su estado original es, por así decirlo, "bombardeada" en ellos. Como resultado, un número de átomos mayor que el normal se encuentra en sus estados superiores, por lo que cuando la radiación es estimulada, resulta muy amplificada, mientras que la frecuencia permanece igual a la de la fuente estimulante y, por tanto, se dice que es coherente.

**Sumario.** En este capítulo se ha desarrollado la fisión moderna desde los primeros experimentos de conducción eléctrica a través de gases, hasta las modernas máquinas de altísimos voltajes empleadas en las máquinas que se usan en experimentos de desintegración. Aunque se han mencionado muchos tópicos, el estudiante no debe suponer que esta discusión ha sido completa; la física moderna es un tema demasiado grande para que pueda tratarse en un solo capítulo, pero para el propósito de este panorama descriptivo de la física, la exposición es adecuada para dar una orientación apropiada al principiante. Por otro lado, este capítulo ha sido más detallado que los anteriores debido a la importancia que tiene en la sociedad la física moderna. Se ha intentado enterar al estudiante del gran número de términos técnicos, que en años recientes se han deslizado en el vocabulario; esto incluye los nombres de muchas partículas atómicas; la descripción usada para describir las transformaciones nucleares; los diversos conceptos de la física del estado sólido y algunos aparatos como el transistor y el laser, para nombrar unos pocos. Se ha intentado también recalcar la necesidad de comprender los conceptos de la física clásica, antes que pueda tenerse una apreciación verdadera de los conceptos de la física moderna.

Gran parte de la física moderna se encuentra en la óptica, que será tratada en los capítulos siguientes. Empezaremos con una descripción de los fenómenos ópticos y terminaremos con el tema de la naturaleza de la luz.

**CUESTIONARIO**

1. Describa brevemente la apariencia de la descarga eléctrica en un tubo de vidrio cuando la presión del aire se va reduciendo.
2. ¿Qué diferencia hay entre los rayos catódicos y los rayos X?
3. ¿En qué consiste el efecto fotoeléctrico?
4. En general, ¿a qué se refiere el término "electrónica"?
5. ¿En qué consiste la radiactividad?
6. ¿En qué se diferencian las partículas alfa, las partículas beta y los rayos gamma?
7. ¿Cómo es el modelo de Bohr de un átomo de hidrógeno?
8. ¿Qué son los isótopos?
9. ¿En qué difiere un neutrón de un electrón o de un protón?
10. ¿En qué consiste la fisión nuclear?

## CONSIDERACIONES OPTICAS

### FOTOMETRIA; LEYES DE LA OPTICA GEOMETRICA; APARATOS OPTICOS

**Ambito de la óptica.** De todos los fenómenos físicos, ninguno más fascinante y de más inmediato interés que el relacionado con la visión humana. Las palabras color, luz solar, diseño geométrico e instrumentos ópticos, también contribuyen al complejo dominio de la óptica. Este campo incluye también los temas de iluminación, fotografía, microscopia, espectroscopia, optometría y polarización, así como el estudio de ciertas cuestiones filosóficas tales como la naturaleza de la luz. Puede verse que la óptica es un tema muy amplio; pero que forma parte de un tema mayor; la física.

**Naturaleza compleja de este estudio.** Desde un punto de vista estrictamente lógico, esta parte de la física está menos adaptada a los métodos empleados en las partes precedentes de este texto, es decir, al desarrollo lógico al pasar, de un tópico a otro. Esto se debe no sólo a la complicación del tema, sino también a la falta de un punto lógico inicial. Históricamente ya se conocían muchos fenómenos muy complicados y en apariencia sin relación, antes que se conocieran otros más sencillos. Filosóficamente ha existido una perpetua controversia entre los partidarios de la teoría corpuscular y los de la teoría ondulatoria de la naturaleza de la luz. Por otra parte, los puntos de contacto entre la óptica y las demás partes de la física son numerosos, pero al mismo tiempo tan diversos como el estudio de la geometría y el de los colores del arco iris. En verdad es esta diversidad la que nos proporciona la clave para un estudio sistemático de los fenómenos ópticos.

**Optica geométrica vs. óptica física.** El estudio de la óptica se divide en dos secciones principales que son la *óptica geométrica* y la *óptica física*. La primera trata acerca de los rayos de luz que se mueven en línea recta y con las imágenes producidas por refracción y reflexión; la segunda trata de la naturaleza física de la luz y los fenómenos relacionados: consideraremos sucesivamente cada una, empezando con la óptica geométrica de acuerdo con el desarrollo histórico. Las investigaciones de las últimas décadas han tenido una gran importancia en relación con la óptica física, que se tratará en el capítulo siguiente, y final, de este libro.

**Primeras teorías.** En la antigüedad se opinaba que la luz y la visión eran prácticamente lo mismo; se pensaba que la luz se originaba en el ojo haciendo contacto de un modo misterioso con los cuerpos observados. Parece extraño que nadie estuviera perturbado por el hecho de que los cuerpos invisibles a los ciegos fueran visibles a los demás. Un punto de vista posterior atribuía a los cuerpos luminosos la propiedad de emitir partículas de luz capaces de moverse en línea recta y de impresionar el ojo del observador. Que el cuerpo luminoso es el que emite y el ojo el que recibe es el punto de vista moderno, pero que la radiación en sí misma sea corpuscular u ondulatoria es un tema que han discutido los físicos a lo largo de toda la historia de la física.

**Propagación rectilínea de la luz.** Un hecho, sin embargo, es cierto: el del movimiento de la luz en línea recta, lo que técnicamente se llama la *propagación rectilínea* de la luz, lo que se prueba, al menos superficialmente, por la formación de sombras bien definidas (Fig. 14.1) la cámara oscura también demuestra este hecho (Fig. 14.2). El concepto de rayos de luz se sugiere de este modo. Estos *rayos* son emitidos ya sea por los cuerpos que son luminosos por sí mismos, o bien, son re-

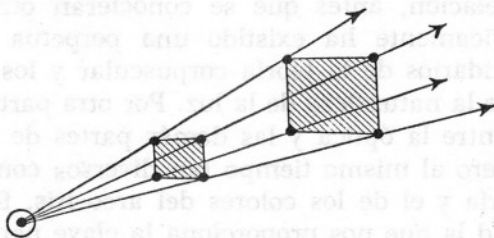


FIG. 14.1. Propagación rectilínea de la luz

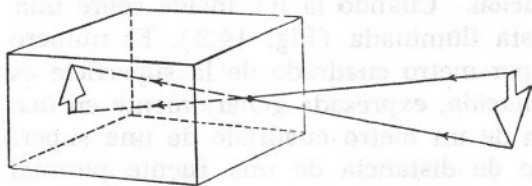


FIG. 14.2. La cámara oscura demuestra la propagación rectilínea de la luz

flejados de los cuerpos iluminados para poder ser percibidos por el ojo. Por supuesto, hablando objetivamente, el ojo no es en general, una parte del fenómeno óptico.

**Fotometría.** El concepto de rayos lleva a la noción de la simetría esférica de la radiación alrededor de una fuente puntual de luz y sugiere un modo de medir la cantidad de la luz. Este campo de la óptica se llama *fotometría*. La fuente luminosa se compara con una bujía o candela, en cuya unidad se mide la intensidad de una fuente luminosa. Por ejemplo, una fuente luminosa de cien candelas es unas cien veces más intensa que el tipo especificado de bujía. Una candela normal es la que emite un número especificado de lúmenes de luz, siendo el *lumen* la unidad de cantidad de luz. Si una fuente luminosa es tan pequeña que pueda imaginarse como un punto matemático, las reglas de la geometría en el espacio son suficientes para calcular las cantidades de luz emitidas por fuentes de diversas intensidades. Si una fuente no es puntual, sino que tiene superficie, se habla más bien de su brillo que de su intensidad: el *brillo* se refiere a cuantos lúmenes emite por unidad de área.

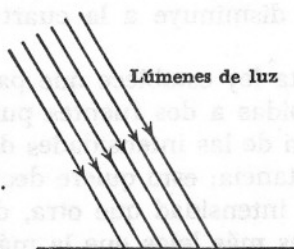


FIG. 14.3. La iluminación de una superficie se mide por medio del número de lúmenes que inciden sobre el área unidad. Un lumen por metro cuadrado se llama *lux* y es la iluminación que recibe una superficie de un metro cuadrado, que esté a un metro de distancia de la candela normal



**Iluminación.** Cuando la luz incide sobre una superficie se dice que está iluminada (Fig. 14.3). El número de lúmenes incidentes por metro cuadrado de la superficie es una medida de la *iluminación*, expresada generalmente en *lux*. El *lux* es la iluminación de un metro cuadrado de una superficie colocada a un metro de distancia de una fuente puntual cuya intensidad sea de una candela. Debido al popular interés por la fotografía, los medidores de iluminación se han convertido actualmente en instrumentos comunes: con un luxímetro o exposímetro es con lo que el fotógrafo determina el tiempo necesario de exposición para fotografía instantánea.

**Importancia práctica de la fotometría.** Estos y otros temas fotométricos son de gran interés actualmente en la profesión de ingeniero de iluminación. La industria se ha convencido de que la eficiencia de los trabajadores de oficinas y fábricas aumenta cuando existen condiciones apropiadas de iluminación. En lugar de iluminaciones de diez a treinta luxes que se empleaban anteriormente en las fábricas modernas se emplea por lo general iluminaciones de 400 a 500 luxes.

Incidentalmente, la iluminación de una superficie expuesta al sol a mediodía puede llegar a ser como de 100 000 luxes; en cambio, la iluminación de la luna llena es como de 0.2 lux.

**Ley de la iluminación.** Una ley muy importante de la fotometría es la ley del cuadrado inverso. Esta ley establece que la iluminación de una superficie por una fuente luminosa puntual varía inversamente como el cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie. Esto significa, por ejemplo, que si se duplica la distancia entre la fuente y la pantalla, la iluminación que ésta recibe disminuye a la cuarta parte de su valor original.

Otra forma de esta ley establece que para que sean iguales las iluminaciones debidas a dos fuentes puntuales de diferente intensidad, la relación de las intensidades debe ser proporcional al cuadrado de la distancia; esto quiere decir que si una fuente luminosa tiene doble intensidad que otra, debe encontrarse como una y media veces más lejos que la más débil, para producir la misma iluminación en un lugar dado (Fig. 14.4).

**Reflexión.** En el estudio de la óptica geométrica hay dos fenómenos de gran importancia que son la *reflexión* y la *refracción*, caracterizada cada una de ellas por una ley natural. En

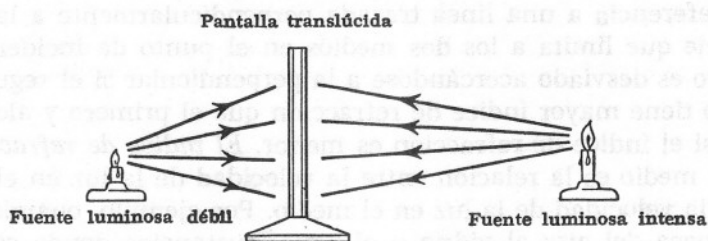


FIG. 14.4. Para producir la misma iluminación en una pantalla la fuente débil debe estar más cerca que la intensa. La iluminación debida a una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente a la pantalla

el caso de la reflexión, la llamada ley de la reflexión regular establece que el ángulo que describe el rayo incidente y la línea perpendicular trazada por el punto de incidencia en la superficie reflectora, siempre es igual al ángulo que hace la misma perpendicular y el rayo reflejado; dice, además, que el rayo incidente, el rayo reflejado y la línea perpendicular se encuentran en el mismo plano (Fig. 14.5).

**Refracción.** Este fenómeno consiste en que un rayo de luz parece quebrarse cuando pasa de un medio a otro de diferentes características ópticas, debido a que la luz cambia su velocidad al pasar de un medio a otro. La ley básica que se aplica es de *Snell*. Esta ley se expresa generalmente en lenguaje matemático y se refiere a la desviación relativa de los rayos de luz en dos medios adyacentes, en términos de ángulos y velocidades; nuevamente se hace referencia a la óptica geométrica. Aunque no es capaz de expresarse con precisión sin el uso del lenguaje matemático, la ley de Snell establece esencialmente que

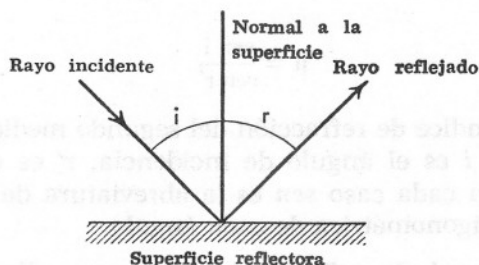


FIG. 14.5. La ley de la reflexión regular establece que:  $r = i$

con referencia a una línea trazada perpendicularmente a la superficie que limita a los dos medios en el punto de incidencia, el rayo es desviado acercándose a la perpendicular si el segundo medio tiene mayor índice de refracción que el primero y alejándose si el índice de refracción es menor. El índice de refracción de un medio es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio. Por ejemplo, cuando un rayo pasa del aire al vidrio o al agua, sustancias donde se retarda su movimiento, el rayo se desvía de tal manera que el ángulo que hace el rayo incidente y la perpendicular al vidrio o al agua, es más pequeño que el que hace el rayo incidente y la misma perpendicular en el aire (Fig. 14.6); es decir, el ángulo de refracción es más pequeño que el ángulo de incidencia en el aire; además, el ángulo de refracción así definido, es más pequeño para el vidrio que el para el agua porque el índice de refracción del vidrio es mayor que el del agua.

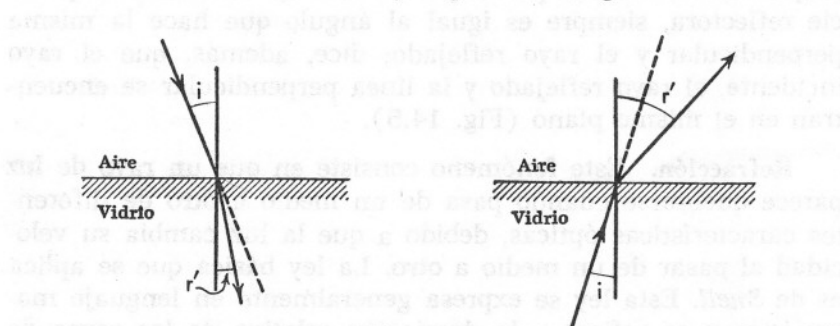


FIG. 14.6. Dos casos de refracción, demostrando la desviación de la luz cuando pasa de un medio a otro

Aunque el aspecto matemático de la ley de Snell no importa mucho en este texto, la ley se expresa matemáticamente como sigue:

$$\mu = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'}$$

donde  $\mu$  es el índice de refracción del segundo medio con respecto al primero,  $i$  es el ángulo de incidencia,  $r'$  es el ángulo de refracción y en cada caso *sen* es la abreviatura de *seno* que es una función trigonométrica de cada ángulo.

**El fenómeno de la reflexión total interna.** Una consecuencia interesante de esta ley es el fenómeno de la *reflexión total*

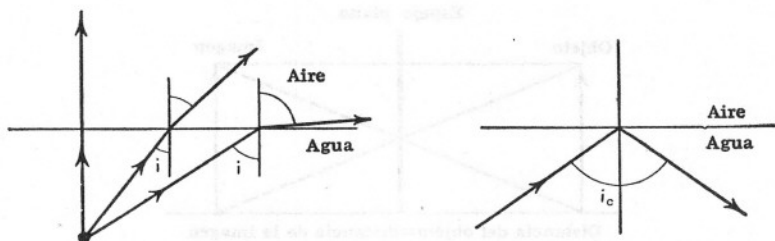


FIG. 14.7. Cuando la luz pasa del agua al aire, existe un cierto ángulo límite de incidencia tal, que cuando se excede la luz es totalmente reflejada internamente dentro del agua. Este ángulo está indicado por  $i_c$  en el segundo diagrama

*interna.* Cuando la luz pasa de un medio a otro de menor índice de refracción hay un límite al valor del ángulo de incidencia para que la luz se refracte; si el ángulo de incidencia excede este *ángulo crítico*, como se le llama, la luz en lugar de ser refractada se refleja hacia el medio inicial, como si hubiera un espejo, obedeciéndose las leyes de reflexión (Fig. 14.7). Es evidente que como en estas circunstancias el rayo se desvía alejándose de la normal, no puede desviarse haciendo un ángulo mayor de noventa grados; el límite es impuesto por el valor del ángulo de incidencia; para el vidrio en el aire este ángulo es de unos cuarenta y dos grados, que es menor que los cuarenta y cinco grados que tiene un triángulo isósceles y rectángulo. Por consiguiente, la luz que llega a un pedazo triangular recto de vidrio, paralelo a un lado, si llega por un cateto debe ser reflejada por la hipotenusa saliendo perpendicular al otro cateto (Fig. 14.8). En otras palabras, la luz cambiará noventa grados su dirección como si hubiera un espejo inclinado cuarenta y cinco grados con respecto al rayo incidente, pero

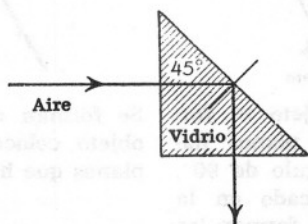


FIG. 14.8. El ángulo crítico para la superficie de vidrio a aire es de unos  $42^\circ$ , menor que el ángulo de incidencia de  $45^\circ$ ; por consiguiente, la luz es reflejada interna y totalmente, como se muestra en la figura

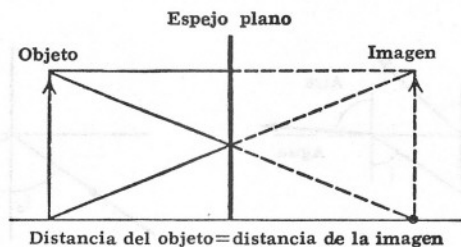
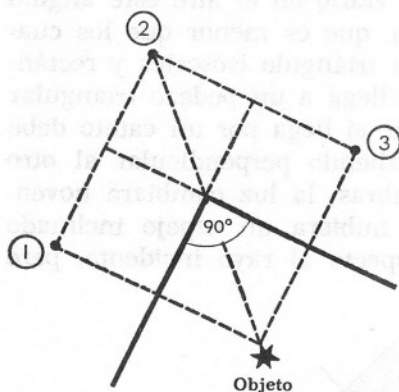


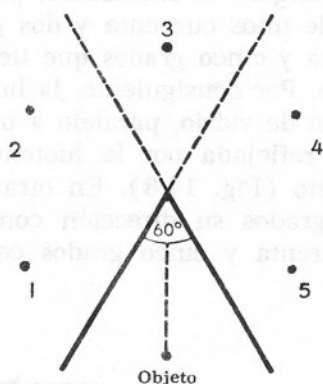
FIG. 14.9. La imagen formada por un espejo plano es derecha y virtual. Se forma detrás del espejo a la misma distancia de éste que la imagen sin necesidad de ningún plateado. El cambio de dirección se dice que es un resultado de la reflexión total interna.

**Imágenes formadas por los espejos planos.** Teniendo en cuenta las leyes de la refracción y de la reflexión se llega a numerosas conclusiones con respecto al comportamiento de los rayos de luz en un medio óptico, explicando cosas tales como la formación de imágenes con espejos, prismas y lentes. Como el funcionamiento de todos los instrumentos ópticos parte de estas consideraciones, éstas no deben subestimarse.

Consideremos, por ejemplo, el espejo plano. Se infiere de las leyes de la reflexión que una imagen derecha se forma apa-



Tres imágenes del objeto se forman con dos espejos planos haciendo entre sí un ángulo de  $90^\circ$ , si el objeto está colocado en la bisectriz del ángulo que forman los dos espejos.



Se forman cinco imágenes de un objeto colocado entre dos espejos planos que hacen entre sí un ángulo de  $60^\circ$ .

FIG. 14.10. Ejemplos de imágenes múltiples formadas por la reflexión en espejos planos angulares



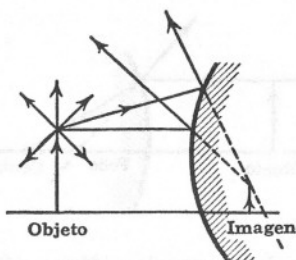
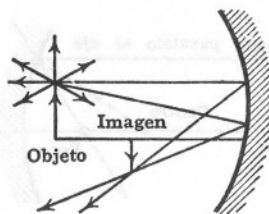


Imagen obtenida con un  
espejo esférico convexo



Un caso de imagen obtenida con  
un espejo esférico cóncavo

FIG. 14.11. Imágenes obtenidas con espejos esféricos

rentemente atrás del espejo cuando el objeto se encuentra al frente de él (Fig. 14.9). Este simple fenómeno es, por supuesto, de ocurrencia cotidiana, pero a pesar de ello es muy importante desde el punto de vista físico. Otros ejemplos pueden verse en la Fig. 14.10.

**Reflexión en superficies esféricas.** Cuando los rayos de luz se reflejan en espejos curvos los resultados son muy interesantes. Un espejo *convexo* proporciona imágenes de tamaños más pequeños que el objeto, pero derechos; en cambio un espejo esférico *cóncavo* puede producir imágenes invertidas colocadas en el espacio enfrente del espejo; otras veces producen imágenes derechas localizadas aparentemente detrás del espejo (Fig. 14.11). Las imágenes invertidas se llaman *imágenes reales* porque en realidad se encuentran donde se enfocan los rayos luminosos, pudiendo ser proyectadas sobre una pantalla. Muchas ilusiones ópticas pueden producirse con las imágenes reales.

Las imágenes derechas se llaman imágenes *virtuales*; éstas nunca pueden ser proyectadas sobre una pantalla.

Es evidente que la formación de imágenes con espejos curvos —cilíndricos, esféricos y parabólicos— pueden ser de gran importancia práctica en los instrumentos ópticos.

**Puntos focales.** Los más grandes telescopios del mundo, como el de Monte Palomar, en California (de cinco metros de diámetro) se basan en el principio de la formación de imágenes reales de los cuerpos celestes con grandes espejos cóncavos. Una de las características de estos instrumentos es que todos los rayos de luz que llegan de objetos muy distantes se enfocan en un solo punto llamado *foco* o *punto focal* (Fig. 14.12). La distancia desde este punto al espejo se llama *distancia focal*. Puede demostrarse que en los espejos esféricos la distancia focal es

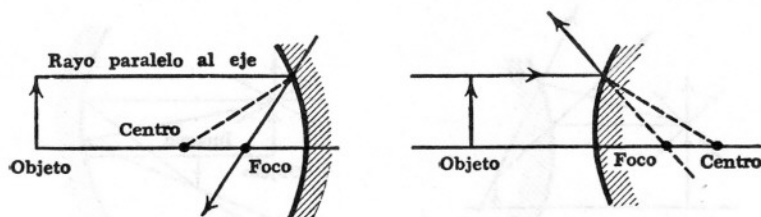


FIG. 14.12. Las figuras muestran el foco de un espejo esférico cóncavo y el foco virtual de un espejo esférico convexo. La distancia focal es la mitad del radio de curvatura

la mitad de radio de curvatura. Mientras los espejos esféricos convexos siempre producen imágenes virtuales más pequeñas que el objeto siendo virtual su punto focal (o foco), los espejos esféricos cóncavos producen imágenes cuyo tipo y tamaño dependen de la distancia entre el objeto y el espejo, relacionada con la distancia focal y el radio de curvatura. El espejo es un ejemplo de un *sistema convergente*, porque en realidad hace convergir a los rayos de luz; por otro lado, el espejo convexo hace divergir a los rayos de luz por lo que se le llama *espejo divergente*.

**Lentes sencillas.** Otro ejemplo de otro sistema convergente es el de la lente biconvexa la que, por refracción, obliga a los rayos de luz a desviarse más en las orillas que en el centro, por lo que los hace convergir en el foco. Por otro lado la lente biconcava, siendo más gruesa en los bordes que en el centro, produce un efecto opuesto, por lo que es un ejemplo de un sistema divergente (Figs. 14.13 y 14.14).

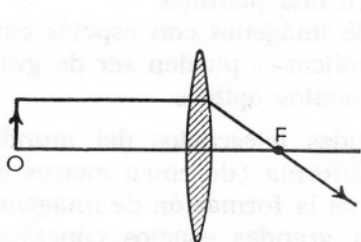


FIG. 14.13. La lente convergente tiene un foco real a donde se reúnen los rayos originalmente paralelos al eje de la lente

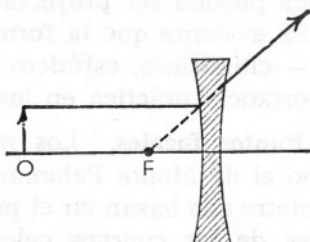


FIG. 14.14. La lente divergente tiene un foco virtual de donde los rayos, originalmente paralelos al eje, parecen salir después de refractados

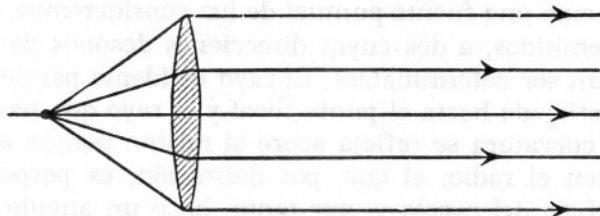


FIG. 14.15. Una fuente puntual está en el foco de una lente convergente. Los rayos de luz refractados por la lente son paralelos entre sí

La convergencia de un sistema puede demostrarse haciendo pasar un haz de luz solar, limitado por una abertura, a través de la lente —o reflejada en el espejo— en un local lleno de humo; entonces se encuentra que los rayos originalmente paralelos (ya que el Sol está a unos ciento cincuenta millones de kilómetros y un haz estrecho no tiene mucha oportunidad de dispersarse en el corto espacio que recorre en un local ordinario) convergen en un foco real o divergen de un foco virtual como se indica en las Figs. 14.13 y 14.14.

Debe hacerse notar también que los rayos de una fuente puntual colocada en el eje principal y a la distancia focal de una lente convergente, deben seguir paralelos al ser refractados por la lente; así puede producirse un haz paralelo de luz en el laboratorio sin acudir a los rayos del Sol (Fig. 14.15).

Con un sistema convergente, ya sea una lente biconvexa o un espejo cóncavo, las imágenes obtenidas son siempre reales e invertidas cuando los objetos se encuentran más allá del foco. Los objetos colocados a distancias menores que la focal dan origen a imágenes virtuales derechas y aumentadas. El tamaño de la imagen es al tamaño del objeto como la distancia de la imagen es a la distancia del objeto al espejo.

**Diagrama de rayos.** Teniendo en cuenta las leyes de la reflexión y refracción, y conociendo las características de los focos de una lente o de un espejo esférico, es posible encontrar la imagen de un objeto con el llamado diagrama de rayos.

**Diagrama de rayos para un espejo cóncavo.** Consideremos un objeto en forma de flecha cuya base descansa en el eje del

espejo esférico cóncavo (Fig. 14.16). Tratando a la punta de la flecha como una fuente puntual de luz consideremos, de todos los rayos emitidos, a dos cuyas direcciones después de la reflexión puedan ser determinables. El rayo incidente paralelo al eje debe ser reflejado hasta el punto focal y el rayo que pasa por el centro de curvatura se refleja sobre sí mismo porque este rayo coincide con el radio, el que, por definición, es perpendicular a la superficie del espejo y, por tanto, hace un ángulo de incidencia igual a cero. Excepto que la base de la flecha se encuentre en el foco, esos dos rayos deben intersectarse al frente del espejo, o bien, sus prolongaciones parecerán intersectarse detrás del espejo. En estas intersecciones estará la imagen del punto de donde salieron originalmente los rayos de luz. Si la intersección tiene lugar al frente del espejo, la imagen es real; si detrás del espejo, la imagen es virtual. Se ha encontrado que si el objeto está más allá de la distancia focal, la imagen *siempre* es real e invertida; si el objeto se encuentra entre el espejo y el foco, la imagen es virtual y derecha. Debe recordarse que cuando se mira en un espejo de rasurar a muy pequeña distancia del espejo, la imagen observada es derecha, está detrás del espejo y está aumentada; por otra parte, si el espejo se coloca a bastante distancia, la imagen de la cara es real e invertida, debido a que se ha sobrepasado la distancia focal.

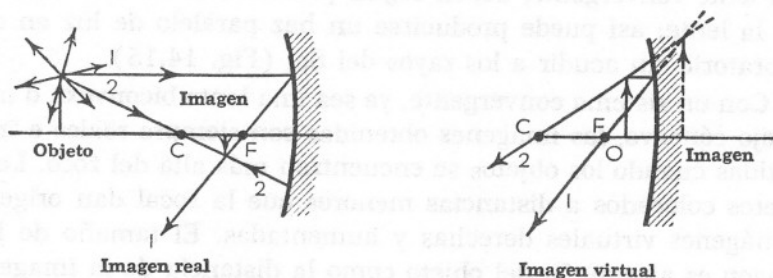


FIG. 14.16. Dos ejemplos de imágenes encontradas por el método de diagrama de rayos; estas imágenes se forman con espejos convergentes (cóncavos)

**Diagrama de rayos para un espejo convexo.** El mismo procedimiento puede aplicarse a un espejo convexo, encontrándose que, en este caso, la imagen siempre es virtual y de menor tamaño que el objeto (Fig. 14.17).

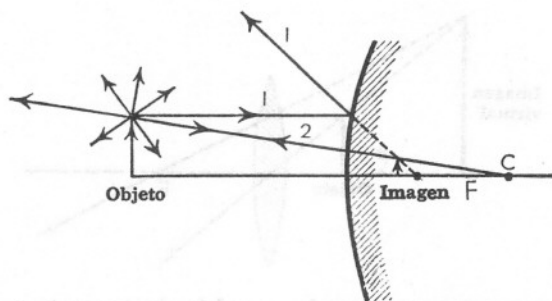


FIG. 14.17. La imagen virtual obtenida por un espejo divergente (convexo) se encuentra por el método del diagrama de rayos

Una comprobación interesante de estos casos se tiene cuando se considera un tercer rayo. Evidentemente, el rayo que sale de la punta de la flecha, que representa al objeto y que pasa por el foco, será reflejado paralelo al eje y deberá pasar también por el punto donde se intersectan los otros dos rayos.

Por supuesto, debe ser necesario considerar estos rayos —que se llaman el primero, el segundo y el tercero— para cada punto del objeto y encontrar así cada punto de la imagen; pero esto no es generalmente necesario, ya que la punta de la flecha localiza la posición de la imagen con su base sobre el eje.

**Diagrama de rayos para lentes delgadas.** Las consideraciones anteriores se aplican también a las lentes delgadas, con la diferencia de que en lugar de reflejarse los rayos atraviesan la lente, y que en lugar de considerar al rayo que pasa por el centro

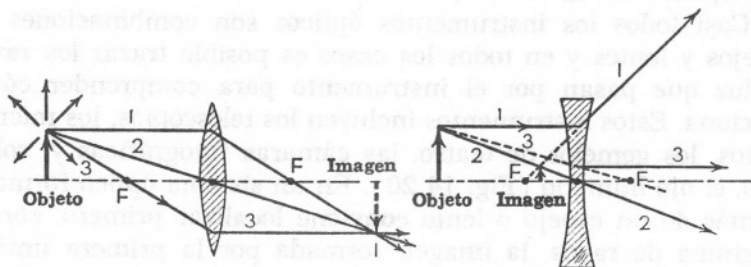


FIG. 14.18. Imágenes encontradas con el diagrama de rayos en una lente convergente y en una divergente; las figuras indican cómo un tercer rayo que pasa por el foco, emerge de la lente paralelo al eje, comprobando los resultados obtenidos por los rayos 1 y 2



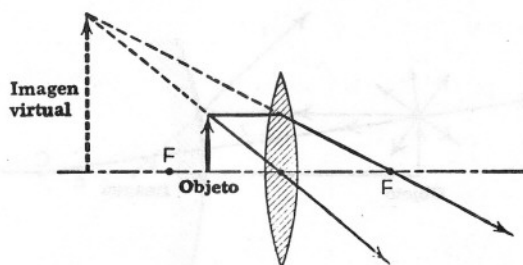


FIG. 14.19. El microscopio simple, o vidrio de aumento o lupa, representa un caso especial de formación de imágenes con una lente convergente, cuando el objeto está colocado entre el foco y la lente. La imagen es virtual y está del mismo lado de la lente que el objeto

de curvatura, se considera al rayo que pasa por el centro verdadero de la lente (Fig. 14.18). Puede demostrarse que este rayo no se desvía. Con este análisis se encuentra que una lente divergente siempre produce imágenes virtuales y más pequeñas, y que las lentes convergentes producen imágenes reales de los objetos que están más allá del foco e imágenes virtuales si el objeto está entre el foco y la lente.

**La lente de aumento.** Un ejemplo de la última situación se encuentra en la lupa o *microscopio simple*, como se le llama técnicamente. La lente se mantiene a una distancia del objeto menor que la distancia focal, obteniéndose una imagen virtual, derecha, mayor, y del mismo lado de la lente del objeto (Fig. 14.19). Si la lente se coloca bastante lejos del objeto la imagen obtenida es real, invertida y colocada, con respecto al objeto, del lado opuesto de la lente.

Casi todos los instrumentos ópticos son combinaciones de espejos y lentes y en todos los casos es posible trazar los rayos de luz que pasan por el instrumento para comprender cómo funciona. Estos instrumentos incluyen los telescopios, los microscopios, los gemelos de teatro, las cámaras fotográficas y, sobre todo, el ojo humano (Fig. 14.20). En un sistema óptico formado de más de un espejo o lente conviene localizar primero, con el diagrama de rayos, la imagen formada por la primera unidad del sistema, y luego tratar esta imagen como objeto para la segunda unidad, y así sucesivamente.

**El ojo.** Posiblemente el más importante instrumento óptico es nuestro ojo, aunque no debe confundirse el fenómeno de la

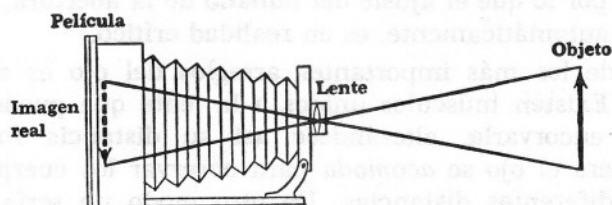


FIG. 14.20. Aquí se muestra el funcionamiento de una cámara fotográfica. Se forma una imagen real del objeto sobre la película colocada en la parte posterior de la cámara

visión con el de la formación de imágenes por el sistema óptico del ojo. La visión incluye la interpretación por el cerebro de la imagen formada. Aquí sólo trataremos al ojo como un instrumento óptico, es decir, como una especie de cámara fotográfica en donde la imagen de un objeto se forma en un tejido nervioso, que se llama *retina*, y que se encuentra en la parte posterior del ojo; la retina juega el mismo papel de la película en la cámara fotográfica.

Enfrente del ojo hay una combinación de una abertura llamada *pupila* y de un arreglo de lentes que sirve como sistema óptico para producir las imágenes de los objetos exteriores. Estas imágenes caen en la retina, la que en realidad forra la parte posterior del globo del ojo, estimulando las células nerviosas que contiene y que envían mensajes apropiados al cerebro (Fig. 14.21). El ojo está lleno con un fluido acuoso que también toma parte en el fenómeno de la refracción. La abertura de la pupila se controla automáticamente por la acción del diafragma iris; cuanto más pequeña, más definida es la imagen; pero demasiado pequeña no deja entrar luz suficiente para estimular

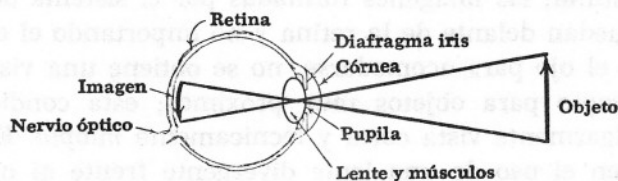


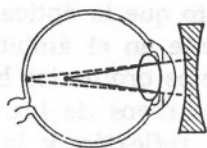
FIG. 14.21. El sistema óptico del ojo humano sirve para formar una imagen real en la retina, el tejido nervioso que forra a la parte posterior del globo del ojo

la retina, por lo que el ajuste del tamaño de la abertura, aunque realizado automáticamente, es en realidad crítico.

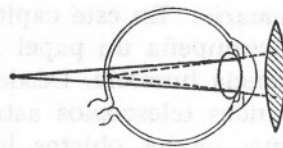
Uno de los más importantes arreglos del ojo es el de su enfoque. Existen músculos unidos a la lente que pueden aplanarla o encorvarla, alterándose así su distancia focal. De esta manera el ojo se *acomoda* para observar los cuerpos colocados a diferentes distancias. De otro modo no sería posible enfocar los ojos a una escena distante y después a un periódico colocado a la distancia ordinaria de lectura. El poder de acomodación se pierde gradualmente con la edad, siendo entonces necesario emplear los llamados anteojos "bifocales". De hecho, lo relativo a los anteojos, que será considerado a continuación, es una aplicación de la física a la vida cotidiana.

Aunque toda la retina es muy sensible a la luz, existe una región en particular que es sumamente sensible; en realidad, es tan sensible que para toda observación cuidadosa como, por ejemplo, la lectura, el ojo está moviéndose continuamente para enfocar lo que se observa en estas regiones de los dos ojos. Estas regiones son tan pequeñas que es necesario mover los ojos para enfocar cada uno de los puntos que forman los dos puntos de este signo de puntuación: por esto la lectura hace necesario que los ojos se muevan a sacudidas a lo largo de las líneas de la página impresa enfocando un punto después de otro en rápida sucesión. ¿Hay sorpresa alguna en que nuestros ojos se fatiguen a veces y muchas personas necesiten la ayuda de anteojos, especialmente en la edad madura y en la vejez?

**Los defectos del ojo y los anteojos — Miopía.** Ya se ha sugerido que la adaptación de anteojos para ayudar a la visión humana, es una aplicación práctica de la física. Algunas personas nacen con el globo del ojo demasiado largo, no teniendo una visión distinta; las imágenes formadas por el sistema de lentes del ojo quedan delante de la retina y no importando el esfuerzo que haga el ojo para acomodarse, no se obtiene una visión distinta, excepto para objetos muy próximos; esta condición se llama vulgarmente vista corta y técnicamente *miopía*. El remedio está en el uso de una lente divergente frente al ojo para aumentar la distancia focal del sistema; por esta razón los miopes emplean lentes que son más gruesos en los bordes que en el centro, es decir, usan lentes divergentes (Fig. 14.22).



En la miopía o vista corta, la imagen se forma antes de la retina; esta falla se corrige con una lente divergente colocada enfrente del ojo, con lo que la imagen se forma en la retina



En la hipermetropía o vista larga, la imagen se forma atrás de la retina. La imagen se forma en ella con la ayuda de una lente convergente colocada delante del ojo

FIG. 14.22. Defectos del ojo

**Hipermetropía.** La condición opuesta es, por supuesto, la vista larga o *hipermetropía*, como también se le llama. En este caso el globo del ojo es demasiado corto y las imágenes se forman siempre detrás de la retina; este defecto se remedia empleando una lente convergente para acortar la distancia focal del sistema. Cuando se pierde el poder de acomodación al envejecer el ojo, por lo general se vuelve más y más hipermetrope; el punto próximo, por así decirlo, retrocede cuando la edad avanza; por esta razón muchas personas hipermétropes encuentran que su visión mejora al pasar el tiempo.

**Astigmatismo.** Muchos ojos sufren un defecto llamado *astigmatismo*. Es probable asegurar que la mayoría de los anteojos se usan más por esta razón que por cualquier otra. El astigmatismo es una aberración relacionada con la forma de la superficie frontal de la *córnea* del ojo. Este defecto aparece cuando una persona intenta ver con igual precisión a todas las líneas de una serie dibujada en un plano y radialmente a partir de un punto; entonces el ojo astigmático ve las líneas en cierta dirección más distintamente que en las otras. La jaqueca constituye un síntoma común de esta dificultad como un resultado del esfuerzo que hacen los músculos del ojo cuando intentan compensar el defecto. La corrección de este defecto se hace con lentes cilíndricas cuyos ejes se ajustan apropiadamente en la dirección del astigmatismo. Por supuesto, varios defectos pueden ser compensados simultáneamente por un par de anteojos, por lo que éstos a menudo son combinaciones de superficies cilíndricas y esféricas, siendo esto parte del trabajo del optometrista. No es exageración repetir que la aplicación de la física a la ayuda de la visión humana es de la más grande importancia.

**Sumario.** En este capítulo se ha visto que la óptica geométrica desempeña un papel muy importante en el ámbito de la experiencia humana. Desde en los anteojos ordinarios hasta en los grandes telescopios astronómicos, los rayos de luz forman imágenes de los objetos luminosos. La reflexión y la refracción, los espejos y las lentes, la iluminación y la oscuridad: todo forma parte del dominio de la óptica, siendo, a su vez, una parte del estudio de la física. Consideraremos en seguida el efecto de un prisma en un haz luminoso, la maravilla del arco iris, y otros fenómenos ópticos relacionados con la óptica física, en contraste con la óptica geométrica.

### CUESTIONARIO

1. ¿Qué quiere decir fotometría?
2. ¿Cómo varía la iluminación de un lugar con la distancia a la que se encuentra de la fuente luminosa?
3. Defina el lux.
4. Cuando un rayo de luz pasa por el centro de una lente delgada no se desvía; ¿por qué?
5. Indique el camino de dos rayos de luz que saliendo de un punto del objeto puedan dibujarse para localizar la imagen formada por a) un espejo esférico; b) una lente.
6. Demuestre con un diagrama que una persona puede verse de cuerpo entero en un espejo plano de la mitad de su estatura.
7. ¿Cómo se corrige la miopía y la hipermetropía por medio de espejos?
8. ¿Qué tipo de lente produce una imagen aumentada en una pantalla?
9. Muestre con un diagrama cómo pasa la luz a través de a) una lente más gruesa en el centro que en los bordes; b) una lente cuyos bordes son más gruesos que su centro.
10. Para iniciar un fuego, ¿podrá usarse una lente doble convexa?; ¿un espejo convexo?; ¿un espejo cóncavo?
11. Diga qué tipo de imagen se forma en la película de una cámara fotográfica, por medio de su lente.



## CONSIDERACIONES OPTICAS (Continuación)

### OPTICA FISICA; DISPERSION; ESPECTROSCOPIA; INTERFERENCIA; DIFRACCION Y POLARIZACION

En el capítulo anterior se consideraron cuestiones relacionadas con los aspectos direccionales de los rayos de luz, observándose que los rayos son reflejados, refractados, hechos intersectar entre sí para formar imágenes y afectados por la presencia de la materia, siendo la geometría de cada situación de la más inmediata importancia que la naturaleza misma de la luz; en este capítulo se insiste en la última cuestión, pero consideraremos primero otro fenómeno en que la dirección toma también un importante papel.

**El espectro visible.** Cuando un haz estrecho de luz solar se hace pasar por un prisma triangular de vidrio (Fig. 15.1) un resultado muy interesante, y quizás extraño, se produce por la refracción de la luz. Los rayos no solamente cambian de dirección debido a la refracción sino que se esparcen en una banda o *espectro* de colores que van desde el rojo hasta el violeta, lo cual indica que debe haber algo en el haz luminoso que hace posible su descomposición en sus diversos componentes. Este fenómeno se llama *dispersión* de la luz. Si la fuente luminosa es una estrecha rendija iluminada, y una imagen de ella se forma en una pantalla por medio de una lente colocada cerca del prisma, habrá en la pantalla imágenes sucesivas y traslapadas de la rendija de cada uno de los colores simples presentes en la fuente; por esta razón el espectro formado por un prisma es característico de la fuente de luz empleada y muchos diferentes tipos de espectro se han clasificado de acuerdo con la naturaleza de la fuente.

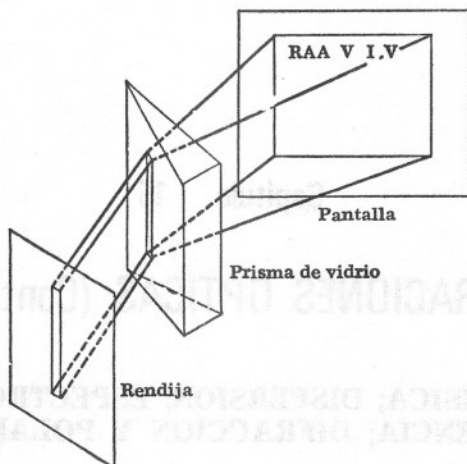


FIG. 15.1. Un haz de luz solar se dispersa en un espectro coloreado con un prisma triangular de vidrio

**Espectroscopia.** Todas las fuentes incandescentes de luz se ha encontrado que emiten espectros continuos, esto es, una banda continua de luz que contiene todos los colores del arco iris. En realidad, el arco iris mismo es un fenómeno espectroscópico producido por la luz del Sol pasando por las gotillas de agua de la lluvia, cuando el Sol hace un cierto ángulo con el horizonte. Sin embargo, el espectro solar no es estrictamente un espectro continuo, pero los filamentos de las lámparas eléctricas y los hornos incandescentes sí dan espectros continuos.

Los vapores incandescentes, como los de las modernas lámparas fluorescentes, originan espectros en donde sólo están presentes colores seleccionados. Nuevamente, si la fuente es una rendija iluminada por esta luz, el espectro será un grupo de líneas discretas separadas por espacios oscuros; este espectro se llama de *líneas brillantes* y los elementos químicos presentan diferentes espectros de líneas brillantes, por lo que la identificación de sustancias químicas se vuelve posible con métodos espectroscópicos. Esto está de acuerdo con lo que se sabe sobre la estructura del átomo (Cap. XIII). Para un átomo dado, como el del hidrógeno y tomando en cuenta el modelo de Bohr de su estructura, al agregar energía, el electrón orbitando salta a una órbita exterior; cuando cae de una órbita exterior a una interior se libera energía en forma de radiación y de una frecuencia dada, de acuerdo con el principio cuántico,  $E = h\nu$  (donde  $E$  significa

energía,  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia característica). Si esta energía está en la frecuencia visible, se hace evidente por las líneas brillantes del espectro. En realidad, todas las líneas del espectro del hidrógeno se explican de este modo. Análogamente se explican los espectros característicos de líneas brillantes debidos a los vapores incandescentes de todos los elementos químicos; de esto resulta claro que no hay dos elementos químicos que tengan exactamente la misma configuración espectral. Además, debido al extenso estudio de la espectroscopia de los elementos, es por lo que actualmente mucho se conoce con relación a la estructura de la materia.

El tercer tipo de espectro en la clasificación es el espectro de *líneas oscuras* o de *absorción*. Este caso se produce cuando la luz de una fuente incandescente se hace pasar a través de un vapor caliente antes de llegar al espectroscopio. En estas condiciones, los colores que constituyen ordinariamente el espectro del vapor son absorbidos del espectro continuo producido por la fuente incandescente obteniéndose un espectro continuo cruzado por líneas oscuras.

**Líneas de Fraunhofer.** El espectro solar es un espectro de líneas oscuras, indicando que las porciones exteriores del Sol contienen elementos cuyas longitudes de onda características han sido absorbidas por el espectro continuo emitido por las porciones interiores y más calientes del Sol. Como estas líneas fueron observadas por el físico alemán Fraunhofer, llevan su nombre y las más conspicuas se indican con letras (Fig. 15.2); así la línea D de Fraunhofer se refiere al doblete del sodio, o sea, al par de líneas muy próximas en la región amarilloanaranjada del espectro que se encuentra precisamente en la misma posición que la que ocupa el par semejante de líneas amarilloanaranjadas en

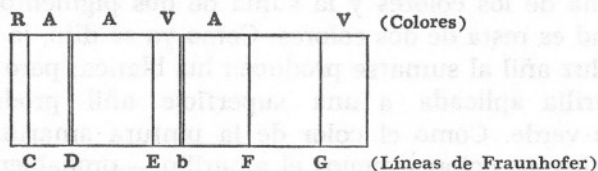


FIG. 15.2. Apariencia del espectro solar cruzado por las líneas de Fraunhofer. Los colores de este espectro están desigualmente espaciados cuando se obtienen por un prisma. La línea D se debe al sodio, la C al hidrógeno, etc.

el espectro de una lámpara de vapor del sodio. La llamada dispersión óptica de un espectroscopio se mide frecuentemente por el grado con que el instrumento puede separar las líneas de este doblete.

**Descubrimiento del helio.** Ciertas líneas del espectro solar que no fueron identificadas postularon la existencia de un nuevo elemento que fue llamado helio —el elemento del Sol— antes que su presencia en la Tierra fuera descubierta después de haber sido emprendida una cuidadosa investigación.

De este modo, el tema de la naturaleza y estructura de la luz fue promovido por el estudio de la espectroscopia. Es evidente que la llamada luz blanca, o simplemente luz de día, puede ser separada en sus colores constituyentes por el prisma del espectroscopio; pero, además, es posible recombinar los colores para reproducir la luz blanca. Por medio de simples procedimientos pueden llevarse a cabo estos experimentos con bastante facilidad en el salón de clases, como justamente lo demostró Newton hace unos trescientos años.

**Mezcla de colores.** La superposición o mezcla de colores es, en sí misma, un estudio interesante y proporciona al arte una base física. Se ha encontrado que sólo tres colores, llamados primarios, son necesarios para producir aproximadamente la luz blanca y que la combinación de estos tres colores reproduce prácticamente cualquier color. La impresión a colores (policromía) utiliza así los tres colores primarios. De modo menos aproximado, algunas parejas de colores producen una bastante buena reproducción de la luz blanca; estos pares de colores se llaman complementarios como, por ejemplo, el añil y el amarillo y el solferino y el verde.

**Suma y resta de colores.** Hay una importante distinción entre la suma de los colores y la suma de dos pigmentos, la que en realidad es resta de dos colores. Como ya se dijo, la luz amarilla y la luz añil al sumarse producen luz blanca; pero una pintura amarilla aplicada a una superficie añil produce una superficie verde. Como el color de la pintura amarilla resulta de que todos los colores menos el amarillo —probablemente orlado por una porción del verde— han sido absorbidos, y como el color de la pintura azul resulta de que todos los colores, excepto el azul —probablemente orlado por una porción del verde—, son absorbidos, el único color reflejado por la combinación es

el que es reflejado en común por cada uno de ellos, a saber, el verde. Por esta razón, la suma de un pigmento amarillo con un pigmento de color añil, consiste en la sustracción de todos los colores, excepto el verde.

La distinción entre suma y resta de colores puede demostrarse de otro modo. Si dos reflectores, uno con filtro amarillo y otro con un filtro añil, iluminan el mismo lugar de una pantalla blanca, la mancha de luz resultante será prácticamente blanca. Por otra parte, si se emplea un solo reflector provisto de dos filtros —el amarillo y el añil— la mancha resultante en la pantalla será verde. Esto se debe a que el filtro amarillo impide el paso de todos los colores menos el del amarillo y de una porción pequeña del verde; análogamente, el filtro azul evita el paso de todos los colores menos el añil y probablemente algo del verde debido a una filtración incompleta. Entonces, el único color que probablemente puede pasar a través de dos filtros es el verde. Por supuesto, un filtrado completo por los filtros producirá negro, o sea, la completa ausencia de colores. Entre paréntesis, haremos notar que ningún cuerpo tiene color en la oscuridad, puesto que el color es el resultado de la absorción selectiva de la luz. Así, una manzana roja aparece negra iluminada con luz estrictamente verde, porque en dicha luz no hay ninguna luz roja que pueda ser reflejada.

**Interferencia.** La superposición de la luz no abarca sólo el tema de la suma de colores, sino sugiere también otro fenómeno de considerable interés. Bajo circunstancias muy especiales, la luz, que aparentemente llega de dos fuentes diferentes, puede producir oscuridad, es decir, puede hacerse que dos haces de luz se nulifiquen entre sí. Tomás Young (1773-1829) observó que cuando la llama de una vela se coloca detrás de una doble rendija (dos rendijas paralelas muy juntas), la luz que sale de las dos rendijas forma un diagrama peculiar en una pantalla colocada frente a las rendijas. Este diagrama consiste en un grupo de bandas alternativamente brillantes y oscuras, orientadas paralelamente a las rendijas. Cuando se emplea la luz blanca de la vela, las bandas brillantes son coloreadas, pero cuando se emplea luz de un solo color —por ejemplo, la luz amarilla de una fuente de vapor de sodio— las bandas brillantes, o franjas como también se les llama, son todas de un color y separadas, por supuesto, por bandas oscuras (Fig. 15.3).



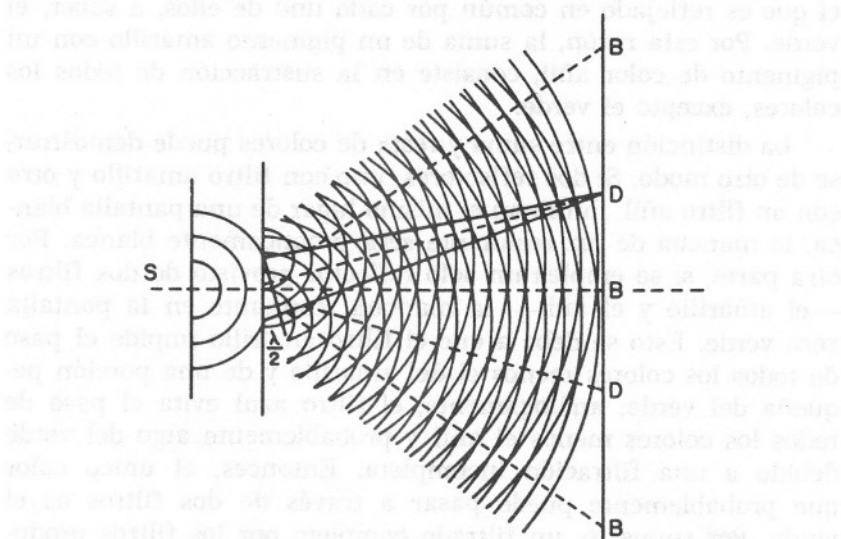


FIG. 15.3. Experimento de interferencia de Young

La explicación de este fenómeno involucra la teoría ondulatoria de la luz. Se sabe que las ondas en el agua son capaces de interferir cuando se superponen si una de ellas está defasada con respecto a la otra en media longitud de onda; de manera análoga, las ondas luminosas pueden interferir destructivamente bajo condiciones apropiadas. Las bandas oscuras D, D, etc. se presentan en aquellos lugares que distan de una rendija una distancia que excede a la distancia a la otra rendija, en un número entero de semilongitudes de onda. Por supuesto, las distancias entre las franjas son muy pequeñas, ya que la longitud de onda de la luz es muy pequeña, del orden de décimos de micra (una micra es un millonésimo de milímetro), y la separación de la rendija debe ser razonablemente pequeña por la misma razón. El fenómeno en conjunto se llama interferencia de la luz. Las bandas oscuras representan interferencia destructiva, y las brillantes, interferencia constructiva.

**Difracción.** Aunque el espectroscopio de prisma proporciona un medio de romper la luz en sus partes componentes —en particular de separar la luz blanca en colores por refracción—, existe otra manera de producir el mismo efecto; esta manera es la *difracción*, que es un fenómeno de desviación selectiva de

los rayos de luz —de acuerdo a su longitud de onda— cuando la luz pasa tocando los bordes de pantallas, siendo las ondas largas más desviadas que las cortas. Una gratícula, producida rayando varios millares de líneas por centímetro en una lámina transparente de vidrio con una punta de diamante, constituye un aparato por medio del cual la luz blanca puede ser resuelta en sus colores. Al pasar la luz por esta gratícula, parte de ella es desviada, siéndolo más la luz roja que la azul; en consecuencia, se producen espectros con una gratícula (Fig. 15.4). Este fenómeno es en realidad un fenómeno de interferencia y para su interpretación hay que suponer que la luz es un fenómeno ondulatorio. Si la luz fuera un fenómeno corpuscular no sería afectado por la gratícula. Como ya se ha hecho notar, la desviación de la luz es selectiva y de acuerdo con la longitud de onda.

**Espectroscopio de red o de gratícula.** Este tipo de espectroscopio convierte en algo muy sencillo la medición de longitud de onda de la luz. El cambio de dirección de las ondas al pasar por un borde es un fenómeno familiar a todos los que hayan observado el paso de las olas cerca de diques y muelles; lo que no es familiar es el que la desviación depende de la longitud de onda. Las muy cortas ondas luminosas (de  $.00004$  a  $.00007$  mm) son, por lo general, desviadas tan poco que se forman sombras definidas, y se dice entonces que la propagación de la luz es rectilínea, esto es, que la luz se propaga en línea recta. Sin embargo, bajo las extraordinarias condiciones de la gratícula la desviación selectiva es muy grande y se forma un espectro. Grabar una gratícula es muy caro, por lo que parecería que no es fácil demostrar el fenómeno de difracción; pero esto no sucede

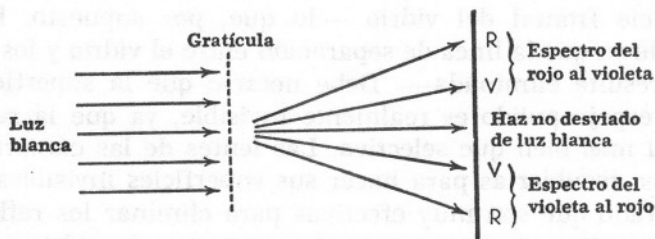


FIG. 15.4. Una gratícula, formada trazando varios miles de líneas en cada centímetro de una placa de vidrio, producirá espectros por difracción, como se indica en la figura

porque pueden construirse réplicas baratas de las grátículas rayadas a gran costo, muy fácilmente sobre colodión y que funcionan tan bien como las grátículas originales.

**Colores de las películas delgadas, debidas a la interferencia.** Otro interesante fenómeno son los colores que se observan en películas muy delgadas, como las de aceite en agua o como las que constituyen el nácar de las conchas de los ostiones. Estos son también fenómenos de interferencia que pueden producirse solamente cuando las películas son muy delgadas. La luz reflejada por una superficie interfiere con la luz reflejada por la otra, dependiendo el refuerzo o la nulificación del número de semilongitudes de onda comprendidas entre las dos superficies. De hecho, con frecuencia, el espesor de una película puede medirse por los fenómenos de color que producen. Esta es una manera de utilizar las ondas luminosas en las mediciones. Estos fenómenos interferométricos se emplean en mediciones de precisión actualmente de un refinamiento tal, que es posible medir con certidumbre hasta millonésimos de centímetro haciendo así posible el intercambio de las diversas partes de un automóvil moderno, que debe estar ajustado con claros muy pequeños del orden de unos pocos milésimos de centímetro.

**Vidrio invisible.** Una aplicación nueva e interesante de las leyes de la interferometría es la construcción del vidrio invisible, lo cual se lleva a cabo recubriendo el vidrio con una película de algún material conveniente. El espesor de esta película es algo muy crítico, pues debe ser tal que la luz reflejada por una cara debe interferir destructivamente con la luz reflejada por la otra (no mayor que un cuarto de la longitud de onda de la luz), con lo cual se elimina el haz que normalmente sería reflejado por la superficie frontal del vidrio —lo que, por supuesto, lo hace invisible ya que la línea de separación entre el vidrio y los alrededores resulta eliminada—. Debe notarse que la superficie real de un espejo pulido es realmente invisible, ya que la reflexión es total más bien que selectiva. Las lentes de las cámaras fotográficas, recubiertas para hacer sus superficies invisibles, se ha encontrado que son muy efectivas para eliminar los reflejos en las fotografías. Análogamente, las ventanas de vidrio invisible enfrente de relojes y medidores eléctricos, por ejemplo, eliminan los reflejos, pudiéndose así observar cómodamente las carátulas de dichos instrumentos.

**Luz polarizada.** Como tema final que será considerado en este panorama descriptivo de la óptica, y en general de la física, volveremos a tratar la luz polarizada, un tema que ha obtenido gran popularidad recientemente por la fabricación del material polarizador empleado en algunos anteojos contra los rayos del Sol y en algunas películas tridimensionales. Los conceptos de interferencia y difracción establecieron definitivamente el aspecto ondulatorio de la luz, aunque debemos recordar que el aspecto corpuscular, derivado de la teoría cuántica, no debe ser ignorado. A pesar de todo, es evidente que para muchas explicaciones el aspecto ondulatorio de la luz se invoca más a menudo para explicar los fenómenos comunes, que el aspecto corpuscular. Teniendo esto en cuenta, la siguiente cuestión que debe ser resuelta es si las ondas luminosas son longitudinales, como las ondas sonoras, o transversales como las elásticas. Esto ha sido resuelto estudiando la polarización de la luz.

Cuando un rayo de luz pasa por un cristal de turmalina, o por un disco polarizador, la luz adquiere una condición muy especial, pues esta luz sólo puede pasar por un segundo cristal de turmalina (o un disco polarizador) si éste está orientado exactamente como el primero. Si el segundo disco polarizador, por ejemplo, se hace girar un ángulo de  $90^\circ$  con respecto al primero, la luz no puede pasar; este fenómeno se llama *polarización*. Entonces se dice que la luz ha sido "polarizada" por el primer disco, llamado el *polarizador*, pudiendo entonces ser determinado el ángulo de polarización por el segundo disco que recibe el nombre de *analizador*.

**Naturaleza de la luz polarizada.** Para comprender en qué consiste este fenómeno, es conveniente considerar una analogía. Si una cuerda horizontal fijada por un extremo se hace oscilar en un plano vertical subiendo y bajando el otro extremo de la cuerda, se establece una onda plana vertical; la situación no debe alterarse si la cuerda pasa a través de otra rendija vertical. Sin embargo, si esta rendija se hace girar hasta que quede horizontal, detendrá el movimiento ondulatorio que no podrá propagarse más allá de la segunda rendija (Fig. 15.5). Además, si se usan dos rendijas, con alguna distancia entre ellas, un movimiento lateral aleatorio comunicado al extremo libre de la cuerda, será restringido, por la primera rendija, a un movimiento paralelo a ella, y, excepto que la segunda rendija esté orientada

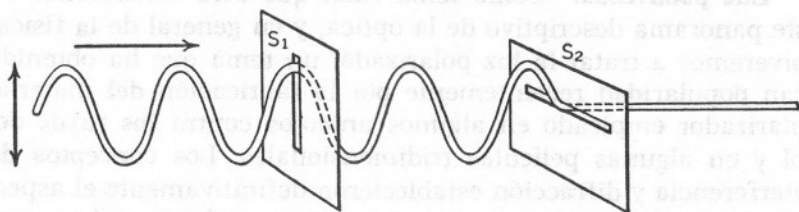


FIG. 15.5. Luz polarizada. Las vibraciones verticales de la cuerda que pasa por la rendija vertical  $S_1$ , serán detenidas por la rendija horizontal  $S_2$ . La onda representada está polarizada, es decir, sólo vibra en un plano; la luz puede ser polarizada con ciertas sustancias como, por ejemplo, la turmalina

en la misma dirección que la primera, la segunda rendija no dejará pasar al movimiento ondulatorio. Existe algo en el arreglo atómico o molecular de la turmalina que deja pasar sólo a las ondas luminosas que tengan un plano particular de vibración, justamente como las rendijas del ejemplo anterior restringen el movimiento de la cuerda. Cuando el modo de la vibración de la luz se restringe así, se dice que la luz es polarizada plana. Vemos nuevamente que la polaridad de la luz requiere que ésta sea un movimiento ondulatorio transversal, si es que es un movimiento ondulatorio, porque las ondas longitudinales no pueden ser polarizadas.

**Polarización por reflexión.** Además del fenómeno de polarización por transmisión que presenta la turmalina, la luz se polariza en gran extensión por reflexión solamente. En realidad, toda la luz reflejada está polarizada en parte, aun el brillo de una carretera de cemento en un día brillante. Por esta razón los anteojos polarizadores para sol reducen efectivamente los reflejos al eliminar la componente polarizada de la luz reflejada. La luz del cielo también está polarizada debido a la reflexión de las partículas que contiene el aire —vapor de agua, polvo, etc.— Esta reflexión, o dispersión, es mucho más pronunciada para las ondas cortas luminosas que para las largas y, por tanto, la luz reflejada por el cielo es azul, por lo menos al medio día; el cielo es rojizo a la puesta del sol, lo que se debe a que entonces la luz es transmitida por la atmósfera y se ve roja debido a que el azul ha sido removido por dispersión. El cielo a medio día se



ve con luz reflejada, mientras que en el ocaso se ve con luz transmitida; tanto las componentes de la luz transmitida como esparcida están polarizadas.

**Fotoelasticidad.** Se ha encontrado que la luz polarizada es de valor considerable para el diseñador de maquinaria, debido a que muchos materiales, que son transparentes a la luz ordinaria, tienen una apariencia bastante diferente a la luz polarizada. Además, muchos materiales, generalmente transparentes, cuando están sometidos a esfuerzos se vuelven opacos a la luz polarizada. Por ejemplo, el vidrio o el celuloide exhiben configuraciones de interferencia regularmente coloreadas al ser vistos con luz polarizada cuando están sometidos a esfuerzos; modelos de celuloide de engranajes y otras partes de la maquinaria muestran así las regiones que están sometidas a esfuerzos cuando se ven funcionando bajo luz polarizada. Muchos industriales realizan estas pruebas fotoelásticas en nuevos diseños antes de producir partes de máquinas y productos manufacturados. En particular, en la industria de la aviación, cuyas estrictas tolerancias en peso son muy importantes, el análisis fotoelástico se emplea para evitar un sacrificio de la resistencia en aras del peso. De hecho, el tema de la luz polarizada es una rama de la física que ilustra bastante bien cómo la física ha sido puesta conscientemente a trabajar por los técnicos que no están conformes con lo que saben de ingeniería, sino que rápidamente adaptan a sus necesidades los desarrollos de los laboratorios científicos.

**Conclusión.** No es de extrañar, en esta edad científica, que los profanos estén interesados en los intrincados problemas de la física, aunque en algunos casos no puedan ahondar en las matemáticas correspondientes. Para esos estudiantes, y para la gente en general, que estén sinceramente interesados en un modesto tratamiento de la física a nivel descriptivo, se ha elaborado este texto. Este libro no puede, ni debe proporcionar el conocimiento necesario a aquellas personas que desearan utilizarlo de un modo profesional, pero el autor espera que se haya despertado el interés del lector y que haya desarrollado una apreciación de lo que es la física y de lo que no es. Esperamos también que haya adquirido un vocabulario técnico suficiente para que pueda leer con placer y conocimiento la literatura científica popular que va en aumento.



**CUESTIONARIO**

1. Dibuje un esquema del paso de un rayo de luz por un prisma triangular.
2. ¿Qué clase de espectro se obtiene de la luz de la Luna? ¿Cuál de la luz de las estrellas?
3. Describa la apariencia de una tarjeta roja cuando se mueve a lo largo de un espectro continuo.
4. Explique por qué produce negro una mezcla de todos los pigmentos, mientras que la superposición de todos los colores produce blanco.
5. La luz roja ¿es más o menos difractada que la luz azul? ¿Cómo se compara esto con la refracción?
6. ¿Qué cosa quiere decir difracción?
7. ¿Qué es lo que quiere decir interferencia constructiva e interferencia destructiva de las ondas luminosas?
8. ¿Por qué el fenómeno de la polarización indica que la luz es un fenómeno ondulatorio transversal?
9. Al físico, una precisión de una millonésima de centímetro le sugiere métodos ópticos de medición. ¿Por qué?

**CUESTIONARIO DE REPASO**

(Para respuestas véase Pág. 251)

**CAPÍTULOS XII, XIII, XIV Y XV**

1. Las contracciones de las piernas de una rana llevaron al descubrimiento de la corriente eléctrica por: 1) Volta; 2) Ampère; 3) Coulomb; 4) Galvani; 5) Oersted ..... ( )
2. La fricción del agua en el tubo es semejante a: 1) la corriente eléctrica; 2) la diferencia de potencial; 3) la carga electrostática; 4) la resistencia eléctrica; 5) la fuerza electromotriz ..... ( )
3. La resistencia eléctrica en un circuito eléctrico desempeña un papel similar, en un circuito de agua, al de: 1) una bomba; 2) un tubo; 3) una rueda hidráulica; 4) la fricción; 5) la presión manométrica.... ( )
4. Un kilowatt hora es equivalente a: 1) una lámpara de 10 watts encendida durante una hora; 2) una de 100 watts durante una hora; 3) una de 10 watts

- durante 10 horas; 4) una de 100 watts durante 10 horas; 5) una de 100 watts durante 100 horas ..... ( )
5. La corriente eléctrica está determinada por: 1) la carga total que fluye entre dos puntos; 2) la distancia que fluye la carga; 3) el tiempo que tarda la carga en fluir; 4) la carga dividida entre el tiempo; 5) ninguna de las respuestas anteriores ..... ( )
6. El motor eléctrico depende para su funcionamiento: 1) del efecto de calentamiento; 2) del efecto fotoeléctrico; 3) de la emisión termoiónica; 4) de la fuerza lateral que recibe una corriente de un campo magnético; 5) del efecto químico ..... ( )
7. La potencia eléctrica se mide en: 1) amperes; 2) volts; 3) watts; 4) joules; 5) ohms ..... ( )
8. El electrón negativo fue descubierto por: 1) Franklin; 2) Newton; 3) Coulomb; 4) Thomson; 5) Galvani ( )
9. El núcleo del átomo se piensa que está compuesto de: 1) neutrones y electrones; 2) protones y neutrones; 3) partículas alfa y electrones; 4) electrones y protones; 5) protones y partículas alfa ..... ( )
10. La emisión de electrones cuando incide la luz en una superficie metálica se llama: 1) emisión termoiónica; 2) efecto Edison; 3) rayos X; 4) efecto fotoeléctrico; 5) fisión ..... ( )
11. ¿Cuál de los siguientes términos es más descriptivo del fenómeno empleado en la bomba de hidrógeno?: 1) fisión; 2) fusión; 3) electrólisis; 4) interferencia; 5) inducción ..... ( )
12. Los rayos X son: 1) radiación electromagnética de muy corta longitud de onda; 2) radiación electromagnética de muy larga longitud de onda; 3) radiación verde; 4) electrones de alta velocidad; 5) electrones de baja velocidad ..... ( )
13. El efecto fotoeléctrico es la emisión de: 1) electrones de una superficie iluminada; 2) electrones en el gas de un tubo de descarga; 3) electrones de un cuerpo caliente; 4) electrones por una sustancia radiactiva; 5) partículas alfa por una sustancia radiactiva ..... ( )

14. ¿Cuál de las siguientes radiaciones está formada por núcleos de helio?: 1) rayos X; 2) rayos térmicos; 3) rayos gamma; 4) rayos beta; 5) rayos alfa ..... ( )
15. Roentgen es famoso por su trabajo con: 1) el tubo de descarga; 2) los rayos X; 3) el bulbo al vacío de dos elementos; 4) el bulbo al vacío de tres elementos; 5) la medida de la luz ..... ( )
16. Se piensa que la luz es un movimiento ondulatorio debido principalmente a: 1) el fenómeno de interferencia; 2) su enorme velocidad; 3) su acción sobre el ojo humano; 4) las teorías de Einstein; 5) su propagación en línea recta ..... ( )
17. La difracción es: 1) lo mismo que refracción; 2) lo mismo que fluorescencia; 3) gobernada por la ley de la reflexión; 4) la causa de los ocasos rojos; 5) la desviación de la luz alrededor de las aristas ..... ( )
18. El viejo conflicto entre las teorías ondulatorias y corpuscular de la luz ha sido resuelto por los físicos actuales: 1) en favor de la teoría ondulatoria; 2) en favor de la teoría corpuscular; 3) considerando que la luz no es ni ondulatoria ni corpuscular; 4) corpuscular para explicar la difracción y ondulatoria para explicar su enorme velocidad; 5) considerando la luz tanto semejante a una onda como semejante a un flujo de corpúsculos ..... ( )
19. La velocidad de la luz fue determinada con gran precisión por: 1) Newton; 2) Galileo; 3) Michelson; 4) Einstein; 5) Huygens ..... ( )
20. El espejo plano más corto en donde una persona puede verse de cuerpo entero: 1) tiene una altura igual a su estatura; 2) depende de su distancia al espejo; 3) tiene una altura igual a la mitad de su estatura; 4) tiene el doble de su estatura; 5) es indeterminado ( )
21. La candela es una medida de: 1) el brillo de una fuente luminosa; 2) la intensidad de una fuente luminosa; 3) un ángulo sólido; 4) los reflejos; 5) la iluminación de una superficie ..... ( )
22. La iluminación que produce una fuente luminosa en una superficie varía: 1) en razón directa a la distancia entre ellas; 2) inversamente a la distancia entre ellas; 3) inversamente al cuadrado de la dis-

- tancia entre ellas; 4) directamente como el cuadrado de la distancia entre ellas; 5) independientemente de la distancia entre ellas ..... ( )
23. La luz converge al pasar por una lente doble convexa, principalmente por: 1) refracción; 2) difracción; 3) reflexión; 4) absorción selectiva; 5) interferencia. ( )
24. Cuando un rayo de luz incide en una superficie de vidrio, después de pasar por el aire, es: 1) desviada hacia la perpendicular a la superficie; 2) desviada alejándose de la perpendicular; 3) no desviada; 4) difractada; 5) "enfocada" ..... ( )
25. Un remo parcialmente sumergido en agua parece "quebrado", debido a: 1) la refracción; 2) la difracción; 3) la polarización; 4) la interferencia; 5) la absorción ..... ( )
26. El espectro del Sol: 1) es una banda de color casi continua, abarcando todo el tramo visible; 2) es un espectro de líneas brillantes; 3) es producido sólo por medio de un prisma; 4) puede ser producido sencillamente con un espejo cóncavo; 5) es muy parecido al espectro de la luz del arco de mercurio ..... ( )
27. Las imágenes reales difieren de las virtuales en que: 1) las imágenes reales siempre están invertidas; 2) las imágenes reales siempre son derechas; 3) las imágenes reales son a veces invertidas y a veces derechas; 4) las imágenes virtuales pueden proyectarse en una pantalla; 5) sólo las lentes convergentes pueden producir imágenes virtuales ..... ( )
28. La longitud de onda de la luz amarilla es aproximadamente de: 1) 0.6 mm; 2) 0.006 mm; 3) 0.0006 mm; 4) 0.06 mm; 5) 0.000006 mm ..... ( )
29. La luz amarilla y la luz azul añil, cuando se reúnen, producen: 1) verde; 2) amarillo; 3) rojo; 4) blanco; 5) negro ..... ( )
30. Una lente de vidrio doble convexa es: 1) un sistema divergente; 2) capaz de producir imágenes virtuales; 3) incapaz de producir imágenes reales; 4) siempre sin aberración cromática; 5) siempre sin aberración esférica ..... ( )
31. El ojo humano es: 1) esencialmente un espectroscopio capaz de analizar los colores componentes de

- una fuente luminosa; 2) esencialmente un radioreceptor "sintonizado" a una estrecha banda de las frecuencias electromagnéticas; 3) en ningún aspecto un receptor de radio; 4) absolutamente no afectado por la luz infrarroja; 5) esencialmente un microscopio compuesto ..... ( )
32. La miopía o vista corta se corrige por el uso de: 1) lentes cóncavas; 2) lentes convexas; 3) espejos cóncavos; 4) espejos convexos; 5) lentes estigmáticas. ( )
33. Los más grandes telescopios del mundo tienen espejos debido a: 1) que se desean imágenes invertidas; 2) que son más baratos y prácticos que las lentes del mismo tamaño; 3) que captan más luz que las lentes del mismo tamaño; 4) que pueden construirse con mayor longitud focal; 5) que es posible obtener mayor aumento que con una lente del mismo tamaño ..... ( )
34. La luz polarizada: 1) fue descubierta por el uso del polaroide; 2) indica el aspecto corpuscular de la luz; 3) puede emplearse para detectar esfuerzos en materiales transparentes; 4) es azul; 5) no tiene valor comercial ..... ( )

*Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 173-77*

1. (1)	7. (1)	13. (1)	19. (4)	25. (1)	31. (1)
2. (1)	8. (5)	14. (3)	20. (5)	26. (3)	32. (2)
3. (4)	9. (2)	15. (3)	21. (3)	27. (3)	33. (2)
4. (1)	10. (3)	16. (3)	22. (1)	28. (1)	34. (3)
5. (2)	11. (4)	17. (4)	23. (2)	29. (4)	35. (1)
6. (5)	12. (1)	18. (3)	24. (4)	30. (3)	36. (1)
					37. (1)

*Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 120-123*

1. (3)	5. (1)	10. (3)	15. (2)	20. (1)	25. (2)
2. (2)	6. (5)	11. (5)	16. (5)	21. (3)	26. (5)
3. (2)	7. (3)	12. (1)	17. (1)	22. (3)	27. (2)
4. (3)	8. (2)	13. (4)	18. (2)	23. (2)	28. (5)
	9. (4)	14. (1)	19. (1)	24. (3)	

*Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 174-177*

1. (5)	6. (3)	11. (1)	16. (2)	21. (5)	26. (3)
2. (1)	7. (2)	12. (5)	17. (2)	22. (4)	27. (4)
3. (1)	8. (4)	13. (3)	18. (5)	23. (3)	28. (2)
4. (2)	9. (1)	14. (3)	19. (4)	24. (3)	29. (2)
5. (3)	10. (2)	15. (1)	20. (1)	25. (3)	

*Resultados de las preguntas de repaso; Págs. 246-250*

1. (4)	7. (3)	13. (1)	19. (3)	25. (1)	31. (2)
2. (4)	8. (4)	14. (5)	20. (3)	26. (1)	32. (1)
3. (4)	9. (2)	15. (2)	21. (5)	27. (1)	33. (2)
4. (4)	10. (4)	16. (1)	22. (3)	28. (3)	34. (3)
5. (4)	11. (2)	17. (5)	23. (1)	29. (4)	
6. (4)	12. (1)	18. (5)	24. (1)	30. (2)	



## APENDICE

### CUESTIONARIO FINAL DE REPASO

1. El método científico: 1) se basa en el razonamiento deductivo; 2) se basa en el razonamiento inductivo; 3) es ejemplificado por los escritos de Aristóteles; 4) siempre ha sido seguido en la física; 5) no toma en cuenta los hechos ..... ( )
2. Una hipótesis es: 1) lo mismo que teoría científica; 2) algo no permitido en física; 3) una cosa que nunca tiene éxito; 4) una etapa necesaria en el razonamiento inductivo; 5) algo que siempre tiene éxito ( )
3. La fuerza es lo mismo que: 1) la masa; 2) un empuje; 3) la potencia; 4) el ímpetu; 5) la aceleración ( )
4. La resultante de dos fuerzas de 10 N de la misma dirección y con sentidos opuestos es: 1) 20 N; 2) 10 N; 3) 14 N; 4) 5 N; 5) Cero ..... ( )
5. Siempre se necesita una fuerza para: 1) mantener a un cuerpo moviéndose uniformemente en una dirección fija; 2) cambiar la velocidad de un cuerpo; 3) justificar la velocidad de un cuerpo; 4) mantener a los cuerpos en reposo; 5) determinar la posición de un cuerpo ..... ( )
6. El desplazamiento es: 1) el cambio de posición; 2) la distancia recorrida; 3) la rapidez con que cambia la velocidad; 4) lo mismo que ímpetu; 5) sinónimo de magnitud ..... ( )
7. La velocidad puede cambiar: 1) sólo en magnitud; 2) en magnitud, en dirección o en ambas; 3) sólo en dirección; 4) sólo por la ley de Newton; 5) sólo horizontalmente ..... ( )
8. La aceleración de la gravedad vale: 1) cero; 2) 9.8 cm/seg; 3) 9.8 m/seg; 4) 9.8 cm/seg/seg; 5) 9.8 m/seg/seg ..... ( )

9. La aceleración es: 1) lo mismo que velocidad; 2) lo mismo que desplazamiento; 3) la rapidez con que cambia el desplazamiento; 4) la rapidez con que cambia la velocidad; 5) siempre cero ..... ( )
10. Un cuerpo que recorre un círculo con un valor constante de la velocidad; 1) tiene movimiento uniforme; 2) está acelerado; 3) no es afectado por la gravedad; 4) su desplazamiento es cero; 5) es ingrávito ..... ( )
11. La Segunda Ley de Newton del Movimiento propone que: 1) la fuerza es la masa multiplicada por la aceleración 2) el peso es una fuerza; 3) un cuerpo en reposo continúa en reposo, a menos que reciba una fuerza; 4) a toda acción le corresponde una reacción igual y opuesta; 5) todos los cuerpos son atraídos por el centro de la Tierra ..... ( )
12. El trabajo es: 1) la masa multiplicada por la aceleración; 2) la fuerza multiplicada por el desplazamiento cuando tienen la misma dirección; 3) la fuerza multiplicada por el desplazamiento cuando son perpendiculares entre sí; 4) la fuerza multiplicada por la velocidad; 5) la masa multiplicada por la velocidad ( )
13. El trabajo dado cuando una fuerza de 10 newtons actúa horizontalmente sobre un cuerpo de 50 kg colocado sobre una superficie lisa horizontal, vale: 1) 10 joules; 2) 10 kg; 3) 500 joules; 4) 500 kg; 5) cero ..... ( )
14. La capacidad de suministrar un trabajo se llama: 1) ventaja mecánica; 2) energía; 3) potencia; 4) eficiencia; 5) ímpetu ..... ( )
15. La relación entre la fuerza suministrada por una máquina y la fuerza aplicada a ella se llama: 1) ventaja mecánica; 2) energía; 3) potencia; 4) eficiencia; 5) ímpetu ..... ( )
16. La máxima elongación en un movimiento vibratorio se llama: 1) frecuencia; 2) velocidad; 3) amplitud; 4) periodo; 5) inercia ..... ( )
17. El movimiento armónico simple: 1) tiene lugar en línea recta; 2) es giratorio; 3) es torsional; 4) es siempre audible; 5) siempre incluye nodos y vientres ( )

18. El sonido es un fenómeno ondulatorio; 1) transversal; 2) circular; 3) longitudinal; 4) electromagnético; 5) elíptico ..... ( )
19. La velocidad de una onda es: 1) el producto de la frecuencia y la longitud de onda; 2) la relación entre la frecuencia y la longitud de onda; 3) la masa multiplicada por la aceleración; 4) la distancia de una cresta a la siguiente; 5) siempre de 300 000 km/seg ( )
20. En un tubo abierto en sus dos extremos, las ondas sonoras: 1) presentan un nodo en cada extremo; 2) presentan un antinodo en el centro; 3) resuena con la longitud de onda fundamental, cuatro veces mayor que la longitud del tubo; 4) tiene una onda fundamental cuya longitud es el doble de la del tubo; 5) nunca puede resonar ..... ( )
21. El número de armónicos de un sonido: 1) determina el tono; 2) determina el timbre; 3) gobierna la intensidad; 4) explica los fenómenos de las pulsaciones; 5) siempre es cero ..... ( )
22. Cuando un diapasón de 256 hertz vibra simultáneamente con uno de 260 hertz, el número de pulsaciones que se escucha es: 1) cero; 2) uno; 3) dos; 4) tres; 5) cuatro ..... ( )
23. Siempre que dos ondas de la misma frecuencia, velocidad y amplitud se sobreponen al moverse en sentidos opuestos: 1) siempre hay interferencia destructiva; 2) siempre hay interferencia constructiva; 3) se demuestra la refracción; 4) la diferencia de fase siempre vale cero; 5) se producen ondas estacionarias ..... ( )
24. Los átomos son: 1) esferas rígidas; 2) compuestos de moléculas; 3) estacionarios; 4) compuestos de electrones, protones y neutrones; 5) no existen ... ( )
25. Si la presión de un gas aumenta tres veces a temperatura constante, el volumen: 1) aumentará tres veces; 2) disminuirá tres veces; 3) disminuirá nueve veces; 4) permanecerá constante; 5) disminuirá a cero ..... ( )
26. Si la temperatura de un gas aumenta, sus moléculas; 1) aumentan su velocidad; 2) disminuyen su

- velocidad; 3) no cambia su velocidad; 4) se vuelven más pequeñas; 5) se vuelven mayores ..... ( )
27. La temperatura Celsius que corresponde a  $-40^{\circ}$  Fahrenheit es: 1)  $0^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $-22.2^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $-72^{\circ}\text{C}$ ; 4)  $10^{\circ}\text{C}$ ; 5)  $-40^{\circ}\text{C}$  ..... ( )
28. La ley de Boyle tiene que ver con: 1) líquidos buscando su propio nivel; 2) la difusión de los gases a través de cuerpos porosos; 3) la ley de las proporciones múltiples; 4) los hemisferios de Magdeburgo; 5) la relación entre la presión y el volumen de un gas ..... ( )
29. El calor es: 1) un fluido; 2) energía; 3) potencia; 4) ímpetu; 5) lo mismo que temperatura ..... ( )
30. La presión puede medirse en: 1) kilogramos; 2) centímetros; 3) newtons por centímetros; 4) newtons por centímetro cuadrado; 5) newtons por centímetro cúbico ..... ( )
31. Cuando la presión atmosférica disminuye, la temperatura a la que hierve el agua: 1) se eleva; 2) vale siempre  $100^{\circ}\text{C}$ ; 3) disminuye; 4) permanece a  $50^{\circ}\text{C}$ ; 5) no se altera ..... ( )
32. La razón para aislar un refrigerador es: 1) evitar que salga radiación; 2) evitar que entre calor; 3) evitar que salga el frío; 4) fundir el hielo; 5) evitar que se funde el hielo ..... ( )
33. Cuando se frota con lana una barra de ebonita: 1) se genera electricidad; 2) las electricidades negativa y positiva se separan; 3) la lana queda negativamente cargada; 4) la barra queda positivamente cargada; 5) no sucede nada ..... ( )
34. El protón comparado con el electrón negativo tiene: 1) carga del mismo signo; 2) el mismo tamaño; 3) carga de signo opuesto; 4) el doble de carga; 5)  $1/1800$  parte de la carga ..... ( )
35. Dos cargas eléctricas iguales: 1) se atraen entre sí; 2) se rechazan entre sí; 3) se neutralizan entre sí; 4) no ejercen efecto entre sí; 5) deben ser neutrales ..... ( )
36. Cuando el vidrio se frota con seda: 1) se genera electricidad; 2) se carga positivamente el vidrio; 3) se carga negativamente el vidrio; 4) la seda se descar-

- ga; 5) la carga que adquiere la seda es el doble de la que adquiere el vidrio ..... ( )
37. Las hojuelas de un electroscope cargado, se separan entre sí porque: 1) cargas iguales se atraen; 2) están cargadas positivamente; 3) están cargadas negativamente; 4) cargas opuestas se atraen; 5) cargas iguales se rechazan ..... ( )
38. De la teoría electrónica se infiere que cuando una varilla de ebonita se frota con una franela: 1) los electrones negativos son tomados de la franela; 2) los electrones positivos se acumulan en la franela; 3) los protones se acumulan en la varilla; 4) los protones son sacados de la varilla; 5) la varilla se vuelve un buen conductor de la electricidad ..... ( )
39. La función de un capacitor o condensador es: 1) producir una chispa; 2) aumentar el potencial; 3) disminuir la carga; 4) aumentar la intensidad de la chispa a una presión eléctrica dada; 5) condensar una carga eléctrica en un pequeño volumen ..... ( )
40. En un conductor metálico sus dos extremos se mantienen a una diferencia de potencial constante; entonces: 1) se establece una corriente eléctrica; 2) los electrones fluyen de positivo a negativo; 3) los protones fluyen de más a menos; 4) se cargan pilas en el extremo negativo; 5) no se producen efectos magnéticos ..... ( )
41. La electrólisis generalmente se clasifica como un efecto: 1) magnético; 2) térmico; 3) químico; 4) acústico; 5) estático ..... ( )
42. En este lugar el extremo norte de la brújula apunta: 1) al este del norte; 2) al norte; 3) al oeste del norte; 4) hacia el polo norte magnético de la Tierra; 5) al sur ..... ( )
43. Una carga unitaria positiva en reposo y un polo magnético norte unitario: 1) se atraen entre sí; 2) se rechazan entre sí; 3) no ejercen fuerzas entre sí; 4) producen otros polos magnéticos; 5) producen otras cargas eléctricas ..... ( )
44. Cuando un electroscope se carga por inducción: 1) el signo de la carga inducida es igual al del cuerpo cargado; 2) el signo de la carga inducida

- es opuesto al del cuerpo cargado; 3) las cargas se transportan directamente del cuerpo cargado al electroscopio; 4) la carga inducida es siempre positiva, puesto que las hojillas divergen; 5) el electroscopio cargado tiene el mismo número de electrones antes y después ..... ( )
45. Cuando una corriente pasa por un alambre perpendicular a un campo magnético: 1) el alambre es atraído hacia el lado norte del campo; 2) el alambre es atraído hacia el lado sur del campo; 3) el alambre no es atraído; 4) el alambre siempre se imanta; 5) el alambre recibe una fuerza en ángulo recto al campo y a su propia dirección ..... ( )
46. La inducción electromagnética fue descubierta por: 1) Maxwell; 2) Edison; 3) Einstein; 4) Oersted; 5) Faraday ..... ( )
47. La diferencia de potencial eléctrico se mide con un: 1) voltímetro; 2) amperímetro; 3) vatímetro; 4) celda fotoeléctrica; 5) fusible ..... ( )
48. Un tostador eléctrico depende para su funcionamiento del siguiente efecto de la corriente: 1) el térmico; 2) el magnético; 3) el químico; 4) el termoeléctrico; 5) el electrolítico ..... ( )
49. El nombre asociado con los rayos catódicos es el de: 1) Joule; 2) Franklin; 3) Tales de Mileto; 4) Oersted; 5) J. J. Thomson ..... ( )
50. Los siguientes son todos físicos modernos, excepto: 1) Michelson; 2) Compton; 3) Millikan; 4) Maxwell; 5) Heisenberg ..... ( )
51. Los siguientes términos sugieren física moderna, excepto: 1) teoría cuántica; 2) relatividad; 3) positrón; 4) protón; 5) resistividad ..... ( )
52. La luz se piensa que sea un movimiento ondulatorio principalmente por: 1) su enorme velocidad; 2) la posibilidad de que se polarice; 3) su propagación en línea recta; 4) su acción sobre las placas fotográficas; 5) la posibilidad de enfocarla con una lente... ( )
53. El fotómetro se emplea para medir: 1) iluminación; 2) reflejo; 3) brillo de una fuente luminosa; 4) intensidad luminosa; 5) distancia ..... ( )



54. La desviación de la luz alrededor de las aristas se debe a la: 1) refracción; 2) reflexión; 3) polarización; 4) difracción; 5) absorción ..... ( )
55. La iluminación de la parte de una mesa colocada directamente a dos metros abajo de una lámpara de 40 bujías es: 1) 10 luxes; 2) 100 luxes; 3) 20 luxes; 4) cero; 5) 80 luxes ..... ( )
56. El espectro visible del Sol es: 1) una banda continua de colores desde el rojo al violeta; 2) una banda de color cruzada por líneas oscuras; 3) un espectro de líneas brillantes; 4) como el espectro visible de la luz del sodio; 5) una banda continua de color menos la luz verde ..... ( )

*Resultados de las preguntas finales de repaso*

1. (2)	10. (2)	19. (1)	29. (2)	39. (4)	48. (1)
2. (4)	11. (1)	20. (4)	30. (4)	40. (1)	49. (5)
3. (2)	12. (2)	21. (2)	31. (3)	41. (3)	50. (4)
4. (5)	13. (5)	22. (5)	32. (2)	42. (3)	51. (5)
5. (2)	14. (2)	23. (5)	33. (2)	43. (3)	52. (2)
6. (1)	15. (1)	24. (4)	34. (3)	44. (2)	53. (1)
7. (2)	16. (3)	25. (2)	35. (2)	45. (5)	54. (4)
8. (5)	17. (1)	26. (1)	36. (2)	46. (5)	55. (1)
9. (4)	18. (3)	27. (5)	37. (5)	47. (1)	56. (2)
		28. (5)	38. (1)		