



$$W_x = \frac{M \cdot \omega_x}{2}$$

Entornos invisibles

(de la ciencia y la tecnología)

Bar

Capítulo 8

Guía didáctica

Autores | Carlos Trapani | Juan Linares

$$\sigma_{ad} = 1.600 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \sigma_{pd} = 16.000 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$



Ministerio de
Educación
Presidencia de la Nación



encuentro

educar

inet
Instituto Nacional de
Educación Tecnológica

Autoridades

Presidente de la Nación

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Ministro de Educación

Dr. Alberto E. Sileoni

Secretaria de Educación

Prof. María Inés Abrile de Vollmer

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica

Lic. María Rosa Almandoz

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional

Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.

Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Saavedra 789. C1229ACE.

Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

República Argentina.

2011

Director de la Colección:

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinadora general de la Colección:

Claudia Crowe

Diseño didáctico y corrección de estilo:

Lic. María Inés Narvaja

Ing. Alejandra Santos

Coordinación y producción gráfica:

Augusto Bastons

Diseño gráfico:

María Victoria Bardini

Augusto Bastons

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Ilustraciones:

Diego Gonzalo Ferreyro

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Administración:

Cristina Caratozzolo

Néstor Hergenrether

Colaboración:

Jorgelina Lemmi

Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez

Dra. Stella Maris Quiroga

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición -Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto-.

Colección Encuentro Inet

Esta colección contiene las siguientes series (coproducidas junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica - INET):

- La técnica
- Aula-taller
- Máquinas y herramientas
- Entornos invisibles de la ciencia y la tecnología

DVD 4 | Aula-taller

Capítulo 1
Biodigestor

Capítulo 2
Quemador de biomasa

Capítulo 3
Planta potabilizadora

Capítulo 4
Probador de inyecciones

DVD 5 | Aula-taller

Capítulo 5
Planta de tratamiento de aguas residuales

Capítulo 6
Tren de aterrizaje

Capítulo 7
Banco de trabajo

Capítulo 8
Invernadero automatizado

DVD 6 | Máquinas y herramientas

Capítulo 1
Historia de las herramientas y las máquinas herramientas

Capítulo 2
Diseño y uso de Máquinas Herramientas

Capítulo 3
Diseño y uso de Herramientas de corte

Capítulo 4
Nuevos paradigmas en el mundo de las máquinas herramientas y herramientas de corte

DVD 7 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 1
Parque de diversiones

Capítulo 2
Cocina

Capítulo 3
Red de energía eléctrica

Capítulo 4
Campo de deportes

DVD 8 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 5
Estadio de Rock

Capítulo 6
Estructuras

Capítulo 7
Chacra orgánica

Capítulo 8
Bar

DVD 9 | Entornos invisibles (de la ciencia y la tecnología)

Capítulo 9
Estación meteorológica

Capítulo 10
Restaurante

Capítulo 11
Seguridad en obras de construcción

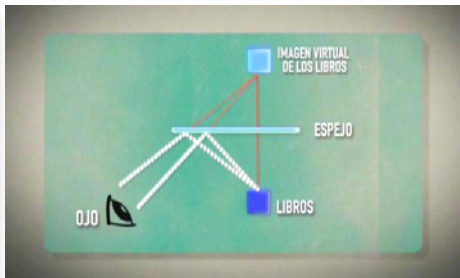
Capítulo 12
Camping musical

Capítulo 13
Hospital

Índice | Bar

LA MATERIA VA DE ONDA - Desarrollo	08
8.1. Red conceptual	16
8.2. Interferencia por una rendija doble	17
8.3. El experimento de Young de la doble rendija	19
8.4. Relevancia física del experimento de Young	20
8.5. Formulación clásica	21
8.6. Formulación moderna	21
8.7. La paradoja del experimento de Young	22
8.8. Condiciones para la interferencia	23
8.9. Resultados observados	23
8.10. Rejillas de difracción	23
8.11. Algunas aplicaciones de la interferometría	25
8.12. Actividades propuestas: ¿La materia... va de onda?	27
♦ 8.12.1. Presentación	27
♦ 8.12.2. Actividades	27
8.13. Bibliografía	31

Imágenes del capítulo



LA MATERIA VA DE ONDA - Desarrollo

1) PRIMERAS TEORÍAS

Comenzaremos esta reseña ubicándonos en la Grecia antigua (500 A.N.E. aprox.), donde los grandes filósofos comenzaron a preguntarse “¿Cómo es posible ver?”, es decir, cómo será que la vista, a diferencia del tacto, nos permitía conocer la forma, el color y el brillo de los objetos, pero habiendo una distancia de por medio.

De las respuestas a estas preguntas, podemos rescatar *tres corrientes teóricas* acerca de la idea de la visión de los objetos. En ellas, la naturaleza de la luz estaba dada por el tipo de explicación del fenómeno de “ver” las cosas:

- La primera hacía salir la luz del ojo hacia el objeto, como explicación de la visión.
- La segunda, estaba a favor de la emisión que partía de los cuerpos hacia el ojo.
- La tercera, de la escuela platónica, proponía una combinación de los dos flujos.

Empédocles de Siracusa pensaba que la vista no era más que tocar los objetos con una “mano” muy larga. Él creía que de los ojos salían emanaciones que hacían contacto con los objetos y recogían su forma. Esta teoría se llama *extramisión*.

Leucipo (¿de Abdera?), en cambio, creía que el acercamiento ocurría en sentido contrario. Los objetos emitían “algo” que contenía su forma y color, y que incidía sobre los ojos, los cuales no hacían más que captarlo. Esta teoría se llama *intromisión*.

Ninguno de los dos pudo explicar por qué no podían existir estas emanaciones en la oscuridad, pero coincidían en que estas emanaciones o “rayos” viajaban en línea recta. Esto permitió a Euclides de Megara estudiar su propagación usando las leyes de la geometría, estableciendo las bases de la perspectiva hasta hoy usada.

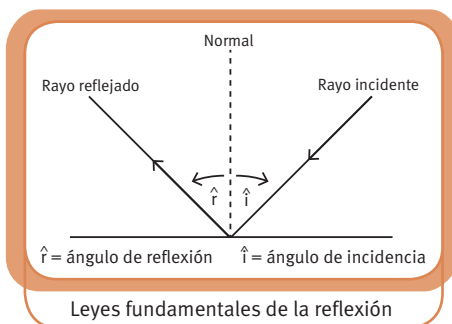
Platón de Aenas, en su “Diálogos con Teeteto” o “De la Ciencia” (aprox. 350 A.N.E.) pone en boca de Sócrates, que “... Cuando el ojo de una parte y el objeto de otra se encuentran y han producido la mirada y la sensación, que naturalmente les corresponde, las cuales jamás se habrían producido si el ojo se fijara en otro objeto o recíprocamente, entonces, moviéndose estas dos cosas en el espacio intermedio, a saber, la visión hacia los ojos y la mirada hacia el objeto que produce el color juntamente con los ojos, el ojo se ve empapado en la visión, percibe y se hace, no mirada ni visión, sino ojo que ve”¹.

Nota 1

Heron de Alejandría (100 A.N.E., aprox.) avanzó experimentalmente en el estudio del comportamiento de los “rayos” de luz al incidir sobre distintas superficies, considerándolos como las rectas geométricas supuestas por Euclides. Escribió dos tratados sobre Óptica: “Catóptrica” y “Dióptrica”. En el primero, caracteriza la igualdad de los ángulos de incidencia y reflexión de la luz ante espejos planos. Avanza también sobre la reflexión en espejos curvos. En el

¹ Platón: “Diálogos con Teeteto” o “De la Ciencia” (aprox. 350 A.N.E.)

segundo describe la desviación de la luz -refracción- al atravesar la superficie que separa dos medios transparentes distintos (dioptra). Se sabe que desarrolló, en consecuencia, instrumentos hidráulicos de comando para graduar las posiciones de espejos empleados en barberías y quirófanos, para ubicar, ampliar o concentrar el campo visual.



Muchos años después, se resolvió el añejo debate de extramisión contra intromisión. El encargado de esto fue Al`Hazen, experimentador físico y anatomista árabe que, al iniciarse el Siglo XI de N.E., investigó la reflexión y refracción de la luz sobre superficies esféricas, el arco iris, la cámara oscura, etc. En su “Libro de Óptica”, tomando en cuenta -entre otras cosas- el hecho de que mirar directamente al sol lastima los ojos, dedujo que los ojos son receptores y no emisores. También acertó al explicar que un objeto recibe luz del ambiente y la esparce en todas direcciones. En ausencia de obstáculos, esta luz esparcida se propaga hacia el ojo y le permite a éste percibir el objeto. Si no hay luz, concluye, los objetos no pueden esparcir nada y es por eso que no los podemos ver.

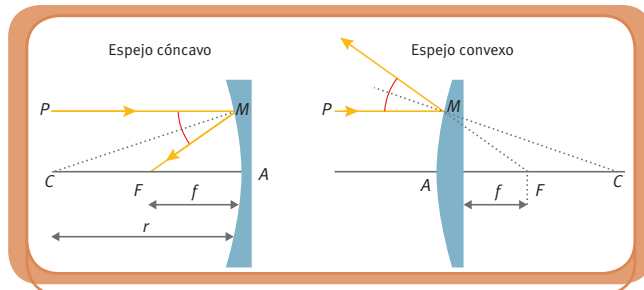
2) RENACIMIENTO DE LAS CIENCIAS

Nota 2

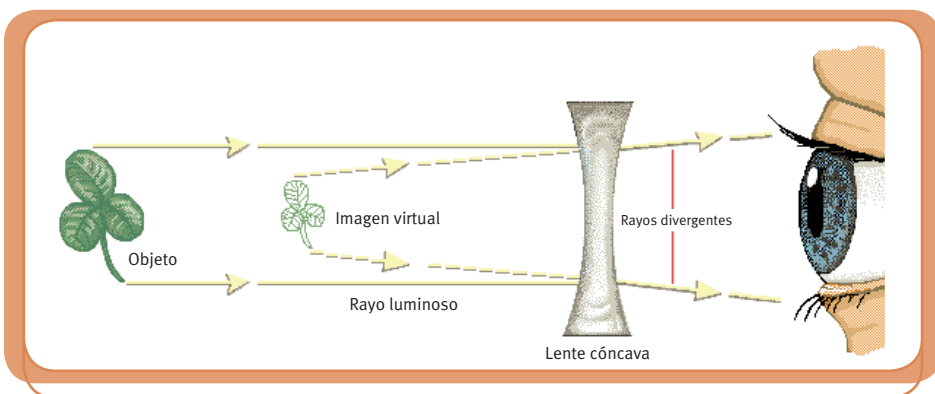
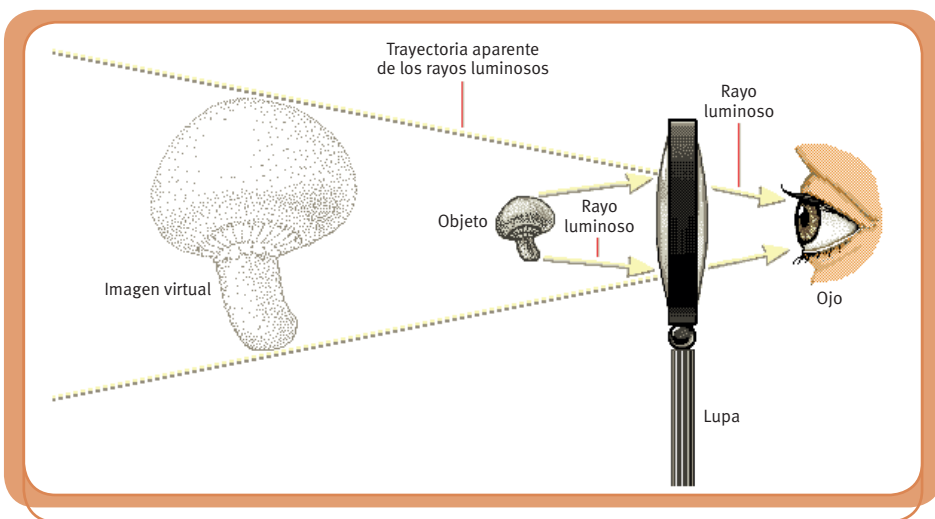
Además, le dio expresión matemática formal a la técnica -tal vez de Al`Hazen- del “constructor de espejos y lentes”. Con ella, aplicada a espejos y lentes esféricos, se inicia una intensa producción de instrumentos ópticos cada vez más precisos y diversificados. Así surgen las lupas, los lentes, anteojos, telescopios, microscopios, prismáticos, etc.

$$1/f = (n - 1) (1/r_1 - 1/r_2)$$

René Descartes (S. XVII), formulaba en su libro “El Mundo” que, tal como Dios es uno e infinito, la luz -tanto como el espacio y la materia- es continua, infinita e indivisible (no existe el vacío ni existen los átomos).



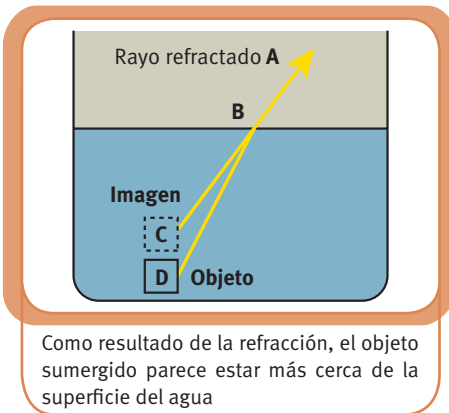
Situación del objeto	Tipo de la imagen	Posición de la imagen	Tamaño de la imagen	Orientación de la imagen
Más allá de C	Real	Entre C y F	Menor	Invertida
Entre C	Real	En C	Igual	Invertida
Entre C y F	Real	Más allá de C	Mayor	Invertida
Entre F y A	Virtual	Detrás del espejo	Mayor	Derecha
Delante de A para espejos convexas	Virtual	Detrás del espejo	Menor	Derecha



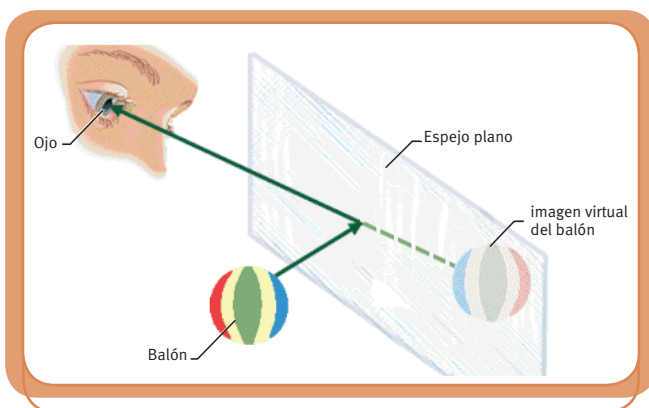
Antes de la “Revolución Científica” culminada por Newton, se comienza a vislumbrar un cambio fundamental en la lógica que relaciona la investigación empírica y el desarrollo del pensamiento: se enfatiza el llamado “método experimental”. De esta manera, el Padre Grimaldi descubrió el fenómeno de la difracción de la luz y Hooke declara estar preparado

para “explicar todos los colores del mundo”, a través de un dispositivo creado para medir el índice de refracción de los líquidos. En 1676, Olaff Römer, consigue medir la velocidad de la luz.

A finales del siglo XVII Isaac Newton ensayó una explicación de **la naturaleza de la luz**, considerándola como si estuviera formada de **pequeños corpúsculos materiales**, característica básica de lo que se conoce como **TEORÍA CORPUSCULAR** o de emisión de partículas. El movimiento de estas partículas podía explicarse por medio de sus leyes de la Mecánica Clásica. Por ejemplo, la luz viaja en línea recta porque así es como toda partícula viaja de acuerdo a la ley de la inercia, la luz se refleja en algunas superficies porque las partículas que la forman, simplemente rebotan al colisionar contra el espejo, según el principio de acción y reacción, etc.



Newton también quiso dar una explicación de la refracción y supuso que la velocidad de las pelotitas de luz cambiaba bruscamente al pasar de un medio menos denso a otro más denso, hecho que es cierto, aunque se equivocó al proponer que aumentaba en el medio más denso.

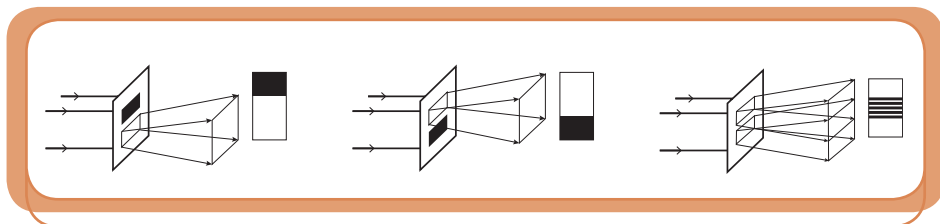


Para Newton, la intensidad de la luz se correspondía con la cantidad de pelotitas que cruzan una superficie determinada por unidad de tiempo. La luz demasiado intensa es dañina porque los ojos no pueden soportar la energía que la pelotitas liberan al golpearlos. Por otra parte, la luz de diferentes colores consistiría en pelotitas de diferentes tamaños, las más pequeñas correspondientes al color violeta y las más grandes al color rojo. Tiempo después, los seguidores de Newton explicaron la polarización suponiendo que las pelotitas no son esféricas sino que tienen otra forma geométrica y que un filtro polarizador sólo permitiría pasar por él a las que tienen una orientación determinada.

Sin embargo, la difracción seguía resistiendo las explicaciones basadas en la teoría corpuscular. Si la luz estuviera hecha de pelotitas que viajan en línea recta, un obstáculo debería solamente detener una parte de éstas y la proyección de la luz sobre una pantalla consistiría simplemente en una sombra geométrica, como ocurre efectivamente para obstáculos grandes. Así, no había modo de explicar por qué, con obstáculos pequeños, la luz se desvía

tan notoriamente de su trayectoria recta, ni por qué la luz proyecta sobre una pantalla un complejo patrón de difracción.

En 1803 Thomas Young realiza un experimento en el que hace pasar un haz de luz a través de dos rendijas (muy delgadas) para así crear dos haces que puedan proyectarse sobre una pantalla. Cuando se tapa una de las rendijas, la otra puede iluminar por sí sola más de la mitad de la pantalla. Cuando las dos rendijas se destapan, los dos haces coinciden en la región central y hacen aparecer una serie de franjas iluminadas y oscuras alternantes, llamada “espectro”.



Si la luz estuviera formada de partículas, como defendía Newton, la región central estaría siendo golpeada por el doble de pelotitas y por tanto su iluminación presentaría el doble de la intensidad que la de las otras regiones. Sin embargo, aunque en esta región existen zonas muy bien iluminadas, también existen otras completamente oscuras. La explicación requería abandonar completamente la idea de las partículas y considerar a la luz como una onda.

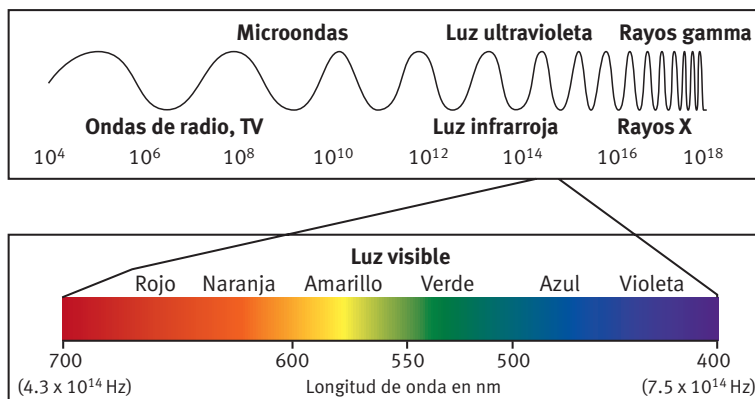
Huygens propuso interpretar el fenómeno según el “modelo ondulatorio” en el que la luz es concebida como un fenómeno oscilante de tipo mecánico, similar al sonido, que requiere para su propagación de un “médium” muy particular: el éter, especie de fluido impalpable que todo lo llena, incluso el vacío, donde la luz también se propaga.

Según el diccionario de la Real Academia Española: “... la luz es la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión...”

En realidad la definición del diccionario parece muy importante, pero ¿estamos comprendiendo qué nos dice?

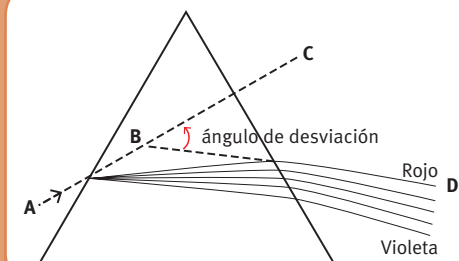
En la **TEORÍA ONDULATORIA** de Huygens, la intensidad de la luz se relaciona con la amplitud de la onda, mientras que los diferentes colores corresponden a valores diferentes de las frecuencias de las ondas: el color rojo tiene la menor frecuencia de onda, mientras que el color violeta tiene la mayor frecuencia.

Pero ahora la pregunta se convierte en otra. Ya que la longitud de onda de la luz es pequeña con respecto al tamaño de los objetos cotidianos, ¿existirían ondas electromagnéticas con otras longitudes? Heinrich Hertz consiguió generar ondas electromagnéticas con longitudes mucho más largas (como las de las señales de radio y televisión) que pueden “sortear” los obstáculos como sucede con el sonido.

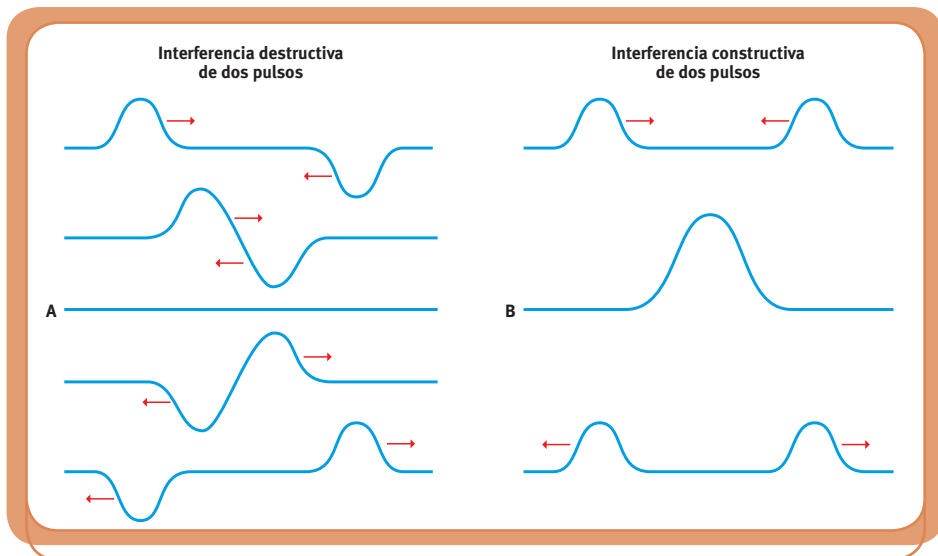


Con longitudes de onda un poco más largas que las del color rojo se encuentran los rayos infrarrojos, mientras que los rayos ultravioleta tienen longitudes de onda un poco más cortas que el violeta. Los rayos X y los rayos gamma son ondas electromagnéticas de longitudes de onda más cortas que la luz. Una consecuencia de considerar la luz como una onda electromagnética era que el éter dejaba de ser necesario. El papel de “medio” se volvió prescindible, mientras adquiría importancia ahora el concepto de campo.

Luz ultravioleta en exceso	Mata células de la piel y de tejidos blandos
Rayos X en exceso	Produce malformaciones celulares, eventualmente cáncer
Las micro-ondas (por efecto calórico)	Queman tejidos internos
Las ondas de radio y TV	Son básicamente inofensivas

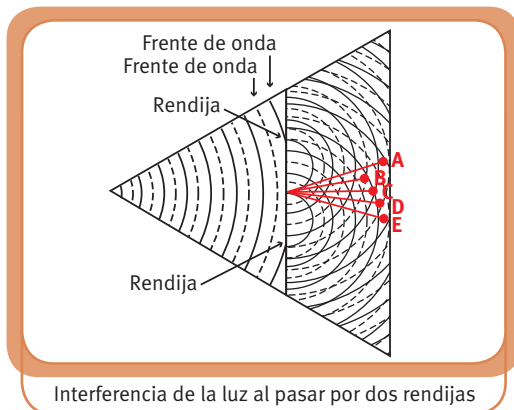


Según el principio de Huygens, cuando la luz se encuentra con un obstáculo, cada punto de éste se convierte en una nueva fuente emisora de ondas que se propagan en todas direcciones, lo que explica sin problemas el fenómeno de la difracción.



Estas nuevas ondas se interfieren entre sí, dando lugar al surgimiento de direcciones de propagación preferenciales, como las que ocurren en los fenómenos de reflexión y refracción. Las franjas espectrales que aparecen en el experimento de Young pueden explicarse directamente como consecuencia de interferencia constructiva y destructiva entre los dos haces de luz.

Parecía ser el triunfo de la teoría ondulatoria sobre la corpuscular. Pero una nueva teoría se habría pasado con el descubrimiento de la electricidad. A partir de éste y de la certeza de que el magnetismo es generado por cargas eléctricas en movimiento (electromagnetismo), Michael Faraday imaginó y defendió la existencia de un “Campo de Fuerzas”, como una perturbación del espacio.



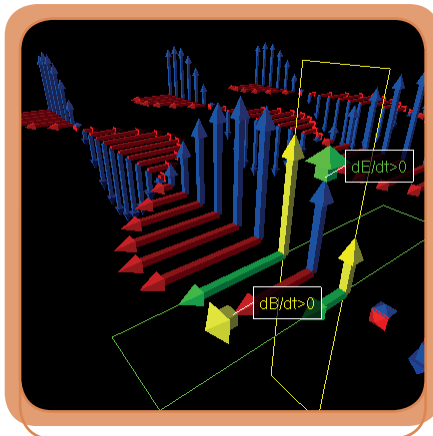
Interferencia de la luz al pasar por dos rendijas

Comprobado por James Clerk Maxwell, una carga produce un campo eléctrico y si se mueve produce también un campo magnético variable que se recrea en una nueva variación del campo eléctrico... y así sucesivamente. Ambos, entonces se propagan juntos en lo que sería una perturbación electromagnética oscilante. La velocidad con que esta perturbación del vacío se

propaga a través del espacio resultó ser muy similar a la velocidad de la luz, que ya había sido medida en aquel entonces. Conclusión de esta teoría: la luz es una **ONDA ELECTROMAGNÉTICA**.

3) NUEVA CONCEPCIÓN DE LA LUZ

Aparentemente estaba todo resuelto... sin embargo a principio del S. XX, los científicos comenzaron a estudiar ciertos fenómenos que, ni siquiera la teoría electromagnética de Maxwell podía inferir. Uno de ellos era el efecto fotoeléctrico. En éste, la energía que la luz puede transferir a un electrón depende de su color.



La teoría electromagnética dice que la energía contenida en la luz se relaciona con la amplitud de la onda mientras que el color se relaciona con su frecuencia de onda. En ninguna parte plantea esta teoría una relación entre energía y color.

Para resolver el enigma Albert Einstein tuvo que dar un pequeño salto hacia atrás y “subirse a los hombros de un Gigante”: señaló que el efecto fotoeléctrico podía explicarse fácilmente si se supone que **la luz está formada por paquetes discretos** (de cierta cantidad pequeña) de energía, **a los que llamó “fotones”**.

La energía de un fotón depende directamente de la frecuencia (color) de onda de la luz, de acuerdo a una relación calculada por Max Planck, en el estudio de la radiación calórica emitida por un cuerpo negro. Un fotón de luz azul tiene más energía que uno de luz roja, debido a su mayor frecuencia de onda.

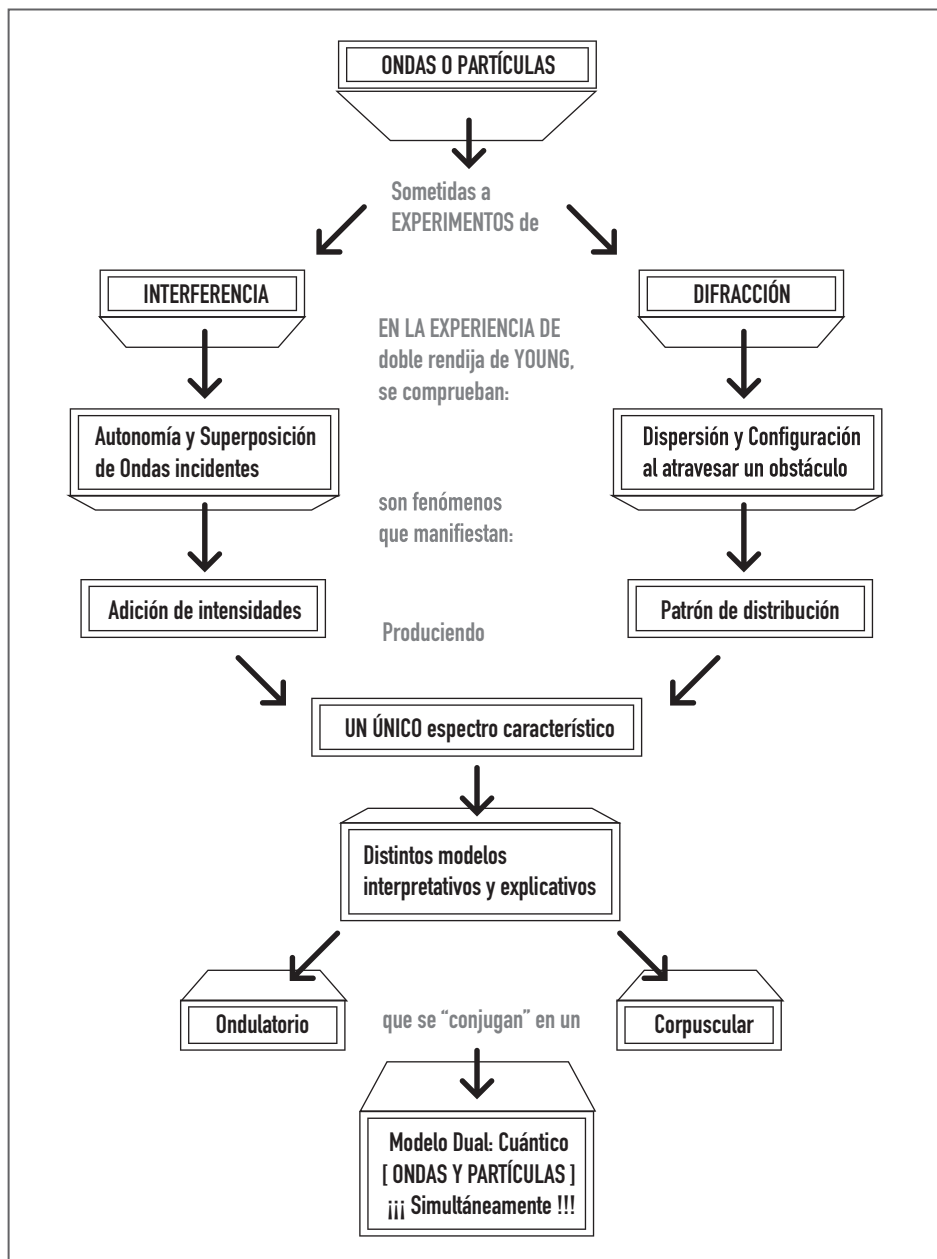
Para los rayos X y los rayos gamma, los fotones resultan ser altamente energéticos. Por lo tanto, la energía transferida por el fotón al electrón en el efecto fotoeléctrico dependerá del color de la luz y no de su intensidad.

Pero esta concepción de la luz como “granizada de fotones”, reavivaba la teoría de Newton que asignaba carácter corpuscular -material- a la luz. Después de mucha confusión, se llegó a la conclusión de que, tanto esta teoría como la ondulatoria, eran necesarias y se estableció la **TEORÍA DE LA DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA**, en donde algunas veces pueden predominar las propiedades de onda y otras veces, según las condiciones de contorno, las características de partícula material.

Luis de Broglie llevó esta ambigüedad un poco más lejos y planteó que si las ondas tenían propiedades de partícula, también las partículas debían tener propiedades de onda y difractarse -como ellas- al pasar por las rendijas. Este concepto, luego confirmado en la práctica experimental, llevó al desarrollo de la MECÁNICA ONDULATORIA, más conocida hoy como **FÍSICA CUÁNTICA**.

8. Bar

8.1. Red conceptual



8.2. Interferencia por una rendija doble

Esta característica de los altavoces se conoce como directividad, y hace referencia a la relación entre la energía acústica. Cuando las ondas procedentes de dos fuentes diferentes (que, por todo lo demás, son idénticas) se superponen en un punto del espacio, la intensidad de la onda combinada resultante en ese punto puede ser mayor, igual o menor que la intensidad de cualquiera de las dos ondas superpuestas. A este efecto lo llamamos interferencia emitida y la dirección en la que se propaga el sonido.

La interferencia puede ser: *constructiva* cuando la intensidad neta es mayor que las intensidades individuales, o *destruktiva* cuando la intensidad neta es menor que las intensidades individuales. Como veremos más adelante, el hecho que la interferencia sea *constructiva* o *destruktiva* depende de las fases relativas de las dos ondas.

En principio, cualquier número de ondas puede interferir; pero aquí consideramos sólo la interferencia de dos ondas. Suponemos que cada una de las fuentes de ondas emite, únicamente, una sola longitud de onda¹.

Suponemos también, por ahora, que la relación de fases entre las dos ondas no cambia con el tiempo. Se dice que tales ondas son *coherentes*. Cuando ondas coherentes interfieren, la intensidad de ondas combinadas en cualquier punto del espacio no cambia con el tiempo. La coherencia es una condición necesaria para que ocurra la interferencia.

En general, dos fuentes de luz distintas no pueden hacerse coherentes porque la emisión de la luz por los átomos de una fuente es independiente de la otra. Las crestas y valles de las ondas que proceden de dos fuentes no mantienen una relación de fases definidas, se dice que las ondas son *incoherentes*.

Por lo general, para llevar a cabo experimentos de interferencia con la luz es necesario dividir la luz que procede de una sola fuente en dos componentes y tratar a cada componente como si fuera emitida por una fuente de luz independiente. Si lo hacemos en forma adecuada, puede conseguirse que las ondas interfieran. Más adelante, consideraremos varios esquemas para crear una división de la onda de la luz. Aquí consideramos la técnica de hacer pasar una onda de luz por dos rendijas o aberturas estrechas. El ancho de las rendijas debe ser del mismo orden que la longitud de la onda de luz. Así pues, estamos claramente fuera de los dominios en que se aplica la óptica geométrica.

La figura 1 muestra una barrera en la que se han cortado dos rendijas angostas paralelas. Sobre las rendijas incide un tren de ondas planas de luz como el que puede obtenerse de un láser. A través de las rendijas pasan porciones de cada frente de ondas incidente, de modo que las rendijas pueden considerarse como dos fuentes de ondas de luz coherentes.

¹ El caso de fuentes que emiten ondas de varias longitudes de onda puede manejarse al considerar por separado las interferencias de las longitudes de onda de los componentes individuales.

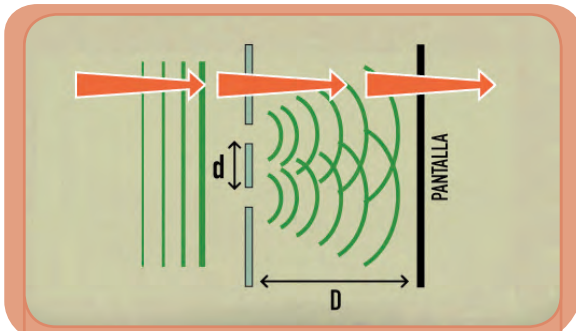


Figura 1.

El esparcimiento de la luz al pasar por dos rendijas, ilustrado en la figura 1, se llama difracción. Por ahora nos ocuparemos de rendijas angostas, de modo que cada una puede considerarse como una línea de fuentes puntuales de luz, emitiendo cada una las pequeñas ondas de Huygens. Nótese que las dos ondas pueden superponerse e interferir al incidir en la pantalla.

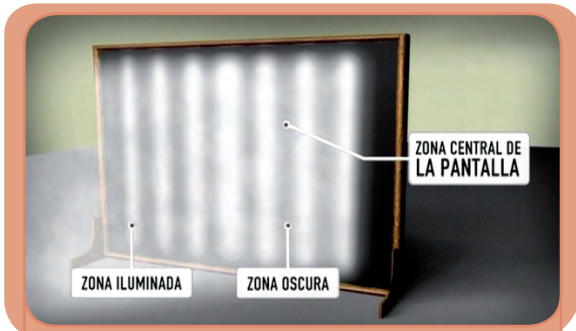


Figura 2.

Para simplificar el análisis, suponemos que la distancia D de las rendijas y la pantalla es mucho mayor que la separación d entre las rendijas. (Como alternativa, podemos colocar una lente entre la rendija y la pantalla para enfocar la luz emergente sobre la pantalla, como veremos más adelante.)

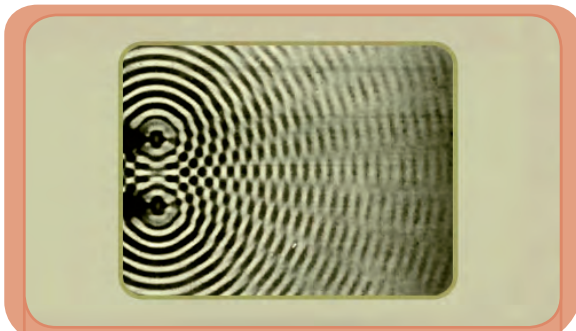


Figura 3.

Cuando observamos la pantalla, vemos una serie alternante de bandas claras y oscuras, o *franjas de interferencia*, que corresponden a máximos y mínimos en la intensidad de la luz respectivamente, como se muestra en la figura 2. La figura 3 muestra un patrón de máximos y mínimos en la intensidad o interferencia de las ondas en agua contenida en un estanque o cuba de ondas. Con base de análisis similares, se puede comprender la interferencia de las ondas de luz y de las ondas de agua que producen máximos y mínimos.

Para analizar el patrón de interferencia, consideramos que las ondas que proceden de cada rendija se combinan en un punto arbitrario P de la pantalla C de la figura 4.

El punto P está a distancia de r_1 y r_2 de las rendijas S_1 y S_2 , respectivamente. Se traza la línea S_2b de modo que las líneas PS_2 y Pb tengan longitudes iguales. Si d , el esparcimiento entre las ranuras, es mucho menor que la distancia D entre las ranuras de la pantalla (en la figura se exagera la razón d/D por claridad), S_2b es entonces casi perpendicular tanto a r_1 como a r_2 . Esto significa que el ángulo S_1S_2b es casi igual al ángulo PaO , estando ambos ángulos marcados θ en la figura; de forma equivalente, puede considerarse que las líneas r_1 y r_2 son casi paralelas.

Los dos rayos que llegan a P en la figura 4 partiendo S_1 y S_2 están en fase en las rendijas fuente; am-

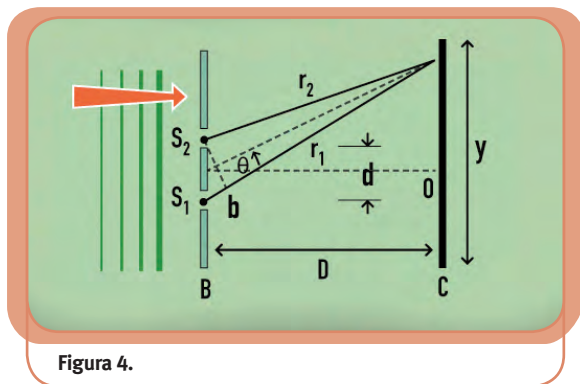


Figura 4.

Los rayos provienen del mismo frente de ondas de la onda plana incidente. Puesto que los rayos recorren caminos ópticos de longitud diferente, llegan a P con una diferencia de fase. El número de longitud de onda contenido en la diferencia S_1b del camino determina el tipo de interferencia en P.

Para tener un *máximo* en P, los dos rayos deben llegar a fase, y así S_1b ($S_1b = d \sin \theta$) debe contener un número entero de longitudes de ondas, o sea:

$$S_1b = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

lo que podemos escribir así :

$$d \sin \theta = m\lambda = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{máximos}) \quad (1)$$

Nótese que cada máximo arriba de O en la figura 4 tiene un máximo ubicado simétricamente debajo de O; esto corresponde a usar $m = -1, -2, \dots$ en la ecuación 1. El máximo central se describe por $m = 0$.

Para *mínimo* en P, los dos rayos deben diferir en fase por un múltiplo impar de π , para el cual S_1b ($= d \sin \theta$) debe contener un número semi-entero de longitud de onda, o sea:

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{mínimos}) \quad (2)$$

Los valores negativos de m dan la posición de los mínimos en la mitad inferior de la pantalla.

8.3. El experimento de Young de la doble rendija

El experimento de Young², también denominado experimento de la doble rendija, fue realizado en 1801 por Thomas Young en un intento de discernir entre la naturaleza corpuscular u ondulatoria de la luz. Young comprobó un patrón de interferencias en la luz procedente de una fuente lejana al difractarse en el paso por dos hendiduras, resultado que contribuyó a la teoría de la naturaleza ondulatoria de la luz.

El experimento de Young será analizado con detalle y, a continuación, trataremos la relevancia física de este experimento mediante interferencia-difracción y sus consecuencias en la física cuántica.

² Thomas Young (1773 - 1829) fue un científico inglés. Young pertenecía a una familia cuáquera de Somerset donde nació en 1773 siendo el más joven de diez hermanos. Es célebre por su experimento de la doble rendija que mostraba la naturaleza ondulatoria de la luz y por haber ayudado a descifrar los jeroglíficos egipcios a partir de la piedra Rosetta.

El experimento ha sido considerado fundamental a la hora de demostrar la **dualidad onda-córpúsculo**, una característica de la mecánica cuántica. El experimento también puede realizarse con electrones, átomos o neutrones, produciendo patrones de interferencia similares a los obtenidos cuando se realiza con luz, mostrando, por tanto, el comportamiento dual onda-córpúsculo de la materia.

En la figura 6 se muestran las franjas de interferencia en una rendija doble con separación $d = 50 \lambda$ entre rendijas para tres anchos de rendija diferentes.

Cada rendija en una rendija doble se divide en N tiras (ver figura 7). En el límite diferencial, las tiras se vuelven infinitesimalmente pequeñas e infinitamente numerosas.

8.4. Relevancia física del experimento de Young

Aunque este experimento se presenta habitualmente en el contexto de la mecánica cuántica, fue diseñado mucho antes de la llegada de esta teoría para responder a la pregunta de si la luz tenía una naturaleza corpuscular o si, más bien, consistía en ondas viajando por el éter, análogamente a las ondas sonoras viajando en el aire. La naturaleza corpuscular de la luz se basaba principalmente en los trabajos de Newton. La naturaleza ondulatoria, en los trabajos clásicos de Hooke y Huygens. Los patrones de interferencia observa-

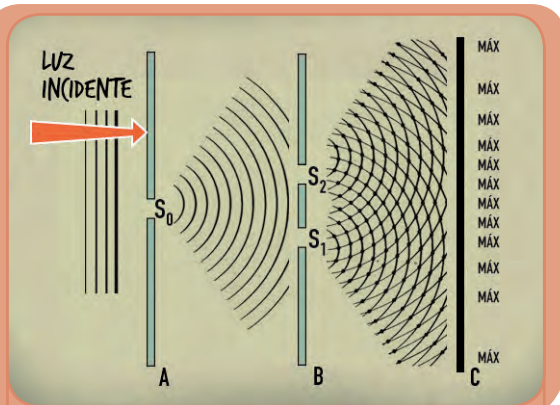


Figura 5.

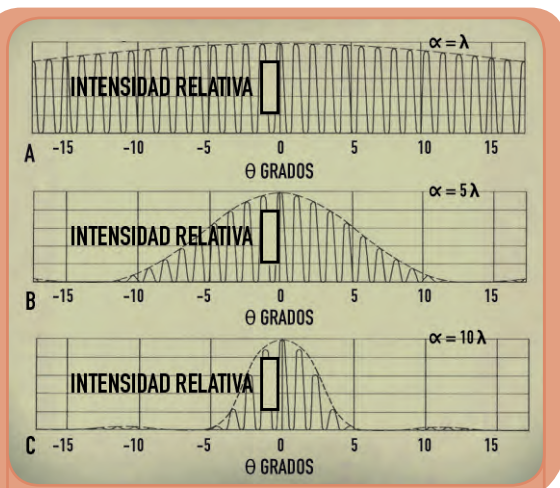


Figura 6.

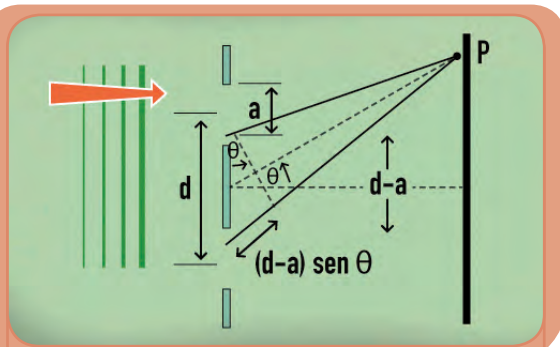


Figura 7.

³ Se trata de un programa "shareware". Permite utilizarse sin costo como medio de evaluación del programa.

dos restaban crédito a la teoría corpuscular. La teoría ondulatoria se mostró muy robusta hasta los comienzos del siglo XX, cuando nuevos experimentos empezaron a mostrar un comportamiento que sólo podía ser explicado por una naturaleza corpuscular de la luz. De este modo, el experimento de la doble rendija y sus múltiples variantes se convirtieron en un experimento clásico por su claridad a la hora de presentar una de las principales características de la mecánica cuántica.

La forma en la que se presenta normalmente el experimento se realizó en 1961 utilizando electrones y mostrando la dualidad onda-corpúsculo de las partículas subatómicas. En 1974 fue posible realizar el experimento en su forma más ambiciosa, electrón a electrón, comprobando las hipótesis mecano-cuánticas predichas por Richard Feynman⁴. Este experimento fue realizado por un grupo italiano liderado por Pier Giorgio Merli y repetido de manera más concluyente en 1989 por un equipo japonés liderado por Akira Tonomura que trabajaba para la compañía Hitachi. El experimento de la doble rendija electrón a electrón se explica a partir de la interpretación probabilística de la trayectoria seguida por las partículas.

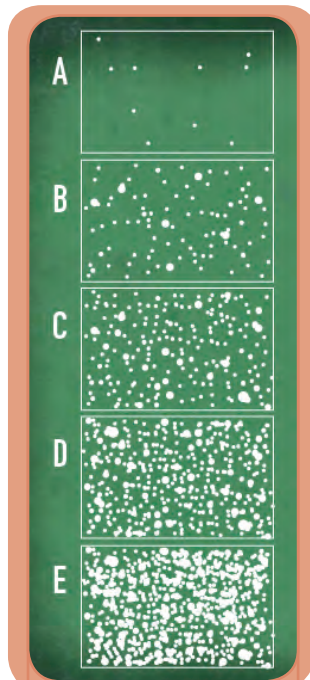


Figura 8. Acumulación de electrones con el paso del tiempo

8.5. Formulación clásica

La formulación original de Young es muy diferente de la moderna formulación del experimento y utiliza una doble rendija. En el experimento original un estrecho haz de luz, procedente de un pequeño agujero en la entrada de la cámara, es dividido en dos por una tarjeta de una anchura de unos 0,2 mm. La tarjeta se mantenía paralela al haz que penetraba horizontalmente, orientado por un simple espejo. El haz de luz tenía un ancho ligeramente superior al ancho de la tarjeta divisoria por lo que, cuando ésta se posicionaba correctamente, el haz era dividido en dos, cada uno pasaba por un lado distinto de la pared divisoria. El resultado puede verse proyectado sobre una pared en una habitación oscurecida. Young realizó el experimento en una de la Royal Society mostrando el patrón de interferencias producido, demostrando así la naturaleza ondulatoria de la luz.

8.6. Formulación moderna

La formulación moderna permite mostrar tanto la naturaleza ondulatoria de la luz como la dualidad onda-corpúsculo de la materia.

⁴ **Richard Phillips Feynman** (1918 - 1988) físico estadounidense, considerado como uno de los más importantes de su país en el siglo XX. Su trabajo en electrodinámica cuántica le valió el Premio Nobel de Física en 1965, compartido con Julián Schwinger y Sin-ichiro Tomonaga. En este trabajo desarrolló un método para estudiar las interacciones y propiedades de las partículas subatómicas utilizando los denominados diagramas de Feynman. En su juventud participó en el desarrollo de la bomba atómica en el proyecto Manhattan. Entre sus múltiples contribuciones a la física destacan también sus trabajos exploratorios sobre computación cuántica y los primeros desarrollos de nanotecnología.

En una cámara oscura se deja entrar un haz de luz por una rendija estrecha. La luz llega a una pared intermedia con dos rendijas. Al otro lado de esta pared hay una pantalla de proyección o una placa fotográfica. Cuando una de las rejillas se cubre aparece un único pico correspondiente a la luz que proviene de la rendija abierta. Sin embargo, cuando ambas están abiertas en lugar de formarse una imagen resultado de una superposición de las obtenidas con las rendijas abiertas individualmente, tal y como ocurriría si la luz estuviera hecha de partículas, se obtiene una figura de interferencias con rayas oscuras y otras brillantes.

Este patrón de interferencias se explica fácilmente a partir de la interferencia de las ondas de luz al combinarse la luz que procede de dos rendijas, de manera muy similar a las ondas en la superficie del agua que se combinan para crear picos y regiones más planas. En las líneas brillantes la interferencia es de tipo "constructiva". El mayor brillo se debe a la superposición de ondas de luz coincidiendo en fase sobre la superficie de proyección. En las líneas oscuras la interferencia es "destruktiva" con prácticamente ausencia de luz a consecuencia de la llegada de ondas de luz de fase opuesta (la cresta de una onda se superpone con el valle de otra).

8.7. La paradoja del experimento de Young

Esta paradoja trata de un experimento mental, un experimento ficticio no realizable en la práctica, que fue propuesto por Richard Feynman examinando teóricamente los resultados del experimento de Young analizando el movimiento de cada fotón.

Para la década de 1920, numerosos experimentos (como el efecto fotoeléctrico) habían demostrado que la luz interacciona con la materia únicamente en cantidades discretas, en paquetes "cuantizados" o "cuánticos" denominados fotones. Si la fuente de luz pudiera reemplazarse por una fuente capaz de producir fotones individualmente y la pantalla fuera suficientemente sensible para detectar un único fotón, el experimento de Young podría, en principio, producirse con fotones individuales con idéntico resultado.

Si una de las rendijas se cubre, los fotones individuales irían acumulándose sobre la pantalla en el tiempo creando un patrón con un único pico. Sin embargo, si ambas rendijas están abiertas los patrones de fotones incidiendo sobre la pantalla se convierten de nuevo en un patrón de líneas brillantes y oscuras.

¡¡¡Este resultado parece confirmar y contradecir, simultáneamente, la teoría ondulatoria de la luz!!!

Por un lado, el patrón de interferencias confirma que la luz se comporta como una onda incluso si se envían partículas de una en una.

Mientras que, por otro lado, cada vez que un fotón de una cierta energía pasa por una de las rendijas el detector de la pantalla detecta la llegada de la misma cantidad de energía. Dado que los fotones se emiten uno a uno no pueden interferir globalmente, así que no es fácil entender el origen de la "interferencia".

La teoría cuántica resuelve estos problemas postulando ondas de probabilidad que determinan la probabilidad de encontrar una partícula en un punto determinado, estas ondas de

probabilidad interfieren entre sí como cualquier otra onda.

Un experimento más refinado consiste en disponer un detector en cada una de las dos rendijas para determinar por qué rendija pasa cada fotón antes de llegar a la pantalla. Sin embargo, cuando el experimento se dispone de esta manera las franjas desaparecen debido a la naturaleza indeterminista de la mecánica cuántica y al colapso de la función de onda.

8.8. Condiciones para la interferencia

Analicemos algo más detalladamente el fenómeno de la interferencia, profundizando algunos conceptos. Las ondas que producen interferencia han de ser "coherentes", es decir los haces provenientes de cada una de las rendijas han de mantener una fase relativa constante en el tiempo, además de tener la misma frecuencia –aunque esto último no es estrictamente necesario– puesto que puede hacerse el experimento con luz blanca⁵.

Las dos rendijas han de estar cerca (unas 1.000 veces la longitud de onda de la luz utilizada) o en otro caso el patrón de interferencias sólo se forma muy cerca de las rendijas. El ancho de las rendijas es normalmente algo más pequeño que la longitud de onda de la luz empleada permitiendo utilizar las ondas como fuentes puntuales esféricas y reduciendo los efectos de difracción por una única rendija.

8.9. Resultados observados

Se puede formular una relación entre la separación de las rendijas, s , la longitud de onda λ , la distancia de las rendijas a la pantalla D , y el ancho de las bandas de interferencia (la distancia entre franjas brillantes sucesivas), x .

$$\lambda / s = x / D \quad (3)$$

Esta expresión es tan sólo una aproximación y su formulación depende de ciertas condiciones específicas. Sin embargo, es posible **calcular la longitud de onda de la luz incidente** a partir de la relación superior.

Si s y D son conocidos y x es observado, entonces λ puede ser calculado, lo cual es de especial interés a la hora de medir la longitud de onda correspondiente a haces de electrones u otras partículas.

8.10. Rejillas de difracción

Una extensión lógica de la interferencia producida por una rendija doble es aumentar el número de rendijas desde dos hasta un número N más grande.

⁵ Además, ambos han de tener polarizaciones no perpendiculares. En el experimento de Young esto se consigue al hacer pasar el haz por la primera rendija, produciendo una restricción del frente de onda en dos frentes coherentes. También es posible observar franjas de interferencia con luz natural. En este caso se observa un máximo central blanco junto a otros máximos laterales de diferentes colores. Más allá, se observa un fondo blanco uniforme. Este fondo no está formado realmente por luz blanca, puesto que sí, fijada una posición sobre la pantalla, se pone paralelo a la franja un espectrómetro por el cual se hace pasar la luz, se observan alternadamente franjas oscuras y brillantes. Esto se ha dado en llamar espectro acanalado.

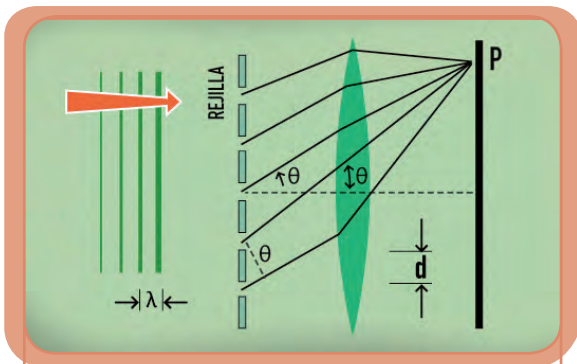


Figura 9.



Figura 10.

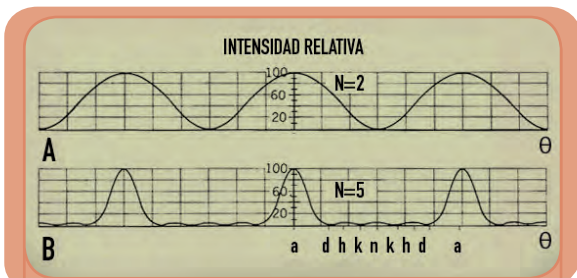


Figura 11.

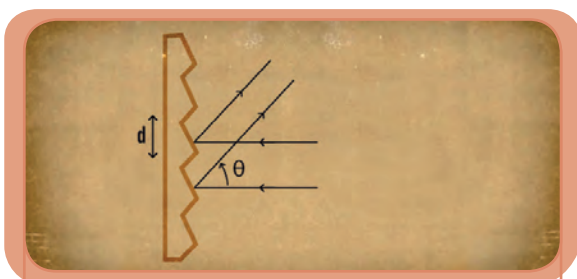


Figura 12.

Como podemos observar en la figura 9, tenemos una rejilla de difracción idealizada que contiene cinco rendijas. Se supone que el ancho a de la rendija es mucho menor que λ , si bien esta condición puede no lograrse en la práctica. También, la distancia focal f será mucho mayor que d en la práctica; en la figura se distorsionan estas dimensiones por la claridad.

El patrón de difracción producido por una rendija (figura 10) con (a) dos rendijas y (b) cinco rendijas. Podemos notar, que en el caso de las cinco rendijas, las franjas son más definidas (más angostas) y, entre los máximos principales brillantes, aparecen los máximos de baja intensidad. En la figura 11 se muestran los patrones de intensidad para los casos (a) y (b).

Una rejilla típica puede contener $N = 10.000$ rendijas distribuidas en un ancho de unos cuantos centímetros.

En la figura 12 se muestra una sección transversal de una rejilla surcada vista por la luz reflejada. Existe una diferencia de camino de $d \sin \theta$ entre los dos rayos que se muestran.

Un tipo sencillo de espectroscopio de rejilla utilizado para analizar las longitudes de onda de la luz emitida por una fuente s , se esquematiza en la figura 13, donde G es la rejilla. La luz proviene de la fuente s que enfoca por la lente L_1 sobre la rendija S_1 situada en el plano focal de la lente L_2 . La luz paralela emerge de un colimador C que incide sobre la rejilla G . Los rayos paralelos asociados con un máximo de interferencia en particular que se presenta a un ángulo inciden sobre la lente L_3 , haciéndolos pasar por un foco en el plano FF' . La imagen formada en este plano se examina usando un arreglo de lentes de aumento E (el ocular).

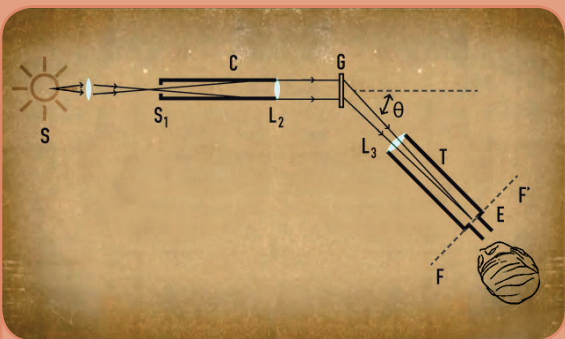


Figura 13.



Figura 14. Ejemplos de espectros de luz visible emitida por gases de sodio (Na) y de mercurio (Hg)

Como podemos notar en la figura 15, los diferentes órdenes identificados por el índice m se muestran separados verticalmente, a efectos de claridad. Tal como se ven realmente no estarían tan desplazados. La línea central en cada orden corresponde a una longitud de onda de 550 nm. Las rejillas de difracción en uso común hoy día se diseñan para concentrar la intensidad de la luz en un orden particular y no muestran los patrones simétricos ideales que se ilustran aquí.

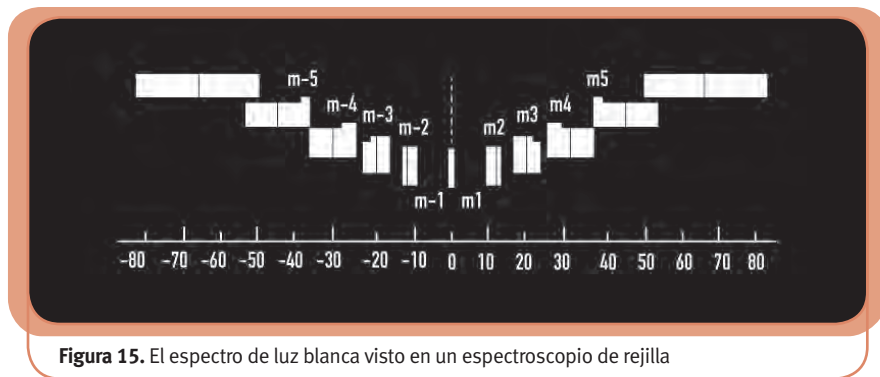
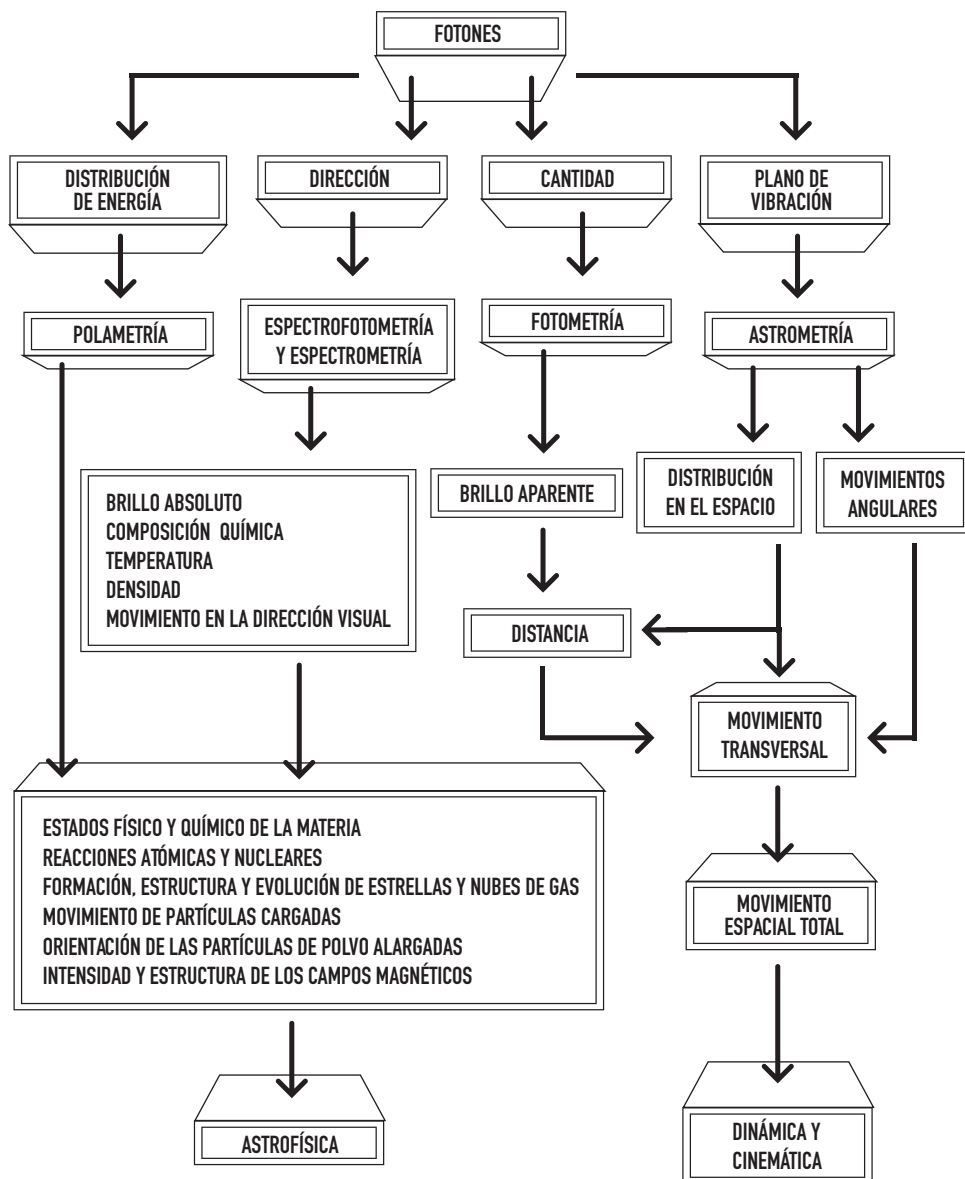


Figura 15. El espectro de luz blanca visto en un espectroscopio de rejilla

8.11. Algunas aplicaciones de la interferometría

En la actualidad, es habitual la realización de análisis de los espectros de difracción de la luz emitida por la combustión o descarga eléctrica en sustancias desconocidas, para obtener su composición química. También se utilizan las técnicas de la espectrometría en estudios astronómicos y astrofísicos. En el esquema siguiente se sintetiza el campo de aplicaciones de esta técnica al estudio de los materiales, los astros, los átomos y la energía.



8.12. Actividades propuestas: ¿La materia... va de onda?

8.12.1. Presentación

Para presentar la secuencia de actividades sugeridas a docentes, tal vez convenga mencionar aquí que al comienzo de la elaboración del guión, cuando proponíamos nombres posibles para esta película, uno de los favoritos fue entonces: “La materia va... de onda”. Recordarlo aquí nos parece apropiado ya que expresa con claridad el propósito principal de la propuesta didáctica que subyace a este material de apoyo a la enseñanza: complejizar la comprensión de ciertos fenómenos hasta percibir la validez, los alcances y las limitaciones que son propias de todas las teorías científicas. A tal propósito se orientan las actividades sugeridas.

8.12.2. Actividades

Hemos organizado la secuencia de actividades propuestas en relación con el desarrollo de distintos “tramos” de la película. En tal sentido, la selección toma referencias en los tramos que detallamos a continuación:

TRAMO	DESDE	HASTA	TEMA	CARACTERÍSTICA
1	12:13	13:15	La luz	Distintas perspectivas teóricas
2	13:15	14:10	La luz	Enfoque corpuscular: presentación
3	15:20	16:16	La luz	Enfoque ondulatorio: presentación
4	16:30	17:06	Difracción	Enfoque ondulatorio: explicación
5	21:10	22:00	Efecto fotoeléctrico	Enfoque corpuscular: explicación
6	23:13	24:00	La luz	Dualidad ondulatorio-corpuscular

a) Visualización de los fenómenos de interferencia

Para visualizar aspectos empíricos que resultan de la realización de este fenómeno, se puede recurrir al video llamado “Interferencia-interferencia”, que está contenido en:

<http://fisicamodernaexperimental.blogspot.com/search/label/Interferência>

En él, se muestra claramente cómo inciden, constructiva o destructivamente, dos frentes de onda distintos en un mismo punto. Resulta adecuado para identificar y destacar la amplitud resultante de la onda compuesta por dos incidentes, y para notar su variabilidad (o no) en ciertos puntos.

Su empleo es recomendado para indagar con más detalle respecto del modo cómo se produce

la interacción entre dos ondas simultáneamente incidentes en un punto. El momento clave para esta temática es el lapso de trabajo que puede abrirse entre el tramo 3 y el tramo 4, cuyos sentidos respectivos son: una presentación (tramo 3) y una síntesis descriptiva (tramo 4). La mediación propuesta entre ellos es la exposición del video (0:18 minutos) al conjunto de alumnos y alumnas (grupo-clase) para que, a través de un análisis de los aspectos empíricos del fenómeno se pueda arribar a una síntesis más próxima a la comprensión de sus manifestaciones singulares y a una explicación global empleando argumentos conceptuales.

Las preguntas que ayudarán a indagar las nociones propuestas son del tipo:

1. ¿Qué ocurre en un punto al que llegan dos frentes de onda simultáneamente?
2. ¿Qué aspecto manifiesta la oscilación del medio (agua) en él?
3. ¿Qué característica muestra la amplitud de onda resultante? ¿Por qué?

El objetivo de aprendizaje es poder reconstruir, conceptual y gráficamente, el tipo de situación que experimenta cualquier punto del espacio al que lleguen dos frentes de onda simultáneamente incidentes.

Para analizar la composición geométrica de las posiciones de máximos y mínimos del espectro de interferencias, puede explorar la animación que proporciona el simulador disponible posteriormente en la misma página:

La evaluación puede consistir en elaborar los métodos y razonamientos pertinentes para validar (o no) con mayor detalle, los resultados que se obtienen en la simulación animada suministrada por:

http://www.walter-fendt.de/ph14s/interference_s.htm

El tiempo estimado de realización de la actividad es de un módulo horario (40 a 60 minutos de clase).

b) Visualización de los fenómenos de difracción

La obtención de espectros de difracción de luz es bastante dificultosa en las condiciones usuales del aula y requiere, por otra parte, equipamiento específico de laboratorio y personal con cierta experiencia en la operación de equipos con emisión de luz láser y además con redes o cristales de difracción.

En vista de este habitual escollo, proponemos realizar una experiencia de difracción que no se produce por el paso de la luz “a través de pequeñas hendiduras” sino por la reflexión de la luz ante una superficie provista de una multitud de espejos distribuidos con un patrón regular: sí, un disco compacto.

En la parte central de la página ya mencionada hay un video que se titula “Determinación de la cantidad de surcos en cada milímetro (radial) de un CD”:

<http://fisicamodernaexperimental.blogspot.com/search/label/Interferência>

Allí se muestra cómo desde un pequeño emisor de luz láser fijo a una pantalla se obtiene, por medio de una reflexión múltiple en la superficie de un CD, sobre la pantalla que sostiene al emisor, un espectro de distribución regular de luz reflejada similar al obtenido por difracción a través de cristales.

Se identifican en el espectro obtenido sobre la pantalla, zonas de concentración de luz, más o menos intensas, distribuidas de modo regular en torno al centro de la pantalla, ocupado por el emisor. Este “patrón de difracción” tiene forma simétrica en cuanto a la distancia que existe entre cada una de los “puntos iluminados” y en cuanto a los ángulos de ordenamiento en la pantalla, respecto de cualquier dirección tomada en ella como referencia.

Ahora bien, la forma del espectro informa sobre ciertas características de la radiación y sus dimensiones se relacionan con la frecuencia (color de la luz) y con la distribución espacial de las fuentes “secundarias”. Aquí está nuestro tema: buscamos conocer la densidad de espejitos en la superficie de un CD.

Conviene, a nuestro entender, organizar la tarea en “pequeños grupos de alumnos y alumnas investigadores que puedan reunirse fuera del aula y de la clase a realizar el experimento. Cada grupo dispondrá de algún láser y algunos CD.

Los resultados que obtengan los grupos pueden ser “concordantes” con las características propias del CD y la luz utilizados o pueden ser “discrepantes”. Así, con los grupos en situación “discordante” podremos rehacer la experiencia y los cálculos, discutir los procedimientos y cálculos y –seguramente– tomar su situación en “concordante”. Con ellos y con los demás grupos de circunstancia “concordante” podemos realizar, ahora, una recolección de esos resultados y elaborar en clase una distribución experimental de valores de las mediciones.

La experiencia, una vez ensayada por la profesora o el profesor, es de relativa “sencillez” para ella o para él. Pero no es “sencilla” para los y las estudiantes, ya que desde el montaje del dispositivo, pasando por la toma de mediciones y los cálculos auxiliares, y culminando en la discusión de los resultados obtenidos forman parte de una experimentación “novedosa” y con relativa “autonomía”.

Claro está que la experiencia de “determinación” confirma propiedades conocidas (en nuestro caso, Ley de Bragg), pero su empleo y utilidad es, en general, desconocido por los y las estudiantes. Esto puede tornar relevante la experiencia, siempre que el objetivo de aprendizaje consistente en la visualización e interpretación de espectros lumínicos sea evaluado en términos de obtención empírica, validación metodológica y justificación conceptual de los resultados obtenidos.

Esta actividad debe extenderse entre la última parte de una clase, la realización y elaboración de la experiencia en pequeños grupos y, luego, la discusión y tratamiento en una nueva clase. De este modo estimamos que insumirá dos clases en el aula y el tiempo de trabajo “autónomo” que sea necesario. Sugerimos interponer entre ambas, una clase de consulta.

c) Visualización de las características básicas del Efecto fotoeléctrico

Recomendamos ahora la realización de una actividad de identificación de variables críticas en la producción del efecto fotoeléctrico.

Sugerimos a los y las docentes impulsar un relevamiento bibliográfico y virtual sobre el tema. Hay en la red suficiente cantidad de materiales publicados al respecto, una parte de los cuales es de correcta factura. No desesperar, sino aprovechar esta circunstancia para profundizar la reflexión sobre la actividad científica, en particular sobre la “confiabilidad” de las fuentes.

Es propicio, creemos, ubicar esta actividad luego de exhibir los tramos 1 y 2 de la película, para promover luego el desarrollo de la tarea de relevamiento de fuentes y reseña conceptual, para cerrar con el tramo 5 de la película. Esperemos de esta actividad, simplemente, una descripción bien detallada y ampliamente consensuada respecto de las condiciones de producción del efecto fotoeléctrico y las relaciones causales que contribuyen a su comprensión.

Consideramos que este objetivo de aprendizaje para nuestros alumnos y alumnas estará cubierto cuando puedan reconstruir en términos correctos todas las fases de ocurrencia del fenómeno y distinguir en él las relaciones de causalidad. Alentamos a evaluar mediante el empleo de alguna animación (tipo simulador, de profusa existencia en la red) de características similares a la presentada en:

<http://fisicamodernaexperimental.blogspot.com/2009/04/efeito-fotoeletrico.html>

El tiempo estimado para el despliegue de toda la actividad rondaría los 3 módulos-clase (120 a 180 minutos) más la actividad de búsqueda, reseña, resumen y estudio, fuera del espacio y horario de clase en el aula.

d) Discusión sobre la naturaleza y propiedades de la luz y otras radiaciones... ¿Onda o materia?

La actividad recomendada aquí es, básicamente, la de formar grupos que asuman la defensa de alguna de las perspectivas e intenten rebatir las otras, mientras otros grupos “adversarios teóricos” preparan su polémica con estos.

La calidad argumental de las defensas, la penetración de las críticas, la habilidad para diseñar estrategias de acción, la posibilidad de interpretar los distintos puntos de vista de “otros y otras científicos”, ponderar su validez, etc., son objetivos de enseñanza. Su evaluación es relativamente fácil de realizar mediante la discusión en un “Congreso de Física”, sea en la feria, la exposición o la jornada de ciencias de la escuela, sea en un “Foro Vir-

tual” que se despliegue en la Red, y pueda ser recuperado para su edición y publicación.

Esta actividad es la menos pautada... puede insumir una sola clase, o convertirse en un proyecto con un plan de trabajo que abarque el año lectivo, dependiendo de la amplitud, profundidad e intensidad que el o la docente quiera conferirle al trabajo. El cierre puede incluir el tramo 6 de la película.

8.13. Bibliografía

Alonso, M. y Finn, E. (1992). *Física*. Buenos Aires, Addison Wesley Iberoamericana.

Hecht, E. (2000). *Óptica*. Madrid. Addison Wesley Iberoamericana S.A.

Resnick, R.; Halliday, D y Krane, K. (1994). *Física II*. México. Ediciones CECSA.

Tipler, P. (1996). *Física II*. Barcelona. Editorial Reverté S.A.

Tipler, P. (1994). *Física Moderna*. Barcelona. Editorial Reverté S.A.