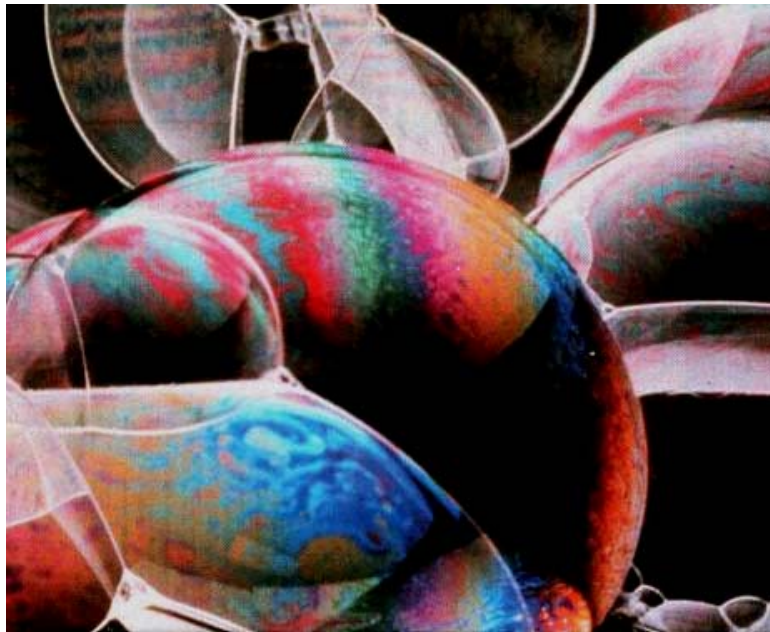


FÍSICA III A- III B

1er Semestre 2020



Programa sintético FÍSICA III B

- 1) **Propagación de ondas electromagnéticas en materiales.** Velocidad de propagación, vector de Poynting e intensidad de la onda e. m. Reflexión y transmisión en una discontinuidad. Leyes de Snell. Elevación aparente, reflexión total y fibras ópticas.
- 2) **Polarización.** Polarización por reflexión. Ley de Malus
- 3) **Interferencia.** Películas delgadas. Cuñas de aire. Anillos de Newton. Experiencia de Young.
- 4) **Difracción.** Difracción de Fraunhofer. Difracción e interferencia en una experiencia de Young. Red de difracción. Poder resolvente.
- 5) **Óptica geométrica.** Dióptricos esféricos, lentes delgadas y espejos esféricos; superficies planas. Aumentos laterales y axiales.
- 6) **Fotometría** Flujo luminoso. Intensidad luminosa. Iluminación
- 7) **Propiedades corpusculares de la radiación.** Radiación del cuerpo negro. modelo de Planck. Efecto fotoeléctrico. Introducción del concepto de fotón. Modelo de Bohr átomo de hidrógeno.
- 8) **Propiedades ondulatorias de la materia.** Dualidad onda-partícula. Longitud de onda de De Broglie. Difracción de electrones.
Toda la bibliografía se encuentra disponible en la Biblioteca de la Facultad. Se recomienda a los alumnos consultar todos los textos sugeridos y seguir el que le resulte más comprensible para el tema de interés.

Programa sintético FÍSICA III A

- 1) **Propagación de ondas electromagnéticas en materiales.** Ondas electromagnéticas en un material. Velocidad de propagación y relación entre las magnitudes del campo eléctrico y el campo magnético. Vector de Poynting e intensidad de la onda e. m. Reflexión y transmisión en una discontinuidad para incidencia normal. Cambio de fase. Propagación de ondas electromagnéticas en medios homogéneos e isotrópicos. Leyes de Snell. Medios inhomogeneos. Principio de Fermat. Espejismo y fibras ópticas. Medios anisótropos. Birrefringencia.
- 2) **Polarización.** Polarizadores por absorción (Polaroids), por reflexión y por birrefringencia. Polarización y scattering.
- 3) **Interferencia.** Diferencia de camino óptico. Interferencia. Películas delgadas. Cuñas de aire. Anillos de Newton. Experiencia de Young. Interferencia de luz polarizada. Láminas retardadoras birrefringentes.
- 4) **Difracción.** Difracción de Fraunhofer por una rendija rectangular. Difracción e interferencia en una experiencia de Young. Difracción de Fraunhofer por un apertura circular. Resolución. Red de difracción. Poder resolvente de una red. Condiciones de Fresnel para la difracción cerca de las aberturas. Difracción de Rayos X.
- 5) **Óptica geométrica.** Diópticos esféricos, lentes delgadas y espejos esféricos; superficies planas. Aumentos laterales y axiales. Instrumentos ópticos simples: lupa, microscopio, telescopios refractores y reflectores. Aumento angular. Poder resolutor de un telescopio reflector.
- 6) **Propiedades corpusculares de la radiación.** Radiación térmica; modelo de Planck; cuantos de energía. Efecto fotoeléctrico; modelo de Einstein; función trabajo, frecuencia y longitud de onda umbral. Introducción del concepto de fotón. Efecto Compton. Modelo de Bohr del átomo de hidrógeno.
- 7) **Propiedades ondulatorias de la materia.** Difracción de electrones. Longitud de onda de De Broglie. Dualidad onda-partícula.
- 8) **Ecuación de Schrödinger.** Significado físico de la función de onda. Condiciones de contorno y normalización. Solución de la ecuación de Schrödinger en una dimensión. Partícula libre, escalón de potencial, pozos de potencial infinito y finito, barrera. Efecto túnel. Láser.
- 9) **Estadísticas cuánticas.** Indistinguibilidad de partículas idénticas. Funciones de onda simétrica y antisimétrica. Estadística de Boltzmann. Estadística de Fermi; principio de exclusión de Pauli. Estadística de Bose - Einstein.
- 10) **Teoría de bandas.** Electrones en materia condensada. Modelo de pozos múltiples. Modelo de Kronig - Penney para un cristal unidimensional infinito. Número de estados en una banda. Estructura de bandas en metales, aisladores y semiconductores.
- 11) **Relatividad.** Variación de la masa con la velocidad. Energía cinética relativista y momento relativista. Transformaciones relativistas de la posición, del tiempo y de las velocidades.

Bibliografía

- ❖ Óptica E. Hecht. Addison-Wesley Iberoamericana, Buenos Aires, 1986
- ❖ Física. Tomo II. Raymond A. Serway. Mc Graw-Hill, Mexico, 1996
- ❖ Física. P. A Tipler. Editorial Reverté (1994). (Es incompatible con la convención de signos de óptica geométrica seguida por la Cátedra).
- ❖ Física. Alonso M. y Finn E. J. Editorial Addison-Wesley Interamericana (1995).
- ❖ Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería. V II. Resnick – Halliday, - Krane. CECSA.
- ❖ Óptica. Francis W. Sears. Editorial Aguilar, Madrid (1967)
- ❖ Física. Fundamentos y Aplicaciones. Eisberg, Lerner. Editorial McGraw-Hill (1983).
- ❖ Física Universitaria, Sears, Zemansky, Young. Editorial Fondo Educativo Interamericano (1986).
- ❖ Física Clásica y Moderna. W. Edward Gettys, Frederick J. Keller and Malcom J. Skove. Mc Graw-Hill, Madrid, 1989
- ❖ El Curso Interactivo de Física en Internet. Ángel Franco García, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Eibar, España. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/>

Cronograma Física III B

1	2 marzo	Repaso Ondas electromagnéticas- Vector Pointing Ley Snell- Espejismo y fibra óptica
2	9 marzo	Ecuaciones Fresnel -Polarización
3	16 marzo	Interferencia Young -Interferencia películas delgadas
4	30 marzo	Difracción Fraunhofer- Difracción múltiples ranuras
5	6 abril	Red de difracción Poder resolvente Óptica Geométrica
6	13 abril	Efecto fotoeléctrico -Radiación térmica Laboratorio Interf-difracción
7	20 abril	Átomo de Borh- Repaso Recuperatorio Laboratorio Interf-difracción
	27 abril	1ra fecha Evaluación Física III A- III B
	4 mayo	Muestra evaluaciones y consulta. Lab. Óptica Geométrica
	11 mayo	2da fecha evaluación Física III A- III B
	18 mayo	Consulta Recuperatorio Lab. Óptica Geométrica
	1 junio	Flotante SOLO ALUMNOS Física III B
FINAL CURSO ALUMNOS FÍSICA III B		

ASISTENCIA A LOS LABORATORIOS Y APROBACION DEL INFORME ES CONDICION NECESARIA PARA LA APROBACION MATERIA POR PROMOCION

Cronograma Física III A

1	2 marzo	Repaso Ondas electromagnéticas- Vector Pointing Ley Snell- Espejismo y fibra óptica
2	9 marzo	Ecuaciones Fresnel -Polarización
3	16 marzo	Interferencia Young -Interferencia películas delgadas
4	30 marzo	Difracción Fraunhofer- Difracción múltiples ranuras
5	6 abril	Red de difracción Poder resolvente Óptica Geométrica
6	13 abril	Efecto fotoeléctrico -Radiación térmica Laboratorio Interf-difracción
7	20 abril	Átomo de Borh- Repaso Recuperatorio Laboratorio Interf-difracción
8	27 abril	1ra fecha Evaluación Física III A- III B
	4 mayo	Muestra evaluaciones y consulta. Lab. Óptica Geométrica
	11 mayo	2da fecha evaluación Física III A- III B
9	18 mayo	De Broglie- Dualidad onda-partícula Mecánica cuántica Recuperatorio Lab. Óptica Geométrica
10	1 junio	Mecánica cuántica Lab. Radiación cuerpo negro-Líneas espectrales
11	8 junio	Estadísticas cuánticas Recuperatorio Lab. Radiación cuerpo negro-Líneas espectrales
12	22 junio	Teoría de bandas-Relatividad
	29 junio (a confirmar)	1ra fecha evaluación Física III A
	6 julio	Muestra evaluaciones y consulta
	13 julio (a confirmar)	2da fecha evaluación Física III A
	3 agosto (a confirmar)	Flotante SOLO ALUMNOS Física III A (fecha a confirmar)

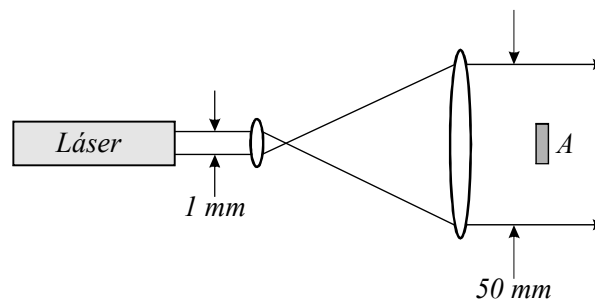
ASISTENCIA A LOS LABORATORIOS Y APROBACION DEL INFORME ES CONDICION NECESARIA PARA LA APROBACION MATERIA POR PROMOCION

Practica 1 – Física III A- III B

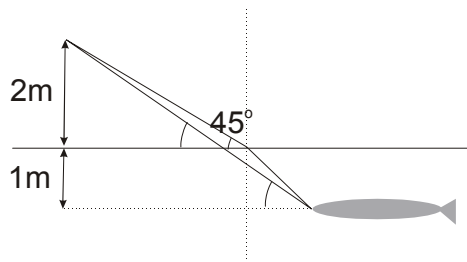
Ondas Electromagnéticas. Polarización

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

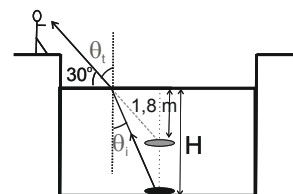
- 1) Una onda electromagnética con longitud de onda de 435 nm viaja en el vacío en la dirección z . El campo eléctrico tiene una amplitud de 2.70×10^3 V/m y es paralelo al eje x . a) ¿Cuáles son la frecuencia y la amplitud del campo magnético? b) Escriba las ecuaciones vectoriales para $\vec{E}(z, t)$ y $\vec{B}(z, t)$.
- 2) → El campo eléctrico correspondiente a una onda electromagnética en el vacío tiene las siguientes componentes: $E_x = E_z = 0$; $E_y = (100 \text{ V/m}) \sin(10^7 \frac{1}{\text{m}} \cdot x - \omega t)$, donde todas las magnitudes están expresadas según el Sistema Internacional de Medidas (SI) Determinar: a) la longitud de onda, la frecuencia y la dirección de propagación; b) las componentes x , y , z del campo magnético; c) el vector de Poynting y d) la intensidad (potencia media por unidad de área) transportada por la onda.
- 3) → Un láser con una potencia de 1 mW es expandido y colimado con dos lentes como en la figura. a) Calcule las amplitudes de $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ en el punto A. b) ¿Cuánto vale el valor medio del vector de Poynting en A? c) ¿Qué valor de potencia medirá un detector de 1 cm^2 ubicado en A?



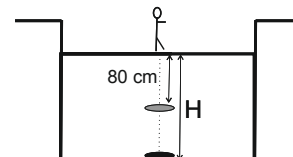
- 4) Una estación de radio en la superficie terrestre emite una onda sinusoidal con una potencia total media de 50 kW. Suponiendo que el transmisor irradia uniformemente en todas direcciones sobre el terreno, a) calcule las amplitudes $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ detectadas por un satélite ubicado a 100 km de la antena; b) determinar la intensidad que recibe el satélite.
- 5) → En la parte superior de la atmósfera terrestre la intensidad de la radiación solar es $1,4 \text{ kW/m}^2$. a) ¿Cuáles son las amplitudes $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$? b) ¿Cuál es la intensidad a mitad de camino entre la Tierra y el Sol? (la distancia media Tierra-Sol es $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$) c) ¿Cuál es la potencia total emitida por el Sol?
- 6) La longitud de onda de la luz roja de un láser de helio-neón es de 633 nm en el aire, pero de 474 nm en el humor acuoso del globo ocular. Calcule el índice de refracción del humor acuoso y la frecuencia de la luz en esta sustancia
- 7) Un pescador está de pie sobre una barca. Sus ojos están a 2 metros por encima del agua. Si ve los ojos de un tiburón que está 1m por debajo del agua con un ángulo de 45 grados. ¿Con qué ángulo, respecto de la superficie, ha de disparar su arpón para ensartar al tiburón entre los ojos?



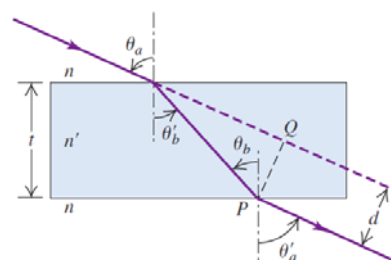
8) → a) Una persona observa desde el aire ($n = 1$) un objeto que se encuentra en el fondo de una pileta llena de agua $n = 1,33$, como indica la figura. De acuerdo al observador la profundidad del objeto es de 1,8 m. Sabiendo que su visual aproximadamente forma un ángulo de 30° con la superficie del agua, determinar la profundidad real H a la que se encuentra el objeto.



b) Si el observador se encuentra ubicado justo encima de otro objeto (es decir incidencia próxima a la normal, ver figura), el observador estima que el objeto se encuentra a 80 cm por debajo de la superficie del agua, determinar en este caso la profundidad real a la que se encuentra el objeto.

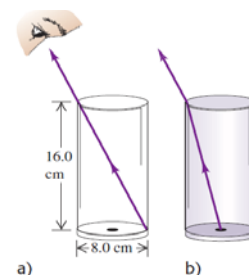


- 9) a) Demuestre que un rayo que incide sobre una lámina de caras paralelas, inmersa en un medio único de índice de refracción n , no se desvía al atravesarla. Calcule el desplazamiento lateral de dicho rayo, en términos de su espesor t y de su índice de refracción n' . b) Demuestre que el rayo que se refleja en la primera cara y el que emerge luego de reflejarse en la segunda son paralelos. c) Si el medio exterior es único, ¿existe algún ángulo de incidencia tal que produzca reflexión total en la cara inferior?



- 10) ¿Es cierta la afirmación que el Sol puede verse después de que se ha puesto, es decir que cuando está debajo del horizonte? Tenga en cuenta que la luz del Sol que pasan a través de la atmósfera de la Tierra siempre se desvía debido a la refracción atmosférica. Justifique la respuesta
- 11) Cuando sale aire caliente de un radiador o un conducto caliente, los objetos tras él parecen vibrar u ondular. ¿Cuál es la causa de esto?
- 12) El ángulo crítico para la reflexión interna total en una interfaz líquido-aire es de $42,5^\circ$. a) Si un rayo de luz que viaja por el líquido incide en la interfaz con un ángulo de $45,0^\circ$, ¿qué ángulo forma el rayo refractado en el aire con respecto a la normal? b) Si un rayo de luz que viaja por el líquido tiene un ángulo de incidencia en la interfaz de $35,0^\circ$, ¿qué ángulo forma el rayo refractado en el aire con respecto a la normal?
- 13) a) Un rayo de luz que procede desde el agua incide en una interfaz con el aire. ¿Hay algún intervalo de ángulos para los cuales ocurre la reflexión total o el ángulo es único? Explique su respuesta. b) y si el rayo procede desde el aire, cuál sería el intervalo o el ángulo para el que se produce reflexión total
- 14) Cuando la luz incide en una interfaz entre dos materiales, el ángulo del rayo refractado depende de la longitud de onda, pero el ángulo del rayo reflejado no. ¿Por qué es así?

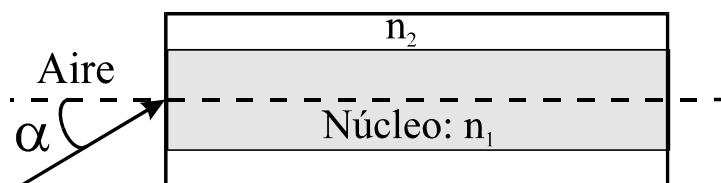
15) Se observa desde el borde de un vaso con lados verticales el borde opuesto del fondo (figura a)). El vaso es un cilindro hueco de paredes delgadas, de 16,0 cm de alto y 8,0 cm de diámetro en sus partes superior e inferior. Mientras se mantiene la vista en la misma posición, se llena el vaso con un líquido transparente, y entonces se ve una moneda pequeña en el centro del fondo del vaso (figura b)). Determinar el índice de refracción del líquido



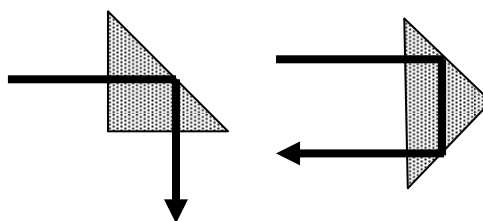
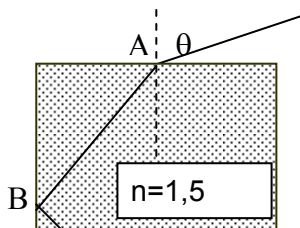
16) Los índices de refracción de cierta clase de vidrio para el rojo y el violeta valen: 1,51 y 1,53,

respectivamente. Halle los ángulos límites de reflexión total para rayos que incidan en la superficie de separación vidrio-aire. ¿Qué ocurre si un rayo de luz blanca incide formando un ángulo de 41° sobre dicha superficie?

- 17) → La luz natural del Sol se refleja en la superficie lisa del agua en una pileta de natación. a) ¿Con qué ángulo de incidencia el rayo reflejado polariza completamente la luz? ¿Cuál es el plano del vector \vec{E} en la luz reflejada? b) ¿Cuál es el ángulo de refracción en este caso? c) De noche se enciende un reflector dentro de la pileta. Repita los incisos a) y b) para los rayos del reflector que llegan a la superficie desde abajo.
- 18) → Un pequeño cuerpo luminoso está en el fondo de un estanque lleno de agua ($n = 4/3$) a 1 m de profundidad, y emite rayos luminosos en todas direcciones. En la superficie del agua se forma un círculo luminoso por los rayos que se refractan al pasar al aire. Fuera de este círculo los rayos se reflejan totalmente en la superficie del agua. Hallar el radio del círculo.
- 19) → Una fibra óptica consiste de un núcleo central de vidrio de SiO_2 generalmente dopado con Ge de índice de refracción n_1 rodeada de un material similar pero de índice de refracción n_2 , como muestra el esquema. El ángulo de aceptación de la fibra es el máximo valor que puede tomar α sin que la luz incidente desde el aire escape del núcleo y pueda, de ese modo, propagarse por la fibra. a) Si la fibra trabaja por reflexión total interna, muestre que $n_2 < n_1$. b) Encuentre el ángulo de aceptación para $n_1 = 1,50$ y $n_2 = 1,49$, si la fibra óptica está sumergida en aire. c) ¿Porqué no se utiliza una fibra “pelada” (núcleo en el aire)? d) ¿Porqué en fibras para Comunicaciones Ópticas se utilizan materiales con índices tan próximos?




- 20) Calcular el ángulo máximo de incidencia en A para que haya reflexión total interna en B. a) el bloque está en el aire, b) el bloque está sumergido en agua. c) Discuta el funcionamiento de los prismas utilizados como espejos.



- 21) → Ecuaciones de Fresnel a incidencia normal: Una superficie de vidrio ($n = 1,5$) está recubierta por una película de un material transparente. ¿Cuál es el índice de refracción de la película si se refleja *prácticamente* la misma cantidad de luz en la primera superficie que separa el aire de la película, que en la segunda, que separa la película del vidrio? Suponga que la cantidad de luz que incide en la película es la misma que llega al vidrio. Recuerde este ejercicio para poder diseñar películas antirreflectantes (Ej. 9 Práctica No 2).
- 22) El ángulo de reflexión total en una interfase que separa dos medios transparentes es 35° . Calcule los ángulos de polarización para la misma interfase y medios.
- 23) Incide un haz de luz linealmente polarizada sobre la superficie de separación de dos medios transparentes. ¿Qué condiciones deben cumplirse para que ese haz se transmita totalmente

hacia el segundo medio, es decir que no haya haz reflejado?

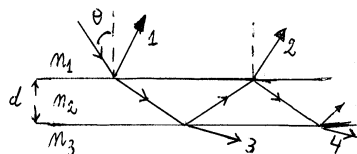
- 24) → Sobre un polarizador lineal incide luz natural de intensidad I_0 , que luego de atravesarlo incide en una superficie plana de vidrio sin experimental reflexión. a) Indique el plano de vibración de la luz incidente, coincide con el plano de incidencia en el vidrio. b) Si el índice de refracción del vidrio es 1,5 ¿Cuál es el ángulo de transmisión en el vidrio? ¿Cuál es la intensidad transmitida en el vidrio?
- 25) Incide un haz de luz natural de intensidad I_0 sobre un polarizador lineal (ideal). ¿Qué intensidad se transmite? ¿Por qué? ¿la intensidad depende de la dirección del eje de transmisión del polarizador?
- 26) Se hace incidir luz linealmente polarizada sobre un polarizador lineal. Al ir rotando el polarizador, ¿cómo varían el estado de polarización y la intensidad del haz transmitido?
- 27) → Luz con intensidad original I_0 pasa a través de dos filtros polarizadores ideales que tienen sus ejes de polarización orientados como se ilustra en la figura. Se desea ajustar el ángulo ϕ de manera que la intensidad en el punto P sea igual a $I_0/10$. a) Si la luz original no está polarizada, ¿cuál debe ser el valor de ϕ ? b) Si la luz original está linealmente polarizada en la misma dirección que el eje de polarización del primer polarizador ¿cuánto debe valer ϕ ?
- 
- 28) Un haz de luz linealmente polarizada pasa a través de un polarizador. Cuando el ángulo entre el eje de transmisión del polarizador y la dirección de polarización de la luz incidente es θ , la intensidad del haz emergente es I . Si se desea que ahora la intensidad sea de $I/5$, ¿cuál debe ser el ángulo (en términos de θ) entre el ángulo del eje de transmisión del polarizador y la dirección original de polarización de la luz?
- 29) Un arreglo de tres polarizadores se disponen en una línea. La dirección del eje de transmisión del segundo polarizador está rotado 23° con respecto al primero y el tercer polarizador está rotado 62° respecto al primero. Si sobre el primer polarizador incide luz natural de intensidad 75.0 W/cm^2 . a) Determine la intensidad a la salida de cada polarizador. b) ¿cuál es la intensidad a la salida del arreglo si se retira el segundo polarizador?
- 30) → Imagínese dos polarizadores lineales con sus ejes de transmisión vertical y horizontal. Luego inserte un tercer polarizador lineal entre ellos con su eje de transmisión a 30 grados con respecto a la vertical. Determinar la intensidad emergente antes y después de la inserción del tercer polarizador en términos de la intensidad del haz de luz natural incidente.

Practica 2 – Fisica III A- III B

Interferencia

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

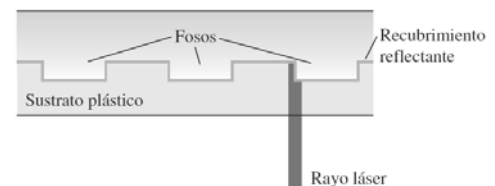
- 1) → Dos fuentes coherentes A y B en aire emiten ondas electromagnéticas con una longitud de onda de 2 cm. El punto P se halla a 4,86 m de A y a 5,24 m de B . ¿Cuál es la diferencia de camino geométrico entre las ondas en el punto P ? ¿y la diferencia de camino óptico? b) ¿Cuál es la diferencia de fase en P entre estas dos ondas? c) si las fuentes se sumergen en agua ($n = 1,33$) como serán ahora la diferencia de camino óptico y de camino geométrico en el punto P ?
- 2) → a) En la lámina de caras paralelas que se indica en la figura incide normalmente un haz de luz con longitud de onda λ , y se cumple que $n_1 < n_2$ y $n_2 > n_3$. Indique cual es la diferencia de fase total, la diferencia de fase por reflexión y la diferencia de fase por diferencia de camino óptico entre los rayos 1 y 2 y entre los rayos 3 y 4. b) Determinar el espesor mínimo de dicha lámina para que dichos rayos interfieran constructivamente. Cuando eso sucede, ¿qué pasa con los rayos 3 y 4? Justifique la respuesta. c) ¿Qué sucede si, manteniendo el espesor mínimo, se cambia el medio inferior de manera que ahora $n_1 < n_2 < n_3$?



- 3) → Las paredes de una burbuja de jabón tienen aproximadamente el mismo índice de refracción que el del agua corriente, $n = 1,33$. Dentro y fuera de la burbuja hay aire. a) ¿Qué longitud de onda dentro del rango visible se refleja con mayor intensidad en un punto localizado sobre una burbuja donde la pared de ésta mide 290 nm de espesor? ¿A qué color corresponde esto? b) Repita el inciso a) para un espesor de pared de 340 nm. c) Si la película de jabón es muy delgada y su espesor es mucho menor que una longitud de onda de la luz visible, se ve negra. ¿Por qué? En contraste, una capa igualmente delgada de agua jabonosa ($n = 1,33$) sobre vidrio ($n = 1,5$) parece muy brillante. ¿Por qué existe esta diferencia?
- 4) Un buque tanque derrama una gran cantidad de petróleo ($n = 1,45$) en el mar ($n = 1,33$). a) Si se observa al derrame desde arriba, ¿cuál es la longitud de onda predominante que se ve en un punto en el que el petróleo tiene un espesor de 380 nm? ¿De qué color es la luz? b) En el agua debajo de la mancha aceitosa, ¿qué longitud de onda visible (según se mide en el aire) predomina en la luz transmitida en el mismo punto de la mancha que se describe en el inciso a)?
- 5) Calcular el espesor de una película de jabón que al ser iluminada por luz natural se ve roja por reflexión y verde por transmisión cuando se mira normal a la superficie. Tomar como índice de refracción del agua jabonosa $n=4/3$, longitud de onda del rojo $\lambda=667$ nm y longitud de onda del verde $\lambda=500$ nm.
- 7) → Una película de aceite ($n = 1,45$) flota sobre agua y es iluminada con luz blanca (tomar el espectro visible como aquellas longitudes de onda comprendidas en el rango $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$). La película tiene un espesor de 280 nm. a) Encuentre el color predominante en la luz reflejada y en la luz transmitida (suponga incidencia normal). b) Haga un esquema donde se observe claramente los rayos que interfieren en cada uno de los dos

casos.

- 8) Sobre la superficie de la ventana de un automóvil se coloca una película plástica con índice de refracción de 1,85 para incrementar la luz reflejada y mantener más fresco el interior del vehículo. El vidrio de la ventana tiene un índice de refracción de 1,52. a) ¿Cuál es el espesor mínimo que se requiere si luz con longitud de onda de 550 nm se refleja en ambos lados de la película para interferir constructivamente? b) Es difícil fabricar e instalar recubrimientos tan delgados como el del inciso a). ¿Cuál es el espesor siguiente más grueso para el que también habría interferencia constructiva?
- 9) → **Se desea disminuir la reflexión de luz de longitud de onda de $\lambda = 550$ nm depositando una película de índice de refracción n y espesor d sobre una lámina de vidrio de índice de refracción $n_v = 1,5$. Calcule el espesor de la película para los siguientes casos: a) $n = 1,225$; b) $n = 1,7$; c) ¿Por qué se construyen las láminas antirreflectantes siguiendo el caso a? Recuerde problema 21) TP 1.**
- 10) Muestre que si una película de un material con índice de refracción muy grande (ZnS, $n = 1,7$) se deposita sobre un material de índice pequeño (criolita Na_3AlF_6 , $n = 1,225$) se puede incrementar la reflexión de una determinada longitud de onda. a) Calcular el espesor de la película para luz verde de longitud de onda de 550 nm. b) Comparar con el problema anterior.
- 11) Una celda solar (dispositivos que generan electricidad cuando se exponen a la luz solar) tiene pérdidas por reflexión del 30%, pero un recubrimiento puede reducir este valor a casi 10%. Las celdas solares están recubiertas con una delgada película transparente de monóxido de silicio (SiO , $n = 1,45$) para minimizar las perdidas por reflejo de la superficie. Suponga que una celda solar de silicio ($n = 3,5$) está recubierta con una delgada película de monóxido de silicio para este propósito. a) Determine el mínimo grosor de película que produce la menor reflexión a una longitud de onda de 550 nm, cerca del centro del espectro visible. b) ¿qué ocurre si la luz incidente cubre una gama amplia de longitudes de onda?
- 12) Un rayo de luz verde ($\lambda_0 = 565,69$ nm) incide perpendicularmente sobre una película delgada de índice 1,5 sumergida en aire. a) ¿Cuál es el espesor más pequeño de película para el cual el punto de reflexión aparece brillante? b) ¿Cómo se vería ese punto si la película tuviese un espesor de 1500 nm?
- 13) Los discos compactos (CD) se leen por la parte de abajo mediante un láser semiconductor con longitud de onda de 790 nm que pasa a través de un sustrato plástico cuyo índice de refracción es de 1,8. Cuando el haz encuentra un foso (*pit*), una parte del haz se refleja en el foso y otra parte en la región plana que separa los fosos, de manera que los dos haces interfieren uno con el otro. ¿Cuál debe ser la profundidad mínima de los fosos de manera que la parte del haz que se refleja en un foso cancele la parte del haz que se refleja en la región plana? (Esta cancelación es lo que permite que el aparato reconozca el comienzo y final de un foso.



- 14) → Dos piezas rectangulares planas de vidrio descansan una sobre otra. Entre ellas y en un borde se coloca una tira delgada de papel, de modo que quede entre ellas una fina cuña de aire. Las láminas se iluminan normalmente por un haz de luz de sodio cuya longitud de onda en el vacío es de 589 nm, observándose franjas de interferencia brillantes y oscuras, de las cuales hay diez de cada clase en una longitud de un centímetro medida perpendicularmente a los bordes de contacto. Calcúlese el ángulo de la cuña.
- 15) Obtenemos una película de aire en forma de cuña situando un pequeño trozo de papel entre los bordes de dos piezas planas de vidrio. Se hace incidir luz de 500 nm normalmente a las superficies de vidrio y se observan las franjas de interferencia por reflexión. Si el ángulo que forman las dos superficies es de $\theta = 3 \times 10^{-4}$ rad, ¿cuántas franjas de interferencia se observan por unidad de longitud?

- 17) → **Dos placas planas de vidrio ($n_{\text{vidrio}} = 1,6$) superpuestas se tocan en un extremo y están**

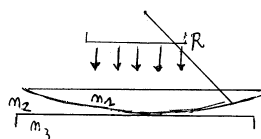
separadas por un alambre en el otro, de manera que se forma una delgada cuña de aire ($n_a = 1$). Cuando sobre la placa de vidrio incide normalmente luz de longitud de onda en el vacío $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ (láser de He-Ne) se observan por reflexión 9 franjas brillantes entre el alambre y el vértice (suponga que el alambre se localiza en la décima franja oscura). a) ¿Por qué el vértice aparece oscuro? ¿Cómo aparece el vértice cuando se observa por transmisión? b) Muestre que las franjas están espaciadas uniformemente. c) ¿Cuál es el diámetro del alambre? d) ¿Qué ocurre si el espacio entre las láminas se llena con aceite de $n_{\text{aceite}} = 1,5$? ¿Cuántas franjas se observarían en este caso?

18) → Una lente esférica ($n_e = 1,7$) cuyo radio de curvatura es 20 cm, descansa sobre una superficie plana de vidrio ($n_v = 1,5$) y es iluminada normalmente con luz monocromática con una longitud de onda de 590 nm. a) Haga un esquema mostrando cuales son los rayos que interfieren si se observa por reflexión. b) Indique si el centro de la figura que se observa por reflexión es brillante u oscuro y explique por qué. c) ¿Cuál es el radio del décimo anillo brillante cuando se observa por reflexión? d) Repita a), b) y c) para el caso que se observe por transmisión.

19) → Un haz de luz que tiene dos constituyentes de longitudes de onda en el vacío (650 nm y 520 nm) incide sobre una lente plano-convexa a una incidencia próxima a la normal. La lente reposa sobre una placa plana. El radio de curvatura de la lente es de 85 cm y el aire ocupa la abertura entre la lente y la placa plana. Si la m -ésima banda oscura correspondiente a la longitud de onda de 650 nm coincide con la $(m+1)$ -ésima banda oscura a 520 nm. Determine el radio de la banda en cuestión.

20) Imagínese que se tiene una disposición de anillos de Newton. Se mide el diámetro de cualquier anillo, por ejemplo, el cuarto anillo brillante. Ahora se vierte un líquido desconocido en la abertura y se mide otra vez el diámetro. Si éste varía de 2,52 cm a 2,21 cm. Calcular el índice del líquido.

21) Se observan anillos de Newton en un dispositivo constituido por una lámina de vidrio de índice de refracción n_3 , una lente de vidrio con $n_1 \neq n_3$ y un líquido de intermedio de índice n_2 (ver figura). a) Si $n_1 > n_2 < n_3$ ¿Son oscuros o brillantes los centros del sistema de anillos observados por reflexión y por transmisión? b) Suponga ahora que el líquido tiene un índice $n_2 = 1,59$ y el dispositivo se ilumina con una luz con una longitud de onda de 590 nm. Cuando se observan los anillos por reflexión, el radio del 5to. anillo es de 2 mm. Determinar el radio de curvatura de la lente.



22) Se observan anillos de Newton con una lente plano-convexa ($n = 1,5$) situada sobre una placa plana ($n = 1,5$), con aire entre la lente y la placa plana ($n = 1$). ¿Qué ocurre con la diferencia entre los cuadrados de los radios de los anillos consecutivos si: a) se cambia la lente por otra también plano-convexa del mismo radio de curvatura, pero de mayor índice de refracción, b) o se coloca agua en vez de aire entre la lente y la lámina de vidrio? Justificar la respuesta en cada caso.

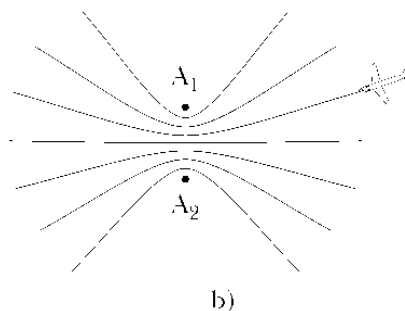
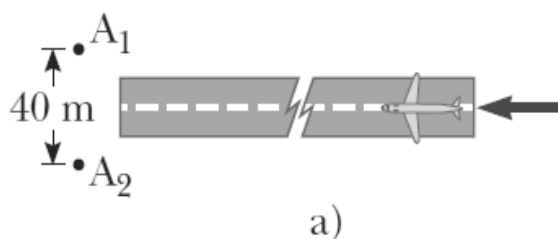
23) → a) En un dispositivo para observar anillos de Newton el espacio entre la lente y la lámina de vidrio está lleno de líquido. Se observan anillos por transmisión. La longitud de onda empleada es de 589 nm y el radio de curvatura de la lente es de 10 m. Hallar el índice de refracción del líquido sabiendo que el radio del 3er. anillo brillante es de 3.65 mm. b) ¿Qué sucede con los anillos para un ligerísimo desplazamiento hacia arriba de la lente: convergen hacia el centro o se alejan de éste? ¿Por qué?

24) Con el objetivo de determinar la longitud de onda de una fuente luminosa monocromática desconocida se realiza un experimento de interferencia de Young con una separación entre rendijas de 1 mm y la pantalla situada a 1 m. Sobre la pantalla se forman franjas brillantes consecutivas que distan 0,546 mm. ¿Cuál es la longitud de onda?

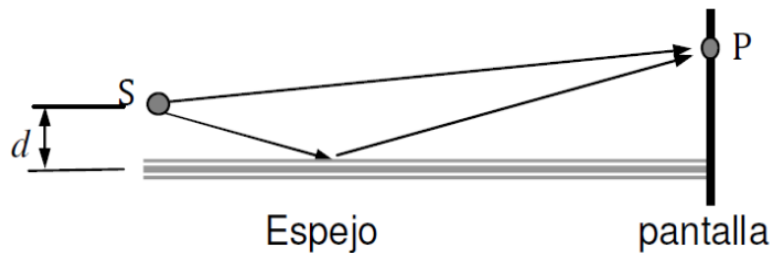
25) → Dos rendijas estrechas distantes entre sí 1,5 mm se iluminan con la luz amarilla de una lámpara de sodio de 589 nm de longitud de onda. Las franjas de interferencia se observan sobre una pantalla situada a 3 m de distancia. a) Hallar la separación de las franjas sobre la pantalla. Repetir los cálculos si la distancia entre rendijas es de 0,8 mm, $\lambda = 590 \text{ nm}$ y la pantalla

está a 0,5 m. b) Si la luz monocromática se sustituyera por luz blanca como es el patrón de interferencia sobre la pantalla

- 26) En un patrón de interferencia de dos ranuras sobre una pantalla distante, a) ¿Las franjas brillantes consecutivas se encontrarán igualmente separadas? ¿y las franjas oscuras? ¿Siempre es esta una buena aproximación?; b) ¿las franjas brillantes están a la mitad de la distancia que hay entre las franjas oscuras?
- 27) → A través de dos ranuras angostas separadas por una distancia de 0,3 mm pasa luz coherente que contiene dos longitudes de onda 660 nm (rojo) y 470 nm (azul), y se observa el patrón de interferencia en una pantalla colocada a 5 m de las ranuras. ¿Cuál es la distancia en la pantalla entre las franjas brillantes de primer orden para las dos longitudes de onda?
- 29) → Se hace pasar luz roja con longitud de onda de 700 nm a través de un aparato con dos ranuras. Al mismo tiempo, por el aparato pasa luz visible monocromática con otra longitud de onda. Como resultado, la mayor parte del patrón que aparece en la pantalla es una mezcla de dos colores; sin embargo, el centro de la tercera franja brillante ($m = 3$) de la luz roja aparece como un rojo puro, sin nada del otro color. ¿Cuáles son las posibles longitudes de onda del segundo tipo de luz visible? ¿Necesita conocer la separación de las ranuras para responder esta pregunta? ¿Por qué?
- 30) Un obstáculo con dos rendijas separadas por 0,32 mm se ilumina con una onda plana monocromática cuya longitud de onda es de 500 nm. a) Determinar el número de máximos de interferencia que se observan en el intervalo angular entre $+30^\circ$ y -30° . b) Depende esta respuesta de la distancia entre el obstáculo y la pantalla de observación. Justifique la respuesta. c) Depende de la longitud de onda de la fuente de iluminación. Justifique la respuesta.
- 31) Considere un experimento de interferencia con dos ranuras de diferente ancho. La amplitud del campo eléctrico de la onda procedente de la primera ranura es E_0 mientras que la amplitud de la onda procedente de la segunda ranura es $2E_0$; a) Encontrar la expresión de la distribución de intensidad sobre una pantalla b) ¿Cuál es el valor mínimo de la intensidad en este caso?
- 32) El experimento de doble ranura de Young es la base del *sistema de aterrizaje por instrumentos* que se emplea para guiar aviones a aterrizajes seguros cuando hay mala visibilidad. Aun cuando los sistemas reales son más complicados, este ejemplo funciona con los mismos principios. Un piloto intenta alinear su avión con una pista, como se sugiere en la figura. Dos antenas de radio A_1 y A_2 están colocadas adyacentes a la pista, separadas 40 m. Las antenas transmiten ondas de radio coherentes no moduladas a 30 MHz. a) Encuentre la longitud de onda de las ondas. El piloto sigue la máxima señal en conformidad con el máximo central de interferencia. Si el piloto encuentra el máximo central, el avión tendrá el rumbo correcto para aterrizar cuando llegue a la pista. b) ¿Qué pasaría si el avión vuela siguiendo el primer máximo lateral (ver figura)? ¿A qué distancia de la lateral de la línea de centro de la pista estará el avión cuando este a 2 km de las antenas? c) Es posible avisarle al piloto que está en el máximo equivocado si se le envían dos señales desde cada antena y se equipa al avión con un receptor de dos canales. Explique la forma en que funcionaría este sistema de dos frecuencias y por qué no necesariamente daría resultado si las frecuencias estuvieran relacionadas por una relación de enteros.



- 33) La figura muestra un dispositivo denominado *espejo de Lloyd* utilizado para realizar experiencias de interferencia con rayos X. Represente claramente las ondas que parten de S e interfieren en P. Haga una analogía con la experiencia de Young. Calcule la separación de las franjas en la pantalla cuando: $\lambda = 0,8 \text{ nm}$, $d = 2 \text{ mm}$ y la distancia de la fuente a la pantalla es de 3 m.



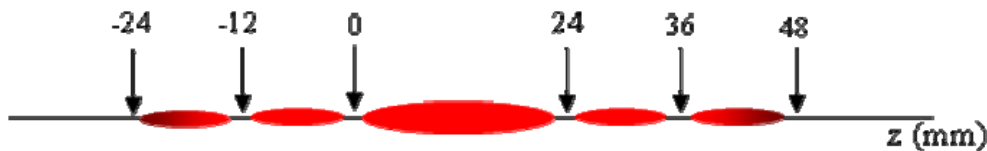
- 34) Sea una fuente monocromática ($\lambda = 550 \text{ nm}$), y un dispositivo de Young de las siguientes características: distancia entre ranuras: $s = 3,3 \text{ mm}$, distancia de las ranuras a la pantalla: $D = 3 \text{ m}$. a) Calcular la distancia entre franjas. b) Detrás de una de las ranuras se coloca una lámina de vidrio de caras paralelas y planas cuyo espesor es de $0,01 \text{ mm}$. Sabiendo que las franjas de interferencia se han desplazado $4,73 \text{ mm}$, determinar el valor del índice de refracción del vidrio. ¿Se puede detectar dicho corrimiento cuando se emplea una fuente policromática?

Practica 3 – Fisica III A- III B

Difracción

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

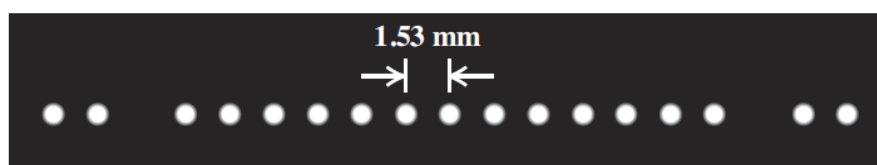
- 1) → Se hace pasar el haz de un láser de 700 nm de longitud de onda a través de una rendija vertical de 0,2 mm de ancho y el patrón de difracción se observa sobre una pantalla a 6 m de distancia. Determinar a) el ancho del máximo central o lóbulo central de la figura de difracción sobre la pantalla b) y el ancho de los lóbulos laterales de difracción.
- 2) → En el esquema de la figura se presenta el patrón de difracción de Fraunhofer correspondiente a una rendija iluminando con un láser de He-Ne (632,8 nm) y observándola sobre una pantalla situada a 160 cm de distancia. Las posiciones de los mínimos de intensidad se indican en mm en la figura, colocando arbitrariamente el cero en el primer mínimo a la izquierda del máximo principal. Determine el ancho de la rendija, expresando el resultado con su error correspondiente



- 3) La luz de un láser de He-Ne (633 nm) se difracta por una rendija. Encuentre el rango del ancho de la rendija para que no se observen franjas oscuras sobre una pantalla alejada.
- 4) Una sola ranura de ancho $s = 0,1$ mm se ilumina con un haz de rayos paralelos cuya longitud de onda es de 600 nm. Sobre una pantalla localizada a 40 cm se observa el patrón de difracción. ¿A qué distancia del máximo central se encuentra el tercer mínimo de difracción?
- 5) Se registra la figura de difracción de una rendija sobre una pantalla alejada 140 cm y se determina que la distancia entre el máximo central y el primer máximo hacia un lado resulta $1 \times 10^4 \lambda$. Determinar el ancho de la rendija.
- 6) → Sobre una rendija incide normalmente un haz paralelo de luz monocromática de longitud de onda λ . El ancho de la rendija es igual a 6λ . a) Bajo qué ángulo se observará el 3er mínimo de difracción. b) Si sobre la rendija, hacemos incidir luz blanca. ¿Cómo se observa el máximo central? Calcular la separación angular del primer mínimo correspondiente a luz roja (670 nm) y luz violeta (430 nm), teniendo en cuenta que el ancho de la rendija es igual a 3000 nm.
- 7) → A través de una única ranura de ancho a pasa luz de longitud de onda λ y de frecuencia f . Se observa el patrón de difracción en una pantalla a una distancia x de la ranura. El ancho del máximo central se reduce al: a) Disminuir el ancho de ranura. b) Disminuir la frecuencia f de la luz. c) Disminuir la longitud de onda λ de la luz. d) Disminuir la distancia x de la ranura a la pantalla. Justifique su respuesta en cada caso.
- 8) → Considere el patrón de interferencia formado por dos ranuras paralelas de ancho a y con una separación d . Sea $d = 3a$. Las ranuras están iluminadas por luz normalmente incidente con longitud de onda λ . a) Sin tener en cuenta los efectos de difracción debidos al ancho de ranura, ¿a qué ángulos θ con respecto al máximo central aparecerán los cuatro máximos siguientes del patrón de interferencia? Exprese su respuesta en términos de d y λ . b) Ahora incluya los efectos de difracción. Si la intensidad en $\theta = 0$ es I_0 , ¿cuál será la intensidad en cada uno de los ángulos calculados en el inciso a)? c) ¿Qué máximo de interferencia de doble ranura se pierde en el patrón?
- 9) → Se realiza una experiencia de interferencia-difracción por doble rendija con una fuente

luminosa que emite en 400 nm. La separación entre los puntos medios de las rendijas es de 0.4 mm y el ancho de cada una de ellas es de 0.04 mm. La pantalla se localiza a 1 m de las rendijas. Si posteriormente se cambia la fuente luminosa por otra que emite en 600 nm, determinar: a) en cuánto varió la distancia entre franjas; b) en cuánto varió el número total de franjas de interferencia contenidas en la campana principal (lóbulo central) de la figura de difracción. c) en cuánto varió el ancho angular de la campana principal (lóbulo central) de la figura de difracción.

- 10) Sobre dos ranuras separadas una distancia de 1 mm, inciden dos ondas planas monocromáticas de longitudes de onda λ_1 y λ_2 . a) ¿Qué relación debe satisfacer el cociente λ_1/λ_2 para que el 3er. máximo de interferencia de λ_1 coincida con el 3er. mínimo de interferencia de λ_2 ? b) ¿Qué ancho deben tener las ranuras para que además los max. λ_1 /min. λ_2 calculados en la parte (a) del problema coincidan con el primer mínimo de difracción de λ_1 ? ¿Qué intensidad se registrará en la pantalla en ese punto?
- 11) ¿Cuál es la separación angular entre el tercer máximo de interferencia y el segundo mínimo de difracción producido en una experiencia de Young con $d = 100\mu\text{m}$ y $a = 20\mu\text{m}$ (separación entre ranuras y ancho de cada ranura)? Considere: a) $\lambda = 514\text{nm}$ b) $\lambda = 633\text{nm}$
- 12) Un experimento de interferencia-difracción produce el patrón de franjas brillantes y oscuras de la figura. Sólo la porción central del patrón se muestra en la figura. Los puntos brillantes están igualmente espaciados a 1,53 mm entre sus centros (excepto por el punto faltante u orden perdido o desaparecido) sobre una pantalla a 2,50 m de las ranuras. La fuente de luz era un láser de helio-neón que produce una longitud de onda de 632,8 nm. a) ¿A qué distancia están las dos ranuras? b) ¿Qué máximo de interferencia se pierde en la pantalla? c) ¿Qué tan ancha es cada una? d) si cambia la longitud de onda cambia el orden perdido



- 13) Dos rendijas de anchura $a=0,015$ mm están separadas por una distancia $d=0,06$ mm y se encuentran iluminadas por luz de longitud de onda $\lambda=650$ nm. a) ¿Qué órdenes de interferencia faltan? b) ¿Cuántas franjas brillantes o máximos de interferencia se ven en el máximo central de difracción? c) ¿Cuántas franjas brillantes o máximos de interferencia se ven en los lóbulos laterales de difracción?
- 14) → Se realiza una experiencia de interferencia-difracción por doble rendija con una fuente luminosa que emite en 400 nm. La separación entre los puntos medios de las rendijas es de 0.4 mm y el ancho de cada una de ellas es de 0.04 mm. La pantalla se localiza a 1 m de las rendijas. a) Represente el diagrama de intensidad sobre la pantalla de observación abarcando varios lóbulos de difracción (lóbulo central y al menos un par de lóbulos laterales). b) Determinar: en cuánto varia la distancia entre franjas (máximos de interferencia) y el número total de franjas de interferencia contenidas en el lóbulo central de la figura de difracción si cambia la longitud de onda de la fuente luminosa a 600 nm. b) Indique si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas. Justifique adecuadamente a partir de las ecuaciones la respuesta.

*El ancho del lóbulo central de difracción aumenta cuando aumenta el ancho de las ranuras

*La posición del máximo central de interferencia no cambia si se modifica la longitud de onda

- 15) Un obstáculo con dos rendijas produce una figura de interferencia-difracción en la que no se observa el 4to. máximo a cada lado del centro brillante. Cuando se tapa una rendija, la figura de difracción tiene un máximo central de 5 mm sobre una pantalla localizada a 2 metros de la rendija. a) Calcular el ancho de cada rendija en unidades de λ . b) Calcular la separación entre las rendijas. c) Repetir a) y b) para una longitud de onda de 633 nm.

- 16) Un obstáculo con dos ranuras de ancho a y separadas una distancia $d = 0.4 \text{ mm}$ se ilumina con luz monocromática con una longitud de onda de 633 nm en las condiciones de Fraunhofer. La figura de difracción-interferencia se observa sobre una pared a 2 metros de distancia de las ranuras donde se distinguen nueve franjas brillantes a cada lado del máximo central (la décima franja brillante es un orden perdido). a) Represente la distribución de intensidad luminosa sobre la pared en función de la posición. b) Calcule el ancho de las ranuras c) Como cambia la distribución de intensidad si una de las ranuras duplica su ancho ó si una de las ranuras es tapada
- 17) → a) Realizar un esquema de la figura de interferencia-difracción para 4 y 8 rendijas observando la variación de intensidad entre dos máximos principales de interferencia. b) si el ancho y la separación de las rendijas se mantiene en los casos de 4 y 8 rendijas ¿Coincide la posición de los máximos principales? c) Estime el ancho de los máximos principales de interferencia en ambos casos d) Se modifica el ancho el lóbulo central de la figura de difracción cuando cambia el numero de ranuras de 4 a 8 pero manteniendo el resto de los parámetros constante?
- 18) → Se observa la figura de difracción, producida por 5 ranuras, en el plano focal de una lente de distancia focal f . El ancho de cada ranura es a y las ranuras están separadas por una distancia $b = 3a$. Las ranuras se iluminan mediante ondas planas de longitud de onda λ . a) ¿Cuál es la expresión que describe la intensidad $I(y)$ observada en la pantalla? Indicar el significado de cada término (Suponer: $\sin(\theta) = \tan(\theta) = y/f$ y $I(y = 0) = I_0$) b) ¿Cuántos máximos principales y cuántos máximos secundarios quedan comprendidos dentro del lóbulo central de difracción? ¿Cuántos máximos principales y cuántos máximos secundarios quedan comprendidos dentro de los lóbulos laterales de difracción? Realice un dibujo c) Como se modifica el diagrama si el número de ranuras se reduce a dos del mismo ancho a y separadas también $b = 3a$. Indique si se modifica el ancho del lóbulo central de difracción, el número de máximos principales y secundarios dentro del lóbulo central respecto al caso b).
- 19) Considere un obstáculo con 3 ranuras de ancho a y separadas una distancia $d = 3a$, e iluminado con una onda plana de longitud de onda λ . a) Escriba la expresión que describe la intensidad sobre una pantalla en términos de los datos. Haga un esquema de la distribución de intensidad sobre una pantalla. b) ¿Qué ocurre con el patrón si se tapan dos de las ranuras ¿y si se aumenta el número de ranuras? Considere en particular los casos de 5 ranuras y 50 ranuras.
- 20) → Suponga al ojo humano limitado por difracción, y calcule el mínimo ángulo que resuelve para un diámetro de pupila de 2 mm . Si dos puntos se hallan a la distancia de visión clara, ¿cuál es la mínima distancia entre ellos para que estén resueltos?
- 21) ¿Cuántas franjas por milímetro tiene una red de difracción, si el 1er orden correspondiente a la franja verde del mercurio ($546,1 \text{ nm}$) se observa bajo un ángulo de $19^\circ 8'$?
- 22) Un haz monocromático proveniente de un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) incide perpendicularmente sobre una red de difracción de 6000 líneas/cm . Encuéntrese el ángulo en el que se observa el 1er y el 2do orden.
- 23) Una red de difracción de 20000 líneas tiene una longitud de 5 cm . Hallar la separación angular de todo el espectro visible, desde 390 nm (violeta) hasta 770 nm (rojo), para el primero y segundo orden.
- 24) → Las longitudes de onda del espectro visible abarcan aproximadamente desde 400 nm (violeta) hasta 700 nm (rojo). a) Calcule la anchura angular del espectro visible de primer orden que produce una red plana con $600 \text{ ranuras por milímetro}$ cuando incide luz blanca sobre la red en dirección normal. b) ¿Se traslapan los espectros de primero y de segundo órdenes? ¿Y los espectros de segundo y de tercer orden? ¿Dependen sus respuestas del espaciado de rejilla?
- 25) → Una red de difracción de 3 cm de ancho con ranuras cada 775 nm se ilumina con una lámpara de sodio. a) ¿Cuál es la separación angular en el 1er orden entre las emisiones

amarillas del sodio (589.0 nm y 589,6 nm)? b) ¿Es posible separar con la mencionada red el doblete del sodio?

- 26) Se dispone de dos redes de difracción cuadradas de 2 cm de lado; una de ellas tiene 600 líneas/mm y otra 1200 líneas/mm. a) Calcule el poder resolvente de cada red en el 1er. orden. b) Si la fuente con la cual se iluminan las redes emite en 500 nm, determinar el máximo orden observable.
- 27) Si una red de difracción produce su máximo de tercer orden a un ángulo de 78.4° con luz de longitud de onda de 681 nm, calcule a) el número de ranuras por centímetro de la rejilla; b) la posición angular de los máximos de primer y segundo orden. c) ¿Habría un máximo brillante de cuarto orden? Explique su respuesta.

Óptica Geométrica

Estudiaremos las modificaciones que sufre un frente de onda al encontrarse con un elemento óptico cuyas dimensiones lineales puedan caracterizarse por la distancia d . Si la onda tiene una longitud de onda λ tal que $\lambda \ll d$, se puede representar por rayos que viajan en la dirección del movimiento de la onda y son perpendiculares a los frentes de onda. Los rayos cumplen las leyes de la reflexión y de la refracción de Snell. Este es el ámbito de la óptica geométrica. No olvide que el comportamiento límite de cualquier elemento o sistema óptico está gobernado por la naturaleza ondulatoria de la luz; un ejemplo contundente de esto se encuentra en el cálculo del poder resolutor de un instrumento. La óptica geométrica predice una concentración infinita de radiación en un punto matemático mientras que la difracción “desparrama” esa energía en una zona de tamaño finito.

Objetos e imágenes

Nuestro propósito será encontrar las alteraciones que sufren los rayos que salen del objeto (luminosos, como una vela, o iluminado, como una mano) al reflejarse o refractarse en el elemento óptico considerado. Si luego de esas transformaciones los rayos convergen hacia un lugar tendremos ahí una imagen. En este caso la imagen es real y se puede observar en una pantalla o en una película fotográfica; si los rayos divergen de un lugar, la imagen es virtual y para observarla se necesita un elemento o sistema óptico adicional, el ojo por ejemplo. Al concluir este capítulo estaremos en condiciones de calcular la posición de la imagen con respecto a un sistema de referencia, encontrar el tamaño y discutir sus deformaciones con respecto al objeto original.

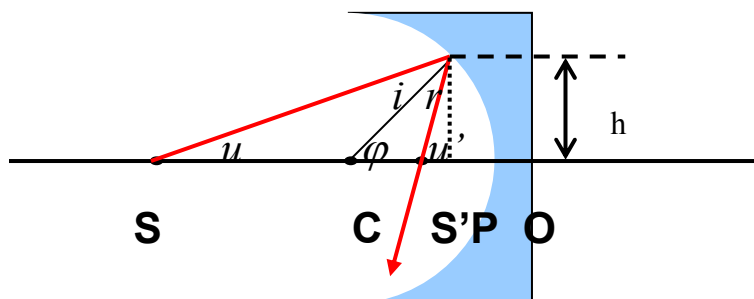
En lo que sigue se presentarán las ecuaciones válidas para elementos ópticos con superficies esféricas (las superficies planas son un caso límite de las esféricas con radio de curvatura muy grande). Estas superficies son las más fáciles de tallar y las más comunes en elementos de vidrio.

Las ecuaciones, los sistemas de referencia para los cuales fueron deducidas y las convenciones de signos empleadas, no pueden aislarse, forman un conjunto inseparable. Ese conjunto no es único, el lector podrá encontrar tantos como libros consulte. Todos los conjuntos son válidos, ninguno es mejor que otro: ¡elija uno y respételo!

Espejos esféricos

i) objeto puntual

cóncavo = hueco



i) Física: ley de Snell,

$$i = r$$

ii) **Geometría:** $u + i = \varphi$, $\varphi + r = u'$

la ley de la reflexión indica $i = r$, entonces: $\varphi - u = u' - \varphi$

o sea

$$u + u' = 2\varphi$$

iii) **Aproximación paraxial:**

Consideremos aberturas pequeñas ($h \ll c$) o directamente ángulos pequeños, de manera que:

u , φ y $u' \ll 1$ (radián), de manera que los ángulos se puedan reemplazar por sus tangentes,

$$\frac{h}{SP} + \frac{h}{S'P} = \frac{2h}{CP}$$

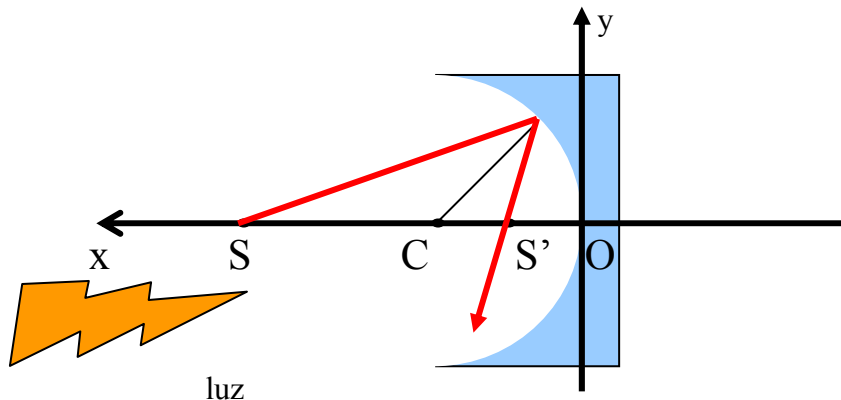
Pero para ángulos pequeños, OP es pequeño por lo que,

$$\frac{h}{SO} + \frac{h}{S'O} = \frac{2h}{CO}$$

iv) **Sistema de referencia**

Como hemos dicho en la introducción, existen tantas convenciones como libros. Nosotros utilizaremos la forma europea, contenida en la norma DIN 1335,

- 1) Se usa un sistema de ejes cartesianos x , y con origen en el vértice (intersección del eje óptico con el elemento);
- 2) El eje x positivo se toma contrario a la incidencia de la luz;
- 3) x indica la coordenada del objeto, x' la coordenada de la imagen y c la coordenada del centro de curvatura del elemento; pueden ser positivas o negativas según de que lado del origen se encuentren;



Con la elección del sistema de referencia de la figura, la ecuación queda:

$$1/x + 1/x' = 2/c$$

x = coordenada del objeto

x' = coordenada de la imagen

c = coordenada del centro de curvatura

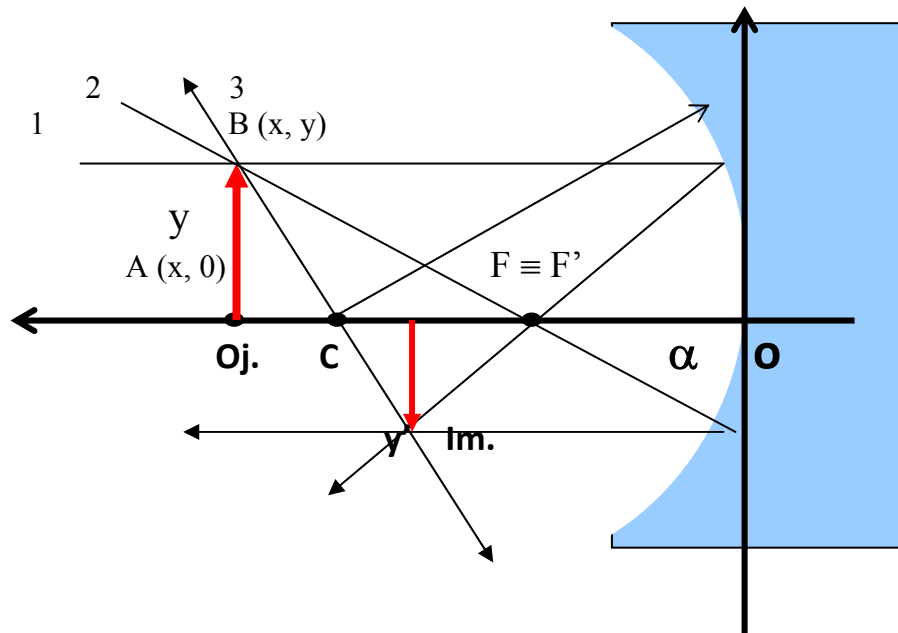
Foco Imagen: Si el objeto está muy lejos ($x \rightarrow \infty$), la imagen se forma en el foco imagen; $x' = c/2 = f_{\text{imagen}}$. *Los rayos que inciden paralelos al eje pasan por el foco imagen.*

Foco Objeto: lugar donde debe estar el objeto para que la imagen se forme en el infinito ($x' \rightarrow \infty$); $x = c/2 = f_{\text{objeto}}$. *Los rayos que inciden pasando por el foco objeto salen paralelos al eje óptico.*

Objetos de tamaño finito

Para encontrar la imagen de la punta de la flecha se utilizan 3 rayos principales que pasan por la punta de la flecha:

- 1) *Un rayo que incide paralelo al eje y pasa por el foco imagen;*
- 2) *Un rayo que incide pasando por el foco objeto y emerge paralelo;*
- 3) *Un rayo que incide pasando por el centro de curvatura y se refleja sin desviarse.*



Aumentos

El aumento lateral o transversal es la relación de alturas entre el objeto y la imagen. El signo indica la orientación relativa. $m = y'/y = -FO \operatorname{tg} \alpha / AF \operatorname{tg} \alpha = -f / (x - f)$, donde módulo de $f = OF$. Utilizando $1/x + 1/x' = 1/f$, resulta:

$$m = -x'/x$$

Si el objeto se extiende una cantidad dx en la dirección del eje x , la imagen se extenderá una cantidad dx' . Se define como *aumento longitudinal o axial* a la relación dx'/dx . Derivando $1/x + 1/x' = 1/f$, resulta: $l = \text{aumento longitudinal} = dx'/dx = -x'^2/x^2 = -m^2$ (¡siempre negativo! Para los espejos).

$$l = -m^2$$

Espejos planos. Se pueden considerar como el caso límite cuando $c \rightarrow \infty$,

Espejos planos
 $x' = -x; m = 1; l = -1$

Como $m_y = m_z = 1$ y $m_x = -1$, una mano derecha se convierte en una mano izquierda al reflejarse en un espejo plano.

Para los elementos ópticos que consideraremos en este curso se derivan las siguientes ecuaciones para las relaciones entre las posiciones del objeto y de la imagen y para los aumentos laterales y longitudinales (convención de signos DIN 1335)

Elemento	Ecuación objeto / imagen	Aumentos transversal	longitudinal
Espejo esférico	$1/x + 1/x' = 2/c$	$-x'/x$	$-(x'/x)^2$
Espejo plano	$x' = -x$	1	- 1
Dióptrico esférico	$n_i/x - n_t/x' = (n_i - n_t)/c$	$n_i x' / n_t x$	$(n_i / n_t) (n_i x' / n_t x)^2$
Dióptrico plano (elevación aparente)	$x' = n_t x / n_i$	1	n_i / n_t
Lente delgada	$\frac{1}{x} - \frac{1}{x'} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) =$ $= \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right)$ <p><small>(n_2=índice de refracción del vidrio lente, n_1=índice de refracción aire (en gral); C_1 y C_2=radios de curvatura)</small></p>	x'/x	$(x'/x)^2$
Potencia	$P(\text{dioptrias}) = 1 / f_i (\text{m})$		
Lentes adosadas	$P = \sum P_i$		

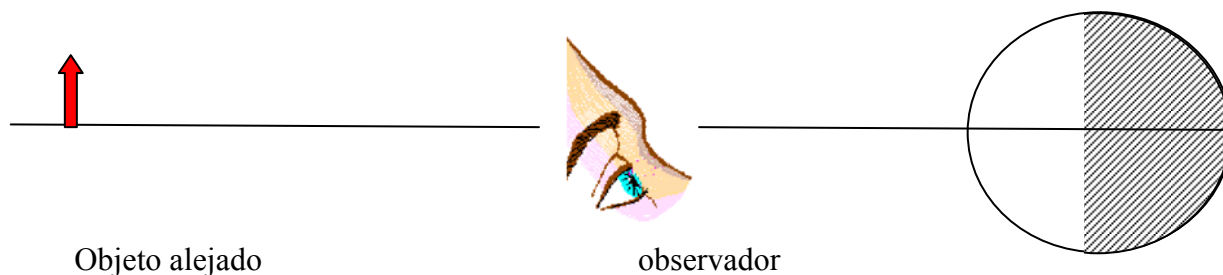
Sistemas ópticos centrados

Se denomina sistema óptico a cualquier conjunto de superficies reflectantes y /o refractoras.

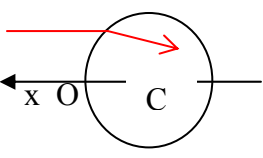
Un grupo particularmente importante de los sistemas ópticos son los sistemas centrados, que son aquellos en los que los centros de curvatura se encuentran todos sobre un mismo eje, que recibe el nombre de eje óptico. En este caso la imagen final se obtiene por aplicaciones sucesivas de las transformaciones que realiza cada superficie. La imagen que produce una superficie intermedia actúa como objeto para la siguiente y así sucesivamente hasta la última. El aumento total del sistema es el producto de los aumentos que produce cada superficie.

Ejemplo Combinaciones de Dióptricos y espejos

Una pecera esférica de radio R con paredes delgadas está llena de agua ($n = 1,33$) y tiene un hemisferio espejado, como indica la figura. Calcular la posición de la imagen de un objeto muy alejado de la pecera para un observador que mira hacia el espejo.

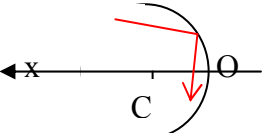


i) refracción aire – agua.

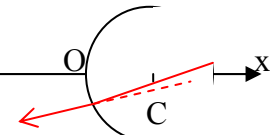
Datos	→	ecuación	→	resultado
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;"> $n_i = 1$ $n_t = 4/3$ $c = -R$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $n_i/x - n_t/x' = (n_i - n_t)/c$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $x' = -4R$ </div>

Convención signos!!!!

ii) reflexión espejo esférico

 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;"> $c = R$ $x = -2R$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $1/x + 1/x' = 2/c$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $x' = 2/5 R$ </div>
--	--	---	--	---

iii) refracción agua – aire

 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;"> $n_i = 4/3$ $n_t = 1$ $c = R$ $x = 8/5 R$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $n_i/x - n_t/x' = (n_i - n_t)/c$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> $x' = 2R$ </div>
--	--	---	--	--

Rta.: la imagen final se encuentra en el vértice espejado. Es una imagen virtual.

Practica 4 – Fisica III A- III B

Óptica Geométrica

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

→ **Problema 1.** Un espejo esférico cóncavo tiene radio R y tiene su centro en C . Un objeto real derecho de altura $R/6$ está localizado a una distancia $1,5 R$ del vértice del espejo a) dibuje el diagrama de rayos que muestra la formación de la imagen b) calcular el aumento (transversal y longitudinal) y la localización de la imagen.

Problema 2. Si se sumerge en agua un espejo esférico, ¿cambia su distancia focal? Justifique su respuesta.

→ **Problema 3.** Una vela de 4,85 cm de alto está 39,2 cm a la izquierda de un espejo plano. ¿Dónde el espejo forma la imagen, y cuál es la altura de ésta?

Problema 4. Cuando una habitación tiene espejos en dos muros opuestos, se puede ver una serie de reflejos infinitos. Analice este fenómeno en términos de imágenes.

Problema 5. a) Determinar en qué rango de posiciones de un objeto real, un espejo esférico cóncavo forma una imagen real. b) En algún rango de posiciones del objeto real, este espejo forma una imagen virtual c) Repetir para el caso de un espejo esférico convexo.

→ **Problema 6.** Se coloca un objeto de 0.6 cm de altura a 16,5 cm a la izquierda del vértice de un espejo esférico cóncavo, cuyo radio de curvatura es de 22 cm. a) Realice un diagrama de rayos para mostrar la formación de la imagen. b) Determine la posición, el tamaño, la orientación y la naturaleza (real o virtual) de la imagen.

Problema 7. Una persona mira su reflejo en el lado cóncavo de una cuchara reluciente. ¿El reflejo es derecho o invertido? ¿Influye la distancia entre el rostro y la cuchara? ¿Y si la persona se mira en el lado convexo es derecha o invertida la imagen? Justificar analíticamente y empleando trazado de rayos

Problema 8. El espejo del lado del pasajero de un auto es convexo y tiene una distancia focal cuya magnitud es de 18 cm. a) Se observa una imagen virtual de otro auto en este espejo lateral a 13 cm detrás del espejo. Si este auto tiene 1,5 m de altura, ¿cuál es la altura de la imagen? b) El espejo lleva una advertencia con respecto a que los objetos que se ven en él están más cerca de lo que parecen. ¿A qué se debe esto?

→ **Problema 9.** Un aficionado a los autos antiguos pule la "taza" de una rueda hasta que sea un buen espejo *esférico* de ambos lados. Cuando mira desde un lado de la taza ve la imagen de su cara a 30 cm detrás de la taza y cuando la da vuelta vuelve a ver su imagen, pero a 10 cm por detrás de la taza. Represente la marcha de los rayos en cada caso. a) ¿Cuál el radio de curvatura del espejo? b) ¿A qué distancia está la cara de la taza?

Problema 10. Un dentista utiliza un espejo esférico para inspeccionar la dentadura de sus pacientes. Suponga que el dentista quiere que se forme una imagen derecha con un aumento transversal de 2, cuando el espejo está a 1,25 cm de una pieza dental del maxilar superior. a) ¿Qué tipo de espejo (cóncavo o convexo) se necesita? Utilice un diagrama de rayos para responder sin efectuar ningún cálculo. b) ¿Cuáles deben ser la distancia focal y el radio de curvatura de este espejo?

Problema 11. Calcule la posición, el tamaño y la orientación de la imagen que forma un espejo cóncavo de un objeto cúbico de 1 cm de lado que se encuentra colocado a 20 cm del vértice del espejo cuya distancia focal es 40 cm. Resolver analítica y gráficamente. Repetir para un objeto que se encuentra a 60 cm del vértice.

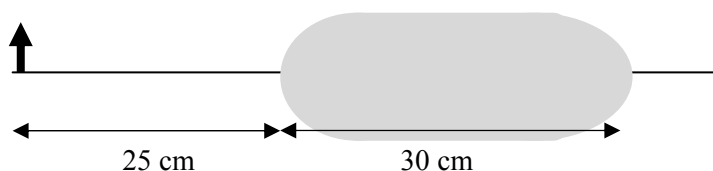
→ **Problema 12.** Una partícula de tierra está incrustada a 3,5 cm bajo la superficie de una plancha de hielo ($n = 1,309$). Determinar la profundidad aparente a la que se localiza la partícula vista a una incidencia normal empleando la ecuación de los dióptricos. ¿Qué valor tiene el radio de curvatura en este caso? Comparar con el cálculo de profundidad aparente de la practica 1 realizado en el Módulo I.

Problema 13. Un tanque cuyo fondo es un espejo se llena con agua a una profundidad de 20 cm. Un pez pequeño flota inmóvil a 7 cm bajo la superficie del agua. a) ¿Cuál es la profundidad aparente del pez visto a una incidencia normal? b) ¿Cuál es la profundidad aparente de la imagen del pez vista a una incidencia normal?

Problema 14. Una sustancia transparente está limitada por una superficie esférica cóncava de 60 cm de radio. Su índice de refracción es 1,5. Determinar las distancias focales (objeto e imagen), la posición de la imagen y el aumento de un objeto colocado en la sustancia transparente a una distancia de la superficie igual a: a) 2,4 m b) 0,6 m. c) Repetir el problema para una superficie convexa.

→ **Problema 15.** El extremo izquierdo de una larga varilla de vidrio de 6 cm de diámetro tiene una superficie hemisférica convexa de 3 cm de radio. El índice de refracción del vidrio es de 1,6. Halle la posición de la imagen de un objeto colocado en aire sobre el eje de la varilla a las siguientes distancias a la izquierda del vértice del extremo curvo: a1) infinitamente lejos, a2) 12 cm, y a3) 2 cm. b) Si se sumerge la varilla en aceite ($n = 1,45$). Un objeto situado a la izquierda de la varilla formará una imagen en un punto a 1,2 m en el interior de la varilla. ¿Qué tan lejos del extremo izquierdo de la varilla debe estar colocado el objeto para formar esta imagen?

→ **Problema 16** Una varilla cilíndrica de vidrio ($n = 3/2$) termina en dos superficies esféricas convexas de radios de curvatura 10 y 20 cm, respectivamente. La longitud de la varilla es de 30 cm. Un objeto está situado a 25 cm del vértice de la primera superficie. Calcular la posición de la imagen final y su aumento cuando la varilla está sumergida en aire. Definir su carácter (real ó virtual, derecha ó invertida, etc). Repetir esto suponiendo todo el sistema sumergido en un líquido de índice de $n = 1,6$.



→ **Problema 17.** Un objeto real está 16 cm a la izquierda de una lente, la lente forma una imagen a 36 cm a su derecha. a) ¿Cuál es la distancia focal de la lente? ¿Ésta es convergente o divergente? b) Si el objeto tiene 8 mm de altura, ¿cuál es la altura de la imagen? ¿Es derecha o invertida? c) Realice un diagrama de rayos.

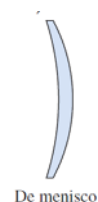
→ **Problema 18.** Una lente convergente con una distancia focal de 12 cm forma una imagen virtual a 17 cm de la lente cuya altura es de 8 mm. ¿El objeto y la imagen están del mismo lado o en lados opuestos de la lente? ¿La imagen es derecha o invertida? Calcule la posición y el tamaño del objeto. Realice un diagrama de rayos de esta situación. b) Repita aplicado al caso de una lente divergente con una distancia focal de 24 cm.

Problema 19. Si se coloca una película fotográfica en el plano donde se halla una imagen real, la película registra la imagen ¿Se puede proceder de la misma manera con una imagen virtual? Si la respuesta es negativa, indicar como se debería proceder si para registrar una imagen virtual.

Problema 20. Una lente delgada convergente con radios de curvatura de sus caras iguales tiene una distancia focal de 50 cm. Con esta lente proyectamos sobre una pantalla la imagen de un objeto cuyo tamaño es de 5 cm. a) Calcular la distancia de la pantalla a la lente para que la imagen formada por la lente tenga un tamaño de 40 cm. b) Si el índice de refracción de la lente es 1,5 y la lente esta sumergida en aire, ¿qué valor tienen los radios de la lente y cuál es su potencia de la lente?

Problema 21. Una lente forma una imagen de un objeto, el cual está a 16 cm de la lente. La imagen está a 12 cm de la lente del mismo lado que el objeto. a) ¿Cuál es la distancia focal de la lente? ¿Esta es convergente o divergente? b) Si el objeto tiene 8,5 mm de altura, ¿cuál será la altura de la imagen? ¿Es derecha o invertida? c) Dibuje un diagrama de rayos principales.

Problema 22. Una lente divergente de menisco con un índice de refracción de 1,52 tiene superficies esféricas, cuyos radios son de 7 cm y 4 cm. ¿Cuál es la posición de la imagen de un objeto colocado a 24 cm a la izquierda de la lente? ¿Cuál es su aumento?



Problema 23. Cuando una lente convergente se sumerge en agua, ¿aumenta o disminuye su distancia focal en comparación con el valor en el aire? Explique su respuesta.

Problema 24. Una burbuja esférica de aire en agua puede funcionar como lente. ¿Se trata de una lente convergente o divergente? ¿Cuál es la relación entre su distancia focal y su radio?

→ **Problema 25.** Una lente delgada convergente de índice de refracción $3/2$, produce una imagen real a 10 cm de ella de un objeto dado. Luego se sumerge en agua junto con el objeto, sin modificar la distancia entre ellos y se obtiene la imagen a 60 cm de la lente. Encontrar la distancia focal de la lente.

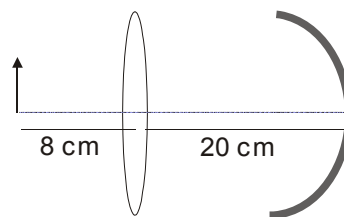
→ **Problema 26.** Un objeto luminoso está situado a 6 m de una pantalla. Una lente, cuya distancia focal es desconocida, forma sobre la pantalla una imagen real, invertida y cuatro veces mayor que el objeto. a) ¿Cuál es la naturaleza y la posición de la lente? ¿Cuál es el valor de la distancia focal de la lente? b) Se desplaza la lente de manera que se obtenga sobre la misma pantalla una imagen nítida, pero de tamaño diferente al obtenido anteriormente. ¿Cuál es la nueva posición de la lente y el nuevo valor del aumento?

Problema 27. En un cuarto oscuro se tiene una vela encendida a 1,5 m de una de las paredes y se coloca una lente de manera que se forme la imagen de la vela sobre la pared. Si la lente se mueve 90 cm hacia la pared también se enfoca la imagen de la vela. a) Realice una marcha de rayos aproximada para los dos casos y caracterice las dos imágenes (derechas, invertidas, menores, mayores, etc). b) calcule la distancia focal de la lente utilizada y las dos distancias entre la vela y la lente para que la imagen esté enfocada en la pared. *Nota: la distancia entre la vela y la pared no se modifica nunca.*

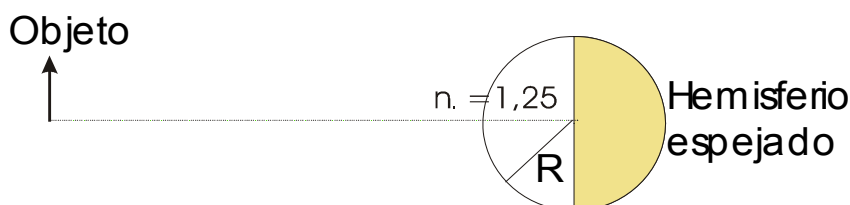
→ **Problema 28** Un sistema óptico está compuesto de dos lentes delgadas biconvexas L_1 y L_2 de distancias focales 10 cm y 20 cm (respectivamente) separadas por una distancia de 80 cm (L_1 está a la izquierda de L_2). Describa la imagen final (tamaño, posición, naturaleza real o virtual) correspondiente a un objeto real de 5 mm de alto colocado a 15 cm a la izquierda de la primera lente. Realizar un diagrama de rayos para hallar la posición y tamaño de la imagen y comprobar el resultado utilizando la ecuación de la lente delgada.

Problema 29. Un objeto se coloca a 15 cm a la izquierda de una lente convergente de 6 cm de distancia focal. A 4 cm a la derecha de esta lente se coloca una lente divergente de 12 cm de distancia focal. Encontrar la posición, tamaño y naturaleza de la imagen.

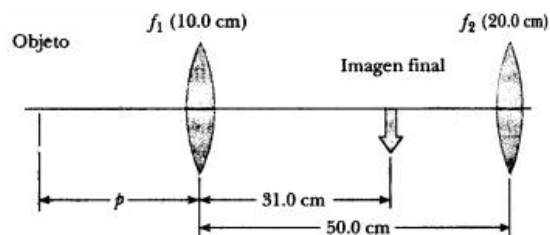
→ **Problema 30.** La figura muestra una lente convergente delgada para la cual los radios de curvatura son $R_1 = 9$ cm y $R_2 = 6$ cm. La lente está frente a un espejo cóncavo de radio $R = 8$ cm a) Si la distancia focal es de 5 cm, determine su índice de refracción. b) Si la lente y el espejo están separados 20 cm y el objeto se coloca a 8 cm a la izquierda de la lente. Determine la posición de la imagen final y su aumento. c) La imagen final es real o virtual? esta invertida o derecha? Justifique



→ **Problema 31.** Una pecera esférica de radio $R = 20$ cm con paredes delgadas (despreciar el efecto de las paredes) está llena de un líquido cuyo índice de refracción es $n = 1,25$ y tiene un hemisferio espejado. a) Calcular la posición final de la imagen de un objeto muy alejado de la pecera para un observador que mira hacia el espejo.



→ **Problema 32.** Dos lentes convergentes se utilizan como indica la figura para formar una imagen final entre las lentes. a) ¿a qué distancia p a la izquierda de la lente de 10 cm de focal debe estar el objeto? b) calcule el aumento lateral. c) ¿la imagen final está derecha o invertida?



Problema 33. Una delgada lente biconvexa tiene superficies con radios de curvatura iguales que miden 2,5 cm. Esta lente forma una imagen real de un árbol muy lejano a una distancia de 1,87 cm de la lente. ¿Cuál es el índice de refracción de la lente?

Problema 34. Una cámara fotográfica tiene una lente normal con una distancia focal de 50 mm que puede enfocar sobre el sensor objetos reales localizados entre 45 cm y el infinito. a) Suponiendo que la lente de la cámara es única ¿La lente es biconcava o biconvexa? b) La cámara se enfoca desplazando la lente en el cuerpo de la cámara, lo cual cambia su distancia con respecto a la película. ¿En qué intervalo de distancias entre la lente y el plano del sensor se debe desplazar la lente para enfocarla correctamente entre los límites de 45 cm y el infinito?

Problema 35. Dos lentes biconvexas iguales están hechas, una de vidrio de índice de refracción de 1,5 y la otra de un vidrio de índice de refracción de 1,7. Hallar la relación entre sus distancias focales. ¿Qué efecto produce cada una de estas lentes sobre un rayo paralelo al eje óptico, cuando se sumergen en un líquido transparente de índice 1,6?

Problema 36. En uno de los planos focales, a la derecha de una lente biconvexa (convergente) hay un espejo plano. A la izquierda de la lente, a una distancia $x = +(3/2)f$ hay un objeto luminoso. Todo el arreglo está al vacío. Calcule la posición de la imagen final y haga un esquema de rayos. ¿Es una imagen real o virtual? Justifique.

Problema 36. Suponga 4 lentes de distancias focales $f_1 = 0,1 \text{ cm}$, $f_2 = 1 \text{ cm}$, $f_3 = 10 \text{ cm}$, $f_4 = 100 \text{ cm}$. ¿Cuál es (en dioptrías) la potencia total del sistema con las 4 lentes acopladas?

Radiometría y fotometría

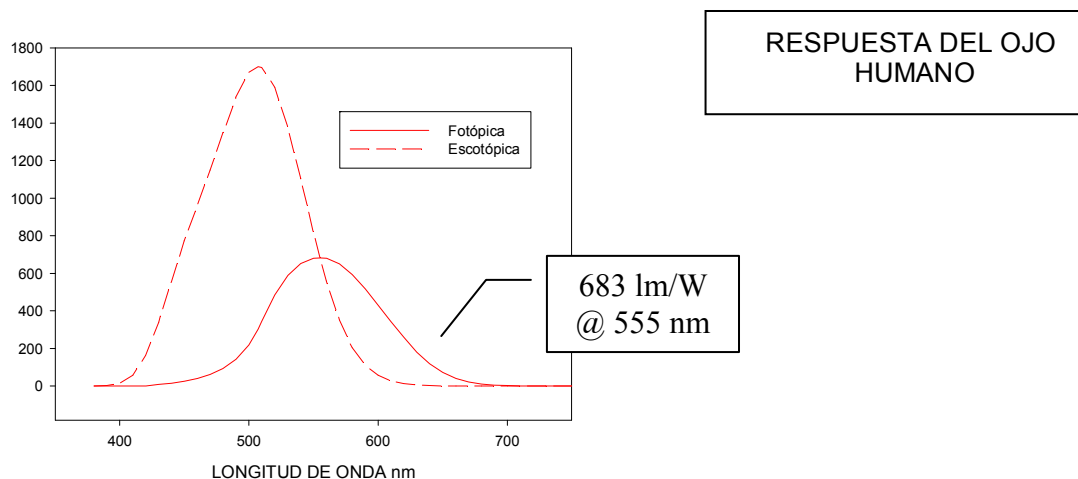
Flujo luminoso

La luz, al igual que las ondas de radio, los rayos X o los rayos gamma, es una forma de energía electromagnética. Pero no toda la energía emitida por una fuente y que llega al ojo produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume, por ejemplo, una lámpara se convierte en luz. Todo esto se ha de evaluar de alguna manera y para ello definiremos nuevas magnitudes asociadas a la sensación luminosa.

Para hacernos una primera idea consideraremos una lámpara común incandescente de 60 W. Cuando hablamos de 60 W nos referimos a la potencia consumida por la lámpara de la cual solo una parte se convierte en luz visible. Esta parte se llama **flujo luminoso**. Podríamos medirlo en watts (W), pero se define una nueva unidad, el **lumen**, que toma como referencia la radiación visible. Arbitrariamente se define que a una radiación de 555 nm de 1 W de potencia emitida le corresponden 683 lumen.

Se define el **flujo luminoso** como la potencia emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es Φ y su unidad es el lumen (lm). A la relación entre watt y lumen se le llama **equivalente luminoso de la radiación** y como hemos dicho para 555 nm, 1 W equivalen a 683 lm. Para otras longitudes de onda esta equivalencia es diferente. Se debe utilizar la curva de respuesta espectral del ojo, ya sea para condiciones de buena iluminación (fotópica) o de mala iluminación (escotópica).

La respuesta luminosa del ojo se puede representar aproximadamente por una curva gaussiana, $V(\lambda) = 683 \exp[-0.5 (\lambda - 555)^2 / 41.9^2]$. En términos crudos, esta curva muestra como son necesarios más vatios de radiación azul o roja para producir el mismo estímulo en el cerebro que producen menos vatios de radiación verde.



Intensidad Luminosa.

El flujo luminoso nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo una lámpara, en todas las direcciones del espacio. Pero no todas las fuentes son isotrópicas. Necesitamos conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso definimos la intensidad luminosa,

Se conoce como **intensidad luminosa** al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta.

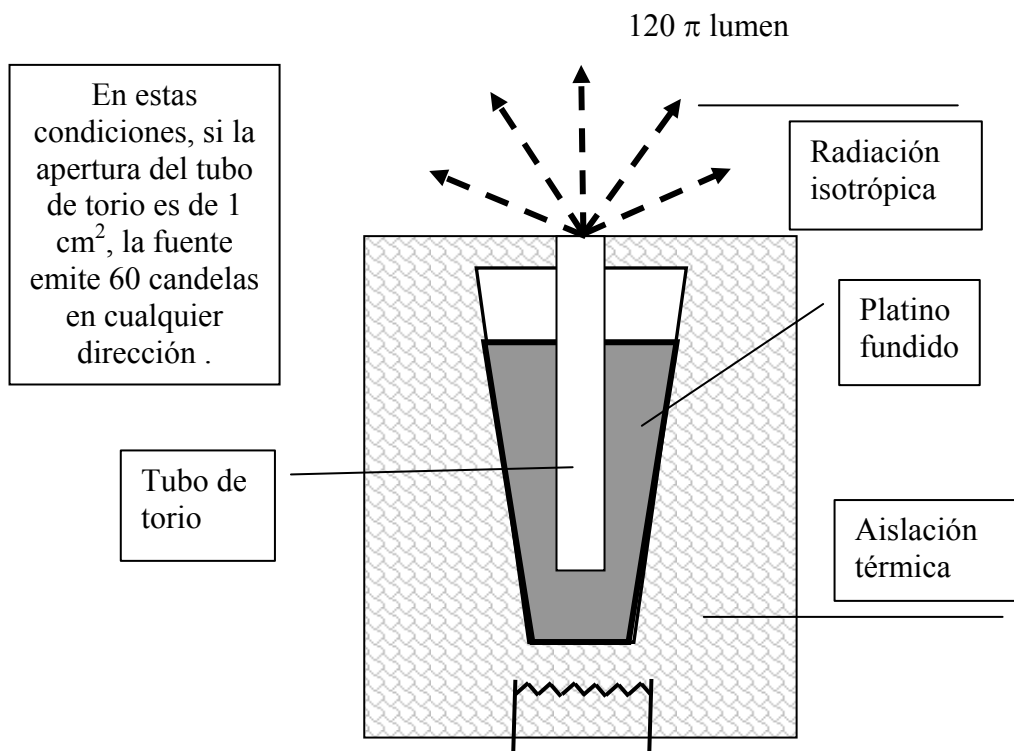
Para una fuente isótropa, que emite Φ lúmenes, la intensidad en candelas (cd) es,

Su símbolo es I y su unidad la candela (cd).

$$1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} / \text{estereoradian}$$

La fuente patrón y la candela

Históricamente se definía la candela sobre la base de la emisión de un cuerpo incandescente. Un tubo de torio se mantiene a la temperatura de fusión del platino (2.046°K) en una cavidad,



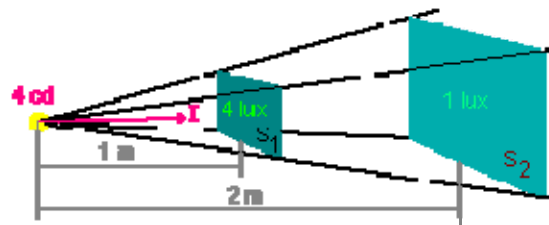
Iluminancia

Se define **iluminancia** como el flujo luminoso recibido por unidad de superficie. Su símbolo es E y su unidad el lux (lx) que es un lm/m^2 . Entonces a una distancia r de una fuente puntual o isotrópica que emite Φ lúmenes o I candelas, la iluminancia es

$$E = \frac{\Phi}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2}$$

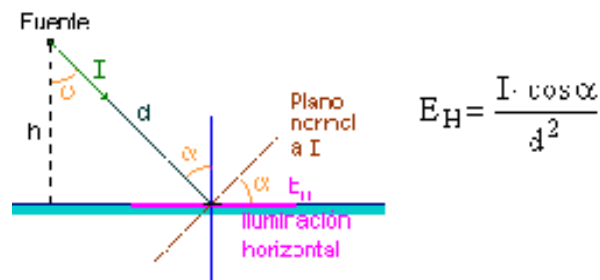
Para una fuente puntual, se cumple la ley inversa de los cuadrados que relaciona la intensidad luminosa (I) y la distancia a la fuente.

$$E = \frac{I}{r^2}$$



Una fuente se puede considerar puntual si la observamos a una distancia mayor a 8 veces su tamaño.

¿Qué ocurre si la superficie iluminada no es perpendicular a la recta que la une con la fuente? En este caso,



En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cos^3(\alpha_i)}{h_i^3}$$

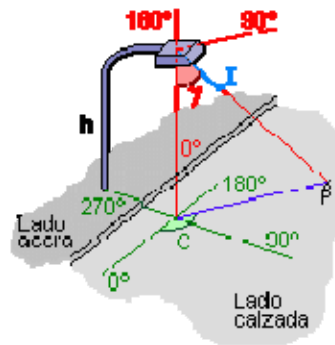
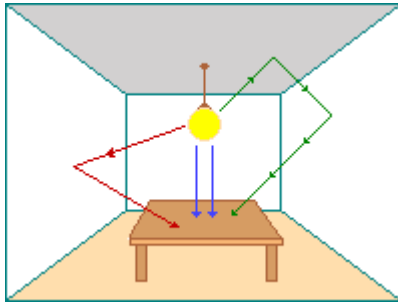
Valores típicos de iluminancia generados por	[lux]
Sol + cielo	100.000
Sol + cielo (nublado)	10.000
Interior cerca de una ventana	1.000
Luz de la luna llena	0,2
Luz de las estrellas	0,0003

Los niveles de iluminación recomendados para un local dependen de las actividades que se vayan a realizar en él. En general podemos distinguir entre tareas con requerimientos luminosos mínimos, normales o exigentes.

Valores típicos de iluminancia necesarios para,	[lux]
almacenes, cuartos de maquinaria..	50 - 200
zonas de trabajo	100 - 1000
Mínimo recomendado para trabajos comunes	100
tareas visuales con un grado elevado de detalle	2000

Para calcular las necesidades de iluminación en interiores se debe tener en cuenta que en una habitación no solo se recibe luz directa de las lámparas sino también luz difusa que viene de las

paredes y del techo (si están pintados con colores claros). En exteriores, sólo se puede trabajar con el redireccionamiento que producen las luminarias.



$$E_H = \frac{I(C, \gamma)}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma$$

Resumen de la nomenclatura

		Radiometría		Fotometría	
Magnitud	Símbolo	Denominación	Unidad	Denominación	Unidad
Flujo de energía	Φ	Potencia Radiante	Watt	Flujo luminoso	Lumen (lm)
Sobre una superficie	E	Irradiancia	W/m ²	Iluminancia	Lux (lx)
Desde una superficie	I	Intensidad radiante	W/sr	Intensidad luminosa	Candela (cd)
Propagándose en un haz	L	Radiancia	W/m ² sr	Luminancia	Cd/m ²

Practica 5 – Física III A- III B

Radiometria -Fotometria

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

→ **Problema 1.** Un flujo radiante está formado por 20 W de luz monocromática de longitud de onda de 500 nm y 10 W de luz monocromática de longitud de onda de 600 nm a) ¿Cuál es el flujo radiante del conjunto? b) ¿Cuál es el flujo luminoso? c) ¿Cuál es el rendimiento de dicho flujo radiante?

→ **Problema 2.** Una lámpara cuya intensidad es de 10 cd ilumina una mesa situada a 2 m. a) ¿A qué altura se deberá instalar otra lámpara de 50 cd para que la iluminación sea igual? b) Si la lámpara tiene una eficiencia luminosa total de 12 lm/W. ¿Cuál es la potencia eléctrica suministrada a la lámpara?

→ **Problema 3.** Una lámpara de 500 cd se encuentra a 2 m de altura en el centro de una mesa circular de 120 cm de diámetro. Calcule la iluminación horizontal y vertical que recibe: a) el centro de la mesa b) cada uno de los puntos del borde de la misma.

Problema 4. Dos lámparas de 10 cd cada una se hallan a 2 m de altura sobre una mesa y a 6 m de distancia entre sí. Calcule la iluminación horizontal que recibe en el punto de la mesa que equidista de las lámparas.

Problema 5. Una fuente tiene una intensidad de 60 cd. a) ¿Qué iluminación producirá sobre una pantalla ubicada a 5 m de distancia de manera tal que los rayos incidan perpendiculares a su superficie? b) ¿Cuánto disminuirá dicha iluminación si la pantalla se inclina 60° ?

→ **Problema 6.** Una fuente puntual se encuentra en el centro de una esfera de 70 cm de radio y emite un flujo luminoso de 600 lm hacia una superficie de esa esfera con un área de 3 m^2 . A) Calcular la intensidad luminosa. b) Determinar el flujo luminoso total de esa fuente.

→ **Problema 7.** Una lámpara situada a 20 m de altura en el centro de una pista circular de 20 m de diámetro produce una iluminación de 6 lux en el centro de la pista. Calcule la intensidad de la lámpara.

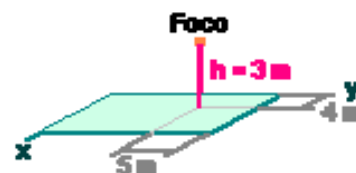
Problema 8. Una pantalla tiene una superficie de 60 cm^2 . A ella llega un flujo luminoso de 0,2 lm al ser iluminada con una fuente de 50 cd. a) ¿A qué distancia se halla el foco de la pantalla? b) ¿Qué iluminación recibe la pantalla? c) ¿Cuánto disminuye el flujo luminoso que llega si se inclina la pantalla 40° ?

Problema 9. Una superficie está iluminada por una fuente puntual de 80 cd de intensidad constante en todas direcciones situada a 2 m de altura. Calcular la iluminancia horizontal y vertical para los siguientes valores del ángulo alfa: 0° , 30° , 45° , 60° , 75° y 80° .

→ **Problema 10.** Un relé es controlado por una célula fotoeléctrica, accionada por el efecto fotoeléctrico a través de una abertura de 15 mm x 40 mm. Para accionar el dispositivo ha de incidir sobre la célula fotoeléctrica un flujo mínimo de 0,2 lm ¿Cuál es la distancia máxima a la que se deberá colocar una fuente uniforme, cuya intensidad es de 50 cd si la luz procedente de la fuente ha de accionar el relé?

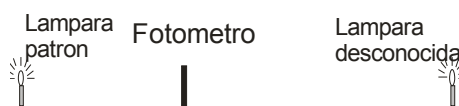
Problema 11. Una superficie circular de 3 m de radio está iluminada por una lámpara de 50 cd de intensidad constante en todas direcciones situada a 2 m de altura sobre el centro de la plataforma. Calcular la iluminación horizontal y vertical máxima y mínima sobre la superficie.

→ **Problema 12.** Tenemos una fuente luminosa puntual de 100 cd de intensidad constante en todas direcciones situada sobre una plataforma rectangular de 20 m x 10 m como la de la figura. Calcular la iluminación horizontal máxima y mínima sobre la superficie y en los puntos: (3 m, 10 m), (0 m, 15 m), (7 m, 20 m) y (10 m, 15 m).



Problema 13. Dos lámparas de 25 cd y 50 cd se encuentran separadas por una distancia de 1 metro. ¿En qué punto entre ambas será iluminada ambas caras de una pantalla con la misma iluminación?

→ **Problema 14.** a) El banco de un fotómetro tiene 2 metros de longitud. Dicho banco tiene una lámpara patrón cuya intensidad en la dirección del fotómetro es 30 lm/sr colocada en uno de sus extremos y una lámpara de intensidad desconocida en el otro extremo. Si el fotómetro está localizado a 50 cm de la lámpara de 30 lm/sr (recordar que en ese punto la iluminación o iluminancia en ambas caras del fotómetro es la misma) ¿Cuál es la intensidad de la lámpara desconocida en la dirección del fotómetro? b) Si la lámpara patrón, cuya intensidad es 30 lm/sr, es considerada como una fuente luminosa puntual e isotrópica. Calcule el flujo luminoso de dicha fuente. ¿Cuál es la potencia eléctrica suministrada si eficiencia total de la lámpara es 12 lm/W?



→ **Problema 15** Una lámpara de 10 cd se encuentra a 125 cm de una pantalla fotométrica, produciendo en ella la misma iluminación que una lámpara desconocida a 175 cm, de distancia. Si la lámpara desconocida consume 0,85 A a 110 V ¿Cuál es el rendimiento luminoso total?

Problema 16 En los vértices de un cubo de arista $a = 2\text{ m}$ se han colocado focos luminosos de intensidad $I = 120\text{ cd}$ ¿Cuál será la iluminación que ellos producen en el centro del cubo?

→ **Problema 17.** ¿A qué altura por encima del centro de una mesa circular de radio R debe colocarse una fuente luminosa puntual para producir una iluminación máxima en el borde de la mesa?

Problema 18. Una cámara de video funciona hasta con 1 lux de iluminación. ¿A qué distancia de una lámpara incandescente de 60 W podrá colocarse un objeto para que se pueda registrar? Ignore la iluminación que recibe desde el techo o desde las paredes. Considere la hoja de datos siguiente.

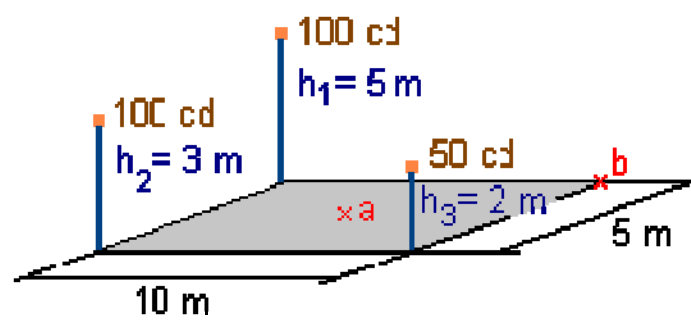
Lámparas Incandescentes Standard								
Código OA	Denominación para pedido	Ampolla	Potencia (W)	Tensión (V)	Casquillo	Flujo lm	Diámetro mm	Longitud mm
9006001	A CL 40-12	Clara	40	12	E 27	645	A-60	103
1161001	A CL 60-12	Clara	60	12	E 27	900	A-60	103
9041001	A CL 40-250	Clara	40	250	E 27	415	A-60	103
9042001	A CL 60-250	Clara	60	250	E 27	715	A-60	103
9043001	A CL 75-250	Clara	75	250	E 27	945	A-60	103
9044001	A CL 100-250	Clara	100	250	E 27	1340	A-60	103
9057001	A CL 150-250	Clara	150	250	E 27	2240	A-65	119
9058001	A CL 200-250	Clara	200	250	E 27	3050	A-65	119
1642021	A CL 25-120	Clara	200	120	E 27	210	A-60	103

Problema 19. Una lámpara de filamento A se considera como una fuente puntual e isotrópica. Si se la pone frente al Sol, un fotómetro colocado entre ambos a una distancia $d = 3,28\text{ cm}$ de A , la iluminación (o iluminancia) E en ambas caras del fotómetro es la misma. La intensidad en la dirección del fotómetro de A es $I_A = 105\text{ lm/sr}$ y la distancia al Sol es $D = 1,5 \cdot 10^{11}\text{ m}$. a) ¿Cuál es la intensidad I_{Sol} del Sol? b) Calcule el flujo luminoso Φ_{lum} de la fuente A .

→ **Problema 20.** La luz de una lámpara puntual colgada del techo tiene una intensidad de 60 cd. ¿Qué flujo luminoso $\Delta\Phi_{\text{lum}}$ incidirá sobre un cuadro de área $\Delta A = 0,5\text{ m}^2$ que está colgado verticalmente en una pared que se encuentra a 2m de distancia de la lámpara, si en la pared opuesta (también a 2 m de la lámpara) hay un espejo grande? Recuerde que para ángulos sólidos $\Delta\Omega = \Delta A/r^2$.

Problema 21. La luz de una lámpara puntual de 200 cd incide formando un ángulo de 45° sobre un lugar de trabajo donde se mide una iluminancia horizontal es $E_H = 141\text{ lx}$. a) ¿A qué distancia (en m) se halla la lámpara del lugar de trabajo? b) ¿A qué altura (en m) desde el lugar de trabajo está colgada la lámpara?

→ **Problema 21.** Para la disposición de lamparas de la figura, calcular la iluminancia horizontal en el centro de la placa punto a) y en el punto b)



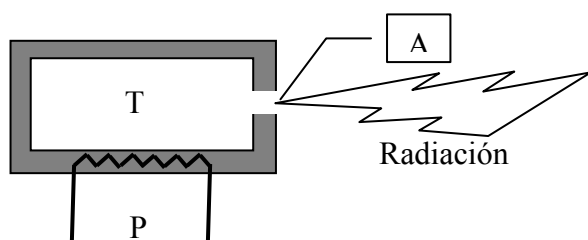
Radiación del cuerpo negro

Consideremos una cavidad cuyas paredes están a una cierta temperatura de equilibrio. Si se abre un pequeño agujero en el recipiente, parte de la radiación se escapa y se puede analizar. El agujero se ve muy brillante cuando el cuerpo está a alta temperatura, y se ve completamente negro a bajas temperaturas. **Se puede mostrar que las características de la radiación dependen solamente de la temperatura de las paredes y son independientes del material del que están hechas.**

La potencia necesaria para mantener el equilibrio resulta proporcional a la superficie del agujero y a la cuarta potencia de la temperatura. Por lo tanto la potencia que escapa de la cavidad como radiación resulta,

$$W = \sigma A T^4, \quad \text{con } \sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right)$$

Esta expresión se conoce como *ley de Stefan-Boltzmann*. La energía emitida por un cuerpo negro por unidad de área y unidad de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T .



Si ahora analizamos el espectro de la radiación emitida, resulta que la energía, por unidad de área por unidad de tiempo y por unidad de longitud de onda, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$), para la longitud de onda λ , de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T , viene dada por la Ley de Planck,

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

donde k es la constante de Boltzmann, cuyo valor es $k = 1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

La distribución espectral de radiación es continua y tiene un máximo dependiente de la temperatura.

La ley del desplazamiento de Wien

La posición del máximo en el espectro de la radiación del cuerpo negro depende de la temperatura y está dado por la ley de desplazamiento de Wien.

El máximo a distintas temperaturas T_1, T_2, T_3, \dots , se produce a las longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ tales que

$$\lambda_1 T_1 = \lambda_2 T_2 = \lambda_3 T_3 = \dots = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Históricamente, el nacimiento de la Mecánica Cuántica, se sitúa en el momento en el que Max Planck explica el mecanismo que hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía observada.

Max Planck sugirió en 1900 que

1. La radiación dentro de la cavidad está en equilibrio con los átomos de las paredes que se comportan como osciladores armónicos de frecuencia dada f .
2. Cada oscilador puede absorber o emitir energía de la radiación en una cantidad proporcional a f . Cuando un oscilador absorbe o emite radiación electromagnética, su energía aumenta o disminuye en una cantidad hf .

La segunda hipótesis de Planck, establece que la energía de los osciladores está cuantizada. La energía de un oscilador de frecuencia f sólo puede tener ciertos valores que son $0, hf, 2hf, 3hf, \dots, nhf$.

Intensidad de la radiación emitida en una región del espectro

La fracción de la intensidad emitida en una región del espectro comprendida entre las longitudes de onda λ_1 y λ_2 , es el cociente entre la intensidad emitida en dicha región dividido por la intensidad total (ley de Stefan).

$$F(\lambda_1, \lambda_2) = -\frac{15}{\pi^4} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad \text{con } x(\lambda) \equiv \frac{hc}{\lambda kT}$$

Para calcular la integral definida se ha de emplear un procedimiento numérico, por ejemplo el método de Simpson.

En la siguiente tabla, se proporciona la contribución de la radiación infrarroja, visible y ultravioleta a las temperaturas que se indican.

Temperatura (K)	% infrarrojo	% visible	% ultravioleta
1000	99,999	$7,367 \cdot 10^{-4}$	$3,258 \cdot 10^{-11}$
2000	98,593	1,406	$7,400 \cdot 10^{-4}$
3000	88,393	11,476	0,131
4000	71,776	26,817	1,407
5000	55,705	39,166	5,129
6000	42,661	45,732	11,607
7000	32,852	47,506	19,641
8000	25,565	46,210	28,224
9000	20,154	43,247	36,599
10000	16,091	39,567	44,342

- A baja temperatura prácticamente toda la radiación es infrarroja.
- A muy alta temperatura la contribución de la radiación ultravioleta es cada vez mayor y la visible e infrarroja se hacen cada vez menores.
- La contribución de la radiación visible alcanza un máximo aproximadamente a 7100 K.

Veamos ahora, la explicación del color aparente de un cuerpo caliente. Por ejemplo, a temperatura de 2000 K un cuerpo emite luz visible pero la intensidad en el extremo rojo (baja frecuencia, alta longitud de onda) del espectro visible es mucho mayor que la azul (alta frecuencia, baja longitud de onda) y el cuerpo aparece rojo brillante. A 3000 K, la temperatura aproximada de un filamento de una lámpara incandescente, la cantidad relativa de luz azul ha aumentado, pero predomina aún la componente roja. A 6000 K, que es aproximadamente la temperatura del Sol, la distribución es casi uniforme entre todas las componentes de la luz visible y el cuerpo aparece blanco brillante. Por encima de 10000 K se emite luz azul con mayor intensidad que roja y un cuerpo (estrella caliente) a esta temperatura se ve azul.

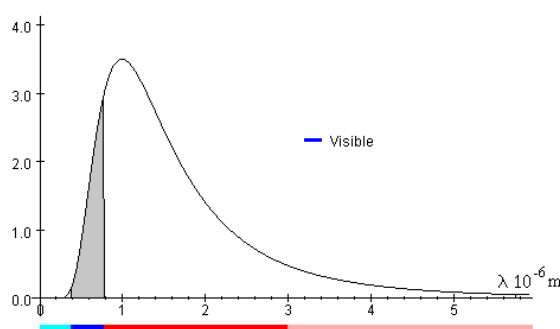
La lámpara incandescente

La lámpara incandescente se inventó en 1870. La primera lámpara consistía en un filamento de carbón contenida en un recipiente de vidrio en el que se había hecho el vacío. Esta lámpara duraba muy poco y fue sustituida por lámparas de filamento metálico, principalmente de wolframio.

La lámpara incandescente funciona cuando un filamento metálico se calienta a altas temperaturas. Los electrones de los átomos emiten energía en todas las longitudes de onda. Cuando una parte importante de la radiación emitida está en el espectro visible y podemos ver el objeto por la radiación visible que emite, decimos que está incandescente.

Para que un sólido emita radiación visible tiene que estar a una temperatura de 850 K, entonces lo vemos de color rojo. Comparando con la temperatura de 6500 K de la fotosfera solar, podemos afirmar que es imposible conseguir calentar un objeto sólido a esta temperatura sin que se funda, para que emita el mismo espectro de la radiación que el Sol.

El wolframio es el metal que tiene a la vez la temperatura más alta de fusión 3680 K y el menor grado de evaporación. El carbono soporta temperaturas más elevadas antes de fundirse pero se evapora rápidamente.



En la práctica, la temperatura más alta que soporta una lámpara incandescente ordinaria fabricada con filamento de wolframio es de 2900 K. A estas temperaturas solamente, una pequeña fracción de la energía emitida está en la región visible, menos del 11%, la mayor parte de es radiación infrarroja. Por lo que las lámparas incandescentes son poco eficientes en la emisión de luz visible.

Hemos supuesto que el filamento se comporta como un cuerpo negro, ignorando la emisividad ϵ que depende la temperatura y de la longitud de onda. Por ejemplo, la emisividad del wolframio a la longitud de onda de 650 nm (color rojo) y a la temperatura de 2900 K es de $\epsilon = 0.420$.

Cuando la lámpara está incandescente, el filamento de wolframio sufre pérdidas de material por evaporación, y en una lámpara normal se depositan sobre la bombilla de cristal, produciendo un ennegrecimiento. En los últimos años se han utilizado las lámparas halógenas que son lámparas incandescentes a las que se les añade pequeñas cantidades de un halógeno (yodo o bromo) en el gas de relleno que se combina con el material evaporado dando un compuesto gaseoso. Cuando toma contacto con el filamento incandescente este compuesto se descompone en sus elementos originales y se produce una deposición del wolframio sobre el filamento y el halógeno sigue con

su función regenerativa, lo que reduce considerablemente el ensuciamiento de la bombilla y aumenta la eficacia y la vida de la lámpara.

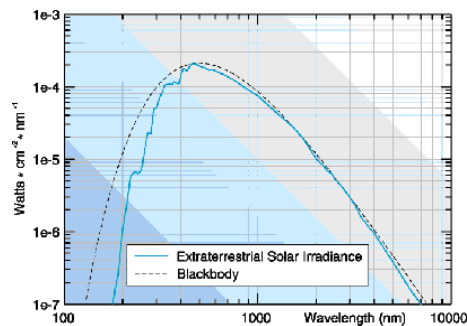
Tienen una temperatura de color un poco más alta que las ordinarias y su envoltura de cuarzo (cuando no tienen una segunda de vidrio) dejan pasar el ultravioleta desde los 250 nm.

Luz natural.

La principal fuente natural es el Sol. La visión es un fenómeno que tiene lugar sobre todo bajo iluminación solar. Caracterizar una fuente luminosa como ocurre con cualquier fuente de radiación, es conocer su distribución espectral de energía y su distribución espacial. Respecto a este último punto, en primera aproximación el Sol se puede considerar como una fuente puntual con una emisión isótropa. Esto significa que podemos utilizar la ley del cuadrado de la distancia para calcular la intensidad.

Radiación solar extraterrestre.

La radiación solar es la radiación electromagnética total del Sol que se extiende desde las grandes longitudes de onda del dominio de la radio, hasta las longitudes de onda más cortas donde domina el carácter corpuscular de la luz. Es muy absorbida por la atmósfera terrestre, salvo para dos zonas de longitudes de onda, y hay que considerar dos partes: la *radiación solar extraterrestre* medida en la alta atmósfera y la *radiación en el suelo*.



Radiación solar en el suelo.

La absorción por la atmósfera no deja pasar la radiación solar más que en dos zonas, la *ventana óptica* de aproximadamente 0,3 a 2,5 μm de longitud de onda y la *ventana radio* de 0,1 a 15 m aproximadamente. En el dominio de la radiación óptica esta absorción se debe principalmente a los gases del aire, nitrógeno y oxígeno neutro o ionizado, dióxido de carbono para las longitudes de onda cortas y las bandas de absorción del agua y del dióxido de carbono para las grandes longitudes de onda. A ello se añaden los efectos de la difusión y de la dispersión fuertemente dependiente de la nubosidad y del estado del cielo.

Para tiempo claro la radiación difusa proviene de la dispersión molecular en la alta atmósfera (12000 m de altitud). Esta dispersión estudiada por Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda, lo que explica que el cielo se vea azul, ya que el fenómeno es cerca de diez veces más intenso a 0,4 μm que a 0,7 μm y se le añade el efecto de las partículas de todo tipo que están en suspensión en el aire.

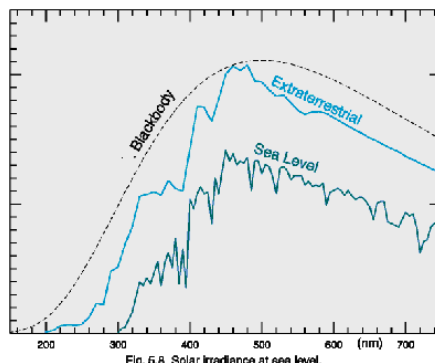


FIG. 6.8 Solar irradiance at sea level.

La temperatura del Sol

Para determinar la temperatura de la radiación de un cuerpo negro o de una estrella se mide la longitud de onda λ_m a la cual el objeto emite con intensidad máxima.

Otra forma de estimar la temperatura del Sol, es la aplicación de la ley de Stefan-Boltzmann.

Practica 6 – Física III A- III B

Radiación del cuerpo negro

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

Problema 1. Si todo objeto irradia energía por contraste a una cierta temperatura. Entonces, ¿por qué no podemos ver los objetos en la oscuridad?

Problema 2. Hallar el valor de la longitud de onda donde se produce la máxima emisión del cuerpo negro a: a) $T = 3 \text{ K}$, b) $T = 300 \text{ K}$ c) $T = 3000 \text{ K}$.

Problema 3 Si calentando un trozo de metal, inicialmente a temperatura ambiente, en un cuarto oscuro, en cierto momento comenzará a resplandecer visiblemente. ¿Cuál será su primer color visible, y por qué?

→ **Problema 4.** La temperatura de un cuerpo negro se eleva por calentamiento desde 1500 K hasta 4000 K. a) ¿Cuántas veces aumenta la potencia total emitida? b) ¿Qué variación experimenta la longitud de onda correspondiente al máximo de la emitancia espectral de radiación?

→ **Problema 5.** Calcular la temperatura de la superficie del Sol. a) Utilizar la ley de Wien para el espectro de la radiación solar que llega al borde de nuestra atmósfera (radiación extraterrestre). b) Utilizar la ley de Stefan–Boltzmann y el valor de la constante solar $I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$ (intensidad que llega al borde de nuestra atmósfera). (distancia entre el sol y la tierra es $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ y su radio es de $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$ y $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

Problemas 6. a) Caracterizar la radiación térmica del cuerpo humano considerando que el cuerpo se encuentra a una temperatura de 37°C . b) Determinar la potencia total emitida suponiendo al cuerpo como un cuerpo negro cuya emisividad $e = 1$ y cuya superficie es de 2 m^2 c) Si consideramos que el ojo humano tiene su máxima sensibilidad a 560 nm. ¿Cuál es la temperatura de un cuerpo negro cuya radiación más intensa ocurrirá en esta longitud de onda? (comparar con la temperatura del Sol)

Problema 7. Una esfera de radio 250 mm tiene una capa de humo en su superficie. Determinar la potencia radiada si su superficie esta: a1) $T = 300 \text{ K}$ a2) $T = 1500 \text{ K}$. b) ¿A qué longitud de onda irradia con una máxima intensidad?

→ **Problema 8.** Una lámpara incandescente de 100 W tiene un filamento cilíndrico de tungsteno de 30 cm de longitud, 0.4 mm de diámetro, y su emisividad es 0.26. a) ¿Cuál es la temperatura del filamento? b) ¿Para qué longitud de onda es máxima la emitancia espectral de radiación de la lámpara? c) Las lámparas incandescentes no son fuentes eficientes de luz visible. ¿Por qué? Justifique la respuesta.

Problema 10. Las “enanas blancas” son las estrellas compactas cuya masa es del mismo orden que la masa del Sol y su radio es aproximadamente igual al 1% del radio del Sol. Las estrellas cuya temperatura es de $7 \cdot 10^4$ K se llaman *estrellas calientes*, mientras que si la temperatura es de $5 \cdot 10^3$ K las estrellas se llaman *frías*. La temperatura de la superficie de las “enanas blancas” es de $1 \cdot 10^4$ K. ¿En qué parte del espectro se encuentra el máximo de radiación?

Problema 11. La potencia emitida por un cuerpo negro en forma de radiación infrarroja es de 400 W. Si la máxima radiación ocurre para $\lambda = 1000$ nm. a) Determinar la temperatura del objeto b) Suponiendo que la temperatura aumenta al doble de su valor original, determinar la longitud de onda del máximo de emisión y la nueva potencia radiada

Problema 12. Dos estrellas, que se comportan como cuerpos negros ideales, irradian la misma energía total por segundo. La más fría tiene una temperatura T en su superficie y un diámetro que es 3 veces el diámetro de la estrella más caliente. a) ¿Cuál es la temperatura de la estrella más caliente en términos de T ? b) ¿Cuál es la razón entre la longitud de onda de máxima intensidad de la estrella caliente y la longitud de onda de máxima intensidad de la estrella fría?

Problema 13. a) Si ves una estrella roja, podrás asegurar que su intensidad máxima está en la región del infrarrojo. ¿Por qué? Y si ves una estrella “violeta”, puedes estar seguro de que su intensidad máxima está en el ultravioleta. ¿Por qué? b) Las estrellas “verdes” no se ven verdes, sino blancas. ¿Por qué? (*Sugerencia:* observe la curva de radiación)

→ **Problema 14.** La radiación sobre la superficie de cierto cuerpo opaco es de 50 W/m^2 . La superficie absorbe 20 W/m^2 a) ¿Cuál es el poder reflectante de la superficie b) ¿Cuál es el poder absorbente? c) Si el área de la superficie del cuerpo es 100 cm^2 ¿Cuál es el flujo radiante total que incide sobre él? d) Si el cuerpo se encuentra en equilibrio térmico y solo puede intercambiar energía por emisión y absorción de energía radiante ¿Cuál será el poder emisor de su superficie? e) ¿Cuál será la temperatura del cuerpo? f) ¿Cuál sería el poder emisor de un cuerpo negro a la misma temperatura?

→ **Problema 15.** Se analiza luz procedente de un cuerpo negro esférico ideal, de 15 cm de diámetro, mediante una red de difracción de 3850 líneas/cm. Cuando se hace pasar la luz a través de la red, se observa que la longitud de onda de máxima intensidad forma una franja brillante de primer orden a $61,6^\circ$ con respecto a la franja brillante central. ¿Cuál es la temperatura del cuerpo negro?

Aspectos corpusculares de la radiación

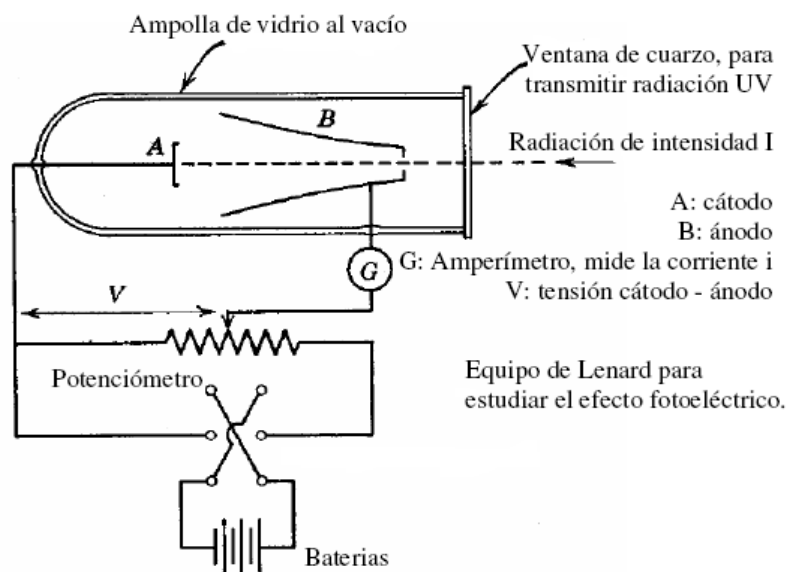
EFFECTO FOTOELÉCTRICO

Cuando se ilumina un metal con radiación de frecuencia mayor que un cierto valor umbral, se desprenden electrones.

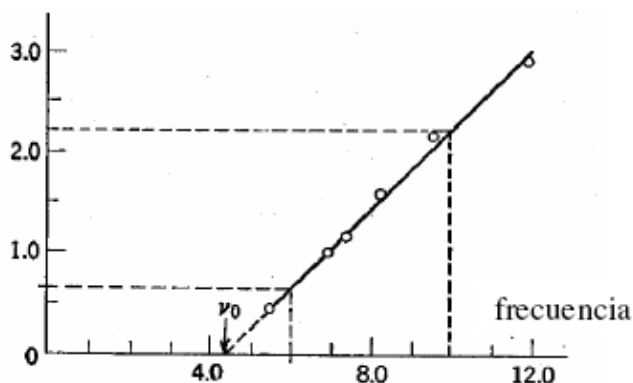
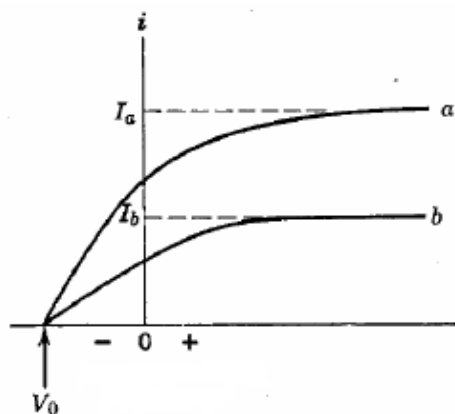
Los electrones habían sido descubiertos recién en el año 1900, pero muchos años antes se conocía la electricidad y su relación con la luz. Por ejemplo, Hertz sabía que era más fácil hacer saltar una chispa entre electrodos si se iluminaban con luz azul o violeta. A principio del siglo XX los experimentos se habían perfeccionado, y Philipp Von Lenard realizó en 1902 observaciones del efecto fotoeléctrico en las que se ponía de manifiesto la variación de energía de los electrones con la frecuencia de la luz incidente.

La energía cinética de los electrones desprendidos podía medirse a partir de la diferencia de potencial necesaria para frenarlos en un tubo de rayos catódicos. La radiación ultravioleta requería por ejemplo potenciales de frenado mayores que la radiación de mayor longitud de onda. Los experimentos de Lenard, con un equipo similar a la de la figura, permitieron establecer los siguientes hechos,

- 1) la corriente es mayor cuanto mayor es la intensidad de la radiación,
- 2) sólo se produce corriente cuando la radiación tiene frecuencia mayor que un cierto valor umbral. Este umbral depende del material del cátodo,
- 3) la energía de los electrones es proporcional a la frecuencia de la radiación incidente.



Cuando la polaridad es la adecuada, esto es el electrodo iluminado es el cátodo del circuito (recuerde que cátodo quiere decir debajo en griego, es decir electrodo negativo), se desprenden electrones y la corriente crece con la intensidad de la iluminación, $I_b > I_a$. Cuando la polaridad se invierte, y la copa se hace negativa, la corriente disminuye porque los electrones se frenan y para un valor V_f que sólo depende la frecuencia de la luz empleada, por fin se interrumpe. Entonces la energía máxima de los electrones desprendidos iguala al producto de su carga por la diferencia de potencial eV_f .



Corriente de electrones en función de la tensión aplicada entre el cátodo y el ánodo para distintos valores de la intensidad luminosa. Potencial de frenado en función de la frecuencia de la radiación incidente.

Los principales resultados se pueden rescatar de los experimentos resumidos en los gráficos de la figura. Si se grafica el potencial de frenado en función de la frecuencia, como lo hizo Millikan muchos años después, se obtiene una recta que permite calcular la frecuencia umbral y la constante de Planck. Los principales resultados se pueden rescatar de los experimentos resumidos en los gráficos de la figura. Si se grafica el potencial de frenado en función de la frecuencia, como lo hizo Millikan muchos años después, se obtiene una recta que permite calcular la frecuencia umbral y la constante de Planck.

En 1905, Einstein, explicó con una sencillez casi insultante, todas estas características, llevando la hipótesis de cuantificación de Planck a un nuevo nivel de popularidad. Einstein aplicó la idea de Planck y supuso que la radiación transportaba la energía en paquetes o cuantos. En el momento de la absorción por el metal, la energía del fotón, cuanto de radiación e. m., se utilizaba para vencer la atracción del metal y comunicarle energía cinética al electrón.

1) La radiación incidente, de frecuencia f , sólo puede intercambiar energía con los electrones del metal en una cantidad igual a hf ,

2) Los electrones usan esa energía para vencer la energía que los liga al metal (ya que no pueden escapar espontáneamente) y el resto para adquirir energía cinética, con la que llegan al otro electrodo. Esta idea se puede escribir como,

Energía del electrón desprendido = energía del cuanto de radiación – Energía de ligadura al metal

$$E_e = hf - E_l = hf - hf_0$$

Y si la energía del electrón se mide frenándolo con un potencial V_f , se puede escribir,

$$V_f = \frac{h}{e} (f - f_0)$$

3) Si la luz tiene más intensidad, son más los cuantos de energía hf que transfieren su energía a los electrones, y por lo tanto la corriente es mayor.

En 1914 Millikan obtuvo el premio Nóbel de Física por determinar la carga del electrón (con el experimento de la gota de aceite) y obtener un valor muy preciso de la constante de Planck, en base a la ecuación del efecto fotoeléctrico. Lo mismo había sucedido con Einstein en 1911.

Lenard obtuvo el premio Nobel de 1905 por sus trabajos con rayos catódicos (electrones).

ASPECTOS ONDULATORIOS DE LAS PARTÍCULAS

Una idea de De Broglie resultó clave para interpretar una serie de fenómenos en los cuales las partículas parecían comportarse como ondas, por ejemplo en algunos casos se difractaban en obstáculos de la misma manera que la luz.

Según De Broglie, si a la luz de longitud de onda λ se debía asociar un fotón con una cantidad de movimiento p , dada por

$$p = h/\lambda$$

entonces a una partícula con cantidad de movimiento p , se le debe asociar una onda con longitud de onda λ , dada por

$$\lambda = h/p$$

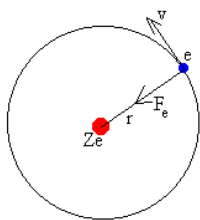
Para los cuerpos macroscópicos, esta longitud de onda es muy pequeña y el carácter ondulatorio pasa desapercibido, pero para los electrones, neutrones y átomos, es fundamental.

ÁTOMO DE HIDRÓGENO

Modelo atómico de Bohr

El modelo de Bohr es muy simple y recuerda al modelo planetario de Copérnico, los planetas describiendo órbitas circulares alrededor del Sol. El átomo de **hidrógeno** es el más simple de todos: un **protón** y un **electrón**. El electrón está a una distancia r del protón, donde se mueve con una velocidad v . La fuerza **coulombiana** suministra la fuerza **centrípeta**.

Consideremos un átomo o ión con un solo electrón. El núcleo de carga Ze es suficientemente pesado para considerarlo inmóvil.



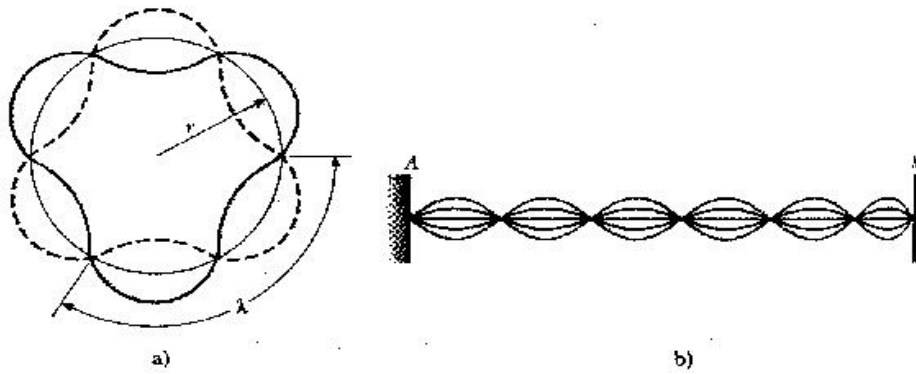
Si el electrón describe una órbita circular de radio r , por la [dinámica del movimiento circular](#) uniforme

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

La mecánica clásica no pone ninguna condición a la distancia r . Pero el electromagnetismo nos enseña que toda carga acelerada irradia energía EM y por lo tanto el electrón debe ir cayendo hacia el núcleo.

El electrón de un átomo o ión hidrogenoide describe órbitas circulares, pero los radios de estas órbitas no pueden tener cualquier valor. Sólo son posibles las órbitas en las que la longitud de onda de De Broglie asociada con el electrón forma una onda estacionaria.

$\lambda = h/p = h/mv = 2\pi r/n$, de donde, $mvr = nh/2\pi$ (ésta es la condición de cuantificación del momento angular impuesta por Bohr unos años antes).



a) 3 longitudes de onda alrededor del átomo de hidrógeno. b) 3 longitudes de onda en una cuerda tensa.

Puede mostrarse que la energía total E es,

$$E_n = - \left(\frac{m_e e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2} \right) \frac{1}{n^2}$$

La energía del electrón aumenta con el número cuántico n .

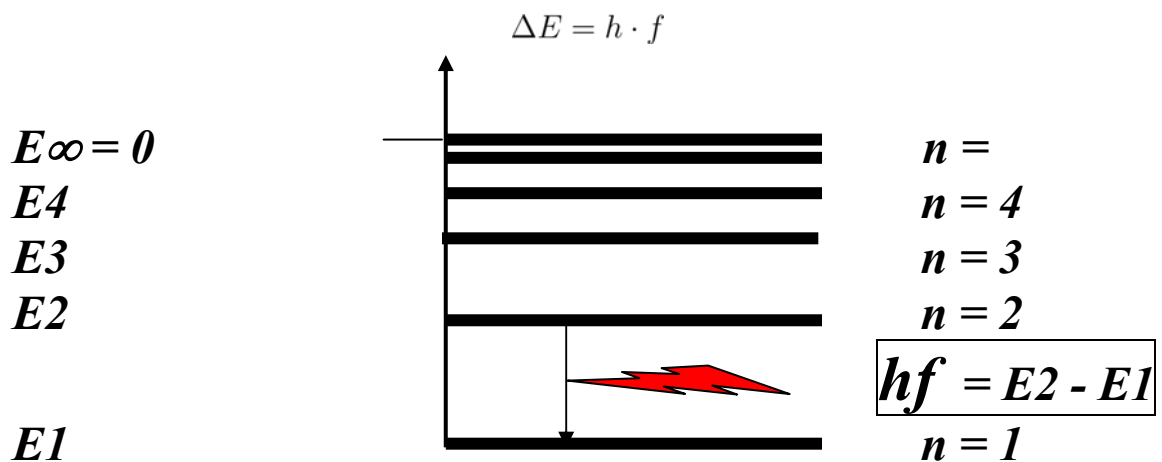
La energía del estado fundamental se obtiene con $n=1$, $E_1 = -13,6$ eV y la del primer estado excitado con $n=2$, $E_2 = -3,4$ eV.

Las energías se suelen expresar en electrón-voltios ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J)

La radiación emitida cuando el electrón pasa del estado excitado al fundamental es

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h} = 2,47 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

- Existen ciertas energías permitidas para el átomo de hidrógeno, en particular una que es la más pequeña, por debajo de la cual éste no puede llegar.
- Las energías permitidas corresponden a las distancias donde el momento angular es un múltiplo de $h/2\pi$,
- En los saltos se absorbe o irradia energía EM con frecuencia f , dada por



Practica 7 – Física III A- III B

Efecto fotoeléctrico y modelos atómicos

NOTA: Los ejercicios marcados con → son esenciales.

→ **Problema 1.** a) Hállese la energía en Joules asociada a un fotón cuya longitud de onda es $\lambda = 600 \text{ nm}$ b) Calcular en Joules el trabajo de extracción de una superficie fotoemisora si la longitud de onda umbral para esa superficie es de 580 nm . c) Con qué diferencia de potencial tendría que ser acelerado un electrón para adquirir la energía indicada en la parte a)?

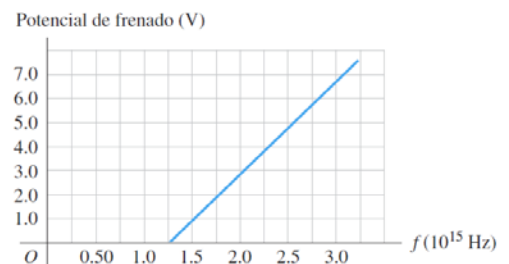
→ **Problema 2.** a) Enuncie algunos aspectos del fenómeno que no pueden explicarse con la teoría clásica. b) ¿Qué son más efectivos para desprender electrones de una superficie metálica, los fotones de luz violeta o los fotones de luz roja? ¿Por qué?

Problema 3. La función trabajo de Cesio es $1,9 \text{ eV}$ a) Hallar la frecuencia umbral y la longitud de onda para el efecto fotoeléctrico. Hallar el potencial de frenado si la longitud de onda de la radiación incidente es 250 nm y 350 nm .

→ **Problema 4.** El umbral fotoeléctrico de cierto metal es 275 nm . Hallar: a) el trabajo necesario, expresado en eV, para arrancar un electrón de ese metal ¿Cuál sería la función trabajo mínima de un metal para que la luz visible (de 400 a 700 nm) expulsara fotoelectrones?; b) la velocidad máxima de los electrones arrancados por radiación de 180 nm ; c) la diferencia de potencial necesaria para detenerlos.

Problema 5. Cuando una luz ultravioleta de 254 nm de longitud de onda incide sobre una superficie de cobre, el potencial de frenado necesario para detener la emisión de fotoelectrones es $0,181 \text{ V}$. a) ¿Cuál es la longitud de onda umbral fotoeléctrica para esta superficie de cobre? b) ¿Cuál es la función trabajo de esta superficie?

→ **Problema 6.** La figura muestra el potencial de frenado como función de la frecuencia de la luz incidente sobre una superficie de metal. a) ¿Cuál es la función trabajo de este metal? b) ¿Es posible determinar el valor de la constante de Planck da esta gráfica? c) ¿Por qué la gráfica *no* se extiende por debajo del eje y? d) Si se empleara un metal diferente, ¿qué características de la gráfica esperaría que fueran iguales y cuáles diferentes?



	Longitud de onda (nm)	Potencial de frenado (V)
→ Problema 7. Cuando cierta superficie fotoeléctrica se ilumina con luz de distintas longitudes de onda, se observan los siguientes potenciales de frenado:	366	1,48
	405	1,15
	436	0,93
	492	0,62
	546	0,36
	579	0,24

Determine a) la frecuencia de umbral, b) la longitud de onda umbral, c) la función de trabajo fotoeléctrico del material (en electrón volts), y d) el valor de la constante de Planck h (suponiendo que se conoce el valor de la carga electrón).

→ **Problema 8.** Justificar si es verdadero o falso, que en el efecto fotoeléctrico,

- La corriente es proporcional a la intensidad de la luz incidente.
- La función trabajo de un metal depende de la frecuencia de la luz incidente.
- La máxima energía cinética de los electrones emitidos varía linealmente con la frecuencia de la luz incidente.

d) La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia.

→ **Problema 9.** Analizar si en el efecto fotoeléctrico el número de electrones emitidos por segundo es:

- a) Independiente de la intensidad de la luz incidente**
- b) Proporcional a la intensidad de la luz incidente.**
- c) Proporcional a la función trabajo de la superficie expuesta.**
- d) Proporcional a la frecuencia de la luz incidente.**

Problema 10. Cuando un haz luminoso de longitud de onda λ_1 incide sobre un cierto cátodo fotoeléctrico, no se produce emisión de electrones aunque la intensidad de la luz incidente sea muy intensa. Por otro lado, cuando se lo ilumina con longitud de onda $\lambda_2 < \lambda_1$, hay emisión de electrones aunque la intensidad de la luz incidente sea débil. Explicar que ocurre.

Problema 11. La función trabajo para el tungsteno es de 4,58 eV. a) Encontrar la frecuencia umbral y la longitud de onda para el efecto fotoeléctrico. b) Encontrar la máxima energía cinética de los electrones si la longitud de onda de la luz incidente es de 200 nm. c) Reiterar para $\lambda=250$ nm.

→ **Problema 12.** El litio, el berilio y el mercurio tienen funciones trabajo de 2,30 eV, 3,90 eV y 4,50 eV, respectivamente. Sobre cada uno de estos metales incide una luz con una longitud de onda de 400 nm. Determine a) cuál de estos metales muestra el efecto fotoeléctrico. Explique su razonamiento. b) Encuentre la energía cinética máxima de los fotoelectrones en cada caso.

Problema 13. Calcular la constante de Planck sabiendo que los fotoelectrones arrancados de la superficie de un metal por luz con una frecuencia de $2,2 \cdot 10^{15}$ Hz son retenidos totalmente por un potencial retardador de 6,6 V, mientras que los arrancados por la luz de frecuencia de $4,6 \cdot 10^{15}$ Hz lo son por un potencial de 16,5 V.

→ **Problema 14.** En un experimento que implica el efecto fotoeléctrico, si la intensidad de la luz incidente (con frecuencia más alta que la frecuencia de umbral) se reduce en un factor de 10 sin cambiar nada más, ¿cuál de los siguientes enunciados (si acaso alguno) es verdadero en relación con este proceso?

- a) Lo más probable es que el número de fotoelectrones se reduzca en un factor de 10.**
- b) Lo más probable es que la energía cinética máxima de los fotoelectrones expulsados se reduzca en un factor de 10.**
- c) Lo más probable es que la velocidad máxima de los fotoelectrones expulsados se reduzca en un factor de 10.**
- d) Lo más probable es que la velocidad máxima de los fotoelectrones expulsados se reduzca en un factor de 10**
- e) El tiempo para que el primer fotoelectrón sea expulsado aumentará en un factor de 10.**

Problema 15. En un experimento fotoeléctrico, ¿cuál de los siguientes cambios aumentará la energía cinética máxima de los fotoelectrones? a) Usar luz de mayor intensidad; b) usar luz de mayor frecuencia; c) usar luz de mayor longitud de onda; d) usar una superficie metálica con mayor función trabajo. En cada caso, justifique su respuesta.

Problema 16. Las funciones de trabajo fotoeléctrico para muestras de ciertos metales son las siguientes: cesio, 2,1 eV; cobre, 4,7 eV; potasio, 2,3 eV; y cinc, 4,3 eV. a) ¿Cuál es la longitud de onda umbral para cada superficie metálica? b) ¿Cuál de estos metales *no* podría emitir fotoelectrones al irradiarse con luz visible (de 400 a 700 nm)?

→ **Problema 17.** Una célula fotoeléctrica de vacío consta de un cátodo central que es una esferita de wolframio y de un ánodo formado por la superficie interna plateada de la ampolla (la función trabajo del wolframio es de 4,58 eV). Esta célula fotoeléctrica se ilumina con una longitud de onda $\lambda = 2,3 \cdot 10^{-7}$ m. a) ¿Qué potencial retardador habrá que aplicar

entre los electrodos para que la corriente fotoeléctrica baje a cero? b) ¿Qué velocidad alcanzarían los electrones al llegar al ánodo si entre el cátodo y el ánodo no se aplica una diferencia de potencia externa?

Problema 18. Considere una lámina de Cesio, con función trabajo es 1,9 eV, iluminada por un haz de luz láser de longitud de onda 530 nm y potencia 0,5 W, que tiene una sección circular de $0,5 \text{ mm}^2$ e incide perpendicularmente sobre la lámina. Calcule la energía cinética de los fotoelectrones resultantes y el número de electrones liberados por unidad de tiempo

→ **Problema 19.** Calcule cuál es el radio de la primera órbita del electrón que gira alrededor del núcleo del átomo de hidrógeno según el modelo de Bohr. Determine la velocidad con que el electrón se mueve en esta órbita.

Problema 20. ¿En qué difiere el espectro de un sólido incandescente de la energía radiante emitida por un gas excitado?

→ **Problema 21.** Un átomo de hidrógeno está inicialmente en el nivel fundamental; absorbe un fotón y se excita al nivel $n = 4$. Determine la longitud de onda y la frecuencia del fotón.

Problema 22. En un átomo de hidrogeno un electrón decae de la cuarta a la segunda orbita. Indicar a) ¿Cuál es la longitud de onda y la frecuencia del fotón emitido al decaer el electrón? b) ¿Cuál es la disminución de energía del átomo? c) Indicar cuáles son las distintas posibilidades de emisión de líneas espectrales para un átomo cuando el electrón decae entre las orbitas mencionadas

→ **Problema 23.** Se excita un átomo de hidrógeno desde el estado base ($n = 1$) hasta el nivel $n = 4$. a) Calcular la energía que debe absorber el átomo. b) Calcular y hacer un diagrama de niveles de energía de las distintas energías para los fotones que emitiría el átomo si regresara a su estado fundamental. c) ¿De cuántas maneras posibles puede decaer el átomo desde el nivel $n=4$ al fundamental? ¿Cuántas radiaciones distintas puede emitir? (Ayuda: en el modelo de Bohr son equivalentes las transiciones $n=4 \rightarrow n=1$ o $n=4 \rightarrow \dots \rightarrow n=i \rightarrow \dots \rightarrow n=1$).

Problema 24. a) Hallar la longitud de onda máxima de la serie ultravioleta del espectro del hidrógeno. b) ¿Qué velocidad mínima deberán tener los electrones para que al chocar con los átomos de hidrógeno, estos se exciten y aparezca esta línea.

→ **Problema 25.** La distancia en dirección radial entre dos órbitas consecutivas en un átomo de Hidrógeno es siete veces el radio de Bohr r_0 . ¿Qué números cuánticos principales tienen dichas orbitas? b) ¿Qué energía tiene el fotón emitido al decaer un electrón de una de las órbitas a la otra?

Problema 26. Calcúlense las frecuencias y las longitudes de onda de las líneas espectrales emitidas cuando el electrón de un átomo de hidrogeno vuelve de la sexta órbita de Bohr a la tercera b) ¿A qué serie de líneas espectrales espectrales corresponden?

→ **Problema 27.** La serie de Balmer de emisión del hidrógeno corresponde a transiciones electrónicas que terminan en $n = 2$. ¿Cuál es la longitud de onda más corta y más larga de las emisiones que corresponden a esta serie? ¿En qué región del espectro electromagnético se encuentran estas longitudes de onda?

Problema 28. En un átomo de hidrogeno la distancia en dirección radial entre dos órbitas consecutivas es once veces el radio de Bohr r_0 . Determinar la longitud de onda y la frecuencia del fotón emitido al decaer un electrón entre las órbitas que cumplen la condición mencionada.

Problema 29. a) ¿Cuál es la cantidad mínima de energía, en electronvolts, que se debe transmitir a un átomo de hidrógeno que al principio está en su nivel fundamental, para que pueda emitir la línea H_α de la serie de Balmer ($\lambda = 656,3 \text{ nm}$)? b) ¿Cuántas posibilidades distintas de emisiones

de líneas espectrales hay para este átomo cuando el electrón comienza en el nivel $n = 3$ y termina en el nivel fundamental? Calcule la longitud de onda del fotón emitido en cada caso.

→ Problema 30. ¿Cuál debe ser la temperatura de un cuerpo negro ideal de manera que los fotones de la luz que irradia con la longitud de onda de máxima intensidad puedan excitar el electrón en el átomo de hidrógeno del modelo de Bohr de su estado fundamental al nivel $n = 3$?

→ Problema 31. Sobre una red de difracción incide normalmente un haz de luz que procede de un tubo de descarga lleno de hidrógeno atómico. La constante de red es de $5 \cdot 10^{-4}$ cm. ¿A qué salto del electrón le corresponde la línea espectral que se observa con esta red en el espectro de quinto orden bajo un ángulo de 41° ?

Practica 1 – MODULO II

Física III A

Mecánica cuántica

1-DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA – PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

1.1 A partir del principio de incertidumbre, de un argumento plausible que justifique porque la energía del más baja de un electrón en un potencial ligado, como por ejemplo un pozo infinito, no puede ser cero.

1.2 Un haz de electrones que tiene la dirección del eje x incide sobre una rendija de ancho Δy , transversal a la dirección del haz. Se hace una medida de la coordenada y de un electrón en dicho haz. Demuestre que esto introduce una incerteza Δp_y en la componente y del impulso del electrón, tal que $\Delta p_y \Delta y \geq \hbar$, es decir cumpliendo con el principio de incertidumbre (Sugerencia: considere la difracción de la onda del electrón a través de la rendija).

1.3 Una bala de 40g viaja 1000 m/s. (a) ¿Qué longitud de onda se le puede asociar? (b) ¿Por qué no se observa la naturaleza ondulatoria de la bala por medio de efectos de difracción?

1.4 La longitud de onda de la emisión amarilla del sodio es 589 nm ¿Que energía cinética tendría que tener un electrón para la misma longitud de onda de De Broglie? Compárela con la energía del fotón del haz amarillo del sodio.

1.5 Un electrón se acelera hasta que su factor gamma se hace igual a 2. (a) ¿Cuál es la energía cinética en eV en ese momento? (b) ¿Qué longitud de onda se debe asociar al electrón? (c) ¿Qué velocidad predice la mecánica clásica para la misma energía cinética?

1.6 ¿Cuáles son la frecuencia, longitud de onda e impulso de un fotón cuya energía es igual a la energía de masa en reposo de un electrón?

1.7 Electrones de 64 eV difractan en un cristal. Uno de los picos de difracción observados ocurre a un ángulo de Bragg de 45° . Determinar la separación de los planos cristalinos responsables de este pico.

1.8 El espaciamiento principal entre planos de un cristal de cloruro de potasio es 3.14 \AA . Compare el ángulo para una reflexión de Bragg de primer orden de estos planos, de electrones con energía cinética de 40 keV con el correspondiente a fotones de 40 keV.

1.9 Un haz de electrones de 25 eV incide sobre dos rendijas separadas entre sí por $1\mu\text{m}$. Determinar la separación entre un máximo y el mínimo más próximo cuando se observan en una pantalla colocada a 1 m de las rendijas.

3-TEORÍA DE SCHRÖDINGER

3.1 ¿Cómo se relacionan el postulado de “de Broglie” en la teoría de Schrödinger?

3.2 ¿Por qué es tan importante que la ecuación de Schrödinger sea lineal?

3.3 Cómo se determinan la posición y la velocidad de una partícula cuántica a partir de la función de onda asociada.

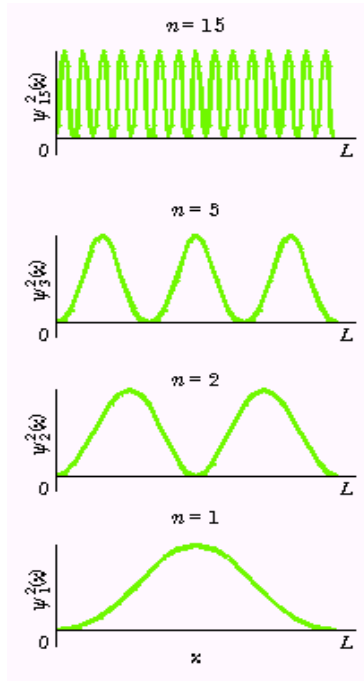
3.4 ¿Por qué la mecánica cuántica de Schrödinger proporciona solamente información estadística del sistema? ¿Esto es una falla de la teoría o una propiedad de la naturaleza?

3.5 En los sistemas donde la partícula está ligada como por ejemplo un electrón en un pozo de potencial, la energía del estado fundamental de la partícula ligada está por encima del valor mínimo de energía potencial. Utilice el principio de incertidumbre para explicar porque tiene sentido físico este aspecto.

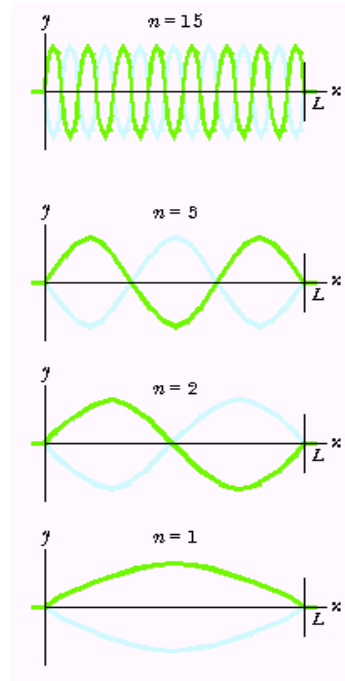
3.6 Si las funciones de onda ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 son tres soluciones a la ecuación de Schrödinger para un potencial particular $V(x,t)$, demostrar que la combinación lineal siguiente es también solución de la ecuación: $\psi(x,t) = c_1\psi_1(x,t) + c_2\psi_2(x,t) + c_3\psi_3(x,t)$

3.7 (a) Demuestre que $\psi = A \sin(kx) + B \cos(kx)$ con $k = \sqrt{2mE}/\hbar$ es una solución de la ecuación de Schrödinger para una partícula libre confinada en una caja de longitud L cuya energía potencial $V = 0$ dentro de la caja. (b) Explique por qué $\psi = A \sin(kx)$ es una función de onda aceptable para una partícula en una caja con paredes rígidas en $x=0$ y en $x = L$ sólo si k es un múltiplo entero de π/L . (c) Repita el apartado a) para $\psi = A \cos(kx)$. Explique por qué ésta NO es una función de onda aceptable para una partícula en una caja con paredes rígidas en $x=0$ y en $x = L$ sin importar el valor de k . (d) ¿Cuál es la causa de la cuantización de la energía?

3.8 Resolver la ecuación de Schrödinger para un electrón en un potencial unidimensional tipo “caja de paredes impenetrables”. Suponga una caja de 0,4 nm de lado. (a) Calcular la energía de los niveles permitidos. (b) ¿cuál es la longitud de onda emitida cuando el electrón cae desde el primer nivel excitado al fundamental? (c) Discuta el sentido físico de las densidades de probabilidad graficadas en función de la posición x del electrón en el pozo infinito mostradas abajo a la izquierda (Ayuda: Compare con las ondas estacionarias establecidas en una cuerda graficadas abajo a la derecha). (d) Explique el significado físico de la condición de normalización.



Densidad de probabilidad de una partícula en un potencial ∞



Ondas estacionarias en una cuerda con los extremos fijos

3.09 Un electrón está confinado en un pozo cuadrado de $a = 0,75$ nm de ancho y profundidad $U_0 = 6E_\infty$ (donde E_∞ es la energía del estado fundamental de un pozo de potencial infinito de ancho $a = 0,75$ nm). Si el electrón está inicialmente en el nivel fundamental (suponga que la energía del estado fundamental es E_∞) y absorbe un fotón. ¿Qué longitud de onda máxima puede tener el fotón y aún liberar al electrón del pozo?

3.10 Un electrón con una energía cinética inicial $E = 3$ eV encuentra una barrera de altura V_0 y ancho $a = 0,5$ nm. ¿Cuál es el coeficiente de transmisión para los siguientes casos: (a) $V_0 = 5$ eV, (b) $V_0 = 7$ eV, (c) $V_0 = 11$ eV. Usar la expresión aproximada siguiente para evaluar el coeficiente de transmisión: $T \cong e^{-k \cdot a}$, donde $k = \sqrt{2m(V_0 - E)}/\hbar$

Practica 2 – MODULO II

Fisica III A

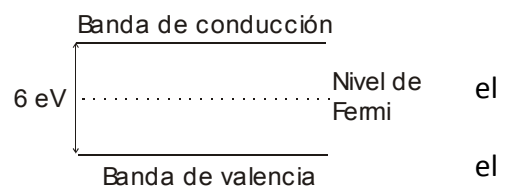
Partículas idénticas. Estadísticas cuánticas. Estado sólido.

1. ¿Qué tipo de funciones de onda describen las partículas que cumplen el principio de exclusión de Pauli? Demuestre que 2 de estas partículas no pueden coexistir en el mismo estado cuántico.
2. ¿Dos partículas descritas por funciones de onda simétricas tienen mayor o menor probabilidad de encontrarse en el mismo estado cuántico respecto a 2 partículas clásicas? (Sugerencia: compare la densidad de probabilidad simétrica con la densidad clásica).
3. Demuestre que la probabilidad de que tres bosones se encuentren en el mismo estado es 6 veces más grande que la probabilidad clásica.
4. Si un electrón se encuentra en el tope de la banda de valencia de un semiconductor cuyo gap de energía es ΔE (brecha de energía prohibida entre las bandas de valencia y conducción) ¿Cuál debe ser la máxima longitud de onda de un fotón para “subir” el electrón a la banda de conducción? (Sugerencia: compare este fenómeno con el efecto fotoeléctrico).
5. La función de distribución de Fermi-Dirac puede escribirse como:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} = \frac{1}{\exp\left(\left(\frac{E}{E_F} - 1\right)\frac{T_F}{T}\right) + 1}$$

donde $T_F = E_F/k$ es la *Temperatura de Fermi*. Graficar $f(E)$ en función de E/E_F para los siguientes valores de temperatura: $T = 0,1 T_F, 0,2 T_F, 0,5 T_F$.

6. Calcule la probabilidad de que un estado 0,073 eV por arriba de la energía de Fermi esté ocupado para las temperaturas: $T = 0$ K, $T = 320$ K.
7. La energía de Fermi de la plata es de 5.5 eV. (a) ¿Cuáles son las probabilidades que los estados con energías siguientes estén ocupados a 273 K: 4,4 eV; 5,4 eV, 6,4 eV? (b) ¿A qué temperatura la probabilidad de ocupación del estado de 5,6 eV de energía es 0,16?
8. La densidad del oro es $19,3 \text{ g/cm}^3$. Cada átomo contribuye con un electrón de conducción. Calcule la energía de Fermi del oro.
9. El esquema de bandas de un aislante es el que se muestra en la figura. Determinar la probabilidad de que estado de menor energía de la banda de conducción este ocupado a 500 K. El nivel de Fermi se encuentra en medio de la banda prohibida
10. La brecha de energía para el silicio a 300 K es 1.14 eV. Encuentre el fotón de más baja frecuencia que asciende un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. ¿Cuál es la longitud de onda de ese fotón?
11. La mayor parte de la radiación solar está constituida por radiación de longitudes de onda del orden de $1 \mu\text{m}$ o menor. ¿Qué brecha de energía debe tener el material en una celda solar para absorber esa radiación? ¿El silicio es apropiado?
12. El cristal de KCl tiene una banda prohibida entre bandas de 7,6 eV arriba de la banda ocupada más alta, la cual está llena. ¿Este cristal es opaco o transparente a la radiación de 140 nm de longitud de onda?



Practica 3 – MODULO II

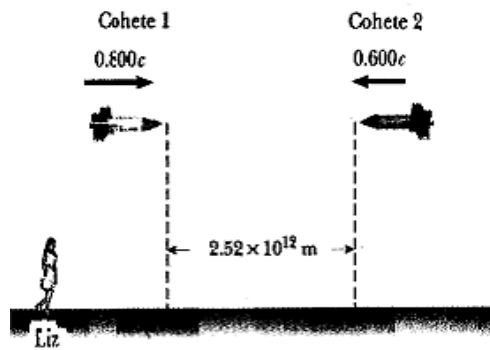
Fisica III A

Relatividad

1. Un pasajero que viaja en un tren a $0.1\ c$ prende una linterna y el haz de luz se propaga en la misma dirección y sentido que se mueve el tren. ¿A qué velocidad viaja la luz para el pasajero? ¿Y para un observador en el andén?
2. En Mecánica Clásica la masa inercial de un cuerpo se definió como la propiedad física que tiene un cuerpo de oponerse a un cambio en su estado de movimiento y la misma era constante ($p/v = m_0$). En el marco de la Mecánica Relativista, analice el cociente p/v para los casos límites $v \ll c$ y $v \leq c$.
3. ¿La siguiente afirmación contradicen el segundo postulado de Einstein? “Cuando se propaga en un vidrio lo hace con más lentitud que en el vacío”. Justificar la respuesta
4. ¿Cuánta energía se requerirá para acelerar una partícula de masa en reposo m_0 desde ese estado hasta las siguientes velocidades: a) $300\ \text{m/s}$, b) $0.5\ c$, c) $0.9\ c$, d) $0.99\ c$.
5. ¿Qué porcentaje de error se comete al utilizar la expresión $\frac{1}{2}mv^2$ para calcular la energía cinética de la partícula si su velocidad es: a) $300\ \text{m/s}$ b) $10\%\ c$ y c) $90\%\ c$.
6. Un protón con energía en reposo $938,28\ \text{MeV}$ se mueve con una velocidad igual al 75% de la velocidad de la luz en el vacío. Hallar su energía total, su energía cinética y su cantidad de movimiento.
7. a) Calcule la velocidad de los electrones en el sincrotrón de Campinas, Brasil, cuyo potencial de aceleración es $1,37\ \text{GV}$ ($1\ \text{GV} = 10^9\ \text{V}$). Expresar el resultado como un porcentaje de la velocidad de la luz en el vacío. b) ¿Cuál es el factor gamma de los electrones? (Recordar: Cuando una partícula de carga Q es acelerada a través de una diferencia de potencial V , la energía cinética que gana es de $Q \cdot V$)
8. Una nave se mueve a gran velocidad en la dirección $+x$ de un sistema de referencia inercial (S_1) fijo a la tierra desde donde un observador realiza mediciones. En el sistema fijo a la nave (S_2), una varilla mide $1\ \text{m}$ de largo y forma un ángulo de 30° con respecto a la dirección de su movimiento. En esas condiciones: (a) ¿A qué velocidad deberá moverse la nave para que su inclinación medida en S_1 sea 45° ? (b) ¿Cuál es la longitud de la varilla en este sistema de coordenadas?
9. El período de un péndulo es $T_0 = 2s$. ¿Cuál es el período de este péndulo para un observador en un sistema de referencia inercial que se mueve respecto del sistema del inercial del péndulo con velocidad relativa de $90\%\ c$?
10. Un cubo está moviéndose en dirección paralela a uno de sus aristas. Mostrar que el volumen del cubo y su densidad satisfacen $(V_0/V)^2 = \delta/\delta_0 = \gamma^2$, donde V_0 y δ_0 son su volumen y densidad en reposo.
11. Un cohete se mueve a $0,7\ c$ respecto a la Tierra. Un segundo cohete lo sobrepasa viajando a $0,95\ c$ según observadores terrestres. Calcular la velocidad relativa entre ambos cohetes.
12. La vida media de los muones (en reposo) es $2,2\ \text{ms}$. Esto significa que una cantidad determinada de muones disminuye a $1/e$ de su valor en $2,2\ \text{ms}$ o que la cantidad de muones en el tiempo t se puede escribir como: $N(t) = N_0 e^{-t/2,2\ \text{ms}}$, donde N_0 es la cantidad inicial.
(a) Calcular la vida media de los muones que se mueven con una velocidad de $0,95\ c$.
(b) Si se generan 50.000 muones en un punto alto de la atmósfera terrestre ¿Cuántos quedan después de viajar $3\ \text{km}$ (para un observador en la superficie), con la velocidad mencionada?
13. Un cohete de $60\ \text{m}$ de largo se aleja de la Tierra con un espejo en cada extremo. En un instante se envía desde la tierra un destello de luz y se recibe la reflexión en cada espejo, 200 segundos después la que proviene del espejo más cercano y luego de otros $1,74$ microsegundos,

la del más alejado. (a) ¿A qué velocidad se desplaza en ese instante? (b) ¿A qué distancia de la tierra se encuentra la nave en el momento de llegar cada destello?

14. En la figura mostrada a continuación, dos cohetes están a punto de chocar. Liz observa la escena desde la tierra y según sus mediciones los dos cohetes miden 50 m. (a) ¿Cuáles son las longitudes de cada cohete cuando están en el hangar?, (b) ¿Cuál es la velocidad relativa de acercamiento de los cohetes medida desde cualquiera de ellos? (c) Según Liz, ¿cuánto tiempo falta para que choquen? (d) ¿Y cuánto falta para colisionar según un observador en uno de los cohetes? ¿Encuentra diferencias? ¿Quién tiene más chance de evitar chocar a la otra nave? (Ayuda: tenga en cuenta que los procesos que son simultáneos para Liz no lo son para el observador en el cohete).



15. Supongamos que la mayor longitud de onda visible para el ojo humano, en el límite hacia el infrarrojo, es de 650 nm. Un cohete de última generación despegue alejándose de la tierra a gran velocidad emitiendo luz verde ($\lambda = 500 \text{ nm}$). Cierta tiempo después del despegue, un observador terrestre afirma que la señal luminosa emitida por la nave ha desaparecido repentinamente. Al aterrizar, se comprueba que la fuente luminosa de la nave nunca dejó de funcionar ¿Cómo podrías explicar esto?