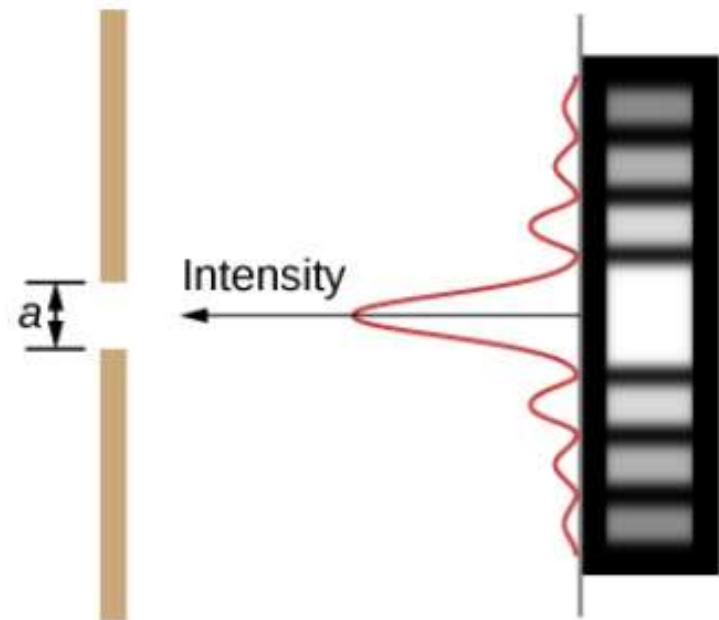


26- PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ



AVISOS

Cuarta evaluación corta: la realizaremos el jueves 20 sobre la hora 10.00. Temas: sonido (ondas estacionarias en tubos, intensidad del sonido, escala en decibeles, efecto Doppler) y Unidad 5 (propagación de la luz, leyes de reflexión y refracción, reflexión interna total, formación de imágenes en espejos y lentes).



EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

Examen agosto 2024- Una película delgada de índice de refracción $n = 1,50$ está rodeada de aire. Se ilumina normalmente con luz blanca y se observa por reflexión. El análisis de luz reflejada resultante muestra que las únicas longitudes de onda que se han perdido son las de 450 y 600 nm. Es decir que en el caso de estas longitudes de onda existe interferencia destructiva. ¿Qué colores correspondientes al rango visible serán las más brillantes en el diagrama de interferencia reflejado? Rangos aproximados de longitud de onda para el espectro visible: $\lambda_{\text{violeta}}=380-430 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{azul}}=430-450 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{verde}}=450-520 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{amarillo}}=565-590 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{naranja}}=590-625 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{rojo}}=625-780 \text{ nm}$.

Interfase azul: aire-película hay cambio de fase en 180°

Interfase verde: película-aire no hay cambio de fase en 180°

Hay 1 solo cambio de fase en 180° , por tanto la condición de mínimos es :

$$2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

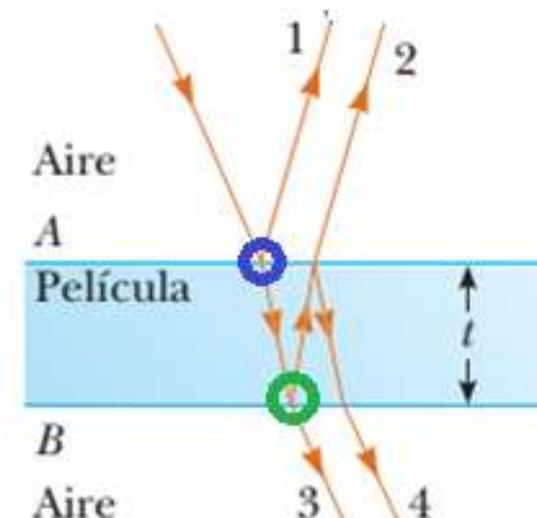
$$\lambda = \frac{2nt}{m}$$

Tengo mínimos para 450 nm y 600 nm:

$$450 = \frac{2nt}{m+1}$$

$$600 = \frac{2nt}{m}$$

$$\frac{600}{450} = \frac{4}{3} = \frac{\frac{2nt}{m}}{\frac{2nt}{m+1}} = \frac{m+1}{m}$$



Por lo tanto $m = 3$ y ahora puedo determinar el espesor t :

$$t = \frac{600 m}{2n} = \frac{600 (3,00)}{2(1,50)} = 600 \text{ nm}$$

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

Examen agosto 2024- Una película delgada de índice de refracción $n = 1,50$ está rodeada de aire. Se ilumina normalmente con luz blanca y se observa por reflexión. El análisis de luz reflejada resultante muestra que las únicas longitudes de onda que se han perdido son las de 450 y 600 nm. Es decir que en el caso de estas longitudes de onda existe interferencia destructiva. ¿Qué colores correspondientes al rango visible serán los más brillantes en el diagrama de interferencia reflejado? Rangos aproximados de longitud de onda para el espectro visible: $\lambda_{\text{violeta}}=380-430 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{azul}}=430-450 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{verde}}=450-520 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{amarillo}}=520-565 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{naranja}}=565-590 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{rojo}}=590-625 \text{ nm}$.

La condición de máximos es en este caso:

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\lambda = \frac{2nt}{m+\frac{1}{2}} = \frac{1800 \text{ nm}}{m+\frac{1}{2}}$$

m	0	1	2	3	4	5
$\lambda \text{ (nm)}$	3600	1200	720	514	400	327

Por lo tanto los colores más brillantes que se observan son: rojo (720 nm), azul (514 nm) y violeta (400 nm).

Examen agosto 2024- parte B

¿Cuál de las siguientes aseveraciones es **la falsa**?

- a) Dos ondas coherentes de longitud de onda λ experimentan interferencia destructiva si la diferencia de sus recorridos es igual a $(m+\frac{1}{2})\lambda$, siendo m un número entero.
- b) Cuando un rayo de luz que viaja a través de un vidrio emerge por la interfase con el aire, entonces no se produce ningún cambio de fase en el rayo reflejado.
- c) Un haz de luz reflejado por un material con índice de refracción mayor que el del material en el que viaja, cambia de fase por 180° o medio ciclo.
- d) El fenómeno que explica por qué un prisma de vidrio separa la luz blanca en diferentes colores es la **dispersión**.
- e) Cuando un haz luminoso monocromático ingresa desde el aire a la película de la parte A, su longitud de onda se reduce a $2/3$ de la original.
- f) Cuando una onda de luz entra en un medio de diferente densidad óptica (distinto índice de refracción) cambia su velocidad, su frecuencia y su longitud de onda.

Polarización por reflexión

Al reflejarse en una superficie luz no polarizada, puede resultar por completo polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es 0° o 90° (un ángulo normal o que pasa rozando), el haz reflejado es no polarizado. Para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la luz reflejada está parcialmente polarizada.

Se comprueba que para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado se polariza totalmente.

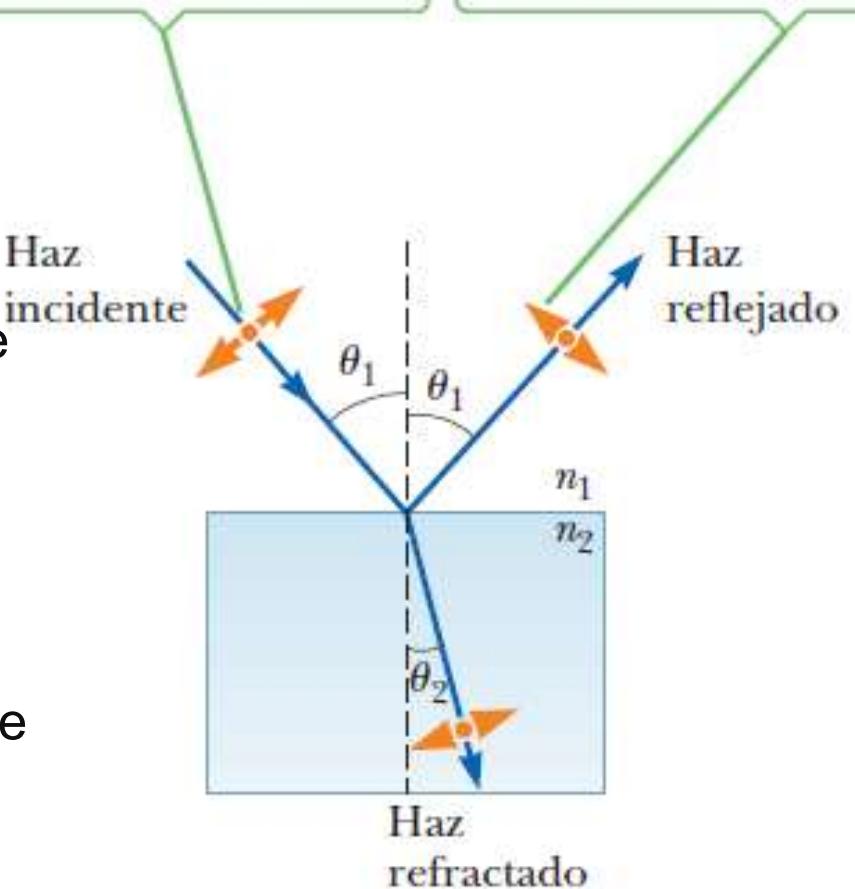
Haz de luz no polarizado que incide sobre una superficie.

Se encuentra que la componente paralela se refleja con más intensidad que las otras componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado y el haz refractado también es parcialmente polarizado.

Ahora supongamos que el ángulo de incidencia, θ_1 , varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado es 90° .

Los puntos representan las oscilaciones del campo eléctrico paralelo a la superficie reflectante y perpendicular a la página.

Las flechas representan las oscilaciones del campo eléctrico perpendicular a las representadas por los puntos.



Polarización por reflexión

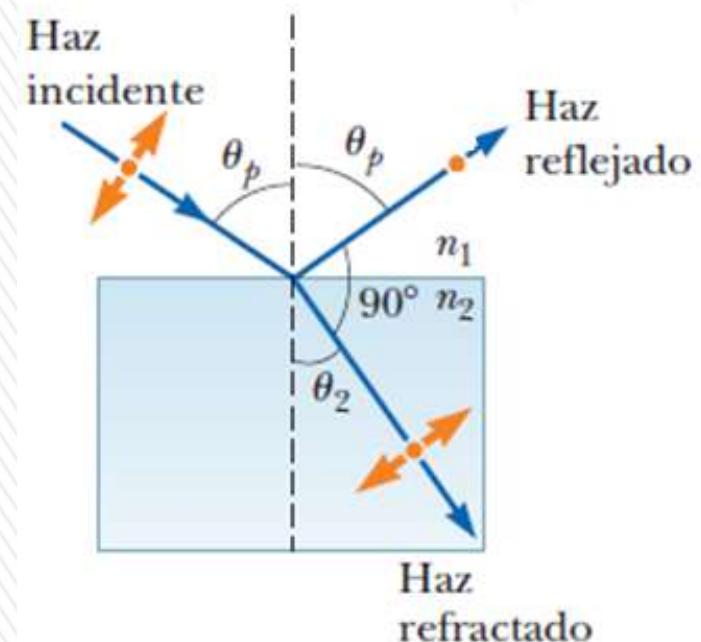
Este ángulo de incidencia particular, es el **ángulo de polarización θ_P** , y el **haz reflejado es completamente polarizado**, con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado.

$$\theta_P + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \text{ es decir: } \theta_2 = 90^\circ - \theta_P$$

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_P = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 \text{ como } n_1 = n_{\text{aire}} = 1,00 \text{ y } n_2 = n$$

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_P}{\sin \theta_2} \quad \operatorname{sen} \theta_2 = \operatorname{sen} (90^\circ - \theta_P) = \cos \theta_P$$

$$n = \frac{\sin \theta_P}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_P}{\cos \theta_P} = \tan \theta_P$$



Ley de Brewster y el **ángulo de polarización θ_P** se llama **ángulo de Brewster**

La polarización por reflexión es un fenómeno común. La luz solar que se refleja del agua, vidrio o nieve es parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector de campo eléctrico de la luz reflejada tiene un fuerte componente horizontal.

Si la incidencia no es desde el aire, sino de un medio con índice de refracción n_1 , la ley de Brewster se expresa de las siguiente forma:

Ley de Brewster

$$\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$$

EJEMPLO: EJERCICIO 6.1.10

- b) El ángulo crítico para reflexión interna total para zafiro rodeado por aire es $34,4^\circ$. Calcule el ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire.

El ángulo crítico para la reflexión interna total está dado por: $n_1 \cdot 1 = n_2 \cdot \operatorname{sen}\theta_{CRIT}$

por tanto en nuestro caso, considerando que $n_1 = n_{aire} = 1$, y que $n_2 = n_{zafiro}$:

$$n_{zafiro} = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta_{CRIT}} = \frac{1}{\operatorname{sen}34,4^\circ} = 1,7700$$

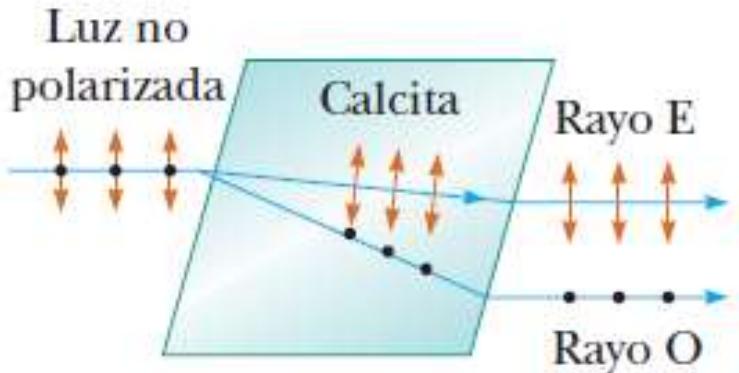
Ley de Brewster: $\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \tan^{-1}(n_{zafiro}) = \tan^{-1}(1,770) = 60,53^\circ$$

Ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire: $60,5^\circ$.



Polarización por refracción doble



La luz no polarizada que incide en un ángulo al eje óptico en un cristal de calcita se divide en un rayo ordinario (O) y un rayo extraordinario (E). Estos dos rayos están polarizados en direcciones mutuamente perpendiculares.
(El dibujo no está a escala.)

La luz también puede ser polarizada por refracción doble.

Cuando un rayo de luz incidente no polarizada entra en algunos **cristales anisótropos (calcita y cuarzo)**, que se caracterizan por tener dos índices de refracción, se divide en dos rayos llamados **rayo ordinario y extraordinario**, que se encuentran **polarizados en direcciones perpendiculares** entre sí y viajan a velocidades diferentes.

Este fenómeno se denomina **doble refracción o birrefringencia**.

Las dos magnitudes de velocidad corresponden a dos índices de refracción, n_O para el rayo ordinario y n_E para el rayo extraordinario.

Existe una dirección (**eje óptico**), en la que los rayos ordinario y extraordinario tienen la misma rapidez.

Si la luz entra a un material birrefringente en un ángulo distinto al eje óptico, los índices de refracción diferentes ocasionarán que los dos rayos polarizados se dividan y viajen en direcciones diferentes.

El índice de refracción n_O , para el rayo ordinario es el mismo en todas direcciones, mientras que el índice de refracción n_E varía con la dirección de propagación.

Polarización por refracción doble

La diferencia en rapidez para los dos rayos es máximo en la dirección perpendicular al eje óptico.

Si coloca una pieza de calcita sobre una hoja de papel y se mira a través del cristal cualquier cosa escrita sobre papel, se verá dos imágenes (formada por los dos rayos)

Algunos materiales como el vidrio y el plástico se convierten en birrefringentes cuando son sometidos a un esfuerzo.

Si se somete el plástico a un esfuerzo, las regiones de mayor esfuerzo se hacen birrefringentes y cambia la polarización de la luz que pasa a través de él.

Índices de refracción para algunos cristales de doble refracción a una longitud de onda de 589.3 nm.

Cristal	n_O	n_E	n_O/n_E
Calcita (CaCO_3)	1.658	1.486	1.116
Cuarzo (SiO_2)	1.544	1.553	0.994
Nitrato de sodio (NaNO_3)	1.587	1.336	1.188
Sulfito de sodio (NaSO_3)	1.565	1.515	1.033
Cloruro de zinc (ZnCl_2)	1.687	1.713	0.985
Sulfuro de zinc (ZnS)	2.356	2.378	0.991



Polarización por scattering (esparcimiento)

Cuando la luz incide sobre un sistema de partículas, como un gas, los electrones en el medio pueden absorber y volver a radiar parte de la luz. La absorción y re-radiación de la luz por el medio o **dispersión** (más exactamente esparcimiento, difusión o **scattering**), es lo que hace que se polarice la luz solar que llega a un observador en la Tierra.

Esto se verifica al mirar hacia arriba a través de lentes polarizados, menos luz pasa a través de ciertas orientaciones de las lentes que de otras.

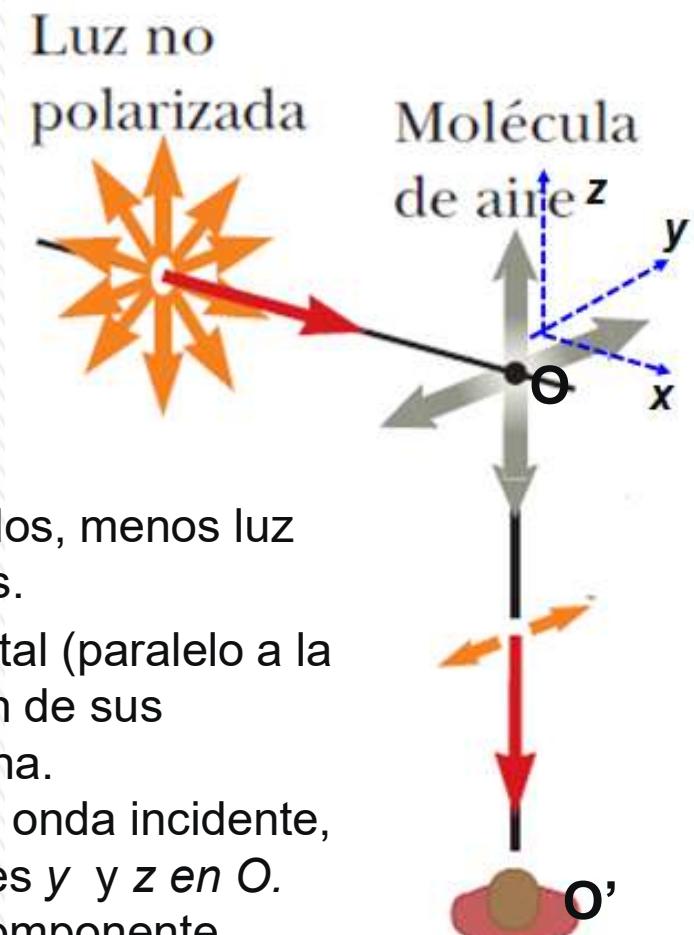
Un haz de luz solar no polarizado que viaja en dirección horizontal (paralelo a la tierra) incide sobre una molécula del aire, originando la vibración de sus electrones, que actúan como las cargas vibratorias de una antena.

Los electrones oscilan en respuesta al campo eléctrico (**E**) de la onda incidente, como dos dipolos oscilatorios cuyos ejes están en las direcciones *y* y *z* en *O*.

La componente horizontal de **E** de la onda incidente crea una componente horizontal de la vibración de las cargas, y la vertical genera una componente vertical de vibración, ya que las ondas E.M. son transversales y un dipolo oscilatorio no irradia a lo largo de su propio eje.

Un observador en *O'* no recibe ninguna radiación del dipolo en *O* que oscila en la dirección *z* y lo que llega a *O'* proviene por completamente del dipolo en *O* que oscila en la dirección *y*, y por tanto se **polariza linealmente en la dirección *y***.

Si el observador de la figura mira directo hacia arriba (perpendicularmente a la dirección original de propagación de la luz), las oscilaciones verticales de las cargas (según *z*) no emiten radiación alguna hacia él.



Polarización por scattering (esparcimiento)

Por tanto, esta persona ve una luz totalmente polarizada en la dirección horizontal (según y), como lo indican las flechas cafés Si mira en otras direcciones, la luz estaría parcialmente polarizada en la dirección horizontal.

Variaciones en el color de la luz dispersada en la atmósfera-

Cuando incide luz de diversas longitudes de onda λ sobre moléculas de gas de diámetro d , donde $d \ll \lambda$ la intensidad relativa de la luz dispersa varía en función de $1/\lambda^4$ (**scattering de Rayleigh**).

La condición $d \ll \lambda$ se cumple para la dispersión a causa de moléculas de oxígeno (O_2) y de nitrógeno (N_2) en la atmósfera tienen diámetros del orden de 0,2 nm.

Por esto las longitudes de onda corta (luz violeta) se dispersan con mayor eficiencia que las longitudes de onda larga (luz roja).

En consecuencia, cuando la luz solar es dispersada por las moléculas de gas que existen en el aire, la radiación de longitud de onda corta (violeta) se dispersa con mayor intensidad que la radiación de longitud de onda larga (rojo):

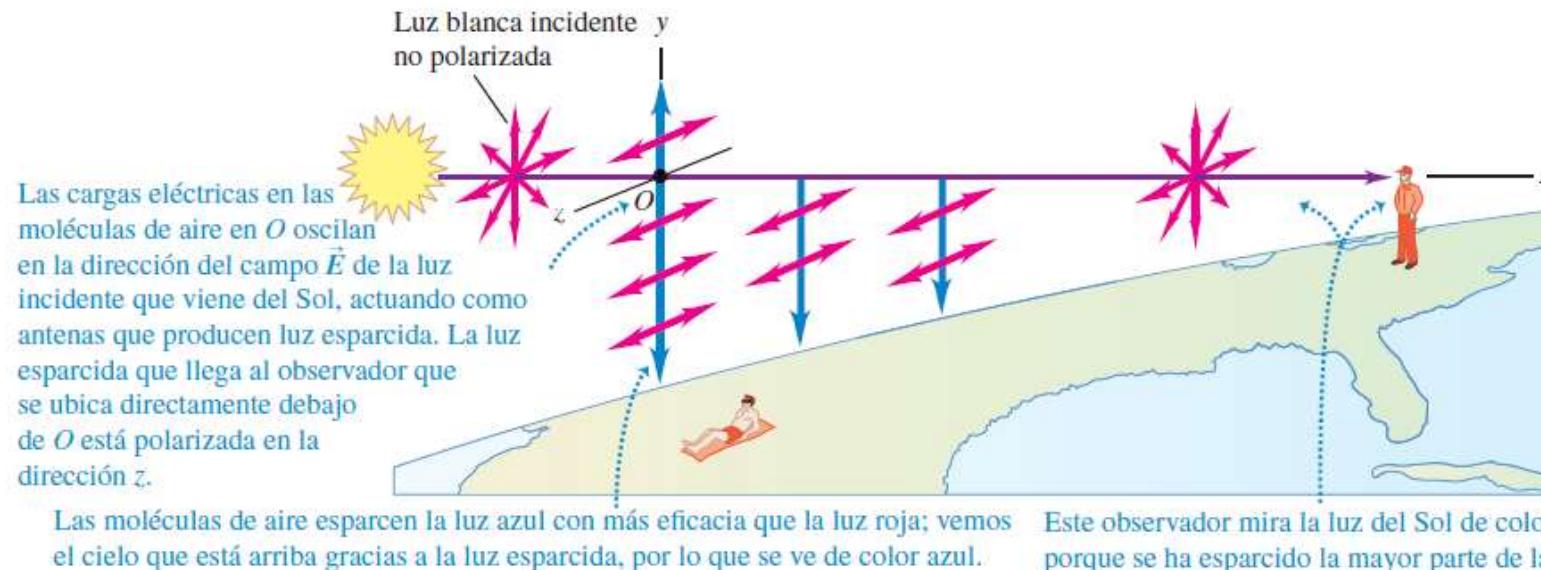
$(750 \text{ nm}/380 \text{ nm})^4 = 15$; la luz esparcida contiene 15 veces más luz violeta que roja.

Cuando mira hacia el cielo en una dirección que no sea hacia el Sol, lo que se ve es la luz dispersa, que es predominantemente violeta.

Pero, el ojo humano no es muy sensible a la luz violeta. La luz del siguiente color en el espectro, azul, se dispersa con menos intensidad que el violeta, pero los ojos son más sensibles a la luz azul que a la luz violeta.

Por esto, se observa un cielo azul.

Polarización por dispersión (esparcimiento)



Si se mira hacia el Sol en el ocaso o al amanecer, se estará viendo luz que ha pasado a través de una gran distancia de aire a través de la atmósfera.

La luz azul mayoritariamente ha sido dispersada por el aire entre el observador y el Sol. La luz que supera este recorrido a través del aire ha dispersado la mayor parte de su componente azul y, debido a eso está cargado hacia el extremo rojo del espectro; como resultado, se ven los colores rojo y naranja.

La luz blanca sin la luz azul se ve de color amarillo o rojo, lo cual explica el tono amarillo o rojizo que es frecuente ver durante el ocaso (y que percibe el observador en el extremo derecho de la figura).

En conclusión, el cielo es azul y los atardeceres son rojos debido a que la luz del cielo está parcialmente polarizada; por ello, el cielo se ve más oscuro desde ciertos ángulos que desde otros cuando se observa a través de unos anteojos Polaroid para sol.

Si la Tierra no tuviera atmósfera, el cielo se vería tan negro durante el día como durante la noche, tal como lo ve un astronauta en el espacio o en la Luna.

Polarización en animales

Muchos animales pueden ser capaces de percibir la polarización de luz, usando esa habilidad con objetivos de navegación ya que **la polarización lineal de la luz de cielo es siempre perpendicular a la dirección del sol.** Esta capacidad es muy común entre los insectos, incluyendo las abejas, que usan esta información para orientar su danza de la abeja. La sensibilidad a la polarización también ha sido observada en especies de pulpo, calamar, sepia y mantis.

El rápido cambio en la coloración de la piel de la sepia se usa para la comunicación, polarizando la luz que se refleja sobre ella.

La mantis religiosa es conocida por tener un tejido reflexivo selectivo que polariza la luz.

El ojo humano es débilmente sensible a la polarización, sin necesidad de la intervención de filtros externos.



Visión de las abejas y la luz polarizada del cielo- Los ojos de una abeja pueden detectar la polarización de la luz. Las abejas aprovechan esta capacidad para volar entre la colmena y las fuentes de alimento. Una abeja ve la luz no polarizada si observa directamente hacia el Sol, y la luz polarizada completamente si observa con un ángulo de 90° con respecto al Sol. Estas polarizaciones no se ven afectadas por la presencia de nubes, de modo que una abeja puede volar en relación con el Sol, incluso en un día nublado.

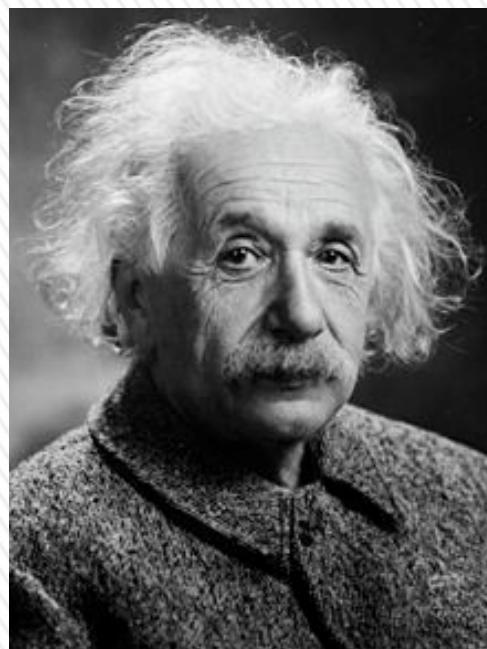
26- FÍSICA MODERNA



Max Planck

(1858-1947).

Nobel de Física 1918
Considerado como el fundador de la teoría cuántica (1900)



Albert Einstein

(1879-1955).

Nobel de Física 1921
Autor de la Teoría de la Relatividad,
explicación del efecto fotoeléctrico.



Louis Víctor de Broglie

(1892-1987).

Nobel de Física 1929
Ondas de materia,
descubrimiento ondulatorio del electrón.



Niels Bohr

(1885-1962).

Nobel de Física 1922
Estructura del átomo y mecánica cuántica

LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

Hacia fines del siglo XIX, muchos consideraban la física como una ciencia acabada. Se comprendían bien las leyes del movimiento, de la termodinámica y del electromagnetismo, y parecía que tan sólo problemas experimentales y de cálculo podrían dificultar ulteriores progresos.

Sin embargo surgieron una serie de problemas que no podían explicarse...

- 1) El problema del éter** y la incompatibilidad de la mecánica clásica y el electromagnetismo (la no invarianza de las ecuaciones de Maxwell ante las transformaciones galileanas)
- 2) Problema de la estabilidad del átomo**, en su evolución de los modelos del pastel de pasas (electrón descubierto en 1897) y el modelo planetario de Rutherford (que con los experimentos de Geiger y Marsden en 1911 bajo supervisión de Rutherford descubren el núcleo atómico).

- 3) La catástrofe ultravioleta.** De acuerdo a la teoría clásica de la radiación del cuerpo negro, de Rayleigh-Jeans se predice que la radiación crece indefinidamente con la frecuencia, lo cual contradecía los resultados experimentales.

4) El efecto fotoeléctrico-

Sin embargo transcurridos sólo 20 años del siglo XX, la descripción del mundo físico se vio profundamente conmovida.

Los problemas no resueltos en 1900 sólo resultaron explicables mediante hipótesis drásticas sin precedentes históricos.

Hacia 1912 los trabajos de Max Planck, Niels Bohr y Albert Einstein proporcionaron una nueva imagen del mundo.

CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA

Cuando se examina la emisión, absorción y dispersión de la radiación electromagnética, descubrimos un aspecto totalmente distinto de la luz. Vemos que la energía de una onda electromagnética está **cuantizada**: se emite y absorbe en forma de paquetes semejantes a partículas de energía definida, llamados **fotones o cuantos**.

La energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación. También la energía interna de los átomos está cuantizada. Para una determinada clase de átomo individual, la energía no puede tener un valor cualquiera; sólo son posibles valores discretos, llamados **niveles de energía**.

Estas consideraciones nos llevan al umbral de la **mecánica cuántica**, que *implica cambios radicales en nuestras ideas sobre la naturaleza de la radiación electromagnética y de la materia misma.*



COMPORTAMIENTO CORPUSCULAR DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

¿Cómo se produce la luz?

Heinrich Hertz produjo ondas electromagnéticas al usar oscilaciones en un circuito resonante *L-C*.

Usó frecuencias del orden de 10^8 Hz, pero la luz visible tiene frecuencias del orden de 10^{15} Hz, es decir, mucho mayores que cualquier frecuencia que pueda alcanzarse con los circuitos electrónicos convencionales.

Al final del siglo XIX, algunos físicos especulaban que las ondas en este intervalo de frecuencias podrían ser producidas por cargas eléctricas oscilantes dentro de átomos individuales.

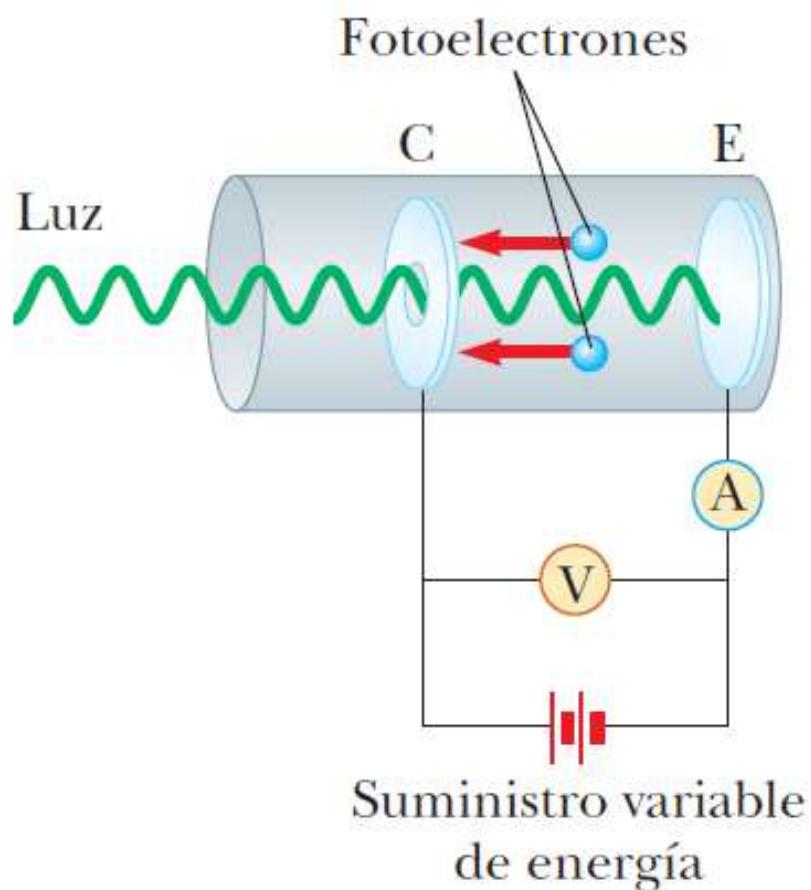
Sin embargo, sus hipótesis no explicaban algunos resultados experimentales clave.

Entre los grandes desafíos que enfrentaban los físicos en 1900 estaban cómo explicar:

*los espectros atómicos de líneas,
y el efecto fotoeléctrico*



EFEITO FOTOELÉCTRICO



En 1887 Heinrich Hertz descubre este fenómeno: la luz que incide sobre ciertas superficies metálicas provoca la emisión de electrones de éstos (**fotoelectrones**).

Un tubo de vidrio al vacío (fotocelda), contiene una placa metálica E (el emisor) conectado a la terminal negativa de una fuente de energía variable.

Otra placa metálica, C (colector), se mantiene a un potencial positivo mediante la fuente de energía.

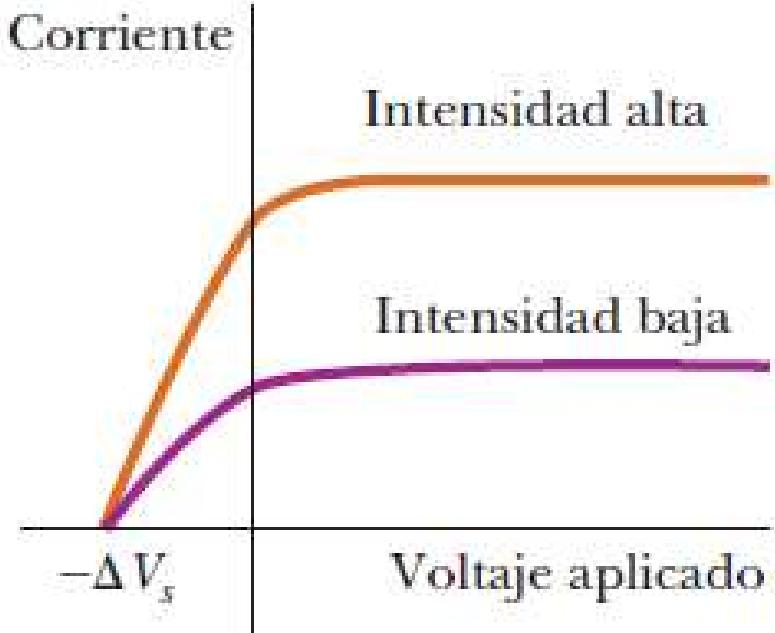
Cuando el tubo se conserva en la oscuridad, el amperímetro lee cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito.

Sin embargo, cuando la placa E se ilumina con luz que tiene una λ más corta que cierta λ particular que depende del material utilizado para formar la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que indica un flujo de cargas a través de la diferencia entre E y C.

Esta corriente surge de los fotoelectrones emitidos de la placa negativa E y recolectados en la placa positiva.

Los diversos experimentos se pueden resumir en las dos gráficas siguientes.

EFEITO FOTOELÉCTRICO



Corriente fotoeléctrica en función de la diferencia de potencial aplicada a dos intensidades de luz.

La corriente aumenta al incrementar la intensidad, pero con valores altos de V *llega a un* nivel de saturación.

Con voltajes iguales o más negativos que V_s , en donde V_s es el potencial de frenado, la corriente es igual a cero.

Resultados experimentales:

Si V se hace suficientemente grande la corriente alcanza cierto valor de saturación.

Si el voltaje se invierte, la corriente no cae a cero, lo que muestra que los electrones son emitidos con una cierta energía cinética K .

Si se alcanza cierto valor V_s (**potencial de frenado**), corriente se anula. Por tanto es una medida de la **energía cinética máxima ($K_{MÁX}$)**

$$K_{MÁX} = eV_s \quad (1)$$

El valor de $K_{MÁX}$ es independiente de la intensidad luminosa I .