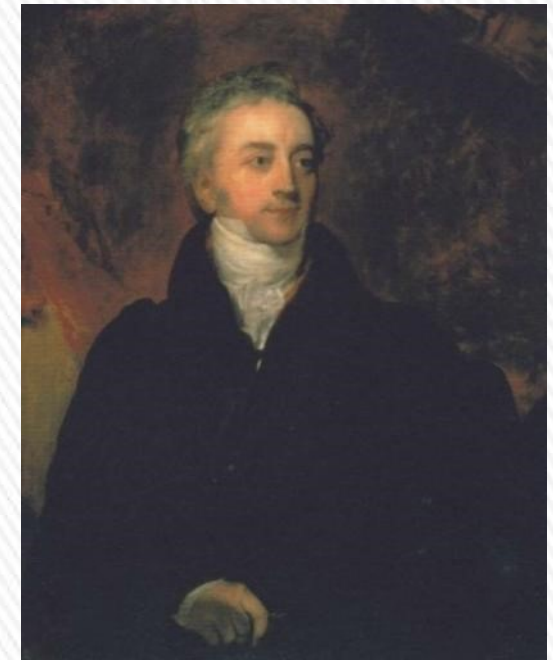


06.2-PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ II



THOMAS YOUNG
(1773 – 1829)

Los colores en muchas de las plumas de un colibrí no se deben al pigmento. La *iridiscencia que provoca los colores refulgentes que con frecuencia aparecen en la garganta y pecho del ave se debe a un efecto de interferencia causado por las estructuras de las plumas. Los colores varían dependiendo del ángulo de vista.*

Un prodigio!!!

A los 2 años leía, a los 4 había leído la Biblia dos veces, a los 14 sabía 8 idiomas!!

DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES

En principio, es posible determinar la longitud de onda de cualquier onda electromagnética, si se dispone de una rejilla con un espaciamiento entre rendijas adecuado (del orden de λ).

Los rayos X, descubiertos en el año 1895 por Wilhelm Roentgen, son ondas electromagnéticas de una longitud de onda muy reducida (del orden de 0,1 nm). Sería imposible, utilizando el proceso de corte para construir una rejilla con un espaciamiento tan pequeño.

Sin embargo, el espaciamiento atómico en un sólido es de aproximadamente 0,1nm. En el año de 1913, Max von Laue (1879-1960) sugirió que la organización normal de los átomos en un cristal pudiera funcionar como una rejilla de difracción tridimensional para los rayos X.

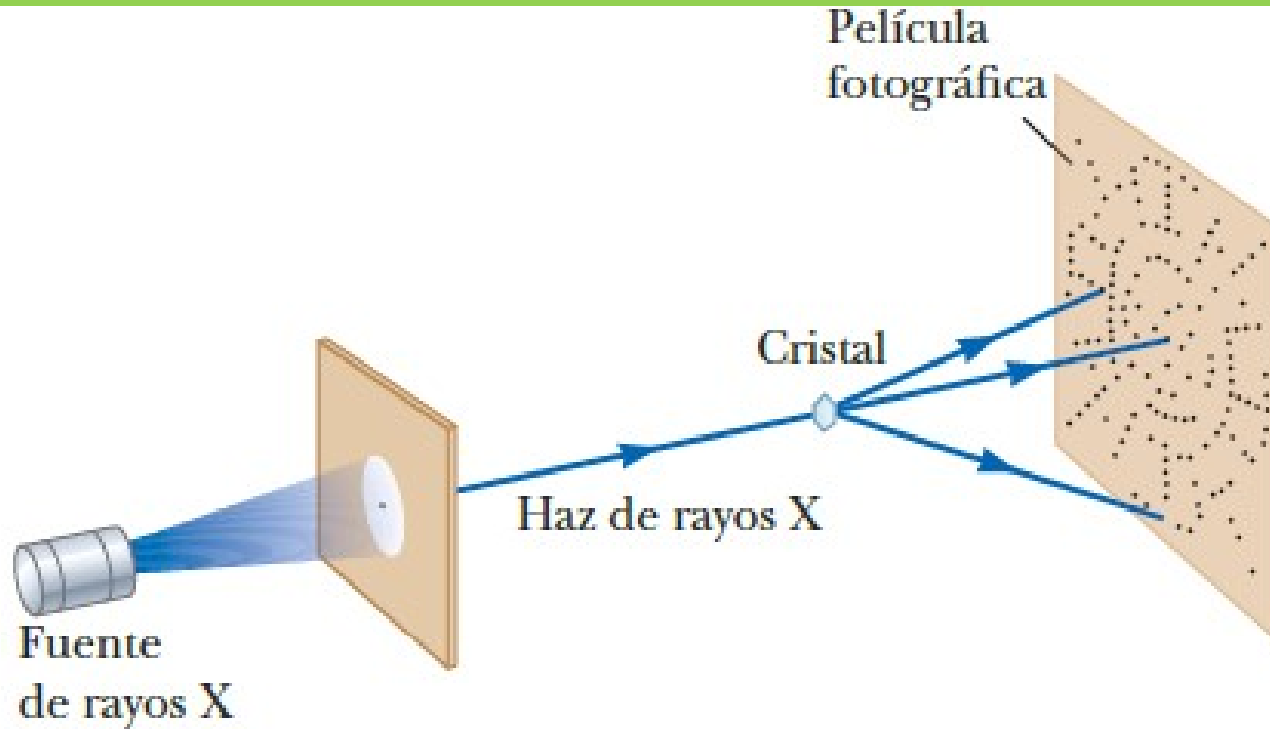
Experimentos consecutivos confirmaron esta predicción.

Los patrones de difracción de cristales son complejos debido a la naturaleza tridimensional de la estructura cristalina.

A pesar de esto, la difracción de los rayos X ha demostrado ser una técnica invaluable para aclarar estas estructuras y para un mejor discernimiento de la estructura de la materia.



DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES

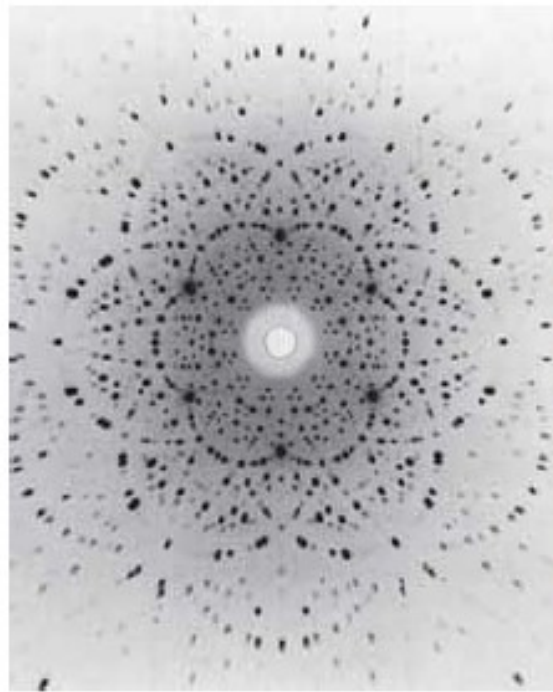


La figura muestra un arreglo experimental para la observación de la difracción de los rayos X mediante un cristal. Sobre el cristal incide un haz colimado de rayos X monocromáticos. Los rayos difractados son muy intensos en ciertas direcciones, que corresponden a la interferencia constructiva de ondas reflejadas de las capas de átomos del cristal.

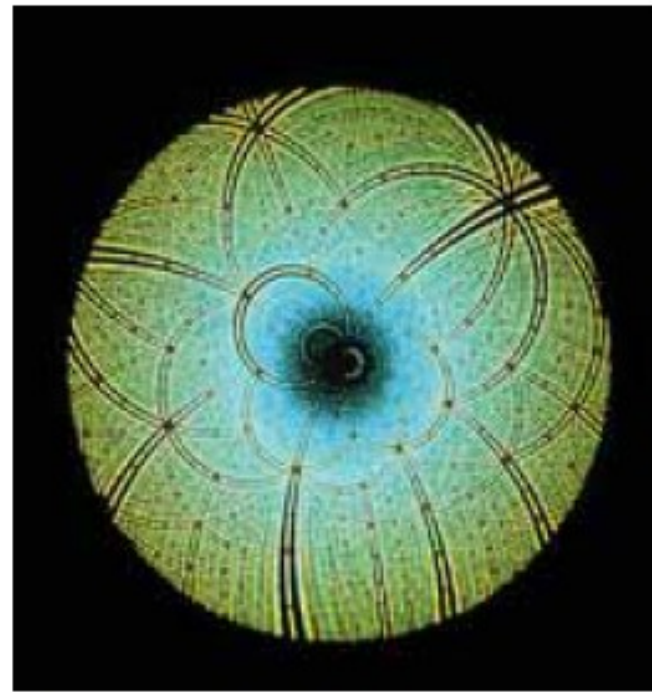
Los rayos difractados, que pueden ser detectados sobre una película fotográfica, forman un arreglo de puntos conocido como **patrón de Laue**.

Es posible deducir la estructura cristalina al analizar las posiciones relativas y las intensidades de los diversos puntos en el patrón.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



Used with permission of Eastman Kodak Company



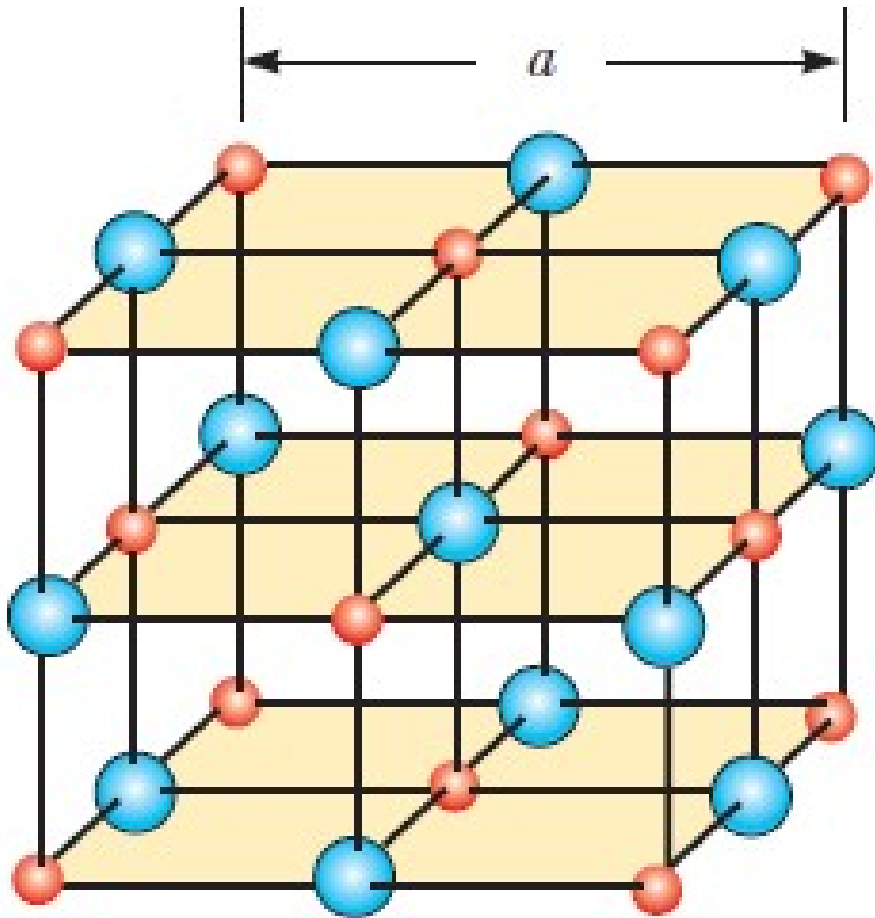
a

b

a) Un patrón Laue de un cristal simple del mineral berilio (aluminosilicato de berilio). Cada punto representa un lugar de interferencia constructiva.

b) Patrón Laue de la enzima Rubisco, producida mediante un espectro de rayos X de banda ancha. Esta enzima está presente en las plantas y forma parte de la fotosíntesis. El patrón Laue es utilizado para determinar la estructura cristalina del Rubisco.

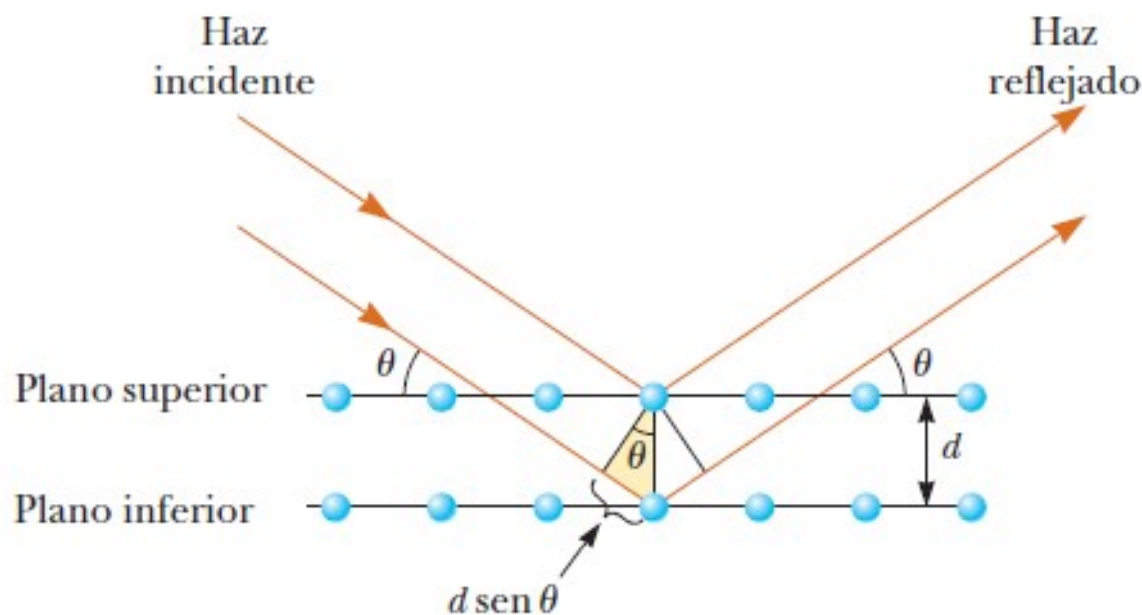
DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



La figura muestra la organización de los átomos en un cristal de cloruro de sodio (NaCl). Las esferas de color azul representan iones Cl , y las de color rojo iones Na . La longitud de la arista del cubo es igual a $a = 0,563 \text{ nm}$. Cada celda unitaria (el sólido geométrico que se repite en todo el cristal) es un cubo de arista a . *Un examen cuidadoso de la estructura del NaCl muestra que los iones yacen en planos discretos (las áreas sombreadas de la figura).*



DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



Supongamos que un rayo X incidente forma un ángulo θ con uno de los planos, El rayo puede reflejarse tanto del plano superior como del inferior.

El rayo reflejado del plano inferior se desplaza más que el rayo reflejado proveniente del plano superior.

La diferencia en la trayectoria efectiva es igual a $2d \sin \theta$.

Los dos haces se refuerzan (*interferencia constructiva*) cuando esta diferencia de trayectoria es igual a algún múltiplo entero de λ .

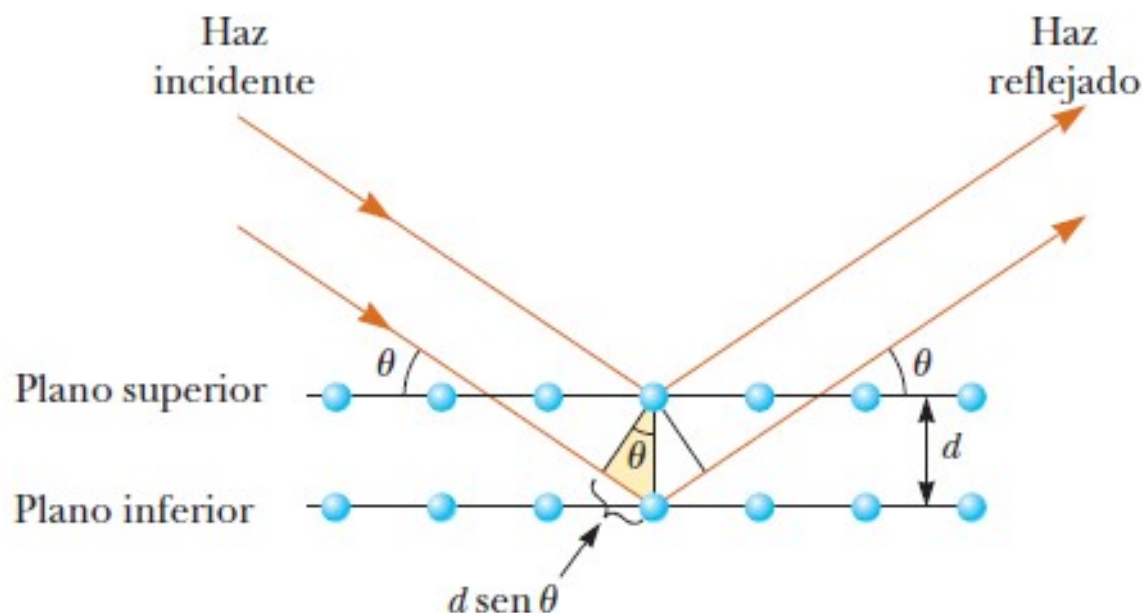
Esto también ocurre para la reflexión de toda la familia de planos paralelos.

La condición para una interferencia *constructiva* (*máximos en el rayo reflejado*) es igual a: $2d \sin \theta = m\lambda$ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ **condición de Bragg**

Esta condición se conoce como **Ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), quien fue el primero en deducir la relación.

Si se mide la longitud de onda y el ángulo de difracción, es posible calcular el espaciamiento entre los planos atómicos.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



Supongamos que un rayo X incidente forma un ángulo θ con uno de los planos, El rayo puede reflejarse tanto del plano superior como del inferior.

El rayo reflejado del plano inferior se desplace más que el rayo reflejado proveniente del plano superior.

La diferencia en la trayectoria efectiva es igual a $2d \sin \theta$.

Los dos haces se refuerzan (*interferencia constructiva*) cuando esta diferencia de trayectoria es igual a algún múltiplo entero de λ .

Esto también ocurre para la reflexión de toda la familia de planos paralelos.

La condición para una interferencia *constructiva* (*máximos en el rayo reflejado*) es igual a: $2d \sin \theta = m\lambda$ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ **condición de Bragg**

Esta condición se conoce como **Ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), quien fue el primero en deducir la relación.

Si se mide la longitud de onda y el ángulo de difracción, es posible calcular el espaciamiento entre los planos atómicos.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES

La difracción de rayos X se utilizó originalmente con cristales inorgánicos relativamente simples, se ha aplicado también con éxito espectacular a moléculas biológicas, que pueden cristalizar, tales como proteínas y ácidos nucleicos.

Por ejemplo, en los años 1950, Perutz comparó las posiciones e intensidades de miles de manchas de hemoglobina con las que se hubieran esperado con diversos modelos de la molécula.

Halló así que esta proteína portadora de oxígeno de la sangre consta de unos 10.000 átomos unidos en cuatro cadenas, todas ellas de forma helicoidal y con varios codos. Al combinar los datos de rayos X con la determinación química de la secuencia del aminoácido que forma los bloques de la molécula de hemoglobina, fue capaz de construir un modelo detallado de la localización y la distancia de los átomos.

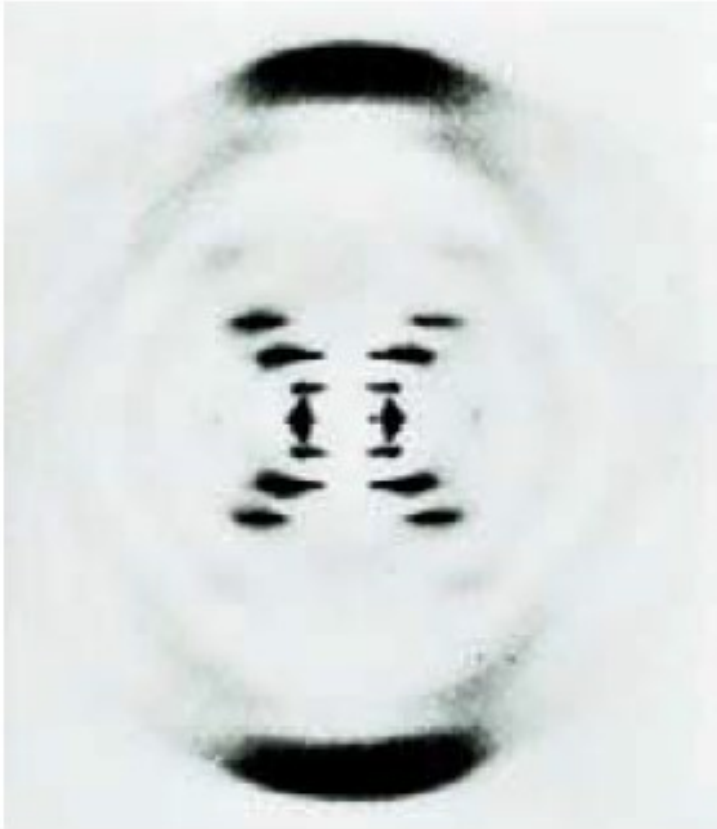
Además, Perutz demostró cómo varía la forma de la hemoglobina cuando gana o pierde oxígeno.

Otro progreso importante en biología basado en parte en estudios de rayos X fue el descubrimiento por Crick y Watson en 1953 de que el ácido nucleico ADN tiene estructura de doble hélice.

La estructura helicoidal del ADN es evidente cuando su figura de difracción se compara con la que sería de esperar a partir de una configuración de hélices.



DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



La difracción de rayos X es una herramienta experimental muy importante en la investigación de la estructura cristalina de sólidos.

La difracción de rayos X también desempeña un importante papel en el estudio de estructuras de líquidos y de moléculas orgánicas.

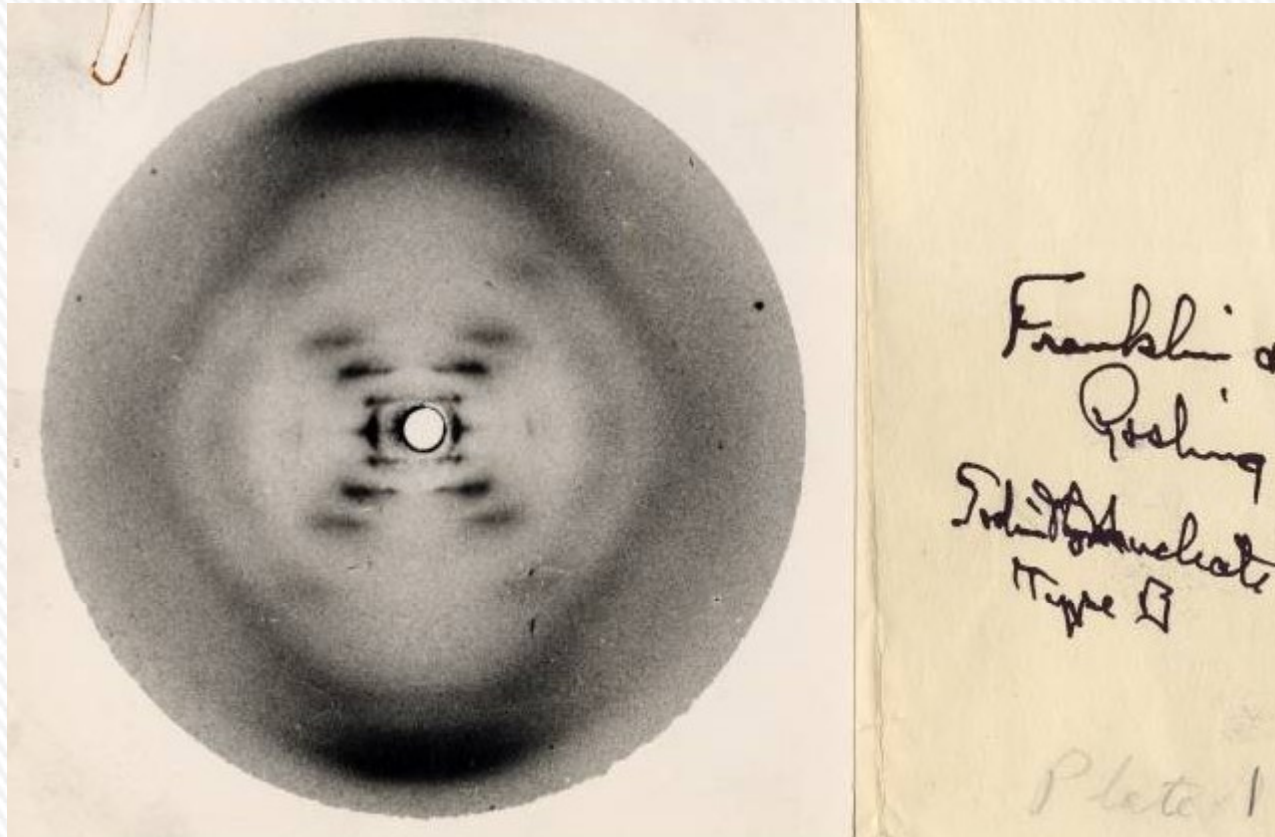
Ha sido una de las principales técnicas experimentales para establecer la estructura de doble hélice del DNA y lograr avances ulteriores en genética molecular.

La científica británica Rosalind Franklin obtuvo esta revolucionaria imagen de difracción de rayos X del DNA en 1953.

Las bandas oscuras dispuestas en cruz suministraron la primera prueba de la estructura helicoidal de la molécula de DNA.



DIFRACCIÓN DE RAYOS X MEDIANTE CRISTALES



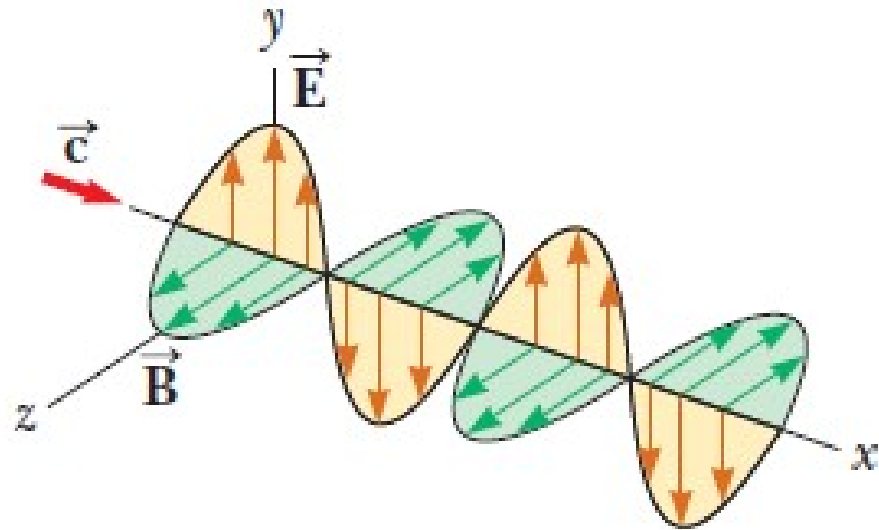
La **Fotografía 51** es el nombre dado a una imagen del ADN obtenida por Raymond Gosling, mediante difracción de rayos X en 1952 y que fue una evidencia fundamental² para identificar la estructura del ADN.

La fotografía fue tomada por Gosling, entonces estudiante de doctorado supervisado por Rosalind Franklin mientras trabajaba en el King's College de Londres.

POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

La luz es una onda electromagnética, y como todas ellas es una onda transversal.

La figura muestra que los vectores de campo eléctrico y magnético asociados con una onda electromagnética están en ángulos rectos entre sí y también con la dirección de propagación de la onda.



El fenómeno de **polarización**, es una firme evidencia de la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas.

Un haz de luz ordinario consiste en un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos o moléculas de la fuente de luz.

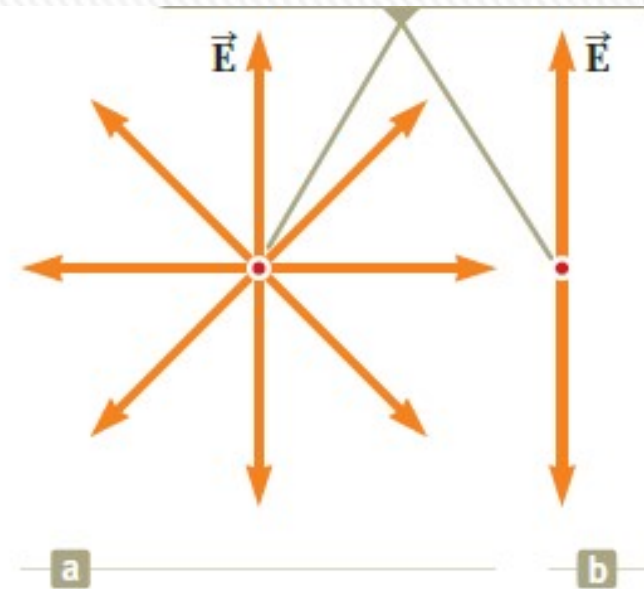
Las cargas vibratorias asociadas con los átomos actúan como pequeñas antenas. Cada átomo produce una onda con su propia orientación de \vec{E} , que corresponde a la dirección de vibración atómica.

La *dirección de polarización de cada una de las ondas individuales* se define como la dirección en la que vibra su campo eléctrico.

Sin embargo, dado que todas las direcciones de vibración son posibles, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas producidas por las fuentes atómicas individuales.

POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS LUMINOSAS

El resultado es una onda de luz **no polarizada**, representada de manera esquemática en la figura a. La dirección de propagación de la onda que se muestra en la figura es perpendicular a la página. Se observa que *todas las direcciones del vector de campo eléctrico* son de igual forma probables y yacen en un plano (como el plano de la página) perpendicular a la dirección de propagación.



Se dice que una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico resultante \mathbf{E} vibra en la misma dirección *en todo momento en un punto particular, como en la figura b.* (A veces se describe como *polarizada plana* o *sólo polarizada*.)

La onda de la figura de la diapositiva anterior es un ejemplo de una onda que está linealmente polarizada en la dirección y .

Conforme la onda se propaga en la dirección x , \mathbf{E} siempre está en la dirección y .

El plano que forma \mathbf{E} y la dirección de propagación se llama *plano de polarización de la onda*. En dicha figura el plano de polarización es el plano xy .

Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de un haz no polarizado al remover todas las ondas del haz excepto aquellas con vectores de campo eléctrico que oscilan en un solo plano. Ahora analizaremos tres procesos para hacer esto:

1) absorción selectiva, 2) reflexión y 3) dispersión.

Polarización por absorción selectiva

La técnica más común para polarizar luz es usar un material que transmita ondas que tengan vectores de campo eléctrico que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban dichas ondas con vectores de campo eléctrico que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección.

En 1932, E. H. Land descubrió un material, que llamó **Polaroid**, que polariza luz a través de absorción selectiva mediante moléculas orientadas.

Este material se fabrica en hojas delgadas de hidrocarburos de cadena larga, que se estiran durante la fabricación de modo que las moléculas se alinean. Después de que una hoja se sumerge en una solución que contiene yodo, las moléculas se convierten en buenos conductores eléctricos.

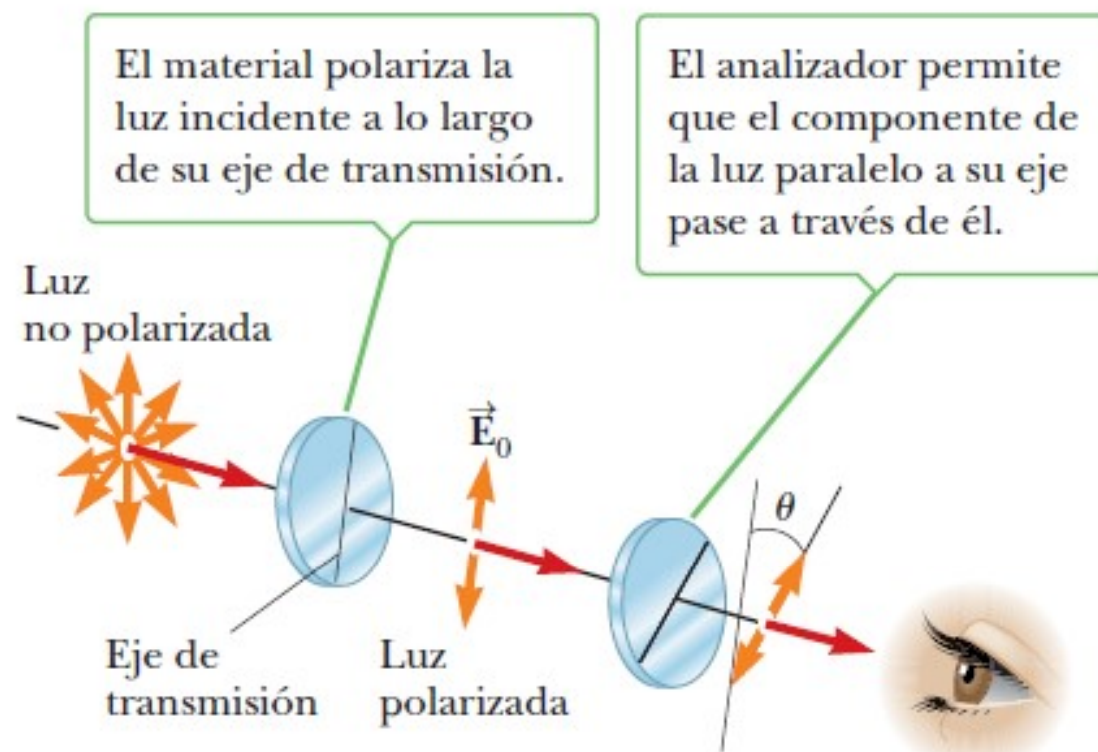
Sin embargo, la conducción tiene lugar principalmente a lo largo de las cadenas de hidrocarburos, porque los electrones de valencia de las moléculas se pueden mover con facilidad sólo a lo largo de dichas cadenas (los electrones de valencia son electrones “libres” que se pueden mover de forma fácil a través del conductor.)

Como resultado, las moléculas fácilmente *absorben luz que tiene un vector de campo eléctrico paralelo a sus longitudes y transmiten luz con un vector de campo eléctrico perpendicular a sus longitudes.*

Es común referirse a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares como el **eje de transmisión**.

En un polarizador ideal, se absorbe toda la luz con **E** perpendicular al eje de transmisión.

Polarización por absorción selectiva



Los polarizadores reducen la intensidad de la luz que pasa a través de ellos.

La figura muestra un haz de luz no polarizado que incide sobre la primera hoja polarizadora, llamada **polarizador** con el eje de transmisión como se indica.

La luz que pasa a través de esta hoja se polariza verticalmente y el vector de campo eléctrico transmitido es \vec{E}_0 .

Una segunda hoja polarizadora, llamada **analizador**, intercepta este haz con su eje de transmisión a un ángulo de θ con el eje del polarizador.

El componente de \vec{E}_0 que es perpendicular al eje del analizador se absorbe por completo. Al componente de \vec{E}_0 que es paralelo al eje del analizador, $E_0 \cos \theta$, se le permite pasar a través del analizador.

Polarización por absorción selectiva

Como la intensidad del haz transmitido varía como el cuadrado de su amplitud E , se concluye que la intensidad del haz (polarizado) transmitido a través del analizador varía como:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (\text{Ley de Malus})$$

I_0 es la intensidad de la onda polarizada incidente sobre el analizador.

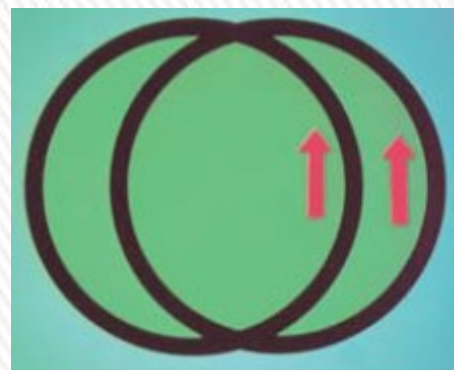
La ley de Malus, se aplica a cualesquiera dos materiales polarizadores que tienen ejes de transmisión a un ángulo θ uno con otro.

De acuerdo a esta ecuación la intensidad transmitida es un máximo cuando los ejes de transmisión son paralelos ($\theta = 0$ o 180°) y es un mínimo (absorción completa por el analizador) cuando los ejes de transmisión son mutuamente perpendiculares.

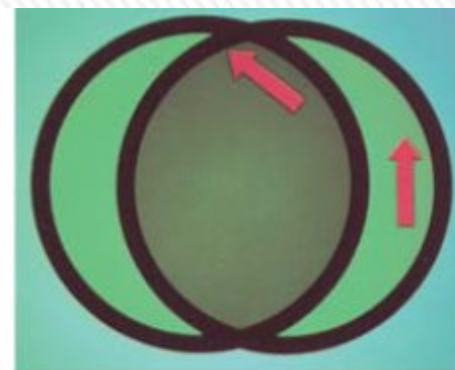
Esta variación en intensidad transmitida a través de un par de hojas polarizadoras se muestra la figura.

Cuando luz no polarizada con intensidad I_0 se envía a través de un solo polarizador ideal, la luz linealmente polarizada que se transmite tiene intensidad $I_0/2$.

Este hecho resulta de la ley de Malus, porque el valor promedio de $\cos^2 \theta$ vale $1/2$.



a)



b)



c)

Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada es 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.

Sin embargo, para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la luz reflejada es polarizada en cierta medida.

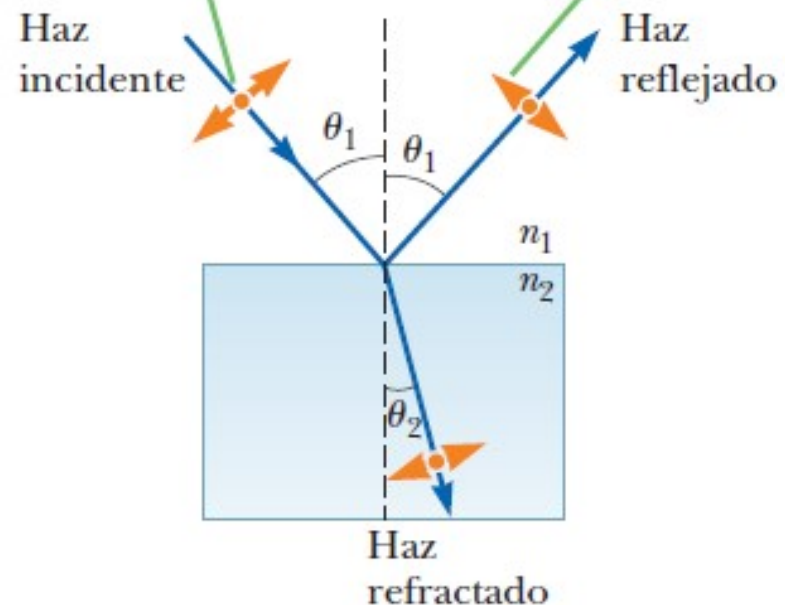
Para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado se polariza totalmente.

Sea un haz de luz no polarizado que incide sobre una superficie.

El haz se puede describir mediante dos componentes de campo eléctrico, uno paralelo a la superficie (representado mediante puntos) y el otro perpendicular al primer componente y a la dirección de propagación (representados mediante flechas anaranjadas).

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

Se encuentra que el componente paralelo se refleja con más intensidad que los otros componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado.

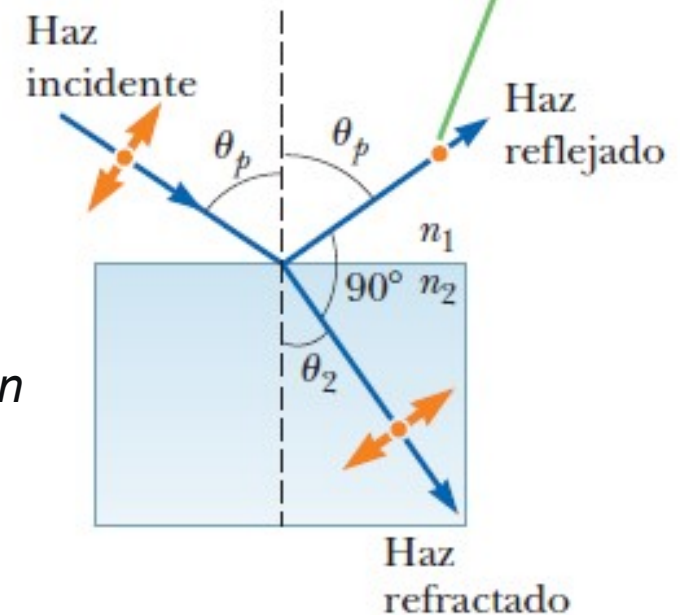
Además, el haz refractado también es parcialmente polarizado.

Ahora suponga que el ángulo de incidencia, θ_1 , varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado es 90° . A este ángulo de incidencia particular, llamado **ángulo de polarización θ_p** , **el haz reflejado es completamente polarizado**, con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado.

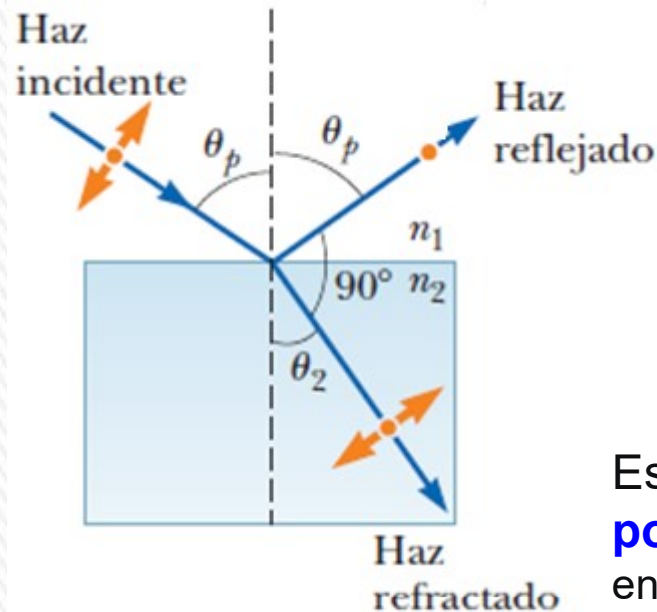
Una expresión que relaciona el ángulo de polarización con el índice de refracción de la superficie reflejante se puede obtener usando la figura: $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$ es decir: $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$
Al usar la ley de Snell y tomar $n_1 = n_{\text{aire}} = 1,00$ y $n_2 = n$

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

Los electrones en la superficie oscilan en la dirección del rayo reflejado (perpendicular a los puntos y paralelo a la flecha azul) no envían la energía en esta dirección.



Polarización por reflexión



$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_p}{\sin \theta_2}$$

Como $\sin \theta_2 = \sin (90^\circ - \theta_p) = \cos \theta_p$ la expresión para n se puede escribir:

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

Esta ecuación se llama **ley de Brewster** y el **ángulo de polarización** θ_p a veces se llama **ángulo de Brewster** en honor a su descubridor, sir David Brewster (1781-1868).

Como n varía con la longitud de onda para una sustancia dada, el ángulo de Brewster también es una función de la longitud de onda.

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.

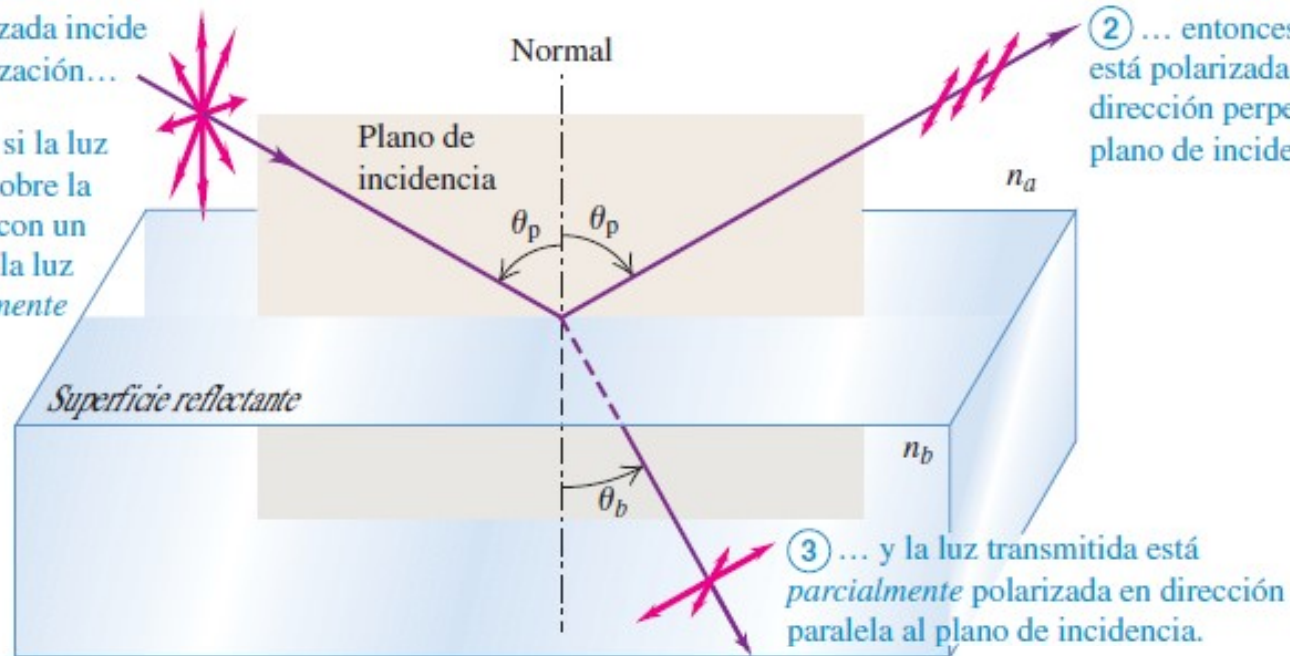
Si la incidencia no es desde el aire, sino de un medio con índice de refracción n_1 , la ley de Brewster se expresa de la siguiente forma:

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

Cuando la luz incide en una superficie reflectante en el ángulo de polarización, la luz reflejada está linealmente polarizada.

① Si la luz no polarizada incide en el ángulo de polarización...

④ Alternativamente, si la luz no polarizada incide sobre la superficie reflectante con un ángulo distinto de θ_p , la luz reflejada está *parcialmente* polarizada.



② ... entonces, la luz reflejada está polarizada al 100% en dirección perpendicular al plano de incidencia...

③ ... y la luz transmitida está *parcialmente* polarizada en dirección paralela al plano de incidencia.

Los anteojos de sol utilizan filtros polarizadores, actuando por reflexión.

Cuando la luz solar se refleja en una superficie horizontal, el plano de incidencia es vertical, y la luz reflejada contiene una preponderancia de luz que está polarizada en la dirección horizontal.

Cuando la reflexión ocurre en una carretera asfáltica lisa o en la superficie de un lago, produce una reverberación indeseable. La visión mejora si se elimina esa reverberación.

El fabricante hace que el eje de polarización del material de los anteojos sea vertical, por lo que muy poca de la luz polarizada horizontalmente que se refleja en la carretera se transmite a los ojos.

Los anteojos también reducen la intensidad general de la luz transmitida a un poco menos del 50% de la intensidad de la luz incidente no polarizada.

Polarización por dispersión

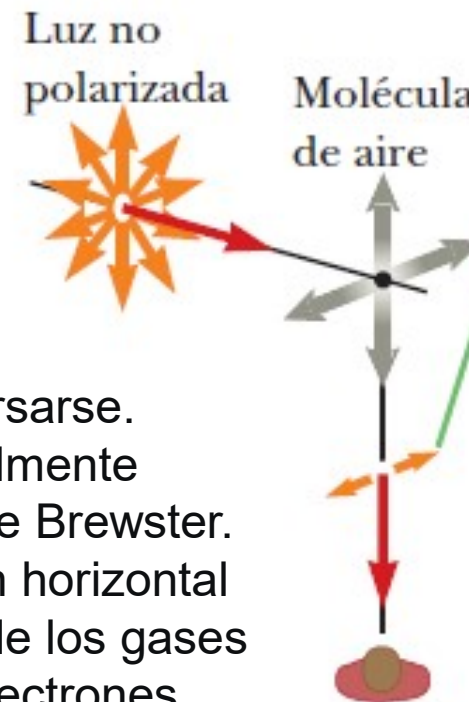
Cuando la luz incide sobre un sistema de partículas, como un gas, los electrones en el medio pueden absorber y volver a radiar parte de la luz.

La absorción y re-radiación de la luz por el medio, llamada **dispersión** (más exactamente se debería hablar de **scattering**), es lo que hace que se polarice la luz solar que llega a un observador en la Tierra directa sobre su cabeza. Esto se puede observar al mirar directamente hacia arriba a través de un par de lentes para el Sol hechas de vidrio polarizado.

Menos luz pasa a través de ciertas orientaciones de las lentes que de otras.

La figura muestra cómo la luz solar se polariza al dispersarse. El fenómeno es similar al de la creación de una luz totalmente polarizada al reflejarse de una superficie en el ángulo de Brewster. Un haz de luz solar no polarizado que viaja en dirección horizontal (paralelo a la tierra) incide sobre una molécula de uno de los gases que conforman el aire, originando la vibración de sus electrones. Estas cargas en vibración actúan como las cargas vibratorias de una antena.

La luz dispersada viaja perpendicular a la luz incidente y está polarizada en un plano, porque las vibraciones verticales de las cargas en la molécula de aire no envían la luz en esta dirección.



Polarización por dispersión

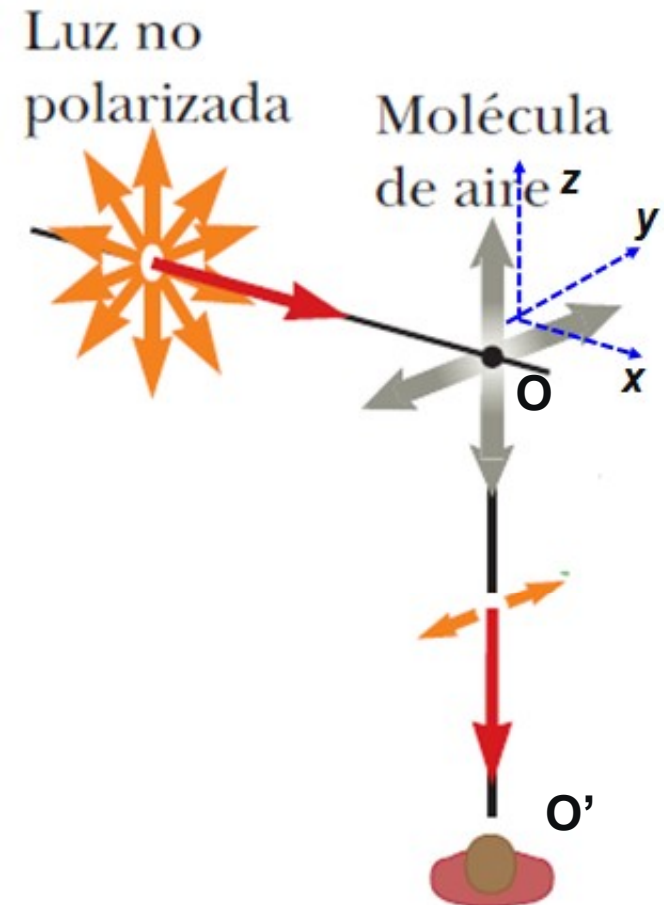
Los electrones que se encuentran en la molécula oscilan en respuesta a las componentes eléctricas de la onda incidente, siendo su movimiento equivalente a dos dipolos oscilatorios cuyos ejes están en las direcciones y y z en O .

En las ondas electromagnéticas transversales, un dipolo oscilatorio no irradia a lo largo de su propio eje. Así, un observador en O' no recibiría ninguna radiación del dipolo en O que oscila en la dirección z . La radiación que llega a O' provendría por completo del dipolo en O que oscila en la dirección y y se polarizaría linealmente en la dirección y .

Por tanto la componente horizontal del vector del campo eléctrico de la onda incidente crea una componente horizontal de la vibración de las cargas, y la componente vertical del vector da como resultado una componente vertical de la vibración.

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.

Por tanto, esta persona verá una luz totalmente polarizada en la dirección horizontal (según y), como lo indican las flechas cafés



Polarización por dispersión

Si mirara en otras direcciones, la luz estaría parcialmente polarizada en la dirección horizontal.

Variaciones en el color de la luz dispersada en la atmósfera se pueden entender como sigue.

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, cuyos diámetros son cercanos a 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.

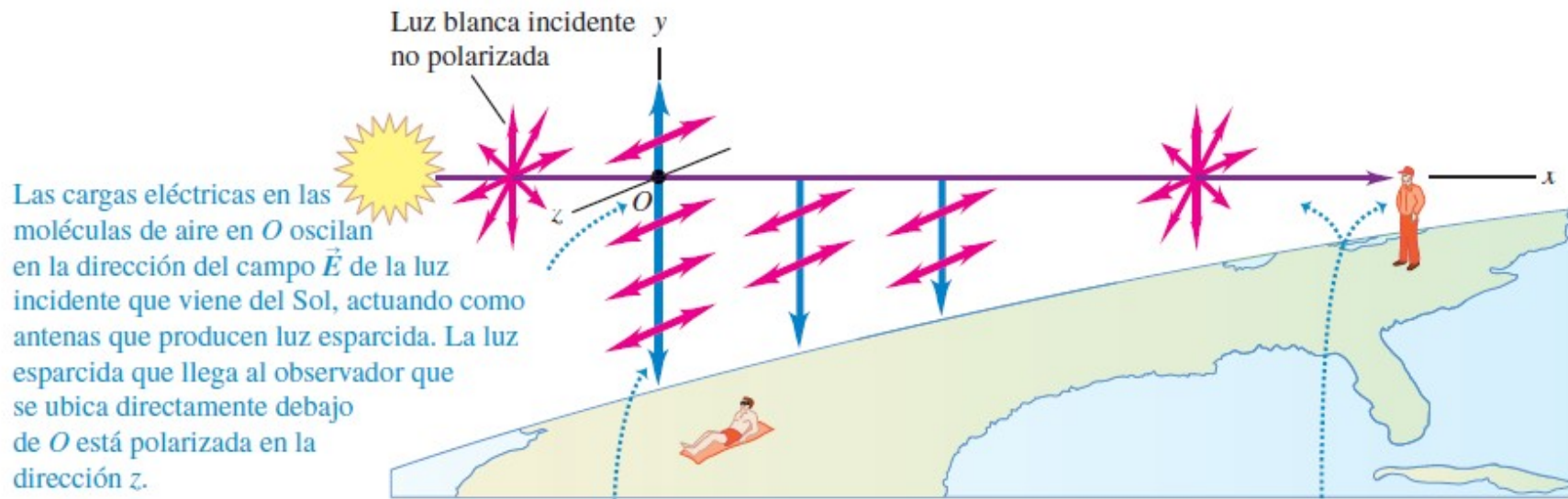
Cuando mira hacia el cielo en una dirección que no sea hacia el Sol, lo que se ve es la luz dispersa, que es predominantemente violeta.

Sin embargo, el ojo humano no son 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



Las moléculas de aire esparcen la luz azul con más eficacia que la luz roja; vemos el cielo que está arriba gracias a la luz esparcida, por lo que se ve de color azul.

Este observador mira la luz del Sol de color rojizo porque se ha esparcido la mayor parte de la luz azul.

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

La mayor parte de la luz azul ha sido dispersada por el aire entre usted 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.

Polarización por dispersión

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.

Cuando miramos el cielo durante el día, la luz que se observa es la del Sol que ha sido absorbida y vuelta a irradiar en diferentes direcciones.

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.

Las nubes contienen una gran concentración de gotas de agua o cristales de hielo suspendidos, que también esparcen la luz. Como tal concentración es elevada, la luz que pasa a través de una nube tiene mucho más oportunidades de esparcirse que la luz que pasa a través de un cielo despejado.

En consecuencia, luz de *todas las longitudes de onda terminan por* esparcirse fuera de la nube y, por eso, la nube es de color blanco.

La leche se ve blanca por la misma razón: el esparcimiento se debe a los glóbulos de grasa de la leche.



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.