

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS: LA LUZ

1. LA NATURALEZA DE LA LUZ

La naturaleza de la luz suscitó, desde tiempos remotos, la que quizás sea la mayor controversia de la historia de la ciencia. Algunos hechos relativos a la luz son conocidos desde la Antigüedad, como su propagación rectilínea en un medio homogéneo, deducida a partir de la formación de sombras, y la ley de la reflexión. Ambos aspectos aparecen ya citados en la obra de **Euclides**, *Catóptrica* (S.III a.C).

El desarrollo de la óptica como aplicación práctica de los fenómenos luminosos fue previo al conocimiento de la propia naturaleza de la luz. Así, ya en 1608 se construye el primer telescopio refractor, basado en el fenómeno de la refracción, cuyas leyes no formuló Snell hasta más tarde. Las leyes de la refracción también fue deducida por el filósofo francés **René Descartes** en su obra *La Dioptrique*. En dicho tratado, Descartes enuncia su teoría corpuscular de la luz, según la cual, los cuerpos luminosos emiten partículas pequeñas de luz que se mueven en línea recta a gran velocidad.

En el siglo XVII se abren pasos a dos concepciones contrapuestas: la teoría **corpuscular** de la luz, defendida sobre todo por **Newton** y sus seguidores, y la teoría **ondulatoria**, defendida por **Hooke** y enunciada posteriormente por **Christian Huygens**. ¿Qué hechos avalaban una u otra hipótesis?

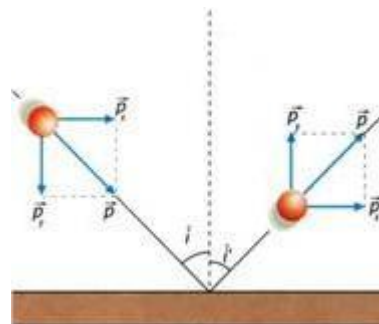
1.1. TEORÍA CORPUSCULAR DE LA LUZ: Debido al gran prestigio de Newton y a la sencillez de sus ideas, la teoría corpuscular contó con el apoyo de la mayor parte de los científicos de la época. Permitía explicar:

- La propagación rectilínea de la luz en un medio homogéneo.
- La formación de sombras bien definidas.
- Los fenómenos de reflexión y refracción.
- El fenómeno de dispersión y la existencia de distintos colores.

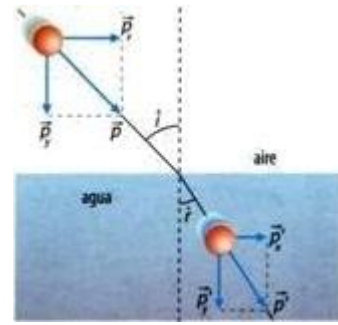
Según la teoría corpuscular, los corpúsculos luminosos, al chocar con la retina del ojo, producen la visión y, debido a su pequeña masa y a su gran velocidad, se propagan en línea recta.

Los distintos colores se debe a la existencia de corpúsculos luminosos de diferentes masas. Cada tipo de corpúsculo es responsable de un color.

La reflexión se produce como consecuencia de los choques elásticos de las partículas de la luz con la superficie de objetos iluminados. Si no existen rozamientos, la componente de la velocidad tangente a la superficie no varía, pero la componente normal a la superficie se invierte debido a la enorme diferencia de masa entre las partículas de luz y del objeto, siendo el ángulo de incidencia, igual al de reflexión.



En la refracción, para explicar el cambio de velocidad que tiene lugar en la superficie de separación de ambos medios, es necesario admitir la existencia de fuerzas atractivas que actúan entre las partículas de luz y la materia. Así, en las superficies aire-agua o aire-vidrio, según Newton, aumenta la componente normal de la velocidad, manteniendo constante la componente paralela. En consecuencia, la velocidad debería ser mayor en el agua y en el vidrio que en el aire, cosa que no ocurre.



Esta teoría no podía explicar fenómenos como la interferencia y la difracción de ondas, ni por qué unas luces se refractan más que otras.

1.2. TEORÍA ONDULATORIA DE LA LUZ: Christian Huygens, contemporáneo de Newton, basándose en ideas previas de Robert Hooke, propuso que la luz se compone de minúsculas ondas del mismo tipo del sonido. Como las ondas necesitan un medio material para propagarse, supuso la existencia de un medio, **el éter luminífero**, que llena todo, incluso el espacio vacío. La teoría ondulatoria permite explicar:

- La propagación tridimensional de la luz desde un foco puntual.
- La reflexión y la refracción.
- La difracción, y más tarde la interferencia.

Newton rechaza esta teoría al no existir pruebas de la difracción de la luz. Si la luz fuese una onda, debía cambiar de dirección, bordeando obstáculos. Su trayectoria no sería rectilínea y no existirían sombras nítidas.

Debido al gran prestigio de Newton, esta teoría fue olvidada durante más de cien años, incluso cuando la propagación rectilínea y los fenómenos de difracción quedaban plenamente justificados por la pequeña longitud de onda de las ondas luminosas.

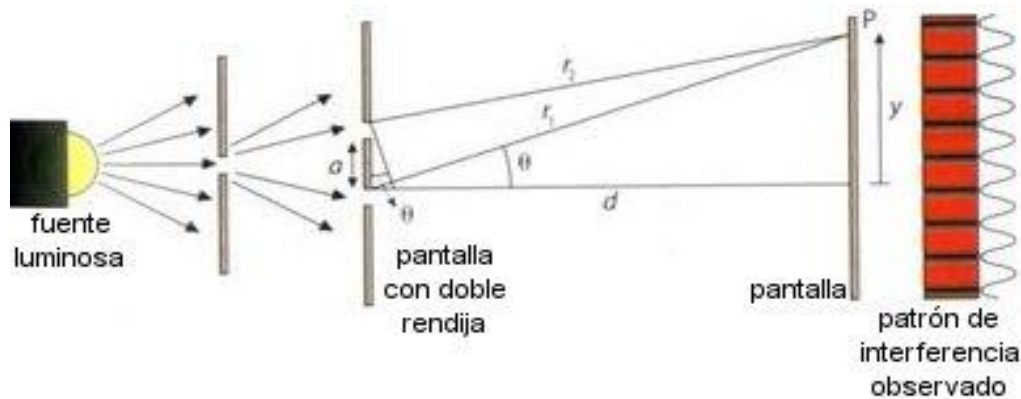
No es hasta principios del siglo XIX, cuando se producen varios hechos experimentales que propician la reaparición de la teoría ondulatoria.

Experimento de Young de la doble rendija (1801). Thomas Young demostró en un experimento de interferencia, ya clásico, que la luz producía fenómenos de interferencia.

Para que se produzca un patrón de interferencia observable entre luces procedentes de distintos focos, estas deben ser **coherentes**, es decir, deben tener la misma frecuencia, amplitud y una diferencia de fase constante.

En general, las luces de dos focos distintos producidas por las emisiones aleatorias de los átomos, nunca serán coherentes, lo cual explica la dificultad que entrañaba la observación de interferencias luminosas.

Sin embargo, existe un método para conseguir dos focos coherentes que consiste en dividir en dos la luz procedente de un foco luminoso al hacerla pasar por dos rendijas.



Young hizo pasar la luz procedente de un único foco luminoso por dos rendijas estrechas (de pequeño grosor en comparación con la longitud de onda de la luz), separadas entre sí una distancia a . De este modo consiguió dos focos coherentes y pudo observar un patrón de interferencia, es decir, una secuencia alternada de zonas iluminadas (interferencia constructiva) y oscuras (interferencia destructiva).

La interferencia resulta constructiva cuando la diferencia de fase entre las ondas que se superponen es $0, 2\pi, 4\pi \dots$, mientras que resulta destructiva cuando esa diferencia es π , o un múltiplo impar de π . Esta diferencia de fase puede originarse por la diferencia de caminos recorridos por las ondas. Así, la interferencia será constructiva si la diferencia de caminos es un número entero de longitudes de onda.

Como se observa en la imagen, las condiciones del experimento de Young eran:

- La distancia entre las pantallas (d) es grande en comparación con la distancia entre las rendijas (a).
- Los ángulos correspondientes a los máximos son realmente muy pequeños, por lo que el patrón de interferencia se produce en las proximidades del centro de la pantalla.

Supongamos que en el punto P se produce una interferencia constructiva. Se cumplirá:

$$r_2 - r_1 = n\lambda$$

Como se ve en la figura: $r_2 - r_1 = a \operatorname{sen}\theta \cong a \operatorname{tg}\theta \cong a \frac{y}{d} \rightarrow n\lambda = a \frac{y}{d} \rightarrow y = \frac{d}{a} n\lambda$ donde y es la **distancia de los máximos de intensidad al centro de la pantalla**.

El experimento de Young demostró que la luz era una onda. Todas las ondas conocidas en el momento, necesitaban de un medio material para su propagación, que en el caso de la luz era el éter luminífero.

Velocidad de propagación de la luz. Desde un primer momento se aceptaba que la velocidad de propagación de la luz debía ser muy grande, incluso llegó a pensarse que era infinita.

Método de Römer (1676): La primera medición aproximada de la velocidad de la luz se debe al astrónomo danés Olaf Römer. En el siguiente enlace tienes una descripción detallada del método empleado por Römer que sobrepasa los objetivos del tema.

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm#Procedimiento>

de

Roemer.

El valor de la velocidad que obtuvo Römer es: $2,14 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Método de Fizeau (1849): El enorme valor de la velocidad de la luz establecido por Römer permitía extraer dos conclusiones: La velocidad de la luz es finita e iba a ser tremendamente difícil diseñar un experimento en un laboratorio terrestre para medirla.

<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz17.htm>

En el enlace anterior tienes una descripción del método utilizado por Fizeau para la determinación de la velocidad de la luz. El valor establecido por este método fue: $3,13 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, mucho más aproximado al valor establecido en la actualidad que el valor de Römer.

Valor actualmente aceptado de la velocidad de la luz: El valor actualmente aceptado para la propagación de la luz en el vacío, que se designa con la letra c , es:

$c = 2,997924562 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \pm 1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, valor que aproximaremos en los cálculos por $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

1.3. SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

Oersted, demostró experimentalmente que una corriente eléctrica da lugar a un campo magnético. Ampère dio forma matemática a lo anterior con la ley que lleva su nombre. Faraday, por su parte, señalaba el fenómeno inverso, como el cambio en el flujo magnético a través de una espira daba lugar a la creación de corriente. Ampère y Faraday unificaron los fenómenos eléctricos y magnéticos al considerar que los fenómenos eléctricos y magnéticos eran manifestaciones de la carga eléctrica.

En 1865, **James Clerk Maxwell** publicó su teoría dinámica del campo electromagnético. Toda su teoría se resumía en cuatro ecuaciones:

Ecuaciones de Maxwell

Forma diferencial		Forma integral
$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Ley de Gauss (Coulomb)	$\oiint E \cdot dS = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	Inexistencia de Monopolos	$\oiint B \cdot dS = 0$
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Ley de Faraday Lenz.. Henry	$\oint E \cdot dl = -\frac{d\Phi_M}{dt}$
$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	Ley de Ampere - Maxwell	$\oint B \cdot dl = \mu_0 I + \frac{d}{dt} Q = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$

De su teoría se establecen dos conclusiones:

- Un campo magnético variable con el tiempo induce un campo eléctrico proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético y de dirección perpendicular a dicho campo magnético.
- Un campo eléctrico variable con el tiempo induce un campo magnético proporcional a la rapidez con que cambia el flujo eléctrico y de dirección perpendicular a dicho campo eléctrico.

Así como la primera conclusión tenía su base experimental en el fenómeno de inducción, la segunda era establecida por Maxwell a partir de la creencia de que la relación entre el campo magnético y el eléctrico no podía ser unívoca, sino que debía ser **simétrica**. Para ello introdujo el primer término del segundo miembro (corriente de desplazamiento), en la ley de Ampère, que a partir de entonces se conoce como ley de Ampère-Maxwell.

La consecuencia de esta teoría es clara: **una carga eléctrica que posee un movimiento acelerado crea una perturbación electromagnética**.

La razón es que una carga con movimiento acelerado crea un campo eléctrico variable que da lugar a un campo magnético variable, que a su vez, produce un campo eléctrico, y así sucesivamente. En consecuencia, **la perturbación electromagnética se propaga en forma de onda**.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una onda electromagnética es la propagación de la perturbación periódica de los campos eléctrico y magnético. Las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y otro magnético cuyas intensidades varían de forma periódica. Los dos campos vibran, en fase, en planos perpendiculares entre sí, y perpendiculares a la dirección de propagación. Son por tanto, **ondas transversales**.

<https://www.youtube.com/watch?v=YjifA07slss&feature=youtu.be>

En el enlace anterior, se explica la producción de ondas electromagnéticas.

Las ecuaciones del campo eléctrico y magnético son las de una onda armónica:

$$E = E_0 \text{sen}(\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \text{sen}(\omega t - kx)$$

Donde ω , la frecuencia angular, y k , el número de ondas tienen el mismo significado que el visto para ondas armónicas. La relación entre los módulos de los campos, en la misma posición y tiempo es: $B=E/c$ donde c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética y cuyo valor se obtiene a partir de las ecuaciones de Maxwell.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La coincidencia de este valor con el deducido por Fizeau para la luz, llevó a Maxwell a la conclusión de que la **luz es una perturbación electromagnética**. De esta forma, Maxwell unificó el electromagnetismo y la óptica.

La sorprendente predicción de Maxwell acerca de la existencia de las ondas electromagnéticas se vio confirmada poco después por **Hertz**, que consiguió producir y detectar las ondas de radio que en su honor se denominan **ondas hertzianas**.

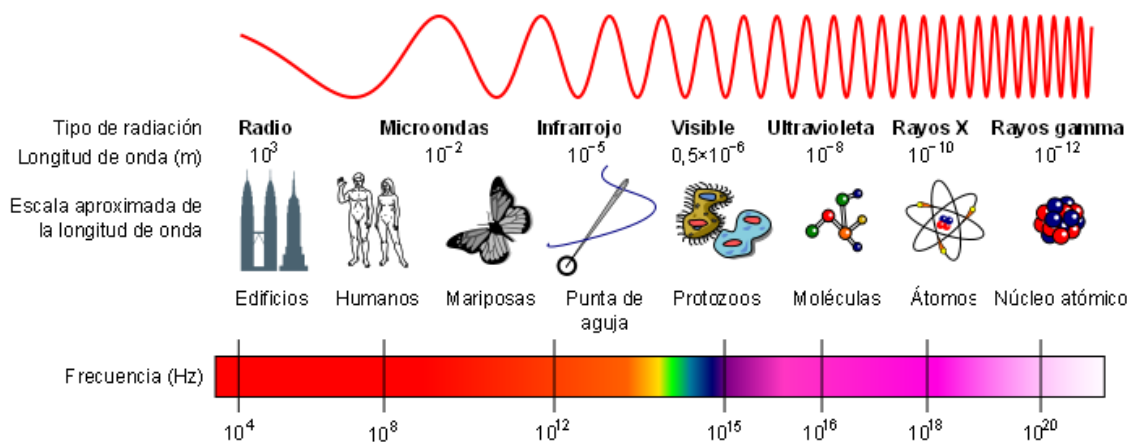
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Todas las ondas electromagnéticas tienen la misma naturaleza. Son ondas transversales formadas por un campo eléctrico y otro magnético oscilantes, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. Solo se diferencian por su frecuencia y longitud de onda.

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las radiaciones de distinta frecuencia en que puede descomponerse la radiación electromagnética.

Dado que la velocidad de propagación de todas ellas en el vacío es la misma, la frecuencia y longitud de onda están relacionadas por la ecuación: $c = \lambda f$

El espectro electromagnético se divide tradicionalmente en siete zonas. Sin embargo, esta división no presenta límites nítidos.



Ondas de radio: Son ondas electromagnéticas producidas por un circuito oscilante. Su longitud de onda está comprendida entre unos pocos centímetros (televisión y onda corta), hasta varios kilómetros (onda larga de radio). Se emplean en radio y televisión. Sus frecuencias oscilan entre 10^4 y 10^{10} Hz.

Microondas: Son producidas por vibraciones de las moléculas. Sus frecuencias están comprendidas entre 10^{10} y 10^{12} Hz aproximadamente. La parte de baja frecuencia, en torno a los 2 GHz, se usa en telefonía móvil. También se usa esta radiación para el calentamiento y cocción de los alimentos en los hornos microondas¹. Igualmente, su

¹ El microondas eleva la temperatura de los alimentos porque algunas moléculas, como las de agua, son dipolos que tratan de alinearse con el campo, produciendo una rotación y, por lo tanto aumentando el

facilidad para penetrar en la atmósfera es lo que ha motivado su utilización en las comunicaciones con vehículos espaciales.

Infrarrojo (IR): Son ondas electromagnéticas producidas por los cuerpos calientes y se deben a vibraciones de los átomos. El Sol irradia aproximadamente la mitad de su energía en forma de radiación infrarroja. Su frecuencia está comprendida entre 10^{12} y $4 \cdot 10^{14}$ Hz, aproximadamente. Tienen aplicaciones en la industria y en medicina, por ejemplo, para realizar termografías médicas, y en rehabilitación muscular y ósea porque favorecen la cicatrización. El calor que sentimos cuando nos exponemos al Sol o cuando nos acercamos a un radiador se propaga a través de este tipo de ondas. Algunos mandos a distancia también funcionan con radiación infrarroja.

Espectro visible: Son las ondas electromagnéticas a las que nuestra retina es sensible. A este tipo de ondas es al que nos referimos comúnmente como luz y constituye la parte más estrecha del espectro pues abarca solo desde los 700 nm (rojo) a los 400 nm (violeta). Los diferentes colores del espectro corresponden a diferentes frecuencias. Se producen, como las radiaciones infrarrojas y ultravioleta, por los saltos electrónicos entre niveles atómicos y moleculares.

Ultravioleta (UV): Como su nombre indica, son las radiaciones que se encuentran “más allá del violeta”, con longitudes de onda que abarcan desde los 390 nm hasta 1 nm. Se produce por saltos electrónicos entre átomos y moléculas excitados. El Sol es un poderoso emisor de radiación ultravioleta, que es la responsable del bronceado de la piel. Esta radiación, que en parte es absorbida por la capa de ozono, puede resultar peligrosa para la salud si se recibe en dosis excesiva. La radiación UV del Sol se suele dividir en tres partes, en orden creciente de frecuencias: UV-A, UV-B y UV-C.

Los rayos UV-A, los de menor frecuencia, no son peligrosos para la salud. Favorecen la producción de vitamina D y contribuyen a la fijación del calcio en los huesos.

Los rayos UV-B son peligrosos para los seres vivos. Esta parte de la radiación UV es parcialmente absorbida por la capa de ozono atmosférica, de modo que la intensidad de radiación que llega a la superficie terrestre es compatible con el desarrollo de la vida. Sin embargo, una reducción del espesor de la capa de ozono supone un aumento exponencial de la intensidad de la componente B que llega a la Tierra. Una exposición excesiva a esta radiación puede producir cáncer de piel, alteraciones en la visión y disminución del sistema inmunológico. Los efectos perjudiciales de esta radiación no se limitan al ser humano: también puede llegar a impedir el crecimiento de las plantas o producir daños en el plancton marino, lo que podría dar lugar a un desequilibrio ecológico importante.

Los rayos UV-C, los más peligrosos por su elevada frecuencia, son absorbidos por la capa de ozono y prácticamente no llegan a la superficie terrestre.

Rayos X: Tienen frecuencias comprendidas entre 10^{17} y 10^{19} Hz, es decir longitudes de onda entre 1 nm y 10^{-11} m, es decir, longitudes de onda equiparables al tamaño de los

número de colisiones y la energía cinética promedio, que es proporcional a la temperatura absoluta. Esta energía es dispersada en forma de calor al resto del contenido.

átomos y a las distancias interatómicas en los cuerpos sólidos. Esto los ha convertido en instrumento especialmente útil en cristalografía y en medicina para la obtención de radiografías. Por su elevada energía, debe hacerse un uso controlado y racional en la obtención de radiografías. Son producidos por oscilaciones de los electrones próximos al núcleo del átomo.

Rayos gamma (γ): Tienen frecuencias superiores a 10^{19} Hz. Se producen en los fenómenos radiactivos y en reacciones nucleares. Tienen un gran poder de penetración y son extremadamente peligrosos para los seres vivos. Atraviesan el cuerpo humano y solo se frenan con placas de plomo y gruesos muros de hormigón. Por su poder de destrucción se utilizan en radioterapia para destruir las células cancerosas.

1.4. DOBLE NATURALEZA DE LA LUZ

Aunque a finales del siglo XIX se establece definitivamente el carácter ondulatorio de la luz, el estudio de su naturaleza no está ni mucho menos terminado.

En el año 1900. **Lenard** observó que cuando un haz de luz de frecuencia adecuada incide sobre algunas superficies metálicas se expulsan electrones. Este hecho se conoce como **efecto fotoeléctrico**.

En 1905 **Einstein** explica dicha emisión suponiendo que la energía de las ondas luminosas se concentra en pequeños paquetes, **cuantos de energía**, llamados **fotones**, que según Planck tienen una energía: $E = h\nu$, siendo h , la constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$) y ν la frecuencia de la onda luminosa.

Esta interpretación significa, en cierta medida una vuelta a la teoría corpuscular. Parece fuera de toda duda que ciertos fenómenos, los que implican una interacción entre la luz y la materia (efecto fotoeléctrico y efecto Compton), solo pueden explicarse mediante una teoría corpuscular; por otra parte, los fenómenos de interferencia, difracción y polarización solo pueden describirse desde el punto de vista ondulatorio. Hay que admitir, por tanto que la luz se comporta como si tuviera una doble naturaleza, aunque en ningún fenómeno manifieste simultáneamente este carácter dual. **La luz es una realidad que se propaga como una onda electromagnética e intercambia su energía como si estuviera formada por partículas.**

2. FENÓMENOS ONDULATORIOS DE LA LUZ

2.1. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

Sabemos que los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de las ondas se pueden explicar a partir del principio de Huygens. En el caso de la luz, sin embargo, pueden estudiarse convenientemente haciendo uso de la **aproximación del rayo**. Recuerda que un rayo:

- Es la línea que indica la dirección de propagación de la energía radiante.
- Son en todo instante perpendiculares a los frentes de onda.
- Son rectilíneos si la propagación se produce en un medio isótropo.

Esta aproximación no puede utilizarse para analizar los fenómenos de difracción, cuando las dimensiones de la abertura son del orden de la longitud de onda de la luz. Es sin embargo, especialmente útil en el campo de la óptica geométrica.

REFLEXIÓN: La reflexión de la luz es el cambio de dirección que experimentan los rayos de luz cuando, al transmitirse por un medio, encuentran en su camino la superficie lisa y pulida de otro medio a través del cual no pueden propagarse, y vuelven al mismo medio por el que han llegado.

Para estudiar la reflexión necesitamos los siguientes términos:

Rayo incidente: Es el rayo que llega al espejo.

Rayo reflejado: Es el rayo que sale del espejo.

Punto de incidencia: Es el punto del espejo al que llega el rayo incidente.

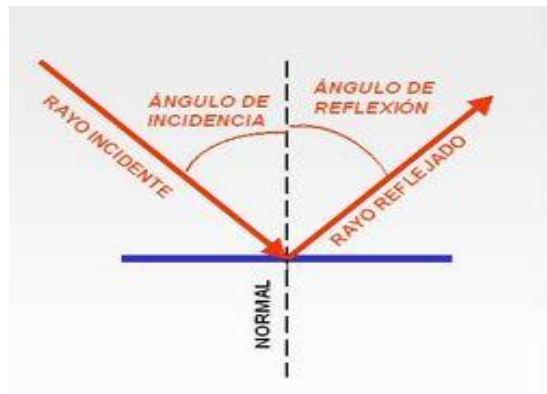
Normal al espejo: Es una línea imaginaria y perpendicular al espejo por el punto de incidencia.

Ángulo de incidencia: Es el ángulo que forma el rayo incidente con la normal.

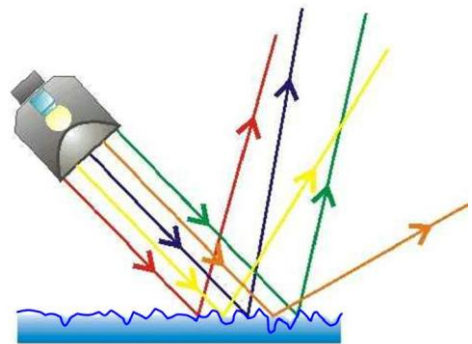
Ángulo de reflexión: Es el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal.

Las leyes de la reflexión establecen que:

- El rayo incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



La reflexión sobre una superficie depende de las irregularidades estructurales de la misma, de la relación entre las dimensiones de dichas irregularidades y de la longitud de onda de la luz incidente. Así, si las irregularidades o rugosidades de la superficie son pequeñas comparadas con la longitud de onda, la reflexión es perfecta y el haz luminoso reflejado emerge en una sola dirección. En este caso la reflexión es **especular**. Por el contrario si las imperfecciones de la superficie son del tamaño de la longitud de onda de la luz incidente, se producen reflexiones en todas las direcciones y se dice que la reflexión es **difusa**. Este mecanismo de reflexión difusa es el que nos permite ver las superficies de los objetos que no emiten luz y que de no ser así, no percibiríamos.



REFRACCIÓN: Es el cambio de dirección que sufre la luz cuando, al transmitirse por un medio, encuentra en su camino una superficie de separación con un medio transparente distinto y pasa a ese segundo medio. El cambio de dirección de la luz se debe a la distinta velocidad de propagación de la luz en los distintos medios. La deformación aparente de los

objetos sumergidos en agua, o la profundidad aparentemente menor a la que se encuentran los peces dentro de un río, se explican mediante la refracción de la luz.

Las leyes de la refracción son:

- El rayo, incidente, el refractado y la normal están en el mismo plano.
- **Ley de Snell:** Da la relación entre los ángulos de incidencia y de refracción. La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante característica de los dos medios. Esta constante es igual al **índice de refracción relativo** (cociente entre el índice de refracción del segundo medio y el del primero n_2/n_1).

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow n_1 \text{sen } \hat{i} = n_2 \text{sen } \hat{r}$$

En la expresión anterior, n_1 y n_2 son los **índices de refracción** del medio 1 y del medio 2.

El **índice de refracción** de un medio es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c , y la velocidad de la luz en ese medio: $n_{\text{medio}} = \frac{c}{v_{\text{medio}}}$

Teniendo en cuenta la definición de índice de refracción resulta: $\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$

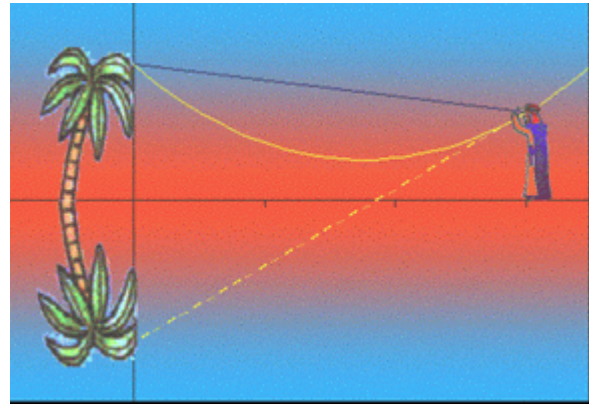
La ley de Snell permite explicar lo que se observa experimentalmente:

- Si la luz pasa de un medio como el aire a otro de mayor índice de refracción absoluto (más refringente), como el vidrio o el agua, el ángulo refractado es menor que el de incidencia, es decir, el rayo se acerca a la normal.
- Si la luz pasa de medio a otro menos refringente (de menor índice de refracción), el rayo refractado se aleja de la normal.

Un hecho importante: cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pues tan pronto llega un frente de onda incidente, surge uno refractado (principio de Huygens). Si la frecuencia no cambia y sí lo hace la velocidad, cabe concluir que **la longitud de onda cambia al pasar la luz de un medio a otro**. La magnitud que determina el color es la frecuencia, por lo que, dado que ésta no se modifica, el color no varía al pasar la luz de un medio a otro.

²² Esta última expresión permite enunciar la ley de Snell de la siguiente forma: el producto del índice de refracción de un medio, por el seno del ángulo que forma el rayo de luz con la normal en el mismo medio es una constante, llamada **invariante de refracción**. Por tanto un incremento del índice de refracción implica una disminución del ángulo y viceversa.

La refracción atmosférica es la responsable de las ilusiones ópticas denominadas **espejismos**, debido al desigual índice de refracción de las capas de aire cuando se encuentran a diferente temperatura. En días muy calurosos las capas de aire próximas al suelo se hallan a una temperatura más elevada que las capas superiores. El índice de refracción en las capas más calientes (menos densas) es inferior al de las capas de aire superiores más frías (más densas). Los rayos de luz que proceden de objetos lejanos se curvan hacia arriba al ir cruzando estas capas de aire a diferente temperatura. Esto hace que al observador le parezca que la luz procede de otra dirección y perciba el objeto invertido. En ciertas condiciones atmosféricas se puede dar un fenómeno parecido pero a la inversa: es el denominado **Fata Morgana**, que hace que veamos los objetos como si volaran. Durante la noche, o en lugares muy fríos, la capa de aire frío está junto al suelo, los rayos se curvan hacia abajo en lugar de hacia arriba.



2.2. ÁNGULO LÍMITE: REFLEXIÓN TOTAL

Hemos visto que cuando un rayo luminoso pasa de un medio a otro menos refringente, por ejemplo del agua al aire, el rayo refractado se aleja de la normal. En estas condiciones, si el ángulo de incidencia es suficientemente grande, el rayo luminoso puede no refractarse, reflejándose totalmente en la superficie de separación de ambos medios.

Si $n_2 < n_1$ siempre existe un ángulo de incidencia para el que el ángulo de refracción es de 90° . Este ángulo de incidencia es el **ángulo límite o ángulo crítico**.

Si aplicamos la ley de Snell: $\frac{\text{sen } \hat{i}_l}{\text{sen } 90} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \hat{i}_l = \text{arcsen } \frac{n_2}{n_1}$

En la reflexión total no se pierde intensidad. Una aplicación importante de este fenómeno es la **fibra óptica**. La fibra óptica consiste en un tubo delgado de vidrio o plástico formado por varias capas. La parte central tiene un índice de refracción superior al de la capa que la cubre, de modo que cuando se lanza luz a su interior con un ángulo adecuado, esta luz va experimentando reflexiones totales sucesivas, de forma que no sale del tubo. La fibra óptica se utiliza fundamentalmente en medicina, para la observación de órganos internos, y en telecomunicaciones (telefonía e internet).

2.3. REFRACCIÓN DE LA LUZ EN UNA LÁMINA DE CARAS PARALELAS.

Cuando un haz de luz monocromática incide sobre una lámina transparente de caras planas y paralelas, se refracta en ambas caras de la lámina. Si la lámina de índice n_2 está inmersa en un medio de índice n_1 , según la ley de Snell:

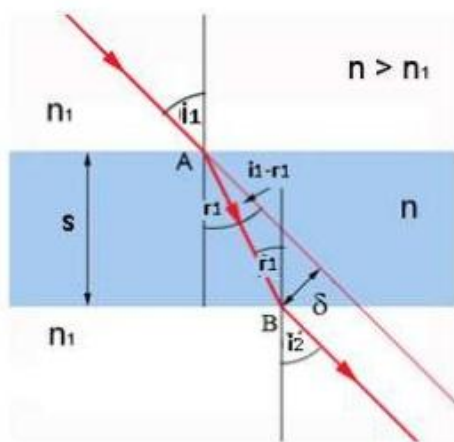
Primera cara: $n_1 \text{sen } \hat{i}_1 = n_2 \text{sen } \hat{r}_1$

Segunda cara: $n_2 \widehat{r}_1 = n_1 \widehat{i}_2$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene: $n_1 \widehat{i}_1 = n_1 \widehat{i}_2 \rightarrow \widehat{i}_1 = \widehat{i}_2$

Es decir, el rayo luminoso emerge de la lámina paralelo al rayo incidente. El desplazamiento lateral que experimenta el rayo se deduce de la imagen siguiente.

REFRACCIÓN EN LÁMINAS DE CARAS PLANAS Y PARALELAS



Desplazamiento lateral δ (distancia entre las direcciones del rayo incidente y emergente)

$$\delta = AB \sin(i_1 - r_1)$$

$$AB = s / \cos(r_1)$$

$$\delta = s \frac{\sin(i_1 - r_1)}{\cos(r_1)}$$

s: espesor lámina

AB: longitud del rayo dentro lámina

i_1 : ángulo incidente en la cara 1

r_1 : ángulo de refracción de la cara 1 (que coincide con el ángulo de incidencia de la cara 2)

La distancia recorrida por el rayo en el interior de la lámina coincide con la longitud de la hipotenusa AB.

3. DIFRACCIÓN DE LA LUZ

Uno de los fenómenos cruciales que demostró la naturaleza ondulatoria de la luz al propagarse es la difracción. La difracción es básicamente un fenómeno de interferencia y no hay distinción física real entre ambos. Suele hablarse de interferencia cuando son pocas las fuentes que interfieren, mientras que la difracción se refiere a una interferencia de numerosas fuentes. Se produce cuando un frente de onda luminosa se encuentra con un pequeño obstáculo, un pequeño orificio o una fina rendija.

Para entender el fenómeno de difracción hacemos uso del principio de Huygens. Los puntos del frente de onda que no están tapados por el obstáculo se convierten en centros emisores de nuevos frentes de onda, logrando de esta forma la onda bordear el obstáculo y propagarse detrás del mismo.

Si la naturaleza de la luz fuese corpuscular, las partículas atravesarían una abertura en línea recta y veríamos en la pantalla únicamente la proyección luminosa de la abertura. En la

realidad, obtenemos un **patrón de difracción** correspondiente a la superposición o interferencia de todos los frentes de onda secundarios que se han formado en la abertura.

Para que los efectos de difracción sean observables, el tamaño de la abertura debe ser comparable a la longitud de onda.

Son fenómenos de difracción luminosa los halos que se observan alrededor de las farolas los días de niebla (difracción en las gotas de agua).

4. POLARIZACIÓN

La polarización es un fenómeno característico de las ondas transversales; por tanto la luz también se polariza.

En la luz no polarizada, los campos eléctrico y magnético oscilan en planos perpendiculares entre sí, en todas las posibles orientaciones del plano de vibración que es a su vez, perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Cuando por cualquier procedimiento se consigue que el campo eléctrico, que por convenio se toma como referencia, vibre en una sola dirección, decimos que la luz está polarizada. Se denomina **plano de polarización** al que forma la dirección de propagación de la onda y la dirección de vibración del campo eléctrico.

La radiación emitida por un solo átomo está polarizada linealmente, pero en general, la luz emitida por cualquier fuente luminosa, constituida por muchísimos átomos, no está polarizada. La razón es que, al considerar un conjunto tan grande de átomos, las probabilidades de polarización en cualquier dirección son las mismas y no hay una dirección privilegiada de polarización.

Los **polarizadores** son dispositivos capaces de imponer una dirección de vibración a la luz. Se utilizan como polarizadores cristales de espato de Islandia, cuarzo y turmalina. En la industria se fabrican filtros polarizadores a partir de hidrocarburos de cadena larga que se orientan durante el proceso de fabricación, de forma que dejan pasar el campo eléctrico en una sola dirección (filtros polaroid).

Los métodos más habituales para conseguir la polarización de la luz son: la absorción, reflexión, difusión o esparcimiento, birrefringencia...

La absorción es el método empleado por los filtros polaroid. Estos filtros consisten en láminas de alcohol polivinílico estiradas y tintadas con yodo. Este compuesto forma largas moléculas alineadas en su estructura; el yodo suministra electrones libres. Cuando el campo eléctrico de la luz tiene la dirección de estas moléculas, se generan corrientes de electrones libres a lo largo de ella y la luz es absorbida. Sin embargo, la luz cuyo campo eléctrico oscila en la dirección perpendicular a la de alineación de las moléculas no sufre apenas variación y atraviesa el filtro. A la dirección perpendicular a la de absorción se la denomina, **eje de transmisión del filtro**.

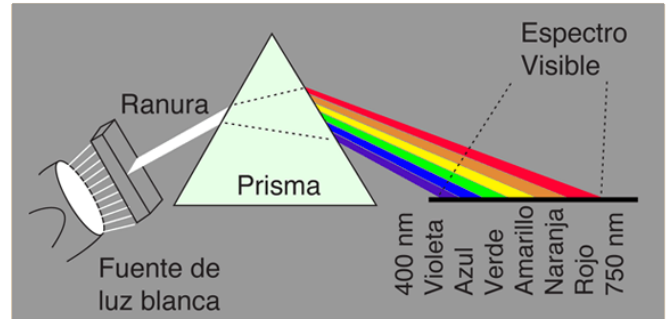
Otra forma de conseguir polarizar la luz es la reflexión. Cuando el haz de luz incide en la superficie de separación de dos medios transparentes, con un ángulo de incidencia (**ángulo**

de Brewster) tal que el haz reflejado y el refractado forman un ángulo de 90°, el haz reflejado está polarizado en la dirección de la superficie, mientras que el refractado está parcialmente polarizado en la dirección perpendicular a la superficie.

5. DISPERSIÓN CROMÁTICA DE LA LUZ

Podemos comprobar que la luz blanca está formada por todos los colores del espectro visible haciéndola incidir sobre un prisma. Se aprecia el mismo efecto cuando la luz llega a la superficie de un CD, a la de una pompa de jabón o a las gotas de las nubes cuando se forma el arco iris.

La dispersión es la descomposición de la luz blanca en todos los colores que la forman, lo que da lugar al espectro visible.

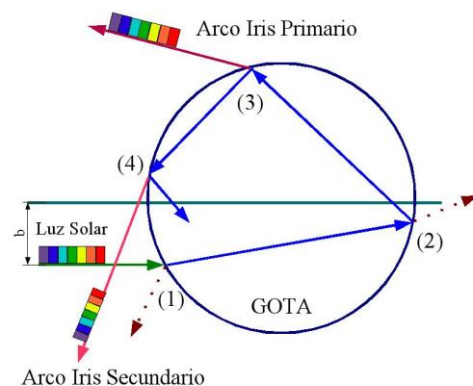


Se puede conseguir mediante un prisma de vidrio debido a su distinto índice de refracción para cada longitud de onda. Al pasar la luz blanca, las componentes de distintas frecuencias se separan por propagarse con distintas velocidades en el prisma.

El índice de refracción de un medio transparente depende de la longitud de onda: $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda_{\text{medio}}}$ y según la ley de Snell: $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

La luz roja tiene mayor longitud de onda, para ella el índice de refracción es menor, se refracta menos y el ángulo de refracción es ligeramente mayor. En cambio, la luz violeta tiene la mayor longitud de onda; para ella, el índice de refracción es mayor, se refracta más y su ángulo de refracción es el más pequeño. Al conjunto de luces que aparecen en el haz dispersado se le llama el espectro visible.

El arco iris se forma por dispersión de la luz del Sol en las gotas de lluvia. En el arco iris simple, la luz se refracta en cada gota de agua, se refleja en la parte posterior de la gota y vuelve a refractarse al salir. Mientras llueve, el aire se llena de gotas de agua que dispersan la luz apareciendo los siete colores del espectro visible. La luz roja aparece en la parte exterior y la luz violeta en el interior. En los días con mucha luz, puede percibirse un segundo arco iris, que se produce por doble reflexión en el interior de las gotas de lluvia con los colores invertidos.



- (1) Entrada del rayo de luz. Refracción dentro de la gota. Pérdidas por reflexión.
- (2) Reflexión interna. Pérdidas por refracción al exterior.
- (3) Refracción exterior. Forma el arco iris primario. Reflexión para arco iris superiores.
- (4) Refracción exterior. Arco Iris Secundario. Reflexión para arco iris superiores.

6. ESPARCIMIENTO DE LA LUZ.

- **¿Por qué el cielo es azul?** Se debe a un fenómeno denominado **esparcimiento de la luz**.

Cuando hay mucha separación entre las partículas de un medio, como ocurre con las moléculas del aire, si la frecuencia de la radiación incidente no coincide con la frecuencia natural de oscilación de dichos átomos o moléculas, estos irradian luz de la misma frecuencia. Al estar las moléculas muy separadas, la luz reemitida no va a parar a las moléculas o átomos vecinos, sino que se esparce en todas las direcciones. Por otro lado, si el tamaño de las moléculas del aire es inferior a la longitud de onda de la luz incidente y la separación entre las partículas es grande en comparación con dicha longitud de onda, se produce un fenómeno conocido como **esparcimiento Rayleigh**, según el cual: **la intensidad de la luz esparcida es proporcional a la frecuencia elevada a la cuarta potencia**. Esto significa que la intensidad esparcida correspondiente al azul y al violeta es considerablemente mayor que la del rojo. Por este motivo vemos el cielo azul. Pero, ¿por qué no lo percibimos violeta? La razón radica en que la sensibilidad de nuestro ojo al violeta es mucho menor que al azul.

- **¿Por qué vemos las nubes blancas?** La respuesta es que el esparcimiento crece conforme aumenta el tamaño de las partículas, hasta el límite en que dicho tamaño es comparable a la longitud de onda. Cuando esto ocurre, el esparcimiento ya no es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia y, al ser las partículas mayores que la longitud de onda, el esparcimiento tampoco depende de la frecuencia. En este caso, todos los colores sufren igual esparcimiento, lo que da lugar al blanco.
- **¿Por qué vemos el cielo rojizo en los atardeceres y amaneceres?** Lo que ocurre es que la luz solar, que atraviesa un mayor tramo de atmósfera, ha experimentado ya un mayor esparcimiento de la luz azul, mientras que la luz roja no ha sufrido tanto esparcimiento y es capaz de atravesar toda la capa atmosférica.