



Guía Conceptual de Física Tema: Instrumentos Ópticos . (Recopilación Montoya)

La frase más excitante que se puede oír en ciencia,
la que anuncia nuevos descubrimientos, no es "¡Eureka!"
sino "qué extraño" .

Instrumento óptico

Un **instrumento óptico** sirve para procesar ondas de luz con el fin de mejorar una imagen para su visualización, y para analizar las ondas de luz (o fotones) para determinar propiedades características.

Los primeros instrumentos ópticos fueron telescopios utilizados para la magnificación de imágenes distantes, y microscopios utilizados para magnificar imágenes muy pequeñas. Desde los días de Galileo y van Leeuwenhoek, estos instrumentos han sido mejorados ampliamente y se han extendido a otras porciones del espectro electromagnético. Los microscopios tenían como máximo 10x, mientras que los modernos tienen entre 400 x y 600 x .

Otra clase de instrumentos ópticos es utilizada para analizar las propiedades de la luz o de materiales ópticos. Entre ellos se incluyen:

- Interferómetro para medir la interferencia de las ondas de luz
- Fotómetro para medir la intensidad de la luz
- Polarímetro para medir la dispersión o rotación de luz polarizada
- Reflectómetro para medir la reflectividad de la superficie de un objeto
- Refractómetro para medir índice de refracción de varios materiales, inventado por Ernst Abbe
-
-

En este capítulo analizaremos conceptos ópticos de tipo geométrico, que luego profundizaremos, pero que son necesarios para el entendimiento de algunos temas que veremos en los capítulos siguientes.

- **Cuerpos luminosos o iluminados:** son cuerpos luminosos aquellos que pueden producir luz propia (lámpara, Sol) y son cuerpos iluminados aquellos que reciben luz de fuentes luminosas para ser visibles (mesa, silla, birome).
- **Cuerpos transparentes, opacos y traslúcidos:** son cuerpos transparentes aquellos que cuando la luz pasa a través de ellos prácticamente no se altera (agua pura, aire); son cuerpos opacos aquellos que no permiten el paso de la luz, (aunque no hay opacos en absolutos ya que si se reduce a laminas adquieren características traslucidas) y son cuerpos

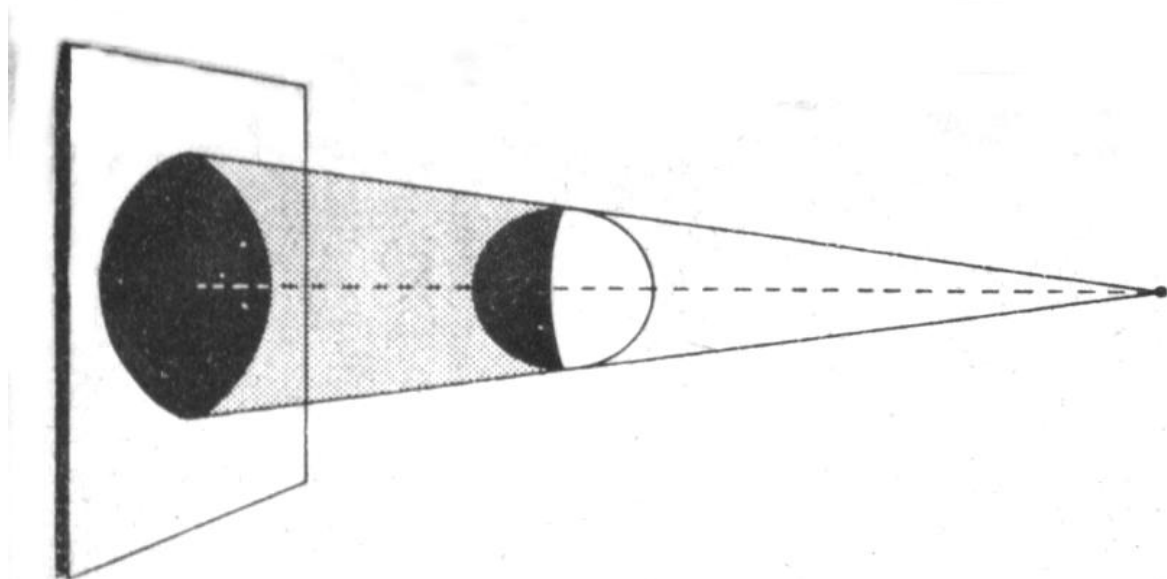
traslucidos aquellos que si bien permiten el paso de la luz no permiten precisar la forma de los objetos a través de ellos).

- **Propagación rectilínea de la luz:** el hecho de que la luz se propaga en "línea recta" (más adelante veremos más profundamente cual es la forma de propagación de la luz) es muy fácilmente comprobable, solo basta con encender una linterna y ver como el haz de luz viaja a través de una línea recta.

El postulado general de la óptica geométrica es la propagación rectilínea de la luz, es decir dedica al estudio de la luz como si fueran rayos rectilíneos sin tener en cuenta ni su naturaleza ni su velocidad.

La consecuencia del hecho de tomar a la luz en estos sentidos no es ni más ni menos que la formación de SOMBRAS Y PENUMBRAS y la formación de estas dependen del tipo de fuente luminosa:

1.



Los rayos tangentes a la esfera determinan sobre la pantalla una zona de sombra: es otro fenómeno resultante de la propagación rectilínea de la luz.

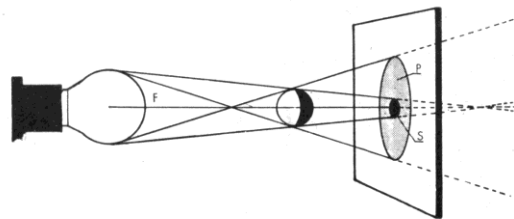
2.

3. **FUENTE LUMINOSA PUNTUAL:** es aquella que se supone que es ínfimamente pequeña por consiguiente cualquier cuerpo opaco colocado entre la misma y una

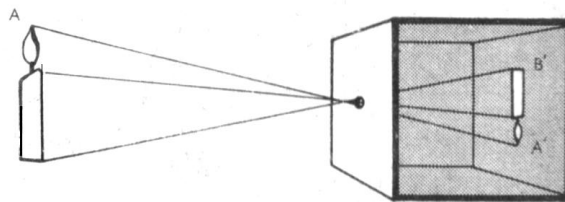
pantalla, además de quedar en sombra parte del cuerpo, formará en la pantalla una sombra de igual forma al cuerpo (si es una esfera formará un círculo) y tamaño proporcional a las distancias existentes entre las tres. Si el cuerpo es una esfera podríamos explicar esto diciendo que los rayos tangentes a la superficie de la esfera forman un cono, llamado cono de sombra, el cual tiene base (o sección) en la pantalla; de este modo los rayos inferiores a la superficie cónica no pasan y los superiores si lo hacen formándose la sombra.

4. **FUENTE LUMINOSA NO PUNTUAL EXTENSA:** es aquella que tiene dimensiones geométricas a considerar. Ahora gracias a que la fuente no es solo un punto, es un cuerpo con dimensiones a tener en cuenta, cuando colocamos por ejemplo una esfera entre pantalla y fuente se nos forman dos conos uno que tiene por generatrices a los rayos tangentes exteriores y otro que tiene por generatrices a los rayos tangentes interiores. De este modo se nos forman tres zonas: la sombra propiamente dicha, la zona totalmente iluminada que recibe todos los rayos de luz y la penumbra o faja angular comprendida entre las dos anteriores zonas.

La fuente luminosa no puntual origina zonas de sombra (S) y de penumbra (P).

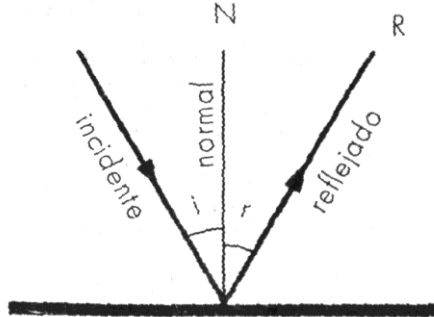


En la cámara oscura, la formación invertida de la imagen es consecuencia de la propagación rectilínea de la luz.



CÁMARA OSCURA: este es el fundamento de la cámara fotográfica. Si en una caja cerrada hacemos un orificio pequeño y colocamos un cuerpo luminoso por delante dentro de la caja aparecerá la imagen del mismo invertida. Teniendo en cuenta la propagación rectilínea de la luz y siendo el orificio pequeño los rayos que llegan a este son oblicuos entonces como la luz no dobla sigue su recorrido rectilíneo formando una imagen invertida como se ve en la figura.

Leyes de la reflexión:
 I, N y R pertenecen al mismo plano; el ángulo de incidencia (i) es igual al de reflexión (r).



REFLEXIÓN

Este es uno de los fenómenos ópticos más sencillos. Si nosotros encendiéramos una linterna apuntándole a una SUPERFICIE PULIDA (**espejo**) veríamos como el haz de luz producido por la linterna rebota y vuelve dirigiéndose por ejemplo hacia una pared.

Entonces tomando una recta de referencia normal (N) perpendicular al espejo tenemos un rayo incidente (el proveniente de la linterna) y un rayo reflejado (el proveniente del espejo). Sobre este fenómeno rigen dos leyes:

1° Tanto el rayo incidente como el rayo reflejado y la recta N pertenecen al mismo plano.

2° El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión ($i = r$). De este modo se deduce fácilmente que si el rayo incidente coincide con la recta N este rebota sobre sí mismo, ya que ambos ángulos tienen 0° .

ESPEJOS PLANOS

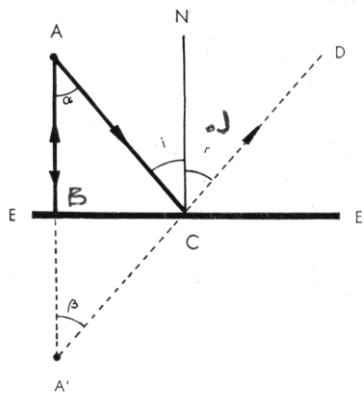


Imagen de un punto en un espejo plano: es, virtual y simétrica respecto del espejo.

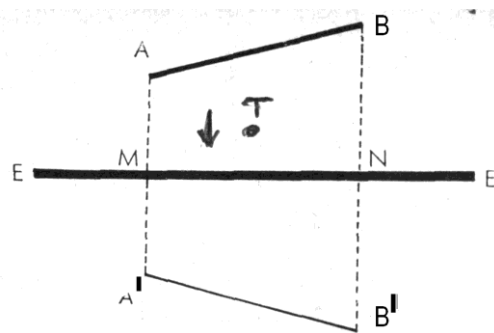
Imágenes de un cuerpo puntual:

De todos los rayos que parten de A tomaremos en cuenta al rayo AB, perpendicular al espejo y reflejado sobre sí mismo (según lo explicado anteriormente) y al rayo AC que forma con la normal CN un ángulo de incidencia i que reflejado (CD) forma un ángulo de reflexión r . Si prolongamos los segmentos AC y CD veremos como estos dos se cortan en un punto A' llamado imagen de A. De este modo un observador parado en J afirmaría que los todos rayos parecen provenir de A'.

Por lo tanto todos los rayos que parten de un punto objeto y se reflejan determinan otros, que prolongados determinan la llamada imagen virtual del punto en cuestión.

Cabe destacar que el punto A es simétrico con respecto a A' debido a que el espejo EE' es mediatriz del segmento AA', de esta manera si hay un incremento el segmento AB también lo habrá en el segmento A'B. Esta es la explicación de por qué cuando nos acercamos a un espejo la imagen del espejo parece también acercarse hacia nosotros.

Imágenes de un cuerpo no puntual:



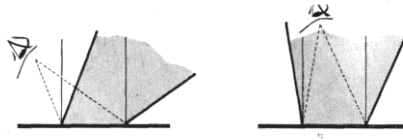
La imagen del objeto, se determina al unir A' y B' que son los simétricos de A y B.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores de las mediatrices se puede construir la imagen virtual de AB trazando las perpendiculares AM y BM al espejo, prolongando sus medidas y uniendo los puntos determinados en el paso anterior obteniendo la imagen virtual A'B'.

Un observador que desconoce principios de óptica al que imaginaremos transparente en el punto T que mira según el sentido de la flecha (hacia el espejo) estaría en condiciones de afirmar que el punto A que en realidad es A' se encuentra situado bajo si derecha pero él mismo si girara 180° comprobaría que en realidad el punto A se encuentra de su lado izquierdo. Esta es la razón por la cual si miramos por un espejo vemos las cosas invertidas como muestra el esquema.

CAMPO DE UN ESPEJO

Es la región del espacio visible desde un punto dado gracias a un espejo. El mismo queda determinado por los rayos reflejados provenientes de los dirigidos a la periferia del espejo.



El campo de un espejo se modifica de acuerdo con la ubicación del observador.

ESPEJOS EN ÁNGULO.

Si tenemos dos espejos cuyas superficies pulidas se encuentran hacia fuera bien podríamos decir que se encuentran a 360° . Si colocamos un cuerpo entre medio de ellas no se formaría ninguna imagen. Del mismo modo si estuviesen a 180° (siguiendo una línea recta) y colocase un cuerpo como marca la figura se formaría una sola imagen y si estuviesen a 90° se formarían tres uno compartido y otros dos uno en cada uno de los espejos.

Entonces para averiguar la cantidad de imágenes n que se forman en dos espejos en ángulo a es válida la expresión:

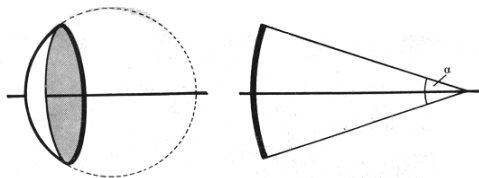
$$n = \frac{360}{\alpha} - 1$$

De este modo vemos también que mientras más chico sea el ángulo serán más las imágenes formadas por lo que se podría decir que si α es un número muy chico la cantidad de imágenes sería un número cercano al infinito, razón por la cual en espejos paralelos se forman infinitas imágenes que se pierden intensidad y no llegan a distinguirse bien.

ESPEJOS ESFÉRICOS:

Algunas definiciones

•



Un espejo esférico es un casquete esférico.

Abertura de un espejo.

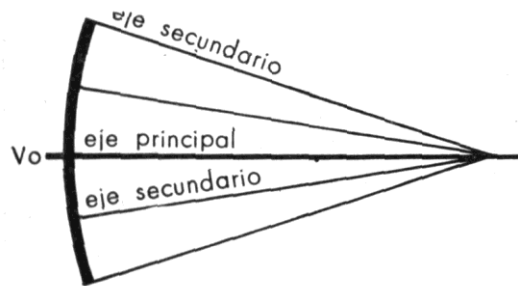
•

- Espejo curvo es el que tiene la superficie curva pulida.
- Espejo esférico es el que tiene la superficie pulida semejante a la de un casquete esférico.
- Espejo esférico cóncavo es el que tiene la superficie interior pulida.
- Espejo esférico convexo es el que tiene la superficie exterior pulida.

ESPEJOS CONCAVOS

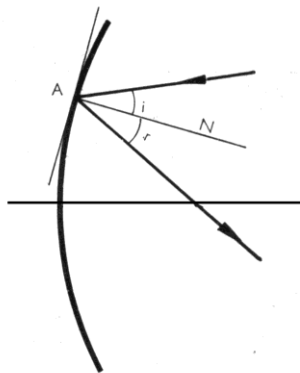
Elementos de un espejo esférico:

Elementos de un espejo esférico.



- Radio de curvatura: es el radio de la esfera a la cual pertenece.
- Vértice del espejo: es el polo del casquete.
- Eje principal: es la recta determinada por el vértice y el centro de la curvatura.
- Eje secundario: es cualquier recta que pasa por el centro de la curvatura
- Abertura del espejo: es el ángulo determinado por los dos ejes secundarios que pasan por el borde del espejo o suele también determinarse entre un eje secundario que pasa por el borde y el principal.

Marcha de los rayos

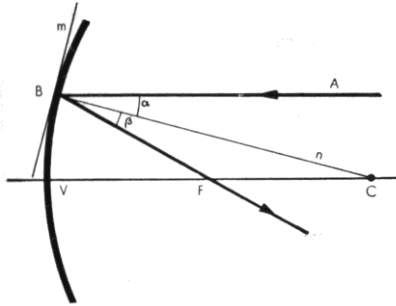


En la reflexión en espejos esféricos se admite que en cada punto exista un plano tangente que actúe como espejo plano.

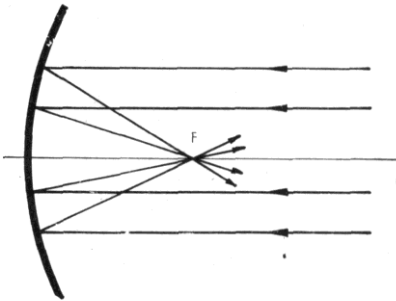
Se verifica lo siguiente en todos los espejos exceptuando los espejos esféricos superiores a los 8° o 9° ya que para estos no se cumple estrictamente todo lo que anunciaremos a continuación:

Las leyes de reflexión se verifican talen como en los planos tomando como espejo plano a la tangente en el punto que choca el rayo incidente, o sea que el punto de incidencia es un espejo plano infinitamente pequeño tangente al punto de incidencia mismo.

Focos



El foco está ubicado aproximadamente en la mitad del radio de curvatura.



El foco de un espejo esférico resulta de la reflexión de todos los rayos paralelos al eje principal.

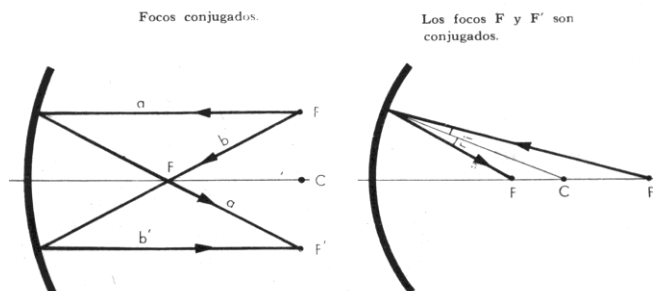
Si volvemos a usar nuestra linterna colocándola a una distancia considerable del espejo paralela al eje principal en distintas posiciones veremos como todos los rayos chocan contra el espejo y tienden a pasar por un mismo punto llamado foco y viceversa (si pasan por el foco serán paralelos al eje principal). Si ahora en vez de colocar la linterna paralela al eje principal la colocáramos paralela a cualquier eje secundario veremos como también los rayos chocan y tienden a pasar por otro punto distinto al anterior llamado foco secundario. Por último podríamos colocar la linterna coincidente con el eje principal veremos como el rayo tiende a reflejarse sobre sí mismo debido a que coincide con la recta normal del espejo tangente.

Del estudio del triángulo BFC se podría decir que el foco se sitúa aproximadamente en la mitad del radio de la curvatura debido a que $VF \cong FC$. O sea la distancia focal es aproximadamente igual a la mitad del radio de la curvatura.

Si la curvatura fuese mayor a 8° o 9° en vez de que todos los rayos pasen por un solo punto (foco) se forma una superficie luminosa llamada cáustica por reflexión.

IMÁGENES EN ESPEJOS ESFÉRICOS

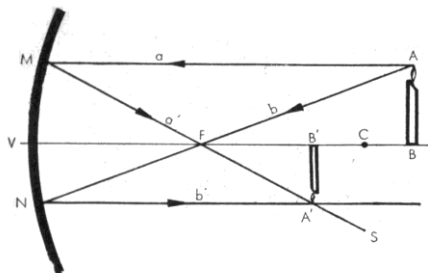
Focos conjugados



Si consideramos una fuente puntual F frente a un espejo esférico y suponemos que los rayos a' y b' son rayos reflejados de a y b suele decirse que F' es el foco conjugado de F . Esto es recíproco ya que si consideramos como fuente luminosa a F' tendría como foco conjugado a F por lo que se puede decir que el foco luminoso con su foco conjugado son recíprocos.

Imágenes de cuerpos no puntuales

Estos tipos de espejos presentan diferentes casos que estudiaremos por separado:



EL OBJETO SE ENCUENTRA DETRÁS DEL CENTRO DE LA CURVATURA (ENTRE EL CENTRO Y EL INFINITO)

Consideraremos a un objeto AB perpendicular al eje principal y con el punto b en común para evitar complicaciones innecesarias.

Los rayos a y b se reflejan según a' y b' determinando el punto A' y el punto B' es imagen de B por lo tanto $A'B'$ es imagen de AB resulta real, invertida de menor tamaño y situada entre el foco y el centro.

EL OBJETO ESTÁ SITUADO EN EL CENTRO DE LA CURVATURA

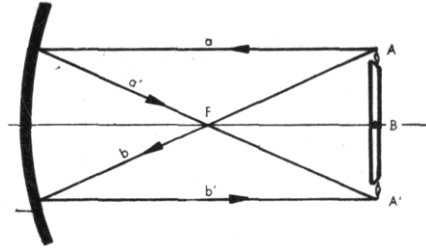


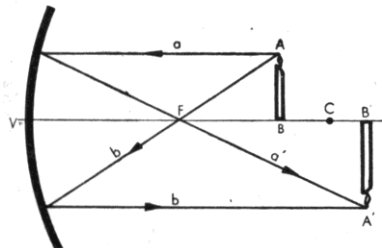
Imagen del objeto situado en el centro de curvatura.

Sucedo análogamente con los rayos a , b , a' y b' la intersección de los últimos nos da el punto A' imagen de A y B es conjugado con B' entonces tenemos la imagen $A'B'$ de AB que ahora es real, invertida, de igual tamaño y situada también en el centro.

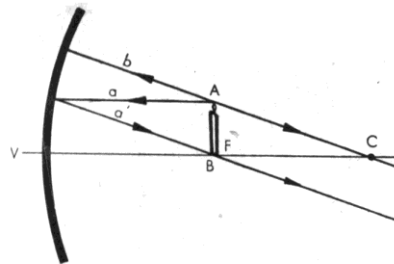
EL OBJETO ESTÁ SITUADO ENTRE EL CENTRO Y EL FOCO PRINCIPAL

Es recíproco al primer caso ya que como muestra la figura los rayos determinan una imagen $A'B'$ de AB real, invertida pero de mayor tamaño y situada detrás del centro.

Imagen cuando el objeto está entre el centro de curvatura y el foco.



EL OBJETO ESTÁ SOBRE EL FOCO

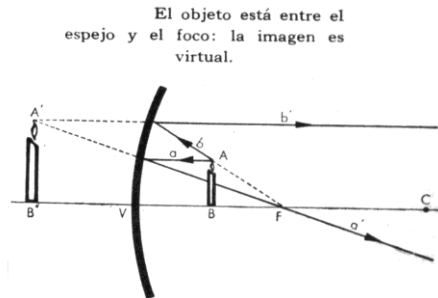


Cuando el objeto está en el foco la imagen da en el infinito.

Los rayos a y b se reflejan pero los rayos reflejados son ahora paralelos por lo tanto nunca se cruzan imposibilitando la formación de una imagen, o como también se dice la imagen está infinitamente alejada.

EL OBJETO ESTÁ ENTRE EL FOCO Y EL ESPEJO

Considerando los rayos a y b vemos como al llegar al espejo tienden a separarse se logra solo si intersección si estos se prolongan por lo que la imagen de AB es A'B' que como queda detrás del espejo resulta virtual, mayor y de igual sentido que el objeto.



Fórmula de los focos conjugados

Todas las consideraciones anteriores corresponden a la siguiente expresión matemática siendo x la distancia objeto-espejo, x' la distancia imagen espejo y f la distancia focal del espejo (aproximadamente la mitad del radio de la curvatura).

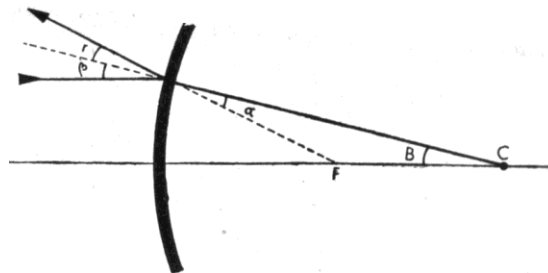
$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

ESPEJOS CONVEXOS

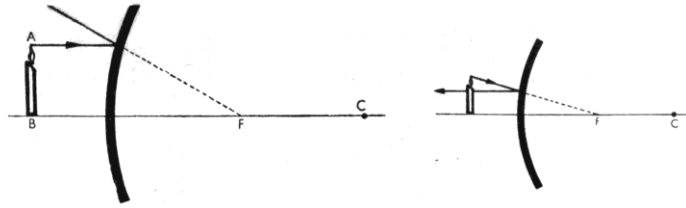
También se cumplen las leyes de reflexión pero en este tipo de espejos el foco principal es imaginario debido a que los rayos tienden a separarse, y por lo tanto la distancia es negativa.

Marcha de los rayos

1. Todo rayo paralelo al eje principal de un espejo convexo se refleja de modo tal que su prolongación pasa por el foco. Por lo tanto si un rayo incidente que pasa por el foco se refleja paralelo al eje principal
2. El rayo que incide en dirección hacia el centro se refleja sobre si mismo.



El foco de un espejo convexo está aproximadamente en la mitad del radio.



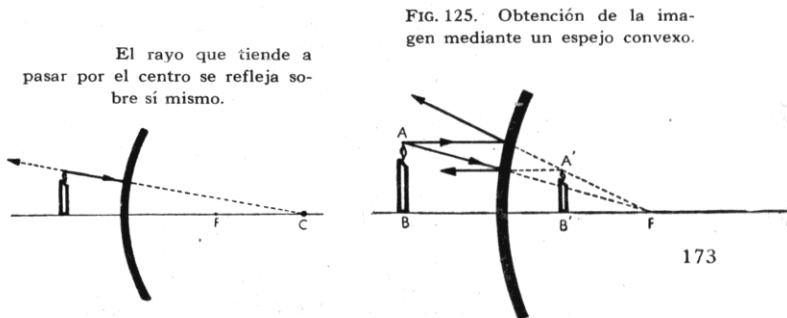
Todo rayo paralelo al eje principal se refleja de modo que su prolongación pasaría por el foco.

Todo rayo que tiende a pasar por el foco se refleja paralelo al eje.

Imagen en un espejo convexo

Del mismo modo que en los espejos cóncavos prolongando los rayos A y B determinamos los puntos virtuales A' y B' y obtenemos la imagen virtual.

Esta es la única posibilidad que ofrecen los espejos, o sea que lo anterior se cumple siempre en este tipo de espejos.



El rayo que tiende a pasar por el centro se refleja sobre sí mismo.

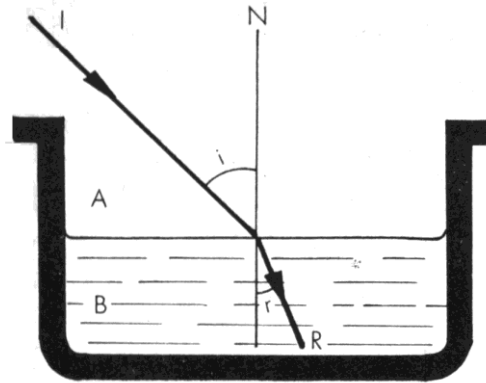
FIG. 125. Obtención de la imagen mediante un espejo convexo.

173

ABERRACIÓN: hemos aclarado que todo lo dicho se verificaba con espejos no superiores a 9° o 8° , el porque se explica de la siguiente manera:

Los espejos que como hemos supuesto aquí reflejan un solo punto a partir de otro (por ejemplo A' y A) se llaman espejos **aplanéticos**. Los espejos que cumplen perfectamente con el aplanetismo luminoso son los planos. En los demás como los que hemos excluido aquí se produce un fenómeno llamado ABERRACIÓN que consta de la reflexión de un sistema de focos conjugados a partir de un punto. La aberración puede corregirse utilizando espejos parabólicos ya que estos son aplanéticos en diferentes condiciones (colocando la fuente luminosa en el foco o "bastante lejos") o utilizando una lente que luego veremos su funcionamiento.

Este tipo de espejos son utilizados en espejos de dentistas que son cóncavos y tienden a concentrar los rayos luminosos en los lugares a observar (que será el foco), lámparas dicroicas, linternas, espejos retrovisores que son convexos y permiten la formación de una imagen virtual y visible para el conductor, espejos de parques de diversiones que son combinaciones de cóncavos y convexos. Cabe destacar que los espejos cilíndricos siempre "deforman" en forma longitudinal no transversal.



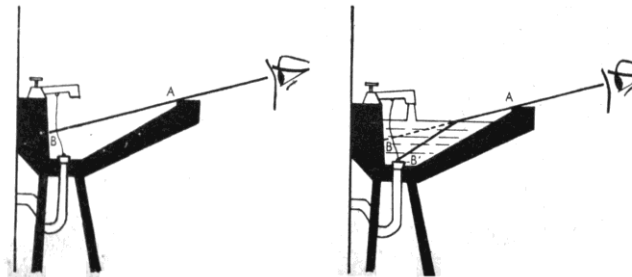
Marcha del rayo refractado.

REFRACCIÓN

Es la desviación de un rayo luminoso cuando pasa de un medio transparente a otro medio también transparente pero de distinta densidad. Este es el fenómeno que sucede cuando por ejemplo metemos una cucharita en un vaso de agua y esta parecería estar quebrada.

Para darnos cuenta de manera más ejemplificativa de la desviación de los rayos lumínicos podríamos colocarnos frente a una pileta vacía en la cual no viéramos el tapón de la misma. Si ahora comenzamos a llenar de agua la pileta se produce una desviación de los rayos luminosos (refracción) que permite que veamos el tapón. La única causa de esta desviación es el hecho de que el agua tiene distinta densidad del aire.

El observador podrá ver el tapón conforme el agua haya alcanzado cierto nivel.



Si ahora quisiéramos calcular cuanto se va a desviar el rayo tendríamos que tener en cuenta el rayo incidente con su ángulo de incidencia i con respecto a la normal N (perpendicular a la superficie de separación) y el rayo refractado con su ángulo de refracción también con respecto a N .

La Ley de Snell acerca de la refracción enuncia: (m y n son índices de refracción de los medios)

$$\sin i \cdot n = \sin r \cdot m$$

Ambos rayos refractado e incidente y la recta normal pertenecen al mismo plano.

La relación entre los senos de los ángulos de los dos ángulos es un índice de refracción del primero para con el segundo en símbolos:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

teniendo en cuenta un índice particular de dos medios (por ej. agua-aire)

El índice n depende de los medios en cuestión siendo mayor al ser más refringente el medio. Cuando el rayo coincide con la normal no sufre ninguna desviación.

LAMINA DE CARAS PARALELAS

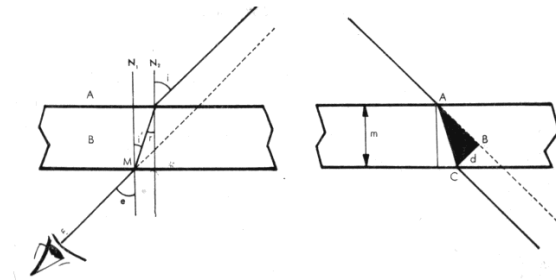


Lámina de caras paralelas: el rayo emergente mantiene la misma dirección que el rayo incidente. Sólo se verifica un desplazamiento del rayo.

Se considera lámina de caras paralelas a todo medio refringente limitado por planos paralelos. Por ejemplo un vaso octogonal, etc.

En estas se verifica que todo rayo que incide sobre una de las caras de la lámina de caras paralelas emerge de ella y no se desvía, solo sufre un desplazamiento que depende del ángulo de incidencia:

$$d = m \cdot \sin i \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 i}{n^2 - \sin^2 i}} \right)$$

Si se analiza trigonométricamente la relación entre i y e se obtendrá que los ángulos son iguales.

PRISMA

Un prisma es un medio transparente limitado por dos caras planas concurrentes. La intersección de esas caras se llama aristas y el diedro que forman, ángulo de refringencia.

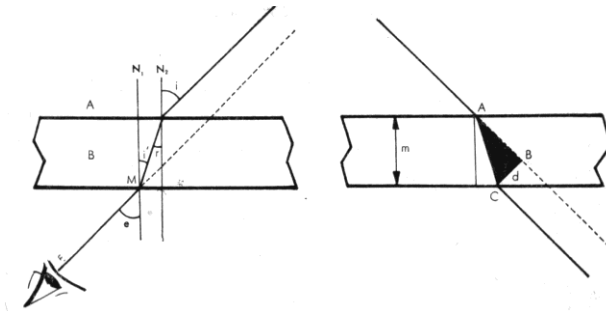


Lámina de caras paralelas: el rayo emergente mantiene la misma dirección que el rayo incidente. Sólo se verifica un desplazamiento del rayo.

Marcha de los rayos en el prisma

Si sobre la cara e un prisma incide un rayo IT sufrirá, al atravesarlo, la desviación que indica TS, es decir, acercándose a la normal N, pues pasa de un medio menos refringente a otro más refringente.

Cuando el rayo desaparece de un medio l, vuelve a desviarse en dirección SR, pues pasa de un medio menos refringente a otro más refringente.

La trayectoria inicial es IT y la final SR, las cuales determinan el ángulo de desviación.

Se demuestra:

$$\delta = i + e - A$$

El ángulo de desviación sufrida por un rayo luminoso al atravesar un prisma es igual a la suma del ángulo de incidencia i y el ángulo de emergencia e menos el ángulo de refringencia A .

Parte 2: La Luz como onda electromagnética. Lentes delgadas.

LA LUZ Y EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

En la Parte 4 "Historia y actualidad de la naturaleza de la luz" hemos realizado una recopilación de cómo se ha llegado a creer que la luz es una onda electromagnética y si lo es eso únicamente, por lo que en este capítulo arrancaremos del concepto de que la luz es una **onda electromagnética**.

James Clerk Maxwell, uno de los más grandes científicos de la historia, entre muy importantes descubrimientos demostró que la luz era una parte del espectro electromagnético, es decir que difiere con las demás ondas (como pueden ser ondas de radio, microondas, rayos ultravioleta, infrarrojos) solo en su longitud de onda (distancia entre cresta y cresta de la onda)

Luz es entonces la región del espectro electromagnético visible al ojo.

En óptica se usan unidades de longitud de onda como:

micra (10^{-6} metros), Ångstrom (10^{-10} metros), o nanómetro (10^{-9} metros).

Los límites del espectro visible no están bien definidos ya que la curva de sensibilidad del ojo tiende a acercarse a los límites pero nunca lo hace, aunque los límites rondan un valor de entre 4300 Å y 6900 Å.

Energía y cantidad de movimiento

Una de las principales características de las ondas electromagnéticas es que pueden llevar energía de un lugar a otro. Así la radiación visible y no visible que emite el Sol llega a la Tierra y en algunos casos es convertida a energía eléctrica (por ejemplo mediante paneles fotovoltaicos). Esto explica perfectamente como las ondas electromagnéticas transportan energía. Así como conocemos los vectores de campo eléctrico y magnético las ondas electromagnéticas están ligadas a su transporte de energía mediante el vector de Poynting S con ese nombre en honor a John Henry Poynting quien fue el primero en descubrir este fenómeno:

$$S = \frac{1}{\mu} E \times B$$

Vemos como en la onda electromagnética influyen los valores instantáneos de campo eléctrico y magnético. S en sistema MKS se mide en watt/m²

Otra característica importante es la llamada presión de radiación. Digamos que si yo prendo una linterna apuntando hacia un libro esta ejerce una presión de fuerzas muy chicas contra el libro. Con esto podríamos afirmar que la luz tiene cantidad de movimiento lineal. Estos efectos fueron predichos por Maxwell y se expresa en un tiempo que para una cantidad de energía U, una cantidad de movimiento p se establecen las siguientes relaciones:

$$p = \frac{U}{c} \text{ (absorción total)}$$

$$p = \frac{2 \cdot U}{c} \text{ (reflexión total)}$$

Conociendo esto vale la pena manifestar otras relaciones útiles para el cálculo:

$$S = \frac{U}{t \cdot a} \quad F = \frac{p}{t}$$

Siendo t el tiempo, a el área a la que se esta incidiendo y F la fuerza hecha por la onda

Esta presión de radiación fue comprobada experimentalmente por Nichols y Hulls 30 años luego su predicción teórica.

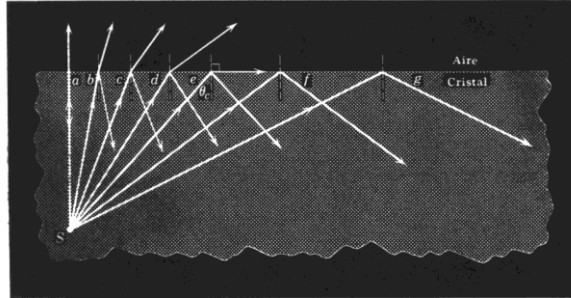
Principio de Huygens y la ley de refracción

El principio de Huygens es un antiguo principio geométrico que permite averiguar donde está el frente de la onda en un momento cualquiera en el futuro si conocemos su posición actual.

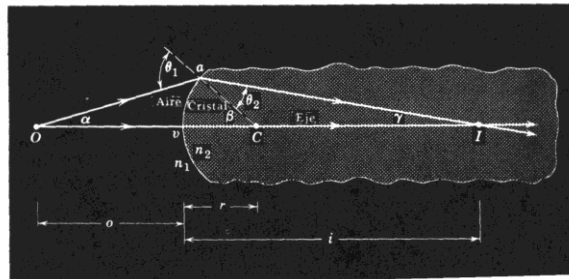
Utilizando este principio se deduce que en la refracción la velocidad de la luz en el medio más denso debe ser menor a la del medio menos denso.

Reflexión total interna

A medida que aumentamos el ángulo de incidencia aumentará el ángulo de refracción hasta llegar a 90° (rayo e) superando ese valor es apreciable que los rayos no son refractados sino reflejados en un fenómeno llamado reflexión total interna.

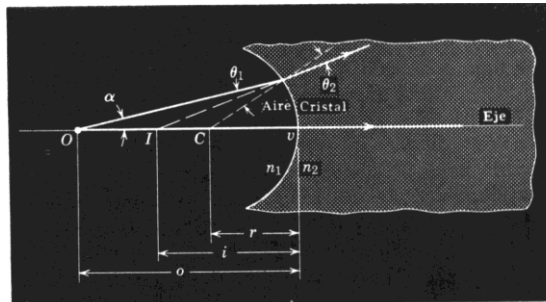


Superficie esférica refractora



En la figura vemos como al llegar un rayo luminoso divergente de un punto O se refracta para luego converger en un punto I formando una imagen real del objeto luminoso.

Lo contrario sucede en este otro caso en que la luz sale de un punto se refracta pero no converge en un punto sino que diverge formando una imagen virtual.



Lentes delgadas

Al fijarse en los aparatos que se usan para resolver los problemas que se presentan en la práctica, entre los que interviene la luz, los más importantes son las lentes, ya que se usan mucho directamente, y como parte de aparatos más complicados. Por ejemplo: para que las personas que padecen ametropías ópticas, puedan ver correctamente, para observar pequeños objetos claramente, para observar objetos lejanos mejor que a simple vista, para fotografiar objetos o personas de los que convenga conservar la imagen, para proyectar transparencias y películas cinematográficas, e inclusive, el ojo presenta varias lentes para que puedan desarrollar sus funciones.

Las lentes, por su forma, lo mismo que por la manera que se comportan al ser atravesadas por los rayos de luz, se clasifican en dos grupos, el de las lentes convergentes y el de las lentes divergentes.

Las lentes convergentes, se caracterizan porque son más gruesas en el centro que en la orilla, pudiendo presentar tres formas diferentes: lente biconvexa (1), lente planoconvexa (2), menisco convergente (3).

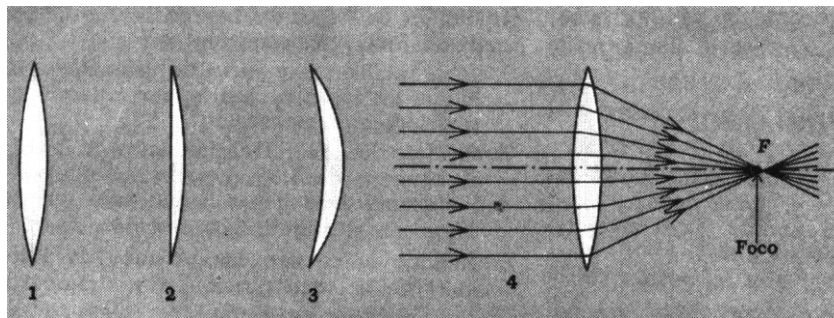
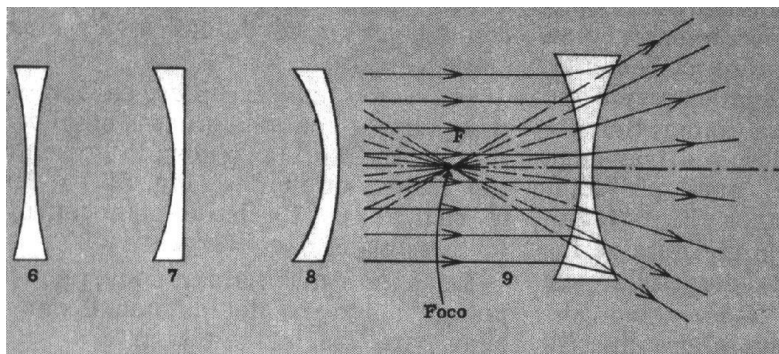


Fig. Tipos de lentes convergentes.

Estas lentes se llaman convergentes, porque los rayos de luz que llegan a ellas paralelos, se refractan dos veces y después se cruzan en un mismo punto, que se llama foco, F (4); como las lentes funcionan igual en un sentido que en el otro, presentan dos focos, equidistantes de ellas.

Debido a que los tres tipos de lentes convergentes funcionan de igual manera, para representarlos en los esquemas se usa una línea recta, terminada por ambos extremos en flechas, con sentido hacia fuera, debiendo marcarse también claramente sus focos.

Las lentes divergentes, se caracterizan porque son más gruesas en la orilla que en el centro y pueden presentar tres formas diferentes: lente bicóncava (6), lente plano cóncava (7), y menisco divergente (8).



Estas lentes se llaman divergentes, porque los rayos que llegan a ellas paralelos, se refractan dos veces, resultando después divergentes, pero sus prolongaciones se cruzan en un mismo punto que también se llama foco de la lente F (9); como todas estas lentes funcionan igualmente en ambos sentidos, presentan dos focos virtuales equidistantes a ellas.

Como las tres formas de lentes divergentes funcionan de igual manera, para representarlas en los esquemas, se usa una línea recta terminada en sus extremos por flechas, con de sentido afuera hacia el centro, debiendo marcarse claramente sus focos.

Características de las lentes:

Para estudiar gráficamente los fenómenos ópticos que se presentan en las lentes, se necesita conocer sus características, las cuales se indican gráficamente en la figura siguiente,

características que son comunes a ambos tipos de lentes, por lo que el esquema presenta flechas en los dos sentidos.

El plano óptico de la lente, es el plano central de ella, siendo lo que se representa con la línea LL', del esquema.

El centro óptico O, es el punto central de la lente.

El eje principal AB, o simplemente eje, es la recta que siendo perpendicular a la lente, pasa por el centro óptico.

Los focos principales F y F', o simplemente focos, son los puntos donde se cruzan los rayos que llegan a la lente paralelos al eje principal, o sus prolongaciones.

Distancia focal f, es la distancia entre el centro óptico y el foco, que en las lentes divergentes se considera negativa.

La forma más sencilla de determinar gráficamente las imágenes de las lentes y sus características, consiste en usar una serie de rayos denominados notables. Estos son:

Cualquier rayo que llegue a una lente convergente, paralelo al eje principal, se refracta pasando por el foco del otro lado (1). Cualquier rayo que llegue a una lente convergente pasando por el foco, se refracta paralelo al eje principal (2).

- Cualquier rayo que llegue a una lente convergente pasando por el centro óptico, se refracta sin cambiar de dirección (3).

Para las lentes divergentes, los rayos notables son los siguientes:

- Cualquier rayo que llegue a una lente divergente paralelo al eje principal, se refracta en dirección del foco del mismo lado de la lente de donde viene la luz (4).
- Cualquier rayo que llegue a una lente divergente en dirección del foco del otro lado, se refracta paralelo al eje principal (5).
- Cualquier rayo que llegue a una lente divergente en dirección del centro óptico, se refracta sin cambiar de dirección (6).

POTENCIA DE UNALENTE

Se ha verificado experimentalmente que una lente es tanto más potente cuanto menor es su distancia focal. En símbolos:

$$P = \frac{1}{f} \text{ (para lentes convergentes)}$$

Por convención se ha establecido que si la distancia focal es de un metro la potencia es de una dioptría. Así la potencia se mide en dioptrías y la distancia focal en metros. De esta fórmula se deduce que para una distancia infinitamente grande la potencia es cero y los rayos no sufren desviación.

La fórmula para lentes divergentes es análoga pero negativa:

$$P = -\left(\frac{1}{f}\right)$$

La fórmula de los focos conjugados es la misma que en espejos.

Reflexión difusa

Cuando iluminamos una hoja de papel en un cuarto oscuro pareciera que la hoja difundiría la luz haciendo que gran parte de la habitación se ilumine. Esto se llama reflexión difusa y sucede a partir de numerosas reflexiones y refracciones que ocurren en la hoja.

Parte 3: Óptica Física. Polarización. Interferencia. Difracción. Espectroscopia.

COLOR

Los colores simples (los del arco iris) son ondas que difieren en su longitud de onda. Esa es la única diferencia entre ellos. El blanco es el color que contiene a todos ellos, es decir que si descomponemos al blanco obtendremos toda la gama de colores simples. Podemos descomponer al blanco utilizando un prisma, como el índice de refracción depende de la longitud de onda los rayos se van desviando de manera distinta y por lo tanto se separan.

INTERFERENCIA

Cuando dos disturbios de onda se combinan, en tal forma que los picos de una onda coinciden con los picos de la otra, las dos ondas se refuerzan para producir un disturbio mayor. Este proceso se conoce como interferencia constructiva. Por otro lado si los picos de una onda coinciden con los valles de la otra, entonces las ondas tendrán a cancelarse. Este proceso se conoce como interferencia destructiva.

El experimento clásico que demuestra la interferencia de la luz fue realizado primero por Thomas Young en 1801. Young separó la luz al pasarla por dos ranuras paralelas angostas. En una pantalla blanca colocada más allá de las ranuras se mostró un patrón de bandas alternadas claras y oscuras llamadas franjas de interferencia. Las franjas claras indican interferencia constructiva y las oscuras indican interferencia destructiva de las dos ondas por las ranuras. Mediciones cuidadosas muestran que la interferencia constructiva ocurre en un punto dado en la pantalla en donde las dos longitudes de trayectoria óptica difieren en un número entero de longitudes de onda de la luz y la interferencia destructiva ocurre si la diferencia de trayectoria es un número entero de media longitud de onda.

Otro ejemplo familiar de interferencia de la luz se logra por los efectos del color en películas delgadas, tal como en películas de jabón. Estos efectos se deben a la interferencia de las ondas de luz que se reflejan de las superficies frontal y posterior de la película. Un efecto similar se nota cuando una lente de vidrio convexa se presiona contra una placa de vidrio plana, tal que se forma una delgada película de aire en forma de cuña. Cuando la luz se refleja de la región de contacto, se notan una serie de anillos de colores. Este fenómeno fue observado primero por Newton, y por ello se conocen como anillos de Newton.

La interferencia de la luz se usa en muchas formas prácticas. El estándar fundamental de longitud se basa en la longitud de onda de cierta línea espectral del gas kriptón. Luz desde una lámpara de kriptón se usa en conjunto con un interferómetro óptico para hacer mediciones precisas de longitud.

Otros usos de la interferencia es la película antirreflexión. Lentes y otras partes ópticas, usadas en todos los instrumentos finos, son cubiertos con delgadas capas transparentes de material diseñado para reducir pérdidas por reflexión, debido a interferencia destructiva. La luz que

sería de otro modo reflejada, es transmitida. En sistemas multilentes este proceso puede incrementar la eficiencia de un instrumento considerablemente.

Películas delgadas son también usadas en filtros de interferencia, en donde se utiliza interferencia constructiva en forma tal que permite que la luz de un color pase a través del filtro mientras refleja las otras longitudes de onda.

DIFRACCIÓN

Si un objeto opaco se coloca entre una fuente puntual de luz y una pantalla blanca, un examen cuidadoso muestra que el borde de la sombra no es perfectamente agudo, como lo predice la ley de propagación rectilínea de la óptica geométrica. Más bien se encuentra que una pequeña porción de luz se derrama dentro de la zona oscura y que franjas desvanecidas aparecen en la zona iluminada.

Otro fenómeno relacionado es el esparcimiento de un haz de luz a su paso por un pequeño agujero o separación angosta. El nombre dado a estas variantes de la óptica geométrica se conoce como difracción. La óptica geométrica provee resultados útiles en la mayoría de aplicaciones debido a que la longitud de onda de la luz visible es pequeña y los efectos de difracción no son importantes en circunstancias ordinarias.

Las características esenciales de la difracción se explican por el principio de Huygens, que establece que cada punto en un frente de onda que avanza, puede ser considerado la fuente de una nueva onda u onda secundaria. Las ondas secundarias se combinan para producir el nuevo frente de onda.

La difracción es particularmente aparente en la retícula de difracción, un dispositivo usado para separar luz en sus longitudes de onda componentes. La retícula se hace al rayar surcos o estrías cercanas espaciadas equidistantemente sobre una superficie de vidrio u otro material. Cuando la retícula se ilumina con un haz de luz paralelo, la onda incidente es descompuesta por las estrías en una serie de ondas secundarias.

La dirección de la cual procede el nuevo frente de onda, está determinado por el requerimiento para que las ondas secundarias se refuercen una a otra. Este reforzamiento ocurre cuando la diferencia de trayectoria óptica entre ondas, desde estrías adyacentes, son un número entero de longitudes de onda. La mayoría de instrumentos espectroscópicos utilizan retículas, más que prismas para el elemento dispersivo básico.

POLARIZACIÓN

La naturaleza transversal de las ondas de luz es revelado por el fenómeno de la polarización. Ciertos cristales naturales, particularmente la turmalina mineral, tiene la propiedad especial conocida como dicroísmo, en la cual se absorbe luz cuya vibración de campo eléctrico está en una dirección y transmite luz cuya vibración está a ángulo recto a esa dirección.

El producto sintético Polaroid es dicroico. Cuando luz ordinaria, la cual tiene direcciones aleatorias de vibración, pasa por un polarizador hecho de material dicroico. La luz emergente sale polarizada, en otras palabras tiene su vibración de campo eléctrico confinado a una cierta dirección.

Cuando luz polarizada se envía a través de un segundo polarizador, la luz será transmitida o absorbida, dependiendo de la orientación relativa de los dos polarizadores. Cuando luz natural

no polarizada se refleja desde una superficie suave, tal como la superficie de un camino mojado, se vuelve polarizada. Una lámina dicróica orientada apropiadamente, similar a la usada en anteojos Polaroid para el sol, reduce el brillo reflectivo por la absorción del componente polarizado de la luz.

ESPECTROSCOPIA

Es el estudio de la composición energética de las radiaciones mediante su análisisespectral y es una potente herramienta para los químicos en el reconocimiento de sustancias.

PARTE 4: Historia y actualidad de la naturaleza de la luz

Breve recopilación historica:

¿Qué es la luz?. Es Isaac Newton (1642 - 1727) el que formula la primera hipótesis científica sobre la naturaleza de la luz.

Modelo corpuscular: Conocida como teoríacorpuscular o de la emisión, es el primer modelo exitoso en explicar el comportamiento de la luz. En gran parte se debe a la autoridad de Newton, ya que en esa misma época el modelo ondulatorio trataba de explicar el mismo fenómeno.

A finales del siglo XVI, con el uso de lentes e instrumentos ópticos, empezaron a observar, analizar y experimentar los fenómenos luminosos, siendo el holandés Willebrord Snell, en 1620, quién descubrió de manera experimental la ley de la refracción, aunque no fue conocida hasta que, en 1638, René Descartes (1596-1650) publicó su tratado "Óptica". Descartes fue el primer gran defensor de la teoría corpuscular, diciendo que la luz se comportaba como un proyectil que se propulsaba a velocidad infinita. Sin especificar absolutamente nada sobre su naturaleza y rechazando que cierta materia fuera de los objetos al ojo, explicó claramente el fenómeno de reflexión, pero tuvo alguna dificultad con la refracción.

En 1672 Newton envió una breve exposiciónde su teoría de los colores a la Royal Society de Londres. Su publicación provocó tantas críticas que confirmaron su recelo a las publicaciones, por lo que se retiró a la soledad de su estudio en Cambridge. En 1704, sin embargo, publicó su obra Óptica, en la que explicaba detalladamente su teoría. En esta obra explicaba que las fuentes luminosas emiten corpúsculos muy livianos que se desplazan a gran velocidad y en línea recta. Según su teoría la variación de intensidad de la fuente luminosa era proporcional a la cantidad de corpúsculos que emitía en determinado tiempo. La reflexión de la luz consistía en la incidencia de dichos corpúsculos en forma oblicua sobre una superficie espejada, de manera que al llegar a ella variaba de dirección pero siempre en el mismo medio. La igualdad del ángulo de incidencia con el de reflexión se debía a que tanto antes como después de la reflexión los corpúsculos conservaban la misma velocidad (debido a que permanecían en el mismo medio). La refracción la resolvió expresando que los corpúsculos que inciden oblicuamente en una superficie de separación de dos medios de distinta densidad son atraídos por la masa del medio más denso y, por lo tanto, aumenta la componente de la velocidad que es la velocidad que es perpendicular a la superficie de separación, razón por la cual los corpúsculos luminosos se acercan a la normal.

Según lo expresado por Newton en su obra, la velocidad de la luz aumentaría en los medios de mayor densidad, lo cual contradice los resultados de los experimentos realizados años después. Esta explicación, contradictoria con los resultados experimentales sobre la velocidad de la luz

en medios más densos que el vacío, obligó al abandono de la teoría corpuscular para adoptar el modelo ondulatorio.

Modelo ondulatorio: Desde otro punto de vista, Christian Huygens (astrónomo, matemático y físico holandés) en el año 1678, describe y explica lo que hoy se considera las leyes de reflexión y refracción. Define a la luz como un movimiento ondulatorio semejante a la propagación del sonido, de tipo mecánico, que necesita un medio material para propagarse. Supuso tres hipótesis:

- 1.
2. Todos los puntos de un frente de ondas son centros emisores de ondas secundarias.
3. De todo centro emisor se propagan ondas en todas direcciones del espacio con velocidad distinta en cada medio.
4. Como la luz se propaga en el vacío y necesita un material perfecto sin rozamiento, supuso que todo el espacio estaba ocupado por *éter*.

Las ondas mecánicas requieren de algún medio material que las transporte, para las ondas lumínicas se suponía la existencia de una materia insustancial e invisible a la cual se le llamó éter, la que debía estar esparcida por todo el espacio. Justamente la existencia del éter fue el principal problema de la teoría ondulatoria.

En aquella época, la teoría de Huygens no fue muy considerada, fundamentalmente, y tal como se ha mencionado, dado al prestigio que alcanzó Newton. Pasó más de un siglo para que fuera tomada en cuenta gracias a los experimentos del médico inglés Thomas Young sobre los fenómenos de interferencias luminosas, y los del físico francés Auguste J. Fresnel sobre la difracción, que fueron decisivos para que se colocara en la tabla de estudios de los físicos sobre la luz, la propuesta realizada por Huygens en el siglo XVII.

Thomas Young demostró experimentalmente un hecho paradójico que no se podía explicar desde la teoría corpuscular: la suma de dos fuentes luminosas pueden producir menos luminosidad que por separado. Su experiencia consistía en practicar dos minúsculas ranuras muy próximas entre sí sobre una tela negra en la que se hace incidir luz de un pequeño y distante foco apareciendo sobre la pantalla (colocada a determinada distancia de la tela) en forma de líneas alternativamente brillantes y oscuros. ¿Cómo explicar el efecto de ambas ranuras, que por separado darían un campo iluminado, combinadas producen sombra en ciertas zonas? Young logró explicar la alternancia de las franjas asociando las ondas de luz al comportamiento de las ondas acuáticas. Si las ondas suman sus crestas hallándose en concordancia de fase, la vibración resultante será intensa y se verá una zona clara. Por el contrario, si la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la vibración resultante será nula, viéndose una zona oscura. Deducción simple imputada a una interferencia y se desarrolla la idea de la luz como estado vibratorio de una materia insustancial e invisible, el éter, al cual se le resucita. (ver interferencia)

Ahora bien, la colaboración de Auguste Fresnel para el rescate de la teoría ondulatoria de la luz estuvo dada por el aporte matemático que le dio rigor a las ideas propuestas por Young y la explicación que presentó sobre el fenómeno de la polarización al transformar el movimiento ondulatorio longitudinal, supuesto por Huygens y ratificado por Young, quien creía que las vibraciones luminosas se efectuaban en dirección paralela a la propagación de la onda luminosa, en transversales. Pero aquí, y pese a las sagaces explicaciones que incluso rayan en

las adivinanzas dadas por Fresnel, inmediatamente queda presentada una gran contradicción a esta doctrina, ya que no es posible que se pueda propagar en el éter la luz por medio de ondas transversales, debido a que éstas sólo se propagan en medios sólidos.

En su trabajo, Fresnel explica una multiplicidad de fenómenos manifestados por la luz polarizada. Observa que dos rayos polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero no lo hacen si están polarizados entre sí cuando se encuentran perpendicularmente. Este descubrimiento lo invita a pensar que en un rayo polarizado debe ocurrir algo perpendicularmente en dirección a la propagación y establece que ese algo no puede ser más que la propia vibración luminosa. La conclusión se impone: las vibraciones en la luz no pueden ser longitudinales, como Young lo propusiera, sino perpendiculares a la dirección de propagación, transversales.

Las distintas investigaciones y estudios que se realizaron sobre la naturaleza de la luz, en la época engendraron aspiraciones de mayores conocimientos sobre la luz. Entre ellas, se encuentra la de lograr medir la velocidad de la luz con mayor exactitud que la permitida por las observaciones astronómicas (En 1670 el astrónomo danés Olaf Roemer pudo calcular la velocidad de la luz observando el eclipse de una de las lunas de Jupiter). Hippolyte Fizeau (1819- 1896) concretó el proyecto en 1849 con un clásico experimento. Hizo pasar la luz reflejada por dos espejos entre los intersticios de una rueda girando rápidamente, determinó la velocidad que podría tener la luz en su trayectoria, que estimó aproximadamente en 300.000 km./s. Después de Fizeau, lo siguió León Foucault (1819 – 1868) al medir la velocidad de propagación de la luz a través del agua. Este experimento fue de gran interés, ya que sirvió de criterio para analizar la veracidad beligerante entre la teoría corpuscular y la ondulatoria. La primera teoría requería que la velocidad fuese mayor en el agua que en el aire; lo contrario exigía, la segunda. En sus experimentos logró comprobar que la velocidad de la luz cuando transcurre por el agua es inferior a la que desarrolla cuando transita por el aire. La teoría ondulatoria adquiere cierta preeminencia sobre la corpuscular, y pavimenta el camino hacia la gran síntesis realizada por Maxwell.

Velocidad de la Luz: en 1670, por primera vez en la historia, el astrónomo danés Olaf Roemer (1644-1710) pudo calcular la velocidad de la luz. Se hallaba estudiando los eclipses de una de las lunas de Júpiter, cuyo período había determinado tiempo atrás. Estaba en condiciones de calcular cuales serían los próximos eclipses. Se dispuso a observar uno de ellos, y con sorpresa vio que a pesar de que llegaba el instante tan cuidadosamente calculado por él, el eclipse no se producía. El satélite demoró 996 seg. en desaparecer. Presupuso que la demora era producida debido a que la luz debía recorrer una distancia suplementaria de 299.000.000 Km., que es el diámetro de la órbita terrestre. Su observación anterior correspondía a una estación distinta del año y la posición de la Tierra no era la misma.

Suponiendo que la luz se propagara a velocidad constante y en línea recta se puede calcular la velocidad de propagación dividiendo el espacio recorrido por el tiempo tardado: $V_{luz} = 299.000.000 \text{ Km} : 996 \text{ seg.} = 300.200 \text{ Km/seg.}$

Observaciones posteriores llevaron a la conclusión que el atraso en cuestión era de 1.002 seg., lo cual da por resultado que la velocidad de la luz sería de 298.300 Km/seg.

En 1849, el físico francés Fizeau, logró medir la velocidad de la luz mediante una experiencia hecha en la Tierra. Para calcular la velocidad con la que la luz realizaba el recorrido total, colocó una rueda dentada delante del haz luminoso, de modo que los dientes bloquearan la luz

y los espacios intermedios la dejaran pasar. La velocidad de rotación de la rueda, muy elevada, se regulaba de modo que la luz que pasaba entre dos dientes tuviera justo el tiempo de llegar hasta la ventana y volver, antes de ser ocultada por el siguiente diente. Conociendo la distancia recorrida por el haz luminoso y la velocidad de rotación de la rueda, Fizeau obtuvo una medida de la velocidad de la luz

La rueda tiene igual cantidad de dientes y espacios entre ellos, X dientes y X espacios, por lo tanto su perímetro será $2X$. Da n vueltas por segundo (que es la frecuencia con que gira), o sea que, por cada segundo pasan $2 \cdot xn$ dientes y espacios. El tiempo es inversamente proporcional a la frecuencia, de allí que: $t = (2xn)^{-1}$.

Cuando no llega más luz al observador es evidente que los tiempos de ida y de vuelta son iguales. Aplicando las ecuaciones de MRU tenemos: $V = 2d / t = 2d / (2xn)^{-1} = 2d \cdot 2xn = 4d \cdot xn$

Fizeau colocó el espejo a 8.633 m del observador, la rueda tenía 760 dientes y giraba a 12,6 revoluciones por segundo.

Si aplicamos la fórmula obtenida, resultará: $v = 313.274 \text{ Km./seg.}$

León Foucault y Fizeau (casi simultáneamente), hallaron en 1850 un método que permite medir la velocidad de la luz en espacios reducidos. La idea consiste en enviar un haz de luz sobre un espejo giratorio haciéndole atravesar una lámina de vidrio semitransparente y semirrefletores, un espejo fijo devuelve el rayo y atraviesa luego lámina observándose la mancha luminosa en una pantalla. Con este método se obtuvo que: $v = 295.680 \text{ Km./seg.}$

En general todas las mediciones de que se tiene conocimiento obtuvieron resultados entre 298.000 Km/seg y 313.300 Km/seg sin embargo se toma como velocidad de la luz la de 300.000 Km/seg por ser un término medio entre los valores obtenidos y por ser una cifra exacta que facilitan los cálculos.

Modelo electromagnético: los físicos sabían desde principios del siglo XIX que la luz se propaga como una onda transversal (una onda en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de avance del frente de ondas). Sin embargo, suponían que las ondas de luz requerían algún medio material para transmitirse, por lo que postulaban la existencia de una sustancia difusa, llamada éter, que constituía el medio no observable. Maxwell apareció con una teoría que hacía innecesaria esa suposición, pero el concepto de éter no se abandonó inmediatamente, porque encajaba con el concepto newtoniano de un marco absoluto de referencia espaciotemporal.

James Clerk Maxwell (1831-1879), físico inglés, dio en 1865 a los descubrimientos sobre la relación entre campos eléctricos y magnéticos había realizado el genial autodidacta Michael Faraday, un andamiaje matemático y logró reunir los fenómenos ópticos y electromagnéticos hasta entonces identificados dentro del marco de una teoría de reconocida hermosura y de acabada estructura. En la descripción que hace de su propuesta, Maxwell propugna que cada cambio del campo eléctrico engendra en su proximidad un campo magnético, e inversamente cada variación del campo magnético origina uno eléctrico.

Dado que las acciones eléctricas se propagan con velocidad finita de punto a punto, se podrán concebir los cambios periódicos - cambios en dirección e intensidad - de un campo eléctrico como una propagación de ondas. Tales ondas eléctricas están necesariamente acompañadas

por ondas magnéticas indisolublemente ligadas a ellas (variación de campos inducidos). Los dos campos, eléctrico y magnético, periódicamente variables, están constantemente perpendiculares entre sí y a la dirección común de su propagación. Son, pues, ondas transversales semejantes a las de la luz. Por otra parte, las ondas electromagnéticas se transmiten, como se puede deducir de las investigaciones de Webery Kohlrausch, con la misma velocidad que la luz. De esta doble analogía, y haciendo gala de una espectacular volada especulativa Maxwell termina concluyendo que la luz consiste en una perturbación electromagnética que se propaga en el éter. Ondas eléctricas y ondas luminosas son fenómenos idénticos.

Veinte años más tarde, Heinrich Hertz (1857-1894) comprueba que las ondas hertzianas de origen electromagnético tienen las mismas propiedades que las ondas luminosas, estableciendo con ello, definitivamente, la identidad de ambos fenómenos.

Hertz, en 1888, logró producir ondas por medios exclusivamente eléctricos y, a su vez, demostrar que estas ondas poseen todas las características de la luz visible, con la única diferencia de que las longitudes de sus ondas son manifiestamente mayores. Ello, deja en evidencia que las ondas eléctricas se dejan refractar, reflejar y polarizar, y que su velocidad de propagación es igual a la de la luz. La propuesta de Maxwell quedaba confirmada: ¡la existencia de las ondas electromagnéticas era una realidad inequívoca! Establecido lo anterior, sobre la factibilidad de transmitir oscilaciones eléctricas sin inalámbricas, se abrían las compuertas para que se produjera el desarrollo de una multiplicidad de inventivas que han jugado un rol significativo en la evolución de la naturaleza humana contemporánea.

Pero las investigaciones de Maxwell y Hertz no sólo se limitaron al ámbito de las utilidades prácticas, sino que también trajeron con ellas importantes consecuencias teóricas. Todas las radiaciones se revelaron de la misma índole física, diferenciándose solamente en la longitud de onda en la cual se producen. Su escala comienza con las largas ondas hertzianas y, pasando por la luz visible, se llegan a la de los rayos ultravioletas, los rayos X, los radiactivos, y los rayos cósmicos.

Sin embargo, la teoría electromagnética de Maxwell, pese a su belleza, deja sin explicación fenómenos como el fotoeléctrico, y la emisión de luz por cuerpos incandescentes. En consecuencia, pasado el entusiasmo inicial, fue necesario para los físicos, como lo hizo Planck (a regañadientes) en 1900, retomar la teoría corpuscular. La salida al dilema que presentaban las diferentes teorías sobre la naturaleza de la luz, empezó a tomar forma en 1895 en la mente de un estudiante de dieciséis años, Albert Einstein, que en el año 1905, en un ensayo publicado en el prestigioso periódico alemán Anales de la física, abre el camino para eliminar la dicotomía que existía sobre las consideraciones que se hacían sobre la luz al introducir el principio que más tarde se haría famoso como relatividad.

La luz es, de acuerdo a la visión actual, una oscilación electromagnética que se propaga en el vacío cuya longitud de onda es muy pequeña, unos 6.500 Å para la luz roja y unos 4.500 Å para la luz azul. (1Å = un Angstrom, corresponde a una décima de milimicra, esto es, una diez millonésima de milímetro).

Por otra parte, la luz es una parte insignificante del espectro electromagnético. Más allá del rojo está la radiación infrarroja; con longitudes de ondas aún más largas la zona del infrarrojo lejano, las microondas de radio, y luego toda la gama de las ondas de radio, desde las ondas de centímetros de longitud, metros y decámetros, hasta las ondas largas de radiocomunicación,

con longitudes de cientos de metros y más. Por ejemplo, el dial de amplitud modulada, la llamada onda media, va desde 550 y 1.600 kilociclos por segundo, que corresponde a una longitud de onda de 545 a 188 metros, respectivamente.

Ondas	Radio AM	Onda Corta	Radio FM	Microondas	Infrarrojos	Ultravioleta	Rayos x	Rayos Gamma
-------	----------	------------	----------	------------	-------------	--------------	---------	-------------

En física, se identifica a las ondas por lo que se llama longitud de onda, distancia entre dos máximos y por su frecuencia, número de oscilaciones por segundo, que se cuenta en un punto, y se mide en ciclos por segundo (oscilaciones por segundo). El producto de ambas cantidades es igual a la velocidad de propagación de la onda.

En el otro extremos del espectro electromagnético se encuentra la radiación ultravioleta, luego los rayos x y a longitudes de onda muy diminutas los rayos.

La atmósfera terrestre es transparente sólo en la región óptica, algo en el infrarrojo y en la zona de ondas de radio. Por ello, es que la mayor información que hemos obtenido sobre el universo ha sido a través de la ventana óptica, aunque en las últimas décadas la radioastronomía ha venido jugando un rol sustancial en la entrega de conocimientos sobre el cosmos, proporcionando datos cruciales. Observaciones en el ultravioleta, rayos X, como así también de parte del infrarrojo, hay que efectuarlas con instrumentos ubicados fuera de la atmósfera de la Tierra. Sin embargo, es posible también obtener resultados en el infrarrojo con instrumentación alojada en observatorios terrestres empotrados a gran altura sobre el nivel del mar o con tecnología puesta en aviones o globos que se eleven por sobre la baja atmósfera, que contiene la mayor parte del vapor de agua, que es la principal causa de la absorción atmosférica en el infrarrojo.

Dilema actual: Hoy en día no se sabe fehacientemente cual es la naturaleza de la luz. Ambos modelos tanto el electromagnético como el cuántico, que plantea la existencia de los fotones de Einstein, coexisten en un marco de incertidumbre. El modelo más fuerte es el cuántico ya que la mecánica cuántica después de las leyes del movimiento de Newton es la mejor teoría experimentalmente probada. Pero la existencia de partículas con energía pero sin masa llama mucho la atención. Para entender mejor el tema podríamos hacer una sencilla analogía: si nosotros viviéramos en la prehistoria e intentáramos analizar científicamente al viento nos encontraríamos en un gran problema. Al no tener ningún conocimiento previo y tampoco disponer de instrumentos tales como microscopios llegaríamos a una conclusión bastante incoherente. No nos quedaría más que definir al viento como algo con energía y sin masa, porque al no poder verlo y si sentirlo (es decir ver que ejerce fuerzas) no tendríamos otra opción. Quizás hoy en día no tengamos los instrumentos para ver qué son verdaderamente los fotones.

PARTE 4: Fotometría

La luz, al igual que las ondas de radio, los rayos X o los gamma es una forma de energía. Si la energía se mide en joules (J) en el Sistema Internacional, para qué necesitamos nuevas unidades. La razón es más simple de lo que parece. No toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume, por ejemplo, una bombilla se convierte en luz. Todo esto se ha de evaluar de alguna manera y para ello

definiremos nuevas magnitudes: el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la iluminancia, la luminancia, el rendimiento o eficiencia luminosa y la cantidad de luz.

Flujo luminoso

Para hacernos una primera idea consideraremos dos bombillas, una de 25 W y otra de 60 W. Está claro que la de 60 W dará una luz más intensa. Pues bien, esta es la idea: ¿cuál luce más? o dicho de otra forma ¿cuánto luce cada bombilla?

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

Cuando hablamos de 25 W o 60 W nos referimos sólo a la potencia consumida por la bombilla de la cual solo una parte se convierte en luz visible, el llamado flujo luminoso. Podríamos medirlo en watts (W), pero parece más sencillo definir una nueva unidad, el **lumen**, que tome como referencia la radiación visible. Empíricamente se demuestra que a una radiación de 555 nm de 1 W de potencia emitida por un cuerpo negro le corresponden 683 lumen.

Se define el **flujo luminoso** como la potencia (W) 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 watts y lúmenes se le llama **equivalente luminoso de la energía** y equivale a:

$$1 \text{ watt-luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$

	Símbolo: Φ
Flujo luminoso	
	Unidad: lumen (lm)


Intensidad luminosa

El flujo luminoso nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo una bombilla, en todas las direcciones del espacio. Por contra, si pensamos en un proyector es fácil ver que sólo ilumina en una dirección. Parece claro que necesitamos conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso definimos la intensidad luminosa.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

Diferencia entre flujo e intensidad luminosa.

Se conoce como **intensidad luminosa** al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. Su símbolo es I y su unidad la candela (cd).

	Símbolo: I	
Intensidad luminosa	$I = \frac{\Phi}{\omega}$	
	Unidad: candela (cd)	

Iluminancia

Quizás haya jugado alguna vez a iluminar con una linterna objetos situados a diferentes distancias. Si se pone la mano delante de la linterna podemos ver esta fuertemente iluminada por un círculo pequeño y si se ilumina una pared lejana el círculo es grande y la luz débil. Esta sencilla experiencia recoge muy bien el concepto de iluminancia.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

Concepto de iluminancia.

Se define **iluminancia** como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad el lux (lx) que es un lm/m².

Iluminancia $E = \frac{\Phi}{S}$	Símbolo: E	$\text{lux} = \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$
	Unidad: lux (lx)	

Existe también otra unidad, el *foot-candle*(fc), utilizada en países de habla inglesa cuya relación con el lux es:

1 fc \approx 10 lx
1 lx \approx 0.1 fc

En el ejemplo de la linterna ya pudimos ver que la iluminancia depende de la distancia del foco al objeto iluminado. Es algo similar a lo que ocurre cuando hacemos interactuar dos imanes, cuando alejamos los imanes la fuerza disminuye considerablemente. Lo que ocurre con la iluminancia se conoce por la **ley inversa de los cuadrados** que relaciona la intensidad luminosa (I) y la distancia a la fuente. Esta ley solo es válida si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

¿Qué ocurre si el rayo no es perpendicular? En este caso hay que descomponer la iluminancia recibida en una componente horizontal y en otra vertical a la superficie.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

A la componente horizontal de la iluminancia (EH) se le conoce como la **ley del coseno**. Es fácil ver que si $\alpha = 0$ nos queda la ley inversa de los cuadrados. Si expresamos EH y EV en función de la distancia del foco a la superficie (h) nos queda:

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

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

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

Luminancia

Hasta ahora hemos hablado de magnitudes que informan sobre propiedades de las fuentes de luz (flujo luminoso o intensidad luminosa) o sobre la luz que llega a una superficie (iluminancia). Pero no hemos dicho nada de la luz que llega al ojo que a fin de cuantases la que vemos. De esto trata la luminancia. Tanto en el caso que veamos un foco luminoso como en el que veamos luz reflejada procedente de un cuerpo la definición es la misma.

Se llama **luminancia** a la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la cd/m². También es posible encontrar otras unidades como el stilb (1 sb = 1 cd/m²) o el nit (1 nt = 1 cd/cm²).

<p>Luminancia</p> $L = \frac{I}{S_{\text{aparente}}} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$	<p>Símbolo: L</p> <hr/> <p>Unidad: cd/m²</p>	
---	---	--

Es importante destacar que sólo vemos luminancias, no iluminancias.

Rendimiento luminoso o eficiencia luminosa

Ya mencionamos al hablar del flujo luminoso que no toda la energía eléctrica consumida por una lámpara (bombilla, fluorescente, etc.) se transformaba en luz visible. Parte se pierde por calor, parte en forma de radiación no visible (infrarrojo o ultravioleta), etc.

Para ver el gráfico seleccione la opción "Descargar" del menú superior

Para hacernos una idea de la porción de energía útil definimos el **rendimiento luminoso** como el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida, que viene con las características de las lámparas (25 W, 60 W...). Mientras mayor sea mejor será la lámpara y menos gastará. La unidad es el lumen por watt (lm/W).

<p>Rendimiento luminoso</p> $\eta = \frac{\Phi}{W}$	<p>Símbolo: η</p> <hr/> <p>Unidad: lm / W</p>	$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Potencia consumida}}$
---	---	--

Cantidad de luz

Esta magnitud sólo tiene importancia para conocer el flujo luminoso que es capaz de dar un flash fotográfico o para comparar diferentes lámparas según la luz que emiten durante un cierto periodo de tiempo. Su símbolo es Q y su unidad es el lumen por segundo (lm·s).

<p>Cantidad de luz</p> $Q = \Phi \cdot t$	<p>Símbolo: Q</p> <hr/> <p>Unidad: lm·s</p>
---	---

Todos estos conceptos son válidos para la iluminación de interiores, en los cuales las propiedades de físicas de la fuente luminosa (forma, longitud) son despreciables. Para la

iluminación de calles, estadios deportivos, industrias, se utilizan gráficos y diagramas (a veces realizados por programas de computadoras) que si tienen en cuenta los aspectos antes citados.

Bibliografía:

Artículos extraídos de Internet acerca de Fotometría, Naturaleza de la Luz, óptica física y Lentes Delgadas

Parte de óptica geométrica extraída del libro "Física de Tercer Año escuelas de educación técnica" Carlos R. Miguel.

Parte de la Luz como onda electromagnética extraída del libro "Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería" Parte dos de Hallyday-Resnick.

Autor:

Guido de Giovanni

alumno de escuela técnica

[gldg86\[arroba\]yahoo.com.ar](mailto:gldg86@yahoo.com.ar)

Profesor a cargo de la corrección: Ing. Jorge Ivaldi