Para visualizar lo que representa un estereorradián, consideremos una esfera hueca de radio (R), en cuyo centro se coloca una fuente puntual que emite luz uniformemente en todas direcciones. Si cuatro radios a partir de la fuente puntual determinan sobre la superficie de la esfera una área igual a R^2, el ángulo definido por los cuatro radios es una unidad de ángulo sólido, es decir un estereorradián.

Estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área (A) sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio.

El estereorradián es una cantidad física adimensional, igual que el radián.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso emitido por una fuente estándar a través de una abertura de $\frac{1}{60}$ cm² realizada en un ángulo sólido de un estereorradián.

Lo que se considera como una fuente estándar es un recipiente esférico hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino, alrededor de 1773 °C. El lumen en sí mide el brillo por comparación con la fuente estándar.

Intensidad luminosa.

La intensidad luminosa (I) es la razón del flujo luminoso a la unidad del ángulo sólido. En el Sistema Internacional la unidad de intensidad luminosa es el lumen sobre estereorradián, a esta razón de unidades se le llama candela (cd). Inicialmente se estableció esta unidad a partir de una candela o vela con ciertas especificaciones, las cuales no eran estables en la intensidad de luz que emitían, por lo que no fue un patrón de referencia confiable. Ahora, la fuente de luz considerada es un sexagésimo de un centímetro cuadrado de toria (óxido blanco del elemento torio) fusionado y mantenido a 2045°K (temperatura de congelación del platino), a esta temperatura la toria se torna incandescente y emite luz de manera constante y confiable, ver fig. 32.

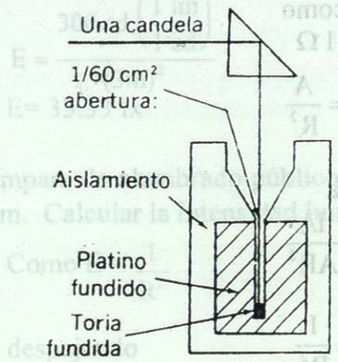

Figura 32.- Manera de obtener una unidad candela de intensidad luminosa.

Una fuente isotrópica es aquélla que emite uniformemente luz en todas direcciones.

Iluminación

La iluminación (E) sobre una superficie (A) se define como el flujo luminoso (F) en la unidad de área. Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso es decir

$$E = \frac{F}{A}$$

cuando el flujo luminoso (F) se mide en lumen (lm) y el área (A) en metros cuadrados (m²), la iluminación (E) tiene unidades de lm/m² o lux (lx).

La luz irradiada por una fuente puntual es emitida en todas direcciones, al aumentar la distancia, la luz se dispersa y una superficie alejada recibe menos iluminación, por lo tanto la cantidad de iluminación que recibe una superficie es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a la fuente.

La iluminación se puede expresar en término de la intensidad luminosa y de la distancia respecto a la fuente, es decir

$$E = \frac{F}{A}$$

y como

$$F = I\,\Omega$$

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

Al sustituir en la ecuación anterior, resulta

$$E = \frac{IA}{AR^2}$$

eliminando A se tiene

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

Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso.

Observa que las unidades de intensidad (cd) y las unidades de flujo (lm) son dimensionalmente las mismas. Esto es cierto, ya que el ángulo sólido en estereorradianes es adimensional.

El brillo fotométrico o luminancia es la intensidad luminosa de una superficie en una dirección dada, por unidad de área proyectada de la misma. El ojo capta brillo, no iluminación de los objetos visibles.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 1.- Una superficie de escritorio está 2 m abajo de una lámpara de 160 candelas. Calcular la iluminación en la superficie .

I= 160 cd Como $E = \frac{I}{R^2}$

R= 2 m sustituyendo $E = \frac{160\text{ cd}\left(\frac{1\text{lm}}{1\text{cd}}\right)}{(2\text{m})^2}$

$$E = 40\,\frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

$$E = 40\text{ lx}$$

Ejemplo 2.- Si una lámpara eléctrica de 300 candelas está a 3 m de altura. Calcular la iluminación en el suelo.

I= 300 cd Como $E = \frac{I}{R^2}$

R= 3 m sustituyendo

$$E = \frac{300\text{ cd}\left(\frac{1\text{ lm}}{1\text{ cd}}\right)}{(3\text{m})^2}$$

$$E = 33.33\text{ lx}$$

Ejemplo 3. Una lámpara de alumbrado público produce 3.8 lux de iluminación a una distancia de 10 m. Calcular la intensidad luminosa de la lámpara.

E= 3.8 lx Como $E = \frac{I}{R^2}$

R= 10 m

despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(3.8\,\frac{\text{lm}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{1\text{cd}}{1\text{lm}}\right)(10\text{m})^2$$

$$I = 380\text{ cd}$$

Ejemplo 4. Calcular la distancia a la que debe colocarse una lámpara eléctrica de 300 candelas para que produzca sobre la superficie de una mesa una iluminación de 60 lux.

I = 300 cd Como $E = \frac{I}{R^2}$

E = 60 lx despejando

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

$$R = \sqrt{\frac{I}{E}}$$

sustituyendo

$$R = \sqrt{\frac{300\text{ cd }(1\text{ lm}/1\text{ cd})}{60\text{ lm}/\text{m}^2}}$$

$$R = 2.24\text{ m.}$$

Ejemplo 5. Una lámpar ubicada a 1.5 m de una superficie pr luce una iluminación de 225 lux sobr esta superficie. Calcular la intensidad de la fuente.

R = 1.5 m

E = 225 lx

Como $E = \frac{I}{R^2}$

despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(225 \frac{lm}{m^2}\right)(1.5\ m)^2$$

$$I = 506.25\ lm \left(\frac{1\ cd}{1\ lm}\right)$$

$$I = 506.25\ cd$$

Ejemplo 6. Se suspende una luz a 9 m por encima del piso de la calle y proporciona una iluminación de 36 lux en un punto directamente debajo de ella. Determinar la intensidad luminosa.

R = 9m

E = 36 lx

Como $E = \frac{I}{R^2}$

despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(36 \frac{lm\ (1\ cd / 1\ lm)}{m^2}\right)(9m)^2$$

$$I = 2{,}916\ cd.$$

5.- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTRO VISIBLE

El espectro electromagnético lo constituyen las diferentes clases de radiación electromagnética que existen, todas ellas son ondas electromagnéticas que poseen un campo eléctrico y un campo magnético, son ondas transversales, su diferencia básica de cada clase es su frecuencia y su longitud de onda. La velocidad de propagación de todas las radiaciones electromagnéticas es de 300,000 km/s en el vacío, Maxwell fue el primero en proponer y comprobar lo anterior.

En el espectro se puede visualizar cómo la longitud de onda decrece de manera progresiva y se empieza con las ondas largas de radio, ondas cortas de radio, infrarrojo, región de luz visible, ultravioleta, rayos X, rayos gamma. ver fig. 33.

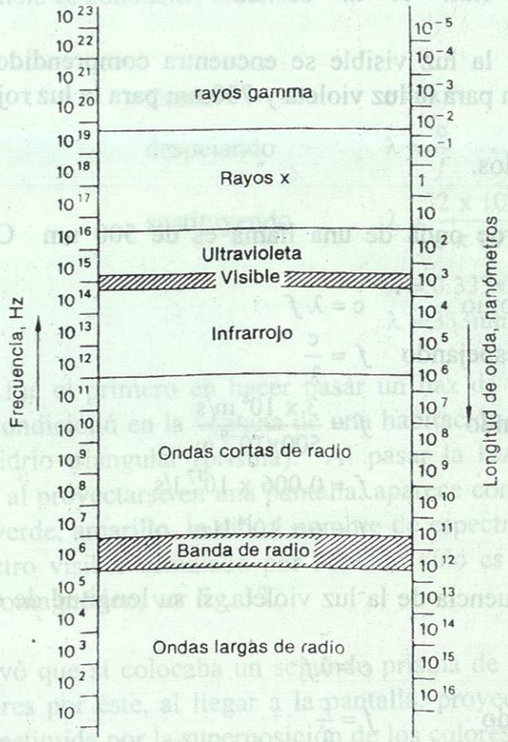

Figura 33. . Espectro electromagnético.

Las regiones del espectro se superponen un poco entre sí, cada región tiene sus propias características, sin embargo, todas las regiones corresponden a radiación electromagnética.

La longitud de onda (λ) de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia (f) por la ecuación general

$$c = \lambda f$$

En donde **c** es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) en el vacío.

La región de luz visible del espectro electromagnético está comprendida en longitudes de onda entre 0.00004 cm y 0.00007 cm, como son muy pequeñas, dichas longitudes se expresan en función del nanómetro en el Sistema Internacional.

$$1\text{nm} = 10^{-9}\,\text{m} = 10^{-7}\,\text{cm}$$

Por lo tanto, el espectro de la luz visible se encuentra comprendido entre las longitudes de onda de 400 nm para la luz violeta y 700 nm para la luz roja.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 7.- Si la longitud de onda de una llama es de 500 nm Calcular su frecuencia.

λ=500nm Como $c = \lambda f$

$c = 3 \times 10^8$ m/s despejando $f = \dfrac{c}{\lambda}$

sustituyendo $f = \dfrac{3 \times 10^8\,\text{m/s}}{500\times10^{-9}\,\text{m}}$

$f = 0.006 \times 10^{17}$ 1/s

$f = 6 \times 10^{14}$ Hz

Ejemplo 8.- Calcular la frecuencia de la luz violeta, si su longitud de onda es de 410 nm.

$\lambda = 410$nm Como $c = \lambda f$

$c = 3 \times 10^8$ m/s despejando $f = \dfrac{c}{\lambda}$

sustituyendo $f = \dfrac{3\times10^8\,\text{m/s}}{410\times10^{-9}\,\text{m}}$

$f = 0.0073\times10^{17}$ 1/s

$f = 7.3\times10^{14}$ Hz

Ejemplo 9.- Cuando una luz de longitud de onda de 500 nm pasa del aire a una placa de vidrio delgada y de nuevo hacia el aire, la frecuencia permanece constante, pero la velocidad de la luz en el vidrio se reduce a 2×10^8 m/s. Calcular su longitud de onda dentro del vidrio.

$\lambda = 500$nm Como $c = \lambda f$

$c = 3 \times 10^8$ m/s despejando $f = \dfrac{c}{\lambda}$

sustituyendo $f = \dfrac{3\times10^8\,\text{m/s}}{500\times10^{-9}\,\text{m}}$

$f = 0.006\times10^{17}$ 1/s

$f = 6\times10^{14}$ Hz

como la frecuencia es constante, entonces

$f = 6 \times 10^{14}$ 1/s

$c = 2 \times 10^8$ m/s Como $c = \lambda f$

despejando $\lambda = \dfrac{c}{f}$

sustituyendo $\lambda = \dfrac{2 \times 10^8\,\text{m/s}}{6 \times 10^{-14}\,\text{1/s}}$

$\lambda = 0.333\times10^6$ m

$\lambda = 333$nm

Isaac Newton fué el primero en hacer pasar un haz de luz solar a través de un orificio que acondicionó en la ventana de una habitación oscura y lo dirigió hacia un pequeño vidrio triangular (prisma). Al pasar la luz a través del prisma se descompone y al proyectarse en una pantalla, aparece como una banda de colores: violeta, azul, verde, amarillo, le dió el nombre de espectro a dicha banda, ver fig. 6. Este espectro visible estudiado por Newton sólo es una pequeña región del espectro electromagnético, ver fig. 33.

Newton observó que sí colocaba un segundo prisma de tal manera que pasara la banda de colores por éste, al llegar a la pantalla, proyectaba luz blanca. La luz blanca está constituída por la superposición de los colores del iris, los cuales pasan imperceptiblemente de uno a otro, desde el rojo hasta el violeta. La descomposición o dispersión de la luz es el fenómeno mediante el cual se obtienen los colores del iris, ver fig. 34.

Figura 34. Descomposición o dispersión de la luz blanca usando un prisma.

El espectro de los colores que forman la luz blanca, en el aire o en el vacío, tienen la misma velocidad de la luz, se distingue un color de otro por su frecuencia. La frecuencia del rojo es aproximadamente 3×10^{14} Hz y del violeta es 8×10^{14} Hz. A partir de la ecuación $c = \lambda f$ se tiene que la longitud de onda es mayor para el rojo que para el violeta, ver fig. 35. A partir de la figura se observa que la longitud de onda del espectro visible es de 7000 A° para el rojo y 4000 A° para el color violeta, en donde 1 angstrom (A°) = 10^{-10}m.

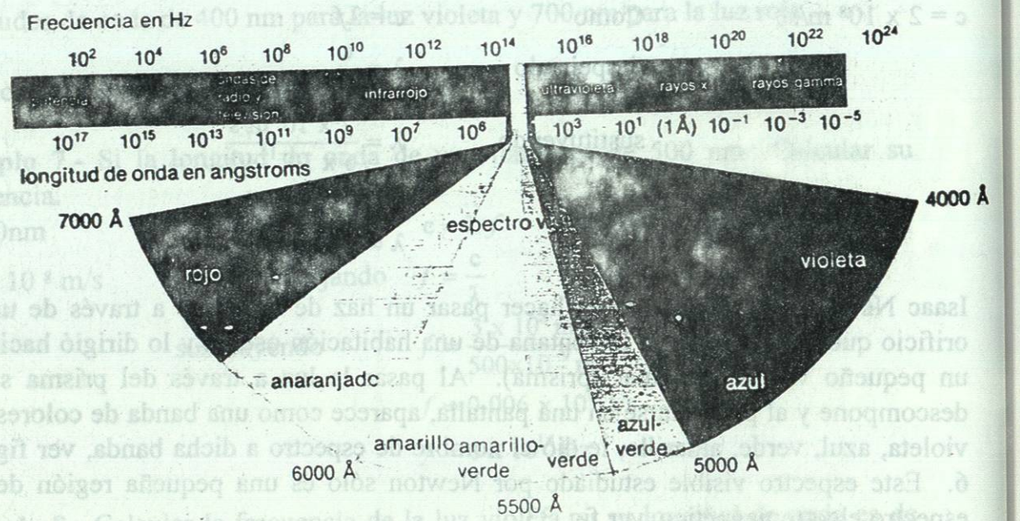

FIGURA 35 Espectro electromagnético.

La descomposición de la luz por un prisma de vidrio es debida a que cada uno de los colores tiene diferente índice de refracción, siendo el más refractado el violeta y el menos refractado el rojo, debido a que cada color tiene diferente velocidad a través del prisma, siendo el rojo el que se desvía menos por ser su velocidad mayor que la del color violeta, el cual se desvía más.

Por lo tanto Newton demostró que la luz está formada de diversos colores (desde el rojo hasta el violeta en la descomposición de la luz blanca), considerando los colores primarios de la luz el rojo, verde y azul, en tanto que el amarillo (combinación de la luz roja y azul), turquesa (verde y azul), magenta (rojo con azul) se llaman colores secundarios de la luz. Por ejemplo una pantalla de un televisor de color se pinta con 700000 puntos distribuídos en grupos de tres: uno que emite luz azul, otro verde, y otro rojo. De la parte posterior del tubo de T.V. provienen 3 haces de electrones. Las variaciones de colores se logran variando las intensidades de los haces.

Un objeto se ve de un color particular por la luz del color que refleja y absorbe los demás colores, por ejemplo una camisa roja se ve de este color porque refleja la luz roja, debido a que al incidir la luz blanca sobre la camisa, los pigmentos en el tinte absorben la luz de los colores restantes que la componen. Al hacer incidir luz azul, los pigmentos en el tinte absorberán toda la luz azul y no se reflejará ninguna luz y la camisa roja con luz azul que le incide se verá negra.

6.- REFLEXIÓN DE LA LUZ

La mayor parte de la luz que se ve a nuestro alrededor es el resultado de la luz reflejada. La reflexión es un fenómeno que describe cómo la luz regresa a su medio original como resultado de incidir sobre una superficie. Al llegar la luz a la superficie de un cuerpo, se refleja total o parcialmente en todas direcciones. Al ser la superficie lisa, los rayos son reflejados o rechazados en una sola dirección. La superficie lisa que refleja los rayos de luz recibida es llamada espejo, por ejemplo, el agua en una alberca, espejos de cristal, etc.

El rayo de luz que llega al espejo se llama incidente y al rayo rechazado se le denomina reflejado. El rayo de luz que llega a una superficie con un ángulo de incidencia (θi) se refleja con un ángulo igual de reflexión (θr) a esto se le conoce como Ley de reflexión. Los ángulos de incidencia y de reflexión se miden a partir de una línea perpendicular (normal) a la superficie en el punto de incidencia. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal quedan en el mismo plano, ver fig. 36a. *La ley de reflexión señala que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.*

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie irregular, ver fig.36b), el rayo de luz reflejado no queda bien definido y se dispersa la luz en todas direcciones.

Este fenómeno de la luz se llama reflexión difusa o difusión de la luz por una superficie áspera. Un superficie irregular o áspera dispersará la luz incidente, dando como resultado que se ilumine dicha superficie. Por ejemplo reflexión de la luz en la hoja de papel, el ladrillo, el mueble, es ejemplo de reflexión difusa.

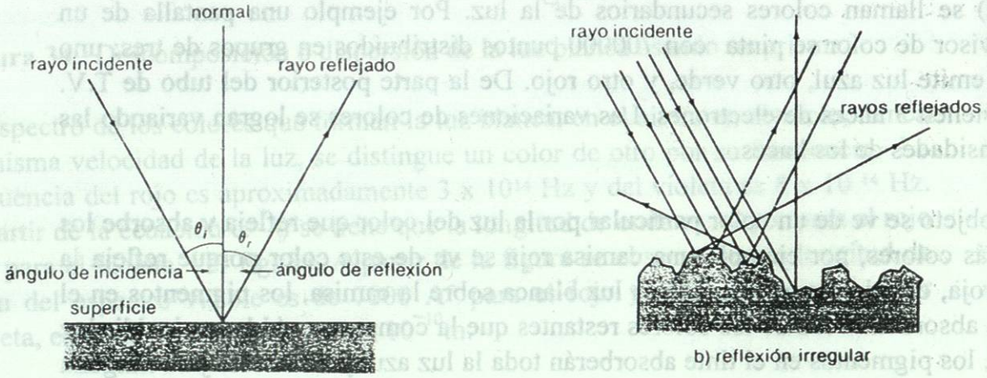

Figura 36.- a) reflexión en superficie lisa. b) Reflexión difusa en superficie irregular.

7.- ESPEJOS PLANOS.

Como ya se dijo, un espejo es toda superficie lisa que refleja los rayos de luz que recibe. Los tipos más comunes de espejos son los planos y esféricos.

En un espejo plano la superficie reflectora es de forma plana. En un espejo es derecho al conservar la misma posición; se forma una imagen virtual porque se ve como si estuviera dentro del espejo y es simétrica porque la imagen real y virtual están a la misma distancia del espejo, ver fig. 37.

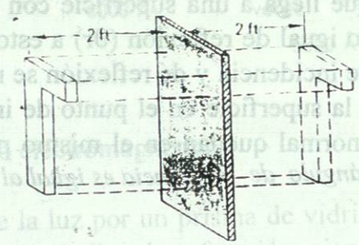

Figura 37.- En los espejos planos las imágenes están invertidas derecha-izquierda.

Para un espejo plano, la distancia del espejo al objeto es siempre de igual magnitud que la distancia a la imagen de dicho objeto. Se observa que las imágenes formadas por un espejo plano son realmente reflexiones de objetos reales. Las imágenes formadas no son reales puesto que la luz no pasa a través de ellas, es decir, una imagen real se forma por rayos de luz verdaderos que pasan por ella; se pueden proyectar en una pantalla dichas imágenes reales. Una imagen virtual es la que parece formarse por luz proveniente de la imagen, aunque en realidad los rayos de luz no pasan por ella, o sea no se pueden proyectar en una pantalla, ver fig. 38.

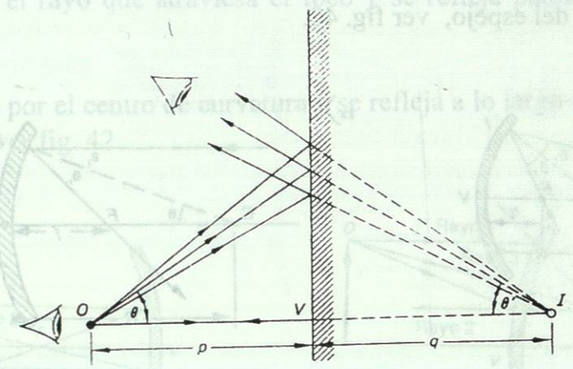

Figura 38.- Construcción de la imagen de un objeto puntual, por un espejo plano.

8.- ESPEJO ESFÉRICO

Un espejo esférico es aquél formado por una sección de una esfera reflejante. Un espejo cóncavo es la superficie reflejante de la parte interna de una esfera reflejante.

Un espejo convexo es la superficie reflejante de la parte externa de una espejo esférico, ver fig. 39.

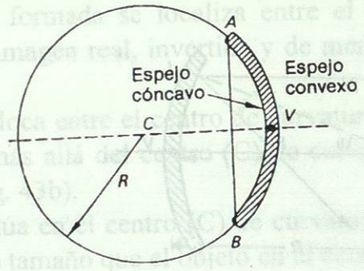

Figura 39.- Espejo esférico, el cual puede ser espejo convexo o espejo cóncavo.