

# OLIMPIADAS COLOMBIANAS DE ASTRONOMÍA, ASTRONÁUTICA Y ASTROFÍSICA



**OCA** OLIMPIADAS COLOMBIANAS DE  
**ASTRONOMÍA**

PARTE II

INTRODUCCION DE CONCEPTOS BÁSICOS A TENER EN CUENTA

PARA ESTUDIANTES DE OLIMPIADAS

NO ES DE USO COMERCIAL

## Plano Eclíptico

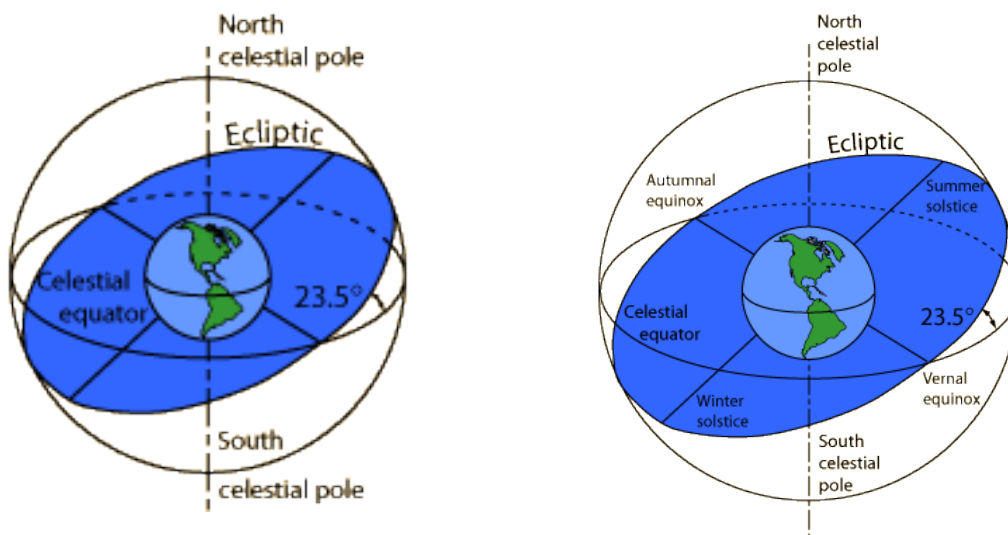
Si se observa la trayectoria del sol, desde un sistema de referencia de la Tierra, parece que se mueve alrededor de la Tierra en una trayectoria que se inclina con respecto al eje de rotación  $23,5^\circ$ . A este camino se le llama la eclíptica. Nos dice que el eje de rotación de la Tierra, está inclinado respecto al plano de la órbita solar de la Tierra  $23,5^\circ$ . Las observaciones, nos muestran que los demás planetas, con la excepción del enano Plutón, también orbitan alrededor del Sol en el mismo plano esencialmente. El plano de la eclíptica, contiene pues, la mayor parte de los objetos que orbitan el Sol. Esto sugiere que el proceso de formación del sistema solar proviene de un disco de material con el que formó el Sol y los planetas. La inclinación de  $23,5^\circ$  del eje de rotación de la Tierra proporciona las variaciones estacionales debido a la cantidad de luz solar recibida en la superficie.

La órbita de Plutón es excepcional, ya que su órbita forma un ángulo de  $17^\circ$  con la órbita de la Tierra. Esto ha llevado a una serie de teorías sobre el origen de Plutón. Mercurio es el único otro planeta que se mueve considerablemente lejos del plano de la eclíptica ( $7^\circ$ ).

## La Eclíptica

Al camino aparente del movimiento del Sol sobre la esfera celeste según se ve desde la Tierra se llama Eclíptica. El plano eclíptico está inclinado  $23,5^\circ$  respecto del plano del ecuador celeste, ya que el eje de rotación de la Tierra, está inclinado  $23,5^\circ$  respecto de su órbita alrededor del Sol. El plano de la Eclíptica intersecta el plano ecuatorial celeste a lo largo de la línea entre los equinoccios.

La inclinación del eje de la Tierra con respecto a la eclíptica es responsable de las estaciones de la Tierra.



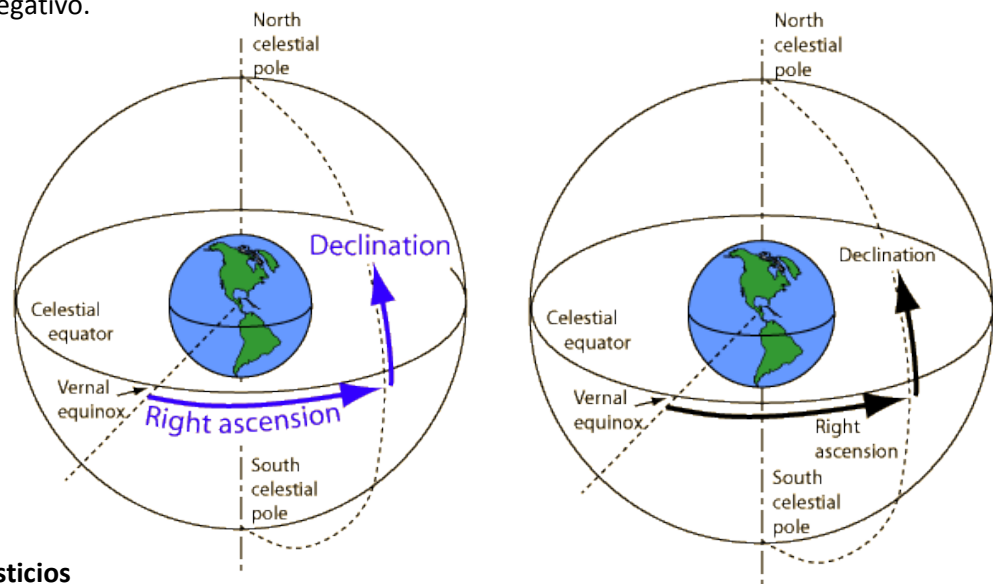
## La Esfera Celeste

Las estrellas pueden ser imaginadas, como puntos de luz en una esfera que gira alrededor de la Tierra. La proyección de los polos de la Tierra y el Ecuador hacia fuera, sobre esta esfera imaginaria, ofrece un marco de referencia para la medida celestial. Las medidas formales de vistas desde la Tierra se expresan en términos de ascensión recta y declinación, los análogos a longitud y latitud sobre la superficie de la Tierra.

### Declinación y Ascensión Recta

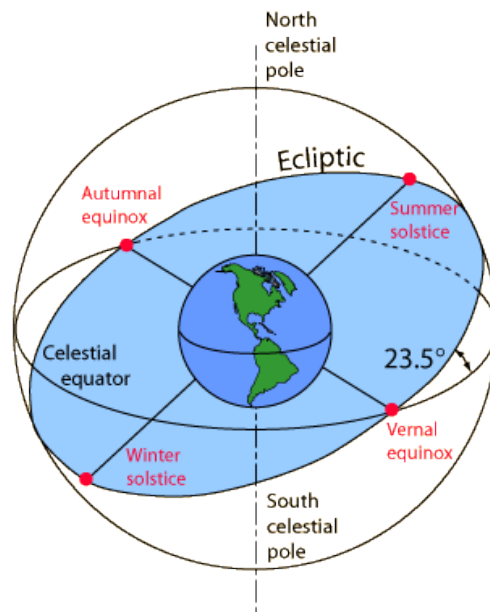
La ascensión recta y la declinación son como la longitud y latitud en la superficie de la Tierra, excepto que aquellas son medidas respecto a la esfera celeste, con el equinoccio de invierno como el origen de coordenadas.

La ascensión recta es la longitud celeste, medida en la dirección de rotación de la Tierra. Puesto que la rotación hace un círculo completo en 24 horas, la notación adoptada para la ascensión recta se hace en términos de horas y minutos, con 24 horas, representando un círculo completo. La declinación se expresa como un ángulo respecto al ecuador celeste. Por ejemplo, la coordenada celeste de la estrella Betelgeuse en la constelación de Orión, tiene ascensión recta = 5 horas 52 minutos y la declinación es de 7 grados 24 minutos. Una declinación al sur del ecuador celeste se da con un signo negativo.



### Equinoccios y Solsticios

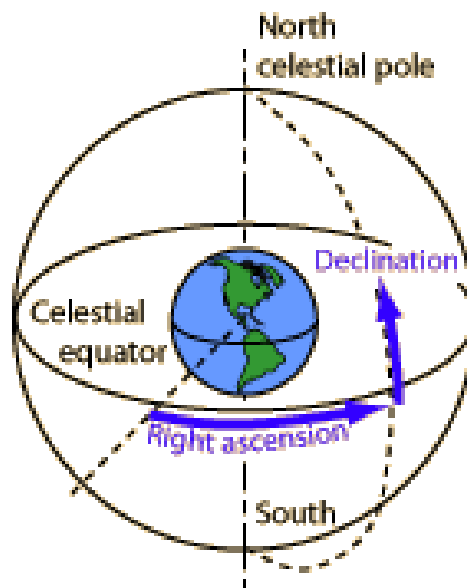
Los puntos donde la eclíptica cruza el plano ecuatorial de la esfera celeste se llaman equinoccios. En esas fechas hay 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad. A la excursión más septentrional del Sol se llama solsticio de verano y tendrá la mayor cantidad de luz solar. Frente a ella, el solsticio de invierno es el período más breve de luz solar.



### Medida Celestial

Se toman las medidas celestiales, para significar las clases de medidas respecto de la esfera celeste, que le permite localizar objetos astronómicos para la observación. Las medidas respecto a la esfera celeste, se expresan típicamente como ascensión recta y declinación, medidas análogas a la longitud y latitud sobre la superficie de la Tierra.

Con el fin de saber dónde buscar en el cielo un objeto dado, se necesita una descripción precisa del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, y una medición precisa de la hora. A menudo es más conveniente describir el movimiento aparente del sol y las estrellas con respecto a la Tierra como si estuviera quieta. En el marco de referencia de la Tierra, al camino aparente del Sol, se le llama eclíptica. El plano de la eclíptica está inclinado  $23.5^\circ$  respecto al ecuador celeste como consecuencia de la inclinación del eje de rotación de la Tierra, respecto del plano de su órbita alrededor del Sol.



## **Periodos Sinódico y Sideral**

El lapso de tiempo que toma una órbita planetaria alrededor del Sol, respecto de las estrellas fijas, se llama periodo sideral. El periodo sideral de la Tierra es alrededor de 365 1/4 días. Es útil otro tipo de periodo para ver otros planetas -el periodo entre los momentos que sus posiciones ocupan la misma línea radial con el Sol- se llama periodo sinódico. Cuando los planetas están sobre la misma línea radial con el Sol, se dice que están "en oposición". Para los planetas más cercanos al Sol que la Tierra, el periodo sinódico de la Tierra es más largo que el periodo sideral, y para los planetas exteriores es más corto, según son vistos por un observador sobre aquellos planetas.

El período sideral de Marte es de 1,88 años, mientras que el período sinódico es 2,135 años según se ve desde la Tierra. El tiempo de oposición de Marte está asociado con su aparente movimiento retrógrado para un observador sobre la Tierra.

El período que lleva de nuevo a la misma posición angular con respecto al Sol se llama el año trópico y dura 365,242 días solares medios. Formalmente este periodo se define como el intervalo de tiempo entre un equinoccio de invierno y el siguiente. El periodo sideral (periodo con respecto a las estrellas distantes) de 365,256 días solares medios, es alrededor de 20 minutos más largo como consecuencia de la precesión del eje de rotación de la Tierra. Ese periodo de precesión de alrededor de 26.000 años, trae el equinoccio de invierno unos 20 minutos más tempranos cada año. El hecho de que el año no tiene exactamente 365 días, nos ha llevado a la inclusión de los años bisiestos y otros ajustes en el calendario.

El día sideral, que consiste en encontrar a una estrella fija en la misma posición en la siguiente noche, es de 23 horas, 56 minutos and 4 segundos. El efecto práctico es observar que las estrellas se elevan unos cuatro minutos más tempranos cada noche, alrededor de 2 horas antes en un mes, y aparecen como un desfile que avanza hacia el oeste a través del cielo nocturno.

El punto Aries no es un punto fijo, se mueve sobre la esfera celeste sometido principalmente al movimiento de Precesión de los equinoccios y en menor medida al movimiento de Nutación. Si consideramos sólo el movimiento de precesión hablaremos del equinoccio medio.

### **Tiempo sidéreo medio**

Es el ángulo horario del equinoccio medio. Es un tiempo que discurre uniformemente, al prescindirse de la nutación.

Si consideramos precesión y nutación hablaremos del equinoccio verdadero.

### **Tiempo sidéreo verdadero**

Es el ángulo horario del equinoccio verdadero, y por tanto se tiene en cuenta la precesión y nutación, por lo que es un tiempo que no discurre uniformemente.

La diferencia entre ambos tiempos sidéreos se llama Ecuación de Equinoccios y es siempre menor que 1,18 segundos.

## Tiempo sidéreo local (TSL) y Tiempo sidéreo de Greenwich

Los valores locales del tiempo sidéreo varían de acuerdo con la longitud del observador. Si nos movemos una longitud de 15° hacia el este, el tiempo sidéreo aumenta una hora sidérea. Las posibles diferencias se deben a la exactitud de las medidas. El tiempo sidéreo de Greenwich es el Tiempo sidéreo local para un observador situado en el Meridiano de Greenwich.

Los intervalos en Tiempo sidéreo (S) y en Tiempo medio (M) regido por el Sol medio y que tiene que ver con el Tiempo Universal Coordinado (TUC) se relacionan mediante un factor constante

$$S = M \cdot 1,00273790935$$

El *tiempo sidéreo local* (Tsl o  $\Theta_m(th, \lambda)$ ) o la *hora sidérea local* es el ángulo horario que forma el punto Aries con el meridiano del observador. El *tiempo sidéreo local* es la ascensión recta de un astro más el ángulo horario de dicho astro:  $TSL = \Theta_m(th, \lambda) = H + \alpha$

El tiempo sidéreo se usa en observatorios astronómicos por la facilidad que supone a la hora de determinar qué objetos astronómicos serán visibles en un momento dado. Los objetos se sitúan en el cielo nocturno empleando la ascensión recta y declinación relativas al ecuador celeste (algo análogo a la longitud y latitud en la Tierra), y cuando el tiempo sidéreo de un objeto es igual a su ascensión recta, se encontrará cruzando el meridiano ( $H = 0$ ) en el punto más alto del cielo y será además el mejor momento para realizar las observaciones. O dicho de otro modo: en el instante de la culminación de una estrella su ascensión recta nos da el tiempo sidéreo, o a la inversa, conocido el tiempo sidéreo tenemos la ascensión recta de la estrella.

Como caso particular para Greenwich se establece el tiempo sidéreo de Greenwich, de gran importancia en Astronomía: ángulo horario del equinoccio vernal en el Meridiano de Greenwich. Una magnitud que está tabulada en todos los Anuarios de Astronomía es el Tiempo sidéreo medio en Greenwich a 0h de T.U.  $\Theta_m(0h, Gr)$  e puede calcular mediante la expresión:

$$\Theta_m(0h, Gr) = 6h38min45,836s + 8640184,542s \cdot T + 0,0929s \cdot T^2$$

donde  $T$  es el número de siglos julianos de 36525 días medios transcurridos a medianoche de Greenwich desde el mediodía medio en Greenwich de 31 de diciembre de 1899.

Una vez hecho el cálculo se transforma a la primera vuelta en el rango 0-24 horas.

Para calcular el tiempo sidéreo de Greenwich a una hora  $t$  de T.U. se transforma el intervalo de tiempo medio  $t$  en tiempo sidéreo.

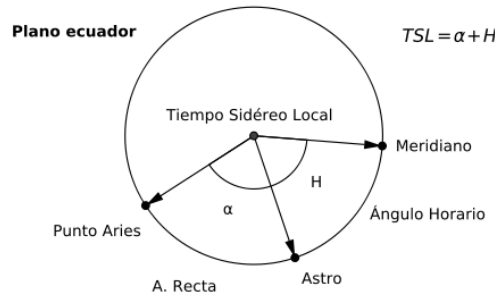
$$\Theta_m(th, Gr) = \Theta_m(0h, Gr) + t \cdot 1,00273790935$$

Para calcular el tiempo sidéreo local TSL en un lugar de longitud geográfica  $\lambda$  a una hora  $t$  de T.U.

basta con sumar la longitud (transformada en intervalo de tiempo) y positiva al este de Greenwich.

$$\Theta_m(th, \lambda) = \Theta_m(th, Gr) + \lambda$$

### Relación entre TSL, H y $\alpha$

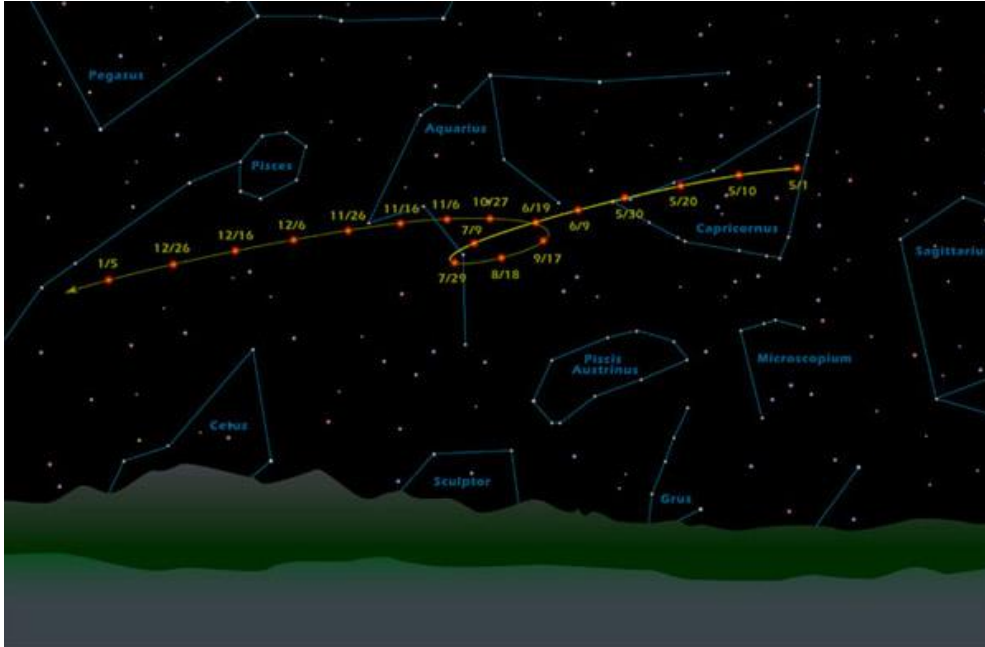


### La fecha Juliana

En astronomía, **J2000.0** se refiere a la fecha Juliana 2451545.0 TT (Tiempo Terrestre), o 1 de enero de 2000, mediodía TT. Es equivalente al 1 de enero de 2000, 11:59:27.816 TAI, o 1 de enero de 2000, 11:58:55.816 UTC. Esta fecha es usada ampliamente para indicar un instante en el tiempo estándar para la medición de las posiciones de los cuerpos celestes y otros eventos estelares. Por ejemplo, aunque imperceptible a simple vista, las estrellas se mueven en el espacio, y es necesario, para describir su posición en el firmamento, especificar la fecha a la que se refiere dicha posición. Si pretendemos averiguar el lapso transcurrido entre dos eclipses lejanos, aunque sean del mismo calendario, hay que llevar cuenta de los bisiestos transcurridos, lo que se complica aún más si uno es del calendario juliano y otro del gregoriano. Por esto en el mismo año 1582, José Scaliger de Leyden creó una escala continua de tiempo fijando su origen (día 0) en el mediodía del 1º de enero del año 4713 a. C. del calendario juliano proléptico y contando los días solares correlativamente. Este número se llama fecha juliana. El día 11 de julio de 1997 a las 12 h TU se completa el día 2.450.641. En el calendario de uso civil no hay año cero, el año anterior al 1 d. C. es el 1 a. C; las fechas julianas no presentan esta discontinuidad. Este problema de origen significa que si se introduce para la fecha 12,3,-3283 se entiende el año 3284 a. C. La primera forma de designar la fecha se llama astronómica y la segunda fecha histórica. Así la fecha juliana es una cuenta continua de días y fracciones contados desde un punto inicial fijo. En este momento, el día en que consultas el presente artículo (21 de mayo de 2014, a las 16:25 TU), la fecha juliana es 2456799.1840278. La parte entera (2456799) corresponde al día de hoy (desde el mediodía pasado hasta el próximo mediodía); la fracción indica la fracción de día transcurrida desde el último mediodía (de forma que 0,5 sería la medianoche TU).

## Movimiento Retrógado de Marte

Como resultado de la naturaleza de las órbitas de la Tierra y de Marte alrededor del Sol, hay momentos en que Marte parece estar viajando hacia atrás durante un tiempo corto en comparación con las "estrellas fijas".

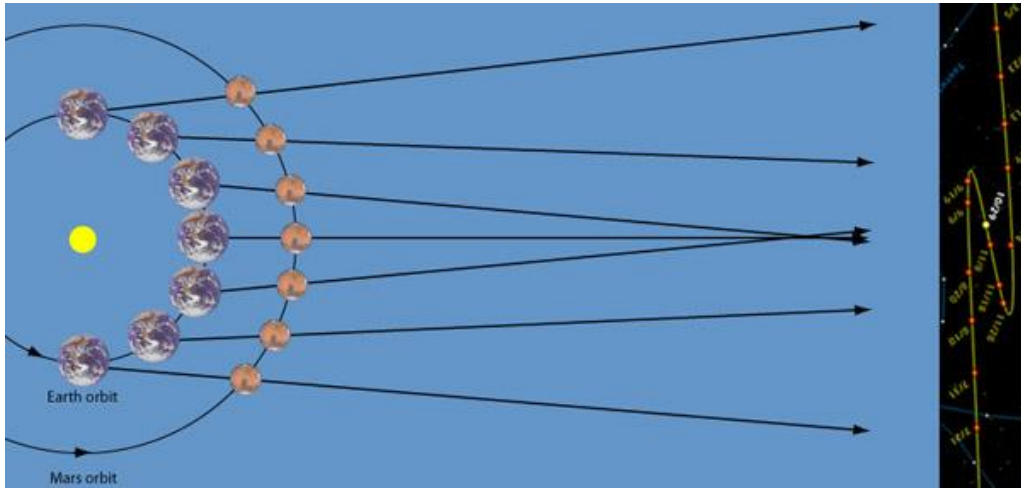


Mirando hacia arriba en el cielo cada noche a la misma hora, por lo general se observa que Marte está un poco más hacia el este, en comparación con las constelaciones. Sin embargo, aproximadamente cada dos años cuando se observa igualmente a la misma hora, hay un par de meses, donde parece que Marte se mueve de este a oeste (movimiento retrógrado). Lo de arriba es el patrón observado en 2003.

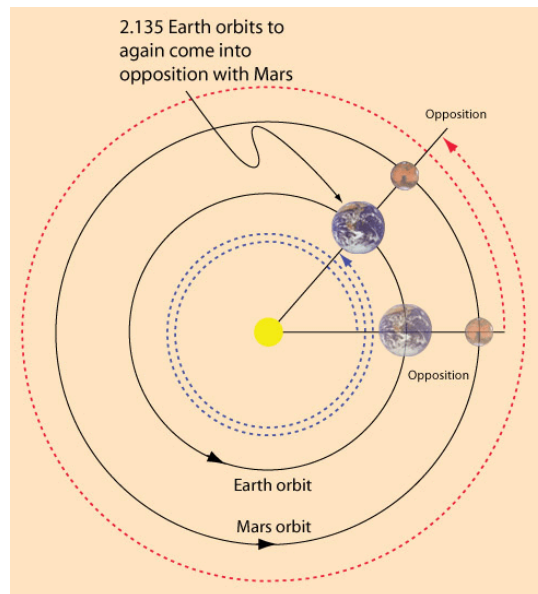




Esta es la trayectoria aparente de Marte durante 2005 cuando mostró un movimiento retrógrado durante aproximadamente un período de dos meses.



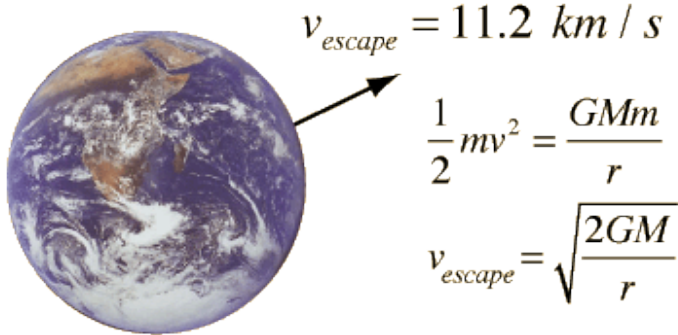
Este movimiento hacia atrás o retrógrado era un misterio para los primeros observadores, y les llevó a la utilización de la palabra "planeta", del término griego que significa "vagabundo". Con nuestra actual comprensión de que la Tierra viaja alrededor del Sol en un año, mientras que el más lejano Marte tiene un período sideral de 1,88 años terrestres, está claro que la Tierra periódicamente "alcanzará" a su más lejano vecino. A medida que la Tierra se mueve hacia adelante en su órbita, Marte parecerá deslizarse hacia atrás en comparación con su más común marcha hacia el este a través del cielo.



Desde el momento en que la Tierra y Marte están en línea a través del Sol (llamado estar en "oposición") a la siguiente oposición hay 2,135 órbitas terrestres. En este corto período de tiempo incluyendo el tiempo de oposición, es cuando Marte exhibe su movimiento retrógrado para un observador en la Tierra. El período de tiempo entre oposiciones se llama período sinódico.

## Velocidad de Escape

En ausencia de resistencia de fricción, un objeto lanzado desde la Tierra puede escapar de ella, cuando su energía cinética iguala en magnitud a su energía potencial.



	Mass*	Radius*
Mercury	0.0558	0.383
Venus	0.815	0.95
Earth	1	1
Mars	0.107	0.532
Jupiter	318	11.2
Saturn	95.1	9.41
Uranus	14.5	4.06
Neptune	17.2	3.88
Pluto	0.01	0.2
Moon	0.0123	0.273

\*relative to Earth

Earth mass =  $5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$

Earth equatorial radius =  $6378 \text{ km}$

$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$

## Velocidad de Órbita y Velocidad de Escape

Si la energía cinética de un objeto  $m_1$  lanzado desde un planeta de masa  $M_2$  fuera igual en magnitud a la energía potencial, entonces, en ausencia de resistencia de fricción, podría escapar del planeta. La velocidad de escape está dada por:

$$U = -\frac{Gm_1M_2}{R} = \frac{1}{2}m_1v^2 \qquad v_{\text{escape}} = \sqrt{\frac{2GM_2}{R}}$$

Para encontrar la velocidad de órbita para una órbita circular, se puede establecer la fuerza gravitacional igual a la fuerza centrípeta requerida:

$$\frac{Gm_1M_2}{R^2} = \frac{m_1v^2}{R} \qquad v_{\text{orbit}} = \sqrt{\frac{GM_2}{R}}$$

Note que la velocidad de órbita y la velocidad de escape de ese radio están relacionadas por

$$v_{\text{escape}} = \sqrt{2} v_{\text{orbit}}$$

## Energía Cinética

La energía cinética (siglas en inglés K.E.) es la energía del movimiento. La energía cinética de un objeto es la energía que posee a consecuencia de su movimiento. La energía cinética\* de un punto material  $m$  está dada por

$$\text{Kinetic Energy} = \frac{1}{2} mv^2$$

La energía cinética es una expresión del hecho de que un objeto en movimiento, puede realizar un trabajo sobre cualquier cosa que golpee; cuantifica la cantidad de trabajo que el objeto podría realizar como resultado de su movimiento. La energía mecánica total de un objeto es la suma de su energía cinética y su energía potencial.

Para un objeto de tamaño finito, esta energía cinética se llama la energía cinética de traslación de la masa, para distinguirlo de cualquier energía cinética rotacional que puede poseer. La energía cinética total de una masa, se puede expresar como la suma de la energía cinética de traslación de su centro de masa, más la energía cinética de rotación alrededor de su centro de masa.

\*Se supone que la velocidad es mucho menor que la velocidad de la luz. Si la velocidad es comparable a  $c$ , se debe usar la expresión de la energía cinética relativista.

## Energía Potencial Gravitacional

La expresión general para la energía potencial gravitacional, surge de la ley de la gravedad, y es igual al trabajo realizado contra la gravedad, para llevar una masa a un punto determinado del espacio. Como consecuencia de la naturaleza de la fuerza de gravedad dependiente del inverso del cuadrado, la fuerza se acerca a cero para grandes distancias, y por tanto cobra sentido elegir el cero de energía potencial gravitacional a una distancia exterior infinita. Entonces, la energía potencial gravitacional cerca de un planeta es negativa, puesto que la gravedad realiza un trabajo positivo cuando se acerca la masa. Este potencial negativo es indicativo de un "estado ligado"; una vez que la masa está cerca de un cuerpo grande, es atrapada hasta que algo pueda suministrarle energía suficiente que le permita escapar. La forma general de la energía potencial gravitacional de una masa  $m$  es:

$$U = -\frac{GMm}{r}$$

donde  $G$  es la constante gravitacional,  $M$  es la masa del cuerpo atractivo y  $r$  es la distancia entre sus centros.

Esta es la fórmula de la energía potencial gravitacional más útil para el cálculo de la velocidad de escape de la gravedad de la Tierra.

### Energía Potencial Gravitacional

Del trabajo realizado contra la fuerza de la gravedad, para llevar una masa hasta el infinito, donde la energía potencial, se le asigna el valor de cero, la expresión para la energía potencial gravitacional es:

$$U = \frac{-GMm}{r}$$

Esta expresión es útil para el cálculo de la velocidad de escape, la energía para sacarla de una órbita. etc. Sin embargo, para objetos cercanos a la Tierra la aceleración de la gravedad  $g$ , se puede considerar que sea aproximadamente constante, y la expresión de la energía potencial en relación con la superficie de la Tierra se convierte en:

$$U = mgh$$

donde  $h$  es la altura sobre la superficie, y  $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad en la superficie.

### Potencial Gravitacional

From the definition of potential energy  $U = -\int_{\text{ref}}^r \vec{F} \cdot d\vec{r}$   
and the law of gravitation  $F = -\frac{GMm}{r^2} \hat{1}_r$

with the choice of the zero of potential energy at infinite distance where the force approaches zero, the gravitational potential energy is the work done to bring an object from infinity to radius  $r$ :

$$U(r) = -\int_{\infty}^r -\frac{GMm}{r'^2} dr' = -\frac{GMm}{r}$$

$\hat{1}_r$  represents a unit vector in the outward radial direction

## Integral de Potencial Gravitacional

The potential integral is of the polynomial form  $\int \frac{1}{r^2} dr = -\frac{1}{r}$  so that

$$U(r) = -\int_{\infty}^r -\frac{GMm}{r'^2} dr'$$

has three minus signs which yield the negative expression  $U(r) = -\frac{GMm}{r}$ . The negative potential energy indicates a bound state.

$r$  is measured from the center of the earth

$$F_{\text{gravity}} = -\frac{GMm}{r^2}$$

from infinity

An object at radius  $r$  out from the earth is bound to the earth by energy  $U$ , and would require the supply of extra energy equal to  $U$  to escape the earth's gravity.

## Gravedad

La gravedad, la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales, es sin embargo la fuerza dominante en el universo y modela la estructura a gran escala de las galaxias, estrellas, etc. La fuerza gravitacional entre dos masas  $m_1$  y  $m_2$  está dada por la relación:

$$F_{\text{gravedad}} = \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$$

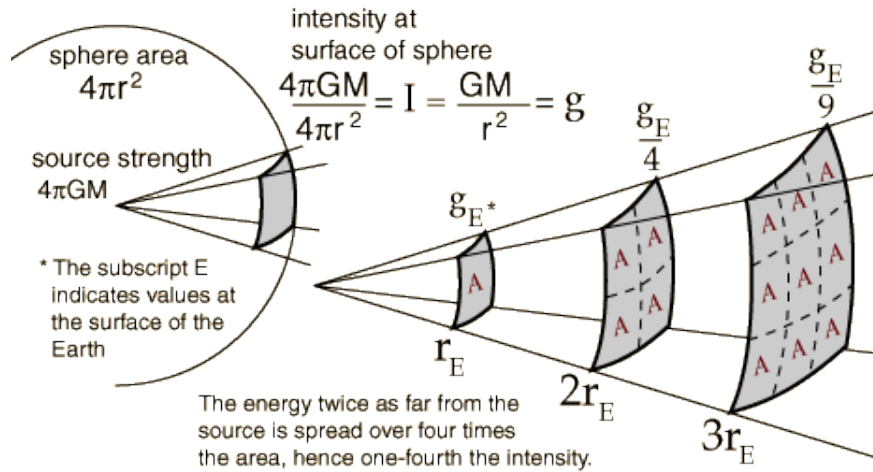
A esto se le llama a menudo la "ley de gravitación universal" y  $G$  la constante de gravitación universal. La gravedad es un ejemplo de una fuerza que sigue la ley del inverso del cuadrado\*. La fuerza es siempre atractiva y actúa a lo largo de la línea de unión del centro de masa de las dos masas. Las fuerzas de las dos masas son de igual magnitud, pero de sentido opuesto, obedeciendo a la tercera ley de Newton. Vista como un intercambio de fuerzas, a la partícula de intercambio menos masiva se le llama gravitón.

La fuerza de la gravedad, tiene la misma forma que la ley de Coulomb para la fuerza entre cargas eléctricas, o sea, es una fuerza de la ley del inverso del cuadrado, que depende del producto de las dos fuentes interaccionando. Esto llevó a Einstein a comenzar a trabajar con la fuerza electromagnética y la gravedad como el primer intento para demostrar la unificación de las fuerzas fundamentales. Resulto ser el lugar equivocado para comenzar, y la gravedad sería la última de las fuerzas para unificar con las otras tres fuerzas. La Unificación electrodébil (unificación de las fuerzas débil y magnética) se demostró en 1983, un resultado que no era previsible en el momento de la investigación por Einstein. Ahora parece que la forma común de la gravedad y la fuerza electromagnética, surge del hecho de que cada uno de ellos consiste en una partícula de intercambio con masa cero, no por una simetría inherente que los harían fáciles de unir.

**\* Anotaciones sobre la Ley del Inverso de cuadrado:**

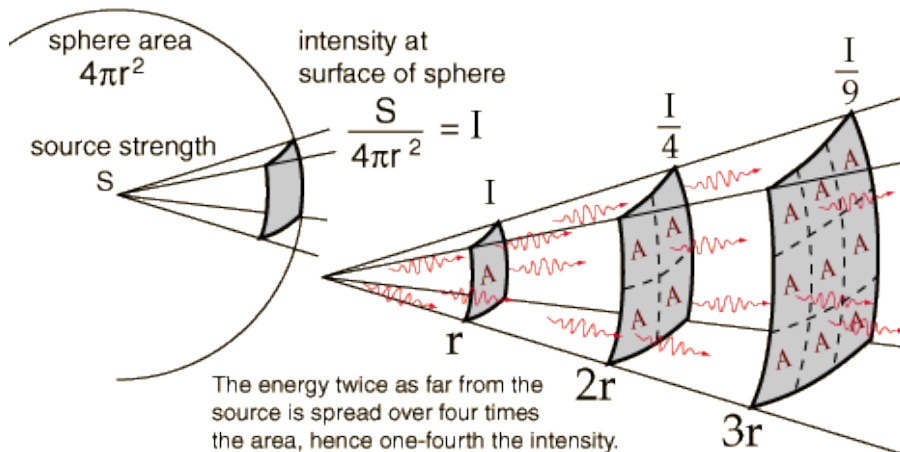
**Ley del Inverso del Cuadrado, Gravedad**

Como uno de los campos que obedece la general ley del inverso del cuadrado, el campo gravitatorio puede ponerse en la forma mostrada abajo, mostrando que la aceleración de la gravedad  $g$ , es una expresión de la intensidad del campo gravitatorio.



**Ley del Inverso del Cuadrado, Radiación**

Como uno de los campos que obedece la general ley del inverso del cuadrado, una fuente de radiación puntual, se puede caracterizar por la relación de abajo, ya sea hablando sobre Roentgens, rads, o rems. Todas las medidas de radiación disminuirán siguiendo la ley del inverso del cuadrado. La fuente se describe por el símbolo general de "intensidad de la fuente"  $S$ , ya que hay muchas maneras de caracterizar una fuente de radiación -por gramos de un isótopo radiactivo, intensidad de la fuente de Curie, etc-. Para dicha descripción de fuente, si se determina la cantidad de radiación por unidad de superficie que llega a 1 metro de distancia, entonces, a 2 metros de distancia será una cuarta parte, etc.



## Energía Potencial Cero

La naturaleza de la energía potencial es que el punto cero es arbitrario; se puede establecer como el origen de un sistema de coordenadas. Esto no quiere decir que sea insignificante, una vez que se establece el cero de energía potencial, a continuación, todos los valores de la energía potencial se mide con respecto al cero. Otra forma de decirlo: es el cambio de energía potencial que tiene significado físico.

Cuando usamos la forma simple de la energía potencial gravitacional:

$$PE_{\text{gravitacional}} = \text{weight} \times \text{height} = mgh$$

generalmente se supone que el cero de energía potencial gravitatoria es la superficie de la tierra y que la energía potencial es proporcional a la altura sobre la superficie de la Tierra. Esta es una aproximación que sólo es válida cerca de la superficie de la tierra, pero está muy bien para pelotas de béisbol y otras aplicaciones comunes de la energía potencial gravitatoria. Si usted está en una habitación, es lógico establecer el suelo como el cero de energía potencial gravitatoria, y medir la energía de un objeto elevado con respecto al suelo.

Cuando se usa la forma mas general de energía potencial gravitacional, incluido el hecho de que disminuye con la distancia de la tierra:

$$U = \frac{-GMm}{r}$$

entonces la lógica en la elección del punto cero es diferente. En este caso, suelen optar por el cero de energía potencial gravitacional en el infinito, ya que la fuerza gravitatoria se aproxima a cero en el infinito. Esta es una manera lógica para definir el cero, ya que la energía potencial con respecto a un punto en el infinito nos dice la energía con que un objeto está ligado a la tierra. Esta es la perspectiva usada para el cálculo de cosas como la velocidad de escape de la Tierra u otros planetas.

Este caso más general, es similar a aquel que se hace con el cero de potencial eléctrico, puesto que es lógico definir el voltaje cero en un punto suficientemente lejos de cualquier carga.

## Velocidad de Órbita a la Tierra


La velocidad de un satélite en una órbita circular alrededor de la Tierra, depende del radio de la órbita y de la aceleración de la gravedad en esa órbita.

$$v_{orbit} = \sqrt{r g_{orbit}}$$

$v_{orbit} = ?$

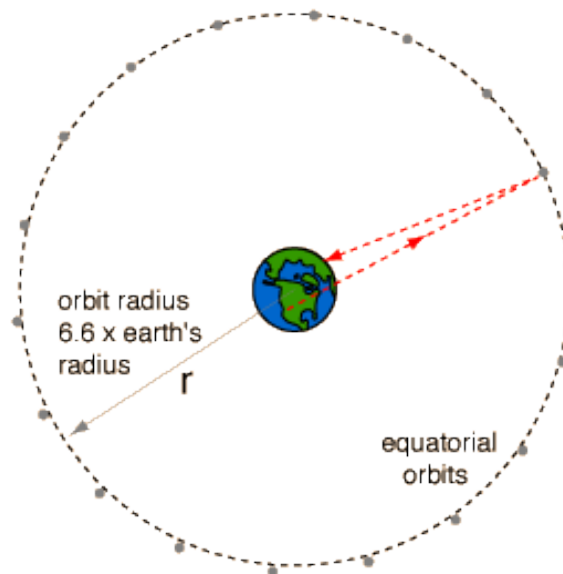
Enter data into any of the boxes to recalculate.

$r$   $g_{surface}$

A small image of the Earth with a satellite in a circular orbit around it. The satellite is represented by a small grey sphere with a black dot in the center. The Earth is shown in a blue and green color scheme.

Los satélites de comunicaciones son más valiosos cuando se mantienen por encima del mismo punto en la tierra, en lo que se llama "órbita geoestacionaria". Esto ocurre cuando el periodo orbital es de 24 horas. Del cálculo de velocidad de órbita, se puede ver que un satélite en un radio 6,62 veces el radio de la Tierra, tendrá un periodo de 24 horas. Estos satélites están a unos 35.900 kilómetros alrededor de 22.300 millas por encima de la superficie terrestre.

El tiempo mínimo de tránsito de una señal hasta un satélite y regreso de nuevo a la superficie de la Tierra, es de alrededor de un cuarto de segundo. Cualquier clase de onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz. De modo que en las comunicaciones enlazadas por satélites, habrá un mínimo de un cuarto de segundo de retraso.





## Fuerza Centrípeta

Cualquier movimiento sobre un camino curvo, representa un movimiento acelerado, y por tanto requiere una fuerza dirigida hacia el centro de la curvatura del camino. Esta fuerza se llama fuerza centrípeta, que significa fuerza "buscando el centro". La fuerza tiene la magnitud

$$F_{\text{centrípeta}} = m \frac{v^2}{r}$$

El balanceo de una masa en una cuerda requiere tensión en la cuerda, y si la cuerda se rompe, la masa recorrerá un camino tangencial en línea recta.

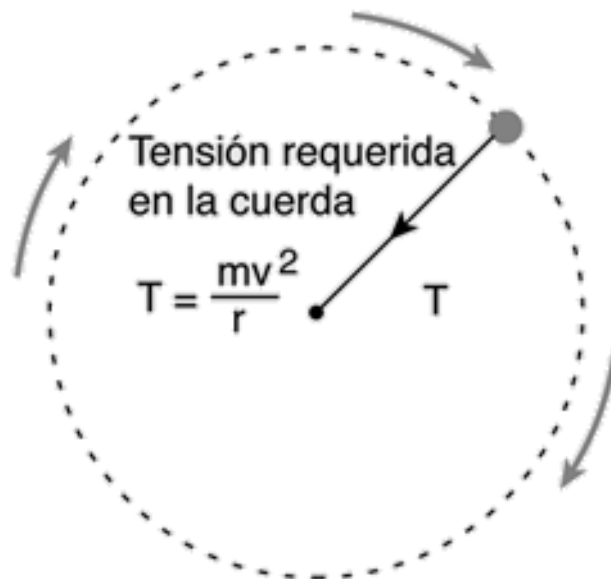
La aceleración centrípeta se puede derivar para el caso de movimiento circular puesto que el camino curvado en cualquier punto, puede extenderse hasta formar un círculo.

## Cálculo de la Fuerza Centrípeta

Fuerza Centrípeta = masa x velocidad<sup>2</sup> / radio

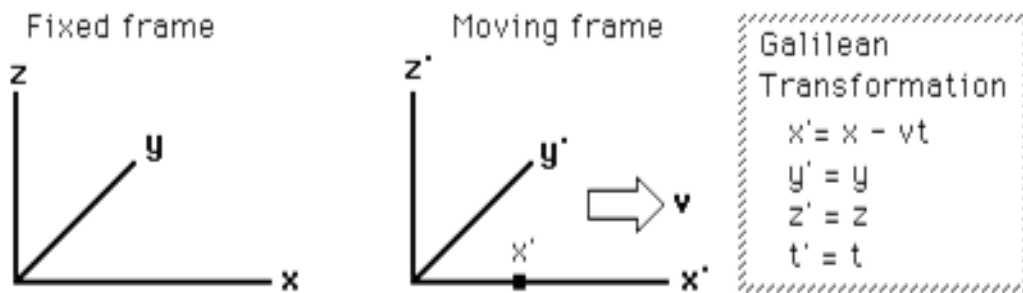
Se puede cambiar cualquier valor en las casillas. Terminada la entrada, pulse sobre la cantidad que desee calcular en la fórmula de arriba. La conversión de unidades se llevará a cabo a medida que entre los datos, pero los valores no serán forzados a ser consistente hasta no pulsar sobre la cantidad deseada.

**Nota:** Se asume en estas condiciones que no hay fuerzas adicionales, como si fuera un círculo horizontal en una superficie sin fricción. Para un círculo vertical, la velocidad y la tensión deben variar

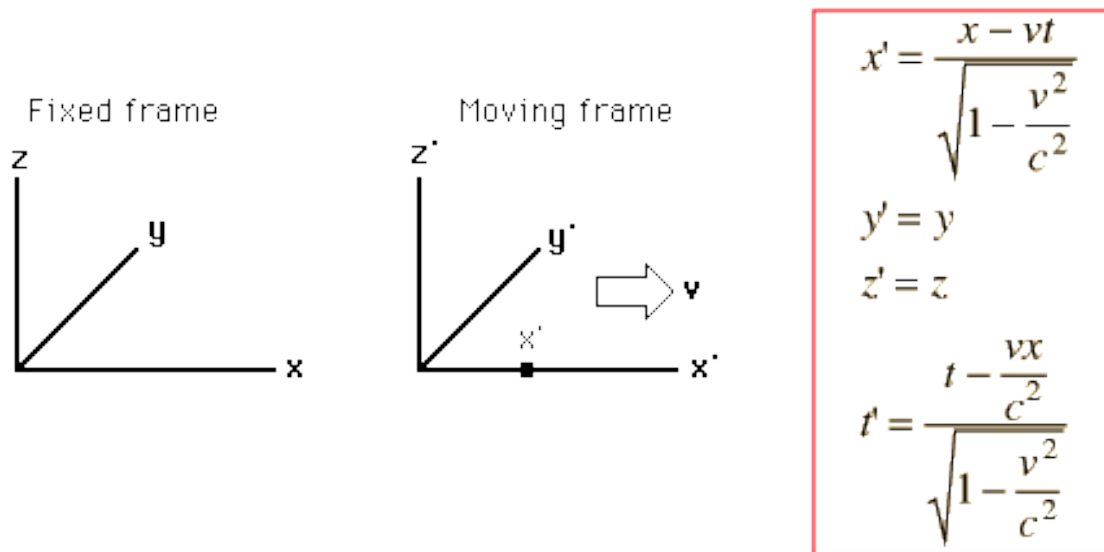


## UN POCO DE RELATIVIDAD

### Transformación Galileana



### Transformación de Lorentz



El marco prima se mueve con velocidad  $v$  en la dirección  $x$ , respecto al marco de referencia fijo. Los marcos de referencia coinciden en  $t = t' = 0$ . El punto  $x'$  se mueve con el marco prima.

La transformación inversa es:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La mayor parte de la literatura de la relatividad, utiliza los símbolos  $\beta$  y  $\gamma$  como se definen aquí, para simplificar la escritura de las relaciones relativistas.

$$\beta = \frac{v}{c}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

### Velocidad de la Luz

Desde el siglo XVII, las medidas experimentales de la velocidad de la luz, se han ido perfeccionando en experimentos cada vez más precisos. Los experimentos recientes dan una velocidad de

$$c = 299.792.458 \pm 1,2 \text{ m/s}$$

pero las incertidumbres en este valor se deben principalmente, a las comparaciones con los estándares anteriores de la longitud del metro. Por lo tanto la velocidad de la luz de arriba, ha sido adoptada como un valor estándar y la longitud del metro se ha redefinido para ser consistente con este valor.

$$c \equiv 299,792,458 \text{ m/s}$$

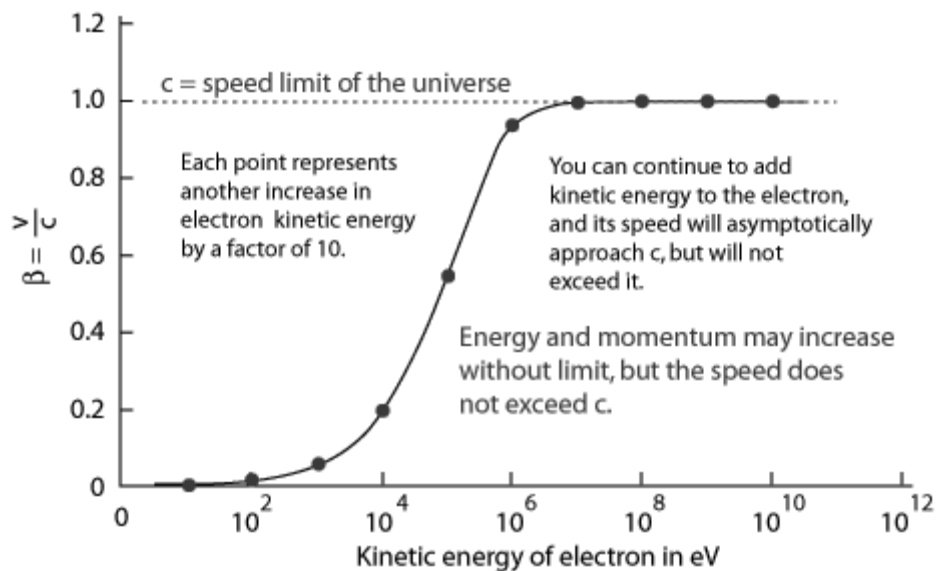
La velocidad de la luz en un medio, está relacionada con las propiedades eléctricas y magnéticas del medio, y la velocidad de la luz en el vacío puede ser expresada como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \begin{array}{l} \epsilon_0 = \text{electric permittivity} \\ \mu_0 = \text{magnetic permeability} \end{array}$$

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz,  $c$ .

## Como Límite de Velocidad

La velocidad de la luz  $c$  se dice que es el límite de velocidad del universo, porque nada puede ser acelerado a la velocidad de la luz con respecto a uno. Una forma común de describir esta situación es decir que, cuando un objeto se aproxima a la velocidad de la luz, su masa aumenta y se debe ejercer una fuerza aún mayor, para producir una determinada aceleración. Hay dificultades con el punto de vista de una "masa cambiante", y por lo general es preferible decir que a la velocidad de la luz, el momento relativista y la energía relativista, se acercan a infinito. Puesto que la fuerza neta aplicada es igual a la tasa de variación del momento, y el trabajo realizado es igual a la variación de energía, se necesitaría un tiempo infinito y una cantidad infinita de trabajo, para acelerar un objeto a la velocidad de la luz. (Lo siento, capitán Kirk. ¡No podemos darle la velocidad de la luz!).



Una resistencia común al límite de velocidad, es sugerir que se aceleran dos objetos diferentes a más de la mitad de la velocidad de la luz, y se dirige cada uno hacia el otro, dando a una velocidad relativa mayor que  $c$ . Pero eso ¡no funciona! El tiempo y el espacio están entrelazados de tal manera, que ningún observador ve otro objeto moviéndose hacia él a mayor velocidad que  $c$ . La adición de velocidad de Einstein se refiere a la transformación de velocidades, dando siempre una velocidad relativa menor que  $c$ . No está de acuerdo con el sentido común, pero parece ser la forma en que funciona el universo.

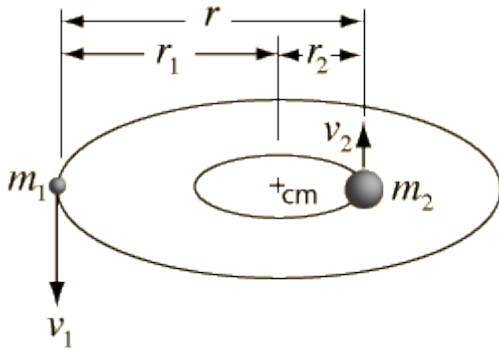
## ACERCA DE LAS ORBITAS

### Órbita Circular Binaria

De la fuerza de la gravedad y la fuerza centrípeta necesaria:

$$\frac{Gm_1m_2}{[r_1 + r_2]^2} = \frac{m_1v_1^2}{r_1} = \frac{m_2v_2^2}{r_2}$$

Si usted está montando en una de las masas, la ecuación de movimiento relativo tiene la misma forma si sustituye la masa reducida



$$\mu = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2}$$

lo cual da la ecuación de la órbita:

$$\frac{Gm_1m_2}{r^2} = \frac{\mu v^2}{r}$$

Esto nos conduce a la tercera ley de Kepler (la ley de los periodos), la cual es útil para las órbitas de las Lunas y las estrellas binarias.

Puesto que el periodo  $T$  de una órbita está dado por

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

entonces la ecuación del movimiento se puede escribir

$$\frac{Gm_1m_2}{r^2} = \frac{\mu(2\pi r)^2}{rT^2}$$

que se reduce a

$$T^2 = \frac{4\pi^2\mu}{Gm_1m_2} r^3 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} r^3$$

Si usamos las unidades astronómicas convenientes

$r = a$  en AU (unidades astronómica)

$G = 4\pi^2$

$m$  en  $M_{\odot}$  (masas solares)

$T$  en años

entonces esto toma la forma

$$T^2 = \frac{a^3}{m_1 + m_2}$$

Esto aplica a las órbitas circulares donde  $a$  es el radio, y a las órbitas elípticas donde  $a$  es el semieje mayor.

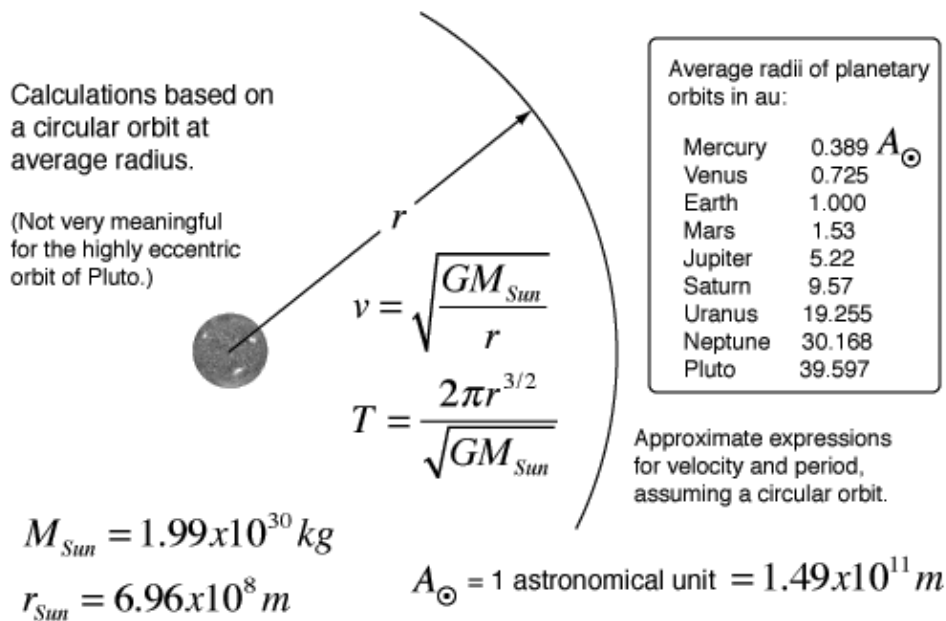
y del periodo y el radio de la órbita, se puede obtener la suma de las masas  $m_1 + m_2$ . Si puede obtener los radios de las órbitas individuales  $r_1$  y  $r_2$  entonces, puede usar la condición del centro de masa

$$m_1 r_1 = m_2 r_2 \quad m_1 = m_2 \frac{r_2}{r_1}$$

con la suma de las masas medida, para obtener las masas individuales

$$m_2 \left( 1 + \frac{r_2}{r_1} \right) = m_1 + m_2 \quad \therefore \quad m_2 = \frac{m_1 + m_2}{\left( 1 + \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

## Órbita Solar



A partir de la Ley de Kepler para los periodos y los semiejes mayores de las órbitas elípticas, se pueden calcular valores precisos de los periodos de los planetas. Sin embargo, puede ser instructivo calcular los valores aproximados de los períodos y velocidades orbitales, suponiendo una órbita circular y el radio medio de la órbita.

Con base en la longitud precisa del año terrestre de 365,256 días, se toma la órbita de la Tierra como un círculo, da un error de unos 2 días o un 0.6%, de modo que la órbita de la Tierra está muy cerca de ser un círculo. La desviación de la órbita circular de los planetas, se puede expresar en términos de la excentricidad de la órbita.

Estas aproximaciones, hacen uso de la segunda ley de Newton, la ley de gravitación universal y el concepto de fuerza centrípeta. Una órbita circular perfecta, se puede describir de forma precisa como sigue:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GmM_{Sun}}{r^2}$$

Applying Newton's 2nd Law for the case of circular motion, the required centripetal force is supplied by gravity.

$$v^2 = \frac{GM_{Sun}}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM_{Sun}}{r}} = \frac{2\pi r}{T}$$

The application of Newton's 2nd law gives you the velocity. For a circular orbit, the period T can be found from the orbit velocity.

$$\frac{T}{2\pi r} = \sqrt{\frac{r}{GM_{Sun}}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GM_{Sun}}$$

Solving for the period gives you Kepler's Law of Periods for the special case of a circular orbit.

The expressions for velocity and period are seen to follow from Newton's 2nd law and the law of gravity.

$$v = \sqrt{\frac{GM_{Sun}}{r}} \quad T = \frac{2\pi r^{3/2}}{\sqrt{GM_{Sun}}}$$

## Leyes de Kepler

Johannes Kepler, trabajando con datos cuidadosamente recogidos por Tycho Brahe sin la ayuda de un telescopio, desarrolló tres leyes que describen el movimiento de los planetas en el cielo.

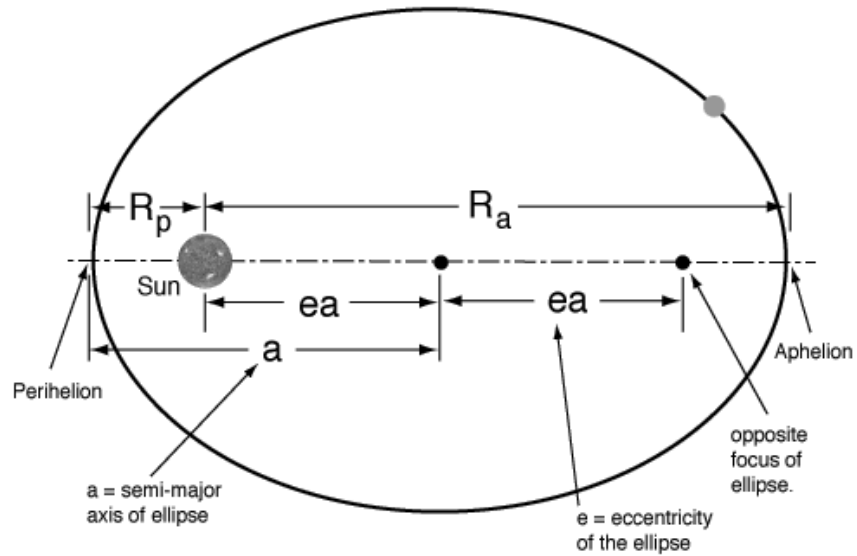
1. La ley de la órbita: Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de los focos.
2. La ley de las áreas: La línea que une un planeta al Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.
3. La ley de los periodos: El cuadrado del periodo de cualquier planeta, es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.

Las leyes de Kepler fueron derivadas de las órbitas alrededor del Sol, pero de igual manera se aplican a las órbitas de los satélites.



## La Ley de las Órbitas

Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de los focos.

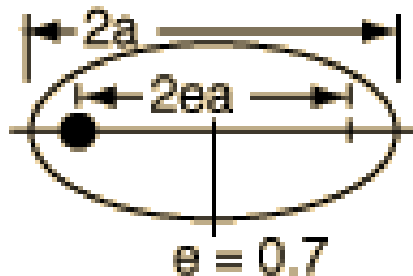


$$R_a = a(1+e) \quad R_p = a(1-e)$$

Esta es una de las leyes de Kepler. La forma elíptica de la órbita, es el resultado de la fuerza del inverso del cuadrado de la gravedad. Aquí está bastante exagerada la excentricidad de la elipse.

## Excentricidad de la Órbita

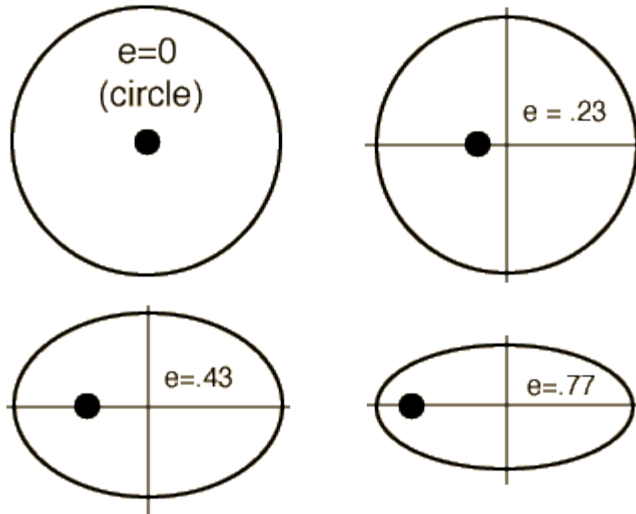
La excentricidad de una elipse se puede definir como la proporción entre las medidas de



la distancia entre focos respecto al eje mayor de la elipse. La excentricidad es cero para un círculo. En las órbitas planetarias, solo el enano Plutón tiene una excentricidad grande.

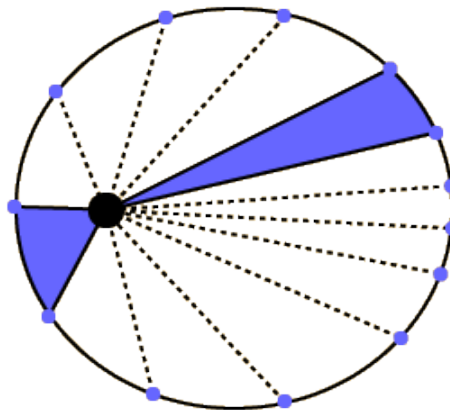
## Ejemplos de Excentricidad de Elipses

Mercurio	0,206
Venus	0,0068
Tierra	0,0167
Marte	0,0934
Júpiter	0,0485
Saturno	0,0556
Urano	0,0472
Neptuno	0,0086
Plutón	0,25



## La Ley de las Áreas

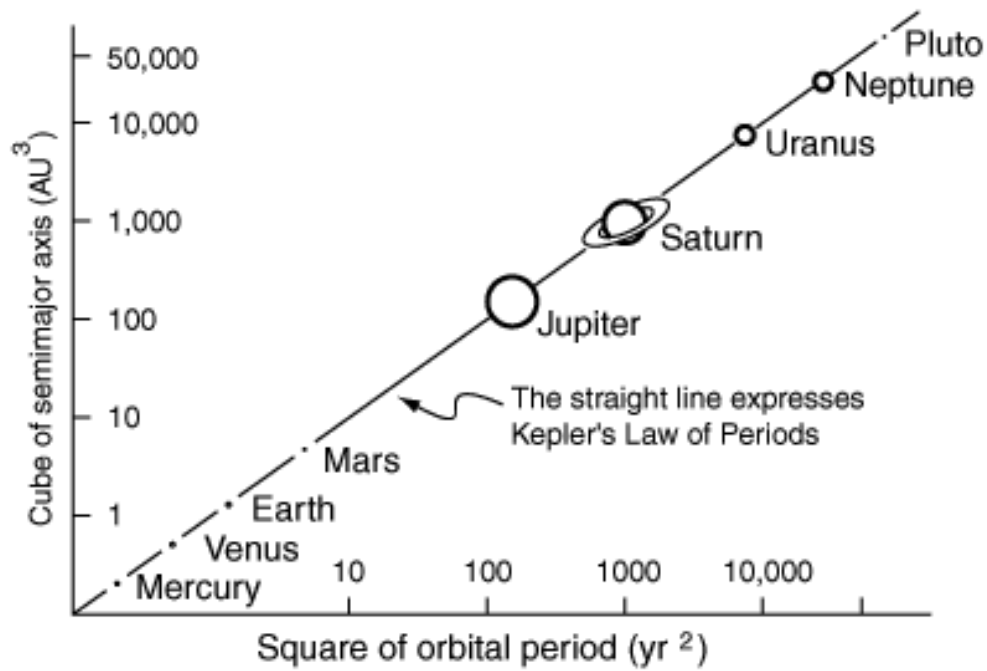
La línea que une un planeta al Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales. Esta es una de las leyes de Kepler. Esta ley empírica descubierta por Kepler, surge de la conservación del momento angular. Cuando el planeta está más cerca del Sol, se mueve más rápido, barriendo, la misma área sobre un camino más largo en un determinado tiempo.



## La Ley de los Periodos

El cuadrado del periodo de cualquier planeta, es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$



Esta es una de las leyes de Kepler. Esta ley surge de la ley de la gravitación. Newton formuló primero la ley de la gravitación a partir de la tercera ley de Kepler.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

can be expressed  
as simply

$$T^2 = a^3$$

If expressed in the following units:

$T$  Earth years

$a$  Astronomical units AU  
( $a = 1$  AU for Earth)

$M$  Solar masses  $M_{\odot}$

Then  $\frac{4\pi^2}{G} = 1$

La ley de los periodos de Kepler en la forma de arriba, es una aproximación, que sirve bien para las órbitas de los planetas, porque la masa del Sol es bastante dominante. Pero la ley se debería escribir más precisamente

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3$$

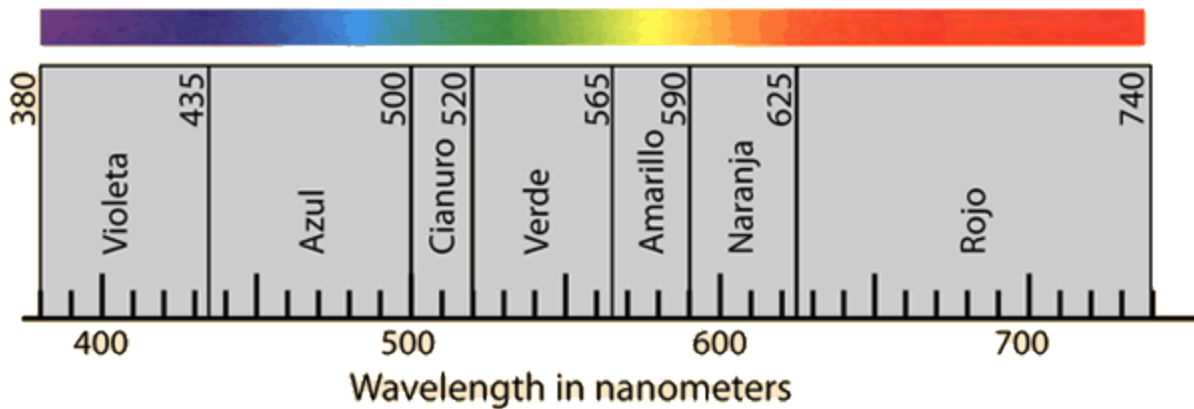
Esta forma más rigurosa, es útil para el cálculo del periodo orbital de la Luna u otras órbitas binarias como las de las estrellas binarias.

## LUZ - ESPECTROS –OPTICA-LENTE Y ESPEJOS

### Colores del Espectro



En un arco iris o en la separación de colores por un prisma, se puede ver un rango continuo de colores espectrales (el espectro visible). Un color espectral, está compuesto por una longitud de onda simple, y se puede correlacionar con la longitud de onda como se muestra en el gráfico de abajo (una guía general y no una indicación precisa sobre el color). Es bastante seguro decir que la luz monocromática de un láser de helio-neón es roja (632 nm) ó que la transición 3-2 en el espectro del hidrógeno es de color rojo (656 nm), porque ambos caen en el rango de longitudes de ondas apropiado. Pero la mayoría de los objetos coloreados, emiten una gama de longitudes de onda y la caracterización del color es mucho más que una declaración de longitud de onda. La percepción de los colores se puede representar en un diagrama de cromaticidad.



### El Color

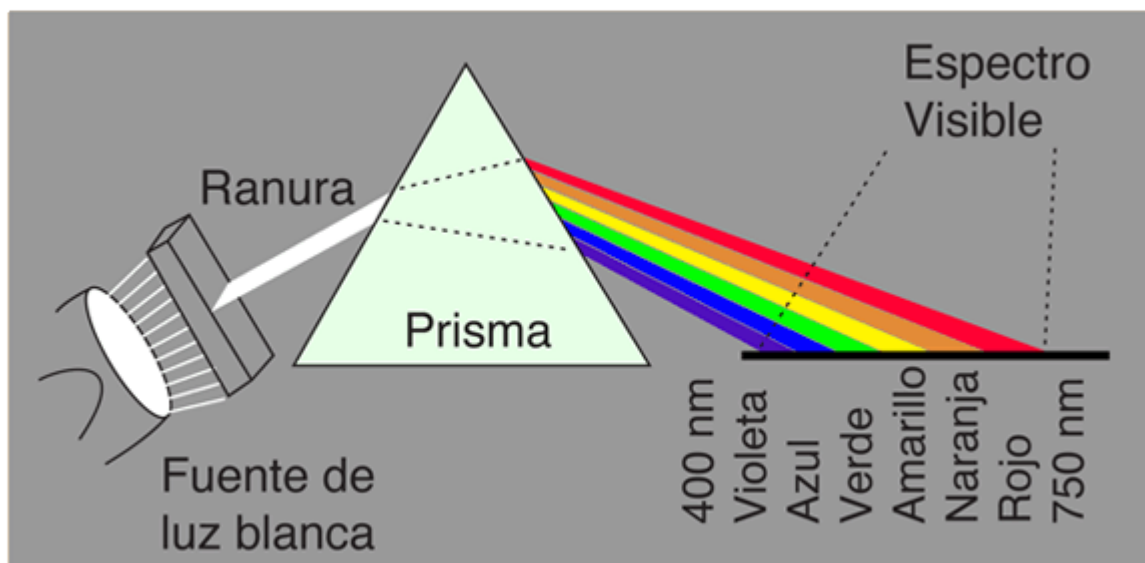


Es una práctica usual, definir los colores puros en términos de la longitud de onda de la luz que muestran. Esto funciona bien con los colores espectrales, pero se ha encontrado que muchas combinaciones diferentes de longitudes de onda de luz pueden producir la misma percepción de color.

Infrared	R	O	Y	G	B	I	V	Ultraviolet
----------	---	---	---	---	---	---	---	-------------

Esta progresión de izquierda a derecha es para la luz desde longitudes de ondas largas a longitudes de ondas cortas, (desde bajas frecuencias a altas frecuencias). Las longitudes de ondas se expresan normalmente en nanómetros ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). El espectro visible va aproximadamente desde 700 nm (extremo rojo) a 400 nm (extremo violeta). La letra I en la secuencia de arriba es para la palabra índigo -también se dice añil en español-. Sus nombres equivalentes en español son Red=Rojo, Orange=Naranja, Yellow=Amarillo, Green=Verde, Blue=Azul, Indigo=Añil, Violet=Violeta.

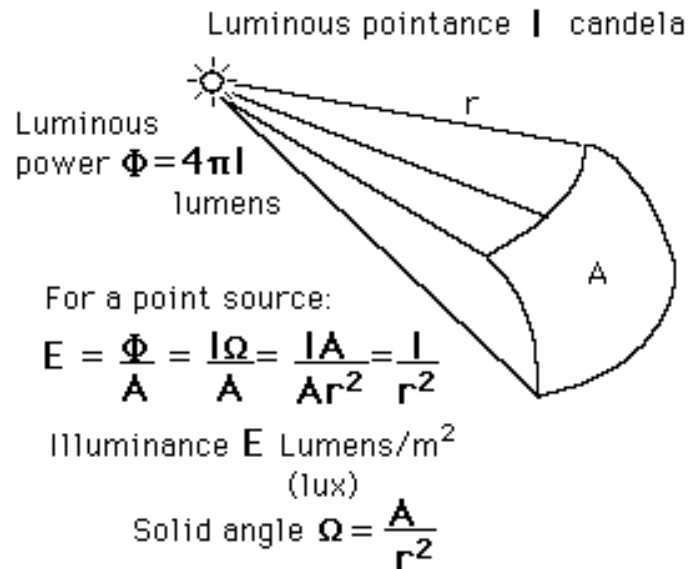
Las características intrínsecamente distinguibles del color son tono, saturación, y brillo. Los sistemas de medición del color los caracterizan con varios parámetros que se relacionan con el tono, la saturación y el brillo. Entre estos sistemas tenemos los subjetivos Munsell y Ostwald, y el sistema de color cuantitativo CIE.



La luz blanca o luz casi blanca del Sol, contiene una distribución continua de longitudes de onda. La luz del Sol es esencialmente la de un radiador de cuerpo negro a 5780 °K. Las longitudes de ondas (colores del espectro) de la luz blanca pueden ser separadas por un medio dispersivo como un prisma. Incluso una separación más eficaz se puede lograr con una rejilla de difracción.

## Potencia por Unidad de Ángulo Sólido

La potencia (flujo) por unidad de ángulo sólido (llamada a veces "pointance") es la terminología precisa más cercana al término común de intensidad. Expresa la direccionalidad de la energía radiada y es apropiada para la descripción de fuentes puntuales. En el caso de la potencia radiante, se expresa en vatios por estéroradian. Para la luz visible, se expresa en lúmenes por estéroradian = candela.

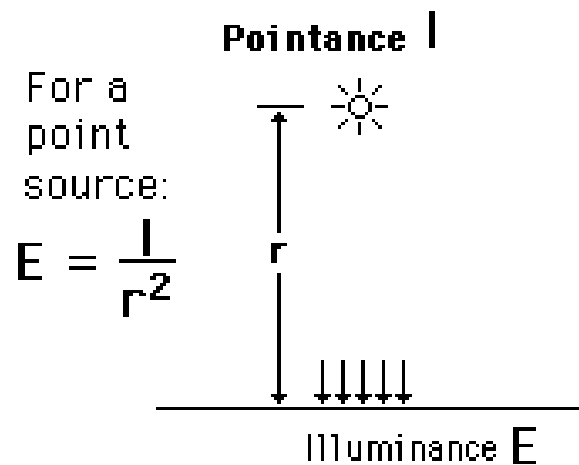


Si la intensidad ( $I = d\Phi/d\omega$ ) de una fuente es la misma en todas direcciones, la fuente se llama isotrópica. De otra manera, en una superficie radiante plana, conocida como una lambertiana, la intensidad cae con el coseno del ángulo de observación, respecto de la normal a la superficie.

## Potencia por Unidad de Área de Superficie

La potencia por unidad de área sobre una superficie iluminada, llamada a veces "areance", se distingue de la cantidad similar de la fuente. En radiometría el "areance" de superficie, se suele llamar "irradiance" y el "areance" luminoso, iluminancia. Esta última es la cantidad importante. La iluminancia se mide en lux, pero todavía se encuentra la antigua unidad bujía-pié.

## Example for point source of light

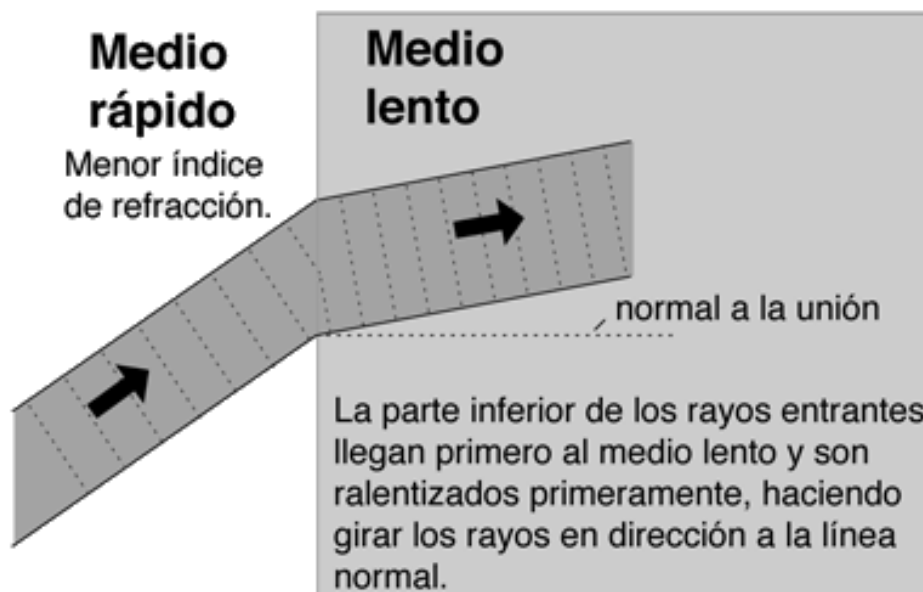


### Refracción de la Luz

La refracción de una onda es la flexión que sufre cuando entra en un medio con velocidad de propagación diferente. La refracción de la luz, cuando pasa de un medio de propagación rápido a otro más lento, dobla el rayo de luz en dirección a la normal a la superficie de contacto entre ambos medios. La cantidad de difracción depende de los índices de refracción de los dos medios y se describe cuantitativamente por la ley de Snell.

La refracción es la responsable de la formación de imágenes por las lentes y el ojo.

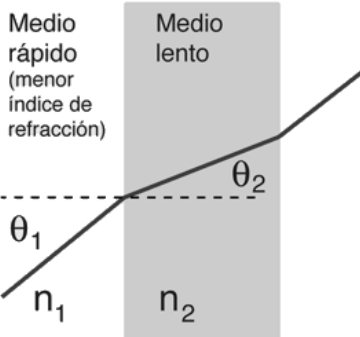
Cuando se reduce la velocidad de la luz en un medio más lento, la longitud de onda se reduce proporcionalmente. La frecuencia no cambia; es una característica de la fuente de luz y no es afectada por los cambios de medios.



## Ley de Snell

La ley de Snell relaciona los índices de refracción de los dos medios, con las direcciones de propagación en términos de los ángulos con la normal. La ley de Snell se puede derivar del principio de Fermat o de las ecuaciones de Fresnel.

Ley de Snell

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$


Si el medio incidente tiene un índice de refracción mayor, entonces aumenta por la refracción el ángulo con la normal. El medio con índice mayor se llama comúnmente el medio "interno", ya que el aire con  $n=1$ , está normalmente rodeándolo (medio "externo"). Se puede calcular la condición para la reflexión interna total estableciendo el ángulo refractado =  $90^\circ$  y calculando en ángulo incidente. Puesto que la luz no se puede refractar más de  $90^\circ$ , todos los ángulos mayores de  $90^\circ$ , reflejarán la luz calculada para el ángulo de  $90^\circ$ .

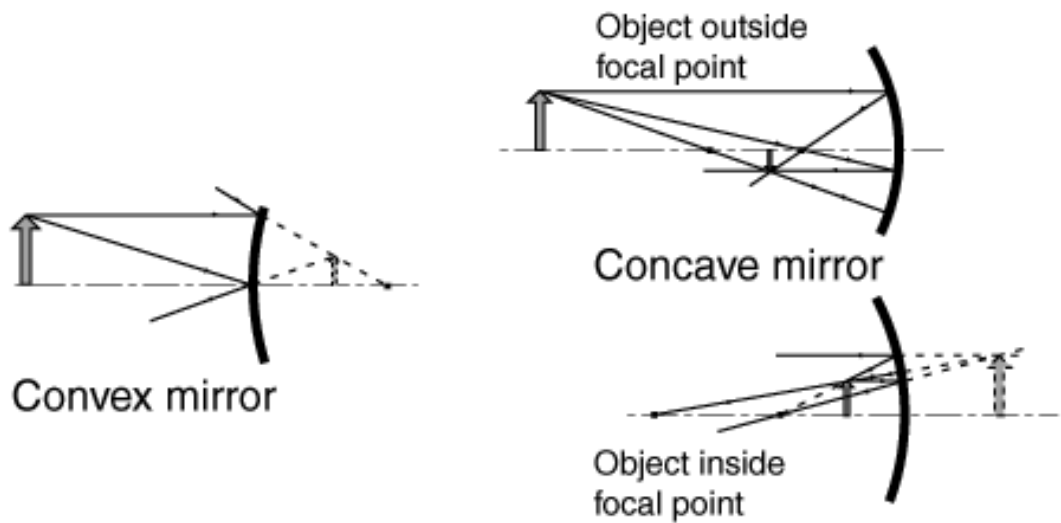
## Reflexión

La luz incidente sobre una superficie en general, será parcialmente reflejada y parcialmente transmitida como un rayo refractado. La relación de ambos ángulos de reflexión y de refracción se puede derivar del principio de Fermat. Al hecho de que el ángulo de incidencia sea igual al ángulo de reflexión, se le llama a veces la "ley de reflexión".

## Los Espejos en Imágenes

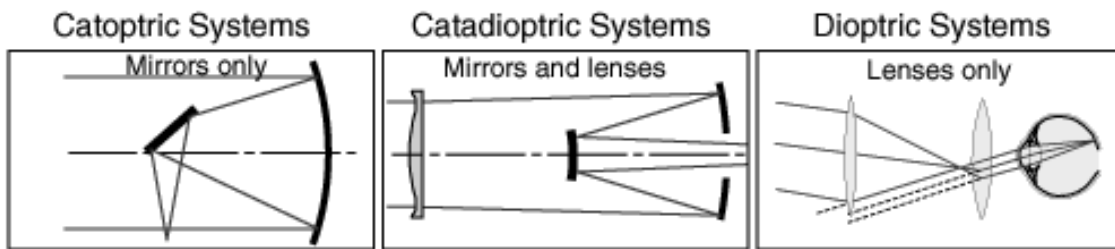
Los espejos son ampliamente utilizados en los instrumentos ópticos para la captación de luz y la formación de imágenes, ya que trabajan en un rango más amplio de longitudes de onda, y no tienen los problemas de dispersión característicos de las lentes y otros elementos refractantes.





### Instrumentos con Espejos

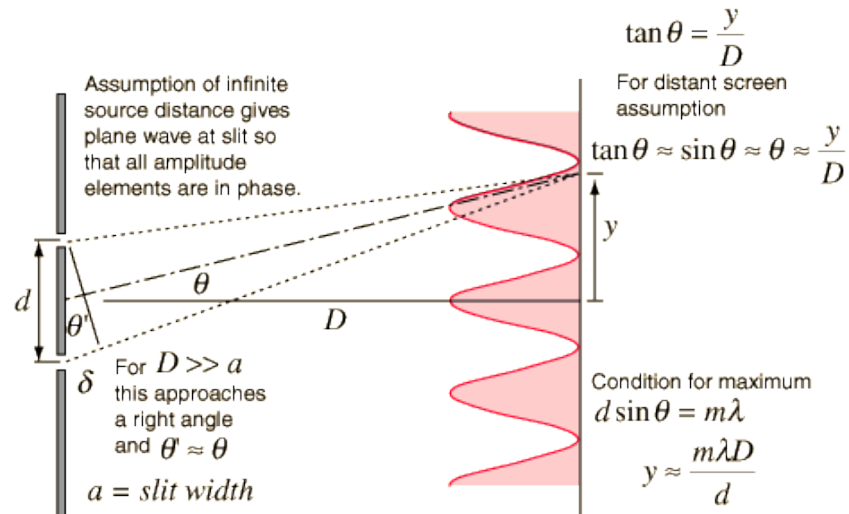
Los espejos son ampliamente utilizados en los telescopios y lentes de telefoto. Tienen la ventaja de operar en un rango más amplio de longitudes de onda, desde el infrarrojo hasta más allá del ultravioleta. Evitan la aberración cromática que surgen de la dispersión en las lentes, pero están sujetos a otras aberraciones. Los instrumentos que utilizan solamente espejos para la formación de imágenes, se denominan sistemas catóptricos, mientras que los que utilizan las lentes y los espejos se llaman sistemas catadióptricos (los sistemas dióptricos son los que solamente utilizan las lentes).



## Interferencia

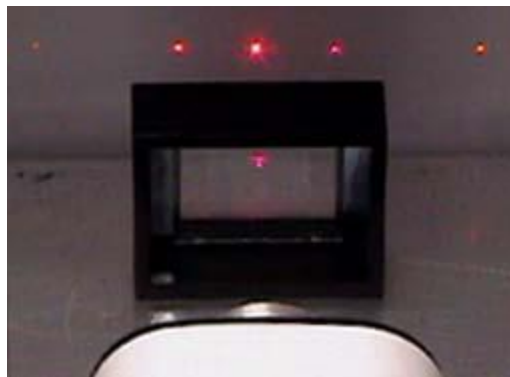
Las propiedades ondulatorias de la luz nos lleva a las interferencias, pero se deben cumplir ciertas condiciones de coherencia para que los efectos de esta interferencia sean fácilmente visibles.

### Interferencia Doble Rendija



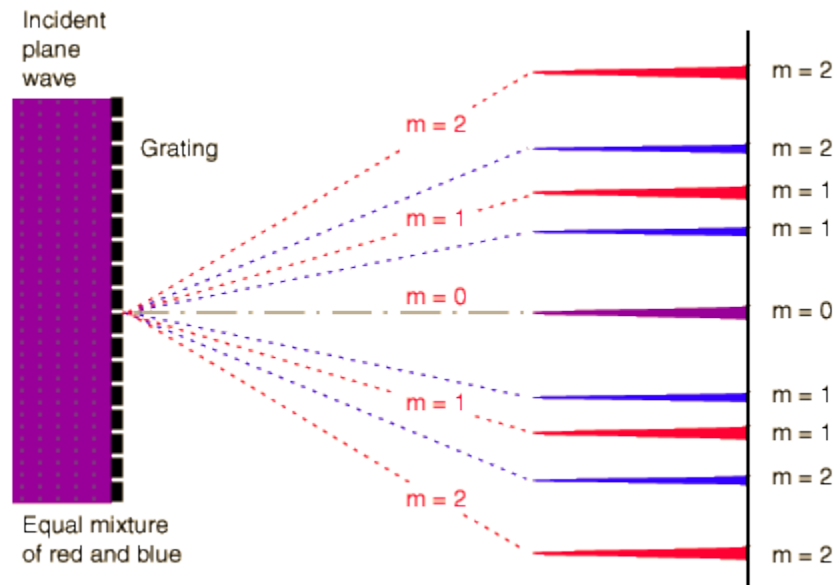
### Red de Difracción

Cuando hay una necesidad de separar la luz de diferentes longitudes de onda en alta resolución, la herramienta de elección más usada es la red (o rejilla) de difracción. Ese aspecto de "súper prisma" de la red de difracción, conduce a su aplicación en la medición de los espectros atómicos tanto en instrumentos de laboratorio como en telescopios. Una red de difracción está constituida por un gran número de rendijas paralelas, muy próximas entre sí. La condición de máxima intensidad es la misma que la de la doble rendija o rendijas múltiples, pero con un gran número de rendijas, el máximo de intensidad está muy marcado y estrecho, proporcionando una alta resolución para las aplicaciones espectroscópicas. En la red, las intensidades de picos también son mucho mayores que en la doble rendija. Cuando la luz de una sola longitud de onda, como la luz roja de 632.8nm del láser de helio-neón de abajo, incide sobre una red de difracción, se difracta a cada lado en múltiples órdenes. Se muestran los órdenes 1 y 2 a cada lado del rayo directo. Diferentes longitudes de ondas se difractan a diferentes ángulos, de acuerdo con la relación de la red.

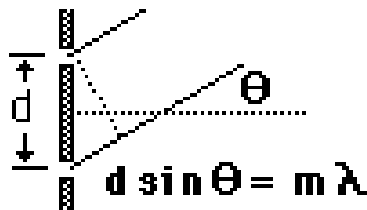


## Red de Difracción

La red o rejilla de difracción es la herramienta de elección para separar los colores de la luz incidente.



La condición de máxima intensidad es la misma que la de la doble rendija. Sin embargo, la separación angular del máximo, generalmente es mucho mayor debido a la pequeña separación de las rendijas en la red de difracción.



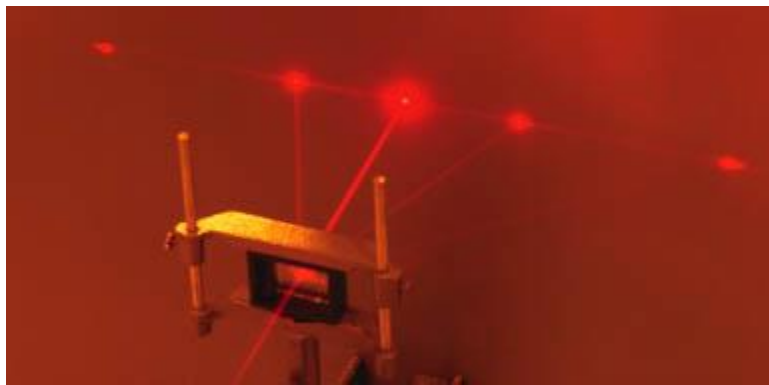
La red de difracción es una herramienta muy útil para la separación de las líneas espectrales asociadas con las transiciones atómicas. Actúa como un "superprisma", que separa los diferentes colores de luz mucho más que el efecto de dispersión del prisma. La ilustración muestra el espectro del hidrógeno. El gas hidrógeno contenido en un tubo delgado de cristal, se excita por una descarga eléctrica, y se puede ver su espectro a través de la red de difracción.



Las pistas de un disco compacto actúan como una red de difracción, produciendo una separación de los colores de la luz blanca. La separación nominal de las pistas en un CD es de 1,6 micrómetros, correspondiente a unas 625 pistas por milímetro. Este es el rango de las redes de difracción ordinarias de laboratorios. Para la luz roja de 600 nm, esto daría un máximo de difracción de primer orden, a unos  $22^\circ$ .



### Rejilla de Difracción y Láser de Helio-Neón



Mientras dirigimos el rayo rojo de 632,8 nm. de un láser de helio-neón a través de una rejilla de difracción de 600 líneas/mm, se formó una nube con nitrógeno líquido. Se pueden observar el rayo directo, así como los primero y segundo órdenes de la difracción.



Otra forma de visualizar la difracción es, tomar un exposición temporal, mientras se barre un cristal esmerilado a través de los haces de rayos. Con ello se "pintan" los rayos de la luz de láser difractada.

## LENTEs

### Ecuación de Lentes Delgadas

Abajo se muestra la forma común Gausiana de la ecuación de lentes. Esta es la forma que se usa en la mayoría de los textos introductorios. La forma usando la convención de signos cartesianos, se utiliza a menudo en los textos más avanzados, debido a la ventaja que ofrece con los sistemas de múltiples lentes e instrumentos ópticos más complejos. Cualquiera de las formas se pueden usar con lentes positivas o negativas y predicen la formación de ambas imágenes real y virtual. No se aplica a las lentes gruesas.

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

$\frac{1}{\text{object distance}} + \frac{1}{\text{image distance}} = \frac{1}{\text{focal length}}$

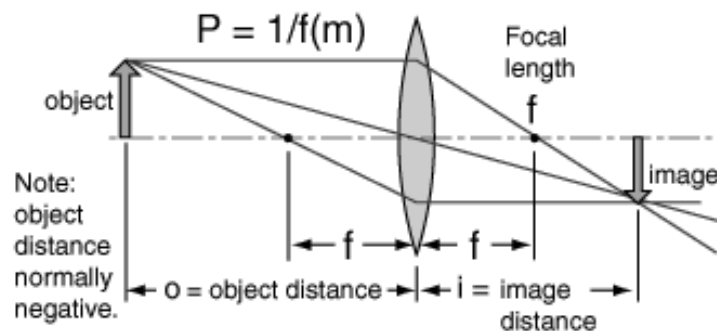
Si de la ecuación de lentes resulta una distancia de imagen negativa, entonces se trata de una imagen virtual en el mismo lado de la lente donde está el objeto. Si resulta una longitud focal negativa, entonces se trata de una lente divergente en vez de una lente convergente como la de la ilustración. Se puede usar la ecuación de lente para calcular la distancia de la imagen, tanto para una imagen real como virtual, y tanto para lentes positivas como negativas. La fórmula del aumento lineal, permite predecir el tamaño de la imagen.

### Ecuación de Lentes Delgadas: Convención Cartesiana

La ecuación de lentes delgadas en la forma cartesiana es

$$\frac{1}{o} + \frac{1}{f} = \frac{1}{i}$$

en donde se usa la convención de signos cartesianos. La ecuación de lentes se expresa a veces en forma Newtoniana. La derivación de la forma Gausiana procede de la geometría del triángulo. Para una lente delgada, la potencia de lente  $p$  es la suma de las potencias de cada superficie. Para lentes más gruesas se puede usar la ecuación de Gullstrand para obtener la potencia total equivalente.

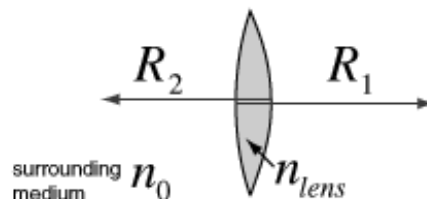


## Fórmula de Lens-Maker

En una lente delgada, la potencia es aproximadamente la suma de las potencias de superficie.

$$P_{lens} = \frac{(n_{lens} - n_0)}{n_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

El radio de curvatura se mide aquí de acuerdo con la convención de signos cartesianos. En una lente doble convexa, el radio  $R_1$  es positivo, puesto que se mide desde el frente de la superficie y se extiende a la derecha hacia el centro de curvatura. El radio  $R_2$  es negativo, puesto que se extiende a la izquierda desde la segunda superficie.



El cálculo anterior es un cálculo cuyo único propósito es devolver la potencia y las longitudes focales sobre la base de los valores de los radios y los índices de refracción. Sustituir un dato en cualquier campo y se reiniciará el cálculo. Los valores del radio y del índice se pueden cambiar, pero cualquier parámetro sin especificar, tomará un valor por defecto.

La segunda parte del cálculo de arriba muestra, muestra la disminución de potencia de una lente en otro medio distinto del aire. Esto proporciona un importante conocimiento sobre el papel que juegan las dos lentes del ojo humano. La córnea tiene una potencia mayor porque la luz entra desde el aire. Las lentes interiores del cristalino tiene mucha menos potencia de refracción, porque está suspendida en un medio similar al agua.

Para lentes gruesas, se puede usar la ecuación de Gullstrand para calcular la potencia de lente.

## Ecuación de Gullstrand

Las lentes gruesas se pueden manejar con el mismo tipo de ecuaciones de las lente finas, si las distancias están medidas respecto de los hipotéticos planos principales. La potencia de una lente respecto del segundo plano principal  $H_2$  está dada por la ecuación de Gullstrand:

$$P = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \frac{d}{n_2}$$

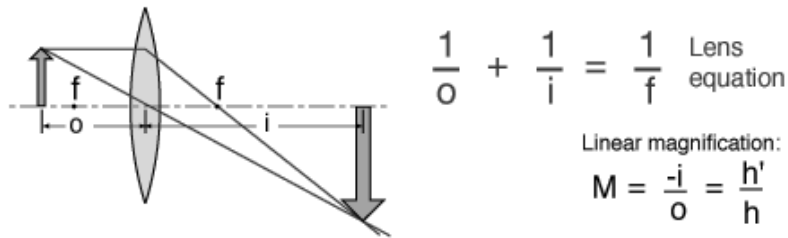
La distancia focal  $f$  respecto a ese segundo plano principal está dada por:

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - \frac{d}{n_2}}$$

Las formas de la ecuación de Gullstrand son aplicables tanto a lentes separadas como a una simple lente gruesa. Puesto que las potencias de Gullstrand y las distancias focales se miden respecto del plano hipotético, es a menudo más útil trabajar con las longitudes focales de los vértices frontal y dorsal.

### Aumento: Transversal y Angular

El aumento ("magnificación") lineal o aumento transversal es la proporción entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto. Si la imagen y el objeto están en el mismo medio, entonces es la distancia de la imagen dividida por la distancia del objeto.



Utilizando la forma Gaussiana de la ecuación de lentes, se usa un signo negativo como recordatorio de que todas las imágenes reales están invertidas. Si la imagen es virtual, la distancia de la imagen será negativa y el aumento será por lo tanto positivo para una imagen derecha (no invertida).

Si el medio es diferente en los dos lados de las superficies de la lente, el aumento ya no es tan sencillo. Entonces en su lugar se expresa como

$$M_T = \frac{V}{V'} = \frac{nu}{n'u'} = \frac{ni}{n'o}$$

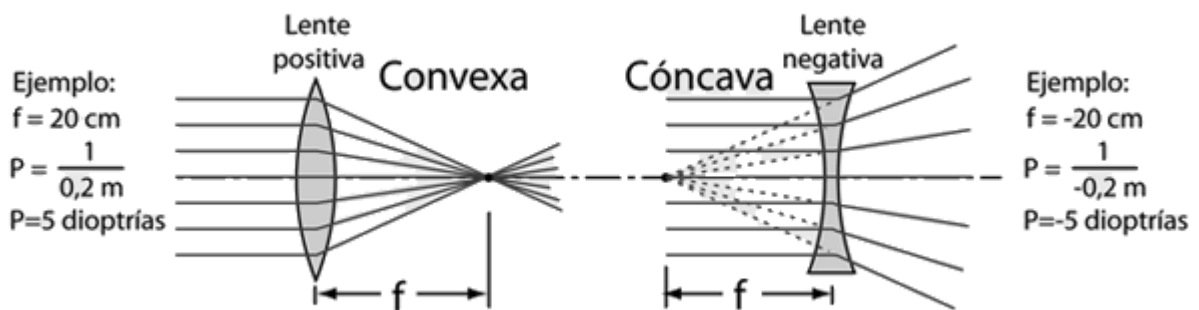
$V = \text{vergence}$      $o = \text{object distance}$      $i = \text{image distance}$

En esta ecuación  $V$  es la vergencia,  $n$  es el índice de refracción, y  $u$  es el ángulo. Nótese que en esta expresión del aumento, no aparece el signo menos. En este caso se utiliza normalmente la convención de signos cartesianos y la distancia del objeto tiene un valor negativo. Con esto se toma en consideración el signo menos que se pone en la expresión de la forma Gaussiana de arriba.

El aumento angular de un instrumento es la proporción entre el ángulo de la vista con el objeto cuando se usa el instrumento, y el mismo ángulo sin instrumento. Un ejemplo importante está en la lupa simple. El aumento angular de cualquier sistema óptico, se puede obtener de su matriz del sistema.

## Longitud Focal Principal

En una lente delgada biconvexa, todos los rayos paralelos se concentrarán en un punto que se llama punto focal principal. La distancia desde la lente a ese punto, es la longitud focal principal  $f$  de la lente. En una lente doble cóncava, donde los rayos son divergentes, la distancia focal principal es la distancia desde punto donde se unen las prolongaciones hacia atrás de esos rayos, hasta la lente, y se le da un signo negativo. La potencia o intensidad de la lente en dioptrías, se define como el inverso de la distancia focal en metros. En una lente gruesa hecha de superficies esféricas, la distancia focal es diferente para diferentes rayos, y a este cambio se le conoce como aberración esférica. La longitud focal para diferentes longitudes de onda, también variará ligeramente, y a esto se le llama aberración cromática.



La longitud focal principal de una lente se determina por el índice de refracción del vidrio, por el radio de curvatura de las superficies, y por el medio en el cual reside la lente. Se puede calcular por la fórmula de lens-maker para lentes delgadas.

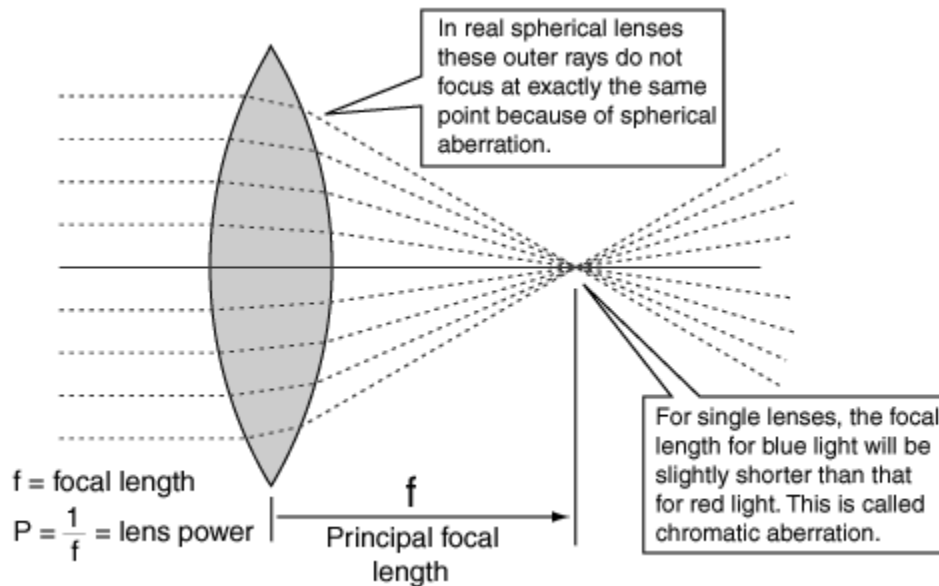


Esta ilustración muestra dos haces de sendos láseres de helio-neón, convergiendo en el punto focal principal situado a 30 cm. de una lente doble convexa. Los rayos entran luego a la derecha en una lente divergente con una longitud focal de -10 cm. Los haces del láser se hicieron visible, gracias a un bote de spray de humo artificial.



## Longitud Focal e Intensidad de Lente

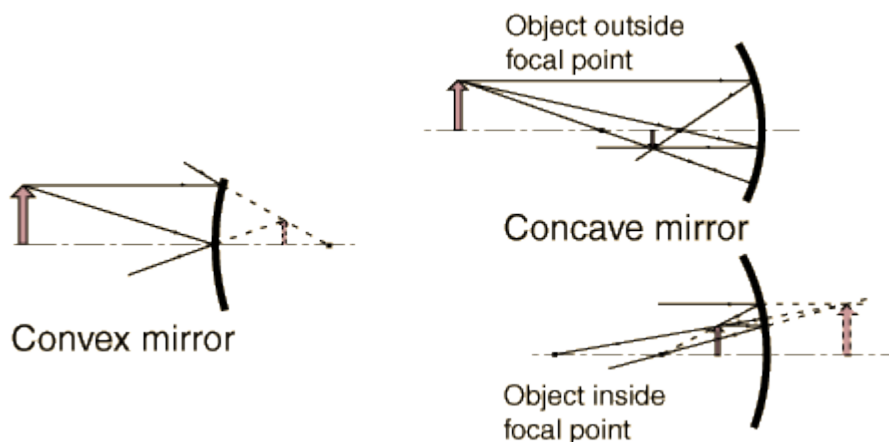
La característica más importante de una lente es su longitud focal principal, o su inverso, que se llama intensidad de lente o "potencia" de la lente. Los oculistas normalmente prescriben las lentes correctoras en términos de potencia de lente, en dioptrías. La potencia de lente es el inverso de la longitud focal en metros: la unidad física de potencia de lente es 1/metro que se llama dioptría.



## ESPEJOS

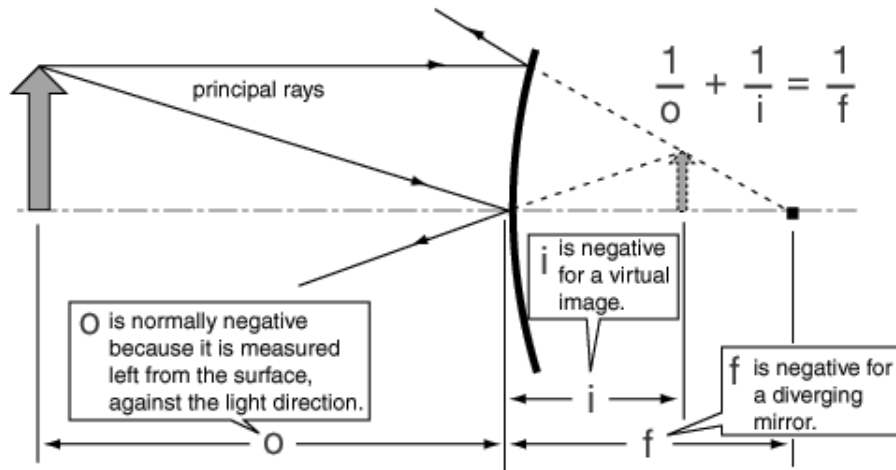
### Trazado de Rayos en Espejos

El trazado de los rayos en espejos es similar al trazado de rayos en lentes, en los cuales se usan rayos paralelos al eje óptico y rayos a través del punto focal. Un tercer rayo útil es el que pasa por el centro de curvatura, puesto que es normal al espejo y su prolongación hacia atrás redibuja el objeto.



## Imagen en Espejo Convexo

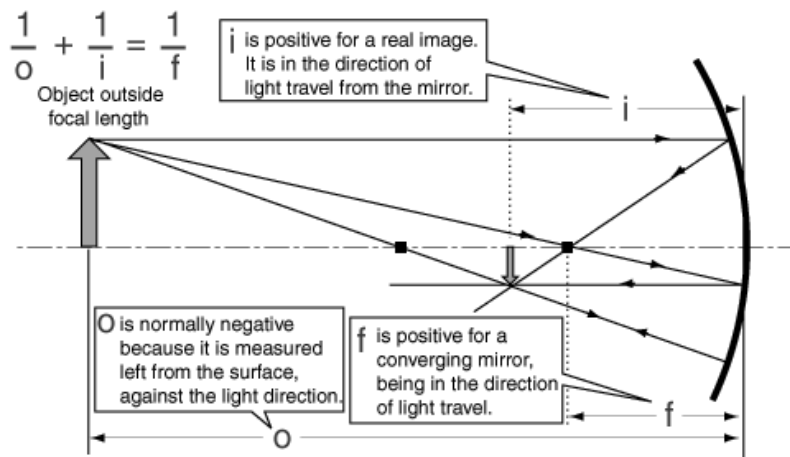
Un espejo convexo forma una imagen virtual.



Usando un rayo paralelo al eje principal y uno incidente sobre el centro del espejo, se puede construir la posición de la imagen, proyectando hacia atrás los rayos que se reflejan en el espejo. La imagen virtual que se forma aparecerá más pequeña y más cerca del espejo que el objeto.

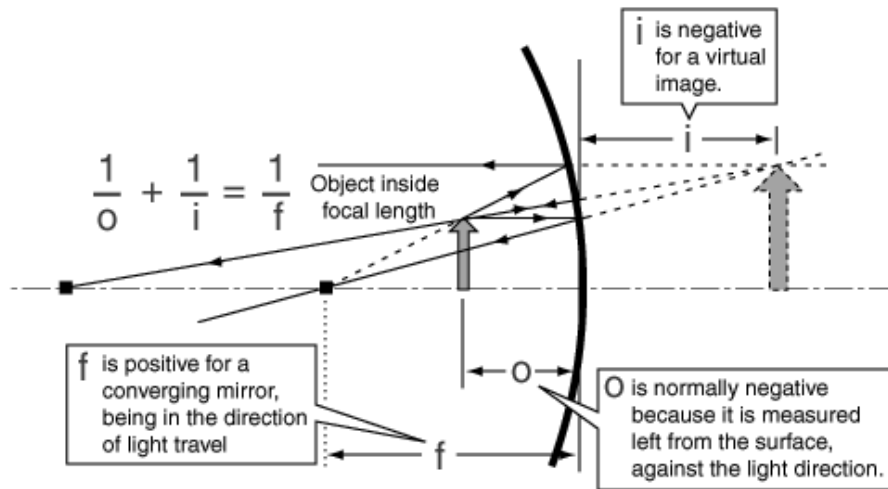
## Imagen de Espejo Cóncavo

Si el objeto está fuera de la distancia focal, un espejo cóncavo formará una imagen real invertida.



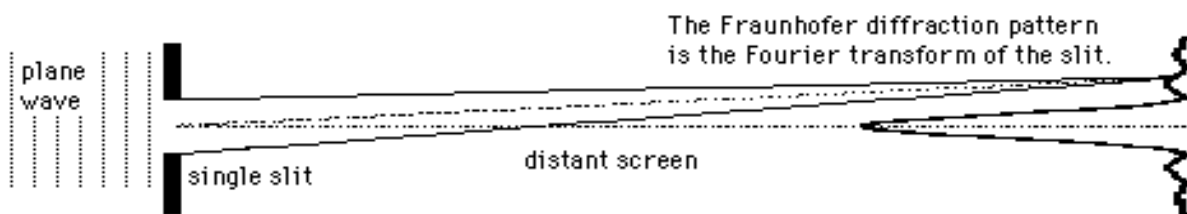
## Imagen de Espejo Cóncavo

Si en el interior de la distancia focal de un espejo cóncavo situamos un objeto, se formará una imagen virtual agrandada y recta (no invertida), detrás del espejo.



## Óptica de Fourier

Los métodos ópticos de Fourier se pueden visualizar, considerando el patrón de difracción de una rendija simple. El proceso de difracción transforma la imagen de la ranura en el plano objeto, en un patrón de difracción en el distante plano de la imagen. Este patrón de difracción contiene información sobre la ranura de una forma tal que los detalles espaciales pequeños (rendijas más estrechas) se transforman en mayor desplazamiento espacial en el plano de la imagen (patrones de difracción más anchos). Los detalles espaciales más pequeños puede ser referidos como una mayor "frecuencia espacial", y el patrón de difracción produce una trama en la que a mayor distancia del eje óptico implica una mayor frecuencia espacial. Este tipo de transformación, donde se transforma una trama de distribución de luz en una trama de frecuencia espacial, es un ejemplo de una transformación de Fourier, y es un punto de partida conceptual para la óptica de Fourier.



## RESOLUCION OPTICA

El término resolución óptica hace referencia al poder de un instrumento para separar dos objetos de una imagen. En astronomía la cuestión que se plantea es la distancia angular que puede haber entre dos estrellas para que se puedan distinguir por separado. Las estrellas están tan lejos que son siempre fuentes puntuales. Sin embargo, debido a la difracción de la luz al atravesar el telescopio la luz procedente de un objeto puntual crea una imagen anular con un patrón de difracción característico denominado disco de Airy. El límite óptico debido a la difracción puede calcularse de manera empírica a partir del criterio de Rayleigh.

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

donde  $\theta$  es la resolución angular,  $\lambda$  la longitud de onda de la luz y  $D$  el diámetro o apertura del telescopio. El factor 1.22 se deriva de un cálculo de la posición del primer anillo de oscuridad rodeando el disco de Airy central. Este factor se utiliza para aproximar la habilidad del ojo humano para distinguir dos fuentes puntuales de luz cuyos discos de Airy se superponen.

Por otro lado, el efecto de la turbulencia de la atmósfera (llamado seeing) provoca que incluso en noches claras haya un límite en torno a 1 segundo de arco de resolución (esto viene a ser la separación de los faros de un coche vistos a 300km de distancia). Esta es una de las razones por las que se envían telescopios en satélites artificiales, más allá de la atmósfera.

## DISCO DE AIRY

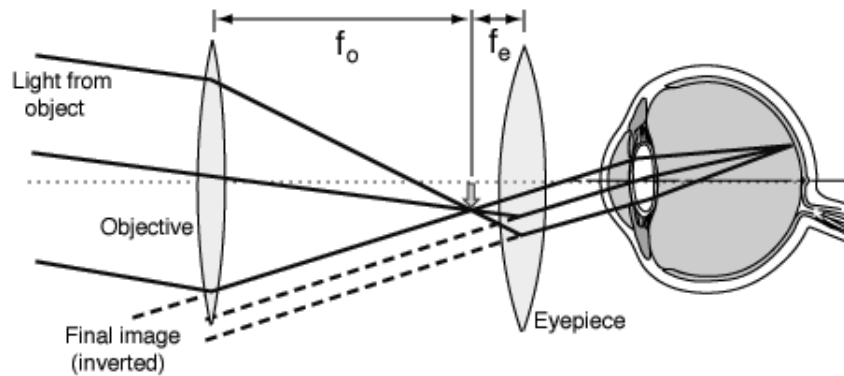
El disco de Airy es un fenómeno óptico. Debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, cuando ésta atraviesa una apertura circular se difracta produciendo un patrón de interferencia de regiones iluminadas y oscuras sobre una pantalla alejada de la apertura.

El patrón de difracción resultante en una apertura circular iluminada uniformemente tiene una región central brillante conocida como **disco de Airy** rodeada de una serie de anillos concéntricos denominados patrón de Airy (ambos nombrados así en honor a George Airy). El diámetro del disco central está relacionado con la longitud de onda de la luz y el tamaño de la abertura circular.

La más importante aplicación de este concepto está en cámaras y telescopios. Debido a la difracción, el punto más pequeño en el que se puede enfocar un rayo de luz usando una lente tiene el tamaño de un disco de Airy. Así, incluso teniendo una lente perfecta, aún existe un límite para la resolución de una imagen creada por dicha lente. Un sistema óptico en el que la resolución no está limitada por imperfecciones en las lentes sino sólo por difracción se dice que está limitado por difracción.

## El Telescopio Astronómico

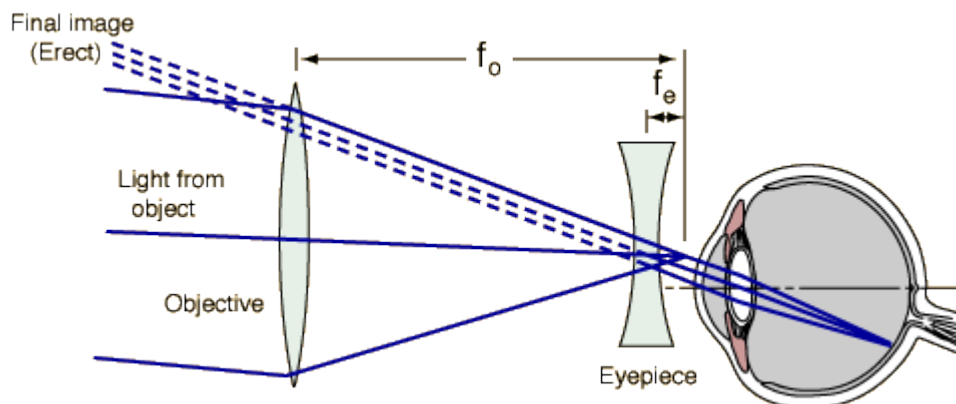
El telescopio astronómico hace uso de dos lentes positivas: el objetivo, que forma la imagen de un objeto distante exactamente en su longitud focal, y el ocular, que actúa como una lupa simple, y con la que se ve la imagen formada por el objetivo. Su longitud es igual a la suma de las longitudes focales del objetivo y del ocular y su aumento angular es  $-f_o/f_e$ , dando una imagen invertida.



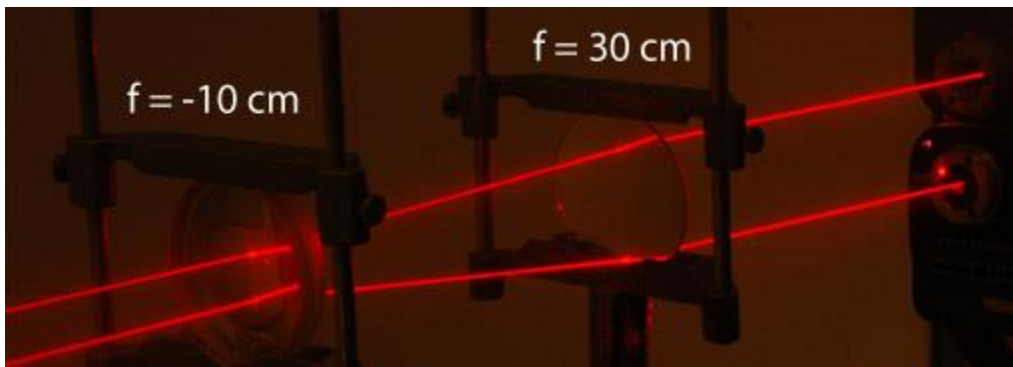
El telescopio astronómico se puede usar para vistas terrestres, pero al verse las imágenes invertidas, resulta de un inconveniente definitivo. La visión de las estrellas invertidas, no supone ningún problema. Otro inconveniente para la visión terrestre es la longitud del telescopio astronómico, igual a la suma de las longitudes focales de las lentes objetivo y ocular. Un telescopio más corto y con la visión recta es el telescopio Galileano.

## Telescopio Galileano

El telescopio Galileano o terrestre, usa una lente objetivo positiva y un ocular negativo. Da imágenes rectas y es más corto que un telescopio astronómico con la misma potencia. Su aumento angular es  $-f_o/f_e$ .



La imagen de abajo muestra los rayos paralelos de dos láseres de helio-neón pasando a través de un telescopio Galileano, hecho con un objetivo con  $f=30\text{cm}$  y un ocular con  $f=-10\text{cm}$ .



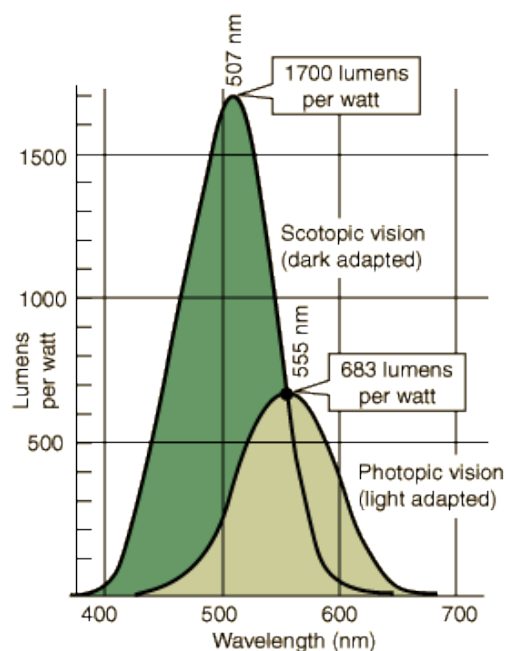
Con las lentes colocadas a una distancia de 20 cm =  $f_o + f_e$ , los rayos de entrada paralelos, se vuelven a enviar paralelos de nuevo por la lente del ocular, dando una imagen en el infinito. Esto muestra uno de los usos de los telescopios galileanos. Es útil como un colimador que toma un gran haz de luz paralela y reduce su tamaño, manteniendo paralelos los rayos. El aumento angular de este telescopio galileano es 3. Estos haces de helio-neón, se hicieron visibles con un bote de spray de humo artificial.

### Eficacia Luminosa

Estas curvas representan la eficacia luminosa espectral de la visión humana. El lumen se define de tal manera, que el pico de la curva de la visión fotópica, tiene una eficacia luminosa de 683 lúmenes/vatio. Este valor del pico fotópico, tiene la misma eficacia que el valor de la curva escotópica a 555 nm.

La visión escotópica es principalmente una visión de bastones, y la visión fotópica incluye los conos.

La curva de respuesta del ojo, junto con la distribución de energía espectral de un objeto luminoso, determina el color percibido del objeto.



## El Lumen

El lumen es la unidad estándar del flujo luminoso de una fuente de luz. Es una unidad derivada SI, basada en la candela. Se puede definir como el flujo luminoso emitido sobre una unidad de ángulo sólido (1 sr), por una fuente puntual isotrópica que tiene una intensidad luminosa de una candela. El lumen unitario es por tanto igual a, cd x sr. La abreviatura es lm y el símbolo es  $\Phi_v$ . En términos de potencia radiante (llamada también flujo radiante) se puede expresar como:

Flujo luminoso en lúmenes = Potencia radiante (vatios) x 683 lúmenes/vatio x eficacia luminosa

El flujo luminoso es la parte de la potencia que se percibe como luz por el ojo humano, y la cifra 683 lúmenes/vatio se basa en la sensibilidad del ojo a 555 nm, el pico de eficiencia de la curva de visión fotópica (diurna). A esa frecuencia, la eficacia luminosa es 1.

Una lámpara normal incandescente de 100 vatios, tiene un flujo luminoso de unos 1700 lúmenes.

Otras cantidades en fotometría tienen unidades que contienen el lumen, como el lux (lúmenes/metro<sup>2</sup>).

## Flujo Luminoso

El flujo luminoso ( $\Phi_v$ ) es la energía por tiempo unitario (dQ/dt), que es irradiado por una fuente en longitudes de ondas visibles. Más específicamente, es energía radiada en longitudes de onda sensibles al ojo humano, desde unos 380 nm a 780 nm. De esta manera, el flujo luminoso es un promedio ponderado del flujo radiante en el espectro visible. Esta ponderado de manera promedio, porque el ojo humano no responde de igual manera a todas las longitudes de onda visibles.

La sensibilidad del ojo tiene su pico a 555 nm y cae a aproximadamente  $10^{-4}$  a 380 y 750 nm. Esto constituye el intervalo de sensibilidad diurna o visión fotópica. La sensibilidad del ojo por la noche, llamada visión escotópica, se desplaza en dirección al extremo azul del visible, teniendo su pico a 507 nm y cayendo a  $10^{-4}$  a 340 y 670 nm. Este factor de ponderación, o eficacia luminosa ( $V_\lambda$ ), permite la conversión del flujo radiante en flujo luminoso en cualquier longitud de onda. Al pico a 555 nm en la región fotópica, se le asigna un valor de conversión de 683 lúmenes por vatio. El lumen es la unidad de flujo luminoso, y se define en términos de la candela, una unidad base del sistema SI, como el metro o el segundo. 1 lumen se define como  $1/4\pi$  candela, la unidad base SI de la intensidad luminosa.

Puesto que el ojo no ve igualmente de bien todas las longitudes de onda, la curva de eficacia es un camino muy importante para determinar el flujo luminoso de una fuente. El flujo luminoso de una fuente monocromática que produce luz a una sola longitud de onda, es la mas facil de determinar.

$$\Phi_v = \Phi * V_\lambda * (683 \text{ lm/W})$$

Por ejemplo, un puntero láser de 5 mW usando una longitud de onda de 680 nm produce

$$0,005 \text{ W} * 0,017 * 683 \text{ lm/W} = 0,058 \text{ lm}$$

mientras que un puntero laser de 630 nm produce  $0,005 \text{ W} * 0,265 * 683 \text{ lm/W} = 0,905 \text{ lm}$

Un flujo luminoso significativamente más grande.

La determinación del flujo luminoso de una fuente radiando sobre un espectro de longitudes de onda es más difícil. Es necesario determinar la distribución de energía espectral de la fuente dada. Una vez hecho esto, es necesario calcular el flujo luminoso en cada longitud de onda, o a intervalos regulares de un espectro continuo. La suma de los flujos en cada longitud de onda, da el flujo total producido por la fuente en el espectro visible.

Con algunas fuentes es más fácil hacer esto que con otras. Una lámpara incandescente estándar produce un espectro continuo en el visible, y se deben usar varios intervalos para determinar el flujo luminoso. Para fuentes como una lámpara de vapor de mercurio sin embargo, es ligeramente más fácil. El mercurio emite luz primariamente en un espectro de líneas. Emite flujo radiante en 6 longitudes de ondas primarias. Esto hace más fácil determinar el flujo luminoso de esta lámpara respecto de una incandescente.

Generalmente, no se precisa determinar el flujo luminoso por uno mismo. Se da normalmente con la lámpara, basado en pruebas de laboratorio durante su fabricación. Por ejemplo, el flujo luminoso de una lámpara incandescente de 100 vatios es de aproximadamente 1700 lm. Se puede usar esta información para extrapolarla para lámparas similares. Por lo tanto, la eficacia luminosa media de una lámpara incandescente es sobre 17 lm/W. Ahora se puede usar esto como una aproximación para fuentes incandescentes similares de varias potencias. Muchas veces, el fabricante da como datos de una lámpara, una lista de 'lúmenes iniciales'. Este es el flujo luminoso de esa lámpara. Se lista de esa manera, porque con el envejecimiento de la lámpara, su distribución de potencia se desplaza y ya no radia a las longitudes de ondas precisas de cuando era nueva. Sin embargo, en cualquier cálculo necesario, se puede usar los 'lúmenes iniciales' como flujo luminoso.

### **La Candela**

La candela es la unidad básica para la medición de la luz visible. Es una de las siete unidades básicas SI. Su definición formal es:

La candela es la intensidad luminosa en una determinada dirección, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y que tiene una intensidad radiante en esa dirección de  $1/683$  vatios por estéerorradian.

La candela es abreviada con cd y su símbolo estándar es  $I_v$ . La candela se usa luego para definir el lumen y otras cantidades usadas en la medición de la luz visible. Es aproximadamente igual a la antigua unidad "candela-potencia", y se toma generalmente como equivalente.



En una fuente isotrópica, la relación entre la candela y el lumen es  $1 \text{ cd} = 4\pi \text{ lm}$ , y la relación de unidades es  $1 \text{ cd} = \text{lm/sr}$ .

#### Typical values for luminous intensity

	Candela
Light emitting diode (LED)	0.005
Candle	1
100 watt incandescent bulb	150
Automobile headlamp(high beam)	100,000
Lighthouse	300,000
Flashtube (peak value)	1,000,000

## Radiación electromagnética

Se entiende por radiación electromagnética a las ondas producidas por la emisión de energía debida a la oscilación o aceleración de las cargas eléctricas. Las ondas así originadas tienen componentes eléctricas y magnéticas oscilantes, que se propagan por el espacio transportando energía en forma de paquetes denominados fotones. A diferencia de otros tipos de onda como el sonido, las ondas electromagnéticas no necesitan medio material para propagarse, pudiendo hacerlo en el vacío, donde alcanzan su máxima velocidad:  $c=300.000$  km/s. En función de su longitud de onda, las ondas electromagnéticas pueden dividirse en diversos rangos espectrales; desde las de longitud de onda larga, como las de radio o microondas, hasta las de longitud de onda corta, como los rayos X o los gamma. La luz visible constituye una pequeña porción de este espectro electromagnético.

El electromagnetismo de Maxwell es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza. A mediados del s. XIX, los científicos sabían que los fenómenos eléctricos y magnéticos guardaban relación, pero desconocían cómo ni porqué. Buscaban la respuesta. Algunos como Morse y Marconi supieron ver su importancia para las telecomunicaciones.

Oersted demostró que las corrientes eléctricas producían campos magnéticos. Y Faraday el proceso inverso, es decir, que un campo magnético podía producir corrientes eléctricas. Pero fue el escocés James Clerk Maxwell quien unificó los fenómenos eléctricos y magnéticos en una única fuerza, en 1873.

Maxwell creía que todo el espacio estaba lleno de una sustancia electromagnética invisible, una especie de éter, por el que se expandían las fuerzas. Lo imaginaba como las celdillas de un panal de abejas, y por su interior discurría la energía. Introdujo la idea de campos de energía. La causa de todo magnetismo era un movimiento de carga eléctrica. Las corrientes eléctricas son movimientos de carga eléctrica y, por eso, producen un campo magnético. Cuando dos corrientes eléctricas circulan en el mismo sentido, se atraen. Si circulan en sentido contrario, se repelen.



La unificación de Maxwell supuso una revolución en el mundo de la Física. Casi todas las herramientas que empleamos en nuestra vida cotidiana se basan en el electromagnetismo. Por ejemplo, la web. También está presente en todo nuestro entorno. Es el responsable de que no atravesemos las paredes o no nos precipitemos hasta el centro de la Tierra por efecto de la gravedad.

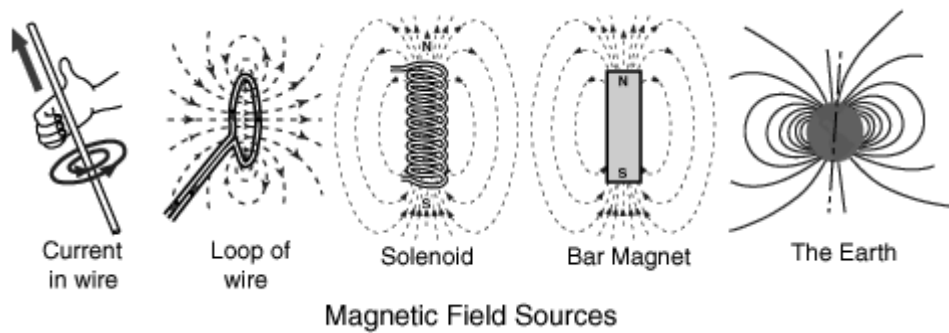
El electromagnetismo es millones de veces más fuerte que la gravedad, afortunadamente para nosotros. La repulsión electromagnética entre nuestros átomos y los del resto de objetos hace que podamos tocarlos sin atravesarlos. En algunos materiales los electrones se alinean de tal manera que multiplican su repulsión o atracción, y por eso podemos ver el efecto de la fuerza. Es el caso de los imanes.



Maxwell unificó las fuerzas eléctrica y magnética mediante cuatro ecuaciones matemáticas. También comprobó su relación con la velocidad de la luz. Por qué sigue siendo un misterio. La constante eléctrica dividida entre la constante magnética da exactamente la velocidad de la luz. La velocidad de la luz es una constante en la Naturaleza, y también un límite hasta ahora infranqueable. Curiosamente, la velocidad de la fuerza de gravedad también es la velocidad de la luz. Estas casualidades confirmaron a Einstein en su creencia de que todo en la Naturaleza está relacionado, y que existe una teoría del todo.

### **Campo Magnético**

Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas, las cuales pueden ser corrientes macroscópicas en cables, o corrientes microscópicas asociadas con los electrones en órbitas atómicas. El campo magnético  $B$  se define en función de la fuerza ejercida sobre las cargas móviles en la ley de la fuerza de Lorentz. La interacción del campo magnético con las cargas, nos conduce a numerosas aplicaciones prácticas. Las fuentes de campos magnéticos son esencialmente de naturaleza dipolar, teniendo un polo norte y un polo sur magnéticos. La unidad SI para el campo magnético es el Tesla, que se puede ver desde la parte magnética de la ley de fuerza de Lorentz,  $F_{\text{magnética}} = q_v B$ , que está compuesta de (Newton x segundo)/(Culombio x metro). El Gauss (1 Tesla = 10.000 Gauss) es una unidad de campo magnético más pequeña.



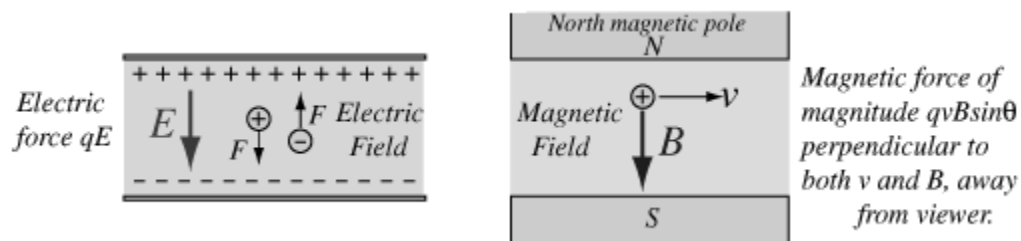
### Ley de la Fuerza de Lorentz

Se pueden definir ambos campos magnéticos y eléctricos a partir de la ley de la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

*Electric force*
*Magnetic force*

La fuerza eléctrica es recta, siendo su dirección la del campo eléctrico si la carga q es positiva, pero la dirección de la parte magnética de la fuerza está dada por la regla de la mano derecha.



### Unidades de Campo Magnético

La unidad estándar (SI) para el campo magnético es el Tesla, que se puede ver desde la parte magnética de la ley de fuerza de Lorentz,  $F_{\text{magnética}} = qvB$ , que está compuesta de (Newton x segundo)/(Culombio x metro). El Gauss (1 Tesla = 10.000 Gauss) es una unidad de campo magnético más pequeña.

La cantidad magnética B a la que llamamos aquí "campo magnético", se le llama a veces "densidad de flujo magnético". El Weber por metro cuadrado es el nombre antiguo de Tesla, siendo el Weber la unidad de flujo magnético.

## Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell representan una de las formas más elegantes y concisas de establecer los fundamentos de la Electricidad y el Magnetismo. A partir de ellas, se pueden desarrollar la mayoría de las fórmulas de trabajo en el campo. Debido a su breve declaración, encierran un alto nivel de sofisticación matemática y por tanto no se introducen generalmente en el tratamiento inicial de la materia, excepto tal vez como un resumen de fórmulas.

Estas ecuaciones básicas de la electricidad y el magnetismo se pueden utilizar como punto de partida para los cursos avanzados, pero generalmente se encuentran por primera vez después del estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, en forma de ecuaciones unificadoras.

Símbolos usados		
E = Campo eléctrico	$\rho$ = Densidad de carga	i = corriente eléctrica
B = Campo magnético	$\epsilon_0$ = permitividad	J = densidad de corriente
D = Desplazamiento eléctrico	$\mu_0$ = permeabilidad	c = velocidad de la luz
H = Intensidad de campo magnético	M = Magnetización	P = Polarización

## Ecuaciones de Maxwell

Forma Integral en ausencia de medio magnético o polarizable:

### I. Ley de Gauss para la Electricidad

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

### II. Ley de Gauss para el Magnetismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

### III. Ley de Faraday para la Inducción

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

### IV. Ley de Ampere

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

### Ecuaciones de Maxwell

Forma Diferencial en ausencia de medio magnético o polarizable:

#### I. Ley de Gauss para la Electricidad

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 4\pi k \rho$$

#### II. Ley de Gauss para el Magnetismo

$$\nabla \cdot B = 0$$

#### III. Ley de Faraday para la Inducción

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

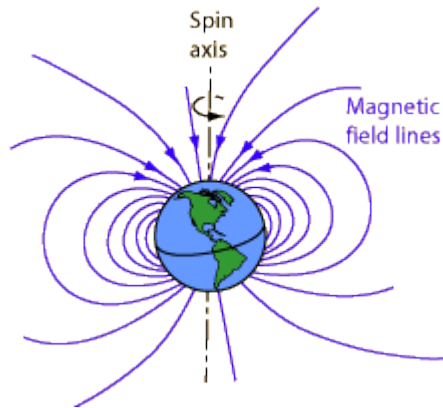
#### IV. Ley de Ampere

$$\begin{aligned} \nabla \times B &= \frac{4\pi k}{c^2} J + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \\ &= \frac{J}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \text{Coulomb's constant} \quad c^2 = \frac{1}{\mu_0\epsilon_0}$$

## Campo Magnético de la Tierra

El campo magnético de la Tierra es similar al de un imán de barra inclinado 11 grados respecto al eje de rotación de la Tierra. El problema con esa semejanza es que la temperatura Curie del hierro es de 700 grados aproximadamente. El núcleo de la Tierra está más caliente que esa temperatura y por tanto no es magnético. Entonces ¿De dónde proviene su campo magnético?

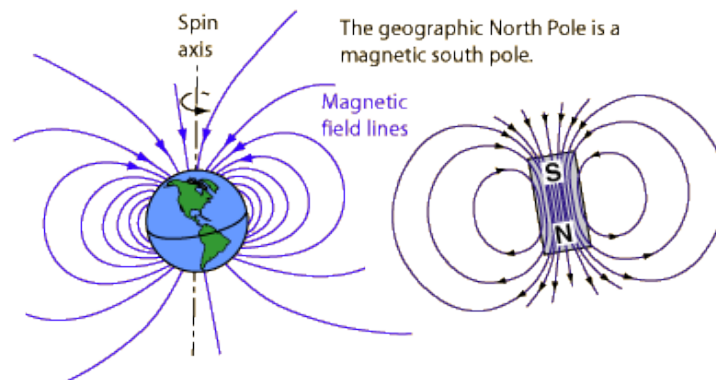


Los campos magnéticos rodean a las corrientes eléctricas, de modo que se supone que esas corrientes eléctricas circulantes, en el núcleo fundido de la Tierra, son el origen del campo magnético. Un bucle de corriente genera un campo similar al de la Tierra. La magnitud del campo magnético medido en la superficie de la Tierra es alrededor de medio Gauss. Las líneas de fuerza entran en la Tierra por el hemisferio norte. La magnitud sobre la superficie de la Tierra varía en el rango de 0,3 a 0,6 Gauss.

El campo magnético de la Tierra se atribuye a un efecto dinamo de circulación de corriente eléctrica, pero su dirección no es constante. Muestras de rocas de diferentes edades en lugares similares tienen diferentes direcciones de magnetización permanente. Se han informado de evidencias de 171 reversiones del campo magnético, durante los últimos 71 millones de años.

Aunque los detalles del efecto dinamo no se conocen, la rotación de la Tierra desempeña un papel en la generación de las corrientes que se suponen que son la fuente del campo magnético. La nave espacial Mariner 2 descubrió que Venus no tiene un campo magnético, aunque su contenido de un núcleo de hierro debe ser similar al de la Tierra. El período de rotación de Venus de 243 días de la Tierra, es demasiado lento para producir el efecto dinamo.

La interacción del campo magnético terrestre con las partículas del viento solar crea las condiciones para los fenómenos de auroras cerca de los polos.



El polo norte de la aguja de una brújula es un polo norte magnético. Es atraído por el polo norte geográfico que es un polo sur magnético (polos opuestos se atraen).

## **El Efecto Dinamo**

La simple pregunta "¿Cómo obtiene la Tierra su campo magnético?" no tiene una respuesta simple. Parece claro que la generación del campo magnético está relacionada con la rotación de la Tierra, ya que Venus con una similar composición de núcleo de hierro, pero con un período de rotación de 243 días terrestres, no tiene un campo magnético que pueda medirse. Ciertamente, parece plausible que depende de la rotación del hierro metálico líquido que compone una gran parte del interior de ambos planetas. El modelo del conductor giratorio nos lleva al "efecto dinamo" o "geodinamo", evocando la imagen de un generador eléctrico.

La convección mueve el fluido del núcleo exterior y lo hace circular con relación a la Tierra. Esto significa que un material conductor de electricidad se está moviendo con respecto al campo magnético de la Tierra. Si por alguna interacción como por ejemplo la fricción entre placas, se obtiene una carga eléctrica, entonces se produce un bucle de corriente efectiva. El campo magnético de un bucle de corriente, podría sostener el campo magnético de la Tierra, de tipo de dipolo magnético. Las modelaciones a gran escala en ordenadores, están consiguiendo una simulación realista de tal tipo de geodinamo.

## **Propiedades de la radiación electromagnética**

1. ¿Qué es la radiación electromagnética?
2. Parámetros de la radiación electromagnética: Frecuencia, longitud de onda y amplitud
3. La ley del cuadrado de la distancia.
4. El espectro electromagnético.
5. Polarización de las ondas.

### **1. ¿Qué es la radiación electromagnética?**

La radiación electromagnética es el producto de la variación periódica de los campos eléctrico y magnético. Un campo es una región del espacio en la que la materia está sometida a algún tipo de fuerza. En el caso de la radiación electromagnética, los campos son producidos por las partículas cargadas en movimiento.

La luz visible es un tipo de radiación electromagnética. A veces se comporta como una onda que se propaga en el espacio, y otras veces se comporta como un conjunto de fotones. A este fenómeno se le denomina dualidad de la radiación.

Los distintos tipos de radiación electromagnética dependen directamente de las características de la onda, que son:



Frecuencia ( $f$ ), longitud de onda ( $\lambda$ ) y amplitud ( $A$ ) o intensidad ( $I$ ). En realidad, como veremos a continuación, la frecuencia y la longitud de onda están directamente relacionadas, por lo que para describir completamente una onda, (la radiación electromagnética en nuestro caso) basta con dar información acerca de su amplitud y frecuencia (o longitud de onda). Las ondas electromagnéticas transportan energía siempre a la misma velocidad en el vacío: 299792 kilómetros por segundo, lo que se conoce como velocidad de la luz ( $c$ ).

## 2. Parámetros de la radiación electromagnética: frecuencia, longitud de onda y amplitud

Como ya hemos visto, la radiación electromagnética puede ser descrita como una onda. Vamos a estudiar los parámetros que la definen.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos máximos consecutivos de la onda. Se mide en unidades de distancia: por ejemplo, metros ( $m$ ) o cualquiera de sus submúltiplos, como el ángstrom ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

La frecuencia ( $f$ ) se define como el número de máximos que pasan por un punto en un tiempo determinado. Sus unidades son los hercios ( $Hz$ ), de forma que 1 Hz equivale a un ciclo por segundo. La amplitud ( $A$ ) es la distancia que hay entre el punto de inflexión de la onda y el máximo.

Debido a que la velocidad de la luz es constante e igual a  $c$ , existe una relación directa entre la frecuencia y la longitud de onda, ya que dada una longitud de onda determinada, si sabemos que la onda se desplaza a velocidad  $c$ , para saber el número de veces que pasa un máximo por un punto, sólo hace falta dividir la velocidad de la luz entre la longitud de onda. Tenemos, por tanto,

$$\text{que } v = c/\lambda$$

Otra característica importante de las ondas es que transportan energía. La energía de una onda electromagnética está directamente relacionada con su frecuencia, de forma que  $E = hv$ , y, utilizando la relación entre la frecuencia y la longitud de onda, podemos tener también que  $E = hc/\lambda$ , donde  $h$  es la constante de Planck, cuyo valor es  $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . De esta forma, tendremos que las ondas con una frecuencia alta serán muy energéticas, mientras que aquellas cuyas frecuencias sean bajas (y, por tanto, su longitud de onda grande) transportarán menos energía.

## 3. La ley del cuadrado de la distancia

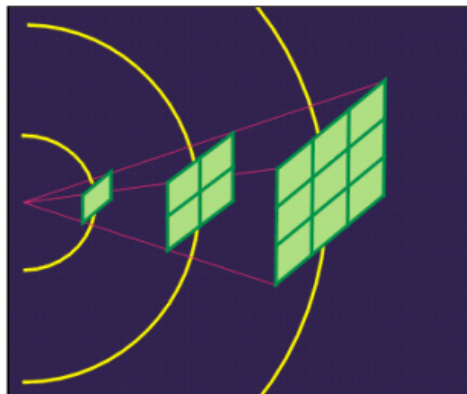
La radiación electromagnética se propaga por el espacio siguiendo un comportamiento determinado. Sabemos que al alejarnos de una fuente luminosa (que es una fuente de radiación electromagnética) la intensidad que percibimos se va haciendo cada vez menor, pero vamos a ver qué regla sigue esta disminución de intensidad.

Podemos imaginar que la radiación está contenida en una esfera que inicialmente es la fuente que la produce. A medida que la radiación electromagnética se aleja de la fuente, esta esfera imaginaria aumentaría de tamaño de forma que la intensidad que inicialmente se concentraba en la superficie de una esfera de pequeño radio, ahora tendrá que repartirse por la nueva esfera cuya superficie es mucho mayor.

El área de esta esfera aumenta proporcionalmente al cuadrado de la distancia que la separa de su centro, en el que se encuentra la fuente.

$$A = 4\pi R^2$$

La fórmula exacta es donde  $A$  es el área de la esfera y  $R$  la distancia recorrida por la radiación o, lo que es lo mismo, el radio de la esfera. Por lo tanto, la intensidad de la señal se debilita a medida que se aleja de la fuente, fenómeno que se conoce como la ley del cuadrado de la distancia.



Podemos ilustrar esta ley con un ejemplo: Saturno está aproximadamente 10 veces más lejos del Sol que el planeta Tierra. Si definimos la Unidad Astronómica (UA) como la distancia media entre la Tierra y el Sol, Saturno se encuentra a 10 UA. Entonces, la energía contenida en una esfera de radio 1 UA, a la distancia que se encuentra Saturno se habrá diluido en una esfera de superficie 100 veces mayor y por lo tanto, Saturno recibe una centésima parte del flujo (Energía por unidad de superficie y por unidad de tiempo) de energía solar que recibe la Tierra.

La ley del cuadrado de la distancia es muy importante en Astronomía: implica que la concentración de energía disminuye muy rápidamente a medida que nos alejamos de la fuente de radiación electromagnética. No importa si la fuente es una nave espacial con un transmisor de baja potencia, una estrella muy brillante o una radiogalaxia, la distancia a la Tierra es tan enorme que la radiación electromagnética estaría diluida en una gigantesca esfera de forma que a un detector en la superficie sólo le llegaría una pequeña cantidad de energía.

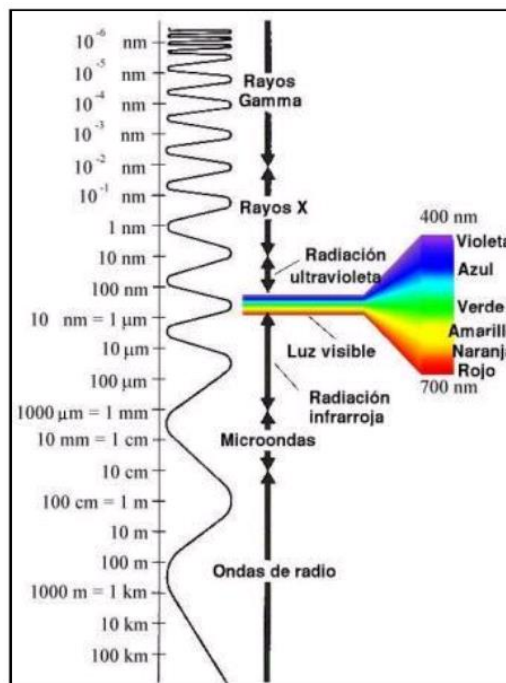
#### **4. El espectro electromagnético**

El espectro electromagnético es el conjunto de la radiación electromagnética de todas las longitudes de onda. La luz, por ejemplo, no es más que radiación electromagnética en un rango de frecuencias a las que el ojo humano (y el de la mayoría de las especies dotadas de visión) es sensible. El hecho de que estemos dotados para la visión en el rango visible, nos permite

aprovechar el máximo de emisión del Sol que se produce en este rango. Probablemente, si nuestro Sol tuviese su máximo en el infrarrojo, nuestros ojos estarían dotados para ese tipo de visión.

Pero el espectro electromagnético no tiene una frecuencia máxima o mínima, sino que se extiende indefinidamente, más allá de los estrechos límites de sensibilidad del ojo humano. En orden creciente de frecuencias (y por tanto, de energía) el espectro está compuesto por las ondas de radio, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Estos nombres distinguen distintas frecuencias de un mismo fenómeno: la radiación electromagnética. Los diagramas que se incluyen en esta sección muestran el rango del espectro electromagnético en el que se produce la mayor parte de la emisión de fuentes astronómicas. Los límites entre distintas regiones del espectro son difusos y, en muchas ocasiones, dependen de las técnicas empleadas para detectar o producir la radiación.

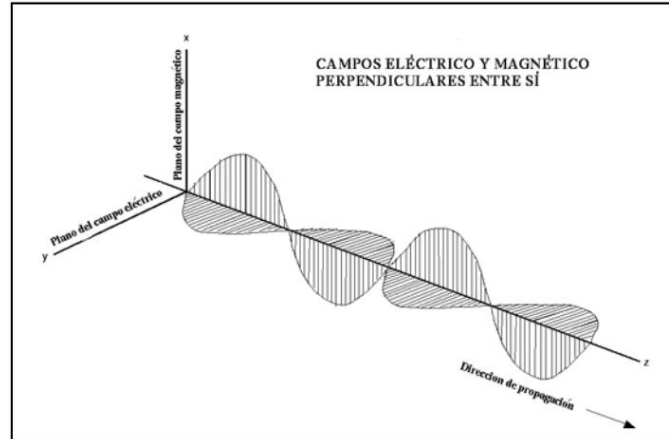
A lo largo de este curso nos centraremos más en la información que se puede de obtener de la luz con frecuencias de entre 5 khz y 300 GHz (las "radiofrecuencias"). Dentro de las radiofrecuencias se han definido unas bandas determinadas estándar que comprenden un pequeño rango de longitudes de onda, de manera que se pueden ajustar los radiotelescopios para detectar selectivamente radiación en estas bandas.



Banda	Longitud de onda (cm)	Frecuencia (Ghz)
L	30-15	1-2
S	15-7.5	2-4
C	7.3-3.75	4-8
X	3.75-2.4	8-12
K	2.4-0.75	12-40

## 5. Polarización de las ondas

El campo electromagnético tiene dos componentes, la componente eléctrica y la componente magnética. Éstas son ondas que se propagan por el espacio en línea recta cuando no encuentran obstáculos a su paso. En el vacío, estas dos componentes son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, como se muestra en la siguiente figura:



Un campo vectorial es aquél que está descrito en todo momento por un vector, que le proporciona una dirección y una magnitud. Los campos eléctrico y magnético son campos vectoriales, descritos por los vectores eléctrico y magnético, respectivamente.

La polarización de las ondas electromagnéticas está definida por el vector de campo eléctrico. Si este vector forma un ángulo constante con el horizonte, se dice que las ondas están linealmente polarizadas.

En radioastronomía, cuando una onda está linealmente polarizada y su vector de campo eléctrico es paralelo a la superficie de la Tierra se dice que se trata de una polarización horizontal. Cuando, por el contrario, la polarización se produce en un plano perpendicular al horizonte decimos que se trata de polarización vertical.

Las ondas también pueden estar circularmente polarizadas si el vector eléctrico rota alrededor de la dirección de propagación de la onda. La rotación puede ser dextrógira, cuando para un observador que mira la onda en el sentido de la propagación, ésta rota en el sentido de las agujas del reloj, o levógira, cuando el mismo observador ve la onda girando en sentido contrario a las agujas del reloj.

Las ondas de radio procedentes de fuentes extraterrestres pueden estar polarizadas lineal o circularmente o incluso puede ser una mezcla de ambas. Las propiedades de polarización de las ondas electromagnéticas proporcionan información complementaria sobre los procesos físicos que tienen lugar en la fuente de radiación.

## Comportamiento de la radiación electromagnética

### 1. Interacción de las ondas con la materia

#### 1.1. Reflexión

#### 1.2. Refracción

#### 1.3. Interferencia y difracción

#### 1.4. Rotación de Faraday

### 2. Efectos del movimiento y la gravedad

#### 2.1 Efecto Doppler

#### 2.2 Desplazamiento al rojo gravitatorio

#### 2.3 Lentes gravitatorias

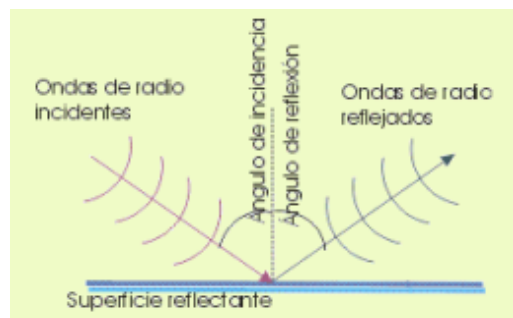
#### 2.4 Velocidades superlumínicas

## 1. Interacción de las ondas con la materia

### 1.1 Reflexión

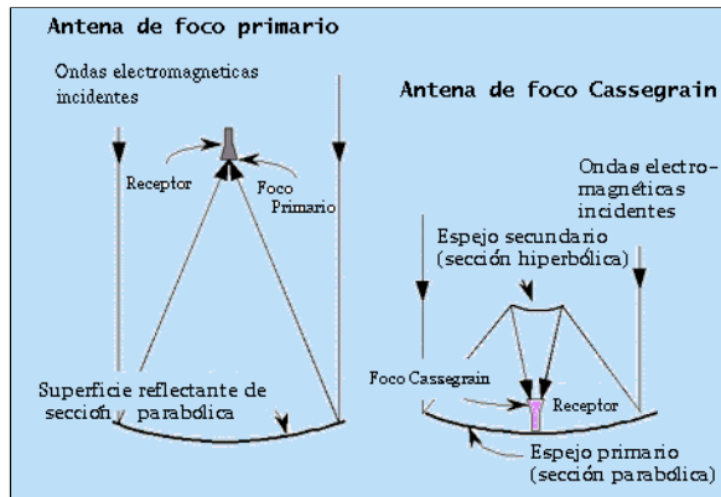
Las ondas de radio se comportan de la misma manera que el resto de las ondas electromagnéticas, es decir, siguen los principios de óptica que a todos nos resultan familiares. Cuando una onda incide sobre una superficie reflectante, ésta se comporta como un espejo, es decir, la onda es reflejada formando un ángulo con la perpendicular a la superficie igual al ángulo incidente.

El principio de reflexión de las ondas se emplea en el diseño de antenas para dirigir la radiación y concentrarla en un receptor. Si el disco reflector de la antena se con forma de paraboloides, las ondas de radio procedentes del espacio que se propagan en direcciones paralelas, serán reflejadas de forma que acabarán confluyendo en un punto, por encima de la superficie del disco, en el que se coloca un receptor. En este tipo de diseño se dice que el receptor se halla en el foco primario y proporciona la máxima apertura para detectar señales débiles.



Sin embargo, para grandes antenas no es conveniente esta disposición de foco primario. El equipo que habría que colocar en el foco primario pesa tanto que deformaría la estructura global de la antena lo que, a su vez, afecta a la calibración. Una solución disponible para estos problemas consiste en colocar los receptores en el foco Cassegrain.

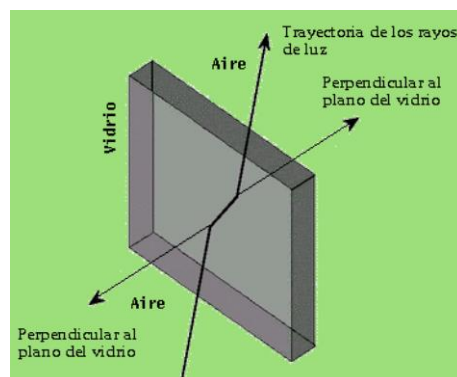
Las antenas Cassegrain añaden un reflector secundario que concentra la radiación en un nuevo foco próximo al primer reflector (la superficie de la antena). De esta forma, el equipo pesado se encuentra siempre próximo al centro de gravedad de la antena y le confiere un mayor grado de estabilidad estructural incluso aunque se trate de una antena de gran apertura.



## 1.2 Refracción

La refracción es un fenómeno que se produce cuando una onda pasa de un medio a otro. La velocidad de la luz en un medio ( $v$ ) es generalmente diferente a la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ). Se puede caracterizar un determinado medio por su índice de refracción:  $n=c/v$ . Según la Ley de Snell, la relación entre el ángulo de incidencia ( $i$ ) de una onda que se propaga en un medio con índice  $n_1$ , y el ángulo de refracción ( $r$ ) en un medio con índice  $n_2$  es:  $n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$ .

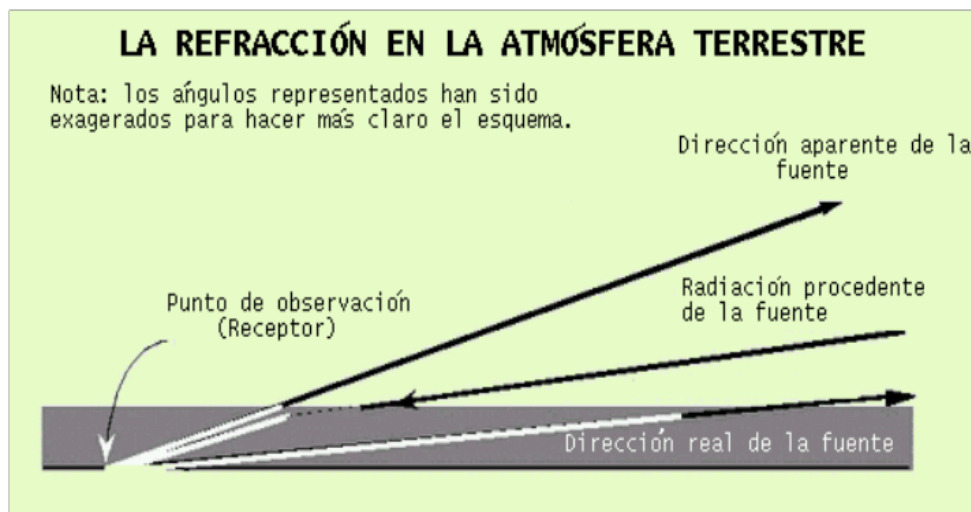
De esta forma, tenemos que si una onda se propaga en el vacío ( $n=1$ ) y pasa a propagarse en un medio, como por ejemplo el vidrio ( $n=1,5$ ), se producirá una refracción de manera que  $\text{sen } i = 1,5 \cdot \text{sen } r$ , como se puede ver en la siguiente figura.



Éste es un efecto que estamos acostumbrados también a ver en el óptico. Por ejemplo, cuando se sumerge una varilla recta o un lápiz en el agua se puede apreciar cómo da la impresión de estar quebrado, puesto que las ondas que atraviesan el agua pasan por un medio con distinto índice de refracción del que presenta el aire.

En general, el índice de refracción de un medio es distinto para longitudes de onda distintas. Es decir, luz de distintas longitudes de onda (o colores) es refractada a diferentes ángulos cuando la luz tiene el mismo ángulo de incidencia. Este efecto es el que se observa al hacer pasar un haz de luz a través de un prisma, por ejemplo, donde el hecho de que cada longitud de onda se refracte con un ángulo ligeramente distinto permite observar la luz descompuesta en sus diferentes longitudes de onda.

De igual forma, las ondas electromagnéticas que penetran en la atmósfera procedente del espacio sufren una ligera desviación debida a la refracción. La refracción atmosférica, que así se llama este fenómeno, es más importante cuando la fuente se encuentra próxima al horizonte (por debajo de  $15^\circ$ ) y el efecto es el de aumentar la altura aparente de la fuente. Si al rotar la Tierra el objeto gana altura, los efectos de la refracción disminuyen, hasta alcanzar un mínimo cuando el objeto culmina, es decir, alcanza la máxima altura sobre el horizonte. Si en algún momento, debido a su posición, el objeto pasase por el cenit (que es el punto más alto de la bóveda celeste y se encuentra justamente encima de nuestras cabezas) la refracción no afectaría en absoluto a la dirección de propagación de la onda.

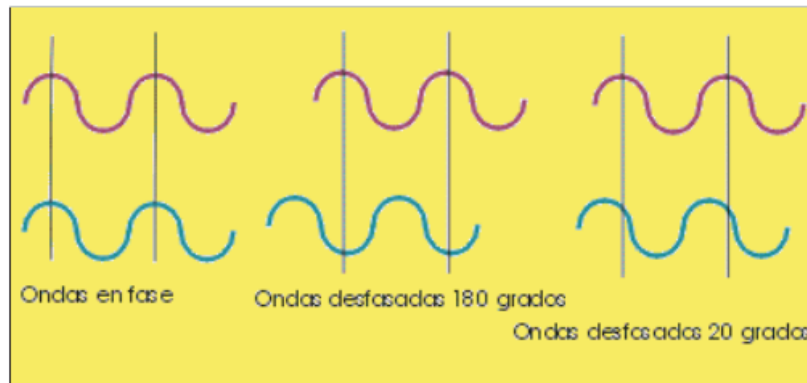


El aumento, debido a la refracción, de la altura aparente de un objeto hace que éste sea visible cuando en realidad se encuentra por debajo del horizonte. Este efecto hace, por ejemplo, que el día dure cinco minutos más en el ecuador.

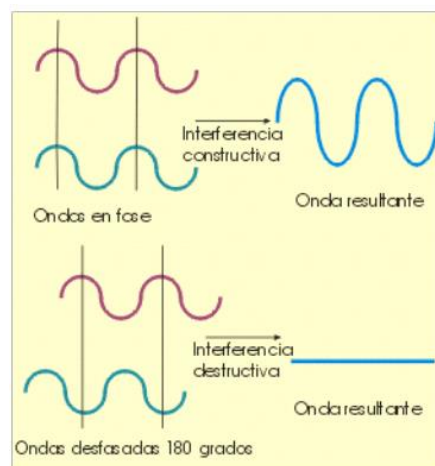
### 1.3 Interferencia y difracción

Las ondas siguen el denominado principio de superposición, que afirma que cuando dos ondas se encuentran en el espacio se combinan en ese punto de encuentro, siguiendo posteriormente cada una de ellas su camino anterior sin producirse ninguna variación ni en su amplitud ni en su frecuencia ni en su fase.

La fase de una onda respecto a otra de la misma frecuencia es el alineamiento relativo de sus máximos y sus mínimos. Se dice que dos ondas están en fase cuando sus máximos y sus mínimos respectivos coinciden exactamente. Se dice que dos ondas están desfasadas 180 grados cuando el máximo de una coincide con el mínimo de la otra.



Hemos visto que, si dos ondas coinciden en el espacio, su interacción permanece mientras dura esa coincidencia. Por tanto, si tenemos dos ondas superpuestas y viajando en la misma dirección, su interacción será permanente, produciendo lo que se denomina interferencia, y la onda resultante será la suma de las dos ondas iniciales.



Si las ondas tienen la misma frecuencia, y están en fase, se dice que su interferencia es constructiva, dando lugar a una onda resultante de la misma frecuencia cuya amplitud es mayor que las amplitudes de las ondas originales. Si las ondas están desfasadas 180 grados, se dice que su interferencia es destructiva, ya que si sus amplitudes son iguales, la amplitud de la onda resultante es cero.

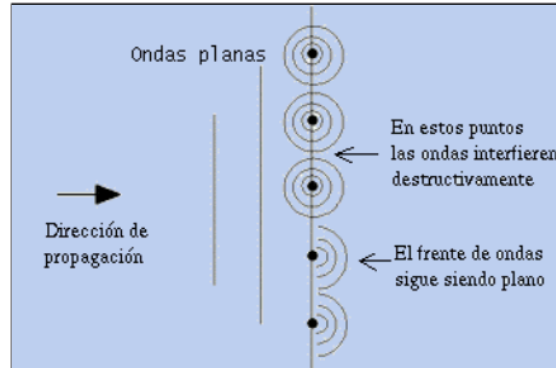


Esto, por supuesto, es una simplificación, porque supondría que la energía contenida en ambas ondas desaparecería. En realidad, no hay ondas infinitamente delgadas, por lo que al superponer dos ondas, se dan interferencias constructivas en unas zonas y destructivas en otras.

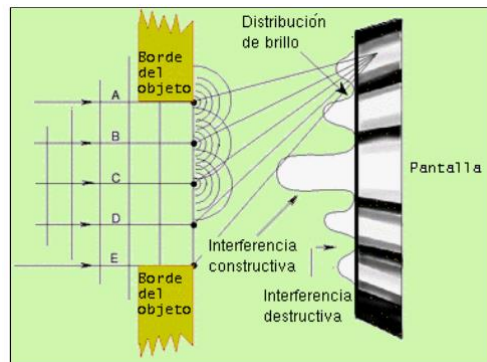
La interferencia tiene un papel muy importante en la difracción de las ondas. Cuando la radiación electromagnética encuentra un obstáculo a su paso, la dirección de propagación de los rayos próximos al borde del obstáculo sufre una desviación. La desviación es en general lo suficientemente pequeña como para que apenas nos demos cuenta de que ocurre. Éste es el fenómeno conocido como difracción.

Sin embargo, es sencillo comprobar sus efectos sin más que colocar dos dedos frente a una fuente de luz a una distancia de unos 10 cm de nuestros ojos, y aproximarlos uno a otro hasta que se encuentren a 1 mm aproximadamente. Con un ligero ajuste de esta distancia podremos observar franjas claras y oscuras debidas a la interferencia (constructiva y destructiva) de las ondas que sufren difracción al pasar entre los dedos.

La razón por la que ocurre la difracción no es obvia. Christian Huygens hacia la mitad del siglo XVII, propuso una teoría que, aunque parezca extraño, todavía explica bastante bien las observaciones. Podemos suponer que la radiación electromagnética se propaga como ondas planas (la figura que ilustra el fenómeno de la refracción representaba la radiación como ondas planas). Huygens supuso que ese caso es equivalente a tener, en cada punto del frente plano, una fuente de ondas que se propagan en todas direcciones. Las ondas dirigidas hacia los lados se anulan con las emitidas por los puntos vecinos del frente de forma que la onda sigue siendo plana.

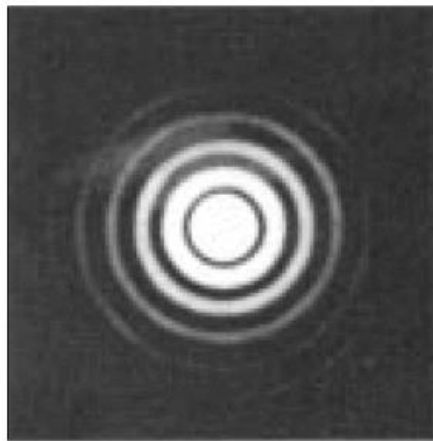


Si, bajo estas hipótesis, la onda encuentra un obstáculo, los puntos situados junto a su borde van a emitir ondas que no se ven contrarrestadas en los laterales produciendo así el efecto aparente de desviar la dirección de propagación.



Supongamos que un cierto tipo de radiación electromagnética (por ejemplo, luz visible) es bloqueada por una superficie (llamémosla pantalla) poco después de haber pasado por el obstáculo, como en la figura de la izquierda. Entonces, dado un punto de la pantalla, la distancia recorrida por las ondas producidas en los bordes del obstáculo (ondas A y E en el esquema) será distinta (mayor o menor) que la recorrida por las que lo atraviesan (B, C y D).

El resultado es que, en algunos puntos de la pantalla, las ondas que se superponen están desfasadas unas respecto a otras, mientras que a otros puntos llegan en fase. En estos últimos se producirá una interferencia constructiva que dará lugar a una región iluminada; por el contrario, en los puntos a los que llegue radiación con diferencias de fase de 180 grados se producirá una interferencia destructiva y quedarán, por lo tanto, sin iluminar. Los efectos de la difracción son más visibles si la luz que produce el fenómeno es monocromática, esto es, si está compuesta de ondas de la misma frecuencia.

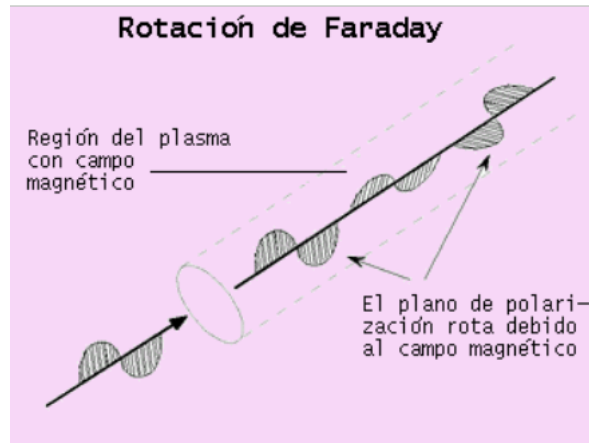


Patrón de difracción de una estrella con un telescopio óptico

Las consecuencias que implica la difracción son importantes, tanto para los telescopios que operan en el rango óptico como para los radiotelescopios, ya que la difracción que se produce en los bordes de la apertura de un telescopio limita su poder de resolución. En radio, el hecho de que las longitudes de onda sean mayores, implica que las figuras de difracción (los patrones de bandas brillantes y oscuras alternadas) son de mayor tamaño, empeorando así la resolución de las imágenes. Este efecto puede ser atenuado si observamos con radiotelescopios de gran tamaño o empleando conjuntos interferométricos. La imagen que se muestra a continuación representa un patrón de difracción típico de una estrella, obtenido al enfocar los rayos de luz en un punto mediante un telescopio óptico de lente convergente.

#### 1.4 La rotación de Faraday

El campo magnético también puede influir sobre las ondas electromagnéticas. Cuando una onda linealmente polarizada (es decir, en la que el campo eléctrico y el magnético oscilan en un plano) se propaga en presencia de un campo magnético, se produce un cambio en el plano de polarización, como se puede ver en la figura.

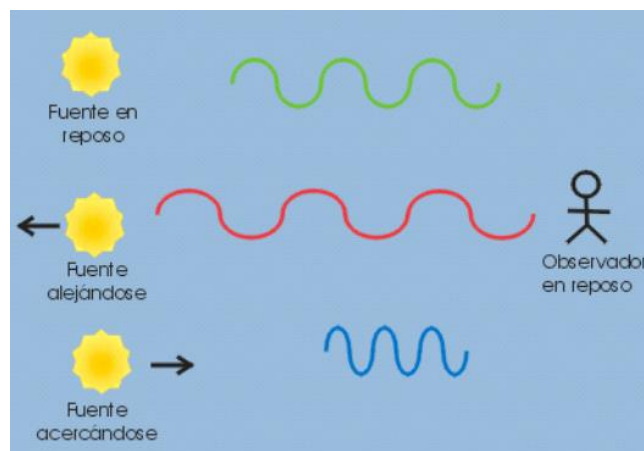


Una onda polarizada linealmente se puede analizar como la suma de dos ondas de la misma frecuencia, polarizadas circularmente en sentidos opuestos. Al atravesar una región con campo magnético, las velocidades de propagación de las dos componentes cambian (una de ellas se adelanta respecto de la otra) produciendo una rotación del plano de polarización de la onda compuesta. Este efecto se puede utilizar para calcular la densidad del plasma.

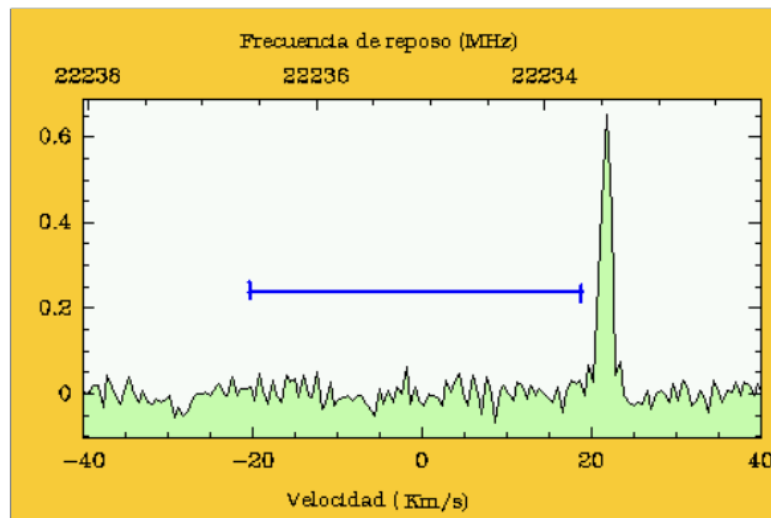
## 2. Efectos del movimiento y la gravedad

### 2.1 Efecto Doppler

El efecto Doppler consiste en una variación aparente en la longitud de onda (y frecuencia) de una onda cuando existe un movimiento relativo entre el emisor y el observador. Este efecto se produce también con las ondas sonoras, y es el causante de que cuando un coche con una sirena se acerca a nosotros, oigamos el sonido más agudo (la longitud de onda se acorta) y cuando se aleja, el sonido sea más grave (la longitud de onda se alarga). En la figura podemos ver un ejemplo de este efecto. Si un cuerpo emite una onda a una determinada frecuencia (o longitud de onda) y este cuerpo se aleja de nosotros, la radiación que nos llegará tendrá una frecuencia menor que la emitida realmente. Por eso se dice, en este caso, que se produce un desplazamiento al rojo de la radiación. Sin embargo, si el cuerpo se está acercando, lo que apreciaremos será un aumento de la frecuencia, produciéndose, por tanto un desplazamiento al azul.

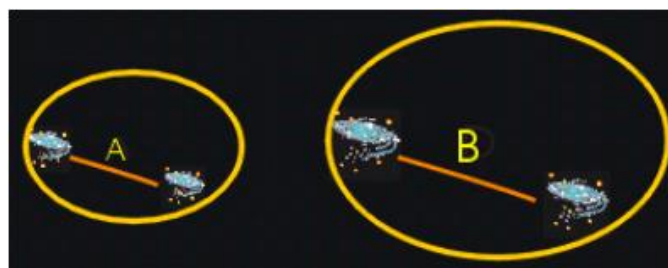


El efecto Doppler es muy importante tanto en astronomía óptica como en radioastronomía. Cuando se toma un espectro de un objeto que se está alejando de la tierra, sus líneas aparecen desplazadas hacia longitudes de onda mayores (frecuencias menores), una cierta cantidad dependiendo de cuál sea la velocidad con la que se aleja. Esto es muy importante, por ejemplo, cuando se quiere hacer el espectro de una sola línea. Veamos la figura. Muestra un espectro de un máser de agua tomado con la antena de 70 m de Robledo. La línea está desplazada de su posición de reposo, ya que, como se puede ver, se mueve a una velocidad algo mayor de 20 km/s. Esto hace, que en lugar de aparecer centrada en la frecuencia adecuada, aparece desplazada aproximadamente 1,5 MHz. Si nuestro espectrómetro tuviera una anchura de menos de 3 MHz, (si tuviera la anchura marcada por la línea azul) no podríamos ver el máser porque se quedaría fuera de nuestro rango de observación. Por eso, en estos casos, es importante conocer a priori las velocidades de los objetos cuyos espectros queremos tomar.



Máser desplazado por efecto Doppler

En el Universo, la mayoría de los objetos se están alejando unos de otros. Este hecho fue descubierto en los años 20, después de que Hubble confirmase que las galaxias no pertenecían a la Vía Láctea, sino que eran objetos lejanos y diferenciados. A partir de entonces comenzaron a realizarse medidas, descubriendo que cuanto más lejos estaba una galaxia, a más velocidad se alejaba de nosotros. Este hecho confirmaba la teoría de un Universo en expansión y se estableció la constante de Hubble que relaciona la distancia con la velocidad de expansión de un objeto. Éste es uno de los temas abiertos en cosmología, ya que dependiendo del valor de esta constante podremos tener un Universo que continúe indefinidamente su expansión, uno que atraviese después una fase de contracción o uno en el que la expansión vaya ralentizándose cada vez más sin llegar nunca a la contracción.



Representación de la separación de galaxias al expandirse el Universo

Debido a la expansión del Universo, la mayoría de los objetos que podemos observar, sobre todo aquellos que se encuentran fuera de nuestra Galaxia, están alejándose de nosotros, por lo que veremos sus espectros desplazados al rojo. A este efecto se le denomina desplazamiento al rojo cosmológico. En la figura se representa un universo (la línea amarilla) en expansión. Supongamos dos galaxias entre las que existe una distancia A. Si imaginamos que las galaxias no tienen ningún desplazamiento propio y que su único movimiento es debido a la expansión del punto en el que están fijas, vemos que al expandirse el universo, la distancia que habrá entre ellas será B, que es mayor que A. La impresión que tendrá un habitante de una de estas galaxias es que la otra se está alejando de ella.

El espectro de los cuásares, por ejemplo, está considerablemente desplazado al rojo. Junto con otras características, como su gran energía, este desplazamiento al rojo sugiere que los cuásares son los objetos más distantes y más antiguos que hemos observado. Los cuásares más lejanos se alejan a una velocidad del 90% de la velocidad de la luz.

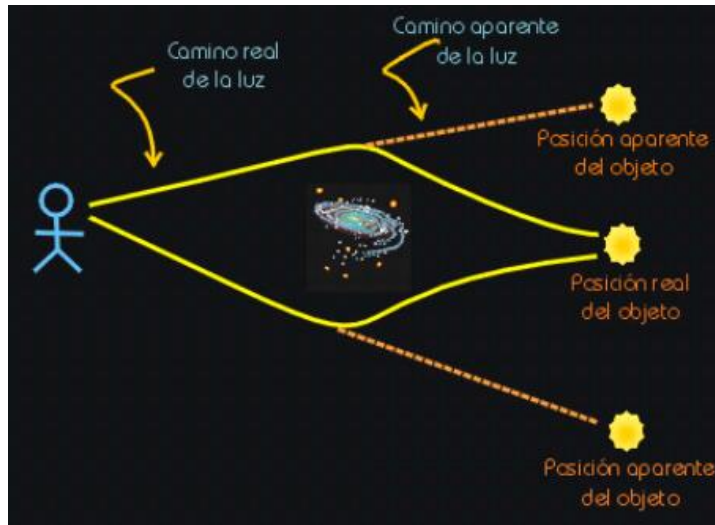
## **2.2 Desplazamiento al rojo gravitatorio**

El desplazamiento al rojo gravitatorio tiene lugar cuando la radiación se escapa de una atracción gravitatoria. La razón por la que ocurre es la misma por la cual los proyectiles disminuyen su velocidad cuando se elevan, porque tienen que transformar su energía cinética en la energía potencial que adquieren al ganar altura.

Los fotones no pueden disminuir su velocidad, ya que ésta siempre debe ser igual a la velocidad de la luz  $c$ , así que para liberar energía cinética cuando ha aumentado su energía potencial, lo que hacen es disminuir su frecuencia. Como una disminución de frecuencia supone un alargamiento de la longitud de onda, el resultado final es un enrojecimiento denominado desplazamiento al rojo gravitatorio. Ocurre un proceso similar cuando un fotón cae a un pozo gravitatorio, para aumentar su energía cinética aumenta su frecuencia y se desplaza hacia el azul.

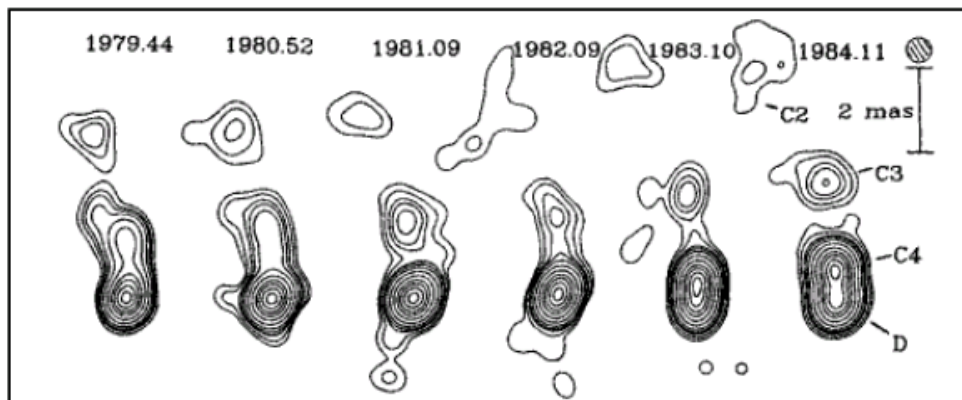
## **2.3 Lentes gravitatorias**

La teoría general de la relatividad de Einstein predice que el espacio se distorsiona alrededor de los objetos masivos. En 1979, los astrónomos observaron dos cuásares notablemente similares muy cercanos. Tenían la misma magnitud, espectro y desplazamiento al rojo. Resultaba asombroso que dos imágenes tan similares representaran objetos distintos. Se concluyó la existencia de una galaxia directamente en el camino entre los dos cuásares y la Tierra, pero mucho más cerca de ésta. La galaxia curva el espacio de manera que la luz procedente del cuásar tiene dos posibles caminos para llegar a la Tierra. Así, recibimos la imagen doble del cuásar como si estuviese mucho más cerca de lo que en realidad se encuentra. La galaxia está actuando de la misma manera que lo hacen las lentes ópticas, ampliando y acercando la imagen de un objeto, con la peculiaridad de que las lentes gravitatorias pueden producir más de una imagen del mismo objeto. Gracias a las lentes gravitatorias se pueden estudiar objetos tan lejanos que no podrían ser observados de otra manera. Estos estudios están ayudando a confirmar o rechazar teorías de evolución del Universo, ya que los objetos más lejanos son también los más antiguos.



## 2.4 Velocidades superlumínicas

En los años 70 se descubrió, mediante observaciones de radio de alta resolución, que existía un cuásar: 3C345 que tenía dos "puntos calientes" de emisión de radio que en observaciones hechas entre 1969 y 1976 se movían aparentemente a una velocidad superior a la de la luz. Este hecho dejó atónitos a los científicos, que pronto encontraron una explicación que demostraba que en realidad no se estaba violando la relatividad de Einstein, sino que lo que se estaba observando era un efecto del punto de vista del observador.



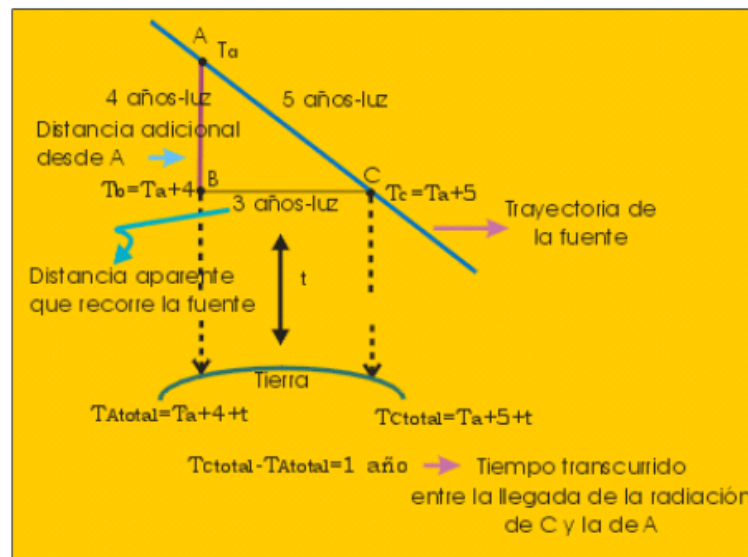
Imágenes del cuásar 3c345 tomadas a lo largo de 5 años donde se aprecian los tres chorros que se mueven a una velocidad aparentemente superlumínica. Cortesía de John Biretta/Space Telescope Science Institute.

Veamos cómo puede ocurrir este efecto: supongamos un objeto que se mueve formando un ángulo determinado con el observador. En un momento, el objeto está en el punto A y emite una cantidad de radiación en un instante que llamaremos  $T_a$ . Supongamos, que, mientras tanto, el objeto se desplaza de A a C con velocidades relativistas, es decir, muy próximas a la velocidad de la luz, por lo que tardará aproximadamente 5 años en encontrarse en la posición C (la distancia entre

A y C es de 5 años-luz). La radiación que emita el objeto desde C, habrá salido cinco años más tarde que la que salió de A. Sin embargo, el punto C está más cerca de nosotros que A, por lo que la luz que se emita desde aquél tardará menos en llegar a nosotros.

El punto B está situado a la misma distancia de la Tierra que C. Por tanto, la luz emitida en A tiene que recorrer los 4 años luz adicional que hay entre A y B. Si la luz tarda en llegarnos un tiempo  $t$  desde B y C, entonces la radiación que ha salido de A llega a la Tierra en el instante  $T_{A\text{total}} = T_a + 4 + t$ .

Y la radiación que ha salido desde C llega a la Tierra en un instante  $T_{C\text{total}} = T_a + 5 + t$ . Entonces, la radiación procedente de C será recibida en la Tierra sólo un año después de haber recibido la de A, mientras que, aparentemente, en ese año la fuente parecerá haberse movido de B a C (los objetos en el cielo parecen todos situados sobre el mismo plano), es decir, se habrá movido una distancia de 3 años-luz en 1 año. Se ha medido, por tanto, una velocidad aparente mayor que la de la luz, pero, como hemos visto, esto es sólo un efecto de la proyección.



# IMPORTANTE:

Hyperphysics (© C. R. Nave, 2010) es una base continuamente en desarrollo de material de instrucción de física. El autor está abierto a propuestas para su uso con fines de instrucción no lucrativos. La intención general ha sido desarrollar un entorno de exploración de gran alcance que pueda ser de utilidad para estudiantes y profesores.



Seleccionado por el programa SciLinks, un servicio de la National Science Teachers Association.

Copyright 2001.

Un número de instituciones educativas están utilizando el material en aulas equipadas con ordenadores, y para ello, se pueden preparar para su institución paquetes de laboratorio de DVD's. Otra posibilidad es una licencia para publicar Hyperphysics internamente, en un sitio interno, que le permitirá modificar y agregar a Hyperphysics como una base sobre la que ampliar. Tales licencias están sujetas a la restricción, de que el acceso al sitio espejo interno desde la World Wide Web, debe estar al menos protegido por contraseña. Estas licencias están siendo utilizados por un número de instituciones educativas y centros de formación para facilitar el desarrollo de contenidos específicos sin tener que "reinventar la rueda", rellenando todo el material de introducción