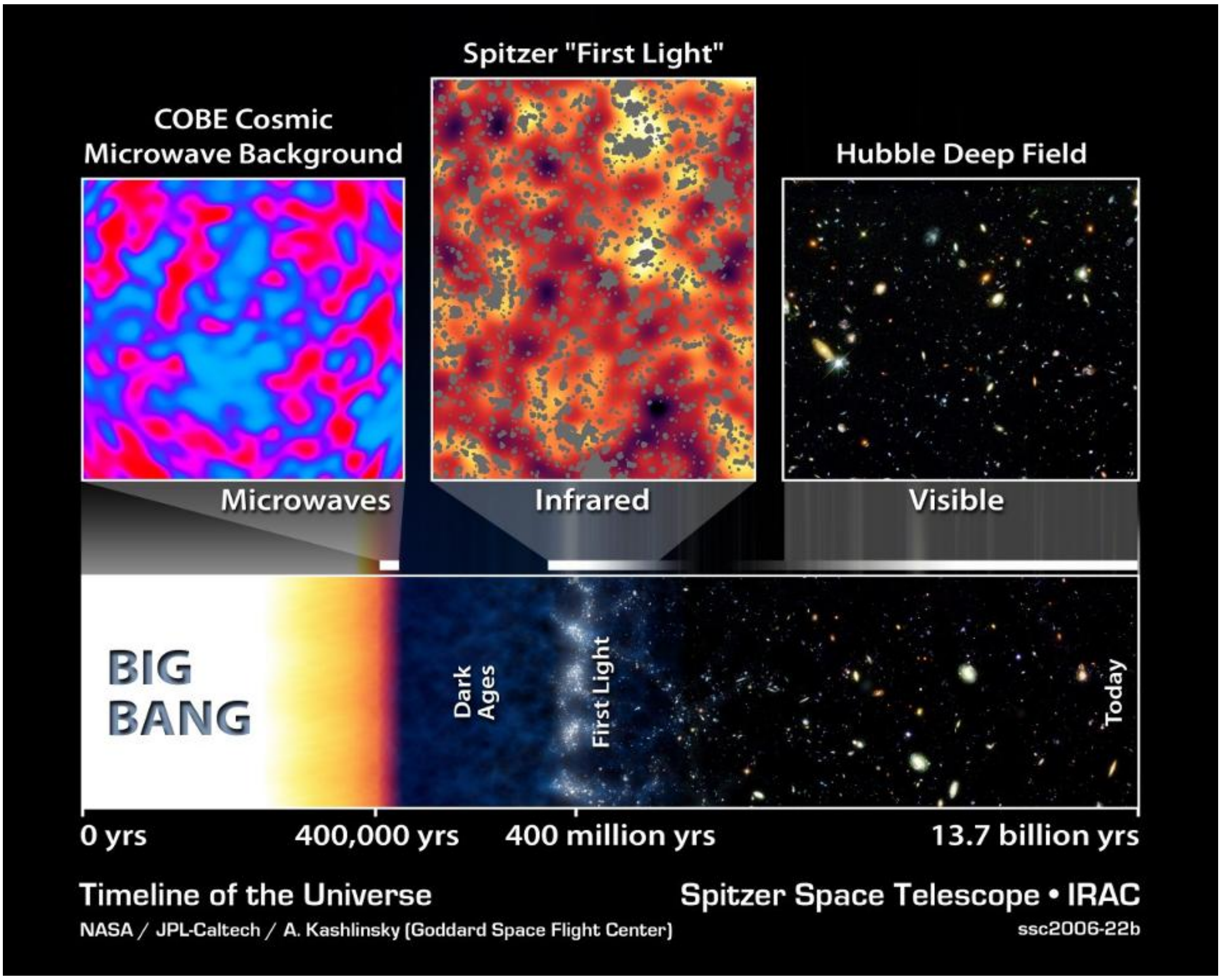
Óptica física y geométrica

JFGH
Space-time Foundation & Quantum TimeLord Virtual Academy

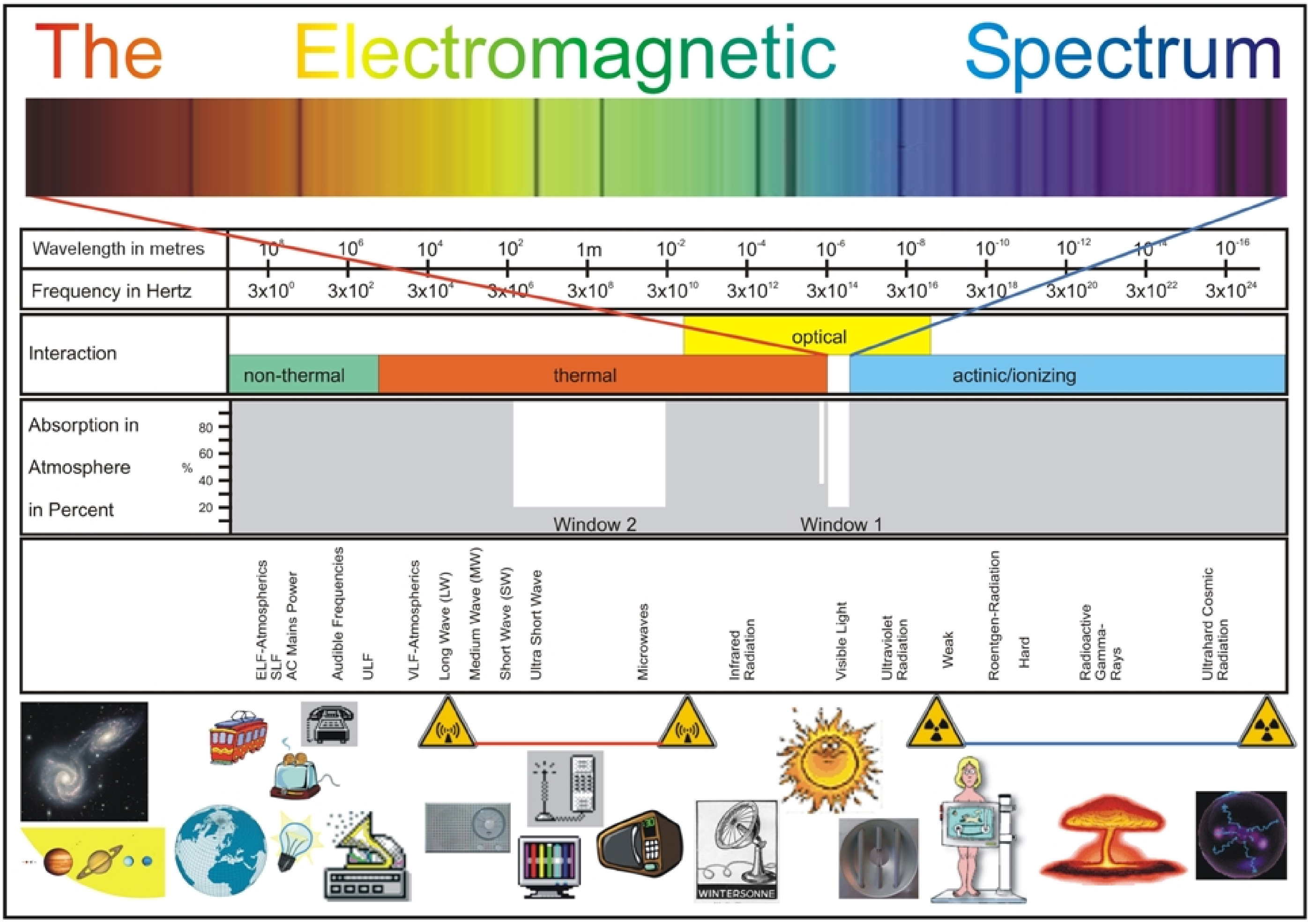
Multiverse of Madness

Resumen

Resumen con LaTeX en español de los temas de Óptica Física y Geométrica. 2° Bachillerato.



Índice



The Electromagnetic Spectrum
Wavelength in metres
10^8 10^6 10^4 10^2 1m 10^-2 10^-4 10^-6 10^-8 10^-10 10^-12 10^-14 10^-16
Frequency in Hertz
3x10^0 3x10^2 3x10^4 3x10^6 3x10^8 3x10^10 3x10^12 3x10^14 3x10^16 3x10^18 3x10^20 3x10^22 3x10^24
Interaction
optical
non-thermal
thermal
actinic/ionizing
Absorption in Atmosphere in Percent
% 80 60 40 20
Window 2
Window 1
ELF-Atmospherics SLF AC Mains Power
Audible Frequencies
ULF
VLF-Atmospherics
Long Wave (LW)
Medium Wave (MW)
Short Wave (SW)
Ultra Short Wave
Microwaves
Infrared Radiation
Visible Light
Ultraviolet Radiation
Weak
Roentgen-Radiation
Hard
Radioactive Gamma-Rays
Ultrahard Cosmic Radiation
WINTERSONNE

1. Óptica física

La Óptica física estudia los más importantes fenómenos ondulatorios particularizados a las ondas electromagnéticas y la luz. En particular, la lista de fenómenos que incluye es:

1. Reflexión.
2. Refracción.
3. Resonancia.
4. Polarización.
5. Interferencia (superposición).
6. Difracción.
7. Amortiguación o absorción.
8. Reverberación.
9. No linealidad.
10. ...

Propiedades más generales de las ondas como intensidad, potencia, nivel de intensidad, son también aplicables a la teoría de la Óptica física.

Las dos leyes más importantes de la Óptica Física son las leyes de la reflexión y la refracción (Snell-Descartes).

1.1. Reflexión

Ley de la reflexión

Cuando un rayo es reflejado por una superficie, se tiene en general que el ángulo reflejado es igual al de incidencia, respecto de la normal de la superficie de separación de dos medios ópticos diferentes. Matemáticamente:

$$\boxed{\theta_i = \theta_r} \tag{1}$$

1.2. Refracción

Se denomina índice de refracción de un medio al cociente de la velocidad de luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese medio:

$$\boxed{n = \frac{c}{v}} \tag{2}$$

En general, salvo circunstancias excepcionales, el índice de refracción es igua o mayor que uno y la velocidad de la luz es imbatible en el vacío. Sin embargo, en ciertos medios ópticamente densos, puede ocurrir que el índice de refracción sea menor que uno y tener una velocidad de la luz mayor que en el vacío en dicho medio.

Ley de Snell de la refracción

Si un rayo de luz pasa de un medio de índice de refracción n_i a otro de índice de refracción n_r, con un ángulo de incidencia respecto de la normal θ_i y un ángulo de refracción respecto de la normal en el segundo medio igual a θ_r, entonces se verifica la ley de Snell

$$\boxed{n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r} \tag{3}$$

En general, suele haber tanto reflexión como refracción en un medio. Sin embargo, cuando se cambia de un medio de un índice de refracción mayor a uno menor, existe un ángulo, denominado ángulo límite, para el que no hay refracción, sino que como el ángulo refractado es 90°, el rayo luminoso no entra en el medio ópticamente denso. Matemáticamente, el ángulo límite se define como

$$n_i \sin\theta_L = n_r \sin 90 \longrightarrow \boxed{\theta_L = \sin^{-1}\frac{n_r}{n_i}} \tag{4}$$

Nota: si $n_r > n_i$, entonces no existe ángulo límite.

En 1812, Brewster enunción una ley de polarización que hoy se llama ley de Brewster de la polarización. En física óptica, el ángulo de Brewster (nombrado en honor al físico escocés Sir David Brewster) corresponde al ángulo de incidencia de luz sobre una superficie que anula la componente con polarización paralela al plano de incidencia. El resultado cuando se aplica un rayo de luz no polarizada sobre una superficie bajo el ángulo de Brewster es la obtención de un rayo reflejado de luz polarizada en una dirección (cuyo vector de polarización es perpendicular al plano de incidencia). Brewster observó que cuando las direcciones de los haces transmitido y reflejado formaban un ángulo de 90 grados sexagesimales, el haz de luz reflejado resultaba polarizado linealmente. Dicho de otra manera: La polarización por reflexión es máxima cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción de la sustancia. La polarización es nula para la incidencia normal. En general, el ángulo de Brewster entre dos medios depende de las características electromagnéticas de los mismos (permitividad eléctrica y permeabilidad magnética). En el caso en que las permeabilidades magnéticas de ambos medios no varían (el caso más frecuente), el ángulo de Brewster se puede calcular a partir de los índices de refracción de ambos medios como sigue:

Ley de Brewster y ángulo de Brewster de polarización

El ángulo de Brewster de polarización se define como

$$\boxed{\theta_B = \tan^{-1}\frac{n_r}{n_i}} \tag{5}$$

Demostración: teniendo en cuenta que el ángulo de refracción es complementario del incidente, esto es, que $\theta_r = 90° - \theta_i$

$$\sin\theta_r = \sin(90 - \theta_i) = \cos\theta_i \tag{6}$$

$$\theta_i = \theta_B \tag{7}$$

$$n_i \sin\theta_i = n_r \sin\theta_r = n_r \cos\theta_i = n_r \cos\theta_B = n_i \sin\theta_B \tag{8}$$

$$\boxed{\tan\theta_B = \frac{n_r}{n_i}} \tag{9}$$

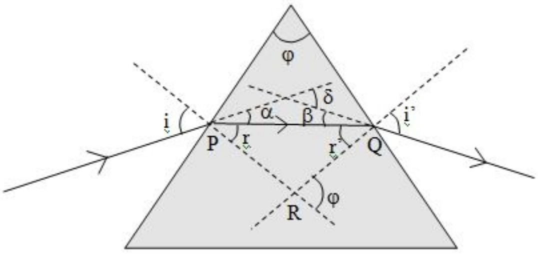
$$\theta_B = \tan^{-1}\frac{n_r}{n_i} \qquad Q.E.D. \tag{10}$$

Recuerda: La polarización es una propiedad exclusiva de las ondas transversales como las ondas electromagnéticas o las ondas gravitacionales.

Para la interferencia de ondas ópticas vale también el **principio de Huygens**.

1.3. Prisma óptico(ampliación)

Un prisma óptico o de refracción es un sistema como el que sigue, hecho de un índice n:



Aplicando la ley de Snell se obtiene:

$$\sin i = n \sin r \tag{11}$$
$$n \sin r' = \sin i' \tag{12}$$
$$\varphi = r + r' \tag{13}$$
$$\delta = \alpha + \beta \tag{14}$$
$$i = \alpha + r \qquad i' = \beta + r' \tag{15}$$
$$\delta = i - r + i' - r' = i + i' - (r + r') \tag{16}$$
$$\delta = i + i' - \varphi \tag{17}$$

Experimentalmente se comprueba que la desviación mínima del prisma δ_m, se alcanza para la igualdad de los ángulos de incidencia y emergencia, i.e., $i = i'$. Como $r = r'$, entonces $\varphi = 2r$, de donde se obtiene

$$\delta_m = i + i' - \varphi = 2i - \varphi \tag{18}$$

o bien

$$r = \frac{\varphi}{2} \tag{19}$$

y

$$i = \frac{\delta_m + \varphi}{2} \tag{20}$$

Entonces, la ecuación que permite determinar experimentalmente el índice de refracción del prisma y una sustancia transparente n, con la desviación mínima es

$$\boxed{n = \frac{\sin \dfrac{\delta_m + \varphi}{2}}{\sin \dfrac{\varphi}{2}}} \tag{21}$$

Para incidencias casi normales en el prisma, se tiene la relación aproximada $\delta \approxeq (n-1)\varphi$, que es coherente con que la mínima desviación $\Delta = \delta_m$ que corresponde a un ángulo de incidencia i satisfaga las ecuaciones dadas anteriores, i.e.,

$$i = \frac{\Delta + \varphi}{2}, \quad \sin \frac{\Delta + \varphi}{2} = n \sin \frac{\varphi}{2}$$

Principio de Fresnel (mínimo cámino óptico): de entre toda las trayectorias posibles, la que efectivamente sigue un rayo de luz entre dos puntos es la que minimiza su camino óptico.

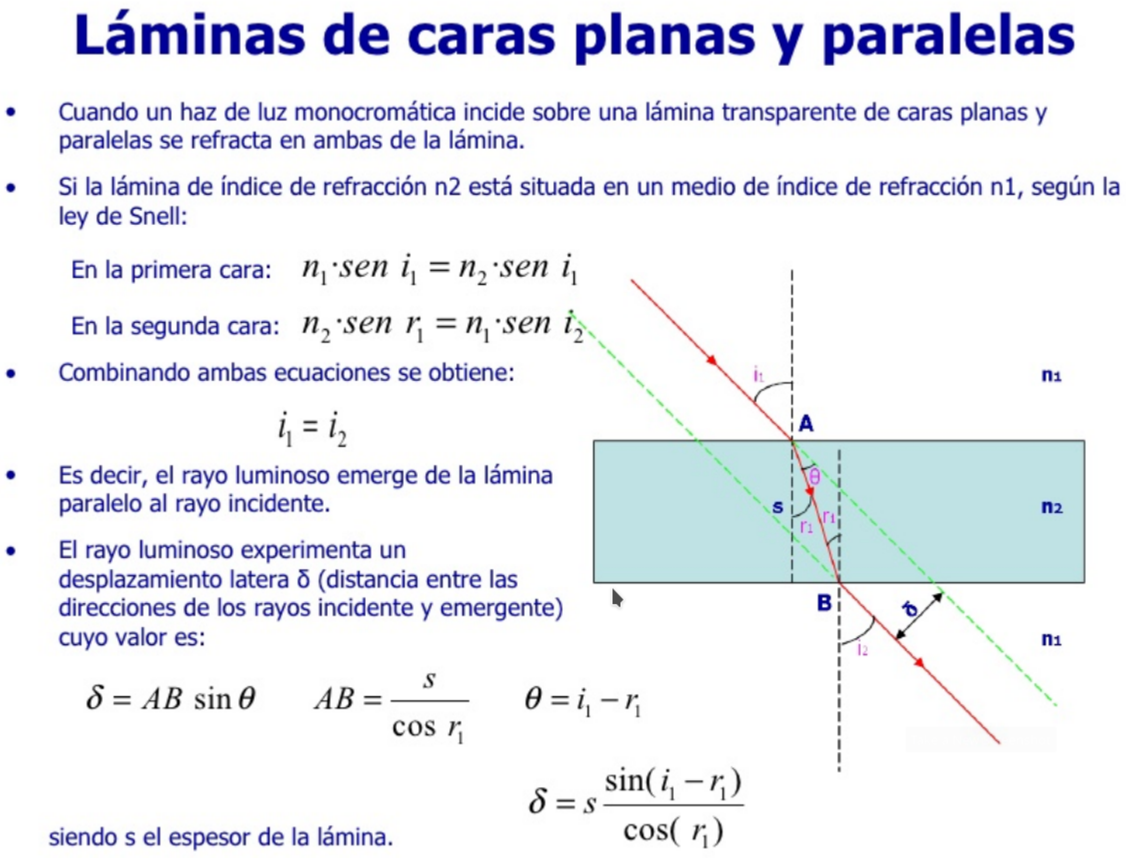
El camino óptico se define como la expresión

$$s = \sum n_i d_i$$

.

1.4. Lámina de caras plano-paralelas

Otro caso particular común en óptica es la lámina de caras plano-paralelas. En este sistema se tiene:



El rayo emergente paralelo al rayo incidente de una lámina de caras planas-paralelas de espesor D e índice de refracción n están separados una distancia

$$d = D\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

2. Óptica geométrica

La Óptica Geométrica es la parte de la Física y la Óptica que trata y estudia los problemas de propagación de los rayos de luz y los instrumentos ópticos. Generalmente, en Óptica Geométrica, se usa la denominada aproximación de Gauss o **paraxial**: todos los rayos de luz se consideran paralelos al eje óptico, y así se desprecian efectos como la aberración de la luz y otros varios que sí considera la Óptica de rayos en su versión de difracción u Óptica de Fresnel. En el límite de difracción, se tiene que

$$\boxed{d = \frac{1{,}22\lambda}{2n\sin\theta}} \qquad (22)$$

Y también, $\tan\alpha = \operatorname{sen}\alpha = \alpha$.

Por tanto, en la aproximación paraxial consideramos:

- Propagación rectilínea de la luz
- Dimensiones de los objetos mucho mayores que la longitud de onda de la luz que emiten. Evitamos entonces la posibilidad de la difracción.
- Que el medio de propagación es en general homogéneo e isótropo.

Además, veremos que, en aproximación paraxial:

- Las características principales de los sistemas centrados es que los puntos y planos principales de un sistema óptico los determinan las posiciones de los objetos e imágenes, y ciertos puntos llamados focales objeto e imagen. Para lentes delgadas, el grosor de la lente debe ser pequeño en relación a los radios de curvatura. En el dioptrio esférico tendremos n, n', y en los espejos esféricos $n' = -n$.
- Focales para lentes delgadas en aire se satisfacen:

$$\frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right), \; f = \frac{-nR}{n'-n}, \quad f' = \frac{n'R}{n'-n} \tag{23}$$

- Focales para espejos esféricos en aire: $f' = f = R/2$.
- Relaciones útiles para posiciones de objeto e imagen. Para sistemas centrados:

$$\frac{f}{s} + \frac{f'}{s'} = 1 \tag{24}$$

  Para lentes delgadas

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \tag{25}$$

  Para espejos esféricos

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{f} = \frac{1}{s'} + \frac{1}{s} \tag{26}$$

- Aumento lateral para sistemas centrados generales:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'f}{sf'} \tag{27}$$

  que para lentes da $\beta_L = s'/s$, para dioptrios $\beta_d = \dfrac{ns'}{n's}$ y para espejos $\beta_e = -\dfrac{s'}{s} = \dfrac{R}{R-2s}$.
- Aumento angular γ. Para sistemas centrados generales proporciona

$$\gamma = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{s}{s'} = \frac{x}{f'} = \frac{x'}{f} \tag{28}$$

  y donde $x = s - f$, $x' = s' - f$. Para lentes delgadas $\gamma_L = \dfrac{s}{s'}$. Para dioptrios esféricos $\gamma_d = \dfrac{s}{s'}$, y para espejos esféricos $\gamma_e = -\dfrac{s}{s'} = \dfrac{R-2s}{R}$.
- Relaciones entre aumentos lateral y angular. Para sistemas centrados

$$\beta\gamma = \frac{f}{f'} \tag{29}$$

  que para lentes deltadas da $\beta_L\gamma_L = 1$, $\beta_d\gamma_d = \dfrac{n}{n'}$ para dioptrios esféricos, y $\beta_e\gamma_e = -1$ para espejos esféricos.
- El invariante de Helmholtz es una cantidad invariante en dioptrios esféricos y espejos. Para dioptrios se tiene que $ny\alpha = n'y'\alpha'$, y para espejos esféricos $y\alpha = -y'\alpha'$.
- Fórmulas de Newton para sistemas centrados y lentes delgadas, respectivamente: $xx' = ff'$, $xx' = -f'^2$.
- La convergencia o potencia de una lente es $C = 1/f' = \varphi$, pero para un sistema de dos lentes separadas una distancia d, se puede escribir

$$C = C_1 + C_2 - \frac{C_1C_2}{d} \tag{30}$$

También hay unos conceptos usuales a tener en cuenta:

- **Objeto**: En óptica geométrica llamamos objeto a cualquier fuente de la que proceden los rayos, bien sea por luz propia o reflejada. Los objetos pueden ser puntuales, cuando se supone todo su volumen concentrado en un único punto o no puntuales. En este último caso, cada punto de la superficie puede ser considerado en sí mismo una fuente puntual de rayos.

- **Dioptrio**: Es una superficie que separa dos medios transparentes de distinto índice de refracción. El dioptrio refracta la luz haciendo que los rayos varíen su trayectoria. Según su forma se distinguen: dioptrios esféricos, y dioptrios planos.

- **Espejo**: Es una superficie lisa y pulimentada que refleja todos los rayos que llegan a ella. El espejo refleja la luz haciendo que los rayos varíen su trayectoria. Según su forma se distinguen: espejos esféricos y espejos planos.

- **Centro de curvatura**: Es el centro geométrico de la superficie esférica a la que pertenece el dioptrio o el espejo. En el caso de los dioptrios y espejos planos, se considera situado en el infinito. Solemos designarlo por la letra C.

- **Radio de curvatura**: Es el radio de la superficie esférica a la que pertenece el dioptrio o espejo. Podemos clasificar las superficies, en función de su curvatura en: superfice cóncava y otra convexa, aunque también puede haber superficies planas con radio de curvatura infinito.

Hay un criterio general de signos, denominado criterios DIN, para la Óptica Geométrica, aunque también se pueden usar otros. En los criterios DIN:

- Alturas positivas tienen $y > 0$, alturas negativas $y < 0$ quedan por debajo del llamado eje óptico.

- Ángulos antihorarios son positivos, ángulos horarios son negativos.

- Distancias a la izquierda del centro u origen del sistema óptico (no confundir centro óptico con centro de curvatura) son negativas, distancias a la derecha son positivas.

Otras definiciones importantes son las siguientes:

- **Sistema óptico**: Se suele denominar sistema óptico al conjunto de varios dioptrios y espejos. Así, podemos distinguir:
    - Dióptricos: Si están formados sólo por dioptrios, es decir, superficies refractantes. De ellos, las lentes delgadas son los que estudiaremos con más atención.
    - Catóptricos: Si están formados sólo por espejos, es decir, superficies reflectantes.
    - Catadióptricos: Si están formados por ambos tipos de superficies.

- **Eje óptico**: También llamado eje principal, es el eje de simetría en torno al cual se sitúan el/los dioptrio/s y/o el/los espejo/s.

- **Vértice óptico**: También denominado centro óptico o polo, es el punto de corte del dioptrio o espejo con el eje óptico. Se suele denotar por la letra O ya que constituye el origen de coordenadas.

- Cantidad de luz: energía en forma luminosa (generalmente visible para el ojo o un instrumento).

- Flujo luminoso: cantidad de luz por unidad de tiempo.

- Intensidad luminosa: cantidad de luz emitida por un foco por unidad de tiempo y por unidad de ángulo sólido.

- Luminancia de un foco extenso, B, es la cantidad de luz emitida por unidad de ángulo sólido y por unidad de superficie perpendicular a la dirección de emisión considerada.

- Iluminación E de una superficie: cantidad de luz recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie.

- Fotometría: para de la Óptica encargada de medir la intensidad, potencia y cantidad de luz, o magnitudes relacionadas.

Estudiaremos principalmente los sistemas ópticos centrados, que son aquellos con sus centros de curvatura situados sobre una misma recta llamada eje del sistema o eje óptico.

El objetivo principal de los sistemas ópticos es la formación de *imágenes*. Cuando todos los rayos de un objeto puntual que pasan por el sistema óptico convergen en un punto, decimos que dicho punto es la imagen del objeto. En el caso de los objetos no puntuales, los distintos puntos de la superficie del mismo convergerán en distintos puntos de la imagen formando una réplica del objeto original. La imagen puede ser clasificada:

- Atendiendo a su orientación: pueder ser *derecha* si tiene la misma orientación o *invertida* si tiene la orientación contraria.
- Atendiendo a su tamaño: puede ser más grande que el objeto (aumentada o ampliada/magnificada), o más pequeña que el objeto (disminuida o empequeñecida), aunque también puede ser de igual tamaño o tamaña natural que la del objeto.
- Atendiendo a la procedencia de los rayos puede ser **imagen real**, si se forma por la intersección de los rayos convergentes que provienen del objeto, tras pasar por el sistema óptico. En un espejo aparecen delante y en un dioptrio detrás generalmente. También puede ser una **imagen virtual**, si se forma por la intersección de las prolongaciones de los rayos divergentes que provienen del objeto, tras pasar por el sistema óptico. En un espejo están detrás y en un dioptrio delante.

2.1. Dioptrios esféricos

Un dioptrio esférico es generalmente la superficie de separación de dos medios con índices de refracción diferentes y cierta curvatura, dada por un radio R. El dioptrio se llama convexo si $R > 0$ y cóncavo si $R < 0$ en los convenios DIN. Hay una ecuación fundamental que liga las distancias del objeto y la imagen de un dioptrio:

Ecuación del dioptrio esférico

Si la distancia de un objeto al origen del dioptrio es s y la distancia a la imagen s', entonces:

$$\boxed{\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R}} \tag{31}$$

Existen dos puntos muy importantes cuando estudiamos un dioptrio: su foco objeto y su foco imagen.

- El foco objeto de un dioptrio esférico es el punto F del eje óptico en el que tendría que situarse un objeto para que sus rayos saliesen paralelos al eje tras refractarse en el dioptrio. La distancia del foco objeto al vértice del dioptrio se denomina distancia focal objeto y se denota por f. Se cumple que, usando la ecuación del dioptrio esférico:
$$f = -R\frac{n}{n' - n} \tag{32}$$
- El foco imagen es el punto F' del eje ópticoico en el que convergen, tras pasar por el dioptrio, los rayos que son paralelos al eje óptico. La distancia del foco imagen al vértice del dioptrio se denomina distancia focal imagen y se denota por f'. Se cumple que:
$$f' = +R\frac{n'}{n' - n} \tag{33}$$

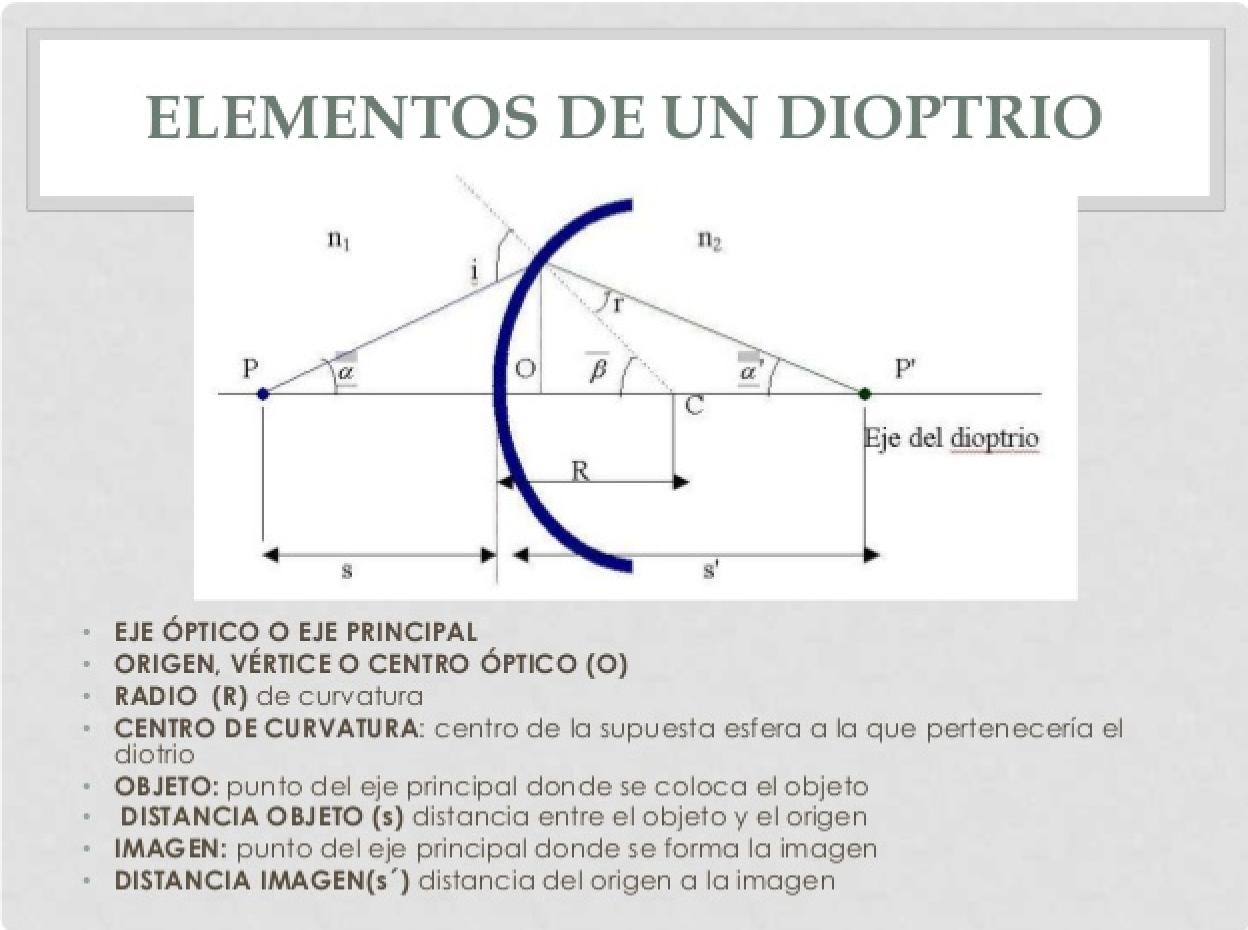
Las focales verifican las siguientes 2 ecuaciones:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'} \tag{34}$$

$$f + f' = R \tag{35}$$

y una tercera ecuación, derivada de la del dioptrio, llamada **ecuación de Gauss**:

$$\boxed{\frac{f}{s} + \frac{f'}{s'} = 1} \tag{36}$$



La relación entre el tamaño de la imagen del objeto y', y el tamaño del objeto y se calcula con el denominado aumento lateral $A_L = \beta_L$:

Aumento lateral

Se llama aumento lateral de un dioptrio esférico a la cantidad

$$\boxed{\beta_L = \frac{y'}{y} = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s}} \tag{37}$$

El signo del aumento lateral dice si la imagen es derecha $\beta_L > 0$, o invertida $\beta_L < 0$, y además dice si está aumentada $|\beta_L| > 1$, es de tamaño natural $|\beta_L| = 1$, o si está reducida $|\beta_L| < 1$.

Es habitual obtener la posición y dimensiones de las imágenes de los objetos en el dioptrio desde un punto de vista gráfico. Para ello se usa lo que se conoce como diagrama de rayos. En ellos nos basta dibujar 2 rayos de trayectoria conocida, de los infinitos posibles. En realidad, es fácil dibujar al menos tres. Son los llamados rayos principales. Se denominan rayos principales a rayos de trayectoria conocida que nos permiten determinar la posición de la imagen de un objeto en un diagrama de rayos. En el dióptrio esférico son:

- El rayo procedente del objeto y paralelo al eje óptico, que, tras refractarse, pasará por el foco imagen.
- El rayo que, procedente del objeto, pasa por el centro de curvatura del dioptrio. Tras refractarse no modifica su trayectoria

- El rayo procedente del objeto que pase por el foco objeto, que, tras refractarse, saldrá paralelo al eje óptico.

2.2. Espejos esféricos y planos

En Óptica Geométrica un espejo es cualquier superficie lisa y pulida capaz de reflejar los rayos de luz que llegan a él. El espejo refleja la luz haciendo que los rayos varíen su trayectoria y formando imágenes. En este apartado vamos a analizar como se ven las los objetos cuando estas superficies reflectoras son esféricas. Matemáticamente, la ecuación de los espejos esféricos se obtiene poniendo $n' = -n$ en la ecuación del dioptrio esférico:

Ecuación de los espejos esféricos

Si la distancia objeto es s, la distancia imagen s', y llamamos focal imagen a la cantidad $f' = f = R/2$, entonces

$$\boxed{\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}} \tag{38}$$

La ecuación de los aumentos para un espejo esférico se deriva trivialmente de la del dioptrio esférico con $n' = -n$

Aumento lateral para los espejos esféricos

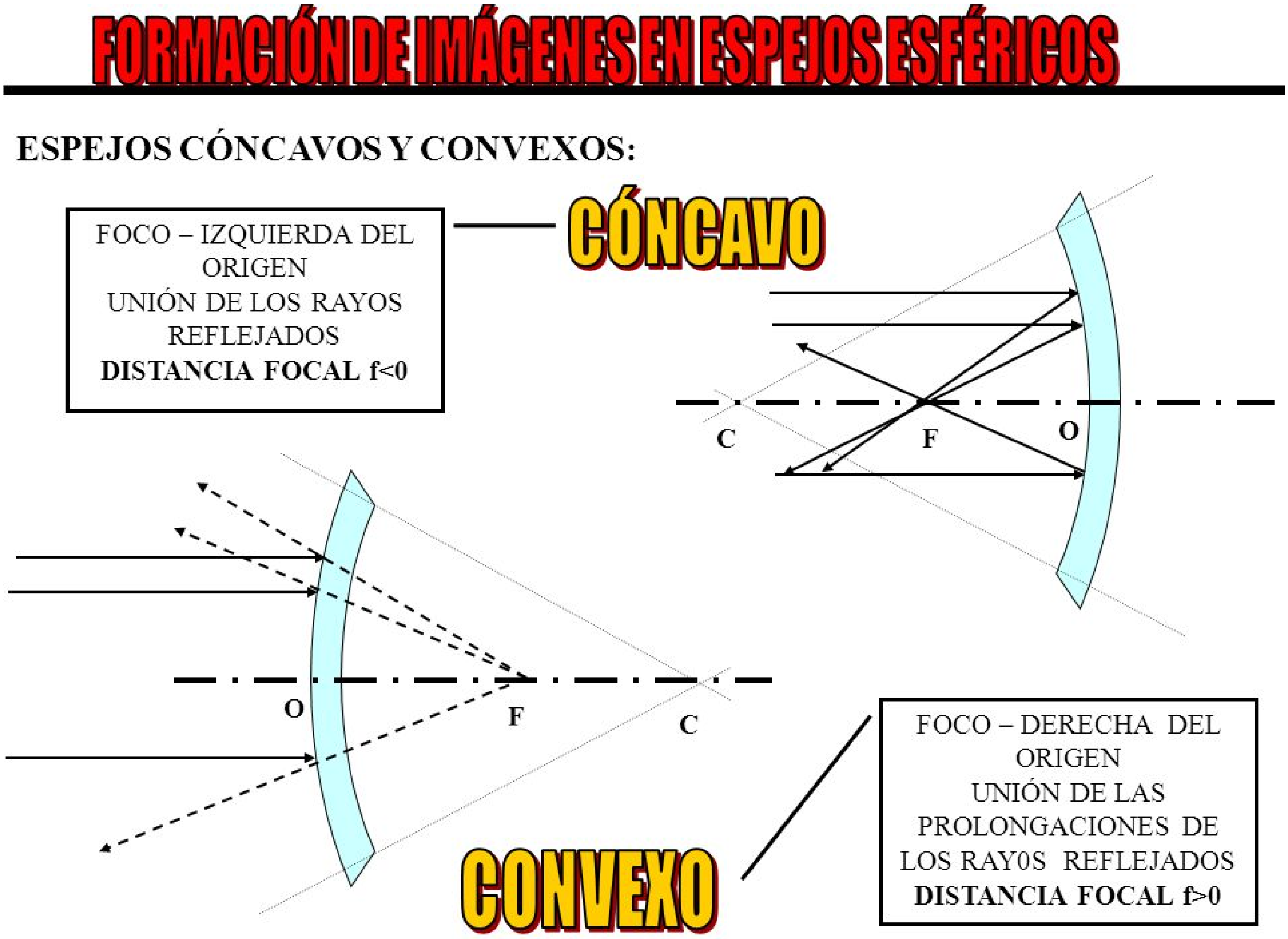
El aumento lateral para un espejo esférico viene dado por

$$\boxed{\beta_L = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}} \tag{39}$$

En el espejo esférico, los rayos principales son:

- El rayo procedente del objeto y paralelo al eje óptico, que, tras reflejarse, pasará por el foco.
- El rayo que, procedente del objeto, pasa por el centro de curvatura del espejo. Tras reflejarse no modifica su dirección.
- El rayo procedente del objeto que pase por el foco, que, tras reflejarse, saldrá paralelo al eje óptico.

La formación de imágenes en estos espejos esféricos puede verse de la siguiente forma:



Un caso particular de los espejos esféricos es cuando el radio de curvatura es infinito. En tal caso el espejo se llama plano y verifica

Espejos planos

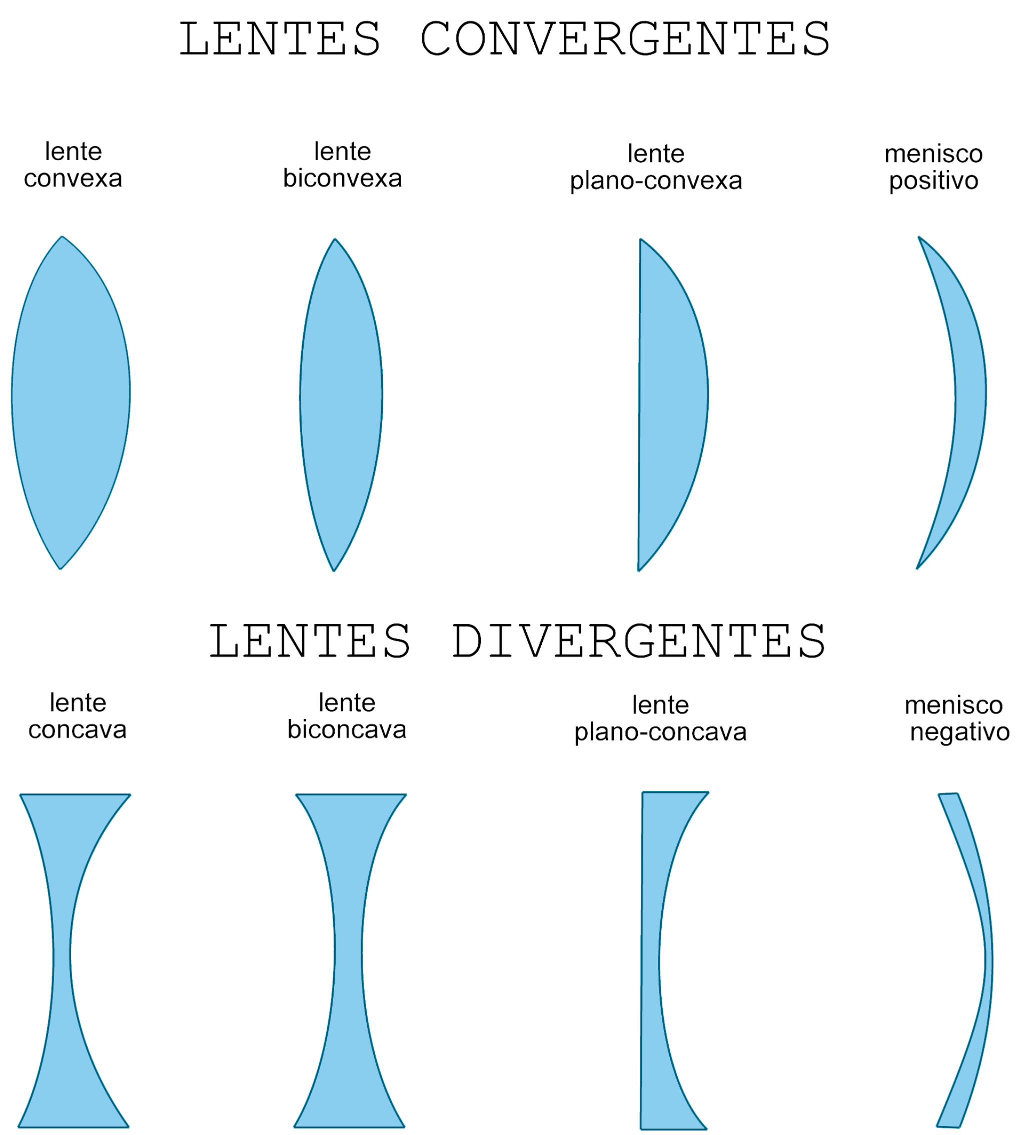
$$\boxed{s' = -s} \tag{40}$$

$$\boxed{f = f' = R = \infty} \tag{41}$$

$$\boxed{\beta_L = \frac{y'}{y} = 1} \tag{42}$$

2.3. Lentes y lentes delgadas

Una lente es un sistema óptico que encierran dos superficies o dioptrios, con un determinado índice de refracción n'. Hay varios tipos de lentes según la curvatura:



Observa como las lentes convergentes son más gruesas en su parte central y las divergentes son más gruesas en sus extremos. Por otro lado, las lentes menisco-convexa y menisco-cóncava también se suelen denominar menisco-convergente y menisco-divergente respectivamente. Los signos de los radios indicados corresponden al criterio DIN.

El comportamiento convergente o divergente de una lente depende, en realidad, de la relación entre el índice de refracción del medio que rodea la lente, n , y el de la propia lente, n'. Cuando decimos con carácter general que una lente es convergente o divergente lo hacemos asumiendo que n’>n , y más concretamente, que la lente se encuentra en el aire (n=1).

Ecuación del constructor de lentes

Usando dos veces la ecuación del dioptrio esférico, se puede probar que la ecuación de que relaciona las posiciones objeto e imagen s, s', los índices de refracción del medio externo y de la lente n, n', y los radios de curvatura de las superficies de la lente R_1, R_2 está dada por

$$\boxed{\frac{n}{s'} - \frac{n}{s} = (n' - n)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} \tag{43}$$

Si el medio externo es aire, la ecuación toma la forma

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n' - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{44}$$

Demostración: usamos dos veces la ecuación de los dioptrios, con posición de la imagen de la primera lente igual a la posición del objeto de la segunda lente

$$\frac{n'}{s_1} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{R_1} \tag{45}$$

$$\frac{n}{s'} - \frac{n'}{s_1} = \frac{n - n'}{R_2} \tag{46}$$

Sumando las dos ecuaciones se obtiene la ecuación del constructor de lentes de forma trivial. Un concepto importante es el de lente delgada, que es cuando no se aprecia la curvatura de la lente, y solamente podemos saber si es convergente (acerca los rayos al eje óptico), o divergente (separa los rayos del eje óptico). En tal caso, la ecuación de las lentes se transforma en la ecuación de las lentes delgadas:

Ecuación de las lentes delgadas

Cuando la curvatura de las lentes es despreciable, se obtiene la llamada ecuación de las lentes delgadas

$$\boxed{\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}} \tag{47}$$

Para lentes convergentes, $f' > 0$, y para lentes divergentes $f' < 0$.

Para una lente delgada el aumento lateral viente dado por la siguiente relación:

Aumento lateral para lentes delgadas

Para una lente delgada

$$\boxed{\beta_L = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}} \tag{48}$$

Las focales objeto e imagen de las lentes delgadas vienen dada por las expresiones

Focales objeto e imagen de lentes delgadas

$$\frac{n}{f} = (n - n')\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{49}$$

$$\frac{n}{f'} = (n' - n)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{50}$$

Se puede observar que $f' = -f$.

Otra definición importante es la potencia de una lente (o un sistema óptico en general):

Potencia de una lente

Se llama potencia de una lente, y se mide en **dioptrías** ($1D = 1m^{-1}$), a la cantidad

$$\boxed{\varphi' = \frac{1}{f'}} \tag{51}$$

Los rayos principales para una lente son:

- El rayo procedente del objeto y paralelo al eje óptico, que, tras refractarse en la lente, pasará por el foco imagen.
- El rayo que, procedente del objeto, pasa por el centro óptico de la lente. Tras refractarse en la lente no modificará su dirección.

- El rayo procedente del objeto que pase por el foco objeto, que, tras refractarse en la lente, saldrá paralelo al eje óptico.

2.4. El ojo humano

El ojo es un instrumento óptico natural que consta de las siguientes partes:

1. LA CÓRNEA

Las imágenes entran en el ojo atravesando una ventana exterior transparente que conocemos como la **córnea** y que en el ojo humano se comporta como una lente de unas 43 dioptrías.

Las paredes del ojo, es decir, la carcasa o chasis de la cámara fotográfica, están compuestas por un tejido fibroso blanco que llamamos **esclerótica**. Éste, a su vez, se protege del exterior por una fina capa transparente denominada **conjuntiva**.

2. LA PUPILA

La **pupila** es la parte negra y redondeada que vemos en los ojos y es como su ventana interior. Se comporta como un mecanismo de diafragma regulando la intensidad de la luz entrante, con mucha luz se hace pequeña y con poca luz se agranda. La pupila es el orificio natural del **iris**, que es la capa interna que da el color a los ojos.

3. EL CRISTALINO

Tras la pupila, la imagen atraviesa una lente que conocemos como **cristalino** y que sería como la lente de la cámara fotográfica. Tiene una potencia de unas 22 dioptrías pero su consistencia elástica le permite de manera automática variar su poder permitiendo no sólo ver de lejos, sino el enfoque de objetos próximos como hacemos en la lectura.

4. LA RETINA Y EL NERVIO ÓPTICO

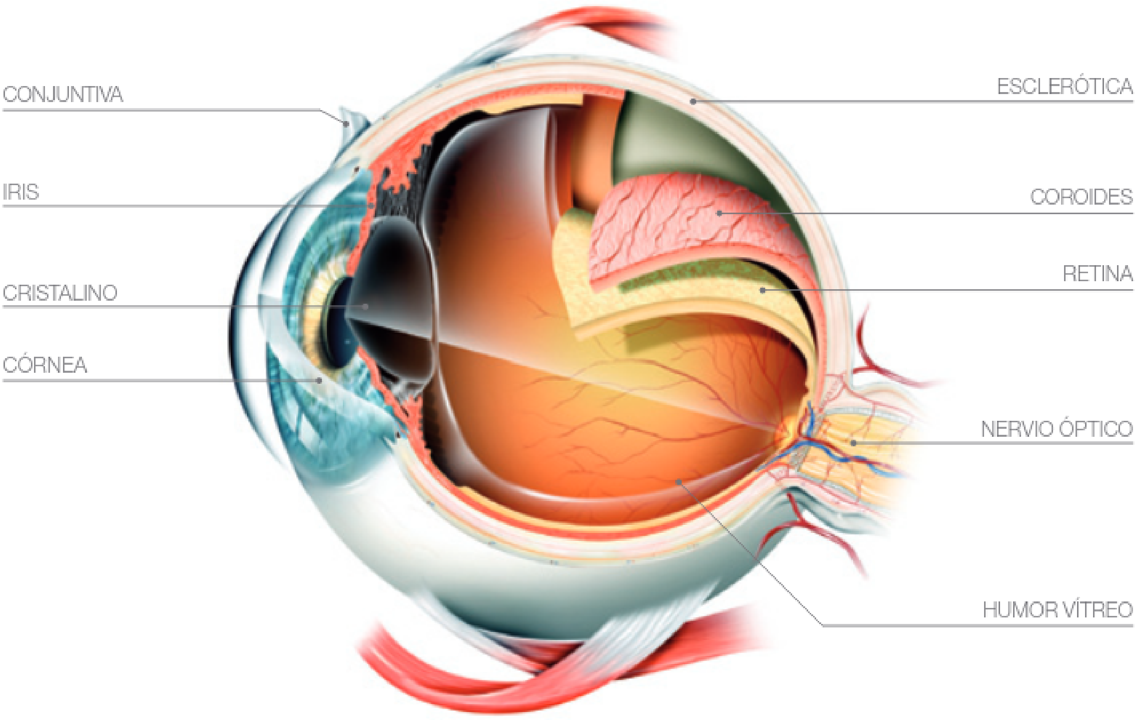
Las imágenes, tras atravesar una estructura gelatinosa transparente denominada **humor vítreo**, llegan finalmente al fondo del ojo donde son captadas por la retina. La **retina** se comporta como el carrete fotográfico que colocamos en la parte trasera de las cámaras, de forma que recibe y procesa las imágenes. Éstas serán luego transmitidas al cerebro a través del **nervio óptico**.

5. LA NUTRICIÓN DEL OJO

El sistema ocular se alimenta de nutrientes que llegan por arterias y venas que se sitúan en una capa entre la retina y la esclerótica, que conocemos como **coroides** o **úvea**. También encontramos vasos directamente sobre la retina y que podemos observar y estudiar cuando hacemos una exploración del fondo del ojo.

El ojo humano es un tipo particular evolucionado de lente natural. La potencia normal de un ojo sano es de 40 dioptrías la córnea, y 20 dioptrías el cristalino, generalmente. Así, la potencia total es de unas 60 dioptrías, aunque suele darse habitualmente un valor más bajo medio de 50 dioptrías como algo más normal y natural. Hay varios defectos de la visión:

- Miopía: se corrige con lentes divergentes. Los rayos convergen por delante de donde deberían, y se ven las imágenes de objetos lejanos borrosas.
- Hipermetropía: se corrige con lentes convergentes. Los rayos convergen detrás de donde deben, y se ven las imágenes de objetos cercanos borrosas.
- Astigmatismo: se corrige con lentes curvas. El cristalino o el globo ocular pierden su esfericidad. Crea borrosidad en la silueta de los objetos.
- Vista cansada o presbicia: se corrige con lentes de diverso tipo. Se debe a la pérdida de elasticidad del cristalino.
- Daltonismo: pérdida de la capacidad para distinguir colores o ciertas frecuencias de forma diferenciada.



2.5. Microscopios, telescopios y sistemas compuestos

Un sistema óptico compuesto, como microscopios o telescopios, es en realidad un conjunto de lentes. el aumento de un sistema compuesto es igual al producto de los aumentos de los diferentes sistemas.

$$\boxed{\beta_t = \beta_1\beta_2\cdots\beta_N = \prod_{i=1}^{N}\beta_i} \tag{52}$$

Doctor Who?

$$\varrho\Delta\Xi\Theta\Sigma\text{ШЖЮ}$$

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\heartsuit\heartsuit\rangle + |\blacklozenge\blacklozenge\rangle\right)$$

$$\oint_{\partial\Sigma}\Theta = \int_{\Sigma} d\Theta$$