



TEMA 3.- CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS DE LOS INSTRUMENTOS ÓPTICOS

- Magnitudes fotométricas.
- Relaciones básicas de la fotometría.
- Iluminación de la imagen proporcionada por un Instrumento Óptico Objetivo.
- Luminancia aparente de la imagen proporcionada por un Instrumento Óptico Subjetivo.
- Luminosidad de un Instrumento Óptico.

Estudio de los Instrumentos Ópticos desde el punto de vista de su rendimiento energético

3.1.- Magnitudes fotométricas

- Algunas de las características más relevantes, desde el punto de vista práctico, de los sistemas formadores de imágenes están relacionadas con la transferencia de energía entre el objeto y su imagen a través del sistema.

RADIOMETRÍA: MEDIDA DE LA ENERGÍA RADIANTE

- El ojo humano es el receptor final (de modo directo o indirecto) en los instrumentos ópticos



FOTOMETRÍA: LAS MAGNITUDES FOTOMÉTRICAS TIENEN EN CUENTA LA RESPUESTA DEL SISTEMA VISUAL HUMANO A LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Magnitudes (notación y unidades) definidas de acuerdo con los criterios de la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)



ENERGÍA RADIANTE Q (J)

- Cantidad total de energía radiante electromagnética que incide sobre, atraviesa o emerge de una superficie dada en un período de tiempo determinado.
- Unidad: **Julio**

FLUJO RADIANTE o POTENCIA RADIANTE Φ_e (W)

- Cantidad de energía radiante que incide sobre, atraviesa o emerge de una superficie dada por unidad de tiempo.
- Unidad: **Vatio = Julio/segundo**

$$\Phi_e = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_t}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt}$$

Para radiación policromática es útil definir las densidades espectrales para poder considerar la respuesta espectral de los detectores

ENERGÍA ESPECTRAL RADIANTE Q_λ ($\text{J} \cdot \text{nm}^{-1}$)

- Cantidad ΔQ correspondiente a un cierto intervalo de longitudes de onda ($\lambda - \Delta\lambda/2$, $\lambda + \Delta\lambda/2$) del espectro electromagnético.

- Unidad: **Julio/nanómetro**

$$Q_\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{dQ}{d\lambda}$$

FLUJO o POTENCIA ESPECTRAL RADIANTE $\Phi_{e,\lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$)

- Cantidad de energía radiante, correspondiente a una cierta longitud de onda λ que incide sobre, atraviesa o emerge de una superficie dada por unidad de tiempo.

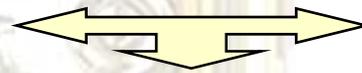
- Unidad: **Vatio/nanómetro**

$$\Phi_{e,\lambda} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_\lambda}{\Delta t} = \frac{dQ_\lambda}{dt}$$

La Energía y el Flujo radiantes pueden obtenerse como adición de todas las contribuciones monocromáticas

FLUJO RADIANTE o POTENCIA RADIANTE

$$\Phi_e = \int_{\Lambda} \Phi_{e,\lambda} d\lambda$$



$$\Phi_v = \int_{\Lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Detector lineal con sensibilidad espectral $V(\lambda)$

Detector = ojo humano

FLUJO LUMINOSO

Unidad: lumen.

Flujo luminoso asociado a un flujo radiante de 1/683 W de radiación monocromática de $\lambda = 555\text{nm}$.

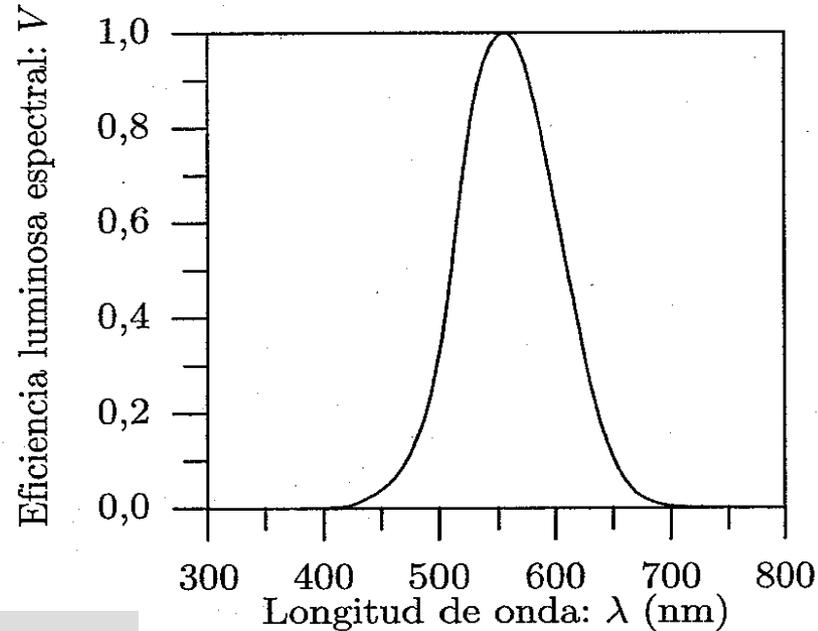
$$\Phi_v \equiv \Phi(lm)$$

$V(\lambda)$

Eficiencia luminosa espectral

Detector = ojo humano \longrightarrow FLUJO LUMINOSO

$$\Phi_v \equiv \Phi(lm)$$



$$V(\lambda)$$

Eficiencia luminosa espectral fotópica
(observador fotométrico patrón. CIE 1924).



FACTOR DE TRANSMISIÓN τ

- **Caracteriza la transferencia de Flujo luminoso o radiante en cualquier sistema óptico**

$$\tau = \frac{\text{Flujo transmitido}}{\text{Flujo incidente}} = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

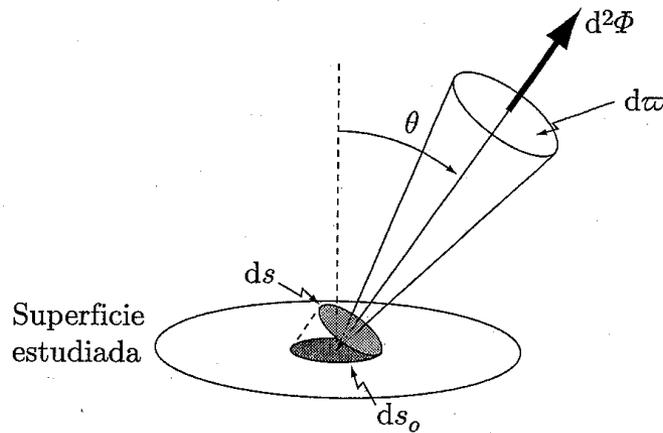
INTENSIDAD LUMINOSA I (cd) (Punto P y una dirección determinada)

$$I = \lim_{\Delta\varpi \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_P}{\Delta\varpi} = \frac{d\Phi}{d\varpi}$$

- $\Delta\Phi_P$ es el Flujo luminoso que incide sobre, atraviesa o emerge de un punto P de una superficie dada en un entorno de una dirección determinada (caracterizado por un ángulo sólido de anchura $\Delta\varpi$).

- **Unidad: candela = lumen/estereoradián**

LUMINANCIA L ($\text{nit} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)
 (Superficie emisora y una dirección determinada) $L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds}$



$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds_0 \cos \theta}$$

$\theta = 0^\circ$



$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds}$$

- Se define cuando las dimensiones de las superficies no permiten considerar los elemento estudiados como puntuales.
- Unidad: **nit = candela/(metro)²**

ILUMINACIÓN (o ILUMINANCIA) E ($\text{lux} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$)
 (Superficie receptora)

- Representa la densidad superficial de Flujo luminoso que incide sobre una superficie dada.
- Unidad: **lux = lumen/(metro)²**

$$E = \frac{d\Phi}{ds}$$

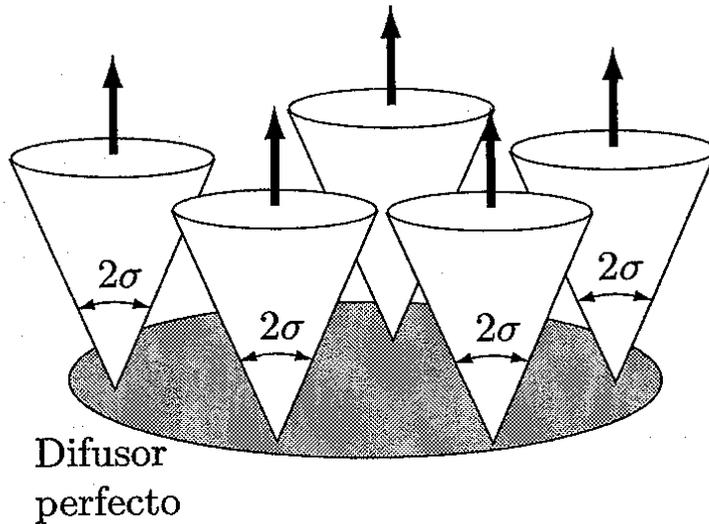
3.2.- Relaciones fotométricas básicas

Relación entre la ILUMINACIÓN y la LUMINANCIA

$$\begin{array}{l}
 E = \frac{d\Phi}{ds} \\
 \theta = 0^\circ \\
 L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 L = \frac{dE}{d\omega} \longrightarrow \boxed{E = \int L d\omega} \longrightarrow \boxed{E = \pi L}
 \end{array}
 \right.$$

Para un DIFUSOR PERFECTO o LAMBERTIANO
(superficie elemental que presenta una Luminancia independiente de la dirección de observación)

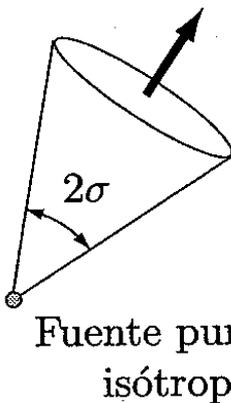
FLUJO EMITIDO POR UN DIFUSOR PERFECTO de superficie S y Luminancia uniforme L en un cono de apertura 2σ



$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega ds}$$

$$\Phi_{\sigma} = \pi L S \sin^2 \sigma$$

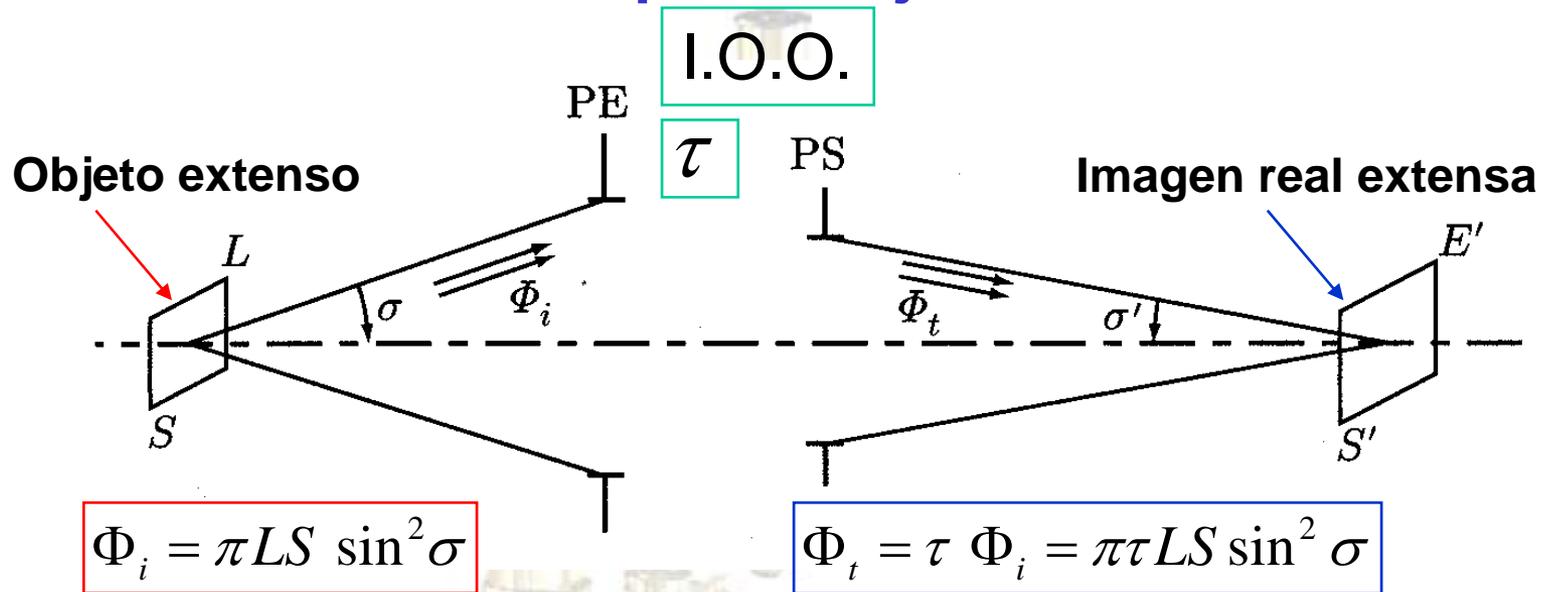
FLUJO EMITIDO POR UNA FUENTE PUNTUAL en un cono de apertura 2σ



$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

$$\bar{\Phi}_{\sigma} = \pi I \sin^2 \sigma$$

3.3.- Iluminación de la imagen proporcionada por un Instrumento Óptico Objetivo

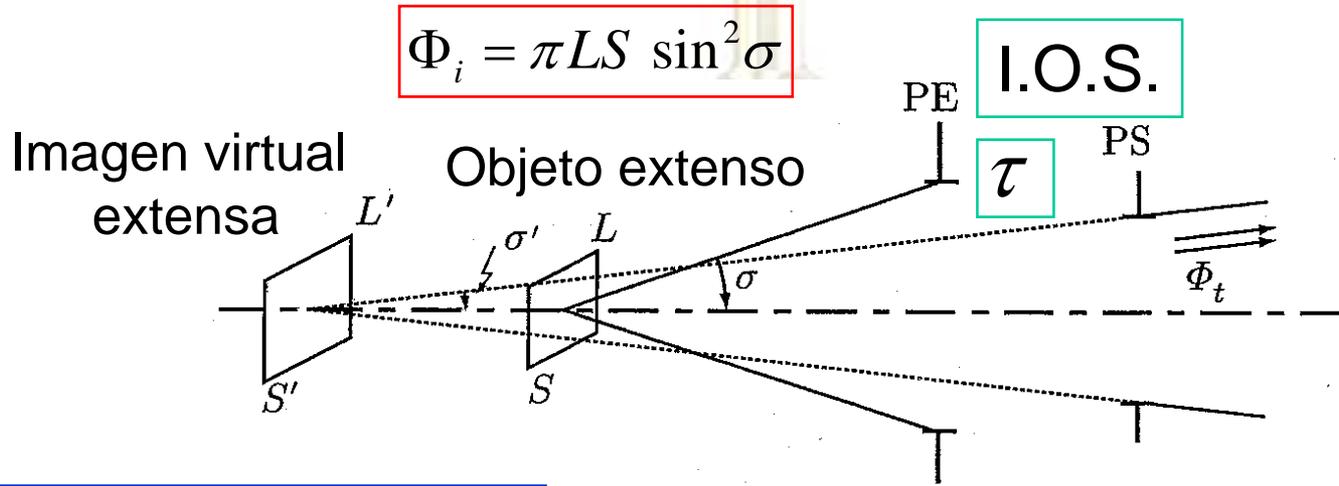


Iluminación recibida por la imagen

$$E' = \frac{\Phi_t}{S'}$$

$$E' = \pi \tau L \left(\frac{n'}{n} \right) \sin^2 \sigma'$$

3.4.- Luminancia aparente de la imagen proporcionada por un Instrumento Óptico Subjetivo



$$\Phi_i = \pi L S \sin^2 \sigma$$

$$\Phi_t = \tau \Phi_i = \pi \tau L S \sin^2 \sigma$$

Puede considerarse como emitido por la imagen virtual de **Luminancia aparente L'**

$$\Phi_t = \pi L' S' \sin^2 \sigma'$$

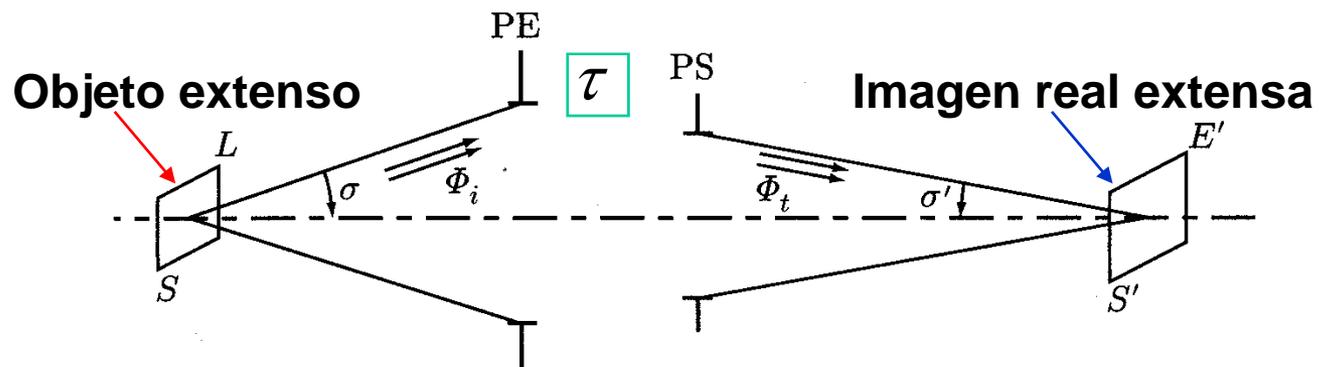
Luminancia aparente de la imagen

$$L' = \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \tau L$$

3.5.- Luminosidad o Claridad de un Instrumento Óptico

Rendimiento fotométrico del Instrumento

INSTRUMENTO ÓPTICO OBJETIVO



LUMINOSIDAD o CLARIDAD = $\frac{\text{Iluminación } E' \text{ de la imagen}}{\text{Luminancia } L \text{ del objeto}}$

$$C = \frac{E'}{L}$$

$$C = \pi \tau \sin^2 \sigma'$$

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto extenso

LUMINOSIDAD = $\frac{\text{Iluminación } E_r' \text{ observando con Instrumento}}{\text{Iluminación } E_A' \text{ observando en visión directa}}$

$$C_e = \frac{E_r'}{E_A'}$$

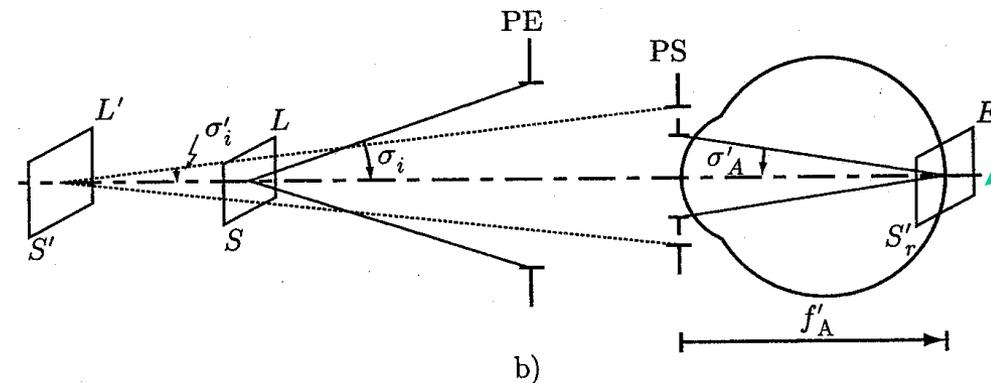
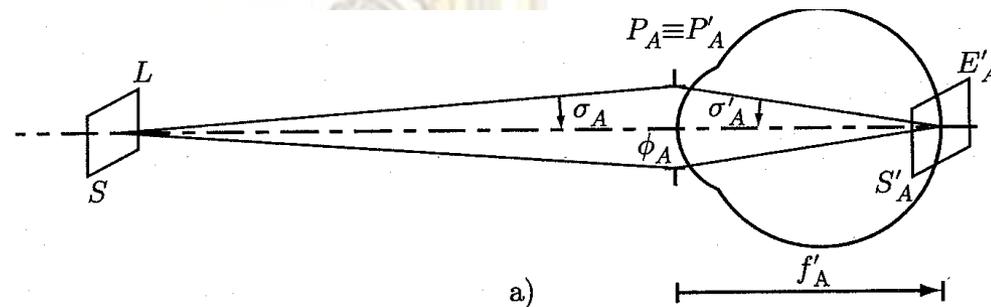
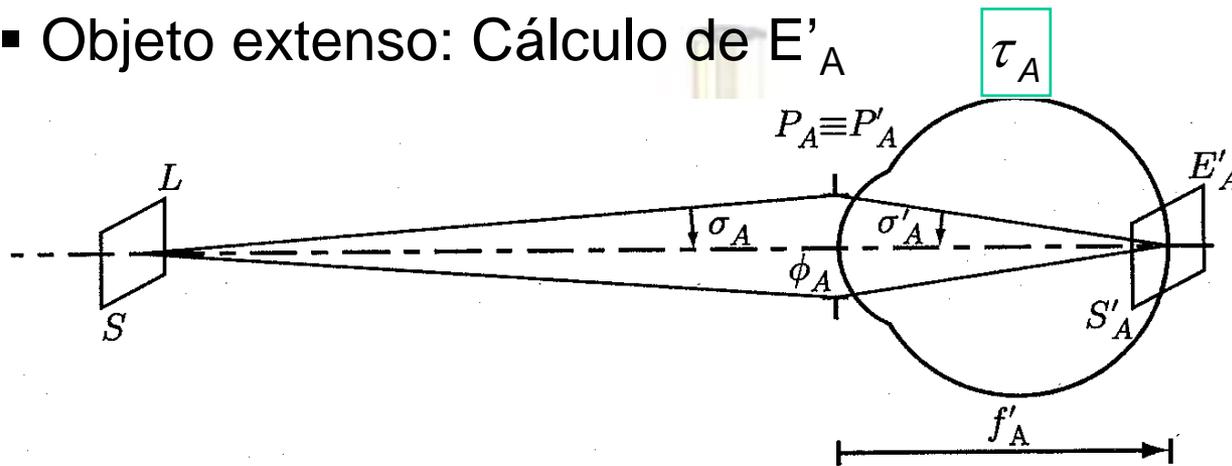


Imagen retiniana

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto extenso: Cálculo de E'_A



$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A}$$

Visión directa

$$E' = \pi \tau L \left(\frac{n'}{n} \right) \sin^2 \sigma'$$

$n = 1$ $n' = n_A$

$$\sin^2 \sigma'_A$$

$$E'_A = \pi \tau_A L n_A^2 \sin^2 \sigma'_A \cong KL \phi_A^2$$

$$K = \pi \tau_A \left(\frac{n_A}{2f'_A} \right)^2$$

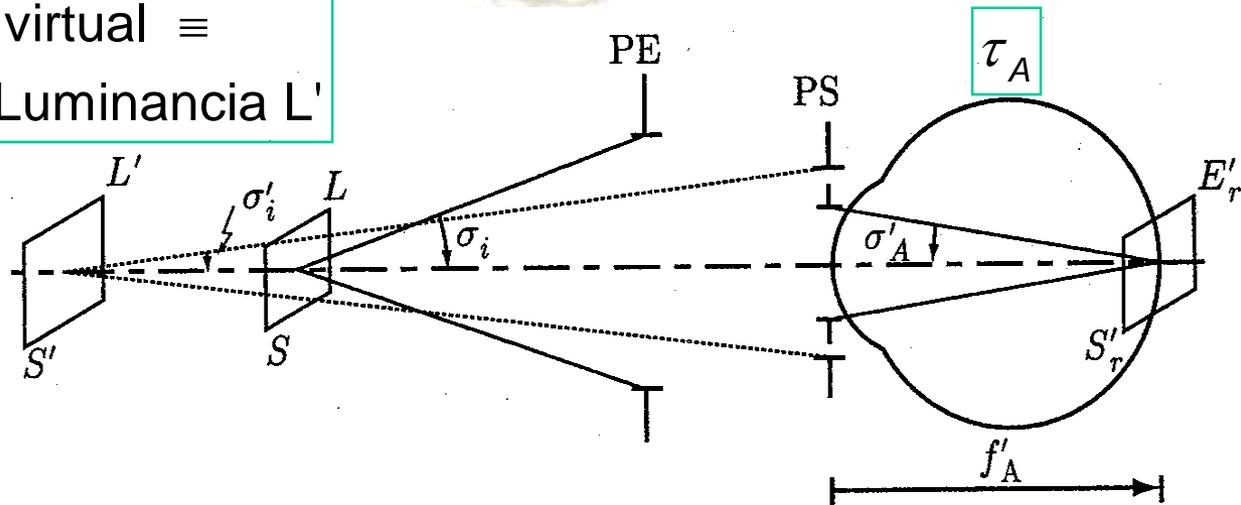
En el modelo de ojo reducido considerado, este factor es independiente del estado de acomodación del ojo

- Objeto extenso: Cálculo de E'_r

$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A}$$

Visión con Instrumento

Imagen virtual \equiv
"objeto" de Luminancia L'



Pupila de salida efectiva del sistema Instrumento-Ojo

$$\phi_{PS}^{ef} = \min \{ \phi_{PS} ; \phi_A \}$$

$$E'_r = KL' (\phi_{PS}^{ef})^2$$

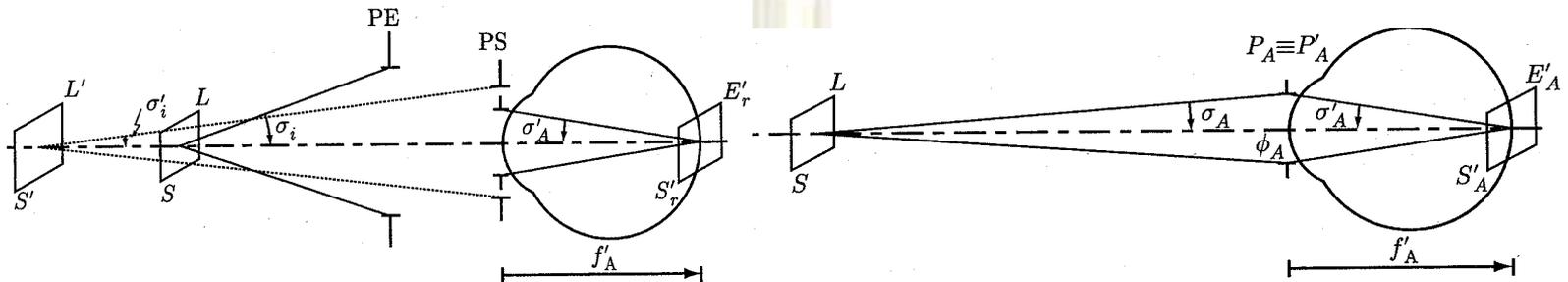
$$K = \pi \tau_A \left(\frac{n_A}{2f'_A} \right)^2$$

independiente del estado de acomodación del ojo

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto extenso

$$\text{LUMINOSIDAD} = \frac{\text{Iluminación } E'_r \text{ observando con Instrumento}}{\text{Iluminación } E'_A \text{ observando en visión directa}}$$



$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A} \left\{ \begin{array}{l} E'_r \\ E'_A \\ L' \end{array} \right.$$

$$C_e = \frac{E'_r}{E'_A} = \tau \left(\frac{\phi_{PS}^{ef}}{\phi_A} \right)^2$$

$$\phi_{PS} = \phi_A \rightarrow C_e = \tau \rightarrow E'_r \approx E'_A$$

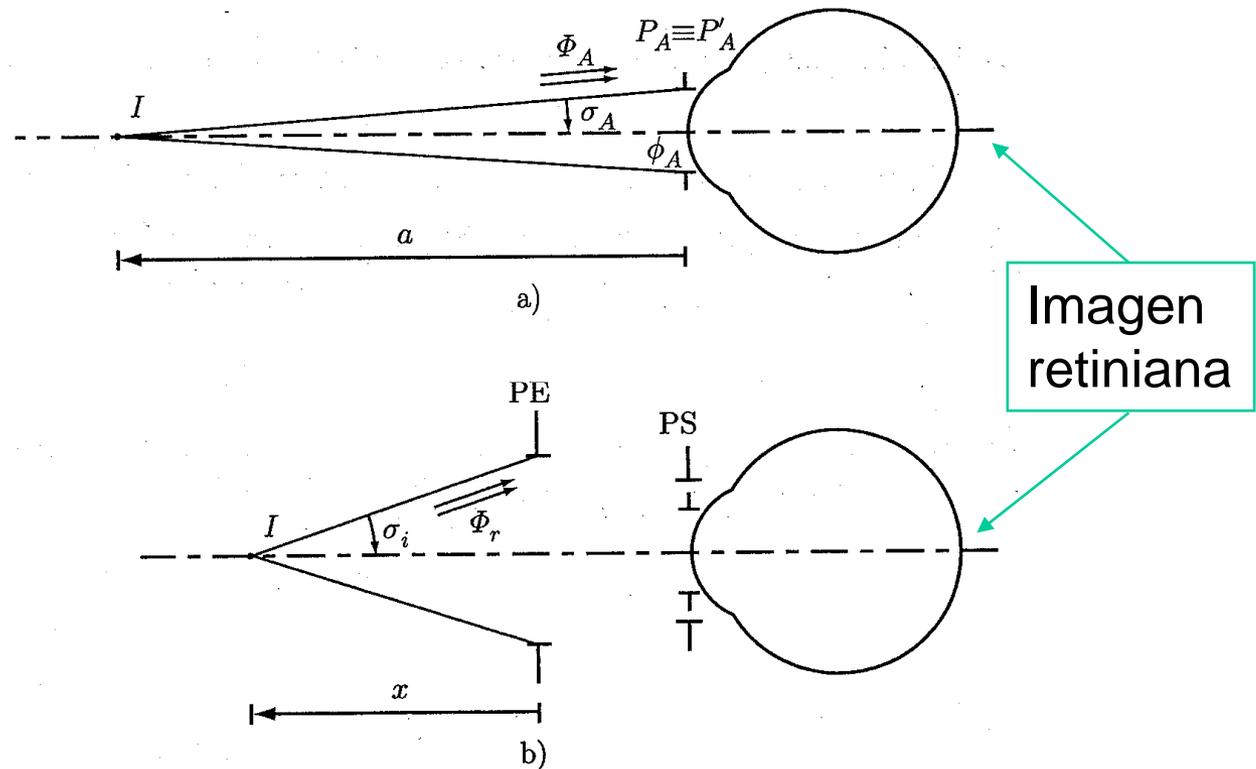
Instrumento muy luminoso

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto puntual (o de dimensiones tan reducidas que su imagen impresione un único fotorreceptor de la retina)

$$\text{LUMINOSIDAD} = \frac{\text{Flujo luminoso } \Phi_r' \text{ observando con Instrumento}}{\text{Flujo luminoso } \Phi_A' \text{ observando en visión directa}}$$

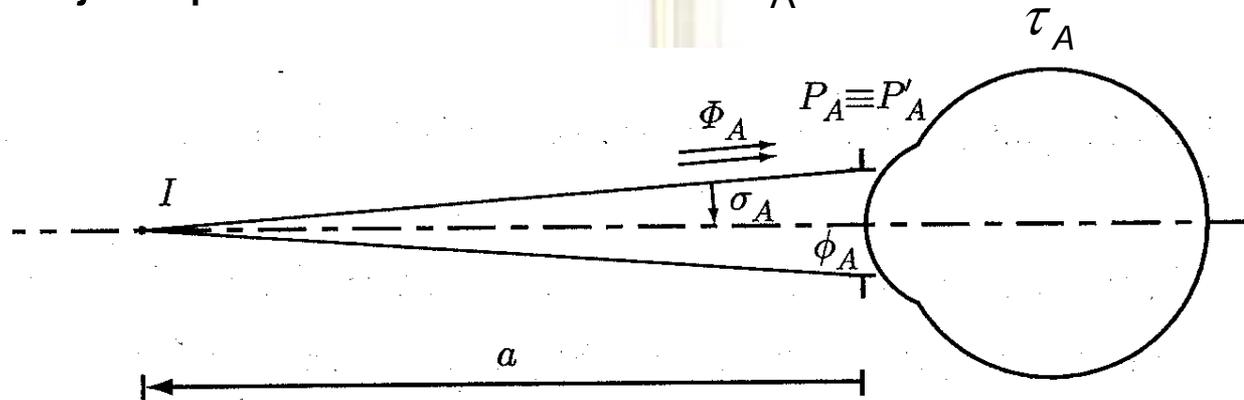
$$C_P = \frac{\Phi_r'}{\Phi_A'}$$



INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto puntual: Cálculo de Φ'_A

$$C_P = \frac{\Phi'_r}{\Phi'_A}$$



Flujo Luminoso incidente sobre el ojo

$$\Phi_A = \pi I \sin^2 \sigma_A \cong \pi I \left(\frac{\phi_A}{2a} \right)^2$$

Flujo luminoso que llega a la imagen retiniana

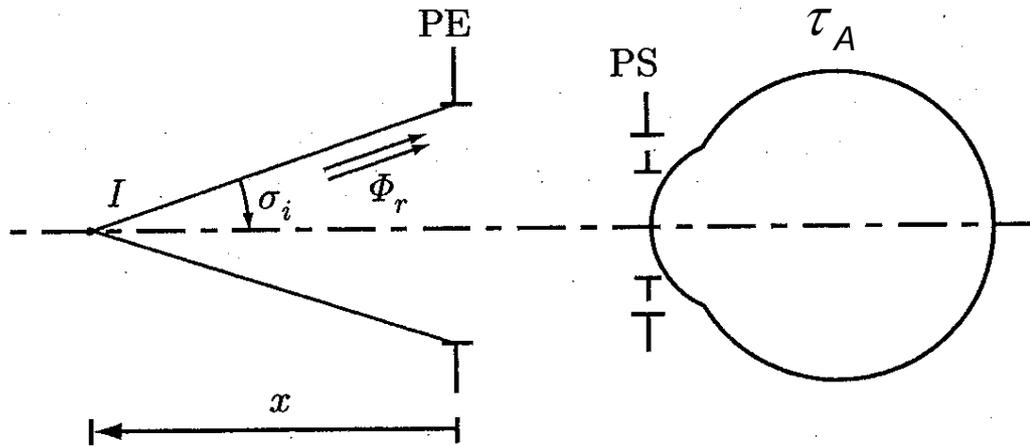
$$\Phi'_A = \tau_A \Phi_A = \pi \tau_A I \left(\frac{\phi_A}{2a} \right)^2$$

Depende de la distancia al objeto

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto puntual: Cálculo de Φ'_r

$$C_P = \frac{\Phi'_r}{\Phi'_A}$$



$$\phi_{PE}^{ef} = \min \{ \phi_{PE} ; \tilde{\phi}_A \}$$

$\tilde{\phi}_A$ es el homólogo de ϕ_A en el espacio objeto

Flujo Luminoso incidente sobre el ojo

$$\Phi_r = \pi I \sin^2 \sigma_i \cong \pi I \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{2x} \right)^2$$

Flujo luminoso que llega a la imagen retiniana

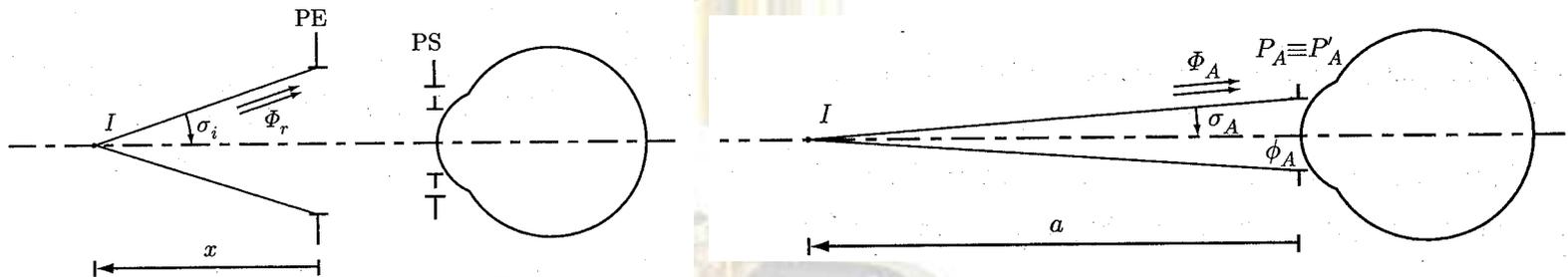
$$\Phi'_r = \tau \tau_A \Phi_r = \tau \tau_A \pi I \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{2x} \right)^2$$

Depende de la distancia al objeto

INSTRUMENTO ÓPTICO SUBJETIVO

- Objeto puntual (o de dimensiones tan reducidas que su imagen impresione un único fotorreceptor de la retina)

$$\text{LUMINOSIDAD} = \frac{\text{Flujo luminoso } \Phi_r' \text{ observando con Instrumento}}{\text{Flujo luminoso } \Phi_A' \text{ observando en visión directa}}$$



$$C_P = \frac{\Phi_r'}{\Phi_A'} = \tau \left(\frac{a}{x} \right)^2 \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{\phi_A} \right)^2 \left\{ \begin{array}{l} \text{Objeto muy alejado} \\ x \approx a \end{array} \right\} \rightarrow C_P = \tau \left(\frac{\phi_{PE}^{ef}}{\phi_A} \right)^2$$

En general $\phi_{PE}^{ef} \gg \phi_A \rightarrow$ La Luminosidad de un I.O.S, para el caso de objetos puntuales, es mucho mayor que la unidad