

# ERGONOMÍA DE LA VISIÓN

Según la Asociación Internacional de Ergonomía (IEA) :

*“la ergonomía es una disciplina científica de carácter multidisciplinar, que estudia las relaciones entre el hombre, la actividad que realiza y los elementos del sistema en que se halla inmerso, con la finalidad de disminuir las cargas físicas, mentales y psíquicas del individuo y de adecuar los productos, sistemas, puestos de trabajo y entornos a las características, limitaciones y necesidades de sus usuarios; buscando optimizar su eficacia, seguridad, confort y el rendimiento global del sistema”*

Los términos “Ergonomía” y “Factores Humanos” son sinónimos.

el uso del término “Factores Humanos” es más habitual en Estados Unidos



Ergonomía de  
la Visión



Factores  
humanos en la  
Visión

En radiometría se mide la energía de los campos de radiación electromagnética y se estudia la transferencia de energía desde una fuente, a través de un medio o la que incide sobre un detector

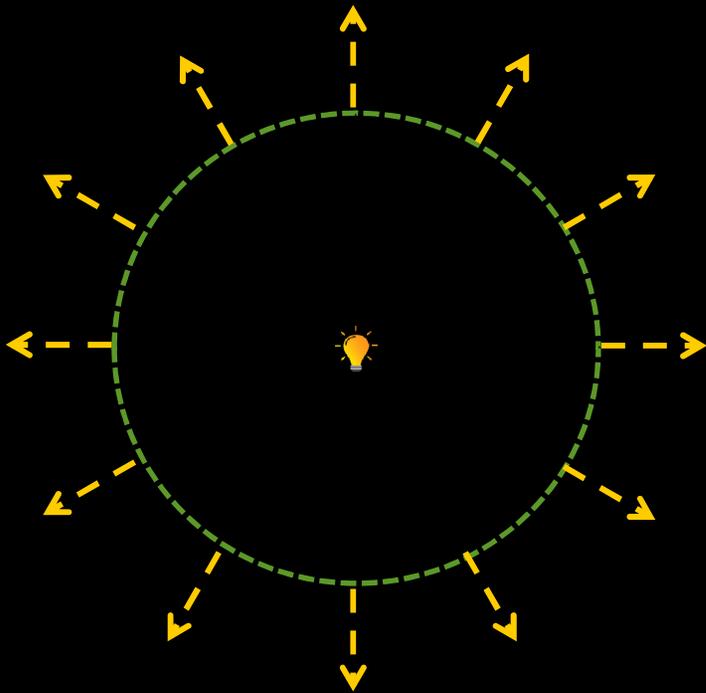
La Comisión Internacional de Iluminación (*Commission Internationale de l'Eclairage, CIE, International Commission on Illumination*) define las siguientes franjas espectrales en el rango óptico:

<b>Nombre</b>	<b>Rango de Longitudes de Onda</b>
<b>UV-C</b>	100 nm – 280 nm
<b>UV-B</b>	280 nm – 315 nm
<b>UV-A</b>	315 nm – 400 nm
<b>VIS (visible)</b>	(360-400) nm hasta (760-800) nm
<b>IR-A (infrarrojo cercano, <i>near IR, NIR</i>)</b>	780 nm – 1400 nm
<b>IR-B</b>	1.4 $\mu\text{m}$ – 3.0 $\mu\text{m}$
<b>IR-C (infrarrojo lejano, <i>far IR</i>)</b>	3.0 $\mu\text{m}$ – 1.0 mm

**Bibliografía:** "Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría", Emilio Gómez González.

ESI - Universidad de Sevilla 2006

$\Phi$  = Flujo de Energía Radiante  
(flujo luminoso en fotometría):



$\Phi \rightarrow$  cantidad de energía  
electromagnética que atraviesa  
una superficie cerrada por  
unidad de tiempo.

Se mide en Wats [W], en  
radiometría.

El Lumen [Lm] es la unidad  
fotométrica.

$\Phi_\lambda$  = Flujo radiante espectral

Es el flujo de radiación por unidad de longitud de onda entorno a la longitud de onda  $\lambda$

$$\Phi_\lambda = d\Phi/d\lambda$$

$$[\Phi] = [\text{W}/\text{nm}]$$

## Irradiancia (E) / Exitancia (M)

Es el flujo de energía que incide sobre un área elemental "dA" desde todas direcciones

ó, el flujo de energía que se emite desde un elemento de área "dA" en todas direcciones

$$E = d\Phi/dA$$

$$[E] = \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$



flujo de energía que proviene desde una hemiesfera que rodea al punto de interés

dA: elemento de área sobre el que se mide el flujo de energía

Se denomina Irradiancia ( $E$ ) al flujo radiante **incidente** por unidad de área, desde todas direcciones, sobre un punto  $P$  del espacio (en un ángulo sólido hemisférico)



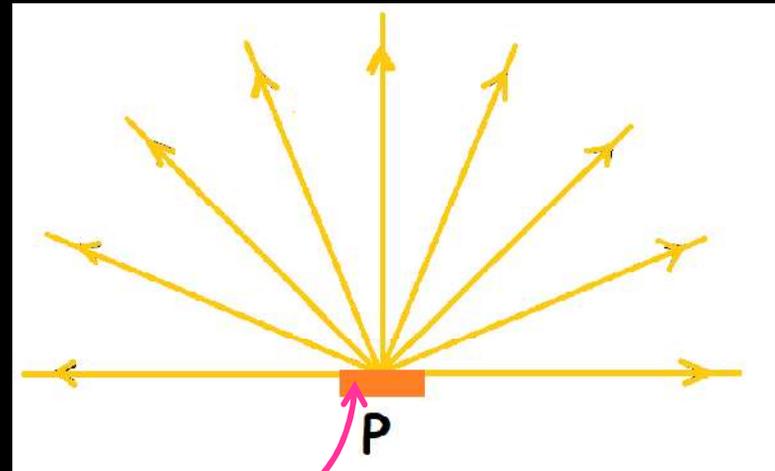
El sensor de este fotómetro tiene la forma de una semiesfera, la medida es el resultado de la energía radiante que incide sobre esta superficie



Exitancia o Emisividad ( $M$ )  $\rightarrow$  flujo radiante **emitido** por unidad de área desde un punto  $P$  dado en todas direcciones (en un ángulo sólido hemisférico).

En este caso el punto  $P$  puede pertenecer a una fuente de radiación o a una superficie reflectora o transmisora de radiación.

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



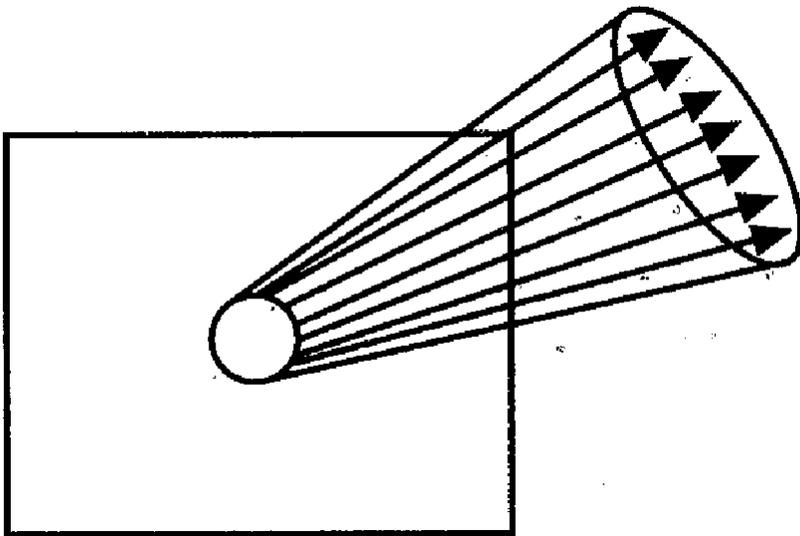
La Irradiancia/Exitancia es función de la posición específica del punto considerado sobre la superficie a menos que se pueda asumir que ésta es uniforme en la zona de la superficie emisora o irradiada considerada.

$dA$  elemento de área desde la que se emite el flujo de energía radiante designada como  $E$

## Radiancia, $L$

Es el flujo de energía emitido por unidad de ángulo sólido por unidad de área de fuente en la dirección  $\theta$ .

Se puede pensar como la energía que llega a un punto del espacio proveniente de una elemento,  $dA$ , de una fuente extensa en una dada dirección,  $\theta$ , en un cono de rayos definido por un elemento de ángulo sólido  $d\Omega$



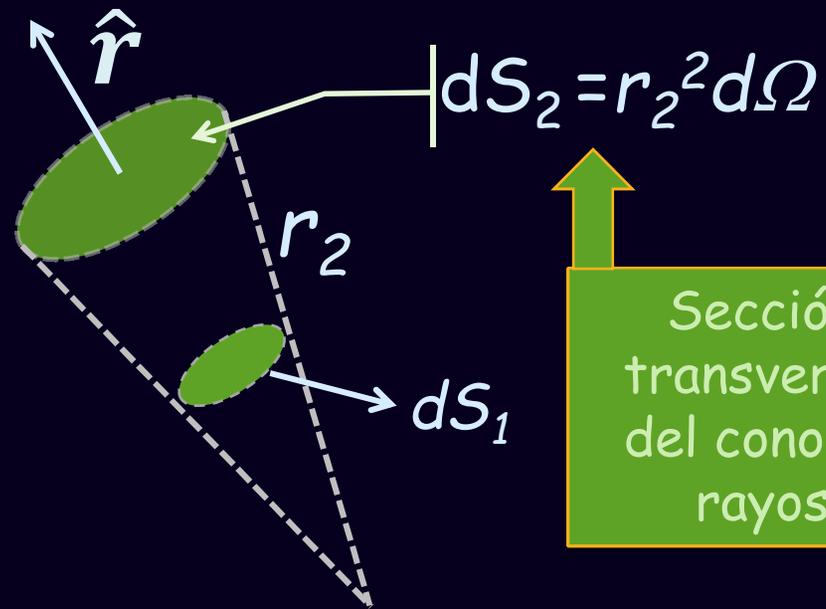
$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\Omega \cos \theta}$$

$$[L] = [W/m^2 \text{ sr}]$$

## Radiancia, $L$

La cantidad de flujo radiante contenido en un rayo se mantiene invariante a medida que se propaga en el espacio libre (medio no absorbente, no dispersivo, etc)

La cantidad neta de energía que atraviesa a la sección  $dS_1$  es igual a la cantidad neta de energía que atraviesa a  $dS_2$



Sección transversal del cono de rayos

$$[L]=[W/m^2 \text{ sr}]$$

Radiancia (L)

fuente

Haz contenido en un diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$

$dS$  sección transversal del haz

$\rho$

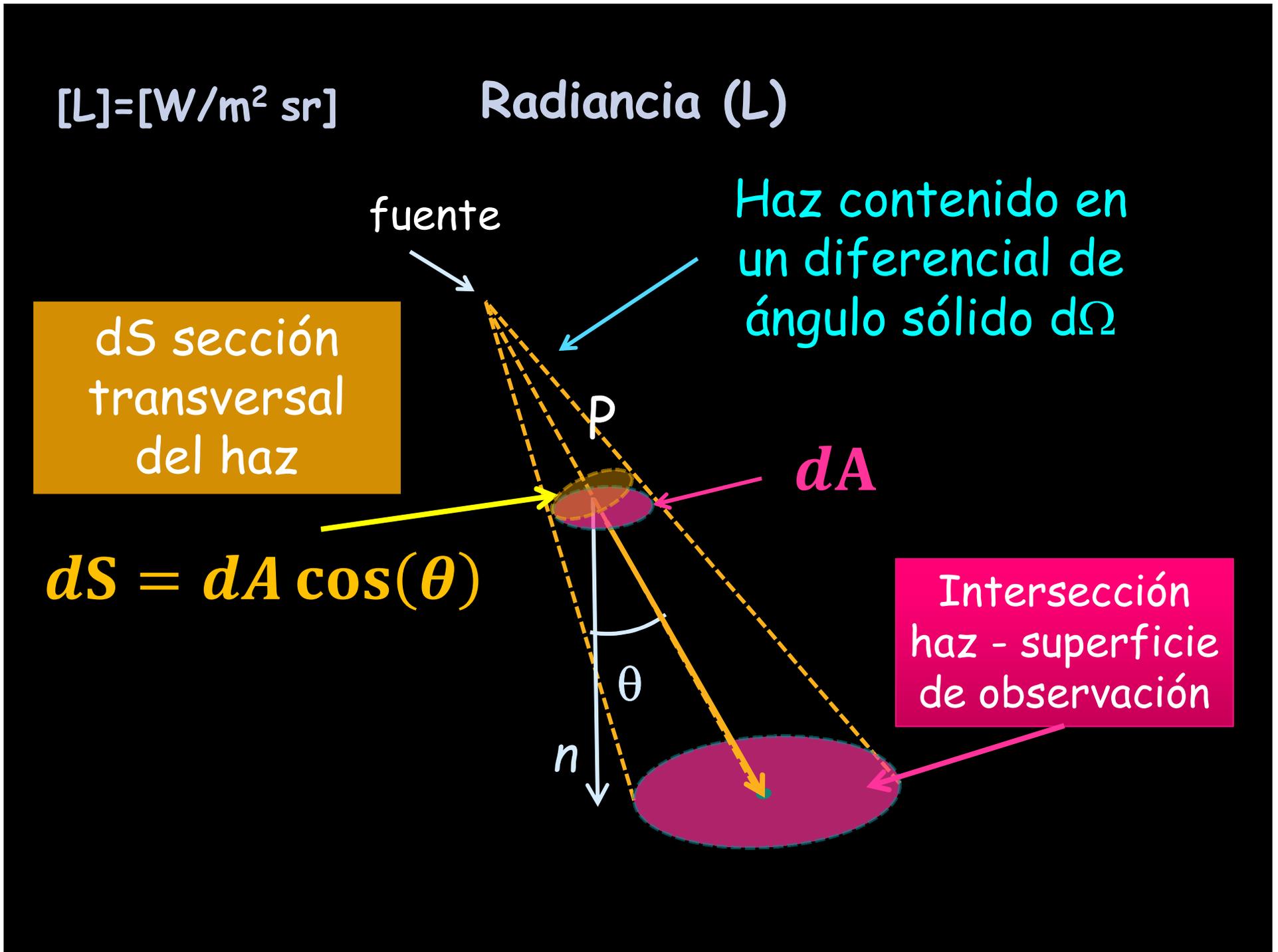
$dA$

$$dS = dA \cos(\theta)$$

Intersección haz - superficie de observación

$n$

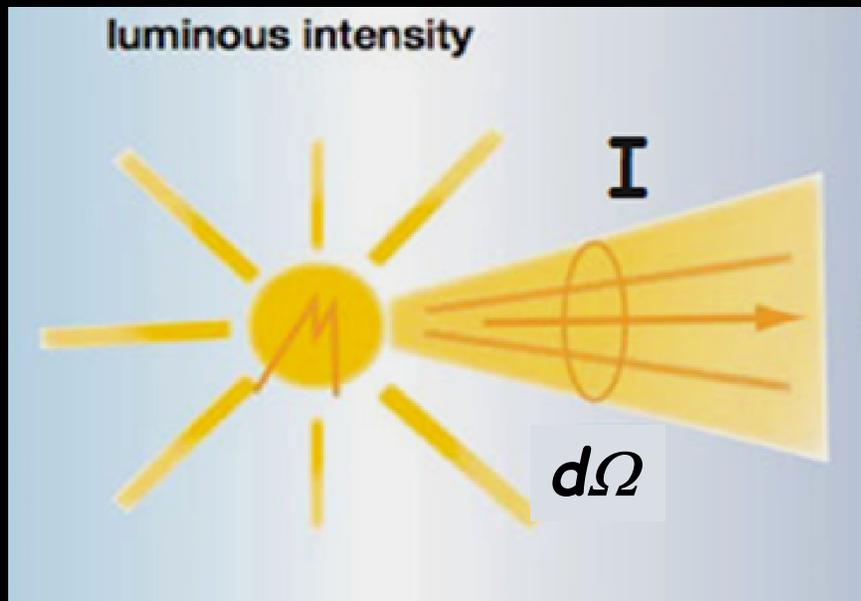
$\theta$



## Intensidad Radiante (I)

La intensidad (I) es la cantidad de flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido por **una fuente puntual** en una dada dirección,  $\theta$

$$[I] = [W/sr]$$



“I es la cantidad de flujo radiante de un rayo contenido en un elemento de ángulo sólido  $d\Omega$ ”

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

# Intensidad Radiante ( $I$ )

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

La Irradiancia

$$E = d\Phi/dA$$

cuenta la radiación emitida en todas las direcciones

Tomando en cuenta que

$$dS = dA \cos(\theta)$$

$$dS = r^2 d\Omega$$

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi \cos(\theta)}{dS}$$

$$E = \frac{d\Phi}{r^2 d\Omega} \cos(\theta)$$

$$E = \frac{I \cos(\theta)}{r^2}$$

Ley inversa del cuadrado

$$\text{Intensidad Radiante } I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

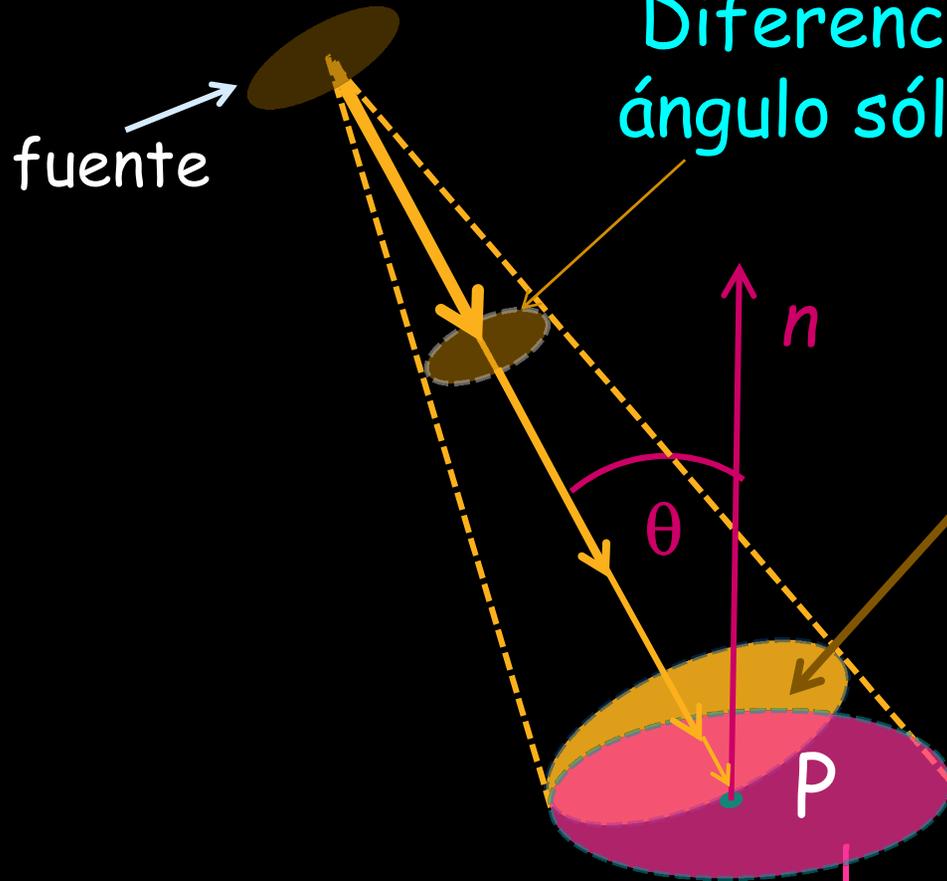
La Intensidad (I), densidad de flujo radiante **incidente** sobre, **emitido** por, o bien **que atraviesa**, un punto en una dada dirección del espacio y se puede relacionar con la exitancia (E)

$$E = \frac{I \cos(\theta)}{r^2}$$

Aquí I es la intensidad de la fuente

fuente

Diferencial de ángulo sólido  $d\Omega$



$dS$  = Sección transversal del haz

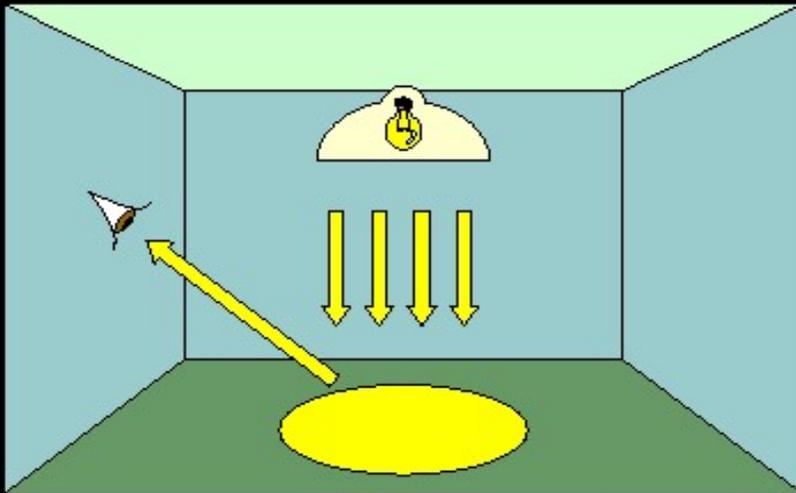
$$dS = dA \cos(\theta)$$

$dA$  = Área de observación

Radiancia  $[L]=[W/m^2 \text{ sr}]$

$$L = \frac{d^2 \Phi}{dA d\Omega \cos \theta}$$

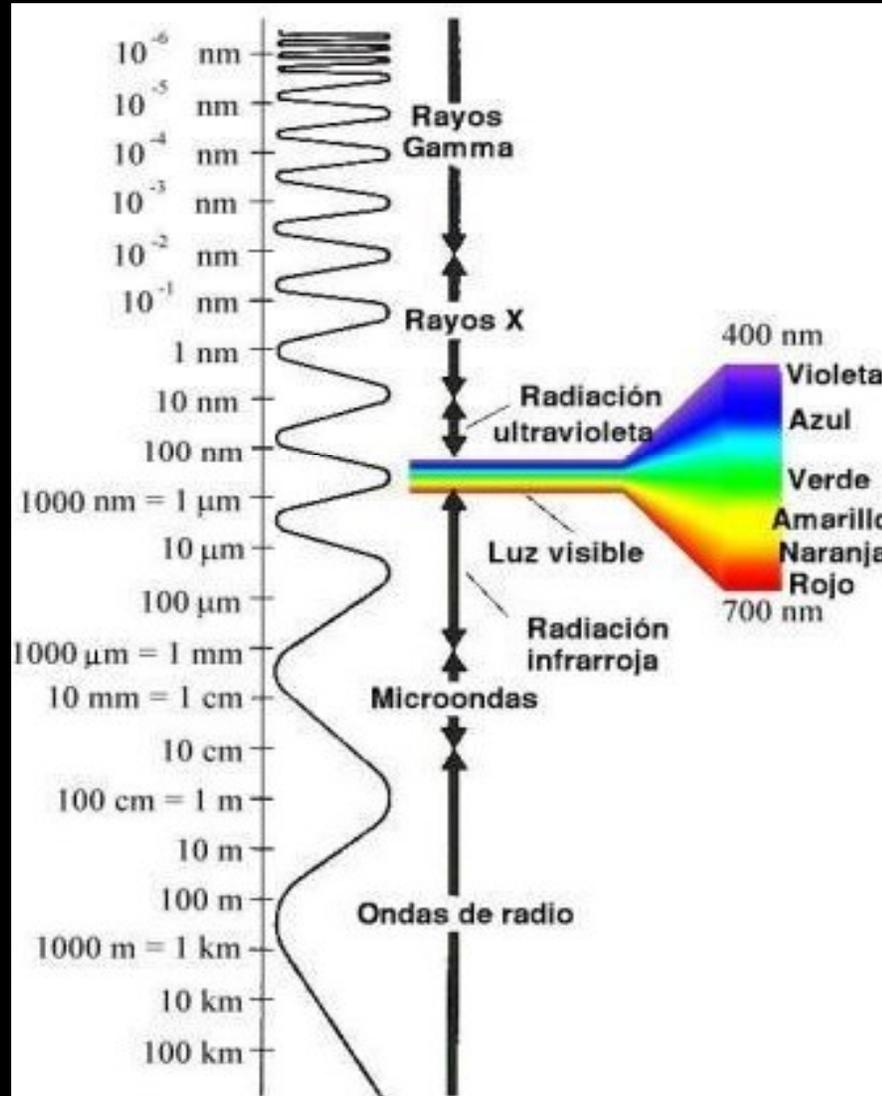
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$



$$L = \frac{dI}{dA \cos \theta}$$

$dI$  es el diferencial de intensidad de un elemento infinitesimal de fuente de área  $dA$

# Magnitudes y unidades de la luz



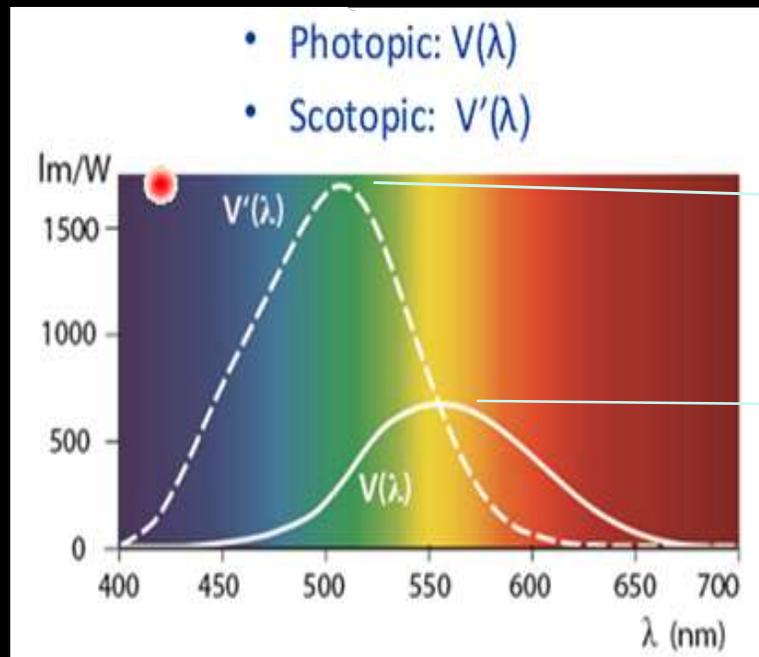
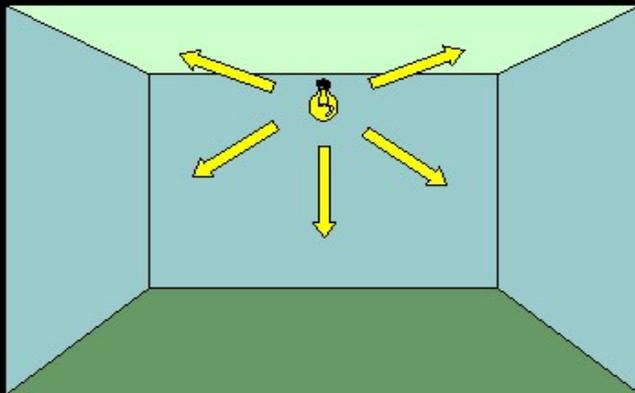
# Fotometría - Flujo Luminoso

*Flujo Luminoso  $F$  ( $\Phi$  en radiometría [W]): es la cantidad de energía luminosa que emite una fuente por unidad de tiempo [Lumen]*

$$F = 683,002 \int_{\lambda_{\text{visible}}} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

*Donde  $\Phi(\lambda) d\lambda$  es flujo espectral*

$$\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$$

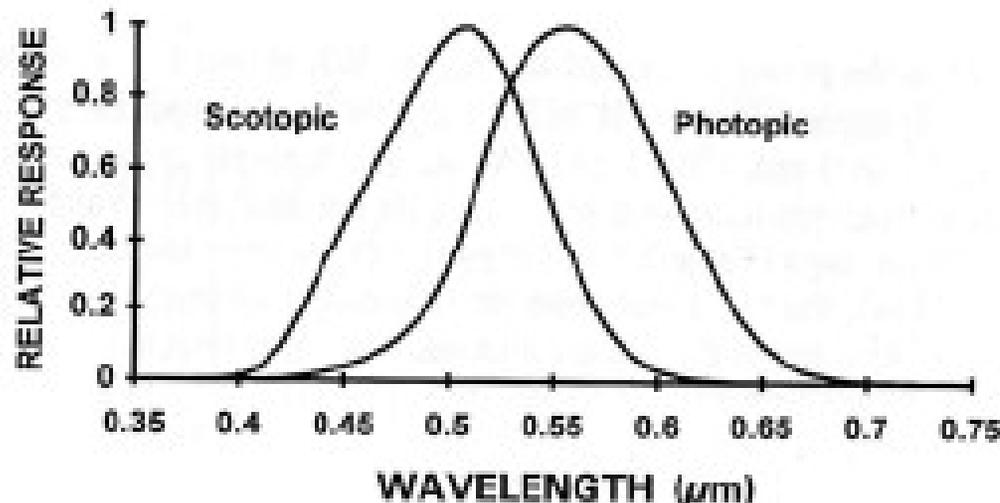


1699 [cd]

683 [cd]

## Fotometría. Respuestas fotópica y escotópica

- en condiciones de **alta luminosidad** (luz de día, niveles superiores a  $5 \cdot 10^{-2}$  lux), se denomina **curva de respuesta fotópica** (*photopic response*). Está determinada por la respuesta de las células tipo conos de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra en  $\lambda \approx 0.55 \mu\text{m} \approx 550 \text{ nm}$  (correspondiente, aproximadamente, al pico de emisión del sol)
- en condiciones de **baja luminosidad** (nocturna, niveles inferiores a  $5 \cdot 10^{-3}$  lux), se denomina **curva de respuesta escotópica** (*scotopic response*). Está determinada por la respuesta de las células tipo bastones de la retina y es una curva cuyo máximo se encuentra en  $\lambda \approx 0.505 \mu\text{m} \approx 505 \text{ nm}$  (desplazado hacia longitudes de onda menores)



Curvas de respuesta relativas fotópica y escotópica del ojo humano.

- en un amplio rango de condiciones intermedias, ambos receptores (conos y bastones) responden a la luz incidente, denominándose **respuesta mesópica** (*mesopic response*)

Los colores del espectro visible se definen según su percepción como:

Púrpura: 360 nm – 450 nm  
Azul: 450 nm – 500 nm  
Verde: 500 nm – 570 nm  
Amarillo: 570 nm – 591 nm  
Naranja: 591 nm – 610 nm  
Rojo: 610 nm – 830 nm

# Fotometría - Intensidad Luminosa

$$I_V = \frac{dF}{d\Omega}$$

Intensidad luminosa espectral

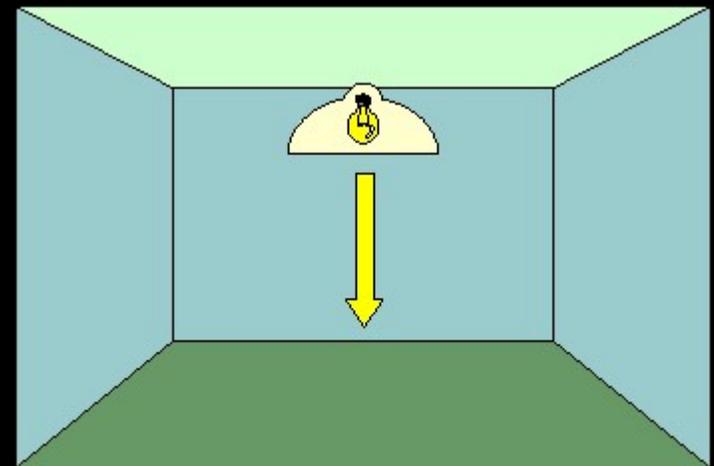
$$I_V = K \int_{\text{visible}} I(\lambda)V(\lambda) d\lambda$$

*cd = lm/sr*

*1729 Pierre Bouguer*

*Hoy 1cd=1/683W/sr (550nm)*

luminous intensity



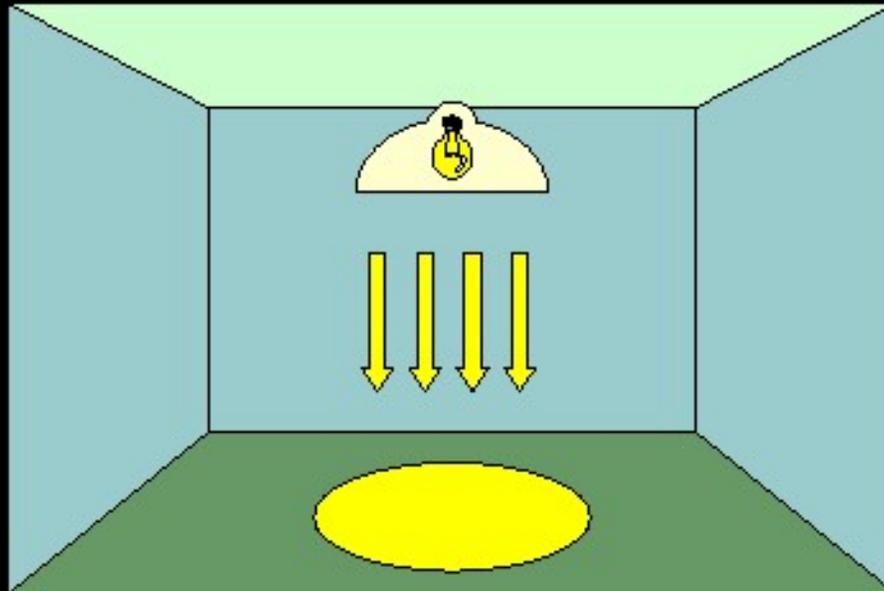


# Fotometría - Iluminancia

*Iluminancia  $E$ : es la porción del flujo que incide sobre una superficie.  $[lux] = [lumen]/[m^2]$*

$$E_v = \frac{dF}{dS}$$

$$lux = lm/m^2$$



# Fotometría - Luminancia

*Luminancia  $L$ : es la luz que refleja la superficie en la dirección de nuestros ojos. [cd/m<sup>2</sup>]*

$$L_v = \frac{d^2 F}{dS d\Omega \cos \theta}$$

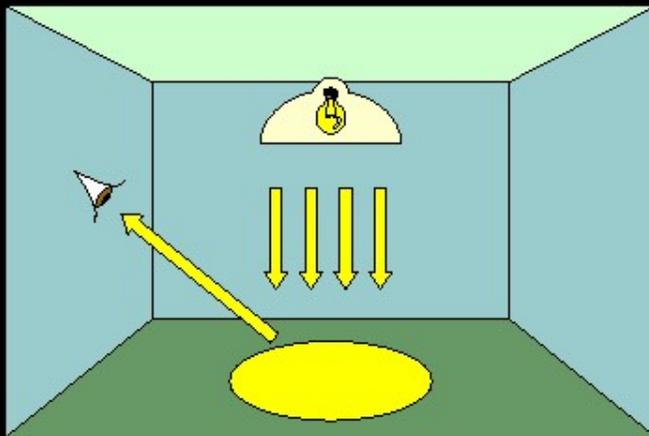
$L_v$  es la luminancia medida en candela / metro<sup>2</sup>.

$F$  es el flujo luminoso en lumenes.

$dS$  es un elemento de superficie considerado en m<sup>2</sup>.

$d\Omega$  es un elemento de ángulo sólido en estereoradianes.

$\theta$  es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección considerada.



# Magnitudes y unidades de la luz

## Resumiendo

- *Flujo Luminoso  $\Phi$ : es la cantidad de energía luminosa que emite una fuente [Lumen]*
- *Iluminancia  $E$ : es la porción del flujo que incide sobre una superficie. [lux] = [lumen]/[m<sup>2</sup>]*
- *Luminancia  $L$ : es la luz que refleja la superficie en la dirección de nuestros ojos. [cd/m<sup>2</sup>]*
- *Iluminancia retiniana: es la cantidad de luz que llega a la retina. La misma está controlada por el tamaño de la pupila [troland]*

<b>Magnitud Radiométrica</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Magnitud Fotométrica</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
<b>Flujo Radiante</b>	$\Phi_e$	W	<b>Flujo Luminoso</b>	$\Phi_v$	lumen (lm)
<b>Intensidad Radiante</b>	$I_e$	W/sr	<b>Intensidad Luminosa</b>	$I_v$	lm/sr = candela (cd)
<b>Irradiancia</b>	$E_e$	W/m <sup>2</sup>	<b>Iluminancia</b>	$E_v$	lm/m <sup>2</sup> = lux (lx)
<b>Radiancia</b>	$L_e$	W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	<b>Luminancia</b>	$L_v$	lm m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> =cd/m <sup>2</sup>

# Magnitudes fotométricas estándar

Definición	Símbolo	Unidades SI y MKS	Unidades CGS	Unidades S. Inglés
<b>Energía Luminosa</b>	$Q_v$	<b>Talbot (T)</b>	Talbot (T)	Talbot (T)
<b>Flujo Luminoso</b>	$\Phi_v$	<b>Lumen (lm)</b>	Lumen (lm)	Lumen (lm)
<b>Intensidad Luminosa</b>	$I_v$	<b>Candela (cd)</b> lumen/sr	Candela (cd) lumen/sr	Candela (cd) lumen/sr
<b>Exitancia Luminosa</b> (desde una fuente) También: <b>emitancia luminosa</b>	$M_v$	<b>Lux (lx) =</b> lumen/m <sup>2</sup>	Phot (ph) lumen/cm <sup>2</sup>	Footcandle (fc) lumen/ft <sup>2</sup>
<b>Incidencia Luminosa</b> (sobre un objetivo) También: <b>iluminancia</b>	$E_v$	<b>Lux (lx) =</b> lumen/m <sup>2</sup>	Phot (ph) lumen/cm <sup>2</sup>	Footcandle (fc) lumen/ft <sup>2</sup>
<b>Esterancia luminosa</b> También: <b>brillo, luminancia</b>	$L_v$	<b>Nit =</b> lumen/(m <sup>2</sup> · sr) = cd/m <sup>2</sup>	Stilb (sb) cd/cm <sup>2</sup>	Candela/ft <sup>2</sup>

### Valores típicos de algunas magnitudes radiométricas [3]

Magnitud	Valor
Flujo radiante total de una bombilla incandescente de tungsteno, de 100 W	82 W
Flujo radiante de salida de un láser de He-Ne de media potencia	5 mW
Flujo radiante de una lámpara fluorescente de 40 W	23.2 W
Irradiancia solar fuera de la atmósfera, en posición media de la órbita terrestre	1367 W/m <sup>2</sup>
Irradiancia solar directa en la superficie de la tierra, a mediodía, en el sudeste de USA, en invierno, cielo claro	852 W/m <sup>2</sup>
Radiancia del sol en su superficie	$2.3 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
Radiancia aparente del sol desde la superficie de la tierra	$1.4 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

## Ejercicio 1: ángulo sólido subtendido por una lente desde su foco

Obtener la relación entre el ángulo sólido  $\Omega$  subtendido por un círculo C de radio  $r$  situado a una distancia  $f$  de un punto P (en un plano perpendicular a la dirección que une el punto con el centro del círculo) y el semiángulo  $\alpha$  del cono definido por P y C.

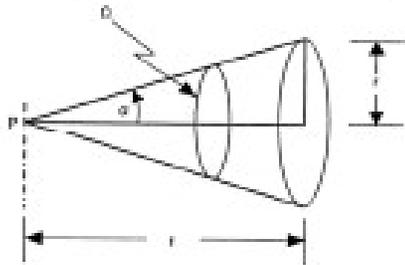


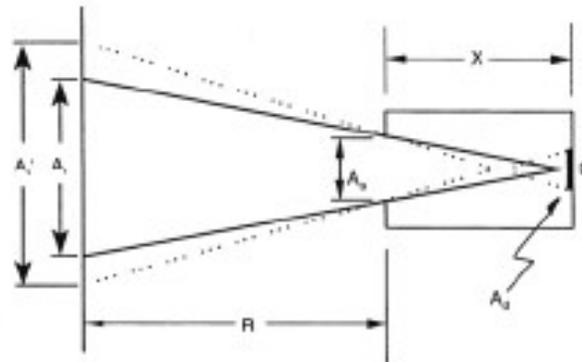
Figura 6. Geometría del ángulo sólido subtendido por el círculo C desde P.

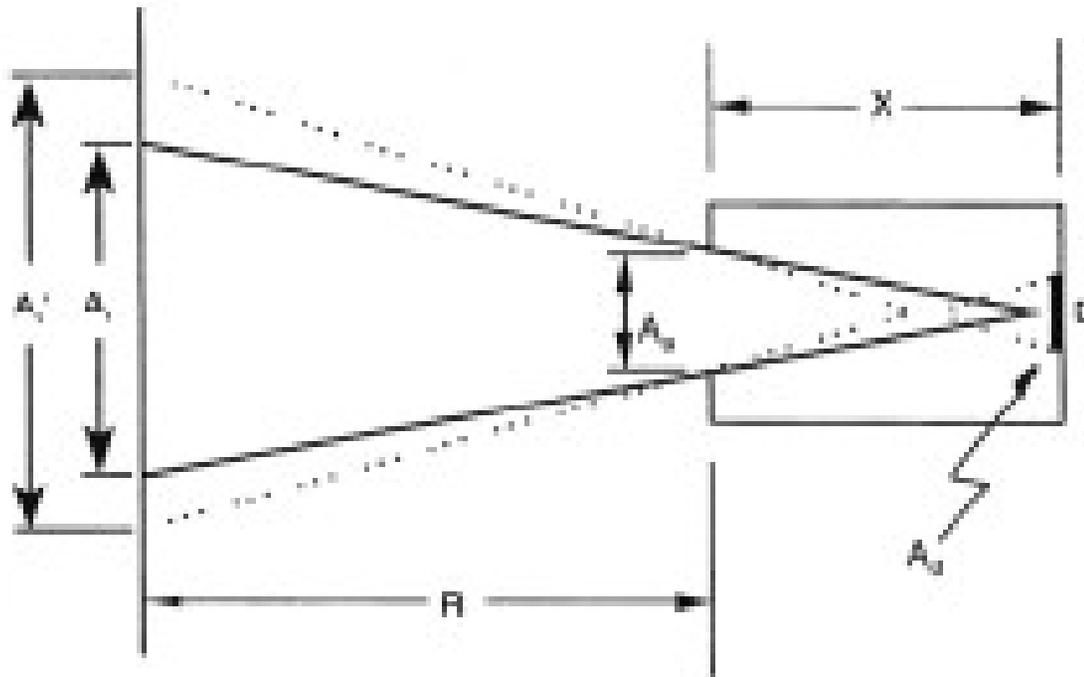
La solución es  $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$

Este resultado es muy importante porque corresponde a una situación equivalente a una lente radialmente simétrica con una apertura circular centrada (en el eje) cuyo radio subtende el ángulo  $\alpha$  respecto al eje de la lente en su punto focal.

## Ejercicio 2 Medidor de radiancia

El flujo radiante recibido en un detector D de área  $A_d$ , situado en un extremo de un tubo negro (de paredes perfectamente absorbentes) de longitud  $X$  y sección  $A_s$ , apuntado hacia un emisor plano situado a una distancia  $R$  del tubo, es  $\Phi_d$ . Suponiendo que  $A_d \ll X^2$ ,  $A_s \ll X^2$ ,  $A_s \ll R^2$ , obtener la radiancia media del emisor. Este esquema corresponde a los **medidores de radiancia** usados habitualmente.





Dividiendo el flujo  $\Phi_d$  entre el área  $A_d$  del detector y el ángulo sólido del área de la apertura de entrada  $A_1$  en el centro del detector, tenemos la radiancia media en la apertura, estando calculado este valor medio sobre el ángulo sólido subtendido por el centro del detector, denominado **campo de visión** (*field of view*) desde el centro del detector:

$$L = \frac{\Phi_d}{A_d \frac{A_1}{X^2}} = \frac{\Phi_d X^2}{A_d A_1}$$

donde se ha utilizado que el área de la esfera de radio  $X$  limitada por la apertura circular de detector es, en la aproximación de ángulo pequeño considerada, igual al área plana de la apertura  $A_1$ .