

# Radiación en la atmósfera

## I - Conceptos básicos para el estudio de la radiación en la atmósfera

Agustín Laguarda  
laguarda@fing.edu.uy

Universidad de la República

2023



- 1 Introducción
- 2 Espectro electromagnético
- 3 Ángulo sólido
- 4 Cantidades radiométricas

- 1 **Introducción**
- 2 Espectro electromagnético
- 3 Ángulo sólido
- 4 Cantidades radiométricas

¿Qué es la radiación?

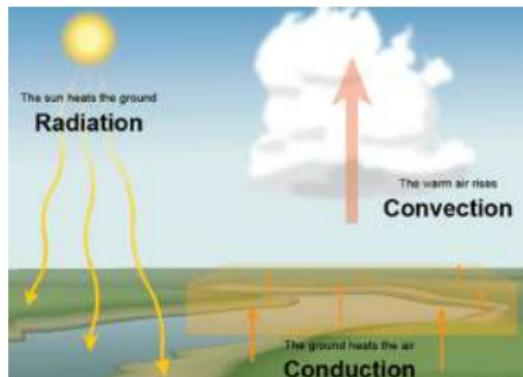
- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas

¿Qué es la radiación?

- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas
- A veces se refiere a *fotones* (dualidad onda-partícula)

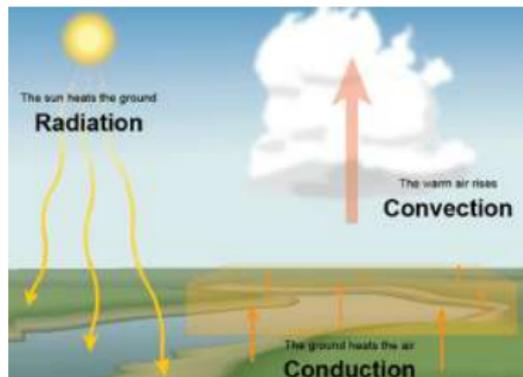
¿Qué es la radiación?

- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas
- A veces se refiere a *fotones* (dualidad onda-partícula)
- Es uno de los tres mecanismos de transferencia de calor



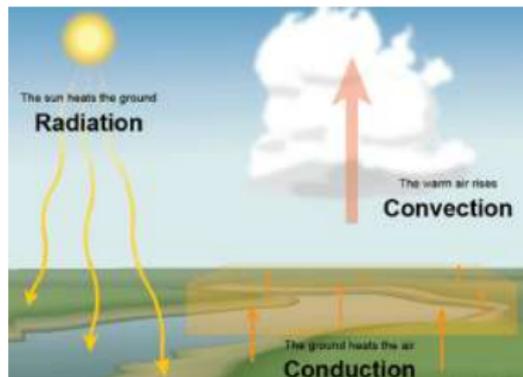
## ¿Qué es la radiación?

- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas
- A veces se refiere a *fotones* (dualidad onda-partícula)
- Es uno de los tres mecanismos de transferencia de calor
  - Conducción: Contacto entre moléculas



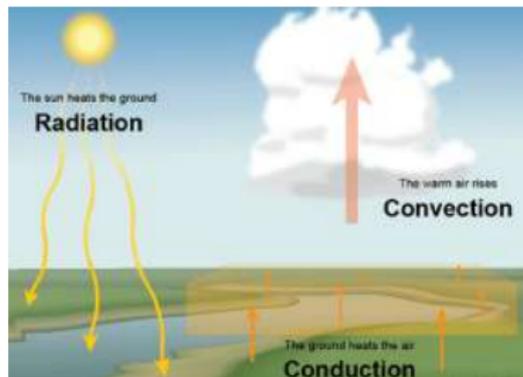
## ¿Qué es la radiación?

- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas
- A veces se refiere a *fotones* (dualidad onda-partícula)
- Es uno de los tres mecanismos de transferencia de calor
  - Conducción: Contacto entre moléculas
  - Convección: Movimiento de un fluido



## ¿Qué es la radiación?

- Transferencia de energía a través de la propagación de ondas electromagnéticas
- A veces se refiere a *fotones* (dualidad onda-partícula)
- Es uno de los tres mecanismos de transferencia de calor
  - Conducción: Contacto entre moléculas
  - Convección: Movimiento de un fluido
  - **Radiación: Ondas electromagnéticas**



## Algunas propiedades de la radiación

- Puede transmitir energía a través del vacío. También a través de medios materiales.

## Algunas propiedades de la radiación

- Puede transmitir energía a través del vacío. También a través de medios materiales.
- Su velocidad de propagación en el vacío es  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s , mientras que en el aire es un 99.97% de esa velocidad.

## Algunas propiedades de la radiación

- Puede transmitir energía a través del vacío. También a través de medios materiales.
- Su velocidad de propagación en el vacío es  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s , mientras que en el aire es un 99.97% de esa velocidad.
- Todos los objetos con temperatura mayor a 0 K emiten radiación.

## Algunas propiedades de la radiación

- Puede transmitir energía a través del vacío. También a través de medios materiales.
- Su velocidad de propagación en el vacío es  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s , mientras que en el aire es un 99.97% de esa velocidad.
- Todos los objetos con temperatura mayor a 0 K emiten radiación.
- Objetos más calientes emiten mayor radiación (para toda long. de onda) que objetos más fríos.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.

Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:

## Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:
  - Monitoreo ambiental (composición de la atmósfera, cambio climático, calidad de agua, cobertura vegetal, erosión de suelos, contaminación del aire, etc.)

## Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:
  - Monitoreo ambiental (composición de la atmósfera, cambio climático, calidad de agua, cobertura vegetal, erosión de suelos, contaminación del aire, etc.)
  - Estudio de suelos (Agricultura, Cartografía)

## Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:
  - Monitoreo ambiental (composición de la atmósfera, cambio climático, calidad de agua, cobertura vegetal, erosión de suelos, contaminación del aire, etc.)
  - Estudio de suelos (Agricultura, Cartografía)
  - Meteorología y climatología (predecir tiempo y clima, patrones climáticos, detección de fenómenos atmosféricos)

## Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:
  - Monitoreo ambiental (composición de la atmósfera, cambio climático, calidad de agua, cobertura vegetal, erosión de suelos, contaminación del aire, etc.)
  - Estudio de suelos (Agricultura, Cartografía)
  - Meteorología y climatología (predecir tiempo y clima, patrones climáticos, detección de fenómenos atmosféricos)
  - Ciencias oceanográficas (estado de océanos, salinidad, presencia de algas, dinámica oceánica)

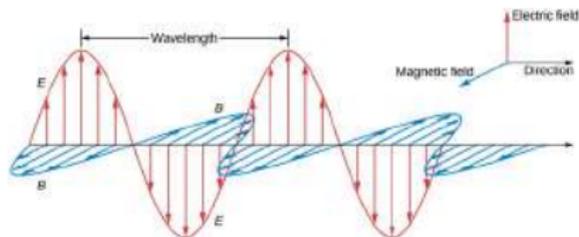
## Relevancia para las ciencias atmosféricas:

- La radiación es el único proceso de intercambio de energía que opera de forma continua a través de la atmósfera y por largas distancias.
- El calentamiento (y enfriamiento) por radiación depende fuertemente de procesos no locales. Esto permite aplicaciones como por ejemplo el sensado remoto.
- La mayoría de la radiación en la atmósfera es de origen solar.
- Esta es el forzante del sistema climático. La absorción de esta radiación por la atmósfera (y la superficie) es la responsable de mantener la estructura térmica del planeta. Esto incluye los gradientes (cambios con la distancia) de temperatura que generan la circulación atmosférica.
- También es importante la radiación térmica, emitida por la Tierra y por la atmósfera.
- Esta radiación es relevante para el efecto invernadero, permitiendo temperaturas más cálidas en el planeta.
- Las técnicas de sensado remoto miden estas radiaciones para diversos propósitos:
  - Monitoreo ambiental (composición de la atmósfera, cambio climático, calidad de agua, cobertura vegetal, erosión de suelos, contaminación del aire, etc.)
  - Estudio de suelos (Agricultura, Cartografía)
  - Meteorología y climatología (predecir tiempo y clima, patrones climáticos, detección de fenómenos atmosféricos)
  - Ciencias oceanográficas (estado de océanos, salinidad, presencia de algas, dinámica oceánica)
  - Y más! (Exploración espacial, respuesta a desastres, etc.)

- 1 Introducción
- 2 Espectro electromagnético**
- 3 Ángulo sólido
- 4 Cantidades radiométricas

# Radiación electromagnética

La radiación es la transferencia de energía que se propaga en el espacio mediante ondas electromagnéticas (combinación oscilante de campos eléctricos y magnéticos)



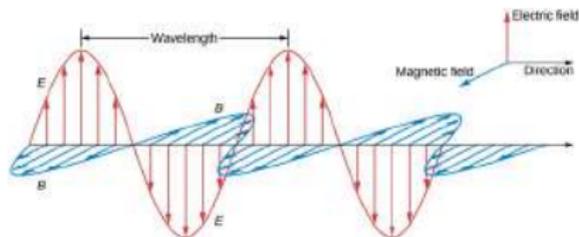
- Una haz monocromático de radiación pueden describirse en función de su longitud de onda,  $\lambda$ , o de su frecuencia,  $\nu$  (en 1/s o Hz), verificándose

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$



# Radiación electromagnética

La radiación es la transferencia de energía que se propaga en el espacio mediante ondas electromagnéticas (combinación oscilante de campos eléctricos y magnéticos)



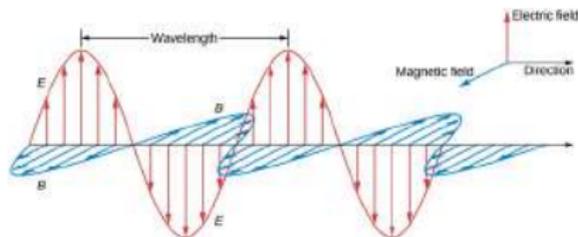
- Una haz monocromático de radiación pueden describirse en función de su longitud de onda,  $\lambda$ , o de su frecuencia,  $\nu$  (en 1/s o Hz), verificándose

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

- La radiación se propaga como ondas de diferentes longitudes (o frecuencias).
- Longitudes de onda menores (mayores frecs.) se asocian a radiación de mayor energía que long. de onda mayores (menores frecs.)

# Radiación electromagnética

La radiación es la transferencia de energía que se propaga en el espacio mediante ondas electromagnéticas (combinación oscilante de campos eléctricos y magnéticos)



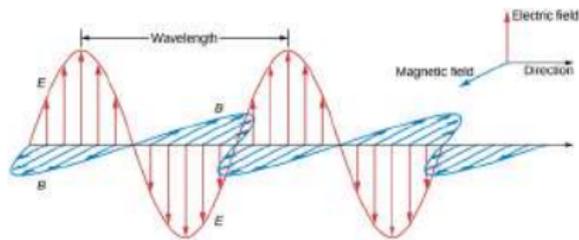
- Una haz monocromático de radiación pueden describirse en función de su longitud de onda,  $\lambda$ , o de su frecuencia,  $\nu$  (en 1/s o Hz), verificándose

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

- La radiación se propaga como ondas de diferentes longitudes (o frecuencias).
- Longitudes de onda menores (mayores freqs.) se asocian a radiación de mayor energía que long. de onda mayores (menores freqs.)
- Espectro electromagnético denota la distribución de las ondas electromagnéticas en términos de  $\lambda$  o  $\nu$ .

# Radiación electromagnética

La radiación es la transferencia de energía que se propaga en el espacio mediante ondas electromagnéticas (combinación oscilante de campos eléctricos y magnéticos)

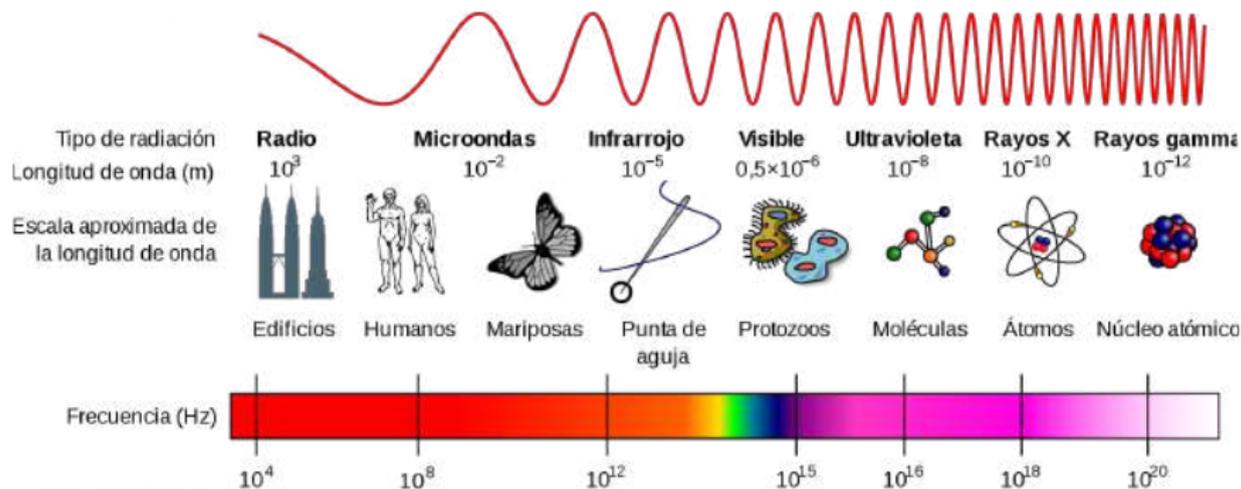


- Una haz monocromático de radiación pueden describirse en función de su longitud de onda,  $\lambda$ , o de su frecuencia,  $\nu$  (en 1/s o Hz), verificándose

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

- La radiación se propaga como ondas de diferentes longitudes (o frecuencias).
- Longitudes de onda menores (mayores freqs.) se asocian a radiación de mayor energía que long. de onda mayores (menores freqs.)
- Espectro electromagnético denota la distribución de las ondas electromagnéticas en términos de  $\lambda$  o  $\nu$ .
- La radiación de diferentes longitudes de onda tiene asociado nombres específicos.

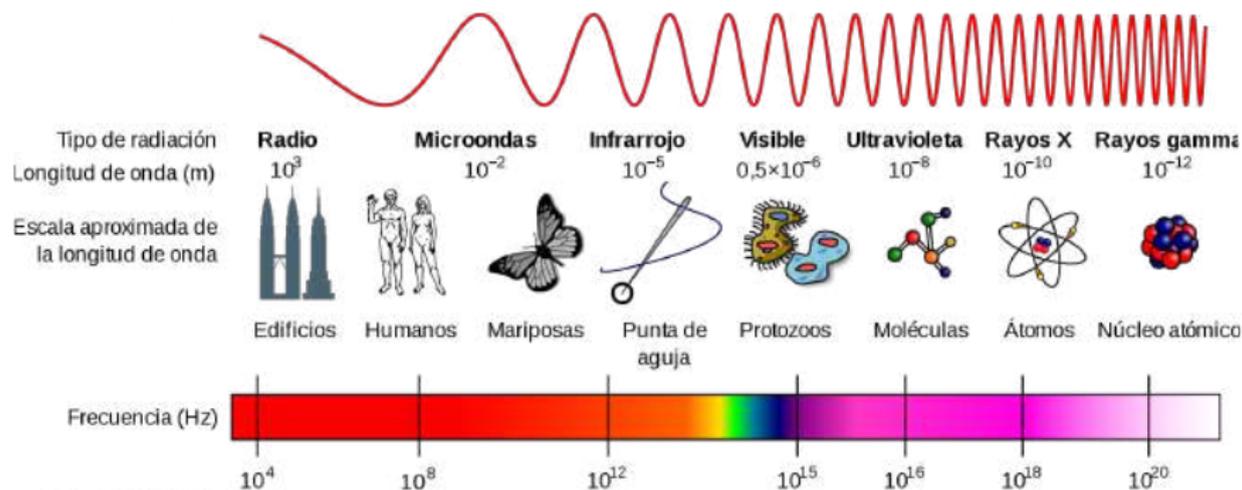
# Espectro electromagnético



Fuente: adaptado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagnetico](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnetico)

- Cuando la radiación está compuesta por frecuencias entre  $\lambda$  y  $\lambda + d\lambda$  se denota *monocromática*.

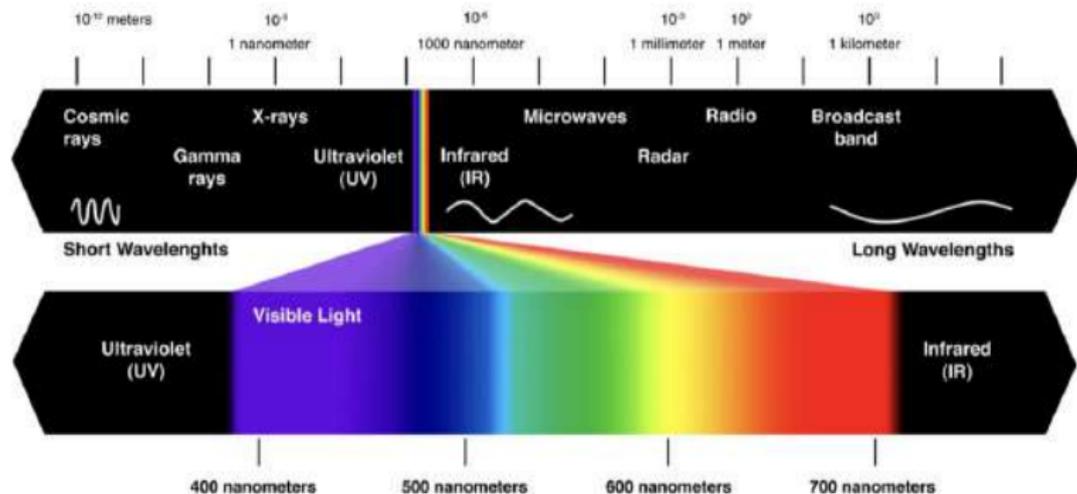
# Espectro electromagnético



Fuente: adaptado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagnetico](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnetico)

- Cuando la radiación está compuesta por frecuencias entre  $\lambda$  y  $\lambda + d\lambda$  se denota *monocromática*.
- Cuando consiste en un amplio rango de frecuencias le decimos *banda ancha*.

# Espectro electromagnético



Color	Longitud de onda
violeta	~ 380-427 nm
azul	~ 427-476 nm
cian	~ 476-497 nm
verde	~ 497-570 nm
amarillo	~ 570-581 nm
naranja	~ 581-618 nm
rojo	~ 618-780 nm

## Las leyes que gobiernan el electromagnetismo son las Leyes de Maxwell

Si consideramos un medio homogéneo, con propiedades eléctricas y magnéticas son isotrópicas y con dependencia lineal con  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$ , las leyes de Maxwell quedan expresadas como<sup>a</sup>

- Ley de Gauss:  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$
- Inexistencia del dipolo Magnético:  $\nabla \cdot \vec{H} = 0$
- Ley de inducción de Faraday:  $\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$
- Ley de Ampere (corregida):  $\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon_0(1 + \chi) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico,  $\vec{H}$  el magnético, y el medio tiene propiedades  $\mu$  (permeabilidad mag.),  $\sigma$  (conductividad eléc.),  $\chi$  (susceptibilidad eléctrica). Estas cantidades pueden ser complejos.

<sup>a</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

La energía instantánea transmitida por una onda electromagnética está dada (tanto en dirección como en magnitud) por el *vector de Poynting*:  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  (en W/m<sup>2</sup>). Si la onda es armónica, se calcula la intensidad de flujo como  $F = \langle \vec{S} \rangle = \langle \vec{E} \times \vec{H} \rangle$ .

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):

---

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):
  - $\vec{k}$  es el *vector de onda* y puede ser complejo ( $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ ). Si la parte imaginaria no es cero, la amplitud del campo se va atenuando con la distancia. Si el medio es no absorbente  $\vec{k}$  es real.

---

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):
  - $\vec{k}$  es el *vector de onda* y puede ser complejo ( $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ ). Si la parte imaginaria no es cero, la amplitud del campo se va atenuando con la distancia. Si el medio es no absorbente  $\vec{k}$  es real.
  - tanto  $\vec{E}_o$  como  $\vec{B}_o$  son ortogonales a  $\vec{k}$ , además  $\vec{E}_o \cdot \vec{B}_o = 0$ .

---

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):

- $\vec{k}$  es el *vector de onda* y puede ser complejo ( $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ ). Si la parte imaginaria no es cero, la amplitud del campo se va atenuando con la distancia. Si el medio es no absorbente  $\vec{k}$  es real.
- tanto  $\vec{E}_o$  como  $\vec{B}_o$  son ortogonales a  $\vec{k}$ , además  $\vec{E}_o \cdot \vec{B}_o = 0$ .
- La velocidad de fase de la onda EM es  $v = \frac{\omega}{|k''|}$ . En el vacío, es  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

---

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):

- $\vec{k}$  es el *vector de onda* y puede ser complejo ( $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ ). Si la parte imaginaria no es cero, la amplitud del campo se va atenuando con la distancia. Si el medio es no absorbente  $\vec{k}$  es real.

- tanto  $\vec{E}_o$  como  $\vec{B}_o$  son ortogonales a  $\vec{k}$ , además  $\vec{E}_o \cdot \vec{B}_o = 0$ .

- La velocidad de fase de la onda EM es  $v = \frac{\omega}{|k''|}$ . En el vacío, es  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

- La energía asociada a la onda (potencia por unidad de área) será  $F = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2$ .

---

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

# Descripción matemática de ondas electromagnéticas

## Ejemplo útil

Las ecuaciones anteriores admiten soluciones armónicas de los campos EM, en particular la de *onda plana*<sup>1</sup> :

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_o \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t),$$

- Tienen propiedades interesantes (sin dem.):

- $\vec{k}$  es el *vector de onda* y puede ser complejo ( $\vec{k} = \vec{k}' + i\vec{k}''$ ). Si la parte imaginaria no es cero, la amplitud del campo se va atenuando con la distancia. Si el medio es no absorbente  $\vec{k}$  es real.

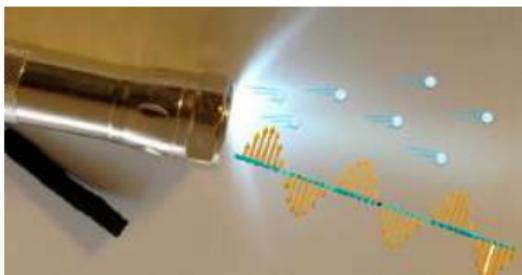
- tanto  $\vec{E}_o$  como  $\vec{B}_o$  son ortogonales a  $\vec{k}$ , además  $\vec{E}_o \cdot \vec{B}_o = 0$ .

- La velocidad de fase de la onda EM es  $v = \frac{\omega}{|k''|}$ . En el vacío, es  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

- La energía asociada a la onda (potencia por unidad de área) será  $F = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2$ .

En general, la densidad de flujo (en W/m<sup>2</sup>) es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico.

<sup>1</sup>Sugerencia: Leer capítulo 2.5 de G.Petty

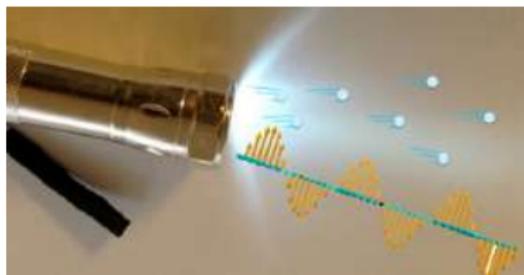


La partícula fundamental asociada a los fenómenos electromagnéticos es el fotón, cuya energía,  $E$ , esta relacionada con la longitud de la onda de la forma

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck:  $h = 1.05457 \times 10^{-34}$  Js.

- De esta relación se deduce que un fotón de menor  $\lambda$  transporta mayor energía.

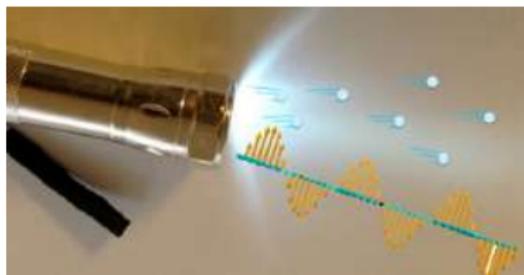


La partícula fundamental asociada a los fenómenos electromagnéticos es el fotón, cuya energía,  $E$ , esta relacionada con la longitud de la onda de la forma

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck:  $h = 1.05457 \times 10^{-34}$  Js.

- De esta relación se deduce que un fotón de menor  $\lambda$  transporta mayor energía.
- Para una onda EM monocromática *clásica*, la densidad de flujo se relaciona con el campo eléctrico al cuadrado. Esto se corresponde a la densidad de flujo fotónico (nro. de fotones por unidad de tiempo por unidad de área).



La partícula fundamental asociada a los fenómenos electromagnéticos es el fotón, cuya energía,  $E$ , está relacionada con la longitud de la onda de la forma

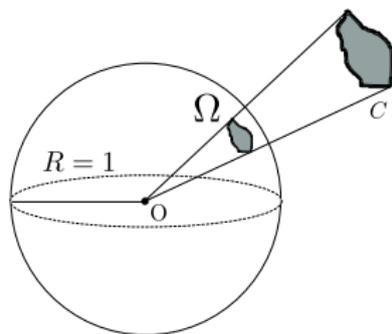
$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck:  $h = 1.05457 \times 10^{-34}$  J s.

- De esta relación se deduce que un fotón de menor  $\lambda$  transporta mayor energía.
- Para una onda EM monocromática *clásica*, la densidad de flujo se relaciona con el campo eléctrico al cuadrado. Esto se corresponde a la densidad de flujo fotónico (nro. de fotones por unidad de tiempo por unidad de área).

Es usual considerar la condición de partícula (fotón) de la radiación para describir la interacción de la radiación con los componentes de la atmósfera, en particular en lo que refiere a absorción y emisión.

- 1 Introducción
- 2 Espectro electromagnético
- 3 Ángulo sólido**
- 4 Cantidades radiométricas



El ángulo sólido ( $\Omega$ ) de un objeto  $C$  con respecto a un observador  $O$  se define como el ángulo espacial que ocupa visto desde  $O$ . Se mide en estereorradianes (sr) y se puede interpretar como el área de la intersección de la proyección cónica entre el objeto y una esfera de radio  $R = 1$  centrada en  $O$ .

## Observación:

El ángulo sólido dependerá de la distancia entre  $C$  y  $O$ .

# Ángulo sólido

## Coordenadas esféricas

Cualquier dirección definida por un vector unitario,  $\hat{u}$ , queda especificada por los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$ .

- ángulo cenital:  $\theta$
- ángulo acimutal  $\varphi$

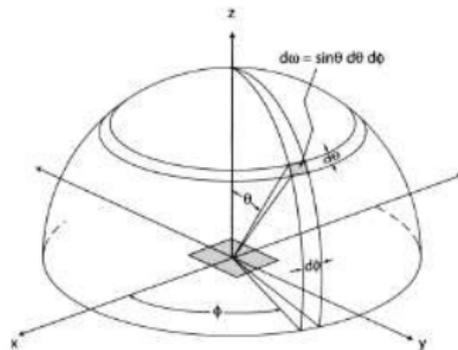
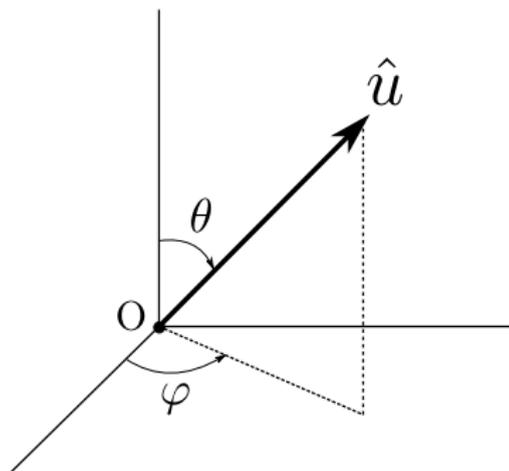


Fig. 2.4: The relationship between solid angle and polar coordinates.

Un diferencial de ángulo sólido se puede expresar como

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi = -d(\cos \theta) d\varphi.$$

$$\Omega = \int d\Omega = \int_{\Delta\varphi} \int_{\Delta\theta} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$$

$$\Omega = \int d\Omega = \int_{\Delta\varphi} \int_{\Delta\theta} \sin\theta d\theta d\varphi$$

- El ángulo sólido que ocupa la bóveda celeste para un observador que se encuentra sobre una superficie horizontal es  $\Omega = 2\pi$ :

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta d\varphi = -2\pi \int_1^0 d(\cos\theta) = -2\pi(0 - 1) = 2\pi$$

$$\Omega = \int d\Omega = \int_{\Delta\varphi} \int_{\Delta\theta} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$$

- El ángulo sólido que ocupa la bóveda celeste para un observador que se encuentra sobre una superficie horizontal es  $\Omega = 2\pi$ :

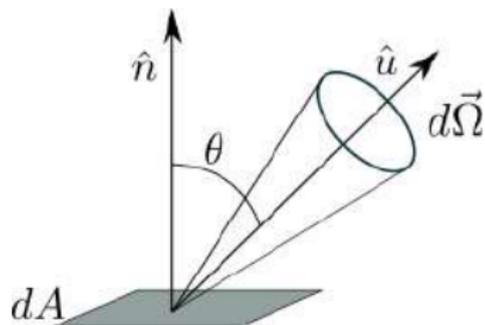
$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = -2\pi \int_1^0 d(\cos\theta) = -2\pi(0 - 1) = 2\pi$$

- Ejercicio: Un satélite meteorológico orbita la Tierra a una altura  $h$  sobre la superficie terrestre. calcule el ángulo sólido de la Tierra en función del radio terrestre  $R_T$  y la altura  $h$  (Ejercicio 1.2 Liou).

- 1 Introducción
- 2 Espectro electromagnético
- 3 Ángulo sólido
- 4 Cantidades radiométricas**

## Radiancia (o Intensidad monocromática)

Considere el diferencial de energía radiante ( $dE_\lambda$ ) monocromático (en el rango  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ ) que atraviesa un área  $dA$  en el intervalo de tiempo  $dt$  proveniente desde las direcciones contenidas en un diferencial de ángulo sólido ( $d\Omega$ ), definido según  $\hat{u}$ .



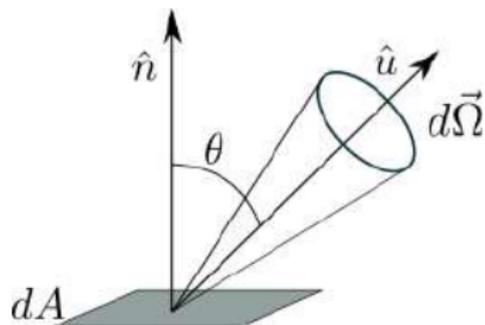
La radiancia o intensidad monocromática,  $I_\lambda(\hat{u}, t)$  (en  $\text{W}/\text{m}^2\text{m sr}$ ) se define como:

$$\boxed{\frac{dE_\lambda}{d\Omega d\lambda dt dA} = I_\lambda(\hat{u}, t) \cos \theta} \quad (3)$$

- La radiancia implica una direccionalidad en la radiación ( $\hat{u}$ )

## Radiancia (o Intensidad monocromática)

Considere el diferencial de energía radiante ( $dE_\lambda$ ) monocromático (en el rango  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ ) que atraviesa un área  $dA$  en el intervalo de tiempo  $dt$  proveniente desde las direcciones contenidas en un diferencial de ángulo sólido ( $d\Omega$ ), definido según  $\hat{u}$ .



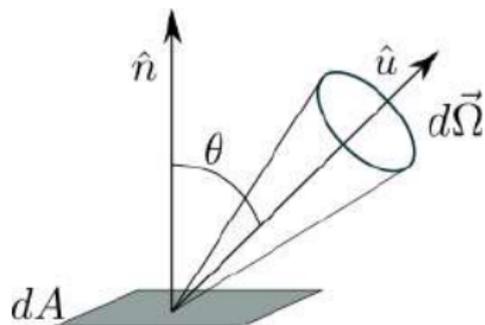
La radiancia o intensidad monocromática,  $I_\lambda(\hat{u}, t)$  (en  $\text{W}/\text{m}^2\text{m sr}$ ) se define como:

$$\boxed{\frac{dE_\lambda}{d\Omega d\lambda dt dA} = I_\lambda(\hat{u}, t) \cos \theta} \quad (3)$$

- La radiancia implica una direccionalidad en la radiación ( $\hat{u}$ )
- Además depende de la orientación de  $dA$  (a través de  $\hat{n}$  y por tanto de  $\cos \theta$ ).

## Radiancia (o Intensidad monocromática)

Considere el diferencial de energía radiante ( $dE_\lambda$ ) monocromático (en el rango  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ ) que atraviesa un área  $dA$  en el intervalo de tiempo  $dt$  proveniente desde las direcciones contenidas en un diferencial de ángulo sólido ( $d\Omega$ ), definido según  $\hat{u}$ .



La radiancia o intensidad monocromática,  $I_\lambda(\hat{u}, t)$  (en  $\text{W}/\text{m}^2\text{m sr}$ ) se define como:

$$\boxed{\frac{dE_\lambda}{d\Omega d\lambda dt dA} = I_\lambda(\hat{u}, t) \cos\theta} \quad (3)$$

- La radiancia implica una direccionalidad en la radiación ( $\hat{u}$ )
- Además depende de la orientación de  $dA$  (a través de  $\hat{n}$  y por tanto de  $\cos\theta$ ).

Cuando la radiancia se asocia a una superficie que *emite* radiación se le llama **luminancia** o **Brillo**.

## Irradiancia monocromática (o densidad de flujo monocromático)

Definimos la *densidad de flujo* o *irradiancia monocromática* (en  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ m}$ ) a través de una superficie  $dA$  como la componente normal de  $I_\lambda$  integrada sobre un ángulo sólido  $\Omega$ .

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega . \quad (4)$$

- Si el ángulo de integración es corresponde a un hemisferio situado por encima de  $dA$  se le llama **Irradiancia Hemisférica monocromática**

## Irradiancia monocromática (o densidad de flujo monocromático)

Definimos la *densidad de flujo* o *irradiancia monocromática* (en  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ m}$ ) a través de una superficie  $dA$  como la componente normal de  $I_\lambda$  integrada sobre un ángulo sólido  $\Omega$ .

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega. \quad (4)$$

- Si el ángulo de integración es corresponde a un hemisferio situado por encima de  $dA$  se le llama **Irradiancia Hemisférica monocromática**
- En coordenadas polares, la irradiancia hemisférica se expresa

$$F_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (5)$$

## Irradiancia monocromática (o densidad de flujo monocromático)

Definimos la *densidad de flujo* o *irradiancia monocromática* (en  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ m}$ ) a través de una superficie  $dA$  como la componente normal de  $I_\lambda$  integrada sobre un ángulo sólido  $\Omega$ .

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos \theta d\Omega. \quad (4)$$

- Si el ángulo de integración es corresponde a un hemisferio situado por encima de  $dA$  se le llama **Irradiancia Hemisférica monocromática**
- En coordenadas polares, la irradiancia hemisférica se expresa

$$F_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda(\theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (5)$$

- En caso de que la radiancia espectral sea isotrópica (independiente de  $\Omega$ ), se tiene que la irradiancia hemisférica se expresa

$$F_\lambda = I_\lambda \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = 2\pi I_\lambda \int_1^0 (-\cos \theta) d(\cos \theta)$$

$\Rightarrow$

$$F_\lambda = \pi I_\lambda$$

## Irradiancia monocromática (o densidad de flujo monocromático)

- Cuando la densidad de flujo se asocia a una superficie que emite radiación se le llama **Emitancia**.
- Las ecuaciones para emitancia son análogas, pero en la Ec. 4, la  $I_\lambda$  es la emitida en la dirección  $\hat{u}$ .

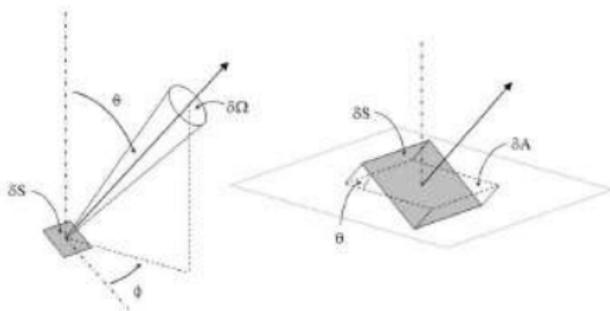


Figura 1.2: La intensidad espectral emitida por una superficie es el flujo de energía emitido por unidad de superficie  $\delta S$ , por unidad de ángulo sólido  $\delta\Omega$  y por unidad de longitud de onda.

Figure: Notas de transferencia de calor de H. Failache

### Notación

Se suele usar  $F_\lambda^\downarrow$  y  $F_\lambda^\uparrow$  para irradiancias y emitancias monocromáticas hemisféricas, respectivamente.

- La densidad de flujo, energía radiante o irradiancia (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) se obtiene integrando el flujo monocromático en cierto rango espectral  $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} d\lambda \quad (6)$$

## Densidad de flujo, energía radiante o irradiancia

- La densidad de flujo, energía radiante o irradiancia (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) se obtiene integrando el flujo monocromático en cierto rango espectral  $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} d\lambda \quad (6)$$

- También se usa la notación  $F^{\downarrow}$  y  $F^{\uparrow}$  para densidades de flujo hemisféricas de banda ancha.

## Densidad de flujo, energía radiante o irradiancia

- La densidad de flujo, energía radiante o irradiancia (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) se obtiene integrando el flujo monocromático en cierto rango espectral  $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda \quad (6)$$

- También se usa la notación  $F^\downarrow$  y  $F^\uparrow$  para densidades de flujo hemisféricas de banda ancha.

### Ejercicio

El flujo monocromático puede escribirse en el dominio de la frecuencia,  $\nu$  (en vez de  $\lambda$ ). Usando  $F = \int F_\lambda d\lambda = \int F_\nu d\nu$  y la relación entre  $\lambda$  y  $\nu$ . Demuestre que  $F_\nu = -\frac{\lambda^2}{c} F_\lambda$  y la expresión análoga para  $I_\nu$  y  $I_\lambda$ .

## Densidad de flujo, energía radiante o irradiancia

- La densidad de flujo, energía radiante o irradiancia (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) se obtiene integrando el flujo monocromático en cierto rango espectral  $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda \quad (6)$$

- También se usa la notación  $F^\downarrow$  y  $F^\uparrow$  para densidades de flujo hemisféricas de banda ancha.

### Ejercicio

El flujo monocromático puede escribirse en el dominio de la frecuencia,  $\nu$  (en vez de  $\lambda$ ). Usando  $F = \int F_\lambda d\lambda = \int F_\nu d\nu$  y la relación entre  $\lambda$  y  $\nu$ . Demuestre que  $F_\nu = -\frac{\lambda^2}{c} F_\lambda$  y la expresión análoga para  $I_\nu$  y  $I_\lambda$ .

- El flujo o potencia radiante (en  $\text{J}/\text{s}$ ) es la potencia emitida, transmitida o recibida en forma de radiación por un cuerpo de área  $A$

$$f = \int_A F dA \quad (7)$$

Symbols, Dimensions, and Units of Various Radiometric Quantities

Symbol	Quantity	Dimension <sup>a</sup>	Unit <sup>b</sup>
$E$	Energy	$ML^2T^{-2}$	Joule (J)
$f$	Flux (luminosity)	$ML^2T^{-3}$	Joule per second (J sec <sup>-1</sup> , W)
$F$	Flux density (irradiance) Emittance	$MT^{-3}$	Joule per second per square meter (W m <sup>-2</sup> )
$I$	Intensity (radiance) Brightness (luminance)	$MT^{-3}$	Joule per second per square meter per steradian (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )

<sup>a</sup> $M$  is mass,  $L$  is length, and  $T$  is time.

<sup>b</sup>1 watt (W) = 1 J sec<sup>-1</sup>.

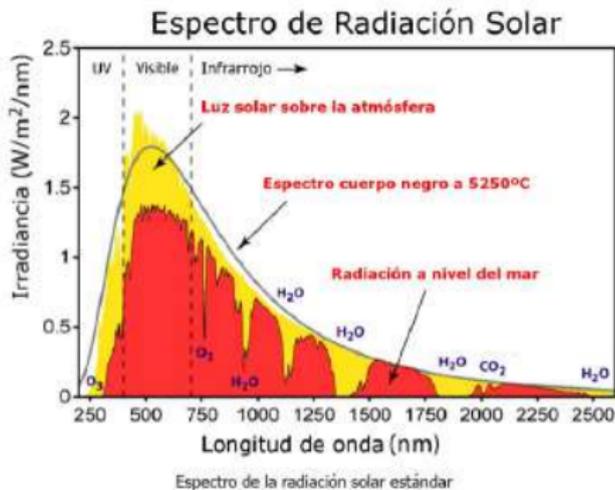
**Figure:** Magnitudes de banda ancha (Fuente: Liou,2002). Para cantidades espectrales, agregar una longitud extra "L" en el denominador.

Las radiancias (e iluminancia) son cantidades que se asocian a alguna dirección y superficie de referencia, mientras que la irradiancia (o emitanancia) se asocia a la integral sobre un ángulo sólido y un plano de referencia.

- **Radiación total:** Radiación se refiere a emisión o transferencia de energía electromagnética. El nombre total se refiere a todo el espectro electromagnético (entre 0 nm y  $\infty$   $\mu\text{m}$ ).

- **Radiación total:** Radiación se refiere a emisión o transferencia de energía electromagnética. El nombre total se refiere a todo el espectro electromagnético (entre 0 nm y  $\infty$   $\mu\text{m}$ ).
- **Radiación Solar o Radiación de Onda Corta (SWR):** Se refiere al espectro solar (entre 280 nm y 3  $\mu\text{m}$ ).

- **Radiación total:** Radiación se refiere a emisión o transferencia de energía electromagnética. El nombre total se refiere a todo el espectro electromagnético (entre 0 nm y  $\infty \mu\text{m}$ ).
- **Radiación Solar o Radiación de Onda Corta (SWR):** Se refiere al espectro solar (entre 280 nm y 3  $\mu\text{m}$ ).
- **Radiación Térmica o Radiación de Onda Larga (LWR) :** Se refiere al espectro de emisión térmica de cuerpos de temperaturas moderadas (entre 3  $\mu\text{m}$  y 100 $\mu$ ).



Fin