



Introducción a las Ondas Electromagnéticas

Óptica y Radiaciones

Docentes – Baldezzari Lucas y Billordo Javier
3er Semestre – Tecnólogo en Ingeniería Biomédica

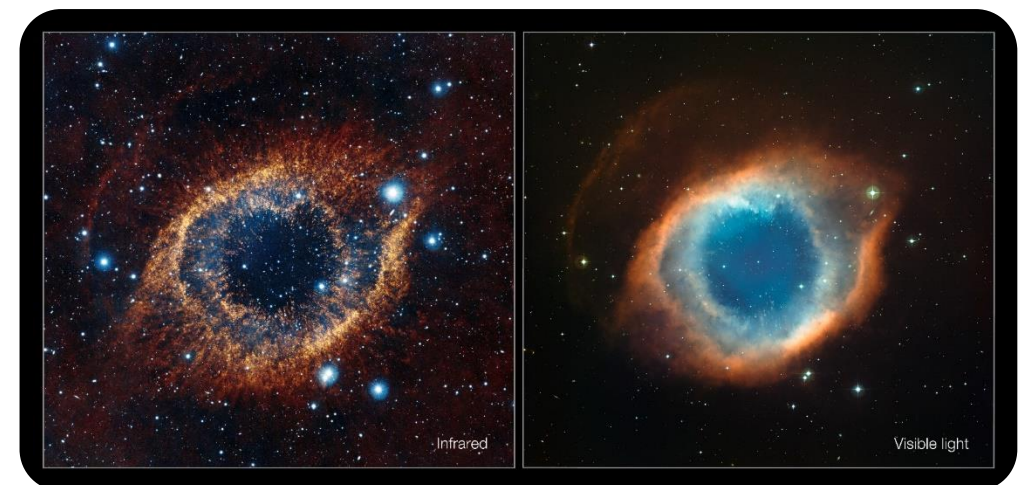
9 de Marzo de 2020

Ondas electromagnéticas (OEM)

Son ondas creadas como resultado de las oscilaciones entre un campo eléctrico y un campo magnético.

Las OEM están compuestas de campos magnéticos y eléctricos **oscilantes en el tiempo**.

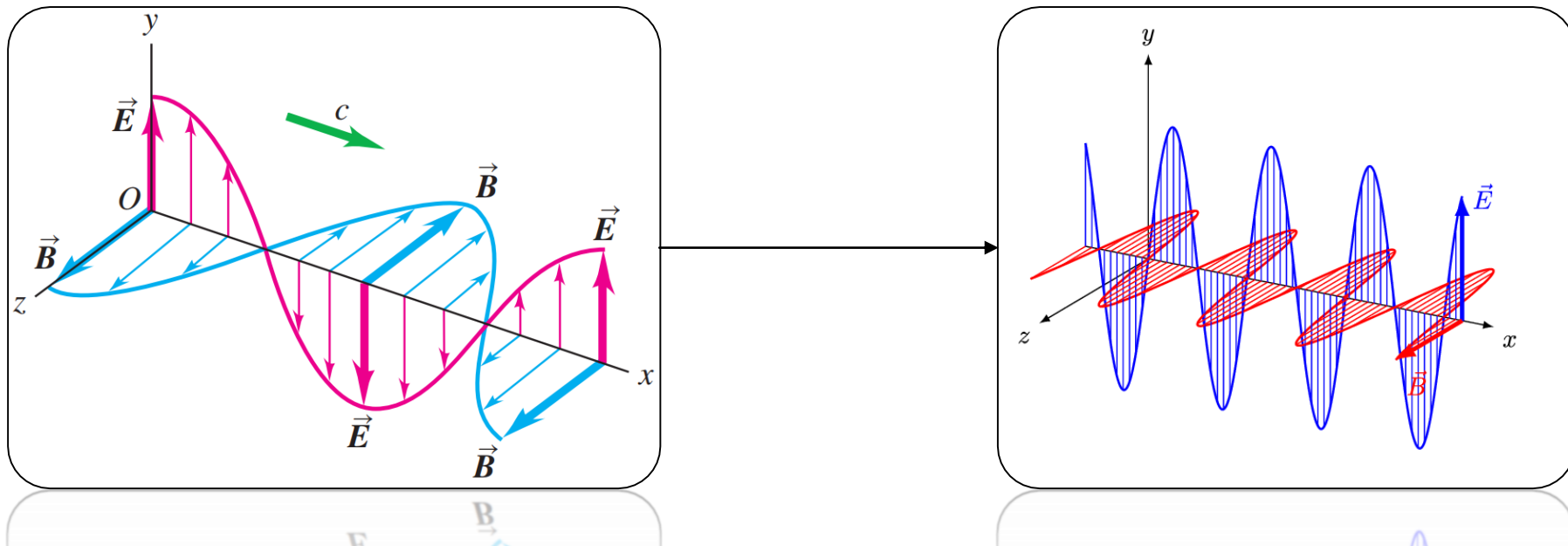
Las OEM se forman cuando los campos **E** y **B** entran en contacto.



Ondas electromagnéticas

Características

- Son la interacción entre un campo eléctrico y magnético variables en el tiempo y perpendiculares entre sí.
- Puede **propagarse en el vacío** (sin un medio conductor).
- Son Periódicas.
- Son Transversales (es decir que \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares a la dirección de propagación).



Ondas electromagnéticas

Para estudiar una Onda EM debemos tener en cuenta los elementos que la caracterizan.

- Longitud de onda
- Amplitud
- Frecuencia
- Velocidad de propagación

$$v = f * \lambda \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

- $v = \text{velocidad}[m/s]$
- $f = \text{frecuencia}[Hz]$
- $\lambda = \text{longitud de onda}[nm]$
- $T = \text{período de la señal}[seg]$

Ondas electromagnéticas

En el **vacío** las OEM viajan a la **velocidad de la luz**, entonces la ecuación (1) nos queda

$$c = f * \lambda \text{ (3)}$$

donde **c** es la velocidad de la luz y es aproximadamente igual a $3 \times 10^8 [m/s]$

Las OEM transportan energía en paquetes o cuantos. Podemos relacionar la **energía de un cuanto (o fotón)** de una OEM mediante la ecuación

$$E = h * f \text{ (4)}$$

Donde **h** es la **constante de Planck** y es igual a $6,63 \times 10^{-34} [J.s]$


↑ Energía y frecuencia ↓ longitud de onda

Ondas electromagnéticas

Problema simple

¿Cuál es la longitud de una OEM que posee una frecuencia de $25,75 \times 10^9 \text{ Hz}$ emitida por una estación de radio? (5 minutos)

¿Cómo podemos detectar esta señal?


$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 [\text{m} / \text{s}]}{25,75 \times 10^9 [1/\text{s}]} = 1,64 \times 10^{-2} [\text{m}] = \mathbf{16,4 \text{ cm}}$$

Ondas electromagnéticas

Las intensidades del campo eléctrico y del campo magnético asociados a una OEM en **el vacío** vienen dadas por,

$$E = cB \quad (5)$$

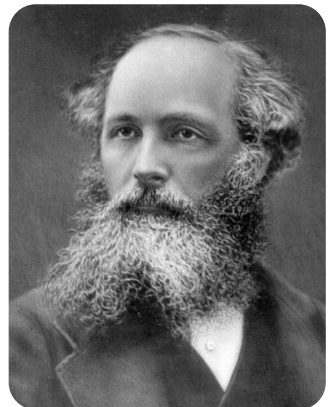
$$B = \mu_0 \epsilon_0 c E \quad (6)$$

Una OEM debe cumplir con estas leyes por lo tanto las ecuaciones anteriores se satisfacen si, $\mu_0 \epsilon_0 c = 1/c$, entonces,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299,792,458 \text{ m/s} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (7)$$

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [C^2/Nm^2]$ – Permitividad en el vacío

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [T.m/A]$ – Permeabilidad en el vacío



James Clerk Maxwell

Ondas electromagnéticas

Propiedades claves de las OEM

- ✓ Las OEM son **transversales**, esto quiere decir que **E** y **B** son perpendiculares a la propagación de la onda. Los campos **E** y **B** son **perpendiculares** entre sí.
- ✓ La dirección de la OEM resulta de hacer el producto vectorial de $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.
- ✓ La razón que define las magnitudes de los campos es, $\mathbf{E} = c\mathbf{B}$
- ✓ La OEM que viaja en el **vacío** lo hace con **rapidez definida e invariable**.
- ✓ Las OEM no necesitan de un medio conductor para transmitirse.

Ondas electromagnéticas

Interacción con la materia

La Luz viaja por el
aire, el agua o el
vidrio.

Las OEM **también viajan a través de la materia.**

La rapidez de una OEM que viaja por un medio diferente al vacío es **siempre es menor a c .**

Denotamos v a la velocidad de la onda en un medio conductor, entonces,

$$E = vB \quad (8)$$

$$B = \epsilon\mu vE \quad (9)$$

Donde $\epsilon = K\epsilon_0$ y $\mu = K_m\mu_0$ son la **Permitividad relativa** y **Permeabilidad relativa**, respectivamente, entonces la ecuación (7) nos queda,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} < c \rightarrow \text{SIEMPRE} \quad (10)$$

Ondas electromagnéticas

Interacción con la materia

Veamos por qué $v < c$. Sabemos que $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, tomamos a $K_m \approx 1$, ¿luego?

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{KK_m}}$$

La permeabilidad relativa K_m para nuestro estudio se aproxima a 1, entonces,

$$v = \frac{c}{\sqrt{KK_m}} = \frac{c}{\sqrt{K \cdot 1}} = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (6)$$

Constante
dieléctrica

Como K siempre es mayor a la unidad, la rapidez v de las OEM en un dieléctrico **siempre** es menor a la rapidez c en el vacío.

Ejemplo: La constante dieléctrica K del agua es de alrededor de 1,8 para la luz visible, entonces la OEM se desplazará a una velocidad menor en el agua que en el vacío en un factor igual a $1/\sqrt{1,8} = 0,745$

5 minutos!

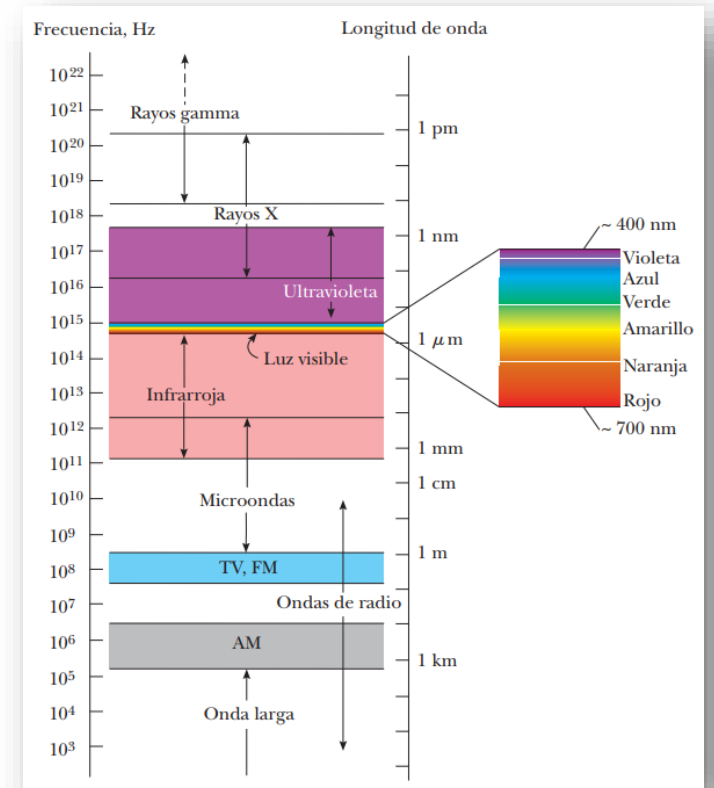


Time for
a BREAK

Espectro Electromagnético

Se han detectado OEM con frecuencias que van desde 1Hz a $10 \times 10^{24}\text{Hz}$.

Dentro de este amplio espectro encontramos las ondas de radio y televisión, la luz visible, la radiación infrarroja y ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma.

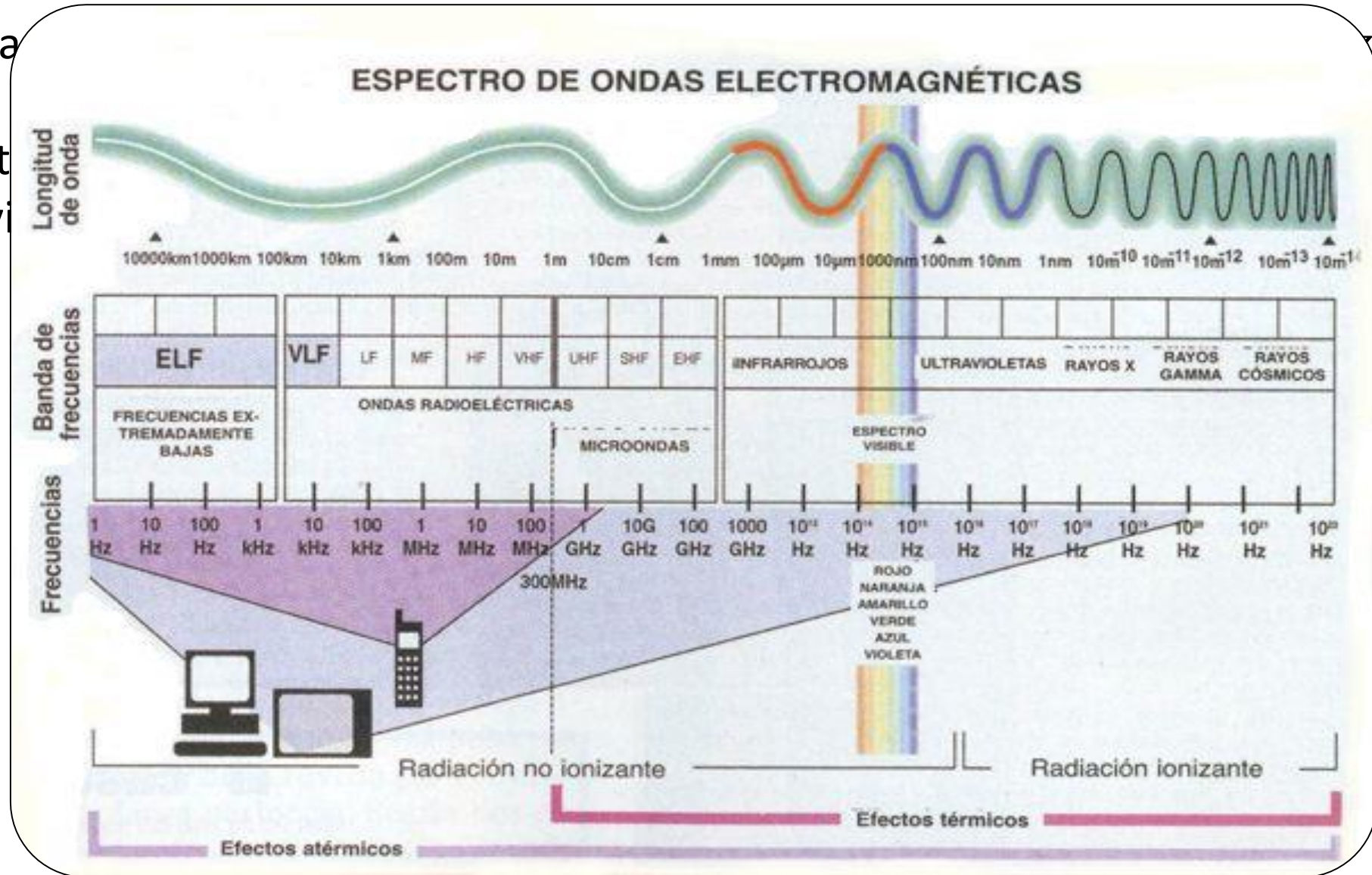


Espectro Electromagnético

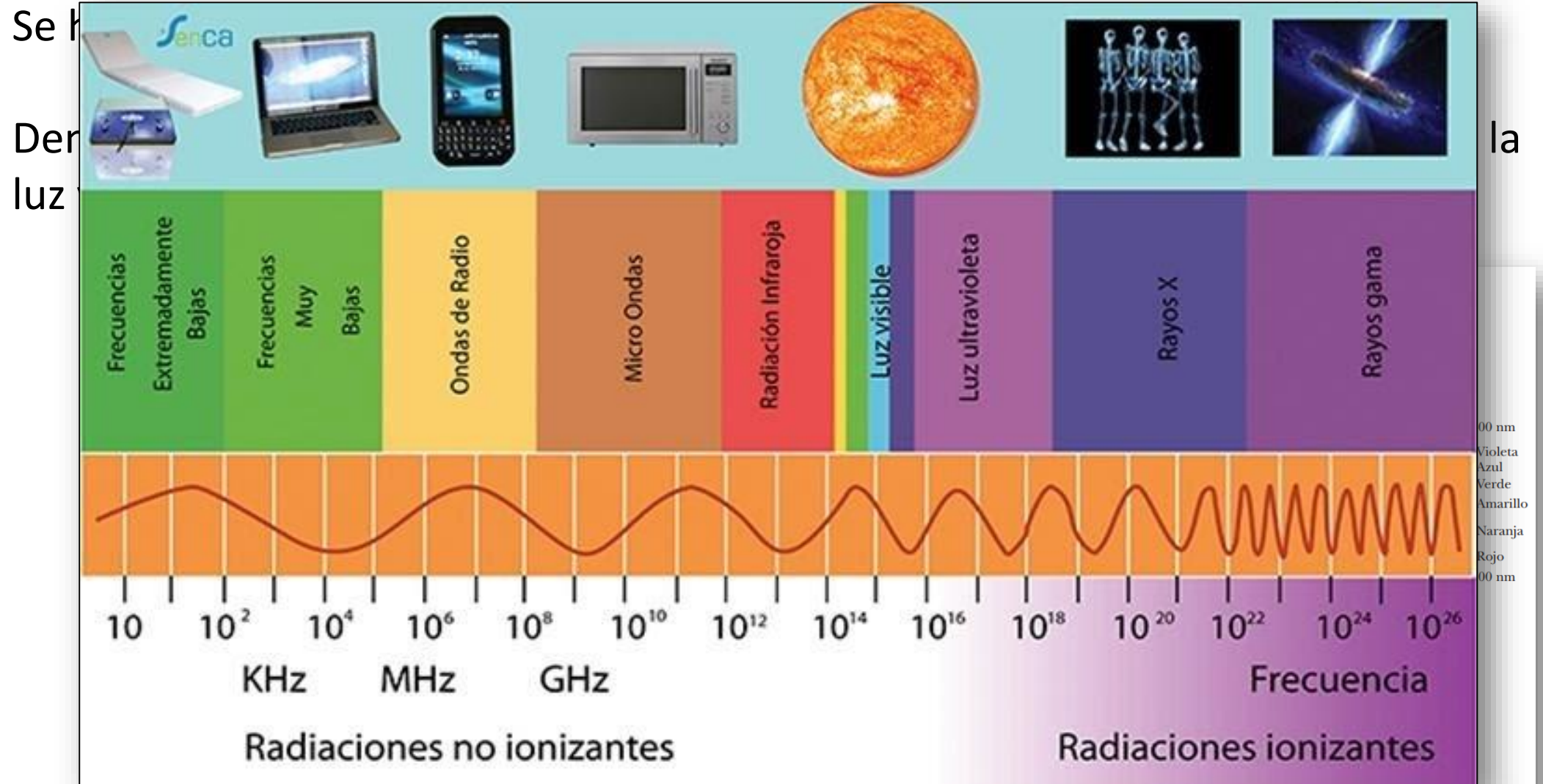
Se ha

Dent
luz vi

ón, la
na.



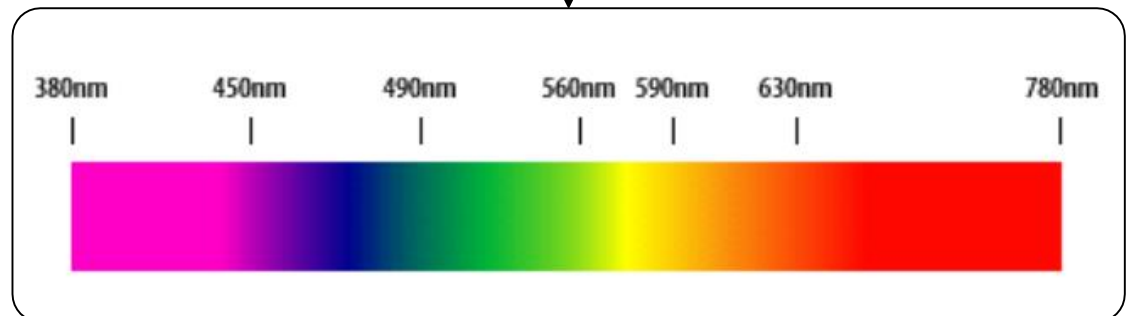
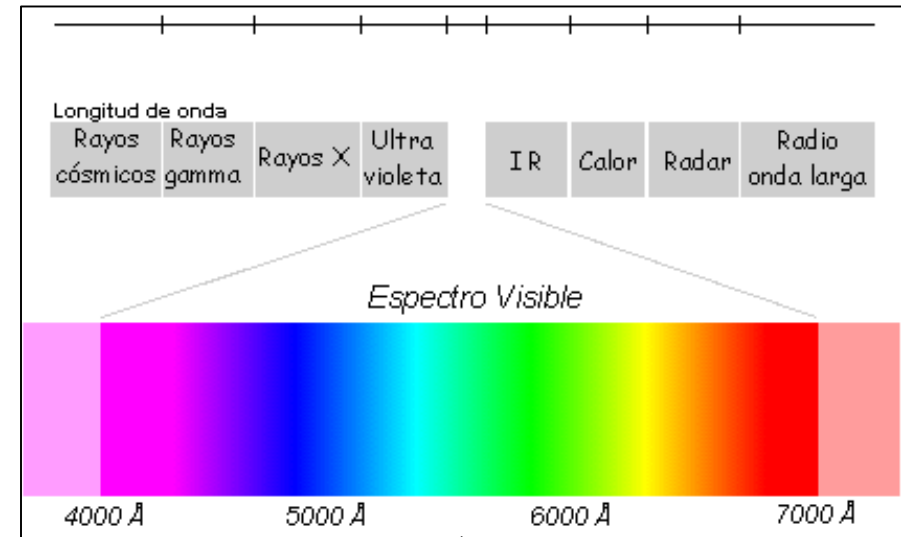
Espectro Electromagnético



Espectro Electromagnético

Nuestro sentido de la vista solo reconoce las frecuencias del espectro denominado **luz visible** que va desde los 380[nm] a los 780[nm].

| color | λ (Long de onda) |
|----------|---------------------------|
| Rojo | 622-780 |
| Naranja | 597-622 |
| Amarillo | 577-597 |
| Verde | 492-577 |
| Azul | 455-492 |
| Violeta | 380-455 |



Aplicaciones

| OEM | Generación/Fuente | Detección | Ejemplo/Aplicación |
|----------------|---|--|---|
| EBF | Artefactos alimentados con AC | Bobinas, capacitores, magnetrómetros | Energía eléctrica |
| RF | Circuitos electrónicos - Antenas | Antenas | Radio, televisión |
| MO | Magnetrones | Antenas | Telefonía, radar, espectroscopía atómica |
| IR | Objetos calientes – Materiales fluorescentes - Sol – Filamentos incandescentes – Descargas eléctricas | Radiómetros | Calefacción, bisturí laser |
| VISIBLE | Sol – Filamentos incandescentes – Descargas eléctricas - LED | Fotodiodos, el ojo, cámaras CCD | Microscopía |
| UV | Descargas eléctricas – Sol | Fotodiodos | Revelado de máscaras fotosensibles, fraguado de cemento, esterilización |
| RX | Tubos de Rx | Placas fotosensibles, cámara CCD | Radiografía, seguridad, cristalografía |
| Rayos γ | Procesos nucleares | Cristales de centelleo, cámaras de ionización. | Medicina nuclear |



Energía transportada por las OEM

¿Las OEM transmiten energía?

Energía transportada por las OEM

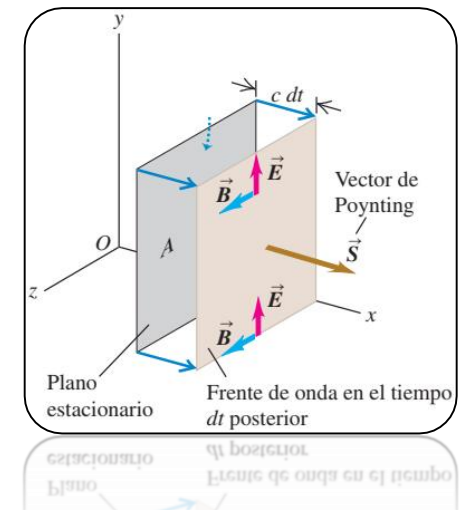
Vector de Poynting

Las OEM transportan energía. El **vector de Poynting** nos muestra cual es el flujo de energía por unidad de área y por unidad de tiempo a través de un área de sección transversal y perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

$$\vec{S}_{instantánea} = \vec{S}(t) = \frac{1}{\mu_0} \vec{E}(t) \times \vec{B}(t) \rightarrow \text{unidades de } \left[\frac{J}{s \cdot m^2} \right] = \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

La frecuencia de las OEM mas comunes son muy altas, por lo tanto se habla del **valor medio** de la energía. La magnitud del valor medio de \vec{S} en un punto se llama **Intensidad de la onda**, y tiene unidades de **$1W/m^2$** entonces,

$$I = S_{prom} = \frac{1}{2} \frac{E_{max} B_{max}}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{E_{max}^2}{\mu_0 c} = \frac{1}{2} \frac{c B_{max}^2}{\mu_0} \quad (7)$$



Energía transportada por las OEM

Vector de Poynting - Problema

El Sol entrega aproximadamente 1000 W/m^2 energía a la superficie de la Tierra vía radiación electromagnética. Suponga que la radiación incide de manera perpendicular sobre el techo.

Calcule la potencia total que incide sobre el techo de una casa con dimensiones de $8.00 \text{ m} \times 20.0 \text{ m}$.

$$P_{prom} = S_{prom}A = (1000[\text{W/m}^2])(8 \times 20[\text{m}^2])$$
$$P_{prom} = 1,6 \times 10^6 \text{ W}$$

Presión de radiación

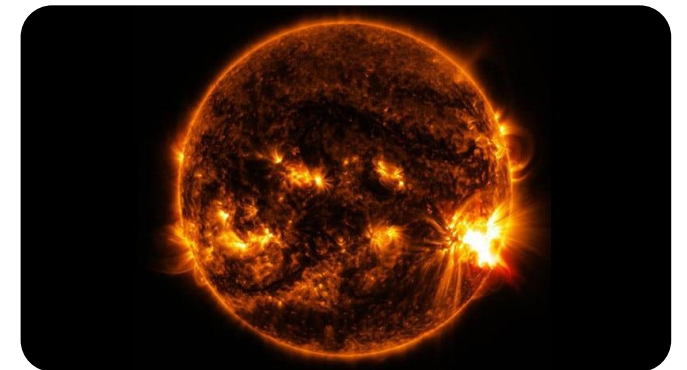
Presión de Radiación

La radiación de una OEM produce **presión** sobre la materia.

La expresión de radiación, o p_{rad} esta dada por,

$$P_{rad} = \frac{S_{med}}{c} = \frac{I}{c} \text{ (para una onda absorbida completamente)}$$

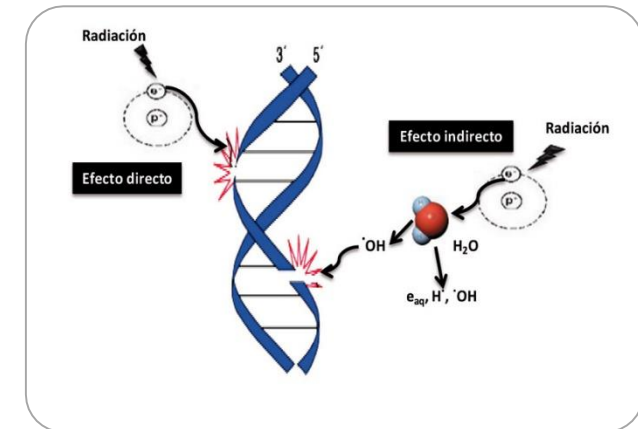
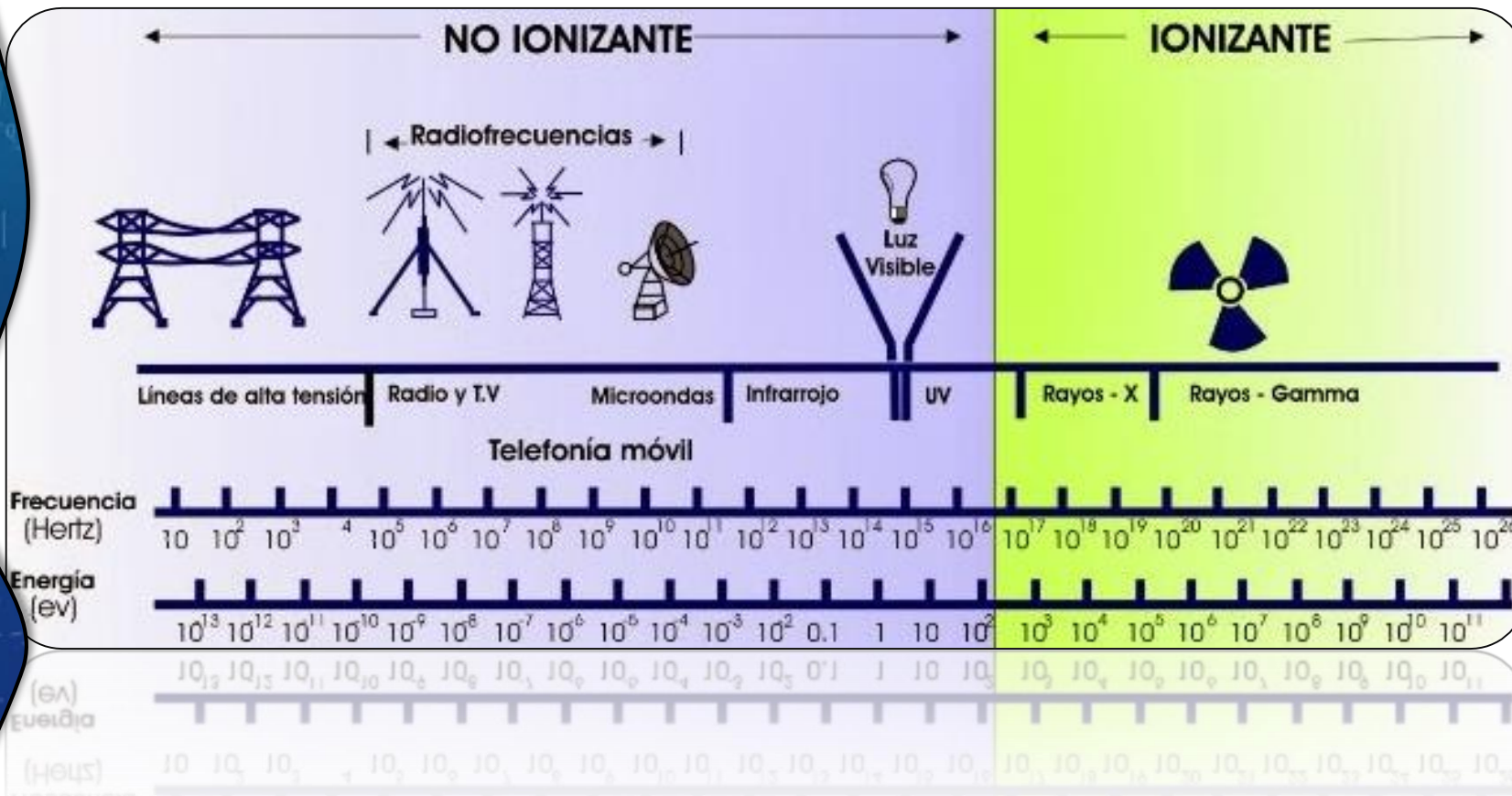
$$P_{rad} = \frac{2S_{med}}{c} = \frac{2I}{c} \text{ (para una onda reflejada completamente)}$$



Radiaciones Ionizantes y No Ionizantes

Concepto

La Radiación Ionizante (RI) se diferencia de la Radiación No Ionizante (RNI) en que las primeras tiene suficiente energía como para desligar un electrón atómico de su órbita nuclear.



Lesionan las células mediante interacción con el ADN del núcleo, evitando la división celular normal y produciendo cambios químicos.

Radiaciones No Ionizantes

Aplicaciones biomédicas

Fototerapias

Radiofrecuencia HF-VHF 3-300MHz

Efectos térmicos muy bajos

- Procesos inflamatorios
- Procesos traumáticos



Microondas 300MHz-3GHz

Diatermia (calor profundo)

- Analgesia
- Relajación muscular
- Aumento del flujo sanguíneo



Luz visible 780-400nm

Fototerapia recién nacido
Regulación de ciclo circadiano
Diagnóstico (diafanoscopia)
Fluorescencia y fosforescencia

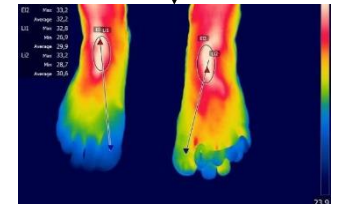
LASER

(Amplificación de Luz mediante emisión estimulada de Radiación.
Luz monocromática y coherente)

Remoción de lesiones
Estética
Oftalmología
Odontología

Infrarrojo 780-10000nm

Para diagnóstico



Ultravioleta 400-100nm

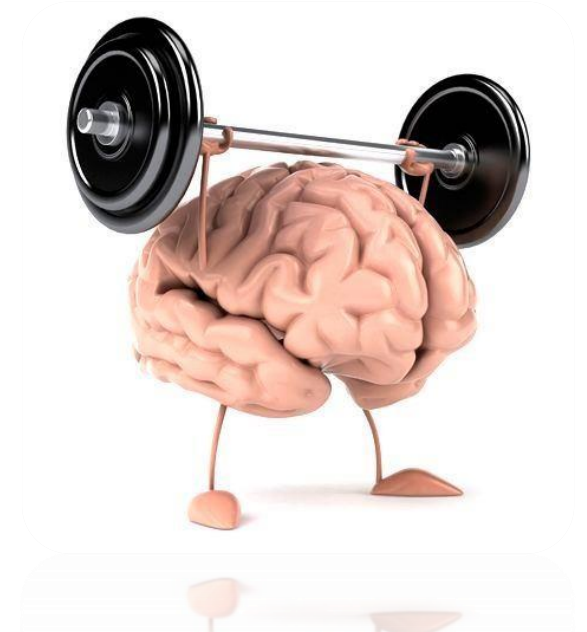
Efecto fotoquímico
Acción bactericida
Síntesis de vit D
Estética

Ejercitación

Guía 1



Ejercicios del 1 al 6



20 minutos!

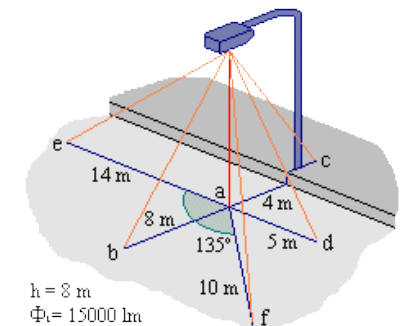


Time for
a BREAK

Radiometría y Fotometría

Concepto

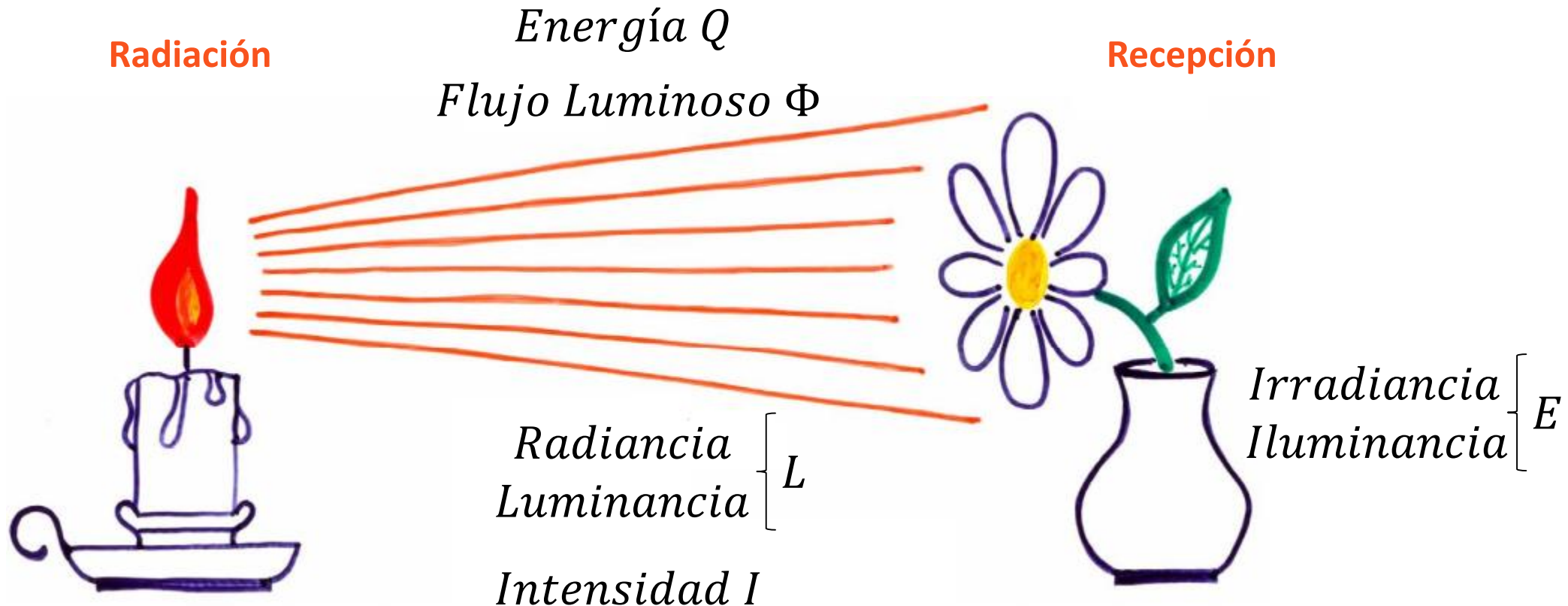
- ✓ Es la cuantificación de la energía transportada por una onda EM.
- ✓ La **radiometría** nos da la medida de las radiaciones electromagnéticas (Radiaciones Ionizantes y No Ionizantes). Espectro completo.
- ✓ La **fotometría** se ocupa de la parte del espectro electromagnético que el ojo humano percibe como sensación luminosa. Espectro Visible.



Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

Para poder trabajar en fotometría debemos definir algunas magnitudes y unidades de medida, entonces,



Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

Flujo luminoso: Es el flujo de energía Q emitida por una fuente **en longitudes de ondas del espectro visible**, transmitida o recibida por unidad de tiempo. El flujo luminoso es un promedio ponderado del flujo radiante **en el espectro visible**.

$$\Phi_v = \frac{dQ}{dt} = lm$$

Donde,

$$1 \text{ lumen } [lm] = cd \times sr$$

| | |
|----------------|-----------------|
| Flujo luminoso | Símbolo: Φ |
| | Unidad: lumen |



Lumen: flujo luminoso emitido sobre una unidad de ángulo sólido (1 sr), por una fuente puntual isotrópica que tiene una intensidad luminosa de una candela.

$$1 \text{ lumen} = 683W * V_{\lambda}$$

Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

El ojo humano tiene su máxima sensibilidad con luz diurna (visión fotópica) a los **555nm**.

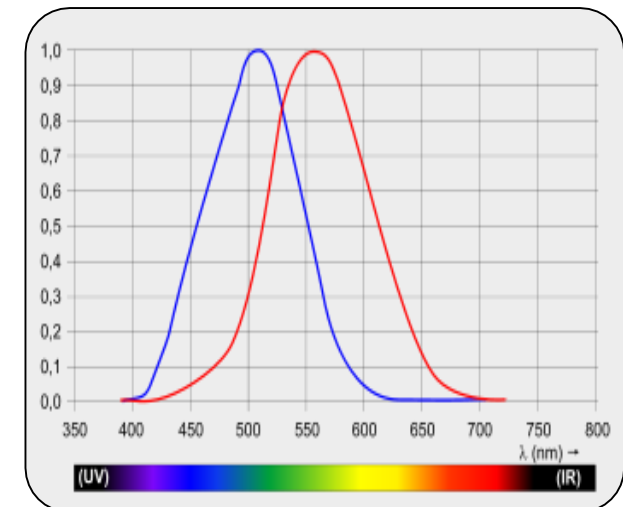
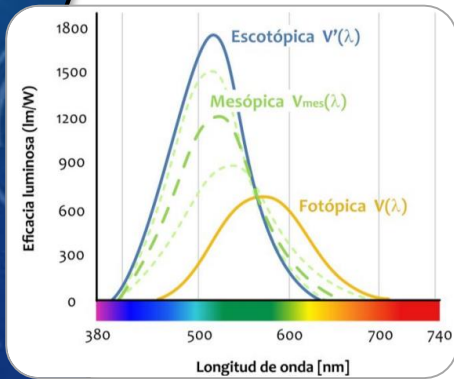
A esta λ se le asigna un valor de **683 lúmenes por vatio**.

El flujo luminoso para luz **monocromática** viene dado por,

$$\Phi_v = \Phi[W] \times V_\lambda \times 683 \left[\frac{lm}{W} \right]$$

El flujo luminoso para una fuente de luz **policromática** viene dado por,

$$\Phi_v = 683 \left[\frac{lm}{W} \right] \int_0^{+\infty} \Phi \times V_\lambda \times d\lambda$$



Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

Intensidad luminosa (energía de la fuente de luz): Es la cantidad de flujo luminoso que lleva cada rayo emitido por una fuente por unidad de ángulo sólido (estereorradián) en una determinada dirección. Su símbolo es ***I*** y su unidad es la **candela (cd)**.

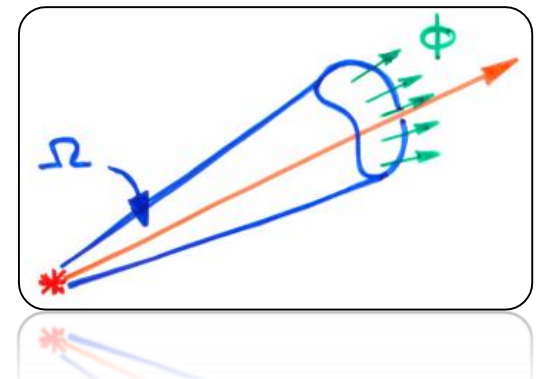
$$I = \frac{\Phi_v}{\Omega} [cd]$$

Intensidad luminosa

Símbolo: *I*

Unidad: candela (cd)

Candela: Es la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de longitud de onda 555nm con una intensidad en esa dirección de $1/683 [W \cdot sr^{-1}]$



Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

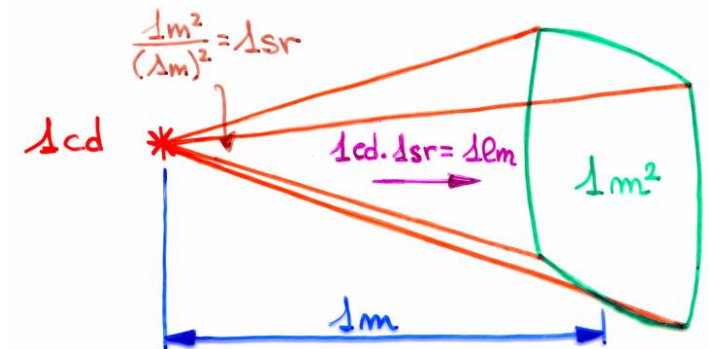
Iluminancia – E: flujo **recibido** sobre una superficie por unidad de área. Su unidad esta en lux (lx). La iluminancia **depende** de la distancia del objeto que esta siendo iluminado.

$$E = \frac{\Phi_v}{Area} [lux]$$

| | |
|-------------|------------------|
| Iluminancia | Símbolo: E |
| | Unidad: lux (lx) |

Lux: Iluminancia que produce una fuente puntual con intensidad luminosa de una candela sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación situada a un metro de la fuente.

$$lux = \frac{lumen}{m^2}$$

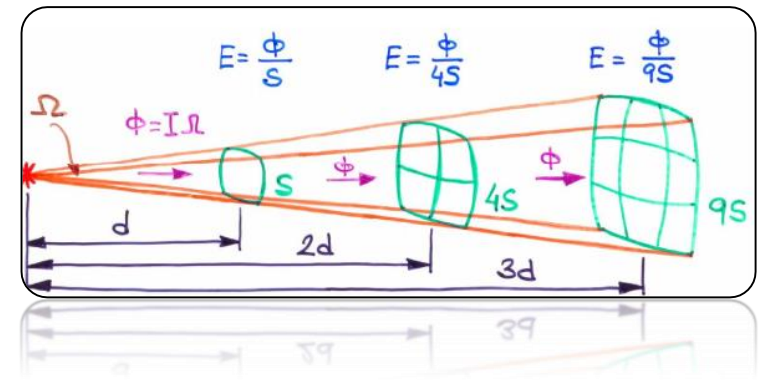


Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

A medida que nos alejamos de la fuente luminosa, la iluminancia disminuye según una ley conocida con el nombre de **Ley Inversa de los Cuadrados**

$$E = \frac{I}{d^2}$$



Fotometría

Magnitudes y unidades de medida

Rendimiento luminoso

En general, en una fuente de luz no toda la energía eléctrica gastada se transforma en luz visible. Un porcentaje se pierde en forma de calor y en radiación fuera del espectro visible.

Definimos el **rendimiento luminoso** como la **relación entre el flujo luminoso y la potencia eléctrica consumida**.



$$\eta = \frac{\Phi}{Potencia} \left[\frac{lm}{Watt} \right]$$

Rendimiento
luminoso

Símbolo: η

Unidad: lm/W

Fotometría

Concepto

| RADIOMETRÍA | | | FOTOMETRÍA | | |
|--------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| MAGNITUD | UNIDAD | EQUIV. | MAGNITUD | UNIDAD | EQUIV |
| Energía radiante | J | $\text{Kg m}^2 / \text{s}^2$ | | | N.m |
| Potencia radiante | W | J/s | Flujo luminoso * | Lumen o lm | cd sr |
| Irradiancia o Intensidad | W/m^2 | J/s. m^2 | Iluminancia | lm/m^2 | lux o lx |
| | | | Intensidad luminosa | lm/sr | candela o cd |
| Radiancia o Brillo | W/sr.m^2 | J/sr .s .m^2 | Luminancia | lm/sr.m^2 | cd/m^2 |

* 1W de luz de $\lambda=555\text{nm}$ (pico de sensibilidad del ojo humano) equivale a 683 lm

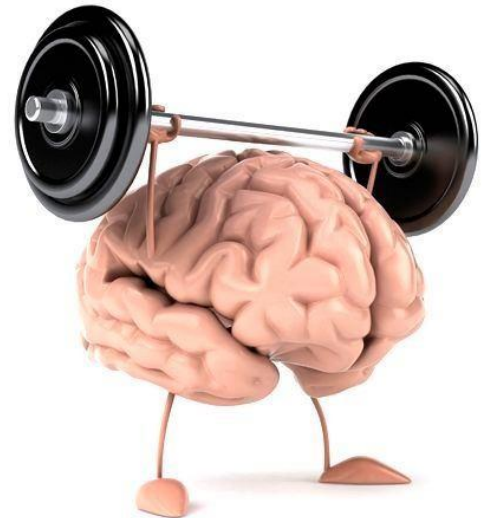
sr : el ángulo sólido de una porción de la esfera con área $r^2 \cdot 1 \text{ grado}^2 = 3,046 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$ (esteroradianes)

Ejercitación

Guía 1

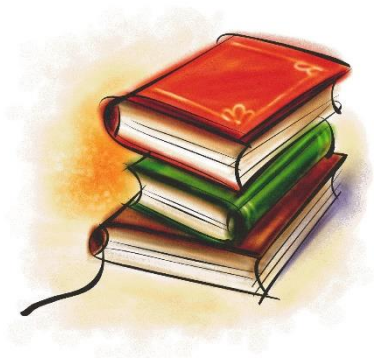


Ejercicios 11, 12, 16, 17 y 18



Bibliografía

- ✓ Young HD, Sears FW, Freedman, RA & Zemansky MW – “*Física universitaria con física moderna*”, Volumen II. Pearson Educación (CAPÍTULO 32)
- ✓ Serway RA & Jewett JW Jr. “*Física para ciencias e ingeniería*”, Volumen 2. (CAPÍTULO 34).
- ✓ Kane JW & Sternheim MM. Física. Reverté (CAPÍTULO 23).





**KEEP
CALM**

this
is

The End

