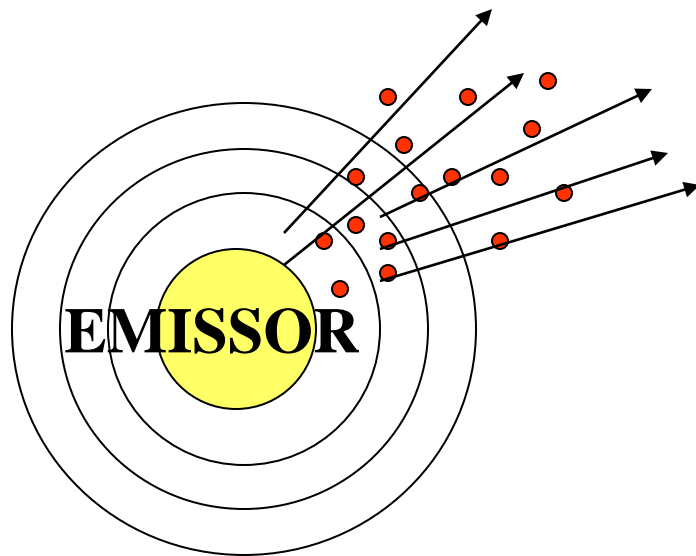




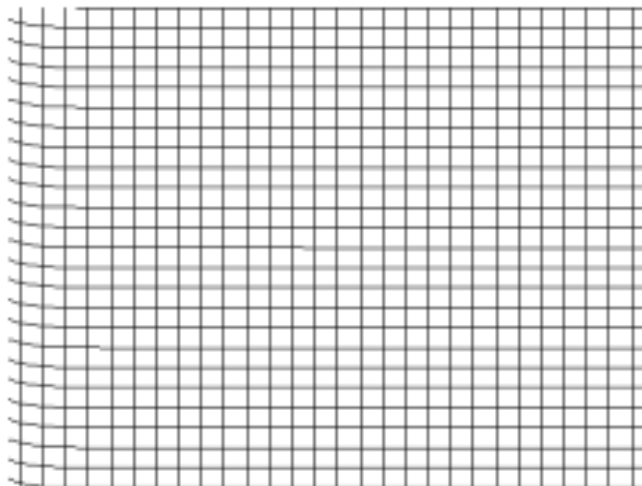
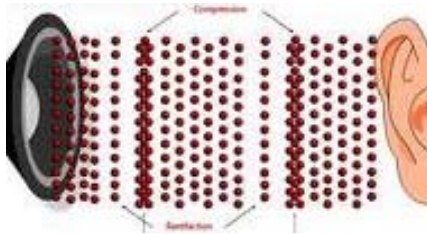
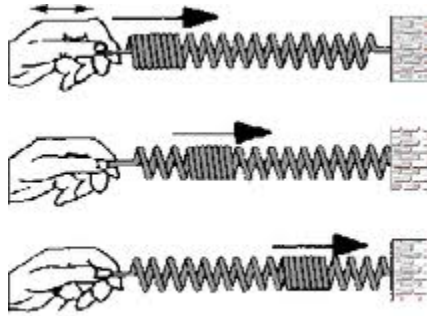
# Tema 5

# Ones electromagnètiques

- **Radiació:** Flux de partícules o d'energia emès per una font i que es propaga per l'espai o la matèria

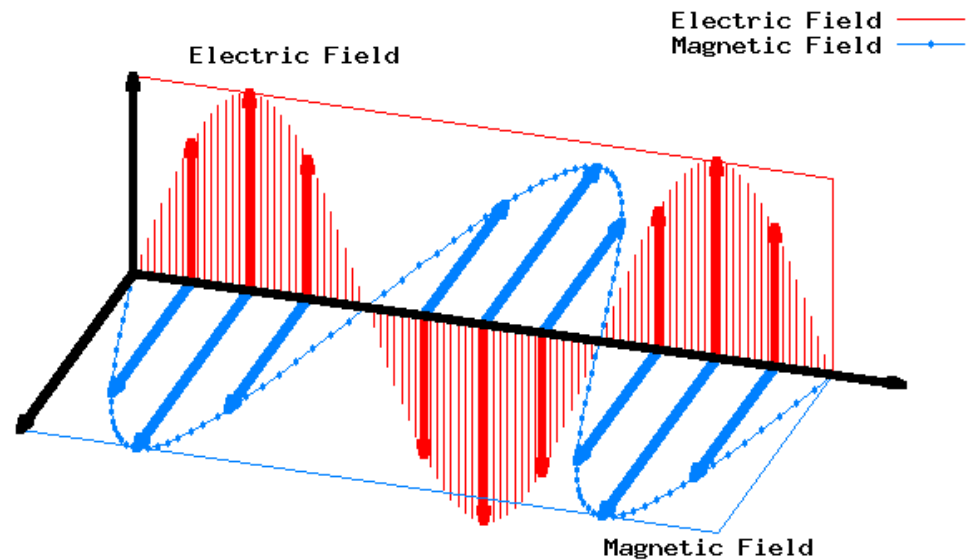


## Ones mecàniques:



## Ones electromagnètiques:

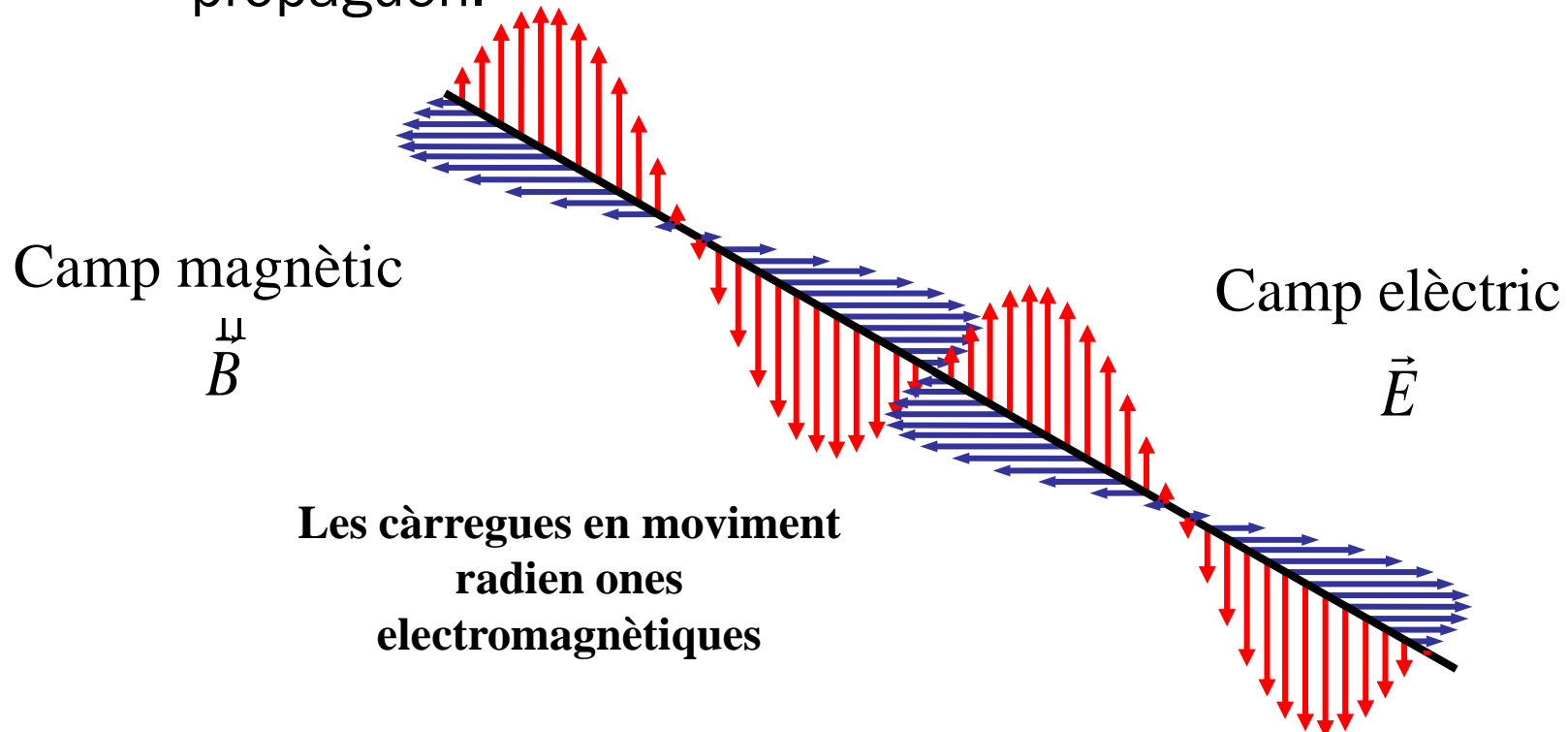
- Causades pel moviment de càrregues/camps electromagnètics
- Propagació a la velocitat de la llum



- Ones electromagnètiques
  - Oscil·lacions de camps elèctrics i magnètics que es propaguen pel buit o per un medi material
  - Es produeixen quan existeixen càrregues elèctriques que es mouen amb acceleració

- Ones electromagnètiques

- Pertorbació en l'espai i en el temps que transmet energia associada a un camp elèctric i/o magnètic
- Els camps, mútuament perpendiculars, oscil·len temporalment en forma sinusoidal a mesura que es propaguen.



- Equacions de Maxwell

$$\vec{\nabla} \equiv \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Llei de Gauss

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Llei de Faraday / Henry  
(inducció magnètica)

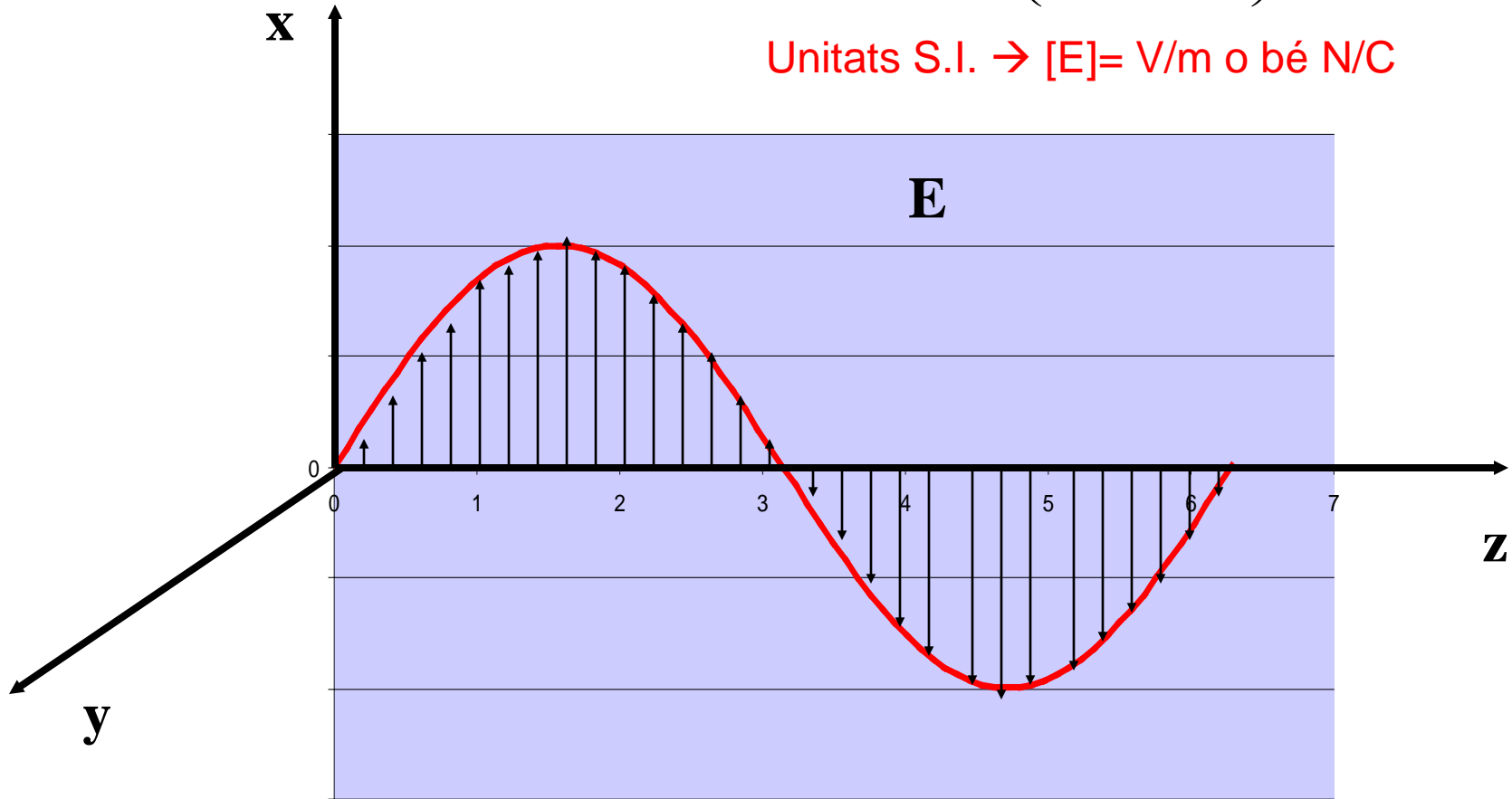
Llei d'Ampère + correcció de Maxwell

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot \vec{n} dS + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS \quad \Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- Camp elèctric

$$\vec{E} = E_0 \operatorname{sen} \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \vec{i}$$

Unitats S.I.  $\rightarrow [E] = \text{V/m}$  o bé  $\text{N/C}$

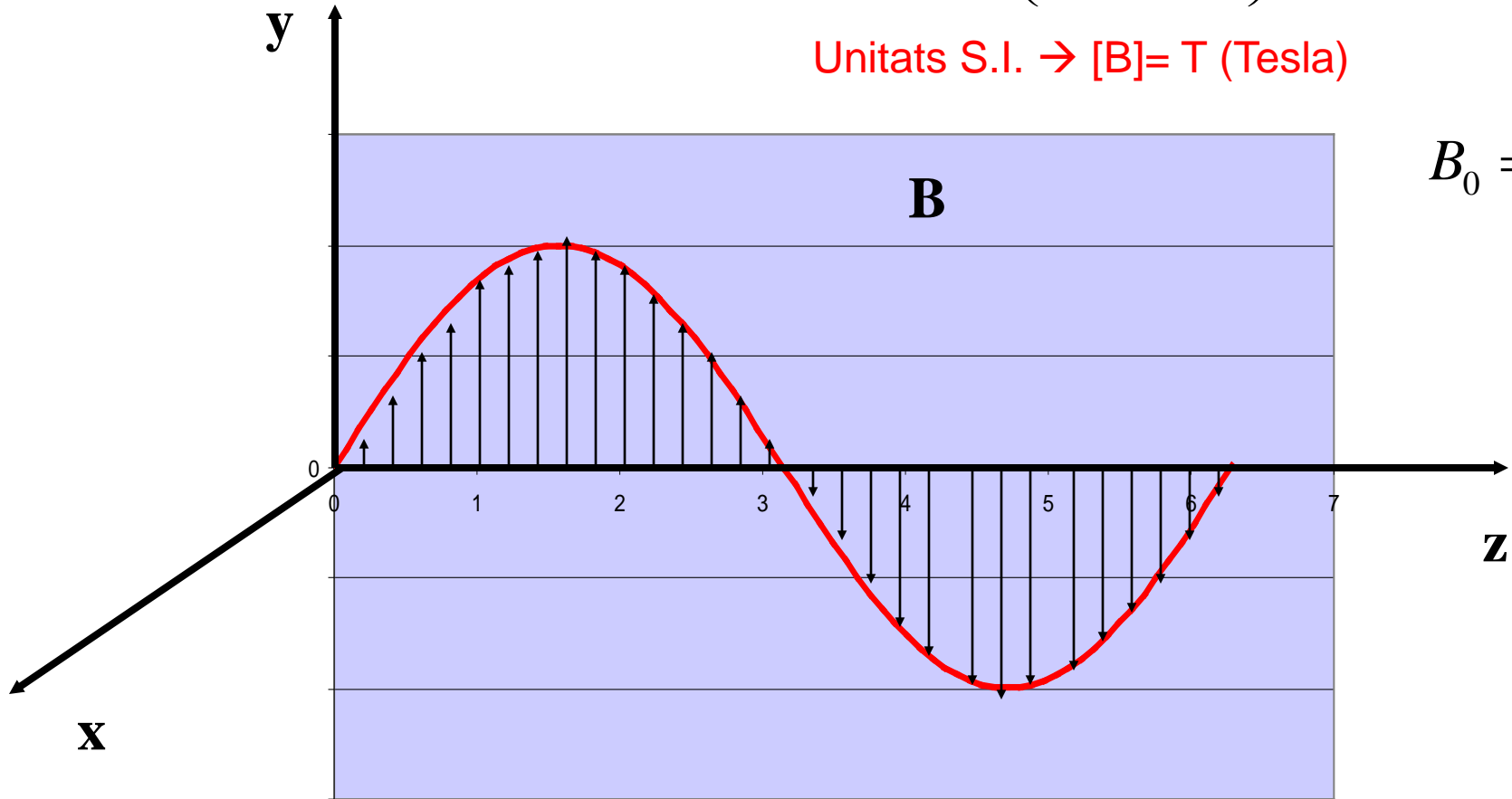


- Camp magnètic

$$\vec{B} = B_0 \text{sen} \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \vec{j}$$

Unitats S.I.  $\rightarrow [B] = \text{T (Tesla)}$

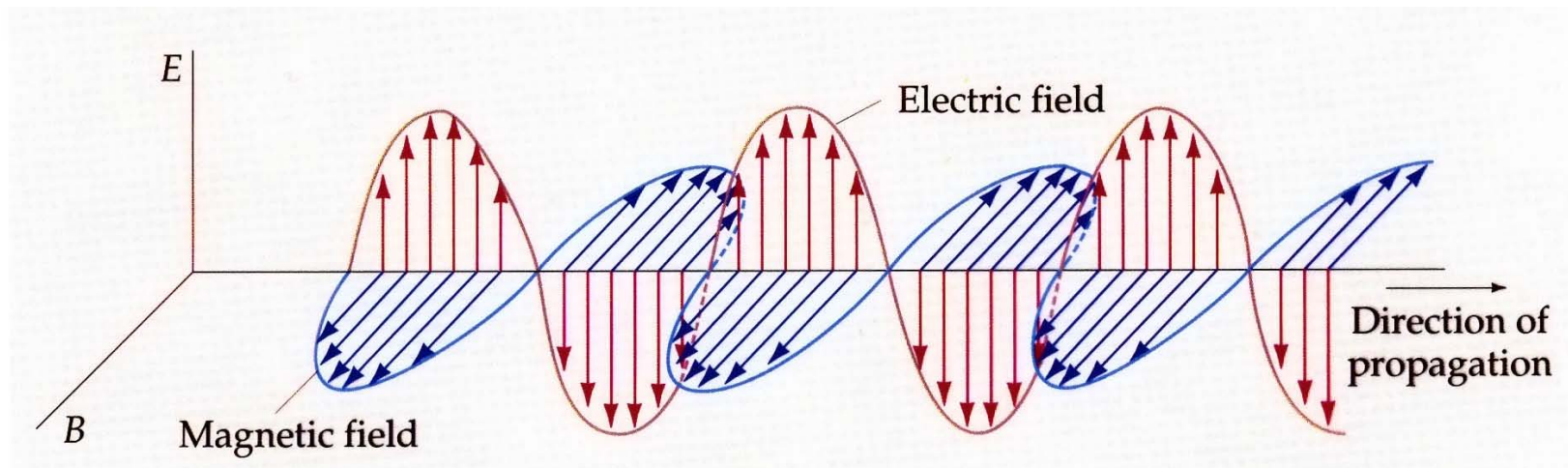
$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$



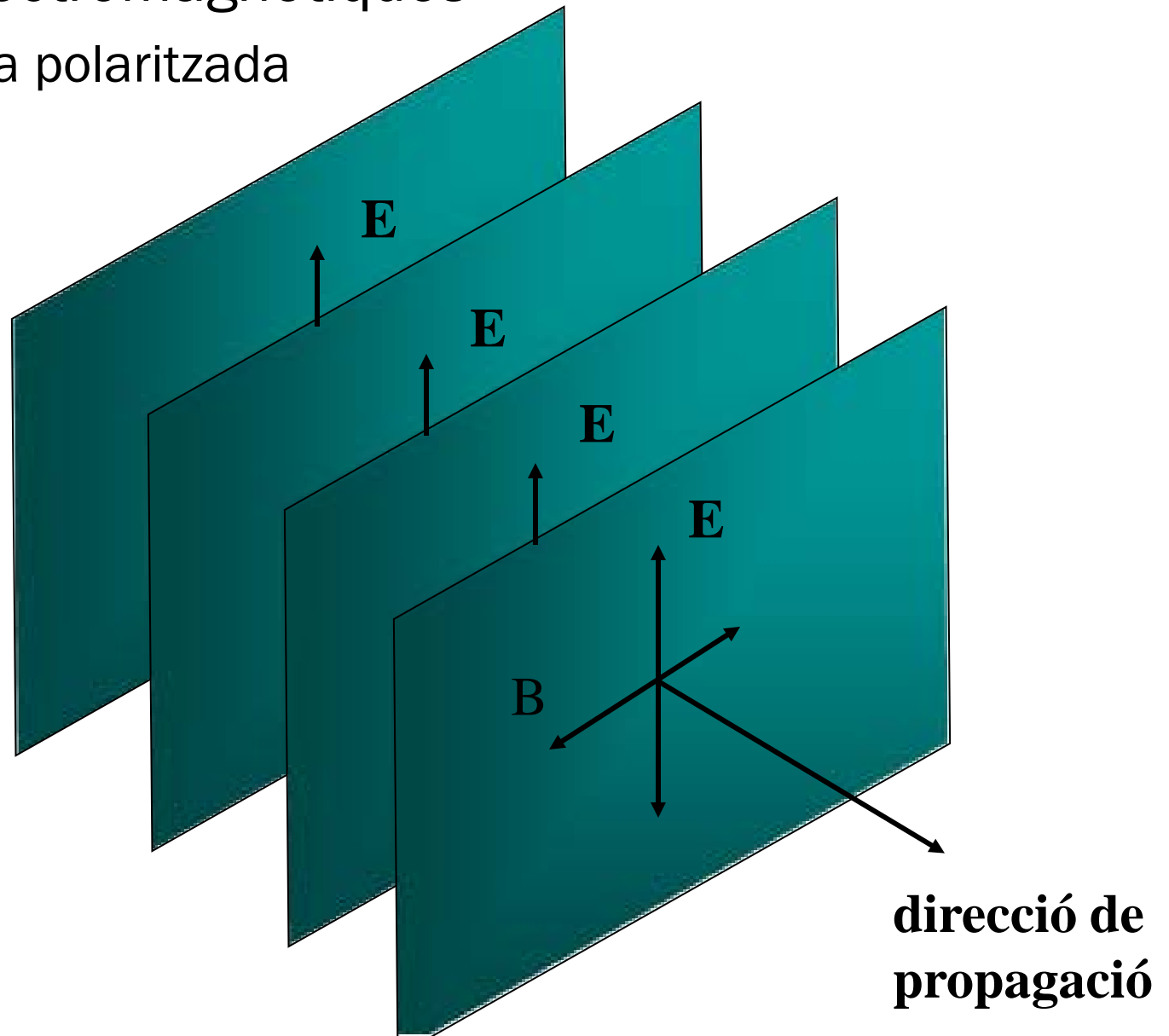
- Ones electromagnètiques
  - Es propaguen a la velocitat de la llum ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

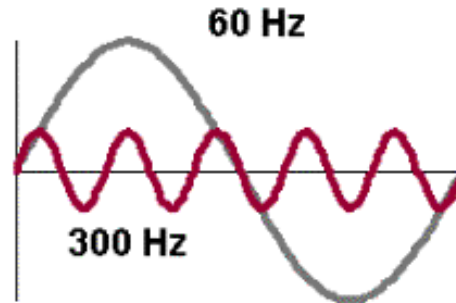
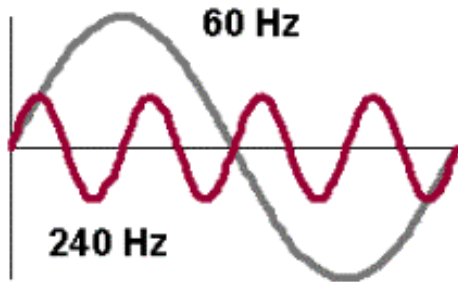
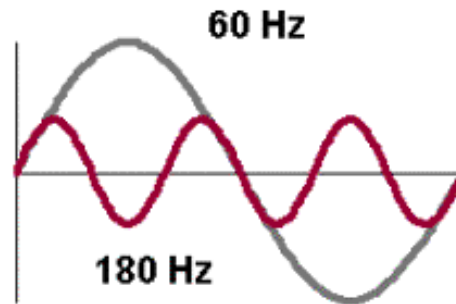
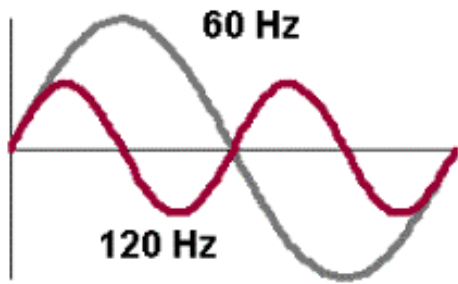
- Ones transversals (oscil·lacions perpendiculars a la direcció de propagació)



- Ones electromagnètiques
  - Ona plana polaritzada



- Ones electromagnètiques



Longitud d'ona,  $\lambda$ ,  
distància recorreguda per l'ona en el temps corresponent a una oscil·lació,  $T$ , anomenat període

$$\lambda = c \cdot T$$

Freqüència,  $f$ , número d'oscil·lacions en la unitat de temps

- 1 electronvolt (eV)
  - Energia que adquireix un electró sotmès a una diferència de potencial elèctric d'un volt

$$1 eV = 1,6 \cdot 10^{-19} C \cdot 1V = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

$$1 keV = 10^3 eV = 1,6 \cdot 10^{-16} J$$

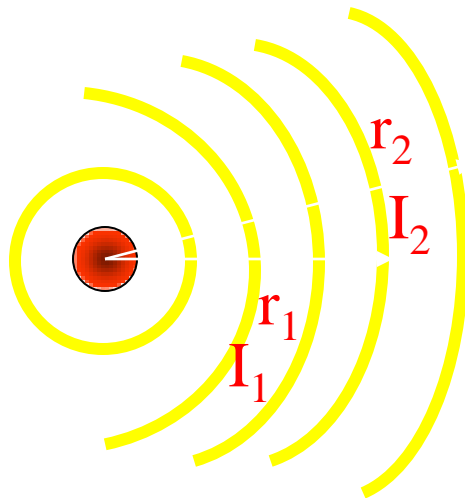
$$1 MeV = 10^6 eV = 1,6 \cdot 10^{-13} J$$

- Intensitat de l'ona

Potència per unitat d'àrea ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$$I = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S} \propto E_0 \cdot B_0$$

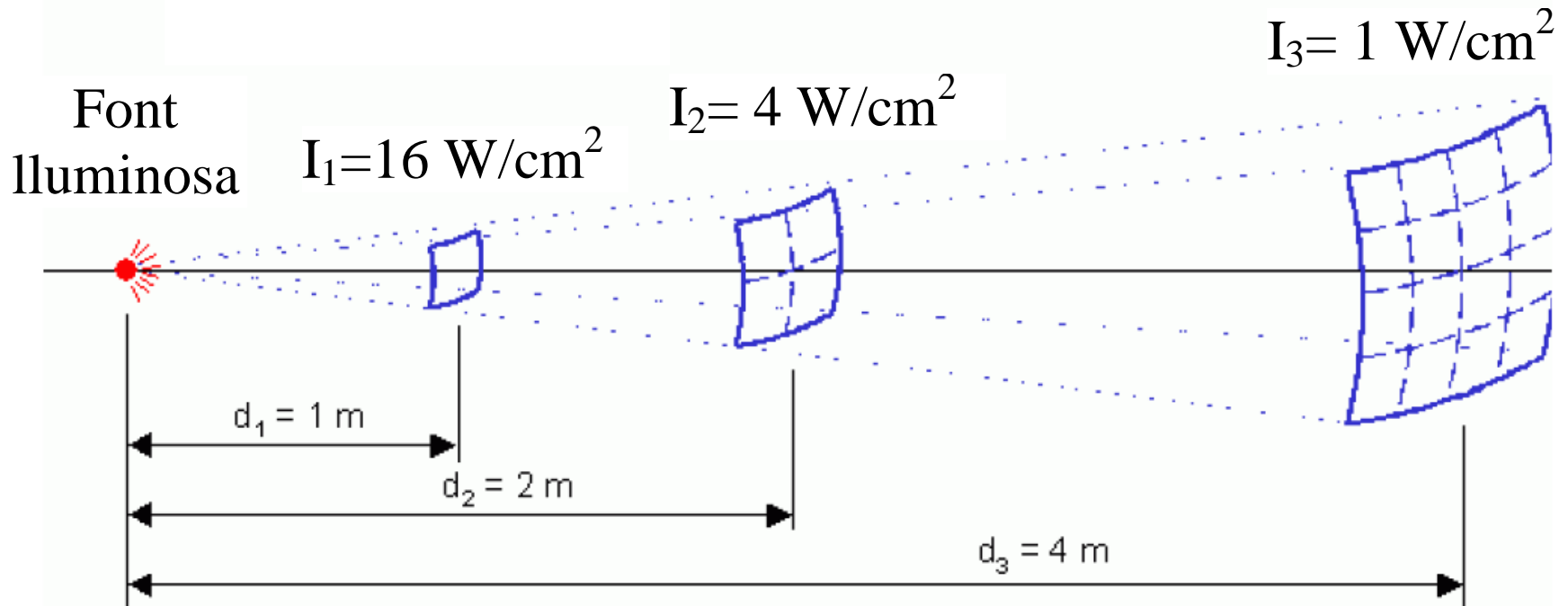
$$S_{\text{esfera}} = 4\pi r^2$$



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

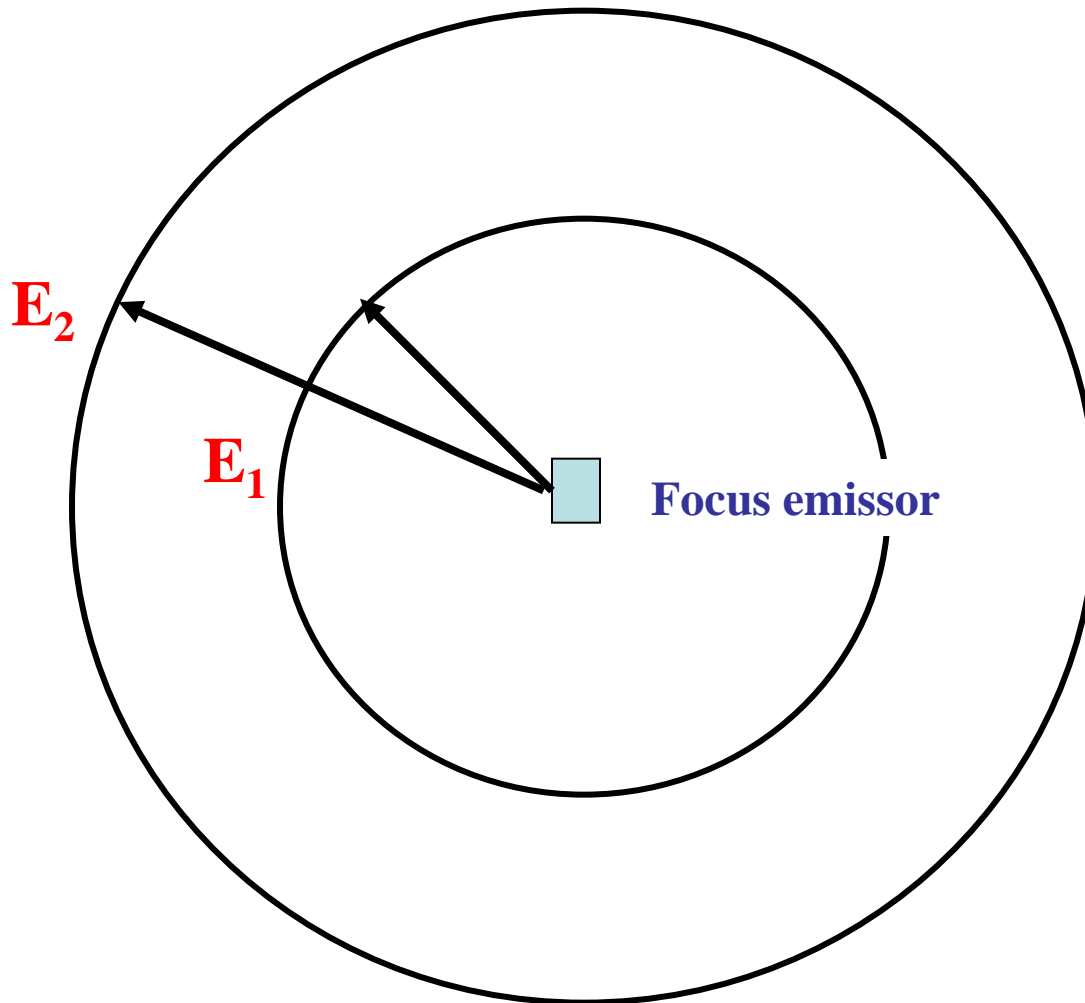
Suposant que no hi ha absorció d'energia al medi (propagació al buit)

- Llei de l'invers del quadrat de la distància



$$I_1 \cdot d_1^2 = I_2 \cdot d_2^2 = I_3 \cdot d_3^2$$

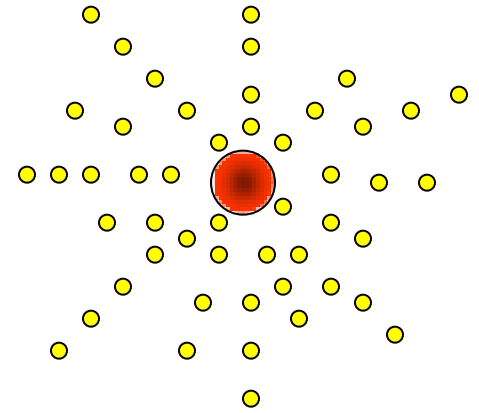
- Absorció d'energia en un medi material



$$E_2 < E_1$$

En un medi material, la intensitat no només decreix segons la llei del quadrat de la distància, sinó que també disminueix per absorció al medi.

- Concepte de fotó
- Interpretació corpuscular de la radiació electromagnètica



Partícula sense massa que es propaga a la velocitat de la llum  $c$

Energia del fotó:  $E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda}$

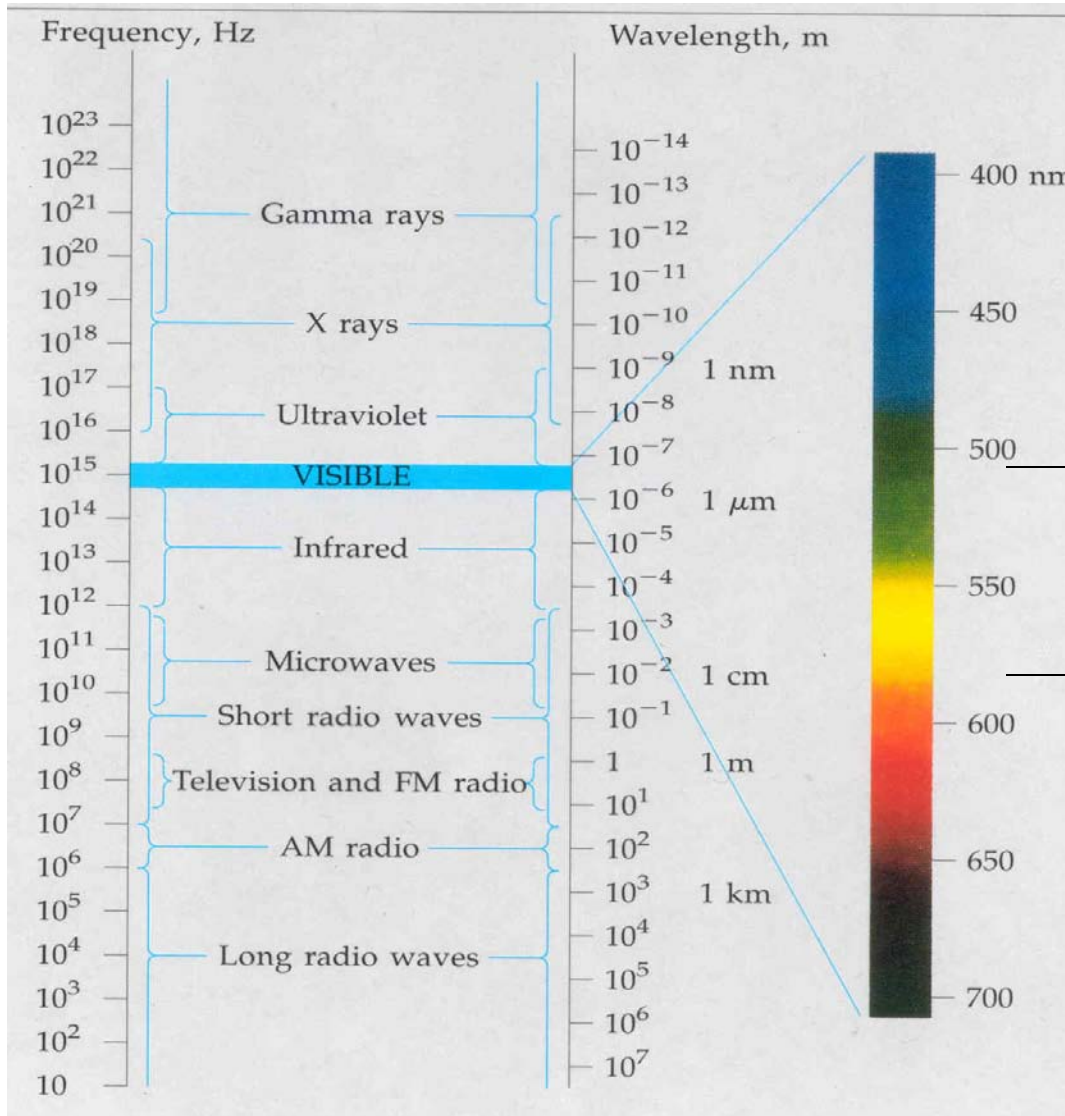
$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s, constant de Planck

Quantitat de moviment:

Partícules amb massa:  $p = m \cdot v$

Fotó:  $p = E/c$

- Espectre electromagnètic

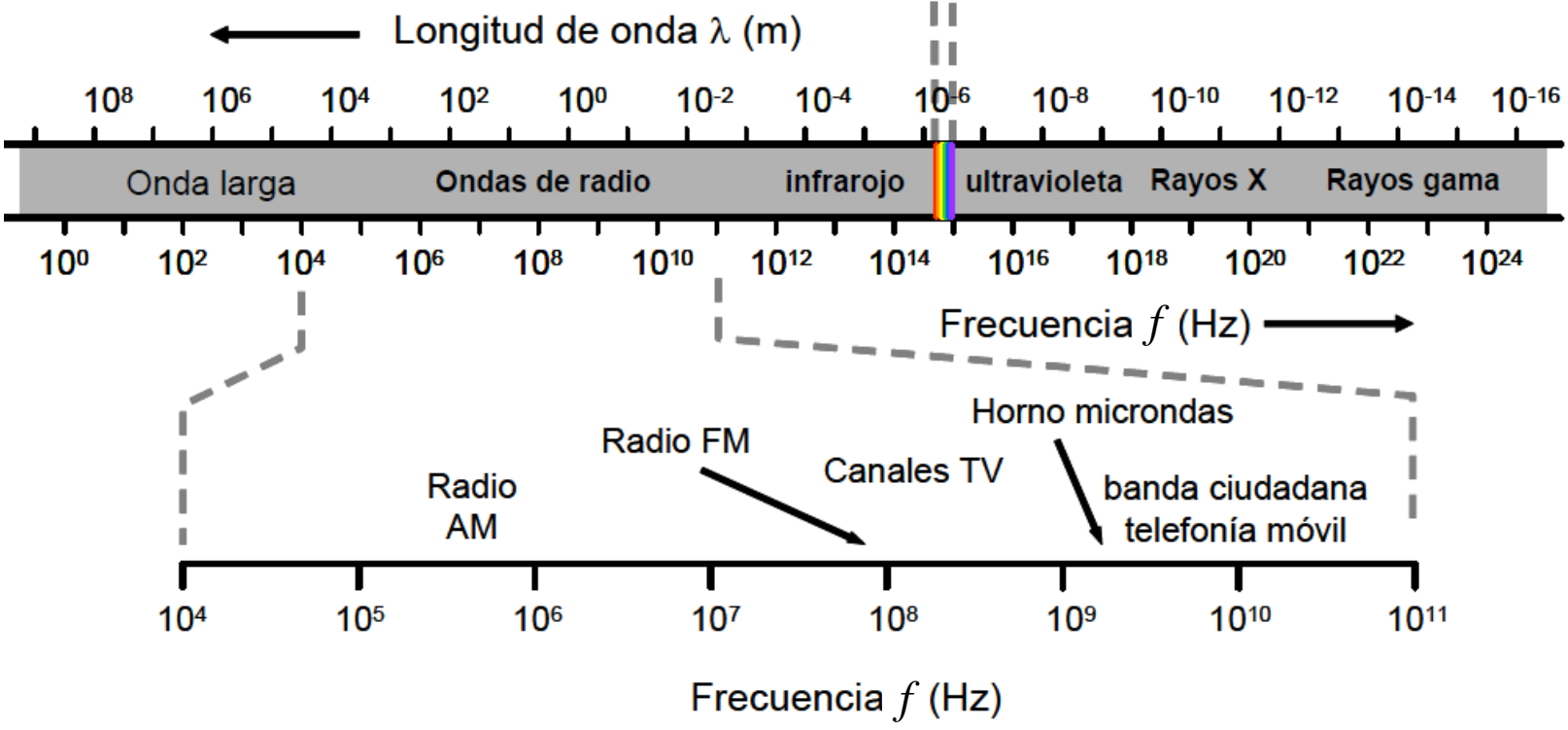
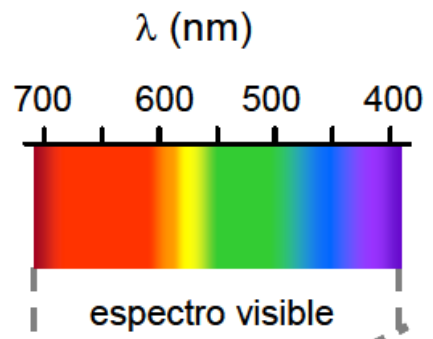


**Radiacions ionitzants**

**Radiacions òptiques**

**Camps electromagnètics**

$$\lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



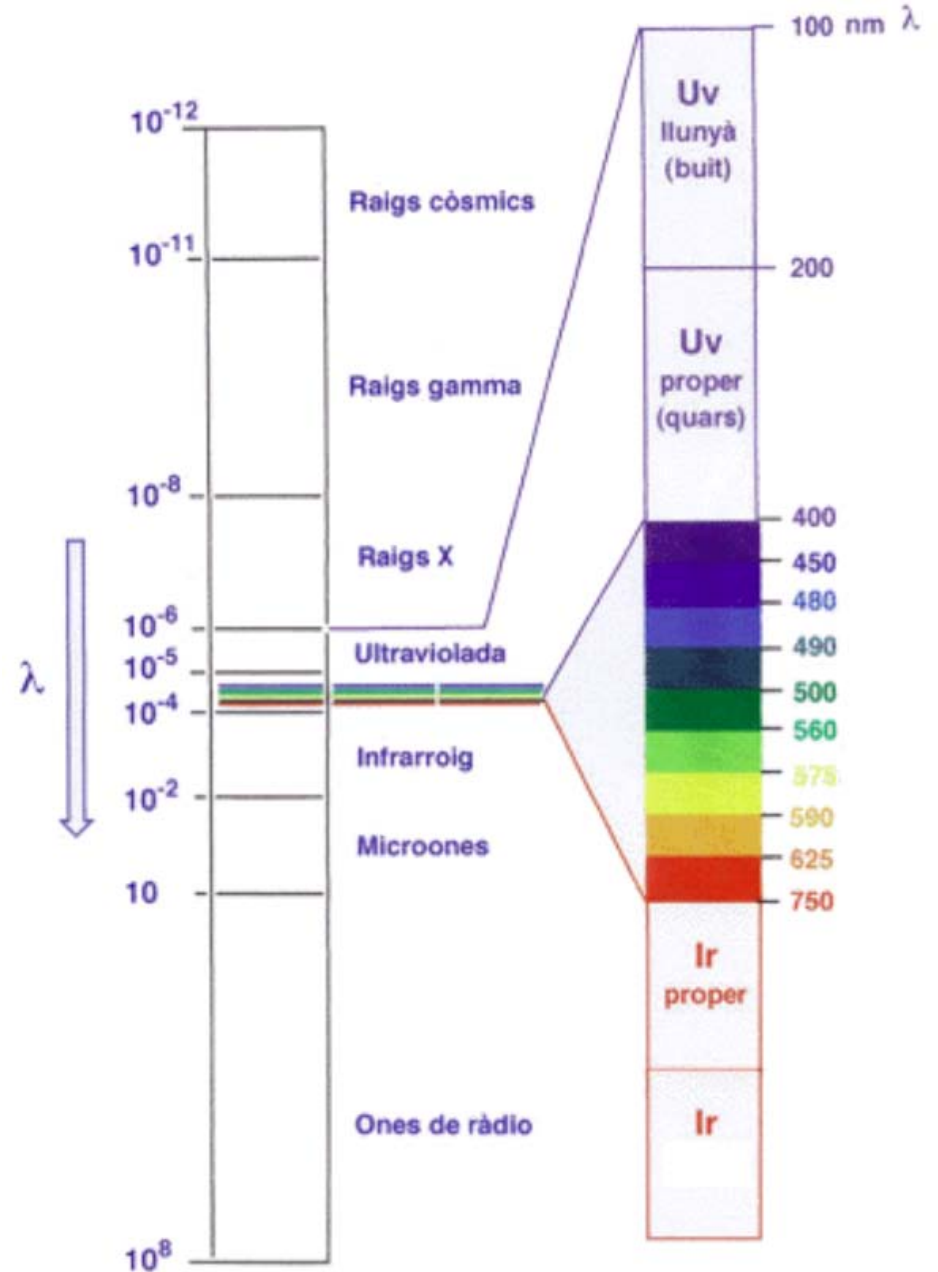
Radiació		Freqüència	Longitud d'onda	Energia (J)	
Radiació Òptica (RO)	Radiació Ultraviolada	UV-C	1071 THz a 30 PHz	280 a 100 nm	$7.1 \cdot 10^{-19}$ a $2.0 \cdot 10^{-18}$
		UV-B	952 a 1071 THz	315 a 280 nm	$6.3 \cdot 10^{-19}$ a $7.1 \cdot 10^{-19}$
		UV-A	750 a 952 THz	400 a 315 nm	$5.0 \cdot 10^{-19}$ a $6.3 \cdot 10^{-19}$
	Radiació Visible	Violeta	707 a 750 THz	424 a 400 nm	$4.7 \cdot 10^{-19}$ a $5.0 \cdot 10^{-19}$
		Blau	611 a 707 THz	491 a 424 nm	$4.0 \cdot 10^{-19}$ a $4.7 \cdot 10^{-19}$
		Verd	522 a 611 THz	575 a 491 nm	$3.5 \cdot 10^{-19}$ a $4.0 \cdot 10^{-19}$
		Groc	513 a 522 THz	585 a 575 nm	$3.4 \cdot 10^{-19}$ a $3.5 \cdot 10^{-19}$
		Taronja	463 a 513 THz	647 a 585 nm	$3.1 \cdot 10^{-19}$ a $3.4 \cdot 10^{-19}$
		Vermell	385 a 463 THz	780 a 647 nm	$2.5 \cdot 10^{-19}$ a $3.1 \cdot 10^{-19}$
	Radiació Infraroja (IR)	I. Proper	214 a 385 THz	1.4 $\mu$ m a 780 nm	$1.4 \cdot 10^{-19}$ a $2.5 \cdot 10^{-19}$
		I. Mig	100 a 214 THz	3 a 1.4 $\mu$ m	$6.6 \cdot 10^{-20}$ a $1.4 \cdot 10^{-19}$
		I. Llunyà	300 GHz a 100 THz	1 mm a 3 $\mu$ m	$2 \cdot 10^{-22}$ a $6.6 \cdot 10^{-20}$
	Camps electromagnètics (CEM)	Microones (MO)	EHF	30 a 300 GHz	10 a 1 mm
SHF			3 a 30 GHz	100 a 10 mm	$2 \cdot 10^{-24}$ a $2 \cdot 10^{-23}$
UHF			0.3 a 3 GHz	1 a 0.1 m	$2 \cdot 10^{-25}$ a $2 \cdot 10^{-24}$
Radio-freqüència (RF)		VHF	30 a 300 MHz	10 a 1 m	$2 \cdot 10^{-26}$ a $2 \cdot 10^{-25}$
		HF	3 a 30 MHz	100 a 10 m	$2 \cdot 10^{-27}$ a $2 \cdot 10^{-26}$
		MF	0.3 a 3 MHz	1 km a 100 m	$2 \cdot 10^{-28}$ a $2 \cdot 10^{-27}$
		LF	30 a 300 kHz	10 a 1 km	$2 \cdot 10^{-29}$ a $2 \cdot 10^{-28}$
Ones de molt baixa freqüència		VLF	3 a 30 kHz	100 a 10 km	$2 \cdot 10^{-30}$ a $2 \cdot 10^{-29}$
		ELF	0 a 3 kHz	L > 100 km	$E < 2 \cdot 10^{-30}$
		CE	0 Hz	$\infty$	0

- Espectre electromagnètic

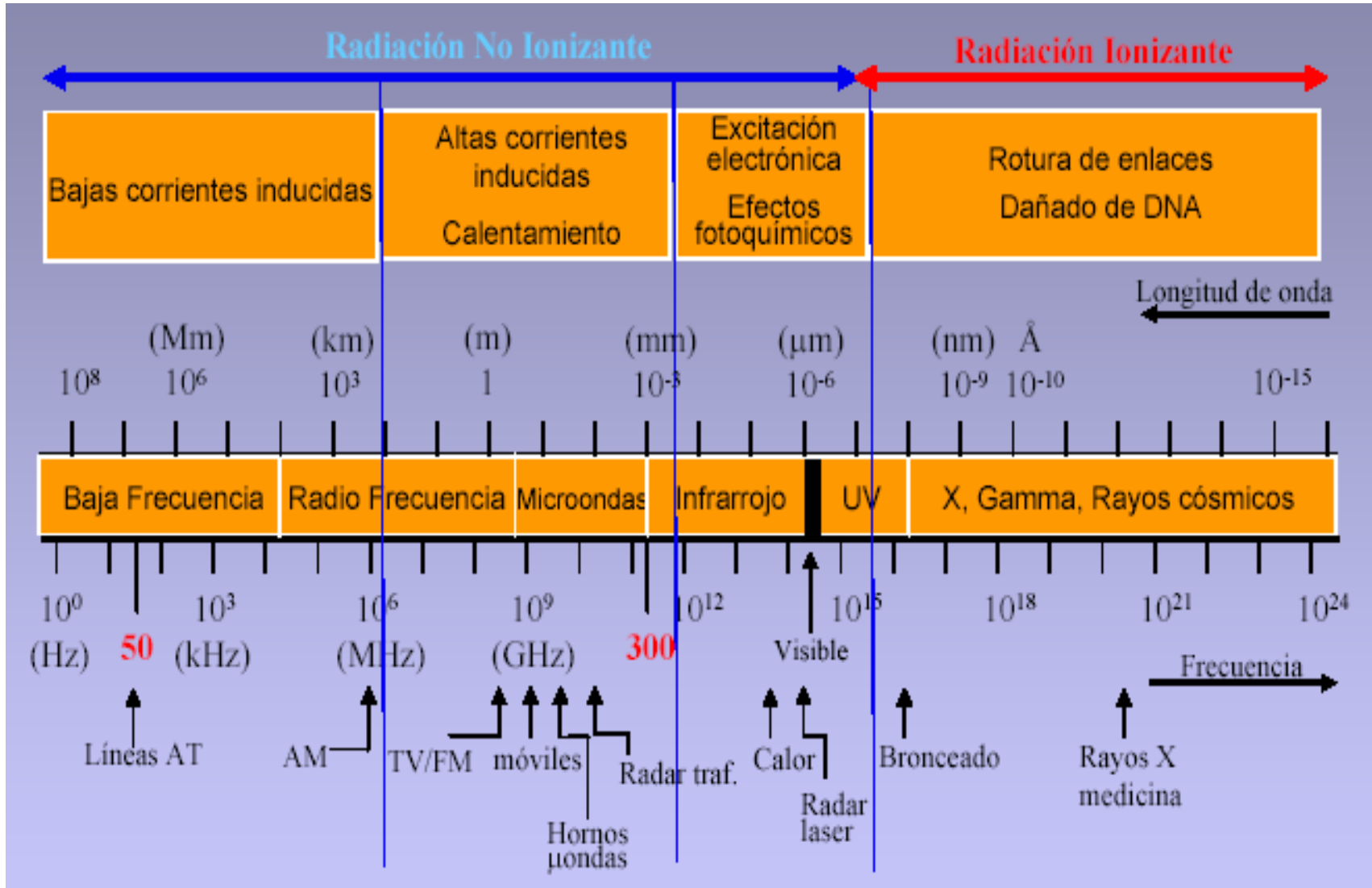
$$E = h \cdot f$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

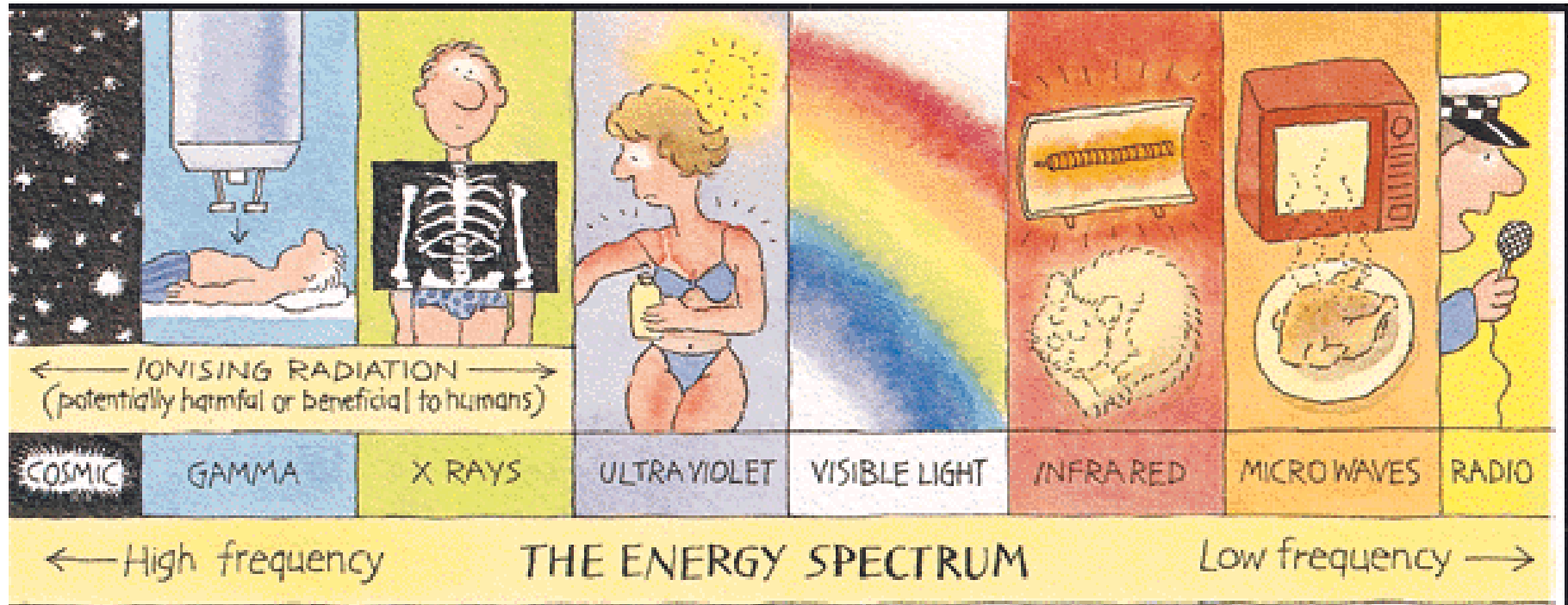
$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$



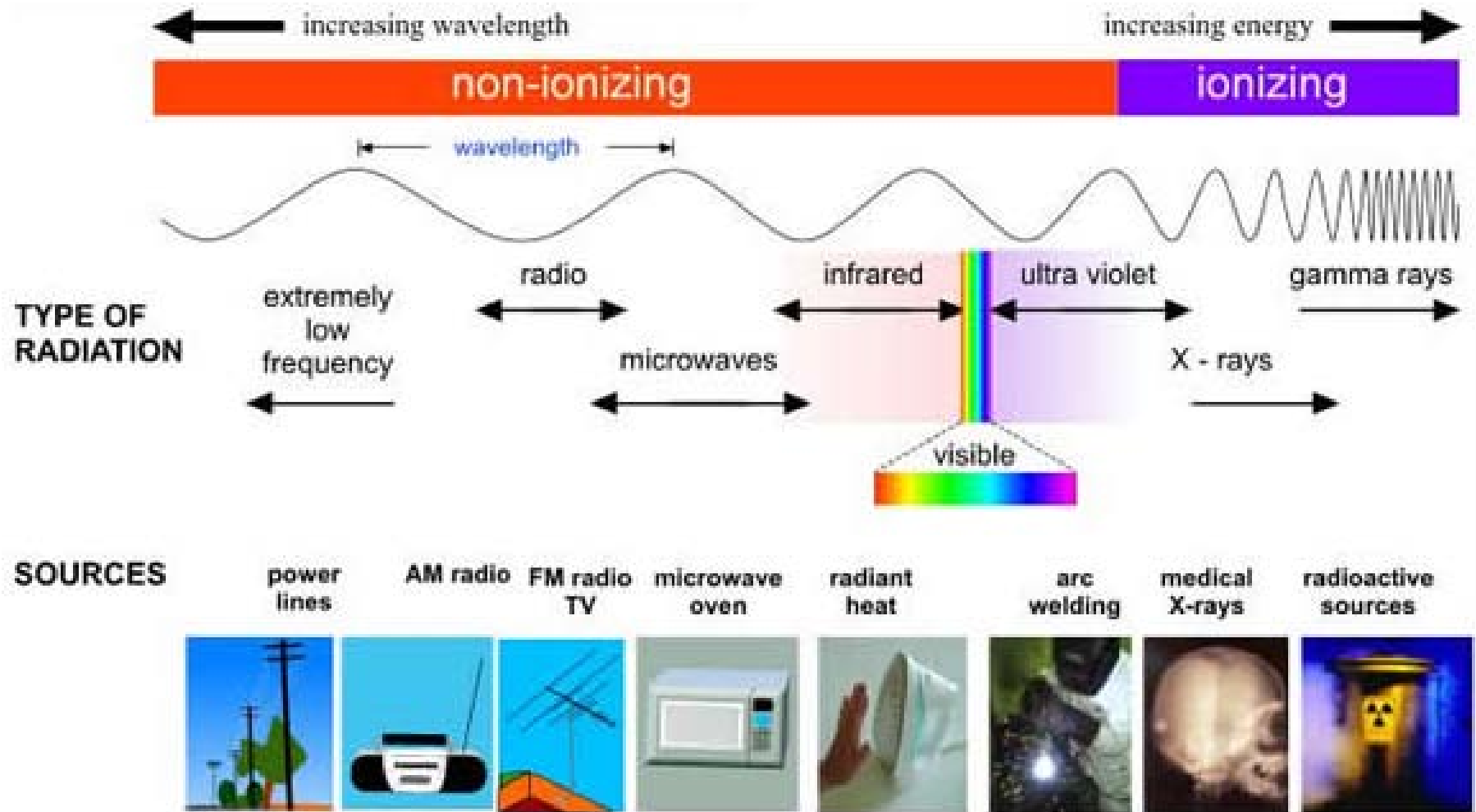
- Espectre electromagnètic (efectes)



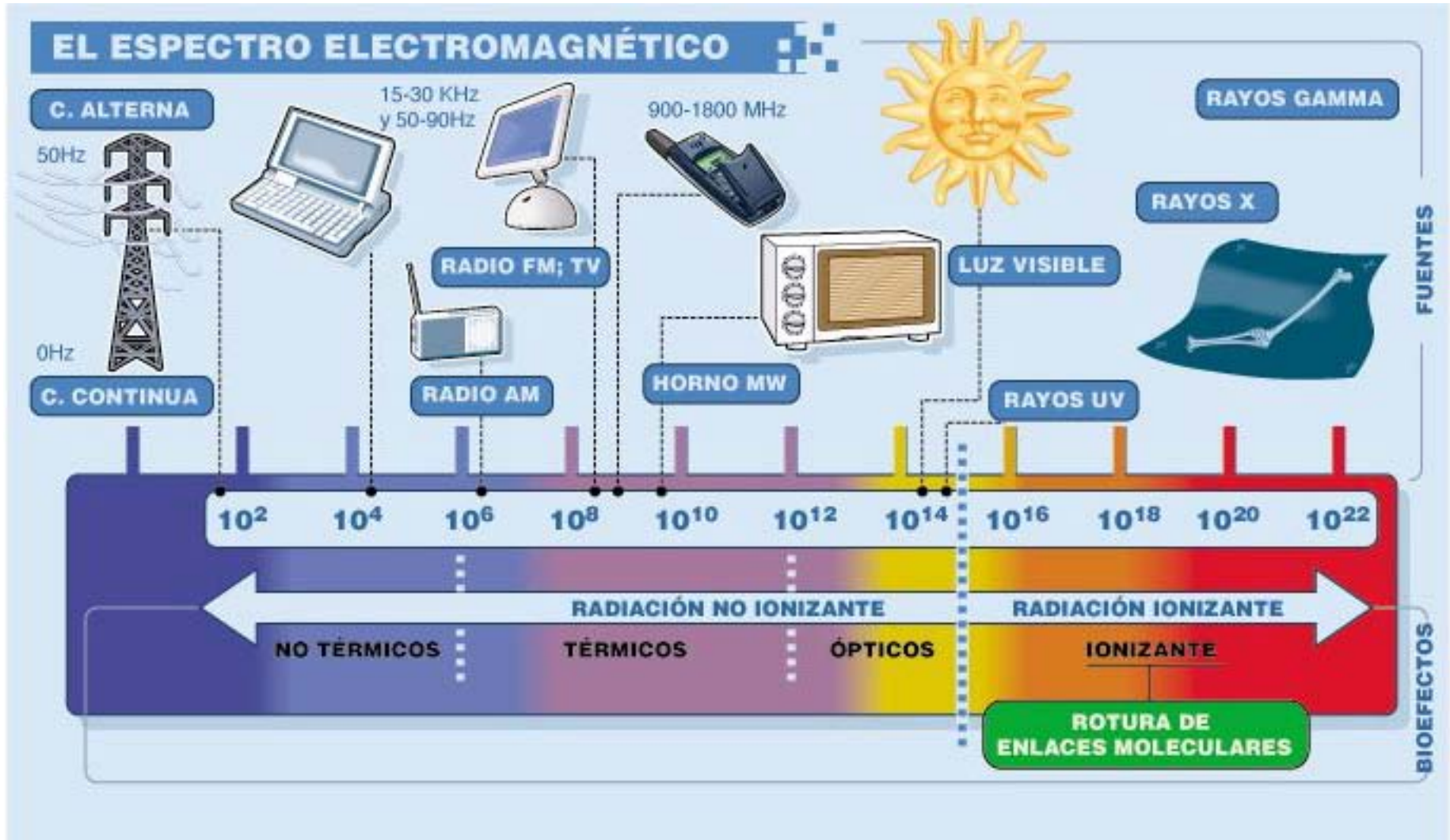
- Espectre electromagnètic (usos)



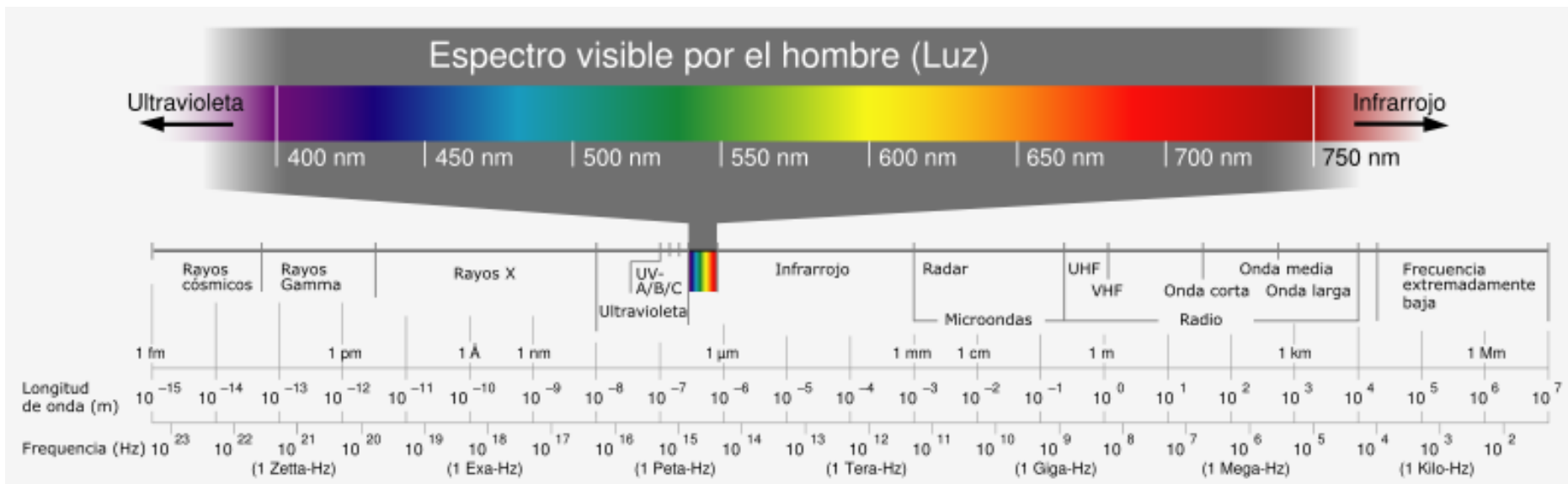
- Espectre electromagnètic (usos)



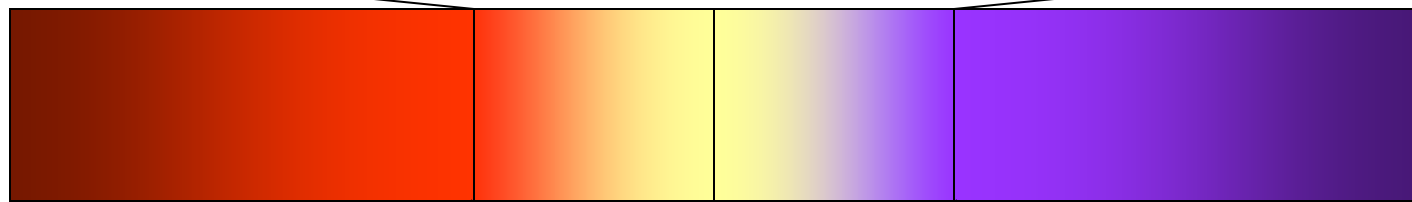
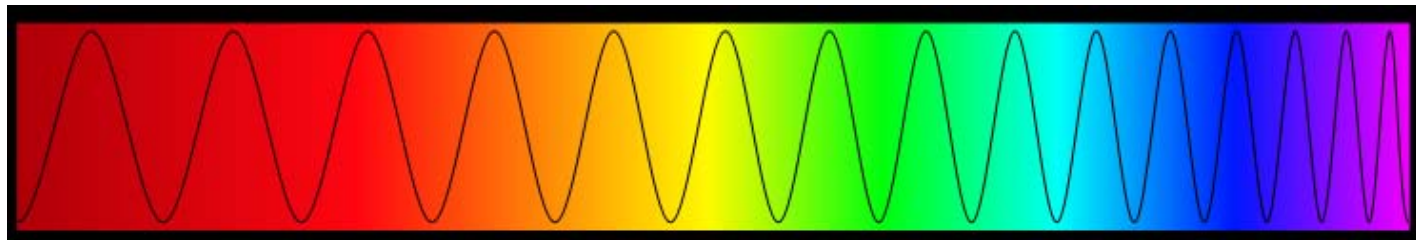
- Espectre electromagnètic (usos i efectes)



- Espectre electromagnètic



- Radiació òptica



**Infraroig**

**Visible**

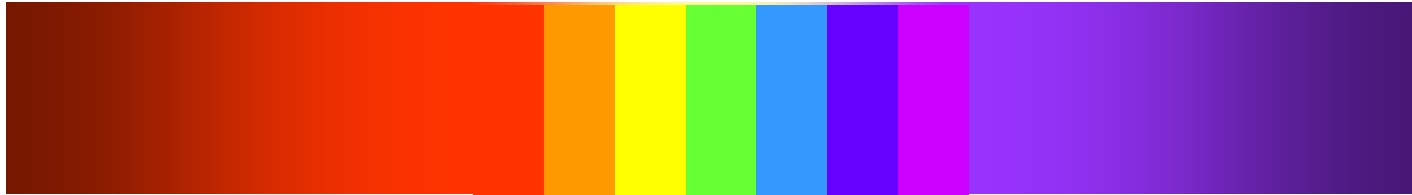
**Ultraviolada**

$$730 \text{ nm} > \lambda > 380 \text{ nm}$$

$$4,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz} < f < 7,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$1,7 \text{ eV} < E_{\text{fotó}} < 3,3 \text{ eV}$$

- Radiació òptica

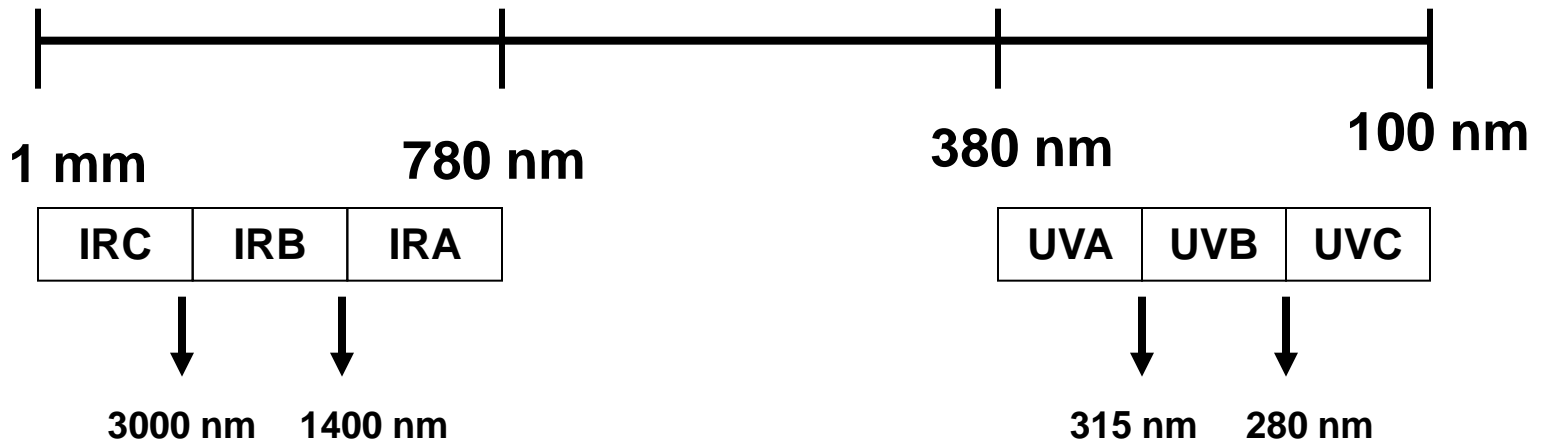


**INFRARROJOS (IR)**

**VISIBLE**

**ULTRAVIOLETA (UV)**

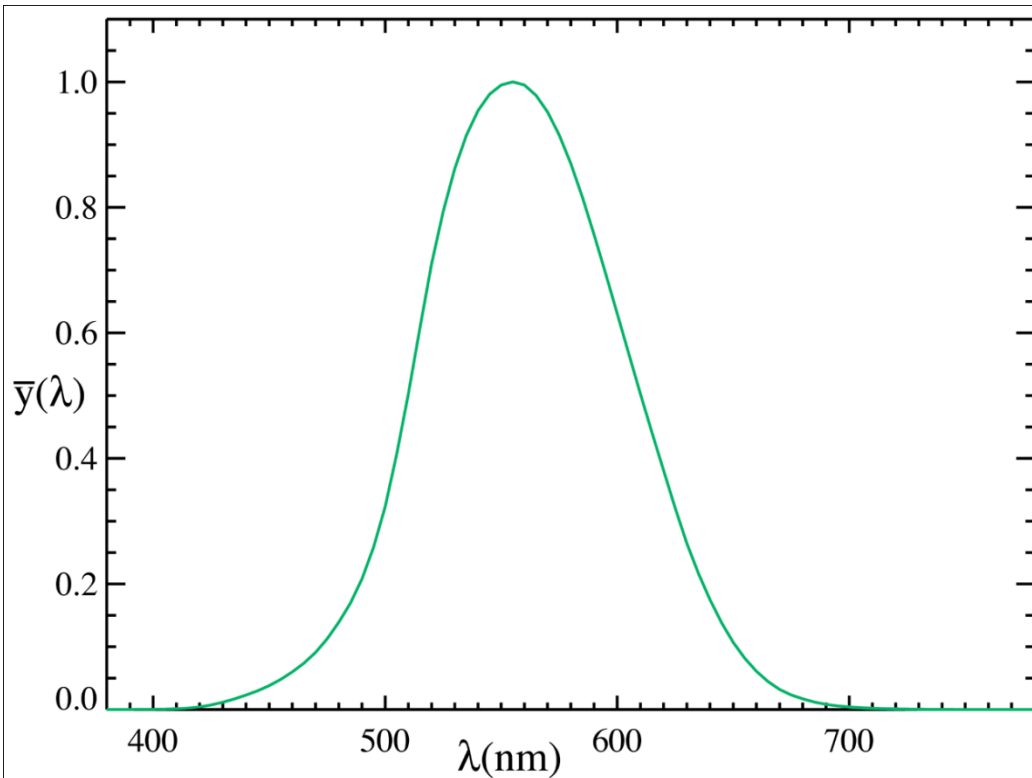
$\lambda$



- Radiació òptica: espectre visible

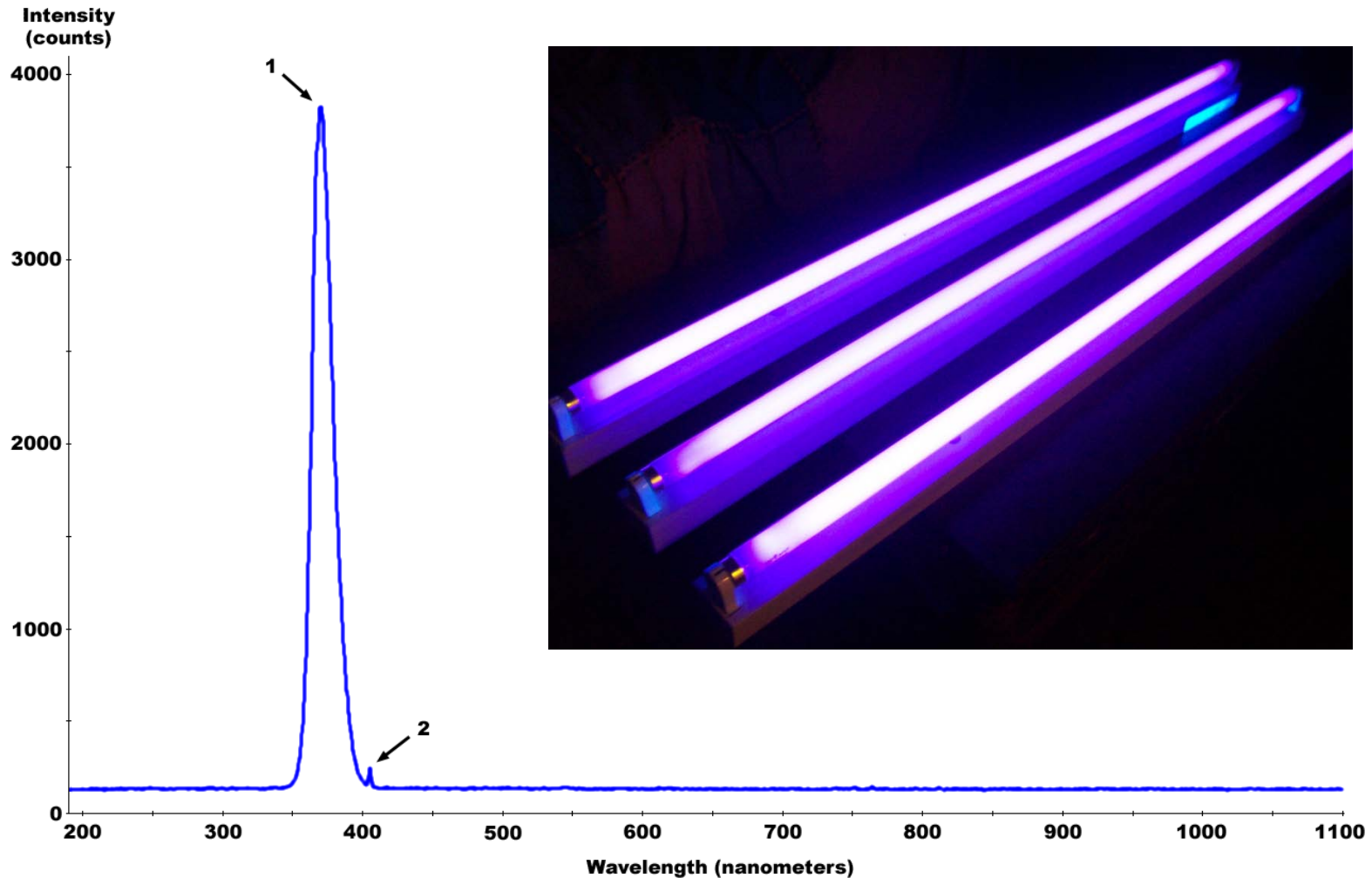
Color	Longitud d'ona ( $\lambda$ )	Freqüència
Violat	~ 380 a 430 nm	~ 790 a 700 THz
Blau	~ 430 a 500 nm	~ 700 a 600 THz
Cian	~ 500 a 520 nm	~ 600 a 580 THz
Verd	~ 520 a 565 nm	~ 580 a 530 THz
Groc	~ 565 a 590 nm	~ 530 a 510 THz
Taronja	~ 590 a 625 nm	~ 510 a 480 THz
Vermell	~ 625 a 740 nm	~ 480 a 405 THz

- Sensibilitat espectral de l'ull humà

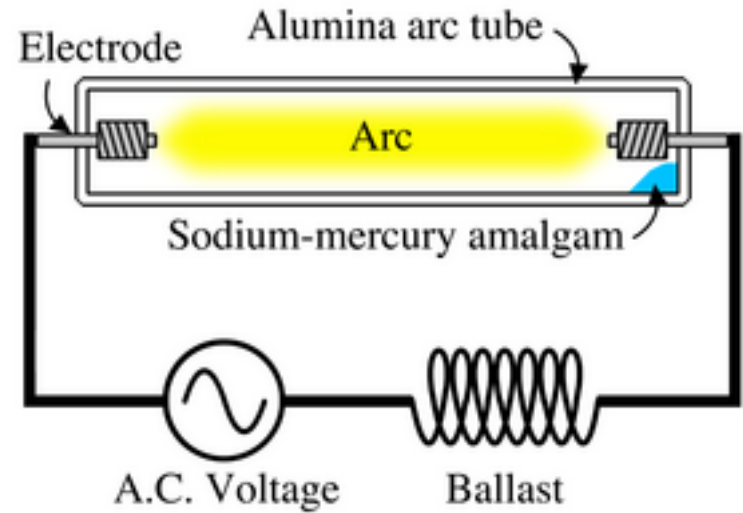


Color	Longitud d'ona (l)
Violat	~ 380 a 430 nm
Blau	~ 430 a 500 nm
Cian	~ 500 a 520 nm
Verd	~ 520 a 565 nm
Groc	~ 565 a 590 nm
Taronja	~ 590 a 625 nm
Vermell	~ 625 a 740 nm

- Espectre d'un fluorescent de "llum negra"



- Fonts emissores de radiació òptica

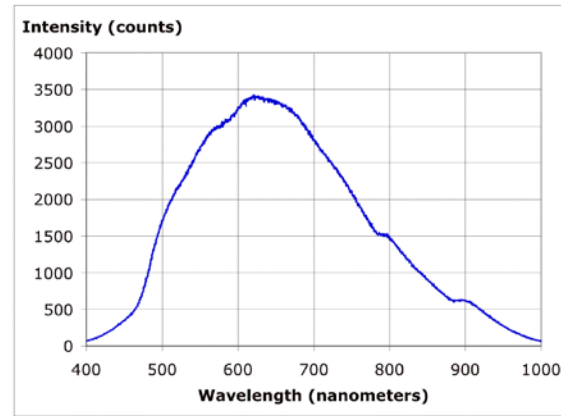


- INCANDESCÈNCIA
- FLUORESCÈNCIA
- LÀSER

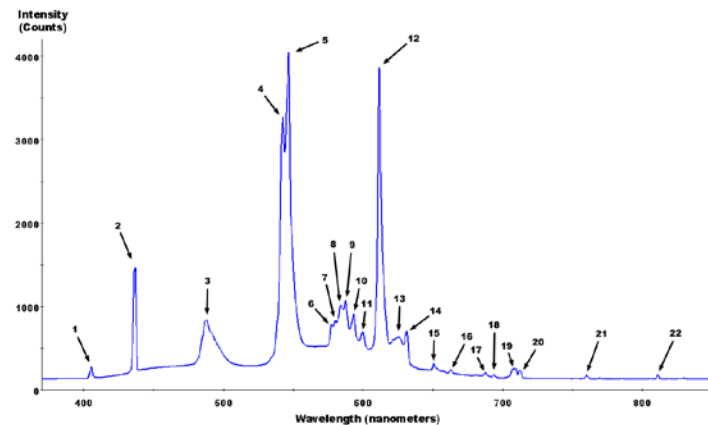
- Fonts emissores de radiació òptica



Làmpada  
d'incandescència



Làmpada  
fluorescent



- Fonts emissores de radiació òptica



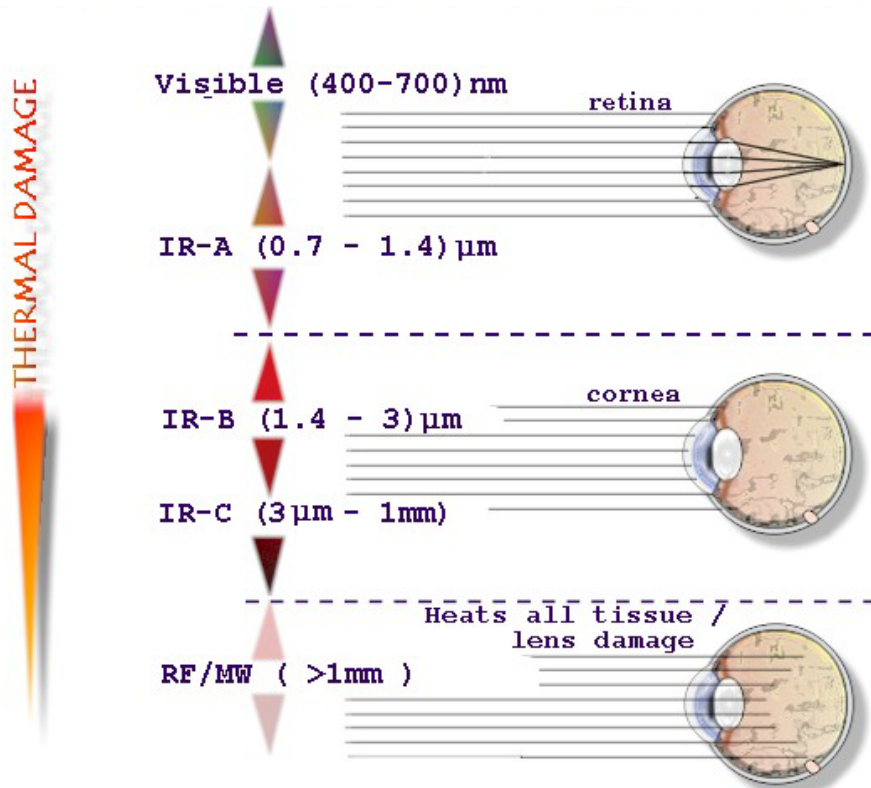
Làmpada de sodi d'alta pressió



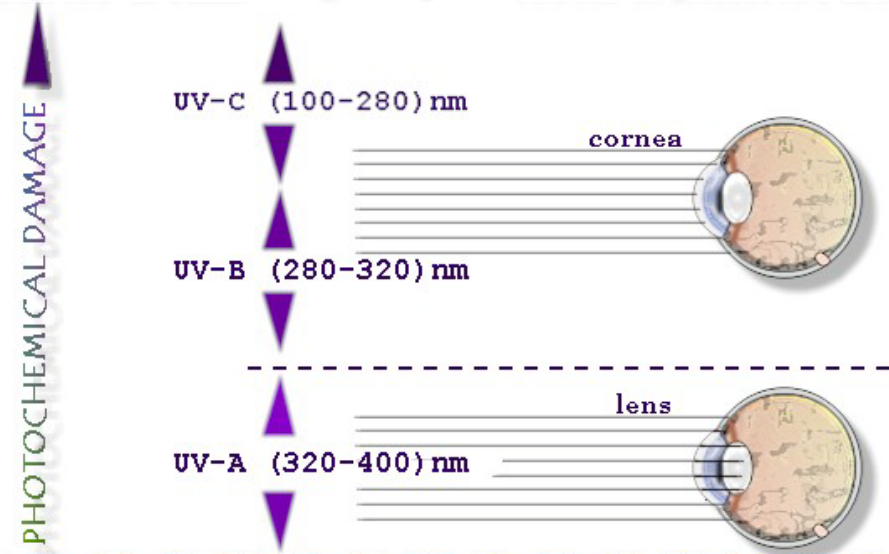
Làmpada de sodi de baixa pressió

# Mecanismes d'interacció:

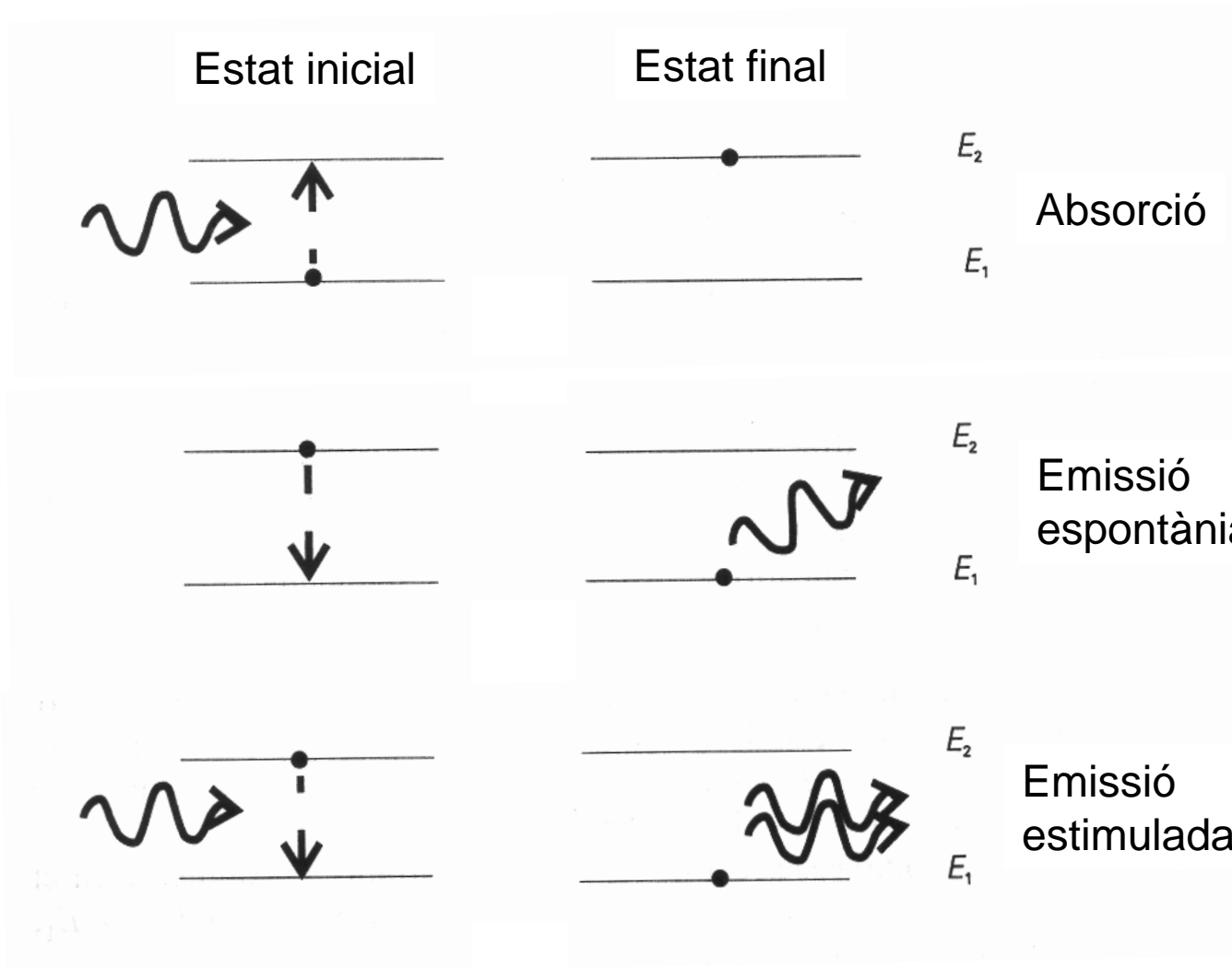
- Fotoquímics
- Tèrmics



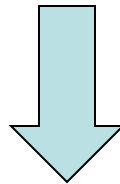
# Eye Tissue Damaged By Non-Ionizing Radiation



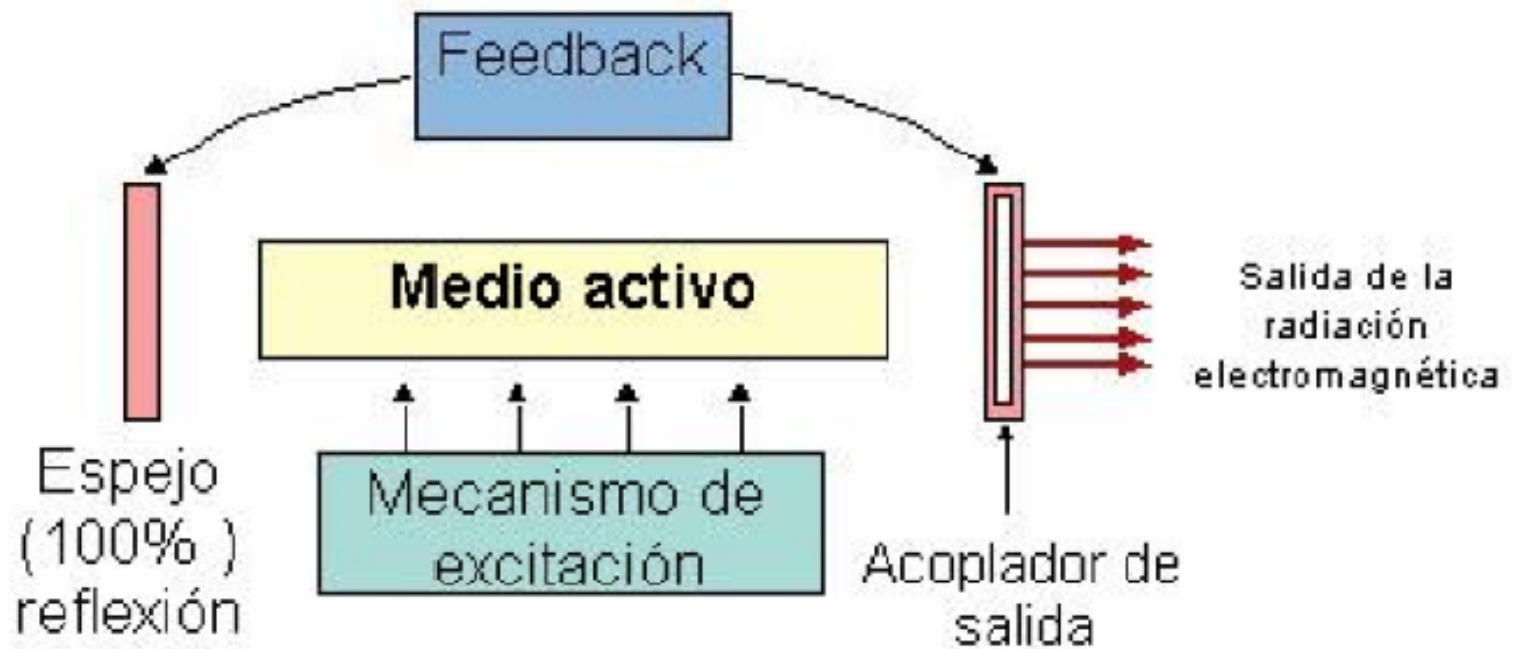
# Làser: Amplificació de llum per emissió estimulada de radiació



- **Propietats de l'emissió Làser:**
  - Monocromaticitat
  - Coherència (temporal y espacial)
  - Direccionalitat i col·limació elevada



Intensitat elevada, especialment si és polsat



Medi actiu: Pot ser sòlid, líquid, gas o plasma

Mecanisme d'excitació

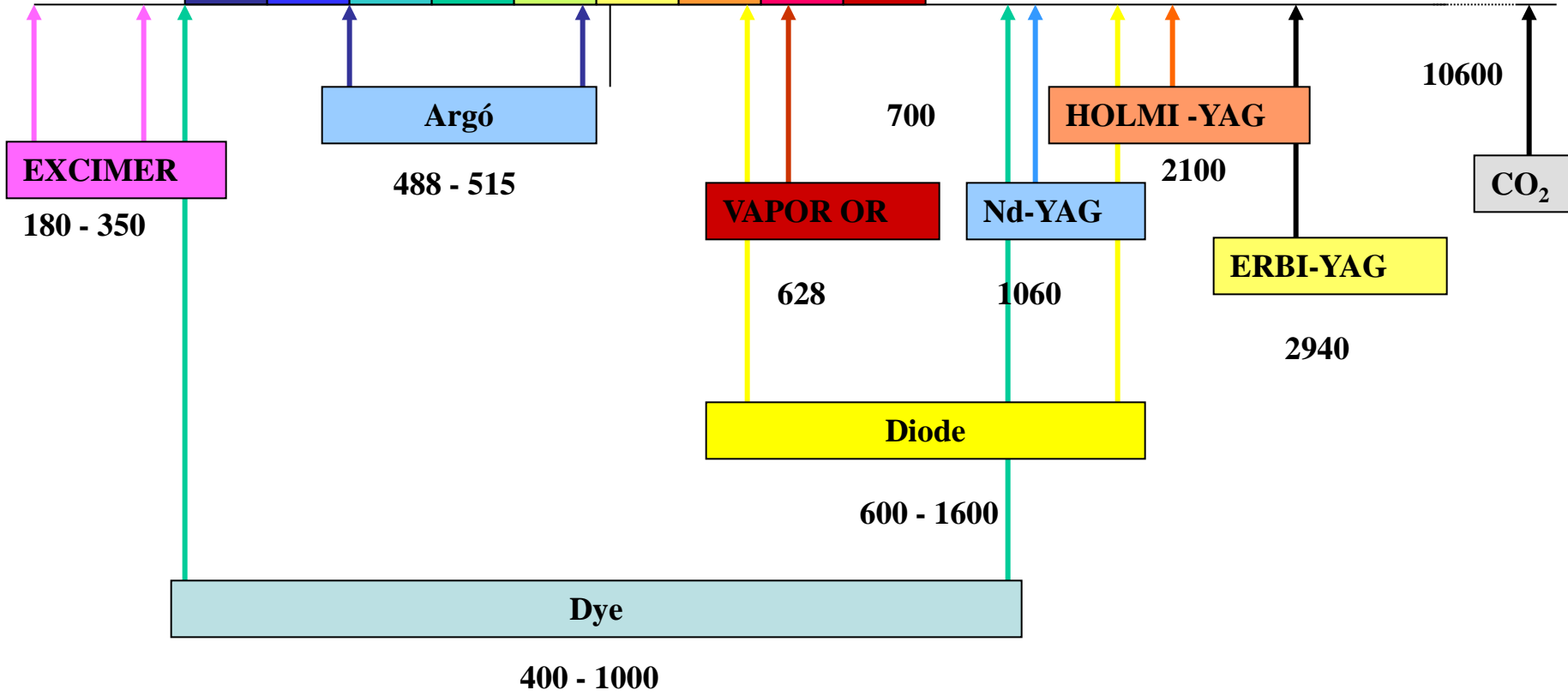
Retroalimentació òptica: Miralls, per exemple

Acoblador de sortida

Ultraviolada

Visible

Infraroig



## Classificació dels dispositius Làser

Segons l'ANSI 1973 es classifiquen segons el dany que poden ocasionar

### Classe 1:

- La seva emissió no suposa un perill en les condicions d'utilització raonablement previsibles
- L'energia emesa és molt baixa o el sistema està tancat, impossibilitant l'accés al feix.

## Classe 2:

- Làsers que emeten radiació visible (400-700 nm). La protecció de l'ull està assegurada pels moviments reflexes
- La visió en feix directe produeix un enlluernament desagradable però no pot causar dany en exposicions inferiors a 0,25 s.

## Classe 3:

- Són perillosos per l'ull sense protecció, tant si emeten radiació visible com invisible.
- La visió en feix directe amb ajuda d'instruments òptics pot ser perillosa

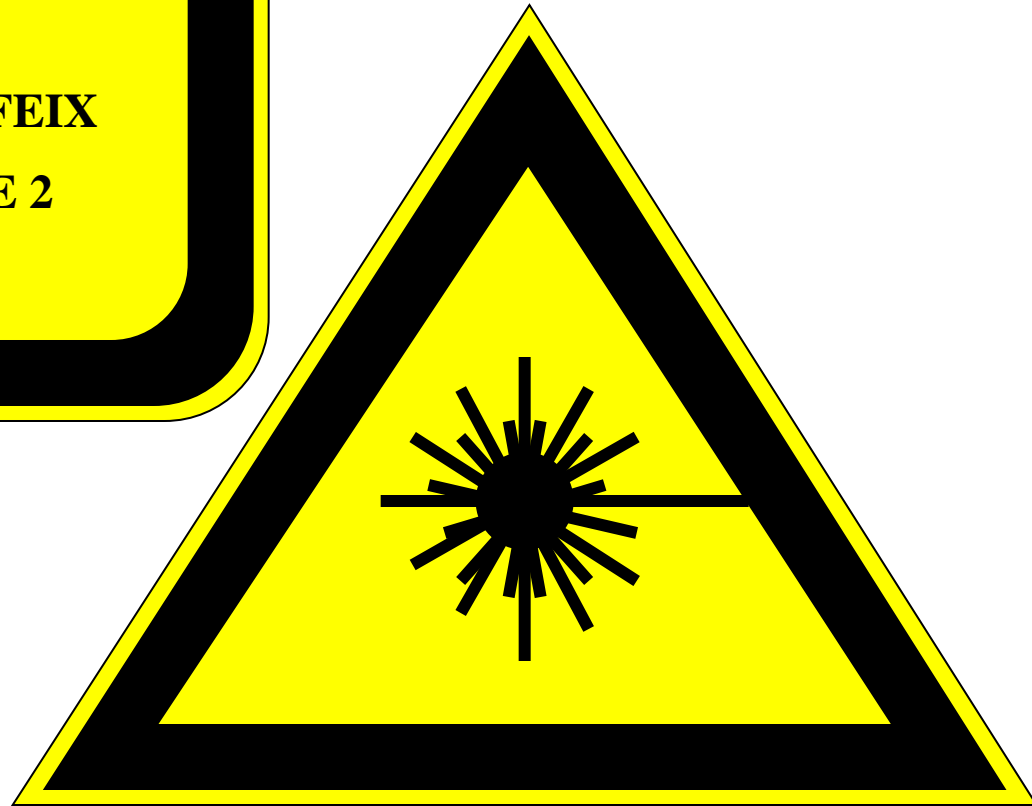
## Classe 4:

- El feix reflectit difús és perillós per l'ull.
- Poden causar danys a la pell.
- La radiació emesa pot provocar la ignició de materials inflamables que intercepten el feix.

**RADIACIÓ LÀSER**

**EXPOSICIÓ PERILLOSA AL FEIX**

**EQUIP LÀSER DE CLASSE 2**

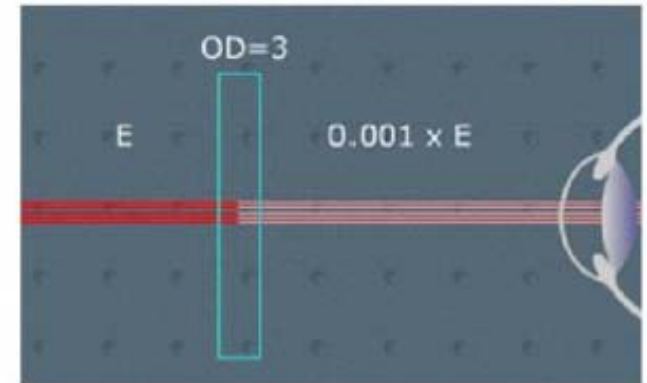
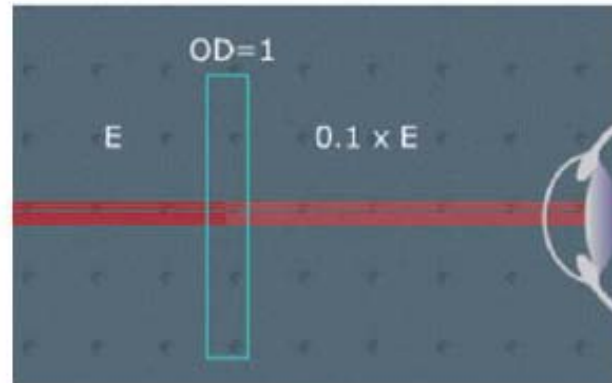
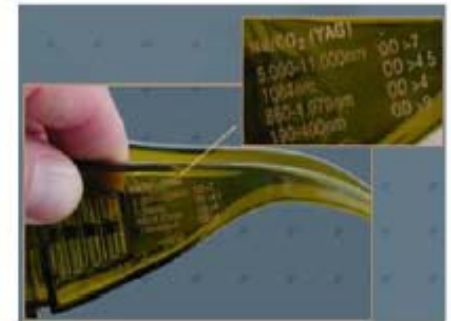


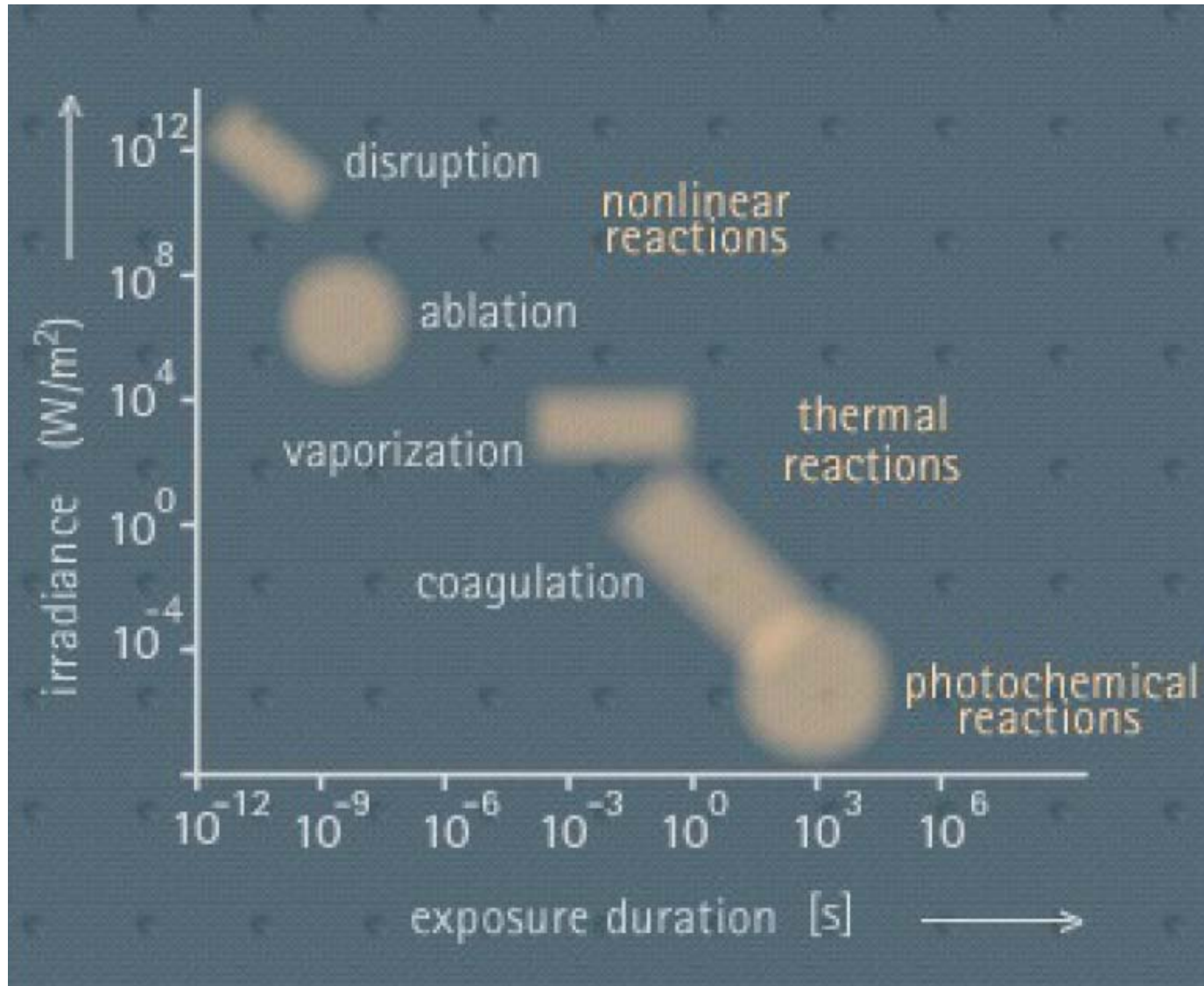
Mecanismes de protecció → Densitat òptica:

$$OD = \log_{10} \left[ \frac{P_{incident}(\lambda)}{P_{emergent}(\lambda)} \right]$$



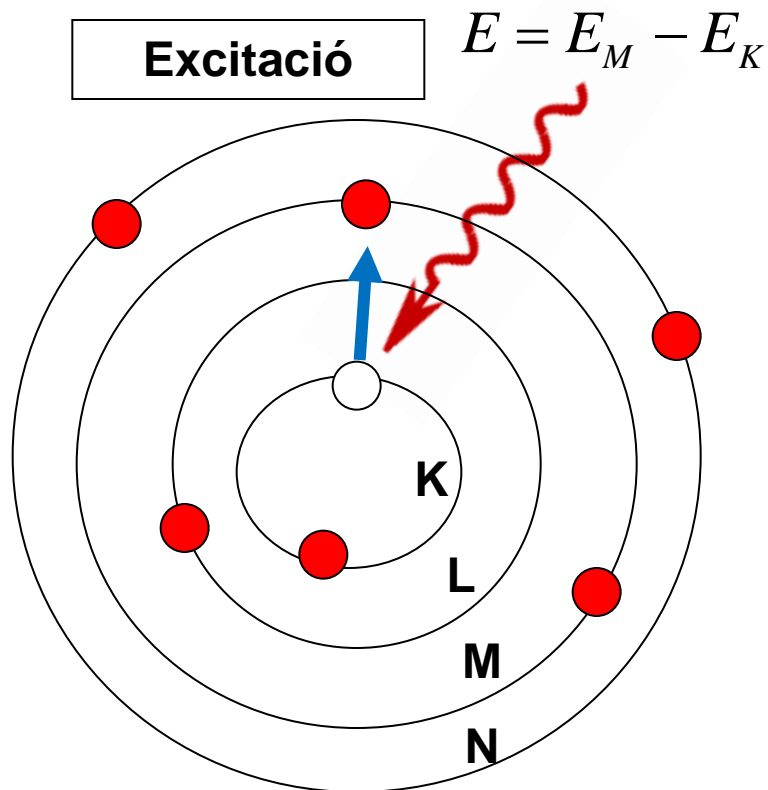
optical density	transmission
[OD = 1]	0.1
[OD = 2]	0.01
[OD = 3]	0.001





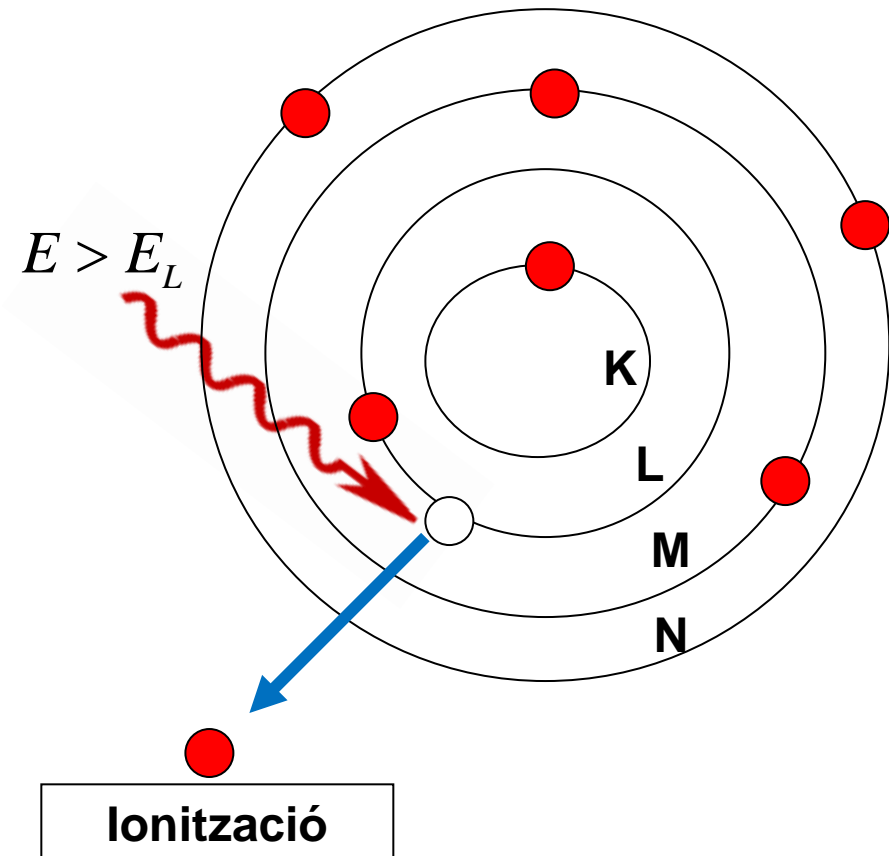
- **Excitació:**

- No es perden electrons
- Àtom neutre (càrrega 0)

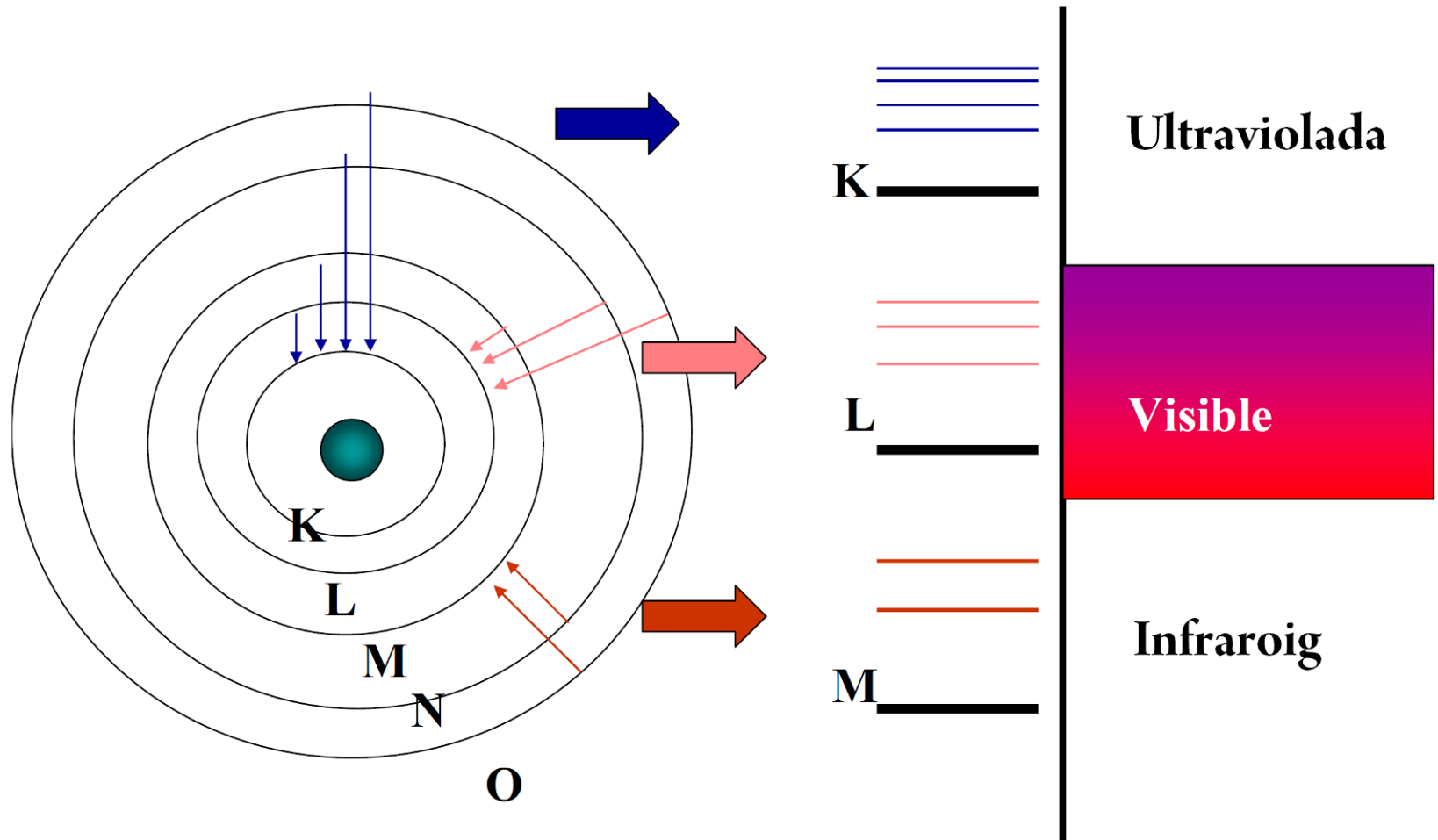


- **Ionització:**

- Es perden electrons
- Àtom positiu (càrrega +)



- Radiació ionitzant



- Radiació ionitzant

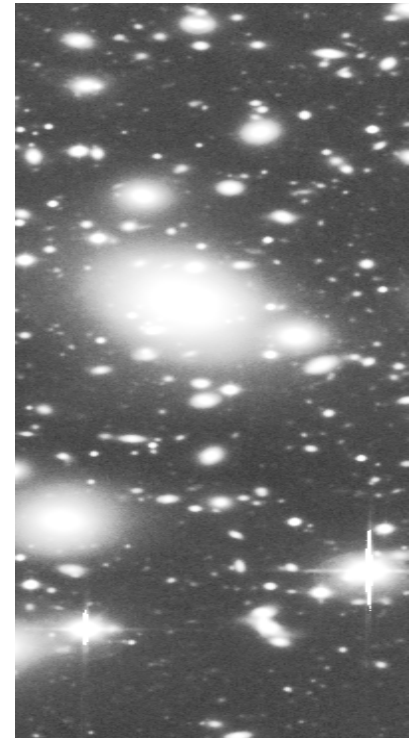
## Rajos X



## Radiació gamma



## Radiació còsmica



$$E = h \cdot f$$