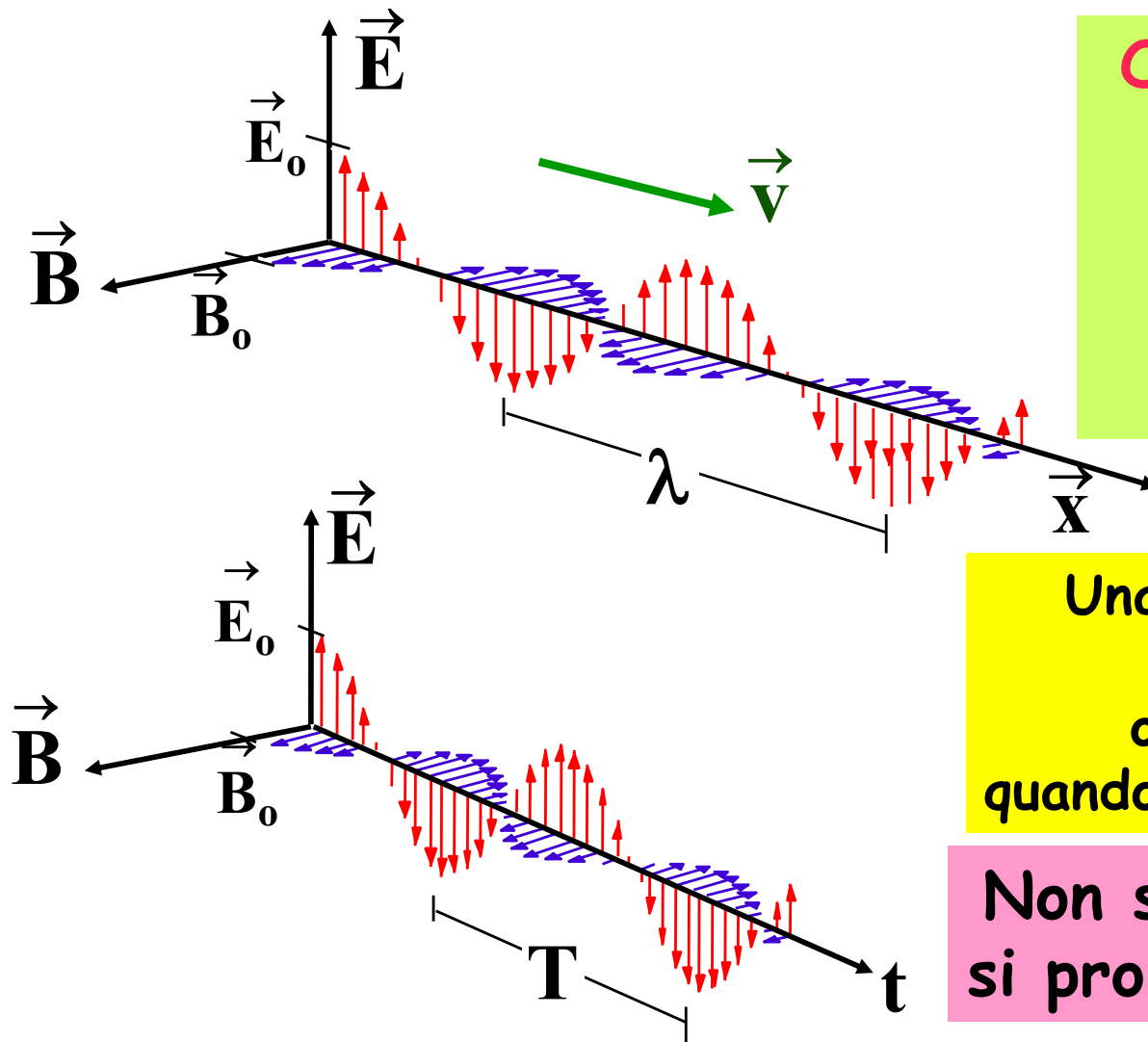


Spettro Elettromagnetico

Scannicchio: capitoli 21, 23

Onde elettromagnetiche



Onda elettromagnetica:
"vibrazione"
del campo elettrico
e del campo magnetico
in direzione
perpendicolare a entrambi

Una carica elettrica in moto
emette o assorbe
onde elettromagnetiche
quando soggetta ad accelerazione

Non serve materia: i campi
si propagano **anche nel vuoto!**

Le funzioni d'onda armoniche in una corda soddisfano all'equazione differenziale alle derivate parziali detta **equazione di propagazione per onde o equazione delle onde**

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

$y(x,t)$ **funzione d'onda** (spostamento della corda)

v : **velocità di propagazione dell'onda** (dipende dal mezzo), per una corda in tensione $v = \sqrt{F/\mu}$ con F = tensione e μ = massa lineare

Le soluzioni dell'equazione lineare sono **funzioni d'onda armoniche**

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx - \omega t)$$

$k = 2\pi/\lambda$: numero d'onda

$\omega = 2\pi v$: pulsazione

Consideriamo ora il **campo elettromagnetico**.

Le leggi di Maxwell implicano un'equazione delle onde per questo campo e quindi implicano l'esistenza di un **campo elettrico \mathbf{E}** e di un **campo magnetico \mathbf{B}** che si propagano nello spazio con **velocità c** pari a quella della **luce nel vuoto**.

Supponiamo che sia \mathbf{E} che \mathbf{B} siano $\mathbf{f}(\mathbf{x},t) \Rightarrow$ **onde piane** (grandezze che caratterizzano il campo sono costanti su piani \perp all'asse x).

Energia e quantità di moto di un'onda

Un'onda di qualsiasi tipo **trasporta energia**. L'**intensità energetica media** dell'onda (potenza media per unità di superficie attraversata) è uguale al prodotto dell'energia media per unità di volume per la velocità di propagazione dell'onda. Per i campi elettrico e magnetico abbiamo

$$u_{\bar{E}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad u_{\bar{B}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

dell'energia media per
unità di volume

Per un'onda elettromagnetica che si propaga nel **vuoto** abbiamo **$E = cB$**

$$u_{\bar{B}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{E^2}{c^2 \mu_0} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = u_{\bar{E}}$$

$$u = u_{\bar{B}} + u_{\bar{E}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} + \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{EB}{\mu_0 c}$$

Equazioni dimensionali:

$$[U] = [J] = [N] \cdot [L] \Rightarrow \frac{[U]}{[L]^3} = \frac{[N]}{[L]^2} \quad \text{Energia su volume}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 &\Rightarrow [\varepsilon_0] = \frac{[C]^2}{[N][L]^2} \\ &\Rightarrow [E]^2 = \frac{[N]^2}{[C]^2} \end{aligned} \right\} [\varepsilon_0 E^2] = \frac{[C]^2}{[N][L]^2} \times \frac{[N]^2}{[C]^2} = \frac{[N]}{[L]^2}$$

$$[I] = \frac{[P]}{[L]^2} = \frac{[U]}{[t]} \times \frac{1}{[L]^2} \quad \text{Intensità di energia}$$

$$\Rightarrow [I] = \frac{[U][L]}{[L]^3 [t]} = \frac{[U]}{[L]^3} \times [v] = [\varepsilon_0 E^2] \times [c]$$

Intensità energetica istantanea = potenza istantanea riferita all'unità di area di superficie attraversata. È il prodotto dell'energia istantanea per unità di volume per la velocità di propagazione dell'onda.

Intensità = energia che passa per l'area unitaria nell'unità di t.

$$I = \frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial t} = uc$$

$$I_{\text{istantanea}} = uc = c\epsilon_0 E^2 = c \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{EB}{\mu_0}$$

Vettorialmente possiamo scrivere

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$$

vettore di Poynting

$|\mathbf{S}|$ = intensità istantanea dell'onda, \mathbf{S} = direzione di propagazione onda
Il **flusso di S** attraverso una superficie A dà l'energia che attraversa A nell'unità di tempo

$$\frac{dE}{dt} = \int_A c^2 \epsilon_0 (\vec{E} \times \vec{B}) \cdot \vec{u}_n dA$$

Onde elettromagnetiche

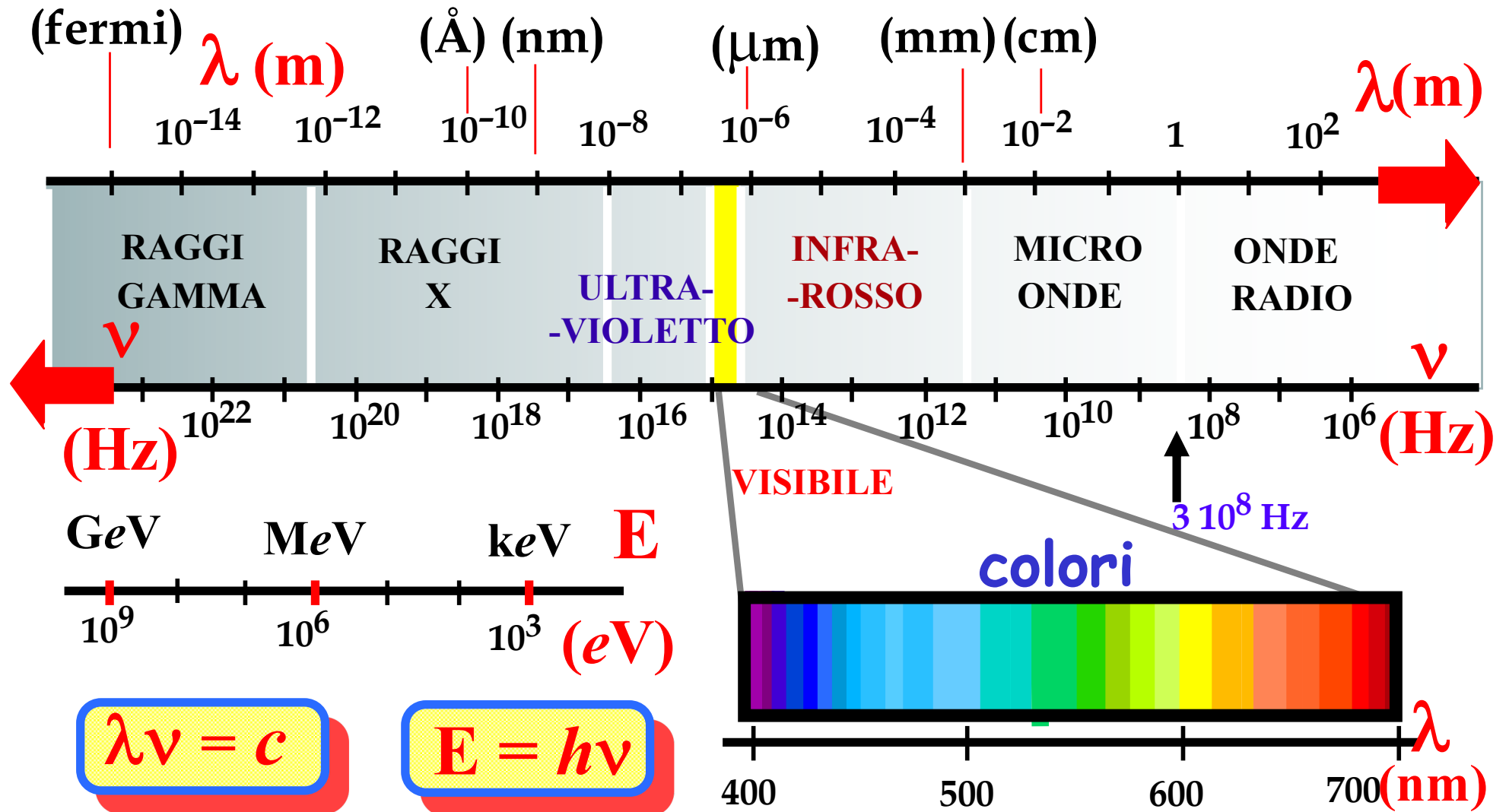
- nel vuoto (unità S.I.) $v \equiv c$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

velocità della luce nel vuoto

massima velocità possibile in natura

Spettro elettromagnetico



$$h = 6.626069 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J s} = 4.135 \dots \cdot 10^{-16} \text{ eV s}$$

Cellulari GSM e Forni a Microonde

Il **forno a microonde** è un tipo di **forno** da cucina in cui la cottura del cibo è principalmente dovuto all'effetto riscaldante delle **microonde**.

Il meccanismo di funzionamento del forno in questione è abbastanza semplice: un dispositivo, chiamato **magnetron**, genera un **campo elettromagnetico** variabile, ovvero la radiazione a microonde.

L'oscillazione del campo elettromagnetico, che si ripete 2 miliardi e 450 milioni di volte al secondo (2,45 GHz), è capace di amplificare le oscillazioni nelle molecole che possiedono polarizzazione, principalmente acqua, ma anche **lipidi**, **proteine** e **zuccheri**. Dunque il meccanismo di funzionamento del microonde è semplicemente quello di scaldare l'acqua (ovvero di aumentarne l'agitazione termica grazie

$P=1$ W su una superficie sferica di raggio $r = 5$ cm, cioè $S = 4 \pi r^2 = 314$ cm²,
cioè:
3mW / cm²

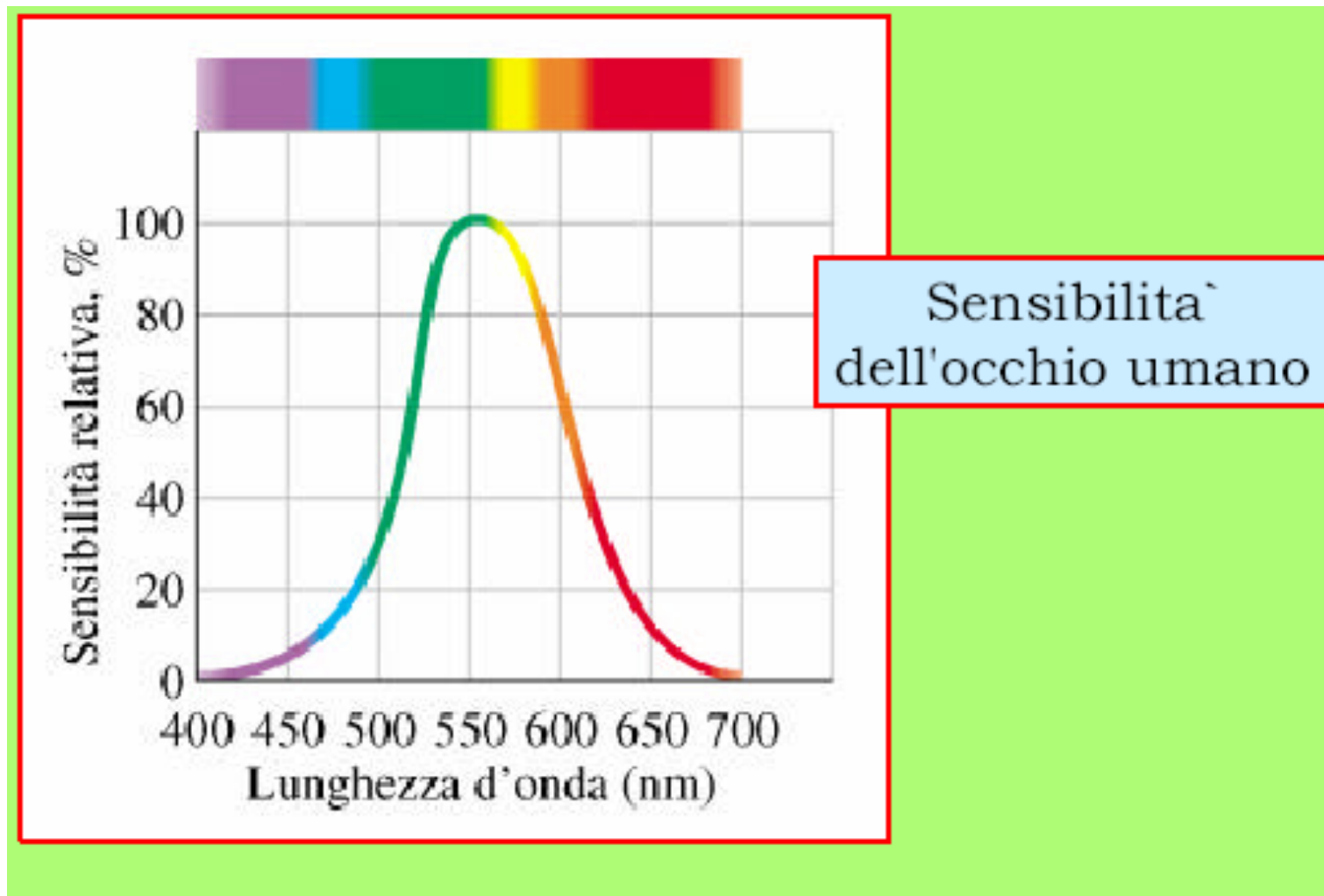
Emissione di radiazioni

Diverse persone sono preoccupate dall'esposizione alle microonde in prossimità di forni a microonde accesi.

Da molti anni tutti i modelli di forni a microonde in commercio hanno una **schermatura** metallica sia all'interno del forno che per l'apertura anteriore di **vetro**.

Negli **Stati Uniti** il limite di emissione di radiazioni è di 1 mW/cm² a 5 cm di distanza da un forno nuovo (per un forno usato il limite sale di cinque volte). Difficilmente un forno eccede questo limite. Come confronto, un **telefono cellulare GSM** può emettere 1 W a 1800 MHz, il che produce un campo di 2 mW/cm² a 5 cm. Ad ogni modo, l'esistenza stessa di rischi connessi ad un'esposizione a lungo termine è tuttora controversa

Sensibilità dell'occhio umano

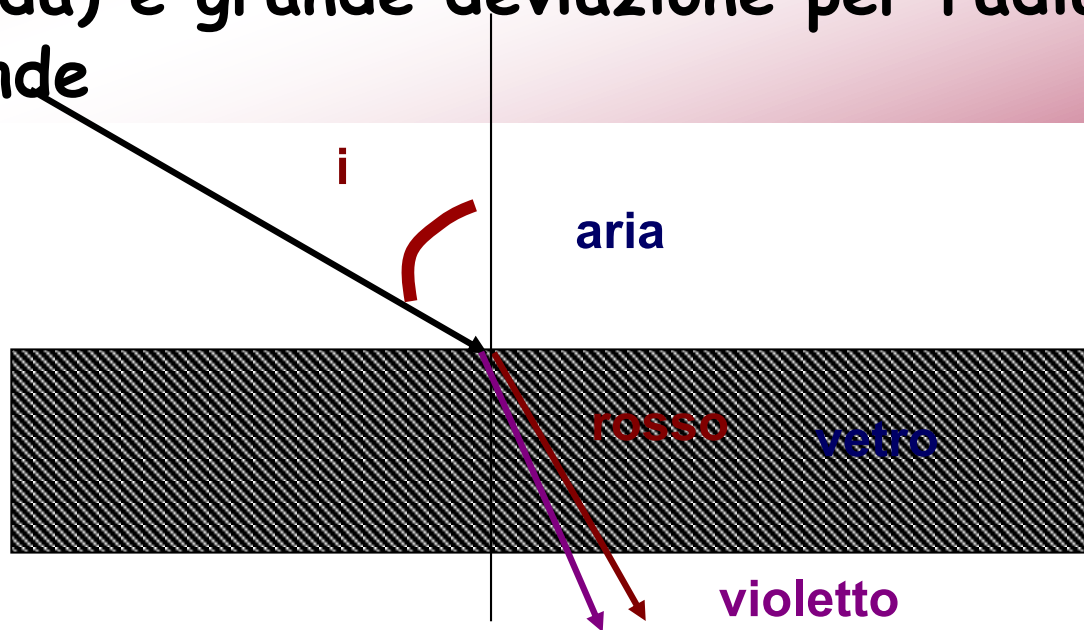


Ottica elettromagnetica

- Le onde luminose sono di natura elettromagnetica: esse costituiscono una piccola porzione dello spettro elettromagnetico di lunghezza compresa fra 400 e 700 nanometri, delimitato da infrarosso e ultravioletto.
- Nella trattazione ondulatoria dell'ottica la *lunghezza d'onda* della luce esprime la distanza fra due punti successivi nei quali la perturbazione ondosa assume nello stesso istante il medesimo valore.
 - nello spettro elettromagnetico le lunghezze d'onda più alte (corrispondenti a frequenze inferiori a 30 Hz), superano i 10000 km

Dispersione della luce

La luce bianca è composta di radiazioni di diversa lunghezza d'onda le quali, attraversando un mezzo (prisma, goccia d'acqua, ...) sono rifratte ad angoli diversi. Il fenomeno è noto come dispersione della luce ed è caratterizzato da angoli di deviazioni piccoli per radiazioni di frequenza piccola (grande lunghezza d'onda) e grande deviazione per radiazione di frequenza grande



$$n = \frac{c}{v}$$

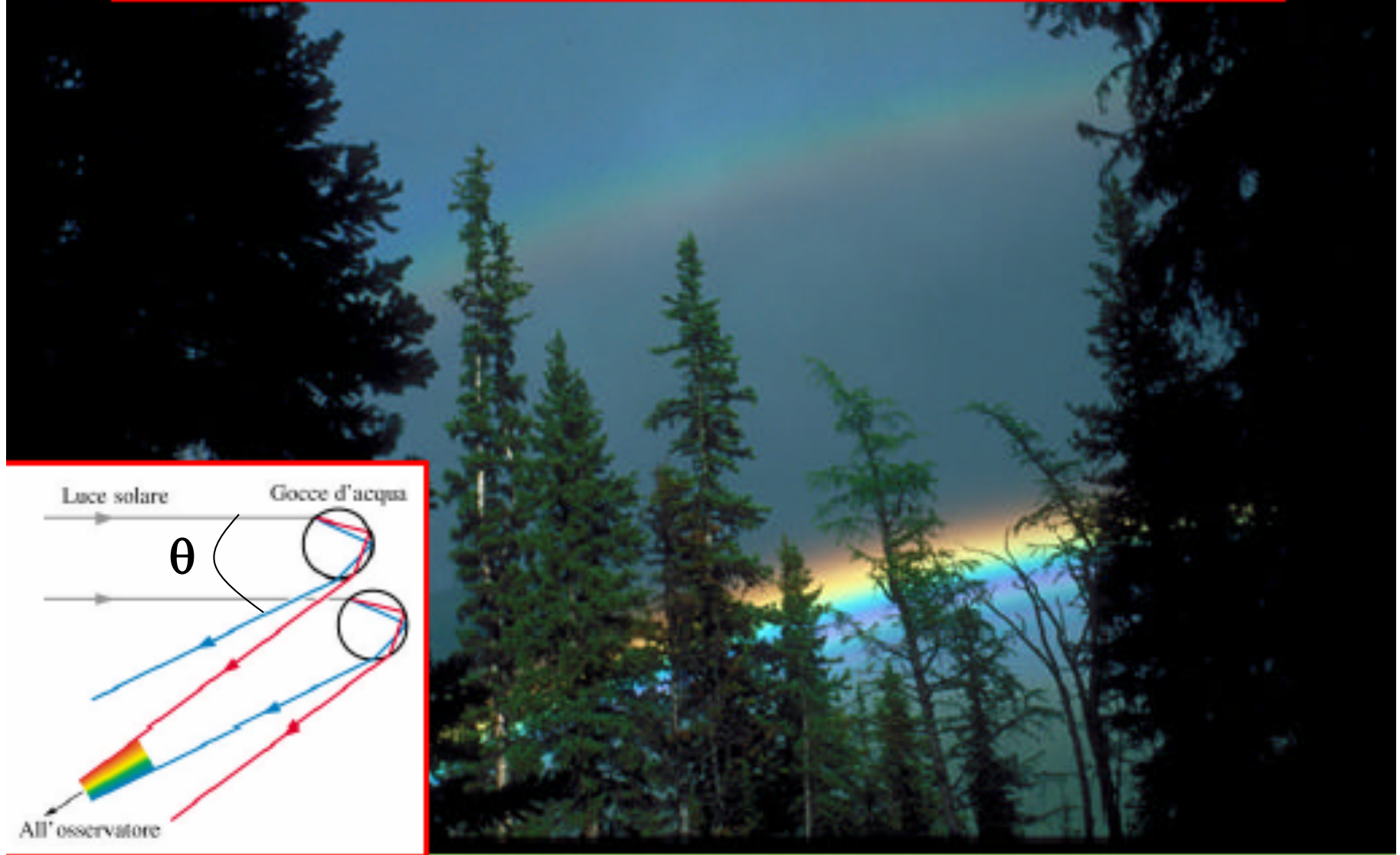
indice di rifrazione

Praticamente tutti i mezzi trasparenti sono dispersivi, cioè “disperdono” la luce, perché la velocità v con cui le onde luminose si propagano all’interno del mezzo dipende, seppur debolmente, dalla lunghezza d’onda, e con essa l’indice di rifrazione ($n = c/v$)

Dipendenza dell’indice di rifrazione dalla lunghezza d’onda della luce
(a temperatura e pressione ordinaria)

	687 nm (rosso)	589 nm (giallo)	486 nm (blu)	434 nm (violetto)
acqua	1,330	1,333	1,337	1,341
vetro flint leggero	1,507	1,510	1,516	1,522
diamante	2,401	2,418	2,435	2,448

arcobaleno tipico esempio naturale di dispersione della luce.



Arcobaleno

Nell' arco primario il raggio viene prima rifratto all' interfaccia aria-acqua dipendentemente dalla sua lunghezza d' onda, poi riflesso totalmente, e rifratto nuovamente prima di arrivare all' osservatore.

L' angolo di deviazione ($180^\circ - \theta$) dipende dalla lunghezza d' onda e varia tra 138° per la luce rossa ($\theta = 42^\circ$) e 140° per quella violetta ($\theta = 40^\circ$)

Quindi abbiamo il colore rosso all' esterno e violetto all' interno!

Per l' arcobaleno secondario invece ho due riflessioni totali e i colori risultano invertiti!

LE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE IN MEDICINA

Spettro elettromagnetico

Radiazioni termiche:

microonde

infrarossi

Radiazioni ionizzanti:

ultravioletti

raggi X

raggi gamma



Radiazioni termiche

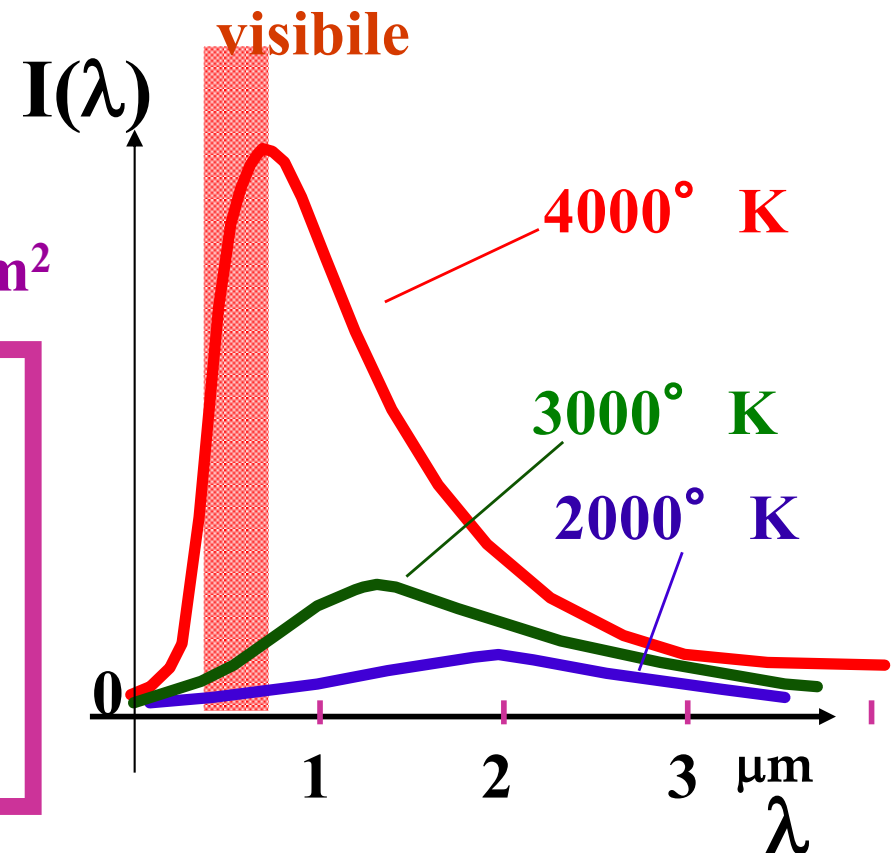
→ Irraggiamento termico

intensità $I = \frac{Q}{\Delta t \Delta S}$ cal/(s·m²)
oppure W/m²

LEGGI DELL'EMISSIONE TERMICA

legge di Stefan $I \propto T^4$ (W/m²)

legge di Wien $\lambda_{\max} \propto 1/T$ (cm)



Sono radiazioni termiche: microonde, infrarossi

Microonde

Frequenza: $300 \text{ MHz} < \nu < 300 \text{ GHz}$

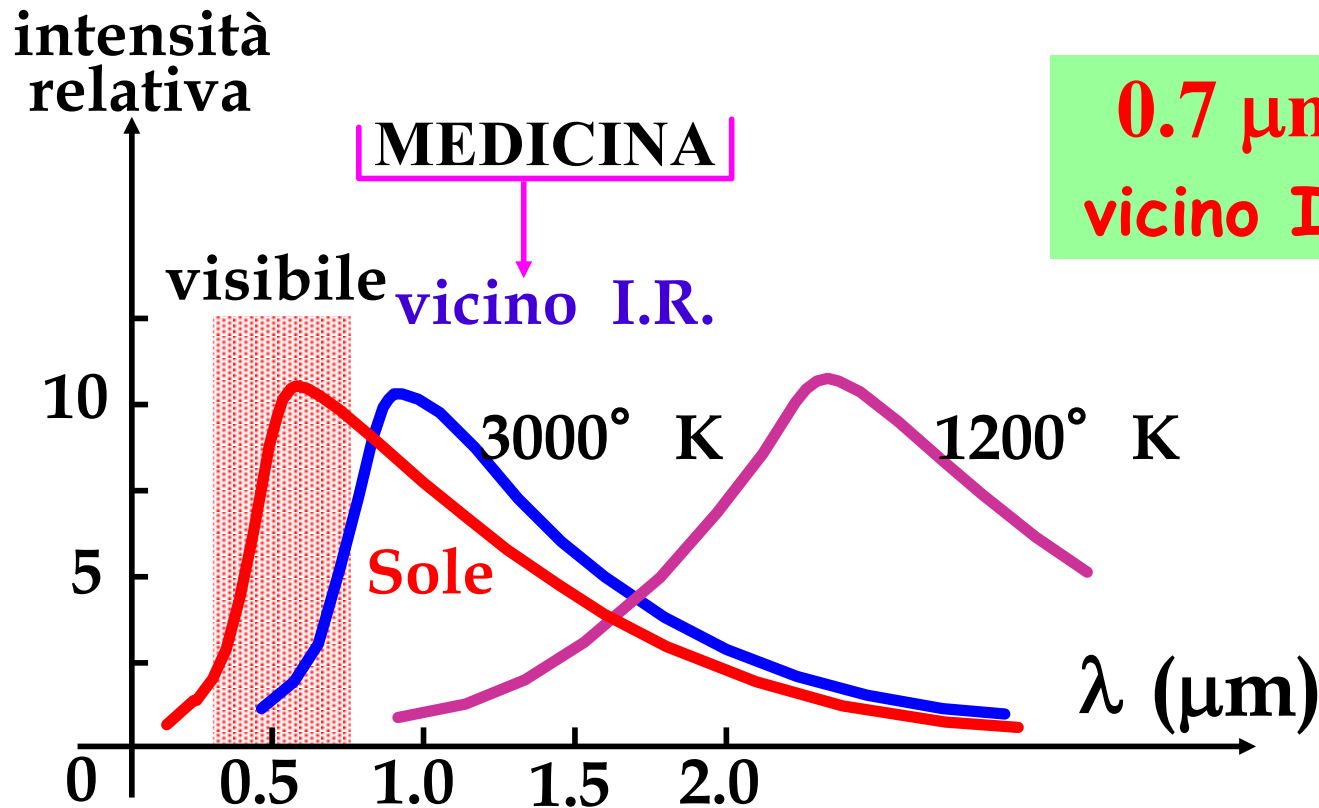
Energia: $10^{-6} \text{ eV} < E = h\nu < 10^{-3} \text{ eV} \rightarrow$ **non** ionizzanti
effetti : calore (tecnica della **diatermia**)

Riscaldamento di regioni limitate e profonde
in corpi ricchi di acqua.

Uso in terapia: artriti, borsiti, strappi muscolari.

Esposizione limite per l'uomo: $I = 10 \text{ mW/cm}^2$
(1/10 della massima potenza radiante solare assorbita)

Infrarossi



- **effetto termico**
 - $\lambda \approx 0.7 \mu\text{m}$ penetrazione $\Delta x \approx 10 \text{ cm}$
 - $\lambda > 1.4 \mu\text{m}$ $\Delta x < 1 \text{ mm}$
- **fotografia I.R.** → **immagine termica (termografia)**

Radiazioni ionizzanti

Ionizzare un atomo =
togliergli uno o più elettroni rendendolo ione.
Si **distrugge** così la struttura **chimica** del materiale.

Per togliere (= allontanare) elettroni
bisogna compiere un **lavoro**, cioè fornire energia.

Energia minima di ionizzazione: $E = 13.6 \text{ eV}$
(potenziale di ionizzazione atomo idrogeno)

Di fatto si considerano **ionizzanti** le radiazioni con **$E > 100 \text{ eV}$** .

All'aumentare dell'energia, gli elettroni estratti ricevono energia cinetica e possono ionizzare "a catena" altri atomi.

Sono radiazioni ionizzanti: ultravioletti, raggi X, raggi gamma
(solo UVC)

Ultravioletti

Produzione UV
naturale: Sole
artificiale: lampade UV

Si distinguono in:

UVA: $\lambda = 400-315$ nm

UVB: $\lambda = 315-280$ nm

UVC: $\lambda = 280-100$ nm (*ionizzanti*)

Assorbimento UV
in alta atmosfera:

ozono (O_3) - inclinazione raggi
nubi - inquinamento

materiali:

vetro opaco
acqua trasparente
(penetrazione alcuni cm)

Effetti chimico-biologici:
eccitazione atomi e molecole
dissociazione legame C-C (4 eV)

benefici...

abbronzatura - sintesi vitamina D
azione battericida

... malefici

eritemi - lesioni oculari
tumori alla pelle

Radiazioni ad alta energia

raggi X ($\text{KeV} < E < 100 \text{ KeV}$, luce a livello dell'atomo)

- **produzione artificiale**

- **tubo a raggi X**

raggi γ ($> 100 \text{ KeV}$, luce a livello del nucleo)

- **produzione naturale**

- **emissione γ da decadimento nuclei instabili (radionuclidi)**

- **produzione artificiale**

- **acceleratori di particelle**

Diffrazione a raggi X

L'informazione che può essere ottenuta dall'esame di un materiale dipende da quanto è fine la sonda utilizzata.

La lunghezza d'onda dei raggi X si trova nella regione attorno a 0.1 nm (cioè attorno all'energia di 12.4 KeV)

Le analisi con i raggi X sono limitate a strutture che si ripetono con regolarità in quanto è tramite l'interferenza costruttiva di raggi X diffusi da molte strutture identiche che si può ottenere una nitida figura di diffrazione.

(unità di riflessione per i raggi X i piani degli atomi)

Descrizione di una semplice macchina a raggi X

Tutte le macchine a raggi X hanno in comune tre parti:

1. un generatore di raggi X

2. un monocromatore

per selezionare la radiazione di una certa banda di lunghezza d'onda

3. dispositivo fotografico

per registrare le figure di diffrazione

Descrizione di una semplice macchina a raggi X

➤ Nel **generatore di raggi X** gli elettroni vengono accelerati mediante campi elettrici elevati e vanno a colpire un bersaglio metallico (di solito Cu, rame) con velocità elevata.

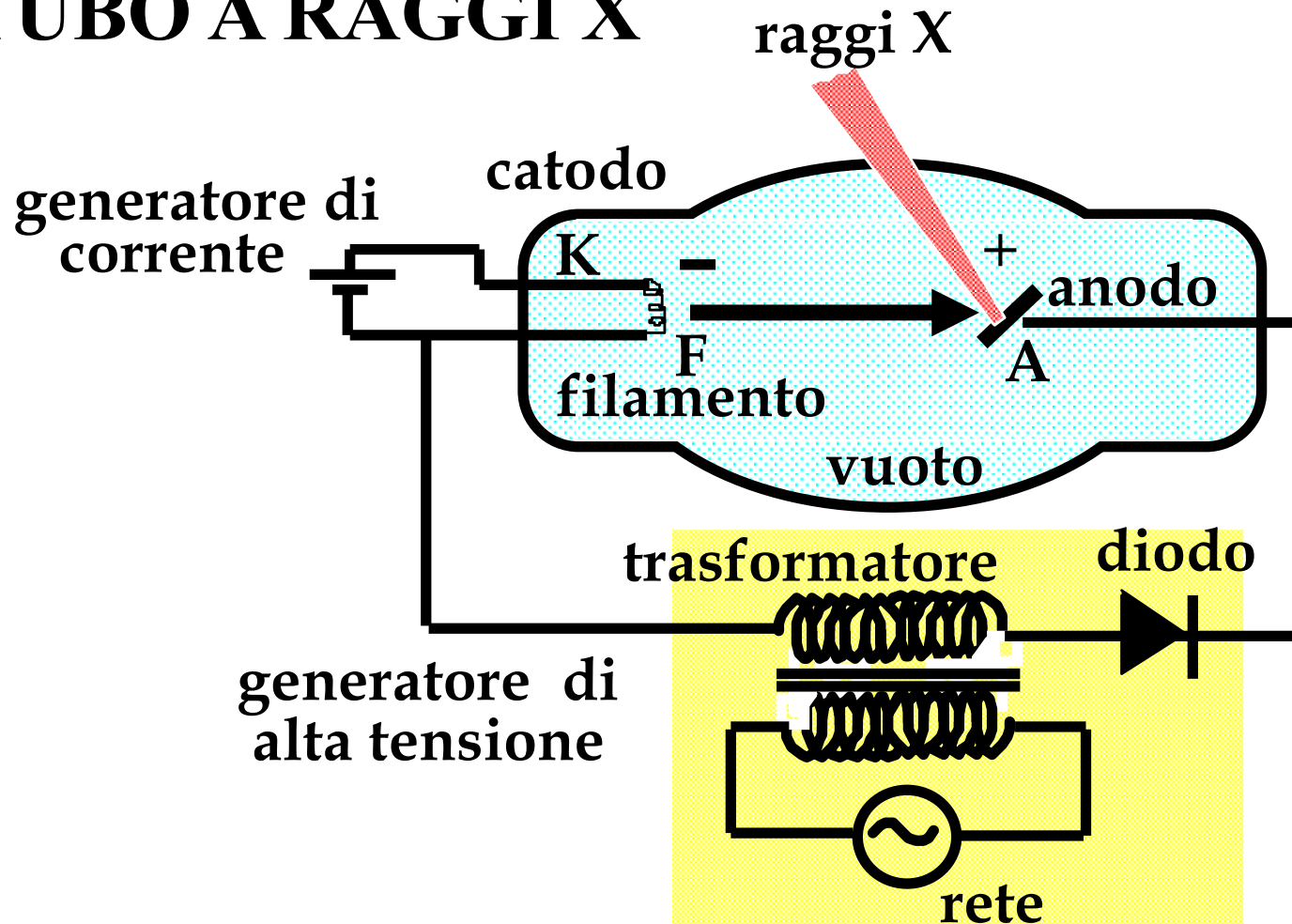
Si produce così uno spettro continuo dovuto al frenamento degli elettroni più alcune righe specifiche per l'emissione di elettroni dalle orbite più interne

➤ Il **monocromatore** è costituito da un cristallo in modo che i raggi incidenti e il cristallo formino angoli costanti lungo tutto il cristallo. Scegliendo opportunamente tale angolo si focalizzano sulla pellicola raggi X focalizzati

➤ I raggi X entrano nella camera contenente il campione che diffrange la radiazione e la **pellicola** che ne registra la figura.

Raggi X: generatore

TUBO A RAGGI X



Raggi X: assorbimento

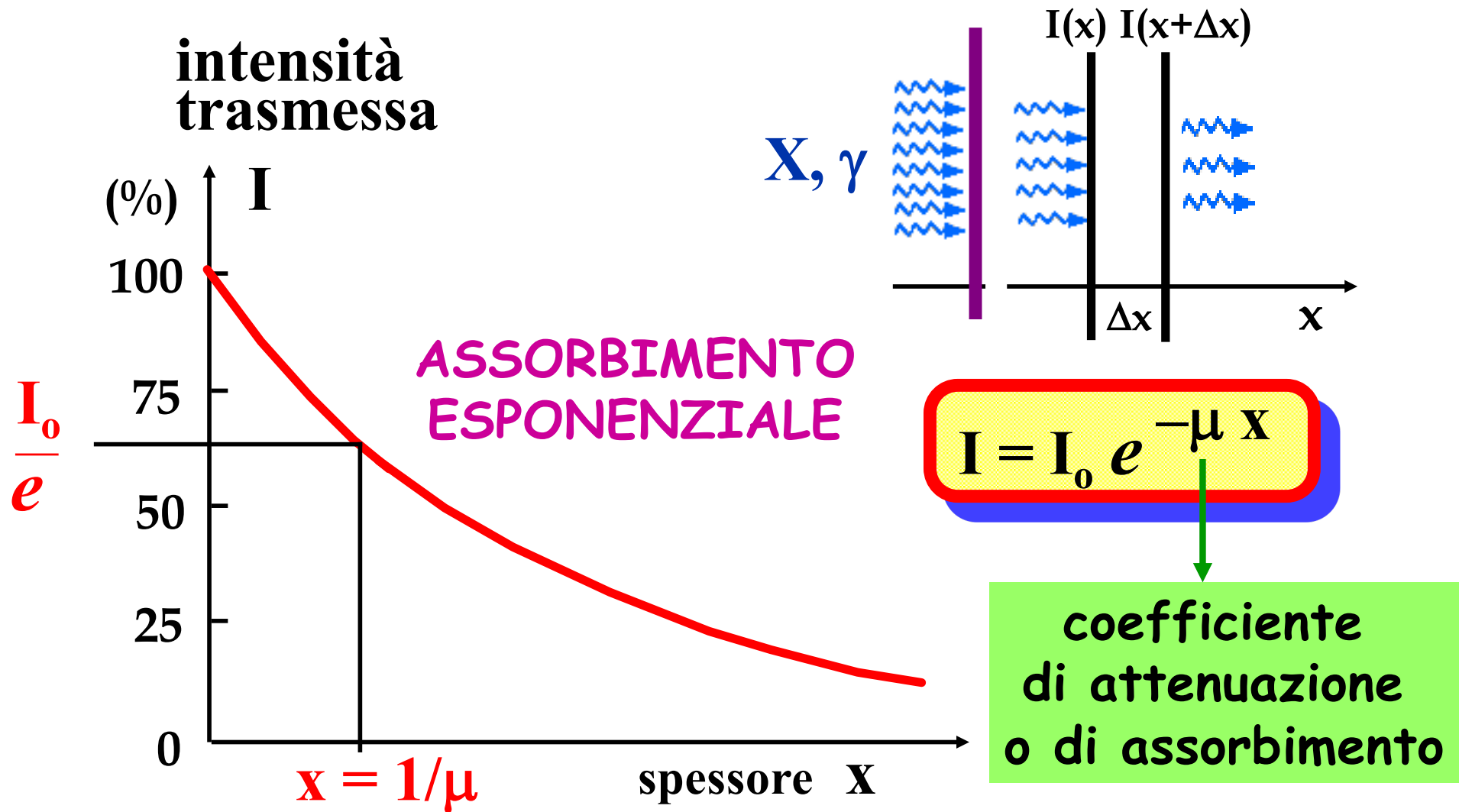
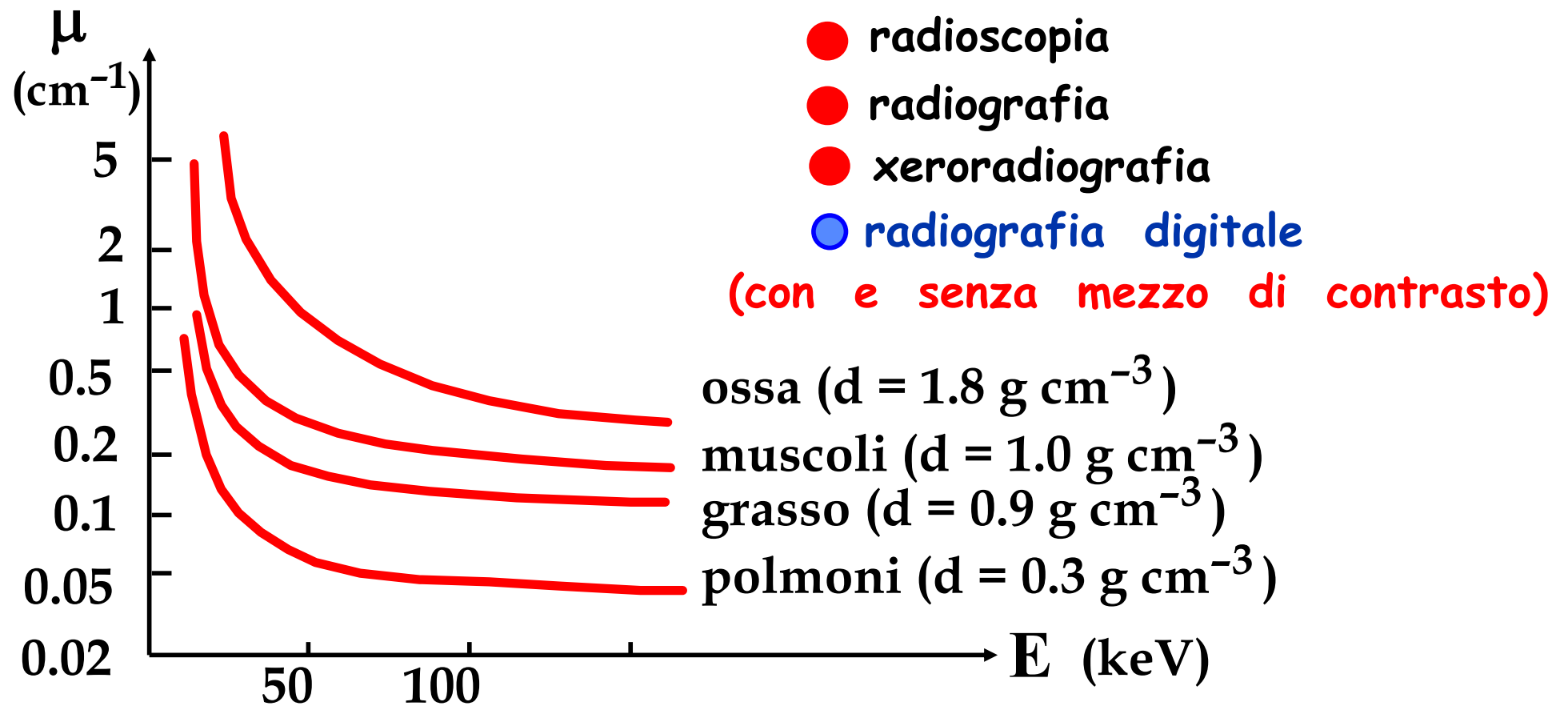


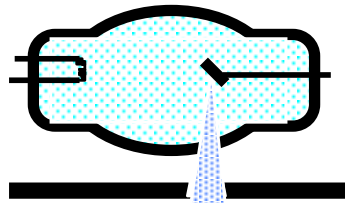
Immagine radiologica

diversa opacità delle strutture biologiche
(diverso **coefficiente di assorbimento**)

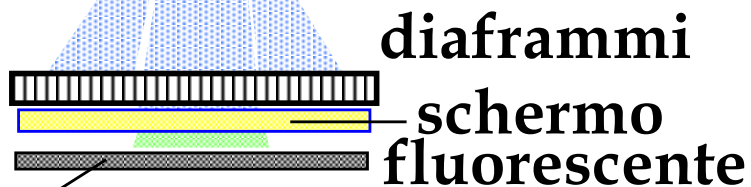


Radiografia

tubo a raggi X



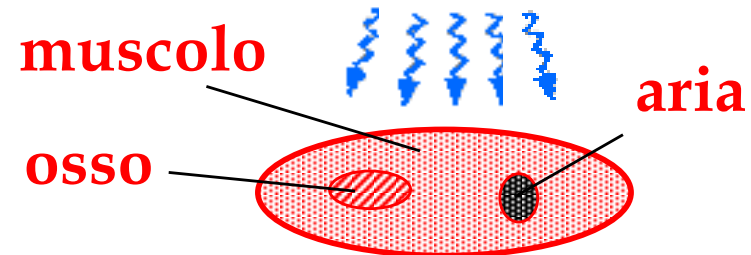
struttura biologica



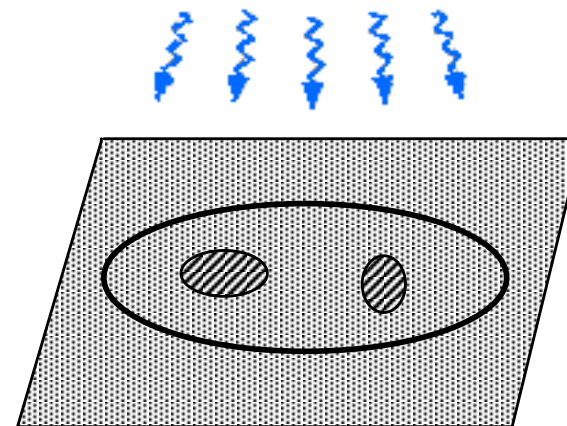
pellicola radiografica

- immagine **negativa**
- sviluppo della pellicola
- **radiografia digitale**

fascio X incidente



fascio X trasmesso



pellicola radiografica

Parametri per la radiografia

contrasto radiologico

- parametri :
- potenziale elettrico
 - intensità di corrente
 - tempo di esposizione

$$\Delta V \longrightarrow 45 \text{ kV} \div 130 \text{ kV}$$

$$i \longrightarrow 3 \text{ mA} \div 50 \text{ mA}$$

$$\Delta t \longrightarrow (1/60)'' \div (1/120)'' \text{ (cioè sui 10 millesecondi)}$$

Raggi gamma: impiego diagnostico

radiodiagnostica

- radioisotopi** →
- ▣ **radiofarmaci**
 - ▣ **diffusione nell'organismo**
 - ▣ **decadimento radioattivo**
 - ▣ **rivelazione radiazione**

immagine

**conteggio
dosimetrico**

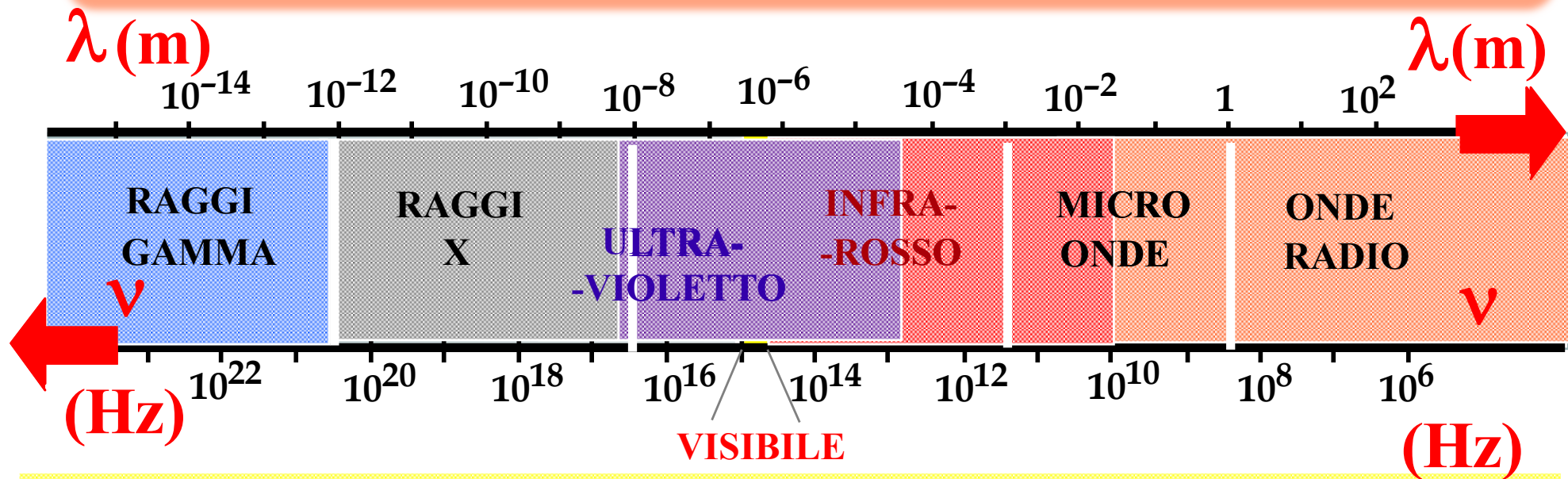
Raggi gamma: impiego terapeutico

- ☀ **cobaltoterapia** ^{60}Co γ (1.3 MeV)
- ☀ **fasci di elettroni**(acceleratori di particelle)
- ☀ **fasci gamma** (acceleratori di particelle)
- ☀ **adroterapia** (acceleratori di particelle)
 - **protoni**
 - **neutroni (BNCT)**
 - **ioni pesanti**

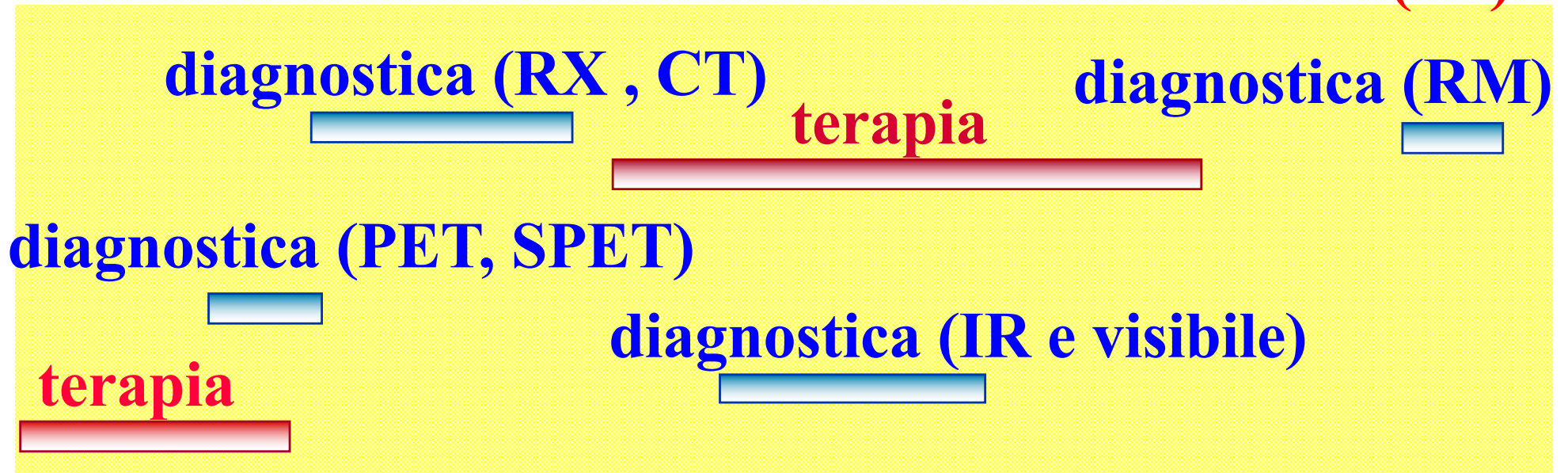
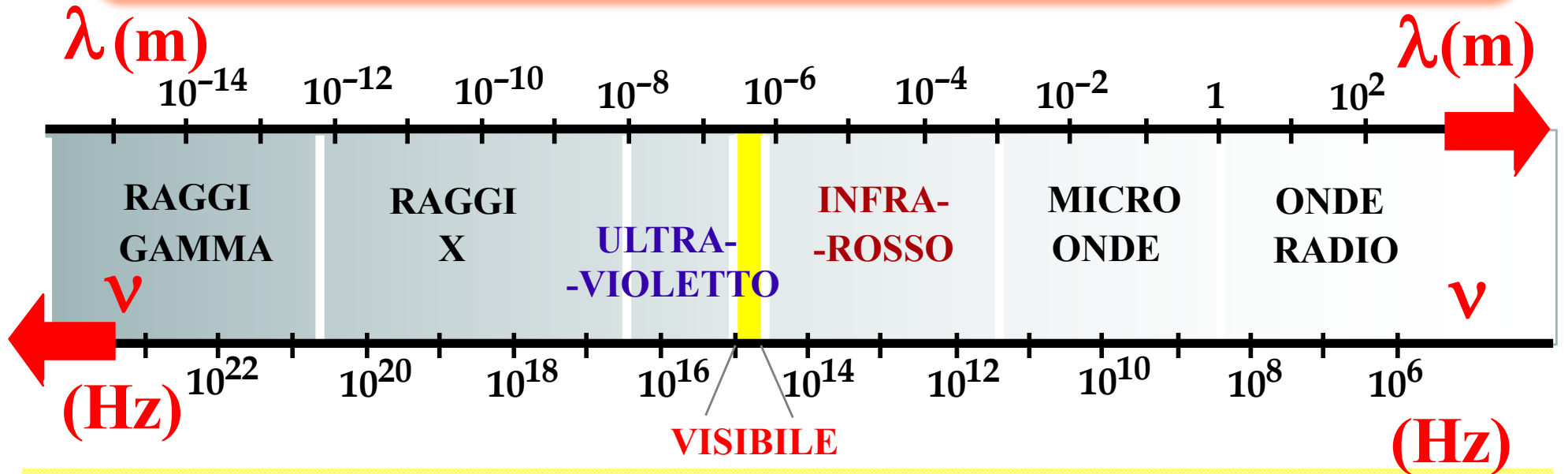


Boron Neutron Capture Therapy

SPETTRO ELETTROMAGNETICO : produzione



SPETTRO ELETTROMAGNETICO : impiego



SPETTRO ELETTROMAGNETICO : rivelazione

