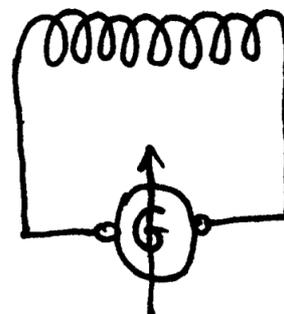


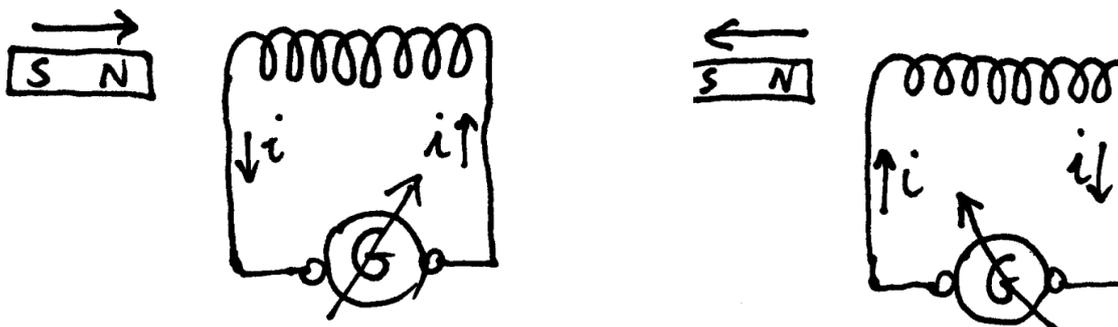
# Elettromagnetismo

## 1. Induzione elettromagnetica

Supponiamo di avere un circuito elettrico chiuso costituito da un filo di materiale conduttore, senza generatore, con un *galvanometro* inserito in serie (ricordiamo che il galvanometro è un particolare *amperometro*, capace di rilevare correnti molto piccole). Una parte del filo conduttore è avvolta a spirale, per formare un avvolgimento *solenoidale*. In condizioni di riposo, senza interferenze esterne, ovviamente nel circuito non può avvenire alcun passaggio di corrente, poiché manca il generatore di tensione.



A questo punto facciamo in modo da produrre in prossimità dell'avvolgimento un campo magnetico variabile. Un primo modo di realizzare ciò può essere far muovere in avanti e indietro rispetto all'avvolgimento un magnete permanente (calamita): poiché il magnete permanente genera un campo magnetico, farlo muovere nello spazio farà nascere un campo magnetico variabile. Nel circuito elettrico si noterà subito il passaggio di corrente elettrica, e tale corrente sarà più forte tanto più velocemente facciamo muovere il magnete. Inoltre il verso della corrente sarà positivo o negativo a seconda di se avviciniamo o allontaniamo il magnete dall'avvolgimento.



Tale fenomeno può essere ripetuto sostituendo il magnete permanente con un circuito elettrico percorso da corrente stazionaria o costante (ricordiamo che il campo magnetico è generato oltre che dai magneti permanenti anche e soprattutto dalle correnti elettriche). Se facciamo muovere velocemente il circuito rispetto all'avvolgimento osserveremo in modo analogo un passaggio di corrente, la cui intensità dipende dalla velocità di movimento e il cui verso dipende da se allontaniamo o avviciniamo i due circuiti.

La corrente che nasce nel circuito con l'avvolgimento prende il nome di *corrente indotta* e il circuito in cui tale corrente circola è denominato *circuito indotto*. Poiché nel circuito indotto circola una corrente, deve necessariamente esistere in esso un campo elettrico che faccia muovere le cariche (ricordiamo che le tre condizioni per l'esistenza di una corrente elettrica sono l'esistenza di un circuito chiuso, l'esistenza di un campo elettrico e la presenza di un generatore).

Complessivamente possiamo dunque concludere che la presenza di un campo magnetico variabile ha prodotto un campo elettrico. Il fenomeno appena descritto va sotto il nome di induzione elettromagnetica.

CAMPO MAGNETICO VARIABILE NEL TEMPO  $\longrightarrow$  CAMPO ELETTRICO

L'induzione elettro-magnetica è regolata dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz:

$$\Delta V_i = - \frac{\Delta \Phi(B)}{\Delta t}$$

In tale espressione,  $\Delta V_i$  è la differenza di potenziale indotta,  $\Delta\Phi(B)$  è la variazione del flusso del campo magnetico che attraversa il circuito indotto,  $\Delta t$  è la variazione del tempo. Tale legge afferma che la d.d.p. indotta è direttamente proporzionale alla variazione del flusso del campo magnetico e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo in cui avviene tale variazione.

## 2. Induzione magnetoelettrica

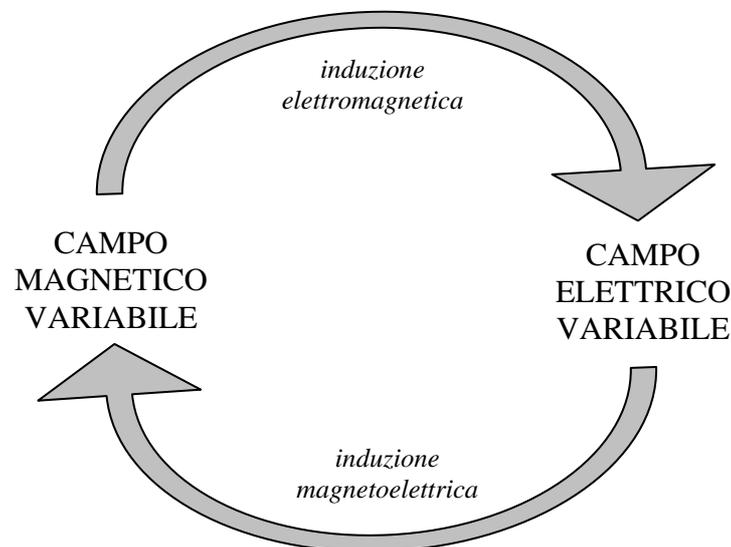
Abbiamo detto che se in una zona dello spazio è presente un campo magnetico variabile, si induce contemporaneamente un campo elettrico. In maniera del tutto simmetrica, si può verificare sperimentalmente che se in una zona dello spazio è presente un campo elettrico variabile, si genera come conseguenza un campo magnetico. Tale fenomeno è denominato *induzione magnetoelettrica*.

CAMPO ELETTRICO VARIABILE NEL TEMPO  CAMPO MAGNETICO

Quando abbiamo studiato la magnetostatica abbiamo detto che un campo magnetico è sempre generato dall'esistenza di una corrente elettrica. Ora, grazie al fenomeno dell'induzione magnetoelettrica, un campo elettrico variabile nel tempo può essere riguardato alla stregua di una corrente, poiché, come questa, produce un campo magnetico. Possiamo quindi affermare che le sorgenti del campo magnetico sono, oltre alle correnti elettriche, anche i campi elettrici variabili nel tempo.

## 3. Il campo elettromagnetico

Si è visto nei paragrafi precedenti che un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico, anch'esso variabile nel tempo, e simmetricamente, un campo elettrico variabile nel tempo genera un campo magnetico variabile nel tempo.



Quindi la presenza di uno dei due campi determina l'esistenza dell'altro. L'elettricità e il magnetismo non sono dunque separati, ma risultano intimamente collegati tra loro: sono due aspetti della stessa forza, la forza elettromagnetica. Se nella stessa regione dello spazio sono presenti contemporaneamente sia il campo elettrico sia quello magnetico, si parla di *campo elettromagnetico*.

Lo scienziato che unificò genialmente i fenomeni elettrici con quelli magnetici fu James Clerk Maxwell, il quale elaborò nel 1865 le famose equazioni che prendono il suo nome. Attraverso le sue equazioni (che non riportiamo per semplicità), Maxwell riuscì a spiegare ed unificare tutti i fenomeni di natura elettrica e magnetica scoperti fino ad allora.

## 4. Le onde elettromagnetiche

Dalle sue equazioni, Maxwell dimostrò poi in modo teorico, senza fare esperimenti, che il campo elettromagnetico non è fisso e costante nello spazio, ma assume le caratteristiche di un fenomeno ondulatorio.

Le interazioni elettromagnetiche non sono istantanee, ma si propagano nello spazio con una velocità finita: se, in un certo punto e in un certo istante, una carica sorgente si muove, l'effetto del suo moto non viene avvertito in altri punti dello spazio nello stesso istante, ma solo dopo un certo intervallo di tempo proporzionale alla distanza dalla carica sorgente.

La propagazione del campo elettromagnetico avviene in maniera formalmente analoga ad altri fenomeni ondulatori, come la propagazione delle onde del mare, la propagazione del suono, ecc.: nella propagazione delle onde del mare è l'acqua che, spostandosi in alto e in basso, consente all'energia prodotta dal vento di propagarsi; nella propagazione del suono l'energia meccanica prodotta da una sorgente si propaga nell'aria attraverso variazioni di pressione. Alla fine dell'Ottocento ci si chiedeva quale fosse il supporto materiale le cui vibrazioni consentissero la propagazione delle onde elettromagnetiche. A questa domanda si rispondeva invocando l'esistenza di un mezzo ad hoc, l'*etere cosmico*, che pervaderebbe l'intero universo. La cosa tragica fu che tutti gli esperimenti volti a dimostrare l'esistenza dell'etere diedero però risultato negativo; si dovette accettare a malincuore il fatto che le onde elettromagnetiche, a differenze delle altre, si propagano anche nel vuoto, dove non esiste alcun supporto materiale in grado di vibrare. Si pensi ad esempio al Sole che irradia un'enorme quantità di energia, parte della quale, dopo aver attraversato 150 milioni di km di spazio vuoto, giunge sulla Terra. I fenomeni elettromagnetici si propagano "come se" esistesse un mezzo materiale, ma questo in realtà non esiste; a propagarsi è soltanto il campo elettromagnetico.

Analizzando e combinando le equazioni di Maxwell si scoprì che la velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto è data da:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 300.000 \frac{km}{s}$$

Sorprendentemente, tale valore coincideva quello già noto della velocità della luce, indicata con  $c$ . Da questo fatto nacque l'ipotesi che la luce fosse in realtà un'onda elettromagnetica (Si osservi come nella relazione della velocità compaiono  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$ , rispettivamente la costante dielettrica e la costante magnetica del vuoto).

Maxwell morì nel 1879 purtroppo senza "vedere effettivamente" le onde elettromagnetiche di cui aveva previsto l'esistenza teorica.

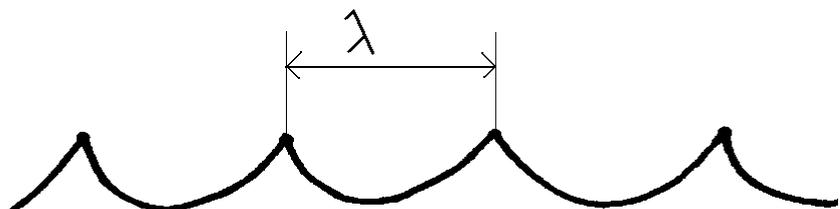
La verifica sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche si ebbe solo nove anni dopo, nel 1888, quando il tedesco Heinrich Hertz riuscì a produrre e rivelare onde elettromagnetiche in un esperimento rimasto famoso nella storia della fisica.

## 5. Proprietà delle onde elettromagnetiche

Le grandezze che caratterizzano i fenomeni ondulatori di qualunque tipo, compresi quelli elettromagnetici, sono: la lunghezza d'onda  $\lambda$ , il periodo  $T$ , la frequenza  $f$ ; la velocità di propagazione  $v$ .

Ricordiamo brevemente il loro significato, facendo per semplicità, riferimento al moto delle onde del mare, a tutti ben familiare.

Se ci troviamo in acqua ad una certa distanza dalla riva, con mare non calmo, e scattiamo una foto in un certo istante di tempo, otterremo il profilo delle onde:



la distanza tra due *cavalloni* consecutivi prende il nome di *lunghezza d'onda* e viene indicato con il simbolo  $\lambda$  (lambda). Essendo  $\lambda$  una lunghezza, essa viene misurata in metri.

Supponiamo poi di avere un cronometro e misurare, restando fermi, la durata dell'intervallo di tempo tra due cavalloni consecutivi: tale durata prende il nome di *periodo* e viene indicata con il simbolo  $T$ . Il reciproco del periodo è la *frequenza*  $f$ , corrispondente al numero di oscillazioni in un secondo.  $T$  è misurato in secondi,  $f$  (in onore dello scienziato) in Hertz.

Ora, uno spazio fratto un tempo dà una velocità; pertanto la velocità della perturbazione ondosa è data dalla relazione:

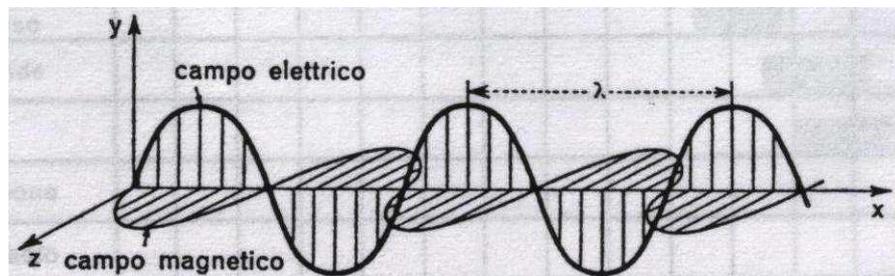
$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \frac{1}{T} = \lambda \cdot f$$

Dalle relazione precedente deriva che, a parità di velocità di propagazione  $v$ , lunghezza d'onda  $\lambda$  e frequenza  $f$  sono inversamente proporzionali: aumentando l'una diminuisce l'altra e viceversa.

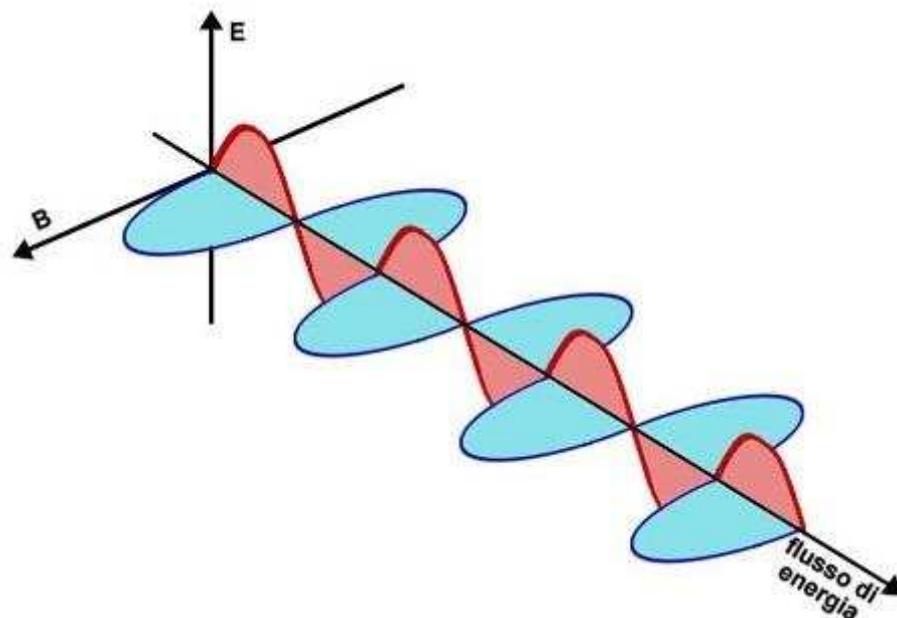
Vediamo ora le principali caratteristiche delle onde elettromagnetiche:

- 1) un'onda elettromagnetica è costituita da un campo elettrico  $\vec{E}$  ed un magnetico  $\vec{B}$  che vibrano in direzioni perpendicolari tra loro e alla direzione di propagazione, come mostrato nelle figure che seguono.
- 2) il campo elettrico e quello magnetico oscillano con la stessa frequenza;
- 3) in un mezzo omogeneo le onde si propagano in linea retta;
- 4) le onde elettromagnetiche, come tutti i fenomeni ondulatori, mentre si propagano, trasportano energia.

*andamento della propagazione al variare dello spazio, in istante di tempo fissato*

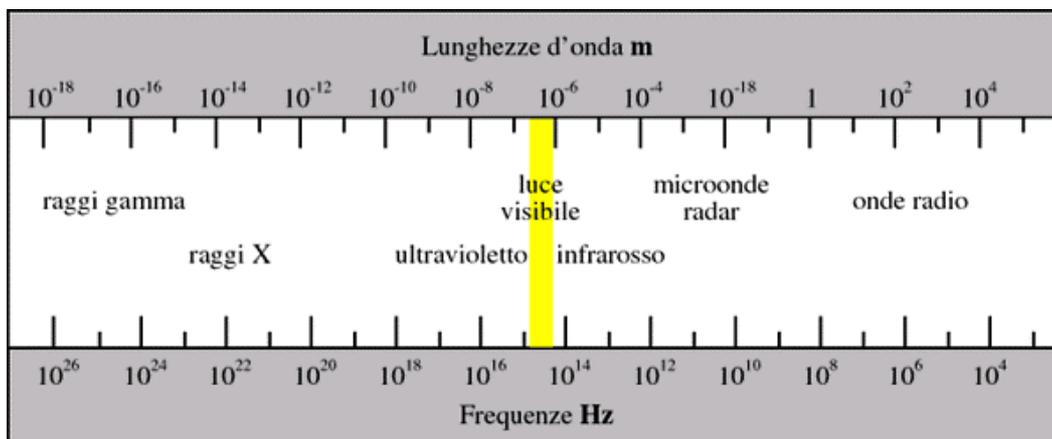


*andamento della propagazione con riferimento al trasporto di energia*



## 6. Spettro delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche coprono un'ampissima gamma di frequenze, che formano lo **spettro elettromagnetico**. Lo spettro è diviso in varie regioni, come mostrato nell'immagine seguente:



Esamineremo le diverse parti dello spettro elettromagnetico, a partire dalle lunghezze d'onda maggiori e via via diminuendone il valore, oppure, equivalentemente, a partire dalle frequenze più basse ed aumentando il valore. All'inizio troviamo le **onde radio**, successivamente le **microonde**, poi i **raggi infrarossi**, ancora la **luce visibile**, i raggi ultravioletti, i **raggi X** e infine i **raggi gamma**.

### 6.1. Le onde radio

La parte più bassa dello spettro è costituita dalle **onde radio**, con lunghezze d'onda comprese tra 10 km (frequenza = 30 kHz) e 10 cm (frequenza = 3 GHz). Le onde radio sono così chiamate poiché esse vengono usate principalmente per le comunicazioni radio e televisive, ma anche nella telefonia e nelle trasmissioni satellitari.

Per le trasmissioni radio si usano onde di frequenze diverse a seconda delle esigenze. Le trasmissioni radiofoniche usano le *onde lunghe (LW)* e le *onde medie (MW)*, le quali possono facilmente aggirare ostacoli e raggiungere posti lontani. Le *onde corte (SW)* possono inoltre attraversare lunghe distanze, poiché, in particolari condizioni, vengono riflesse dalla ionosfera (è uno strato dell'alta atmosfera, costituito da particelle ionizzate). I segnali televisivi viaggiano su *onde cortissime (VHF)* e *ultracorte (UHF)*, con lunghezze d'onde dell'ordine del metro e non possono aggirare gli ostacoli, a differenza delle precedenti.

### 6.2. Le microonde

Le microonde hanno lunghezza d'onda compresa tra 10 cm (frequenza = 3 GHz) e 1 mm (frequenza = 300 GHz).

Tutto l'Universo è permeato da una radiazione a microonde, detta *radiazione fossile o di fondo*, che si ritiene sia il residuo dell'Evento Iniziale, il Big Bang. Le microonde sono prodotte da particolari dispositivi elettronici detti *klystron* e *magnetron*.

Le microonde vengono usate per le comunicazioni telefoniche a lunga distanza e per i telefoni cellulari; vengono impiegate nel radar, che serve a determinare la posizione e la distanza degli aerei nel cielo; le troviamo infine in cucina, nei forni a microonde.

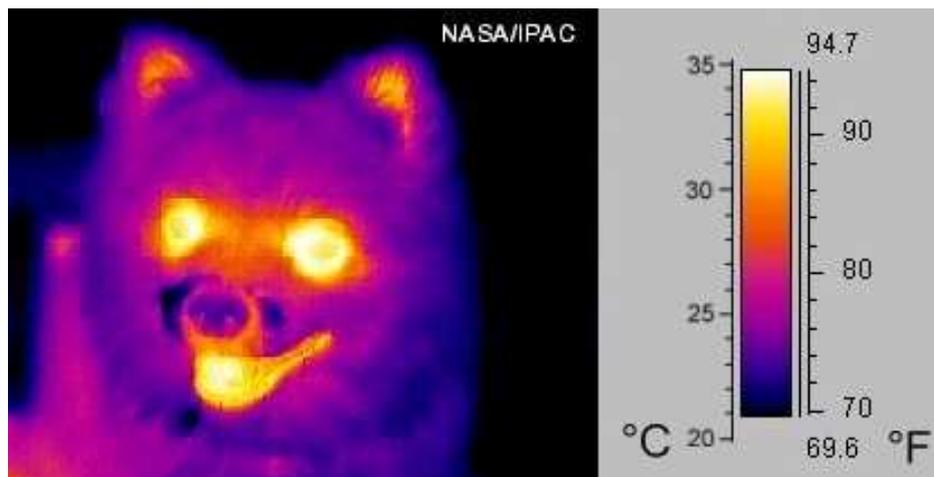
### 6.3. I raggi infrarossi

I raggi infrarossi (*IR*) sono onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra 1 mm (frequenza = 300 GHz) e 750 nm (nanometri) (frequenza = 400 THz). Essi sono così chiamati poiché si trovano subito al di sotto della luce visibile, prima del rosso. I raggi infrarossi vengono emessi da

ogni corpo (anche dal corpo umano) a qualunque temperatura esso si trovi e all'aumentare di questa, aumenta la loro emissione. Ai raggi infrarossi è associato il trasporto del calore per *irraggiamento*.

I raggi infrarossi sono invisibili ai nostri occhi, ma possiamo percepirli sulla pelle come una sensazione di calore. Inoltre si possono effettuare riprese e fotografie nell'infrarosso, allo scopo di mettere in evidenza le temperature delle diverse parti di un oggetto o di un corpo.

La radiazione infrarossa viene usata in apparecchi di *visione notturna*, quando non c'è abbastanza luce visibile. I sensori infrarossi convertono la radiazione in arrivo in un'immagine: questa può essere monocromatica (ad esempio, gli oggetti più caldi risulteranno più chiari), oppure può essere usato un sistema di falsi colori per rappresentare le diverse temperature. Questi apparecchi si sono diffusi inizialmente negli eserciti di numerosi Paesi, per poter vedere i loro obiettivi anche al buio.



Tra le applicazioni della radiazione infrarossa è la cosiddetta *termografia*, evoluzione in campo civile della tecnologia di visione notturna nata per scopi militari.

## 6.4. La luce visibile

La luce visibile è costituita dalle onde elettromagnetiche che noi, esseri umani, percepiamo sotto forma di luce attraverso gli occhi ed il cervello. Le onde della luce visibile hanno lunghezza compresa tra 750 nm e 400 nm (frequenza tra 750 THz e 400 THz). A 750 nm troviamo il colore rosso (fino a 640 nm), via via diminuendo la lunghezza d'onda gli altri colori dell'iride: l'arancione (da 640 a 580 nm), il giallo (da 580 a 570 nm), il verde (da 570 a 490 nm), l'azzurro (da 490 a 420 nm), l'indaco (da 450 a 420 nm), per finire col violetto (da 420 a 400 nm). Al di fuori di questo intervallo il nostro occhio è cieco.

Comunemente si intende con *luce bianca* la luce che riceviamo dal Sole: scomponendola per mezzo di un prisma si osservano i colori dell'iride.

## 6.5. I raggi ultravioletti

I raggi ultravioletti (*UV*) sono radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra 400 nm (frequenza = THz) e 10 nm (frequenza = Hz). Essi sono chiamati così poiché si trovano subito al di sopra della luce visibile, oltre il violetto.

La regione dell'ultravioletto può essere suddivisa in *UV vicino* (400-200 nm) e *UV estremo* (200-10 nm). Quando viene considerato l'effetto dei raggi UV sulla salute umana, la gamma delle lunghezze d'onda UV viene in genere suddivisa in **UV-A** (400-315 nm), **UV-B** (315-280 nm) e **UV-C** (280-10 nm).

I raggi ultravioletti hanno la proprietà di favorire diverse reazioni chimiche, ad esempio la produzione di melanina, il pigmento che dà il colore alla pelle: per questo motivo l'esposizione ai raggi UV determina l'abbronzatura. Nel contempo, però, i raggi UV possono essere pericolosi per la pelle

e per gli occhi, procurando anche danni molto gravi, che favoriscono l'insorgenza di tumori (*melanomi*).

I raggi ultravioletti sono prodotti in natura per emissione termica da corpi molto caldi: anche il Sole, per esempio, emette raggi UV in entrambe le bande UV-A e UV-B, ma a causa dell'assorbimento da parte dell'atmosfera terrestre, circa il 99% degli ultravioletti che arrivano sulla superficie terrestre sono UV-A., poiché le radiazioni a minor lunghezza d'onda, più dannose dal punto di vista biologico, sono assorbite dallo strato di ozono atmosferico. I raggi UV possono essere prodotti artificialmente con apposite lampade o tubi con materiali fluorescenti.

Lampade ultraviolette sono usate per analizzare minerali, gemme e nell'identificazione di vari oggetti da collezione. Molti materiali sono simili in luce visibile, ma rispondono in modo diverso alla luce ultravioletta, o presentano caratteristiche di fluorescenza diverse a seconda che vengano usati UV corti o lunghi. Coloranti UV fluorescenti sono usati in molti campi (per esempio, in biochimica e nelle indagini della polizia scientifica).

## 6.6. I raggi X

I raggi X hanno lunghezze d'onda comprese tra 10 nm e 0,001 nm.

Essi sono prodotti artificialmente mediante appositi dispositivi nei quali degli elettroni molto veloci vengono fatti decelerare rapidamente urtando contro un bersaglio metallico.

I raggi X sono dotati di molta energia e sono molto penetranti: per questo motivo essi sono utilizzati per mettere in evidenza strutture nascoste. Un classico impiego è quello delle *radiografie mediche*: in una radiografia i raggi X passano attraverso i tessuti molli, ma sono arrestati dalle ossa e ciò permette di vedere l'interno del nostro corpo. Nell'analisi chimica i raggi X vengono usati nella *spettrofotometria XRF* e nell'analisi della struttura dei materiali con la *cristallografia a raggi X* e con la *spettroscopia di assorbimento dei raggi X*. Le ricerche puntano a visualizzare strutture vive sempre più minute e in laboratorio si riescono a raggiungere dimensioni di 500 nanometri.

I raggi X hanno una grande capacità di ionizzare gli atomi e rompere i legami atomici e molecolari; per tale motivo, se assorbiti in dosi elevate, possono essere pericolosi per gli esseri viventi, in quanto possono alterare il DNA delle cellule, inducendo mutazioni genetiche; ciò può innescare trasformazioni cancerogene, con l'insorgenza di tumori.



## 6.7. I raggi gamma

Nell'ultima parte dello spettro elettromagnetico troviamo i raggi gamma (spesso indicati con la lettera greca  $\gamma$ ), con lunghezza d'onda inferiore a 0,001 nm. I raggi gamma sono radiazioni altamente energetiche. Essi sono emessi in natura dai nuclei atomici durante le trasformazioni radioattive e le reazioni nucleari. I raggi  $\gamma$  possono anche essere prodotti artificialmente costringendo degli elettroni altamente energetici a colpire un bersaglio.

I raggi gamma, ancor di più rispetto ai raggi X hanno una grande capacità di ionizzare gli atomi e per questo possono essere molto dannosi per gli esseri viventi.

Tra le applicazioni positive, i raggi gamma (nonostante essi stessi possono causare il cancro) possono essere usati per la cura dei tumori (*radioterapia*), per la sterilizzazione di strumenti chirurgici e di alimenti.

