

# Guida alla Radiazione Elettromagnetica: Dalle Onde alla Fisica Nucleare

## 1.0 Fondamenti della Radiazione Elettromagnetica: La Natura Ondulatoria

La radiazione elettromagnetica (EM) è uno dei fenomeni più fondamentali e pervasivi della fisica, essenziale tanto per i processi naturali quanto per lo sviluppo tecnologico moderno. Dalla luce visibile che ci permette di percepire il mondo, alle onde radio che trasportano le nostre comunicazioni, fino ai raggi X utilizzati in diagnostica medica, le manifestazioni della radiazione EM sono innumerevoli. Comprendere la sua natura primariamente ondulatoria è il primo passo indispensabile per padroneggiare concetti più avanzati, dall'ottica geometrica alla fisica nucleare, e per apprezzarne le profonde implicazioni in campo biomedico.

Le onde elettromagnetiche sono perturbazioni che si propagano nello spazio trasportando energia e impulso. A differenza delle onde meccaniche (come il suono), esse non necessitano di un mezzo materiale per viaggiare e possono propagarsi anche nel vuoto. La loro natura è **trasversale**: sono costituite da un campo elettrico (**E**) e un campo magnetico (**B**) che oscillano in fase, ma su piani reciprocamente perpendicolari. Entrambi i campi sono, a loro volta, perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. Questa interdipendenza, descritta dalle equazioni di Maxwell, è ciò che permette all'onda di auto-sostenersi e viaggiare a velocità immense.

Le caratteristiche fondamentali che descrivono un'onda elettromagnetica sono:

- **Frequenza (f)**: Rappresenta il numero di oscillazioni complete che l'onda compie in un secondo. Si misura in **Hertz (Hz)**, dove 1 Hz corrisponde a un'oscillazione al secondo.
- **Periodo (T)**: È l'intervallo di tempo necessario per compiere un'oscillazione completa. È l'inverso della frequenza, secondo la relazione  $T = 1/f$ , e si misura in secondi (s).
- **Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )**: È la distanza spaziale tra due punti consecutivi dell'onda che si trovano nello stesso stato di oscillazione (ad esempio, due creste successive). Si misura in metri (m).
- **Velocità di propagazione (v)**: È la velocità con cui l'onda si sposta nello spazio. È legata alla frequenza e alla lunghezza d'onda dalla relazione fondamentale  $v = \lambda f$ . Nel vuoto, tutte le onde elettromagnetiche viaggiano a una velocità costante universale, la velocità della luce, indicata con  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s. Quando un'onda attraversa un mezzo materiale, la sua velocità diminuisce secondo la relazione  $v = c/n$ , dove **n** è l'**indice di rifrazione** del mezzo, una grandezza adimensionale che caratterizza le proprietà ottiche del materiale.

Un'onda elettromagnetica trasporta energia. Questa energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza massima della grandezza fisica che oscilla, in questo caso i campi elettrico e magnetico ( $E \propto A^2$ ). Per quantificare questo trasporto di energia, si introduce il concetto di **intensità (I)**, definita come l'energia che attraversa un'unità di superficie perpendicolare alla direzione di propagazione nell'unità di tempo. L'intensità si misura in **Watt per metro quadrato (W/m<sup>2</sup>)**. Per un'onda piana, l'intensità media è legata all'ampiezza del campo elettrico ( $E_0$ ) dalla relazione:

$$I_{\text{media}} = (1/2)c\epsilon_0 E_0^2$$

dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto. Questa formula evidenzia come un'onda più "intensa" sia associata a campi elettrici e magnetici di ampiezza maggiore. La variazione di frequenza e lunghezza d'onda, e di conseguenza dell'energia trasportata, dà origine a un vasto spettro di radiazioni, ciascuna con proprietà, interazioni con la materia e applicazioni uniche che andremo ora a catalogare.

## 2.0 Lo Spettro Elettromagnetico: Un Catalogo di Energie

Lo spettro elettromagnetico è la classificazione continua di tutte le forme di radiazione EM, ordinate per frequenza crescente e, di conseguenza, per lunghezza d'onda decrescente. Poiché l'energia di un'onda è legata alla sua frequenza, lo spettro rappresenta anche un ordinamento per energia crescente. Questa classificazione è di importanza strategica, poiché permette di comprendere e prevedere come ogni tipo di radiazione interagirà con la materia, determinandone le applicazioni: dalle comunicazioni radio a lunga distanza all'imaging medico ad alta risoluzione.

La tabella seguente riassume le principali regioni dello spettro, le loro caratteristiche e alcune delle loro applicazioni più significative in ambito medico. (I valori di frequenza e lunghezza d'onda ai confini delle regioni spettrali possono variare a seconda delle convenzioni; si adottano qui i valori della classificazione riassuntiva per coerenza).

Regione dello Spettro	Caratteristiche Fisiche Principali ( $\lambda$ , f, Energia)	Applicazioni Mediche Rappresentative
<b>Onde radio</b>	$\lambda$ : > 1 m   f: < 300 MHz   Energia: < 10 <sup>-6</sup> eV	Risonanza Magnetica (RM); terapie a radiofrequenza (es. ablazione di tumori, aritmie).

<b>Microonde</b>	$\lambda$ : 1 m – 1 mm   f: 300 MHz – 300 GHz   Energia: $10^{-6}$ – $10^{-3}$ eV	Diatermia, Sterilizzazione, Monitoraggio
<b>Infrarosso (IR)</b>	$\lambda$ : 1 mm – 700 nm   f: 300 GHz – 400 THz   Energia: $10^{-3}$ – 1.7 eV	Termografia, Terapie per dolori muscolari
<b>Luce visibile</b>	$\lambda$ : 700 nm – 400 nm   f: 400 THz – 750 THz   Energia: 1.7 – 3.1 eV	Endoscopia, Chirurgia laser (es. oftalmologia)
<b>Ultravioletto (UV)</b>	$\lambda$ : 400 nm – 10 nm   f: 750 THz – 30 PHz   Energia: 3.1 – 100 eV	Sterilizzazione di strumenti, Terapia UV per psoriasi
<b>Raggi X</b>	$\lambda$ : 10 nm – 0.01 nm   f: 30 PHz – 30 EHz   Energia: 100 eV – 100 keV	Radiografia, Tomografia Computerizzata (TAC)
<b>Raggi gamma (<math>\gamma</math>)</b>	$\lambda$ : < 0.01 nm   f: > 30 EHz   Energia: > 100 keV	Radioterapia oncologica, Diagnostica nucleare (PET)

## Onde radio

- **Caratteristiche:** Sono radiazioni **non ionizzanti** a bassa energia e lunga lunghezza d'onda. Hanno un'elevata capacità di penetrazione nei tessuti biologici.
- **Applicazioni Mediche:** L'applicazione più nota è la **Risonanza Magnetica (RM)**, che utilizza onde radio per eccitare i nuclei di idrogeno nel corpo, generando immagini dettagliate dei tessuti molli. Vengono inoltre impiegate in terapie a radiofrequenza per il trattamento di tumori, aritmie e nel controllo del dolore.

## Microonde

- **Caratteristiche:** Radiazioni **non ionizzanti** con penetrazione media nei tessuti. Il loro principale effetto è il riscaldamento, dovuto all'oscillazione delle molecole polari (come l'acqua).

- **Applicazioni Mediche:** In **diatermia**, le microonde sono usate per riscaldare in profondità i tessuti a scopo terapeutico. Sono anche utilizzate per la sterilizzazione di strumenti medici e in radiometria per l'analisi dei tessuti.

## Infrarosso (IR)

- **Caratteristiche:** Radiazione **non ionizzante** associata al calore. Viene emessa da tutti gli oggetti caldi e viene assorbita principalmente a livello superficiale dalla pelle.
- **Applicazioni Mediche:** La **termografia** utilizza una telecamera a infrarossi per mappare la distribuzione della temperatura sulla superficie del corpo, utile per la diagnostica vascolare. La terapia a infrarossi è impiegata per alleviare dolori muscolari.

## Luce visibile

- **Caratteristiche:** L'unica porzione dello spettro **non ionizzante** percepibile dall'occhio umano. La sua interazione con la materia determina il colore degli oggetti.
- **Applicazioni Mediche:** È fondamentale in **endoscopia**, dove fasci di luce vengono guidati all'interno del corpo per visualizzare organi e tessuti. I laser a luce visibile sono utilizzati in chirurgia di precisione, come quella oftalmica.

## Ultravioletto (UV)

- **Caratteristiche:** Si trova al confine tra radiazioni non ionizzanti e ionizzanti. In particolare, la banda UV-C è **debolmente ionizzante** e ha proprietà germicide, in quanto può danneggiare il DNA. L'assorbimento è limitato alla pelle.
- **Applicazioni Mediche:** La sua capacità di distruggere microrganismi la rende ideale per la **disinfezione e sterilizzazione** di aria, acqua e superfici. In dermatologia, la terapia UV è usata per trattare patologie come la psoriasi e la vitiligine.

## Raggi X

- **Caratteristiche:** Sono radiazioni **ionizzanti** ad alta energia (frequenze tra 30 PHz e 30 EHz), capaci di penetrare in profondità nei tessuti. La loro capacità di attraversare la materia dipende dalla densità del materiale (vengono assorbiti maggiormente da ossa che da tessuti molli).
- **Applicazioni Mediche:** Sono la base dell'imaging radiologico. La **radiografia** fornisce immagini bidimensionali dello scheletro, mentre la **Tomografia Computerizzata (TAC)** combina multiple proiezioni per creare immagini tridimensionali dettagliate di organi e tessuti.

## Raggi gamma ( $\gamma$ )

- **Caratteristiche:** La forma di radiazione EM più energetica e **altamente ionizzante**. Sono generati da decadimenti radioattivi e reazioni nucleari e possono causare danni cellulari massivi.
- **Applicazioni Mediche:** In **radioterapia**, fasci concentrati di raggi gamma vengono usati per distruggere le cellule tumorali. In medicina nucleare, sono impiegati in

tecniche diagnostiche come la **Tomografia a Emissione di Positroni (PET)**, dove un tracciante radioattivo emette radiazioni gamma che vengono rilevate per mappare l'attività metabolica degli organi.

La visione classica della radiazione come onda continua, sebbene efficace per descrivere la sua propagazione e lo spettro, non è sufficiente a spiegare tutti i fenomeni osservati, specialmente quando la radiazione interagisce con la materia a livello atomico e molecolare. Per comprendere questi fenomeni, è necessario adottare un modello quantistico.

### 3.0 La Natura Quantistica della Luce: Il Fotone e le sue Implicazioni

Per comprendere appieno l'interazione tra radiazione e materia, la fisica del XX secolo ha introdotto il concetto rivoluzionario del **dualismo onda-particella**. Secondo questo principio, la radiazione elettromagnetica, pur propagandosi nello spazio come un'onda, interagisce con la materia in "pacchetti" discreti e localizzati di energia, chiamati **fotoni**. Questa visione quantistica è cruciale per spiegare fenomeni altrimenti incomprensibili con la teoria ondulatoria classica, come l'effetto fotoelettrico e l'assorbimento selettivo di luce da parte delle molecole biologiche.

Il **fotone** è definito come il *quanto* di energia della radiazione elettromagnetica, ovvero la più piccola quantità di energia che può essere scambiata. L'energia di un singolo fotone è direttamente proporzionale alla frequenza della radiazione, secondo la celebre equazione di Planck:

$$E = h\nu$$

dove  $h$  è la costante di Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J·s). Al fotone è associata anche una quantità di moto, inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda:

$$p = h/\lambda$$

Queste due equazioni collegano in modo indissolubile le proprietà corpuscolari (energia  $E$ , quantità di moto  $p$ ) con quelle ondulatorie (frequenza  $\nu$ , lunghezza d'onda  $\lambda$ ).

#### L'Effetto Fotoelettrico: La Prova della Quantizzazione

L'**effetto fotoelettrico** è una delle prove sperimentali più dirette della natura quantistica della luce e fu spiegato da Albert Einstein nel 1905. L'analisi del fenomeno si può strutturare come segue:

- **Descrizione del fenomeno:** Consiste nell'emissione di elettroni da una superficie metallica quando questa viene colpita da radiazione elettromagnetica (ad esempio, luce ultravioletta).
- **Condizioni necessarie:** L'emissione di elettroni avviene solo se l'energia del singolo fotone incidente ( $E_{\text{fotone}} = h\nu$ ) è superiore a una soglia minima, specifica per

ogni materiale, chiamata **lavoro di estrazione ( $W_e$ )**. Questa è l'energia che lega l'elettrone al metallo. La condizione è quindi:  $E_{\text{fotone}} > W_e$ .

- **Energia degli elettroni emessi:** L'energia in eccesso del fotone viene trasferita all'elettrone sotto forma di energia cinetica. La formula di Einstein descrive l'energia cinetica massima ( $E_{\text{max}}$ ) degli elettroni emessi:  $E_{\text{max}} = hv - W_e$
- **Fallimento del modello ondulatorio:** La teoria classica prevedeva che l'energia di un'onda dipendesse solo dalla sua intensità. Pertanto, una luce molto intensa, anche a bassa frequenza, avrebbe dovuto prima o poi fornire abbastanza energia per estrarre un elettrone. L'osservazione sperimentale che l'emissione dipende solo dalla frequenza (e non dall'intensità, che determina solo il *numero* di elettroni emessi) è spiegabile solo se si assume che l'energia sia trasferita in pacchetti discreti (fotoni).

## Assorbimento Selettivo nelle Molecole Biologiche

Il modello quantistico è fondamentale anche per spiegare come le molecole biologiche interagiscono con la luce. Ogni molecola possiede livelli energetici elettronici discreti e "permessi". Un fotone può essere assorbito da una molecola solo se la sua energia  $E = hv$  corrisponde *esattamente* alla differenza di energia tra lo stato fondamentale e uno degli stati eccitati della molecola. Questo principio è alla base dell'**assorbimento selettivo**.

Due esempi chiave in biologia sono:

- **Clorofilla:** Le molecole di clorofilla nelle piante assorbono fortemente la luce nelle regioni del blu e del rosso dello spettro visibile, mentre riflettono il verde. L'energia dei fotoni assorbiti viene utilizzata per avviare il processo di fotosintesi.
- **Emoglobina:** L'emoglobina nel sangue assorbe la luce in modo diverso a seconda che sia legata all'ossigeno (ossiemoglobina) o no (deossiemoglobina). L'ossiemoglobina appare rosso vivo perché assorbe la luce blu-verde, mentre la deossiemoglobina appare più scura, quasi bluastra, perché assorbe maggiormente nel rosso. Questa differenza di assorbimento è sfruttata in campo diagnostico da strumenti come il **pulsossimetro** per misurare la saturazione di ossigeno nel sangue.

Sebbene la natura quantistica sia fondamentale a livello microscopico, su scala macroscopica è spesso sufficiente e più pratico considerare la luce come un insieme di raggi che si propagano in linea retta. Questa approssimazione, nota come ottica geometrica, è la base per la progettazione di quasi tutti gli strumenti ottici.

## 4.0 Ottica Geometrica: Il Comportamento della Luce come Raggio

L'ottica geometrica è quel modello della fisica che descrive la propagazione della luce in termini di **raggi**, ovvero linee rette che indicano la direzione del flusso di energia luminosa. Questa è un'approssimazione estremamente valida e utile quando la lunghezza d'onda della luce è trascurabile rispetto alle dimensioni degli oggetti con cui interagisce, come lenti, specchi e diaframmi. Sebbene sia una semplificazione del modello ondulatorio, l'ottica

geometrica permette di descrivere con grande precisione fenomeni come la riflessione, la rifrazione e la formazione delle immagini, rendendola uno strumento fondamentale per la progettazione di strumenti ottici complessi, dal microscopio al telescopio.

Questo modello si basa su due leggi fondamentali che governano il comportamento dei raggi luminosi all'interfaccia tra due mezzi diversi.

1. **Legge della Riflessione:** Quando un raggio di luce incide su una superficie, viene in parte o totalmente riflesso. La legge della riflessione afferma che l'angolo di incidenza ( $\theta_i$ ), ovvero l'angolo tra il raggio incidente e la normale (la perpendicolare) alla superficie, è uguale all'angolo di riflessione ( $\theta_r$ ).  $\theta_i = \theta_r$  Si distingue tra:
  - **Riflessione speculare:** Avviene su superfici lisce (come uno specchio), dove raggi paralleli incidenti vengono riflessi come raggi paralleli.
  - **Riflessione diffusa:** Avviene su superfici ruvide, dove i raggi vengono riflessi in molte direzioni diverse.
2. **Legge della Rifrazione (Legge di Snell):** Quando un raggio di luce passa da un mezzo trasparente a un altro con un diverso indice di rifrazione (ad esempio, dall'aria all'acqua), la sua direzione di propagazione cambia. La relazione tra l'angolo di incidenza ( $\theta_1$ ) e l'angolo di rifrazione ( $\theta_2$ ) è data dalla Legge di Snell:  $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$  dove  $n_1$  e  $n_2$  sono gli indici di rifrazione dei due mezzi. Se la luce passa da un mezzo meno denso a uno più denso ( $n_1 < n_2$ ), il raggio si avvicina alla normale; viceversa, si allontana.

Un'importante conseguenza della legge di Snell è la **riflessione interna totale**. Questo fenomeno si verifica quando la luce viaggia da un mezzo otticamente più denso a uno meno denso ( $n_1 > n_2$ ). Aumentando l'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta fino a raggiungere i  $90^\circ$ . L'angolo di incidenza per cui ciò accade è detto **angolo limite** (o critico). Per angoli di incidenza superiori all'angolo limite, il raggio non viene più rifratto ma completamente riflesso all'interno del primo mezzo. La formula per l'angolo limite è:

$$\theta_{\text{limite}} = \arcsen(n_2/n_1)$$

Infine, la **dispersione** è il fenomeno per cui l'indice di rifrazione di un materiale dipende dalla frequenza (e quindi dal colore) della luce che lo attraversa. In genere, l'indice di rifrazione è leggermente maggiore per la luce blu (alta frequenza) rispetto alla luce rossa (bassa frequenza). Questo è il motivo per cui un prisma di vetro scompone un raggio di luce bianca nei suoi colori costituenti, deviando maggiormente il blu rispetto al rosso.

## Proprietà delle Lenti Sottili

Una lente è un dispositivo ottico trasparente che sfrutta la rifrazione per far convergere o divergere i raggi luminosi. Per le lenti "sottili" (il cui spessore è trascurabile), valgono le seguenti proprietà:

- Le lenti possono essere **convergenti** (biconvesse, piano-convesse), che focalizzano i raggi paralleli in un punto detto fuoco. Hanno una distanza focale  $f$  positiva ( $f > 0$ ).

- Le lenti possono essere **divergenti** (biconcave, piano-concave), che fanno divergere i raggi paralleli come se provenissero da un punto. Hanno una distanza focale  $f$  negativa ( $f < 0$ ).
- La relazione tra la distanza dell'oggetto ( $p$ ), la distanza dell'immagine ( $q$ ) e la distanza focale ( $f$ ) è data dall'**equazione dei punti coniugati**:  $1/p + 1/q = 1/f$
- Le immagini formate possono essere **reali**, se i raggi luminosi si intersecano effettivamente nel punto immagine (possono essere proiettate su uno schermo), o **virtuali**, se sono formate dal prolungamento dei raggi e non possono essere proiettate.
- L'**ingrandimento lineare (G)** è il rapporto tra la dimensione dell'immagine e quella dell'oggetto. È dato dalla formula:  $G = -q/p$  Un valore di  $G$  negativo indica un'immagine capovolta.

### Applicazione: Il Microscopio

- **Microscopio Semplice:** Comunemente noto come lente d'ingrandimento, è una singola lente convergente. Per ottenere un'immagine ingrandita e virtuale, l'oggetto deve essere posto a una distanza inferiore alla lunghezza focale. L'**ingrandimento angolare (GA)**, che confronta l'angolo sotto cui si vede l'immagine con quello dell'oggetto visto a occhio nudo alla minima distanza di visione chiara ( $d_0 \approx 25$  cm), è dato da:  $GA = d_0/f$
- **Microscopio Composto:** Per ottenere ingrandimenti maggiori, si usa un sistema di due lenti. L'**obiettivo**, una lente a corta focale, produce un'immagine reale, capovolta e ingrandita dell'oggetto. Questa immagine intermedia funge da oggetto per l'**oculare**, che agisce come un microscopio semplice per produrre un'immagine finale virtuale e ulteriormente ingrandita. L'ingrandimento totale è il prodotto degli ingrandimenti dei due componenti:  $G_{tot} = G_{obiettivo} * G_{oculare}$

Mentre l'ottica geometrica ci permette di manipolare la luce visibile, per comprendere le radiazioni più energetiche dello spettro, come i raggi gamma, dobbiamo spostare la nostra attenzione dalla propagazione dei raggi alla loro stessa origine: il nucleo atomico.

## 5.0 Radioattività: L'Energia dal Nucleo Atomico

Il nucleo atomico, sebbene di dimensioni infinitesime, è una riserva di energia immensa, tenuta insieme da forze che non hanno eguali su scala macroscopica. L'equilibrio tra queste forze determina la stabilità di un nucleo. Quando un nucleo è instabile, tende a raggiungere una configurazione più stabile attraverso un processo spontaneo di trasformazione noto come **radioattività**. Questo processo, detto decadimento radioattivo, comporta l'emissione di particelle e/o radiazioni elettromagnetiche ad alta energia, con profonde implicazioni in fisica, geologia e, soprattutto, in medicina.

Il nucleo è composto da protoni e neutroni, collettivamente chiamati nucleoni. La sua composizione è descritta da:

- **Numero atomico (Z):** il numero di protoni, che definisce l'elemento chimico.

- **Numero di massa (A):** il numero totale di nucleoni (protoni + neutroni). Un nucleo specifico (o nuclide) si indica con la notazione  ${}^A_Z X$ , dove X è il simbolo dell'elemento. Nuclei con lo stesso numero di protoni (Z) ma diverso numero di neutroni sono detti **isotopi** di quell'elemento.

L'energia che tiene uniti i nucleoni è l'**energia di legame nucleare**. Questa energia corrisponde al "difetto di massa": la massa di un nucleo stabile è sempre leggermente inferiore alla somma delle masse dei suoi protoni e neutroni costituenti. Questa differenza di massa ( $\Delta m$ ) viene convertita in energia al momento della formazione del nucleo, secondo la famosa equazione di Einstein  $E = \Delta mc^2$ . La stabilità di un nucleo dipende dal rapporto tra protoni e neutroni. Graficando il numero di neutroni rispetto al numero di protoni per tutti i nuclei stabili conosciuti, si ottiene una regione definita "valle di stabilità". I nuclei che si trovano al di fuori di questa valle sono instabili e soggetti a decadimento radioattivo.

Esistono tre principali tipi di decadimento, riassunti nella tabella seguente:

Tipo di Decadimento	Particella Emessa	Trasformazione del Nucleo (Variazione di A e Z)
<b>Decadimento Alfa (<math>\alpha</math>)</b>	Nucleo di Elio ( ${}^4_2\text{He}$ )	$A \rightarrow A - 4$ $Z \rightarrow Z - 2$
<b>Decadimento Beta (<math>\beta</math>)</b>		
<b>Beta meno (<math>\beta^-</math>)</b>	Elettrone ( $e^-$ )	$A \rightarrow A$ $Z \rightarrow Z + 1$
<b>Beta più (<math>\beta^+</math>)</b>	Positrone ( $e^+$ )	$A \rightarrow A$ $Z \rightarrow Z - 1$
<b>Decadimento Gamma (<math>\gamma</math>)</b>	Fotone ad alta energia (raggio $\gamma$ )	$A \rightarrow A$ $Z \rightarrow Z$   (Il nucleo passa da uno stato eccitato a uno stabile)

La radioattività è un processo statistico. Non è possibile prevedere quando un singolo nucleo decadrà, ma per un gran numero di nuclei, il processo segue una **legge del decadimento radioattivo** precisa. Il numero di nuclei N che non sono ancora decaduti al tempo t è descritto da un'equazione esponenziale:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

dove  $N_0$  è il numero di nuclei iniziali e  $\lambda$  è la **costante di decadimento**, che rappresenta la probabilità di decadimento per unità di tempo. Da questa legge derivano tre grandezze fondamentali:

- L'**attività (a)** di un campione, definita come il numero di decadimenti al secondo. Si misura in **Becquerel (Bq)**, dove 1 Bq = 1 decadimento/s.
- La **vita media ( $\tau$ )**, che è il tempo medio che un nucleo impiega per decadere. È l'inverso della costante di decadimento ( $\tau = 1/\lambda$ ).
- Il **tempo di dimezzamento ( $T_{1/2}$ )**, ovvero il tempo necessario perché la metà dei nuclei radioattivi in un campione decada. È legato alla vita media dalla relazione:  

$$T_{1/2} = \tau * \ln(2) \approx 0.693\tau.$$

Ora che comprendiamo l'origine e la natura di queste radiazioni nucleari, la domanda fondamentale in ambito biomedico diventa: cosa accade esattamente quando queste particelle energetiche incontrano il tessuto vivente? La risposta risiede nella distinzione più critica di tutte: la loro capacità di ionizzare la materia.

## 6.0 Interazione con i Tessuti Biologici: Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti

Quando la radiazione attraversa la materia, cede parte della sua energia agli atomi e alle molecole che incontra. In ambito biomedico, la distinzione più importante tra i vari tipi di radiazione non risiede nella loro origine, ma nella loro capacità di **ionizzare** la materia. Questa distinzione è fondamentale per valutare il rischio biologico associato all'esposizione e per sfruttare in modo mirato le proprietà delle radiazioni a scopi diagnostici e terapeutici.

- **Radiazioni Non Ionizzanti (NIR):** Sono radiazioni i cui fotoni hanno un'energia insufficiente a strappare un elettrone da un atomo o una molecola. I loro effetti biologici sono principalmente di natura termica (riscaldamento) o di eccitazione elettronica. Questa categoria include le onde radio, le microonde, l'infrarosso e la luce visibile.
- **Radiazioni Ionizzanti:** Sono radiazioni i cui fotoni (o particelle) trasportano un'energia sufficiente a causare la ionizzazione degli atomi, superando la soglia di legame degli elettroni atomici (indicativamente,  $E > 10$  eV per la maggior parte delle molecole biologiche). Questo processo crea ioni e radicali liberi, specie chimiche altamente reattive che possono danneggiare strutture cellulari critiche, in particolare il DNA. Questa categoria include i raggi X, i raggi gamma, le particelle  $\alpha$  e  $\beta$ , e la porzione più energetica della radiazione ultravioletta (UV-C).

I fotoni ionizzanti (raggi X e gamma) interagiscono con i tessuti biologici principalmente attraverso tre meccanismi:

1. **Effetto Fotoelettrico:** Il fotone cede tutta la sua energia a un elettrone legato, che viene espulso dall'atomo.

2. **Scattering Compton:** Il fotone interagisce con un elettrone, cedendogli solo una parte della sua energia e venendo diffuso con un'energia inferiore.
3. **Produzione di Coppie:** Un fotone molto energetico ( $>1.022$  MeV) che passa vicino a un nucleo può trasformarsi in una coppia elettrone-positrone.

Per quantificare gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti e gestire i rischi associati, è stata sviluppata la **dosimetria**, che si avvale di diverse grandezze fisiche:

- **Dose Assorbita (D):** Rappresenta la quantità di energia depositata dalla radiazione per unità di massa del tessuto irradiato. È la misura fondamentale del trasferimento di energia. L'unità di misura è il **Gray (Gy)**, dove  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$ .
- **Dose Equivalente (H):** A parità di dose assorbita, radiazioni diverse (es. particelle alfa vs. raggi gamma) producono un danno biologico differente. La dose equivalente tiene conto di questa differenza ponderando la dose assorbita per un fattore di peso della radiazione ( $w_R$ ). La formula è  $H = D * w_R$ . L'unità di misura è il **Sievert (Sv)**.
- **Dose Efficace (E):** Diversi tessuti e organi del corpo hanno sensibilità diverse ai danni da radiazione. La dose efficace pondera la dose equivalente per un fattore di peso del tessuto ( $w_T$ ) per fornire una stima del rischio complessivo per l'intero organismo. La formula è  $E = \sum (H_T * w_T)$ , sommando su tutti i tessuti irradiati. Si misura anch'essa in **Sievert (Sv)**.

In conclusione, la radiazione elettromagnetica si manifesta come un fenomeno unificante che attraversa l'intera fisica. Il nostro percorso ci ha portati dalle onde macroscopiche descritte dall'ottica, che manipoliamo con lenti e specchi, alla natura quantistica della luce, espressa da pacchetti di energia chiamati fotoni, fino alle particelle subatomiche ad altissima energia originate nei decadimenti nucleari. La profonda comprensione di questo vasto spettro è una delle conquiste scientifiche più significative, essenziale per lo sviluppo di innumerevoli tecnologie che hanno rivoluzionato la comunicazione, l'industria e, in modo particolare, la medicina moderna.