

Sommario

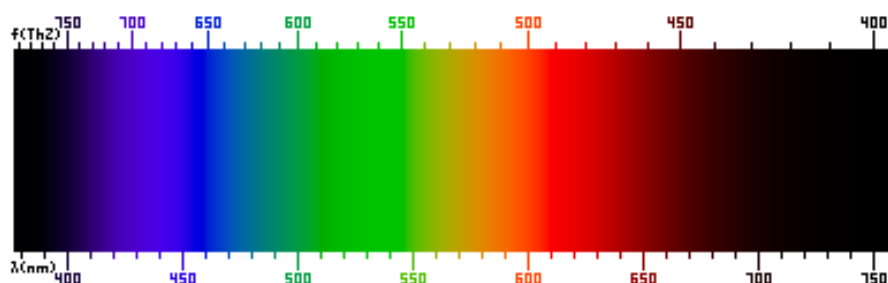
Ottica	2
Teorie sulla luce.....	2
Velocità della luce.....	5
Onde elettromagnetiche.....	9
Parametri dell'onda elettromagnetica.....	10
Spettro elettromagnetico	17

Ottica

L'ottica è lo studio della luce e dell'interazione tra luce e materia.

Il termine **luce** (dal latino **lux, lucis**) si riferisce alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile dall'occhio umano ed è approssimativamente compresa tra 400 e 700 nm di lunghezza d'onda, ovvero tra 750 e 428 THz di frequenza. Questo intervallo coincide con la regione di massima emissione da parte del sole.

Sebbene i limiti dello spettro visibile all'occhio umano non siano uguali per tutte le persone, si può affermare che, mediamente, possono raggiungere i 380 nm verso gli ultravioletti ed i 760 nm verso gli infrarossi.



La luce, come tutte le onde elettromagnetiche, interagisce con la materia. I fenomeni più comuni osservabili sono l'assorbimento, la trasmissione, la riflessione, la rifrazione e la diffrazione.

Sebbene nell'elettromagnetismo classico la luce sia descritta come un'onda, l'avvento della meccanica quantistica agli inizi del XX secolo ha permesso di capire che questa possiede anche proprietà tipiche delle particelle. Nella fisica moderna, la luce (e tutta la radiazione elettromagnetica) viene descritta come composta da **quanti del campo elettromagnetico** denominati **fotoni**.

Teorie sulla luce

Teoria corpuscolare

Formulata da Isaac Newton nel XVII secolo, considera la luce come composta da piccole particelle di materia (**corpuscoli**) emesse in tutte le direzioni. Oltre che essere matematicamente molto semplice, questa teoria spiega molto facilmente

alcune caratteristiche della propagazione della luce che erano ben note all'epoca di Newton.

Innanzitutto, la meccanica galileiana prevede, correttamente, che le particelle (inclusi i corpuscoli di luce) si propagano in linea retta ed il fatto che questi fossero previsti essere molto leggeri è coerente con una velocità della luce alta ma non infinita. Anche il fenomeno della riflessione è spiegabile in maniera semplice tramite l'urto elastico della particella di luce sulla superficie riflettente.

La spiegazione della rifrazione è leggermente più complicata ma non impossibile: le particelle incidenti sul materiale sono soggette a forze perpendicolari alla superficie che ne cambiano la traiettoria.

I colori dell'arcobaleno venivano spiegati tramite l'introduzione di un gran numero di corpuscoli di luce diversi (uno per ogni colore) ed il bianco era pensato come formato dall'insieme di queste particelle. La separazione dei colori operata, ad esempio, da un prisma poneva qualche problema teorico in più poiché le particelle di luce dovrebbero avere proprietà identiche nel vuoto ma diverse all'interno della materia.

Una conseguenza della teoria corpuscolare della luce è che questa, per via dell'accelerazione gravitazionale, aumenti la sua velocità quando si propaga all'interno di un mezzo.

Teoria ondulatoria

Formulata da Christiaan Huygens nel 1678, considera la luce come un'onda che si propaga (in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche) in un mezzo, chiamato **etere**, che si supposeva pervadere tutto l'universo ed essere formato da microscopiche particelle elastiche. La teoria ondulatoria della luce permetteva di spiegare, anche se in maniera matematicamente complessa, un gran numero di fenomeni: oltre alla riflessione ed alla rifrazione, Huygens riuscì infatti ad analizzare il fenomeno della birifrangenza nei cristalli di calcite.

Nel 1801, Thomas Young dimostrò come i fenomeni della diffrazione e dell'interferenza fossero interamente spiegabili dalla teoria ondulatoria e non lo fossero dalla teoria corpuscolare.

Un problema della teoria ondulatoria era la propagazione rettilinea della luce. Infatti era ben noto che le onde sono capaci di aggirare gli ostacoli mentre è esperienza comune che la luce si propaghi in linea retta (proprietà già stata notata da Euclide nel suo trattato "Optica"). Questa apparente incongruenza può però essere spiegata assumendo che la luce abbia una lunghezza d'onda microscopica.

Al contrario della teoria corpuscolare, quella ondulatoria prevede che la luce si propaghi più lentamente all'interno di un mezzo che nel vuoto.

Teoria elettromagnetica

Proposta da James Clerk Maxwell alla fine del XIX secolo, sostiene che le onde luminose sono elettromagnetiche e non necessitano di un mezzo per la trasmissione e mostra che la luce visibile è una parte dello spettro elettromagnetico. Con la formulazione delle equazioni di Maxwell, vennero completamente unificati i fenomeni elettrici, magnetici ed ottici. Per la grandissima maggioranza delle applicazioni questa teoria è ancora utilizzata al giorno d'oggi.

Teoria quantistica

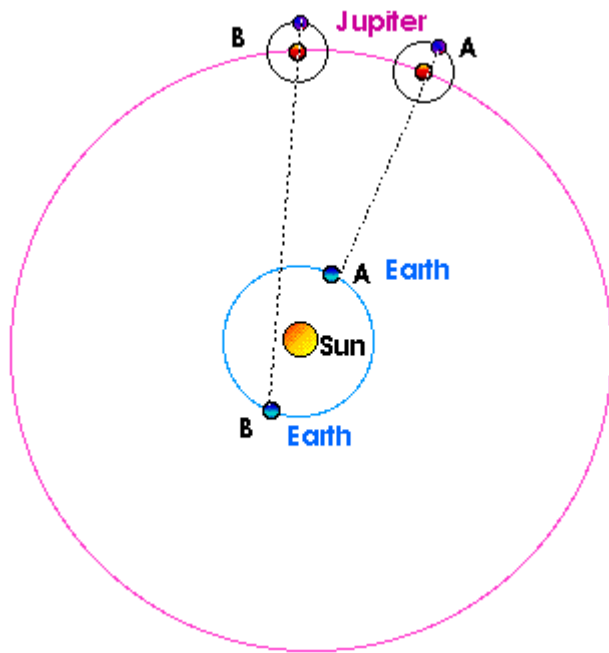
Per risolvere alcuni problemi sulla trattazione del corpo nero, nel 1900 Max Planck formulò l'ipotesi che l'energia associata ad un'onda elettromagnetica non fosse proporzionale al quadrato della sua frequenza, come nel caso delle onde elastiche in meccanica classica, ma direttamente proporzionale alla frequenza e che la sua costante di proporzionalità fosse discreta e non continua. L'interpretazione successiva che Albert Einstein diede dell'effetto fotoelettrico portò a ritenere che quanto ipotizzato da Planck non fosse un mero artificio matematico, ma piuttosto l'interpretazione

di una nuova struttura fisica, cioè che la natura della luce potesse avere un qualche rapporto con una forma discreta di alcune sue proprietà. Si cominciò così a parlare di pacchetti discreti di energia, battezzati **fotoni**. Con l'avvento delle **teorie quantistiche dei campi** (in particolare dell'elettrodinamica quantistica), il concetto di fotone venne formalizzato ed oggi sta alla base dell'**ottica quantistica**.

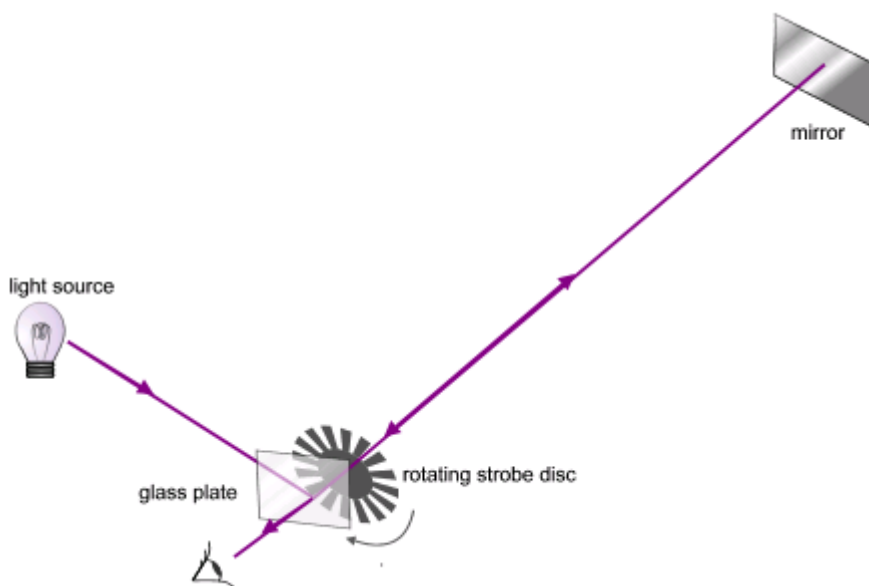
Velocità della luce

Il primo tentativo di misurazione della velocità della luce venne compiuto da Galileo Galilei con l'ausilio di lampade oscurabili, ma la rudimentalità dei mezzi disponibili non gli permise di ottenere alcun valore.

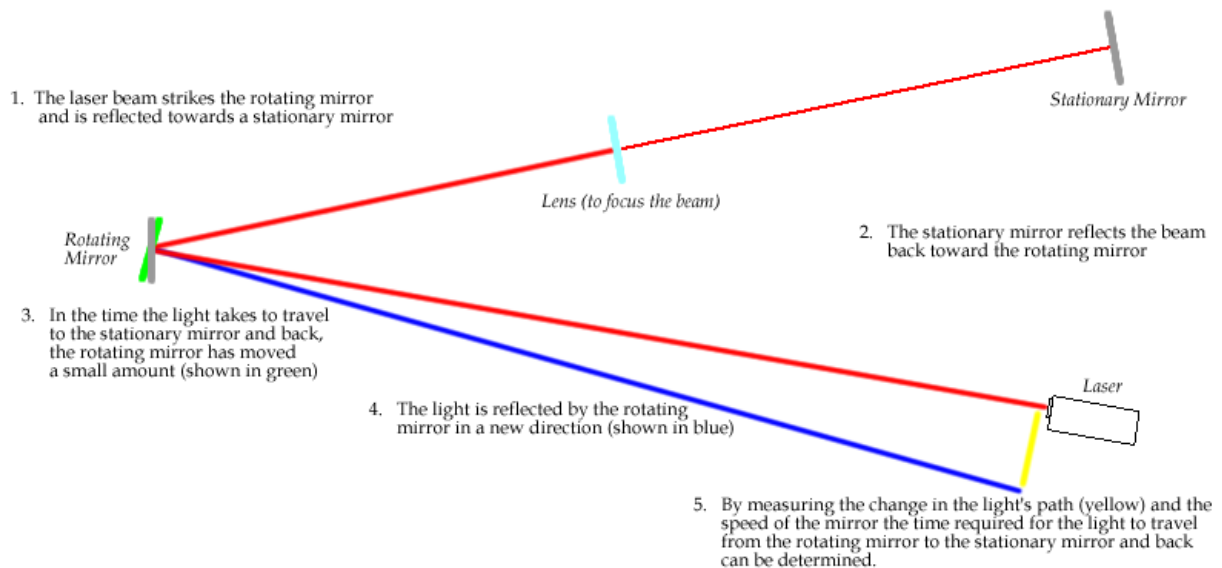
La prima vera misurazione fu eseguita dal fisico danese Olaus Roemer nel 1676, basandosi sull'osservazione di Giove e di una delle sue lune mediante telescopio. Grazie al fatto che la luna veniva eclissata ad intervalli regolari, determinò il suo periodo di rivoluzione attorno al pianeta in 42,5 ore quando la Terra era vicina a Giove. L'allungamento del periodo di rivoluzione all'allontanarsi della Terra da Giove poteva essere spiegato assumendo che la luce impiegava più tempo a coprire la distanza Terra-Giove ed ipotizzando quindi una velocità finita per essa. Analizzando la distanza tra i due pianeti in tempi differenti, Roemer calcolò una velocità di 210.800.000 m/s.



Una successiva e più accurata misurazione fu quella realizzata nel 1849 dal fisico francese Hippolyte Fizeau. Il suo metodo si basava sull'impiego di una sorgente luminosa, uno specchio fisso distante alcuni chilometri ed una ruota dentata rotante: il fascio di luce emesso veniva riflesso dallo specchio verso la ruota. Fizeau verificò che, per una specifica velocità di rotazione della ruota, il fascio di luce passante nell'intervallo tra due denti della ruota all'andata attraversava l'intervallo successivo al ritorno. Noti la distanza dello specchio, il numero di denti della ruota e la sua velocità di rotazione, Fizeau stimò una velocità della luce pari a 313.000.000 m/s.

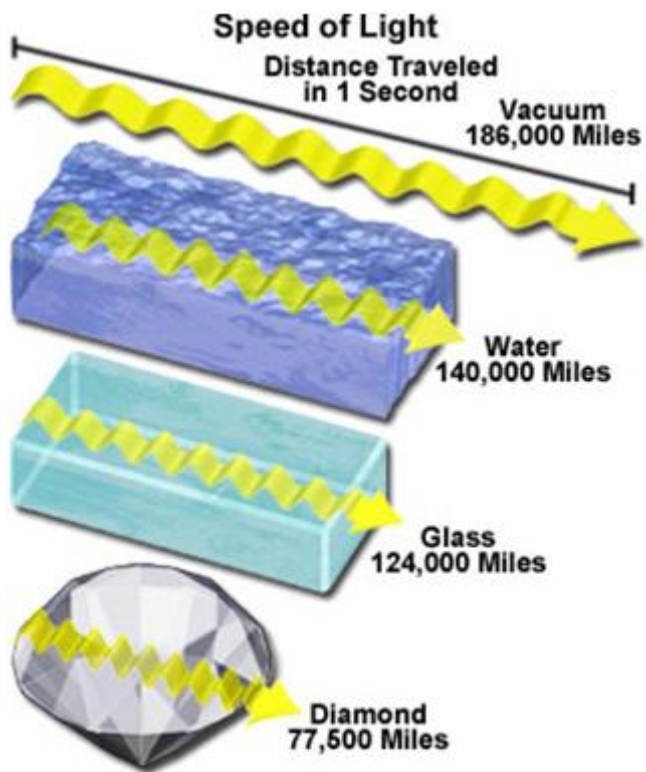


Nel 1862, il fisico francese Léon Foucault modificò l'apparato di Fizeau introducendo uno specchio rotante sul percorso del fascio luminoso (lo schema illustrato nella figura sottostante è analogo a quello originale, salvo l'impiego di una moderna sorgente laser invece di una sorgente di luce bianca). Il valore così determinato fu di 298.000.000 m/s.



Nel 1926, il fisico prussiano, naturalizzato statunitense, Albert A. Michelson si servì di uno schema simile per misurare il tempo impiegato dalla luce per percorrere il viaggio di andata e ritorno dal monte Wilson al monte San Antonio in California. La misurazione portò ad un valore di $299.796.000 \pm 4.000$ m/s.

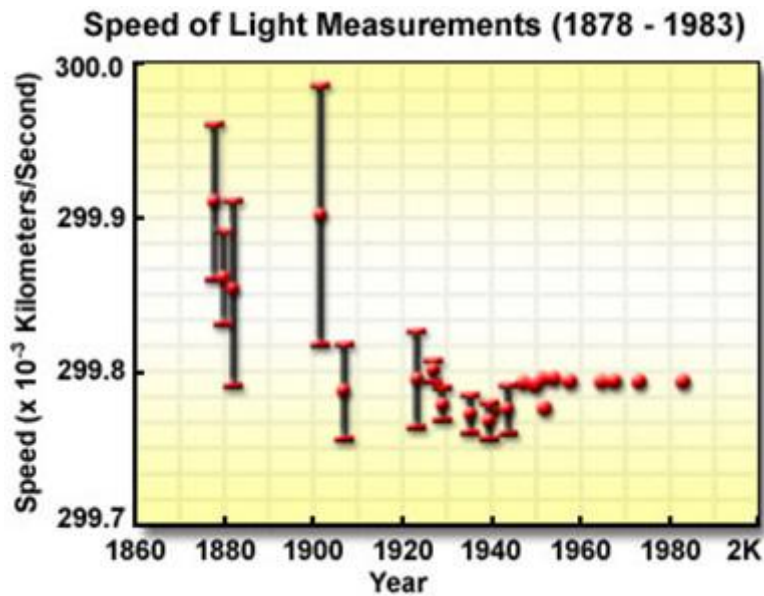
È opportuno sottolineare come le modalità di effettuazione di tutte queste misurazioni abbiano consentito di ottenere non la velocità massima della luce bensì quella nell'aria. Infatti, quando la luce passa attraverso una sostanza trasparente, come aria, acqua o vetro, la sua velocità viene ridotta a causa della rifrazione.



Il valore della sua velocità dipende dall'**indice di rifrazione n** del mezzo, dove $n = 1$ nel vuoto e $n > 1$ nella materia. L'indice di rifrazione dell'aria di fatto è molto vicino a 1 e, in effetti, la misura di Michelson rappresentava un'ottima approssimazione di c .

Nel corso del XX secolo, i metodi di misurazione sempre più precisi, basati sull'interferometria nonché sull'impiego di laser in condizioni di vuoto, hanno fatto progressivamente convergere le rilevazioni della velocità assoluta della luce sul seguente valore:

$$c = 299.792.457,4 \pm 1,2 \text{ m/s}$$



Nell'uso comune, questo valore viene arrotondato a:

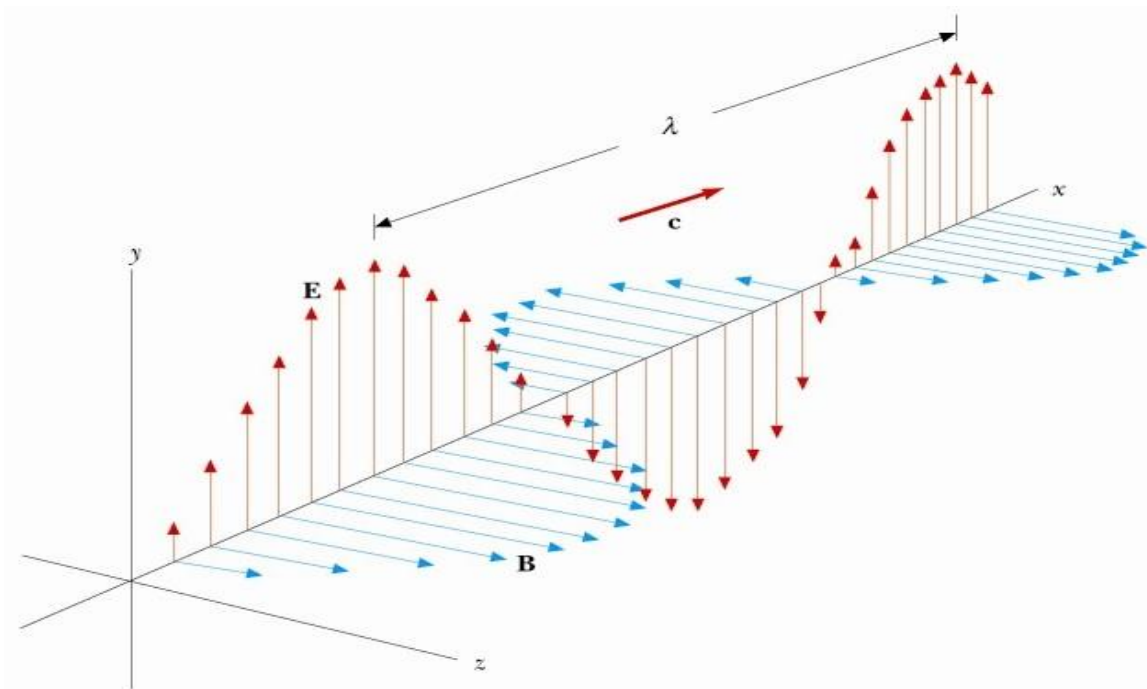
$$c \approx 300.000 \text{ km/s}$$

Onde elettromagnetiche

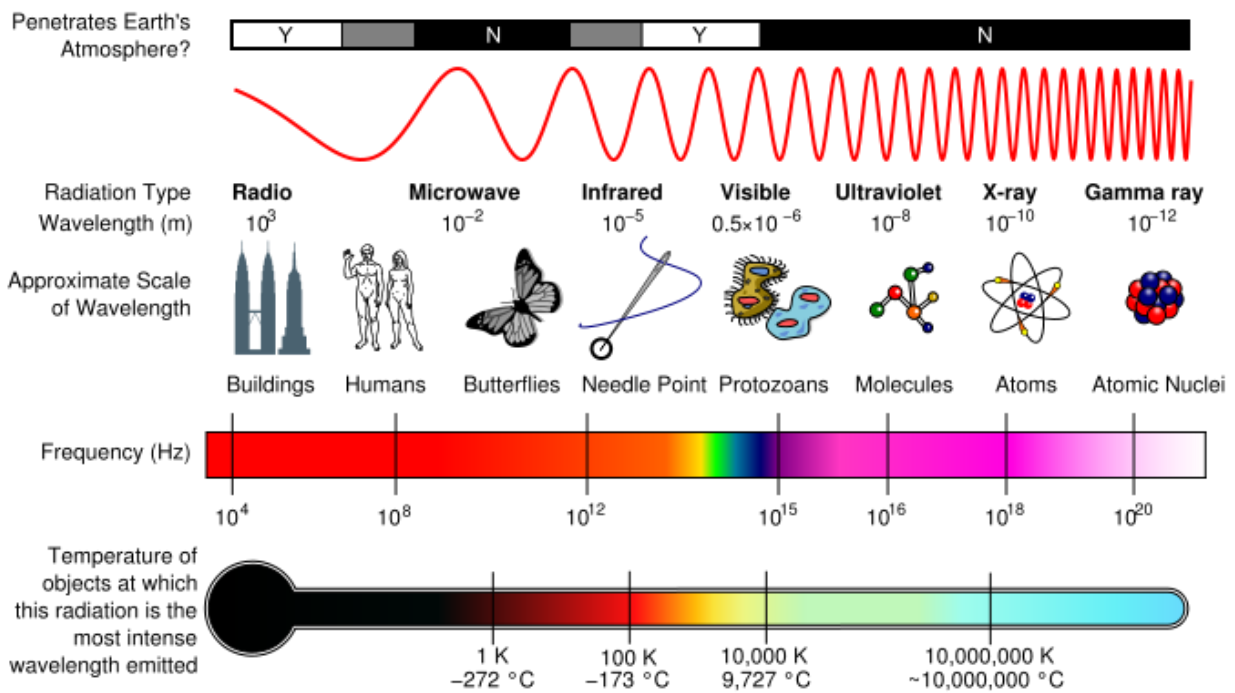
Nel 1845, Michael Faraday scoprì che era possibile modificare l'angolo di polarizzazione di un fascio luminoso mediante un campo magnetico, un effetto noto come **rotazione di Faraday**. Si ebbe così la prima prova che la luce era correlata all'elettromagnetismo. Nel 1847, Faraday ipotizzò che la luce fosse una vibrazione elettromagnetica ad alta frequenza, in grado di propagarsi anche in assenza di un mezzo quale l'etere.

Il lavoro di Faraday fu di stimolo a James Clerk Maxwell per studiare la radiazione elettromagnetica e la radiazione luminosa. Maxwell scoprì che le onde elettromagnetiche si propagavano nello spazio con velocità costante ed uguale a quella misurata per la luce. Sulla base di queste risultanze, Maxwell concluse che la luce era una forma di radiazione elettromagnetica ("On Physical Lines of Force", 1862). Nel 1873, pubblicò "A Treatise on Electricity and Magnetism", contenente la descrizione matematica dei campi elettrici e magnetici riassunta nelle **equazioni di Maxwell**.

Poco dopo, Heinrich Hertz confermò sperimentalmente la fondatezza della teoria di Maxwell generando e rilevando onde radio e dimostrando che queste si comportavano esattamente come la luce visibile, in quanto soggette a riflessione, rifrazione, diffrazione ed interferenza.



Parametri dell'onda elettromagnetica



Velocità di propagazione

È la distanza percorsa nell'unità di tempo; in ottica, l'unità di misura comunemente utilizzata è il **[km/s]**. La velocità è inversamente proporzionale all'indice di rifrazione assoluto del mezzo di propagazione (vuoto, aria, acqua, vetro, ecc.):

$$n = c / v \geq 1$$

$$v = c / n \leq 300.000 \text{ km/s}$$

n

indice di rifrazione assoluto del mezzo di propagazione considerato.

c

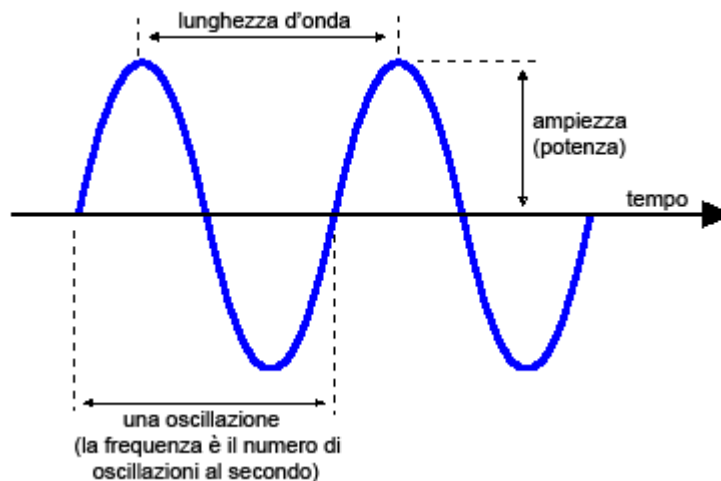
velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto ($\approx 300.000 \text{ km/s}$).

v

velocità dell'onda elettromagnetica nel mezzo considerato ($v \leq c$).

Lunghezza d'onda

È la distanza tra punti ripetitivi di una forma d'onda ed è comunemente indicata con la lettera greca λ . L'unità di misura dipende dalla banda dello spettro elettromagnetico considerato: nel visibile, si utilizza il **[nm]**.



La lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza e direttamente proporzionale al periodo; la relazione è la seguente:

$$c = \lambda \cdot f = \lambda / T$$

$$\lambda = c / f = c \cdot T$$

c

velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto (≈ 300.000 km/s);

λ

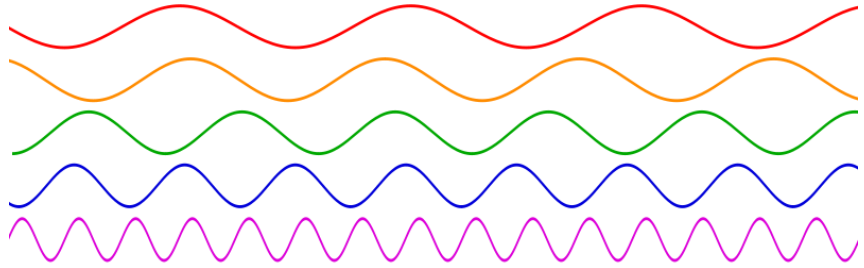
lunghezza d'onda, distanza tra due massimi o due minimi consecutivi [nm, nel visibile];

f

frequenza, numero di oscillazioni complete effettuate al secondo [cicli/s = Hz];

T

periodo, tempo impiegato a percorrere una distanza pari alla lunghezza d'onda [s].



Quando le onde elettromagnetiche passano attraverso un materiale, la loro lunghezza d'onda viene ridotta in funzione dell'indice di rifrazione n del materiale, ma la frequenza dell'onda non cambia. La lunghezza d'onda in un generico materiale è data da:

$$\lambda = \lambda_0 / n$$

λ_0

lunghezza d'onda nel vuoto [nm, nel visibile];

n

indice di rifrazione assoluto del mezzo di propagazione considerato.

Le lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica sono normalmente riferite al vuoto, anche se questo non è sempre dichiarato esplicitamente.

Frequenza

È il numero di cicli della forma d'onda ripetitiva nell'unità di tempo ed è comunemente indicata con la lettera greca ν o con quella latina f . L'unità di misura è l'hertz [$\text{Hz} = 1/\text{s} = \text{s}^{-1}$].

La frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda ed al periodo; la relazione è la seguente:

$$c = \lambda \cdot f = \lambda / T$$

$$f = c / \lambda = 1 / T$$

c

velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto (≈ 300.000 km/s);

 λ

lunghezza d'onda, distanza tra due massimi o due minimi consecutivi [nm, nel visibile];

f

frequenza, numero di oscillazioni complete effettuate al secondo [cicli/s = Hz];

T

periodo, tempo impiegato a percorrere una distanza pari alla lunghezza d'onda [s].

Periodo

È il tempo necessario a completare un ciclo della forma d'onda ripetitiva o, in altri termini, a percorrere una distanza pari alla lunghezza d'onda durante la propagazione. È comunemente indicato con la lettera latina **T**. L'unità di misura è il **[s]**.

Il periodo è inversamente proporzionale alla frequenza e direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda ed al periodo; la relazione è la seguente:

$$c = \lambda \cdot f = \lambda / T$$

$$T = \lambda / c = 1 / f$$

c

velocità dell'onda elettromagnetica nel vuoto (≈ 300.000 km/s);

λ

lunghezza d'onda, distanza tra due massimi o due minimi consecutivi [nm, nel visibile];

f

frequenza, numero di oscillazioni complete effettuate al secondo [cicli/s = Hz];

T

periodo, tempo impiegato a percorrere una distanza pari alla lunghezza d'onda [s].

Costante di Planck

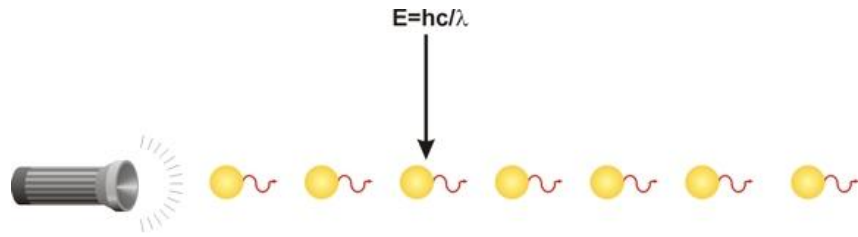
Indicata con la lettera latina ***h***, è una costante fisica equivalente alla ***quantità di azione fondamentale o quanto di azione*** ed ha le dimensioni di un'energia per un tempo.

La costante prende il nome da Max Planck, i cui studi fondamentali sullo spettro della radiazione di corpo nero hanno gettato le basi della teoria quantistica. Secondo le raccomandazioni CODATA del 2006, il suo valore sperimentale è il seguente:

$$h = 6,6260689633 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Energia (fotonica)

La radiazione visibile è un insieme di pacchetti di energia o ***quanti di luce*** che rappresentano le particelle luminose elementari emesse o assorbite dagli elettroni di valenza degli atomi. Questi pacchetti di energia sono i ***fotoni***.



E = Packet Energy
h = Planck's Constant
c = Speed of Light (meters/seconds)
λ = Wavelength (meters)

Ciascun fotone ha un contenuto di energia proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica ad esso associata:

$$E_{\lambda} = h \cdot f = h / T$$

E_λ

energia del fotone con lunghezza d'onda λ [J].

h

costante di Planck ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s).

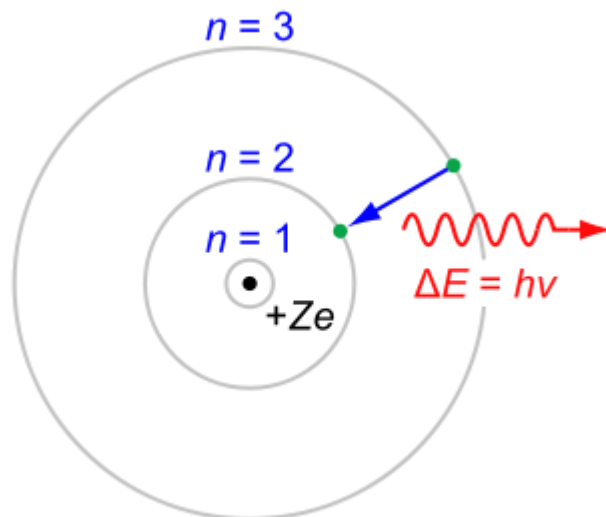
f

frequenza del fotone [Hz].

T

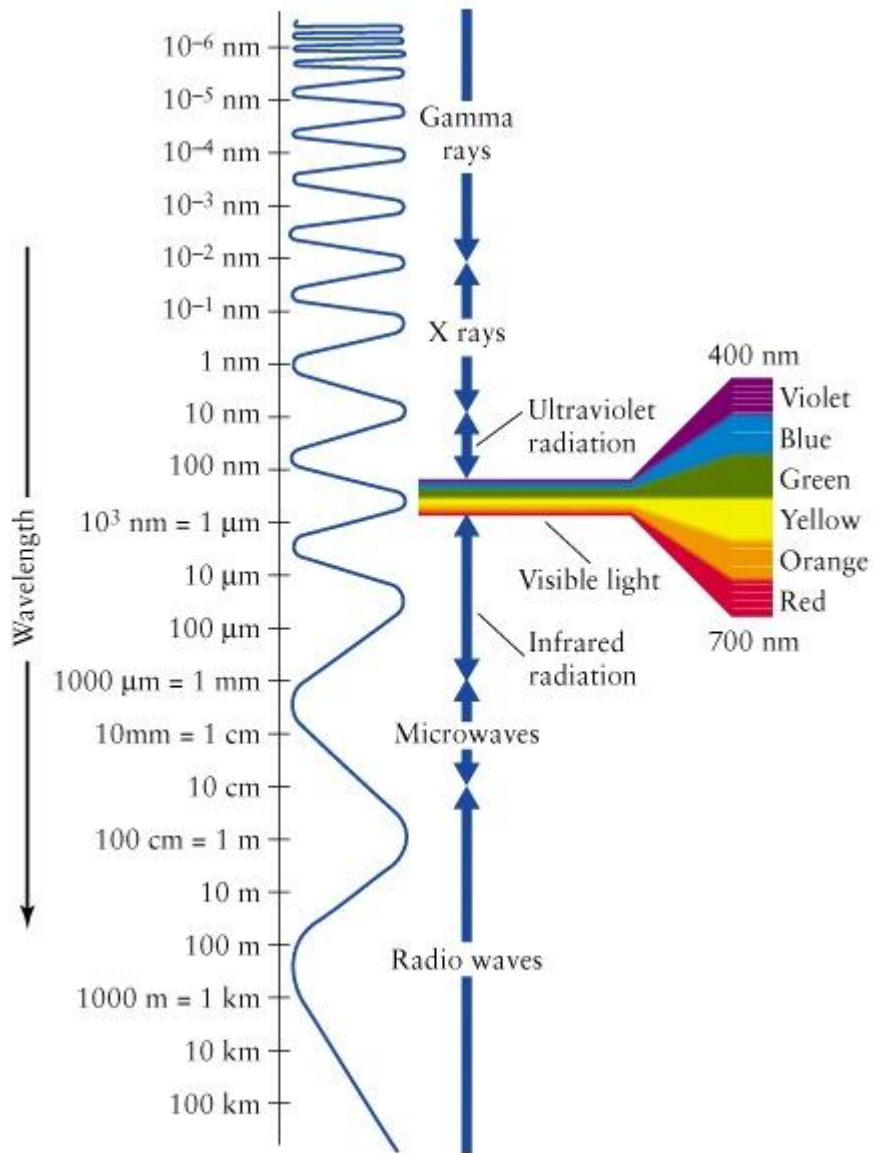
periodo del fotone [s].

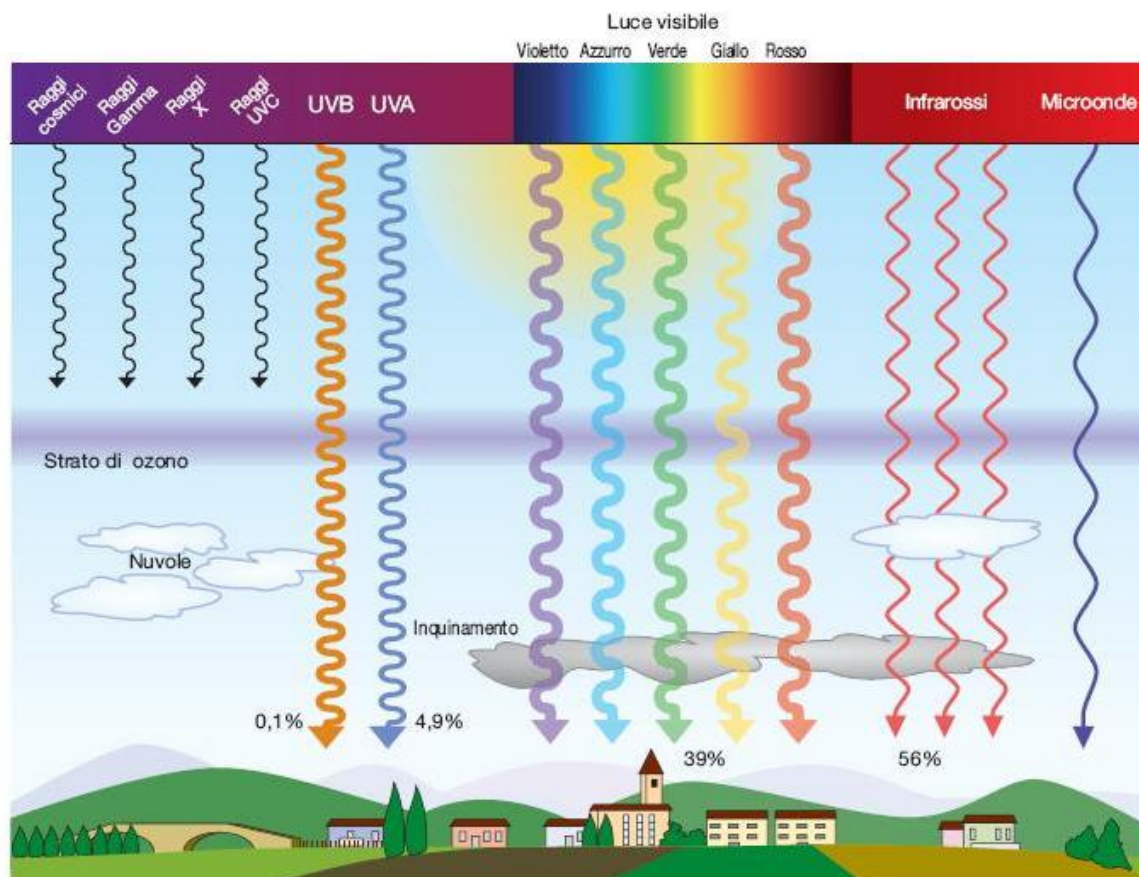
I fotoni possono essere prodotti in molti modi, inclusa l'emissione da elettroni che cambiano di stato o di orbitale. Possono essere anche creati per transizione nucleare, annichilazione particella-antiparticella o fluttuazione del campo elettromagnetico.



Spettro elettromagnetico

Ai fini tecnici e scientifici, lo spettro elettromagnetico viene suddiviso in bande con specifiche caratteristiche ed utilizzazioni. Occorre però sottolineare che non esiste una demarcazione ben definita tra bande adiacenti: infatti, le radiazioni al confine tra due bande presentano sovente proprietà comuni ad entrambe. Ad esempio, la luce rossa e la radiazione infrarossa sono entrambe in grado di indurre la risonanza di alcuni tipi di legami chimici.





Onde radio

Hanno lunghezze d'onda comprese tra qualche centinaio di metri e circa un millimetro. Sono utilizzate per trasmissioni di dati mediante modulazione. La televisione, la telefonia mobile, l'MRI, le reti wireless e la radiofonia sono alcuni dei principali settori di utilizzazione delle onde radio. Intervenendo su ampiezza, frequenza e fase delle onde radio in una determinata banda di frequenze, è possibile adattarele al trasporto di informazioni (dati). L'utilizzo dello spettro radio è generalmente regolamentato dai governi mediante assegnazione delle frequenze. Quando la **radiazione elettromagnetica (EM)** è intercettata da un conduttore, si aggancia e si propaga lungo di esso ed induce una corrente elettrica sulla sua superficie eccitandone gli elettroni; questo **effetto pelle** è sfruttato nelle antenne. Inoltre, l'energia delle radiazioni EM viene assorbita da alcuni tipi di molecole causandone il riscaldamento.

Microonde

Sono costituite dalle onde Super High Frequency (SHF) e da quelle Extremely High Frequency (EHF). Si tratta di onde sufficientemente corte da consentire l'impiego di guide d'onda tubolari metalliche. Le microonde sono assorbite dalle molecole con **momento di dipolo elettrico** nei liquidi (ad esempio l'acqua), un effetto sfruttato nei forni a microonde per cuocere i cibi. Inoltre, le radiazioni a microonde a bassa intensità trovano impiego nelle **reti Wi-Fi**.

Radiazione infrarossa

La porzione infrarossa dello spettro elettromagnetico si estende da circa 300 GHz (1 mm) a 400 THz (750 nm) ed è suddivisa in tre bande:

- **Infrarosso lontano**

300 GHz (1 mm) – 30 THz (10 μm)

Tipicamente, questa banda di radiazioni è assorbita dai modi di rotazione delle molecole nei gas, dai moti molecolari nei liquidi e dai fononi nei solidi (**fonone: quasiparticella che descrive un quanto di vibrazione in un reticolo cristallino**). L'elevato assorbimento in questa banda dell'acqua allo stato di vapore rende l'atmosfera opaca alle relative radiazioni. Tuttavia, l'atmosfera presenta alcune **finestre** che permettono la trasmissione di bande ristrette utilizzabili in astronomia. Sempre in campo astronomico, la banda compresa tra 200 μm ed alcuni millimetri è denominata **submillimetro**, mentre l'infrarosso lontano comprende le lunghezze d'onda inferiori a 200 μm .

- **Infrarosso intermedio**

30 – 120 THz (10 – 2,5 μm)

I corpi caldi (**radiatori a corpo nero**) emettono intensamente in questa banda e le relative radiazioni sono assorbite dalle

vibrazioni molecolari. Poiché i materiali presentano specifici spettri di assorbimento in questa banda, la si indica anche come **regione di impronta (fingerprint region)**.

- **Infrarosso vicino**
120 – 400 THz (2.500 – 750 nm)

I processi fisici relativi a questa banda sono analoghi a quelli dello spettro visibile.

Anche se non visibile agli esseri umani, l'infrarosso viene percepito dai recettori della pelle come calore.

Luce visibile

È la banda di massima emissione del Sole e delle stelle di tipo analogo e rappresenta una porzione molto ristretta dello spettro elettromagnetico. Probabilmente, non è una coincidenza che l'occhio umano sia sensibile alle lunghezze d'onda che il Sole irradia in misura maggiore. Tipicamente, la luce visibile e quella dell'infrarosso vicino sono assorbite ed emesse dagli elettroni presenti in atomi e molecole che saltano di livello energetico.

La radiazione EM percepibile dall'occhio umano è costituita dalle lunghezze d'onda comprese tra circa 380 nm e 760 nm. Il termine **luce** è talvolta utilizzato anche per le bande di lunghezze d'onda immediatamente adiacenti allo spettro visibile, cioè gli UV e gli IR.

Le differenti lunghezze d'onda vengono interpretate dal cervello come colori, che vanno dal rosso dell'estremo superiore (frequenza più bassa) al violetto dell'estremo inferiore (frequenza più alta) dello spettro visibile. Tuttavia, **non a tutti i colori è possibile associare una lunghezza d'onda**, in quanto è vero che ad ogni lunghezza d'onda è associabile un colore, ma non è vero il contrario. Quei colori a cui non sono associate lunghezze d'onda sono invece generati dal meccanismo di funzionamento dell'apparato visivo umano (occhio + cervello). In particolare, i coni (le cellule della retina

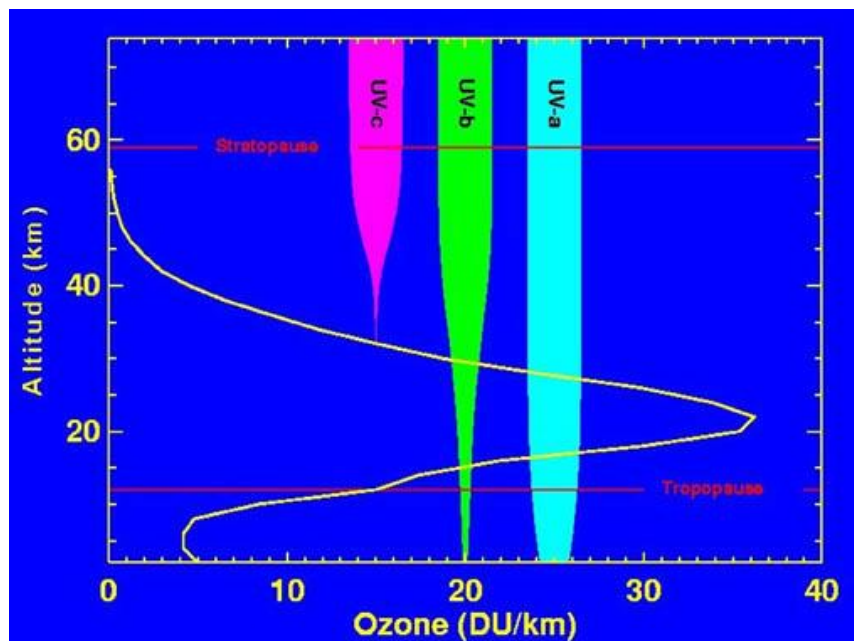
responsabili della visione a colori) si differenziano in tre tipi perché sensibili a tre diverse regioni spettrali della luce.

Ad esempio, due diverse onde monocromatiche, appartenenti a due diverse bande spettrali, sollecitano contemporaneamente l'occhio, il cervello interpreta la sollecitazione come un nuovo colore, somma dei due originali (sintesi additiva).

Radiazione ultravioletta

È la banda di lunghezze d'onda più brevi di quelle visibili. La radiazione ultravioletta non viene percepita dagli esseri umani se non in maniera molto indiretta, in quanto la sovraesposizione della pelle ai raggi UV causa scottature.

L'emissione del Sole nell'UV è così intensa da essere potenzialmente in grado di rendere la Terra un pianeta sterile. Fortunatamente, la radiazione ultravioletta è assorbita in larga percentuale dallo **strato di ozono (O₃)** presente nella parte alta dell'atmosfera prima che raggiunga la superficie terrestre.



Le radiazioni UV sono ripartite in tre bande, in funzione della loro lunghezza d'onda:

- **Raggi ultravioletti A (UVA)**

320 – 400 nm

Meno potenti degli altri due tipi ma molto penetranti, sono in grado di raggiungere il derma, innescando il fotoinvecchiamento e favorendo l'insorgenza di varie forme di cancro alla pelle. Il 4,9% dell'energia solare che giunge a terra è costituito da raggi UVA.

- **Raggi ultravioletti B (UVB)**

290 – 320 nm

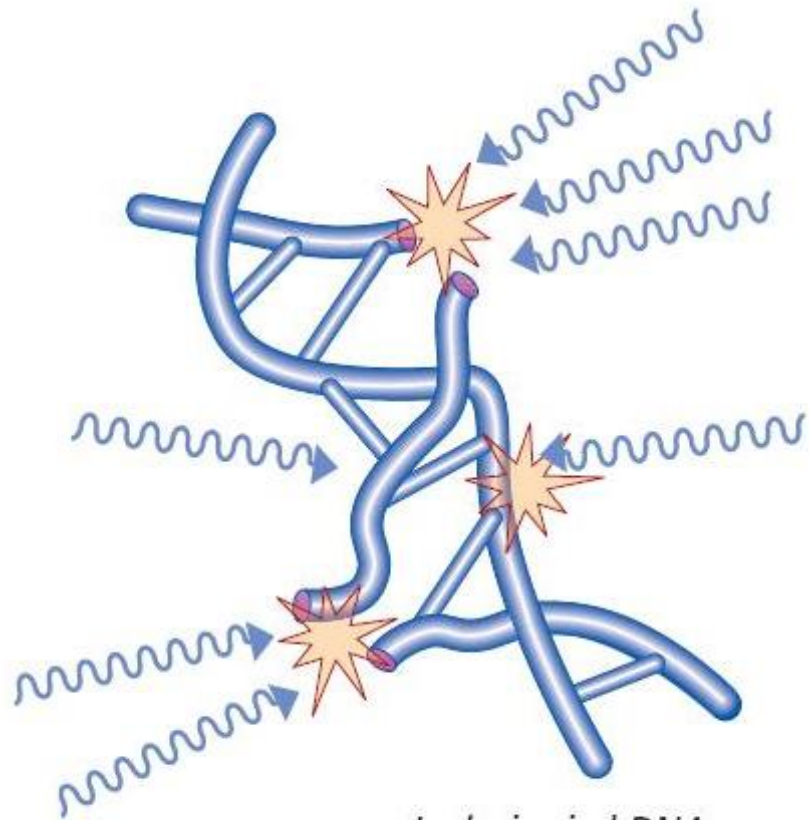
Estremamente energetici, sono dannosi per la pelle al punto da essere responsabili del 65% dei tumori cutanei. Solo lo 0,1% dell'energia solare che arriva sulla superficie terrestre è costituito da radiazioni UVB.

- **Raggi ultravioletti C (UVC)**

200 – 290 nm

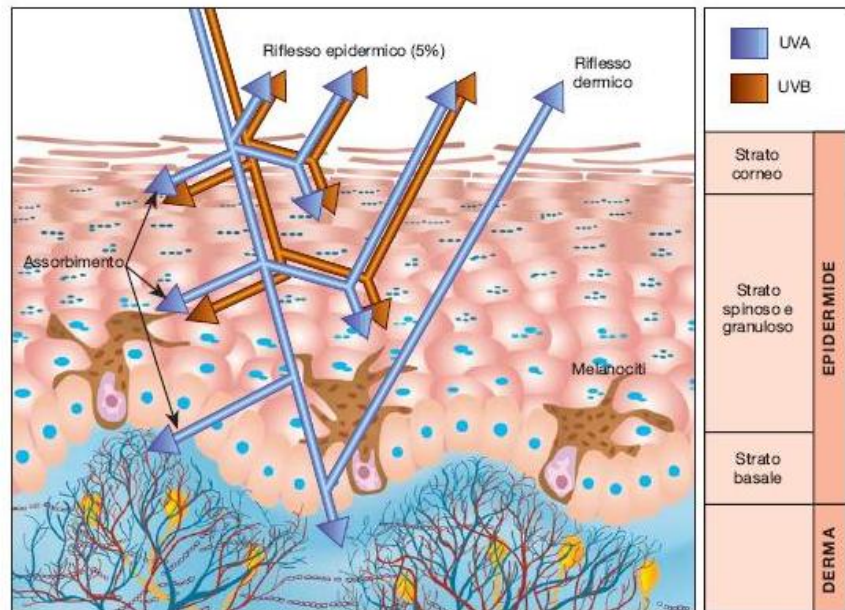
Hanno un'elevatissima energia e sono mortali per gli esseri viventi, ma fortunatamente sono integralmente assorbiti dallo strato di ozono.

I raggi ultravioletti possono facilmente danneggiare il DNA sia perché intervengono direttamente sui suoi costituenti sia per azione indiretta. In entrambi i casi, il DNA viene lesionato o addirittura mutato.



*Le lesioni al DNA
causate dagli UV*

Il che non deve spaventare, in quanto le mutazioni del DNA fanno parte del vivere quotidiano, al punto che esistono sistemi di difesa della cellula in grado di permettere la loro individuazione e la loro correzione. Tuttavia permangono alcuni rischi, in particolare quando i meccanismi di protezione non funzionano a dovere. Gli UVA e gli UVB penetrano, infatti, nella pelle in modo diverso e comportano conseguenze differenti, da contrastare con azioni mirate.



Le radiazioni UVB, da 30 a 50 volte più potenti delle UVA, non penetrano a fondo nella pelle; al contrario, vengono assorbite a livello degli strati superiori dell'epidermide. Ma ciò è sufficiente per causare danni significativi al DNA, il software genetico. Come risultato, **gli UVB sono responsabili del 65% dei casi di cancro cutaneo.**

Le radiazioni UVA, decisamente meno potenti delle UVB, penetrano in profondità, raggiungono il derma e causano una serie di modifiche della sua struttura: la pelle invecchia precocemente, si riempie di rughe e perde la sua luminosità. Ma non solo, **gli UVA sono responsabili del rimanente 35% dei casi di cancro cutaneo.**

Insieme, UVA e UVB diventano quindi un nemico temibilissimo.

Raggi X

Questa banda dello spettro elettromagnetico è suddivisa tra **raggi X molli** e **raggi X duri**, con lunghezze d'onda minori. I raggi X sono utilizzati per radiografie mediche ed industriali, nella fisica delle alte energie ed in astronomia. Ad esempio, lo studio delle stelle di neutroni e dei dischi di accrescimento

attorno ai buchi neri è reso possibile dai raggi X che emettono.

Le apparecchiature radiografiche operano inviando un fascio di elettroni di sufficiente energia su un target che, colpito, genera i raggi X.

Raggi gamma

Sono i fotoni più energetici, non avendo un limite inferiore alla loro lunghezza d'onda. Sono utilizzati dagli astronomi per studiare corpi o regioni ad alta energia e dai fisici per via della loro elevata capacità di penetrazione nei materiali e della loro produzione da radioisotopi. La lunghezza d'onda dei raggi gamma è misurabile con elevata accuratezza mediante ***effetto Compton***.