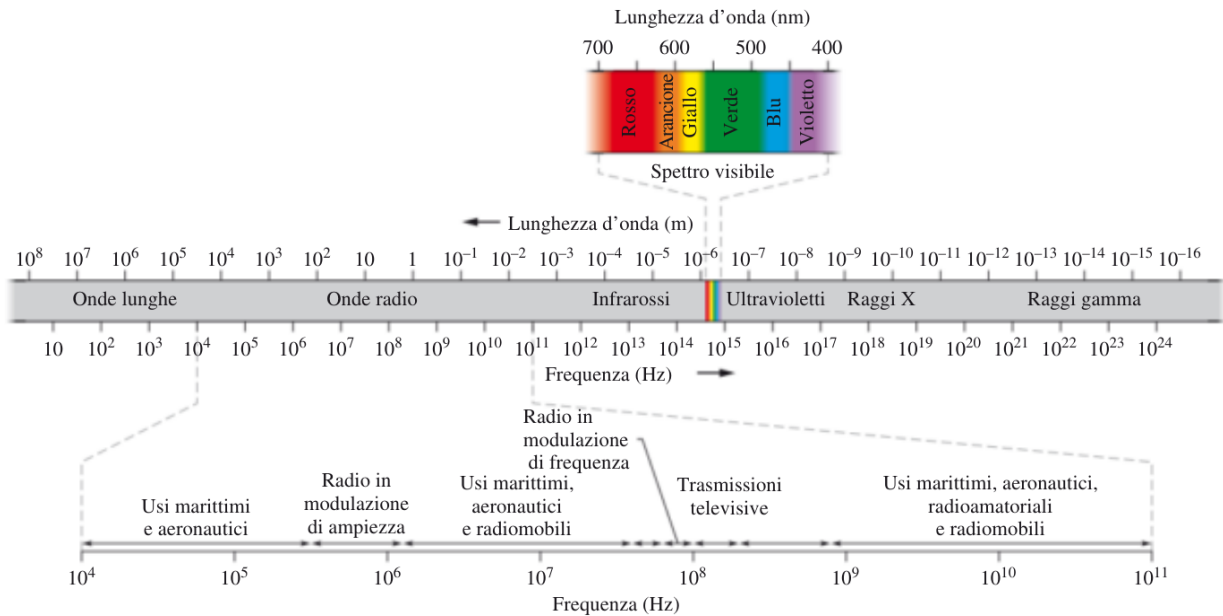


Spettro onde elettromagnetiche



L'intervallo delle frequenze delle onde elettromagnetiche è molto ampio e si estende dalle onde hertziane (limite inferiore ~ 10² Hz) ai raggi γ, che hanno frequenze superiori a 10¹⁸ Hz.

Nella figura superiore è riportata una rappresentazione schematica dello spettro: la frequenza ν è nella scala in basso, mentre in alto c'è la corrispondente lunghezza d'onda λ nel vuoto, calcolata con la formula $\lambda = c/\nu$.

Lo spettro è suddiviso convenzionalmente in una successione di bande: *onde hertziane*, *microonde*, *infrarosso*, *visibile*, *ultravioletto*, *raggi X*, *raggi γ*. Le separazioni non sono nette e gli intervalli delle singole bande hanno zone di sovrapposizione, come avviene ad esempio alle altissime frequenze tra raggi X e raggi γ. Le differenti denominazioni hanno origine storica e sono talvolta legate al modo di produzione o di rilevazione delle onde (è il caso delle onde hertziane e del visibile). Nella zona inferiore dello spettro la produzione delle onde avviene con circuiti elettrici ed elettronici (almeno sulla Terra), il limite massimo essendo intorno a 10¹² Hz; le onde di frequenza superiore derivano da fenomeni a livello atomico e nucleare, spontanei o provocati.

In ogni caso è sempre la frequenza che determina le proprietà fisiche; anche quando l'onda attraversa un mezzo materiale e la sua velocità varia ($v = 1/\sqrt{\epsilon\mu} = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}1/\sqrt{\kappa_e\kappa_m} = c/\sqrt{\kappa_e\kappa_m}$), è la lunghezza d'onda che cambia, ma il numero di oscillazioni al secondo resta invariato.

Le caratteristiche ondulatorie della luce sono alla base dei fenomeni che costituiscono il campo di studio dell'ottica (interferenza, diffrazione, riflessione e rifrazione, ecc.). E' bene osservare che con strumenti opportuni gli stessi fenomeni si possono osservare per tutte le onde elettromagnetiche, almeno fino alle frequenze dei raggi X, e in generale per tutti i tipi di onde. Invece per la spiegazione di altri fenomeni che sono provocati dalla luce visibile, come l'effetto fotoelettrico, la descrizione quantistica è essenziale.

Per avere una comprensione completa dello spettro delle onde elettromagnetiche è opportuno introdurre anche la descrizione quantistica, che riprenderemo in seguito; essa è essenziale per spiegare diversi fenomeni non riconducibili alle proprietà ondulatorie.

Secondo la meccanica quantistica l'energia elettromagnetica ha una struttura discreta come la materia e non continua come previsto dalla teoria ondulatoria di Maxwell. Essa è costituita da quanti di energia detti fotoni, ognuno dei quali ha l'energia

$$U = h\nu ,$$

dove $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js è la costante di Planck e ν la frequenza dell'onda. I fotoni si muovono in qualsiasi sistema di riferimento con velocità $c = 3 \cdot 10^8$ m/s e hanno massa nulla. La loro quantità di moto è

$$p = \frac{U}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} .$$

Un'onda elettromagnetica piana di intensità I è composta da un flusso di N fotoni per metro quadro e per secondo, con

$$N = \frac{I}{h\nu} .$$

Senza approfondire per il momento questo argomento, diremo che la teoria di Maxwell delle onde elettromagnetiche dà una descrizione media dei fenomeni tanto più appropriata quanto minore è l'energia dei fotoni e maggiore il loro numero. Nelle onde hertziane e nelle microonde l'energia dei quanti è così piccola e il numero N così grande che non è possibile rilevare sperimentalmente il singolo quanto. Nel campo del visibile si presentano fenomeni interpretabili solamente con la descrizione quantistica, ma l'aspetto ondulatorio è più evidente. Nei raggi X e nei raggi γ l'effetto quantistico è predominante e le proprietà ondulatorie possono essere messe in evidenza solo in qualche caso e con raffinati esperimenti.

Avendo in mente questi aspetti diamo una descrizione delle diverse bande che compongono lo spettro elettromagnetico:

Onde hertziane o onde radio

$$(3 \cdot 10^6 \geq \lambda \geq 0.3) \text{ m} , (10^2 \leq \nu \leq 10^9) \text{ Hz} , (\sim 0 \leq U \leq 4 \cdot 10^{-6}) \text{ eV}$$

L'energia dei quanti è molto piccola e non può dare origine a processi singoli osservabili, per cui la descrizione classica dell'onda è appropriata. Queste onde sono prodotte con dispositivi elettronici, principalmente circuiti oscillanti, e sono utilizzate nelle trasmissioni radiofoniche e televisive o per la radiofonia (LTE - 4G; 5G è già nelle microonde). Per questa ragione si parla anche di onde radio o di radiofrequenze.

Microonde

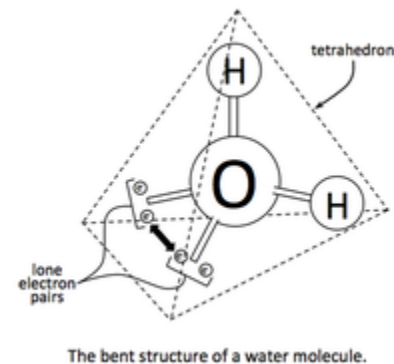
$$(0.3 \geq \lambda \geq 10^{-3}) \text{ m} , (10^9 \leq \nu \leq 3 \cdot 10^{11}) \text{ Hz} , (4 \cdot 10^{-6} \leq U \leq 1.2 \cdot 10^{-3}) \text{ eV}$$

Vengono prodotte con dispositivi elettronici o da fenomeni atomici (maser); sono utilizzate per comunicazioni e sistemi radar ma anche in forni a microonde per il riscaldamento dei cibi. Quest'ultima applicazione si fonda sul fatto che le microonde vengono assorbite prevalentemente nei liquidi e nelle sostanze che compongono i cibi, poco in alcuni materiali come le ceramiche e la terracotta, e per nulla nei metalli. Prevalde la descrizione classica, ma alle frequenze più elevate l'energia dei fotoni è sufficiente per alcuni studi di strutture molecolari, in quanto è dello stesso ordine di grandezza delle differenze di energia tra livelli molecolari.

Nota: The water molecule, as a whole, has 10 protons and 10 electrons, so it is neutral. The oxygen atom and hydrogen atoms share electrons in covalent bonds, but the sharing is not equal. In the covalent bond between oxygen and hydrogen, the oxygen atom attracts electrons a bit more strongly than the hydrogen atoms.

*In a water molecule, the hydrogen atoms form a 104.5° angle with the oxygen atom. The hydrogen atoms are close to two corners of a tetrahedron centered on the oxygen. At the other two corners are **lone pairs** of valence electrons that do not participate in the bonding. In a perfect tetrahedron, the atoms would form a 109.5° angle, but the repulsion between the lone pairs is greater than the repulsion between the hydrogen atoms. Other substances have a tetrahedral molecular structure, for example, **methane** (CH_4). However, oxygen is more **electronegative** than most other elements, so the oxygen atom retains a negative charge while the hydrogen atoms are positively charged. Along with the bent structure, this gives the molecule an **electrical dipole moment** and it is classified as a **polar molecule**.*

In quanto dipolo elettrico la molecola tende ad orientarsi in direzione del campo elettrico dell'onda incidente. Se l'onda incidente ha la frequenza giusta, detta di risonanza, il dipolo della molecola dell'acqua oscilla con la frequenza dell'onda assorbendo in modo massimale l'energia dell'onda, aumentando l'energia termica del liquido.



Infrarosso

$$(10^{-3} \geq \lambda \geq 0.78 \cdot 10^{-6})\text{m} , (3 \cdot 10^{11} \leq \nu \leq 3.8 \cdot 10^{14})\text{Hz} , (1.2 \cdot 10^{-3} \leq U \leq 1.5)\text{eV}$$

Questa regione viene suddivisa in tre parti: il lontano infrarosso da 10^{-3} a $3 \cdot 10^{-5}$ m, il medio infrarosso da $3 \cdot 10^{-5}$ a $3 \cdot 10^{-6}$ m e il vicino infrarosso da $3 \cdot 10^{-6}$ a $0.78 \cdot 10^{-6}$ m, soglia del visibile. Se assorbiti da una molecola, i quanti di energia nell'infrarosso sono sufficienti a provocare un moto vibrazionale, che per effetto degli urti che avvengono a livello microscopico, si traduce in aumento di temperatura del corpo di cui la molecola fa parte. Per contro, in un corpo ad una data temperatura, gli atomi e le molecole vengono continuamente eccitati tramite gli urti dovuti all'agitazione termica e le successive diseccitazioni producono (anche) radiazione infrarossa. L'emissione infrarossa provocata termicamente è utilizzata per esempio per scopi terapeutici in medicina; quella spontanea è sfruttata ad esempio nella fotografia infrarossa. I telecomandi per il televisore, il videoregistratore, il DVD e simili usano un fascio infrarosso per comunicare con i dispositivi.

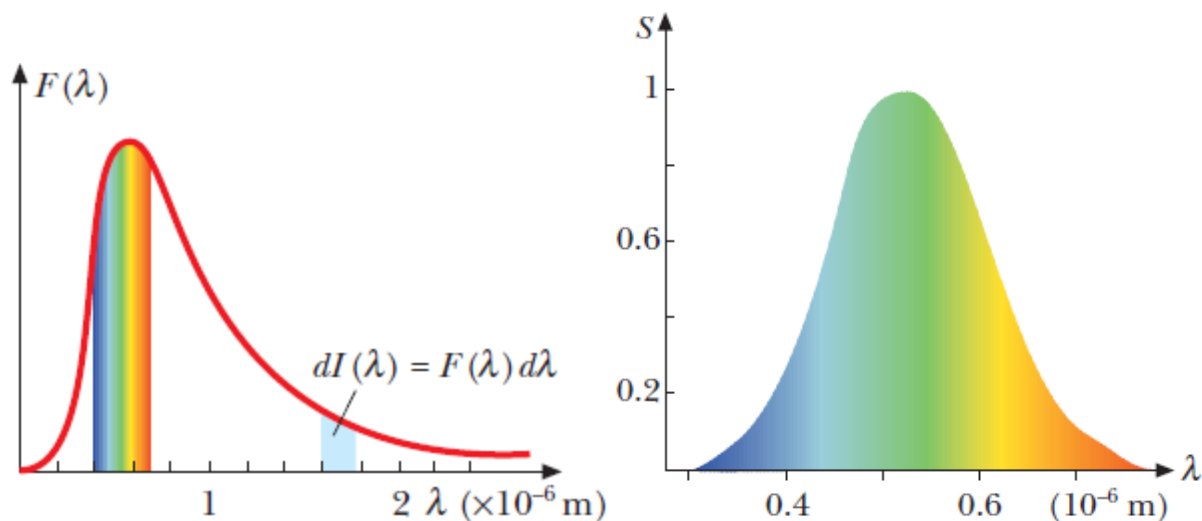
Nella ricerca ci si serve dei raggi infrarossi nella spettroscopia vibrazionale, cioè nello studio dei livelli energetici vibrazionali delle molecole, o in astrofisica per lo studio di galassie distanti

Luce visibile

$$(0.78 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 0.38 \cdot 10^{-6})\text{m} , (3.8 \cdot 10^{14} \leq \nu \leq 7.9 \cdot 10^{14})\text{Hz} , \\ (1.6 \leq U \leq 3.3)\text{eV}$$

È la banda di frequenze cui è sensibile l'occhio della maggior parte degli esseri viventi. La luce visibile è prodotta nei moti di agitazione termica ad alta temperatura, da scariche in un gas (ad esempio in lampade a incandescenza e in lampade a scarica rispettivamente), in generale da processi in cui vengono eccitati gli elettroni più esterni degli atomi.

Il Sole è la più importante sorgente di luce visibile vicina a noi; l'energia elettromagnetica ha origine dall'agitazione termica degli atomi che si trovano sulla superficie ad una temperatura di circa 6000 K. Lo spettro $F(\lambda)$ della radiazione solare è mostrato in figura a sinistra. Vediamo che esso inizia nel vicino ultravioletto, ha un massimo nel visibile per $\lambda \approx 0.5 \cdot 10^{-6}$ m e si estende abbastanza nell'infrarosso. Per ogni intervallo $d\lambda$ la quantità $dI(\lambda) = F(\lambda)d\lambda$, area, sotto la curva, rappresenta l'intensità riferita a quell'intervallo $d\lambda$. La curva di $F(\lambda)$ è tipica dell'emissione termica di un corpo caldo; a temperature più basse la curva si sposta verso destra, nell'infrarosso, a temperature più alte verso sinistra, nell'ultravioletto. Lo spettro delle frequenze è continuo, ma non tutte sono emesse con la stessa intensità, come mostra $F(\lambda)$ che dà l'energia per unità di superficie, unità di tempo e intervallo unitario di lunghezza d'onda (W/m^3).



Quando il meccanismo di emissione è diverso da quello termico si hanno spettri formati da una o più frequenze ben distinte, come la luce emessa da una lampada a gas o da un laser.

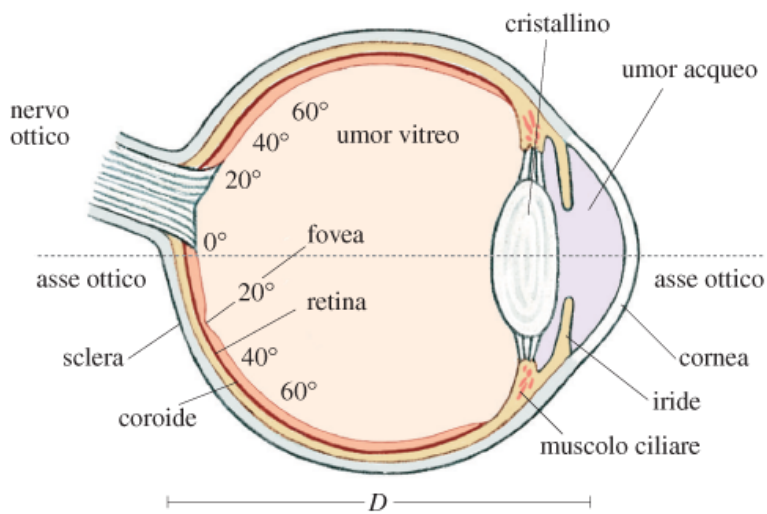
Le diverse sensazioni che la luce produce nell'occhio dipendono dalla lunghezza d'onda e vengono classificate come colori; i relativi intervalli di λ e il valore centrale di U sono riportati nella tabella:

| colore | λ (10^{-6} m) | ν (10^{14} Hz) | U (eV) |
|-----------|--------------------------|-----------------------|----------|
| rosso | 0.780 – 0.622 | 3.85 – 4.82 | 1.79 |
| arancione | 0.622 – 0.597 | 4.82 – 5.03 | 2.04 |
| giallo | 0.597 – 0.577 | 5.03 – 5.20 | 2.12 |
| verde | 0.577 – 0.492 | 5.20 – 6.10 | 2.34 |
| azzurro | 0.492 – 0.455 | 6.10 – 6.59 | 2.62 |
| violetto | 0.455 – 0.380 | 6.59 – 7.89 | 2.99 |

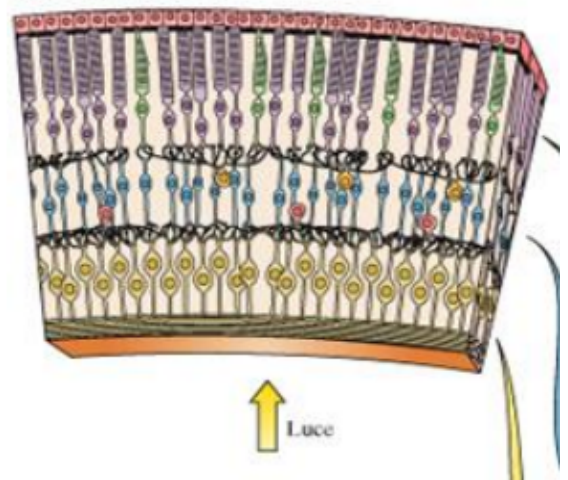
La curva della sensibilità relativa dell'occhio è mostrata nell'immagine superiore a destra; il massimo si ha per la luce giallo-verde con $\lambda \approx 0.56 \cdot 10^{-6}$ m. I limiti dello spettro visibile non sono ben definiti poiché la curva di sensibilità dell'occhio è asintotica sia per le lunghezze d'onda corte, sia per quelle lunghe. Se vengono stabiliti dei limiti arbitrari, scegliendo le lunghezze d'onda a cui la sensibilità visiva cade all'1% del suo valore massimo, si delimita la zona tra circa 430 e 690 nm; tuttavia, l'occhio può intercettare radiazioni con lunghezze d'onda oltre questi limiti, purché siano sufficientemente intense.

Dal punto di vista fisico l'occhio può essere approssimato ad un sistema di lenti e diottri che focalizza la luce su una parte sensoriale detta retina in cui sono presenti dei fotoricettori, ovvero dei neuroni specializzati che, se stimolati da fotoni, emettono dei segnali bioelettrici che poi giungono al cervello attraverso il nervo ottico. I fotoricettori sono di due tipi: **coni** e **bastoncelli**. I coni si concentrano nella zona centrale della **retina** (la **fovea**) e sono deputati alla visione dei

colori e alla visione distinta; ne esistono almeno tre tipi diversi, rispettivamente per il rosso (64%), il verde (32%) e il blu (4%) (se ne contano circa 6 milioni per occhio). A seconda di quanto vengono stimolati i coni di diverso tipo, e dalle loro combinazioni, percepiamo i colori. I bastoncelli, invece, sono più sensibili al movimento, sono impiegati per la visione al buio e si concentrano nella zona periferica della retina (~120 milioni per occhio). Coni e bastoncelli presentano una diversa sensibilità alla luce riconducibile alla rispettiva organizzazione del lavoro. Il lavoro dei coni è individuale nel senso che ciascuno di essi genera un impulso che è avviato al cervello indipendentemente. Nel caso dei bastoncelli, invece, diverse migliaia di elementi convergono su un singolo **interneurone** e l'impulso che viene avviato al cervello emerge dalla sommatoria di tutti i singoli impulsi. I bastoncelli risultano così circa 4000 volte più sensibili alla luce rispetto ai coni.



(A) Sezione di retina



Ultravioletto

$$(0.38 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-10}) \text{ m} , (7.9 \cdot 10^{14} \leq \nu \leq 5 \cdot 10^{17}) \text{ Hz} ,$$

$$(3.3 \leq U \leq 2 \cdot 10^3) \text{ eV}$$

La radiazione ultravioletta è emessa da atomi eccitati con i mezzi già detti, in particolare anche con il meccanismo del laser, e da particelle cariche accelerate. L'applicazione scientifica

principale si ha nello studio di strutture atomiche; questa dell'utilizzo negli studi strutturali è una caratteristica comune a varie bande e si basa sul fatto che i salti tra livelli energetici atomici o molecolari possono essere prodotti solo da fotoni incidenti con quella data energia. I raggi ultravioletti hanno anche svariate applicazioni tecnologiche.

Il Sole, è una sorgente di radiazioni ultraviolette; una parte notevole di esse viene assorbita nell'atmosfera, oltre i 100 km di altezza, attraverso fenomeni di ionizzazione e dà luogo alla formazione della ionosfera. Un ulteriore assorbimento si ha soprattutto tra 20 e 30 km di altezza, dove si realizzano le condizioni ottimali per la reazione di formazione dell'ozono, $3 O_2 \rightarrow 2 O_3$, fortemente endotermica e resa possibile appunto dall'apporto energetico della radiazione ultravioletta. L'ozono prodotto successivamente si scinde, riformando ossigeno, e diffonde anche verso gli strati più bassi dove ad ogni modo reagisce con altre sostanze (l'ozono è un ossidante molto forte); tra formazione e scomparsa si ha un equilibrio dinamico che mantiene una determinata concentrazione di ozono, massima intorno ai 25 km di altezza.

L'assorbimento atmosferico dei raggi ultravioletti solari è fondamentale per la vita sulla Terra in quanto questa radiazione in grandi quantità risulta letale. È noto il dibattito scientifico iniziato negli anni Ottanta sull'assottigliamento dello strato di ozono e sulla sua scomparsa sopra l'Antartide; una possibile causa è l'immissione nell'atmosfera di clorofluorocarburi (CFG), contenuti negli impianti frigoriferi, in molti tipi di plastica e nelle bombolette spray, che reagiscono con l'ozono distruggendolo.

Uno dei risultati dell'esposizione alla piccola parte della radiazione ultravioletta solare che raggiunge la superficie terrestre è l'abbronzatura della pelle: i fotoni infatti hanno un'energia sufficiente per formare, nell'interazione con le molecole dei primi strati della pelle, la melanina, cioè la sostanza che dà la colorazione scura alla pelle.

Raggi X

$$(6 \cdot 10^{-10} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-12})\text{m} , (5 \cdot 10^{17} \leq \nu \leq 5 \cdot 10^{19})\text{Hz} , (2 \cdot 10^3 \leq U \leq 2 \cdot 10^5)\text{eV}$$

Spesso vengono classificati, a seconda della loro energia in *soft* e *hard* X-ray.

Le onde elettromagnetiche denominate raggi X vengono prodotte con due meccanismi differenti. Il primo consiste nel frenamento di elettroni accelerati (radiazione di frenamento) da differenza di potenziale al massimo dell'ordine di 100 kV. In un fascio di raggi X così prodotti sono presenti fotoni con energie da un minimo di circa 10^3 eV fino ad un massimo corrispondente all'energia massima degli elettroni, cioè circa 10^5 eV. Raggi X di questo tipo sono utilizzabili per indagini radiografiche. L'assorbimento dei raggi X è diverso nei vari tessuti che costituiscono il corpo umano e soprattutto nelle ossa; il flusso di raggi X che emerge dal corpo sottoposto a irraggiamento X è pertanto diverso a seconda del tessuto attraversato e una lastra fotografica viene più o meno impressionata in corrispondenza. Avendo la possibilità di interagire con le molecole cedendo una grande quantità di energia, i fotoni X possono distruggere i tessuti viventi: fasci ben focalizzati e molto intensi sono usati nella terapia contro i tumori. Anche per mezzo della radiazione di sincrotrone si ha emissione nella banda dei raggi X di frenamento.

I raggi X caratteristici, sono invece emessi da atomi eccitati in corrispondenza a transizioni di elettroni dei livelli più interni; di conseguenza le frequenze, ovvero le energie dei fotoni, sono ben definite e caratteristiche dell'elemento. Le lunghezze d'onda sono confrontabili con le distanze interatomiche ($\sim 10^{-10}$ m) e questi raggi vengono pertanto usati per studi di strutture cristalline. Proprio l'interazione con strutture cristalline ha dimostrato che i raggi X hanno proprietà ondulatorie, in quanto subiscono il fenomeno della diffrazione; la natura corpuscolare è però predominante.

Raggi γ

$$\lambda \leq 10^{-10} \text{ m} , \quad \nu \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz} , \quad U \geq 1.2 \cdot 10^4 \text{ eV}$$

I raggi γ sono prodotti in processi nucleari, quali decadimenti radioattivi e reazioni tra nuclei, e nelle reazioni e nei decadimenti di particelle subnucleari; vengono però chiamati γ anche i fotoni emessi per bremsstrahlung da elettroni di alta energia e in generale tutti i fotoni la cui energia è superiore a qualche centinaio di keV, comunque emessi. I raggi γ prodotti nei processi nucleari hanno energie che al massimo valgono qualche MeV, mentre quelli originati in fenomeni subnucleari possono assumere in pratica qualsiasi energia, i limiti essendo posti naturalmente dalla legge di conservazione dell'energia nelle reazioni di produzione. La massima energia per raggi γ prodotti in laboratorio è dell'ordine di 10^{11} eV = 10^2 GeV, a cui corrisponde $\nu = 2.4 \cdot 10^{25}$ Hz ovvero $\lambda = 1.25 \cdot 10^{-17}$ m. In eventi astronomici noti come Gamma Ray Burst sono stati trovati fotoni con energie ancora superiori (oltre 10^{12} eV). Questi sono gli eventi più energetici dell'universo, e sono causati (si ritiene) dal collasso di stelle massive, o dalla fusione di stelle di neutroni.

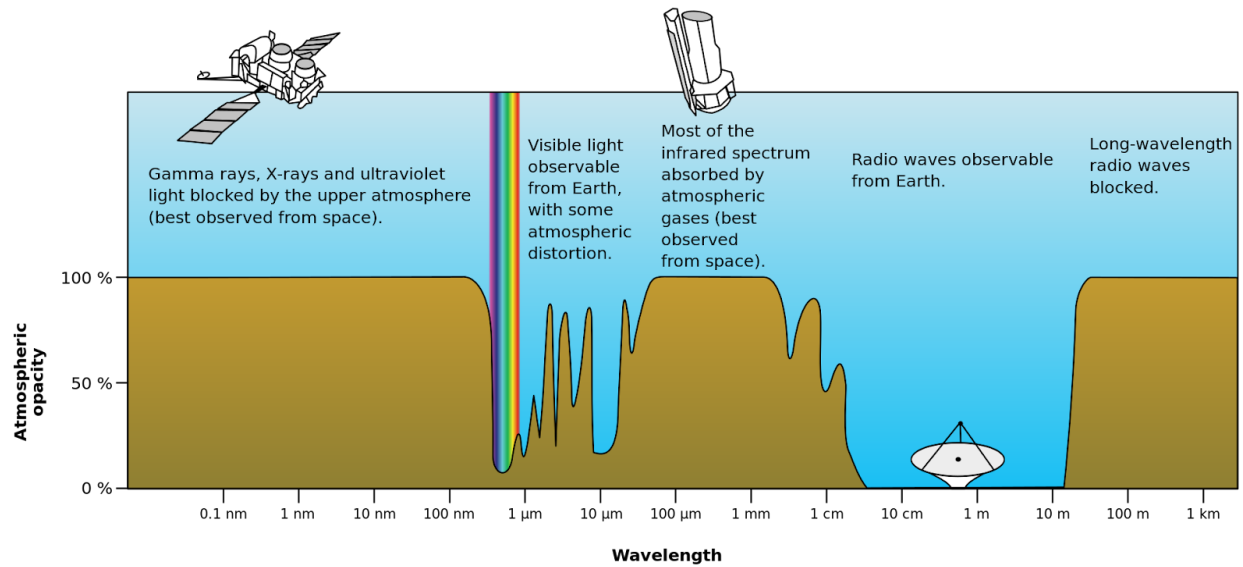
Note: The sources of most GRBs are billions of [light years](#) away from [Earth](#), implying that the explosions are both extremely energetic (a typical burst releases as much energy in a few seconds as the [Sun](#) will in its entire 10-billion-year lifetime) and extremely rare (a few per galaxy per million years^[8]). All observed GRBs have originated from outside the [Milky Way galaxy](#), although a related class of phenomena, [soft gamma repeaters](#), are associated with [magnetars](#) within the Milky Way. It has been hypothesized that a gamma-ray burst in the [Milky Way](#), pointing directly towards the Earth, could cause a [mass extinction](#) event.^[9] The [Late Ordovician mass extinction](#) has been hypothesized by some researchers to have occurred as a result of such a gamma-ray burst.

L'intensità di raggi γ emessa da una sorgente nucleare (radioattività γ) può essere molto elevata e tali sorgenti vanno utilizzate con cautela, poiché l'assorbimento di questi γ può causare seri danni in un organismo vivente. D'altra parte, come i raggi X, i raggi γ nucleari trovano applicazioni in terapie antitumorali.

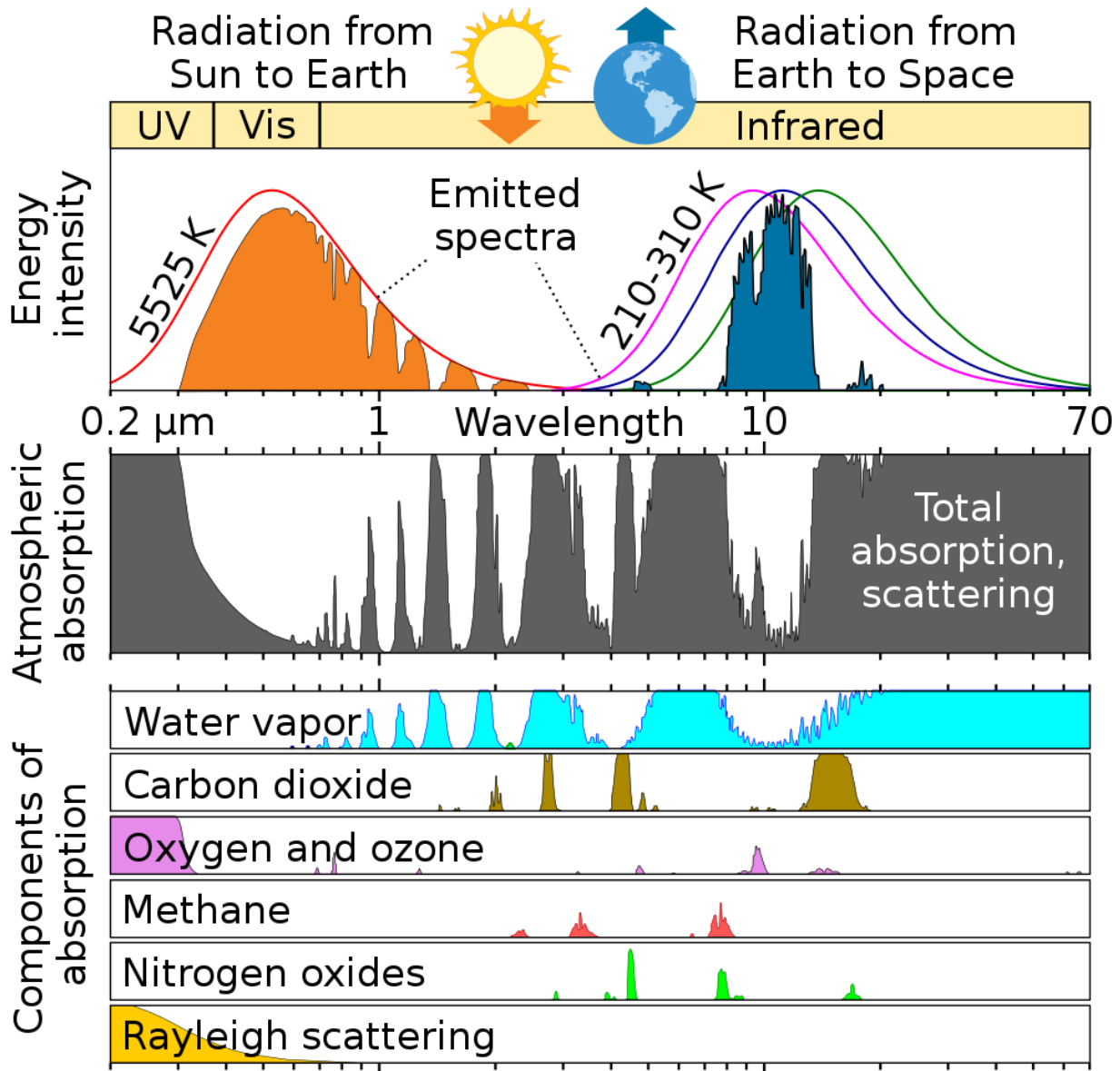
Nella loro interazione con la materia i raggi γ manifestano soltanto la natura corpuscolare, non essendo possibile per ora misurare lunghezze d'onda così corte.

Opacita' atmosferica:

L'atmosfera terrestre non e' trasparente allo stesso modo a tutte le lunghezze d'onda che la colpiscono. Il grafico sottostante, mostra l'assorbimento atmosferico in funzione della lunghezza d'onda incidente.



Facendo uno zoom sulle frequenze emesse dal nostro sole e quelle emesse per irraggiamento termico dalla terra otteniamo la figura sottostante



An **atmospheric window** is a range of [wavelengths](#) of the [electromagnetic spectrum](#) that can pass through the [atmosphere of Earth](#). The [optical](#), [infrared](#) and [radio](#) windows comprise the three main atmospheric windows.^[2] The windows provide direct channels for Earth's surface to receive electromagnetic energy from the Sun, and for [thermal radiation](#) from the surface to leave to space. This last point is important for the greenhouse effect (i.e. atmosphere not completely transparent to the infrared light), which regulates the Earth temperature, making it ~10 degrees higher than without it. In the last century, human activities increased the concentration of greenhouse gasses (i.e. gas that absorbs the infrared light, e.g. CO₂), increasing the efficiency of the greenhouse effect, which in turn caused an increase of ~1° of the mean global temperature. Also, the atmosphere is opaque to all frequencies higher than UV, thus blocking ionizing (and thus dangerous) radiation from space (Sun or cosmic rays). Note also that in the visible band the atmosphere is practically transparent, which explains why the human (and animal) eyes evolved to be more sensitive to these wavelengths.

Communications satellites greatly depend on the atmospheric windows for the transmission and reception of signals: the satellite-ground links are established at frequencies that fall within the spectral bandwidth of atmospheric windows. The atmospheric windows also explain the necessity of space satellites to explore the universe at wavelengths laying outside the windows.

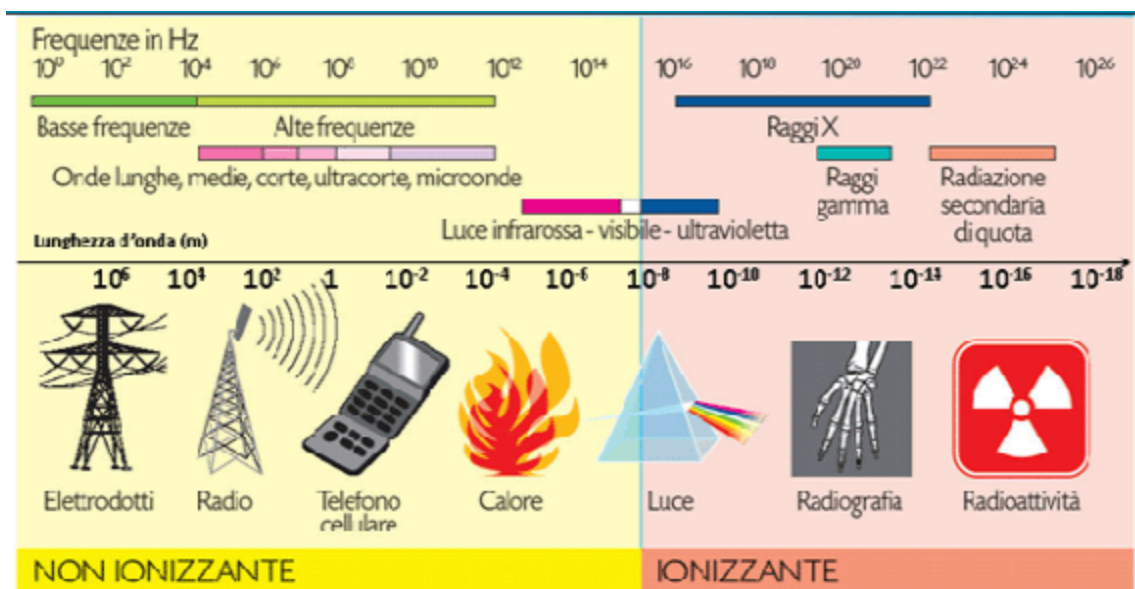
Note: Rayleigh scattering (/ˈreɪli/ RAY-lee), named after the 19th-century British physicist Lord Rayleigh (John William Strutt), refers to the elastic scattering of light or other electromagnetic radiation by particles much smaller than the wavelength of the radiation. For light frequencies well below the resonance frequency of the scattering medium (normal dispersion regime), the amount of scattering is inversely proportional to the fourth power of the wavelength, e.g., a blue color is scattered much more than a red color as light propagates through air.

Radiazione Ionizzante:

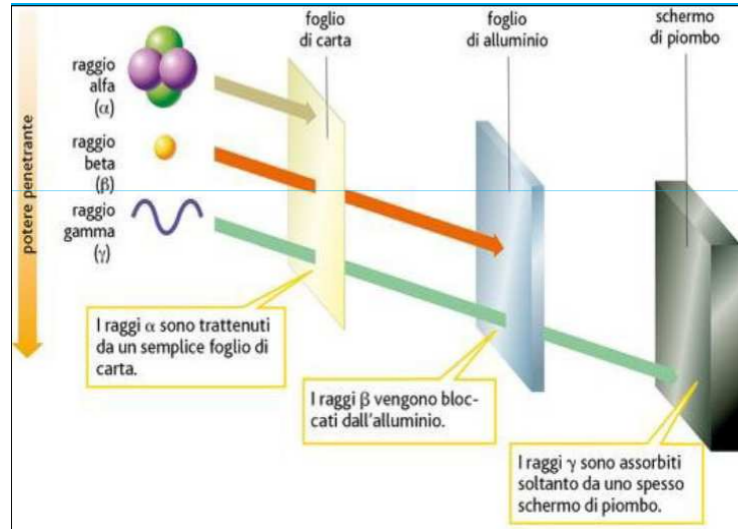
La radiazione ionizzante è la **radiazione** che trasporta abbastanza **energia** da liberare **elettroni** da **atomi** o **molecole** colpiti, **ionizzandoli**. La radiazione ionizzante può essere composta da **particelle subatomiche** o **ioni** o atomi che si muovono ad alte velocità, o anche **onde elettromagnetiche** nell'estremità più energetica dello **spettro elettromagnetico**. In particolare per quanto riguarda le onde e.m.: **raggi gamma**, **i raggi X** e la porzione ad alta frequenza degli **ultravioletti** dello spettro elettromagnetico sono ionizzanti. Il confine che esiste nell'ultravioletto tra radiazioni elettromagnetiche ionizzanti e non ionizzanti non è nettamente definito, dal momento che atomi e molecole diversi vengono ionizzati a energie differenti. La definizione convenzionale colloca il confine a un'energia del fotone tra **10 eV** e **33 eV** nell'ultravioletto (NB 13.6 eV energia ionizzazione idrogeno).

Quando la frequenza delle onde elettromagnetiche è superiore a quella visibile, gli effetti della quantizzazione delle onde elettromagnetiche sono più evidenti, per cui in tale parte dello spettro elettromagnetico, si parla di **fotoni**. Anche se i fotoni sono elettricamente neutri, possono ionizzare gli atomi direttamente attraverso l'**effetto fotoelettrico** e l'**effetto Compton**. Ciascuna di queste interazioni provocherà l'espulsione di un elettrone da un atomo a velocità relativistiche, trasformando tale elettrone in una **particella beta** (particella beta secondaria) che ionizzerà molti altri atomi. Poiché la maggior parte degli atomi interessati sono ionizzati direttamente dalle **particelle beta secondarie**, i fotoni sono chiamati **radiazioni indirettamente ionizzanti**.

Le **particelle subatomiche ionizzanti** più comuni comprendono le **particelle alfa** (nuclei elio), le **particelle beta** (elettroni e positroni) e i **neutroni**. Quasi tutti i prodotti del **decadimento radioattivo** sono ionizzanti perché l'energia del decadimento radioattivo è generalmente molto più alta di quella richiesta per ionizzare. Altre **particelle subatomiche ionizzanti** che esistono naturalmente sono i **muoni**, i **mesoni**, i **positroni**, e altre particelle che costituiscono i **raggi cosmici** secondari, i quali vengono prodotti dopo che i **raggi cosmici primari** interagiscono con l'**atmosfera terrestre**^{[2][3]}. I raggi cosmici sono generati dalle stelle e da alcuni eventi celesti catastrofici come l'esplosione di una **supernova**. Ogni **particella carica massiva** può ionizzare gli atomi direttamente tramite **interazione fondamentale** attraverso la **forza di Coulomb** se trasporta un'energia cinetica sufficiente.



L'uomo è da sempre esposto a radiazioni ionizzanti di origine naturale (raggi cosmici, prodotti di decadimento dei cosiddetti nuclidi primordiali, ecc.); a partire dalla fine del diciannovesimo secolo le radiazioni ionizzanti sono state deliberatamente utilizzate per scopi medici e industriali, e ciò ha comportato la possibilità di un'accresciuta esposizione da parte dei lavoratori che le utilizzano e della popolazione in generale. Nel caso dell'esposizione di esseri umani a radiazioni ionizzanti, le particelle cariche formatesi possono determinare, in funzione dell'entità dell'esposizione e delle modalità con cui questa avviene, danni per la salute molto gravi. Il potere penetrante di una radiazione ionizzante, e quindi la sua capacità di raggiungere i tessuti interni ed organi del nostro corpo, dipende dalla sua natura (particellare o elettromagnetica), e dalla sua energia.



La dosimetria è la disciplina che si occupa di misurare e valutare la quantità di energia depositata dalle radiazioni ionizzanti nell'unità di massa del materiale attraversato. Si definisce pertanto la **dose assorbita**:

(D) : energia assorbita per unità di massa [J/kg] = [Gray]

come l'energia assorbita dal materiale per unità di massa del materiale stesso.

In dosimetria radioprotezionistica si introducono altre grandezze dosimetriche allo scopo di valutare i rischi sanitari derivanti dall'esposizione del corpo umano e dei suoi organi alle radiazioni ionizzanti. Si definisce pertanto **dose equivalente**:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \text{ [Sv] Sievert}$$

ovvero la dose media assorbita in un organo o tessuto dovuta alla radiazione R e moltiplicata per un fattore peso w_R che tiene conto del tipo e di energia della radiazione ionizzante che attraversa quel tessuto od organo.

Per tener conto della diversa radiosensibilità di un determinato organo o tessuto, si definisce la **dose efficace** E come somma delle dosi equivalenti pesate con un fattore peso w_T in tutti i tessuti ed organi del corpo:

$$E = \sum_T w_T H_T \text{ [Sv]}$$

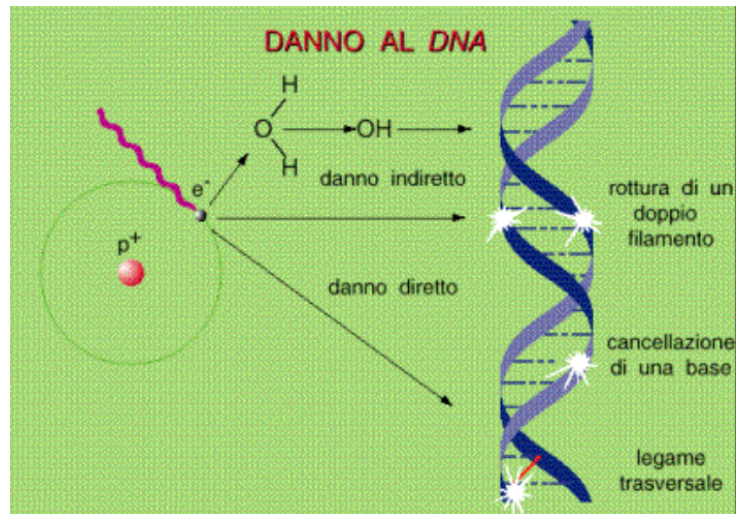
A parità di dose assorbita e di qualità della radiazione, il danno biologico indotto può essere diverso a seconda delle caratteristiche del tessuto bersaglio, ossia della sua radiosensibilità specifica.

| Tipo di radiazione | Fattore di ponderazione della radiazione, w_R |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Fotoni | 1 |
| Elettroni ^a e muoni | 1 |
| Protoni e pioni carichi | 2 |
| Particelle alfa, frammenti di fissione, ioni pesanti | 20 |
| Neutroni | Funzione continua dell'energia del neutrone |

Attraverso il processo di ionizzazione, le radiazioni trasferiscono una quantità di energia all'interno del mezzo considerato: tale deposito di energia è correlato agli effetti delle radiazioni sulla materia vivente.

- *Effetto biologico*: è la diretta conseguenza dell'esposizione alle radiazioni, costituita da alterazioni o modificazioni delle caratteristiche biologiche dell'organismo che non necessariamente sono dannose per l'individuo e i suoi discendenti.
- *Danno biologico*: quando l'effetto biologico supera la capacità di compensazione biologica dell'organismo.

I processi di interazione della radiazione con la materia si verifica in tempi estremamente brevi. La catena di eventi che possono indurre l'insorgenza di un determinato danno biologico può richiedere fino ad alcuni anni. Infine il danno può essere trasmesso alla progenie e manifestarsi anche dopo decine di anni in determinate condizioni di esposizione. Il percorso che porta all'induzione di un determinato danno a seguito dell'interazione iniziale è non lineare ed è affetto da casualità intrinseca. Un singolo evento ionizzante può evolvere in diversi modi ed è praticamente impossibile prevederne i diversi canali di interazione. Gli effetti della radiazione sull'uomo possono essere:



- *Somatici*: interessano le cellule somatiche, ossia le cellule che costituiscono i tessuti dell'individuo e che scompaiono all'atto della sua morte.

- *Genetici: interessano il corredo genetico delle cellule riproduttive e può essere trasmesso alla progenie attraverso la riproduzione.*

Inoltre è possibile individuare effetti deterministici (radiodermatite, infertilità) e stocastici (e.g. mutazioni genetiche, tumori e leucemie), i primi con effetti immediati, i secondi tardivi. Un effetto somatico può essere sia deterministico, sia stocastico mentre l'effetto genetico è per sua natura stocastico e quindi ha carattere ereditario.

*Gli effetti deterministici si manifestano su tutti gli individui esposti a dosi superiori ad un certa soglia, e la loro gravità aumenta al crescere della dose. L'entità dell'effetto biologico dipende dalla **radiosensibilità specifica** dell'organo. L'effetto biologico è tanto maggiore quanto più la cellula è vicina al compartimento staminale. Per questo motivo i tessuti più radiosensibili sono il midollo osseo rosso, i linfonodi, la mucosa gastroenterica, la cute e il cristallino. Entro certi limiti, questi effetti sono reversibili.*

Gli effetti stocastici sono caratterizzati dall'assenza di una dose soglia, o meglio dall'attuale impossibilità di dimostrarne l'esistenza, e dal carattere probabilistico. Inoltre: a) al crescere della dose aumenta la probabilità di insorgenza del danno ma non la sua gravità; b) l'insorgenza è generalmente tardiva (anni o decenni); c) gli effetti stocastici delle radiazioni non sono distinguibili da quelli determinate da altre cause (ovvero sono aspecifici), i cosiddetti casi spontanei d) e sono irreversibili.

L'aspecificità degli effetti stocastici somatici comporta una difficoltà oggettiva nel quantificare, anche su base epidemiologica, gli effetti stocastici delle radiazioni, specie nel campo delle basse dosi, che è quello di maggiore interesse in radioprotezione. La fonte principale delle attuali conoscenze sugli effetti stocastici proviene da studi epidemiologici condotti sui sopravvissuti delle esplosioni atomiche di Hiroshima e Nagasaki, un gruppo di studio composto da una popolazione di circa 90000 persone. Da questi studi epidemiologici, è risultato che in gruppi esposti a dosi efficaci pari a:

- *qualche centinaio di mSv (millisievert): si è osservato un aumento statisticamente significativo della frequenza di tumori;*
- *qualche decina di mSv: non è possibile dimostrare, né escludere che vi sia un incremento delle patologie tumorali, essendo gli eventuali effetti delle radiazioni nascosti dalle fluttuazioni statistiche dei casi spontanei.*

In particolare non è stato possibile stabilire se vi sia una soglia di dose al di sotto della quale si possa ragionevolmente escludere il verificarsi di danni stocastici. Di conseguenza, ai fini della prevenzione dei rischi delle esposizioni a basse dosi, è stata adottata cautelativamente l'ipotesi della linearità senza soglia: si ipotizza che a qualsiasi dose, per quanto piccola, sia associata una probabilità non nulla che si manifesti un danno di tipo stocastico e che questa probabilità sia proporzionale alla dose efficace.

Le radiazioni ionizzanti fanno normalmente parte dell'ambiente in cui viviamo e hanno accompagnato lo sviluppo dell'ecosistema terrestre e del genere umano. Il campo di radiazioni dovuto a sorgenti naturali, la radiazione di fondo, è composta da tre componenti principali:

- i raggi cosmici: costituiti da radiazioni primarie di origine extraterrestre emesse da corpi stellari e, in misura minore, dal Sole, accompagnate da radiazioni secondarie da esse prodotte nella stessa atmosfera;
- i radioisotopi cosmogenici: isotopi radioattivi che si producono per effetto dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera e con la superficie terrestre;
- I radioisotopi primordiali; isotopi radioattivi presenti fin dall'epoca di formazione del Sistema Solare e non ancora decaduti in forme stabili.

I raggi cosmici primari vengono quasi totalmente assorbiti negli strati più alti dell'atmosfera e già alla quota di 20 km dal livello del mare i raggi cosmici sono quasi interamente di natura secondaria. Il contributo medio mondiale in termini di dose efficace è 0.38 mSv.

La radiazione terrestre ha origine dai radioisotopi naturali presenti a diversa concentrazione nelle acque, nelle rocce e nei terreni. Tali radiazioni

contribuiscono all'irradiazione esterna ed interna dei viventi. L'esposizione esterna è dovuta principalmente ai raggi gamma emessi da radioisotopi naturali presenti nel suolo e nei materiali da costruzione. Il rate di dose assorbito in aria, pesato sulla popolazione mondiale, è valutato in 57 nGy/h, che coincide col valore medio registrato in Italia.

Per effetto del fondo naturale ciascun individuo assume in media ogni anno una dose variabile orientativamente fra 2 e 4 mSv, in dipendenza delle caratteristiche geomorfologiche del luogo di residenza e del tipo di vita, per il solo fatto di vivere sul pianeta Terra, che è un pianeta naturalmente radioattivo. In Italia la dose efficace media del fondo naturale è pari a 3.4 mSv all'anno. A queste dosi si devono aggiungere quelle dovute alle sorgenti artificiali sviluppate dalle pratiche antropiche: medico diagnostiche, applicazioni industriali, produzione di energia nucleare, fall-out radioattivo degli esperimenti nucleari in atmosfera.

| Equivalente di dose assorbito per ogni ora a varie altezze per effetto dei raggi cosmici | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Altezza (metri) | Dose (microSievert/ora) |
| 20.000 (aerei supersonici) | 13 |
| 12.000 (aerei di linea) | 5 |
| 4000 (altissima montagna) | 0,1 |
| 2000 (alta montagna) | 0,2 |
| 0 (mare) | 0,03 |

A quante radiazioni è sottoposto un italiano in un anno?

| Sorgente | | Dose efficace media Individuale mSv/anno |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Naturale | Esposizione esterna: | |
| | Raggi cosmici | 0,4 |
| | Radiazione gamma terrestre | 0,6 |
| | Esposizione interna: | |
| | Inalazione (radon e toron) | 2 |
| | Inalazione (diversa da radon e toron) | 0,006 |
| | Ingestione | 0,3 |
| TOTALE NATURALE | | 3,3 |
| Artificiale | Diagnostica medica | 1,2 |
| | Incidente di Chernobyl | 0,002 |
| | Test nucleari | 0,005 |
| | Industria nucleare | 0,0002 |
| TOTALE ARTIFICIALE | | 1,2 |

Totale = 4.5 mSv