

Protezione dei lavoratori contro i rischi di esposizione ai campi elettromagnetici durante le attività lavorative

Dott. Silvia Vaccari

Servizio di Fisica Sanitaria
Università degli Studi di Parma

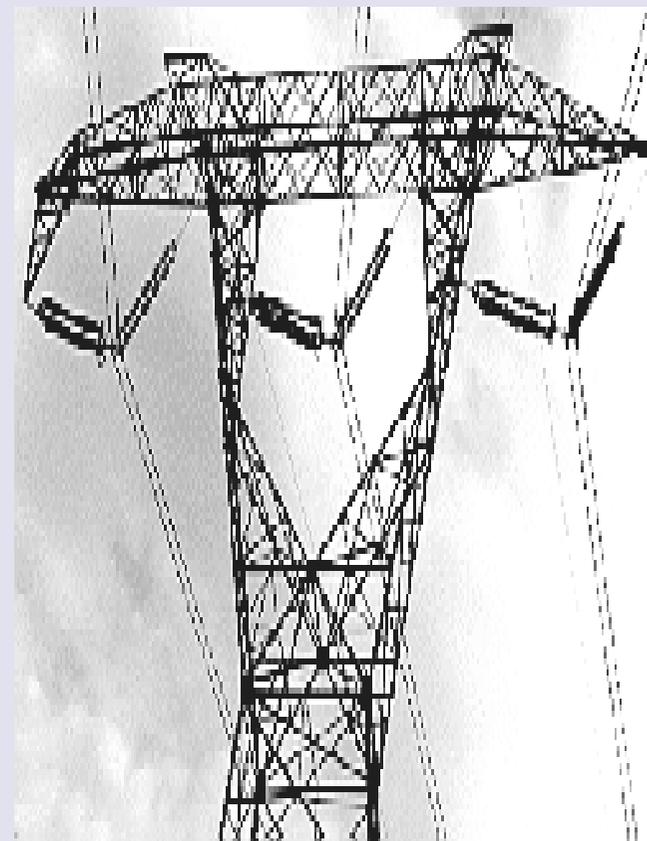


Parma, 20 gennaio 2009

CAMPI ELETTROMAGNETICI

Da sempre sulla terra è presente un fondo naturale di **radiazione elettromagnetica** dovuta ad emissioni del sole, della terra stessa e dell'atmosfera.

Il progresso tecnologico ha aggiunto a questo fondo naturale un contributo sostanziale dovuto alle sorgenti legate alle attività umane. Assieme agli enormi **benefici** dovuti alle varie forme di uso dell'elettricità, sono cresciute le **preoccupazioni per i potenziali rischi sanitari e di impatto sull'ambiente delle onde elettromagnetiche**, dato che l'esposizione alle diverse frequenze può riguardare ogni individuo della popolazione.



Situazione

Sviluppo tecnologico

Interessi economici

hanno preceduto

Risposte della
scienza

Pubblica opinione

Organismo umano
non ha percezione
dei CEM

rende impossibile

Esperienza diretta
dell'esposizione ai
CEM

Preoccupazione della
pubblica opinione

Incertezza da parte della
comunità scientifica

Situazione complessa

ONDE ELETTROMAGNETICHE

L'emissione elettromagnetica determinata da una sorgente provoca un'alterazione delle caratteristiche elettromagnetiche dello spazio circostante, originando la propagazione del campo elettromagnetico; le caratteristiche del campo dipendono fortemente dalla natura della sorgente.

L'interazione elettromagnetica è usualmente descritta facendo ricorso a due tipi di campi:

campo elettrico e campo magnetico

È necessario sottolineare che nella maggior parte dello spettro tali campi non sono sempre due entità indipendenti, ma sono viceversa intimamente connessi.

CAMPO ELETTRICO e CAMPO MAGNETICO

La differenza di concentrazione nello spazio di cariche elettriche con polarità diverse genera la *tensione elettrica* V (che si misura in V) ed il *campo elettrico* E (la cui intensità si misura in V/m).

Il movimento di cariche genera la *corrente elettrica* I (che si misura in A) ed il *campo magnetico* H (che si misura in A/m).

La densità di flusso magnetico, detta *induzione magnetica* B , (che si misura in T), tiene conto anche delle caratteristiche del mezzo fisico in cui il campo magnetico si genera ($B = \mu H$).

Campi elettrici: esistono ovunque sia presente una carica elettrica pos. o neg., esercitano forze su altre cariche presenti entro il campo. Ogni conduttore elettrico carico produce un campo elettrico. Maggiore è la tensione, più alto è il campo elettrico. Il campo esiste anche se non circola alcuna corrente. Infatti, poiché è prodotto dalle cariche elettriche, esiste anche in presenza di apparecchi elettrici spenti ma collegati alla rete elettrica in quanto è generato dagli impianti e dai circuiti di alimentazione.

L'intensità dei campi elettrici è massima vicino a una carica, o a un conduttore carico, e diminuisce rapidamente allontanandosi da questi. Il campo elettrico è facilmente schermabile da oggetti materiali, quali legno, metallo, alberi, edifici, ecc. e quindi anche dal corpo umano con riduzione che può essere notevole passando dall'esterno all'interno delle strutture (edifici, corpo umano, ecc.).

Campi magnetici: derivano dal moto delle cariche elettriche. A differenza dei campi elettrici, un campo magnetico si produce soltanto quando un apparecchio elettrico viene messo in funzione e quindi in esso circola corrente elettrica. Più alta è la corrente, maggiore è l'intensità del campo magnetico.

Il legame tra il campo magnetico H e l'induzione magnetica B è determinato dalla permeabilità magnetica del mezzo attraverso il quale tali grandezze si manifestano.

Come i campi elettrici, anche quelli magnetici sono massimi vicino alle loro sorgenti e diminuiscono rapidamente a distanze maggiori.

Il campo magnetico non è facilmente schermabile né dal corpo umano né da oggetti materiali, quindi risulta praticamente invariato passando dall'esterno all'interno delle strutture (edifici, corpo umano, ecc.)

Grandezze fisiche e unità di misura

Intensità di un campo elettrico (E), misurata in Volt/metro (V/m).

Intensità di un campo magnetico (H), misurata in ampère/metro (A/m).

Induzione magnetica (B), misurata in Tesla.

Densità di potenza di un campo elettromagnetico (S), data dal prodotto della componente elettrica E per quella magnetica H ($S=EH$), misurata in watt/metro quadrato (W/m^2).

Grandezze dosimetriche

Interazione dei campi elettromagnetici con i tessuti biologici.

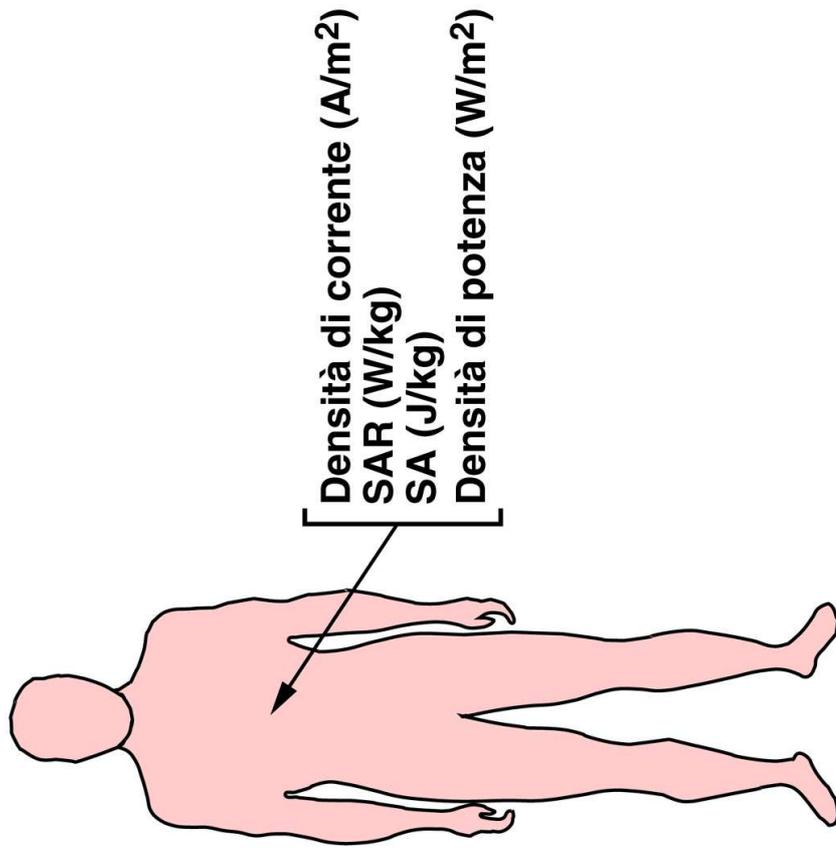
➤ per basse frequenze:

Densità di corrente (J) misurata in A/m^2 . Indica la corrente elettrica che fluisce attraverso una sezione unitaria di tessuto corporeo.

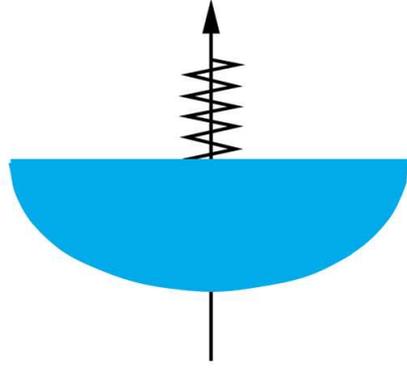
➤ per alte frequenze:

SAR, *Tasso Specifico di Assorbimento* (Specific Absorption Rate), espresso in W/kg . Rappresenta la potenza assorbita per unità di massa della materia esposta al campo. Nei tessuti biologici varia fortemente; indica la "dose" di energia elettromagnetica assorbita da un chilogrammo di tessuto biologico.

Individuo esposto



Sorgente



La relazione tra campo magnetico ed elettrico, assume meno importanza nel momento in cui si affronta il problema dei CEM a frequenze relativamente basse (sotto i 300 Hz).

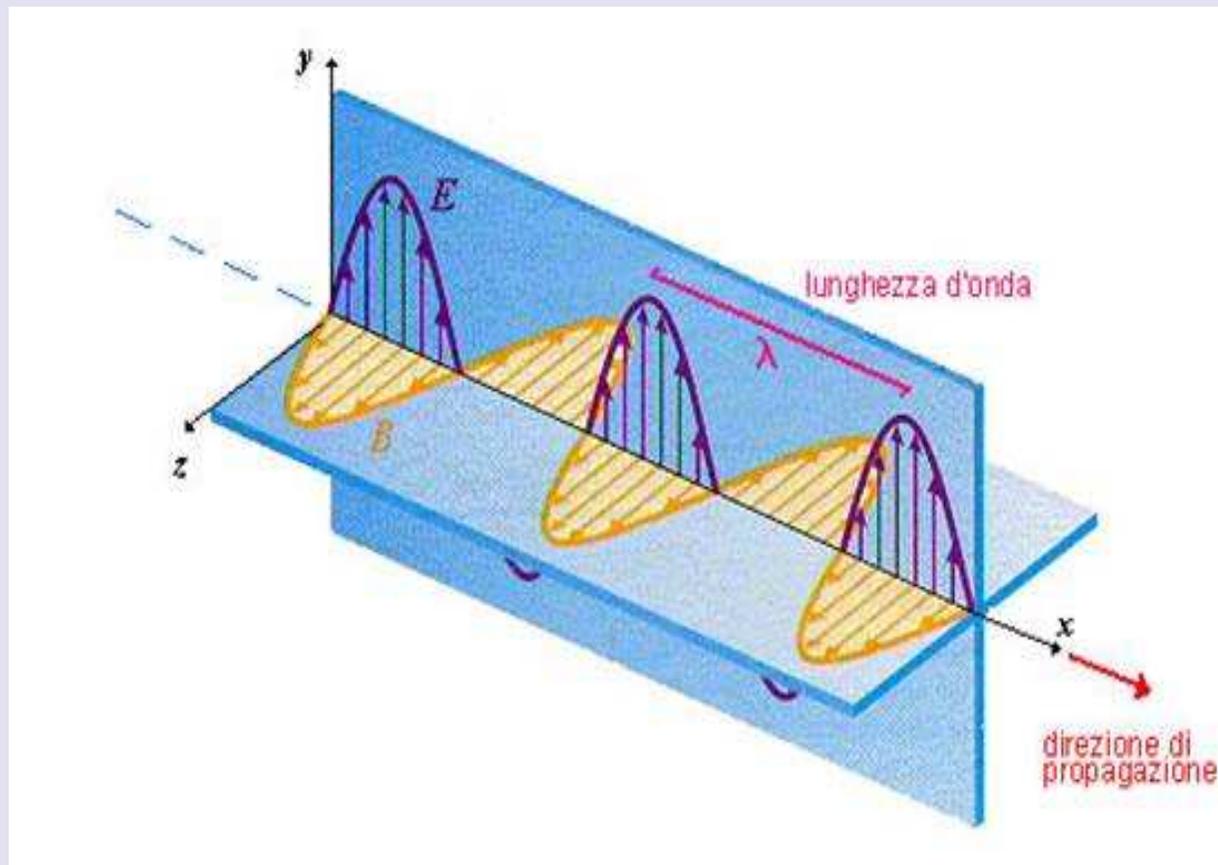
In tale intervallo di frequenze, infatti, il campo E e B (ovvero il campo H) non sono direttamente correlati (anche a grande distanza dalla sorgente) e perciò occorre che siano misurati separatamente. Inoltre l'energia resta localizzata in prossimità della sorgente di emissione.

Nel caso delle medie e alte frequenze (> 300 Hz) il campo magnetico ed elettrico si propagano nello spazio in fase, in maniera perpendicolare tra loro, e sono in grado di trasportare energia a distanze notevoli rispetto al punto di origine.

Nella regione delle radiofrequenze e microonde, i campi elettrici e magnetici vengono considerati insieme, come le due componenti dell'onda elettromagnetica. La densità di potenza (W/m^2) descrive l'intensità di questi campi.

Si noti che i campi si chiamano *statici* quando non variano nel tempo; in generale i campi elettrici e magnetici interagiscono con cariche e correnti elettriche, ed obbediscono alle numerose leggi fisiche dell'elettromagnetismo, e tra queste alle leggi di Maxwell.

Se E e B sono perpendicolari alla direzione di propagazione e la propagazione avviene lungo una linea retta, l'onda si dice piana.



L'andamento temporale delle emissioni

Un'onda è un fenomeno periodico nel tempo, si può definire il concetto di periodo e di frequenza.

- Il **periodo** rappresenta il tempo impiegato a compiere un ciclo completo, si misura in secondi.
- La **frequenza**, reciproco del periodo, rappresenta il numero di cicli compiuti in un secondo, si esprime in Hertz o nei suoi multipli.
- L'onda si propaga nello spazio con velocità c e si ripete con una periodicità che viene espressa dalla **lunghezza d'onda** λ , ossia la distanza tra un'onda e la successiva, si misura in metri.

Per l'onda elettromagnetica generata da una sorgente alla frequenza f , si definisce la lunghezza d'onda $\lambda = c/f$.

Campi di lunghezza d'onda diversa interagiscono col corpo umano in modo diverso.

Le onde elettromagnetiche si comportano diversamente a secondo del mezzo fisico in cui si propagano: passando dal vuoto alla materia la frequenza dell'onda rimane la stessa, mentre cambiano la velocità di propagazione e la lunghezza d'onda.

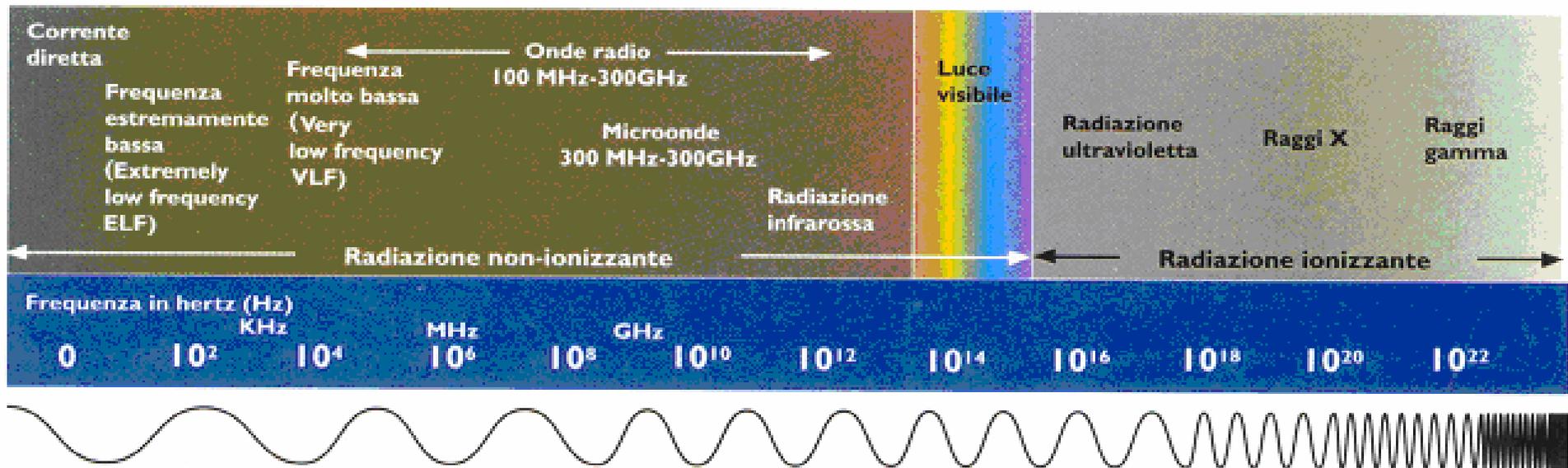
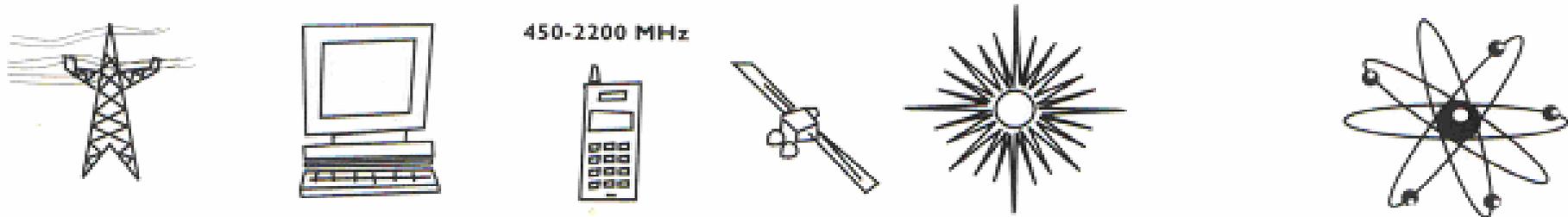
Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

L'insieme di tutte le frequenze delle onde elettromagnetiche è chiamato **spettro elettromagnetico**.

Lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche è suddiviso in due principali categorie:

radiazioni ionizzanti (IR, con frequenze maggiori degli UV)

radiazioni non ionizzanti (NIR)



Radiazioni non ionizzanti

Radiazioni ionizzanti

Campi statici

Correnti alternate

Onde radio

Microonde

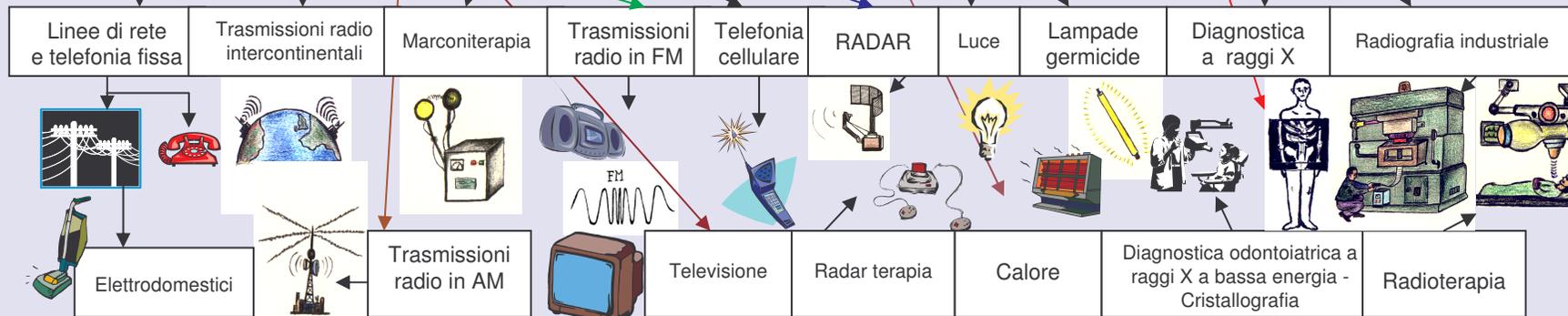
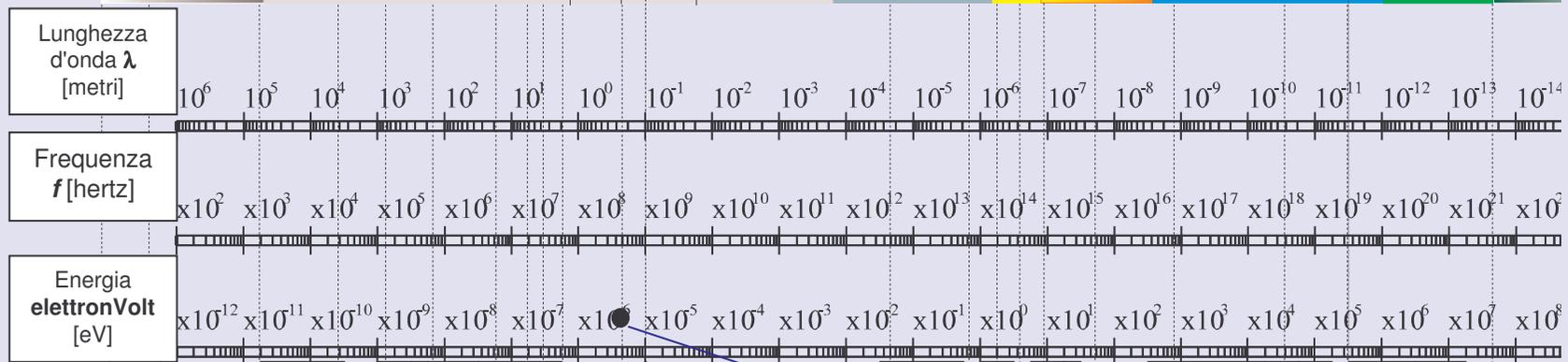
INFRAROSSO

ULTRAVIOLETTO
ULTRAVIOLETTO

RAGGI X

Raggi gamma

Raggi cosmici



Classificazione dello spettro elettromagnetico - NIR

Frequenza	Denominazione	Lunghezza d'onda
0 Hz - 300 Hz	Onde e.m. a frequenze estremamente basse (ELF)	∞ - 1000 km
300 Hz - 300 kHz	Onde e.m. a frequenze basse (VLF-LF)	1000 km - 1 km
300 kHz - 300 MHz	Radiofrequenze (RF)	1 km - 1 m
300 MHz - 300 GHz	Microonde (MW)	1 m - 1 mm
300 GHz - 300 THz	Infrarosse (IR)	1 mm - 760 nm
375 THz - 750 THz	Luce visibile (LV)	760 nm - 400 nm
750 THz - 3×10^4 THz	Ultravioletto (UV)	400 nm - 100 nm



RADIAZIONI IONIZZANTI

Le radiazioni ionizzanti, (frequenza di molto superiore a quella della radiazione visibile), trasportano energia sufficiente ad estrarre un elettrone dall'orbita più esterna dell'atomo (energia superiore a $12-13 \text{ eV}$); tale fenomeno è detto **ionizzazione**.

Le radiazioni ionizzanti sono dotate di un potere altamente penetrante, che permette loro di **ionizzare la materia** e cioè di riuscire a separare gli elettroni dagli atomi che incontrano nel loro percorso. Di conseguenza gli atomi perdono la loro neutralità e si caricano elettricamente.

La ionizzazione può causare negli organismi viventi fenomeni chimici che portano a lesioni osservabili sia a livello cellulare che dell'organismo, con conseguenti alterazioni funzionali e morfologiche, fino alla morte delle cellule o alla loro radicale trasformazione.

Sorgenti tipiche di radiazioni ionizzanti sono i radioisotopi, sostanze in grado di emettere, per effetto di disintegrazioni del nucleo (fenomeno detto "decadimento") radiazioni costituite da particelle (raggi α o raggi β) o onde elettromagnetiche particolarmente energetiche (raggi γ o raggi x).

RADIAZIONI NON IONIZZANTI

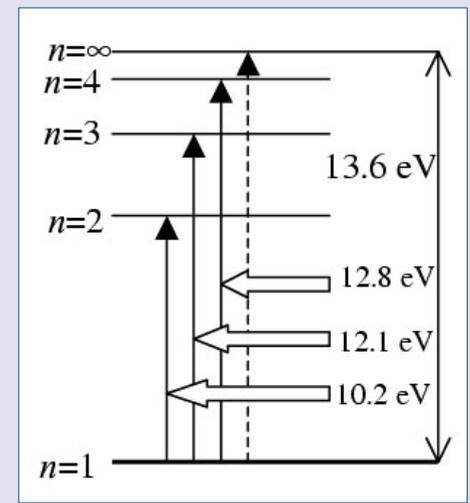
Le radiazioni non ionizzanti NIR (frequenze inferiori a UV e comprendenti la luce visibile) sono onde elettromagnetiche a bassa energia, che non provocano la ionizzazione degli atomi attraversati. Le radiazioni non ionizzanti sono ritenute meno pericolose delle radiazioni ionizzanti, in quanto nel breve termine non possiedono l'energia sufficiente a determinare modificazioni strutturali dirette degli atomi. Le sorgenti di onde elettromagnetiche vengono suddivise in tre categorie principali nell'arco di frequenza 0-300 GHz :

- sorgenti di campi a bassa frequenza (fino a 300 kHz), comprendenti i campi ELF (Extremely Low Frequency - fra 0 Hz e 300 Hz) dovuti essenzialmente al sistema di produzione e distribuzione dell'energia elettrica (linee elettriche, cabine di trasformazione, elettrodomestici, ecc.) che in Italia presenta una frequenza industriale pari a 50 Hz;
- sorgenti di campi a radio-frequenza, definiti come campi RF (Radio Frequency - fra i 300 kHz e i 300 MHz) dovute generalmente agli impianti di ricettazione radio e tv;
- sorgenti di campi a Micro Onde o MO (fra i 300 MHz e i 300 GHz) dovute agli impianti per cellulari o ai ponti radio che prevedono frequenze molto più alte, comprese tra 100 kHz e 300 GHz.

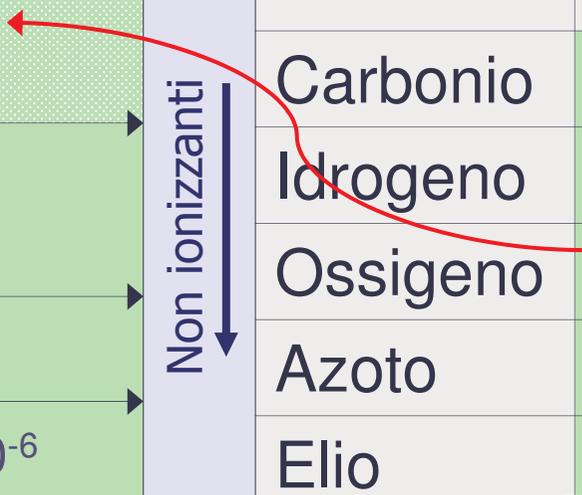
Ionizzanti e non ionizzanti

Denominazione	Intervallo d'energia
Raggi Gamma	100 KeV - 10 TeV
Raggi X	100 eV - 100 KeV
Raggi Ultravioletti	3 eV - 100 eV
Radiazione Visibile	centrata sui 2 eV
Microonde	$1,2 \times 10^{-3}$ - 1 eV
Onde Radio	$1,2 \times 10^{-3}$ - $1,2 \times 10^{-6}$

↑ Ionizzanti
↓ Non ionizzanti



Atomo	Energia di ionizzazione
Carbonio	11,3 eV
Idrogeno	13,6 eV
Ossigeno	13,6 eV
Azoto	14,5 eV
Elio	24,6 eV



Presenza di campi elettromagnetici

Negli ambienti di vita e di lavoro sono presenti tipicamente:

- **CAMPO ELETTRICO STATICO E CAMPO MAGNETICO STATICO** per lo più di origine naturale, in risonanza magnetica (immagini diagnostiche in medicina) e in settori di ricerca
- **CAMPO ELETTRICO A BASSA FREQUENZA ELF (50 Hz)** dovuto alla presenza di tensione nella rete elettrica (abitazioni, aziende, ambiente)
- **CAMPO MAGNETICO A BASSA FREQUENZA ELF (50 Hz)** dovuto alla presenza di correnti circolanti nella rete elettrica (abitazioni, aziende, ambiente)
- **CAMPO ELETTROMAGNETICO** emesso da apparecchi funzionanti a frequenza superiore a 100 kHz (ripetitori radio e Tv, telefonia, telefoni cellulari, forni a microonde, radar, sistemi anti-intrusione, telepass, ecc.).

INTERAZIONI RADIAZIONI NON IONIZZANTI E MATERIA

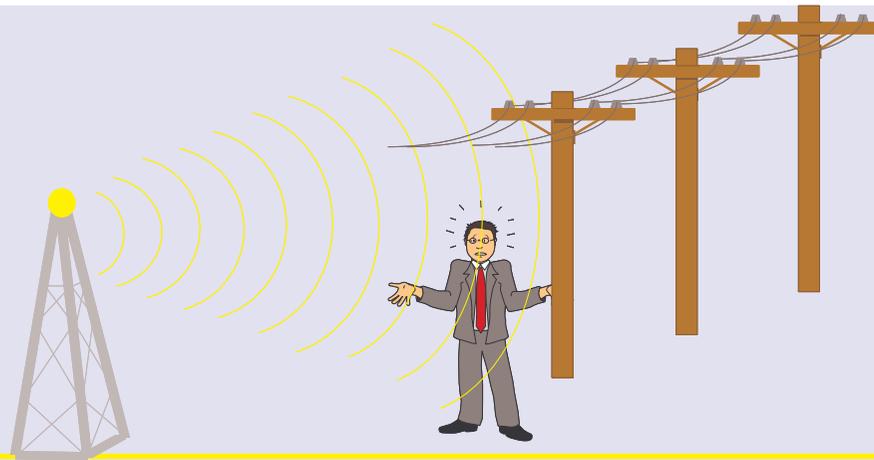
L'interazione tra campo elettromagnetico e materia biologica è governata da meccanismi molto complessi, che solo da poco tempo sono stati esplorati. Mentre gli effetti sanitari delle IR sulle persone sono stati studiati sistematicamente a partire dall'uso della bomba atomica, gli effetti biologici e sanitari delle NIR sono stati indagati negli ultimi decenni in funzione degli sviluppi e delle applicazioni tecnologiche. Sono stati indagati in particolare gli effetti per la frequenza industriale 50 Hz.

Le normative vigenti sono predisposte sulla base di normative tecniche e criteri protezionistici emessi dalle principali organizzazioni internazionali che coordinano anche numerose ricerche scientifiche: l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) e la Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP).

Gli effetti negativi di esposizione alle NIR che sono stati accertati con maggior chiarezza nell'uomo sono quelli che si sviluppano immediatamente dopo un'esposizione a breve termine.

Questi si contrappongono ad altri effetti, detti a lungo termine, che possono manifestarsi solo dopo un'esposizione di lungo periodo e/o dopo una lunga latenza.

EFFETTI BIOLOGICI EFFETTI SANITARI



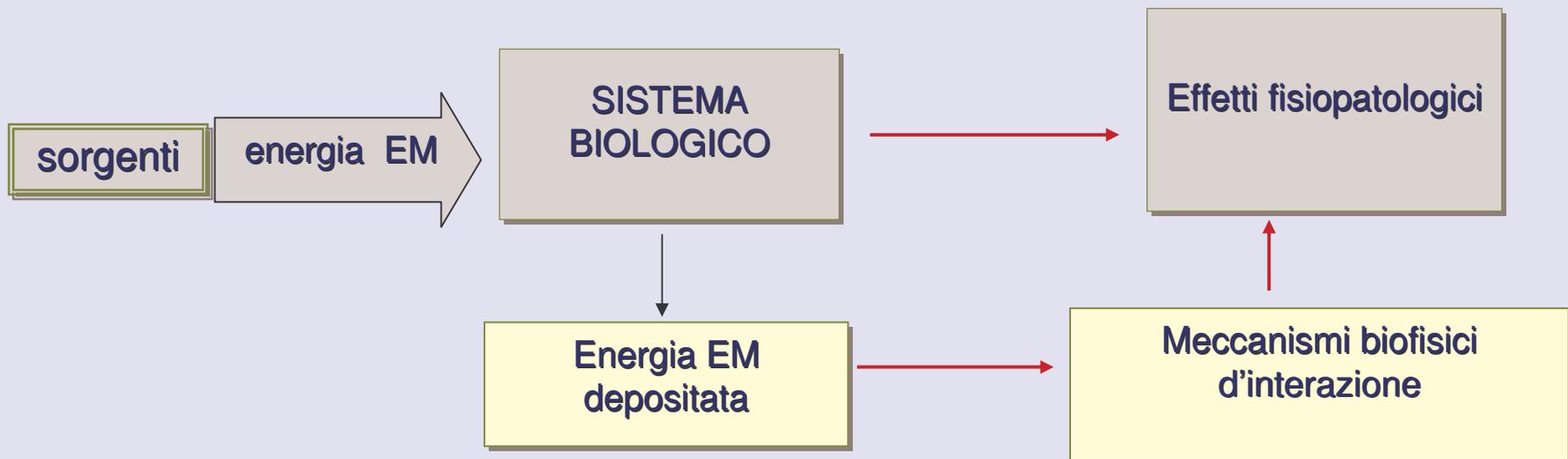
- I campi e le onde elettromagnetiche interagiscono con la materia in cui si propagano, per cui si può sicuramente parlare di *interazione* anche con la materia biologica.
- Gli *effetti biologici* sono risposte ad uno stimolo o ad un cambiamento ambientale. Queste risposte non sono necessariamente nocive per la salute, quindi non sempre si traducono in *danni*.
- Non vi sono evidenze certe sugli *effetti biologici*, né tanto meno su possibili *danni* di tale interazione di campi elettromagnetici di bassa intensità con i tessuti biologici.
- È altresì certo che campi elettromagnetici intensi provocano effetti acuti e danni biologici sul corpo umano.
- Il dibattito attuale si concentra sulla possibilità o meno che *l'esposizione prolungata a bassi livelli di campo* possa sollecitare risposte biologiche e influenzare lo stato di benessere delle persone.

L'interazione di energia elettromagnetica con un sistema biologico può provocare effetti patologici.

L'origine di questo è da ricercarsi in un qualche **meccanismo biologico di interazione**.

Effetto biologico: variazioni fisiologiche in un sistema biologico

Danno alla salute: si verifica quando l'organismo non è in grado di compensare l'effetto biologico



Effetti acuti

Effetti acuti: effetti dovuti ad esposizione a campi che superano determinati livelli (soglie).

- *immediati:* si verificano subito quando si applica il campo e scompaiono subito quando il campo cessa, salvo effetti permanenti;
- *oggettivi:* si verificano su qualunque soggetto, salvo valori di soglia un poco diversi da individuo a individuo.

Effetti a lungo termine

Effetti sanitari a lungo termine: effetti dovuti ad esposizioni prolungate nel tempo a campi di intensità notevolmente più bassi di quelli che provocano effetti acuti.

- *un insieme di sintomi*
affaticamento, irritabilità, difficoltà di concentrazione, cefalee, insonnia, impotenza...(più o meno soggettivi);
- *sintomi oggettivi* ed in genere gravissimi (tumori, leucemie).

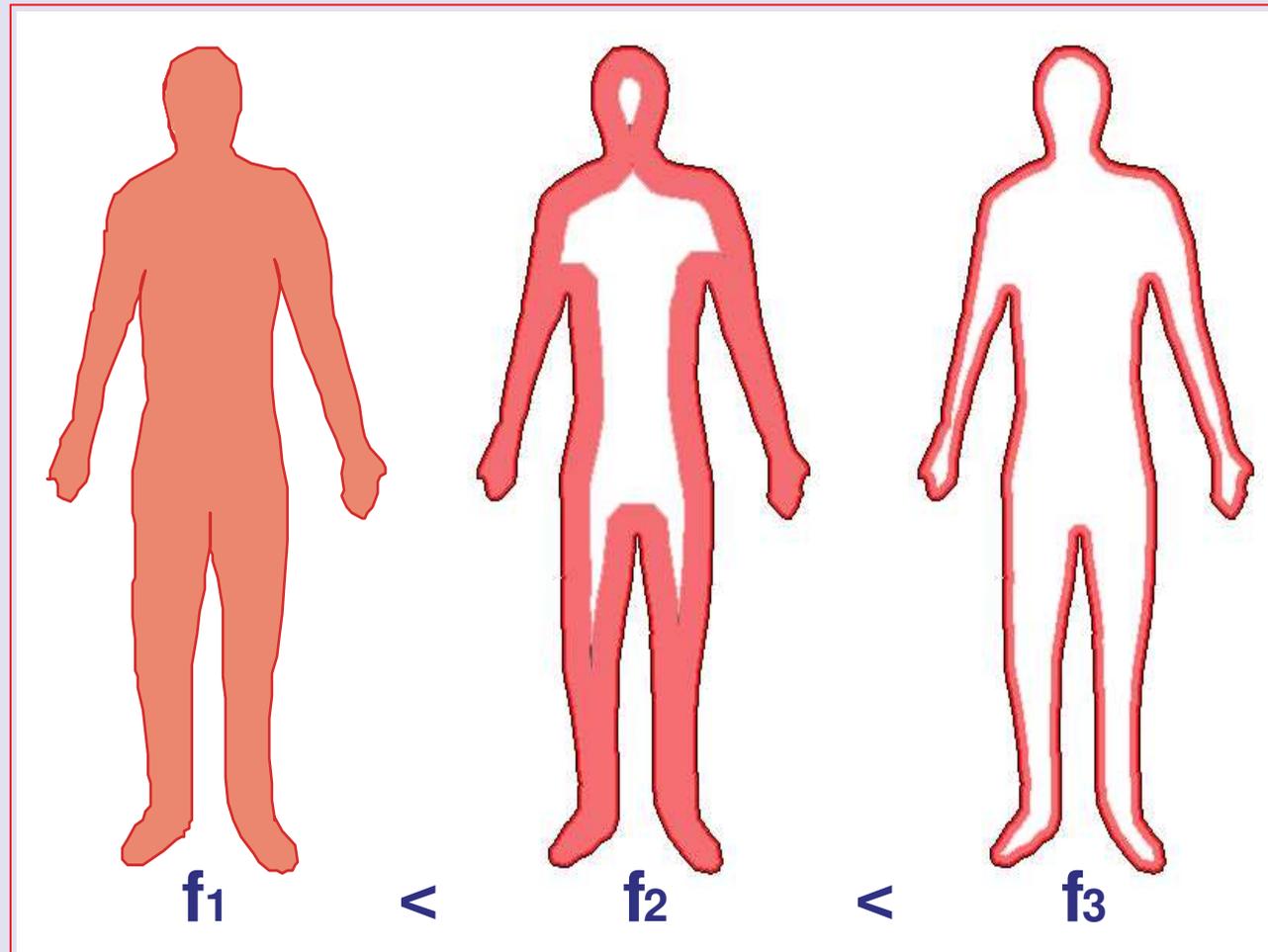
L'indagine deve essere fatta con metodi epidemiologici

Meccanismi di interazione fisico-biologica dei CEM

Il parametro critico dell'onda e.m., dal quale dipende l'energia, è la frequenza f , ed è quindi questa a determinare il livello di interazione fra la radiazione e la materia attraversata.

- Fino a circa **1 MHz** prevale l'induzione di correnti elettriche nei tessuti elettricamente stimolabili (nervi e muscoli).
Praticamente in tutti i normali ambienti, i livelli delle correnti indotte nel corpo sono troppo bassi per dar luogo a effetti sanitari ovvi.
- All'**aumento della frequenza** prevale l'assorbimento di energia nei tessuti dovuto al rapido movimento oscillatorio di ioni e molecole d'acqua che si manifesta sotto forma di calore per effetto Joule come fenomeno primario o secondario e conseguente aumento della temperatura corporea.
Le linee guida per l'esposizione a campi elettromagnetici a RF e MO sono stabilite in modo tale da prevenire effetti sanitari causati da un riscaldamento localizzato o del corpo intero.
- Sopra **10 MHz** questo è l'unico effetto
- Sopra **10 GHz** l'assorbimento è solo superficiale

Profondità di penetrazione



$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}}$$

Con l'aumento della frequenza aumenta la potenza assorbita, ma per contro diminuisce la profondità di penetrazione in quanto aumenta l'attenuazione manifestata dalla materia attraversata nei confronti dei campi incidenti.

L'interazione delle radiazioni non ionizzanti con la materia è dovuto essenzialmente alla polarizzazione delle molecole del mezzo, ed al loro successivo rilassamento.

L'interazione con la radiazione comporta **fenomeni termici** dovuti all'assorbimento dell'onda (fenomeni che possono innalzare la temperatura dei tessuti), e **fenomeni "non termici"** conseguenti al rilassamento dei dipoli indotti ed al conseguente riarrangiamento delle strutture: il campo elettrico dell'onda incidente può ad esempio interagire con la membrana cellulare, alterando il potenziale di membrana e la sua funzione nella conduzione degli impulsi nervosi.

Conseguenze di questi effetti, nel campo delle **microonde e radiofrequenze**, possono essere:

- danni agli occhi ed agli organi riproduttivi, per gli effetti termici;
- danni al sistema nervoso per gli effetti non termici

IL PRINCIPIO DI PRECAUZIONE

Nell'attesa che la comunità scientifica internazionale possa fornire risposte certe in merito alla effettiva pericolosità dei campi elettromagnetici di bassa intensità per i possibili effetti a lungo termine sulla salute, sembra comunque ragionevole, sulla base dell'ormai consolidato "principio di precauzione", adottare le migliori tecnologie mirate alla riduzione delle emissioni elettromagnetiche indesiderate da parte di tutti gli impianti, sistemi e apparecchiature elettriche ed elettroniche e per diffusione dei segnali per telecomunicazioni.

- Metodi di lavoro con minor esposizione ai CEM
- Scelta di attrezzature emettenti CEM d'intensità inferiori
- Misure tecniche per ridurre l'emissione CEM, incluso, se necessario, l'uso di dispositivi di sicurezza, schermature, ecc.
- Programmi appropriati di manutenzione su attrezzature, luoghi, postazioni di lavoro
- Progettazione e struttura di luoghi e postazioni
- Limitazione di durata e intensità di esposizione
- Disponibilità di adeguati DPI
- Formazione e informazione dei lavoratori

Di che cosa si occupa la legge...

- Campi elettromagnetici:

campi magnetici statici e campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici variabili nel tempo di frequenza inferiore o pari a 300 GHz.

- Materia del decreto:

protezione dai rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori dovuti agli effetti nocivi a breve termine conosciuti nel corpo umano derivanti dalla circolazione di correnti indotte o dall'assorbimento di energia, e da correnti di contatto.

- Valori limite di esposizione:

limiti all'esposizione basati direttamente sugli effetti sulla salute accertati e su considerazioni biologiche.

Il rispetto di questi limiti garantisce che i lavoratori esposti ai campi siano protetti contro tutti gli effetti nocivi a breve termine per la salute conosciuti.

- Valori di azione:

entità dei parametri direttamente misurabili (valori per E, H, B, S). Il rispetto di questi valori assicura il rispetto dei pertinenti valori limite di esposizione.