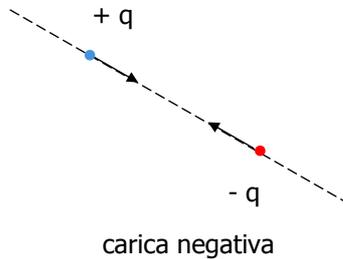


## Onde elettromagnetiche



### --- Il campo elettrico ---

carica positiva



Su ciascuna delle due cariche si esercita la medesima forza

$$\vec{F}_{+q,-q} = \vec{F}_{-q,+q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(+q)(-q)}{d^2} \hat{r}$$

$$\vec{F} = (-q)\vec{E}$$

Il rapporto tra la forza esercitata da una carica sull'altra e la carica di quest'ultima viene definito CAMPO ELETTRICO

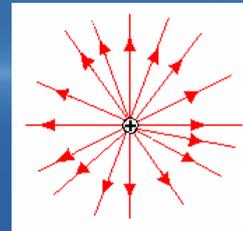
$$\vec{E}_{+q} = \frac{\vec{F}_{+q,-q}}{(-q)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(+q)(-q)}{d^2} \frac{1}{(-q)} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(+q)}{d^2} \hat{r}$$

Il campo elettrico prodotto da una carica:

ha un'intensità che dipende dalla carica stessa (e dalla distanza)

introduce una modifica nello spazio (il moto di una seconda carica viene modificato a causa del campo)

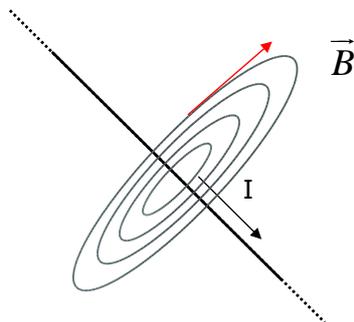
A prescindere dalla presenza della carica "sorgente", possiamo utilizzare il concetto di campo in modo più generale, ovvero pensare che nello spazio sia comunque presente un campo elettrico (eventualmente nullo in assenza di carica/che o altre sorgenti)



## Onde elettromagnetiche



### --- Il campo magnetico ---

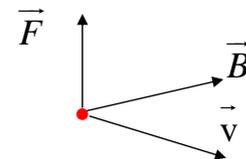


Il filo percorso da corrente elettrica continua genera attorno a sé un campo magnetico

$$\vec{B} \propto \frac{I}{r}$$

Ovvero, una carica che si trovasse a passare in prossimità del filo sarebbe soggetta ad un forza pari a

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$



Il campo magnetico prodotto da una corrente continua:

ha un'intensità che dipende dall'intensità di corrente (e dalla distanza)

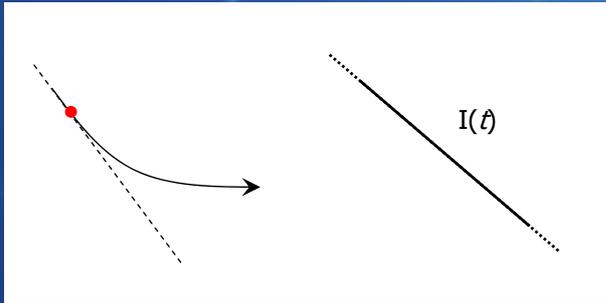
introduce una modifica nello spazio (il moto di una carica viene modificato a causa del campo)

A prescindere dalla presenza della "sorgente" del campo, possiamo utilizzare il concetto di campo in modo più generale, ovvero pensare che nello spazio sia comunque presente un campo magnetico (eventualmente nullo in assenza di sorgenti)

# Onde elettromagnetiche

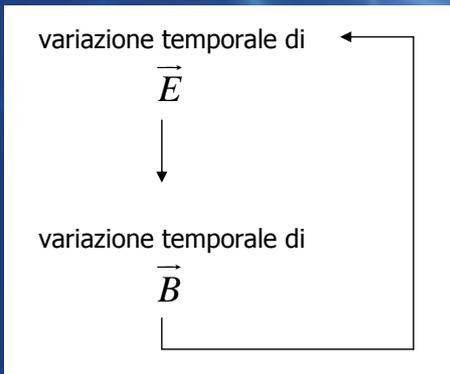


Se le cariche sono in movimento e le correnti non sono continue ...



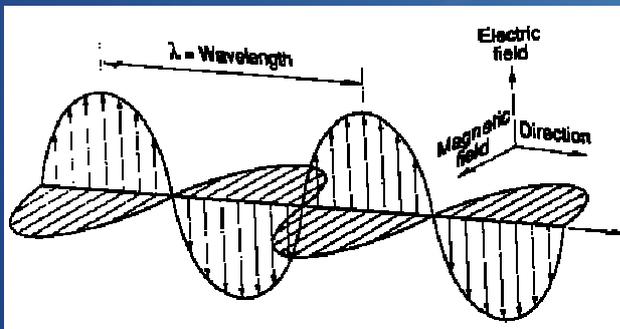
$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{\partial B_x}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 I_x + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}$$



Questa mutua relazione tra i due campi dà luogo allo sviluppo di una perturbazione dei campi stessi che si propaga nello spazio e nel tempo

→ si produce un'onda elettromagnetica



<http://www.geo.mtu.edu/rs/back/spectrum/>

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda f = c$$

non necessitano di un mezzo per propagarsi

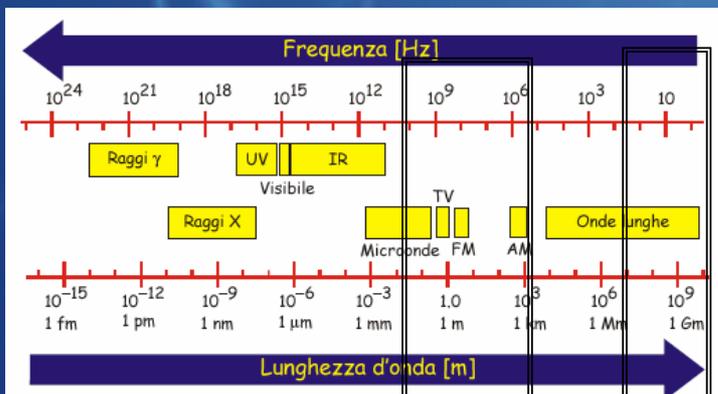
il campo elettrico e quello magnetico sono perpendicolari tra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione

→ sono onde trasversali

$$E \rightarrow \text{V/m}$$

$$B \rightarrow \text{T} \quad (1 \text{ T} = 10000 \text{ G})$$

D. Galli - www.unibo.it



$$\frac{|\vec{E}|}{c} = |\vec{B}|$$

MHz / GHz

50 Hz

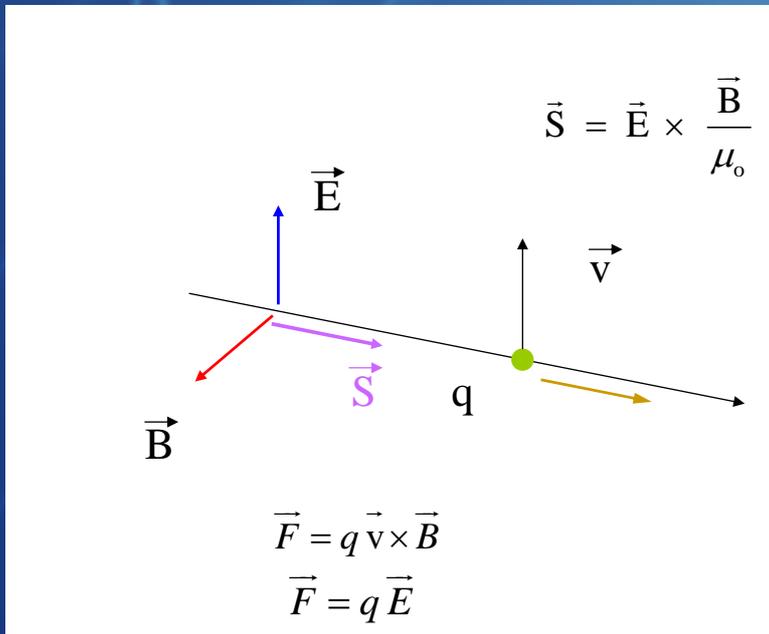
telefonia cellulare, ponti radio, radar, etc.

elettrodotti

# Onde elettromagnetiche



Energia trasportata da un'onda elettromagnetica: il vettore di Poynting  
(contributo legato ad E e a B)

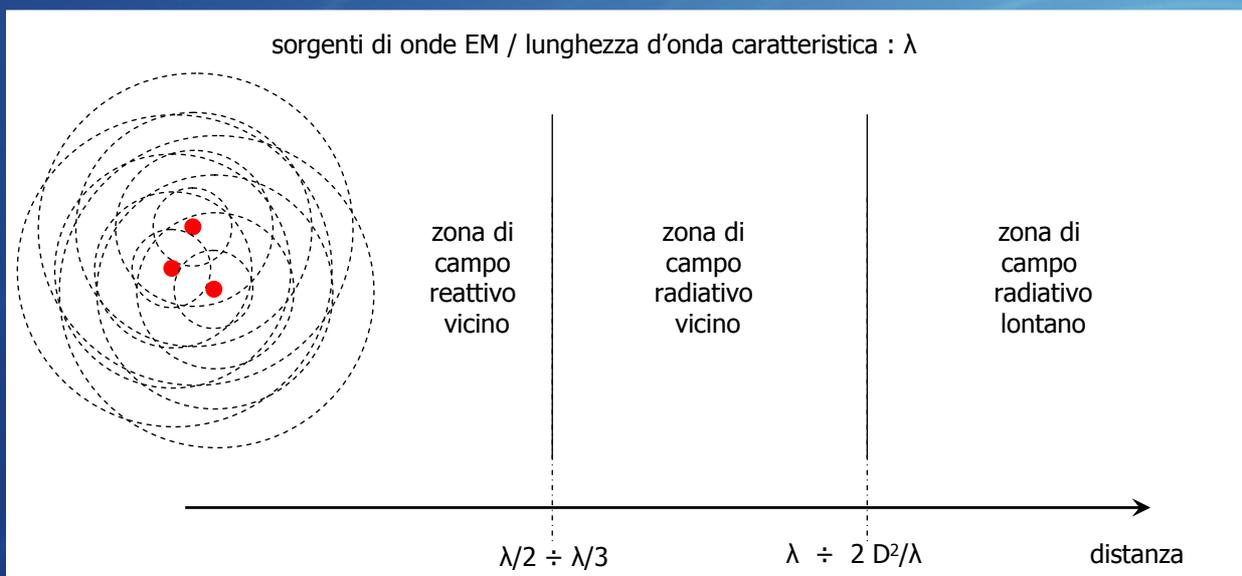


$$I = \frac{E^2}{377} \text{ W/m}^2$$

$$I \sim \frac{1}{R^2}$$

$$E \sim \frac{1}{R}$$

## Le zone di emissione



zona di campo radiativo lontano: la propagazione di E e B avviene secondo quanto visto fino ad ora, E e B sono perpendicolari tra loro e vale la relazione di proporzionalità fra i loro moduli

zona di campo radiativo vicino: la struttura dei campi inizia a diventare più complessa, però si può supporre che continui a valere la relazione di proporzionalità tra i moduli di E e B

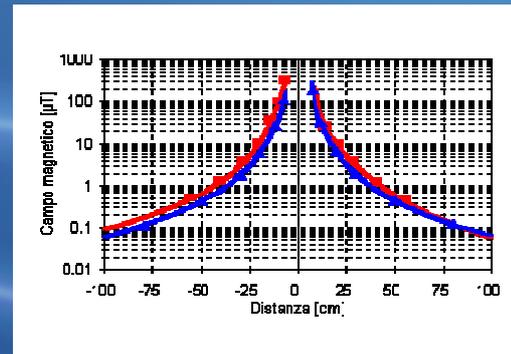
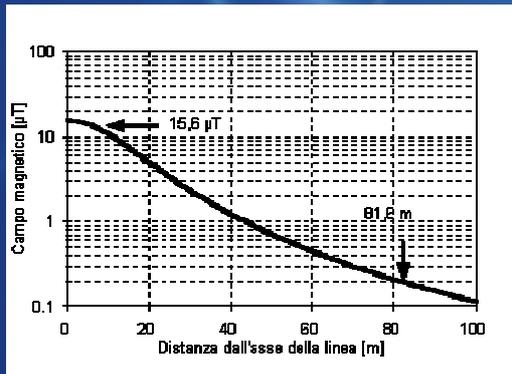
zona di campo reattivo vicino: non esiste una relazione definita tra E e B; la componente dominante del campo elettromagnetica è quella tipica della sorgente considerata

## Le zone di emissione



$$f = 50 \text{ Hz} \quad \lambda \sim 10000 \text{ Km}$$

La radiazione elettromagnetica emessa dagli elettrodotti possiede una frequenza caratteristica molto bassa e di conseguenza la sua lunghezza d'onda è molto elevata; questo fa sì che, in presenza di tali sorgenti, ci si trovi SEMPRE in condizioni di campo vicino reattivo. Il campo dominante è quello magnetico (l'elettrodotto, in condizioni statiche, è assimilabile ad un filo percorso da corrente, ovvero una sorgente tipica di campo magnetico)



Quando monitoriamo sorgenti di questo tipo è importante prendere nota di:

- distanza dalla sorgente
- intensità di corrente che circola nei cavi

## Le zone di emissione



$$f = 100 \text{ MHz} \div 1 \text{ GHz} \quad \lambda \sim 3 \text{ m} \div 30 \text{ cm}$$

La radiazione elettromagnetica emessa dai ripetitori per le telecomunicazioni (telefonata/radio/video) possiede una frequenza caratteristica elevata e di conseguenza la sua lunghezza d'onda è dell'ordine delle decine di cm; questo fa sì che, in presenza di tali sorgenti, ci si trovi in condizioni di campo lontano radiativo. In questo caso non esiste un campo dominante e si osserva la relazione di proporzionalità tra il modulo di E e quello di B.

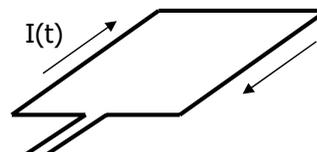
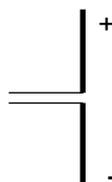
Quando si monitora questo tipo di sorgente è importante prendere nota di:

- distanza dalla sorgente
- potenza nominale della trasmittente

attenzione

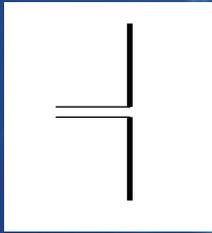
La configurazione della sorgente può avere una notevole influenza sulla direzionalità dell'emissione.

Consideriamo le sorgenti più semplici: dipolo elettrico e spira percorsa da corrente

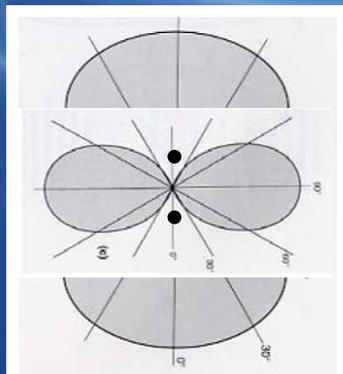
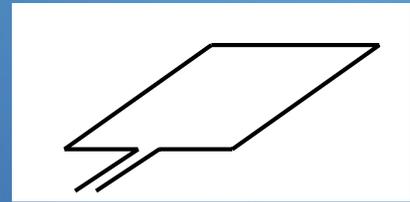
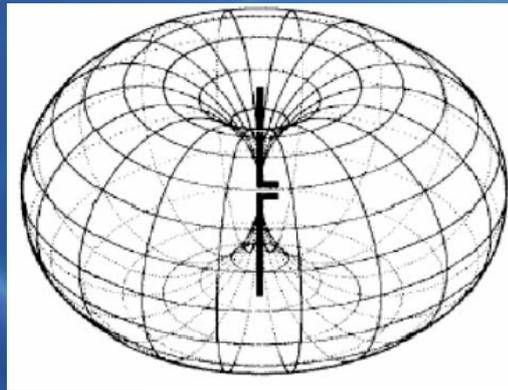


## La direzionalità dell' emissione

Distribuzione dell'intensità delle onde elettromagnetiche generate da un singolo dipolo (elettrico o magnetico)



Luca Vincetti



L'intensità è concentrata prevalentemente lungo questa direzione

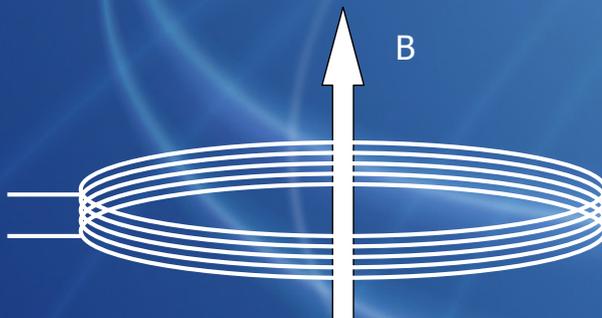


→ prestare attenzione in fase di misura !

## Onde elettromagnetiche



Quando ci troviamo in una regione in cui domina la componente "magnetica" del campo elettromagnetico possiamo avere effetti spiegabili mediante il fenomeno dell'induzione magnetica



Un campo magnetico variabile, applicato ad un circuito che formi un anello, induce ai capi di quest'ultimo una differenza di potenziale; se il circuito è chiuso si osserva il passaggio di corrente elettrica

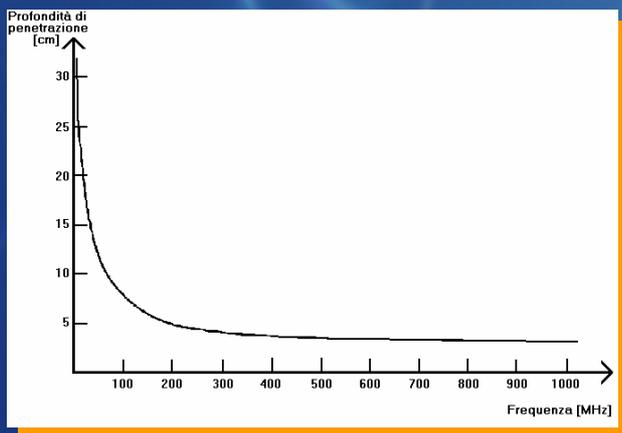
Le fibre nervose sono dei "fili elettrici"; se si applica un campo magnetico alternato si possono indurre delle correnti al loro interno → stimolazione muscolare

# Interazione tra onde elettromagnetiche e tessuti biologici



Effetti termici

During the second world war, concerns began to be raised in the USSR that military personnel may be subject to health hazards from working with radar. In the cold Siberian winters, servicemen soon found that standing in front of the radar antenna was a great way to keep warm but rumours began to circulate that it also caused sterility.

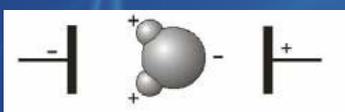
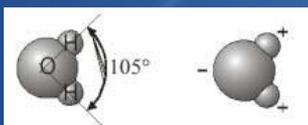


Effetti non termici

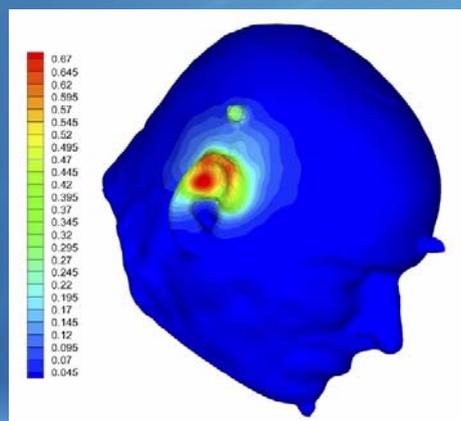
Alterazione della produzione di melatonina  
 Possibili interazioni con patologie di tipo tumorale  
 Influenze sugli scambi ionici attraverso la membrana cellulare  
 Influenza sull'apparato endocrino e su quello riproduttivo

## Effetti termici

G. Liut, Università di Trieste



$$f_{\text{acqua}} = 2.45 \text{ GHz (max assorbimento)}$$



G. Scarella et al. / C. R. Physique 7 (2006) 501-508

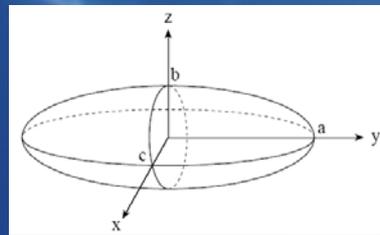
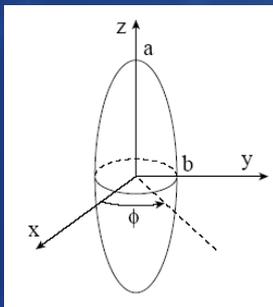
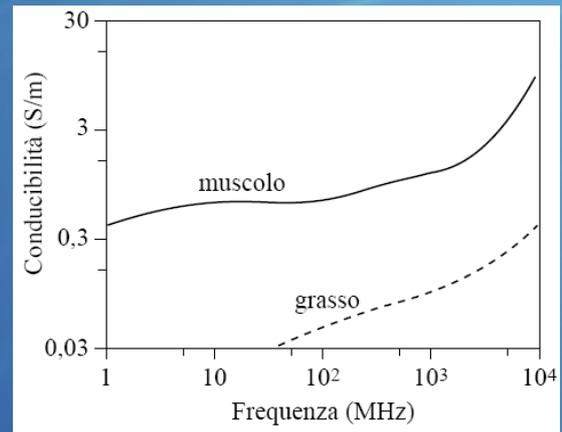
- ◊ Gli organi/tessuti maggiormente colpiti sono quelli caratterizzati dall'aver scarsa irradiazione sanguigna
- ◊ Il riscaldamento non proviene dall'esterno del corpo ma dall'interno, quindi gli usuali meccanismi di termoregolazione non vengono attivati
- ◊ L'elevata esposizione può indurre la cataratta o una temporanea sterilità
- ◊ In casi estremi si arriva alla necrosi cellulare

## Effetti termici

$$SAR = \left( \frac{\sigma E^2}{\rho} \right) \quad \text{si esprime in W/kg}$$

Conducibilità

acqua	$0,075 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
neve	$5 - 30 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$
rame	$5 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$



L'assorbimento di radiazione elettromagnetica da parte dell'uomo dipende dall'orientazione dei campi elettrico e magnetico

## Effetti termici

L'assorbimento può essere non omogeneo

$f < 30$  MHz (intervallo di subrisonanza)

in cui all'aumentare della frequenza si ha un aumento del campo trasmesso e quindi del SAR

$30 \text{ MHz} < f < 300 \text{ MHz}$

intervallo di risonanza del corpo intero; per  $f$  fino a 400 MHz si ha risonanza legata al cranio

$400 \text{ MHz} < f < 2000 \text{ MHz}$

intervallo dei punti caldi in cui si hanno assorbimenti localizzati di potenza

$f > 2000 \text{ MHz}$

intervallo di assorbimento superficiale ( $\rightarrow$  SAR mediata sul volume corporeo non è adeguata)

30 MHz	300 MHz	400 MHz	2000 MHz
10 m	1 m	75 cm	15 cm

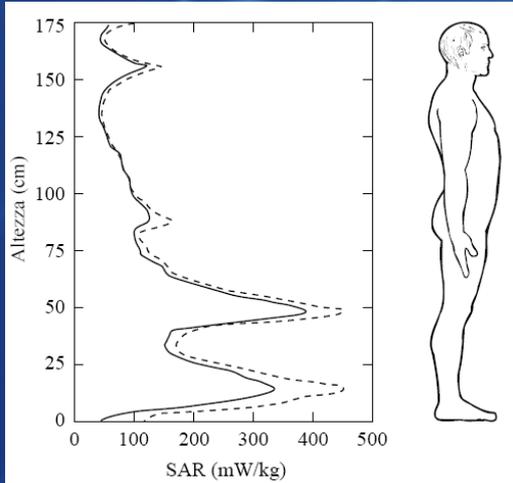
L'assorbimento dipende anche dalla direzione di propagazione dell'onda rispetto al soggetto colpito

Per frequenze superiori a qualche gigahertz l'assorbimento è limitato alla superficie del corpo umano e perciò il SAR sul corpo intero non è adeguato a rappresentare la potenza localizzata

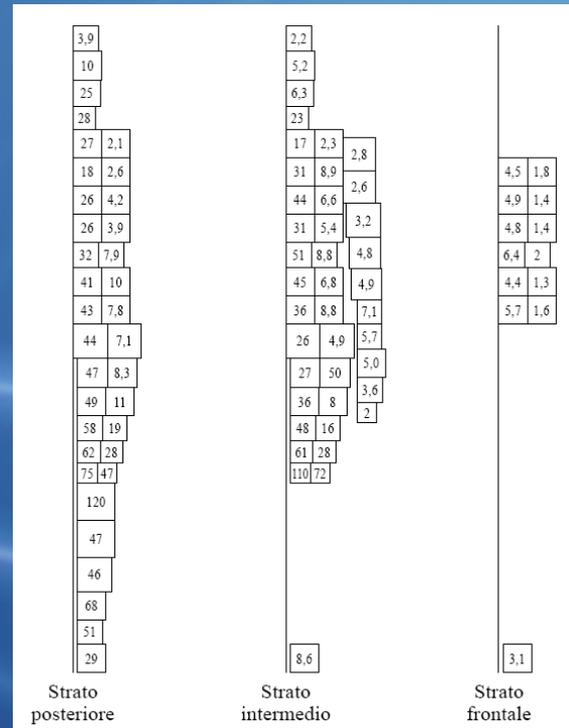
## Effetti termici

### Modello a blocchetti (180)

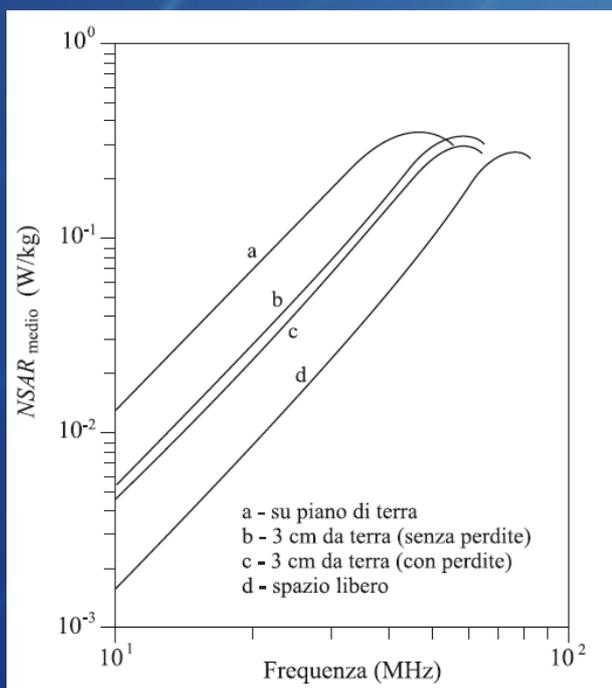
I numeri racchiusi in ciascun cubetto rappresentano i valori di SAR calcolati per quel dato blocchetto.



### Soluzioni numeriche (con approssimazioni)



## Effetti termici



La presenza di un piano altera il valore di frequenza per cui si osserva l'assorbimento massimo. Un piano, quindi, *aumenta la lunghezza elettrica* del corpo.

## Effetti termici

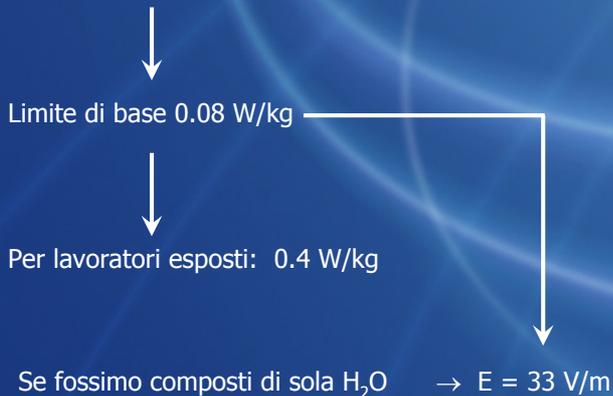
### Livelli di riferimento

Gli effetti di tipo termico si riscontrano tipicamente in presenza di esposizioni brevi ma intense

SAR = 2 W/kg (media corporea) → + 1 °C

SAR = 4 W/kg (media corporea) valore di soglia

SAR > 10 W/kg (media corporea) danni irreversibili



Livelli di riferimento indiretti per il campo elettrico in V/m per la telefonia mobile per le frequenze da 900 MHz e 1800 MHz

Paese	900 MHz	1800 MHz	Osservazioni
ICNIRP	41	58	
Australia	41	58	
Austria	48	61	
Bulgaria	6	6	
Canada	47	61	
Cina	12*	12*	* per breve tempo
Raccomandazione UE (su base ICNIRP)	41	58	
Francia	41	58	
Germania	41	58	
Ungheria	6	6	
<b>Italia</b>	<b>20 (6*)</b>	<b>20 (6*)</b>	<b>* ambienti abitati</b>
Giappone	47	61	
N. Zelanda	41	58	
Polonia	6	6	
Russia	20*	dato non riportato	* telefonia mobile
Sud Africa	41	58	
Svezia	41	58	
Svizzera	41 (4*)	59 (6*)	* per impianto
Turchia	41	58	

Supponendo che il fabbisogno calorico giornaliero sia di 2000 kcal si ottiene → 1.2 W/kg

## Effetti non termici

SAR < 0.01 W/kg

alterazioni dell'attività enzimatica

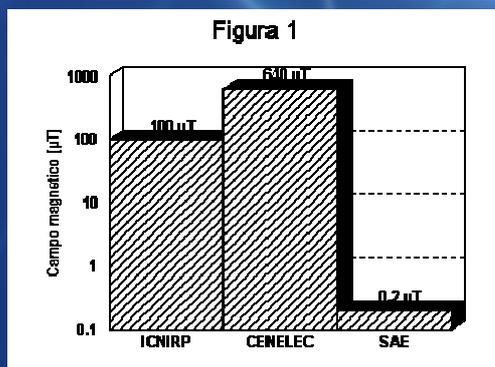
modifica del tenore di calcio nelle cellule

effetto sul trasporto di ioni attraverso la membrana cellulare

Effetti acuti del campo magnetico a 50 Hz e normative

Effetto	Campo magnetico	Densità di corrente
riscaldamento dei tessuti (0,4 W/kg)	1.600.000 μT	10.000 mA/m <sup>2</sup>
induzione di extrasistole (rischio di fibrillazione)	130.000 μT	800 mA/m <sup>2</sup>
percezione sensoriale, magnetofosfeni	16.000 μT	100 mA/m <sup>2</sup>
rumore elettrofisiologico	160 μT	1 mA/m <sup>2</sup>

Soglia di attenzione epidemiologica



	A ridosso	10 cm	20cm	30cm
Asciugacapelli	40+100	40	5	1,5
Aspiratore	2+235	20	7	3
Frullatore	50+230	14	3,5	1,5
Ventilatore	30+50	2,9	0,4	0,15
Lampada ad incandescenza	60	3,8	0,85	0,27
Radio registratore	0,3+15	2	0,8	0,4
Coperta elettrica	0,4+2,3	0,25	0,18	0,13
Televisore 14"	2+7	2,5	1	0,5
Rasoio	50+1300	20	5	1,7
Lavatrice	0,1+27,5	12,6	10	7,2
Lavastoviglie	0,3+3,4	0,2	0,11	0,1
Frigorifero	0,5+1,7	1,5	1	0,25

\* I valori sono indicati in microtesla (μT)

## Livelli di riferimento

Tabella 1 – Limiti di esposizione

Frequenza (MHz)	Intensità di campo Elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza dell'onda piana equivalente (W/m <sup>2</sup> )
0.1 – 3	60	0.2	---
3 – 3000	20	0.05	1
3000 – 300000	40	0.01	4

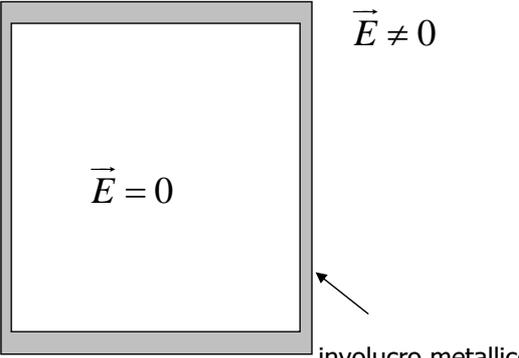
Tabella 2 - Valori di attenuazione

Frequenza	Intensità di campo Elettrico E (V/m)	Intensità di campo magnetico H (A/m)	Densità di potenza D (W/m <sup>2</sup> )
0.1MHz – 300 GHz	6	0.016	0.10 (3 MHz – 300 GHz)

$$B = \mu_o H \quad \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$

D.P.C.M. 8 luglio 2003: "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenuazione e degli obiettivi di qualità, per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz" (GU n. 199 del 28/08/2003).

## Schermi



$\vec{E} = 0$

$\vec{E} \neq 0$

involucro metallico

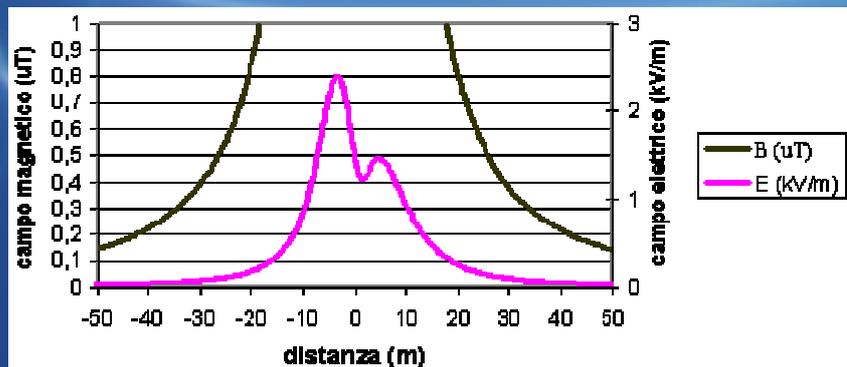
Gabbia di Faraday

L'involucro permette di schermare la zona interna dall'influenza di campi elettrici statici

La superficie metallica riflette le onde EM, quindi la gabbia funge da schermo nei confronti dei campi EM

Lo stesso vale se la superficie metallica presenta delle aperture di dimensione inferiore a  $\lambda$  (→ cemento armato)

Schermare una zona dalla presenza di campi magnetici non è altrettanto semplice. In questo caso, quindi, per diminuire l'intensità del campo serve allontanarsi dalla sorgente.



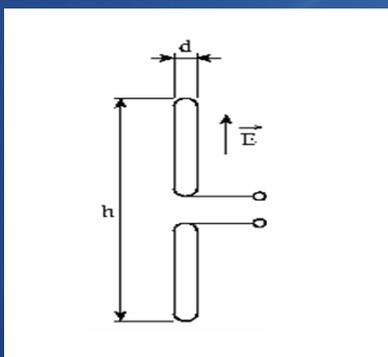
## Strumentazione

La struttura dei rivelatori di onde elettromagnetiche deve tenere conto del tipo di campo in cui verranno effettuate le misurazioni.



## Strumentazione

zona reattiva



sensore ad accoppiamento capacitivo

Il sensore ha una struttura aperta, costituita da due masse metalliche confinate in una regione tanto piccola che il campo elettrico si possa considerare uniforme in essa

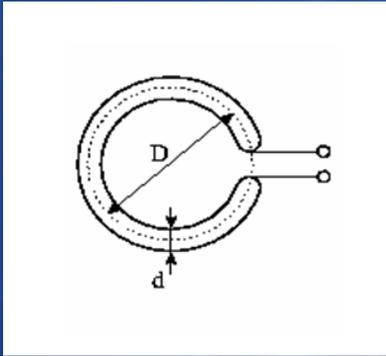
Per induzione elettrica, si formano sulle due masse delle cariche elettriche di segno opposto; la variazione temporale di tali cariche, originata dalla variazione del campo elettrico inducente, induce una corrente elettrica nel circuito di misura che collega le due masse.

La corrente è direttamente proporzionale all'ampiezza di E

Il sensore abbraccia un'area limitata (al limite nulla); il circuito di misura non deve possedere delle richiuse ad anello → il sensore è pressoché **insensibile al campo magnetico**

Date le sue piccole dimensioni → il sensore ha una **buona risoluzione spaziale**

Il più comune tra i sensori di questo tipo è il **dipolo corto**; ha i bracci molto sottili (diametro "d" molto minore della lunghezza "h") e si presenta quindi come un doppio stilo filiforme.



sensore ad accoppiamento induttivo

L'accoppiamento **induttivo** ha luogo se il sensore ha una struttura anulare chiusa che abbraccia una superficie tagliata dalle linee di forza del campo magnetico e di estensione tanto piccola da poter considerare uniforme il campo stesso su di essa

Per induzione magnetica, ai terminali dell'anello si forma una differenza di potenziale proporzionale all'intensità del campo magnetico ed alla sua frequenza.

$$\varepsilon = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial (B A_{\text{sensore}})}{\partial t} = -A_{\text{sensore}} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$B(t) = B_o \sin(f t + \varphi)$$

$$\varepsilon = -A_{\text{sensore}} B_o \omega \sin(\omega t + \varphi)$$

Il campo elettrico è uniforme nella zona di spazio occupata dal sensore, quindi complessivamente si ha una cancellazione delle tensioni da esso indotte in ogni tratto dell'anello → il sensore risulta pressoché **insensibile al campo elettrico**

Date le sue piccole dimensioni → il sensore ha una buona risoluzione spaziale

Nella regione dei campi radiativi "lontani" si possono eseguire misure di campo EM utilizzando liberamente i sensori ad accoppiamento **radiativo**, ovvero le **antenne**. Si tratta di strutture di grandi dimensioni, paragonabili o superiori alla lunghezza d'onda della radiazione misurata, che funzionano come elemento di transizione tra la propagazione nello spazio libero di un campo elettromagnetico e la propagazione guidata all'interno della linea di collegamento.

Quando un'onda che si propaga con le modalità dello spazio libero investe un'antenna, in uscita da questa è presente un segnale di ampiezza proporzionale all'intensità delle onde EM. La costante di proporzionalità fra queste due quantità ha le dimensioni di una superficie e prende il nome di **area equivalente o efficace** dell'antenna

antenna  
semi-logaritmicaantenna  
bi-conicaantenna  
a tromba

## Strumentazione

Il sensore deve essere in grado di operare alla frequenza del segnale ( $\rightarrow$  rapporto  $D/\lambda$ )

**banda passante:** specifica l'intervallo di frequenze a cui il dispositivo fornisce una risposta corretta, entro determinati margini di errore.

Può capitare che la sorgente sotto sorveglianza emetta contemporaneamente su più frequenze.

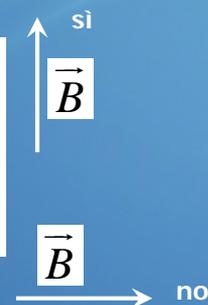
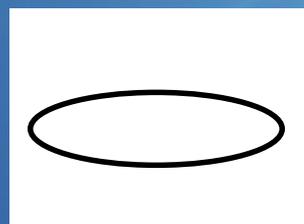
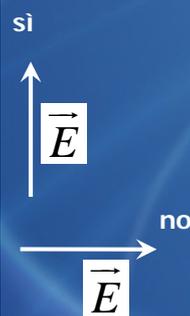
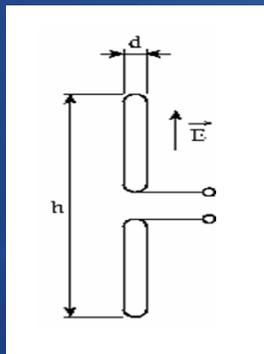
Si può operare a **banda stretta** utilizzando strumentazione con una ridottissima banda passante, centrata attorno a ciascuna delle frequenze a cui la sorgente emette.

Si può altrimenti operare a **banda larga**, usando uno strumento la cui banda passante abbracci tutto lo spettro emesso dalla sorgente. Lo strumento fornisce in questo caso una misura globale dell'intensità dei campi o della radiazione presente nel sito di misura.

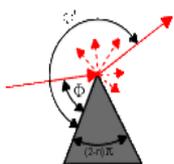
È inoltre necessario ricorrere alle misure a banda stretta anche qualora a banda larga si rilevi un valore complessivo dell'intensità di campo maggiore del limite specificato dalla normativa presa a riferimento; in questo caso occorre infatti determinare singolarmente il contributo di ciascuna sorgente, in modo da disporre dei dati necessari a pianificare le opportune procedure per la riduzione a conformità.

## Strumentazione

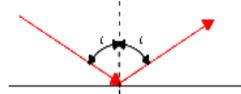
Attenzione: la polarizzazione delle onde elettromagnetiche può influire sulla lettura dello strumento



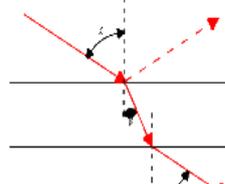
Attenzione: le onde elettromagnetiche, una volta emesse dalla sorgente, possono risentire di effetti di diffrazione, riflessione o trasmissione prima di giungere all'apparato di misura.



Diffrazione



Riflessione



Trasmissione

