



Corso di Master di secondo livello
*“Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio e
la gestione del territorio”*

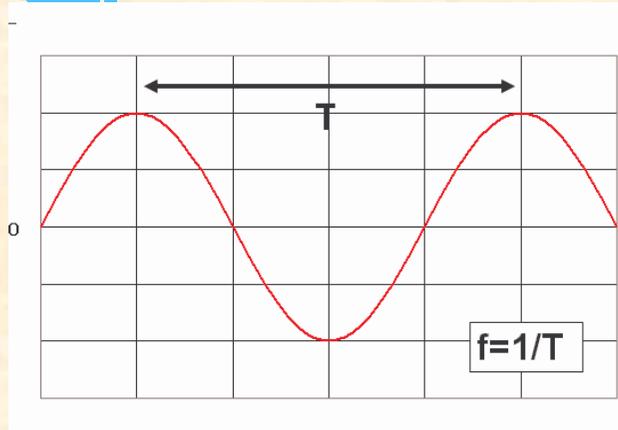
**Campi elettrici e magnetici a bassa frequenza:
sorgenti e metodi di valutazione**

Ing. Nicola Zoppetti – IFAC - CNR, Firenze

5 marzo 2008

- Cenni di Fisica dei campi a bassa frequenza.
- Caratteristiche degli Elettrodotti.
- Caratteristiche di una banca dati georeferenziata delle sorgenti: l'esempio di CERT (Catasto Elettrodotti Regione Toscana).
- Reperimento dei dati
- Metodi di calcolo del campo elettrico e magnetico a bassa frequenza.
- Esempi di valutazione.
- Possibili interventi per la mitigazione del campo magnetico.
- L'approccio CERT alla gestione di un modello del terreno.
- Vincoli imposti dalla normativa vigente e metodi utilizzabili per verificarli.
- (Misure di campo elettrico e magnetico a bassa frequenza).

Bassa frequenza



Campi lentamente variabili
(regime “quasi statico”)

Campo elettrico e magnetico disaccoppiati
(si calcolano e si misurano indipendentemente
l’uno dall’altro)

Campo elettrico generato
da distribuzioni di carica
libera

Campo magnetico generato
da correnti

Induzione di corrente

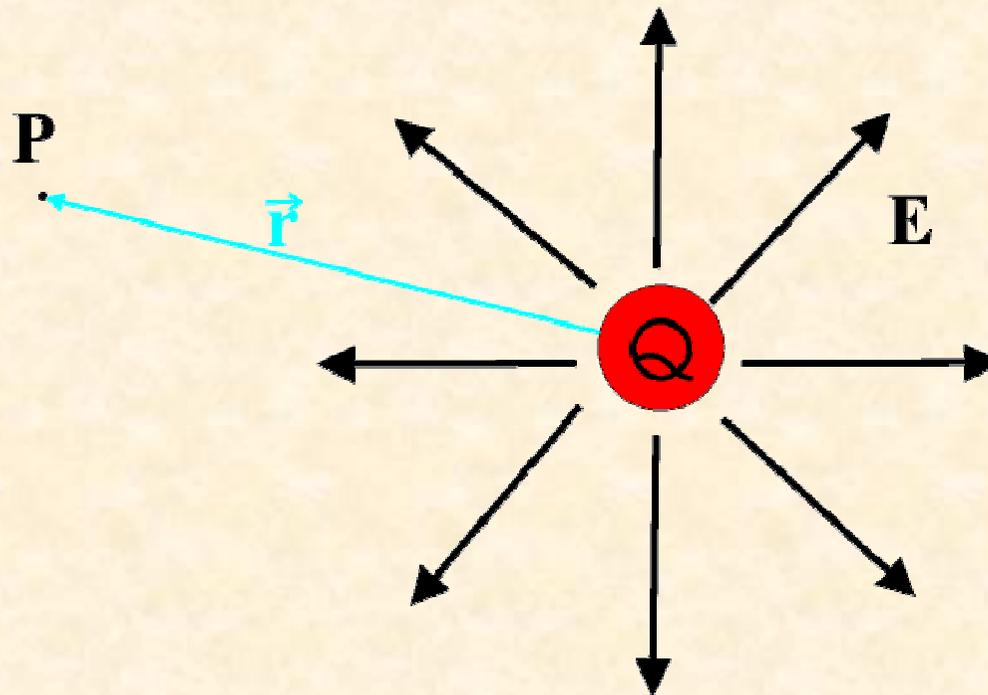
- La lunghezza d'onda è molto maggiore della massima dimensione della regione di spazio in cui è confinato il problema di interesse ($\lambda \gg L$, Regime “Quasi-statico”)

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad \varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

$$\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

	50 Hz	1 kHz	10 kHz	1 MHz
λ_0	6000 km	300 km	30 km	300 m

Campo elettrico



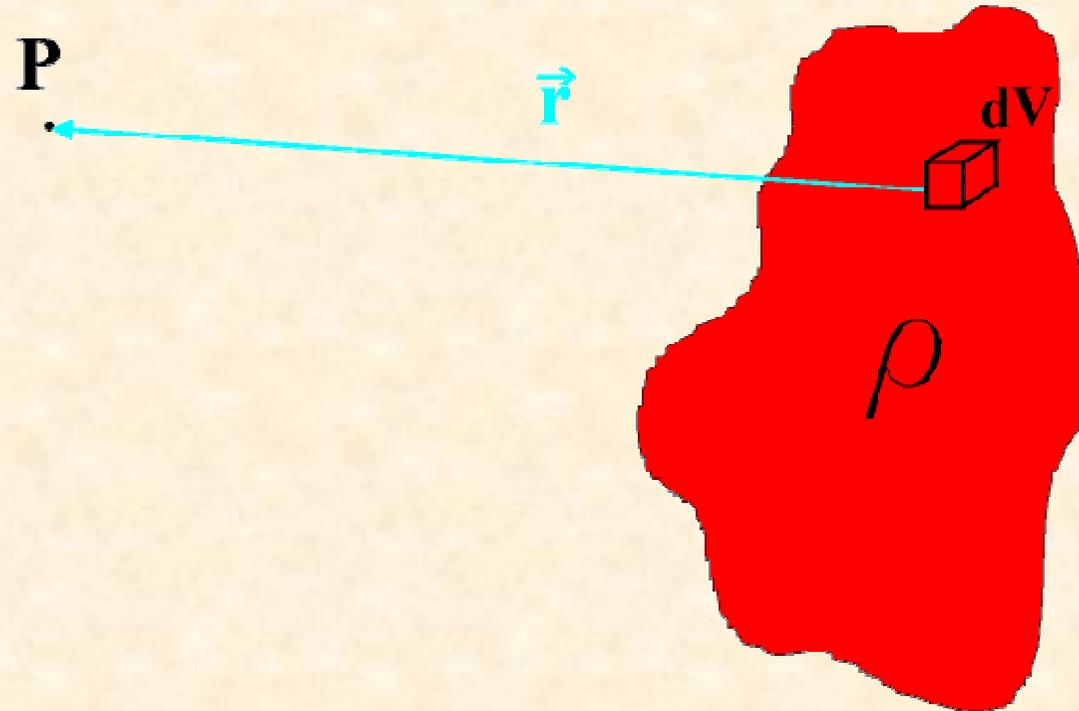
- Una carica q posta in P è sottoposta ad una forza

$$\vec{f} = q \cdot \vec{E}(P)$$

- Diretto “radialmente”
- Il verso del campo dipende dal segno della carica Q

$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q}{|\vec{r}|^3} \cdot \vec{r} \quad \left[\frac{V}{m} \right]$$

- La direzione del campo dipende dalla forma della distribuzione di carica
- Ogni volumetto di carica dV contribuisce al campo totale come una carica puntiforme $Q = \rho \cdot dV$

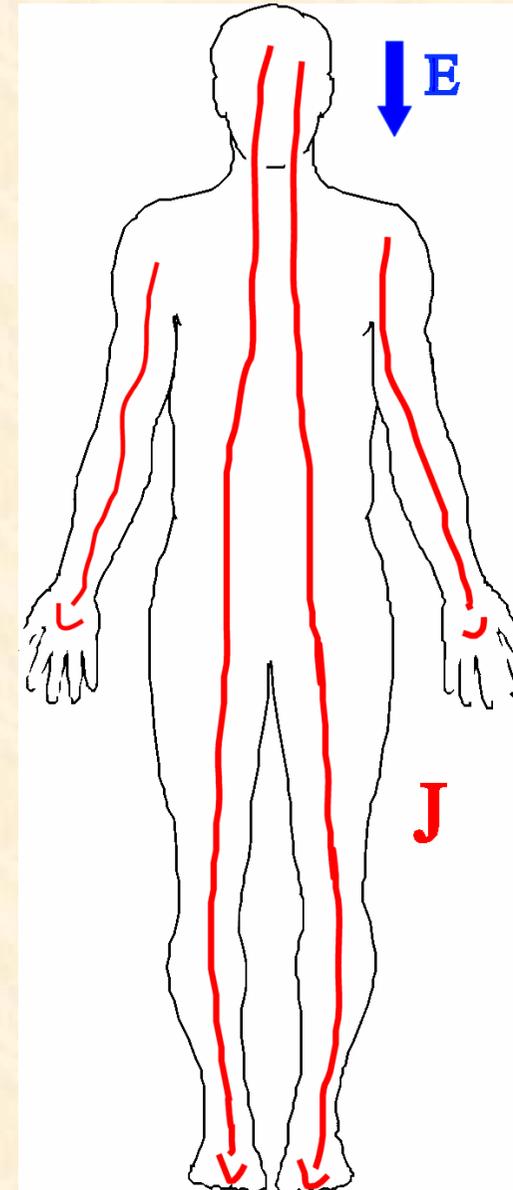


$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \int_V \frac{\rho}{|\vec{r}|^3} \cdot \vec{r} \cdot dV$$

densità di corrente [A/m²]

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

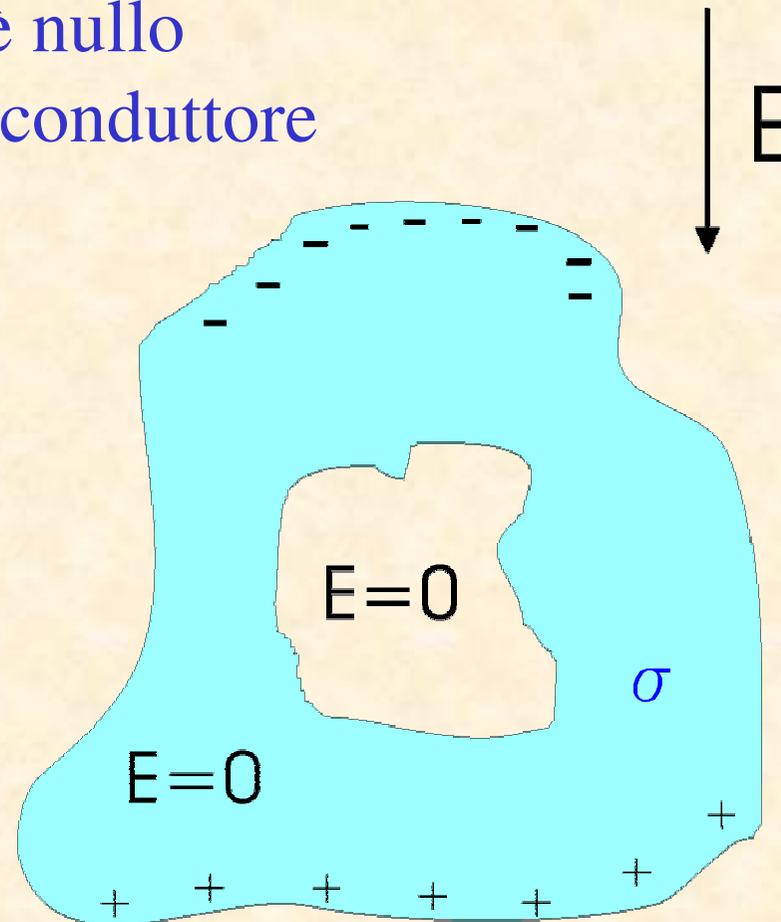
conducibilità [S/m]



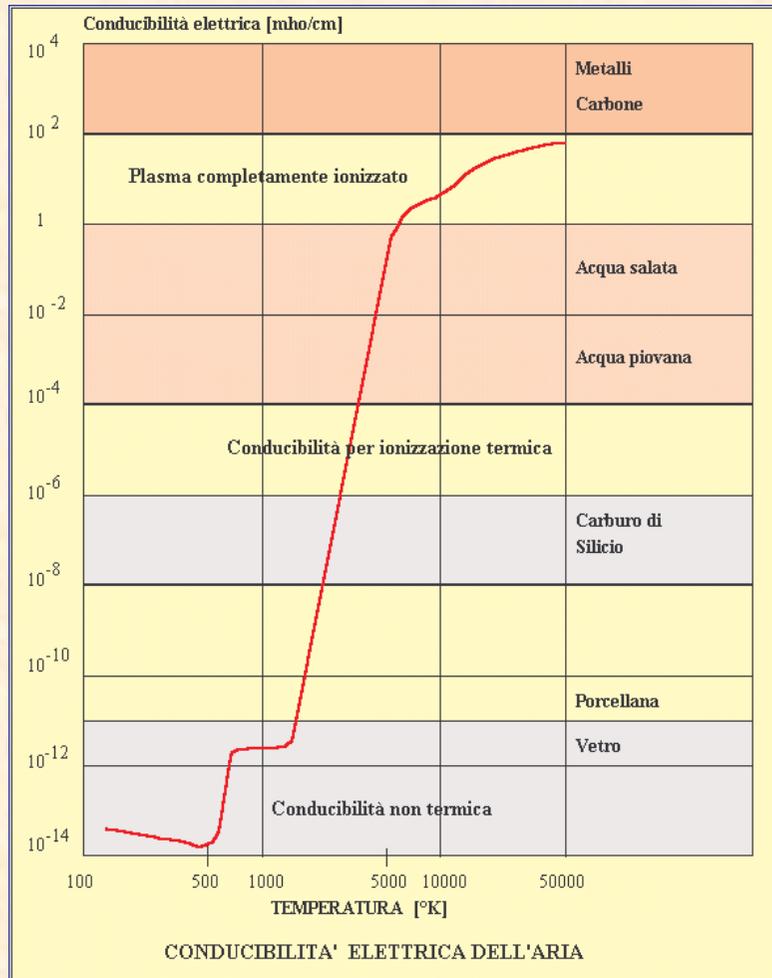
Campo elettrico in presenza di conduttori



Il campo elettrico all'interno di un conduttore è nullo, come è nullo all'interno di un "guscio" conduttore cavo.



Se per un materiale è soddisfatta la condizione $\sigma \gg 2\pi f \epsilon$ si dice che questo, alla frequenza f , si comporta come un **buon conduttore**.



Aria:

$$\sigma_{aria, Tambiente} \approx 10^{-14} \frac{mho}{cm} = 10^{-12} \frac{S}{m}$$

a 50 Hz: $\omega \epsilon_0 \approx 2,8 \cdot 10^{-10}$

a 1 MHz: $\omega \epsilon_0 \approx 5,5 \cdot 10^{-5}$

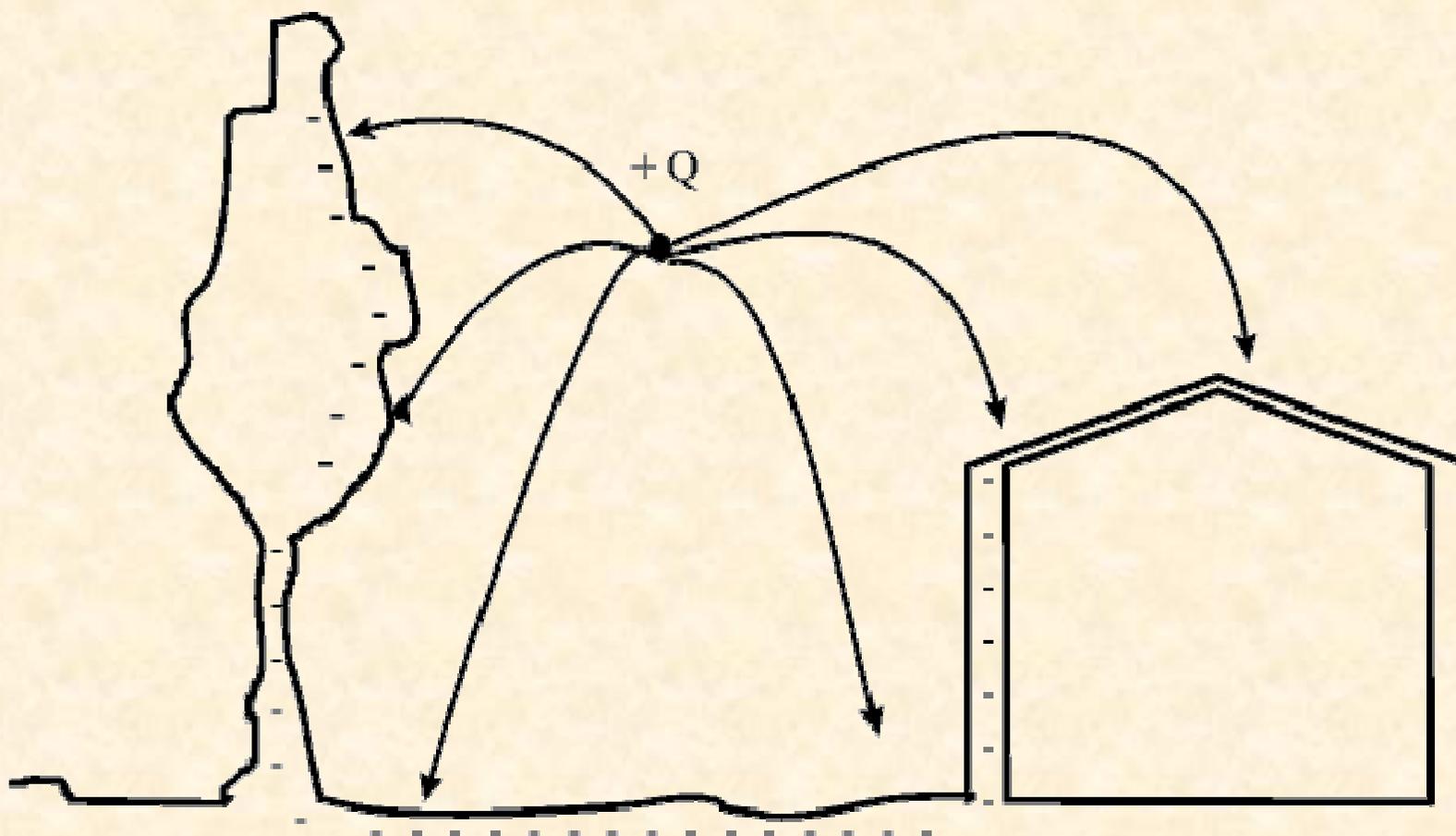
~~$\sigma_{aria} \gg \omega \epsilon_0$~~

Terreno:

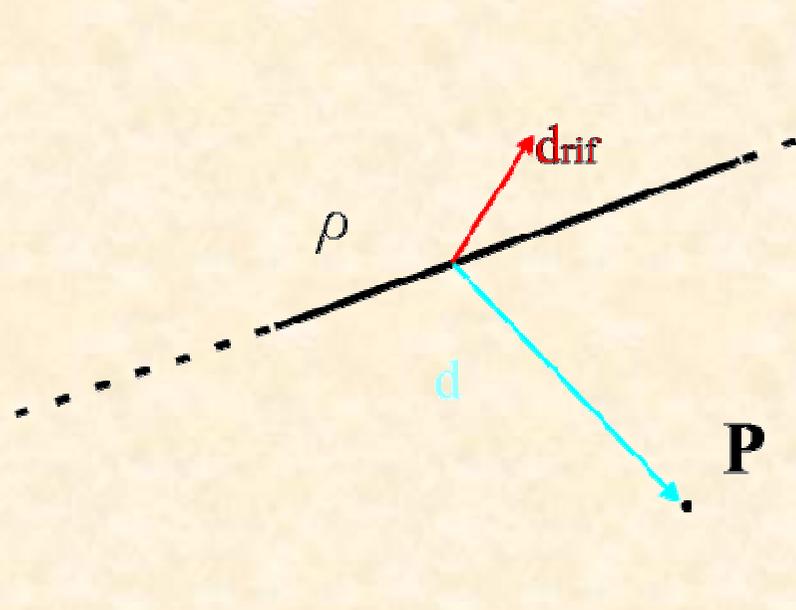
$$\sigma_{terrenoumido} \approx 10^{-1} \frac{S}{m}$$

$\sigma_{terreno} \gg \omega \epsilon_{terreno}$

Alle basse frequenze la vegetazione ed i manufatti si comportano come buoni conduttori e sono quindi in grado di schermare il campo elettrico.



Il campo elettrico (campo vettoriale) in un punto può essere espresso in termini di una grandezza scalare detta **potenziale** che è l'energia potenziale per unità di carica associata nel punto considerato. La **differenza di potenziale** tra due punti rappresenta l'energia necessaria a spostare una carica di 1 Coulomb da un punto all'altro.



$$\phi(P) = -\frac{\rho}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{d_{rif}}$$

$$\vec{E}(P) = -\nabla\Phi(P) = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 d} \cdot \hat{d}$$

Campo magnetico

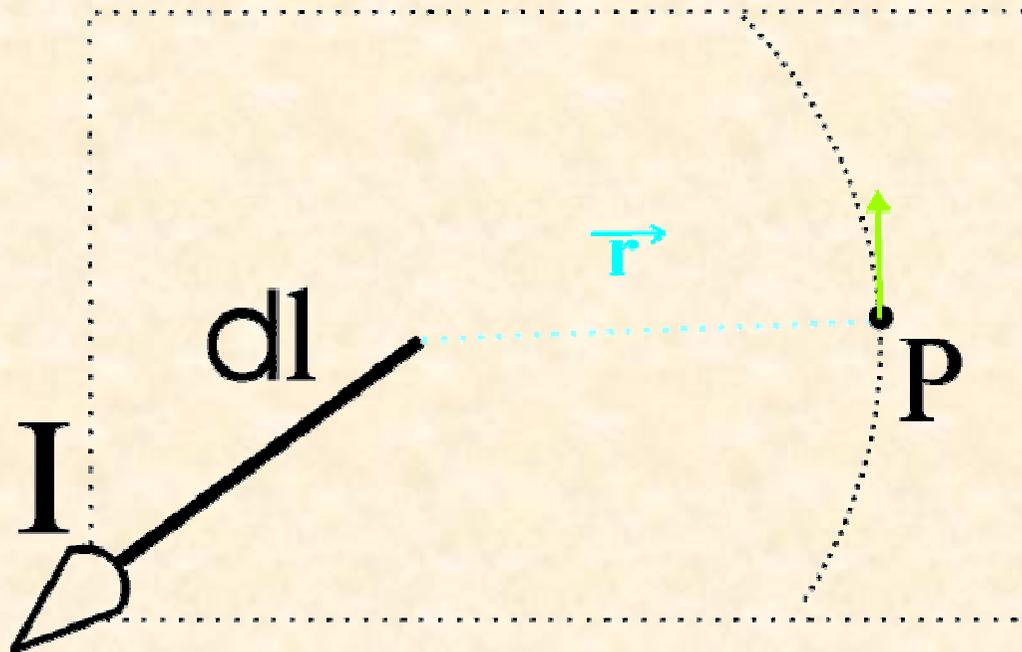


- Non sono sinonimi: il campo magnetico si misura in **Ampere/metro** [A/m] l'induzione magnetica in **Tesla** [T].
- Le norme tecniche e legislative si riferiscono all'**induzione magnetica**
- Come unità di misura viene spesso usato il **microtesla** [μT] che corrisponde a 10^{-6}T a volte si usa il **Gauss** [G] che equivale a 10^{-4}T e quindi a $100 \mu\text{T}$.
- Il legame tra il campo magnetico e l'induzione magnetica in un punto è dato dalla cosiddetta **permeabilità magnetica** del mezzo che in aria ed in tutti i mezzi non ferromagnetici vale $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [Henry/m].
- A differenza del campo elettrico il campo magnetico agisce solo sulle cariche in movimento.

$$\vec{B}(P) = \mu \cdot \vec{H}(P)$$

$$\vec{f} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}(P)$$

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3}$$

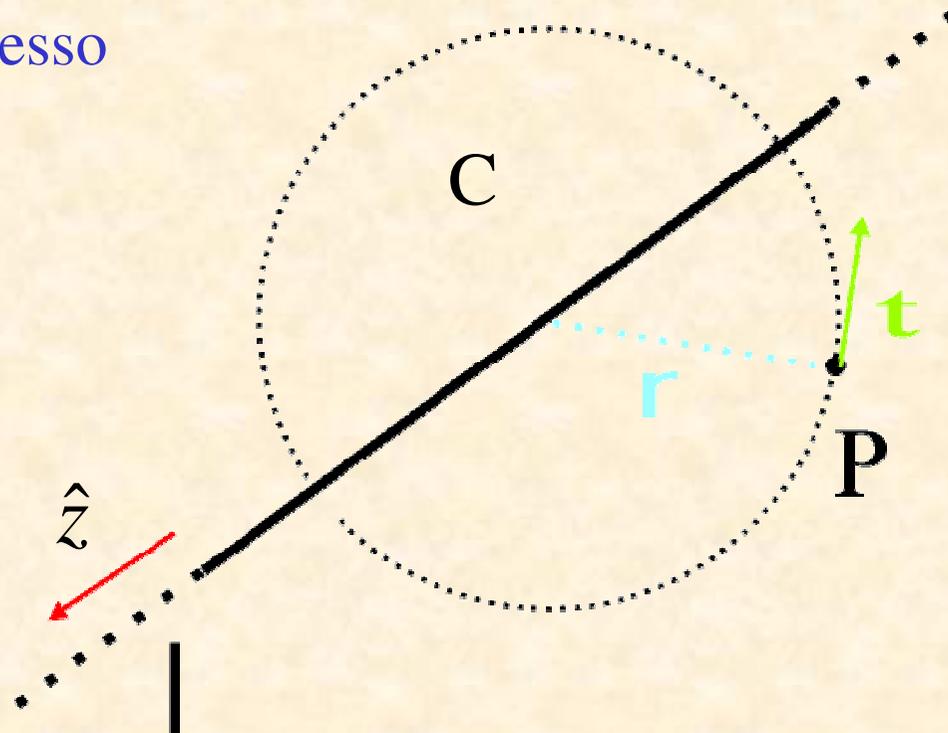


- L'induzione magnetica generata da un elemento infinitesimo di corrente giace sul piano ortogonale all'elemento di corrente stesso.

- L'induzione magnetica appare diretta in senso antiorario se guardata dalla parte da cui si vede la corrente scorrere verso se stessi.

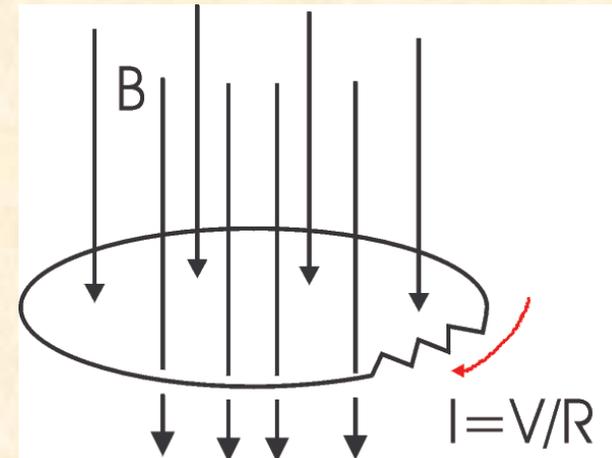
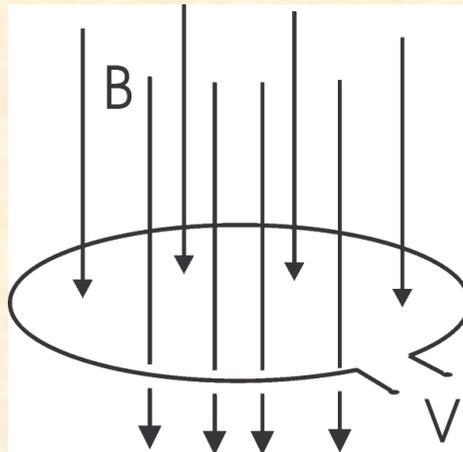
Legge di **Biot-Savart**: il campo magnetico generato da un conduttore rettilineo ed indefinito decade con l'inverso della distanza dal conduttore stesso

$$\vec{B}(P) = \frac{\mu \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{\hat{z} \times \vec{r}}{r^2} = \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot r} \cdot \hat{t}$$



Legge di **Faraday**: in una spira immersa in un campo magnetico variabile viene indotta una forza elettromotrice proporzionale alla variazione del flusso dell'induzione magnetica concatenato alla spira stessa.

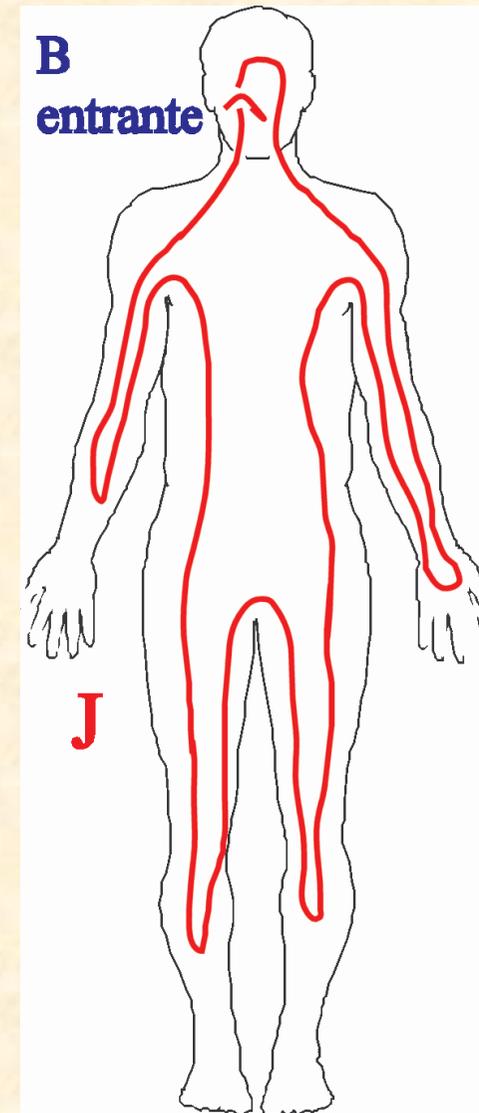
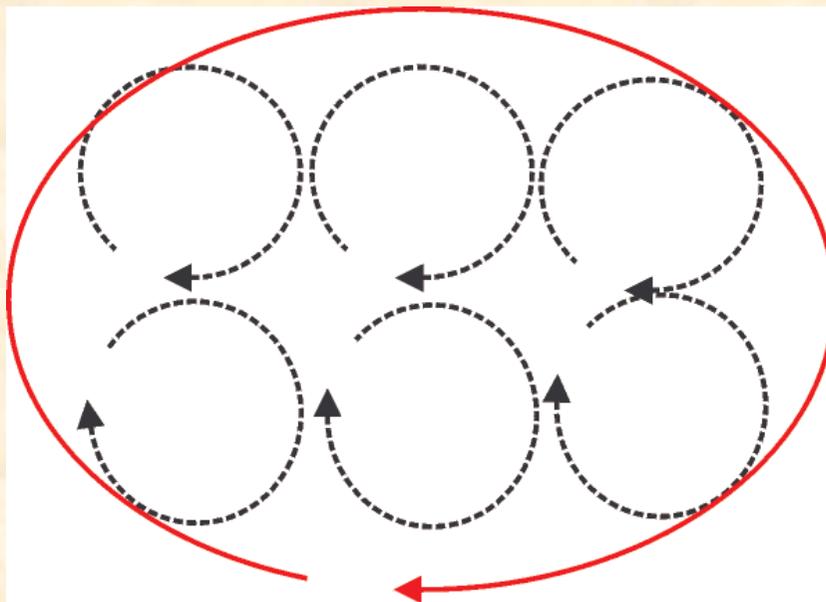
$$\left\{ \begin{array}{l} V = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ \Phi = \iint_{S_{spira}} \vec{B} \cdot d\vec{S}_{spira} \end{array} \right.$$



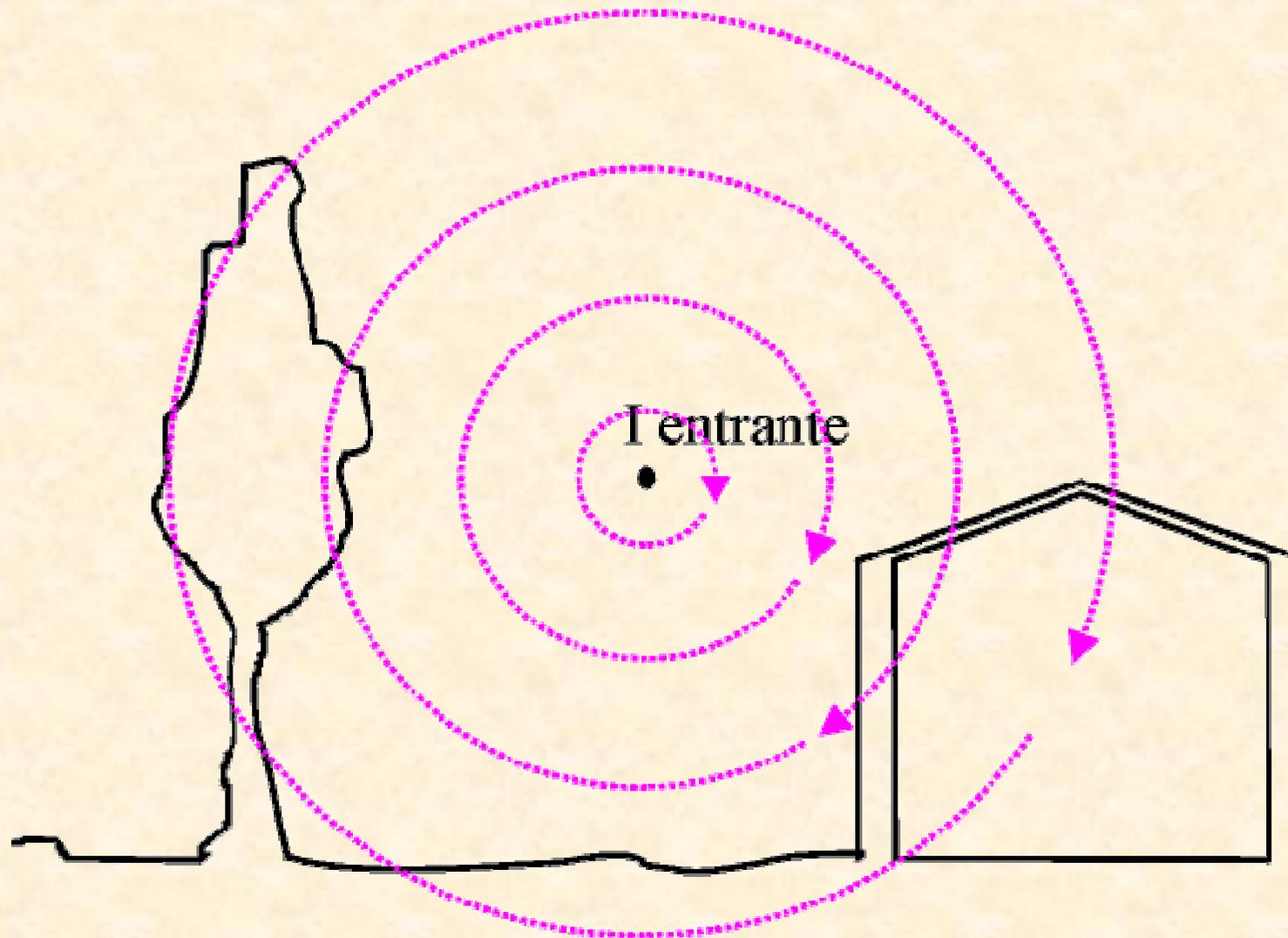
Campo magnetico: induzione di corrente



Le correnti indotte nell'organismo dal campo magnetico non fluiscono al suo esterno e questo implica che sia difficile misurarle in modo non invasivo.



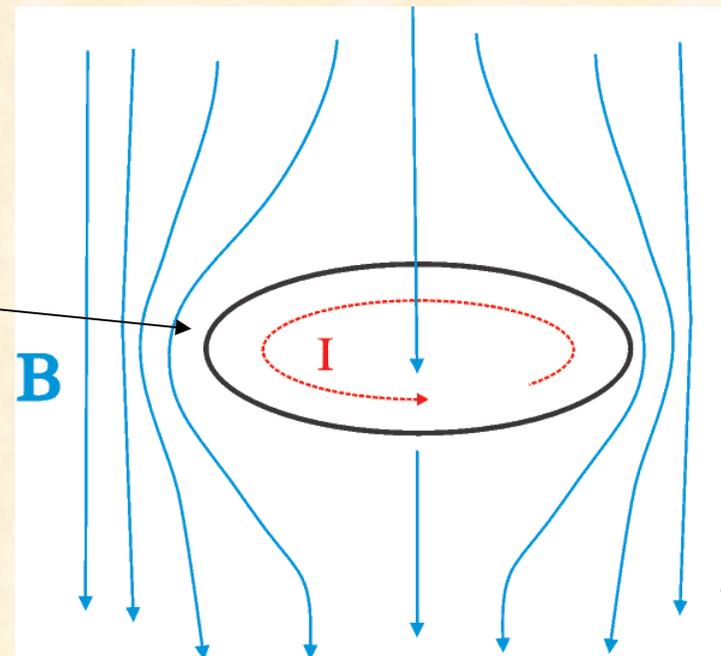
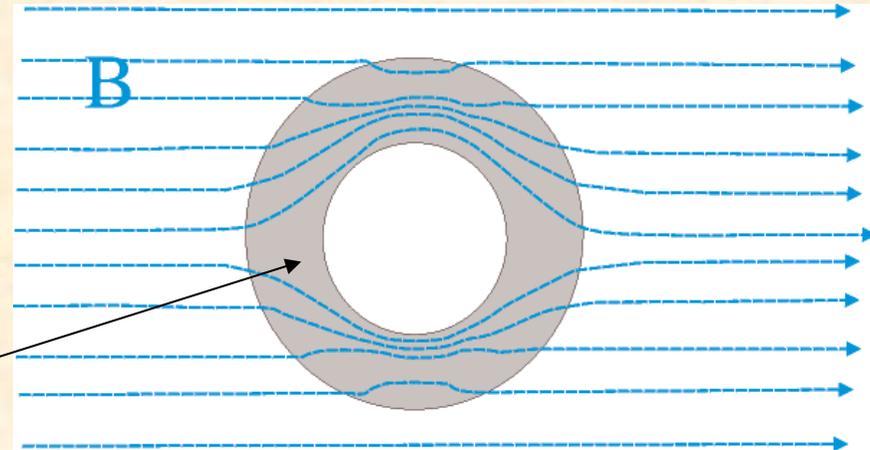
Alle basse frequenze la vegetazione ed i manufatti non sono in grado di schermare il campo magnetico



Campo magnetico: presenza di materiali ferromagnetici e spire in corto circuito

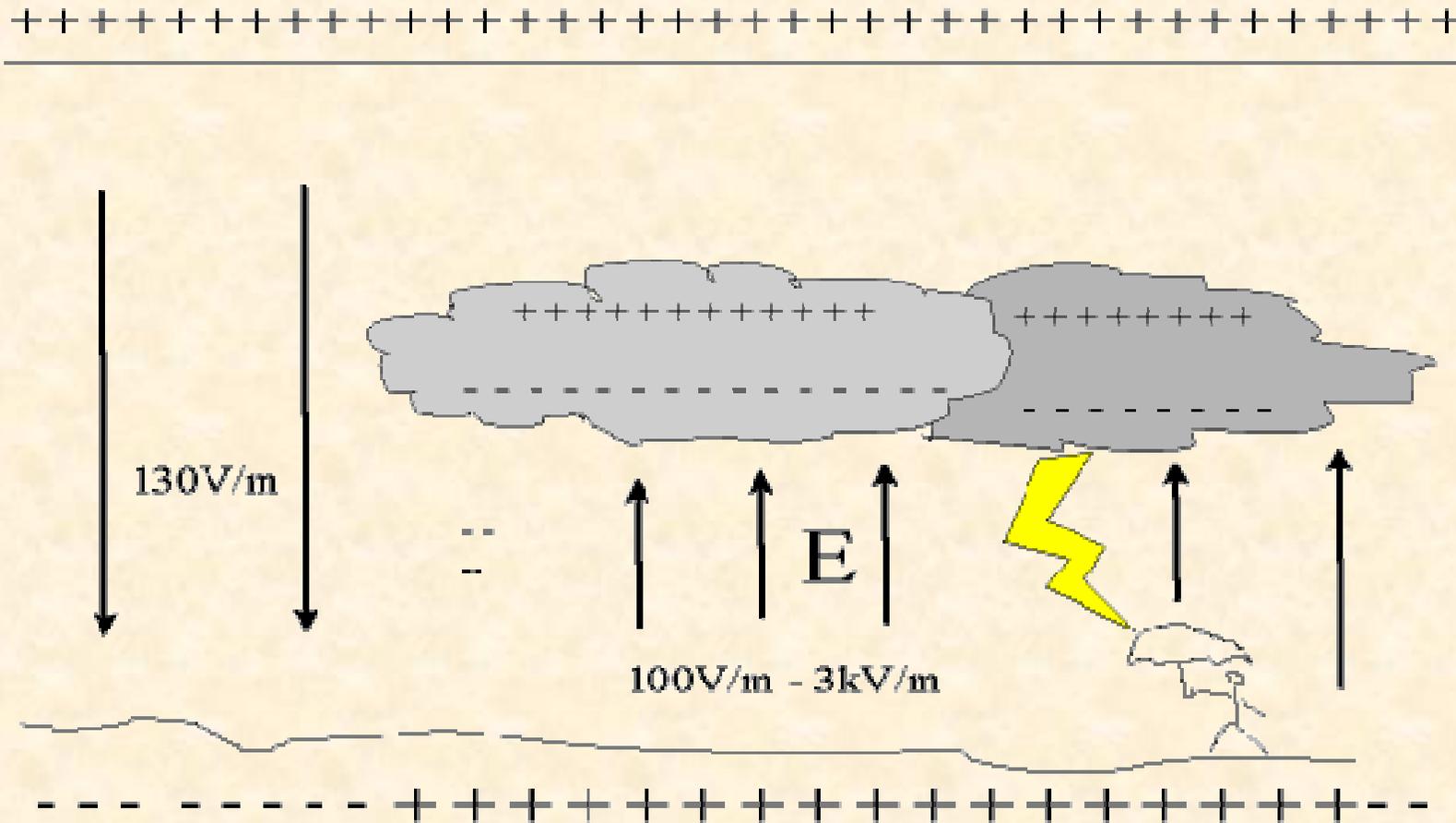


La distribuzione dell'induzione magnetica viene modificata in presenza di materiali ferromagnetici ("incanalamento" delle linee di flusso) o in presenza di spire chiuse di materiale fortemente conduttivo (metalli).



Sorgenti naturali

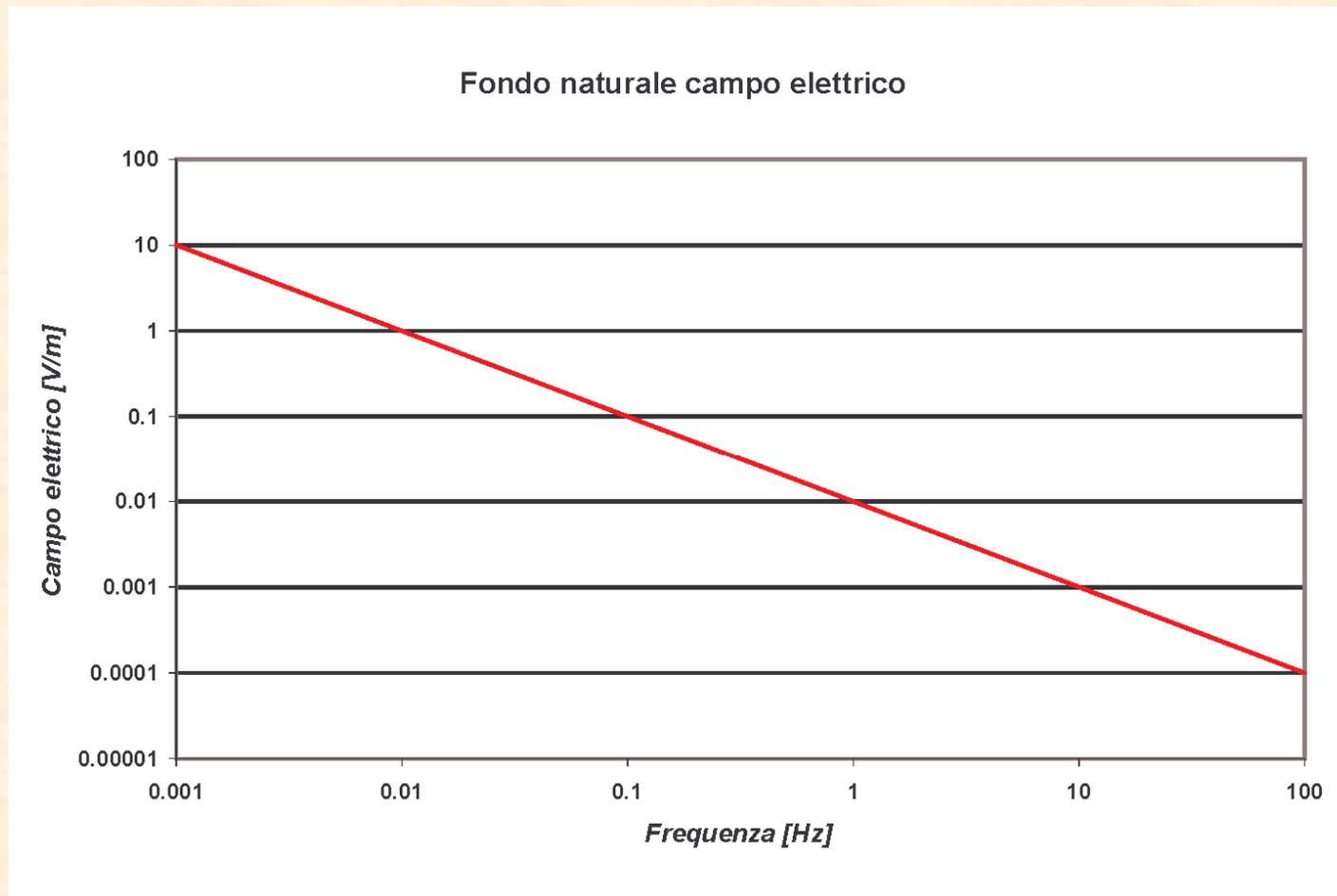
Sorgenti naturali: campo elettrico statico



Sorgenti naturali: campo elettrico variabile



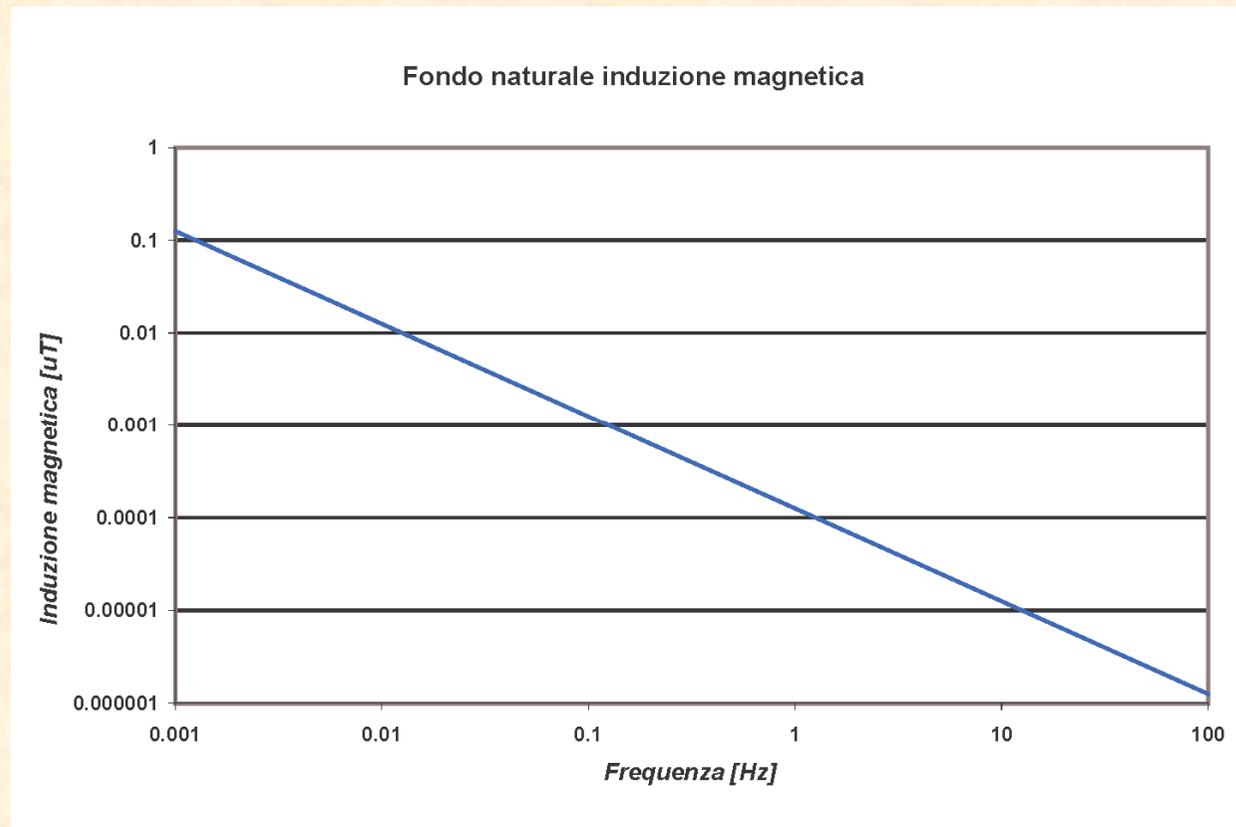
È dovuto principalmente ai fulmini ed in misura minore alle microvariazioni del campo magnetico terrestre.



Campo magnetostatico: 35 μT all'equatore, 70 μT ai poli

Componenti variabili nel tempo:

- 0.001-5 Hz : attività geomagnetica
- 5-1000 Hz : attività solare e fulmini



Sorgenti imputabili all'uomo

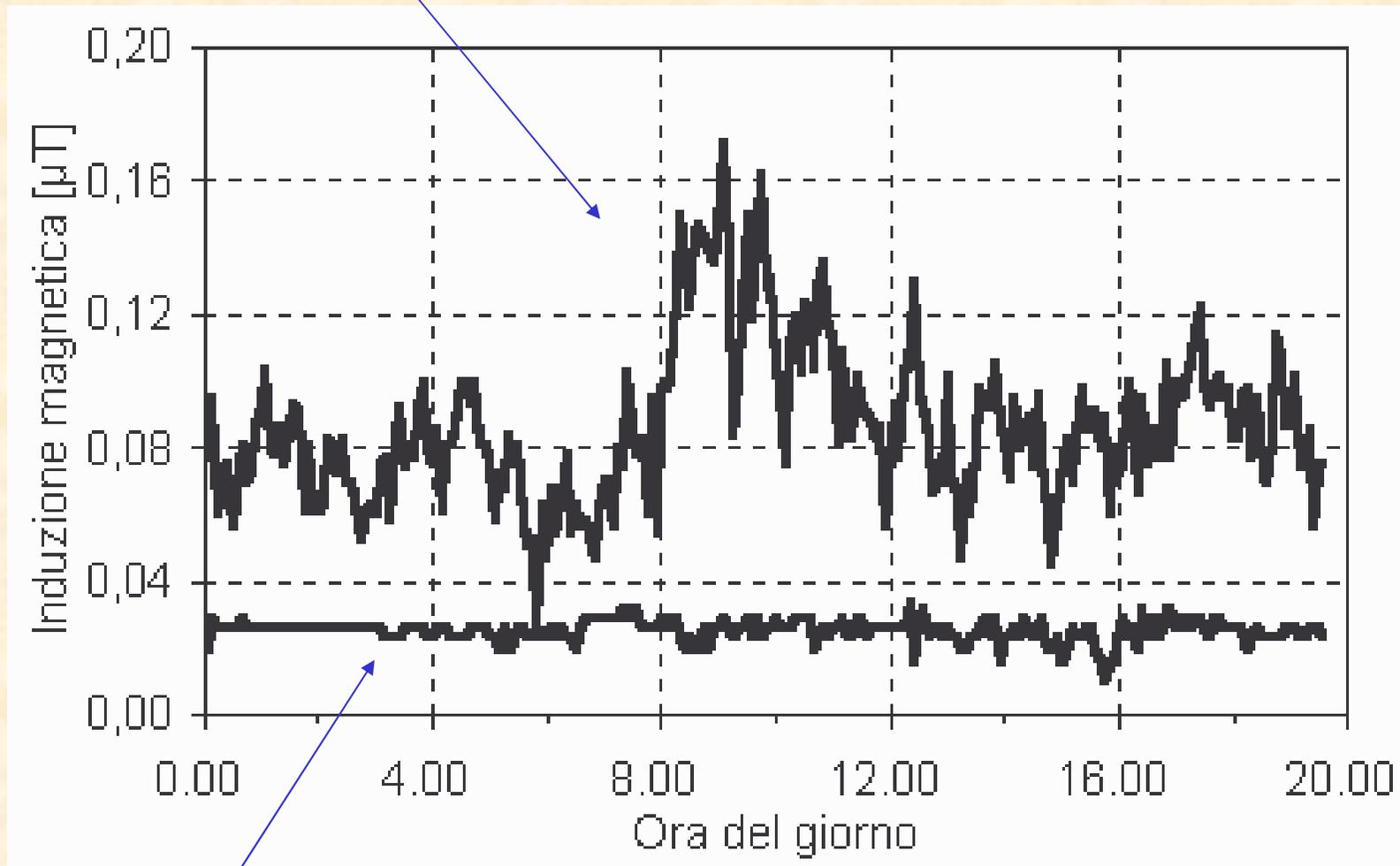
Classificazione delle sorgenti a bassa frequenza



Frequenza	Sorgente	Tipo di emissione	Campi emessi
50-60 Hz	Produzione trasporto e distribuzione dell'energia elettrica (centrali, stazioni, cabine elettrodotti aerei ed interrati)	Accidentale	Elettrico e magnetico
50-60 Hz	Utilizzo dell'energia elettrica (impianti elettrici ed apparecchi utilizzatori)		
fino a 3 kHz	Varchi magnetici (sistemi antifurto e per la rilevazione dei transiti)	Intenzionale localizzata	Magnetico
fino a 50 kHz	Sistemi per il riscaldamento ad induzione magnetica		

Sorgenti di campi magnetici a bassissima frequenza nell'ambiente domestico

Appartamento in condominio urbano



Abitazione singola in quartiere periferico semirurale

Il campo magnetico del fondo a 50 Hz negli ambienti domestici presenta una notevole variabilità temporale a breve e medio termine, nella quale è possibile talvolta riconoscere una ciclicità giorno/notte.

Esso risulta più elevato negli appartamenti condominiali e minore nelle abitazioni singole; ciò potrebbe essere dovuto all'influenza del cablaggio comune e al contributo degli appartamenti limitrofi.