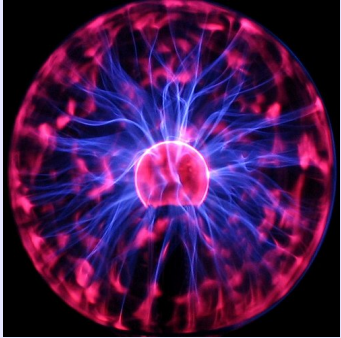


Le 4 forze della natura:

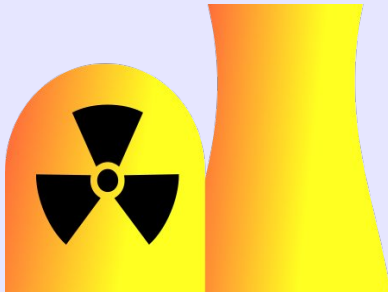
Forze elettromagnetiche



Forze gravitazionali



Forze nucleari forti



Forze nucleari deboli



Elettromagnetismo

Per la stragrande maggioranza, i fenomeni fisici comunemente osservati (in laboratorio e nella vita quotidiana) sono fenomeni **elettromagnetici**, ad es.:

- forze d'attrito di contatto
- forze di resistenza viscosa
- forze legate al magnetismo, es. terrestre
- forze elastiche, di reazione e di coesione
- forze tra atomi e molecole nella materia
- forze “chimiche” - es. biomolecole
- la luce è un'onda elettromagnetica

Elettrostatica

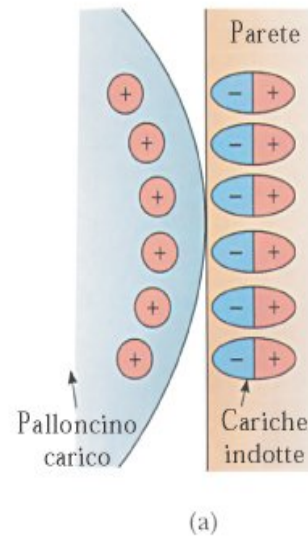


Figura 19.6

(a) Un palloncino carico induce delle cariche sulla superficie di una parete. (b) Un pettine carico attira dei pezzettini di carta a causa dello spostamento di cariche nella carta. La carta è neutra ma polarizzata. (*Fundamental Photographs, NYC*)

strofinando un palloncino sui capelli in una giornata secca, palloncino e capelli si caricano elettricamente

piccoli pezzetti di carta si attaccano fra loro e al pettine sfregato in una giornata secca

Evidenze sperimentali

esiste carica **positiva** e **negativa**

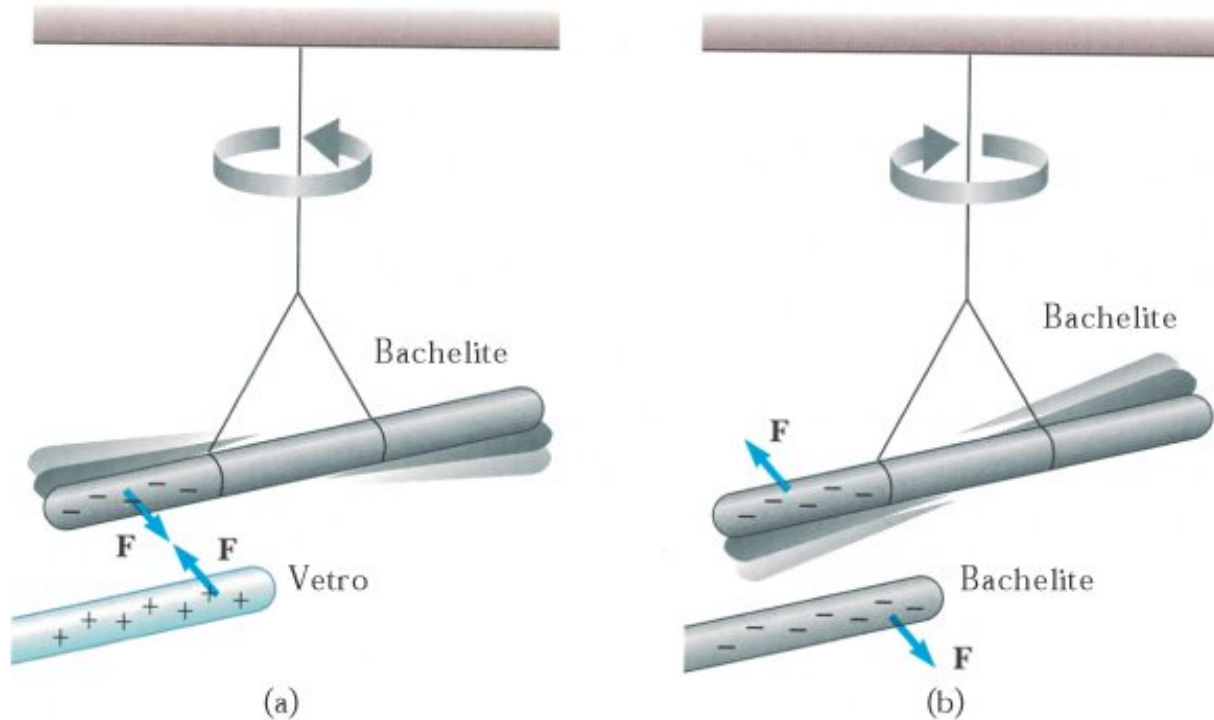


Figura 19.2

(a) Una bacchetta di bachelite, carica negativamente e sospesa a un filo, è attirata da una bacchetta di vetro carica positivamente. (b) Una bacchetta di bachelite carica negativamente è respinta da un'altra bacchetta di bachelite carica negativamente.

attrazione:

cariche dello stesso tipo si attirano

repulsione:

cariche dello stesso tipo si respingono

Legge di Coulomb

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

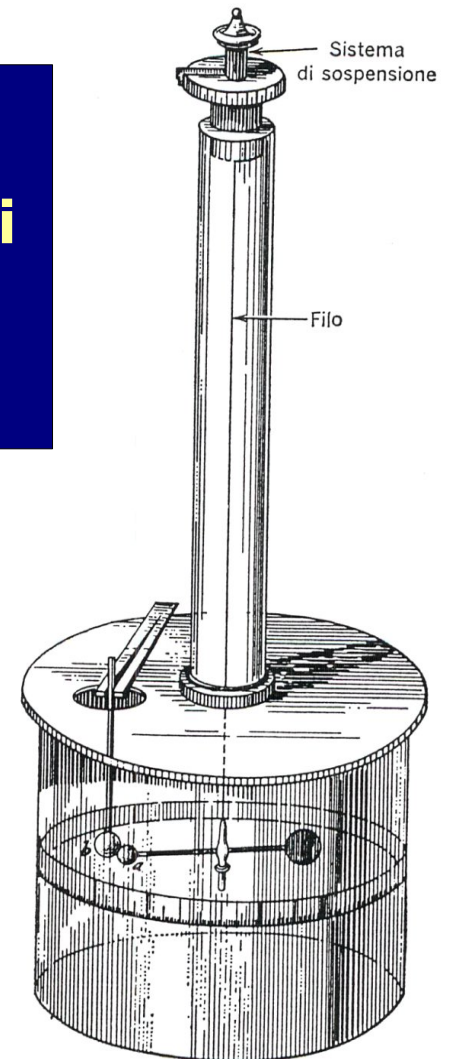
validità:

- **cariche puntiformi**
- **ferme**
- **nel vuoto**

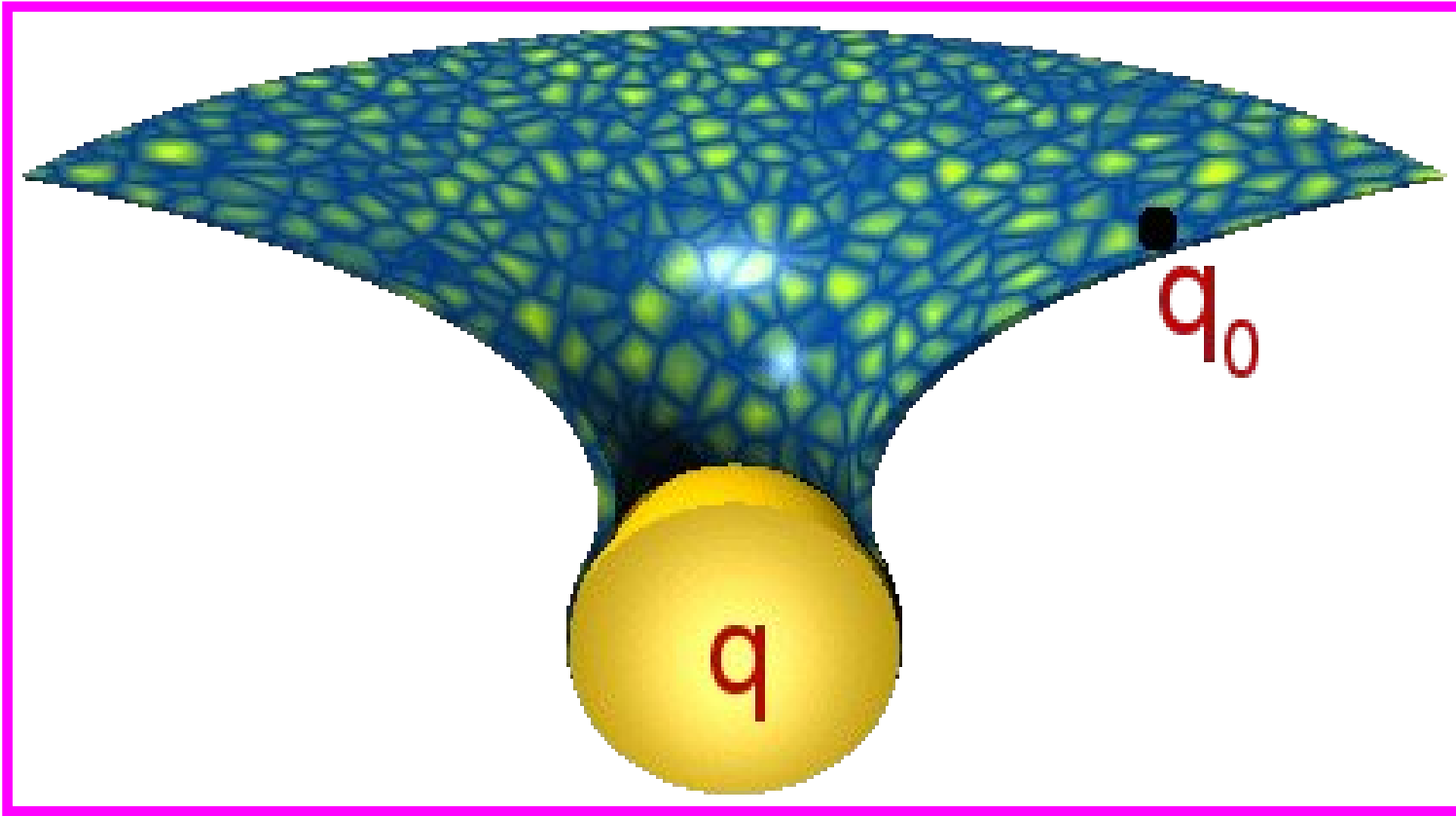
costante di proporzionalità $= 1/(4\pi\epsilon_0)$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N m}^2)$$

quindi 2 cariche di 1 C a 1 m di distanza si respingono con una forza pari a circa $9 \cdot 10^9$ N, uguale alla forza peso di un milione di tonnellate



Campo elettrico

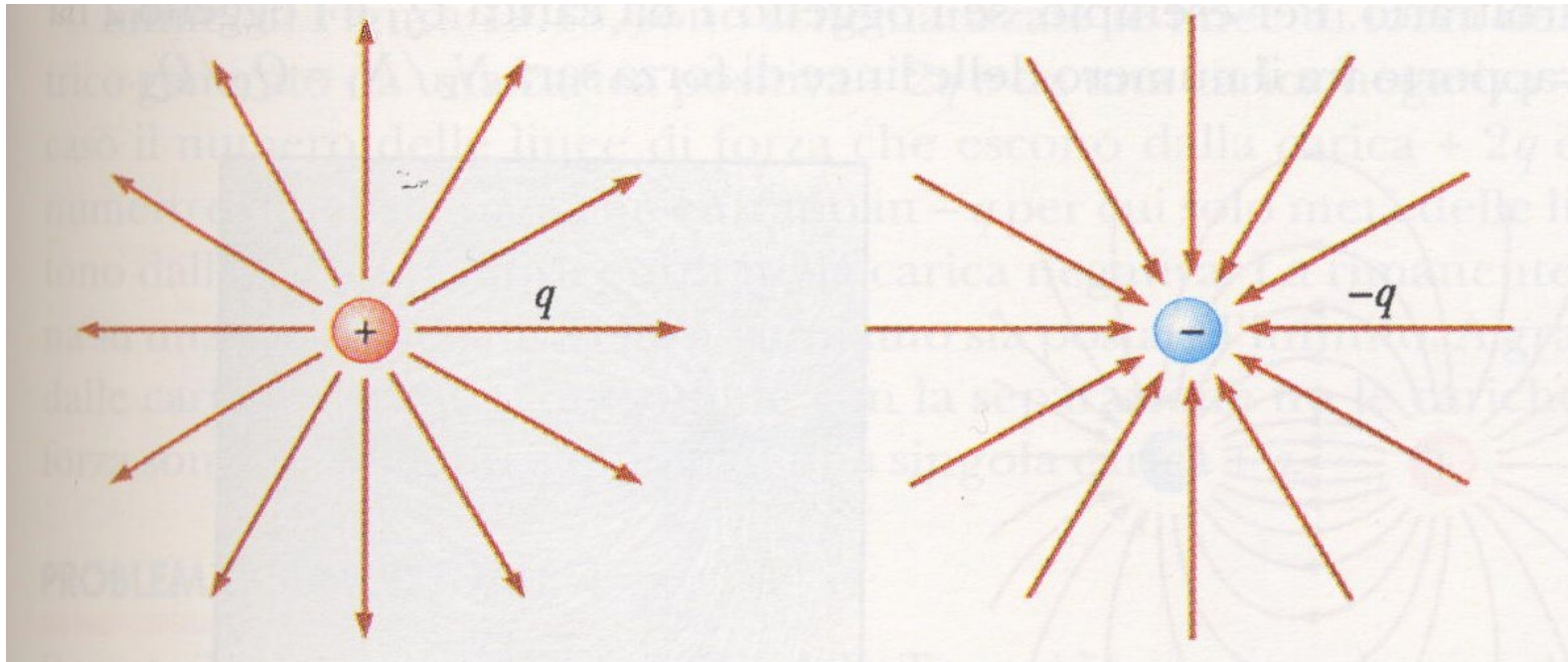


$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

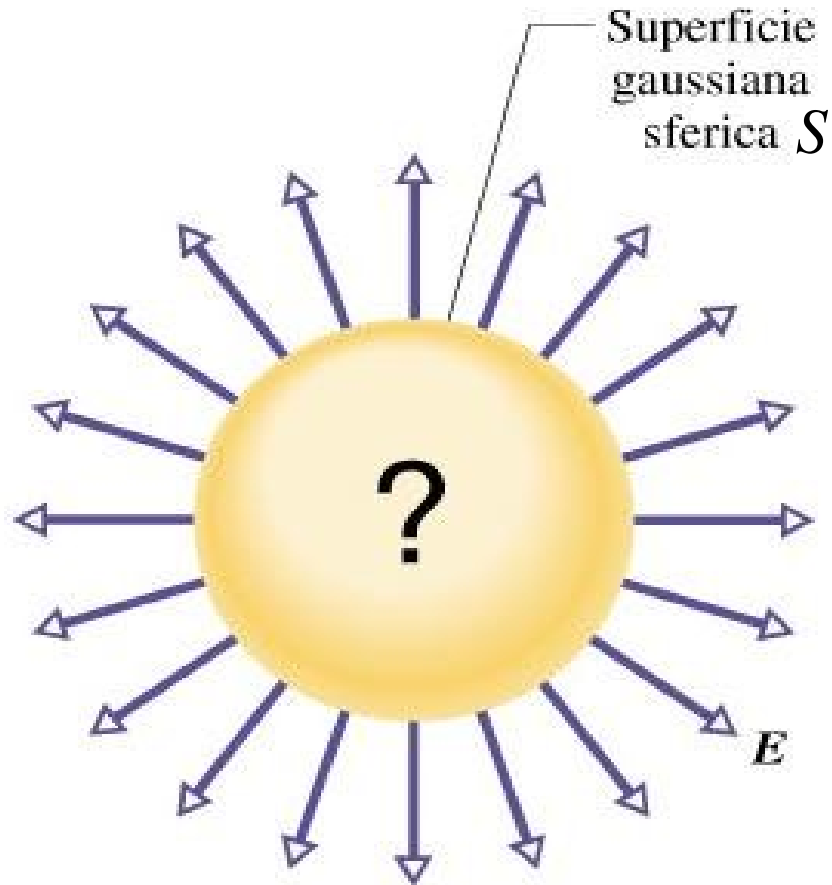
q (sorgente) \Rightarrow deforma il telo, e così una carica deforma lo spazio
q₀ (carica di prova) \Rightarrow subisce una forza che segue la curvatura del campo

Le linee di forza del campo elettrico

- Sono una rappresentazione del campo
- Sono le linee tangenti ad $\vec{E}(P)$ in ogni punto $P(x,y,z)$ dello spazio
- $\vec{E}(P)$ generato da carica q puntiforme \Rightarrow Linee di forza **radiali**
- vanno da cariche positive a cariche negative



Legge di Gauss



definizione: $\Phi(\vec{E}) \equiv \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{A}$

$$\Phi(\vec{E}) = q/\epsilon_0$$

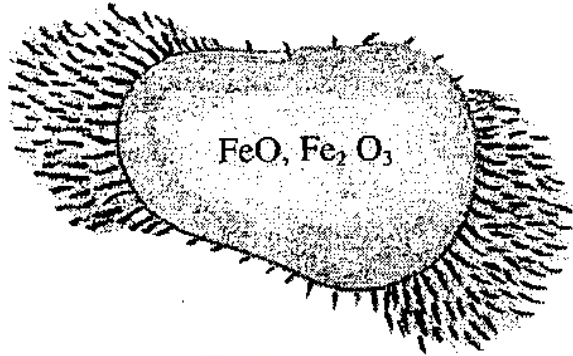
attraverso qualunque
superficie **chiusa**

vero in generale:

flusso Φ del campo elettrico \vec{E}
=

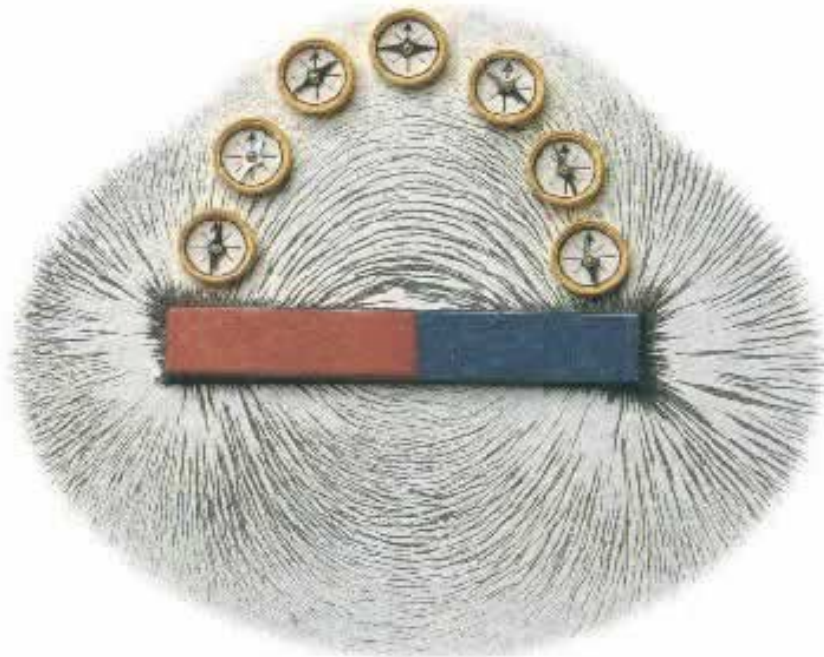
carica totale q *all'interno* della
superficie, divisa per la costante
elettrom. $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$

Fenomeni magnetici



La magnetite attira limatura di ferro:

- proprietà **non uniforme** nel materiale;
- si manifesta in determinate parti.

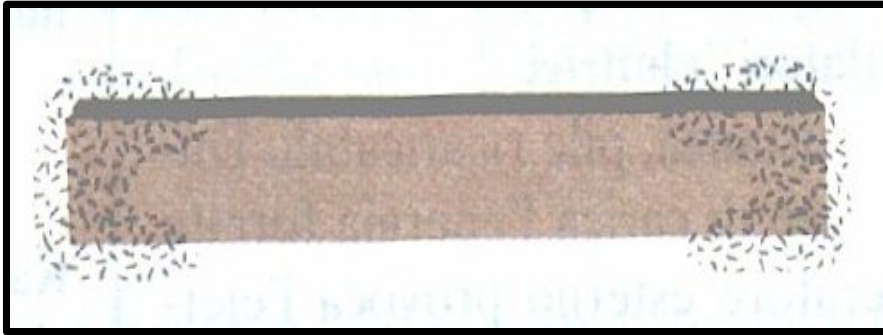


campioni cilindrici o parallelepipedi magnetizzati (**magneti**) attirano la limatura soprattutto ai “**poli**”

Osservazioni sperimentali

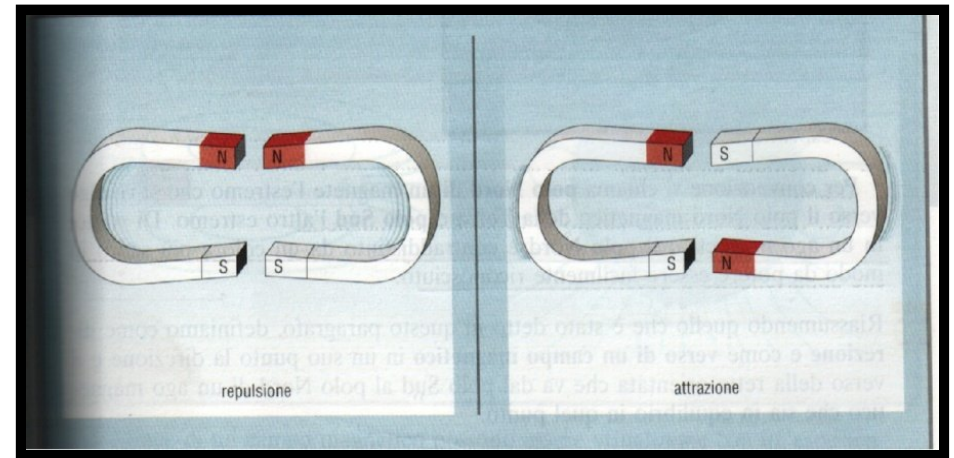
Forza magnetica

attrattiva



alcuni metalli (ferro, nichel) e isolanti (magnetite) **magnetizzati** attirano limatura di ferro, acciaio ed altri metalli

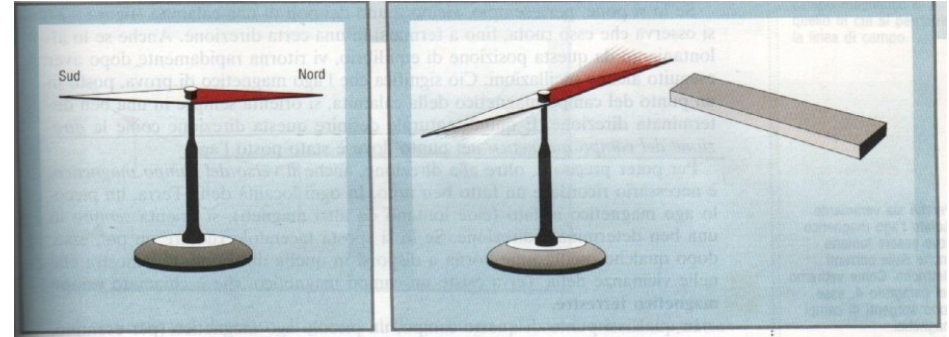
repulsiva / attrattiva



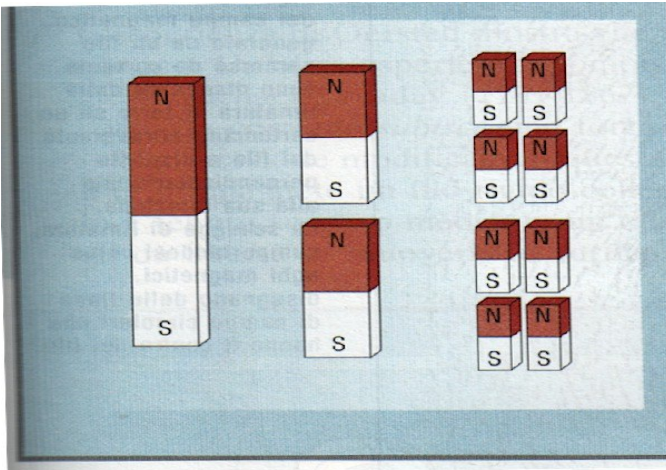
estremi di magneti di polarità uguale/opposta si respingono/attirano

Osservazioni sperimentali

può indurre un
momento di rotazione



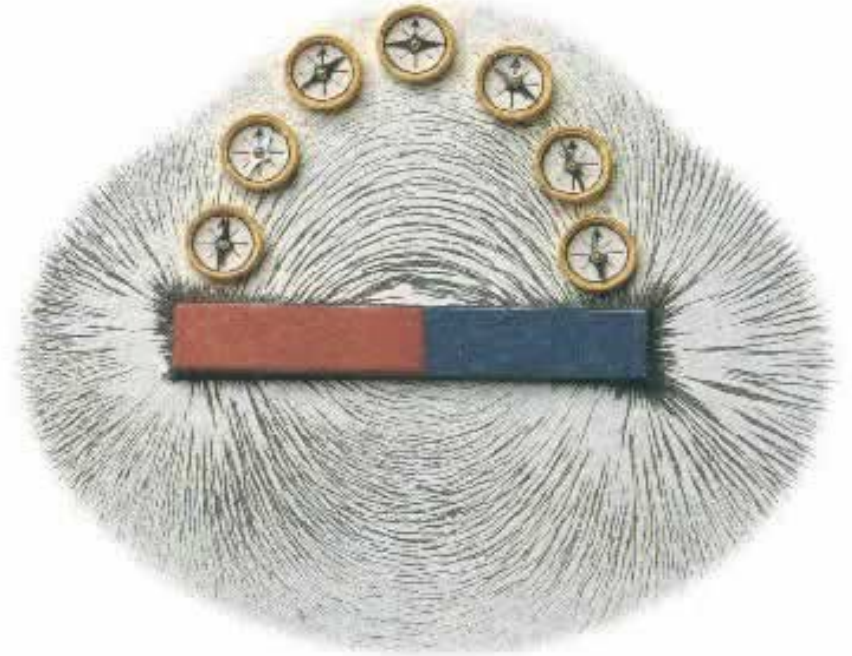
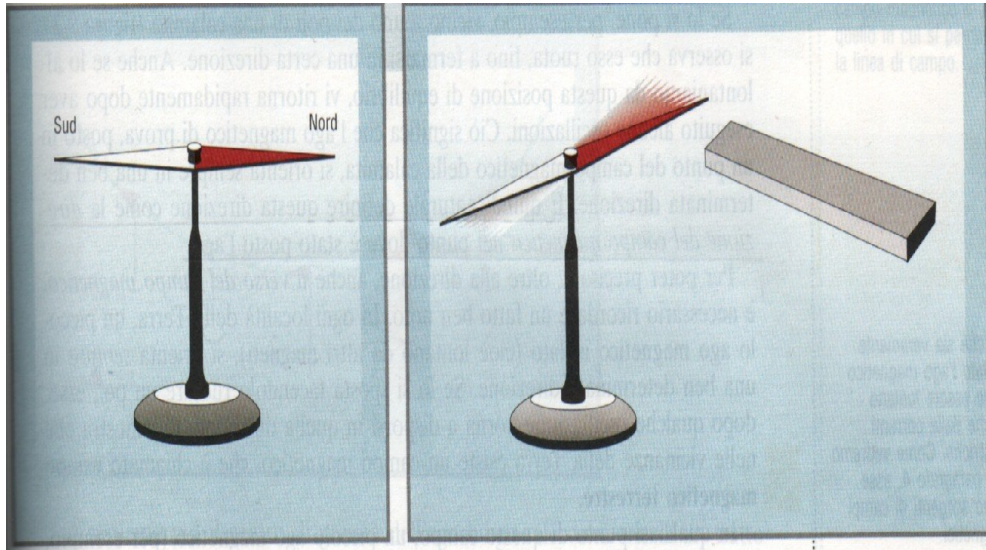
un pezzetto di magnetite fa **cambiare orientamento** a una sottile lamina di magnetite in equilibrio su una punta o sospesa con un filo



non esiste un polo magnetico
isolato (**monopolo**): tagliando
a metà una calamita
compaiono **sempre due poli**

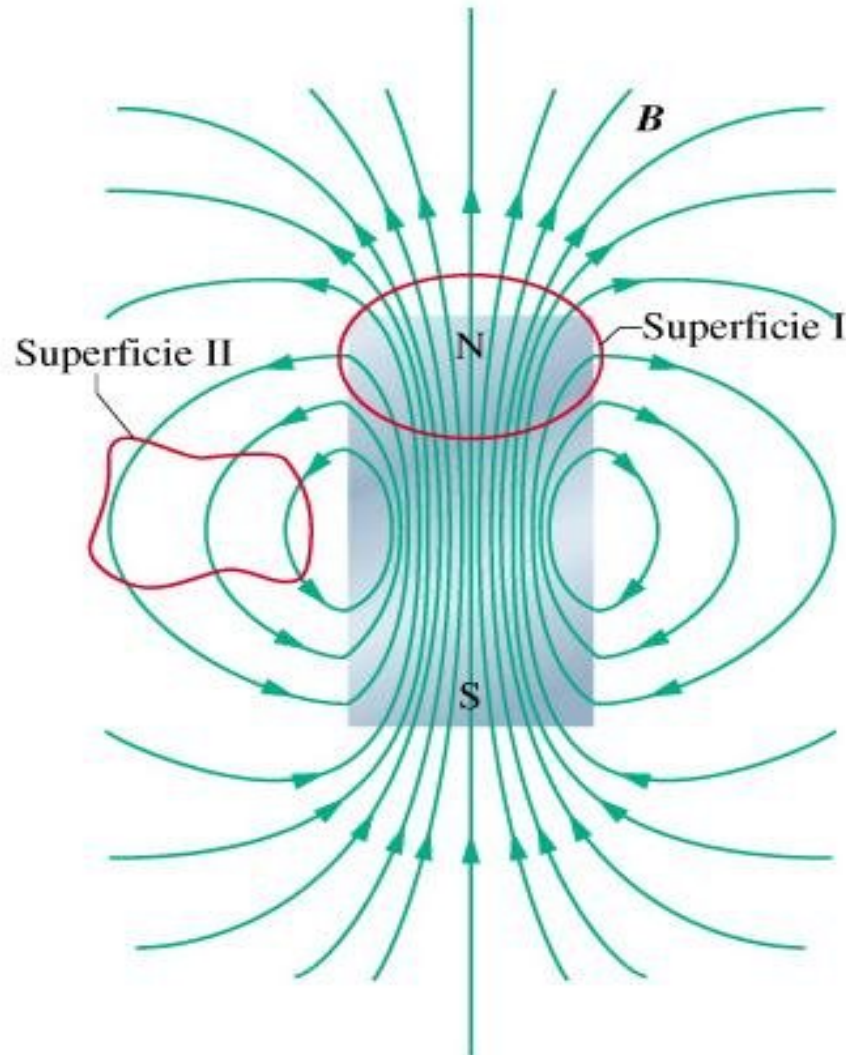
Il campo magnetico

un insieme di magneti (o di cariche in moto) genera un **campo magnetico B**



in ogni punto, definisco **direzione** e **verso** del campo **B**
utilizzando come **sonda** un piccolo **ago magnetico**
(come in elettrostatica, dove si usa invece una carica di prova q_0)

Teorema di Gauss



$$\Phi(\vec{B})=0$$

attraverso **qualunque**
superficie **chiusa**

in natura

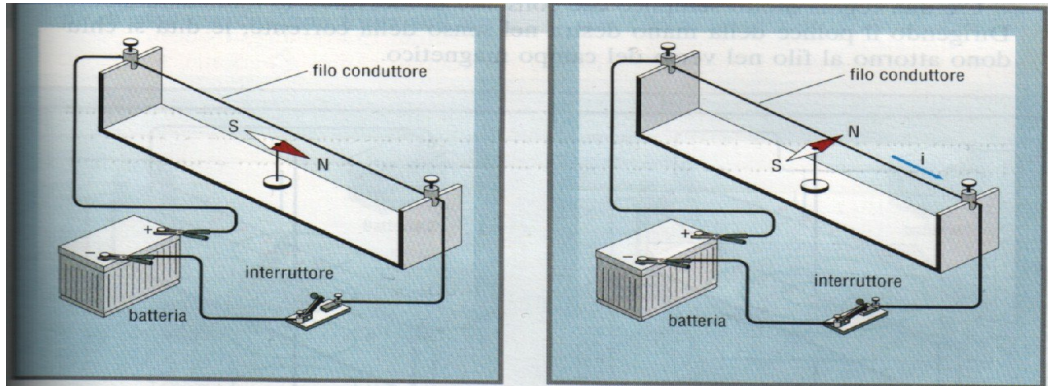
**non esistono cariche
magnetiche isolate**



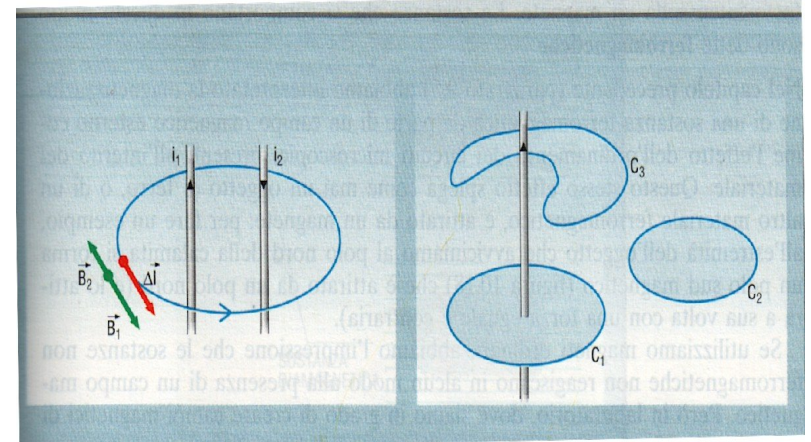
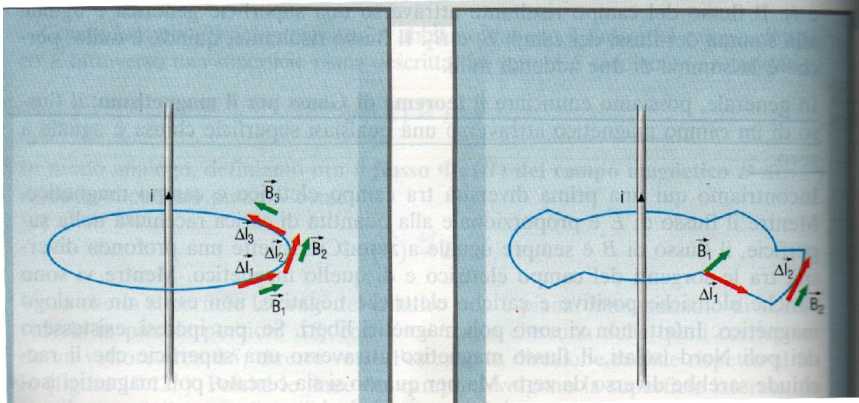
**non esistono sorgenti
di campo magnetico**

Circuitazione di Ampere

campi magnetici non hanno bisogno di materiali magnetici, bastano **correnti**



filo percorso da corrente
fa cambiare orientamento
ad ago magnetico



$$\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l} = i / (c^2 \epsilon_0)$$

$$\mu_0 = 1 / (c^2 \epsilon_0)$$

$$\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l} = (i_1 - i_2) / (c^2 \epsilon_0)$$

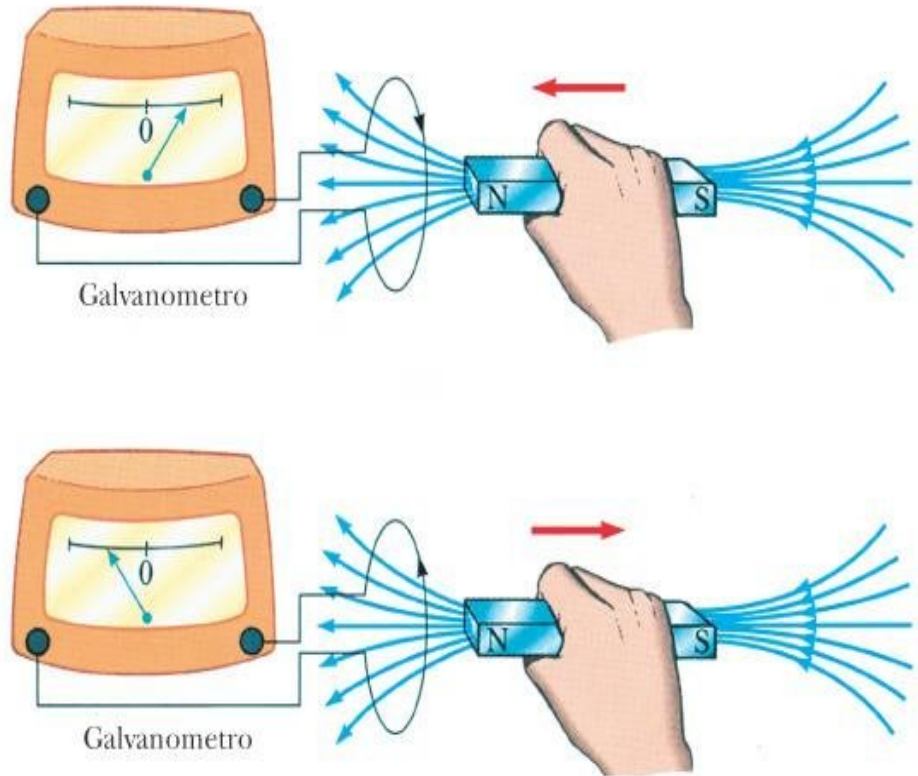
Induzione elettromagnetica

E correnti possono produrre campi magnetici? Solo se in movimento relativo!

Fenomeno nuovo:

induco una corrente elettrica in un circuito se:

- campo **B** stazionario, circuito si muove (flusso **tagliato**)
- circuito fermo, campo **B** varia nel tempo (flusso **concatenato**)



Legge di Faraday-Lenz

effetto diretto: non è l'induzione di una **corrente**, ma di una **forza elettromotrice**

L'azione della **f.e.m.** tende ad **opporsi** a qualsiasi variazione di campo magnetico (del **flusso** del campo magnetico)

$$\text{f.e.m.} = -\partial\Phi(\vec{\mathbf{B}})/\partial t$$

attraverso qualunque superficie **S(C)** il cui bordo è il circuito **C**

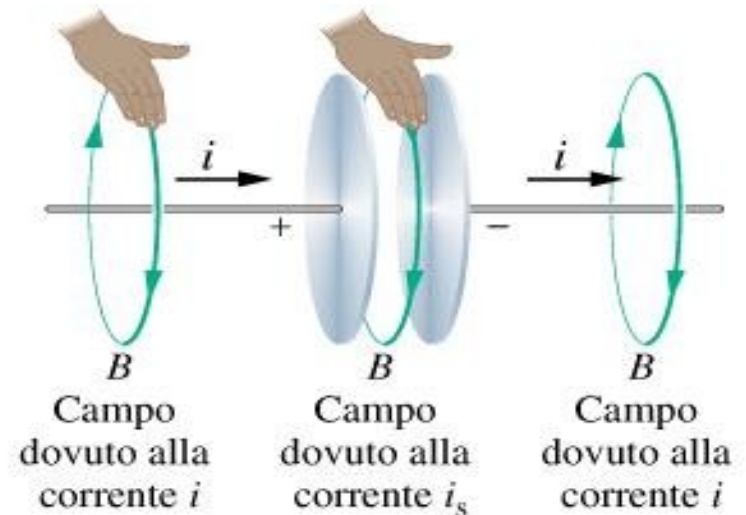
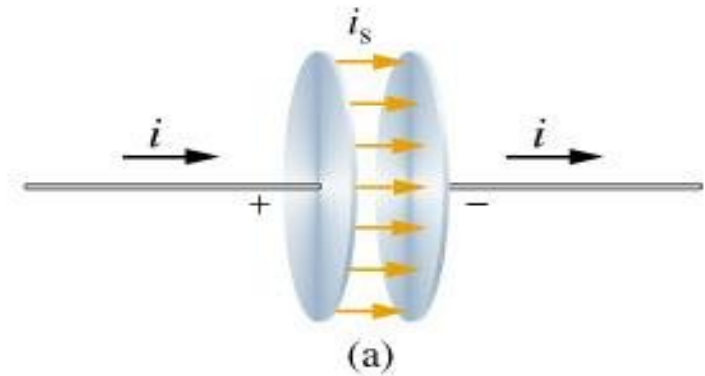
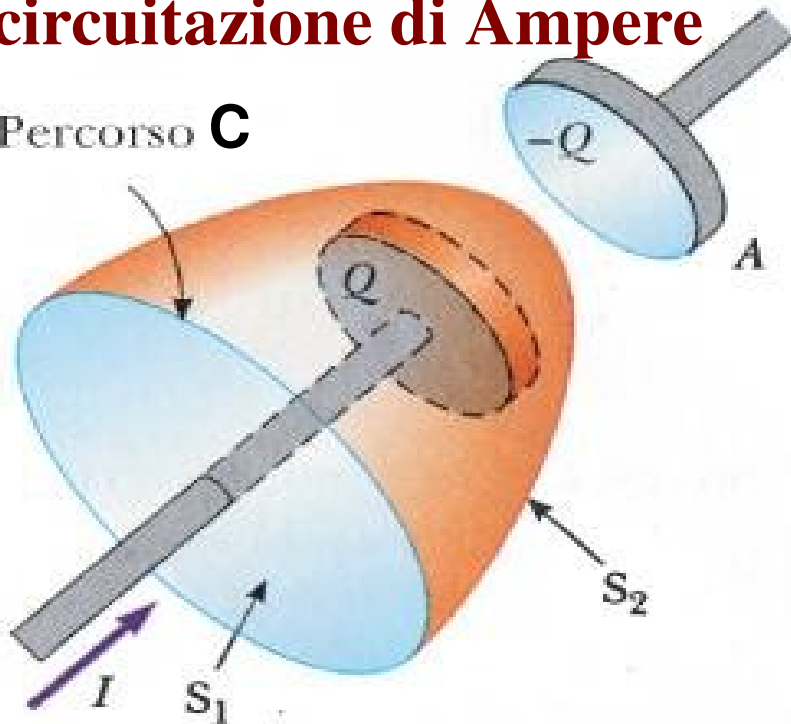
definizione: f.e.m. $\equiv \oint_C \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}}$

[si misura in Volt = J/C]

Legge di Ampere-Maxwell

il pezzo mancante nella
circuitazione di Ampere

Percorso **C**



$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = [i + \epsilon_0 \partial \Phi(\vec{E}) / \partial t] / (c^2 \epsilon_0) = (i + i_s) / (c^2 \epsilon_0)$$

il flusso $\Phi(\vec{E})$ attraverso la superficie $\mathbf{S}(\mathbf{C})$ il cui bordo è \mathbf{C}

Le equazioni di Maxwell

$$\Phi(\vec{E}) = q/\epsilon_0$$

attraverso ogni superficie **chiusa**
le cariche el. sono le sorgenti di **E**

$$\Phi(\vec{B}) = 0$$

attraverso ogni superficie **chiusa**
il campo **B** non ha sorgenti

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\partial\Phi(\vec{B})/\partial t$$

f.e.m. = – derivata flusso di **B** attraverso sup. **S(C)** bordata dal circuito **C**
un **B** che cambia nel tempo può produrre un **E**

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = i/(c^2\epsilon_0) + \partial\Phi(\vec{E})/\partial t / c^2$$

i è la corrente, e $\Phi(\vec{E})$ il flusso attraverso **S(C)** con il circuito **C** per bordo
ristabilisce la simmetria tra **B** ed **E**: un **E** che cambia può produrre un **B**

Ancora le equazioni di Maxwell

(forma **differenziale**)

(forma **integrale**)

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 4\pi k \rho$$

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{\vec{J}}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{i}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Forza su una carica puntiforme

$$\vec{F} = q_0 (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

q_0 = carica elettrica “di prova” che si sta muovendo a velocità v

- è detta **forza di Lorentz**
- contiene solo il termine elettrico quando la velocità v è nulla
- il termine con **B** descrive, ad es., le forze magnetiche sui fili percorsi da corrente (lì, il termine elettrico è nullo perché il filo è elettricamente neutro)

Riassunto unità di misura

$$\mathbf{E} \quad \text{N/C} \quad \text{o} \quad \text{V/m}$$

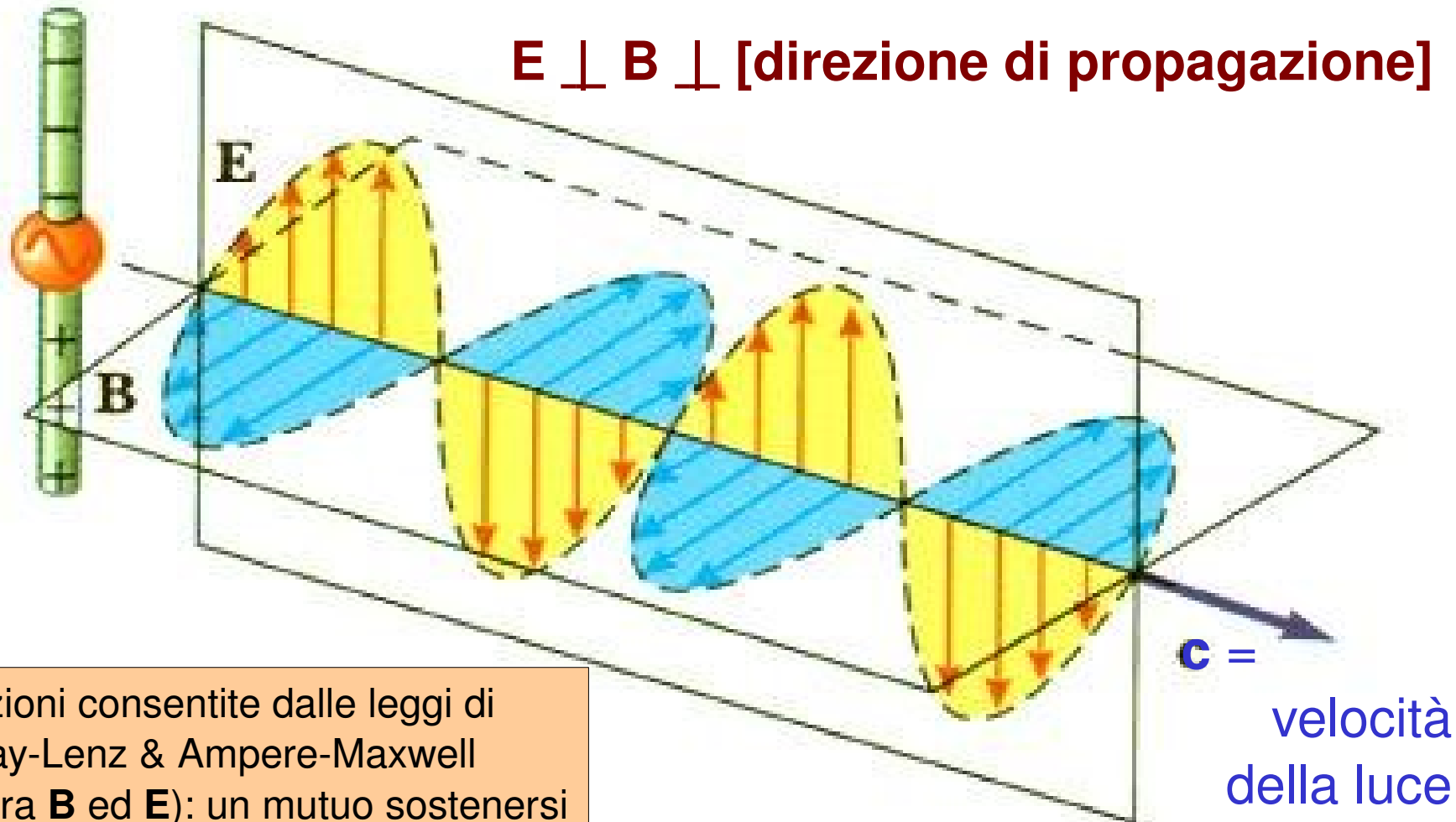
$$\mathbf{B} \quad \text{T} \quad \text{o} \quad \text{kg}/(\text{A s}^2)$$

$$c \quad \text{m/s}$$

$$\epsilon_0 \quad \text{C}^2 / (\text{N m}^2)$$

Onde elettromagnetiche:

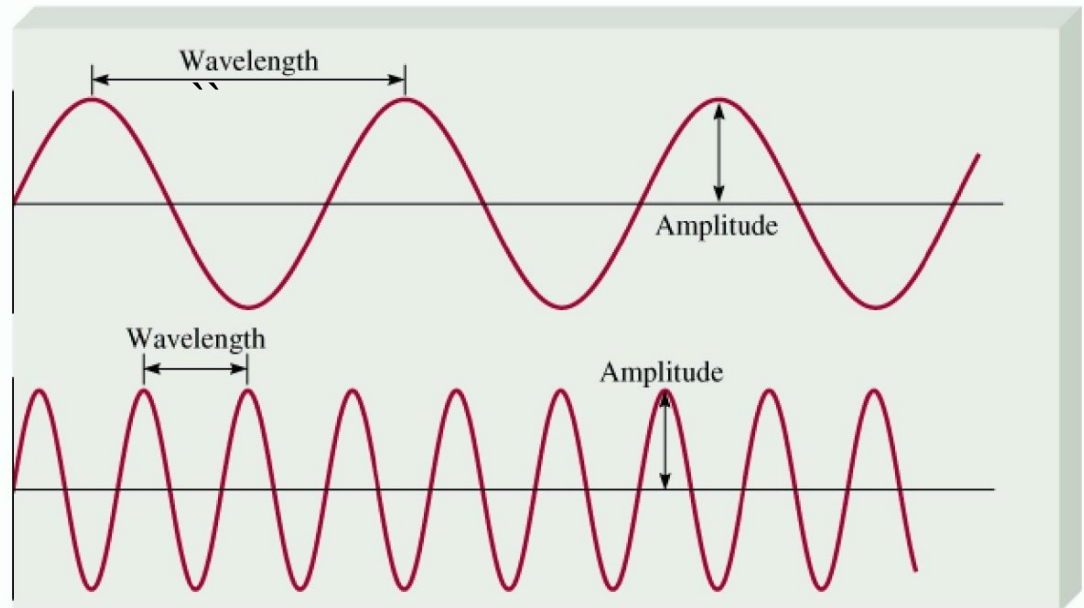
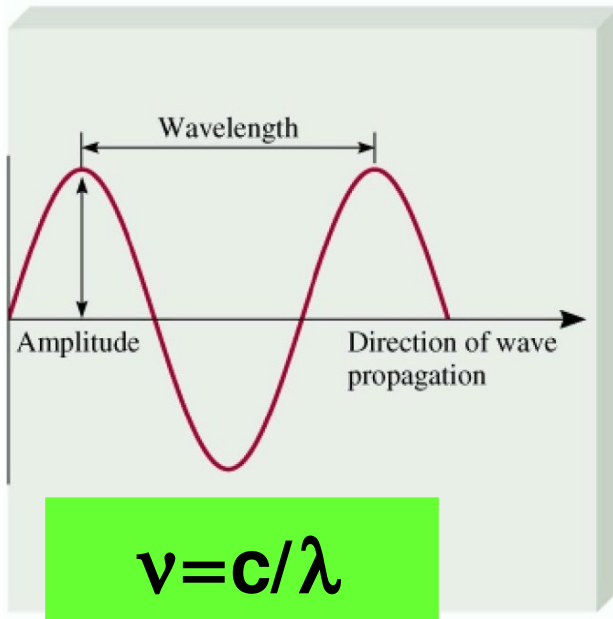
sono una soluzione delle eq. di Maxwell nel vuoto



Oscillazioni consentite dalle leggi di Faraday-Lenz & Ampere-Maxwell (simmetria tra \mathbf{B} ed \mathbf{E}): un mutuo sostenersi di oscillazioni di \mathbf{B} ed \mathbf{E} nel “nulla”

Parametri di un'onda

- **Lunghezza d'onda (λ)** distanza tra due massimi
- **Ampiezza** distanza verticale tra un massimo e l'asse delle x
- **Frequenza (ν)** numero di oscillazioni in 1 secondo (Hz = 1 ciclo/s)



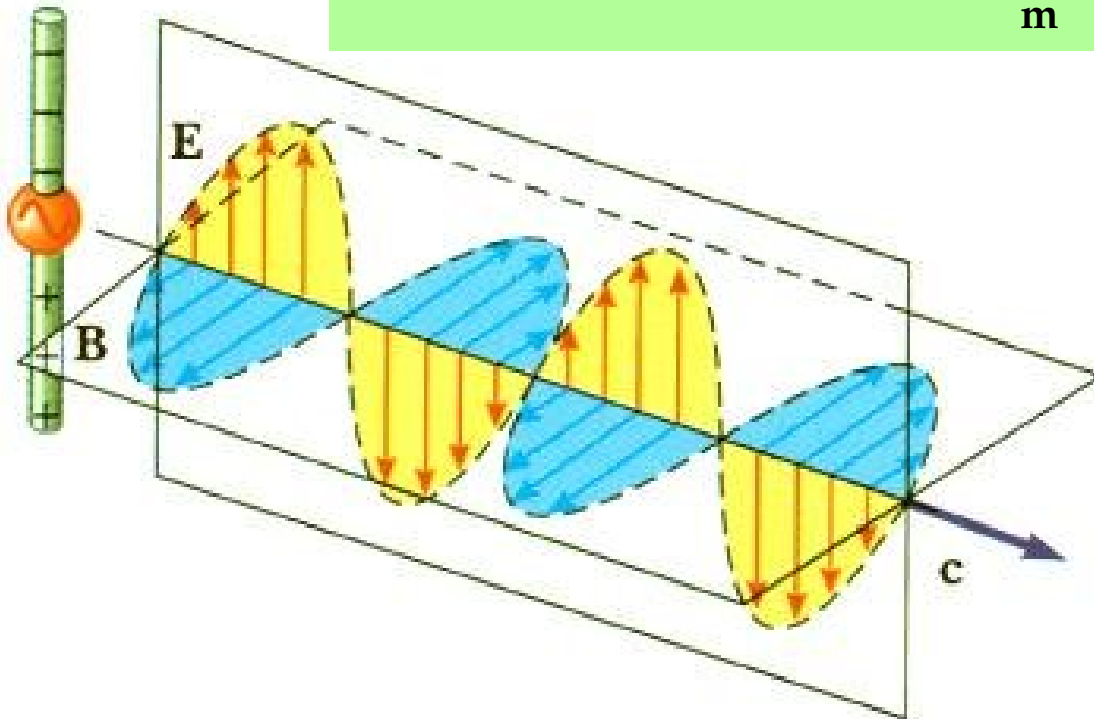
Funzione d'onda

La piu` semplice: onda piana in direzione x:

$$E_y(x,t) = E_m \cos(2\pi(x/\lambda - v t))$$

$$B_z(x,t) = B_m \cos(2\pi(x/\lambda - v t))$$

$$E_m = c B_m$$



Spettro Elettromagnetico



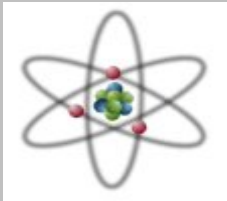
ONDE RADIO $\lambda = 1\text{km} - 10\text{ cm}$
trasmissioni radio-televisive



MICROONDE $\lambda = 10\text{ cm} - 1\text{ mm}$
radar, telefonia, forni

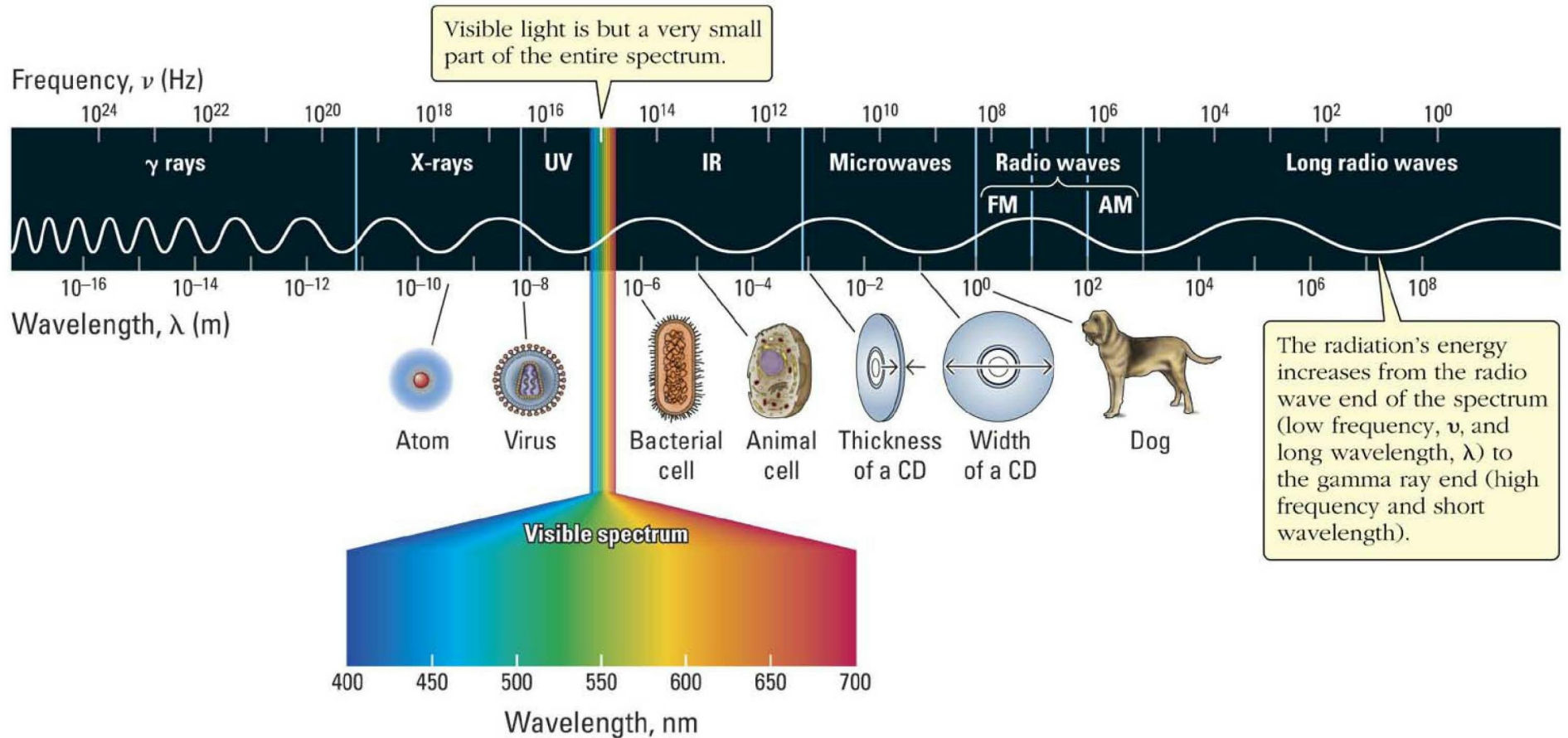


IR-VISIBILE-UV $\lambda = 1\text{ mm} - 10^{-8}\text{ m}$
calore, luce, reazioni chimiche

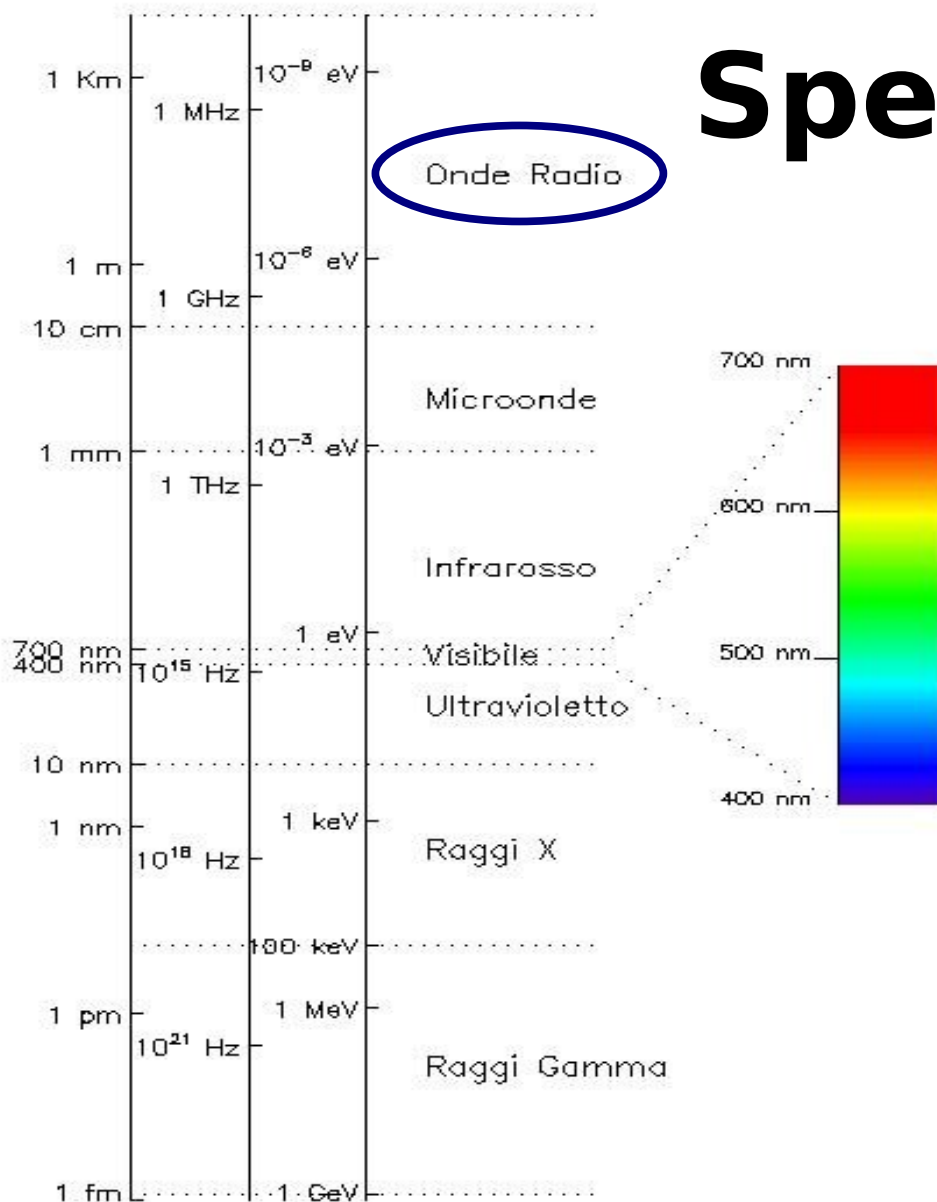


RAGGI X – RAGGI γ $\lambda = 10^{-8}\text{ m} - 10^{-12}\text{ m}$
radiografie, reazioni nucleari

Spettro Elettromagnetico



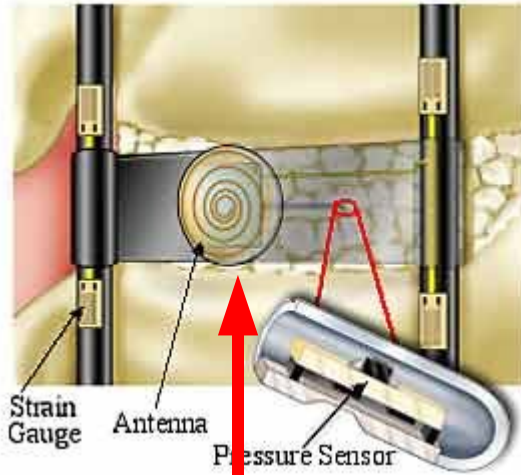
Spettro EM



Onde radio

- 1885 – Hertz scopre le onde radio
- Le onde radio sono prodotte da dispositivi elettrici e elettronici, da correnti alternate in antenne
- Vaste applicazioni in telecomunicazioni (radio, TV...)
- Nell'universo onde radio sono emesse dalle stelle e dai gas

antenne grandi e piccole per trasmettere/ricevere onde radio



Impianto ortopedico
per monitorare la
fusione delle
vertebre, con
microantenna per
trasmettere i dati a
monitor esterni
all'organismo

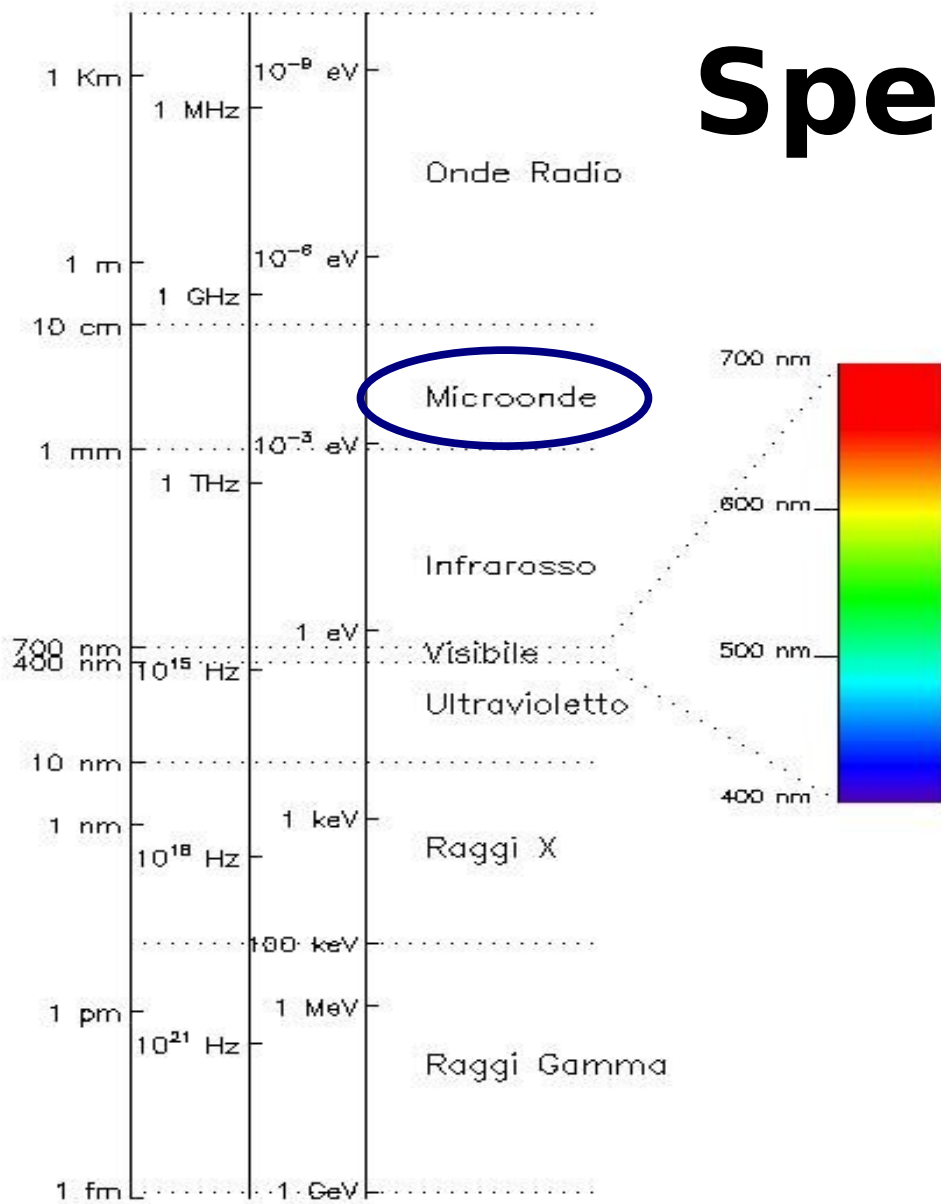


antenne per telecomunicazioni
terrestri

antenne per telecomunicazioni con
satelliti



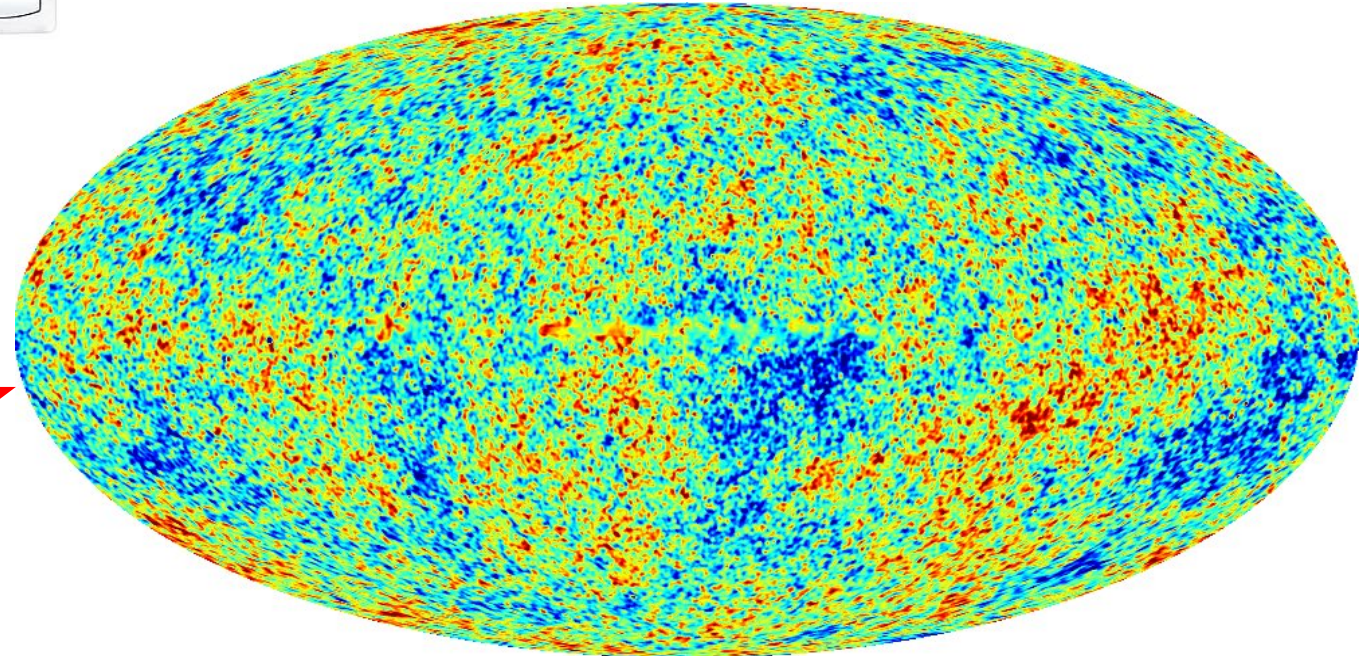
Spettro EM



Microonde

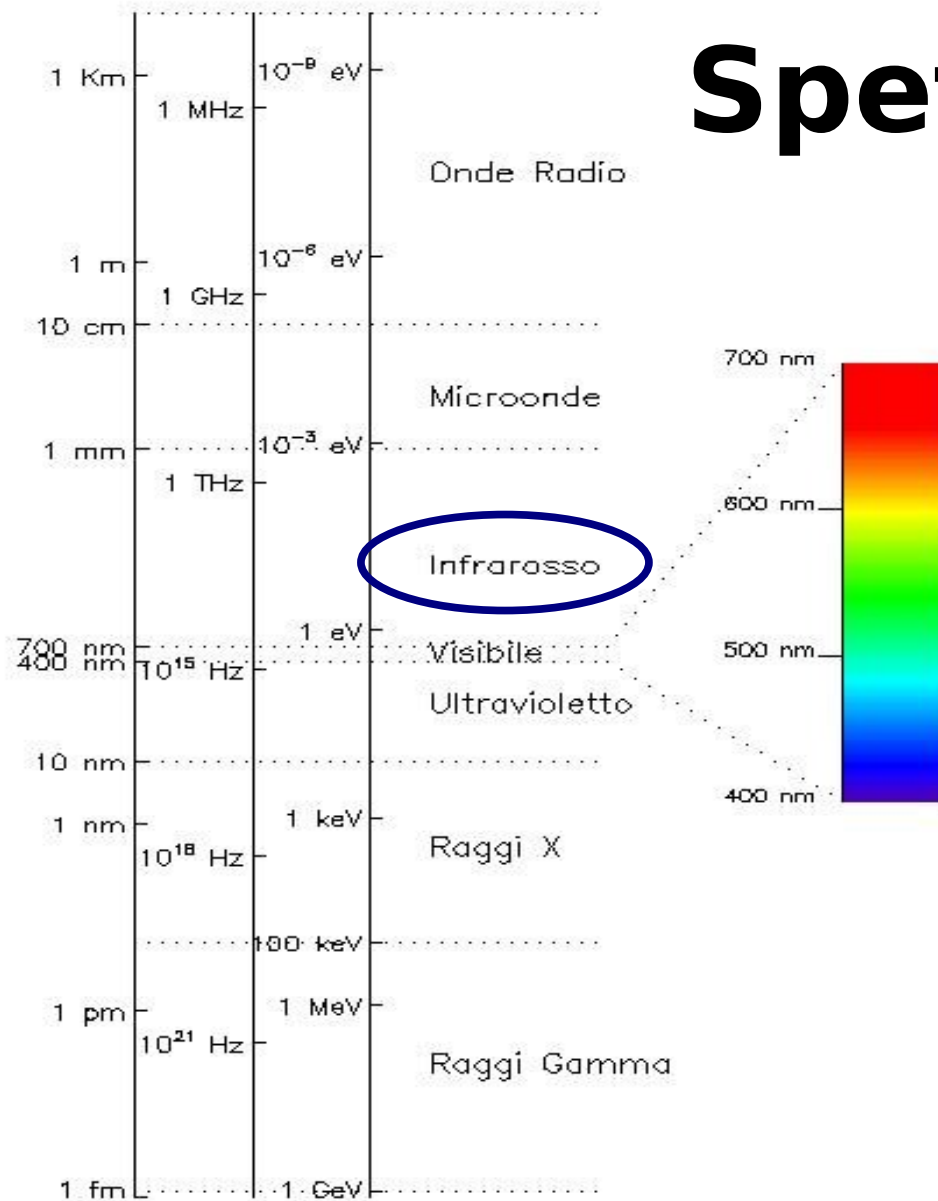
- Prodotti da dispositivi elettronici
- Applicazioni includono radar, forni, telefonia cellulare
- Gli astronomi utilizzano quelle di origine spaziale per studiare la struttura della galassia

microonde per scaldare, per trasmettere...



Mappa della
temperatura del fondo
a microonde
dell'universo

Spettro EM



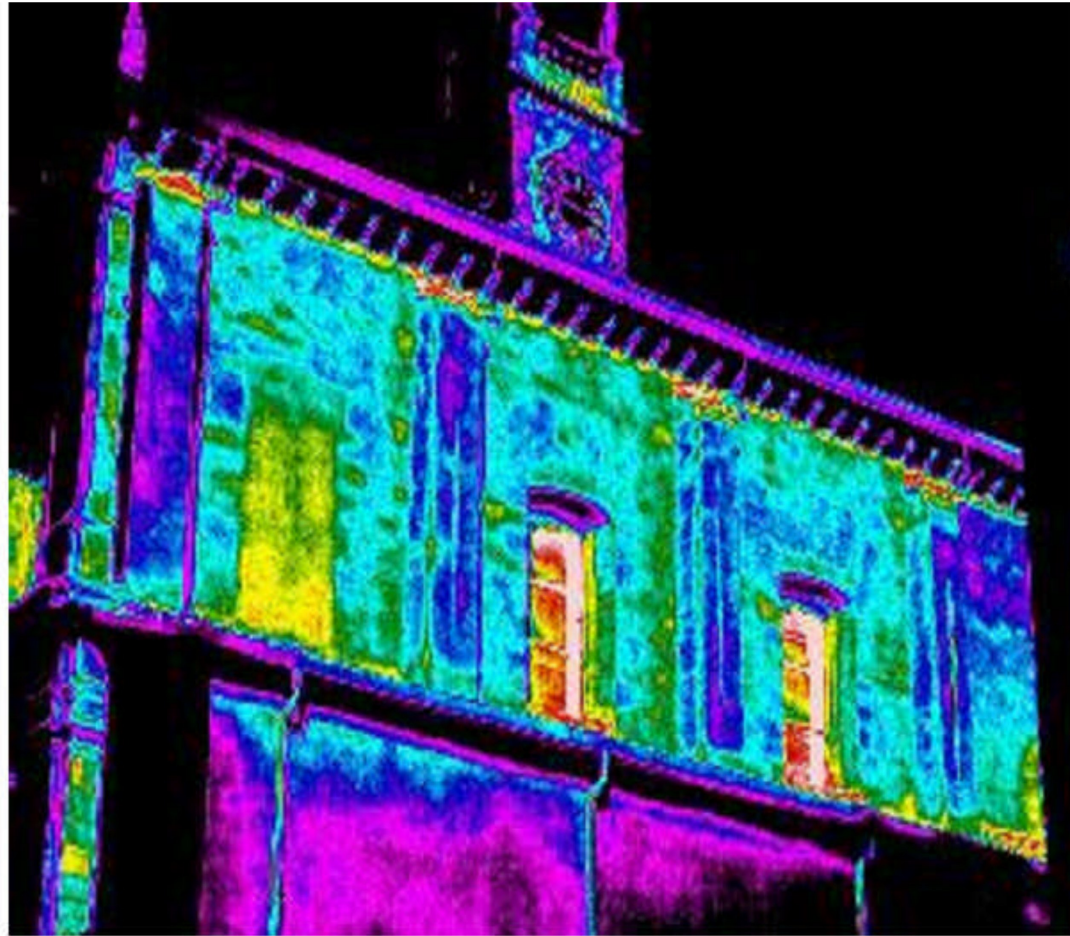
Infrarosso

- Nell'1800 Herschel dimostra che la radiazione solare si estende nell'infrarosso
- Prodotto da transizioni rotazionali e vibrazionali delle molecole e da corpi caldi
- Applicazioni nella terapia medica, fotografia all'IR, forni e riscaldamento
- Viene utilizzata nello spazio per lo studio della polvere stellare

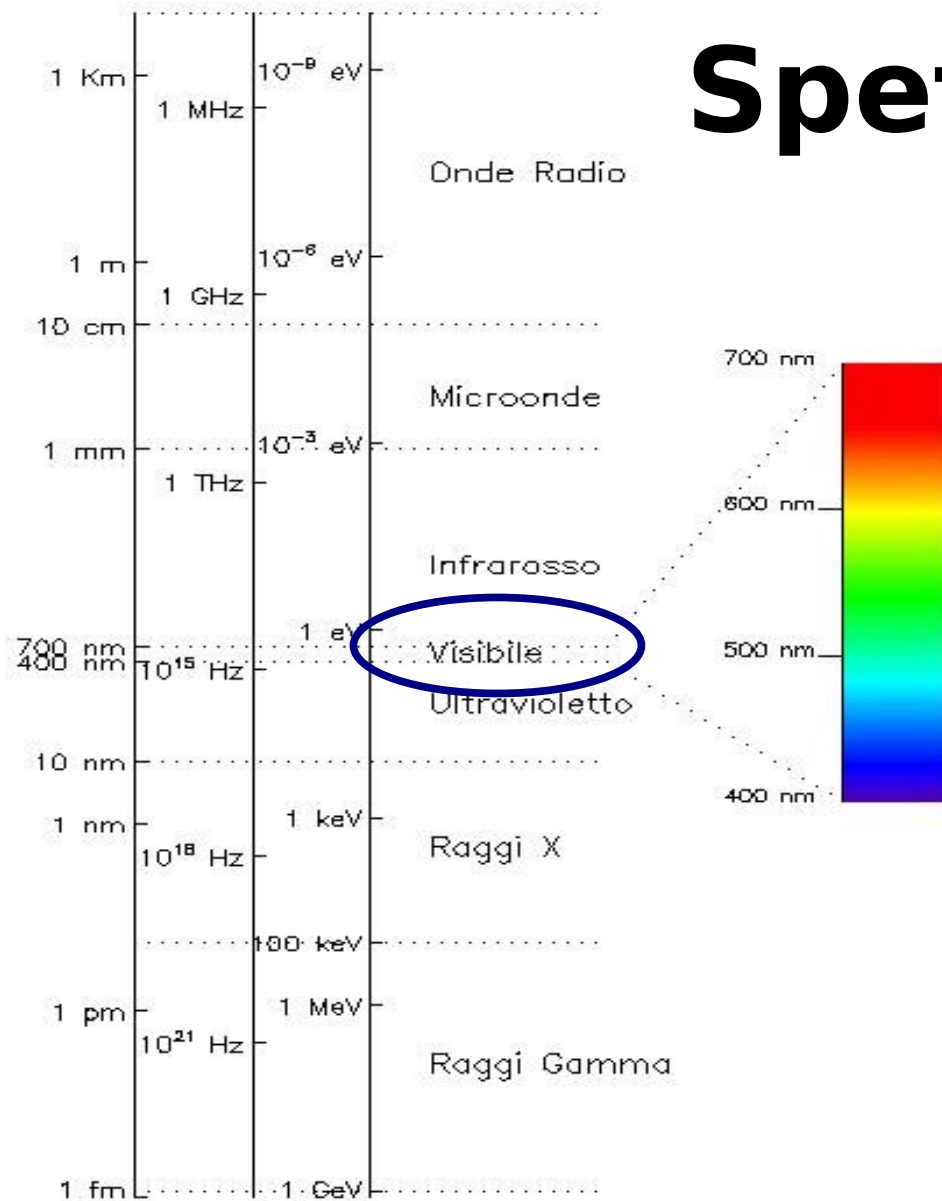
fotografia infrarossa

Visibile

IR



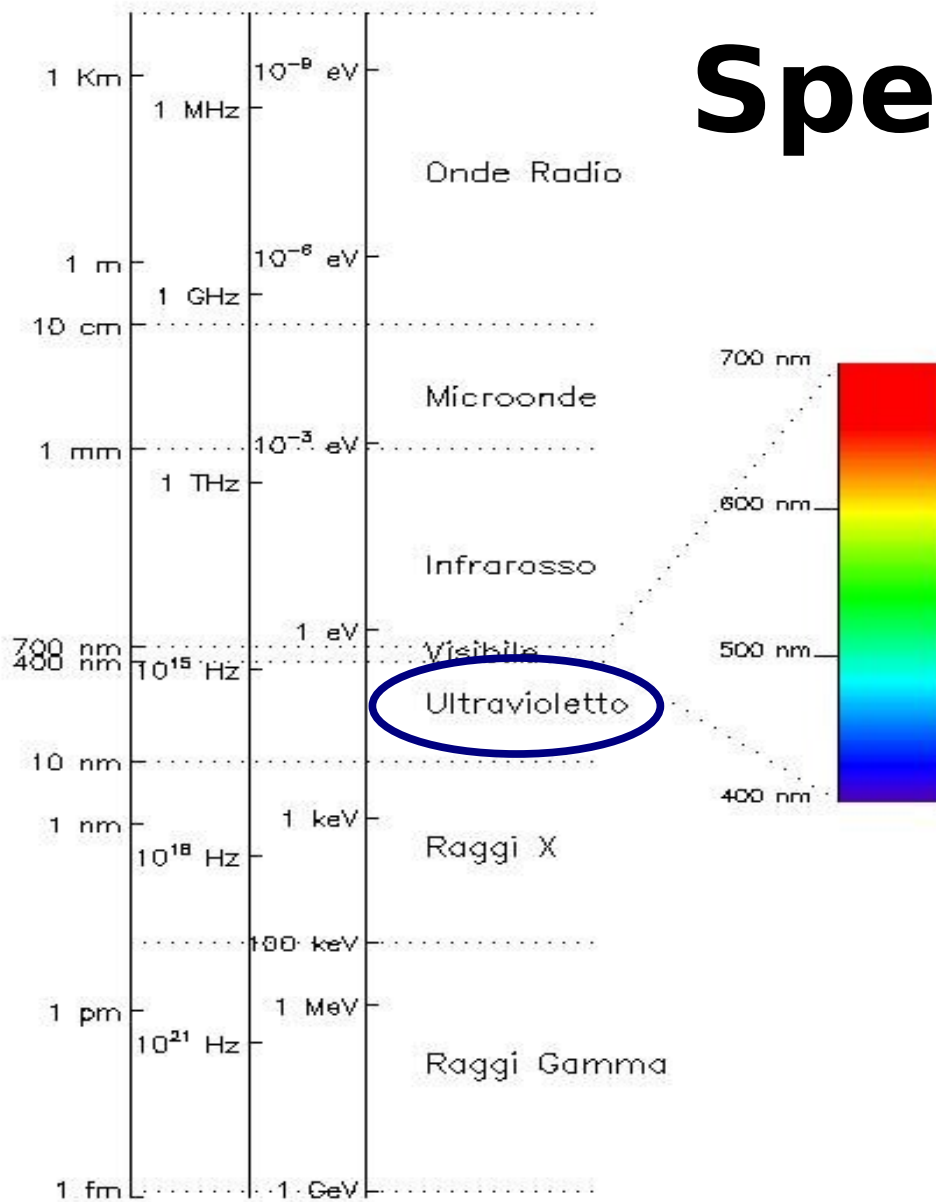
Spettro EM



Luce visibile

- Nel 1666 Newton disperde la luce bianca con un prisma
- Possiamo associare ad ogni colore un intervallo di lunghezza d'onda
- Il visibile è prodotto da transizioni degli elettroni di atomi e molecole (es. lampade fluorescenti) e da corpi molto caldi (es. lampade a filamento)
- Applicazioni...
- L'astronomia è cominciata con le osservazioni nel visibile

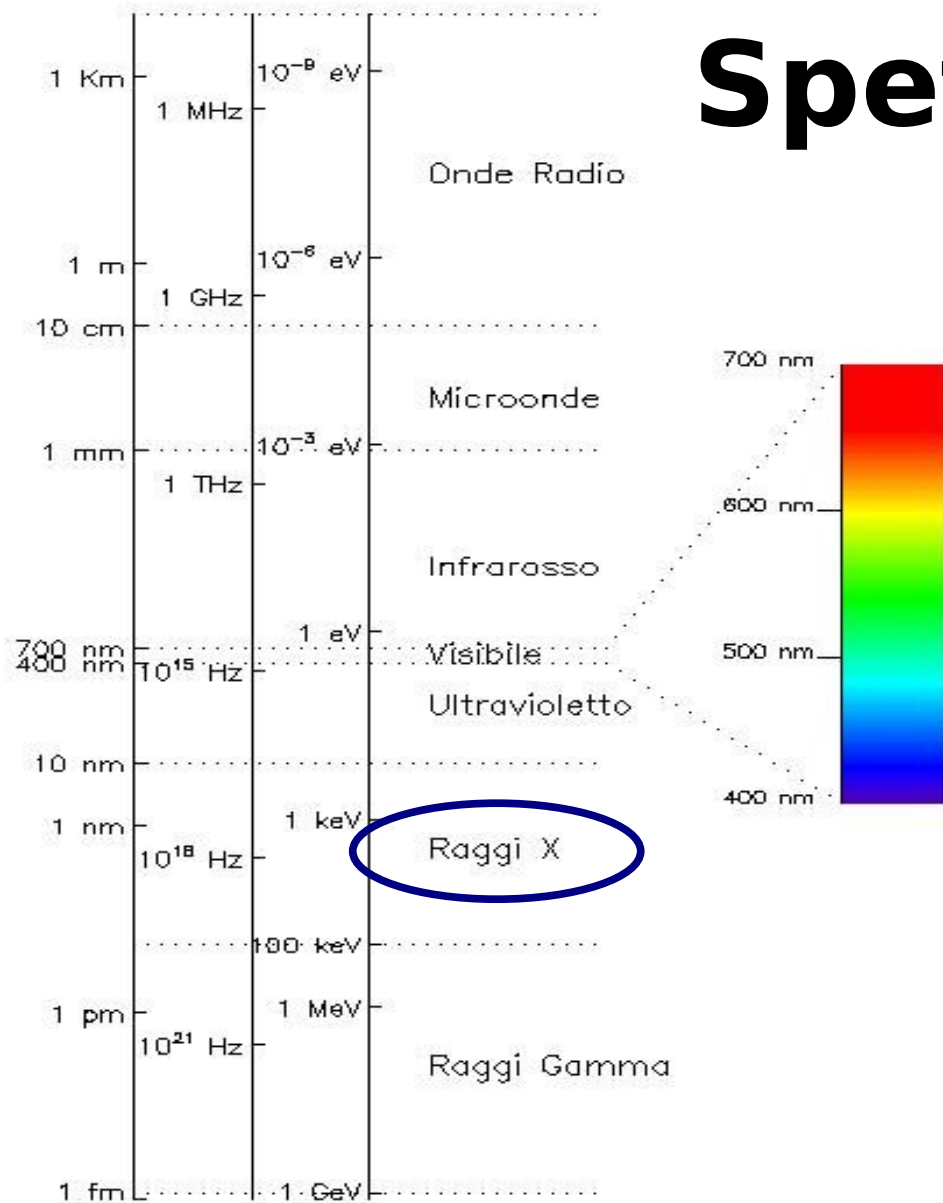
Spettro EM



Luce ultravioletta

- Nel 1801 Ritter scopre questo tipo di radiazione
- Oggetti molto caldi, come le stelle e per es. il Sole, emettono UV
- L'UV è prodotto da transizioni elettroniche di atomi spesso ionizzati.
- Abbronzatura, ozono...

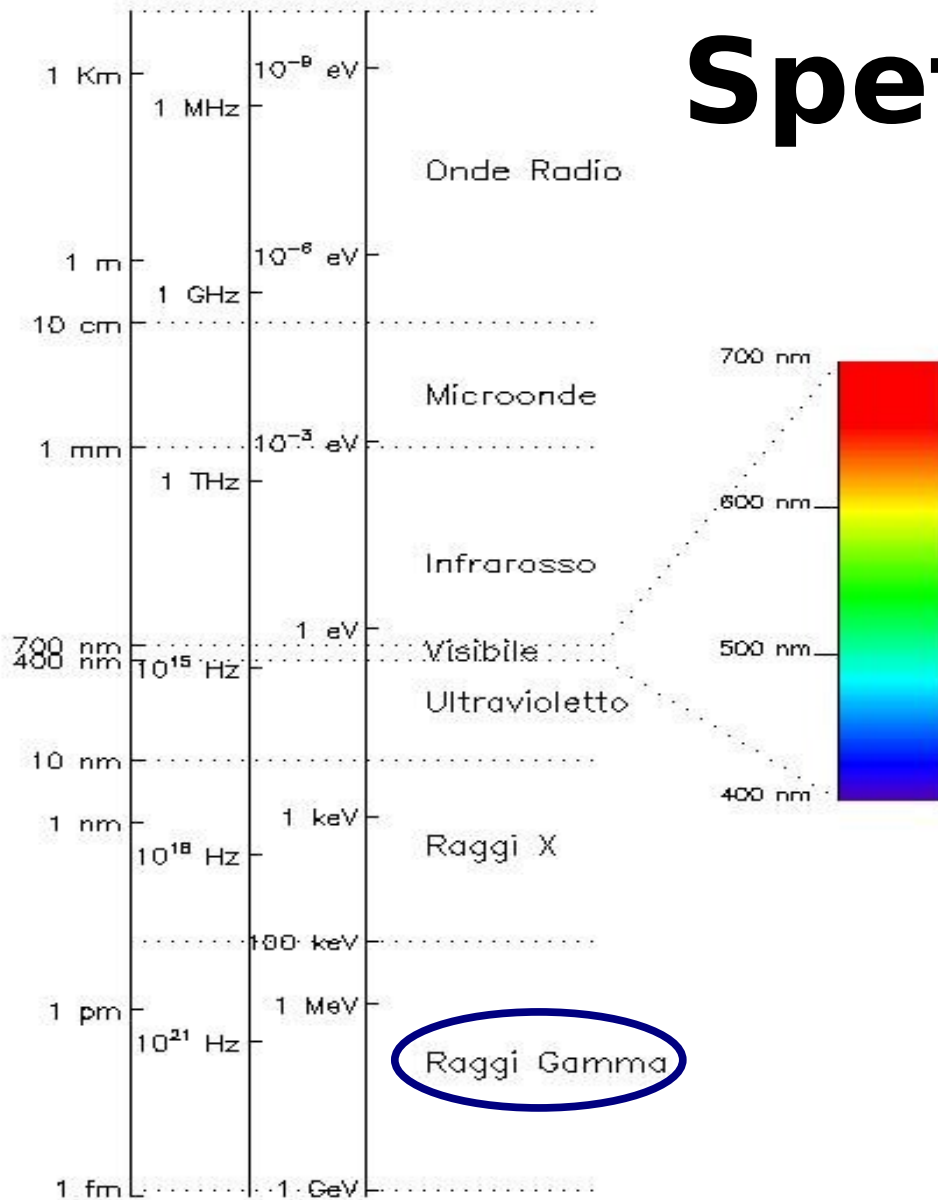
Spettro EM



Raggi X

- Nel 1896, Roentgen scopre i raggi X
- I raggi X sono prodotti nelle transizioni atomiche di elettroni di shell interne
- Vengono utilizzati in diagnostica medica ed industriale, nello studio della struttura cristallina dei solidi, oggi soprattutto biologici (proteine, DNA)
- L'astronomia sta studiando le proprietà di molte sorgenti cosmiche di raggi X

Spettro EM



Raggi γ

- Nel 1914, Rutherford identifica i raggi γ
- I raggi γ sono prodotti nelle reazioni nucleari
- Radiazioni altamente penetranti e generalmente dannose per la materia vivente
- Applicazioni in diagnostica industriale e nello studio della struttura del nucleo atomico
- L'universo è il più grande emettitore di radiazione γ

Tabella spettro EM

Le regioni dello spettro elettromagnetico				
Regione dello spettro	Lunghezza d'onda (Å)	Lunghezza d'onda (cm)	Frequenza (Hz)	Energia (eV)
Radio	$>10^9$	>10	$<3 \times 10^9$	$<10^{-5}$
Microonde	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrarosso	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visibile	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioletto	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raggi X	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raggi gamma	<0.1	$<10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Mecc. quantistica → la luce è composta di **fotoni** di

$$\text{Energia} = h\nu \quad [h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}]$$