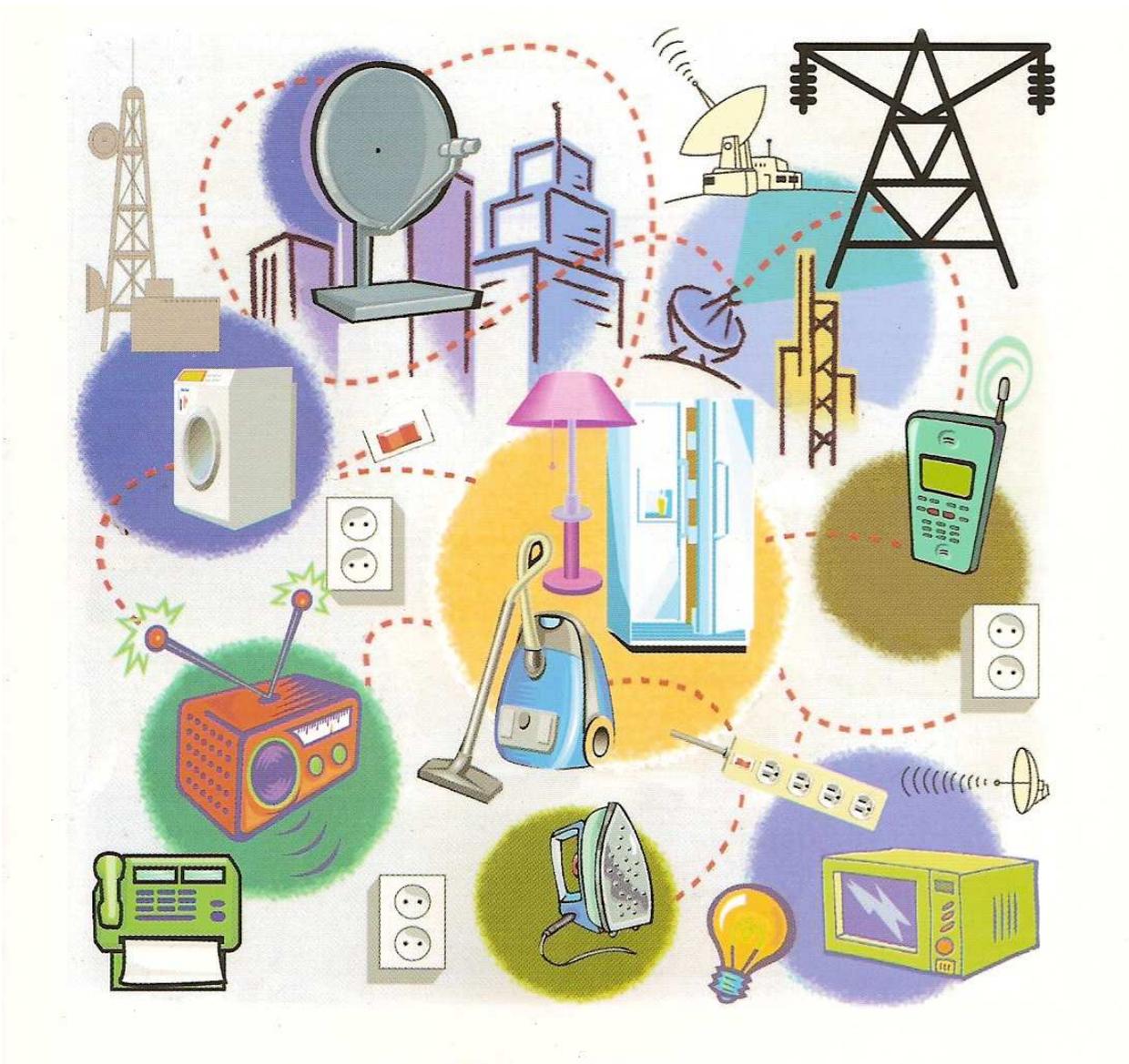


Giacomo Baggio V BB

Liceo scientifico "N.Tron" a.s. 2007\08

# ELETTROMAGNETISMO

Tra innovazioni tecnologiche ed elettrosmog:  
il duplice aspetto del progresso



## PRESENTAZIONE:

L'elettromagnetismo è un fenomeno che, sebbene sia alla base di un continuo progresso scientifico e tecnologico volto a migliorare la vita contemporanea, viene spesso messo in discussione per i suoi possibili effetti nocivi sulla salute umana e ambientale.

In questo lavoro mi sono proposto di analizzare il duplice aspetto di tale fenomeno.

Ho considerato inizialmente l'elettromagnetismo nel suo evolversi storico, dalle prime intuizioni del mondo antico, fino alle recenti scoperte della fisica quantistica. Ho rivolto particolare attenzione agli sviluppi scientifici e alle innovazioni tecniche avvenute nella seconda metà del XIX secolo, periodo che, per il decisivo progresso nei campi della meccanica, della chimica e dell'elettricità, ha preso il nome di Seconda Rivoluzione Industriale.

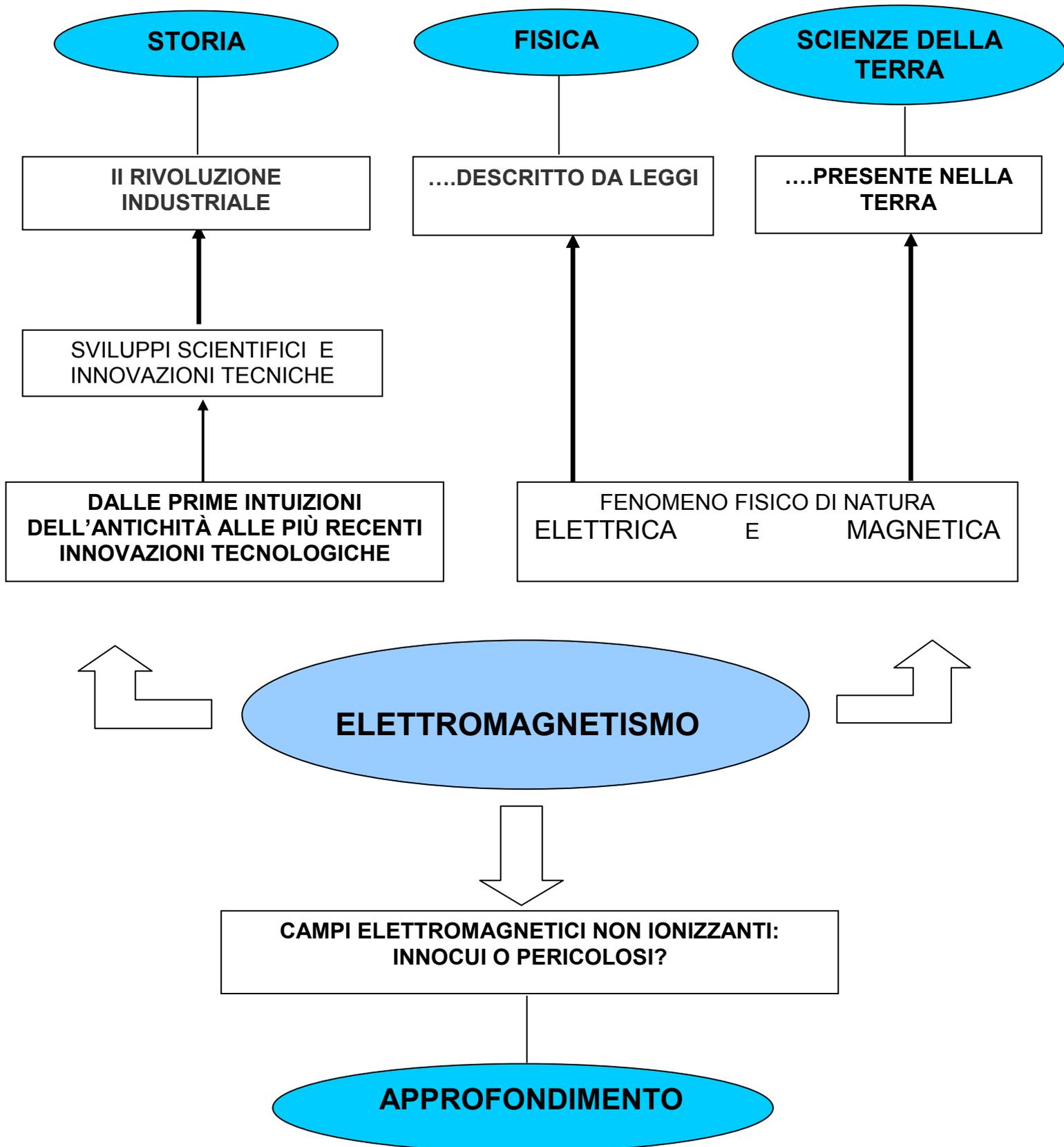
Sono poi passato a considerare questo fenomeno relativamente al nostro pianeta: il campo magnetico terrestre. Mi sono soffermato sulle caratteristiche di questo campo, sulle teorie relative alla sua origine e, infine, sulle ricerche paleomagnetiche che hanno evidenziato la presenza di inversioni e anomalie nel campo.

Nella parte riguardante la Fisica ho esaminato le leggi che regolano l'elettrostatica e il magnetismo, per poi considerare le interazioni tra i fenomeni di natura elettrica e magnetica: tutto ciò appartiene a quella branca della Fisica, l'Elettromagnetismo, il cui comportamento classico è descritto dalle equazioni di Maxwell.

Infine, nell'approfondimento, ho considerato l'ipotizzata pericolosità dei campi elettromagnetici non ionizzanti, con particolare attenzione alla controversa questione sulla presunta nocività delle radiazioni prodotte dai telefoni cellulari.

# ELETTROMAGNETISMO

*Schema generale*



## SCHEMA RIASSUNTIVO:

### INTRODUZIONE E CENNI STORICI

- Le prime intuizioni dell'antichità
- XIX secolo: dalla pila di Volta alle equazioni di Maxwell
- Elettromagnetismo oggi: dalla fisica quantistica alle più recenti innovazioni tecnologiche

### STORIA: LA SECONDA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

- Sviluppi scientifici e innovazioni tecniche nel campo dell'elettricità, della meccanica e della chimica
- Binomio tecnologia-attività produttive: la catena di montaggio

### SCIENZE DELLA TERRA: IL MAGNETISMO TERRESTRE

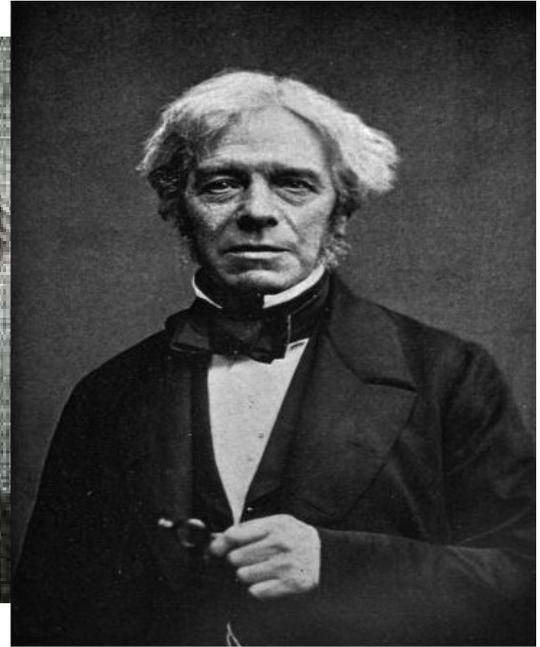
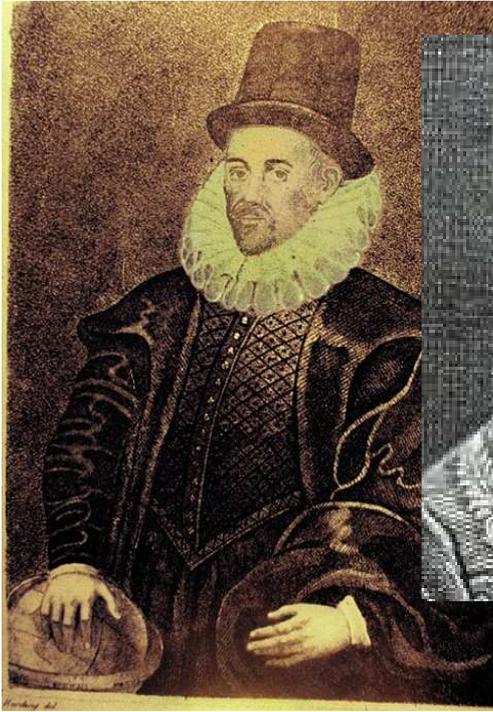
- Introduzione
- Poli magnetici
- Caratteristiche del campo
- Teorie sulla presenza del campo
- Paleomagnetismo
- Inversioni del campo magnetico terrestre

### FISICA: L'ELETTROMAGNETISMO

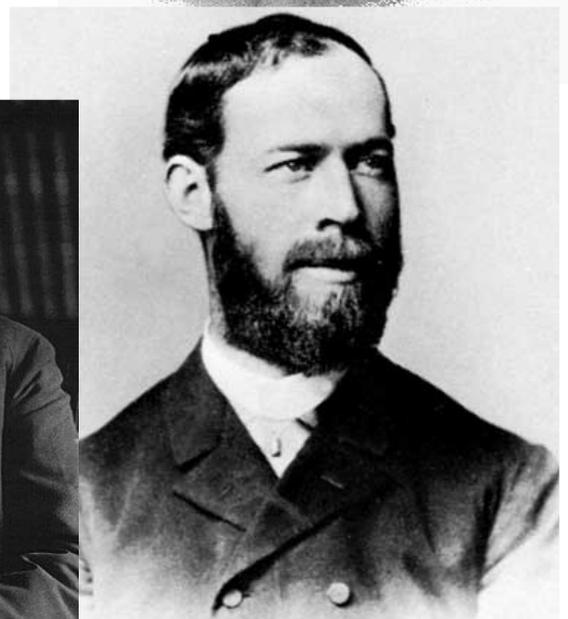
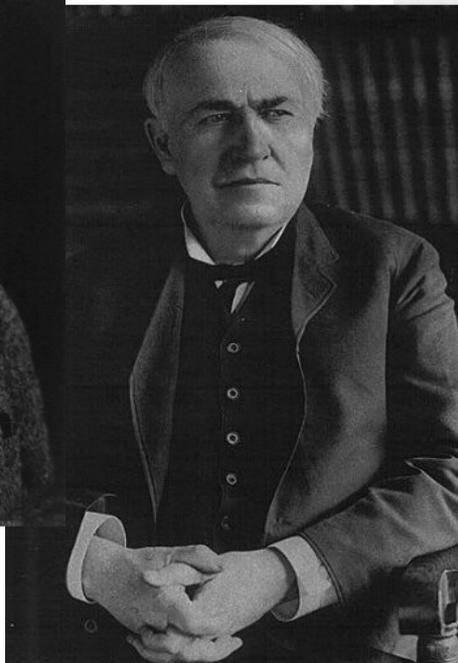
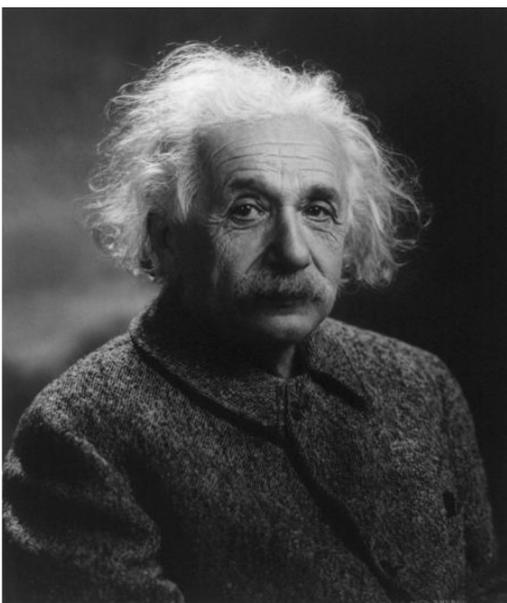
- Introduzione
- Elettrostatica: forza di Coulomb e campo elettrico
- Magnetismo: forza di Lorentz e campo magnetico
- Elettromagnetismo: equazioni di Maxwell e campo elettromagnetico

### APPROFONDIMENTO

- Campi elettromagnetici non ionizzanti: innocui o pericolosi?
- Inquinamento elettromagnetico e telefoni cellulari: una questione aperta



# CENNI STORICI



## INTRODUZIONE

L'elettromagnetismo è alla base di molte delle principali applicazioni che rendono possibile la vita di tutti i giorni. Infatti, grazie all'elettromagnetismo, possiamo ottenere energia elettrica, far viaggiare informazioni, comunicare con tutto il mondo.

Per produrre *energia elettrica* bisogna sempre utilizzare una *turbina elettrica*, che non è altro che una matassa di filo conduttore inserito all'interno di un grande magnete.

Quindi si utilizzano le varie fonti energetiche per creare il movimento della turbina elettrica.

Proprio la *variazione del campo elettromagnetico*, indotta dal movimento del conduttore all'interno del magnete, produce la corrente elettrica, elemento di base per la nostra civiltà.

## CENNI STORICI

I magneti ai primordi della cultura scientifica vennero considerati "pietre viventi". Riguardo l'elettricità, nell' antichità si sapeva poco più del fatto che l'ambra e anche i vetri, se strofinati con un panno di lana, producevano scariche elettriche. Plinio il Vecchio (23-79 d.C.) nel *Libro di Storia Naturale*, narra che il nome *Magnete* deriva dal pastore Cretese di nome "Magnes" il quale, adoperando il suo bastone con la punta di ferro, scoprì la proprietà di attrazione e repulsione di alcune pietre che furono chiamate magnetiche. Tali pietre oggi sappiamo contengono la magnetite, un magnete naturale composto di ossidi di ferro ( $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$  – magnetite). Si ha notizia che anche le antiche culture alchemiche della Cina e dell'India conoscevano le proprietà magnetiche prima della cultura filosofico - scientifica della Magna Grecia. Comunque, l'interpretazione del magnetismo per millenni è rimasta intrisa di riferimenti cognitivi di indole "antropomorfica - vitalistica". Durante il Medio Evo, la "sacra inquisizione" condannò ogni riferimento a forze misteriose e magiche di indole magnetica nella spiegazione delle leggi che agiscono sulla struttura dell'universo. Un frate italiano, Petrus Peregrinus, scrisse (1269) una *Epistola sulle proprietà dei dipoli magnetici*, ricercando la possibilità di attuare il "moto perpetuo" facendo uso di forze magnetiche. Cecco d' Ascoli, docente all' Università di Bologna, fu bruciato vivo come eretico perché ricercava un determinismo nella interpretazione degli eventi facendo riferimento a forze invisibili di indole magnetica. Ancora per molti anni il magnetismo fu considerato un curioso fenomeno naturale: Galileo Galilei studiò le "calamite", principalmente per studiare la loro potenza nel sollevare pesi di ferro.

Il primo studio scientifico dei fenomeni elettrici e magnetici apparve solo nel 1600 d.C., quando furono pubblicate nel "*De magnete*" le ricerche del fisico britannico William Gilbert. Fissata la distinzione tra *elettricità* e *magnetismo*, questi chiamò elettrica (dal greco *elektron* = ambra) la forza che si esercita tra cariche. Un seguace di Gilbert fu l'americano Benjamin Franklin (1706-1790) che elaborò una teoria secondo la quale l'elettricità sarebbe un "fluido" presente in tutta la materia, ipotizzando così che i due stati di elettrizzazione di un corpo sarebbero dovuti all'eccesso o alla carenza di tale fluido. Persisteva ancora, però, una logica vitalistica nella scienza. Tale concettualità di base si esaurì definitivamente in seguito alla disputa tra Galvani, professore di medicina alla Università di Bologna, e Volta, professore di fisica e chimica all'Università di Pavia. Galvani sperimentò l'azione della corrente elettrica su una zampa di rana ed osservò che essa si contraeva al passaggio delle corrente; pertanto suppose che la contrazione fosse imputabile al magnetismo animale. Di parere contrario a tale spiegazione Alessandro Volta il quale sostenne che le contrazioni erano causate da una differenza di potenziale elettrico estrinseca al corpo animale. Convinto di ciò, egli costruì la "*pila bimetallica*". La scoperta della "*pila*" è da considerarsi una pietra miliare dello sviluppo della scienza, in quanto dette nuove possibilità di interpretazione e di successiva utilizzazione industriale dell'elettricità.

Colui che dette un fondamento matematico alla elettrostatica fu l'ingegnere francese Charles - Augustin De Coulomb. Egli studiò le leggi dell'attrito elettrostatico e costruì dei dispositivi sperimentali che misurano la torsione di un filo elastico sottoposto alle forze elettrostatiche che si originano tra lamine caricate positivamente e negativamente o tra opposte polarità magnetiche. La pila di Volta e gli studi del fisico danese Hans Christian Ørsted sulle interazioni tra correnti elettriche e magnetiche ottenute misurando come una corrente elettrica influenzi la rotazione dell'ago di una bussola, interessarono gli studi di elettrochimica di due chimici inglesi, Humphry Davy e del suo giovane assistente autodidatta, Michael Faraday. In particolare, Faraday provò che una corrente che scorre in una bobina può indurre una corrente in una seconda bobina posta in prossimità della prima, a causa di una variazione del flusso del campo magnetico. In seguito Antonio Pacinotti, (1841-1912) Professore di



Con la scoperta dell'esistenza di una relazione fra elettricità e magnetismo, il chimico e fisico danese Hans Christian Ørsted pose le basi per lo sviluppo della teoria elettromagnetica. Nel 1825 lo scienziato riuscì anche a isolare per la prima volta l'alluminio, sebbene in forma impura.

Fisica all' Università di Pisa, costruì la "dinamo", poi brevettata e perfezionata dal meccanico belga Zenobe Gramme. Si gettano quindi le basi per produrre energia elettrica utilizzando il movimento di un avvolgimento elettrico, all'interno di un campo magnetico.

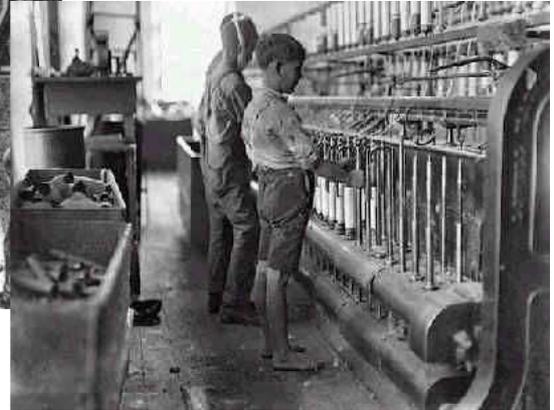
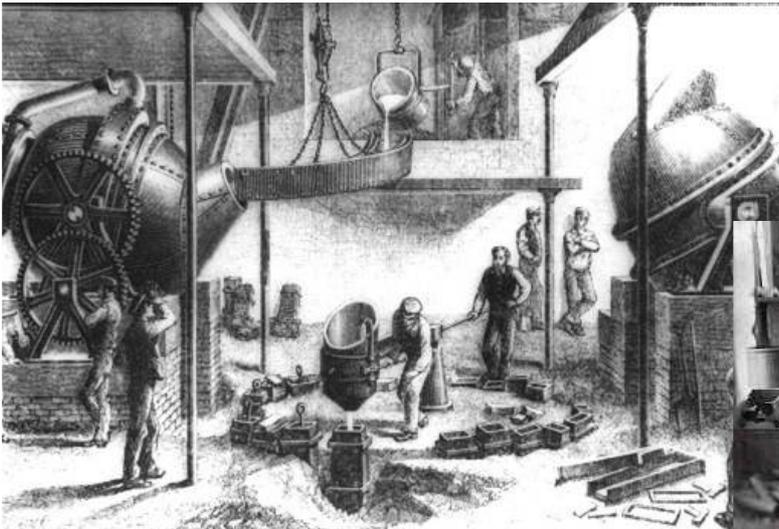
Nel XIX secolo le scoperte sull' elettricità ed il magnetismo e le loro applicazioni industriali si susseguirono rapidamente. André Marie Ampere sperimentò che correnti parallele si attraggono l'una con l'altra, come se fossero magnetizzate. Colui che riorganizzò sistematicamente il vasto insieme di conoscenze dei fenomeni elettromagnetici fu il fisico tedesco Georg Simon Ohm (1789-1854). Egli concluse che *il Voltaggio (V) è proporzionale all'Intensità di Corrente (I) per la resistenza del mezzo (R)* ( $1^a$  Legge di Ohm, 1827). Da allora scoperte tecnologiche e scientifiche si susseguirono a ritmo incalzante. Nel 1835 Joseph Henry inventò il "relè ad induzione magnetica": dispositivo che, al passaggio della corrente elettrica in un avvolgimento, fa aprire o chiudere l'interruttore di un altro circuito; tale scoperta fu l'importante premessa necessaria per la costruzione dei motori elettrici e del telegrafo. Il 24 maggio 1844 Samuel Morse inviò il primo messaggio telegrafico tra Washington e Baltimora in USA inoltrando in tempo reale gli impulsi elettrici nell'alfabeto Morse. Nel 1860 l' abate piemontese Giovanni Caselli sperimentò il *Pantelegrafo*, con il quale venivano trasmessi impulsi elettrici che riproducevano a distanza un fax simile del disegno o degli scritti, là dove, un sistema ricevente analogo montato con un altro relè accoppiato ad una penna che si alzava e si abbassava, riusciva a riprodurre su carta l'immagine registrata ed inviata come impulsi elettrici da un sistema trasmittente a pendolo. Nel 1849 il fiorentino Antonio Meucci fece i primi esperimenti con telegrafo parlante; strumento che poi il Prof. Alexander Graham Bell perfezionò e brevettò con il nome attuale di "telefono". Nel 1877 un altro grande inventore e impresario americano, Thomas Alva Edison, ideò e brevettò il fonografo a cilindro.



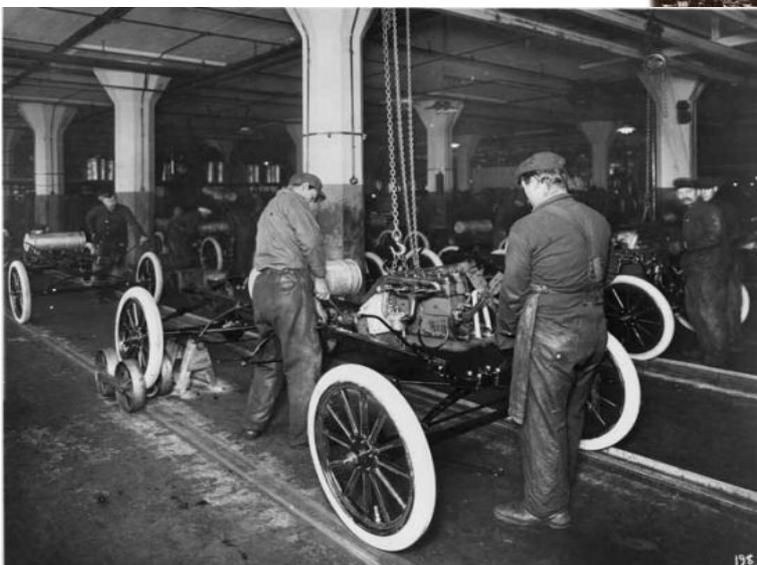
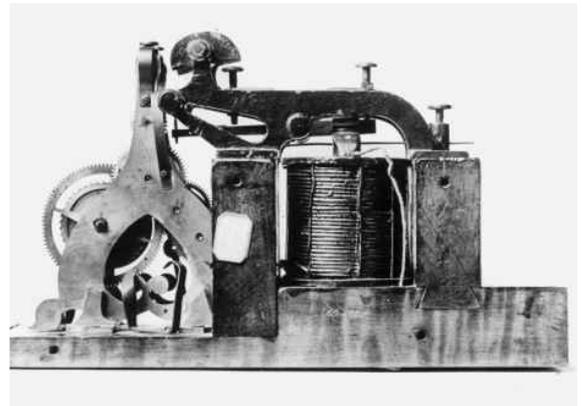
A James Clerk Maxwell, uno dei più grandi scienziati dell'Ottocento, si deve la formulazione della teoria del campo elettromagnetico. Egli ipotizzò l'esistenza di onde elettromagnetiche che trasportano energia alla velocità della luce e l'ipotesi fu confermata da Hertz circa una ventina di anni dopo. Le sue idee hanno rivoluzionato l'interpretazione dei fenomeni luminosi, aprendo la strada all'elaborazione di alcune delle teorie fondamentali della fisica moderna, quali la teoria della relatività e la teoria dei quanti.

Nel 1878 T.A. Edison inventò la lampadina. Edison, assieme al suo assistente Nikola Tesla, progettò anche le prime centrali elettriche a corrente continua. Tesla entrò in conflitto con il suo datore di lavoro perché preferì progettare centrali elettriche a corrente alternata. Pertanto dette le dimissioni dall'impresa di Edison e passò ad un'altra società elettrica, la Westinghouse, con cui costruì e mise in funzione (1891) la prima centrale idroelettrica, convogliando le acque delle cascate del Niagara per azionare motori elettrici. Un importante contributo allo studio dell'elettricità fu l'opera del fisico - matematico britannico James Clerk Maxwell, il quale sviluppò la teoria della luce come radiazione elettromagnetica e formulò le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo, oggi note come equazioni di Maxwell. La conferma della validità della sua teoria si ebbe con le ricerche del fisico tedesco Heinrich Hertz, che nel 1886 riuscì a produrre e a rivelare le onde elettromagnetiche presenti nell'atmosfera, e dell'ingegnere italiano Guglielmo Marconi, il quale nel 1896 sfruttò queste onde per realizzare il primo sistema pratico di comunicazione radio.

L'elettricità fino ad allora era considerata come fluido di onde elettromagnetiche, ma ancora non si conosceva il fondamento materiale che le generava, fino a che Joseph John Thomson, nel 1897, scoprì l'esistenza di una particella sub-atomica di carica negativa, che denominò "elettrone". J.J. Thomson, misurò approssimativamente anche la carica e la massa dell'elettrone. La scoperta, da parte di J.J. Thomson, dell'esistenza di particelle sub-atomiche (elettroni e nuclei), rappresentò una rivoluzione scientifica decisiva che fu premessa primaria di un profondo cambiamento del pensiero scientifico nel XX secolo. Sappiamo oggi infatti che l'elettricità statica è causata da correnti superficiali di elettroni su materiali isolanti, mentre quella dinamica è generata da insiemi di elettroni che scorrono nelle bande di conduzione dei metalli. Infine le varie tipologie con cui si presentano i fenomeni magnetici, sono imputabili al fatto che gli elettroni come altre particelle si comportano, ruotando su se stesse, come dei piccoli magneti, con un asse di polarizzazione denominato "*spin*". Una volta giunti alla comprensione, per merito di J.J. Thomson e di un buon numero di altri scienziati, che gli atomi sono composti da corpuscoli sub-atomici, si capì anche che tutti i corpuscoli, nel loro movimento di rotazione e vibrazione e traslazione, emettono onde elettromagnetiche nello spazio; quest'ultime possono essere generate appositamente ed anche convogliate da sistemi di ricezione e trasformate in frequenze udibili e visibili da opportuni congegni di trasformazione della energia associata alle vibrazioni delle onde elettromagnetiche. La teoria elettronica, che è la base della moderna teoria dell'elettricità, fu enunciata nel 1892 dal fisico danese Hendrik Antoon Lorentz, mentre la prima misura accurata della carica dell'elettrone fu ottenuta nel 1909 dal fisico statunitense Robert Andrews Millikan. Nei primi anni del XX secolo i fisici scoprirono che la teoria ondulatoria di Maxwell non rendeva conto di tutte le proprietà della radiazione osservate. Nel 1900 il fisico tedesco Max Planck dimostrò che lo spettro del corpo nero poteva essere spiegato solo assumendo che i fenomeni di emissione e di assorbimento della radiazione elettromagnetica da parte della materia avvenissero non in modo continuo, ma discreto, attraverso lo scambio di quantità definite di energia, dette quanti. Nel 1905, l'ipotesi quantistica fu applicata anche da Albert Einstein per spiegare l'effetto fotoelettrico. Oggi la doppia natura, ondulatoria e corpuscolare, della radiazione elettromagnetica è universalmente riconosciuta: in base al fenomeno analizzato, emerge ora l'uno ora l'altro dei due aspetti. Il concetto simmetrico, secondo cui anche la materia può alternare un comportamento ondulatorio a uno corpuscolare, fu proposto nel 1925 dal fisico francese Louis de Broglie ed è uno dei capisaldi della teoria della meccanica quantistica.



# SECONDA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE



## SECONDA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

La seconda rivoluzione industriale è il processo di sviluppo industriale e tecnologico iniziato nella seconda metà del XIX secolo. In questo periodo fecero la loro prima apparizione una serie di strumenti, di macchine, di oggetti di uso domestico che sarebbero poi diventati parte integrante della nostra vita quotidiana: la lampadina e l'ascensore elettrico, il motore a scoppio ed i pneumatici, il telefono e il grammofono,

la macchina da scrivere e la bicicletta, il tram elettrico e l'automobile per ricordare solo i più importanti. La caratteristica principale di questa seconda fase fu la sostituzione del carbone, come fonte energetica, con l'elettricità e il petrolio. Alla base di questa nuova rivoluzione vi erano i progressi delle scienze chimiche e fisiche, i quali portarono all'affermazione di una nuova cultura positivista. Notevole importanza ebbero le scoperte relative allo studio delle onde elettromagnetiche da cui ebbero origine i primi esperimenti di telegrafia senza fili da parte di G. Marconi e quelle di Röntgen sui raggi x. Inoltre grande rilievo ebbero le innovazioni nel campo dell'elettricità. Sebbene i primi apparecchi elettrici risalivano ai primi decenni dell'800, essi erano ancora curiosità scientifiche non suscettibili di applicazioni pratiche. Sol fra il 1860 e il 1880, grazie alle scoperte quasi contemporanee di numerosi scienziati (Gramme, i francesi Planté e Faure, Siemens, Edison e Pacinotti) fu possibile realizzare congegni in grado di trasformare i movimenti di un corpo entro un campo magnetico in corrente elettrica (dinamo e generatori), di immagazzinarla (batterie e accumulatori), di trasmetterla e distribuirla a grandi distanze, di utilizzarla per l'illuminazione o il riscaldamento, o di ritrasformarla in movimento (motori elettrici). Motori e generatori elettrici sono macchine elettriche rotanti, usate per convertire energia elettrica in energia meccanica o viceversa. Il funzionamento delle macchine elettriche rotanti si basa su due fenomeni fisici correlati. Il primo è il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, scoperto nel 1831 dal fisico britannico Michael Faraday: se un conduttore si sposta in un campo magnetico, o più precisamente, se varia il flusso concatenato con il conduttore, viene indotta in quest'ultimo una corrente elettrica. Il secondo fenomeno fu invece osservato per la prima volta nel 1820 dal fisico francese André-Marie Ampère: un conduttore percorso da corrente e immerso in un campo magnetico è sottoposto a una forza che dipende dalla geometria del sistema. L'invenzione decisiva per lo sviluppo della industria elettrica fu la lampadina a filamento incandescente ideata da Edison. Nacquero così in Europa e negli Stati Uniti le prime grandi centrali termiche destinate soprattutto all'illuminazione pubblica. Inoltre, in questo periodo, vennero realizzate le prime centrali idroelettriche. Sempre legate all'elettricità furono altre invenzioni non meno rivoluzionarie come il telefono (Bell), il grammofono (Edison), il cinematografo (da parte dei fratelli Lumière), apparecchi destinati a rivestire un ruolo fondamentale nella società di massa.



*Una delle prime aree industriali degli Stati Uniti, a Waterbury, nel Connecticut. Negli ultimi decenni del XIX secolo gli stati nordorientali del paese videro la nascita di fonderie e grandi fabbriche manifatturiere. Lo sviluppo industriale rese necessaria la costruzione di nuove strade, canali e ferrovie per il trasporto delle materie prime e dei prodotti finiti.*

L'impiego su vastissima scala dell'acciaio fu uno dei tratti distintivi della nuova epoca e permise nuove soluzioni nel campo della meccanica. L'acciaio è una particolare lega di ferro e carbonio che unisce in misura ottimale i vantaggi dell'elasticità con quelli della durezza. Con l'impiego di nuove tecniche di fabbricazione (metodo Bessemer e il forno Martin-Siemens) fu possibile produrne grandi quantità a costi relativamente modesti. L'acciaio rese possibile la costruzione di grandi edifici e di grandi ponti (ad esempio la Torre Eiffel).

Nel campo chimico vi furono tra le industrie fortissime competizioni che portarono in pochissimi anni alla scoperta di nuovi prodotti come fertilizzanti, coloranti sintetici, ammoniaca, dinamite, soda e prodotti farmaceutici quali il cloroformio, disinfettanti e analgesici.

Il settore meccanico del motore a combustione interna, che permise un eccezionale progresso nei trasporti, ebbe un notevole sviluppo, soprattutto dopo l'introduzione della catena di montaggio negli Stati Uniti a opera di Henry Ford nel 1913: nacquero così le "città dell'automobile" come Birmingham e Coventry (Gran Bretagna), Wolfsburg, Stoccarda, Monaco (Germania), Torino (Italia), Detroit (USA). Caratteristica fondamentale di questa rivoluzione industriale fu la stretta integrazione, oltre che tra scienza e tecnologia, fra tecnologia e attività produttive. Accanto alla produzione di macchine sempre più evolute, in grado di prendere il posto dell'operaio, comparve la catena di montaggio (prima applicazione nell'industria automobilistica Ford di Detroit): il che comportò un cambiamento profondo nello stesso modo di produrre.

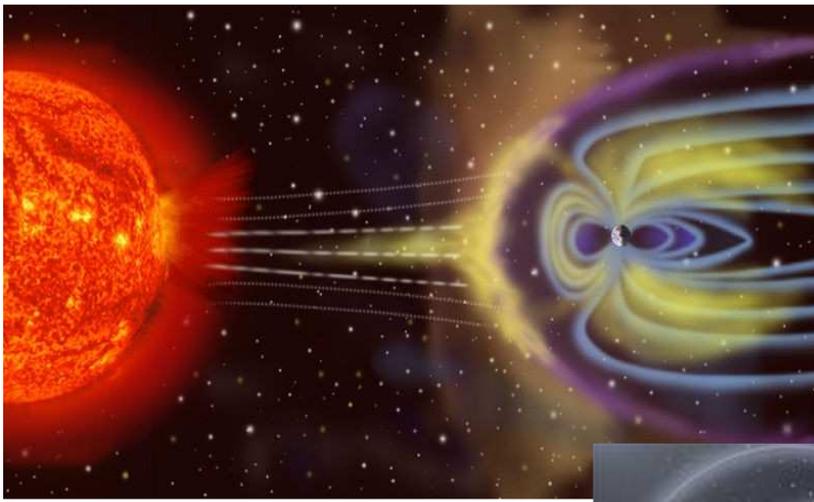


Operai della Ford Motor Company al lavoro, in una foto d'epoca. Nel 1913 l'industriale statunitense Henry Ford introdusse nel suo stabilimento il sistema della catena di montaggio per aumentare la produttività; tale sistema consiste in sostanza nell'assegnare a ogni operaio una sola fase della lavorazione.

<b>Le principali tappe del progresso tecnico-scientifico:</b>	
1864	Siemens-Martin costruisce l'altoforno per l'acciaio, sfruttando la scoperta di Bessemer.
1870	Monier introduce l'uso del cemento armato.
1876	Bell perfeziona il telefono inventato da Meucci.
1878	Edison costruisce la prima lampadina a luce elettrica.
1885	Vengono introdotti da Daimler e Benz i primi esemplari del motore a scoppio.
1886	Si ricava l'alluminio dalla bauxite.
1887	Nobel scopre la dinamite.
1895	Costruzione del primo apparecchio cinematografico per opera dei fratelli Lumière.
1901	Marconi sperimenta la prima trasmissione radio transatlantica.
1903	I fratelli Wright collaudano il primo aeroplano.
1909	Baekeland brevetta un nuovo prodotto, la bachelite precursore della plastica.



1878: Thomas Alva Edison inventa la lampadina a filamento incandescente.



# CAMPO MAGNETICO TERRESTRE



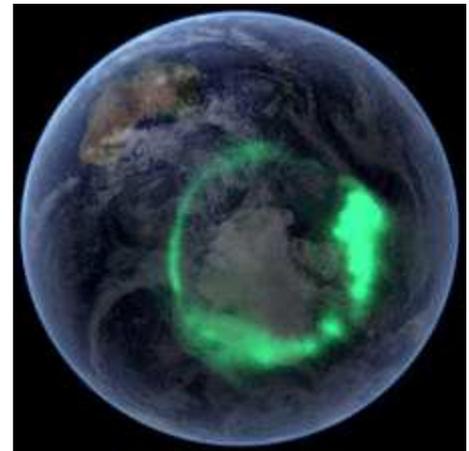
## **CAMPO MAGNETICO TERRESTRE**

Il campo geomagnetico è un fenomeno naturale presente sul pianeta Terra e comune a molti altri corpi celesti, come, ad esempio, il Sole. Esso è assimilabile a un dipolo magnetico con poli non coincidenti con quelli geografici e non statici, con un asse inclinato di  $11,3^\circ$  rispetto all'asse di rotazione terrestre. Nonostante le numerose ipotesi sulla presenza di questo campo, le teorie si sono orientate verso un modello analogo a quello di una dinamo ad autoeccitazione.

L'intensità del campo magnetico terrestre non è costante nel tempo, ma subisce notevoli variazioni sia in termini direzionali che di intensità. Queste variazioni hanno portato, nel corso delle ere geologiche, alla deriva dei poli magnetici e a ripetuti fenomeni di inversione del campo, con scambio reciproco dei poli magnetici Nord e Sud.

Il magnetismo terrestre ha una notevole importanza per la vita sulla Terra. Infatti esso si estende per svariate decine di migliaia di chilometri nello spazio, formando una zona chiamata magnetosfera, la cui presenza genera una sorta di "scudo" elettromagnetico che devia e riduce il numero di raggi cosmici. È proprio dall'interazione tra i raggi cosmici (vento solare) e la magnetosfera che viene originato lo splendido fenomeno dell'aurora polare.

La scoperta del campo magnetico terrestre risale al 1269 ad opera di Pierre de Maricourt, scienziato francese del 13° secolo, nel suo "*Epistula de magnete*" (Lettera sul magnete), in stampa nel 1558, mentre il campo gravitazionale fu scoperto, sempre per convenzione, da Isaac Newton nel 1687, anno di pubblicazione di "*Philosophiae naturalis principia mathematica*" (Principi matematici della filosofia naturale). L'unità di misura del campo geomagnetico nel sistema internazionale (SI) è il tesla (T), ma essendo valori molto piccoli, in pratica si utilizza il suo sottomultiplo nanoTesla (nT), pari a  $10^{-9}$  T. Dall'equatore ai poli, sulla superficie terrestre, il valore del campo varia da circa poco più di 20000 nT all'equatore ai circa 70000 nT delle zone polari.



Aurora australe catturata l'11 settembre 2005 da un satellite NASA.

## **POLI MAGNETICI**

Il polo magnetico, per definizione, è il punto dove il campo geomagnetico, generato nel nucleo interno terrestre, ha una direzione verticale.

Definire i poli magnetici con i termini Nord e Sud è solo una convenzione: infatti le linee di forza del campo magnetico terrestre entrano nell'emisfero nord ed escono dall'emisfero sud. Quindi, dal punto di vista magnetico, il polo Nord magnetico è quello posto a sud e viceversa. Infatti l'ago della bussola non potrebbe indicare un polo di uguale polarità, ma solo l'opposto.

L'asse geografico e l'asse magnetico terrestre non sono coincidenti. I poli magnetici, infatti, al contrario di quelli geografici che sono fissi, si spostano, non costantemente e lentamente, lungo una circonferenza di 160 km circa.

## **CARATTERISTICHE DEL CAMPO**

La prima esatta configurazione del campo magnetico terrestre fu opera di Gauss, nel 1832.

Tale campo può essere paragonato ad un campo prodotto da un dipolo situato al centro della terra e formante un angolo di  $11,3^\circ$  con l'asse terrestre.

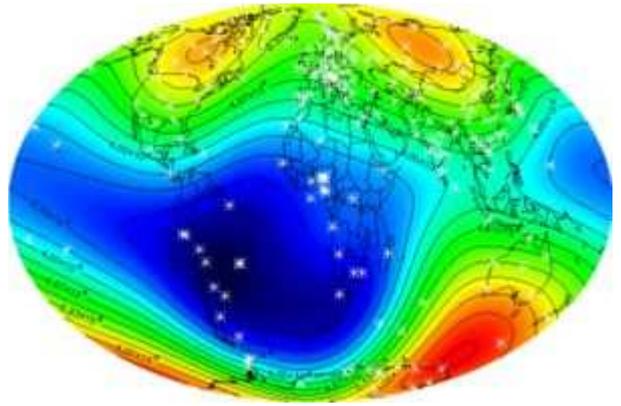
Il paragone ad un campo dipolare è solo un'approssimazione: non potrebbe infatti esistere un vero dipolo in quanto il centro della Terra si trova a temperature ben superiori ai 1043 K (circa  $770^\circ\text{C}$ ),

valore della temperatura di Curie al di sopra della quale qualunque minerale ferromagnetico perde le sue proprietà magnetiche.

Il campo geomagnetico si presenta con una massima intensità ai poli e una minima intensità all'equatore; non è omogeneo lungo la superficie terrestre, ma le sue variazioni non dipendono dalle variazioni geologiche o morfologiche.

Esso è costituito da tre parti:

- Il campo nucleare, originato dal nucleo esterno ad opera di sistemi di correnti elettriche;
- Il campo crostale, generato da rocce magnetizzate dal campo nucleare;
- Il campo esterno o atmosferico e il campo indotto interno, indotti da correnti elettriche prodotte nell'atmosfera terrestre.



Intensità del campo magnetico nel 2000 secondo i dati IGRF (International Geomagnetic Reference Field). I due estremi sono i colori rosso e blu, rispettivamente di 68000 nT e di 24000 nT.

## TEORIE SULLA PRESENZA DEL CAMPO INTERNO

Le ipotesi sull'origine del campo geomagnetico si dividono in due gruppi:

- Teorie magnetiche
- Teorie elettriche

### Teorie magnetiche:

- Terra completamente magnetizzata: nucleo e mantello assimilati ad un magnete sferico orientato secondo l'asse di rotazione terrestre. Tale teoria, espressa per la prima volta da Bacone e ripresa da Gilbert nel 1600, non era corretta poiché alla base della crosta si supera la temperatura di Curie e i minerali ferromagnetici perdono le loro proprietà magnetiche.
- Mantello omogeneo con magnete dipolare permanente posto al centro della Terra. Questa teoria, sostenuta da Gauss nel 1835, fu successivamente invalidata, oltre che per il precedente motivo (superamento temperatura di Curie) anche perché non spiegherebbe le variazioni e le anomalie del campo.

### Teorie elettriche:

- Presenza di una spira di corrente elettrica centrale quasi continua. Dopo la scoperta di Ørsted, secondo la quale i conduttori percorsi da corrente elettrica generavano un campo magnetico, si originò la teoria secondo la quale al posto del dipolo situato al centro del pianeta vi era un sistema di correnti elettriche. Questa teoria venne messa in disparte poiché il campo in tale situazione sarebbe in lento e progressivo decadimento e le cariche tali a generarlo molto intense e disposte in maniera decisamente improbabile.
- Dinamo ad autoeccitazione posta nel nucleo. Nel 1949 Edward Crisp Bullard ipotizzò che il campo magnetico terrestre fosse originato da un meccanismo simile a quello di una dinamo ad autoeccitazione. In una dinamo ad autoeccitazione un disco di materiale buon conduttore di elettricità, posto in rotazione, si muove attraverso le linee di flusso di un campo magnetico: in tali condizioni si genera, nel conduttore, una corrente elettrica indotta, che viene fatta fluire in un circuito. È proprio questa corrente che, attraversando un solenoide inserito nel circuito, genera e mantiene un campo magnetico, attraverso cui ruota il disco conduttore. Per innescare la dinamo è necessario quindi, all'inizio, la presenza di un campo magnetico esterno. Nel caso della Terra, per innescare la "geodinamo" basta che il nostro pianeta abbia attraversato occasionalmente qualche campo sporadico, probabilmente di origine solare, mentre erano già in atto i moti convettivi nel nucleo fluido. Tale teoria spiega benissimo le variazioni

dell'intensità del campo ma non le inversioni di polarità. Per spiegare anche quest'ultima particolarità, evoluzioni successive portarono il numero delle dinamo a due, accoppiate fra loro.

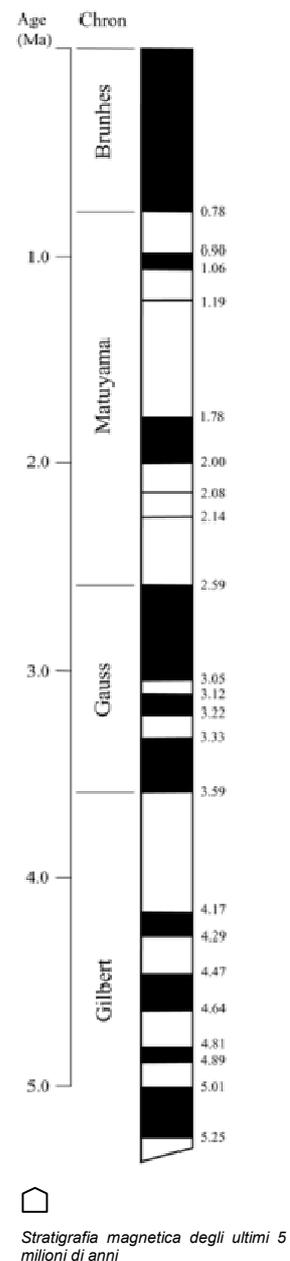
## VARIAZIONI DEL CAMPO

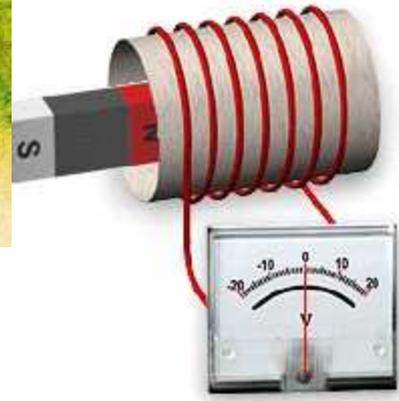
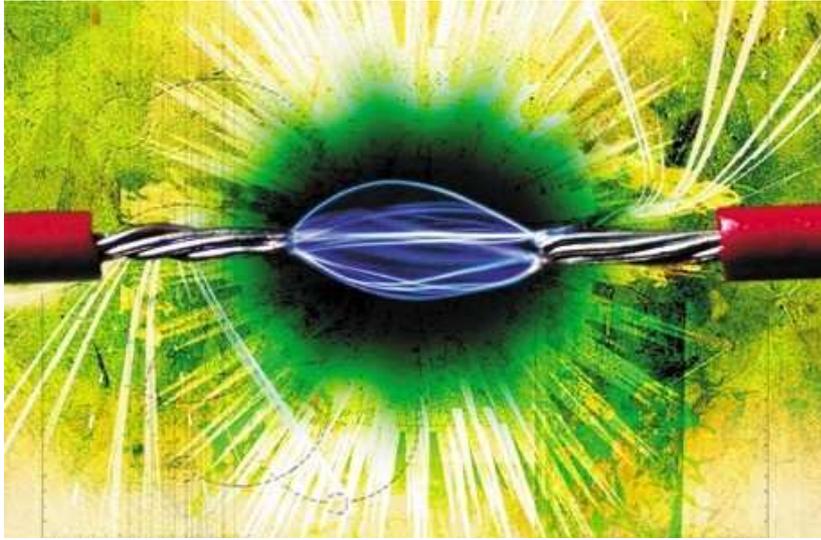
Il campo magnetico terrestre non è affatto costante ed uniforme. Le sue variazioni vengono calcolate sulla base dei valori medi giornalieri, mensili ed annuali. Il campo magnetico si definisce attivo quando si discosta dalla normalità. Le variazioni vengono analizzate in base alla loro ciclicità durata e origine. Si suddividono primariamente in esterne ed interne in base alla posizione dell'origine rispetto alla superficie terrestre. Le variazioni esterne si distinguono in regolari, intermedie (pulsazioni) e irregolari. Le variazioni interne vengono raggruppate in un'unica sezione: le variazioni secolari.

## PALEOMAGNETISMO

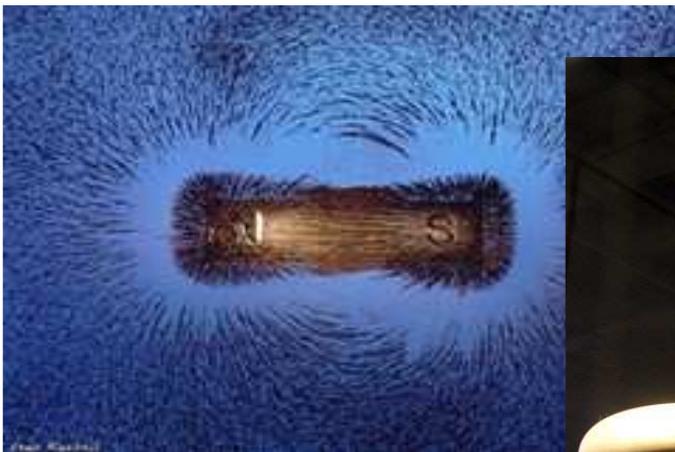
Il paleomagnetismo è essenzialmente lo studio del campo magnetico terrestre del passato, così come registrato da rocce e sedimenti nel momento della loro formazione. Questo è possibile perché molte rocce conservano una magnetizzazione propria, indotta dal campo geomagnetico esistente al momento della loro formazione. Questo fenomeno si verifica, ad esempio, quando una lava si raffredda. Al suo interno si formano numerosi cristalli di minerali, alcuni dei quali (come la magnetite) sono particolarmente sensibili alla presenza del campo magnetico terrestre che esiste al momento della loro formazione; tali minerali vengono magnetizzati perciò dal campo geomagnetico e diventano minuscole calamite permanenti, con il proprio piccolo ma sensibile campo magnetico orientato come quello terrestre che lo ha prodotto. Si è così scoperto che il campo geomagnetico esiste almeno da 3,5 miliardi di anni. Lo studio delle paleodirezioni del campo geomagnetico, registrato nei campioni di roccia di età diversa in diverse zone della Terra, ha reso possibile la compilazione di una scala delle polarità geomagnetiche dove sono riportate le inversioni del campo magnetico terrestre nel passato. Da ciò si è dedotto che il campo magnetico terrestre è passato alternativamente da *normale* cioè orientato con il polo nord come oggi, a *inverso*. Utilizzando numerosi campioni di rocce accuratamente datati, si è ricostruito in dettaglio la successione dei periodi di tempo a polarità normale e inversa che si sono susseguiti negli ultimi 5 milioni di anni circa: si è stabilita così una *scala stratigrafica paleomagnetica* divisa in 4 epoche magnetiche (Gilbert, Gauss, Matuyama, Brunhes) all'interno delle quali si sono riconosciuti alcuni brevi intervalli di inversioni (*eventi*) e degli intervalli ancora più brevi, la cui durata è per definizione minore ai 30.000 anni (*escursioni*). Secondo le ricerche di alcuni esperti in questo ambito (pubblicate recentemente nella rivista *Le scienze* – 14 aprile 2002 e 18 dicembre 2003) il calo di intensità del campo magnetico terrestre - pari a circa il 10 per cento negli ultimi 160 anni - potrebbe segnalare l'arrivo di uno degli sporadici capovolgimenti improvvisi del campo.

Lo studio del campo magnetico condotto lungo le dorsali oceaniche è stato determinante nella formulazione della teoria della tettonica delle placche. Infatti lungo le dorsali vi è una continua emissione di lava basaltica che, raffreddandosi, registra il campo geomagnetico presente prima di venire annessa ai lati della dorsale stessa e divisa in due dalle emissioni successive. Nel tempo questa bandatura simmetrica ha registrato le inversioni di polarità del campo magnetico terrestre e permesso di riconoscere il fenomeno dell'espansione dei fondali oceanici. Analizzando l'angolo tra il campo magnetico registrato e quello odierno è stato possibile calcolare la posizione delle masse continentali in un determinato tempo geologico, ed arrivare a ricostruire, incrociando i vari dati geologici e paleontologici, tutti gli spostamenti dei continenti e la loro frammentazione od unione nel tempo, sulla superficie del pianeta.





# ELETTROMAGNETISMO



# ELETTROMAGNETISMO

L'elettricità e il magnetismo possono sembrare molto diversi, per numerosi aspetti, ma in realtà sono fenomeni intimamente collegati. Il campo elettrico e quello magnetico, infatti, possono essere considerati aspetti differenti della stessa cosa, come i due lati di una moneta. È stato sperimentato, per esempio, che una corrente elettrica produce un campo magnetico e che un campo magnetico variabile produce un campo elettrico (legge di Faraday). L'elettromagnetismo è la branca della fisica che studia i fenomeni di natura elettrica e magnetica e le loro interazioni, il cui comportamento classico è descritto dalle equazioni di Maxwell.

## **ELETTROSTATICA: FORZA DI COULOMB E CAMPO ELETTRICO**

L'elettrostatica è lo studio dei fenomeni connessi a cariche elettriche in quiete, in particolare delle forze elettriche che si esercitano tra di esse e dei campi elettrici a esse associati.

Cariche elettriche esercitano delle forze le une sulle altre. La legge che descrive queste forze fu formulata per la prima volta da Coulomb sul finire del '700. Secondo la legge di Coulomb, l'intensità della forza elettrostatica fra due cariche  $q_1$  e  $q_2$  è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche per una costante di proporzionalità  $k$  che dipende dal mezzo in cui sono immerse le cariche, il cui valore nel vuoto è di  $8,99 \times 10 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ , e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (\text{N})$$

Nella legge di Coulomb la direzione della forza è lungo la linea che congiunge le due cariche.

Una volta teorizzata la legge di Coulomb, sorse il problema di quale fosse il meccanismo che trasmette la forza da  $q_1$  a  $q_2$ . Infatti la legge di Coulomb stabilisce soltanto che si esercita una forza, ma non dice alcunché del meccanismo con cui la forza si trasmette e suppone che la forza si trasmetta istantaneamente. Per ovviare a questo difetto della legge di Coulomb, M. Faraday introdusse il concetto di campo elettrico. Secondo Faraday l'esistenza di un campo elettrico nello spazio attorno a una carica elettrica è una proprietà intrinseca della natura. Questo campo elettrico è un campo di forza che esercita una forza sulle cariche situate sul campo stesso. Se una carica di prova,  $q_0$ , risente di una forza  $F$ , in una data posizione, il modulo dell'intensità del campo elettrico  $E$  in quella posizione è:

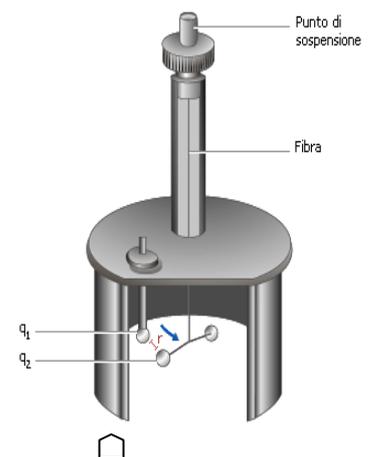
$$E = \frac{F}{q_0} \quad (\text{N/C o V/m})$$

La direzione orientata dell'intensità del campo elettrico è quella della forza agente sulla carica di prova positiva mentre il verso della forza dipende dal segno della carica.

Quindi il campo elettrico è la forza per unità di carica in una data posizione.

Inoltre il campo elettrico dipende dalla rapidità di variazione del potenziale elettrico rispetto allo spostamento.

Il modulo dell'intensità del campo elettrico può essere così trovato anche mediante la seguente equazione:



*Charles-Augustin de Coulomb studiò la forza elettrostatica per mezzo di una bilancia di torsione, in cui una carica elettrica  $q_1$  esercita una forza su una seconda carica  $q_2$ , posta all'estremità di un'asta libera di ruotare. Misurando l'intensità della forza in base all'angolo di torsione dell'asta rispetto all'asse di sospensione, Coulomb trovò che la forza elettrostatica è direttamente proporzionale alle due cariche interagenti e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Ne risultò la legge di Coulomb:  $F = K q_1q_2/r^2$ , dove  $K$  indica una costante di proporzionalità.*

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta s} \quad (\text{N/C o } \text{V/m})$$

Dove  $\Delta V$  è la differenza di potenziale. Si definisce il potenziale elettrico  $V$  come l'energia potenziale di una carica riferita alla carica stessa, ossia, come l'energia potenziale riferita all'unità di carica.

Il campo elettrico a una distanza  $r$  da una carica puntiforme  $q$  ha la seguente intensità:

$$E = \frac{kq}{r^2} \quad (\text{N/C o } \text{V/m})$$

Le linee del campo elettrico:

1. hanno in ogni punto la direzione del vettore campo elettrico  $E$  in quel punto
2. partono dalle cariche positive o dall'infinito
3. finiscono nelle cariche negative o all'infinito
4. sono più dense dove  $E$  ha un'intensità maggiore, in particolare, il numero di linee entranti o uscenti da una carica è proporzionale all'intensità della carica.

## MAGNETISMO: FORZA DI LORENTZ E CAMPO MAGNETICO

Il magnetismo è l'insieme dei fenomeni e delle leggi che descrivono ciò che accade in presenza di magneti o di materiali conduttori percorsi da una corrente elettrica.

La forza che un campo magnetico esercita su una carica in movimento, è detta forza di Lorentz. Detta  $q$  la carica in questione,  $v$  la sua velocità e  $B$  il campo magnetico, la forza esercitata da  $B$  su  $q$  è:

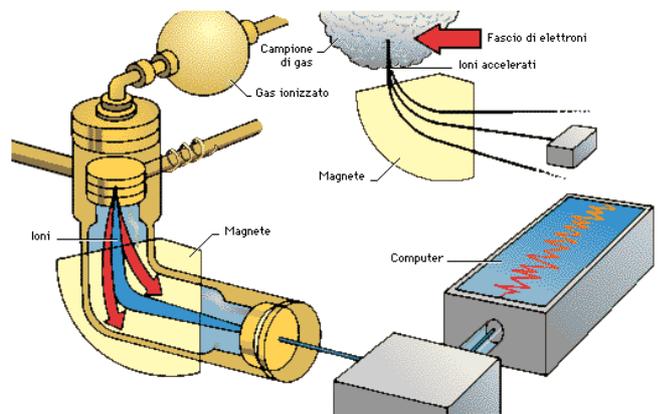
$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (\text{N})$$

Trattandosi di un prodotto vettoriale, l'intensità della forza di Lorentz è massima quando  $v$  e  $B$  sono perpendicolari, vale a dire quando la carica si muove in direzione ortogonale alle linee di forza del campo, ed è nulla quando i due vettori sono paralleli. Le regole del prodotto vettoriale permettono inoltre di determinare direzione e verso della forza di Lorentz: la direzione è quella perpendicolare al piano individuato da  $v$  e da  $B$ ; il verso è dato dalla regola della mano destra: se il pollice punta nella direzione della velocità e le altre quattro dita in quella del campo, il verso della forza di Lorentz è quello uscente dal palmo della mano.

Quindi affinché un campo magnetico eserciti una forza su un particella, essa deve avere una carica e deve essere in movimento.

La forza magnetica  $F$  punta nella direzione perpendicolare sia a  $B$  che a  $V$ .

Quando la velocità  $V$  di una particella è parallela a  $B$  la accelerazione della particella è zero, quindi la sua velocità rimane costante. Il moto descritto dalla particella è un moto



In uno spettrometro di massa, gli ioni del campione di gas prodotti da un fascio di elettroni vengono accelerati verso un magnete permanente. Nel campo generato da quest'ultimo, per effetto della forza di Lorentz, particelle di massa diversa percorrono traiettorie diverse, in modo che solo gli ioni aventi una determinata massa colpiscono un rivelatore opportunamente posizionato. I dati vengono raccolti ed elaborati per mezzo di un computer o di altra apparecchiatura elettronica.

rettilineo uniforme, che ha per traiettoria una linea retta tracciata lungo le linee del campo magnetico.

Quando la velocità  $V$  di una particella è perpendicolare a  $B$ , la forza magnetica è perpendicolare alla velocità e punta sempre verso un centro comune: di può affermare quindi che il moto descritto dalla particella è un moto circolare uniforme.

In questo caso la forza centripeta può essere uguagliata alla forza magnetica:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Quando una particella ha una velocità iniziale inclinata di un certo angolo rispetto a  $B$ , ci sono una componente della velocità parallela a  $B$  e una componente perpendicolare a  $B$ . la componente parallela non risente di alcuna forza, e quindi rimane costante nel tempo, mentre quella perpendicolare determina un moto circolare uniforme. Combinando i due moti si ottiene un moto elicoidale.

Questo moto è descritto dalle leggi del moto rettilineo uniforme sul piano  $x$  e del moto circolare uniforme sul piano  $y$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} x = v_x t = v \cos \alpha \cdot t \\ y \rightarrow v_y = v \sin \alpha = \frac{2\pi R}{T} \end{array} \right.$$

Infine, l'intensità della forza su un segmento di filo di lunghezza  $L$  percorso da una corrente  $i$  che forma un angolo  $\alpha$  con un campo magnetico  $B$  è data dalla formula :

$$F = iLB \sin \alpha \quad (\text{N})$$

La direzione e il verso di tale forza sono dati dalla regola della mano destra.

Il campo magnetico dà un'indicazione della perturbazione causata dalla presenza di un magnete in una data regione. Un magnete è caratterizzato da due poli, chiamati polo nord e polo sud. Questi poli non possono essere separati.

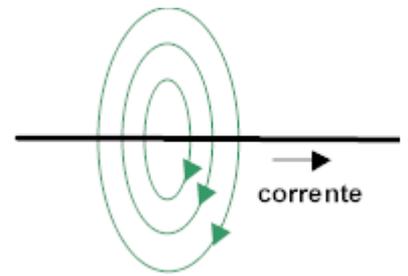
I campi magnetici possono essere rappresentati mediante delle linee molto simili a quelle che descrivono il campo elettrico. In particolare più dense sono le linee più intenso è il campo. Le linee del campo magnetico, che escono dal polo nord ed entrano nel polo sud, sono sempre linee chiuse. L'intensità del campo magnetico è definita attraverso la relazione data con l'equazione delle forza di Lorentz e la sua unità di misura del S.I. è il Tesla (T):

$$B = \frac{F}{qv \sin \alpha} \quad (\text{T})$$

ESEMPI DI CAMPI MAGNETICI:

Il campo magnetico prodotto da un filo percorso da corrente è dato dall'equazione:

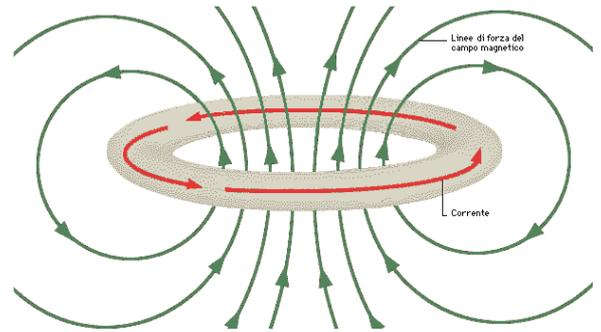
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d} \quad (\text{T})$$



Linee di forza in un campo magnetico prodotto da un filo percorso da corrente

Il campo magnetico prodotto da una spira percorsa da corrente nel suo centro è dato dall'equazione:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (\text{T})$$

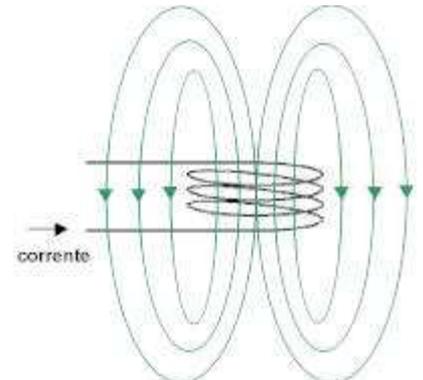


Una spira percorsa da corrente elettrica produce intorno a sé un campo magnetico come quello qui rappresentato. Il verso delle linee di forza è determinato dal verso della corrente: se fosse orario, anziché antiorario come in figura, l'orientazione del campo sarebbe quella opposta. Come si può osservare, le linee di forza sono rigorosamente chiuse, avvolte intorno alla spira.

Il campo magnetico prodotto da un solenoide percorso da corrente è dato dall'equazione:

$$B = \mu_0 n i \quad (\text{T})$$

dove  $n$  è la densità di spire  $n = \frac{N}{l}$

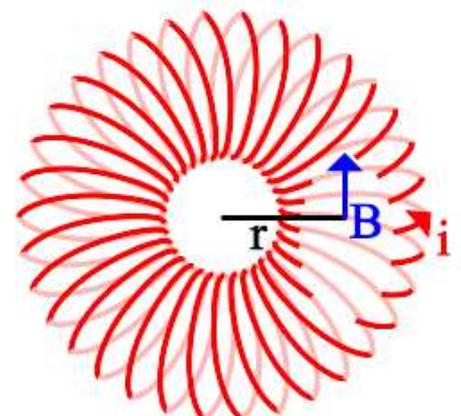


Linee di forza di un campo magnetico prodotto da un solenoide percorso da corrente.

Il campo magnetico prodotto da un toroide percorso da corrente, è dato dall'equazione:

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi R} \quad (\text{T})$$

dove  $N$  è il numero di avvolgimenti.



Linee di forza di un campo magnetico prodotto da un toroide percorso da corrente

## ELETTROMAGNETISMO: EQUAZIONI DI MAXWELL E CAMPO ELETTROMAGNETICO.

Nel 1864 James Clerk Maxwell prese tutte le equazioni dell'elettricità e del magnetismo allora note e le combinò ottenendo 4 equazioni che permettevano di dedurre tutti i risultati della teoria elettromagnetica. Queste equazioni presero il nome di equazioni di Maxwell. Le quattro equazioni sono :

1. **Teorema di Gauss per l'elettricità:** il flusso del campo elettrico uscente da una superficie chiusa è uguale al rapporto tra la somma delle cariche contenute all'interno della superficie e la costante dielettrica  $\epsilon_0$ :

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

dove  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

2. **Teorema di Gauss per il magnetismo:** il flusso del campo magnetico uscente da una superficie chiusa è sempre nullo:

$$\phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

3. **Legge di Faraday-Neumann-Lenz dell'induzione elettromagnetica:** la circuitazione del campo elettrico indotto da un campo magnetico variabile nel tempo lungo una linea chiusa è uguale al rapporto, cambiato di segno, tra la variazione di flusso del campo magnetico concatenato con percorso considerato e l'intervallo di tempo in cui è avvenuta la variazione:

$$C_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

4. **Teorema di Ampère con l'aggiunta di un nuovo termine detto corrente di spostamento:** la circuitazione del campo magnetico, lungo un percorso chiuso, è uguale al prodotto della permeabilità magnetica  $\mu_0$  per la somma della corrente effettiva e di quella di spostamento:

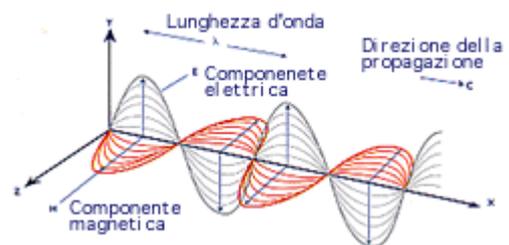
$$C_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{concatenate} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

## SIGNIFICATO EMPIRICO DELLE EQUAZIONI DI MAXWELL

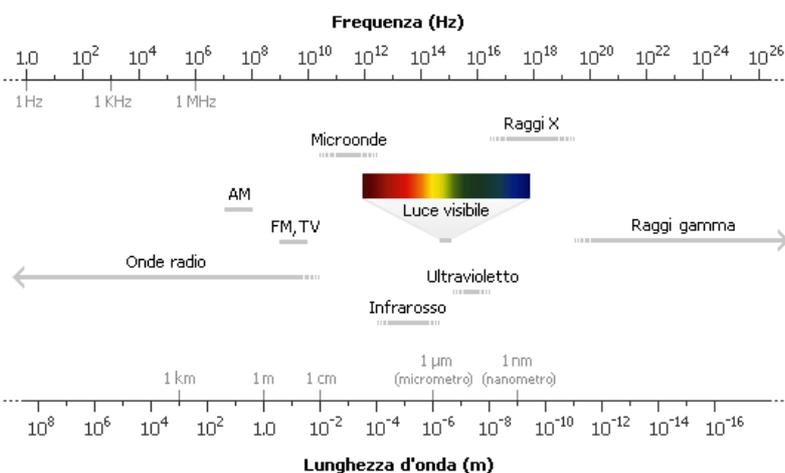
<i>EQUAZIONE</i>	<i>SIGNIFICATO</i>
<b>Prima</b>	Descrive il campo elettrico generato da cariche ferme, secondo la legge di Coulomb.
<b>Seconda</b>	Descrive il campo magnetico; in particolare indica che non esistono "cariche magnetiche" isolate (diversamente da quanto accade per la cariche elettriche), ma che il polo nord di una sorgente di campo magnetico è sempre legato al polo sud.
<b>Terza</b>	Esprime la legge di <i>induzione elettromagnetica</i> , secondo cui un campo magnetico variabile nel tempo produce un campo elettrico (e, per esempio, una corrente in un circuito, se questo è immerso nel campo magnetico variabile).
<b>Quarta</b>	Afferma che un campo magnetico viene generato sia da una corrente continua, sia da un campo elettrico variabile nel tempo; in quest'ultimo caso si introduce una quantità detta <i>corrente di spostamento</i> , che non viene generata da cariche elettriche in movimento, ma produce effetti magnetici paragonabili a una corrente vera e propria.

La terza e la quarta equazione esprimono la natura inscindibile di campo elettrico e campo magnetico, per cui la variazione di uno è sorgente dell'altro, e di conseguenza introducono il concetto di campo elettromagnetico come entità unica.

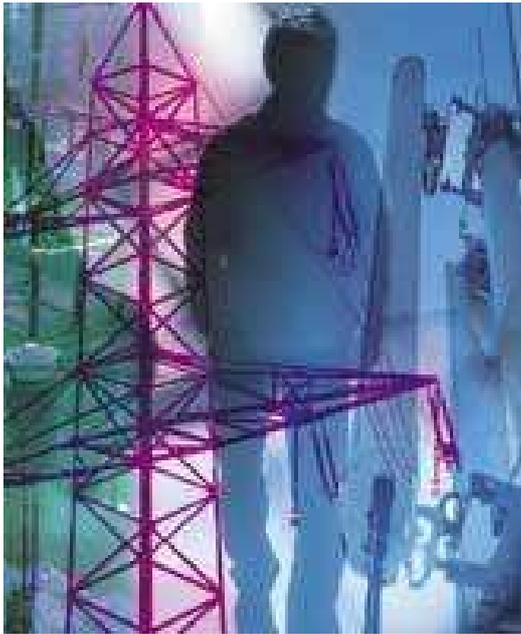
Il campo elettromagnetico è causato dall'interazione tra il campo magnetico e quello elettrico. Le onde elettromagnetiche sono campi elettrici e magnetici oscillanti che si propagano. Il campo elettrico e quello magnetico in un'onda elettromagnetica sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione. Qualsiasi carica accelerata irradia energia sotto forma di onda elettromagnetica. Le onde elettromagnetiche possono viaggiare nel vuoto tutte con la stessa velocità,  $c=300\ 000\ \text{Km/s}$ , cioè la velocità della luce nel vuoto. Le onde elettromagnetiche possono avere una frequenza qualsiasi compresa fra 0 e infinito. L'intero intervallo di frequenze è chiamato *spettro elettromagnetico*.



La radiazione elettromagnetica si propaga in direzione ortogonale al campo elettrico e magnetico.



Le onde elettromagnetiche si distinguono per la frequenza di oscillazione del campo che propagano: come è mostrato nell'illustrazione, onde appartenenti ai diversi intervalli di frequenza manifestano proprietà diverse, e vengono utilizzate per applicazioni differenti. Le frequenze che vanno da  $10^2\ \text{Hz}$  (100 KHz) a  $10^{11}\ \text{Hz}$  (100 GHz) sono definite anche onde hertziane: vengono usate per la radiocomunicazione e in campo industriale. Le onde infrarosse hanno origine nelle vibrazioni molecolari: sono, ad esempio, caratteristiche dei laser. Nell'intervallo del visibile cadono le onde provocate dalle transizioni degli elettroni atomici e molecolari e dai corpi incandescenti, e percepite dall'occhio umano. Della medesima origine sono le onde ultraviolette e i raggi X, questi ultimi generati da transizioni elettroniche fra orbitali atomici molto interni, e dunque caratterizzati da elevata frequenza e considerevole potere penetrante: sono perciò utilizzati nelle indagini e cure mediche e, nell'industria, per le analisi dei materiali. Le onde gamma sono di altissima frequenza, superiore a  $10^{19}\ \text{Hz}$  (10 miliardi di GHz): sono caratteristiche delle reazioni nucleari e altamente penetranti, e dunque particolarmente utili nella cura dei tumori e nel trattamento industriale degli alimenti. Raggi ultravioletti, X e gamma di origine celeste sono anche ampiamente usati in astronomia, per lo studio della struttura e dell'evoluzione dell'universo.



# CAMPI ELETTROMAGNETICI NON IONIZZANTI: INNOCUI O PERICOLOSI?



# ELETTROSMOG

## Campi elettromagnetici non ionizzanti: innocui o pericolosi?

Viviamo tra i campi elettromagnetici. Basta scaldare una vivanda nel forno a microonde, asciugarsi i capelli col phon o semplicemente fare una passeggiata in campagna, sotto i cavi che trasportano l'energia elettrica, per essere soggetti alla loro azione.

Oggi molte voci sostengono che l'esposizione favorisca l'insorgenza di numerosi disturbi e di alcune forme tumorali, in particolare della leucemia infantile ma, nonostante la mole di dati che la letteratura scientifica ha prodotto sull'argomento nel corso degli ultimi vent'anni, le evidenze sperimentali sono estremamente contrastanti.

Nel 1873 il fisico scozzese Maxwell postula l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio alla velocità della luce. Producendo le prime onde elettromagnetiche artificiali con un generatore, il fisico tedesco Heinrich Hertz conferma l'intuizione nel 1887. Anni dopo, questa scoperta renderà possibili le più straordinarie invenzioni nel campo della telecomunicazione: dalla radio alla televisione, dal radar al telefono senza fili. L'elettromagnetismo sta anche alla base di numerose applicazioni industriali e medico - diagnostiche. Nei primi anni sessanta dello scorso secolo dal mondo della medicina si levano i primi sospetti: le emissioni elettromagnetiche, sempre più diffuse nell'ambiente, provocherebbero insonnia, emicrania, stress. Ancora qualche tempo e l'accusa si aggrava: le onde di Hertz sarebbero associate ad alcune forme di cancro.

Tutto questo rappresenta un altro caso in cui il progresso scientifico rivela la sua ambiguità.

## SORGENTI DI CAMPI E DI RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

*Esempi di campi elettromagnetici a bassa frequenza (50-60Hz) e ad alta frequenza (300kHz-300Ghz).*



I campi elettromagnetici non ionizzanti vengono divisi, a seconda della frequenza di emissione, e, quindi, in base alla sorgente che li produce in *campi a bassa frequenza* (30 - 300 Hz) e in *campi ad alta frequenza* (300 KHz - 300 GHz).

I campi elettromagnetici a bassa frequenza sono chiamati anche campi a frequenza industriale o, in termini abbreviati, ELF (Extremely Low Frequency).

Le centrali di produzione, le stazioni di trasformazione e le linee di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica, gli impianti elettrici civili e industriali, le apparecchiature elettriche per la casa (elettrodomestici), per l'ufficio o per applicazioni industriali e sanitarie producono campi elettromagnetici che oscillano con una frequenza di 50 Hz in Europa (di 60 Hz negli U.S.A.) e quindi sono compresi nella categoria di frequenza dei campi ELF.

In questa categoria, molto rilevanti per la salute umana sono le sorgenti delle radiazioni elettromagnetiche prodotte dagli elettrodomestici e cioè il cosiddetto *magnetismo quotidiano*.

Le sorgenti dei campi magnetici prodotti dagli elettrodomestici sono generalmente i motori e i trasformatori che li fanno funzionare, e i rilevamenti fatti in prossimità degli apparecchi casalinghi e le indagini di carattere epidemiologico hanno dato risultati per certi versi

<b>Campo Elettromagnetico ad Alta Frequenza</b>	<b>Campo Elettromagnetico a Bassa Frequenza</b>
<b>AF</b>	<b>BF</b>
Forni a microonde	Trazione elettrica Ferroviaria
Impianti di allarme edifici	Linee elettriche ad alta tensione
Impianti di allarme aeroporti	Trasformatori
Rilevatori di metalli	Quadri elettrici domestici
Trasmettitori radio televisivi	Scaldabagno elettrico
<i>Onde lunghe e medie</i>	Coperte elettriche
<i>Onde corte</i>	Elettrodomestici per la cucina
<i>UKW; VHF - TV; UHF - TV</i>	Apparecchi per il bricolage
Telesivori	Telesivori
Computer	Computer
Macchine industriali per riscaldamento	Macchine industriali per riscaldamento
Macchine industriali per saldatura	Macchine industriali per saldatura
Macchine industriali per indurimento	Macchine industriali per indurimento
Saldatura	Saldatura
Vulcanizzazione	Vulcanizzazione
Essiccamento dielettrico	Essiccamento dielettrico
Trasmettitori per CB	Produzione dell'alluminio
Telefoni cellulari (TACS GSM)	Elettrolisi del cloro
Radiotelefoni	
Telefoni senza fili	
Interfoni	
Impianti radar	
Apparecchi per magnetoterapia	
Apparecchi per radioterapia	
Apparecchi per Ipertermia	
Apparecchi per Marconiterapia	

inattesi. Alcune ricerche hanno riscontrato, ad esempio, che gli uomini che utilizzano abitualmente il rasoio elettrico sono più soggetti ad ammalarsi di tumori e leucemie. L'ambiente con più strumenti a rischio è la cucina, dove si concentra la maggior degli elettrodomestici della casa; tra questi, fornelli elettrici, forni a microonde, mixer e aspirapolvere sono quelli che presentano valori di campi più elevati.

I campi elettromagnetici ad alta frequenza comprendono i campi a radiofrequenza (300KHz – 300MHz) e microonde (300MHz – 300GHz).

Le principali applicazioni tecnologiche che danno luogo ad una significativa presenza di campi elettromagnetici a radiofrequenza e microonde nell'ambiente esterno sono collegate ai vari servizi di telecomunicazione (emittenti radiotelevisive e stazioni radio base per la telefonia cellulare).

In questi ultimi decenni si è assistito ad una grande diffusione di sorgenti di campi elettromagnetici ad alta frequenza negli ambienti domestici e di lavoro e ad un notevole aumento della loro varietà, sia in applicazioni industriali e sanitarie sia per uso personale. Ci si riferisce tanto agli apparecchi che funzionano a stretto contatto con l'utilizzatore (telefonini, telefoni senza fili o "cordless", ricetrasmittenti di varie categorie, babyphone) quanto a quelli che operano in posizioni fisse, sottoponendo ad una esposizione più o meno rilevante chi transita o sosta nei pressi (apparecchi industriali, forni a microonde, sistemi di allarme antifurto e antintrusione, dispositivi anticaccheggio, varchi magnetici).

Oggetto della misura	Campo elettrico	Campo magnetico
Rasoio elettrico	30 V/m	100 $\mu$ T
Spazzolino elettrico	50 V/m	90 $\mu$ T
Frullatore	80 V/m	70 $\mu$ T
Aspirapolvere (a 10 cm)	50 V/m	60 $\mu$ T
Asciugacapelli in funzione	20 V/m	20 $\mu$ T
Asciugacapelli collegato	80 V/m	20 $\mu$ T
Macchina da scrivere elettric.	3 V/m	10 $\mu$ T
Radio	100 V/m	8 $\mu$ T
Tubo a fluorescenza	-	8 $\mu$ T
Lavatrice (sui comandi)	100 V/m	5 $\mu$ T
Ventilatore	1 V/m	1 $\mu$ T
Ferro da stiro	60 V/m	4 $\mu$ T
Lampadina (100 w a 10 cm)	60 V/m	3 $\mu$ T
Fotocopiatrice in funzione	80 V/m	2 $\mu$ T
Fotocopiatrice accesa	1 V/m	1 $\mu$ T
Frigorifero (motore)	-	2 $\mu$ T
Registratore (10 cm)	90 V/m	1.5 $\mu$ T
Televisore (comandi)	120 V/m	1.1 $\mu$ T
Giradischi	100 V/m	1 $\mu$ T
Telefono	8 V/m	50 nT
Interruttore (10 cm)	50 V/m	30 nT
Spina (non funzionante)	60 V/m	-



Esempi di campi elettrici e magnetici prodotti da apparecchi elettrici quotidiani.

## STUDI EPIDEMIOLOGICI

Le indagini che per prime hanno messo sotto accusa le emissioni elettromagnetiche sono state di carattere epidemiologico. L'epidemiologia è la disciplina medica che cerca di associare, su base statistica, l'esposizione a un agente sospetto all'insorgenza di una determinata malattia.

Gli studi che sostengono di aver trovato correlazioni significative tra l'esposizione a radiazione elettromagnetica a bassa frequenza e l'insorgenza di effetti a lungo termine (quali leucemia e vari tipi di tumore) sono spesso contestati sulla base della presunta non significatività del risultato, dovuta principalmente alla ristrettezza del campione.

### Effetti acuti

Gli effetti acuti si manifestano a breve tempo dall'esposizione e, il più delle volte, cessano quando si rimane per un tempo sufficiente lontani dalla sorgente del campo. Su di essi si hanno ormai solo pochi dubbi, tanto che già da qualche anno le associazioni internazionali si sono preoccupate di stabilire dei limiti e di fornire indicazioni precise sulle intensità dei campi potenzialmente pericolose per la salute. Qualche anno fa una ricerca svedese che voleva analizzare le conseguenze delle lunghe ore di lavoro davanti al videoterminale, ha messo bene in evidenza alcuni malesseri provocati dall'esposizione ai campi elettromagnetici emessi dallo schermo del computer; un lavoratore su sette accusava disturbi di diverso tipo: mal di testa, brividi, senso di affaticamento e allergie.

Ancora negli anni '60 le prime ricerche, compiute in Unione Sovietica, su gruppi di lavoratori particolarmente esposti all'azione dei campi, riscontrarono una frequenza piuttosto elevata di insonnia e mal di testa. Recentemente, uno studio statunitense ha rilevato una frequenza anomala di mal di testa, brividi e dolori al petto tra i lavoratori impiegati nelle stazioni radiofoniche e televisive.

Tra gli effetti a breve termine, una posizione di rilievo è occupata dalle possibili conseguenze dell'esposizione ai campi elettromagnetici emessi dai computer sulle gestanti e sulla salute del nascituro. Il sospetto è sorto all'inizio degli anni ottanta, quando alcuni epidemiologi si accorsero che la frequenza di aborti e malformazioni fetali era leggermente più elevata tra le lavoratrici di alcuni enti che utilizzavano i videoterminali. I giornali diedero molto rilievo alla notizia, e la paura crebbe nel 1982 in seguito a uno studio dello spagnolo Delgado, che dimostrava che embrioni di pollo sottoposti all'azione di un campo magnetico pulsante sviluppavano delle malformazioni. Le ricerche successive, tuttavia, non confermavano i risultati.

### Effetti a lungo termine

Oggi l'attenzione dei ricercatori e dei media è concentrata sulle possibili forme tumorali provocate dall'esposizione ai campi elettromagnetici e il moltiplicarsi degli studi di epidemiologia che legano il cancro alla presenza di linee elettriche ad alta tensione in prossimità di case e centri abitati ha destato perplessità e preoccupazione, sebbene la questione sotto il profilo scientifico sia molto controversa.

Il primo studio che dimostra un'associazione tra esposizione a campi elettromagnetici a 60Hz e tumori infantili risale al 1979 e fu pubblicato sulla rivista di epidemiologia più prestigiosa del mondo: l' *America Journal of Epidemiology*. L'articolo, firmato dall'epidemiologa Nancy Weirtheimer e dal fisico Ed Leeper, prendeva in esame i casi di 344 bambini morti di tumore tra il 1950 e il 1973 nella contea di Denver in Colorado dopo due anni di lavoro e dopo aver esaminato tutti i fattori di rischio senza averne cavato nulla, la ricercatrice si accorse quasi per caso che l'unico elemento che accomunava le abitazioni in cui erano vissuti i bambini era la vicinanza ad una centralina elettrica o a una linea dell'alta tensione. La ricercatrice concluse che le leucemie e i tumori al cervello che avevano ucciso i bambini dovevano esser in qualche modo collegati alla vicinanza delle loro abitazioni a sorgenti di campi elettromagnetici con una frequenza di 60 Hz.

Lo studio fu oggetto di diverse critiche di tipo metodologico (la principale fonte di dubbio veniva dal fatto che la valutazione dell'esposizione al campo magnetico, non era basata su misure dirette di quest'ultimo nelle abitazioni).

Nel 1986, lo svedese Tomenius analizzò i casi di tumore infantile verificatisi nella contea di Stoccolma tra il 1958 e il 1973, deducendo l'esposizione al campo dalla distanza delle linee elettriche e da misurazioni effettuate all'ingresso delle abitazioni. La ricerca riscontrò una frequenza più elevata di tumori nella popolazione residente in prossimità di linee elettriche da 200 KV.

Due anni dopo lo studio di Tomenius. L'americano David Savitz pubblicò una ricerca che analizzava i casi di leucemia infantile verificatisi a Denver tra il 1976 e il 1983. In un certo senso era il proseguimento della ricerca di Nancy Weirtheimer, ma l'esposizione dei campi era valutata attraverso misurazioni effettuate nelle varie stanze della casa. Savitz riscontrò un'associazione tra leucemie, tumori al cervello ed esposizione ai campi elettromagnetici.

Gli studi furono soggetti a molte critiche. A dipanare, almeno in parte, la complicata questione, arrivò nel 1992 uno studio svedese. Una ricerca estremamente accurata e talmente vasta da mettere sotto esame la popolazione di un'intera nazione. Per portarla a termine Maria Feychting e Anders Ahlbom presero in considerazione le abitazioni che, su tutto il territorio svedese, si trovavano a meno di trecento metri di distanza da una linea da 200 a 400 KV, consultando i registri dell'anagrafe e della compagnia elettrica svedese. Registrarono tutti i casi di tumori infantili e quelli di leucemie e tumori al cervello negli adulti, verificatisi tra il 1960 e il 1985 nella popolazione svedese che aveva abitato nel corridoio di 300 metri dalle linee dell'alta tensione e che ammontava a circa mezzo milione di persone. I risultati della ricerca mostrarono un aumento significativo del rischio di leucemia infantile per i campi magnetici superiori a 0,2 microtesla, un rischio che cresceva se i campi considerati erano di maggiore intensità. Nessuna relazione significativa fu invece trovata tra l'esposizione ai campi elettromagnetici ed i tumori al cervello.

Lo studio svedese riaccese la discussione e nuove indagini si susseguirono. L'accusa mossa a questi ricercatori era l'inconsistenza dei dati epidemiologici e la mancanza di una prova biologica conclusiva che chiarisse il meccanismo d'azione dei campi elettromagnetici sui tessuti organici.

Nel 1995 l'Istituto Superiore di Sanità pubblicò un documento in cui si riconosceva che gli studi epidemiologici "...indicano in modo coerente un incremento di rischio di leucemia infantile in relazione a un'esposizione a livelli di induzione magnetica superiori a 0,2 microtesla."

Recentemente gli studi si sono susseguiti in maniera massiccia, soprattutto quelli che riguardano le tecnologie più moderne, come ad esempio la correlazione tra l'utilizzo del telefono cellulare e l'insorgenza di tumori, i cui risultati si sono rivelati tuttavia controversi.

Infatti numerosi ricercatori sostengono che il potere di risoluzione delle indagini epidemiologiche non sia sufficiente a rivelare la presenza di un effetto di lieve entità. Effettivamente dai dati emerge che se l'esposizione ai campi elettromagnetici fosse veramente legata all'insorgenza di certi tipi di tumore, in particolare leucemie e tumori al cervello, l'effetto sarebbe piuttosto ridotto. Per questo motivo i rapporti dei vari comitati interpellati, come quello del *National Academy of Science* del 1997, hanno sempre sottolineato la necessità di spostare le ricerche all'individuazione di un meccanismo biologico plausibile in grado di rendere conto dell'effetto cancerogeno, e negli ultimi anni numerosi gruppi di biologi si sono assunti il compito di indagare l'influenza che l'esposizione ai campi elettromagnetici esercita sulla fisiologia degli organismi, sui meccanismi cellulari e sulle molecole biologiche.

## **EFFETTI BIOLOGICI ACCERTATI**

Nel corso degli ultimi decenni molte ricerche hanno dimostrato che l'esposizione alle radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti è in grado di produrre effetti biologici.

### Campi elettrici e magnetici ELF

Gli studi biologici fino ad ora condotti hanno dimostrato la presenza di effetti immediati e deterministici, spesso anche di natura transitoria, dovuti all'esposizione a campi elettrici e magnetici a queste frequenze, quali ad esempio l'insorgenza di magnetofosfene, cioè la sensazione di alone colorato alla periferia del campo visivo a seguito dei movimenti della testa, o la riduzione del ritmo cardiaco. La soppressione di secrezione di melatonina (un ormone collegato ai nostri ritmi giorno-notte), mentre per quanto riguarda la presenza di eventuali effetti a lungo termine i risultati degli studi biologici sono ancora incerti.

### Campi ad alta frequenza

Un effetto accertato delle onde elettromagnetiche cosiddetto ad alta frequenza è l'innalzamento della temperatura dei tessuti biologici attraversati, soprattutto quelli più ricchi d'acqua. Esistono studi che documentano svariati effetti dei campi elettromagnetici sulla salute umana.

In particolare le radiazioni di microonde causano almeno due meccanismi che sono alla base dello sviluppo di un cancro: formazioni di micronuclei e shock termico delle proteine.

- shock termico delle proteine: quando avviene il surriscaldamento di punti nei tessuti umani, il corpo produce proteine per far fronte allo shock termico del tentativo di proteggere e riparare le cellule surriscaldate. Queste proteine proteggono anche le cellule cancerose rendendole resistenti alle terapie. In molti tumori il numero di queste proteine risulta altissimo.
- Formazione di micronuclei: i micronuclei sono filamenti spezzati del DNA ed indicano che le cellule non sono più in grado di ripararsi correttamente. Gli studi condotti dall'industria delle telecomunicazioni confermano che le radiazioni dei cellulari producono micronuclei nelle cellule ematiche umane a livelli ben più bassi rispetto a quelli previsti dalle normative in materia di esposizione del governo statunitense. Tutti i tumori sono causati da un danno genetico e la presenza di micronuclei nelle cellule è il primo segnale d'allarme del cancro. Secondo studi recenti alcune ore di esposizione a microonde molto basse rispetto ai limiti di

legge attuali, causerebbero un forte aumento dell'attività delle cellule tumorali e danni genetici a queste non più sanabili e trasmessi alle generazioni di cellule successive.

Inoltre le radiazioni di microonde causano un calo della produzione degli ormoni tiroidei.

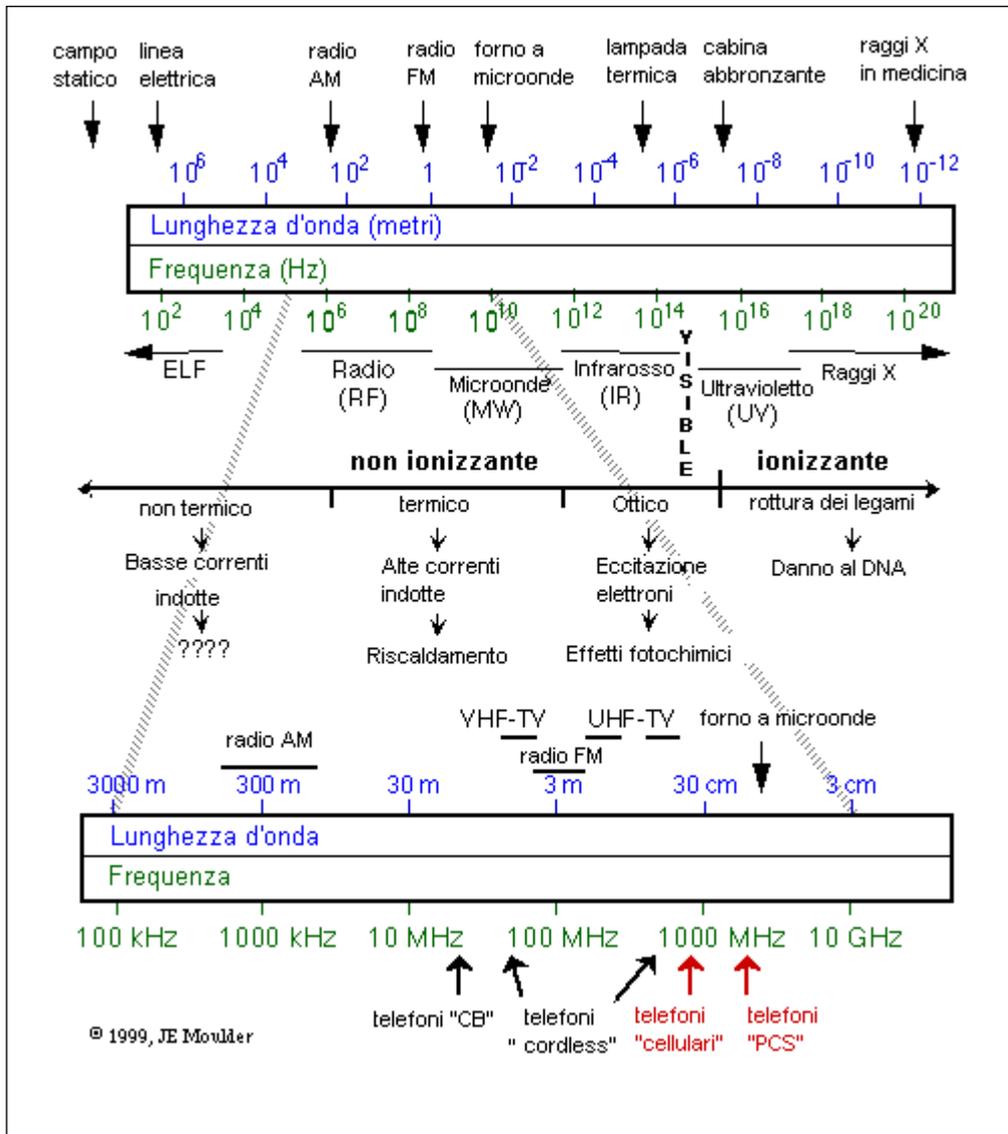


Grafico riassuntivo delle frequenze, delle lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche e degli effetti da esse provocati.

## INQUINAMENTO ELETTROMAGNETICO E TELEFONI CELLULARI: UNA QUESTIONE APERTA

La ricerca sui telefoni cellulari per accertare la pericolosità è iniziata a metà degli anni novanta. Impossibile dunque avere dati epidemiologici accurati o risultati definitivi. La potenza massima emessa dai moderni telefoni cellulari può arrivare a circa 2 W, ma il suo valore medio si mantiene tipicamente ad un centinaio di milliwatt. Si tratta di una potenza limitata in grado di provocare soltanto un modesto riscaldamento a cui il sistema di termoregolazione dell'organismo può far fronte senza difficoltà.

Le indagini epidemiologiche e biologiche si sono però rivolte a considerare gli effetti a lungo termine provocati dalle onde dei cellulari.

Sebbene gli studi epidemiologici abbiano dato un quadro finora rassicurante, circa la non pericolosità di queste onde, le più recenti ricerche di laboratorio hanno portato a conclusioni allarmanti. Particolare risonanza, tra questi esperimenti, ha ricevuto uno studio australiano del 1997, nel quale i ricercatori diretti da Tony Basten, direttore del *Centenary Institute of cancer medicine and cell biology di Sidney*, hanno studiato 200 topi che erano stati predisposti geneticamente a sviluppare linfomi,

cancri dei globuli bianchi del sangue. Metà dei topi furono esposti a impulsi digitali a microonde del tipo prodotto dai comuni telefonini europei. I topi furono esposti alle radiazioni per 30 minuti due volte al giorno ad una densità di potenza equivalente a quella che si ha tenendo il telefonino vicino alla testa. Dopo 18 mesi i topi esposti alle microonde avevano da 2 a 4 volte più linfomi rispetto ai topi che non erano stati esposti.

Per quanto riguarda le ricerche nazionali, alla clinica otorinolaringoiatrica di Verona l'equipe del professor Vittorio Colletti sta attualmente compiendo ricerche sull'effetto del cellulare sul nervo uditivo. Con pazienti operati a cranio aperto è stata simulata una telefonata, appoggiando il cellulare sull'orecchio. Si è riscontrato che dopo due minuti di telefonata il nervo uditivo entrava in condizioni critiche, a causa delle variazioni dei suoi potenziali bioelettrici.

Secondo studi recentissimi, utilizzare il telefono cellulare 1 ora al giorno farebbe aumentare il rischio di tumore al cervello del 20-30%, e telefonando 22 ore al mese (cioè circa 40 minuti al giorno), il rischio di tumore alle ghiandole salivari raddoppierebbe. A sostegno di questi risultati si è espresso il Dottor George Carlo membro dell'*American College of Epidemiology* e presidente della principale società di ricerca sulla sanità americana, è stato per sette anni presidente di *Wireless Technology Research*, un gruppo di studio finanziato dall'industria dei cellulari per indagare sui possibili effetti nocivi dei telefonini. Il paradosso è che

le ricerche di George Carlo furono incentivate proprio dall'industria della telefonia mobile che aveva finanziato la sua equipe e il suo laboratorio per 28 milioni di dollari affinché provassero l'innocuità dei telefoni cellulari. Carlo è invece giunto alla conclusione opposta, diventando così nemico giurato dei suoi stessi finanziatori.

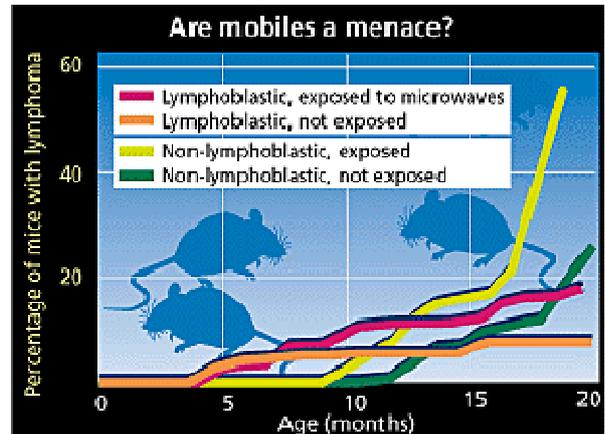


Grafico dell'esperimento dello studio australiano del 1997 teso a considerare la pericolosità delle onde dei cellulari. I topi esposti a microonde dopo un periodo di 18 mesi presentano più linfomi rispetto a quelli non esposti.

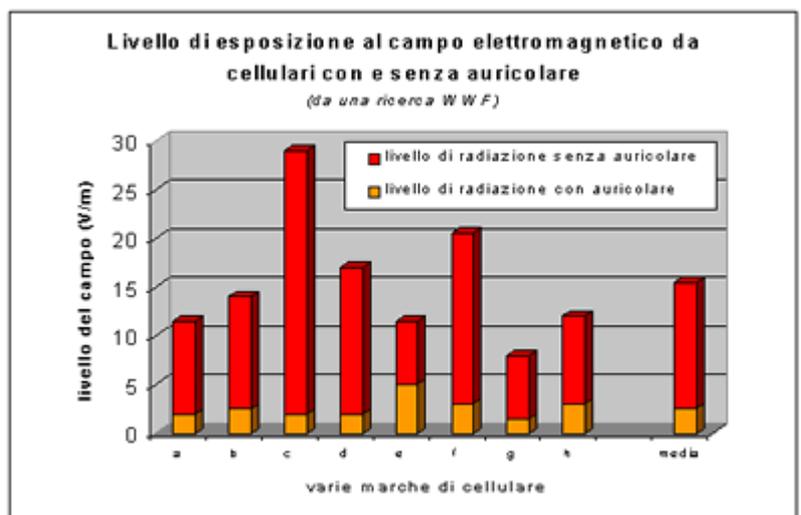


Grafico di una ricerca WWF rappresentante i livelli di esposizioni del campo elettromagnetico prodotto da cellulari con e senza auricolare.

Concludo il mio lavoro con una frase di George Bernard Shaw, noto drammaturgo irlandese premio Nobel per la letteratura nel 1925, che esprime in poche parole l'ambiguità del progresso scientifico e tecnologico.

*“ La scienza è imperfetta.  
Quando risolve un problema, ne crea altri.”*

*George Bernard Shaw*

## **Bibliografia e sitografia:**

### Cenni storici:

- M. FARADAY *Saggio storico di elettromagnetismo*, (a cura di P. Marazzini e P. Tucci), Ed. Cuen, Napoli 1996
- G.MASSIMO *Fatti e protagonisti dell'elettromagnetismo. Breve compendio crono-biografico delle scienze e tecnologie elettromagnetiche*, Aracne, 2005
- <http://www.ispesl.it/gauss/Livello%20Superiore/Elettricit%C3%A0%20e%20Magnetismo/1.1.asp>

### Seconda rivoluzione industriale:

- A. GIARDINA - G. SABBATUCCI - V. VIDOTTO *Profili storici vol. 3° I dal 1900 a oggi*, Paravia, Milano 2005
- D. S. LANDES *Prometeo liberato. Trasformazioni tecnologiche e sviluppo industriale nell'Europa occidentale dal 1750 ai nostri giorni*, Einaudi, Torino 1978, pp.326-28
- [http://it.wikipedia.org/wiki/Seconda\\_rivoluzione\\_industriale](http://it.wikipedia.org/wiki/Seconda_rivoluzione_industriale)

### Il campo geomagnetico:

- E. L. PALMIERI - M. PAROTTO *Il globo terrestre e la sua evoluzione*, Zanichelli, Bologna 2004
- [http://it.wikipedia.org/wiki/Campo\\_magnetico\\_terrestre](http://it.wikipedia.org/wiki/Campo_magnetico_terrestre)
- [http://lescienze.espresso.repubblica.it/articolo/E\\_se\\_si\\_invertissero\\_i\\_poli/1289124](http://lescienze.espresso.repubblica.it/articolo/E_se_si_invertissero_i_poli/1289124)

### Fisica: elettrostatica, magnetismo ed elettromagnetismo:

- J. S. WALKER *Fisica volume terzo*, Zanichelli, Bologna 2006
- P. J. NOLAN *Fondamenti di fisica*, Zanichelli, Bologna 2003
- *Enciclopedia della scienza e della tecnica*, De Agostini, Novara
- <http://it.wikipedia.org/wiki/Elettromagnetismo>

### Approfondimento: inquinamento elettromagnetico:

- L. CARRA *Onde sospette, elettricit  e salute*, Ed. Riuniti, Roma 1994
- M. FRONTE *Campi elettromagnetici innocui o pericolosi? Avverbi*, Roma 1997
- D. ANDREUCCETTI – P. BEVITORI *Inquinamento elettromagnetico conoscerlo per prevenirlo*, F. Angeli, Milano 2007
- G. ROMUALDO, *Inquinamento elettromagnetico e telefoni cellulari: una questione aperta*, Edizioni scientifiche italiane, 2004
- M. ORIANA – T. CRISTIAN, *Navigando tra le onde. Le radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti*, Aracne, 2008
- <http://www.greenpeace.it/archivio/clima/elettrosmog.htm>
- <http://www.inquinamentoambientale.it/Elettromagn.%20Effetti%20Biologici.htm>
- <http://it.wikipedia.org/wiki/Elettrosmog>
- <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn2959>
- <http://www.elettrosmog.it/Salute.htm>
- <http://www.ecplanet.com/canale/ecologia-6/elettrosmog-167/0/0/28515/it/ecplanet.rxd>
- [http://www.legambientesbt.it/downloads/campi\\_elettromagnetici.pdf](http://www.legambientesbt.it/downloads/campi_elettromagnetici.pdf)