

V.11. Le onde elettromagnetiche

- ⌘ Richiami sui fenomeni ondulatori
- ⌘ Richiami sui fenomeni luminosi
- ⌘ Le onde elettromagnetiche nella sintesi maxwelliana
- ⌘ La generazione delle onde elettromagnetiche
- ⌘ Cariche in moto circolare uniforme
- ⌘ Lo spettro elettromagnetico
- ⌘ Fotoni e treni d'onda: qualche stranezza
- ⌘ L'inquinamento elettromagnetico

11.1 Richiami sui fenomeni ondulatori

11.1.1 DI NUOVO LE ARMONICHE

Lo studio dei fenomeni ondulatori in fisica avviene a partire da due gruppi di fenomeni: le onde elastiche nei mezzi materiali e la luce.

Lo studio delle onde elastiche ha avuto una sua storia indipendente trattandosi di un fenomeno la cui natura ondulatoria è evidente in partenza. Si chiama onda un fenomeno in grado di trasportare energia nel tempo e nello spazio e caratterizzato da una qualche forma di ripetitività. Gli ingredienti necessari alla generazione di un'onda elastica sono pertanto:

- un mezzo materiale (elastico) che faccia da agente di trasmissione dell'onda
- un fenomeno meccanico (movimento, pressione, ...), caratterizzato da ripetitività

Solitamente lo studio delle onde si effettua a partire da oscillazioni di tipo sinusoidale dette *armoniche*. Questa scelta è dovuta a due elementi caratteristici delle onde sinusoidali:

- qualunque fenomeno periodico, anche non sinusoidale si può analizzare come somma di fenomeni sinusoidali. Si tratta di una conseguenza del teorema di Fourier cui si è accennato nel capitolo dedicato alle oscillazioni armoniche.
- mentre, nel corso della sua propagazione, una generica onda, normalmente cambia forma, ciò non accade alle onde sinusoidali.

11.1.2 ELEMENTI CARATTERISTICI DI UN'ONDA

Gli elementi tipici dell'onda sono:

- la lunghezza d'onda λ che corrisponde alla distanza spaziale tra due punti in fase, cioè tra due punti che oscillano in sincronia ⁽¹⁾
- la frequenza ν cioè il numero di oscillazioni nell'unità di tempo e che corrisponde all'inverso del periodo T (tempo necessario a compiere una oscillazione)
- la v velocità di propagazione che dipende dalle caratteristiche del mezzo e dalla frequenza dell'onda. La velocità delle armoniche è anche chiamata velocità di fase per distinguerla dalla velocità di gruppo che corrisponde alla velocità con cui il fenomeno ondoso non armonico (gruppo di armoniche) trasmette nello spazio la sua energia. Si ricordi che $v = \lambda \nu$
- la ampiezza: cioè il valore massimo della grandezza oscillante
- la intensità: cioè la potenza per unità di superficie in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. La intensità è proporzionale al quadrato dell'ampiezza.

da ricordare

$$v = \lambda \nu \quad I \propto A^2$$

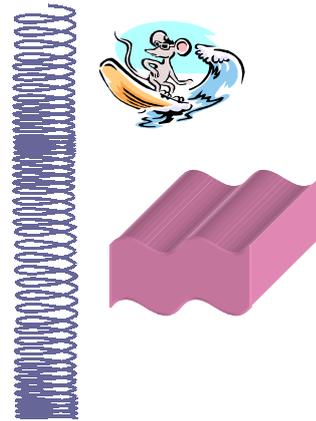
¹ La parola *oscillano* è utilizzata in senso estensivo perché non è detto che l'onda corrisponda ad una oscillazione nel senso di spostamento materiale.

- la direzione di propagazione
- la direzione di oscillazione e, se esiste, il piano di oscillazione
- il fronte d'onda: una regione di spazio i cui punti oscillano in fase tra loro

11.1.3 CLASSIFICAZIONE DELLE ONDE

Dal punto di vista puramente terminologico le onde si distinguono in:

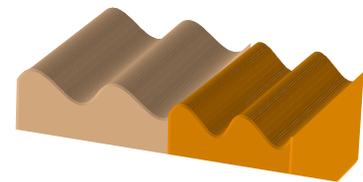
- ◆ *onde longitudinali e trasversali* quando la direzione di oscillazione coincide od è perpendicolare a quella di propagazione. Le onde sonore in un gas sono onde longitudinali di pressione. Le onde lungo una corda vibrante sono trasversali.
- ◆ *onde trasversali polarizzate*: quando la direzione di oscillazione è fissa rispetto a quella di propagazione e forma dunque con essa un piano detto *piano di polarizzazione*. Un'onda trasversale non polarizzata può sempre diventarlo se si eliminano con un apposito dispositivo tutte le vibrazioni che avvengono lungo le direzioni non desiderate.
- ◆ *onde impulsive*: quando la estensione spaziale dell'onda è piccola rispetto alle dimensioni considerate
- ◆ *onde monodimensionali*, bidimensionali o tridimensionali a seconda che il fronte d'onda sia un punto, una linea o un piano, una superficie tridimensionale. Per esempio, è monodimensionale l'onda che si propaga lungo una corda vibrante, sono bidimensionali le onde superficiali dell'acqua, mentre sono tridimensionali le onde sonore che si propagano in un gas lungo superfici sferiche.
- ◆ *onde coerenti*: sono onde che conservano nel tempo le stesse caratteristiche di fase



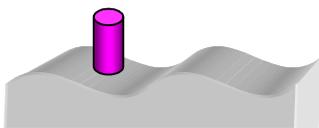
11.1.4 FENOMENI ONDULATORI TIPICI

Le onde, qualsiasi sia la loro natura danno sempre luogo ad alcuni fenomeni tipici di cui richiamiamo le caratteristiche fondamentali:

- ◇ *quando un'onda cambia mezzo di propagazione* la sua frequenza non cambia e poiché, in genere, cambia la sua velocità si determina conseguentemente anche una modifica di lunghezza d'onda.
- ◇ *la riflessione* avviene alla superficie di separazione del mezzo di propagazione quando un'onda che si propaga in un mezzo omogeneo incontra una discontinuità. Una parte della energia torna indietro. Nel caso di onde monodimensionali (raggi) vale una legge molto semplice: *il raggio incidente la normale al piano tangente nel punto di incidenza e il raggio riflesso stanno in uno stesso piano e formano angoli uguali*.
- ◇ *la rifrazione* avviene alla superficie di separazione del mezzo di propagazione quando un'onda che si propaga in un mezzo omogeneo incontra la superficie di separazione di un altro mezzo. Una parte della energia passa nell'altro mezzo ma in questo processo si ha un mutamento di direzione. Nel caso di onde monodimensionali (raggi) vale una legge molto semplice: *il raggio incidente la normale al piano e il raggio rifratto stanno in uno stesso piano e formano angoli per cui $\sin i / \sin r = \text{costante}$* . Tale costante dipende dai due mezzi, è detta indice di rifrazione ed è pari al rapporto delle velocità di propagazione nei due mezzi. Sul fenomeno della rifrazione si basa il funzionamento delle lenti.



la rifrazione è caratterizzata da cambiamento di lunghezza d'onda



per effetto della **diffrazione** le onde si propagano al di là degli ostacoli quando $\lambda \gg d$



Una tipica immagine di interferenza, le **onde stazionarie**: i punti presentano la stessa fase e diverse ampiezze con massimi (interferenza costruttiva) e minimi (interferenza distruttiva)

- ◇ *la diffrazione* è la proprietà delle onde di propagarsi al di là degli ostacoli. L'elemento critico è la dimensione dell'ostacolo comparata con la lunghezza d'onda. La diffrazione ha inizio quando le dimensioni dell'ostacolo diventano comparabili con la lunghezza d'onda e continua ad aumentare quanto più l'ostacolo risulta piccolo rispetto ad essa. Una importante conseguenza di questo fatto è che le onde non possono *vedere* (cioè *essere deviate da*) oggetti di dimensioni dell'ordine di grandezza della (o inferiori alla) loro lunghezza d'onda.
- ◇ *la interferenza* è la proprietà delle onde coerenti di sovrapporsi dando luogo, nello spazio, a risultati di potenziamento (interferenza costruttiva) o depotenziamento (interferenza distruttiva) stabili nel tempo. L'interferenza in particolari condizioni dà luogo alle cosiddette *onde stazionarie* cioè a condizioni in cui la propagazione ondosa cessa ed è sostituita da oscillazioni locali che sembrano non propagarsi. La interferenza è il fenomeno assolutamente inspiegabile al di fuori di una teoria ondulatoria e consente tra l'altro, esaminando le caratteristiche *figure di interferenza* che si formano, di risalire alla lunghezza d'onda del fenomeno considerato.

11.2 Richiami sui fenomeni luminosi

11.2.1 L'OTTICA GEOMETRICA E IL MODELLO CORPUSCOLARE

Lo studio dei fenomeni luminosi ha avuto in fisica una storia indipendente da altri fenomeni che oggi vengono invece analizzati unitariamente. Essendo rimasti lungamente ignoti sia il meccanismo di generazione sia la natura della luce, i fenomeni luminosi sono stati studiati come un campo di indagine con un approccio prevalentemente sperimentale e fenomenologico.

In una prima fase si sono scoperte le leggi oggi note come leggi dell'*ottica geometrica* cioè le leggi che riguardano fenomeni nei quali la luce può essere trattata come un *raggio che si propaga in linea retta* (leggi della riflessione e della rifrazione, specchi e lenti, strumenti ottici, ...). Questa fase che inizia con gli albori della civiltà può considerarsi giunta alla fase matura nella seconda metà del 600. Si ricordi che il famosissimo *discorso sul metodo* di Descartes è la introduzione metodologica ad un'opera scientifica in tre parti (la diottrica, la geometria e le meteore). La diottrica è dedicata allo studio dettagliato della rifrazione e di tutte le sue applicazioni.⁽²⁾

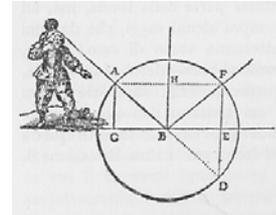
In una seconda fase ci si è occupati dei colori e dello studio di particolari fenomeni di diffrazione. Il dibattito sul carattere ondulatorio o corpuscolare della luce è contestuale a questo periodo (Newton). È proprio la teoria newtoniana (di tipo corpuscolare) ad affermarsi inizialmente. Nel determinare la sua affermazione gioca un ruolo fondamentale il peso culturale del modello newtoniano adottato per la meccanica. In questo periodo iniziano anche le prime ricerche tese alla determinazione della velocità della luce o alla determinazione della lunghezza d'onda (tra i sostenitori del modello ondulatorio).

Nel 1676 l'astronomo danese Ole Rømer attraverso lo studio nei ritardi di comparsa delle eclissi dei satelliti di Giove fornisce il primo valore dimensionalmente corretto per la velocità della luce $c = 215'000$ km/s. Le difficoltà nella misurazione della velocità e della lunghezza d'onda della luce derivano dal valore elevato della prima, ed estremamente basso della seconda. Inoltre per le sorgenti luminose è piuttosto difficile produrre quella *condizione di coerenza* necessaria alla osservazione dell'interferenza a causa della natura assolutamente casuale con cui gli atomi emettono la radiazione luminosa.

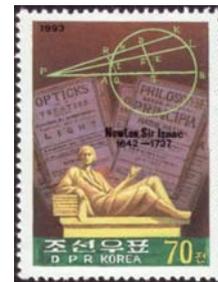
11.2.2 IL MODELLO ONDULATORIO

In una terza fase (primi 70 anni dell'800) la teoria ondulatoria si afferma definitivamente (così sembra) grazie alla possibilità di realizzare gli esperimenti e le misure necessarie a sostenerla: misure metodologicamente diverse, ma concordanti, della velocità della luce, misure di lunghezza d'onda dei diversi componenti della radiazione solare (quella che, solitamente, chiamiamo luce bianca).

In questa fase, che possiamo chiamare la fase della maturità, emergono due problemi riguardanti la radiazione luminosa che porteranno a due



disegno di Descartes per illustrare le leggi della rifrazione



Newton nonostante si sia mosso entro un modello corpuscolare ha dato enormi contributi allo studio delle proprietà della luce



Alla fine del 600 si ha la prima stima corretta da parte di Rømer della velocità della luce

² René Descartes, *Opere scientifiche: discorso sul metodo, la diottrica, le meteore, la geometria*; ed. Utet



Einstein e Planck sono i due padri del **dualismo ondulatorio corpuscolare per la radiazione**

Il **dualismo ondulatorio corpuscolare**: la luce presenta un livello di realtà più complesso che manda in crisi i modelli tradizionali di descrizione del mondo fisico

nuovi rivolgimenti teorici: la teoria della relatività e la meccanica quantistica.

- *Il problema dell'etere* e del vento d'etere. Assodato che la luce viaggia nel vuoto ad una velocità intorno ai 300'000 km/s ci si interroga sulle caratteristiche del mezzo (permeante il vuoto) nel quale le onde luminose si possano propagare. Inoltre, scartato un ritorno al geocentrismo (con una terra immobile nell'etere) si cerca di rilevare il movimento della terra rispetto all'etere e cioè una variazione nella velocità della luce quando la terra si muove nella stessa direzione, ma in versi diversi, nell'etere.

Il problema si fa ancora più rilevante quando, come vedremo nel prossimo paragrafo, appare chiaro che la luce è solo una particolare onda elettromagnetica e che dunque il problema del movimento nell'etere riguarda l'intero elettromagnetismo che, in quel periodo, appare come il nuovo modello di unificazione della intera conoscenza.

- *Il dualismo ondulatorio-corpuscolare*. Le ricerche sulle caratteristiche della luce emessa dai gas (spettri di righe) che consentono un rapido sviluppo delle conoscenze di chimica fondamentale, le ricerche sulla interazione tra radiazione e materia e le prime ricerche sulle modalità di emissione della luce portano tra fine 800 e l'inizio del 900 alla scoperta di nuovi fenomeni che, paradossalmente, riproporranno il carattere corpuscolare della luce, e con essa delle onde elettromagnetiche.

La contraddizione che si riapre viene ricomposta, come è tipico della scienza matura, con una nuova concezione che afferma la dualità del fenomeno luminoso: trovo i fotoni se cerco le particelle, trovo l'interferenza se cerco le onde. Ciò che chiamiamo radiazione elettromagnetica presenta un livello di *realtà fisica* che non è ben descrivibile con gli strumenti che ci fornisce il senso comune.

11.3 Le onde elettromagnetiche nella sintesi maxwelliana

11.3.1 UN SECOLO DI SVOLTE LEGATE ALLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Le onde elettromagnetiche costituiscono oggi (per una persona di media cultura) un argomento noto, almeno sul piano operativo ed applicativo, a causa della incidenza che giocano nella vita quotidiana. Viviamo infatti nella civiltà dell'informazione che è stata resa possibile dalla capacità delle onde elettromagnetiche di trasmettere informazioni, nelle forme più diverse, praticamente in tempo reale. Eppure, poco più di un secolo fa, si discuteva ancora della loro esistenza. Le tappe del processo di affermazione delle onde elettromagnetiche sono state le seguenti:

- 1860-1870: ipotesi maxwelliana sulla esistenza di onde di campo elettromagnetico e sulla riconducibilità delle radiazioni luminose ad un tipo particolare di tali onde
- 1870-1890: ricerche sulla conferma sperimentale relativa alla loro esistenza e generazione delle onde elettromagnetiche da parte di G. Hertz
- 1890-1910: prime applicazioni legate alla trasmissione delle informazioni (radiotelegrafia, radio): Marconi, Popov
- 1930-1940: invenzione del radar e della televisione
- 1950-1960: utilizzo dei satelliti come strumenti di controllo del pianeta e telefonia via onde elettromagnetiche
- 1970-1980: boom delle radio e tv commerciali
- 1990-2000: telefonia satellitare, telefonia cellulare, Internet

La storia incomincia quando Maxwell sintetizza nel monumentale trattato di elettricità e magnetismo i risultati delle sue ricerche degli anni 50-70. ⁽³⁾

Il trattato contiene una puntigliosa ricostruzione delle conoscenze di elettromagnetismo dell'800 e nella parte terminale ospita i contributi originali di Maxwell: le equazioni che sintetizzano in una forma particolare (che diventerà classica) le leggi dell'elettromagnetismo e le ipotesi sulla esistenza delle onde elettromagnetiche che da esse scaturiscono.

Le equazioni di Maxwell, nella scelta del formalismo matematico utilizzato e nella scelta di porre al loro centro la nozione di campo (visto come una nuova realtà fisica indipendente), segnano una svolta rispetto alle impostazioni precedenti.

Maxwell si lascia guidare dall'idea di una unità tra fenomeni elettrici e magnetici che condensa nella ricerca di simmetrie formali nelle equazioni. Tra queste la più rilevante è quella che lo porta ad ipotizzare, generalizzando le leggi della induzione elettromagnetica, che non solo campi magnetici variabili producono campi elettrici variabili senza bisogno che esistano circuiti elettrici (si veda la legge espressa mediante la circuitazione del vettore \mathbf{E}) ma anche che campi elettrici variabili sono in grado

³ James Clerk Maxwell, *Trattato di elettricità e magnetismo*, edizione italiana a cura di Evandro Agazzi, Utet 2 volumi





di generare campi magnetici variabili (senza bisogno che esistano correnti elettriche).

Le equazioni si basano sull'idea che il campo magnetico ed elettrico siano l'espressione di una nuova realtà fisica dotata di esistenza indipendente che Maxwell, come si è già osservato, riprende da Faraday, sviluppa e porta alle estreme conseguenze.

11.3.2 LASCIAMO LA PAROLA A MAXWELL

Vediamo ora come lo stesso Maxwell presenta la discussione che lo porterà ad ipotizzare l'esistenza delle onde elettromagnetiche ed a ridurre la luce ad un caso particolare di esse. Il brano che segue è tratto dal capitolo XX del *Trattato* intitolato *Teoria elettromagnetica della luce*.



§ 781: In parecchie parti di questo trattato si è tentato di spiegare i fenomeni elettromagnetici ricorrendo all'azione meccanica trasmessa da un corpo all'altro tramite un mezzo che occupi lo spazio tra loro interposto. La teoria ondulatoria della luce ipotizza pure l'esistenza di un mezzo. Dobbiamo ora dimostrare che le proprietà del mezzo elettromagnetico sono identiche a quelle del mezzo in cui si propaga la luce.

Riempire tutto lo spazio con un nuovo mezzo ogni volta che si debba spiegare un nuovo fenomeno non è certo cosa degna di una seria filosofia, ma se lo studio di due diverse branche della scienza ha suggerito in modo indipendente l'idea di un mezzo, e se le proprietà che si devono attribuire al mezzo per spiegare i fenomeni elettromagnetici sono identiche a quelle che si attribuiscono al mezzo luminifero per spiegare i fenomeni luminosi, si rafforzerà notevolmente il complesso di prove a favore dell'esistenza fisica del mezzo.

Ma le proprietà dei corpi si possono misurare quantitativamente. Noi otteniamo così il valore numerico di alcune proprietà del mezzo, come la velocità con cui si propaga in esso una perturbazione, che si può calcolare a partire da esperimenti elettromagnetici e che, nel caso della luce si può osservare direttamente. Se si dovesse trovare che la velocità di propagazione delle perturbazioni elettromagnetiche è la stessa della velocità della luce e questo, non solo nell'aria, ma anche in altri mezzi trasparenti, si avrebbero delle valide ragioni per credere che la luce sia un fenomeno elettromagnetico, e la combinazione delle prove ottiche e di quelle elettriche produrrebbe una convinzione circa l'effettiva realtà del mezzo, simile a quella che si ottiene nel caso di altri tipi di oggetti dalle verifiche combinate fornite dai sensi.

§ 782: Nell'emettere luce il corpo luminoso eroga una certa quantità di energia e, se un altro corpo assorbe questa luce, esso si riscalda dimostrando che ha ricevuto energia dall'esterno. Durante l'intervallo di tempo dopo che la luce ha lasciato il primo corpo e prima che raggiunga il secondo, essa deve essere esistita come energia nello spazio tra loro interposto.

Secondo la teoria dell'emissione, la trasmissione di energia si effettua grazie all'effettivo trasferimento di corpuscoli di luce dal corpo luminoso a quello illuminato, i quali portano con sé la loro energia cinetica, insieme ad ogni altro tipo di energia di cui possano essere ricettori.

Secondo la teoria dell'ondulazione, c'è un mezzo materiale che riempie lo spazio tra i due corpi ed è per l'azione di parti contigue di questo mezzo che l'energia si trasferisce da una porzione alla successiva, finché raggiunge il corpo illuminato.

Perciò il mezzo luminifero, quando la luce lo attraversa, è un ricettacolo di energia. Nella teoria ondulatoria, come è stata sviluppata da Huygens, Fresnel, Young, Green, etc., si suppone che questa energia sia in parte potenziale ed in parte cinetica. Si suppone che l'energia potenziale sia dovuta alla deformazione delle porzioni elementari del mezzo. Si deve perciò considerare il mezzo come elastico. Si suppo-

E' lecito ipotizzare che la luce e le onde elettromagnetiche siano la stessa cosa

Le interazioni si trasmettono attraverso i campi

ne che l'energia cinetica sia dovuta al moto vibratorio del mezzo. Si deve perciò considerare il mezzo come dotato di una densità finita. ⁽⁴⁾

Nella teoria della elettricità e del magnetismo sostenuta in questo trattato si riconoscono due forme di energia, l'elettrostatica e l'elettrocinetica (si vedano i § 630 e 636), e si suppone che esse abbiano sede non solo nei corpi elettrizzati o magnetizzati, ma in ogni parte dello spazio circostante, in cui si osservi l'azione della forza elettrica o magnetica. Perciò la nostra teoria concorda con la teoria ondulatoria nel supporre l'esistenza di un mezzo che è in grado di diventare ricettacolo di due forme di energia

Giunto a questo punto Maxwell applica il suo sistema di equazioni differenziali già ricavato nei capitoli precedenti al caso di una perturbazione elettromagnetica e dimostra che essa soddisfa la stessa equazione già nota per la propagazione delle onde elastiche e che la velocità di propagazione di questa perturbazione è pari a $\frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$.

Ai tempi dello scritto erano noti sia i valori sperimentali di ϵ che di μ (necessari per la determinazione delle unità di misura delle grandezze elettriche e magnetiche) sia quelli della velocità della luce. Maxwell utilizza i valori delle costanti elettromagnetiche per determinare la velocità teorica delle onde elettromagnetiche e la confronta con i valori sperimentali della velocità della luce. Così ottiene per le sue perturbazioni valori che vanno da 282'000 km/s (misure di Thomson) a 310'740 km/s (misure di Weber) mentre per la luce i valori vanno da 298'360 km/s (misura di Foucault) a 314'000 km/s (misura di Fizeau). Le due quantità sono dello stesso ordine di grandezza e lo stesso accade nel caso di onde che si propagano in un mezzo materiale.

le costanti dell'elettromagnetismo determinano la velocità delle onde elettromagnetiche

$$c \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

11.3.3 I RAGIONAMENTI CHE PORTANO A GENERALIZZARE LE EQUAZIONI DELL'ELETTROMAGNETISMO

È opportuno riassumere l'insieme delle conoscenze delle leggi dell'elettromagnetismo da cui parte Maxwell per operarne la generalizzazione. Esse sono:

- $\Phi_{\sigma}(\mathbf{E}) = \frac{\sum q_{int}}{\epsilon}$ (V.11.1)
- Il teorema di Gauss per il campo elettrostatico che esprime in forma matematica la conservazione della carica e la dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza delle interazioni elettrostatiche
- $\Phi_{\sigma}(\mathbf{B}) = 0$ (V.11.2)

i teoremi di Gauss per E e per B

⁴ Christian Huygens (1629-1695) matematico, astronomo e fisico. Nell'ambito dell'ottica difese una posizione ondulatoria fornendo tra l'altro la spiegazione, ancora accettata, del meccanismo della diffrazione.

Augustin Jean Fresnel (1788-1827) fondatore della teoria ondulatoria contrapposta a quella newtoniana. Introdusse per primo l'idea dell'etere luminifero come solido elastico necessario alla propagazione delle onde trasversali.

Thomas Young (1773-1829) archeologo (decifrazione dei geroglifici), medico, fisiologo (potere di accomodazione dell'occhio, astigmatismo) e fisico diede la prima interpretazione ondulatoria degli esperimenti newtoniani che avevano visto l'affermarsi di ipotesi corpuscolari. Attraverso esperienze di interferenza determinò le lunghezze d'onda della luce visibile (esperimento della doppia fenditura).

le leggi sulla circuitazione per E e per B

$$\mathcal{C}_\Gamma(\mathbf{E}) = - \frac{\delta\Phi_\sigma(\mathbf{B})}{\delta t} \quad (\text{V.11.3})$$

La legge di Faraday Neumann Lenz che associa la presenza di variazioni di campo magnetico con la comparsa di un campo elettrico di natura circuitale non conservativo. Il campo elettrico non è più associato alla esistenza di cariche elettriche.

$$\mathcal{C}_\Gamma(\mathbf{B}) = \mu \sum i_{\text{int}} \quad (\text{V.11.4})$$

Il teorema della circuitazione di Ampère associa al movimento di cariche elettriche la comparsa di un campo magnetico.

Le 4 equazioni presentano alcune simmetrie tra campo elettrico e magnetico che si evidenziano meglio se si usano i sistemi di unità di misura (c.g.s) utilizzati nell'800. In quel caso le due costanti ϵ e μ compaiono con lo stesso ruolo e con la stessa posizione nelle diverse equazioni.

Tra la (V.11.3) e la (V.11.4) è però presente una notevole asimmetria: mentre il campo elettrico circuitale è associato alle variazioni di campo magnetico, il campo magnetico non è associato a variazioni di campo elettrico. La questione si appesantisce perché la equazione (V.11.4) risulta in contrasto con se stessa se la si applica per esempio al caso di un condensatore soggetto a un processo di carica e scarica. In quel caso se si considerano le due superfici σ_1 e σ_2 aventi la stessa linea di contorno Γ si ottiene per il termine di destra rispettivamente μi e 0 perché per la seconda superficie non si ha alcuna corrente.

Inoltre nelle vicinanze del filo, ma anche nelle vicinanze del condensatore si riscontra la presenza di un campo magnetico come se le variazioni di campo elettrico che si hanno nel condensatore fossero in grado di produrre, come le correnti, un campo magnetico.

Se indichiamo con q la carica istantaneamente presente sul condensatore si ha (per quanto visto sul campo tra le armature) $E = \frac{q}{S\epsilon}$ e pertanto $q = E S \epsilon$. Ma d'altra parte:

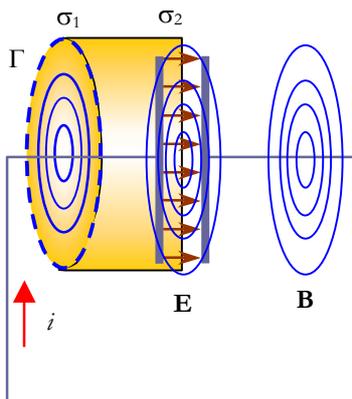
$$i = \frac{\delta q}{\delta t} = \epsilon S \frac{\delta E}{\delta t} = \epsilon \frac{\delta\Phi_S(\mathbf{E})}{\delta t}$$

Maxwell suppone a questo punto che quando si è nello spazio (vuoto o in presenza di un dielettrico) ed esistano delle variazioni di campo elettrico su una superficie S ortogonale alle linee di forza, si possa ammettere la presenza di una corrente virtuale detta *corrente di spostamento* dotata delle stesse proprietà magnetiche delle correnti ordinarie. Il termine utilizzato fa riferimento al fatto che nel dielettrico le cariche connesse al fenomeno della polarizzazione subiscono dei veri e propri spostamenti avanti e indietro rispetto alle proprie posizioni di equilibrio nel reticolo del solido.

Se, dopo aver introdotto la corrente di spostamento

$$i_s = \epsilon \frac{\delta\Phi_S(\mathbf{E})}{\delta t} \quad (\text{V.11.5})$$

simmetrie e asimmetrie nelle equazioni



Il ragionamento che porta Maxwell ad introdurre la **corrente di spostamento**

$$i_s = \epsilon \frac{\delta\Phi_S(\mathbf{E})}{\delta t}$$

si generalizza il teorema della circuitazione di Ampere si ottiene una nuova equazione che diventerà parte integrante delle equazioni di Maxwell e che elimina le contraddizioni e le asimmetrie:

$$\mathcal{E}_\Gamma(\mathbf{B}) = \mu i + \mu\epsilon \frac{\delta\Phi_S(\mathbf{E})}{\delta t} \quad (\text{V.11.6})$$

Il campo magnetico è prodotto da correnti elettriche o da variazioni di campo elettrico. Si osservi ancora che la equazione nello spazio vuoto di circuiti diventa semplicemente:

$$\mathcal{E}_\Gamma(\mathbf{B}) = \mu\epsilon \frac{\delta\Phi_S(\mathbf{E})}{\delta t} \quad (\text{V.11.7})$$

Manipolando dal punto di vista matematico le equazioni (V.11.3) e (V.11.7) Maxwell arriva a concludere che un campo elettrico variabile deve produrre nello spazio circostante un campo magnetico circuitale di tipo variabile e che questo, a sua volta, genera un campo elettrico variabile e così via. Dal puro calcolo matematico emerge anche che i campi elettrico e magnetico strettamente associati si propagano con velocità pari a $\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$

11.3.4 DALLA IPOTESI DELLE ONDE ALLA LORO OSSERVAZIONE

La previsione di Maxwell di una identità tra perturbazione elettromagnetica e fenomeni luminosi si scontra con il fatto che le perturbazioni di Maxwell non sono mai state osservate.

Esse sono il risultato matematico di un sistema di equazioni ottenute per generalizzazione di fenomeni osservati nei quali non rientrano le onde. Si tratta dunque, per uscire dal terreno delle ipotesi, di riuscire a generare onde elettromagnetiche. La situazione si sblocca grazie ad alcuni lavori classici di Hertz pubblicati nel 1888.

La difficoltà nel produrre onde elettromagnetiche è dovuta, come vedremo, alla necessità di generare variazioni molto rapide per produrre onde di intensità sufficiente da potersi rivelare con i mezzi sperimentali primitivi del tempo.

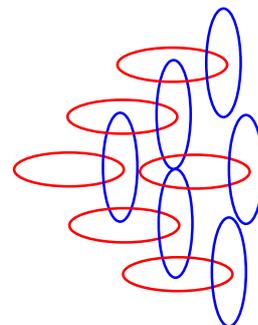
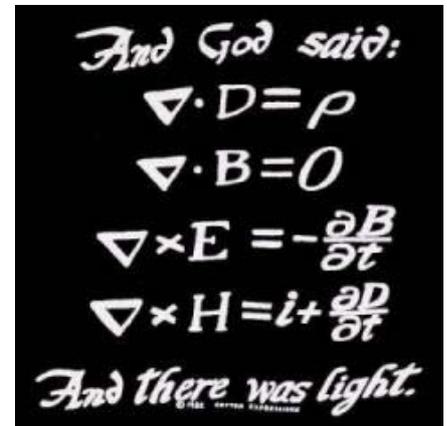
Hertz riesce a produrre onde elettromagnetiche utilizzando scariche a scintilla e con apparati di rivelazione sempre basati sulla induzione di una scintilla conduce le esperienze *canoniche* per la giustificazione del carattere ondulatorio del fenomeno osservato: misura della lunghezza d'onda, carattere trasversale, riflessione, rifrazione, formazione di onde stazionarie per interferenza.

Dalla teoria di Maxwell discende che le onde elettromagnetiche si propagano in un dielettrico con una velocità ancora determinata dalle costanti ϵ e μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (\text{V.11.8})$$

e, tenendo conto del fatto che (con la eccezione dei materiali ferromagnetici) la permeabilità magnetica relativa è circa 1 si ottiene:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{V.11.9})$$



i campi elettrico e magnetico si generano reciprocamente e si propagano



Il francobollo dedicato ad Hertz ci richiama visivamente il processo di produzione delle onde elettromagnetiche

L'indice di rifrazione dipende dalla costante dielettrica relativa

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{V.11.10})$$

11.3.5 INTENSITÀ DELLE ONDE E AMPIEZZA DEL CAMPO

Sempre dalla teoria di Maxwell emerge che i due campi (elettrico e magnetico) sono ortogonali tra loro e giacciono in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda; inoltre la densità di energia elettrica e magnetica associata è uguale per i due campi:

$$\epsilon E^2 = \mu H^2$$

Dunque la densità complessiva di energia $u = u_m + u_e = 2 u_m = 2 u_e$ vale:

$$u = \epsilon E^2 = \mu H^2 = \sqrt{\epsilon} E \sqrt{\mu} H = \sqrt{\epsilon \mu} E H = \frac{E H}{v}$$

Ma, in tutti i fenomeni ondulatori, si chiama intensità di un'onda, la potenza per unità di superficie in direzione ortogonale a quella di propagazione. Considerato perciò un volume Δv di superficie σ si ha:

$$I = \frac{P}{\sigma} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t \sigma} = \frac{u \Delta v}{\Delta t \sigma} = \frac{u \Delta x}{\Delta t} = E H \quad (\text{V.11.11})$$

Dunque, i valori del campo elettrico e del campo magnetico, concorrono nel determinare la intensità del fenomeno ondulatorio. Poiché E e H sono tra loro proporzionali è bene memorizzare la dipendenza della intensità dell'onda dal quadrato del campo. Succede esattamente la stessa cosa anche per le onde elastiche per le quali la intensità è proporzionale al quadrato della ampiezza.

L'intensità dell'onda è proporzionale al quadrato del campo e i due campi sono tra loro proporzionali e la costante di proporzionalità è la velocità di propagazione

Osserviamo ancora che se, invece del campo H , si usa l'induzione magnetica B , le equazioni precedenti perdono qualche elemento di simmetria ma ci consentono di esprimere qualche ulteriore considerazione quantitativa.

$$\epsilon E^2 = \mu H^2 \Leftrightarrow \epsilon E^2 = \frac{B^2}{\mu} \Leftrightarrow \epsilon \mu E^2 = B^2$$

$$E = v B \quad (\text{V.11.12})$$

Da qui, se teniamo conto del valore elevato di v , vediamo distintamente che la componente elettrica delle onde elettromagnetiche è di diversi ordini di grandezza più intensa di quella magnetica.

Le onde elettromagnetiche sono in grado di trasmettere una pressione quando incontrano una superficie metallica. Il fenomeno può essere spiegato attraverso la forza di Lorentz.

Per illustrare questo aspetto consideriamo un'onda elettromagnetica che, propagandosi lungo l'asse x incontra una piastra metallica collocata nel piano $y\zeta$ e indichiamo con y e ζ le due direzioni di azione dei campi elettrico e magnetico associati all'onda.

Il campo elettrico mette in moto gli elettroni lungo il verso opposto a quello di y e fornisce loro una velocità v proporzionale a E . Per effetto di ciò gli elettroni risentono della forza di Lorentz, che sarà diretta come l'asse x . La forza di Lorentz è proporzionale a $v B$, ma poiché v è proporzionale a E la forza sarà proporzionale a $E B$. La forza media esercitata dagli elettroni presenti nella zona considerata determina la comparsa

di una pressione che risulterà dunque proporzionale alla densità di energia.

Il fenomeno della pressione legata alla radiazione elettromagnetica è evidenziabile utilizzando un mulinello a pale metalliche che rechi superfici a specchio su un lato e annerite sull'altro (*radiometro di Crookes*). Il mulinello è racchiuso in una sfera di vetro sotto vuoto per eliminare ogni azione meccanica che non sia da radiazione. Questo dispositivo è oggi disponibile a basso prezzo nei negozi di *gadget*. Se si illumina il mulinello esso si mette a ruotare a causa del diverso potere riflettente delle superfici che determina una differenza di pressione sui due lati quando l'apparato viene illuminato da una sorgente luminosa intensa.

È interessante osservare che la pressione delle onde elettromagnetiche e la relazione che consente di determinarla, prevista da Maxwell, risulta deducibile anche applicando proprietà di tipo corpuscolare. In questo caso la pressione viene spiegata con un effetto d'urto del tutto analogo a quello delle molecole di un gas.



radiometro di Crookes

11.4 La generazione delle onde elettromagnetiche

11.4.1 CARICA ACCELERATA E CAMPO ELETTROMAGNETICO

Le onde elettromagnetiche sono prodotte ogni qualvolta si ha un movimento accelerato di cariche elettriche. In effetti il moto accelerato di una carica determina un campo magnetico variabile nelle sue vicinanze; tale campo magnetico variabile determina un campo elettrico variabile e la variazione di campo elettrico ridetermina una variazione di campo magnetico e così via.

Il campo elettrico prodotto dal moto della carica presenta due componenti: la ordinaria componente elettrostatica che decresce come l'inverso del quadrato della distanza e una seconda componente ondulatoria la cui intensità decresce come l'inverso della distanza.

Si dimostra che il valore di campo elettrico radiante associato ad una carica elettrica in moto accelerato vale:

$$E = \frac{\mu_0 q a \sin \theta}{4 \pi r} \quad (\text{V.11.13})$$

dove a è l'accelerazione della carica considerata, r la distanza tra la carica ed il punto considerato, θ è l'angolo formato tra il vettore accelerazione e la direzione di propagazione considerata (vettore \mathbf{r})

Come abbiamo già visto il campo magnetico è sempre proporzionale al campo elettrico secondo la (V.11.4).

Mentre il campo elettrostatico dipende da $1/r^2$ il campo radiante decresce come $1/r$ e perciò a distanze sufficientemente elevate diventa rilevante rispetto al primo.

Dunque il campo radiante diventa prevalente a grande distanza o in presenza di accelerazioni molto intense.

11.4.2 UN ESEMPIO: L'OSCILLATORE ARMONICO

Nel caso di una carica elettrica accelerata con legge sinusoidale

$$x = A \sin \omega t$$

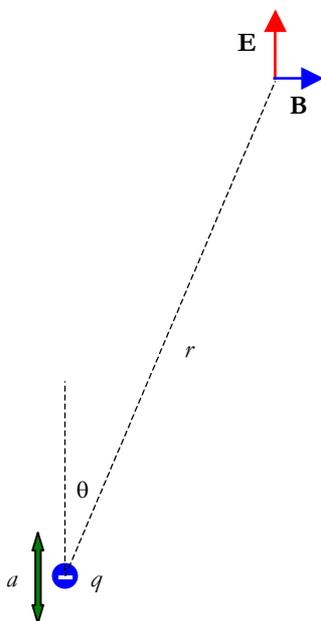
si ottiene un'onda elettromagnetica in cui sia il campo elettrico, sia quello magnetico variano sinusoidalmente con la stessa frequenza e poiché in quel caso la accelerazione (derivata seconda) risulta proporzionale ad $A \omega^2$ cresce con ω^2 la intensità del campo radiante.

La potenza irradiata (proporzionale a E^2) risulta essere pari a

$$P = \frac{\mu_0}{12\pi \epsilon} q^2 A^2 \omega^4 \quad (\text{V.11.14})$$

La equazione (V.11.14) è del tutto plausibile se si tiene presente che sia E che H sono proporzionali a ω^2 e che la potenza irradiata è proporzionale al prodotto delle due componenti.

Dunque la potenza emessa da una carica in un circuito oscillante cresce con la frequenza alla quarta potenza ⁽⁵⁾ Poiché il fattore moltiplicativo è



L'intensità del campo elettromagnetico decresce più lentamente di quello coulombiano ed è **proporzionale alla accelerazione** della carica

⁵ Si ricordi che $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

molto piccolo si spiega così la difficoltà incontrata inizialmente a produrre onde elettromagnetiche. Solo ad altissima frequenza diventano rilevanti i fenomeni di radiazione.

Il fatto di lavorare ad alta frequenza costituisce una condizione necessaria per la generazione di onde elettromagnetiche, ma la condizione, di per sé non è sufficiente. Nel circuito che genera i campi elettromagnetici variabili bisogna far in modo che non esistano zone del circuito sufficientemente ravvicinate e in cui si generano campi in opposizione di fase (per esempio porzioni di circuito vicine percorse da correnti uguali ed opposte). Il problema viene superato usando come circuiti emettitori le *antenne aperte* nelle quali la corrente pur cambiando direzione, in un dato istante presenta lo stesso verso in tutti i punti. In una antenna le due grandezze che governano la produzione di campo elettrico e magnetico (capacità ed induttanza) sono distribuite lungo l'intero corpo dell'antenna.

11.4.3 RADIAZIONE DI CERENKOV

Nel 1934 il fisico russo Cerenkov scoprì un fenomeno di emissione di radiazione da parte di elettroni relativistici in moto rettilineo uniforme in un liquido (cioè in assenza di accelerazione). Gli elettroni emettevano una debole luce azzurrognola quando la loro velocità risultava superiore alla velocità della luce nel mezzo considerato. ⁽⁶⁾

Il fenomeno è del tutto simile alla propagazione ondosa a forma triangolare che si genera quando un motoscafo si muove in acqua con velocità superiore alla velocità di propagazione delle onde generate dal motoscafo stesso (il fenomeno analogo che si produce in aria quando la sorgente si muove a velocità superiore a quella del suono è noto come *cono di Mach*).

Il cono di luce che si forma ha una apertura dipendente dalla velocità della particella e dalla velocità della luce nel mezzo, che come sappiamo dipende solo dalla costante dielettrica relativa del mezzo. Pertanto la apertura del cono di luce viene a dipendere dalla velocità della particella. Su questo effetto si basa il funzionamento di alcuni misuratori di velocità delle particelle relativistiche: basta misurare la lunghezza d'onda della radiazione Cerenkov per risalire alla velocità della particella.

Si tenga presente che quella di cui si parla non è una vera e propria radiazione dell'elettrone, che in effetti non perde energia, ma piuttosto una radiazione del mezzo generata dal campo dell'elettrone in moto.

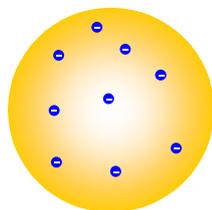


⁶ Si ricordi che la velocità della luce ha un carattere limite nel vuoto e che, poiché in un mezzo materiale si ha $v = n c$ dove n è l'indice di rifrazione, può benissimo accadere che una particella materiale in moto con velocità $u < c$ si muova a velocità maggiore di v .

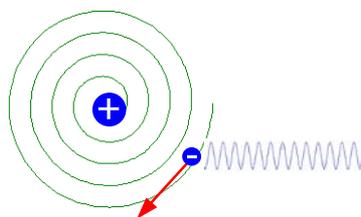
11.5 Cariche in moto circolare uniforme

11.5.1 LA FISICA CLASSICA E IL MODELLO ATOMICO PLANETARIO

Una particella elettricamente carica che si muova di moto circolare uniforme dovrebbe produrre onde elettromagnetiche, visto che si muove di moto accelerato con accelerazione centripeta $a_n = \frac{v^2}{r}$. Questa situazione si verifica in due contesti diversi entrambi interessanti: negli atomi e nei grandi acceleratori di particelle.



modello statico a panettone con gli elettroni fermi in una pasta di elettricità positiva



per la fisica classica il modello planetario è instabile perché l'elettrone deve irraggiare energia sotto forma di onde elettromagnetiche e quindi dovrebbe perdere energia e cadere rapidamente sul nucleo

La previsione relativa alla perdita di energia di una particella carica in moto circolare viene direttamente dalla teoria maxwelliana. Per questa ragione i primi modelli atomici avanzati tra fine 800 e inizio 900 non presero neppure in esame ipotesi di tipo dinamico (modello planetario). La teoria di Maxwell si era appena affermata ed era giudicata indiscutibile.

Dopo aver scoperto che gli atomi erano tenuti insieme da forze elettriche, ed averne evidenziato uno dei mattoni (l'elettrone) si scartò l'ipotesi di un modello atomico di tipo planetario per dedicarsi invece a complicati modelli di tipo statico nei quali gli elettroni erano immersi in una *pasta di elettricità positiva* come le uvette nel panettone.

La ragione di ciò stava proprio nella constatazione che se gli elettroni fossero stati dotati di moto rotatorio intorno ad un nucleo di elettricità positiva si sarebbe realizzato sì un equilibrio dinamico (come avviene per i pianeti intorno al sole) ma a questa situazione si sarebbe sovrapposta la emissione di onde elettromagnetiche che avrebbero portato gli elettroni a perdere energia e a precipitare nel nucleo in un tempo che, come vedremo in questo stesso paragrafo, sarebbe stato molto breve (circa 10^{-10} s).

11.5.2 LA RADIAZIONE DI SINCROTRONE

Nel caso degli acceleratori di particelle il fenomeno di emissione di radiazione elettromagnetica dovuta al fatto che una carica soggetta a moto circolare è sempre accelerata, è diventato particolarmente significativo. I fasci di particelle emettono una radiazione *monocromatica e coerente* la cui intensità e frequenza dipendono dalle caratteristiche dell'acceleratore (raggio di curvatura ed energia). Tale radiazione viene utilizzata come sottoprodotto tecnologico della attività di ricerca fondamentale.

La energia corrispondente alla radiazione emessa deve essere fornita dalle cavità risonanti delle zone di accelerazione che sono costrette a fornire continuamente energia al fascio per mantenerlo alla energia cinetica desiderata.

Tale radiazione, a seconda della energia delle zone coinvolte, può essere nella zona del visibile, dell'ultravioletto o dei raggi X (si veda in questo stesso capitolo la descrizione dello spettro elettromagnetico).

Nel capitolo dedicato agli acceleratori si è già accennato ad una limitazione nell'utilizzo degli acceleratori circolari per collisioni tra elettroni. Tale limitazione è dovuta alla radiazione di sincrotrone e sta determinando, nella fisica delle alte energie una modificazione di strategie: gli acceleratori ad elettroni del futuro saranno necessariamente di tipo lineare, mentre si potrà continuare ad utilizzare i sincrotroni per le particelle pe-

santi (gli adroni) che presentano però lo svantaggio, rispetto agli elettroni, di non essere puntiformi (o detto diversamente di non essere elementari) e di dare pertanto luogo a collisioni *sporche* molto più difficili da decodificare.

La ragione di tutto ciò sta nel fatto che, a parità di altre condizioni la potenza di radiazione emessa, nel caso di particelle relativistiche, risulta proporzionale a $\frac{1}{(1 - \beta^2)^2}$ e questa quantità, ricordando la legge dell'incremento relativistico della massa corrisponde a $\frac{m^4}{m_0^4}$ che a sua volta è pari a $\frac{\mathcal{E}^4}{\mathcal{E}_0^4}$. Dunque a parità di energia del fascio gli elettroni (che hanno una massa di riposo 1836 volte inferiore a quella dei protoni) emettono una energia di sincrotrone $1836^4 \approx 10^{13}$ volte superiore a quella dei protoni. Pertanto, mentre si può ipotizzare la non esistenza di un limite superiore (da radiazione di sincrotrone) alle energie raggiungibili da un fascio di protoni, tale limite esiste, ed è già stato raggiunto con l'impianto del CERN, per le energie degli elettroni.

11.5.3 QUANTO IMPIEGA UN ELETTRONE A CADERE NEL NUCLEO?

Stimare il tempo impiegato da un elettrone in orbita intorno al nucleo a perdere la propria energia cinetica per irradiazione. Si supponga che l'elettrone segua le leggi della fisica classica.



☹

Possiamo stimare il tempo τ richiesto osservando che nella ipotesi di una irradiazione costante dovrà essere: $\mathcal{E}_k = P \tau$ e pertanto:

$$\tau = \frac{\mathcal{E}_k}{P}$$

Sappiamo dalla (V.11.14) che la potenza emessa da una carica oscillante con ampiezza A vale $P = \frac{\mu_0}{12\pi c} q^2 A^2 \omega^4$. Ora se teniamo presente che il moto circolare uniforme può essere analizzato come composizione di due moti oscillatori che vanno rispettivamente come il seno ed il coseno potremo sul piano della semplice stima utilizzare per il calcolo della potenza la (V.11.14) con la assunzione che sia $A = r$ dove r è il raggio dell'orbita elettronica.

La quantità P richiesta sarà dunque pari a:

$$P = \frac{\mu_0}{12\pi c} e^2 r^2 \omega^4 = \frac{\mu_0}{12\pi c} e^2 \frac{v^4}{r^2}$$

La energia cinetica vale $\frac{1}{2} m v^2$ e pertanto:

$$\tau = \frac{E_k}{P} = \frac{m v^2}{2} \frac{12\pi c}{\mu_0} \frac{r^2}{e^2 v^4} = \frac{6\pi c m r^2}{\mu_0 e^2 v^2}$$

Ma d'altra parte il legame tra v e r è evidenziabile attraverso la II legge della dinamica:

$\frac{m v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}$ da cui $v^2 = \frac{k e^2}{m r}$ e pertanto sostituendo nella precedente relazione si ha:

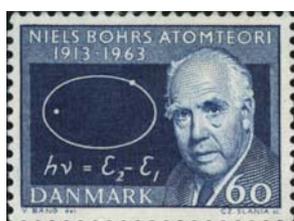
$$\tau = \frac{6\pi c m r^2}{\mu_0 e^2 v^2} = \frac{6\pi c m r^2}{\mu_0 e^2} \frac{mr}{k e^2} = \frac{6\pi c m^2 r^3}{\mu_0 k e^4}$$

Se sostituiamo i valori delle costanti considerate e assumiamo un raggio dell'orbita pari a 10^{-10} m avremo:

$$\tau = \frac{6\pi c m^2 r^3}{\mu_0 k e^4} = \frac{6\pi \times 3 \times 10^8 \times 9.1^2 \times 10^{-62} \times 10^{-30}}{4\pi \times 10^{-7} \times 9 \times 10^9 \times 1.6^4 \times 10^{-76}} \approx 2 \times 10^{-10} \text{ s}$$

☺

Dunque, se gli atomi si basano su un modello di tipo planetario e se valgono le leggi della fisica classica, gli elettroni dovrebbero implodere nel nucleo in un tempo dell'ordine di 10^{-10} s perdendo la loro energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. In altri termini, la materia, come la conosciamo, non dovrebbe esistere. Questa è la ragione sostanziale per cui furono avanzati i modelli atomici di tipo statico.



La prima risposta alla scoperta successiva dell'esistenza negli atomi di un *nocciolo duro* contenente quasi tutta la massa fu la adozione di un modello semi classico di tipo planetario nel quale si ipotizzava che, per una ragione ignota, gli elettroni in orbita negli atomi possedessero orbite privilegiate nelle quali non irradiavano energia mentre l'energia veniva emessa sotto forma di fotoni solo durante il passaggio dall'una all'altra delle orbite stabili. Ciò consentiva di conservare l'accordo tra il modello planetario necessario per spiegare l'esistenza di un nocciolo duro (il nucleo) e la necessità di salvaguardare la sostanziale stabilità degli atomi i quali, in condizioni normali non irradiano energia.

11.6 Lo spettro elettromagnetico

11.6.1 PARAMETRI TIPICI DI UN FOTONE

Come si è accennato all'inizio del presente capitolo le onde elettromagnetiche sono parte della nostra esistenza anche se, la limitatezza dei nostri sensi, ci consente di percepirne solo una piccola parte e in maniera diversificata.

I parametri caratteristici di un'onda sono la frequenza e la lunghezza d'onda (che cambia al cambiare del mezzo di propagazione insieme alla velocità). Si è anche osservato che alla fine dell'ottocento ha iniziato a riaffacciarsi sulla scena il problema della natura della luce, trasformatosi in problema sulla natura della radiazione elettromagnetica: *onda o corpuscolo?*

- Sono tipiche delle onde: la estensione infinita, la capacità di sovrapporsi senza distruggersi dopo la sovrapposizione (le onde si attraversano e poi proseguono per la loro strada), la capacità di produrre interferenza.
- Sono tipici dei fenomeni corpuscolari: il processo d'urto, il possedere quantità di moto, avere dimensioni spaziali definite, avere una energia definita.

Quando si è incominciato ad indagare il mondo delle onde in campi di indagine più vasti del mondo della luce visibile sono emersi alcuni fenomeni nuovi (in particolare l'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton) che ci hanno costretto a modificare nuovamente il punto di vista sulle onde elettromagnetiche. Le onde elettromagnetiche sono anche corpuscoli (seppur di tipo particolare) che trasportano energia definita e li chiamiamo *fotoni* (particelle di luce).

La evidenza sperimentale della esistenza di fotoni, rispetto alle prime ipotesi di quasi un secolo fa, si è molto estesa perché gli apparati di misura sono ormai in grado di seguire l'effetto prodotto da fotoni singoli. Rimane una sorta di sgomento rispetto al fatto che *l'immaginazione umana non è stata finora in grado di concepire un oggetto che goda delle proprietà di un corpuscolo, e al tempo stesso delle proprietà di un'onda, tuttavia la natura è più ricca della immaginazione umana, e nel suo studio ci si deve attenere ai risultati ottenuti con l'osservazione e l'esperienza e non alla sola immaginazione.*⁽⁷⁾

Nel descrivere lo spettro elettromagnetico, cioè l'insieme dei diversi tipi di onde elettromagnetiche con cui abbiamo a che fare, utilizzeremo pertanto una scala di classificazione nella quale compaiono sia grandezze ondulatorie, sia grandezze corpuscolari.

- La *lunghezza d'onda*, la *frequenza* e la *velocità del fotone*. Esse sono correlate dalla relazione:

$$c = \lambda \nu \tag{V.11.15}$$

Dunque 1 m corrisponde a 3×10^8 Hz

- L'*energia del fotone*, sempre proporzionale alla frequenza secondo la relazione:



"Once and for all I want to know what I'm paying for. When the electric company tells me whether light is a wave or a particle I'll write my check."



⁷ D. Sivuchin, *Corso di fisica generale vol. 5*



$$\mathcal{E} = h \nu = \frac{h c}{\lambda} \tag{V.11.16}$$

dove h è la costante di Planck pari a $6.6260755 \times 10^{-34}$ J·s.

Quando si usa questo tipo di relazione si sta operando nel mondo microscopico nel quale si usa largamente l'elettronvolt come unità ausiliaria di energia ($1\text{eV} = 1.60217733 \times 10^{-19}$ J). Pertanto si userà anche $h = 4.13566924 \times 10^{-15}$ eV·s. Si osservi che la quantità $hc \approx 1.986 \times 10^{-25}$ J·m $\approx 1.24 \times 10^{-6}$ eV·m. Dunque la lunghezza d'onda di un metro corrisponde a una energia di circa 10^{-6} eV.

relazioni fondamentali sul fotone

$$\mathcal{E} = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

$$p = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h \nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- La *quantità di moto* del fotone. Essa si connette alla energia tramite la relazione



$$p = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h \nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \tag{V.11.17}$$

I fotoni, essendo onde che trasportano una quantità definita di energia presentano anche una estensione spaziale limitata e, per questa ragione, sono detti *pacchetti d'onda*. La loro estensione spaziale sarà esaminata attraverso l'uso del principio di indeterminazione di Heisenberg.

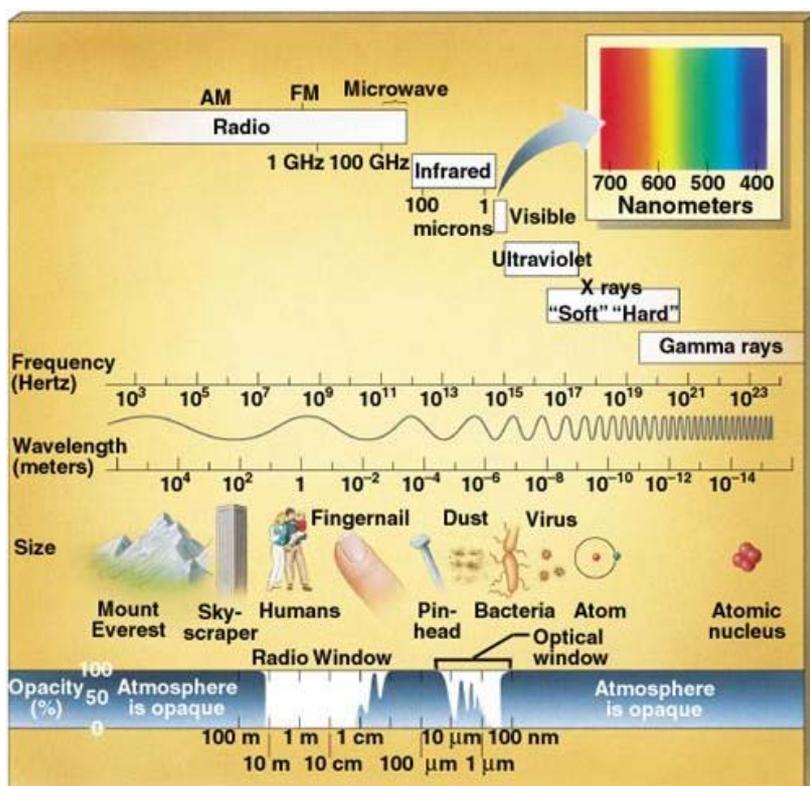
11.6.2 UNO SGUARDO ALLO SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Lo spettro elettromagnetico si estende, per lunghezze d'onda decrescenti, dalle onde lunghissime ai raggi gamma con una diversificazione energetica di molti ordini di grandezza. Esamineremo ora, seppur a grandi linee lo spettro nel suo insieme. Si tenga presente che, al cambiare dei parametri, cambiano non solo lunghezza d'onda, frequenza ed energia, ma anche la prevalenza dell'aspetto ondulatorio rispetto a quello corpuscolare, il tipo di applicazione, il processo di generazione.

Si ricordi ancora che la capacità di un'onda di passare al di là degli ostacoli o di creare ombre nette è legata al fenomeno della diffrazione che si evidenzia quando $\lambda \leq L$.

La generazione della radiazione elettromagnetica, man mano che la lunghezza d'onda decresce, dipende sempre meno da fenomeni di natura macroscopica (movimenti ordinati di cariche elettriche) e sempre più da fenomeni di origine microscopica. Questi fenomeni sono la induzione di risonanze nelle nubi elettroniche e il riassetto di livelli energetici molecolari, atomici e/o nucleari.

Per questa ragione la generazione dei fotoni di alta energia diventa sempre più un fenomeno complesso che ha a che fare con leggi di natura probabilistica. Per esempio, una delle ragioni per cui è difficile osservare l'interferenza nella zona del visibile sta nella difficoltà a produrre due sorgenti coerenti, cioè sorgenti che emettono luce conservando nel tempo la stessa fase. Ciò accade perché gli elettroni emettono il fo-



tone quando vogliono e non su comando. Le prime sorgenti di luce coerente, prodotte negli anni 60 si chiamano *laser*.

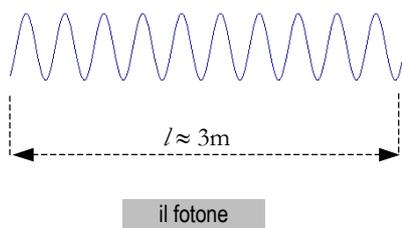
Nei capitoli dedicati ai raggi X e alla fisica del nucleo prenderemo in esame le cosiddette radiazioni ionizzanti cioè le radiazioni in cui prevale l'aspetto corpuscolare e in cui il fotone possiede energie maggiori o eguali ai 10 eV. Si tratta di radiazioni utilizzate come proiettili o come onde di bassa lunghezza d'onda per la indagine di microstrutture. Il termine radiazioni ionizzanti sta ad indicare la capacità dei corrispondenti fotoni di strappare direttamente elettroni dai nuclei o di rompere legami interatomici. Al termine di questo capitolo prenderemo invece in esame gli aspetti sanitari legati all'uso sempre più ampio delle cosiddette *radiazioni non ionizzanti* ampiamente utilizzate nella trasmissione delle informazioni.

λ m	ν Hz	\mathcal{E} eV	lo spettro elettromagnetico descrizione, origine, effetti, assorbimento
10^5	3×10^3	10^{-11}	audio, correnti alternate. Si utilizza nei telefoni
10^5 10	3×10^3 3×10^7	10^{-11} 10^{-7}	radio onde: oscillazioni elettriche dalla bassa frequenza (VLF) alla alta frequenza (HF). Si generano nei tubi elettronici e nei semiconduttori. Sono utilizzate per le trasmissioni radio
10 1	3×10^7 3×10^8	10^{-7} 10^{-6}	radio onde: oscillazioni elettriche di frequenza molto alta (VHF). Si generano nei tubi elettronici e nei semiconduttori. Sono utilizzate per le trasmissioni TV, radio a modulazione di frequenza, e radioastronomia. Interagiscono con i conduttori mettendone in moto gli elettroni liberi (antenne riceventi).
1 10^{-1}	3×10^8 3×10^9	10^{-6} 10^{-5}	radio onde e micro onde: oscillazioni elettriche di frequenza molto alta (UHF). Si generano in tubi particolari detti <i>magnetron</i> e <i>klystron</i> . Sono utilizzate per radar, TV, e radioastronomia. Inizia la banda del GHz.
10^{-1} 10^{-3}	3×10^9 3×10^{11}	10^{-5} 10^{-3}	micro onde: quelle da 1 a 30 cm sono trasparenti alla atmosfera e pertanto possono essere usate per comunicazioni con satelliti. Possono generarsi per riassetamenti tra livelli energetici molto vicini (orologi campione). Hanno energia sufficiente ad interagire con le molecole polari (cottura a micro onde). Per questa ragione si pone il problema di una possibile pericolosità.
10^{-3} 10^{-6}	3×10^{11} 3×10^{14}	10^{-3} 1	infrarosso: è una zona molto estesa nella fascia delle vibrazioni molecolari che confina inferiormente con la zona del visibile. Viene percepito come calore (radiante). Può essere utilizzata per creare immagini basata sulla emissione all'infrarosso (termografia, applicazioni meteorologiche e militari).
10^{-6} 10^{-7}	3×10^{14} 3×10^{15}	1 10	visibile: è una fascia molto ristretta che va da 0.7 a 0.4 μm con colorazioni dal rosso al violetto. L'origine principale di questa radiazione sta nei riassetamenti di orbite elettroniche. La sensibilità dell'occhio umano è diversa sulle diverse frequenze del visibile e a sua volta essa è diversa per animali diversi (comunque sempre compresa tra 0.3 e 0.7 μm). Dalle dimensioni della lunghezza d'onda si comprende la difficoltà di osservare la diffrazione in maniera semplice e si comprende anche la ragione per cui il μm è considerato il limite nella osservazione ottica in luce visibile. Si osservi ancora che un quanto di luce ha energie dell'ordine dell'eV. Lo studio degli spettri di luce è stato un elemento essenziale allo sviluppo della chimica qualitativa e quantitativa.
10^{-7} 10^{-8}	3×10^{15} 3×10^{16}	10 10^2	ultravioletto: ha caratteristiche analoghe alla fascia del visibile; unico elemento da sottolineare in più è la capacità ionizzante di questi fotoni che sono in grado di estrarre elettroni dai metalli e dai singoli atomi. Questi fotoni, così come quelli del visibile possono indurre reazioni chimiche con assorbimento del fotone (fotografia, fotosintesi)
10^{-8} 10^{-12}	3×10^{16} 3×10^{20}	10^2 10^6	raggi X: si origino nel frenamento di elettroni di alta energia da parte di bersagli metallici (spettro continuo) e da transizioni di livelli energetici di atomi complessi (metalli). Le applicazioni sono per radiografia, terapia superficiale, cristallografia (si usa il reticolo cristallino come ostacolo per produrre diffrazione).
10^{-10} 10^{-15}	3×10^{18} 3×10^{23}	10^4 10^{13}	raggi γ : si origino nel riassetamento degli adroni all'interno del nucleo atomico per radioattività naturale, radioattività indotta, fissione e fusione nucleare. Dal punto di vista energetico sono parzialmente sovrapposti ai raggi X ma è diversa la genesi. Si utilizzano per gli stessi scopi della radiazione X anche se diventa sempre più prevalente l'aspetto di cristallografia e demolitivo (terapia dei tumori).

11.7 Fotoni e treni d'onda: qualche stranezza

11.7.1 IL FOTONE HA UNA ESTENSIONE SPAZIALE FINITA

Se le nostre conoscenze sul fatto che i quanti di luce trasportano una energia definita sono corrette ne derivano due implicazioni abbastanza rilevanti:



- poiché il fotone trasporta una energia definita ed è prodotto in un processo temporale di durata limitata, risulta essere limitata anche la sua estensione spaziale
- per effetto della sua estensione spaziale limitata il fotone deve essere considerato come un oggetto la cui frequenza è definita con un certo grado di indeterminazione.

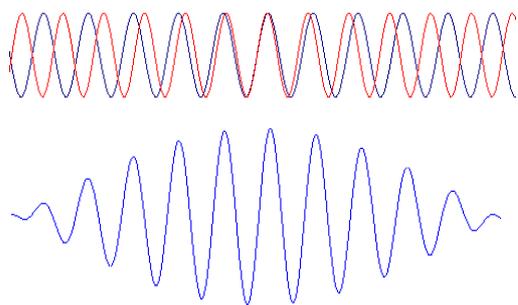
In effetti, il meccanismo con cui la luce visibile, infrarossa, ultravioletta e i raggi X sono emessi prevede che un atomo eccitato, cioè dotato di energia in eccesso, si riporti alla prima energia disponibile emettendo un'onda elettromagnetica. Poiché tali processi hanno una durata tipica $\tau \approx 10^{-8}$ s deve essere tale anche la durata temporale dell'onda emessa che, per questa ragione viene chiamata *treno d'onda*.

Se si assume $\tau \approx 10^{-8}$ s si ottiene che $l \approx 3$ m e visto che nella zona del visibile $\lambda \approx 0.4 \times 10^{-6}$ m si ha che in un treno d'onda sono comunque contenute alcune milioni di lunghezze d'onda

Dunque un treno d'onda è una sorta di impulso di onde regolari dotato di una dimensione spaziale finita che viaggia nel vuoto alla velocità c (in figura si è rappresentato il solo campo elettrico la cui intensità, come si è già osservato, gioca comunque il ruolo più rilevante nei diversi fenomeni).

11.7.2 PER QUESTA RAGIONE È INDETERMINATO IN FREQUENZA

In fisica è ben noto dall'acustica il *fenomeni dei battimenti* che si verifica quando si sovrappongono due armoniche della stessa ampiezza ma con frequenza leggermente diversa. Si genera una armonica di frequenza intermedia tra le due e con una ampiezza variabile nel tempo molto più lentamente di quanto non oscilli la armonica.



Si tratta del suono con un caratteristico *va e vieni* che si ascolta quando si cerca di accordare una chitarra usando una chitarra già accordata o quando si ascolta il suono delle campane che, essendo formate di due metà, mai perfettamente simmetriche, producono suoni mai perfettamente isocroni.

La figura qui a lato ci dà una illustrazione di quanto detto. Si osservi che date le due armoniche $x_1 = A \sin \omega_1 t$ e $x_2 = A \sin \omega_2 t$ se si applicano le formule di prostaferesi si ottiene:

$$x = x_1 + x_2 = A (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) = 2A \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$$

Si produce un'onda di frequenza media delle due $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ e la cui am-

piezza cambia nel tempo con frequenza $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = 2\pi \Delta\nu$.

dalla sovrapposizione di onde con frequenza simile si produce un fenomeno ondulatorio di frequenza $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ la cui ampiezza varia con frequenza $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$

Per esempio due suoni di 1000 e 1002 Hz che ci sembrano quasi identici producono, sovrapponendosi, un suono di 1001 Hz la cui intensità aumenta e diminuisce con la frequenza di 1 Hz (che percepiamo come un va e vieni del suono).

Un treno d'onda, o fotone, è un oggetto simile alla figura del battimento (con una spuntatura negli estremi) e tale oggetto, per il fatto di essere il prodotto di una sovrapposizione di onde di frequenza diversa presenta sempre una frequenza media di riferimento, cioè che abbiamo finora chiamato con ν , ma anche una indeterminazione $\Delta\nu$ che dipende dalla estensione spaziale del fotone.

I ragionamenti condotti sono di tipo qualitativo. Ci si potrebbe, per esempio chiedere che fine fanno gli altri componenti del battimento (ne abbiamo disegnato uno solo) e bisognerebbe introdurre la sovrapposizione di infinite onde di ampiezza variabile.

Il fotone presenta una estensione spaziale pari alla dimensione del battimento e se lo trattiamo come una particella possiamo considerare tale estensione come una indeterminazione nella posizione. La estensione

spaziale del battimento è $\frac{v}{\Delta\nu}$.

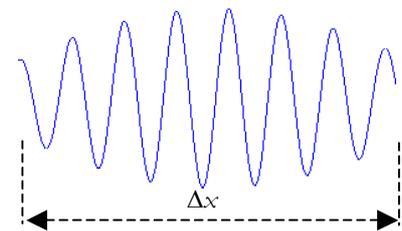
Ma alla indeterminazione in frequenza corrisponde anche una indeterminazione nella energia e nella quantità di moto:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{v} \text{ da cui } \Delta p = \frac{h \Delta\nu}{v}$$

Dunque il prodotto delle due indeterminazioni ha le dimensioni di h :

$$\Delta x \Delta p \approx h$$

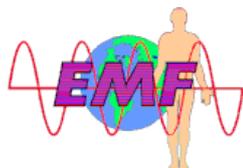
quando il fotone viene trattato come una particella esso risulta soggetto ai vincoli del principio di indeterminazione.



il fotone come battimento troncato

11.8 L'inquinamento elettromagnetico

11.8.1 IL PROGETTO CAMPI ELETTO MAGNETICI DELL'ORGANIZZAZIONE MONDIALE DELLA SANITÀ



il logo della Organizzazione Mondiale della Sanità e quello del progetto Campi Eletto Magnetici

Negli ultimi anni è cresciuta enormemente la nostra interazione con una parte dello spettro elettromagnetico considerata inoffensiva (quella delle radiazioni di bassa energia o radiazioni non ionizzanti). Accanto a questa maggiore presenza si sono giustamente diffuse le preoccupazioni delle autorità e della pubblica opinione circa i possibili rischi.

Per questa ragione i diversi paesi si sono dati disposizioni a tutela dei cittadini consumatori e l'organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha varato un progetto poliennale per la ricerca e la informazione sul tema denominato CEM (campi elettromagnetici, in inglese EMF electromagnetic field).

Abbiamo scelto di informare su aspetti in cui la conoscenza scientifica va accompagnata dal senso civico utilizzando i materiali messi a disposizione dalla OMS per evitare sia atteggiamenti eccessivamente tranquillizzanti del tipo *se le onde si usano vuol dire che non fanno male* ma anche isteriche prese di posizione contro la tecnologia nella speranza che una maggiore diffusione delle fonti ufficiali contribuisca a far crescere consapevolezza e razionalità.

Il progetto CEM iniziato nel 1996 con l'adesione di una quarantina di paesi dovrebbe terminare nel corso del 2003 e ha finora prodotto una serie di valutazioni di impatto e di raccomandazioni che servono ai diversi paesi per la emanazione di provvedimenti relativi sia alle cautele da adottare nella realizzazione degli impianti sia alla protezione della salute dei propri cittadini e dei lavoratori addetti.

La parte dello spettro di cui ci si occupa è quello rappresentato nella tabella qui sotto in cui vengono anche condensate le sigle utilizzate.

Denominazione		Sigla	Frequenza
Frequenze estremamente basse		ELF (<i>extremely low frequency</i>)	0 - 3 kHz
Frequenze bassissime		VLF (<i>very low frequency</i>)	3 - 30 kHz
Radiofrequenze (RF)	Frequenze basse (onde lunghe)	LF (<i>low frequency</i>)	30 - 300 kHz
	Medie frequenze (onde medie)	MF (<i>medium frequency</i>)	300 kHz - 3 MHz
	Alte frequenze	HF (<i>high frequency</i>)	3 - 30 MHz
	Frequenze altissime (onde metriche)	VHF (<i>very high frequency</i>)	30 - 300 MHz
Microonde (MO)	Onde decimetriche	UHF (<i>ultra high frequency</i>)	300 MHz - 3 GHz
	Onde centimetriche	SHF (<i>super high frequency</i>)	3 - 30 GHz
	Onde millimetriche	EHF (<i>extremely high frequency</i>)	30 - 300 GHz

L'inquinamento elettromagnetico o *elettrosmog* se si prescinde dal cosiddetto fondo naturale di radiazione di provenienza sia cosmica sia terrestre è dovuto ai seguenti attori:

- Linee di distribuzione dell'energia elettrica ad alta tensione.
- Apparat per telecomunicazione (ripetitori radio TV - stazioni

- base telefonia cellulare)
- Elettrodomestici (impianti HI-FI - elettrodomestici in genere - ferro da stiro - rasoio - radiosveglia - lampade alogene - forno a microonde - PC e macchine da ufficio)
- Processi produttivi
- Apparecchiature per applicazioni biomedicali



11.8.2 I CAMPI A FREQUENZA ESTREMAMENTE BASSA

Campi di questo genere si incontrano in corrispondenza degli elettrodotti di trasporto della energia elettrica a causa delle elevate intensità di corrente che si hanno nelle linee di trasporto ed in ambiente domestico dove la presenza dei motori dei piccoli elettrodomestici ci pone in continuo contatto con campi magnetici a 50 Hz.

Dal punto di vista biologico non si evidenziano significativi effetti per campi elettrici sino a 20 kV/m mentre l'effetto dei campi magnetici a bassa frequenza è quello di indurre deboli correnti che risultano però inferiori (alle normali esposizioni) alle correnti elettriche già presenti nel nostro organismo (come per esempio quelle che regolano il battito cardiaco).

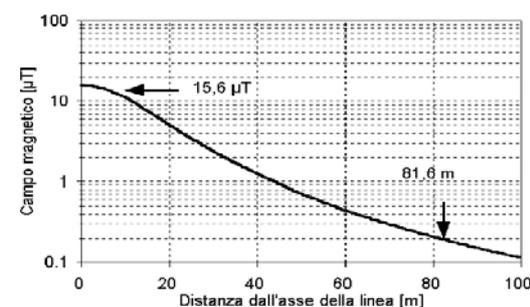
Si assume cautelativamente un limite di sicurezza di 100 µT mentre la soglia di attenzione epidemiologica cioè il limite inferiore al di sotto del quale non ha praticamente senso la misurazione è di 0.2 µT.

Nelle abitazioni veniamo in contatto con campi magnetici significativi quando siamo a distanza ravvicinata da motori elettrici in azione come si vede dalla tabella seguente.

Elettrodomestico	valore di B in µT alla distanza		
	3 cm	30 cm	1 m
asciugacapelli	6÷2000	0.01÷7	0.01÷0.03
rasoio elettrico	15÷1500	0.08÷9	0.01÷0.03
aspirapolvere	200÷800	2÷20	0.13÷2
lampada fluorescente	40 – 400	0.5 – 2	0.02 – 0.25
forno a micro onde	73 ÷ 200	4 ÷ 8	0.25 ÷ 0.6
radio portatile	16 – 56	1	< 0.01
forno elettrico	1÷50	0.15÷0.5	0.01÷0.04
lavatrice	0.8÷50	0.15÷3	0.01÷0.15
ferro da stiro	8÷30	0.12÷0.3	0.01÷0.03
lavastoviglie	3.5÷20	0.6÷3	0.07÷0.3
Personal Computer	0.5÷30	< 0.01	
Tv	2.5÷50	0.04÷2	0.01÷0.15
Trapano	400÷800	2÷3.5	

In grassetto si sono indicate le distanze tipiche di utilizzo; nel caso del phon e del rasoio l'elevato indice di variabilità è legato alle diversità costruttive

Mentre dalla immagine qui a lato possiamo osservare in scala logaritmica il rapido decremento del campo sotto le linee ad alta tensione al crescere della distanza (in questo caso bisogna però tener conto della continuità del processo di esposizione nel caso di abitazioni troppo a ridosso di tali linee come accade per certi insediamenti degli anni 50 e 60).



andamento del campo in funzione della distanza dai cavi per una linea di trasporto da 380 kV e 1500 A; come si nota appena sopra gli 80 m si va al di sotto del limite di attenzione



A partire dal 1979, quando gli studi epidemiologici sollevarono per la prima volta il problema della relazione tra campi magnetici a frequenza industriale e tumori infantili, sono stati condotti un gran numero di studi per stabilire se l'esposizione ai campi ELF potesse influenzare lo sviluppo del cancro, ed in particolare della leucemia infantile.

Non c'è nessuna evidenza convincente che l'esposizione ai campi ELF che sperimentiamo nei nostri ambienti di vita provochi un danno diretto alle molecole biologiche, compreso il DNA. Poiché non sembra verosimile che l'esposizione a campi ELF possa iniziare un processo cancerogeno, sono state condotte numerose ricerche per stabilire se non possa invece influenzare la promozione o la co-promozione del cancro. I risultati degli studi su animali condotti fino ad oggi suggeriscono che i campi ELF non siano né iniziatori né promotori del cancro.

Tuttavia, due recenti analisi dei dati aggregati di diversi studi epidemiologici hanno fornito indicazioni che sono state cruciali nella valutazione della IARC. Questi studi suggeriscono che, in una popolazione esposta a campi magnetici mediamente superiori a $0,3-0,4 \mu\text{T}$, si possa sviluppare un numero doppio di casi di leucemia infantile rispetto ad una popolazione con esposizione inferiore. Nonostante la gran mole di dati, rimane ancora incerto se l'aumento dell'incidenza di leucemie sia dovuto all'esposizione ai campi magnetici o a qualche altro fattore.

La leucemia è una malattia rara. Attualmente, essa viene diagnosticata ogni anno a 4 bambini su 100.000 di età compresa tra 0 e 14 anni. Anche un'esposizione media al di sopra di $0,3-0,4 \mu\text{T}$ nelle abitazioni è rara. Dai risultati degli studi epidemiologici si può stimare che meno dell'1% della popolazione sia esposta a questi livelli laddove si utilizza energia elettrica a 240 V.⁸

E già che ci siamo parliamo di cancro

Nel giugno 2001, un gruppo di lavoro della IARC, formato da scienziati esperti nel settore, ha esaminato gli studi relativi alla cancerogenicità dei campi elettrici e magnetici statici ed ELF. Usando la classificazione standardizzata della IARC, che soppesa i dati di studi sull'uomo, sull'animale e di laboratorio, i campi magnetici ELF sono stati classificati come *possibilmente cancerogeni per l'uomo*, sulla base degli studi epidemiologici relativi alla leucemia infantile. Le evidenze scientifiche relative a tutti gli altri tipi di tumori nei bambini e negli adulti, nonché quelle relative ad altri tipi di esposizione (cioè a campi statici ed a campi elettrici ELF) sono stati considerati non classificabili, perché le informazioni scientifiche erano insufficienti o incoerenti.

"*Possibilmente cancerogeno per l'uomo*" è una classificazione usata per connotare un agente per il quale vi sia una limitata evidenza di cancerogenicità nell'uomo ed un'evidenza meno che sufficiente negli animali da laboratorio.

La classificazione è la più debole tra le tre ("*possibilmente cancerogeno per l'uomo*", "*probabilmente cancerogeno per l'uomo*" e "*cancerogeno per l'uomo*") usate dalla IARC per classificare i potenziali cancerogeni in base all'evidenza scientifica. Sono qui riportati alcuni esempi di comuni agenti classificati dalla IARC.

- tre livelli di pericolosità
- cancerogeno per l'uomo
 - probabilmente cancerogeno
 - possibilmente cancerogeno

Classificazione decrescente come causa di cancro	Fattori di rischio
Cancerogeno per l'uomo (normalmente in base ad una forte evidenza di cancerogenicità nell'uomo)	Asbesto; Iprite; Tabacco; Radiazione gamma
Probabilmente cancerogeno per l'uomo (normalmente in base ad una forte evidenza di cancerogenicità negli animali)	Gas di scarico dei motori diesel; Lampade solari; Radiazione UV; Formaldeide

⁸ Promemoria 263 ottobre 2001 progetto CEM

Classificazione decrescente come causa di cancro	Fattori di rischio
Possibilmente cancerogeno per l'uomo (normalmente sulla base di una evidenza nell'uomo che è considerata credibile, ma per la quale non si possono escludere altre cause)	Caffè; Gas di scarico dei motori a benzina; Fumi di saldatura; Campi magnetici ELF

