

41. EQUAZIONI DI MAXWELL PER CAMPI VARIABILI NEL TEMPO

41.1. Campi elettrici generati da flussi magnetici variabili

Le linee del campo magnetico che circondano correnti elettriche sono sempre chiuse: non hanno né inizio né fine. Ad esempio le linee del campo magnetico dovuto a una corrente che percorre un filo rettilineo molto lungo sono circonferenze perfette con il centro sul filo. D'altra parte le linee del campo elettrico descritte nel capitolo 23 hanno origine sulle cariche positive (dette anche *sorgenti*) e finiscono sulle cariche negative (dette anche *pozzi*). È possibile che anche le linee del campo elettrico siano chiuse?

Per rispondere a questa domanda consideriamo una spira circolare di raggio r attraversata da un flusso magnetico variabile diretto lungo l'asse della spira (Fig. 41.1).

La legge dell'induzione elettromagnetica ci dice che nella spira viene indotta una forza elettromotrice quando si produce una variazione del flusso magnetico attraverso di essa.

Nel filo circola allora una corrente indotta e ciò significa che le cariche elettriche si muovono nella spira. Su queste cariche si deve esercitare una forza risultante non nulla che le faccia muovere lungo il circuito e fornisca, per esempio, l'energia consumata per scaldare il filo.

Questa forza, riferita alla carica elettrica, è semplicemente l'intensità del campo elettrico \mathbf{E} che stiamo cercando.

In questo esempio totalmente simmetrico non c'è alcunché che distingua una parte della spira circolare da un'altra e quindi il campo elettrico che è ovunque tangente al filo, ha la stessa intensità in ogni punto della spira.

Possiamo trovare il modulo di \mathbf{E} mediante la legge di induzione elettromagnetica. La forza elettromotrice è stata definita nel paragrafo 33.6 a pag. 434 come il lavoro riferito all'unità di carica. In questo caso il lavoro per unità di carica compiuto nel percorrere l'intero circuito, lungo $2\pi r$, è legato alla forza riferita alla carica elementare dalla relazione

$$[41.1] \quad \mathcal{E} = 2\pi r E .$$

Uguagliando questa espressione alla velocità di variazione del flusso magnetico [39.11], otteniamo:

$$[41.2] \quad 2\pi r E = - \frac{\Delta \Phi_{\mathbf{B}}}{\Delta t} .$$

La [41.2] dice che, nel caso di una spira di raggio maggiore, il campo elettrico in corrispondenza a tale raggio deve essere proporzionalmente minore, perché il prodotto del campo elettrico per la lunghezza della

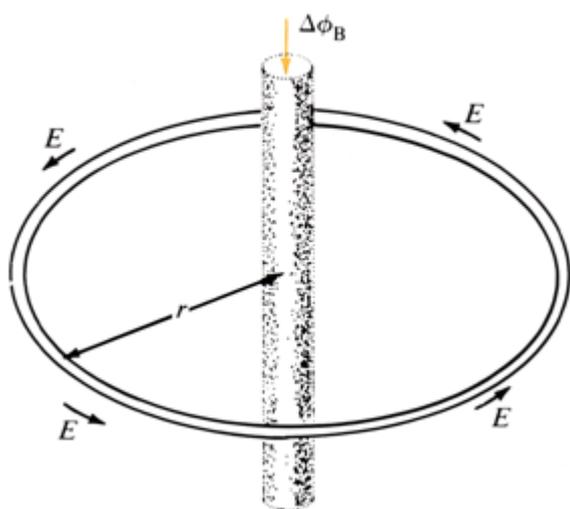


Fig. 41.1. Quando il flusso magnetico varia attraverso l'area ombreggiata, il campo elettrico che lo circonda deve essere lo stesso ovunque lungo il filo. Perciò l'energia riferita alla carica elementare ricevuta da una carica a cui viene fatto percorrere l'intero filo è $2\pi r E$.

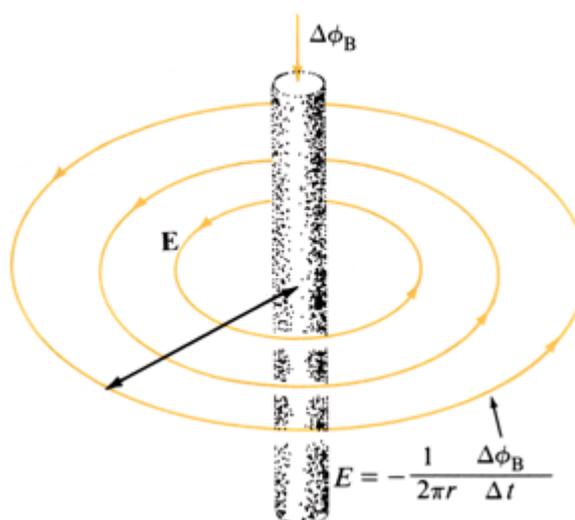


Fig. 41.2. Le linee del campo elettrico indotto intorno a un flusso magnetico variabile sono circonferenze. Il campo elettrico è inversamente proporzionale alla distanza.

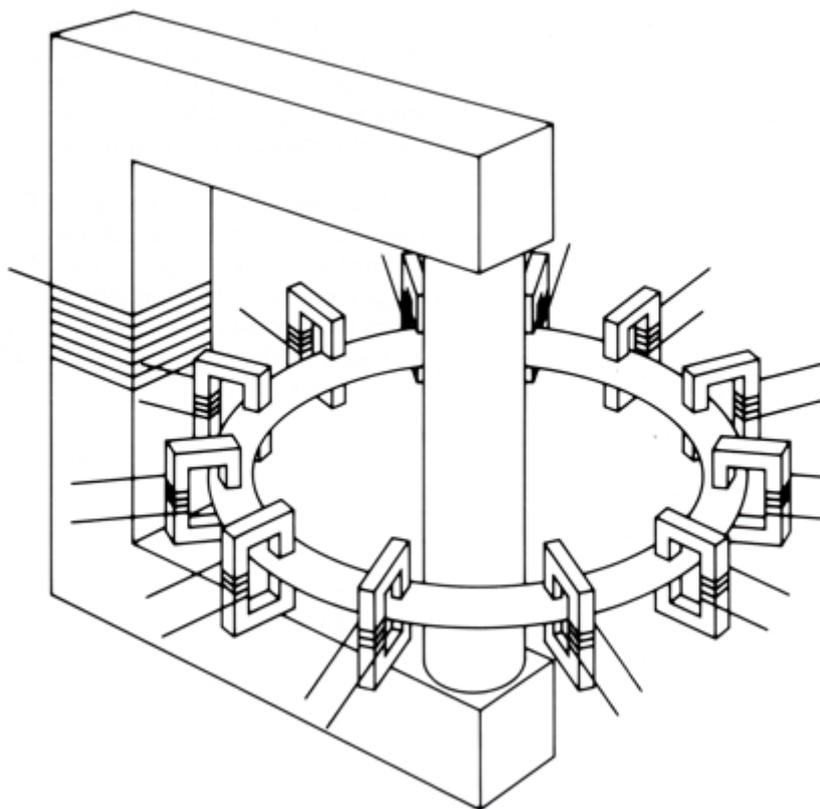


Fig. 41.3. Rappresentazione schematica di un betatrone. Il flusso magnetico variabile nella parte centrale produce un campo elettrico che accelera gli elettroni. Gli elettroni vengono deflessi e costretti a percorrere traiettorie circolari dall'anello esterno di elettromagneti. Possiamo prevedere correttamente le traiettorie in base al campo magnetico che deflette gli elettroni e al campo elettrico indotto che imprime agli elettroni l'accelerazione lungo la traiettoria.

circonferenza deve essere sempre uguale all'opposto della velocità di variazione del flusso magnetico.

Questa conclusione dipende dalla presenza di una spira? Nel capitolo 23 il campo elettrico \mathbf{E} è stato definito per descrivere la forza riferita alla carica indipendentemente dalla sua effettiva esistenza. Analogamente la legge di induzione dovrebbe essere valida siano presenti o no circuiti reali.

In altre parole, il campo elettrico intorno a un cilindro di flusso magnetico variabile esisterebbe anche nel vuoto, come è indicato nella Fig. 41.2. Questo ragionamento fu proposto da James Clerk Maxwell, che sviluppò la formulazione matematica dei fenomeni elettrici e magnetici.

Che questo campo elettrico esista realmente si può verificare sperimentalmente con particelle cariche non rinchiusi in un circuito conduttore.

Gli acceleratori per le alte energie, come ad esempio il betatrone (Fig. 41.3), accelerano singole particelle cariche fino a fare assumere loro alte energie sfruttando proprio tali campi elettrici circolari. In questi acceleratori elettroni contenuti in una «ciambella» in cui è stato fatto il vuoto vengono fatti muovere sempre più velocemente concatenati a un flusso magnetico variabile.

Essi accelerano esattamente nel modo previsto in base all'azione del campo elettrico generato dall'induzione elettromagnetica.

Vediamo ora come generalizzare la [41.2]. Dalla definizione di forza elettromotrice si ha:

$$[41.3] \quad \mathcal{E} = \frac{L}{q} = \frac{\oint_{lc} \mathbf{F} \times d\mathbf{l}}{q} = \oint_{lc} \frac{\mathbf{F}}{q} \times d\mathbf{l} = \oint_{lc} \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = C_{lc}(\mathbf{E})$$

e ricordando la [39.12] si ottiene:

$$[41.4] \quad C_{lc}(\mathbf{E}) = \oint_{lc} \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{\mathbf{B}}}{dt}.$$

In realtà, non è necessario che la traiettoria chiusa sia circolare e che giaccia in un piano, la legge dell'induzione elettromagnetica vale sempre.

Nell'applicare alla Fig. 41.1 la legge di Faraday-Neumann-Lenz, immaginiamo che nel campo si trovi una spira circolare conduttrice. Se $\Phi_{\mathbf{B}}$ attraverso questa spira cresce, la corrente indotta tenderà ad opporsi a questa «variazione», creando un campo magnetico proprio, diretto verso l'alto all'interno della spira. Così la corrente indotta i dovrà circolare in verso antiorario, la qual cosa implica che le linee di \mathbf{E} , che è il

responsabile della corrente, dovranno anch'esse avere verso antiorario. Se invece il campo magnetico nella Fig. 41.1 fosse decrescente nel tempo, la corrente indotta e le linee di forza del campo elettrico \mathbf{E} avrebbero verso orario, in modo da opporsi sempre alla variazione di Φ_B .

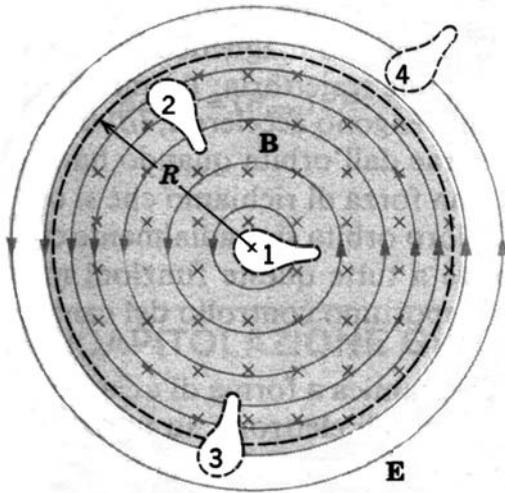


Fig. 41.4. Linee circolari di \mathbf{E} , associate ad un campo magnetico crescente. Le quattro linee chiuse sono percorsi immaginari lungo i quali si può calcolare una *f.e.m.*.

elettriche, tuttavia esiste una differenza la cui manifestazione più semplice è la seguente: le linee di \mathbf{E} associate ad un flusso magnetico variabile sono linee chiuse (si veda la Fig. 41.4), mentre, per un campo associato con cariche elettriche, esse partono dalle cariche positive e si arrestano sulle cariche negative e non possono formare linee chiuse.

Quesiti

- 41.1.** Le linee di un campo elettrico indotto da una variazione del flusso magnetico hanno un inizio e una fine?
- 41.2.** Riusciresti a indurre una corrente nella spira della Fig. 39.7 riempiendo di ferro la zona in cui è presente il campo magnetico? Perché sì o perché no?
- 41.3.** Supponi che il flusso magnetico Φ_B della Fig. 41.2 vari nel tempo con andamento sinusoidale, come è indicato nella Fig. A.

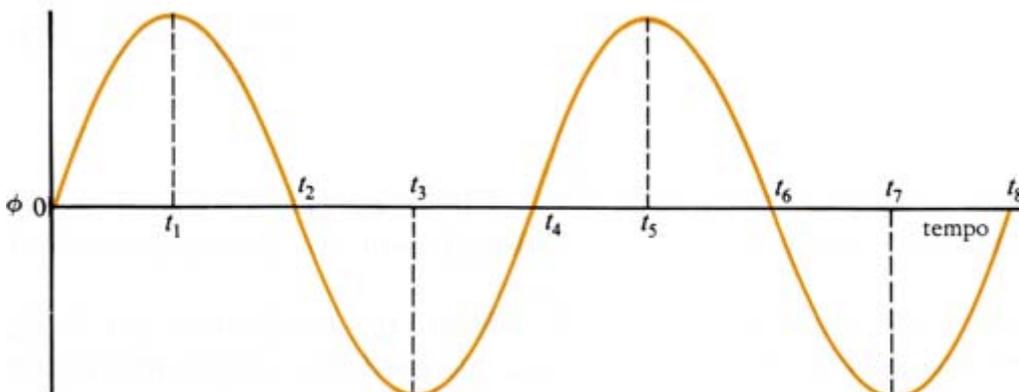


Fig. A.

- (a) In quali istanti il campo elettrico \mathbf{E} è massimo?
- (b) In quali istanti il campo elettrico \mathbf{E} è nullo?

(c) Supponi che nell'istante $t = 0$ la direzione e il verso del campo elettrico \mathbf{E} sia quello indicato nella figura. In quali intervalli di tempo il campo elettrico \mathbf{E} avrà il verso opposto, mantenendo la stessa direzione?

41.4. Quali sarebbero le traiettorie degli elettroni nel betatrone rappresentato schematicamente nella Fig. 41.3 se non esistesse l'anello esterno di magneti?

41.5. Se la velocità di variazione del flusso magnetico attraverso una spira conduttrice chiusa raddoppia, quale sarà l'effetto sull'intensità della corrente indotta?

41.6. In un betatrone, gli elettroni vengono accelerati a energie molto alte da un flusso magnetico variabile. Gli elettroni si muovono in una traiettoria circolare all'interno di una «ciambella» di vetro argentato in cui è stato fatto il vuoto e accelerano quando aumenta il flusso magnetico concatenato con il foro della ciambella. Dentro la ciambella esiste un altro campo magnetico che ha la direzione perpendicolare al piano della ciambella e che mantiene gli elettroni in moto su traiettorie circolari. Un elettrone nella ciambella di un betatrone si muove lungo un'orbita circolare di 50 cm di raggio a una velocità pari al 98 % di quella della luce. Se il flusso magnetico all'interno della ciambella cresce alla rapidità di 24 Wb/s per un tempo pari a 1/240 secondi, quanta energia (in elettronvolt) verrà trasferita all'elettrone? (Nota. Si supponga che la velocità rimanga costante e approssimativamente uguale alla velocità della luce.)

41.2. Campi magnetici concatenati con flussi elettrici variabili

Il campo elettrico che circonda un tubo di flusso magnetico variabile (Fig. 41.2) è molto simile al campo magnetico che circonda una corrente elettrica (Fig. 34.6 (a)). Non è perciò molto sorprendente che le leggi della circuitazione per i due casi risultino espresse in modo simile. Abbiamo visto che la legge della circuitazione di Ampere per \mathbf{B} applicata ad un lungo filo rettilineo percorso da corrente dà (Fig. 41.5)

$$[41.5] \quad 2\pi rB = \mu_0 i \quad \text{o meglio} \quad C_l(\mathbf{B}) = \oint_l \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_j i_j .$$

Confrontiamola con l'espressione:

$$[41.6] \quad 2\pi rE = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \quad \text{o meglio} \quad C_l(\mathbf{E}) = \oint_l \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

che è la legge della circuitazione di \mathbf{E} (Fig. 41.6).

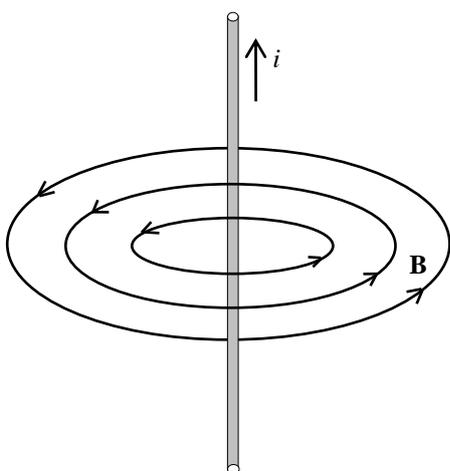


Fig. 41.5. Il campo magnetico di una corrente elettrica è concatenato con la corrente e la sua grandezza decresce come $1/r$.

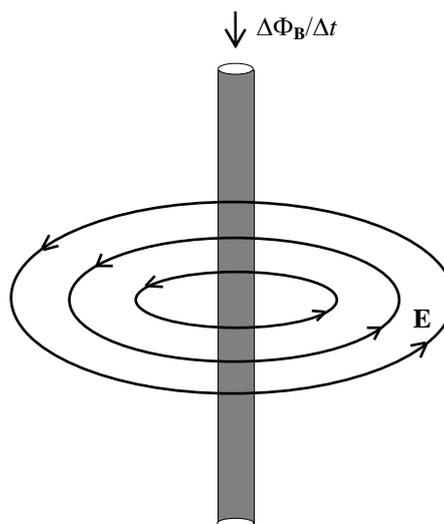


Fig. 41.6. In modo corrispondente il campo elettrico attorno ad un tubo di flusso magnetico variabile è concatenato col flusso e decresce come $1/r$ a partire dalla regione in cui il campo magnetico è intenso.

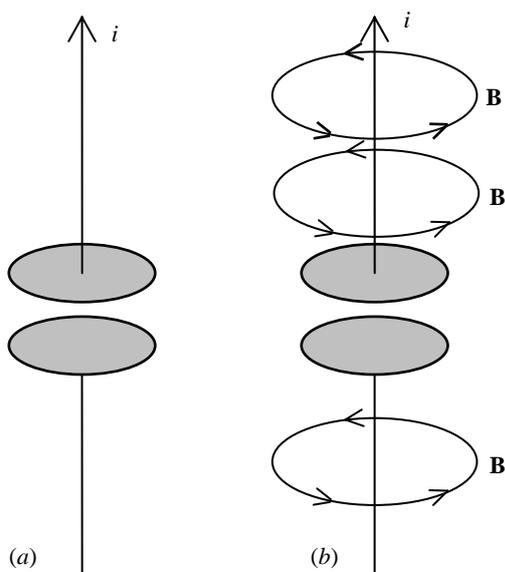


Fig. 41.7. (a) Un lungo filo rettilineo è stato interrotto e due piastre parallele circolari sono state inserite sul cammino della corrente. (b) Durante il passaggio della corrente che carica le piastre, ci saranno linee circolari di campo magnetico attorno al filo.

Nel primo caso il campo magnetico \mathbf{B} circonda la corrente, e la sua intensità decresce come $1/r$ se la corrente resta costante; nel secondo caso il campo elettrico circonda il flusso magnetico variabile e la sua intensità decresce anch'essa come $1/r$ se la velocità di variazione del flusso è costante. Solo i versi delle frecce lungo gli assi dei circuiti sono diversi, come ci si deve aspettare a causa del segno meno della seconda equazione.

Ma che cosa succede se la corrente non è costante? Consideriamo il campo magnetico nelle prossimità di un lungo filo rettilineo, interrotto in modo da poter inserire sul cammino della corrente due piastre parallele affacciate, come è rappresentato nella Fig. 41.7(a).

Possiamo tenere il resto del circuito così lontano da poter considerare la simmetria come assiale, e possiamo anche usare piastre circolari per essere certi che tutte linee di \mathbf{B} saranno circonferenze. La corrente nel filo fornirà cariche alle piastre e durante il processo di carica avremo linee circolari di \mathbf{B} attorno al filo come in Fig. 41.7(b). In ogni istante durante la carica, questo campo \mathbf{B} deve soddisfare la legge della circuitazione di Ampere $2\pi rB = \mu_0 i$, dove i è la corrente istantanea che attraversa la superficie limitata dalla linea circolare di \mathbf{B} . Ma a questo punto ci imbattiamo in un paradosso. (Qual è il significato della frase “linea chiusa concatenata con il circuito”?) Niente nella legge della circuitazione di Ampere ci diceva che la superficie limitata dalla linea circolare doveva essere piana; e difatti quando avevamo soltanto un lungo filo potevamo benissimo considerare una superficie concava (o di qualunque altra forma) limitata dalla superficie circolare, senza alcuna differenza sostanziale per quanto riguarda l'enunciato della legge della circuitazione (Figg. 41.8(a) e 41.8(b)). Quando nel circuito sono inserite le piastre, se scegliamo una superficie “a tazza” in modo che passi attraverso lo spazio tra esse, non vi è flusso di corrente attraverso la superficie (Figg. 41.8(c) e 41.8(d)); eppure c'è un campo \mathbf{B} e quindi la circuitazione ($2\pi rB$) non è nulla. La legge della circuitazione sembra fallire, e ci troviamo di fronte a un vero paradosso.

Per risolvere questo problema dobbiamo fare una delle seguenti due cose: o dire che la legge della circuitazione per \mathbf{B} vale soltanto per correnti uniformi, oppure dobbiamo correggere la legge in modo che valga anche per questo caso in cui le cariche si accumulano in qualche punto del circuito. In accordo con Maxwell, seguiremo la seconda via. Notiamo per prima cosa che anche se non c'è passaggio di corrente tra le due piastre, tra esse vi è un campo elettrico in ogni istante da quando comincia la carica, e le linee di questo campo vanno dalle cariche positive che sono su una piastra a quelle negative che sono sull'altra. In secondo luogo notiamo che ogni volta che si ha un passaggio di corrente nel circuito, si ha una variazione di carica elettrica sulle piastre, e per conseguenza una variazione dell'intensità del campo elettrico. Se definiamo flusso del campo elettrico Φ_E il prodotto dell'intensità del campo \mathbf{E} per l'area a cui \mathbf{E} è perpendicolare, possiamo parlare, invece che di variazione di intensità di campo elettrico, di variazione del flusso del campo elettrico. Ora, se diciamo che questo flusso elettrico variabile è in un certo senso equivalente a una corrente,

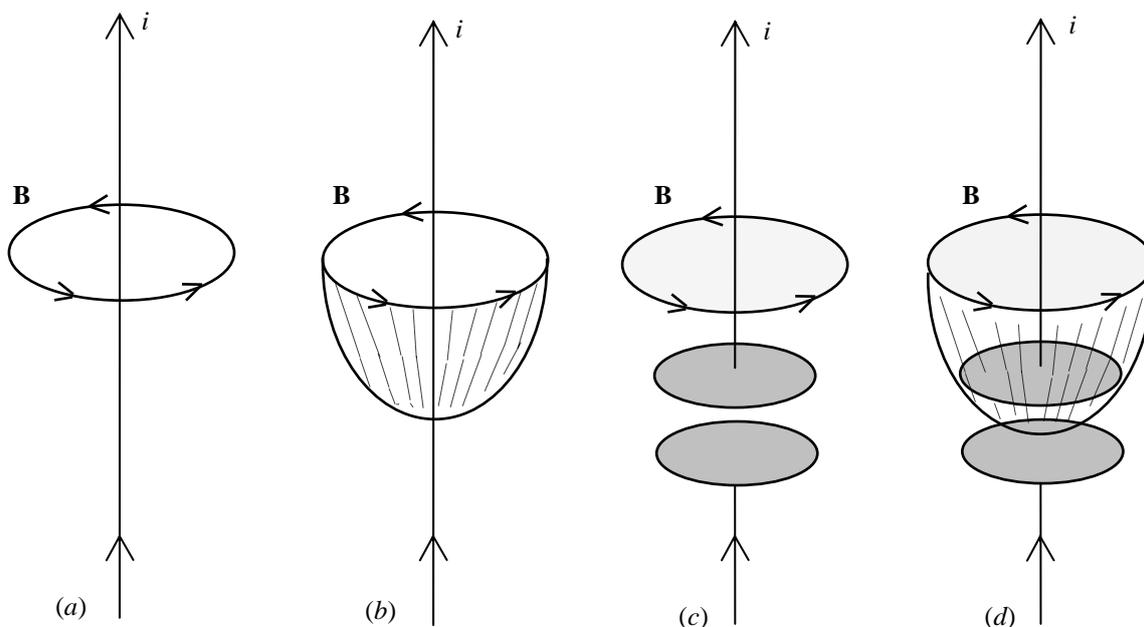


Fig. 41.8. (a) e (b) Nella legge della circuitazione di Ampere (applicata al campo di un lungo filo rettilineo percorso da corrente) niente ci dice che la superficie limitata dalla spira debba essere piana. (c) e (d) Applicando lo stesso ragionamento al caso in cui nel circuito sono inserite le piastre parallele siamo però condotti ad un paradosso.

possiamo “salvare” la legge della circuitazione di \mathbf{B} : ciò che attraversa la superficie “a tazza” limitata dalla nostra spira (Fig. 41.8(d)) non è proprio una corrente, ma un flusso elettrico variabile. Nell’inserto a pagina 528 si dimostra come una variazione di flusso elettrico può essere espressa mediante la variazione della carica sulle piastre. Vediamo che la corrente totale necessaria perché la legge della circuitazione di Ampere sia valida per correnti non uniformi è data dalla somma della corrente vera i e della “corrente equivalente”

(si usa anche il termine “corrente di spostamento”) $\varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$, dove ε_0 è la costante dielettrica nel vuoto. Per la

superficie “a tazza” che passa tra le due piastre la corrente vera è zero e la “corrente equivalente” dovuta al flusso elettrico variabile è la sola che conta. Allora nella zona tra le piastre si ha:

$$[41.7] \quad C_l(\mathbf{B}) = \oint_l \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$$

ossia

$$[41.8] \quad 2\pi r B = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta\Phi_{\mathbf{E}}}{\Delta t}.$$

L’importanza di questo termine aggiunto da Maxwell non è dovuto tanto al fatto che esso risolve il paradosso, ma al fatto che esso ha portato a prevedere l’esistenza delle onde elettromagnetiche e ad affermare, molti anni prima della verifica sperimentate, che la luce è semplicemente radiazione elettromagnetica.

È facile vedere che il termine $\varepsilon_0 \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}$ ha le dimensioni di una corrente. Il concetto di corrente equivalente (o di spostamento) permette di mantenere il concetto di continuità della corrente valido per correnti di conduzione continue.

Per esempio nella Fig. 41.9, la corrente i entra nella armatura positiva ed esce dalla armatura negativa. La corrente di conduzione non è continua nell'intercapedine tra le armature del condensatore perché non vi è trasporto di cariche in quella intercapedine. Ma si può dimostrare che la corrente equivalente i_e in quella regione è proprio uguale ad i .

Per calcolare la corrente equivalente, ricordiamo che E nella intercapedine è dato da

$$[41.9] \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0 A},$$

da cui derivando si ottiene

$$[41.10] \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_0 A} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_0 A} i.$$

La corrente equivalente per definizione è

$$[41.11] \quad i_e = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d(EA)}{dt} = \varepsilon_0 A \frac{dE}{dt}.$$

Sostituendo dE/dt ottenuta con la [41.10] nella [41.11] si ottiene

$$[41.12] \quad i_e = (\varepsilon_0 A) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0 A} i \right) = i,$$

che mostra che la corrente equivalente nell'intercapedine è identica alla corrente di conduzione nei fili conduttori.

È una specie di “corrente equivalente” in una regione in cui non c'è una vera corrente ma, in suo luogo, un campo elettrico variabile. Possiamo utilizzare questa “corrente equivalente” per modificare la legge della circuitazione di \mathbf{B} in modo che sia applicabile al caso delle due piastre parallele collegate al lungo filo rettilineo. Aggiungiamo alla corrente vera i la corrente equivalente e scriviamo la circuitazione di \mathbf{B} come:

$$[41.13] \quad \oint_l \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = 2\pi r B = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + i \right) = \mu_0 (i_e + i) \quad (4^{\text{a}} \text{ equazione di Maxwell})$$

Poiché $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ e $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$ dove $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$, il contributo alla circuitazione dato dalla “corrente equivalente” è:

$$[41.14] \quad \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2}{4\pi \times (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)} \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{1}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

Quesiti

41.7. Che cosa determina la “corrente equivalente” fra due piastre parallele in un circuito elettrico?

41.8. È possibile mantenere indefinitamente:

(a) una circuitazione magnetica costante?

(b) una circuitazione elettrica costante?

41.9. Nella Fig. 41.8(c), supponi che le piastre fossero inizialmente scariche e che la corrente indicata abbia fluito per un tempo brevissimo.

(a) Qual è il segno delle cariche su ciascuna piastra?

(b) Qual è l'orientazione del campo elettrico?

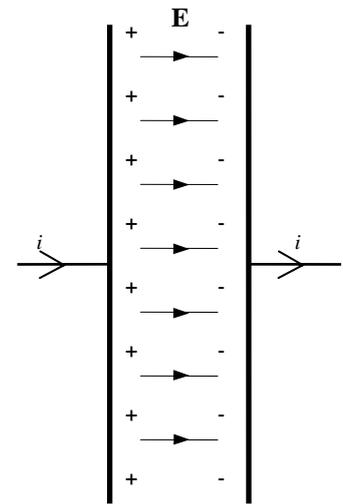


Fig. 41.9.

41.10. Indica con un segno quali delle equazioni di Maxwell implicano i fenomeni sotto indicati.

Fenomeno	Equazioni di Maxwell			
	I	II	III	IV
1. Le linee di E hanno origine e termine dove ci sono cariche				
2. La corrente di spostamento				
3. In condizioni statiche non ci può essere carica nell'interno di un conduttore.				
4. Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico				
5. Il flusso del campo magnetico attraverso una superficie chiusa è zero.				
6. Un campo magnetico variabile genera un campo elettrico.				
7. Le linee di B sono chiuse.				
8. Il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa può essere uguale o diverso da zero.				
9. Una carica elettrica è sempre accompagnata da un campo elettrico.				
10. Non vi sono monopoli magnetici.				
11. Una corrente elettrica è sempre accompagnata da un campo magnetico.				
12. La legge di Coulomb.				
13. Il campo elettrostatico è conservativo.				

41.11. Un condensatore piano con armature circolari di raggio R è stato caricato come in Fig. A.

(a) Determinare un'espressione per il campo magnetico indotto per diversi raggi. Considerare sia $r \leq R$ che $r > R$.

(b) Determinare \mathbf{B} per $r = R$ e per $dE/dt = 1.0 \times 10^{12}$ V/m·s e per $R = 50$ mm.

(c) Quanto vale la corrente di spostamento? [R. (b) $0.28 \mu\text{T}$; (c) 70 mA]

41.12. Un condensatore piano ha armature quadrate di lato 1.0 m come in Fig. B. Esso è caricato da una corrente di 2.0 A entrante (e uscente).

(a) Quanto vale la corrente di spostamento nell'intercapedine tra le armature?

(b) Quanto vale dE/dt in questa regione?

(c) Quanto vale la corrente di spostamento attraverso il quadrato tratteggiato tra le armature?

(d) Quanto vale la $C(\mathbf{B})$ lungo questo percorso tratteggiato?

[R. (a) 2.0 A ; (b) $2.3 \times 10^{11} \text{ V/m}\cdot\text{s}$; (c) 0.50 A ; (d) $6.3 \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}$]

41.13. Un condensatore piano con armature circolari ha raggio $R = 30 \text{ mm}$ e distanza tra le armature di 5.0 mm . Viene applicata alle armature una d.d.p. sinusoidale con valore massimo 150 V e frequenza 60 Hz . Trovare $B_0(R)$, il massimo valore del campo magnetico indotto per $r = R$.

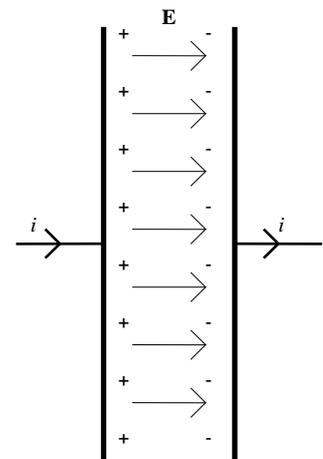
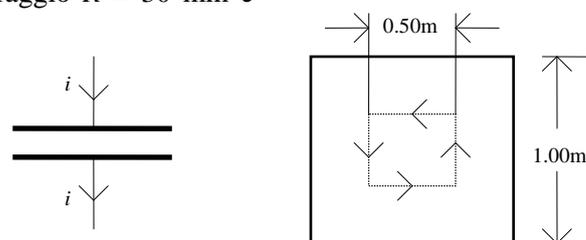


Fig. A.



Visione laterale

Visione frontale

Fig. B.

41.3. Radiazione elettromagnetica

Le due leggi della circuitazione ci permettono di dedurre importanti proprietà delle onde elettromagnetiche nello spazio vuoto. Dobbiamo per prima cosa riscrivere le leggi, in modo che esse possano essere applicate anche a circuiti chiusi formati da piccoli tratti rettilinei, invece di cammini circolari simmetrici. Dobbiamo conoscere la componente di ogni campo nella direzione del percorso punto per punto; moltiplichiamo la lunghezza del percorso per cui la componente del campo ha un dato valore per ogni tratto del circuito chiuso, e poi sommiamo i singoli risultati per tutti i tratti che formano il circuito chiuso. Allora:

$$[41.15] \quad C_l(\mathbf{E}) = \oint_l \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{\mathbf{B}}}{dt}$$

$$[41.16] \quad C_l(\mathbf{B}) = \oint_l \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = \left(\frac{1}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt} = \frac{1}{c^2} \frac{d\Phi_{\mathbf{E}}}{dt}.$$

Abbiamo tralasciato il termine relativo alla corrente ordinaria perché vogliamo applicare le leggi dell'induzione in una regione di spazio non contenente materia, ma solo campi elettrici e magnetici variabili nel tempo. Queste sono le due leggi che Maxwell ha combinato per arrivare a predire le onde elettromagnetiche.

Possiamo seguire gli aspetti principali della sua argomentazione, se ammettiamo come punto di partenza che nello spazio vuoto esista o un campo elettrico variabile o un campo magnetico variabile. Partendo da tale ipotesi, faremo vedere allora che la presenza di uno dei due campi variabili induce l'altro e che i due campi si automantengono nello spazio vuoto, solo se variano in modo tale da propagarsi nello spazio con la velocità della luce.

Consideriamo un campo magnetico variabile \mathbf{B} la cui configurazione si sposti nello spazio vuoto con velocità v . Nella Fig. 41.10, abbiamo disegnato un grafico del campo in funzione di x (direzione in cui si muove il campo) in due istanti diversi, t e $t + \Delta t$. Nella Fig. 41.11(a) abbiamo rappresentato il campo in tre dimensioni, in corrispondenza all'istante t e ai due valori x e x' . Supponiamo per semplicità che il campo sia costante, per un dato valore di x , su tutto il piano parallelo al piano (y,z) , ma vari con x . In un breve intervallo di tempo Δt l'intera configurazione si sposterà verso destra (come è indicato nella Fig. 41.10); il campo magnetico \mathbf{B} e perciò il flusso $\Phi_{\mathbf{B}}$, concatenato con tutte le parti della spira rettangolare di Fig. 41.11(a), decresce durante questo breve intervallo di tempo. Per la legge dell'induzione, il campo variabile \mathbf{B} produrrà un campo elettrico indotto \mathbf{E} . L'orientazione del campo elettrico è indicata nella rappresentazione

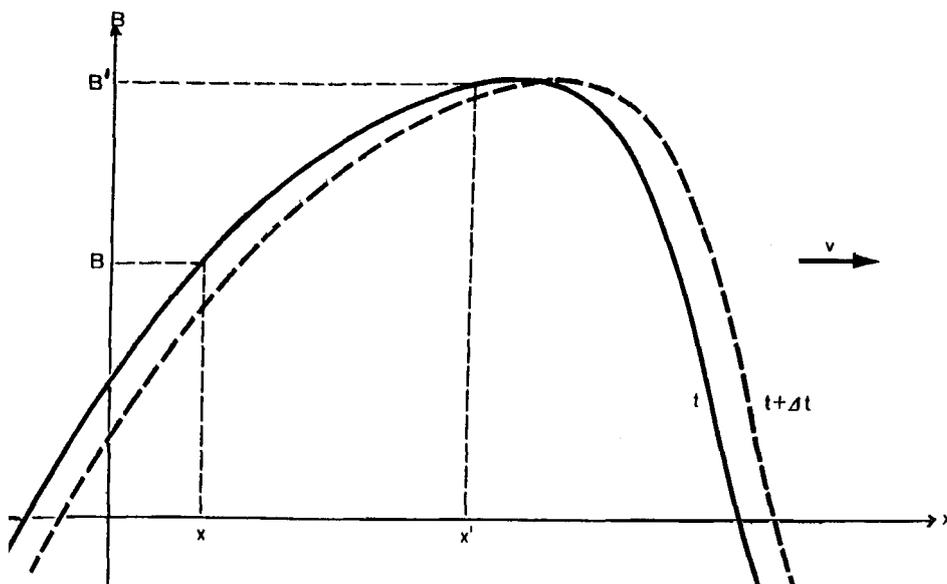


Fig. 41.10. Intensità di un campo magnetico \mathbf{B} negli istanti t e $t + \Delta t$ in un'onda elettromagnetica viaggiante lungo l'asse x con velocità v .

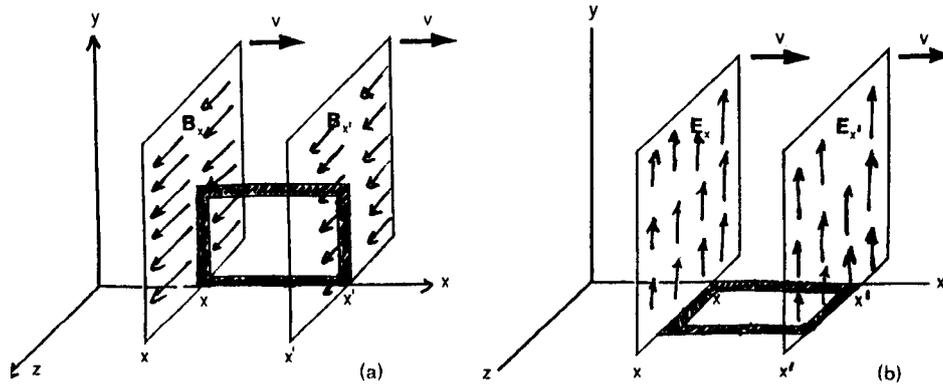


Fig. 41.11. Campo \mathbf{B} e campo \mathbf{E} , in x e x' nell'istante t , costanti su ogni piano (y,z) .

tridimensionale di Fig. 41.11(b). I due campi sono perpendicolari tra loro ed entrambi sono perpendicolari a \mathbf{v} , che rappresenta la direzione in cui si muovono i due campi. Non lo abbiamo dimostrato, ma semplici esperimenti (per esempio, con le onde radio) indicano che ciò è vero.

Abbiamo solo dimostrato che un campo magnetico variabile nel tempo, in moto con velocità v nella direzione positiva dell'asse x , dà origine a un campo elettrico variabile. Avremmo potuto benissimo partire considerando un campo elettrico variabile in moto con velocità v . Quindi, esaminando la variazione di flusso in un breve intervallo di tempo Δt attraverso tutta la spira di Fig. 41.11(b), avremmo trovato un campo magnetico indotto. I due campi variabili, le cui configurazioni si spostano verso destra sono intimamente legati fra loro. Ciascuno di essi non può esistere senza l'altro.

Finora non abbiamo parlato del valore della velocità v . Per dimostrare che deve essere la velocità della luce, troveremo la relazione fra la variazione del campo elettrico \mathbf{E} e la variazione del campo magnetico fra due punti nel vuoto, servendoci delle due leggi dell'induzione e delle espressioni della circuitazione elettrica e magnetica lungo due spire immerse nei due campi.

Consideriamo anzitutto il campo magnetico nei punti x e x' negli istanti t e $t+\Delta t$. Nella Fig. 41.12(b) abbiamo disegnato un cammino chiuso rettangolare nel piano (x,y) perpendicolare al campo variabile \mathbf{B} ; la sua lunghezza è $x'-x$. Nell'istante t , il campo magnetico in x è \mathbf{B} e in x' è \mathbf{B}' .

Consideriamo ora ciò che accade nel piccolo lasso di tempo Δt durante il quale la configurazione del campo \mathbf{B} si muove verso destra con velocità v , com'è indicato nella Fig. 41.12(a). Durante questo breve lasso di tempo si ha una piccola diminuzione del flusso magnetico attraverso il cammino chiuso rettangolare. Abbiamo scelto Δt tanto piccolo che la distanza $v\Delta t$ lungo l'asse x di cui si sposta la configurazione del campo \mathbf{B} nel tempo Δt sia piccola rispetto alla lunghezza del cammino chiuso. Perciò, possiamo considerare che il cammino chiuso rettangolare grande sia costituito da un numero grandissimo di cammini chiusi, rettangolari, piccoli e identici di larghezza $v\Delta t$ lungo l'asse x com'è indicato nelle Figg. 41.12(b) e 41.12(c).

Nell'istante t , il valor medio di \mathbf{B} su ciascun cammino chiuso piccolo ricavabile dal grafico di Fig. 41.12(a), è rappresentato con le frecce in Fig. 41.12(b). Dopo un tempo Δt , i valori medi di \mathbf{B} attraverso ciascuno dei cammini chiusi piccoli sono rappresentati nella Fig. 41.12(c). Osserviamo che il campo magnetico in ciascuno dei cammini chiusi piccoli nell'istante $t+\Delta t$ è uguale al campo magnetico nel cammino chiuso piccolo situato immediatamente alla sua sinistra nell'istante t . (Ciò accade perché la configurazione di campo si muove verso destra con velocità v).

Per trovare il campo \mathbf{E} indotto attraverso il cammino chiuso rettangolare grande, dobbiamo trovare la variazione del flusso magnetico $\Delta\Phi_{\mathbf{B}}$ attraverso tale cammino chiuso, durante l'intervallo di tempo Δt . Essa è la somma delle variazioni del flusso magnetico attraverso tutti i cammini chiusi piccoli. Essa è:

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi_{\mathbf{B}} &= lv\Delta t(B + B_1 + B_2 \dots B_5) - lv\Delta t(B_1 + B_2 \dots B_5 + B') = \\
 [41.17] \quad &= lv\Delta t(B - B') \\
 &= lv\Delta t\Delta B.
 \end{aligned}$$

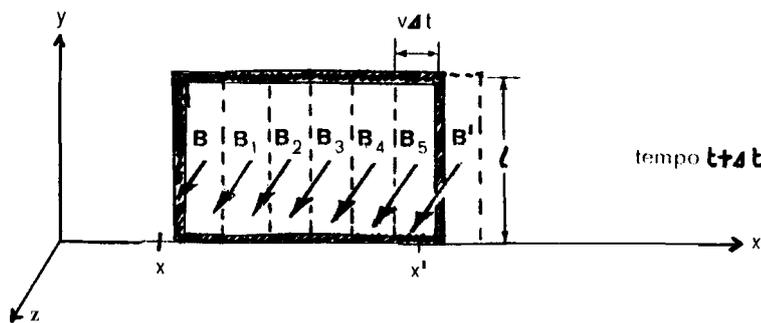
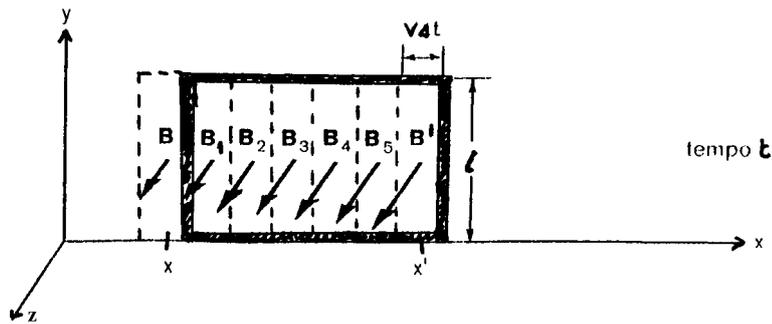
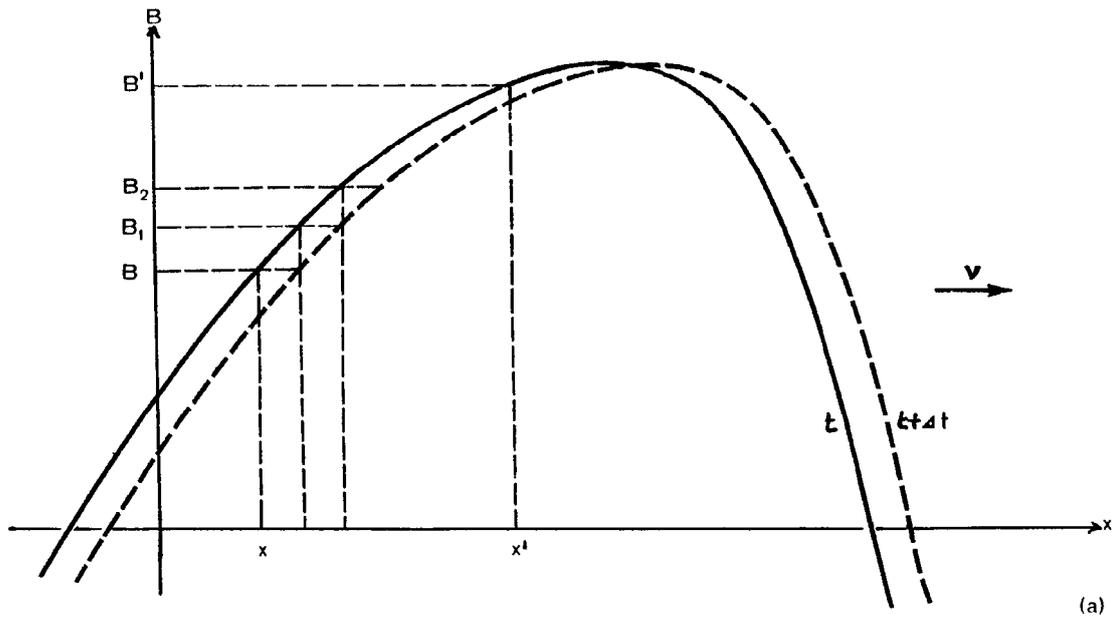


Fig. 41.12. In (a) è rappresentato il campo \mathbf{B} in funzione di x negli istanti t e $t+\Delta t$, nel caso di una configurazione di campo magnetico in moto. In (b) e in (c) sono rappresentati i campi medi \mathbf{B} , \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2, \dots , \mathbf{B}' concatenati con piccoli cammini chiusi rettangolari di altezza $v \cdot \Delta t$, rispettivamente negli istanti t e $t+\Delta t$. (Per semplicità, all'interno del cammino chiuso rettangolare grande sono stati disegnati solo 6 piccoli cammini chiusi rettangolari).

Possiamo usare lo stesso ragionamento per trovare la variazione del flusso elettrico $\Delta\Phi_{\mathbf{E}}$ attraverso un cammino chiuso rettangolare grande identico al precedente e posto nel piano (x,z) perpendicolare al campo \mathbf{E} . Come ci si aspetta, risulta che

$$[41.18] \quad \Delta\Phi_{\mathbf{E}} = lv\Delta t(E - E') = lv\Delta t\Delta E ;$$

perciò dalle [41.18] e [41.17] si ricavano rispettivamente:

$$[41.19] \quad \frac{\Delta\Phi_{\mathbf{E}}}{\Delta t} = lv\Delta E$$

e

$$[41.20] \quad \frac{\Delta\Phi_{\mathbf{B}}}{\Delta t} = lv\Delta B .$$

Possiamo ora trovare sia la circuitazione elettrica sia la circuitazione magnetica lungo i cammini chiusi rettangolari identici rappresentati nella Fig. 41.13, tenendo presente che per ogni lato la circuitazione è positiva se il verso del campo e il verso sul cammino sono concordi, negativa se sono discordi.

Poiché i campi sono paralleli ai lati di lunghezza l e perpendicolari agli altri, le componenti E_l e B_l lungo i lati del cammino chiuso rettangolare sono E e B lungo i lati di lunghezza l e zero lungo gli altri lati. Per questo motivo, possiamo tralasciare l'indice l in E_l e B_l . Inoltre, nel ricavare la circuitazione elettrica tralascieremo il segno negativo nella relazione $\oint_l \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = -\frac{\Delta\Phi_{\mathbf{B}}}{\Delta t}$, poiché ci interessa solo il valore assoluto di

$$\frac{\Delta\Phi_{\mathbf{B}}}{\Delta t} \text{ e non il segno.}$$

Circuitazione elettrica

$$El - E'l = \frac{\Delta\Phi_{\mathbf{B}}}{\Delta t} ,$$

$$l\Delta E = lv\Delta B ,$$

Quindi,

$$\Delta E = v\Delta B ,$$

Circuitazione magnetica

$$Bl - B'l = \frac{1}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} \frac{\Delta\Phi_{\mathbf{E}}}{\Delta t} ,$$

$$l\Delta B = \frac{1}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} lv\Delta E .$$

$$\Delta B = \frac{1}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} v\Delta E .$$

Eliminando ΔE dalle due equazioni precedenti si ottiene:

$$\Delta B = \frac{v^2}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2} \cdot \Delta B .$$

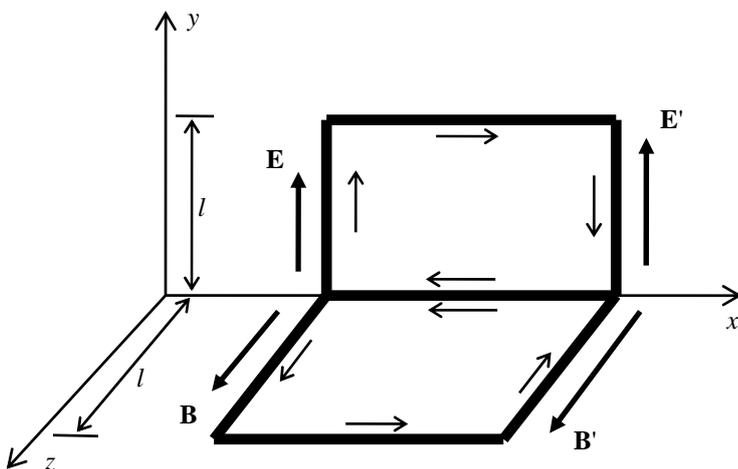


Fig. 41.13. Per trovare sia la circuitazione elettrica sia la circuitazione magnetica nell'istante t , abbiamo disegnato due spire identiche, una nel piano (x,y) perpendicolare a \mathbf{B} e l'altra nel piano (x,z) perpendicolare a \mathbf{E} . Ci riferiremo alla spirale nel piano (x,y) per trovare la circuitazione elettrica e a quella sul piano (x,z) per trovare la circuitazione magnetica.

Si vede perciò che la configurazione dei due campi può muoversi invariata nello spazio (come un'onda su una molla elicoidale) solo se $v^2 = 9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$; cioè, se $v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, che è la velocità c della luce.

Questa conclusione ricavata dalle leggi della circuitazione per il campo elettrico e il campo magnetico ha condotto Maxwell a concludere “che la luce stessa (compreso il calore raggianti ed altre eventuali radiazioni) è una perturbazione elettromagnetica sotto forma di onde ..”. Al tempo di Maxwell non c'era alcuna prova evidente del carattere elettrico della luce, né di alcun'altra radiazione. Più di venti anni dopo (1886) questa previsione Heinrich Hertz fu in grado di generare radiazioni che noi ora chiamiamo onde radio, usando dispositivi elettrici, e dimostrò che queste onde veramente si propagano con la velocità della luce. La teoria di Maxwell era così brillantemente confermata. Nel prossimo paragrafo studieremo brevemente alcune prove dell'esistenza della radiazione elettromagnetica e della natura elettrica della luce.

41.4. Prove a favore della radiazione elettromagnetica: lo spettro elettromagnetico

Tutti i campi elettrici e magnetici traggono origine dalle cariche elettriche e dal loro moto. In quali condizioni ci aspettiamo che questi campi si irradiano a distanza dalle particelle elettriche che li hanno originati? Una carica elettrica in quiete ha intorno a sé solo un campo radiale coulombiano, un campo cioè che tende a zero rapidamente (con il quadrato dell'inverso della distanza) e che non si propaga a distanza. Una carica in moto rettilineo uniforme non differisce in realtà da una carica ferma (Fig. 41.14). Se ci muoviamo con essa, la vediamo ferma rispetto a noi e il campo intorno ad essa è coulombiano. Se procediamo con una velocità costante diversa, minore o maggiore, a causa delle variazioni di flusso elettrico vedremo anche un campo magnetico; ma questo campo magnetico è localizzato nella regione del campo coulombiano. Così i campi elettrico e magnetico restano legati alla carica in moto rettilineo uniforme e non si propagano a distanza. D'altra parte se la carica è accelerata, non esiste alcun sistema di riferimento, nel quale siano valide le leggi di Newton e dell'elettromagnetismo, rispetto al quale essa sia a riposo o si muova di moto rettilineo uniforme. Inoltre quando acceleriamo una carica, compiamo un lavoro per cui è questa la sola circostanza in cui abbiamo l'occasione di cedere energia al campo elettromagnetico, originando un impulso di campo elettrico e magnetico incrociati e autopropagantisi. Volendo trovare la radiazione elettromagnetica, dovremo dunque considerare cariche accelerate.

Osserviamo allora sperimentalmente che cosa accade quando acceleriamo delle cariche.

- Una stazione radiotrasmittente immette cariche lungo una antenna, dapprima in una direzione poi in quella opposta; queste cariche non si muovono con velocità costante, ma vanno avanti e indietro accelerate dapprima in un verso, poi nell'altro. Le radioonde che si staccano dall'antenna si propagano alla velocità di $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. Evidentemente esse sono originate dal moto accelerato delle cariche spinte avanti e indietro lungo l'antenna.
- Quando sull'anticatodo di un tubo a raggi X facciamo arrestare elettroni molto veloci, nel far ciò diamo loro una rapida accelerazione all'indietro; dalla regione dove le cariche vengono accelerate si irradiano raggi X. Misurando la velocità di propagazione dei raggi X troviamo che anch'essa è di $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

- In un sincrotrone – macchina che fornisce elettroni molto veloci – dei campi magnetici deflettori fanno girare lungo grandi orbite elettroni dotati di enormi energie. Se guardiamo lungo l'orbita, vediamo uscirne luce. In effetti, l'energia alla quale possiamo portare gli elettroni è limitata praticamente dall'energia che essi irradiano sotto forma di luce mentre vengono accelerati dalle forze magnetiche deflettrici. Noi forniamo loro energia quanto più rapidamente possibile per mezzo di un gigantesco oscillatore elettrico; ma quando il moto degli elettroni ha raggiunto una certa velocità, l'energia viene irradiata con la stessa rapidità con la quale viene da noi fornita. L'ordinaria luce visibile è perciò una radiazione elettromagnetica che trae origine dall'accelerazione delle particelle elettriche. La coincidenza fra la velocità della luce e la velocità della radiazione elettromagnetica quale fu calcolata da Maxwell non era accidentale: tutte le radiazioni che abbiamo nominato si propagano a $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$, e tutte hanno origine elettrica. Esse sono tutte radiazioni elettromagnetiche (Fig. 41.15).

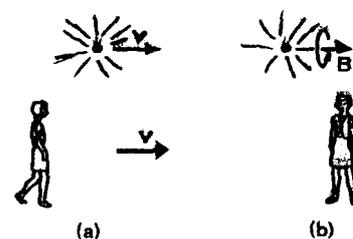


Fig. 4114. (a) Se ci spostiamo insieme con una carica in moto, noi vediamo solo il suo campo coulombiano. (b) Se la carica si muove rispetto a noi con una velocità costante, osserviamo nella stessa regione anche un campo magnetico.

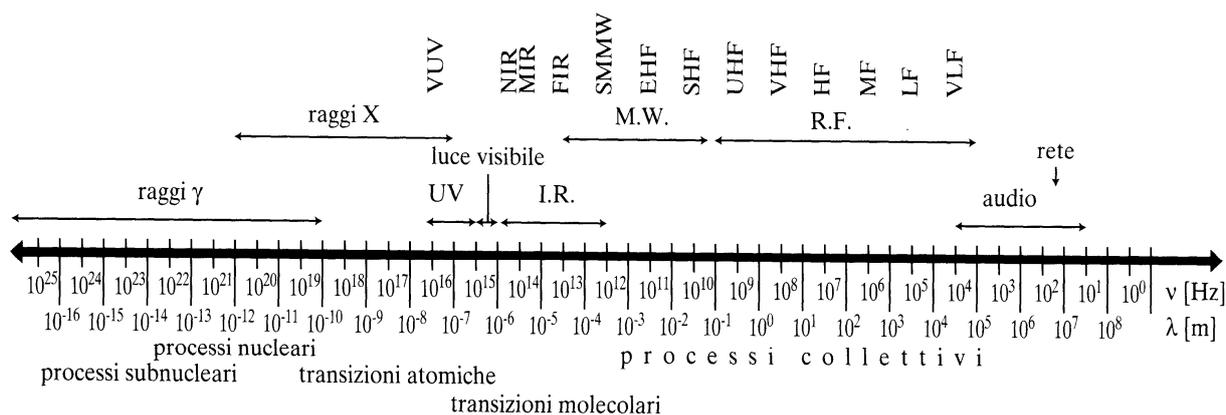


Fig. 41.15. Lo spettro elettromagnetico. C'è un insieme continuo di radiazioni dai raggi gamma alle onde radio. I nomi usati per le diverse parti dello spettro hanno valore storico e danno semplicemente una classificazione secondo la sorgente della radiazione, ma la natura fisica della radiazione è la stessa per tutto lo spettro. La radiazione di qualunque zona ha sempre la stessa velocità e la stessa natura elettromagnetica; la sola differenza tra una parte dello spettro e un'altra è nella frequenza e nella lunghezza d'onda. Le zone contraddistinte dai nomi storici si sovrappongono, ma i nomi danno sempre uno spunto per individuare le sorgenti: onde radio e microonde da elettroni in movimento nei conduttori; infrarosso da oggetti caldi; luce visibile da oggetti molto caldi; ultravioletto da archi e scariche nei gas; raggi X da elettroni che colpiscono un ostacolo; raggi γ da nuclei di atomi radioattivi.

L'uguaglianza della velocità di queste radiazioni e l'essere tutte prodotte dall'accelerazione delle cariche non sono le sole prove che abbiamo sulla loro natura elettromagnetica. Esistono altre ragioni per raggruppare assieme l'intero spettro delle radiazioni, dai raggi X alle onde radio. Se acceleriamo particelle cariche avanti e indietro con una data frequenza, i campi elettrici della radiazione che se ne distacca dovranno avere questa stessa frequenza di oscillazione. Ogni stazione radiotrasmittente immette cariche avanti e indietro lungo la sua antenna con una frequenza determinata; le onde radio emesse devono avere perciò questa frequenza. A sua volta il campo elettrico oscillante di queste onde dovrà far muovere le cariche sull'antenna ricevente avanti e indietro con la stessa frequenza. Esistono realmente queste correnti oscillanti? I segnali radio si rivelano accordando un circuito oscillante dell'apparecchio radio ricevente, e si riceve una particolare stazione radio solo quando il ricevitore è stato sintonizzato esattamente sulla stessa frequenza emessa dal trasmettitore.

Facendo uso di circuiti e antenne diverse siamo in grado di costruire trasmettitori capaci di irradiare onde radio che vanno da una frequenza di circa 10^4 Hz a circa 3×10^{11} Hz, e tutti generano onde elettromagnetiche che si propagano con la velocità della luce. Le lunghezze d'onda che possiamo misurare per interferenza vanno perciò da circa 30 km giù fino a un millimetro. Nella regione delle grandi lunghezze d'onda, queste onde si diffrangeranno attorno a qualsiasi ostacolo di dimensioni ordinarie; ma al crescere della frequenza, esse si comportano sempre di più come la luce.

Anche alle più alte radiofrequenze che noi possiamo generare, la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica è molte volte maggiore della lunghezza d'onda massima della luce visibile; nel mezzo si trova la regione della radiazione termica che viene emessa nell'urto tra molecole. L'agitazione termica delle molecole fa sì che le loro cariche vibrino, emettendo radiazioni elettromagnetiche di frequenza più alta di quelle prodotte per mezzo di qualunque circuito elettrico macroscopico. A temperature ancor più elevate, per esempio negli archi e nelle scintille, gli atomi perturbati emettono luce: infrarossa, visibile o persino ultravioletta. La parte visibile dello spettro corrisponde a frequenze comprese fra 4×10^{14} Hz, e 8×10^{14} Hz. A questo punto abbiamo di molto sorpassato la regione dove possiamo misurare direttamente la frequenza; ma possiamo ancora determinarla per la luce di un singolo colore dello spettro misurando la lunghezza d'onda. In questo modo, usando spettroscopi montati sotto vuoto, possiamo trovare le frequenze della radiazioni ultraviolette emesse dagli atomi. Queste frequenze vanno da 10^{15} Hz in su. Così come emettono luce, gli atomi l'assorbono. Un atomo di tipo determinato assorbirà luce solo di certe frequenze ben definite; presumibilmente queste sono le frequenze dei moti naturali degli elettroni nell'atomo. L'atomo è accordato solo su queste frequenze, e risponderà solo ai campi elettrici che oscillano con queste frequenze. Non possiamo infatti sintonizzare gli atomi come sintonizziamo un circuito oscillante da noi costruito; ma scegliendo opportunamente il tipo di atomo, possiamo riuscire a trovare un moto elettronico, accordato sulla regione di frequenze nella quale vogliamo assorbire luce.

A frequenze più alte raggiungiamo la regione dei raggi X. Se la frequenza dei raggi X non è troppo elevata, la loro lunghezza d'onda si aggirerà intorno alle dimensioni di un atomo. Infine, a frequenze enormemente elevate, giungiamo ai raggi gamma, che vengono emessi spontaneamente in alcuni processi di disintegrazione radioattiva.

Tutte queste radiazioni elettromagnetiche trasportano energia, per cui quando vengono assorbite il corpo che le assorbe si scalda. Ciò significa che la radiazione elettromagnetica, com'era prevedibile, può essere emessa solamente in un processo nel quale venga fornita energia. Come abbiamo supposto all'inizio, affinché si generino dei campi elettrici e magnetici capaci di autopropagarsi occorre che cariche vengano accelerate da qualche forza. Le prove che la radiazione elettromagnetica trae origine da cariche accelerate sono ora schiaccianti. Riassumendo: la radiazione elettromagnetica esiste, essa si propaga con la velocità della luce e trae origine da cariche accelerate.

Quesiti

- 41.14.** Supponi che a un dato istante non vi sia alcun campo elettrico nella zona in cui ti trovi, ma che dopo un intervallo di tempo brevissimo vi sia un campo elettrico rivolto verso il basso e diretto lungo la verticale. La superficie di separazione fra la zona in cui c'è campo e quella in cui non c'è, si muove direttamente verso di te. Quando questa superficie ti raggiunge, qual è l'orientazione del campo magnetico nel punto in cui ti trovi?
- 41.15.** Qual è la velocità nel vuoto (a) delle onde radio, (b) delle onde infrarosse, (c) dei raggi gamma ?
- 41.16.** Quando elettroni animati da una velocità di 3×10^7 m/s colpiscono l'anticatodo di un tubo a raggi X, vengono arrestati all'incirca in uno spazio pari a un diametro atomico: circa 10^{-10} m.
(a) Qual è il tempo di arresto?
(b) Se usiamo l'inverso di questo tempo per valutare le frequenze presumibili della radiazione elettromagnetica originata da questa decelerazione, quale frequenza otterremo?
(c) A quale lunghezza d'onda corrisponde questa frequenza?
- 41.17.** Quali prove indicano che il suono non è una radiazione elettromagnetica?
- 41.18.** (a) La lunghezza d'onda dei raggi X più energetici emessi quando elettroni, accelerati fino a 18 GeV nello Stanford Linear Accelerator, urtano contro un bersaglio solido è di 0.067×10^{-15} m. Quanto vale la frequenza di questi raggi X? (b) Un'onda radio VLF (a bassissima frequenza) ha frequenza di soli 30 Hz. Quanto vale la sua lunghezza d'onda?
- 41.19.** Elettroni accelerati in un fascio dallo Stanford Linear Accelerator hanno un'energia cinetica di 18 GeV. Se fossero in gara nel vuoto con un fascio di luce su un percorso di 1 km quale fascio vincerebbe e con quale distacco? (Attenzione ai valori numerici! L'energia dello Stanford Linear Accelerator è proprio 18 GeV)
- 41.20.** Indicare le analogie fra le onde meccaniche e le onde elettromagnetiche.
- 41.21.** Indicare le differenze fra le onde meccaniche e le onde elettromagnetiche.

41.5. Hertz e la rivelazione delle onde elettromagnetiche

Maxwell era pervenuto a risultati entusiasmanti partendo dalle sue equazioni dell'elettromagnetismo. Egli era riuscito anche a prevedere l'esistenza di onde elettromagnetiche di diversa lunghezza d'onda; particolarmente suggestiva era poi la teoria elettromagnetica della luce.

Mancava però alla sua costruzione un sostegno sperimentale; infatti le equazioni dalle quali ricavò il concetto di onda elettromagnetica facevano uso della corrente di spostamento, introdotta matematicamente solo per salvare la validità del teorema della circuitazione di Ampere del campo magnetico. Per questo motivo i fisici del tempo mostrarono una certa diffidenza verso la teoria elettromagnetica di Maxwell.

Una conferma sperimentale delle sue previsioni teoriche si ebbe dopo circa vent'anni, quando il fisico tedesco Heinrich Hertz (1857-1894) nel 1886 riuscì a rivelare le onde elettromagnetiche durante una lezione al Politecnico di Karlsruhe, dove era professore.

Le sue ricerche sulle onde elettromagnetiche hanno avuto un'importanza storica fondamentale in quanto sono state l'inizio di un nuovo campo d'indagine, in cui si distinsero Augusto Righi (1850-1921) e il

suo allievo Guglielmo Marconi (1874-1947) che nel 1895 ottenne, utilizzando le onde elettromagnetiche, la trasmissione di segnali a distanza, da cui hanno avuto origine poi la radio e la televisione.

Per illustrare lo storico esperimento di Hertz, partiamo dalla descrizione del rocchetto di Ruhmkorff (fisico tedesco: 1803-1877) o bobina a induzione. Tale dispositivo (Fig. 41.16) è formato da un nucleo di fili di ferro, per ridurre le correnti di Foucault, sul quale sono avvolte due bobine, il primario e il secondario.

Il primario, costituito da poche spire, è inserito in un circuito contenente una batteria e un interruttore a vibrazione. Il secondario invece è formato da un elevato numero di spire e termina su due sferette, che costituiscono lo spinterometro del rocchetto. Chiudendo e aprendo l'interruttore con una certa frequenza ν , si genera un campo elettrico indotto che, mettendo in moto gli elettroni di conduzione, produce tra le sferette dello spinterometro una d.d.p. variabile con la stessa frequenza delle vibrazioni dell'interruttore.

Con un secondario avente un elevato numero di spire (per quanto visto nella teoria del trasformatore statico) le d.d.p., e di conseguenza il campo elettrico, tra le sferette dello spinterometro sono sufficientemente intense da provocare una scarica elettrica accompagnata da fenomeni luminosi.

Hertz usò un dispositivo sperimentale (Fig. 41.17) formato da un oscillatore e un rivelatore. L'oscillatore era composto da due grosse sfere metalliche *A* alle quali erano collegate altre due sfere *B*; il tutto era connesso a un rocchetto di Ruhmkorff.

Di fronte all'oscillatore, a una certa distanza, si trovava il rivelatore, che era un semplice filo metallico piegato ad anello, i cui estremi facevano capo a due piccole sfere *C*, separate da una certa distanza.

Egli si accorse che, ogni qualvolta si produceva tra le sferette *B* una scarica elettrica, se ne induceva un'altra quasi istantaneamente tra le sferette *C* del rivelatore.

Inoltre le scariche nel rivelatore si succedevano con la stessa frequenza con cui erano prodotte dall'oscillatore.

Questo esperimento dimostra che le scariche dell'oscillatore producono campi elettrici e magnetici variabili nel tempo e che si propagano nello spazio, inducendo quindi analoghi campi tra le sferette *C* del rivelatore. Inoltre, i campi indotti hanno la stessa frequenza dei campi prodotti dall'oscillatore. Il campo elettrico variabile tra le sfere *C* del rivelatore è responsabile della successione di scariche.

Incoraggiato da questi risultati, Hertz proseguì le ricerche sull'elettromagnetismo che aveva iniziato sin dal 1883. Egli riuscì a misurare sperimentalmente, dal ritardo con cui scoccavano le scintille nel rivelatore rispetto all'istante in cui erano prodotte dall'oscillatore, la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, trovando un valore che era in ottimo accordo con la velocità della luce.

A ulteriore conferma della natura elettromagnetica della luce Hertz, e poi ancora di più Righi, dimostrarono che le onde elettromagnetiche originano fenomeni di riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione.

L'unica differenza che essi notarono riguardava il valore della lunghezza d'onda; le onde elettromagnetiche di Hertz e quelle di Righi avevano infatti una lunghezza d'onda rispettivamente di 66 cm e 10 cm, entrambe molto più grandi della lunghezza d'onda della luce, compresa fra 8×10^{-5} cm e 4×10^{-5} cm circa, rispettivamente per il rosso e il violetto.

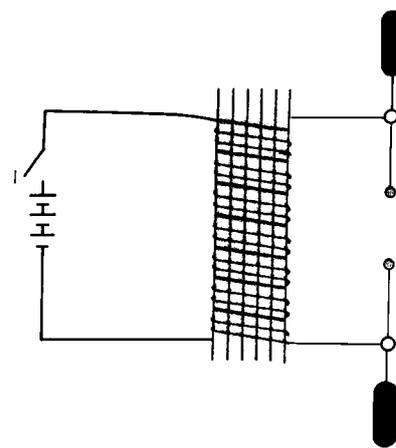


Fig. 41.16. Rocchetto di Ruhmkorff. Chiudendo e aprendo l'interruttore *I* del circuito che alimenta una bobina avvolta su un nucleo di fili di ferro (primario) si induce un campo elettrico variabile, che sposta gli elettroni di conduzione alternativamente da una all'altra delle due sferette metalliche, collegate agli estremi di una bobina (secondario), ad elevato numero di spire, avvolta sullo stesso nucleo.

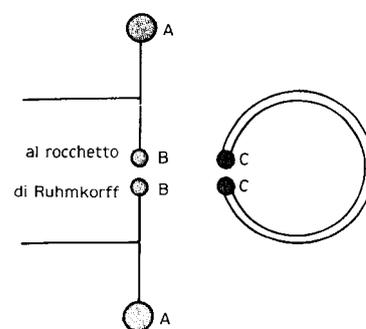


Fig. 41.17. Dispositivo di Hertz. Le scintille, che si producono tra le sferette *B* collegate ad un rocchetto di Ruhmkorff, generano con la stessa frequenza una scarica tra le sferette *C* della spira rivelatrice disposta nelle vicinanze.

41.6. Onde elettromagnetiche

Abbiamo discusso la produzione di una corrente elettrica alternata. Le variazioni sinusoidali di una corrente elettrica costituiscono chiaramente un caso di moto accelerato delle cariche elettriche nel filo conduttore e possono perciò determinare la trasmissione di energia a particelle cariche situate all'esterno del filo.

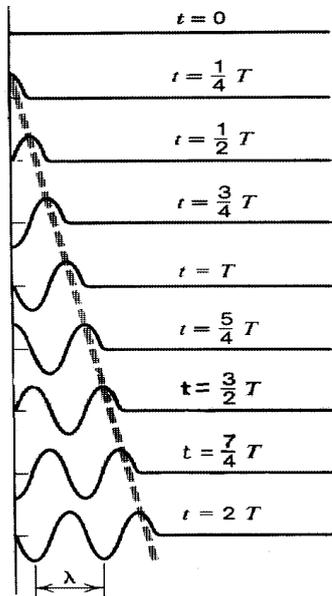


Fig. 41.18. Generazione di un'onda progressiva in un tratto di corda. L'estremo sinistro della corda viene eccitato su e giù in modo sinusoidale e il moto si propaga lungo la corda formando un'onda progressiva sinusoidale.

La generazione di un campo elettromagnetico per opera della corrente elettrica variabile in un'antenna costituita da un filo conduttore è simile alla produzione di un'onda progressiva in una corda per opera di un'oscillazione impressa a un estremo della corda, come nella Fig. 41.18. Come uno spostamento sinusoidale della corda si propaga lungo la corda stessa, così la variazione sinusoidale dei vettori del campo elettromagnetico, **E** e **B**, si propaga attraverso lo spazio (Fig. 41.19).

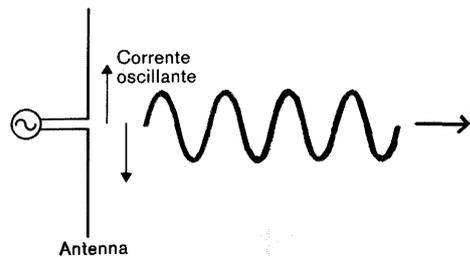


Fig. 41.19. La variazione sinusoidale dell'intensità della corrente elettrica che fluisce in un filo conduttore produce variazioni sinusoidali di **E** e di **B**, le quali si propagano attraverso lo spazio con velocità *c*. In questo caso, la sorgente dell'onda elettromagnetica è una semplice antenna e la propagazione dell'onda è solo schematica (si veda la Fig. 41.21).

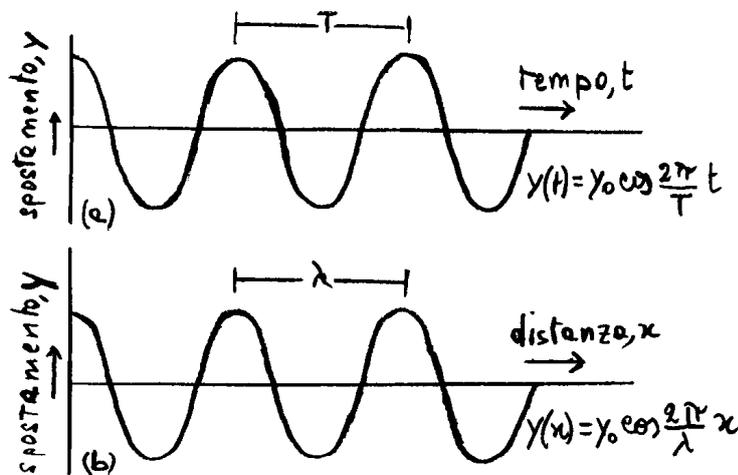


Fig. 41.20. (a) Spostamento di un dato punto della corda in funzione del tempo. (b) Spostamento della corda in funzione della distanza per un dato istante. Entrambe le curve sono sinusoidali.

L'analogia fra il caso meccanico e quello elettromagnetico va oltre. Nel caso della propagazione dell'onda meccanica illustrata nella Fig. 41.20, lo spostamento in funzione del tempo in qualsiasi posizione è sinusoidale, e tale è anche lo spostamento in funzione della distanza in qualsiasi istante. Lo stesso vale nel caso elettromagnetico. In un'onda elettromagnetica c'è una variazione sinusoidale, nello spazio e nel tempo, dei vettori del campo elettromagnetico, **E** e **B**, com'è illustrato nella Fig. 41.21.

In una regione dello spazio lontana dall'antenna (orientata nella direzione *y* nella Fig. 41.21), e in un dato istante, non vi sarà sostanzialmente alcuna variazione dei

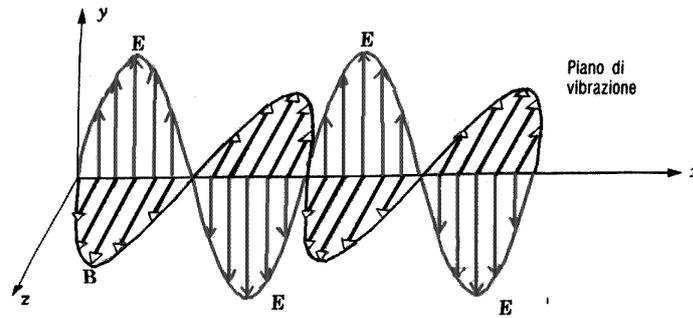


Fig. 41.21. A grande distanza dall'antenna (orientata secondo la direzione y), la variazione di \mathbf{E} e di \mathbf{B} con la distanza, in un dato istante, è sinusoidale. Inoltre, l'onda elettromagnetica è un'onda piana, con $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ in ogni punto e in ogni istante.

vettori del campo elettromagnetico nel piano y,z . Cioè, il campo elettromagnetico è uniforme in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda lontano dall'antenna. L'onda elettromagnetica propagantesi è perciò un'onda piana.

Le onde elettromagnetiche hanno le seguenti importanti proprietà.

1. In un'onda elettromagnetica piana, i vettori del campo elettromagnetico, \mathbf{E} e \mathbf{B} , sono dappertutto mutuamente perpendicolari:

$$\mathbf{E} \perp \mathbf{B} \quad (\text{onda elettromagnetica piana})$$

2. La direzione e il verso di propagazione di un'onda elettromagnetica sono dati da una regola della mano destra: la direzione e il verso di propagazione dell'onda coincidono con la direzione e il verso di $\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}$. Anche se gli orientamenti dei vettori \mathbf{E} e \mathbf{B} variano con il tempo e con la posizione, l'onda si propaga sempre nella stessa direzione e nello stesso verso, come si può vedere applicando la regola della mano destra alle varie parti dell'onda nella Fig. 41.21.
3. Le onde elettromagnetiche sono onde *trasversali*. Si rilevi che nella Fig. 41.21 i vettori \mathbf{E} e \mathbf{B} sono sempre *perpendicolari* alla direzione di propagazione dell'onda; a grandi distanze dalla sorgente, i vettori del campo elettromagnetico non hanno mai alcun componente nella direzione di propagazione.
4. Le onde elettromagnetiche, di qualsiasi regione dello spettro (dalle onde radio ai raggi γ), interferiscono, nello spazio in cui si propagano, similmente alle onde meccaniche (vedi film PSSC "Le onde elettromagnetiche", esperienza di Young con la luce, figure di diffrazione, ecc.).
5. La velocità di propagazione nel vuoto di tutti i tipi di onde elettromagnetiche (onde luminose, radioonde, raggi X, ecc.) è $c = 3.00 \times 10^8$ m/s o meglio $c = 2.998 \times 10^8$ m/s.
6. Le onde elettromagnetiche trasportano *energia* e *quantità di moto*.

41.7. Energia e quantità di moto trasportate dalla radiazione elettromagnetica

Quando le cariche elettriche subiscono accelerazioni si produce un campo elettromagnetico variabile nel tempo e dalla sorgente si propagano onde elettromagnetiche. È facile vedere che questa *radiazione elettromagnetica* trasporta sia *energia* sia *quantità di moto*. Si consideri una particella carica ($+q$) situata nel cammino di un'onda elettromagnetica (Fig. 41.22). Se la particella è inizialmente in quiete, l'induzione magnetica \mathbf{B} non avrà alcuna influenza sulla particella, mentre l'intensità del campo elettrico \mathbf{E} eserciterà una forza sulla particella imprimendole un'accelerazione nella direzione e nel verso di \mathbf{E} . Non appena la particella ha acquistato una velocità in questa direzione e in questo verso, il campo magnetico esercita una forza sulla particella. Applicando la regola della mano destra per la forza magnetica ($\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$) si vede che la direzione e il verso di questa forza coincidono con quelli di propagazione

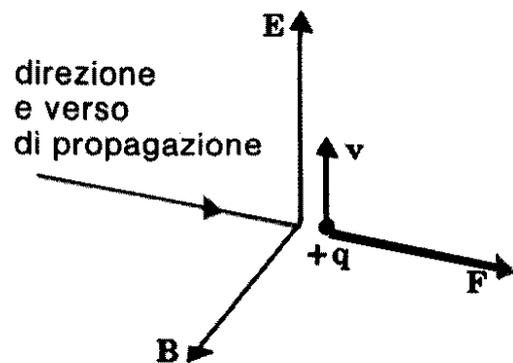


Fig. 41.22. Un'onda elettromagnetica esercita sempre una forza su una particella carica giacente nella direzione di propagazione dell'onda. L'orientamento della forza dipende dal segno della carica?

dell'onda. Inoltre, la forza conserva lo stesso orientamento nel successivo semiperiodo dell'onda, quando gli orientamenti di \mathbf{E} e \mathbf{B} si invertono entrambi. (Si applichi di nuovo la regola della mano destra.) È vero che la forza esercitata sulla particella dal campo elettrico è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, ma l'orientamento di questa forza s'inverte ogni semiperiodo e perciò questa forza si elide quando viene mediata su un intero periodo. La forza magnetica, d'altra parte conserva sempre lo stesso orientamento. Perciò, la forza media che si esercita sulla particella è quella dovuta alla forza magnetica. Se a una particella carica, inizialmente in quiete è stata impressa un'accelerazione da un'onda elettromagnetica, allora l'onda ha trasmesso alla particella sia energia sia quantità di moto. Si deve perciò concludere che le onde elettromagnetiche trasportano sia energia sia quantità di moto.

Quesiti

- 41.22.** (a) Qual è la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica di 5 MHz usata dall'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino per diffondere i segnali orari?
 (b) Qual è la frequenza della radiazione elettromagnetica nella banda di radiodiffusione a onde corte di 10 m? [R. (a) 60 m; (b) 3×10^7 Hz]
- 41.23.** Un protone oscilla avanti e indietro da un estremo all'altro di un diametro di un nucleo (pari a circa 10^{-14} m) con una velocità $v = 0.05 \cdot c$. Qual è la frequenza approssimata della radiazione emessa? (La frequenza della radiazione è uguale alla frequenza dell'oscillazione.) Come si potrebbe classificare questa radiazione? [R. 1.5×10^{21} Hz].

41.8. Polarizzazione delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali poiché le direzioni dei campi elettrico e magnetico oscillanti sono perpendicolari alla direzione di propagazione e non paralleli ad essa come nel caso delle onde longitudinali. Un'onda elettromagnetica trasversale ha inoltre la caratteristica di essere *polarizzata* (più precisamente, *polarizzata rettilineamente*). Ciò significa che i vettori del campo elettrico oscillante sono tutti paralleli tra di loro in tutti i punti dell'onda. Anche i vettori del campo magnetico sono tutti paralleli tra di loro ma quando si parla di polarizzazione si usa focalizzare l'attenzione sul campo elettrico, al quale sono sensibili molti strumenti di rivelazione della radiazione elettromagnetica.

La Fig. 41.23 è disegnata in modo da evidenziare le caratteristiche della polarizzazione. In questa figura l'onda si propaga nella direzione dell'asse x ; si dice che è polarizzata nella direzione dell'asse y perché i vettori del campo elettrico sono tutti paralleli a quell'asse. Il piano definito dalla direzione di propagazione (l'asse x) e dalla direzione di polarizzazione (l'asse y) si dice *piano di vibrazione*.

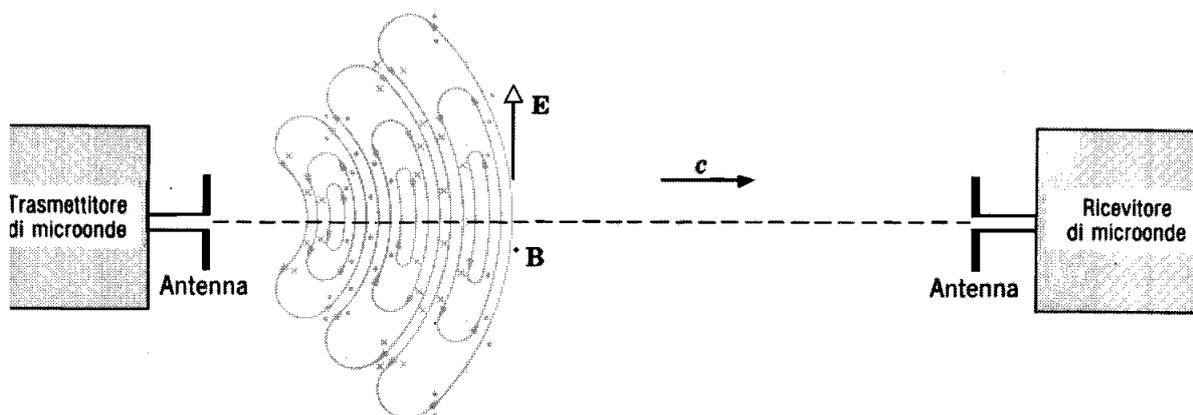


Fig. 41.23. Un'onda elettromagnetica polarizzata prodotta da un'antenna trasmittente. Il piano di vibrazione è il piano della pagina.

Le onde elettromagnetiche nell'intervallo di frequenza delle onde radio e delle microonde presentano facilmente polarizzazione. Un'onda di questo tipo, prodotta dal moto oscillante della carica nel dipolo che costituisce l'antenna di trasmissione in Fig. 41.23, ha il vettore del campo elettrico \mathbf{E} parallelo all'asse del dipolo (per punti lungo l'asse orizzontale). Il piano di vibrazione dell'onda trasmessa è il piano della figura. Si veda anche la Fig. 41.24(a), che mostra un fascio polarizzato uscente perpendicolarmente dal piano della figura.

Quando l'onda polarizzata di Fig. 41.23 raggiunge un secondo dipolo collegato a un rivelatore di microonde, la componente elettrica oscillante dell'onda costringe gli elettroni ad oscillare lungo l'antenna ricevente, producendo un segnale nel rivelatore. Se si ruota l'antenna ricevente di 90° rispetto alla direzione di propagazione, il segnale nel rivelatore si annulla. In questa orientazione il vettore campo elettrico non è in grado di indurre un moto oscillante di carica lungo l'asse del dipolo perché esso è perpendicolare a quell'asse. L'esperimento descritto dalla Fig. 41.23 può essere riprodotto ruotando l'antenna ricevente del televisore di 90° attorno all'asse che punta nella direzione della stazione trasmittente (supponendo che l'antenna sia di tipo dipolo elettrico). La variazione d'intensità risulterà evidente.

Nelle sorgenti di onde radio e microonde, gli elettroni oscillanti nell'antenna trasmittente sono i responsabili della creazione dell'onda elettromagnetica ed essi agiscono all'unisono. Invece nelle comuni sorgenti di luce, come il sole o una lampada a fluorescenza, sono gli atomi costituenti la sorgente che sono responsabili della creazione dell'onda elettromagnetica ed essi agiscono indipendentemente.

Ciò non è vero per la luce laser. Gli atomi che producono questa luce non agiscono indipendentemente ma all'unisono. Il fascio uscente in molti dispositivi laser è polarizzato.

Per questo motivo, la luce propagata da queste sorgenti in una data direzione consiste di molti treni d'onda indipendenti, i cui piani di vibrazione sono orientati casualmente attorno alla direzione di propagazione, come in Fig. 41.24(b). Questa luce non è polarizzata. Inoltre la natura trasversale delle onde viene mascherata dalla distribuzione casuale dei piani di vibrazione per cui, per studiarla, si deve trovare un modo per isolare i diversi piani di vibrazione.

Si potrebbe tentare di polarizzare le onde elettromagnetiche facendole passare attraverso un reticolo di fili conduttori, ma in tal caso la polarizzazione interesserebbe solo le lunghezze d'onda maggiori della distanza fra due fili consecutivi del reticolo (*passo* o *periodo* o *costante* del reticolo). Perciò, un reticolo di fili conduttori si comporta da polarizzatore solo per radioonde, ma il passo del reticolo non può essere reso tanto piccolo quanto basta per polarizzare la luce.

Per capire meglio si faccia riferimento al seguente quesito:

Si supponga che una radioonda non-polarizzata incida su un reticolo di fili conduttori paralleli. La distanza fra i fili del reticolo (passo del reticolo) è piccola rispetto alla lunghezza d'onda della radioonda. Quale componente dell'onda – parallela o perpendicolare ai fili – verrà trasmessa attraverso il reticolo? (Quale componente verrà assorbita, inducendo una corrente elettrica nei fili, dove l'energia perduta si converte in calore per effetto Joule? Perché l'altra componente non indurrà una corrente elettrica?)

Si può costruire un efficace polarizzatore ottico usando un «reticolo» costituito da molecole equiorientate invece che da fili conduttori. Il primo materiale di questo tipo a essere prodotto fu la lamina di *polaroid lineare di tipo H* della Polaroid Land, in cui gli agenti polarizzanti sono lunghe molecole contenenti numerosi atomi di iodio, le quali possono essere disposte a brevissima distanza l'una dall'altra e orientate secondo direzioni pressoché parallele. Il risultato è un reticolo di piccolissimo passo, il quale trasmette solo la luce avente un particolare orientamento.

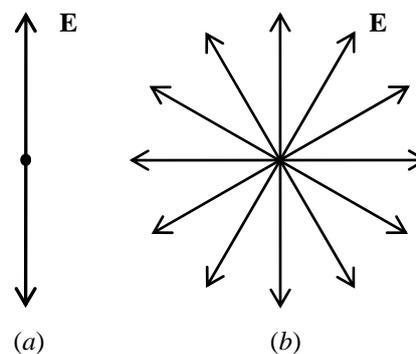


Fig. 41.24. (a) Un'onda polarizzata uscente perpendicolarmente al piano della pagina, della quale viene mostrato solo il campo elettrico. (b) Un'onda trasversale non polarizzata vista come una sovrapposizione casuale di molti treni d'onda polarizzati.

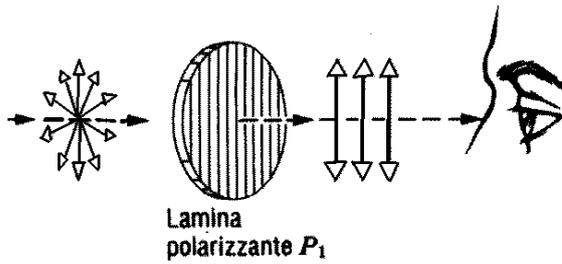


Fig. 41.25. Luce non polarizzata viene polarizzata per mezzo di una sola lamina polarizzante.

La Fig. 41.25 mostra luce non polarizzata che incide su una lamina di un materiale polarizzante in commercio con il nome *Polaroid*. Nella lamina esiste una definita direzione polarizzante caratteristica, messa in evidenza dalle linee parallele. La lamina trasmette solo quelle componenti dei treni d'onda i cui vettori elettrici oscillano parallelamente a quella direzione, mentre assorbe quelli che oscillano perpendicolarmente a quella direzione. La luce emergente è polarizzata. La direzione di polarizzazione viene fissata durante il

processo di fabbricazione che consiste nell'inserimento di certe molecole a lunga catena in una lamina plastica flessibile che viene poi sottoposta a tensione in modo che le molecole si dispongano allineate tra loro.

Nella Fig. 41.26 la lamina polarizzante, usata come *polarizzatore*, giace nel piano della pagina e la direzione di propagazione è entrante perpendicolarmente a quel piano. La freccia \mathbf{E} indica il piano di vibrazione di un treno d'onda incidente sulla lamina, scelto a caso. Il vettore \mathbf{E} può essere scomposto nei due vettori componenti \mathbf{E}_x (di valore $E \cdot \cos \theta$) nella direzione perpendicolare alla direzione polarizzante ed \mathbf{E}_y (di valore $E \cdot \sin \theta$) nella direzione parallela a quella polarizzante. Solo \mathbf{E}_y viene trasmesso; \mathbf{E}_x viene assorbito nella lamina.

Disponiamo ora una seconda lamina P_2 (detta generalmente *analizzatore*, quando viene usata in questo modo) come in Fig. 41.27. Se si ruota P_2 attorno alla direzione di propagazione vi sono due posizioni, a 180° tra di loro, per cui l'intensità della luce trasmessa è praticamente nulla; queste sono le posizioni per cui le direzioni polarizzanti di P_1 e P_2 sono mutuamente perpendicolari.

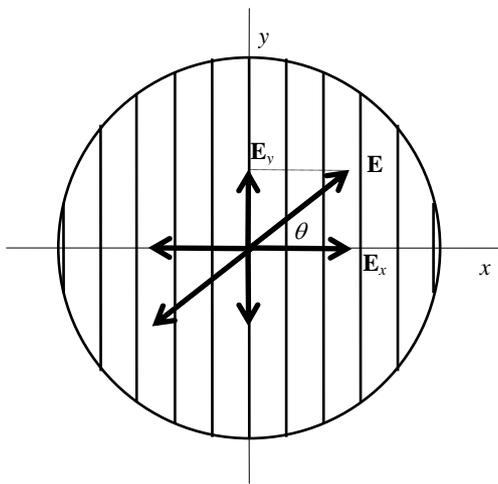


Fig. 41.26. Un treno d'onda \mathbf{E} è equivalente a due treni d'onda componenti \mathbf{E}_x e \mathbf{E}_y . Solo il secondo viene trasmesso dal polarizzatore.

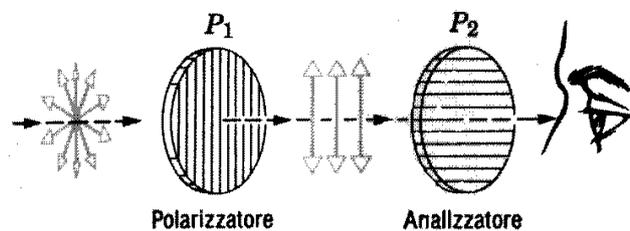


Fig. 41.27. La luce non polarizzata non è trasmessa da due lamine polarizzanti con direzioni polarizzanti mutuamente ortogonali.

41.9. Polarizzazione per riflessione

Oltre alla polarizzazione per trasmissione attraverso materiali artificiali come una lamina di polaroid lineare, esistono processi naturali che producono luce polarizzata. Per esempio, quando la luce viene riflessa da una sostanza trasparente quale l'acqua o il vetro (ma non da una superficie metallica), la luce riflessa è polarizzata, con il vettore del campo elettrico \mathbf{E} parallelo alla superficie. La polarizzazione del fascio riflesso è pari al 100% in corrispondenza di un particolare angolo d'incidenza, detto *angolo di Brewster* (o di incidenza brewsteriana) i_B , tale che $\tan i_B = n$. (L'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga il fascio incidente è assunto pari a 1.) Nel caso del vetro ordinario, con $n = 1.520$, un fascio di luce riflesso è totalmente polarizzato quando l'angolo d'incidenza è uguale a $\arctan(1.520) = 56.7^\circ$. Nel caso dell'acqua ($n = 1.333$), l'angolo di Brewster è 53.1° . Poiché la luce riflessa è polarizzata con il vettore del campo elettrico (intensità del campo elettrico) parallelo alla superficie, quando questa luce viene osservata attraverso un polaroid con l'asse di trasmissione verticale la sua intensità è molto ridotta. È questo il modo in cui gli occhiali da sole Polaroid riducono (o talvolta eliminano completamente) il bagliore della luce riflessa dall'acqua o dal vetro.

Quesiti

-
- 41.24.** Nel momento in cui si interrompe un circuito elettrico, per esempio quando si toglie una spina da una presa, a volte scocca una scintilla. La spiegazione è nella legge di Faraday Neumann e Lenz. Perché?
- 41.25.** Spiegare per quale motivo un filtro polarizzatore perfetto trasmetterebbe il 50% dell'intensità di un fascio di luce non polarizzato.
- 41.26.** Come si può dimostrare che il campo elettromagnetico trasporta energia e quantità di moto?
- 41.27.** Le equazioni della gravitazione universale e quelle relative alle forze agenti fra due cariche, implicano che una variazione di posizione nella sorgente venga simultaneamente avvertita in tutti i punti dell'Universo. Per quale motivo le equazioni di Maxwell non contengono necessariamente l'implicazione segnalata?
- 41.28.** In un punto P di un campo elettromagnetico i vettori \mathbf{E} e \mathbf{B} sono perpendicolari ed hanno i valori $E=10^6\text{V/m}$, $B=0.03\text{T}$. Un elettrone transita per P con una velocità di 10^5 km/s in direzione perpendicolare al piano individuato da \mathbf{E} e \mathbf{B} . Calcolare la forza agente sulla particella, considerando la velocità della particella prima orientata in un verso e poi nel verso opposto.
- 41.29.** La velocità di propagazione della perturbazione elettromagnetica da quali caratteristiche del mezzo in cui si propaga dipende?
- 41.30.** Quale è la velocità della luce (a) nell'acqua; (b) nel vetro flint, (c) nel diamante? Cosa si può dire circa la velocità di una radioonda nei mezzi di cui ai punti (a), (b), (c)?
- 41.31.** Se fosse possibile vedere il vettore elettrico e il vettore magnetico lungo una linea coincidente con la direzione di propagazione della perturbazione elettromagnetica, essi apparirebbero costanti oppure variabili con una qualche legge?
- 41.32.** Prepararsi a discutere l'esperimento di Young.
- 41.33.** Prepararsi a discutere la figura di interferenza prodotta dalla luce bianca attraverso due fenditure.
- 41.34.** Prepararsi a discutere il rapporto fra colore e lunghezza d'onda della luce.
- 41.35.** Prepararsi a discutere il fenomeno della diffrazione prodotta da una fenditura.
-

41.10. Electromagnetic waves and transparent media

From F. A. Jenkins and H. E. White – "Fundamentals of Optics"

Equation $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r}$ (*) gives very nearly correct values of n for gases, but when we attempt to apply it to denser media, large deviations are found. Thus the relative dielectric constant for water, measured by placing it between the plates of a condenser charged to a steady potential, is 81, indicating a value of 9 for the index of refraction. For sodium light, the measured index of water is 1.33. For various kinds of glass, ϵ_r varies from 4 to 9, which would require n to vary from 2 to 3. This again is higher than the observed values for visible light. We do not have to look far for the cause of discrepancy. It lies in the fact that the electric field of a light wave is not a steady field but a rapidly alternating one. For yellow light the frequency is 5×10^{11} Hz. If the relative dielectric constant of a substance is measured using an alternating potential on the plates in place of a steady one, the result is found to vary with the frequency, or wavelength. As the wavelength becomes very large and approaches infinity, the frequency approaches zero. The limiting case of steady field thus corresponds to zero frequency, and we are led to expect the index of refraction to approach the square root of the relative dielectric constant for steady fields. That this is in fact the case is shown by the measurements of the index of refraction of water for electromagnetic waves quoted in the following Table A.

Table A – VARIATION OF n WITH λ FOR WATER

Wavelength, m	Frequency, Hz	n
5.89×10^{-7}	5.1×10^{14}	1.333
12.56×10^{-7}	2.9×10^{14}	1.3210
258×10^{-7}	0.116×10^{14}	1.41
800×10^{-7}	0.0375×10^{14}	1.41
0.0040	750×10^8	5.3
0.0175	171×10^8	7.82
0.081	37×10^8	8.10
0.65	4.6×10^8	8.88
∞	0×10^8	$(9.03 = \sqrt{\epsilon_r})$

The value of $\sqrt{\epsilon_r}$ measured for a steady field is shown for comparison. Clearly the value of n approaches exactly the predicted value for infinitely long waves.

(*) Per l'esattezza $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ poiché $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ e $v = 1/\sqrt{\epsilon \mu} = 1/\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}$, ma $\mu_r \cong 1$ per le sostanze dia- e paramagnetiche.

41.11. L'etere e le moderne teorie fisiche

L'ipotesi dell'esistenza dell'etere era stata formulata per avere un mezzo nel quale si propagassero le onde luminose. Maxwell pensò che anche le onde elettromagnetiche si propagassero nell'etere, sebbene questa ipotesi non fosse affatto necessaria per descrivere in termini matematici la teoria dell'elettromagnetismo. Ma, ciò nonostante, poco prima della sua morte, avvenuta nel 1879, Maxwell scrisse un articolo nel quale sosteneva ancora l'ipotesi dell'esistenza dell'etere:

Qualunque siano le difficoltà che possiamo incontrare nel formarci un'idea precisa sulla natura dell'etere, non vi possono essere dubbi sul fatto che gli spazi interstellari e interplanetari non sono vuoti, ma in essi è distribuita una sostanza materiale che certamente è il corpo più esteso e più uniforme di cui si abbia conoscenza ...

Maxwell era consapevole del fallimento delle prime teorie sull'etere, infatti nella prima parte dello stesso articolo dice:

Vari tipi di etere sono stati man mano proposti per spiegare il movimento dei pianeti, la formazione di atmosfere elettriche ed effluvi magnetici, la trasmissione delle sensazioni da una parte all'altra dei nostri corpi, e così via, fino a che lo spazio è stato riempito tre o quattro volte con ogni tipo di etere. Solo se ricordiamo quali profonde e dannose influenze ebbero le ipotesi sull'etere usate in modo artificioso nei tempi passati, possiamo capire il fastidio che, durante il diciottesimo secolo le persone più ragionevoli provarono nei confronti di questo concetto ...

Perché, dopo esser riuscito a formulare matematicamente una teoria dell'elettromagnetismo in modo indipendente da qualsiasi modello dell'etere, Maxwell continuò a parlare del «grande oceano di etere» che riempie tutto lo spazio? Come tutti gli uomini, anche Maxwell non poteva andare oltre a un certo limite nel cambiare la sua concezione del mondo. Era quasi inconcepibile pensare che potessero esistere delle vibrazioni senza qualcosa che vibrasse, e cioè delle onde senza un mezzo di propagazione. Inoltre a quasi tutti i fisici del diciannovesimo secolo sembrava assurda l'idea di una «azione a distanza». Come può un oggetto esercitare una forza su un altro corpo lontano, se «qualcosa» non trasmette la forza? Si dice che un corpo agisce *su* un altro e nella parola *su* è contenuta l'idea di contatto. Quindi in accordo con la prassi di descrivere i fenomeni naturali usando il linguaggio comune, sembrava indispensabile supporre l'esistenza dell'etere.

Ma venticinque anni dopo la morte di Maxwell, erano cadute la maggior parte delle ragioni per le quali era stato introdotto il concetto di etere che, nell'arco di altri dieci anni, fu completamente abbandonato. I successi della stessa teoria di Maxwell, che non attribuiva all'etere alcuna proprietà specifica, contribuirono in buona parte a minare la diffusa convinzione della sua esistenza. Le equazioni di Maxwell fornivano le relazioni tra le variazioni dei campi elettrici e magnetici nello spazio senza fare alcun riferimento all'etere. Un'altra delle ragioni dell'abbandono del concetto di etere fu il fallimento di tutti i tentativi di osservare sperimentalmente il moto della Terra rispetto all'etere. Se si pensa che la luce sia una vibrazione di questo etere che pervade tutto lo spazio, allora la luce deve propagarsi con una ben definita velocità rispetto all'etere. Sembra inoltre ragionevole supporre che la Terra si muova attraverso all'etere mentre descrive la sua orbita annuale attorno al Sole, vale a dire che la Terra dovrebbe muoversi come una nave con il «vento d'etere» a favore in alcuni periodi e contrario in altri. In queste condizioni, la velocità relativa della luce, rispetto alla Terra, dovrebbe essere diversa a seconda che la Terra e un raggio di luce si muovano nella stessa direzione attraverso all'etere o in direzioni opposte.^(*)

Venne calcolato il tempo necessario alla luce per compiere un determinato percorso di andata e ritorno, cioè con il vento d'etere a favore e contro, e quello necessario per compiere lo stesso percorso in assenza del vento d'etere, ottenendo una differenza di tempi molto piccola: solo 10^{-15} secondi per un percorso di 30 metri. Sebbene questo intervallo di tempo fosse troppo piccolo perché potesse essere misurato direttamente, esso è dello stesso ordine di grandezza dell'intervallo di tempo impiegato dalla luce visibile per compiere una vibrazione. Si pensò quindi che sarebbe stato possibile rivelarlo costruendo un apposito interferometro. Nel 1887, gli scienziati americani Albert Michelson ed Edward Morley usarono un dispositivo talmente sensibile da poter rivelare un effetto anche solo dell'uno per cento di quello previsto dalla teoria dell'etere. Né questo esperimento né molti altri condotti successivamente hanno mai rivelato un vento d'etere.

^(*) Un effetto analogo è osservato con le onde sonore: la loro velocità rispetto alla Terra è più grande quando viaggiano nella stessa direzione del vento di quando viaggiano nella direzione contraria.

Nel tentativo di dimostrarne la fondatezza, i sostenitori del concetto di etere elaborarono diverse spiegazioni per questo risultato inatteso. Per esempio, fu formulata l'ipotesi che le dimensioni degli oggetti che si muovono ad alta velocità rispetto all'etere subiscano dei cambiamenti tali da rendere impossibile la misura di una variazione della velocità relativa. L'artificiosità di questi tentativi di interpretazione era avvertita anche dalle stesse persone che li proponevano. Il concetto di etere fu definitivamente abbandonato dagli scienziati in seguito non a un esperimento particolare, ma agli sviluppi teorici della fisica dovuti al lavoro geniale di Albert Einstein, che a quell'epoca aveva solo ventisei anni. Egli riuscì a formulare una teoria che unificava profondamente la meccanica e l'elettromagnetismo senza ricorrere al concetto di etere: "teoria della relatività ristretta".

Nel 1905, Einstein dimostrò che le equazioni dell'elettromagnetismo si possono scrivere in modo da soddisfare lo stesso principio di relatività che vale per la meccanica. Come abbiamo già visto, il principio di relatività di Galileo stabilisce che nei sistemi di riferimento che si muovono con velocità costante l'uno rispetto all'altro valgono le stesse leggi della meccanica. Quindi è impossibile, secondo questo principio, scoprire con qualsiasi esperimento di meccanica se il laboratorio o il sistema di riferimento nel quale si esegue l'esperimento è fermo oppure si muove con velocità costante. Questo principio si può illustrare osservando che all'interno di una nave, di una macchina, di un aeroplano o di un treno che si muovano a velocità costante in linea retta, gli oggetti si muovono, o rimangono fermi, o cadono, o reagiscono all'azione di una forza applicata, proprio come nel caso in cui i veicoli sono fermi. Galileo, che era un sostenitore delle teorie di Copernico, si servì di questo principio per dimostrare che il moto di un oggetto rispetto alla Terra (per esempio la caduta di una pietra dall'alto di una torre) non permette di decidere se la Terra è fissa e il Sole è in movimento, oppure se il Sole è fisso e la Terra è in moto.

Einstein suppose che questo principio di relatività dovesse valere non solo per la meccanica ma per tutta la fisica, compreso l'elettromagnetismo. Sembra che una delle principali ragioni che lo indussero a formulare questa ipotesi fosse la sua convinzione che la natura non possa essere talmente asimmetrica da far sì che un principio di relatività valga solo per *alcuni* fenomeni. Inoltre egli aggiunse come seconda "ipotesi" fondamentale nella sua teoria che *la velocità di ogni raggio luminoso in moto nello spazio vuoto sia la stessa per tutti gli osservatori*, anche quando essi si muovono l'uno rispetto all'altro o rispetto alle sorgenti di luce. Questa audace intuizione spiegò perché a un osservatore non sia possibile rivelare il proprio moto rispetto all'etere con esperimenti sulla velocità della luce. Infatti Einstein rifiutò sia il concetto di etere, sia ogni altro tentativo di introdurre un «sistema di riferimento privilegiato» per la propagazione della luce. Einstein dimostrò che le tesi dalle quali era partito richiedevano di rivedere alcune nozioni fondamentali relative ai concetti di spazio e tempo basate sul senso comune. Inoltre dimostrò che le equazioni di Maxwell soddisfacevano pienamente il principio di relatività che egli aveva esteso a tutta la fisica. Questa fu un'altra grande sintesi di idee che prima erano separate, analoga a quelle compiute da Copernico, Newton e Maxwell. Quale fu allora il ruolo giocato dalle elaborate teorie dell'etere, sulle quali si basava buona parte della fisica del diciannovesimo secolo? Sarebbe certamente ingiusto dire che il concetto di etere è stato privo di utilità, in quanto è servito a guidare il lavoro di Maxwell e di altri fisici e ha contribuito anche a un approfondimento della conoscenza delle proprietà elastiche della materia. Possiamo considerare i primi modelli meccanici usati per la luce e per l'elettricità come l'impalcatura necessaria per costruire un edificio; dopo che l'edificio è completato si può togliere l'impalcatura, purché la costruzione sia solida.

In effetti il metodo di spiegazione basato sui modelli meccanici, sebbene intuitivo, si è dimostrato insufficiente nella fisica moderna ed è stato in gran parte abbandonato. Le scoperte fisiche del ventesimo secolo hanno dimostrato l'inadeguatezza della spiegazione meccanicistica.

41.12. Epilogo

Nel nostro corso di studi abbiamo seguito una storia complessa ma coerente: come sia possibile studiare la luce e l'elettromagnetismo dapprima separatamente e poi in modo unitario. Il modello corpuscolare spiegava il comportamento della luce nei fenomeni di riflessione e di rifrazione considerandola formata da particelle che si comportavano come i corpi materiali nella riflessione per urto. Il modello ondulatorio spiegava altrettanto bene questi e altri effetti considerando la luce come un'onda trasversale in un mezzo continuo. Entrambi questi modelli, in alternativa tra loro, partivano da analogie sostanzialmente di tipo meccanico per la luce considerandola sia come corpuscolo, sia come onda.

Queste analogie di tipo meccanico funzionarono fino a un certo punto anche per spiegare l'elettricità e il magnetismo. Infatti sia Faraday che Maxwell usarono dei modelli meccanici per le linee di forza elettriche e magnetiche. Maxwell usò questi modelli per sviluppare la teoria matematica dell'elettromagnetismo che,

quando fu completata, superò i modelli stessi, permettendo di spiegare anche la luce come un fenomeno ondulatorio elettromagnetico.

I campi elettrici e magnetici della teoria di Maxwell non si possono far corrispondere ad alcun modello meccanico. Esiste allora qualche modo per visualizzare un campo? Riportiamo la risposta data dal premio Nobel americano Richard Feynman a questo problema:

Vi ho chiesto di immaginarvi questi campi elettrici e magnetici.

Ma lo potete fare? e come? Come *io stesso* immagino il campo elettrico e magnetico? Cos'è ciò che effettivamente vedo? Cosa si richiede all'immaginazione scientifica? Non è quasi lo stesso che immaginare l'aula piena di angeli invisibili? No, non è lo stesso. Per capire il campo elettromagnetico ci vuole un grado di immaginazione molto più elevato che per capire degli angeli invisibili. Come mai? Perché per rendere comprensibili degli angeli invisibili tutto quello che devo fare è alterare un *pochino* le loro proprietà: li rendo leggermente visibili e allora posso vedere la forma delle loro ali e dei loro corpi e delle loro aureole. Una volta che sono riuscito a immaginare un angelo visibile, l'astrazione richiesta che è quella di partire da angeli quasi invisibili e immaginarseli completamente invisibili è relativamente facile. Potrebbe chiedermi uno di voi: «Professore, per piacere, mi dia una descrizione approssimativa, magari un po' inesatta delle onde elettromagnetiche, in modo che possa vederle almeno altrettanto bene quanto gli angeli invisibili. Modificherò poi questa immagine per raggiungere la necessaria astrazione».

Mi dispiace di non poter far questo per voi. Non possiedo alcuna immagine del campo elettromagnetico che sia precisa in alcun senso. Il campo elettromagnetico lo conosco da lungo tempo: 25 anni fa ero nella stessa situazione in cui vi trovate ora, sicché ho avuto 25 anni di esperienza di più nel pensare a queste onde serpentine. Quando prendo a descrivere il campo magnetico che si muove nello spazio e parlo dei campi **E** e **B** e accenno con le braccia ad un moto ondulatorio, voi potete anche pensare che li vedo. Vi dico subito ciò che vedo: vedo vagamente una sorta di linee indistinte ondulanti; qua e là portano scritto in qualche modo un **E** o un **B** e forse qualcuna delle linee è munita di frecce: una freccia qui, una là che scompaiono quando le guardo attentamente. Quando parlo di campi che saettano attraverso lo spazio c'è in me una terribile confusione tra i simboli che adopero per descrivere gli oggetti e gli oggetti stessi. Non posso davvero costruire un'immagine che nemmeno si avvicini a somigliare a delle vere onde. Perciò se avete delle difficoltà a costruirvi una tale immagine non dovrete preoccuparvi di questa come di un'altra insolita difficoltà. [da *La fisica di Feynman*]

Possiamo riassumere il progresso compiuto passando dalla meccanica all'elettromagnetismo dicendo che le teorie fisiche sono diventate man mano più astratte e matematiche. Newton sostituì i modelli meccanici delle prime teorie con una teoria matematica che faceva uso delle leggi del moto e della legge dell'inverso del quadrato della distanza. Maxwell sviluppò una teoria che, come fu poi dimostrato da Einstein, non richiedeva l'esistenza di un etere materiale diffuso in tutto lo spazio. Avvertiamo un crescente distacco tra il senso comune che si sviluppa a partire dall'esperienza umana diretta e la sottile astrazione matematica elaborata per interpretare quegli effetti che non percepiamo direttamente.

Ma queste teorie molto astratte acquistano un senso anche dal punto di vista dell'esperienza comune quando sono tradotte nel linguaggio di tutti i giorni, e ci parlano delle cose che normalmente vediamo, tocchiamo e sentiamo. Esse usano un linguaggio molto astratto, ma possono venire verificate concretamente anche mediante i risultati che sono stati raggiunti. Hanno permesso di costruire le apparecchiature che guidano le sonde spaziali verso gli altri pianeti e gli strumenti per comunicare con queste sonde. Queste teorie non solo sono alla base di tutti gli sviluppi pratici dell'elettronica e dell'ottica, ma hanno anche portato un notevole contributo alla nostra conoscenza dell'occhio umano e del sistema nervoso. La teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell e l'interpretazione che Einstein formulò dell'elettromagnetismo e della meccanica nella teoria della relatività ristretta provocarono un profondo cambiamento nel punto di vista filosofico della cosmologia newtoniana. Mentre è ancora presto, a questo punto del corso, sperare di capire in maniera esauriente questi cambiamenti, possiamo tuttavia affrontare lo studio di alcuni aspetti di questa nuova cosmologia.