CAPITOLO

# 24

# Le equazioni di Maxwell e le onde elettromagnetiche

**Per coprire i 150 milioni di kilometri che le separano dalla Terra impiegano 8 minuti e 20 secondi: le radiazioni elettromagnetiche prodotte nella fotosfera del Sole percorrono questo tragitto da oltre 4 miliardi e mezzo di anni fornendo l'energia necessaria per la vita sul nostro pianeta.**

## L'ordine di grandezza

Quanta energia solare investe ogni anno l'Italia?

La risposta a pagina 784



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 24.1 Le equazioni dei campi elettrostatico e magnetostatico

Nei capitoli precedenti abbiamo visto le equazioni che regolano il comportamento del campo elettrico e del campo magnetico in condizioni statiche, cioè quando i campi non dipendono dal tempo.

**EQUAZIONI DEI CAMPI ELETTROSTATICO E MAGNETOSTATICO**

- *Campo elettrostatico* $\vec{\mathbf{E}}$:

  Teorema di Gauss $\Phi_S(\vec{\mathbf{E}}) = \dfrac{Q_T}{\varepsilon_0}$ (24.1)

  Conservatività del campo $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = 0$ (24.2)

- *Campo magnetostatico* $\vec{\mathbf{B}}$

  Teorema di Gauss $\Phi_S(\vec{\mathbf{B}}) = 0$ (24.3)

  Teorema di Ampère $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0 \sum_j I_j$ (24.4)

La prima coppia di equazioni stabilisce le caratteristiche del campo elettrico a partire dalle sue sorgenti: le cariche elettriche. In modo analogo, la seconda coppia di equazioni determina le proprietà del campo magnetico a partire dalle sue sorgenti: le correnti elettriche. Notiamo che il campo elettrico non è presente nelle equazioni che determinano il campo magnetico e viceversa: i due campi sono entità distinte, non collegate fra loro.

## 24.2 Campi che variano nel tempo

Quando il campo magnetico varia nel tempo varia anche il suo flusso attraverso una superficie $S$ e nel bordo $\gamma$ di $S$ si origina una f.e.m. indotta data dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz:

$$\mathscr{E} = -\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t}$$

Come abbiamo visto nel paragrafo 21.1, la f.e.m. è il lavoro per unità di carica necessario per spostare una carica $q$ lungo la curva $\gamma$:

$$\mathscr{E} = \frac{L}{q}$$

Suddividiamo la curva in trattini $\Delta\vec{\mathbf{s}}_k$ così piccoli da poter essere considerati rettilinei e tali che in ciascuno di essi la forza $\vec{\mathbf{F}}_k$ sulla carica rimanga costante. Il lavoro elementare $\Delta L_k$ per spostare una carica $q$ lungo il tratto $\Delta\vec{\mathbf{s}}_k$ è $\Delta L_k = \vec{\mathbf{F}}_k \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k$. Il lavoro totale per spostare la carica $q$ lungo l'intera curva $\gamma$ è:

$$L = \sum_k \Delta L_k = \sum_k \vec{\mathbf{F}}_k \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k$$

quindi la f.e.m. è:

$$\mathscr{E} = \frac{L}{q} = \frac{\sum_k \vec{\mathbf{F}}_k \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k}{q} = \sum_k \frac{\vec{\mathbf{F}}_k}{q} \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k$$

Il rapporto $\vec{\mathbf{F}}_k/q$ è il campo elettrico $\vec{\mathbf{E}}_k$ indotto nel tratto $\Delta\vec{\mathbf{s}}_k$ della curva: $\vec{\mathbf{E}}_k = \vec{\mathbf{F}}_k/q$. Quindi:

$$\mathscr{E} = \sum_k \frac{\vec{\mathbf{F}}_k}{q} \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k = \sum_k \vec{\mathbf{E}}_k \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k$$

Il membro di destra è la circuitazione del campo elettrico indotto lungo la curva $\gamma$:

$$\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = \sum_k \vec{\mathbf{E}}_k \cdot \Delta\vec{\mathbf{s}}_k$$

Quindi la legge di Faraday-Neumann-Lenz può essere posta nella forma:

$$\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = -\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t} \qquad (24.5)$$



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

La circuitazione del campo elettrico indotto è diversa da zero: quindi **il campo elettrico indotto non è un campo conservativo**. La legge di Faraday-Neumann-Lenz è una generalizzazione dell'equazione (24.2), a cui si riduce quando il flusso magnetico è costante nel tempo.

## Il teorema di Ampère generalizzato

Secondo la legge di Faraday-Neumann-Lenz una variazione di flusso magnetico genera un campo elettrico indotto. Mosso da considerazioni di simmetria fra i campi, attorno al 1860 James Clerk Maxwell (1831-1879) suggerì che anche **una variazione di flusso del campo elettrico genera un campo magnetico**. Quindi le sorgenti di campo non sono solo le correnti elettriche ma anche le variazioni di flusso elettrico. Per tener conto di questo nuovo contributo Maxwell propose la seguente generalizzazione del teorema di Ampère:

$$\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0\left(\sum_j I_j + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}\right) \qquad (24.6)$$

dove il flusso del campo elettrico è calcolato attraverso una superficie avente come bordo la curva $\gamma$. Il termine $\varepsilon_0 \dfrac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}$ è detto **corrente di spostamento** e ha le dimensioni di una corrente, anche se non si tratta di una corrente di cariche elettriche. Grazie alla corrente di spostamento, le equazioni (24.5) e (24.6) manifestano un'evidente simmetria fra i campi elettrico e magnetico.

## La corrente di spostamento

Maxwell propose l'esistenza della corrente di spostamento con un ragionamento analogo al seguente.

Durante la carica in un circuito *RC* scorre una corrente $I$ che crea un campo magnetico $\vec{\mathbf{B}}$. Consideriamo una curva chiusa $\gamma$ come quella rappresentata in figura 24.1. Secondo il teorema di Ampère, $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0 I$, dove $I$ è la corrente concatenata con $\gamma$. Consideriamo le tre superfici aventi come bordo la stessa circonferenza $\gamma$. Secondo il teorema di Ampère, nei casi **A** e **C** la circuitazione del campo $\vec{\mathbf{B}}$ lungo $\gamma$ è diversa da zero, perché la corrente $I$ attraversa la superficie e quindi è concatenata a $\gamma$. Al contrario, nel caso **B** risulta $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = 0$ perché $I$ non è concatenata a $\gamma$. Secondo Maxwell, l'unico modo per superare questa difficoltà è individuare anche nel caso **B** una «corrente» che genera il campo magnetico.

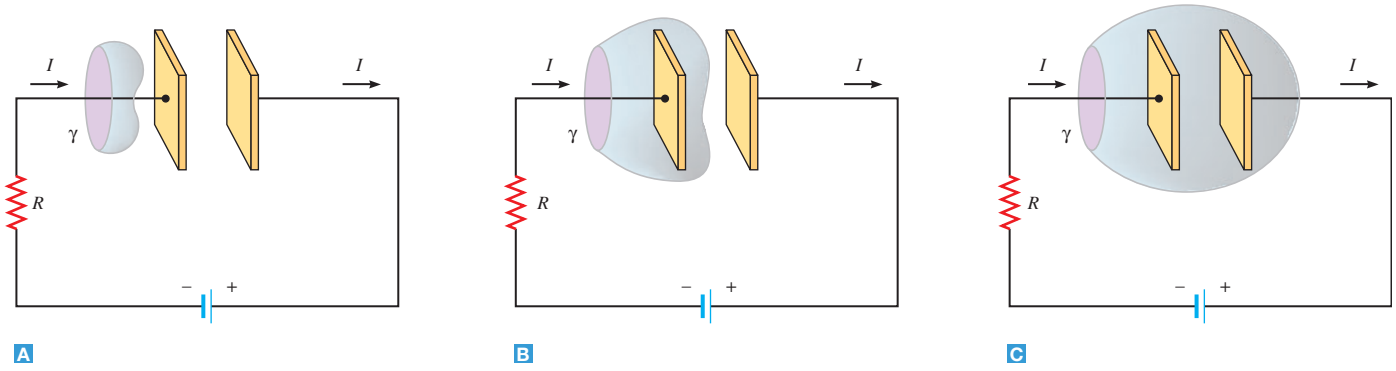



**Figura 24.1**
Schema di un circuito *RC* in cui scorre una corrente $I$ che crea un campo magnetico $\vec{\mathbf{B}}$.

Consideriamo una superficie gaussiana come quella mostrata in figura 24.2 a pagina seguente. All'esterno del condensatore il campo elettrico è nullo, mentre all'interno è uniforme e perpendicolare alle basi del cilindro. Il flusso del campo elettrico attraverso il cilindro è:

$$\Phi_1(\vec{\mathbf{E}}) = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

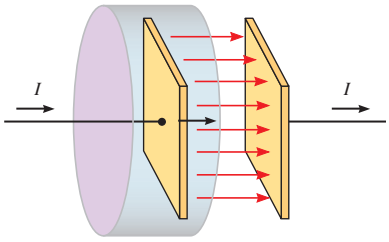



**Figura 24.2**
All'interno del condensatore, la corrente di spostamento è uguale alla cortente di conduzione che scorre nel circuito.

dove $Q$ è la carica sull'armatura. Poiché la carica elettrica si conserva, ogni cambiamento di $Q$ è dovuto alla corrente $I$ del circuito: $\Delta Q = I\Delta t$. In un piccolo intervallo di tempo $\Delta t$ la carica sull'armatura passa dal valore $Q$ al valore $Q + I\Delta t$ e quindi il flusso diventa:

$$\Phi_2(\vec{\mathbf{E}}) = \frac{Q + I\Delta t}{\varepsilon_0}$$

Pertanto risulta:

$$\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}}) = \Phi_2(\vec{\mathbf{E}}) - \Phi_1(\vec{\mathbf{E}}) = \frac{Q + I\Delta t}{\varepsilon_0} - \frac{Q}{\varepsilon_0} = \frac{I\Delta t}{\varepsilon_0}$$

da cui segue:

$$\varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t} = I$$

La corrente di spostamento all'interno del condensatore è quindi uguale alla corrente di conduzione che scorre nel circuito. Questo significa che la circuitazione del campo magnetico lungo una curva chiusa $\gamma$ è la stessa indipendentemente dal tipo di corrente, di conduzione o di spostamento, concatenata a $\gamma$.

## 24.3 Le equazioni di Maxwell

Dopo aver generalizzato il teorema di Ampère ai campi variabili nel tempo, Maxwell pubblica nel 1873 la sua opera fondamentale, il *Treatise on electricity and magnetism*, in cui compaiono le equazioni, dette in seguito **equazioni di Maxwell**, che regolano il comportamento dei campi elettrico e magnetico:

**EQUAZIONI DI MAXWELL**

| | | |
|---|---|---|
| Teorema di Gauss | $\Phi_S(\vec{\mathbf{E}}) = \frac{Q_T}{\varepsilon_0}$ | (24.1) |
| Legge di Faraday-Neumann-Lenz | $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = -\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t}$ | (24.5) |
| Teorema di Gauss | $\Phi_S(\vec{\mathbf{B}}) = 0$ | (24.3) |
| Teorema di Ampère generalizzato | $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0\left(\sum_j I_j + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}\right)$ | (24.6) |

La seconda e la quarta equazione esprimono un legame profondo tra il campo elettrico e il campo magnetico. Ciò significa che $\vec{\mathbf{E}}$ e $\vec{\mathbf{B}}$ non sono più indipendenti come nel caso statico, ma sono aspetti diversi di un unico ente fisico, il **campo elettromagnetico**, che si manifesta nei fenomeni elettromagnetici.

Le equazioni di Maxwell, unite al principio di conservazione della carica elettrica e alla forza di Lorentz, consentono di affrontare con successo lo studio dei fenomeni elettromagnetici: per questa ragione sono considerate uno dei capisaldi della fisica classica.

### La previsione dell'esistenza di onde elettromagnetiche

Attorno al 1870 Maxwell fu in grado di prevedere l'esistenza di un fenomeno allora sconosciuto: le **onde elettromagnetiche**. In termini intuitivi, il ragionamento di Maxwell fu il seguente.

Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile (teorema di Ampère generalizzato), il quale a sua volta genera un campo elettrico variabile (legge di Faraday-Neumann-Lenz) e così via. L'oscillazione di un campo elettrico, cioè la variazione della sua intensità in un punto al variare del tempo, genera l'oscillazione di un campo magnetico in punti vicini e così via: l'oscillazione si propaga nello spazio sotto forma di onda elettromagnetica.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

Diversamente dalle onde meccaniche viste nel capitolo 12, che si propagano solo in un mezzo elastico, le onde elettromagnetiche si propagano anche nello spazio vuoto, privo di materia. Nelle onde elettromagnetiche infatti non oscilla un mezzo materiale, ma le intensità dei campi elettrico e magnetico variano nello spazio e nel tempo, come vedremo nel paragrafo seguente.

Oltre a prevederne l'esistenza, Maxwell dimostrò che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto con una velocità:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

dove $\varepsilon_0$ e $\mu_0$ sono rispettivamente le costante dielettrica del vuoto e la permeabilità magnetica del vuoto. Sostituendo i loro valori nella (24.1) si ottiene che la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto è numericamente uguale alla velocità della luce $c$:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{C^2}}{\mathrm{N \cdot m^2}}\right)\left(4\pi \cdot 10^{-7}\frac{\mathrm{T \cdot m}}{\mathrm{A}}\right)}} = 3{,}00 \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}$$

Quindi:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \qquad (24.7)$$

Questo risultato non può essere una coincidenza, ma suggerisce una conclusione di importanza fondamentale: **la luce è costituita da onde elettromagnetiche**.

L'esistenza delle onde elettromagnetiche fu dimostrata sperimentalmente dal tedesco Heinrich Hertz (1857-1894) nel 1888.

### La velocità della luce

Le prime misure sufficientemente accurate della velocità della luce sono effettuate dal francese Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868) con il metodo dello specchio rotante, perfezionato dall'americano Albert Michelson (1852-1931).

Se la velocità angolare dello specchio rotante a otto lati di figura 24.3 ha il valore corretto, la luce riflessa da un lato viaggia verso lo specchio fisso, si riflette su di esso e poi si riflette su un altro lato dello specchio rotante, che la invia al rilevatore. La minima velocità angolare deve essere tale che un lato dello specchio ruoti per un ottavo di giro nel tempo che la luce impiega a percorrere il cammino fra gli specchi. Nel 1926, durante uno dei suoi esperimenti, Michelson mise lo specchio fisso a una distanza di 35 km dallo specchio rotante e ottenne il valore

$$c = (2{,}997\,96 \pm 0{,}000\,04) \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}$$

Oggi la velocità della luce è nota con un grado di accuratezza tale che viene usata per definire il metro. Come abbiamo visto nel paragrafo 1.2, la velocità della luce è ora *definita* come:

*Velocità della luce nel vuoto* $c = 299\,792\,458$ m/s

ma il valore approssimato $3{,}00 \cdot 10^8$ m/s è sufficiente per la maggior parte dei calcoli.

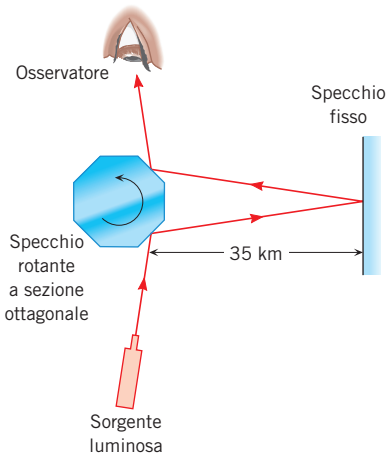



**Figura 24.3**
Fra il 1878 e il 1931 Michelson utilizzò uno specchio rotante con otto lati per misurare la velocità della luce. La figura mostra una versione semplificata del dispositivo.

## 24.4 Le onde elettromagnetiche

### La generazione di onde elettromagnetiche

La figura 24.4 a pagina seguente illustra un modo di produrre onde elettromagnetiche. Il dispositivo consiste di due fili metallici rettilinei che sono connessi ai terminali di un alternatore e funzionano come antenna. La differenza di potenziale fra i terminali varia nel tempo in maniera sinusoidale con un periodo $T$. La parte A della figura



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

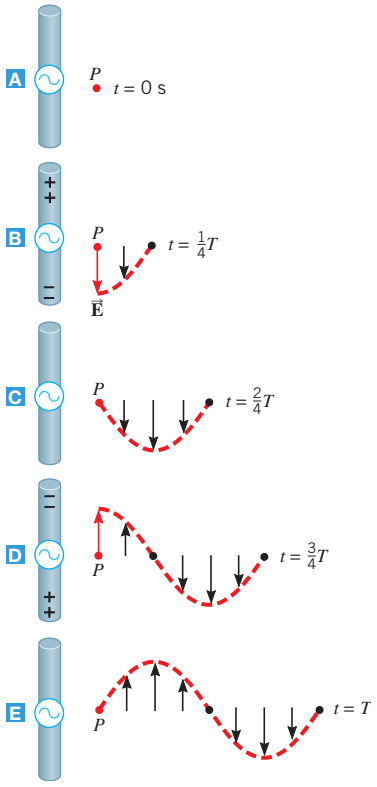



**Figura 24.4**

In figura le frecce rosse rappresentano il campo elettrico $\vec{\mathbf{E}}$ prodotto nel punto $P$ dalla carica che oscilla nell'antenna all'istante di tempo indicato. Le frecce nere rappresentano il campo elettrico creato negli istanti di tempo precedenti. Per semplicità sono mostrati solo i campi che si propagano verso destra.

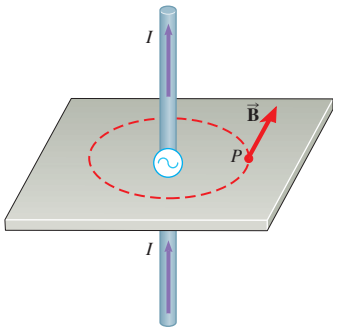



**Figura 24.5**

La corrente $I$ oscillante nell'antenna crea un campo magnetico $\vec{\mathbf{B}}$ nel punto $P$ che è tangente alla circonferenza centrata sul filo. Il campo è diretto come in figura quando la corrente scorre verso l'alto, mentre è diretto nel verso opposto quando la corrente scorre verso il basso.

mostra l'istante $t = 0$ s, quando agli estremi del filo non c'è carica e nel punto $P$ vicino all'antenna non c'è alcun campo elettrico. Al passare del tempo, l'estremità superiore del filo si carica positivamente e quella inferiore negativamente. Un quarto di ciclo più tardi ($t = T/4$) le cariche raggiungono il loro valore massimo, come mostra la parte **B** della figura. Il corrispondente campo elettrico $\vec{\mathbf{E}}$ nel punto $P$ è rappresentato dalla freccia rossa ed è aumentato fino al suo massimo valore nella direzione verso il basso (*). La parte **B** mostra anche che il campo elettrico creato in istanti di tempo precedenti (la freccia nera) non è scomparso ma si è mosso verso destra. Questo è il punto cruciale: il campo elettrico non viene rilevato istantaneamente nei punti lontani. Esso è creato prima vicino ai fili e poi, come l'onda che si genera quando un sasso viene gettato in uno stagno, si muove verso l'esterno in tutte le direzioni. Per chiarezza la figura mostra solo il campo elettrico che si muove verso destra.

Le parti **C-E** della figura **24.4** mostrano il campo elettrico nel punto $P$ (freccia rossa) in istanti di tempo successivi durante un ciclo del generatore. In ciascuna parte, i campi generati precedentemente (frecce nere) continuano a propagarsi verso destra. Nella parte **E** della sequenza è stato disegnato un periodo completo congiungendo le punte dei vettori campo elettrico per dimostrare che il campo cambia in modo sinusoidale.

Le correnti nel filo di figura **24.4** generano anche un campo magnetico $\vec{\mathbf{B}}$.

La figura **24.5** mostra che, quando la corrente è diretta verso l'alto, il campo magnetico nel punto $P$ è diretto nel verso entrante nella pagina. Mentre la corrente oscilla, il campo magnetico oscilla con essa. Il campo magnetico creato si propaga verso l'esterno sotto forma di onda, come fa il campo elettrico.

Notiamo che il campo magnetico nella figura **24.5** è perpendicolare alla pagina, mentre il campo elettrico nella figura **24.4** giace nel piano della pagina. In ogni punto **i campi elettrico e magnetico creati dall'antenna sono perpendicolari fra loro**. Inoltre **entrambi i campi sono perpendicolari alla direzione di propagazione**. Questi campi elettrici e magnetici fra loro perpendicolari che si propagano insieme nello spazio alla velocità $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s costituiscono un'onda elettromagnetica.

## I campi lontano dall'antenna emettitrice

I campi variabili generati vicino all'antenna si propagano con il meccanismo che abbiamo visto nel paragrafo precedente: l'oscillazione di un campo elettrico genera l'oscillazione di un campo magnetico in punti vicini [equazione (24.6)], che genera a sua volta l'oscillazione di un campo elettrico (24.5) in punti vicini e così via. L'onda si propaga in questo modo nello spazio.

La figura **24.6** mostra un'«istantanea» dell'onda elettromagnetica molto lontana dall'antenna. Per semplicità è stata rappresentata solo la parte dell'onda che viag-

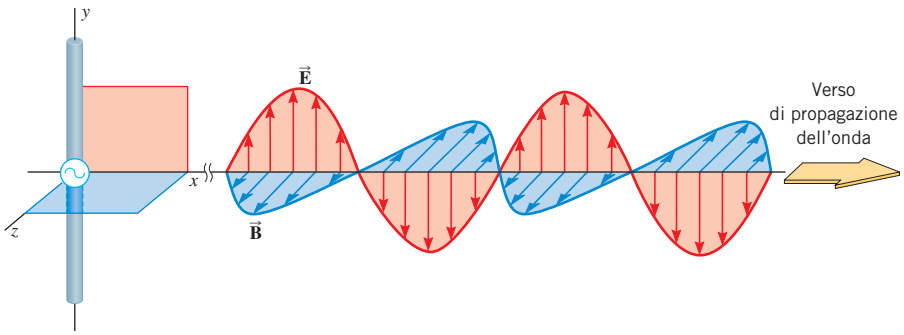



**Figura 24.6**

Le onde elettromagnetiche molto lontane dall'antenna. Notiamo che $\vec{\mathbf{E}}$ e $\vec{\mathbf{B}}$ sono perpendicolari fra loro e sono anche perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

(*) La direzione e il verso del campo elettrico si ottengono immaginando una carica di prova positiva in $P$ e determinando la direzione e il verso in cui sarebbe spinta dalla carica presente sui fili.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

gia lungo il verso positivo dell'asse $x$. Dal disegno risulta chiaro che **un'onda elettromagnetica è un'onda trasversale** perché i campi elettrico e magnetico sono entrambi perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

## Andamento temporale di un'onda elettromagnetica

Si possono generare onde elettromagnetiche anche senza un'antenna. In generale, ogni carica elettrica che viene accelerata emette un'onda elettromagnetica, indipendentemente dal fatto che si muova in un filo. Nel caso di una corrente alternata, un elettrone oscilla con moto armonico lungo il filo ed è un esempio di carica accelerata.

La frequenza di un'onda elettromagnetica è determinata dalla frequenza di oscillazione delle cariche elettriche nella sorgente dell'onda. Più precisamente, come mostra la figura 24.7, **in ogni punto dello spazio i campi elettrico e magnetico di un'onda elettromagnetica oscillano in fase con la stessa frequenza** $f$, uguale alla frequenza dell'alternatore con cui è alimentato il circuito dell'antenna emittente.

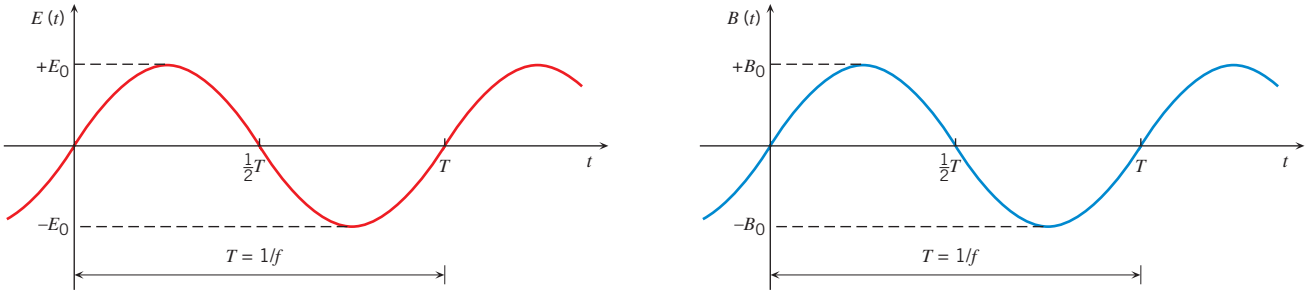



**Figura 24.7**
L'andamento dei campi elettrico e magnetico di un'onda elettromagnetica in un punto fissato dello spazio. La frequenza $f$ è uguale alla frequenza della corrente alternata nell'antenna emittente. Il periodo $T$ è l'inverso della frequenza $f$.

**Fisica quotidiana**
La ricezione radiofonica e televisiva

I segnali radiofonici e televisivi sono formati da onde elettromagnetiche. Quando le onde raggiungono un'antenna ricevente, interagiscono con le cariche elettriche presenti nei fili dell'antenna. Si può utilizzare il campo elettrico o il campo magnetico delle onde. Per utilizzare al meglio il campo elettrico dell'onda, i fili dell'antenna devono essere paralleli al campo elettrico come mostra la figura 24.8. Il campo elettrico agisce sugli elettroni del filo e li forza a oscillare avanti e indietro lungo il filo. Si genera quindi una corrente alternata nell'antenna e nel circuito a essa connesso. Un condensatore a capacità variabile $C$ (—||↗—) e l'induttore nel circuito consentono di selezionare la frequenza dell'onda elettromagnetica desiderata. Cambiando in modo opportuno il valore della capacità si può uguagliare la frequenza di risonanza $f_0$ del circuito alla frequenza dell'onda. In condizioni di risonanza la corrente nell'induttore è massima. Per effetto della mutua induttanza, questa corrente genera una tensione massima nella seconda bobina della figura. La tensione viene poi amplificata dai rimanenti circuiti della radio o del televisore.

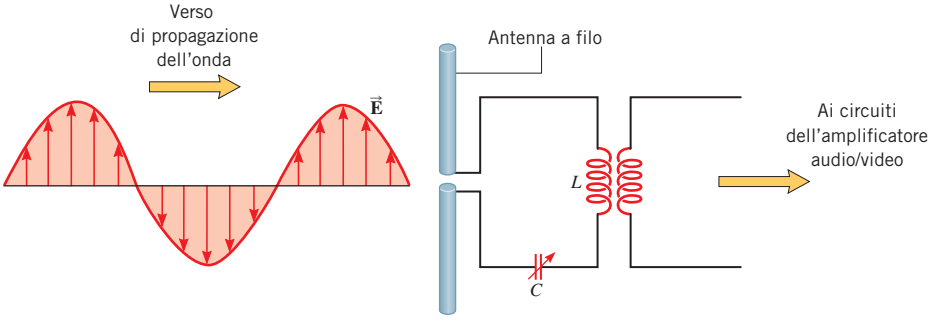



**Figura 24.8**
Un'onda radio può essere rilevata mediante un'antenna ricevente a filo che è parallela al campo elettrico dell'onda. Il campo magnetico dell'onda radio è stato omesso per semplicità.

Per rilevare il campo magnetico di un'onda radio bisogna usare un'antenna a forma di spira, come quella di figura 24.9 a pagina seguente. La ricezione è ottimale quando la normale al piano della spira è parallela al campo magnetico. In tal modo, al variare del campo magnetico c'è una grande variazione del flusso magnetico attraverso la spira che genera una corrente indotta. Anche in questo caso la



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

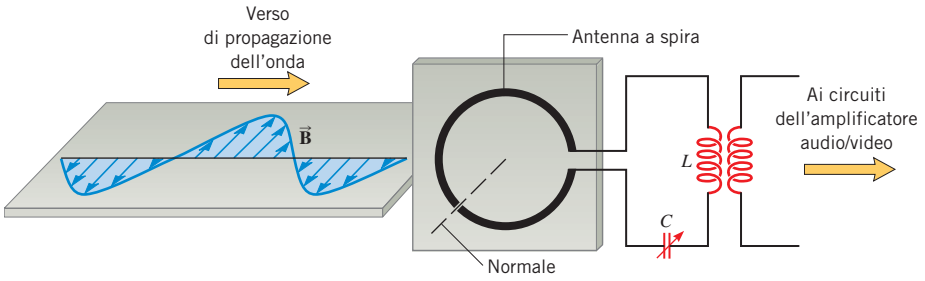



**Figura 24.9**

Mediante un'antenna ricevente a forma di spira si può rilevare il campo magnetico di un'onda radio trasmessa. Per avere una buona ricezione, la normale al piano della spira deve essere parallela al campo magnetico. Per semplicità il campo elettrico dell'onda non è stato disegnato.

frequenza di risonanza della combinazione condensatore-induttore può essere variata per adeguarla a quella dell'onda elettromagnetica desiderata. La figura **24.10** mostra i due tipi di antenna.

## 24.5 Lo spettro elettromagnetico

Come ogni onda periodica, un'onda elettromagnetica ha una frequenza $f$ e una lunghezza d'onda $\lambda$ che sono legate alla velocità $v$ di propagazione dell'onda dalla relazione $v = f\lambda$. Per onde che si propagano nel vuoto o, con buona approssimazione, nell'aria la velocità è $v = c$, per cui $c = f\lambda$.

La serie ordinata di frequenze o lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche è detta **spettro elettromagnetico**. La figura **24.11** mostra lo spettro elettromagnetico in un enorme intervallo di frequenze, da meno di $10^4$ Hz a più di $10^{24}$ Hz. Mediante la relazione $c = f\lambda$ si può determinare il corrispondente intervallo di lunghezze d'onda riportato nella figura.

Storicamente, alle regioni dello spettro sono stati assegnati nomi come onde radio e onde infrarosse. Anche se il confine fra regioni adiacenti è indicato in figura con una linea verticale, in realtà questo confine non è netto e le regioni spesso di sovrappongono.

**Figura 24.10**

Questa nave da crociera usa antenne sia a filo sia a spira per comunicare con altre imbarcazioni e con la capitaneria.

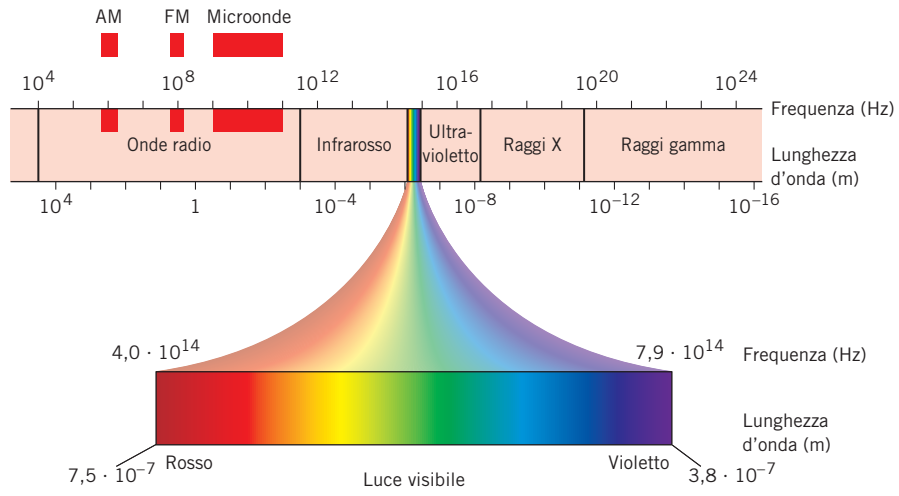



**Figura 24.11**

Lo spettro elettromagnetico.

### Onde radio

Le **onde radio** (lunghezze d'onda comprese fra qualche decina di kilometri e 30 cm) sono utilizzate per le trasmissioni radiofoniche e televisive e sono generate da circuiti oscillanti.

Come abbiamo visto nel capitolo 12, la diffrazione è il fenomeno per cui le onde sono in grado di aggirare un ostacolo. La diffrazione è tanto maggiore quanto più grande è la lunghezza d'onda. Come mostra la figura **24.11**, le onde radio AM hanno una lunghezza d'onda molto maggiore, e quindi una maggior capacità di aggirare ostacoli come per esempio alture o edifici, rispetto alle onde radio FM. Ciò spiega perché la ricezione delle radio FM è più disturbata rispetto a quella delle radio AM.

**Fisica quotidiana**

La ricezione radiofonica AM e FM

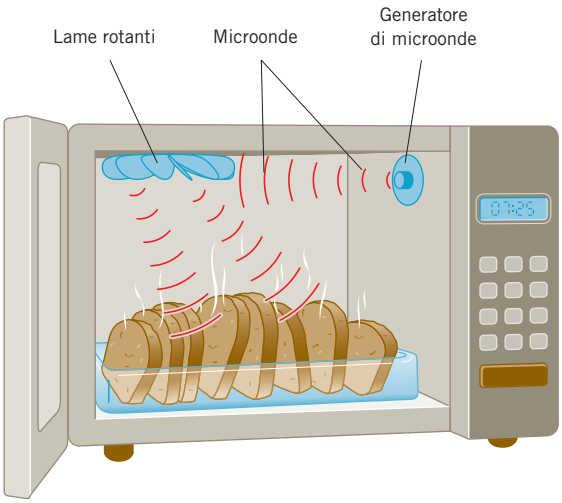


Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## Microonde

Le **microonde** (lunghezze d'onda comprese fra 30 cm e 1 mm) conoscono vari usi, per esempio nella telefonia mobile: un telefono cellulare emette onde con una frequenza di circa 900 MHz, cioè con una lunghezza d'onda di 30 cm.

Il forno a microonde (figura 24.12) genera onde elettromagnetiche di frequenza 2,45 GHz, cioè con lunghezza d'onda di circa 12 cm. Le molecole d'acqua presenti nei cibi sono messe in rotazione dal campo elettrico dell'onda e quindi acquistano energia che trasferiscono ai cibi aumentandone la temperatura.




Anche i radar emettono microonde che sono riflesse da oggetti metallici. Misurando l'intervallo di tempo fra l'emissione e l'arrivo dell'onda riflessa si determina con grande precisione la distanza dell'oggetto che l'ha riflessa.

## Radiazioni infrarosse

Le **radiazioni infrarosse** (lunghezze d'onda comprese fra 1 mm e 750 nm) sono generate dalla vibrazione e dalla rotazione delle molecole all'interno di un materiale. Quando le radiazioni infrarosse sono assorbite dalla nostra pelle sentiamo una sensazione di calore. Esistono sistemi che consentono di visualizzare le radiazioni infrarosse emesse da un corpo: mediante un opportuno codice è possibile associare a ogni temperatura un particolare colore e realizzare fotografie come quella mostrata in figura 24.13.

Un termometro a infrarossi, come quello mostrato in figura 24.14, rileva la temperatura del corpo misurando la quantità di radiazione infrarossa emessa dal timpano e dai tessuti circostanti. L'orecchio è uno degli organi più adatti alla misurazione della temperatura corporea perché è vicino all'*ipotalamo*, l'area del cervello che regola la temperatura del corpo. L'orecchio inoltre non viene raffreddato o riscaldato durante le normali funzioni corporee come mangiare, bere o respirare. Quando la sonda del termometro viene inserita nel canale uditivo la radiazione infrarossa incide sul sensore, che si scalda e cambia la sua resistenza. Questa variazione è misurata da un circuito elettronico, che calcola la temperatura corporea e mostra il risultato su un display digitale.

## Radiazione visibile o luce

La porzione più familiare dello spettro elettromagnetico è quella che percepiamo come **luce visibile** (lunghezze d'onda comprese fra 750 nm e 380 nm). Il sistema occhio-cervello associa luce di diverse lunghezze d'onda a colori diversi. La lunghezza d'onda di 750 nm nel vuoto è approssimativamente la più grande lunghezza d'onda della luce rossa, mentre 380 nm nel vuoto è approssimativamente la più piccola lunghezza d'onda della luce viola. Fra questi due limiti si trovano tutti gli altri colori, come indica la figura 24.11.

**FILM**

Radioscherzi

**Figura 24.12**

Un forno a microonde. Le lame rotanti riflettono le microonde in tutte le parti del forno.

© NASA/IPAC

**Figura 24.13**

Le radiazioni infrarosse, rilevate mednate opportune telecamere, danno informazioni sulla temperatura della sorgente che le ha emesse.

**Fisica quotidiana**

Il termometro a infrarossi

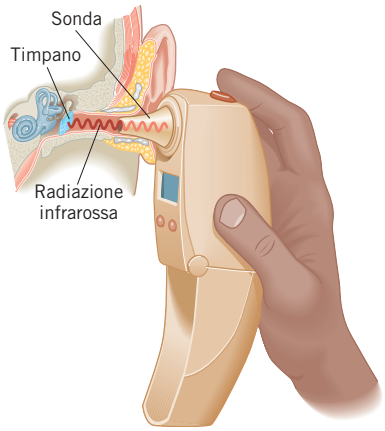



**Figura 24.14**

Un termometro a infrarossi misura la temperatura corporea determinando la quantità di radiazione infrarossa emessa dal timpano e dai tessuti limitrofi.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## Radiazioni ultraviolette

Le **radiazioni ultraviolette** (lunghezze d'onda comprese fra 380 nm e 10 nm) penetrano negli strati superficiali della nostra pelle e attivano molte reazioni chimiche fondamentali per la nostra salute, come per esempio la produzione di vitamina D e di melanina, che è il pigmento che ci conferisce l'abbronzatura. L'esposizione eccessiva alla radiazione ultravioletta è però dannosa perché può provocare malattie degenerative della pelle, come tumori o patologie del cristallino.

Il Sole emette intensamente nell'ultravioletto nelle bande UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) e UV-C (280-10 nm). L'atmosfera terrestre assorbe quasi tutta la banda UV-B: quindi per esporsi al sole è bene usare una crema con un filtro UV-A.

## Raggi X

I **raggi X** (lunghezze d'onda comprese fra 10 nm e 0,001 nm, ossia $10^{-12}$ m) sono emessi durante le violente decelerazioni di elettroni ad alta velocità all'interno di metalli pesanti. Sono diffusamente impiegati in medicina perché attraversano i tessuti molli ma sono assorbiti dalle ossa.

Poiché hanno lunghezze d'onda comparabili con le distanze interatomiche, i raggi X sono usati in cristallografia per studiare i reticoli cristallini.

## Raggi gamma

I **raggi gamma** (lunghezze d'onda minori di 0,001 nm, cioè $10^{-12}$ m) sono radiazioni emesse nei decadimenti nucleari. Si tratta di radiazioni molto penetranti che trovano largo impiego per esempio nella sterilizzazione di strumenti chirurgici, perché uccidono i batteri su cui incidono. I raggi gamma sono usati anche nella radioterapia dei tumori perché danneggiano il DNA delle cellule neoplastiche.

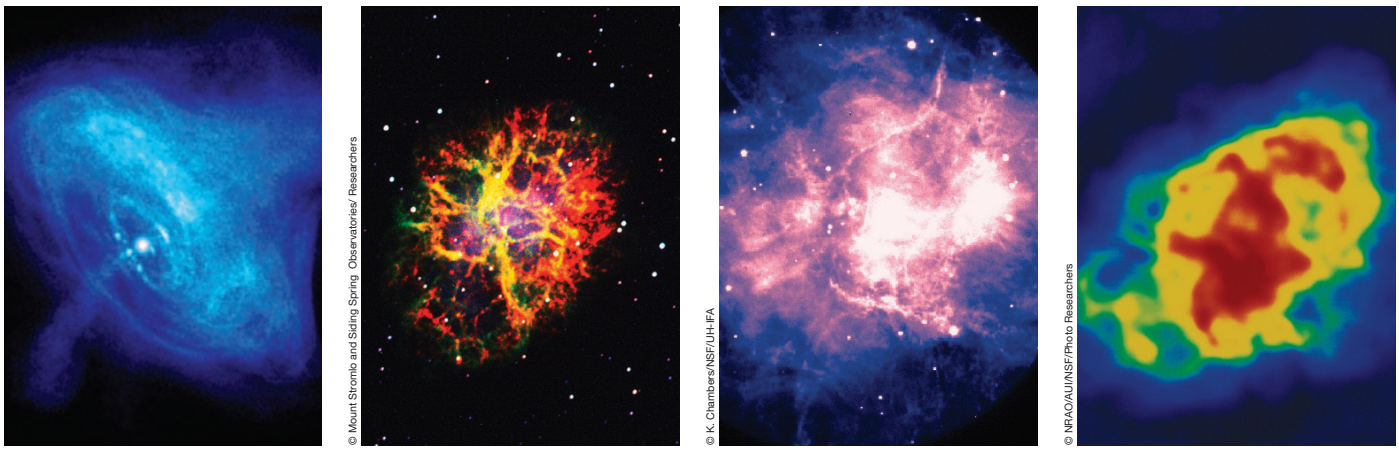



**Figura 24.15**
Quattro fotografie della Nebulosa del Granchio, che è ciò che rimane di una stella che si è trasformata in supernova nel 1054. Dista 6300 anni luce dalla Terra. Le immagini sono prese in differenti parti dello spettro elettromagnetico.

Per avere un'idea delle diverse emissioni che uno stesso oggetto può produrre nelle varie zone dello spettro elettromagnetico, nella figura **24.15** sono mostrate quattro immagini della Nebulosa del Granchio corrispondenti a emissioni in diverse porzioni dello spettro.

## Onde o particelle?

Come abbiamo visto nel capitolo 12, il modello ondulatorio della luce trova sostegno negli esperimenti di interferenza e diffrazione. Tuttavia esistono esperimenti, che vedremo nel capitolo 26, nei quali la luce si comporta come se fosse formata da particelle discrete. Oggi si ritiene che, come le altre onde elettromagnetiche, la luce abbia una doppia natura: a seconda del particolare esperimento che si esegue, manifesta comportamento ondulatorio o comportamento corpuscolare.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 24.6 L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica

### Densità di energia di un'onda elettromagnetica

Come le onde nell'acqua e le onde sonore, anche le onde elettromagnetiche trasportano energia. L'energia è trasportata dai campi elettrici e magnetici che formano l'onda.

La **densità di energia totale** $u$ di un'onda elettromagnetica nel vuoto è la somma della densità di energia elettrica (20.16) e magnetica (23.9):

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}B^2 \qquad (24.8a)$$

In un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto o nell'aria il campo elettrico e il campo magnetico trasportano la stessa quantità di energia per unità di volume. Poiché

$$\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2\mu_0}B^2$$

è possibile riscrivere l'equazione (24.8a) per la densità totale di energia in una delle due forme equivalenti:

$$u = \varepsilon_0 E^2 \qquad (24.8b)$$

$$u = \frac{1}{\mu_0}B^2 \qquad (24.8c)$$

Esiste un'importante relazione fra i campi elettrico e magnetico. Per determinarla, uguagliamo la densità di energia elettrica alla densità di energia magnetica:

$$\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2\mu_0}B^2 \quad \text{oppure} \quad E^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}B^2$$

Secondo l'equazione (24.7), $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$, da cui $E^2 = c^2B^2$. Quindi le intensità del campo elettrico e del campo magnetico di un'onda elettromagnetica sono legate dalla relazione:

$$E = cB \qquad (24.9)$$

In un'onda elettromagnetica i campi elettrico e magnetico oscillano nel tempo in modo sinusoidale, per cui le equazioni (24.8a-c) danno la densità di energia istantanea dell'onda. Per determinare il valore medio $\bar{u}$ della densità di energia bisogna calcolare i valori medi di $E^2$ e $B^2$. Nel paragrafo 23.6 abbiamo affrontato una situazione analoga nel caso della corrente alternata e abbiamo introdotto il concetto di valore efficace di una grandezza variabile nel tempo. Con una procedura analoga si trova che i valori efficaci $E_{\text{eff}}$ e $B_{\text{eff}}$ dei campi elettrico e magnetico sono legati ai rispettivi valori massimi $E_0$ e $B_0$ dalle relazioni:

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}}E_0 \quad \text{e} \quad B_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}}B_0$$

Le equazioni (24.8a-c) danno quindi la densità media di energia se interpretiamo i simboli $E$ e $B$ come valori efficaci e non istantanei dei campi.

L'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche nelle regioni infrarossa e visibile dello spettro ha un ruolo chiave nell'effetto serra, che è una delle cause del riscaldamento globale. Gran parte delle radiazioni infrarosse che provengono dal Sole non raggiungono la superficie terrestre perché il diossido di carbonio e l'acqua presenti nell'atmosfera le riflettono nello spazio. Al contrario, le radiazioni visibili raggiungono la superficie terrestre e la riscaldano. Inoltre un flusso di calore giunge alla superficie dall'interno della Terra. La superficie terrestre a sua volta irradia radiazioni infrarosse che, se non incontrano ostacoli, trasportano energia nello

**Fisica quotidiana**
L'effetto serra



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

spazio. Tuttavia il diossido di carbonio e l'acqua presenti nell'atmosfera riflettono le radiazioni infrarosse indietro verso la Terra, proprio come riflettono le radiazioni provenienti dal Sole. In tal modo la loro energia è intrappolata, proprio come avviene in una serra, e la Terra si riscalda.

**ESEMPIO 1 ■ Densità di energia media della luce solare**

**Relazione tra campo elettrico e campo magnetico**

La luce solare entra nell'alta atmosfera con un campo elettrico di valore efficace $E_{\text{eff}} = 720$ N/C. Calcola:

▶ la densità di energia totale media di questa radiazione.

▶ il valore efficace del campo magnetico della luce solare.

**Ragionamento e soluzione**

▶ Per l'equazione (24.8b) la densità di energia totale media è:

$$\bar{u} = \varepsilon_0 E_{\text{eff}}^2 = \left(\frac{8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}\right)(720\ \text{N/C})^2 = \boxed{4{,}6 \cdot 10^{-6}\ \text{J/m}^3}$$

▶ Dall'equazione (24.9) si ha che il valore efficace del campo magnetico è:

$$B_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{c} = \frac{720\ \text{N/C}}{3{,}0 \cdot 10^8\ \text{m/s}} = \boxed{2{,}4 \cdot 10^{-6}\ \text{T}}$$

## ■ Irradiamento di un'onda elettromagnetica

Mentre un'onda elettromagnetica si sposta nello spazio trasporta energia da una regione a un'altra. L'energia trasportata è determinata dall'**irradiamento** dell'onda.

**■ IRRADIAMENTO**

L'**irradiamento** di un'onda elettromagnetica è il rapporto fra la potenza elettromagnetica che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area della superficie.

Esiste un legame fra l'irradiamento $S$ e la densità di energia $u$ dell'onda. Per dimostrarlo, scriviamo l'irradiamento $S$ come il rapporto fra la potenza $P$ che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area $A$ di questa superficie: $S = P/A$. La potenza è uguale all'energia totale per unità di tempo che attraversa la superficie: $P =$ energia totale$/t$. Combinando queste relazioni si ha:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{\text{energia totale}}{tA}$$

Consideriamo ora la figura 24.16, la quale mostra un'onda elettromagnetica che si propaga lungo l'asse $x$. In un tempo $t$ l'onda percorre la distanza $ct$ attraversando

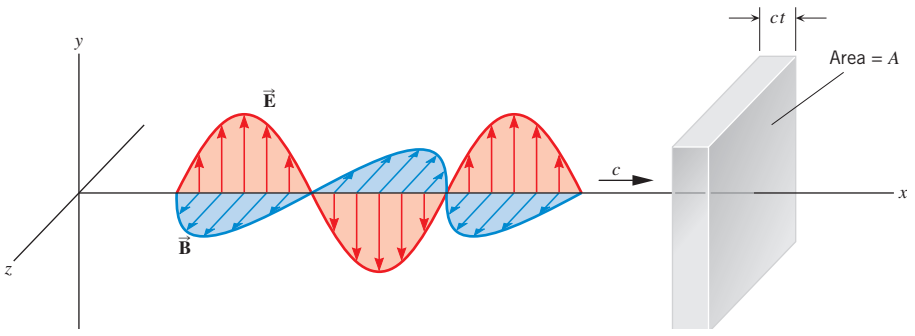



**Figura 24.16**
In un intervallo di tempo $t$, un'onda elettromagnetica percorre una distanza $ct$ lungo l'asse $x$ e attraversa la superficie di area $A$.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

l'area $A$. Quindi l'onda attraversa il volume $ctA$. L'energia totale (elettrica e magnetica) contenuta in questo volume è:

$$\text{energia totale} = (\text{densità di energia totale})(\text{volume}) = u(ctA)$$

Perciò l'irradiamento e la densità di energia di un'onda elettromagnetica sono legati dalla relazione:

$$S = \frac{\text{energia totale}}{tA} = \frac{uctA}{tA} = cu \qquad (24.10)$$

Sostituendo una alla volta le equazioni (24.8a-c) nell'equazione (24.10) si dimostra che l'irradiamento di un'onda elettromagnetica dipende dai campi elettrico e magnetico secondo le relazioni equivalenti:

$$S = cu = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 E^2 + \frac{c}{2\mu_0}B^2 \qquad (24.11a)$$

$$S = c\varepsilon_0 E^2 \qquad (24.11b)$$

$$S = \frac{c}{\mu_0}B^2 \qquad (24.11c)$$

L'irradiamento medio si ottiene sostituendo nelle relazioni precedenti i valori efficaci dei campi elettrico e magnetico.

## ESEMPIO 2 ■ Irradiamento e potenza

### Una sorgente puntiforme di luce

La figura 24.17 mostra una sorgente puntiforme che emette luce uniformemente in ogni direzione. Alla distanza di 2,50 m dalla sorgente il valore efficace del campo elettrico è 19,0 N/C. Supponiamo che la luce non sia riflessa dagli oggetti dell'ambiente.

▶ Determina la potenza media emessa dalla sorgente.

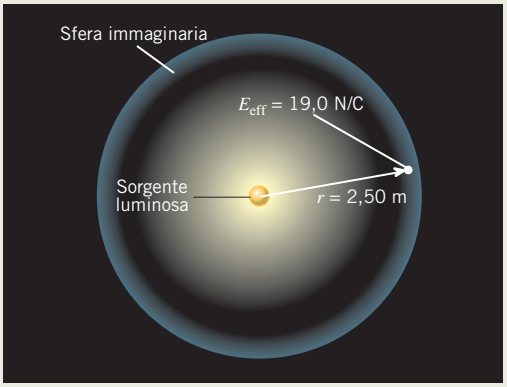



**Figura 24.17**
A una distanza di 2,50 m dalla sorgente luminosa, il valore efficace del campo elettrico della luce è 19,0 N/C.

### Ragionamento e soluzione

La sorgente emette in modo uniforme in tutte le direzioni, quindi l'irradiamento è lo stesso in tutti i punti dell'immaginaria superficie sferica di figura 24.17. Inoltre, la luce attraversa la superficie perpendicolarmente. L'irradiamento medio sulla superficie sferica è:

$$\bar{S} = c\varepsilon_0 E_{\text{eff}}^2 = (3{,}00 \cdot 10^8\ \text{m/s})[8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)](19{,}0\ \text{N/C})^2 =$$
$$= 9{,}58 \cdot 10^{-1}\ \text{W/m}^2$$

La potenza media irradiata dalla sorgente puntiforme è il prodotto fra l'irradiamento medio sulla superficie sferica di raggio $r = 2{,}50$ m e l'area della superficie:

$$\bar{P} = \bar{S}(4\pi r^2) = (9{,}58 \cdot 10^{-1}\ \text{W/m}^2)[4\pi(2{,}50\ \text{m})^2] = \boxed{75{,}3\ \text{W}}$$

**Problem solving**

**Potenza e irradiamento**

I concetti di potenza e irradiamento sono simili ma pur sempre distinti. L'intensità è il rapporto fra la potenza che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area della superficie.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 24.7 L'effetto Doppler

Nel paragrafo 12.6 abbiamo analizzato l'effetto Doppler che le onde sonore presentano quando la sorgente sonora o il ricevitore o entrambi sono in moto rispetto al mezzo in cui avviene la propagazione, per esempio l'aria. L'effetto consiste nell'aumento o nella diminuzione della frequenza rilevata rispetto a quella emessa. Quando la sorgente è in moto si ha un effetto Doppler diverso da quando è in moto l'osservatore.

Anche le onde elettromagnetiche presentano l'effetto Doppler, ma rispetto alle onde sonore ci sono due importanti differenze.

La prima è che le onde sonore hanno bisogno di un mezzo come l'aria per propagarsi ed è importante il moto della sorgente, dell'osservatore e delle onde rispetto al mezzo in cui avviene la propagazione. Nell'effetto Doppler delle onde elettromagnetiche il moto rispetto al mezzo non ha alcun ruolo, perché queste onde **non richiedono un mezzo materiale per propagarsi**.

La seconda differenza è che nelle equazioni dell'effetto Doppler del paragrafo 12.6 la velocità del suono ha un ruolo importante e dipende dal sistema di riferimento rispetto al quale è misurata: per esempio, la velocità del suono rispetto all'aria in movimento è diversa da quella rispetto all'aria in quiete. Come vedremo meglio nel paragrafo 28.2, le onde elettromagnetiche si comportano in modo differente. **La velocità a cui esse si propagano ha sempre lo stesso valore**, indipendentemente dal fatto che sia misurata rispetto a un osservatore in quiete o a uno in moto a velocità costante.

Per queste due ragioni l'effetto Doppler per le onde elettromagnetiche è lo stesso sia che si muova la sorgente delle onde sia che si muova l'osservatore. **È importante solo il moto relativo fra sorgente e osservatore**.

Quando le onde elettromagnetiche, la sorgente e l'osservatore si muovono lungo la stessa direzione nel vuoto o, con buona approssimazione, in aria, l'equazione che regola l'effetto Doppler è:

$$f_o = f_s\left(1 \pm \frac{v_{rel}}{c}\right) \quad \text{se} \quad v_{rel} \ll c \tag{24.12}$$

dove $f_o$ è la frequenza osservata e $f_s$ è la frequenza emessa dalla sorgente, $v_{rel}$ è la velocità relativa fra osservatore e sorgente e $c$ è la velocità della luce nel vuoto. L'equazione (24.12) si applica solo se $v_{rel}$ è molto più piccola di $c$ ($v_{rel} \ll c$). È importante ricordare che $v_{rel}$ è la velocità **relativa** fra osservatore e sorgente. Per esempio, se la sorgente si muove verso est a 28 m/s rispetto alla Terra mentre l'osservatore si muove verso est a 22 m/s, il valore di $v_{rel}$ è 28 m/s − 22m/s = 6 m/s.

Poiché $v_{rel}$ è una velocità relativa, non ha segno. Si tiene conto del verso del moto relativo scegliendo il segno + o il segno − nell'equazione (24.12) nel modo seguente:

- si sceglie il segno + quando sorgente e osservatore si avvicinano;
- si sceglie il segno − quando sorgente e osservatore si allontanano.

Riprendendo l'esempio precedente, supponiamo che la sorgente si sposti a 28 m/s verso est. L'osservatore viaggia avanti rispetto alla sorgente e si sposta a 22 m/s verso est. La sorgente e l'osservatore si avvicinano, in quanto la sorgente sta raggiungendo l'osservatore, e quindi nell'equazione (24.12) si deve scegliere il segno +.

Supponiamo ora che l'osservatore si sposti a 34 m/s verso est, cioè con una velocità maggiore di quella della sorgente. Adesso osservatore e sorgente si stanno allontanando e quindi si deve scegliere il segno −.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## ESEMPIO 3 ■ Effetto Doppler

### Due auto fra le onde

La Polizia stradale usa apparecchi telelaser per rilevare la velocità delle automobili. La figura 24.18 mostra un'auto che si sta avvicinando a un'auto della Polizia ferma. Un telelaser emette onde elettromagnetiche che sono riflesse dall'auto che si muove. L'onda riflessa arriva alla Polizia con una frequenza (misurata dall'apparecchio a bordo) che è diversa da quella emessa. Un tipo di telelaser emette onde di frequenza $8{,}0 \cdot 10^9$ Hz. L'auto si muove verso la Polizia alla velocità di 39 m/s.

▶ Qual è la *differenza* tra la frequenza delle onde riflesse verso la Polizia e la frequenza di emissione?

**Fisica quotidiana**
Il telelaser

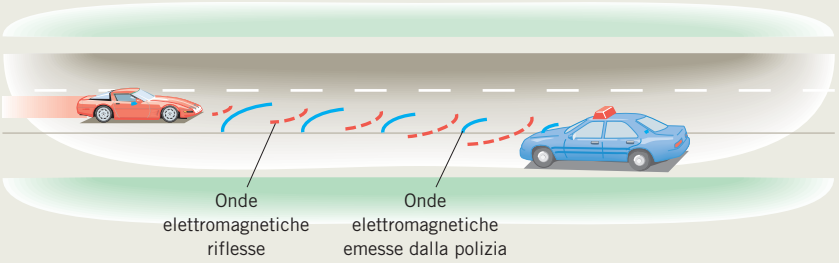



**Figura 24.18**
Un telerilevatore laser nell'auto della Polizia emette onde elettromagnetiche che sono riflesse dall'auto in movimento. Le frequenze delle onde emesse e delle onde riflesse sono diverse a causa dell'effetto Doppler.

### Ragionamento

Mentre si muove verso la radiazione emessa dal telelaser, l'auto intercetta un numero di creste d'onda al secondo maggiore di quanto farebbe se fosse ferma. Per questa ragione l'auto «osserva» una frequenza $f_o$ che è maggiore della frequenza $f_s$ emessa dal telelaser. L'auto riflette le onde verso l'auto della Polizia. In realtà, l'auto diventa una sorgente mobile di onde radio che sono emesse con frequenza $f_o$. Poiché l'auto si muove verso la Polizia, le creste riflesse arrivano alla Polizia con una frequenza $f_o'$ maggiore di $f_o$. Ci sono così due cambiamenti di frequenza dovuti all'effetto Doppler, uno associato a $f_o$ e l'altro a $f_o'$. Useremo l'equazione (24.12) per determinare queste frequenze.

### Dati e incognite

| | Grandezze | Simboli | Valori | Commenti |
|---|---|---|---|---|
| **Dati** | Frequenza emessa dal telelaser | $f_s$ | $8{,}0 \cdot 10^9$ Hz | |
| | Velocità relativa fra le due automobili | $v_{rel}$ | 39 m/s | La velocità relativa è uguale a quella dell'auto, perché l'auto della Polizia è ferma |
| **Incognita** | Differenza di frequenza | $f_o' - f_s$ | | La «o» a pedice indica che $f_o'$ è la frequenza rilevata dall'«osservatore» (l'auto della Polizia) |

### Il modello del problema

**1 Differenza di frequenza** La differenza richiesta è $f_o' - f_s$, dove $f_s$ è la frequenza nota emessa dal telelaser, $f_o'$ è la frequenza incognita della radiazione che arriva alla Polizia dopo la riflessione sull'auto in moto. Le frequenze $f_o'$ e $f_o$ osservate dall'auto in moto sono legate dalla relazione (24.12):

$$f_o' = f_o\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right)$$

dove $v_{rel}$ è la velocità relativa fra le due auto. Abbiamo scelto il segno + perché le due auto si stanno avvicinando. Con questa espressione per $f_o'$, la differenza richiesta è:

$$f_o' - f_s = f_o\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right) - f_s$$

Grandezza da determinare: $f_o$

$$f_o' - f_s = f_o\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right) - f_s \quad (1)$$



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

**2 Frequenza dell'onda «osservata» dall'auto in moto** Il telelaser invia una radiazione di frequenza $f_s$. Mentre l'auto si avvicina «osserva» una radiazione di frequenza $f_o$ maggiore di $f_s$. La relazione tra queste frequenze è data dall'equazione (24.12):

$$f_o = f_s\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right)$$

Anche in questo caso è stato scelto il segno + perché l'auto in moto e l'auto della polizia si stanno avvicinando.

$$f_o' - f_s = f_o\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right) - f_s \quad (1)$$

$$f_o = f_s\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right)$$

**Soluzione**

Combinando i passaggi precedenti si ottiene algebricamente:

$$f_o' - f_s = \underset{1}{f_o}\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right) - f_s = \underset{2}{f_s}\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right)\left(1 + \frac{v_{rel}}{c}\right) - f_s = f_s\left[1 + \frac{2v_{rel}}{c} + \left(\frac{v_{rel}}{c}\right)^2\right] - f_s = f_s\left(\frac{v_{rel}}{c}\right)\left(2 + \frac{v_{rel}}{c}\right)$$

Il valore numerico di $v_{rel}/c$ è $(39\ m/s)/(3{,}0 \cdot 10^8\ m/s) = 13 \cdot 10^{-8}$. Poiché è molto più piccolo di 2, il termine $(2 + v_{rel}/c)$ è praticamente uguale a 2. Quindi la differenza richiesta è:

$$f_o' - f_s = f_s\left(\frac{v_{rel}}{c}\right)(2) = (8{,}0 \cdot 10^9\ Hz)\left(\frac{39\ m/s}{3{,}0 \cdot 10^8\ m/s}\right)(2) = \boxed{2{,}1 \cdot 10^3\ Hz}$$

**Fisica quotidiana**

L'effetto Doppler in astronomia

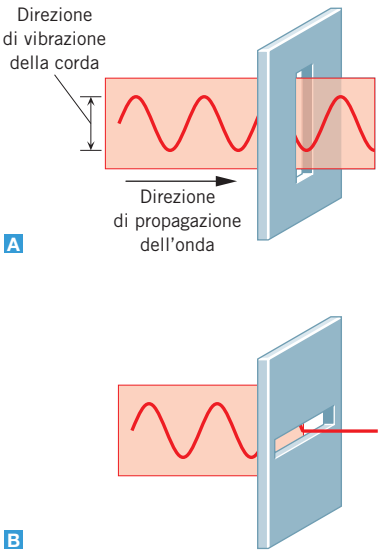



**Figura 24.19**

Un'onda trasversale è polarizzata linearmente quando le sue oscillazioni hanno luogo sempre lungo una direzione.
Un'onda linearmente polarizzata su una corda può attraversare una fenditura che è parallela alla direzione di vibrazione della corda (A), ma non può passare attraverso una fenditura che è perpendicolare alla direzione di vibrazione (B)..

L'effetto Doppler delle onde elettromagnetiche offre un potente strumento agli astronomi. Per esempio, nel capitolo 10 abbiamo visto come gli astronomi abbiano identificato un buco nero supermassivo al centro della galassia M87 usando il telescopio Hubble. Essi hanno puntato il telescopio su regioni opposte rispetto al centro della galassia (figura 10.14). Analizzando la luce emessa da queste regioni sono stati in grado mediante l'effetto Doppler di determinare che un lato della galassia si allontana dalla Terra mentre l'altro lato si avvicina. In altre parole, la galassia sta ruotando. Le velocità di allontanamento e di avvicinamento consentono agli astronomi di determinare la velocità di rotazione della galassia; l'esempio 5 del capitolo 10 mostra come dal valore di questa velocità si risale all'individuazione di un buco nero.

Gli astronomi misurano frequentemente l'effetto Doppler della luce che giunge sulla Terra da parti remote dell'Universo. Attraverso questi studi hanno determinato le velocità con cui gli oggetti celesti luminosi si stanno allontanando dalla Terra.

## 24.8 La polarizzazione delle onde elettromagnetiche

### Polarizzazione lineare

Una delle caratteristiche principali delle onde elettromagnetiche è che sono onde trasversali e a causa di ciò possono essere polarizzate. La figura 24.19 illustra il concetto di **polarizzazione** mostrando un'onda trasversale che si propaga su una corda verso una fenditura. L'onda è **polarizzata linearmente**: ciò significa che vibra lungo una sola direzione, detta direzione di polarizzazione. Nella parte A della figura la direzione di polarizzazione è verticale e parallela alla fenditura, che quindi è attraversata dall'onda con facilità. Quando invece la fenditura è perpendicolare alla direzione di polarizzazione, come nella parte B, l'onda non può passare perché la fenditura impedisce alla corda di oscillare.

Nel caso di onde longitudinali, come le onde sonore, la nozione di polarizzazione non ha nessun significato. In un'onda longitudinale la direzione di polarizzazio-



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

ne è anche quella di propagazione, per cui l'orientazione della fenditura non ha alcun effetto sull'onda.

In un'onda elettromagnetica, come quella vista in figura 24.6, il campo elettrico oscilla lungo l'asse $y$, mentre il campo magnetico oscilla lungo l'asse $z$. Quindi l'onda è polarizzata linearmente, con la direzione di polarizzazione che per convenzione scegliamo uguale a quella in cui oscilla il campo elettrico. Se l'onda è un'onda radio emessa da un'antenna a filo rettilineo, la direzione di polarizzazione è determinata dall'orientazione dell'antenna.

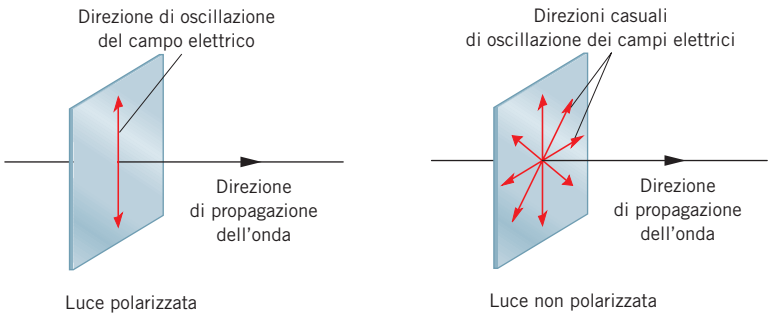



**Figura 24.20**
Nella luce polarizzata il campo elettrico delle onde elettromagnetiche oscilla lungo una data direzione. La luce non polarizzata consiste di brevi impulsi di onde elettromagnetiche emesse da atomi diversi. Le direzioni dei campi elettrici di questi impulsi sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda ma sono distribuite a caso attorno a essa.

La luce visibile emessa da una lampadina a incandescenza è invece formata da onde elettromagnetiche completamente non polarizzate. In questo caso le onde sono emesse da un gran numero di atomi del filamento incandescente della lampadina. Quando l'elettrone di un atomo oscilla, l'atomo si comporta come un'antenna in miniatura che irradia luce per un brevissimo intervallo di tempo, circa $10^{-8}$ s. Tuttavia le direzioni di queste antenne atomiche cambiano in modo casuale per effetto degli urti a livello atomico. La luce non polarizzata quindi consiste di molte onde diverse, emesse in brevissimi brillamenti da parte di «antenne atomiche», ciascuna con la propria direzione di polarizzazione.

La figura 24.20 confronta luce polarizzata e luce non polarizzata. Nel caso di luce non polarizzata, le frecce mostrano le direzioni casuali di polarizzazione delle singole onde che formano la luce.

## I polarizzatori

La luce polarizzata può essere prodotta a partire da luce non polarizzata utilizzando particolari materiali, uno dei quali è disponibile sul mercato con il nome di Polaroid. Questi materiali consentono di essere attraversati solo dalla componente del campo elettrico in una particolare direzione, mentre assorbono le componenti del campo perpendicolari a questa direzione.

Come mostra la figura 24.21, la direzione di polarizzazione che riesce ad attraversare il materiale si dice **asse di trasmissione**. Indipendentemente dall'orientazione di questo asse, l'irradiamento della luce polarizzata trasmessa è la metà di quello della luce incidente non polarizzata. La ragione di ciò è che la luce non polarizzata contiene tutte le direzioni di polarizzazione. Inoltre il campo elettrico lungo ciascuna direzione può essere scomposto in una componente parallela e una perpendicolare all'asse di trasmissione, con il risultato che le componenti medie parallela e perpendicolare all'asse sono uguali. Quindi il materiale polarizzatore assorbe tanto campo elettrico, e magnetico, quanto ne trasmette.

**Problem solving**

**L'effetto del polarizzatore**

Ricorda che quando luce non polarizzata incide su un polarizzatore, solo metà della luce incidente viene trasmessa, mentre l'altra metà viene assorbita dal polarizzatore.

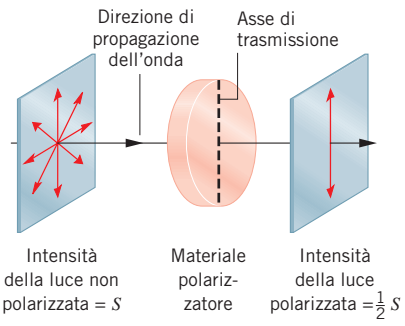



**Figura 24.21**
Con l'aiuto di un foglio di materiale polarizzatore, si produce luce polarizzata a partire da luce non polarizzata. L'asse di trasmissione del materiale è la direzione di polarizzazione della luce che passa attraverso il materiale.

## Legge di Malus

Dopo aver prodotto luce polarizzata mediante un materiale polarizzatore, è possibile usare un secondo materiale polarizzatore per cambiare la direzione di polarizzazione e contemporaneamente modificare l'intensità della luce.

Nella figura 24.22 a pagina seguente il primo materiale è detto **polarizzatore** mentre il secondo è detto **analizzatore**. L'asse di trasmissione dell'analizzatore è orientato secondo un angolo $\theta$ rispetto all'asse di trasmissione del polarizzatore. Se il modulo del campo elettrico della luce polarizzata incidente sull'analizzatore è $E$,



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

il modulo del campo che attraversa l'analizzatore è la componente parallela all'asse di trasmissione, cioè $E \cos \theta$. Di conseguenza l'irradiamento medio della luce polarizzata che attraversa l'analizzatore è proporzionale a $\cos^2 \theta$. Quindi sia la direzione di polarizzazione sia l'irradiamento della luce trasmessa possono essere variati ruotando l'asse di trasmissione dell'analizzatore rispetto a quello del polarizzatore. L'irradiamento medio $\bar{S}$ della luce che esce dall'analizzatore è dunque:

**LEGGE DI MALUS**

$$\bar{S} = \bar{S}_0 \cos^2 \theta \qquad (24.13)$$

dove $\bar{S}_0$ è l'irradiamento medio della luce che entra nell'analizzatore.

Tale relazione è detta **legge di Malus**, dal nome dell'ingegnere francese Étienne-Louis Malus (1775-1812).

Quando $\theta = 90°$, come nella figura 24.22, gli assi di trasmissione del polarizzatore e dell'analizzatore sono perpendicolari: perciò non viene trasmessa alcuna luce.

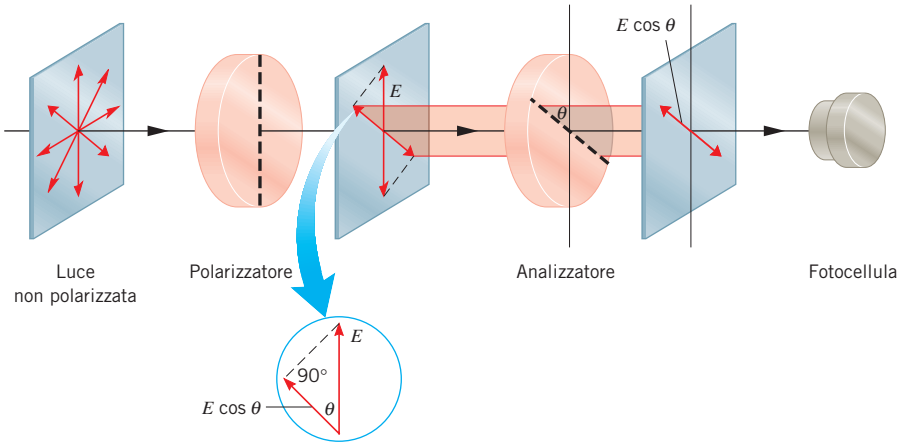



**Figura 24.22**
Mediante due fogli di materiale polarizzatore, detti polarizzatore e analizzatore, si può modificare la direzione e l'intensità della luce che raggiunge la fotocellula. Basta cambiare l'angolo $\theta$ fra gli assi di trasmissione del polarizzatore e dell'analizzatore.

**ESEMPIO 4 ■ Legge di Malus**

### Passa o non passa?

Supponiamo di inserire un terzo foglio di materiale polarizzatore fra il polarizzatore e l'analizzatore di figura 24.22. Gli assi di trasmissione di questi ultimi sono perpendicolari fra loro.

▶ La luce raggiunge la fotocellula?

### Ragionamento e soluzione

La risposta è sì, anche se polarizzatore e analizzatore hanno gli assi di trasmissione perpendicolari fra loro (figura 24.23A). Per comprenderne il motivo notiamo che, se la luce passa attraverso l'analizzatore, deve avere una componente del campo elettrico parallela al suo asse di trasmissione. Se il terzo foglio non è inserito tale componente non esiste. Ma se il foglio è inserito questa componente c'è, come mostrano le parti B e C della figura. La parte B mostra che il campo elettrico $E$ della luce che esce dal polarizzatore forma un angolo $\theta$ con l'asse di trasmissione del terzo foglio. La componente del campo parallela all'asse di trasmissione è $E \cos \theta$ e attraversa il foglio. La parte C mostra che il campo ($E \cos \theta$) incidente sull'analizzatore ha una componente parallela all'asse di trasmissione dell'analizzatore, precisamente ($E \cos \theta$) sen $\theta$. Tale componente attraversa l'analizzatore e quindi la luce raggiunge la fotocellula.

**La luce raggiunge la fotocellula quando l'angolo $\theta$ è compreso fra 0° e 90°.** Se l'angolo è 0° o 90° la luce non giunge alla fotocellula.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

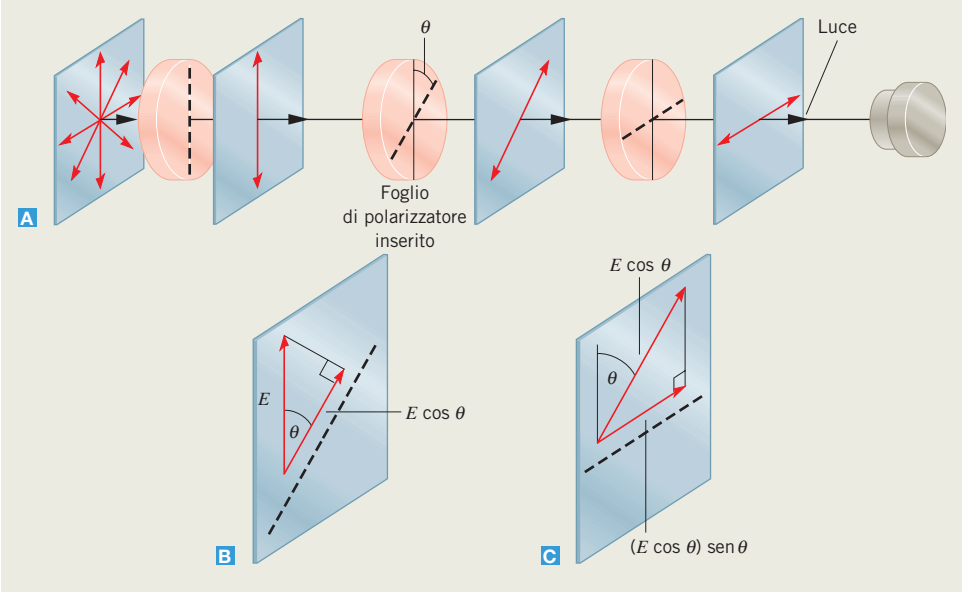



**Figura 24.23**

**A.** La luce raggiunge la fotocellula quando un foglio di materiale polarizzatore è inserito fra il polarizzatore e l'analizzatore che hanno gli assi di trasmissione perpendicolari. **B.** La componente del campo elettrico parallela all'asse di trasmissione del foglio inserito è $E \cos \theta$. **C.** La luce incidente sull'analizzatore ha una componente $(E \cos \theta) \operatorname{sen} \theta$ parallela al suo asse di trasmissione.

## I visori LCD

**Fisica quotidiana**
Il visore a cristalli liquidi

I **visori a cristalli liquidi** (LCD, *liquid crystal display*) sono comunemente usati nelle calcolatrici tascabili e nei telefoni cellulari. Il visore consiste di lettere e numeri neri su sfondo grigio chiaro, come mostra la figura **24.24**: ogni lettera o numero è formato da segmenti di cristalli liquidi che sono stati «accesi» e appaiono neri.

**Figura 24.24**

I visori a cristalli liquidi (LCD) usano segmenti di cristalli liquidi per formare i numeri.

Questi segmenti costituiti da cristalli liquidi sono inseriti fra due elettrodi trasparenti, come mostra la figura **24.25**. Quando si applica una differenza di potenziale agli elettrodi, si dice che i cristalli liquidi sono «accesi». La parte **A** della figura mostra che la luce incidente polarizzata linearmente attraversa i cristalli liquidi «accesi» senza che sia modificata la direzione della sua polarizzazione. Quando non vi è una differenza di potenziale fra gli elettrodi, come nella parte **B**, i cristalli liquidi sono «spenti» e ruotano di 90° la direzione di polarizzazione.

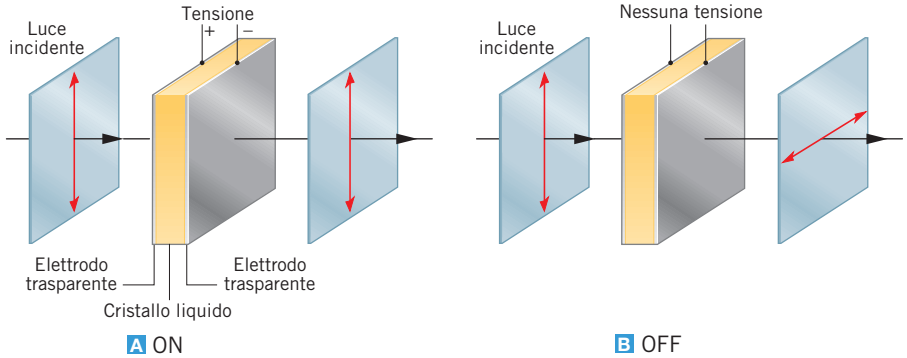



**Figura 24.25**

Un cristallo liquido nel suo stato (**A**) «acceso» e (**B**) «spento».



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

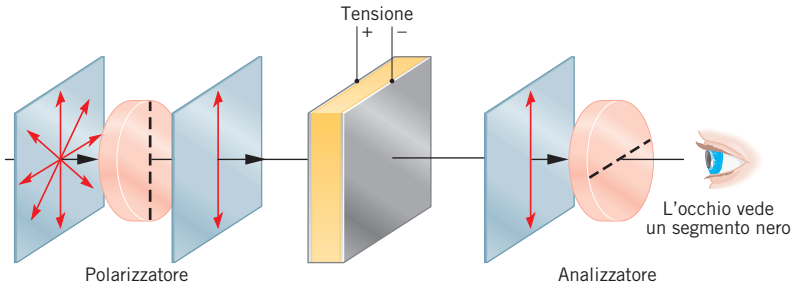



**Figura 24.26**

Un LCD contiene una combinazione polarizzatore-analizzatore con gli assi di trasmissione perpendicolari fra loro. Quando il segmento LCD è «acceso» mediante una differenza di potenziale attraverso l'analizzatore non passa luce e l'osservatore vede un segmento nero.

Un segmento completo è formato anche da un sistema polarizzatore-analizzatore con assi di trasmissione perpendicolari fra loro, come mostra la figura 24.26. Il polarizzatore produce luce polarizzata a partire da luce incidente non polarizzata. Quando il segmento del visore è acceso, come in figura 24.26, la luce polarizzata esce dal polarizzatore ma viene assorbita dall'analizzatore perché è polarizzata perpendicolarmente all'asse di trasmissione dell'analizzatore. Poiché dall'analizzatore non esce alcuna luce, un osservatore vede un segmento nero su uno sfondo grigio chiaro, come in figura 24.24. Quando il segmento è spento, i cristalli liquidi ruotano di 90° la direzione di polarizzazione della luce, che è così parallela all'asse dell'analizzatore. La luce ora passa attraverso l'analizzatore e raggiunge l'occhio dell'osservatore. La luce uscente dal segmento è però stata progettata in modo da avere lo stesso colore e la stessa intensità dello sfondo del visore, per cui il segmento è indistinguibile dallo sfondo.

I **monitor LCD a colori** sono ormai comunemente utilizzati nei televisori e nei computer perché occupano meno spazio e pesano molto meno dei tradizionali tubi a raggi catodici. Un monitor LCD, come per esempio quello di figura 24.27, usa migliaia di segmenti LCD disposti in una matrice. Per riprodurre i colori, sono raggruppati insieme tre segmenti a formare un pixel. Opportuni filtri colorati fanno sì che in ogni pixel un segmento produca il rosso, uno il verde e uno il blu. L'occhio mescola poi i colori di tutti i pixel e restituisce i colori composti. Variando l'intensità dei colori rosso, verde e blu il pixel può generare l'intero spettro dei colori.

© Diane Schiumo/Fundamental Photographs

**Figura 24.28**

Quando gli occhiali Polaroid hanno gli assi di trasmissione paralleli (foto in alto) la luce trasmessa è meno intensa a causa del maggior assorbimento da parte della plastica scura. Tuttavia, quando gli assi sono perpendicolari fra loro (foto in basso) l'intensità della luce trasmessa si annulla a causa degli effetti di polarizzazione.

**Figura 24.27**

Vuoi vedere una tua fotografia? Guarda il display LCD del tuo telefono cellulare.

© Rubberball/Getty Images, Inc.

## Polarizzazione per riflessione

Consideriamo un fascio di luce che incide su una superficie non metallica. Se l'angolo d'incidenza è diverso da zero, il fascio riflesso è parzialmente polarizzato nella direzione parallela alla superficie. Per verificarlo basta osservare la superficie di un lago con un paio di occhiali Polaroid, le cui lenti sono polarizzatori con asse di trasmissione verticale (figura 24.28).



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

L'irradiamento della luce trasmessa dalle lenti è minimo quando gli occhiali sono indossati in modo normale, cioè con l'asse di trasmissione perpendicolare al terreno. Questo significa che la luce riflessa dal lago è parzialmente polarizzata in direzione orizzontale.

Si dimostra che la luce riflessa è totalmente polarizzata per un particolare angolo d'incidenza, detto **angolo di Brewster** $\theta_B$ dal nome del fisico scozzese David Brewster (1781-1868). Il valore dell'angolo di Brewster si calcola mediante la relazione:

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \qquad (24.14)$$

dove $n_1$ è l'indice di rifrazione del materiale in cui si propaga il raggio riflesso e $n_2$ è l'indice di rifrazione del materiale in cui si propaga il raggio rifratto. Come mostra la figura 24.29, quando l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di Brewster, il raggio riflesso e il raggio rifratto sono perpendicolari fra loro.

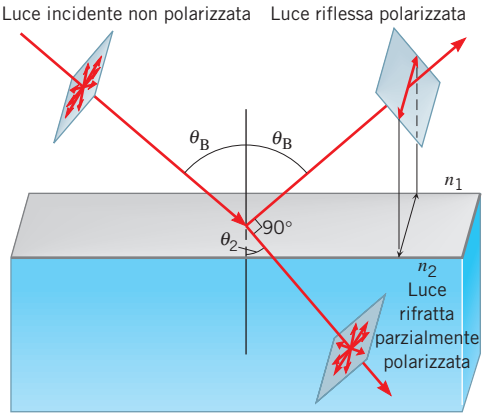



**Figura 24.29**
Quando il fascio di luce non polarizzata incide su una superficie non metallica con l'angolo di Brewster $\theta_B$, il fascio riflesso è totalmente polarizzato in una direzione parallela alla superficie. Il raggio riflesso e il raggio rifratto sono perpendicolari fra loro.

## Polarizzazione per diffusione

La luce polarizzata ha origine anche dalla diffusione della luce da parte delle molecole dell'atmosfera. La figura 24.30 mostra la luce diffusa da una singola molecola atmosferica. Il campo elettrico della radiazione solare non polarizzata fa oscillare gli elettroni delle molecole in direzione perpendicolare a quella in cui la luce si propaga. A loro volta gli elettroni irradiano onde elettromagnetiche in varie direzioni, come mostra la figura. La luce emessa in avanti ($A$) è non polarizzata, proprio come la luce incidente. Ma la luce $C$ emessa perpendicolarmente alla direzione della luce incidente è polarizzata. La luce emessa nelle direzioni intermedie ($B$) è parzialmente polarizzata.

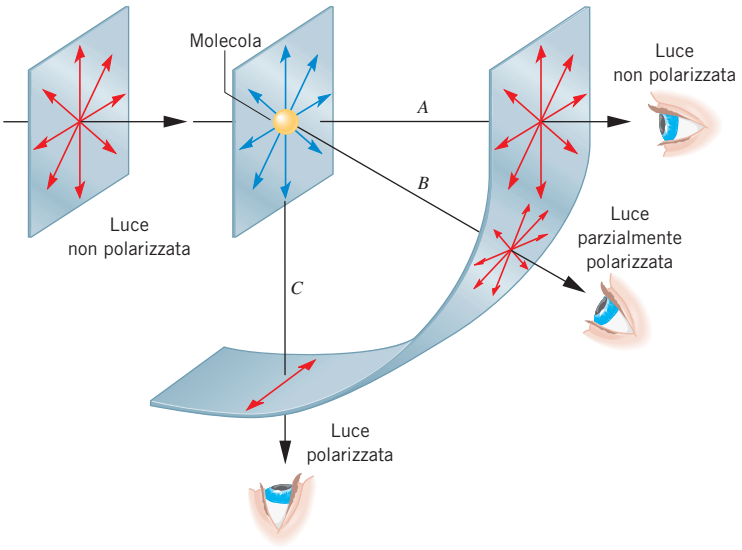



**Figura 24.30**
Nella diffusione da parte delle molecole dell'atmosfera la luce solare non polarizzata diventa parzialmente polarizzata.

**Fisica quotidiana**
Gli occhiali Polaroid



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

# Il campo elettromagnetico

## Conoscenze intorno al 1820

Al principio del 1820 esistevano tre scienze distinte dei fenomeni elettromagnetici: elettrostatica, magnetismo e «galvanismo».

Dopo i pionieristici lavori dell'americano Benjamin Franklin fu il francese Charles-Augustin Coulomb, con una serie di memorie negli anni 1780, a dimostrare la validità della legge dell'inverso del quadrato della distanza per l'interazione tra cariche elettriche.

L'elettrostatica fu in seguito portata ad alto grado di perfezione matematica da Siméon-Denis Poisson, il quale negli anni 1820 completò anche una teoria matematica dei fenomeni magnetici. I fenomeni legati alla corrente elettrica traevano origine dal nome di Luigi Galvani, scopritore intorno al 1780 dell'elettricità animale; fu Alessandro Volta, tuttavia, a rendersi conto della natura elettrica del galvanismo e a giungere nel 1800 all'invenzione della pila.

Molti, tra cui lo stesso Volta, assegnavano alla corrente una natura simile all'elettricità statica.

## Da Oersted a Faraday

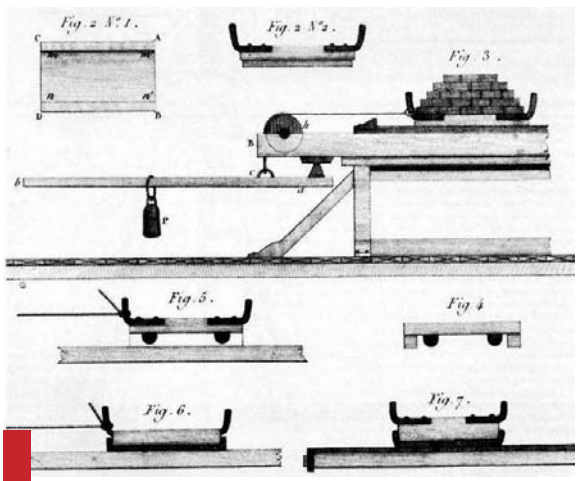
Nel 1820 il danese Christian Oersted, guidato dall'idea romantica dell'unità e dell'interconvertibilità delle manifestazioni della «forza» in natura, scopre che un filo percorso da corrente è in grado di deviare un ago magnetico posto nelle sue vicinanze, in misura proporzionale all'intensità della corrente. È il primo passo dell'«abbraccio» tra elettricità e magnetismo.

Dopo pochi mesi il francese André-Marie Ampère espone una teoria dell'interazione tra fili percorsi da corrente nella quale dimostra che è possibile spiegare i fenomeni conosciuti mediante forze elementari dirette lungo la congiungente gli elementi di filo che le generano e che si propagano in misura proporzionale all'inverso del quadrato della distanza. L'ipotesi-base di Ampère è l'equivalenza tra un magnete e una spira percorsa da corrente: in questa visione il magnetismo è un fenomeno derivato, riconducibile all'azione di correnti.

Nel 1821 l'inglese Michael Faraday si rende conto che un ago magnetico spostato intorno a un filo percorso da corrente viene da questa fatto ruotare in modo continuo. Pur ammirando la teoria di Ampère, Faraday si convince che in elettromagnetismo l'interazione primaria non è rettilinea, ma rotazionale. In quell'anno elabora il concetto secondo cui un filo percorso da corrente è circondato da una *linea di forza* magnetica: quello di linea di forza sarà lo strumento concettuale base per le sue ricerche.

Nel 1831 scopre l'induzione elettromagnetica, cioè che una variazione di corrente in un circuito induce una corrente in un altro circuito. Pochi mesi dopo ripete l'esperimento sostituendo il circuito primario con un magnete e osservando che una corrente transitoria insorge ogni volta che il magnete viene avvicinato o allontanato dal circuito secondario. Da una parte Faraday aveva in questo modo accertato la produzione di correnti elettriche a partire dal magnetismo; dall'altra dai suoi esperimenti emergeva una sorta di identità di azione tra magneti e circuiti percorsi da corrente.

Ciò lo indusse a riflettere sul fatto che un conduttore sottoposto all'indu-




Schizzi di apparati sperimentali utilizzati da Charles-Augustin Coulomb.

Ritratto di Michael Faraday al lavoro nel suo laboratorio.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

zione doveva venirsi a trovare in qualche stato di tensione, cui dette il nome di «stato elettrotonico», senza riuscire a entrare in maggior dettaglio. Nel 1834 scoprì l'autoinduzione (cioè che l'induzione agisce anche sul circuito primario) e nel 1845 dimostrò la rotazione del piano di polarizzazione della luce sotto l'azione di un magnete, mostrando il legame tra magnetismo e luce. Infine, nel 1852 riassunse in un importante lavoro la sua teoria sul comportamento delle linee di forza.

## Dall'azione a distanza al campo

Nel Settecento e nei primi decenni dell'Ottocento l'idea newtoniana che i corpi interagissero direttamente per mezzo di «azioni a distanza» dominò la fisica. Profonde modifiche a questa concezione giunsero dalla teoria ondulatoria della luce di Jean Augustin Fresnel e dalla teoria della propagazione del calore di Jean-Baptiste Fourier.

In entrambi i casi, all'azione diretta a distanza veniva sostituita una propagazione indiretta di effetti trasportati da un mezzo non necessariamente specificato. Nella teoria di Fourier, in particolare, l'idea sottostante è la propagazione di un flusso di calore $Q$ dovuto a una differenza di temperatura $I$: $Q = kI$, dove la quantità dell'effetto $Q$ è proporzionale all'intensità $I$, ovvero al «motore» che produce l'effetto. La relazione quantità-intensità si prestava a spiegare la propagazione non solo del calore, ma anche di altre entità, come la forza, identificata come un flusso di materia in moto. Questa possibilità fu sfruttata da William Thomson (il futuro Lord Kelvin), il quale nel 1845-51 costruì una teoria dell'elettrostatica basata sulle analogie matematiche con la teoria di Fourier.

Ma soprattutto fu sfruttata da James Clerk Maxwell, il quale, partendo dalle raffigurazioni e dal comportamento fisico delle linee di forza di Faraday, giunse, con una serie di lavori tra il 1854 e il 1868, alla moderna teoria dell'elettromagnetismo basata sul concetto di *campo*, «quella parte di spazio che contiene e circonda i corpi nella condizione elettrica o magnetica», nel quale le interazioni elettromagnetiche si propagano «senza supporre l'esistenza di forze capaci di agire direttamente a distanze sensibili», e che ha sede in un mezzo unico per fenomeni elettromagnetici e luce (l'etere).

Così Maxwell scriveva nel 1865: «La teoria che io propongo, quindi, può essere chiamata teoria del campo elettromagnetico, perché riguarda lo spazio nelle vicinanze dei corpi elettrici e magnetici e può essere chiamata una teoria dinamica perché essa suppone che in questo spazio si trovi della materia in movimento, attraverso cui si producono i fenomeni elettromagnetici osservati».

Nella sua opera l'abbraccio tra elettricità e magnetismo è ormai completo: una variazione di corrente induce un campo magnetico e viceversa. A colpi di induzione elettrica e magnetica la perturbazione si propaga sotto forma di onde a una velocità $c$ pari a quella della luce, identificata fin dal 1862 da Maxwell come fenomeno elettromagnetico.

La sintesi della sua teoria fu pubblicata nel 1873 nell'ostico *Treatise on Electricity and Magnetism*, le cui equazioni furono in seguito rese più accessibili da altri scienziati quali l'olandese Hendrik Lorentz e il tedesco Heinrich Hertz, il quale rivelò sperimentalmente alla fine del 1887 le onde elettromagnetiche previste dalla teoria di Maxwell.

Pochi anni dopo Einstein avrebbe mostrato che i fenomeni elettromagnetici non avevano bisogno di alcun mezzo per propagarsi. Oggi il concetto di campo è divenuto così familiare (si pensi alla desolata constatazione «non c'è campo») che si tende a darlo per scontato, dimenticando la rivoluzione che la sua nascita rappresentò per la fisica.

Alessandro Volta dimostra il funzionamento della pila a Napoleone in un dipinto di Giuseppe Bertini.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

# L'ordine di grandezza

## Quanta energia solare investe ogni anno l'Italia?

*Per calcolare quanta energia solare investe l'Italia ogni anno, bisogna moltiplicare l'energia media quotidiana che investe ogni metro quadrato del suolo italiano per la superficie totale del nostro Paese.*

### IL MODELLO

(energia solare annua che investe l'Italia) = 365 (irraggiamento solare medio quotidiano del territorio italiano per $m^2$) (superficie del territorio italiano)

### I NUMERI

- **Irraggiamento solare medio quotidiano del territorio italiano per $m^2$** =
= (potenza istantanea media che colpisce l'unità di superficie) (numero di secondi in 1 giorno) =
= $(1{,}68 \cdot 10^2\ J/s \cdot m^2)\ (8{,}64 \cdot 10^4\ s) = 1{,}5 \cdot 10^7\ J/m^2$ =
= $4{,}2\ kW \cdot h/m^2$

- **Superficie del territorio italiano** =
= $324\,000\ km^2 \approx 3{,}2 \cdot 10^{11}\ m^2$

### IL RISULTATO

energia solare annua che investe l'Italia =
= $3{,}65 \cdot 10^2\ (4{,}2\ kW \cdot h/m^2)\ (3{,}2 \cdot 10^{11}\ m^2)$ =
= $4{,}6 \cdot 10^{14}\ kW \cdot h$ =
= $4{,}6 \cdot 10^5\ TW \cdot h$

L'ordine di grandezza è: $10^5\ TW \cdot h$

L'energia solare che investe ogni anno l'Italia ammonta a $4{,}6 \cdot 10^5\ TW \cdot h$.

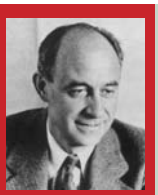
**Un paragone** Considerando che il consumo annuo di energia elettrica in Italia è di circa $3{,}3 \cdot 10^2\ TW \cdot h$, l'energia solare che investe l'Italia è 1400 volte superiore alla quantità consumata. Purtroppo, però, convertire l'energia solare che investe il territorio in energia elettrica effettivamente utilizzabile non è facile.

### Le fonti

**Potenza istantanea media che colpisce la superficie:** IPCC, Intergovernal Panel on Climate Change (www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/041.htm#121)

**Superficie del territorio italiano:** *Atlante,* Zanichelli

## Stima l'ordine di grandezza



**Qual è la percentuale del territorio italiano che bisognerebbe coprire con moduli fotovoltaici per soddisfare il fabbisogno annuo di energia elettrica dell'Italia?**

### IL MODELLO

(percentuale di territorio coperta da moduli fotovoltaici) = (superficie di moduli fotovoltaici necessaria per soddisfare la domanda di energia elettrica) / (superficie del territorio italiano)

### I NUMERI

**Superficie di moduli fotovoltaici necessaria per soddisfare la domanda di energia elettrica** =
= (energia elettrica consumata annualmente in Italia) / [(irraggiamento solare medio annuo italiano) (efficienza dei moduli fotovoltaici)]
**Energia elettrica consumata annualmente in Italia** = $3{,}3 \cdot 10^2\ TW \cdot h$
**Efficienza dei moduli fotovoltaici** = 13%

### IL RISULTATO

Percentuale di territorio coperta da moduli fotovoltaici = ..... %

### Le fonti

**Energia elettrica consumata annualmente in Italia:** IEA, International Energy Agency, *Key world energy statistics*, pag. 52 (www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf)

**Efficienza dei moduli fotovoltaici:** *Energia: la promessa che viene dal Sole*, Le Scienze, 453, maggio 2006



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 1. Le equazioni dei campi elettrostatico e magnetostatico

**Equazioni del campo elettrostatico $\vec{E}$**

- Teorema di Gauss $\Phi_S(\vec{\mathbf{E}}) = \dfrac{Q_T}{\varepsilon_0}$ (24.1)
- Conservatività del campo $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = 0$ (24.2)

**Equazioni del campo magnetostatico $\vec{B}$**

- Teorema di Gauss $\Phi_S(\vec{\mathbf{B}}) = 0$ (24.3)
- Teorema di Ampère $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0 \sum_j I_j$ (24.4)

## 2. Campi che variano nel tempo

**Il campo elettrico indotto non è conservativo**

- La legge di Faraday-Neumann-Lenz:

$$\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = -\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t} \qquad (24.5)$$

dove $\gamma$ è il bordo della superficie sulla quale è calcolato il flusso del campo $\vec{\mathbf{B}}$, è una generalizzazione dell'equazione (24.2), a cui si riduce quando il flusso magnetico è costante nel tempo. La circuitazione del campo elettrico indotto è diversa da zero: quindi il campo elettrico indotto non è un campo conservativo.

**Corrente di spostamento**

- Le sorgenti di campo non sono solo le correnti elettriche ma anche le variazioni di flusso elettrico, come stabilisce il teorema di Ampère generalizzato:

$$\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0\left(\sum_j I_j + \varepsilon_0\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}\right) \qquad (24.6)$$

dove il flusso del campo elettrico è calcolato attraverso una superficie avente come bordo la curva $\gamma$. Il termine $\varepsilon_0\dfrac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}$ è detto corrente di spostamento.

## 3. Le equazioni di Maxwell

**Equazioni del campo elettromagnetico**

- Il comportamento del campo elettromagnetico è regolato dalle equazioni di Maxwell:

| | | |
|---|---|---|
| Teorema di Gauss | $\Phi_S(\vec{\mathbf{E}}) = \dfrac{Q_T}{\varepsilon_0}$ | (24.1) |
| Legge di Faraday-Neumann-Lenz | $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{E}}) = -\dfrac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t}$ | (24.5) |
| Teorema di Gauss | $\Phi_S(\vec{\mathbf{B}}) = 0$ | (24.3) |
| Teorema di Ampère generalizzato | $\Gamma_\gamma(\vec{\mathbf{B}}) = \mu_0\left(\sum_j I_j + \varepsilon_0\dfrac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{E}})}{\Delta t}\right)$ | (24.6) |

## 4. Le onde elettromagnetiche

**Propagazione e velocità**

- Un'onda elettromagnetica consiste di campi elettrici e campi magnetici oscillanti perpendicolari fra loro. L'onda è trasversale perché i campi sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. Le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto o nei materiali. Le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto alla velocità della luce:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\,\mu_0}} \qquad (24.7)$$

dove $\varepsilon_0$ è le costante dielettrica del vuoto e $\mu_0$ è la permeabilità magnetica del vuoto.
In ogni punto dello spazio, i campi elettrico e magnetico di un'onda elettromagnetica oscillano in fase con la stessa frequenza.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 5. Lo spettro elettromagnetico

**Relazione tra frequenza, lunghezza d'onda e velocità**

- La frequenza $f$ e la lunghezza d'onda $\lambda$ di un'onda elettromagnetica nel vuoto sono legate alla sua velocità dalla relazione:

$$c = f\lambda$$

**Spettro elettromagnetico e luce visibile**

- L'insieme delle onde elettromagnetiche, ordinate in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda, formano lo spettro elettromagnetico.
  All'aumentare della frequenza, o al diminuire della lunghezza d'onda, lo spettro include onde radio, microonde, radiazione infrarossa, luce visibile, radiazione ultravioletta, raggi X e raggi gamma. La luce visibile ha lunghezze d'onda comprese fra 380 nm (violetto) e 750 nm (rosso). L'occhio e il cervello umano percepiscono differenti frequenze come colori diversi.

## 6. L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica

**Densità di energia totale**

- La densità di energia totale $u$ di un'onda elettromagnetica nel vuoto è:

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}B^2 \qquad (24.8a)$$

dove $E$ e $B$ sono i moduli rispettivamente dei campi elettrico e magnetico dell'onda. Poiché le densità di energia elettrica e magnetica sono uguali, le seguenti equazioni sono equivalenti all'equazione (24.8a):

$$u = \varepsilon_0 E^2 \qquad (24.8b)$$

$$u = \frac{1}{\mu_0}B^2 \qquad (24.8c)$$

**Relazione tra campo elettrico e campo magnetico**

- Nel vuoto $E$ e $B$ sono legati dalla relazione:

$$E = cB \qquad (24.9)$$

**Campo efficace**

- Le equazioni (24.8a-c) consentono di determinare la densità di energia totale media a partire dai valori efficaci $E_{\text{eff}}$ e $B_{\text{eff}}$:

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}}E_0$$

$$B_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}}B_0$$

**Irradiamento**

- L'irradiamento di un'onda elettromagnetica è il rapporto fra la potenza elettromagnetica che attraversa perpendicolarmente una superficie e l'area della superficie. Nel vuoto l'irradiamento $S$ è legato alla densità di energia $u$ dalla relazione:

$$S = cu \qquad (24.10)$$

## 7. L'effetto Doppler

**Effetto Doppler**

- Quando le onde elettromagnetiche, la sorgente e l'osservatore si muovono lungo la stessa direzione nel vuoto l'effetto Doppler è dato da:

$$f_o = f_s\left(1 \pm \frac{v_{\text{rel}}}{c}\right) \quad \text{se} \quad v_{\text{rel}} \ll c \qquad (24.12)$$

dove $f_o$ e $f_s$ sono rispettivamente la frequenza osservata e la frequenza emessa dalla sorgente e $v_{\text{rel}}$ è la velocità relativa fra osservatore e sorgente. Il segno + si usa quando la sorgente e l'osservatore si avvicinano, mentre il segno − si usa quando si allontanano.



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

## 8. La polarizzazione delle onde elettromagnetiche

**Onda elettromagnetica polarizzata linearmente**

- In un'onda elettromagnetica polarizzata linearmente l'oscillazione del campo elettrico avviene lungo una data direzione, detta direzione di polarizzazione. Anche il campo magnetico oscilla lungo una direzione, che è perpendicolare a quella del campo elettrico.

**Onda elettromagnetica non polarizzata**

- In un'onda non polarizzata, come la luce emessa da un filamento incandescente, la direzione di polarizzazione non rimane fissa ma fluttua in modo casuale nel tempo.

**Materiali polarizzatori e asse di trasmissione**

- I materiali polarizzatori si fanno attraversare dalla componente del campo elettrico (e dalla associata componente del campo magnetico) parallela a una data direzione. La direzione di trasmissione del campo elettrico è detta asse di trasmissione del materiale.

**Irradiamento della luce polarizzata**

- Quando una luce non polarizzata incide su un materiale polarizzatore, la luce polarizzata trasmessa ha un irradiamento uguale alla metà di quello incidente.

**Polarizzatore e analizzatore Legge di Malus**

- Quando due fogli di materiale polarizzatore sono usati in successione, il primo è detto polarizzatore e il secondo analizzatore. Se l'irradiamento medio della luce polarizzata incidente sull'analizzatore è $\bar{S}_0$, l'irradiamento medio $\bar{S}$ della luce che esce dall'analizzatore è dato dalla legge di Malus:

$$\bar{S} = \bar{S}_0 \cos^2 \theta \qquad (24.13)$$

dove $\theta$ è l'angolo fra gli assi di trasmissione del polarizzatore e dell'analizzatore.

# Esercizi

## Domande

**1** Quale dei seguenti concetti si applica sia alle onde sonore sia alle onde elettromagnetiche: intensità, polarizzazione?

**2** Un'antenna trasmittente è posta nell'origine di un sistema di assi $x$, $y$, $z$ e invia un'onda elettromagnetica il cui campo elettrico oscilla lungo l'asse $y$. L'onda si propaga lungo l'asse $x$. Per ricevere l'onda sono disponibili tre antenne a spira collocate rispettivamente una nel piano $xy$, una nel piano $xz$ e una nel piano $yz$. Quale antenna riceve l'onda?

**3** Un astronomo misura la variazione Doppler della frequenza emessa da una stella. A partire da questa misura può stabilire se la stella si sta avvicinando o allontanando dalla Terra?

**4** C'è una reale differenza fra polarizzatore e analizzatore? In altri termini: possono essere usati uno al posto dell'altro?

**5** La legge di Malus è applicata al dispositivo della figura 24.22, in cui il polarizzatore è fisso mentre l'analizzatore è ruotato di un angolo $\theta$. La legge di Malus si può applicare anche nel caso in cui l'analizzatore è fisso e il polarizzatore ruota?

**6** In un giorno di sole sei sulle sponde di un lago e indossi gli occhiali Polaroid. Quando ti sdrai su un fianco, i tuoi occhiali sembrano funzionare male. Perché?



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

# Test

**1** Quali delle seguenti equazioni devono essere modificate nel caso di campi variabili nel tempo?
A. Teorema di Gauss per il campo $E$.
B. Conservatività del campo $E$.
C. Teorema di Gauss per il campo $B$.
D. Teorema di Ampère.
[A] A e B.
[B] A e C.
[C] B e C.
[D] B e D.

**2** Quale fra le seguenti è una forma equivalente alla legge di Faraday-Neumann-Lenz $\mathscr{E} = -\dfrac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$
[A] $\Gamma_\gamma(\vec{E}) = -\dfrac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$
[B] $\Gamma_\gamma(\vec{B}) = -\dfrac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t}$
[C] $\Gamma_\gamma(\vec{B}) = \mu_0\left(\sum_j I_J + \varepsilon_0 \dfrac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t}\right)$
[D] $\Phi_S(\vec{B}) = 0$

**3** Quale fra le seguenti non è un'equazione di Maxwell?
[A] $\Phi_\gamma(\vec{E}) = -\dfrac{\Delta\Gamma(\vec{B})}{\Delta t}$
[B] $\Phi_S(\vec{B}) = 0$
[C] $\Gamma_\gamma(\vec{B}) = \mu_0\left(\sum_j I_J + \varepsilon_0 \dfrac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t}\right)$
[D] $\Phi_S(\vec{E}) = \dfrac{Q_T}{\varepsilon_0}$

**4** Indicate con $Y$ la corrente di conduzione concatenata alla curva chiusa $\gamma$ e con $X$ la corrente di spostamento che attraversa una superficie di bordo $\gamma$, il teorema di Ampère generalizzato si scrive:
[A] $\Phi_\gamma(\vec{B}) = -\dfrac{\Delta(X+Y)}{\Delta t}$
[B] $\Gamma_\gamma(\vec{E}) = \mu_0\left(\dfrac{Y + \varepsilon_0\Delta X}{\Delta t}\right)$
[C] $\Gamma_\gamma(\vec{E}) = \mu_0(Y + X)$
[D] $\Gamma_\gamma(\vec{E}) = -\dfrac{\Delta\Phi(Y+X)}{\Delta t}$

**5** Quale delle seguenti affermazioni relative alle onde elettromagnetiche è falsa?
[A] Si propagano nel vuoto.
[B] Sono onde longitudinali.
[C] Trasferiscono energia nello spazio.
[D] Sono state previste da Maxwell.

**6** Quale fra le seguenti non è una sorgente di onde elettromagnetiche?
[A] Un elettrone che sta decelerando.
[B] Un protone che si muove di moto armonico.
[C] Una corrente continua.
[D] Una corrente alternata.

**7** Quali delle seguenti non sono onde elettromagnetiche?
[A] Onde radio.
[B] Onde sonore.
[C] Microonde.
[D] Raggi X.

**8** Ordina per frequenze crescenti le seguenti onde elettromagnetiche: 1, raggi X; 2, onde radio; 3, raggi gamma; 4, luce visibile; 5, infrarossi; 6, ultravioletti.
[A] 2, 3, 4, 5, 6, 1.
[B] 2, 5, 4, 1, 6, 3.
[C] 2, 5, 4, 6, 1, 3.
[D] 3, 1, 6, 4, 5, 2.

**9** Ordina per lunghezze d'onda crescenti i colori visibili: Blu (B), Verde (V), Rosso (R), Violetto (Vi), Giallo (G).
[A] R, G, V, B, Vi.
[B] Vi, B, V, G, R.
[C] B, V, G, R, Vi.
[D] G, R, Vi, V, B.

**10** Un telefono cellulare emette onde elettromagnetiche con frequenza di 935 MHz. Qual è la loro lunghezza d'onda?
[A] 0,0106 m
[B] 0,321 m
[C] 0,642 m
[D] 1,22 m

**11** Il campo elettrico di un'onda elettromagnetica ha il valore massimo di 250 N/C. Qual è l'irradiamento medio dell'onda?
[A] 0,66 W/m$^2$
[B] 0,89 W/m$^2$
[C] 83 W/m$^2$
[D] 120 W/m$^2$

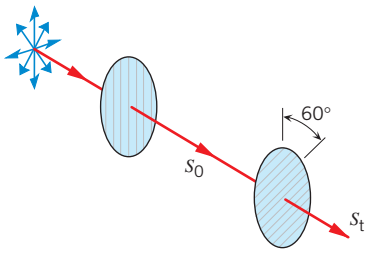
**12** Il campo elettrico di un'onda elettromagnetica ha il valore massimo di 10 N/C. Qual è il valore efficace del campo magnetico dell'onda?
[A] $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ T
[B] $2{,}4 \cdot 10^{-8}$ T
[C] $3{,}3 \cdot 10^{-7}$ T
[D] $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ T

**13** Un astronomo osserva l'emissione di atomi di ossigeno in una galassia distante e misura una frequenza di $5{,}710 \cdot 10^{14}$ Hz. In laboratorio quella stessa emissione ha una frequenza di $5{,}841 \cdot 10^{14}$ Hz. Qual è la velocità della galassia rispetto alla Terra? ($c = 2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)
[A] Si allontana a $6{,}724 \cdot 10^6$ m/s.
[B] Si avvicina a $6{,}724 \cdot 10^6$ m/s.
[C] Si allontana a $4{,}369 \cdot 10^4$ m/s.
[D] Si avvicina a $4{,}369 \cdot 10^4$ m/s.


Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

**14** Un fascio di luce non polarizzata con irradiamento $S_0$ passa attraverso due polarizzatori. Gli assi di trasmissione dei polarizzatori formano un angolo di 60° (figura). Qual è l'irradiamento del fascio trasmesso?

A 0
B $S_0/2$
C $S_0/4$
D $S_0/8$




**15** Un raggio di luce incide su una lastra di plastica secondo l'angolo di Brewster. L'angolo di rifrazione è 35,0°. Quanto vale l'angolo di Brewster?

A 35,0°
B 43,5°
C 46,5°
D 55,0°

# Problemi

## 4. Le onde elettromagnetiche

**1** Quando guardi la stella Polare la stai vedendo com'era 680 anni fa.

▶ Quanto dista dalla Terra?

**2** Due astronauti sono nella nave spaziale a una distanza di 1,5 m fra loro. La loro conversazione è inviata alla Terra mediante onde elettromagnetiche. Il tempo che impiegano le onde sonore per coprire a 343 m/s la distanza fra i due è uguale a quello che le onde elettromagnetiche impiegano per arrivare alla Terra.

▶ Quanto è distante l'astronave dalla Terra?

**3** La distanza fra lo specchio e la sorgente di luce nell'esperimento originario di Michelson era 35 km (figura 24.3).

▶ Calcola la minima velocità angolare (in giri/secondo) dello specchio rotante.

**4** Due specchi paralleli sono posizionati fra due colline. Un cacciatore spara un colpo di fucile vicino a uno di essi. La velocità del suono è 343 m/s.

▶ Quante volte il bagliore dello sparo viaggia da uno specchio all'altro prima che arrivi il suono sull'altra collina?

**5** La distanza fra la Terra e la Luna è $3{,}85 \cdot 10^8$ m.

▶ Calcola il tempo che impiega un'onda radio a coprire tale distanza.

**6** Durante un brillamento solare sono emessi raggi X. La distanza Terra-Sole è $1{,}50 \cdot 10^{11}$ m.

▶ Quanti minuti impiegano i raggi X a raggiungere la Terra?

**7** In astronomia le distanze sono spesso espresse in anni-luce. Un anno-luce è la distanza percorsa dalla luce in un anno. La stella più vicina dopo il Sole è Alpha Centauri e dista 4,3 anni-luce.

▶ Esprimi questa distanza in metri.

**8** Le stazioni radio FM trasmettono con frequenze comprese fra 88,0 MHz e 108 MHz. Supponi che l'induttanza della figura 24.8 sia $L = 6{,}00 \cdot 10^{-7}$ H.

▶ Determina l'intervallo di valori di capacità necessari perché l'antenna riceva tutti i segnali inviati da quelle stazioni radio.

**9** * L'equazione $y = A \text{ sen } (2\pi ft - 2\pi x/\lambda)$ è la rappresentazione matematica di un'onda che oscilla lungo $y$ e si propaga lungo il verso positivo di $x$. Supponi che $y$ sia il campo elettrico di un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto. Il valore massimo del campo elettrico è 156 N/C e la frequenza è $1{,}50 \cdot 10^8$ Hz.

▶ Traccia il grafico dell'intensità del campo elettrico rispetto alla posizione usando per $x$ i valori 0 m; 0,50 m; 1,00 m; 1,50 m; 2,00 m.

Traccia questi grafici per:

▶ $t = 0$ s.

▶ per un istante di tempo uguale a un quarto del periodo.

## 5. Lo spettro elettromagnetico

**10** Calcola la lunghezza d'onda nel vuoto:

▶ della luce blu (frequenza $6{,}34 \cdot 10^{14}$ Hz);

▶ della luce arancione (frequenza $4{,}95 \cdot 10^{14}$ Hz).

Esprimi i risultati in nanometri.

**11** Alcuni televisori portatili usano un'antenna a due baffi, che consiste in una coppia di aste metalliche. La lunghezza di ciascuna asta è regolata per essere un quarto della lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica di



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

frequenza 60,0 MHz.

▶ Quanto è lunga ogni asta?

**12** L'occhio umano ha la maggiore sensibilità per la luce di $5{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz nella zona giallo-verde dello spettro.

▶ Quante lunghezze d'onda di questa luce corrispondono alla larghezza del pollice, circa 2,0 cm?

**13** * Le onde elettromagnetiche possono formare onde stazionarie come le onde elastiche su una corda. In un forno a microonde la distanza fra un nodo e un antinodo è 0,50 cm.

▶ Qual è la frequenza delle microonde?

## 6. L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica

**14** A laser emits a narrow beam of light. The radius of the beam is $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ m, and the power is $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ W.

▶ What is the intensity of the laser beam?

**15** Un laser industriale è utilizzato per forare il metallo. L'irradiamento medio della luce è $\bar{S} = 1{,}23 \cdot 10^9$ W/m$^2$. Qual è il valore efficace:

▶ del campo elettrico?

▶ del campo magnetico delle onde elettromagnetiche emesse dal laser?

**16** La radiazione di microonde rilasciata durante il Big Bang ha una densità di energia di $4 \cdot 10^{-14}$ J/m$^3$.

▶ Qual è il valore efficace del campo elettrico di questa radiazione?

**17** Un laser al neodimio emette brevi impulsi di onde elettromagnetiche molto intense. Il campo elettrico di queste onde ha un valore efficace $E_{\text{eff}} = 2{,}0 \cdot 10^9$ N/C.

▶ Calcola la potenza media di ciascun impulso che attraversa una superficie di $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ m$^2$ perpendicolare al fascio laser.

**18** L'irradiamento medio della luce solare nell'alta atmosfera è 1390 W/m$^2$.

▶ Qual è la massima energia che può raccogliere un pannello solare di 25 m × 54 m in un'ora?

**19** La distanza media Terra-Sole è $1{,}50 \cdot 10^{11}$ m. L'irradiamento medio della radiazione solare nell'alta atmosfera è 1390 W/m$^2$. Il Sole irradia uniformemente in tutte le direzioni.

▶ Calcola la potenza totale irradiata dal Sole.

**20** * Un laser a ioni di argon emette un fascio di luce cilindrico di potenza media 0,750 W.

▶ Quanta energia è contenuta in 2,5 m di fascio?

**21** * Un'onda elettromagnetica incide perpendicolarmente su una sezione di 1,30 cm$^2$ di parete. Il valore efficace del campo magnetico dell'onda è $6{,}80 \cdot 10^{-4}$ T.

▶ Quanto tempo impiega l'onda per trasportare sulla parete un'energia di 1850 J?

**22** * Il raggio di Mercurio è $2{,}44 \cdot 10^6$ m e la sua distanza media dal Sole è $5{,}79 \cdot 10^{10}$ m. Il Sole irradia uniformemente in tutte le direzioni.

▶ Quale frazione dell'energia irradiata dal Sole è intercettata dal pianeta Mercurio?

## 7. L'effetto Doppler

**23** Una galassia emette luce con una lunghezza d'onda di 434,1 nm. Sulla Terra la lunghezza d'onda di questa luce è 438,6 nm.

▶ Stabilisci se la galassia si sta avvicinando o allontanando dalla Terra.

▶ Calcola la velocità della galassia relativa alla Terra.

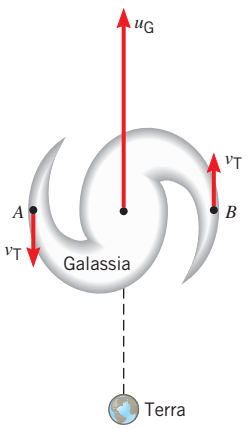
**24** Un rapinatore viaggia a forte velocità e supera un'auto della Polizia che si sposta a 25 m/s. Il telerilevatore laser della Polizia emette onde elettromagnetiche di frequenza $7{,}0 \cdot 10^9$ Hz. L'auto del rapinatore riflette le onde verso l'auto della Polizia che misura una frequenza minore di 320 Hz rispetto a quella inviata.

▶ Calcola la velocità del rapinatore rispetto al terreno.

**25** ** Una galassia ruota su se stessa e contemporaneamente si allontana dalla Terra. Come mostra la figura, il centro galattico si allontana a una velocità di $u_G = 1{,}6 \cdot 10^6$ m/s dalla Terra. Rispetto al centro la velocità tangenziale è $v_T = 0{,}4 \cdot 10^6$ m/s nei punti $A$ e $B$ equidistanti dal centro. Misurate sulla Terra, le frequenze emesse dalla zona $A$ e dalla zona $B$ differiscono di $6{,}200 \cdot 10^{14}$ Hz. Calcola le frequenze effettivamente misurate che provengono:

▶ dalla zona $A$

▶ dalla zona $B$.




## 8. La polarizzazione delle onde elettromagnetiche

**26** Un fascio di luce non polarizzata con un irradiamento di 1,10 W/m$^2$ incide sul polarizzatore di figura 24.22.

▶ Qual è l'irradiamento della luce che attraversa il polarizzatore?

▶ Se l'analizzatore è posto a un angolo $\theta = 75°$ rispetto al polarizzatore, qual è l'irradiamento della luce che raggiunge la fotocellula?

**27** Un fascio di luce polarizzata linearmente incide su un polarizzatore. Qual è il rapporto fra irradiamento tra-



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

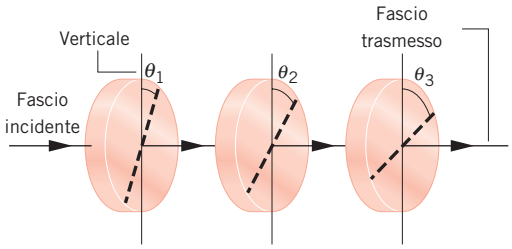
smesso e irradiamento incidente quando l'angolo fra l'asse di trasmissione e il campo elettrico incidente:

▶ 25°?

▶ 65°?

**28** Per ciascuno dei tre polarizzatori in figura è mostrato l'angolo che l'asse di trasmissione forma con la verticale. Il fascio incidente non è polarizzato e ha un irradiamento di 1260,0 W/m$^2$.

▶ Qual è l'irradiamento del fascio trasmesso attraverso i tre polarizzatori quando $\theta_1 = 19{,}0°$, $\theta_2 = 55{,}0°$ e $\theta_3 = 100{,}0°$?




**29** * L'irradiamento della luce che raggiunge la fotocellula di figura **24.23A** è 110 W/m$^2$ quando $\theta = 23°$.

▶ Quale sarebbe l'irradiamento se l'analizzatore fosse rimosso?

**30** Un raggio di luce si riflette su un vetro. Quando incide con un angolo di 56,7° la luce riflessa è polarizzata in direzione orizzontale.

▶ Qual è l'indice di rifrazione del vetro?

**31** * Un fascio di luce incide dall'aria sulla superficie di un liquido. L'angolo d'incidenza è 53,0° e l'angolo di rifrazione è 34,0°.

▶ A quale angolo d'incidenza la luce riflessa è totalmente polarizzata?

**32** * Quando la luce incide da sopra sulla superficie di separazione di due mezzi, l'angolo di Brewster è 65,0°.

▶ Qual è l'angolo di Brewster quando la luce incide sulla stessa superficie, però da sotto?

## PROBLEMI FINALI

**33** Qual è la frequenza di raggi X con lunghezza d'onda di 2,1 nm?

**34** L'intensità massima del campo magnetico di un'onda elettromagnetica è $3{,}3 \cdot 10^{-6}$ T.

▶ Qual è la massima intensità del campo elettrico dell'onda?

**35** Una stazione radio AM trasmette onde di frequenza 1400 kHz. Il valore della capacità della figura **24.8** è $8{,}4 \cdot 10^{-11}$ F.

▶ Quale dev'essere il valore dell'autoinduttanza perché questa stazione sia ricevuta dall'apparecchio radio?

**36** Nel futuro, l'energia per il funzionamento di una stazione spaziale orbitante potrà essere inviata dalla Terra mediante un fascio di onde elettromagnetiche. Supponiamo che il fascio abbia una sezione di 135 m$^2$ e una potenza media di $1{,}20 \cdot 10^4$ W.

▶ Calcola i valori efficaci del campo elettrico e magnetico.

**37** Supponi che l'auto della Polizia di figura **24.18** si muova verso destra a 27 m/s e l'altra auto sopraggiunga alla velocità di 39 m/s rispetto al terreno. Il telerilevatore laser ha una frequenza di $8{,}0 \cdot 10^9$ Hz.

▶ Calcola la differenza tra la frequenza delle onde riflesse dall'auto verso la Polizia e la frequenza originaria.

**38** Nel dispositivo polarizzatore-analizzatore di figura **24.22** il 90,0% dell'irradiamento della luce che incide sull'analizzatore viene assorbito.

▶ Calcola l'angolo fra gli assi di trasmissione del polarizzatore e dell'analizzatore.

**39** * Le onde elettromagnetiche inviate da una chiamata con un telefono cellulare verso un'automobile hanno un campo magnetico efficace di $1{,}5 \cdot 10^{-10}$ T. Le onde attraversano perpendicolarmente un finestrino aperto di area 0,20 m$^2$.

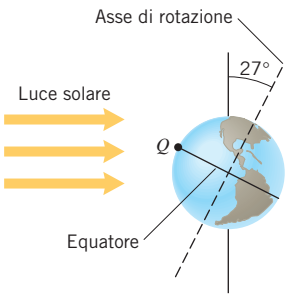
▶ Quanta energia attraversa il finestrino in una chiamata di 45 s?

**40** * Un fascio di luce polarizzata con un irradiamento medio di 15 W/m$^2$ attraversa un polarizzatore. L'asse di trasmissione forma un angolo di 25° con la direzione di polarizzazione.

▶ Calcola il valore efficace del campo elettrico del fascio trasmesso.

**41** * La potenza irradiata dal Sole è $3{,}9 \cdot 10^{26}$ W. La Terra orbita attorno al Sole a una distanza media di $1{,}50 \cdot 10^{11}$ m. L'asse terrestre è inclinato di 27° rispetto al piano dell'orbita (figura), per cui la luce solare non incide perpendicolarmente sull'equatore.

▶ Quale potenza incide su 0,75 m$^2$ di un terreno pianeggiante nel punto $Q$ sull'equatore?




**42** ** Una lampada emette radiazione infrarossa con un campo elettrico efficace di 2800 N/C.

▶ Qual è l'irradiamento medio?

▶ La radiazione è inviata sulla gamba di un paziente attraverso un foro circolare di raggio 4,0 cm. Qual è la potenza media trasmessa alla gamba?

▶ La parte di gamba irradiata ha una massa di 0,28 kg e un calore specifico di 3500 J/(kg · °C). Supponendo

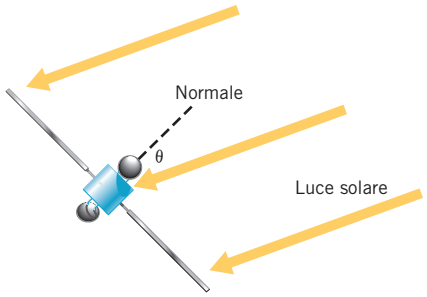


Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010

che la parte di gamba non riceva né rilasci altra energia oltre quella irradiata su di essa, la sua temperatura quanto impiega ad aumentare di 2,0 °C?

**43** * La figura mostra una vista dall'alto dei pannelli solari di un satellite per telecomunicazioni. La linea tratteggiata è la normale ai pannelli solari. La luce solare incide sui pannelli con un angolo $\theta$ rispetto alla normale. Quando $\theta = 65°$, sui pannelli incide una potenza di 2600 W.

▶ Qual è la potenza quando $\theta = 25°$?




## QUESITI

**1** Analizza il ruolo di unificazione e di sintesi svolto per l'elettromagnetismo dalle equazioni di Maxwell.

**2** Che cosa s'intende per corrente di spostamento?

**3** Illustra l'effetto Doppler per le onde elettromagnetiche.

**4** Illustra le caratteristiche dei raggi X e dei raggi gamma.

**5** Descrivi il fenomeno della polarizzazione delle onde elettromagnetiche.

## OLIMPIADI DELLA FISICA

**1** Sia la radiazione ultravioletta sia gli ultrasuoni possono:
A trasportare energia anche nel vuoto.
B essere polarizzati.
C produrre fotoemissioni di elettroni dai metalli.
D dar luogo a diffrazione e interferenza.
E viaggiare alla velocità della luce.
(*Gara di 1° livello edizione 2003*)

**2** I segnali radio della sonda spaziale *Voyager 1* hanno continuato a essere ricevuti sulla Terra anche quando la sonda era ben oltre l'orbita di Nettuno. La potenza della trasmissione è $P = 23$ W. Supponendo che l'antenna direzionale emetta la radiazione in un cono equivalente a $10^{-4}$ di semisfera, e considerando una distanza sonda-Terra $d = 50$ UA (la sonda fu lanciata il 5 settembre 1977; attualmente, secondo stime elaborate dalla NASA, la sonda potrebbe trovarsi a una distanza dalla Terra di circa 80 UA), calcola la potenza ricevuta sulla Terra da un'antenna parabolica avente diametro $D = 40$ m.
*Nota*: 1 UA $\approx 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m.
(*Gara di 2° livello edizione 2004*)

## TEST DI AMMISSIONE ALL'UNIVERSITÀ

**1** Che cosa distingue le onde elettromagnetiche luminose da quelle radio?
A L'intensità.
B La lunghezza d'onda.
C L'energia trasportata in un secondo.
D La distanza a cui possono arrivare.
(*Concorso a borse di studio per l'iscrizione ai corsi di laurea della classe «Scienze e Tecnologie Fisiche» della SIF, 2006-2007*)

**2** Con riferimento alla radiazione X, indica quale tra le seguenti affermazioni è giusta [1 Å (angstrom) = $10^{-10}$ m].
A Un fascio di radiazione X, quando attraversa la materia e non interagisce, aumenta la sua velocità di propagazione.
B Un fascio di radiazione X, quando attraversa la materia e non interagisce, diminuisce la sua velocità di propagazione.
C Un'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda uguale a $10^4$ Å può essere una radiazione X.
D Un'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda uguale a 0,1 Å può essere una radiazione X.
E La velocità di propagazione della radiazione X nel vuoto è tanto maggiore quanto maggiore è la sua energia.
(*Prova di ammissione al corso di laurea in Medicina e Chirurgia, 2001-2002*)

**3** Che cosa sono i raggi infrarossi?
A Sono raggi di natura elastica, come il suono, ma con frequenza diversa.
B Sono raggi di natura elettromagnetica, che in assenza di dispositivi speciali non possono essere visti dall'occhio umano normale.
C Sono i raggi luminosi che danno origine alla nostra (umana) sensazione del colore violetto.
D Non sono onde elettromagnetiche, ma di altra natura.
E Sono ultrasuoni.
(*Prova di ammissione al corso di laurea in Odontoiatria e Protesi Dentaria, 1999-2000*)

## PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

**1** L'intensità della luce proveniente da un polarizzatore è 9,6 W/m$^2$. Incide su un analizzatore, orientato a un angolo di 60° rispetto al polarizzatore. A che valore si riduce l'intensità dopo aver attraversato anche l'analizzatore?
(*Esame di Fisica, corso di laurea in Biotecnologie, Università degli Studi di Torino, 2004-2005*)

**2** Le onde radio ricevute da un apparecchio hanno $E = 10^{-1}$ V/m. Assumendo che l'onda sia piana, calcola l'ampiezza del campo magnetico.
(*Esame di Fisica, corso di laurea in Biotecnologie, Università degli Studi di Torino, 2004-2005*)



Copyright © 2010 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [6759]
Questo file è una estensione online del corso J. D. Cutnell, K. W. Johnson, *Elementi di fisica* © Zanichelli 2010