CAPITOLO

10

Le onde elettromagnetiche

«L'accordo dei risultati sembra mostrare che la luce e il magnetismo sono affezioni della stessa sostanza, e che la luce è una perturbazione elettromagnetica che si propaga attraverso il campo secondo le leggi dell'elettromagnetismo.» — James Clerk Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1865) (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Riconoscere che un campo magnetico variabile genera un campo elettrico e che un campo elettrico variabile genera un campo magnetico.
2. Esporre a parole i quattro messaggi delle equazioni di Maxwell e calcolare la velocità della luce dalle costanti elettriche e magnetiche.
3. Descrivere la struttura di un'onda elettromagnetica, come la producono le cariche accelerate e quanta energia trasporta.
4. Applicare la legge di Malus a uno o più polarizzatori e spiegare la polarizzazione per riflessione.
5. Collocare una radiazione nello spettro elettromagnetico, descriverne produzione, effetti e applicazioni, e distinguere radiazioni ionizzanti e non ionizzanti.
6. Spiegare qualitativamente l'effetto Doppler della luce e i suoi usi.

INDICE DEL CAPITOLO

10.1 Campi che si generano a vicenda 2
10.2 La sintesi di Maxwell 4
10.3 Le onde elettromagnetiche 6
10.4 La polarizzazione 11
10.5 Lo spettro elettromagnetico 15

Fisica 5 · Parte IV · Induzione e onde elettromagnetiche · versione 1.0
Capitolo 10: Le onde elettromagnetiche · pagine 279–304 del volume completo · estratto per lo studio

Il telefono che hai in tasca riceve in questo momento segnali partiti da un'antenna a qualche chilometro di distanza; la luce che illumina la pagina, se viene dal Sole, ha viaggiato per otto minuti attraverso lo spazio vuoto; il dentista, per vedere un dente dall'interno, usa raggi X. Onde radio, luce e raggi X sembrano cose diversissime: le prime attraversano i muri, la seconda no, i terzi attraversano la carne e si fermano sulle ossa. Eppure sono la stessa cosa: onde elettromagnetiche, che differiscono soltanto per la lunghezza d'onda.

Questo capitolo chiude il percorso cominciato con la carica elettrica. Nel capitolo 2 abbiamo preferito il campo all'azione a distanza, promettendo che la scelta si sarebbe giustificata del tutto più avanti: ora vedrai che un campo elettrico che cambia produce un campo magnetico e un campo magnetico che cambia produce un campo elettrico, e che i due, insieme, possono staccarsi dalle cariche e viaggiare nello spazio portando energia, alla velocità della luce. È la grande sintesi di James Clerk Maxwell, che fece dell'ottica un capitolo dell'elettromagnetismo.

10.1 Campi che si generano a vicenda

10.1.1 Il campo elettrico indotto

Riprendiamo una delle esperienze del capitolo 8: una spira ferma, attraversata da un campo magnetico che cresce. Nella spira circola una corrente indotta. Ma che cosa mette in moto gli elettroni del filo? Non la forza di Lorentz del capitolo 7, che agisce solo sulle cariche in movimento: gli elettroni, prima che la corrente parta, sono fermi. Su una carica ferma può agire soltanto un campo elettrico. Dunque, dove il campo magnetico cambia, nasce un **campo elettrico indotto** $\boldsymbol{E}$, ed è questo campo a spingere le cariche lungo la spira.

Il campo elettrico indotto è molto diverso da quello delle cariche ferme. Le linee del campo elettrostatico partono dalle cariche positive e finiscono su quelle negative; le linee del campo indotto non hanno né inizio né fine: si chiudono su sé stesse intorno alla regione in cui $\boldsymbol{B}$ cambia, come mostra la Figura 10.1a. Per questo il campo indotto non è conservativo: il lavoro che compie su una carica che percorre un giro intero non è zero, ma è proprio la f.e.m. indotta, il lavoro per unità di carica. Nel capitolo 3 un giro chiuso in un campo elettrostatico riportava la carica allo stesso potenziale; qui ogni giro le aggiunge energia, presa dal campo magnetico che cambia.

C'è un passo in più, decisivo. Il campo elettrico indotto esiste anche se la spira non c'è: il filo serve solo a rivelarlo, offrendo agli elettroni un percorso in cui muoversi. La legge di Faraday–Neumann, letta in questo modo, non parla più di circuiti ma di campi: **un campo magnetico variabile genera un campo elettrico**, con linee chiuse, in ogni punto dello spazio intorno.

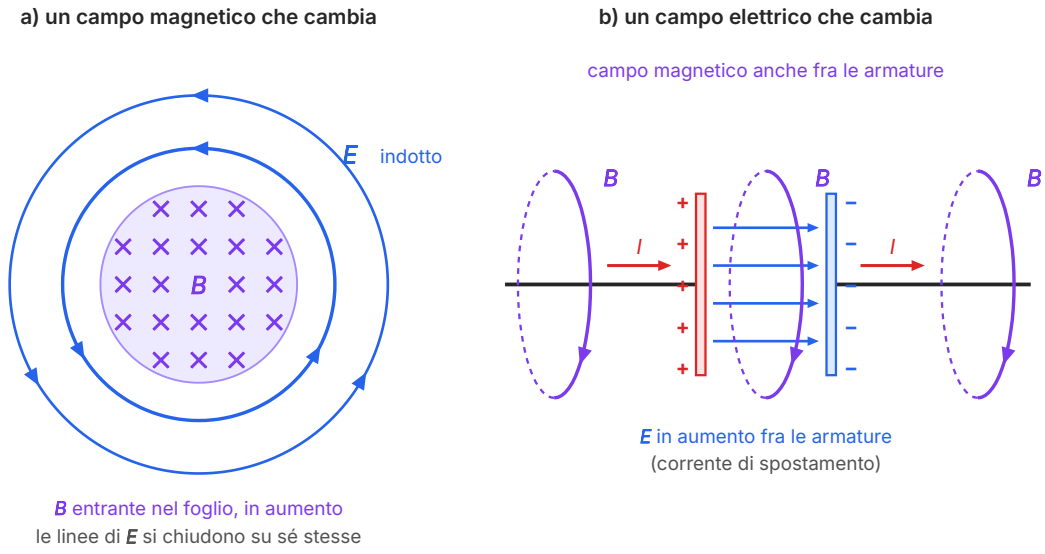


Figura 10.1 I due campi si generano a vicenda (schema). a) In una regione in cui il campo magnetico, entrante nel foglio, aumenta, nasce un campo elettrico indotto con linee chiuse, anche in assenza di conduttori. b) Mentre un condensatore si carica, fra le armature non passa corrente, ma il campo elettrico aumenta: intorno all'intervallo fra le armature c'è lo stesso campo magnetico che c'è intorno ai fili, come se la corrente proseguisse (corrente di spostamento).

10.1.2 La corrente di spostamento

La simmetria suggerisce la domanda inversa: un campo elettrico che cambia produce un campo magnetico? Per trovare la risposta guardiamo un condensatore piano che si sta caricando (Figura 10.1b). Nei fili circola una corrente I, e intorno ai fili c'è il campo magnetico di Oersted, con linee circolari (capitolo 6). Fra le armature, invece, non passa alcuna carica: c'è il vuoto, o un isolante. Eppure qualcosa cambia anche lì: la carica sulle armature cresce, e con essa il campo elettrico fra le armature, $E = \sigma/\varepsilon_0$ (capitolo 2).

Fra il 1861 e il 1865 Maxwell sostenne che il campo elettrico variabile fra le armature produce un campo magnetico esattamente come farebbe una corrente che attraversasse l'intervallo, e diede a questa «corrente» che non trasporta cariche il nome di **corrente di spostamento**. Con la sua ipotesi il circuito torna, per così dire, chiuso: la corrente di conduzione nei fili prosegue, fra le armature, come corrente di spostamento, e il campo magnetico intorno al condensatore è lo stesso che c'è intorno ai fili. Nessuno, allora, aveva misurato quel campo: in un condensatore di laboratorio è debolissimo. Maxwell lo introdusse per ragioni teoriche, perché le leggi dell'elettromagnetismo restassero coerenti anche quando le correnti non percorrono un circuito chiuso. La conferma sarebbe arrivata vent'anni dopo, in modo indiretto e spettacolare, con la scoperta delle onde.

Il risultato si enuncia in modo simmetrico al precedente: **un campo elettrico variabile genera un campo magnetico**, con linee chiuse intorno alla regione in cui il campo elettrico cambia.

10.2 La sintesi di Maxwell

10.2.1 Quattro messaggi

Nel 1865 Maxwell presentò alla Royal Society di Londra la memoria *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* («Una teoria dinamica del campo elettromagnetico»), e nel 1873 raccolse tutto nei due volumi del *Treatise on Electricity and Magnetism*. In forma moderna la sua teoria si riassume in quattro relazioni fra i campi, le **equazioni di Maxwell**. Per scriverle servono strumenti matematici che vedrai, se mai, all'università; ma il loro contenuto fisico si può dire a parole, e lo conosci già quasi tutto: è riassunto nella Tabella 10.1.

Tabella 10.1 I quattro «messaggi» delle equazioni di Maxwell, a parole. Insieme con la forza su una carica, $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$ più la forza di Lorentz, descrivono tutti i fenomeni elettrici e magnetici studiati in questo volume.

Messaggio	Che cosa dice	Da dove viene
1. Le cariche producono il campo elettrico	Le linee del campo elettrico partono dalle cariche positive e finiscono su quelle negative; il flusso del campo attraverso una superficie chiusa dipende solo dalla carica interna (teorema di Gauss).	Coulomb; capitoli 1 e 2
2. Non esistono cariche magnetiche isolate	Le linee del campo magnetico sono sempre chiuse: il flusso di $\boldsymbol{B}$ attraverso una superficie chiusa è zero.	il magnete spezzato; capitoli 6 e 7
3. Un campo magnetico variabile produce un campo elettrico	Dove $\boldsymbol{B}$ cambia nasce un campo elettrico con linee chiuse; in un circuito si manifesta come f.e.m. indotta.	Faraday, Neumann, Lenz; capitolo 8
4. Le correnti e i campi elettrici variabili producono un campo magnetico	Intorno a una corrente, e intorno a una regione in cui $\boldsymbol{E}$ cambia, nasce un campo magnetico con linee chiuse.	Oersted, Ampère (capitolo 6); Maxwell, corrente di spostamento

Le prime due righe riguardano campi che non cambiano nel tempo, e descrivono le sorgenti: le cariche per il campo elettrico, nessuna sorgente puntiforme per quello magnetico. Le ultime due legano i due campi fra loro, e sono quelle che contengono la novità. Nessuna delle quattro, presa da sola, era nuova; nuova era la quarta nella sua forma completa, e nuovo era l'insieme: un sistema chiuso di leggi da cui si poteva dedurre qualcosa che nessuno aveva ancora osservato.

10.2.2 Un'onda che si sostiene da sola

Immagina che in un punto dello spazio il campo elettrico cambi all'improvviso, per esempio perché una carica viene scossa. Per il quarto messaggio, intorno a quel punto nasce un campo magnetico variabile; per il terzo, intorno a questo nasce un campo elettrico variabile, un po' più in là; e così via. Ciascun campo genera l'altro un po' più lontano: la perturbazione si stacca dalla carica e si propaga da sola, senza bisogno di altro. È un'onda elettromagnetica, fatta soltanto di campi.

Dalle sue equazioni Maxwell ricavò anche la velocità di quest'onda nel vuoto, che dipende soltanto dalle due costanti che compaiono nelle leggi dell'elettricità e del magnetismo: la costante dielettrica del vuoto ε_0, che hai incontrato nella legge di Coulomb (capitolo 1), e la permeabilità magnetica del vuoto μ_0, che compare nel campo di un filo (capitolo 6):

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

Facciamo il calcolo con i valori della Tabella A.1: $\varepsilon_0 \mu_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m $\cdot\, 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A $= 1{,}112 \times 10^{-17}$ s^2/m^2, la cui radice quadrata è $3{,}335 \times 10^{-9}$ s/m; quindi $c = 1/(3{,}335 \times 10^{-9}$ s/m$) = 3{,}00 \times 10^8$ m/s. Due costanti misurate con cariche ferme e con correnti, sul tavolo di un laboratorio, danno esattamente la velocità della luce.

Ai tempi di Maxwell il rapporto fra le unità elettriche e quelle magnetiche, che equivale a $1/\sqrt{(\varepsilon_0 \mu_0)}$, era stato misurato nel 1856 da Wilhelm Weber e Rudolf Kohlrausch: circa $3{,}1 \times 10^8$ m/s, vicinissimo alle misure della velocità della luce fatte a Parigi da Fizeau e da Foucault. Già nel 1862, nella memoria *On Physical Lines of Force*, Maxwell ne aveva tratto la conclusione, e la scrisse in corsivo: «difficilmente possiamo evitare la deduzione che la luce consiste nelle ondulazioni trasversali dello stesso mezzo che è la causa dei fenomeni elettrici e magnetici» (traduzione della redazione). Tre anni dopo la ripeté in termini di campo: la luce è una perturbazione elettromagnetica (lo leggi nell'epigrafe del capitolo). Il «mezzo» di cui parla Maxwell è l'etere, che ritroverai, con i suoi problemi, all'inizio del prossimo capitolo.

COLLEGAMENTI

Filosofia: il campo è reale?

Nel capitolo 2 il campo era una comodità: per le cariche ferme dà le stesse previsioni dell'azione a distanza. Con le onde le cose cambiano. Se una carica viene scossa, un'altra carica lontana lo «sente» solo dopo il tempo che l'onda impiega ad arrivare: dalla Luna, più di un secondo. In quell'intervallo l'energia ha lasciato la prima carica e non è ancora arrivata alla seconda: se non vogliamo rinunciare alla conservazione dell'energia, dobbiamo dire che si trova nel campo, nello spazio fra le due. Il campo smette di essere un disegno e diventa un oggetto fisico, che ha energia e la trasporta.

È un esempio di come una teoria scientifica possa cambiare il catalogo di ciò che consideriamo reale. Su questo passaggio, dalla meccanica dei corpi a una fisica dei campi, Einstein e Infeld hanno scritto pagine famose (*L'evoluzione della fisica*, nella bibliografia del capitolo); il tema si collega alle discussioni sulla natura delle teorie scientifiche che incontrerai in filosofia, nella crisi del positivismo e nel Novecento.

10.3 Le onde elettromagnetiche

DA RICORDARE

Dal volume del quarto anno: le onde

Un'onda trasporta energia senza trasportare materia. In un'onda trasversale l'oscillazione è perpendicolare alla direzione di propagazione, in un'onda longitudinale è parallela. Un'onda periodica ha lunghezza d'onda λ, frequenza f e periodo $T = 1/f$, e si propaga con velocità $v = \lambda f$ (Fisica 4, capitolo 12).

L'intensità di un'onda è la potenza che attraversa l'unità di superficie perpendicolare alla direzione di propagazione, $I = P/S$, in $\mathrm{W/m^2}$; per una sorgente puntiforme che emette in tutte le direzioni, $I = P/(4\pi r^2)$, e diminuisce con il quadrato della distanza (Fisica 4, capitolo 13). La luce mostra interferenza e diffrazione, quindi è un'onda; nel vuoto viaggia a $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s (Fisica 4, capitolo 16).

10.3.1 Com'è fatta un'onda elettromagnetica

La Figura 10.2 mostra un'istantanea dell'onda elettromagnetica più semplice: un'onda armonica che si propaga lungo una direzione. In ogni punto il campo elettrico e il campo magnetico oscillano con la stessa frequenza e sono in fase: raggiungono insieme il massimo, si annullano insieme. Le loro direzioni sono perpendicolari fra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione: l'onda elettromagnetica è un'onda trasversale. Il verso di propagazione è quello in cui avanzerebbe una vite che ruota da $\boldsymbol{E}$ verso $\boldsymbol{B}$.

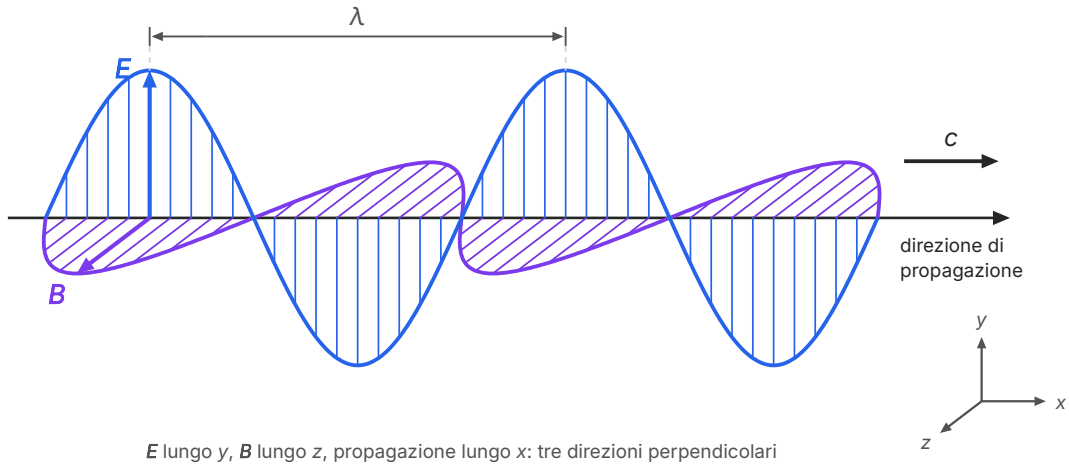


Figura 10.2 Un'onda elettromagnetica armonica in un istante (calcolata, in prospettiva). Il campo elettrico (blu) oscilla in un piano, il campo magnetico (viola) in un piano perpendicolare; i due campi sono in fase, e in ogni punto $E = cB$. L'onda avanza con velocità c e la configurazione si ripete ogni lunghezza d'onda λ. Per leggibilità i due campi sono disegnati con ampiezze simili.

Le teorie di Maxwell danno anche il rapporto fra i due campi: in ogni punto e in ogni istante, nel vuoto,

$$E = c\,B$$

Il campo magnetico di un'onda è quindi molto debole, se lo misuriamo in tesla. In un'onda con un campo elettrico di 30 V/m, un valore che si raggiunge vicino a un'antenna trasmittente, il campo magnetico vale $B = E/c = (30\ \text{V/m})/(3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s}) = 1{,}0 \times 10^{-7}$ T, cinquecento volte meno del campo magnetico terrestre. Non per questo è meno importante: come vedrai, l'energia dell'onda si divide in parti uguali fra i due campi.

Due caratteristiche distinguono le onde elettromagnetiche da quelle meccaniche di Fisica 4. La prima: **non hanno bisogno di un mezzo**. Il suono è un'oscillazione dell'aria e nel vuoto non si propaga; un'onda elettromagnetica è un'oscillazione dei campi, che esistono anche nel vuoto, e ci arriva dal Sole e dalle galassie più lontane. La seconda: nel vuoto **viaggiano tutte alla stessa velocità *c***, qualunque sia la loro frequenza. In un mezzo materiale, come il vetro o l'acqua, la velocità è minore, c/n (Fisica 4, capitolo 15), e dipende un poco dalla frequenza: è la dispersione che separa i colori in un prisma.

10.3.2 Chi produce le onde: le cariche accelerate

Una carica ferma ha intorno a sé soltanto un campo elettrico statico. Una carica che si muove di moto rettilineo uniforme si porta dietro il suo campo elettrico e produce anche un campo magnetico, ma non emette onde: in un sistema di riferimento che si muova con essa, sarebbe ferma. Le onde nascono quando la carica **accelera**: quando parte, frena, cambia direzione o oscilla. Ogni sorgente di onde elettromagnetiche, dall'antenna di una radio a una lampada, contiene in fondo cariche accelerate.

L'esempio più semplice è l'**antenna a dipolo** della Figura 10.3: due bacchette conduttrici allineate, collegate al centro a un generatore di tensione alternata. Gli elettroni oscillano su e giù lungo l'antenna con la frequenza del generatore, e le due metà diventano, alternativamente, positiva e negativa: è un dipolo elettrico (capitolo 2) che si inverte di continuo. L'antenna emette un'onda della stessa frequenza delle cariche che oscillano, e quindi di lunghezza d'onda $\lambda = c/f$; l'antenna funziona al meglio quando è lunga mezza lunghezza d'onda. L'emissione non è uguale in tutte le direzioni: è massima perpendicolarmente all'antenna e nulla lungo il suo asse, e il campo elettrico dell'onda emessa è parallelo all'antenna.

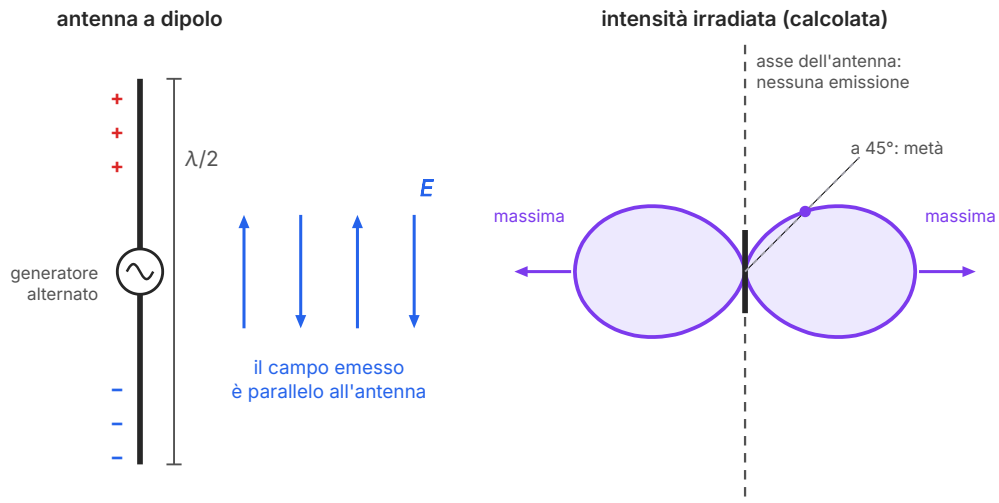


Figura 10.3 A sinistra, un'antenna a dipolo collegata a un generatore di tensione alternata, in un istante in cui la metà superiore è positiva; il campo elettrico dell'onda emessa è parallelo all'antenna. A destra, l'intensità irradiata nelle varie direzioni di un piano che contiene l'antenna (calcolata, proporzionale a sen^2 dell'angolo con l'asse): massima perpendicolarmente all'antenna, metà a 45°, nulla lungo l'asse.

Un'antenna ricevente funziona al contrario. Il campo elettrico dell'onda che arriva spinge avanti e indietro gli elettroni del conduttore, e nell'antenna circola una piccola corrente alternata con la frequenza dell'onda, che il ricevitore amplifica. Perché l'effetto sia massimo, l'antenna ri-

cevente dev'essere parallela al campo elettrico dell'onda, cioè all'antenna trasmittente: è anche per questo che le antenne televisive di uno stesso quartiere, rivolte allo stesso trasmettitore, hanno le aste orientate tutte allo stesso modo.

Allo stesso principio obbediscono sorgenti molto diverse. Nei tubi a raggi X, che incontrerai fra poco, elettroni accelerati da una differenza di potenziale di decine di migliaia di volt (capitolo 3) vengono frenati bruscamente contro un bersaglio metallico, ed emettono radiazione di lunghezza d'onda piccolissima. Negli atomi e nelle molecole, invece, sono le cariche legate a emettere e assorbire la luce, ma, come vedrai nel capitolo 13, la loro descrizione richiede una fisica nuova.

10.3.3 Hertz e Marconi

Maxwell morì nel 1879 senza vedere le sue onde. Le produsse e le rivelò Heinrich Hertz, a Karlsruhe, fra il 1887 e il 1888. Il suo trasmettitore era un circuito in cui una scintilla scoccava fra due sfere metalliche: la corrente oscillava avanti e indietro molto rapidamente, come in un'antenna. Il ricevitore era un anello di filo interrotto da una piccola fessura, in cui saltavano scintille minuscole quando arrivava l'onda. Facendo riflettere le onde su una parete metallica, Hertz ottenne onde stazionarie, misurò la distanza fra i nodi e quindi la lunghezza d'onda, di alcuni metri; conoscendo la frequenza del circuito, ne ricavò una velocità vicina a quella della luce. Mostrò poi che le sue onde si riflettono, si rifrangono e si polarizzano come la luce. L'unità di frequenza, l'hertz, porta il suo nome.

Pochi anni dopo un giovane bolognese, Guglielmo Marconi, cominciò a usare le onde per trasmettere segnali. Nel 1895, nella villa di famiglia a Pontecchio, vicino a Bologna, riuscì a ricevere segnali a distanze sempre maggiori, anche oltre una collina; nel dicembre del 1901 annunciò di aver ricevuto a Terranova, l'isola atlantica oggi canadese, un segnale trasmesso dalla Cornovaglia, attraverso l'Atlantico. Nel 1909 ricevette il premio Nobel per la fisica insieme con il tedesco Ferdinand Braun. La radio, nata come telegrafo senza fili, divenne in pochi decenni uno dei mezzi di comunicazione di massa del Novecento (lo approfondisci nel riquadro alla fine del capitolo).

ESEMPIO SVOLTO

Una stazione radio FM

Problema. Un'emittente radiofonica trasmette alla frequenza di 100 MHz con una potenza di 50 kW. Calcola a) la lunghezza d'onda e la lunghezza di un'antenna a dipolo adatta, b) il tempo che il segnale impiega a raggiungere un'automobile a 20 km di distanza, c) l'intensità dell'onda a quella distanza, supponendo per semplicità che l'antenna irradi in modo uguale in tutte le direzioni, d) l'intensità a 40 km.

a) $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s})/(1{,}00 \times 10^8\ \text{Hz}) = 3{,}00\ \text{m}$. Un dipolo a mezz'onda è lungo $\lambda/2 = 1{,}50\ \text{m}$.

b) $t = d/c = (2{,}0 \times 10^4\ \text{m})/(3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s}) = 6{,}7 \times 10^{-5}\ \text{s}$, cioè 67 μs: per chi ascolta, il segnale è istantaneo.

c) La potenza si distribuisce su una sfera di raggio 20 km: $I = P/(4\pi r^2) = (5{,}0 \times 10^4\ \text{W})/(4\pi \cdot (2{,}0 \times 10^4\ \text{m})^2) = 9{,}9 \times 10^{-6}\ \text{W/m}^2$.

d) A distanza doppia la stessa potenza si distribuisce su una superficie quattro volte più grande: $I = 9{,}9 \times 10^{-6}\ \text{W/m}^2/4 = 2{,}5 \times 10^{-6}\ \text{W/m}^2$.

Controllo. L'intensità ricevuta è minuscola, qualche milionesimo di watt per metro quadrato, eppure basta a un ricevitore. Le antenne reali, in realtà, non irradiano in modo uguale in tutte le direzioni (Figura 10.3), e le emittenti le orientano per mandare la potenza verso la zona da servire.

10.3.4 L'energia trasportata

Nel capitolo 3 hai visto che un campo elettrico contiene energia, con densità $\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$, e nel capitolo 8 che anche un campo magnetico ne contiene. In un'onda elettromagnetica nel vuoto, si dimostra, l'energia è divisa in parti uguali fra il campo elettrico e il campo magnetico, e viaggia con l'onda alla velocità c. Come per le onde meccaniche, si misura con l'intensità $I = P/S$, e per una sorgente puntiforme diminuisce con il quadrato della distanza.

La sorgente più importante per noi è il Sole, che emette una potenza totale di circa $3{,}8 \times 10^{26}$ W. Alla distanza della Terra, $1{,}50 \times 10^{11}$ m, l'intensità della radiazione solare è $I = (3{,}8 \times 10^{26}\ \text{W})/(4\pi \cdot (1{,}50 \times 10^{11}\ \text{m})^2) = 1{,}3 \times 10^3\ \text{W/m}^2$: fuori dall'atmosfera, ogni metro quadrato perpendicolare ai raggi riceve circa 1,3 kW. Una parte viene assorbita o riflessa dall'atmosfera; il resto scalda il suolo e gli oceani, fa crescere le piante, alimenta i pannelli solari.

Un'onda elettromagnetica non trasporta solo energia: quando viene assorbita o riflessa, esercita anche una piccola spinta sulla superficie che colpisce, la **pressione di radiazione**. Per la luce solare assorbita vale circa I/c, qualche milionesimo di pascal ($4{,}5 \times 10^{-6}$ Pa), un valore minuscolo ma misurabile. Nello spazio, dove non c'è attrito, si fa sentire: contribuisce a spingere le polveri delle comete nella direzione opposta al Sole, formando la loro coda, e muove le vele solari, grandi fogli sottilissimi e riflettenti; la sonda giapponese IKAROS, lanciata nel 2010, è stata la prima a dimostrarne l'uso nello spazio interplanetario.

10.4 La polarizzazione

10.4.1 La direzione del campo elettrico

In un'onda come quella della Figura 10.2 il campo elettrico oscilla sempre nella stessa direzione: l'onda è polarizzata in quella direzione. Nel capitolo 16 di Fisica 4 hai visto, in un approfondimento, che la luce può essere polarizzata e che proprio questo prova che è un'onda trasversale; ora sappiamo che cosa oscilla, e possiamo dire che la direzione di polarizzazione è, per convenzione, quella del campo elettrico. Un'antenna a dipolo emette onde polarizzate parallelamente a sé stessa. La luce di una lampada o del Sole, invece, è emessa da un numero enorme di atomi indipendenti, ciascuno con il suo orientamento: il campo elettrico cambia direzione a caso, molte volte in un miliardesimo di secondo, e la luce si dice non polarizzata.

Un polarizzatore, come un foglio di materiale «polaroid», ha una direzione privilegiata, l'**asse di trasmissione**: lascia passare la componente del campo elettrico parallela all'asse e assorbe quella perpendicolare. In un polaroid lunghe molecole allineate si comportano come tanti fili conduttori paralleli: il campo elettrico parallelo alle molecole vi mette in moto gli elettroni e perde energia, quello perpendicolare passa. L'asse di trasmissione è quindi perpendicolare alle molecole. Se la luce che arriva non è polarizzata, ne esce luce polarizzata lungo l'asse, con metà dell'intensità iniziale.

10.4.2 La legge di Malus

Che cosa succede se la luce già polarizzata attraversa un secondo polarizzatore, che in questo ruolo si chiama **analizzatore**, con l'asse inclinato di un angolo θ rispetto alla direzione di polarizzazione (Figura 10.4)? Scomponiamo il campo elettrico, di ampiezza E_0, in due componenti: parallela all'asse dell'analizzatore, $E_0 \cos\theta$, e perpendicolare, $E_0 \operatorname{sen}\theta$. Passa soltanto la prima. Poiché l'intensità di un'onda è proporzionale al quadrato dell'ampiezza, l'intensità trasmessa è quella incidente moltiplicata per $\cos^2\theta$:

$$I = I_0 \cos^2\theta$$

È la **legge di Malus**, dal nome del fisico francese Étienne-Louis Malus, che studiò la polarizzazione della luce all'inizio dell'Ottocento. Qui I_0 è l'intensità della luce polarizzata che arriva sull'analizzatore. Con gli assi paralleli ($\theta = 0°$) passa tutto; a 45° passa metà; con gli assi incrociati ($\theta = 90°$) non passa nulla. Ruotando l'analizzatore di un giro intero l'intensità passa due volte per il massimo e due volte per lo zero, come mostra il grafico della Figura 10.4.

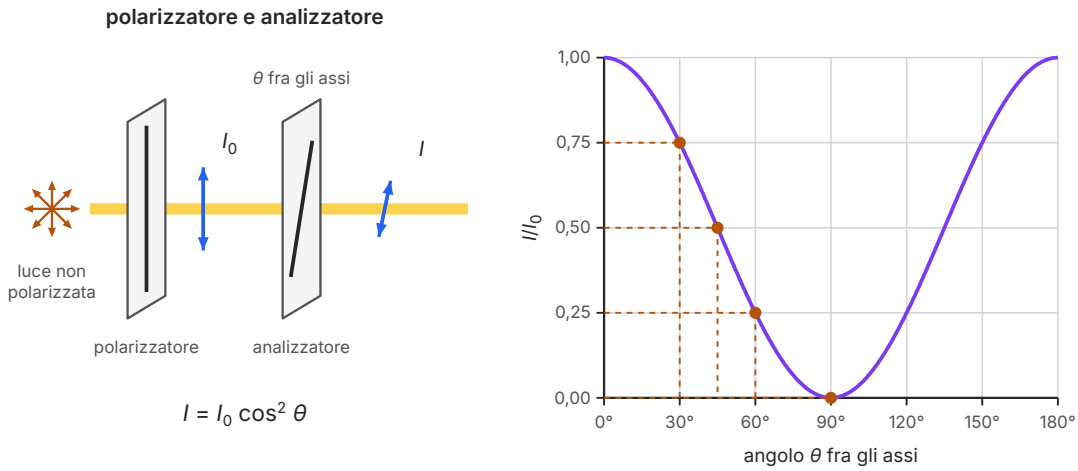


Figura 10.4 A sinistra, luce non polarizzata attraversa un polarizzatore con l'asse verticale e poi un analizzatore con l'asse inclinato di θ (schema); passa solo la componente del campo parallela all'asse dell'analizzatore. A destra, la legge di Malus: l'intensità trasmessa dall'analizzatore, divisa per quella della luce polarizzata che vi arriva, in funzione di θ (calcolata). I punti segnati corrispondono a 30°, 45°, 60° e 90°.

ESEMPIO SVOLTO

Tre polarizzatori

Problema. Luce non polarizzata di intensità 12 W/m^2 attraversa due polarizzatori con gli assi incrociati. a) Quanta luce esce? b) Fra i due si inserisce un terzo polarizzatore, con l'asse a 30° rispetto al primo. Quanta luce esce ora? c) Con quale angolo del polarizzatore intermedio esce più luce? Usa il grafico della Figura 10.4.

a) Il primo polarizzatore lascia passare metà dell'intensità: 6,0 W/m^2, polarizzata lungo il suo asse. Il secondo è a 90°: sul grafico $\cos^2 90° = 0$. Non esce luce.

b) Il polarizzatore intermedio è a 30° dal primo: dal grafico, $I/I_0 = 0{,}75$, e passano 6,0 W/m^2 · 0,75 = 4,5 W/m^2, ora polarizzati a 30°. L'ultimo polarizzatore forma con il precedente un angolo di 90° − 30° = 60°: dal grafico, 0,25. Escono 4,5 W/m^2 · 0,25 = 1,1 W/m^2.

c) Se il polarizzatore intermedio forma l'angolo α con il primo, forma 90° − α con l'ultimo. Il prodotto dei due fattori è massimo quando i due angoli sono uguali, a 45°: 6,0 W/m^2 · 0,50 · 0,50 = 1,5 W/m^2. Per esempio a 30° si ottiene 0,75 · 0,25 ≈ 0,19 invece di 0,25.

Osservazione. Il risultato sorprende: aggiungendo un filtro passa più luce. Il polarizzatore intermedio non crea luce, ne assorbe; ma cambia la direzione di polarizzazione, e la luce che ne esce ha una componente lungo l'asse dell'ultimo polarizzatore, che prima mancava.

10.4.3 Riflessi, occhiali da sole e schermi

La luce si polarizza anche per riflessione. Quando la luce del Sole si riflette sull'acqua di un lago, sull'asfalto bagnato o sul vetro di una finestra, la luce riflessa è in buona parte polarizzata parallelamente alla superficie, cioè, per una superficie orizzontale, orizzontalmente: è la **polarizzazione per riflessione**. Gli occhiali da sole polarizzati hanno l'asse di trasmissione verticale, e spengono i riflessi molto più di quanto attenuino il resto della scena. Lo puoi verificare guardando un riflesso e inclinando la testa di lato.

Su un principio simile funzionano gli schermi a cristalli liquidi, o LCD, di molti orologi, calcolatrici e monitor. Ogni punto dello schermo è un sottile strato di **cristalli liquidi**, sostanze le cui molecole allungate si orientano tutte insieme, chiuso fra due polarizzatori incrociati. Senza tensione, lo strato ruota di 90° la direzione di polarizzazione della luce e il punto appare chiaro; con una piccola tensione, le molecole si allineano al campo elettrico, la rotazione scompare e, per la legge di Malus, il punto diventa scuro.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la legge di Malus

Materiali. Una lampada a LED di luce bianca; due fogli polaroid montati su supporti girevoli con goniometro (sensibilità 2°); un sensore di luce collegato a un sistema di acquisizione dati, oppure il sensore di luminosità di uno smartphone con un'applicazione che ne mostra la lettura in lux; un'aula oscurata.

Procedimento. Si allineano lampada, polarizzatore, analizzatore e sensore, a distanze fisse. Con la lampada spenta si legge il fondo dovuto alla luce ambiente. Poi si accende la lampada, si ruota l'analizzatore fino alla lettura massima e si prende quella posizione come $\theta = 0°$; si ruota l'analizzatore a passi di 15° fino a 90°, annotando ogni volta la lettura del sensore (Tabella 10.2). Si ripete fra 90° e 180° per controllare la simmetria.

Tabella 10.2 Intensità misurata dopo l'analizzatore in funzione dell'angolo fra gli assi (dati tipici). Incertezze: θ ± 2°, intensità ± 5 lux; lettura con la lampada spenta: 5 lux.

θ	$\cos^2\theta$	intensità (lux)
0°	1,000	514
15°	0,933	482
30°	0,750	388
45°	0,500	261
60°	0,250	137
75°	0,067	33
90°	0,000	5

Che cosa concludere. L'intensità diminuisce da 514 lux a 5 lux, ma non in modo proporzionale all'angolo: fra 0° e 15° cala di poco, fra 45° e 60° di molto. Riportando l'intensità in funzione di $\cos^2\theta$ si ottiene invece una retta: la retta dei minimi quadrati ha pendenza 512 lux, che è l'intensità massima trasmessa, e intercetta 4 lux, compatibile con il fondo misurato a lampada spenta. I dati confermano la legge di Malus entro le incertezze. Nota che l'incertezza di 2° sull'angolo pesa di più intorno a 45°, dove la curva della Figura 10.4 è più ripida, e quasi nulla a 0° e a 90°.

Sicurezza. Non usare puntatori laser: se il docente sceglie una sorgente laser, l'esperienza diventa una dimostrazione, condotta da lui, con il fascio sempre sotto l'altezza degli occhi. La lampada a LED scalda poco, ma non va coperta con i fogli polaroid.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Costruisci il grafico dell'intensità in funzione di $\cos^2\theta$, con le barre d'incertezza, traccia la retta e ricavane pendenza e intercetta.

Spiega perché il grafico in funzione di θ non è una retta, e perché a 90° il sensore non legge zero.

10.5 Lo spettro elettromagnetico

10.5.1 Una sola famiglia di onde

Le onde di Hertz e la luce differiscono soltanto per la lunghezza d'onda, e lo stesso vale per tutte le radiazioni scoperte fra il 1800 e i primi anni del Novecento. Insieme formano lo spettro elettromagnetico della Figura 10.5, che va dalle onde radio, lunghe da qualche decina di centimetri a chilometri, ai raggi gamma, più piccoli di un atomo. Nel vuoto viaggiano tutte a c, e per ciascuna $f = c/\lambda$. I nomi delle bande e i loro confini, riportati nella Tabella A.4, sono convenzionali: non c'è un salto fra una microonda di 29 cm e un'onda radio di 31 cm.

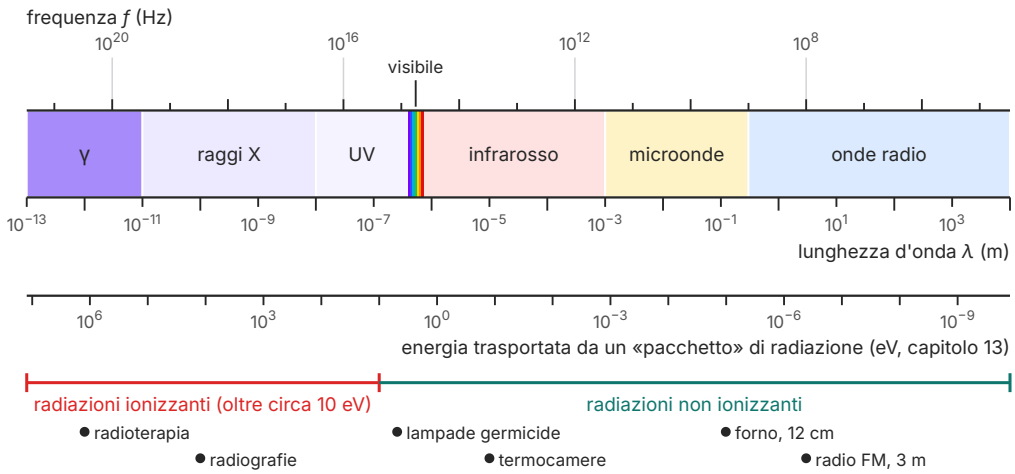


Figura 10.5 Lo spettro elettromagnetico in scala logaritmica, con i confini convenzionali della Tabella A.4: lunghezza d'onda (sotto la striscia), frequenza (sopra) e, nella terza scala, l'energia che la radiazione cede alla materia in un singolo «pacchetto» (capitolo 13), proporzionale alla frequenza. Il limite delle radiazioni ionizzanti, intorno a 10 eV, cade nell'ultravioletto ed è indicativo. In basso, alcune applicazioni, nella loro posizione sullo spettro.

Perché, allora, onde della stessa natura si comportano in modo così diverso? Per due ragioni. La prima è la dimensione: un'onda interagisce soprattutto con oggetti di dimensioni paragonabili alla sua lunghezza d'onda, e quindi un'antenna per le onde radio è lunga metri, mentre la luce è emessa e assorbita da atomi e molecole, e i raggi X sono diffratti dalla distanza fra gli atomi di un cristallo. La seconda è l'energia: come vedrai nel capitolo 13, la radiazione cede energia alla materia a «pacchetti», e l'energia di ciascun pacchetto è proporzionale alla fre-

quenza. Un'onda radio, per quanto intensa, cede energia in porzioni minuscole; un raggio X in porzioni migliaia di volte più grandi di quelle della luce visibile. La Tabella 10.3 riassume, banda per banda, come si producono e si rivelano le onde, che effetti hanno sulla materia e sui tessuti viventi, e due loro applicazioni.

Tabella 10.3 Le bande dello spettro elettromagnetico: produzione, rivelazione, effetti e applicazioni. Gli intervalli di lunghezza d'onda sono quelli convenzionali della Tabella A.4.

Banda (λ)	Come si produce	Come si rivela	Effetti sulla materia e sui tessuti	Applicazioni
onde radio (oltre 30 cm)	correnti alternate nelle antenne	antenne e circuiti risonanti	attraversano muri e corpi; ad alta intensità riscaldano	radio e televisione, telefonia mobile
microonde (da 1 mm a 30 cm)	dispositivi elettronici speciali (magnetron, circuiti a semiconduttori)	antenne, guide d'onda	fanno ruotare le molecole d'acqua: riscaldamento	forno a microonde, radar, Wi-Fi
infrarosso (da 700 nm a 1 mm)	corpi caldi, LED infrarossi	termometri, sensori termici, termocamere	riscaldamento della pelle e dei materiali	telecomandi, visione notturna, fibre ottiche
visibile (da 400 nm a 700 nm)	corpi molto caldi (Sole, filamenti), LED, atomi eccitati	occhio, pellicole e sensori fotografici	fotosintesi, visione; un laser intenso danneggia la retina	illuminazione, fotografia
ultravioletto (da 10 nm a 400 nm)	Sole, lampade a vapori di mercurio, LED UV	sostanze fluorescenti, sensori elettronici	abbronzatura ed eritema, sintesi della vitamina D; altera il DNA	sterilizzazione, controllo delle banconote
raggi X (da 0,01 nm a 10 nm)	elettroni veloci frenati contro un metallo (tubo a raggi X)	lastre fotografiche, schermi fluorescenti, rivelatori elettronici	ionizzanti: attraversano i tessuti molli, sono assorbiti dalle ossa	radiografie e TAC, studio dei cristalli
raggi gamma (sotto 0,01 nm)	nuclei radioattivi, reazioni nucleari, sorgenti cosmiche	rivelatori di particelle	ionizzanti, molto penetranti	radioterapia, sterilizzazione di strumenti medici

10.5.2 Dalle onde radio all'infrarosso

Le **onde radio** hanno le lunghezze d'onda maggiori, e sono le più facili da produrre: basta una corrente alternata in un'antenna. Attraversano i muri delle case e trasportano la radio, la televisione, i segnali dei telefoni cellulari, che usano frequenze fra alcune centinaia di megahertz e qualche gigahertz. Le **microonde** comprendono le frequenze del Wi-Fi, 2,4 e 5 GHz, e quella dei forni, 2,45 GHz. In un forno a microonde il campo elettrico dell'onda, che si inverte miliardi di volte al secondo, fa ruotare avanti e indietro le molecole d'acqua, che sono dipoli elettrici (capi-

tolo 2); gli urti con le molecole vicine trasformano quell'energia in calore. Il radar emette brevi impulsi di microonde e ne riceve l'eco, misurando la distanza degli oggetti dal tempo di andata e ritorno, come il sonar del capitolo 13 di Fisica 4.

L'**infrarosso** fu scoperto nel 1800 dall'astronomo William Herschel, che, spostando un termometro lungo lo spettro della luce solare prodotto da un prisma, trovò che la temperatura saliva anche oltre l'estremo rosso, dove l'occhio non vede nulla. Tutti i corpi emettono radiazione infrarossa, tanto più intensa quanto più sono caldi (Fisica 4, capitolo 7): il nostro corpo ne emette soprattutto intorno a 10 μm, ed è quello che vede una termocamera. La superficie terrestre, scaldata dal Sole, riemette energia nell'infrarosso, che alcuni gas dell'atmosfera assorbono: è l'effetto serra, di cui ti occupi anche in Scienze.

10.5.3 Dal visibile ai raggi gamma

La luce visibile occupa un intervallo strettissimo, da 400 nm a 700 nm: meno di un fattore 2 in lunghezza d'onda, su uno spettro che ne copre più di quindici ordini di grandezza (Figura 10.5). Non è un caso che i nostri occhi siano sensibili proprio lì: è la regione in cui il Sole emette di più e in cui l'atmosfera è trasparente.

Oltre il violetto c'è l'**ultravioletto**, scoperto nel 1801 da Johann Wilhelm Ritter, che vide annerirsi il cloruro d'argento oltre l'estremo violetto dello spettro. Gli ultravioletti del Sole abbronzano la pelle e le permettono di produrre vitamina D, ma un'esposizione eccessiva provoca scottature e aumenta il rischio di tumori della pelle; la parte più energetica è assorbita quasi del tutto dall'ozono dell'alta atmosfera. Le lampade ultraviolette si usano per sterilizzare l'acqua e le superfici.

I **raggi X** furono scoperti per caso l'8 novembre 1895 da Wilhelm Conrad Röntgen, a Würzburg: un tubo a raggi catodici coperto di cartone nero faceva brillare uno schermo fluorescente a qualche distanza. Poche settimane dopo Röntgen fotografò le ossa della mano della moglie, e nel 1901 ricevette il primo premio Nobel per la fisica. I raggi X attraversano facilmente i tessuti molli e sono assorbiti di più dalle ossa, ricche di calcio: per questo una radiografia mostra lo scheletro. I **raggi gamma**, ancora più energetici, sono emessi dai nuclei atomici nei decadimenti radioattivi, che studierai nel capitolo 14; si usano in radioterapia per distruggere le cellule tumorali e per sterilizzare gli strumenti medici.

10.5.4 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

La distinzione più importante, per la salute, separa due gruppi di bande. Per strappare un elettrone a un atomo o a una molecola serve un'energia di qualche elettronvolt o di qualche decina di elettronvolt (capitolo 3). Le radiazioni che cedono energia in «pacchetti» abbastanza grandi da farlo, cioè l'ultravioletto più energetico, i raggi X e i raggi gamma, si dicono **radiazioni ionizzanti**: possono rompere legami chimici e danneggiare il DNA. Le altre, dalle onde radio al visibile, sono **radiazioni non ionizzanti**: per quanto intense, non ionizzano, perché ogni singolo pacchetto ha troppa poca energia.

Non ionizzante non vuol dire innocuo a qualunque intensità: le microonde di un forno cuociono la carne proprio scaldandola, e una luce laser intensa brucia la retina. Ionizzante non vuol dire sempre pericoloso: conta la dose, cioè quanta energia viene assorbita e da quali tessuti, e una radiografia giustificata da un medico dà un beneficio molto maggiore del rischio. I telefoni cellulari e il Wi-Fi usano radiazioni non ionizzanti; per questo tipo di radiazioni, come per quelle ionizzanti, gli enti di protezione nazionali e internazionali stabiliscono limiti di esposizione.

ERRORE FREQUENTE

Onde radio, luce e raggi X: tre cose diverse?

Molti pensano che le onde radio siano una specie di suono, perché la radio «suona», o che i raggi X siano qualcosa di diverso dalla luce, magari più veloce perché più energetico. Non è così. Onde radio, luce, raggi X e raggi gamma sono tutte onde elettromagnetiche, e nel vuoto viaggiano tutte alla stessa velocità c; differiscono solo per la lunghezza d'onda e quindi per la frequenza. Il suono è tutt'altra cosa: un'onda meccanica, che ha bisogno di un mezzo e viaggia a circa 340 m/s nell'aria. Una radio riceve un'onda elettromagnetica, ne estrae un segnale elettrico e solo l'altoparlante lo trasforma in suono.

Attenzione anche alla formula $c = \lambda f$: non dice che a frequenza doppia l'onda va più veloce, ma che, nel vuoto, a frequenza doppia corrisponde una lunghezza d'onda dimezzata.

COLLEGAMENTI

Educazione civica: radiazioni e informazione

Le parole «radiazioni» e «onde» compaiono spesso nelle notizie, a volte in modo allarmistico, a volte in modo rassicurante senza ragione. Questo capitolo ti dà gli strumenti per fare le domande giuste: di quale banda si parla? La radiazione è ionizzante o no? Quanto è intensa, e a che distanza dalla sorgente, visto che l'intensità diminuisce con il quadrato della distanza? Per quanto tempo si è esposti?

Le norme sulla protezione dalle radiazioni, ionizzanti e non ionizzanti, sono stabilite da enti scientifici e autorità sanitarie sulla base degli studi disponibili, e fissano limiti di esposizione con ampi margini di sicurezza. Un cittadino informato non deve conoscere quei numeri a memoria, ma sapere che esistono, chi li stabilisce e su quali basi, e diffidare delle affermazioni che non distinguono una banda dall'altra. Due comportamenti concreti, invece, sono alla portata di tutti: proteggersi dal Sole nelle ore centrali dell'estate, e non sottoporsi a esami radiologici senza che un medico li ritenga necessari.

10.5.5 L'effetto Doppler della luce

Nel capitolo 13 di Fisica 4 hai studiato l'effetto Doppler del suono: una sirena che si avvicina ha un suono più acuto, una che si allontana più grave. Anche per le onde elettromagnetiche la fre-

quenza ricevuta dipende dal moto relativo di sorgente e osservatore: è l'**effetto Doppler della luce**. Se una sorgente di luce si allontana, la frequenza ricevuta è minore e la lunghezza d'onda maggiore: le righe del suo spettro si spostano verso il rosso, ed è lo spostamento verso il rosso; se si avvicina, si spostano verso il violetto, ed è lo **spostamento verso il blu**. Per velocità piccole rispetto a c lo spostamento relativo della frequenza è circa v/c: per la luce delle stelle della nostra galassia è piccolo, ma gli spettroscopi lo misurano con grande precisione, e permettono di sapere se una stella si avvicina o si allontana e con quale velocità. Nel capitolo 12 lo spostamento verso il rosso delle galassie lontane ti porterà all'espansione dell'universo.

Lo stesso principio misura velocità molto più vicine. Alcuni misuratori di velocità della polizia stradale inviano microonde verso un'automobile e confrontano la frequenza dell'eco con quella emessa: la differenza dà la velocità del veicolo. Il radar meteorologico, allo stesso modo, misura con quale velocità si muovono le gocce di pioggia dentro un temporale.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Spettro viene dal latino *spectrum*, «visione, immagine», dal verbo *specere*, «guardare», la stessa radice di *specchio* e di *spettacolo*; in italiano la parola indica anche un fantasma, un'«apparizione». Fu Newton a usarla per la striscia di colori che usciva dal suo prisma; oggi chiamiamo spettro qualunque insieme ordinato di frequenze.

Radiazione viene dal latino *radiatio*, da *radius*, «raggio» (anche il raggio di una ruota): la radiazione è ciò che si diffonde «a raggi» da una sorgente, in tutte le direzioni, come la luce da una lampada.

Antenna è una parola latina, *antemna* o *antenna*, che indicava il pennone, l'asta trasversale dell'albero di una nave a cui si lega la vela. Dall'asta della nave il nome è passato alle antenne degli insetti e, all'epoca dei primi apparecchi radio, ai lunghi fili e alle aste che emettono e ricevono le onde.

Polarizzazione viene da *polo*, dal greco πόλος, «perno» della volta celeste (capitolo 6). Il termine fu introdotto nell'ottica all'inizio dell'Ottocento, quando si immaginava che le particelle di luce avessero, come i magneti, dei «poli» orientati; l'immagine era sbagliata, ma la parola è rimasta per indicare una direzione privilegiata dell'onda.

APPROFONDIMENTO

Marconi, la radio e il Novecento

Guglielmo Marconi, nato a Bologna nel 1874, non frequentò l'università: studiò con insegnanti privati e da autodidatta, leggendo dei lavori di Hertz. Le sue prime esperienze, a Pontecchio nel 1895, erano trasmissioni di segnali in codice Morse, punti e linee. Non trovando in Italia l'interesse che sperava, nel 1896 si trasferì in Inghilterra, dove brevettò il suo sistema e fondò una società per sfruttarlo. Il 12 dicembre 1901 a Terranova annunciò di aver ricevuto la lettera S, tre punti in codice Morse, trasmessa da Poldhu, in Cornovaglia: circa 3500 km. Alcuni storici hanno poi messo in dubbio che quel primo segnale, debole e disturbato, sia stato davvero ricevuto; ma negli anni successivi i collegamenti transatlantici divennero regolari.

La telegrafia senza fili cambiò per prima la navigazione. Nella notte fra il 14 e il 15 aprile 1912 il transatlantico Titanic, che aveva urtato un iceberg, lanciò via radio le sue richieste di soccorso; le raccolse il piroscafo Carpathia, che arrivò sul luogo del naufragio alcune ore dopo e trasse in salvo i superstiti delle scialuppe, circa settecento persone. Il disastro mostrò quanto contasse un servizio radio attivo giorno e notte, e spinse a nuove norme internazionali sulla sicurezza della navigazione.

Dopo la prima guerra mondiale la radio smise di essere soltanto un telegrafo e cominciò a trasmettere voce e musica a un pubblico vastissimo. In Italia le trasmissioni regolari iniziarono il 6 ottobre 1924, con l'Unione radiofonica italiana (URI), sostituita nel 1927 dall'EIAR. Nei decenni seguenti la radio fu uno strumento centrale della propaganda dei regimi totalitari, e poi, durante la seconda guerra mondiale, della guerra delle informazioni: un tema che ritroverai in Storia. Marconi morì a Roma nel 1937.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Campi che si generano a vicenda: un campo magnetico variabile genera un campo elettrico con linee chiuse (induzione); un campo elettrico variabile genera un campo magnetico con linee chiuse (corrente di spostamento). I quattro messaggi delle equazioni di Maxwell sono nella Tabella 10.1.

Velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto: $c = 1/\sqrt{(\varepsilon_0 \mu_0)} = 3{,}00 \times 10^8$ m/s, uguale per tutte le frequenze; $c = \lambda f$, con λ in metri e f in hertz.

Struttura dell'onda: $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$ sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione, in fase, e nel vuoto $E = cB$ (E in V/m, B in T). L'energia è divisa in parti uguali fra i due campi.

Intensità: $I = P/S$, in W/m^2; per una sorgente puntiforme $I = P/(4\pi r^2)$. La radiazione esercita una pressione dell'ordine di I/c.

Polarizzazione: un polarizzatore trasmette metà della luce non polarizzata; la legge di Malus $I = I_0 \cos^2 \theta$ dà l'intensità trasmessa da un analizzatore con l'asse a un angolo θ dalla direzione di polarizzazione.

Spettro: onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi gamma, in ordine di lunghezza d'onda decrescente e di frequenza crescente; dall'ultravioletto più energetico in su le radiazioni sono ionizzanti.

Le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto, senza un mezzo, alla velocità c. Ma rispetto a che cosa? Per le onde del mare o per il suono la risposta è ovvia: rispetto all'acqua, rispetto all'aria. Per la luce, la domanda mise in crisi la fisica dell'Ottocento, e la risposta, nel 1905, cambiò le idee di spazio e di tempo. È il tema del prossimo capitolo.

SINTESI

- Un campo magnetico variabile genera un campo elettrico indotto, con linee chiuse, anche in assenza di conduttori: è questo campo a muovere le cariche nella spira della legge di Faraday–Neumann. Il campo indotto non è conservativo.
- Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico: fra le armature di un condensatore che si carica non passa carica, ma la corrente di spostamento produce lo stesso campo magnetico della corrente nei fili (Maxwell, 1861–1865).
- Le equazioni di Maxwell (1865, *Treatise* 1873) si riassumono in quattro messaggi: le cariche producono il campo elettrico; non esistono cariche magnetiche; un campo magnetico variabile produce un campo elettrico; correnti e campi elettrici variabili producono un campo magnetico.
- Dalle equazioni segue l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano nel vuoto con velocità $c = 1/\sqrt{(\varepsilon_0 \mu_0)} = 3{,}00 \times 10^8$ m/s: la luce è un'onda elettromagnetica.
- In un'onda elettromagnetica $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$ sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione, oscillano in fase e nel vuoto $E = cB$; l'onda non ha bisogno di un mezzo e trasporta energia, divisa in parti uguali fra i due campi.
- Le onde elettromagnetiche sono prodotte da cariche accelerate: un'antenna a dipolo, lunga circa mezza lunghezza d'onda, emette onde polarizzate parallelamente a sé stessa, al massimo perpendicolarmente e per nulla lungo l'asse.
- Hertz produsse e rivelò le onde elettromagnetiche nel 1887–1888 e ne misurò la velocità; Marconi le usò per trasmettere segnali dal 1895, attraverso l'Atlantico dal 1901 (premio Nobel 1909, con Braun).
- L'intensità di un'onda è $I = P/S$; per il Sole, alla distanza della Terra e fuori dall'atmosfera, circa 1,3 kW/m^2. La radiazione esercita una piccola pressione, che muove le vele solari.
- La direzione di polarizzazione è quella del campo elettrico. Un polarizzatore dimezza l'intensità della luce non polarizzata; un analizzatore inclinato di θ trasmette $I = I_0 \cos^2 \theta$ (legge di Malus). La luce riflessa è parzialmente polarizzata; gli schermi LCD usano polarizzatori incrociati.
- Lo spettro elettromagnetico va dalle onde radio ai raggi gamma, con confini convenzionali; le bande differiscono per lunghezza d'onda, e quindi per il modo in cui si producono, si rivelano e interagiscono con la materia.
- Ultravioletto energetico, raggi X e raggi gamma sono radiazioni ionizzanti; le altre bande sono non ionizzanti, ma ad alta intensità possono scaldare. Per tutte gli enti di protezione stabiliscono limiti di esposizione.
- Effetto Doppler della luce: una sorgente che si allontana mostra uno spostamento verso il rosso, una che si avvicina uno spostamento verso il blu; lo usano l'astronomia, i radar e alcuni misuratori di velocità.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● In una regione in cui il campo magnetico cambia nel tempo:
   - **A.** nasce un campo elettrico con linee chiuse, anche se non ci sono conduttori
   - **B.** nasce un campo elettrico solo se c'è una spira conduttrice
   - **C.** nasce un campo elettrico con linee che partono e finiscono su cariche
   - **D.** non nasce alcun campo elettrico, ma solo una corrente

2. ●● Con l'espressione «corrente di spostamento» Maxwell indicò:
   - **A.** la corrente degli elettroni che si spostano lentamente in un filo
   - **B.** la corrente che attraversa il dielettrico di un condensatore quando si rompe
   - **C.** l'effetto magnetico di un campo elettrico variabile, che agisce come una corrente
   - **D.** lo spostamento delle cariche indotte sulla superficie di un conduttore

3. ● Nel vuoto, un'onda elettromagnetica di frequenza doppia di un'altra:
   - **A.** viaggia a velocità doppia
   - **B.** ha lunghezza d'onda dimezzata e la stessa velocità
   - **C.** ha lunghezza d'onda doppia
   - **D.** viaggia a velocità dimezzata

4. ● In un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto, il campo elettrico e il campo magnetico:
   - **A.** sono paralleli fra loro e alla direzione di propagazione
   - **B.** sono perpendicolari fra loro e sfasati di un quarto di periodo
   - **C.** hanno lo stesso modulo, se misurati nelle unità del SI
   - **D.** sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione, e oscillano in fase

5. ●● Quale di queste cariche emette onde elettromagnetiche?
   - **A.** un protone fermo in un nucleo
   - **B.** un elettrone che oscilla avanti e indietro lungo un'antenna
   - **C.** un elettrone che si muove di moto rettilineo uniforme nel vuoto
   - **D.** una sfera carica appoggiata su un supporto isolante

6. ● Luce non polarizzata attraversa due polarizzatori con gli assi perpendicolari. L'intensità trasmessa è:
   - **A.** metà di quella iniziale
   - **B.** un quarto di quella iniziale
   - **C.** zero
   - **D.** uguale a quella iniziale

7. ● Quale di queste radiazioni è ionizzante?
   A. le onde radio FM
   B. le microonde di un forno
   C. la luce infrarossa di un telecomando
   D. i raggi X di una radiografia

Vero o falso

8. ●● Il campo elettrico indotto da un campo magnetico variabile è conservativo, come quello delle cariche ferme. V / F

9. ● Le onde elettromagnetiche, come il suono, non si propagano nel vuoto. V / F

10. ● Raddoppiando la distanza da una sorgente puntiforme, l'intensità della radiazione ricevuta si riduce a un quarto. V / F

11. ● Le microonde di un forno sono radiazioni ionizzanti, perché cuociono i cibi. V / F

12. ●● La luce di una galassia che si allontana da noi presenta righe spettrali spostate verso il rosso. V / F

Applicare

13. ● Un'emittente FM trasmette a 98,5 MHz. Calcola la lunghezza d'onda delle sue onde.

14. ● In un punto, il campo elettrico di un'onda elettromagnetica vale 45 V/m. Quanto vale, nello stesso punto e nello stesso istante, il campo magnetico dell'onda?

15. ● La Luna dista dalla Terra $3{,}84 \times 10^8$ m. Quanto tempo impiega un segnale radio a raggiungerla, e quanto un'eco radar a tornare?

16. ● Luce polarizzata di intensità 60 W/m^2 attraversa un analizzatore con l'asse a 60° dalla direzione di polarizzazione. Calcola l'intensità trasmessa.

17. ●● Luce non polarizzata di intensità 800 W/m^2 attraversa due polarizzatori i cui assi formano un angolo di 30°. Calcola l'intensità dopo il primo e dopo il secondo polarizzatore.

18. ●● Una sorgente emette uniformemente in tutte le direzioni una potenza di 20 W sotto forma di onde elettromagnetiche. Calcola l'intensità a 50 m di distanza.

19. ● Usando la Figura 10.5 o la Tabella A.4, indica a quale banda appartengono le onde di lunghezza d'onda: a) 5 cm; b) 500 nm; c) 0,05 nm; d) 10 μm; e) 2 km. Per ciascuna calcola la frequenza.

Problemi

20. ●● Un telefono cellulare comunica con un'antenna alla frequenza di 1,8 GHz. a) Calcola la lunghezza d'onda. b) Una semplice antenna può essere lunga un quarto di lunghezza d'onda: quanto misura? c) L'antenna della rete è a 3,0 km: quanto tempo impiega il segnale? d) Quante lunghezze d'onda stanno in quella distanza?

21. ●●● Il Sole emette una potenza di $3{,}8 \times 10^{26}$ W. a) Calcola l'intensità della radiazione solare alla distanza della Terra, $1{,}50 \times 10^{11}$ m. b) Quale potenza riceve, fuori dall'atmosfera, un pannello di 2,0 m^2 perpendicolare ai raggi? c) Marte dista dal Sole $2{,}28 \times 10^{11}$ m: calcola l'intensità su Marte e il rapporto con quella sulla Terra. d) Stima la pressione di radiazione sulla Terra, I/c, e confrontala con la pressione atmosferica, $1{,}0 \times 10^5$ Pa (Fisica 3).

22. ●●● Un fascio di luce non polarizzata, di intensità 40 W/m^2, attraversa tre polarizzatori in fila. Il secondo ha l'asse a 30° rispetto al primo, il terzo a 90° rispetto al primo. a) Calcola l'intensità dopo ciascun polarizzatore. b) Quanta luce esce se si toglie il polarizzatore intermedio? c) A quale angolo bisogna ruotare il polarizzatore intermedio per ottenere la massima intensità finale, e quanto vale?

23. ●● In un forno a microonde, senza piatto rotante, si mette una tavoletta di cioccolato e si accende per pochi secondi: nell'onda stazionaria che si forma il cioccolato fonde in punti allineati, distanti fra loro 6,1 cm, che corrispondono a metà lunghezza d'onda. L'etichetta del forno indica una frequenza di 2,45 GHz. a) Calcola la lunghezza d'onda. b) Calcola la velocità delle microonde e confrontala con c. c) Quale fonte d'incertezza pesa di più sul risultato?

24. ●●● (Con il capitolo 8.) Una piccola antenna a spira, formata da una bobina di 50 spire di area 0,010 m^2, riceve un'onda elettromagnetica di frequenza 1,0 MHz il cui campo elettrico ha ampiezza 0,10 V/m. Il piano della bobina è orientato in modo che il campo magnetico dell'onda sia perpendicolare alle spire. a) Calcola l'ampiezza del campo magnetico dell'onda. b) In un quarto di periodo il campo magnetico passa dal massimo a zero: calcola il quarto di periodo e la variazione del flusso attraverso la bobina. c) Calcola la f.e.m. indotta media in quel quarto di periodo. d) Perché una f.e.m. così piccola basta a un ricevitore?

Ragionare e argomentare

25. ●● **Commenta la fonte.** Nel 1862 Maxwell scrive: «difficilmente possiamo evitare la deduzione che la luce consiste nelle ondulazioni trasversali dello stesso mezzo che è la causa dei fenomeni elettrici e magnetici» (*On Physical Lines of Force*, traduzione della redazione). Che cosa afferma? Su quale calcolo si basa? Che cosa, di quella frase, è stato confermato, e che cosa abbandonato? Con quale esperimento si poteva metterla alla prova?

26. ●●● Un telefono cellulare perde spesso il segnale in un ascensore con le pareti di metallo, mentre una radio in automobile continua a ricevere, anche se in modo più debole. Spiega il fenomeno con la gabbia di Faraday del capitolo 2 e con le onde di questo capitolo. Perché conta il confronto fra le dimensioni delle aperture e la lunghezza d'onda?

27. ●● **Trova l'errore.** Uno studente scrive: «Dalla formula $c = \lambda f$ segue che un'onda elettromagnetica di frequenza più alta viaggia più velocemente: per questo i raggi X, che hanno frequenza altissima, attraversano il corpo». Trova gli errori e correggili.

Verso l'esame

28. ●● **Dal documento.** «Nel 1914 Marie Curie organizzò un servizio di radiologia per l'esercito francese: automobili attrezzate con un tubo a raggi X e un generatore portavano le radiografie vicino al fronte, per localizzare proiettili e schegge nei corpi dei feriti.» a) Quale radiazione si usava, e in quale banda dello spettro cade (Figura 10.5)? b) Perché in una radiografia si vedono le ossa e i corpi metallici, e come si producono i raggi X? c) Collega il documento alla storia della prima guerra mondiale e al ruolo della scienza nel conflitto.

29. ●●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega perché la luce è un'onda elettromagnetica, ricostruendo il ragionamento di Maxwell: dalla corrente di spostamento alla previsione delle onde, al valore della loro velocità, fino alla conferma di Hertz.

30. ●●● **Collegamento.** Collega la scoperta delle onde elettromagnetiche con la storia del Novecento: la nascita della radio, la sua diffusione come mezzo di comunicazione di massa e il suo uso politico fra le due guerre. Indica almeno tre fatti certi, con le date.

PER APPROFONDIRE

- [MAX] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*: il capitolo sulla teoria elettromagnetica della luce, nel secondo volume, confronta la velocità calcolata dalle costanti elettriche con le misure della velocità della luce.
- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: le linee di forza da cui Maxwell partì, descritte senza una formula.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sul campo e sulla teoria di Maxwell spiegano perché il campo divenne, per la fisica, una realtà.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sulle equazioni di Maxwell e sulle onde, per chi vuole vedere la teoria con la matematica completa.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle onde elettromagnetiche offre molti esercizi su intensità, polarizzazione e spettro.

Glossario del capitolo

Analizzatore
Polarizzatore posto sul cammino di luce già polarizzata, usato per analizzarne la direzione di polarizzazione; ne trasmette la frazione $\cos^2\theta$.

Antenna a dipolo
Due conduttori allineati alimentati al centro da una tensione alternata; emette onde della frequenza delle cariche che vi oscillano, polarizzate parallelamente a sé stessa. Funziona al meglio se è lunga circa mezza lunghezza d'onda.

Asse di trasmissione
Direzione di un polarizzatore: viene trasmessa la componente del campo elettrico parallela a essa.

Campo elettrico indotto
Campo elettrico generato da un campo magnetico variabile; le sue linee sono chiuse e non è conservativo.

Corrente di spostamento
Termine introdotto da Maxwell per l'effetto magnetico di un campo elettrico variabile, che produce un campo magnetico come una corrente pur senza trasporto di cariche.

Cristalli liquidi
Sostanze le cui molecole allungate si orientano tutte insieme; in uno strato sottile ruotano la direzione di polarizzazione della luce, e una tensione modifica la rotazione (schermi LCD).

Effetto Doppler della luce
Variazione della frequenza della luce ricevuta dovuta al moto relativo di sorgente e osservatore: le righe spettrali si spostano verso il rosso (lunghezza d'onda maggiore) se la sorgente si allontana, verso il blu se si avvicina.

Equazioni di Maxwell
Le quattro leggi che descrivono come cariche, correnti e campi variabili producono il campo elettrico e il campo magnetico; ne segue l'esistenza delle onde elettromagnetiche.

Infrarosso
Banda dello spettro elettromagnetico fra il visibile e le microonde (da 700 nm a 1 mm), emessa da tutti i corpi caldi.

Legge di Malus
$I = I_0 \cos^2\theta$: intensità trasmessa da un polarizzatore il cui asse forma l'angolo θ con la direzione di polarizzazione della luce incidente.

Microonde
Onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda da 1 mm a 30 cm; usate nei forni, nei radar e nelle reti Wi-Fi.

Onde radio
Onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda maggiore di circa 30 cm, prodotte da correnti alternate nelle antenne.

Polarizzazione per riflessione
Polarizzazione parziale della luce riflessa da una superficie, parallela alla superficie stessa.

Pressione di radiazione
Pressione esercitata da un'onda elettromagnetica su una superficie che la assorbe o la riflette; per la luce assorbita è dell'ordine di I/c.

Radiazioni ionizzanti
Radiazioni che cedono energia in quantità sufficienti a strappare elettroni ad atomi e molecole: ultravioletto più energetico, raggi X, raggi gamma.

Radiazioni non ionizzanti
Radiazioni che non possono ionizzare la materia, qualunque sia la loro intensità: dalle onde radio al visibile; ad alta intensità possono scaldare.

Raggi gamma
Onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda minore di 0,01 nm, emesse dai nuclei atomici; ionizzanti e molto penetranti.

Raggi X
Onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda da 0,01 nm a 10 nm, prodotte frenando elettroni veloci; ionizzanti (Röntgen, 1895).

Ultravioletto
Banda dello spettro fra il visibile e i raggi X (da 10 nm a 400 nm); la parte più energetica è ionizzante.

Soluzioni

1. A. Per il terzo messaggio di Maxwell un campo magnetico variabile genera un campo elettrico con linee chiuse in ogni punto dello spazio; il conduttore serve solo a rivelarlo.

2. C. La corrente di spostamento non trasporta cariche: è il campo elettrico variabile, per esempio fra le armature di un condensatore, che produce un campo magnetico come una corrente.

3. B. Nel vuoto tutte le onde elettromagnetiche viaggiano a c; da $c = \lambda f$, a frequenza doppia corrisponde lunghezza d'onda dimezzata.

4. D. L'onda è trasversale, i due campi sono perpendicolari fra loro e alla propagazione e oscillano in fase; i loro moduli sono legati da $E = cB$, non uguali.

5. B. Emettono onde solo le cariche accelerate; l'elettrone che oscilla accelera continuamente. Le cariche ferme o in moto rettilineo uniforme non irradiano.

6. C. Dopo il primo polarizzatore la luce è polarizzata lungo il suo asse; il secondo, a 90°, trasmette $I_0 \cos^2 90° = 0$.

7. D. I raggi X cedono energia in pacchetti abbastanza grandi da ionizzare; onde radio, microonde e infrarosso sono non ionizzanti.

8. F. Le sue linee sono chiuse e il lavoro su un giro completo non è zero: è la f.e.m. indotta. Il campo indotto non è conservativo.

9. F. Le onde elettromagnetiche sono oscillazioni dei campi e non hanno bisogno di un mezzo: la luce del Sole ci raggiunge attraverso il vuoto.

10. V. Con $I = P/(4\pi r^2)$, a distanza doppia la stessa potenza si distribuisce su una superficie quattro volte maggiore.

11. F. Le microonde sono non ionizzanti: cuociono perché scaldano, facendo ruotare le molecole d'acqua, non perché ionizzano.

12. V. Per l'effetto Doppler una sorgente che si allontana è ricevuta con frequenza minore e lunghezza d'onda maggiore: le righe si spostano verso il rosso.

13. $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(9{,}85 \times 10^7 \text{ Hz}) = 3{,}05 \text{ m}$.

14. $B = E/c = (45 \text{ V/m})/(3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1{,}5 \times 10^{-7} \text{ T}$.

15. $t = d/c = (3{,}84 \times 10^8 \text{ m})/(3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1{,}28 \text{ s}$; l'eco percorre andata e ritorno e torna dopo 2,56 s.

16. $I = I_0 \cos^2 \theta = 60 \text{ W/m}^2 \cdot \cos^2 60° = 60 \text{ W/m}^2 \cdot 0{,}25 = 15 \text{ W/m}^2$.

17. Dopo il primo: $800 \text{ W/m}^2/2 = 400 \text{ W/m}^2$. Dopo il secondo: $400 \text{ W/m}^2 \cdot \cos^2 30° = 400 \text{ W/m}^2 \cdot 0{,}750 = 300 \text{ W/m}^2$.

18. $I = P/(4\pi r^2) = 20 \text{ W}/(4\pi \cdot (50 \text{ m})^2) = 6{,}4 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$.

19. Con $f = c/\lambda$: a) 5 cm: microonde, $f = 6{,}0 \times 10^9$ Hz = 6,0 GHz; b) 500 nm: visibile (verde), $6{,}0 \times 10^{14}$ Hz; c) 0,05 nm: raggi X, 6×10^{18} Hz; d) 10 μm: infrarosso, $3{,}0 \times 10^{13}$ Hz; e) 2 km: onde radio, $1{,}5 \times 10^5$ Hz = 150 kHz.

20. a) $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(1{,}8 \times 10^9 \text{ Hz}) = 0{,}17 \text{ m} = 17 \text{ cm}$. b) $\lambda/4 = 0{,}042 \text{ m} \approx 4{,}2 \text{ cm}$: per questo l'antenna sta dentro il telefono. c) $t = (3{,}0 \times 10^3 \text{ m})/(3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1{,}0 \times 10^{-5} \text{ s} = 10 \text{ μs}$. d) $(3{,}0 \times 10^3 \text{ m})/(0{,}167 \text{ m}) = 1{,}8 \times 10^4$ lunghezze d'onda.

21. a) $I = P/(4\pi d^2) = (3{,}8 \times 10^{26} \text{ W})/(4\pi \cdot (1{,}50 \times 10^{11} \text{ m})^2) = 1{,}3 \times 10^3 \text{ W/m}^2$. b) $P = IS = 1{,}34 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot 2{,}0 \text{ m}^2 = 2{,}7 \times 10^3 \text{ W}$. c) $I_{\text{Marte}} = (3{,}8 \times 10^{26} \text{ W})/(4\pi \cdot (2{,}28 \times 10^{11} \text{ m})^2) = 5{,}8 \times 10^2 \text{ W/m}^2$; il rapporto è $(1{,}50/2{,}28)^2 = 0{,}43$: su Marte arriva meno della metà dell'intensità. d) $p \approx I/c = (1{,}34 \times 10^3 \text{ W/m}^2)/(3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 4{,}5 \times 10^{-6}$ Pa, circa $4{,}5 \times 10^{-11}$ volte la pressione atmosferica: sulla Terra non la avvertiamo, nello spazio, senza attrito, può muovere una vela.

22. a) Dopo il primo: $40/2 = 20 \text{ W/m}^2$. Dopo il secondo (30°): $20 \cdot \cos^2 30° = 20 \cdot 0{,}750 = 15 \text{ W/m}^2$. Dopo il terzo, a $90° - 30° = 60°$ dal secondo: $15 \cdot \cos^2 60° = 15 \cdot 0{,}25 = 3{,}8 \text{ W/m}^2$. b) Senza il polarizzatore intermedio

gli altri due sono incrociati: $20 \cdot \cos^2 90° = 0$. c) A 45°: $20 \cdot \cos^2 45° \cdot \cos^2 45° = 20 \cdot 0{,}50 \cdot 0{,}50 = 5{,}0$ W/m^2.

23. a) $\lambda = 2 \cdot 6{,}1$ cm $= 12{,}2$ cm $= 0{,}122$ m. b) $v = \lambda f = 0{,}122$ m $\cdot\ 2{,}45 \times 10^9$ Hz $= 2{,}99 \times 10^8$ m/s, in ottimo accordo con $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s (differenza dello 0,3%). c) La distanza fra i punti fusi: le macchie sono larghe circa un centimetro e il loro centro si individua al più con qualche millimetro di incertezza (1 mm su 61 mm è già quasi il 2%), mentre la frequenza dell'etichetta è nota con precisione molto maggiore. Conviene misurare la distanza fra punti fusi lontani, che comprende più mezze lunghezze d'onda.

24. a) $B_0 = E_0/c = (0{,}10$ V/m$)/(3{,}00 \times 10^8$ m/s$) = 3{,}3 \times 10^{-10}$ T. b) $T = 1/f = 1{,}0 \times 10^{-6}$ s, $T/4 = 2{,}5 \times 10^{-7}$ s; $\Delta\Phi$ per spira $= B_0 S = 3{,}33 \times 10^{-10}$ T $\cdot\ 0{,}010$ m$^2 = 3{,}3 \times 10^{-12}$ Wb. c) $|f_{em}| = N\Delta\Phi/\Delta t = 50 \cdot 3{,}33 \times 10^{-12}$ Wb$/(2{,}5 \times 10^{-7}$ s$) = 6{,}7 \times 10^{-4}$ V $\approx 0{,}7$ mV. d) Il ricevitore non deve fornire energia, ma solo riconoscere un segnale alla frequenza giusta: un circuito risonante seleziona quella frequenza e un amplificatore, alimentato da una batteria o dalla rete, ne aumenta l'ampiezza. La f.e.m. cresce con la frequenza: la rapidità della variazione del flusso è ciò che conta (capitolo 8).

25. Traccia di risposta. Maxwell afferma che la luce è un'onda trasversale dello stesso «mezzo» responsabile dei fenomeni elettrici e magnetici, cioè un fenomeno elettromagnetico. Si basa su un calcolo: la velocità delle onde previste dalla sua teoria dipende da costanti elettriche e magnetiche misurate in laboratorio (Weber e Kohlrausch, 1856) e risulta uguale, entro le incertezze, alla velocità della luce misurata da Fizeau e Foucault. È stata confermata l'identità fra luce e onde elettromagnetiche e il loro carattere trasversale (polarizzazione). È stato abbandonato il «mezzo», l'etere: le onde si propagano nel vuoto (capitolo 11). La prova sperimentale fu quella di Hertz (1887–1888): produrre onde con circuiti elettrici, misurarne lunghezza d'onda e velocità, e mostrare che si riflettono, si rifrangono e si polarizzano come la luce.

26. Traccia di risposta. Un involucro conduttore chiuso scherma i campi elettrici esterni (capitolo 2): le cariche del metallo si ridistribuiscono e annullano il campo all'interno; per le onde elettromagnetiche il campo elettrico dell'onda mette in moto gli elettroni delle pareti, che producono un'onda opposta. Un ascensore di metallo è una scatola quasi chiusa, con fessure strette rispetto alla lunghezza d'onda dei cellulari (da una decina a qualche decina di centimetri): le onde non passano, o passano molto attenuate. Un'automobile ha invece grandi finestrini, larghi decine di centimetri, e l'antenna della radio è all'esterno della carrozzeria; inoltre le onde radio FM sono lunghe circa 3 m. Un'apertura molto più piccola della lunghezza d'onda blocca l'onda, una paragonabile o più grande la lascia passare: per questo la griglia della porta del forno a microonde, con fori di pochi millimetri, trattiene le microonde di 12 cm ma lascia passare la luce, di lunghezza d'onda molto minore.

27. Traccia di risposta. Primo errore: $c = \lambda f$ non dice che c cresce con f; nel vuoto c è la stessa per tutte le onde elettromagnetiche, e a frequenza maggiore corrisponde lunghezza d'onda minore. Secondo errore: i raggi X non attraversano il corpo perché vanno più veloci, ma perché interagiscono poco con i tessuti molli; sono assorbiti di più dalle ossa, ricche di calcio. La capacità di attraversare la materia dipende dalla frequenza attraverso il modo in cui l'onda interagisce con gli atomi, non attraverso la velocità.

28. Traccia di risposta. a) Raggi X, nella banda da 0,01 nm a 10 nm, fra l'ultravioletto e i raggi gamma; sono radiazioni ionizzanti. b) I raggi X attraversano facilmente i tessuti molli e sono assorbiti di più dalle ossa, ricche di calcio, e ancora di più dai metalli: sulla lastra le ossa e le schegge appaiono come ombre. Si producono frenando bruscamente contro un bersaglio metallico elettroni accelerati da una differenza di potenziale di decine di migliaia di volt: cariche accelerate emettono onde elettromagnetiche. c) Collegamento: la scoperta di Röntgen era di meno di vent'anni prima (1895); la prima guerra mondiale fu una guerra in cui la scienza entrò su larga scala nell'organizzazione militare e sanitaria. Marie Curie, premio Nobel per la fisica nel 1903 e per la chimica nel 1911, mise le sue competenze al servizio dei feriti. Un buon colloquio può citare anche altri usi della fisica nella guerra, con fatti

certi, e il problema, allora poco noto, della protezione degli operatori dalle radiazioni.

29. Traccia di risposta (10–15 righe). Faraday aveva mostrato che un campo magnetico variabile produce un campo elettrico. Maxwell, per rendere coerenti le leggi dell'elettromagnetismo, ipotizzò il fenomeno simmetrico: un campo elettrico variabile produce un campo magnetico, come una corrente (corrente di spostamento, per esempio fra le armature di un condensatore che si carica). Con le due leggi insieme, una perturbazione dei campi si autosostiene: il campo elettrico che cambia genera un campo magnetico che cambia, che genera un campo elettrico più in là, e la perturbazione si propaga come un'onda trasversale, con $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$ perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione. La teoria dà la velocità dell'onda, $c = 1/\sqrt{(\varepsilon_0 \mu_0)}$, calcolata da costanti misurate con cariche e correnti: $3{,}00 \times 10^8$ m/s, la velocità della luce. Maxwell ne concluse (1862–1865) che la luce è un'onda elettromagnetica. Hertz, nel 1887–1888, produsse onde con circuiti elettrici, ne misurò lunghezza d'onda e velocità e mostrò che si riflettono, si rifrangono e si polarizzano come la luce. Errori da evitare: dire che le onde hanno bisogno dell'etere; confondere la corrente di spostamento con un moto di cariche.

30. Traccia di risposta. Fatti certi da usare: Hertz produsse le onde nel 1887–1888; Marconi trasmise segnali dal 1895 e attraverso l'Atlantico dal 1901, premio Nobel nel 1909; nel 1912 le chiamate di soccorso del Titanic furono raccolte via radio dal Carpathia; in Italia le trasmissioni regolari iniziarono il 6 ottobre 1924 con l'URI, sostituita nel 1927 dall'EIAR. Fra le due guerre la radio divenne un mezzo di comunicazione di massa: voce e musica arrivavano contemporaneamente in milioni di case, e i regimi totalitari, compreso il fascismo, ne fecero uno strumento di propaganda; nella seconda guerra mondiale le trasmissioni dall'estero furono una fonte di informazione alternativa. Il collegamento con la fisica: la radio sfrutta onde che attraversano i muri e si propagano a grande distanza alla velocità della luce, prodotte da correnti alternate in un'antenna. Si può citare anche l'entusiasmo dei futuristi per la radio e la velocità, senza inventare titoli o citazioni.