CAPITOLO

6

Lo spettro elettromagnetico

Dall'antenna della radio al tubo della radiografia oscilla sempre la stessa cosa, un campo elettrico e un campo magnetico: cambia soltanto quante volte al secondo.

OBIETTIVI

1. Collocare una radiazione nella sua banda a partire dalla frequenza o dalla lunghezza d'onda, e leggere lo spettro su una scala logaritmica.
2. Collegare ogni banda alle sue sorgenti, al modo in cui si propaga e alle sue applicazioni, dalla radio ai raggi gamma.
3. Spiegare la modulazione AM e FM, il ruolo della ionosfera, il funzionamento del radar e del forno a microonde.
4. Usare la legge dell'inverso del quadrato e i decibel per descrivere l'attenuazione di un segnale, e verificarla con una misura.
5. Descrivere la produzione dei raggi X e la legge di Bragg, distinguere radiazioni ionizzanti e non ionizzanti e i principi di protezione.
6. Spiegare quali bande attraversano l'atmosfera e che cosa ne consegue per l'astronomia e per il clima.

INDICE DEL CAPITOLO

6.1 Le bande dello spettro 2
6.2 Onde radio e microonde 5
6.3 Infrarosso, visibile e ultravioletto 14
6.4 Raggi X e raggi gamma 15
6.5 Gli effetti sulla materia e sugli organismi 19
6.6 L'atmosfera come filtro 21

Fisica 5 · Parte II · Le equazioni di Maxwell e le onde elettromagnetiche · versione 1.0
Capitolo 6: Lo spettro elettromagnetico · pagine 185–214 del volume completo · estratto per lo studio

Pensa alla prima mezz'ora di una giornata qualsiasi. La sveglia del telefono suona all'ora giusta perché il telefono ha ricevuto l'ora esatta dalla rete attraverso onde radio. Il tostapane diventa rosso e scalda il pane senza toccarlo. Accendi la luce, guardi fuori dalla finestra, ti metti la crema solare prima di uscire perché a maggio il Sole già «brucia». E magari, qualche giorno prima, il dentista ti ha fatto una radiografia. Onde radio, calore che si sente a distanza, luce, raggi che scottano la pelle, raggi che attraversano i tessuti: sembrano fenomeni diversissimi, studiati da discipline diverse e usati per scopi diversi.

Nel capitolo 5 hai visto che sono la stessa cosa. Un'onda elettromagnetica è un campo elettrico e un campo magnetico che oscillano in fase, perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione, e nel vuoto viaggiano tutte alla stessa velocità c. Ciò che distingue la luce di una lampada dal segnale del Wi-Fi o dai raggi X è soltanto la frequenza, cioè quante volte al secondo il campo oscilla. Ma la frequenza conta moltissimo: cambia il modo in cui l'onda si produce, il modo in cui attraversa l'aria e la materia, gli effetti che ha sui tessuti viventi e quindi le applicazioni. In questo capitolo percorriamo lo spettro da un capo all'altro, banda per banda, e cerchiamo ogni volta di capire **perché** quella banda si comporta così.

6.1 Le bande dello spettro

6.1.1 Più di venti ordini di grandezza

Per ogni onda elettromagnetica nel vuoto vale la relazione del capitolo 5:

$$c = \lambda f$$

Fissata la velocità, frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali: se la frequenza raddoppia, la lunghezza d'onda si dimezza. Le onde elettromagnetiche che sappiamo produrre o osservare hanno frequenze che vanno da meno di un hertz (le oscillazioni lentissime del campo magnetico terrestre) a più di 10^{25} Hz (i raggi gamma più energetici che arrivano dallo spazio). L'insieme di tutte queste onde, ordinate per frequenza o per lunghezza d'onda, si chiama **spettro elettromagnetico**.

Un intervallo così grande non si può disegnare su una scala lineare: se 1 cm rappresentasse 1 MHz, la luce visibile si troverebbe a qualche migliaio di chilometri dall'origine. Si usa allora una scala logaritmica, nella quale a distanze uguali corrispondono **rapporti** uguali: fra 10^6 e 10^7 Hz c'è la stessa distanza che fra 10^{14} e 10^{15} Hz. Ogni intervallo in cui la grandezza si moltiplica per 10 si chiama decade. La Figura 6.1 mostra lo spettro su questa scala, con le frequenze in basso e le lunghezze d'onda in alto: le due scale corrono in versi opposti, perché dove la frequenza cresce la lunghezza d'onda diminuisce.

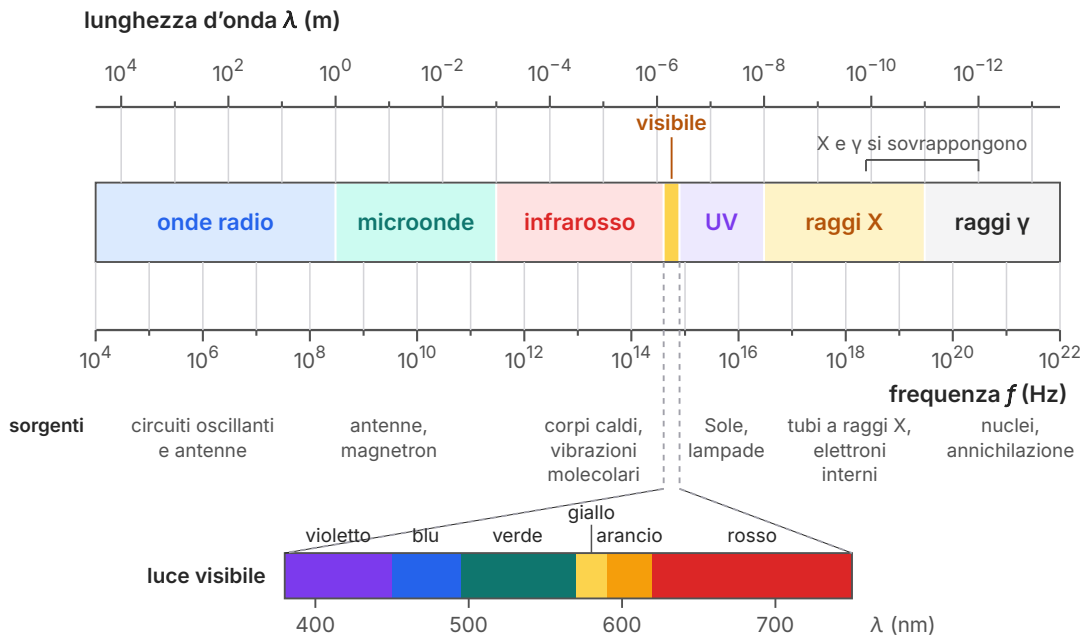


Figura 6.1 Lo spettro elettromagnetico su una scala logaritmica, da 10^4 Hz a 10^{22} Hz (in alto le lunghezze d'onda nel vuoto, $\lambda = c/f$). I confini fra le bande sono quelli convenzionali della Tabella A.2 dell'appendice; la luce visibile, che occupa meno di un terzo di decade, è ingrandita in basso. Sotto ogni banda sono indicate le sorgenti tipiche.

Lo spettro si divide in **bande**, intervalli di frequenza ai quali per tradizione si dà un nome: **onde radio**, **microonde**, **radiazione infrarossa**, luce visibile, **radiazione ultravioletta**, **raggi X** e **raggi gamma**. I loro confini, riportati nella Tabella A.2 dell'appendice, sono **convenzionali**: non succede nulla di speciale a 300 MHz, dove per convenzione finiscono le onde radio e cominciano le microonde, e testi diversi pongono i confini in punti un po' diversi. Il caso più evidente è quello dei raggi X e gamma, che si sovrappongono per alcune decadi: un raggio X e un raggio gamma con la stessa frequenza sono fisicamente indistinguibili, e si chiamano in modo diverso solo per la loro **origine**. Sono X se nascono dagli elettroni, gamma se nascono dai nuclei atomici o da altri processi delle particelle.

C'è un altro modo di caratterizzare ogni banda, di cui per ora possiamo solo accennare. Nel capitolo 11 scoprirai che un'onda elettromagnetica di frequenza f cede energia alla materia non in modo continuo, ma in «pacchetti» di energia proporzionale a f. Per questo nei testi di fisica moderna lo spettro è spesso graduato anche in elettronvolt. Qui ci basta la frequenza, ma tieni presente che molte differenze fra le bande, soprattutto negli effetti sulla materia, si capiranno fino in fondo solo allora.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere una scala logaritmica

Problema. Nella Figura 6.1 ogni decade di frequenza occupa la stessa lunghezza. a) Un punto dell'asse delle frequenze si trova a 0,30 decadi a destra di 10^{14} Hz: quanto valgono la sua frequenza e la sua lunghezza d'onda, e a quale banda appartiene? b) Dove si trova sull'asse il Wi-Fi a 2,4 GHz? c) Quante decadi separano un'onda radio FM di lunghezza d'onda 3 m dalla luce verde di 500 nm?

Soluzione. a) Su una scala logaritmica la posizione misura il logaritmo in base 10 della grandezza: un punto a 0,30 decadi dopo 10^{14} rappresenta $f = 10^{14,30}$ Hz $= 10^{0,30} \times 10^{14}$ Hz $= 2{,}0 \times 10^{14}$ Hz. La lunghezza d'onda è $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s})/(2{,}0 \times 10^{14}\ \text{Hz}) = 1{,}5 \times 10^{-6}$ m $= 1{,}5\ \mu$m: è radiazione infrarossa, vicina alle lunghezze d'onda usate nelle fibre ottiche.

b) $\log 2{,}4 \times 10^{9} = 9 + \log 2{,}4 = 9{,}38$: il Wi-Fi si trova a 0,38 decadi dopo 10^{9} Hz, poco più di un terzo dell'intervallo fra 1 GHz e 10 GHz. La sua lunghezza d'onda è $(3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s})/(2{,}4 \times 10^{9}\ \text{Hz}) = 0{,}125$ m $= 12{,}5$ cm: microonde.

c) Il rapporto fra le lunghezze d'onda è $(3\ \text{m})/(5 \times 10^{-7}\ \text{m}) = 6 \times 10^{6}$, e $\log(6 \times 10^{6}) = 6{,}78$: le due onde distano quasi sette decadi, che sono anche il rapporto fra le loro frequenze.

Che cosa notare. Su una scala logaritmica non esiste lo zero e un passo uguale è un fattore uguale. Il «centro» fra 1 GHz e 10 GHz non è 5,5 GHz ma $\sqrt{10}$ GHz $\approx 3{,}2$ GHz.

6.1.2 Chi emette che cosa

Perché ogni banda ha le sue sorgenti? Una regola pratica guida tutto lo spettro: un sistema emette (e assorbe) bene le onde la cui frequenza è vicina a quella delle sue oscillazioni naturali, o la cui lunghezza d'onda è confrontabile con le sue dimensioni. Le cariche di un'antenna lunga qualche metro, spinte avanti e indietro da un circuito oscillante, emettono onde radio di lunghezza d'onda simile. Le molecole, i cui atomi vibrano e ruotano con frequenze fra 10^{11} e 10^{14} Hz, emettono e assorbono nell'infrarosso. Gli elettroni più esterni degli atomi, quando cambiano stato, danno luce visibile e ultravioletta; gli elettroni più interni, legati molto più fortemente, danno raggi X; i nuclei, ancora più piccoli e più legati, danno raggi gamma. Scendendo nello spettro verso le alte frequenze si scende quindi anche nella scala delle dimensioni: dal circuito alla molecola, all'atomo, al nucleo.

Questa regola spiega anche perché le varie bande si rivelano con strumenti tanto diversi: un'antenna e un ricevitore per le onde radio, un sensore che si scalda per l'infrarosso lontano, l'occhio o una fotocamera per il visibile, una lastra fotografica o un rivelatore a gas per i raggi X e gamma.

6.2 Onde radio e microonde

6.2.1 Le antenne e il magnetron

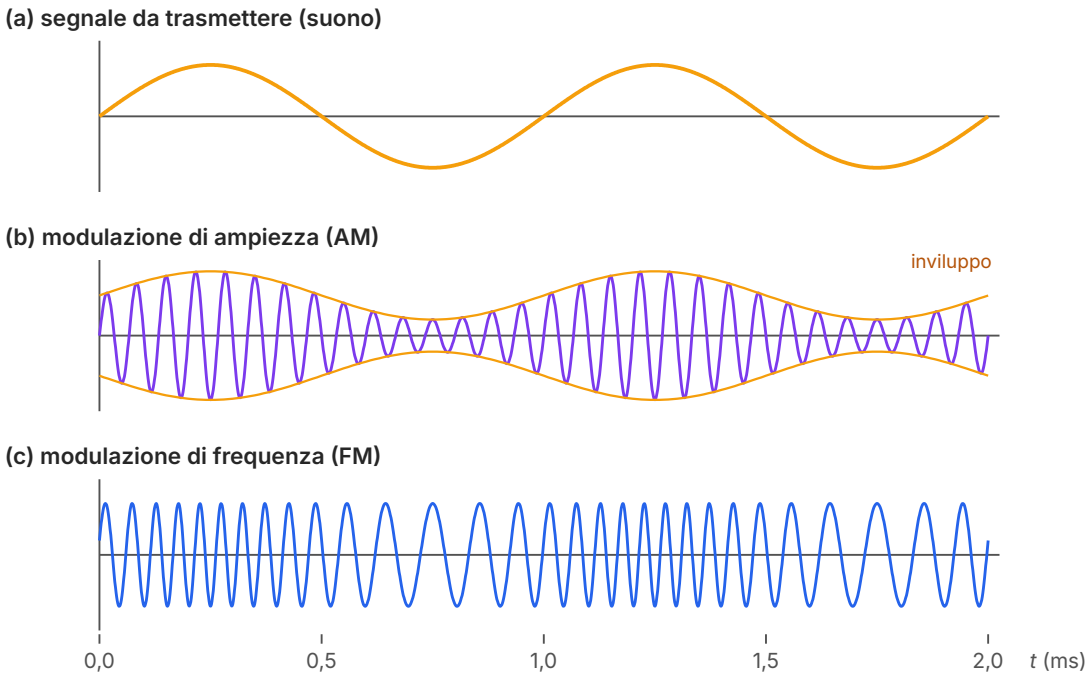
Le onde radio sono prodotte, come hai visto nel capitolo 5, dalle cariche che un circuito oscillante spinge avanti e indietro in un'antenna, lunga di solito mezza lunghezza d'onda (o un quarto, se è verticale sopra il suolo). Per questo le antenne dei telefoni, che lavorano a qualche gigahertz, stanno dentro la custodia.

Per le microonde di grande potenza si usa un dispositivo diverso, il **magnetron**: un tubo a vuoto in cui gli elettroni emessi da un catodo caldo si muovono verso l'anodo in un campo elettrico e in un campo magnetico perpendicolari. La forza di Lorentz (Fisica 4, capitolo 15) li fa girare in tondo, e nel loro moto sfiorano una serie di cavità scavate nell'anodo, mettendole in oscillazione un po' come il soffio fa suonare un fischietto. Le dimensioni delle cavità fissano la frequenza: in un forno domestico 2,45 GHz.

6.2.2 Trasmettere informazione: AM e FM

Un'onda sinusoidale di frequenza fissa, sempre uguale, non trasporta nessun messaggio. Per trasmettere un suono, che contiene frequenze fra qualche decina di hertz e qualche migliaio di hertz, non si può neanche irradiarlo direttamente: onde di 1 kHz avrebbero lunghezza d'onda di 300 km e richiederebbero antenne lunghe chilometri. Si usa invece un'onda ad alta frequenza, la **portante**, e se ne varia una caratteristica seguendo il segnale da trasmettere: è la modulazione.

Nella **modulazione di ampiezza** (AM, *amplitude modulation*) varia l'ampiezza della portante: il suo inviluppo, cioè la curva che ne unisce i massimi, riproduce la forma del segnale (Figura 6.2b). Nella **modulazione di frequenza** (FM) l'ampiezza resta costante e varia di poco la frequenza: la portante si «addensa» dove il segnale è positivo e si «dirada» dove è negativo (Figura 6.2c). Il ricevitore fa il lavoro inverso, la demodulazione: estrae dall'onda ricevuta l'inviluppo (AM) o le variazioni di frequenza (FM) e le trasforma in una tensione che pilota l'altoparlante.



portante disegnata a 15 kHz: in una trasmissione reale oscilla da decine a centinaia di migliaia di volte più in fretta

Figura 6.2 Modulazione di una portante da parte di un segnale sinusoidale di 1 kHz, calcolata. (a) Il segnale. (b) AM: l'ampiezza della portante varia del ±60% seguendo il segnale; l'inviluppo (in arancio) ne riproduce la forma. (c) FM: l'ampiezza è costante e la frequenza istantanea varia fra 9 kHz e 21 kHz, più alta dove il segnale è positivo. Per leggibilità la portante è disegnata a soli 15 kHz.

Le due tecniche hanno pregi diversi. Un'onda modulata non ha più una sola frequenza: occupa una banda attorno alla portante, larga in AM il doppio della frequenza più alta del segnale, in FM molto di più. Per questo le stazioni FM hanno bisogno di canali larghi (qualche centinaio di kilohertz) e stanno a frequenze alte, dove lo spazio non manca. In cambio la FM è molto meno sensibile ai disturbi: i fulmini, i motori, gli apparecchi elettrici producono soprattutto variazioni di ampiezza, che un ricevitore FM ignora. Oggi la maggior parte delle trasmissioni (radio digitale DAB+, televisione digitale terrestre, telefonia mobile, Wi-Fi) è digitale: si trasmettono sequenze di bit variando a scatti l'ampiezza e la fase della portante, ma l'idea di fondo, una portante che porta il messaggio, è la stessa. La Tabella 6.1 raccoglie alcune frequenze di uso comune.

Tabella 6.1 Frequenze e lunghezze d'onda nel vuoto di alcuni servizi radio e a microonde (valori arrotondati).

Servizio	Frequenza	Lunghezza d'onda
radio AM in onde medie	0,53–1,6 MHz	570–190 m
radio in onde corte	3–30 MHz	100–10 m
radio FM	87,5–108 MHz	3,4–2,8 m
televisione digitale terrestre (UHF)	470–694 MHz	64–43 cm
navigazione satellitare GPS (segnale civile)	1,575 GHz	19 cm
Wi-Fi, Bluetooth, forno a microonde	2,4–2,5 GHz	12–13 cm
Wi-Fi a 5 GHz	5,2–5,8 GHz	5,8–5,2 cm
riga dell'idrogeno in radioastronomia	1,420 GHz	21 cm

6.2.3 Come si propagano: la ionosfera

Le onde radio si propagano in linea retta come la luce, ma la Terra è curva. Come fa allora una stazione a onde corte a farsi ascoltare dall'altra parte del pianeta? Il merito è della **ionosfera**, la parte dell'alta atmosfera (fra circa 60 e 1000 km di quota) in cui la radiazione ultravioletta e i raggi X del Sole strappano elettroni alle molecole, lasciando un gas in parte ionizzato. Gli elettroni liberi oscillano sotto l'azione del campo dell'onda e, al di sotto di una certa frequenza, la rimandano indietro: per le onde corte la ionosfera si comporta come uno specchio, e l'onda può rimbalzare più volte fra cielo e suolo (Figura 6.3). La frequenza limite dipende dalla densità degli elettroni, che cambia fra il giorno e la notte. Di notte, senza il Sole, lo strato più basso della ionosfera, che di giorno assorbe le onde medie, si ricombina e scompare, e anche le onde medie sono rimandate a terra dagli strati più alti: è per questo che di sera, in onde medie, si captano stazioni lontane che di giorno non si sentono.

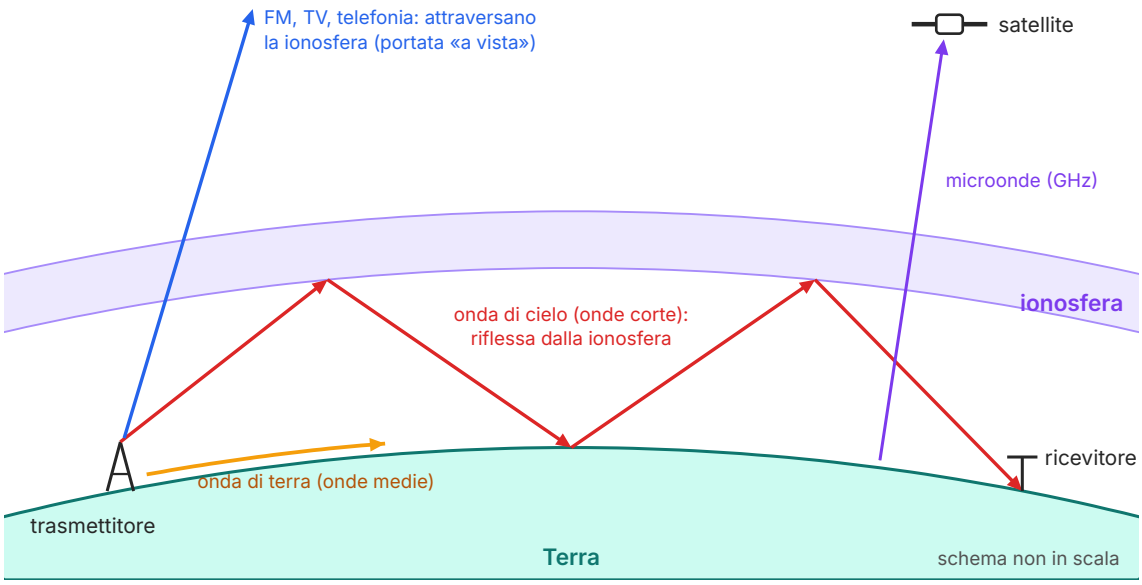


Figura 6.3 Tre modi di propagazione delle onde radio (schema non in scala). Le onde medie seguono la superficie terrestre (onda di terra). Le onde corte sono riflesse dalla ionosfera e, con uno o più rimbalzi, raggiungono ricevitori al di là dell'orizzonte. Le onde a frequenze più alte (FM, televisione, telefonia, satelliti) attraversano la ionosfera: a terra arrivano solo dove l'antenna è «in vista», ma possono raggiungere un satellite.

Sopra qualche decina di megahertz la ionosfera diventa trasparente. Le onde FM, televisive e della telefonia mobile la attraversano e si perdono nello spazio, per cui a terra arrivano solo fino all'orizzonte dell'antenna: è per questo che i ripetitori stanno sulle cime delle colline e che le reti mobili hanno bisogno di migliaia di stazioni base. In compenso, proprio perché la attraversano, sono le onde giuste per comunicare con i satelliti. Le onde medie e lunghe, infine, si propagano anche come onda di terra, seguendo la superficie terrestre per centinaia di chilometri.

6.2.4 Le microonde: telefoni, radar, forni

Le microonde (da 300 MHz a 300 GHz, cioè da 1 m a 1 mm) sono la banda delle telecomunicazioni moderne. Le reti mobili usano bande da qualche centinaio di megahertz a qualche gigahertz; il Wi-Fi e il Bluetooth lavorano intorno a 2,4 GHz e, il Wi-Fi, anche a 5 GHz. Le frequenze più alte trasportano più dati al secondo, ma attraversano peggio muri e ostacoli: l'acqua contenuta nei materiali e nei corpi le assorbe di più.

Il **radar** (*radio detection and ranging*) invia brevi impulsi di microonde e ne riceve l'eco riflessa da un oggetto: dal ritardo Δt dell'eco si ricava la distanza, $d = c\Delta t/2$ (l'onda fa andata e ritorno), dalla direzione dell'antenna la posizione, dallo spostamento Doppler della frequenza (capitolo

5) la velocità. Sono radar quelli del controllo del traffico aereo, quelli meteorologici, che «vedono» le gocce di pioggia, e i misuratori di velocità della polizia stradale.

Nel forno a microonde le onde a 2,45 GHz prodotte dal magnetron rimbalzano sulle pareti metalliche della cavità e attraversano il cibo. Le molecole d'acqua sono dipoli elettrici (Fisica 4, capitolo 10): il campo elettrico che si inverte miliardi di volte al secondo esercita su di esse un momento torcente alternato, e le molecole, cercando di seguirlo, urtano le vicine e trasformano l'energia dell'onda in energia interna. Contrariamente a un'idea diffusa, 2,45 GHz **non** è una frequenza di risonanza della molecola d'acqua: l'assorbimento dell'acqua liquida varia lentamente con la frequenza ed è massimo intorno a qualche decina di gigahertz. Una frequenza più bassa del massimo è anzi un vantaggio, perché le onde penetrano per qualche centimetro nel cibo invece di scaldarne solo la superficie. La banda dei 2,4–2,5 GHz, inoltre, è riservata dagli accordi internazionali agli usi industriali, scientifici e medici e si può usare senza licenza: per questo la usano anche Wi-Fi e Bluetooth.

ESEMPIO SVOLTO

Misurare la velocità della luce con un forno e una tavoletta di cioccolato

Problema. Si toglie il piatto rotante da un forno a microonde da 2,45 GHz e 800 W, vi si appoggia sopra un piatto capovolto con una tavoletta di cioccolato e si accende il forno per una ventina di secondi. Il cioccolato fonde solo in alcune macchie, i cui centri distano (6,0 ± 0,5) cm. a) Spiega da dove vengono le macchie. b) Ricava la velocità delle onde, con la sua incertezza. c) In un'altra prova 250 g d'acqua, scaldati per 60 s, passano da 20 °C a 52 °C: quale frazione della potenza del magnetron finisce nell'acqua?

Soluzione. a) Le onde riflesse dalle pareti si sovrappongono a quelle incidenti e formano onde stazionarie (Fisica 4, capitolo 6): ci sono punti in cui il campo elettrico oscilla con ampiezza massima (ventri) e punti in cui resta quasi nullo (nodi). Senza il piatto rotante il cioccolato fonde dove l'ampiezza è massima, e due ventri consecutivi distano mezza lunghezza d'onda.

b) Da $d = \lambda/2$ si ha $\lambda = 2d = 12{,}0$ cm e $c = \lambda f = 2df = 2 \times 0{,}060\ \text{m} \times 2{,}45 \times 10^9\ \text{Hz} = 2{,}94 \times 10^8$ m/s. La frequenza è nota con molta precisione, quindi l'incertezza relativa su c è quella su d, 0,5/6,0 ≈ 8%: $c = (2{,}9 \pm 0{,}2) \times 10^8$ m/s, compatibile con $3{,}00 \times 10^8$ m/s.

c) L'energia assorbita dall'acqua è $Q = mc_s\Delta T = 0{,}250\ \text{kg} \times 4186\ \text{J/(kg·K)} \times 32\ \text{K} = 3{,}35 \times 10^4$ J; il magnetron ne ha prodotti $800\ \text{W} \times 60\ \text{s} = 4{,}80 \times 10^4$ J. La frazione è 3,35/4,80 ≈ 0,70, cioè circa il 70%. Il resto scalda le pareti e il contenitore o è assorbito dal magnetron stesso.

Che cosa notare. Il campo in una cavità chiusa è un'onda stazionaria in tre dimensioni, non una semplice onda fra due specchi: le macchie non sono allineate in modo perfetto, ed è per questo che l'incertezza su d è grande. Il piatto rotante dei forni serve proprio a far passare ogni parte del cibo per i ventri e per i nodi.

Le microonde, infine, aprono una finestra sull'universo. Gli atomi di idrogeno freddo sparsi nelle galassie emettono una debolissima onda radio a 1420 MHz, la riga a 21 cm, che permette

di mappare la distribuzione del gas e la rotazione delle galassie. È uno degli strumenti principali della radioastronomia. I radiotelescopi sono enormi parabole, perché la capacità di distinguere due sorgenti vicine è limitata dalla diffrazione (Fisica 4, capitolo 8) e dipende dal rapporto λ/D fra lunghezza d'onda e diametro dello strumento: con $\lambda = 21$ cm, per vedere i dettagli che un telescopio ottico vede con uno specchio di 10 cm servirebbe un'antenna di decine di chilometri. Per questo si collegano più radiotelescopi lontani, che lavorano insieme come un'unica antenna grande quanto la loro distanza.

6.2.5 Quanto si indebolisce un segnale

Allontanandosi da un'antenna il segnale si indebolisce. I tecnici delle telecomunicazioni misurano le potenze ricevute in **dBm**, decibel riferiti a un milliwatt: con la stessa idea del livello di intensità sonora (Fisica 4, capitolo 7), una potenza P corrisponde al livello

$$L = 10 \log \frac{P}{1\ \text{mW}} \qquad \text{(in dBm)}$$

Così 1 mW è 0 dBm, 1 W è 30 dBm, un microwatt è −30 dBm. I segnali che arrivano a un telefono hanno tipicamente livelli fra −30 dBm e −90 dBm, cioè potenze fra un microwatt e un miliardesimo di milliwatt: i decibel servono proprio a maneggiare numeri che variano di molte decadi. Lo stesso telefono mostra il livello del segnale Wi-Fi ricevuto, l'RSSI (*received signal strength indicator*), e con questo dato possiamo mettere alla prova la legge dell'inverso del quadrato.

ESEMPIO SVOLTO

Perché il segnale cala di 20 dB a ogni decade di distanza

Problema. Ricava come varia con la distanza r il livello in dBm del segnale ricevuto da un'antenna che irradia in modo uguale in tutte le direzioni, nello spazio libero, e calcola di quanto diminuisce quando la distanza raddoppia e quando decuplica.

Passo 1: l'intensità. Lontano dall'antenna (a distanze molto maggiori della lunghezza d'onda) la potenza irradiata P_0 attraversa sfere sempre più grandi. Per la conservazione dell'energia, come hai visto nel capitolo 5:

$$I = \frac{P_0}{4\pi r^2}$$

Passo 2: la potenza ricevuta. L'antenna ricevente raccoglie la potenza che attraversa una certa superficie efficace A, che dipende dall'antenna ma non dalla distanza: $P = IA$. Quindi $P \propto 1/r^2$.

Passo 3: il livello. Confrontiamo i livelli a due distanze r e r_0. Poiché la differenza di due logaritmi è il logaritmo del rapporto, il milliwatt di riferimento si semplifica:

$$L(r) - L(r_0) = 10 \log \frac{P(r)}{P(r_0)} = 10 \log \frac{r_0^{\,2}}{r^2} = -20 \log \frac{r}{r_0}$$

Passo 4: il grafico. Se si riporta L in funzione di $\log r$, si ottiene una retta con pendenza −20 dB per decade. Raddoppiando la distanza il livello cala di $20 \log 2 = 6{,}0$ dB; decuplicandola cala di 20 dB. Se a 1 m si riceve −38 dBm, a 10 m ci si aspettano −58 dBm e a 100 m −78 dBm.

Condizioni di validità. Spazio libero, cioè nessun ostacolo che assorba e nessuna superficie che rifletta; distanze molto maggiori della lunghezza d'onda e delle dimensioni dell'antenna. Se l'antenna non irradia in modo uguale in tutte le direzioni la legge vale ugualmente lungo una direzione fissata, perché cambia solo la costante.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il segnale Wi-Fi e la legge dell'inverso del quadrato

Materiali. Due smartphone: il primo fa da router, con il punto di accesso personale (*hotspot*) impostato sulla banda dei 2,4 GHz; il secondo ha un'app che legge l'RSSI della rete Wi-Fi in dBm, con risoluzione di 1 dBm. Un metro a nastro (risoluzione 1 cm), due sgabelli o treppiedi della stessa altezza (circa 1 m), un cortile o un prato ampio, lontano da muri e auto; per la seconda parte, un corridoio con porte e stanze ai lati.

Procedimento. 1) Appoggia il telefono-router su uno sgabello e il telefono ricevente sull'altro, alla stessa altezza e sempre con lo stesso orientamento: non tenerlo in mano, perché il corpo, ricco d'acqua, assorbe le microonde. 2) Per ogni distanza, da 0,50 m a 16 m, leggi l'RSSI cinque volte nell'arco di una decina di secondi e registra la media arrotondata al dBm. Le letture fluttuano di qualche unità: assegna a ogni media un'incertezza di ±2 dBm. 3) Ripeti le misure, alle stesse distanze, dentro l'edificio, con il router in una stanza e il ricevitore che si allontana lungo il corridoio e nelle stanze vicine.

Tabella 6.2 Livello del segnale Wi-Fi a 2,4 GHz in funzione della distanza dal router, all'aperto e dentro un edificio (dati tipici; incertezza ±2 dBm).

r (m)	$\log(r/1\ \text{m})$	L all'aperto (dBm)	L in casa (dBm)
0,50	−0,30	−31	−29
1,0	0,00	−39	−40
1,5	0,18	−40	−41
2,0	0,30	−45	−47
3,0	0,48	−47	−50
4,0	0,60	−49	−57
6,0	0,78	−55	−57
8,0	0,90	−55	−64
12	1,08	−60	−67
16	1,20	−62	−72

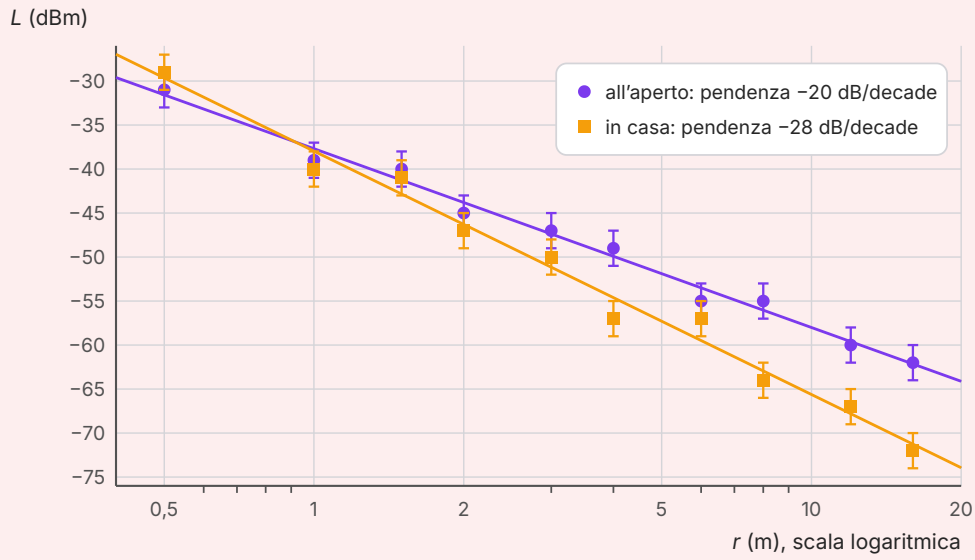


Figura 6.4 I dati della Tabella 6.2 in funzione della distanza su scala logaritmica, con le barre d'incertezza e le rette di miglior accordo. All'aperto i punti seguono la retta di pendenza −20 dB per decade prevista dalla legge dell'inverso del quadrato; dentro l'edificio il segnale cala più in fretta.

Che cosa concludere. In entrambi i casi i punti, riportati in funzione di log r (Figura 6.4), si dispongono attorno a una retta: il livello in dBm decresce linearmente con il logaritmo della distanza, cioè la potenza ricevuta è una potenza di r. Per la pendenza usiamo, come in Fisica 1, le rette di massima e di minima pendenza compatibili con le barre del primo e dell'ultimo punto. All'aperto valgono −23,3 e −17,9 dB per decade, da cui $m = (-21 \pm 3)$ dB per decade; la retta di miglior accordo ha pendenza −20,3 dB per decade e intercetta −37,7 dBm a 1 m.

Confronto teoria–esperimento. La legge dell'inverso del quadrato prevede −20 dB per decade. La differenza fra misura e previsione, circa 1 dB per decade, è minore dell'incertezza di 3 dB per decade: all'aperto la misura è **compatibile** con il modello. Dentro l'edificio le rette estreme danno −31,2 e −25,9 dB per decade, cioè $m = (-29 \pm 3)$ dB per decade (retta di miglior accordo: −27,7 dB per decade): la differenza da −20, circa 9 dB per decade, è tre volte l'incertezza, e la misura **non è compatibile** con il modello dello spazio libero. Il motivo è fisico, non strumentale: muri, porte e mobili assorbono parte del segnale, e il numero di ostacoli attraversati cresce con la distanza.

Sicurezza. L'esperienza non presenta rischi: un telefono usato come router emette qualche decina di milliwatt. All'aperto scegli uno spazio lontano dal traffico.

Per la relazione. Spiega perché conviene riportare i dati in funzione di log r invece che di r. Prova a spostare il ricevitore di pochi centimetri a distanza fissa: le letture cambiano di diversi dBm, perché le onde riflesse dal suolo e dagli oggetti interferiscono con l'onda diretta e creano massimi e minimi distanti qualche centimetro (mezza lunghezza d'onda è circa 6 cm). Proponi

un modo per ridurre questo effetto e discuti perché, all'aperto, la misura a 0,50 m è la meno affidabile.

6.3 Infrarosso, visibile e ultravioletto

6.3.1 L'infrarosso: la radiazione dei corpi caldi

Nel 1800 l'astronomo William Herschel, misurando con un termometro la temperatura dei colori della luce solare dispersa da un prisma, si accorse che il termometro si scaldava ancora di più al di là del rosso, dove l'occhio non vede niente. Aveva scoperto la **radiazione infrarossa**, che occupa lo spettro fra la luce rossa (circa 750 nm) e le microonde (1 mm). La emettono tutti i corpi, per il solo fatto di avere una temperatura: gli atomi e le molecole sono in continua agitazione termica, le cariche che contengono accelerano e quindi irradiano. Più il corpo è caldo, più radiazione emette e a frequenze più alte; nel capitolo 10 vedrai le leggi precise. Un corpo a temperatura ambiente o a 37 °C emette quasi tutto nell'infrarosso, con il massimo intorno a 10 μm; un ferro da stiro molto caldo emette ancora nell'infrarosso; un filamento di lampada, a quasi 3000 K, emette anche luce visibile.

Le termocamere misurano l'infrarosso fra circa 8 e 14 μm e trasformano l'intensità ricevuta in un'immagine a falsi colori della temperatura delle superfici: servono a scoprire le dispersioni di calore di un edificio, i guasti degli impianti elettrici che si surriscaldano, le persone al buio. È la **termografia**. Più vicino al visibile, l'infrarosso a 940 nm dei LED dei telecomandi porta i comandi al televisore, e quello intorno a 1,3 μm e 1,55 μm viaggia nelle fibre ottiche, che lo guidano per riflessione totale (Fisica 2, capitolo 15): il vetro di silice è così trasparente a queste lunghezze d'onda che il segnale perde solo circa 0,2 dB per chilometro. L'infrarosso è assorbito facilmente dalle molecole, le cui vibrazioni hanno frequenze fra 10^{12} e 10^{14} Hz: assorbendolo, i materiali si scaldano. È per questo che lo associamo al calore, anche se in sé non è più «caldo» delle altre radiazioni.

6.3.2 Il visibile: una banda strettissima

La luce visibile va da circa 380 nm (violetto) a circa 750 nm (rosso), cioè da $7{,}9 \times 10^{14}$ Hz a $4{,}0 \times 10^{14}$ Hz: meno di un terzo di decade su più di venti (Figura 6.1). La sensibilità dell'occhio non è la stessa per tutti i colori: alla luce del giorno è massima nel verde-giallo, intorno a 555 nm, e cala fino a zero ai due estremi. Perché proprio questa banda? Perché la radiazione del Sole, riportata in funzione della lunghezza d'onda, è più intensa proprio nel visibile e perché l'atmosfera (e l'acqua) la lasciano passare quasi indisturbata (lo vedremo alla fine del capitolo): gli occhi degli animali si sono sviluppati per sfruttare la radiazione più abbondante. La stessa banda è usata dalle piante: la clorofilla assorbe il blu e il rosso per la fotosintesi e riflette il verde.

Da dove viene, a livello microscopico? Gli elettroni esterni degli atomi e delle molecole possono stare solo in certi stati di energia; quando passano da uno stato a un altro emettono o as-

sorbono luce di frequenze ben precise. Le righe spettrali che hai studiato con il reticolo (Fisica 4, capitolo 8) nascono così, e il capitolo 12 spiegherà perché.

6.3.3 L'ultravioletto

Oltre il violetto, fra 380 nm e 10 nm, c'è la **radiazione ultravioletta** (UV). Il Sole ne emette una parte importante, ma l'atmosfera ne lascia arrivare a terra solo una frazione. Per i suoi effetti sugli esseri viventi si divide in tre sottobande (Tabella 6.3): gli **UV-A**, gli **UV-B** e gli **UV-C**. Gli UV-C e la maggior parte degli UV-B sono assorbiti dall'ozono della stratosfera, fra 15 e 35 km di quota. Gli UV-A arrivano quasi tutti.

Tabella 6.3 Le tre sottobande dell'ultravioletto (convenzione internazionale; il confine fra UV-A e visibile, a 400 nm, sfuma in quello di 380 nm della Tabella A.2).

Sottobanda	Lunghezza d'onda	Arriva a terra?	Effetti e usi
UV-A	315–400 nm	quasi tutta	abbronzatura, invecchiamento della pelle; lampade per la fluorescenza
UV-B	280–315 nm	in piccola parte	eritemi (scottature), sintesi della vitamina D nella pelle, danni al DNA
UV-C	100–280 nm	no	lampade germicide (254 nm) per sterilizzare aria, acqua e superfici

Gli UV-B sono i responsabili principali delle scottature, ma sono anche quelli che permettono alla pelle di produrre la vitamina D: un'esposizione breve fa bene, una lunga e ripetuta aumenta il rischio di tumori della pelle, perché la radiazione UV è assorbita direttamente dal DNA delle cellule e ne può spezzare o alterare i legami. Le creme solari contengono sostanze che assorbono o diffondono gli UV prima che raggiungano la pelle. L'ultravioletto è anche alla base della **fluorescenza**: certe sostanze assorbono radiazione UV e riemettono subito luce visibile, di lunghezza d'onda maggiore. Così funzionano i tubi fluorescenti, nei quali il mercurio emette soprattutto ultravioletto a 254 nm e il rivestimento interno lo trasforma in luce bianca, i segni di sicurezza delle banconote che si illuminano sotto la «luce nera» e il colore acceso degli evidenziatori.

6.4 Raggi X e raggi gamma

6.4.1 La scoperta di Röntgen

Nel novembre 1895 Wilhelm Conrad Röntgen, a Würzburg, studiava la scarica elettrica in un tubo a vuoto, avvolto in un cartone nero. Notò che uno schermo ricoperto di una sostanza fluorescente, poco distante, si illuminava ogni volta che il tubo era acceso. Qualcosa usciva dal

tubo, attraversava il cartone e l'aria, e non era deviato da campi magnetici, quindi non erano particelle cariche. Röntgen lo chiamò «raggi X», con la lettera che in matematica indica l'incognita. In poche settimane scoprì che i nuovi raggi attraversavano la carta, il legno e la carne, ma erano fermati dai metalli e dalle ossa, e che impressionavano le lastre fotografiche: la prima radiografia della storia è quella della mano di sua moglie, con le ossa e l'anello ben visibili. Nel 1901 Röntgen ricevette il primo premio Nobel per la fisica. Che i raggi X fossero onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda molto piccola si capì con certezza solo qualche anno più tardi, quando si riuscì a farli diffrangere dai cristalli.

6.4.2 Il tubo a raggi X

Un moderno tubo a raggi X (Figura 6.5) contiene, nel vuoto, un filamento caldo che emette elettroni e un anodo di metallo. Una differenza di potenziale ΔV di decine di kilovolt accelera gli elettroni, che arrivano sull'anodo con energia cinetica $e\Delta V$: con 80 kV, 80 keV ciascuno. A queste energie gli elettroni hanno velocità pari a una frazione considerevole di c, e il calcolo classico della velocità comincia a sbagliare di parecchio, come era stato anticipato nel volume dello scorso anno: per $\Delta V = 80$ kV la formula $\frac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$ darebbe $0{,}56c$, mentre la relatività, nel capitolo 9, darà circa $0{,}50c$.

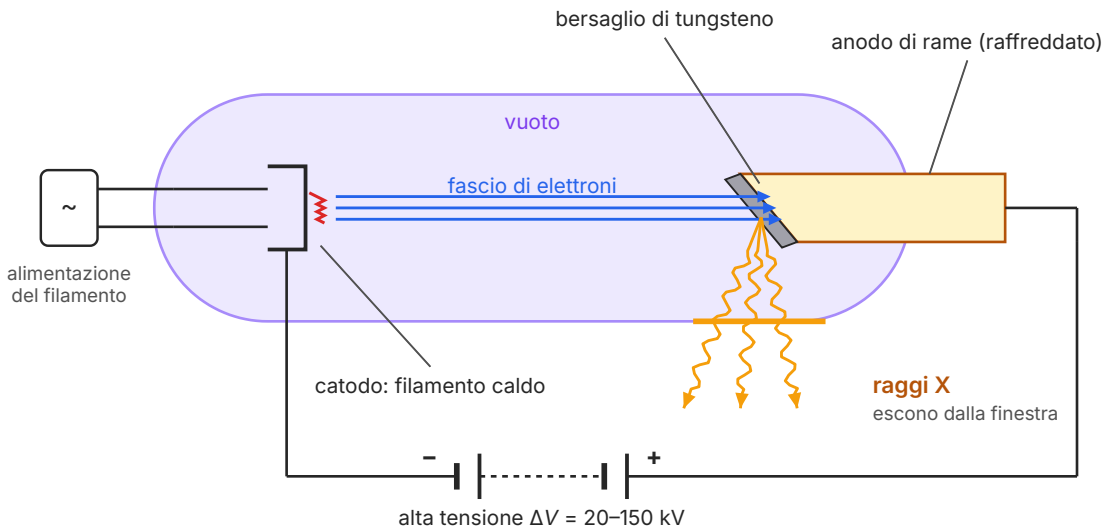


Figura 6.5 Schema di un tubo a raggi X. Gli elettroni emessi dal filamento caldo del catodo sono accelerati dall'alta tensione ΔV e frenati bruscamente nel bersaglio di tungsteno, che emette raggi X. Meno dell'1% dell'energia degli elettroni diventa radiazione: il resto scalda l'anodo, che va raffreddato.

Nell'anodo gli elettroni sono frenati bruscamente dai campi elettrici dei nuclei. Una carica che subisce una forte accelerazione irradia (capitolo 5): nasce così la **radiazione di frenamento** (in

tedesco *Bremsstrahlung*), con uno spettro continuo che si estende fino a una frequenza massima fissata dalla tensione ΔV. Al fondo continuo si sommano alcune **righe caratteristiche**, frequenze precise che dipendono dal metallo dell'anodo: gli elettroni del fascio espellono elettroni dagli strati più interni degli atomi, e quando questi «buchi» vengono riempiti gli atomi emettono raggi X di frequenza ben definita. Per il rame la riga più intensa ha lunghezza d'onda 0,154 nm. Perché lo spettro continuo abbia una frequenza massima, e perché le righe stiano proprio lì, lo capirai nei capitoli 11 e 12.

Il tubo è una sorgente molto poco efficiente: meno dell'1% dell'energia degli elettroni diventa raggi X, il resto diventa energia interna dell'anodo. Per questo gli anodi sono di tungsteno, che fonde a oltre 3400 °C, sono montati su blocchi di rame raffreddati e nei tubi più potenti ruotano, così che il fascio colpisca sempre una zona diversa. La tensione stabilisce la «qualità» della radiazione (a tensione più alta, raggi X più penetranti); la corrente nel tubo ne stabilisce la quantità.

COLLEGAMENTI

Radiografia, tomografia e radioterapia

In una radiografia un fascio di raggi X attraversa il corpo e arriva su un rivelatore. I tessuti assorbono i raggi X tanto più quanto sono densi e quanto più alto è il numero atomico degli elementi che li compongono: le ossa, ricche di calcio, assorbono molto più dei tessuti molli, fatti soprattutto di idrogeno, carbonio e ossigeno, e appaiono chiare su un fondo scuro. Per vedere organi che assorbono come i tessuti vicini, per esempio lo stomaco o i vasi sanguigni, si usano mezzi di contrasto a base di bario o di iodio, elementi di numero atomico alto.

Nella **tomografia computerizzata** (TC, o TAC) il tubo e i rivelatori ruotano attorno al paziente e misurano l'assorbimento lungo moltissime direzioni; un calcolatore ricostruisce da queste misure le immagini di sezioni del corpo, con dettagli che una singola radiografia, in cui tutti gli organi si sovrappongono, non può mostrare. Il prezzo è una dose di radiazione più alta: per questo la TC si usa quando serve davvero. In radioterapia, infine, fasci di raggi X molto più energetici, prodotti da acceleratori di elettroni, o raggi gamma, sono diretti sul tumore da più direzioni, in modo che la dose si concentri lì e sia minore nei tessuti sani attraversati.

APPROFONDIMENTO

I raggi X rivelano la struttura dei cristalli

In un cristallo gli atomi sono disposti in file ordinate, e i piani di atomi distano qualche decimo di nanometro: una distanza confrontabile con la lunghezza d'onda dei raggi X. Un cristallo si comporta quindi, per i raggi X, come un reticolo di diffrazione si comporta per la luce (Fisica 4, capitolo 8). Fra il 1912 e il 1913 William Lawrence Bragg e suo padre William Henry trovarono una condizione semplice. Ogni piano di atomi riflette debolmente una piccola parte dei raggi X; i raggi riflessi da piani successivi si rinforzano solo se la differenza di cammino è un numero intero di lunghezze d'onda. Se i piani distano d e i raggi formano con essi l'angolo θ, quella differenza è $2d$ sen θ (Figura 6.6), e si ha la **legge di Bragg**:

$$2d \operatorname{sen} \theta = m\lambda \qquad (m = 1, 2, 3, \ldots)$$

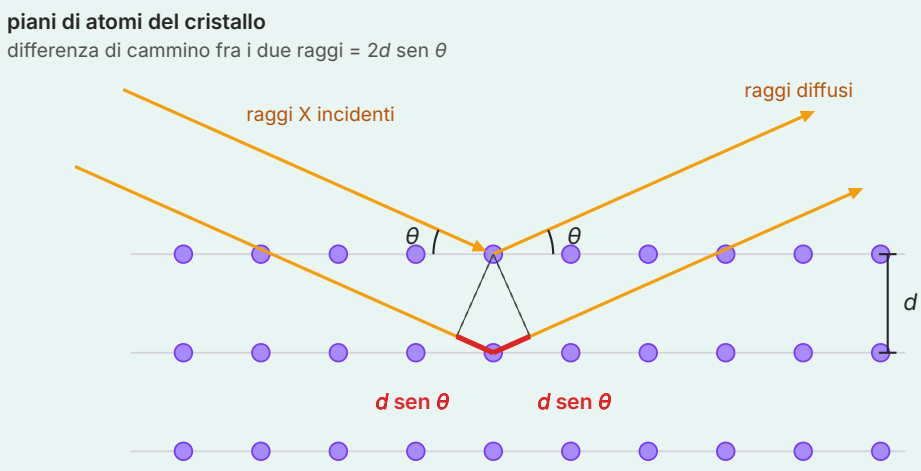


Figura 6.6 La condizione di Bragg. I raggi X riflessi da due piani di atomi consecutivi, a distanza d, percorrono cammini che differiscono per i due tratti in rosso, ciascuno lungo d sen θ: i raggi diffusi si rinforzano se $2d$ sen θ è un multiplo intero della lunghezza d'onda. L'angolo θ è misurato rispetto ai piani, non rispetto alla normale.

Con raggi X di lunghezza d'onda nota, per esempio la riga del rame a 0,154 nm, misurando gli angoli a cui compaiono i massimi si ricava la distanza fra i piani: per il sale da cucina, il cloruro di sodio, il primo massimo compare a 15,8°, e da $2d$ sen 15,8° = 0,154 nm si ottiene d = 0,282 nm. È l'origine della cristallografia a raggi X, che nel corso del Novecento ha rivelato la struttura dei minerali, dei metalli, delle proteine e, con le immagini di diffrazione ottenute da Rosalind Franklin, la doppia elica del DNA. Nota che con la luce visibile, di lunghezza d'onda mi-

gliaia di volte maggiore di d, sen θ dovrebbe superare 1: un cristallo non produce massimi di Bragg per la luce visibile.

6.4.3 I raggi gamma

I **raggi gamma**, di solito con frequenze oltre circa 3×10^{19} Hz e lunghezze d'onda inferiori a un centesimo di nanometro, nascono nei nuclei atomici: un nucleo che ha appena subito un decadimento radioattivo resta spesso in uno stato di energia più alta del normale, e torna allo stato fondamentale emettendo un raggio gamma (capitolo 14). Si producono raggi gamma anche quando una particella e la sua antiparticella si annichilano, come avviene nella tomografia a emissione di positroni (PET) usata in medicina, e in fenomeni astrofisici violentissimi, come le esplosioni di stelle. Sono i più penetranti delle radiazioni elettromagnetiche: per fermarli servono spessori di centimetri di piombo o di decine di centimetri di cemento. Si usano per la radioterapia, per sterilizzare strumenti medici monouso già imballati e per controllare saldature e getti metallici, così come i raggi X si usano per controllare i bagagli.

6.5 Gli effetti sulla materia e sugli organismi

6.5.1 Che cosa fa la radiazione quando viene assorbita

Un'onda elettromagnetica che attraversa la materia agisce con il suo campo elettrico sulle cariche che incontra; che cosa succeda dipende soprattutto dalla frequenza, cioè da quali cariche riescono a seguire il campo. Ripercorrendo lo spettro:

- **onde radio**: nei conduttori mettono in moto gli elettroni liberi e inducono correnti (è così che funziona un'antenna ricevente); i tessuti biologici sono in buona parte attraversati;
- **microonde**: fanno ruotare le molecole polari, come quelle dell'acqua, e scaldano; penetrano nei tessuti per qualche centimetro, meno a frequenza più alta;
- **infrarosso**: eccita le vibrazioni delle molecole e scalda; nel corpo umano si ferma nei primi millimetri della pelle;
- **visibile**: interagisce con gli elettroni esterni degli atomi e delle molecole; è la banda della visione, della fotosintesi, delle reazioni fotochimiche come lo sbiadire dei colori al sole;
- **ultravioletto**: può spezzare i legami delle molecole organiche, anche del DNA, e nella sua parte più energetica ionizza gli atomi;
- **raggi X e gamma**: strappano elettroni agli atomi lungo tutto il loro percorso e attraversano spessori considerevoli di materia.

6.5.2 Radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

La distinzione più importante, per la salute, è fra **radiazioni ionizzanti**, capaci di strappare elettroni agli atomi e alle molecole, e **radiazioni non ionizzanti**, che non ne sono capaci. Per ionizzare un atomo serve un'energia dell'ordine di una decina di elettronvolt. Le radiazioni ionizzanti sono quelle di frequenza superiore a circa 3×10^{15} Hz, cioè di lunghezza d'onda inferiore a circa 100 nm: l'ultravioletto più lontano dal visibile, i raggi X e i raggi gamma. Il confine non è netto, perché atomi e molecole diversi richiedono energie diverse, ma un fatto sperimentale è chiarissimo: la capacità di ionizzare dipende dalla **frequenza** e non dall'intensità. Una luce rossa intensissima non ionizza; radiazione ultravioletta lontana debolissima sì, anche se poco. Con la fisica classica questo fatto è un enigma, perché l'energia di un'onda dipende dalla sua ampiezza e non dalla frequenza; la soluzione, che è uno dei fondamenti della fisica quantistica, arriverà nel capitolo 11.

> **ERRORE FREQUENTE**
> «Una sorgente di microonde o di luce abbastanza potente diventa ionizzante.» **No.** Aumentare l'intensità di una radiazione non ionizzante ne aumenta gli effetti termici (può scaldare fino a ustionare) ma non le dà la capacità di ionizzare, che dipende solo dalla frequenza. Allo stesso modo «radioattivo» e «ionizzante» non sono sinonimi di «elettromagnetico»: le onde del Wi-Fi e del telefono sono elettromagnetiche come i raggi gamma, ma stanno a più di sei decadi di frequenza dalla soglia di ionizzazione.

Le radiazioni ionizzanti sono pericolose perché gli ioni e i radicali liberi che producono nelle cellule possono danneggiare il DNA: a dosi alte uccidono le cellule (ed è proprio ciò che si sfrutta in radioterapia contro i tumori), a dosi più basse aumentano la probabilità che una cellula diventi tumorale anni dopo. L'ultravioletto vicino, pur non essendo ionizzante, è dannoso per un motivo simile: i legami chimici del DNA richiedono pochi elettronvolt per essere alterati, meno dell'energia di ionizzazione, e gli UV-B possono fornirli.

Per le radiazioni non ionizzanti di bassa frequenza, come le microonde dei telefoni e del Wi-Fi, l'effetto biologico accertato è il riscaldamento dei tessuti, del tutto trascurabile alle intensità che si incontrano normalmente: anche a pochi centimetri da un telefono che trasmette, la potenza assorbita è di frazioni di watt, contro i circa 100 W che il corpo produce a riposo. I limiti di esposizione stabiliti dalle norme sono fissati con ampi margini al di sotto della soglia degli effetti termici, e sugli effetti di esposizioni deboli e prolungate la ricerca ha condotto e continua a condurre molti studi.

6.5.3 Proteggersi: distanza, tempo, schermi

Contro le radiazioni pericolose valgono tre principi semplici. La **distanza**: da una sorgente piccola l'intensità decresce come $1/r^2$, quindi raddoppiare la distanza riduce l'esposizione a un quarto. Il **tempo**: l'effetto è proporzionale all'energia assorbita, cioè all'intensità per il tempo di esposizione. Gli **schermi**: per i raggi X e gamma servono materiali densi e di numero atomico alto (i camici piombati di radiologia, le pareti dei bunker di radioterapia); per l'ultravioletto basta poco, un vetro, un tessuto, una crema; per le microonde una lamiera o una rete metallica con maglie molto più piccole della lunghezza d'onda, come quella che vedi nello sportello del forno a microonde. I suoi fori di qualche millimetro, piccolissimi rispetto ai 12 cm delle microonde, le riflettono quasi completamente, ma lasciano passare la luce, la cui lunghezza d'onda è inferiore a un micrometro: puoi guardare dentro il forno senza che le microonde escano.

6.6 L'atmosfera come filtro

6.6.1 Le finestre atmosferiche

L'atmosfera è trasparente solo ad alcune bande dello spettro, le **finestre atmosferiche** (Figura 6.7). La più importante per noi è la **finestra ottica**, da circa 300 nm a circa 1 µm, che comprende il visibile e un po' di ultravioletto vicino e di infrarosso vicino. La seconda è la **finestra radio**, che va da qualche centimetro a circa una decina di metri: al di sotto le microonde più corte sono assorbite dal vapore acqueo e dall'ossigeno, al di sopra le onde radio lunghe sono riflesse dalla ionosfera e non entrano né escono. Nell'infrarosso ci sono alcune finestre strette, separate dalle bande di assorbimento del vapore acqueo e dell'anidride carbonica, e fra l'infrarosso lontano e le microonde millimetriche l'atmosfera è quasi opaca, tranne in pochi siti molto alti e secchi.

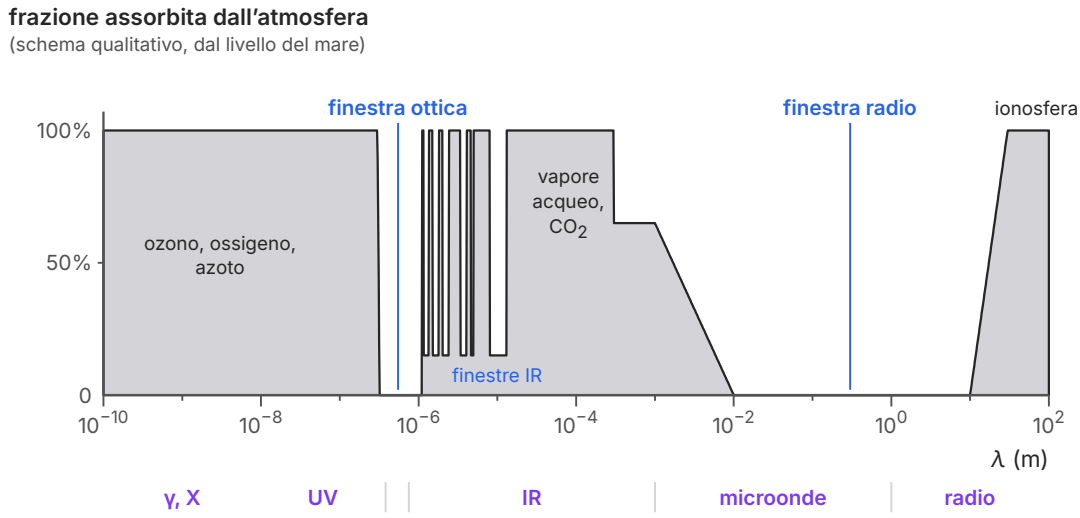


Figura 6.7 Frazione della radiazione assorbita dall'atmosfera, dall'alto fino al livello del mare, in funzione della lunghezza d'onda (schema qualitativo). Raggi gamma, X e ultravioletto sono fermati dall'ossigeno, dall'azoto e dall'ozono; nell'infrarosso il vapore acqueo e l'anidride carbonica lasciano solo alcune finestre strette; le onde radio più lunghe di una decina di metri sono riflesse dalla ionosfera. Restano la finestra ottica e la finestra radio.

Raggi gamma, raggi X e ultravioletto lontano non arrivano al suolo: sono assorbiti negli strati alti, dove ionizzano i gas e creano proprio la ionosfera e l'ozono che, più in basso, ferma gli UV-B e gli UV-C. È una protezione molto efficace, e la ragione è che l'atmosfera è «spessa». La pressione al suolo, $1{,}01 \times 10^5$ Pa, è il peso per unità di superficie di tutta l'aria sovrastante: la colonna d'aria sopra ogni metro quadrato ha massa $p/g = (1{,}01 \times 10^5\ \text{Pa})/(9{,}8\ \text{m/s}^2) \approx 1{,}0 \times 10^4$ kg, la stessa di uno strato d'acqua profondo 10 m. Per i raggi X è come stare sotto dieci metri d'acqua.

6.6.2 Dove mettere i telescopi

Le finestre decidono dove si fa l'astronomia. I telescopi ottici e i radiotelescopi possono stare a terra, i primi in luoghi alti, asciutti e bui, per avere meno aria, meno vapore e meno luci sopra la testa. Per l'infrarosso e le microonde millimetriche servono siti altissimi e aridissimi, come l'altopiano di Chajnantor nelle Ande cilene, a circa 5000 m, dove lavora l'osservatorio ALMA. Per l'ultravioletto, i raggi X e i raggi gamma bisogna invece uscire dall'atmosfera: il telescopio spaziale Hubble osserva anche nell'ultravioletto, Chandra e XMM-Newton nei raggi X, il telescopio Fermi nei raggi gamma. Ogni volta che una nuova banda è stata aperta all'osservazione l'universo si è mostrato diverso da come lo si immaginava: il cielo dei raggi X, per esempio, è dominato da gas a milioni di kelvin e da materia che precipita su stelle di neutroni e buchi neri.

COLLEGAMENTI

L'effetto serra

La finestra ottica fa entrare la radiazione del Sole; il suolo la assorbe, si scalda e riemette energia, ma alla sua temperatura la riemette nell'infrarosso, intorno a 10 μm. In questa banda l'atmosfera non è trasparente: il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il metano assorbono buona parte della radiazione che sale dal suolo e la riemettono in tutte le direzioni, anche verso il basso. Il suolo riceve così, oltre alla luce solare, anche questa radiazione infrarossa, e si porta a una temperatura più alta di quella che avrebbe senza atmosfera: è l'**effetto serra**. Senza di esso la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa −18 °C invece dei circa +15 °C attuali. L'aumento della concentrazione di anidride carbonica dovuto alle attività umane rende l'atmosfera ancora meno trasparente nell'infrarosso e rafforza l'effetto: è il meccanismo fisico alla base del riscaldamento globale, che studi con più dettaglio in Scienze della Terra.

APPROFONDIMENTO

La luce più antica: la radiazione cosmica di fondo

Nel 1965 Arno Penzias e Robert Wilson, due radioastronomi dei Bell Laboratories nel New Jersey, stavano mettendo a punto una grande antenna a tromba per microonde. Trovarono un fruscio di fondo che non riuscivano a eliminare: arrivava con la stessa intensità da tutte le direzioni del cielo, di giorno e di notte, in ogni stagione. Non era un guasto dell'antenna né un disturbo terrestre. Era la **radiazione cosmica di fondo**: la luce emessa quando l'universo, circa 380 000 anni dopo la sua nascita, era un gas caldissimo che si raffreddava diventando trasparente.

Da allora l'espansione dell'universo ne ha allungato la lunghezza d'onda di circa mille volte, e oggi quella radiazione ha lo spettro di un corpo a 2,725 K: riportata in funzione della frequenza, la sua intensità è massima intorno a 160 GHz, cioè a una lunghezza d'onda di circa 2 mm, nelle microonde. Per misurarla con precisione bisogna salire sopra il vapore acqueo dell'atmosfera, con palloni sonda o satelliti, come il satellite europeo Planck. Ne riparleremo nel capitolo 16: è una delle prove più forti del modello del Big Bang.

DA RICORDARE

Verso l'esame: lo spettro elettromagnetico

Lo spettro rientra nel nucleo tematico *Onde e particelle* dei quadri di riferimento della seconda prova, insieme all'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche del capitolo 5. Raramente è l'argomento di un intero problema, ma compare spesso in un quesito o in una domanda di un problema: riconoscere la banda di una radiazione da frequenza o lunghezza d'onda, collegarla alla sorgente e agli effetti, applicare $c = \lambda f$, l'intensità di una sorgente puntiforme e la legge dell'inverso del quadrato, leggere un grafico su scala logaritmica, interpretare una misura in decibel.

Le trappole tipiche: le unità (MHz, GHz, nm, μm: converti tutto in unità SI prima di calcolare); il fattore 2 nel radar (andata e ritorno) e nelle onde stazionarie (ventri a $\lambda/2$); il confine X/gamma, che è di origine e non di frequenza; la soglia di ionizzazione, che dipende dalla frequenza e non dall'intensità. Nelle risposte argomentative, nomina sempre il meccanismo fisico (quali cariche oscillano, che cosa assorbe).

IN SINTESI

Le formule e i fatti del capitolo

$c = \lambda f$ — per tutte le onde elettromagnetiche nel vuoto, $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s; λ in metri, f in hertz. Ogni decade di frequenza è una decade (in verso opposto) di lunghezza d'onda.

Bande (confini convenzionali, Tabella A.2): onde radio ($\lambda > 1$ m), microonde (1 mm–1 m), infrarosso (750 nm–1 mm), visibile (380–750 nm), ultravioletto (10–380 nm), raggi X (0,01–10 nm), raggi gamma ($\lambda < 0{,}01$ nm circa). X e gamma si distinguono per l'origine: elettroni o nuclei.

$d = c\Delta t/2$ — distanza di un oggetto dal ritardo Δt dell'eco radar (andata e ritorno).

$L = 10 \log(P/1\ \text{mW})$ — livello di una potenza in dBm. Da una sorgente puntiforme nello spazio libero $I = P_0/(4\pi r^2)$, quindi il livello ricevuto cala di 20 dB per decade di distanza (6 dB per raddoppio), lontano dall'antenna e senza ostacoli o riflessioni.

$2d \text{ sen } \theta = m\lambda$ — legge di Bragg per la diffrazione dei raggi X da piani di atomi distanti d; θ è l'angolo fra i raggi e i piani.

Radiazione ionizzante: frequenza oltre circa 3×10^{15} Hz ($\lambda < 100$ nm circa): UV lontano, X, gamma. Conta la frequenza, non l'intensità. Protezione: distanza ($1/r^2$), tempo, schermi.

SINTESI

- Le onde elettromagnetiche di tutte le frequenze sono campi elettrici e magnetici oscillanti che nel vuoto viaggiano a c; frequenza e lunghezza d'onda sono legate da $c = \lambda f$.
- Lo spettro copre più di venti decadi e si rappresenta su scala logaritmica; le bande (radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, X, gamma) hanno confini convenzionali, e X e gamma si distinguono per l'origine.
- Ogni banda ha le sue sorgenti: circuiti e antenne per le onde radio, magnetron per le microonde, vibrazioni molecolari e corpi caldi per l'infrarosso, elettroni esterni degli atomi per visibile e UV, elettroni interni per i raggi X, nuclei per i raggi gamma.
- Per trasmettere informazione si modula una portante ad alta frequenza: in ampiezza (AM) o in frequenza (FM), oggi soprattutto in forma digitale.
- La ionosfera riflette le onde corte, che così superano l'orizzonte; le frequenze più alte la attraversano e servono per le comunicazioni a vista e con i satelliti.
- Il forno a microonde scalda facendo ruotare le molecole d'acqua, non per risonanza; il radar misura le distanze dal ritardo dell'eco, $d = c\Delta t/2$.
- Il livello di un segnale si misura in dBm; dalla legge dell'inverso del quadrato, nello spazio libero cala di 20 dB per decade di distanza.
- L'infrarosso è emesso da tutti i corpi e assorbito dalle molecole; il visibile è una banda stretta in cui il Sole emette di più e l'atmosfera è trasparente; l'ultravioletto si divide in UV-A, UV-B e UV-C, questi ultimi fermati dall'ozono.
- I raggi X nascono dalla radiazione di frenamento degli elettroni e dalle righe caratteristiche degli atomi dell'anodo; servono per radiografie, TC e cristallografia (legge di Bragg $2d \operatorname{sen} \theta = m\lambda$).
- Le radiazioni sono ionizzanti oltre circa 3×10^{15} Hz, e questa capacità dipende dalla frequenza, non dall'intensità; ci si protegge con distanza, tempo e schermi.
- L'atmosfera lascia passare solo la finestra ottica, la finestra radio e poche finestre infrarosse: l'astronomia nelle altre bande si fa da siti altissimi o dallo spazio, e l'assorbimento infrarosso è la base dell'effetto serra.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale sequenza di radiazioni è ordinata per frequenza crescente?
   A. raggi X, ultravioletto, visibile, infrarosso
   B. microonde, onde radio, visibile, raggi gamma
   C. onde radio, infrarosso, ultravioletto, raggi X
   D. infrarosso, visibile, microonde, ultravioletto

2. ● Nel vuoto, tutte le onde elettromagnetiche hanno la stessa:

   A. velocità
   B. frequenza
   C. lunghezza d'onda
   D. intensità

3. ● Un raggio X e un raggio gamma con la stessa lunghezza d'onda si distinguono per:

   A. la velocità nel vuoto
   B. la capacità di attraversare la materia
   C. il segno della carica che trasportano
   D. l'origine: elettroni oppure nuclei

4. ● Nella modulazione di frequenza (FM) l'informazione è affidata:

   A. all'ampiezza della portante
   B. a piccole variazioni della frequenza della portante
   C. alla velocità dell'onda
   D. alla direzione di polarizzazione

5. ●● Lo strato di ozono della stratosfera assorbe soprattutto:

   A. l'infrarosso emesso dal suolo
   B. la luce visibile blu
   C. gli UV-C e gran parte degli UV-B
   D. le onde radio corte

6. ●● Una radiazione elettromagnetica è ionizzante se:

   A. la sua frequenza supera una soglia che si trova nell'ultravioletto
   B. la sua intensità supera una soglia, qualunque sia la frequenza
   C. è emessa da una sostanza radioattiva
   D. la sua lunghezza d'onda supera 1 mm

7. ●● Le stazioni a onde corte si possono ascoltare a migliaia di chilometri di distanza perché le loro onde:

   A. seguono la curvatura terrestre per diffrazione
   B. attraversano l'interno della Terra
   C. viaggiano più veloci della luce visibile
   D. sono riflesse dalla ionosfera

8. ●● In un tubo a raggi X si raddoppia la corrente lasciando invariata la tensione ΔV. Allora:

   A. raddoppia la frequenza massima dei raggi X
   B. aumenta la quantità di raggi X prodotti, ma la frequenza massima resta la stessa
   C. si dimezza la lunghezza d'onda delle righe caratteristiche
   D. i raggi X diventano più penetranti

Vero o falso

9. ● La frequenza di 2,45 GHz dei forni a microonde coincide con una frequenza di risonanza della molecola d'acqua. V / F

10. ● La lunghezza d'onda del Wi-Fi a 5 GHz è circa la metà di quella del Wi-Fi a 2,4 GHz. V / F

11. ●● Una lampada a UV-A molto potente emette radiazione ionizzante. V / F

12. ●● I telescopi per raggi X devono stare fuori dall'atmosfera, perché l'aria assorbe i raggi X. V / F

Applicare

13. ● Una stazione radio trasmette a 101,5 MHz. Calcola la lunghezza d'onda e la lunghezza di un'antenna a mezz'onda.

14. ● Il LED di un telecomando emette a 940 nm. Calcola la frequenza e indica la banda.

15. ● La riga più intensa dei raggi X emessi da un anodo di rame ha lunghezza d'onda 0,154 nm. Calcola la frequenza.

16. ● In un forno a 2,45 GHz, senza piatto rotante, a che distanza ti aspetti due zone consecutive di massimo riscaldamento?

17. ●● L'eco di un impulso radar torna all'antenna 0,40 ms dopo l'emissione. A che distanza si trova l'oggetto?

18. ●● Completa. Fra 1 mm e 1 km ci sono _____ decadi di lunghezza d'onda. La luce visibile, da $4{,}0 \times 10^{14}$ Hz a $7{,}9 \times 10^{14}$ Hz, occupa circa _____ di decade.

19. ●● Nella Figura 6.4 leggi, sulla retta dei dati raccolti all'aperto, il livello del segnale a 1 m e a 10 m. Di quale fattore si riduce la potenza ricevuta?

20. ● Il massimo dell'intensità della radiazione cosmica di fondo, in funzione della frequenza, si trova a circa 160 GHz. Calcola la lunghezza d'onda corrispondente e indica la banda.

Problemi

21. ●●● Un'antenna di una stazione base per la telefonia irradia una potenza di 20 W; supponi, semplificando, che irradi in modo uguale in tutte le direzioni. a) Calcola l'intensità a 100 m. b) Calcola l'ampiezza E_0 e il valore efficace del campo elettrico a quella distanza (capitolo 5). c) Di quanto cambiano intensità e campo efficace a 200 m?

22. ●●● Nell'esperimento del cioccolato, con un forno a 2,45 GHz, i centri delle zone fuse distano (6,3 ± 0,3) cm. a) Ricava la velocità delle onde con la sua incertezza. b) Il risultato è compatibile con $3{,}00 \times 10^8$ m/s? c) Quale errore si commetterebbe prendendo la distanza fra le macchie uguale a λ invece che a $\lambda/2$?

23. ●●● Un tubo a raggi X per radiologia lavora a $\Delta V = 100$ kV con una corrente di 4,0 mA. a) Calcola l'energia cinetica con cui ogni elettrone arriva sull'anodo, in keV e in joule. b) Quanti elettroni colpiscono l'anodo ogni secondo? c) Se lo 0,70% della potenza diventa raggi X, quanta potenza va in raggi X e quanta in calore? d) Se il calore non fosse smaltito, di quanto salirebbe in 1,0 s la temperatura di un anodo di tungsteno di 0,20 kg (calore specifico 134 J/(kg·K))?

24. ●●● Un satellite per telecomunicazioni è *geostazionario*: orbita sopra l'equatore con un periodo uguale a quello di rotazione della Terra, 86 164 s. a) Con la terza legge di Keplero (Fisica 3) calcola il raggio dell'orbita e la quota del satellite ($G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ N·m^2/kg^2, $M_T = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg, $R_T = 6{,}37 \times 10^6$ m). b) Calcola il tempo minimo che un segnale a microonde impiega per andare da una stazione a terra al satellite e tornare a terra. c) Perché in una telefonata via satellite geostazionario la risposta dell'interlocutore arriva con un ritardo avvertibile?

25. ●●● Una fibra ottica ha il nucleo con indice di rifrazione 1,48 e il mantello con indice 1,46. a) Calcola l'angolo limite per la riflessione totale fra nucleo e mantello (Fisica 2). b) Calcola la velocità della luce nel nucleo e il tempo che un impulso impiega a percorrere 1,00 km lungo l'asse. c) Un raggio che si riflette sempre all'angolo limite percorre un cammino più lungo: calcola di quanto arriva in ritardo dopo 1,00 km e spiega perché questo limita il numero di impulsi al secondo. d) Con un'attenuazione di 0,20 dB/km, che frazione della potenza resta dopo 50 km?

26. ●●● Un misuratore di velocità radar della polizia emette a 24,1 GHz. L'onda riflessa da un'auto che si avvicina ha lo spostamento Doppler $\Delta f \approx 2vf/c$ del capitolo 5. a) Il radar misura $\Delta f = 4{,}5$ kHz: calcola la velocità dell'auto in m/s e in km/h. b) Se l'auto è a 200 m, dopo quanto tempo torna l'eco? c) Perché per misurare velocità di qualche decina di m/s conviene usare microonde e non onde radio a 100 MHz?

27. ●● Una piccola sorgente di raggi X, in un laboratorio, produce a 0,50 m un'intensità che si vuole ridurre a un decimo senza usare schermi. A che distanza bisogna stare? Quale altro principio di protezione si potrebbe usare se lo spazio non basta?

28. ●● Una stazione in onde medie trasmette a 1,0 MHz con un'antenna verticale lunga un quarto di lunghezza d'onda. a) Quanto è alta l'antenna? b) Quanto sarebbe alta un'antenna a un quarto d'onda per la FM a 100 MHz? c) Spiega perché le stazioni in onde medie si ricevono anche oltre l'orizzonte, di giorno, mentre quelle FM no.

Ragionare e argomentare

29. ● Trova l'errore. «I raggi gamma attraversano anche il cemento perché, avendo frequenza più alta, viaggiano più veloci dei raggi X e della luce.»

30. ●●● Progetta un esperimento, da fare con il forno **scollegato dalla rete**, per verificare che lo sportello di un forno a microonde blocca le microonde ma lascia passare la luce. Spiega perché la griglia metallica dello sportello può avere fori di qualche millimetro.

31. ●●● I nostri occhi sono sensibili proprio nella banda in cui il Sole emette di più e l'atmosfera è trasparente. Discuti questa coincidenza: che cosa vedremmo, e che cosa non vedremmo, se i nostri occhi fossero sensibili ai raggi X oppure alle onde radio di 1 m di lunghezza d'onda? Usa anche l'idea che la capacità di distinguere i dettagli è limitata dal rapporto λ/D fra lunghezza d'onda e apertura dello strumento.

Verso l'esame di Stato

ordine m	1	2	3
angolo θ	14,2°	29,4°	47,5°

32. ●●● **Quesito.** Un fascio di raggi X di lunghezza d'onda 0,154 nm colpisce un cristallo sconosciuto. Ruotando il cristallo si osservano massimi di intensità agli angoli θ fra i raggi e i piani di atomi riportati nella tabella qui sopra. a) Spiega da dove nasce la condizione $2d \operatorname{sen}\theta = m\lambda$. b) Mostra che $\operatorname{sen}\theta$ è proporzionale a m e ricava dai dati la distanza d fra i piani, con una stima della sua dispersione. c) Esiste un massimo di quarto ordine? Se sì, a quale angolo? d) Spiega perché lo stesso cristallo non dà massimi di Bragg con la luce visibile di 500 nm.

33. ●●● **Problema.** Un forno a microonde da 900 W lavora a 2,45 GHz. a) Calcola la lunghezza d'onda delle microonde e la distanza fra due ventri consecutivi dell'onda stazionaria nella cavità. b) 300 g d'acqua a 20 °C, scaldati per 120 s, raggiungono 75 °C: calcola il rendimento del forno (calore specifico dell'acqua 4186 J/(kg·K)). c) Da un forno difettoso esce una potenza di 5,0 mW, che supponi irradiata in modo uguale in tutte le direzioni: calcola l'intensità e il campo elettrico efficace a 50 cm e confronta l'intensità con quella della luce solare, 1,36 kW/m^2. d) Spiega con un argomento fisico perché la luce attraversa la griglia dello sportello e le microonde no, e perché il forno scalda l'acqua e quasi per niente un piatto di ceramica asciutto.

PER APPROFONDIRE

- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sulle onde elettromagnetiche, sulla radiazione e sulla propagazione nella materia.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle onde elettromagnetiche, con lo spettro, la polarizzazione e molti esercizi sulle applicazioni.
- [WEI] S. Weinberg, *I primi tre minuti*: il capitolo sulla scoperta della radiazione cosmica di fondo, raccontata da uno dei protagonisti della cosmologia.
- [MAX] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*: la parte finale, in cui la luce è interpretata come perturbazione elettromagnetica, prima che si conoscessero le altre bande dello spettro.

Glossario del capitolo

Banda (dello spettro)
Intervallo di frequenze dello spettro a cui si dà un nome (onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X, raggi gamma); i confini sono convenzionali.

DBm
Livello di una potenza in decibel riferito a 1 mW: $L = 10 \log(P/1\ \text{mW})$; 0 dBm = 1 mW, 30 dBm = 1 W.

Effetto serra
Riscaldamento della superficie terrestre dovuto ai gas atmosferici che assorbono e riemettono la radiazione infrarossa emessa dal suolo.

Finestra atmosferica
Banda dello spettro che l'atmosfera lascia passare: la finestra ottica (300 nm–1 μm), la finestra radio (cm–decine di m) e alcune strette finestre infrarosse.

Fluorescenza
Emissione di luce visibile da parte di una sostanza che assorbe radiazione di lunghezza d'onda minore, in genere ultravioletta.

Ionosfera
Strato dell'alta atmosfera (circa 60–1000 km) in parte ionizzato dalla radiazione solare; riflette le onde radio sotto qualche decina di megahertz.

Legge di Bragg
Condizione $2d \operatorname{sen} \theta = m\lambda$ per cui i raggi X riflessi da piani di atomi distanti d si rinforzano; base della cristallografia.

Magnetron
Tubo a vuoto che produce microonde di grande potenza: elettroni in campi elettrico e magnetico incrociati mettono in oscillazione cavità risonanti.

Modulazione di ampiezza (AM)
Tecnica di trasmissione in cui l'ampiezza della portante varia seguendo il segnale; l'inviluppo dell'onda riproduce il segnale.

Modulazione di frequenza (FM)
Tecnica di trasmissione in cui l'ampiezza della portante resta costante e la sua frequenza varia di poco seguendo il segnale; è poco sensibile ai disturbi.

Portante
Onda ad alta frequenza di cui si varia una caratteristica (ampiezza, frequenza, fase) per trasmettere un segnale.

Radar
Sistema che invia impulsi di microonde e ne riceve l'eco: dal ritardo ricava la distanza ($d = c\Delta t/2$), dall'effetto Doppler la velocità.

Radiazione cosmica di fondo
Radiazione a microonde che arriva da tutte le direzioni, residuo dell'universo primordiale, con lo spettro di un corpo a 2,725 K; scoperta nel 1965.

Radiazione di frenamento
Radiazione X a spettro continuo emessa dagli elettroni veloci frenati dai nuclei del bersaglio di un tubo a raggi X (*Bremsstrahlung*).

Radiazione ionizzante
Radiazione capace di strappare elettroni ad atomi e molecole: UV lontano, raggi X e gamma, con frequenza oltre circa 3×10^{15} Hz. Conta la frequenza, non l'intensità.

Righe caratteristiche
Raggi X di frequenze precise, tipiche dell'elemento dell'anodo, emessi quando si riempiono le lacune negli strati elettronici più interni.

Spettro elettromagnetico
L'insieme delle onde elettromagnetiche ordinate per frequenza o lunghezza d'onda, dalle onde radio ai raggi gamma; nel vuoto per tutte vale $c = \lambda f$.

Termografia
Misura della temperatura delle superfici attraverso la radiazione infrarossa che emettono, con immagini a falsi colori.

Tomografia computerizzata (TC)
Tecnica che ricostruisce al calcolatore immagini di sezioni del corpo dall'assorbimento dei raggi X misurato in molte direzioni.

UV-A, UV-B, UV-C
Sottobande dell'ultravioletto (315–400 nm, 280–315 nm, 100–280 nm); l'ozono assorbe tutti gli UV-C e gran parte degli UV-B.

Soluzioni

1. C. Le frequenze crescono da radio a infrarosso, ultravioletto, raggi X. In A l'ordine è decrescente; in B le microonde hanno frequenza maggiore delle onde radio; in D le microonde stanno prima dell'infrarosso.

2. A. Nel vuoto tutte viaggiano a $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s; frequenza, lunghezza d'onda e intensità variano.

3. D. Se la lunghezza d'onda è la stessa le due radiazioni sono fisicamente identiche: si chiamano X se emesse da elettroni (frenamento, transizioni interne), gamma se emesse da nuclei o processi delle particelle.

4. B. In FM l'ampiezza è costante e la frequenza istantanea varia seguendo il segnale.

5. C. L'ozono assorbe tutti gli UV-C e gran parte degli UV-B; gli UV-A passano quasi del tutto.

6. A. La capacità di ionizzare dipende dalla frequenza (soglia intorno a 3×10^{15} Hz, $\lambda \approx 100$ nm); l'intensità aumenta solo gli effetti termici. Non conta la sorgente (C) e oltre 1 mm siamo nelle microonde e nelle onde radio (D).

7. D. La ionosfera riflette le onde sotto qualche decina di megahertz; con uno o più rimbalzi fra ionosfera e suolo le onde corte superano l'orizzonte.

8. B. La corrente fissa il numero di elettroni al secondo, quindi la quantità di raggi X; la frequenza massima e la penetrazione dipendono dalla tensione, le righe caratteristiche dal metallo dell'anodo.

9. F. Il riscaldamento è dovuto alla rotazione forzata delle molecole polari, che dissipano energia urtando le vicine; l'assorbimento dell'acqua liquida varia lentamente con la frequenza ed è massimo intorno a qualche decina di GHz, non a 2,45 GHz.

10. V. $\lambda = c/f$: $(3{,}00 \times 10^8)/(5 \times 10^9) = 6{,}0$ cm contro $(3{,}00 \times 10^8)/(2{,}4 \times 10^9) = 12{,}5$ cm, circa la metà.

11. F. Gli UV-A (315–400 nm) hanno frequenza sotto la soglia di ionizzazione (≈ 100 nm); l'intensità non cambia la natura dell'effetto.

12. V. Raggi X, gamma e UV lontano sono assorbiti negli strati alti dell'atmosfera, la cui massa equivale a uno strato d'acqua di 10 m.

13. $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(1{,}015 \times 10^8 \text{ Hz}) = 2{,}96$ m; antenna a mezz'onda: $\lambda/2 = 1{,}48$ m.

14. $f = c/\lambda = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(940 \times 10^{-9} \text{ m}) = 3{,}19 \times 10^{14}$ Hz: infrarosso (vicino), appena sotto il rosso ($4{,}0 \times 10^{14}$ Hz).

15. $f = c/\lambda = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(0{,}154 \times 10^{-9} \text{ m}) = 1{,}95 \times 10^{18}$ Hz.

16. $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(2{,}45 \times 10^9 \text{ Hz}) = 0{,}122$ m; due ventri consecutivi distano $\lambda/2 = 6{,}12$ cm ≈ 6,1 cm.

17. L'onda percorre andata e ritorno: $d = c\Delta t/2 = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s} \times 0{,}40 \times 10^{-3} \text{ s})/2 = 6{,}0 \times 10^4$ m = 60 km.

18. Da 10^{-3} m a 10^3 m il rapporto è 10^6: 6 decadi. $\log(7{,}9/4{,}0) = \log 1{,}98 = 0{,}30$: circa tre decimi di decade (meno di un terzo; si accetta anche «0,3» o «un terzo»).

19. Sulla retta: circa −38 dBm a 1 m e −58 dBm a 10 m. La differenza è −20 dB, cioè un fattore $10^{-20/10} = 10^{-2}$: la potenza si riduce a circa un centesimo, come prevede $1/r^2$ per una distanza dieci volte maggiore.

20. $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(1{,}60 \times 10^{11} \text{ Hz}) = 1{,}9 \times 10^{-3}$ m = 1,9 mm: microonde (per poco: il confine con l'infrarosso è a 1 mm).

21. a) Per la conservazione dell'energia la potenza si distribuisce su una sfera: $I = P/(4\pi r^2) = 20 \text{ W}/(4\pi \times (100 \text{ m})^2) = 1{,}6 \times 10^{-4}$ W/m^2. b) Dal capitolo 5, $I = \tfrac{1}{2} c\varepsilon_0 E_0^{\,2}$ con il valore di **picco**: $E_0 = \sqrt{(2I/(c\varepsilon_0))} = \sqrt{(2 \times 1{,}59 \times 10^{-4}/(3{,}00 \times 10^8 \times 8{,}85 \times 10^{-12}))}$ V/m = 0,35 V/m; il valore efficace è $E_{\text{eff}} = E_0/\sqrt{2} = 0{,}24$ V/m. c) Raddoppiando la distanza l'intensità diventa un quarto ($4{,}0 \times 10^{-5}$ W/m^2), mentre il campo, proporzionale a $\sqrt{I}$, si dimezza ($E_{\text{eff}} = 0{,}12$ V/m).

22. a) Le macchie sono ventri consecutivi dell'onda stazionaria, a distanza $\lambda/2$: $c = \lambda f = 2df = 2 \times 0{,}063\ \text{m} \times 2{,}45 \times 10^9\ \text{Hz} = 3{,}09 \times 10^8$ m/s. L'incertezza relativa è quella di d (la frequenza è nota molto meglio): 0,3/6,3 = 4,8%, cioè ±0,15 × 10^8 m/s; $c = (3{,}09 \pm 0{,}15) \times 10^8$ m/s. b) La differenza da 3,00 × 10^8 m/s è 0,09 × 10^8 m/s, minore dell'incertezza: il risultato è compatibile. c) Si otterrebbe $c = df = 1{,}5 \times 10^8$ m/s, la metà del valore vero: un errore sistematico del 50%, che il confronto con il valore noto rende evidente.

23. a) Per la conservazione dell'energia l'elettrone acquista $K = e\Delta V = 100\ \text{keV} = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 1{,}00 \times 10^5\ \text{V} = 1{,}60 \times 10^{-14}$ J. b) $N/\Delta t = I/e = 4{,}0 \times 10^{-3}\ \text{A}/(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C}) = 2{,}5 \times 10^{16}$ elettroni al secondo. c) La potenza del fascio è $P = \Delta V \cdot I = 1{,}00 \times 10^5\ \text{V} \times 4{,}0 \times 10^{-3}\ \text{A} = 400$ W; in raggi X: 0,0070 × 400 W = 2,8 W; in calore: 397 W ≈ 4,0 × 10^2 W. d) Per il primo principio, senza scambi di calore con l'esterno, $Q = mc\Delta T$: $\Delta T = 397\ \text{J}/(0{,}20\ \text{kg} \times 134\ \text{J/(kg·K)}) = 15$ K in un secondo. In realtà il calore si concentra in una piccola zona del bersaglio, che si scalda molto di più: per questo l'anodo ruota ed è raffreddato.

24. a) Per la seconda legge di Newton applicata al moto circolare con la forza di gravità, $GM_\text{T}m/r^2 = m(2\pi/T)^2 r$, da cui $r = (GM_\text{T}T^2/(4\pi^2))^{1/3} = (6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24} \times 86\,164^2/(4\pi^2))^{1/3}\ \text{m} = 4{,}21 \times 10^7$ m; quota $h = r - R_\text{T} = 3{,}58 \times 10^7\ \text{m} \approx 35\,800$ km. b) Il percorso minimo (stazioni sotto il satellite) è $2h$: $t = 2h/c = 2 \times 3{,}58 \times 10^7\ \text{m}/(3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s}) = 0{,}239$ s. c) La domanda va dall'uno all'altro interlocutore (0,24 s) e la risposta torna indietro (altri 0,24 s): fra la fine della domanda e l'inizio della risposta passa quasi mezzo secondo in più, abbastanza da essere avvertito in una conversazione.

25. a) La riflessione totale avviene se l'angolo di incidenza supera l'angolo limite: sen $\theta_\text{L} = n_2/n_1 = 1{,}46/1{,}48 = 0{,}9865$, $\theta_\text{L} = 80{,}6°$ (misurato dalla normale). b) $v = c/n_1 = 3{,}00 \times 10^8/1{,}48 = 2{,}03 \times 10^8$ m/s; $t = 1000\ \text{m}/(2{,}03 \times 10^8\ \text{m/s}) = 4{,}93$ µs. c) Il raggio all'angolo limite percorre, per ogni metro di fibra, 1/sen $\theta_\text{L} = n_1/n_2$ metri: il ritardo è $\Delta t = t(n_1/n_2 - 1) = 4{,}93\ \mu\text{s} \times 0{,}0137 = 6{,}8 \times 10^{-8}$ s = 68 ns. Un impulso breve all'ingresso esce «allargato» di circa 68 ns per chilometro: impulsi più vicini di questo intervallo si sovrapporrebbero, quindi non se ne possono inviare più di circa 1/(68 ns) ≈ 1,5 × 10^7 al secondo su 1 km. d) 0,20 dB/km × 50 km = 10 dB di perdita: la potenza si riduce di un fattore $10^{10/10} = 10$, ne resta un decimo.

26. a) Da $\Delta f = 2vf/c$: $v = c\Delta f/(2f) = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} \times 4{,}5 \times 10^3\ \text{Hz}/(2 \times 2{,}41 \times 10^{10}\ \text{Hz}) = 28\ \text{m/s} \approx 1{,}0 \times 10^2$ km/h. b) L'onda fa andata e ritorno: $t = 2d/c = 400\ \text{m}/(3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s}) = 1{,}3$ µs. c) Lo spostamento Doppler è proporzionale alla frequenza: a 100 MHz, per la stessa velocità, sarebbe $2 \times 28 \times 1{,}00 \times 10^8/(3{,}00 \times 10^8) \approx 19$ Hz su 100 MHz, una variazione relativa di 2×10^{-7}, difficile da misurare in un intervallo breve. Inoltre a 24 GHz (λ = 1,2 cm) basta un'antenna piccola per ottenere un fascio stretto, che si può puntare su una sola auto; a 100 MHz (λ = 3 m) il fascio sarebbe larghissimo.

27. Da una sorgente piccola $I \propto 1/r^2$: per ridurre l'intensità a un decimo serve r^2 dieci volte maggiore, $r = 0{,}50\ \text{m} \times \sqrt{10} = 1{,}6$ m. Se lo spazio non basta si può ridurre il tempo di esposizione o, meglio, interporre uno schermo di materiale denso e di numero atomico alto (piombo).

28. a) $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s})/(1{,}0 \times 10^6\ \text{Hz}) = 3{,}0 \times 10^2$ m; $\lambda/4 = 75$ m. b) A 100 MHz λ = 3,0 m e $\lambda/4$ = 0,75 m. c) Le onde medie si propagano come onda di terra, seguendo la superficie terrestre per centinaia di chilometri; le onde FM, a frequenza più alta, si propagano in linea retta, attraversano la ionosfera e non sono guidate dal suolo: arrivano solo dove l'antenna è in vista.

29. L'errore è nella velocità: nel vuoto tutte le onde elettromagnetiche viaggiano a c, qualunque sia la frequenza (e nei materiali la velocità non è ciò che decide la penetrazione). I raggi gamma attraversano spessori maggiori perché interagiscono meno con gli atomi a parità di spessore: il modo in cui la radiazione è assorbita dipende dalla frequenza, che però non ne cambia la velocità nel vuoto.

30. Traccia di risposta. Il forno va lasciato scollegato dalla rete per tutta la prova: non va mai acceso vuoto o con oggetti estranei. Si mette dentro un telefono acceso, con la rete Wi-Fi a 2,4 GHz attiva, e si chiude lo sportello: da un secondo telefono si osser-

va che il livello del segnale Wi-Fi (o la possibilità di chiamarlo) cala drasticamente o si annulla, mentre attraverso il vetro si continua a vedere lo schermo acceso. Si ripete con lo sportello aperto come controllo. Le bande del telefono non coincidono tutte con quella del forno, ma il Wi-Fi a 2,4 GHz sì. La griglia funziona perché i fori (pochi millimetri) sono molto più piccoli della lunghezza d'onda delle microonde (12 cm): per esse la rete si comporta come una lastra metallica continua, che le riflette. Per la luce, con λ inferiore a 1 μm, i fori sono enormi e la lasciano passare.

31. Traccia di risposta. La coincidenza non è casuale: gli occhi si sono evoluti per sfruttare la radiazione più abbondante che arriva al suolo, cioè la luce solare nella finestra ottica. Con occhi per i raggi X non vedremmo quasi nulla all'aperto, perché l'atmosfera ferma i raggi X del Sole e del cielo; vedremmo solo sorgenti artificiali, attraverso i corpi «trasparenti» come in una radiografia. Con occhi per onde radio di 1 m vedremmo le antenne e i telefoni accesi, mentre la Terra sarebbe illuminata pochissimo dal Sole in questa banda. Ma soprattutto vedremmo pochissimi dettagli: con una pupilla di qualche millimetro e $\lambda = 1$ m il rapporto λ/D è centinaia di volte maggiore di 1, e la diffrazione cancellerebbe qualunque immagine; per distinguere i dettagli che oggi distinguiamo servirebbe un «occhio» largo chilometri, come le reti di radiotelescopi.

32. a) Ogni piano di atomi riflette una piccola parte del fascio; i raggi riflessi da due piani consecutivi percorrono cammini che differiscono di $2d$ sen θ e si rinforzano (interferenza costruttiva) se questa differenza è un multiplo intero della lunghezza d'onda. b) I seni valgono 0,245, 0,491, 0,737: stanno come 1 : 2,00 : 3,01, quindi sen $\theta \propto m$, come prevede la legge con d fisso. Da $d = m\lambda/(2 \text{ sen } \theta)$ si ottiene 0,3139 nm, 0,3137 nm, 0,3133 nm: media $d = 0{,}3136$ nm, con una semidispersione di 0,0003 nm, quindi $d = (0{,}3136 \pm 0{,}0003)$ nm $\approx 0{,}314$ nm. c) Per $m = 4$: sen $\theta = 4 \times 0{,}154/(2 \times 0{,}3136) = 0{,}982 < 1$, quindi sì, a $\theta \approx 79°$; per $m = 5$ servirebbe sen $\theta = 1{,}23$, impossibile. d) Con $\lambda = 500$ nm, anche per $m = 1$ servirebbe sen $\theta = 500/(2 \times 0{,}314) \approx 800$, impossibile: la distanza fra i piani è migliaia di volte più piccola della lunghezza d'onda e la luce non «vede» la struttura del cristallo. *Indicatori*: a) Argomentare; b) Interpretare/elaborare i dati; c) Sviluppare il processo risolutivo; d) Argomentare.

33. a) $\lambda = c/f = (3{,}00 \times 10^8 \text{ m/s})/(2{,}45 \times 10^9 \text{ Hz}) = 0{,}122$ m; i ventri distano $\lambda/2 = 6{,}1$ cm. b) Calore assorbito dall'acqua: $Q = mc\Delta T = 0{,}300 \text{ kg} \times 4186 \text{ J/(kg·K)} \times 55 \text{ K} = 6{,}91 \times 10^4$ J; energia erogata: $900 \text{ W} \times 120 \text{ s} = 1{,}08 \times 10^5$ J; rendimento $\eta = 6{,}91/10{,}8 = 0{,}64$, cioè 64%. c) Per la conservazione dell'energia su una sfera: $I = P/(4\pi r^2) = 5{,}0 \times 10^{-3} \text{ W}/(4\pi \times (0{,}50 \text{ m})^2) = 1{,}6 \times 10^{-3}$ W/m^2. Da $I = c\varepsilon_0 E_{\text{eff}}^2$: $E_{\text{eff}} = \sqrt{(1{,}59 \times 10^{-3}/(3{,}00 \times 10^8 \times 8{,}85 \times 10^{-12}))}$ V/m $= 0{,}77$ V/m. La luce solare è (1360 W/m^2)/($1{,}59 \times 10^{-3}$ W/m^2) $\approx 8{,}5 \times 10^5$ volte più intensa. d) I fori della griglia sono molto più piccoli della lunghezza d'onda delle microonde (12 cm), che vedono la griglia come una parete metallica e sono riflesse; per la luce ($\lambda < 1$ μm) i fori sono grandissimi. L'acqua è fatta di molecole polari che il campo alternato fa ruotare, e che dissipano l'energia negli urti; la ceramica asciutta non contiene dipoli liberi di ruotare e assorbe pochissimo, quindi è quasi trasparente alle microonde. *Indicatori*: a) Sviluppare il processo risolutivo; b) Interpretare/elaborare i dati; c) Analizzare e Sviluppare il processo risolutivo; d) Argomentare.