

Sorgente luminosa ▼

◀ Matite affiancate

▶ Dita affiancate

La luce fra le dita

Accendi una candela o una lampada e posizionala a circa 50 cm da te. Avvicina fra loro due dita tese (indice e medio) oppure due matite, creando una piccola fessura. Osserva la luce della sorgente attraverso questa fessura, portando le dita o le matite a qualche centimetro dai tuoi occhi.

- Che cosa osservi?
- Riesci a vedere delle bande luminose separate da piccole linee scure tra le dita o tra le matite?

Guarda l'esperimento e prova a farlo tu.
online.zanichelli.it/amaldi



1. IL CAMPO ELETTROMAGNETICO

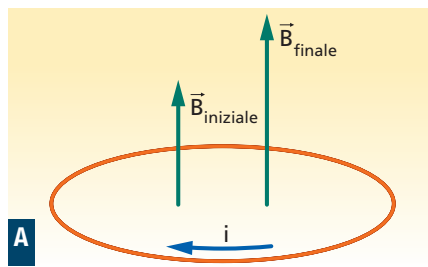
Sappiamo che:

- le cariche elettriche generano un campo elettrico;
- le correnti elettriche (cariche in movimento), generano un campo magnetico.

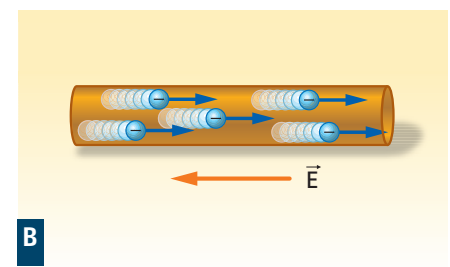
Il campo elettrico indotto

Sappiamo anche che, per induzione elettromagnetica, un campo magnetico che varia genera un campo elettrico.

- ▶ Un campo magnetico che aumenta genera, in una spira di metallo, una corrente indotta.



- ▶ Gli elettroni della spira sono messi in movimento, tutti nello stesso senso, da un campo elettrico.



Campo e spira

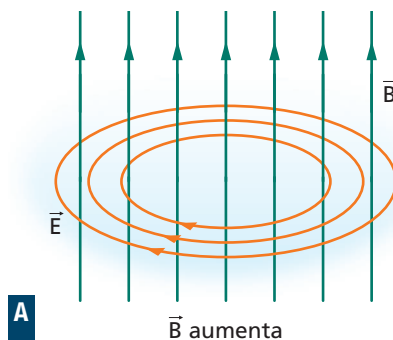
Il campo elettrico indotto esiste anche se in quella zona di spazio *non* c'è una spira metallica.

- ▶ Gli elettroni si comportano come cariche di prova che, con il loro movimento, segnalano l'esistenza del campo elettrico. Questo campo elettrico è *indotto*, cioè generato, dalla variazione del campo magnetico.

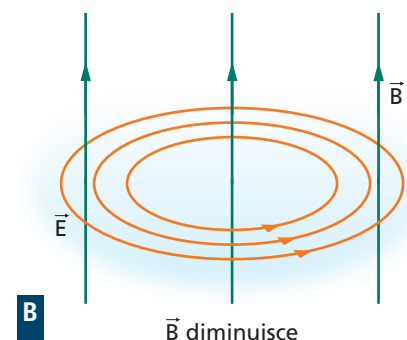
Un campo magnetico variabile genera un campo elettrico.

Il campo elettrico indotto ha le linee di campo chiuse su se stesse e poste in un piano perpendicolare al campo magnetico.

- ▶ Se \vec{B} aumenta, le linee del campo elettrico si avvolgono tutte nello stesso senso.



- ▶ Se \vec{B} diminuisce, le linee del campo elettrico si avvolgono in senso opposto.



James Clerk Maxwell

(1831-1879) fisico scozzese. Si interessò alla teoria dei colori e contribuì a stabilire

che ci sono tre colori fondamentali. Ciò gli permise di ottenere la prima fotografia a colori della storia. Diede contributi fondamentali alla teoria cinetica dei gas e alla termodinamica.

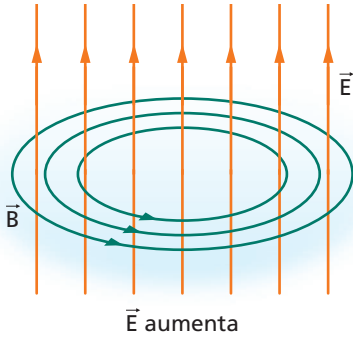
Il campo magnetico indotto

Nel 1873 James C. Maxwell pubblicò il suo fondamentale lavoro *Treatise on Electricity and Magnetism* (Trattato sull'elettricità e sul magnetismo) in cui faceva l'ipotesi che

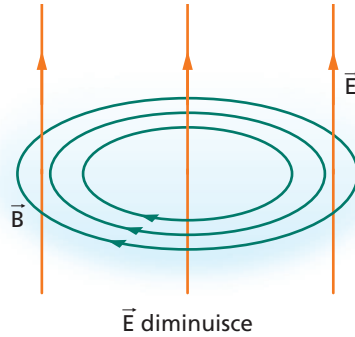
un campo elettrico variabile genera un campo magnetico.

Secondo questa ipotesi, le linee del campo magnetico si chiudono su se stesse su un piano perpendicolare alle linee del campo elettrico.

► Se \vec{E} aumenta, le linee del campo magnetico si avvolgono tutte nello stesso senso.



► Se \vec{E} diminuisce, le linee del campo magnetico si avvolgono in senso opposto.



online.zanichelli.it/amaldi
APPROFONDIMENTO

- Sintesi, modernità e innovazione: l'idea di campo (2 pagine)

Questa ipotesi fu verificata alcuni anni dopo la morte di Maxwell dal fisico tedesco Heinrich Hertz (1857-1894), che riuscì a generare le onde elettromagnetiche, nelle quali campi elettrici variabili generano campi magnetici variabili e viceversa.

Il concetto di campo elettromagnetico

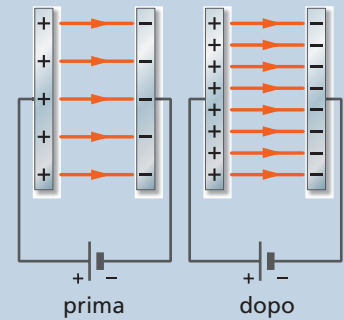
Maxwell sistemò in una teoria unitaria tutte le leggi dei fenomeni elettrici e magnetici. In questa teoria i due tipi di campi sono due aspetti di una stessa entità: il **campo elettromagnetico**.

Campo elettromagnetico	Sorgenti
Campo elettrico	<ul style="list-style-type: none"> • Cariche ferme e in movimento • Campi magnetici variabili
Campo magnetico	<ul style="list-style-type: none"> • Cariche in movimento (correnti elettriche) • Campi elettrici variabili

DOMANDA

Un condensatore piano si sta caricando e, al suo interno, il campo elettrico diventa sempre più intenso.

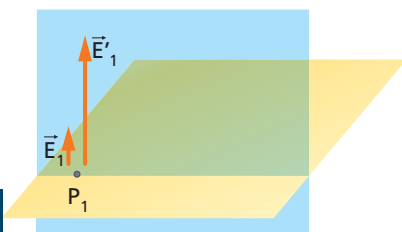
► All'interno del condensatore c'è anche un campo magnetico?



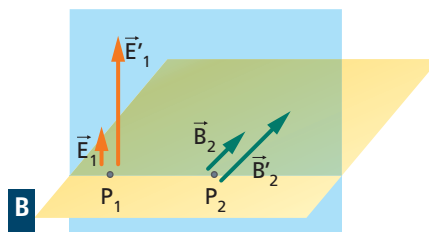
2. LA PROPAGAZIONE DEL CAMPO ELETTRIMAGNETICO

Il campo elettromagnetico si propaga nello spazio. Per capire come fa, immaginiamo di tenere in movimento una carica Q , facendola oscillare molto rapidamente avanti e indietro tra due punti. Questo movimento dà origine a un campo elettrico e a un campo magnetico oscillanti perpendicolari, che si generano l'un l'altro:

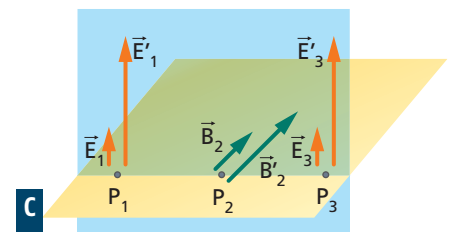
► per effetto del movimento di Q , in un punto P_1 si genera un campo *elettrico* variabile;



► questo, a sua volta, genera un campo *magnetico* variabile in un punto P_2 spostato rispetto a P_1 ;



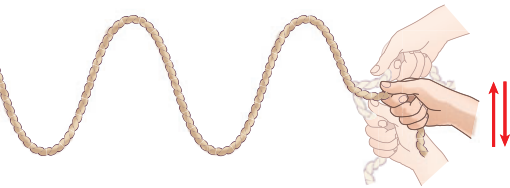
► ma il campo magnetico variabile in P_2 crea un campo elettrico indotto in un altro punto P_3 .



In realtà, in P_1 c'è anche un campo magnetico variabile, che genera in P_2 un campo elettrico variabile, che genera in P_3 un ulteriore campo magnetico...

I campi elettrici e magnetici oscillano perpendicolari l'uno all'altro e si generano con continuità propagandosi sempre più lontano dalla carica che li ha creati all'inizio. Anche quando la carica smette di oscillare, essi continuano a generarsi l'un l'altro in punti sempre più distanti.

Il campo elettromagnetico ha un'esistenza autonoma: si propaga nello spazio e trasporta energia.



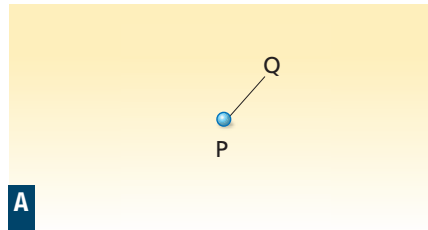
Un fenomeno simile accade a un'onda generata da una mano su una corda (figura a sinistra). La perturbazione (il moto in su e in giù dei punti della corda), una volta prodotta, ha un'esistenza autonoma: si propaga nella corda e trasporta energia (la capacità di mettere in movimento i punti della corda).

Quindi il campo elettromagnetico si propaga come un'onda; possiamo così parlare di **onde elettromagnetiche**.

Le oscillazioni del campo elettromagnetico arrivano lontano

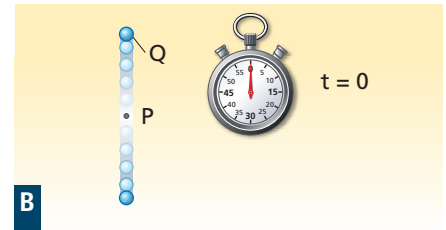
Per capire meglio come si propagano le onde elettromagnetiche, immaginiamo di fare un esperimento ideale.

► Una carica è ferma in un punto P dello spazio.



A

► A $t = 0$ s comincia a oscillare intorno a P con frequenza f .

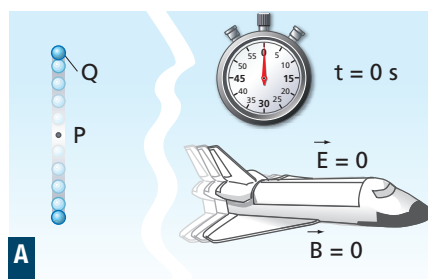


B

Prima dell'istante $t = 0$ s non c'è alcuna onda elettromagnetica. Quando la carica comincia a muoversi, il campo elettrico cambia e nasce anche un campo magnetico. Inizia così la propagazione di un'onda elettromagnetica.

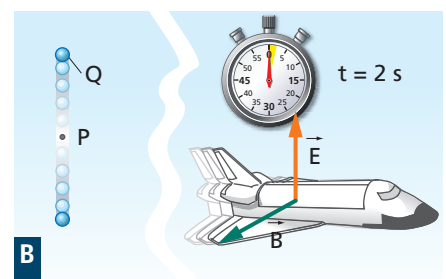
Un astronauta che si trova molto lontano, a 600 000 km dalla Terra, non può sapere *immediatamente* che la carica sta producendo un'onda elettromagnetica. L'informazione lo raggiungerà con un certo ritardo, perché non può viaggiare più veloce della luce, che è la massima velocità raggiungibile. Muovendosi a questa velocità c , che è uguale a 300 000 km/s, l'onda elettromagnetica raggiunge l'astronauta dopo 2 s.

► Fino all'istante 2 s, sull'astronave sono nulli i campi elettrico e magnetico dovuti alla carica che oscilla in P con frequenza f .



A

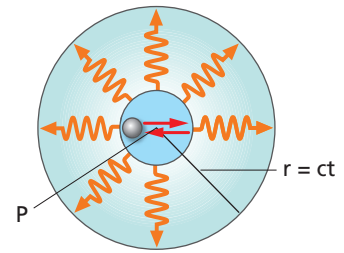
► A partire da 2 s, sull'astronave si osservano i campi elettrici e magnetici, perpendicolari tra loro, che oscillano con frequenza f .



B

Se l'astronauta si fosse trovato ancora più lontano, a 900 000 km, avrebbe registrato la comparsa del campo elettromagnetico 3 s dopo che la carica comincia a muoversi nel punto P .

Il campo elettromagnetico variabile si propaga nello spazio come il guscio di una sfera che ha centro nel punto P e raggio che si espande alla velocità della luce (figura a destra). Più i punti sono lontani, più tardi sono investiti dalla variazione del campo elettromagnetico che è stata causata dall'oscillazione della carica in P .



DOMANDA

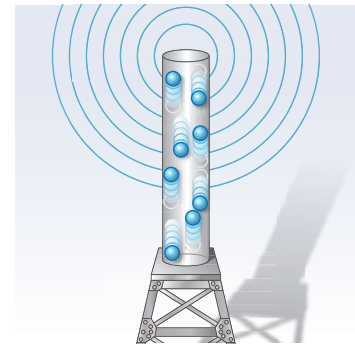
Un elettrone inizia a oscillare all'istante $t_0 = 0$ s e si ferma all'istante $t_1 = 0,2$ s.

► All'istante t_1 , fino a che distanza dall'elettrone è giunta l'onda elettromagnetica da esso generata?

3. LE PROPRIETÀ DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Un'antenna trasmittente (figura a destra) è una struttura di metallo, lungo la quale gli elettroni vengono fatti oscillare avanti e indietro molto rapidamente. Il moto degli elettroni è guidato dalla tensione fornita da un apposito circuito oscillante, che determina la frequenza f .

Mentre gli elettroni oscillano di moto armonico, l'antenna emette un'onda elettromagnetica di frequenza f che si propaga nello spazio.



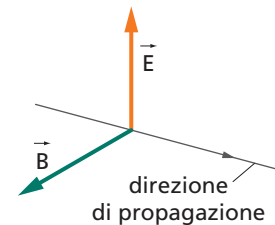
L'onda elettromagnetica nello spazio

Consideriamo ora una delle infinite rette che si dipartono dall'antenna. Essa rappresenta la *direzione di propagazione* dell'onda.

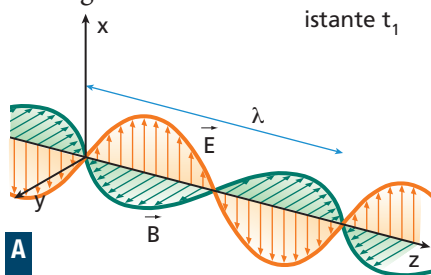
In ogni punto di questa retta troviamo un campo elettrico \vec{E} e un campo magnetico \vec{B} .

I campi \vec{E} e \vec{B} sono perpendicolari e proporzionali tra loro; inoltre sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

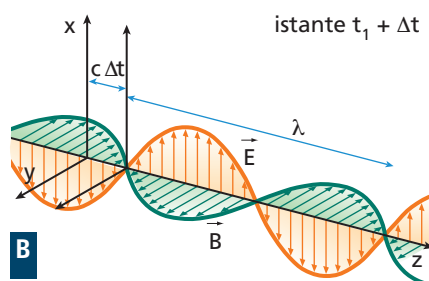
L'onda elettromagnetica è, quindi, un'onda **trasversale**, in quanto le due grandezze che variano oscillano in senso perpendicolare allo spostamento dell'onda. Immaginiamo di scattare un'«istantanea» dell'onda lontano dall'antenna.



► Osserviamo che i valori dei due campi variano nello spazio in modo regolare, descrivendo un'onda che ha lunghezza d'onda λ .

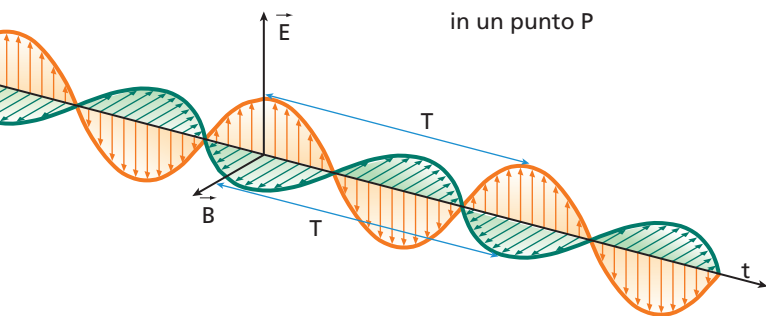


► Dopo un intervallo di tempo Δt l'intera onda si è spostata del tratto $c \Delta t$, dove c è la velocità della luce.



L'onda elettromagnetica nel tempo

Ora ci mettiamo in un punto P fissato e osserviamo come variano \vec{E} e \vec{B} al passare del tempo. I due vettori variano continuamente con la stessa legge del moto armonico: essi aumentano insieme fino a un valore massimo, si



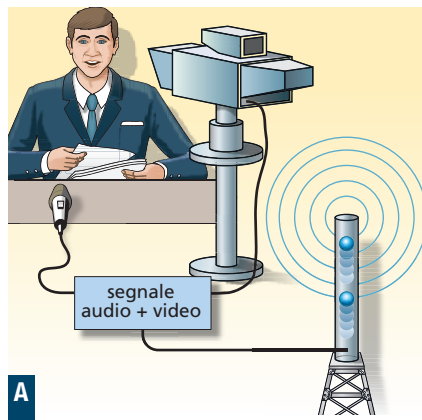
annullano insieme e giungono poi, contemporaneamente, ai loro valori minimi. Questo è illustrato nella figura a lato, che è un *grafico campo-tempo*.

Tutto ciò si ripete in modo regolare con un periodo pari a T . La frequenza f di tale ripetizione è inversamente proporzionale al periodo:

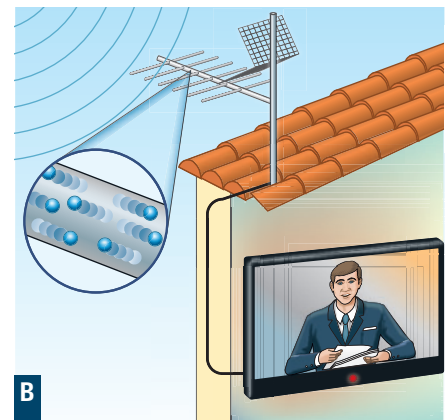
$$f = \frac{1}{T}$$

In un punto fissato, i campi \vec{E} e \vec{B} oscillano in modo concorde, entrambi con frequenza f .

► Gli elettroni che oscillano nell'**antenna trasmittente** emettono un'onda elettromagnetica nello spazio.



► Una sbarretta di metallo, posta sul cammino dell'onda, funziona da **antenna ricevente**.



Le trasmissioni televisive sono irradiate mediante onde elettromagnetiche.

Gli elettroni nell'antenna ricevente si muovono sotto l'effetto dei due campi e creano una corrente che può essere captata e amplificata.

La relazione tra frequenza e lunghezza d'onda

Come per tutte le onde periodiche, la frequenza e la lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica sono legate dalla relazione

$$f \lambda = v$$

dove v è la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica, che nel vuoto è uguale alla velocità della luce c . Da questa formula si ricavano le relazioni

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{e} \quad f = \frac{v}{\lambda}$$

DOMANDA

Un'onda elettromagnetica si estende nel vuoto.

► Di quanto si propaga in 0,100 s?

PROPRIETÀ DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Grandezza che oscilla	La perturbazione che si propaga nello spazio è costituita dal campo elettrico e dal campo magnetico
Tipo di onda	Sono onde trasversali: i campi \vec{E} e \vec{B} sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda (e anche perpendicolari tra loro)
Materiale in cui si propagano	A differenza di quelle elastiche o di quelle acustiche, le onde elettromagnetiche possono propagarsi anche nel vuoto (oltre che nell'aria, nell'acqua e in altri materiali trasparenti a esse)
Origine	Sono generate dalle cariche che subiscono delle accelerazioni, in particolare dalle cariche che oscillano
Grandezze e relazioni	T : periodo dell'oscillazione; f : frequenza; v : velocità di propagazione $f \lambda = v$, $\lambda = \frac{v}{f}$, $f = \frac{v}{\lambda}$
Velocità di propagazione	È massima nel vuoto, dove vale $v = c = 3,00 \times 10^8$ m/s

4. LO SPETTRO ELETTRMAGNETICO

La luce visibile è un particolare tipo di onda elettromagnetica. Altri tipi sono, per esempio, le onde radio, i raggi ultravioletti e i raggi X.

Ciò che differenzia le diverse onde elettromagnetiche è la loro frequenza di oscillazione.

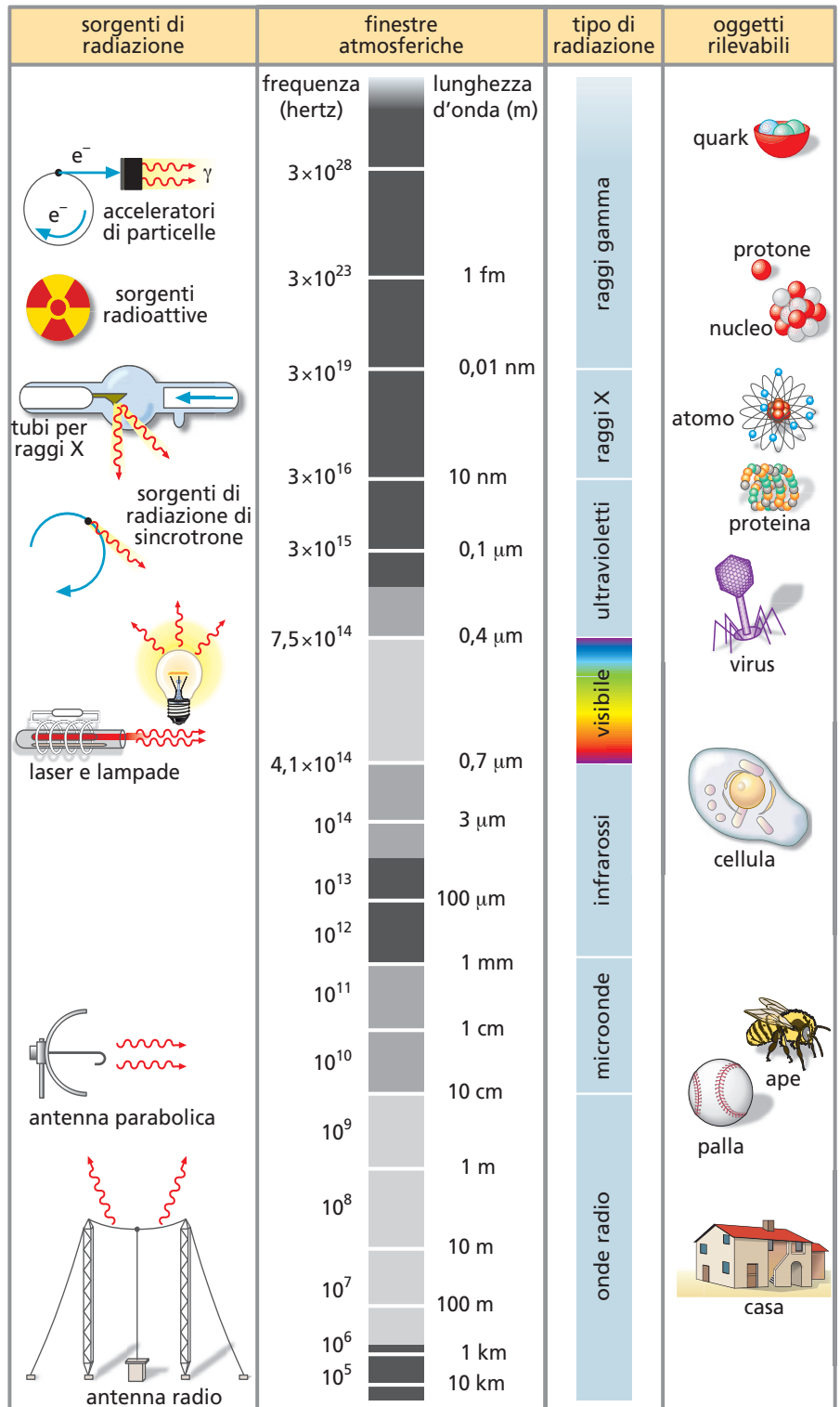


● Lo spettro elettromagnetico (5 minuti)

Si chiama **spettro elettromagnetico** l'insieme delle frequenze delle onde elettromagnetiche.

La **figura** a fianco riporta le principali proprietà dello spettro elettromagnetico. La scala delle frequenze e delle lunghezze d'onda non è regolare: strisce di uguale lunghezza non rappresentano intervalli uguali di frequenze.

La colonna delle *finestre atmosferiche* indica qualitativamente quali radiazioni sono assorbite dall'atmosfera. Per esempio, l'atmosfera assorbe i raggi X e gamma che arrivano dallo spazio (striscia scura), impedendo che queste radiazioni danneggino la vita sulla Terra. È invece trasparente (striscia chiara) alla luce visibile e alle onde radio che provengono dal Sole e dalle stelle.



DOMANDA

Osserva la tabella a destra.
► Qual è la frequenza che segna il passaggio tra la luce visibile e la radiazione ultravioletta?

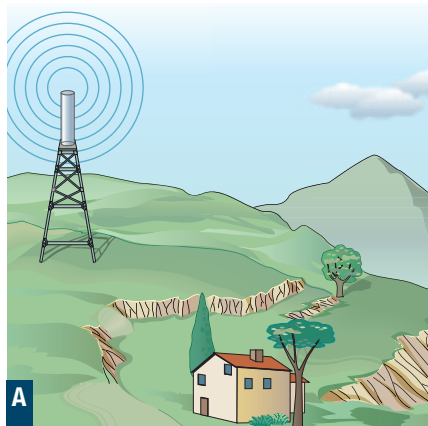
5. LE ONDE RADIO E LE MICROONDE

Iniziamo ora a esaminare le diverse parti dello spettro elettromagnetico.

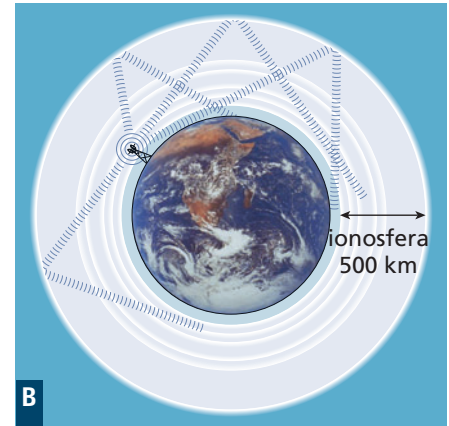
Le **onde radio** occupano la parte a bassa frequenza dello spettro, con lunghezze d'onda comprese tra 10 km e 10 cm.

Per le trasmissioni radio si utilizzano diverse onde elettromagnetiche a seconda delle differenti esigenze. Per esempio:

► Le onde medie hanno lunghezze d'onda attorno a 300 m. Grazie alla diffrazione, queste onde aggirano facilmente ostacoli piccoli come alberi e case. Sono invece fermate dalle montagne.

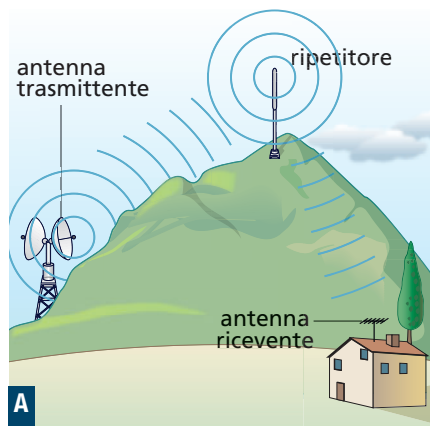


► Per trasmissioni a lunga distanza sono usate onde radio con λ compresa tra 10 km e 30 m. Queste onde sono riflesse dagli strati ionizzati dell'atmosfera e possono così superare la curvatura terrestre.

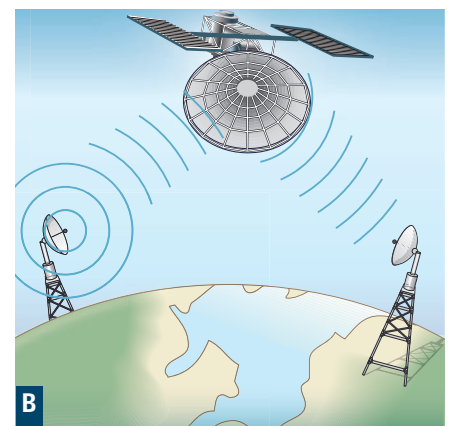


I segnali televisivi viaggiano su onde che hanno una lunghezza d'onda dell'ordine del metro. Esse possono essere bloccate facilmente anche da ostacoli di piccole dimensioni. Quindi, i segnali televisivi possono essere captati soltanto da antenne che «vedono» il trasmettitore.

► Per fare in modo che il segnale televisivo possa essere visto ovunque (e anche per rinforzarlo), tra la stazione televisiva e gli utenti sono situati molti *ripetitori*, che ricevono il segnale e lo inviano di nuovo dopo averlo amplificato.



► In alternativa, il segnale televisivo è inviato a un satellite in orbita, che lo amplifica e lo rimanda verso Terra. Poiché tutte le antenne riceventi «vedono» il satellite, non c'è bisogno di installare dei ripetitori.



online.zanichelli.it/amaldi
FILM

- L'interferenza delle microonde (7 minuti)
- L'interferenza delle onde radio (6 minuti)

online.zanichelli.it/amaldi
APPROFONDIMENTO

- La radio, i cellulari e la televisione (3 pagine)
- La polarizzazione della luce (3 pagine)

Le microonde

La lunghezza d'onda delle **microonde** è compresa tra qualche decina di centimetri e il millimetro.

Le microonde sono utilizzate per le comunicazioni telefoniche a lunga distanza, ma anche per i telefonini cellulari.

Il *radar* emette impulsi di microonde che sono riflessi da aerei, navi e altri oggetti di grandi dimensioni. L'intervallo di tempo che separa l'emissione dell'impulso dalla ricezione del segnale riflesso consente di determinare la distanza dell'ostacolo e di localizzare la sua posizione.

Nei *forni a microonde* (fotografia a fianco) la radiazione elettromagnetica agisce sulle molecole d'acqua e su altre molecole polari che sono contenute nei cibi. Il campo elettrico oscillante della radiazione esercita una forza sulle cariche elettriche di queste molecole, che oscillano a loro volta per allinearsi al campo \vec{E} .

Il processo assorbe energia dalle onde elettromagnetiche e la trasferisce al cibo contenuto nel forno, che così si riscalda.



Trafletti/epic/Shutterstock

DOMANDA

- Qual è la frequenza delle microonde a cui corrisponde una lunghezza d'onda di 1 cm?

6. INFRAROSSO, VISIBILE E ULTRAVIOLETTO

Una lampadina emette radiazione infrarossa, visibile e ultravioletta.

La **radiazione visibile** è costituita dalle onde elettromagnetiche che percepiamo sotto forma di luce.

Questa parte dello spettro elettromagnetico è compresa tra la lunghezza d'onda di 7×10^{-7} m, che il nostro cervello interpreta come colore rosso, e quella di 4×10^{-7} m, che percepiamo come violetto.

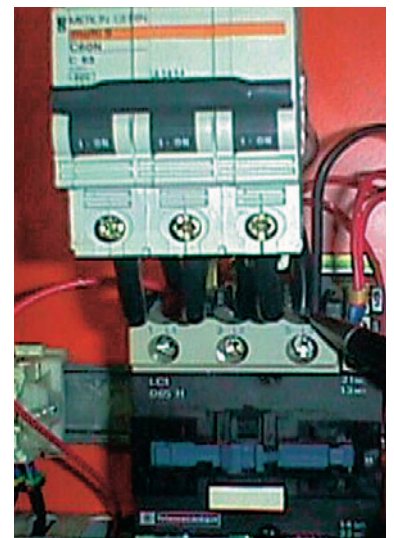
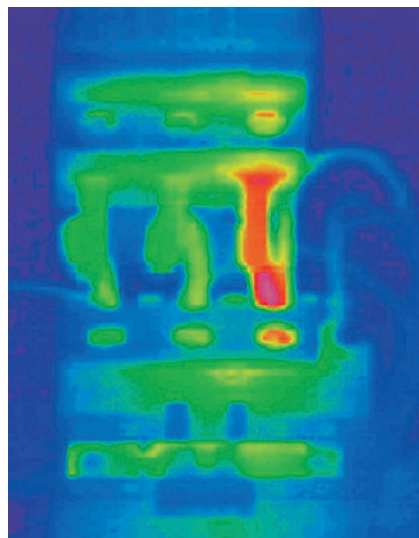
A ogni lunghezza d'onda compresa tra questi due estremi il nostro cervello associa un colore dell'arcobaleno. Al di fuori di questo intervallo, il nostro occhio è cieco.

La radiazione infrarossa

A lunghezze d'onda maggiori di 7×10^{-7} m e fino a 1 mm troviamo la radiazione **infrarossa** (significa: «che sta al di sotto del rosso»).

Noi percepiamo sulla pelle le radiazioni infrarosse come una sensazione di calore. Si possono fare riprese e fotografie nell'infrarosso, che servono per mettere in evidenza le differenti temperature di una stessa zona o di uno stesso oggetto.

Per esempio, una condizione di pericolo che si realizza in un circuito elettrico difettoso o sovraccaricato può essere riconosciuta subito, senza neppure aprire il dispositivo, con una fotografia fatta con una pellicola a raggi infrarossi. Nella *fotografia* a destra, le parti in giallo e verde sono più calde di quelle in blu e quelle in rosso sono ancora più calde. È evidente che un componente elettrico si sta scaldando troppo e deve essere riparato.



online.zanichelli.it/amaldi

FILM

- L'interferenza della luce visibile (6 minuti)



NASA/JPL-Caltech/C. Cava (The Hubble Space Telescope)

Satelliti in orbita fuori dell'atmosfera osservano il cielo rilevando le radiazioni infrarosse. Grazie a essi è possibile osservare corpi celesti «freddi», come nubi di gas, nane brune, molecole interstellari o pianeti (fotografia a sinistra).

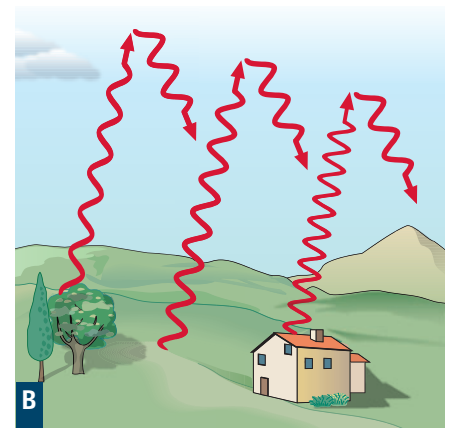
Si può misurare la temperatura corporea grazie a termometri che, inseriti nell'orecchio, analizzano la radiazione infrarossa emessa dal sangue che circola nel timpano.

Il biossido di carbonio (CO_2) che si trova nell'atmosfera è trasparente alla luce visibile, ma assorbe le radiazioni infrarosse.

► Una parte dell'energia che proviene da Sole attraversa l'atmosfera e giunge fino al suolo, dove è assorbita. Così il suolo, la vegetazione e tutti gli oggetti si scaldano.



► Essi riemettono parte dell'energia sotto forma di radiazione infrarossa. Questa però, non può essere dispersa nello spazio perché è assorbita dal CO_2 e da altri gas.



È questo l'**effetto serra**. L'aumento della concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera, provocato soprattutto dai processi di deforestazione e di combustione dovuti alle attività umane, ha l'effetto di innalzare la temperatura della superficie terrestre e dell'atmosfera.

La radiazione ultravioletta

A lunghezze d'onda minori di 4×10^{-7} m e circa fino a 10^{-8} m troviamo la **radiazione ultravioletta** (significa: «che sta sopra al violetto»).

I raggi ultravioletti hanno la proprietà di favorire diverse reazioni chimiche, ad esempio la produzione di melanina, il pigmento che dà il colore alla pelle. Per questo l'esposizione ai raggi ultravioletti, aumentando la melanina, fa abbronzare.

Però i raggi ultravioletti possono essere pericolosi per la pelle e per gli occhi, procurando danni anche gravi, che favoriscono l'insorgenza di tumori.

In astronomia, la rilevazione dei raggi ultravioletti permette di studiare alcune caratteristiche del Sole, l'evoluzione di galassie giovani e molto calde e, ancora, le temperature e la composizione del mezzo interstellare.

DOMANDA

Una radiazione elettromagnetica ha una frequenza di $1,5 \times 10^{12}$ Hz.

► A quale banda dello spettro elettromagnetico appartiene?

7. I RAGGI X E I RAGGI GAMMA

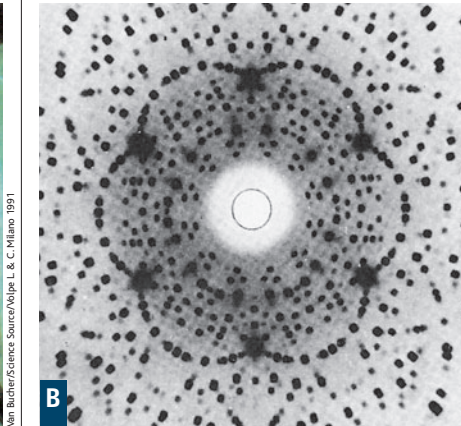
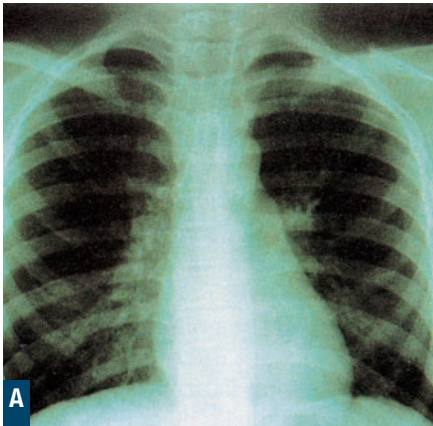
Passiamo ora alle radiazioni elettromagnetiche più energetiche.

I raggi X hanno lunghezze d'onda comprese tra 10^{-8} m e 10^{-11} m.

Come è mostrato nella figura a destra, essi sono prodotti mediante appositi tubi a vuoto, nei quali gli elettroni subiscono una rapida decelerazione urtando contro un bersaglio metallico.

I raggi X sono molto penetranti, per cui sono utilizzati per mettere in evidenza strutture nascoste.

► In una radiografia, i raggi X passano attraverso i tessuti molli, ma sono arrestati dalle ossa. Così, il diverso annerimento di una lastra fotografica permette di vedere l'interno del nostro corpo.



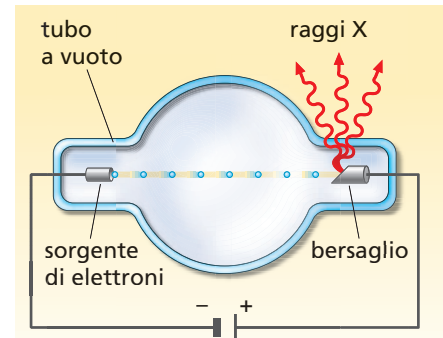
► I raggi X permettono anche di ottenere informazioni sulla struttura del reticolo cristallino di un metallo. Le macchie nere sono dovute all'interferenza costruttiva dei raggi X.



online.zanichelli.it/amaldi

FILM

• L'interferenza dei raggi X (5 minuti)



Nel 1953 il fisico Francis H.C. Crick e il biologo James D. Watson hanno usato dati di raggi X per scoprire la struttura a elica del DNA, la molecola di acido desossiribonucleico che contiene l'informazione genetica.

I raggi gamma

A lunghezze d'onda minori di 10^{-12} m si trovano i raggi gamma.

Essi sono emessi naturalmente dai nuclei durante le trasformazioni radioattive e le reazioni nucleari. Raggi gamma sono anche prodotti quando elettroni di alta energia, all'uscita di un acceleratore di particelle, colpiscono un bersaglio. Questi raggi gamma artificiali sono utilizzati per la radioterapia dei tumori, a cui sono sottoposti in Italia più di centomila pazienti all'anno.

I raggi gamma hanno una grande capacità di ionizzare gli atomi e possono essere pericolosi per gli esseri viventi. Poiché sono radiazioni molto penetranti, per assorbirli sono necessari diversi centimetri di piombo. Sono anche utilizzati per sterilizzare strumenti chirurgici e alcuni alimenti.

DOMANDA

► A che frequenze corrispondono i raggi gamma?

I CONCETTI E LE LEGGI

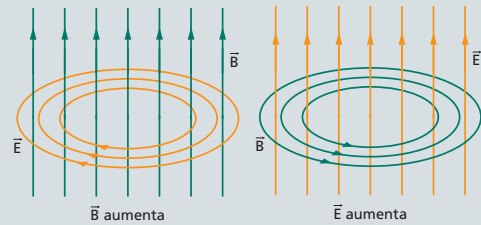
IL CAMPO ELETTRIMAGNETICO

Una campo elettrico variabile in un punto genera un campo magnetico variabile nei punti vicini, che a sua volta genera un campo elettrico variabile e così via. In questo modo si propaga il campo elettromagnetico, che trasporta energia e continua a propagarsi in modo autonomo.

CAMPO ELETTRIMAGNETICO

Il campo elettrico e il campo magnetico sono aspetti diversi di questa entità fisica.

- Un campo magnetico che varia nel tempo genera un campo elettrico che ha linee di campo chiuse e disposte in un piano perpendicolare alle linee del campo magnetico.
- Un campo elettrico che varia nel tempo genera un campo magnetico che ha linee di campo chiuse e disposte in un piano perpendicolare alle linee del campo elettrico.



PROPAGAZIONE DEL CAMPO ELETTRIMAGNETICO

Il campo elettromagnetico si propaga nello spazio vuoto con la velocità della luce.

- Il campo elettromagnetico è composto da campi elettrici e magnetici variabili che oscillano perpendicolari l'uno all'altro e si generano con continuità, propagandosi sempre più lontano dalla sorgente che li ha creati: per esempio, un campo elettrico generato da una carica in movimento crea in un punto dello spazio un campo magnetico variabile, che a sua volta genera un altro campo elettrico variabile e così via.
- Il campo elettromagnetico si propaga come un'onda: parliamo allora di *onde elettromagnetiche*.

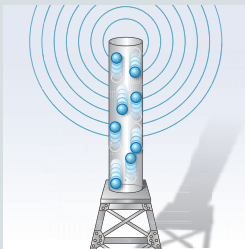
ONDE ELETTRIMAGNETICHE

Origine: antenna trasmittente

È una struttura di metallo lungo la quale gli elettroni vengono fatti oscillare avanti e indietro molto rapidamente.

Mentre gli elettroni oscillano accelerati, l'antenna emette un'onda elettromagnetica di frequenza f che si propaga nello spazio.

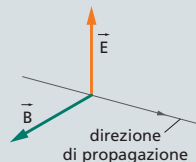
- Le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto.



Tipo: onde trasversali

I campi \vec{E} e \vec{B} che compongono l'onda elettromagnetica sono perpendicolari e proporzionali tra loro, e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali: i valori dei due campi variano nello spazio in modo regolare, descrivendo un'onda che si propaga rimanendo sempre uguale a se stessa.



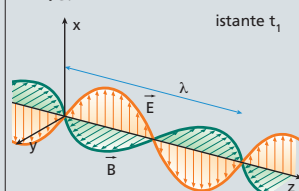
Grandezze caratteristiche: frequenza dei campi \vec{E} e \vec{B}

$$f\lambda = v$$

frequenza \times lunghezza d'onda = velocità di propagazione

In un punto fissato, i campi \vec{E} e \vec{B} oscillano in modo concorde, entrambi con frequenza f .

- L'onda descritta ha lunghezza d'onda λ .
- La velocità di propagazione v è massima nel vuoto, dove è uguale alla velocità della luce $c = 3,00 \times 10^8$ m/s.



Ricezione: antenna ricevente

È una sbarretta di metallo, posta sul cammino dell'onda elettromagnetica.

In essa, gli elettroni si muovono per effetto dei campi e creano una corrente con la stessa frequenza, che può essere captata e amplificata.

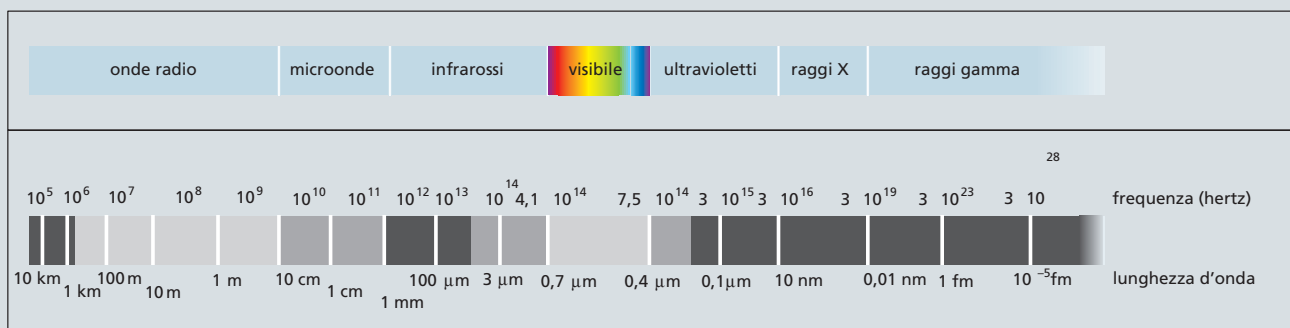


LO SPETTRO ELETTRONMAGNETICO

Ciò che distingue le diverse onde elettromagnetiche è la loro frequenza di oscillazione.

SPETTRO ELETTRONMAGNETICO

È l'insieme delle frequenze delle onde elettromagnetiche.



ONDE RADIO

Occupano la parte a bassa frequenza dello spettro elettromagnetico, con lunghezza d'onda tra 10 km e 10 cm.

- Le onde medie hanno lunghezze d'onda attorno a 300 m.
- I segnali televisivi usano lunghezze d'onda dell'ordine del metro.

MICROONDE

Hanno una lunghezza compresa tra 10 cm e 1 mm.

- Si utilizzano per i forni a microonde, per i telefoni cellulari e i radar.

RADIAZIONE INFRAROSSA

Si trova a lunghezze d'onda comprese tra 7×10^{-7} m e 1 mm.

- La percepiamo sulla pelle come una sensazione di calore.

RADIAZIONE VISIBILE

Ha una lunghezza d'onda compresa tra 7×10^{-7} m (colore rosso), e 4×10^{-7} m (colore violetto)

- È costituita dalle onde elettromagnetiche che percepiamo sottoforma di luce.

RADIAZIONE ULTRAVIOLETTA

Si trova lunghezze d'onda minori di 7×10^{-7} m e fino a 10^{-8} m.

- Favorisce reazioni chimiche, come quelle che producono la melanina, può arrecare danni alla pelle e agli occhi.

RAGGI X

Hanno lunghezze d'onda all'incirca tra 10^{-8} m e 10^{-11} m.

- Sono molto penetranti e sono sfruttati nelle radiografie.
- Sono utilizzati nella radioterapia dei tumori e per sterilizzare strumenti chirurgici e rifiuti ospedalieri.

RAGGI GAMMA

Hanno lunghezze d'onda inferiori a 10^{-12} m.

- Sono molto penetranti e possono essere pericolosi per gli esseri viventi: per assorbirli sono necessari strati di diversi centimetri piombo.

ESERCIZI

1. IL CAMPO ELETTROMAGNETICO

1 Vero o falso?

- a. Il campo elettrico indotto è generato da un campo magnetico costante. V F
- b. Un campo elettrico variabile genera un campo magnetico. V F
- c. La variazione di un campo magnetico genera un campo elettrico solo se il campo magnetico aumenta. V F
- d. Il campo elettrico e il campo magnetico sono in realtà la stessa cosa. V F

2 Caccia all'errore.

- a) Le linee del campo magnetico indotto sono poste su un piano parallelo alle linee del campo elettrico.

- b) Secondo l'ipotesi di Maxwell, le linee del campo magnetico indotto sono linee aperte.

3 ★★★

I simboli \times della figura rappresentano altrettante linee di un campo elettrico diretto perpendicolarmente al foglio con verso entrante. Il campo elettrico sta aumentando.

- Disegna le linee del campo magnetico indotto.

$\times \times \times \times \times \times \times \times \times$
 $\times \times \times \times \times \times \times \times \times$
 $\times \times \times \times \times \times \times \times \times$
 $\times \times \times \times \times \times \times \times \times$
 $\times \times \times \times \times \times \times \times \times$

4 Completa la seguente tabella inserendo «sì» o «no»:

★★★

	CARICHE FERME	CARICHE IN MOTO	UN CAMPO MAGNETICO VARIABILE	UN CAMPO ELETTRICO VARIABILE
Un campo elettrico è generato da	sì
Un campo magnetico è generato da

- 5 Un condensatore piano si sta scaricando e, al suo interno, il campo elettrico diventa sempre più debole.

★★★

- All'interno del condensatore c'è anche un campo magnetico?

2. LA PROPAGAZIONE DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO

6 Caccia all'errore.

- a) Una carica elettrica ferma non genera alcun campo elettrico o magnetico.
- b) Il campo elettromagnetico variabile generato da una carica che oscilla nel punto P si propaga nello spazio lungo una sola retta.

- 7 Test. Una carica inizia a oscillare e si arresta dopo 10 s.

- A che distanza si è propagata dopo 10 s l'onda elettromagnetica generata dalla carica?

- A 3000 km
 B 300 000 km
 C 3 000 000 km
 D 1 000 000 km

- 8 Un elettrone inizia ad oscillare alle ore 12:00:00. Un astronauta si trova a 900 000 km di distanza dall'elettrone.

★★★

- A che ora l'onda elettromagnetica generata dall'elettrone raggiungerà l'astronauta?

[12:00:03]

3. LE PROPRIETÀ DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE

9 Vero o falso?

- a. Un'antenna trasmittente emette un'onda elettromagnetica quando è percorsa da corrente continua. V F



Brand X, The Industrial Environment, Culver City, CA, 2001

- b. In un'onda elettromagnetica i campi \vec{E} e \vec{B} sono perpendicolari fra loro ed \vec{E} è parallelo alla direzione di propagazione. V F
- c. Mentre attraversa una lastra di vetro, la luce si muove con velocità minore che nel vuoto. V F
- d. La frequenza con cui oscilla il campo \vec{E} è uguale alla frequenza con cui oscilla il campo \vec{B} . V F
- e. Una sbarretta metallica posta sul cammino di un'onda elettromagnetica funziona da antenna ricevente. V F

10 Cancella le parole sbagliate.

L'onda elettromagnetica è un'onda *trasversale/longitudinale* poiché i campi \vec{E} e \vec{B} sono *paralleli/perpendicolari* alla direzione di spostamento dell'onda.

11 Test. In un'onda elettromagnetica \vec{E} e \vec{B} variano continuamente al passare del tempo, in modo che:

- A quando \vec{E} è massimo, \vec{B} è minimo e viceversa.
- B quando \vec{E} è massimo, \vec{B} è nullo e viceversa.
- C quando \vec{E} è massimo, anche \vec{B} è massimo.
- D quando \vec{E} è minimo, \vec{B} è nullo e viceversa.

12 Un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto ha una frequenza di 98,6 MHz.

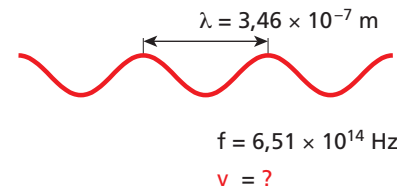
- Qual è il periodo con cui oscilla il campo elettromagnetico?
- Quanto vale la lunghezza d'onda?

[$1,01 \times 10^{-8}$ s; 3,03 m]

13 PROBLEMA SVOLTO**Calcolo della velocità di propagazione**

Un'onda luminosa (che è un particolare tipo di onda elettromagnetica) si propaga nell'acqua. La frequenza dell'onda è $6,51 \times 10^{14}$ Hz, mentre la sua lunghezza d'onda è $3,46 \times 10^{-7}$ m.

- Qual è la velocità di propagazione dell'onda luminosa nell'acqua?

**Dati e incognite**

	GRANDEZZE	SIMBOLI	VALORI	COMMENTI
DATI	Frequenza	f	$6,51 \times 10^{14}$ Hz	
	Lunghezza d'onda	λ	$3,46 \times 10^{-7}$ m	
INCOGNITE	Velocità di propagazione	v	?	Della luce nell'acqua

Ragionamento

- La velocità di propagazione si ottiene dalla formula $v = f\lambda$.

Risoluzione

Sostituendo i valori numerici nella formula precedente si ottiene il risultato:

$$v = f\lambda = 6,51 \times 10^{14} \text{ Hz} \times 3,46 \times 10^{-7} \text{ m} = 2,25 \times 10^8 \text{ Hz} \cdot \text{m} = 2,25 \times 10^8 \frac{1}{\text{s}} \cdot \text{m} = 2,25 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Controllo del risultato

La velocità di propagazione trovata, $2,25 \times 10^8$ m/s, è minore della velocità di propagazione nel vuoto ($3,00 \times 10^8$ m/s). In effetti, quella nel vuoto è la *massima* velocità di propagazione della luce. In ogni mezzo materiale trasparente, la luce si muove con velocità minore che nel vuoto.

- 14** ★★★ Un'onda luminosa si propaga in una lastra di vetro flint. La frequenza dell'onda è di $2,79 \times 10^{14}$ Hz, mentre la sua lunghezza d'onda è di $7,12 \times 10^{-7}$ m.

► Quanto vale la velocità di propagazione dell'onda luminosa nel vetro flint?

[$1,99 \times 10^8$ m/s]

4. LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO

- 15** **Quesito.** Elenca in ordine di lunghezza d'onda crescente i vari tipi di onde elettromagnetiche.

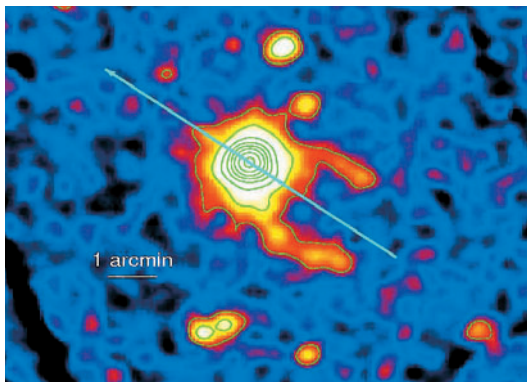
- 16** **Quesito.** Una lampada al sodio emette luce monocromatica con una lunghezza d'onda 5890 Å.
► La radiazione emessa è visibile?
($1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$)

- 17** **Caccia all'errore.** «Nello spettro delle onde elettromagnetiche, ordinate in base alla frequenza crescente, i raggi ultravioletti vengono dopo i raggi X e prima dei raggi gamma.»

18 Vero o falso?

- a. I raggi X emessi dagli oggetti celesti non arrivano fino alla superficie della Terra.

V F



- b. I raggi gamma hanno lunghezza d'onda minore dei raggi X. V F
- c. Le radiazioni ultraviolette non sono onde elettromagnetiche. V F
- d. Nel vuoto, la velocità di propagazione delle onde radio è minore di quella della luce. V F

- 19** **Test.** I vari tipi di onde elettromagnetiche si distinguono gli uni dagli altri per il valore che assume una particolare grandezza fisica. Quale?

- A L'ampiezza.
 B La frequenza.
 C La velocità.
 D Il campo elettromagnetico.

- 20** ★★★ An electromagnetic wave has a wavelength of 600 nm.

- Which kind of radiation does it belong to?
► Which is its frequency? [$5,00 \times 10^{14}$ Hz]

5. LE ONDE RADIO E LE MICROONDE

- 21** **Caccia all'errore.** «Le onde radio occupano la zona dello spettro relativa alle lunghezze d'onda più piccole.»

- 22** **Cancela le alternative sbagliate.**
«Per le trasmissioni a lunga distanza sono usate le onde radio di media/grande lunghezza d'onda. Infatti, grazie alla riflessione/diffrangimento da parte degli strati ionizzati dell'atmosfera, possono superare la curvatura terrestre.»

- 23** **Test.** Quali delle seguenti affermazioni sono vere per le onde tipiche delle trasmissioni radio? (Più di una risposta è esatta)

- A Questo tipo di onde è utilizzato dal radar.
 B La lunghezza d'onda è in generale superiore a 10 cm.
 C Queste onde sono diffratte dalle case e fermate dalle montagne.
 D Hanno la stessa frequenza delle onde utilizzate nelle trasmissioni televisive.

- 24** **Test.** Nel forno a microonde:

- A la radiazione trasferisce energia alle molecole dei cibi sotto forma di energia potenziale.
 B la radiazione elettromagnetica provoca correnti continue indotte nei cibi.
 C il campo elettromagnetico provoca un'oscillazione delle cariche elettriche contenute nelle molecole dei cibi, provocandone il riscaldamento.
 D possono essere riscaldati solo cibi in cui siano presenti cariche elettriche libere.

- 25** ★★★ La lunghezza d'onda delle microonde è compresa fra 1 mm e 0,1 m.

- A quale banda di frequenze dello spettro elettromagnetico appartengono le microonde?

[fra 3×10^9 Hz e 3×10^{11} Hz]

- 26** ★★★ Nel 2004, la missione Cassini-Huygens è arrivata nei pressi del pianeta Saturno dopo un viaggio durato sette anni. Assumi che la distanza fra la Terra e Saturno sia di $1,4 \times 10^{12}$ m.

- Quanti secondi passano fra il momento in cui un segnale elettromagnetico è inviato dalla Terra e il momento in cui viene ricevuto dalla sonda Cassini vicino a Saturno? [$0,47 \times 10^4$ s]

6. INFRAROSSO, VISIBILE E ULTRAVIOLETTA

27 **Quesito.** Fra il rosso e il violetto, a quale colore corrisponde un'onda di frequenza maggiore?

28 **Test.** L'ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce rossa è pari a:

- A 1 nm B 1 μm C 1 mm D 1 m

29 **Cancella le alternative sbagliate.**

- a) La radiazione elettromagnetica infrarossa ha lunghezze d'onda *inferiori/superiori* a quelle della luce visibile.
 b) Il rilevamento della radiazione *infrarossa/ultravioletta* al di fuori dell'atmosfera terrestre permette di individuare corpi e oggetti celesti freddi, come nubi di gas o nane brune.

30 Una radiazione elettromagnetica ha una frequenza di $2,70 \times 10^{15}$ Hz.

- Determina la sua lunghezza d'onda.
 ► A quale banda dello spettro appartiene?

[$1,11 \times 10^{-7}$ m]

31 Il nostro corpo emette soprattutto raggi infrarossi con lunghezza d'onda intorno a 10^{-5} m.

- Quanto vale la frequenza corrispondente?

[3×10^{13} Hz]

7. I RAGGI X E I RAGGI GAMMA

32 **Caccia all'errore.** «I raggi X hanno lunghezze d'onda comprese fra 10^8 e 10^{11} m.»

33 **Cancella le alternative sbagliate.**

«Per vedere l'interno del nostro corpo con una radiografia si utilizzano i raggi X/gamma, mentre per la radioterapia dei tumori si utilizzano i raggi X/gamma.»

34 **Vero o falso?**

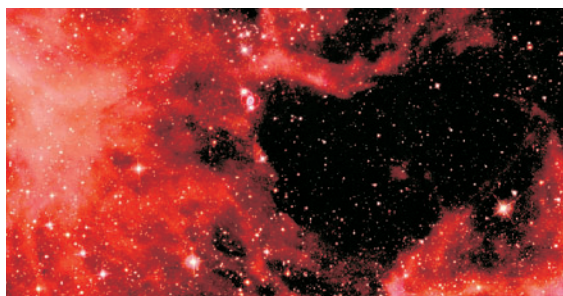
- a. Un'onda di frequenza 10^{18} Hz appartiene ai raggi gamma. V F
 b. I raggi X sono emessi nelle reazioni nucleari e nelle trasformazioni radioattive. V F
 c. I raggi X sono arrestati dalle ossa umane. V F
 d. Per assorbire i raggi gamma bastano pochi millimetri di piombo. V F

35 **Test.** Quali fra le seguenti radiazioni hanno maggiore frequenza?

- A Raggi X.
 B Raggi ultravioletti.
 C Raggi infrarossi.
 D Onde radio.

PROBLEMI GENERALI

1 Nel 1987 è stata osservata l'esplosione di una supernova nella galassia della Grande Nube di Magellano, che dista da noi $1,66 \times 10^{21}$ m.



- Quanti anni ha impiegato l'onda luminosa emessa dall'esplosione per raggiungere la Terra?

[$1,75 \times 10^5$ anni]

2 Un dato giorno dell'anno, in cui la distanza Sole-Terra vale $1,49 \times 10^{11}$ m, il Sole sorge alle 07 h 28 min 20 s.

- A che ora è partito dal Sole il primo raggio di luce che arriva sulla Terra quel giorno?

[07 h 20 min 03 s]

3 Un raggio di luce nel vuoto ha una lunghezza d'onda di 633 nm. In acqua si propaga alla velocità di $1,97 \times 10^8$ m/s.

- Qual è la sua frequenza?
 ► Quanto vale la sua lunghezza d'onda nell'acqua?

[$4,74 \times 10^{14}$ Hz; 416 nm]

4 Un segnale radio emesso da un radar viene riflesso indietro da un ostacolo e torna all'antenna ricevente dopo un intervallo di tempo di $2,5 \times 10^{-4}$ s.

- Qual è la distanza della sorgente dall'ostacolo?

[$3,8 \times 10^4$ m]

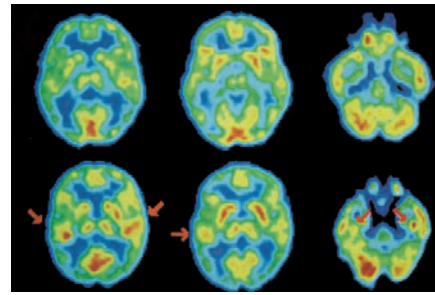
5 Il segnale di una stazione radio a modulazione di ampiezza AM ha una frequenza di 850 kHz. L'antenna della stazione radio AM è alta un quarto della lunghezza d'onda delle onde radio.

- Quanto è alta l'antenna?

[88 m]

6 ★★★ La risonanza magnetica (RMN) e la tomografia ad emissione di positroni (PET) sono due tecniche di diagnosi medica. La prima utilizza onde elettromagnetiche di frequenza pari a $6,38 \times 10^7$ Hz, la seconda onde di frequenza pari a $1,23 \times 10^{20}$ Hz.

- ▶ Calcola la lunghezza d'onda utilizzata da RMN.
- ▶ Calcola la lunghezza d'onda utilizzata da PET.



[4,70 m; $2,44 \times 10^{-12}$ m]

TEST



online.zanichelli.it/amaldi

TEST INTERATTIVI 20 test (30 minuti)

- 1** In base all'ipotesi di Maxwell, un campo magnetico può essere generato da:
- A cariche ferme.
 - B un campo magnetico costante.
 - C un campo elettrico variabile.
 - D un campo magnetico variabile.
- 2** Una carica elettrica Q che oscilla genera:
- A un campo elettrico variabile e un campo magnetico variabile.
 - B un campo magnetico costante ed un campo elettrico variabile.
 - C soltanto un campo elettrico variabile.
 - D soltanto un campo magnetico variabile.
- 3** La direzione di propagazione di un'onda elettromagnetica è:
- A perpendicolare sia a \vec{E} che a \vec{B} .
 - B parallela a \vec{E} e perpendicolare a \vec{B} .
 - C perpendicolare a \vec{E} e parallela a \vec{B} .
 - D parallela sia a \vec{E} che a \vec{B} .
- 4** Quale fra i seguenti tipi di radiazione non appartiene allo spettro elettromagnetico?
- A Raggi gamma.
 - B Raggi X.
 - C Raggi alfa.
 - D Raggi ultravioletti.
- 5** Le onde elettromagnetiche sono onde:
- A longitudinali, come le onde sonore.
 - B trasversali.
 - C rettilinee.
 - D sferiche.
- 6** Le onde radio hanno frequenza maggiore:
- A dei raggi gamma.
 - B delle microonde.
 - C della radiazione visibile.
 - D nessuna delle precedenti risposte è corretta.
- 7** I raggi gamma hanno:
- A lunghezze d'onda minori di 10^{-12} m.
 - B lunghezze d'onda maggiori di 10^{-12} m.
 - C lunghezze d'onda maggiori di 10^{12} m.
 - D frequenze minori di 10^{-12} Hz.

LA FISICA DEL CITTADINO

FREQUENZE E LUNGHEZZE D'ONDA DEI CELLULARI

I normali cellulari GSM funzionano a frequenze attorno a 900 MHz o a 1800 MHz; le frequenze dei cellulari o delle «chiavette» UMTS si aggirano attorno a 2100 MHz. Tutte queste frequenze si possono inserire nell'ambito delle microonde.

I segnali emessi dai cellulari si propagano nell'aria a una velocità che è praticamente uguale a quella della luce nel vuoto.

Domanda 1: Calcola la lunghezza d'onda delle onde a 900 Mhz.

Domanda 2: Calcola ora le lunghezze d'onda dell'altra frequenza GSM e della frequenza UMTS.

Ricorda il fenomeno della *diffrazione*, che è illustrato nel capitolo 1 «La luce».

Domanda 3: Quale delle tre frequenze è bloccata da ostacoli di dimensione minore? Quale invece mostra il fenomeno della diffrazione con aperture di dimensione maggiore?

[0,333 m; 0,167 m; 0,143 m]