



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA

SCUOLA DI SPECIALIZZAZIONE PER L'INSEGNAMENTO SECONDARIO

Classe di Specializzazione A049-A059

Unità Didattica

Onde meccaniche Ed Onde elettromagnetiche

Genny Mazzo

VIII° Ciclo - Anno Accademico 2007-2008

L'argomento verrà suddiviso in 2 unità didattiche.

COLLOCAZIONE DEL TEMA “ONDE MECCANICHE ED ONDE ELETTROMAGNETICHE” NEL CONTESTO DEI PROGRAMMI MINISTERIALI DELLA SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE

Pensando queste unità didattiche per le classi IV e V liceo scientifico con sperimentazione PNI, ho analizzato cosa prevedono i programmi ministeriali per questo tipo di scuola. Prima di parlare degli argomenti specifici si consiglia:

- L'insegnamento della fisica, come naturale prosecuzione dell'attività didattica svolta nel biennio, sposterà gradualmente nel triennio **l'attenzione** dagli aspetti prevalentemente empirici e di osservazione analitica **verso gli aspetti concettuali, la formalizzazione teorica** e i problemi di sintesi e valutazione.
- Si considera fondamentale, per una corretta conoscenza dei contenuti della fisica da parte degli studenti, che il docente presenti fin dall'inizio la differenza fra le definizioni operative ed i concetti astratti. **I modelli saranno presentati come mezzi di rappresentazione e dovranno sempre essere discussi i loro limiti di validità. Le teorie saranno trattate mettendone in evidenza l'evoluzione e il progressivo affinamento.**
- In questo modo si introdurranno implicitamente anche **nozioni di storia della fisica**, come parte importante della formazione culturale dello studente e si proseguirà, come nel biennio, con la lettura di pagine di carattere storico.
- **Lo studio della fisica nel triennio**, oltre a fornire allo studente un bagaglio di conoscenze scientifiche adeguato, **deve mirare allo sviluppo di specifiche capacità di vagliare e correlare le conoscenze e le informazioni scientifiche, raccolte anche al di fuori della scuola,** recependole criticamente e inquadrando in un unico contesto.
- **I contenuti svolti nel biennio dovranno essere approfonditi nel triennio**, nel corso del quale, grazie alla **maggiore capacità di astrazione raggiunta dagli allievi**, saranno affrontati argomenti generali e di più elevata complessità per favorire negli allievi stessi lo sviluppo delle capacità di sintesi e di valutazione.

Gli argomenti delle due unità didattiche sono trattati al **tema n°4 “onde meccaniche ed elettromagnetiche”**. Nei programmi si dice che **questi temi potranno essere presentati adeguatamente con la formalizzazione matematica richiesta solo dopo che nel corso di matematica gli allievi avranno appreso ad utilizzare le funzioni goniometriche**. Verrà sottolineato il fatto che gli argomenti in questione saranno particolarmente importanti per la comprensione della struttura della materia.

I programmi prevedono lo sviluppo delle due unità didattiche nel quarto anno. Per motivi di tempo e di “maturità” degli studenti si preferisce trattare l’argomento “onde meccaniche” nella classe IV e lasciare le onde elettromagnetiche e le equazioni di Maxwell all’anno successivo.

ACCERTAMENTO DEI PREREQUISITI:

Prima dell’inizio di questo nuovo percorso didattico è opportuno accertarsi che gli allievi abbiano acquisito determinati concetti e proprietà e si provvederà a tale accertamento mediante un colloquio con la classe e lo svolgimento di alcuni esercizi come ripasso.

Gli studenti verranno quindi chiamati alla lavagna per dimostrare le conoscenze su tali prerequisiti. Inoltre verranno assegnati esercizi per casa.

Si cercherà, ogniqualvolta questi verranno utilizzati, di richiamare proprietà e concetti ad essi legati.

OBIETTIVI GENERALI:

- Acquisire le conoscenze e le abilità previste dal percorso didattico
- Operare con il simbolismo matematico riconoscendo le regole sintattiche di trasformazioni di formule
- Condurre ad un appropriato lessico fisico
- Costruire procedure di soluzione di un problema sapendo argomentare i passaggi utilizzati
- Rendere gli studenti in grado di affrontare situazioni problematiche di varia natura
- Affrontare situazioni problematiche di varia natura avvalendosi di modelli matematici atti alla loro rappresentazione
- Sviluppare la capacità di leggere un grafico
- Sviluppare la capacità di abbozzare sul foglio un grafico sommario delle funzioni studiate

OBIETTIVI TRASVERSALI:

- Acquisire abilità di studio
- Sviluppare capacità logiche, argomentative e intuitive
- Sviluppare lo spirito critico e potenziare il ragionamento
- Sviluppare la capacità di riesaminare criticamente e sistemare logicamente le conoscenze acquisite
- Sviluppare l’attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra il docente e l’allievo e tra gli allievi stessi per abituare alla comunicazione scientifica e al confronto di idee

- Produrre congetture e sostenerle con ragionamenti coerenti;
- Valutare l'opportunità di ricorrere ai mezzi tecnologici disponibili per ragionare sulle situazioni problematiche proposte
- Abituare a rispettare i tempi di consegna dei lavori
- Perseguire ed ampliare il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti

METODOLOGIE DIDATTICHE

Si introdurrà l'argomento utilizzando un approccio storico-epistemologico che, per tanti argomenti, è fondamentale per far capire agli studenti che ciò che si sta ha delle origini ed è frutto di una evoluzione.

Nelle lezioni in classe si cercherà di dare prima un'interpretazione intuitiva dei concetti, facendo riferimento (per quanto possibile) all'esperienza degli studenti, per poi passare alla formalizzazione rigorosa, in modo da avvicinare **gradualmente** ai concetti. Si partirà quasi sempre da esempi che verranno commentati opportunamente con l'aiuto dell'insegnante per poter poi trarre definizioni e formule. Per l'apprendimento dei contenuti e per perseguire gli obiettivi esposti si farà uso di lezioni sia frontali che dialogate, con il sussidio del libro di testo e di fotocopie contenenti esercizi svolti e approfondimenti. Quindi nella stessa ora di lezione si farà uso dell'approccio dialogato e dell'approccio frontale; le lezioni non saranno mai solo frontali in modo da creare discussioni guidate che stimoleranno gli alunni a dare il loro contributo attivo mediante osservazioni e domande. Verranno assegnati compiti per casa, cercando di dedicare sempre una parte della lezione alla correzione di questi alla lavagna sia da parte del docente, che da parte dei ragazzi. (I compiti verranno comunque controllati dal docente, per assicurarsi che i ragazzi li svolgano).

STRUMENTI UTILIZZATI:

- ✓ Libro di testo
- ✓ Lavagna e gessi
- ✓ Strumenti disponibili nel laboratorio di fisica
- ✓ Calcolatrice scientifica
- ✓ Fotocopie

CONTROLLO DELL'APPRENDIMENTO:

Il controllo dell'apprendimento sarà effettuato mediante *verifiche formative* e *verifica sommativa*.

Le *verifiche formative* consistono nel controllo degli esercizi assegnati per casa, la correzione alla lavagna degli stessi, effettuato dagli allievi, la discussione in classe dei problemi incontrati nello

svolgimento degli esercizi e nello studio della teoria, qualche domanda durante le lezioni, lo svolgimento di qualche esercizio alla lavagna.

Le *verifiche sommative* consistono in prove orali e prove scritte.

Le *prove orali* serviranno al docente per valutare non solo la teoria appresa dai ragazzi, ma verrà chiesto anche lo svolgimento di qualche esercizio e verranno fatte domande riguardanti le attività di laboratorio.

La *prova scritta* sarà svolta al termine dell'unità didattica e ha soprattutto il compito di valutare le abilità e permetterà di verificare l'autonomia dello studente nell'utilizzo degli strumenti forniti.

VALUTAZIONE:

Per determinare il voto della verifica sommativa attribuiamo ad ogni esercizio un punteggio. La diversità di punteggio rappresenta un diverso livello di difficoltà in termini di conoscenze e abilità.

Per attribuire il punteggio teniamo conto dei seguenti indicatori:

- Conoscenze specifiche
- Competenze nell'applicare le procedure e i concetti acquisiti
- Capacità logiche ed argomentative
- Completezza della risoluzione
- Correttezza della risoluzione e dell'esposizione

Naturalmente, nel caso di errore nello svolgimento dell'esercizio, verrà attribuito solo parte del punteggio completo. Per fare questo, si stabilirà di volta in volta, a seconda della gravità dell'errore commesso, quanto farlo pesare e di quanto abbassare il punteggio.

Fatto questo, applicheremo la stessa diminuzione di punteggio a ciascun studente che avrà fatto lo stesso errore.

RECUPERO:

Per gli studenti che trovano difficoltà nell'apprendimento, verranno svolte attività pomeridiane, ossia gli "sportelli", che consistono in esercitazioni mirate al singolo studente.

UNITA' DIDATTICA 1 : Le onde meccaniche

DESTINATARI

Studenti del IV anno del Liceo Scientifico PNI (3 ore settimanali)

PREREQUISITI

Per poter affrontare lo studio di tale unità è richiesta la conoscenza dei seguenti argomenti:

- Le equazioni della cinematica
- Moti armonici
- Le varie forme di energia
- Le leggi di conservazione
- Funzioni trigonometriche
- Geometria euclidea nel piano

OBIETTIVI SPECIFICI

Conoscenze

- Acquisire il concetto di onda come perturbazione che si propaga a distanza, trasportando energia e informazione ma senza spostamento di materia.
- La propagazione delle onde
- Caratteristiche di un'onda: periodo, lunghezza d'onda e velocità di propagazione
- L'equazione di un'onda cosinusoidale
- Il principio di sovrapposizione e l'interferenza
- Riflessione, rifrazione, diffrazione di onde
- Onde stazionarie ed effetto Doppler
- Principio di Huygens

Abilità

- Saper definire un'onda
- Saper distinguere e classificare le principali caratteristiche delle onde
- Saper analizzare in modo qualitativo i fenomeni legati alla sovrapposizione delle onde
- Saper descrivere il comportamento di un'onda in prossimità di un ostacolo
- Saper determinare le principali caratteristiche delle onde

TEMPI PREVISTI PER L'INTERVENTO DIDATTICO:

Per la trattazione degli argomenti dell'unità didattica sono previste 8-10 ore di spiegazione (compreso qualche esercizio applicativo e qualche attività di laboratorio) e 2 ore dedicate alla verifica sommativa e alla correzione della stessa.

CONTENUTI

1. Introduzione
2. Classificazione delle onde
3. Onde meccaniche
4. Fronti d'onda e raggi
5. Caratteristiche delle onde
6. Equazione di un'onda
7. Fase e opposizione di fase
8. Trasporto di energia
9. Principio di sovrapposizione
10. Interferenza e onde stazionarie
11. Riflessione
12. Rifrazione
13. Diffrazione
14. Effetto Doppler
15. Principio di Huygens

SVILUPPO DEI CONTENUTI

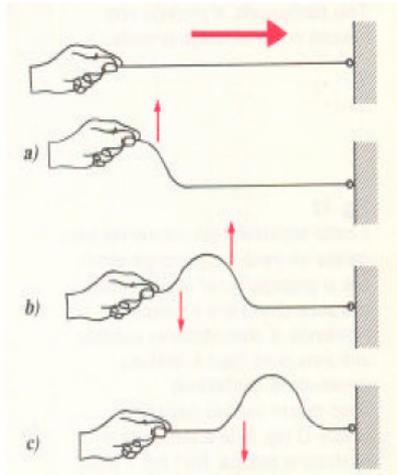
1. Introduzione

Come riusciamo a percepire la musica? Come riusciamo a comunicare? Perché sentiamo i rumori? Cominciamo a riflettere sugli aspetti della nostra vita quotidiana che riguardano il rapporto con gli altri e con il mondo; ci troviamo di fronte a fenomeni che potranno essere spiegati grazie a quello che cominceremo a trattare tra poco.

Si può iniziare ad analizzare fenomeni ondulatori più semplici ed accessibili alla nostra esperienza, comprensibili nel loro manifestarsi, come le onde che si propagano sulla superficie dell'acqua.

Possiamo osservare molti fenomeni legati a disturbi che si propagano nello spazio e nell'acqua, è proprio grazie a questa propagazione che riusciamo a vedere e sentire. Per poter comprendere questi fenomeni, dobbiamo prima capire che cosa è un'onda.

Cosa succede se fisso un estremo di una corda alla parete e con una mano muovo l'altro estremo verso l'alto/basso?



Supponiamo di buttare un sasso in uno stagno le cui acque sono calme. Nei dintorni del punto in cui è caduta la pietra, osserveremo delle increspature sull'acqua che dopo un certo tempo si saranno estese a tutto lo stagno. Questo è un classico esempio di propagazione ondosa.



Osservando attentamente l'esempio ci si accorge che **alla propagazione ondosa non è associato alcun flusso di materia**: il moto delle particelle d'acqua è trasversale rispetto alla direzione della propagazione ondosa, non è la materia che si propaga, ma l'energia. Per rendersi conto di questo basterebbe osservare un pezzo di legno galleggiante presente in prossimità di dove abbiamo gettato il sasso: questo oggetto non verrà trascinato dall'onda verso l'esterno, bensì oscillerà attorno al punto in cui si trovava prima che noi gettassimo il sasso.

Fenomeni molto diversi tra loro, quali il **suono, la luce, i segnali radio, i terremoti, hanno in comune la caratteristica di essere delle onde**; si parla, infatti, di onde sonore, di onde luminose, di onde radio e di onde sismiche.

2. Classificazione delle onde

Possiamo distinguere diversi tipi di onde:

- **onde elastiche o meccaniche.** Sono le più familiari. Si propagano grazie alle proprietà elastiche del mezzo materiale in cui ha origine la perturbazione. Infatti, l'energia ha bisogno di un mezzo per essere trasmessa.

Esempi di onde elastiche sono: le onde del mare, le onde sonore, le onde sismiche. Esse seguono le leggi di Newton e per esistere richiedono un mezzo materiale in cui propagarsi (aria, acqua, rocce, ...).

- **onde elettromagnetiche:** sono variazioni periodiche di proprietà elettriche e magnetiche e possono propagarsi, oltre che nei mezzi materiali, anche nel vuoto.

Esempi: la luce visibile, i raggi ultravioletti, i raggi X, le microonde, le onde radio e televisive.

Tutte le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto alla stessa velocità, che è la velocità della luce $c = 300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, mentre si propagano nei mezzi materiali con una velocità $v < c$.

- **onde di materia:** Esempi: Elettroni, protoni, atomi ... si muovono come onde. Meccanica quantistica (dualità onda-particella).

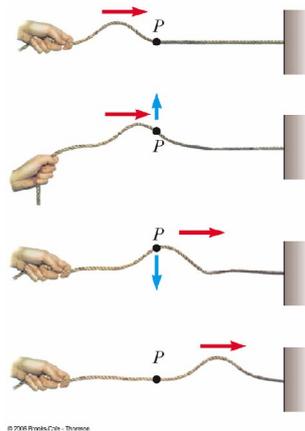
3. Onde meccaniche

Noi, per ora, ci occupiamo di **onde meccaniche o elastiche** che per la loro propagazione hanno bisogno di un mezzo.

Come si genera un'onda meccanica e come si propaga?

Prima di procedere con la spiegazione cerchiamo di raccogliere idee da parte della classe e discuterle insieme. Dopo questo primo momento di discussione cerchiamo di dare ordine alle idee.

Consideriamo la prima figura riportata all'inizio dell'unità didattica:



Prendiamo una corda tesa, fissiamola a un muro da un lato e teniamo con la mano l'estremità libera. Per produrre un'onda meccanica è sufficiente muovere la corda con un solo rapido movimento dall'alto verso il basso della mano. La mano costituisce la sorgente dell'onda; mediante il movimento della mano si imprime un impulso alla parte di corda più vicina a noi che trasmette il

movimento alla porzione di corda ad essa vicina; quest'ultima si mette dunque in movimento e trasmette, a sua volta, **il moto ad un'altra porzione di corda e così via**. Questo processo fa propagare la perturbazione lungo tutta la corda.

E se continuiamo a muovere la mano ripetendo periodicamente lo stesso movimento?

In questo caso si produce un'onda periodica; un tipo di onda periodica interessante da studiare è **l'onda armonica**, generata da una sorgente che oscilla di moto armonico.

A questo punto riassumiamo brevemente cosa succede con le onde meccaniche, tralasciando il caso particolare della corda e della mano.

Le onde meccaniche si propagano da uno strato del mezzo sollecitato al successivo, a causa delle proprietà elastiche del sistema stesso: infatti se in una zona delimitata di un dato mezzo materiale si produce una perturbazione abbastanza piccola, si può supporre che in prima approssimazione sia valida la legge di Hooke, per cui si originano forze proporzionali agli spostamenti delle singole particelle materiali dalla loro posizione di equilibrio, che tendono a riportarle nella loro configurazione iniziale. A causa delle forze di legame esistenti tra le singole particelle che costituiscono il sistema, questa perturbazione tende a propagarsi a tutti i punti del sistema con un certo ritardo determinato dal tipo di sollecitazione che ha causato la perturbazione, dall'inerzia delle particelle materiali formanti il sistema, dal tipo di legame esistente tra esse, dai vincoli esterni ecc.

E' importante sottolineare come il sistema percorso dalla perturbazione non si muova nel suo complesso seguendo il moto dell'onda: sono i vari strati del mezzo che eseguono successivamente oscillazioni limitate.

In natura, quando e dove troviamo l'oscillazione di una corda?

Pensiamo al suono o a un sasso gettato in una pozzanghera d'acqua.

Quando il suono si propaga, in ciascun punto investito dall'onda, la pressione dell'aria oscilla, aumentando e diminuendo con la frequenza dell'onda stessa. Nel caso dell'onda acustica, quindi, è la pressione dell'aria che oscilla. Se non vi fosse l'aria, non vi sarebbe né pressione né suono.

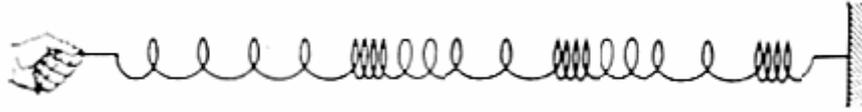
Analogamente, si può dire quando gettiamo un sasso in acqua: l'onda si propaga sulla superficie dell'acqua e le molecole d'acqua investite dall'onda oscillano su e giù. Questa volta è la posizione dei volumetti d'acqua che oscilla rispetto alla posizione di riposo.

A questo punto si vuole dare la definizione di onde trasversali e onde longitudinali. Prima di dare la definizione, però, proviamo a presentare due situazioni e far osservare analogie e differenze.

1. Pensiamo di effettuare lo stesso esperimento di prima con una molla al posto della corda. Imprimendo un movimento periodico a un estremo della molla, dall'alto verso il basso (trasversale rispetto alla lunghezza della molla), notiamo che tutti i punti della molla sono

raggiunti, uno dopo l'altro, dall'oscillazione e anch'essi oscillano trasversalmente (ortogonalmente alla direzione del moto dell'onda).

2. EsercitiAMO ora una compressione periodica di un estremo della molla, ossia un movimento parallelo alla sua lunghezza; notiamo che le vibrazioni avvengono nella direzione di propagazione dell'onda.



A questo punto possiamo dire che le onde meccaniche possono essere suddivise in **onde trasversali** ed **onde longitudinali**. Quando il moto delle particelle avviene in maniera ortogonale alla direzione del moto dell'onda, parleremo di onde trasversali; quando il moto delle particelle avviene nella stessa direzione di propagazione, parleremo di onde longitudinali.

In ambedue i casi osserveremo un'oscillazione delle particelle perturbate: nel primo caso l'oscillazione è ortogonale alla direzione dell'onda, nel secondo caso l'oscillazione è parallela alla direzione dell'onda.

4. Fronti d'onda e raggi

Proviamo a immaginare cosa succede nel caso dei nostri due esempi: quando gettiamo un sassolino nell'acqua o quando si emette un suono.

Dal punto in cui il sasso entra nell'acqua si allontanano onde concentriche, le quali hanno come centro comune il punto in cui è stato gettato il sasso; tutti i punti che, in uno stesso istante, si trovano alla stessa distanza dalla "sorgente" si comportano allo stesso modo, ossia vibrano con la stessa fase.

Allo stesso modo, pensiamo di produrre un rumore; l'onda acustica si propaga radialmente in tutte le direzioni e tutti i punti, posti a una stessa distanza dal punto d'origine, del rumore vibreranno con la stessa fase.

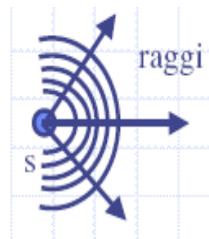
Una superficie caratterizzata dal fatto che tutti i suoi punti vibrano concordemente si chiama **fronte d'onda**.

- Se le onde si propagano su una superficie bidimensionale e la sorgente è puntiforme (caso del sasso nell'acqua) i fronti d'onda saranno circonferenze e si parlerà di onde circolari.

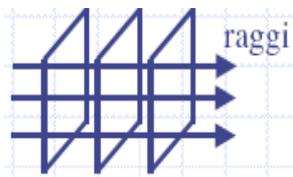


Un caso particolare di fronti d'onda circolari è rappresentato dai fronti d'onda rettilinei (onde rettilinee) che si possono pensare come porzioni isolate e piccole (notevolmente minori del raggio) di fronti d'onda circolari.

Per queste onde, una qualunque retta perpendicolare al fronte d'onda costituisce un **raggio** di propagazione dell'onda.



- Se lo spazio è tridimensionale (propagazione del suono) le onde analoghe a quelle circolari saranno sferiche e quelle analoghe alle rettilinee saranno piane.



Possibile attività di laboratorio utilizzando un endoscopio. Scopo: far osservare e comprendere al meglio il comportamento delle onde.

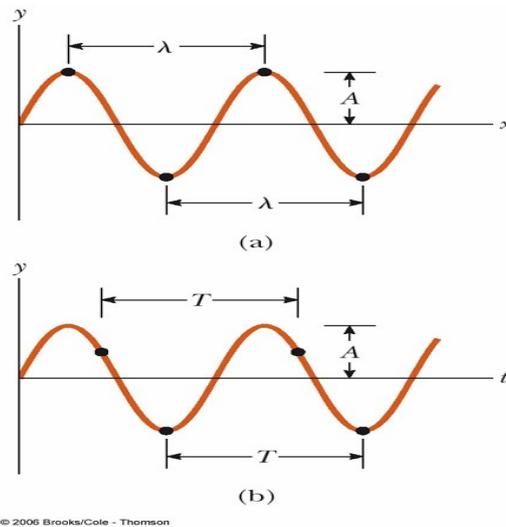
5. Caratteristiche delle onde

Vediamo ora di cercare delle leggi che ci possano dare delle leggi generali per esprimere gli elementi che caratterizzano le onde.

Si cercherà di indurre gli studenti a determinare la relazione fondamentale che collega la *velocità di propagazione*, la *frequenza* e la *lunghezza d'onda*. Occorre prendere in considerazione le definizioni e articularle tra loro.

Cominciamo considerando il primo esempio visto all'inizio dell'unità didattica: la **molla avente un'estremità fissa e fatta vibrare dalla nostra mano.**

Rappresentiamo, in figura, prima (a), a un istante fissato, lo spostamento y dei punti della molla in funzione della posizione x lungo la direzione di propagazione dell'onda e poi (b) lo spostamento di un punto della molla dalla sua posizione iniziale di equilibrio in funzione del tempo.



Il massimo allontanamento di un punto oscillante dalla sua posizione di equilibrio, indicato in figura con A è detto **ampiezza** dell'onda.

Nelle figure troviamo rappresentate altre due grandezze: λ e T ; esse sono, rispettivamente la **lunghezza d'onda** e il **periodo** dell'onda armonica.

La lunghezza d'onda è definita come la distanza tra due massimi o due minimi adiacenti; ripetiamo che per massimo si intende il massimo allontanamento del punto dalla sua posizione di equilibrio $y = 0$.

Il periodo di un'onda armonica è l'intervallo di tempo che intercorre fra due massimi (o minimi) consecutivi dell'oscillazione di un qualsiasi punto del mezzo in cui l'onda si propaga.

A questo punto siamo interessati a scoprire quale è la velocità con cui si propaga un'onda armonica.

Consideriamo un massimo della propagazione; ogni volta che la sorgente dell'onda produce un'oscillazione completa questo massimo si sposta lungo la direzione di propagazione x di una quantità pari alla lunghezza d'onda λ . Quindi, in un intervallo di tempo pari al periodo T , il massimo ha compiuto uno spostamento λ , allora possiamo definire la **velocità di propagazione di un'onda armonica** come il rapporto tra la sua lunghezza d'onda e il suo periodo:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

A questo punto, se indichiamo con f la frequenza di oscillazione della sorgente, ossia il numero di oscillazioni da essa compiute nell'unità di tempo, allora abbiamo che

$$T = \frac{1}{f} \text{ e, di conseguenza che } v = \lambda \cdot f$$

A scopo didattico perdiamo qualche minuto per far capire queste relazioni pregando di ragionare e non di imparare tutto a memoria! Il tutto non ricorda le leggi del moto studiate l'anno prima?

I problemi pratici, spesso, richiedono lo studio della propagazione di un'onda armonica su una corda tesa o in un fluido omogeneo. In questi casi la velocità di propagazione dell'onda varia con la natura e le caratteristiche del mezzo perturbato; nel calcolo della velocità, dunque, si deve tener conto di altri fattori.

Analizziamo i due casi.

- Corda tesa:

La velocità di propagazione dell'onda aumenta con l'aumento della tensione N della corda e diminuisce all'aumentare della **densità lineare (μ) della corda**:

$$v = \sqrt{\frac{N}{\mu}}$$

- Fluido omogeneo:

La velocità di propagazione dell'onda aumenta con il modulo di compressione del fluido (C) e diminuisce all'aumentare della **densità (ρ) del fluido in equilibrio**:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$

Esempio

Le onde del suono viaggiano nell'aria ad una velocità di $343 \frac{m}{s}$. La frequenza più bassa che puoi udire è di 20 Hz, la più alta di 20 kHz.

Trovare le lunghezze del suono per le frequenze di 20 Hz e di 20 kHz.

Soluzione

Considerando la relazione, esplicitando rispetto a λ , si ha:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{343 \frac{m}{s}}{20 s^{-1}} = 17,15 m$$

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{343 \frac{m}{s}}{20000 s^{-1}} = 0,0172 m = 1,72 cm$$

Esempio

Una corda ha una densità lineare di $\mu = 6,0 \text{ g/m}$ ed è soggetta a una tensione $N = 90\text{N}$. Calcolare la lunghezza d'onda di un'onda trasversale armonica di frequenza $f = 420 \text{ Hz}$ che si propaga lungo la corda.

Soluzione

Usiamo la relazione vista sopra: $v = \sqrt{\frac{N}{\mu}}$; non mi interessa solo la velocità, il problema

richiede il calcolo della lunghezza d'onda. Dalla teoria so che vale: $\lambda = \frac{v}{f}$, da cui:

$$\lambda = \frac{\sqrt{\frac{N}{\mu}}}{f} = \sqrt{\frac{N}{\mu}} \cdot \frac{1}{f} = \sqrt{\frac{90}{6,0}} \cdot \frac{1}{420} = \dots$$

Esempio

Una sorgente di onde circolari vibra sulla superficie d'acqua di un ondoscopio con un periodo di $0,1 \text{ s}$. Determinare la velocità di propagazione delle onde sapendo che la lunghezza d'onda è pari a $0,2 \text{ cm}$.

Soluzione

Considerando la relazione $v = \frac{\lambda}{T}$ avremo:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0,2\text{cm}}{0,1\text{ s}} = 2 \text{ cm/s}$$

6. Equazione di un'onda

Possiamo conoscere solo le cose viste fino ad ora a proposito delle onde? Non riusciamo a sapere come si comporta un qualsiasi punto in un determinato istante o, ancora meglio, in ogni istante?

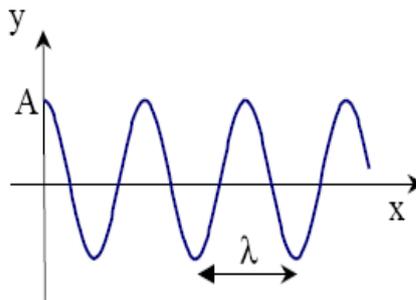
Abbiamo quindi bisogno di determinare l'equazione che ci permetta di calcolare, in ogni istante, lo spostamento dalla posizione di equilibrio di un qualsiasi punto del mezzo materiale in cui si propaga un'onda.

Per semplicità prenderemo in considerazione solo le onde unidimensionali e cercheremo di arrivare all'equazione "per pezzi".

Se facciamo oscillare l'estremo di una corda con moto armonico semplice si origina un'onda dall'aspetto di un seno o un coseno. È questa un'ONDA PERIODICA, costituita da configurazioni generate da una sorgente che si muove di moto armonico.

Cominciamo supponendo che al tempo $t = 0$ il profilo dell'onda sia una funzione cosinusoidale della coordinata x . La direzione y denota lo spostamento verticale della corda e $y = 0$ corrisponde alla corda tesa senza onde.

Ricaviamo l'espressione matematica che descrive y in funzione del tempo t e della posizione x per un'onda armonica di questo tipo.



OSSERVAZIONE

L'onda armonica, rappresentata in figura, si ripete quando viene incrementata di una lunghezza d'onda λ . Perciò la dipendenza dell'onda da x deve essere del tipo:

$$y(x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

La funzione è rappresentata graficamente dal grafico della cosinusoide; il profilo dell'onda si riproduce in forma identica dopo ogni lunghezza d'onda.

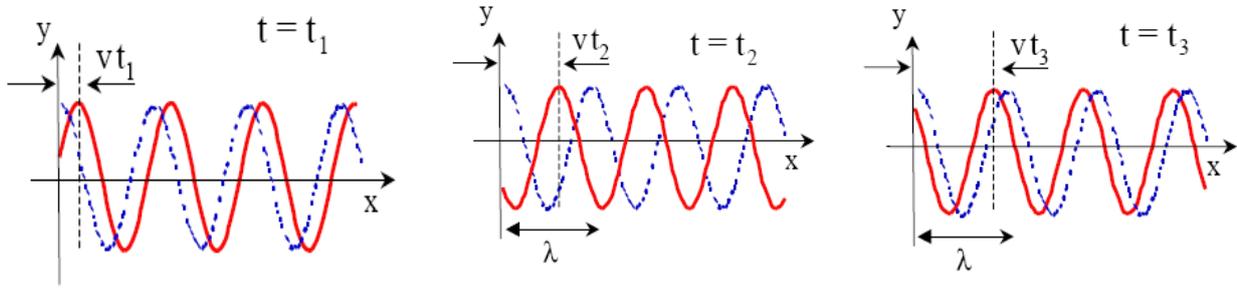
OSSERVAZIONE

Sostituendo x con $x + \lambda$ otteniamo lo stesso valore di y :

$$y(x + \lambda) = A \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x + \lambda)\right] = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + 2\pi\right) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) = y(x)$$

Segue che l'equazione descrive uno spostamento verticale che si ripete con lunghezza d'onda λ .

Questa è solo una parte della « funzione d'onda », dobbiamo ora descrivere come essa varia in funzione del tempo.



L'onda si muove verso destra con velocità v

Siamo interessati a sapere dopo quanto tempo l'onda sarà identica a quella di partenza. Quando la cresta dell'onda che era in $x = 0$ sarà nuovamente una cresta?

Dopo un tempo $t = T$ tale che $\lambda = v \cdot T$.

Quindi la cresta che era in $x = 0$ sarà nuovamente una cresta in $x = v \cdot t$.

Dunque per introdurre esplicitamente la dipendenza temporale nell'espressione dell'onda, basta sostituire $x - v \cdot t$ tutte le volte in cui compare x :

$$y = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}vt\right)$$

ma ricordiamo che $\lambda = v \cdot T$, quindi

$$y = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) = A \cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

Un modo più compatto per scrivere l'equazione di un'onda è:

$$y = A \cos(kx - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ è il numero d'onda e } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ è la pulsazione.}$$

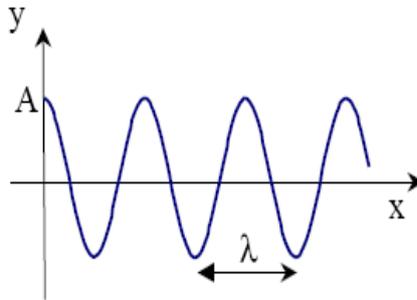
NOTA

La quantità $(kx - \omega t)$ è detta **fase dell'onda**. Si tratta di una quantità dimensionale espressa in radianti e la sua forma più generale è $(kx - \omega t + \Phi)$ dove Φ è una costante, espressa in radianti, che rappresenta la fase dell'onda per $x = 0$ e $t = 0$.

7. Fase e opposizione di fase

Tutti i punti che distano tra loro una o più lunghezze d'onda vibrano nello stesso modo, movendosi all'unisono; si dice che essi sono **in fase**.

Tutti i punti che distano tra loro di mezza lunghezza d'onda (o di un numero dispari di mezza lunghezze d'onda) oscillano in **opposizione di fase**, ciò significa che hanno posizione, velocità e accelerazione di uguale intensità ma segno opposto.



OSSERVAZIONE

Si può anche dire che due o più punti sono in fase se la differenza di fase fra questi punti è un multiplo pari di π , mentre si parla di punti in opposizione di fase se la differenza detta prima è un multiplo dispari di π .

8. Trasporto di energia

[Chi non ricorda gli effetti devastanti dello tsunami? Un'onda può trasportare energia? In che senso?](#)

Per quanto riguarda il **trasporto di energia**, potremmo chiarire il concetto agli alunni fornendo l'esempio, forse più evidente, dello tsunami: quando le onde (di elevate dimensioni!) del maremoto si abbattono sulla costa, si vede che hanno racchiusa in sé una grande quantità di energia, infatti questa energia porta distruzione.

Le onde meccaniche trasportano energia vibrazionale da un punto all'altro del mezzo in cui si propagano.

Concentriamo l'attenzione sulla **corda tesa** sulla quale viaggia un'onda trasversale armonica. Immaginiamo che all'inizio non ci siano onde e assumiamo un sistema di riferimento solidale alla corda tesa. L'energia cinetica della corda in queste condizioni è pari a zero perché nessun pezzo di

corda è in moto; stabiliamo che in questa situazione anche l'energia potenziale sia pari a zero. Quando l'onda comincia a propagarsi lungo la corda, le sue parti si mettono in moto e la corda acquista energia cinetica ed energia potenziale elastica.

Ma quanto vale l'energia immagazzinata dalla corda?

Cominciamo prendendo in considerazione un trattino Δx di corda. Possiamo calcolare l'energia ΔE del trattino ricordando che esso si muove di moto armonico:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m \omega^2 a^2$$

NOTA

Δm rappresenta la massa del trattino di corda, ω è la pulsazione del moto armonico e a è l'ampiezza.

Indicando con ρ la densità lineare della corda possiamo riscrivere la relazione precedente come:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \rho \Delta x$$

Ora, l'energia contenuta nell'intera corda di lunghezza pari alla lunghezza d'onda λ è:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \rho \lambda$$

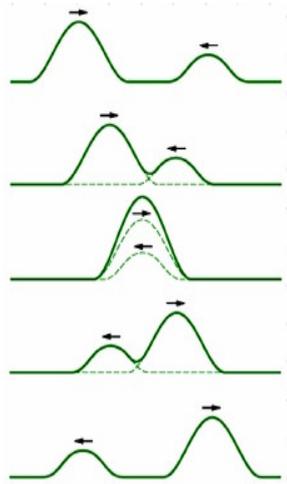
Se l'onda è armonica, ciascuna porzione del mezzo oscilla di moto armonico e possiede un'energia meccanica proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda. Questa conclusione che abbiamo ottenuto per l'onda elastica sulla corda, vale anche per altri tipi di onde, ad esempio quelle luminose o quelle sonore.

9. Principio di sovrapposizione

In natura, quasi mai, le onde si propagano separatamente! Molti fenomeni con cui veniamo a contatto quotidianamente sono dovuti all'interazione di diverse onde.

Nello stesso mezzo si possono propagare, contemporaneamente, numerose onde. Per esempio, quando ascoltiamo la musica di un'orchestra, nella quale molti strumenti suonano contemporaneamente, i loro suoni si combinano all'interno del teatro. Tuttavia possiamo sentire i singoli strumenti, ognuno dei quali emette il proprio suono come se gli altri non fossero presenti.

Quello che accade è che le oscillazioni causate da ciascuna onda si sommano tra loro e la perturbazione che ne risulta è data dalla somma delle perturbazioni che ciascuna onda produrrebbe singolarmente.



In figura si mostra cosa accade quando due onde si incontrano durante la propagazione nello stesso mezzo rappresentato da una fune.

Nell'istante in cui le onde si sovrappongono, le ampiezze si sommano, poiché ogni spostamento, in modo indipendente l'uno dall'altro, porta il proprio contributo alla perturbazione risultante. Dopo l'interazione le onde, senza essersi reciprocamente disturbate, continuano il loro moto ondoso senza mutare forma e velocità. In altri termini, l'effetto di ciascuna perturbazione è lo stesso di quello che si avrebbe se essa si propagasse da sola lungo la fune.

Poiché le onde si sommano, l'onda risultante y ha sempre ampiezza maggiore delle sue onde componenti y_1 e y_2 ?

Faremo osservare che l'ampiezza di y può essere maggiore, minore o uguale a quella di y_1 e y_2 . Infatti l'onda y è la somma di y_1 e y_2 , ma y_1 e y_2 sono talvolta positive e talvolta negative. Perciò, se, per esempio, in un dato istante y_1 è positiva e y_2 è negativa, la somma di $y_1 + y_2$ può essere zero o addirittura negativa. Se y_1 e y_2 hanno la stessa ampiezza A , l'ampiezza di y può assumere valori che vanno da 0 a $2A$.

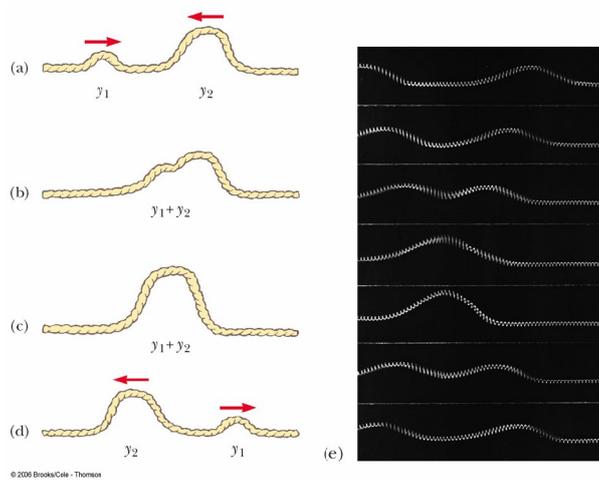
10. Interferenza

L'interferenza è un fenomeno tipico delle onde. L'interferenza tra raggi luminosi ha permesso di riconoscere le caratteristiche ondulatorie della luce. (Questo aspetto verrà studiato in seguito).

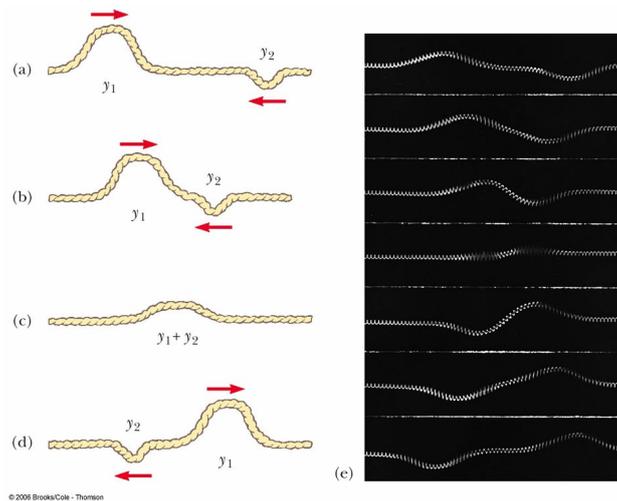
Limitiamoci a considerare onde armoniche elastiche della stessa frequenza. Lo scopo è quello di osservare l'effetto prodotto da più onde che interferiscono tra loro; **studiamo cosa accade sommando due moti armonici della stessa frequenza che avvengono nella stessa direzione.**

Consideriamo gli effetti dell'interferenza di due onde trasversali su una corda, come rappresentato in figura.

Quando le onde si incontrano le loro perturbazioni (spostamenti dalla verticale) si sommano; l'onda risultante ha un'ampiezza data dalla somma delle singole ampiezze. Definiamo questa situazione di *interferenza costruttiva*. (È un fenomeno di rinforzo)

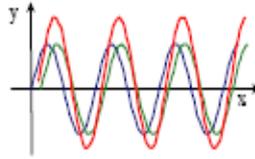


D'altra parte, si possono combinare anche due onde come quelle della figura che segue. In questo caso lo spostamento positivo di un'onda si somma allo spostamento negativo dell'altra. I loro singoli effetti si riducono. Definiamo questa situazione di *interferenza distruttiva*. (È un fenomeno di elisione)



OSSERVAZIONE

Le onde continuano dopo la loro interazione. Dopo l'urto le onde riemergono con la forma che avevano in origine e proseguono il loro cammino senza altre perturbazioni.



È opportuno osservare che l'interferenza è una delle caratteristiche peculiari che definiscono le onde. In generale, quando delle onde si combinano, formano delle figure di interferenza, che hanno zone di interferenza costruttiva ed altre di interferenza distruttiva.

L'interferenza dipende dalla differenza di fase $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ tra le due onde.

Supponiamo che le due oscillazioni che s'incontrano abbiano la stessa frequenza e ampiezza, ma fasi differenti:

$$\begin{cases} y_1 = A \cos(\omega t + \phi_1) \\ y_2 = A \cos(\omega t + \phi_2) \end{cases}$$

Per trovare il moto composto sommiamo matematicamente le due onde:

Dalla formula di prostaferesi $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)$ e, nel nostro caso
 $\alpha = \omega t + \phi_1$ e $\beta = \omega t + \phi_2$

$$y = y_1 + y_2 = 2A \cos\left[\frac{\Delta\phi}{2}\right] \cos\left[\omega t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right]$$

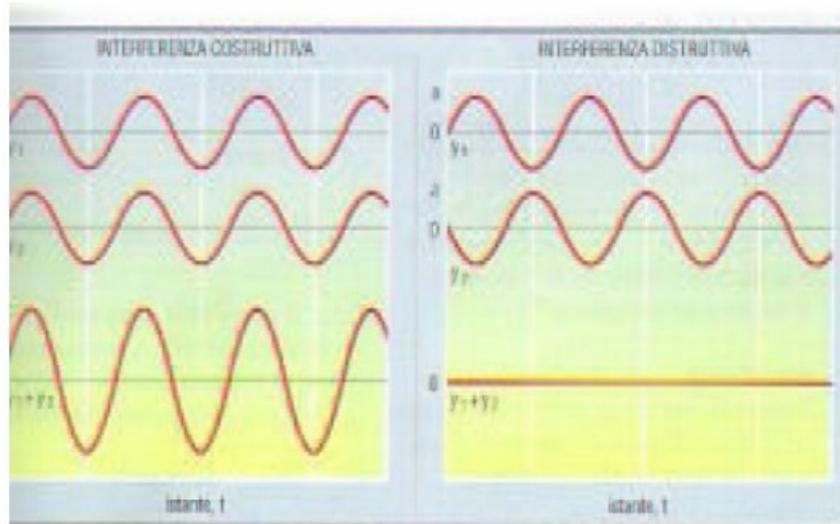
dove $\Delta\phi$ è la differenza di fase $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$

Cosa possiamo osservare?

Componendo i due moti, si ottiene un nuovo moto armonico di frequenza uguale a quella dei moti componenti.

OSSERVAZIONE

Il risultato della somma dei due moti armonici dipende dunque dal loro sfasamento.



Infatti l'ampiezza risultante può variare tra 0 e $2A$ a seconda del valore assunto dalla differenza delle fasi $\Delta\phi$.

Se $\Delta\Phi = (2n+1)\pi$ con n intero, il fattore A è nullo (interferenza distruttiva): i due moti armonici si sommano in modo tale da non dare alcun moto risultante.

Pensiamo, ad esempio, a due suoni uguali che giungono nello stesso punto in opposizione di fase: producono il silenzio.

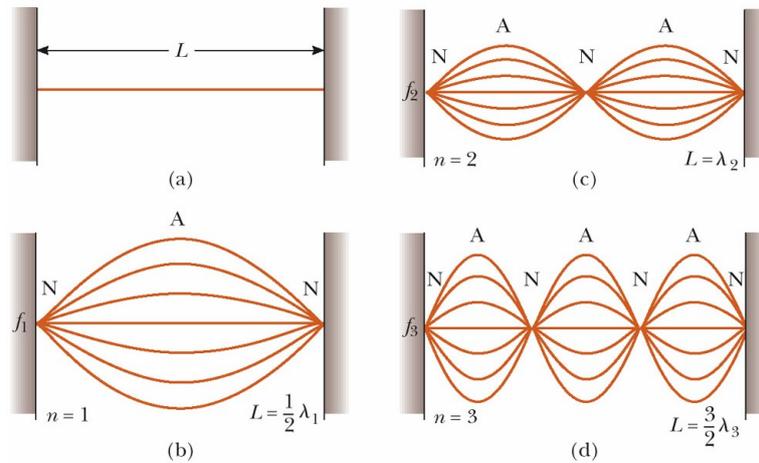
Se $\Delta\Phi = 2\pi n$ la combinazione è costruttiva e il moto risultante ha ampiezza $2A$, doppia di quella di ciascuna componente.

Una particolare interferenza: le onde stazionarie

Se si ottiene interferenza tra due onde aventi la stessa ampiezza e la stessa frequenza, che si propagano in verso opposto, si ottiene un'onda stazionaria. Onde di questo tipo si possono ottenere, per esempio, nelle corde, nelle molle e nell'aria contenuta nelle canne di un organo. Una proprietà fondamentale delle onde stazionarie è che esse non trasportano energia. Infatti, un'onda di questo tipo, come detto sopra, si ottiene dall'interferenza tra un'onda che si allontana dalla sorgente e un'onda, avente stessa ampiezza e frequenza, che si avvicina alla sorgente in seguito a una riflessione. Quindi le due onde componenti trasportano la stessa energia ma in versi opposti, perciò complessivamente l'energia che riescono a trasportare è nulla.

Se fissiamo una corda alle due estremità, la sollecitiamo e poi la lasciamo libera, essa comincia a oscillare su e giù assumendo configurazioni diverse a seconda del punto in cui è stata sollecitata; su di essa si stabiliscono delle onde stazionarie, formate da un'onda incidente (iniziale) e dall'onda riflessa. In quest'onda parti della corda, dette nodi, rimangono in quiete (stazionarie); a metà strada

tra due nodi vi sono i *ventri* dove l'ampiezza dell'onda risultante è massima. Si parla di onde stazionarie perché la posizione dei massimi e minimi non cambia.



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Se pizzichiamo questa corda nel mezzo, essa vibra come viene mostrato in figura (b). Questo viene detto **modo fondamentale di vibrazione** o **prima armonica**.

La prima armonica non è l'unica onda stazionaria che può esistere su una corda. Infatti c'è un numero infinito di modi per ottenere le onde stazionarie o armoniche, per ogni data corda. Per trovare le armoniche superiori, i due estremi della corda devono rimanere immobili. I punti di onda stazionaria, che rimangono fissi, vengono chiamati **nodi**. A metà strada tra due nodi c'è un punto dell'onda che ha un massimo spostamento, come è indicato in figura (c). Tale punto è chiamato **antinodo**.

Alle diverse configurazioni di onda stazionaria sono associate diverse lunghezze d'onda e diverse frequenze.

Possiamo dire qualcosa sulla lunghezza d'onda e sulla frequenza di queste onde?

Ricordiamo che vale sempre la definizione di lunghezza d'onda come la distanza tra due massimi o minimi consecutivi. Allora, indicando con L la lunghezza della corda, possiamo dire che nel caso a)

$\lambda_1 = 2L$, nel caso b) $\lambda_2 = L$, quindi le corrispondenti frequenze sono $f_1 = \frac{v}{2L}$ e $f_2 = \frac{v}{L}$, dove v è la

velocità dell'onda sulla corda. Se consideriamo n un numero intero, le diverse frequenze per le diverse configurazioni si possono ottenere mediante la formula:

$$f_n = n \frac{v}{2L}$$

Queste frequenze sono chiamate **frequenze di risonanza**.

11. Riflessione

OSSERVAZIONE

Ogni volta che un'onda si propaga in un mezzo, il moto vibratorio rimane fino a quando incontra un ostacolo che impedisce il suo moto. Quando ciò accade, poiché l'energia associata all'onda non può sparire, l'onda deve in qualche modo continuare ad esistere. **Che cosa accade?**

Qualunque sia il particolare tipo di onda, l'ulteriore propagazione può avvenire con tre modalità distinte, corrispondenti a tre fenomeni diversi (riflessione, rifrazione, diffrazione).

Esaminiamo le onde di tipo meccanico ed analizziamo il fenomeno della **riflessione**.

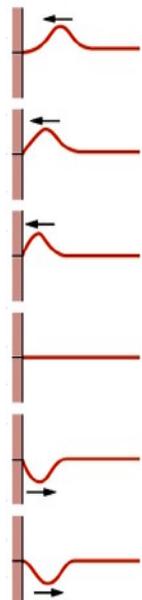


figura 1

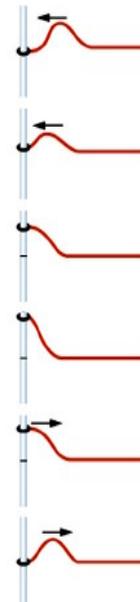


figura 2

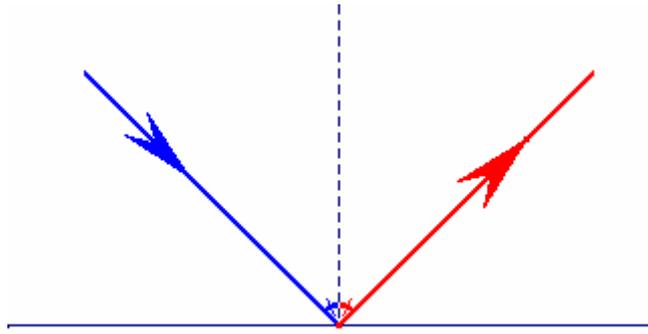
Supponiamo che l'estremo di una corda sia ancorato ad una parete. Se diamo un colpo ad un estremo libero della corda creiamo un'onda «impulsiva» che viaggia verso l'altro estremo. (Figura 1)

Quando questo impulso raggiunge la parete, esercita su di essa una forza verso l'alto, che tenderebbe a sollevarla. Ma a sua volta la parete esercita sull'estremo legato una forza uguale ed opposta, che si oppone al movimento. In sintesi, la parete esercita sulla corda una forza che è esattamente opposta a quella che avevamo esercitato noi, quando abbiamo creato l'impulso. Come conseguenza abbiamo un impulso invertito. (Figura 2)

Quando un'onda, qualunque sia la sua natura e la sua forma, incontra un ostacolo, essa viene **riflessa**, tornando indietro come se provenisse da una nuova sorgente.

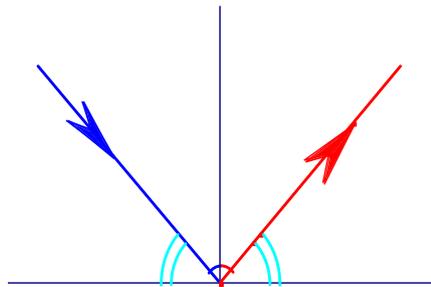
Supponendo che il treno di onde (cioè l'insieme di onde che si propagano nella stessa direzione) sia limitato nello spazio, per semplicità possiamo convenzionalmente identificarlo con un solo raggio incidente a cui corrisponde un solo raggio riflesso.

Sperimentalmente si trova che il fenomeno della riflessione segue due leggi.



In figura il raggio blu è detto **raggio incidente** mentre quello rosso è detto **raggio riflesso**.

Si chiama **angolo di incidenza**, l'angolo formato dal raggio incidente con la normale alla superficie nel punto di incidenza e per **angolo di riflessione** quello formato dal raggio riflesso con la normale.



Nel caso di un'onda piana (vedi figura) dall'uguaglianza dell'angolo di incidenza con quello di riflessione, segue anche l'uguaglianza degli angoli che l'onda incidente e l'onda riflessa formano con la superficie di riflessione e viceversa.

Nota È importante fare questa osservazione poiché grazie ad essa possiamo verificare sperimentalmente la seconda legge, in quanto è più facile misurare l'angolo dell'onda con la superficie di riflessione invece dell'angolo dei raggi con la normale alla superficie stessa.

Presentiamo ora le due leggi della riflessione:

Prima legge

Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente giacciono sullo stesso piano.

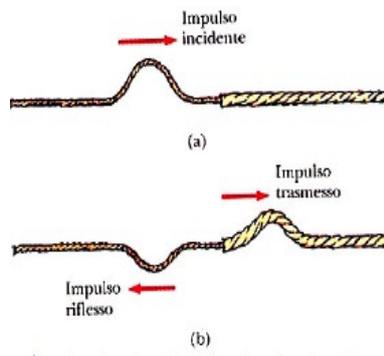
Seconda legge

L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

12. Rifrazione

Cosa accade se consideriamo un'onda originata da un impulso che passa da una fune direttamente collegata ad un'altra fune di diversa dimensione?

Analizziamo cosa accade quando un'onda passa da un mezzo ad un altro mezzo con differenti proprietà fisiche, ossia quando le diverse proprietà del materiale fanno variare la velocità di propagazione dell'onda. Questo determina un **cambiamento della direzione di propagazione**. In questo caso **la frequenza si mantiene mentre cambiano velocità di propagazione e lunghezza d'onda**. Sia che la propagazione avvenga su un piano sia nello spazio la variazione della velocità di propagazione comporta un cambiamento della direzione di propagazione. È questo il fenomeno della **rifrazione**.



- (a) Un impulso in moto verso destra in una corda leggera e legata ad una corda più pesante.
- (b) L'impulso incidente viene parzialmente riflesso (ed invertito), e parzialmente trasmesso alla corda più pesante

OSSERVAZIONE

Nel passaggio da un mezzo all'altro cambia la lunghezza d'onda invece la frequenza rimane la stessa in quanto, ricordiamo, **la frequenza dell'onda non dipende dalle proprietà del mezzo in cui si propaga ma solo dalla frequenza con cui oscilla la sorgente**.

Sperimentalmente si trova che il fenomeno della rifrazione segue due leggi:

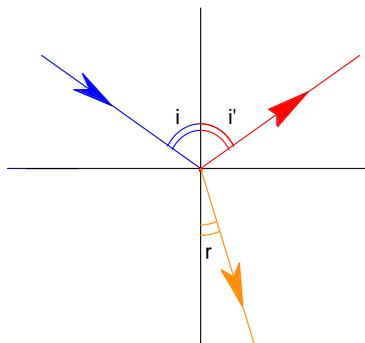
Prima legge

Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione tra i mezzo in cui si propaga l'onda incidente e quello in cui si propaga l'onda rifratta, giacciono sullo stesso piano.

Seconda legge

Il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza (i) (formato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi) e il seno dell'angolo di rifrazione (r) (formato dal raggio rifratto e la normale) è costante ed è uguale al rapporto fra le velocità v_1 e v_2 di propagazione dell'onda nel primo e nel secondo mezzo:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \text{costante}$$



Esempio

Analizziamo, a titolo di esempio, cosa succede a un'onda lineare costretta a passare da una zona d'acqua profonda a una zona d'acqua meno profonda.

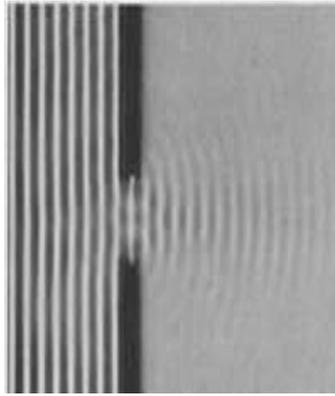
Possibile attività di laboratorio mediante l'uso dell'ondoscopio

- Se produciamo un'onda con fronti d'onda paralleli alla linea di divisione delle due zone d'acqua si osserva che, nel passaggio dell'onda dalla zona più profonda a quella meno profonda, i fronti d'onda rimangono paralleli alla linea di separazione ma diventano più ravvicinati (quindi hanno lunghezza d'onda minore).
- Se produciamo un'onda in modo che il suo fronte d'onda non sia parallelo alla linea di divisione delle due zone d'acqua (angolo non nullo), notiamo che le onde rifratte, oltre ad avere fronti d'onda più vicini (lunghezza d'onda minore), sono anche diversamente inclinate rispetto a quelle incidenti.

13. Diffrazione

Cosa accade se un'onda incontra un oggetto o qualche ostacolo munito di un piccolo foro o di una stretta fenditura?

La **diffrazione** è il fenomeno che si presenta durante la propagazione su un piano o nello spazio tutte le volte che l'onda incontra un ostacolo; è appunto il modo in cui l'onda supera l'ostacolo e si propaga oltre questo.



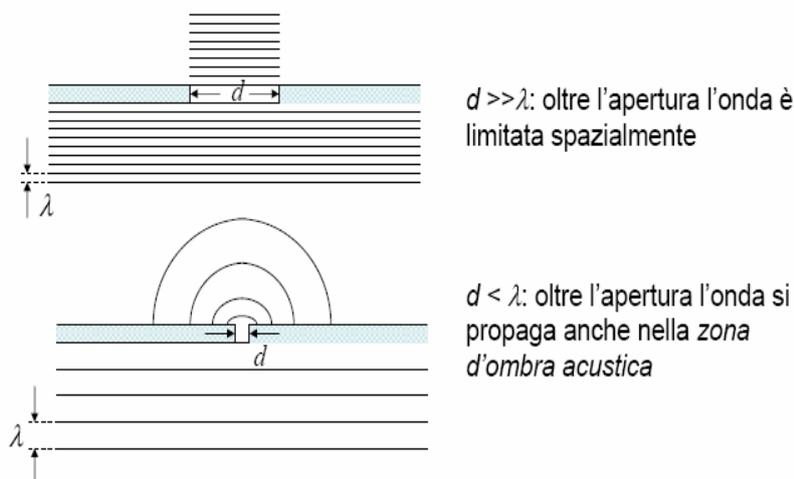
Solitamente l'ostacolo occupa una piccola parte del fronte d'onda ma talvolta può occuparne la maggior parte lasciando solo una fenditura per il passaggio, in entrambi i casi una volta superato l'ostacolo la forma geometrica dell'onda viene alterata.

Se per esempio consideriamo un treno di onde piane che attraversa un foro, le cui dimensioni sono paragonabili alla lunghezza d'onda del fascio, al di là del foro l'onda muta la sua configurazione: essa infatti tende ad assumere la caratteristica forma sferica come se fosse prodotta da una sorgente puntiforme posta nell'apertura stessa.

Possibile attività di laboratorio mediante l'uso dell'ondoscopio

Cerchiamo di capire cosa succede alle figure di diffrazione al diminuire della larghezza di una fenditura incontrata da un'onda.

- Se la larghezza della fenditura è notevolmente più grande della lunghezza d'onda dell'onda incidente ($d \gg \lambda$), il fronte d'onda diffratto è ancora di forma pressoché rettilinea.
- Se la fenditura ha larghezza paragonabile alla lunghezza d'onda, il fronte d'onda diffratto si restringe e le onde cominciano a invadere la zona che non sarebbe interessata dalla perturbazione se questa si propagasse in linea retta (detta zona d'ombra).
- Diminuendo le dimensioni della fenditura ($d \ll \lambda$) il fronte d'onda oltre la fenditura assume una forma circolare e la figura di diffrazione tende a occupare tutta la zona d'ombra.



Nota Tale fenomeno verrà studiato approfonditamente e in maniera più completa quando si parlerà dell'ottica.

14. Effetto Doppler

Immaginiamo di essere in una stazione di treni e sentire il fischio di un treno in arrivo. Cosa possiamo notare? Perché inizialmente il suono è più debole e, man mano che il treno viene verso di noi, lo sentiamo sempre più forte? E se il treno passa davanti a noi e non si ferma? Cosa succede al rumore che udiamo mentre il treno si allontana da noi?

Questa (e altre) esperienze quotidiane ci mette a conoscenza di un effetto che prende il nome dal fisico austriaco Christian Doppler (1803-1853) che lo ha spiegato nel 1843. Tale fenomeno è dunque conosciuto come **Effetto Doppler** e **si verifica ogni volta che una sorgente di onde sonore o elettromagnetiche e l'osservatore sono in moto relativo l'uno rispetto all'altro.**

Consideriamo una sorgente sonora A ferma, che emette un suono con frequenza f , il quale si propaga con velocità v . Un ricevitore, fermo rispetto alla sorgente, riceve un segnale che ha la stessa frequenza di quello emesso dalla sorgente. Le cose si complicano lievemente se sorgente o ricevitore sono in moto l'uno rispetto all'altro.

Il fatto che il fischio del treno venga recepito più forte o più debole dipende dalla frequenza con cui il suono viene udito dal ricevitore/osservatore; la variazione di frequenza è dovuta al fatto che l'osservatore percepisce come frequenza il numero di massimi di oscillazione da cui è investito nell'unità di tempo. Di conseguenza tale numero aumenta se la sorgente si avvicina all'osservatore, diminuisce in caso contrario.

Siano ora f e λ frequenza e lunghezza d'onda dell'onda sonora emessa da una sorgente, sia v la velocità della sua propagazione. Sappiamo che $f = \frac{v}{\lambda}$. Se osservatore e sorgente emittente sono entrambi fermi, l'osservatore percepirà un suono avente la stessa frequenza con cui è stato emesso. Ma, cosa succede se uno dei due si muove?

Distinguiamo due casi

Sorgente ferma, osservatore in moto

Se l'osservatore si muove con velocità v_1 verso la sorgente egli viene investito da tutti i massimi dell'onda che egli riceverebbe stando fermo più quelli che egli intercetta avvicinandosi ad essa, in numero uguale a v_1/λ .

NOTA

Ricordiamo che l'onda si propaga con una sua velocità che indichiamo con v

Da cui, **la frequenza percepita** sarà:

$$f_1 = f + \frac{v_1}{\lambda} = \frac{v+v_1}{\lambda} = \left(1 + \frac{v_1}{v}\right) f$$

NOTA

Se l'osservatore si allontana? Fare dedurre che nella formula compare il segno negativo.

Sorgente in moto, osservatore fermo

Se la sorgente si muove con velocità v_2 verso l'osservatore, egli percepisce una lunghezza d'onda λ' (distanza da lui misurata tra due fronti d'onda consecutivi) minore del valore λ che percepirebbe se la sorgente fosse ferma. Perciò la lunghezza d'onda percepita è uguale alla "vera" lunghezza d'onda diminuita della distanza percorsa dalla sorgente in un periodo (ossia v_2/f).

$$\lambda' = \lambda - \frac{v_2}{f} = \frac{v-v_2}{f} \quad \text{e} \quad f' = \frac{v}{v-v_2} f$$

NOTA

Se la sorgente si allontana dall'osservatore si deve sostituire il segno negativo con quello positivo.

Esempio

Un'automobile passa davanti a una persona alla velocità v_2 di 20,0 m/s, con il clacson che emette un suono di frequenza $f = 250$ Hz. Assumiamo che la velocità di propagazione del suono nell'aria sia

di 340 m/s. Calcolare la frequenza con cui viene percepito il suono dall'osservatore, al passaggio dell'auto.

Usiamo la formula per la frequenza vista sopra: $f' = \frac{v}{v - v_2} f$

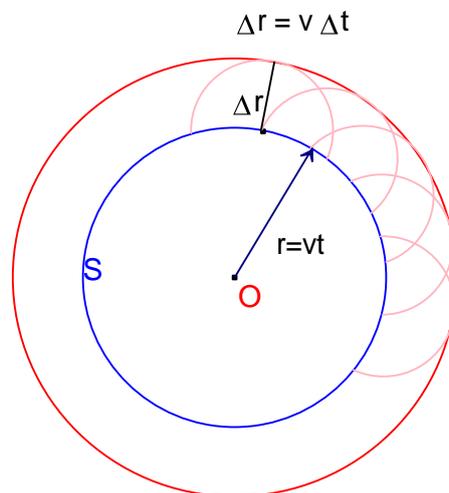
$$f' = \frac{340}{340 - 25} \cdot 250 = 269,8 \text{ Hz}$$

15. Principio di Huygens

I fenomeni connessi con la propagazione delle onde possono essere interpretati per via teorica in base ad un modello, introdotto dall'olandese Huygens quasi tre secoli fa, noto come principio di Huygens.

Attraverso tale modello è possibile costruire una superficie o un fronte d'onda partendo da una superficie o un fronte d'onda qualsiasi.

Si consideri un'onda circolare, come quelle che si formano nell'acqua, generata da una sorgente puntiforme O, posta in un mezzo omogeneo e isotropo (caratterizzato dalle stesse proprietà fisiche in tutte le direzioni dello spazio).



Supponiamo che la perturbazione si propaghi con velocità v , dopo un generico tempo t l'onda raggiunge i punti situati sulla circonferenza S di raggio $r = vt$. Secondo il principio di Huygens ogni qual volta una perturbazione investe i punti di S, ognuno dei punti di S si può considerare una sorgente di onde secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda primitiva. Il nuovo fronte d'onda dopo un certo intervallo di tempo è l'involuppo delle onde secondarie.

Il principio di Huygens è valido qualunque sia la natura delle onde.

I fenomeni descritti sopra potrebbero essere spiegati alla luce del principio di Huygens ma, in questa sede, tralasciamo la descrizione.

UNITA' DIDATTICA 2: Le onde elettromagnetiche

DESTINATARI:

L'unità didattica è rivolta agli allievi che frequentano il V anno di un Liceo Scientifico PNI.

PREREQUISITI:

Lo studente deve possedere le seguenti nozioni:

- Onde sinusoidali
- Frequenza
- Lunghezza d'onda
- Campo elettrico
- Campo magnetico
- Flusso del campo elettrico
- Flusso del campo magnetico
- Circuitazione
- Induzione elettromagnetica
- Circuiti elettrici in corrente continua e corrente alternata
- Equazioni di Maxwell

OBIETTIVI SPECIFICI:

Gli obiettivi specifici sono suddivisi in *conoscenze* e *abilità*.

Conoscenze

- Accennare alla teoria elettromagnetica di Maxwell e alle variazioni rapide del campo elettromagnetico;
- Descrivere le modalità di propagazione del campo elettromagnetico e delle sue variazioni, introducendo così la nozione di onda elettromagnetica;
- Accennare al fatto che dalla teoria di Maxwell si deduce la formula per calcolare la velocità delle onde elettromagnetiche e quindi anche quella della luce;
- Descrivere graficamente, mediante i vettori \vec{E} , \vec{B} , la struttura delle onde elettromagnetiche;
- Classificare le onde elettromagnetiche e descrivere brevemente i caratteri di ciascun tipo;

- Mostrare come si possono generare onde elettromagnetiche mediante antenne trasmittenti.

Abilità

- Sviluppare capacità logiche e di rielaborazione, di comunicazione ed esposizione, di comprensione ed utilizzo del linguaggio matematico e fisico, di applicazione dei concetti acquisiti;
- Saper ripercorrere e comunicare in modo ordinato il percorso svolto;
- Saper riflettere sulle conoscenze necessarie per la risoluzione del compito assegnato.

TEMPI PREVISTI PER L'INTERVENTO DIDATTICO:

Per la trattazione degli argomenti di questa unità didattica si prevede serviranno 5-7 ore a cui verrà aggiunta la verifica sommativa di un'ora.

CONTENUTI

1. Introduzione
2. La corrente di spostamento e il campo magnetico
3. Le equazioni di Maxwell
4. Le onde elettromagnetiche
5. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche.
6. Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche
7. Produzione e ricezione di onde elettromagnetiche
8. Spettro elettromagnetico

SVILUPPO DEI CONTENUTI:

1. Introduzione

La teoria esplicativa delle onde elettromagnetiche, sviluppata dal fisico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879), è universalmente riconosciuta come uno dei progressi più importanti nella storia della scienza. Maxwell elaborò questa teoria a partire dal 1860. A metà del XIX secolo si possono considerare ben definiti i seguenti principi fondamentali:

1. L'esistenza della carica positiva e di quella negativa e della forza di Coulomb tra le cariche. Queste ultime sono riconosciute come sorgenti di un campo elettrico, di verso uscente dalle cariche positive ed entrante in quelle negative.
2. Le cariche in movimento, ossia le correnti, sono riconosciute come sorgenti di un campo magnetico. L'interazione fra campo magnetico e correnti è descritta dalla legge di Ampère.
3. Le linee del campo magnetico sono chiuse, non hanno un inizio o una fine. In altre parole, non esistono monopoli magnetici, ma solo dipoli nord – sud.
4. Un campo elettrico può essere prodotto da un campo magnetico variabile, come espresso dalla legge di induzione di Faraday.

2. Corrente di spostamento e campo magnetico

Prima di cominciare forse è meglio ricordare l'argomento studiato poco prima: l'induzione elettromagnetica, in quanto diventerà di fondamentale importanza per capire i passaggi successivi.

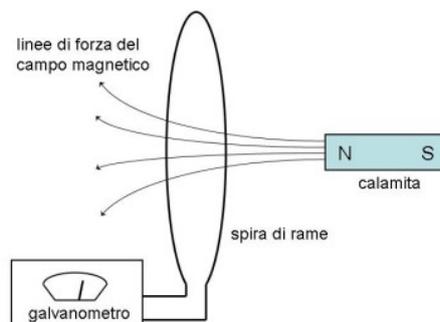
Prima di incontrare Maxwell abbiamo studiato un'importante proprietà dei campi elettrici e magnetici: *un campo magnetico variabile nello spazio produce un campo elettrico*.

Ricordiamo che si tratta del fenomeno di induzione elettromagnetica che era stato scoperto sperimentalmente da Henry e da Faraday; la legge matematica che la esprime è nota come **equazione di Faraday-Henry**:

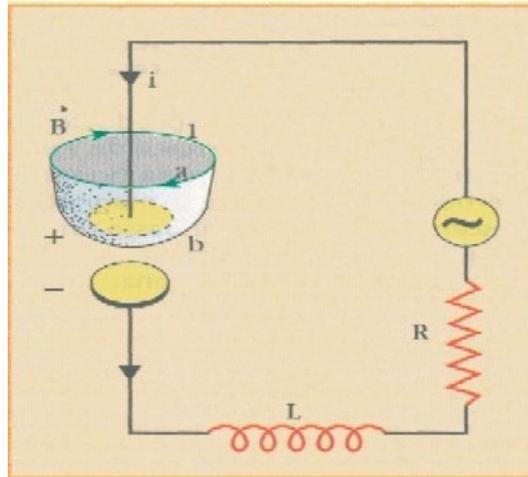
$$\mathcal{C}(\vec{E}) = - \frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$$

NOTA

Se l'insegnante lo ritiene opportuno si può pensare di rinfrescare la memoria alla classe riproducendo la figura che spiega questa legge, oppure di rimandare alle pagine del libro in cui essa viene spiegata.



Consideriamo ora il seguente circuito:



Definiamo con la lettera greca γ una linea chiusa piana di forma arbitraria che circonda il filo conduttore

Osserviamo il circuito di figura contenente un condensatore e cerchiamo di analizzare due diverse situazioni: cosa succede se il circuito è percorso da corrente continua e cosa succede se, invece, è percorso da corrente alternata?

1. In regime di corrente continua, il circuito risulta **aperto**, cioè non passa alcuna carica elettrica, e la circuitazione del campo elettrico calcolata lungo il percorso chiuso γ è nulla, sia prendendo in considerazione la superficie piana a che quella curva b, essendo nulla la corrente concatenata con le due superfici, cioè la corrente che passa attraverso entrambe.
2. La situazione cambia se la corrente i è variabile nel tempo.

OSSERVAZIONE

Ricordiamo che una corrente elettrica variabile nel tempo genera un campo magnetico e, viceversa, per il principio dell'induzione elettromagnetica, un flusso magnetico variabile nel tempo genera corrente indotta.

Nel nostro caso il circuito dotato di condensatore non è chiuso, e **la circuitazione del campo B lungo la linea γ è pari, per il Teorema della circuitazione di Ampère, al prodotto della corrente i concatenata alla curva per la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 .**

NOTA

Risulta opportuno rinfrescare la memoria:

Il **Teorema di Ampère** citato afferma che *la circuitazione dell'induzione magnetica \vec{B} , calcolata lungo un percorso chiuso qualsiasi, è uguale a:*

$$C(\vec{B}) = \mu_0 i_c$$

dove μ_0 è la costante di permeabilità magnetica nel vuoto e i_c è la corrente totale concatenata al percorso.

Allora, tale circuitazione è pari a zero se si prende in considerazione la superficie b passante fra le armature del condensatore, attraverso la quale non passa alcuna corrente, ed è invece pari a $\mu_0 i$ se si prende in considerazione la superficie a (superficie piana delimitata dalla curva γ). Evidentemente siamo giunti ad un paradosso, in quanto la circuitazione $C(\vec{B})$ dell'induzione magnetica lungo la curva γ non può avere due valori distinti, essendo univocamente determinata dall'intensità e dall'orientazione che il vettore \vec{B} assume lungo i punti della curva.

Siamo giunti a questa contraddizione a causa dell'interruzione del circuito, infatti succede che l'intensità di corrente passa dal valore i lungo i fili al valore nullo fra le armature del condensatore.

Non limitiamoci alla corrente! Cosa succede alle cariche positive?

Le cariche positive, accumulandosi sull'armatura, danno origine a sempre nuove linee di campo elettrico che si sviluppano nel dielettrico verso la seconda armatura con carica negativa; linee che si possono considerare come una "continuazione" della linee di corrente. Questo porta ad affermare che la quantità di carica presente sulle armature del condensatore cambia nel tempo e quindi si modifica anche il campo elettrico nello spazio compreso fra di esse. **Quindi** si ha una variazione del flusso del campo elettrico ($\Phi(\vec{E})$) attraverso tutte le superfici che passano tra le due armature.

Maxwell, studiando tale fenomeno, ha cercato di eliminare il paradosso in cui si incorreva applicando il Teorema di Ampère, come abbiamo visto sopra. Egli suppose che nello spazio compreso tra le due armature del condensatore si verificasse un fenomeno equivalente a una corrente. Questa corrente venne chiamata **corrente di spostamento** e venne definita nel modo seguente:

DEFINIZIONE

Se il flusso di campo elettrico attraverso una superficie varia della quantità $\Delta\Phi(\vec{E})$ in un tempo Δt , l'intensità media i_s della corrente di spostamento che fluisce attraverso la superficie è data da:

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

dove ε_0 è la costante dielettrica del vuoto. Nel limite in cui la durata dell'intervallo di tempo considerato tende a zero, questa relazione definisce la corrente di spostamento istantanea

Di conseguenza il teorema della circuitazione di Ampère sull'induzione magnetica, fino ad ora scritta nella forma $C(\vec{B}) = \mu_0 i$, deve essere così modificato:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \left[i + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right]$$

perché alla corrente di conduzione i va aggiunta quella di spostamento i_s . Questa equazione non viene più attribuita al solo André-Marie Ampère ma è detta **equazione di Ampère-Maxwell**; come vedremo essa costituisce la **terza equazione di Maxwell**.

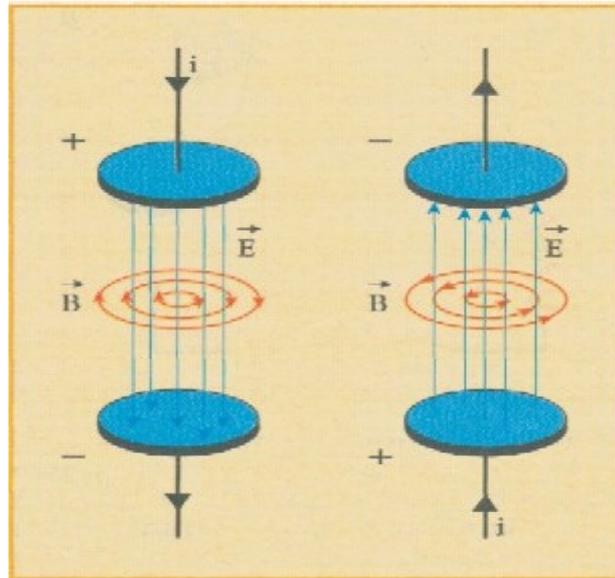
Ma se, finora, abbiamo pensato alla corrente come a un flusso di CARICHE, com'è possibile

che la corrente di spostamento sia definita come visto sopra? ($i_s = \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t}$)

Questa ipotesi potrà apparire come un escamotage matematico volto a salvaguardare la veridicità del teorema di Ampère; la corrente è sempre stata intesa come un moto di cariche elettriche, siano essi elettroni (nei conduttori), ioni positivi e negativi (nelle soluzioni e nei gas), elettroni e lacune (nei semiconduttori); non si capisce dunque, a prima vista, come la formula che esprime i_s possa essere definita una corrente.

Ad un esame più approfondito, invece, emerge il profondo significato fisico.

Maxwell affermò che la corrente di spostamento produce un effetto magnetico al pari della corrente dovuta al movimento delle cariche. Dobbiamo perciò pensare che nella regione di spazio compreso fra le armature del condensatore abbia origine un campo magnetico. Avendo preso in considerazione un condensatore piano ad armature circolari, la corrente di spostamento che fluisce da un'armatura all'altra attraverso lo spazio vuoto è analoga alla corrente che scorre in un filo cilindrico. Le linee di forza del campo magnetico \vec{B} generato dalla corrente di spostamento sono pertanto circolari e con centro sull'asse di simmetria del condensatore. In figura tali linee sono rappresentate sia che la corrente di conduzione (e quindi quella di spostamento) scorra verso l'alto sia che scorra verso il basso, in entrambi i casi con intensità i crescente.



NOTA

Campo elettrico e campo magnetico sono sempre perpendicolari tra loro.

3. Le equazioni di Maxwell

Le molte leggi che regolano i fenomeni elettrici e magnetici erano note prima di Maxwell, però è merito di quest'ultimo l'aver scoperto che esse sono riconducibili a 4 sole equazioni e l'aver dedotto da esse le conseguenze teoriche che hanno consentito la scoperta delle onde elettromagnetiche.

Riassumiamo quanto detto nel paragrafo precedente.

Alla base della teoria e delle equazioni di Maxwell si riscontrano i lavori di **Charles-Augustin de Coulomb** (1736-1806), **Hans Christian Oersted** (1777-1851), **André-Marie Ampère** (1775-1836), **Joseph Henry** (1797-1878) e di **Michael Faraday** (1791-1867).

I loro lavori furono successivamente sintetizzati da **Carl Fredrich Gauss** (1777-1855) nei seguenti due teoremi:

Teorema di Gauss del campo elettrico:

Un corpo carico produce nello spazio circostante delle linee di forza elettriche, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è pari alla somma delle cariche poste al suo interno divisa per la costante dielettrica.

$$\Phi(\vec{E})_S = \frac{q}{\epsilon_0}$$

dove la lettera greca Φ indica il flusso attraverso la superficie S.

NOTA

Il teorema, fisicamente, significa che esiste il **monopolo elettrico**, cioè la carica elettrica singola, ed essa è sorgente di campo elettrico.

Teorema di Gauss del campo magnetico:

Una corrente elettrica che circola in un conduttore produce delle linee di forza magnetiche attorno al conduttore, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.

$$\Phi(\vec{B})_s = 0$$

Negli anni tra il 1860 ed il 1870 Maxwell sviluppò una teoria matematica dell'elettromagnetismo, pubblicata nella sua opera fondamentale *Treatise on electricity and magnetism* (1873), nella quale partì dai due teoremi enunciati sopra, oggi noti come **PRIMA** e **SECONDA EQUAZIONE DI MAXWELL**. Egli propose un **modello unico che riuscisse a visualizzare le relazioni esistenti tra le grandezze elettriche e magnetiche osservate sperimentalmente da Faraday e dagli altri fisici**. Egli lo descrisse matematicamente attraverso un sistema di equazioni, oggi note come **equazioni di Maxwell**, dalle quali si possono ottenere tutte le proprietà dei campi elettrici e magnetici. Il lavoro di Maxwell contiene alcune idee completamente nuove e ricche di conseguenze:

a) *un campo elettrico variabile nel tempo genera un campo magnetico.*

b) *non solo le correnti nei conduttori producono dei campi attorno ad essi, ma anche i campi elettrici variabili nel vuoto producono dei campi magnetici.*

Abbiamo visto come si esprimono le leggi sui **flussi** elettrici e magnetici, per completare lo studio dei fenomeni elettrici e magnetici mancano le leggi che trattino le **circuitazioni** lungo una linea chiusa; queste costituiscono la **TERZA** e la **QUARTA EQUAZIONE DI MAXWELL**:

Legge di Ampère-Maxwell (Terza legge):

La circuitazione del campo di induzione elettromagnetica lungo una linea chiusa è uguale al prodotto della permeabilità magnetica del vuoto per la somma della corrente di conduzione e della corrente di spostamento che attraversano una qualunque superficie avente come contorno la linea considerata:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \left[i + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right]$$

Legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann (Quarta legge):

La circuitazione del campo elettrico lungo una linea chiusa è uguale al rapporto, cambiato di segno, fra la variazione del flusso del campo di induzione magnetica concatenato con il percorso considerato e l'intervallo di tempo infinitesimo in cui avviene la variazione:

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

Presentiamo ora uno schema riassuntivo delle 4 leggi:

I legge	II legge	III legge	IV legge
$\Phi(\vec{E})_s = \frac{q}{\varepsilon_0}$	$\Phi(\vec{B})_s = 0$	$C(\vec{B}) = \mu_0 \left[i + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right]$	$C(\vec{E}) = - \frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t}$

OSSERVAZIONE

Poiché le precedenti equazioni mettono in relazione campi variabili nel tempo, tutti i loro termini devono rappresentare grandezze istantanee; perciò, per esprimere le leggi in maniera formalmente esatta, è opportuno sostituire alle grandezze infinitesime $\Delta\Phi(E)/\Delta t$ e $\Delta\Phi(B)/\Delta t$ rispettivamente $d\Phi(E)/dt$ (derivata del flusso rispetto al tempo) e $d\Phi(B)/dt$ (derivata del flusso magnetico rispetto al tempo).

Tutte queste leggi sono state scritte per campi elettrici e magnetici nel vuoto e praticamente anche nell'aria; in mezzo diverso è necessario sostituire le costanti ε e μ con la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del mezzo considerato .

4. Le onde elettromagnetiche

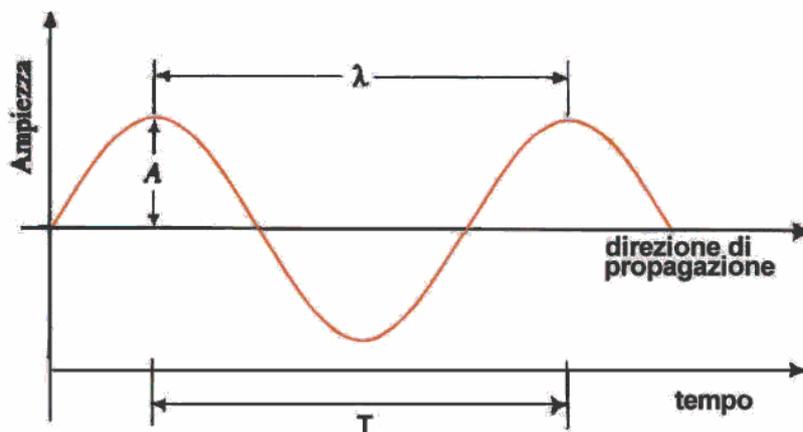
L'insieme completo di relazioni tra i campi elettrici e magnetici proposto da Maxwell non fu subito direttamente verificabile. Egli, però, aveva previsto anche un fenomeno del tutto nuovo, che avrebbe dovuto insorgere per effetto delle reciproche interazioni tra campi elettrici e magnetici variabili. Per capire di cosa si tratta, supponiamo che in una certa regione di spazio ad un certo istante si determini una variazione del campo elettrico, originato, per esempio, da un moto accelerato di cariche elettriche. Nei punti immediatamente vicini si produce allora, per la terza

equazione di Maxwell, un **campo magnetico anch'esso variabile nel tempo**. La **variazione del campo magnetico**, per la quarta equazione di Maxwell, origina nei punti immediatamente vicini **un campo elettrico anch'esso variabile, e così via**. Nasce in tal modo una **perturbazione elettromagnetica** che si propaga nello spazio.

Il fatto che una variazione del campo magnetico in un punto produce un campo elettrico variabile era noto già prima di Maxwell, in quanto era previsto dalla legge di Faraday-Henry; si pensava però che, allorché un campo magnetico bruscamente diminuiva da un valore massimo a zero, altrettanto doveva fare il campo elettrico e il tutto cessava dopo un piccolo intervallo di tempo dall'istante in cui si era annullato il campo magnetico. La novità prevista da Maxwell consiste nel fatto che **il campo elettrico ed il campo magnetico generati dalla variazione nel tempo di uno dei due sono in grado di autosostenersi**, cioè di propagarsi anche se la variazione iniziale che li ha prodotti è venuta meno! Questa è una **conseguenza dell'esistenza della corrente di spostamento**.

Se ne conclude che, da una brusca variazione di un campo elettrico o magnetico nel tempo, ha origine la propagazione di un impulso elettromagnetico, cioè di un'ONDA, chiamata per l'appunto **onda elettromagnetica**, nello stesso modo in cui, muovendo con continuità una estremità di una molla tesa ha origine un'onda elastica.

Alle onde elettromagnetiche si estendono pertanto le definizioni di lunghezza d'onda, periodo e frequenza e le relazioni fra queste grandezze già viste per le onde elastiche.

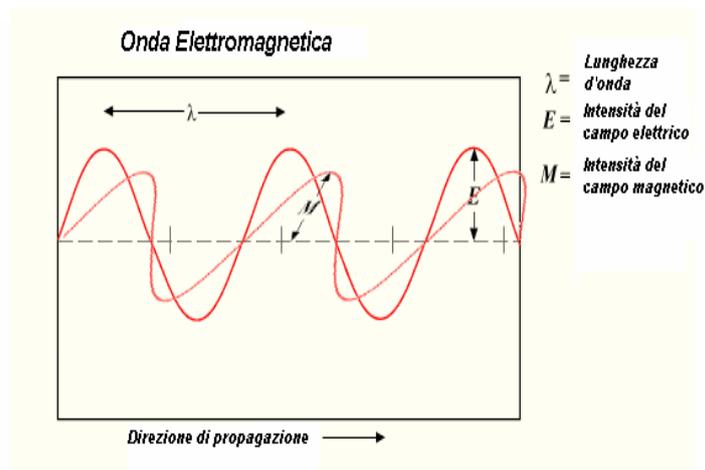
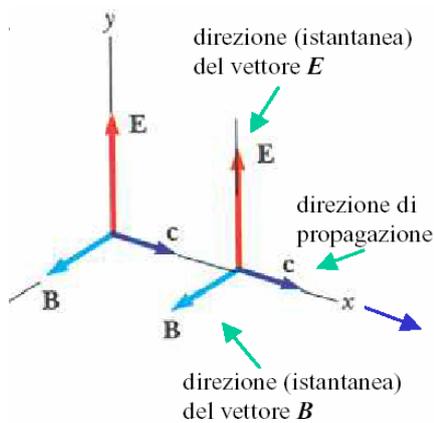


OSSERVAZIONE

Il campo elettrico e il campo magnetico sono sempre ortogonali fra loro, e inoltre sono perpendicolari alla direzione di propagazione.

Propagazione delle onde elettromagnetiche

L'osservazione fatta sopra ci permette di affermare che le onde elettromagnetiche sono onde trasversali.



In analogia con le onde elastiche il luogo dei punti in cui il campo elettrico e il campo magnetico si trovano nella stessa fase di vibrazione (cioè che per ciascuno di essi lo spostamento dalla posizione di equilibrio assuma lo stesso valore in ogni istante) prende il nome di **fronte d'onda**.

Un campo elettrico o magnetico variabile periodicamente in un certo punto dello spazio produce un'onda elettromagnetica sferica, in cui, i fronti d'onda hanno forma sferica. A grande distanza dal centro di emissione, ciascun fronte d'onda, o più precisamente una sua porzione non molto ampia, può considerarsi piana. Si parla in tal caso di onda piana.

Quindi se indichiamo con x la coordinata lungo la direzione di propagazione, con lo stesso procedimento seguito per le onde elastiche troviamo le equazioni che descrivono un'onda elettromagnetica piana sinusoidale, o monocromatica, sono :

$$E = E_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) + \varphi \right]$$

$$B = B_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) + \varphi \right]$$

in cui

λ := la lunghezza d'onda

T := il periodo

φ := è la fase iniziale

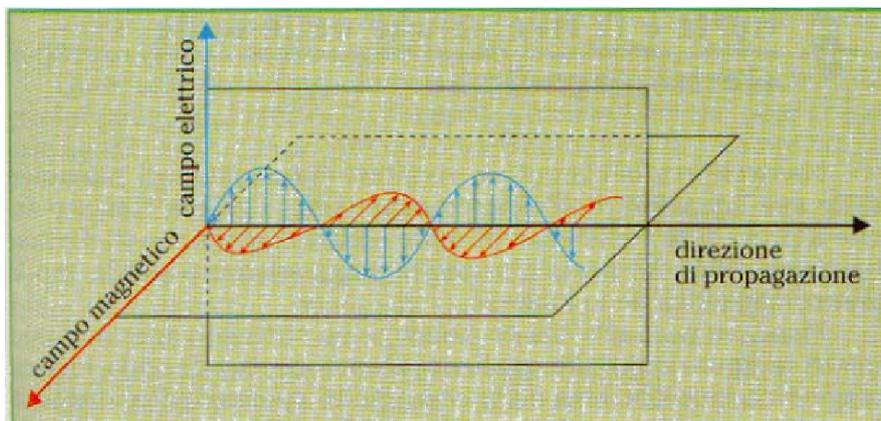
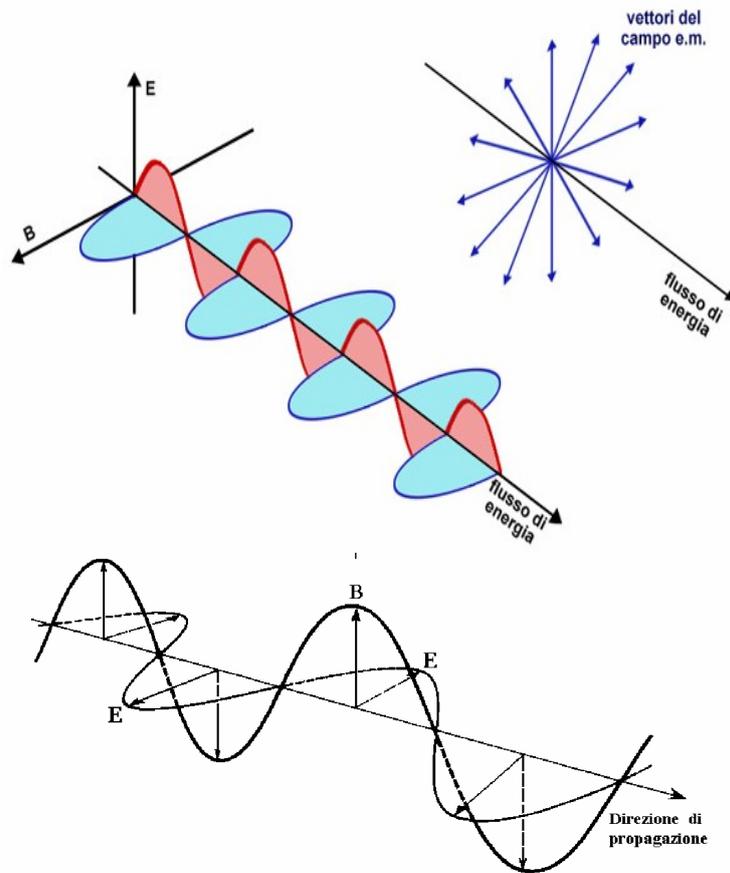
E_0 e B_0 rappresentano rispettivamente i valori massimi del modulo del campo elettrico e di quello del campo magnetico.

OSSERVAZIONE

Le due relazioni esprimono i moduli E e B dei due campi in ogni istante t e in ogni punto x lungo la direzione di propagazione dell'onda. In ogni punto, la direzione del campo elettrico \vec{E} e quella del campo magnetico \vec{B} variano in generale con il tempo, mantenendosi, comunque, perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione.

Cosa succede, invece, se le direzioni di \vec{E} e di \vec{B} rimangono fisse nel tempo?

In questo caso si dice che l'onda elettromagnetica è **polarizzata linearmente**.



La figura evidenzia che le vibrazioni del campo elettrico e del campo magnetico avvengono in piani ortogonali fissi. In particolare modo mostra un'importante proprietà, che è una conseguenza delle equazioni di Maxwell:

- **il campo elettrico e il campo magnetico sono sempre in fase tra loro**, cioè, se in un certo istante e nello stesso punto è massimo il campo elettrico, nello stesso istante e nello stesso punto è massimo anche il campo magnetico;
- se altrove il campo elettrico è nullo, è nullo anche il campo magnetico.

5. Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche

La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche deve dipendere dalle grandezze che compaiono nelle equazioni di Maxwell, ossia dal prodotto $\epsilon_0\mu_0$; infatti, pensando alle quattro equazioni scritte nel vuoto e lontane da cariche e correnti ($q = 0$ e $i = 0$), oltre alle variabili \vec{E} e \vec{B} compare solo il prodotto detto sopra.

Lo stesso Maxwell dedusse dalle sue equazioni che le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto con velocità $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$. Invece, in un mezzo con costante dielettrica ϵ_r e permeabilità magnetica relativa μ_r , la velocità di propagazione risulta essere $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$.

OSSERVAZIONE

Tralasciamo il calcolo delle dimensioni fisiche di questa quantità che ci farebbe vedere che, effettivamente il rapporto scritto sopra è una velocità. In questa sede, riteniamo che sia troppo pesante per gli studenti.

Ora, sostituendo i valori delle costanti ϵ_0 e μ_0 otteniamo:

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

OSSERVAZIONE

Notiamo che quello trovato è proprio il valore della velocità della luce nel vuoto.

Avendo trovato un valore numerico che coincide con la velocità della luce nel vuoto, Maxwell concluse che anche la luce è costituita di onde elettromagnetiche. Egli, dunque, avanzò l'ipotesi della **natura elettromagnetica della luce**. Le equazioni di Maxwell, a questo punto, costituivano una teoria unitaria non solo dei fenomeni elettrici e magnetici ma anche di quelli luminosi.

6. Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche

Anche le onde elettromagnetiche trasportano energia? Come possiamo osservare gli effetti dell'energia trasportata?

Come tutte le onde, anche quelle elettromagnetiche trasportano energia.

Abbiamo visto che le onde elettromagnetiche consistono in campi elettrici e magnetici in movimento. Poiché tali campi possiedono energia, **l'onda trasporta energia nello spazio. Per esempio, le onde elettromagnetiche provenienti dal sole riscaldano la terra e forniscono l'energia necessaria alla crescita delle piante; le onde provenienti da una stazione televisiva lontana trasportano l'energia che reca l'immagine e il suono al televisore.**

Sappiamo che la densità di energia posseduta da un campo elettrico di modulo E per unità di volume è:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

mentre la densità di energia di un campo di induzione magnetica di modulo B per unità di volume è:

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Le stesse espressioni valgono anche nel caso in cui il campo elettrico e il campo magnetico siano variabili nel tempo, oltre che nello spazio: in tal caso, indicando con E e B i moduli dei campi in un punto e in un istante fissati, le relazioni precedenti rappresentano la densità di energia dei campi in quel punto e in quell'istante e, come i campi, sono funzioni della posizione e del tempo .

Dato che

$$B_0 = \sqrt{\xi_0 \mu_0} E_0 ; \quad E_0 = \frac{1}{\sqrt{\xi_0 \mu_0}} B_0 ; \quad E_0 = c B_0$$

risulta :
$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c^2 B_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 = u_B$$

OSSERVAZIONE

Queste relazioni mostrano che l'energia dell'onda elettromagnetica è immagazzinata in ugual misura dal campo elettrico e dal campo magnetico. In un'onda elettromagnetica le densità di energia associate ai campi E e B sono uguali.

La densità, locale e istantanea, dell'energia immagazzinata dal campo elettrico e dal campo magnetico di un'onda elettromagnetica è la somma:

$$u = u_E + u_B = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

7. Produzione e ricezione di onde elettromagnetiche

Per l'emissione di onde elettromagnetiche si usa un sistema introdotto da Guglielmo Marconi (oggi il più diffuso) che utilizza, come elemento radiante un conduttore rettilineo chiamato **dipolo oscillante o antenna**.

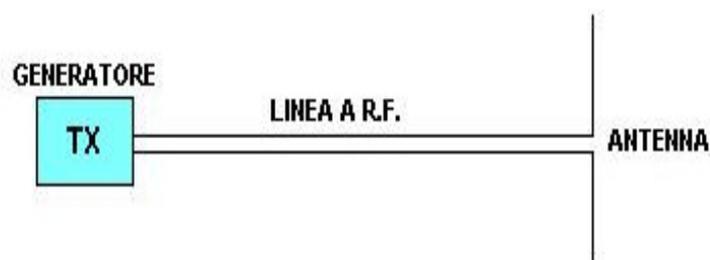
Le antenne sono dispositivi in grado di convertire un segnale elettrico in onde elettromagnetiche ed irradiarle nello spazio circostante o viceversa.

Le antenne possono essere trasmettenti o riceventi a seconda dell'uso cui sono destinate, oppure possono svolgere tutti e due le funzioni anche contemporaneamente.

Le antenne sono dunque impiegate nei trasmettitori e nei ricevitori, radioamatoriali, televisivi, radiofonici, nei cellulari, nei ponti radio, nei satelliti artificiali, nei radiocomandi .

Principio di funzionamento

Un trasmettitore è costituito, essenzialmente, da un generatore del segnale elettrico, da un linea a radiofrequenza e da un'antenna trasmittente secondo lo schema indicato in figura:



Il generatore produce un segnale elettrico contenente l'informazione da trasmettere, che può essere costituita, ad esempio, da un suono, nel caso di una stazione radioamatoriale. La linea elettrica a

R.F. trasporta il segnale dal luogo dove questo è prodotto, all'antenna trasmittente per essere inviato sotto forma di onde elettromagnetiche al destinatario dell'informazione. La linea di collegamento è di norma indispensabile perché l'informazione è prodotta spesso in un punto diverso da quello dove si trova l'antenna. Il radioamatore, ad esempio, può abitare al primo piano, mentre l'antenna va posta di preferenza, per funzionare meglio, sul tetto dell'ultimo piano. I campi elettrici e magnetici lungo il cavo si annullano quasi completamente per compensazione, essendo i conduttori attraversati da cariche elettriche vicinissime e di segno opposto, lungo l'antenna invece, le cose cambiano completamente in quanto qui le cariche di segno positivo si trovano su uno stilo lontano da quelle di segno negativo che si trovano sull'altro stilo ed inoltre le correnti elettriche non risultano opposte, come avviene lungo il cavo, bensì allineate in modo da intensificare l'effetto del campo che esse producano.

Quando perviene sull'antenna, il segnale, si trasforma in energia elettromagnetica perché, in base alle equazioni di Maxwell, una perturbazione del campo elettrico dovuta alla continua variabilità data dalla frequenza, determina una continua variazione del campo magnetico e viceversa, dando così luogo a un'onda detta appunto elettromagnetica costituita da anelli di campo magnetico che si alternano con anelli di campo elettrico ad essi perpendicolari e viceversa.

8. Lo spettro elettromagnetico

Presentiamo ora una breve descrizione dei tipi di onde elettromagnetiche presenti in natura. L'insieme delle onde elettromagnetiche costituisce lo **spettro elettromagnetico**, esso comprende tutte le onde dalle onde radio alle radiazioni γ . Le varie parti dello spettro sono intervalli di lunghezza d'onda e di frequenza che si uniscono tra loro con continuità (quasi come se si mescolassero); quindi è praticamente impossibile stabilire quando finisce un tipo di onda e quando ne comincia un altro.

OSSERVAZIONE

Questi tipi di onde saranno presentate a titolo informativo, si vuole dare agli studenti una visione d'insieme dello spettro, senza pretendere che, per ogni tipo di onda, siano di grado di riportare frequenza, lunghezza d'onda e particolarità specifiche.

Onde Radio ($10^{-1}\text{m} < \lambda < 10^4\text{m}$)

Sono prodotte da cariche accelerate in antenne; sono usate per trasmettere suoni a distanza. Grazie alla loro notevole lunghezza d'onda hanno la proprietà di superare, per diffrazione, ostacoli

di piccole dimensioni come alberi e case, invece vengono bloccate da ostacoli di grandi dimensioni, ad esempio le montagne, creando zone d'ombra.

Microonde e segnali TV ($10^{-4}\text{m} < \lambda < 10^{-1}\text{m}$)

Le microonde sono impiegate nelle comunicazioni con i satelliti, per le comunicazioni terrestri a lunga distanza e per i telefoni cellulari. Queste onde non girano intorno agli ostacoli ma vengono riflesse da essi; per questo motivo esse vengono utilizzate nei radar. Nel radar viene sfruttata la riflessione di un breve pacchetto di onde emesso da una speciale antenna direttiva; in questo modo il dispositivo riesce a rivelare anche al buio, in presenza di nuvole o nebbia, la presenza di un ostacolo e la posizione di un oggetto. Un'altra applicazione tecnologica di questo tipo di onde è il forno a microonde. Il campo elettrico dell'onda fa vibrare le molecole di acqua (sono polari, quindi risentono dell'azione delle onde elettromagnetiche) contenute nei cibi, cedendo una parte della loro energia e provocando così un aumento della temperatura.

Per i segnali TV si usano onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda dell'ordine del metro (al confine tra onde radio e microonde).

Infrarossi ($10^{-6} < \lambda < 10^{-4}\text{m}$)

La radiazione dell'infrarosso si origina, principalmente, per emissione termica, ossia l'energia deriva dall'agitazione termica delle molecole. Tali raggi sono emessi dai corpi caldi e, quando sono assorbiti, riscaldano l'oggetto. Esempio: lampadina. I raggi infrarossi di minore lunghezza d'onda hanno la capacità di impressionare particolari pellicole fotografiche, quindi possono trovare utili applicazioni per effettuare fotografie all'infrarosso che mettono in evidenza le zone calde. Questo tipo di radiazione trova applicazione anche nella terapia fisica, soprattutto per curare reumatismi e artriti.

Radiazioni del visibile ($7 \times 10^{-7}\text{m} < \lambda < 4 \times 10^{-7}\text{m}$)

La radiazione del visibile è costituita dalle onde elettromagnetiche che i nostri occhi percepiscono sotto forma di luce. Essa comprende le frequenze tra il rosso e il violetto; queste, colpendo l'occhio, depositano la loro energia, e ci danno la sensazione dei colori dell'arcobaleno. Al di fuori di questo intervallo di frequenze il nostro occhio è cieco.

Ultravioletti ($10^{-9} - 10^{-8}\text{m} < \lambda < 4 \times 10^{-7}\text{m}$)

Le radiazioni ultraviolette hanno la proprietà di favorire diverse reazioni chimiche, per esempio quelle che formano l'ozono nell'atmosfera o quelle che producono la melanina della pelle. Inoltre hanno la capacità di impressionare le lastre fotografiche e di far diventare fluorescenti alcuni corpi; alcune sostanze, infatti, assorbono l'ultravioletto emettendo altre radiazioni di lunghezza d'onda maggiore, generalmente appartenenti al campo del visibile.

Raggi X ($10^{-11}\text{m} < \lambda < 10^{-8}\text{m}$)

I raggi X sono stati scoperti alla fine del '900 dal fisico tedesco Wilhelm Röntgen. Essi sono prodotti grazie a tubi a vuoto, nei quali gli elettroni subiscono una forte decelerazione urtando contro un bersaglio metallico. Quanto più piccola è la loro lunghezza d'onda, quanto più penetrano nella materia; proprio grazie a questa proprietà essi possono mettere in evidenza strutture nascoste. Hanno, quindi, notevoli applicazioni in medicina: riescono ad attraversare la carne come se fosse trasparente ma sono assorbiti dalle ossa; solo i raggi che attraversano il corpo impressionano una lastra fotografica, sulla quale appare l'ombra che corrisponde alla struttura delle ossa. I raggi X sono utilizzati anche in altri campi scientifici allo scopo di studiare la struttura di parti invisibili ad occhio nudo (struttura di molecole organiche, inorganiche, struttura del DNA).

Raggi γ ($\lambda < 10^{-12}$ m)

I raggi in questione sono emessi da nuclei atomici radioattivi o da elettroni di alta energia frenati nella materia; essi accompagnano le trasformazioni radioattive e le reazioni nucleari. Verranno trattati in modo più approfondito quando si parlerà della fisica nucleare.

Se il tempo lo permette si potrebbero fare alcuni approfondimenti riguardanti il funzionamento della radio, della televisione e del telefono cellulare. Per coinvolgere la classe si potrebbe anche pensare di far cercare agli allievi informazioni a questo proposito e poi discuterne insieme.

VERIFICHE SOMMATIVE

- Verifica sommativa per la parte relativa alle onde meccaniche

Risolvere i seguenti esercizi:

1. (2 punti) Due onde elastiche hanno la stessa lunghezza d'onda ma viaggiano con velocità tali che $v_2 = 3v_1$.

Quali delle seguenti affermazioni è corretta? Esplicitare i calcoli effettuati.

a) $\frac{f_1}{f_2} = 1$

b) $\frac{f_1}{f_2} = 3$

c) $\frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{3}$

- d) Non si riesce a determinare nessuna relazione tra le frequenze.

2. (1 punto) Un'onda si propaga con una velocità di 5 m/s. Se il suo periodo è di 0,25 secondi, quanto valgono la sua lunghezza d'onda e la sua frequenza?
3. (2 punti) La corda di uno strumento musicale ha densità lineare di 3,5 g/m ed è soggetta ad una tensione di 8N. Calcolare la velocità e la lunghezza d'onda di un'onda trasversale armonica che si propaga lungo la corda con una frequenza di 410 Hz.

4. (2 punti) Un'onda elastica si propaga in una sbarra metallica. Sapendo che

l'equazione dell'onda è
$$y = 10^{-6} \cos \left[2 \cdot 10^4 \pi \left(\frac{x}{5 \cdot 10^3} - t \right) \right]$$
, dove tutte le grandezze sono espresse in unità SI, ricavare l'ampiezza, la frequenza, la velocità di propagazione dell'onda e la lunghezza d'onda.

5. (2 punti) Un'onda piana si propaga in un mezzo con velocità 0,20m/s; a un certo punto incontra un secondo mezzo in cui la velocità di propagazione è di 0,30m/s. Calcolare l'angolo di rifrazione corrispondente all'angolo di incidenza di 20°. Calcolare, inoltre, l'angolo di incidenza cui corrisponde un angolo di rifrazione di 45°.

- Verifica sommativa per la parte relativa alle onde elettromagnetiche

1. Spiegare in base a quali considerazioni Maxwell è giunto a enunciare la legge sulla

circuitazione del campo magnetico $C(\vec{B}) = \mu_0 \left[i + \varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t} \right]$. Che cosa esprime il

termine $\varepsilon_0 \frac{\Delta\Phi(\vec{E})}{\Delta t}$?

2. Spiegare il funzionamento dell'antenna, mettendo in luce, in particolare, l'origine delle onde elettromagnetiche.
3. Discutere la seguente affermazione sulla base della teoria studiate riguardante le onde elettromagnetiche: “*le piante terrestri vivono grazie alla presenza del sole che fornisce loro l'energia necessaria per effettuare la fotosintesi clorofilliana*”.

BIBLIOGRAFIA

- A. Caforio, A. Ferilli, *Fisica 2*, Le Monnier, 2005.
 A. Caforio, A. Ferilli, *Fisica 3*, Le Monnier, 2005.
 U. Amaldi, *La fisica per i licei scientifici*, vol. 2, Zanichelli, 1999.
 U. Amaldi, *La fisica per i licei scientifici*, vol. 3, Zanichelli, 1999.

James S. Walker, *Fisica Vol. 2*, Zanichelli

P. Nobel, *Macrofisica e microfisica*, Editrice Ferraro Napoli, 1994.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.