

# INTRODUZIONE ALLE ONDE



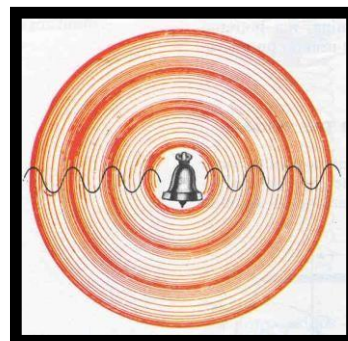
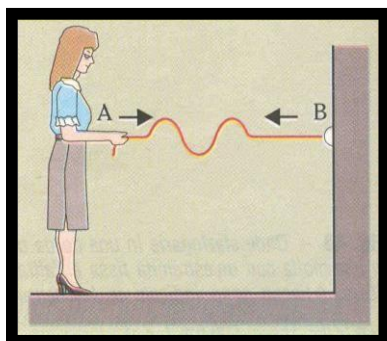
Heinrich Rudolf Hertz

# ONDE

Un'onda è una perturbazione che si propaga senza cambiare la propria forma. Un'onda corrisponde ad uno spostamento di energia senza spostamento netto di materia. L'onda perturba il mezzo nel quale si propaga e lo spostamento della perturbazione avviene a grande velocità in quanto, non essendoci che piccoli spostamenti di massa e masse piccole, l'inerzia interviene poco a rallentare il fenomeno.

Esistono due tipi di onde.

Vi sono le onde **MECCANICHE** ossia perturbazioni che si propagano con oscillazione di materia in cui l'energia ha bisogno di un supporto meccanico (mezzo) per essere trasmesse. Esempi di onde meccaniche sono il suono e il terremoto.



Vi sono le onde **ELETTROMAGNETICHE** ossia perturbazione del campo magnetico ed elettrico che si propagano anche nello spazio vuoto. Esempi di onde elettromagnetiche sono la luce e le trasmissioni radio. Fu il fisico tedesco Heinrich Hertz, attorno al 1880, a dare per primo, nella storia scientifica, una veste sperimentale alle onde elettromagnetiche.

A seconda della direzione di oscillazione, tutte le onde, si distinguono in onde trasversali e onde longitudinali.

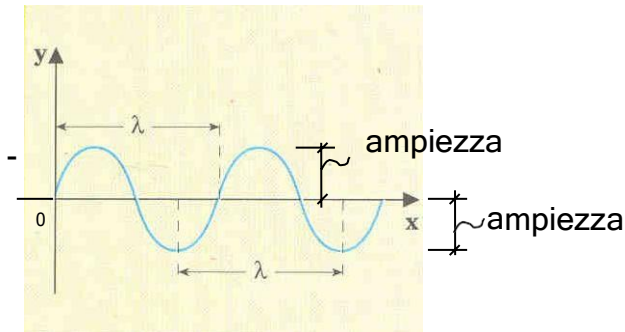
Le **ONDE TRASVERSALI** sono quelle in cui la direzione di oscillazione è ortogonale a quella di propagazione. Esempi di onde trasversali sono quelle che si propagano lungo una corda tesa o quelle elettromagnetiche.

Le **ONDE LONGITUDINALI** sono quelle in cui la direzione di oscillazione è parallela a quella di propagazione. Un'onda longitudinale può essere solo meccanica: essa risulta infatti da successive compressioni e rarefazioni del mezzo. Le onde sonore ne sono un esempio tipico.

La direzione di propagazione di un'onda è la direzione lungo la quale si sposta l'energia.

## GRANDEZZE CARATTERISTICHE DELLE ONDE

- **PERIODO (T)**: è il più piccolo intervallo di tempo (quello di un'oscillazione completa) dopo il quale il moto riassume le stesse caratteristiche in ogni punto del mezzo in cui si propaga l'onda.
- **FREQUENZA (f)**: rappresenta il numero di vibrazioni complete che avvengono nell'unità di tempo. E' inversamente proporzionale al periodo.

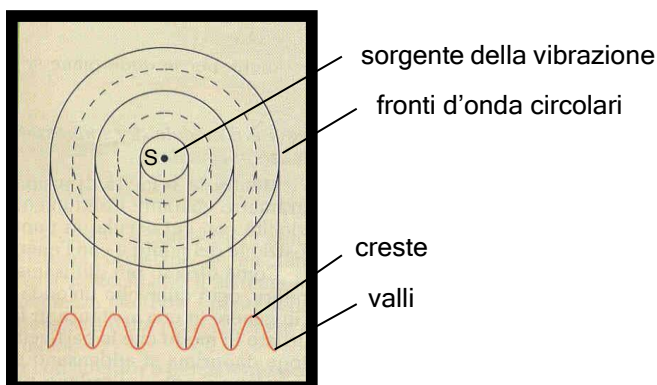


- **LUNGHEZZA D'ONDA (λ)**: è la distanza tra due compressioni successive per le onde longitudinali, quella tra due creste successive per quelle trasversali. La lunghezza d'onda λ e la frequenza f sono legate tra loro attraverso la velocità della luce c.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- **AMPIEZZA**: rappresenta il massimo spostamento dalla posizione di equilibrio ed è uguale sia per gli spostamenti positivi che per quelli negativi.
- **FRONTI D'ONDA E RAGGIO**

Il fronte d'onda è il luogo geometrico delle particelle che vibrano concordemente, nel senso che in essi lo spostamento dalla posizione di equilibrio, in ogni istante, assume lo stesso valore. A seconda della forma del fronte d'onda le onde si dividono in onde circolari, onde rettilinee, onde sferiche e onde piane.

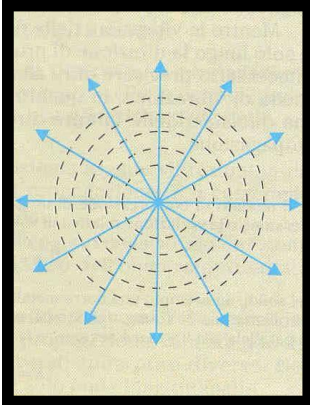


Nella figura si notano i fronti d'onda circolari che si generano sulla superficie di un bacino lacustre quando viene generata una perturbazione della superficie inizialmente piatta nel punto S (sorgente dell'onda).

Si è in presenza di **ONDE CIRCOLARI** se i fronti d'onda sono delle circonferenze. E' il caso di delle onde prodotte sulla superficie dell'acqua quando la sorgente è puntiforme.

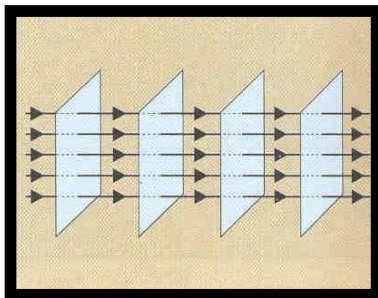
Si è in presenza di **ONDE RETTILINEE** se i fronti d'onda sono linee parallele. E' il caso di onde circolari che a grande distanza dalla sorgente possono essere considerate rettilinee.

Si è in presenza di **ONDE SFERICHE** se i fronti d'onda sono superfici sferiche. E' il caso delle onde sonore prodotte da una piccola sorgente in un fluido omogeneo.



Si è in presenza di **ONDE PIANE** se i fronti d'onda sono piani fra loro paralleli. E' il caso delle onde sferiche che, a grandi distanze dalla sorgente, possono essere considerate piane per una limitata regione di spazio.

Nello studio delle onde si può visualizzare la propagazione del moto ondulatorio mediante il cosiddetto modello a raggi. Si chiamano raggi dell'onda l'insieme delle semirette uscenti dalla sorgente e perpendicolari al fronte d'onda.



## SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Con spettro elettromagnetico si intende tutto l'intervallo di frequenze occupato dalle onde elettromagnetiche.

**Radiofrequenze:**  $3 \times 10^6 \text{ m} > \lambda > 0.3 \text{ m}$   $10^2 \text{ Hz} < f < 10^9 \text{ Hz}$

A questo intervallo delle onde elettromagnetiche è generalmente associata la trasmissione di segnali radio (da 500 kHz a 100 MHz), televisivi (100 MHz), e della telefonia mobile – cellulari - (900MHz e 1800MHz). A causa della bassa energia associata ai fotoni in questa banda di frequenze la loro interazione con la materia è generalmente trascurabile.

**Microonde:**  $0.3 \text{ m} > \lambda > 10^{-3} \text{ m}$   $10^9 \text{ Hz} < f < 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$

Vengono usate nelle telecomunicazioni e nei radar e sono di interesse nell'radioastronomia.

**Infrarosso:**  $10^{-3} \text{ m} > \lambda > 7.8 \times 10^{-7} \text{ m}$   $3 \cdot 10^{11} \text{ Hz} < f < 3.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$

Vengono usate per misura a distanza la temperatura di un corpo, per mappare da un aereo il terreno se esso è coperto da nubi, in medicina, nella costruzione dei visori notturni, dai vigili del fuoco per orientarsi in ambienti saturi di fumo e per la costruzione di telecomandi. I telecomandi di televisori hanno al loro interno un LED che emette radiazioni alla lunghezza d'onda  $\lambda = 950 \text{ nm}$  che corrisponde ad una frequenza  $f = 3.2 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

### Visibile:

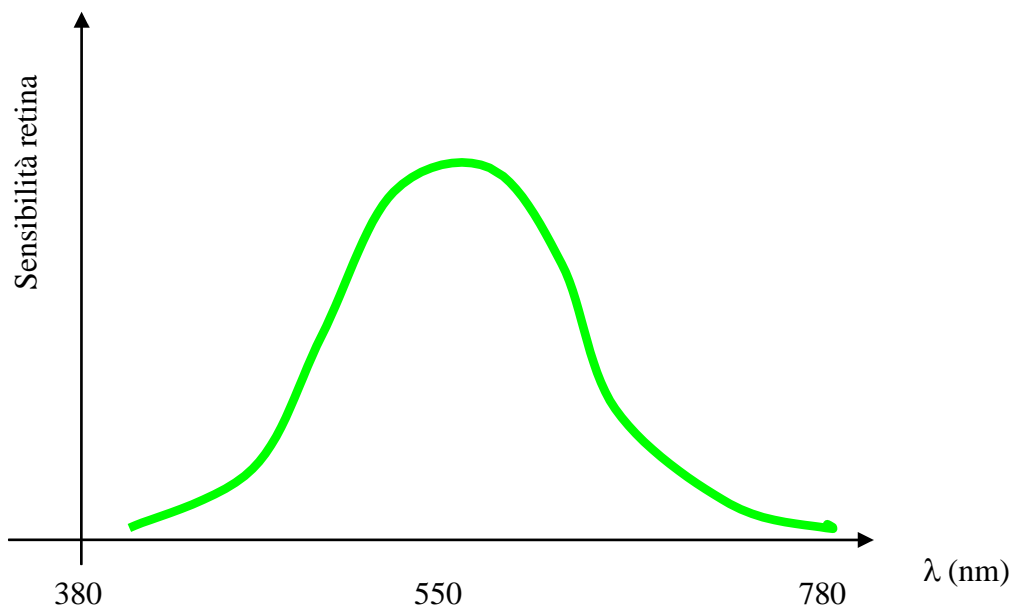
Rosso  $7.8 \times 10^{-7} \text{ m} > \lambda > 6.22 \times 10^{-7} \text{ m}$   $f = 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$

Arancio  $6.22 \times 10^{-7} \text{ m} > \lambda > 5.97 \times 10^{-7} \text{ m}$

Giallo  $5.97 \times 10^{-7} \text{ m} > \lambda > 5.77 \times 10^{-7} \text{ m}$

Blu  $4.92 \times 10^{-7} \text{ m} > \lambda > 4.55 \times 10^{-7} \text{ m}$

Viola  $4.55 \times 10^{-7} \text{ m} > \lambda > 3.80 \times 10^{-7} \text{ m}$   $f = 8 \times 10^{14} \text{ Hz}$



Nella figura si nota che la massima sensibilità della retina dell'occhio è attorno a 550 nm a cui corrisponde il colore verde.

L'interazione della luce visibile con la materia riguarda soprattutto l'eccitazione quantomeccanica degli elettroni di valenza degli atomi in livelli di energia superiore, detti stati eccitati. Il Sole, la cui superficie si trova a circa 6000 K, presenta uno spettro di emissione centrato nell'intervallo spettrale del visibile.

**Ultravioletto:**  $3.8 \times 10^{-7} > \lambda > 6 \times 10^{-10} \text{ m}$   $7.9 \times 10^{14} < f < 5 \times 10^{17} \text{ Hz}$

Tale radiazione interagisce con molte sostanze provocando negli atomi l'eccitazione degli elettroni più interni.

**Raggi X:**  $6 \times 10^{-10} > \lambda > 6 \times 10^{-12} \text{ m}$   $5 \times 10^{17} < f < 5 \times 10^{19} \text{ Hz}$

I raggi X provocano la ionizzazione degli elettroni dagli atomi e dalle molecole anche dai livelli più profondi (ovvero vicini al nucleo) negli atomi più pesanti.

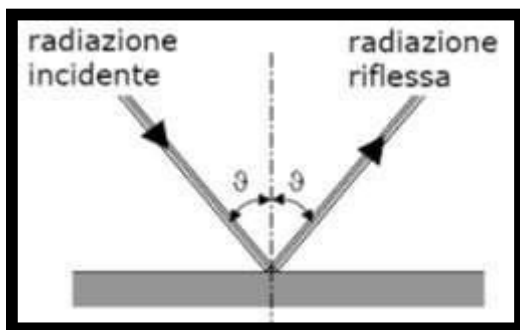
**Raggi  $\gamma$**   $\lambda < 6 \times 10^{-12} \text{ m}$   $f > 5 \times 10^{19} \text{ Hz}$

Vengono prodotti nelle reazioni nucleari e data la loro elevata energia producono effetti di ionizzazione secondaria legati ai prodotti della loro interazione con i nuclei degli atomi.

### **Fenomeni comuni a tutte le onde ( meccaniche ed elettromagnetiche)**

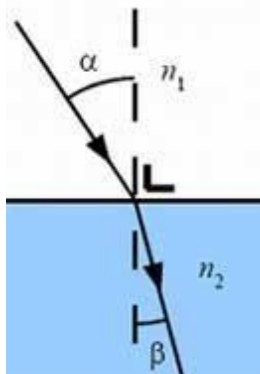
#### **1) RIFLESSIONE**

E' quel fenomeno in cui un'onda dopo aver colpito una superficie di un corpo opaco ritorna indietro con un angolo di riflessione identico a quello di incidenza. Viene sfruttato nei radar, nelle onde del visibile (specchi) e nelle onde radio.



#### **2) RIFRAZIONE**

E' quel fenomeno in cui un'onda, dopo aver colpito la superficie di separazione tra due sostanze di diversa densità, cambia leggermente direzione di propagazione.

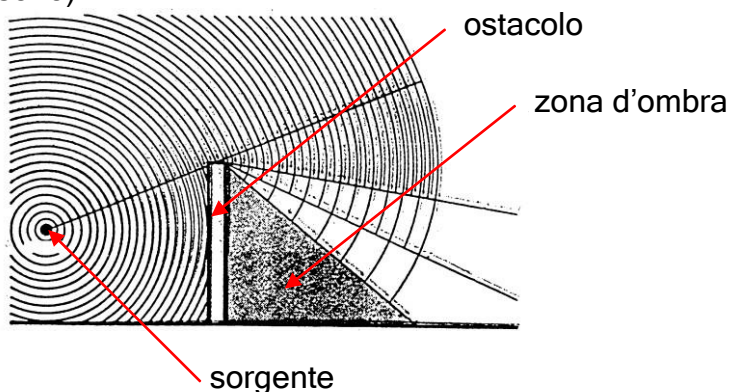


### 3) DIFFRAZIONE

La diffrazione è quel fenomeno in cui un'onda devia dalla sua direzione di propagazione incontrando un ostacolo o un'apertura in uno schermo posto lungo il suo cammino.

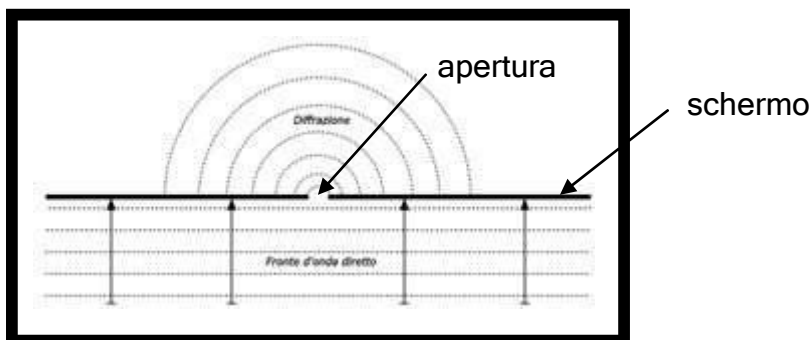
#### DIFFRAZIONE PRODOTTA DA OSTACOLO

Si ha quando un'onda incontra un ostacolo avente dimensioni trasversali confrontabili con la lunghezza d'onda dell'onda che lo colpisce. In tal caso l'onda riesce ad aggirare l'ostacolo come per esempio il suono che aggira l'ostacolo costituita da una persona. La stessa persona impedisce il passaggio dietro di sé della luce (creando ombra) perché la lunghezza d'onda della luce è molto minore della dimensione del corpo umano (vedi fig. sotto).



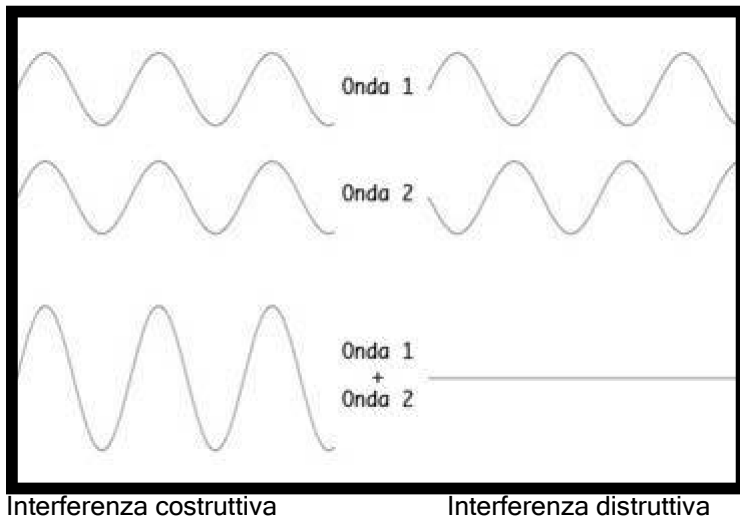
#### DIFFRAZIONE PRODOTTA DA UN'APERTURA SU UNO SCHERMO

Si ha quando un ostacolo (schermo) grande rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda che lo colpisce, è dotato di un piccolo foro (vedi figura sotto).



### 4) INTERFERENZA

Se in un punto dello spazio arrivano due onde emesse da sorgenti diverse ma coerenti aventi la stessa ampiezza, la stessa fase e la stessa frequenza. l'intensità si ottiene con la sovrapposizione degli effetti. L'intensità può aumentare e allora si parla di **interferenza costruttiva** oppure può diminuire fino al limite ad annullarsi e in tal caso si parla di **interferenza distruttiva**.



## 5) RISONANZA

E' un fenomeno che venne notato per la prima volta nel 1665 da Christian Huygens. Un fenomeno di risonanza provoca in genere un aumento significativo dell'ampiezza delle oscillazioni, che corrisponde ad un notevole accumulo di energia all'interno del sistema sollecitato.



La risonanza meccanica portò alla distruzione del Ponte di Tacoma.

In un fenomeno di risonanza, un sistema interagisce con una forza periodica esterna, che corrisponde a una certa quantità di energia trasmessa e ad un corpo che si muove con moto armonico. Un esempio è quello del ragazzo seduto nell'altalena, dove abbiamo: l'eccitatore (ragazzo che spinge) e il sistema altalena + ragazzo (risonatore). Se la spinta è di una certa entità, nel punto in cui si inverte la direzione del moto dell'altalena, questa raggiungerà un'altezza maggiore ad ogni spinta. Il valore che deve avere la spinta dipende dalle proprietà del risonatore. L'eccitatore e il risonatore si dicono in sincronismo.

La risonanza può arrivare a distruggere il sistema per l'eccessivo accumulo energetico.

Nei sistemi smorzati da attrito viscoso (quindi in genere tutti gli oscillatori reali) la massima ampiezza delle oscillazioni indotte al sistema si ha quando la frequenza di sollecitazione è leggermente minore della frequenza propria.



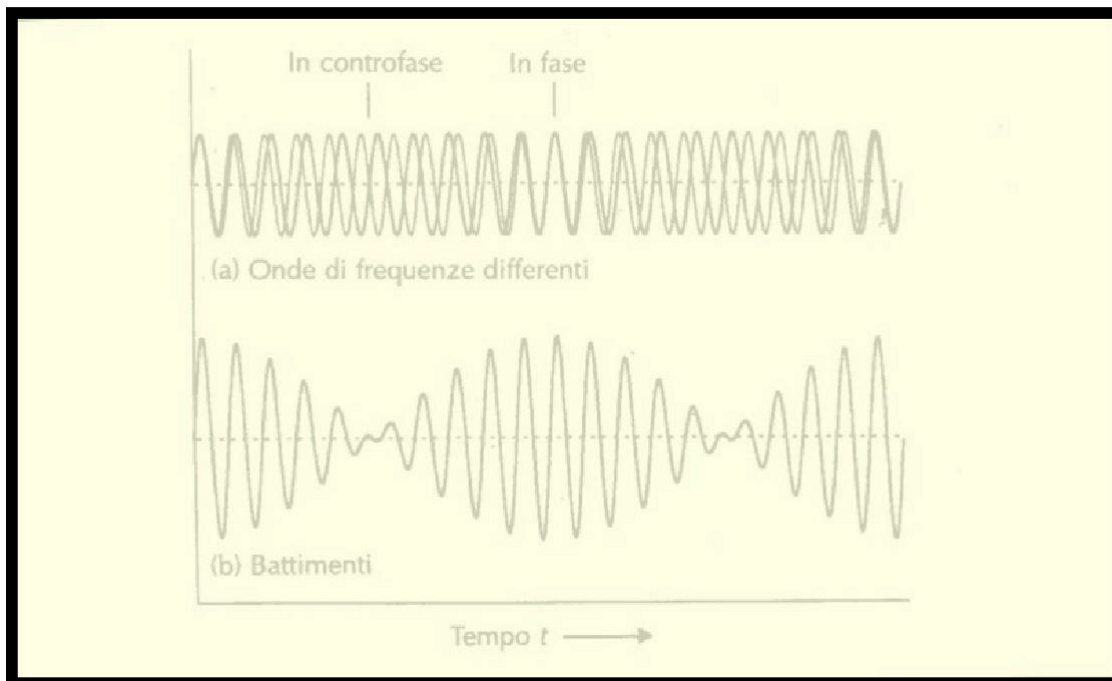
Spesso per **condizione di risonanza** si intende proprio quando la frequenza di sollecitazione è quella che genera la massima ampiezza di oscillazione del sistema. Un corpo capace di vibrare con una determinata frequenza, se viene investito da un'onda della stessa frequenza inizia a vibrare, ma tutti gli altri no.

## 6) SMORZAMENTO

E' quel fenomeno che consiste nella diminuzione dell'ampiezza dell'onda a causa di attriti interni ed esterni a cui l'onda è soggetta.

## 7) BATTIMENTI

Tecnicamente i battimenti sono prodotti dalla sovrapposizione di due onde sinusoidali aventi la medesima ampiezza e frequenze  $f_1$  e  $f_2$  solo "leggermente diverse". L'onda risultante possiede una forma caratteristica che mostra una sorta di "doppia oscillazione".



Di fatto il fenomeno del "battimento" manifesta appieno la sua importanza solo nel campo dell'acustica.

## MODI DI PRODUZIONE DELLA LUCE

- 1) LAMPADE AD INCANDESCENZA
- 2) LAMPADE A FLUORESCENZA
- 3) LED
- 4) LASER

## LAMPADE AD INCANDESCENZA

La lampada ad incandescenza si basa sull'effetto Joule. Vi è un filo metallico che funge da resistenza, attraversato da corrente converte parte della energia in luce.

Il filo usato è tungsteno perché ha un'elevata temperatura di fusione, circa 3410 °C. Esso è inserito in un'ampolla che contiene gas inerte ( azoto od argon). I gas essendo poco reattivi non si combinano, ad alta temperatura col tungsteno, ed inoltre aumentando la pressione, impediscono che le molecole del filamento sublimino a causa della elevata temperatura.

Il filamento è avvolto a spirale per diminuire la superficie riflettente e quindi limitare la dispersione di calore all'esterno con conseguente perdita di efficienza.

La prima lampada ad incandescenza fu realizzata nel 1879 da Edison. Nel 1884 Edison, studiava il modo per evitare l'oscuramento che si verificava all'interno del vetro a causa della progressiva evaporazione del filamento di carbone, e che produceva il noioso l'effetto di ridurre la luce emessa.

## LAMPADE A FLUORESCENZA

Questo tipo di lampade sono erroneamente chiamate lampade al neon o **tubi al neon**, ma non sempre contengono neon, in realtà il loro funzionamento è dovuto principalmente alla presenza di vapori di mercurio e di materiali fluorescenti.

È costituita da un tubo di vetro, che può essere lineare, circolare o variamente sagomato al cui interno è dapprima praticato il vuoto, poi introdotto un gas nobile (argon, xeno, neon, kripton) a bassa pressione e una piccola quantità di mercurio liquido, che in parte evapora mescolandosi al gas nobile.

La superficie interna del tubo è rivestita di un materiale fluorescente, dall'aspetto di una polvere bianca. Ai due estremi del tubo sono presenti due elettrodi.

Gli elettroni in movimento tra i due elettrodi eccitano gli atomi di mercurio contenuti nel gas, sollecitandoli a emettere radiazione ultravioletta. Il materiale fluorescente di cui è ricoperto il tubo, investito da tali radiazioni, emette a sua volta luce visibile. Poiché la luce visibile ha una frequenza e quindi una energia minore di quella ultravioletta, la trasformazione prodotta dal materiale fluorescente comporta una inevitabile perdita di energia, sotto forma di calore, che determina il riscaldamento del tubo.

Una differente composizione del materiale fluorescente permette di produrre una luce più calda oppure più fredda.

## LED

Un LED (**Light Emitting Diode**) e' un dispositivo elettronico che emette luce se eccitato elettricamente.

Come ogni diodo, e' formato da un catodo e un anodo, che sono i terminali del diodo. Quando viene applicata una tensione ai terminali, gli elettroni si accumulano sul catodo e se la tensione e' sufficiente (in genere 0.8 V) gli elettroni vengono attratti

dall'anodo (carico positivamente). Se la tensione è troppo alta (normalmente non dovrebbe superare i 6 V), la corrente può essere talmente intensa da bruciare il diodo.

Per ogni elettrone che passa dal catodo all'anodo, si verifica di fatto una miniscintilla (di potenza minuscola poiché la carica dell'elettrone è infinitesima). Per ogni piccola scintilla, si trasforma una certa quantità di energia (elettrica), in forma di calore (il diodo si riscalda) e di campo elettromagnetico.

La luce è un'onda elettromagnetica avente una frequenza variabile in un determinato campo, per cui progettando adeguatamente il diodo si può ottenere che l'onda elettromagnetica provocata dalla scintilla abbia frequenze (non si riesce ad ottenere una frequenza stabile) che coprano il visibile, e quindi emettano luce.

#### Altre tre piccole caratteristiche

Se il diodo viene eccitato in maniera inversa al suo normale funzionamento (normalmente il catodo va collegato al polo negativo) non funziona, e potrebbe eventualmente essere danneggiato se la tensione è troppo alta.

Se il diodo viene eccitato con una corrente alternata (per esempio 50 Hz) e con una tensione di picco tra i 0.8 e i 6 V, esso emette una luce intermittente ma ai nostri occhi appare come continua.

Il diodo consuma normalmente pochissima energia.

## **LASER**

Laser è l'acronimo di **Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation**.

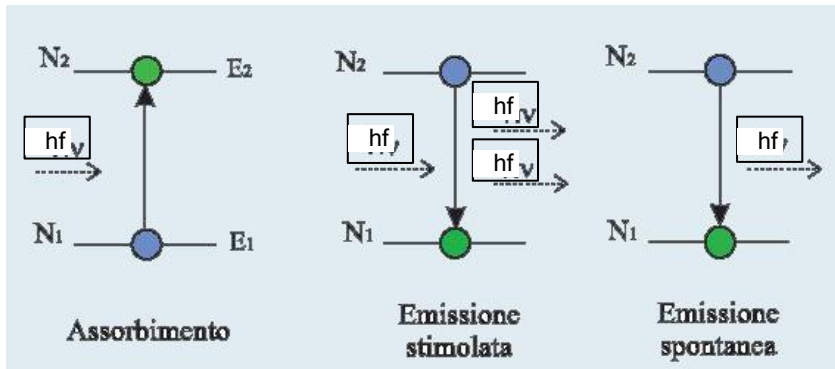
Trattasi di un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente e, generalmente monocromatica, fortemente direzionata e con elevata densità di potenza. Fu inventato nel 1960.

Al fine di comprendere il funzionamento dei laser è necessario un breve richiamo dei principali effetti di interazione tra un'onda elettromagnetica e un mezzo materiale.

I meccanismi con i quali la materia interagisce con la radiazione sono **l'assorbimento, l'emissione stimolata e l'emissione spontanea**.

Il mezzo materiale, in generale, è costituito da atomi o ioni caratterizzati dai loro livelli energetici che rappresentano gli stati in cui tali atomi o ioni possono trovarsi. Si indica solitamente con  $N_i$  il numero di atomi per unità di volume che si trovano nello stato di energia  $E_i$ .

La radiazione elettromagnetica è caratterizzata dalla frequenza  $f$  o dalla lunghezza d'onda  $\lambda$ . In alternativa, se si preferisce una descrizione in termini di fotoni, ogni fotone è caratterizzato dalla propria energia  $E = hf$ .



Per semplicità, consideriamo che un atomo possa assumere solo due stati energetici, si parla in questo caso di sistema a due livelli. Sia  $N_1$  la popolazione del livello con energia  $E_1$  più bassa, detto anche livello fondamentale e  $N_2$  quella del livello eccitato, avente energia  $E_2$ .

Si consideri un'onda elettromagnetica avente frequenza  $f$ , tale che  $E = hf = E_2 - E_1$ , cioè ogni fotone associato all'onda elettromagnetica abbia un'energia esattamente uguale al salto di energia tra i due livelli caratteristici del mezzo materiale in considerazione.

Allora l'onda elettromagnetica può interagire con il mezzo materiale attraverso tre fenomeni: l'assorbimento, l'emissione stimolata e l'emissione spontanea.

Si ha **assorbimento** quando il fotone incide su un atomo che si trova nello stato fondamentale e come risultato di tale interazione il fotone viene assorbito dall'atomo che, in virtù di questo assorbimento, passa dallo stato fondamentale allo stato eccitato. Infine, per quanto riguarda l'**emissione spontanea**, questo è un fenomeno spontaneo che può avvenire ogniqualvolta un atomo che si trova in uno stato eccitato decade verso uno stato avente energia inferiore e la corrispondente differenza di energia è emessa sotto forma di un fotone.

Il fotone emesso ha la stessa energia del segnale ottico incidente, ma polarizzazione, fase e direzione casuali.

Si supponga ora che l'atomo si trovi nel livello eccitato di energia  $E_2$  e che su di esso incida un fotone. In questo caso, il fotone può stimolare l'emissione di un altro fotone avente la stessa frequenza e fase. Come conseguenza di questa **emissione stimolata**, l'atomo compie una transizione dal livello eccitato al livello fondamentale.

I due tipi principali di amplificatori ottici sono gli amplificatori ottici a semiconduttore (SOA) e quelli in fibra ottica (OFA). La nostra attenzione sarà rivolta agli amplificatori in fibra ottica.

Il suo funzionamento si comprende in base alle seguenti assunzioni. La luce è costituita da impulsi ondulatori dotati di energia (quanti) emessi da singoli atomi che passano da uno stato energetico ad uno inferiore. La frequenza della luce emessa è proporzionale ad un certo salto energetico.

Gli atomi normalmente si trovano ai livelli energetici più bassi. In pratica deve esserci una sostanza i cui atomi si trovano quasi tutti allo stato fondamentale, un sistema (lampada flash, ecc.) in grado di eccitare gli atomi di tale sostanza e una coppia di specchi. La luce prodotta successivamente dagli ioni che diseccitano spontaneamente portandosi nuovamente allo stato fondamentale provocano emissione di **luce laser**.

