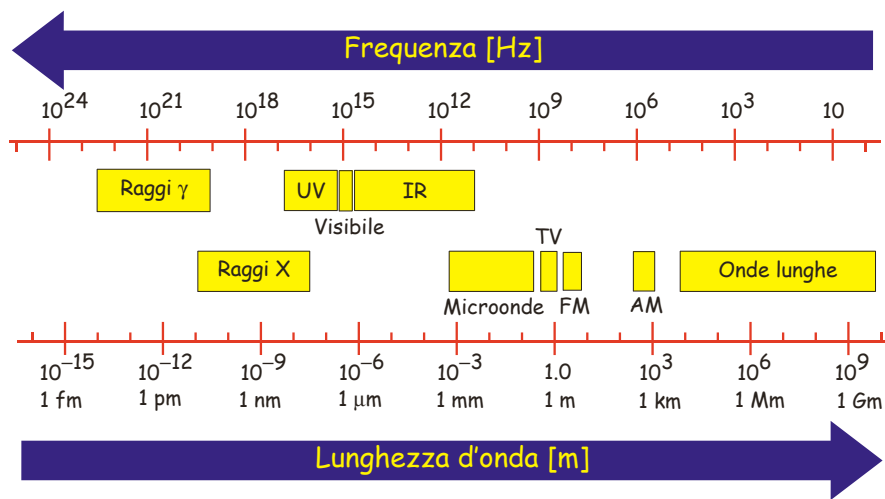


## 11. Lo Spettro delle Onde Elettromagnetiche

<http://campus.cib.unibo.it/2484/>

April 20, 2011

## Lo Spettro Elettromagnetico

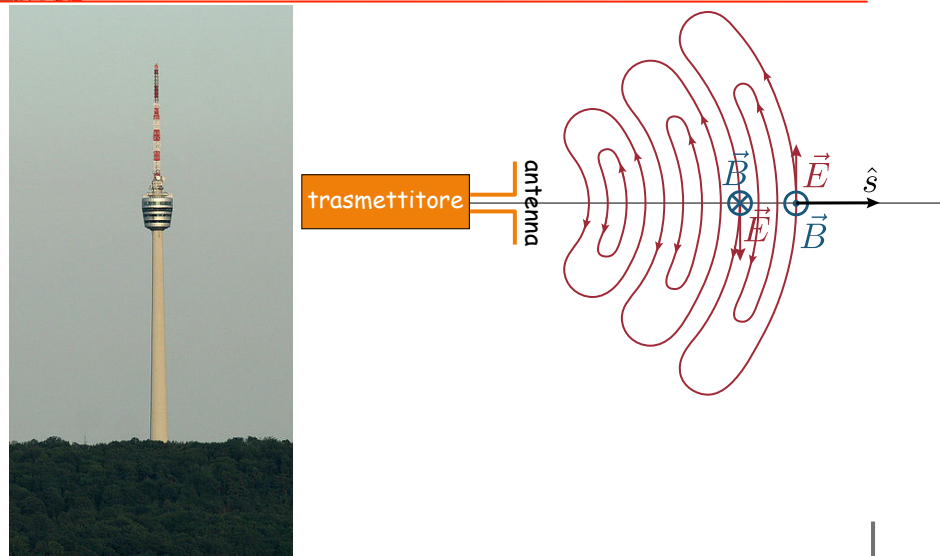


- L'ottica ha avuto **originariamente** come scopo lo studio dei **fenomeni luminosi**, cioè di quei fenomeni che percepiamo mediante l'**occhio**, organo della vista.
- La scoperta di fenomeni da attribuirsi a radiazioni della **stessa natura** delle **radiazioni luminose**, ma **invisibili**, ha esteso largamente i confini dell'ottica.
- **Ottica geometrica**: ha per base il concetto puramente geometrico di **raggio luminoso** e le leggi, anch'esse puramente geometriche, che ne governano la propagazione.
- **Ottica fisica**: si occupa dei fenomeni conseguenti alla natura fisica della radiazione elettromagnetica: **interferenza**, **diffrazione**, **polarizzazione**, **diffusione**, **dispersione**, ecc.

## Onde Radio

- Prodotte da elettroni che oscillano nelle **antenne**, mossi da circuiti elettronici:
  - Onde **miriametriche VLF** ( $\nu \in [3 \text{ kHz}, 30 \text{ kHz}]$ ,  $\lambda \in [10 \text{ km}, 100 \text{ km}]$ )
    - Radionavigazione.
  - Onde **chilometriche LF** ( $\nu \in [30 \text{ kHz}, 300 \text{ kHz}]$ ,  $\lambda \in [1 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ )
    - Radiodiffusione AM (onde lunghe); radionavigazione.
  - Onde **medie MF** ( $\nu \in [300 \text{ kHz}, 3 \text{ MHz}]$ ,  $\lambda \in [100 \text{ m}, 1 \text{ km}]$ )
    - Radiodiffusione AM.
  - Onde **corte HF** ( $\nu \in [3 \text{ MHz}, 30 \text{ MHz}]$ ,  $\lambda \in [10 \text{ m}, 100 \text{ m}]$ )
    - Radiodiffusione AM.
  - Onde **metriche VHF** ( $\nu \in [30 \text{ MHz}, 300 \text{ MHz}]$ ,  $\lambda \in [1 \text{ m}, 10 \text{ m}]$ )
    - Radiodiffusione FM; televisione.
  - Onde **decimetriche UHF** ( $\nu \in [300 \text{ MHz}, 3 \text{ GHz}]$ ,  $\lambda \in [10 \text{ cm}, 1 \text{ m}]$ )
    - Televisione, sistemi radar, telefonia cellulare.

## Onde Radio (II)

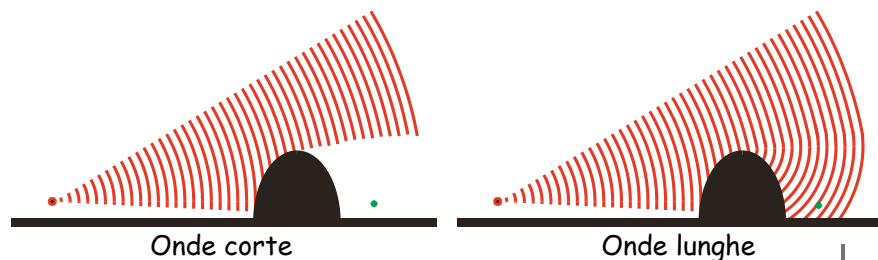


## Onde Radio (III)



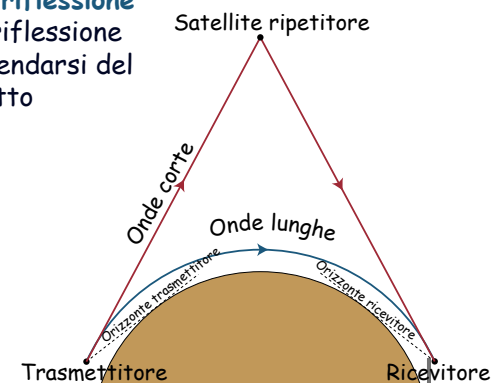
## Diffrazione delle Onde Radio

- Per effetto della **diffrazione**, tanto maggiore è la lunghezza d'onda, tanto maggiore è la **propagazione delle onde nella zona dell'ombra geometrica**.
- L'idea di Marconi fu di utilizzare, per trasmissioni radio, onde lunghe che si propagano al di là degli ostacoli.



## Propagazione a Grandi Distanze di Onde Lunghe e Onde Corte

- Le **onde lunghe** si propagano lungo la superficie terrestre per effetto della **diffrazione**.
- Le **onde corte** diffrangono poco. Si possono ricevere a grande distanza soltanto a causa della **riflessione sulla ionosfera**. Tuttavia tale riflessione non è stabile: risente dell'avvicinarsi del giorno e della notte e dell'effetto delle stagioni.
- Per propagare in maniera affidabile segnali a onde corte a grandi distanze si utilizzano **satelliti ripetitori**.

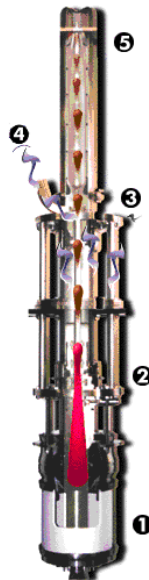


- Possono essere considerate onde radio molto corte:
  - **SHF** ( $\nu \in [3 \text{ GHz}, 30 \text{ GHz}]$  e  $\lambda \in [1 \text{ cm}, 10 \text{ cm}]$ ).
  - **EHF** ( $\nu \in [30 \text{ GHz}, 300 \text{ GHz}]$  e  $\lambda \in [1 \text{ mm}, 1 \text{ cm}]$ ).
- Vengono prodotte da **dispositivi elettronici** detti **klystron** e **magnetron** nei quali un flusso di elettroni accelerati interagiscono col campo elettromagnetico prodotto da cavità risonanti.
- Utilizzate nei **forni a microonde** e nei **radar**.
- Ogni corpo a temperatura superiore allo zero assoluto emette microonde (radiazione termica).

- Il **klystron** è usato prevalentemente per installazioni di grande potenza, come **radar** e **trasmettenti televisive**.
- Viene inoltre utilizzato nei **sincrotroni** e negli **acceleratori lineari** per accelerare le particelle elementari.

## Il Klystron di Alta Potenza di SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)

- Il **cannone elettronico** (1) produce un flusso di elettroni;
- La **cavità di rimbalzo** (2) regola la velocità degli elettroni in modo che essi arrivino a **fiotti** nella cavità di uscita;
- I fiotti di elettroni **eccitano microonde** nella **cavità di uscita** (3) del klystron;
- Le microonde **fluiscono** nella **guida d'onda** (4);
- Gli **elettroni** sono **assorbiti** nel **beam stop** (5).



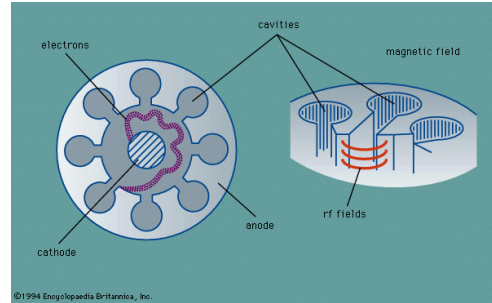
## Klystron da 400 MHz e 500 kW al CERN





## Il Magnetron

- Nel **magnetron** sono presenti **due campi statici**: un campo **elettrico radiale** e un campo **magnetico assiale**.
- In assenza di cavità gli elettroni si muoverebbero **a spirale** dal catodo centrale all'anodo esterno.
- Le cavità, comportandosi come circuiti LC, producono inoltre un **campo elettrico** e un **campo magnetico oscillanti a radiofrequenza**, alimentati dall'energia ceduta agli elettroni dal campo elettrico radiale.

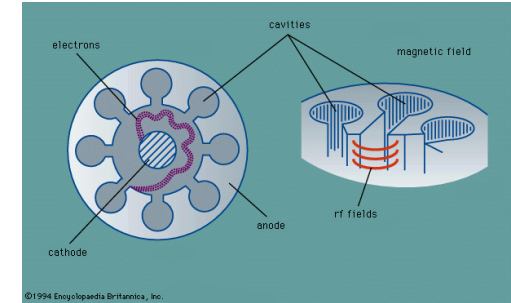


©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.



## Il Magnetron (II)

- La **frequenza** di oscillazione dipende dalla **forma** e dalla **dimensione** delle **cavità risonanti**.
- Una **guida d'onda** estrae una parte di energia dall'interno del magnetron e la trasferisce all'esterno.
- Il magnetron viene utilizzato principalmente nei **forni a microonde** e nei **radar**.

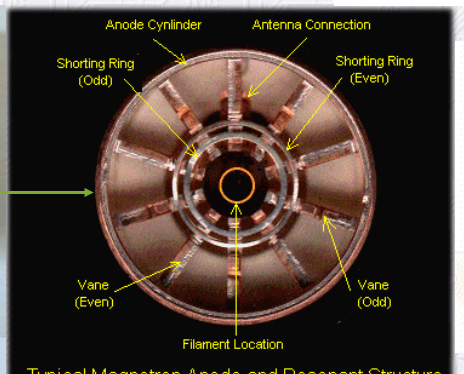
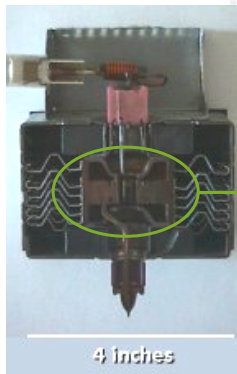
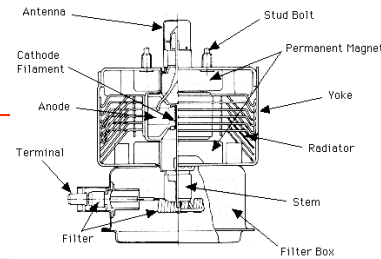


©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

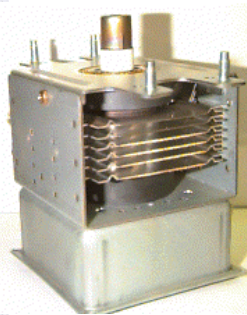


## Il Magnetron (III)

- Un tipico magnetron a **2.45 GHz** per **forno a microonde**.

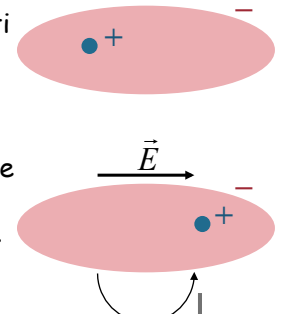


Typical Magnetron Anode and Resonant Structure



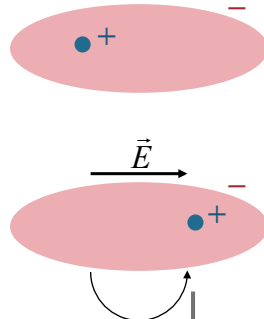
## Il Forno a Microonde

- Alcune molecole di cui gli **alimenti** sono costituiti (acqua, grasso, zucchero, ecc.) sono **molecole polari**:
  - Il "baricentro" della carica negativa non coincidente con il "baricentro" della carica positiva;
  - Momento di dipolo elettrico permanente  $\vec{d} \neq \vec{0}$ .
- Il campo elettromagnetico presente in un forno a microonde sottopone le molecole di cui gli alimenti sono costituiti a un **campo elettrico  $\vec{E}(t)$  alternato, di alta frequenza**.
- Il campo  $\vec{E}(t)$  produce sulle molecole polari una **coppia di forze di momento  $\vec{M} = \vec{p} \wedge \vec{E}$**  che tende a **ruotare** le molecole **allineando** il loro **momento di dipolo elettrico  $\vec{d}$**  con il **campo elettrico  $\vec{E}(t)$** .



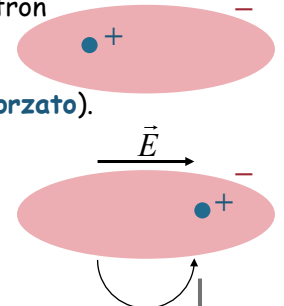
## Il Forno a Microonde (II)

- Poiché il campo  $\vec{E}(t)$  è **alternato**, anche il moto di **rotazione** delle molecole polari è **alternato**.
- Tale moto molecolare microscopico costituisce una parte dell'**energia interna (agitazione termica)** degli alimenti
  - Si propaga per **conduzione**, attraverso le molecole adiacenti, a **tutte le molecole** di cui gli elementi sono costituiti;
  - In questo modo si aumenta l'energia interna (dunque la **temperatura**) degli alimenti.
- Poiché il **momento di dipolo elettrico**  $\vec{d}$  delle molecole di **acqua** ha norma  $d$  **superiore** a quella delle molecole di **zuccheri** e **grasso**, il riscaldamento a microonde è **più efficiente** sulle molecole di **acqua**.



## Il Forno a Microonde (III)

- Conviene pertanto **ottimizzare** il trasferimento di potenza:
  - magnetron  $\rightarrow$  acqua;
- Piuttosto che ottimizzare il trasferimento:
  - magnetron  $\rightarrow$  grassi;
  - magnetron  $\rightarrow$  zuccheri.
- Il **massimo trasferimento di potenza** dal magnetron alle molecole di acqua si ottiene se la frequenza delle microonde è una **frequenza di risonanza** delle **molecole di acqua** (si ricordi l'**oscillatore forzato**).
- Dunque la **massima efficienza energetica** di un forno a microonde per il **riscaldamento** degli **alimenti** si ottiene quando la **frequenza delle microonde** è **pari a una frequenza di risonanza della molecola dell'acqua (2.45 GHz)**.



## Il Forno a Microonde (IV)

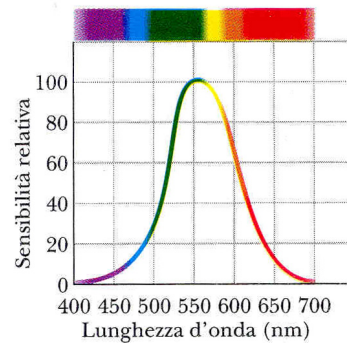
- Il riscaldamento avviene all'**interno** dei cibi, **senza scaldare l'aria circostante**.
- Piatti di **porcellana** e bicchieri di **vetro non contengono acqua** e perciò **non si scaldano**:
  - Le **molecole non polari** non risentono in maniera sensibile del campo elettromagnetico presente nel forno;
  - Le **molecole polari** aventi frequenze di **risonanza molto diverse** dalla frequenza di risonanza dell'acqua risentono in modo minimale del campo elettromagnetico presente nel forno.
- Recipienti **metallici** non possono essere usati perché:
  - Essi **schermano** le microonde;
  - Possono causare **scariche elettriche** a causa della **f.e.m. indotta** dalle microonde sul recipiente conduttore.

## Radiazione Infrarossa

- $\nu \in [300 \text{ GHz}, 3.95 \times 10^{14} \text{ Hz}]$  e  $\lambda \in [0.76 \text{ mm}, 1 \text{ mm}]$ .
- Emessi normalmente da **atomi** o **molecole** quando **cambiano** il loro **moto rotazionale** o **vibrazionale**.
- È un importante mezzo di **trasmissione del calore (irraggiamento)** attraverso il vuoto o mezzi trasparenti (p. es.: tepore del sole e del focolare).
- La massima intensità di radiazione elettromagnetica da parte di corpi a temperatura ambiente (300 K) si ha nell'infrarosso.

## Radiazione Visibile

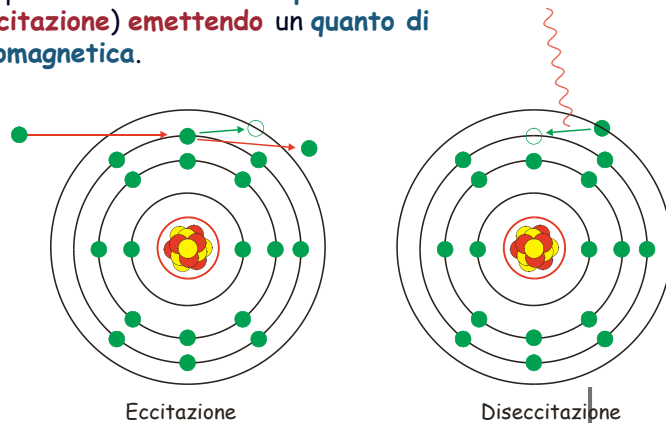
- $\nu \in [3.95 \times 10^{14} \text{ Hz}, 7.89 \times 10^{14} \text{ Hz}]$
- $\lambda \in [380 \text{ nm}, 760 \text{ nm}]$ .
- È la radiazione elettromagnetica percepita dal nostro occhio.
- È inoltre la radiazione elettromagnetica emessa con la **massima intensità** dal **Sole**.
- Prodotta nelle **diseccitazioni degli atomi**.



Sensibilità relativa dell'occhio umano

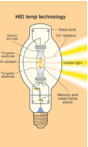
## Emissioni di Onde Elettromagnetiche per Diseccitazione di Atomi

- Un elettrone atomico, urtato da un altro elettrone, acquista energia e **passa in un'orbita più esterna (eccitazione)**.
- Dopo un certo tempo l'elettrone **ritorna spontaneamente sull'orbita più interna (diseccitazione) emettendo un quanto di radiazione elettromagnetica**.



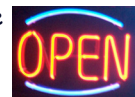
## Sorgenti di Luce Visibile

- Nelle **lampade a incandescenza** l'energia termica (vibrazionale) del reticolo che costituisce il filamento viene in parte rilasciata (diseccitazione) sotto forma di onda elettromagnetica. La massima emissione delle lampade a incandescenza avviene nella parte infrarossa dello spettro: per questo motivo sono **poco efficienti** (soltanto una piccola parte della potenza elettrica assorbita viene emessa nello spettro visibile).
- Nelle **lampade a scarica** un **flusso di elettroni** attraverso il gas **eccita gli atomi**, i quali, nella **diseccitazione**, **emettono onde elettromagnetiche**. Sono lampade a scarica le **lampade al neon**, i **tubi fluorescenti**, le **lampade al sodio** e le **lampade agli alogenuri metallici**.



## Lampade a Scarica

- In alcuni tipi di lampade a scarica le onde elettromagnetiche emesse nella diseccitazione atomica sono nello **spettro visibile**. Questo avviene nei seguenti tipi di lampada:
  - **Lampade al neon**. Producono **luce rossa**. Utilizzate nelle insegne pubblicitarie e nelle lampadine-spia degli elettrodomestici (ora spesso sostituite dai LED).
  - **Lampade a vapore di sodio**. Emettono **luce gialla** (bianco giallastro se si tratta di lampade ad alta pressione). Molto utilizzate nell'illuminazione stradale.
  - **Lampade agli alogenuri metallici**. Emettono **luce bianca**. Molto utilizzate nell'illuminazione di impianti sportivi e in interni di grandi dimensioni.





# Tubi Fluorescenti

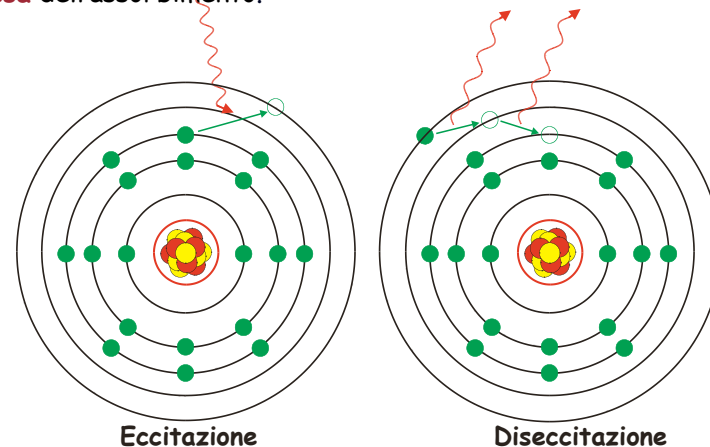


- In altri tipi di lampade a scarica l'emissione avviene principalmente nell'**ultravioletto** (invisibile all'occhio umano).
- Viene quindi ricoperto l'interno del tubo di una **polvere fluorescente** la quale:
  - Assorbe i raggi ultravioletti;
  - Emette luce visibile.
- Gli atomi di una sostanza fluorescente, colpiti da un'onda UV, si **eccitano**, **aumentando l'energia di più di un livello**.
- La **diseccitazione** avviene invece in **più fasi**, in ciascuna delle quali l'atomo **cede** soltanto **una parte** dell'energia acquisita.



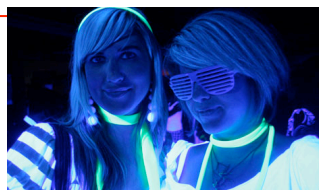
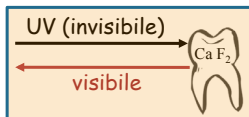
# Tubi Fluorescenti (II)

- Poiché la frequenza di un quanto (treno d'onde) è proporzionale all'energia del quanto stesso, l'**emissione** avviene a **frequenza più bassa** dell'assorbimento.



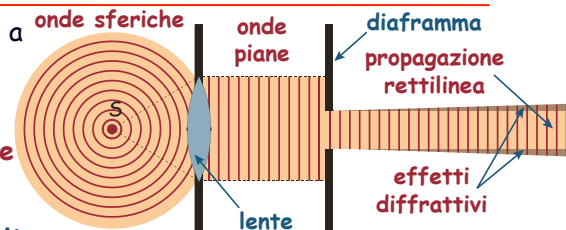
# Lampade a "Luce Nera"

- Sono lampade al **vapore di mercurio**, con il bulbo colorato di nero:
  - Attenuata fortemente la luce visibile;
  - Meno attenuata la luce UV (invisibile).
- Denti e indumenti bianchi** lavati con **detersivi al fluoro** assorbono UV ed **emettono luce visibile per fluorescenza**.



# Perché i CD Sono Letti con Luce Infrarossa e i BD con Luce Blu?

- I fasci di luce si allargano a causa della **diffrazione**.
- Tale allargamento è **tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza d'onda**.
- La diffrazione pone un **limite inferiore** alla dimensione dell'**area del disco che può essere letta distintamente** e perciò pone un limite superiore alla densità di informazione.



CD	780 nm	Infrarosso	650 MByte
DVD	650 nm	Rosso	4.7 GByte
BD (Blue-Ray)	405 nm	Blu-Violetto	25 GByte



## Radiazione Ultravioletta

- $\nu \in [7.89 \times 10^{14} \text{ Hz}, 3 \times 10^{16} \text{ Hz}]$  e  $\lambda \in [10 \text{ nm}, 380 \text{ nm}]$ .
- Radiazione emessa nelle **diseccitazioni degli atomi**.
- È una componente importante della **luce solare**, che tuttavia è fortemente **attenuata** dall'**atmosfera** terrestre (ozono atmosferico,  $O_3$ ).
- Quando  $\lambda < 200 \text{ nm}$  la radiazione può **ionizzare** (ovvero può allontanare un elettrone da un atomo) e **rompere legami chimici**.
- Su **sistemi biologici** può produrre quindi mutagenesi e cancerogenesi rompendo le molecole del DNA e consentendone una diversa ricombinazione.



## Perché il Nostro Occhio è Sensibile Proprio allo Spettro Visibile?

- Lo spettro **UV** con  $\lambda < 300 \text{ nm}$  è **assorbito dallo strato di ozono** presente nell'atmosfera e non raggiunge la superficie terrestre. Se fossimo sensibili agli UV vedremmo **poca luce**.
- La visione degli oggetti è causata dalla luce che incide su di essi e che essi riflettono. **Microonde** e **IR** vengono prodotti con notevole intensità da **tutti i corpi a temperatura ambiente**, compreso il bulbo oculare. Se vedessimo in questo spettro, la **visione sarebbe abbagliata** da queste onde.
- Inoltre **microonde** e **IR** producono una **diffrazione** assai maggiore dello spettro visibile e dunque il **potere risolutivo** dell'occhio sarebbe **assai inferiore**.



## Raggi X

- $\nu \in [3 \times 10^{16} \text{ Hz}, 3 \times 10^{20} \text{ Hz}]$  e  $\lambda \in [1 \text{ pm}, 10 \text{ nm}]$ .
- Possono essere **prodotti**:
  - Nelle **diseccitazioni degli elettroni più interni degli atomi**;
  - Oppure **sottoponendo degli elettroni a forti accelerazioni**:
    - Come avviene nei **tubi a raggi catodici** dei televisori, che proprio per questo motivo sono dotati di uno spesso vetro al piombo.
- Sono utilizzati nella **diagnostica medica** e nello **studio dei reticoli cristallini**.
- Sono **ionizzanti**. Possono quindi produrre mutagenesi e cancerogenesi sui sistemi biologici.



## Raggi Gamma

- $\nu \in [3 \times 10^{19} \text{ Hz}, 3 \times 10^{23} \text{ Hz}]$  e  $\lambda \in [1 \text{ fm}, 10 \text{ pm}]$ .
- Sono prodotti:
  - Nelle **transizioni dei nuclei atomici** da uno stato energetico a un altro.
    - Sorgenti naturali di raggi gamma sono molte sostanze **radioattive**.
  - Sono altresì prodotti in **reazioni subnucleari**:
    - Per esempio:  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ .
- Sono fortemente **ionizzanti**.





## Perché Soltanto la Radiazione ad Alta Frequenza Può Ionizzare?

- L'energia di un'onda elettromagnetica viene prodotta e assorbita in quantità definite dette **quanti**, costituiti da treni d'onda di lunghezza limitata.
- L'**energia** di un quanto **dipende soltanto** dalla **frequenza** dell'onda (**non dall'ampiezza**), secondo la legge:  $E = h\nu$ , dove  $h$  è una costante detta costante di Planck ( $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ).
- **Se aumenta l'intensità** dell'onda che incide su di un materiale, **aumenta il numero dei quanti ma non l'energia del singolo quanto**.
  - Aumenta quindi la probabilità che una molecola del materiale assorba un quanto, ma l'energia assorbita nel singolo atto di assorbimento non varia.



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
SEDE DI FORLÌ

<http://campus.cib.unibo.it/2484/>

**Domenico Galli**

**Dipartimento di Fisica**

[domenico.galli@unibo.it](mailto:domenico.galli@unibo.it)

<http://www.unibo.it/docenti/domenico.galli>

<https://lhcbweb.bo.infn.it/GalliDidattica>