

PROPRIETA' ONDULATORIE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

L'insieme delle radiazioni visibili (400-800 nm) produce luce bianca

Le diverse radiazioni componenti la luce bianca
si possono scomporre per **rifrazione**

The figure illustrates the refraction of light. On the left, a diagram shows a white light ray entering a triangular prism. The ray is refracted and dispersed into its constituent colors: violetto, azzurro, verde, giallo, arancio, and rosso. A perpendicular line is shown to the surface. On the right, a photograph shows a red straw partially submerged in a glass of water, appearing bent at the surface due to refraction.

PROPRIETA' ONDULATORIE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

INTERFERENZA

Si verifica quando due o più onde che si propagano nella stessa direzione si sovrappongono nella stessa regione dello spazio.

a) Interferenza costruttiva (*onde in fase*)
 b) Interferenza distruttiva (*onde in opposizione di fase*)

The figure illustrates wave interference. Part (a) shows constructive interference: two waves in phase (y_1 and y_2) combine to form a larger wave ($y_1 + y_2$). Part (b) shows destructive interference: two waves out of phase (y_1 and y_2) cancel each other out, resulting in zero displacement ($y_1 + y_2 = 0$).

PROPRIETA' ONDULATORIE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

DIFFRAZIONE

Si verifica quando un'onda incontra un'apertura o un ostacolo delle stesse dimensioni della sua lunghezza d'onda

The figure illustrates wave diffraction. Part (a) shows diffraction through an aperture of width d where $\lambda \ll d$. Part (b) shows diffraction through an aperture where $\lambda \sim d$. Part (c) shows a circular diffraction pattern. Below these are diagrams of a source (*sorgente*) creating waves that pass through a slit (*fenditura*) and hit a screen (*schermo*). On the right, there are diagrams of wave patterns labeled "ALTE FREQUENZE" and "BASSE FREQUENZE" with "ZONDE D'OMBRA" and "DIFFRAZIONE" labels. At the bottom right is a photograph of waves diffracting around a breakwater.

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Il corpo nero

Un corpo , quando riscaldato, emette radiazioni elettromagnetiche.
Per $T > 500\text{ }^\circ\text{C}$ il corpo emette luce visibile (rosso \rightarrow bianco)

The diagram illustrates the electromagnetic spectrum with various types of radiation (Radio, Microonde, Infrarosso, Visibile, Ultravioletto, Raggi X, Raggi Gamma) and their corresponding frequencies and wavelengths. It also includes a color spectrum and a temperature scale.

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Il corpo nero

Un corpo , quando riscaldato, emette radiazioni elettromagnetiche.
Per $T > 500\text{ }^\circ\text{C}$ il corpo emette luce visibile (rosso \rightarrow bianco)

Corpo nero (ideale): assorbe e riemette tutte le radiazioni.
La radiazione in uscita dipende solo dalla temperatura.

The diagram shows a black body cavity (Materiale fortemente assorbente) and a graph of radiation intensity versus wavelength for different temperatures (T = 6000 K, 5000 K, 4000 K, 3000 K).

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Il corpo nero

Sperimentale *Interpretazione ondulatoria (catastrofe ultravioletta)*

The left graph shows experimental curves for different temperatures (T = 6000 K, 5000 K, 4000 K, 3000 K) plotted against wavelength in micrometers. The right graph shows the same curves plotted against wavelength in nanometers, highlighting the divergence between the experimental data and the Rayleigh-Jeans prediction at short wavelengths.

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Il corpo nero ipotesi di Planck (1901)

L'energia (E) delle cariche oscillanti può assumere solo valori multipli interi della *quantità* $h\nu$: $E = nh\nu$ ($n=0,1,2,3, \dots$)

a) Interpretazione classica b) Interpretazione quantistica

The diagram illustrates Planck's hypothesis of energy quantization. Part (a) shows a continuous energy distribution (classical interpretation), and part (b) shows a discrete energy distribution (quantum interpretation) with energy levels $E = 4h\nu, E = 3h\nu, E = 2h\nu, E = h\nu, E = 0$.

$h = 6.6262 \times 10^{-34}\text{ J s}$
(costante di Planck)

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

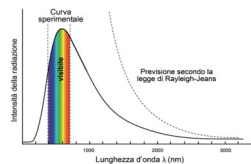
Il corpo nero ipotesi di Planck (1901)

L'energia (E) delle cariche oscillanti può assumere solo valori multipli interi della *quantità* $h\nu$

Quindi gli e^- oscillanti del corpo nero assorbono o emettono radiazioni solo sotto forma di pacchetti discreti (*quanti*) pari al valore $h\nu$:

$$E = nh\nu = nhc/\lambda \quad (n=0,1,2,3\dots)$$

All'aumentare di ν l'energia minima $h\nu$ aumenta, quindi diventa più difficile l'emissione di corpo nero alle alte frequenze.

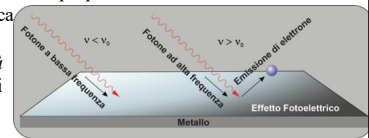


PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Effetto fotoelettrico e fotoni

Una lamina di Zn colpita da radiazioni ultraviolette può emettere fotoni (**Heinrich Hertz 1887**)

1. si ha emissione di elettroni solo se la *frequenza* della radiazione incidente è maggiore di un certo *valore soglia* ν_0 , tipico di ogni metallo;
2. l'energia cinetica degli elettroni emessi aumenta linearmente con la *frequenza* della radiazione incidente e non dipende dalla sua intensità;
3. il numero di elettroni emessi è proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica incidente e *non esiste un valore minimo di intensità* al di sotto del quale non si abbia emissione.



PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Effetto fotoelettrico e fotoni

Una lamina di Zn colpita da radiazioni ultraviolette può emettere fotoni (**Heinrich Hertz 1887**)

Secondo la fisica classica l'energia dipende dall'intensità (al quadrato) dell'onda luminosa e non dalla sua frequenza:

1. si sarebbe dovuta avere emissione di elettroni per qualsiasi valore della frequenza della luce
2. si sarebbe dovuta avere emissione di elettroni solo per luce con intensità superiore ad un certo valore di soglia
3. l'energia cinetica degli elettroni emessi avrebbe dovuto aumentare con l'intensità della radiazione incidente e non con la sua frequenza

PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Effetto fotoelettrico e fotoni

Einstein (1905): qualunque radiazione elettromagnetica di frequenza ν trasporta energia (E) in pacchetti discreti o *quanti* ($E = h\nu$), come se fosse costituita da un fascio di *particelle* senza massa, i *fotoni*, ciascuno in grado di trasportare la stessa quantità di energia.

L'intensità della radiazione è proporzionale al numero di fotoni che questa trasporta

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

Quando si fornisce energia ad una sostanza questa viene eccitata ed emette diverse radiazioni il cui insieme costituisce lo spettro di emissione di quella sostanza

SI TRATTA DI UNO SPETTRO DISCONTINUO

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

In maniera «complementare», la luce bianca che attraversa un campione di sostanza, assorbe le stesse frequenze dello spettro di emissione caratteristiche di quella sostanza (spettro di assorbimento)

SPETTRO DISCONTINUO (A RIGHE)

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

In maniera «complementare», la luce bianca che attraversa un campione di sostanza, assorbe le stesse frequenze dello spettro di emissione caratteristiche di quella sostanza (spettro di assorbimento)

SPETTRO DISCONTINUO (A RIGHE)

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

Ogni atomo presenta uno specifico spettro a righe

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

Serie spettrali caratteristiche dell'idrogeno

Rydberg - Ritz (1890)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

con n_i e n_f interi $n_i > n_f$

$R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ (costante di Rydberg)

MODELLO QUANTISTICO DELL'ATOMO Bohr (1913)

moto circolare uniforme

forza centrifuga (cinetica):
 $F_1 = mv^2/r$

forza centripeta (elettrostatica):
 $F_2 = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon^0 r^2$ ($\epsilon^0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$)

Quando $F_1 = F_2$: $mv^2/r = q_1 q_2 / r^2$

Ipotesi di Bohr: sono **stazionarie** quelle orbite (r) per le quali il momento angolare dell'elettrone è un **multiplo intero di $h/2\pi$**

$mvr = nh/2\pi$ con $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$
QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

MODELLO QUANTISTICO DI BOHR PER L'ATOMO DI IDROGENO E PER GLI IONI MONOELETRONICI (DETTI IDROGENOIDI, TIPO He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} , etc)

$mvr = nh/2\pi$ con $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$
QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

L'elettrone in stato stazionario (orbita r permessa) non irradia energia (contrariamente alla fisica classica).

Quando l'elettrone passa da uno stato (stazionario) a più alta energia E_i (più distante dal nucleo) ad un altro ad energia minore E_f (più vicino al nucleo), si ha emissione di una radiazione elettromagnetica i cui fotoni hanno energia

$$\Delta E = E_i - E_f = h\nu$$

SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

Serie spettrali caratteristiche dell'idrogeno

Rydberg - Ritz (1890)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

con n_i e n_f interi $n_i > n_f$

$R_H = 1.097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ (costante di Rydberg)

MODELLO QUANTISTICO DI BOHR PER L'ATOMO DI IDROGENO

L'energia degli stati stazionari risulta $E_n = -2\pi^2 m e^4 / n^2 h^2 = -E_1 / n^2$
 $n=1,2,3,\dots,\infty$ (numero quantico principale)
 $E_1 = 2.18 \times 10^{-18} \text{ J}$ Costante di Rydberg ($E_1 = R_H$ in Joule)
N.B. per convenzione l'e a distanza infinita dal nucleo ha E_∞ nulla.

Il raggio delle orbite stazionarie risulta $r_n = n^2 h^2 / 4\pi^2 m e^2 = r_1 n^2$
 $n=1,2,3,\dots,\infty$ (numero quantico principale)
 $r_1 = 0.5292 \text{ \AA}$ (raggio di Bohr (dell'atomo di H))

Vediamo l'atomo di H secondo queste due equazioni

MODELLO QUANTISTICO DI BOHR PER L'ATOMO DI IDROGENO

$r_n = r_1 n^2$ $E_n = -E_1 / n^2$

$r_1 = 0.53 \text{ \AA}$
 $E_1 = -13.6 \text{ eV atomo}^{-1}$
 (1 eV atomo⁻¹ = $2.18 \times 10^{-18} \text{ J}$)

n	r_n (Å)	E_n (eV)
1	0.53	-13.6
2	2.12	-3.4
3	4.77	-1.5
4	8.48	-0.8

IDROGENO: SPETTRO ATOMICO E TRANSIZIONI ELETTRONICHE (QUANTISTICHE)

$\Delta E = E_i - E_f = h\nu = hc/\lambda$
Rydberg - Ritz
 $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$

IDROGENO: SPETTRO ATOMICO E TRANSIZIONI ELETTRONICHE (QUANTISTICHE)

- In condizioni ambientali, un campione macroscopico di idrogeno è costituito da *moltissimi* atomi, che si trovano praticamente tutti allo stato fondamentale ($n=1$).
- Fornendo energia al campione (es. scarica elettrica) si popolano gli stati eccitati ($n>1$) di un gran numero di atomi di idrogeno.
- Gli atomi eccitati tornano spontaneamente verso stati a minore energia emettendo radiazioni di frequenza caratteristica (*spettri di emissione*).

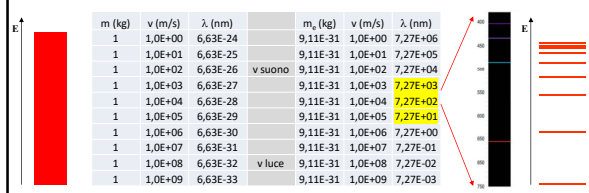
NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

- Natura dualistica della luce: radiazioni elettromagnetiche come onde, ma anche come fasci di «particelle» (fotoni).
- **De Broglie (1924)**: è vero anche il contrario? Cioè, le particelle possono comportarsi come onde?
- Einstein, studi sull'effetto fotoelettrico: il fotone ha $E = h\nu$, ma possiede anche quantità di moto $p = E/c$
- Quindi, per il fotone: $p = h\nu/c$ ed essendo $c = \lambda\nu$ si ha: $p = h/\lambda$ ovvero $\lambda = h/p$
- Se l'ipotesi di De Broglie è vera, allora per una particella di massa m che si muove con velocità v (quantità di moto $p = mv$) risulta:
$$\lambda = h/mv$$

NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

Relazione di De Broglie (1924) $\lambda = h/mv$ valida per qualunque particella

$h = 6.6262 \times 10^{-34}$ J s è piccolissima!!! Spettro visibile 400 – 800 nm



NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

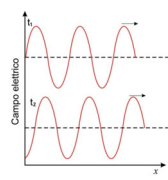
Relazione di De Broglie (1924) $\lambda = h/mv$ valida per qualunque particella

spiega il postulato di Bohr secondo cui le orbite permesse (stazionarie) per l'elettrone sono quelle per le quali

$$mvr = nh/2\pi \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

Nelle onde *progressive* i punti in cui l'ampiezza è nulla si propagano nello spazio (velocità di propagazione dell'onda).
 Le onde *progressive* trasportano energia.



NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

Relazione di De Broglie (1924) $\lambda = h/mv$ valida per qualunque particella

spiega il postulato di Bohr secondo cui le orbite permesse (stazionarie) per l'elettrone sono quelle per le quali

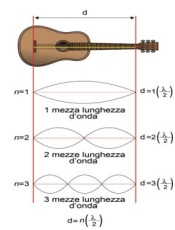
$$mvr = nh/2\pi \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

Le onde *stazionarie* invece oscillano tra punti fissi (*nod*), sono confinate nello spazio e *non* trasportano energia.

Es. per una corda di chitarra di lunghezza d gli stati stazionari implicano che

$$d = n(\lambda/2) \quad n = 1, 2, 3, 4 \dots$$



NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

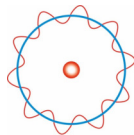
Relazione di De Broglie (1924) $\lambda = h/mv$ valida per qualunque particella

spiega il postulato di Bohr secondo cui le orbite permesse (stazionarie) per l'elettrone sono quelle per le quali

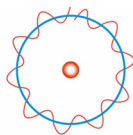
$$mvr = nh/2\pi \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

Gli stati stazionari per l'elettrone nell'atomo di H secondo Bohr sono quelli per cui la circonferenza dell'orbita è un multiplo intero della lunghezza d'onda (Fig. a)



a) L'onda ricade in fase dopo l'orbita



b) L'onda non ricade in fase dopo l'orbita

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Quindi $2\pi r = nh/mv$ da cui $mvr = nh/2\pi$ (Bohr)

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG (1927)

Se una particella si comporta come un'onda (Es. che si propaga in tutto lo spazio circostante) non è possibile stabilirne la posizione in un punto

Non è possibile determinare simultaneamente la posizione (x) e la quantità di moto (mv) di una particella

In particolare Heisenberg dimostrò che

$$\Delta x \times m\Delta v \geq h/2\pi = \hbar \quad (\text{acca tagliato})$$

Il principio vale per qualsiasi corpo, ma per masse «ordinarie» (Es. 1 kg):

$$\Delta x \times \Delta v \geq \hbar/2\pi m = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J s} / (2\pi \times 1 \text{ kg}) = 1.06 \times 10^{-34} \text{ J s/kg}$$

è piccolissimo, così conoscendo la velocità con incertezza $\Delta v = 10^{-6} \text{ m/s}$

$$\Delta p = m\Delta v = 1 \text{ kg} \times 10^{-6} \text{ m/s} = 10^{-6} \text{ kg m/s}$$

quindi $\Delta x \geq \hbar/2\pi m\Delta v = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J s} / (2\pi \times 10^{-6} \text{ kg m/s}) = 1.06 \times 10^{-28} \text{ m}$

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG (1927)

Se una particella si comporta come un'onda (Es. che si propaga in tutto lo spazio circostante) non è possibile stabilirne la posizione in un punto

Non è possibile determinare simultaneamente la posizione (x) e la quantità di moto (mv) di una particella

In particolare Heisenberg dimostrò che

$$\Delta x \times m\Delta v \geq h/2\pi = \hbar \quad (\text{acca tagliato})$$

Invece per un elettrone, assumendo che la sua velocità sia

$3 \times 10^7 \text{ m/s}$ (N.B. $c/10$), nota con incertezza dell'1 %, si calcola:

$$\Delta x \geq \hbar/2\pi m\Delta v = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J s} / (2\pi \times 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 3 \times 10^5 \text{ m/s}) = 3.9 \times 10^{-10} \text{ m} \approx 4 \text{ \AA}$$

che è il doppio dell'ordine di grandezza del diametro dell'atomo di idrogeno

FISICA CLASSICA – FISICA QUANTISTICA

Il dualismo onda-corpuscolo ed il principio di indeterminazione di Heisenberg rimettono in discussione i fondamenti della meccanica classica:

- si perdono i concetti di traiettoria (orbita) e di posizione;

- data la natura ondulatoria degli elettroni non tutte le occupazioni spaziali sono ugualmente probabili (Es. nell'atomo di idrogeno è più probabile che l'elettrone si trovi vicino al nucleo piuttosto che lontano da esso);

E' in questa *visione probabilistica* del moto dell'elettrone che si è sviluppata la *meccanica quantistica*.