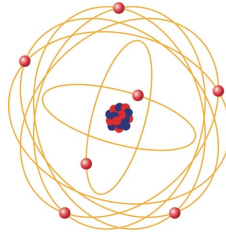


## STRUTTURA FISICA DEL NUCLEO ATOMICO

### Modelli atomici

*L'atomo di Rutherford é in contraddizione con la fisica classica*

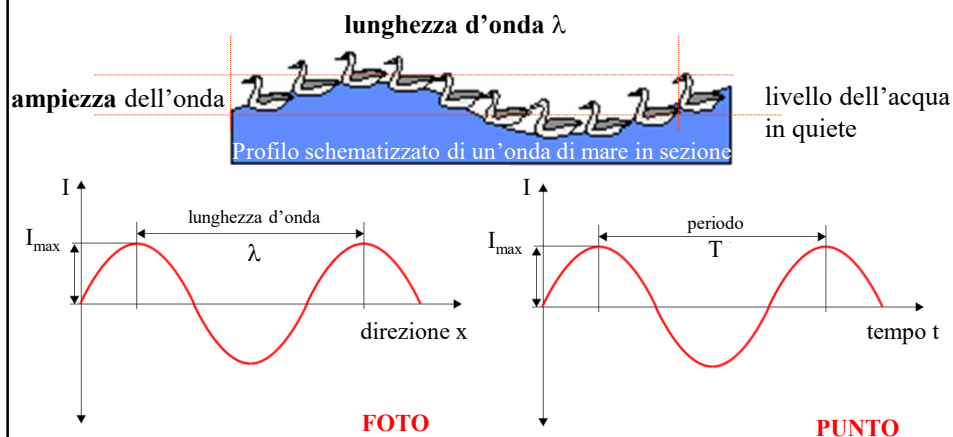
Una carica ruotante emette un campo elettromagnetico (leggi *energia*) perciò l'elettrone dovrebbe collassare sul nucleo in un tempo brevissimo



Gli atomi di un elemento sottoposti a scarica elettrica emettono luce di colore caratteristico, diverso da quello degli atomi degli altri elementi

E' necessario approfondire la conoscenza delle radiazioni elettromagnetiche

## ONDE



**Periodo (T)** : tempo che intercorre fra due valori *in fase* dell'intensità dell'onda

**Frequenza (v)** : numero di creste (n) che passano per un punto P nel tempo t

$$v = n/t = T^{-1} \text{ (essendo } T = t/n)$$

**Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )** : spazio percorso dall'onda in un periodo T

**Velocità dell'onda (v)** : spazio percorso da una cresta nel tempo t  $v = \lambda/T = \lambda v$

## ONDE (RADIAZIONI) ELETTROMAGNETICHE

variazione del campo elettrico

campo elettrico oscillante

carica vibrante

distanza dalla carica vibrante

Velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto

$c = 2.9977 \times 10^8 \text{ m/s}$  (costante universale)

$c = \lambda/T = \lambda \nu$        $\nu = c/\lambda$

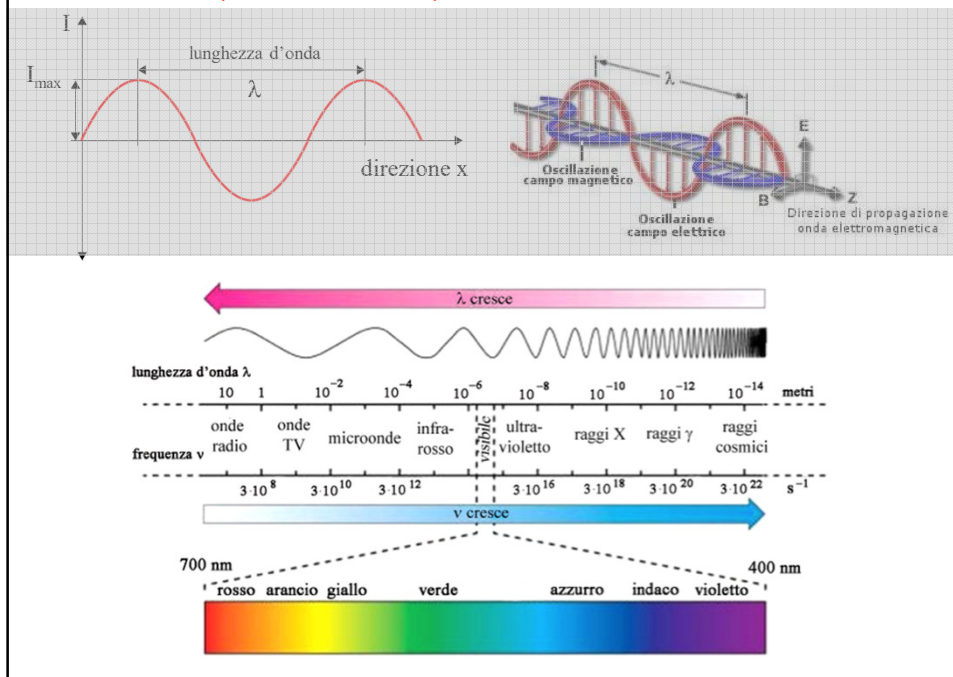
## ONDE (RADIAZIONI) ELETTROMAGNETICHE

Tipo di radiazione	Radio	Microonde	Infrarosso	Visibile	Ultravioletto	Raggi X	Raggi Gamma
Lunghezza d'onda (m)	$10^3$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-12}$
Scala approssimativa della lunghezza d'onda	Edifici	Esseri umani	Farfalle	Punta di un ago	Protozoi	Molecole	Atomi
Frequenza (Hz)	$10^4$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{16}$	$10^{18}$	$10^{20}$
Temperatura degli oggetti alla quale questa radiazione è la più intensa		1 K -272 °C	100 K -173 °C	10,000 K 9,727 °C	10,000,000 K	10,000,000 K	-10,000,000 °C

$\lambda$  CRESCE

$\nu$  CRESCE

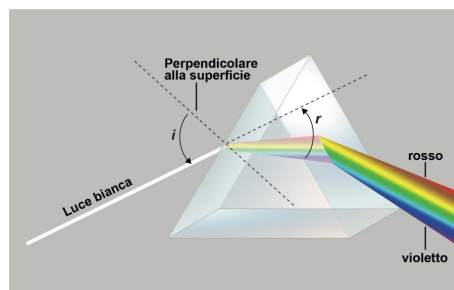
## ONDE (RA DIAZIONI) ELETTROMAGNETICHE



## PROPRIETA' ONDULATORIE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

L'insieme delle radiazioni visibili (400-700 nm) produce luce bianca

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

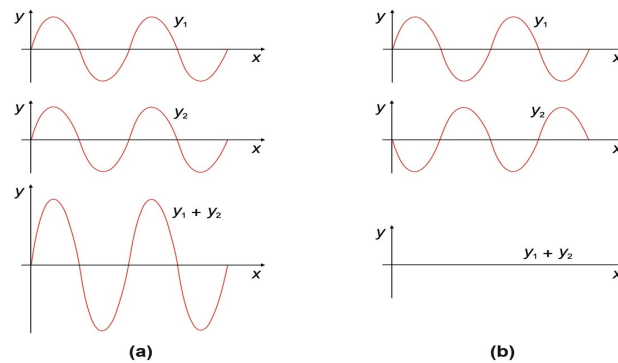


## PROPRIETA' ONDULATORIE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

### INTERFERENZA

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

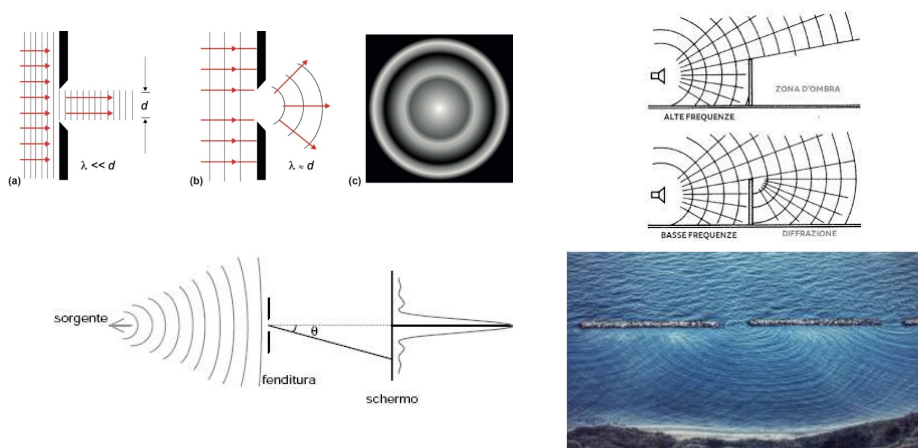
- a) Interferenza costruttiva (*onde in fase*)
- b) Interferenza distruttiva (*onde in opposizione di fase*)



## 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

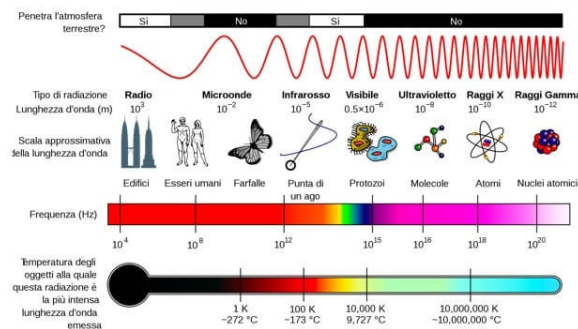


## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

### *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)



## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

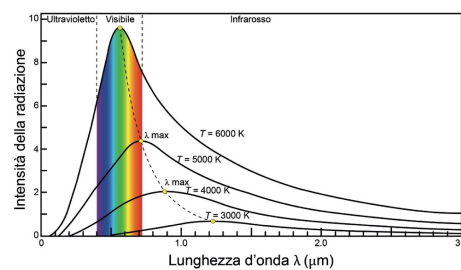
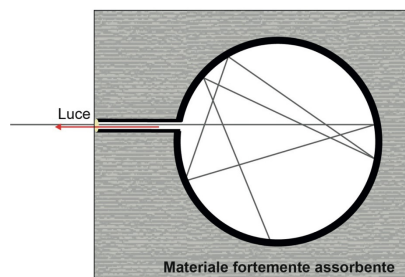
### *Il corpo nero*

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.

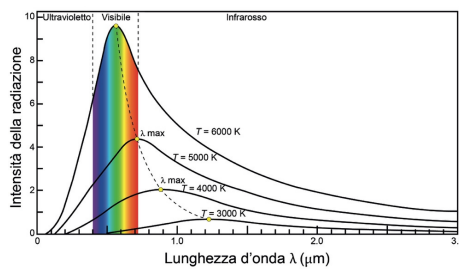
La radiazione in uscita dipende solo dalla temperatura.



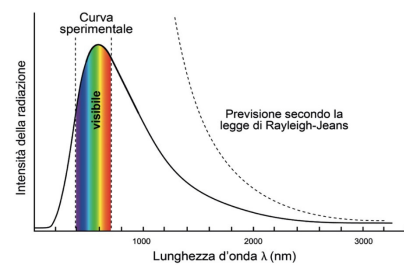
## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

### Il corpo nero

#### Sperimentale



#### Interpretazione ondulatoria (catastrofe ultravioletta)



## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

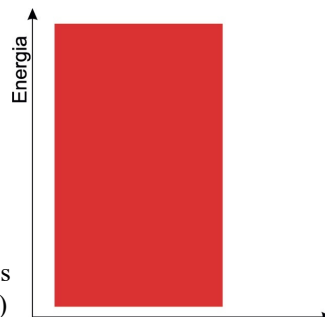
### Il corpo nero ipotesi di Planck (1901)

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

a) Interpretazione classica

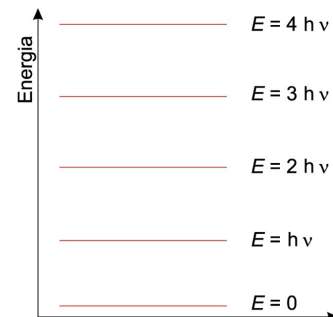


$h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J s}$   
(costante di Planck)



(a)

b) Interpretazione quantistica



(b)

## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

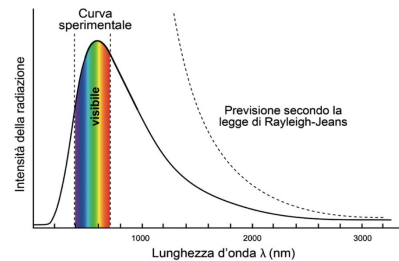
### *Il corpo nero ipotesi di Planck (1901)*

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  $h\nu$ :

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

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

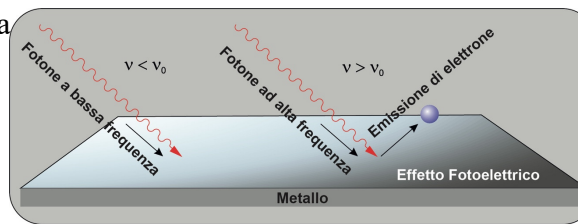


## PROPRIETA' QUANTISTICHE DELLE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

### *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*  $\nu_0$ , 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*

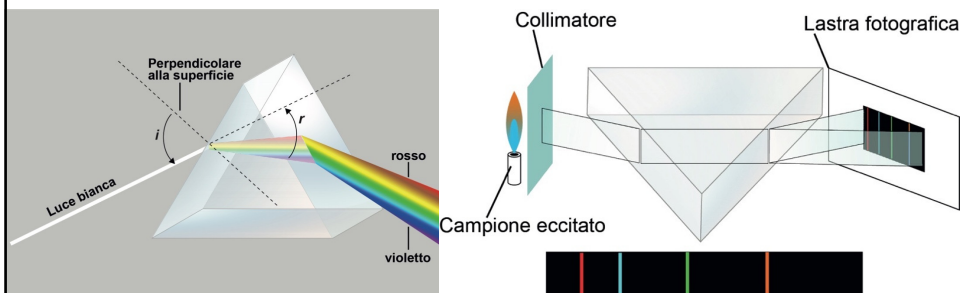
**Einstein (1905)**: qualunque radiazione elettromagnetica di frequenza  $\nu$   
trasporta energia ( $E$ ) in pacchetti discreti o *quanti* ( $E = h \nu$ ), come  
se fosse costituita da un fascio di *particelle* senza massa, i *fotoni*,  
ciascuno in grado di trasportare la stessa quantità di energia.

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



## SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

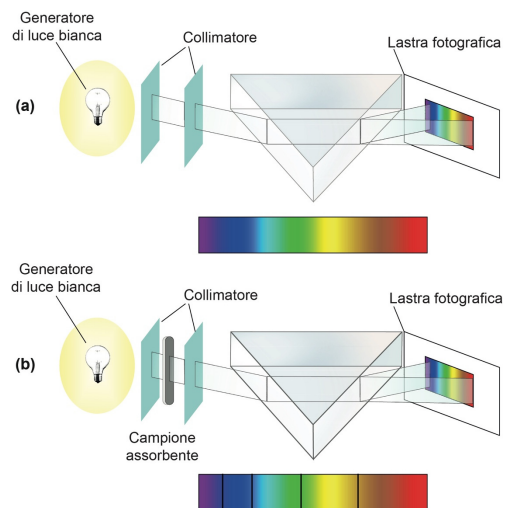
*Quando si fornisce energia ad una sostanza questa viene eccitata ed emette diverse radiazioni il cui insieme costituisce lo spettro di emissione di quella sostanza*



**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

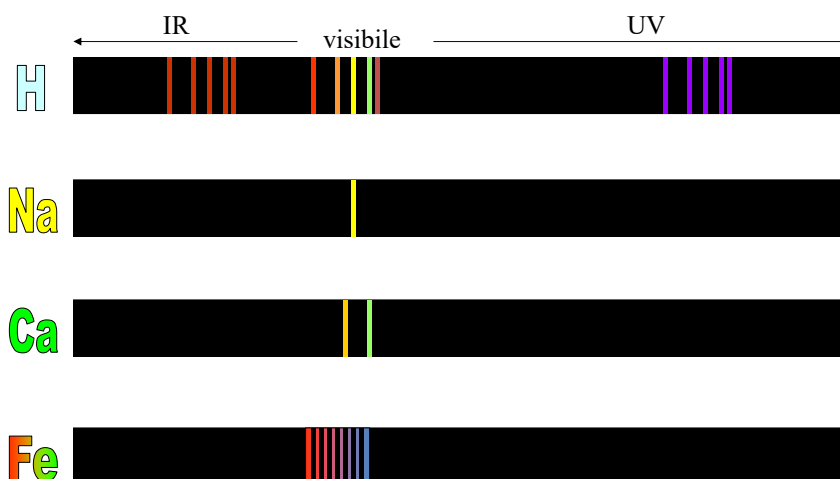
*In maniera  
«complementare», la luce  
bianca che attraversa un  
campione di sostanza,  
assorbe le stesse  
frequenze dello spettro di  
emissione caratteristiche  
di quella sostanza  
(spettro di assorbimento)*



### SPETTRO DISCONTINUO (A RIGHE)

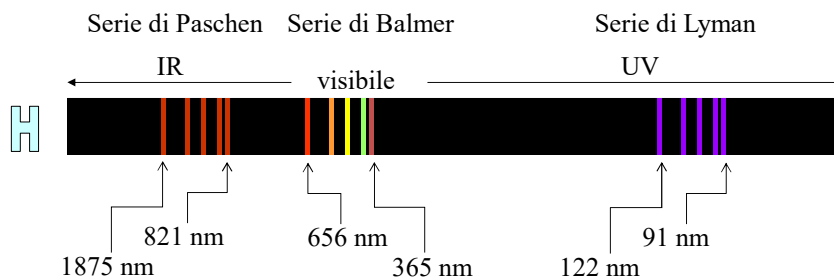
## SPETTROSCOPIA E SPETTRI ATOMICI

*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

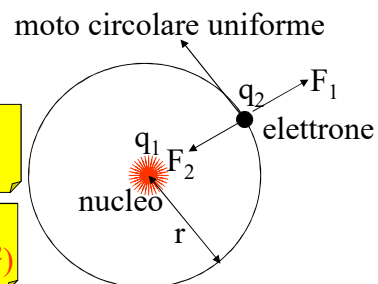
### Bohr (1913)



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 MONOELETTRONICI (DETTI IDROGENOIDI, TIPO $\text{He}^+$ , $\text{Li}^{2+}$ , $\text{Be}^{3+}$ , etc)



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

QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE

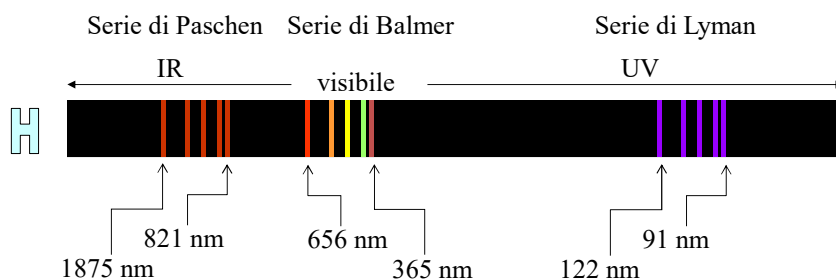
L'elettrone in stato stazionario (orbita r permessa) non irradia energia (contrariamente alla fisica classica).

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

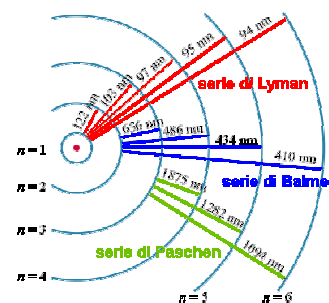


### Rydberg - Ritz (1890)

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

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  $E_n = -2\pi^2me^4/n^2h^2 = -E_1/n^2$

$n=1,2,3\dots\infty$  (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<sup>-</sup> a distanza infinita dal nucleo ha  $E_\infty$  nulla.

Il raggio delle orbite stazionarie risulta  $r_n = n^2h^2/4\pi^2me^2 = r_1 n^2$

$n=1,2,3\dots\infty$  (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

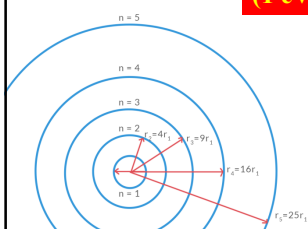
$$r_n = r_1 n^2$$

$$r_1 = 0.53 \text{ \AA}$$

$$E_1 = -13.6 \text{ eV atomo}^{-1}$$

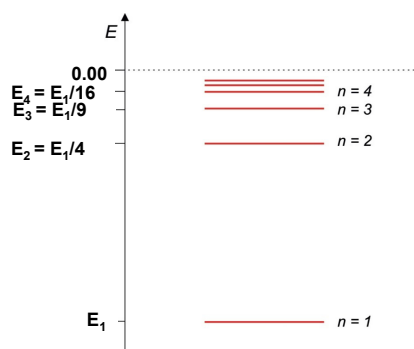
$$(1 \text{ eV atomo}^{-1} = 2.18 \times 10^{-18} \text{ J})$$

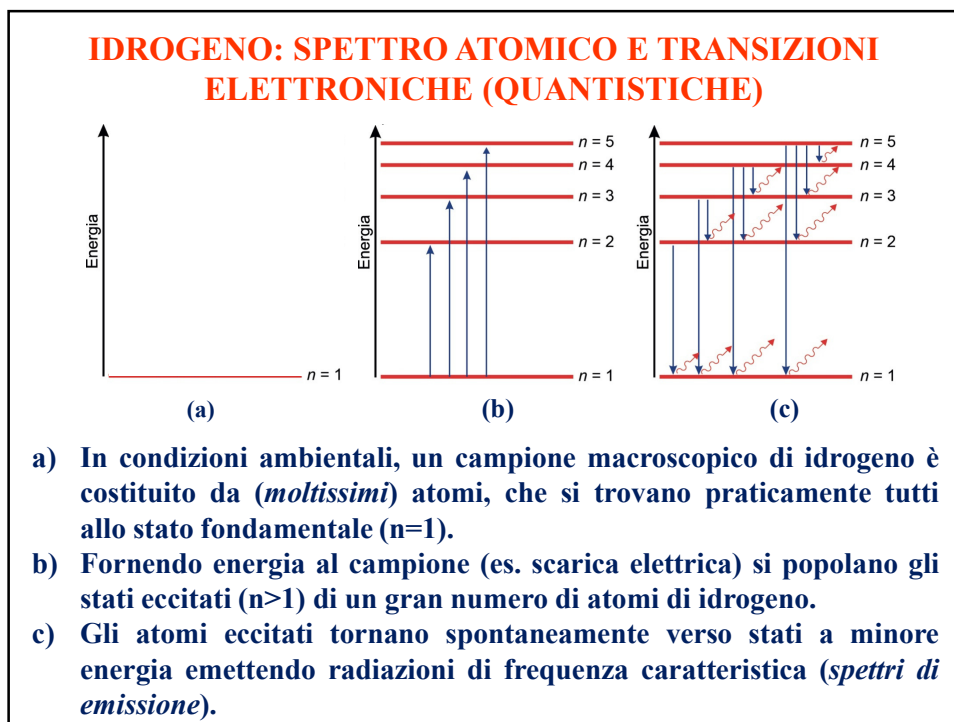
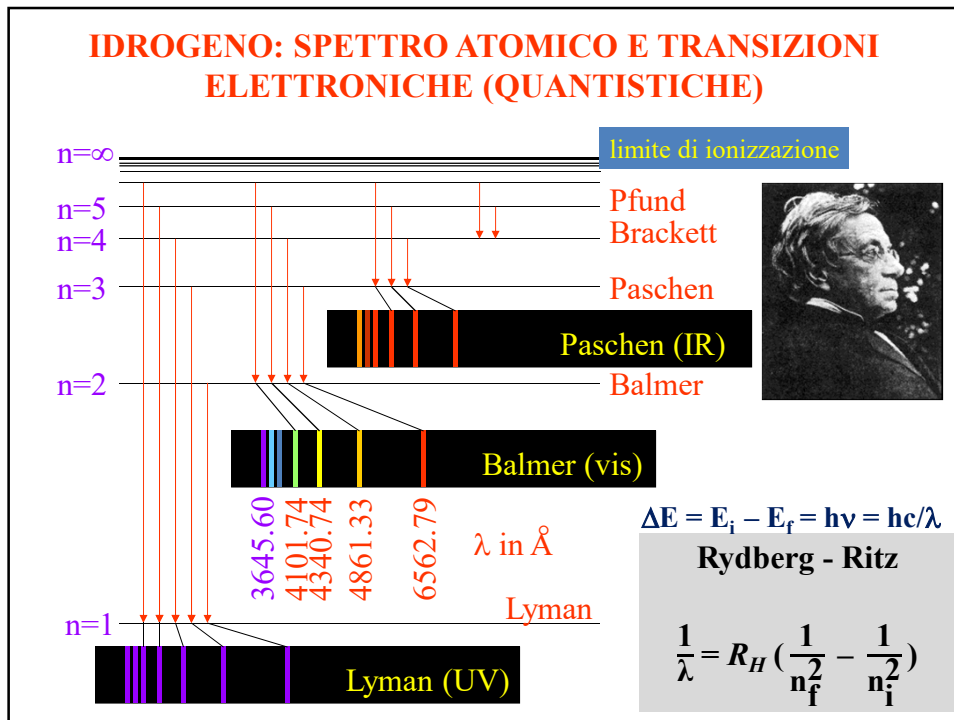
$$E_n = -E_1/n^2$$



$n=1,2,3\dots\infty$

n	$r_n(\text{\AA})$	$E_n(\text{eV})$
1	0.53	-13.6
2	2.12	-3.4
3	4.77	-1.5
4	8.48	-0.8





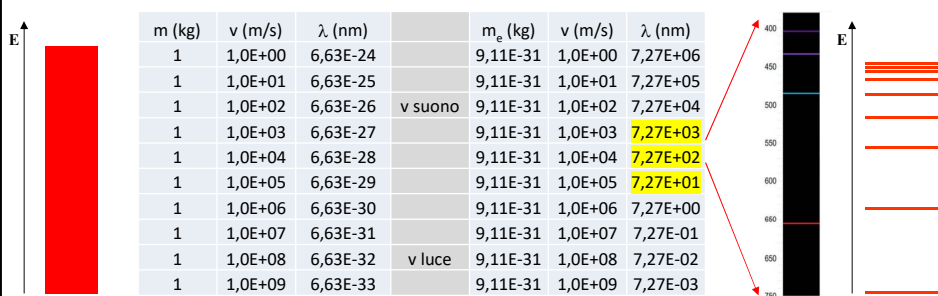
## NATURA ONDULATORIA DELLE PARTICELLE

- 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

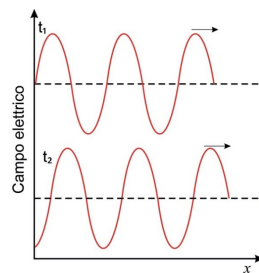
spiega il postulato di Bohr secondo cui le orbite permesse (stazionarie) per l'elettrone sono quelle per le quali

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

**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

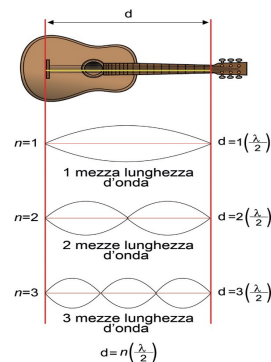
$$mvr = nh/2\pi \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

**QUANTIZZAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE**

Le onde *stazionarie* invece oscillano tra punti fissi (*nodi*), 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

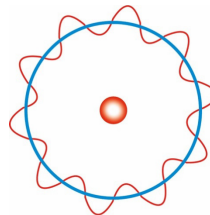
Relazione di De Broglie (1924)  $\lambda = h/mv$  valida per qualunque particella

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

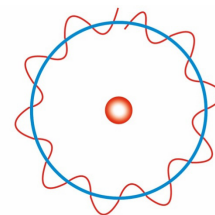
$$mvr = nh/2\pi \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

**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):

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

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

## 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

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

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

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*.