



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Laboratori Nazionali di Frascati

incont  
ri di  
fisica

A red, intricate, and somewhat chaotic visualization of particle tracks or detector data is positioned behind the text 'incont ri di fisica'. The visualization consists of numerous thin, intersecting lines and small dots, creating a dense, web-like structure.

# Introduzione alla fisica moderna

Frascati, 10 ottobre 2018

Susanna Bertelli • Università di Ferrara, LNF INFN

# QUANTUM THEORY

Principali caratteristiche degli atomi (dimensioni, massa, costituenti)

Descrizione di alcune proprietà *puzzling* dei sistemi microscopici: luce e atomi

Nuova teoria: meccanica quantistica 1900-1930

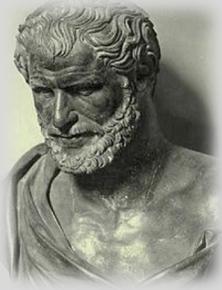


*Tavola periodica degli elementi*

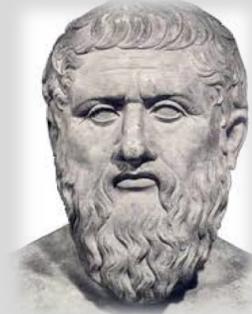
*Molecole*

*Particelle subatomiche*

# ATOMI E COSTITUENTI



*Democrito*  
460 a.C. – 370 a.C.



*Platone*

*360 a.C. Timeo, la prima teoria degli elementi*

Proust 1799 Legge delle proporzioni definite

*quando due o più elementi reagiscono per formare un determinato composto, si combinano sempre secondo proporzioni in massa definite e costanti*



*John Dalton*  
1766-1844

*Interpreta la legge delle proporzioni definite come l'evidenza dell'esistenza degli atomi*

# ATOMI E COSTITUENTI

Teoria cinetica dei gas: assume che un gas è fatto di molecole in rapido movimento

Applicando le leggi di Newton al moto delle molecole si possono spiegare diverse proprietà dei gas  
Legge di Boyle, viscosità, moto browniano.

Chimica e Fisica

Teoria cinetica dei gas fornisce informazioni sulle dimensioni e le masse delle molecole.

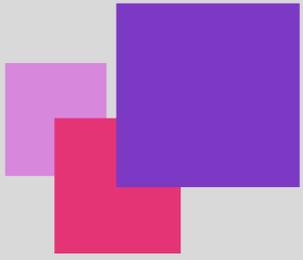
1885 Loschmidt da considerazioni relative al libero cammino medio arriva a determinare dimensioni delle molecole ottenendo  $10^{-7}$  cm

Inizio 1900: la materia è fatta di elementi la cui unità più piccola sono gli atomi. Gli atomi possono raggrupparsi in molecole. Non abbiamo evidenze che gli atomi possano essere divisi.

# ATOMI E COSTITUENTI

1897 J.J. Thomson scopre la prima particella subatomica: l'elettrone.  
Per Thomson l'elettrone deve essere contenuto negli atomi e quindi  
l'atomo è divisibile.





# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

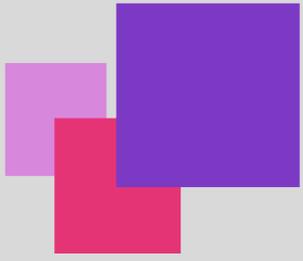
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



L'interesse per i tubi a scarica nasce in seguito ad un episodio del tutto accidentale osservato nel 1676 dall'abate **Jean Picard** (1620-1682). Trasportando un barometro aveva notato che ad ogni brusco movimento del mercurio il barometro si illuminava di una luce bluastra. Quali fossero le cause di questa luminescenza non era chiaro. Egli cercò così di spiegare il motivo di tale fenomeno ma riuscì solo a formulare ipotesi confuse .



**Francis Hauksbee** dal 1705 al 1709 studiò il cosiddetto "fosforo mercuriale" che talvolta emetteva luce, nel vuoto torricelliano, quando un barometro veniva agitato. Nei suoi studi giunse alla conclusione che causa della luminescenza non era il mercurio o il vetro ma l'attrito tra i due. Senza rendersene conto egli fece le prime ricerche sulle scariche elettriche nei gas rarefatti.

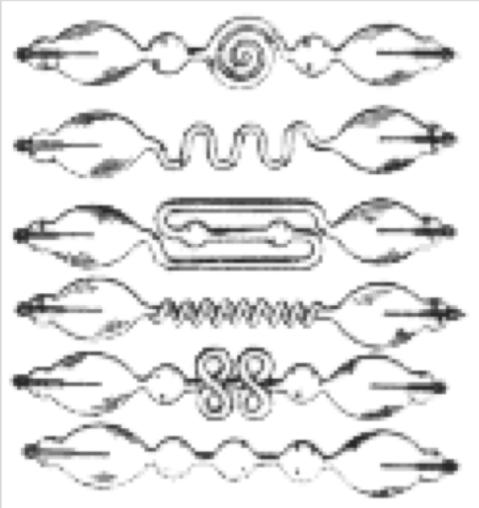


# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

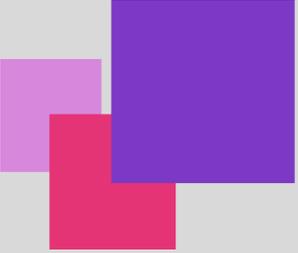
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



Nel 1857 **Heinrich Geissler** studiò le scariche elettriche nei gas rarefatti. Costruì a tale scopo il primo tubo a vuoto (tubo di Geissler). Era un tubo di vetro in cui era stato ottenuto il vuoto tramite una pompa al mercurio e al cui interno erano stati posti due elettrodi. Questi ultimi venivano poi collegati ad un rocchetto di Ruhmkorff. Geissler osservò che il tubo assumeva una colorazione azzurrognola.



Per capire l'origine di questo fenomeno costruì negli anni successivi una svariata molteplicità di tubi con forme molto particolari. Geissler osservò che con tali tubi la scarica elettrica non dipendeva dal gas utilizzato, da questo dipendeva solamente il colore della luce emessa. I tubi di Geissler sono considerati i predecessori dei tubi fluorescenti e al neon.



# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

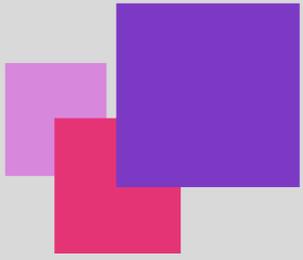
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



Uno strumento simile era stato creato qualche anno prima (poco prima del 1850) da **Auguste De La Rive** (1801-1873) per spiegare le analogie tra le aurore boreali e australi e le scariche elettriche. A questo scopo costruì uno strumento costituito da un tubo di vetro, al cui interno veniva fatto il vuoto, di forma ovoidale contenente due elettrodi sferici di ottone. Lo strumento veniva poi collegato ad un rocchetto di Ruhmkorff. Con questo dispositivo (uovo elettrico) De La Rive dimostrò la rotazione delle scariche elettriche nel vuoto a causa di un campo magnetico e quindi affermare che i movimenti rotatori osservati nelle aurore boreali sono dovuti al magnetismo terrestre.



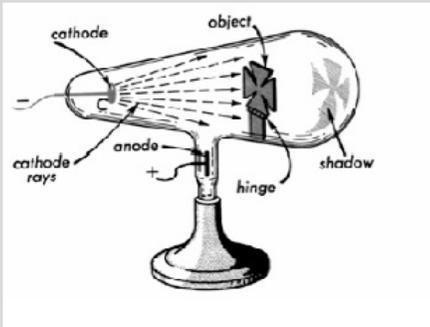
**Julius Plucker** (1801-1868) osservò che avvicinando un magnete al tubo di scarica la posizione del bagliore sulle pareti cambiava, deducendo così che la scarica veniva deviata dai campi magnetici. Egli osservò inoltre che la luminescenza che si produceva cambiava a seconda del vuoto che era stato fatto. Diminuendo la pressione del gas all'interno del tubo aveva osservato che la luminescenza del tubo diminuiva mentre il vetro opposto al catodo emanava una luce verdastra. Era cioè come se il catodo emettesse qualcosa e questa emissione raggiungesse la parte opposta al catodo.



# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

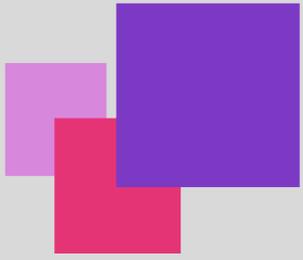
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes

1865-1869 Per studiare le scariche nei gas era necessario ottenere vuoti più spinti. Questo fu possibile negli anni sessanta del diciannovesimo secolo grazie ai miglioramenti apportati alla pompa di Geissler da Torpler e soprattutto da Sprengel. Gli studi di Plucker sulle scariche elettriche nei gas rarefatti furono continuati da un suo allievo **J.W. Hittorf** (1824-1914) Egli nei suoi esperimenti pose all'interno dei tubi a vuoto, nelle vicinanze del catodo, degli ostacoli costituiti da dei corpi solidi. Quello che osservò fu che questi corpi gettavano un'ombra nella parete del tubo opposta al catodo.



Egli concluse che ciò che il catodo emetteva si comportava in modo del tutto simile ai raggi luminosi e si propagava in linea retta. Si cominciano così ad affermare tra gli studiosi della radiazione catodica due diverse interpretazioni dei fenomeni osservati: una interpretazione corpuscolare e una ondulatoria.

Tubo a Croce di Malta.



# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

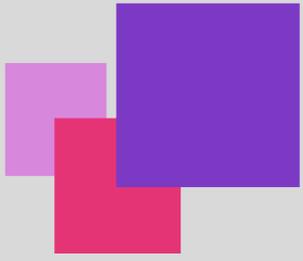
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



1875 Sostenitore della teoria corpuscolare della radiazione catodica fu anche l'inglese **William Crookes**. Egli si occupò di determinare la natura della radiazione catodica nelle scariche elettriche nei gas rarefatti. A questo scopo ideò una molteplicità di tubi a vuoto, tra questi va ricordato il tubo di Crookes con mulinello che sembrò fornire un'ulteriore conferma alla teoria corpuscolare.



All'interno di un tubo a vuoto si trova posto un mulinello a pale libero di muoversi lungo due rotaie. Applicando una differenza di potenziale agli elettrodi si notava che il mulinello cominciava a girare quando colpito dalla radiazione catodica.

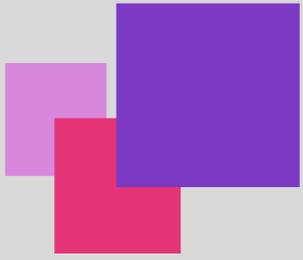


# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes

Nel 1886 **Eugene Goldstein** (1850-1930) scoprì i raggi canale. Con questo nome Goldstein volle indicare quei raggi luminosi che egli aveva osservato dietro a un catodo perforato in un tubo a vuoto quando avveniva una scarica elettrica. Anche essi però venivano deflessi da un campo magnetico.

**Joseph John Thomson** (1856-1940) condusse esperimenti sui raggi catodici generati all'interno dei tubi di Crookes. Questi vennero precedentemente utilizzati da Arthur Schuster a cui risultò che la massa delle particelle, che componevano i raggi generati, era molto inferiore rispetto a quella dell'idrogeno, e J. Perrin che dimostrò la negatività delle particelle che componevano questi raggi. In un primo esperimento utilizzò un tubo di Crookes con l'aggiunta di due piastre caricate in maniera opposta. Successivamente notò che il raggio formato subiva una deviazione verso la piastra positiva. Trasse così la conclusione che le particelle che formano questi raggi catodici sono cariche negativamente e, in seguito ad ulteriori prove, che sono uguali a prescindere dal gas utilizzato.

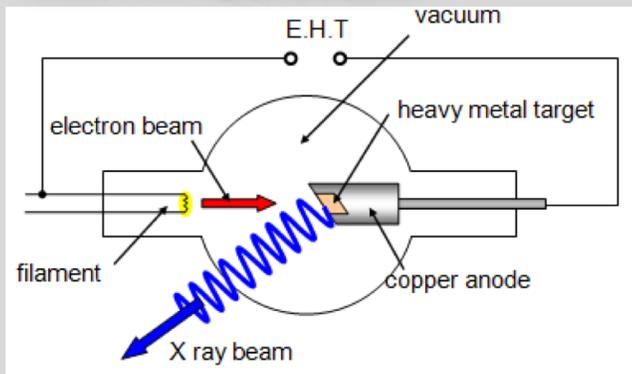


# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes

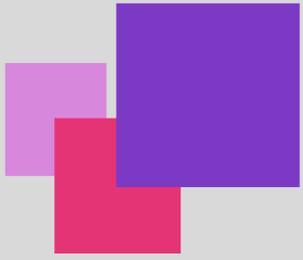


Moltissimi fisici di fine Ottocento tra cui Roentgen si interessarono alla natura dei *raggi catodici* (1) ed effettuarono esperimenti di vario tipo per investigarla. La scoperta dei raggi X fu casuale. Il suo artefice, Wilhelm Conrad Roentgen, durante i suoi esperimenti era solito annotare le sue osservazioni su un quaderno per appunti, utilizzando come segnalibro la chiave di un cassetto della scrivania.



Un giorno, nella primavera del 1895, aveva distrattamente appoggiato il quaderno con la chiave su alcune lastre fotografiche mentre effettuava degli esperimenti con i raggi catodici. Dopo aver fatto qualche esperimento, era sceso nel cortile dell'Istituto a fotografare alcuni fiori. Il giorno seguente trovò, tra le fotografie dei fiori che aveva sviluppato, una foto che raffigurava la chiave della sua scrivania. Cercò per lungo tempo di spiegare questo fatto ma non vi riuscì.

Nell'autunno dello stesso anno eseguì un esperimento con un tubo di Crookes. Roentgen stava studiando elettroni accelerati da una differenza di potenziale che colpiscono un bersaglio metallico.



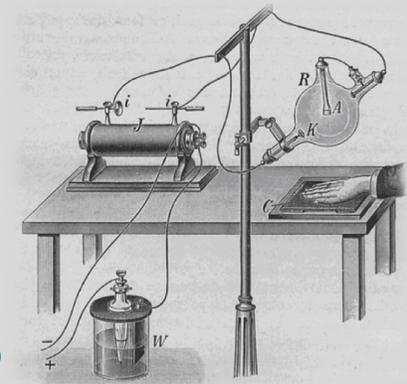
# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

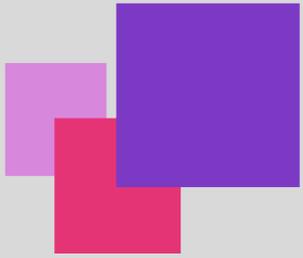
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



Egli osservò una luce verde proveniente da un pezzo di cartone ricoperto da una sostanza luminescente se colpita da luce, ma la stanza era buia e non capì quale fosse la sorgente luminosa responsabile, intuì però che doveva essere in rapporto all'esperimento che stava facendo, poiché la luminescenza scompariva o appariva a seconda se nel tubo a vuoto veniva o meno fatta passare corrente. Roentgen ripeté l'esperimento numerose volte e arrivò alla conclusione che doveva trattarsi

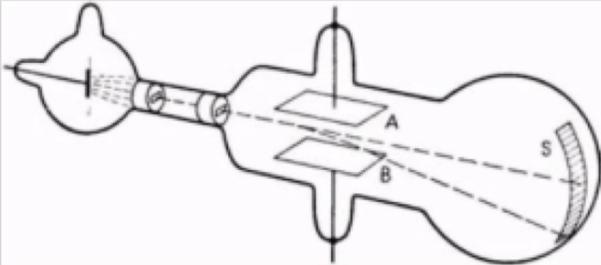
di raggi nuovi originatisi dall'interazione dei raggi catodici, all'interno del tubo. Poiché questi raggi erano sconosciuti li chiamò raggi X. Per prima cosa cercò di stabilire "quanto" quei raggi fossero penetranti. Inizialmente pose tra il tubo e la lastra vari oggetti di diverso spessore e i raggi sembravano oltrepassare Tutti questi fino a che non mise una scatoletta di pesi di piombo e sulla lastra fotografica comparve chiaramente la loro sagoma. Quasi istintivamente Roentgen mise la propria mano davanti ai raggi e si accorse che sullo schermo si delineavano nitide le ossa della mano: ciò significava che i raggi X attraversavano i tessuti molli ma non le ossa. Roentgen intuì così l'importante uso che si poteva fare dei raggi X nella diagnosi medica. La prima vera radiografia della storia fu effettuata dallo scienziato che immortalò la mano sinistra della moglie Anna Bertha.





# LE SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS RAREFATTI

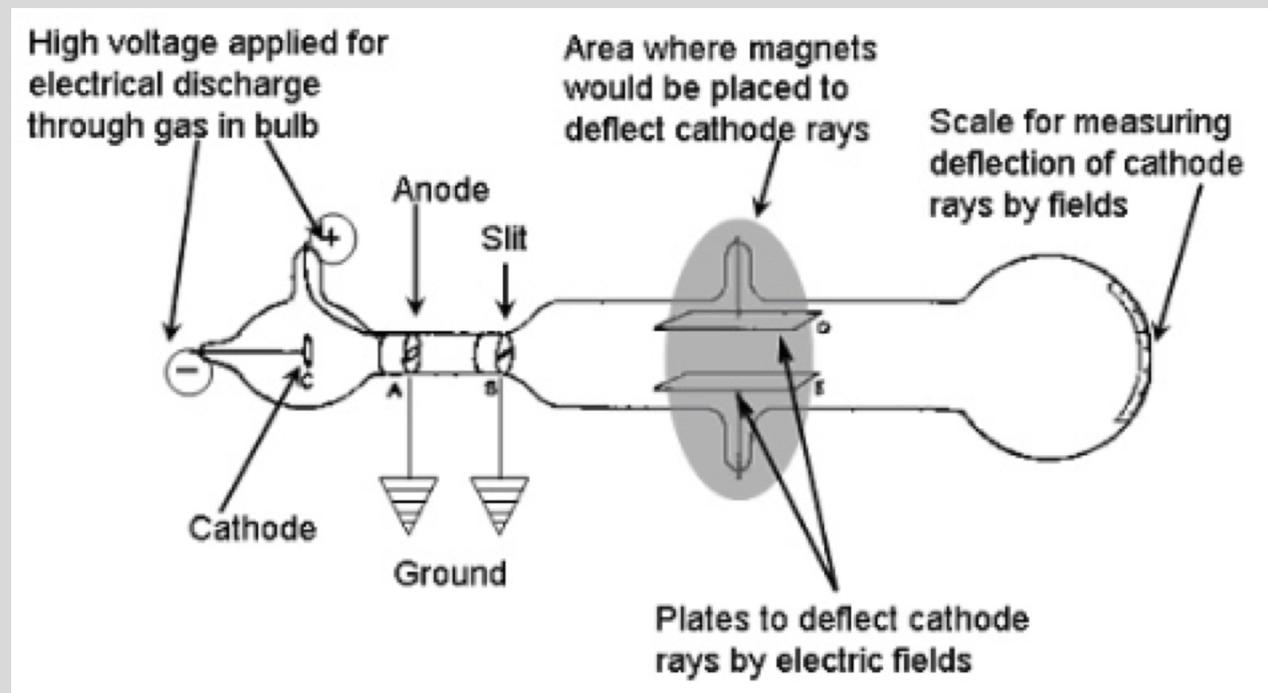
Tubi a vuoto di Geissler e tubi di Crookes



Thomson poi effettuò un altro esperimento per determinare il rapporto tra carica e massa (velocità): sottopose, contemporaneamente, i raggi catodici a due campi uno elettrico ed uno magnetico. Riuscì così a misurare questo rapporto.

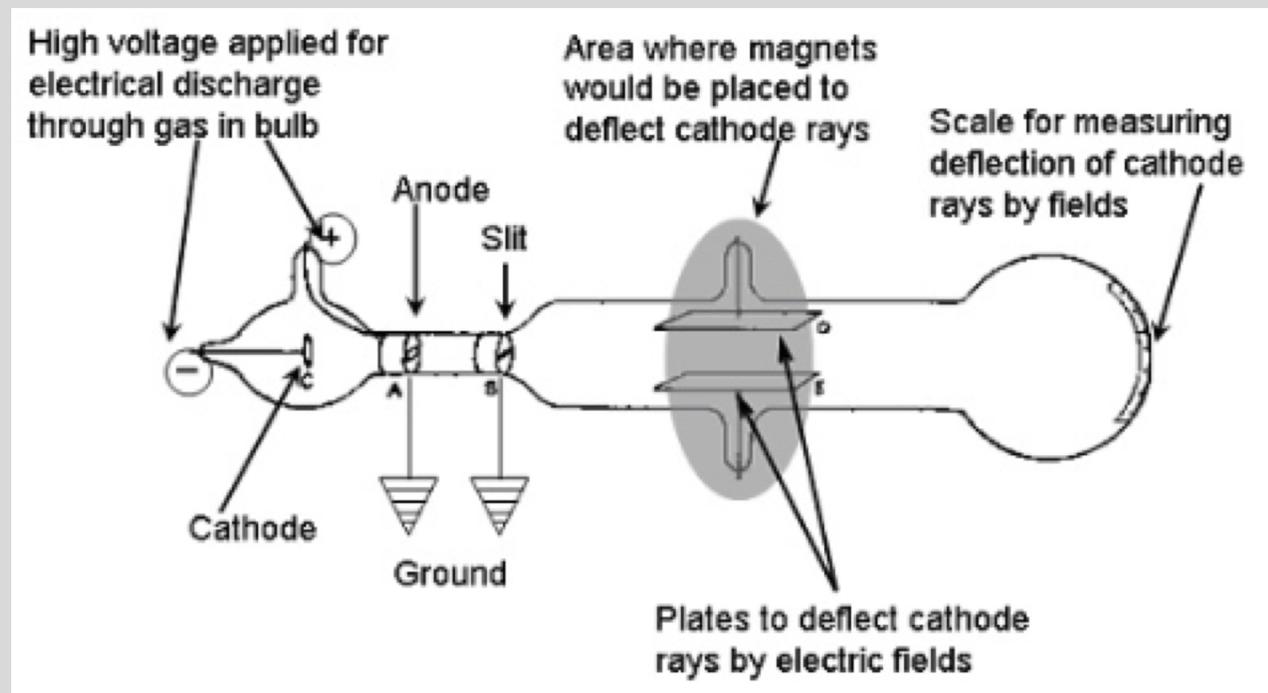
Successivamente osservando la migrazione di gocce di nebbia cariche in campo elettrico determinò la carica dell'elettrone (la massa). Nacque così l'elettrone come caratteristica intrinseca della materia. Per la scoperta dell'elettrone vinse il premio Nobel nel 1906

# ATOMI E COSTITUENTI



Quando viene applicato un elevato potenziale tra catodo e anodo, alcuni atomi del gas ionizzano e si verifica una scarica. Gli ioni positivi che colpiscono il catodo emettono elettroni che vengono accelerati verso l'anodo.

# ATOMI E COSTITUENTI



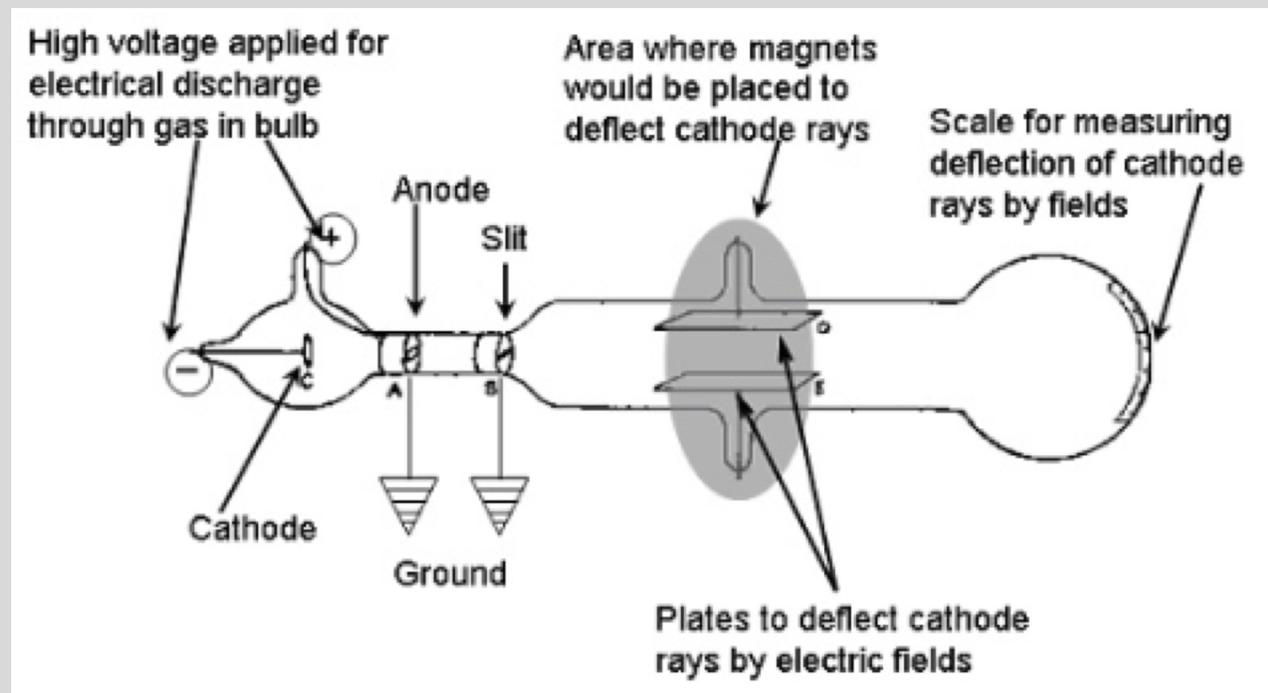
Thomson misurò la velocità dei raggi catodici applicando  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$ . La forza che agisce su ogni elettrone è:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- 1) Prima applicò solo  $\mathbf{E}$  misurando la deflessione degli elettroni
- 2) Rimuove  $\mathbf{E}$  e applica un campo trasversale  $\mathbf{B}$  finché la deflessione dovuta a  $\mathbf{B}$  non uguaglia quella dovuta a  $\mathbf{E}$ , condizione  $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

Modo alternativo compensazione, accendo  $\mathbf{E}$  e configuro  $\mathbf{B}$  per compensare i rispettivi effetti sul moto delle cariche per farle emergere lungo la stessa direzione di entrata.

# ATOMI E COSTITUENTI



Applicando **B** gli elettroni si muovono in un'orbita circolare,  $F_B$  forza centripeta

$$evB = mv^2 / R, \quad R = mv / (eB) \rightarrow m/e = BR / v$$

Thomson eseguì le stesse misure con gas diversi ed elettrodi di materiali diversi e il rapporto mass-to-charge era sempre lo stesso, si trattava di particelle uguali contenute in tutti gli atomi.  $m/e$  per gli elettroni è 2000 volte più piccolo di  $m/e$  per ioni idrogeno. Da qui dedusse che gli elettroni dovevano avere una massa più piccola o una carica più grande.

# ATOMI E COSTITUENTI



1909 Esperimento di Millikan

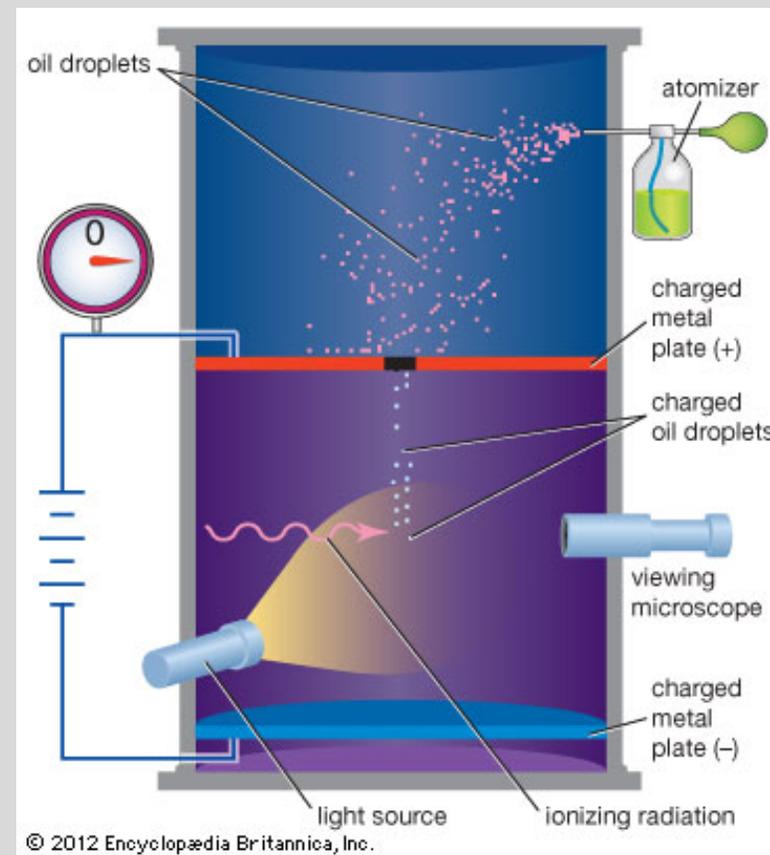
Piccole gocce di olio dotate di carica vengono fatte cadere per gravità tra armature di un condensatore. L'intensità del campo elettrico viene modulata in modo che le gocce rimangono sospese. La forza di gravità  $mg$  uguale e opposta a  $qE$ , ne segue  
$$q=mg/E$$

La massa della goccia veniva determinata misurando la velocità finale della goccia in assenza di  $E$ . Dalla meccanica dei fluidi:  
La velocità finale di una sfera su cui agisce una forza costante  $F$  è:  
$$v= F/ (6 \pi r \eta)$$
 con  $\eta$  viscosità del gas

da  $F=mg = 4/3 \pi r^3 \rho g$  unendo le equazioni:

$$v=2r^2 \rho g/(9 \eta)$$

Noti:  $\rho g \eta$ , la misura di  $v$  consente la misura di  $m$  e quindi di  $q$



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

# ATOMI E COSTITUENTI

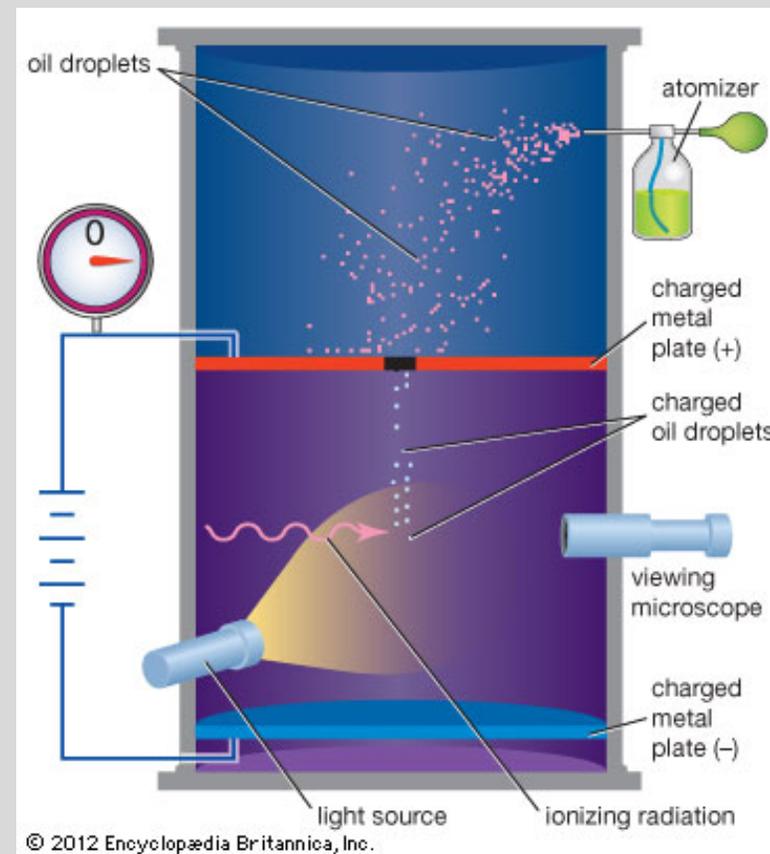


## 1909 Esperimento di Millikan

Alcune volte le gocce si muovono improvvisamente su o giù, ovvero hanno acquistato un extra ione dall'aria. Millikan imparò a cambiare la carica della goccia ionizzando l'aria, con raggi X

In questo modo poteva misurare non solo la carica iniziale ma Anche la variazione di carica dovuta all'acquisto di extra ioni positivi o negativi. Usò diversi liquidi e diverse procedure per cambiare la carica e tutti questi cambiamenti erano multipli interi di un'unità fondamentale  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Che questa unità coincidesse con quella dell'elettrone venne verificato evacuato l'aria dall'apparato. Con poche molecole d'aria si riducono gli ioni che la goccia può acquistare. Millikan osservò che i raggi X potevano ancora Cambiare il segno della carica delle gocce ma solo nella direzione di aumento della carica positiva. Interpretò questo dicendo che i raggi X stavano strappando e dalle gocce. Visto che la variazione della carica era multipla di  $e$ , e doveva essere la carica dell'elettrone.



# ATOMI E COSTITUENTI

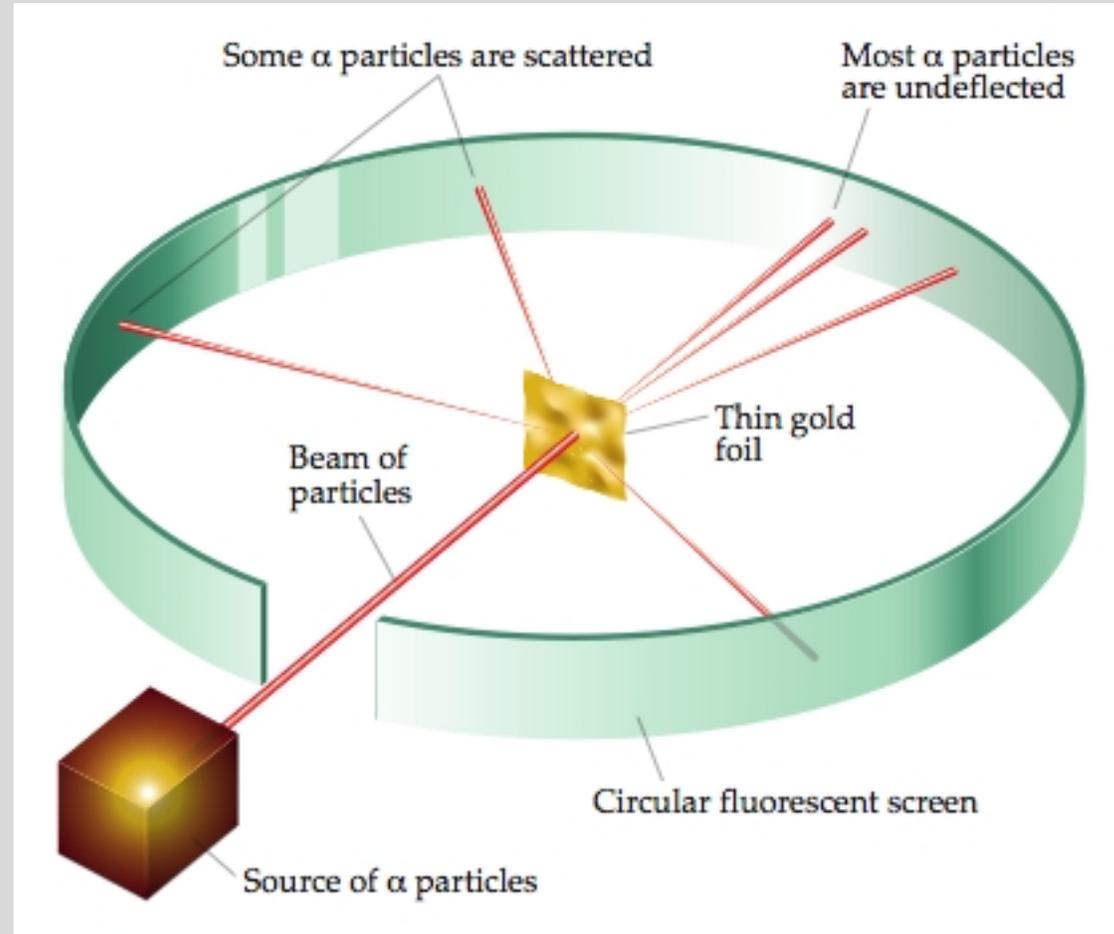


Si determinò la massa dell'elettrone  
 $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

# ATOMI E COSTITUENTI



Ernest Rutherford



# SPETTRI ATOMICI

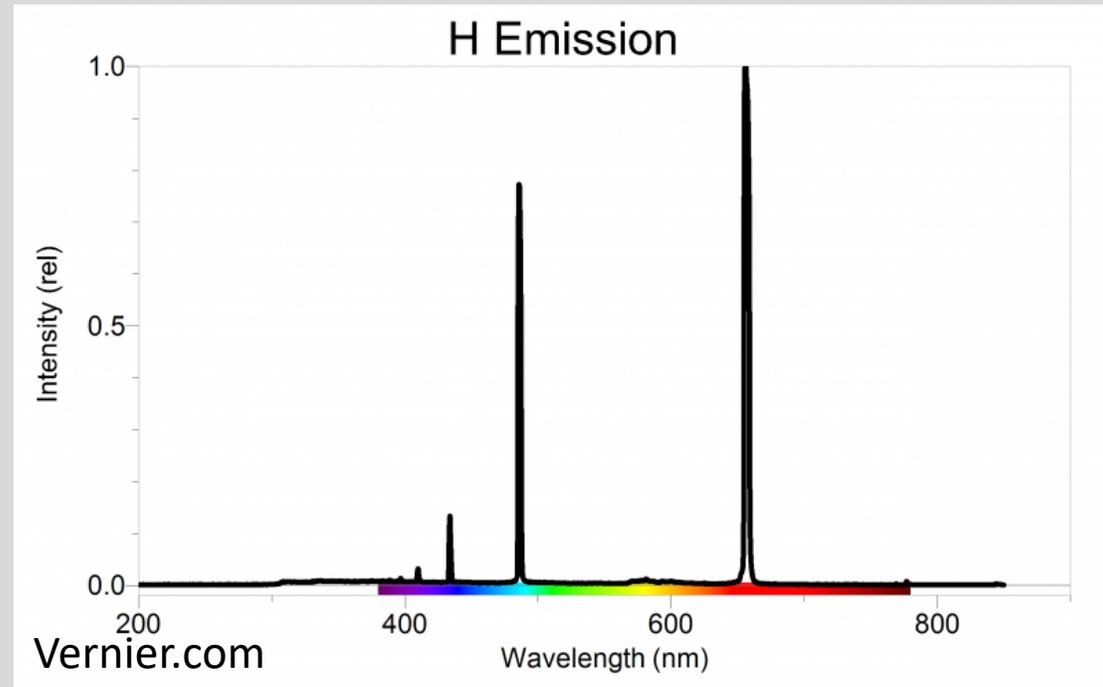
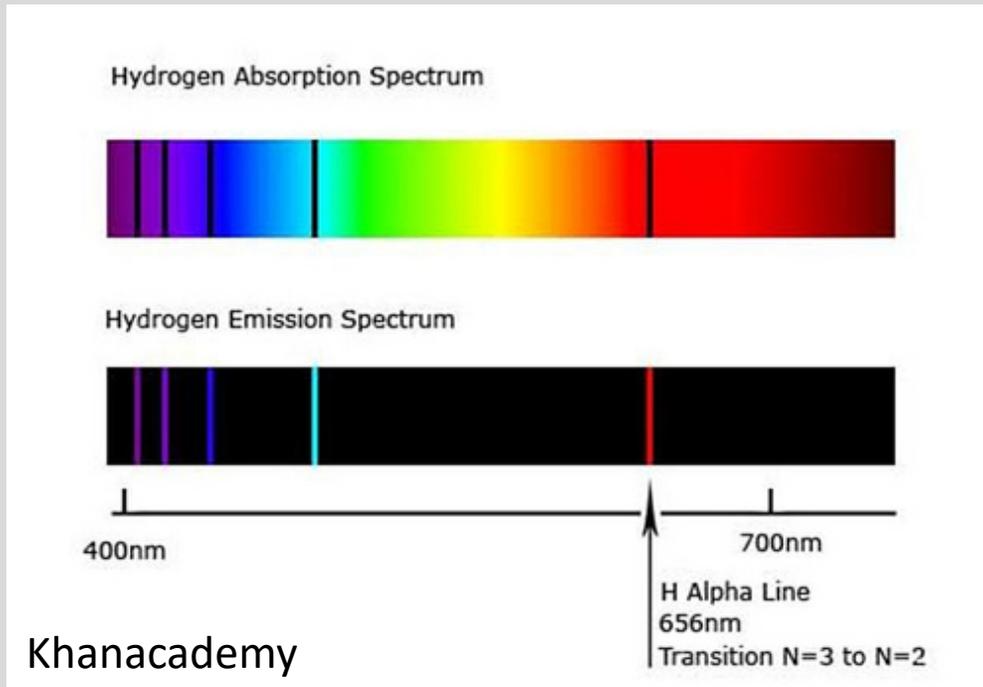


Newton, 1666



Fraunhofer, 1814

# SPETTRI ATOMICI

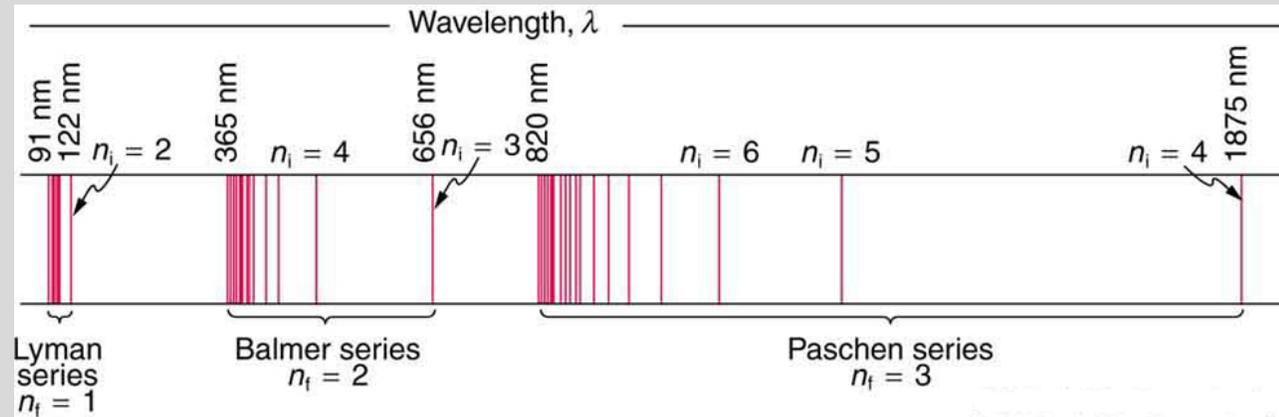


# SPETTRI ATOMICI

Serie di Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$n=3,4,5$  con  $R = 1.097 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$



Tutte sintetizzate da:

Formula di Rydberg

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

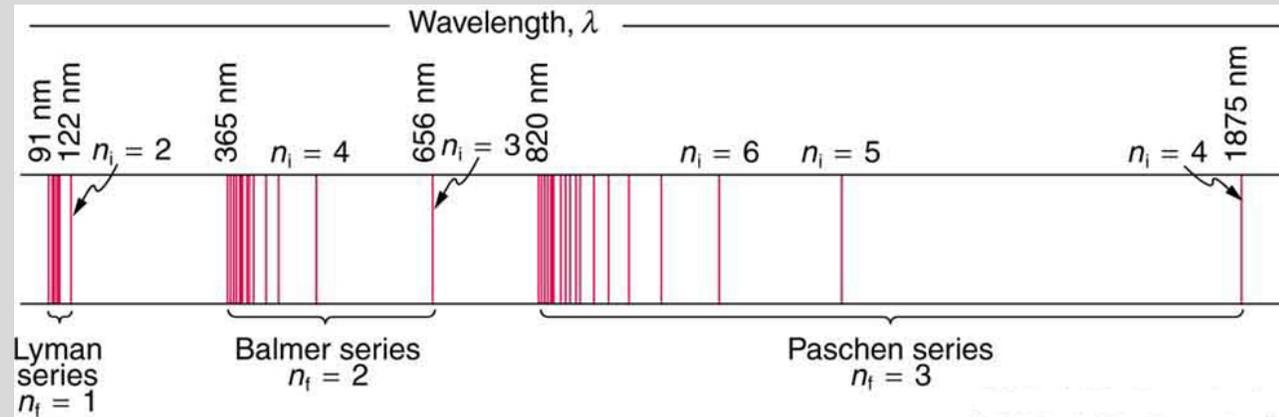
$n_f$  numero caratteristico per ogni serie e  
 $n_i$  numero intero con valori  $n_f+1, n_f+2, \dots$

# SPETTRI ATOMICI

Serie di Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$n=3,4,5$  con  $R = 1.097 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$



Tutte sintetizzate da:

Formula di Rydberg

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

$n_f$  numero caratteristico per ogni serie e  
 $n_i$  numero intero con valori  $n_f+1, n_f+2, \dots$



# MODELLO DI BOHR



1913, Niels Bohr parte dal modello di Rutherford e introduce il concetto di quantizzazione  
-moto circolare uniforme di una particella e concetti quantistici di Planck

-Per Bohr l'elettrone si muove in un'orbita circolare attorno al nucleo sotto l'influenza dell'attrazione coulombiana.

-Non ci sono infinite orbite possibili ma solo quelle in cui il momento angolare è quantizzato, in particolare multiplo di  $h/2\pi$  ovvero:  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$  (\*) con n numero quantico principale

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2} \quad (1) \text{ con } v \text{ velocità orbitale dell'elettrone ed } r \text{ raggio dell'orbita}$$

$$\text{Energia totale } E = E_k + U = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (2)$$

Da (1)  $mv^2 = ke^2/r \rightarrow \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} ke^2/r$  sostituendo in (2)

$E = -\frac{1}{2} ke^2/r$  (3) un qualunque valore di E individua uno stato legato dell'elettrone ovvero una particolare orbita

# MODELLO DI BOHR



Secondo la (\*)  $v = n \frac{h}{2\pi mr}$

Sostituendo in (1) si ottiene:  $\frac{ke^2}{r^2} = m \left( n \frac{h}{2\pi mr} \right)^2 \frac{1}{r}$

Da cui ricaviamo che per l'elettrone solo alcune orbite sono permesse:

$$r_n = \left( \frac{h^2}{4\pi^2 k m e^2} \right) n^2$$

Dalla (3) ricaviamo:  $E_n = - \left( \frac{2km\pi^2 e^4}{h^2} \right) \frac{1}{n^2} = - \frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$

# MODELLO DI BOHR



Secondo la (\*)  $v = n \frac{h}{2\pi mr}$

Sostituendo in (1) si ottiene:  $\frac{ke^2}{r^2} = m \left( n \frac{h}{2\pi mr} \right)^2 \frac{1}{r}$

Da cui ricaviamo che per l'elettrone solo alcune orbite sono permesse:

$$r_n = \left( \frac{h^2}{4\pi^2 k m e^2} \right) n^2$$

Dalla (3) ricaviamo:  $E_n = - \left( \frac{2km\pi^2 e^4}{h^2} \right) \frac{1}{n^2} = - \frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$

-un elettrone che si muove su un'orbita permessa non emette radiazione  
emette radiazioni soltanto nelle transizioni da un'orbita all'altra. La frequenza  
della radiazione emessa è  $\nu = \frac{E_f - E_i}{h}$

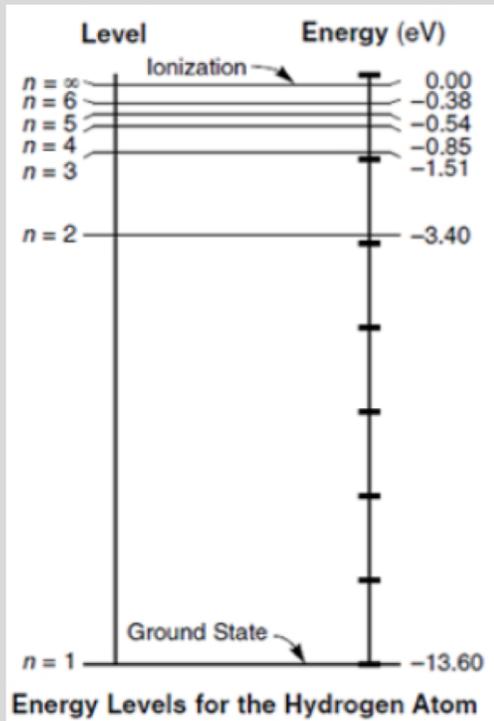
# MODELLO DI BOHR

In un atomo di idrogeno le orbite permesse per l'elettrone sono espresse in termini di livelli energetici.  
 $n$  è il livello energetico :  $n = 1$  è il livello fondamentale, stato di minima energia  
 $n > 1$  stati eccitati

# MODELLO DI BOHR

In un atomo di idrogeno le orbite permesse per l'elettrone sono espresse in termini di livelli energetici.  $n$  è il livello energetico :  $n = 1$  è il livello fondamentale, stato di minima energia  
 $n > 1$  stati eccitati

Elettrone si trova nello stato  $n=1$ , occorre fornirgli una quantità ben definita di energia per farlo passare a  $n > 1$



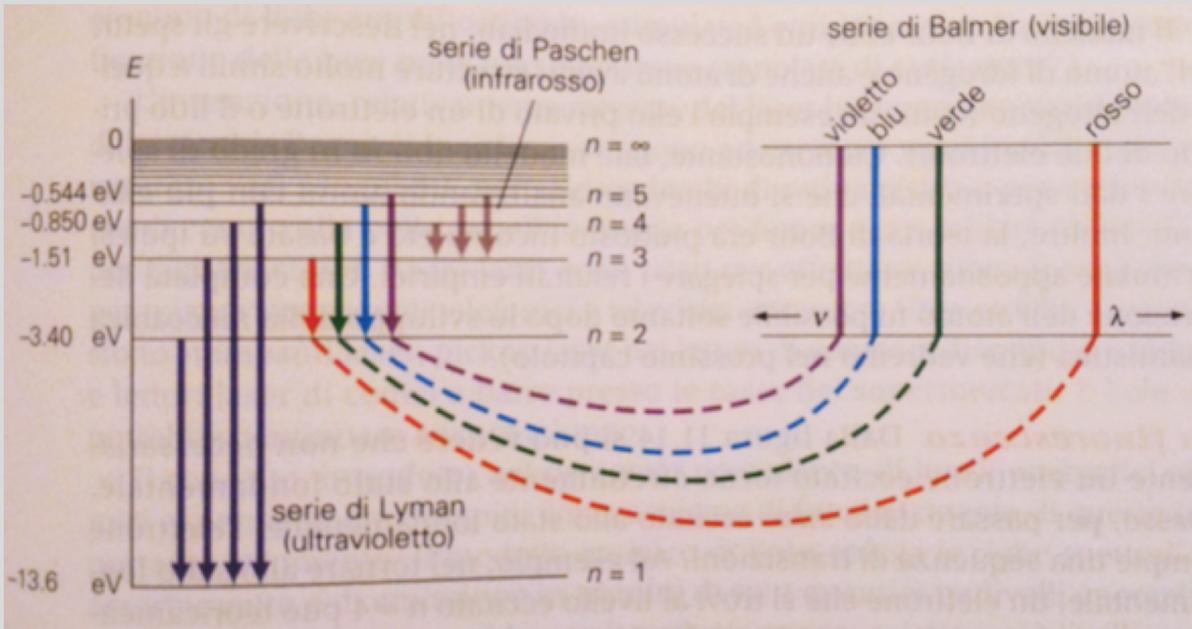
Se elettrone assorbe abbastanza energia viene ionizzato  $n = \infty$

Elettrone non resta a lungo nello stato eccitato e decade in uno stato a minore energia emettendo un fotone. L'energia del fotone emesso è pari a:

$$\Delta E = 13.6 \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \text{ ma } \Delta E = h\nu \text{ quindi } \Delta E = hc/\lambda$$

vengono emessi fotoni di determinate lunghezze d'onda, queste corrispondono alle varie transizioni permesse.

# MODELLO DI BOHR



$n_f$  è il livello energetico su cui arriva (o parte) elettrone nel processo di emissione (assorbimento) che origina le linee della serie spettroscopiche.

Serie di Balmer  $n_f=2$

Serie di Lyman  $n_f=1$

La lunghezza d'onda della luce emessa

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1.24 \cdot 10^3}{\Delta E} \text{ nm}$$

# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

-collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati

-collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati → energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

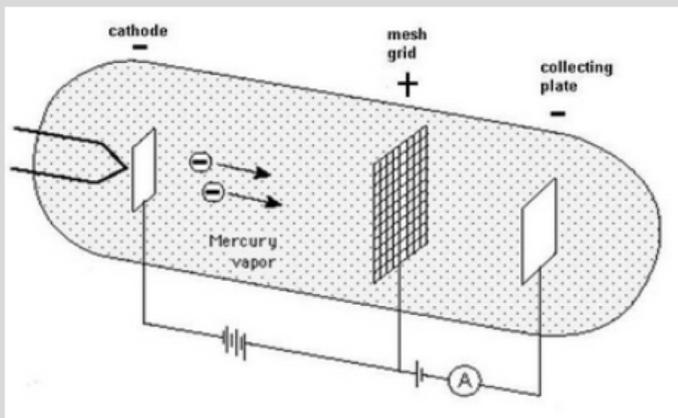
# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

- collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati
- collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati → energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

-In questo esperimento un fascio di elettroni passa in un tubo con vapori di mercurio.



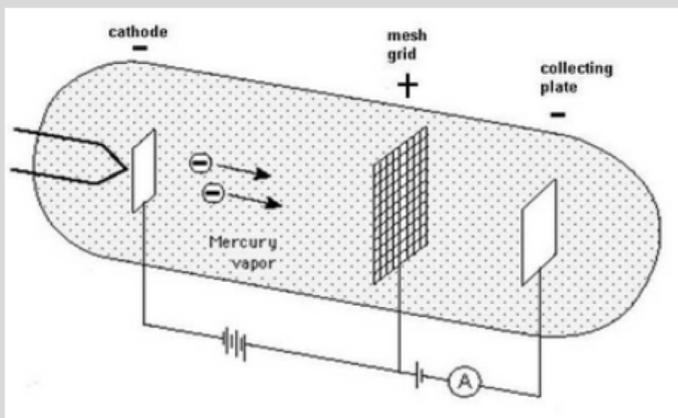
# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

- collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati
- collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati  $\rightarrow$  energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

-In questo esperimento un fascio di elettroni passa in un tubo con vapori di mercurio.



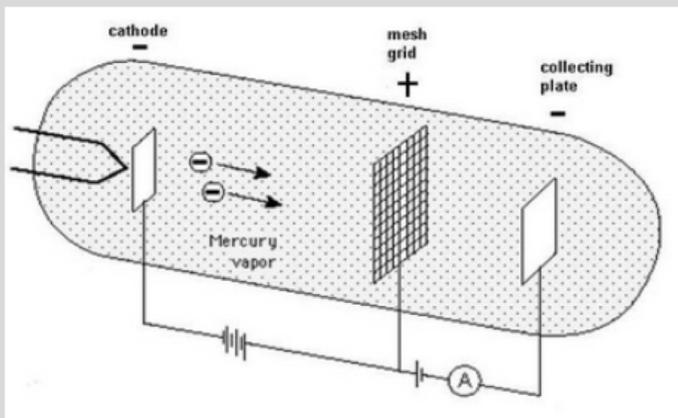
# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

- collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati
- collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati → energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

-In questo esperimento un fascio di elettroni passa in un tubo con vapori di mercurio.



Il comportamento è spiegato con in termini dei livelli energetici quantizzati dell'atomo di mercurio. Si ha un calo brusco della corrente ogni volta il potenziale accelerante raggiunge multipli di 4.9 V mostrando che l'energia di eccitazione del mercurio è 4.9 eV.

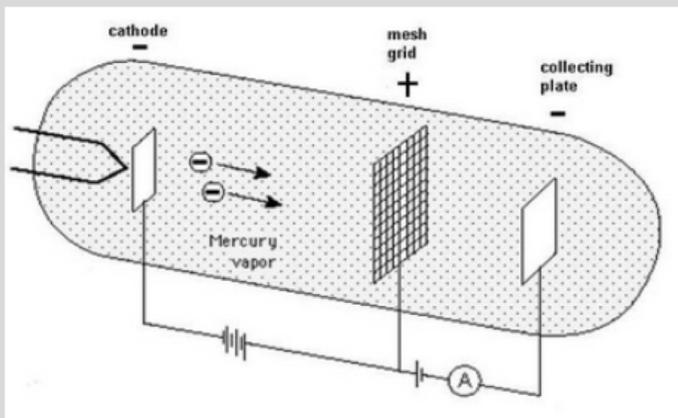
# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

- collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati
- collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati  $\rightarrow$  energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

-In questo esperimento un fascio di elettroni passa in un tubo con vapori di mercurio.



Quando il potenziale accelerante cresce, vengono emessi più elettroni.

Quando un elettrone viene accelerato da  $V$  acquista un'energia  $eV$ .

Finché questa energia  $<$  della prima energia di eccitazione del mercurio, avvengono solo collisioni elastiche.

Quando  $eV$  raggiunge l'energia di eccitazione, alcuni elettroni sono in grado di eccitare gli atomi di mercurio e perdono energia. Questi elettroni raggiunta la griglia non hanno abbastanza energia per superare il potenziale ritardante e non raggiungono il punto P.

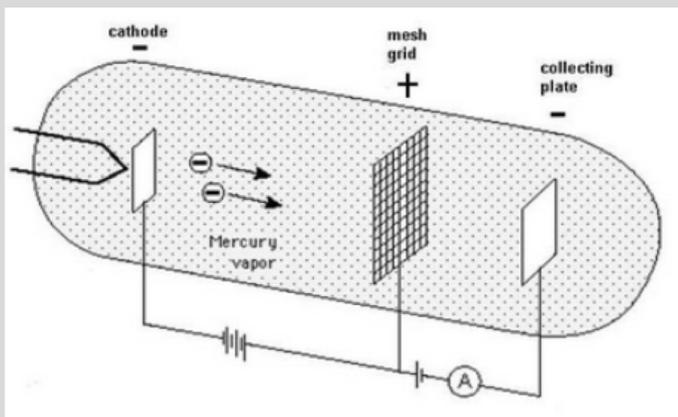
# MODELLO DI BOHR: ESPERIMENTO DI FRANCK HERTZ

1914, Esperimento di Franck Hertz

Idea: far collidere un fascio di elettroni su un bersaglio di atomi di un gas rarefatto:

- collisioni elastiche: non alterano degli elettroni, non inducono stati eccitati
- collisioni anelastiche: l'atomo viene eccitato in un diverso livello energetico e l'elettrone perde energia cinetica. I livelli energetici dell'atomo sono quantizzati → energia persa dall'elettrone è  $E_f - E_i$

-In questo esperimento un fascio di elettroni passa in un tubo con vapori di mercurio.



Quando il potenziale accelerante cresce, vengono emessi più elettroni.

Quando un elettrone viene accelerato da  $V$  acquista un'energia  $Ve$ .

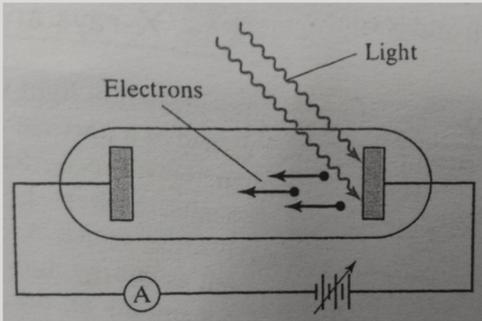
Finché questa energia  $<$  della prima energia di eccitazione del mercurio, avvengono solo collisioni elastiche.

Quando  $Ve$  raggiunge l'energia di eccitazione, alcuni elettroni sono in grado di eccitare gli atomi di mercurio e perdono energia. Questi elettroni raggiunta la griglia non hanno abbastanza energia per superare il potenziale ritardante e non raggiungono il punto P.

Raggiunta la prima energia di eccitazione ci si aspetta una diminuzione della corrente. Se  $V$  viene aumentata più di  $4.9\text{ V}$  la corrente cresce ancora, ma quando raggiunge  $2Ve$  diminuisce, gli elettroni possono subire due collisioni anelastiche tra catodo e griglia. Andando avanti si osservano regolari diminuzioni della corrente spaziate da  $4.9\text{ V}$ . Interpretazione confermata dallo spettro del mercurio

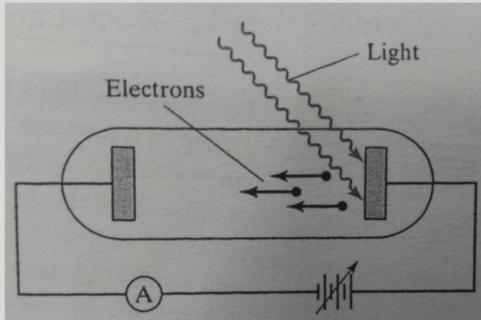
# EFFETTO FOTOELETTRICO

1905, Einstein riprende l'idea di Planck per spiegare l'effetto fotoelettrico, emissione di elettroni da una superficie metallica quando colpita da radiazione come luce UV



# EFFETTO FOTOELETTRICO

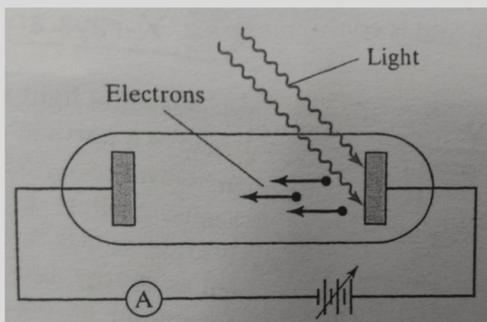
1905, Einstein riprende l'idea di Planck per spiegare l'effetto fotoelettrico, emissione di elettroni da una superficie metallica quando colpita da radiazione come luce UV



1. Se l'intensità della luce incidente cresce, il numero di elettroni cresce ma l'energia cinetica non cambia.
2. Se la frequenza della luce incidente viene ridotta sotto un certo valore non vengono emessi elettroni a prescindere dall'intensità della luce.

# EFFETTO FOTOELETTRICO

1905, Einstein riprende l'idea di Planck per spiegare l'effetto fotoelettrico, emissione di elettroni da una superficie metallica quando colpita da radiazione come luce UV



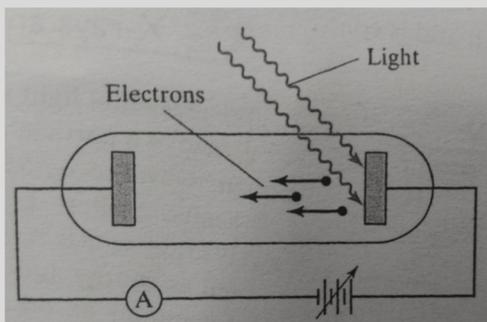
1. Se l'intensità della luce incidente cresce, il numero di elettroni cresce ma l'energia cinetica non cambia.
2. Se la frequenza della luce incidente viene ridotta sotto un certo valore non vengono emessi elettroni a prescindere dall'intensità della luce.

Tutto ciò non è consistente con la visione classica secondo cui le onde em sono una distribuzione continua di campi E e B.

Einstein propone l'idea secondo cui l'energia in un fascio di luce non è distribuita in modo continuo ma consiste in un insieme di pacchetti discreti di energia (fotoni)  $E = h\nu$

# EFFETTO FOTOELETTRICO

1905, Einstein riprende l'idea di Planck per spiegare l'effetto fotoelettrico, emissione di elettroni da una superficie metallica quando colpita da radiazione come luce UV



1. Se l'intensità della luce incidente cresce, il numero di elettroni cresce ma l'energia cinetica ( $K$ ) non cambia.
2. Se la frequenza della luce incidente viene ridotta sotto un certo valore non vengono emessi elettroni a prescindere dall'intensità della luce.

Tutto ciò non è consistente con la visione classica secondo cui le onde em sono una distribuzione continua di campi  $E$  e  $B$ .

Einstein propone l'idea secondo cui l'energia in un fascio di luce non è distribuita in modo continuo ma consiste in un insieme di pacchetti discreti di energia (fotoni)  $E = h\nu$

Ogni elettrone emesso è il risultato di un singolo fotone che cede  $E = h\nu$  all'elettrone

1. Con più fotoni, più elettroni sono emessi, ma visto che ogni fotone ha la stessa energia, ogni elettrone emesso avrà la stessa energia e quindi  $K$  non cambia.
2. Per ogni metallo, c'è una energia minima definita per rimuovere un elettrone (funzione lavoro)  $\phi$   
Se l'energia del fotone  $h\nu < \phi$  non si hanno elettroni emessi, frequenza minima  $\nu_0$

Per Einstein se  $\nu > \nu_0$  ogni elettrone emesso acquista  $h\nu$  ma perde  $\phi \rightarrow K_{\max} = h\nu - \phi$

L'energia massima osservata degli elettroni emessi è una funzione lineare della frequenza con coefficiente angolare dato da  $h$ , la prova la farà Millikan.

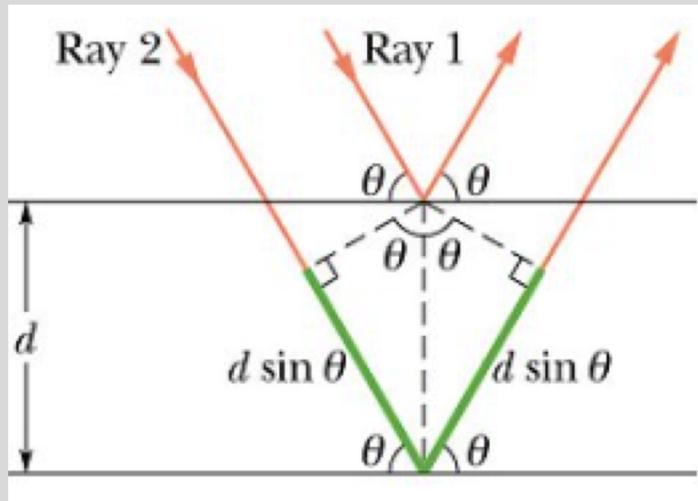
# RAGGI X e DIFFRAZIONE DI BRAGG

L'idea che la luce sia quantizzata viene sempre di più accettata (effetto Compton)

Uno dei modi più efficaci di mostrare che qualcosa sia un'onda è misurare la sua lunghezza d'onda facendola passare attraverso un reticolo di diffrazione.

In un reticolo efficiente il passo deve essere dello stesso ordine della lunghezza d'onda.

Per i raggi X serve 0.1 nm. Nel 1912 von Laue suggerisce di usare gli atomi di un cristallo come reticolo di diffrazione. Tecnica portata avanti dai Bragg



$$2d \sin \theta = n\lambda$$

# NATURA ONDULATORIA DELLA MATERIA



1923, L. De Broglie se le onde luminose presentano un comportamento corpuscolare, anche particelle di materia avrebbero dovuto presentare un comportamento ondulatorio.

La lunghezza d'onda di una particella è la stessa relazione che si applica a fotone:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \text{ con } \lambda \text{ lunghezza d'onda di De Broglie}$$

La conferma di De Broglie arriva nel 1927 dalle esperienze di Davisson Germer e Thomson. Direbbero un fascio di elettroni su un cristallo di nichel e osservarono che gli elettroni presentavano un comportamento di diffrazione come raggi X diffratti da un cristallo.

# Attrezzature scientifiche

3b scientific  
Optika science

Leybold LD-Italia  
Phywe

Klinger Educational