

# la struttura della materia

cosa sappiamo della struttura della materia?  
e perché lo sappiamo? e da quando?

XIX secolo: atomi tenuti insieme da forze di natura  
elettrica

Avogadro (legge dei volumi, proporzioni definite)

Faraday (elettrolisi, carica elettrica fondamentale)

Thomson (1897): esistenza degli elettroni

Rutherford (1908): nucleo atomico concentrato al  
centro dell'atomo

modelli atomici e stabilità degli atomi

l'emergere della meccanica quantistica

# la scoperta della struttura atomica

i raggi catodici (1857 - 1878)

la scoperta dell'elettrone (Thomson, 1897)

la carica dell'elettrone (Millikan, 1907)

la scoperta dei raggi X (Rontgen, 1895)

identificazione dei fotoni (Einstein, effetto f.e. 1905)

la scoperta della radioattività naturale (Bequerel, 1896)

i modelli atomici di Thomson e di Rutherford

l'esperimento di Rutherford (1908)

il protone e le trasmutazioni nucleari (Rutherford 1918)

la scoperta del neutrone (Chadwick, 1932)

# fisica dei quanti

corpo nero (1862-1900)

moto browniano (1828-1905)

effetto fotoelettrico (1887-1905)

effetto Compton (1923)

spettroscopia atomica e atomo di Bohr (1913)

onde di de Broglie (1924)

diffrazione degli elettroni (1927)

principio di indeterminazione (1927)

interpretazione probabilistica e EPR (1935-1964-1982-20..?)

# i raggi catodici

Gaissler (1857): tubo catodico per lo studio della elettroluminescenza nei gas  
pompa a vuoto, per studiare scarica vs pressione  
luminescenza verdastra all'anodo anche con bassissime pressioni



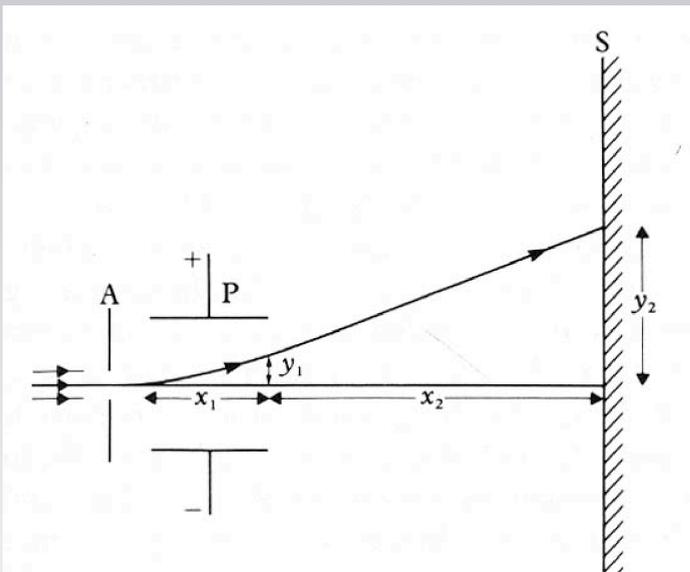
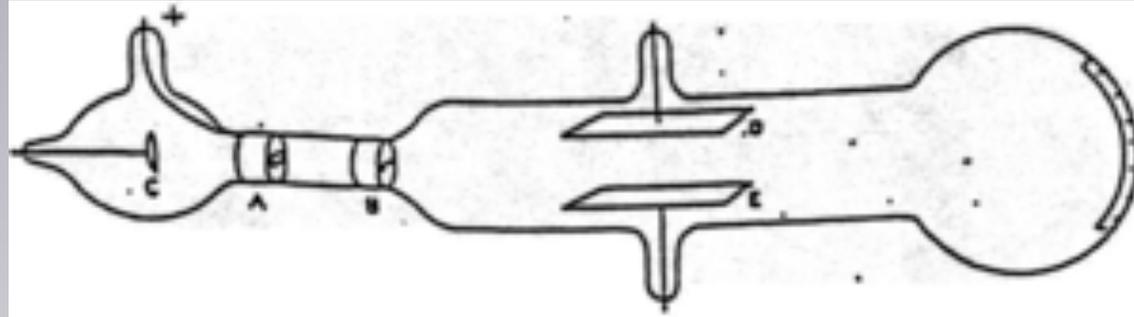
# i raggi catodici

Gaissler (1857): tubo catodico per lo studio della elettroluminescenza nei gas  
pompa a vuoto, per studiare scarica vs pressione  
luminescenza verdastra all'anodo anche con bassissime pressioni

Crookes (1878):  
schermo fluorescente  
raggi catodici assorbiti da ostacoli  
e deviati da campi magnetici



# Esperimento di Thomson



$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left( \frac{x_1}{v} \right)^2 ; \quad v_y = \frac{eE}{m} t$$

$$y_2 = y_1 + v_y t_2 = \frac{eE}{m} \cdot \frac{x_1}{v^2} \left( \frac{x_1}{2} + x_2 \right)$$

$$eE = evB$$

$$\rightarrow e/m = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$

# apparato “e/m”



$$f = ma$$

$$evB = m \frac{v^2}{R}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{BR}$$

$$\left(\frac{e}{m}\right)^2 = \frac{v^2}{B^2 R^2} = \frac{e}{m} \frac{2V}{B^2 R^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 R^2}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

$$v^2 = \frac{e}{m} 2V$$

# importanza del tubo catodico

applicazioni dirette del tubo catodico

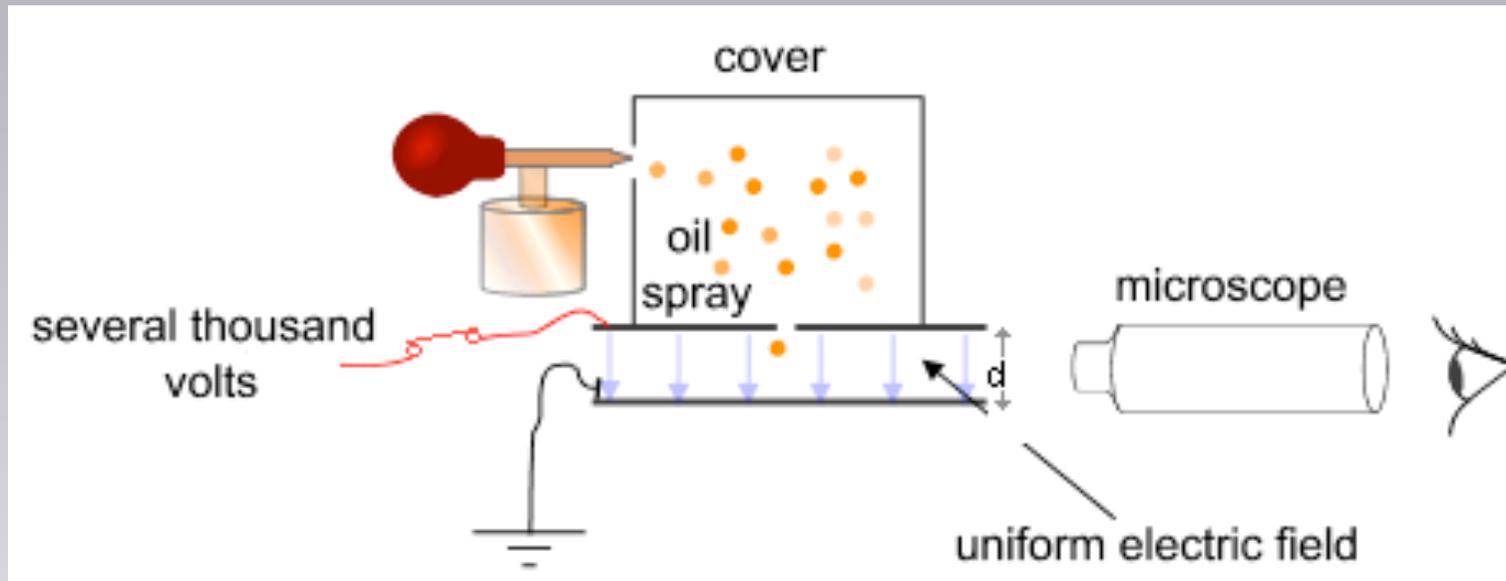
- oscilloscopio
- televisione

primo esempio di tubo a vuoto, o “valvola”

strumenti chiave per la realizzazione di circuiti elettronici

in particolare di amplificatori di segnali

# Esperimento di Millikan



caduta per gravità con resistenza del mezzo  
stima del raggio di ciascuna goccia:

$$6\pi\eta r v = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g$$

applicando un campo elettrico frenante  
si stima la carica di ciascuna goccia:

$$6\pi\eta r v' = mg - qE$$

Dalla spaziatura della distribuzione  
delle cariche si stima la carica unitaria:

$$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{da } e/m \rightarrow m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

# i raggi X

Rontgen (1895)

i raggi catodici, colpendo lo schermo fluorescente, generano una radiazione penetrante, “raggi X”, che impressiona schermi fluorescenti o lastre fotografiche



interpretazione moderna: fotoni irraggiati dagli elettroni a causa della forte deflessione generata dal campo elettrico in prossimità dei nuclei (spettro continuo) e fotoni di energia corrispondente alla transizione tra livelli atomici profondi (spettro a righe)

# la radioattività naturale

Bequerel (1896) scopre casualmente che sali di uranio impressionano lastre fotografiche

uranio, radio, polonio (M. Curie, 1898)

Nel 1900, si conoscevano ormai raggi alfa (positivi), beta (negativi) e gamma (neutri)

interpretazione moderna:

alfa: nuclei di elio ionizzato (carica  $+2e$ ) Po, U

beta: elettroni (come i raggi catodici, carica  $-e$ )  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{14}\text{C}$

gamma: fotoni (come i raggi X) neutri  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$

# La legge dei decadimenti radioattivi

- i decadimenti sono tra loro indipendenti
- la probabilità di decadimento nell'unità di tempo è una proprietà tipica del processo di decadimento e non dipende dal tempo in cui avviene il decadimento,
- la probabilità di decadimento del singolo sistema non dipende da  $N$

$$dP = \lambda dt$$

$$dN = -\lambda N dt$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \rightarrow \ln N = -\lambda t \rightarrow N(t) = C e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{vita media.}$$

$$t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.69\tau \quad \text{emivita o tempo di dimezzamento}$$

# Modelli atomici

## atomo di Thomson

atomo neutro di forma sferica, raggio  $10^{-10}$  m  
carica positiva  $Ze$  distribuita con continuità  
in questa sfera sono immersi  $Z$  elettroni

## atomo di Rutherford

modello di Rutherford: cariche positive concentrate nel nucleo

## previsioni verificabili sulla diffusione di particelle $\alpha$

Nel modello di Rutherford, se la particella  $\alpha$  si avvicina al nucleo lo schermo degli elettroni si riduce sempre più e la particella risente di un campo  $Ze$

all'interno degli atomi intensi campi elettrici, che non possono essere giustificati nel modello di Thomson

# L'esperimento di Geiger-Marsden

Il paradigma degli esperimenti di particelle:

esperimento di Geiger-Marsden: una sorgente di raggi  $\alpha$  è diretta contro spessori sottili di diversi materiali:

- la maggior parte dei raggi  $\alpha$  passa indisturbata
- in alcuni casi, si osserva deflessione dei raggi  $\alpha$  nell'attraversare piccoli spessori di materiale, a volte persino all'indietro!

Nel modello di Thomson nessuno di questi risultati è giustificato:

- i raggi  $\alpha$  dovrebbero avanzare in un mezzo denso dove sono distribuite uniformemente cariche positive e negative
- quindi ci aspettiamo che molte particelle siano rallentate e per effetto dei moltissimi urti siano deviate dalla direzione originale
- queste deviazioni devono tuttavia essere poco significative, perché non ci sono né cariche concentrate, né masse elevate che assorbano impulso: si pensi ad una biglia di metallo che avanza tra palline da ping pong

# L'esperimento di Geiger-Marsden

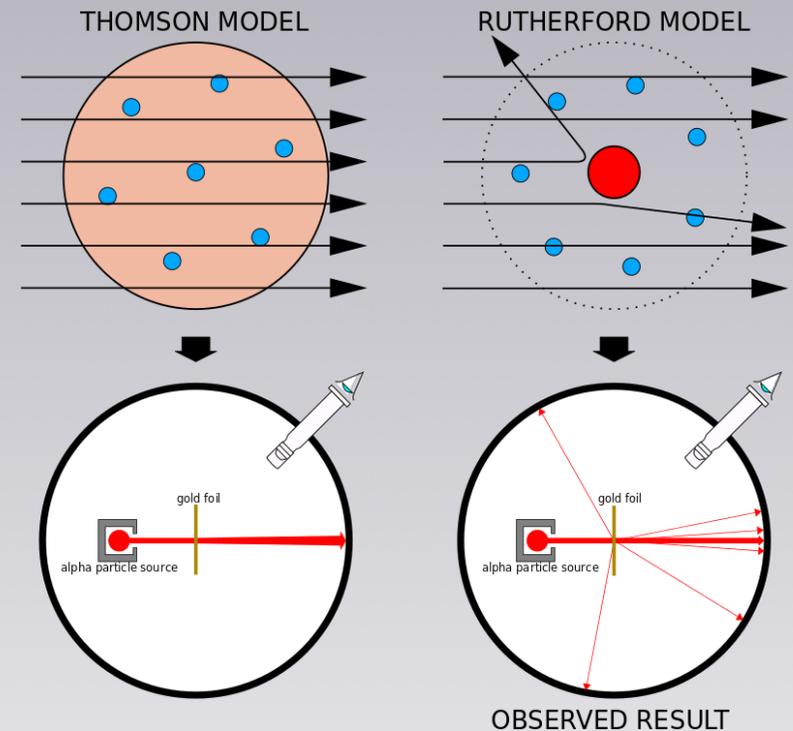
Nel modello di Rutherford, il nucleo è piccolo e pesante

Per il teorema di Gauss, al di sotto di un certo raggio le cariche degli elettroni non hanno nessun effetto, la particella  $\alpha$  vede solo la carica  $Ze$  del nucleo

Deviazione dovuta alla forza coulombiana, urto elastico

Il nucleo assorbe impulso senza assorbire energia

Tanto minore è la distanza dal nucleo, tanto maggiore è la deviazione



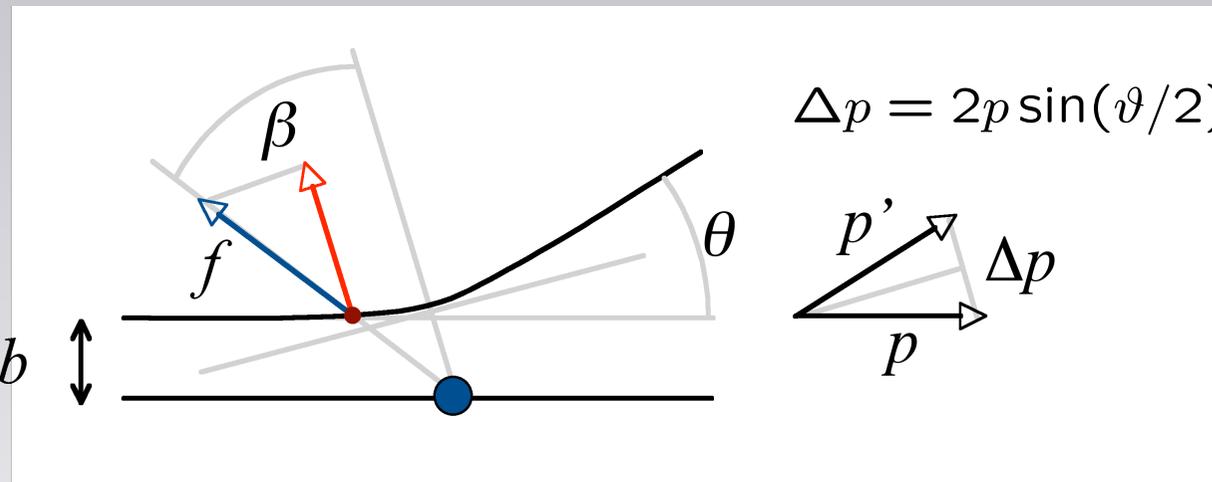
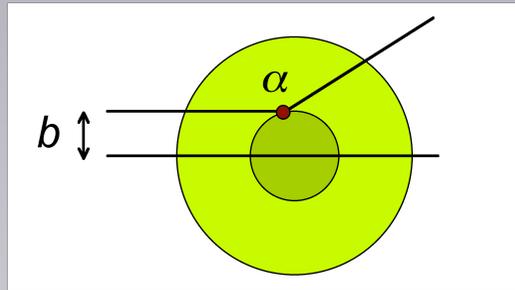
## dal racconto di Rutherford:

“It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.

On consideration, I realized that this scattering backward must be the result of a single collision, and when I made calculations I saw that it was impossible to get anything of that order of magnitude unless you took a system in which the greater part of the mass of the atom was concentrated in a minute nucleus.

It was then that I had the idea of an atom with a minute massive centre, carrying a charge.”

# L'esperimento di Geiger-Marsden

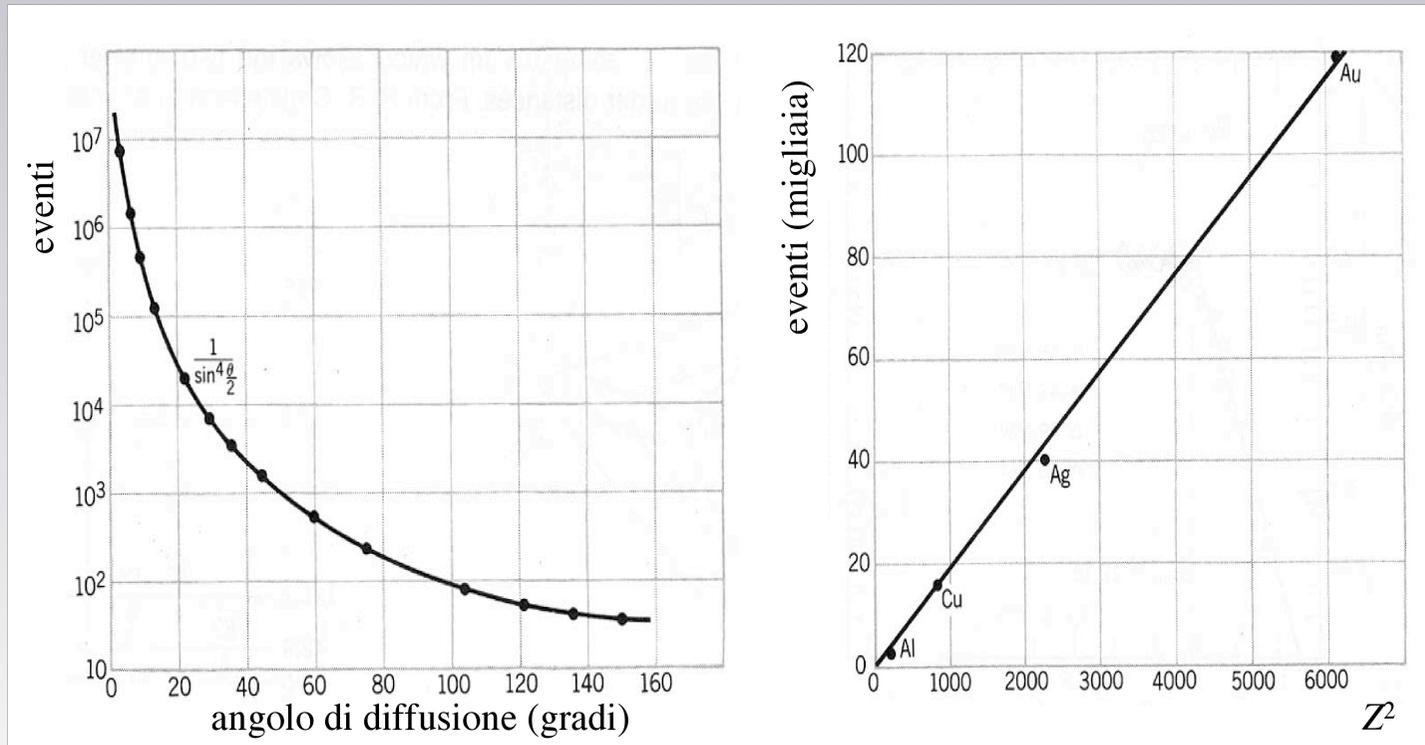


dalla conservazione dell'impulso e del momento angolare si ricava la relazione tra  $b$  e  $\vartheta$

# previsioni e risultati

formula classica di Rutherford

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{zZe^2m}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{4p^4 \sin^4 \frac{\vartheta}{2}} = \left( \frac{zZe^2m}{2\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{\Delta p^4}$$



# la scoperta del protone

(Rutherford, 1918)

particelle  $\alpha$  su bersaglio di azoto  $\rightarrow$  nuclei di idrogeno,  
che devono quindi essere contenuti in quelli di azoto.



“Nuclei di idrogeno” = protoni costituenti dei nuclei  
assieme ai neutroni

Nella terminologia odierna:

- Il nucleo dell'idrogeno è costituito da un solo protone
- Le particelle  $\alpha$  sono nuclei di elio costituiti da due protoni e due neutroni

Prima osservazione di una trasmutazione nucleare

# elettroni, protoni, e poi?

Perché il peso atomico è sempre circa il doppio del numero atomico?

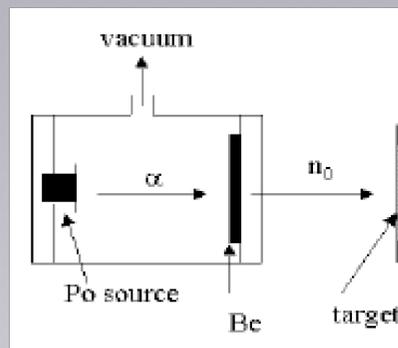
posso costruire un modello solo con elettroni e protoni?

per esempio, in un nucleo ci sono  $Z$  protoni e  $A-Z$  coppie di elettrone e protone

questo stato legato di protone ed elettrone sarebbe una particella neutra, di massa poco maggiore di quella del protone

tuttavia ci sono alcune cose che non tornano, alcune legate al momento angolare intrinseco, altre incompatibili con principio di indeterminazione

# la scoperta del neutrone



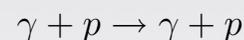
## Bothe e Becker (1928):

particelle alfa di 5.4 MeV su berillio producono una radiazione non ionizzante (raggi x?)

## I. Curie e F. Joliot (1931):

questa radiazione era in grado di espellere protoni con energia cinetica di oltre 5 MeV da un bersaglio ricco di idrogeno.

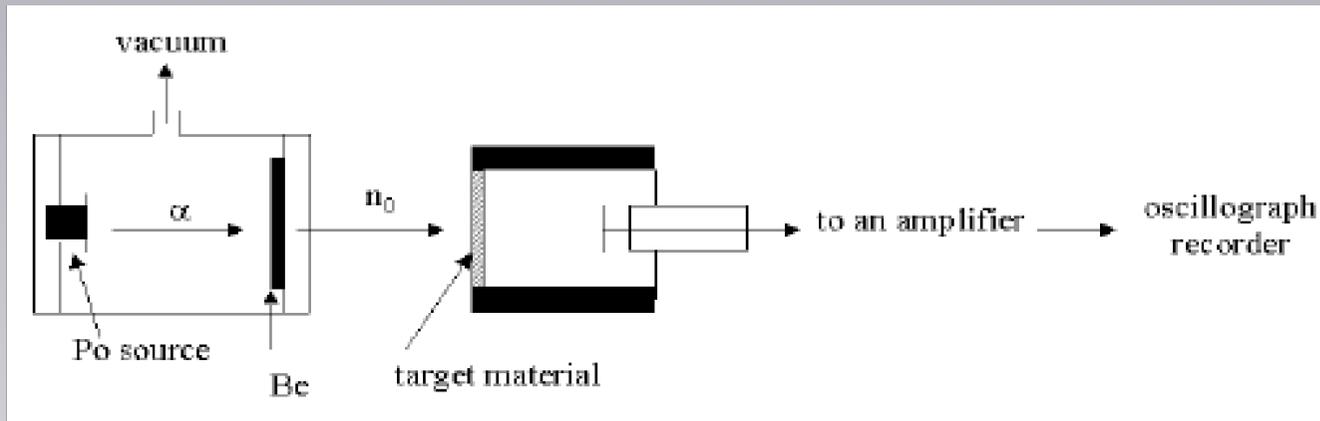
ipotesi:  ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + \gamma$



## Difficoltà di questa interpretazione (Chadwick):

il fotone dovrebbe avere decine di MeV, molto più dei 5.4 MeV iniziali

# l'esperimento di Chadwick



Chadwick mostrò che la nuova particella prodotta aveva una massa uguale a quella del protone entro il 10% e poteva quindi essere identificata col neutrone, nel frattempo proposto da Rutherford per risolvere vari problemi connessi con la struttura nucleare

La reazione doveva essere:  ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + n.$

# Esperimenti di urto

Sia gli esperimenti di Rutherford che l'esperimento di Chadwick sono basati sugli urti tra le particelle coinvolte

Gli aspetti essenziali delle osservazioni si ricavano da considerazioni molto generali sugli urti, la cui validità si estende dal mondo macroscopico a quello microscopico.

Non si osservano direttamente le interazioni, ma dalla conoscenza degli stati iniziali e degli stati finali si traggono informazioni sulla natura delle interazioni

Gli esperimenti si basano sulle distribuzioni degli stati finali più che sull'osservazione di un singolo evento

Questa tipologia di esperimenti si adatta molto bene al carattere probabilistico della meccanica quantistica

# fisica dei quanti

corpo nero (1862 - 1900)

moto browniano (1828 - 1905)

effetto fotoelettrico (1887 - 1905)

effetto Compton (1923)

spettroscopia atomica e atomo di Bohr (1913)

onde di de Broglie (1924)

diffrazione degli elettroni (1927)

principio di indeterminazione (1927)

interpretazione probabilistica e EPR (1935)

# Il problema del corpo nero

Nella seconda metà dell'ottocento la termodinamica è matura e consolidata: da un lato ha acquisito una struttura assiomatica, dall'altro le sue applicazioni tecnologiche hanno cambiato la struttura economica della società

Boltzmann ne dà una interpretazione statistica, p. es. collegando l'entropia  $S$  al numero  $W$  dei microstati possibili ( $S = \ln W$ )

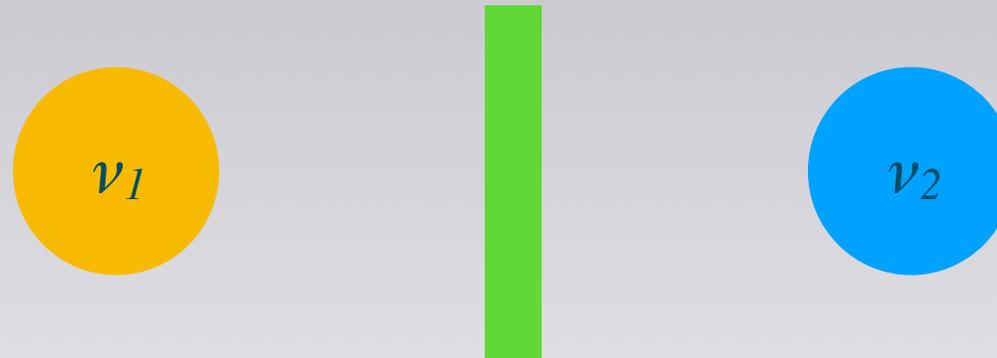
Un problema concettualmente molto significativo si pone per la propagazione del calore per irraggiamento:

determinare le proprietà dell'emissione e assorbimento della radiazione da parte di un corpo a temperatura  $T$  alla luce dei principi della termodinamica

# Iraggiamento e secondo principio

Supponiamo di avere due corpi alla stessa temperatura che abbiano diversi spettri di emissione.

Per semplificare, supponiamo che entrambi emettano due radiazioni monocromatiche, con frequenze diverse,  $\nu_1$  e  $\nu_2$  :



Se interponiamo un filtro che lasci passare la frequenza  $\nu_1$  ma non la frequenza  $\nu_2$ ,

il calore fluirà spontaneamente dal corpo 1 al corpo 2, in palese violazione del secondo principio della termodinamica.

# potere emissivo del corpo nero

Con argomenti analoghi, Kirchhoff dimostra che il rapporto tra il “potere emissivo” e il “potere assorbente” in funzione della temperatura e della lunghezza d’onda della radiazione è (e deve essere) uguale per tutti i corpi, indipendentemente dalla loro natura e dalla loro forma.

Tuttavia l’emissione è difficile da separare dalla parziale riflessione della radiazione incidente che dipende dalle proprietà del corpo

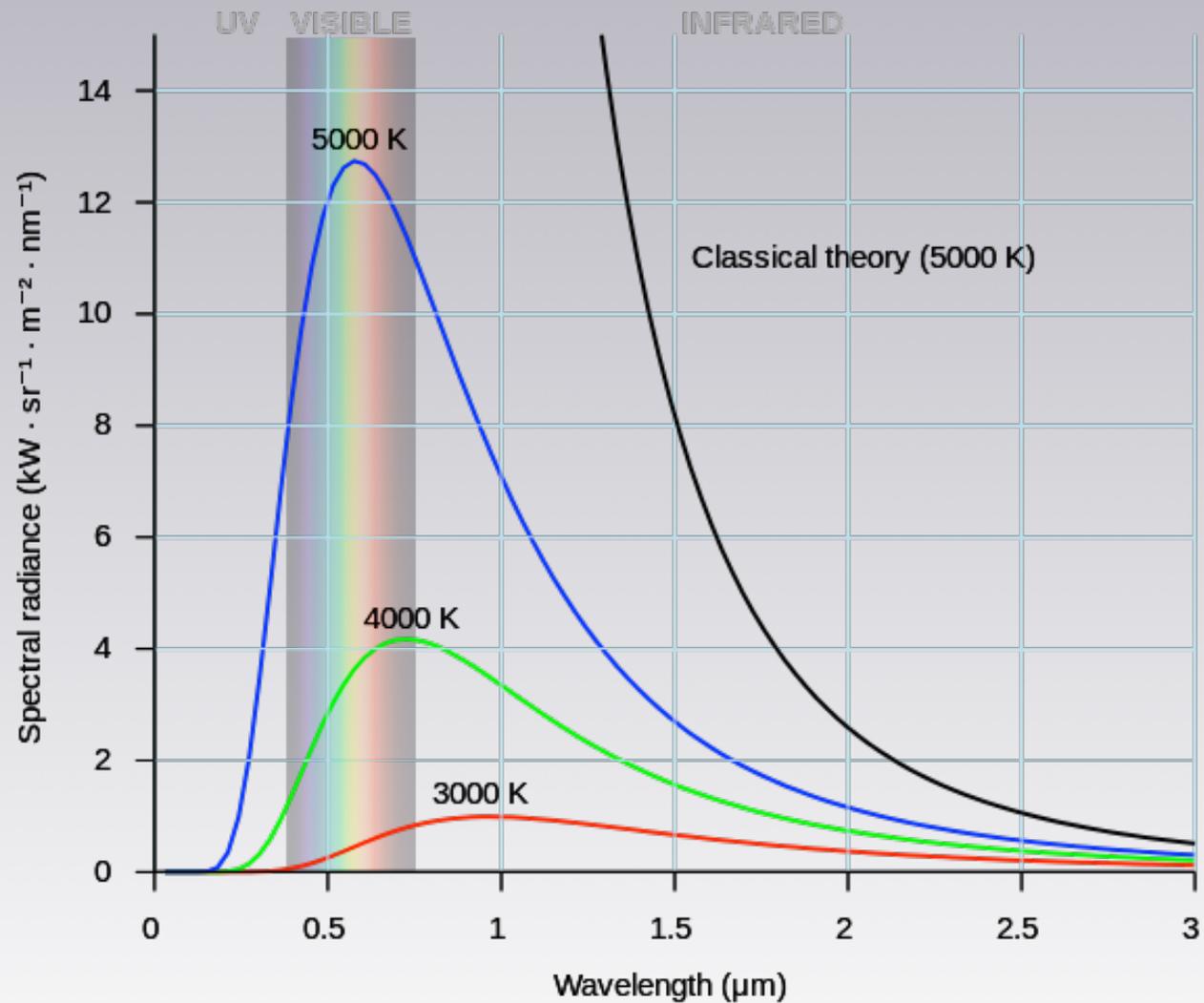
Kirchhoff propone quindi la definizione di **corpo nero** come corpo ideale che assorbe qualunque radiazione incidente

Per il corpo nero (per il quale per definizione il potere assorbente è uguale ad 1 per qualunque lunghezza d’onda) esiste quindi una sola funzione  $u(\lambda, T)$

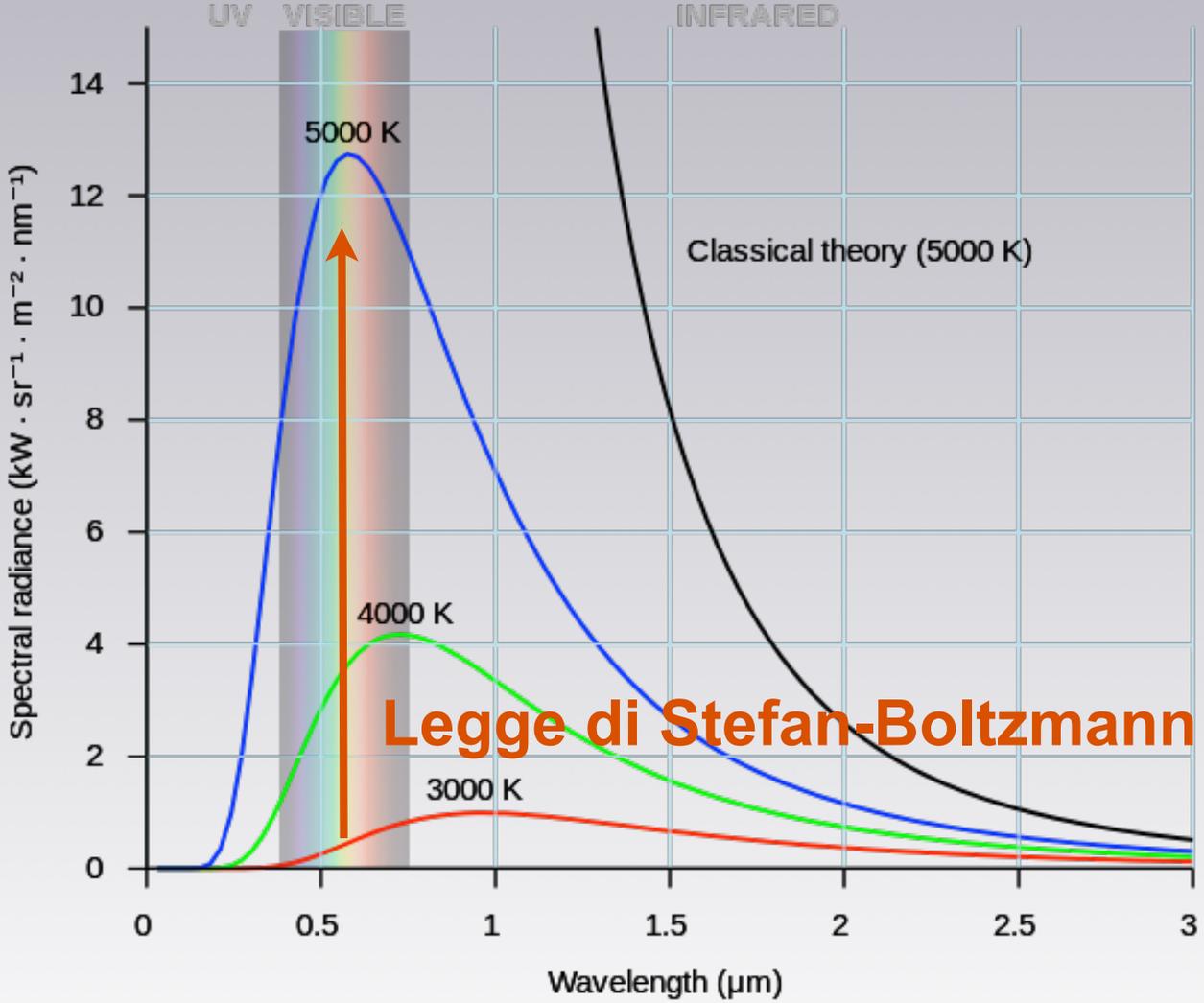
Per rispettare il secondo principio della termodinamica la dipendenza dalla frequenza dello spettro di emissione del corpo nero deve essere una funzione universale della sola temperatura

# Spettro del corpo nero

Dipendenza dalla temperatura dello spettro in frequenza

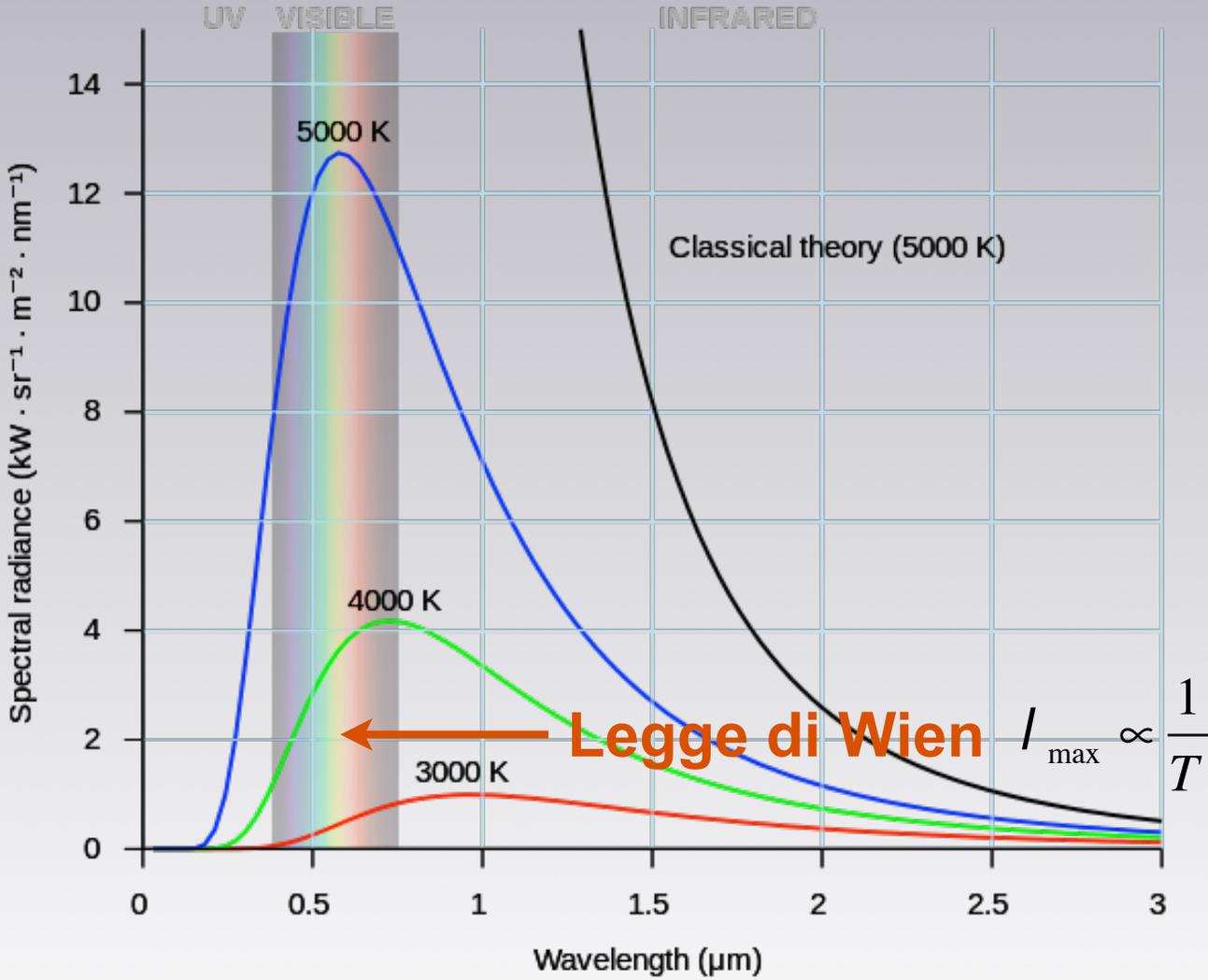


# Leggi del corpo nero



**Legge di Stefan-Boltzmann**  $I = \int R(l) dl \propto T^4$

# Leggi del corpo nero



# Leggi del corpo nero

Dipendenza dalla temperatura dello spettro in frequenza

Modello statistico: il numero di modi in funzione della frequenza è proporzionale al quadrato della frequenza:

$$N(\nu)d\nu \propto \nu^2 d\nu$$

Combinando con l'equipartizione classica dell'energia, per cui ogni possibile modo contribuisce come  $kT$ , si ottiene una distribuzione divergente con la frequenza

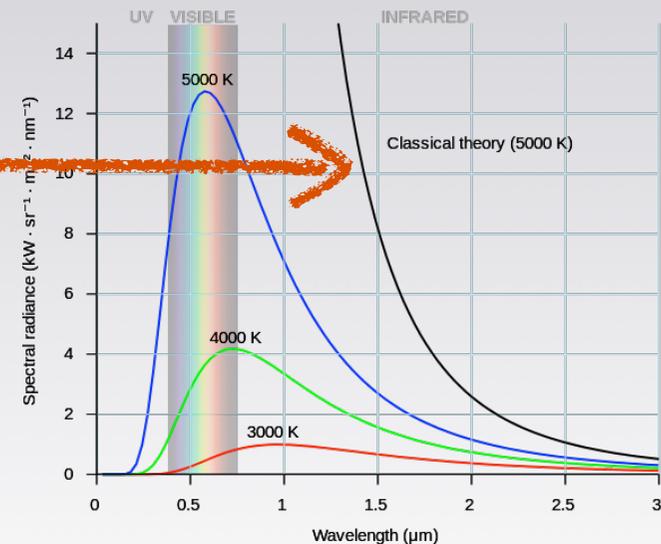
$$f(\nu)d\nu = kT \cdot N(\nu)d\nu \propto kT \nu^2 d\nu$$

$$f(\lambda)d\lambda \propto \frac{kT}{\lambda^4} d\lambda \quad \text{Rayleigh-Jeans}$$

e quindi una energia infinita

**catastrofe ultravioletta**

(Asimmetrie n. 20: Una catastrofe evitata)



# Ipotesi di Planck

Per far tornare lo spettro osservato, Planck ipotizza che l'energia media di ciascun modo dipenda dalla frequenza, secondo la legge:

$$E = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \left( \begin{array}{c} \xrightarrow{\frac{h\nu}{kT} \rightarrow 0} \\ \frac{h\nu}{kT} = kT \end{array} \right)$$

per piccoli valori di frequenza la formula riproduce il valore di energia previsto dall'equipartizione classica.

La formula corrisponde ad assumere che per una data frequenza l'energia possa scambiata in "quanti"  $\Delta E = h\nu$

La corretta distribuzione in frequenza si ottiene sostituendo a  $kT$  la formula di Planck nella derivazione di Rayleigh-Jeans:

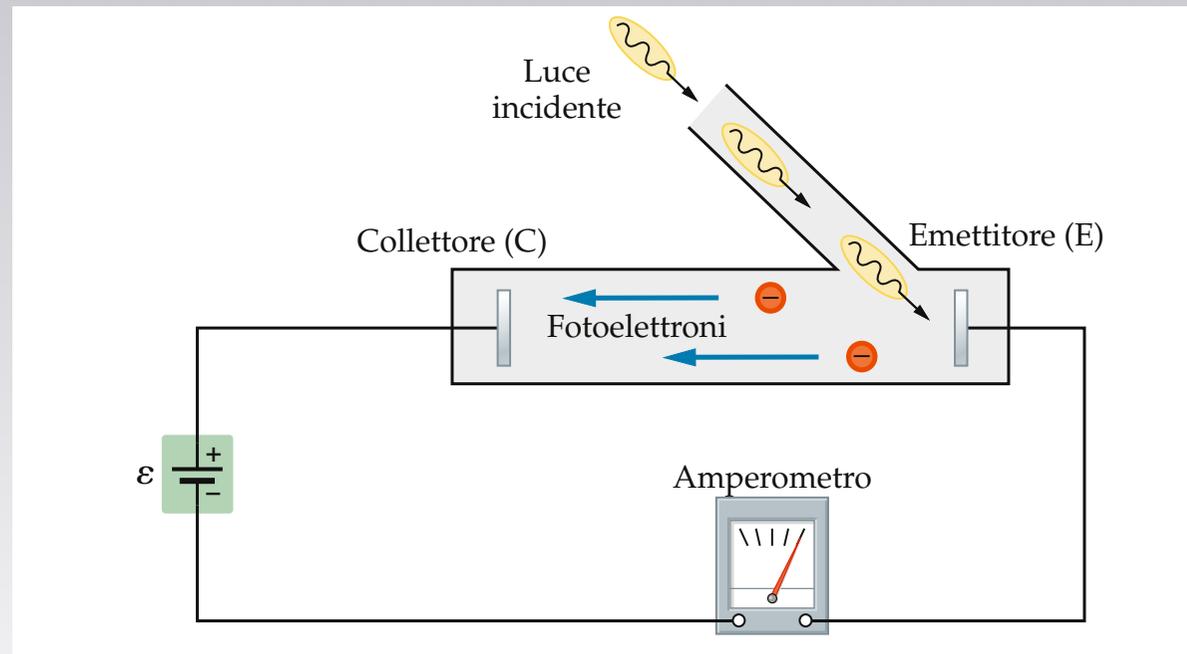
$$f(\nu)d\nu \propto \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

# effetto fotoelettrico

scoperto da Hertz nel 1887

studiato da Lenard nel 1900

La luce incide su uno strato di metallo (catodo) ed emette elettroni, che accelerati da una differenza di potenziale, generano una corrente misurabile con un amperometro.



# effetto fotoelettrico

## Risultati di Lenard:

La corrente è proporzionale all'intensità luminosa.

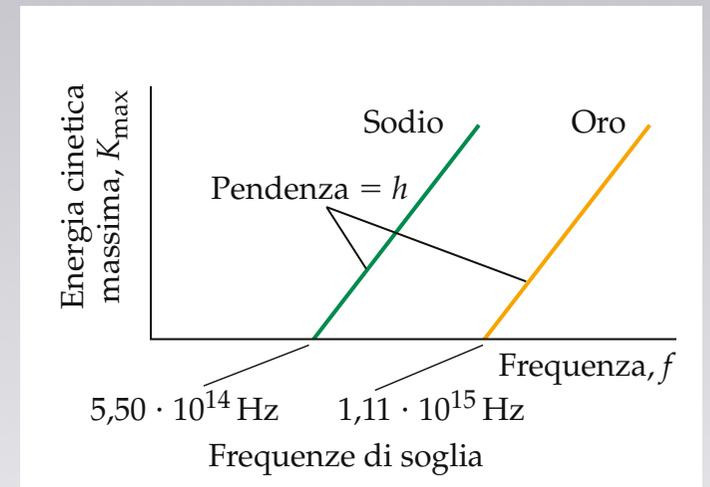
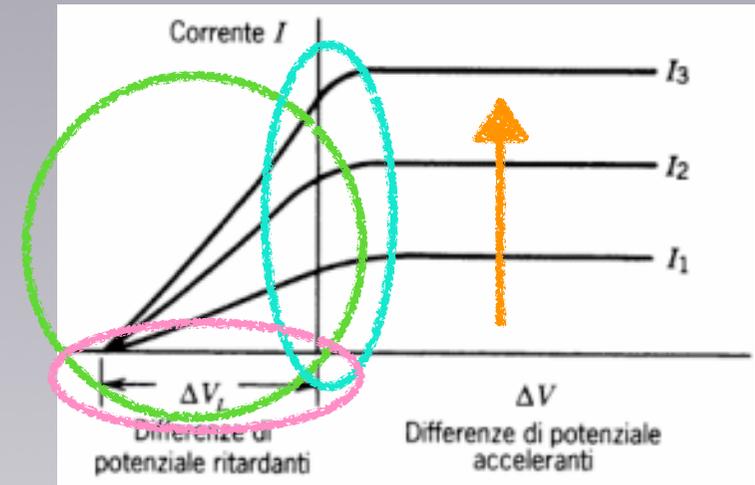
Gli elettroni vengono emessi con una certa energia cinetica, per cui anche con un potenziale negativo si ha il passaggio di corrente, fino al "potenziale d'arresto"

Al crescere della differenza di potenziale, la corrente aumenta fino a stabilizzarsi: tutti gli elettroni emessi vengono raccolti.

Il potenziale d'arresto non dipende dall'intensità luminosa incidente.

Esiste una frequenza di soglia, al di sotto della quale l'effetto fotoelettrico scompare

interpretato da Einstein nel 1905,  
con i quanti di Planck



$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W \rightarrow h\nu > W$$

$$W = h\nu_{\text{soglia}} \Rightarrow \nu_{\text{soglia}} = \frac{W}{h}$$

# applicazioni dell'effetto fotoelettrico

## Fotodiodi

strumenti che provocano un passaggio di corrente quando investiti da radiazione luminosa

fotodiodi a giunzione

## Fotocellule

dispositivi di sicurezza o di controllo

## Rivelatori di segnali luminosi

a vuoto (fotomoltiplicatori)

a stato solido (fotodiodi a valanga)

## Elaborazione di segnali ottici digitali

lettori CD/DVD

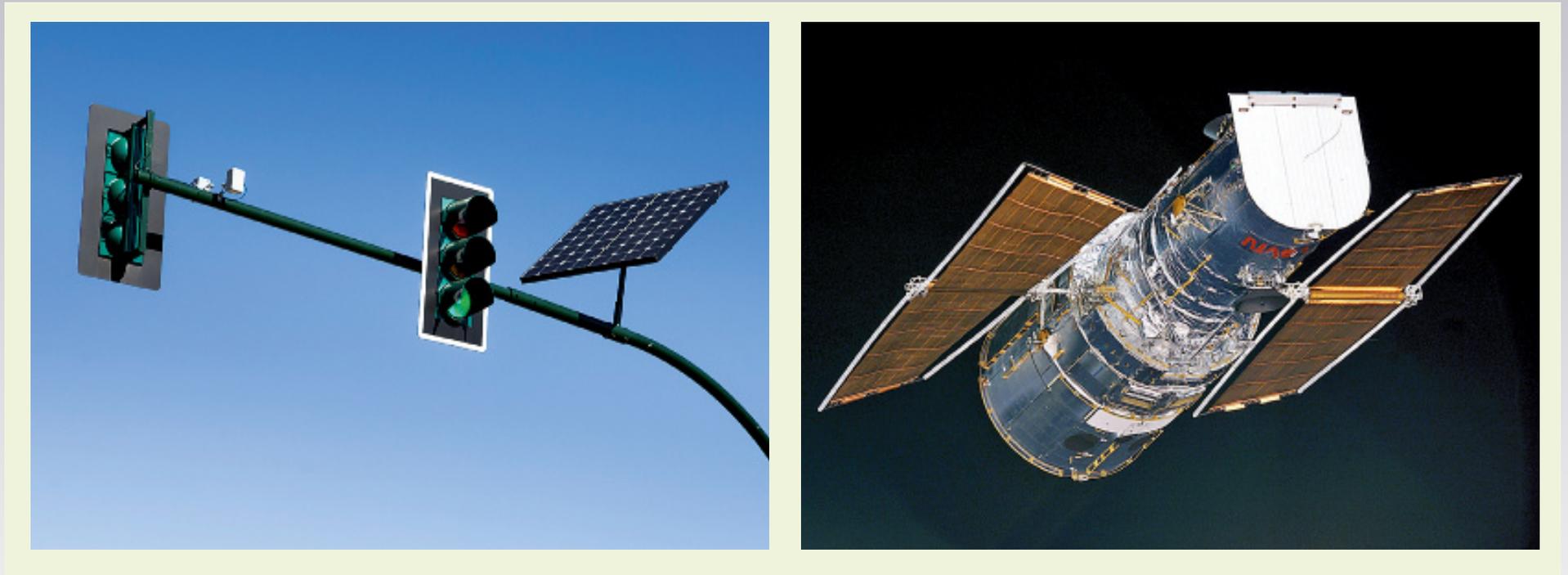
trasmissioni in fibra ottica

## CCD

dispositivi con milioni di pixel, letti con registri a scorrimento

# effetto fotovoltaico

applicazione diretta dell'effetto fotoelettrico per generare una corrente



# Effetto Compton (1923)

Diffusione dei raggi X o gamma sugli elettroni del mezzo.

I fotoni diffusi hanno frequenza minore di quelli incidenti.

Classicamente, un'onda e.m. che incide su cariche elettriche le fa oscillare alla stessa frequenza e l'onda diffusa deve avere quindi la stessa frequenza dell'onda incidente.

La frequenza dei raggi diffusi è invece minore.

Se un singolo fotone cede energia ad un elettrone del mezzo, la sua energia deve diminuire, e con essa la sua frequenza, secondo la legge di Planck

L'effetto Compton è quindi una ulteriore conferma sia della natura corpuscolare dei fotoni, sia dell'ipotesi di Planck  $E = h\nu$

# Cinematica dell'effetto Compton

urto centrale col fotone che rimbalza all'indietro

$$E_\gamma = cp_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$(p_e c)^2 = E_e^2 - (m_e c^2)^2$$

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma$$

conservazione impulso:  $\frac{E_\gamma}{c} = p_e - \frac{E'_\gamma}{c} \Rightarrow cp_e = E_\gamma + E'_\gamma$

conservazione energia:  $E_e = T_e + m_e c^2 = E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2$

$$(p_e c)^2 = (E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2$$

$$(E_\gamma + E'_\gamma)^2 = (E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2$$

$$E_\gamma^2 + E_\gamma'^2 + 2E_\gamma E'_\gamma = E_\gamma^2 + E_\gamma'^2 - 2E_\gamma E'_\gamma + 2(E_\gamma - E'_\gamma)m_e c^2 + (m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2$$

$$4E_\gamma E'_\gamma = 2(E_\gamma - E'_\gamma)m_e c^2$$

$$2 = \left( \frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} \right) m_e c^2 = \frac{1}{hc} (\lambda' - \lambda) m_e c^2$$

$$(\lambda' - \lambda) = 2 \frac{h}{m_e c}$$

# Cinematica dell'effetto Compton

## caso generale

conservazione dell'impulso:

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} \cos \vartheta + p \cos \varphi$$

$$0 = \frac{E'_\gamma}{c} \sin \vartheta - p \sin \varphi$$

$$p \cos \varphi = \frac{E_\gamma}{c} - \frac{E'_\gamma}{c} \cos \vartheta$$

$$p \sin \varphi = \frac{E'_\gamma}{c} \sin \vartheta$$

$$(pc)^2 = (E_\gamma)^2 + (E'_\gamma)^2 - 2E_\gamma E'_\gamma \cos \vartheta$$

# Cinematica dell'effetto Compton

## caso generale

$$E_\gamma = cp_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$(p_e c)^2 = E_e^2 - (m_e c^2)^2$$

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma$$

conservazione impulso:  $(cp_e)^2 = E_\gamma^2 + E'_\gamma{}^2 - 2E_\gamma E'_\gamma \cos \vartheta$

conservazione energia:  $E_e = T_e + m_e c^2 = E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2$

$$(p_e c)^2 = (E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2$$

$$E_\gamma^2 + E'_\gamma{}^2 - 2E_\gamma E'_\gamma \cos \vartheta = (E_\gamma - E'_\gamma + m_e c^2)^2 - (m_e c^2)^2$$

$$E_\gamma E'_\gamma (1 - \cos \vartheta) = (E_\gamma - E'_\gamma) m_e c^2$$

$$(\lambda' - \lambda) = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \vartheta)$$

# lunghezza d'onda Compton dell'elettrone

$$\lambda_C = h/m_e c = 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

lunghezza d'onda Compton dell'elettrone

Per cambiare significativamente  $\lambda$

$$E_\gamma \sim hc/\lambda_C = m_e c^2$$