

GLI ESPERIMENTI E LA ^{incontro #7 - 07.03.2018} NASCITA DELLA FISICA _{verso la fisica moderna} MODERNA

Attraverso gli esperimenti finora abbiamo esplorato la Fisica Classica. Ora dobbiamo fare un salto e passare alla **Fisica Moderna/ Quantistica**.

Come è possibile fare questo salto con gli esperimenti? Lo sviluppo della meccanica quantistica non ci sarebbe stato se all'inizio del secolo scorso importanti esperimenti *non avessero dimostrato la teoria* (es. **Frank&Hertz**) o non avessero addirittura *indicato la strada giusta alle moderne teorie quantistiche* (es. Esperimento di **Rutherford, Stern & Gerlach**). Non solo....



GLI ESPERIMENTI E LA NASCITA DELLA FISICA MODERNA

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

Ancora oggi la ricerca nel campo della struttura della materia si basa su importanti esperimenti che cercano di ricavare le proprietà strutturali ed elettroniche della materia studiando **l'interazione di un materiale** con la **luce/radiazione elettromagnetica** (esperimenti di Riflettività/Fotoemissione), con **i neutroni** (esperimenti di scattering recentemente applicati anche allo studio delle Belle Arti...), con gli **elettroni** (Spettroscopia elettronica sensibile alla superficie).

Da dove nasce tutto quello che vedremo???...Da una rivoluzione....

... da una rivoluzione: quella che ha portato alla
*crisi della Fisica Classica e alla nascita della Moderna Teoria
Quantistica*

**La quantizzazione
e la fine del
dualismo onda-particella**

“I 30 anni che sconvolsero la Fisica”, Gamov



La Fisica Classica. Il determinismo:

Alla fine dell'800...La Fisica Classica deterministica era *all'apice del suo successo* per esempio in meccanica note le leggi del moto era possibile conoscere in ogni momento posizione e velocità di ogni punto materiale ...

Le leggi di Newton e le trasformazioni di Galileo permettevano di descrivere qualsiasi moto di una particella anche in sistemi in moto relativo

Alla FINE DELL'800...

La Fisica Classica. Il determinismo:

Il panorama intellettuale era tanto promettente che uno dei più eminenti scienziati britannici, lord Kelvin, non poté fare a meno di pronosticare nel 1900 l'avvicinarsi di un'epoca storica in cui la fisica avrebbe praticamente raggiunto tutti i suoi obiettivi e non vi sarebbe stato molto altro da scoprire.

Alla FINE DELL'800... incontro #7 - 07.03.2018 verso la fisica moderna

Il dualismo onda-particella



Verso l'unificazione:

Maxwell, con le sue equazioni aveva operato il primo passo fondamentale verso **la grande unificazione** unendo, nelle sue equazioni, la spiegazione dei fenomeni elettrici e magnetici. Era stato dimostrato che cariche in oscillazione generano un'onda em

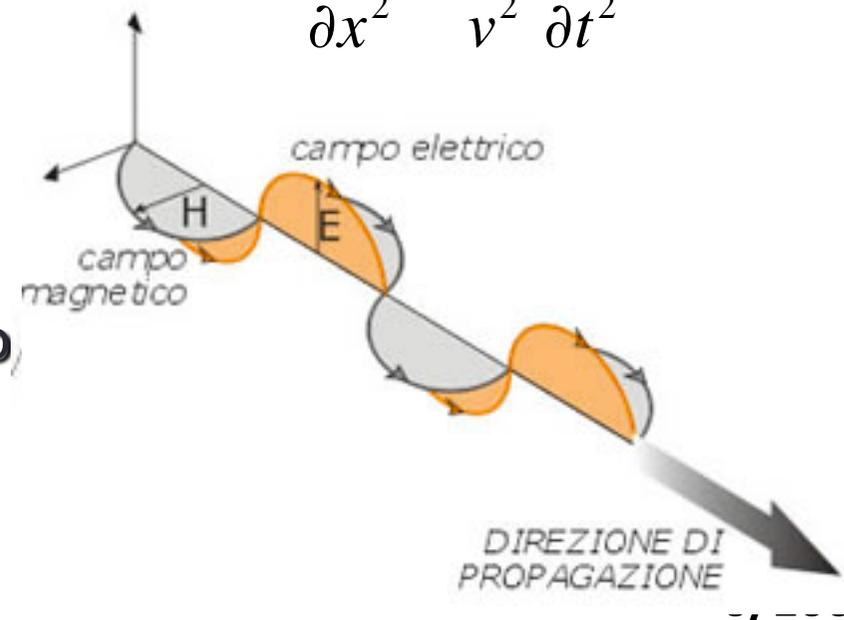
Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

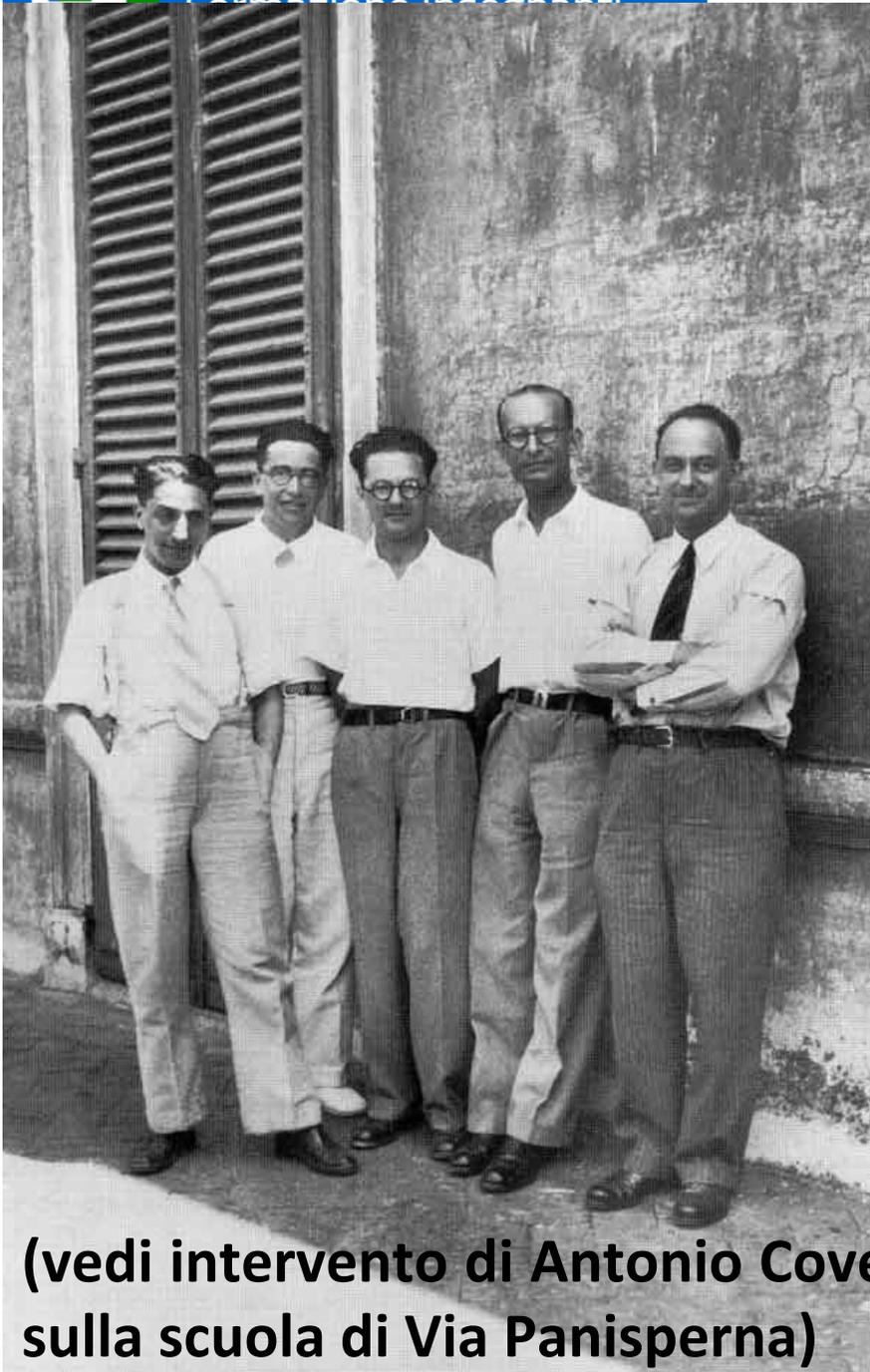
A. Sgarlata - a.a. 2017/'18

Esisteva una precisa distinzione tra:

- **particelle** dotate di massa, che obbedivano alle equazioni di Newton, e **onde**, caratterizzate da lunghezza d'onda e frequenza che obbedivano alle leggi della meccanica ondulatoria.

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$$





(vedi intervento di Antonio Covello
sulla scuola di Via Panisperna)

Il contesto storico incontro #7 - 07.03.2018 alla fine dell'800 verso la fisica moderna

Emilio Segrè scrive: «Alla fine del XIX secolo la fisica classica aveva raggiunto una struttura mirabile. La meccanica era stata portata a maturità da Newton e sistematizzata da Lagrange in modo tale che sembrava la cima di ogni scienza e che ogni scienza dovesse essere ridotta a meccanica...

...In ogni modo su questi due pilastri (Newton e Maxwell) sembrava si reggesse la macchina del mondo. Non per nulla Boltzmann, citando Goethe, aveva detto a proposito delle equazioni di Maxwell:

“Fu un Dio che scrisse questi segni?”



Alla FINE DELL'800

Ma alla fine dell'800 alcuni esperimenti mostrano dei risultati **non spiegabili dalla** pura applicazione della **Fisica Classica**.

Ogni volta che la tecnologia ha offerto all'uomo strumenti di indagine piu' sofisticati e potenti l'intuizione di grandi scienziati ha permesso un ***grande, improvviso e inaspettato passo in avanti verso la comprensione dei fenomeni della natura.***

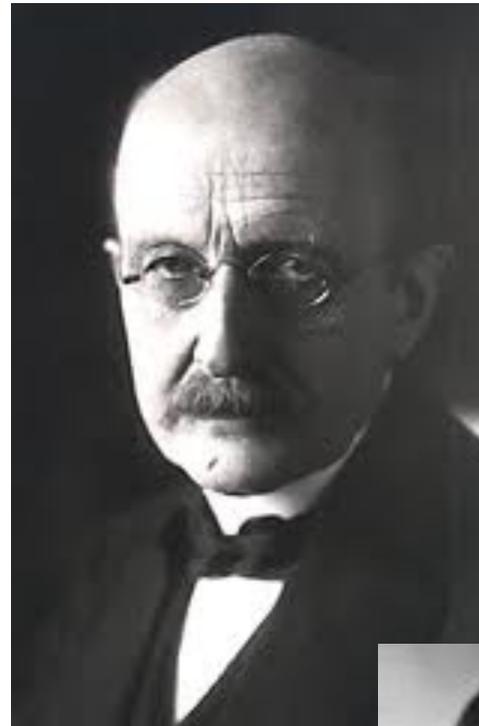


Alcuni dei PROTAGONISTI

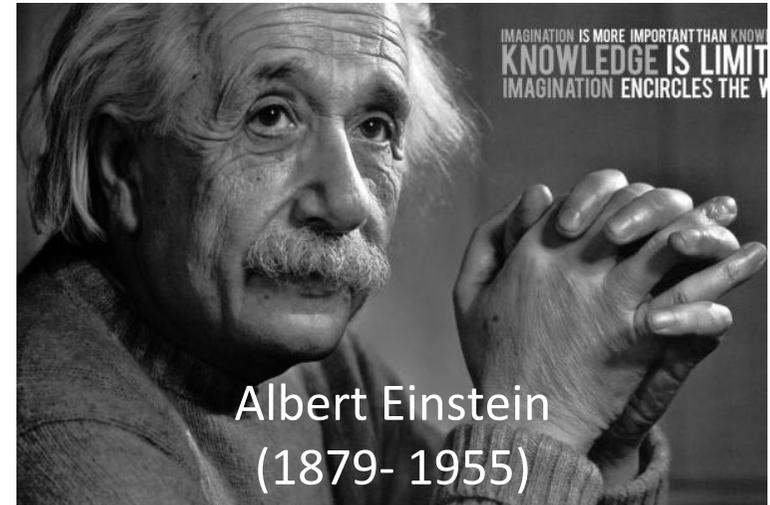
incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna



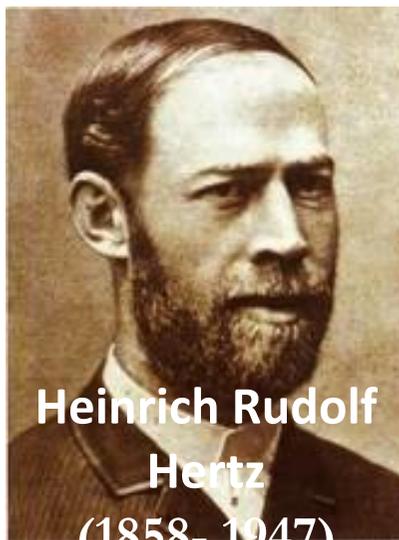
Louis de Broglie
(1892 - 1987)



Max Planck
(1858- 1947)



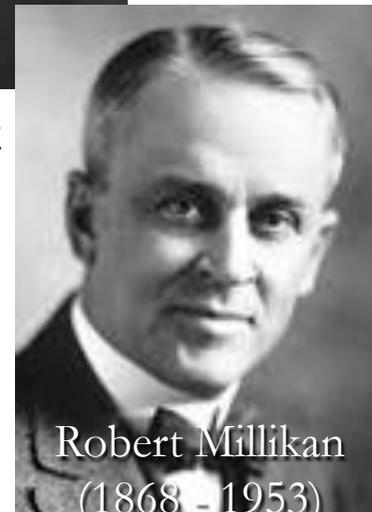
Albert Einstein
(1879- 1955)



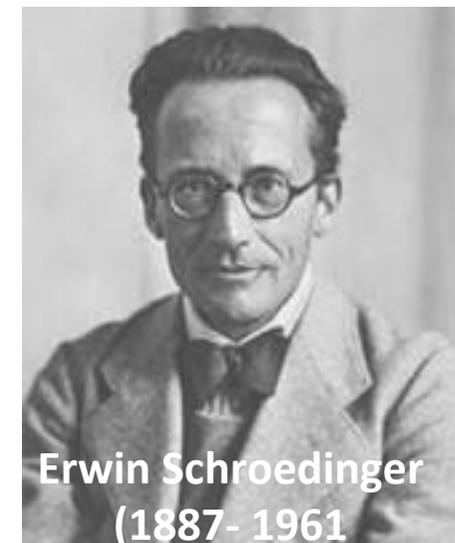
Heinrich Rudolf Hertz
(1858 - 1947)



Werner Karl Heisenberg
(1901 - 1976)



Robert Millikan
(1868 - 1953)

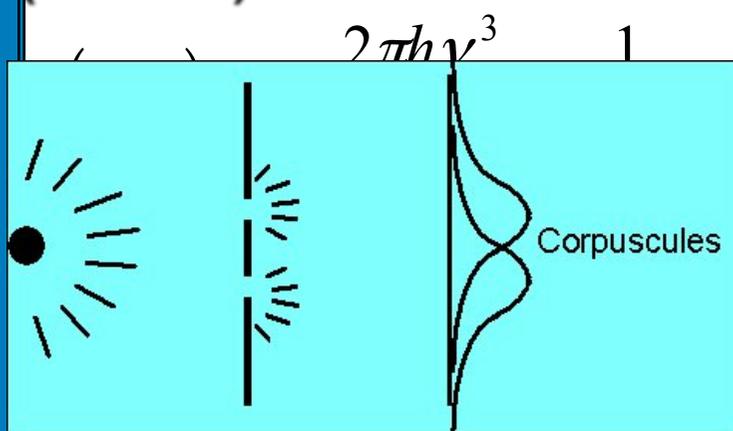
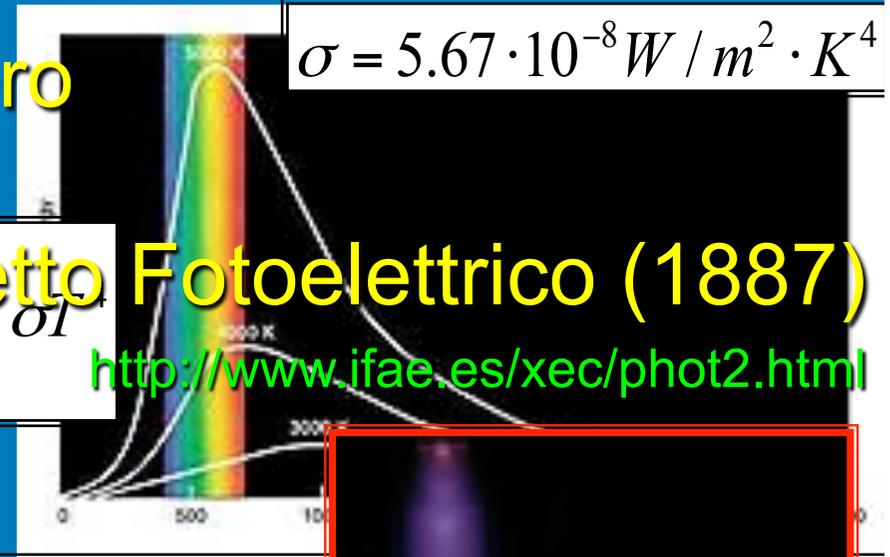


Erwin Schrodinger
(1887- 1961)

"I 30 anni che sconvolsero la Fisica", Gamov

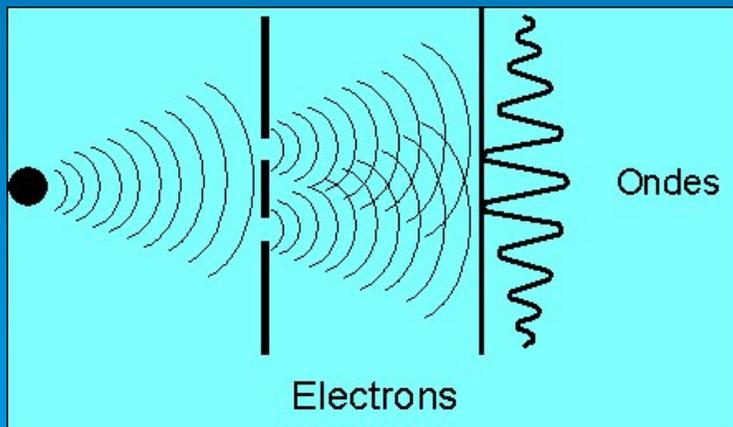
GLI ESPERIMENTI

➤ La radiazione di corpo nero (1862)



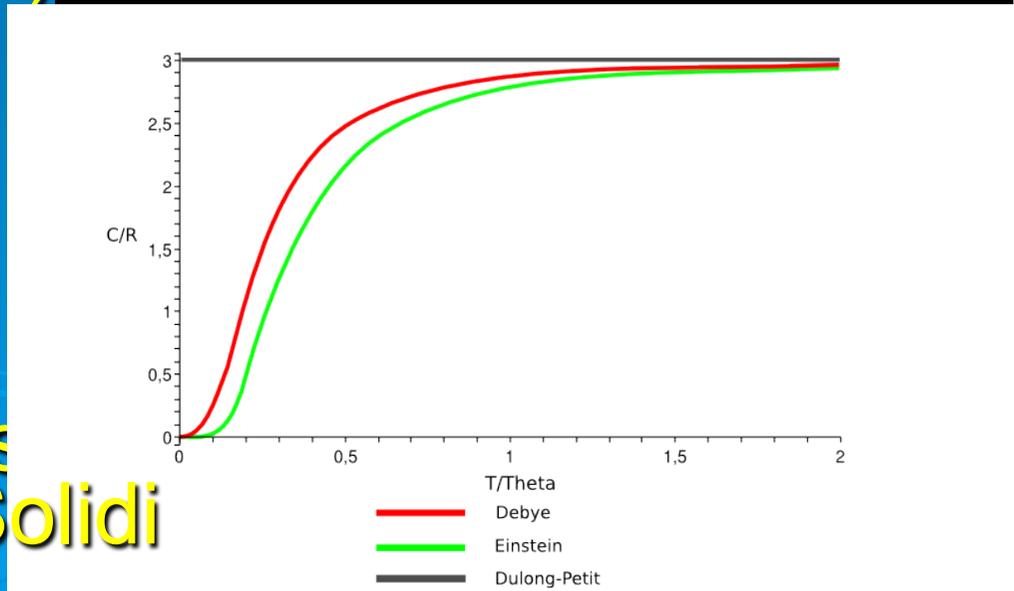
➤ Effetto Fotoelettrico (1887)

$dv \Rightarrow I_T = \sigma I^2$



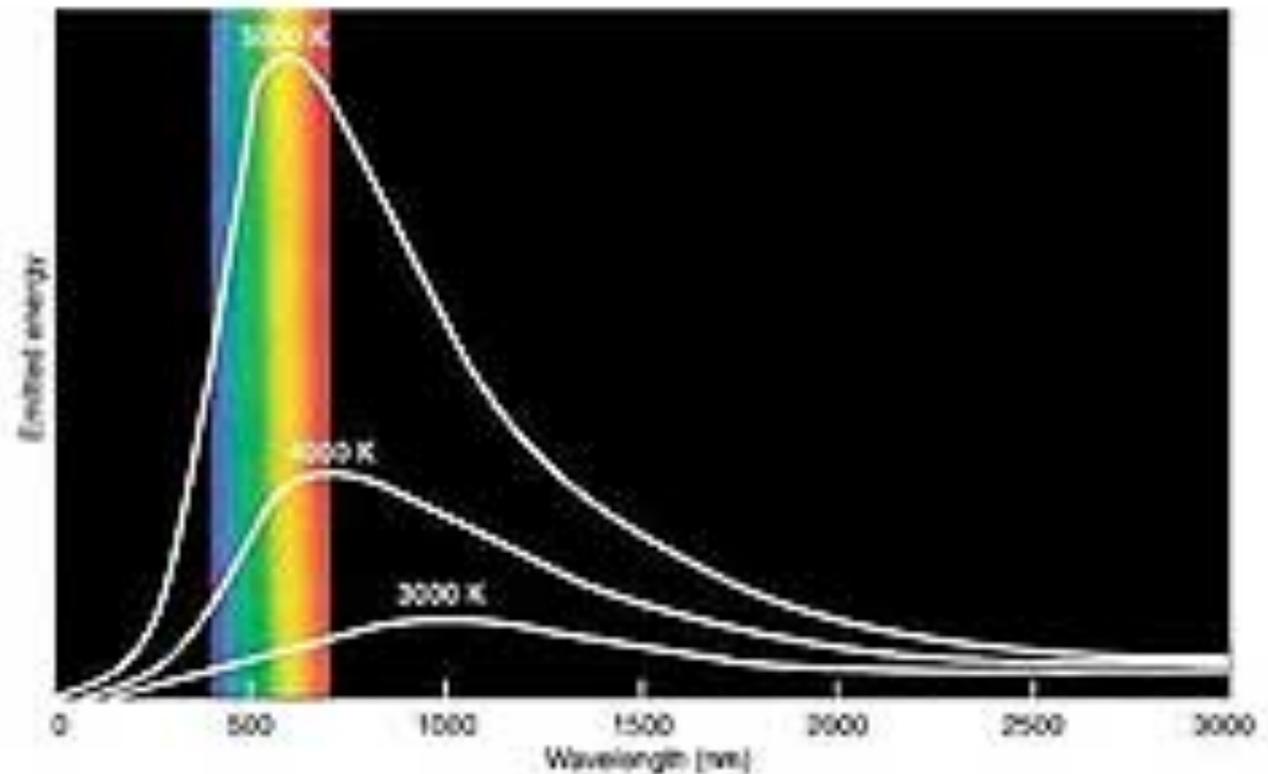
1923)

➤ Calore Specifico dei Solidi (1892)



GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO

- La radiazione di corpo nero (1862)



GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO



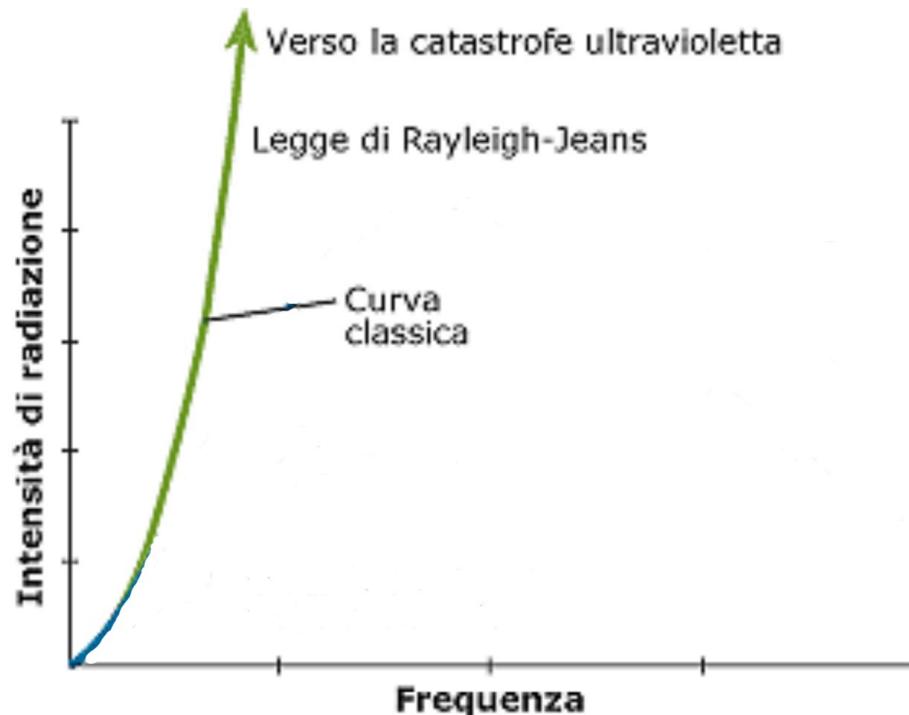
da un corpo solido freddo non percepiamo alcuna emissione, ma un corpo caldo emette radiazione em sottoforma di calore (dovuta al moto vibrazionale delle cariche). Il massimo della radiazione emessa si ha per una frequenza (lunghezza d'onda) che varia o meglio cresce con la temperatura. Al crescere della **temperatura** infatti il corpo comincia a diventare **luminoso** e a cambiare **colore**



GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

➤ La radiazione di corpo nero (1862)



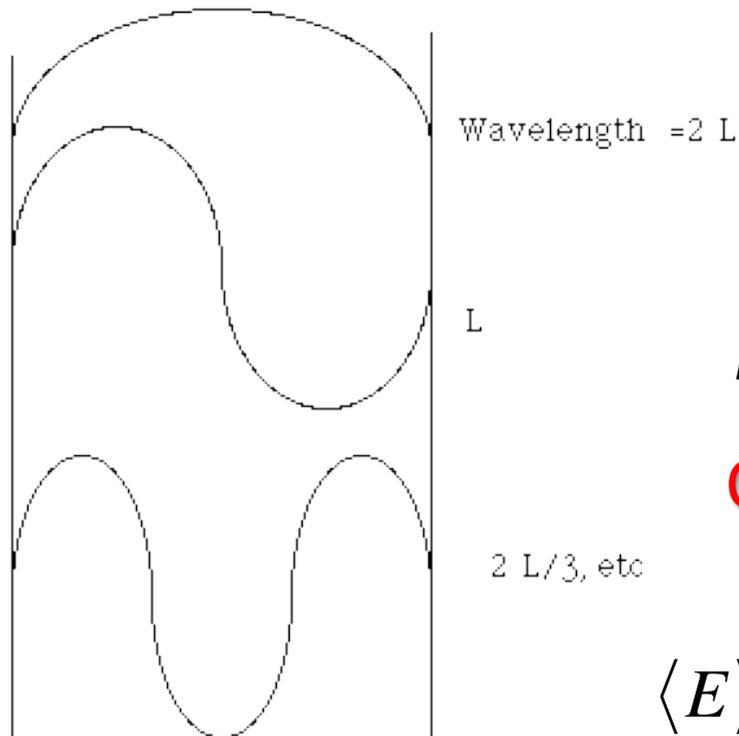
Se si calcola la radiazione emessa da un corpo nero usando i principi della fisica classica si ottiene (curva verde) un andamento che si accorda al risultato sperimentale solo per piccole frequenze

mentre diverge per grandi ν : la **CATASTROFE ULTRAVIOLETTA**. Piu' in dettaglio....

GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

➤ La radiazione di corpo nero (1862)



Il numero di onde stazionarie in una cavita' cubica di lato L e con lunghezza d'onda compresa tra $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ e' :

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} \langle E \rangle = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 \langle E \rangle = \rho(\nu)$$

Classicamente

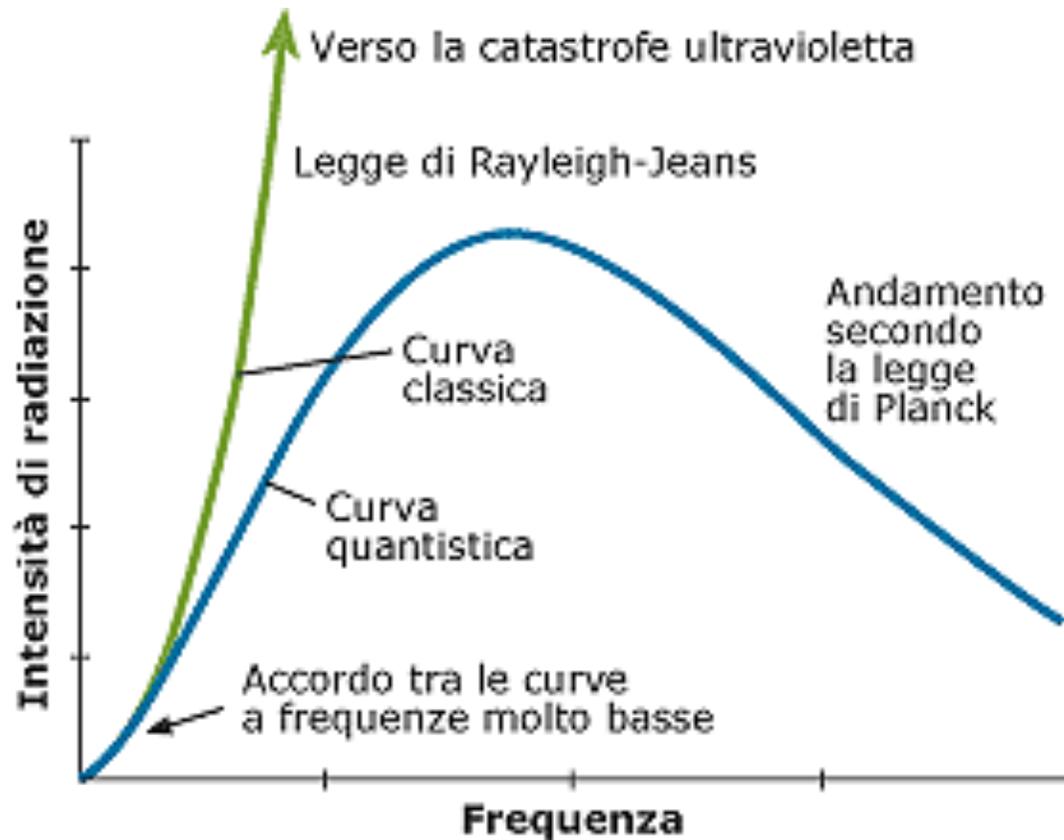
$$\langle E \rangle = \frac{\int_0^{\infty} E e^{-\beta E} dE}{\int_0^{\infty} e^{-\beta E} dE} = -\frac{d}{d\beta} \left[\ln \int_0^{\infty} e^{-\beta E} dE \right] = KT$$

La CATASTROFE ULTRAVIOLETTA

GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

➤ La radiazione di corpo nero (1862)



COME SPIEGARE I DATI
DELL'ESPERIMENTO?

**CON LA
QUANTIZZAZIONE
DI PLANCK**

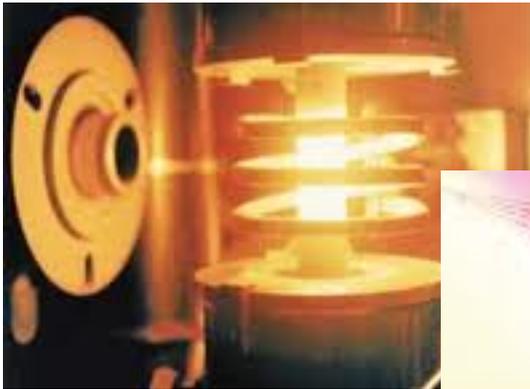
$$\langle E \rangle = KT \Rightarrow \langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}$$



GLI ESPERIMENTI: IL CORPO NERO

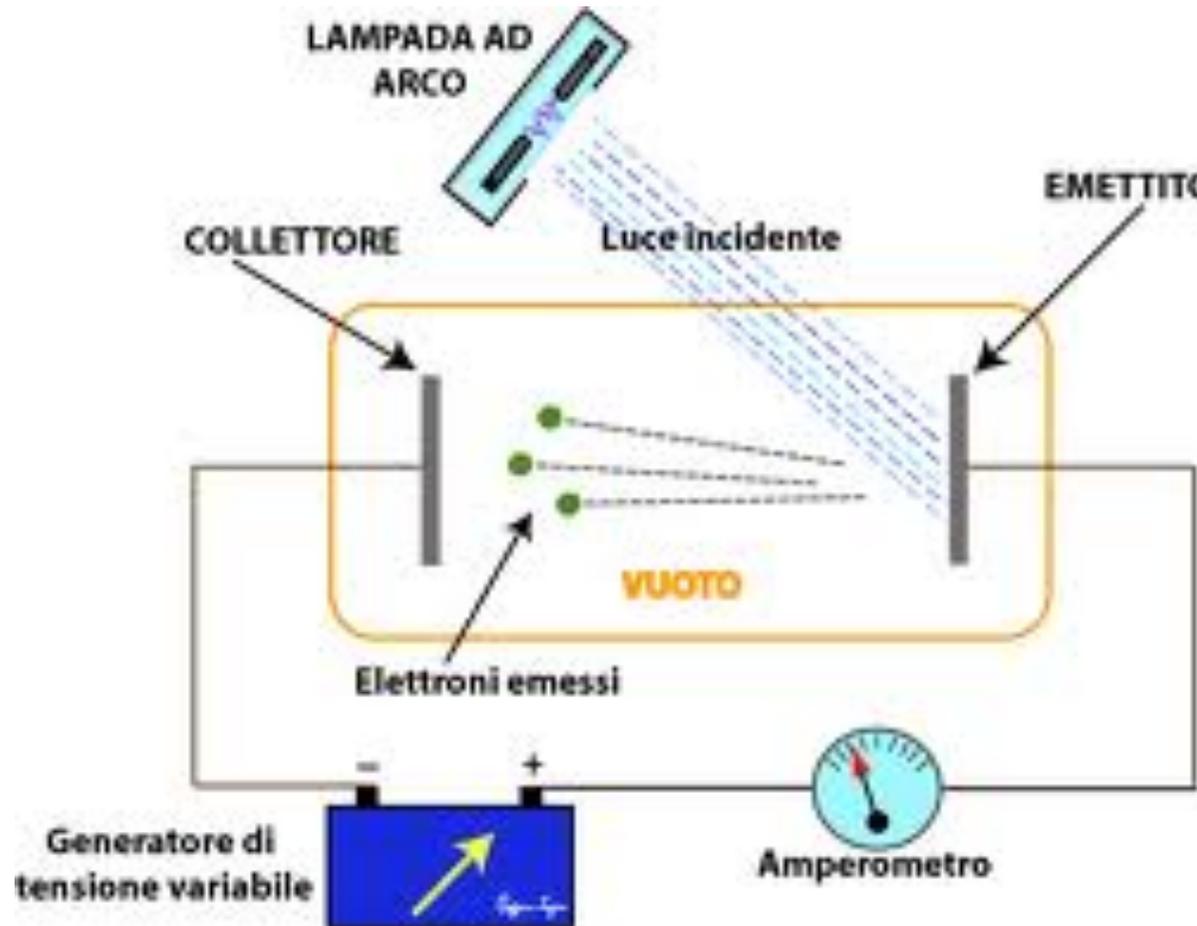
incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

➤ La radiazione di corpo nero oggi: IL PIROMETRO OTTICO



L'EFFETTO FOTOELETTRICO

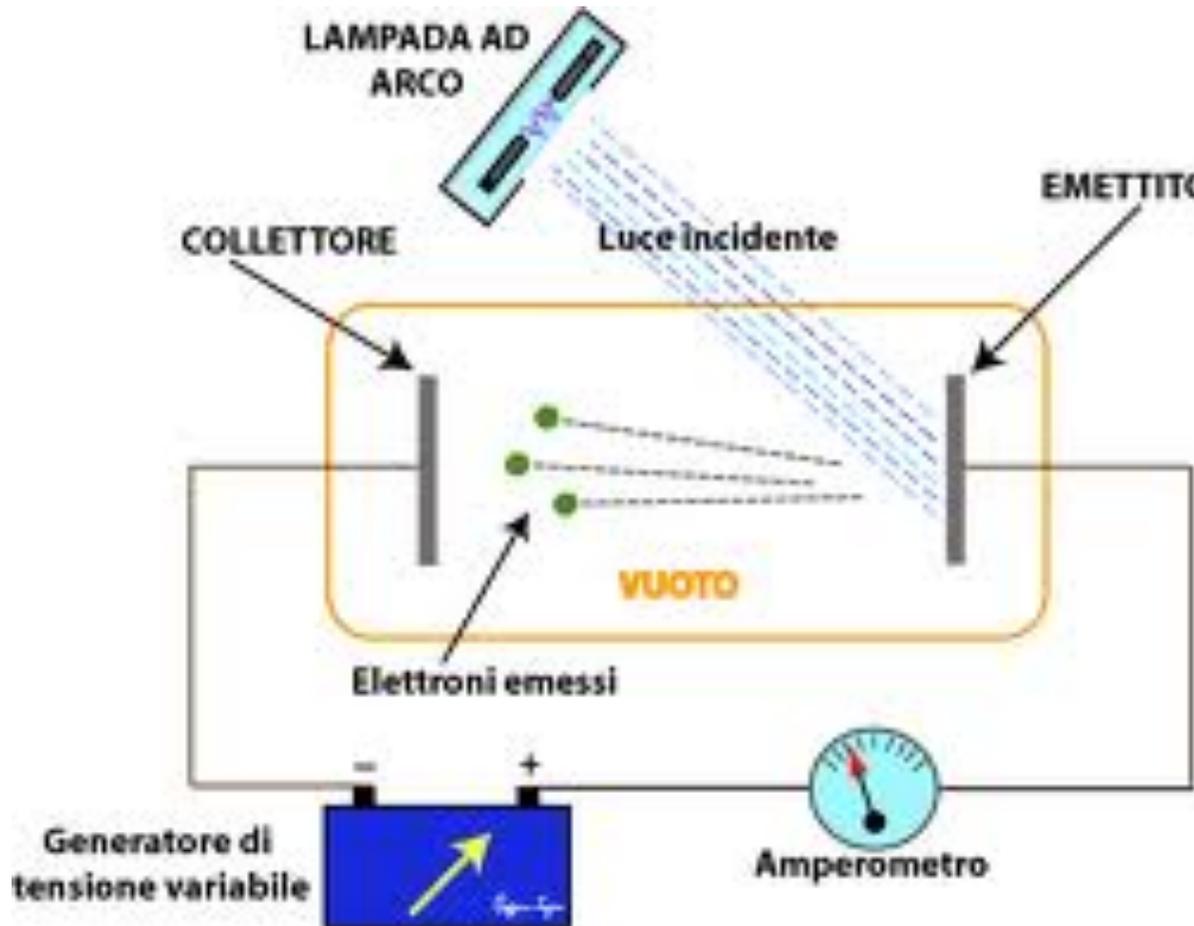
➤ Effetto Fotoelettrico (1887)



Nel 1887 Hertz dimostrò che è possibile estrarre cariche negative da un metallo investito da una radiazione em di frequenza "abbastanza" alta

L'EFFETTO FOTOELETTRICO

➤ Effetto Fotoelettrico (1887)



Nel 1887 Hertz dimostrò che è possibile estrarre cariche negative da un metallo investito da una radiazione em di frequenza "abbastanza" alta

L'EFFETTO FOTOELETTRICO

➤ Effetto Fotoelettrico (1887)

La Fisica Classica non riusciva a dimostrare due fatti evidenti nell'esperimento:

1. Il fatto che l'emissione fosse **istantanea**
2. il fatto che l'**energia cinetica degli elettroni emessi non dipendesse dall'intensità** della sorgente della radiazione incidente

Tra poco noi cercheremo di riprodurre l'effetto fotoelettrico evidenziando i risultati dell'esperimento eseguito da Hertz

L'EFFETTO FOTOELETTRICO

➤ Effetto Fotoelettrico (1887)

La Fisica Classica non riusciva a dimostrare due fatti evidenti nell'esperimento:

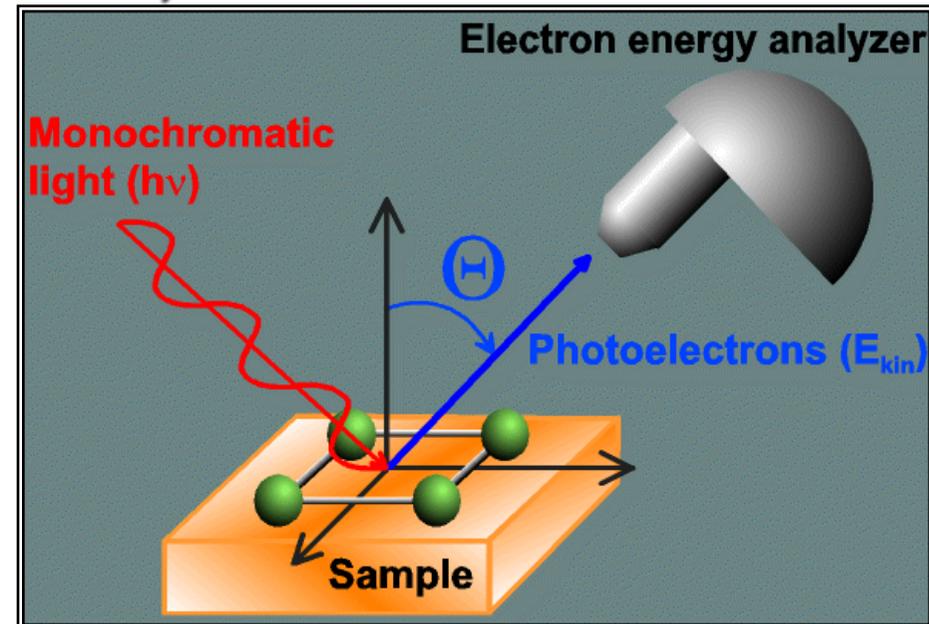
1. Il fatto che l'emissione fosse **istantanea**
2. il fatto che l'**energia cinetica degli elettroni emessi non dipendesse dall'intensità** della sorgente della radiazione incidente

Tra poco noi cercheremo di riprodurre l'effetto fotoelettrico evidenziando i risultati dell'esperimento eseguito da Hertz

L'EFFETTO FOTOELETTRICO

➤ Effetto Fotoelettrico (1887)

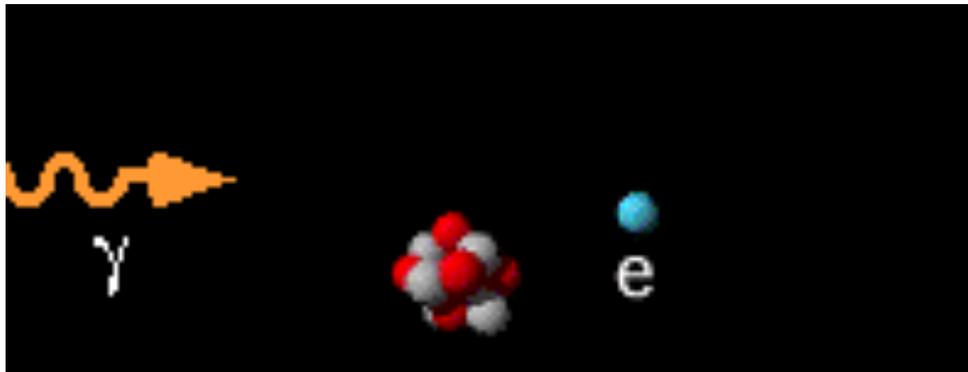
Una nota: Ancora oggi l'effetto fotoelettrico è alla base di uno degli esperimenti più efficaci per studiare la struttura elettronica dei materiali



NEL 1921 ALBERT EINSTEIN FU INSIGNITO del premio Nobel con la seguente motivazione: *Ad Albert Einstein, per i suoi servizi alla fisica teorica e specialmente per la sua scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico*

GLI ESPERIMENTI: L'EFFETTO COMPTON

➤ Effetto COMPTON (1923)



COMPTON aveva inviato un fascio di fotoni incidenti di lunghezza d'onda λ_{inc} contro un bersaglio di grafite e aveva misurato dopo l'interazione un fascio di fotoni diffusi ad un angolo θ di lunghezza d'onda $\lambda_{diff} < \lambda_{inc}$ piu' un elettrone e-

Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

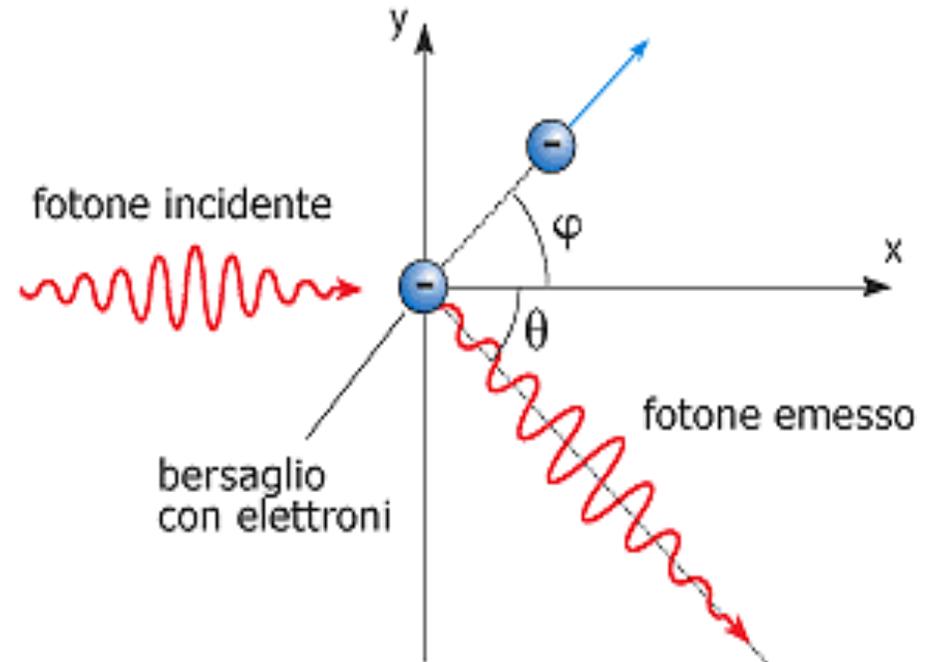
GLI ESPERIMENTI: L'EFFETTO COMPTON

➤ Effetto COMPTON (1923)

COMPTON misuro' la differenza di lunghezze d'onda dei fotoni incidenti e diffusi trovando :

$$\Delta\lambda = \lambda_{Compton} (1 - \cos\theta)$$

Dove $\lambda_{COMPTON} = 2.14 \times 10^{-12} \text{ m}$



Tale formula si dimostra facilmente applicando le leggi dell'urto tra due corpi materiali ai fotoni

E' LA FINE DEL DUALISMO ONDA/PARTICELLA

L'EFFETTO COMPTON

➤ Effetto COMPTON (1923)

$$\begin{cases} p_0 = p_1 \cos \theta + p \cos \phi \\ p_1 \sin \theta = p \sin \phi \end{cases} \Rightarrow p_0^2 + p_1^2 - 2p_0 p_1 \cos \theta = p^2$$

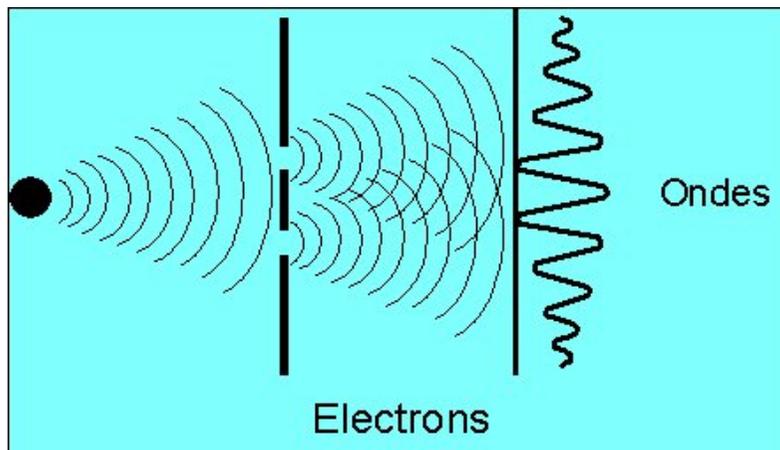
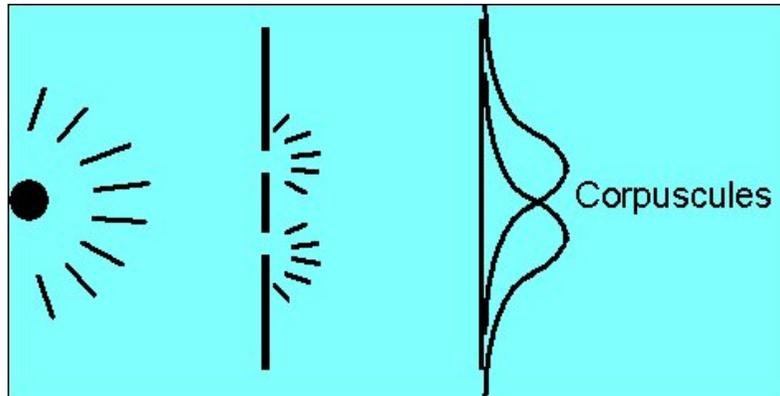
$$E_0 + mc^2 = E_1 + \left(m^2 c^4 + p_2^2 c^2 \right)^{1/2}$$

$$T_2 = \left(m^2 c^4 + p_2^2 c^2 \right)^{1/2} - mc^2 = E_0 - E_1 = c(p_0 - p_1)$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

➤ **Diffrazione di elettroni**



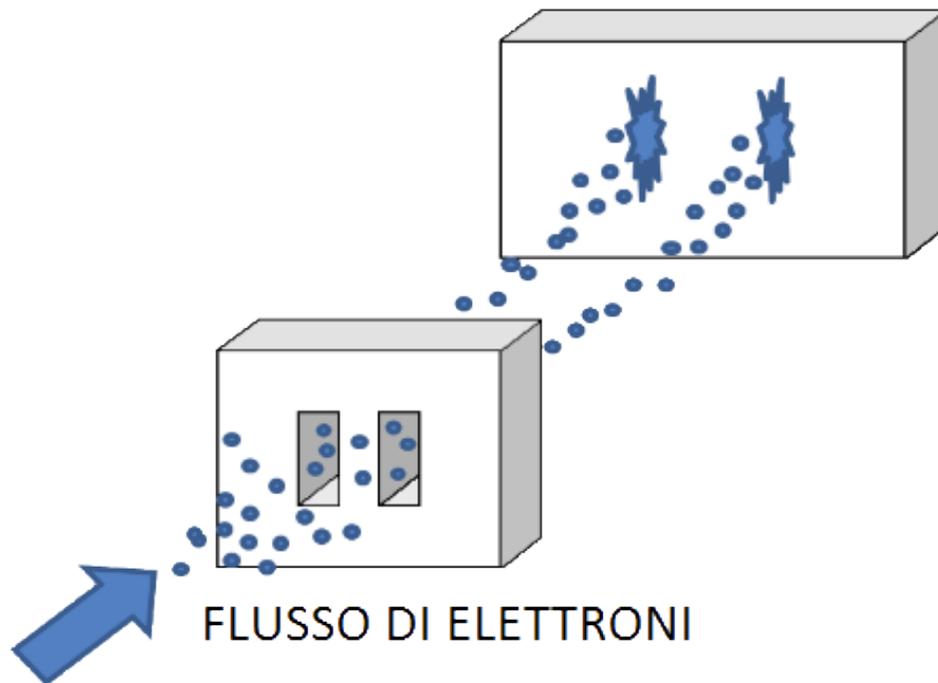
Classicamente esistevano:

- **le particelle** dotate di massa la cui interazione e' regolata dalla conservazione della quantita' di moto e dell'energia cinetica

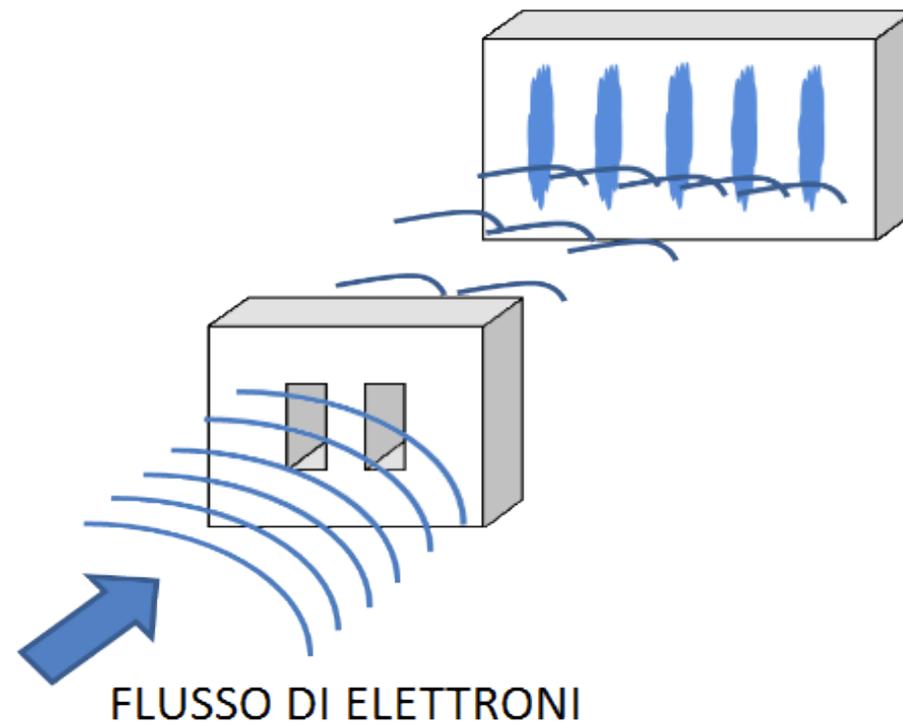
- **le onde** caratterizzate da una lunghezza d'onda e la cui interazione e' regolata dai fenomeni di interferenza/diffrazione

Alla FINE DELL'800...

EFFETTO SE FOSSERO PARTICELLE

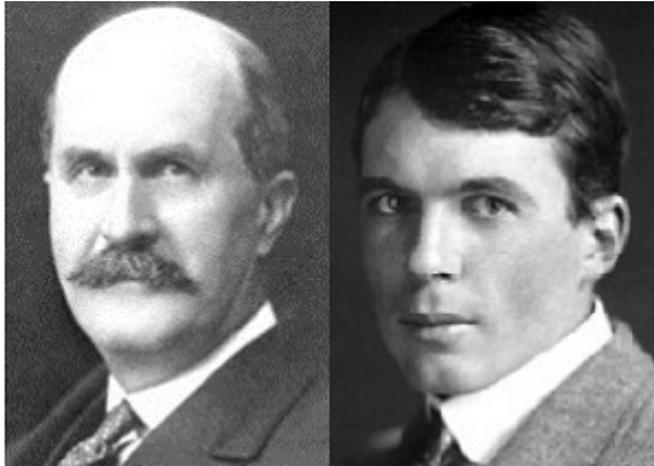


EFFETTO SE FOSSERO ONDE

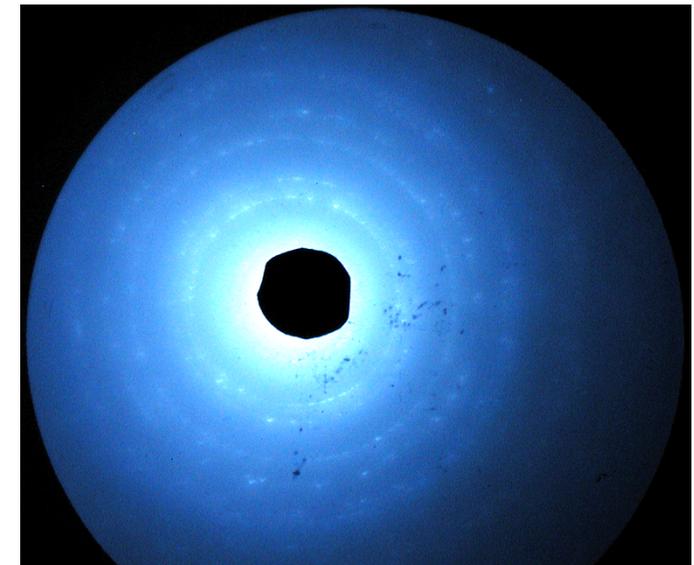
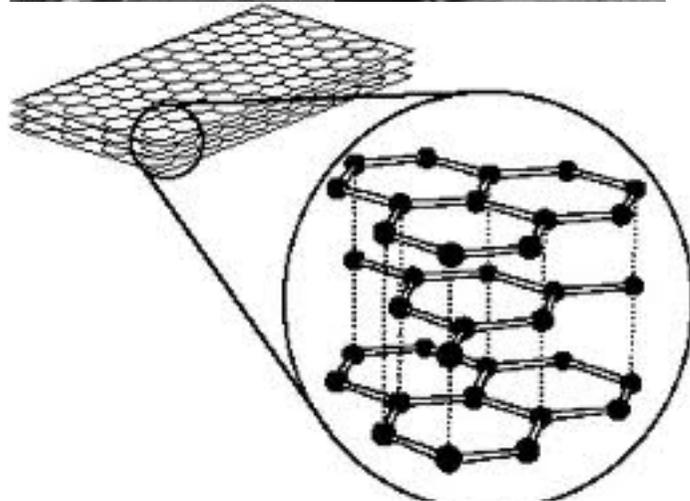


DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

➤ **Diffrazione da Raggi X**



Bragg padre e figlio (premi Nobel nel 1915) dimostrarono che illuminando con un fascio di raggi X un cristallo si ottiene una figura di diffrazione da cui si può ricavare la struttura cristallografica del solido



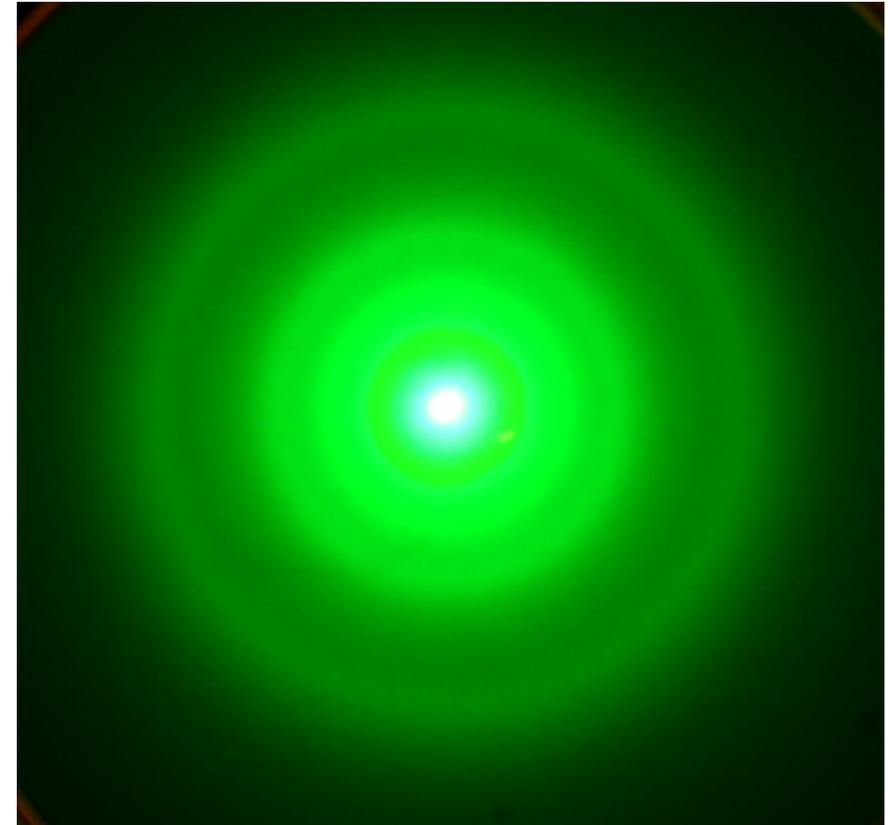
Un esempio Figura di diffrazione da elettroni di un campione di grafite

DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

➤ **Diffrazione da elettroni**

Se si illumina un campione con un fascio di elettroni si ottiene una figura di diffrazione analoga a quella che si ottiene con i raggi X.

In pratica gli elettroni mostrano fenomeni di diffrazione proprio come le onde



UN'ALTRA PROVA SPERIMENTALE CHE SANCISCE LA FINE DEL DUALISMO ONDA/PARTICELLA

DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

➤ Diffrazione da elettroni

Una NOTA: ancora oggi uno degli esperimenti che si fa nei laboratori di ricerca per stabilire la ricostruzione delle superfici e' basata sulla diffrazione da elettroni lenti con il LEED (Low Energy Electron Diffraction)

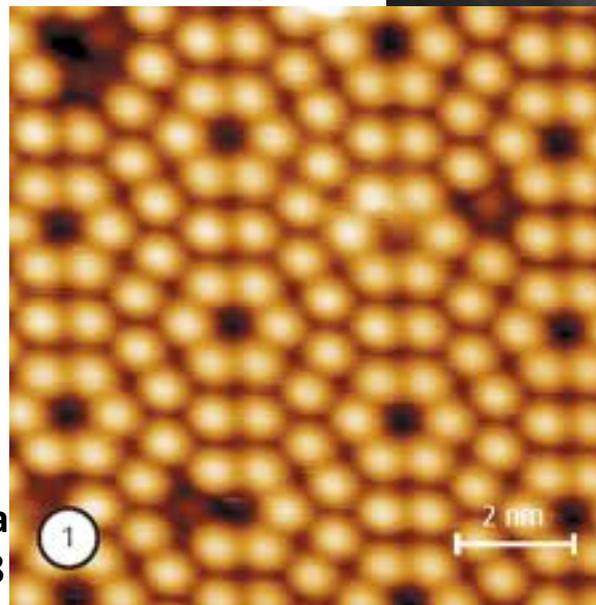
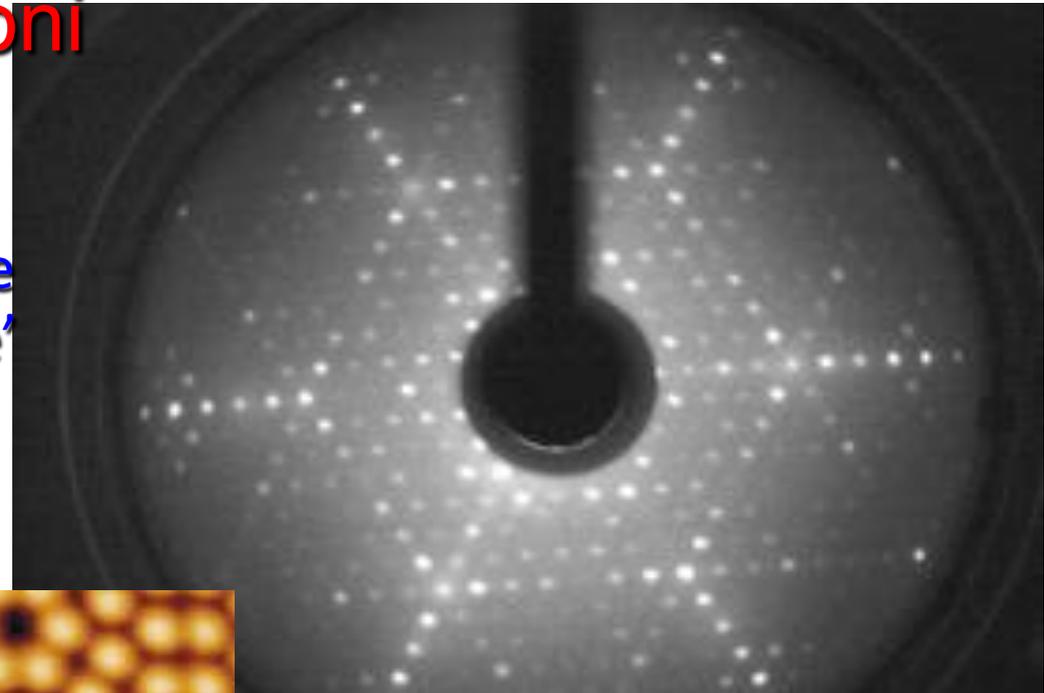


Immagine LEED e topografia misurata con microscopio a scansione tunnel di una superficie di Si(111) 7x7

GLI ESPERIMENTI:

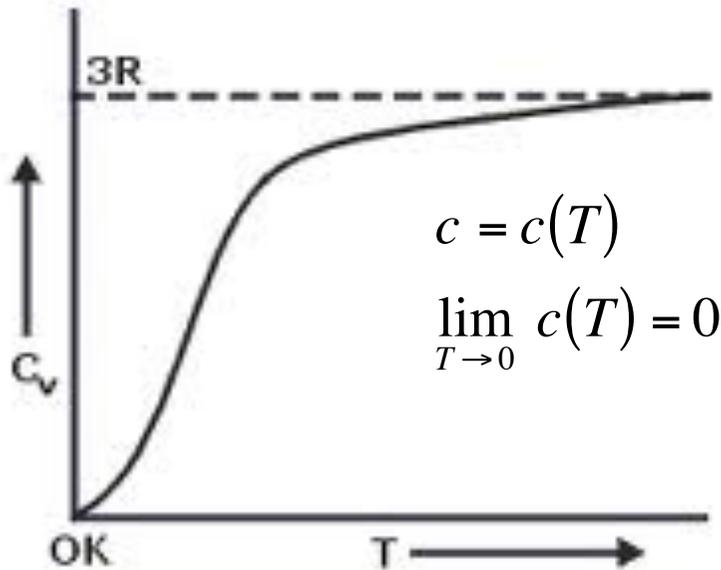
IL CALORE SPECIFICO DEI

➤ Il calore specifico dei solidi

Classicamente: Legge di Dulong e Petit (1819)

$$c_V = 3R$$

Verso la fine dell'800 l'esperimento dimostrò che diversi solidi avevano un calore specifico non costante ma diminuiva al diminuire della T



Variation of c_V with T

Più specificatamente si dimostrò che il calore specifico dei solidi tende a 0 quando T tende a 0 con un andamento specifico proporzionale a T^3

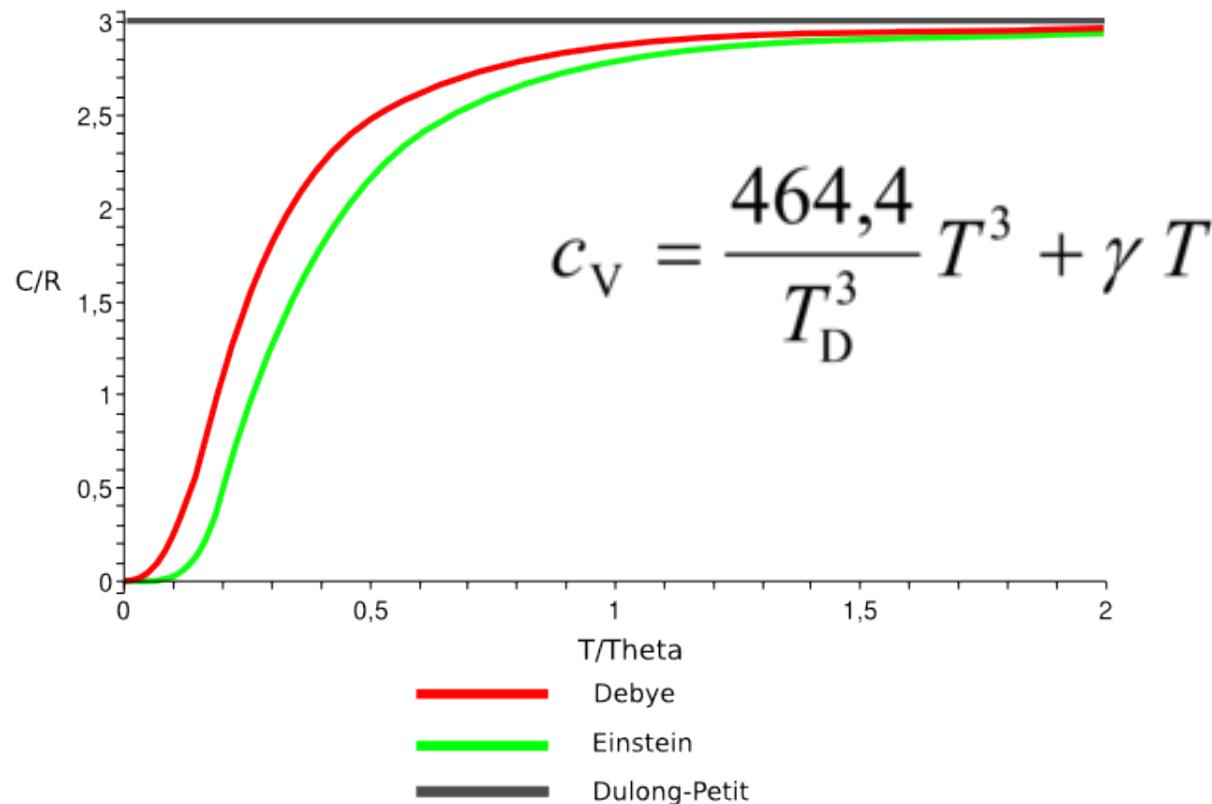
Come spiegarlo?

Ci penso' Einstein con la
moderna

Quantizzazione dell'energia 30/100

GLI ESPERIMENTI: IL CALORE SPECIFICO DEI SOLIDI

➤ Il calore specifico dei solidi



GLI ESPERIMENTI: IL CALORE SPECIFICO DEI SOLIDI

➤ **Il calore specifico dei solidi**

$$E = nh\nu$$

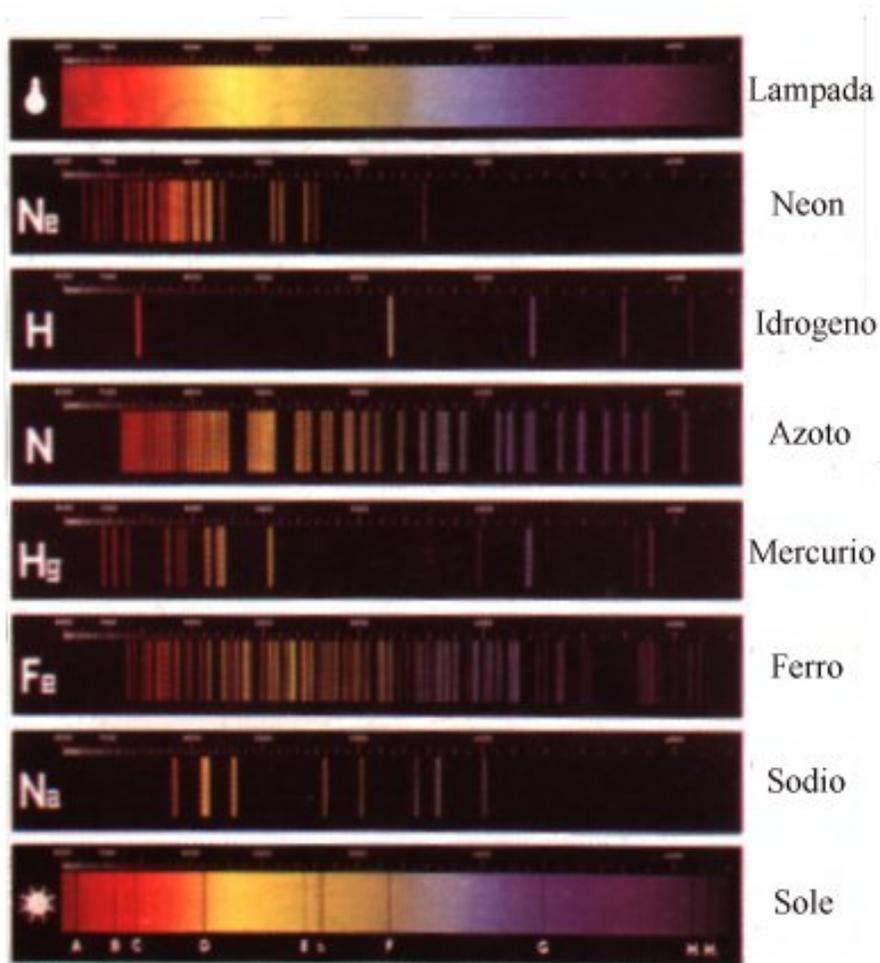
1905 Quantizzazione dell'Energia

$$U = 3N_A \langle E \rangle = 3N_A \frac{h\nu}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

$$c_V = \frac{dU(T)}{dT} = 3N_A \left(\frac{h\nu}{KT} \right)^2 \frac{e^{h\nu/KT}}{\left(e^{h\nu/KT} - 1 \right)^2}$$

GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

➤ Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)



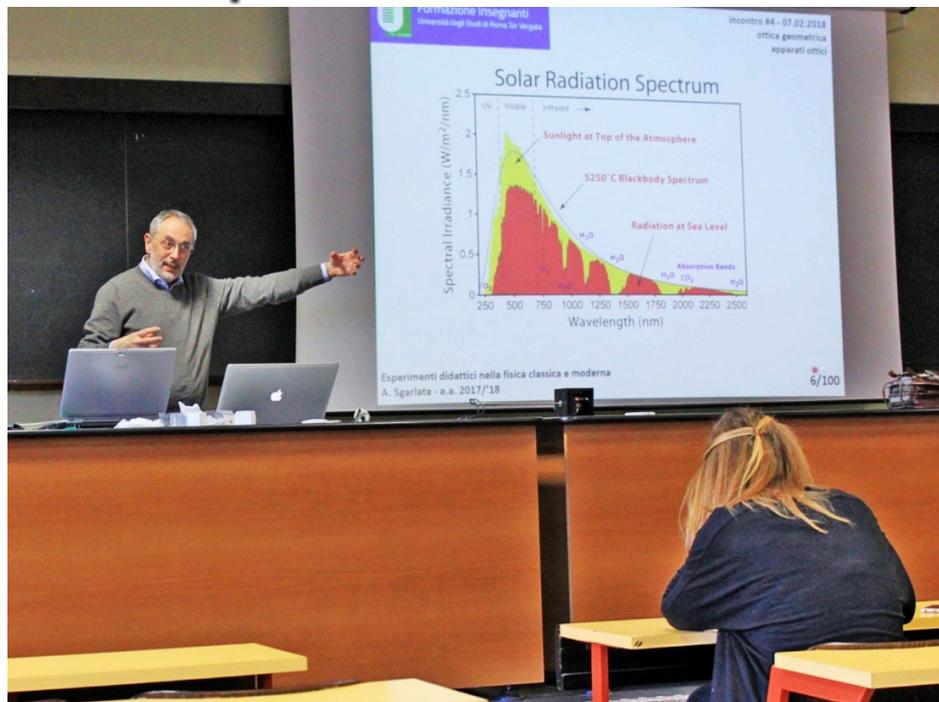
Dalla misura degli spettri di emissione e assorbimento si scopri' che:

Ogni elemento assorbe/emette delle righe specifiche a frequenze caratteristiche



GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

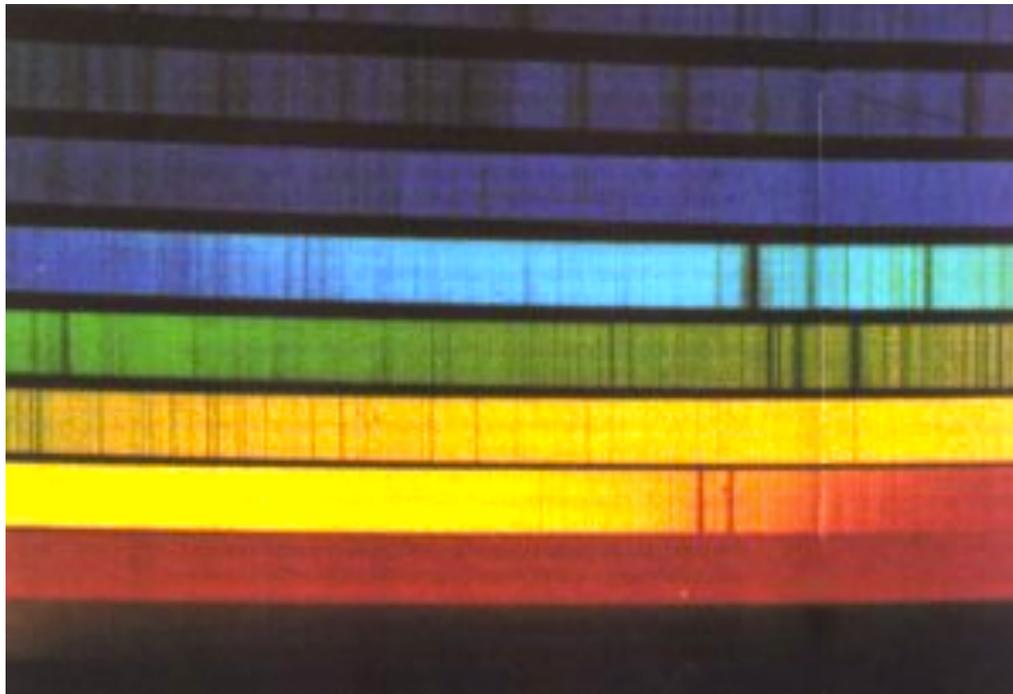
➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**





GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**



Fraunhofer scopre che lo spettro emesso dal sole presenta delle righe caratteristiche che dipendono dagli elementi presenti nell'atmosfera (*righe di Fraunhofer*)

Per chi vuole: *Didattica delle Scienze n. 264 del 2009* "Idrogeno ed Elio atomi di storia" di M. Fanfoni, A. Sgarlata, M. Tomellini

GLI ESPERIMENTI:

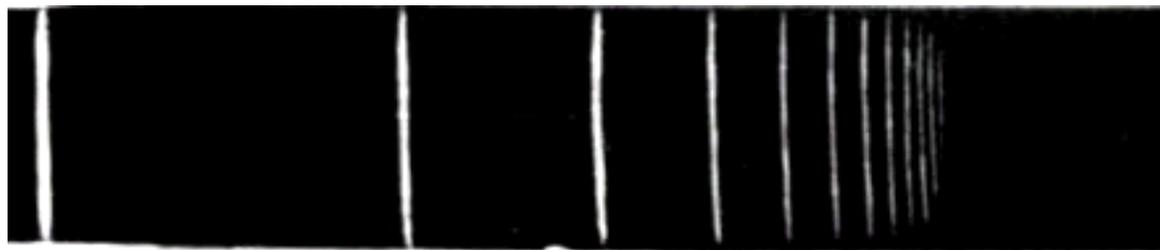
Gli spettri di emissione e assorbimento

Spettri di emissione/assorbimento (1802)



J. J. Balmer (1825-1898)

In particolare nel caso dell'*idrogeno* Balmer aveva dimostrato che la frequenza delle righe si poteva rappresentare con una semplice regola algebrica dove $R=13.6\text{eV}$

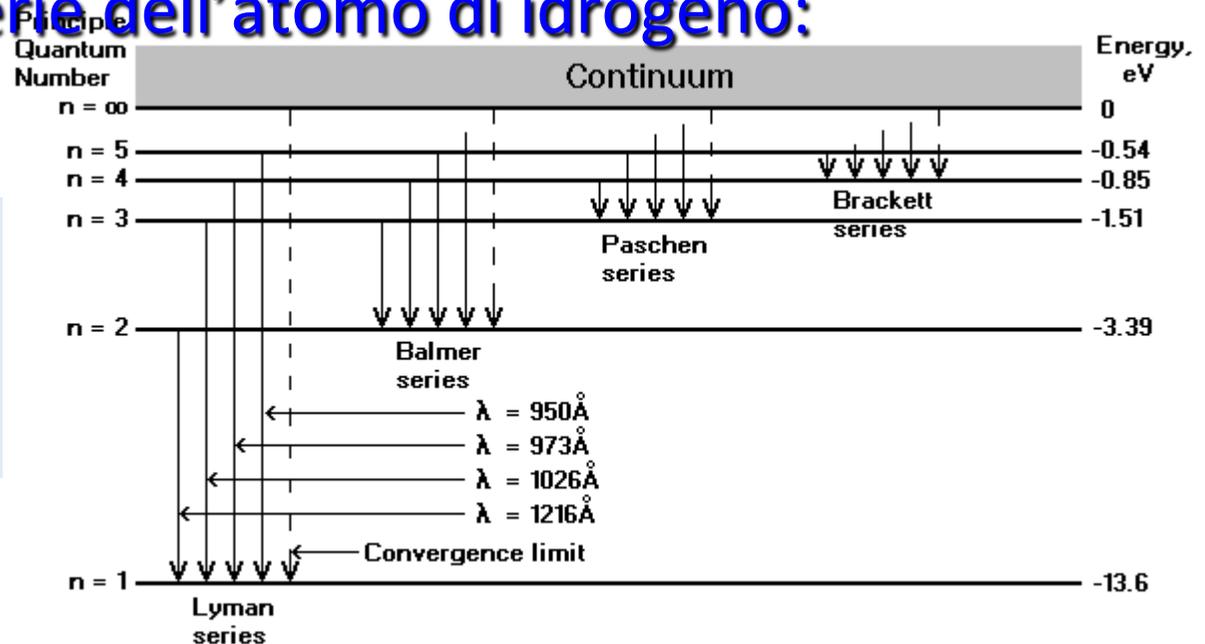


H_α H_β H_γ

$$\nu_{ab} = R \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right) \quad \begin{array}{l} n_a = 2, 3, \dots \\ n_b = 3, 4, \dots \end{array}$$

In realta' la formula di Balmer riesce a prevedere le energie delle righe di molte serie dell'atomo di idrogeno:

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



- n=1, m>1 Lyman (UV)**
- n=2, m>2 Balmer (visibile)**
- n=3, m>3 Paschen (visibile)**
- n=4, m>4 Brackett (visibile)**
- n=5, m>5 Pfund (visibile)**



LA STORIA DI UN ERRORE...

L'IDROGENO ESOTICO

Nel 1897 Pickering misura lo spettro emesso dalla stella ζ -Puppis e scopre nuove righe compatibili con $n=2$ e m semintero ($m=2.5, 3, 3.5, 4, \dots$)

LA SUA INTERPRETAZIONE E':

NELLE STELLE ESISTE UNA FORMA DI **IDROGENO ESOTICO**

Rydberg estende questo ragionamento anche a n

$$E_{n.m} = R \left(\frac{1}{1.5^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ con } m = 2.5, 3, \dots$$



LA STORIA DI UN ERRORE...

L'IDROGENO ESOTICO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**



➤ **E. C. Pickering at
Harvard College Observatory**

➤ **The Harvard Computers standing
in front of Building C at the
Harvard College Observatory, 13
May 1913.**



➤ Le donne calcolatore alla NASA



“IL DIRITTO DI CONTARE” film 2008

LA STORIA DI UN ERRORE...

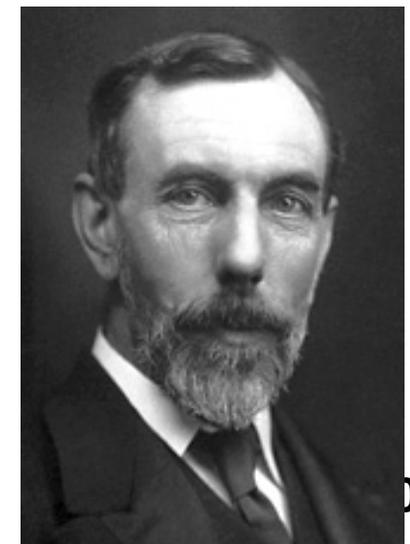
L'IDROGENO ESOTICO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**

L'errore di Pickering della esistenza nelle stelle dell' **IDROGENO ESOTICO** perdura nonostante nel 1869 *J. Janssen* e *N. Lockyer*, osservando l'eclissi del sole, misurarono delle righe non compatibili con nessun altro elemento presente in natura e dichiararono di avere scoperto un nuovo elemento *HELIOS*



➤ D'altra parte l'elio non è presente neppure nella seconda tavola periodica pubblicata nel 1871 da Mendeleev e fu necessario aspettare il 1895 quando *Sir W. Ramsey* (premio Nobel per la Chimica nel 1904) isola per la prima volta l'elio da un ossido di uranio





GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**

➤ L'attribuzione delle righe spettrali ai vari elementi della tavola sembrava agli scienziati di fine ottocento la soluzione di un rompicapo che prima o poi sarebbe stato interpretato con successo dalla fisica classica. Probabilmente nessuno di loro, al momento, si rese conto che avevano invece sollevato un problema che aveva contribuito a minare il solido edificio fondato sulla Fisica Classica che di lì a poco avrebbe dovuto cedere il passo alla Fisica Moderna.



I TRENTA ANNI CHE incontro #7 - 07.03.2018 SCONVOLSERO AL FISICA verso la fisica moderna

Sarebbe impossibile illustrarvi in dettaglio tutti gli esperimenti in una sola lezione. Abbiamo quindi scelto di farvi vedere in dettaglio:

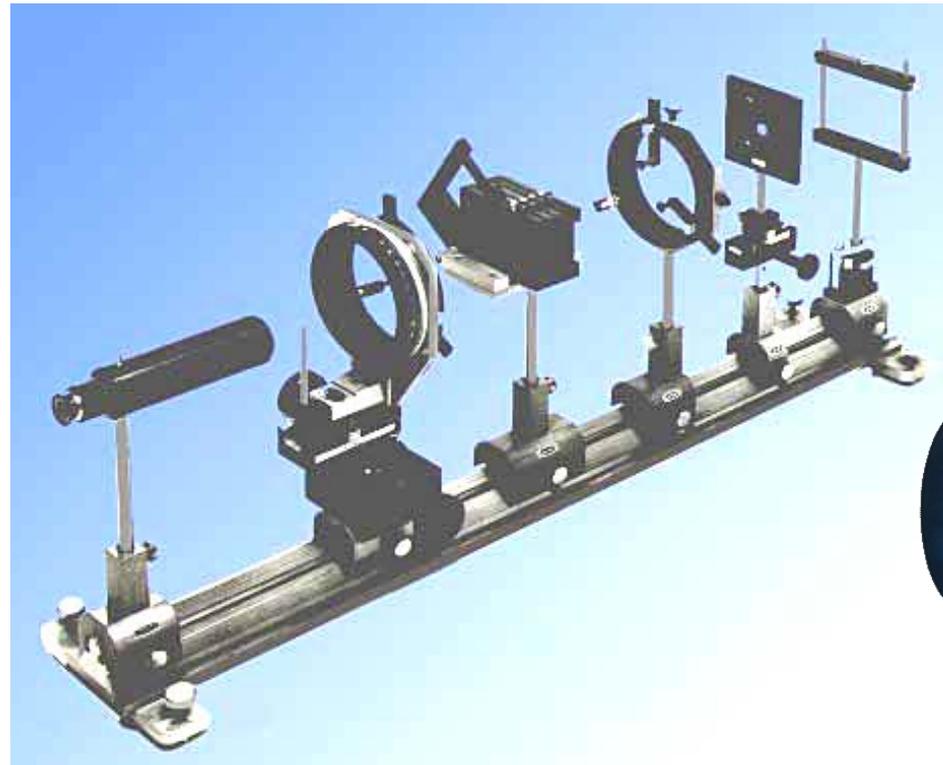
1. Lo spettro delle lampade in particolare di una lampada al Mercurio
2. L'Effetto Fotoelettrico
3. Il Corpo Nero

GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**

SCHEMA:

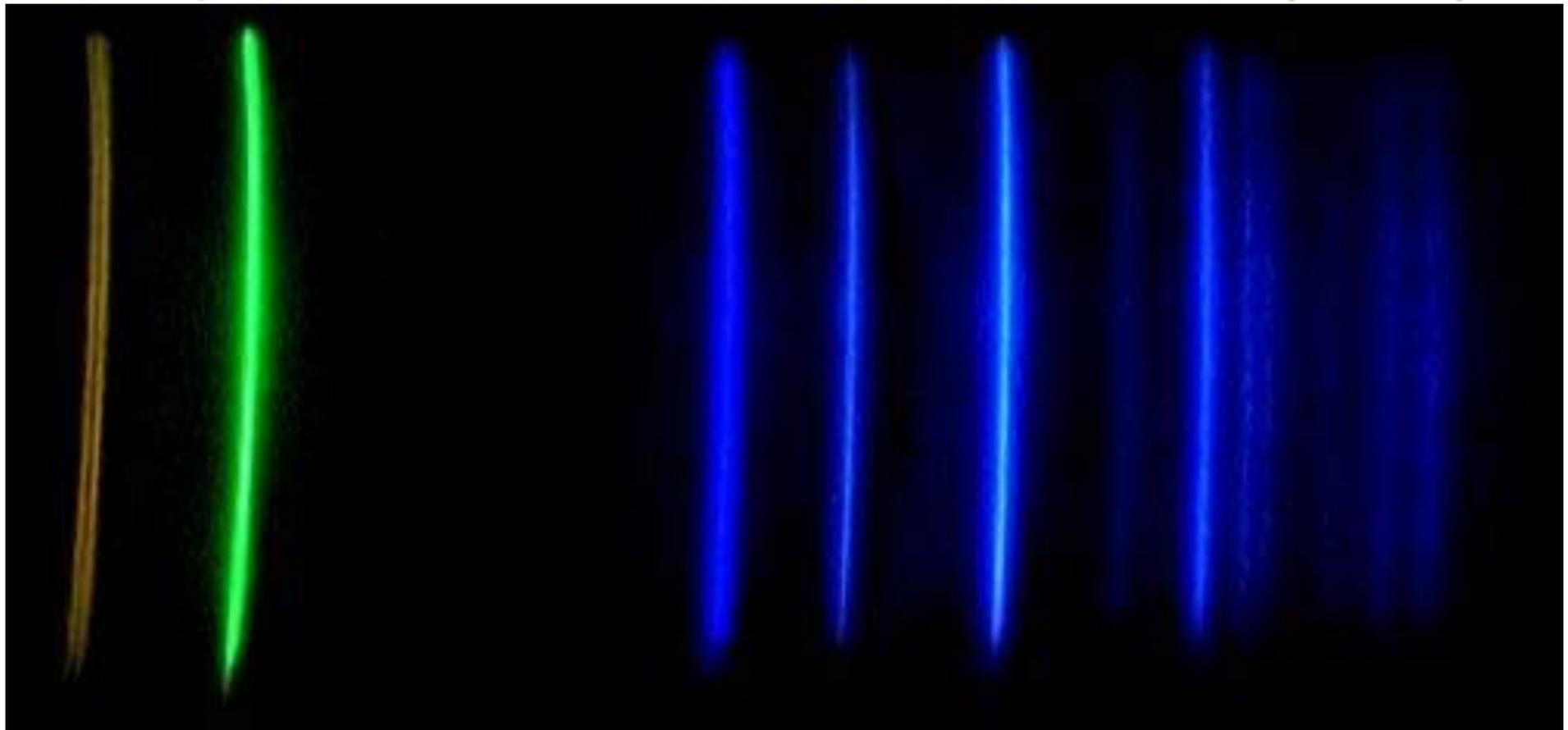
- 1.LAMPADA
- 2.LENTE
- 3.FENDITURE
- 4.LENTE
- 5.RETICOLO





GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**



5780

5461

4358

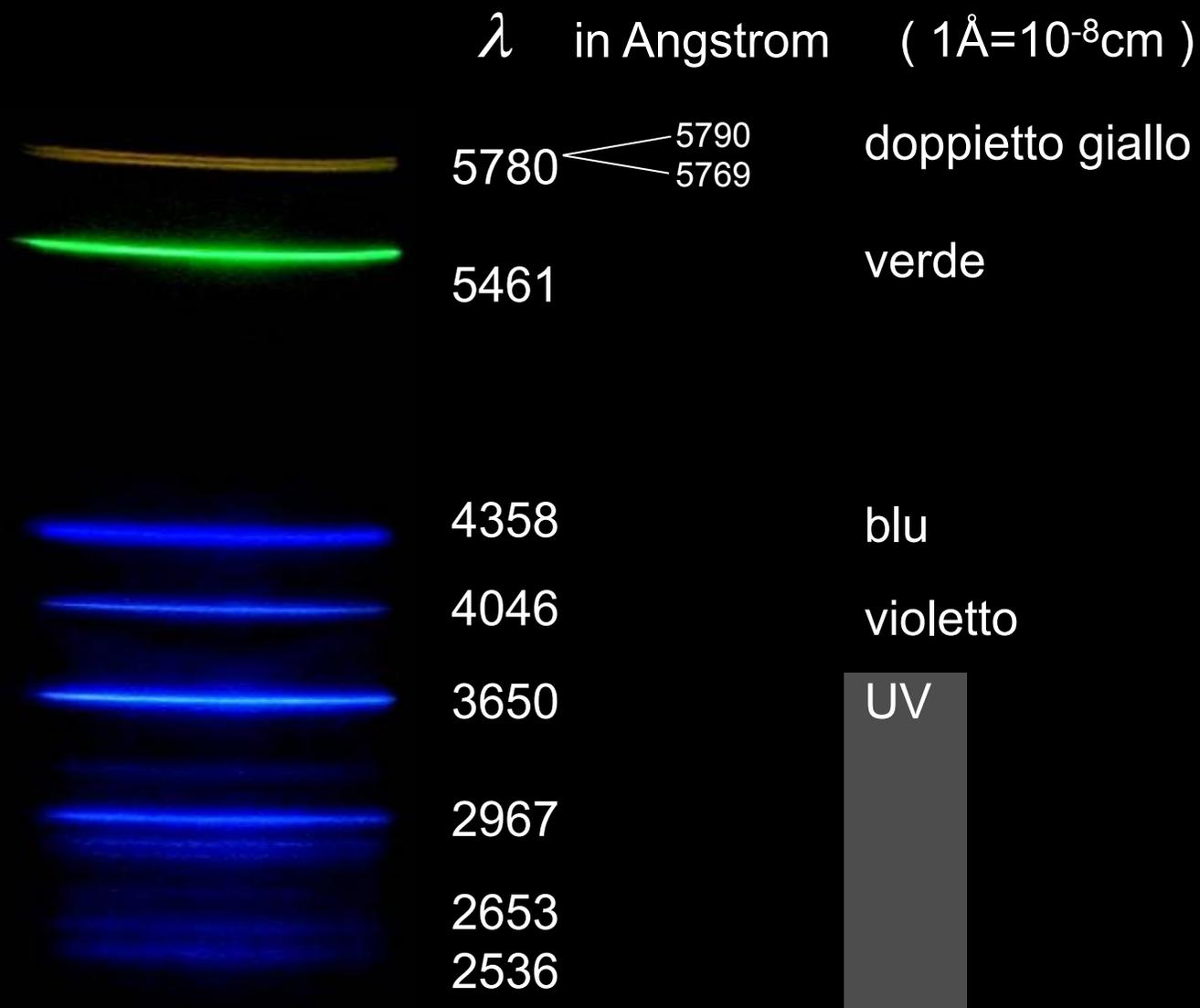
4046

3650

2967

2653 2536 Å

principali righe dello spettro di Hg



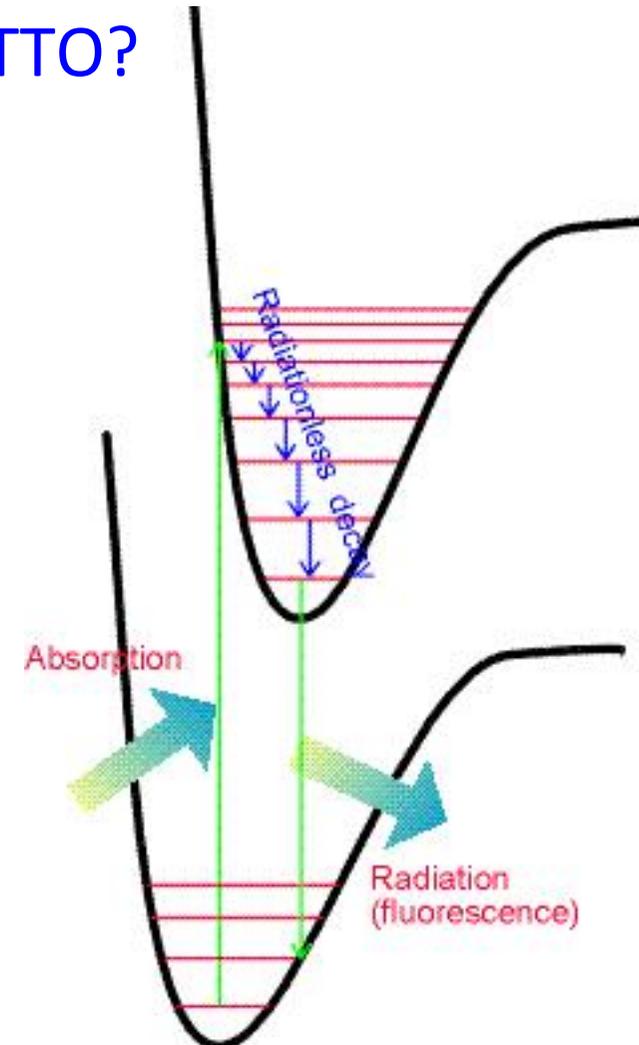
SE SI RIDUCE LA FENDITURA

➤ Doppietto

GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO

COME SI PUO' VEDERE L'ULTRAVIOLETTO?

SFRUTTANDO IL FENOMENO DELLA
FLUORESCENZA CHE VIENE AGGIUNTA
COME ADDITIVO NEI FOGLI DI CARTA
BIANCHI



GLI SPETTRI DI EMISSIONE E

ASSORBIMENTO

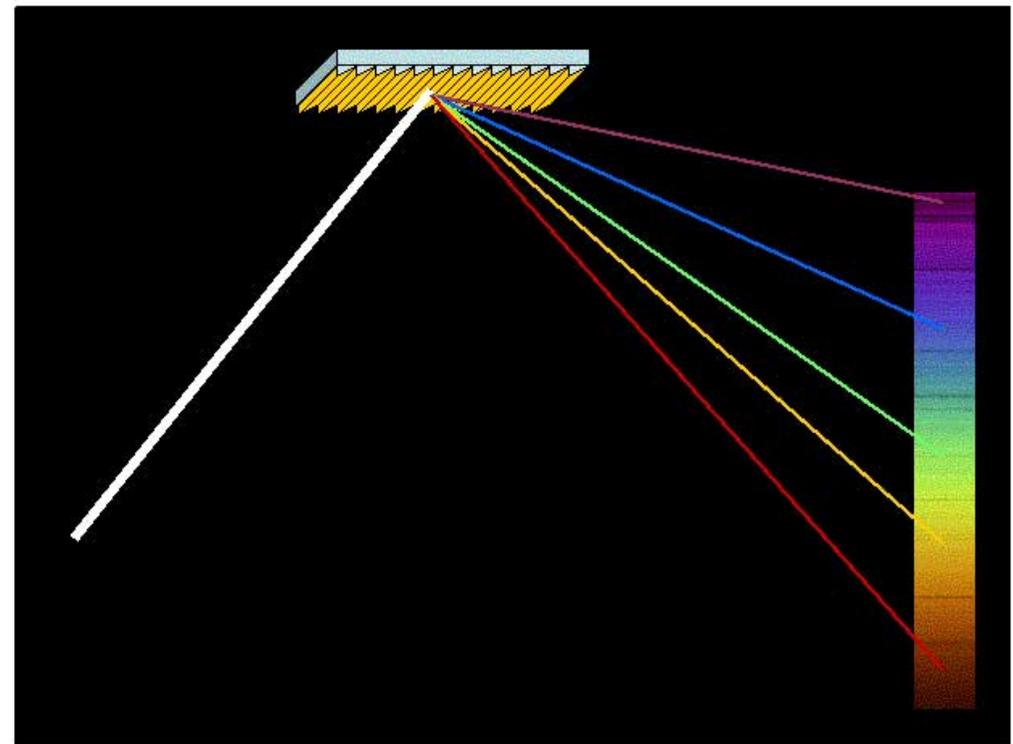
➤ **Gli spettri di emissione e assorbimento (1802)**

COME SI PUO' MISURARE LA LUNGHEZZA D'ONDA
EMESSA DALLA LAMPADA?

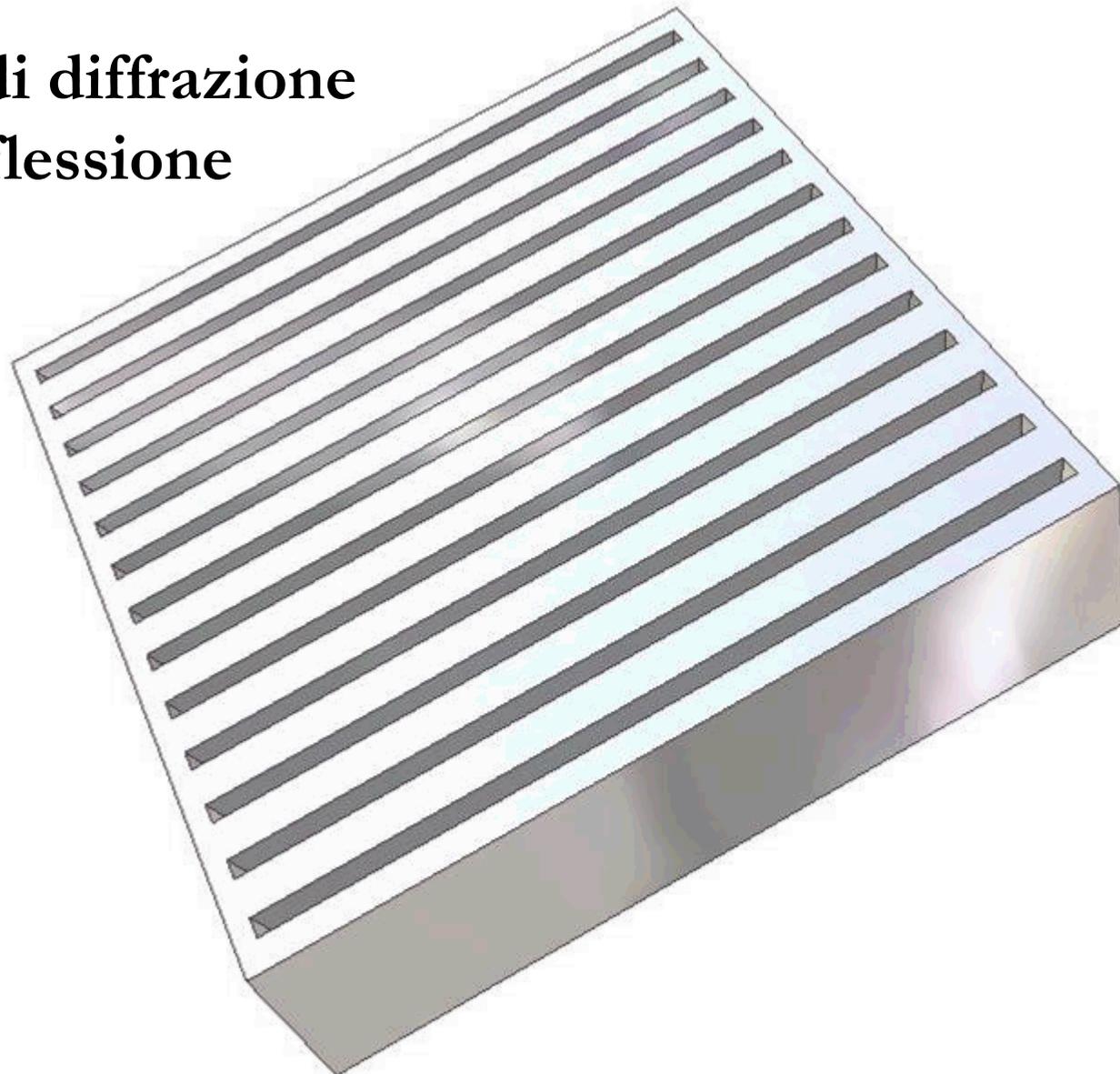
USANDO LO SPETTROSCOPIO A
RETICOLO ad esempio in
riflessione



Il numero di righe per unita' di
lunghezza e' un parametro
importante per definire il
potere dispersivo del reticolo



**reticolo di diffrazione
in riflessione**



$$d(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = k\lambda$$

1

2

θ_1

θ_2

θ_1

$(\frac{\pi}{2} - \theta_2)$

$d \sin \theta_2$

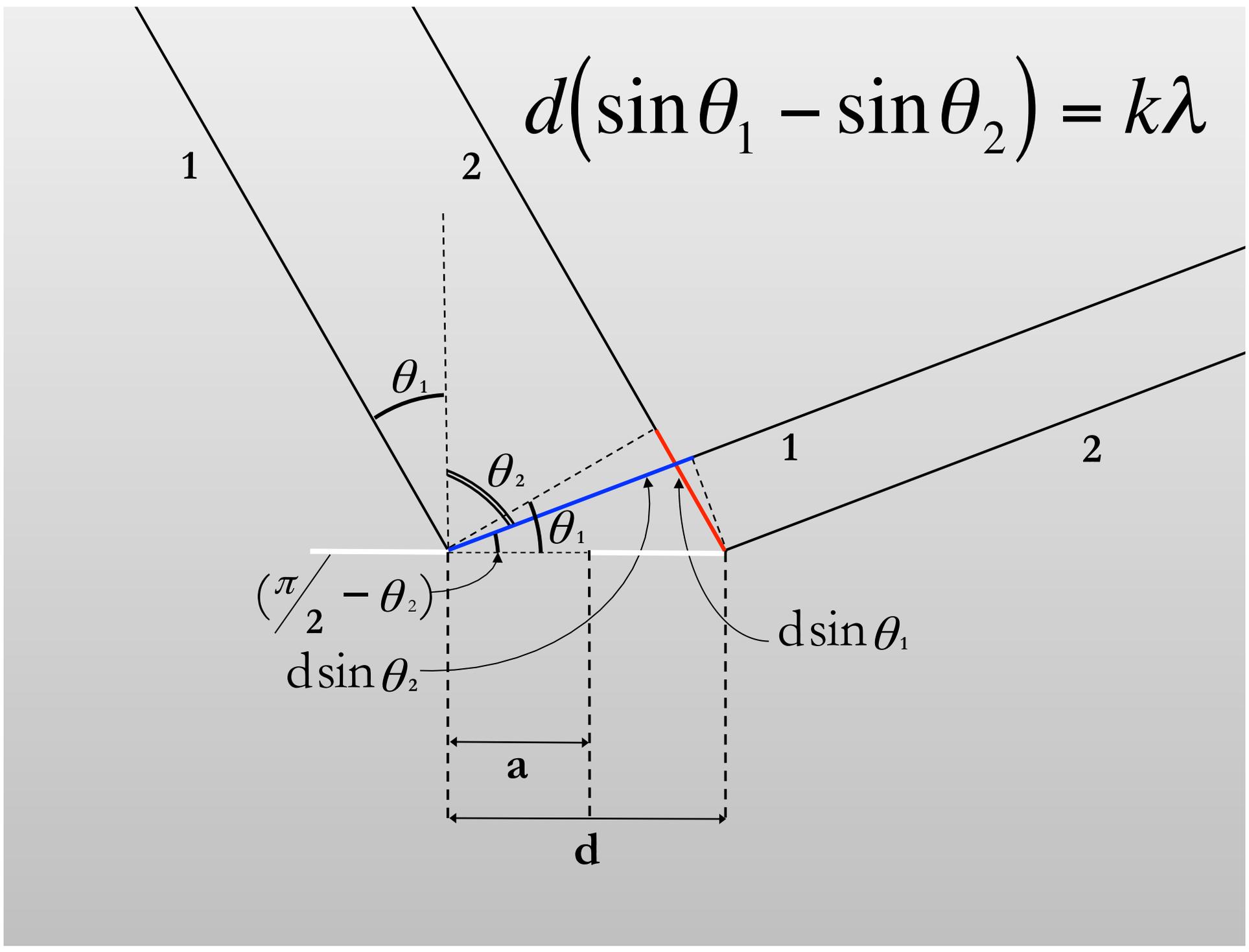
$d \sin \theta_1$

a

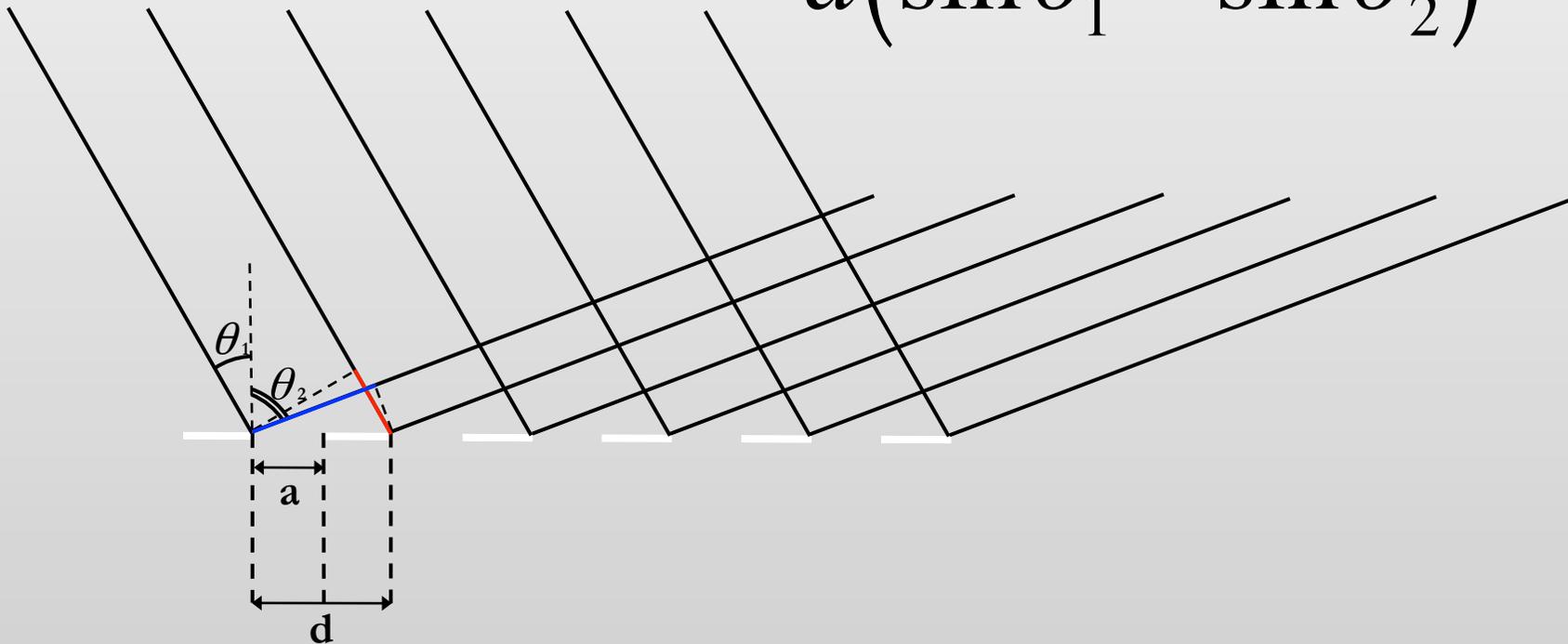
d

1

2



$$d(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = k\lambda$$



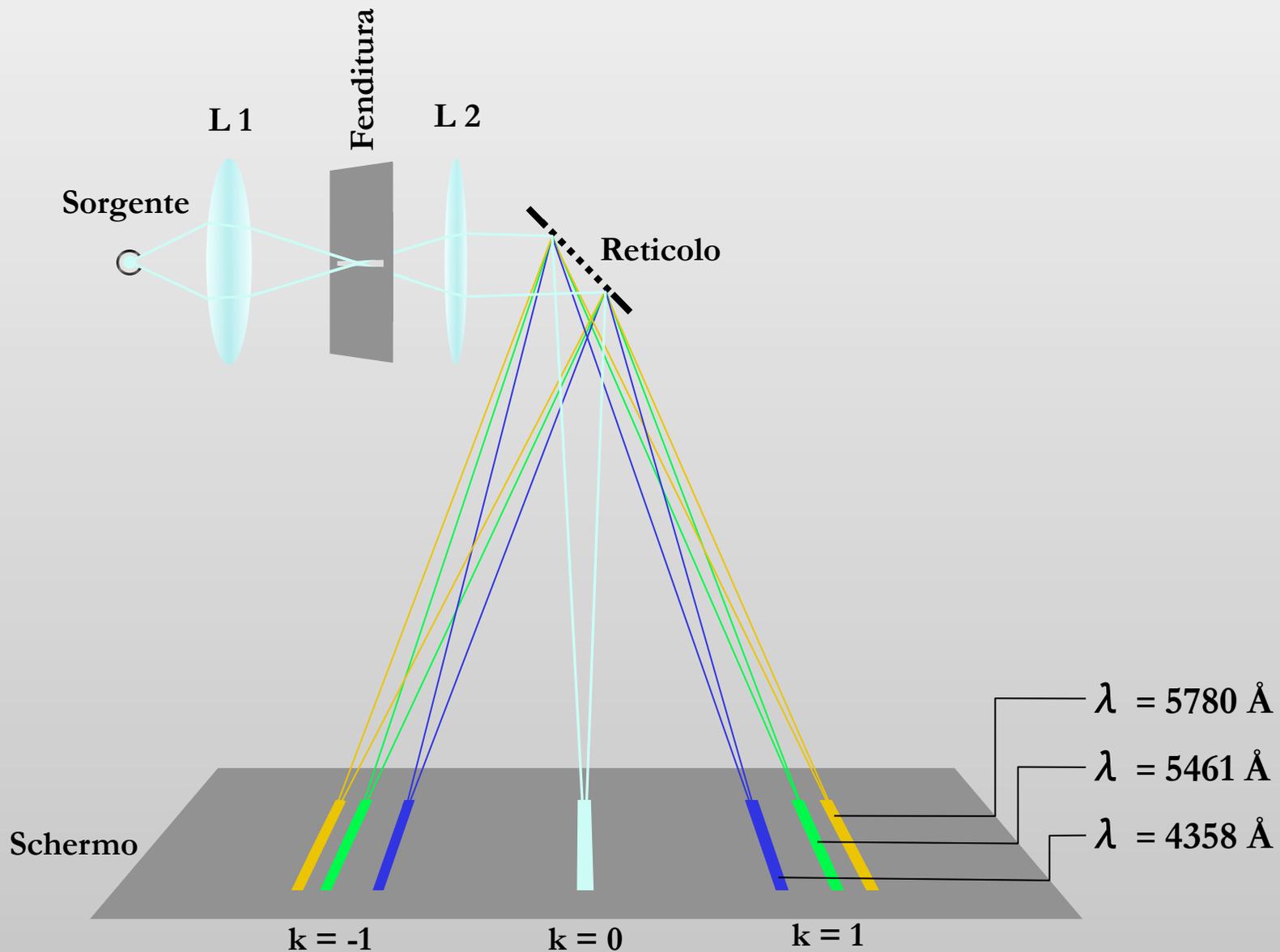
Per $k=0$ la relazione e' soddisfatta per $\theta_1=\theta_2$ per ogni λ

Passano tutte le λ ovvero la luce e' bianca

Per $k=1$ ogni λ soddisfa un particolare valore di $(\sin\theta_1-\sin\theta_2)$

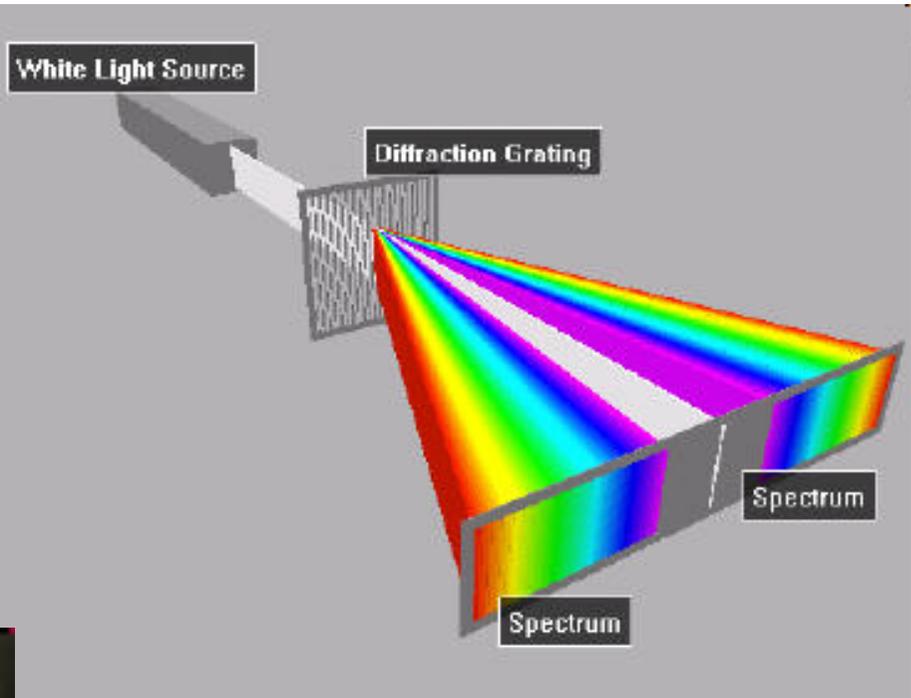
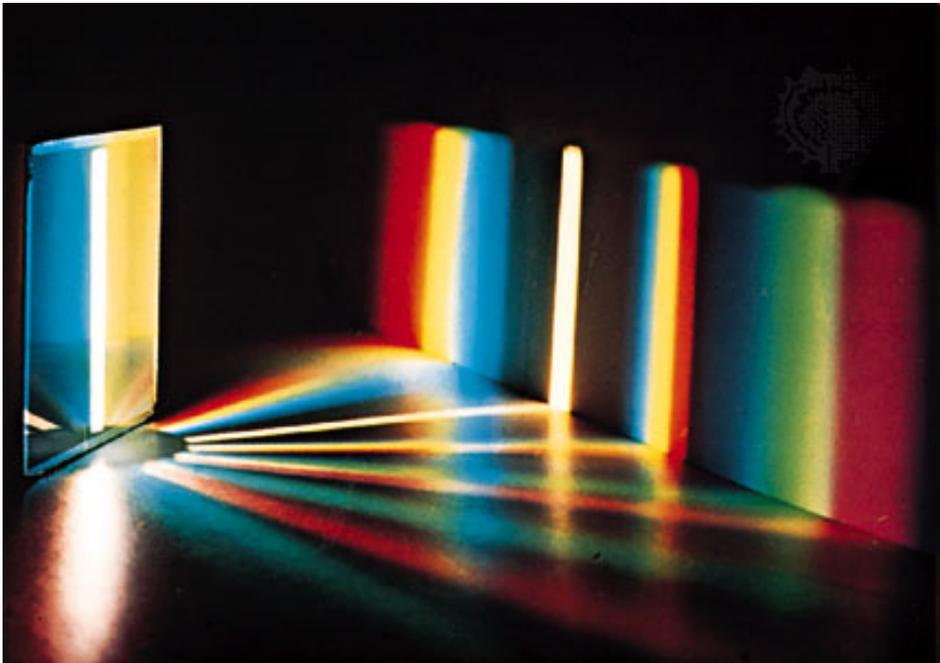
Per cui si ottiene *la dispersione della luce*

Dalla misura della distanza noto il passo del reticolo si puo' ricavare la λ della riga



SE SI METTONO DEI FILTRI SI POSSONO SELEZIONARE I DIVERSI COLORI.

ANCHE L'ORDINE ZERO IN QUESTO CASO SARA' COLORATO



ORA USEREMO LE DUE RIGHE A ENERGIA PARI A 2536\AA E 2657\AA
PER MISURARE L'EFFETTO FOTOELETTRICO CON UN CAMPIONE DI
ZINCO

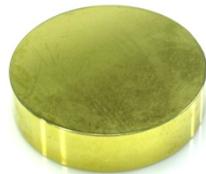
FAREMO PER LA PRECISIONE L'ESPERIMENTO DI HALLWACHS



HALLWACHS, venuto a conoscenza dei risultati di Hertz, allesti' un esperimento piu' semplice illuminando, con la luce prodotta da un lampada ad arco, il pomello di Zn di un elettroscopio a foglie d'oro

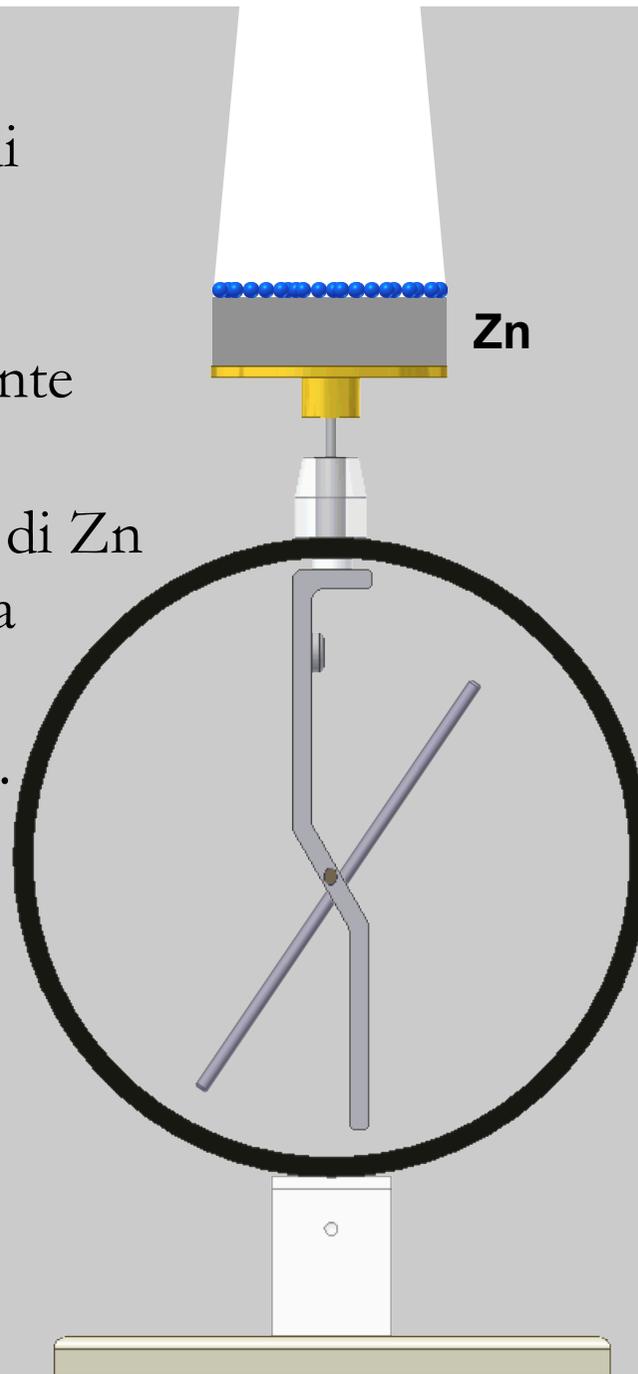
L'ESPERIMENTO DI HALLWACHS

➤ Per riprodurre l'esperimento di Hallwachs utilizziamo un elettroscopio a barretta, un disco di zinco, uno dorato (o di rame), una lampada a vapori di mercurio (la *luce elettrica*), una bacchetta per caricare l'elettroscopio, una lastra di vetro e un filtro UV per la riga 253,6 nm.



Posizioniamo il disco di Zinco sul piattino dell'elettroscopio e carichiamo negativamente l'elettroscopio.

Se illuminiamo il disco di Zn con la luce emessa dalla lampada a vapori di mercurio osserviamo ...



**elettroscopio
caricato
negativamente**



Ora carichiamo positivamente
l'elettroscopio.

Se illuminiamo il disco
di Zn con la luce emessa dalla
lampada a vapori di mercurio
osserviamo ...

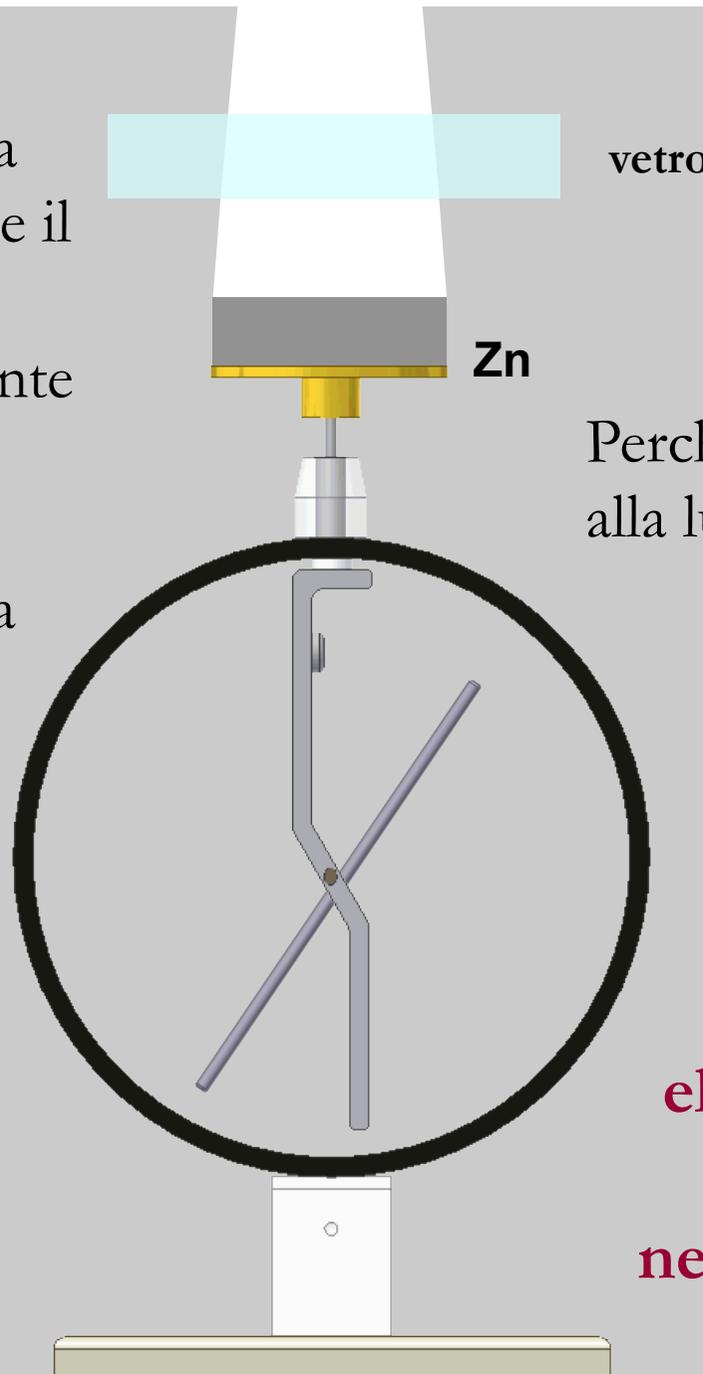


**elettroscopio
caricato
positivamente**



Posizioniamo una lastra di vetro tra la lampada e il disco di Zinco e carichiamo negativamente l'elettroscopio.

Se illuminiamo il tutto con la luce emessa dalla lampada a vapori di mercurio osserviamo ...

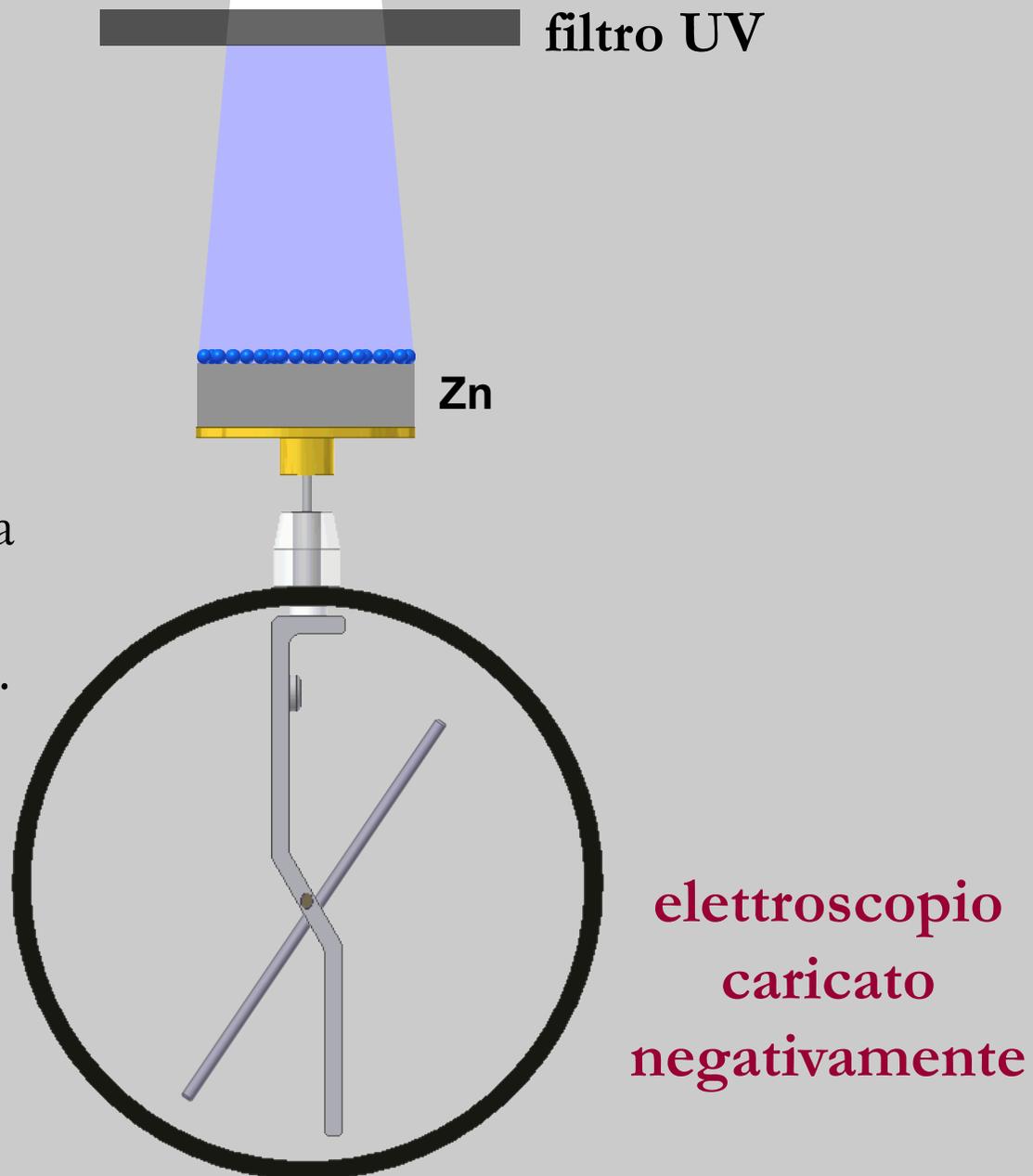


Perché il vetro è opaco alla luce UV !!!

**elettroscopio
caricato
negativamente**

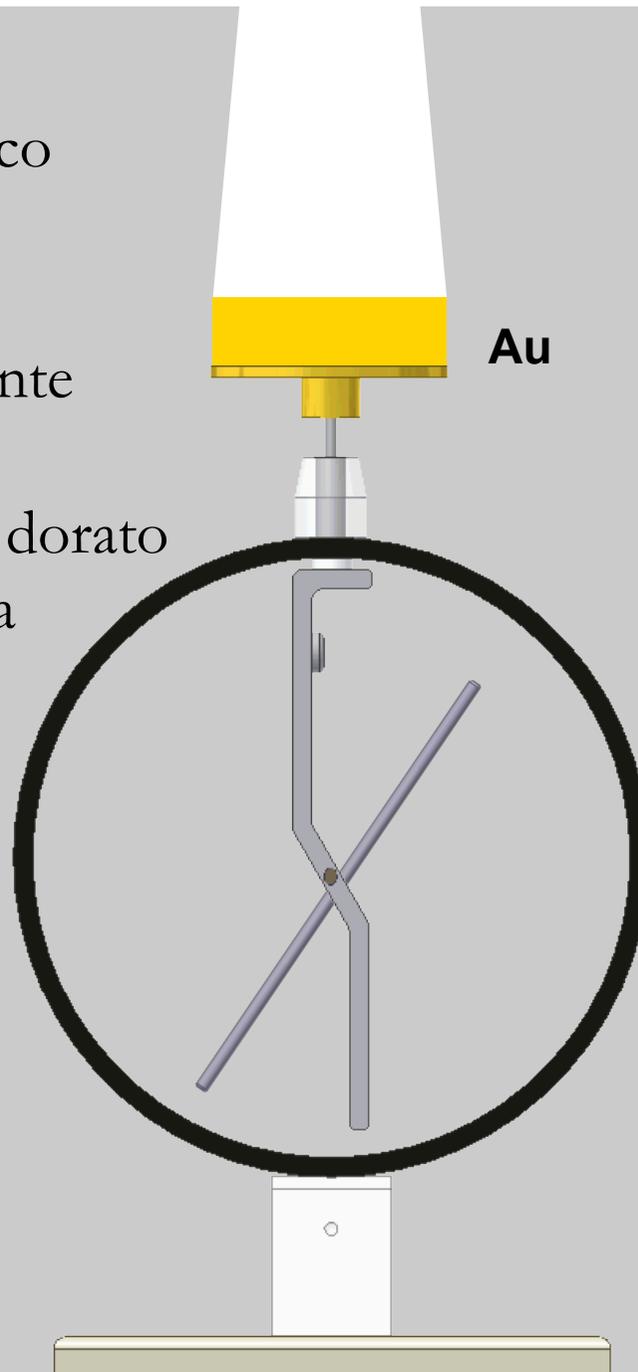


Posizioniamo un filtro UV tra la lampada e il disco di Zinco e carichiamo negativamente l'elettroscopio. Se illuminiamo il tutto con la luce emessa dalla lampada a vapori di mercurio osserviamo ...



Posizioniamo ora il disco dorato sul piattino dell'elettroscopio e carichiamo negativamente l'elettroscopio.

Se illuminiamo il disco dorato con la luce emessa dalla lampada a vapori di mercurio osserviamo ...



**elettroscopio
caricato
negativamente**





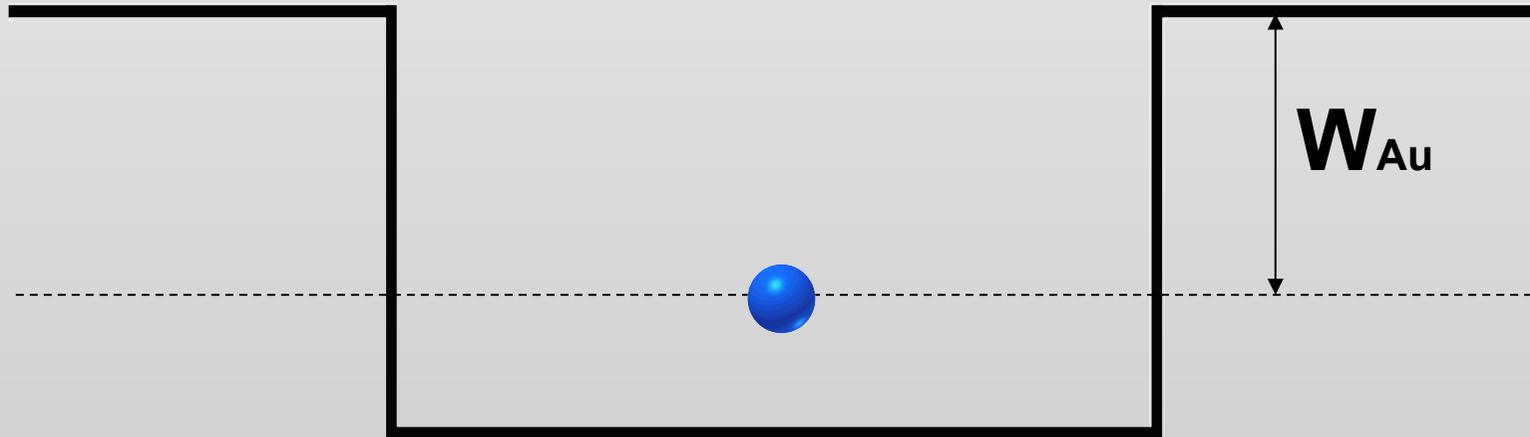
L'esperimento di Hallwachs

➤ ABBIAMO VISTO CHE L'EFFETTO SI HA SOLO
QUANDO L'ELETTROSCOPIO E' CARICO
NEGATIVAMENTE

➤ SE SI USA IL VETRO NON SUCCEDE NULLA

➤ SE SI USA L'Au NON SUCCEDE NULLA

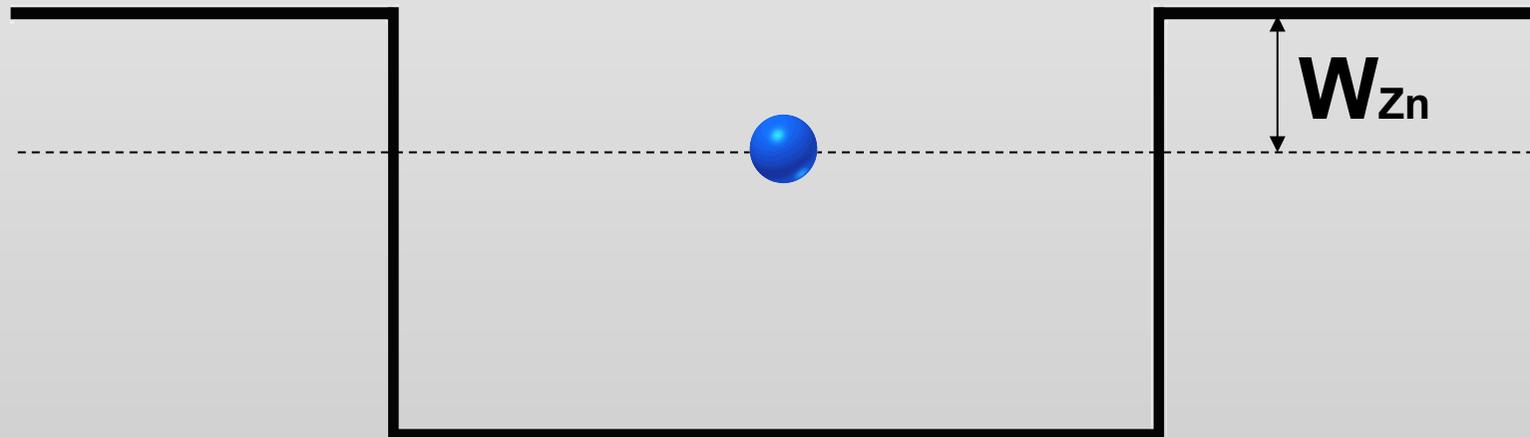
LA FUNZIONE LAVORO



PER DEFINIZIONE LA FUNZIONE LAVORO E' L'ENERGIA NECESSARIA A FARE PASSARE UN ELETTRONE DAL METALLO AL VUOTO.

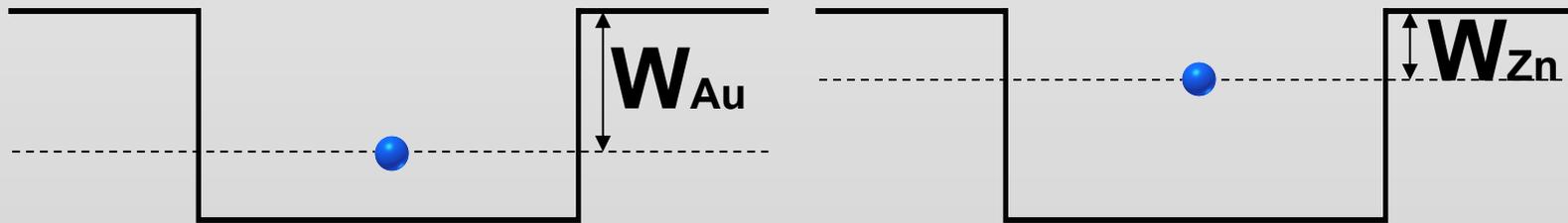
LA FUNZIONE LAVORO DIPENDE DAL MATERIALE

LA FUNZIONE LAVORO



PER STRAPPARE UN ELETTRONE AL METALLO E' NECESSARIA UNA ENERGIA PARI ALLA FUNZIONE LAVORO

LA FUNZIONE LAVORO

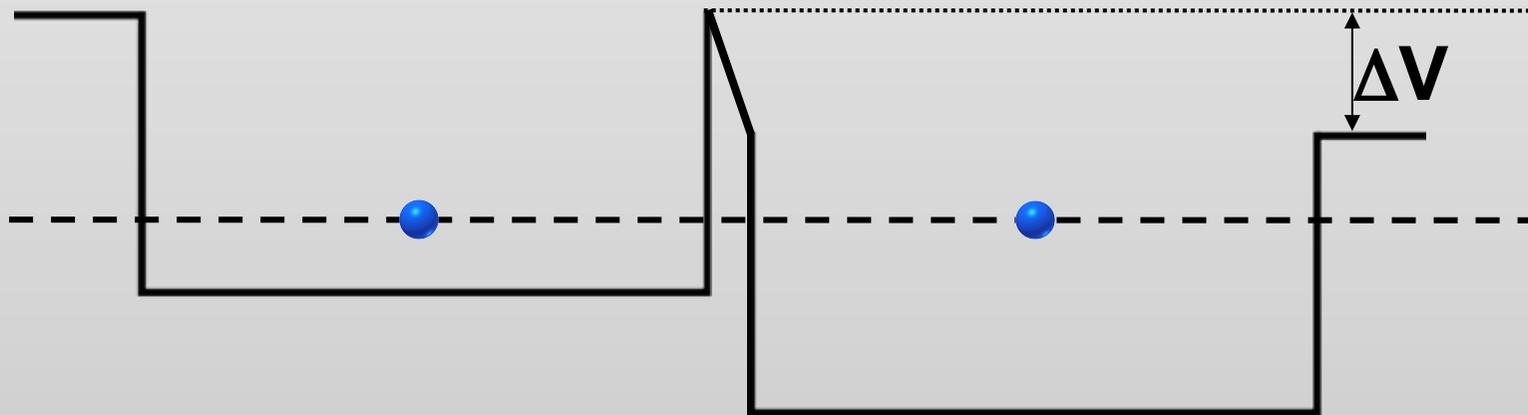


$$W_{\text{Au}} = 5,2 \text{ eV}$$

$$W_{\text{Zn}} = 4,2 \text{ eV}$$

LA FUNZIONE LAVORO DELL'Au E' MAGGIORE DI QUELLA DELLO Zn E QUESTO SPIEGA PERCHE' CON LA LAMPADA AL Hg L'EFFETTO FOTOELETTRICO SI HA SOLO NEL CASO DELLO Zn

MISURA DELLA FUNZIONE LAVORO

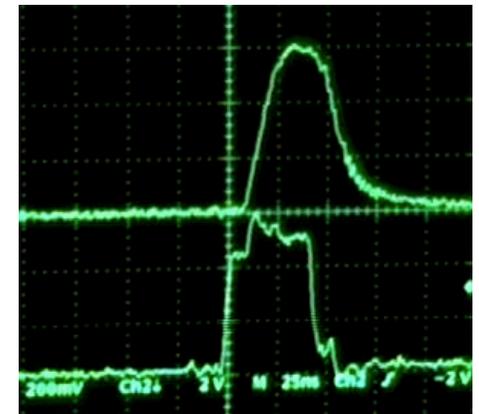


ΔV : d.d.p. di contatto (effetto Volta)

incontro #7 - 07.03.2018
GLI ESPERIMENTI: verso la fisica moderna
L'ESPERIMENTO DI

HALLWACHS

➤ ABBIAMO VISTO CHE L'EFFETTO DI SCARICA DELL'ELETTROSCOPIO E' PRATICAMENTE IMMEDIATO (SE SI MISURASSE L'EFFETTO FOTOELETTRICO CON UNA STRUMENTAZIONE PIU' SOFISTICATA DEL SEMPLICE ELETTROSCOPIO SI AVREBBE UNA STIMA PER $t=10^{-9}$ sec)



➤ FACCIAMO UNA STIMA CLASSICA DEL TEMPO CHE UN ATOMO IMPIEGHEREBBE AD ASSORBIRE L'ENERGIA NECESSARIA A SALTARE FUORI DALL Z_n IPOTIZZANDO CHE L'ENERGIA SIA UNIFORMEMENTE DISTRIBUITA SUL FRONTE D'ONDA SFERICO

L'ESPERIMENTO DI

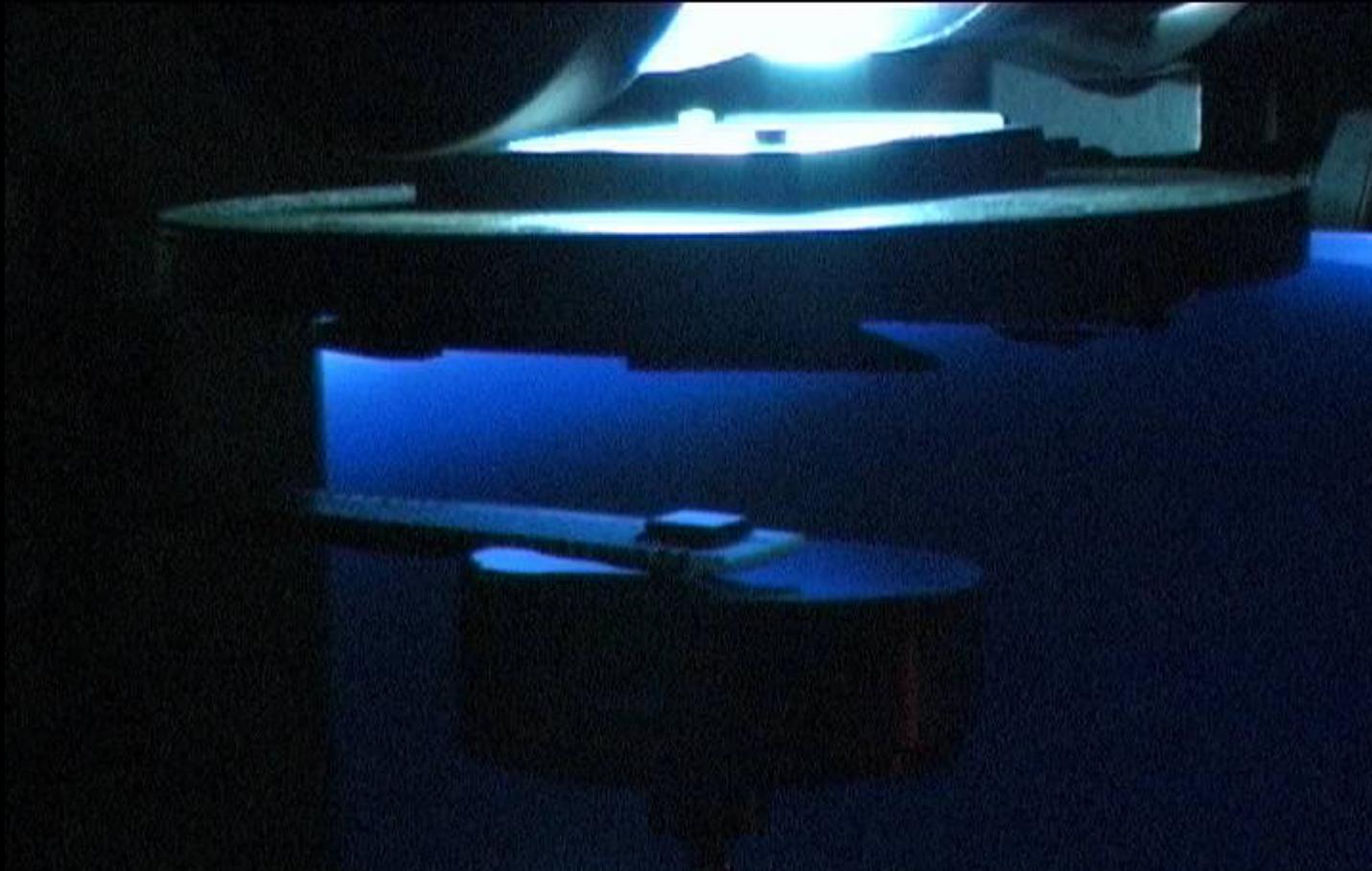
HALLWACHS

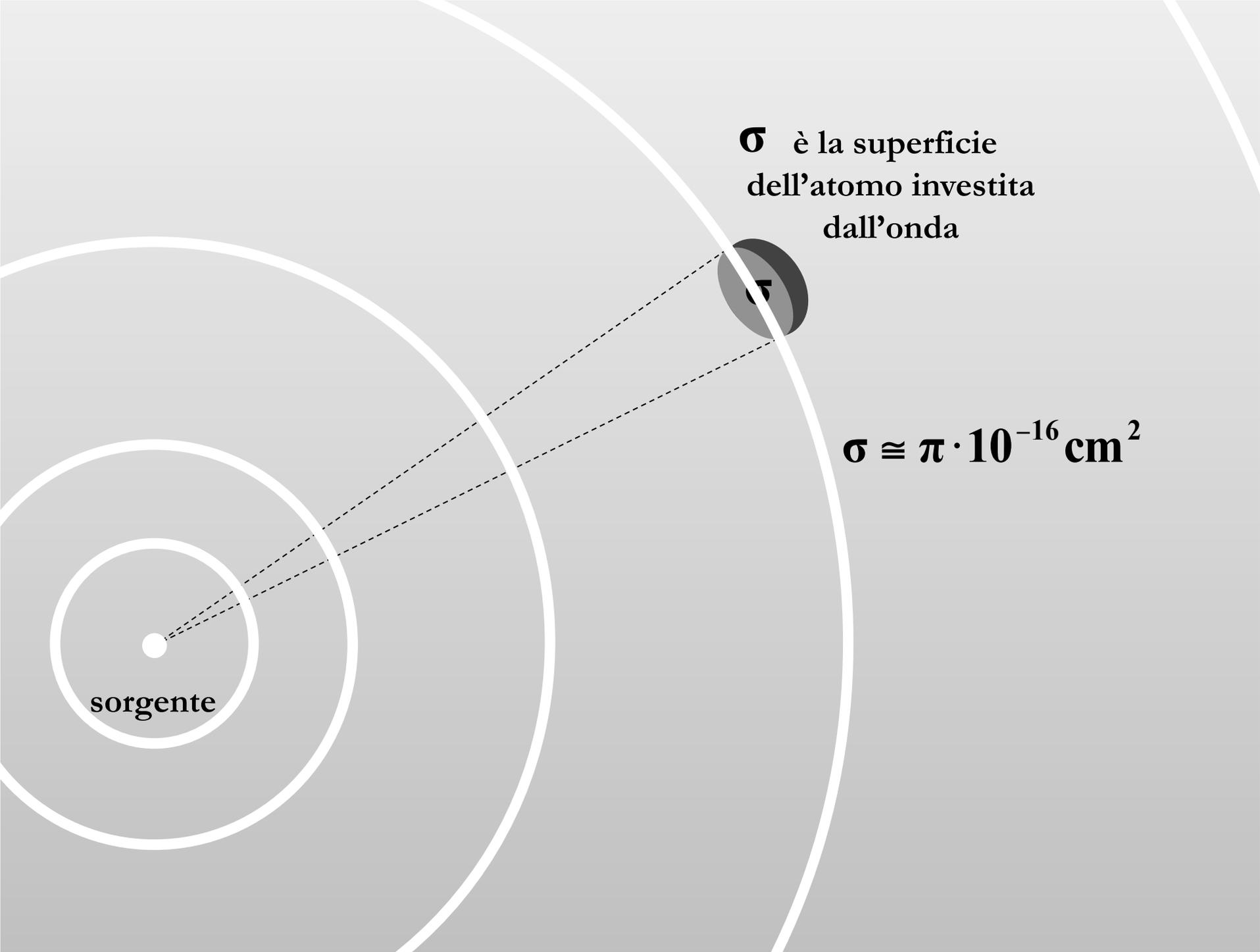
- ✓ Calcolo dell'energia luminosa che investe un atomo nell'unità di tempo

Dati:

1. Dimensione di un atomo di Zn ($R=1.34\text{\AA}$)
2. Potenza emessa dalla lampada alla lunghezza della radiazione UV di 2540\AA per unità di superficie ($I=11.3 \times 10^{-6} \text{W/cm}^2$). Questo valore si può ricavare misurando la corrente ($I=0.5 \times 10^{-6} \text{A}$) che arriva sulla superficie di un fotodiodo (di area pari a 0.34cm^2) nota l'efficienza del fotodiodo alla lunghezza d'onda di interesse (pari a 0.13A/Watt)

Posizionando il fotodiode sul disco di Zn illuminato dalla lampada a vapori di Hg attraverso un filtro che trasmette la radiazione UV intorno a 254 nm, viene misurata una corrente di 0,500 mA.





The diagram shows a central point labeled 'sorgente' (source) with three concentric white circles representing wavefronts expanding outwards. To the right, a grey shaded circular area represents the cross-section of an atom, labeled with the Greek letter sigma (σ). Two dashed lines originate from the 'sorgente' point: one extends to the center of the atom, and the other extends to the outer edge of the atom, intersecting the third wavefront. This illustrates the concept of the atom's cross-sectional area being the area of the third wavefront.

sorgente

σ è la superficie
dell'atomo investita
dall'onda

$$\sigma \cong \pi \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$$

L'ESPERIMENTO DI HALLWACHS

DAI DATI SI RICA VA L'ENERGIA PER UNITA' DI TEMPO CHE VIENE CEDUTA AL SINGOLO ATOMO:

$$I \cdot \sigma = I \cdot \pi \cdot R^2 = 11.3 \cdot 10^{-6} \cdot 5.3 \cdot 10^{-16} =$$
$$= 6 \cdot 10^{-21} \text{ Watt / atomo} = \frac{6 \cdot 10^{-21}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 3.75 \cdot 10^{-2} \text{ eV / s} \cdot \text{at}$$

PER ESTRARRE UN ELETTRONE DALLO Zn SONO NECESSARI CIRCA 4eV.

IL TEMPO PERCHE' L'ATOMO ACQUISTI 4 eV SARA':

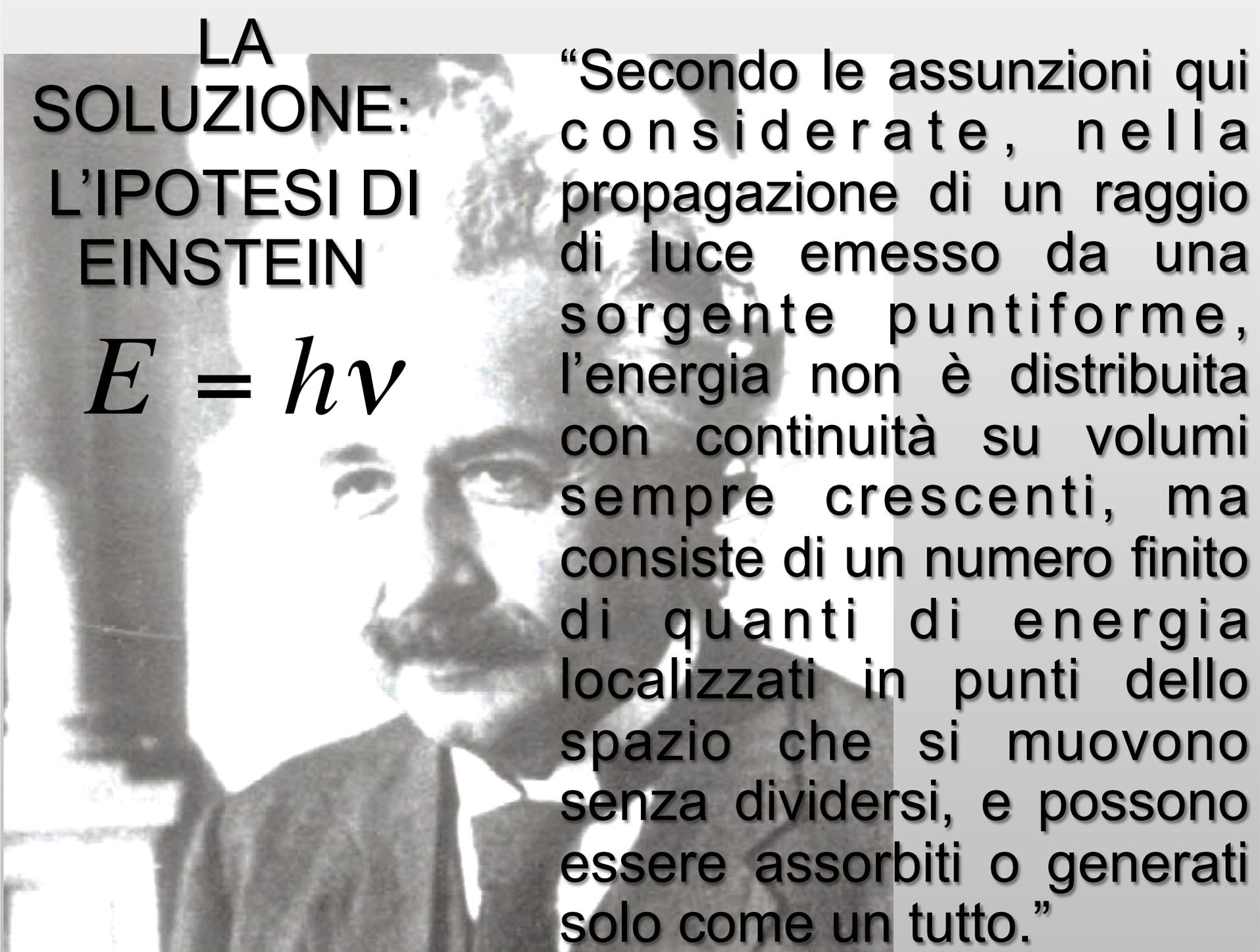
$$t = \frac{4.2 \text{ eV}}{3.75 \cdot 10^{-2}} \approx 110 \text{ s}$$

Mentre l'esperimento mostra che la scarica e' quasi

LA SOLUZIONE

LA SOLUZIONE - L'IPOTESI DI EINSTEIN: L'energia non è distribuita uniformemente sul fronte d'onda sferico ma esiste in quanti proporzionali alla frequenza. La costante di proporzionalità è proprio la costante di Planck

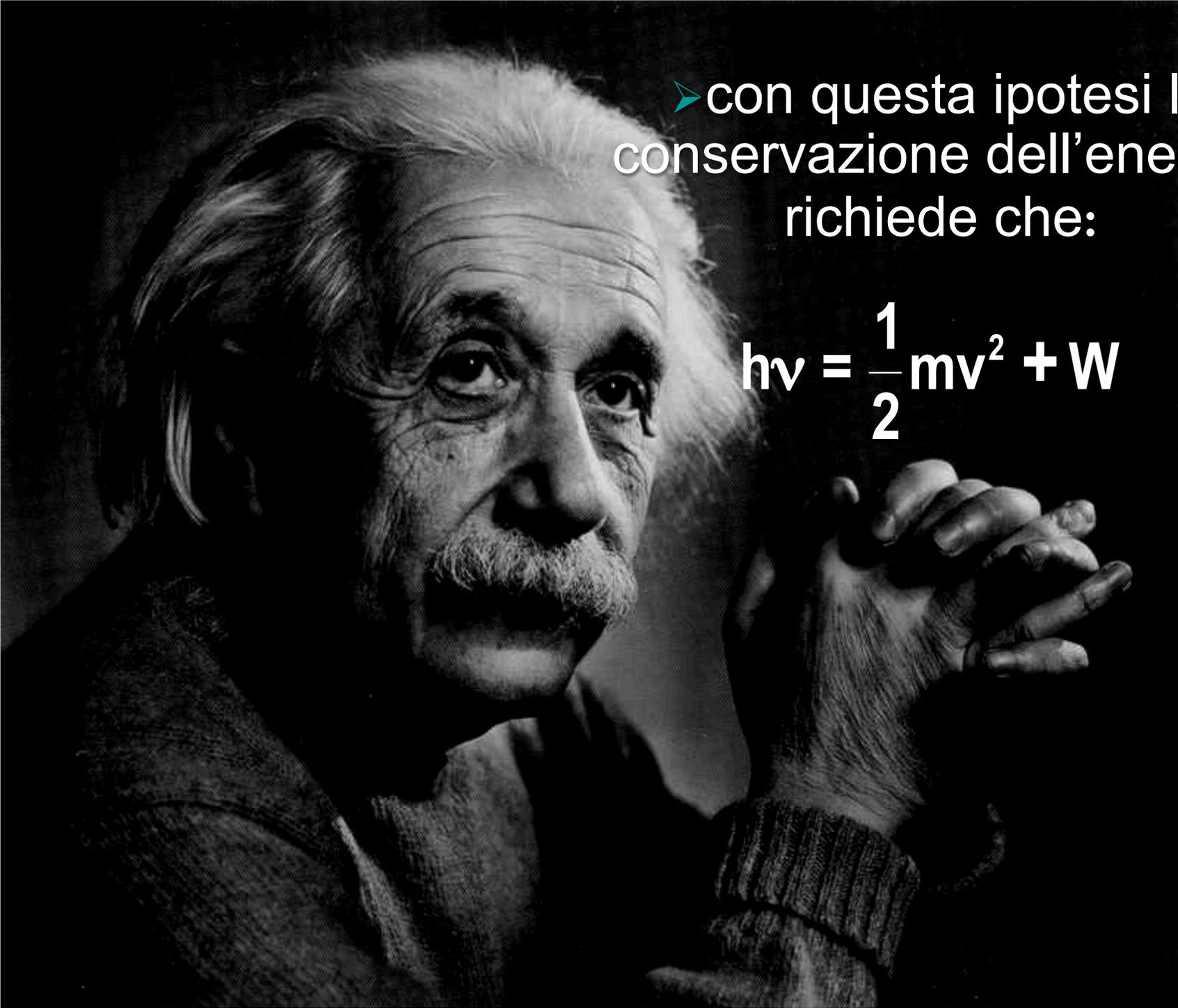
$$h\nu = W + E_{kin} = W + \frac{1}{2}mv^2$$



LA
SOLUZIONE:
L'IPOTESI DI
EINSTEIN

$$E = h\nu$$

“Secondo le assunzioni qui considerate, nella propagazione di un raggio di luce emesso da una sorgente puntiforme, l'energia non è distribuita con continuità su volumi sempre crescenti, ma consiste di un numero finito di quanti di energia localizzati in punti dello spazio che si muovono senza dividersi, e possono essere assorbiti o generati solo come un tutto.”

A black and white portrait of Albert Einstein, showing his characteristic wild hair and mustache. He is looking slightly to the right of the camera with a thoughtful expression. His hands are clasped together in front of him. The background is dark and out of focus.

➤ con questa ipotesi la
conservazione dell'energia
richiede che:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

L'EFFETTO FOTOELETTRICO

La Fisica Classica non riusciva a dimostrare due fatti evidenti nell'esperimento:

1. Il fatto che l'emissione fosse istantanea
2. il fatto che l'energia cinetica degli elettroni emessi non dipendesse dall'intensità della sorgente della radiazione incidente.

Classicamente infatti l'intensità della radiazione è proporzionale al quadrato del campo elettrico. Maggiore è l'intensità della luce, maggiore è il campo elettrico, maggiore è la forza cui sono sottoposti gli elettroni e quindi ci si aspetta che sia maggiore la loro energia cinetica.

MA L'ESPERIMENTO MOSTRAVA UN RISULTATO DIVERSO



L'EFFETTO FOTOELETTRICO

Il punto (2) non si evince
chiaramente dall'esperimento di
Hallwacks, ma fu misurato da
Lenard, un collaboratore di Hertz



Philipp Eduard Anton
von Lenard

L'effetto fotoelettrico: 1899-1902

Nel 1902 Lenard, assistente di Hertz, dimostrò che le particelle emesse erano **elettroni**. Inoltre giunse per primo a stabilire quali fossero le caratteristiche fondamentali dell'effetto fotoelettrico:

1. Il numero di **elettroni emessi**, e quindi la corrente che giungeva all'anodo **era** **proporzionale all'intensità della luce**

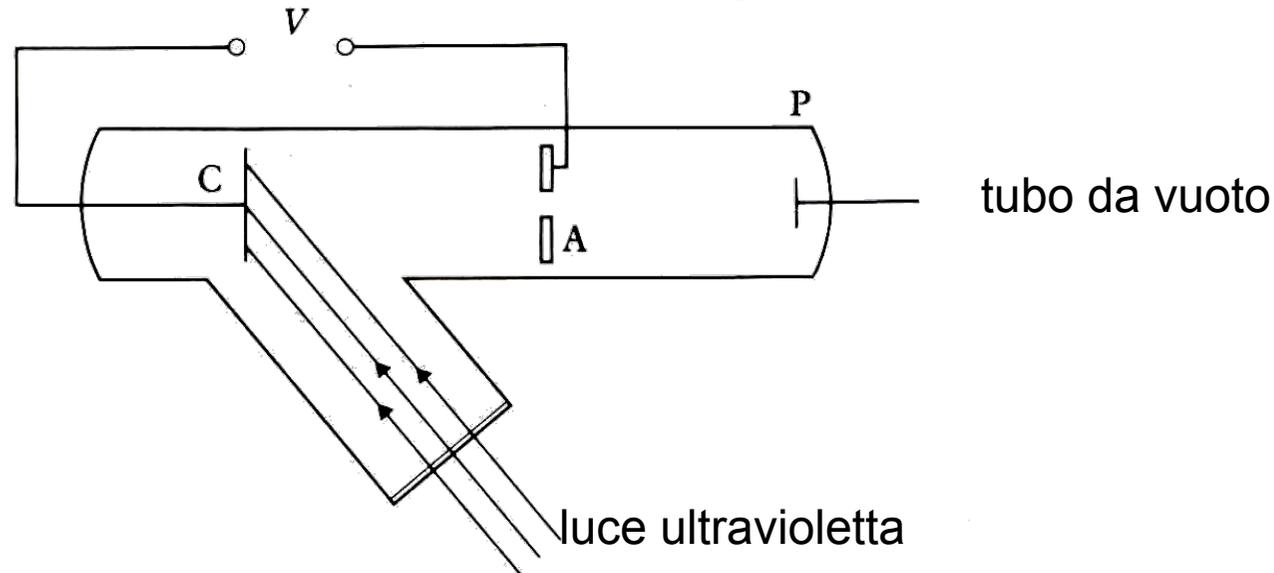
2. **L'energia** degli **elettroni emessi** **dipendeva dalla frequenza** della luce **incidente e dalla natura del catodo, ma non dall'intensità luminosa**



Philipp Eduard Anton
von Lenard

L'esperimento di Lenard

Nei suoi esperimenti Lenard usò l'apparato strumentale mostrato schematicamente in figura.

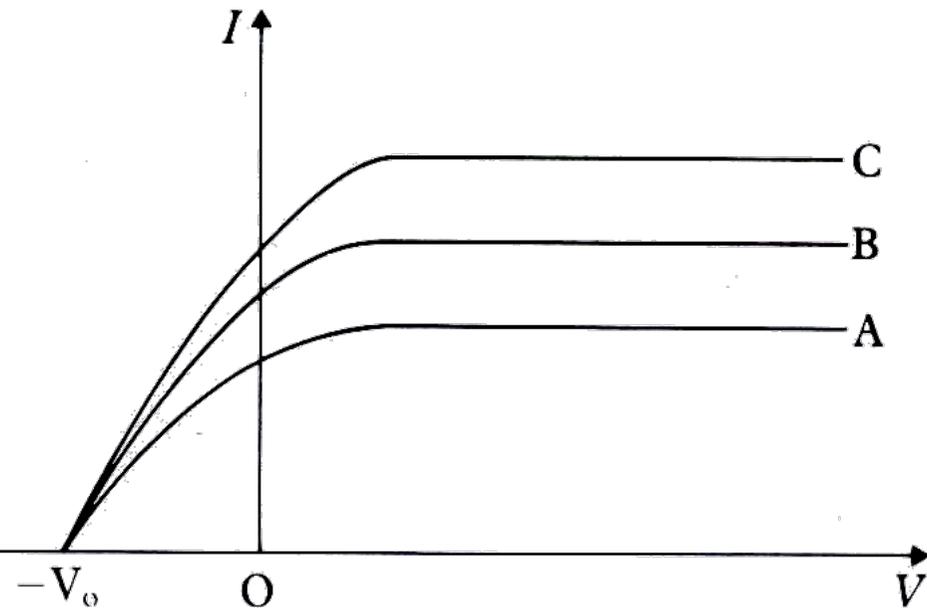


Un catodo **C** colpito da luce ultravioletta emette elettroni che possono attraversare l'anodo **A** passando attraverso un piccolo foro e vengono rivelati da un elettrometro connesso al piatto **P**.

L'esperimento di Lenard

Dal grafico della corrente fotoelettrica in funzione della tensione misurata a diverse intensità della luce ($A < B < C$) si vede che l'aumento della tensione V provoca un aumento della corrente fino a saturare.

Quando V decresce fino ad essere invertita (il catodo diventa positivo rispetto all'anodo) si ha una tensione V_0 per cui la corrente è nulla (potenziale di arresto).



L'esperimento di Lenard

Cosa rappresenta il potenziale V_0 necessario per annullare la corrente?

Quando il potenziale diventa negativo di fatto gli elettroni sono respinti per cui riusciranno comunque ad arrivare all'anodo per essere misurati solo gli elettroni che in uscita dal metallo hanno energia cinetica sufficiente a percorrere il tratto verso l'anodo nonostante il potenziale di segno opposto.

Di fatto quindi V_0 essendo il valore massimo oltre il quale la corrente è zero rappresenta **una misura dell'energia cinetica massima dei fotoelettroni**

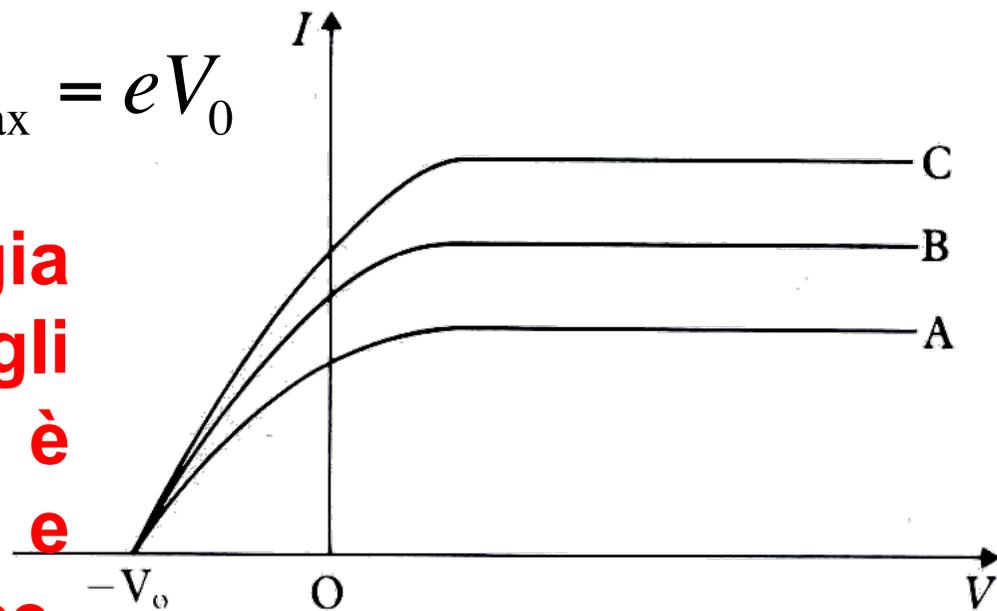
$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0$$

L'esperimento di Lenard

Per valori del potenziale negativo Lenard si accorse che il valore del potenziale V_0 necessario per annullare la corrente non dipende dall'intensità luminosa, ma cambia solo cambiando la sorgente o il metallo con cui è fatto il catodo. Quindi, poiché vale la

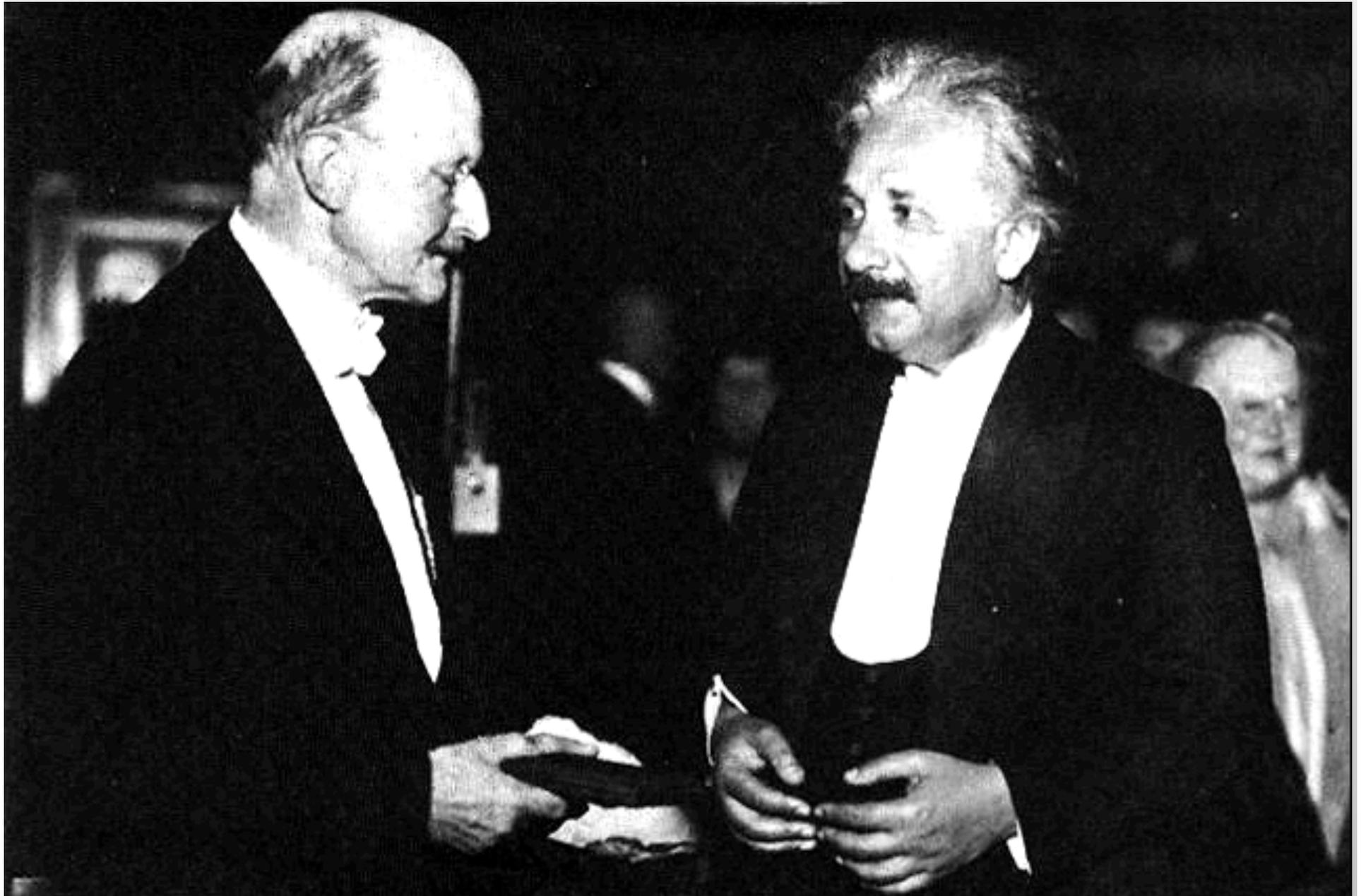
$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0$$

si deduce che **l'energia cinetica massima degli elettroni è indipendente dall'intensità della luce**

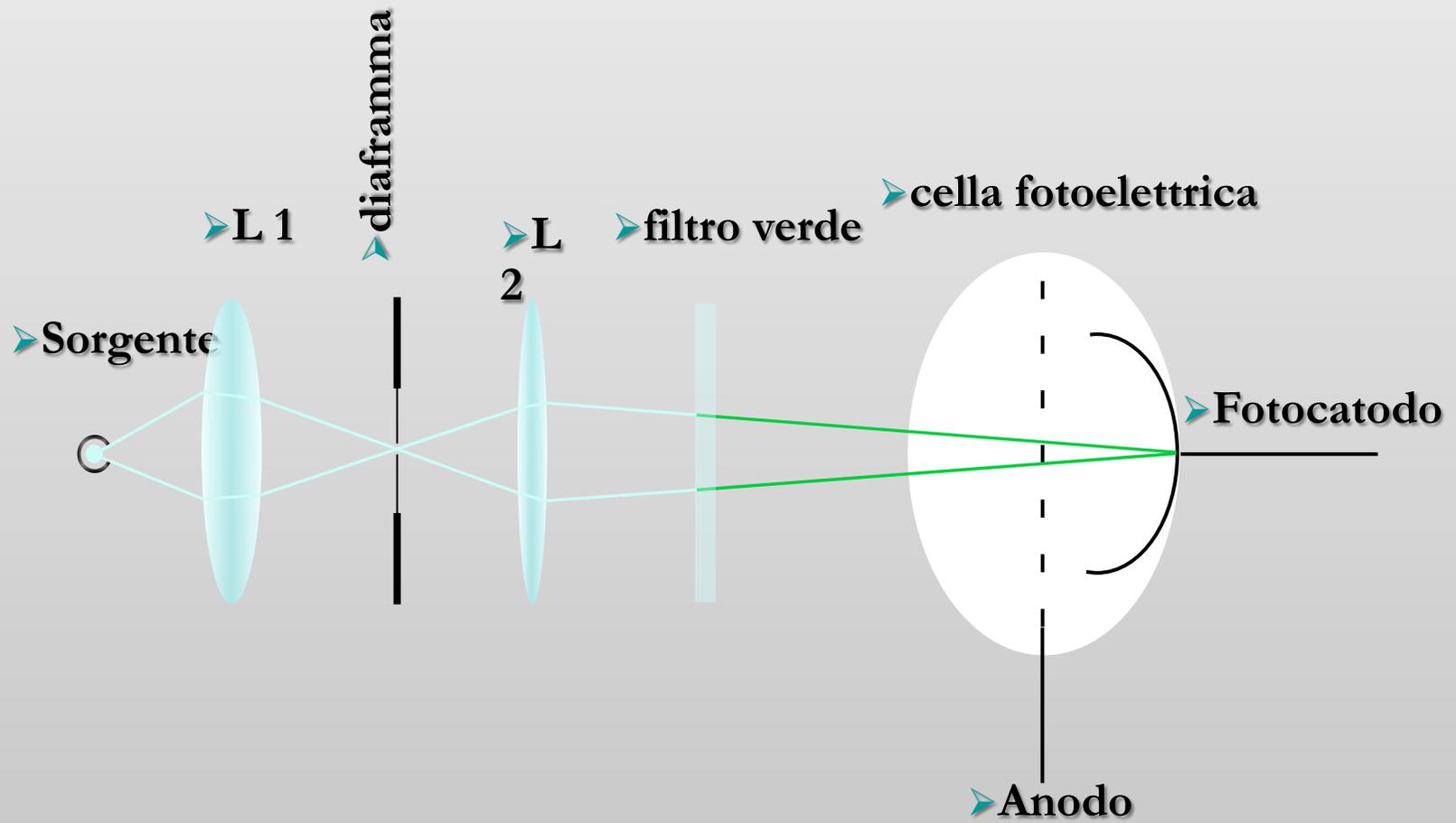


GLI ESPERIMENTI: L'EFFETTO FOTOELETTRICO

**CON UN ESPERIMENTO SIMILE A
QUELLO DI LENARD NOI OGGI
PROVEREMO A MISURARE LA
COSTANTE DI PLANCK**



la misura della costante di Planck





La fotocella
e' al K che
ha un
lavoro di
estrazione
molto piu'
basso dello
Zn per cui
tutte le
righe
emesse
dalla
sorgente al
Hg sono
utili
all'effetto
fotoelettrico



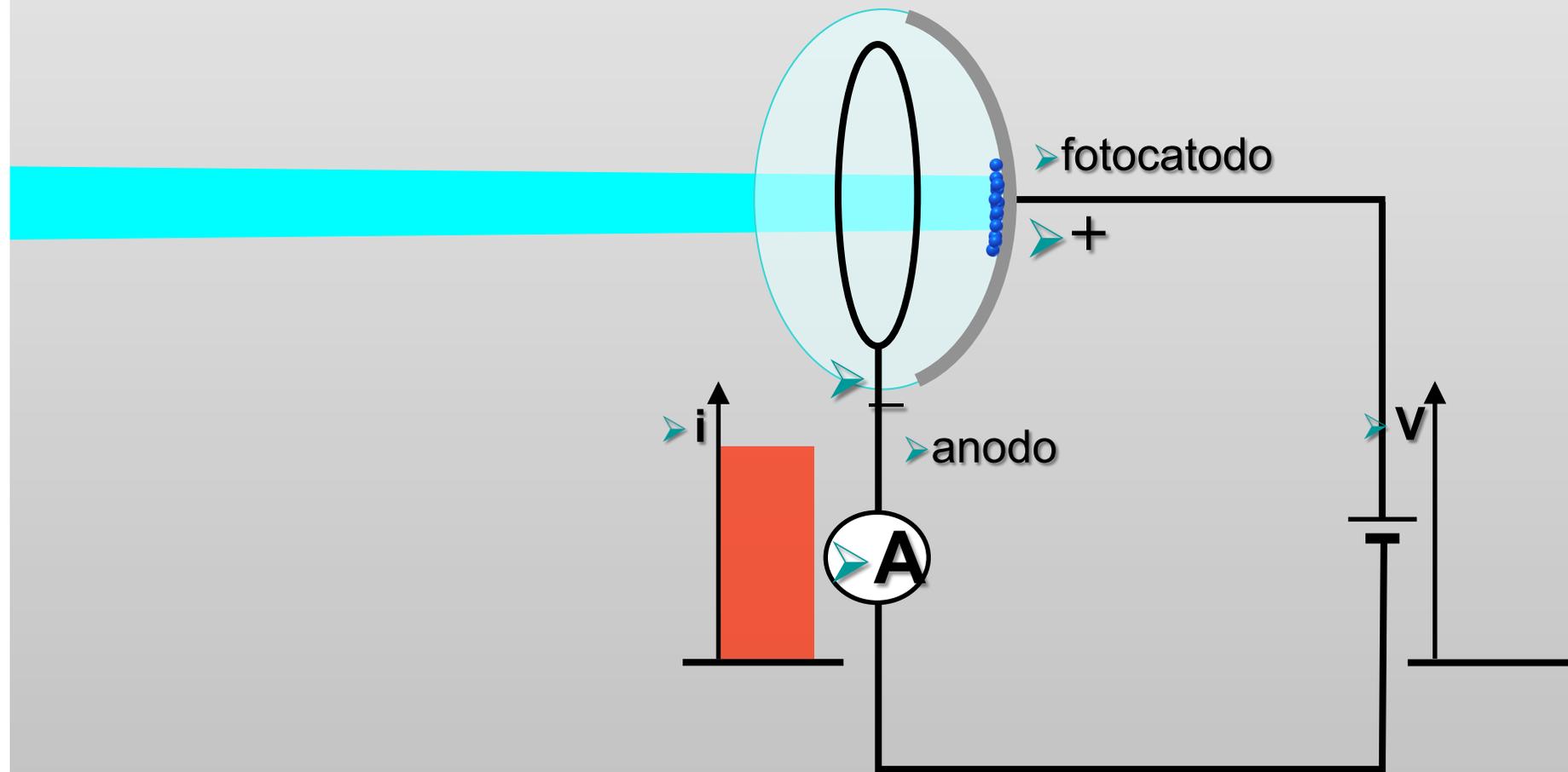
LA MISURA DELLA COSTANTE DI PLANCK

L'IDEA E' DI VARIARE LA FREQUENZA DELLA LUCE USATA (CHE VIENE SELEZIONATA CAMBIANDO DIVERSI FILTRI).

PER OGNI FILTRO (OVVERO FREQUENZA) SI MISURA IL POTENZIALE, DI SEGNO OPPOSTO, NECESSARIO A RESPINGERE TUTTI GLI ELETTRONI IN MODO CHE LA CORRENTE MISURATA SIA UGUALE A ZERO

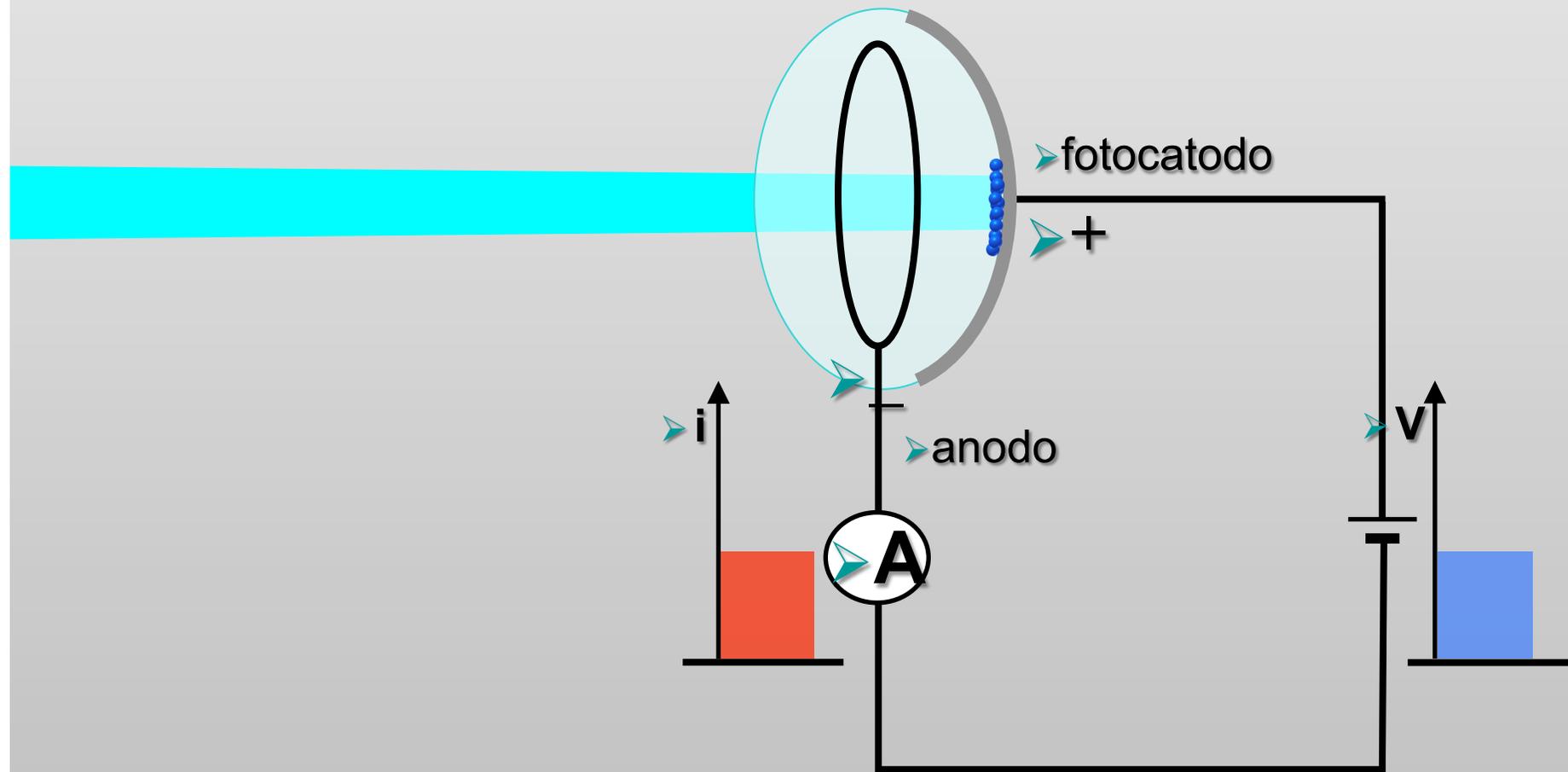
Misura di h

➤ cella fotoelettrica



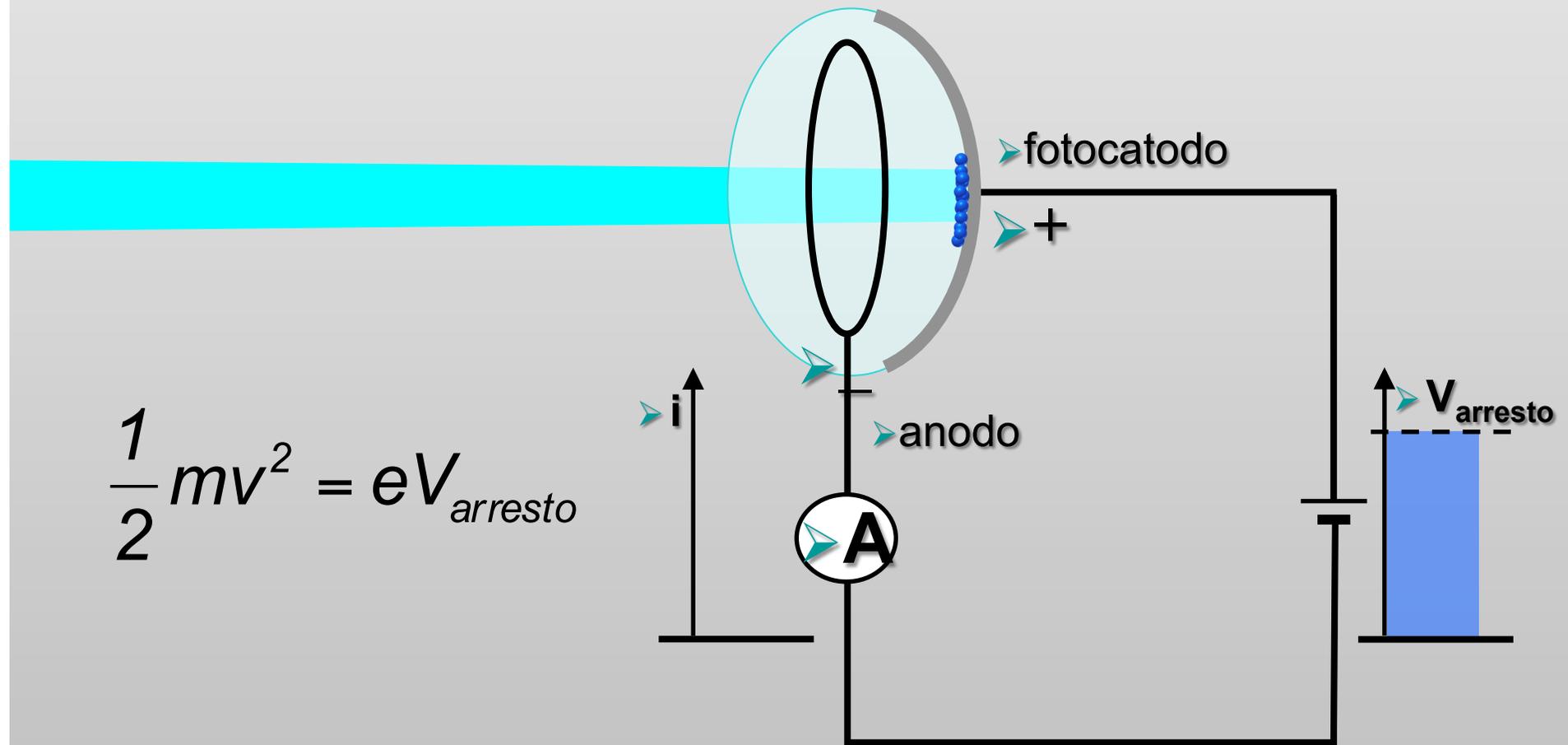
Misura di h

➤ cella fotoelettrica



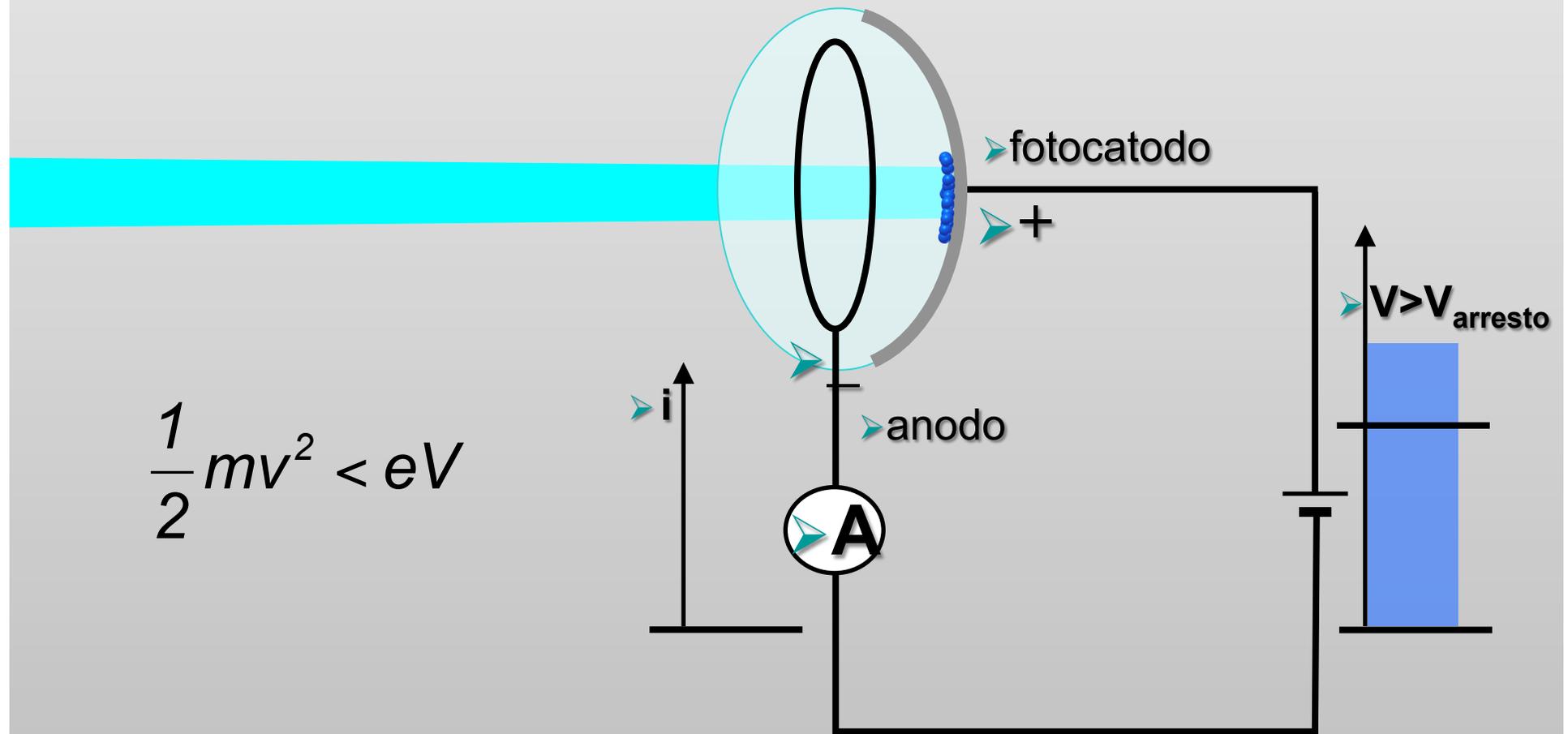
Misura di h

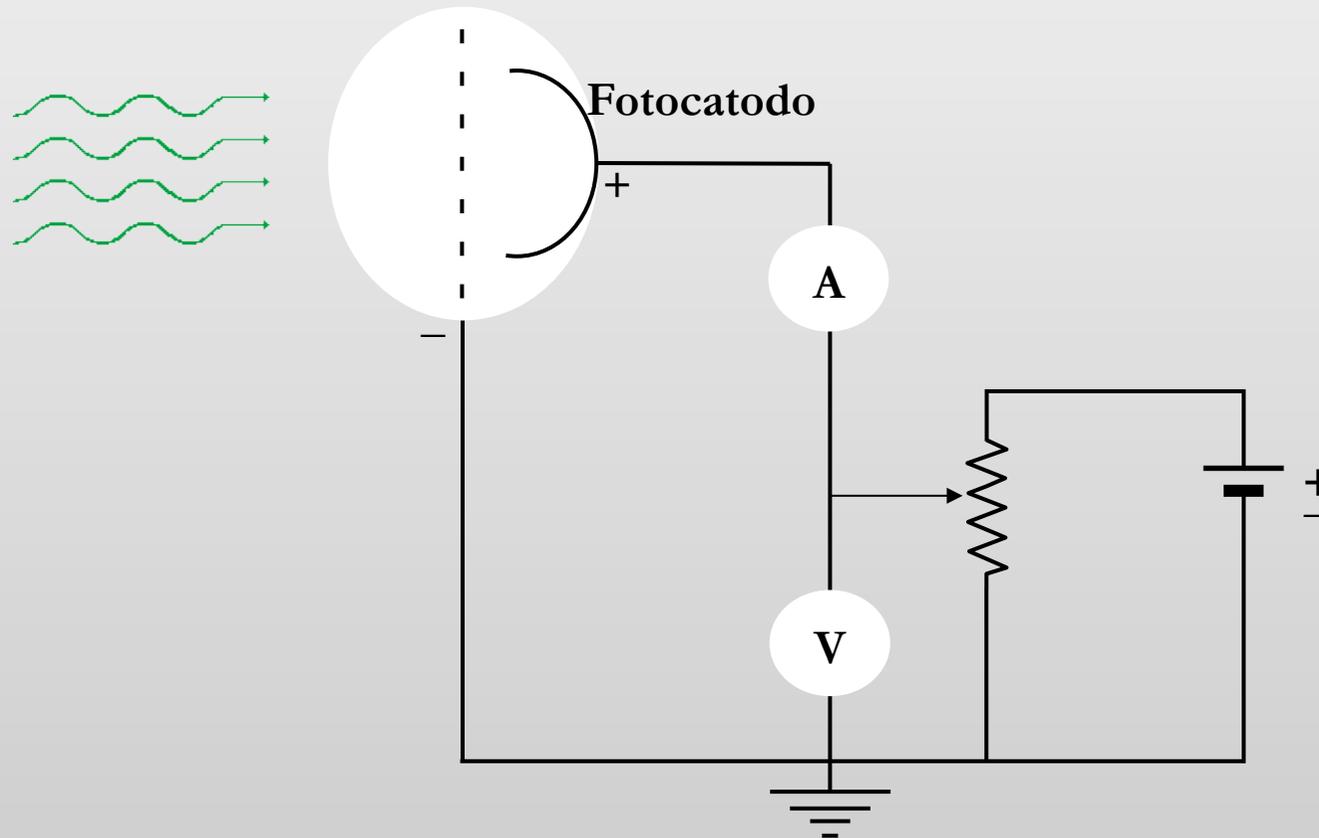
➤ cella fotoelettrica



Misura di h

➤ cella fotoelettrica





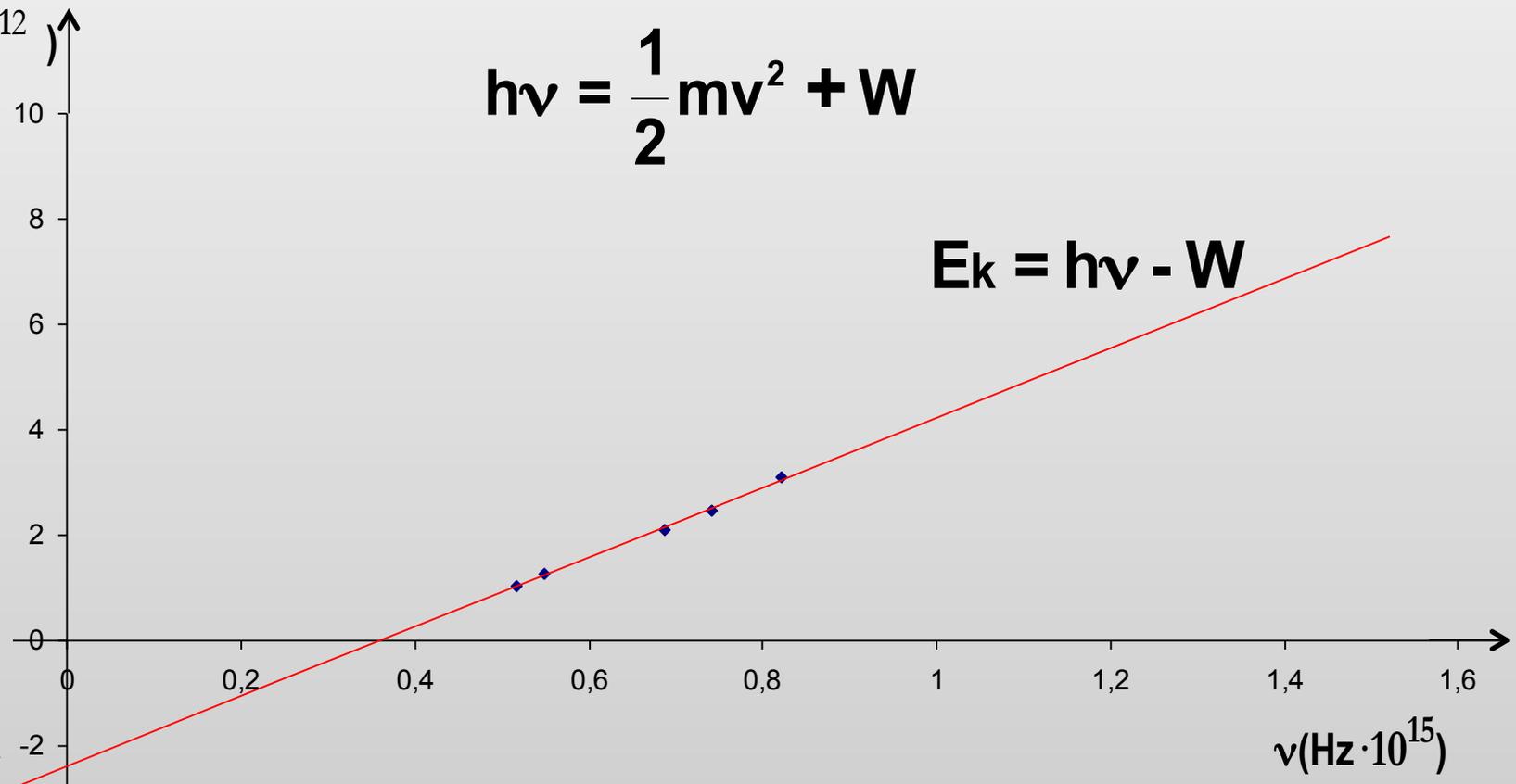
Quando la corrente misurata dall'amperometro A è nulla si ha :

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_0$$

Dalla misura di V_0 si ricava l'energia cinetica degli elettroni

	lunghezza d'onda	frequenza	energia cinetica E_k	d.d.p. oppositrice
	nm	Hz ·10 ¹⁵	Erg ·10 ⁻¹²	Volt
giallo	580	0,516	1,046	0,653
verde	546	0,549	1,252	0,782
blu	436	0,687	2,116	1,321
violetto	405	0,741	2,467	1,540
ultravioletto	365	0,822	3,101	1,935

$E_k(\text{erg} \cdot 10^{-12})$



$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

$$E_k = h\nu - W$$

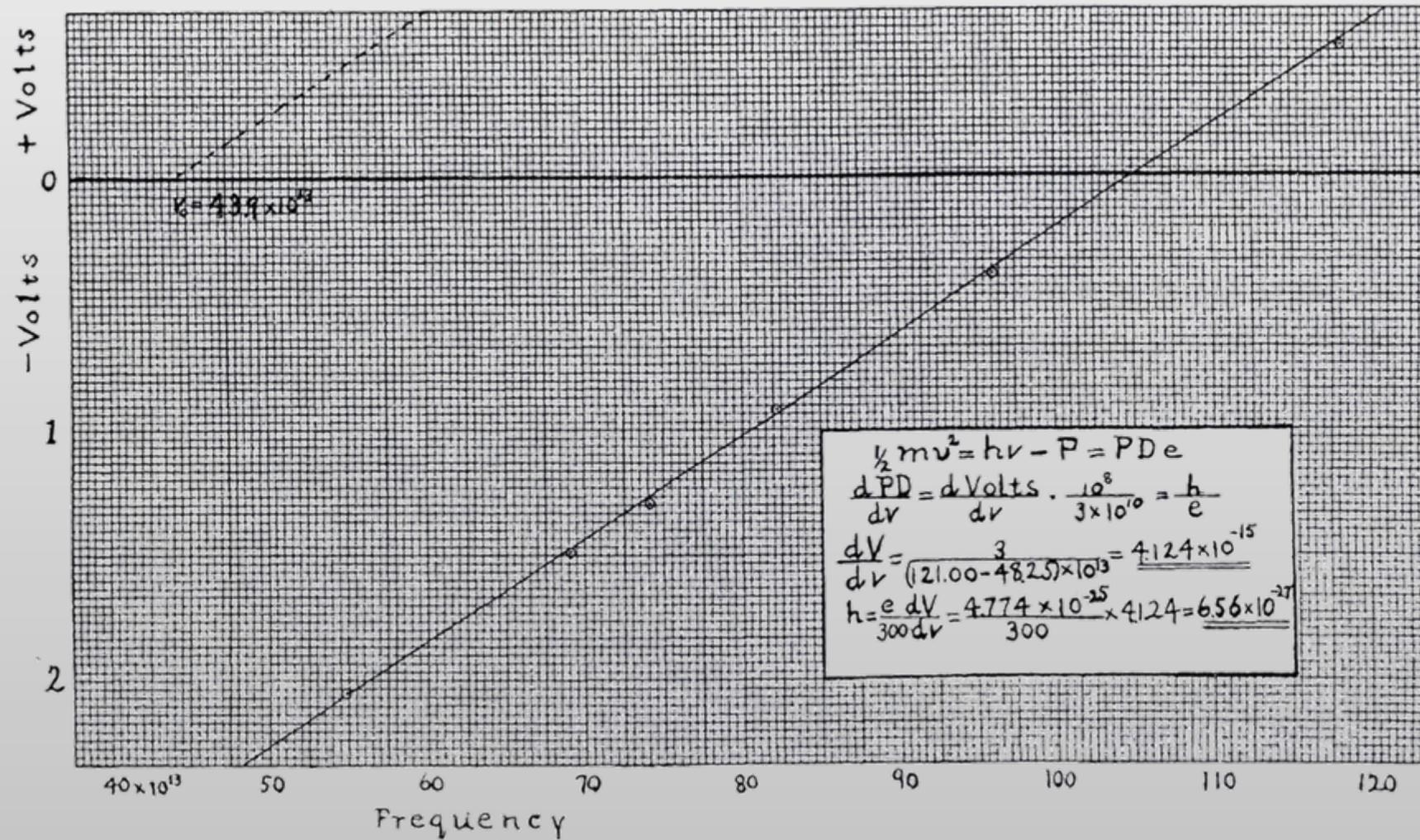
$-W$

$$h = 6,608 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$= 6,608 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$$

che differisce per meno dello 0,2% dal valore standard

misura originale di R. A. Millikan del 1916



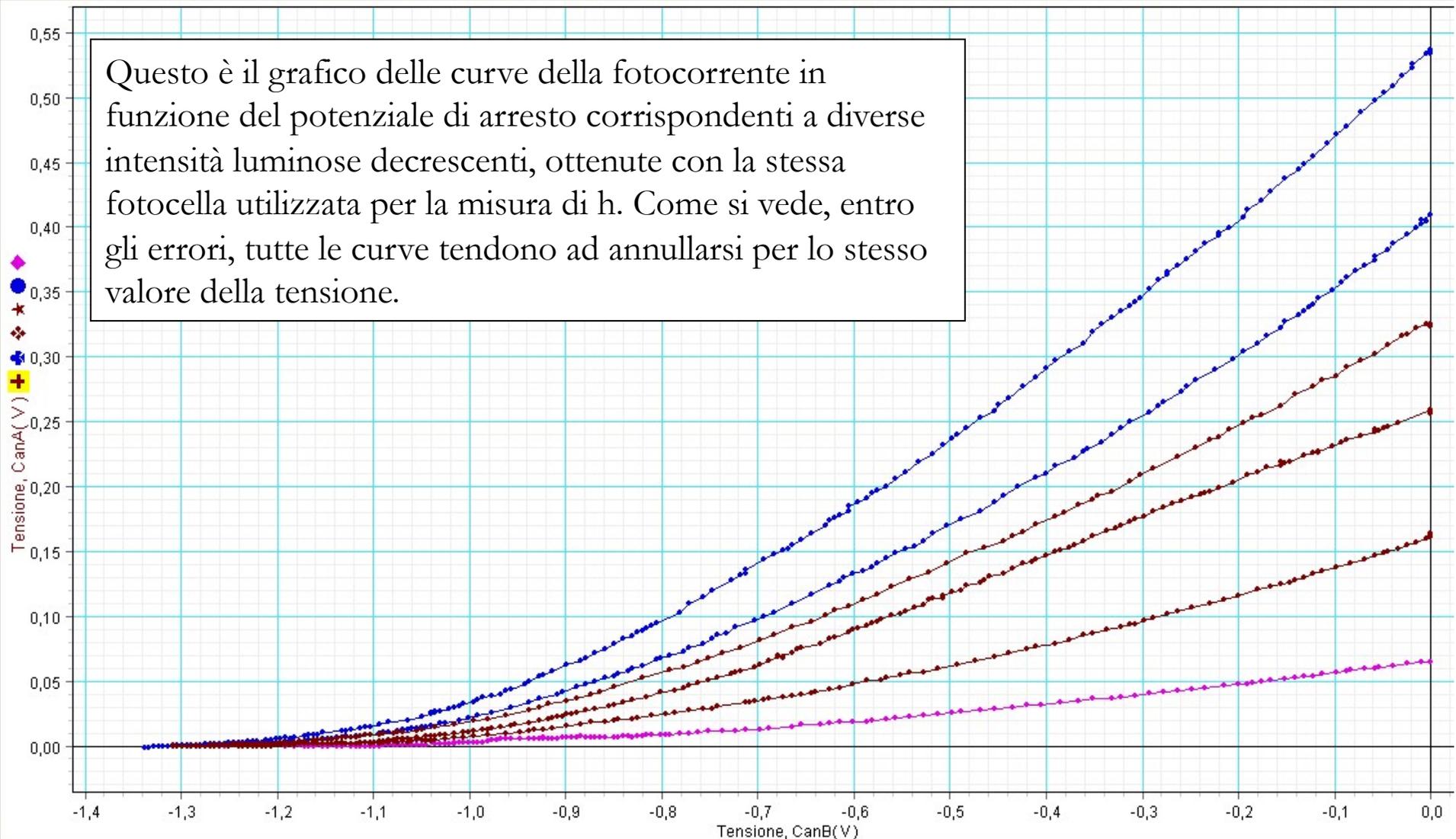


LA MISURA DELLA COSTANTE DI PLANCK

CON UN APPARATO ANALOGO A QUELLO APPENA USATO PER LA MISURA DELLA COSTANTE DI PLANCK E' POSSIBILE MISURARE L'ENERGIA CINETICA MASSIMA DEGLI ELETTRONI (eV_0) AL VARIARE DELL'INTENSITA' DELLA LUCE e dimostrare come già fatto da Lenard che l'energia cinetica massima degli elettroni non dipende dall'intensità della luce come previsto classicamente.

La misura fatta da Giovanni Casini con questo apparato mostra infatti il seguente risultato:

L'esperienza di Lenard



MISURA FATTA DA GIOVANNI CASINI IN LABORATORIO

Università di Roma Tor Vergata — Laboratorio di didattica della Fisica e della Matematica



LA MISURA DELLA COSTANTE DI PLANCK

L'INTENSITA' DELLA LUCE VARIA IL NUMERO
DI ELETTRONI EMESSI MA NON LA LORO
ENERGIA CINETICA

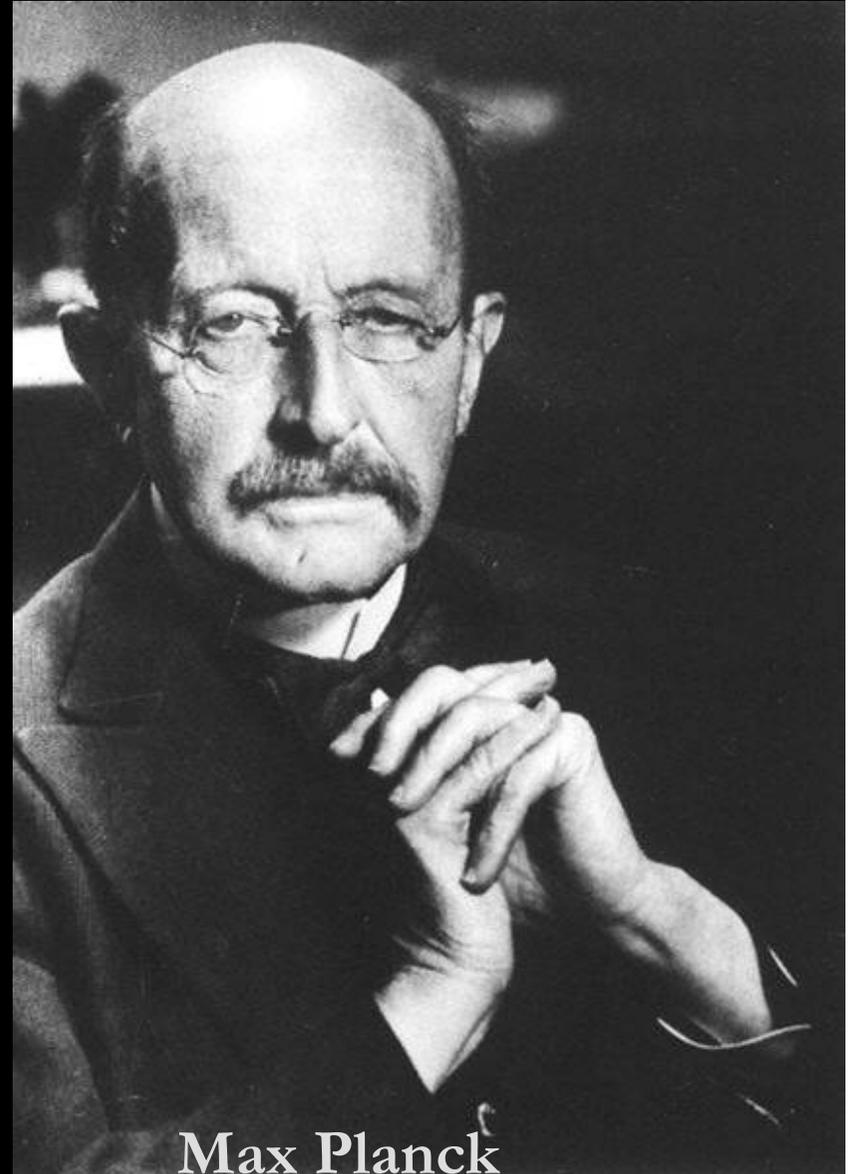
ANCHE QUESTO DATO DELL'ESPERIMENTO (NON
ATTESO DALLA TEORIA CLASSICA) SI SPIEGA CON
L'IPOTESI DI EINSTEIN:

L'ENERGIA CINETICA ACQUISTATA DAGLI
ELETTRONI DIPENDE DALLA FREQUENZA
DELLA LUCE MA NON DALLA SUA INTENSITA'

$$h\nu = W + E_{kin} = W + \frac{1}{2}mv^2$$

L'ipotesi dei fotoni non fu facilmente accolta dalla comunità dei fisici.

Planck scrisse che qualora l'ipotesi dei fotoni fosse stata accettata "la teoria della luce sarebbe tornata indietro di secoli" e tutta la sintesi Maxwelliana dell'elettromagnetismo "sarebbe stata minacciata a causa di poche ancor dubbie speculazioni".



Max Planck

A black and white photograph showing two men in profile, facing each other. The man on the left is older, with thinning hair, wearing a dark suit and a light-colored shirt. The man on the right is younger, with a mustache and wavy hair, also in a dark suit and light shirt. They appear to be in a formal setting, possibly a meeting or a lecture. The background is dark and out of focus, with another person partially visible on the right side.

In occasione dell'ammissione di Einstein all'Accademia prussiana delle Scienze Planck osservò "che le sue speculazioni l'avevano spinto talvolta troppo in là, ad esempio con l'ipotesi dei quanti di luce: tuttavia non si doveva dare troppa importanza a questo fatto. Infatti le Scienze esatte progredirebbero ben poco se nessuno osasse correre rischi".



Lo stesso Millikan nel 1916 scriveva:
“Malgrado l'apparente e completo
successo dell'equazione di Einstein, la
teoria fisica [cioè l'effetto fotoelettrico],
di cui l'equazione era l'espressione
simbolica, è così indifendibile che io
ritengo che lo stesso Einstein non la
sostenga più.”

Adams

Michelson

Einstein

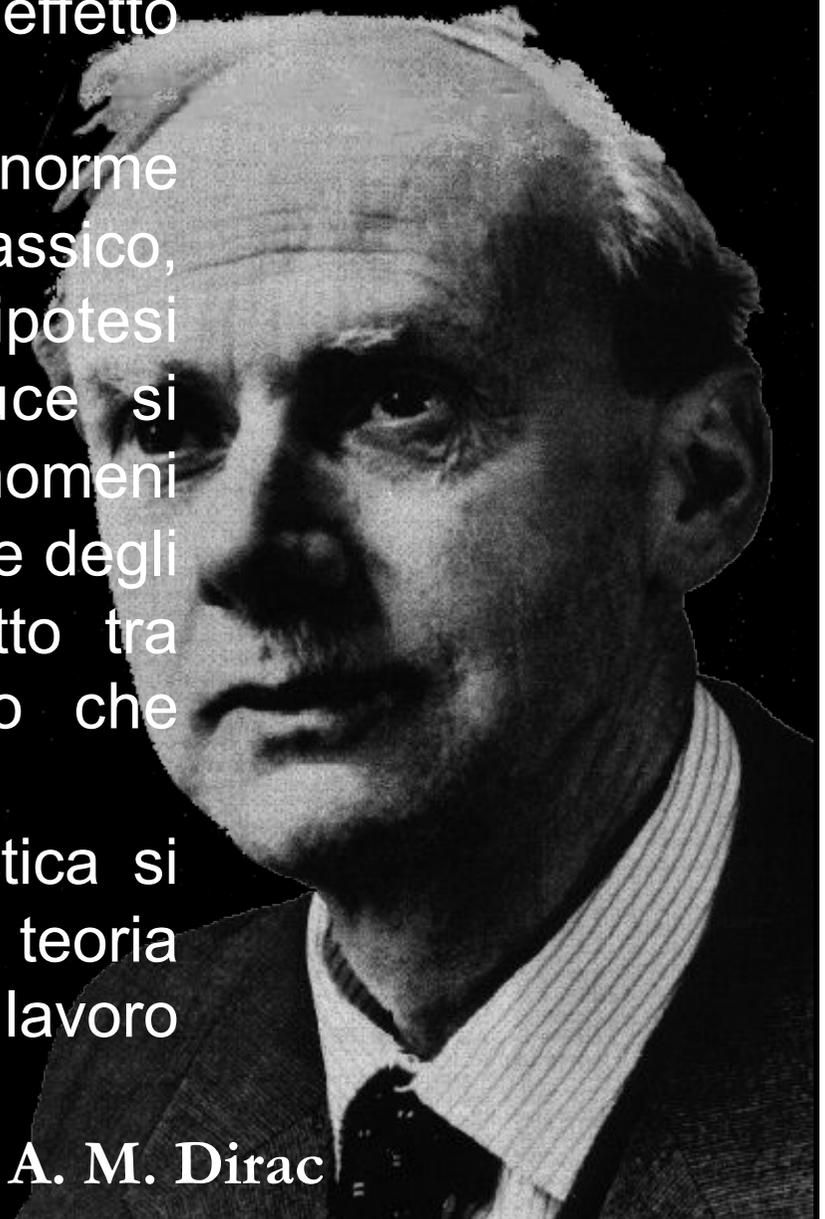
Millikan

Tuttavia l'ipotesi dei fotoni si affermò essendo la sola capace di spiegare l'effetto fotoelettrico, gli spettri atomici, l'effetto Compton.

Non potendosi tuttavia trascurare l'enorme successo dell'elettromagnetismo classico, si fece strada gradualmente un'ipotesi dualistica della radiazione; la luce si comporta come una particella nei fenomeni di emissione e assorbimento da parte degli atomi e come un'onda nel tragitto tra l'atomo che la emette e l'atomo che l'assorbe (M. Born 1926).

Un superamento della teoria dualistica si ebbe solo con lo sviluppo della teoria quantistica dei campi a partire da un lavoro di Dirac del 1927.

P. A. M. Dirac



La Teoria Atomica da Democrito a Bohr

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

- NEGLI STESSI ANNI UN GRANDE PASSO IN AVANTI VIENE FATTO NELL'AMBITO DELLA **TEORIA ATOMICA**.

IN POCHI ANNI SI PASSA DALLA TEORIA
ATOMICA DI DEMOCRITO AL MODELLO
ATOMICO DI BOHR

La Teoria Atomica da Democrito a Bohr

- ANCHE IN QUESTO CASO GLI ESPERIMENTI GIOCANO UN RUOLO IMPORTANTE SIA PER INDICARE IL FALLIMENTO DEI VECCHI MODELLI (esperimento di *Rutherford*, esperimento di *Stern & Gerlach*) SIA PER INDICARE LA STRADA GIUSTA ALLE NUOVE TEORIE (es. *Frank&Hertz*)

La Teoria Atomica da Democrito a Bohr: I Protagonisti

incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

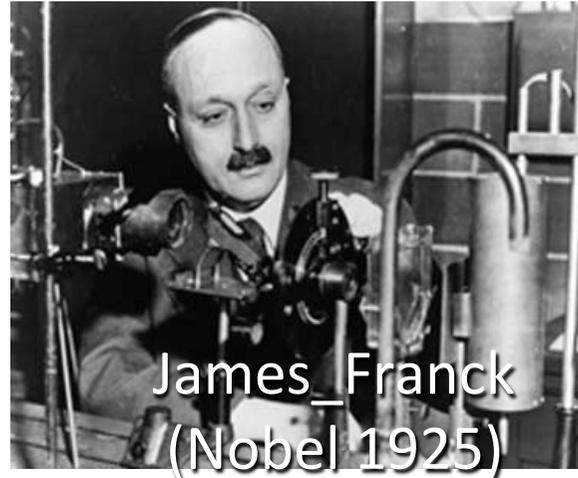


Democrito

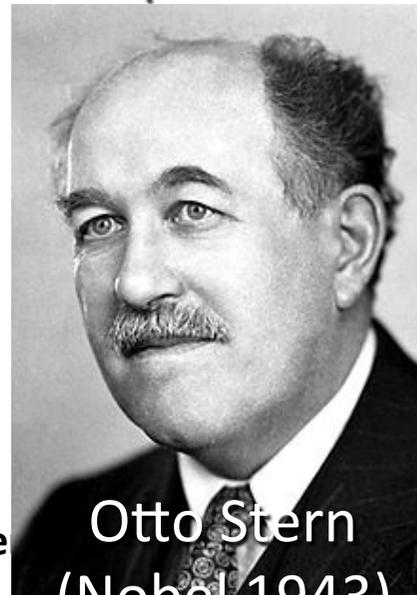
<http://www.trinco.it/educazione/philos/>



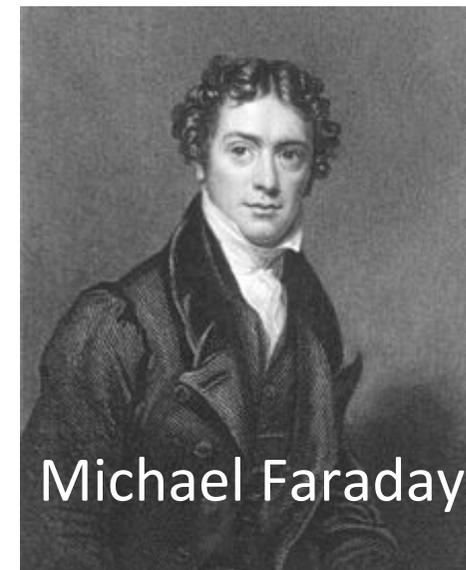
J.J. Thomson
**Thomson
(1898)**



James_Franck
(Nobel 1925)



Otto Stern
(Nobel 1943)



Michael Faraday

/100

TEORIA ATOMICA: ovvero la teoria

degli **ατομ**

- Democrito (460 a.C.)

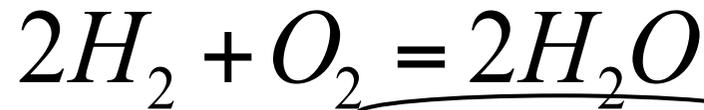


J.J. Thomson.

Thomson (1898)

Alcuni dati...

- **Lavoisier (1743):** *Legge della conservazione della massa*
Niente si crea, niente si distrugge
ma tutto si trasforma

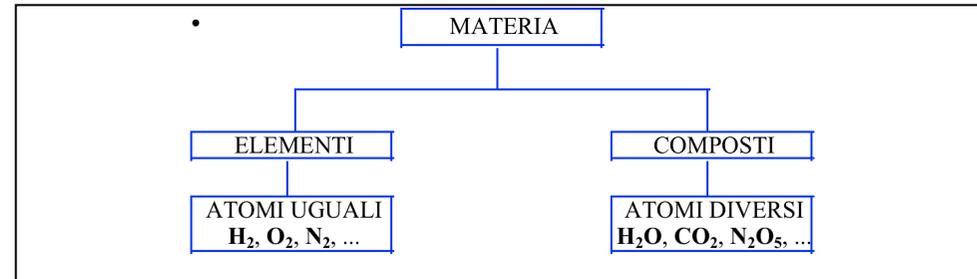


l'acqua, considerata inizialmente un elemento fondamentale, era in realtà un composto (H_2O) (il prodotto), costituita da idrogeno (H_2) e ossigeno (O_2) (reagenti)

Proust (1799): *Legge delle proporzioni costanti*
quando due o più elementi reagiscono, per formare un
determinato composto, si combinano sempre secondo
proporzioni in massa definite e costanti.

IN ALTRE PAROLE: quando facciamo reagire due sostanze e ne mettiamo un eccesso di una, l'andamento della reazione non cambia, la massa in eccesso non reagisce, e si trova inalterata alla fine della reazione assieme al prodotto della reazione

Alcuni dati...



Dalton (1766):

Legge delle proporzioni multiple

Ad esempio, 7 g di N si combinano con l'ossigeno nei seguenti modi:

- + 4 g di O = 11 g ossido nitroso
- + 8 g di O = 15 g di ossido nitrico
- + 12 g di O = 19 g di triossido di diazoto
- + 16 g di O = 23 g di biossido di azoto
- + 20 g di O = 27 g di anidride nitrica

LA QUANTITA' di O CHE REAGISCE CON 7g di N E' SEMPRE

Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

A. Sgarlata - a.a. 2017/'18

MULTIPLO DI 4 g

108/100

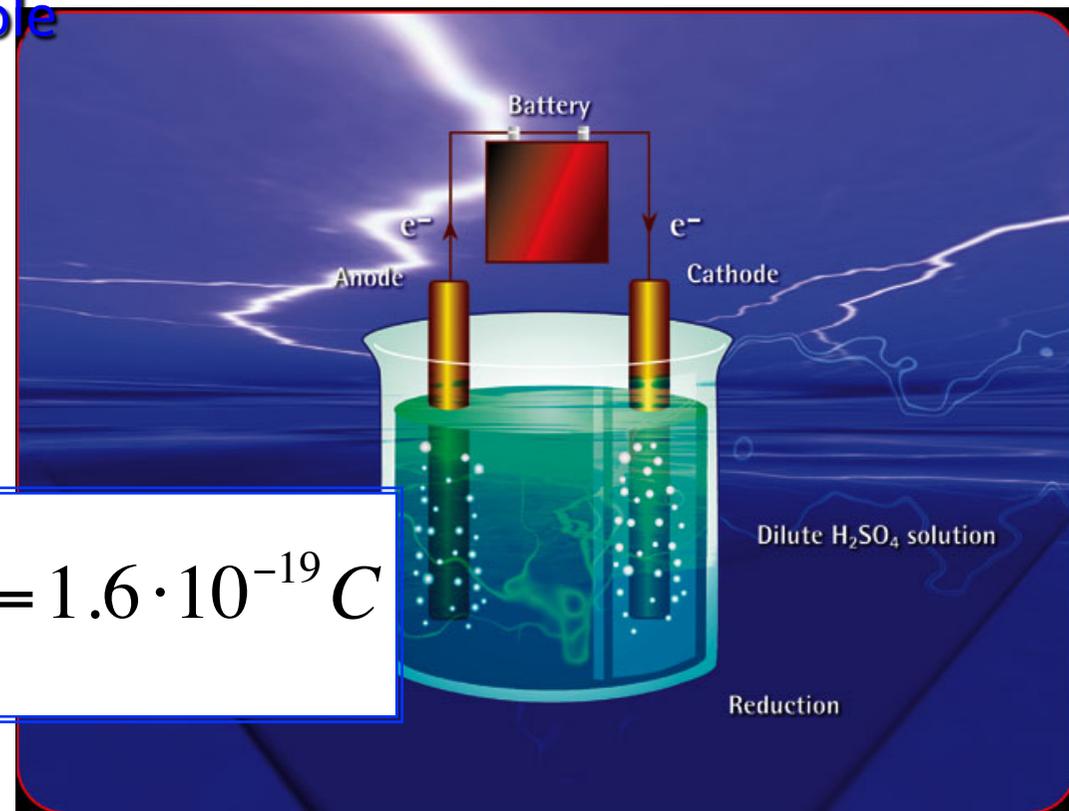
- In pratica tutto sembra indicare/
confermare che ogni composto è
costituito da
unità fondamentali
che entrano in quantità diverse nei
vari elementi

- **FARADAY (1833): Legge dell'elettrolisi**

1 Faraday di corrente ($1F = 96500 \text{ C/mole}$) libera una mole di sostanza monovalente

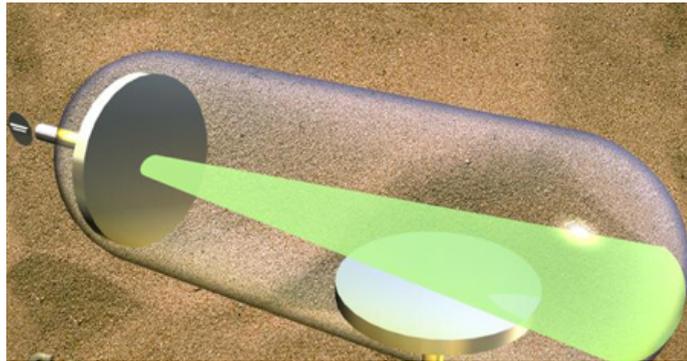
non a caso

$$\frac{F}{N_A} = \frac{96500}{6 \cdot 10^{23}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



la scoperta degli elettroni

•Esperimento di Thomson (1897):



Thomson all'interno del tubo inserì due lamine elettricamente cariche e fece passare il fascio di luce attraverso, notando che il fascio veniva deviato verso la lamina con carica positiva. Questo fece comprendere a Thomson che le particelle che formavano il fascio di luce erano negative

Thomson applicò ai 2 elettrodi (catodo - e anodo +) una forte differenza di potenziale (1000 v), e notò che dal catodo partì un fascio di luce verde fluorescente

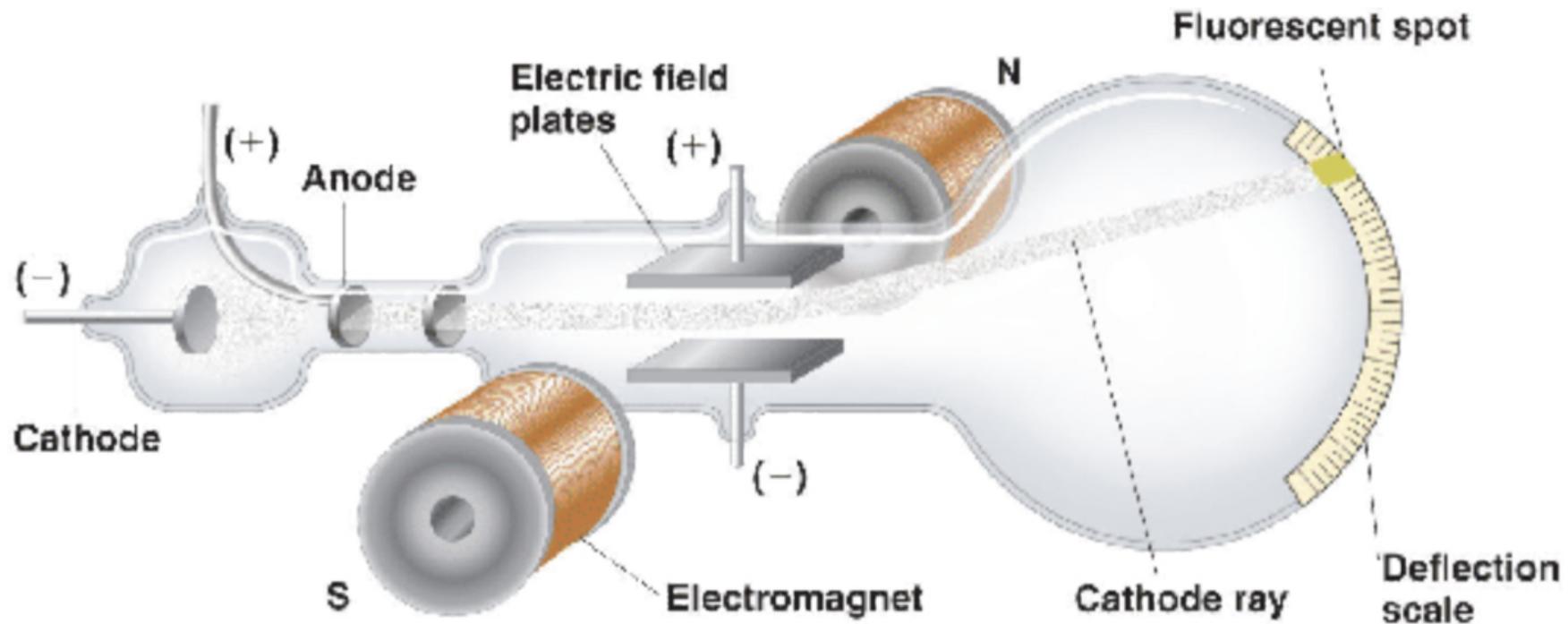


Stima del rapporto e/m

TEORIA ATOMICA: la scoperta degli elettroni

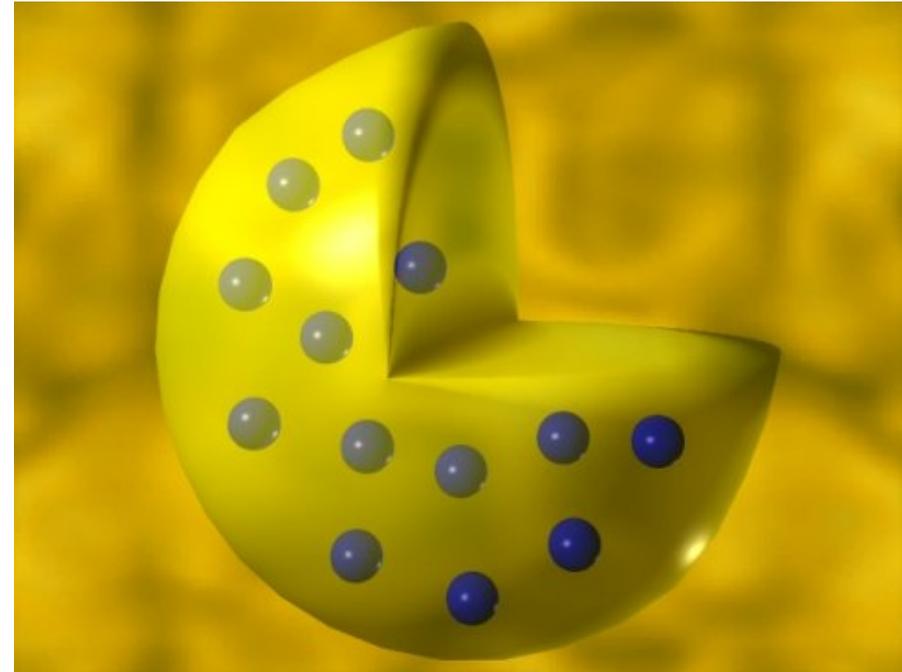
incontro #7 - 07.03.2018
verso la fisica moderna

- Esperimento di **Thomson (1897)**:



Copyright © 2005 Pearson Education, Inc., Publishing as Benjamin Cummings

- IL MODELLO ATOMICO DI THOMSON:
il modello plum pudding



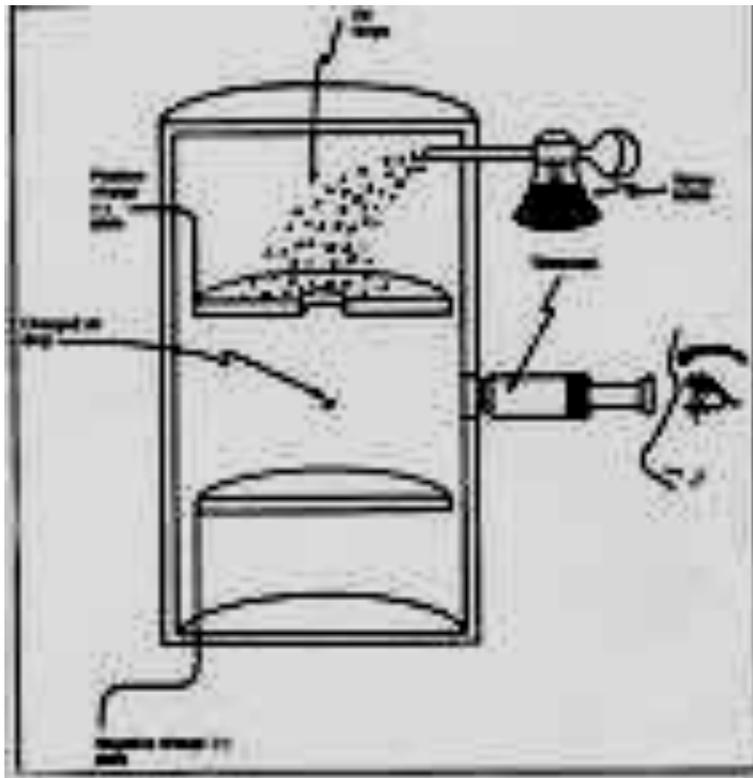
detto anche "A PANETTONE"

Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

A. Sgarlata - a.a. 2017/'18

TEORIA ATOMICA

- L'ESPERIMENTO DI **MILLIKAN (1909)**: misura della carica e della massa dell'elettrone



Misura della velocità limite di minuscole particelle di olio tra le piastre di un condensatore

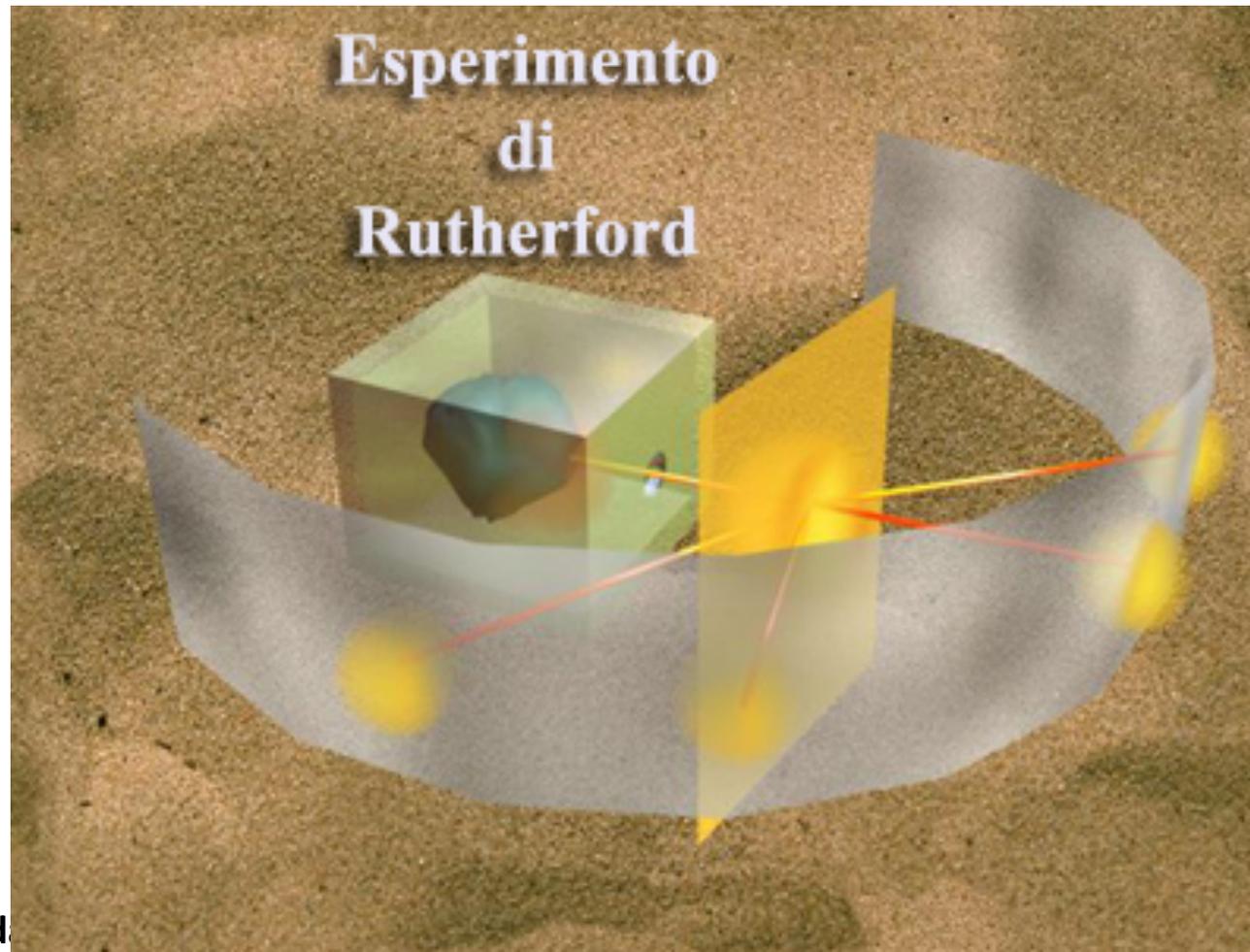
in assenza ($Mg = 6\pi\eta r v_{1lim}$) e

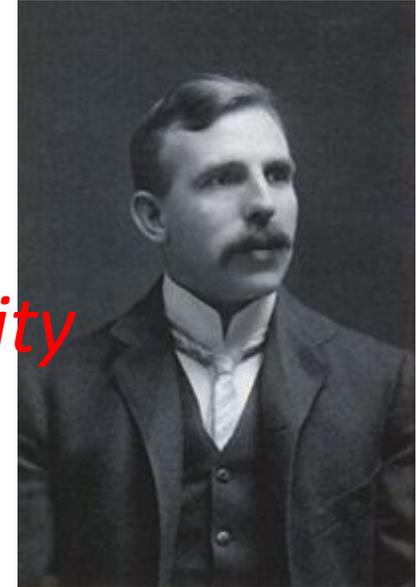
in presenza ($q(V/d) - Mg = 6\pi\eta r v_{2lim}$) di un campo elettrico applicato:

$$|q| = \left| 6\pi\eta r \frac{d}{V} (v_1^{lim} + v_2^{lim}) \right| = ne$$

$$e = 1.59 \cdot 10^{-19} C \Rightarrow m = \frac{e}{e/m} = 9.1 \cdot 10^{-31} kg$$

- L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD (1911):



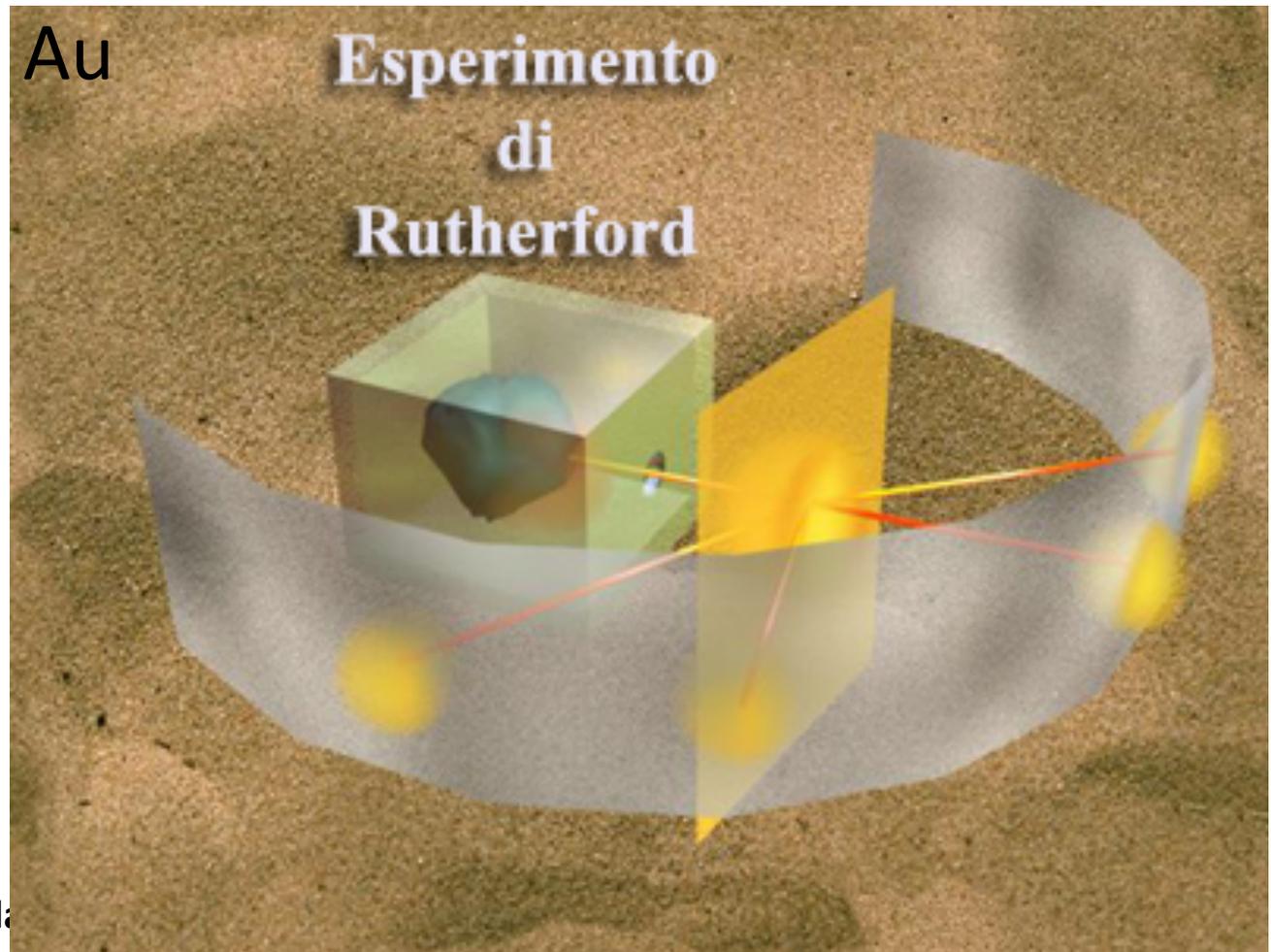


- Nasce in Nuova Zelanda nel **1871** e nel 1898 diventa Prof alla **McGill University**
- **Scopre le particelle α** (1897 Cambridge)
- Trasforma **N_2 in O_2** (1919)
- Stimò *l'età della Terra* in 1500 Milioni di anni **$\sim 10^9$ anni** (dalla misura del residuo di radiazione α presente nelle rocce)
- Ideatore insieme a **Geiger** di un *rivelatore di particelle*
- Studiò insieme a Moseley i raggi X

L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD

(1911):

- Deflessione delle particelle α da parte di un sottile strato di Au



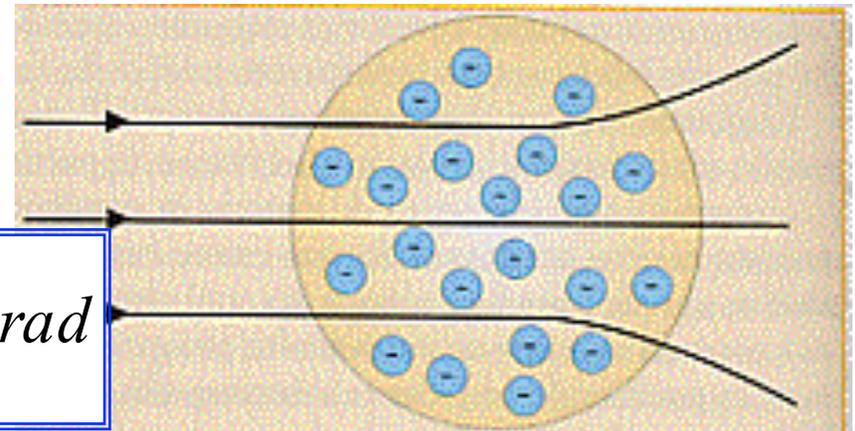
L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD

(1911):

- Risultati previsti dal modello atomico di Thomson:

Deflessione dalle cariche negative

$$\Phi_{\max} = \frac{\Delta p_e}{p_\alpha} = \frac{2m_e v}{M_\alpha v} \approx \frac{2m_e}{4 \cdot 1836 \cdot m_e} \approx 10^{-4} \text{ rad}$$



Deflessione dalla carica positiva

$$\Phi_{\max} = \frac{\Delta p_\alpha}{p_\alpha} = \frac{F_{\max} \Delta t}{M_\alpha v} \approx \frac{1}{M_\alpha v} \cdot \frac{2Ze^2}{R^2} \cdot \frac{R}{v} = \frac{2Ze^2}{Mv^2 R} \approx 10^{-4} \text{ rad}$$

...ci si aspettava che le particelle subissero
una *debolissima* deviazione

Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

A. Sgarlata - a.a. 2017/'18

L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD

(1911):

In realtà le particelle α venivano deflesse anche ad angoli **molto grandi!** Il modello atomico di Thomson non poteva spiegare i risultati dell'esperimento di Rutherford!



Rutherford scrisse :

“Fu l’evento più incredibile che mi fosse mai capitato nella vita. Altrettanto incredibile che se vi fosse capitato di sparare un proiettile da 15 pollici contro un pezzo di carta velina e questo fosse tornato indietro a colpirvi...”

L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD

(1911):

Come spiegare i risultati dell'esperimento ?

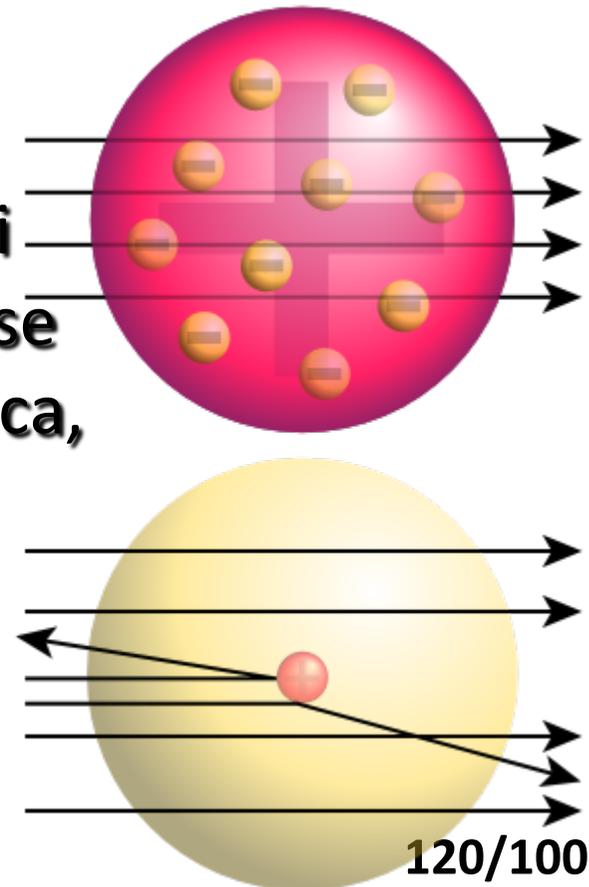
Ora la risposta ci sembra ovvia, ma all'epoca non lo era affatto!

Mentre Geiger e Mardsen misuravano, Rutherford si dedicò all'interpretazione dei dati: ricavò le curve che avrebbe ottenuto se l'interazione fosse stata di origine meccanica, gravitazionale, coulombiana...

Non solo l'accuratezza nel riprodurre l'esperimento, ma anche l'approfondita analisi portarono Rutherford a capire....

Esperimenti didattici nella fisica classica e moderna

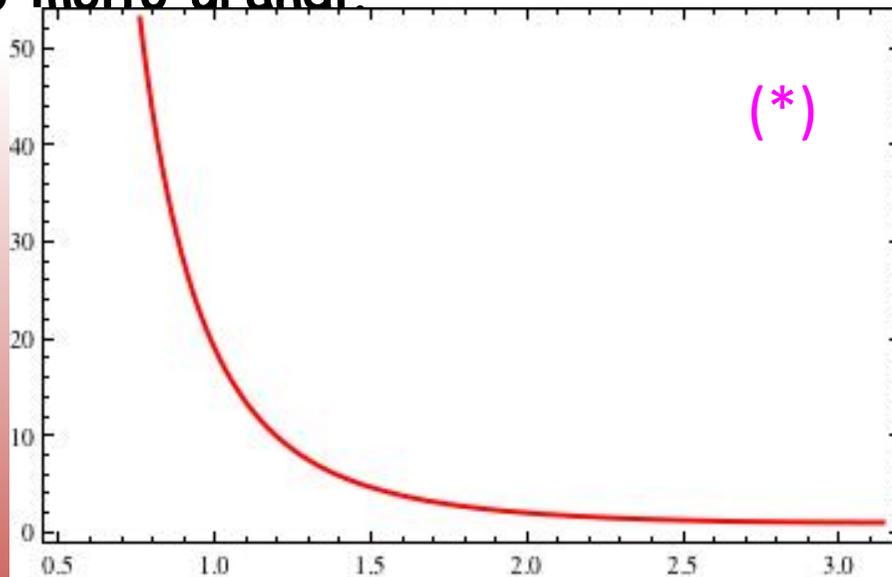
A. Sgarlata - a.a. 2017/'18



Ipotesi: potenziale di interazione coulombiano

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{zZe^2}{2mv_0^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

La trattazione quantistica porta allo stesso risultato. Questa coincidenza si verifica solo nel caso del potenziale coulombiano. La sezione d'urto decresce rapidamente al crescere dell'angolo di diffusione (*). Questa rapida variazione permette un significativo confronto col dato sperimentale. L'accordo tra teoria ed esperimento è eccellente. La teoria fallisce solo per parametri d'urto molto piccoli o molto grandi.



z=numero atomico del proiettile;
Z=numero atomico del bersaglio;
m=massa del proiettile;
v₀=velocità del proiettile

Nella determinazione della sezione d'urto, Rutherford prese in considerazione una sola interazione, pertanto

Stima dello spessore della lamina d'oro

Il peso atomico dell'oro è 197 e la densità $\rho=19.3\text{g/cm}^3$. Il numero di atomi per cm^3

$$n = \frac{N_A}{P_A} \rho = \frac{6 \times 10^{23}}{197} 19.3 = 5.9 \times 10^{22} \text{ atomi/cm}^3,$$

In superficie ci sono $n^{2/3}$ atomi, ovvero 1.5×10^{15} atomi per cm^2 . Per parametri d'urto superiori a 10^{-10}cm la formula di Rutherford non è più valida. Allora se A è la superficie di uno strato, l'area utile per lo scattering sarà

$$S = \pi b_M^2 n^{2/3} A.$$

$$\sigma = \frac{S}{A} = \pi b_M^2 n^{2/3} = \pi \times 10^{-20} 1.5 \times 10^{15} = 4.7 \times 10^{-5}.$$

La probabilità di avere una diffusione nell'attraversare N strati è data dalla somma di avere un evento sul primo strato e niente negli altri $N-1$, di averne uno sul secondo e niente negli altri $N-1$ e così via. Possiamo dunque scrivere:

$$W = N\sigma(1-\sigma)^{N-1} \approx N\sigma(1-\sigma)^N \approx N\sigma(1-N\sigma)$$

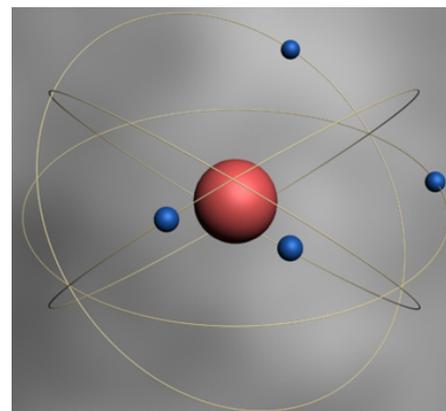
ed il massimo si ha per $N\sigma=1/2$.

IMPORTANZA DELLA TECNOLOGIA!!!

$$N = \frac{1}{2\sigma} = \frac{10^5}{9.4} \approx 10^4 \text{ strati atomici}$$

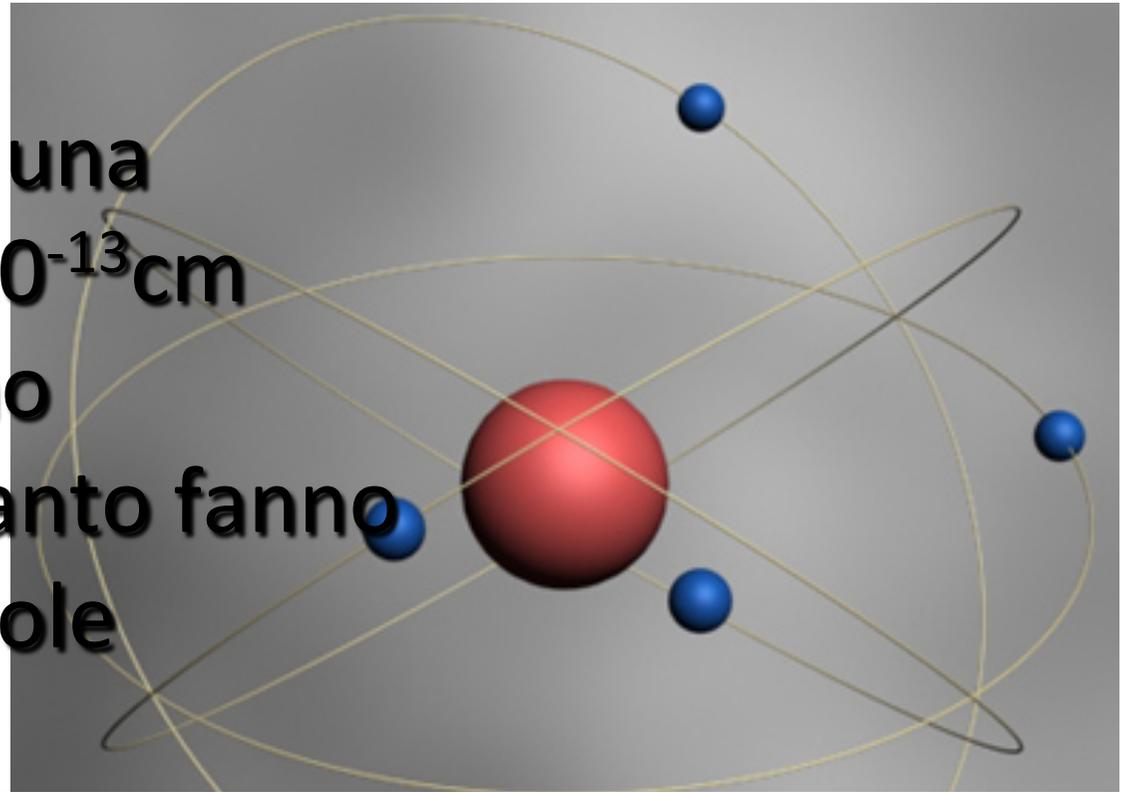
Per particelle α molto veloci ($E > 6 \text{ MeV}$) a grandi angoli, ovvero *parametri d'urto (b) molto piccoli* (urti quasi centrali) si osservano deviazioni nette dalla legge di Rutherford. Questo fatto indica che le forze in gioco non sono più di tipo coulombiano. In effetti le particelle essendo molto energetiche si avvicinano così tanto che cominciano a farsi sentire le forze nucleari. Dai valori di b e θ a cui si cominciano ad osservare questi effetti, si ricava la dimensione del nucleo: 10^{-15} m .

Per parametri d'urto molto grandi l'effetto di schermo degli elettroni dell'atomo si fa sentire ($b > 10^{-10} \text{ cm}$) e la formula di Rutherford fallisce.



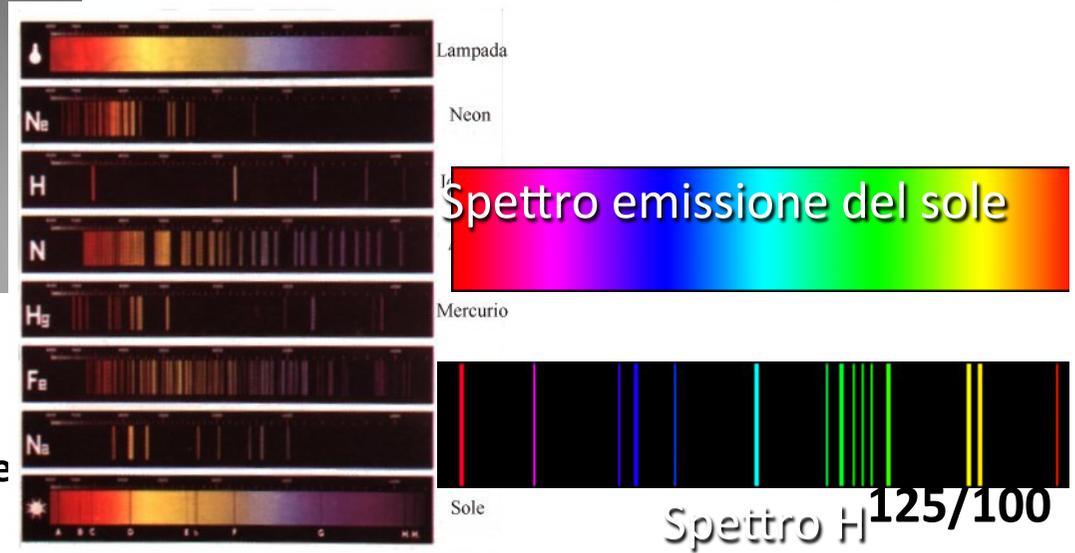
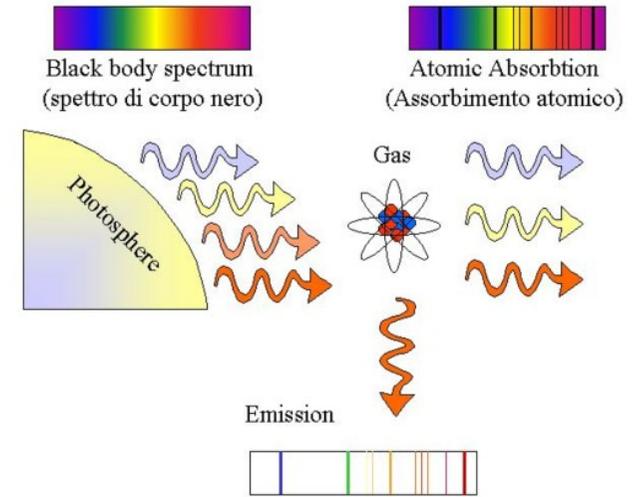
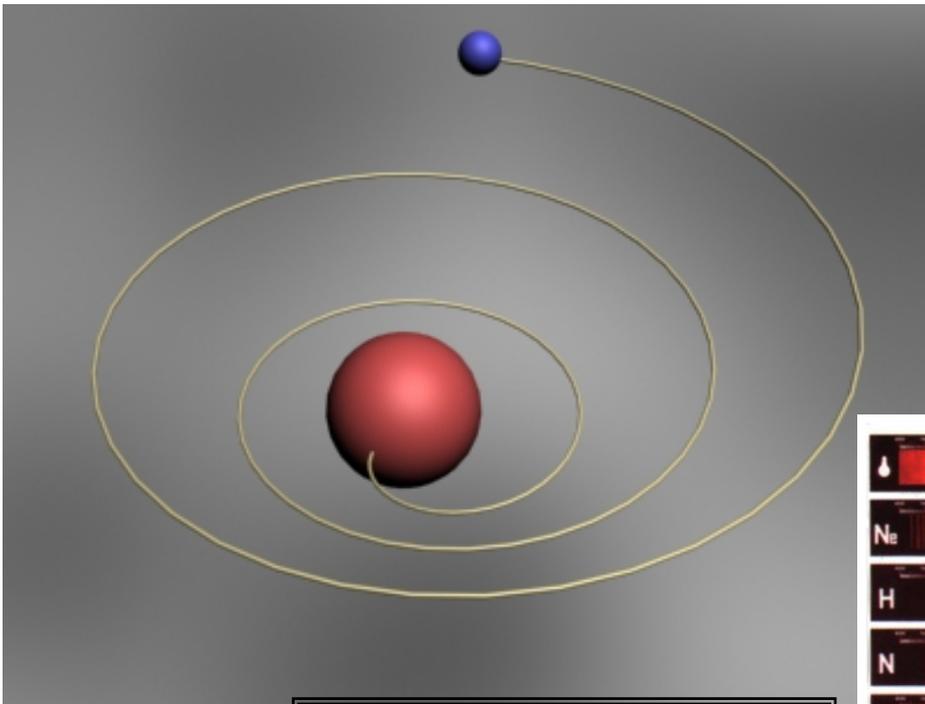
- IL MODELLO PLANETARIO:

Nucleo confinato in una regione di spazio $\approx 10^{-13}$ cm
Elettroni che ruotano analogamente a quanto fanno i pianeti intorno al sole



Per capire: Se il nucleo fosse una sfera di acqua con diametro pari ad 1m, qui a Tor Vergata, l'elettrone, una sferetta di 8mm di diametro, si troverebbe a L'Aquila.

•OLTRE IL MODELLO PLANETARIO: due risposte mancate



Esperimenti did.
A. Sgarlata - a.a.

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



OLTRE IL MODELLO PLANETARIO : LA MODERNA TEORIA ATOMICA

La quantizzazione e la fine del dualismo onda-particella



I TRENTA ANNI CHE SCONVOSERO LA FISICA

Nel 1905 un fisico Einstein manda alla *Annalen der Physik* una serie di articoli



Marzo "E=hn ": la quantizzazione dell'energia

Maggio " Il moto browniano "

Giugno "La Teoria della Relatività"



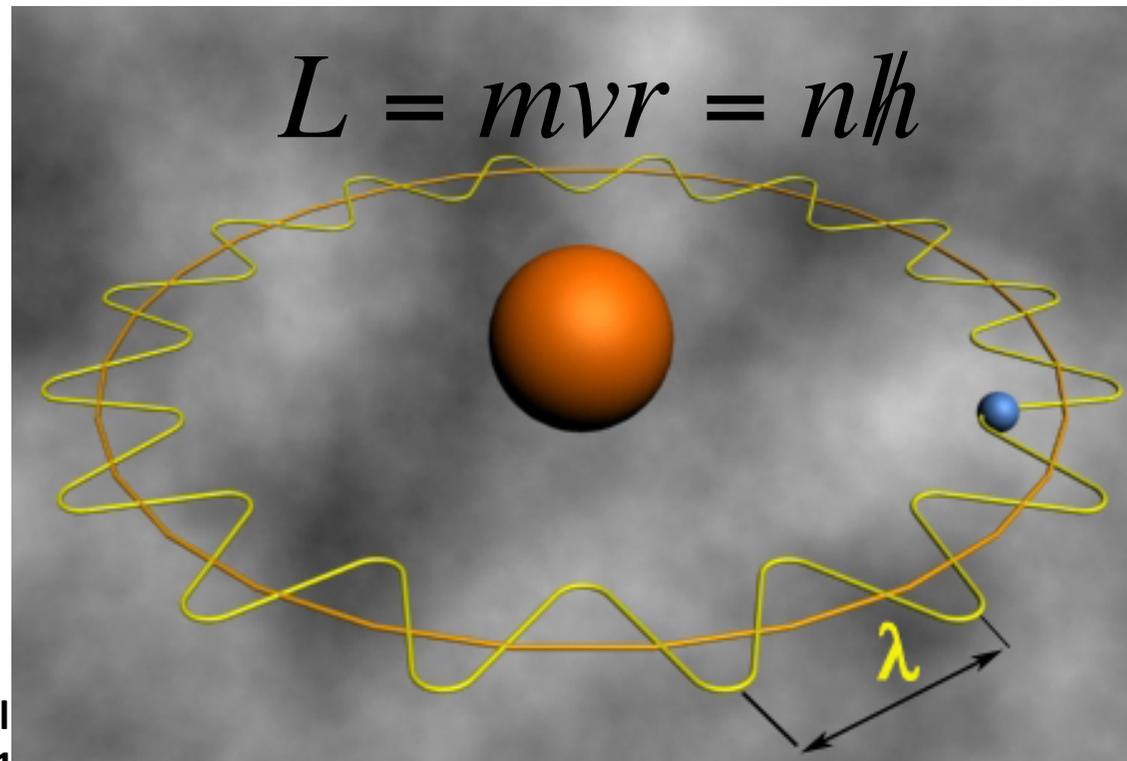
Settembre
classica e moderna

"E=mc²"



1914 l'Atomo di Bohr:

Sono permesse solo le orbite il cui momento angolare è quantizzato e multiplo della costante di Plank

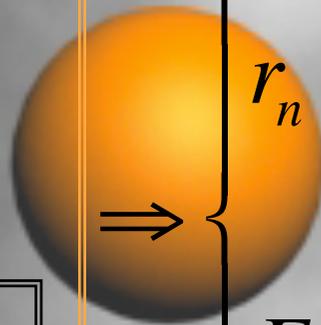


L'ATOMO DI BOHR (1914)

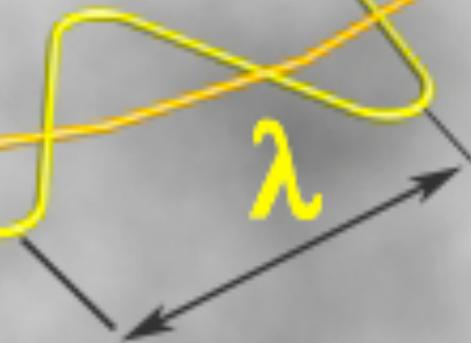
$$\begin{cases} mvr = n\hbar \\ \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r^2} = \frac{mv^2}{r} \end{cases}$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)r}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Ze^2 m} n^2 \\ E_n = -\frac{1}{2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{m}{\hbar^2} \frac{1}{n^2} \end{cases}$$

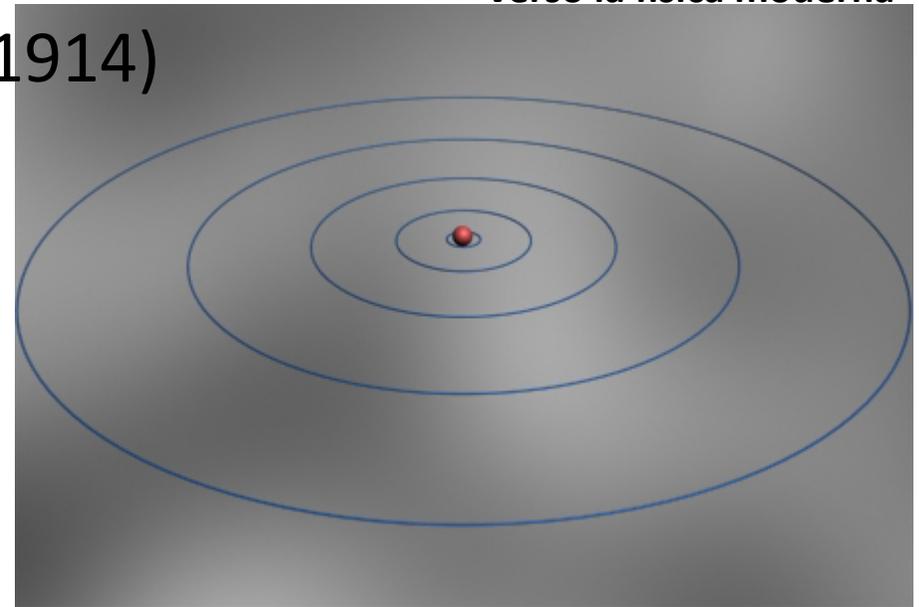


λ

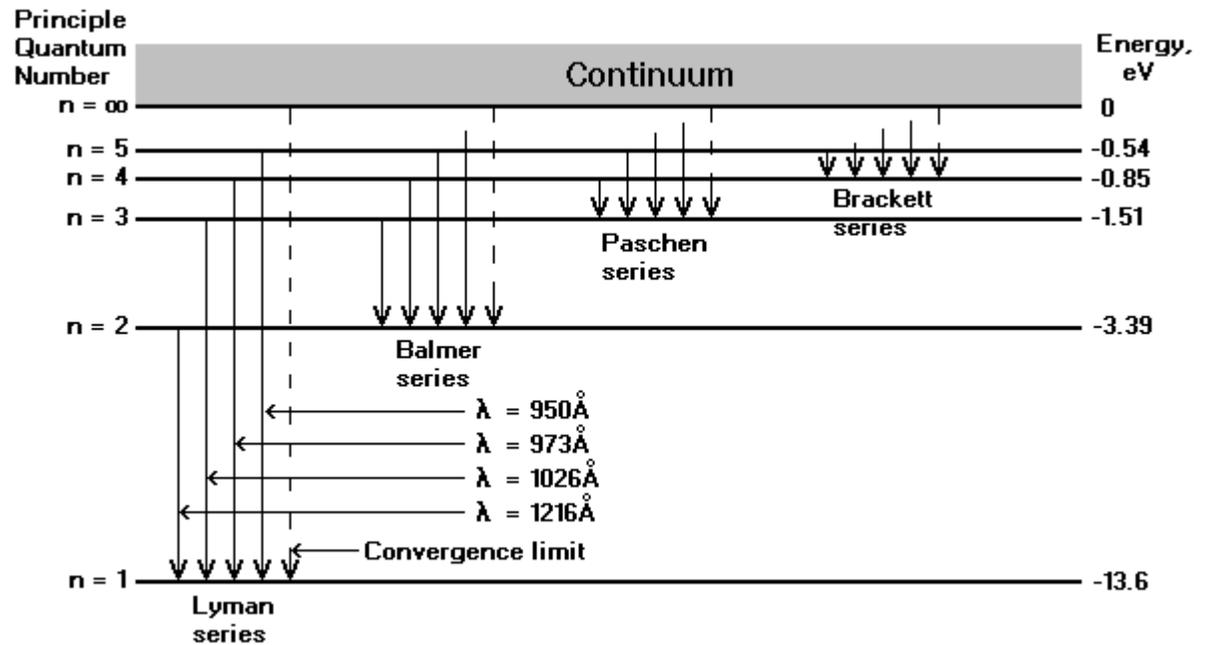
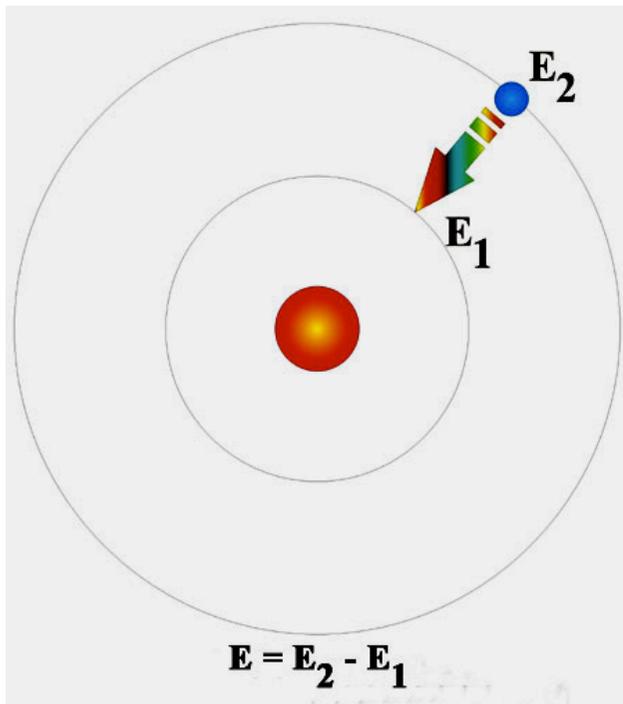


L'ATOMO DI BOHR (1914)

incontro #7 - 07.03.2018
 verso la fisica moderna



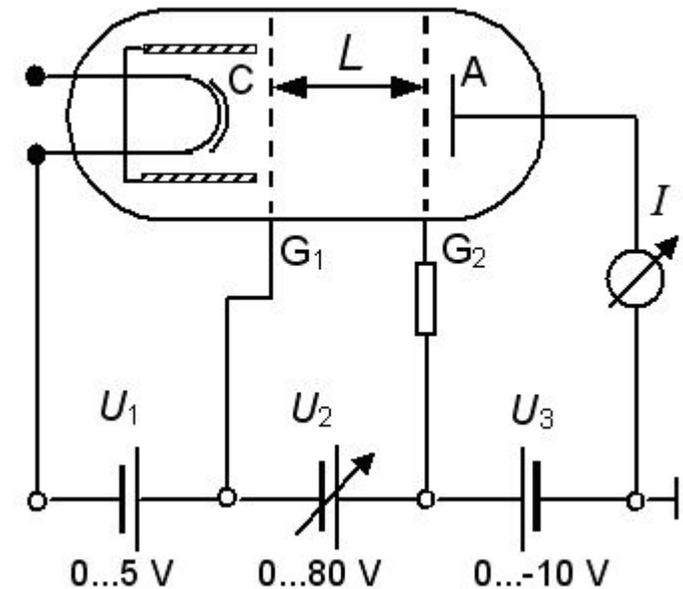
• STATI STAZIONARI



Come dimostrare la veridicità dell'atomo di Bohr?

L'ESPERIMENTO DI FRANCK & HERTZ (1914)

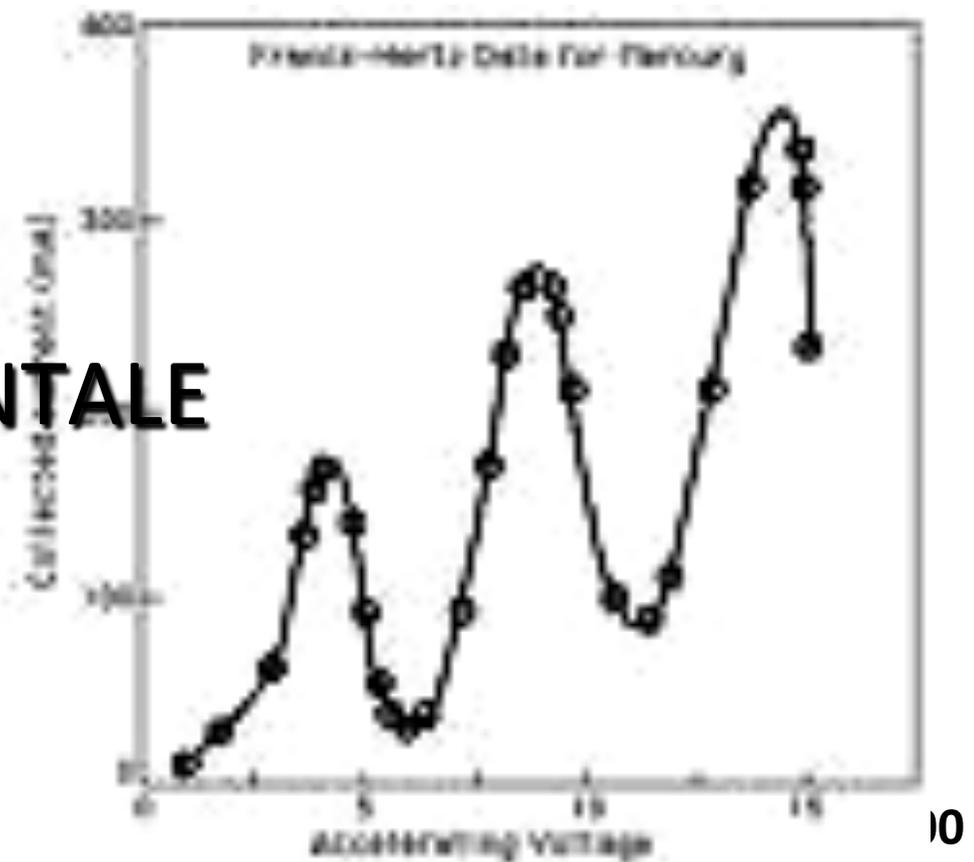
U_1 potenziale di estrazione
 U_2 potenziale di accelerazione
 U_3 potenziale di ritardo



ESPERIMENTO DI FRANK & HERTZ

Risultato della misura dei conteggi (= numero di elettroni) vs U_2 (potenziale di accelerazione)

**PERCHE' QUESTO
RISULTATO SPERIMENTALE
E' LA CONFERMA DEL
MODELLO DI BOHR?"**



ESPERIMENTO DI FRANK & HERTZ

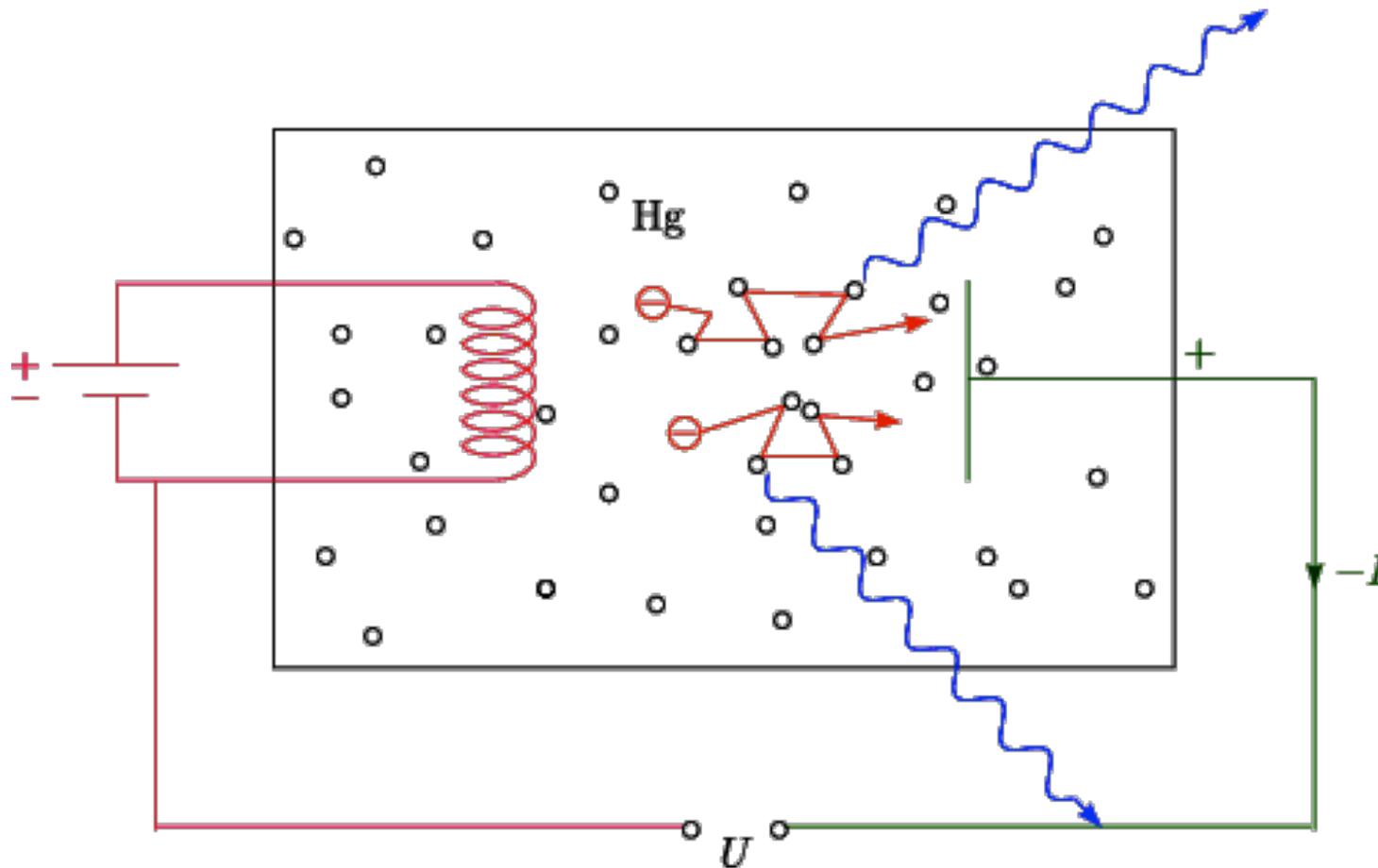
**COSA SUCCEDE SE
AUMENTO U_1 ?**

CAMBIO U_3 ?

**PERCHE' SE AUMENTO U_2 OTTENGO
UN MAGGIOR NUMERO DI PICCHI ?**



ESPERIMENTO DI FRANK & HERTZ



PSSC (Physical Science Study Committee)

«Il **PSSC (Physical Science Study Committee)** è un Comitato che si è proposto di mobilitare celebri fisici teorici, ricercatori, esperti di problemi didattici, insegnanti di fisica, con lo scopo di dare agli Stati Uniti il materiale per un corso di fisica per le scuole secondarie superiori che facesse conoscere agli studenti le idee fondamentali della fisica moderna e desse loro quel tanto di conoscenze fisiche che è da ritenersi indispensabile nella cultura di un uomo d'oggi.

Ovviamente si supposeva che, dopo le grandi conquiste delle scienze fisiche negli ultimi cento anni, l'insegnamento della fisica nelle scuole secondarie dovesse cambiare in modo altrettanto profondo. Il Corso di Fisica PSSC è opera collettiva cui ha partecipato un grandissimo numero di persone. Il lavoro è cominciato nell'autunno del 1956, ed è stato sviluppato nell'estate 1957 da un gruppo di circa 60 fisici, insegnanti, progettisti di apparecchi, scrittori, artisti e altri specialisti.»

(Da «Zanichelli Scuola», aprile 1963)

- **R. Eisberg, R. Resnick** *“Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Partcles”* Jonh Wiley & Sons
- **Una lettura interessante** *“I 30 anni che sconvolsero la Fisica”*, G. Gamov
- **Una lettura interessante** *“L' universo è fatto di storie non solo di atomi. Breve storia delle truffe scientifiche”* di Stefano Ossicin
- **Una lettura consigliata** Dalla rivista Didattica delle Scienza n. 264 del 2009 *“ Idrogeno ed Elio atomi di storia”* di M. Fanfoni, A. Sgarlata, M. Tomellini
- **Un filmato interessante:** DVD G. Chiarotti , G. Casini pubblicati dalla SIF

- Laura Fermi “**Atomi in famiglia**”
- Nicola Pacilio “**Fermi e la pila atomica**”
- Claudio Bartocci “**Enrico Fermi e Franco Rasetti -
scienziati in tempo di guerra**”



- Questa lezione contiene anche parte delle presentazioni elaborate da Giovanni Casini e Gianfranco Chiarotti che hanno realizzato per la prima volta l'esperimento di Hallwacks per il DVD prodotto dalla SIF in occasione dell'Anno della Fisica 2005