

# La Crisi della Fisica Classica

F. Borgonovi (Dipartimento di Matematica e Fisica)

*Interdisciplinary Laboratories for Advanced Materials Physics  
(i-LAMP)*

*Department of Mathematics and Physics,  
Catholic University, Brescia, ITALY  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Pavia, ITALY*

5 Marzo 2014

All'inizio del secolo scorso la fisica aveva ottenuto importanti successi in moltissimi campi e raggruppabili in 3 grandi Tomi:

- La Meccanica (Galileo, Newton, Lagrange, Hamilton, Laplace...)
- La Termodinamica (Kelvin, Clausius...),
- L'Elettromagnetismo (Maxwell, Ampere, Faraday...).

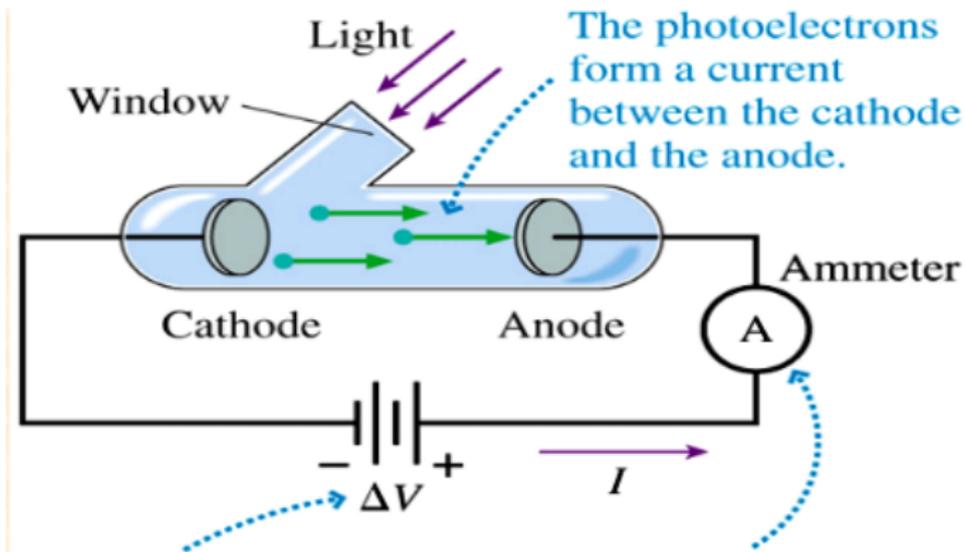
Restavano alcuni punti oscuri dal punto di vista interpretativo, nel senso che esistevano degli esperimenti ai quali l'apparato della Fisica Classica, esemplificato dai 3 Tomi di cui sopra, anche combinati insieme tra loro, non riusciva a dare risposte soddisfacenti. Questi sono:

- Lo spettro di corpo nero
- L'effetto fotoelettrico
- Gli spettri a righe atomici

# Effetto fotoelettrico: Premesse Generiche

- 1 Una superficie metallica, quando investita da una opportuna radiazione luminosa può emettere elettroni.
- 2 La radiazione luminosa è un'onda elettromagnetica caratterizzata da una intensità,  $I$ , e da una frequenza,  $\nu$ .
- 3 Gli elettroni all'interno dei metalli sono in una buca di potenziale, ovvero occorre fornire energia per strapparli.
- 4 La minima energia necessaria per strappare un elettrone dal metallo si chiama lavoro di estrazione,  $W_e$ .
- 5 Gli elettroni emessi formano una corrente le cui caratteristiche possono essere misurate sperimentalmente.

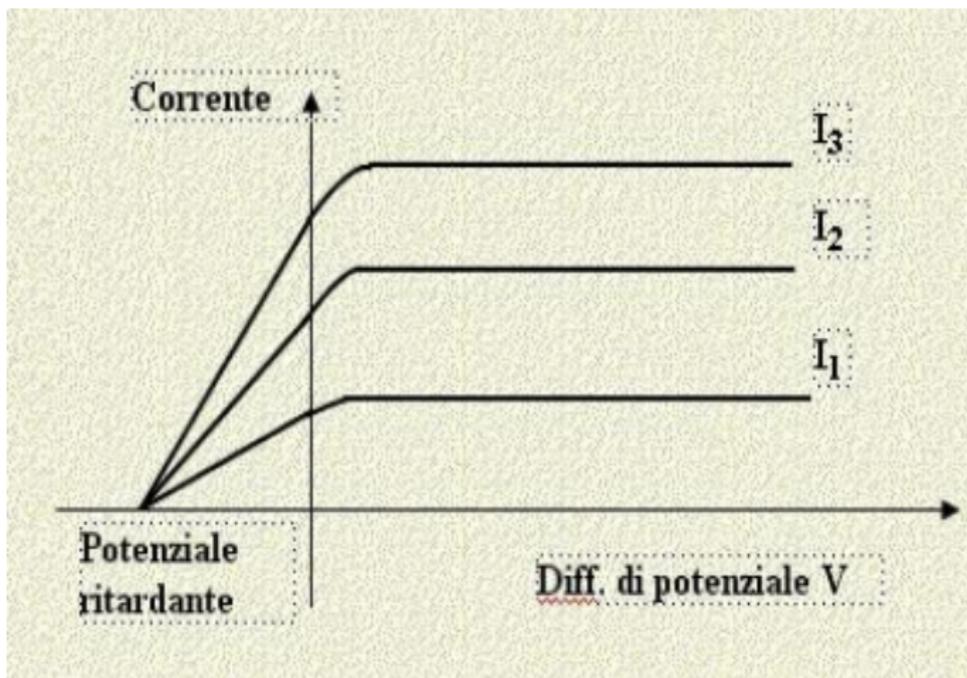
# Apparato sperimentale



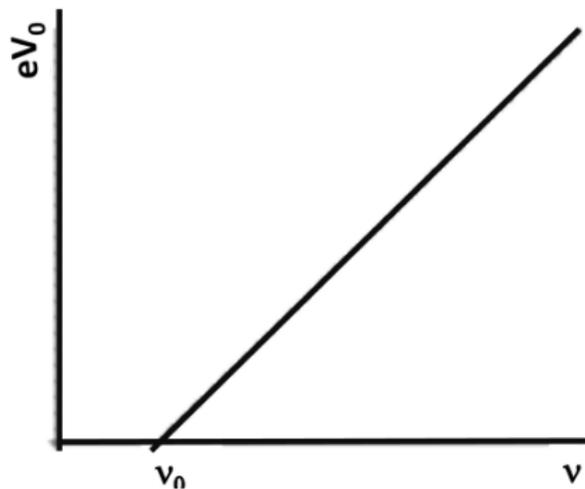
# Caratteristiche generali dell'emissione fotoelettrica

- 1 Aumentando l'intensità della radiazione luminosa,  $I$ , aumenta proporzionalmente l'intensità della corrente fotoelettrica prodotta,  $i$ .
- 2 Esiste, per ogni materiale costituente il catodo, una frequenza minima  $\nu_0$  sotto la quale non si ha passaggio di corrente, proporzionale al lavoro di estrazione  $W_e$ .
- 3 L'emissione fotoelettrica avviene istantaneamente, anche per basse intensità luminose
- 4 applicando una differenza di potenziale tra catodo e anodo in modo da favorire il moto degli elettroni si ottiene una corrente fotoelettrica di saturazione.
- 5 applicando una differenza di potenziale tra catodo e anodo in modo da sfavorire il moto degli elettroni si ferma la corrente al potenziale di arresto  $V_0$ .
- 6 il potenziale di arresto  $V_0$  non dipende dall'intensità della radiazione luminosa, ma è proporzionale alla frequenza della luce utilizzata

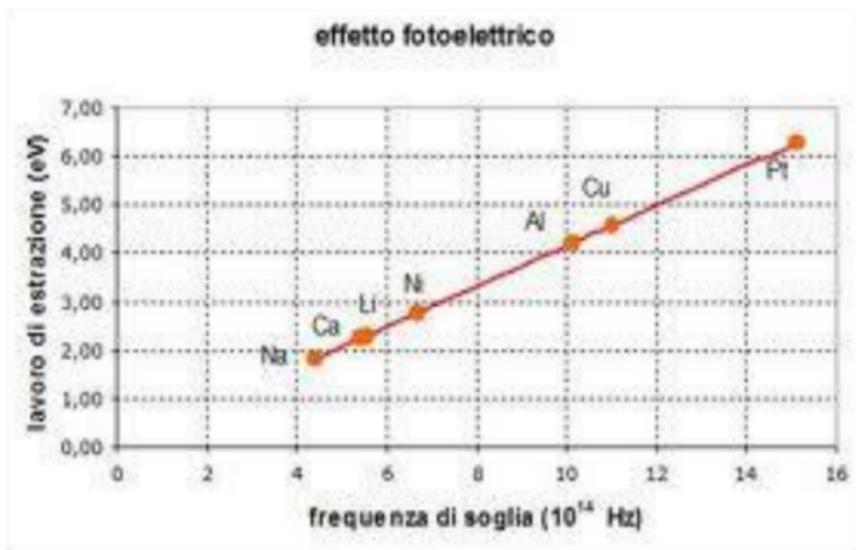
# Intensità corrente fotoelettrica in funzione della d.d.p.



# Dipendenza del potenziale di arresto dalla frequenza $\nu$



# Lavoro di estrazione $W_e$ vs frequenza di soglia



# Ricapitolando le formule

- Proporzionalità diretta tra corrente fotoelettrica di saturazione e intensità luminosa:

$$i \propto I$$

- Proporzionalità diretta tra potenziale di arresto e frequenza della radiazione luminosa:

$$V_0 \propto \nu$$

- Proporzionalità diretta tra lavoro di estrazione dal metallo e frequenza di soglia:

$$W_e \propto \nu_0$$

L'intensità luminosa é proporzionale al quadrato dell'ampiezza,  $\mathcal{E}$ , dell'onda (che nel caso in esame é il campo elettrico associato).

$$I \propto \mathcal{E}^2$$

Un'onda luminosa trasporta con sé una energia per unità di volume

$$w \propto \mathcal{E}^2$$

che si suppone distribuita con continuità nello spazio. La radiazione elettromagnetica cede la propria energia agli elettroni del metallo che colpisce. Quando gli elettroni avranno accumulato sufficiente energia per uguagliare il lavoro di estrazione del metallo,  $W_e$ , si ha emissione e quindi passaggio di corrente.

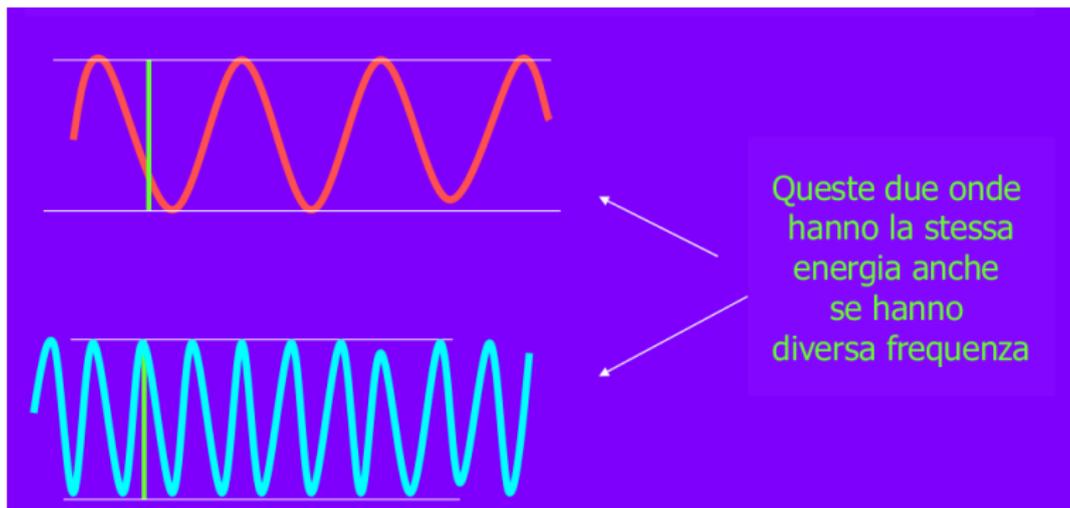
- Gli elettroni emessi saranno emessi con una energia cinetica

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

- Applicando una d.d.p. tra il catodo e l'anodo si accelerano (o decelerano) gli elettroni.
- Il potenziale di arresto, moltiplicato per la carica dell'elettrone ci fornisce una stima del valore massimo della loro energia cinetica:

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

# In Sintesi, modello classico



Questo spiega :

- 1 Il meccanismo di emissione
- 2 La proporzionalità tra corrente di saturazione e intensità luminosa

Ma non spiega :

- 1 l'istantaneità dell'emissione per basse intensità
- 2 l'esistenza di una frequenza di soglia
- 3 la proporzionalità diretta tra potenziale di arresto e frequenza
- 4 l'indipendenza del potenziale di arresto dall'intensità
- 5 la proporzionalità tra frequenza di soglia e lavoro di estrazione

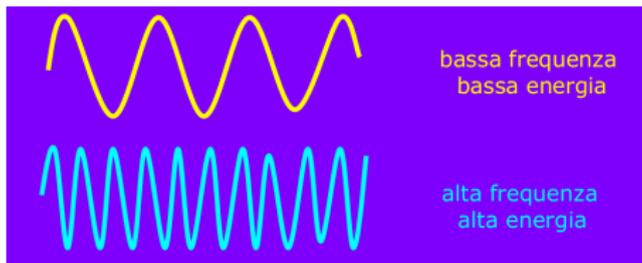
# Interpretazione di Einstein

- La radiazione luminosa e' costituita da **quanti** o fotoni (particelle di luce) la cui energia é proporzionale alla frequenza:

$$E = h\nu$$

- Aumentare l'intensitá ***I*** della radiazione luminosa significa semplicemente aumentare il numero dei fotoni, ***n***

$$I \propto nh\nu$$



# Conseguenze e Interpretazione

- Poiché i fotoni viaggiano alla velocità della luce l'emissione é istantanea.
- L'emissione di un elettrone può avvenire solo se l'energia di un singolo fotone é maggiore del lavoro di estrazione del metallo:

$$h\nu > W_e$$

- questo spiega l'origine della frequenza di soglia

$$\nu_0 = W_e/h$$

e la proporzionalità diretta tra le due quantità.

- Dal bilancio energetico

$$h\nu = W_e + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

e dal fatto che

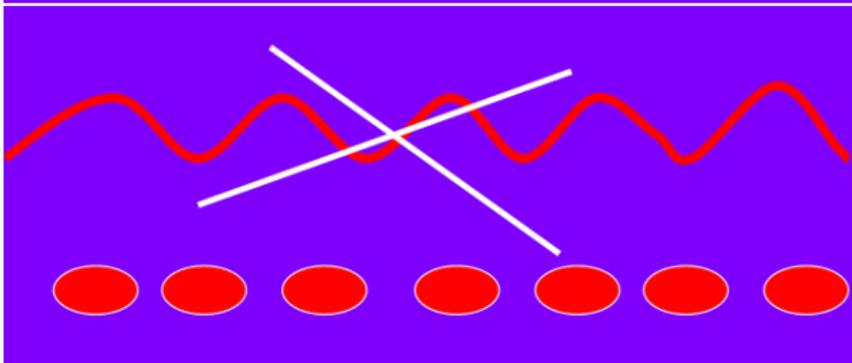
$$eV_0 = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

si ricava la proporzionalità tra potenziale di arresto e frequenza,

$$h\nu = W_e + eV_0 \rightarrow V_0 = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$$

# Einstein, 1905, Annalen der Physik

*"Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce si espande partendo da un punto, l'energia non si distribuisce su volumi sempre più grandi, bensì rimane costituita da un numero finito di quanti di energia localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente."*



# Osservazioni vs Contraddizioni ?

L'ipotesi che la radiazione luminosa (elettromagnetica) sia costituita da corpuscoli spiega in modo completo ed esauriente l'effetto fotoelettrico, cosa che la teoria ondulatoria non riesce a fare

La teoria ondulatoria d'altra parte spiega in modo completo ed esauriente fenomeni come la diffrazione e l'interferenza, cosa che la teoria corpuscolare non riesce a fare

# Dualismo onda-corpuscolo della luce

Si decide di affiancare alla descrizione della radiazione luminosa entrambi i modelli, corpuscolare ed ondulatorio affermando che

**che esistono esperimenti interpretati dal modello corpuscolare ed altri da quello ondulatorio.**

oppure, versione piú morbida,

**esistono esperimenti che mettono in luce il carattere ondulatorio ed altri che ne evidenziano il carattere corpuscolare.**

## Riferimenti bibliografici

- <http://www.bo.infn.it/arcelli/LezioniFisicaModerna/I-FisicaModerna.pdf>
- <http://www.pinadivito.it/classeV/Effetto%20fotoelettrico%20e%20teoria%20dei%20quanti.pdf>
- Simulatore : <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>

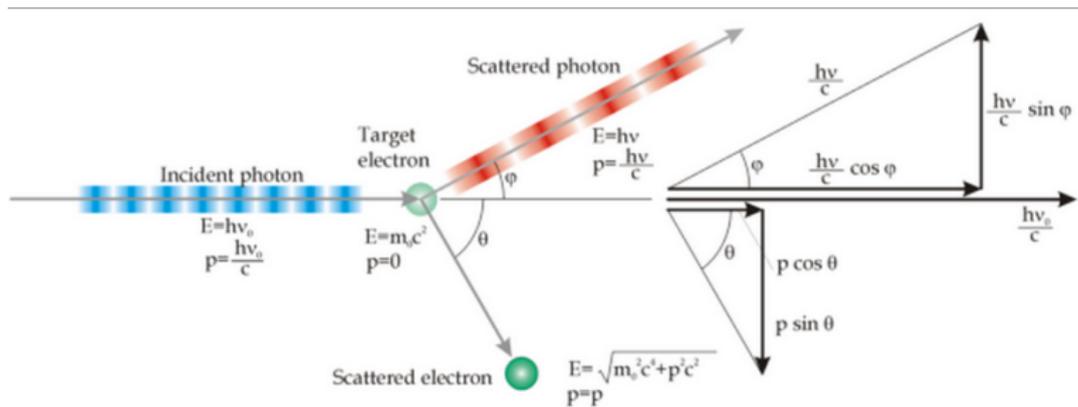
Fatti:

- Diffusione di Raggi X (radiazione elettromagnetica) su cristalli .
- Analisi della radiazione emessa in funzione dell'angolo di diffusione.
- Si trova che la lunghezza d'onda della radiazione diffusa non dipende dal materiale ma solo dall'angolo di diffusione attraverso la formula seguente:

$$\lambda'(\theta) - \lambda = \lambda_c(1 - \cos \theta)$$

dove  $\lambda$  é la lunghezza d'onda della radiazione incidente,  $\lambda_c$  é una costante e  $\theta$  l'angolo di diffusione rispetto alla direzione di incidenza.

# Apparato Sperimentale



- 1 I fotoni sono particelle che interagiscono con altre particelle (gli elettroni inizialmente a riposo ) contenuti all'interno del materiale su cui incidono.
- 2 Si usa la legge di conservazione del momento (su elettroni a riposo)

$$\vec{p}_{fot}^{inc} = \vec{p}_{fot}^{dif} + \vec{p}_{el}^{dif}$$

- 3 e dell'energia (relativistica)

$$E_{fot}^{inc} + E_{el}^{ripos} = E_{fot}^{dif} + E_{el}^{dif}$$

(gli elettroni a riposo hanno una energia relativistica dovuta alla loro massa).

- 1 Il momento di un fotone di lunghezza d'onda  $\lambda$  é dato dalla relazione di De Broglie:

$$|\vec{p}_{fot}| = \frac{h}{\lambda}$$

- 2 L'energia di un fotone é data dalla relazione di Einstein:

$$E_{fot} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = |\vec{p}_{fot}|c$$

- 3 L'energia relativistica di un elettrone é data da

$$E_{el} = c\sqrt{(m_e c)^2 + |\vec{p}_{el}|^2}$$

Si risolve il sistema di due equazioni, definendo

$$|\vec{p}_{fot}^{inc}| = \frac{h}{\lambda} \quad |\vec{p}_{fot}^{dif}| = \frac{h}{\lambda'}$$

$$\vec{p}_{fot}^{inc} \cdot \vec{p}_{fot}^{dif} = \frac{h^2}{\lambda\lambda'} \cos \theta$$

e si trova :

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

## Riferimenti bibliografici:

- <http://www.bo.infn.it/arcelli/LezioniFisicaModerna/IV-FisicaModerna.pdf>