

L'Effetto Fotoelettrico

L. Martina

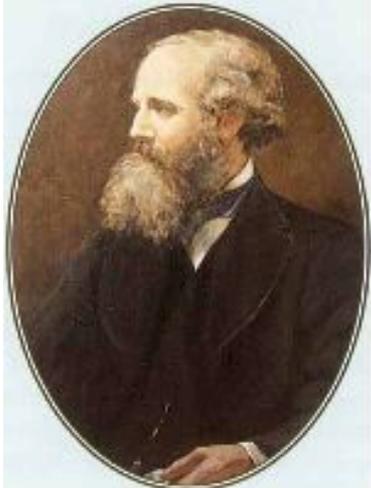
Dipartimento di Matematica e Fisica

Università del Salento

e Sezione INFN – Lecce

PLS 2013-14

Le Equazioni di Maxwell



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

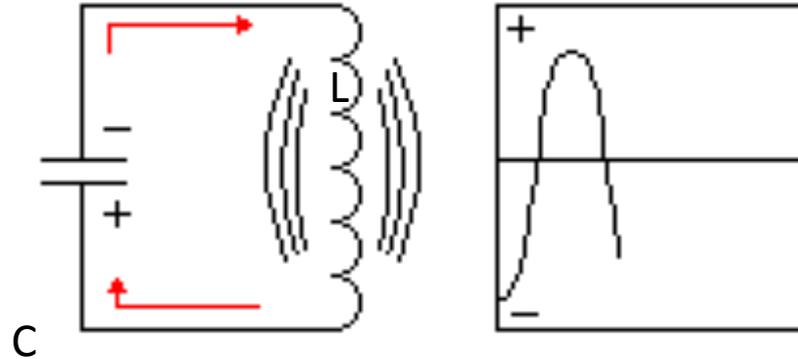
$$\Phi_{S_{chiusa}} \left(\vec{E} \right) = \frac{Q_{Tot. \text{ in } S_{chiusa}}}{\epsilon_0}$$
$$\Phi_{S_{chiusa}} \left(\vec{B} \right) = 0$$

$$\oint_{\gamma_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d \Phi_{S_{\gamma_1}} \left(\vec{B} \right)}{dt}$$

$$\oint_{\gamma_2} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{S_{\gamma_2}} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_{S_{\gamma_2}} \left(\vec{E} \right)$$

Oscillazioni del campo E.M.

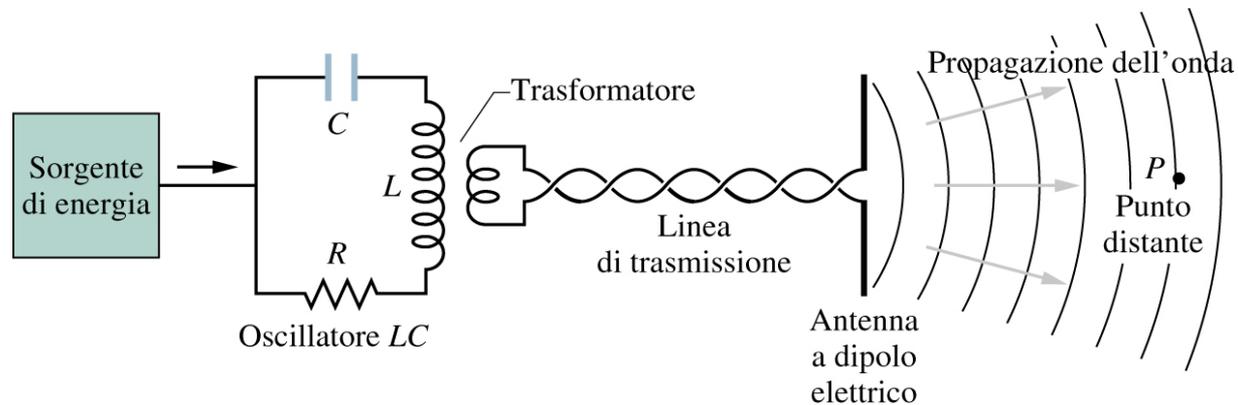
Cavità risonante
Oscillatore LC

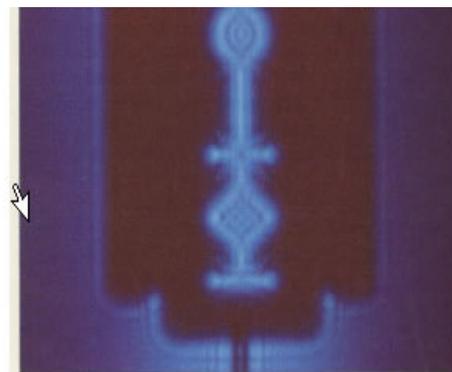
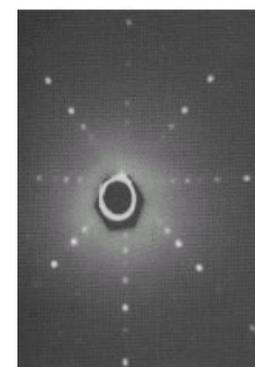
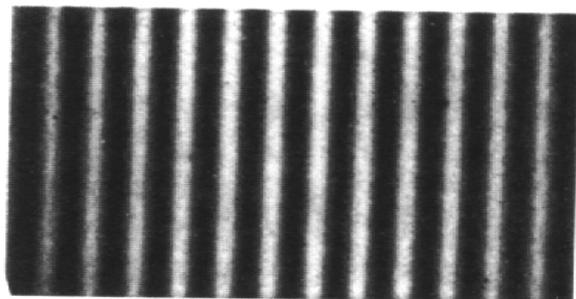
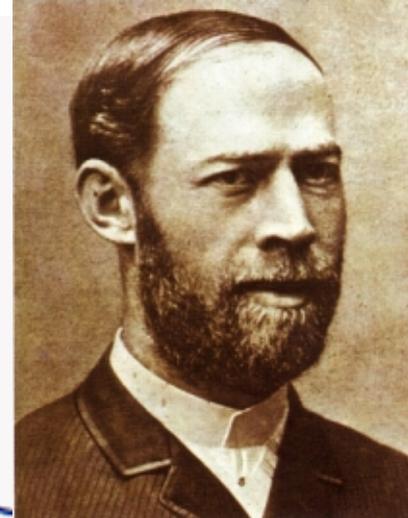
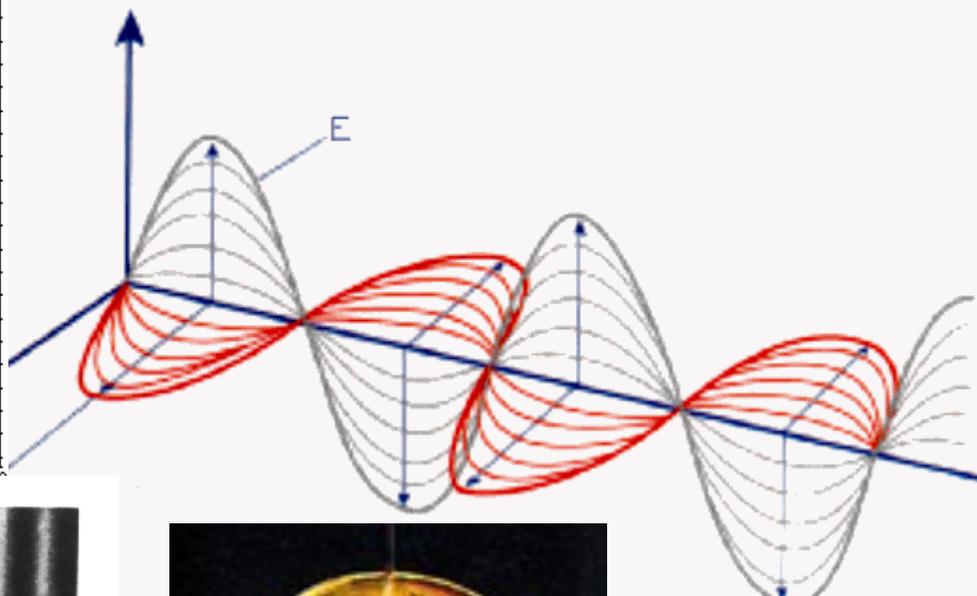
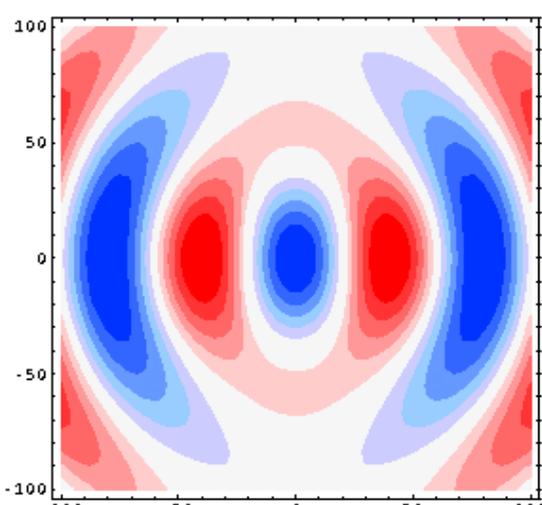


$$\frac{Q(t)}{C} = \frac{\int_0^t I(t') dt'}{C} = - \frac{d\Phi_{S_y}(\vec{B})}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} = \frac{-1}{LC} I \quad \frac{d^2 I}{dt^2} = \frac{-1}{LC} I$$

$$I = I_0 \sin(\omega_0 t + \phi) \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



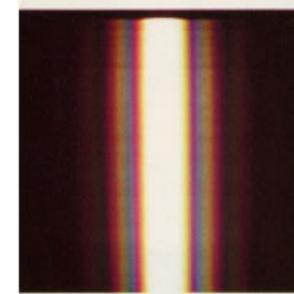
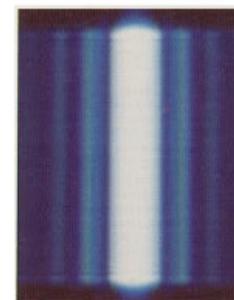


Onde Hertziane (1887)

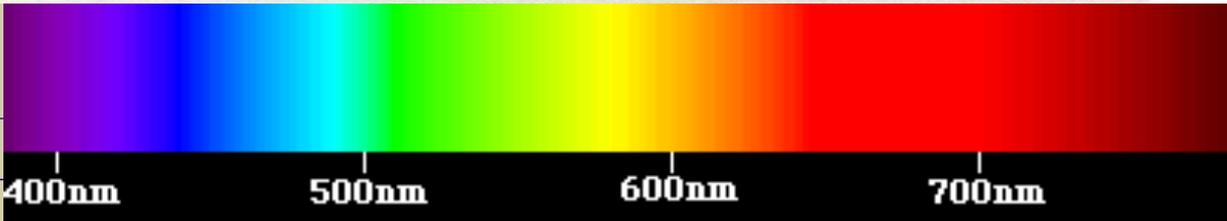
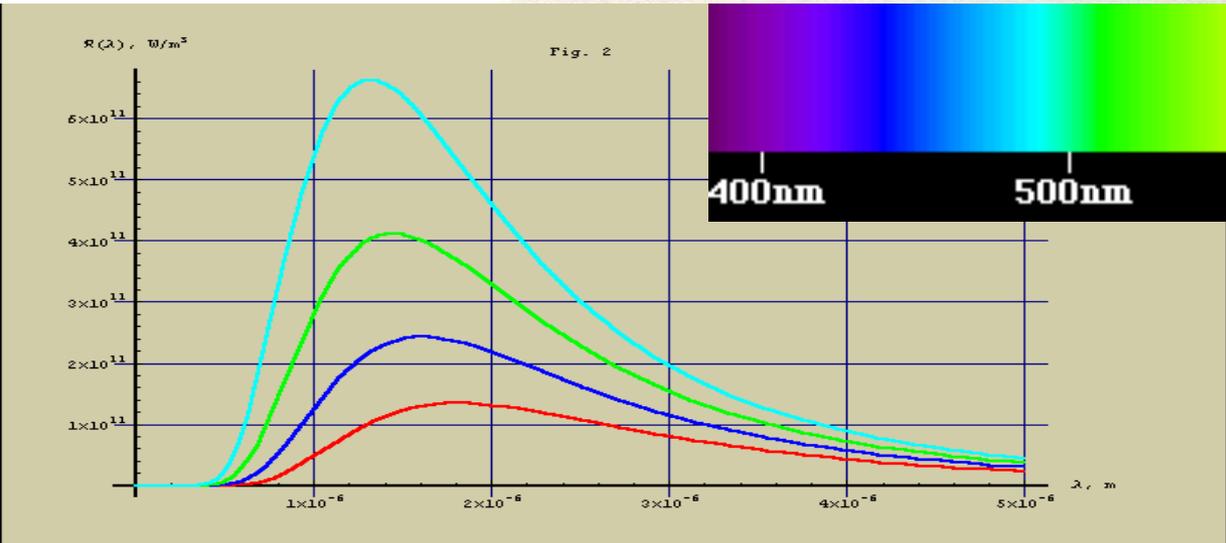
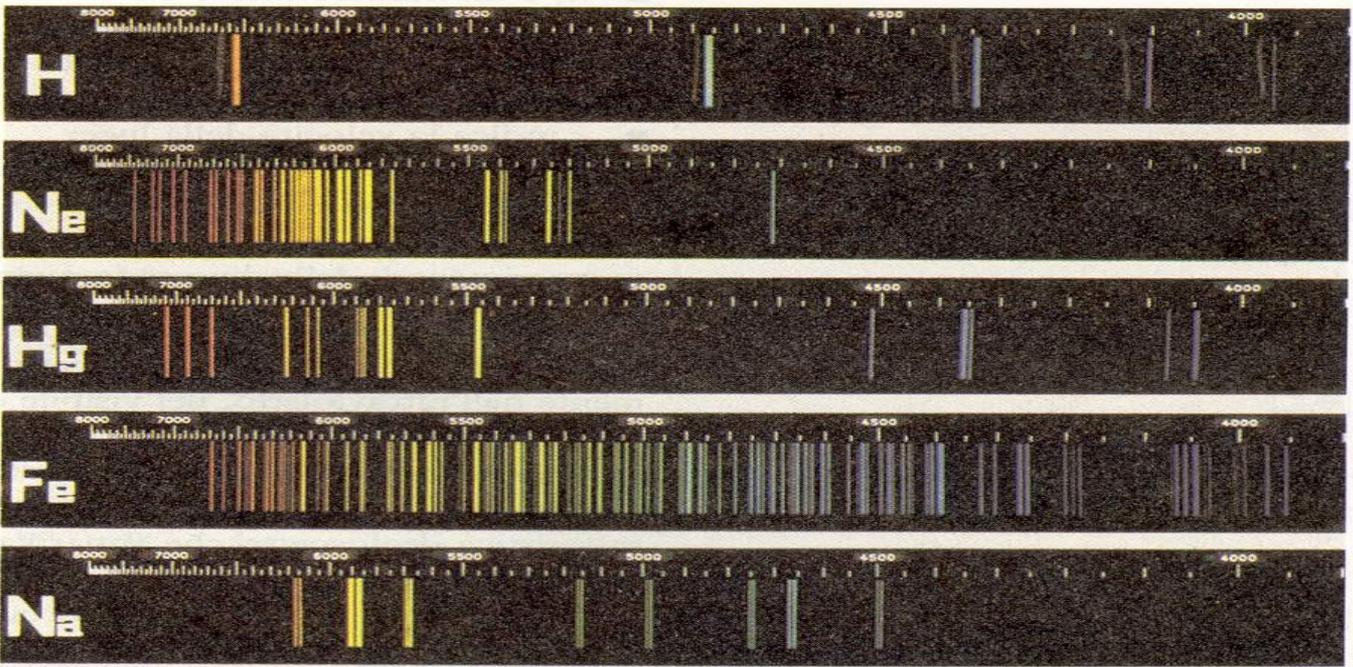
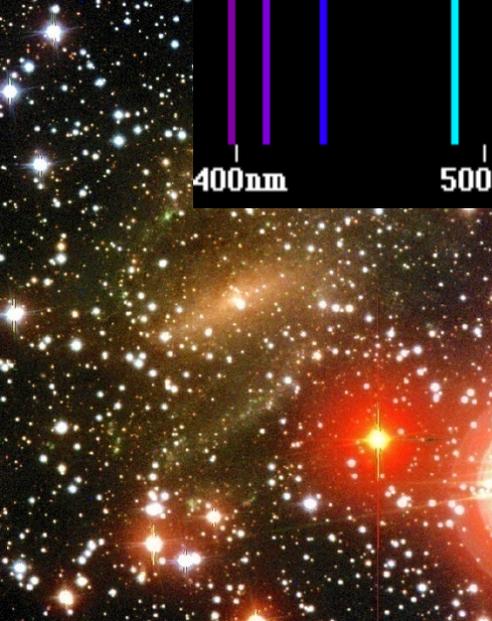


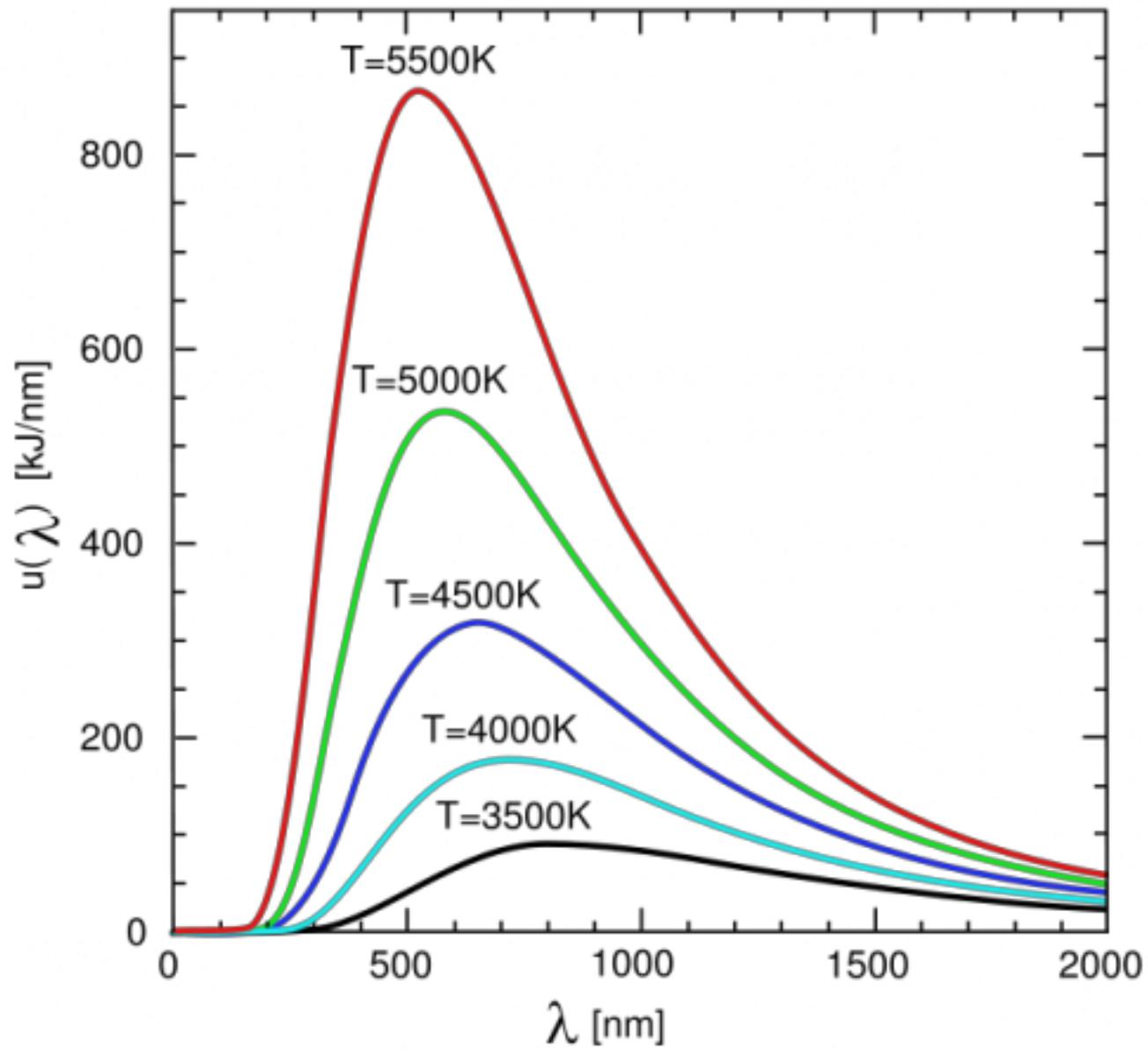
$$\nabla^2 f - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial^2 t} = 0$$

NON INVARIANTE SOTTO
TRASFORMAZIONI DI GALILEI

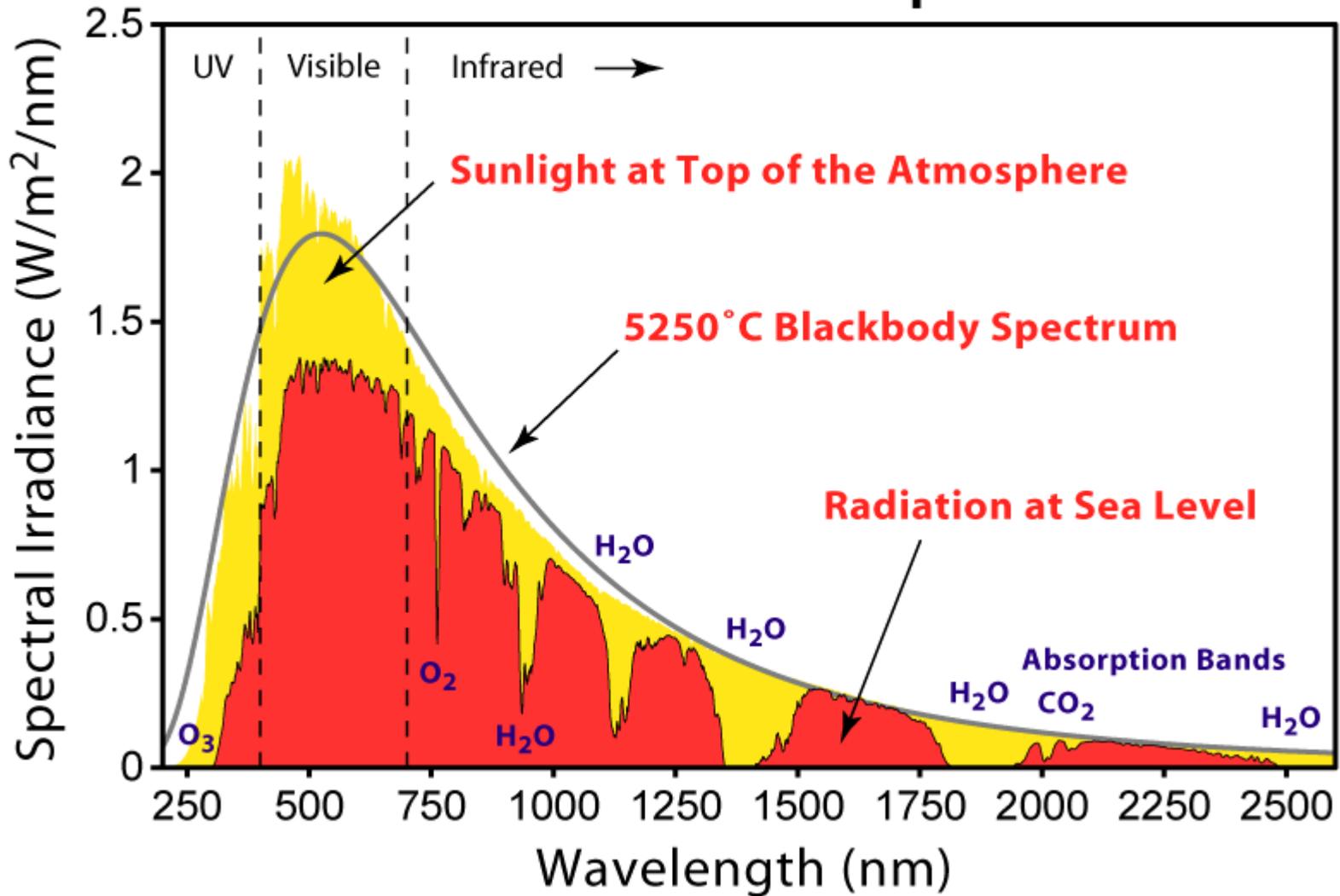


Spettri discreti e continui

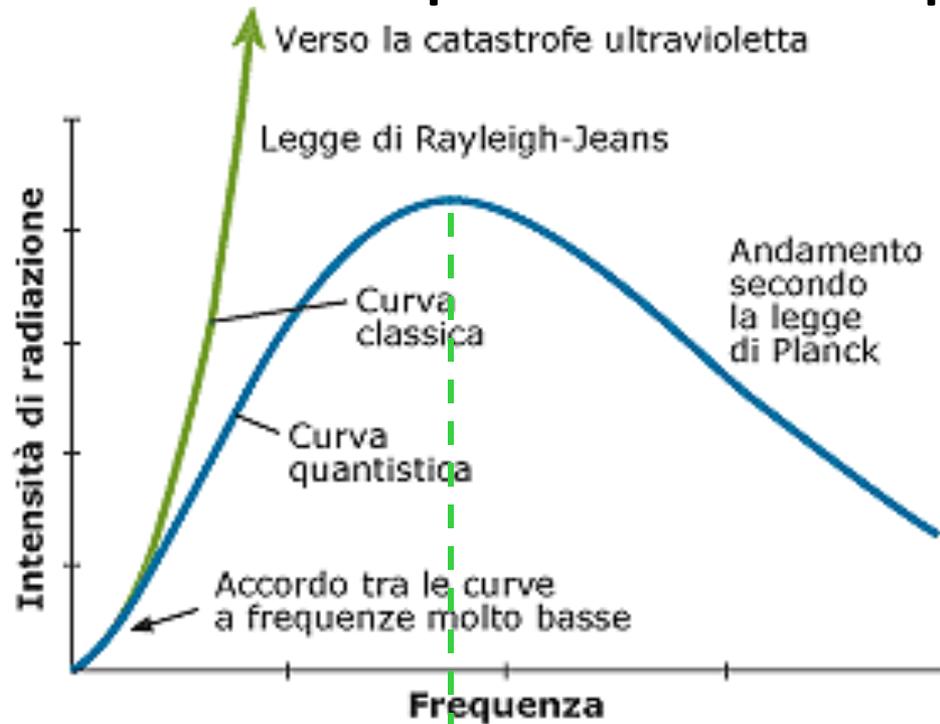




Solar Radiation Spectrum



Spettro di Corpo Nero



$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} E e^{-E/kT}}{\int_0^{\infty} e^{-E/kT}} \quad \langle \nu \rangle \approx \nu^2 T$$

Statistica Boltzmann

Legge Wien $\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} m^{\circ}K$

Ipotesi di Planck (1900): per ogni data frequenza, il sistema materiale può scambiare con la radiazione **multipli interi** di un quanto fondamentale.

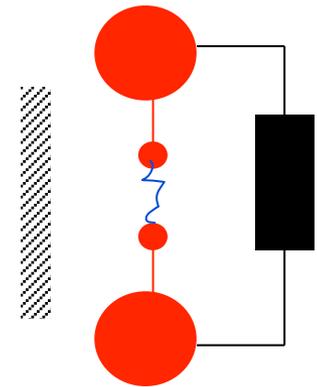
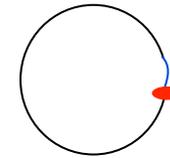
$$\Delta E = h\nu$$

$$\langle \epsilon \rangle(\nu) \approx \frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

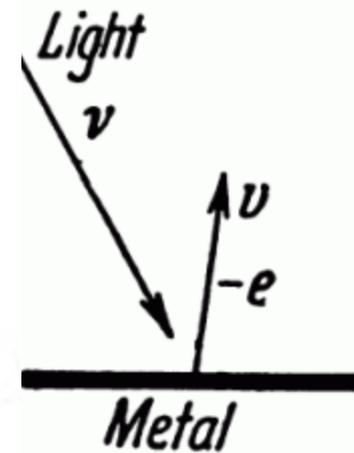
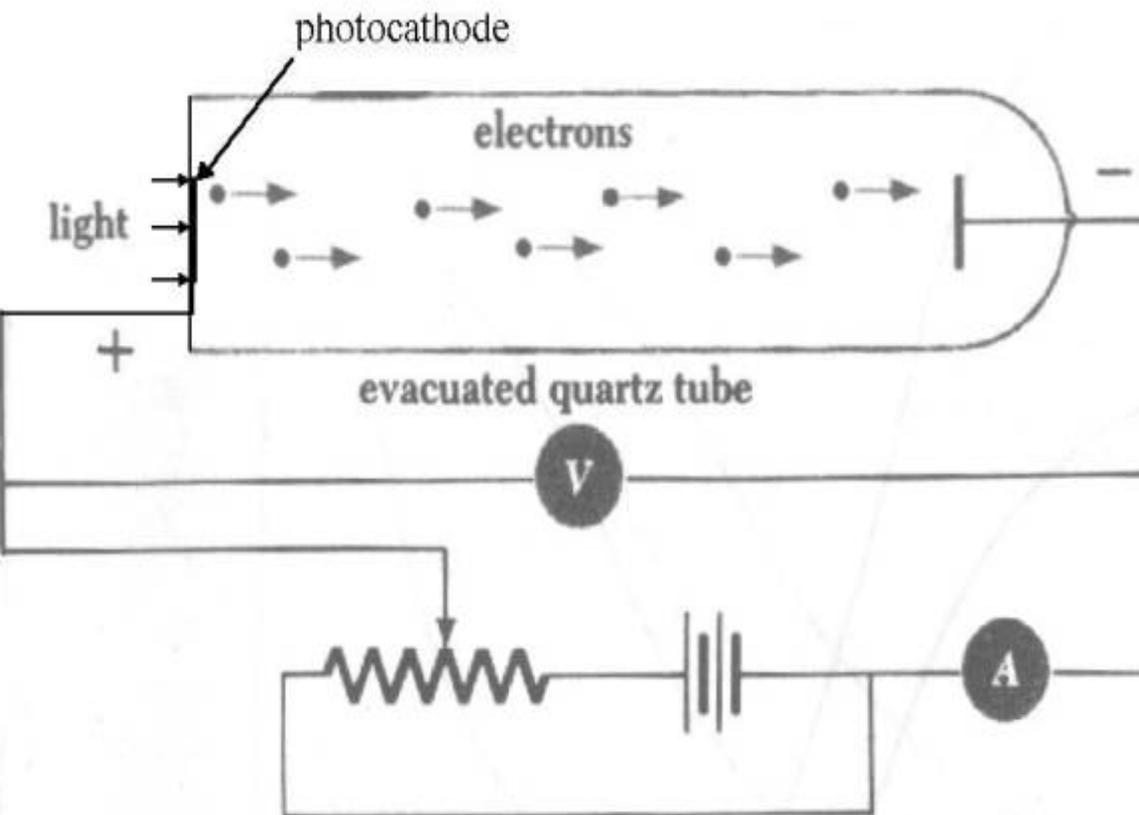


L'effetto Fotoelettrico

Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

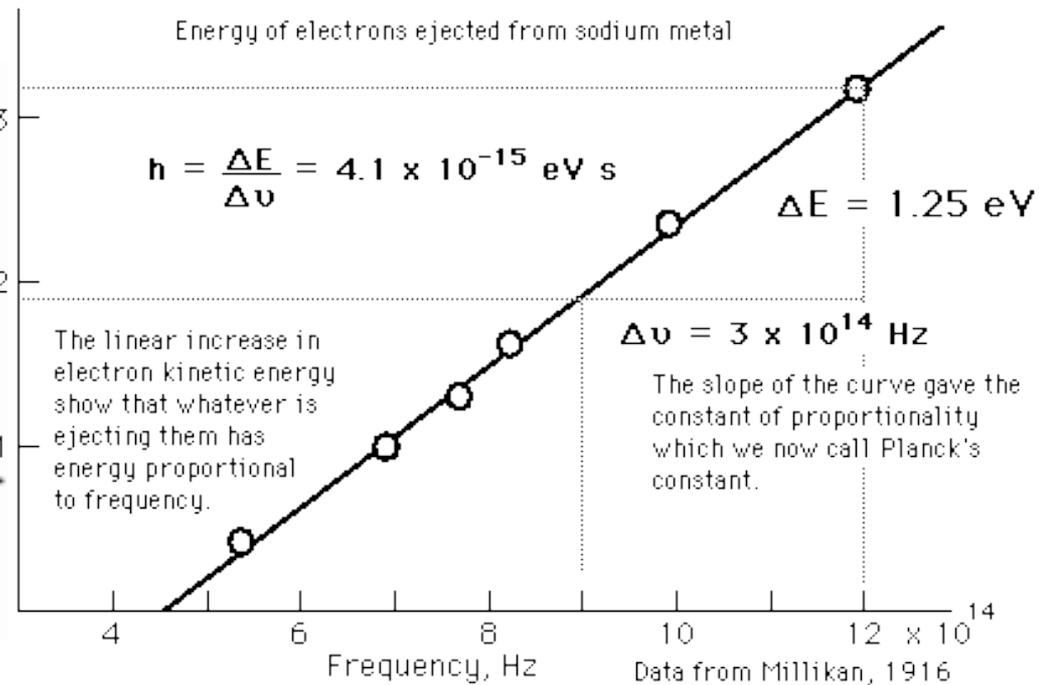
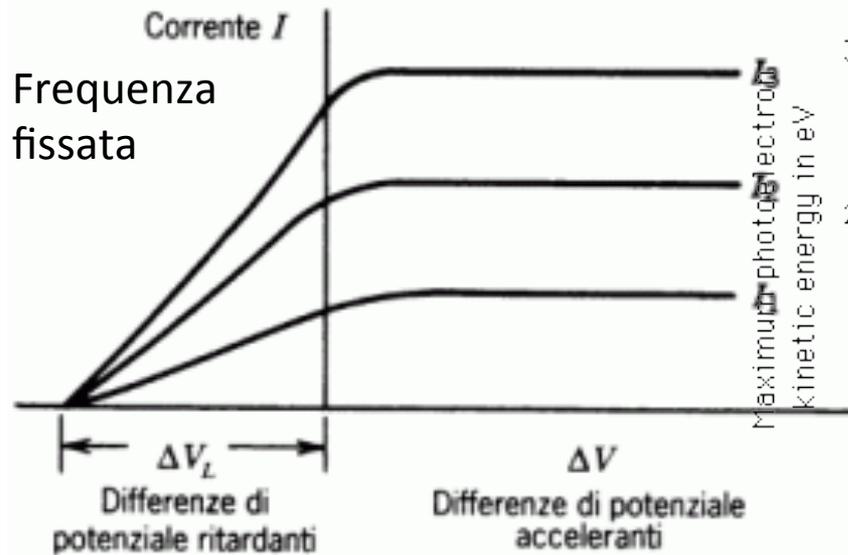


Hertz, 1887



Lenard
1899 - 1902

Relazioni caratteristiche dell'effetto fotoelettrico



- Solo luce con frequenza > frequenza di soglia produce una corrente
- La corrente è attivata in tempi < 10^{-6} s
- L'azione "puntuale" della luce incidente
- Proporzionalità tra corrente e intensità luminosa incidente
- Il potenziale di arresto è proporzionale alla frequenza della luce incidente

Incoerente con la Fisica Classica !!!

Con la fisica classica NON si poteva spiegare l'effetto fotoelettrico:

1-la fisica classica prevede che un fascio di luce di qualsiasi colore (frequenza) possa espellere elettroni, purché abbia un'intensità sufficiente.

Infatti afferma che se un fascio è abbastanza intenso, l'energia che cede a un elettrone supera il lavoro di estrazione e provoca la sua espulsione;

2-la fisica classica prevede che la massima energia cinetica di un elettrone espulso aumenti all'aumentare dell'intensità del fascio di luce. In particolare, maggiore è l'energia che il fascio cede al metallo, maggiore è l'energia che un elettrone può avere dopo esser stato estratto;

Entrambe le previsioni sono "sensate", però non corrispondono alla realtà sperimentale in quanto:

1-per espellere i fotoelettroni, il fascio di luce incidente deve avere una frequenza maggiore di un determinato valore minimo, la cosiddetta frequenza di soglia ν_0 .

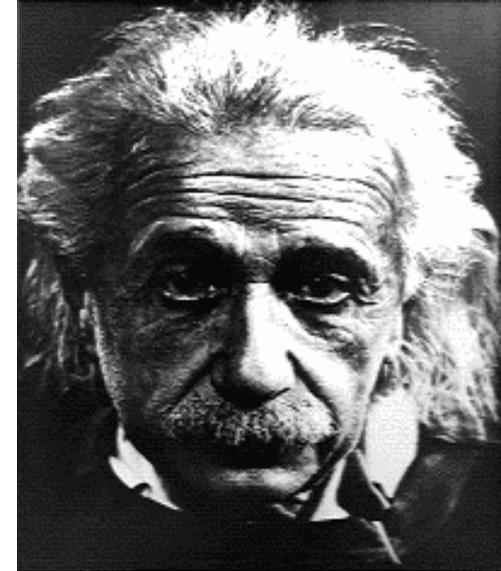
Se la luce ha una frequenza minore di ν_0 non è in grado di estrarre i fotoelettroni, qualunque sia l'intensità;

2-se la frequenza della luce è maggiore della frequenza di soglia, l'aumento della sua intensità aumenta il numero di fotoelettroni emessi nell'unità di tempo. La massima energia cinetica dei fotoelettroni non aumenta con l'intensità del fascio di luce, ma dipende solo dalla frequenza di soglia;

"A splendid light has dawned on me..."

- Albert Einstein

L'idea di Einstein



Nel 1905 Albert Einstein diede un'interpretazione molto semplice dei risultati di Lenard. Egli assunse semplicemente che la radiazione incidente dovesse essere vista come pacchetti ("quanti") di energia hf , dove f è la frequenza e h è una costante (costante di Planck). Nella fotoemissione, uno di questi quanti di energia viene assorbito da un elettrone. L'energia minima necessaria ad estrarre l'elettrone ovvero l' "energia di legame" viene chiamata "lavoro di estrazione " e si indica con W .

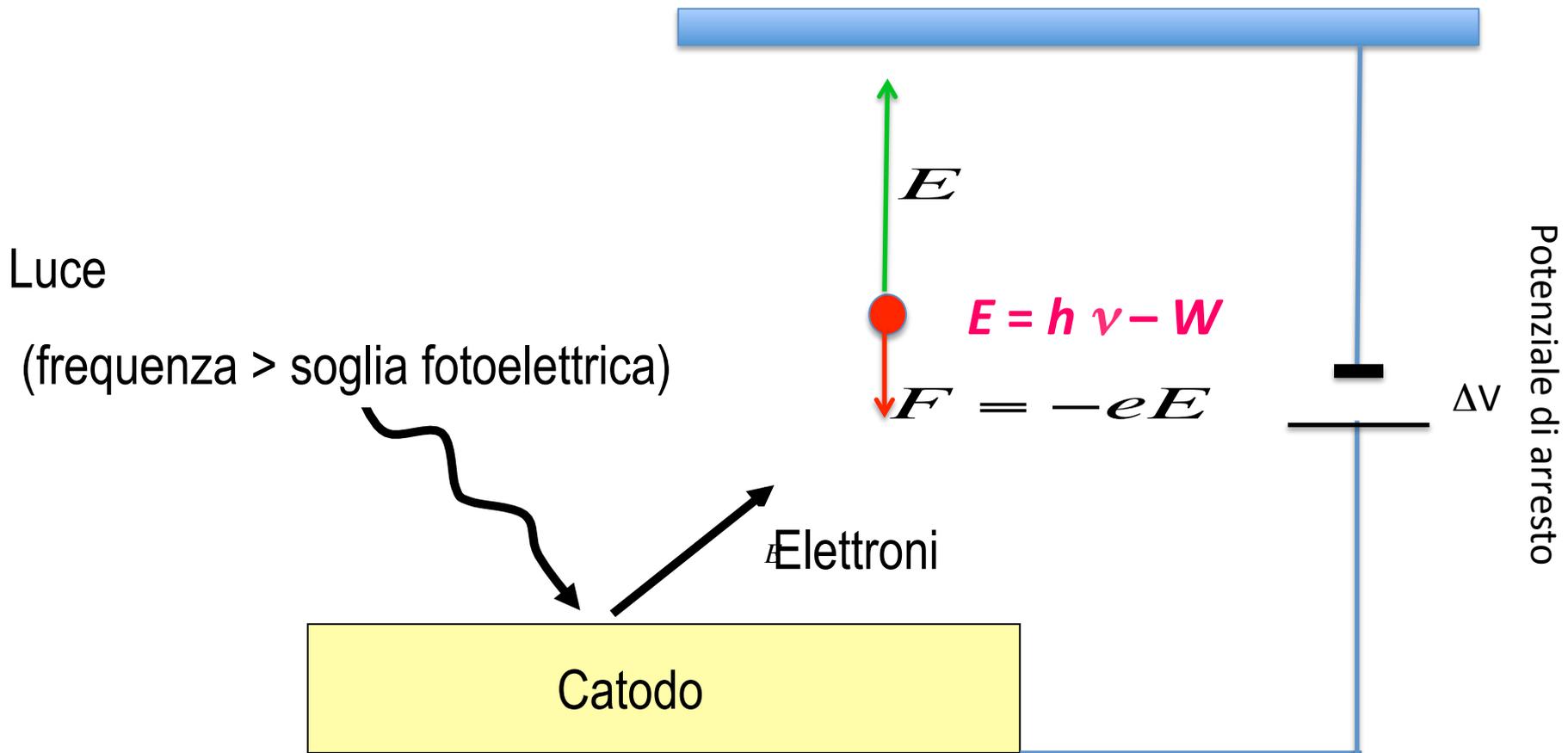


$$E = hf - W$$

1) Appare quindi chiaro che se la luce incidente non ha frequenza abbastanza elevata nessun elettrone verrà emesso perché nessuno riuscirà ad avere energia superiore a quella di legame.

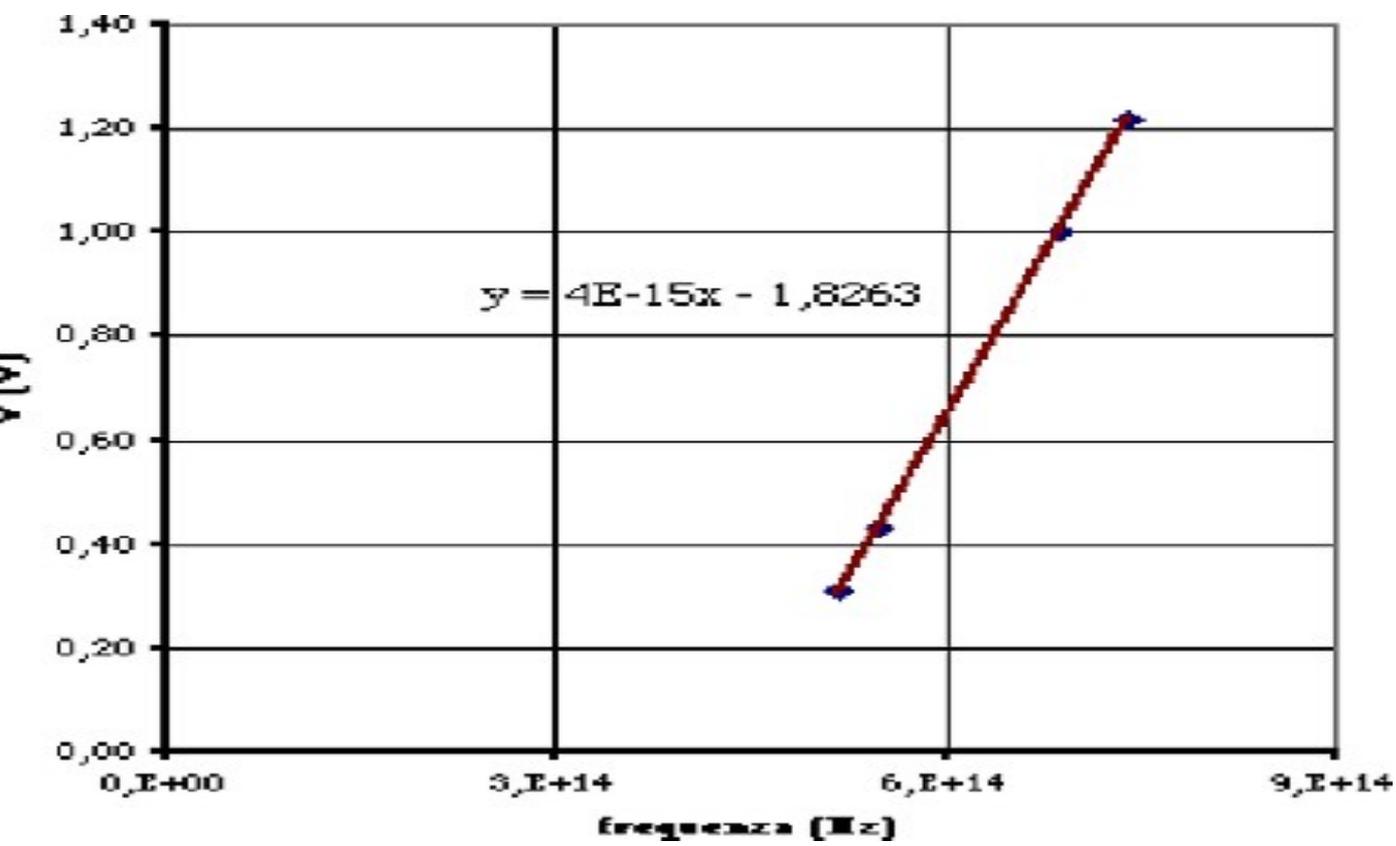
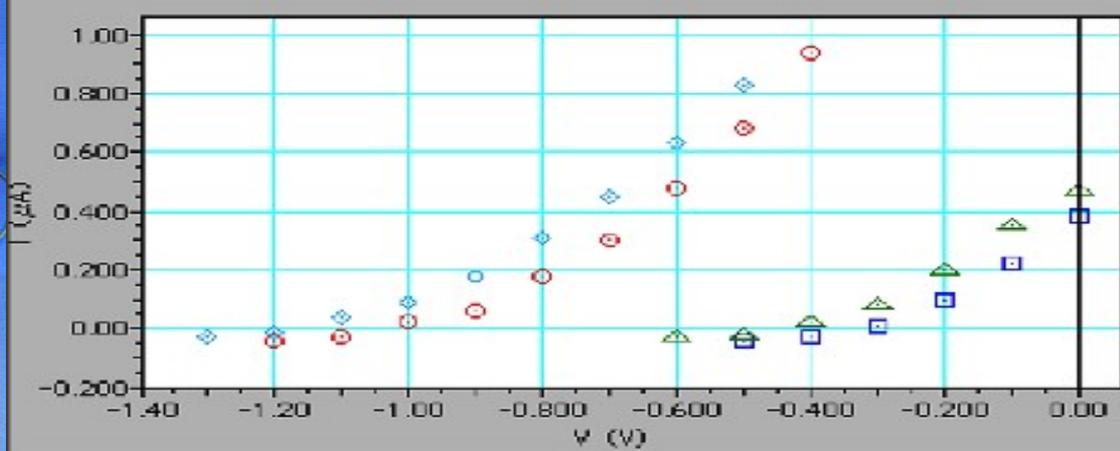
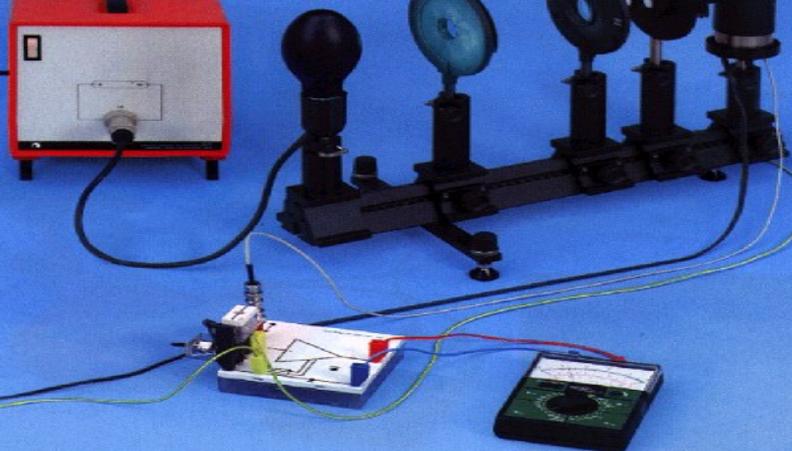
Questo è completamente indipendente dall'intensità della luce stessa, che è invece proporzionale al numero di quanti che attraversano una superficie unitaria nell'unità di tempo.

2) la relazione lineare tra potenziale di arresto e frequenza è immediata



Affinché l'elettrone emesso riesca a raggiungere l'anodo a potenziale di arresto pari a $-\Delta V$, rispetto al catodo emettitore, deve possedere una energia a $E = e \Delta V$.

$$e \Delta V = E = h \nu - W \quad \longrightarrow \quad \Delta V = \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e}$$



$$E = w + eV_r$$

Einstein – Planck

$$E = h\nu$$

$$V_r = -\frac{w}{e} + \frac{h}{e}\nu$$

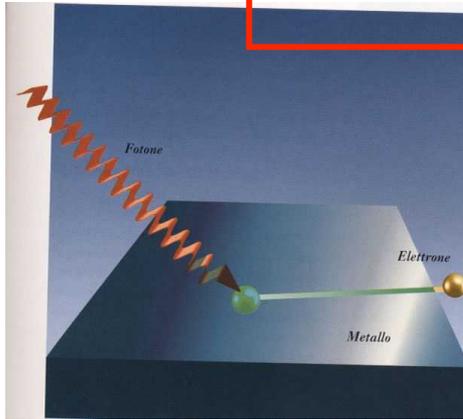
i Fotoni !

Elettromagnetismo
Classico

$$p = \frac{E}{c}$$

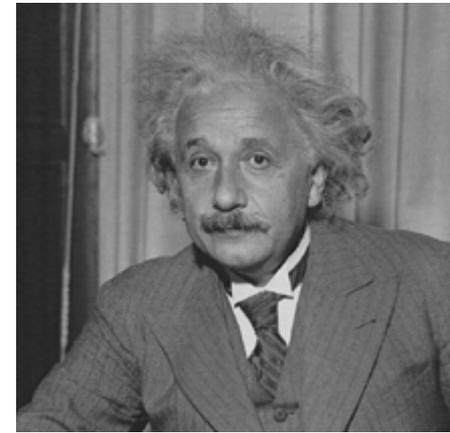


James Clerk Maxwell
1831 - 1879



Einstein (1905)

$$\text{Planck} \\ E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

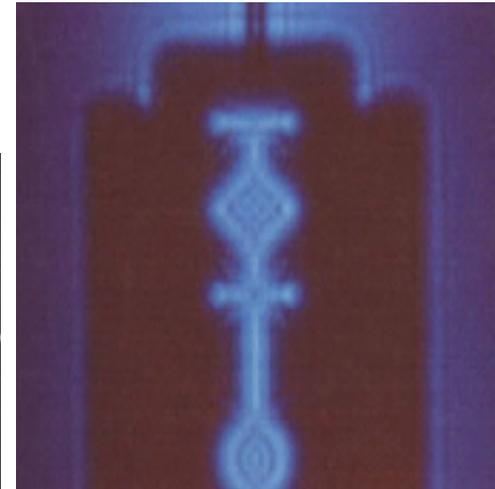
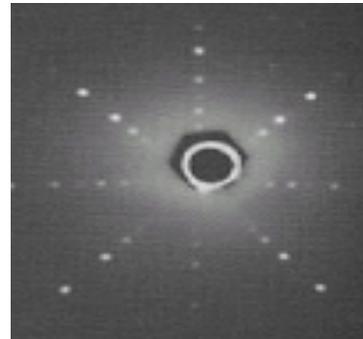
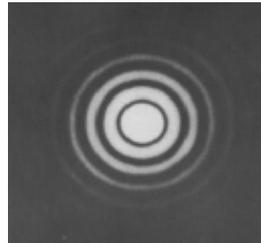


Relazioni
Planck - Einstein

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad \text{Invariante Relativistico}$$

$$m_{\text{fotone}} = 0$$

... e la
DIFFRAZIONE !?!



Il nuovo concetto

- La Fisica possiede una* “costante di scala” universale: il quanto d’azione

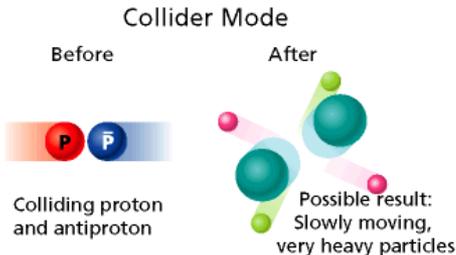
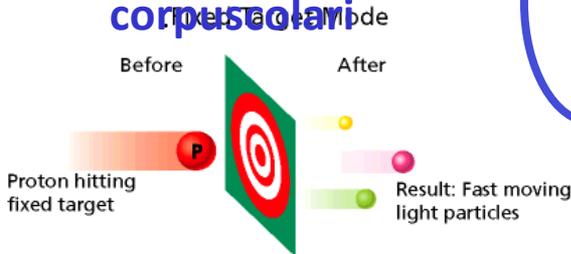
$$h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$$

$$\hbar = h/2\pi$$

determina la *granularità intrinseca* della natura,

- Complementarietà e Relazioni di Planck – Einstein – de Broglie: proporzionalità fra grandezze complementari di un **oggetto quantistico**

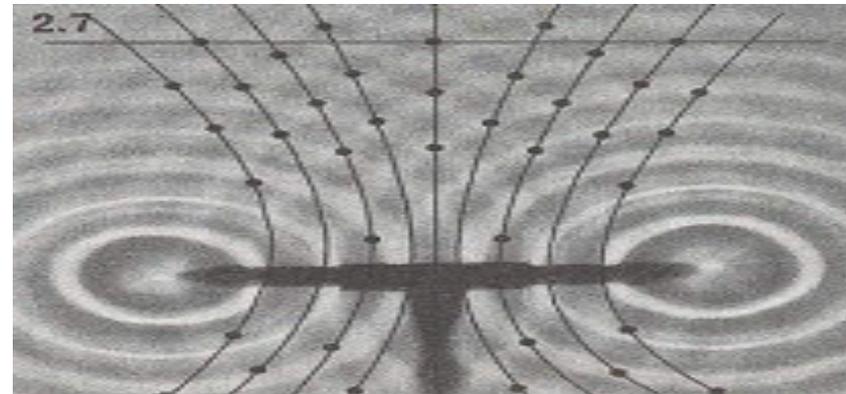
Grandezze corpuscolari



$$E = \hbar \omega / 2\pi = \hbar \omega$$

$$p = \hbar / \lambda = 2\pi \hbar / \lambda = \hbar k$$

Grandezze “ondulatorie”



- Altre scale universali:
- $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$
- $\alpha = 0.00729735$
- $M_{\text{Planck}} = 1.3 \times 10^{19} \text{ GeV}$

Velocità della luce
Cost. Struttura Fine
Massa di Planck

Monocromatore a reticolo di Diffrazione

FIGURA A

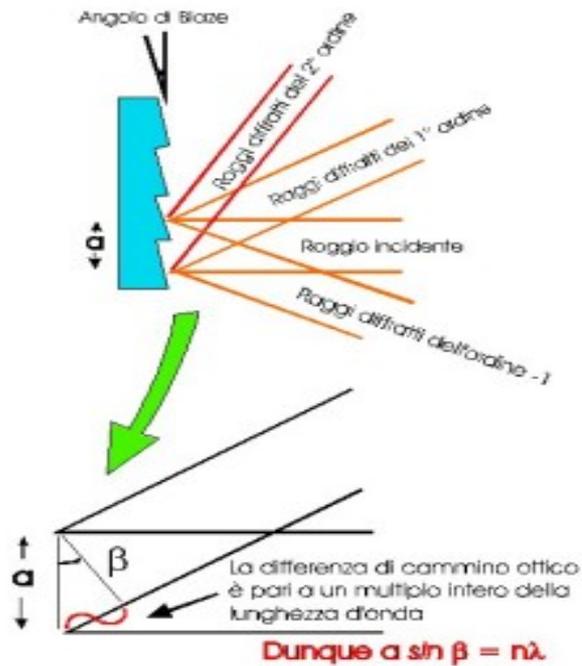
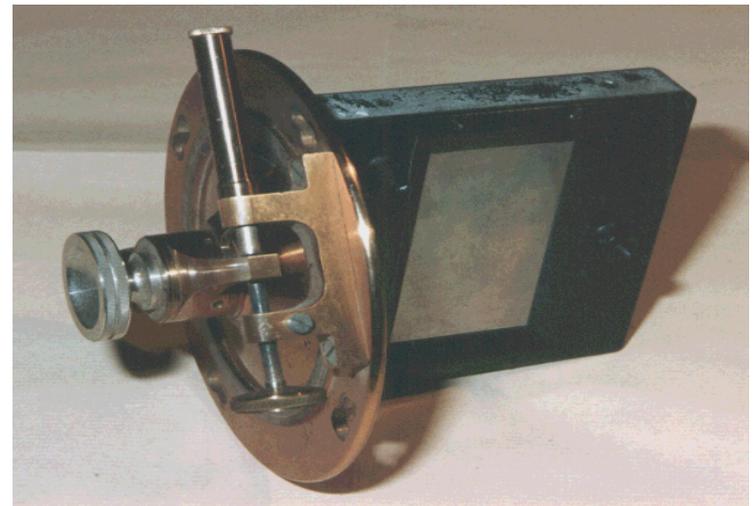
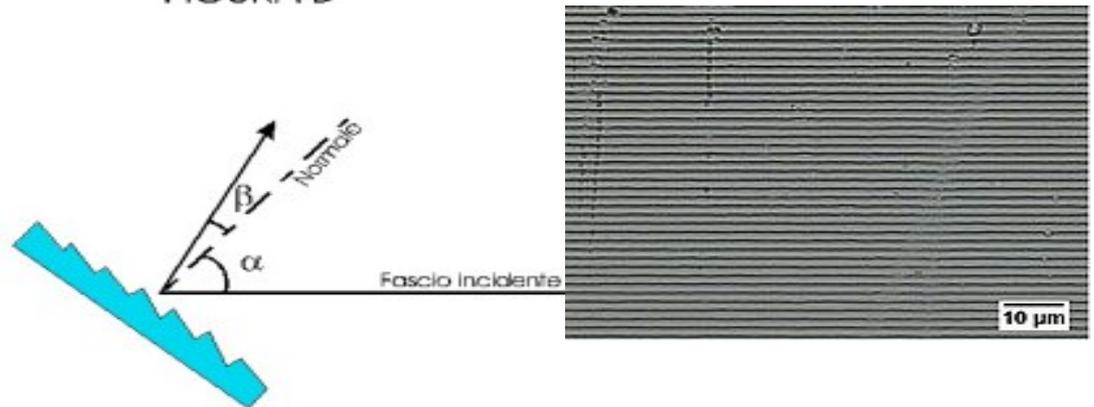


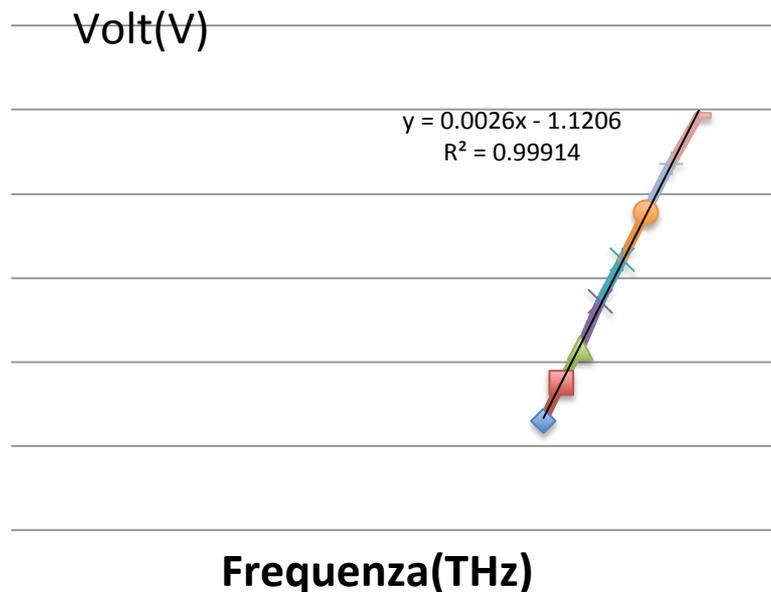
FIGURA B



Procedura sperimentale

Dopo aver selezionato la lunghezza d'onda della luce che si vuole analizzare, con il voltmetro applichiamo una ddp ritardante, cioè negativa in modo da ottenere sul display dell'amperometro un'intensità di corrente nulla (entro gli errori sperimentali). Applichiamo ripetutamente lo stesso procedimento per altre lunghezze d'onda per poi tracciare un grafico avente sull'ascissa la frequenza e sull'ordinata la ddp.

Dove il termine noto dell'equazione della retta rappresenta la frequenza di soglia della lastra metallica dalla quale si estraggono gli elettroni, mentre il coefficiente angolare m^* rappresenta il rapporto h/e , quindi $h = m^* e$.



$$V = (h/e) \nu - (W/e)$$

Questa è l'equazione rappresentata da una retta:

- h/e è il coefficiente angolare

- W/e è lo zero della funzione

Esempio di Misura

$C=$	299.792.458	m/s						
λ (Å)	λ (m)	err relat su λ	frequenza f	$f \cdot 10^{14}$	err. Ass su f	ΔV	err ass su ΔV	
6200	6,20E-07	1,61E-03	4,835E+14	4,8354	0,01	0,24	0,02	
6000	6,00E-07	1,67E-03	4,997E+14	4,9965	0,01	0,27	0,02	
5800	5,80E-07	1,72E-03	5,169E+14	5,1688	0,01	0,28	0,02	
5600	5,60E-07	1,79E-03	5,353E+14	5,3534	0,01	0,33	0,02	
5400	5,40E-07	1,85E-03	5,552E+14	5,5517	0,01	0,38	0,02	
5200	5,20E-07	1,92E-03	5,765E+14	5,7652	0,01	0,43	0,02	
5000	5,00E-07	2,00E-03	5,996E+14	5,9958	0,01	0,49	0,02	
4800	4,80E-07	2,08E-03	6,246E+14	6,2457	0,01	0,60	0,02	
4600	4,60E-07	2,17E-03	6,517E+14	6,5172	0,01	0,67	0,02	
4400	4,40E-07	2,27E-03	6,813E+14	6,8135	0,02	0,69	0,02	
						media		

Err ass. su λ =10 Å

Err ass. su λ 1,00E-09 metri

errore relativo sulla frequenza uguale all'errore relativo su λ

ΔV =0,02 volt

$h/e= 2,496E-15$

$e= 1,602E-19$

$h= 3,99859E-34 = 4,00 E-34$

