

# Radiazione e Materia: Spettro di Corpo Nero e Effetto Fotoelettrico

L. Martina

*Dipartimento di Fisica - Università del  
Salento  
e Sezione INFN - Lecce*

# Sorgenti di radiazione

## Fiamma

Converte energia chimica (combustione)  
in energia radiante.



## Lampadina ad incandescenza

Converte energia elettrica in  
termica e quindi radiante.

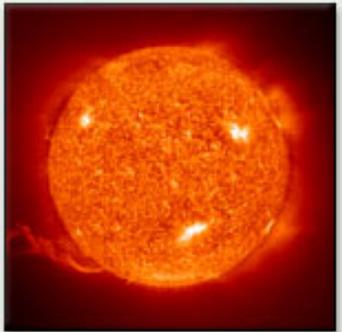
## Tubo al neon e fulmini

Convertono energia elettrica  
in energia di ionizzazione e poi radiante.



## Sole e stelle

Converte energia nucleare in radiante.



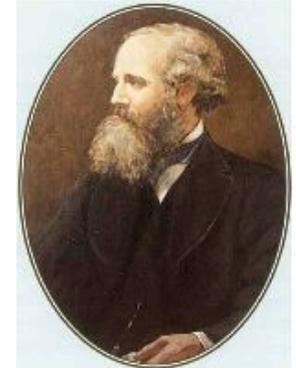
## Aurore

Converte energia cinetica  
in energia di eccitazione in energia radiante.



# Maxwell e le Onde

1864-'65



James Clerk Maxwell  
1831 - 1879

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



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

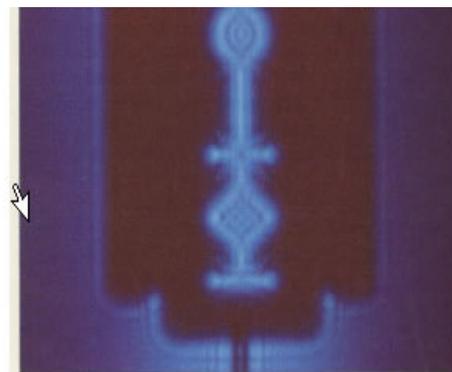
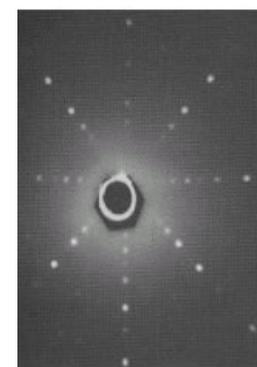
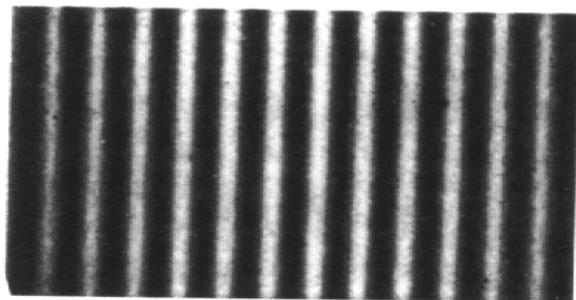
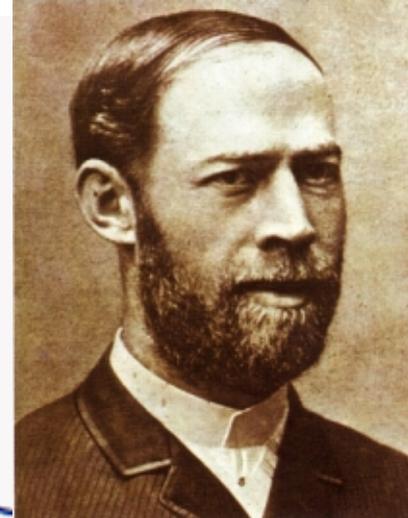
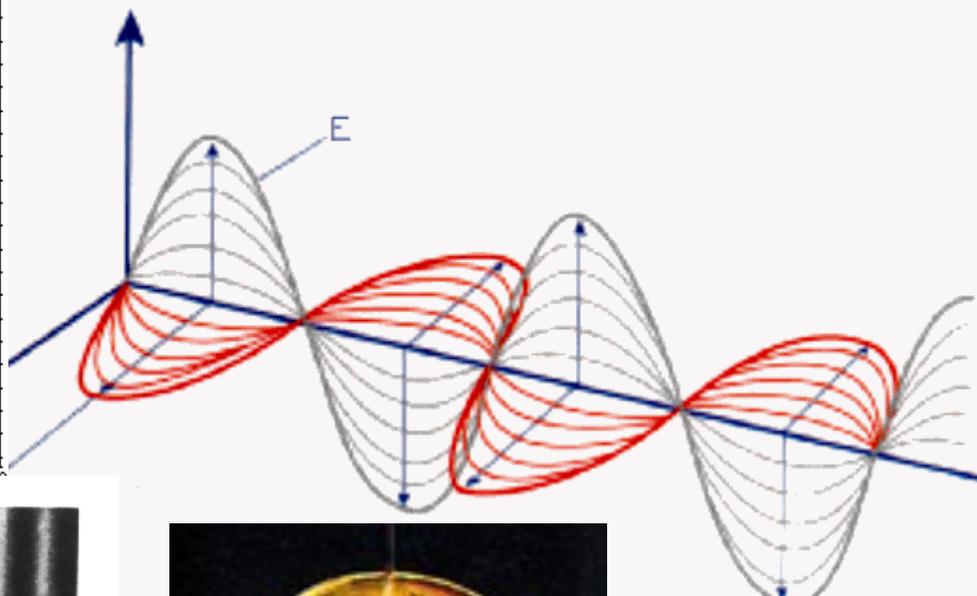
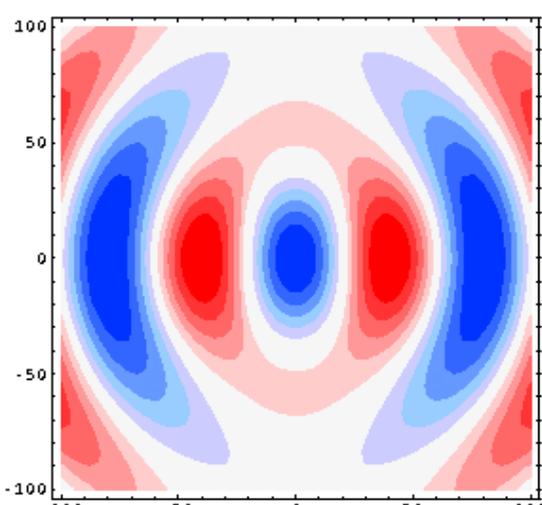
Equazione delle onde

← Velocità della luce

$$f = A \sin(kx - \omega t) \quad \omega = c k$$

Legge di dispersione

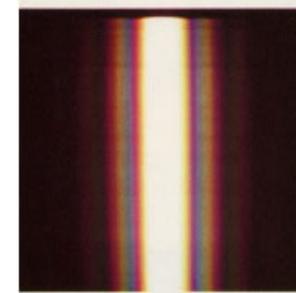
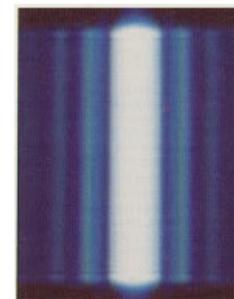
Onde Hertziane (1887)



Onde Hertziane (1887)

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

NON INVARIANTE SOTTO  
TRASFORMAZIONI DI GALILEI



# Caratteristiche principali delle Onde EM

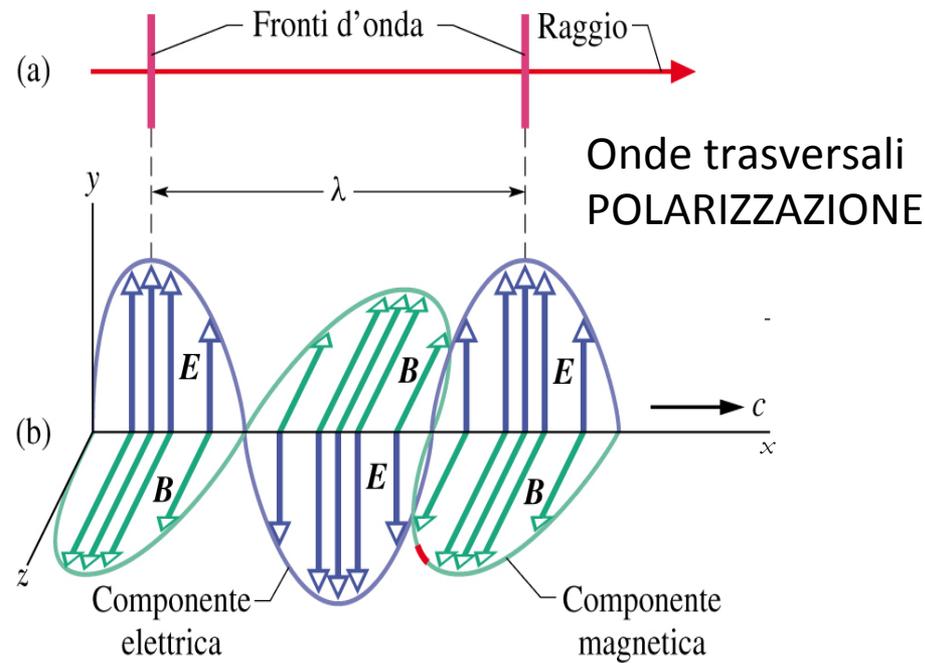
$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$E_m = c B_m$$

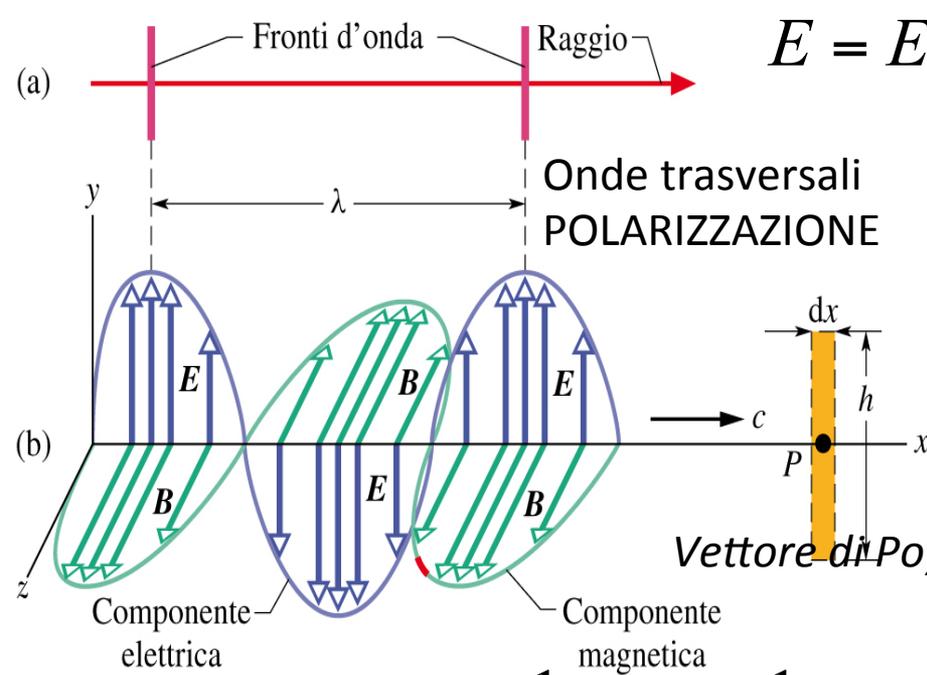
Numero d'onda:  $k = 2\pi / \lambda$

Frequenza angolare:  $\omega = 2\pi / T$

$$\omega = c |\vec{k}| \quad \text{Legge di dispersione}$$



# Energia delle Onde EM



$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$E_m = c B_m$$

Numero d'onda:  $k = 2\pi / \lambda$

Frequenza angolare:  $\omega = 2\pi / T$

Legge di dispersione:  $\omega = c |\vec{k}|$

Densità di energia

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 (cB)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left( \left( \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \right) B \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} = u_B$$

$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{qm}^2$$

$$E_{qm} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

Flusso di energia istantanea

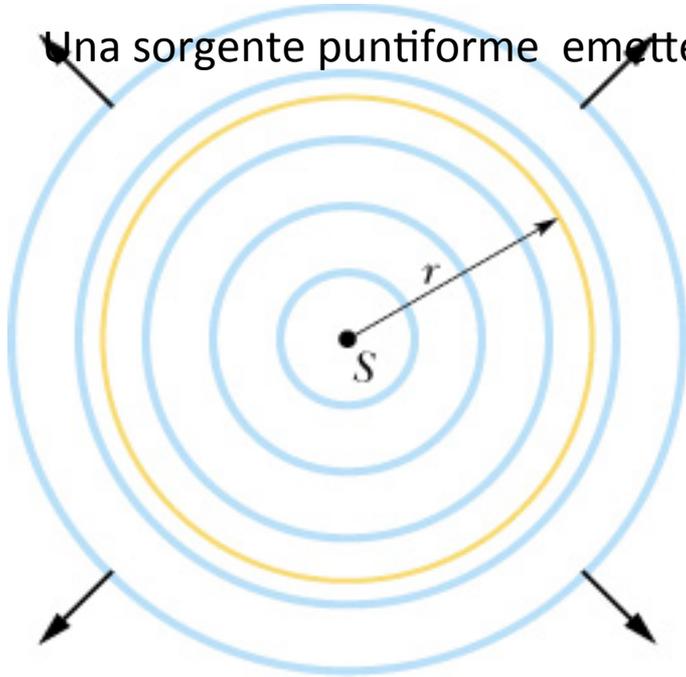
$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

V. Poynting

# Trasporto di energia e momento

Una sorgente puntiforme emette onde elettromagnetiche sferiche:



$$I = \frac{\text{potenza}}{\text{area}} = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

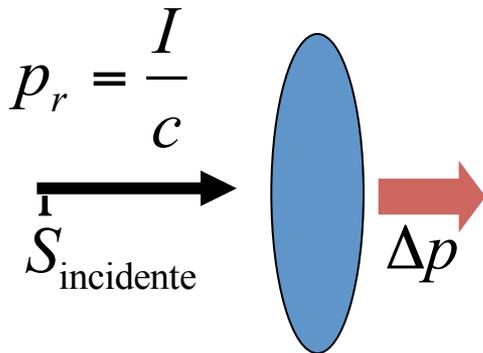
$$S = \left( \frac{\text{energia/tempo}}{\text{area}} \right) = \left( \frac{\text{potenza}}{\text{area}} \right)$$

$$I = \frac{\Delta U / \Delta t}{A} \quad \Delta U = IA \Delta t$$

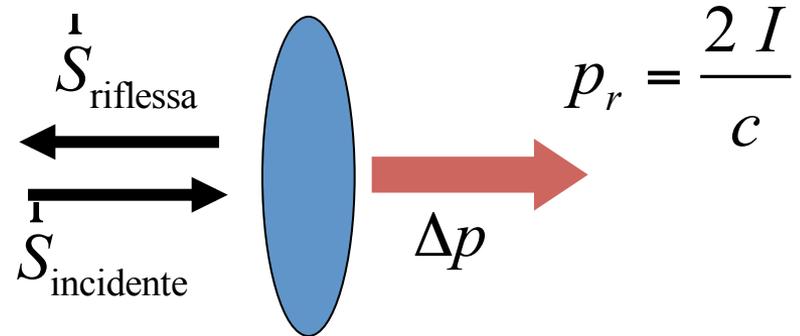
$$F = \frac{IA}{c} \quad \text{assorbimento totale}$$

$$F = \frac{2IA}{c} \quad \text{riflessione totale}$$

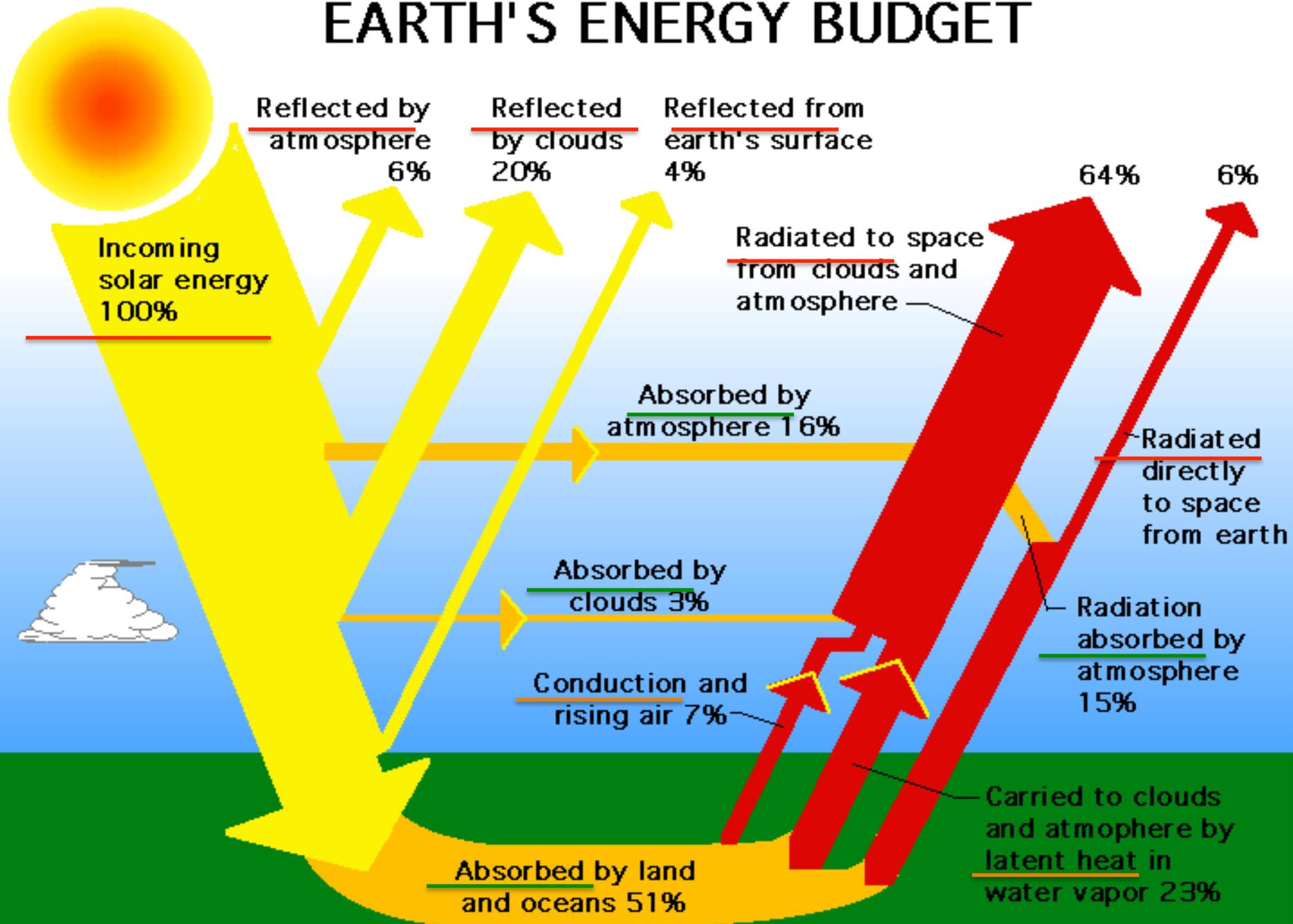
$$p_r = \frac{F}{A} \quad \text{pressione di radiazione}$$



$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$



# EARTH'S ENERGY BUDGET



# Lo Spettro E.M.

## Visibile

1666 – Newton disperde la luce visibile con un prisma. Il visibile è prodotto da transizioni degli elettroni in atomi e molecole e da corpi molto caldi

## Infrarosso

1800 – Herschel mostra che la radiazione solare si estende nell'infrarosso. L'infrarosso è prodotto da transizioni rotazionali e vibrazionali delle molecole e da corpi caldi.

## Ultravioletto (UV)

1801 – Ritter in modo analogo all'IR scopre la luce ultravioletta. L'UV è prodotto da transizioni elettroniche di atomi ionizzati.

## Onde radio e microonde

1885 – Hertz scopre le onde radio.

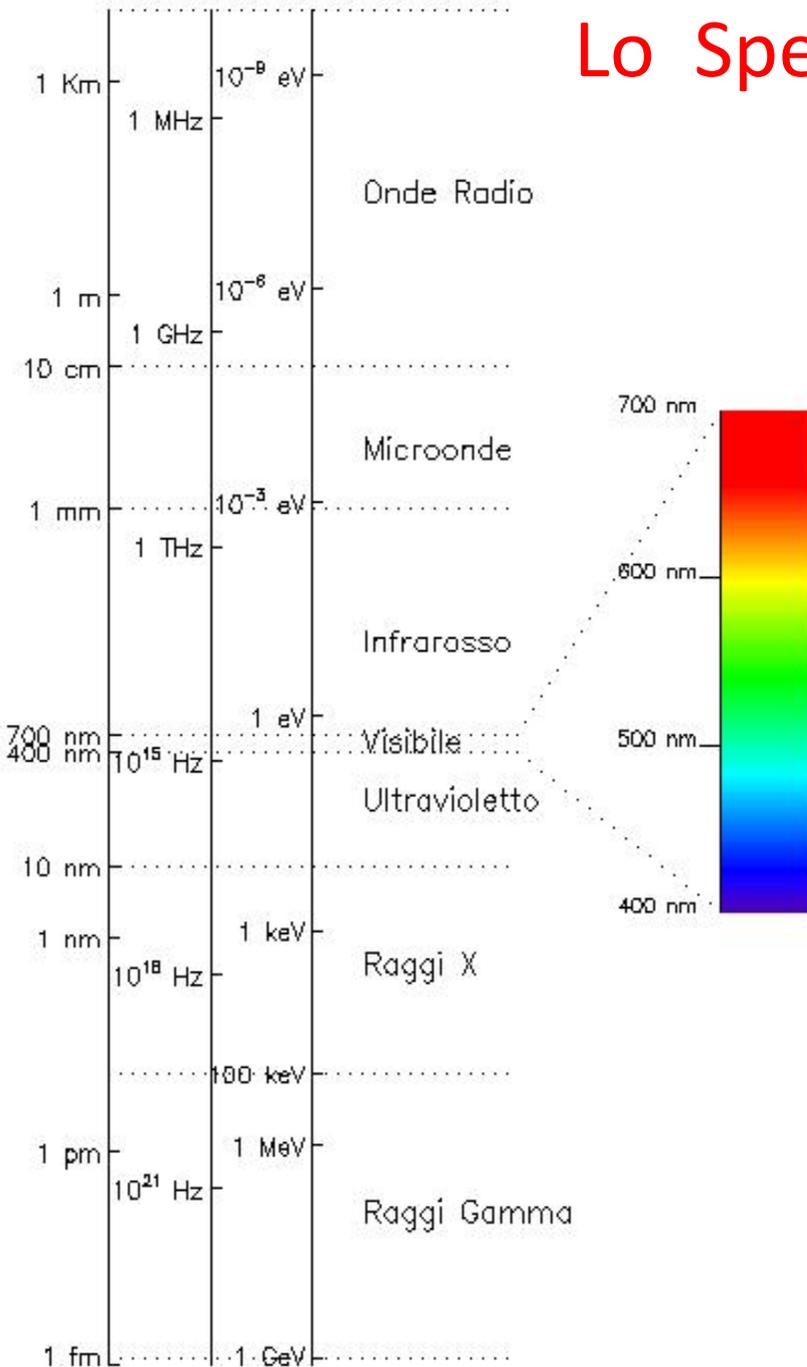
Le onde radio sono prodotte da dispositivi elettrici e elettronici, da radiazione di fondo cosmico e alla radiazione di frenamento.

## Raggi X e Raggi $\gamma$

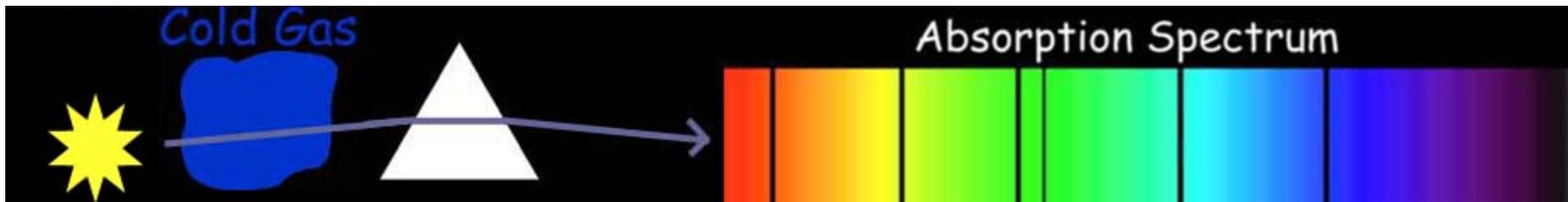
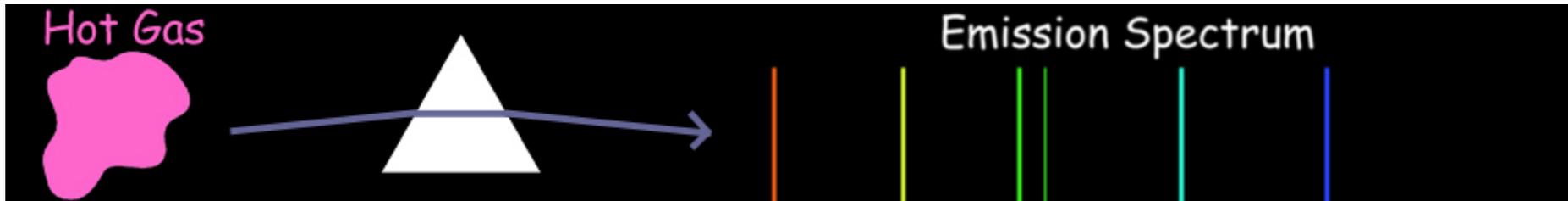
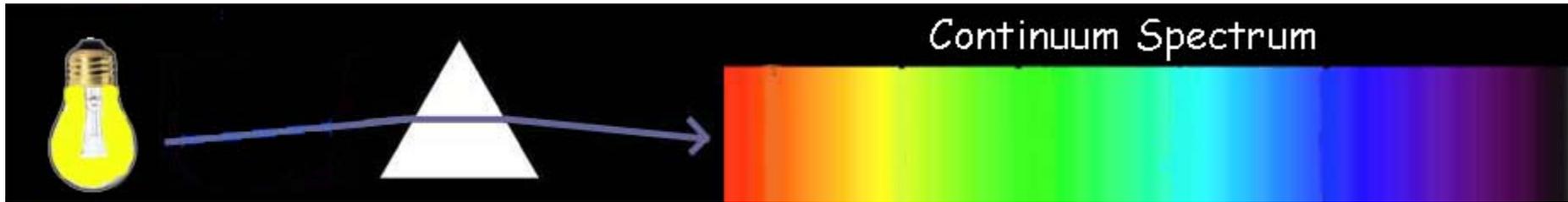
1896 - Roentgen scopre i raggi X.

1914 - Rutherford identifica i raggi  $\gamma$

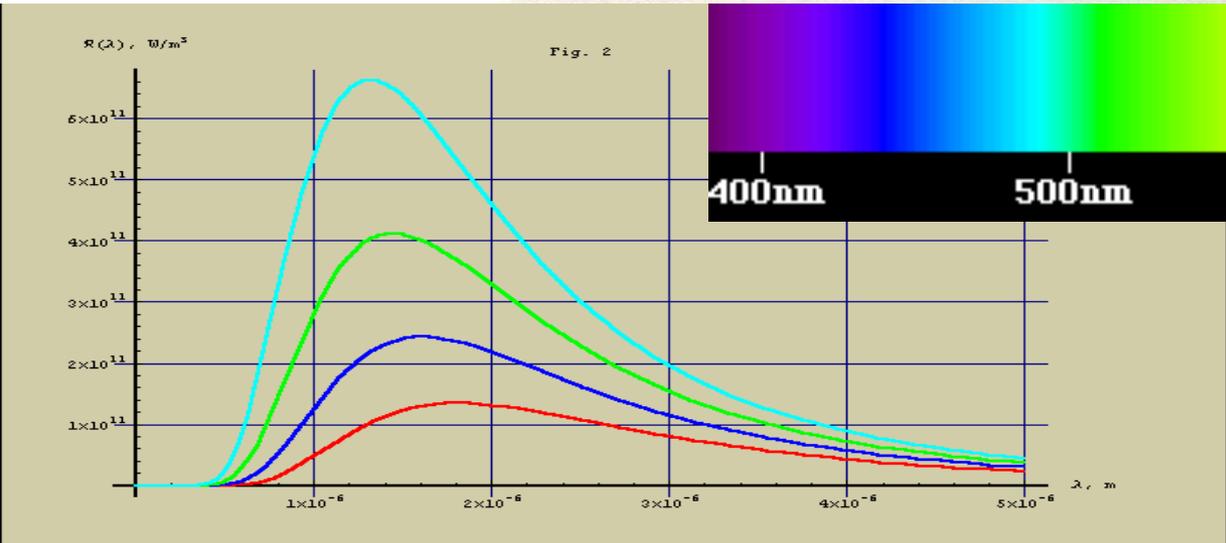
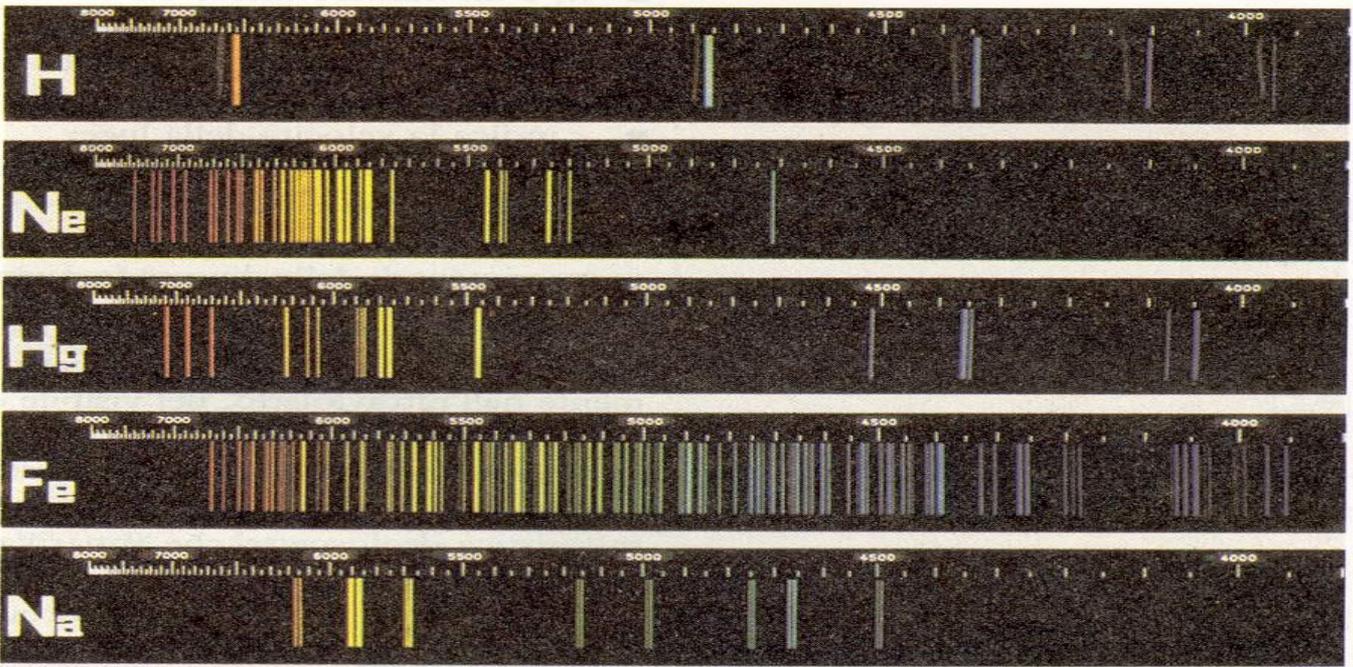
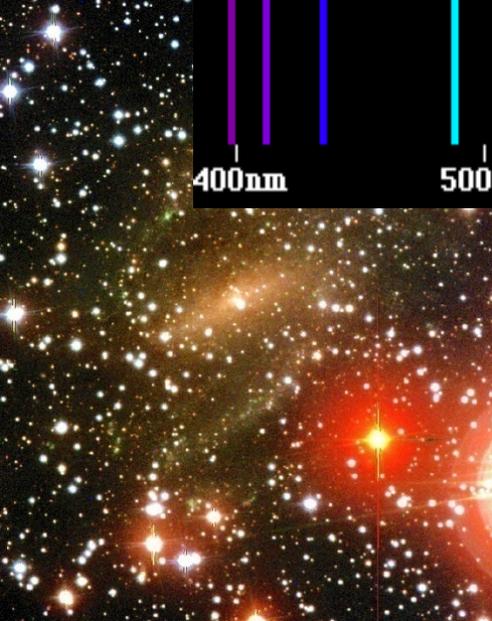
I raggi X sono prodotti nelle transizioni elettroniche negli atomi di elettroni di shell interne. I raggi  $\gamma$  sono prodotti nelle reazioni nucleari.



# Caratteristiche dello spettro



# Spettri discreti e continui



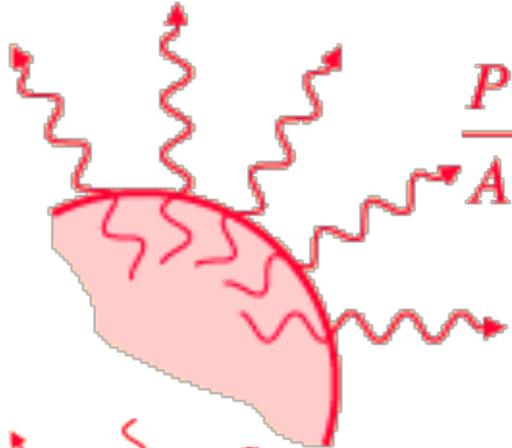
# Irraggiamento



G. R. G. Kirchhoff

*«per ogni sostanza il comportamento rispetto all'emissione e all'assorbimento, a parità di temperature, è il medesimo»*

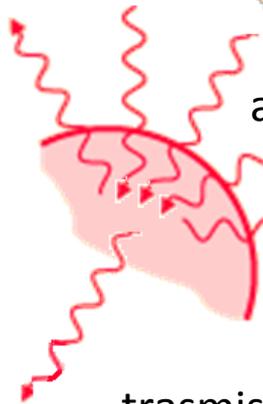
emissione



$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \text{ j/m}^2\text{s} \quad \text{Stefan-Boltzmann Law}$$

$$\sigma_e = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ watt / m}^2\text{K}^4$$

assorbimento



$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

riflessione

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4$$

$$P = e\sigma A(T^4 - T_c^4)$$

trasmissione

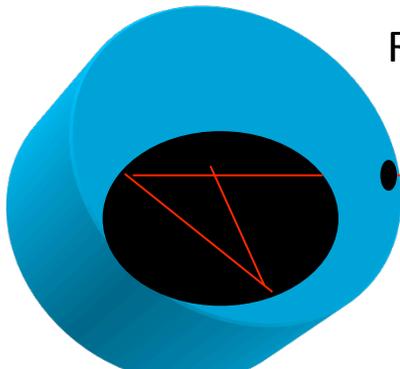
$$e = \alpha$$

Il Principio della Termodinamica



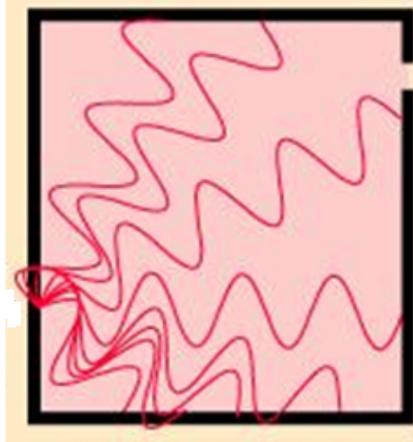
Assorbitore Perfetto  
**CORPO NERO**

Radiatore Perfetto  
**CORPO NERO**



$$P_{emiss} = f(T)$$

# Campo E.M. in una Cavita'



... ..

$$N = \frac{\pi}{3} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2)^{3/2} = \frac{8\pi L^3}{3\lambda^3}$$

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[ \frac{8\pi L^3}{3\lambda^3} \right] = -\frac{8\pi L^3}{\lambda^4}$$

Numero di modi/Volume lungh. d'onda  $= -\frac{1}{L^3} \frac{dN}{d\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4}$

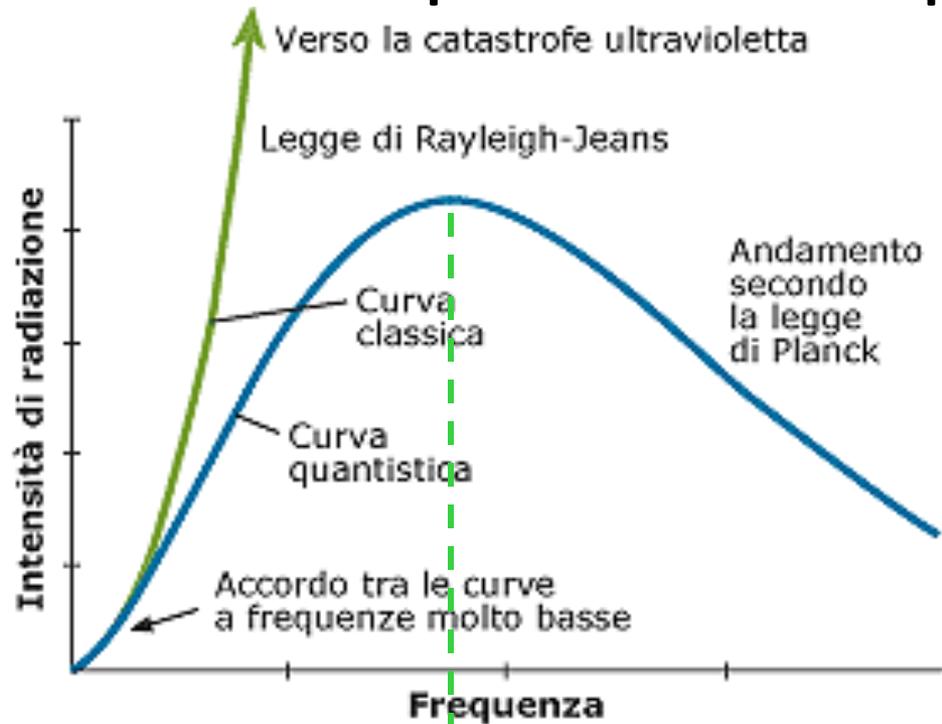
Densita' di energia/lungh.d'onda  $\frac{du}{d\lambda} = \frac{1}{L^3} \frac{dE}{d\lambda} = -kT \frac{1}{L^3} \frac{dN}{d\lambda} = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$

Equipartizione dell'energia

$$\frac{du}{d\nu} = \frac{du}{d\lambda} \frac{c}{\nu^2} = \frac{8\pi kT \nu^4}{c^4} \frac{c}{\nu^2} = kT \frac{8\pi \nu^2}{c^3}$$

Legge di Rayleigh - Jeans

# 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

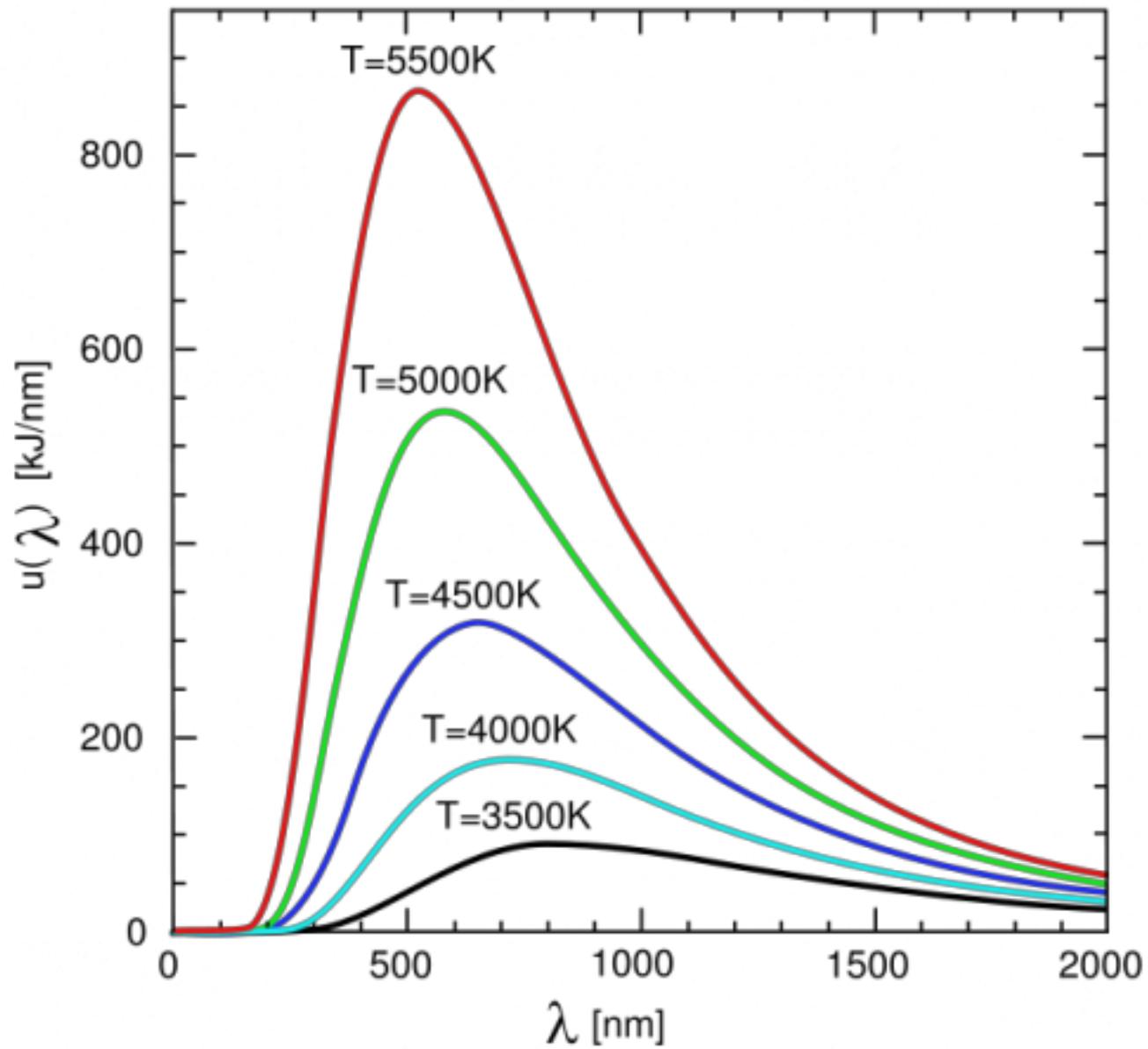
**Legge Wien**  $\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} m^{\circ}K$

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

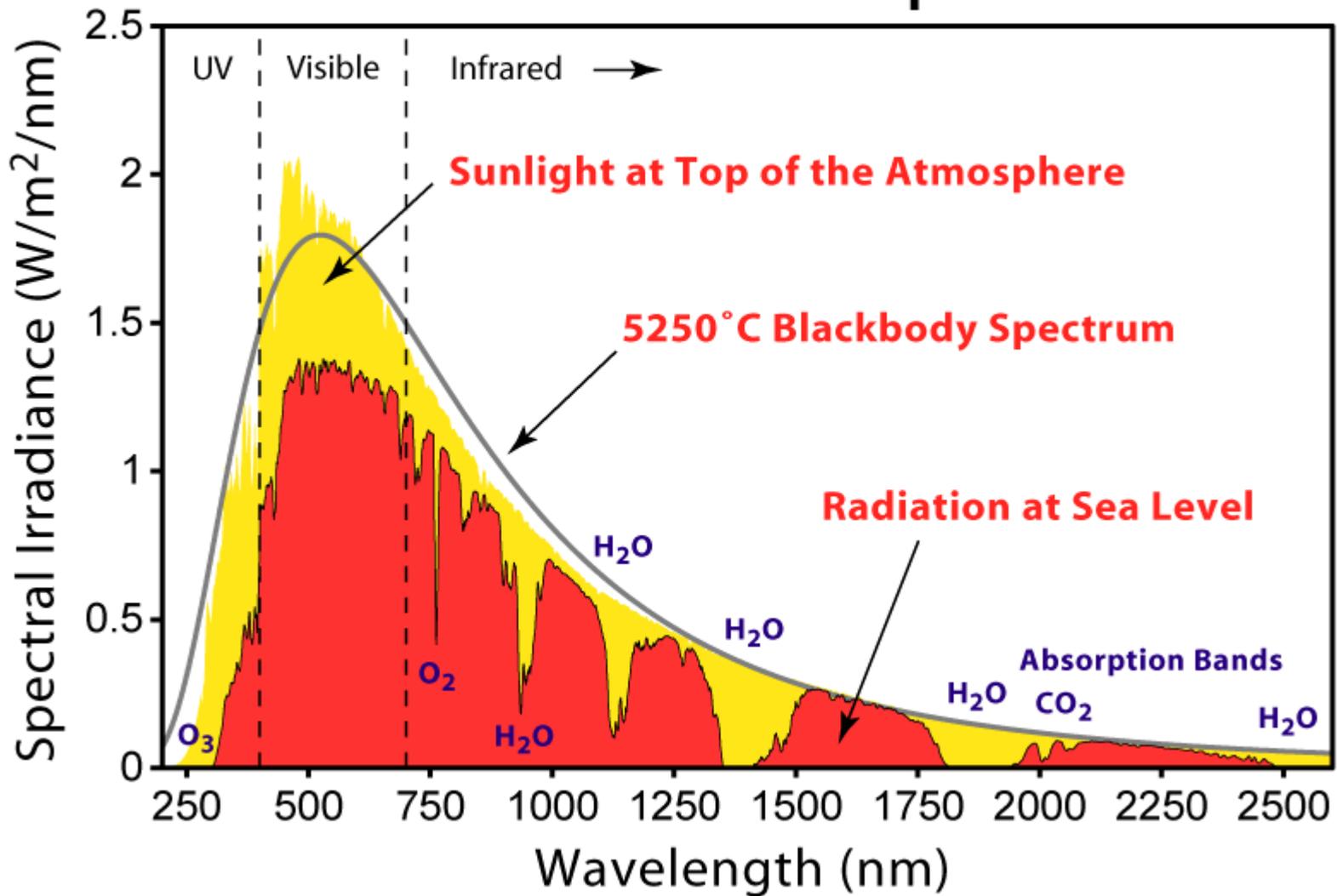
$$\Delta E = h\nu$$

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

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>



# Solar Radiation Spectrum



# Monocromatore a reticolo di Diffrazione

FIGURA A

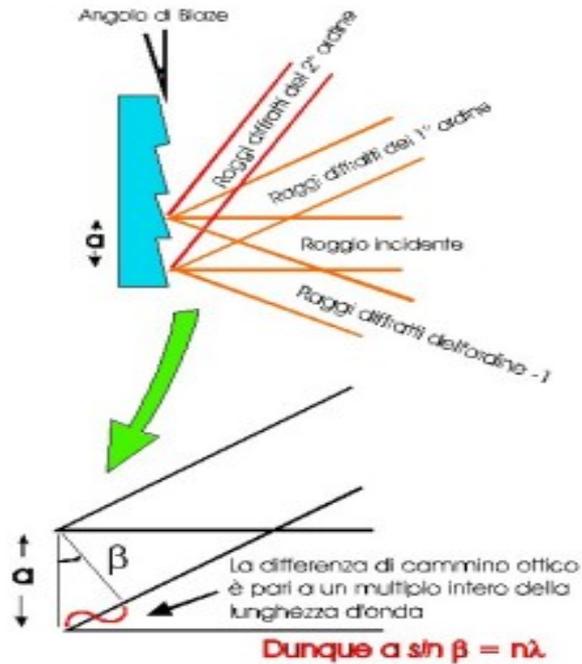
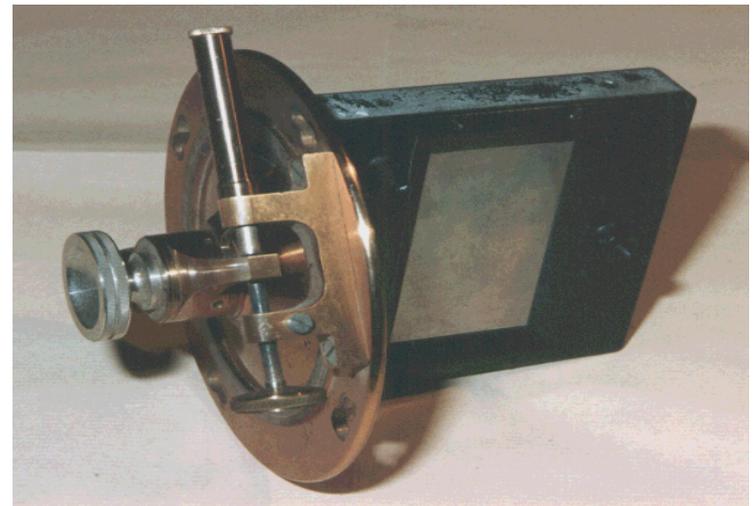
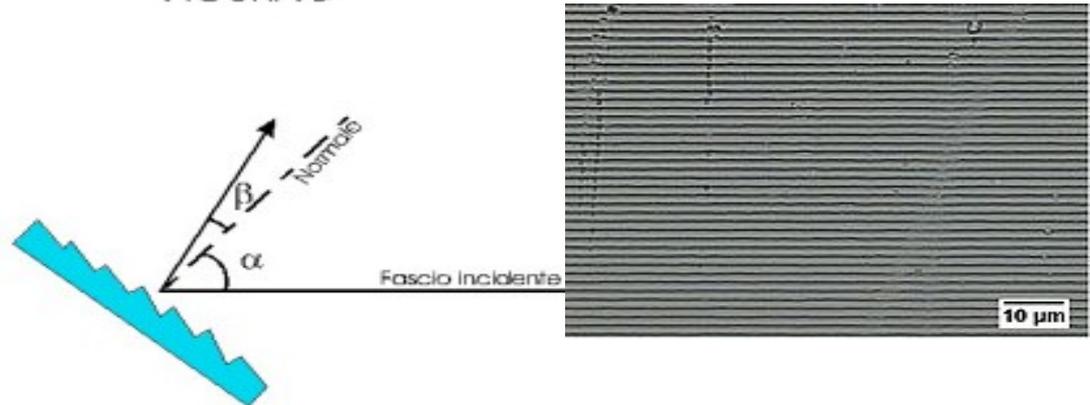
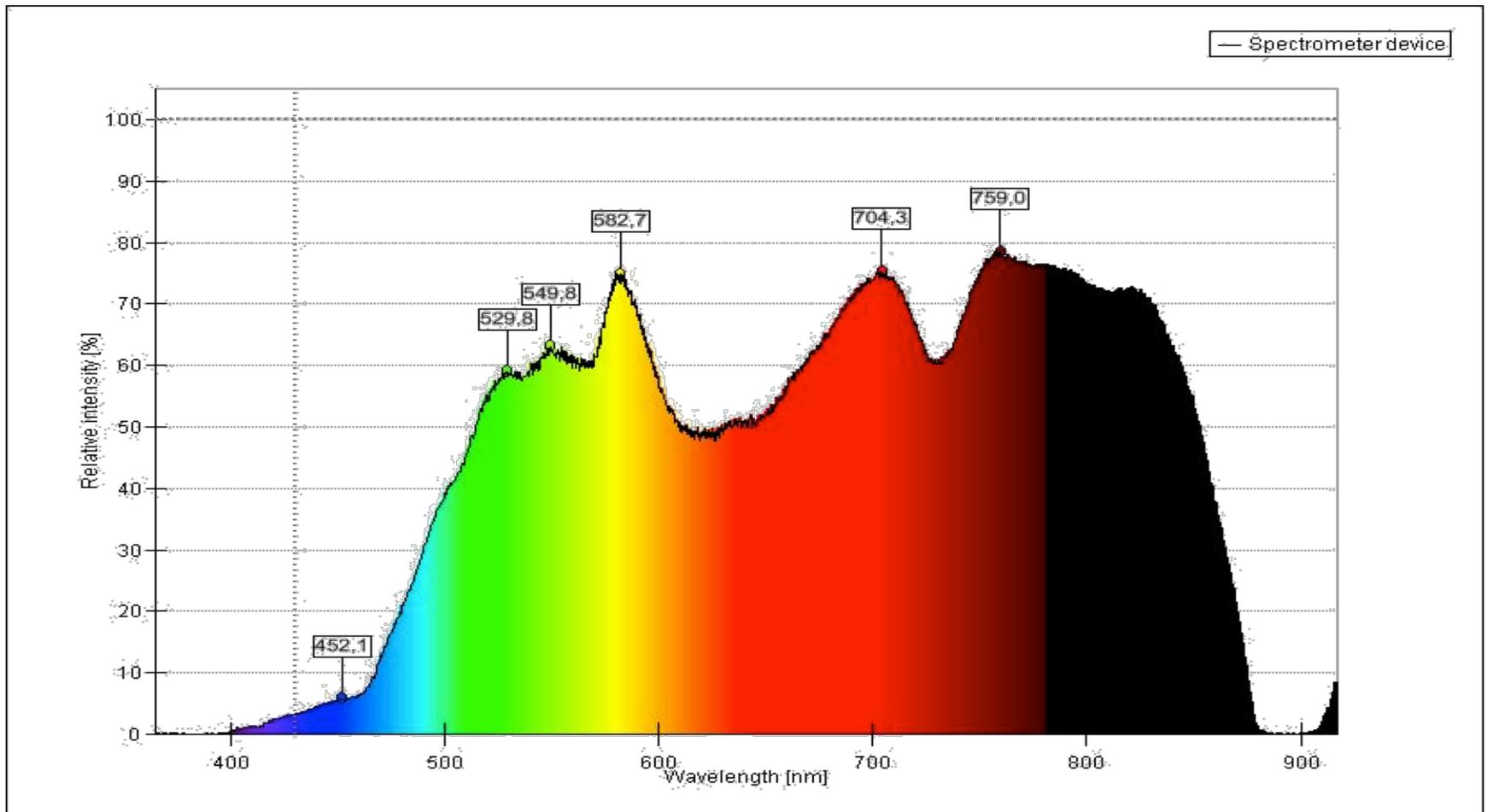


FIGURA B



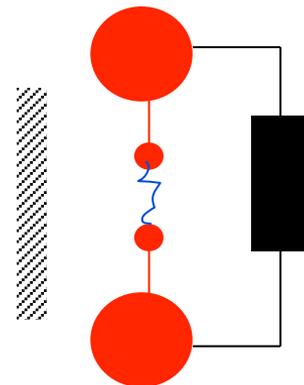
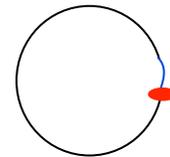
# Curva Spettrale di una Lampada Alogena



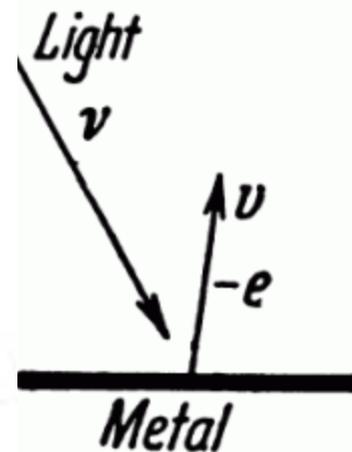
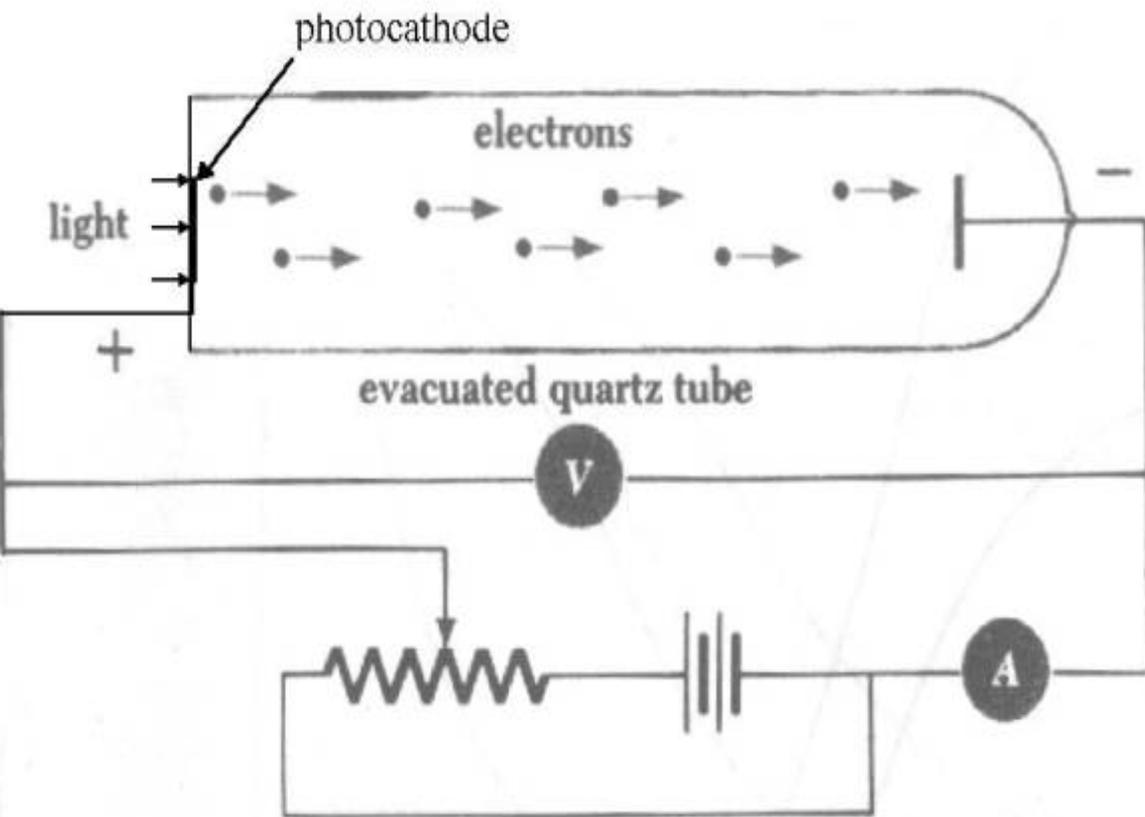


# L'effetto Fotoelettrico

Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

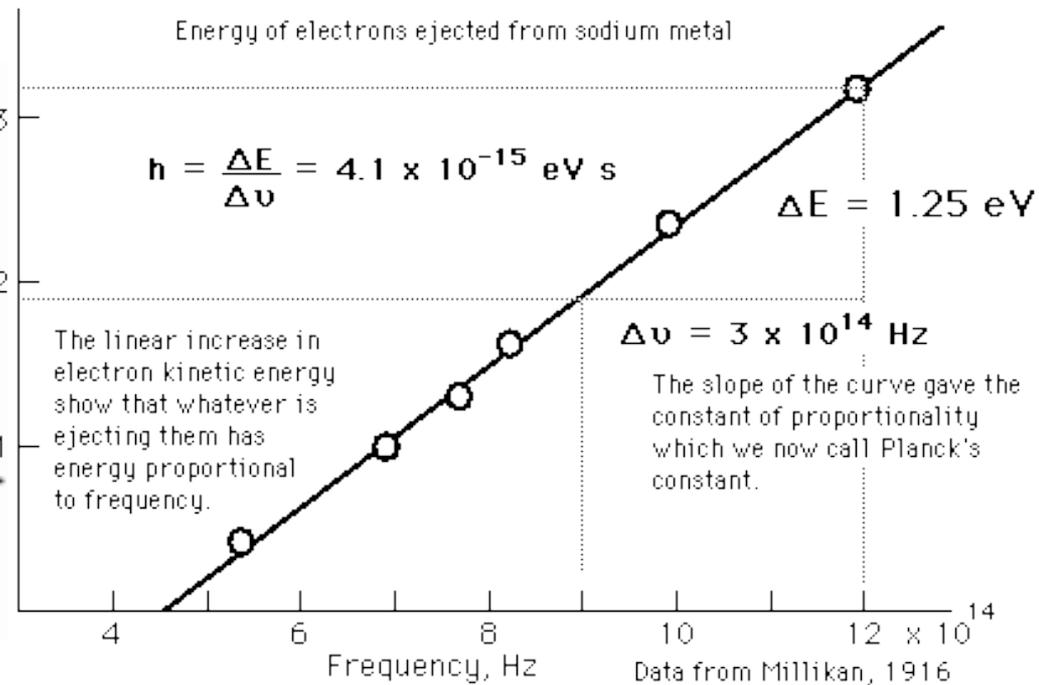
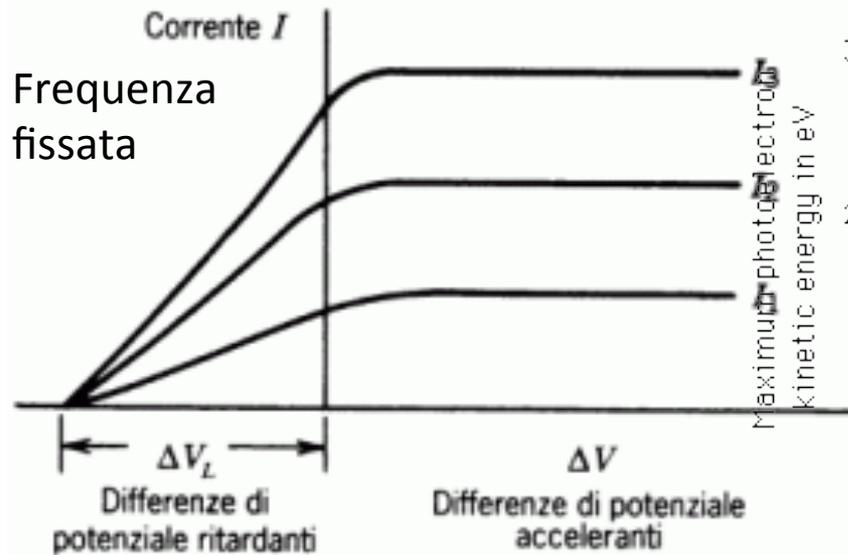


Hertz, 1887



Lenard  
1899 - 1902

# Relazioni caratteristiche dell'effetto fotoelettrico



- Solo luce con frequenza > frequenza di soglia produce una corrente
- La corrente è attivata in tempi <  $10^{-6} \text{ s}$
- 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  $\nu_0$ .

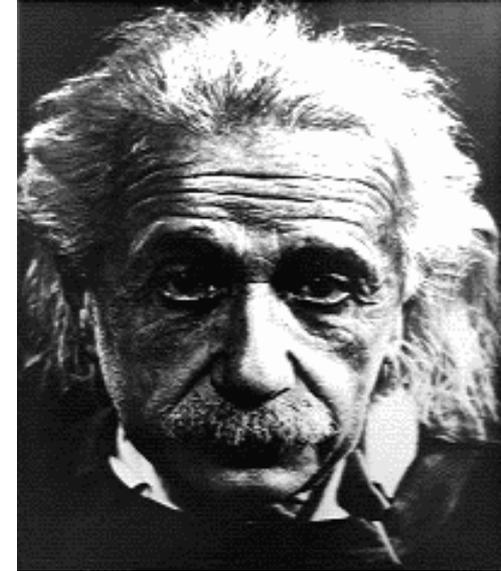
Se la luce ha una frequenza minore di  $\nu_0$  non è in grado di estrarre i fotoelettroni, qualunque sia l'intensità;

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  $W$ .

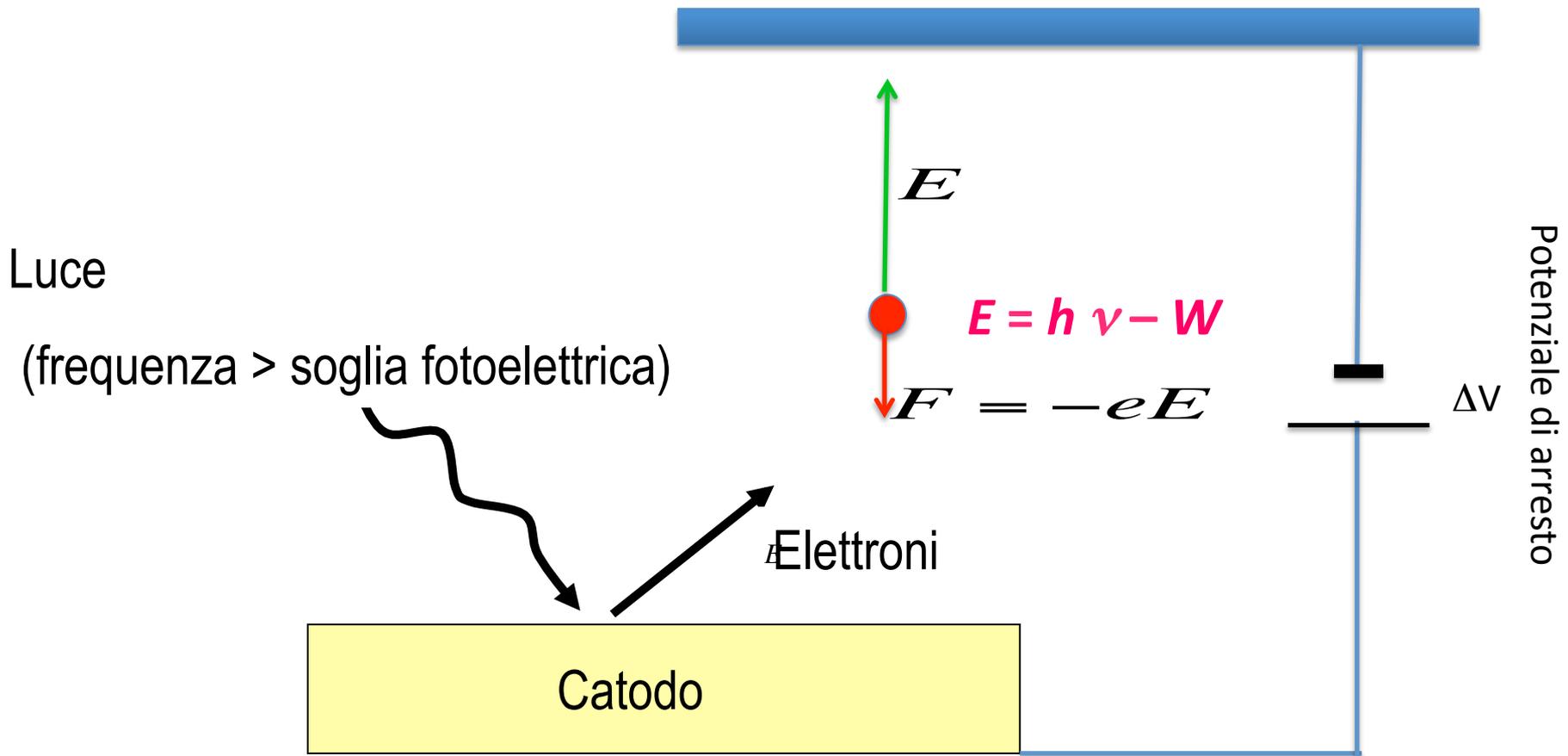


$$E = hf - W$$

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.

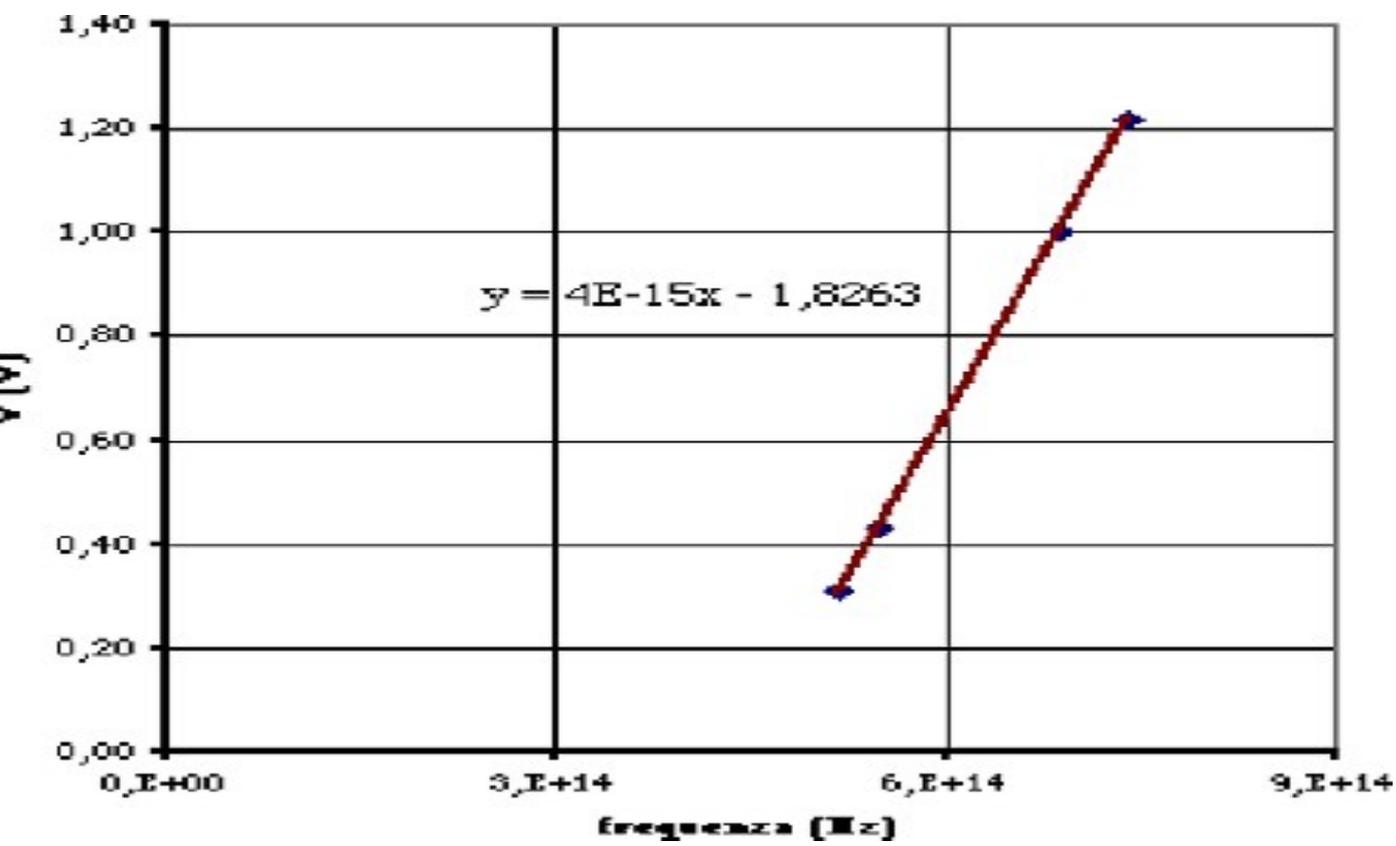
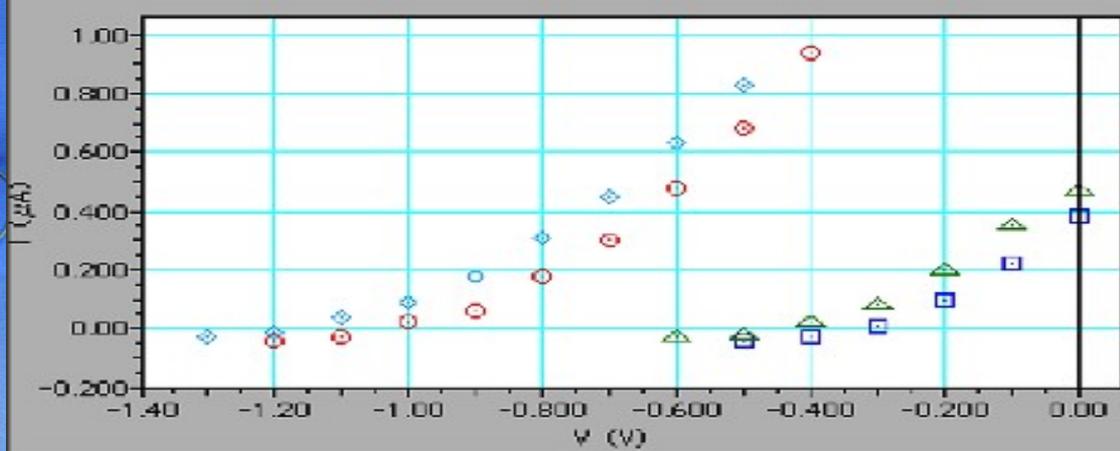
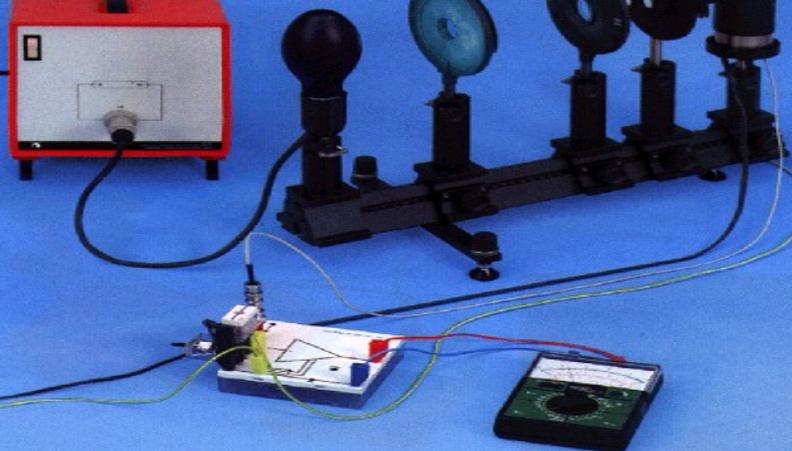
Questo è completamente indipendente dall'intensità della luce stessa, che è invece proporzionale al numero di quanti che attraversano una superficie unitaria nell'unità di tempo.

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

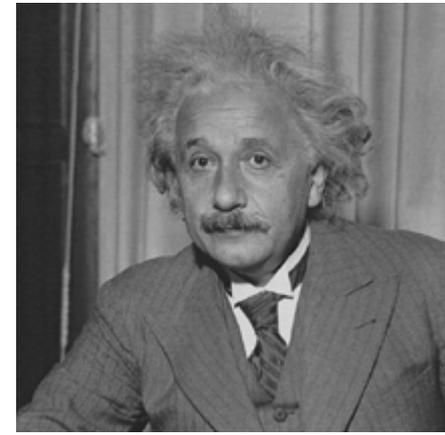
$$p = \frac{E}{c}$$



James Clerk Maxwell  
1831 - 1879

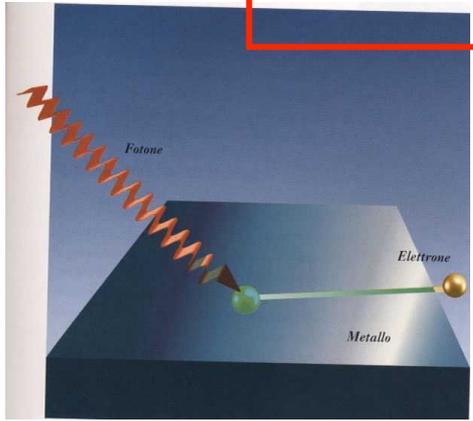
... e la  
**DIFFRAZIONE !?!**

Einstein (1905)



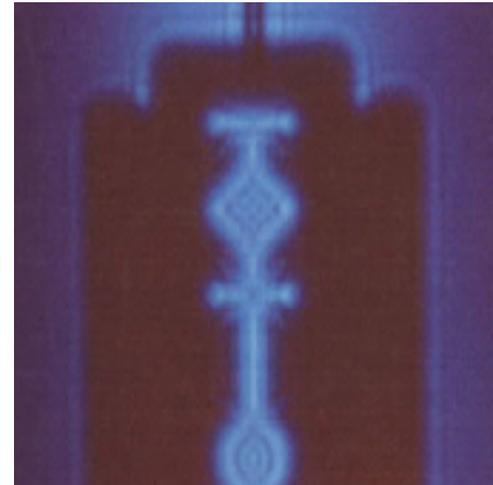
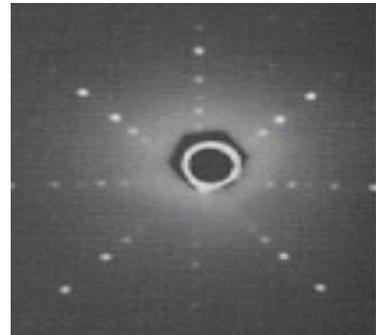
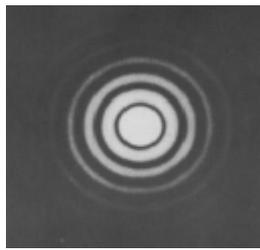
$$\text{Planck} \\ E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

**Relazioni  
Planck - Einstein**



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

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



# 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,

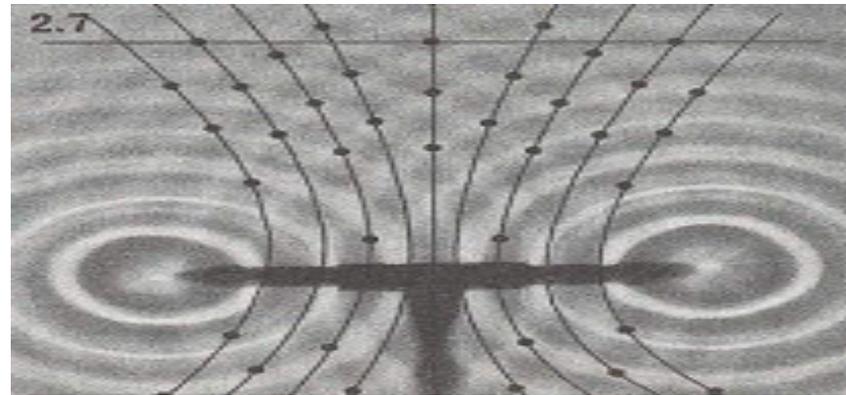
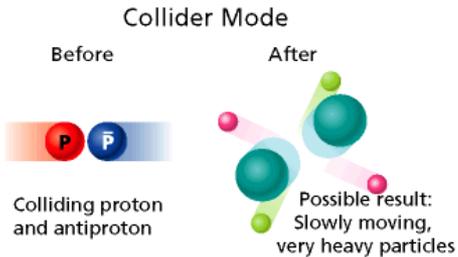
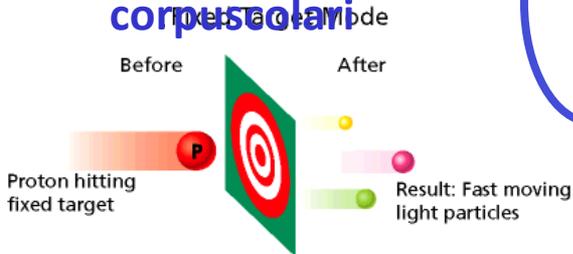
- Complementarietà e Relazioni di Planck – Einstein – de Broglie: proporzionalità fra grandezze complementari di un **oggetto quantistico**

Grandezze corpuscolari

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

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

Grandezze “ondulatorie”



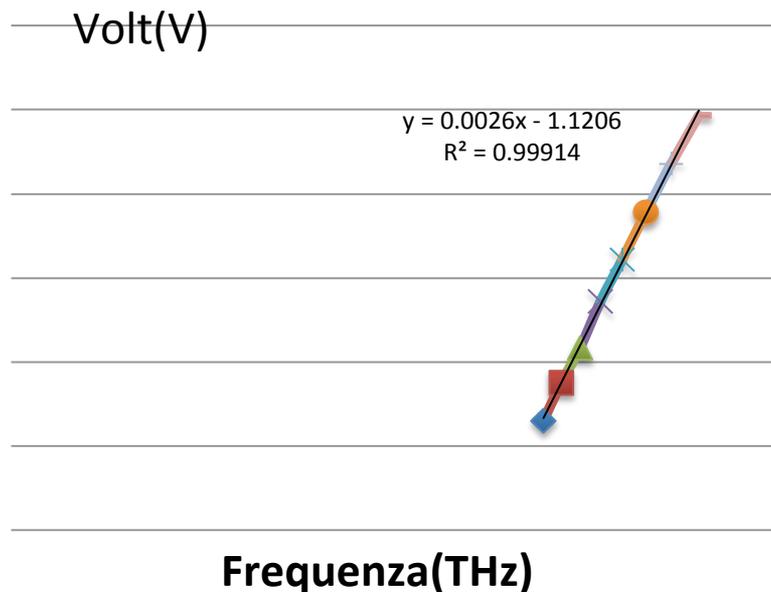
- Altre scale universali:
- $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$
- $\alpha = 0.00729735$
- $M_{\text{Planck}} = 1.3 \times 10^{19} \text{ GeV}$

Velocità della luce  
 Cost. Struttura Fine  
 Massa di Planck

# 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							
$\lambda$ (Å)	$\lambda$ (m)	err relat su $\lambda$	frequenza f	$f \cdot 10^{14}$	err. Ass su f	$\Delta V$	err ass su $\Delta V$	
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  $\lambda$  = 10 Å

Err ass. su  $\lambda$  = 1,00E-09 metri

errore relativo sulla frequenza uguale all'errore relativo su lamda

$\Delta V$  = 0,02 volt

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

**$e = 1,602E-19$**

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

