

Radiazione e Materia: Spettro di Corpo Nero e Effetto Fotoelettrico

L. Martina

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

Sorgenti di radiazione

Fiamma

Converte energia chimica (combustione)
in energia radiante.

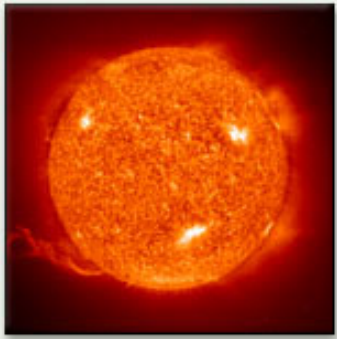


Lampadina ad incandescenza

Converte energia elettrica in
termica e quindi radiante.

Tubo al neon e fulmini

Convertono energia elettrica
in energia di ionizzazione e poi radiante.



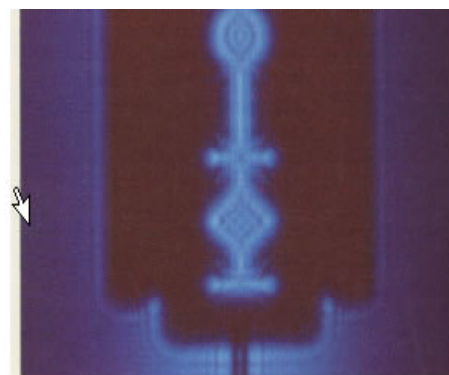
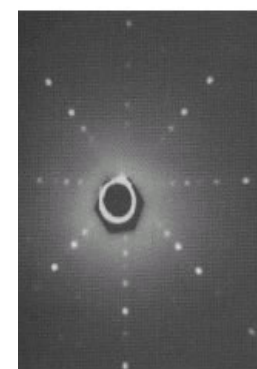
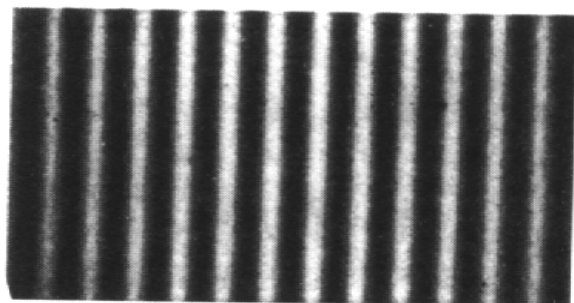
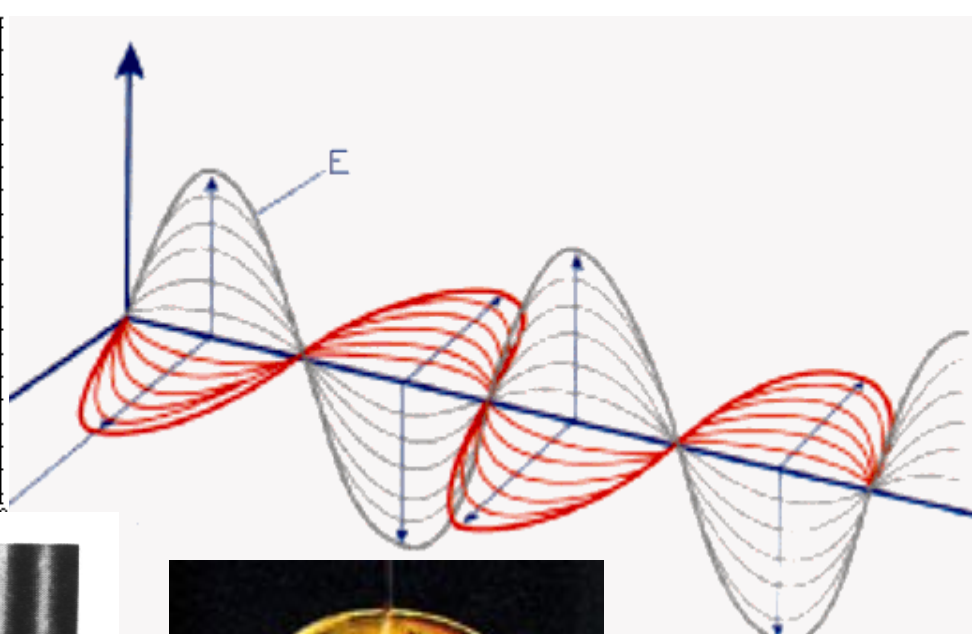
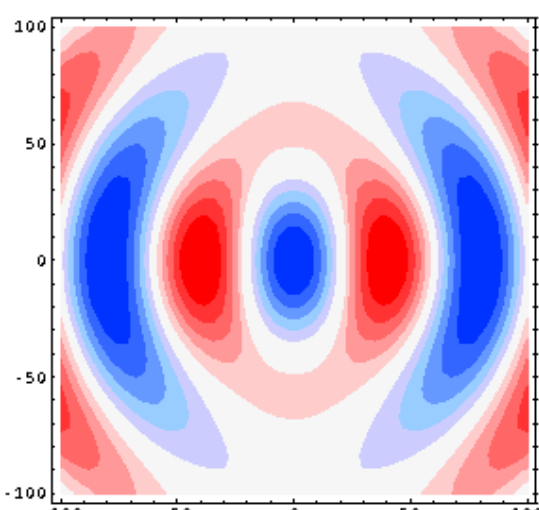
Sole e stelle

Converte energia nucleare in radiante.

Aurore

Converte energia cinetica
in energia di eccitazione in energia radiante.



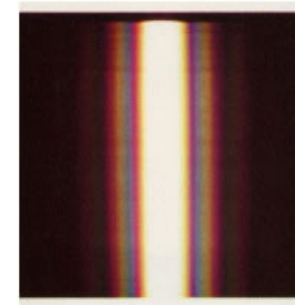


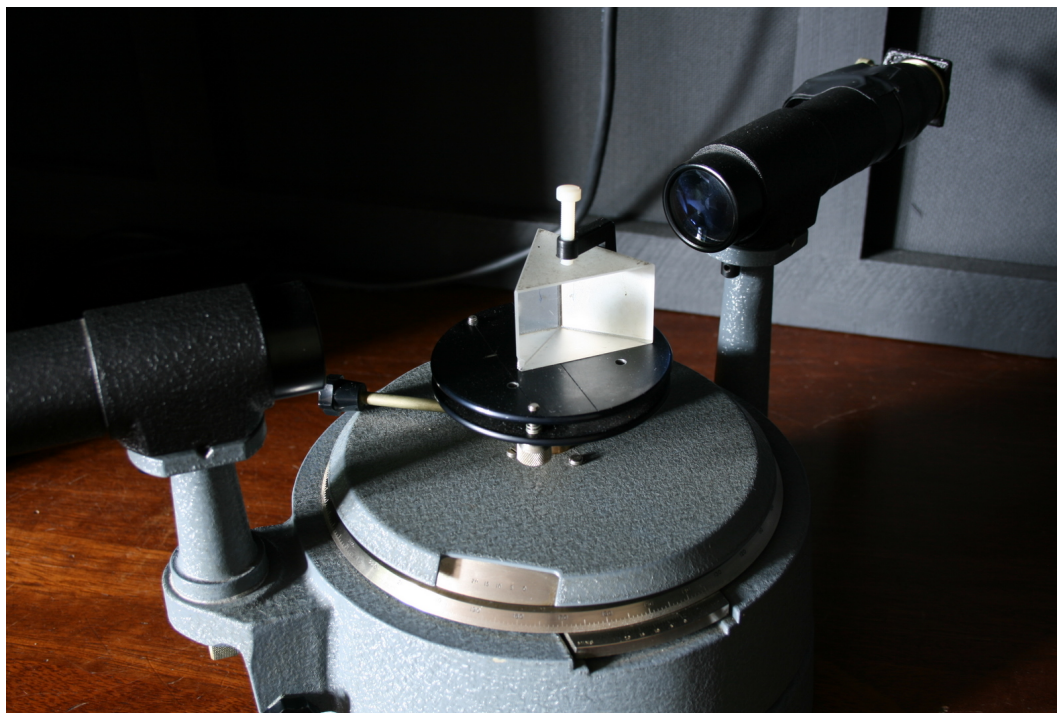
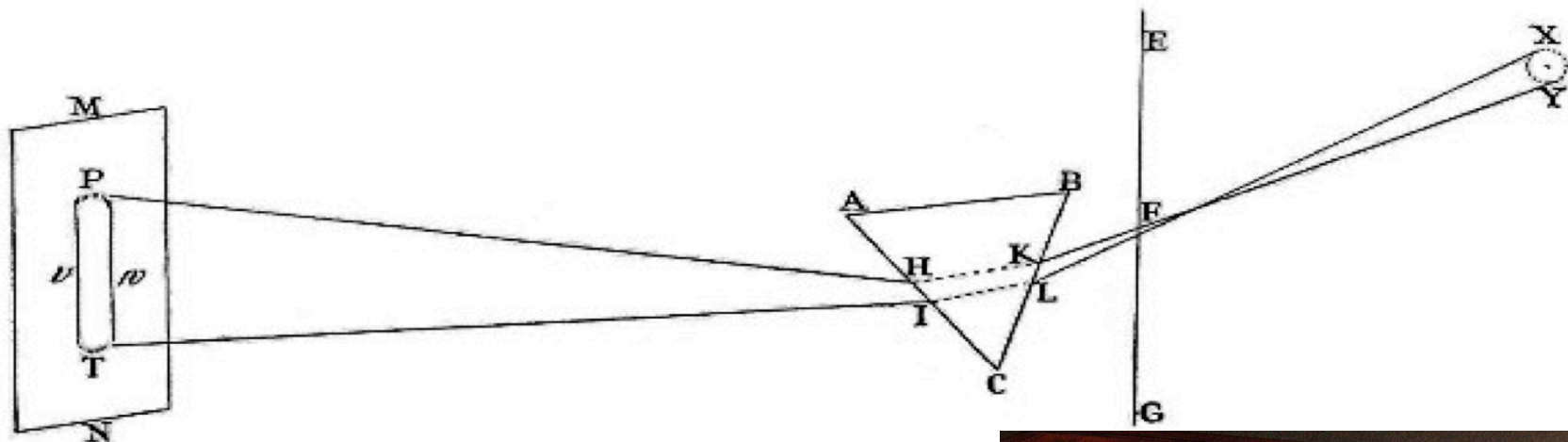
Onde Hertziane (1887)



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

NON INVARIANTE SOTTO
TRASFORMAZIONI DI GALILEI





source

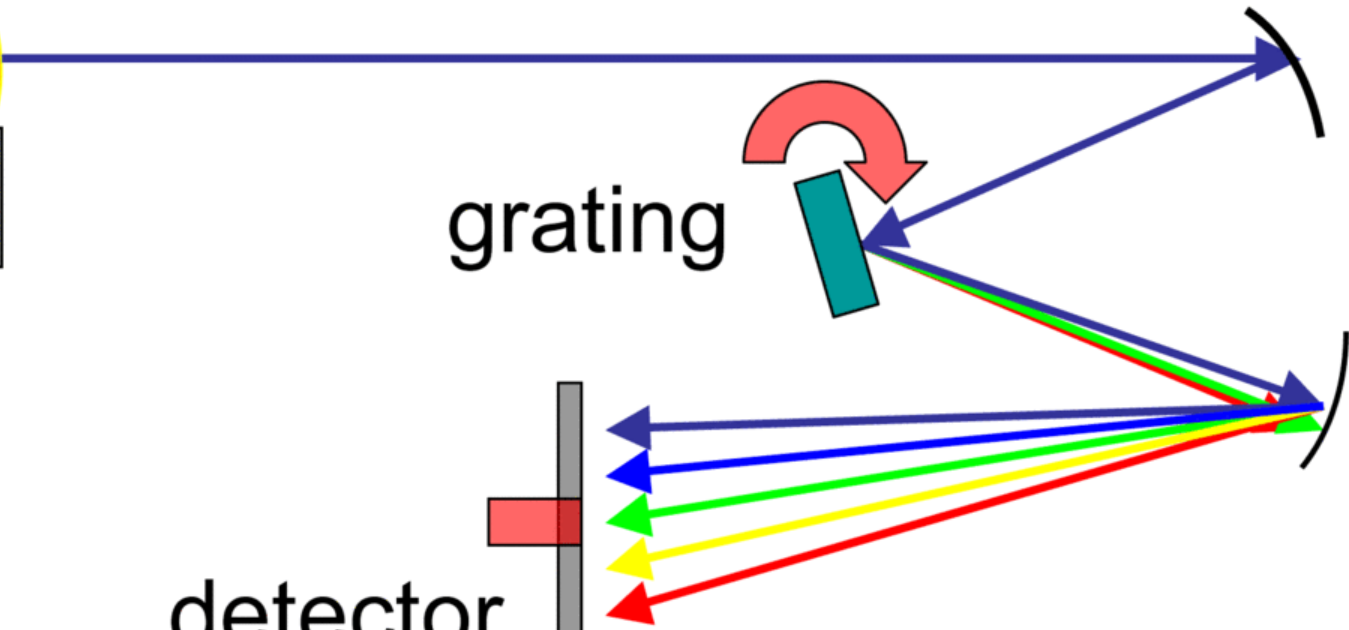
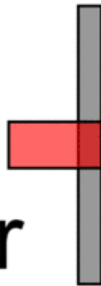


grating



mirrors

detector



Monocromatore a reticolo di Diffrazione

FIGURA A

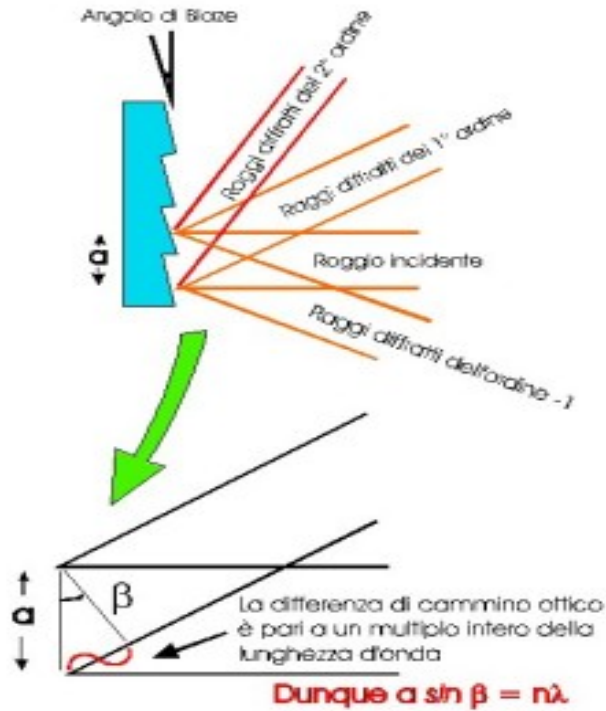
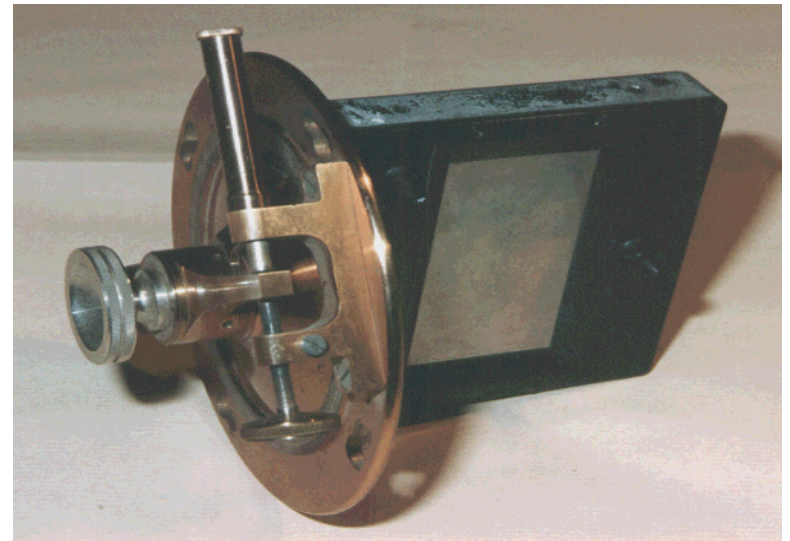
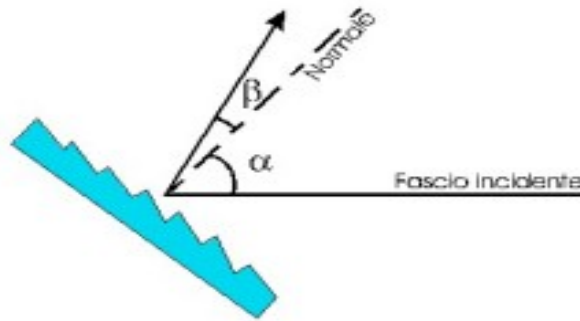


FIGURA B



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.

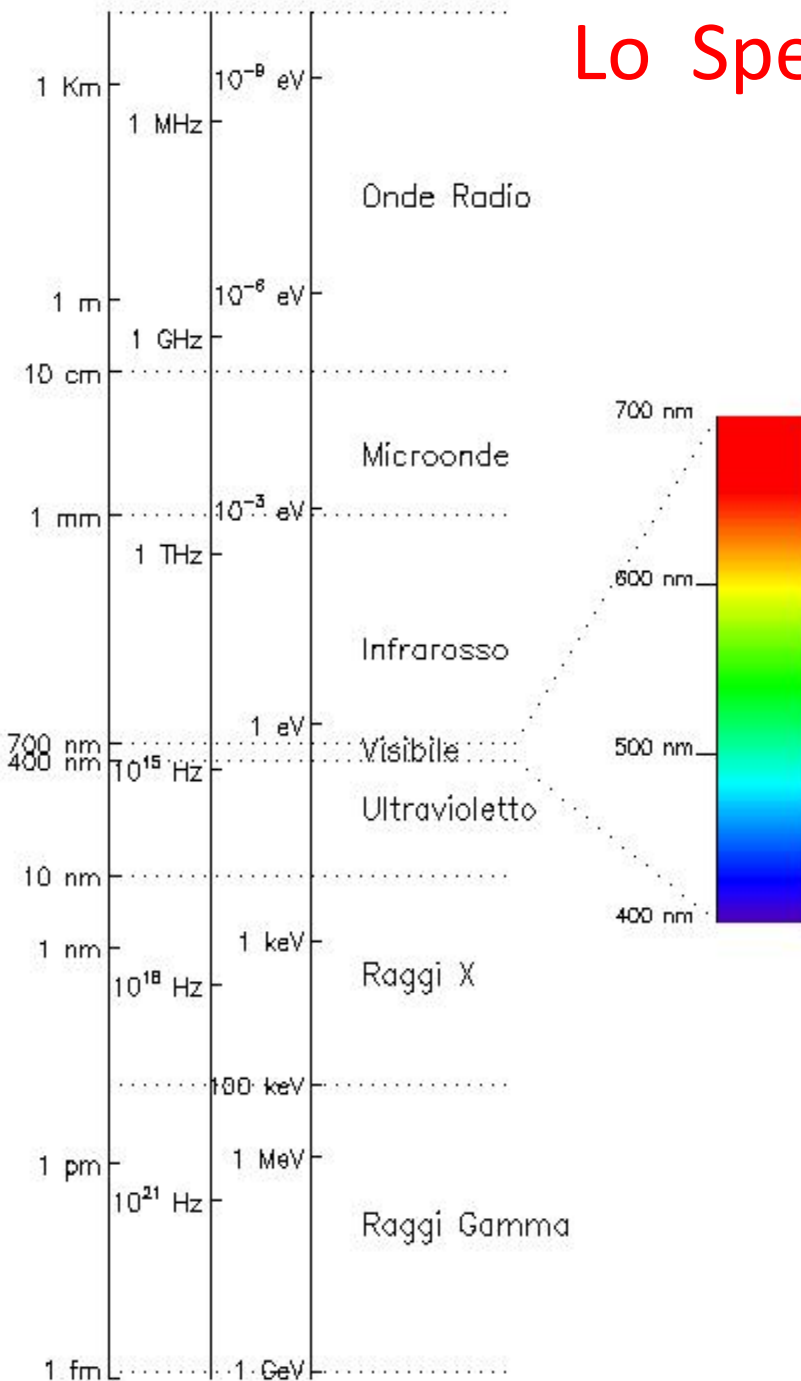
Le onde radio sono prodotte da dispositivi elettrici e elettronici, da radiazione di fondo cosmico e alla radiazione di frenamento.

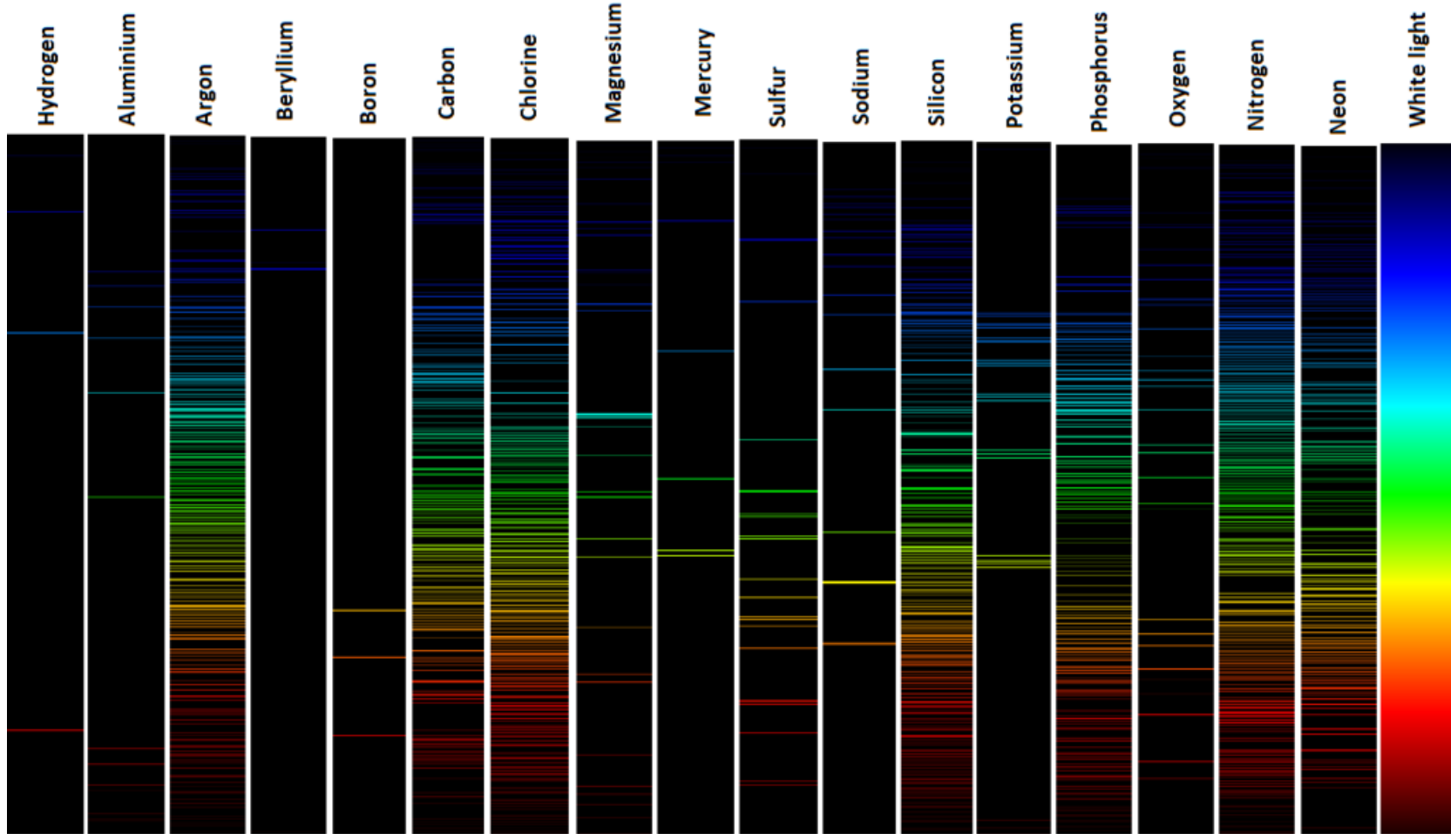
Raggi X e Raggi γ

1896 - Roentgen scopre i raggi X.

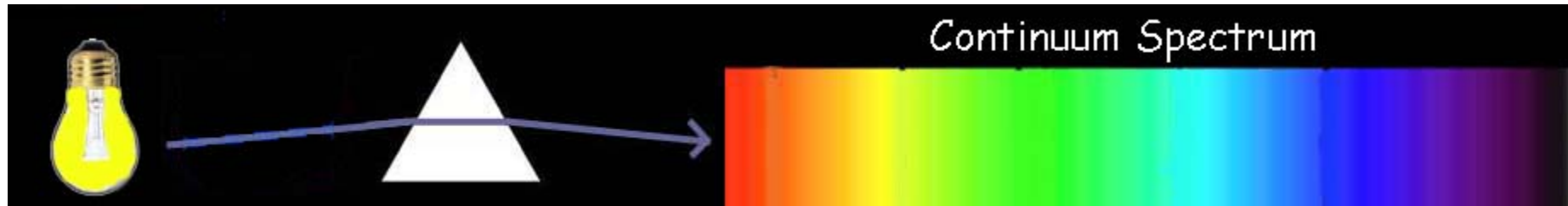
1914 - Rutherford identifica i raggi γ

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





Caratteristiche dello spettro



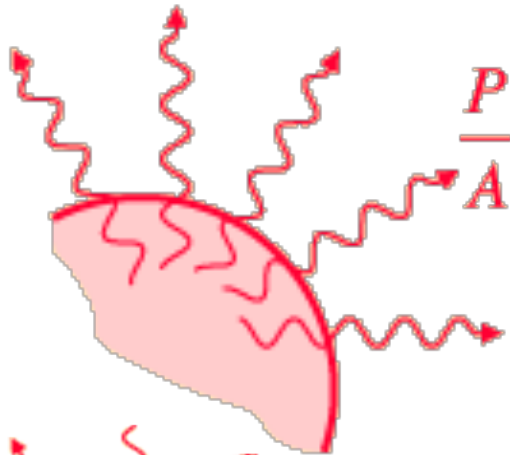
Irraggiamento



G. R. G. Kirchhoff

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

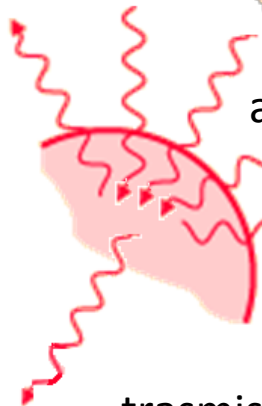
emissione



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

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

assorbimento



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

riflessione

trasmissione

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

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

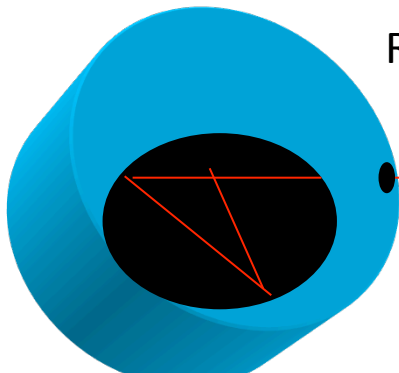
$$e = \alpha$$

Il Principio della Termodinamica



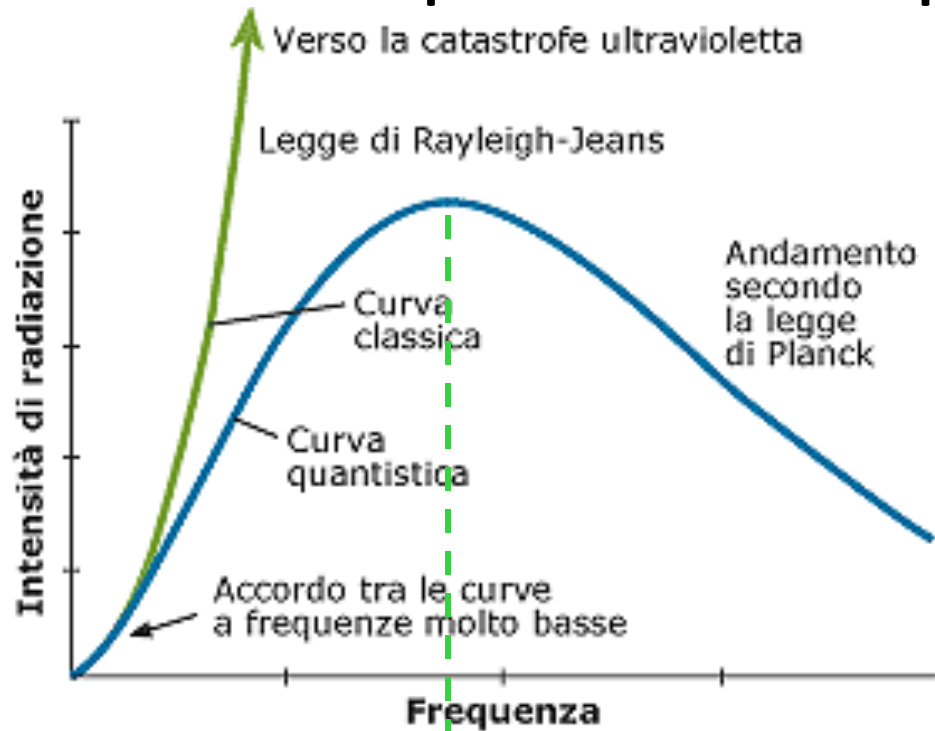
Assorbitore Perfetto
CORPO NERO

Radiatore Perfetto
CORPO NERO



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

Spettro di Corpo Nero



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

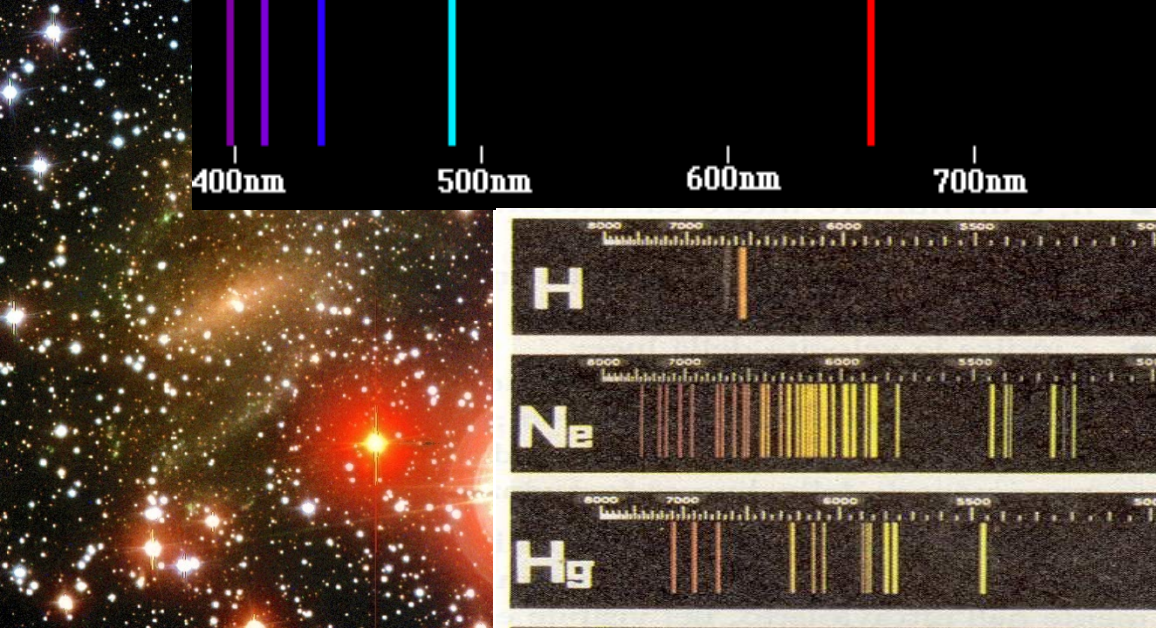
$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\infty} E e^{-E/kT}}{\int_0^{\infty} e^{-E/kT}} (\nu) \approx \nu^2 T$$

Statistica Boltzmann

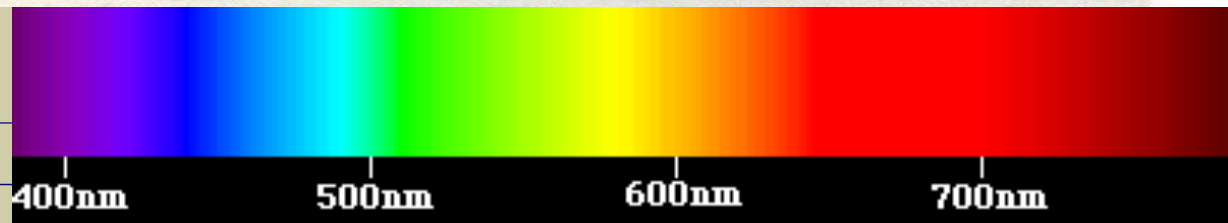
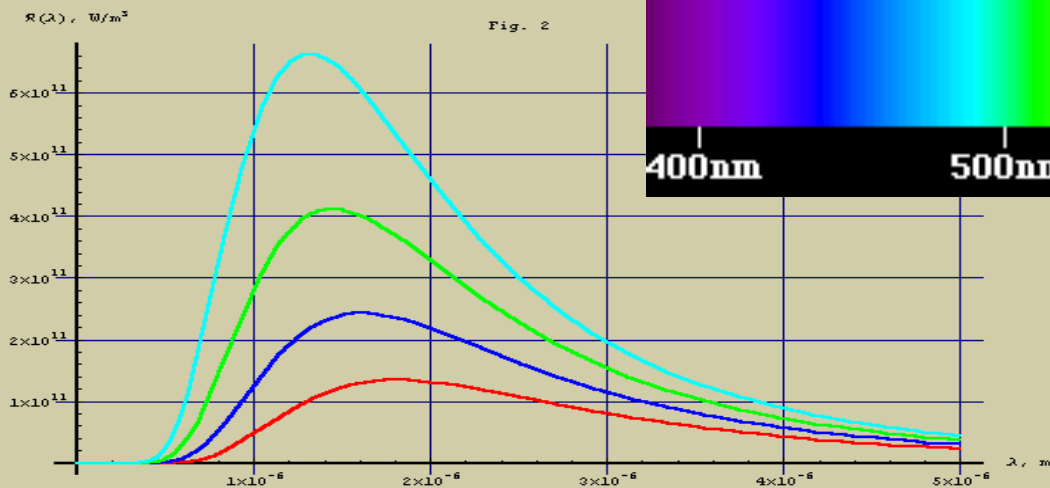
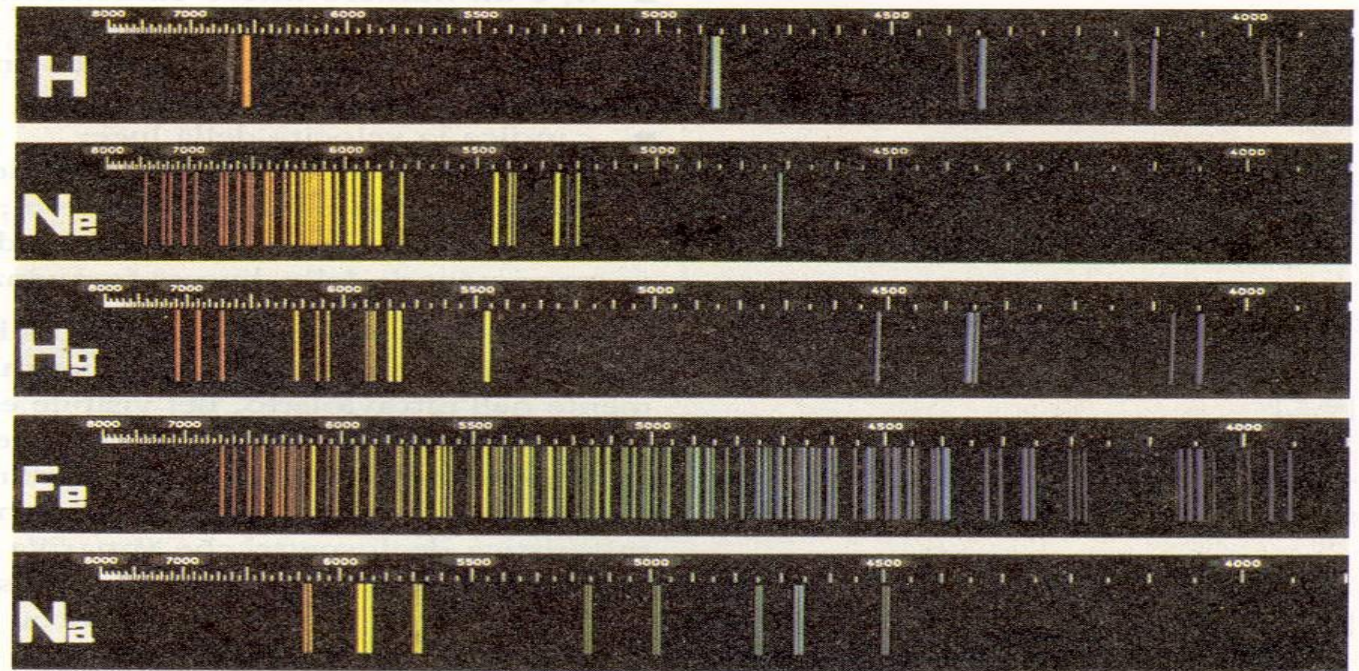
Ipotesi di Planck (1900): per ogni data frequenza, il sistema materiale può scambiare con la radiazione **multipli interi** di un quanto fondamentale.

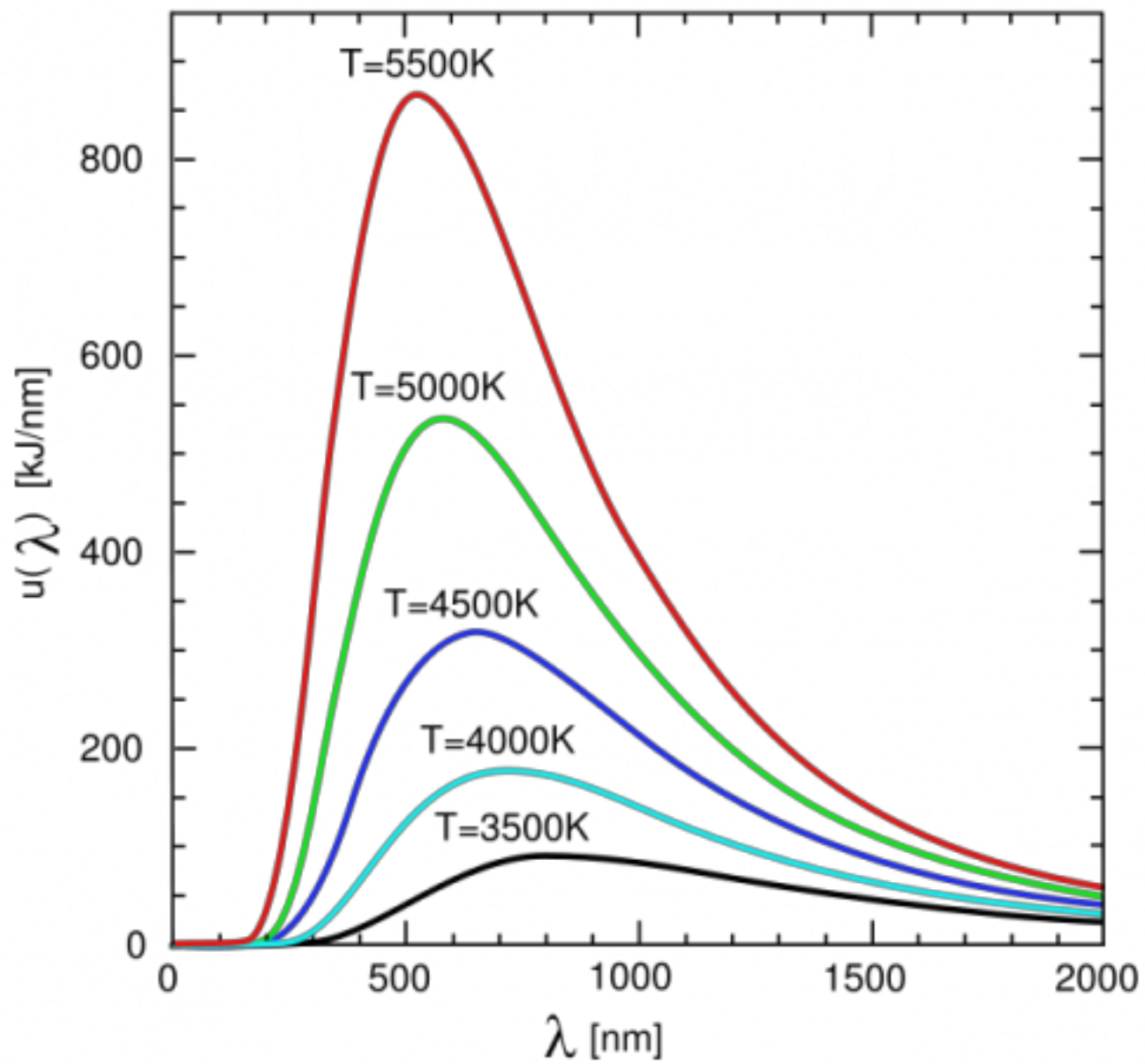
$$\Delta E = h\nu$$

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

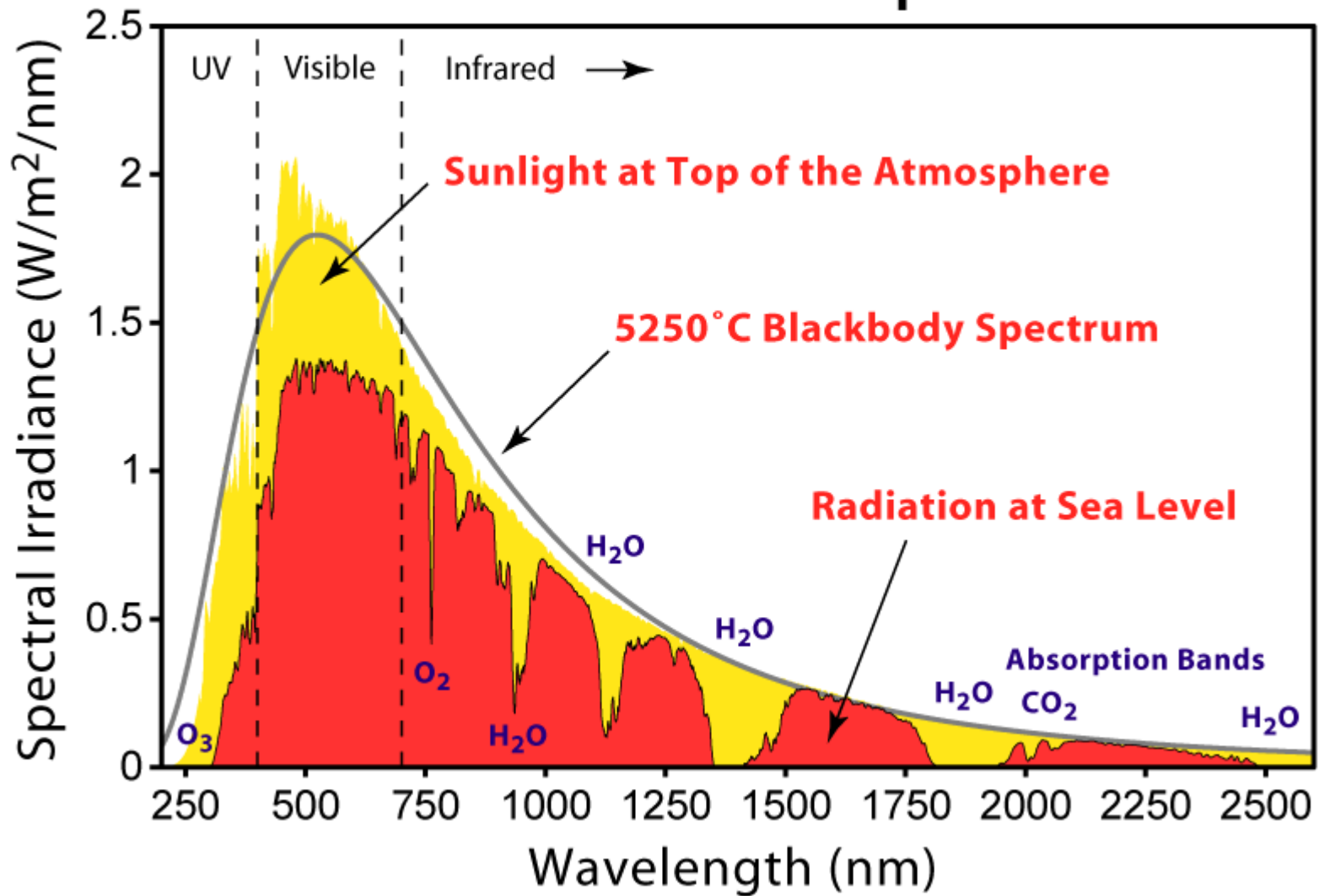


Spettri discreti e continui





Solar Radiation Spectrum



Black Body and Line Spectra

Black Body



Li

Na

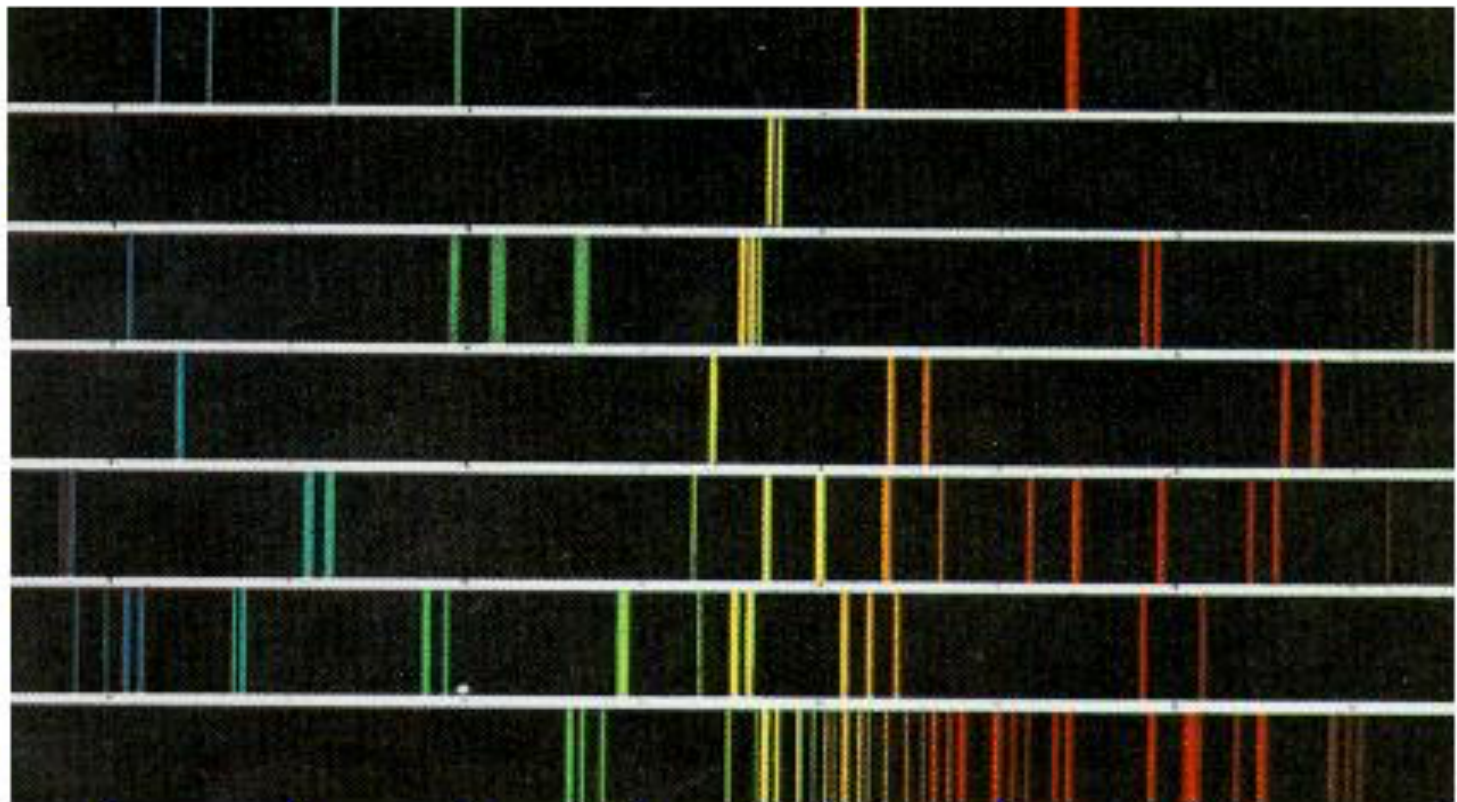
K

Rb

Cs

Hg

Ne



400

500

600

700

nanometers

Fotodiodi

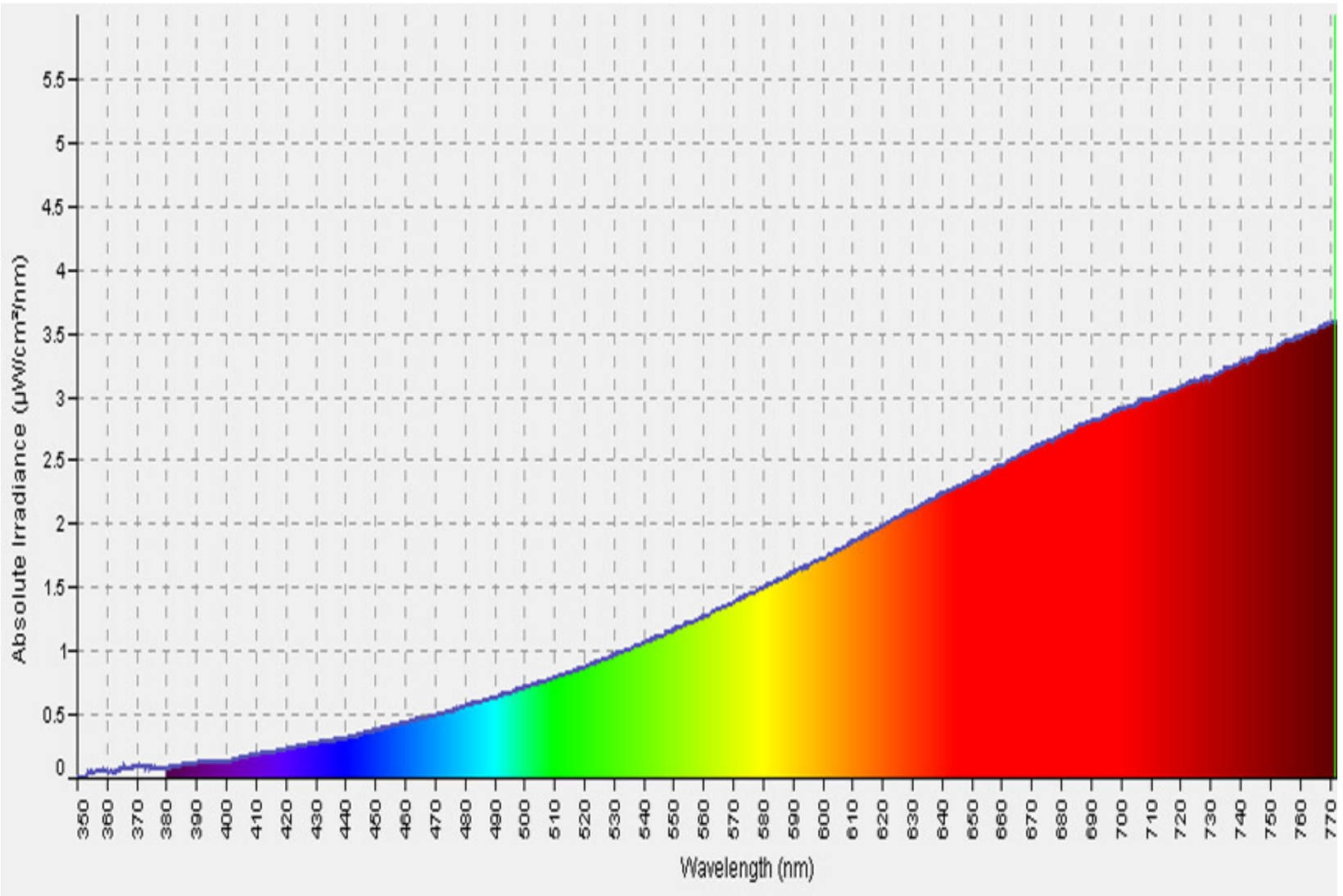
Type No.	Active Area		Responsivity nA Lux-1		Dark Current nA		NEP $\text{WHz}^{-1/2}$ $\lambda = 550 \text{ nm}$ Typ.	Capacitance PF Typ.		Shunt Resistance Megohms		Spectral Curve	Risetime ns $\lambda = 630 \text{ nm}$ Ri= 50Ω Typ.	Package
	mm ²	mm	Typ.	Min.	Max.	Typ.		Vr=0V Max.	Vr=12V Max.	Min.	Typ.			
OSD1-E	1	1.13 dia	1.5	2	2	0.5	1.510e-14	30	6	100	1000	1	7	1
OSD3-E	3	2.16 x 1.4	4	5	5	1	1.810e-14	80	20	60	700	1	9	1
OSD5-E	5	2.52 dia	6	7.5	10	2	1.910e-14	130	35	40	600	1	9	3
OSD7.5-E	7.5	2.75 x 2.75	8	11	10	2	2.710e-14	150	40	30	300	1	10	3
OSD15-E	15	3.8 x 3.8	16	22	10	3	5.210e-14	390	80	5	80	1	12	3
OSD50-E	50	7.98 dia	22	30	40	5	9.310e-14	1300	270	1.5	25	2	26	9
OSD60-E	62	7.9 x 7.9	26	35	50	9	1.310e-13	1800	310	1	12	2	30	9
OSD100-E	100	11.3 dia	45	60	100	20	1.210e-13	2500	520	1	15	2	45	13 *

Notes: * BNC Package also available.

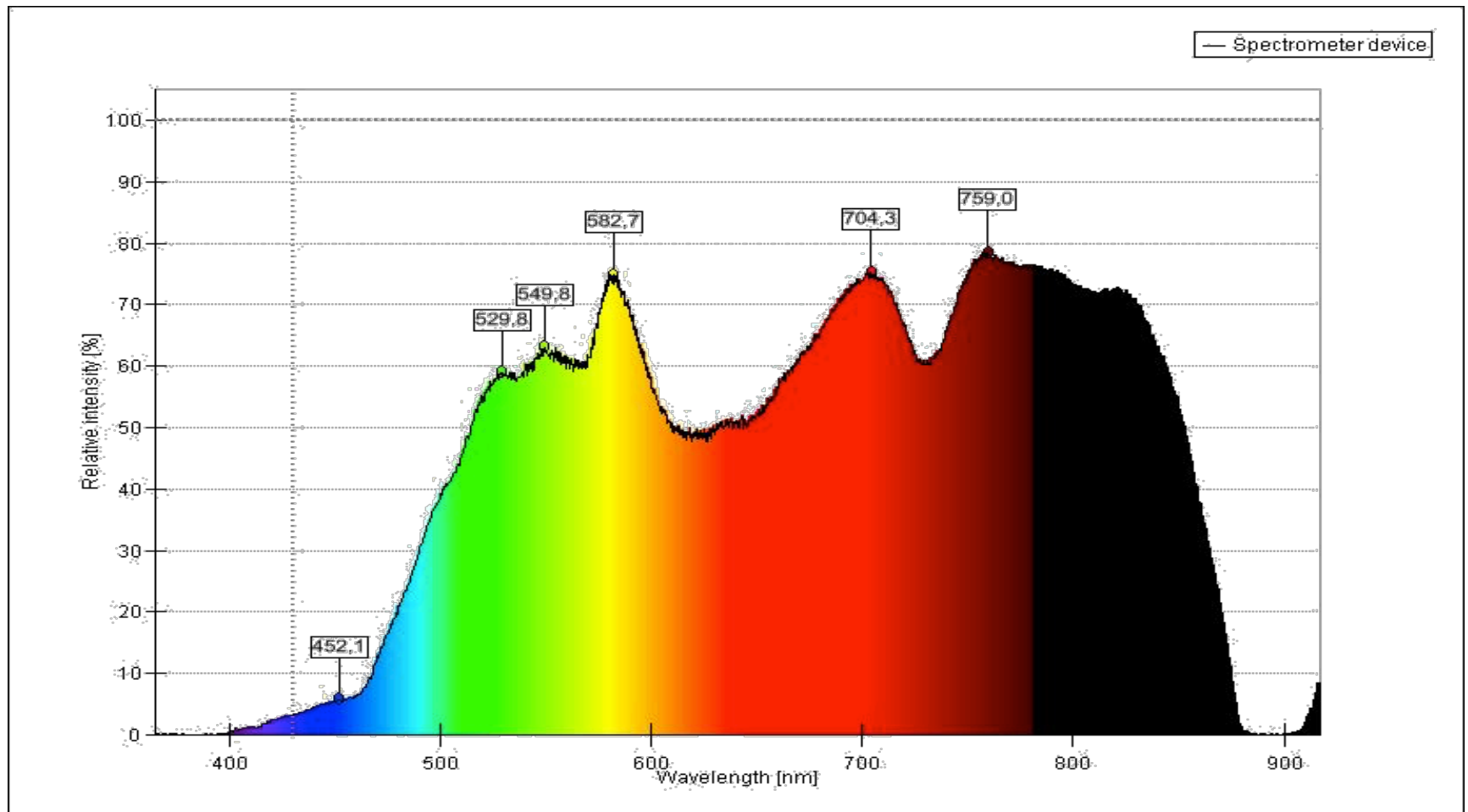
In addition to the Series E listed above, Centronic can provide any other detector in this catalogue with optical filters.
Contact Sales Department for more information.

Unit Conversion Table for Illuminance

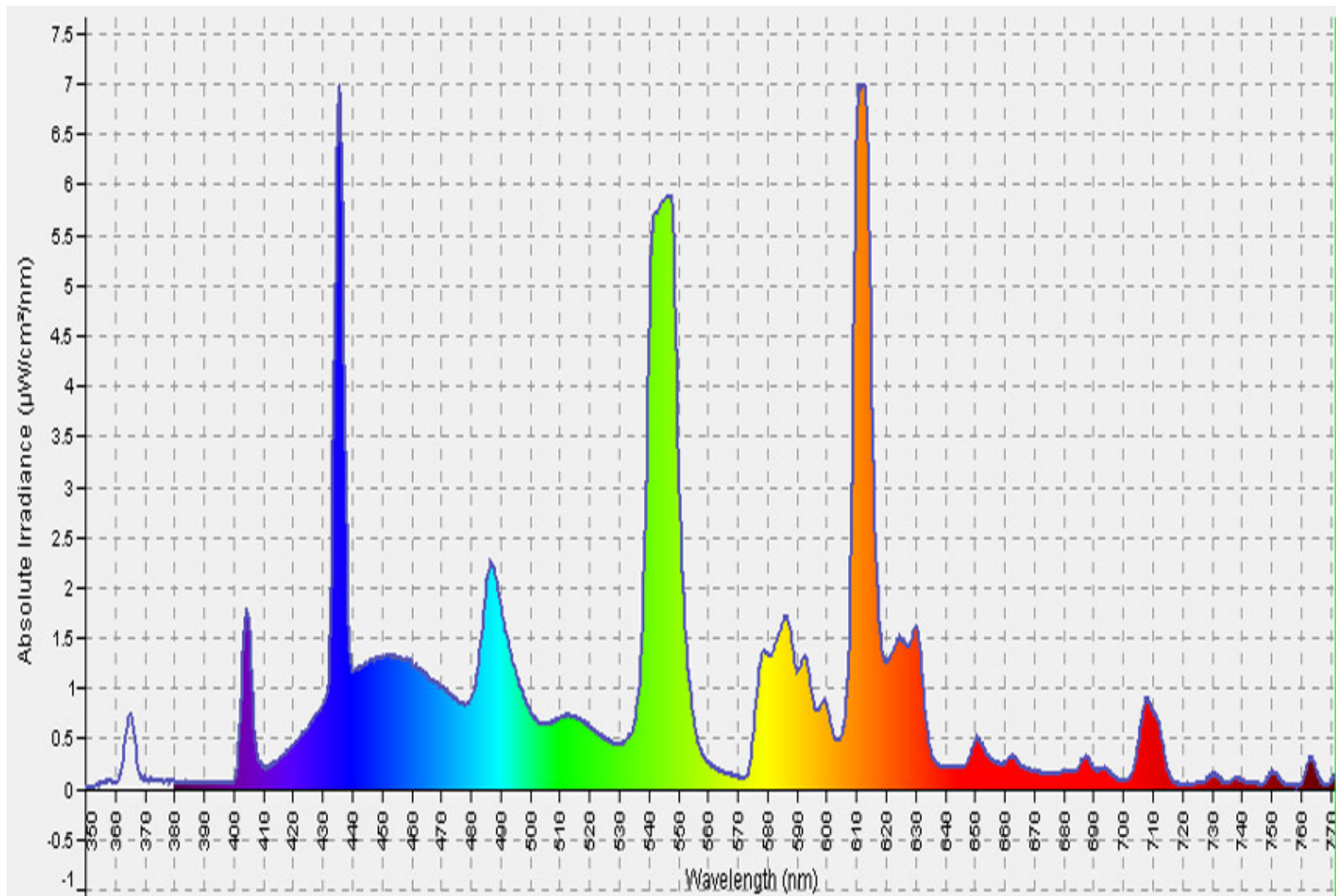
Curva Spettrale di una Lampada a incandescenza



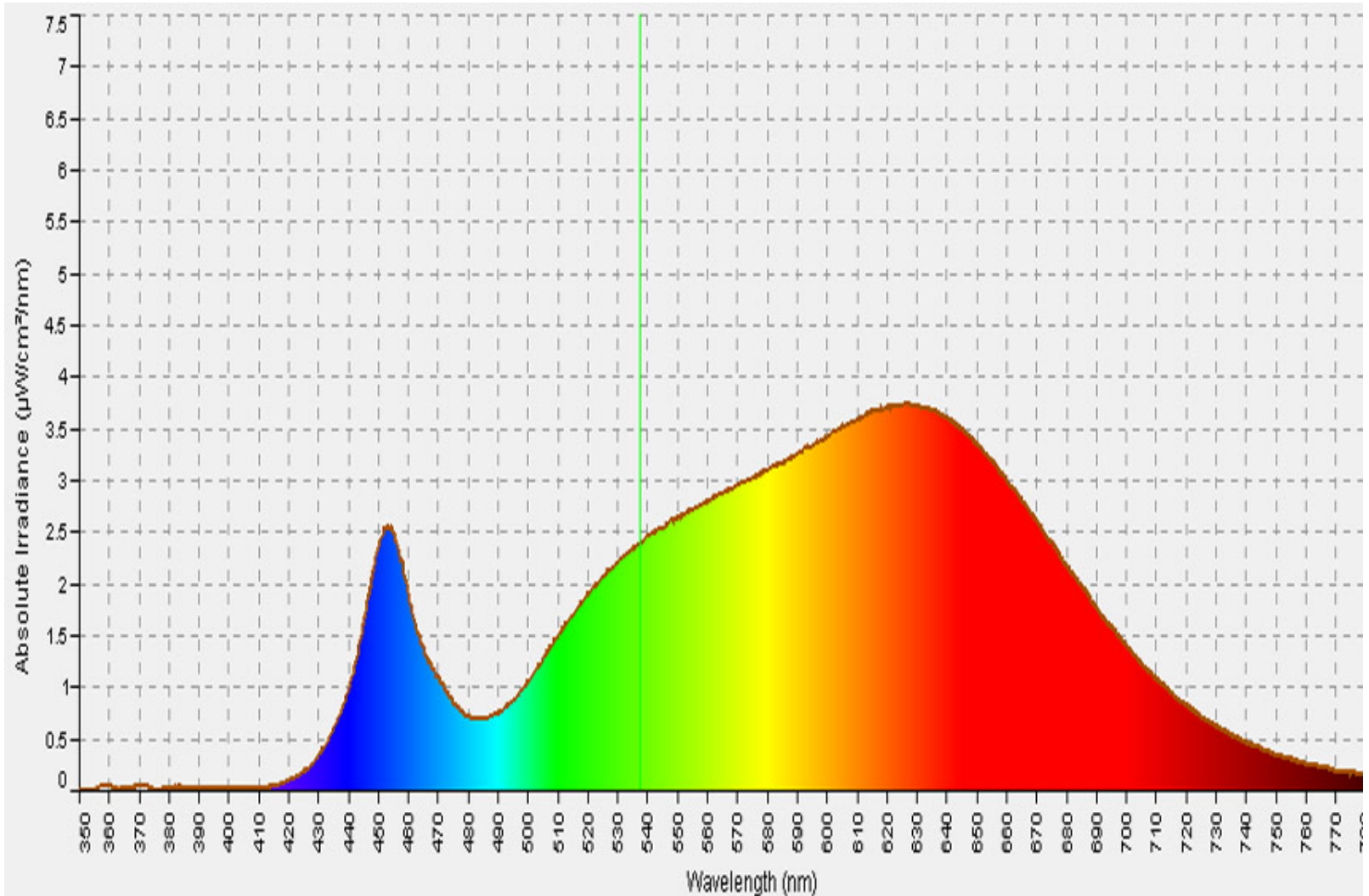
Curva Spettrale di una Lampada Alogena



Curva Spettrale di una Lampada Compatta

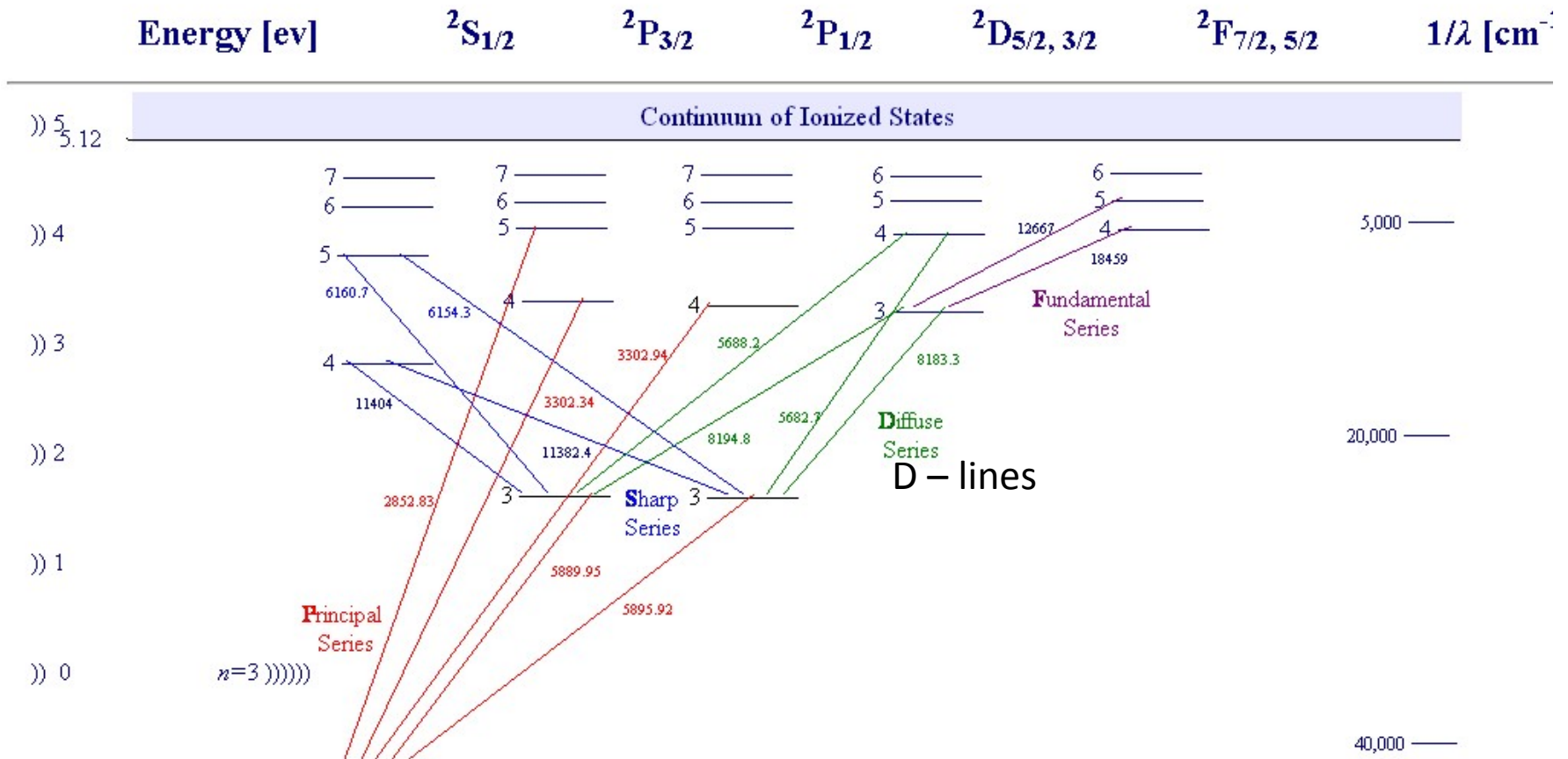


Curva Spettrale di una Lampada a LED

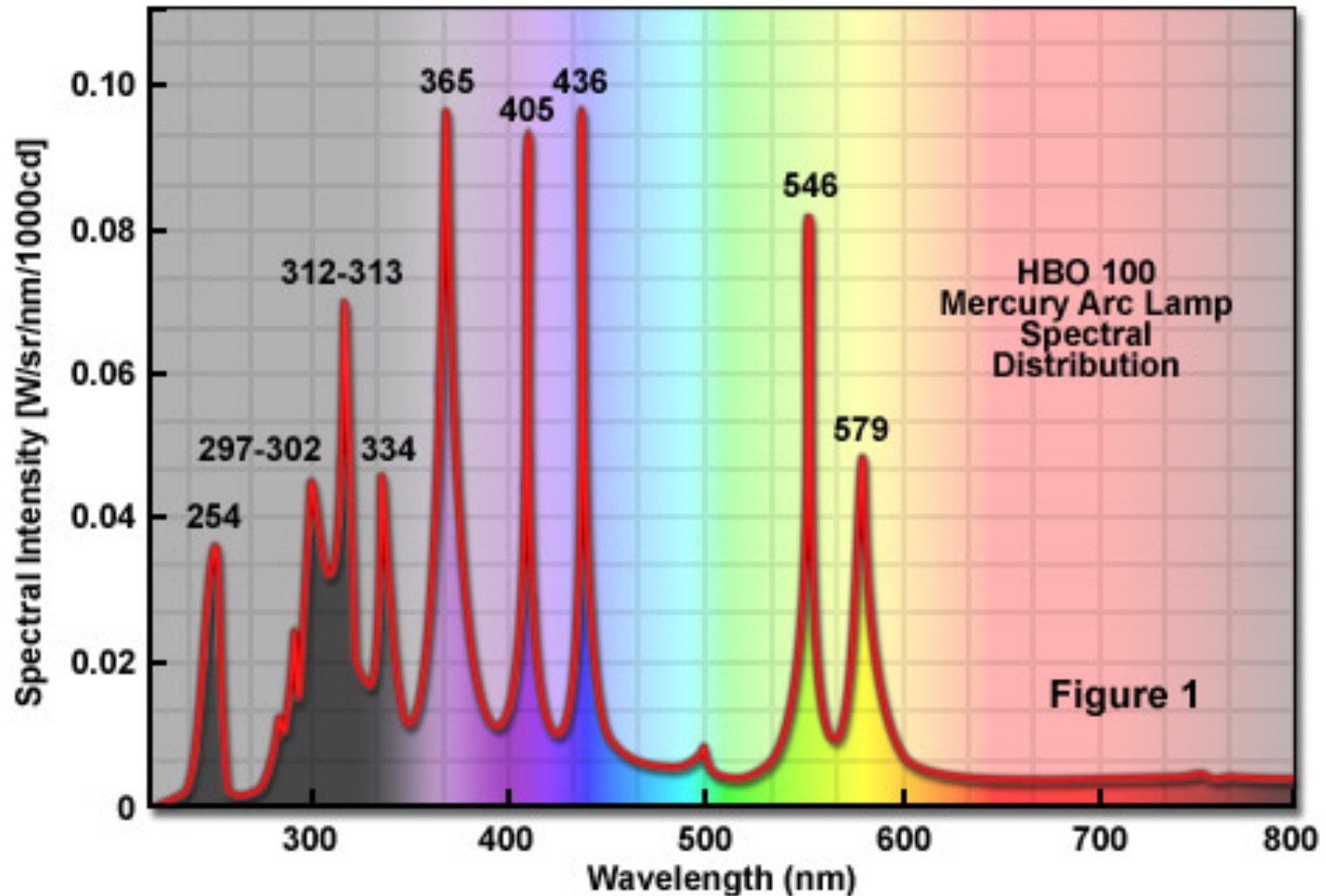


Spettro del Sodio

(Transition λ s are given in Å. Wave numbers are given in cm^{-1} for recombination photons.)



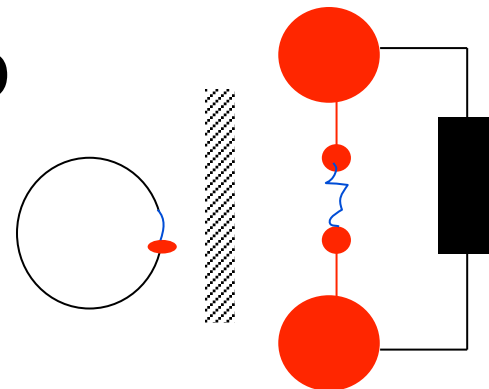
Linee Spettrali del Mercurio



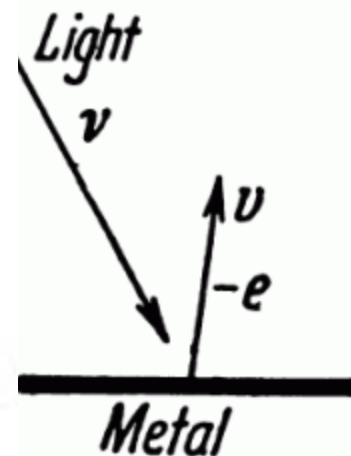
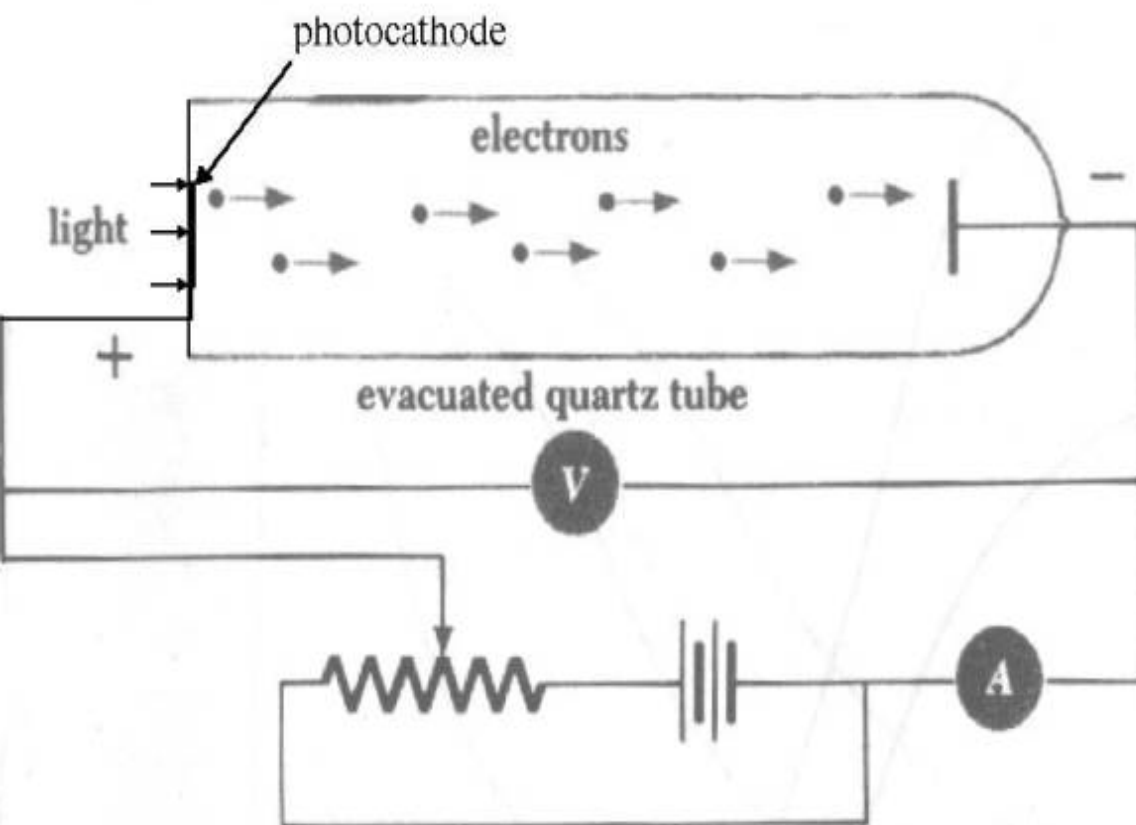


L'effetto Fotoelettrico

Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

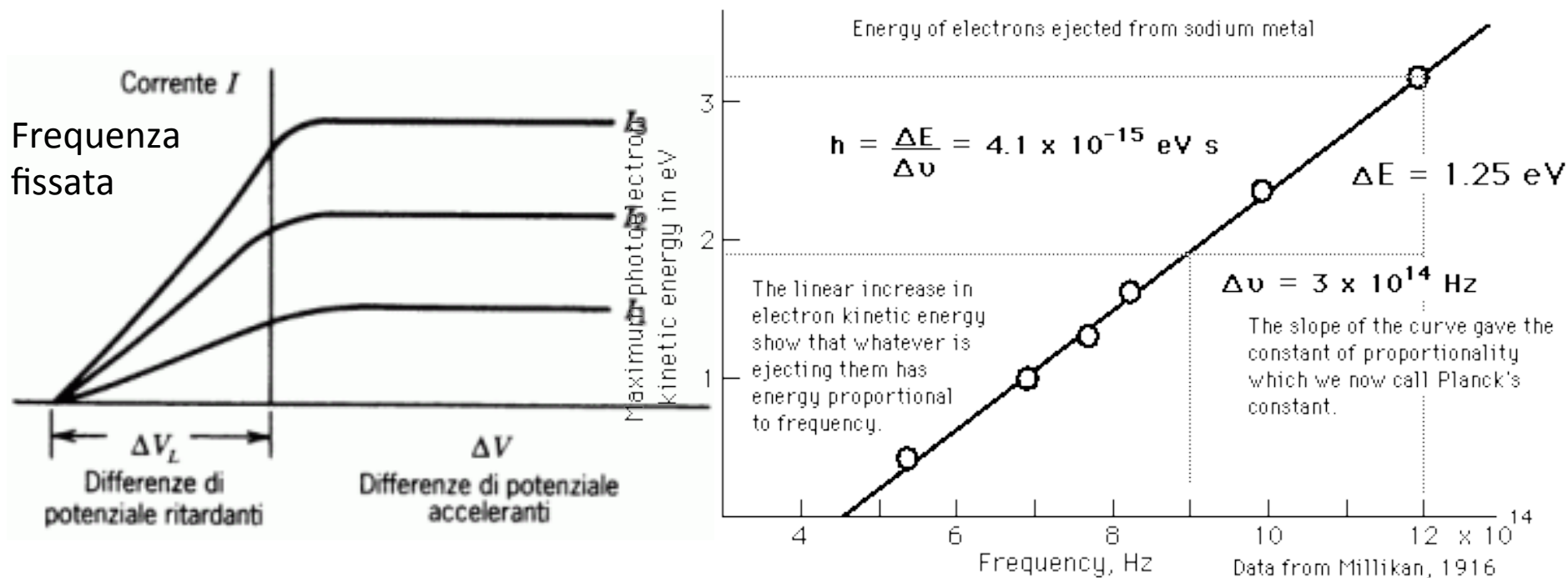


Hertz, 1887



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 ν_0 .

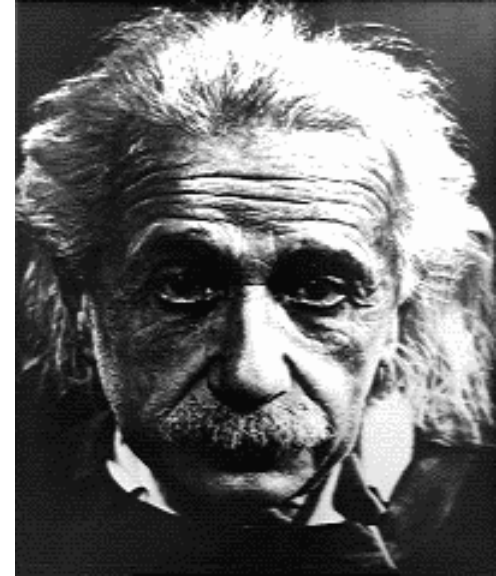
Se la luce ha una frequenza minore di ν_0 non è in grado di estrarre i fotoelettroni, qualunque sia l'intensità;

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 .

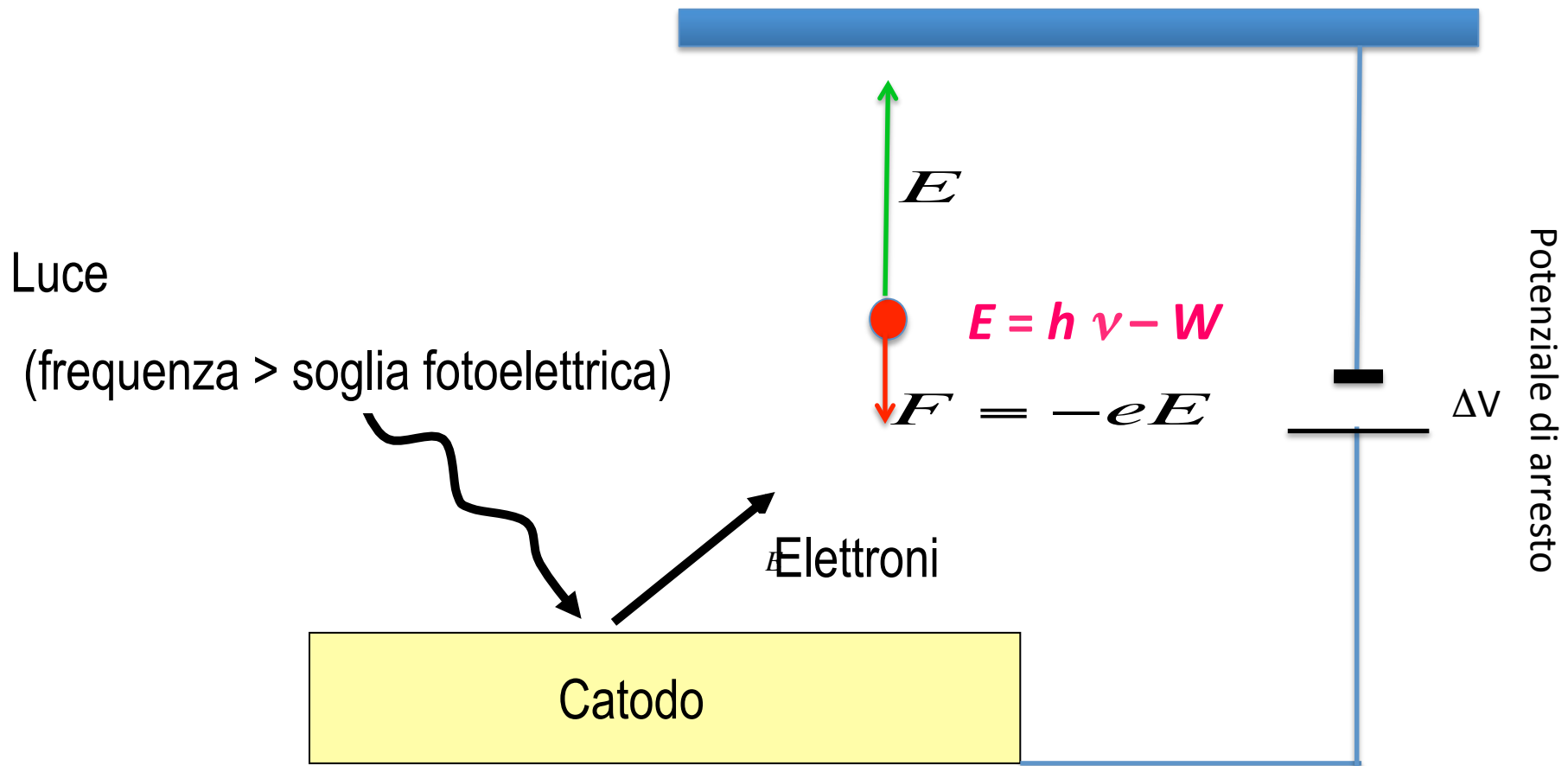


$$E = hf - W$$

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.

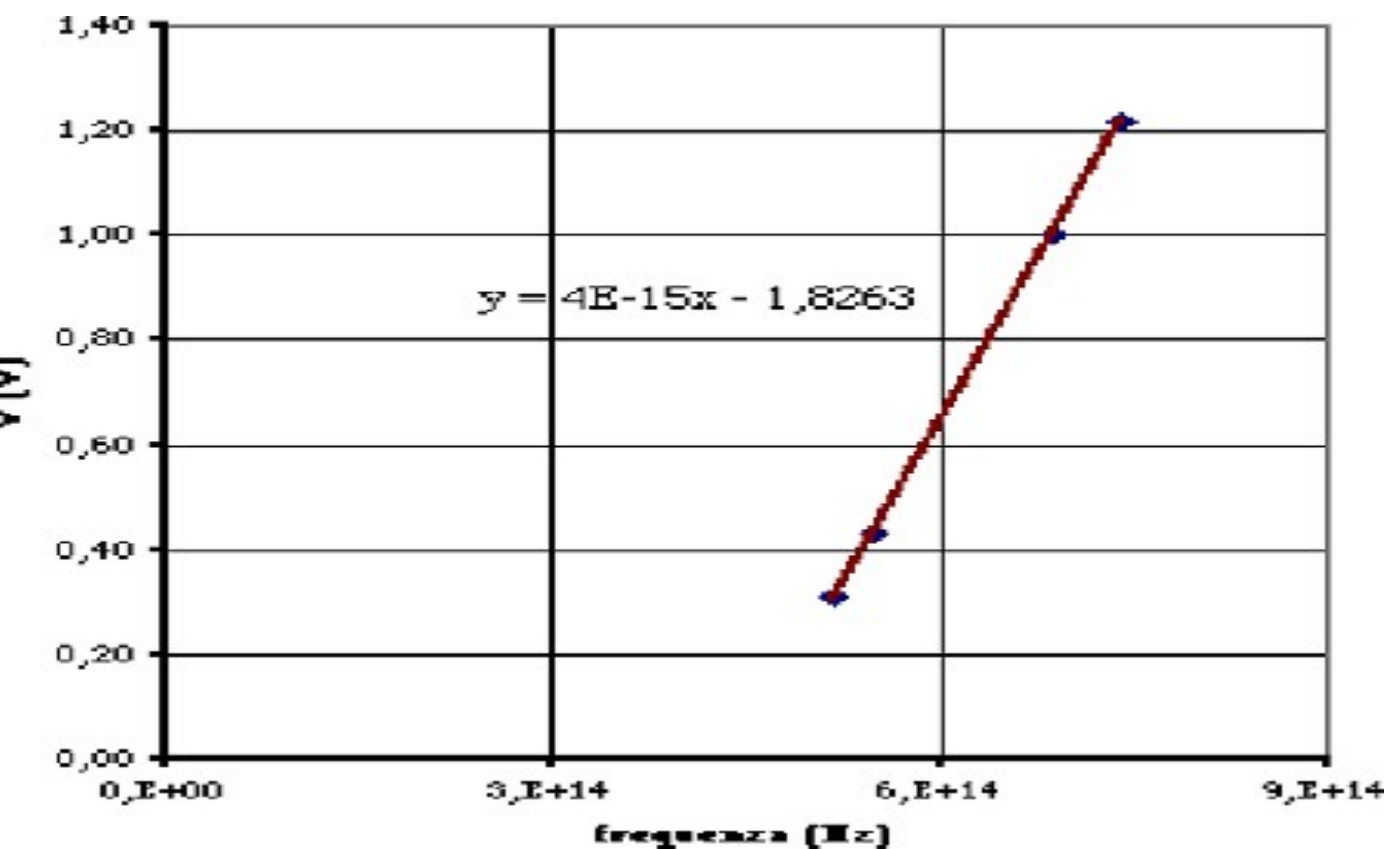
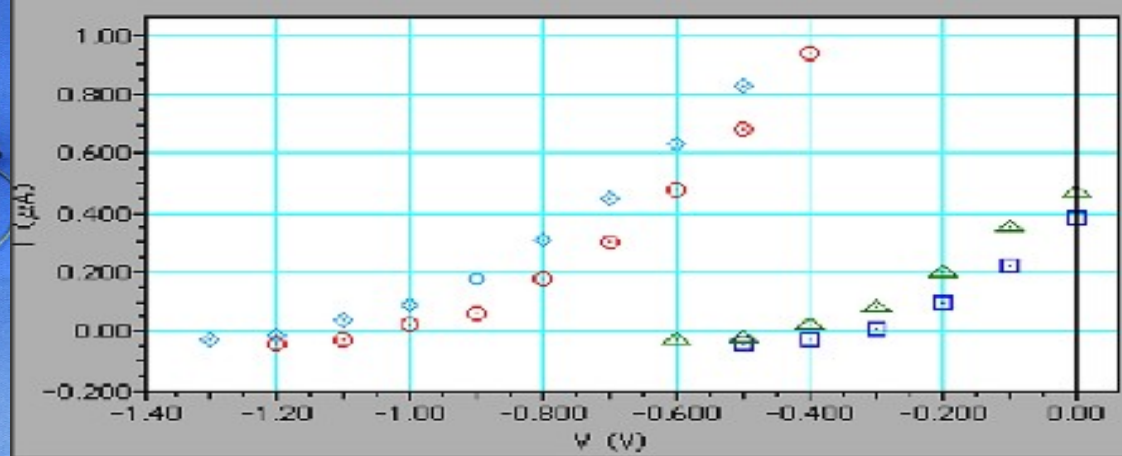
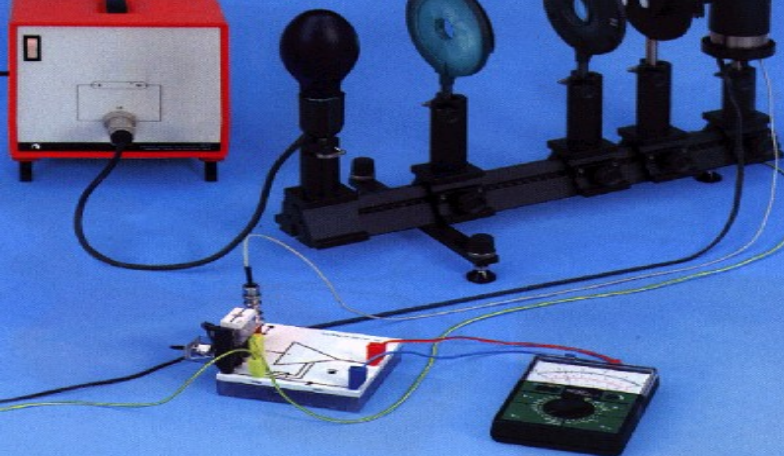
Questo è completamente indipendente dall'intensità della luce stessa, che è invece proporzionale al numero di quanti che attraversano una superficie unitaria nell'unità di tempo.

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

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

Einstein (1905)

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

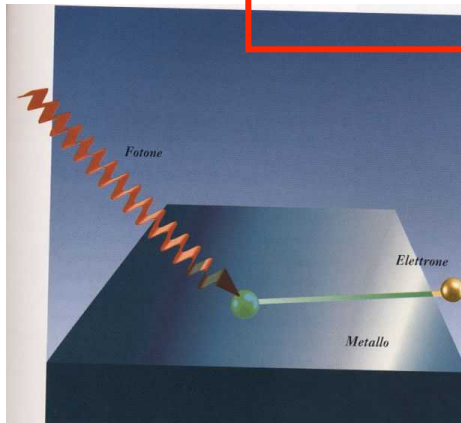
Relazioni
Planck - Einstein

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

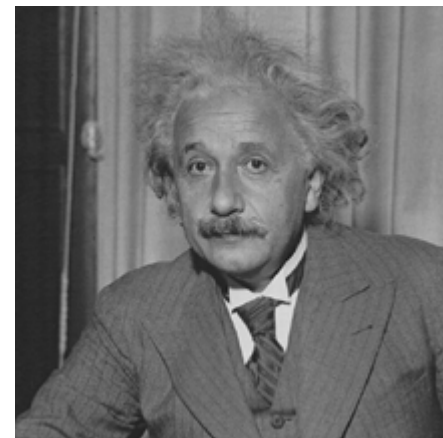
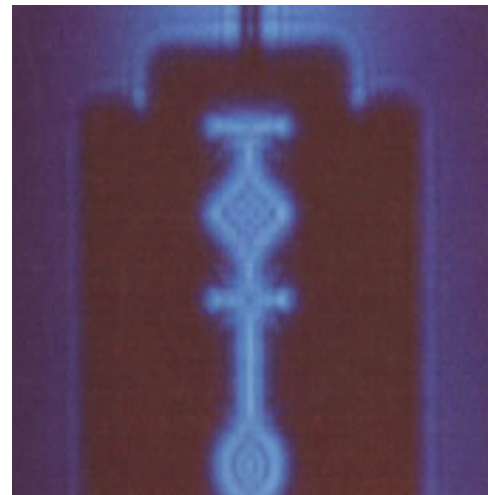
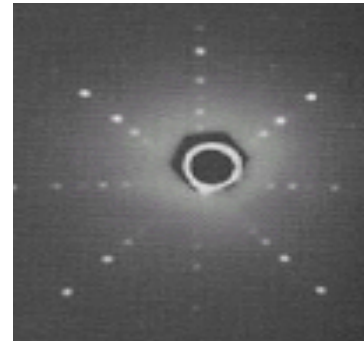
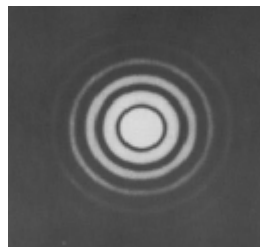
$$m_{\text{fotone}} = 0$$



James Clerk Maxwell
1831 - 1879



... e la
DIFFRAZIONE !?!



Il nuovo concetto

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

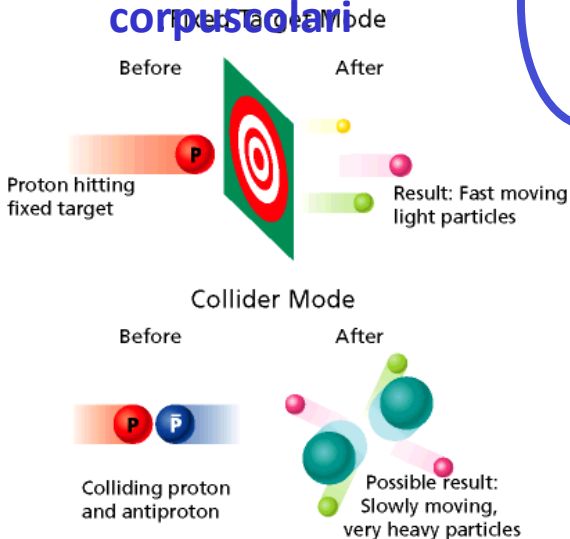
$$h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$$

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

determina la *granularità intrinseca* della natura,

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

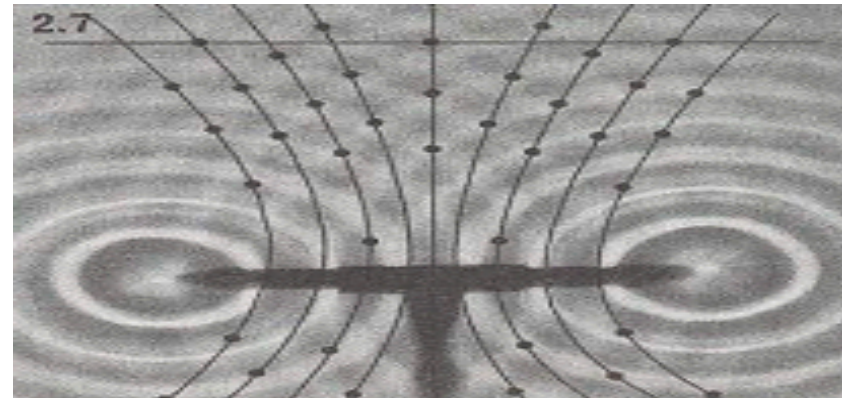
**Grandezze
corporeali**



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

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

**Grandezze
“ondulatorie”**



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

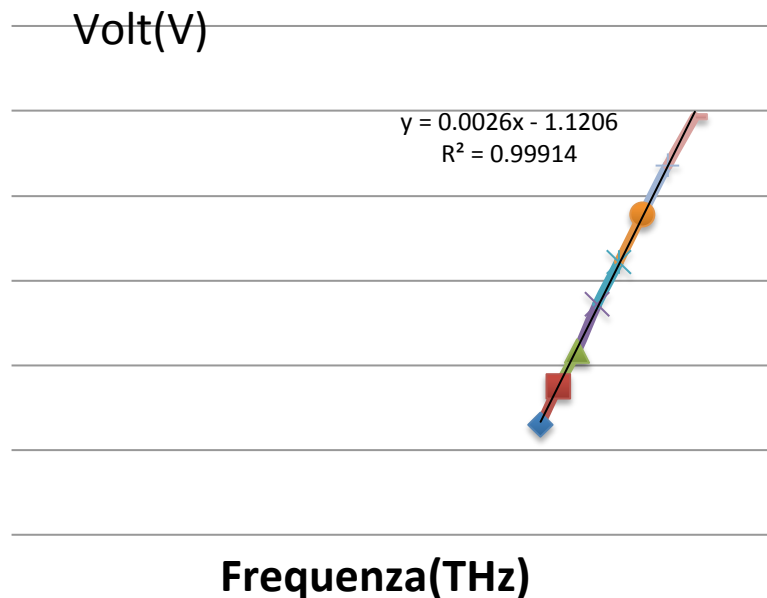
Velocità della luce
Cost. Struttura Fine
Massa di Planck

Procedura sperimentale per la misura della costante di Planck

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 rappresenta di 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

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

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

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

