

Fisica Moderna: micro e macro-cosmo tra XIX e XX secolo

L. Martina
25/01/2017

*Dipartimento di Matematica e Fisica «Ennio De Giorgi»
Università del Salento
Sezione INFN - Lecce*

Newton vs Maxwell

Materia - Corpuscoli

1. Ogni corpo preserva lo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, a meno che non intervengano **FORZE** (principio d'inerzia)

2. La variazione del moto (accelerazione) è proporzionale alla forza impressa

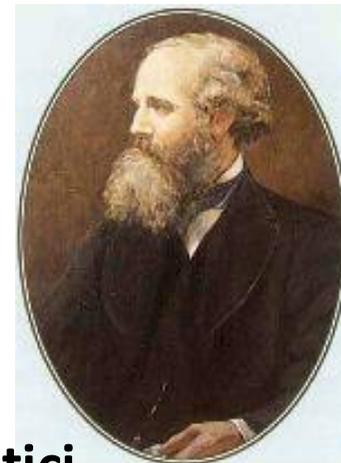
$$m \vec{a} = \vec{F}$$

3. Le forze che due particelle esercitano reciprocamente l'una sull'altra sono

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

4. Due masse esercitano reciprocamente la forza

$$\vec{F}_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

Campi Elettromagnetici

1. Legge di Gauss (c. elettrico)

$$\Phi_{S_{chiusa}}(\vec{E}) = \frac{Q_{Tot. in S_{chiusa}}}{\epsilon_0}$$

2. Legge di Gauss (c. magnetico)

$$\Phi_{S_{chiusa}}(\vec{B}) = 0$$

3. Legge dell'Induzione EM

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

4. Legge di Ampère - Maxwell

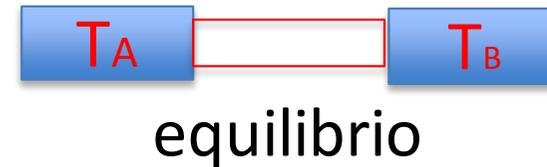
$$\oint_{\gamma_2} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{S_{\gamma_2}} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_{S_{\gamma_2}}(\vec{E})$$

Termodinamica - 1

- Lavoro, Calore, Temperatura

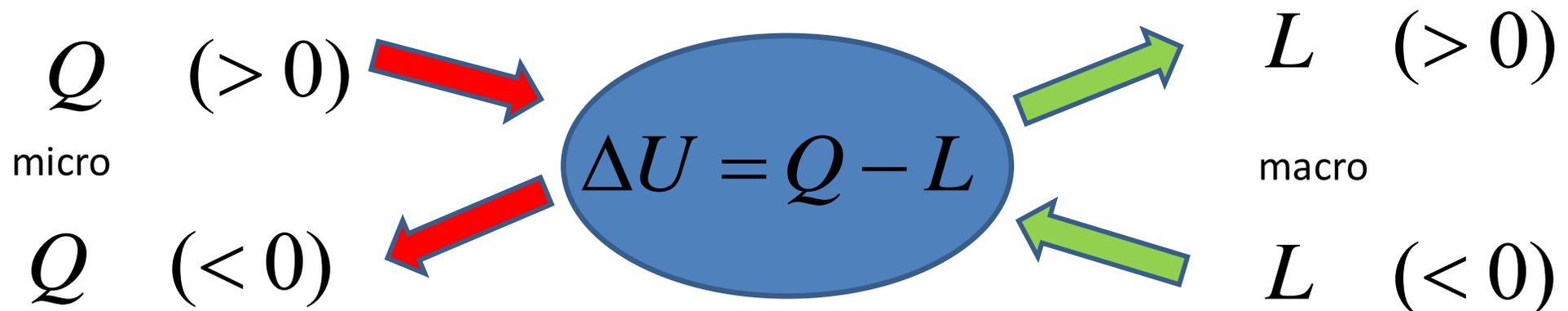


$$T_A > T_B$$



$$T_A = T_B$$

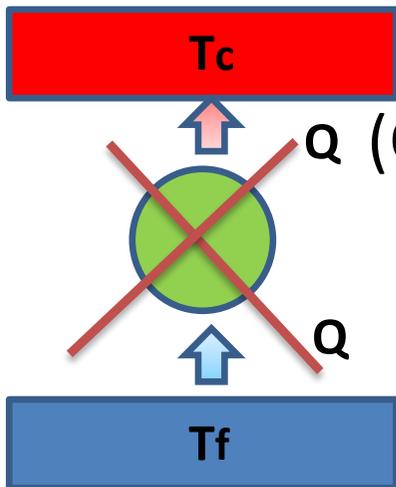
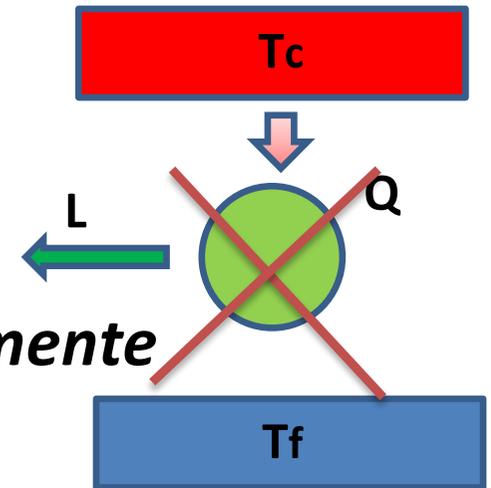
- **Principio "0"**: *se i corpi A e B sono entrambi in equilibrio termico con un terzo corpo C, allora lo sono anche fra loro.*
- **Primo principio** ([conservazione dell'energia](#)): *la variazione di energia interna di un sistema è la somma algebrica del **calore** e del **lavoro** scambiati con l'ambiente*



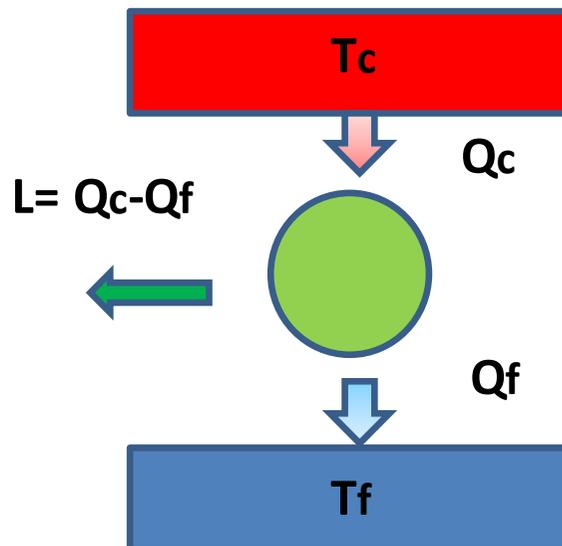
Termodinamica - 2

- **Secondo Principio:** *in un ciclo termodinamico*

(Kelvin - Planck) *e' impossibile convertire **completamente** in **lavoro** il **calore** assorbito dal serbatoio "caldo"*



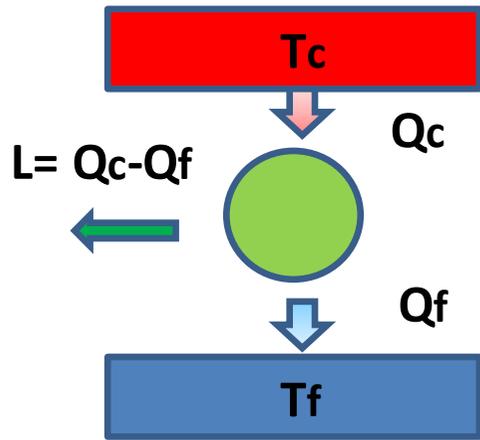
(Clausius) *e' impossibile far passare **spontaneamente** il **calore** dal serbatoio "freddo" a quello "caldo"*



$$= \frac{L}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

Rendimento di una macchina termica

ENTROPIA



Ciclo di Carnot Tr. reversibile

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} \leq \eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$$\frac{-Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \begin{cases} < 0 \\ = 0 \\ \text{Tr. reversibile} \end{cases}$$

$$\oint_{\text{ciclo}} \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} \leq \int_{A_{\text{reversibile}}}^B \frac{\delta Q}{T} = S(B) - S(A)$$

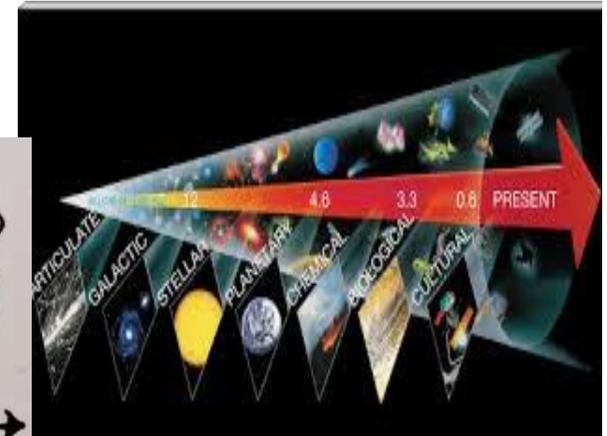
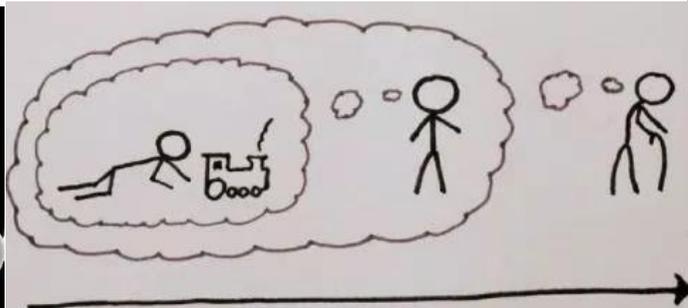
ENTROPIA

$$S(B) \geq S(A)$$

nei sistemi isolati l'**entropia**

è una funzione **non decrescente** delle variabili di stato

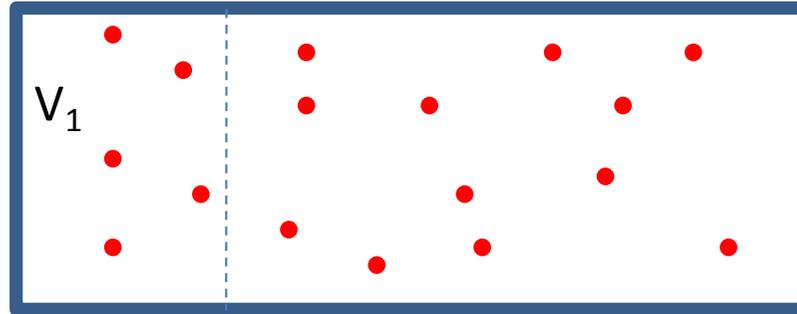
Freccia del TEMPO



Termodinamica e Statistica



Gas ideale costituito da N molecole all'equilibrio termico



Probabilità per la singola molecola di trovarsi in V_1

$$p = \frac{V_1}{V_0}, \quad q = \frac{V_0 - V_1}{V_0}$$

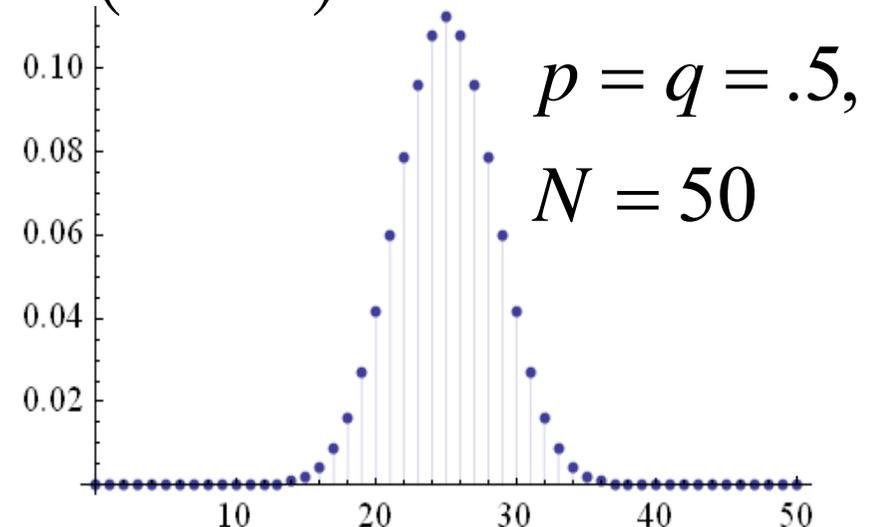
Probabilità per n molecole di trovarsi in V_1 e $N-n$ all'esterno

$$P(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n q^{N-n}$$

$$S = k \ln P$$

Principio di Boltzmann

Il sistema **tende** al macrostato di massima entropia, cioè a quello che possiede il numero massimo di microstati



L'ipotesi Atomistica

1. [D. Bernoulli](#) (1738) teoria cinetica dei gas,
2. [J. Dalton](#) (*New System of Chemical Philosophy*, 1808), legge delle proporzioni multiple, principi elementari, atomi della stessa specie (molecole),
3. [J.-L. Gay-Lussac](#) (1809), legge sui volumi di combinazione dei gas,
4. [A. Avogadro](#) (1811) :
 1. *I gas sono formati da molecole integranti, costituite a loro volta da una, due o più molecole elementari: gli atomi*
 2. *a temperatura, volume e pressione uguali, gas diversi contengono lo stesso **numero di molecole***
5. [Congr. dei Chimici, Karlsruhe \(1860\)](#) : definizione di molecola e di atomo (disaccordo)
6. [J.C. Maxwell](#): *“Benche’ nel corso dei tempi si siano verificate catastrofi ... le molecole...continuano ad esistere oggi esattamente come vennero create: perfette in numero, misura e peso “ (1873)*
7. [W. Thomson](#): *“ E’ un fatto assodato che un gas consista di molecole in movimento Il diametro di una molecola di gas non puo’ essere inferiore a 2×10^{-9} cm .” (1870)*
8. [L. Boltzmann](#): *“...dare una dimostrazione del tutto generale della II legge della teoria del calore, come scoprire il teorema meccanico ad essa corrispondente.” (1866)*

“I problemi della teoria meccanica del calore sono problemi di teoria della probabilita’ ”
(1871)

Anti-atomisti

M. Planck : “ *La piena validita' del Il principio ... e' incompatibile con l'ipotesi di atomi finiti*” (1883)

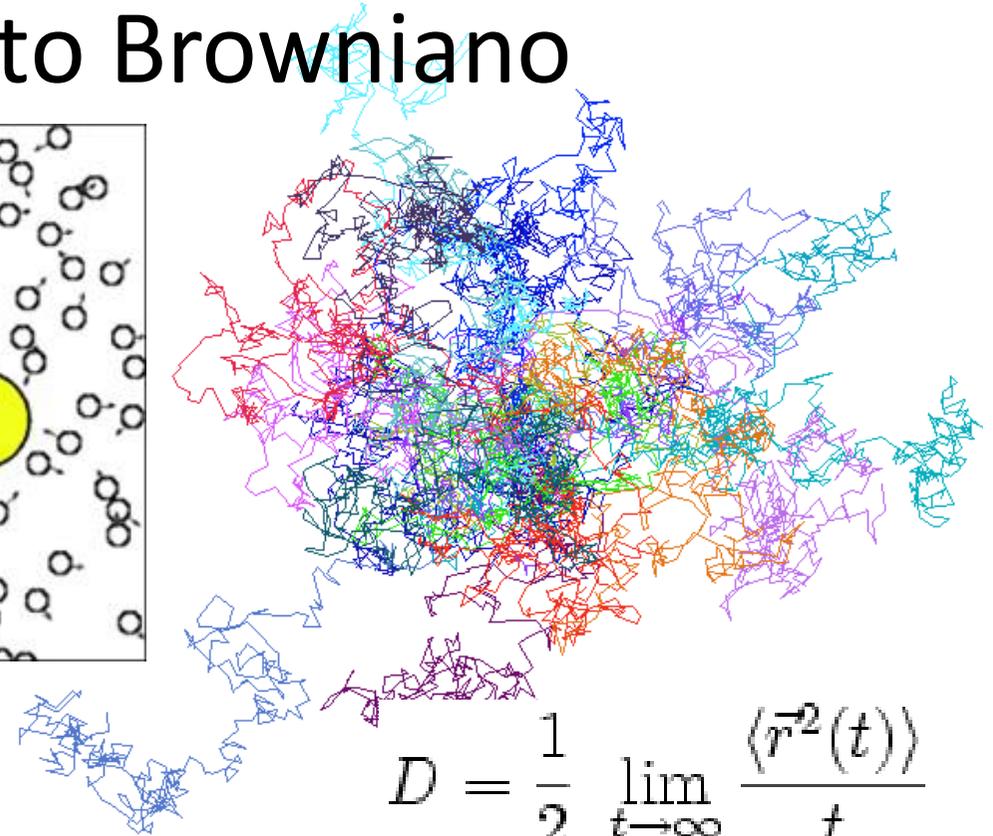
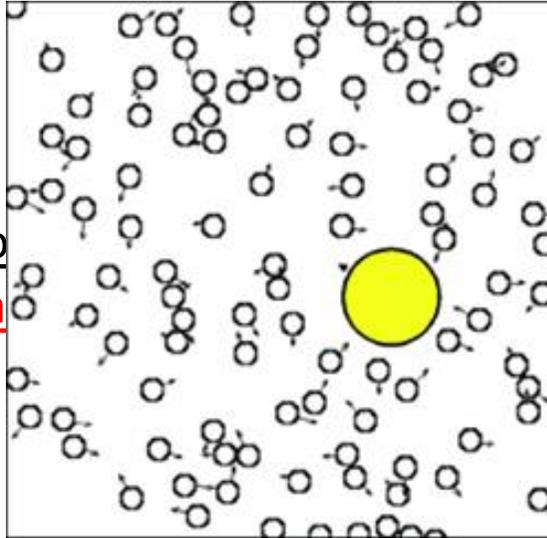
W. Ostwald: “ *L'asserzione che tutti i fenomeni ... sono riducibili a fenomeni meccanici ...e' sbagliata. Tutte le equazioni della meccanica ammettono l'inversione temporale ... Quindi ... un albero potrebbe diventare di nuovo germoglio e seme, una farfalla bruco e un vecchio bambino.*”

E. Mach : “ *Non e' confacente alla fisica considerare mutevoli strumenti, quali molecole e atomi, alla stregua di realta' sottostanti ai fenomeni.*” (1895)

Molecole e Moto Browniano

In questo articolo dovremo mostrare che ... particelle di dimensioni visibili al microscopio sospese in un fluido, **in seguito a moto molecolare del calore** possono descrivere moti osservabili.

A. Einstein, *Ann. d. Phys.*, 17 (1905) 549

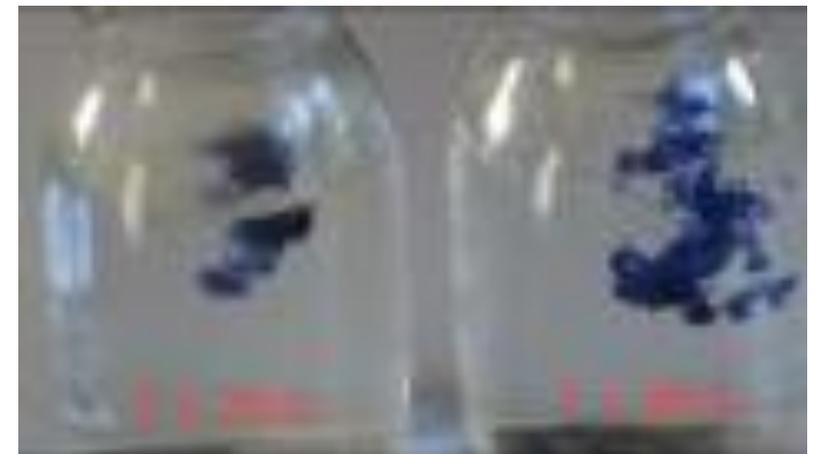


$$D = \frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle r^2(t) \rangle}{t}$$

Coefficiente di diffusione

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\eta d}$$

N_A = Numero di Avogadro
 d = raggio della particella
 η = coeff. di viscosita'

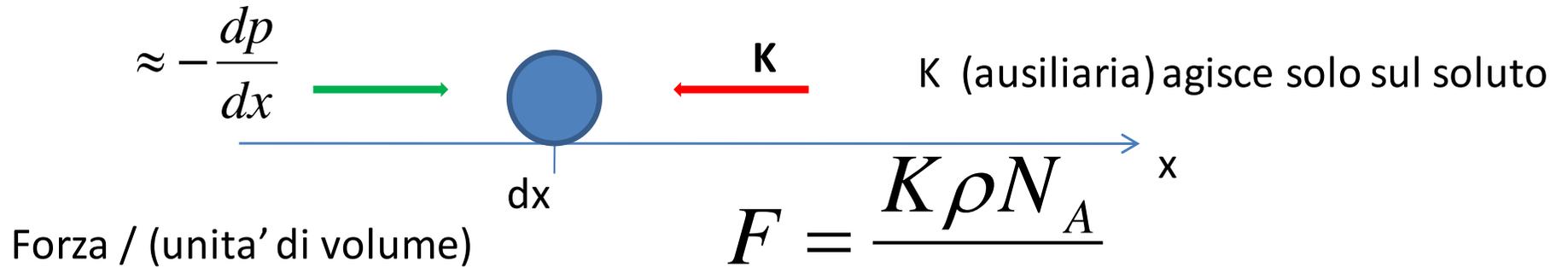


Ipotesi di Einstein

1. Le particelle sospese sono sfere e sono rarefatte nel solvente
2. Per le particelle in sospensione all'equilibrio termico valgono le leggi per di 't Hoff delle soluzioni (gas):
$$p V = n R T$$
3. Le particelle sospese sono grandi rispetto alle caratteristiche del solvente (continuo)
4. Si trascurano i moti rotatori delle sfere
5. Le particelle sospese sono soggette ad una forza di attrito di tipo viscoso dovuto al fluido con coefficiente di **viscosita' corretto** dato da

sperimentale $\rightarrow \frac{\eta^*}{\eta} = 1 + \frac{5}{2} \varphi, \quad \varphi = \frac{N_A \rho}{m} \frac{4\pi}{3} d^3$ Frazione di volume occupato dalle sfere

Derivazione di Einstein



All'equilibrio termico

$$\frac{K \rho N_A}{m} = \frac{dp}{dx} = \frac{RT}{m} \frac{d\rho}{dx}$$

Legge di Stokes
per l'attrito viscoso

$$F_{visc} = 6\pi \eta d v$$

All'equilibrio dinamico

$$F_{visc} \equiv K \Rightarrow v = \frac{K}{6\pi \eta d}$$

Flusso di sfere
nella direzione -x

$$\frac{N_A \rho}{m} v$$

Flusso di Diffusione
nella direzione +x

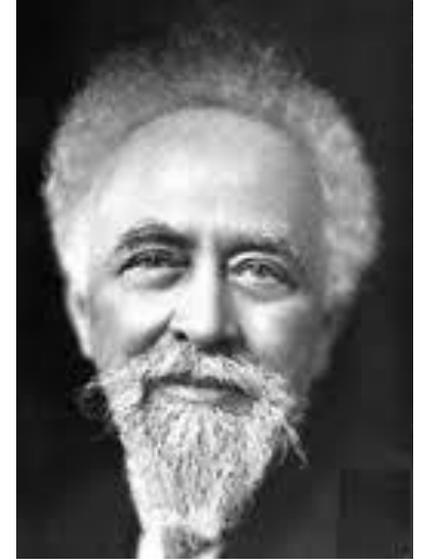
$$D \frac{N_A}{m} \frac{d\rho}{dx}$$

Coefficiente di diffusione
(sperimentale)

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi \eta d}$$

Gradiente
di concentrazione

Realtà delle molecole



J. Perrin: Nobel 1926

N_A	
68×10^{22}	per mezzo di emulsioni analoghe a gas;
62×10^{22}	“ emulsioni analoghe a liquidi;
60×10^{22}	“ fluttuazioni emulsioni concentrate;
64×10^{22}	“ moto Browniano traslazionale;
65×10^{22}	“ moto Browniano rotazionale;
75×10^{22}	“ opalescenza critica;
65×10^{22}	“ azzurro del cielo;
64×10^{22}	“ radiazione di corpo nero;
61×10^{22}	“ goccioline ionizzate secondo Millikan;
62×10^{22}	“ decadimento radioattivo

“La teoria atomica ha trionfato. Ancora poco tempo fa assai numerosi i suoi avversari, alfine conquistati, rinunciano uno dopo l'altro a sfide che furono a lungo legittime e senz'altro utili”

J. Perrin “ Les Atomes”, (Paris, 1913)

Fundamental Physical Constants

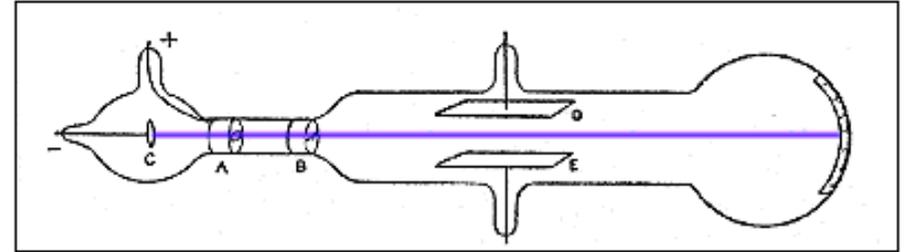
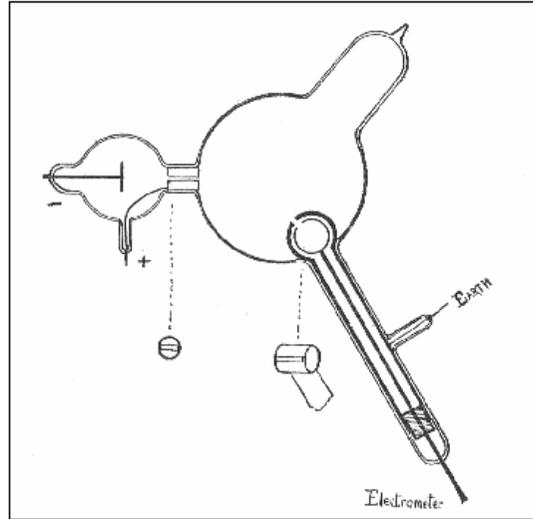
$$N_A = 6.022\,141\,79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$l_{\text{atomo}} \approx \sqrt[3]{\frac{M_{\text{atomo}}}{N_A \delta_{\text{atomo}}}} \approx 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$$



J.J. Thomson

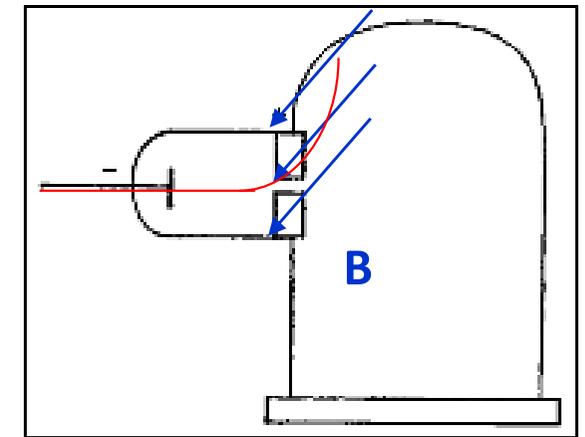
La scoperta dell'elettrone



$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$

"We have in the cathode rays matter in a new state, a state in which the subdivision of matter is carried very much further than in the ordinary gaseous state: a state in which all matter... is of one and the same kind; this matter being the substance from which all the chemical elements are built up."

(J.J. Thomson, "Cathode Rays," The London Phil. Mag. J. Science, V, Oct.1897)



$$\frac{e}{m} = -1.758\,820\,12(15) \times 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$

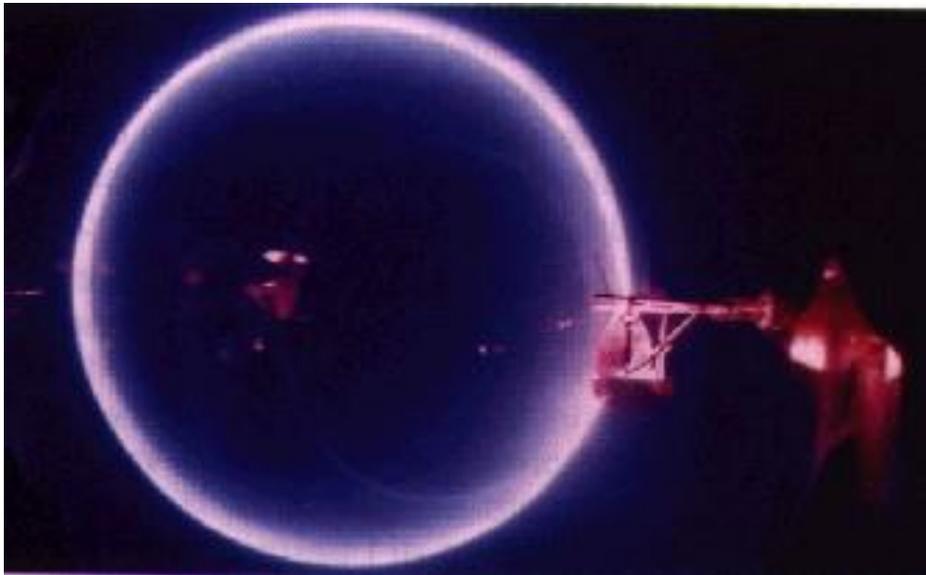
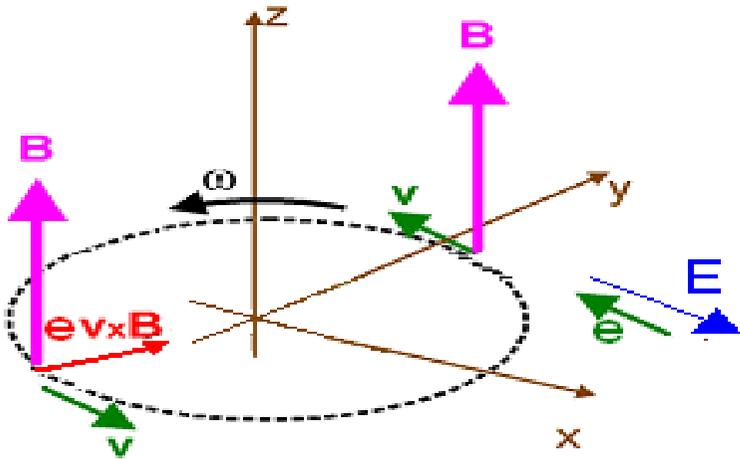
L'esperimento di Thomson

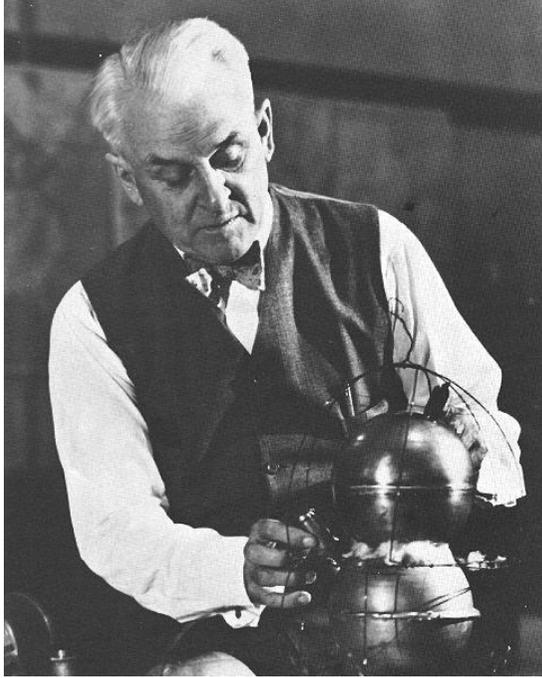
$$\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

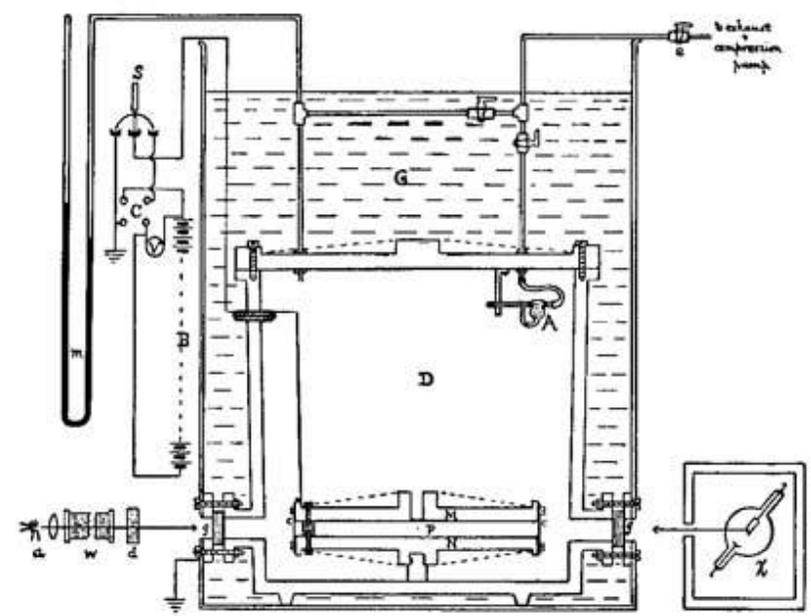
$$\frac{mv^2}{2} = eV$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$$





L'esperienza di Millikan



Nel 1909 Robert Millikan fu il primo a misurare la carica dell'elettrone, grazie l'esperimento della "goccia d'olio", ottenendo già una precisione dello 0.1%: $Q = 1.592 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

L'articolo definitivo (1913) gli valse, 10 anni più tardi, il riconoscimento del premio Nobel.

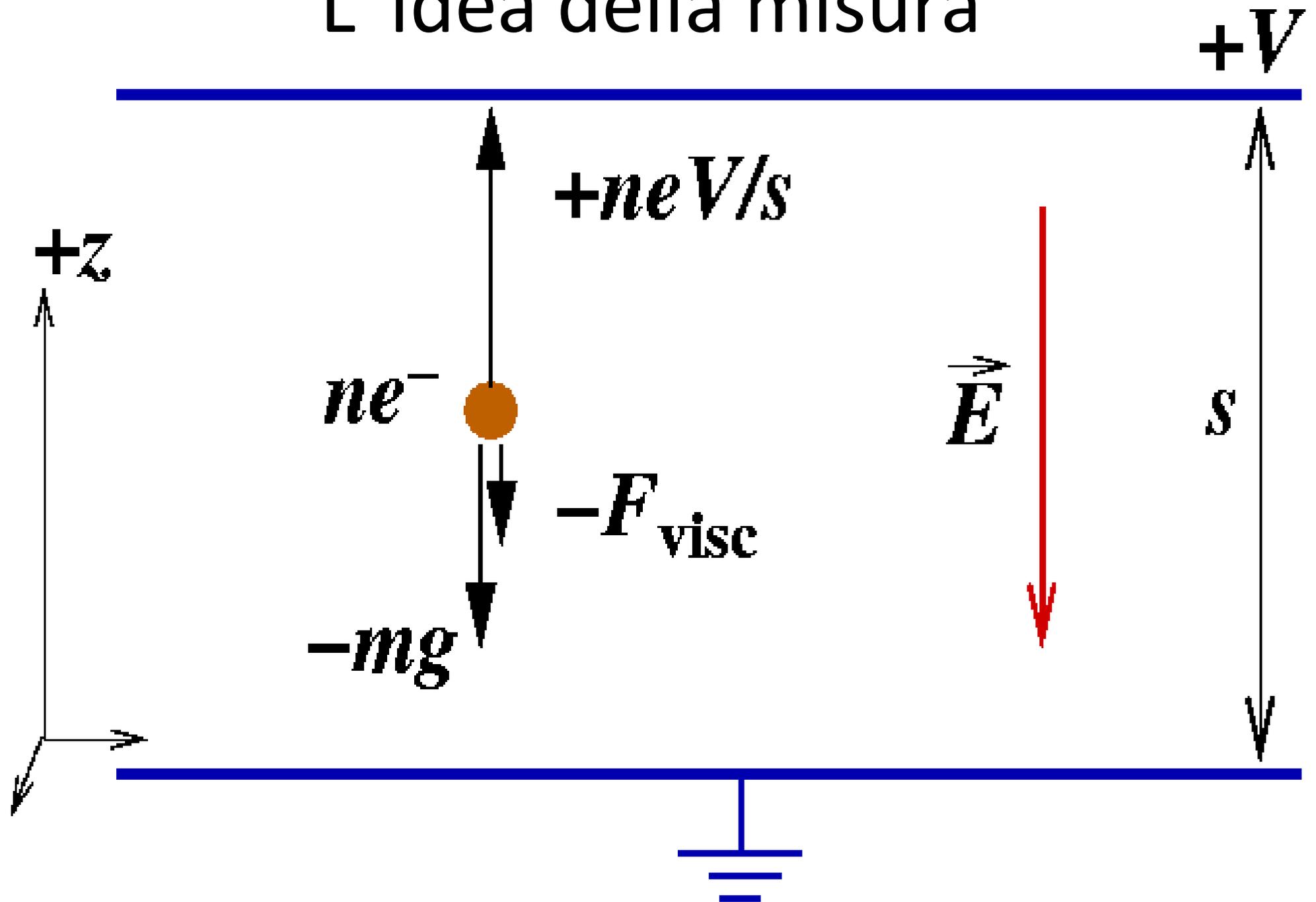
Il valore attualmente noto della carica dell'elettrone è

$$e = 1.602\,176\,565(35) \times 10^{-19} \text{ C}$$

<http://www.aip.org/history/gap/Millikan/Millikan.html>

<http://pdg.lbl.gov/2014/reviews/rpp2014-rev-phys-constants.pdf>

L'idea della misura



Modellizzazione dell'esperienza di Millikan

Forza di attrito viscoso

$$F_{visc} = 6\pi r \eta v \quad \text{velocità limite } v.$$

Equilibrio tra
forza Peso e
Attrito Viscoso

$$\frac{4}{3} r^3 \rho g = 6\pi r \eta v$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$$

Raggio della gocciolina

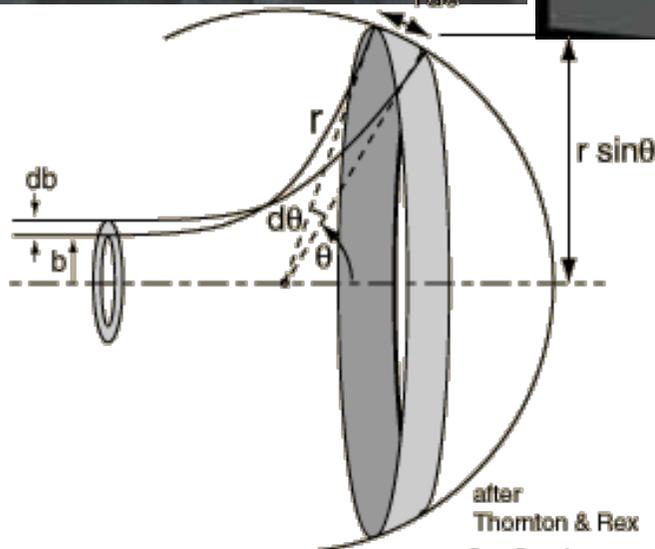
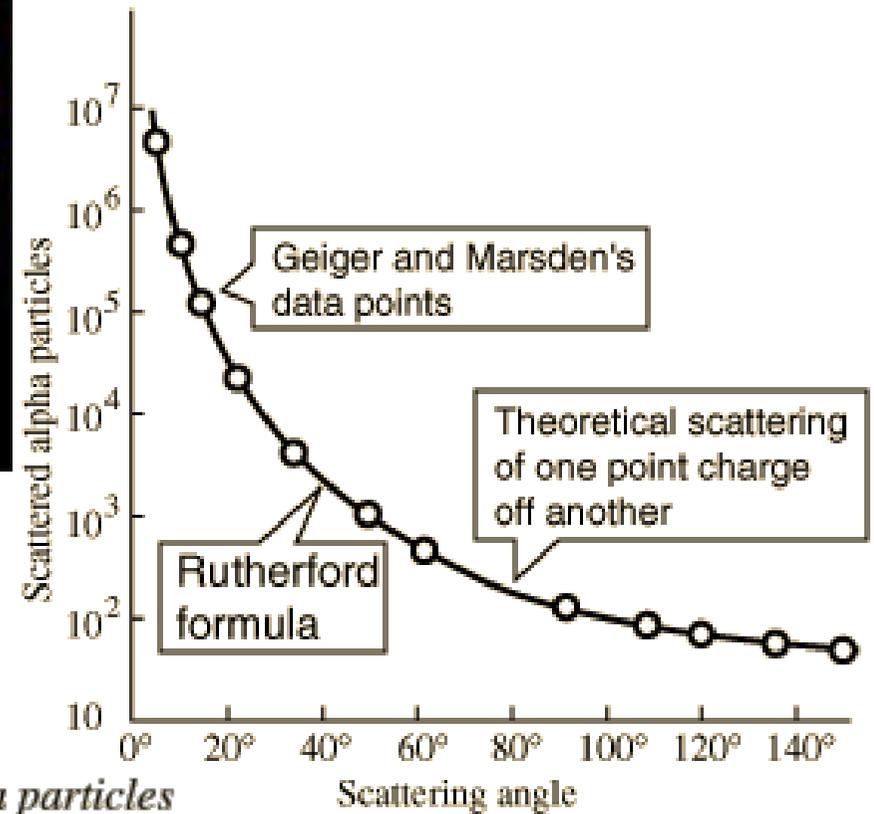
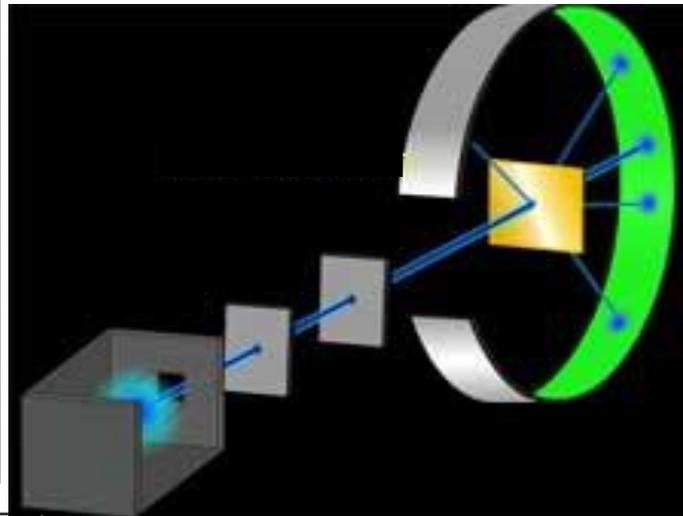
Equilibrio tra
Forza Peso e
Forza di Coulomb

$$qE = mg \quad E = \frac{V}{d} \quad \text{Campo elettrico in un condensatore piano}$$

Carica
della gocciolina

$$q = \frac{18}{V} \frac{d}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\rho g}{\eta}} v^{3/2}$$

La Struttura Atomica



$$N(\theta) = \frac{N_i n L Z^2 k^2 e^4}{4 r^2 K E^2 \sin^4(\theta / 2)}$$

N_i = number of incident alpha particles

n = atoms per unit volume in target

L = thickness of target

Z = atomic number of target

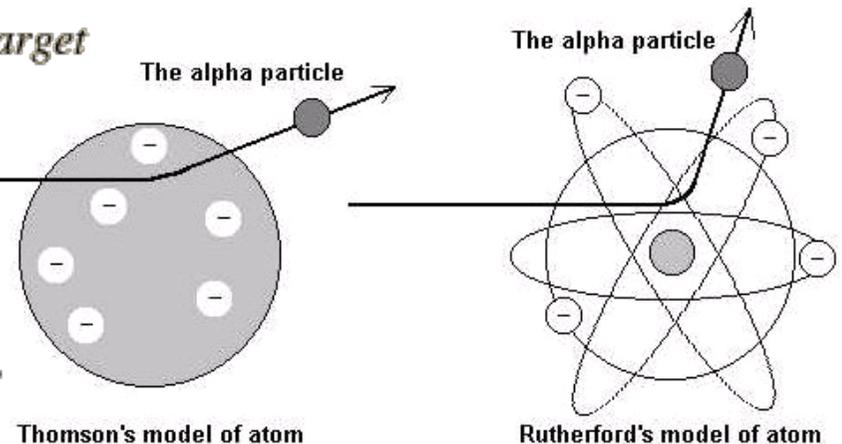
e = electron charge

k = Coulomb's constant

r = target-to-detector distance

KE = kinetic energy of alpha

θ = scattering angle



Thomson's model of atom

Rutherford's model of atom

Incoerenza con la Fisica Classica!!

La Radiazione esplora la Materia



Perché malleabile, opaco
e conduttore?

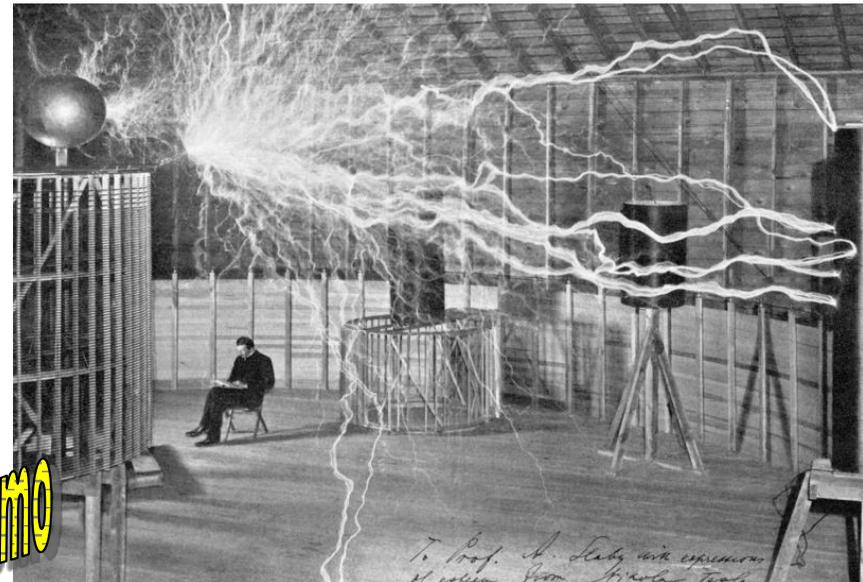


Come si trasforma
la luce in forza vitale?



Perché duro
trasparente e isolante?

Quale l'origine della
sua energia?



Elettromagnetismo

Maxwell e le Onde

1864-'65

Velocità della luce

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

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

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

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


 $\rho = 0, \quad \vec{j} = 0$

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

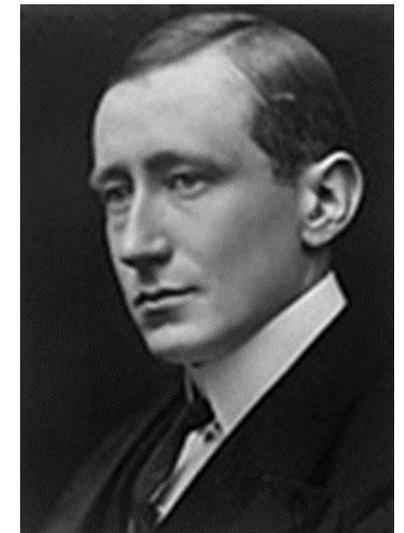
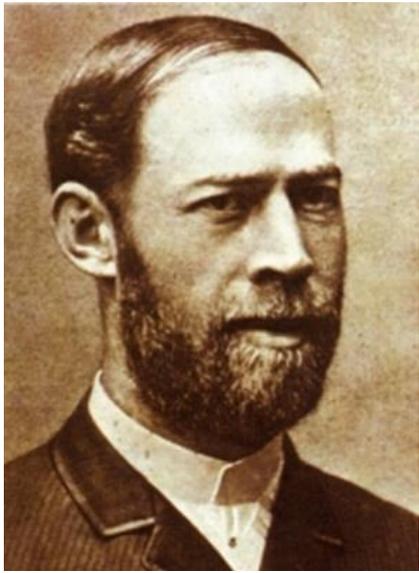
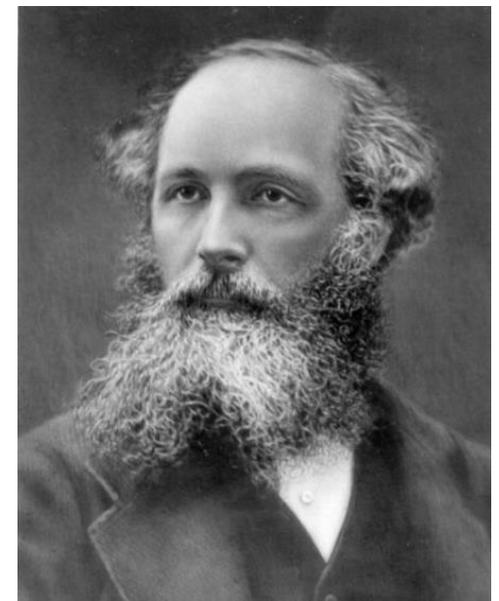
Equazione delle onde
Onde Hertziane (1887)

Assenza di invarianza rispetto a
Trasformazioni di Galilei

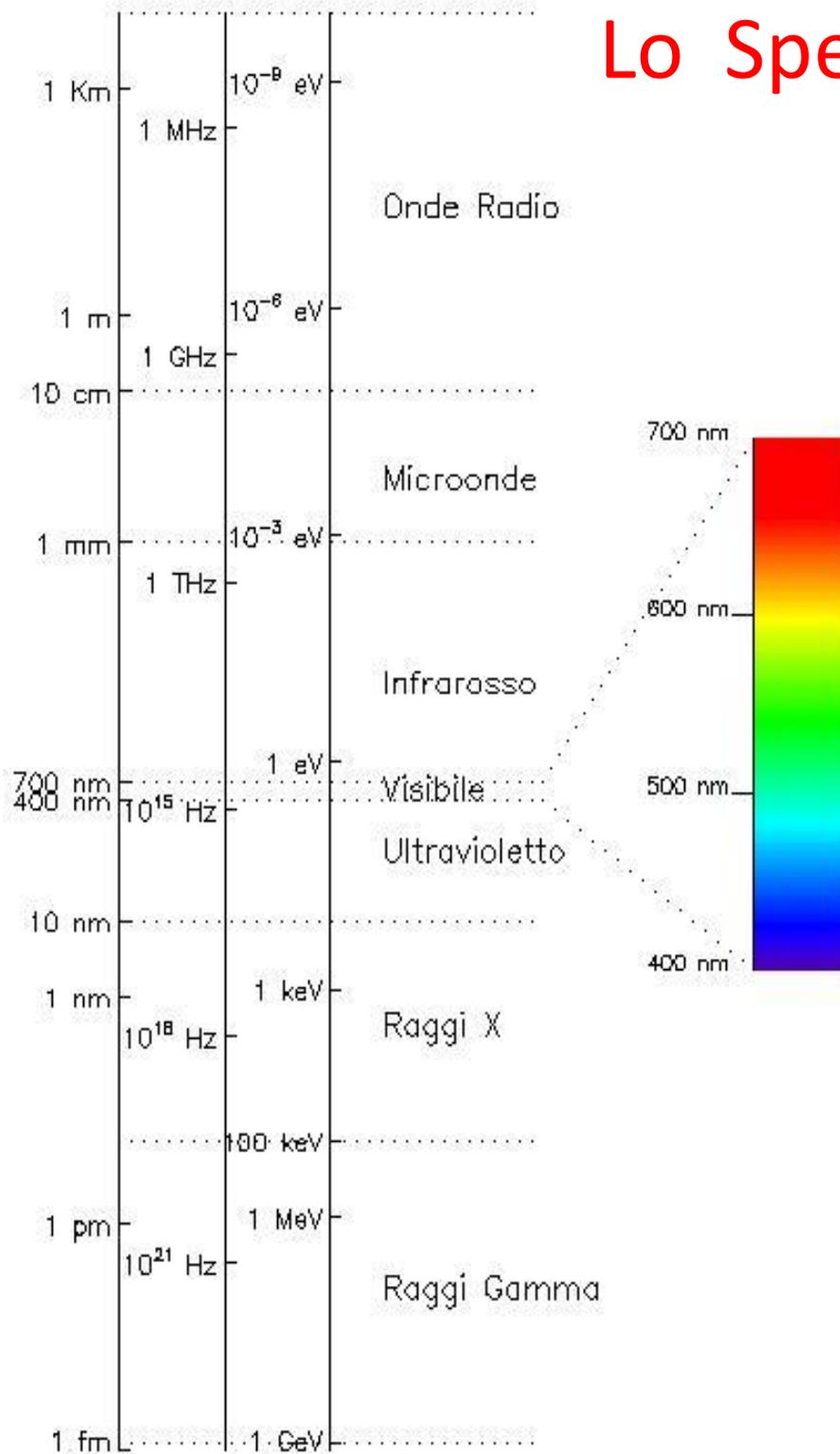
$$f = A \sin(kx - \omega t + \delta) \quad \omega = ck$$

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

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



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 principali delle Onde EM

$$\vec{E} = \vec{E}_m \sin(kx - \omega t)$$

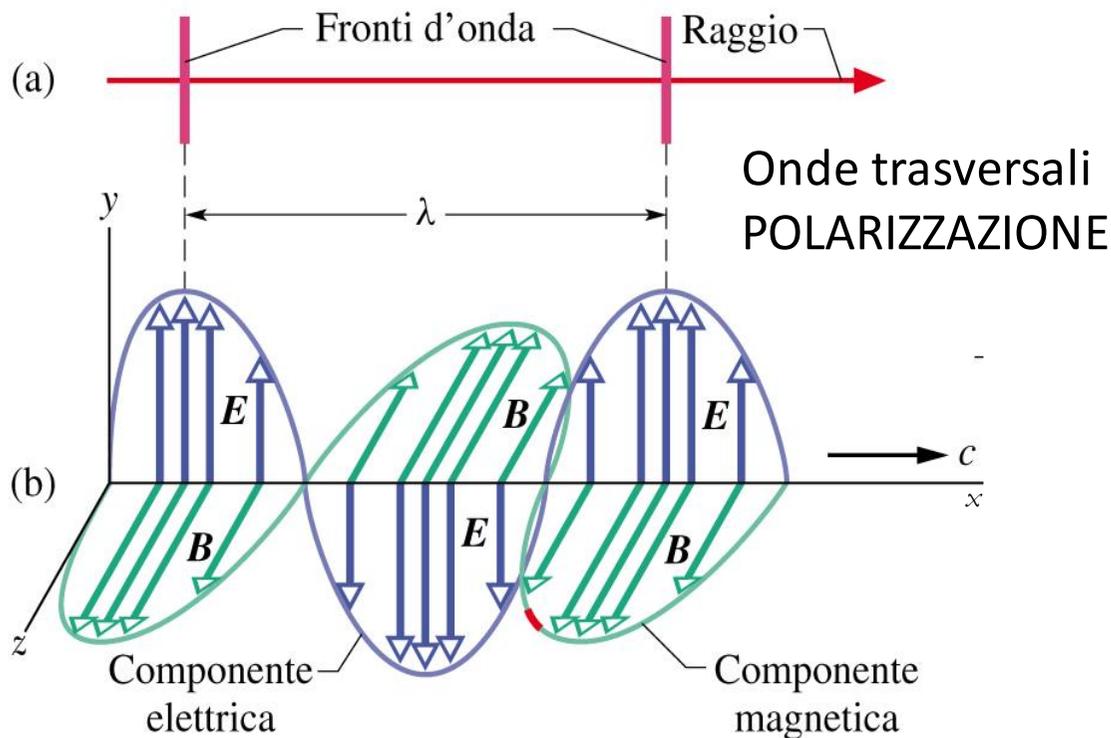
$$\vec{B} = \vec{B}_m \sin(kx - \omega t)$$

$$E_m = c B_m$$

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

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

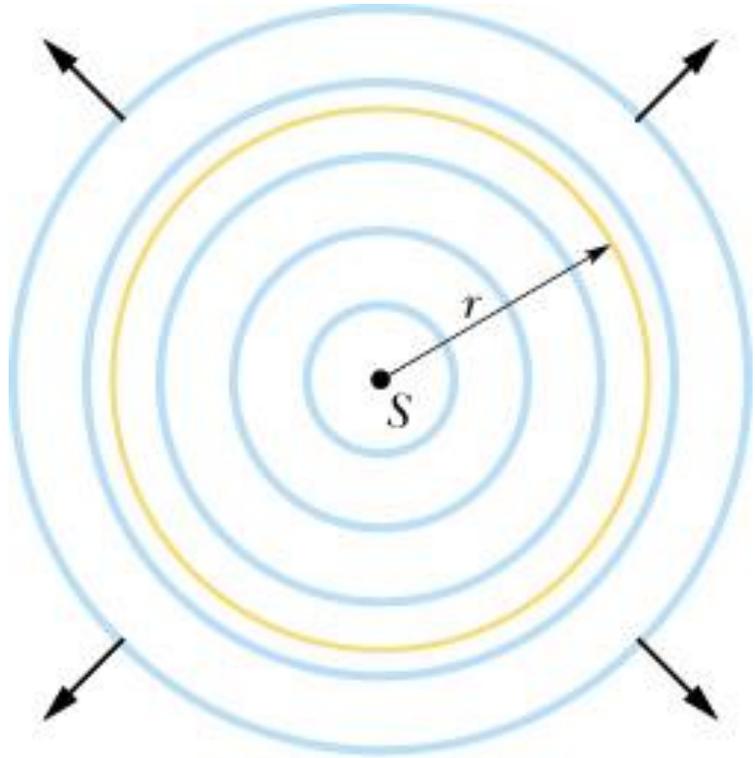
Frequenza angolare: $\omega = 2\pi / T$



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

V. Poynting

Trasporto di energia e momento



$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2 \frac{\text{energia/tempo}}{\text{area}} \div = \frac{\text{potenza}}{\text{area}} \div$$

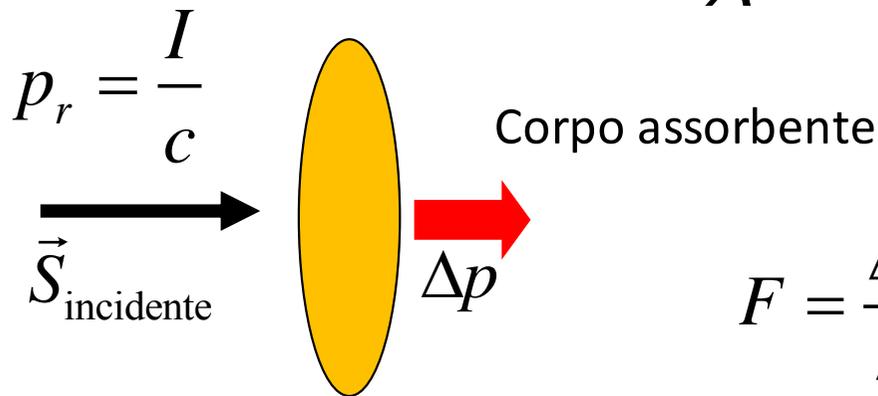
$$I = \frac{\text{potenza}}{\text{area}} = \frac{P_S}{4\pi r^2} \quad \text{Intensità luminosa}$$

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

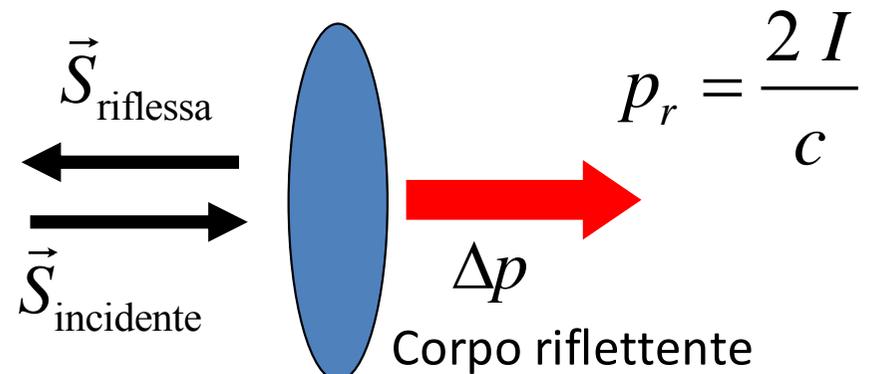
$$F = \frac{IA}{c} \quad \text{assorbimento totale}$$

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

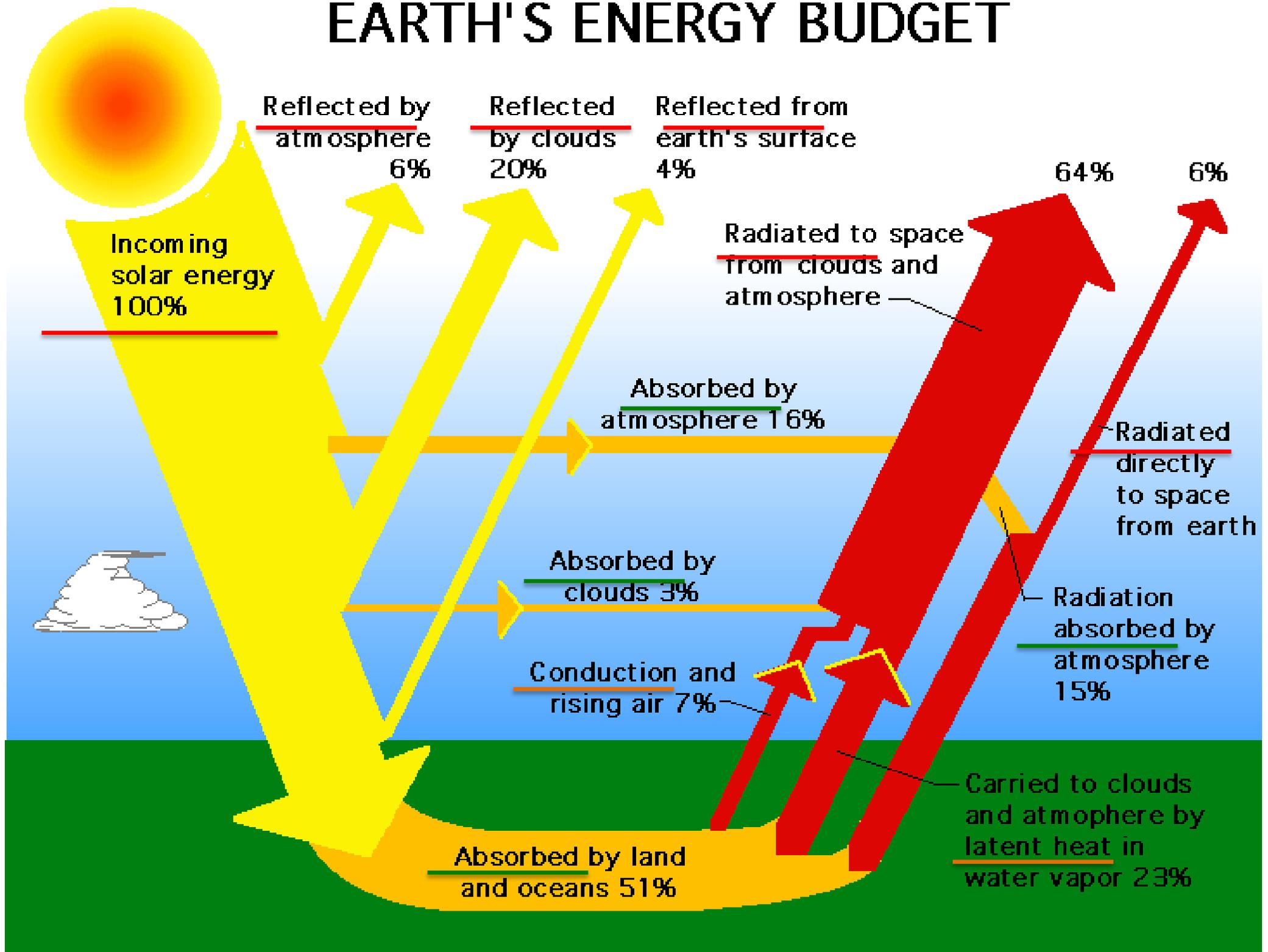
$$p_r = \frac{F}{A} \quad \text{pressione di radiazione}$$



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



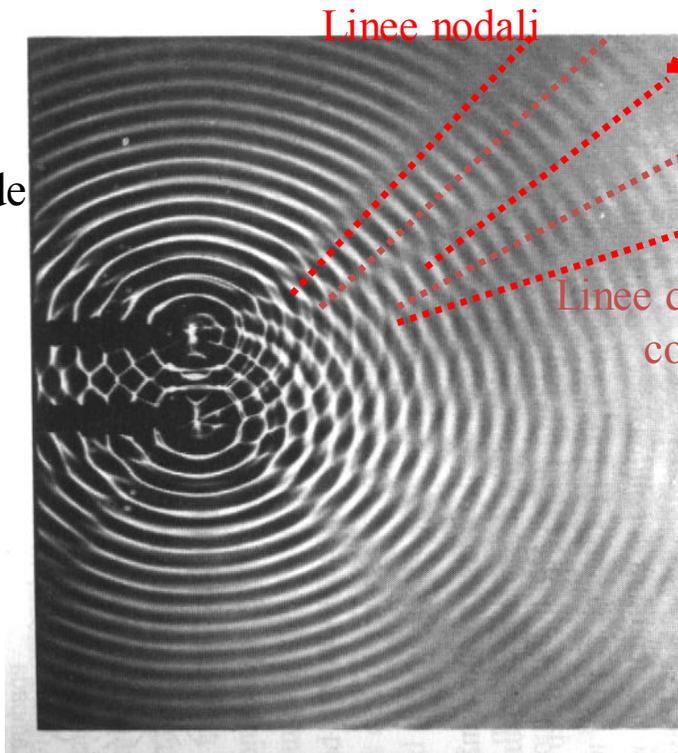
EARTH'S ENERGY BUDGET



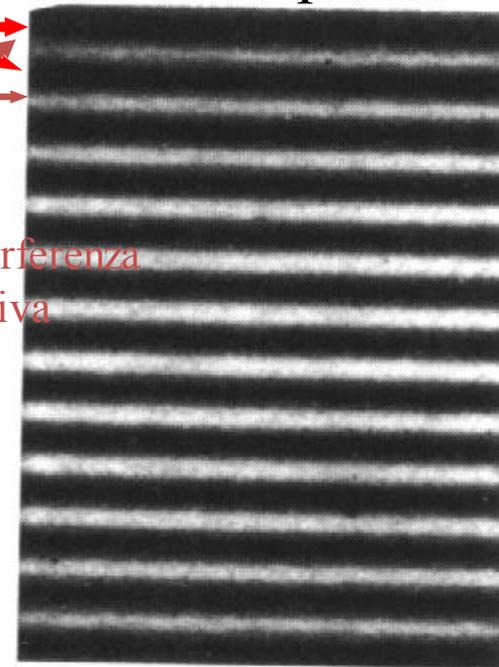
Interferenza

Esperienza di Young (1803)

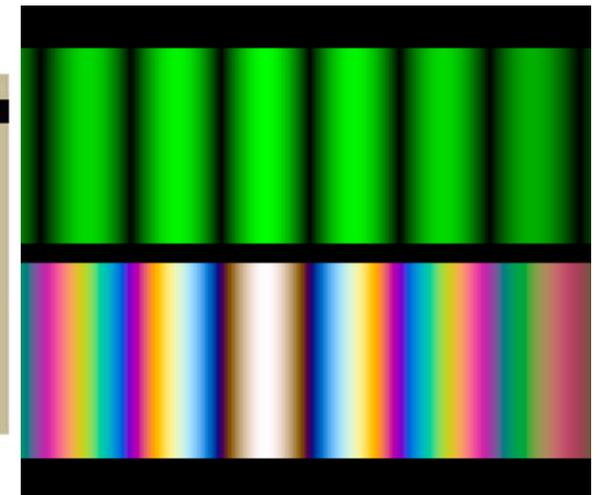
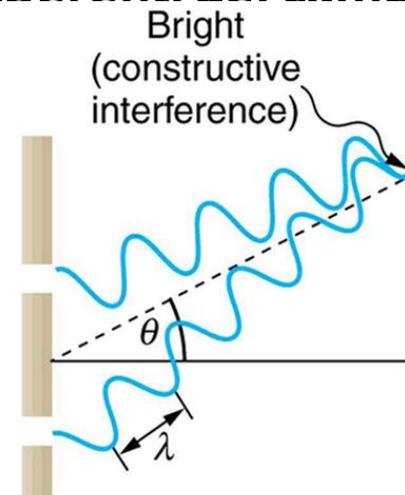
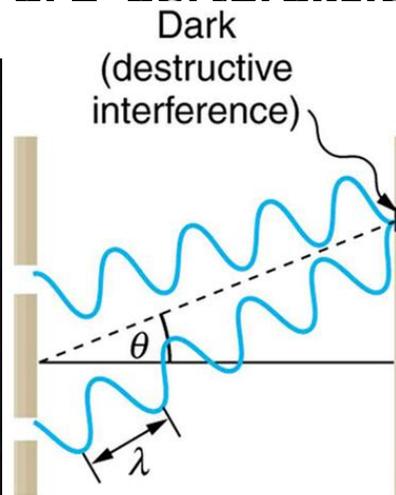
Interferenza di onde meccaniche



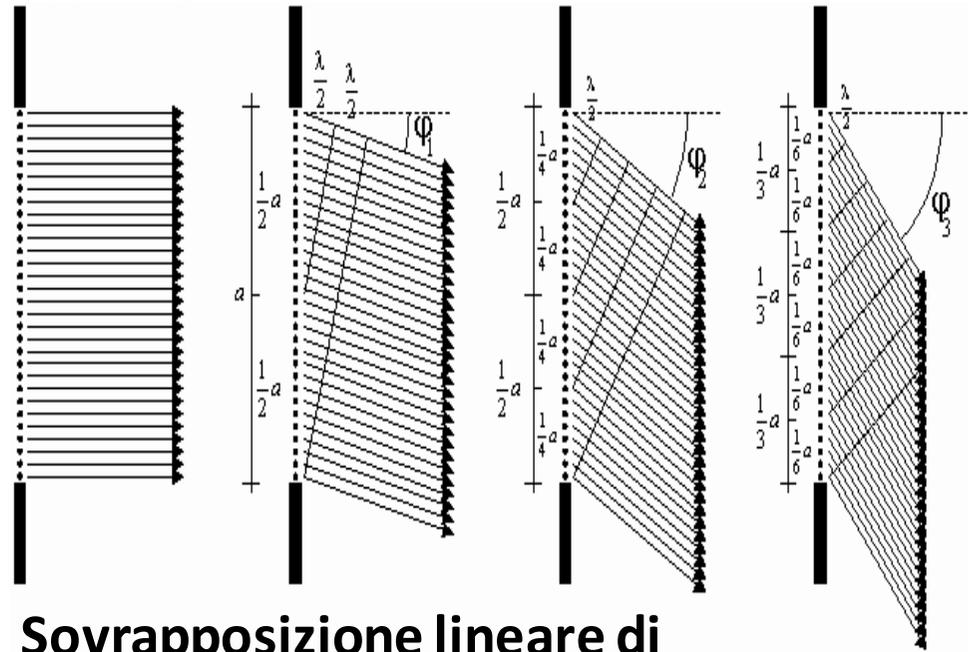
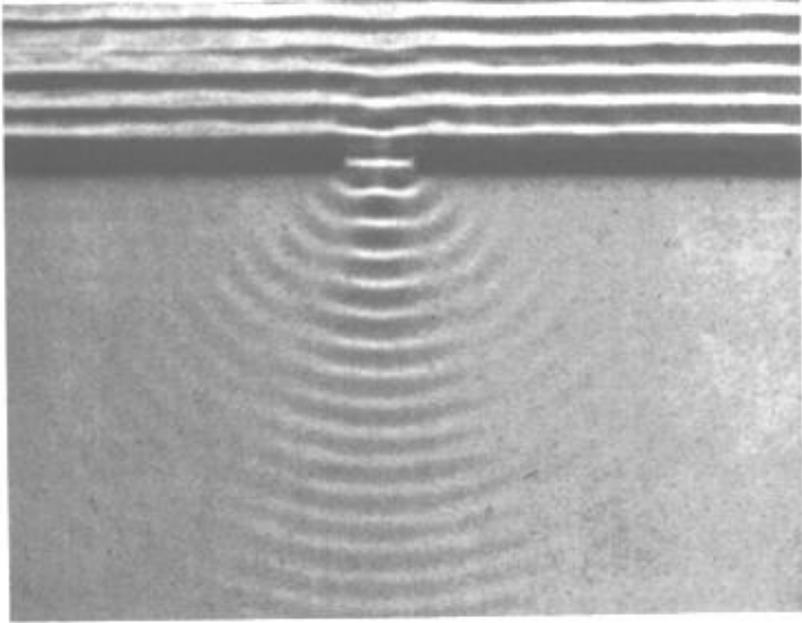
Interferenza di onde luminose



Sovrapposizione lineare di 2 perturbazioni coerenti del campo

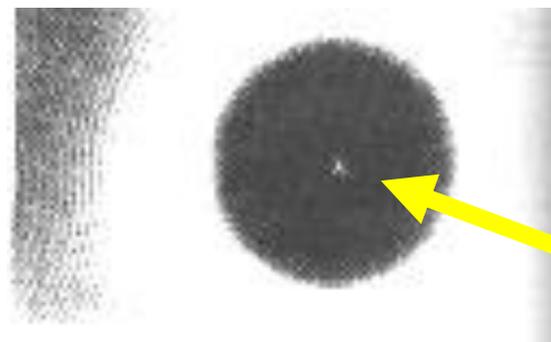
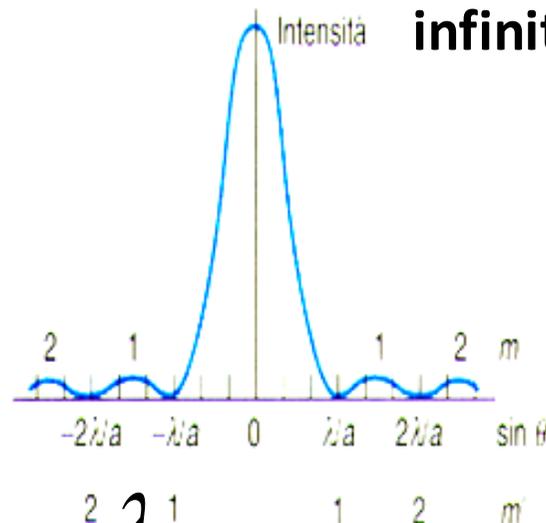


Diffrazione



Sovrapposizione lineare di infinite perturbazioni coerenti del campo

A.J. Fresnel F. Fraunhofer



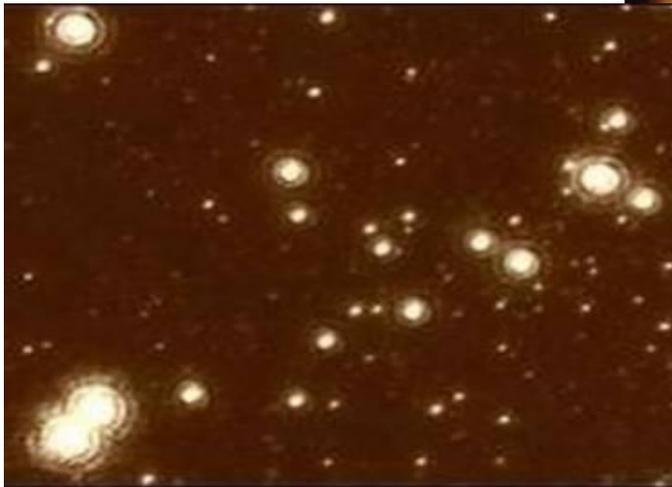
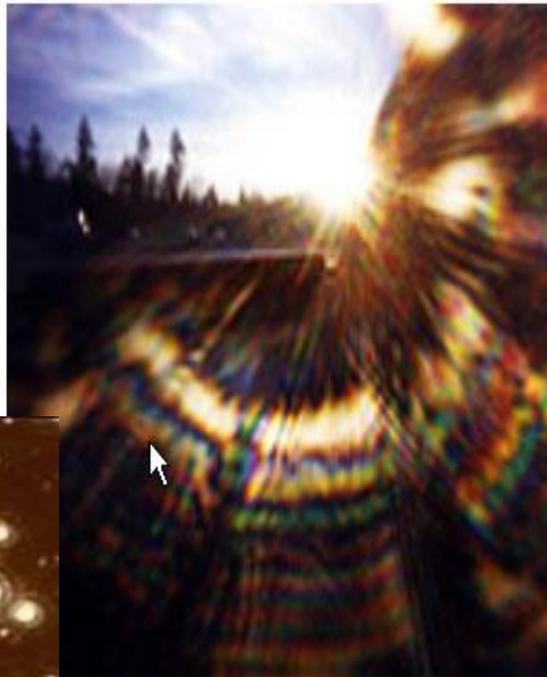
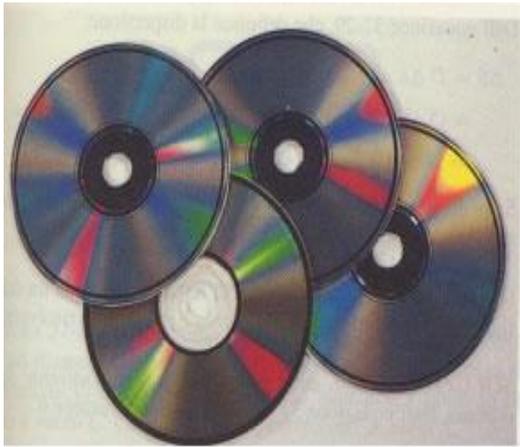
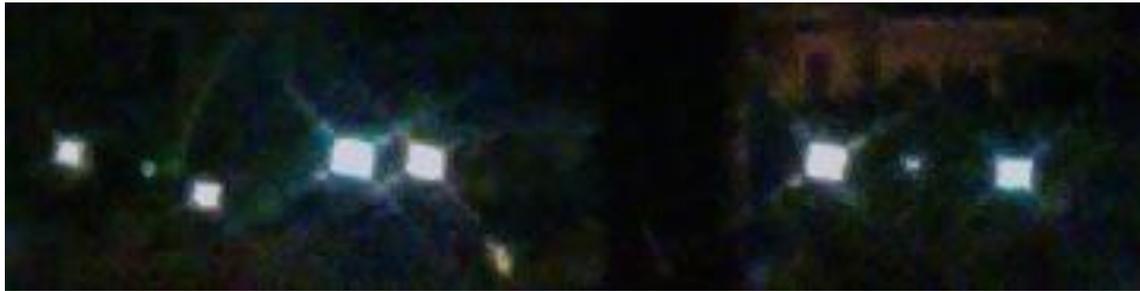
La "Macchia" di Poisson

$$\sin \varphi = m \frac{\lambda}{a}$$

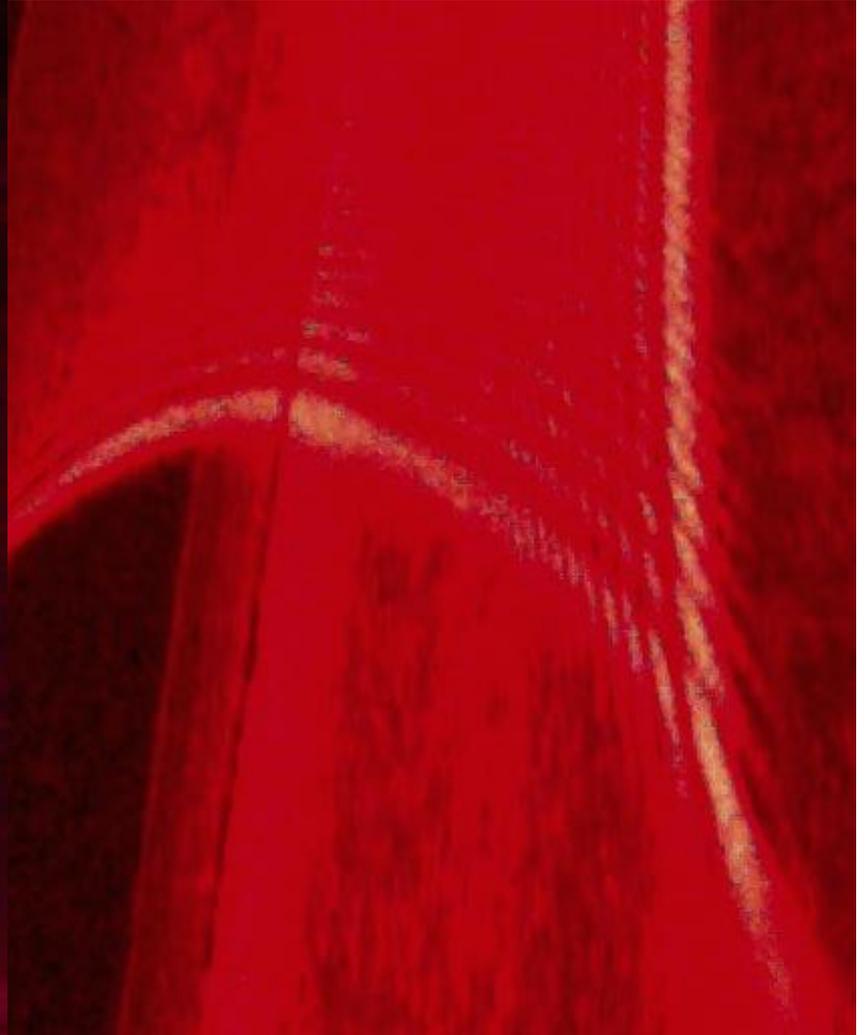
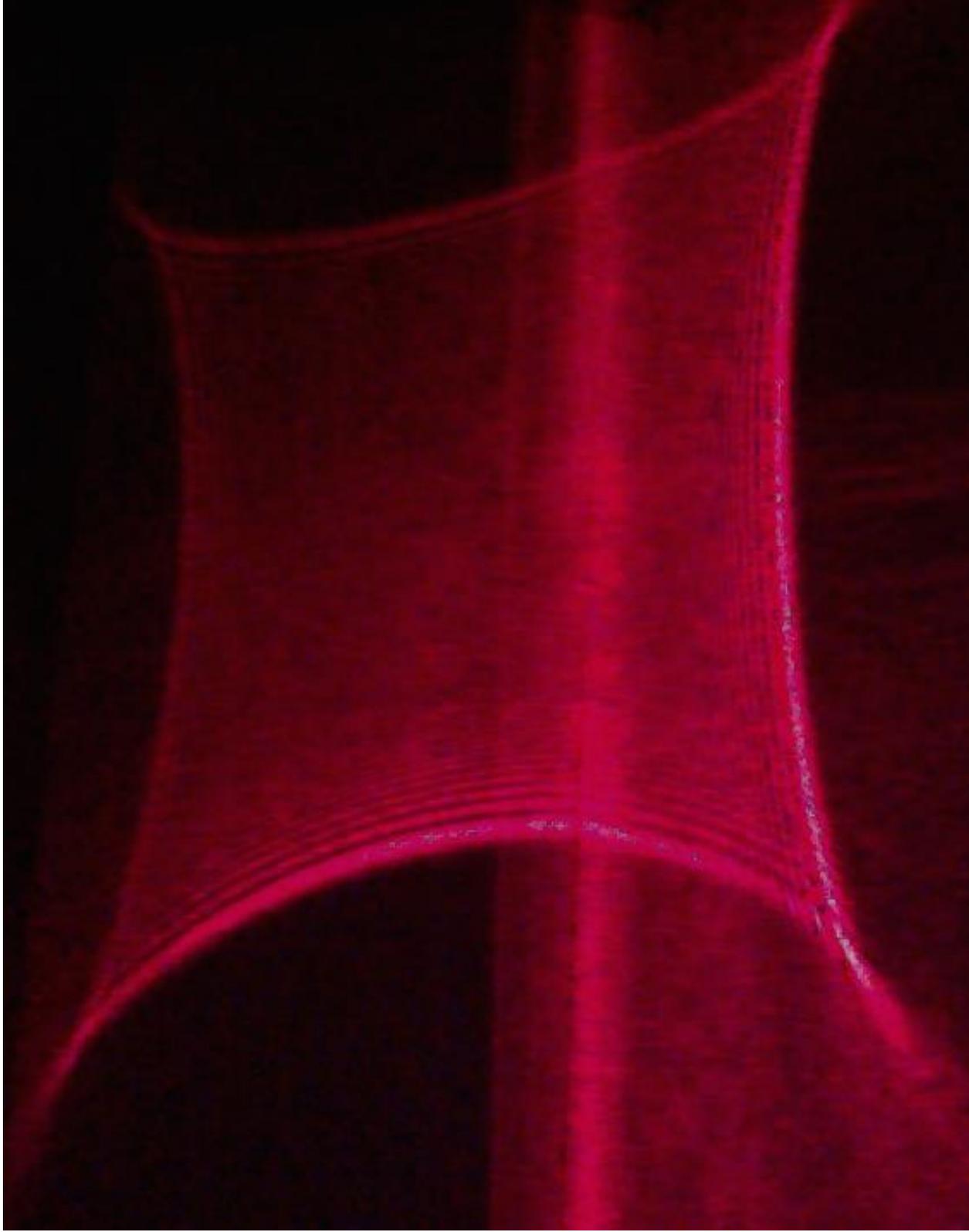


Lampioni stradali attraverso
le tende del salotto

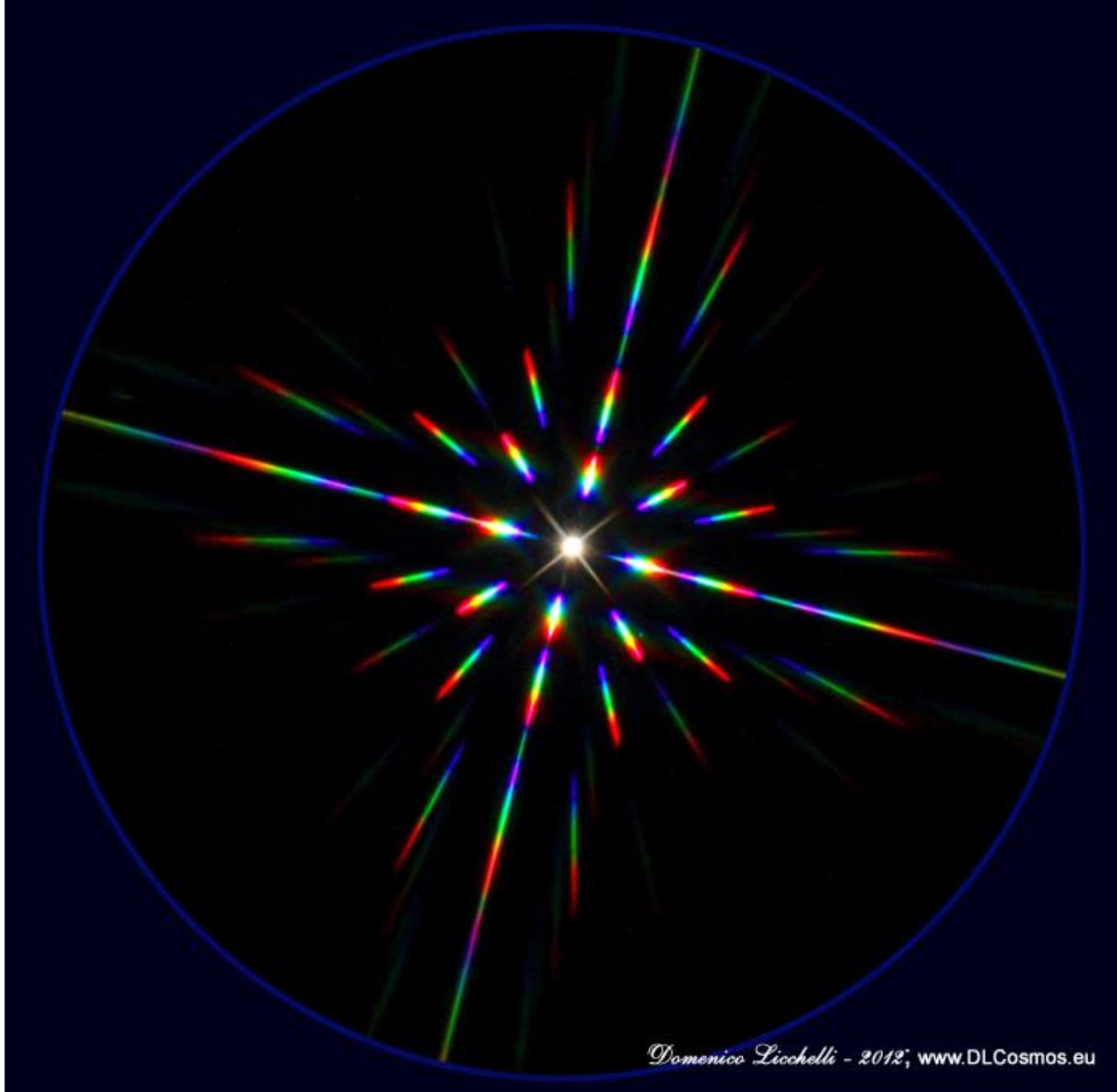




Diffrazione da elementi di
una vetrata



particolare



Domenico Licchelli - 2012, www.DLCosmos.eu

Capella, attraverso un frangifiamma

Velocità della luce e sua misura



1670, Ole Roemer

300000 km/sec

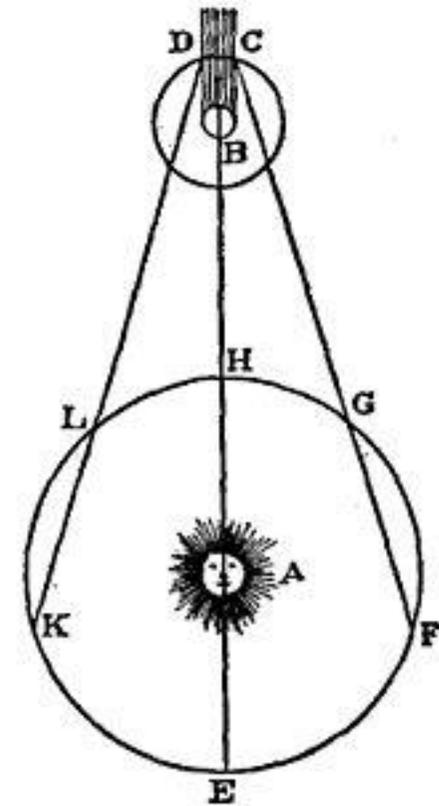


FIG. 70.

Misura della velocità della luce

Metodo di Foucault - Michelson

relazione dei punti coniugati

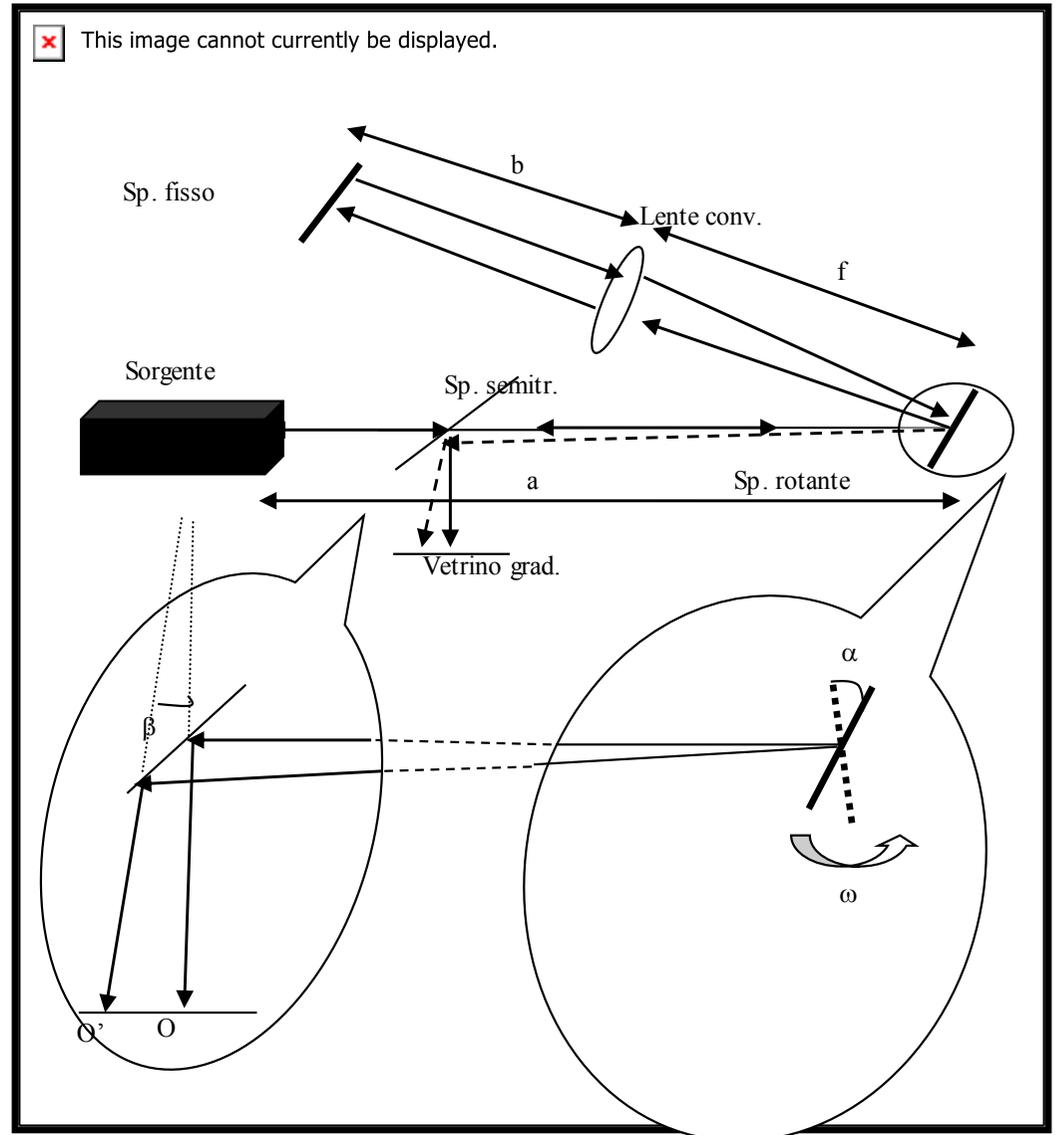
$$\frac{1}{a+f} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \Delta s = 2(b+f)$$

$$\alpha = \omega \Delta t \quad \beta = 2\alpha$$

$$|OO'| = 2\alpha a$$

$$c = \frac{4\omega(b+f)a}{|OO'|}$$



Date	Author	Method	Result (km/s)	Error
1676	Olaus Roemer	Jupiter's satellites	214,000	
1726	James Bradley	Stellar Aberration	301,000	
1849	Armand Fizeau	Toothed Wheel	315,000	
1862	Leon Foucault	Rotating Mirror	298,000	+/-500
1879	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,910	+/-50
1907	Rosa, Dorsay	Electromagnetic constants	299,788	+/-30
1926	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,796	+/-4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavity Resonator	299,792	+/-3
1958	K. D. Froome	Radio Interferometer	299,792.5	+/-0.1
1973	Evanson et al	Lasers	299,792.4574	+/-0.001
1983		Adopted Value	299,792.458	

speed of light in vacuum

Value **299 792 458 m s⁻¹**

Standard uncertainty (**exact**)

Relative standard uncertainty (**exact**)

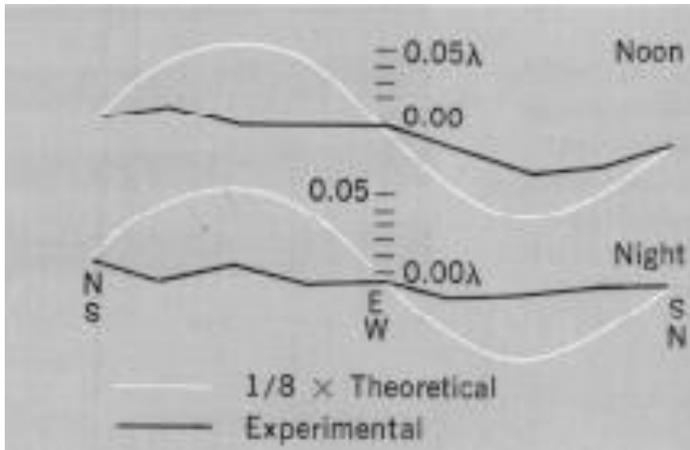
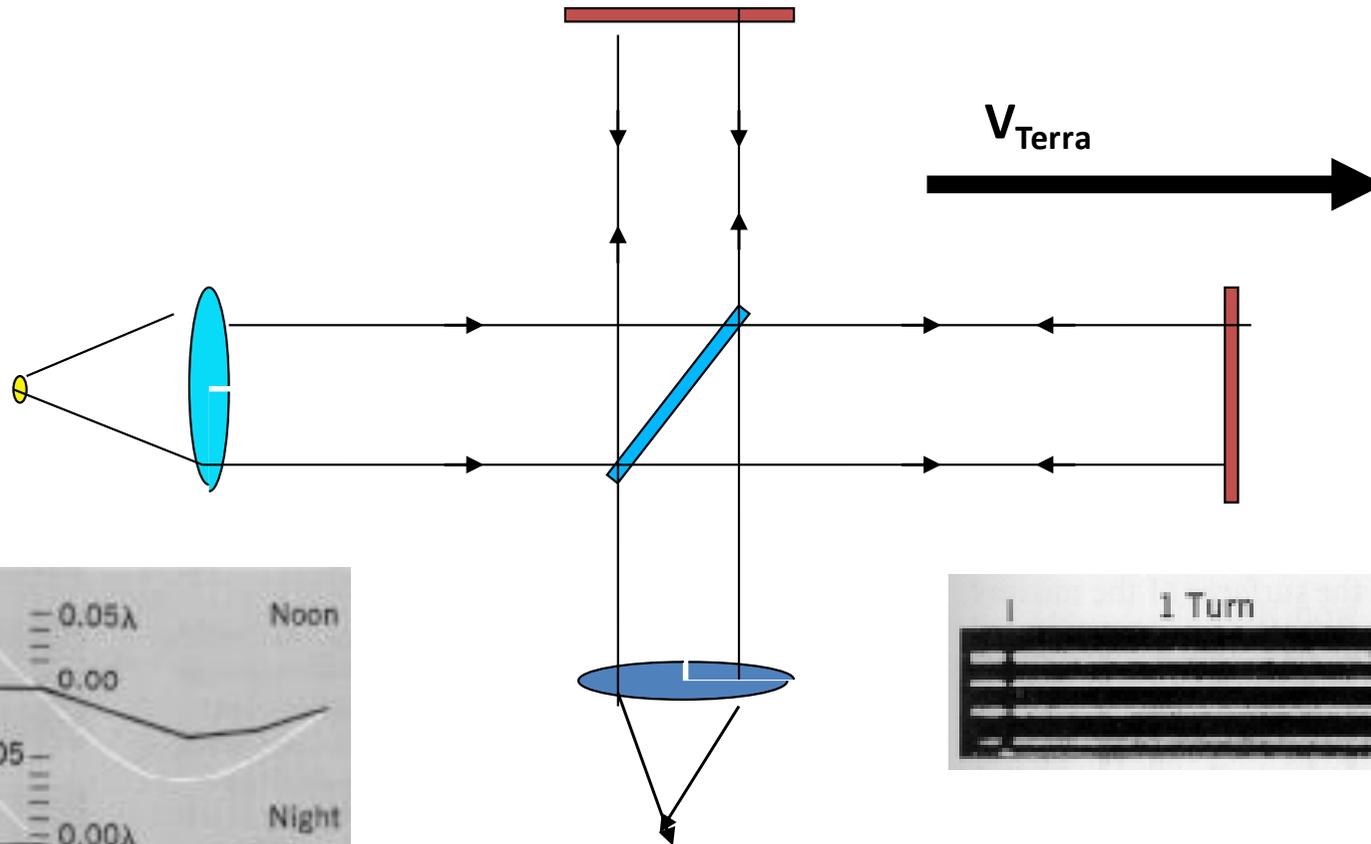
Concise form **299 792 458 m s⁻¹**

Il metro è la lunghezza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299792458 di secondo.

Cercando il vento di Etere: Michelson e Morley



Ipotetiche Proprietà dell'Etere: solido rigido, denso ma imponderabile, senza capacità di offrire attrito significativo ai corpi celesti



Risultato: Nessun vento di etere osservato!

Relatività

Le Leggi della Meccanica di Newton sono invarianti di Galilei.

Le leggi di Maxwell NON sono invarianti rispetto a trasformazioni di Galilei
Quindi incompatibili con la Meccanica Classica



Quale tra queste due teorie qual è la più fondamentale?

La velocità della luce **non cambia** tra due sistemi di riferimento in moto relativo uniforme

I postulati della Relatività

1. Postulato della relatività

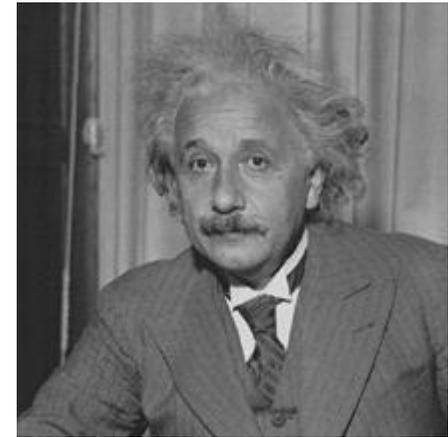
Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Non esiste un sistema di riferimento privilegiato.

(come per Galilei !!!)

2. Postulato della velocità della luce

La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore c in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali. **(NUOVO !!!!)**

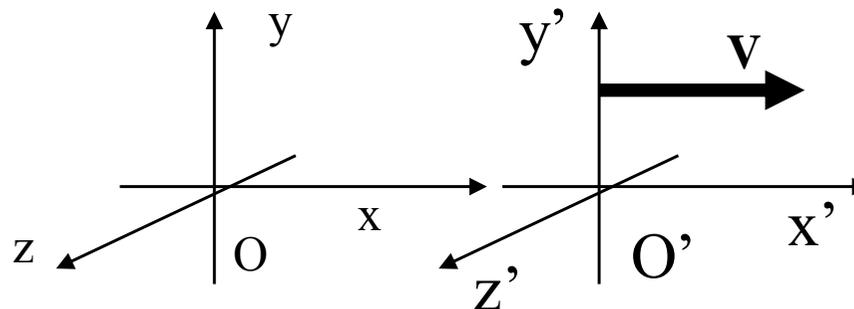
Relatività Speciale



- La velocità della luce è indipendente dal moto della sorgente o del ricevitore
- Le leggi della Fisica sono le stesse in tutti sistemi di riferimento
- Le coordinate dello spazio-tempo tra due sistemi di riferimento inerziali in moto relativo uniforme sono dettate dalle
TRASFORMAZIONI di
LORENTZ

Trasformazioni di Lorentz

$$x' = \frac{x - Vt}{\left(1 - V^2/c^2\right)^{1/2}}, \quad y' = y, \quad z' = z$$
$$t' = \frac{t - V/c^2 x}{\left(1 - V^2/c^2\right)^{1/2}}$$



Sorgenti di radiazione

Fiamma

Converte energia chimica (combustione)
in energia radiante.

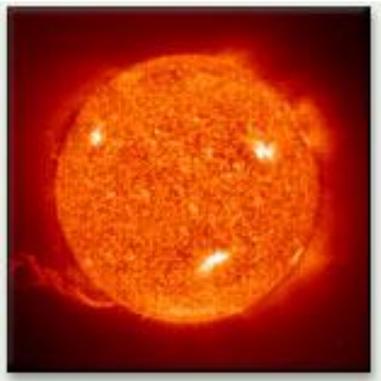


Lampadina ad incandescenza

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

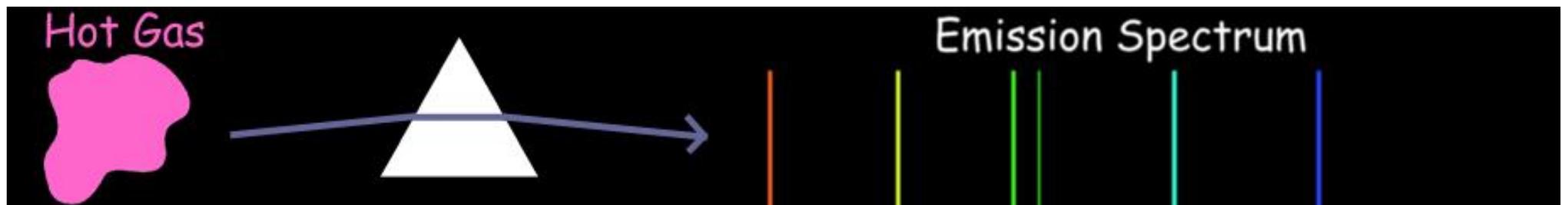
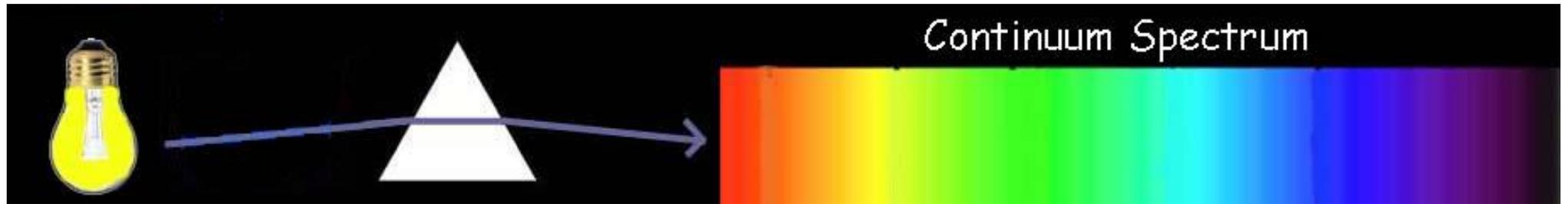
Converte energia nucleare in radiante.

Aurore

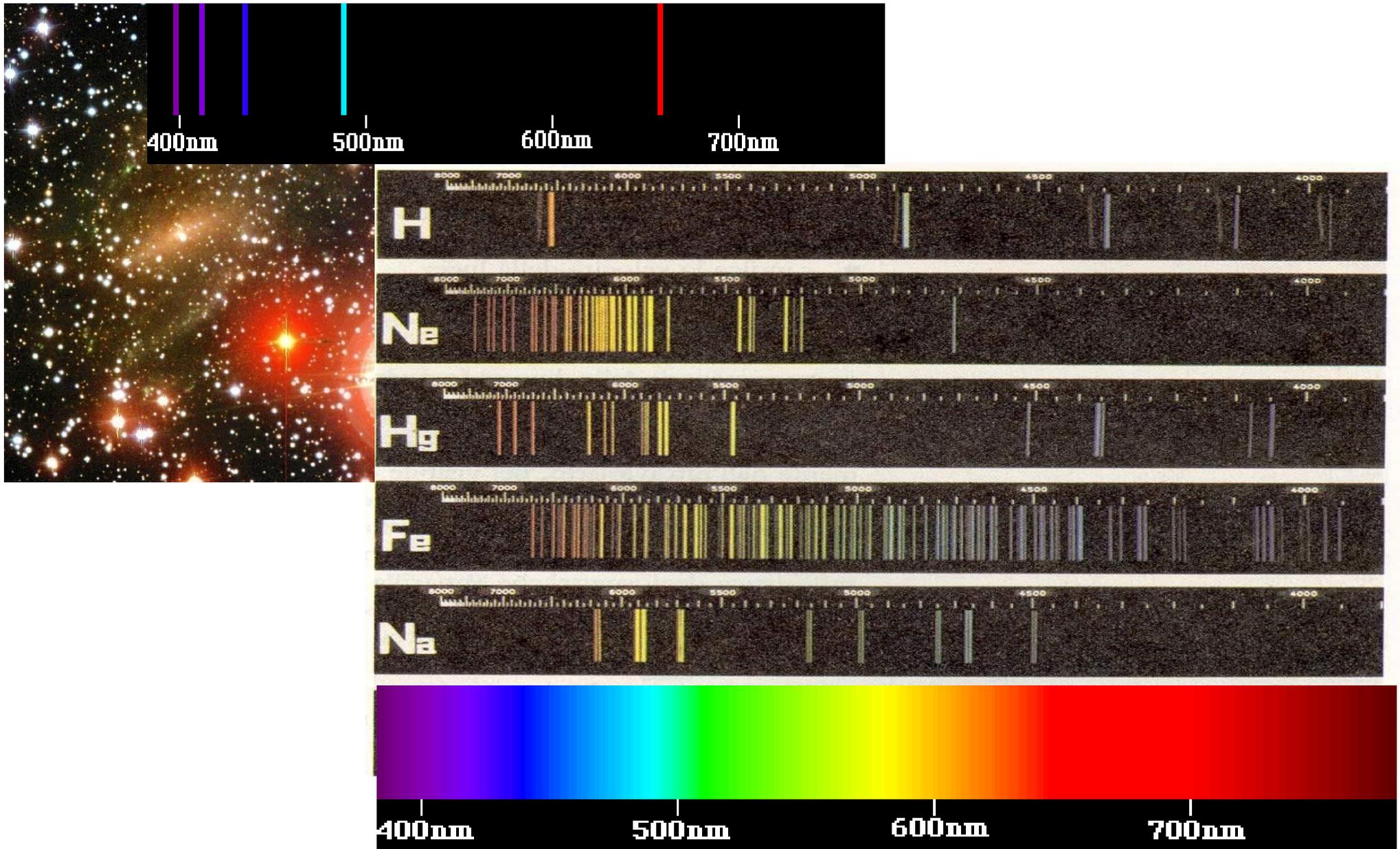
Converte energia cinetica
in energia di eccitazione in energia radiante.



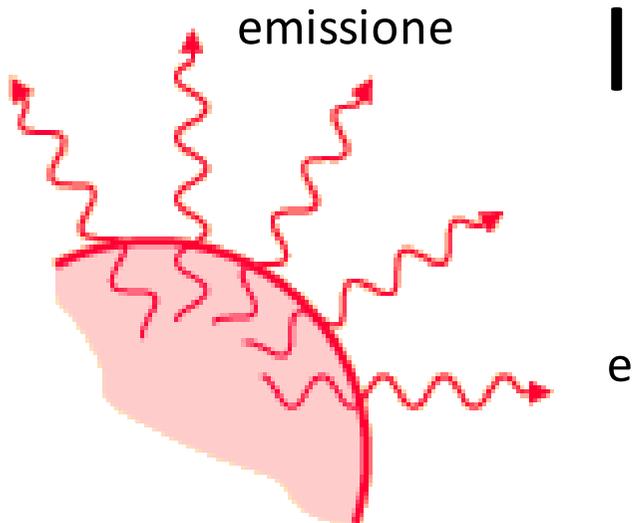
Caratteristiche dello spettro



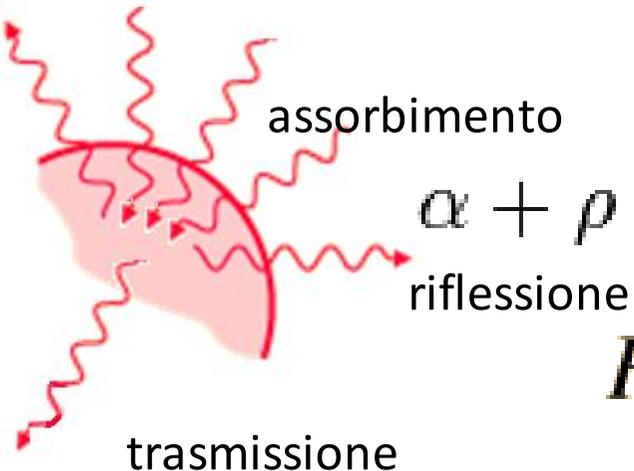
Spettri continui e discreti



Irraggiamento



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



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

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



G. R. G. Kirchhoff

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

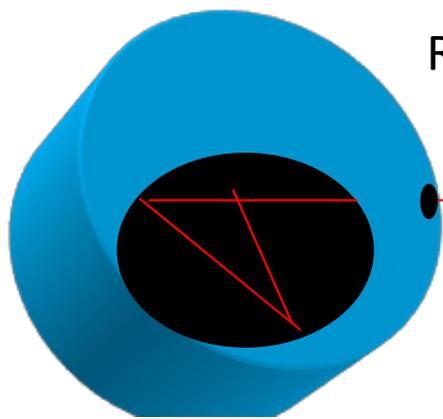
$$e = \alpha$$

Il Principio della Termodinamica



Radiatore Perfetto
CORPO NERO

Assorbitore Perfetto
CORPO NERO



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

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4 \text{ j/ m}^2\text{s}$$

Stefan-Boltzmann Law

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

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 $= -\frac{1}{L^3} \frac{dN}{d\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4}$

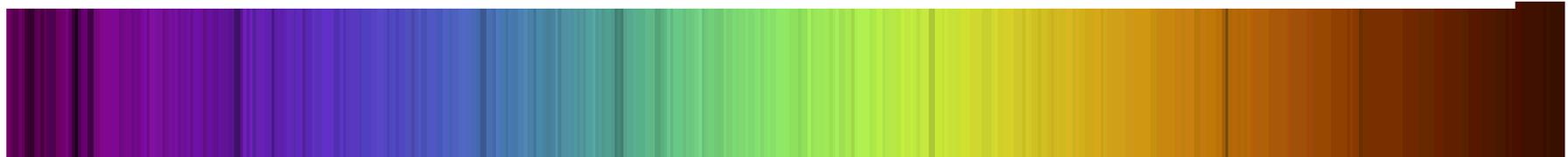
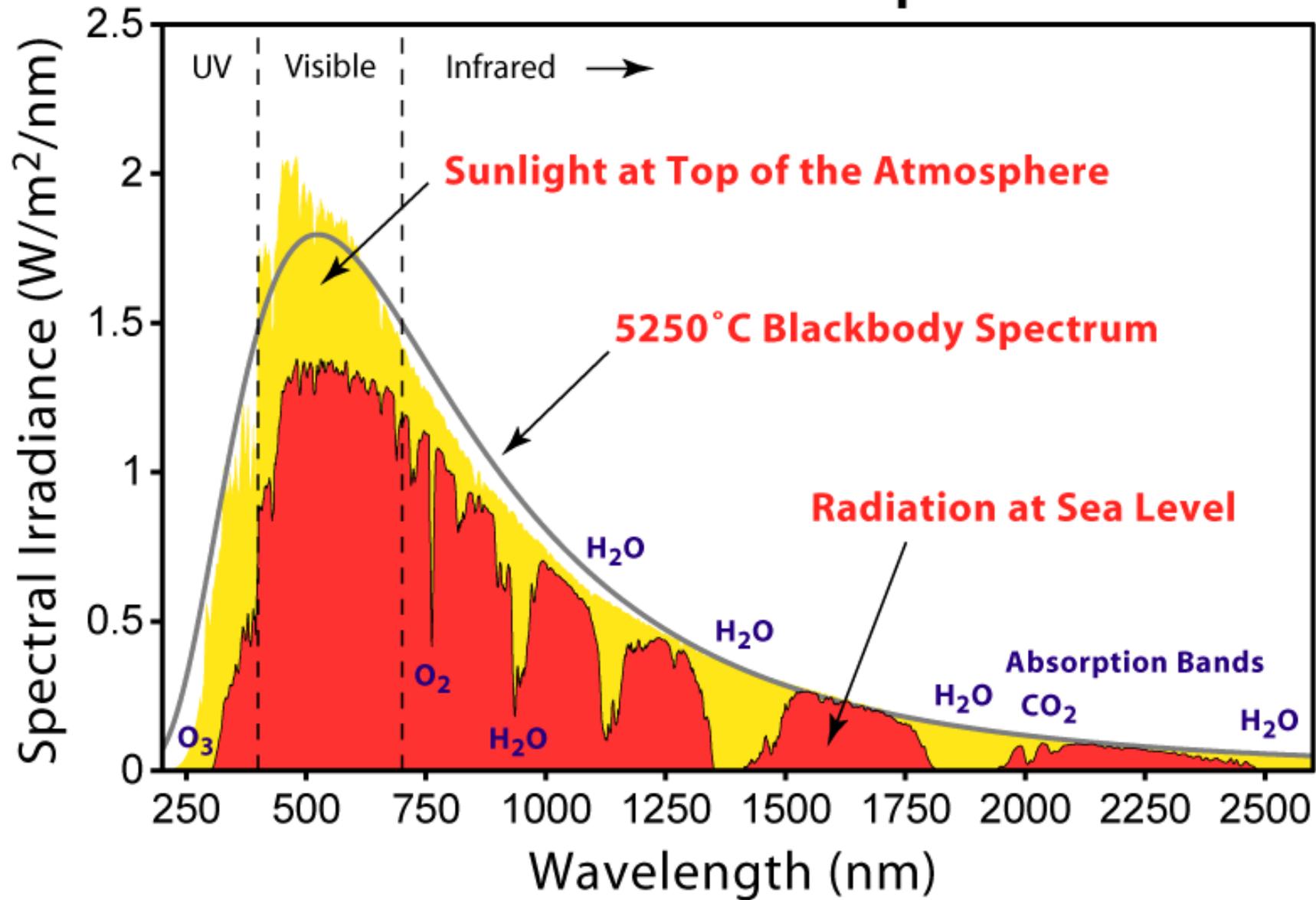
Densita' di energia/lungh.d'onda $\frac{du}{d\lambda} = \frac{1}{L^3} \frac{dE}{d\lambda} = -kT \frac{1}{L^3} \frac{dN}{d\lambda} = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$

Equipartizione dell'energia

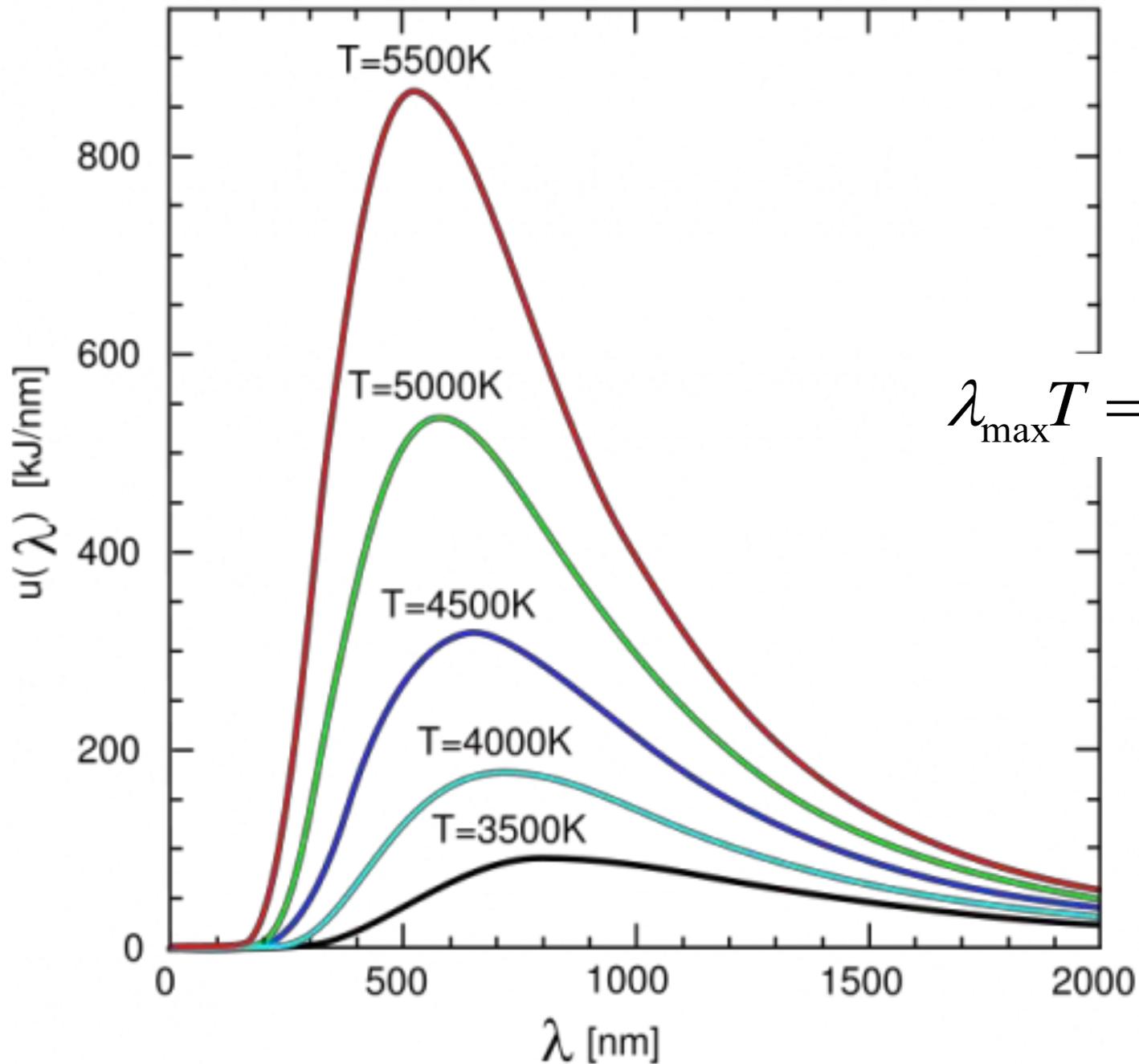
$$\frac{du}{d\nu} = \frac{du}{d\lambda} \frac{c}{\nu^2} = \frac{8\pi kT \nu^4}{c^4} \frac{c}{\nu^2} = kT \frac{8\pi \nu^2}{c^3}$$

Legge di Rayleigh - Jeans

Solar Radiation Spectrum



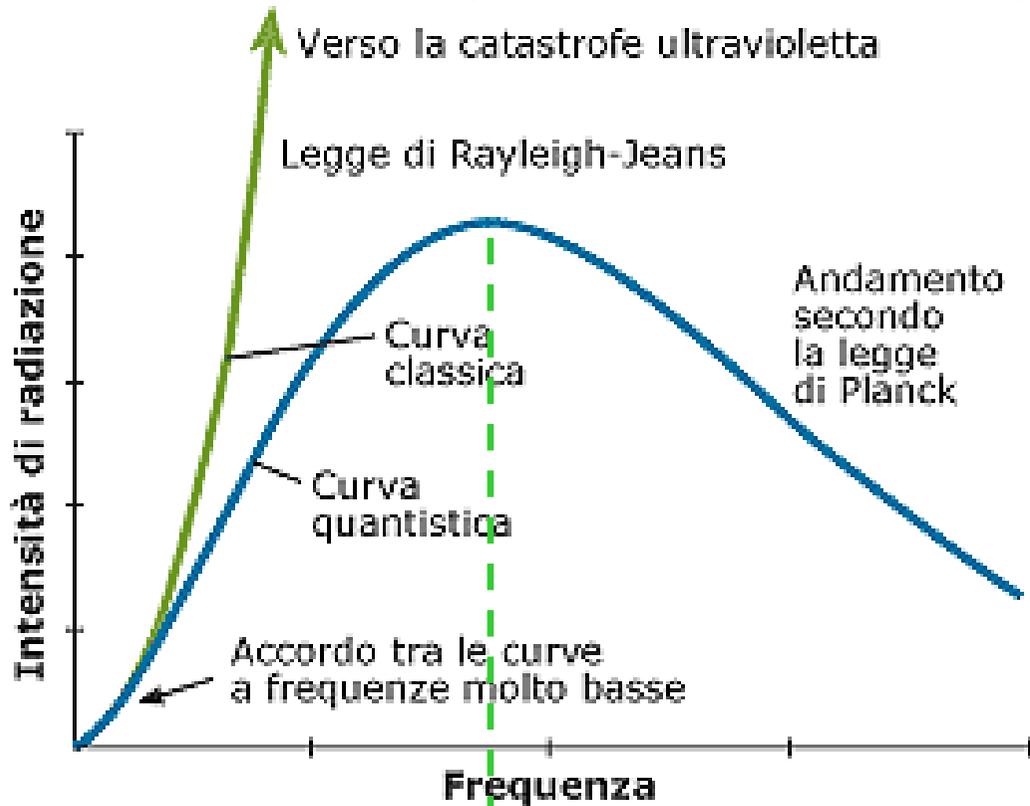
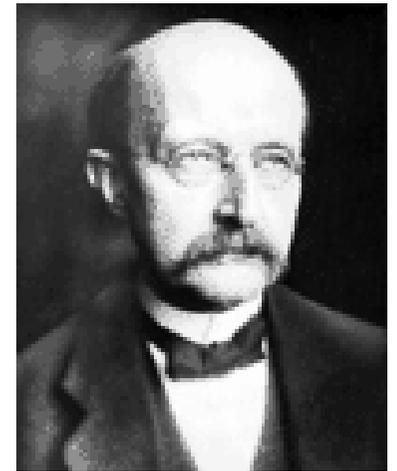
Spettro di corpo nero



Legge di Wien

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m}^0 \text{ K}$$

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 $\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} m^0 K$

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

$$\Delta E = h\nu$$



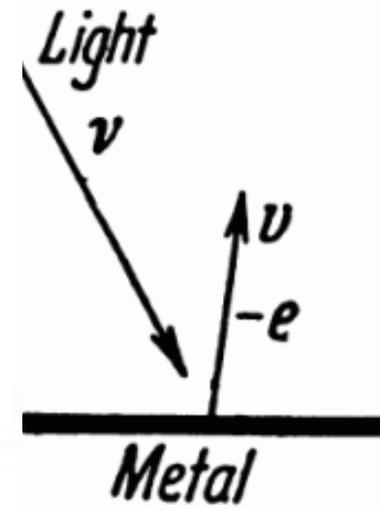
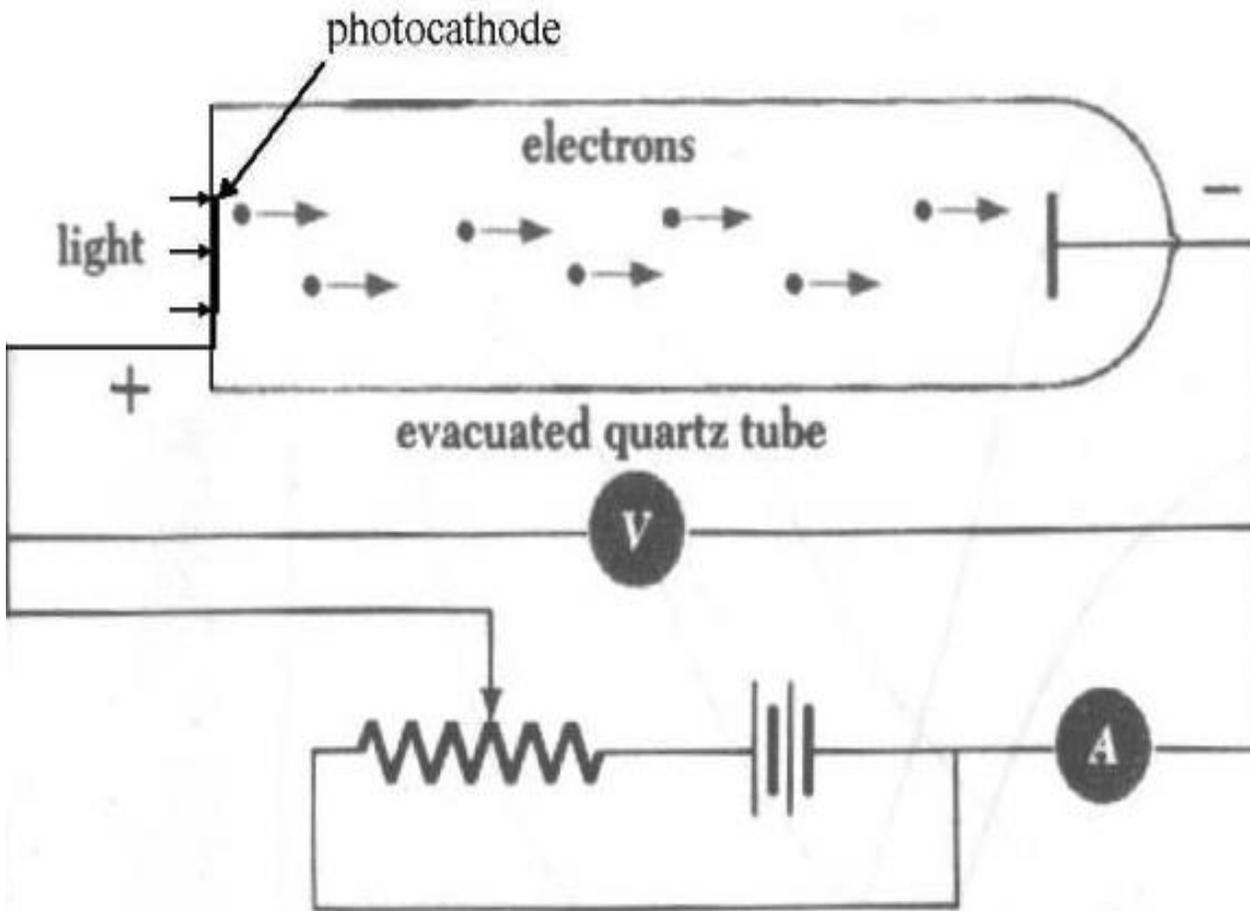
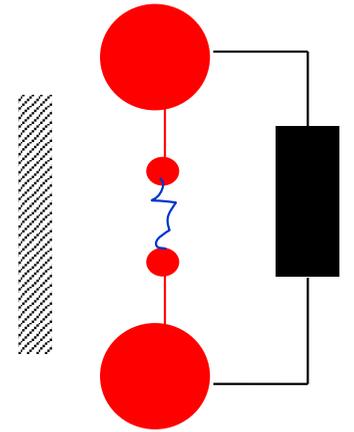
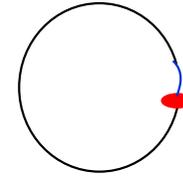
$$\langle \epsilon \rangle(\nu) \approx \frac{h\nu^3}{e^{k_B T} - 1}$$

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



L'effetto Fotoelettrico

Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

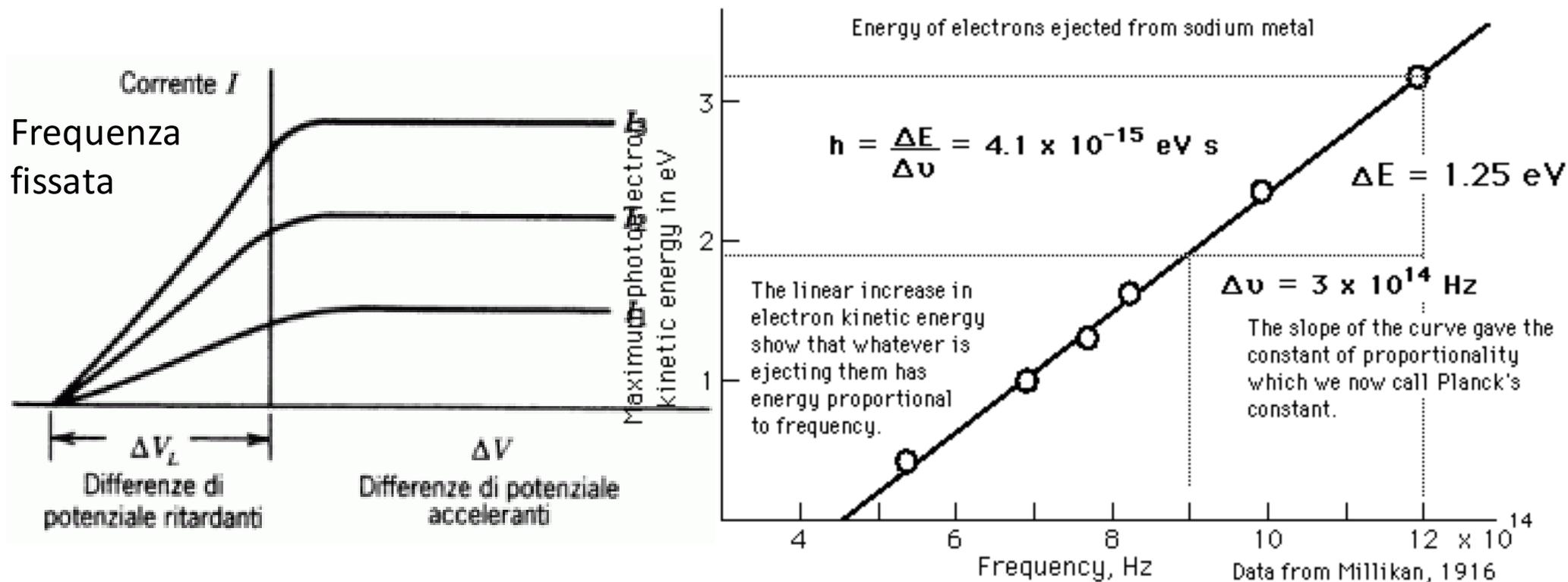


Hertz, 1887



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 !!!

L'idea di Einstein



Nel 1905 Albert Einstein assunse l'ipotesi di Planck che la radiazione incidente è costituita da pacchetti ("quanti") di energia

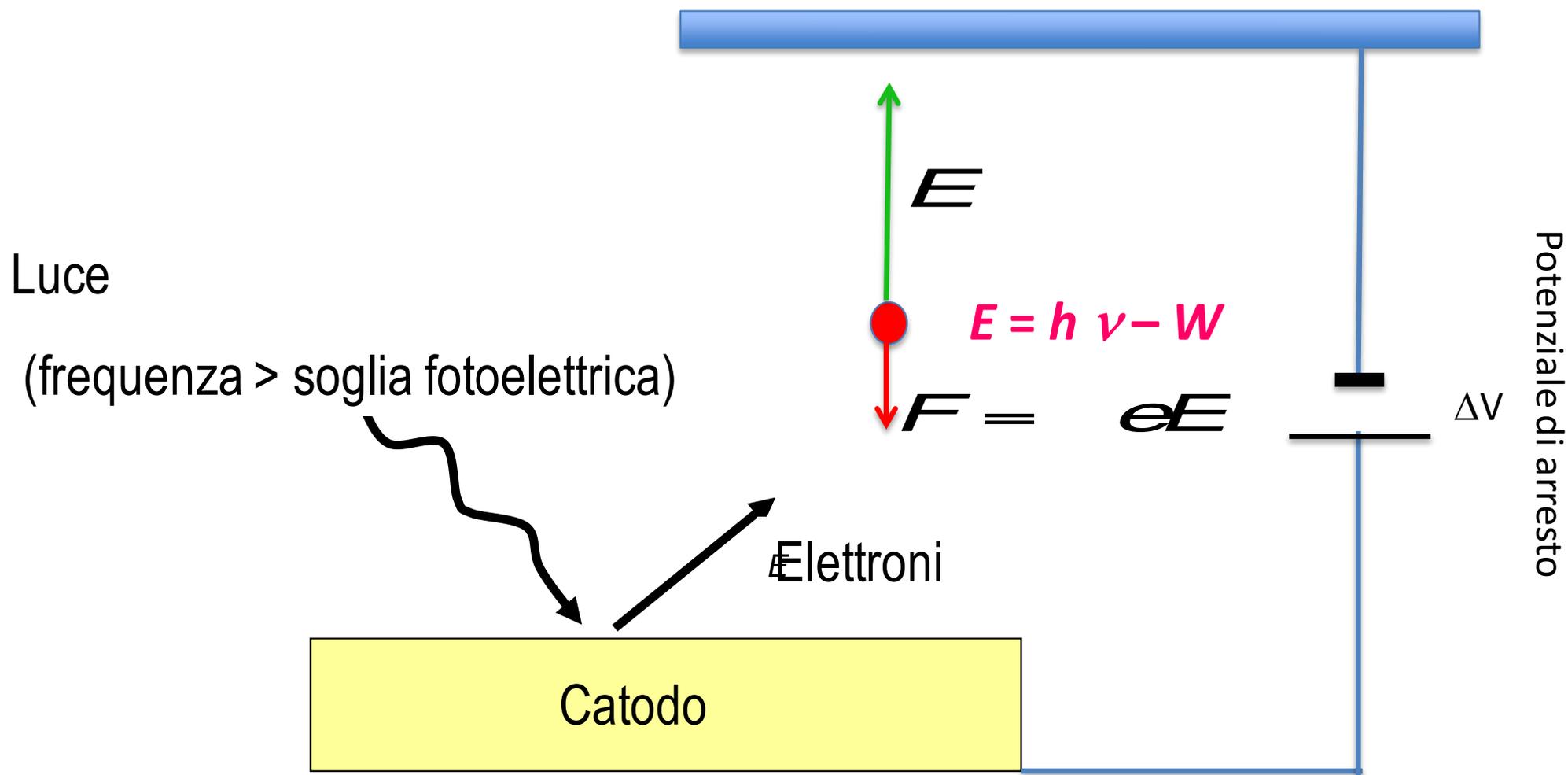
$$E = h\nu$$

dove ν è la frequenza e h è una costante (costante di Planck).

Nella fotoemissione, uno di questi quanti di energia viene assorbito da un elettrone del fotocatodo, ed emesso con energia

$$E = h\nu - W$$

dove l'energia minima necessaria ad estrarre l'elettrone, chiamata "lavoro di estrazione", si è indicata con W .



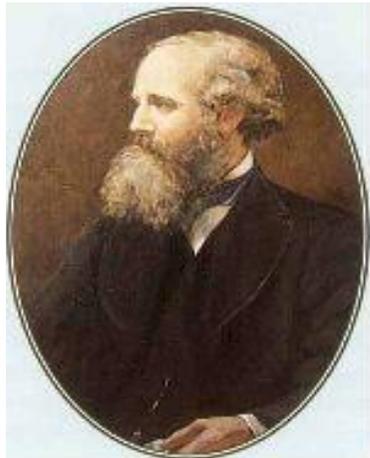
Affinché l'elettrone emesso riesca a raggiungere l'anodo a potenziale di arresto pari a $-\Delta V$, rispetto al catodo emettitore, deve possedere una energia a $E = e \Delta V$.

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

i Fotoni !

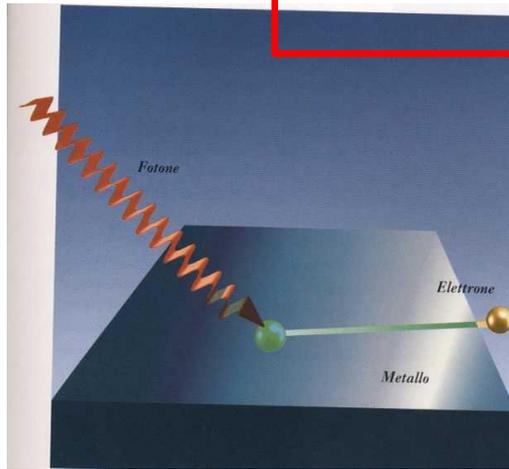
Elettromagnetismo
Classico

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



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

... e la
DIFFRAZIONE !?!



Einstein (1905)

Planck

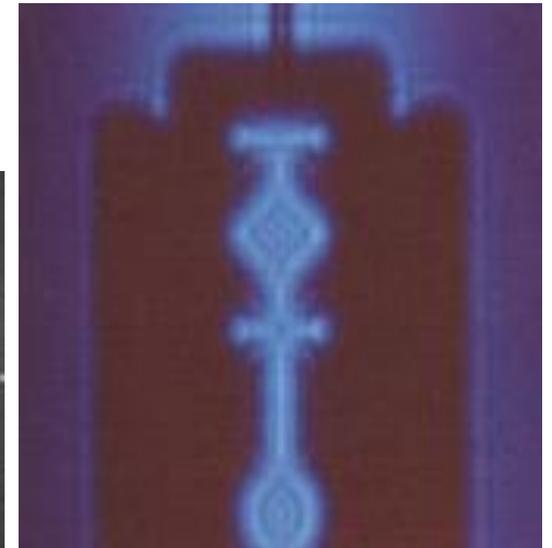
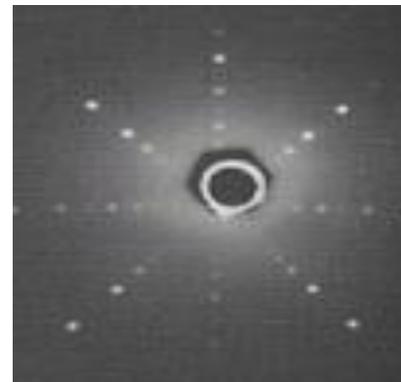
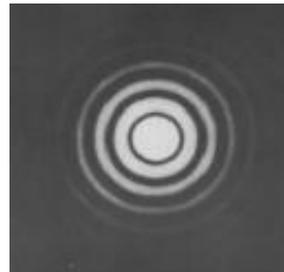
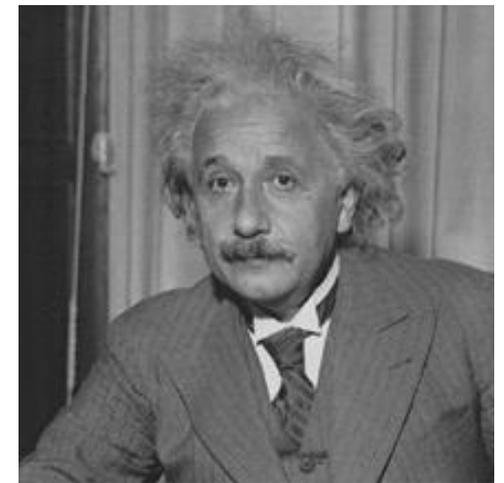
$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

Relazioni
Planck - Einstein

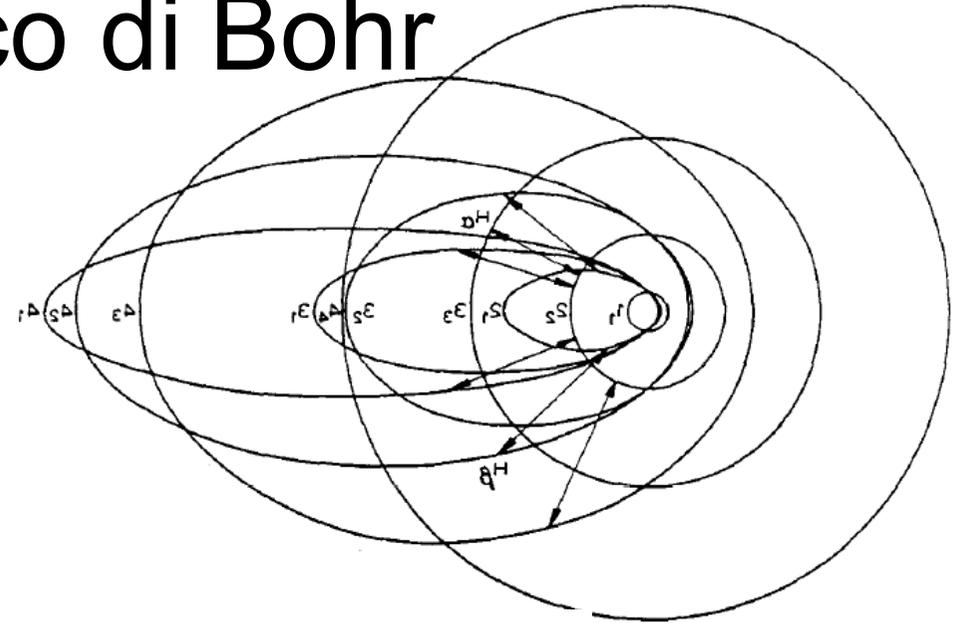
$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

Invariante
Relativistico

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



Modell Atomico di Bohr



$$L = n \hbar \implies m v r = n \hbar \implies r = \frac{n \hbar}{m v} \quad n \in \mathbf{Z}_>$$

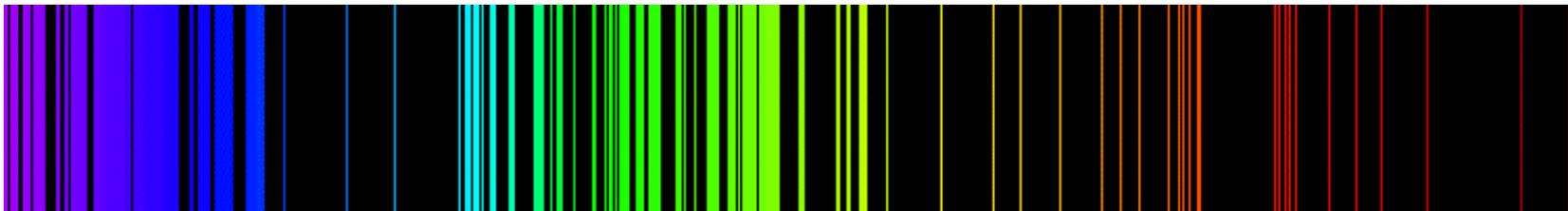
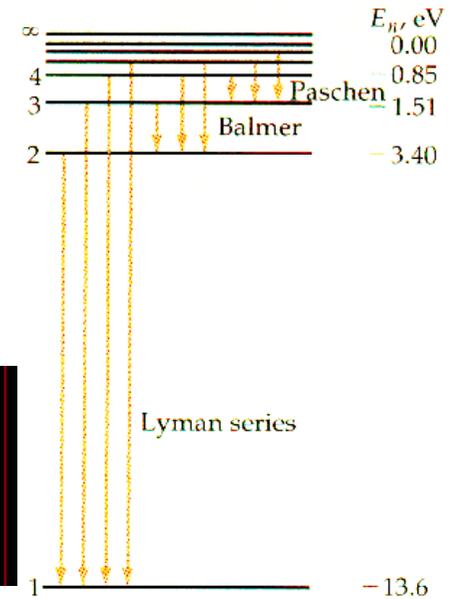


Formula di Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, \dots$$

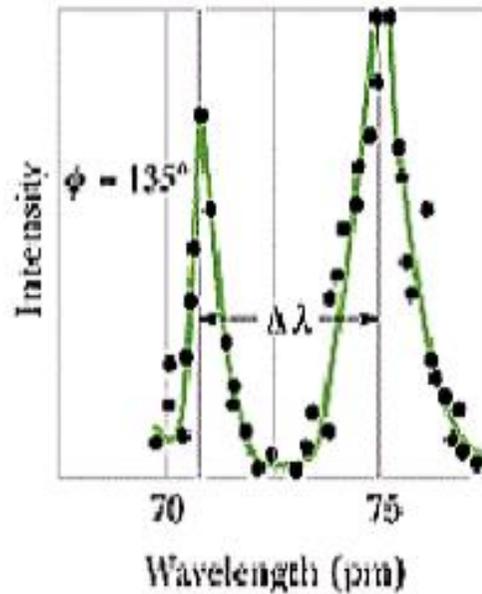
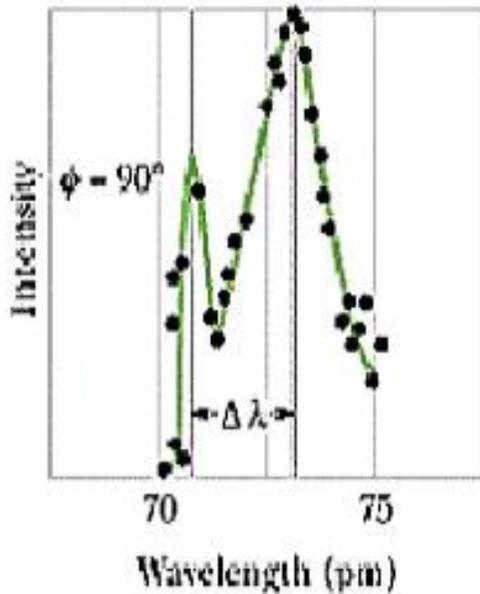
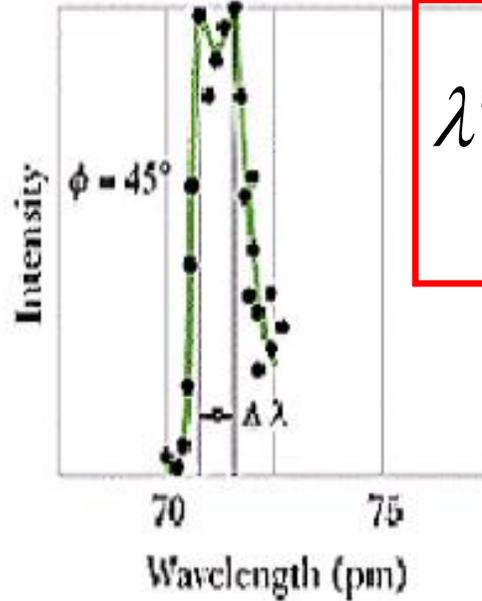
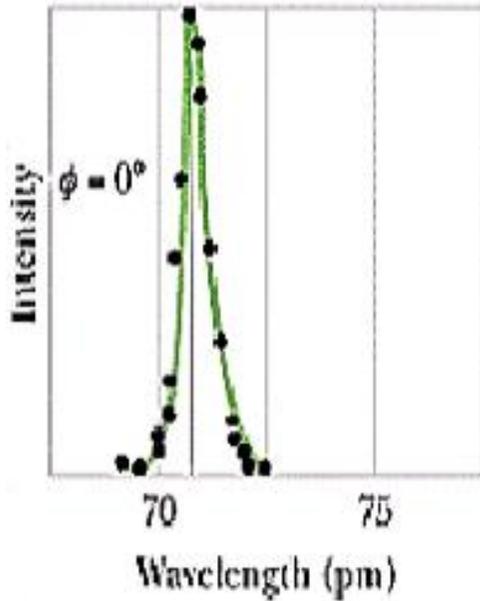
$$\nu = N^2 K \left(\frac{1}{n''^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

$$h\nu = E_i - E_f$$



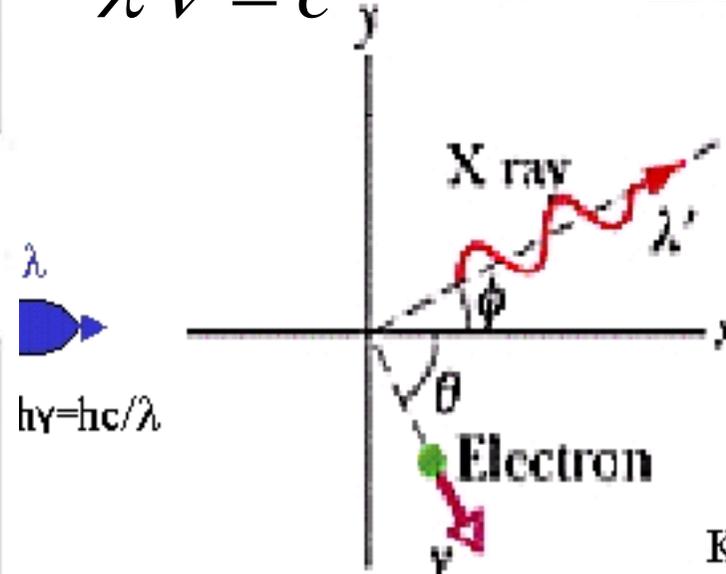
(1923)

Effetto Compton



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

$$\lambda \nu = c$$



• Cons. dell'energia

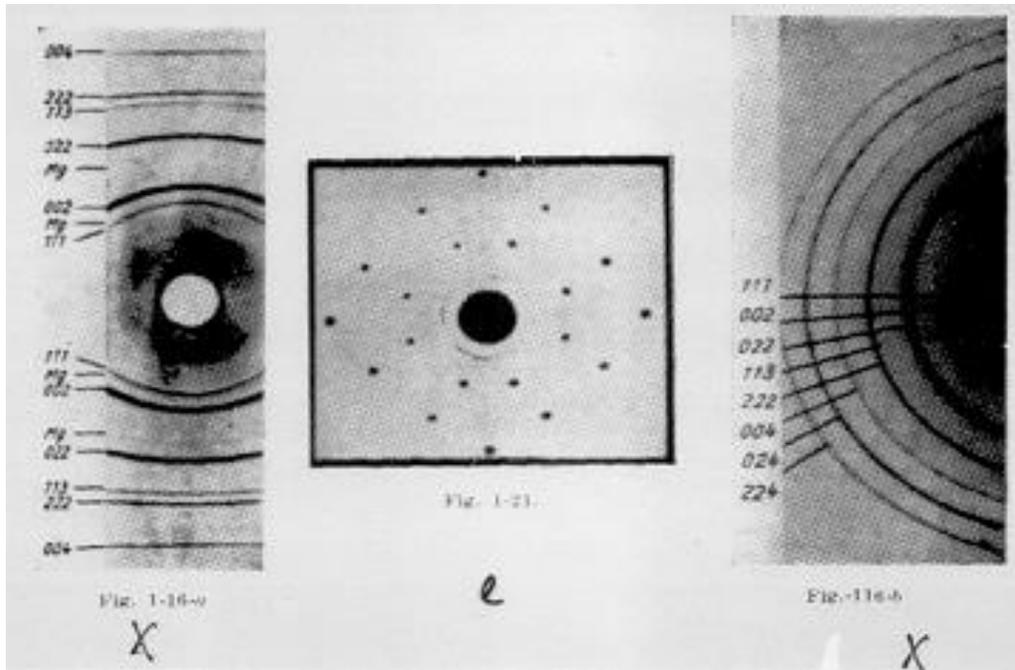
$$E = E' + K$$

• Cons. Quantità di moto

$$\vec{p}_X = \vec{p}_X' + \vec{p}_e$$

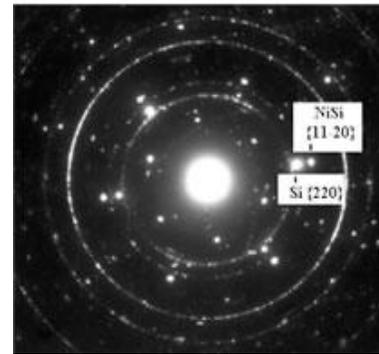
$$p_x = \frac{h}{\lambda}, p'_x = \frac{h}{\lambda'}, p_{el} = \gamma m_{el} \nu$$

Diffrazione di luce e di particelle

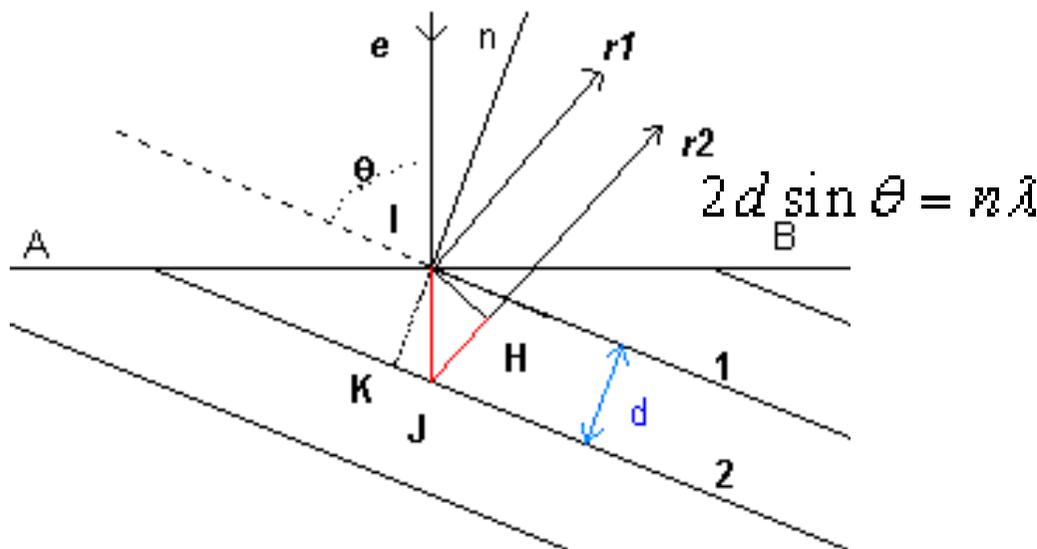
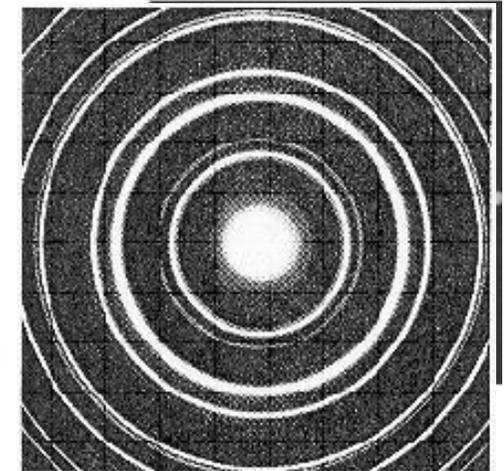


Diffrazione di
elettroni su
cristalli di
ossido di Zn
(Fresnel)

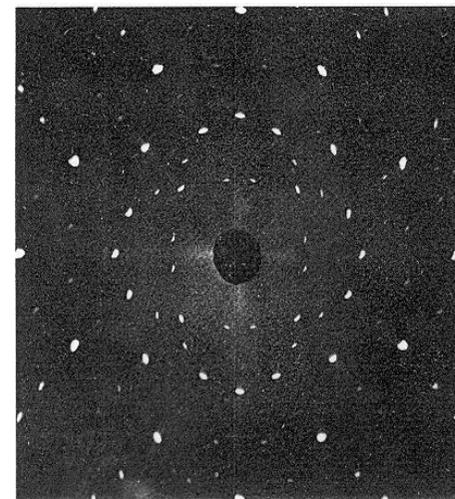
Elettroni
su Au
policristallino



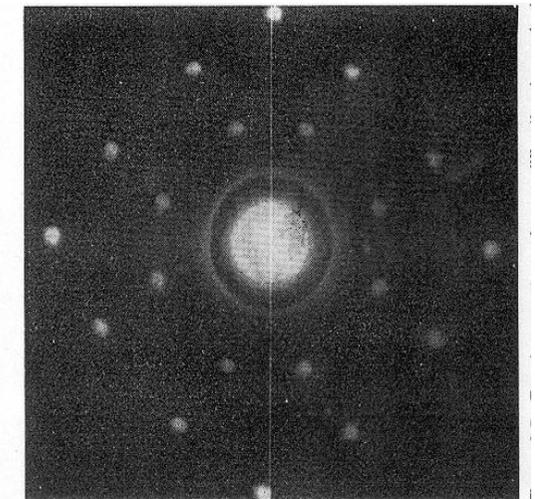
Diffrazione
di elettroni
su NiSi



Diffrazione di Bragg

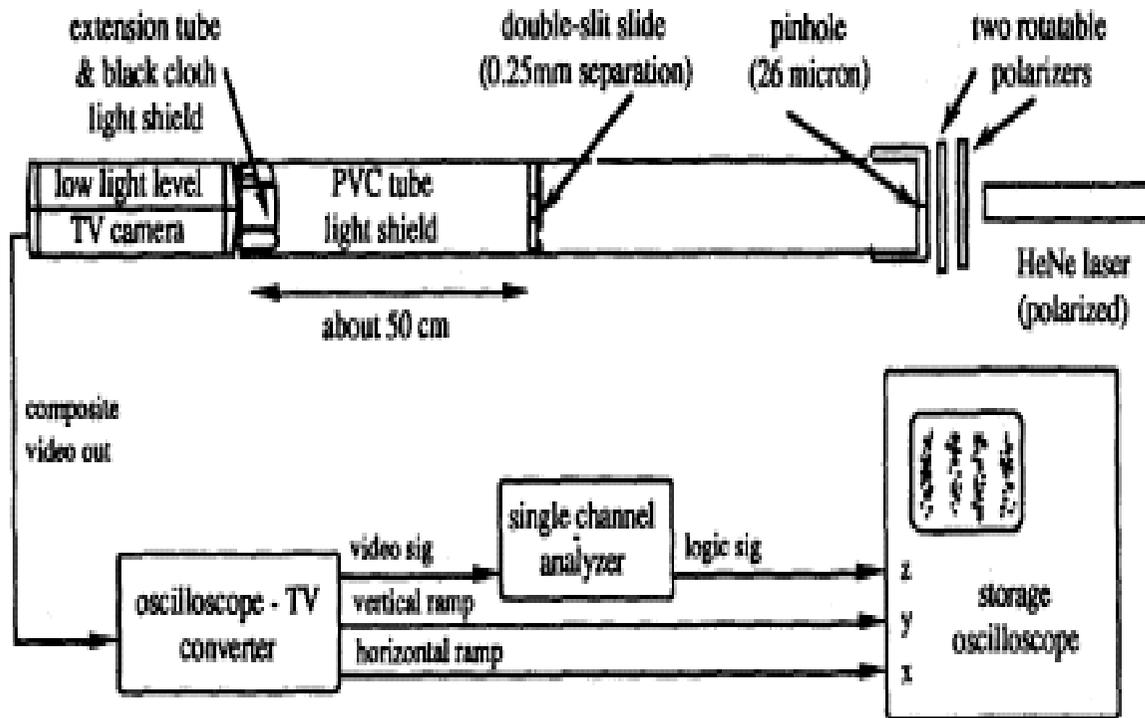


Raggi X su
un monocristallo di NaCl



Neutroni termici su
un monocristallo di NaCl

Diffrazione di singolo fotone



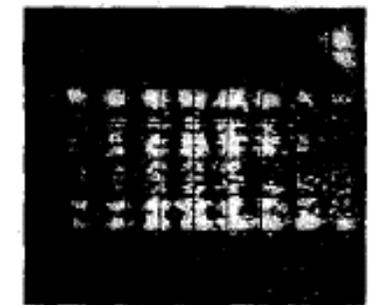
(a) 5 seconds



(b) 30 seconds



(c) 1 minute



(d) 2 minutes



(e) 1 minute

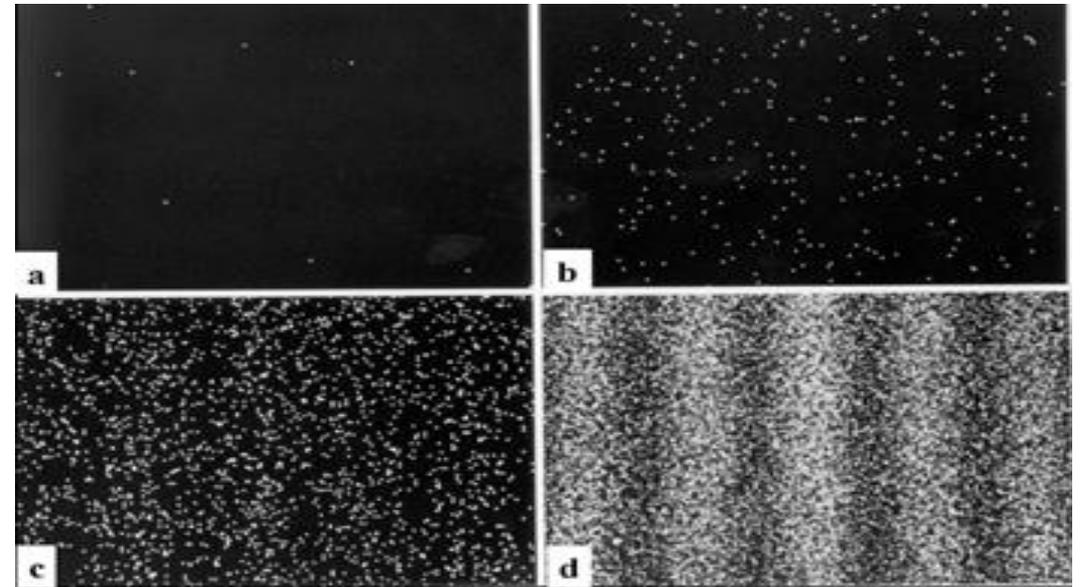
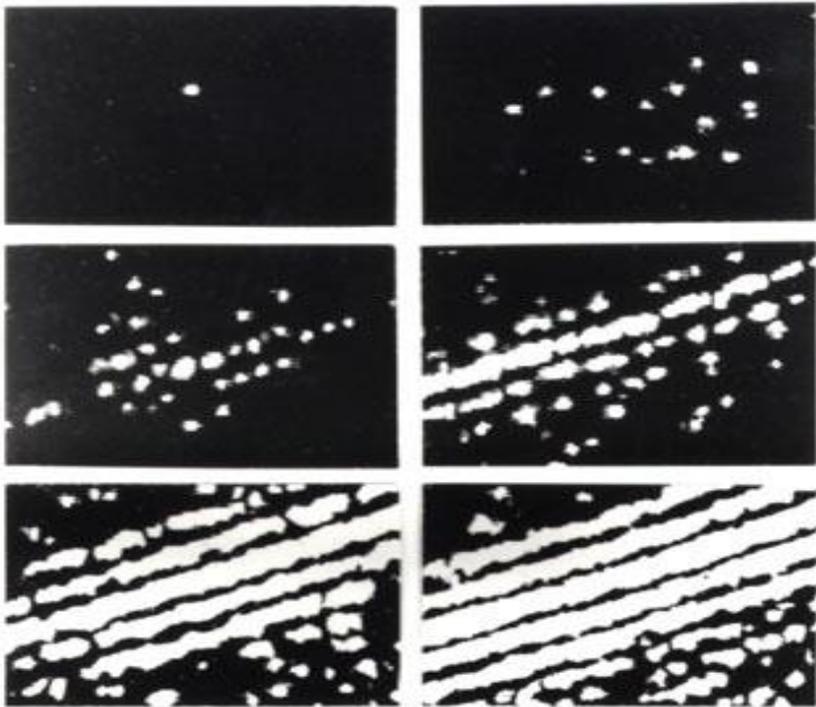
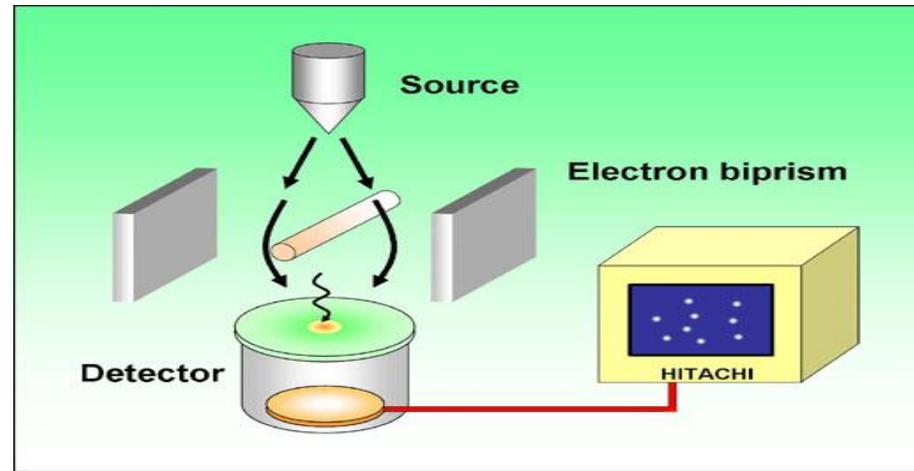


(f) 2 minutes

Wolfgang Rueckner and Paul Titcomb[†] Am. J. Phys. **64** (2), February 1996 184

Fig. 2. Photographs of the storage oscilloscope display. (a)–(d) The accumulation of the double slit events; (e) one slit open followed by (f) the other slit open.

Elettrone su doppia fenditura



P.G. Merli, G.F. Missiroli, G. Pozzi,
Am. J. Phys. 44 (1976) 306-7.

Complementarietà onda-corpuscolo

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

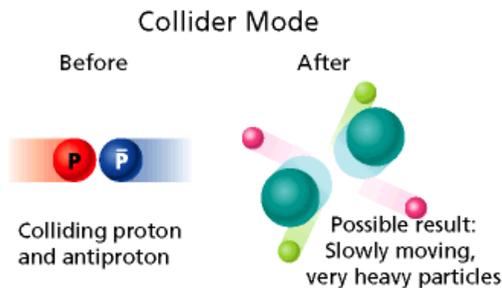
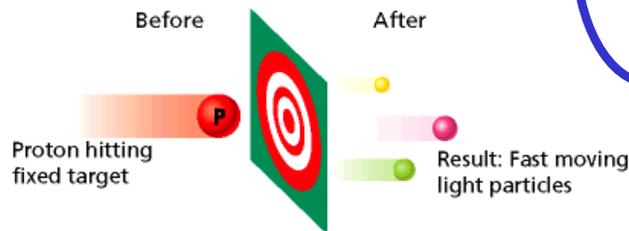
$$h = 6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$$

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

determina la **granularità intrinseca** della natura,

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

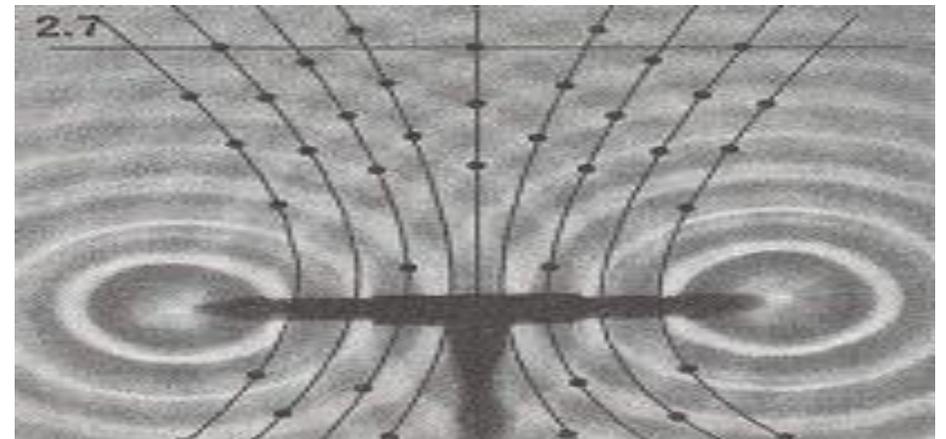
Grandezze
corpuscolari



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

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

Grandezze
“ondulatorie”



- Altre scale universali:

- $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$

Velocità della luce

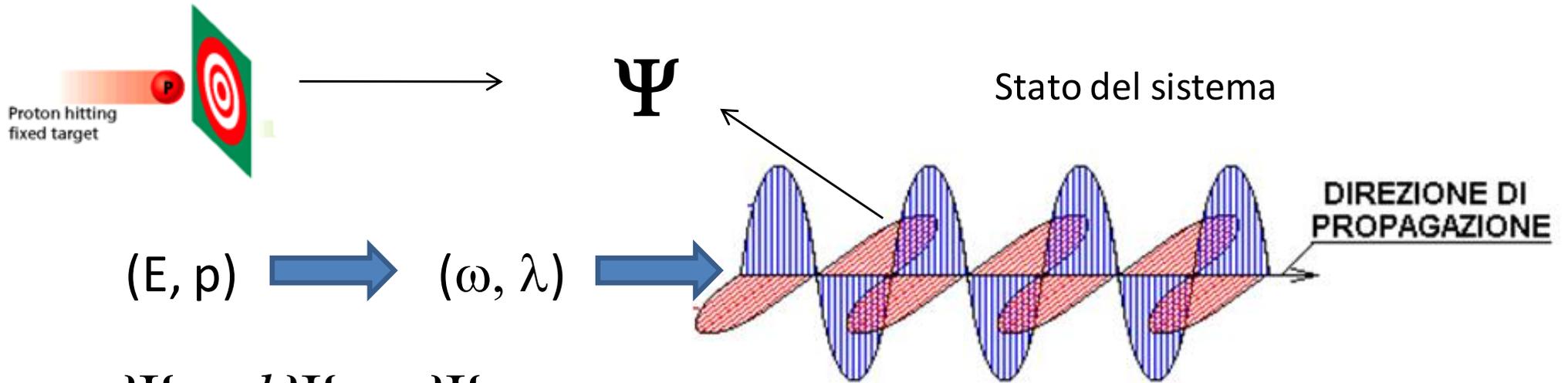
- $\alpha = 0.00729735$

Cost. Struttura Fine

- $M_{\text{Planck}} = 1.3 \times 10^{19} \text{ GeV}$

Massa di Planck

Onde e Probabilità'



$$(E, p) \longrightarrow (\omega, \lambda)$$

$$a\Psi_1 + b\Psi_2 = \Psi \quad \text{Gli Stati si sommano}$$

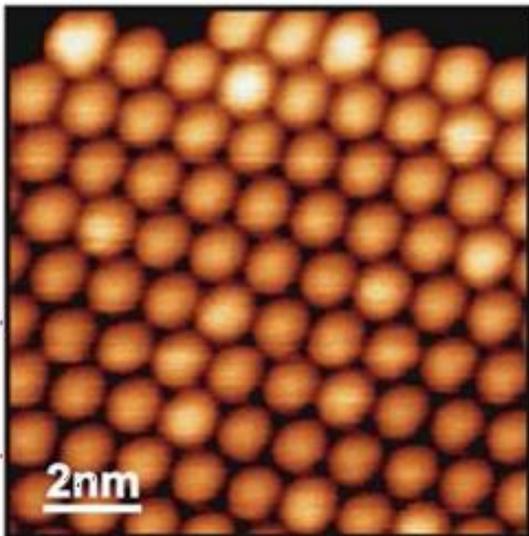
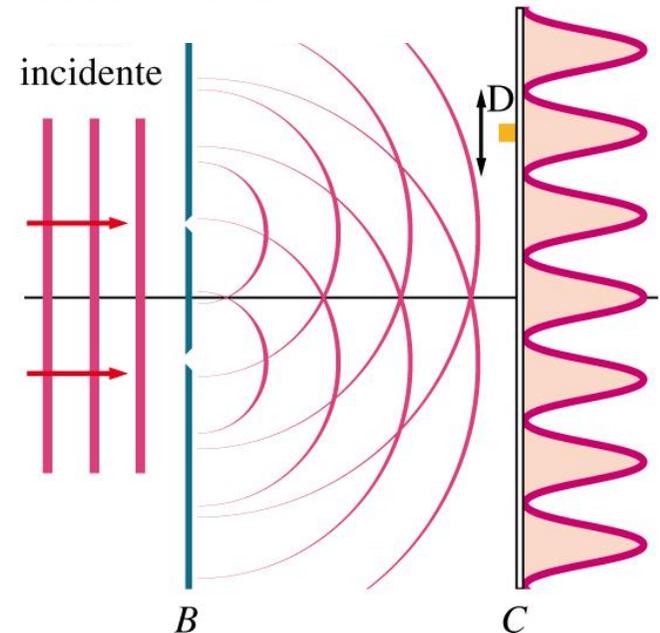
$$|\Psi(\vec{x}, t)|^2$$

Densità di **Probabilità'**
di presenza in \vec{x}

osservabile !!!

In generale:
lo stato di un sistema e'
l'insieme di delle distribuzioni
di probabilità dei possibili
OSSERVABILI

$$\hat{x} \quad \hat{p} \quad \hat{E}, \quad \hat{L}, \quad \hat{S}, \square$$



Osservabili incompatibili

Le distribuzioni di probabilita' di differenti osservabili dinamiche possono essere correlate e in generale **non** possono essere scelte indipendentemente le une dalle altre

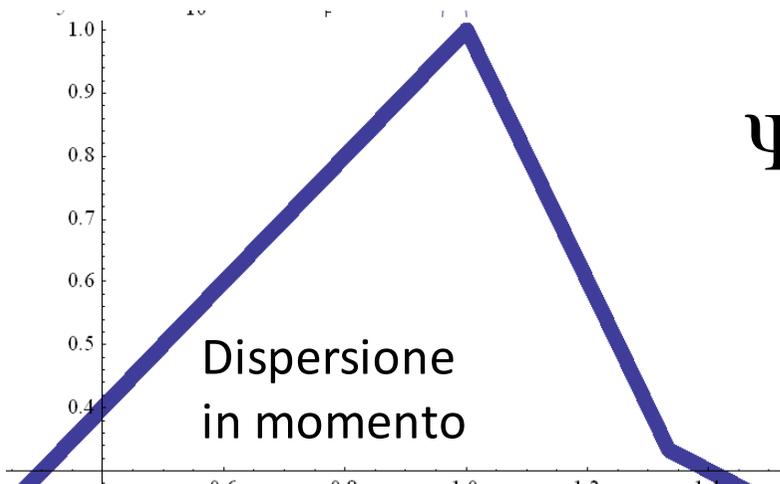
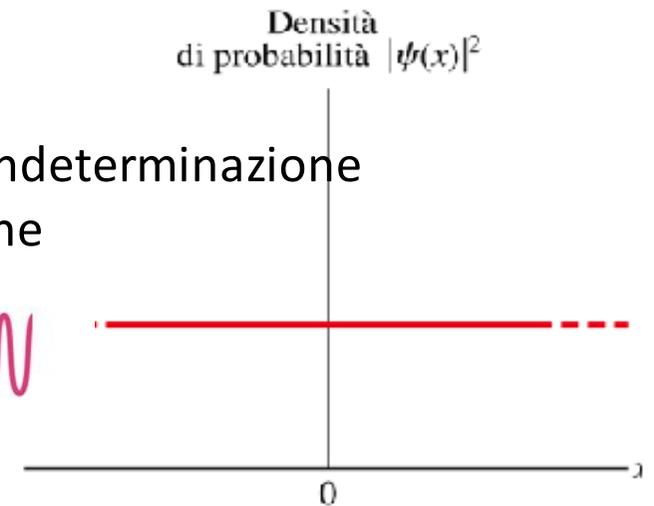
Assoluta precisione
in momento

$$\hat{\vec{p}} \rightarrow \vec{p} \quad \longrightarrow$$

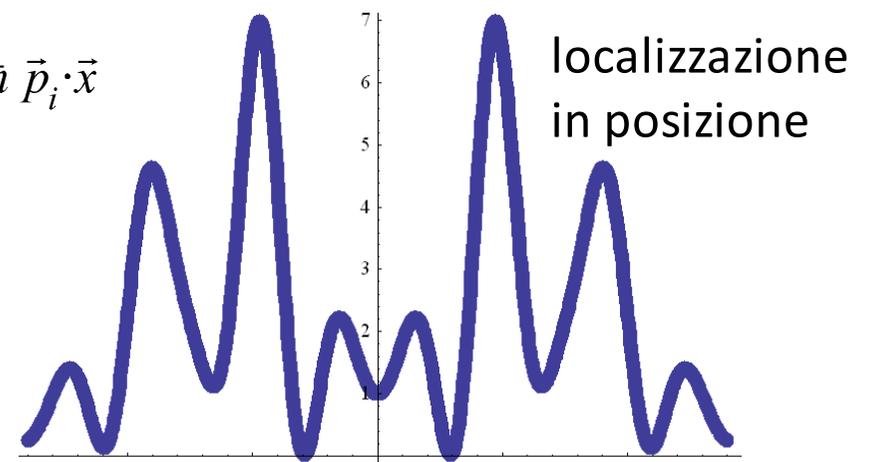
$$\Psi \sim e^{-i/\hbar \vec{p} \cdot \vec{x}} \quad \text{wavy lines} + i \quad \text{wavy lines}$$

$$(e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta)$$

Assoluta indeterminazione
in posizione



$$\Psi \sim \sum \psi_i e^{-i/\hbar \vec{p}_i \cdot \vec{x}}$$



Principio di indeterminazione di Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2 \quad \text{dove } \hbar = h / 2\pi$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar / 2 \quad (\text{principio di indeterminazione di Heisenberg})$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar / 2$$

Come esempio, Δx e Δp_x rappresentano le incertezze **intrinseche** nelle misure delle componenti di \mathbf{r} e di \mathbf{p} lungo x .

Equazione di Schroedinger

Una particella in moto lungo l'asse x attraverso una regione in cui le forze agenti sulla particella le conferiscono un'energia potenziale $V(x)$ si ha:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi + E \psi - V(x) \psi = 0$$

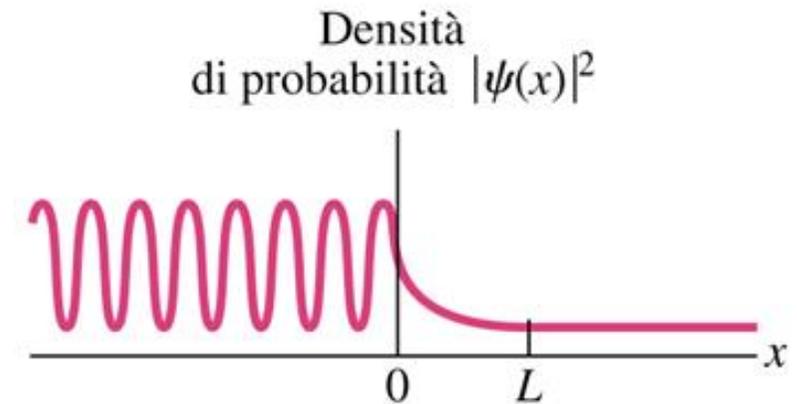
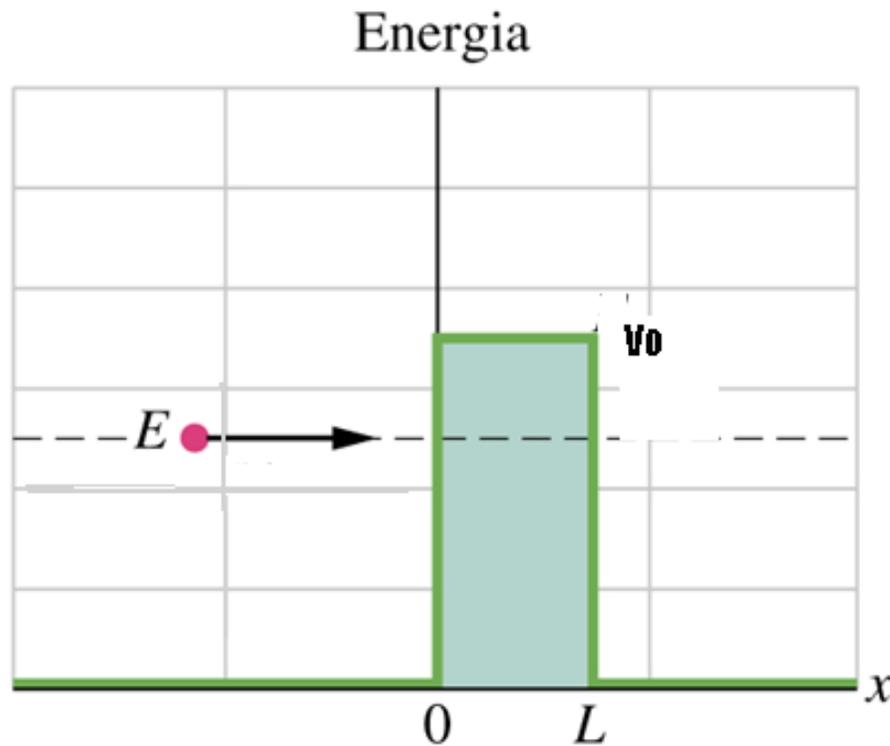
in cui E è l'energia meccanica totale della particella in moto.

Se $V(x)$ è nullo, l'equazione descrive una **particella libera**,

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \frac{mv^2}{2} \psi = 0 \rightarrow \frac{d^2}{dx^2} \psi + \frac{p^2}{\hbar^2} \psi = 0 \longrightarrow \psi \sim e^{\pm i/\hbar \vec{p} \cdot \vec{x}}$$

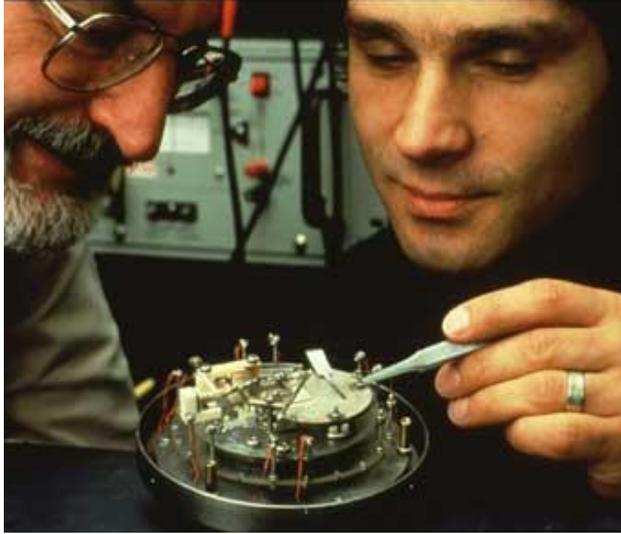
Effetto tunnel

Nella Meccanica Quantistica per una particella in moto con energia totale $E < V_0$ esiste una probabilità finita che l'onda di probabilità *penetri* attraverso la barriera e giunga dall'altra parte. Questo fenomeno prende il nome di **effetto tunnel**.



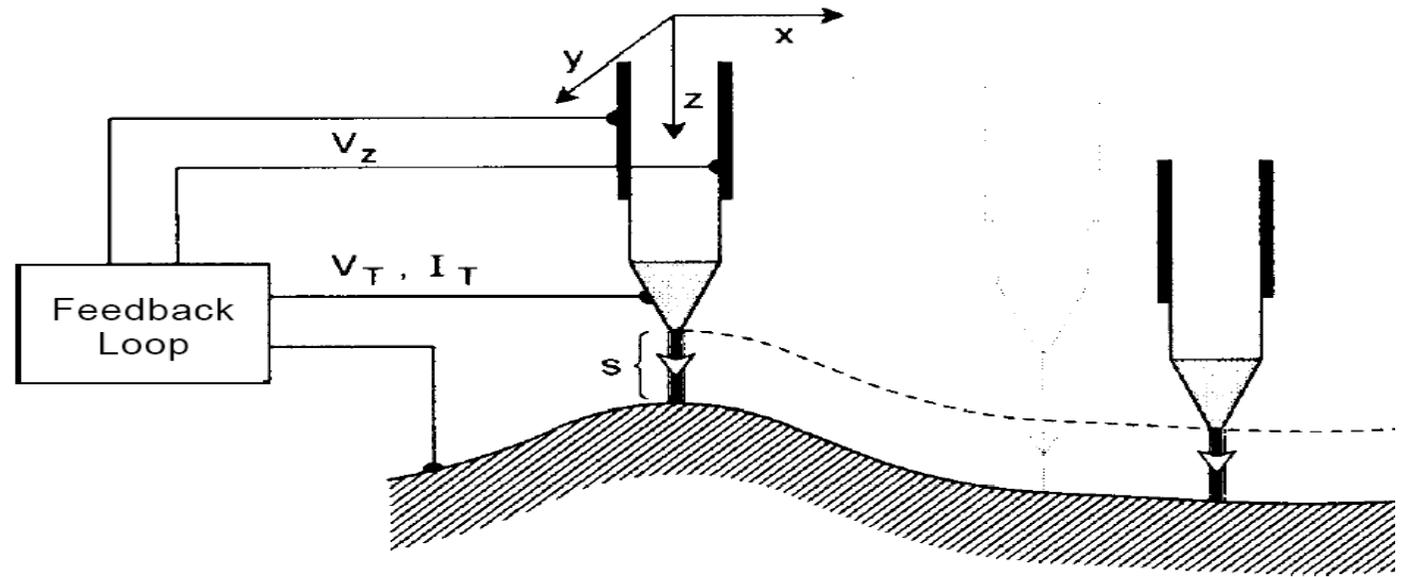
Coefficiente di trasmissione

$$T \approx e^{-2bL} \quad b = \sqrt{\frac{8\pi^2 m (U_b - E)}{h^2}}$$



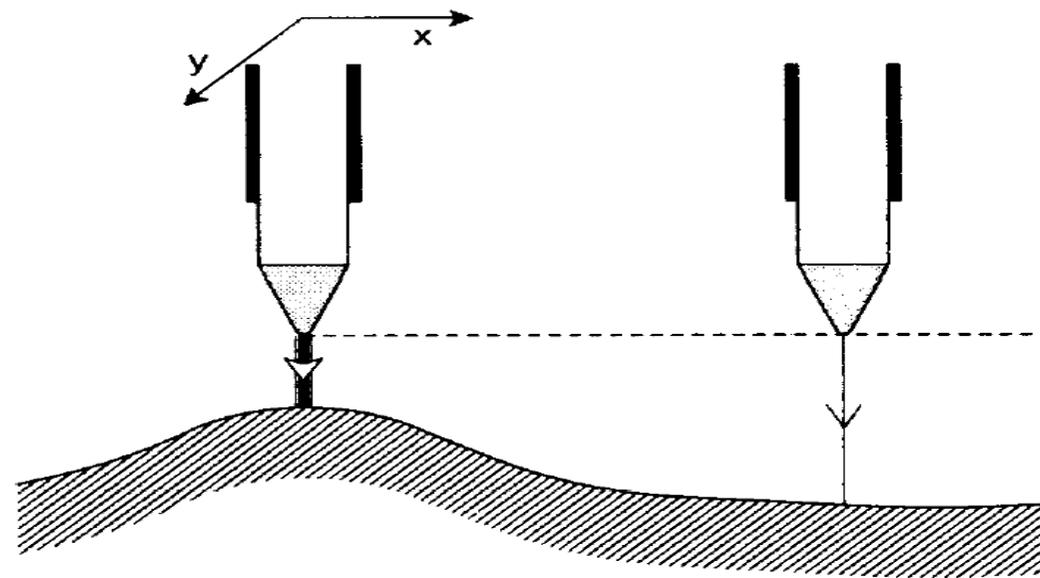
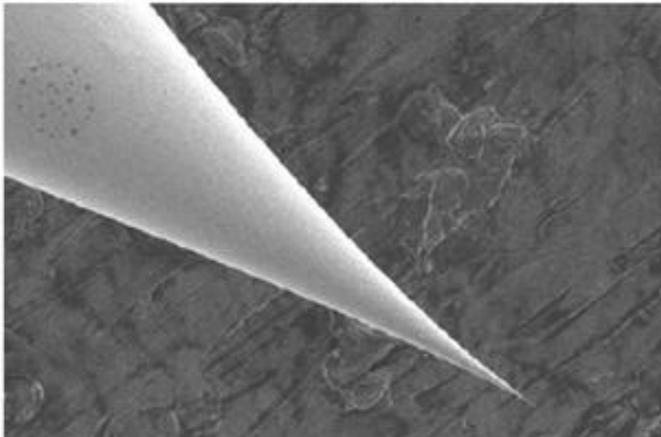
G. Binnig, H. Rohrer
Nobel 1986

Constant Current Mode

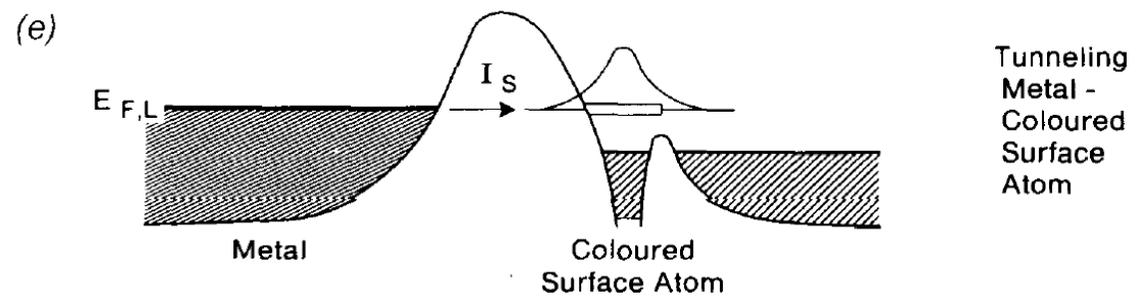
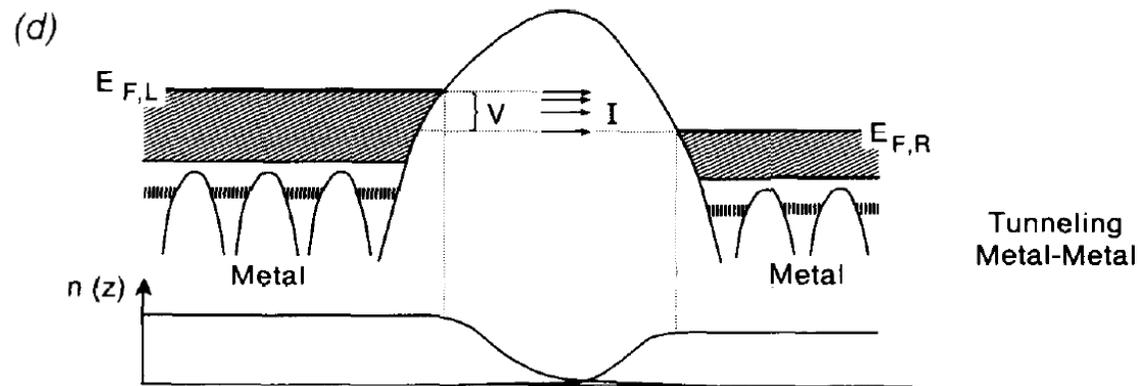
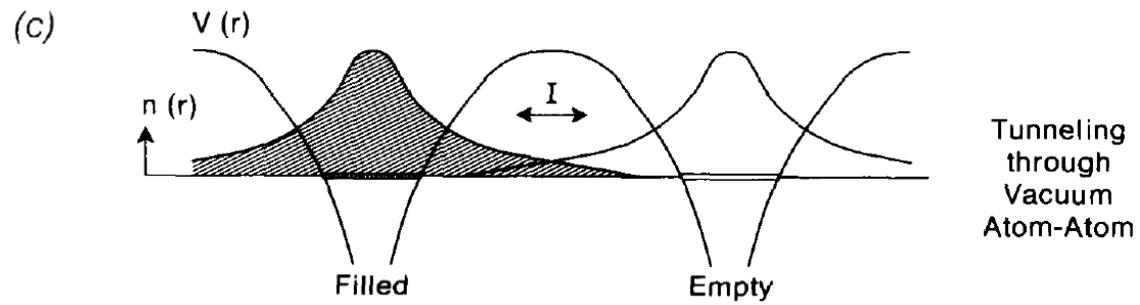
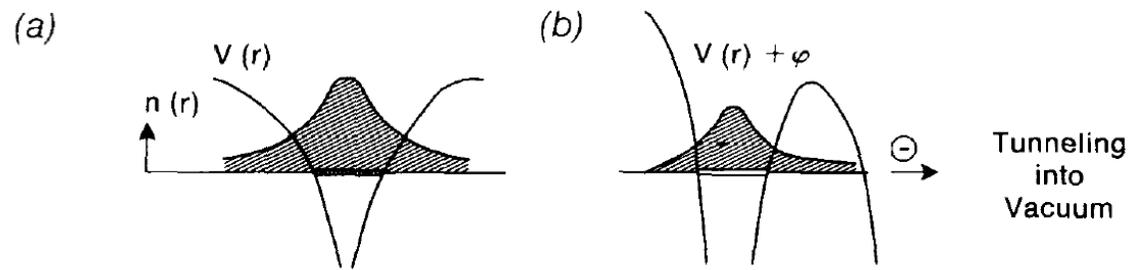


$$V_z (V_x, V_y) \rightarrow z (x, y)$$

Microscopio ad Effetto Tunnel



$$\ln I (V_x, V_y) \rightarrow \sqrt{\Phi} \cdot z (x, y)$$



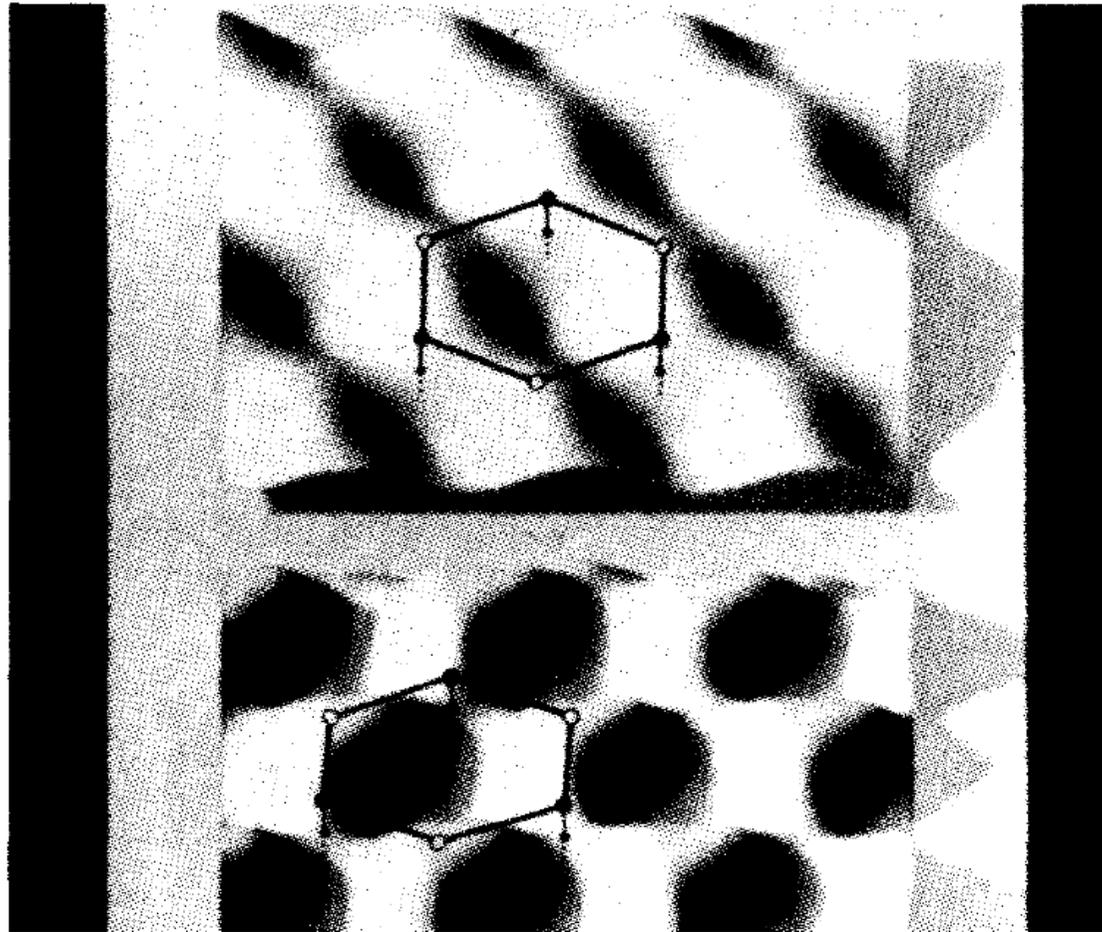
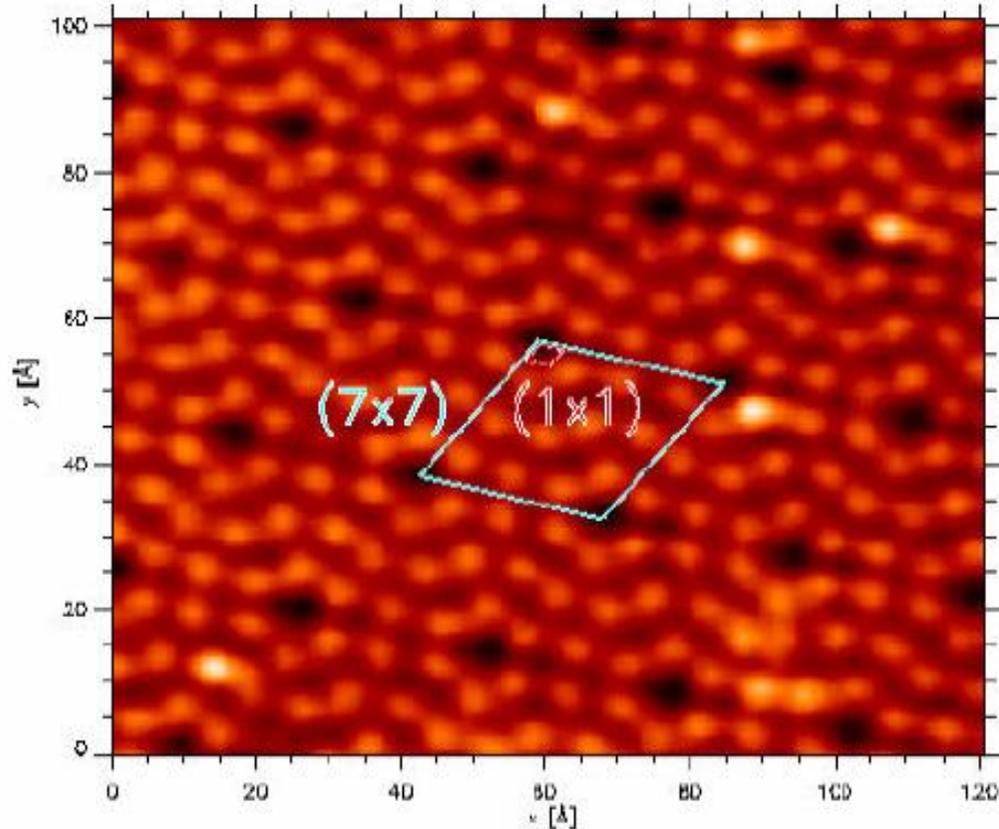
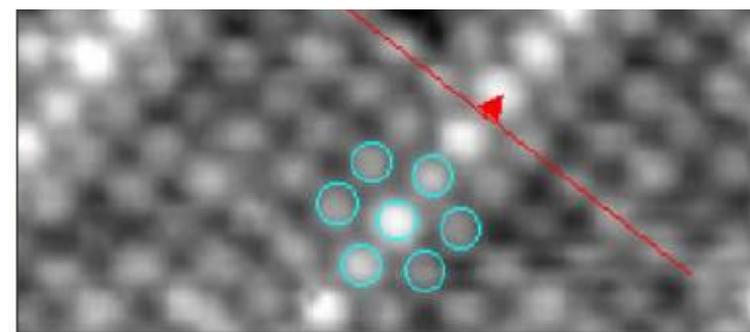


Fig. 7. STM image of cleaved graphite. The top image was taken at a constant tunnel current of 1 nA and at 50 mV. The corrugation traced by the tip reflects the local density of states (LDOS) at the Fermi level and *not* the positions of atoms, which form a flat honeycomb lattice as indicated. The LDOS at the atoms bound to the neighbors in the second layer (open circles) is lower than at the “free” atoms. The image is thus rather a spectroscopic than a topographic one. The middle image is a “current image” showing essentially the same pattern.

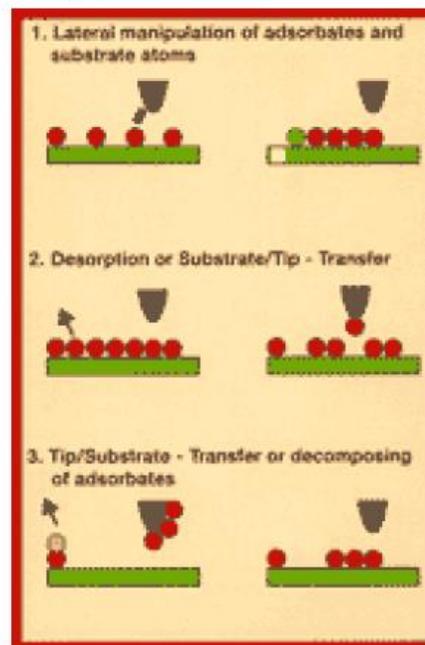


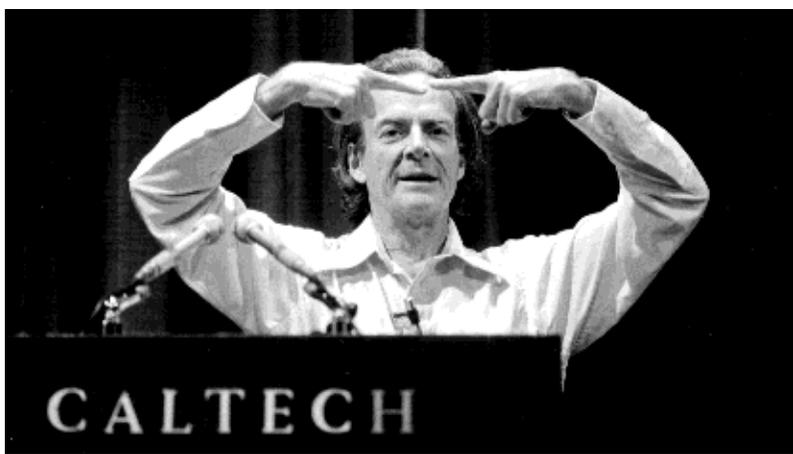
STM image
Si(111)-7x7

D.M. Eigler, E.K. Schweizer. Positioning single atoms with a STM. *Nature* 344, 524-526 (1990)



Further: atom manipulation (bottom-up approach)





Noi sappiamo quale è il comportamento degli elettroni e della luce. Ma come potrei chiamarlo? Se dico che si comportano come particelle, dò un'impressione errata. Ma anche se dico che si comportano come onde. Essi si comportano nel loro proprio modo inimitabile che tecnicamente potrebbe essere chiamato il

"modo quanto meccanico".

Si comportano in un modo che non assomiglia a nulla che possiate aver mai visto prima. La vostra esperienza con cose che avete visto prima è incompleta. Il comportamento delle cose su scala molto piccola è

semplicemente diverso.

(R. P. Feynman)