

World Year of Physics 2005

Einstein in the 21st Century

Esperienze significative in Meccanica Quantistica

L. Martina

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

Help make 2005 another *Miraculous Year!*

Tricase 8/3/2005

Timed to coincide with the 2005 Centennial Celebration of Albert Einstein's *Miraculous Year*, the World Year of Physics 2005 will bring the excitement of physics to the public and inspire a new generation of scientists. Visit www.physics2005.org to find out how you can get involved.

www.physics2005.org



La Meccanica Quantistica nella Scuola Secondaria

Si

- la maggior parte degli sviluppi della fisica e della chimica è incomprensibile senza la MQ
- importanti applicazioni tecnologiche sono basate su leggi quantistiche,
- la MQ ci costringe a esaminare a fondo la trattazione classica (i "limiti"),
- - la MQ ha modificato in modo sostanziale l'approccio alla fisica dal punto di vista fondamentale.

No

- la MQ richiede strumenti matematici avanzati non in possesso degli studenti secondari,
- - è lontana dall'esperienza quotidiana, non è intuitiva, è astratta,
- - gli studenti hanno già sufficienti difficoltà ad apprendere la meccanica classica.

La Fisica E' il Mondo dei Quanti

Perché malleabile
e conduttore?



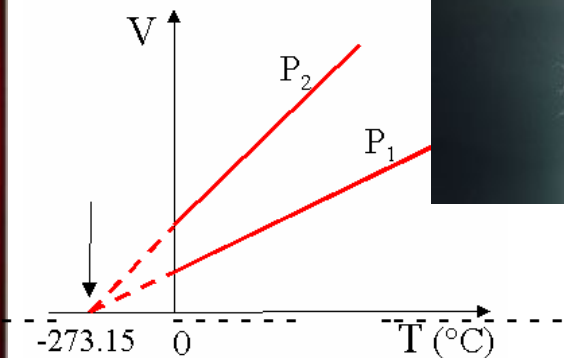
Perché duro e trasparente?



Come trasforma la luce in forza vitale?



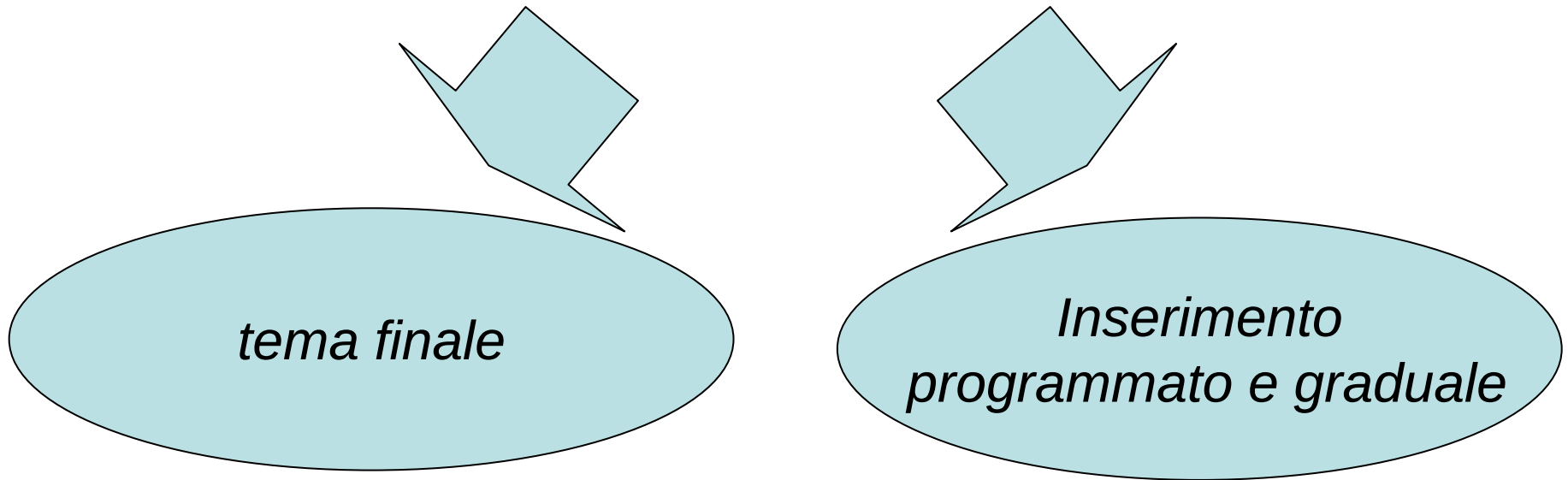
Come funziona?



Programmazione

- Aggancio alla fisica classica
- Riflessioni su alcuni concetti e procedure della fisica classica.

Modalità di inserimento



(In quasi tutti i manuali)

Impostazioni

Storica

- Esperimenti di “crisi” della Fisica Classica
- **relazioni fondamentali:** $E=h\nu$ $p=h/\lambda$

Fenomenologica

I “principi”: *complementarietà onda-corpuscolo, Corrispondenza, Indeterminazione, Sovrapposizione lineare*

Logico – formale

Enunciazione formale della meccanica quantistica (Spazi di Hilbert, Osservabili, meccanica ondulatoria e matriciale).

Cammini di Feynman

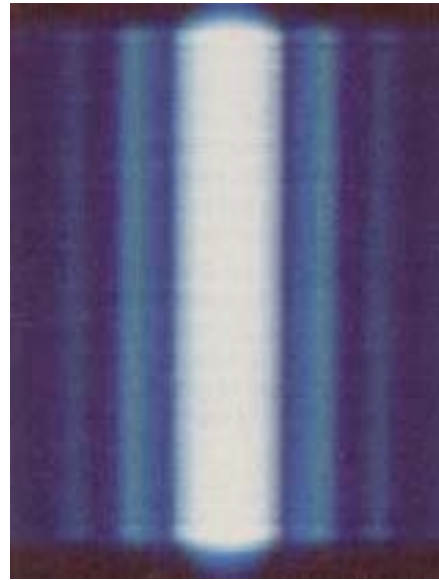
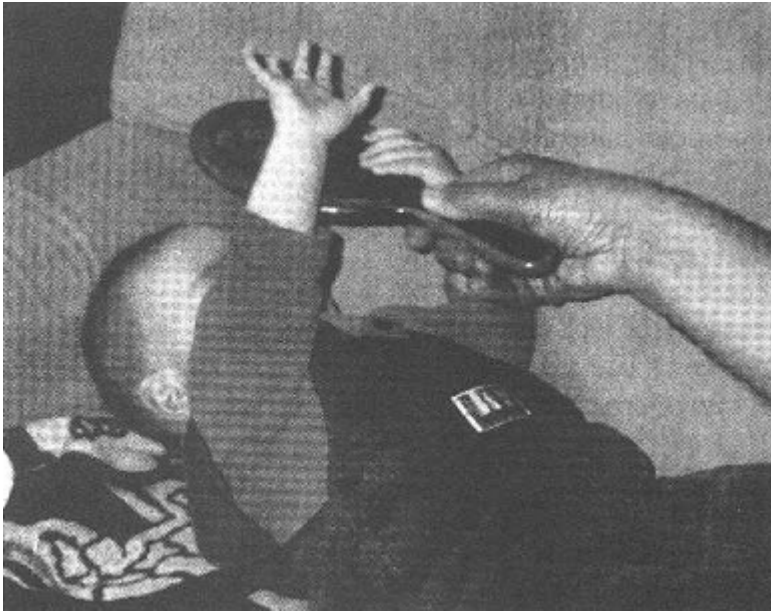
“Integrale sui cammini”

R. Feynman, *QED, la strana teoria della luce*, ADELPHI, 1985;

L. Borello, A. Cuppari, M. Greco, G. Rinaudo, G. Rovero,
Il metodo della "somma sui molti cammini" di Feynman per l'introduzione della Meccanica Quantistica: una sperimentazione nella Scuola di Specializzazione per l'Insegnamento, XXXIX Congresso Nazionale AIF - Milazzo - Ottobre 2000

Metodologia

I concetti Quantistici **non** possono essere costruiti sulla
sola osservazione e interpretazione
dei fenomeni e delle evidenze sperimentali **dirette**



- Il “mondo esterno” è **necessariamente** “classico”,
- L’esigenza di **coerenza interna** della Fisica richiede una forte **revisione critica** dei concetti della Fisica Classica.
- Il mondo dei fenomeni fisici non **è** lo stesso di prima!

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

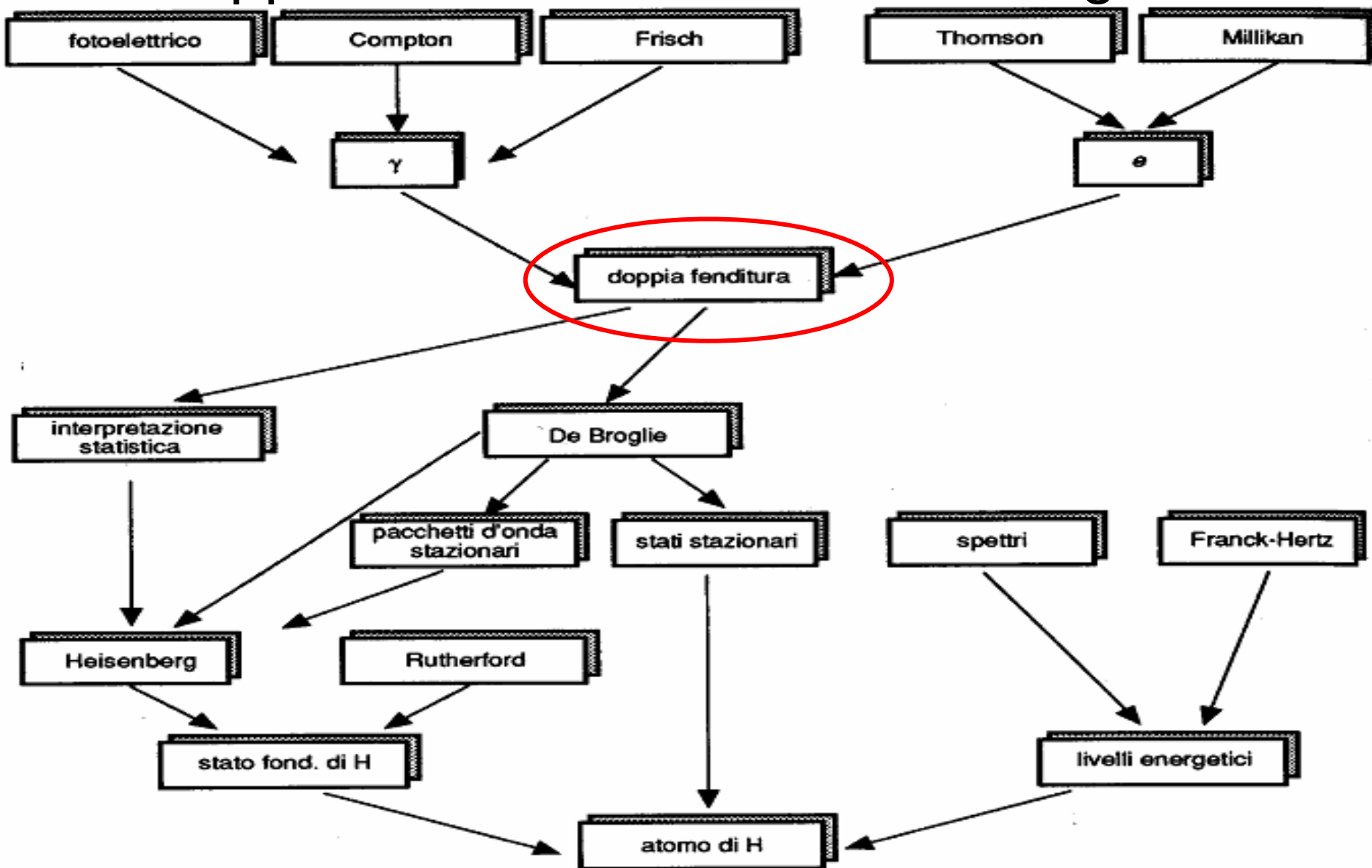
- Relazioni di Planck – Einstein – de Broglie
- proporzionalità fra grandezze descrittive di un **oggetto quantistico**

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

Grandezze “ondulatorie”

* Altre scale: **c = 299 792 458 m s⁻¹**, $M_{\text{Planck}} = 1.3 \times 10^{19} \text{ GeV}$
 Relatività Quantum Gravity

Approccio Storico - Fenomenologico



Esperimenti

Top 10 beautiful experiments – Physics World

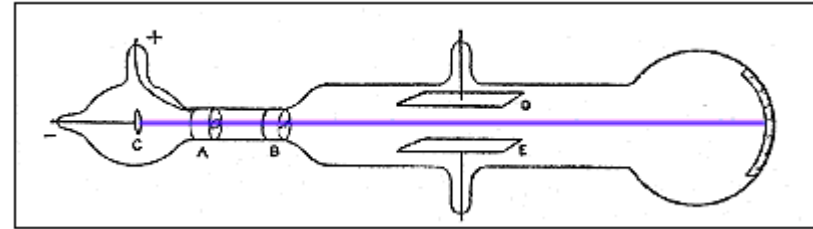
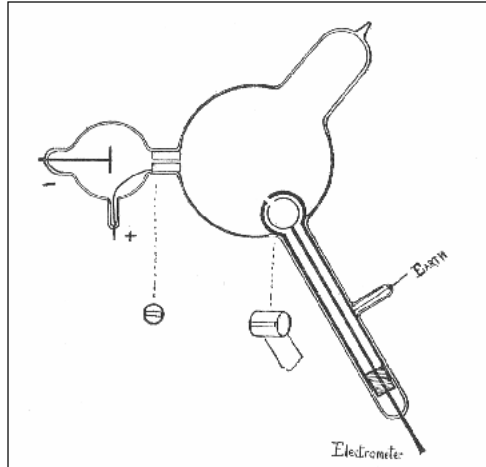
" The best experiments are simple and on a large scale, and their workings are obvious to the audience. The worst experiment is one in which something happens inside a box, and the audience is told that if a pointer moves, the lecturer has very cleverly produced a marvelous effect. Audiences love simple experiments and, strangely enough, it is often the advanced scientist who is most delighted by them." – (Michael Faraday)

- il contatto con il **fenomeno reale**,
- la possibilità di **intervenire per modificare** e far funzionare le cose,
- **capire** come le cose funzionano,
- **acquisire tecniche** sperimentali (usare strumenti e metodi)
- **indagare e scoprire** proprietà, leggi, relazioni, ecc.
- **verificare** ipotesi e leggi,
- **costruire modelli** o validarli,
- verificare i **limiti di applicabilità**

- | |
|---|
| 1 Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons |
| 2 Galileo's experiment on falling bodies (1600s) |
| 3 Millikan's oil-drop experiment (1910s) |
| 4 Newton's decomposition of sunlight with a prism (1665-1666) |
| 5 Young's light-interference experiment (1801) |
| 6 Cavendish's torsion-bar experiment (1798) |
| 7 Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference (3rd BC) |
| 8 Galileo's experiments with rolling balls down inclined planes (1600s) |
| 9 Rutherford's discovery of the nucleus (1911) |
| 10 Foucault's pendulum (1851) |



La scoperta dell'elettrone

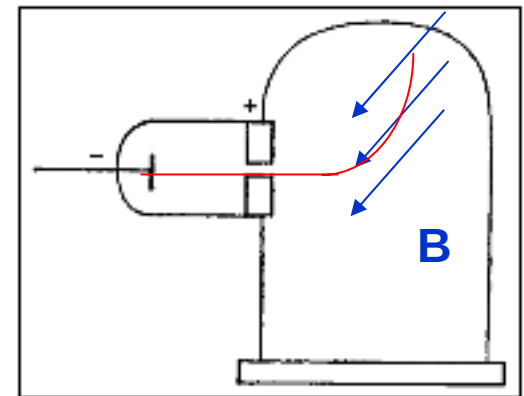


"We have in the cathode rays matter in a new state, a state in which the subdivision of matter is carried very much further than in the ordinary gaseous state: a state in which all matter... is of one and the same kind; this matter being the substance from which all the chemical elements are built up."

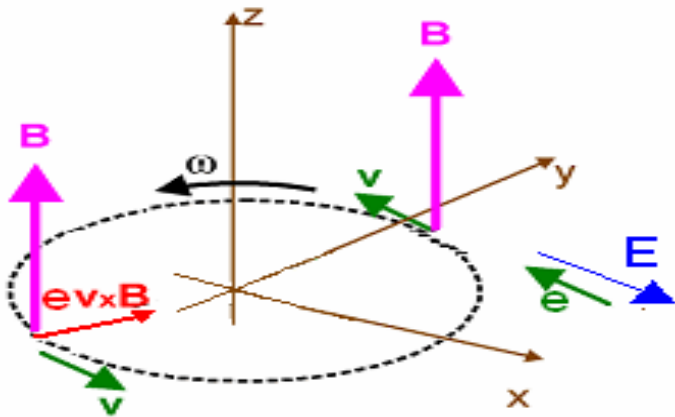
(J.J. Thomson, "*Cathode Rays*," The London Phil. Mag. J. Science, V, October 1897)

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

<http://www.aip.org/history/electron/jjhome.htm>



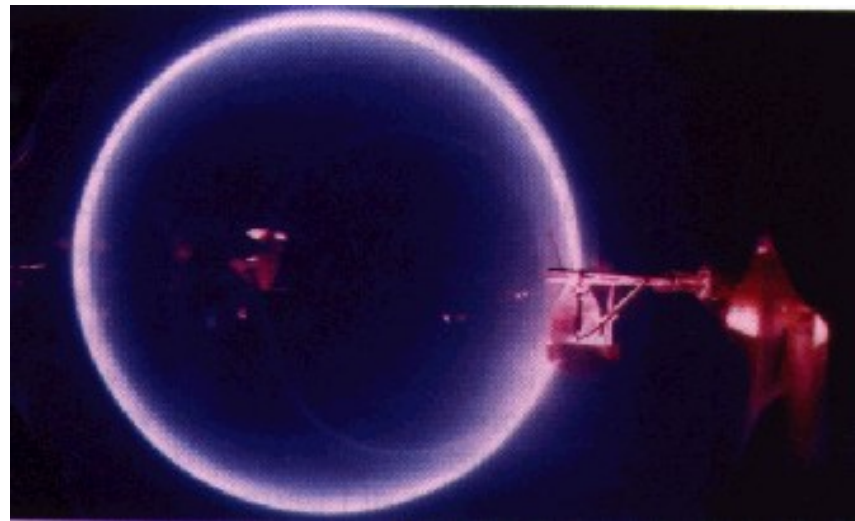
La carica dell'elettrone



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

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

tubo di Wehnelt
bobine di Helmholtz , alimentatori, voltimetri, amperometro
cavetti di collegamento



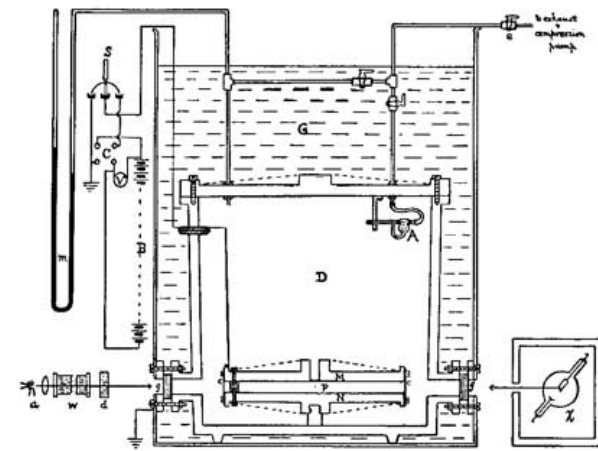
http://web.uniud.it/cird/secif/mec_q/mq.htm



L'esperienza di Millikan

$$e = 1.602\,176\,53(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

The NIST Reference on
Constants, Units, and Uncertainty



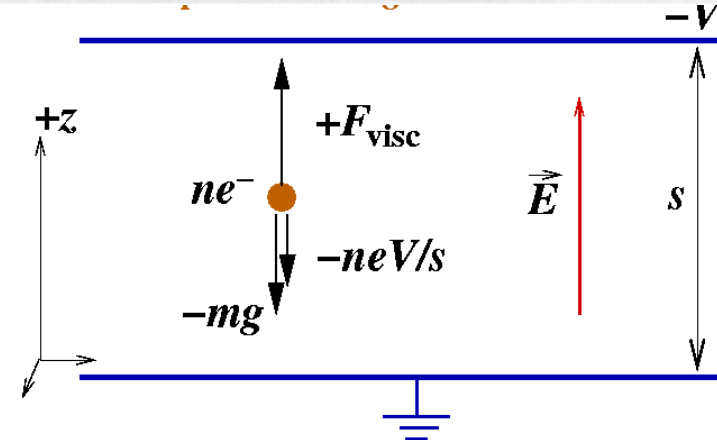
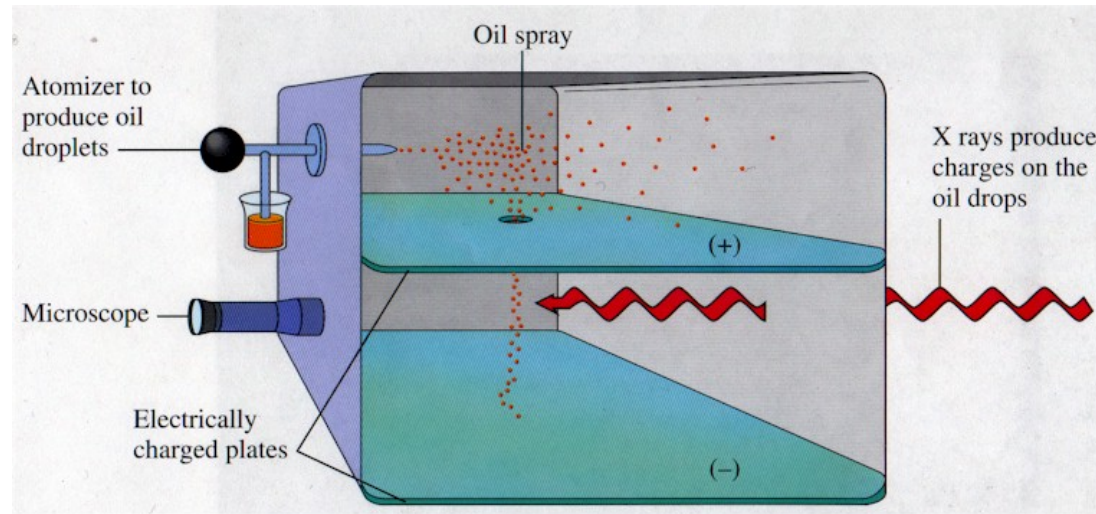
$$F_{\text{visc}} = 6\pi r \eta v \text{ velocità limite } v.$$

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

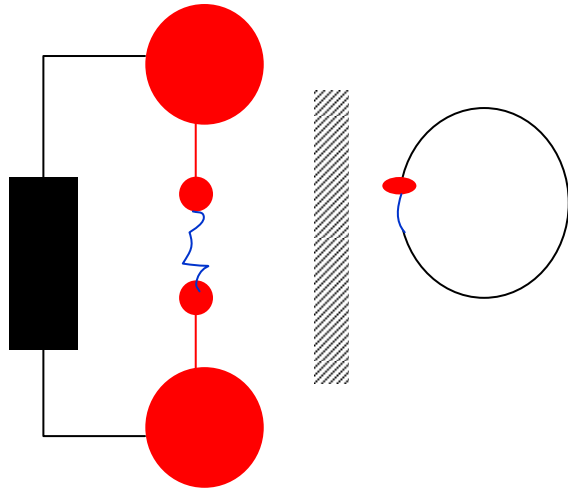
$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$$

$$QE = mg, \quad E = U/d:$$

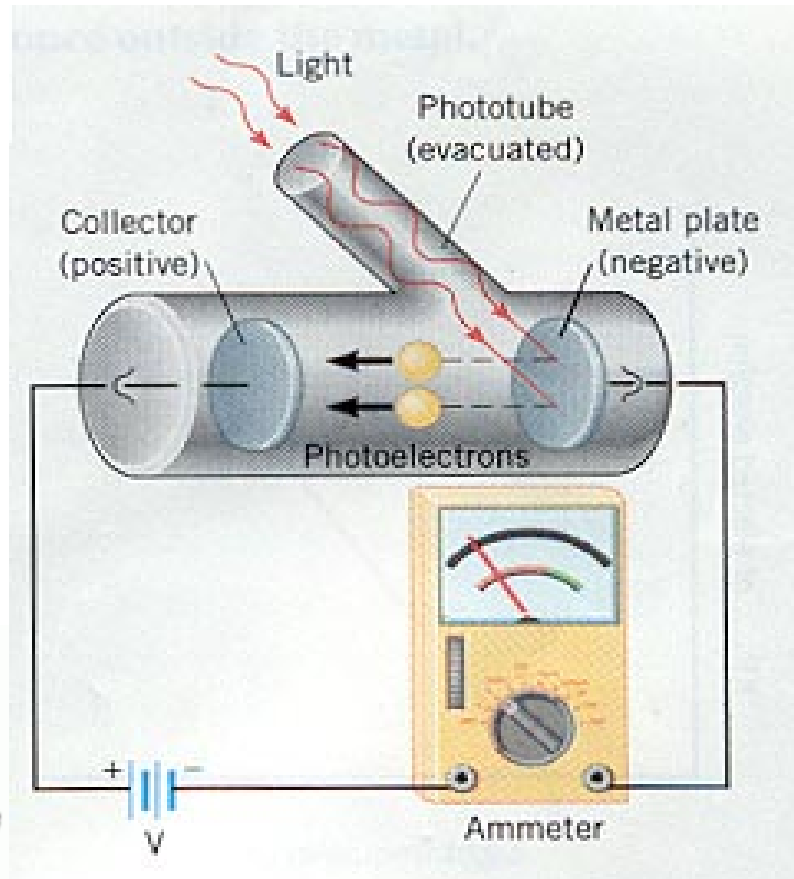
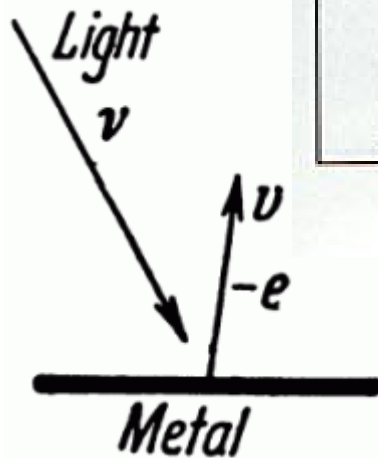
$$Q = \frac{18\pi d}{U} \sqrt{\frac{\eta^3 v^3}{2\rho g}}$$



L'effetto Fotoelettrico



Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

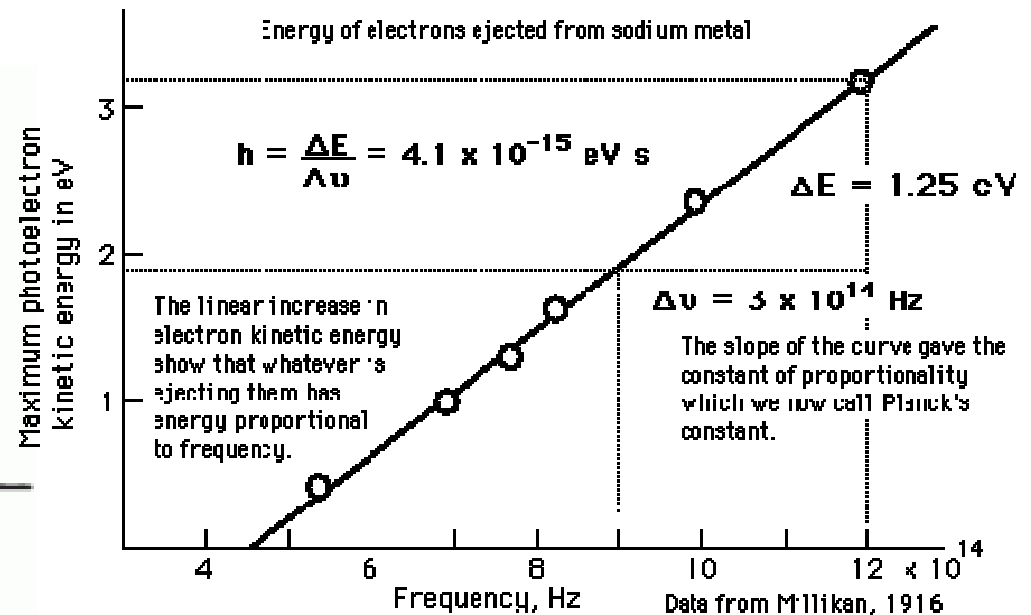
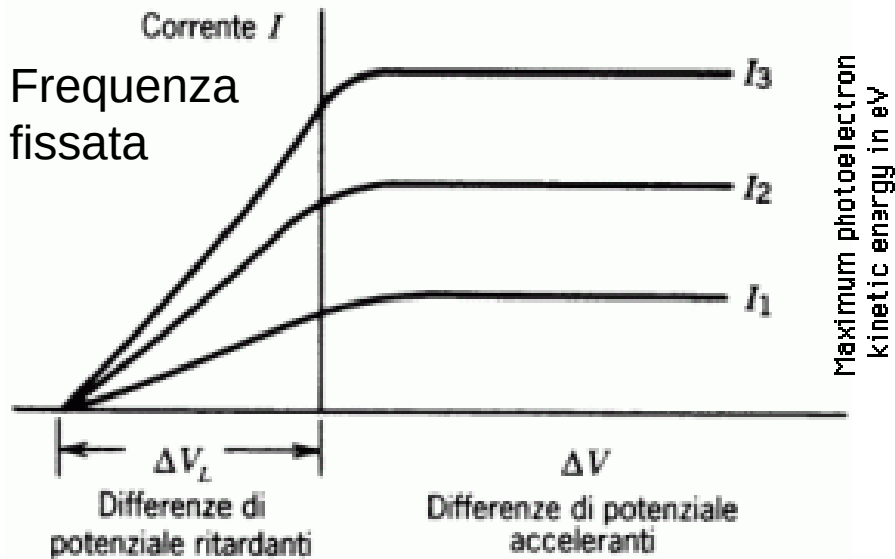


Hertz, 1887

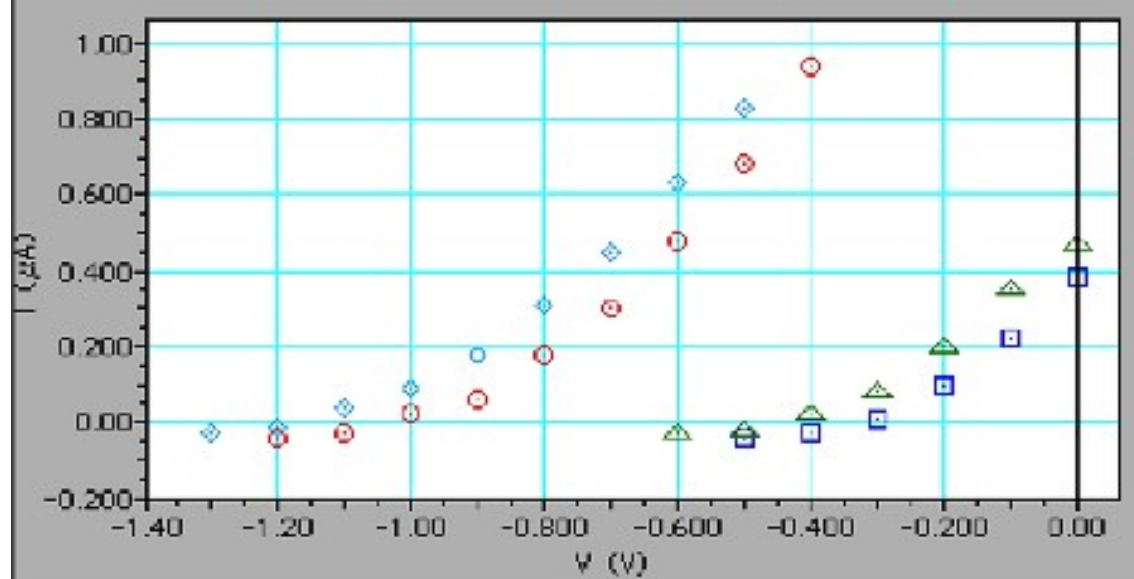
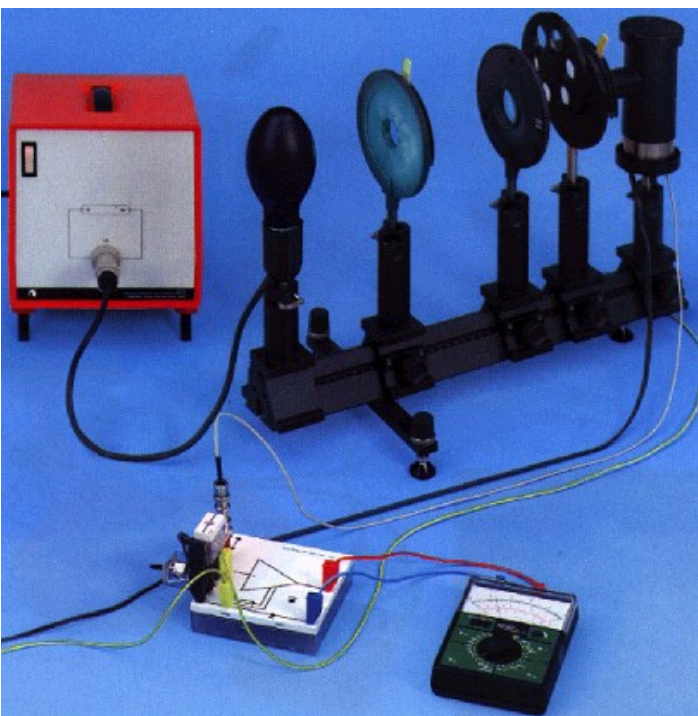


Lenard
1899 - 1902

Relazioni caratteristiche dell'effetto fotoelettrico



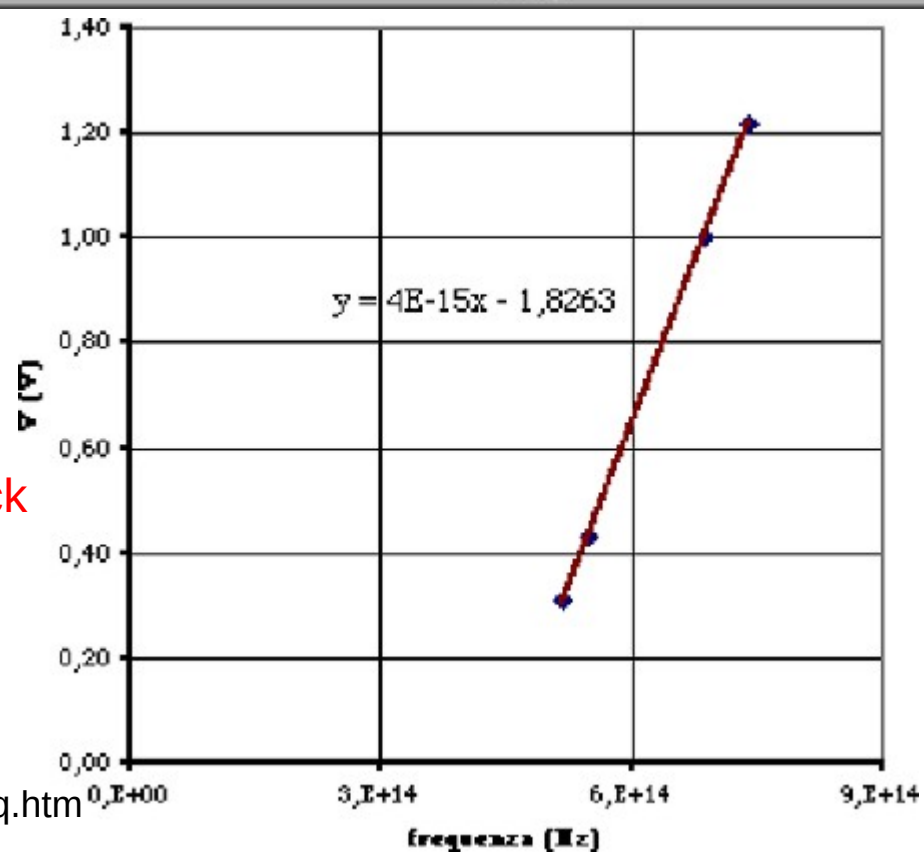
- Solo luce con frequenza $>$ della frequenza di soglia produce una corrente
- La corrente è attivata in tempi $< 10^{-6} \text{ s}$
- L'azione della luce incidente è "puntuale"
- La corrente è proporzionale all'intensità incidente
- Il potenziale di arresto è proporzionale alla frequenza della luce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



$$E = w + eV_r$$

$$E = h\nu \quad \text{Einstein - Planck}$$

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

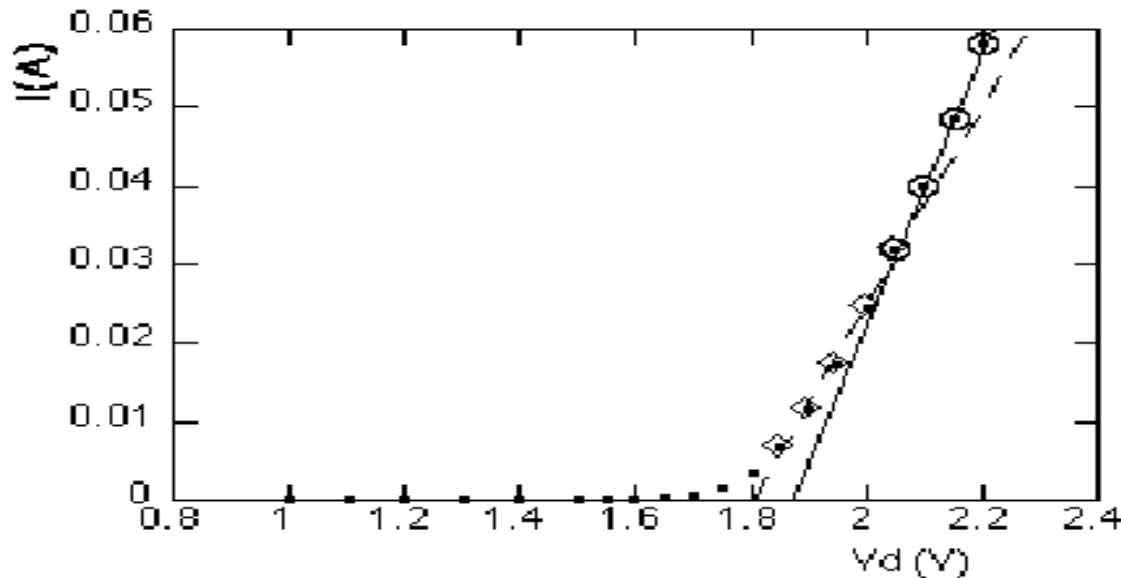


Misura di h

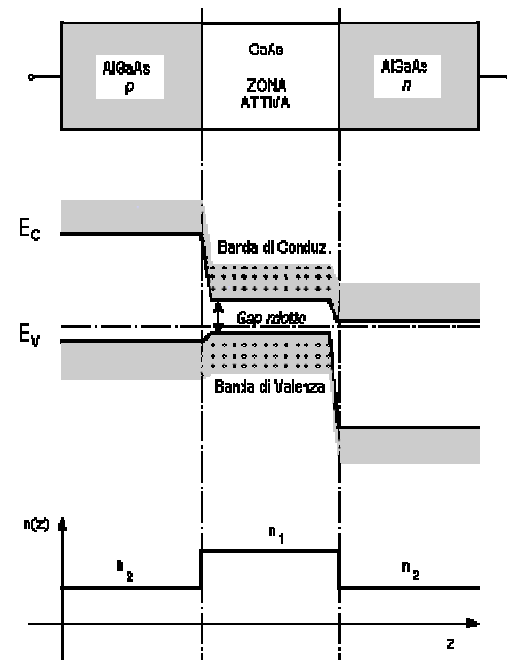
(metodo del LED)

$$h\nu = eV_{\text{diodo}} + \text{cost}$$

http://www.uniud.it/cird/secif/mec_q/esp/plank_1.htm



$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$



1.43 eV per $x=0$

2.26 eV per $x=1$;

$$\lambda(\mu\text{m}) \approx hc/E_g \approx 1.24/E_g(\text{eV})$$

$$850 > \lambda > 550 \text{ nm}$$

$$eV_d = h\nu + Q$$

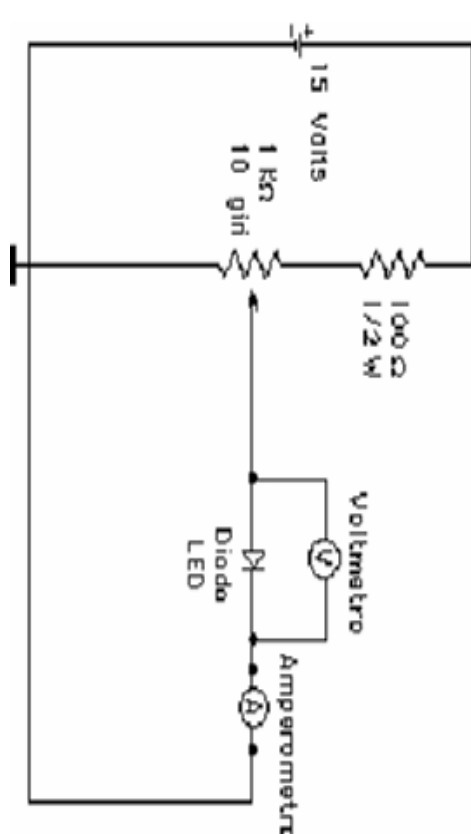
V_d : d.d.p. effettivamente applicata alla giunzione pn

Q : calore, altre transizioni non luminose

$$V_d = V_{\text{diodo}} - R_s I_d$$

$$Q(I_{\text{LED1}}) = Q(I_{\text{LED2}})$$

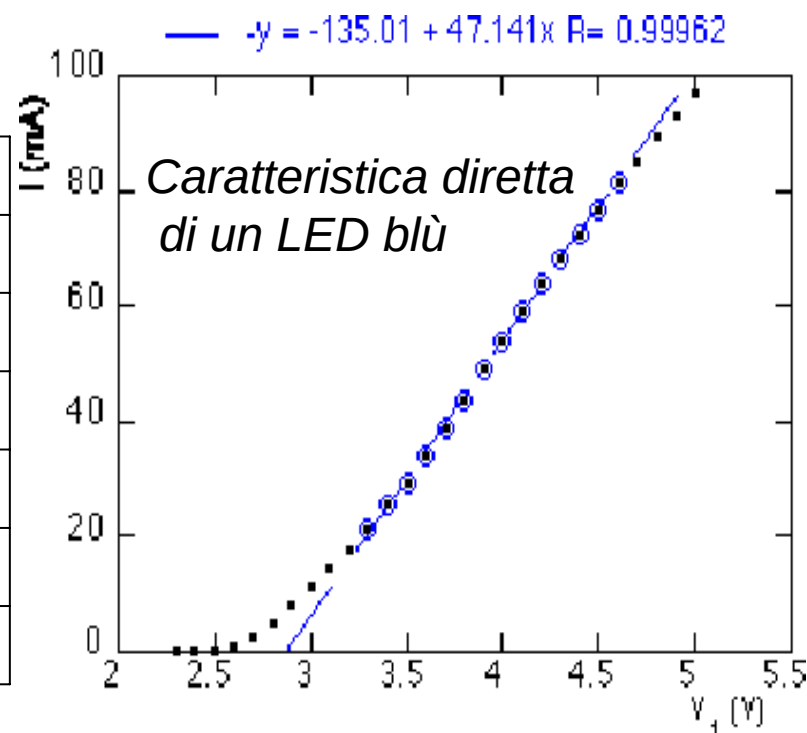
$$\nu = (e/h) V_d + \text{cost}$$



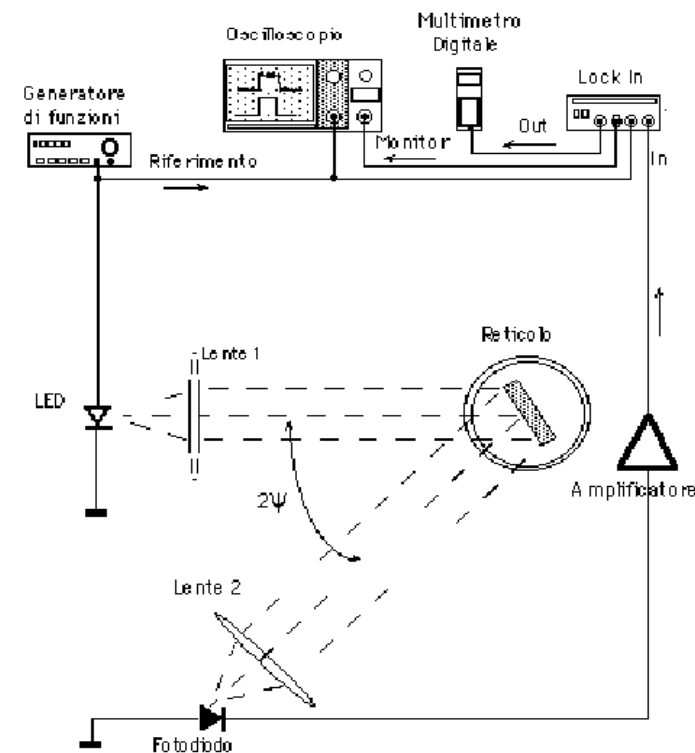
$I_d = 10 \text{ mA}$

Tipo LED	$\lambda_{\text{nominale}} \text{ (nm)}$	$V_{\text{diodo}} \pm \Delta V_{\text{diodo}} \text{ (V)}$
Infrarosso	940	1.185 ± 0.010
Rosso	660	1.746 ± 0.005
Arancio	600	1.883 ± 0.008
Giallo	590	1.985 ± 0.011
Verde	565	2.044 ± 0.005
Blù	470	2.986 ± 0.025

Tipo LED	$R_s \pm \Delta R_s \text{ (}\Omega\text{)}$	$V_d \pm \Delta V_d \text{ (V)}$
Infrarosso	1.5 ± 0.1	1.170 ± 0.010
Rosso	4.7 ± 0.1	1.699 ± 0.006
Arancio	5.1 ± 0.1	1.832 ± 0.009
Giallo	9.4 ± 0.2	1.891 ± 0.013
Verde	14.4 ± 0.3	1.900 ± 0.008
Blù	21.0 ± 0.5	2.776 ± 0.030



Resistenza serie e tensione ai capi della giunzione dei vari LED



$$\lambda(\mu\text{m}) \approx hc/E_g \approx 1.24/E_g(\text{eV}),$$

banda di
conduzione

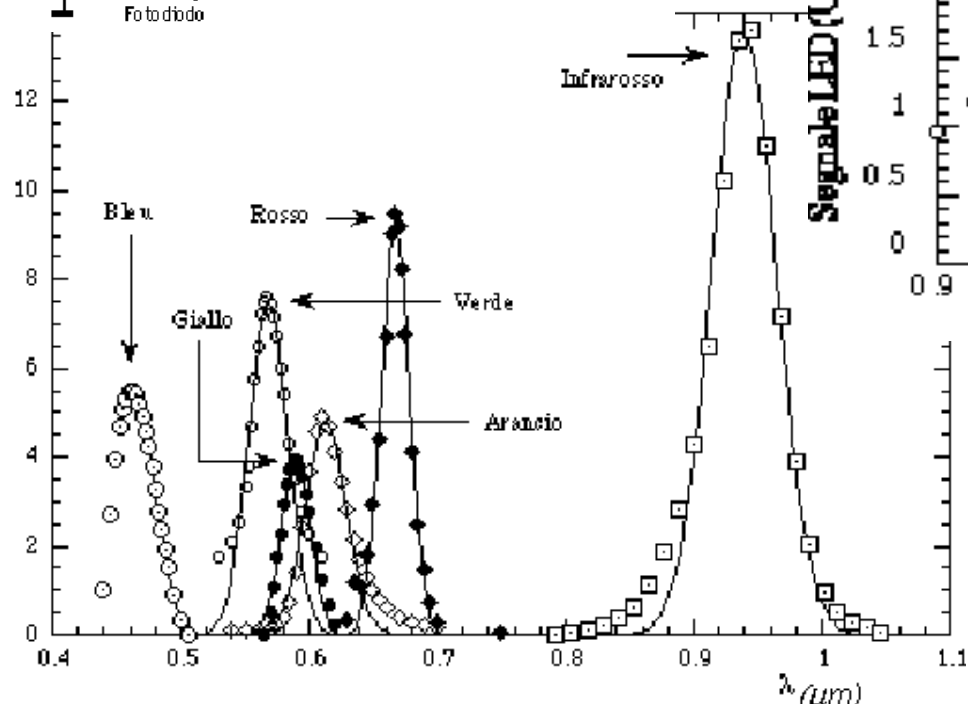
E_g

banda di
valenza

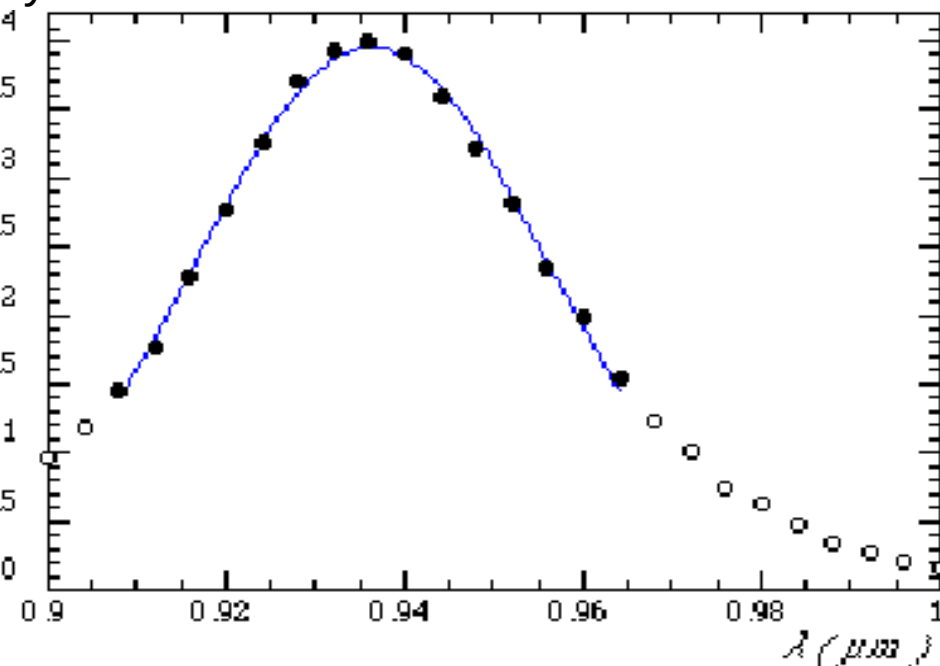
$$\Delta\lambda/\lambda_{\text{max}} \approx 3/2 kT / E_g \approx 0.40/1.0 = 4\%$$

$$\lambda = 2a \cos\gamma \sin R$$

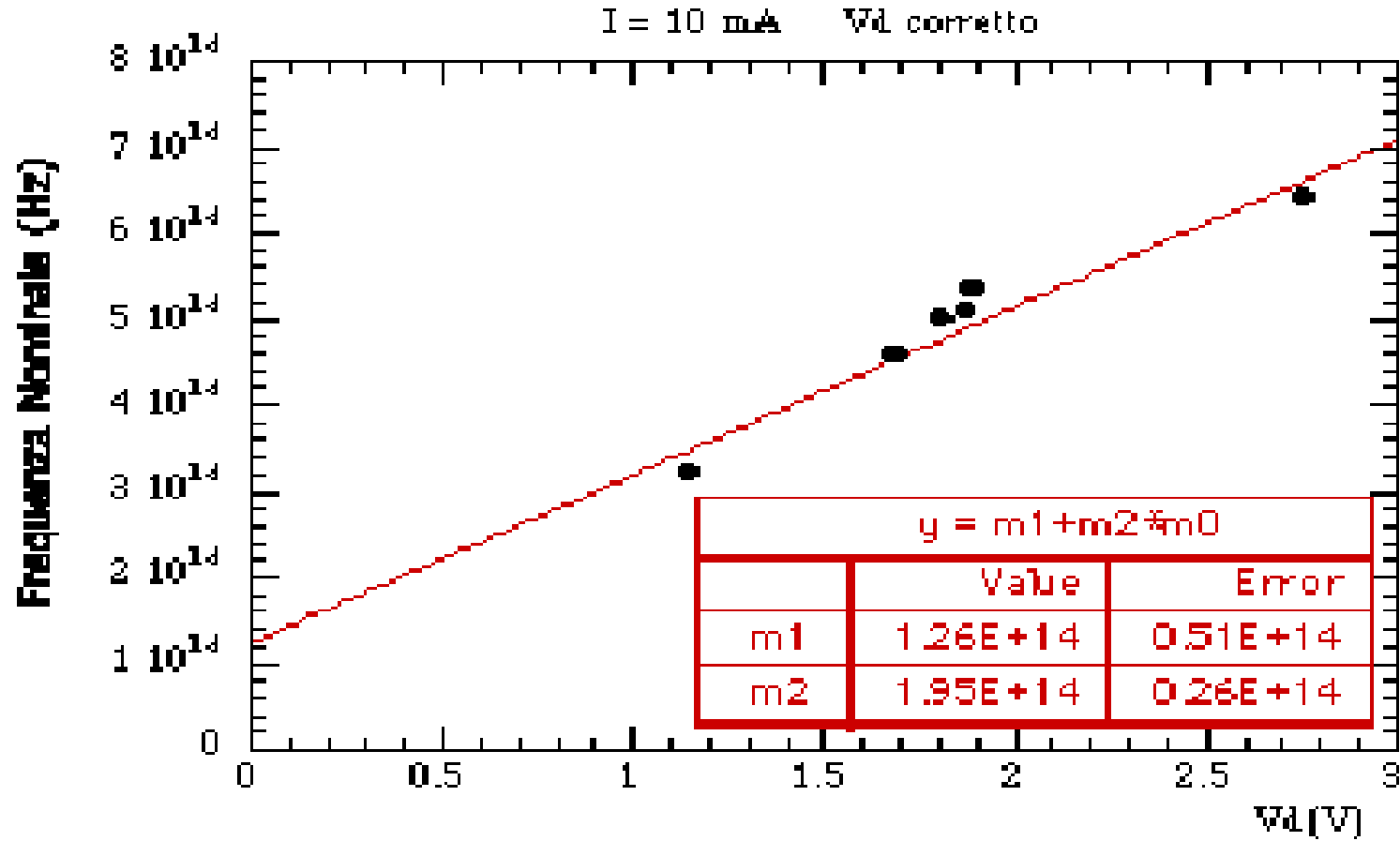
Risposta (Unità arbitrarie)



Segnale LED (Unità arbitrarie)



Spettro di emissione del LED infrarosso. La curva gaussiana che fitta il picco è $A \cdot \exp(-0.5 \cdot ((\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda)^2)$ con $\lambda_0 = 0.9362 \pm 0.0002 \mu\text{m}$ e $\Delta\lambda = 0.0196 \pm 0.0002 \mu\text{m}$.



$$e/h = 2.418 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}\text{V}^{-1}.$$

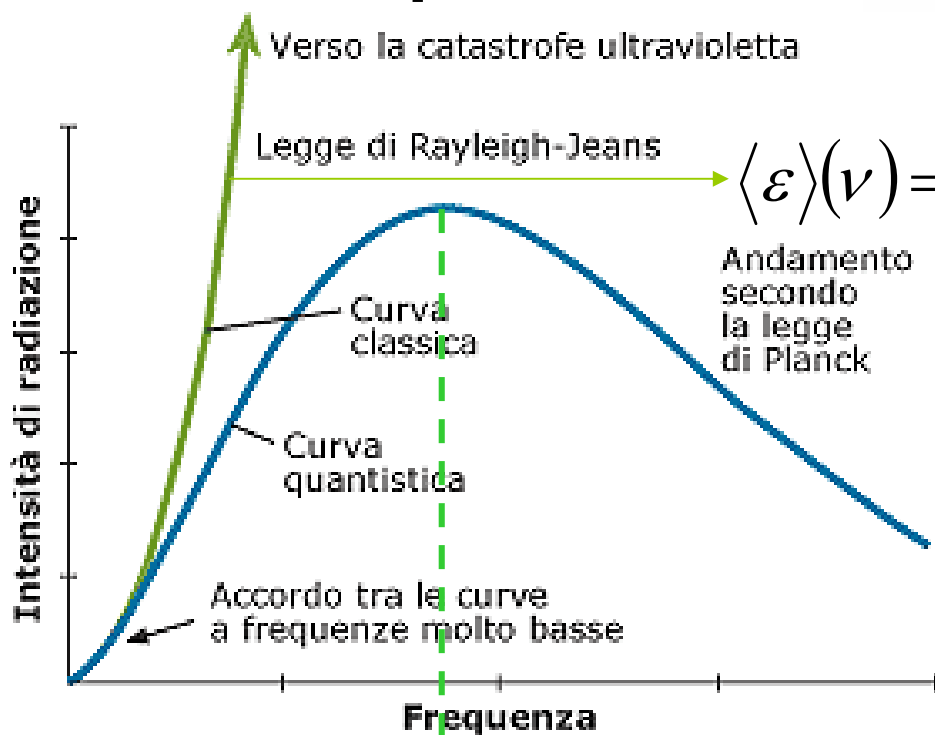
$$h/e = (3.99 \pm 0.22) \times 10^{-15} \text{ V s}$$

$$e = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

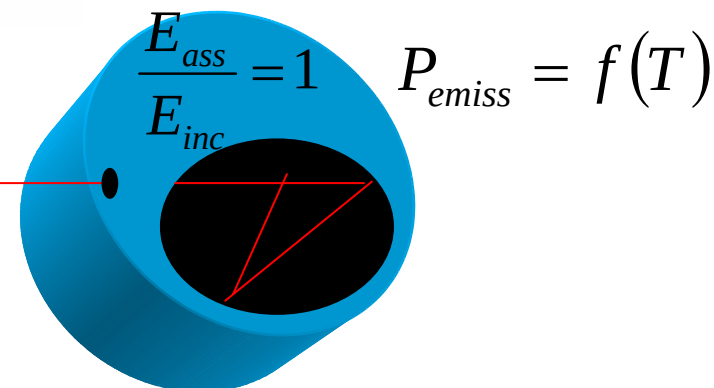
$$h = (6.39 \pm 0.35) \times 10^{-34} \text{ J s}.$$

$$h = 6.626 \, 0693 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Spettro di Corpo Nero



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



L. Wien $\lambda_{\max} T = \sigma_{SB}$

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

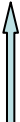
Ipotesi di Planck dei Quanti (1900)

$$\Delta E = h \nu$$

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

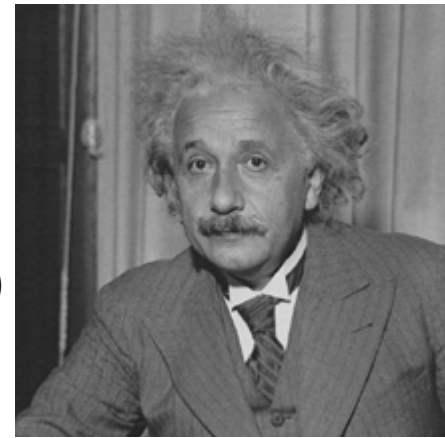
i Fotoni !

Elettromagnetismo
Classico

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


Einstein (1905)

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



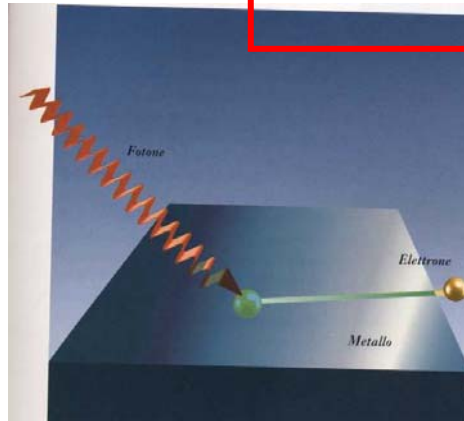
**Relazioni
Planck - Einstein**

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

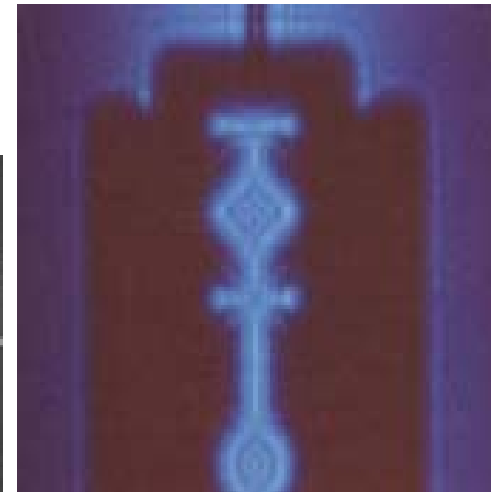
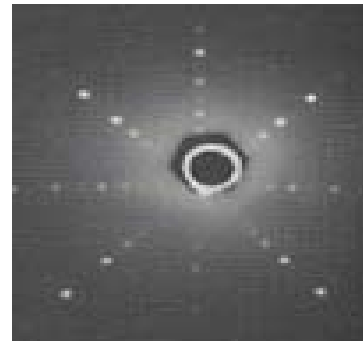
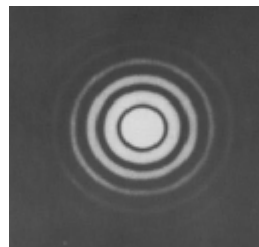
$$m_{\text{fotone}} = 0$$



James Clerk Maxwell
1831 - 1879



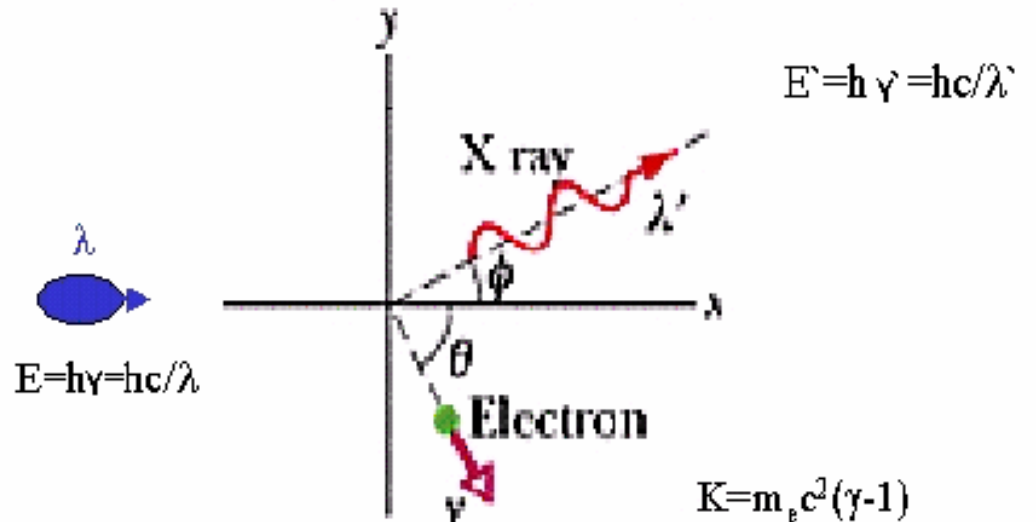
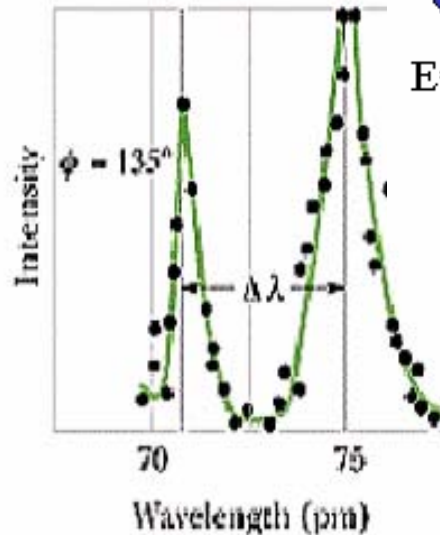
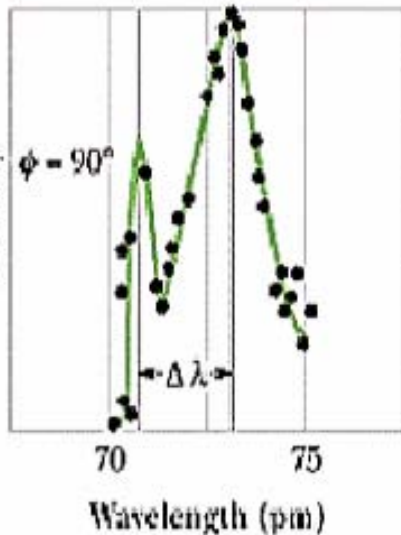
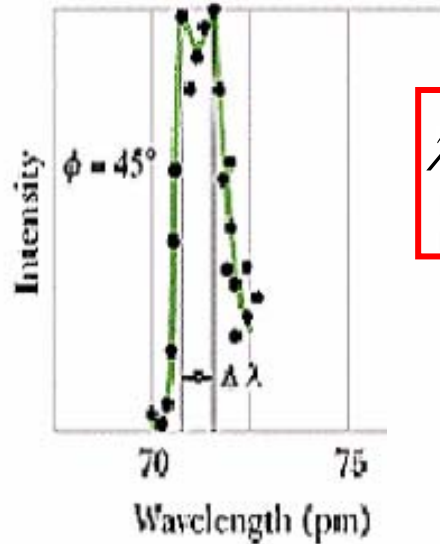
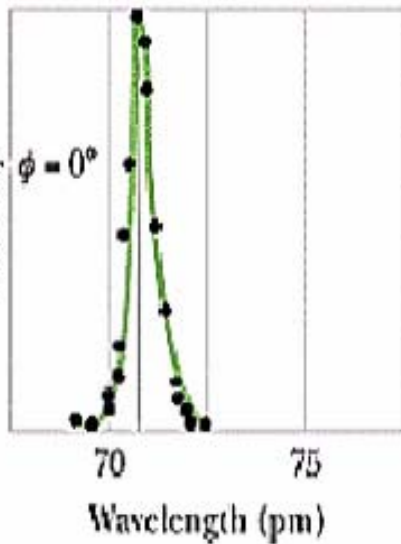
**... e la
DIFFRAZIONE !?!**



Effetto Compton



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



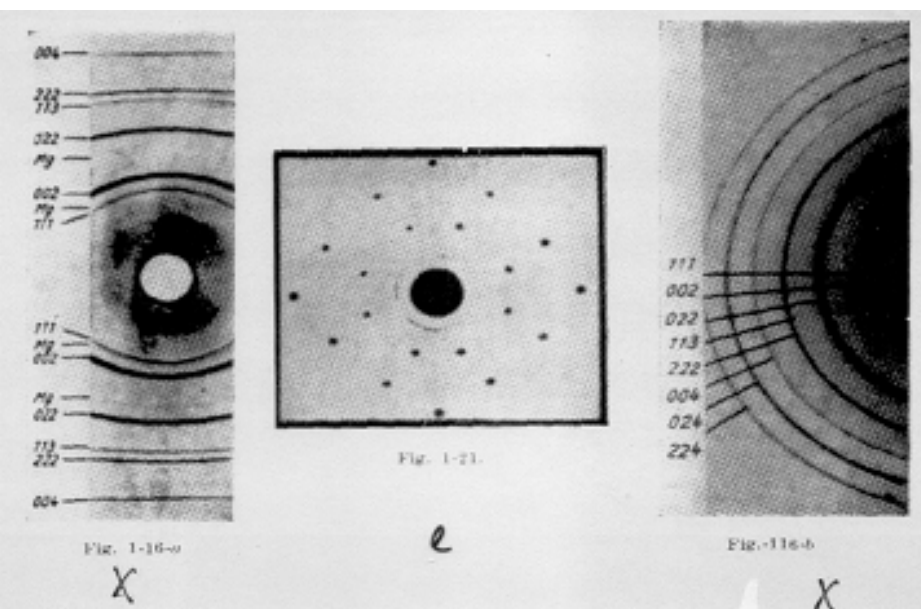
• Cons. dell'energia

$$E = E' + K$$

• Cons. Quantità di moto $\vec{p}_X = \vec{p}_X' + \vec{p}_e$

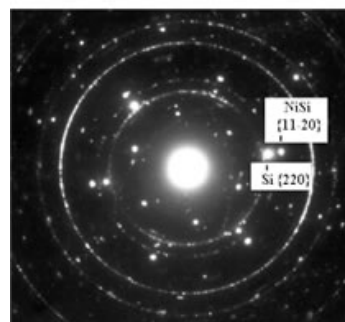
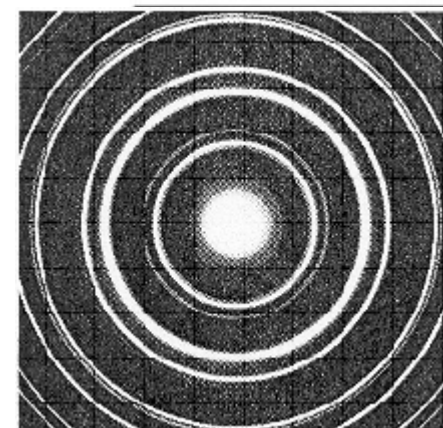
$$p_X = \frac{h}{\lambda}, p_X' = \frac{h}{\lambda'}, p_{el} = \gamma m_{el} v$$

Diffrazione di luce e di particelle

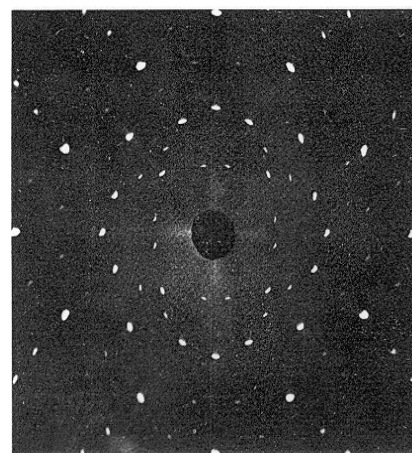
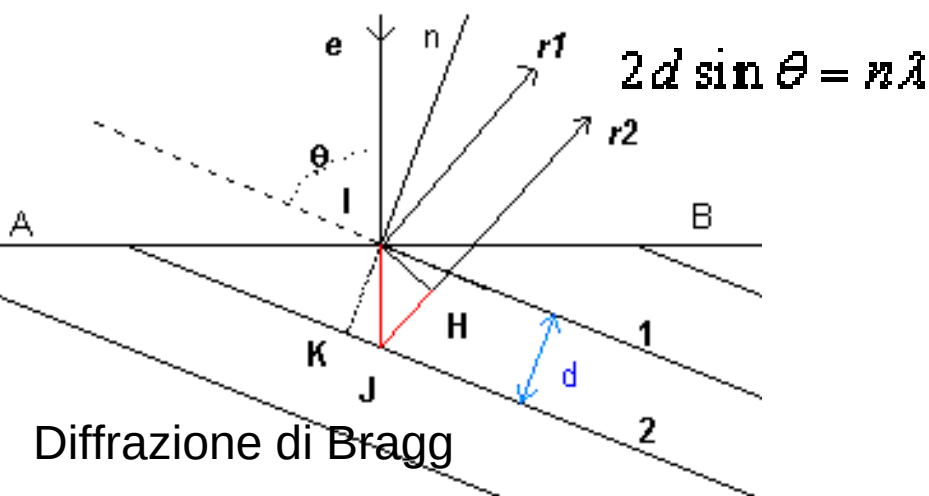


Diffrazione di
elettroni su
cristalli di
ossido di Zn
(Fresnel)

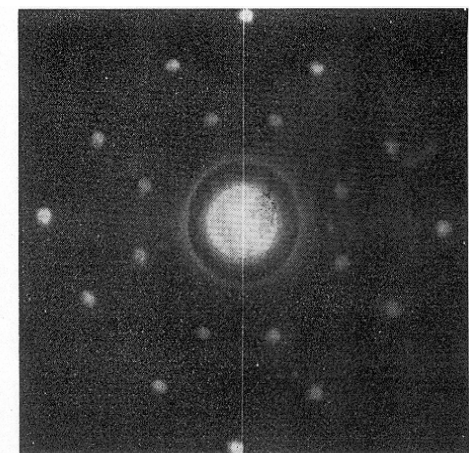
Elettroni
su Au
policristallino



Diffrazione
di elettroni
su NiSi



Raggi X su
un momocristallo di NaCl



Neutroni termici su
un momocristallo di NaCl

Diffrazione di singolo fotone

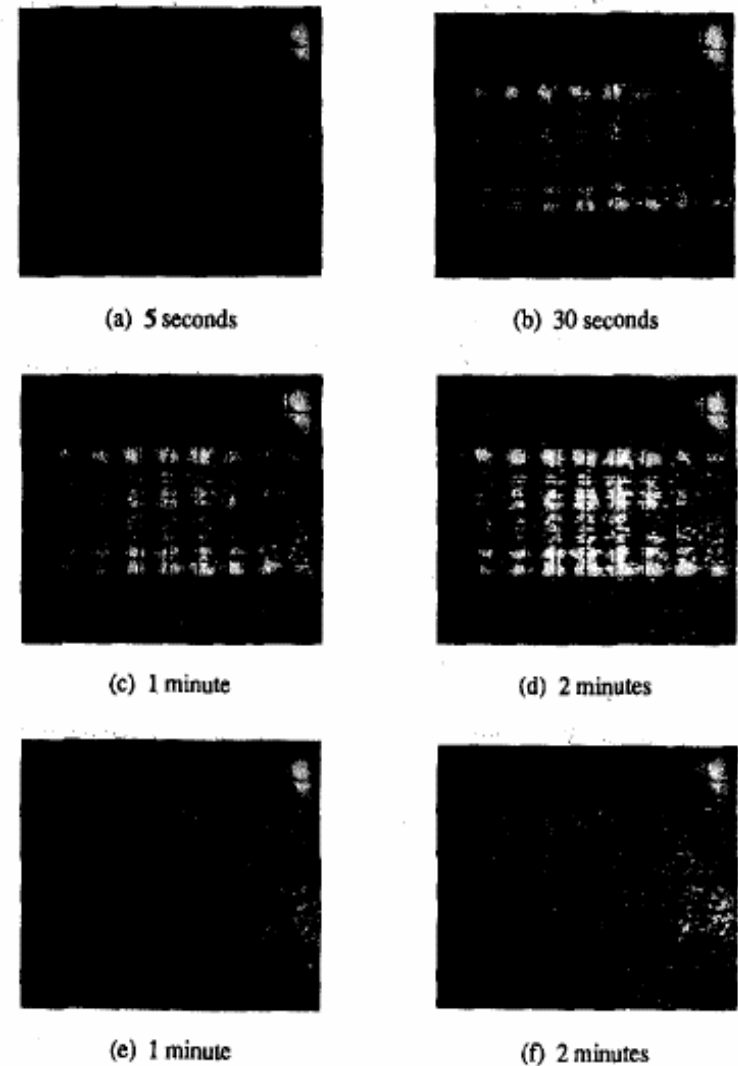
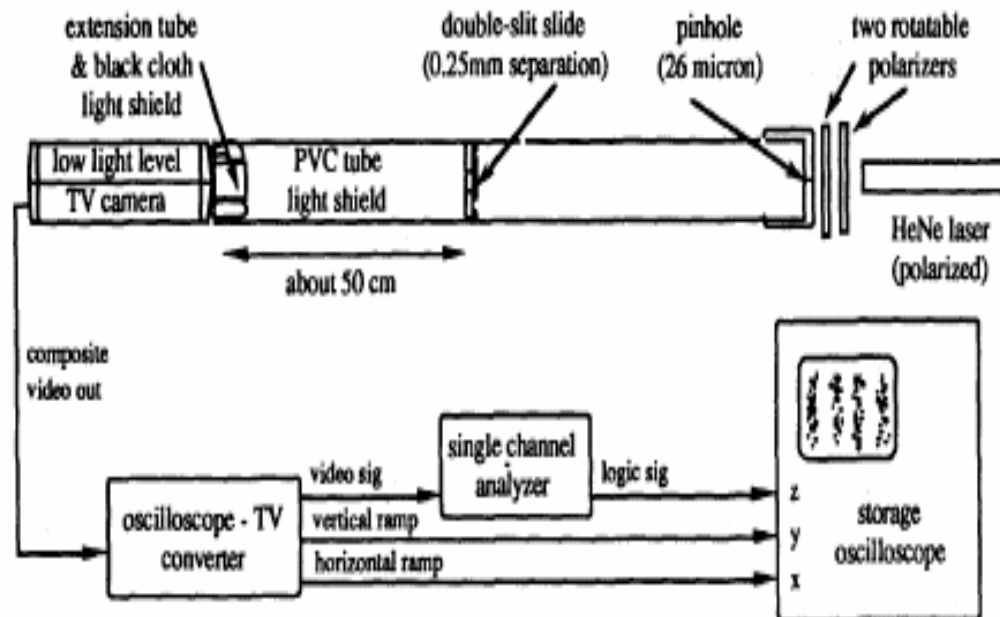
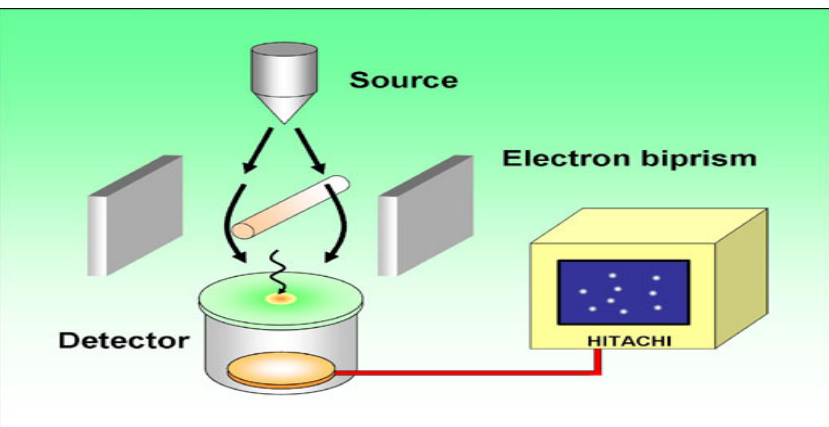


Fig. 2. Photographs of the storage oscilloscope display. (a)–(d) The accumulation of the double slit events; (e) one slit open followed by (f) the other slit open.

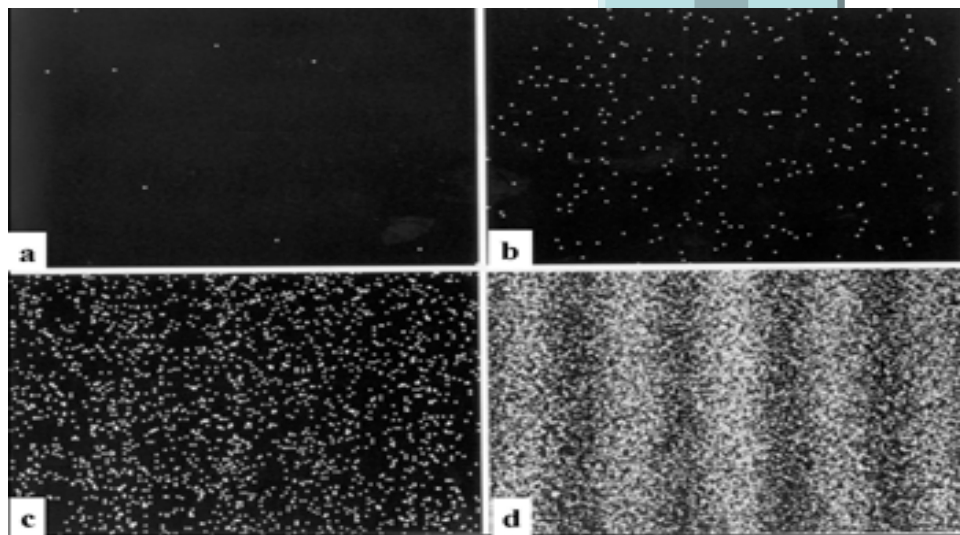
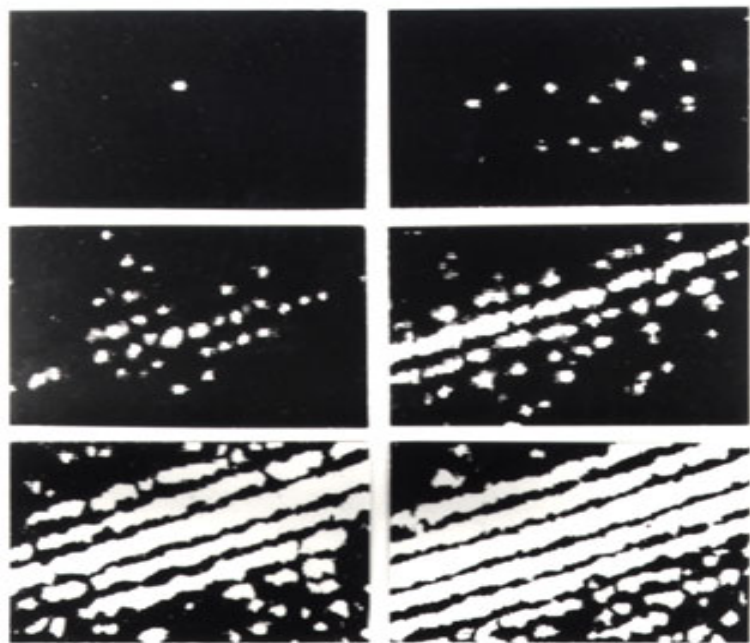
I fotoni sono particelle singole, ma sottoposti ad un esperimento di doppia fenditura la loro distribuzione di arrivo segue la legge determinata dall'interferenza delle onde

Singolo Elettrone su doppia fenditura



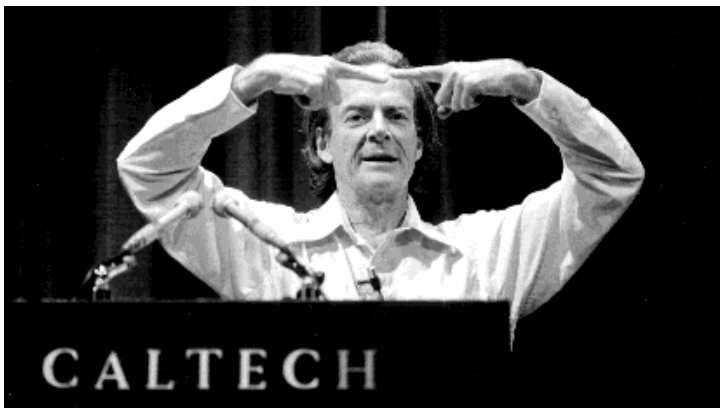
La coesistenza di aspetti corpuscolari ed ondulatori si verifica anche per gli elettroni e, in generale, per tutti i corpi

<http://www.hgrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm>



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

<http://physicsweb.org/articles/world/15/9/1/1>



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)