

Radiazione e Materia

-2-

L. Martina

Dipartimento di Fisica - Università del Salento

e Sezione INFN - Lecce

Maxwell e le Onde

1864-'65



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

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

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

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

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



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

Equazione delle onde

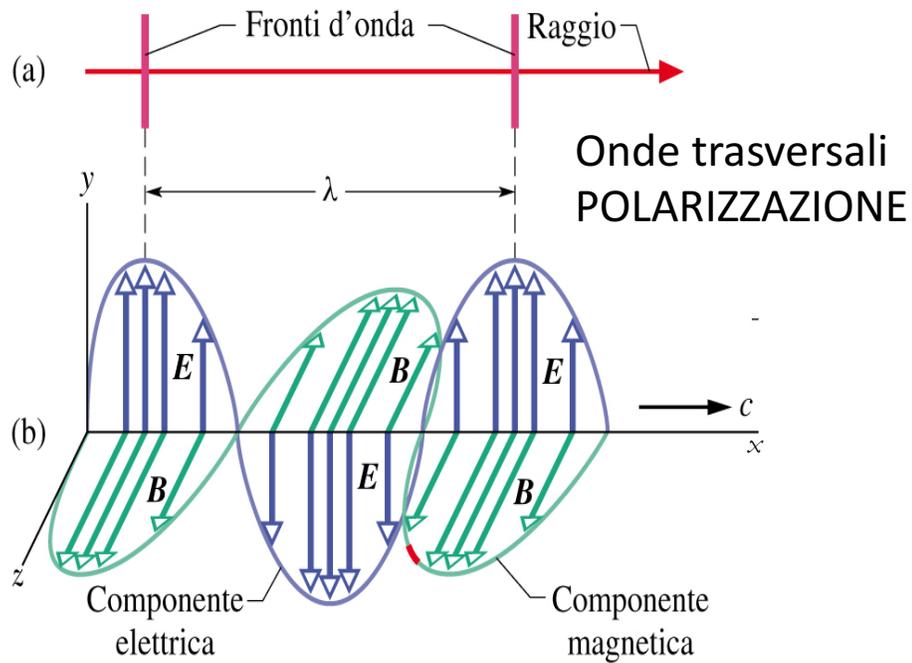
Velocità della luce

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

Legge di dispersione

Onde Hertziane (1887)

Caratteristiche principali delle Onde EM



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

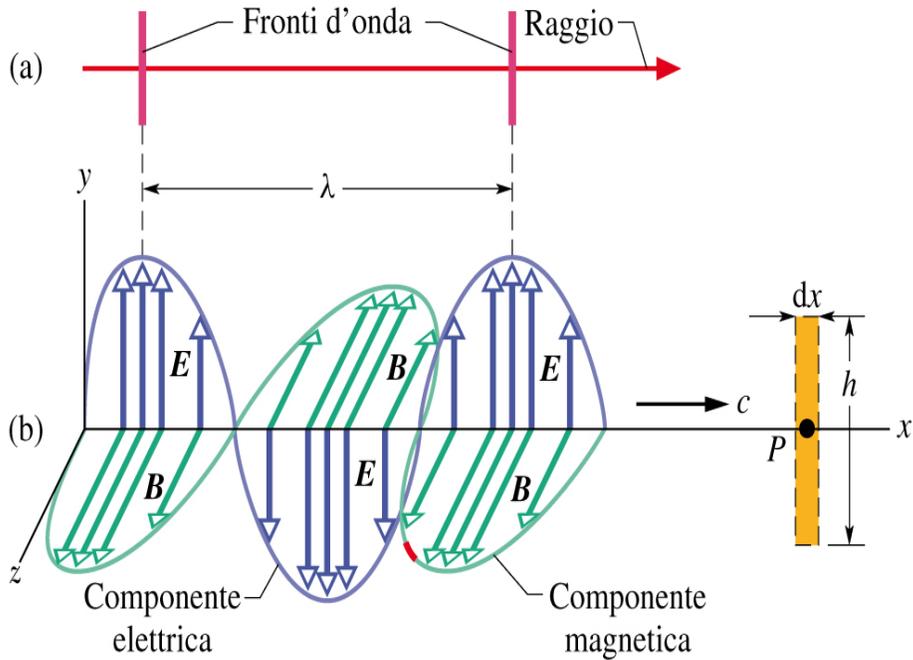
$$E_m = c B_m$$

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

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

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

Energia delle Onde EM



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

$$E_m = c B_m$$

Vettore di Poynting:

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

$$u_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (cB)^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\left(\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \right) B \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} = u_B$$

Densità di energia elettrica

Densità di energia magnetica

Intensità della Radiazione

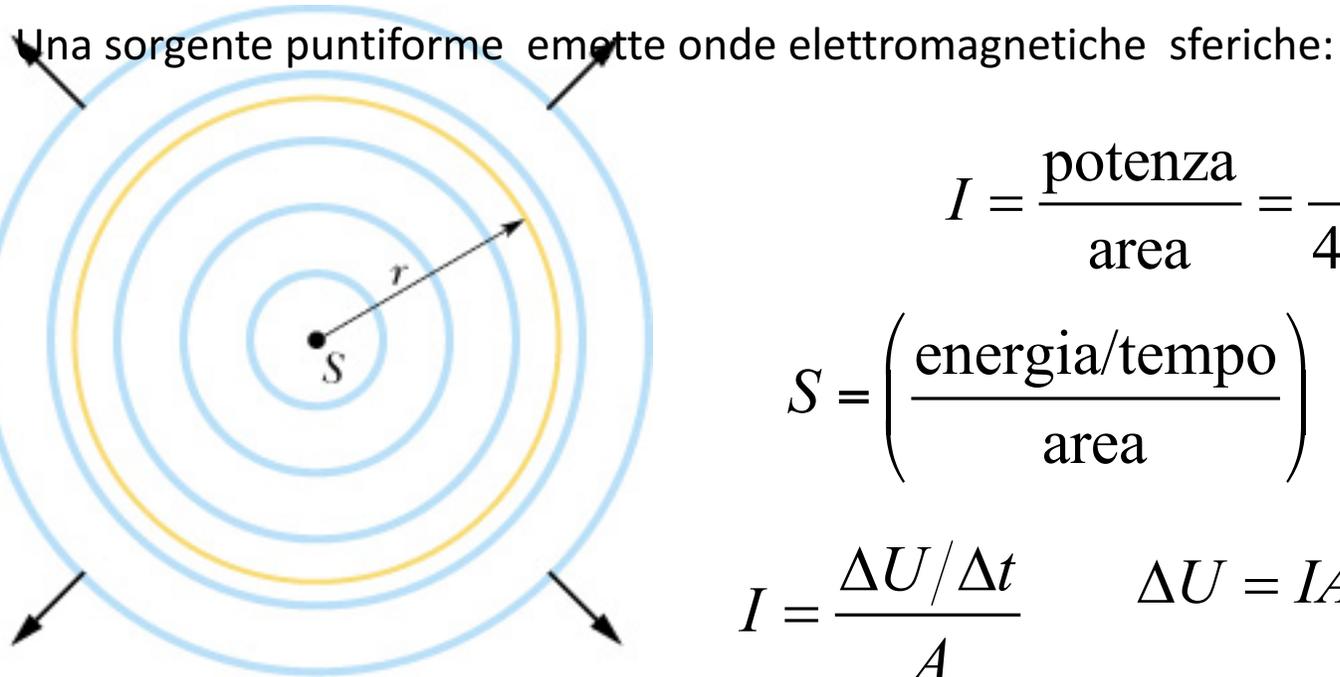
$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{qm}^2$$

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

Flusso di energia

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

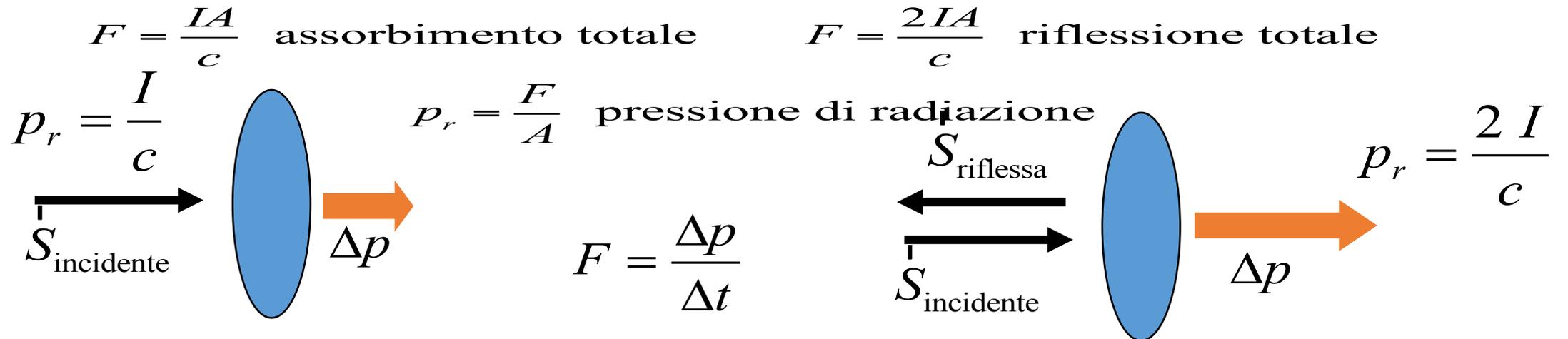
Trasporto di energia e momento

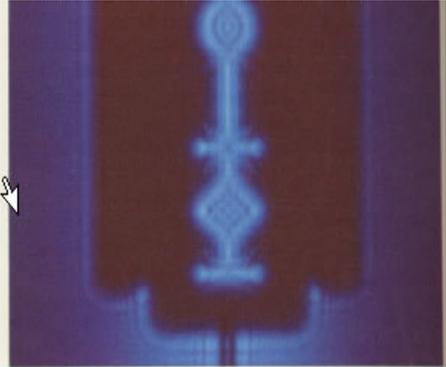
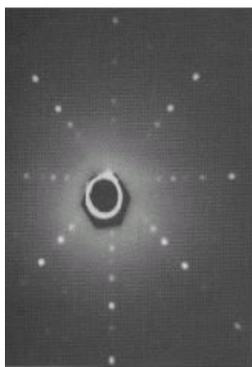
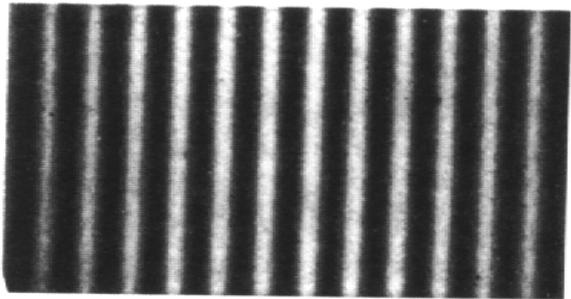
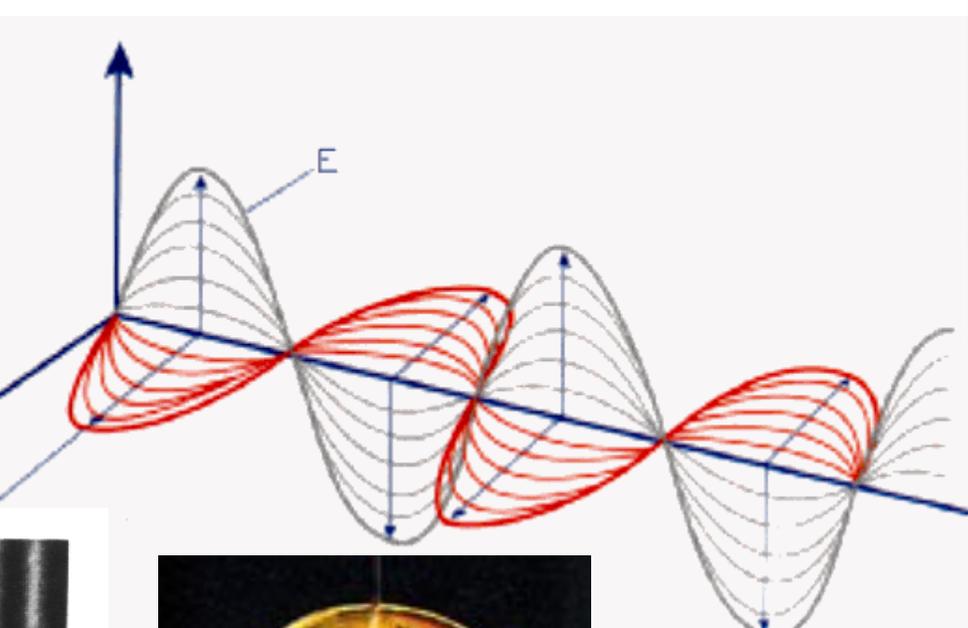
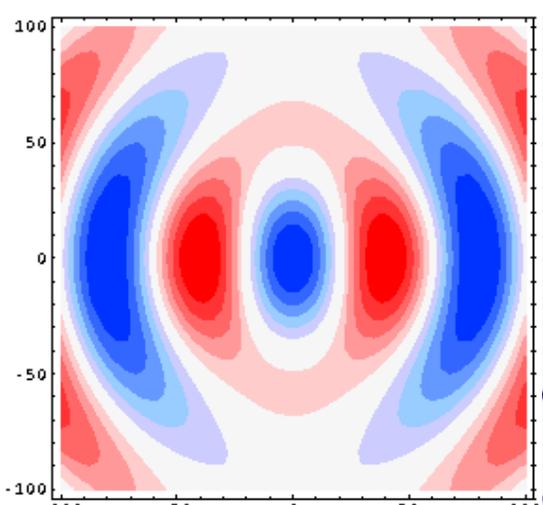


$$I = \frac{\text{potenza}}{\text{area}} = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

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

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



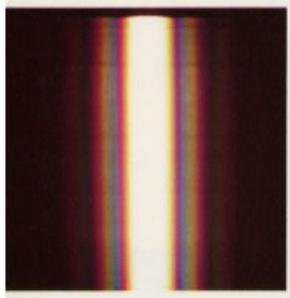
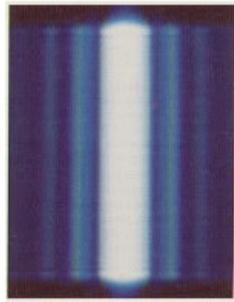


Onde Hertziane (1887)



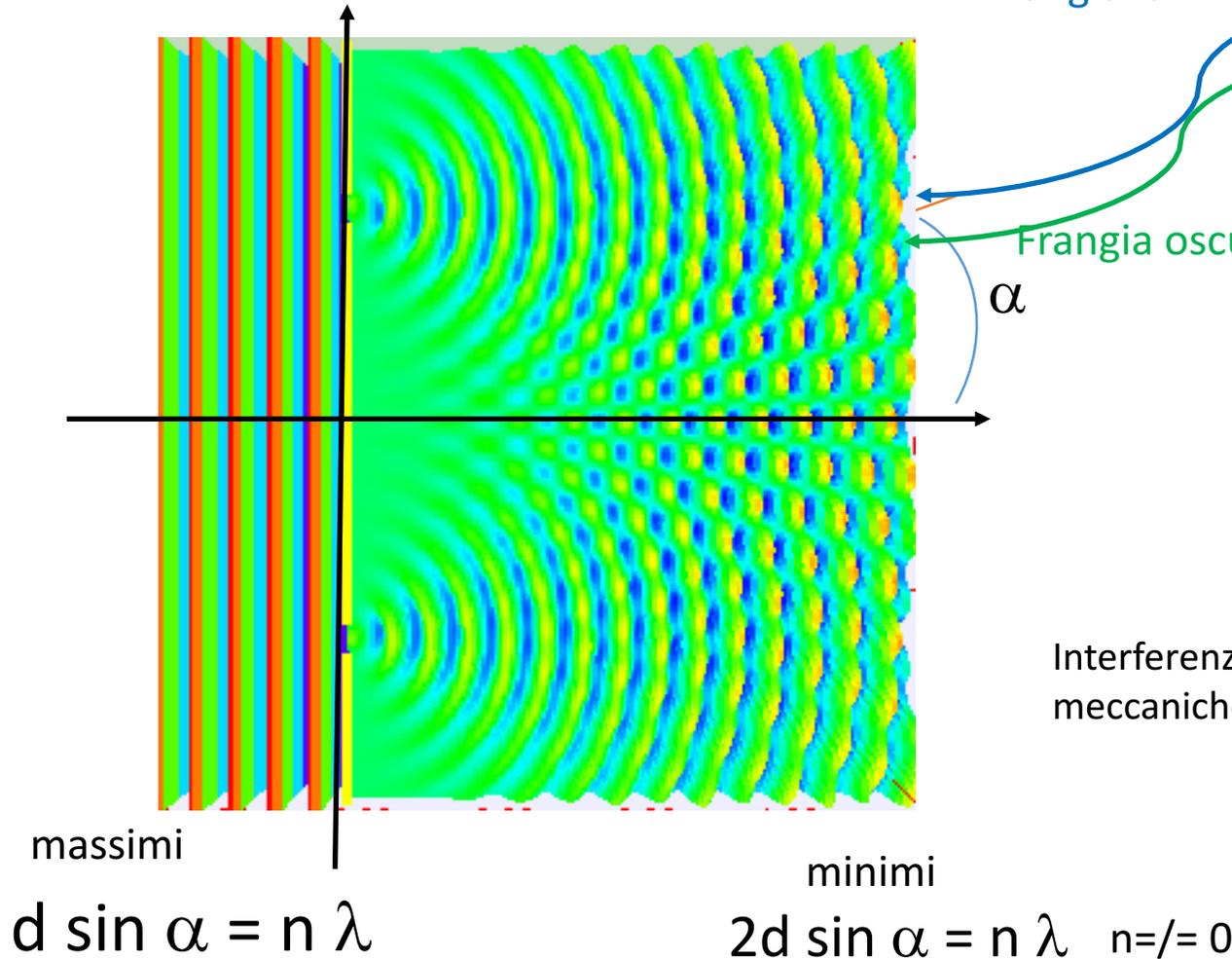
$$\nabla^2 f - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$$

NON INVARIANTE SOTTO
TRASFORMAZIONI DI GALILEI



Conseguenze della teoria ondulatoria della luce

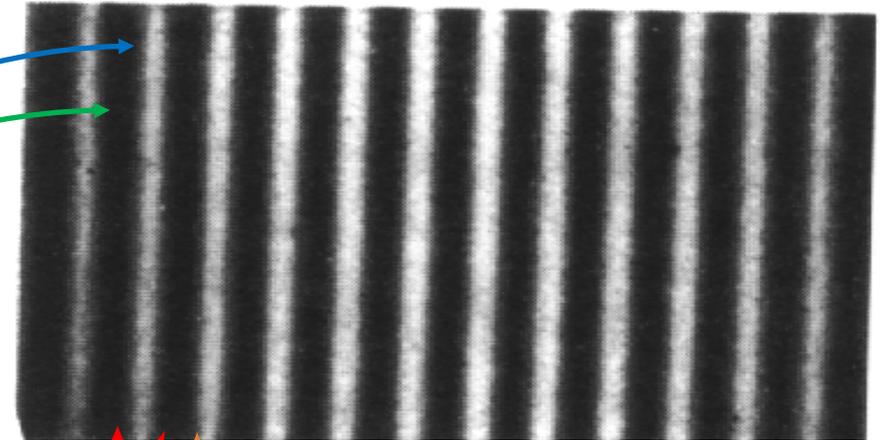
Esperienza di Young (1803)
sull'INTERFERENZA della LUCE



Frangia luminosa

Frangia oscura

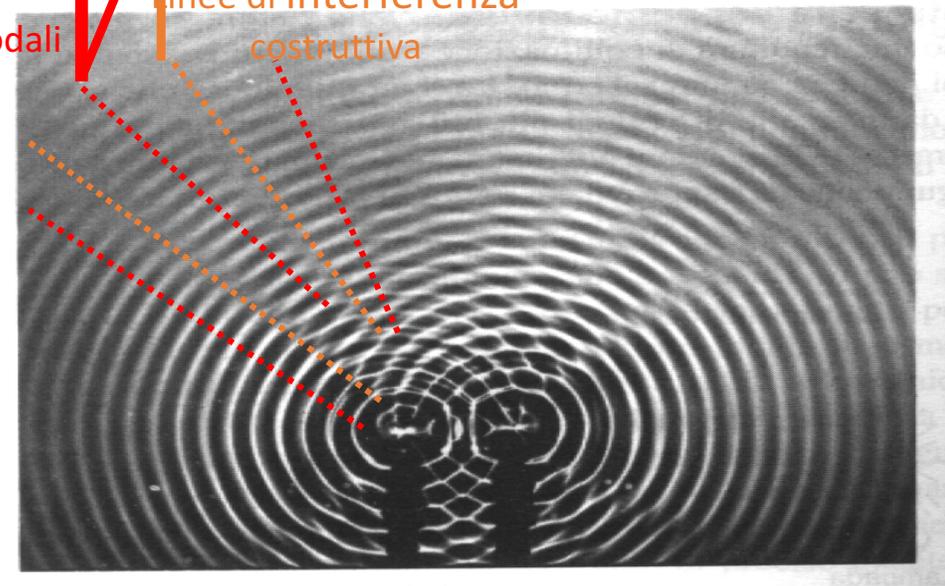
α



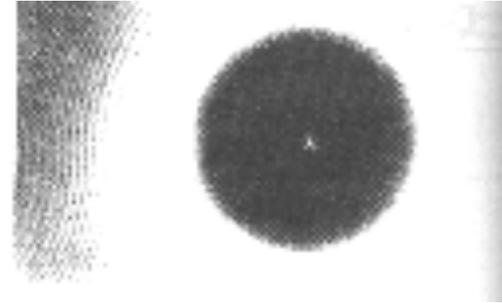
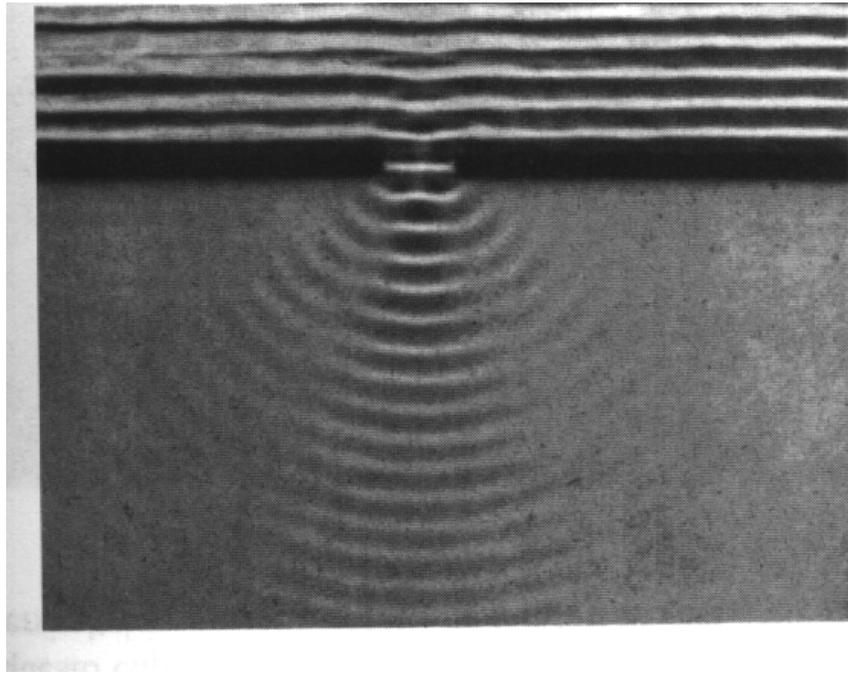
Linee nodali

linee di interferenza
costruttiva

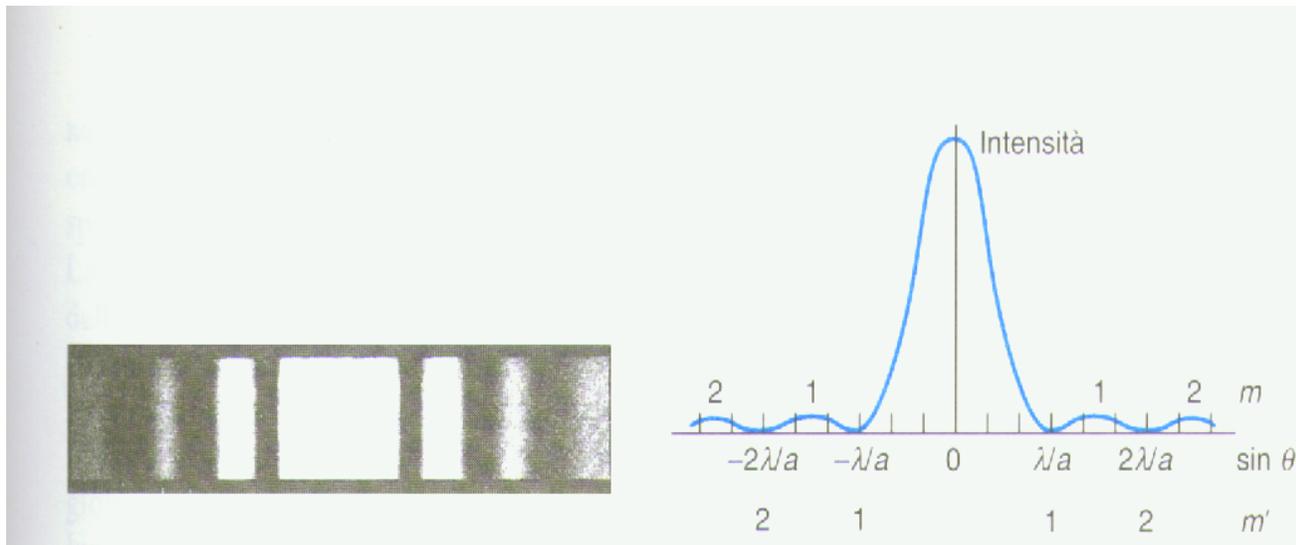
Interferenza di on
meccaniche

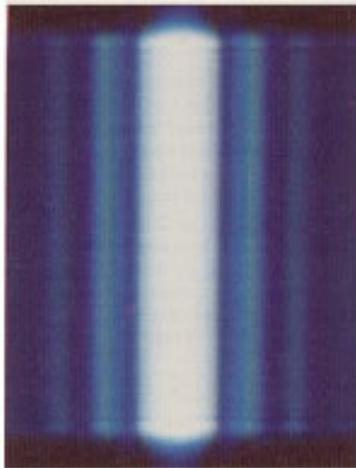
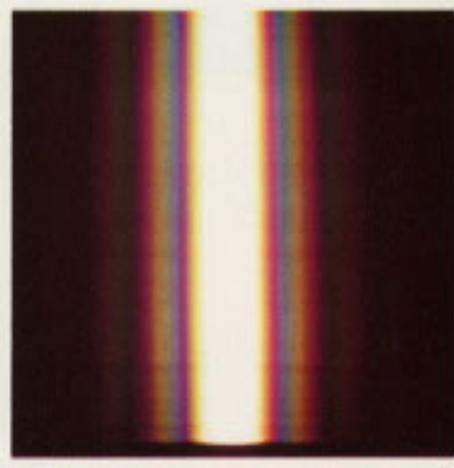


Diffrazione

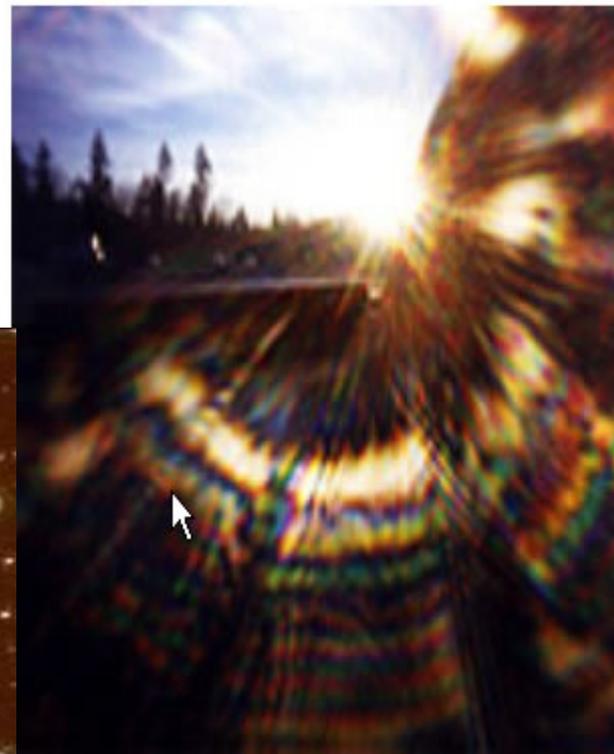
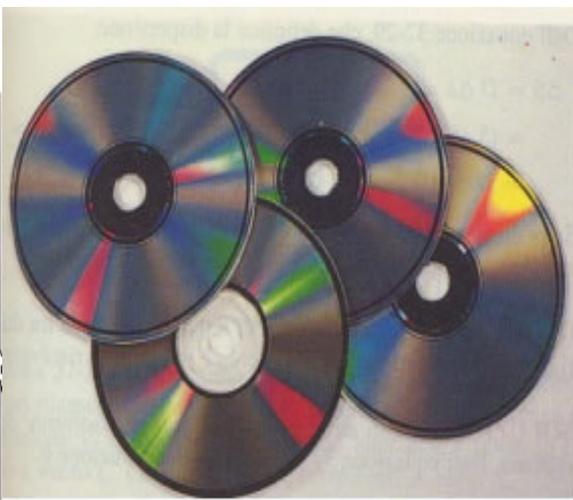
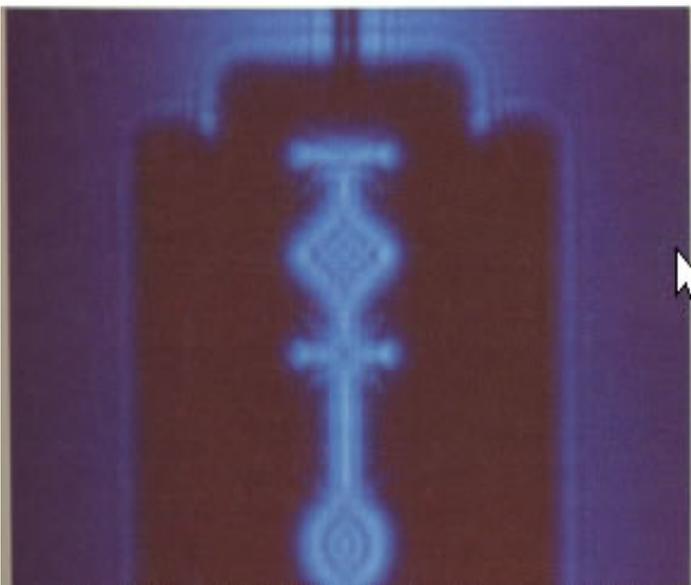
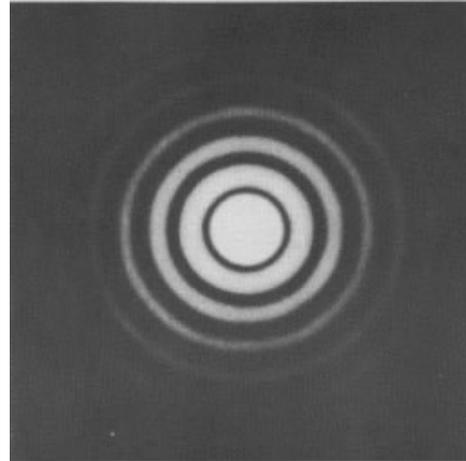


A.J. Fresnel (1788 – 1827)
F. Fraunhofer

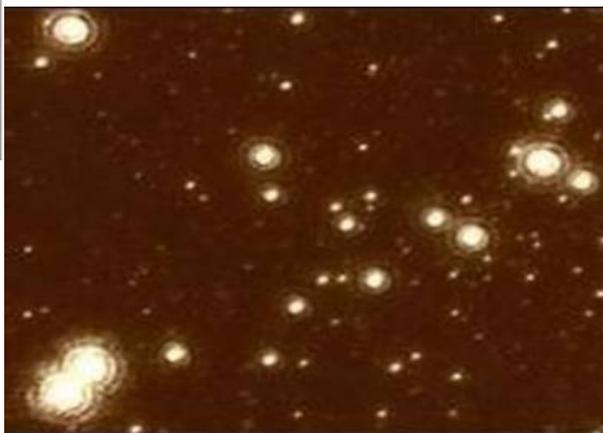


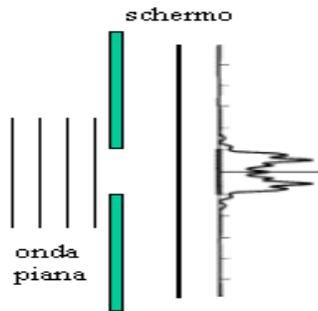


Diffrazione di
luce bianca e
blu



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

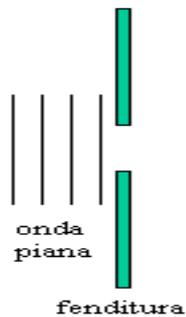
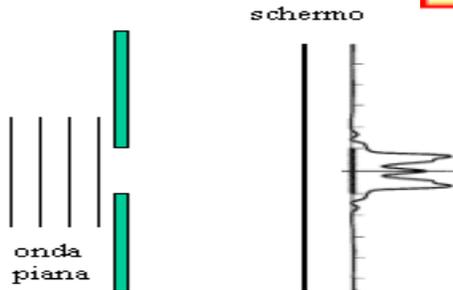




Caso generale: Fresnel

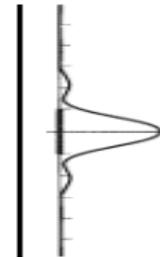
- fronte d'onda qualsiasi
- su apertura/ostacolo qualsiasi
- a distanza qualsiasi dallo schermo

In un punto P dello schermo giungono perturbazioni che differiscono per ampiezza e fase



Caso semplificato: Fraunhofer

- fronte d'onda piano
- su apertura/ostacolo
- fronti d'onda piani sullo schermo

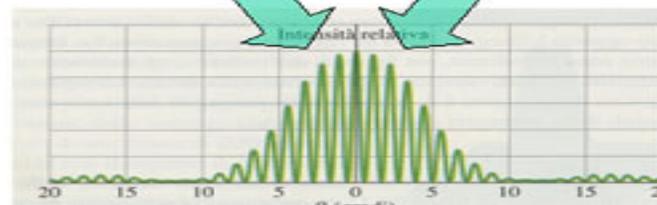
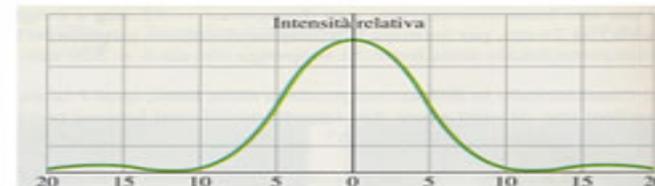
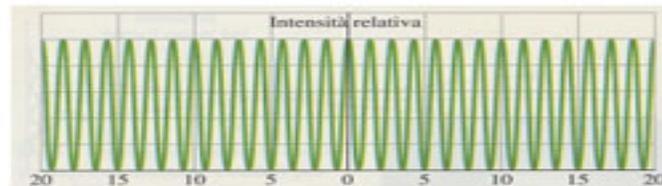


Diffrazione e Interferenza insieme

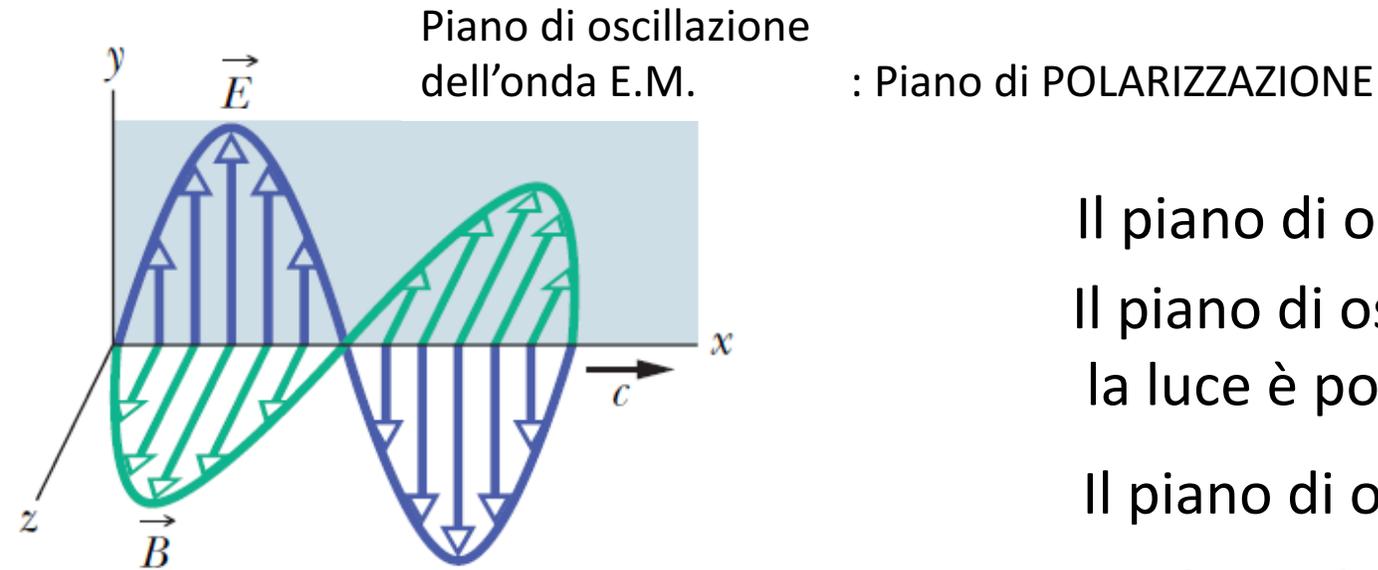


$$I = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta\right) \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2$$

b = distanza fra le fenditure
 a = larghezza di ciascuna fenditura



Polarizzazione della luce



Il piano di oscillazione è arbitrario

Il piano di oscillazione è indipendente dal tempo: la luce è polarizzata linearmente.

Il piano di oscillazione è arbitrario

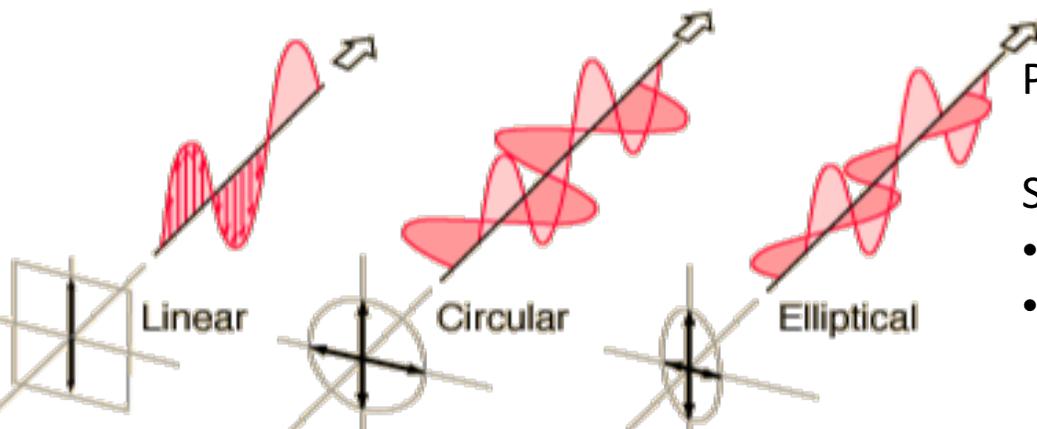
Un fascio luminoso è la sovrapposizione di più c. Elettrici oscillanti su piani diversi.

La luce non è in generale polarizzata

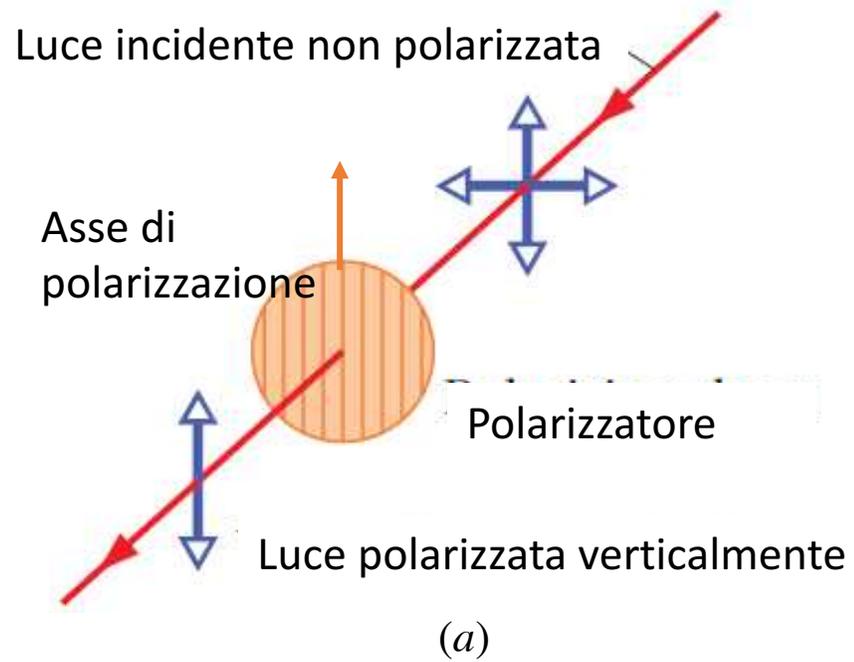
Per la trasversalità dei c. E.M. ci sono due piani ortogonali di polarizzazione

Sovrapposizione di c. E.M. polarizzati ortogonalmente e

- in fase danno luogo a **polarizzazione lineare**,
- sfasati di 90° danno luogo a **polarizzazione circolare/ellittica**

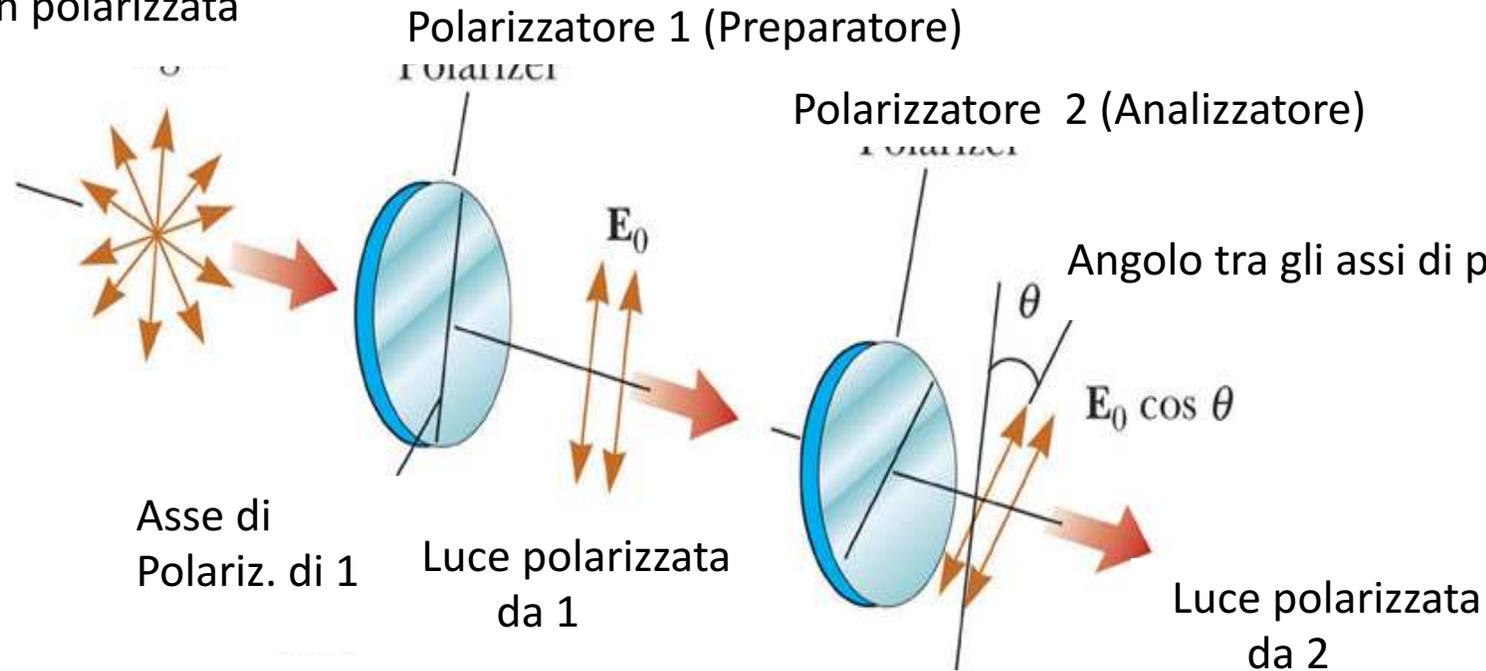


Polarizzatori



Legge di Malus

Luce incidente non polarizzata



Angolo tra gli assi di polarizzazione

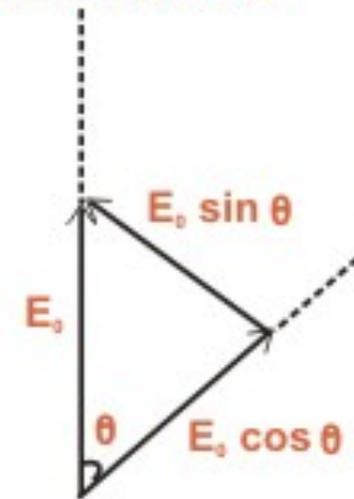
Asse di Polariz. di 1

Luce polarizzata da 1

Luce polarizzata da 2

Polariser Axis

Analyser Axis



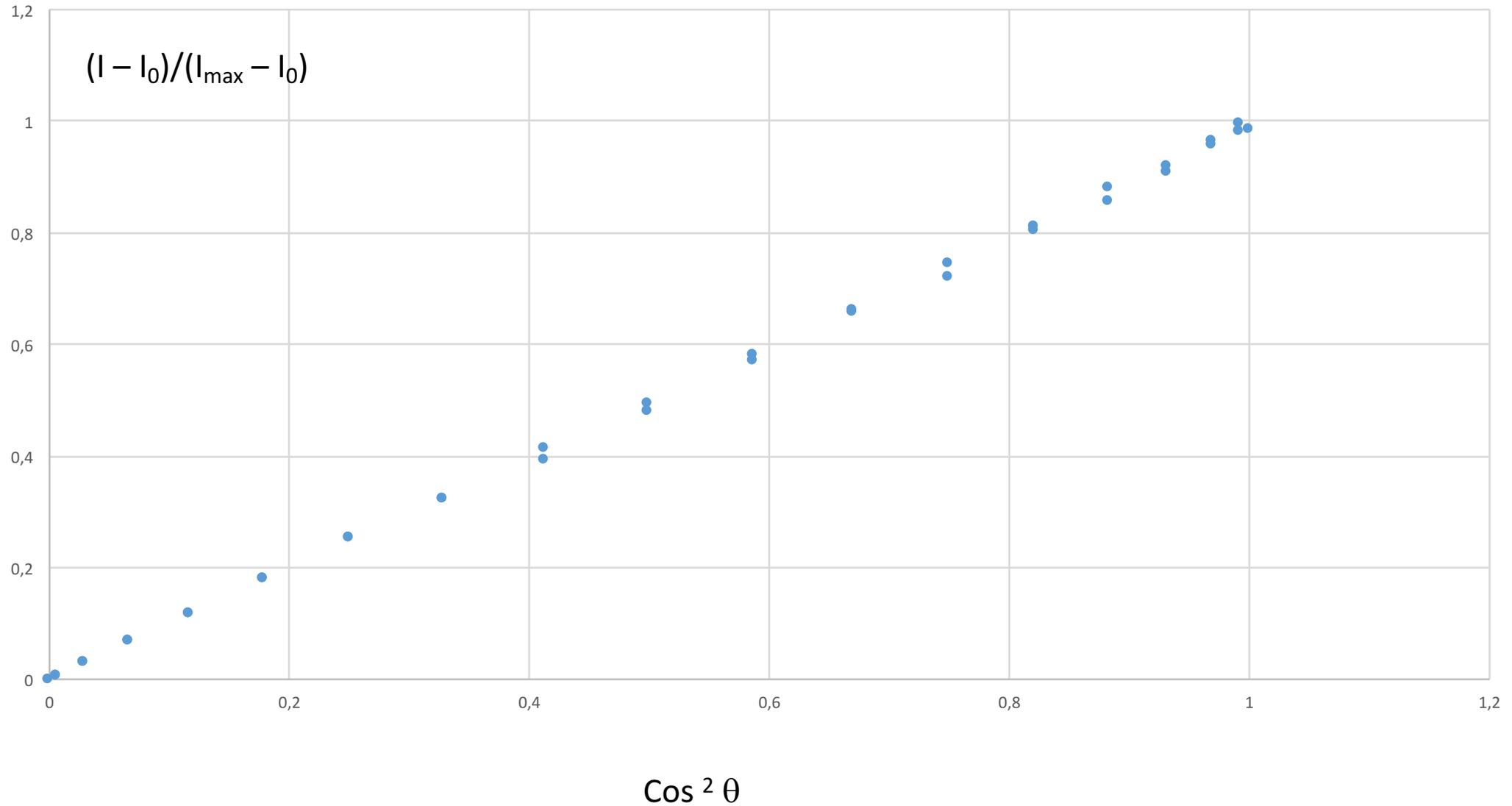
$$I = \frac{1}{c\mu_0} E_{qm}^2$$

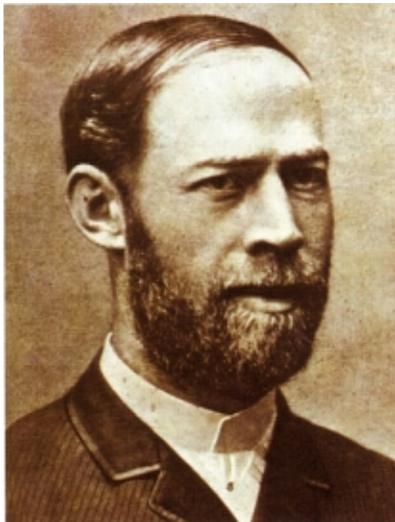


$$I_2 = I_0 \cos^2 \theta$$

Legge di Malus

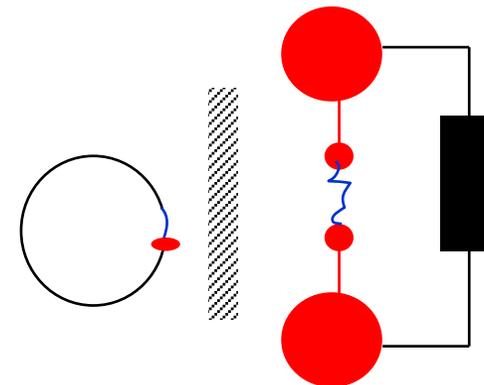
Verifica Sperimentale della legge di Malus



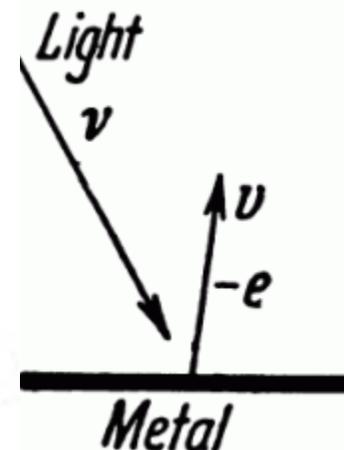
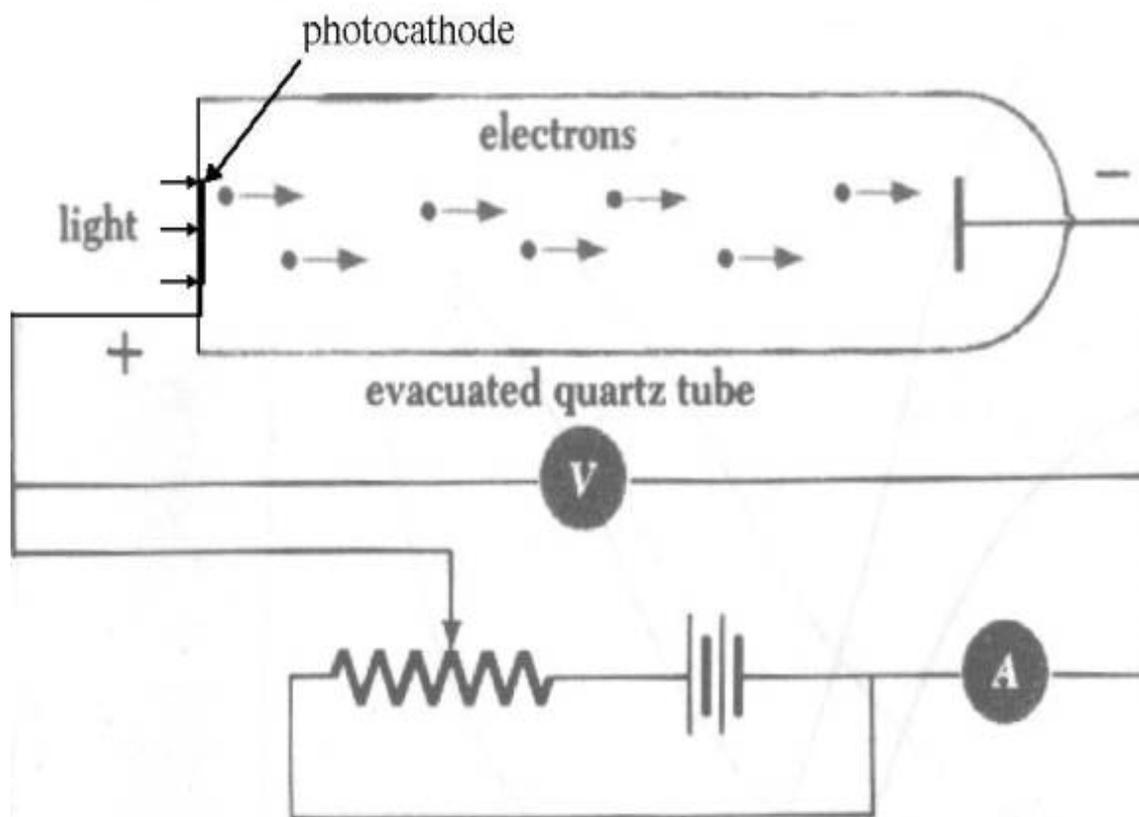


Fotoelettrico

Quarzo	SI
Gesso	SI
Vetro	Ridotta
Legno	Nulla

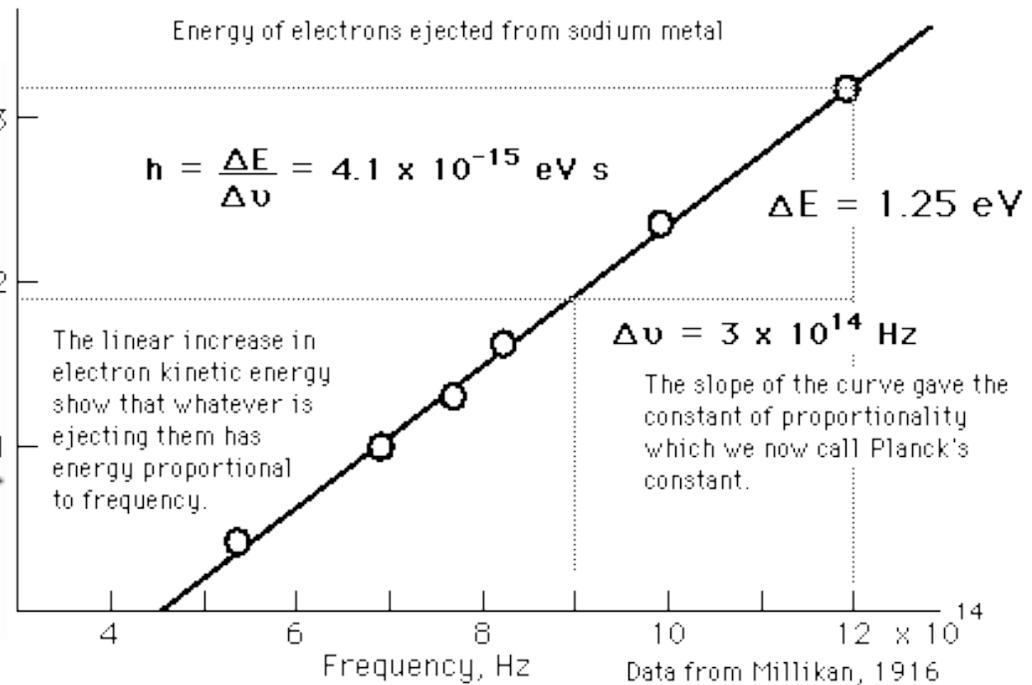
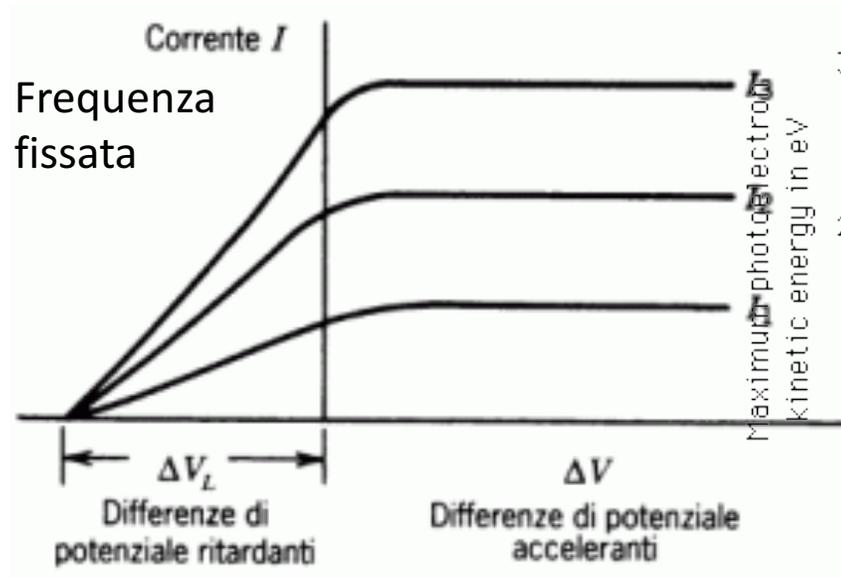


Hertz, 1887



Lenard
1899 - 1902

Relazioni caratteristiche dell'effetto fotoelettrico



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

Incoerente con la Fisica Classica !!!

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

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

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

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

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

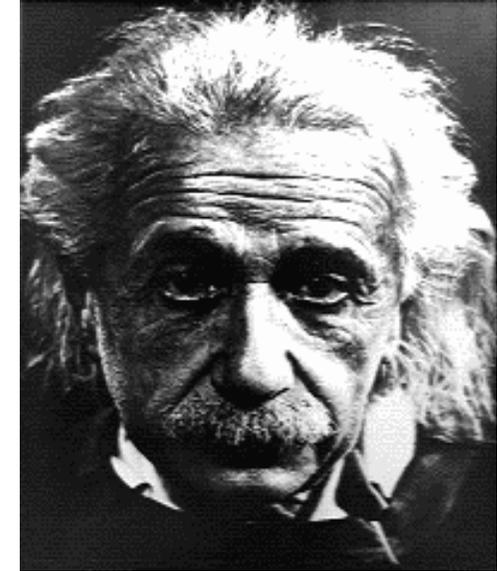
1-per espellere i fotoelettroni, il fascio di luce incidente deve avere una frequenza maggiore di un determinato valore minimo, la cosiddetta frequenza di soglia ν_0 .

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

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

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

- Albert Einstein



L'idea di Einstein

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

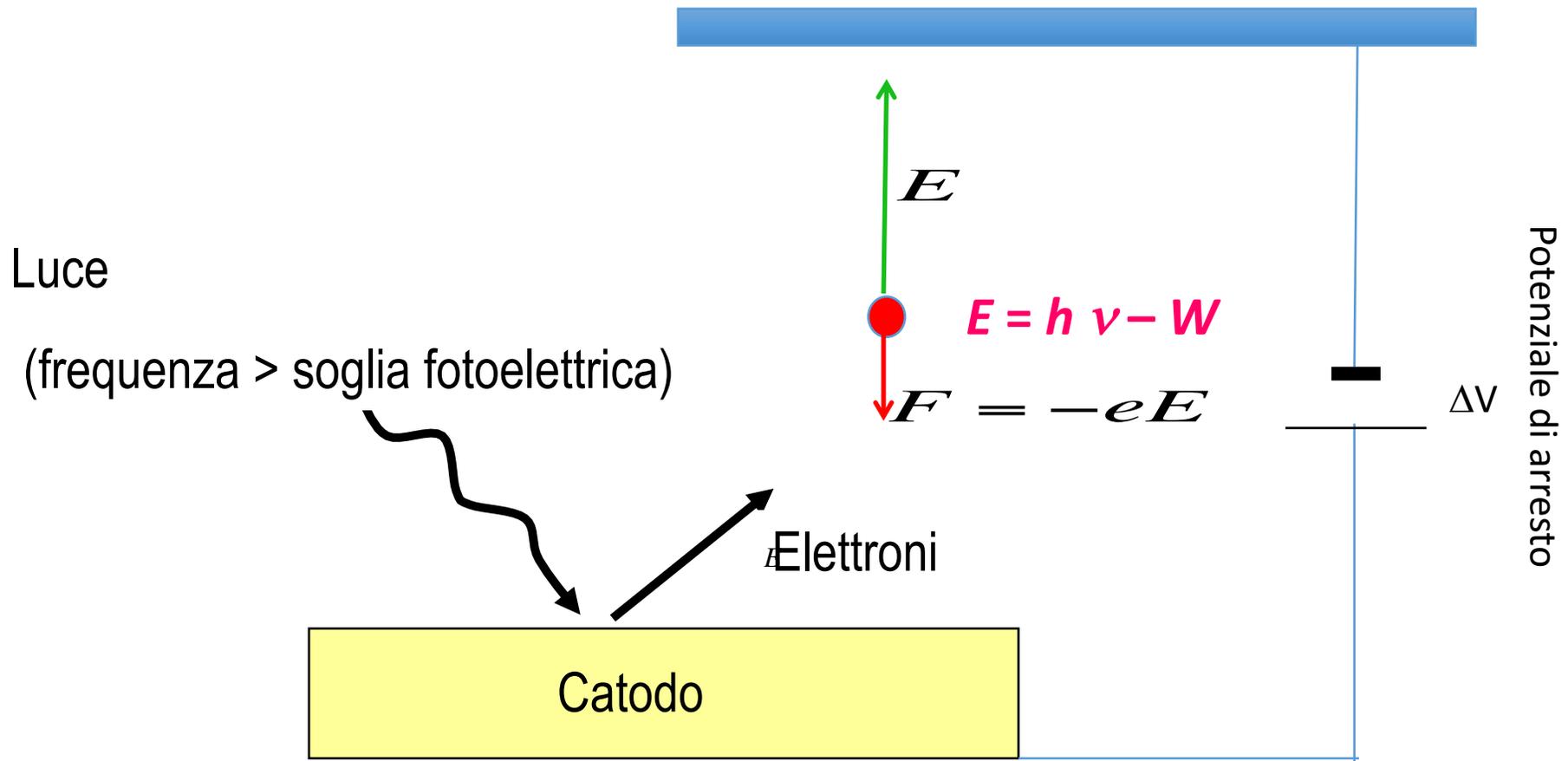


$$E = h\nu - W$$

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.

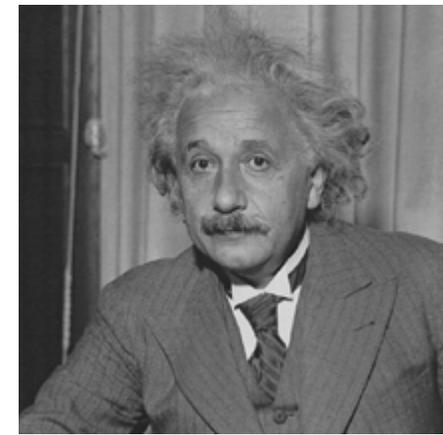
2) la relazione lineare tra potenziale di arresto e frequenza è immediata



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 $E = e \Delta V$.

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

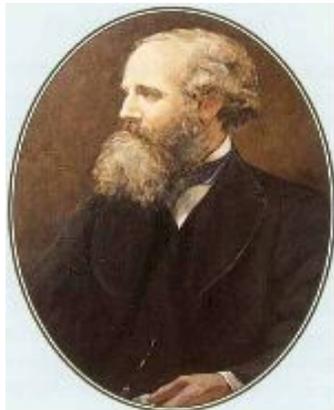
i Fotoni !



Einstein (1905)

Elettromagnetismo
Classico

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

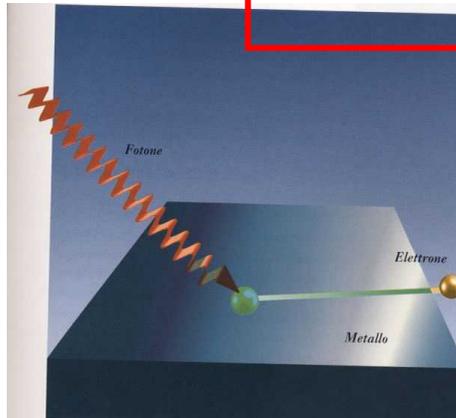


James Clerk Maxwell
1831 - 1879

... e la
DIFFRAZIONE !?!

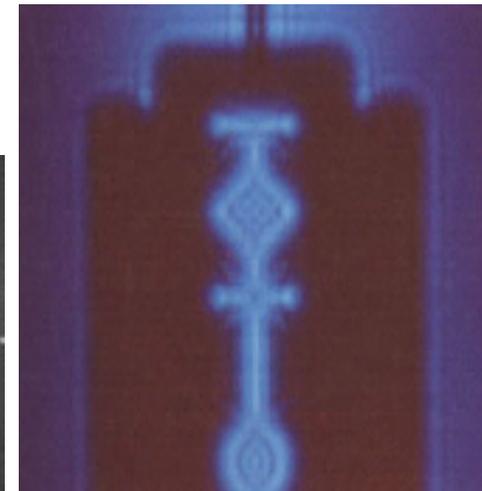
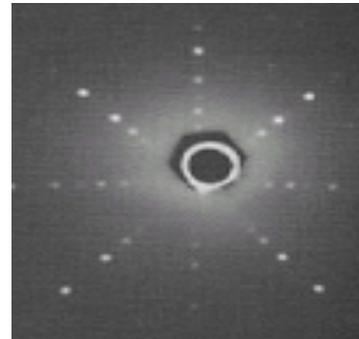
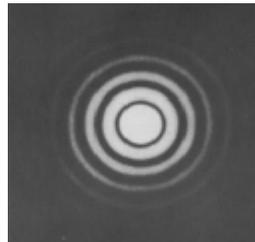
$$\text{Planck} \\ E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

Relazioni
Planck - Einstein



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

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



Dualità onda-corpuscolo

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

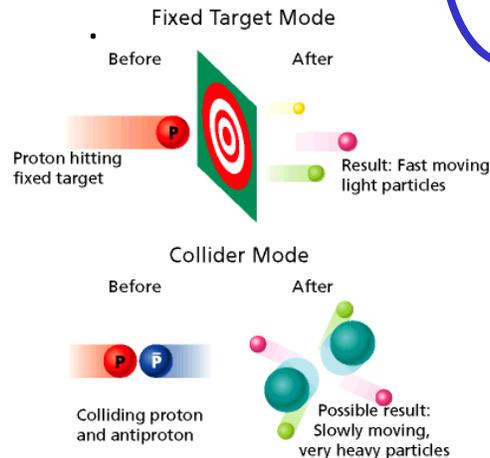
$$\hbar = h/2\pi$$

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

determina la *granularità intrinseca* della natura,

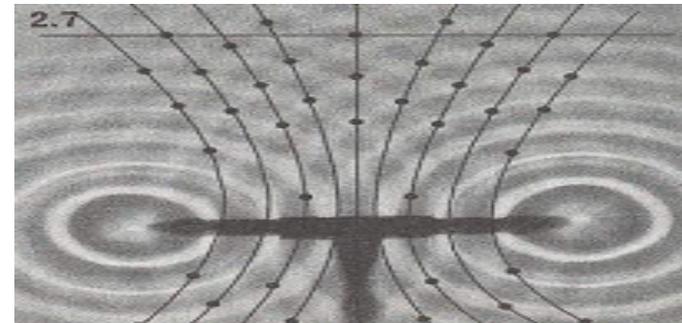
- Complementarietà e Relazioni di Planck – Einstein – de Broglie:
proporzionalità fra grandezze complementari di un **oggetto quantistico**

Grandezze
“corpuscolari”



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

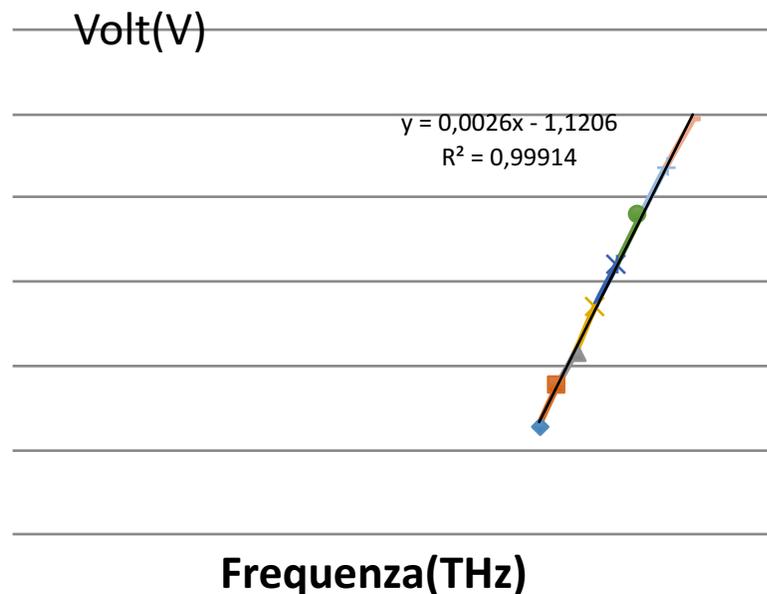
Grandezze
“ondulatorie”



Misura di h: procedura sperimentale

Dopo aver selezionato la lunghezza d'onda della luce che si vuole analizzare, con il voltmetro applichiamo una ddp ritardante, cioè negativa in modo da ottenere sul display dell'amperometro un'intensità di corrente nulla (entro gli errori sperimentali).

Applichiamo ripetutamente lo stesso procedimento per altre lunghezze d'onda per poi tracciare un grafico avente sull'ascissa la frequenza e sull'ordinata la ddp.



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

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

Questa è l'equazione rappresentata da una retta:

- h/e è il coefficiente angolare

- W/e è lo zero della funzione

Misura di h : elaborazione dei dati

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

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

$e = 1,602E-19$

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

