



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 18

La Teoria Quantistica del Mondo  
Reale

La MQ è molto di più di una  
teoria scientifica...

Essa fu un vero e proprio  
“terremoto concettuale”  
che pose seri problemi di  
ordine filosofico...

...i quali sono in gran parte  
tuttora aperti!

## LA MECCANICA QUANTISTICA E' LA TEORIA DI MAGGIOR SUCCESSO IN TUTTA LA STORIA DELLA SCIENZA

- a) Spiega correttamente l'interazione tra la materia e la radiazione (QED)
- b) I valori teorici coincidono con quelli sperimentali con un grado di accuratezza formidabile (es.: per il momento magnetico dell'elettrone il valore teorico è 1,00116 e quello empirico 1,00118 con un'incertezza di 3)
- c) Giustifica la struttura della tavola periodica degli elementi chimici (e dunque fornisce un strumento formidabile alla strutturistica chimica)
- d) Ha consentito la nascita e lo sviluppo dell'elettronica (semiconduttori, superconduttori)
- e) Ha fornito sostegno fondamentale allo studio di oggetti astronomici (MQ dei buchi neri)

MICROPHYSICAL REALITY AND QUANTUM FORMALISM

PERSPECTIVES ON THE EINSTEIN

BOHR DEBATE FIFTY YEARS AFTER THE EPR ARGUMENT



NAÏVE REALISM



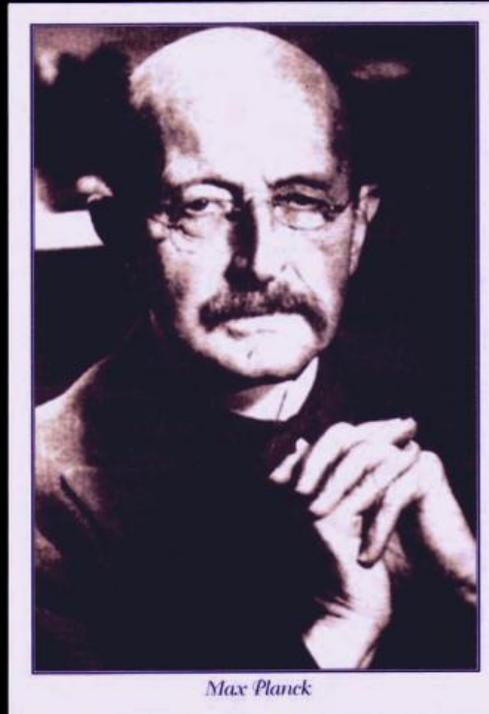
IDEALISM

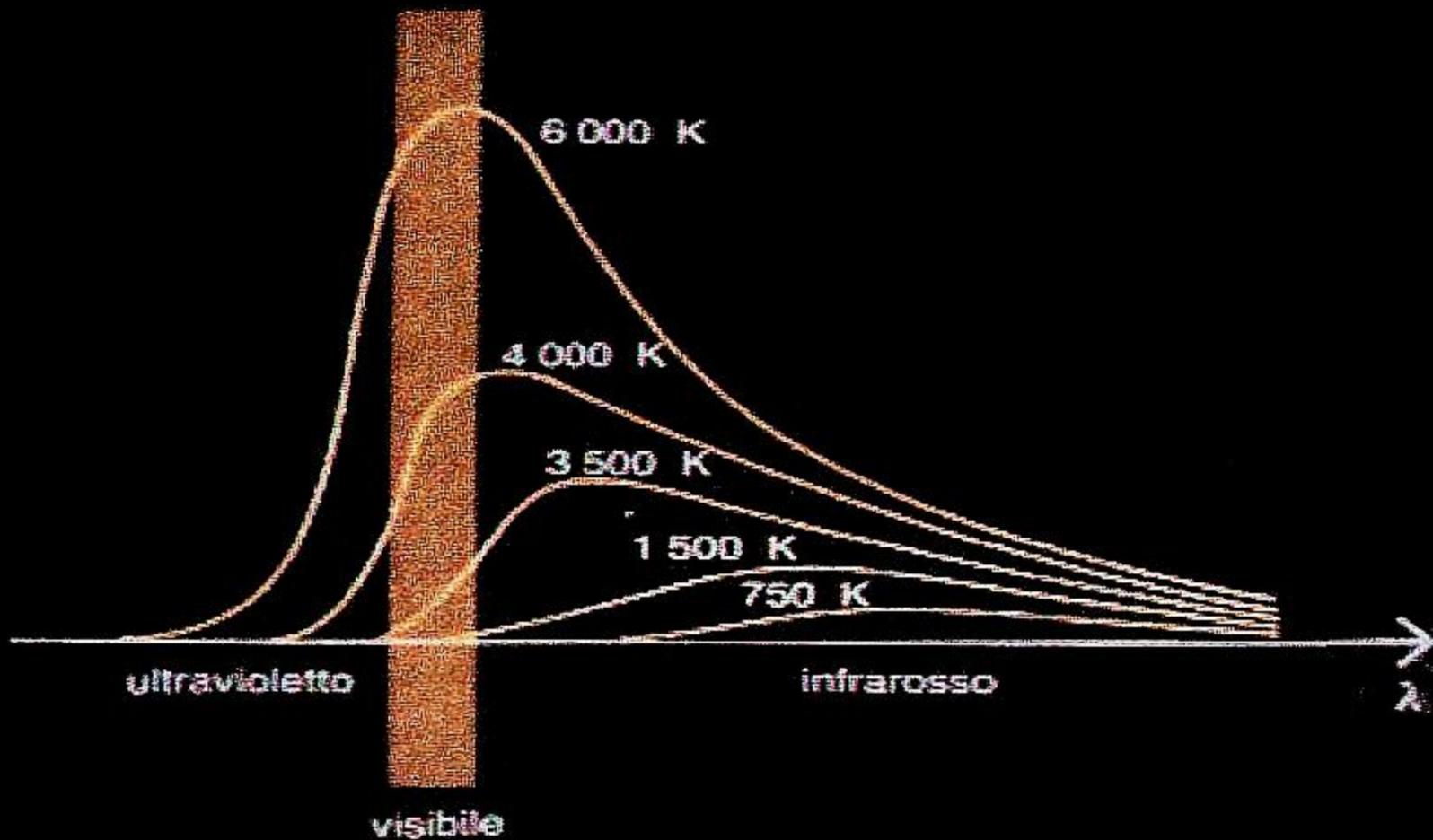


MODERN REALISM

Facciamo un po' di storia...

19 dicembre 1900... Max Planck  
e il problema della radiazione  
del corpo nero...





**Curve di emissione del corpo nero per diverse temperature. All'aumentare della temperatura, il massimo si sposta verso le lunghezze d'onda minori.**

Le curve erano inspiegabili se si applicavano  
la termodinamica classica e l'elettromagnetismo

Planck allora introdusse una nuova idea...

*..."per un puro atto di disperazione.."*

Tuttavia Planck considerava la sua  
soluzione un puro modello matematico

# ERA L'IPOTESI DI QUANTIZZAZIONE DELL'ENERGIA

ENERGIA SCAMBIATA PER...PACCHETTI...  
I QUANTI!

$$E = n \cdot h \cdot \nu$$

$n$  = intero positivo

$h$  = costante di Planck

$\nu$  = frequenza

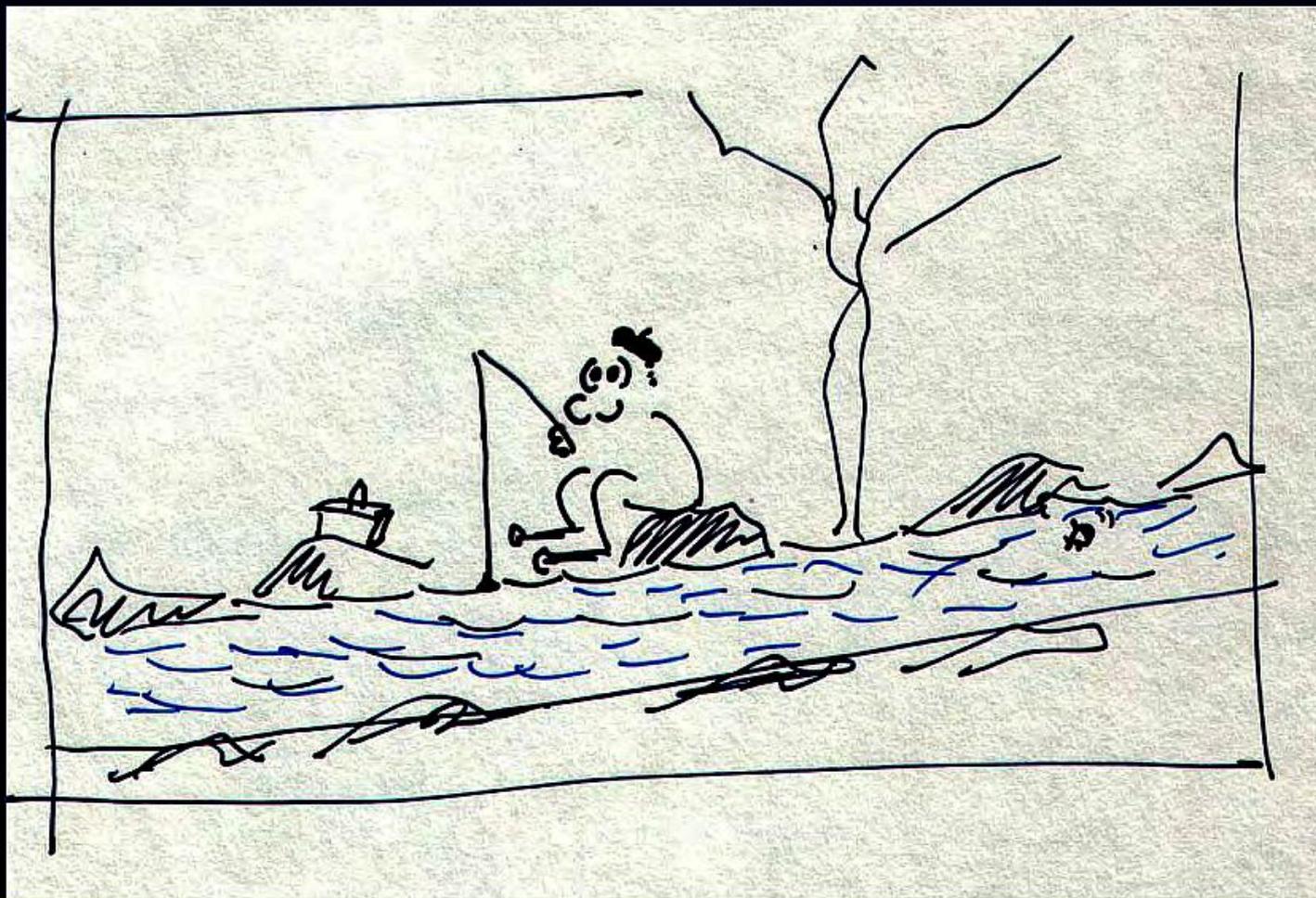
# Informazione

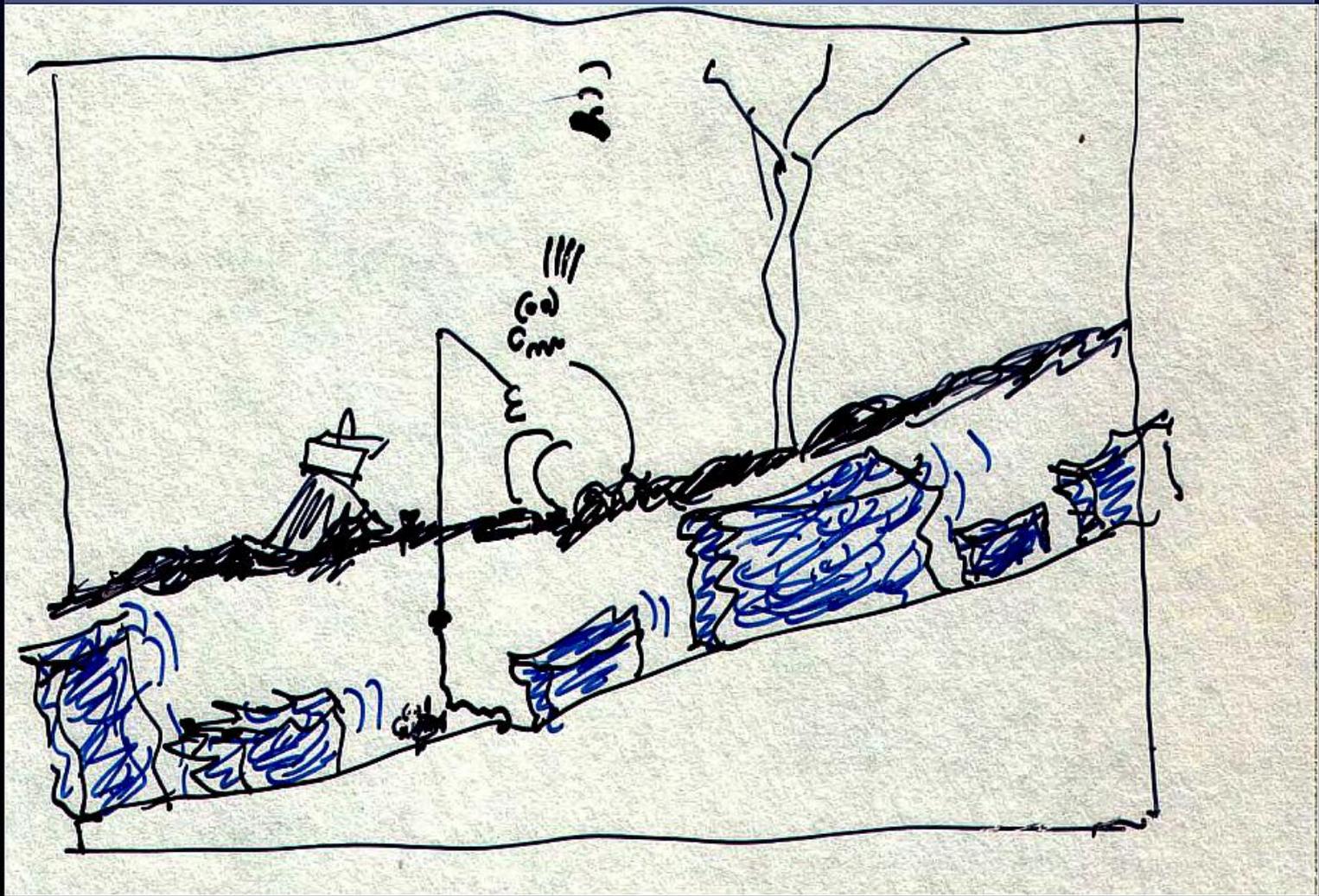
$$I(E) = \log_2(E) \quad \text{bits}$$

$$I(E) = \log_2(n) + \log_2(h) + \log_2(v)$$

*bits*

Si trattava di un'ipotesi... eretica!





fiume...quantizzato

# Unità di Planck

## Unità di Planck: unità fondamentali

Dimensione	Formula		Valore nel Sistema Internazionale
Lunghezza di Planck	Lunghezza (L)	$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1,616\ 252(81) \times 10^{-35}$ m
Massa di Planck	Massa (M)	$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2,176\ 44(11) \times 10^{-8}$ kg
Tempo di Planck	Tempo (T)	$t_p = \frac{l_p}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5,391\ 24(27) \times 10^{-44}$ s
Temperatura di Planck	Temperatura ( $\Theta$ )	$T_p = \frac{m_p c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1,416\ 785(71) \times 10^{32}$ K
Carica di Planck	Carica elettrica (Q)	$q_p = \sqrt{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$1,875\ 545\ 870 \times 10^{-18}$ C

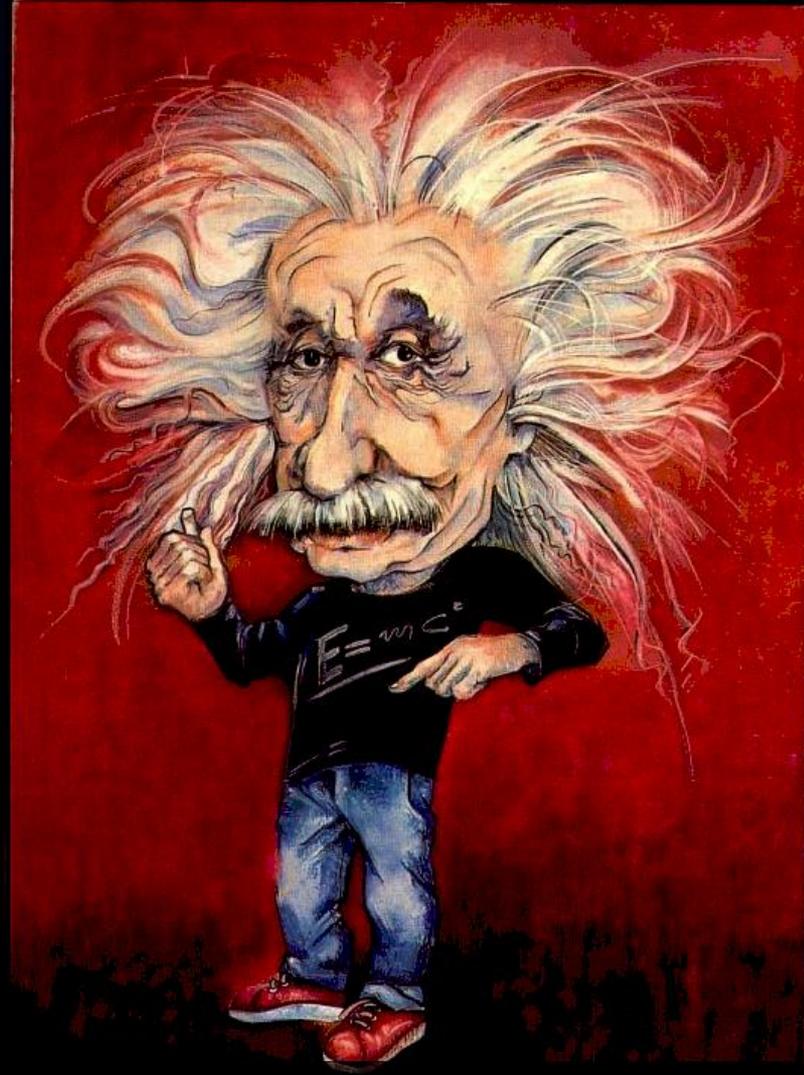
Le tre costanti della fisica sono espresse in questo modo semplicemente, mediante l'uso delle unità fondamentali di Planck:

$$c = \frac{l_p}{t_p}$$

$$\hbar = \frac{m_p l_p^2}{t_p}$$

$$G = \frac{l_p^3}{m_p t_p^2}$$

Ma qualcun altro prese questa idea  
sul serio...



Einstein può essere considerato il vero  
“padre” della teoria dei quanti...

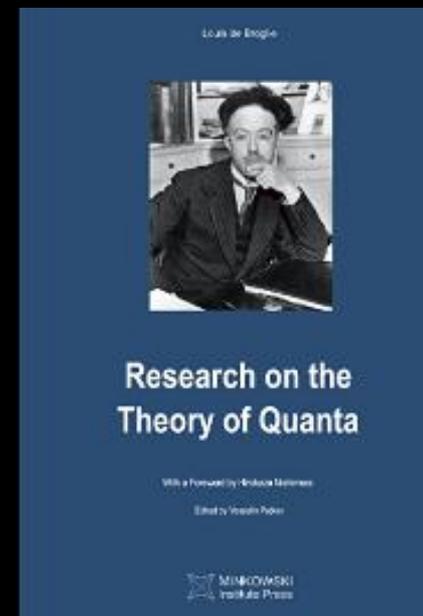
1905: annus mirabilis della storia della fisica!

Einstein scrisse e pubblicò un articolo  
per il quale sarebbe stato insignito  
del premio Nobel nel 1921

UN PUNTO DI VISTA EURISTICO RELATIVO ALLA  
GENERAZIONE E TRASFORMAZIONE DELLA LUCE

# FA LA SUA COMPARSA IL DUALISMO ONDA/CORPUSCOLO!!

La situazione si...appesantisce  
nel 1924 con la tesi di dottorato  
di Louis de Broglie



Erwin Schroedinger



Louis De Broglie

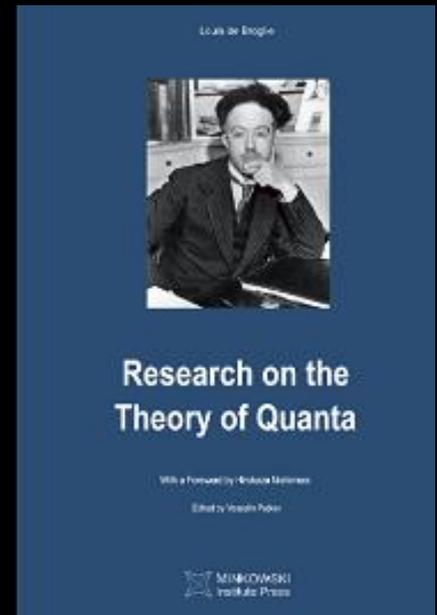


Idea base: se la luce, fenomeno tipicamente ondulatorio, esibisce comportamento corpuscolare, perché non poter pensare che la materia, di natura tipicamente corpuscolare, non possa esibire comportamento ondulatorio?

FORMULA...ERETICA!

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$\lambda$  è la lunghezza dell'onda materiale associata alla particella



# Ma essenzialmente di cosa stiamo parlando?

- Alcuni esperimenti si spiegano meglio pensando ai fotoni (particelle), altre ad onde.
- Dobbiamo accettare entrambe le realtà, ed ammettere che la luce non è descritta completamente da l'uno o l'altro scenario.
- I modelli a particelle od ondulatori si completano a vicenda!

## Più in dettaglio....

- In effetti per interpretare diversi esperimenti è necessario pensare alla luce (in realtà ogni radiazione elettromagnetica) come un fenomeno ondulatorio (interferenza, diffrazione) o particellare (effetto fotoelettrico, diffusione, ecc.).
- Il punto è che per osservare effetti ondulatori è necessario avere a che fare con dispositivi di dimensione comparabile alla lunghezza d'onda della radiazione.

# Esempio di comportamento ondulatorio...



L'atmosfera diffonde con maggiore efficienza la luce blu!

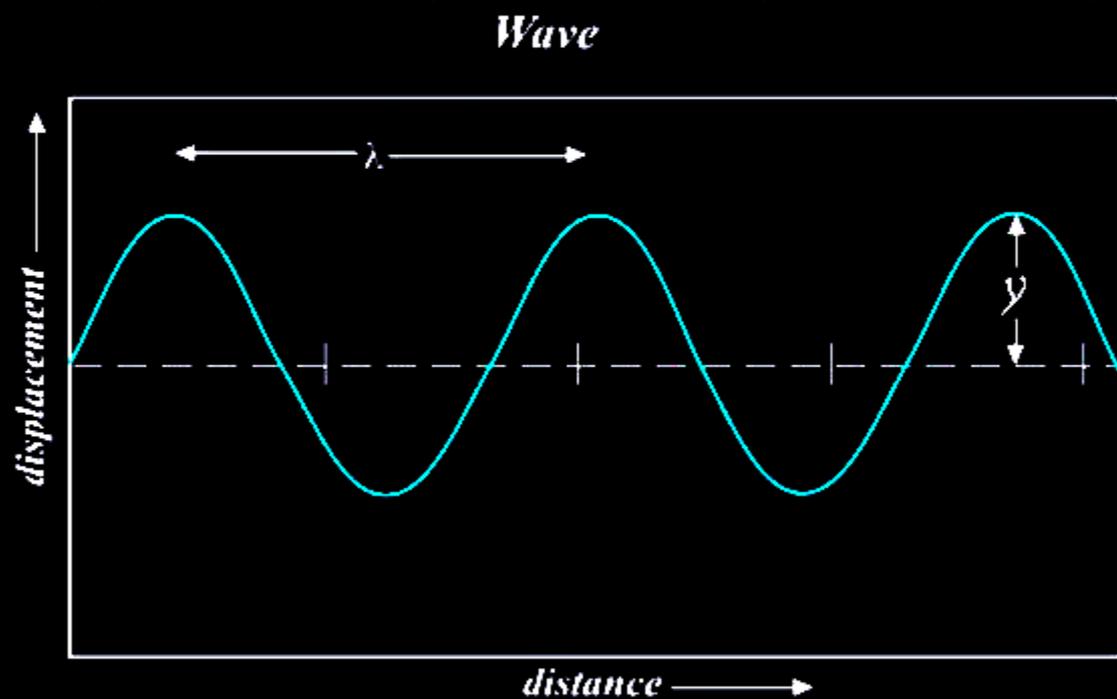
# Non si tratta affatto di un problema recente...

- La natura della luce: onde o particelle? Due diversi punti di vista: Isaac Newton e Christian Huygens.
- Trionfa la teoria ondulatoria: diffrazione, interferenza, polarizzazione della luce, ecc.
- Con Max Planck ed Albert Einstein, ritorna il dualismo onda-particella.



# Vediamo di capirci!

Le onde sono generalmente disturbi di un mezzo (acqua, aria, ecc.) che trasportano energia:



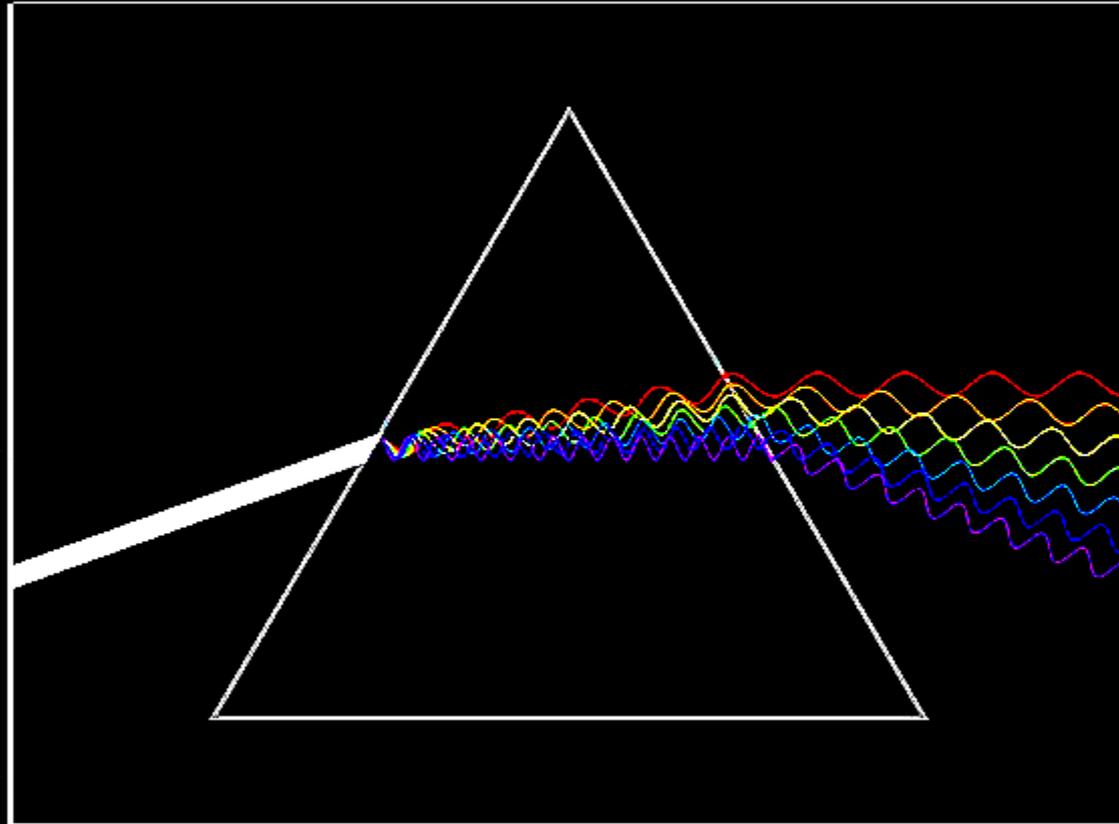
$\lambda = \text{wavelength}$

$\psi = \text{amplitude}$

$$V_{\text{onda}} = \lambda \nu$$

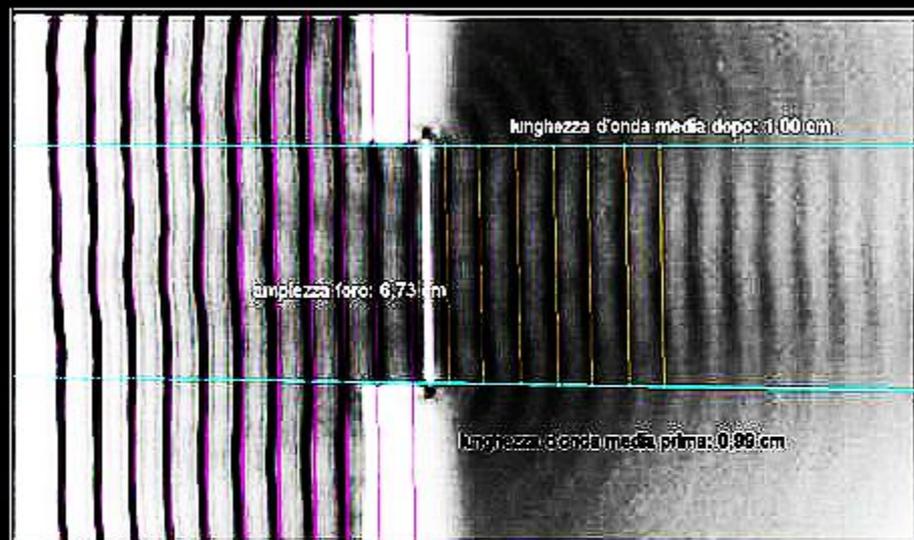
Definiamo alcuni concetti base: lunghezza d'onda, frequenza, intensità...

# Vediamo alcuni fenomeni ondulatori



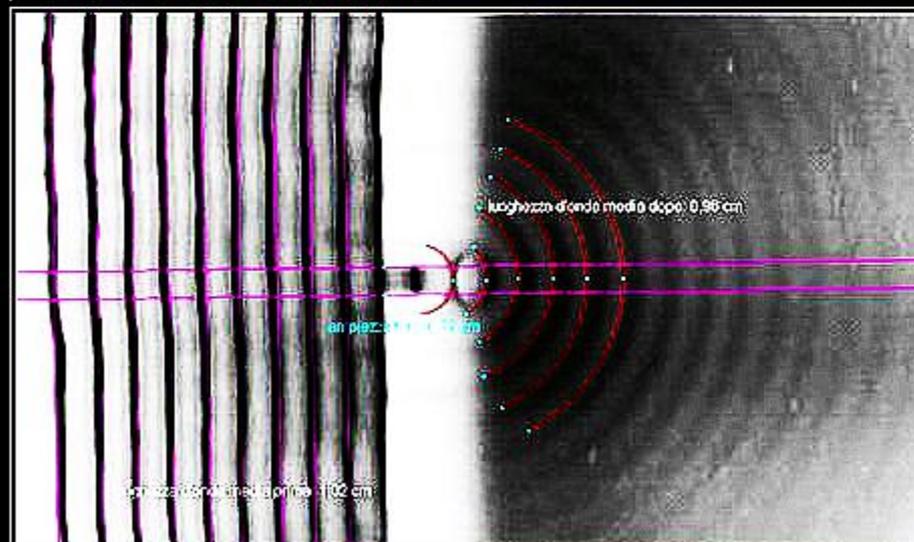
I fenomeni di rifrazione sono naturalmente descritti pensando ad una meccanica ondulatoria

# Un altro fenomeno ondulatorio è l'interferenza



## Foro di sezione $> \lambda$

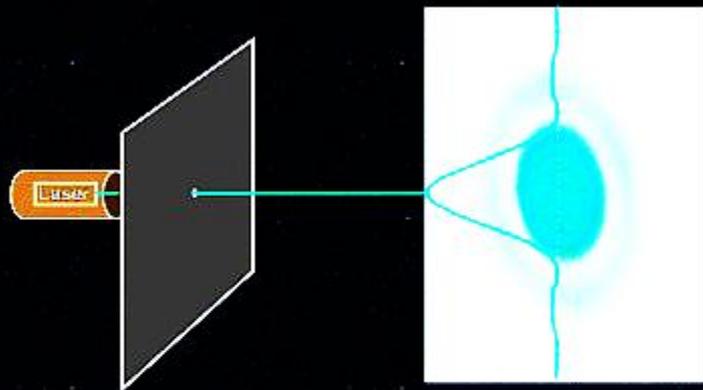
L'onda si propaga oltre il foro come un'onda piana con la stessa lunghezza d'onda dell'onda che si propaga prima del foro.



## Foro di sezione $\leq \lambda$

L'onda si propaga oltre il foro come un'onda sferica con la stessa lunghezza d'onda dell'onda che si propaga prima del foro.

# Accade la stessa cosa con la luce!



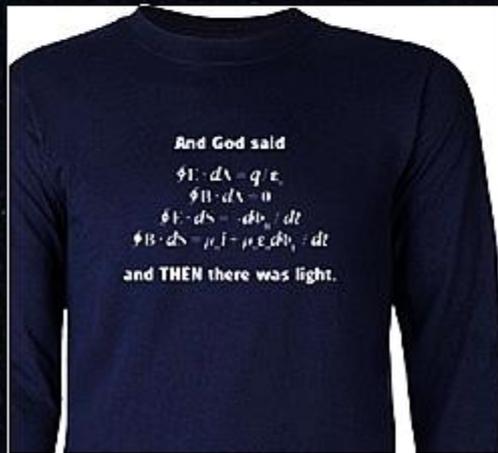
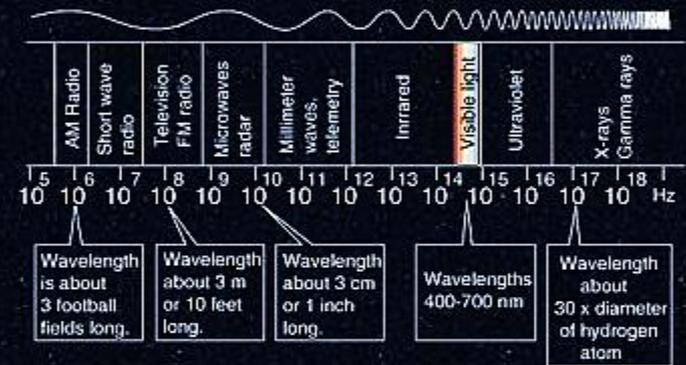
Porto di Alessandria d'Egitto

# Il moderno elettromagnetismo!

## ELETTRO-MAGNETISMO



Maxwell 1865



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

# Ma i “giochi” non erano ancora finiti...

- Max Planck, a cavallo del 1900, dovette introdurre l'ipotesi di quantizzazione della radiazione elettromagnetica
- Ma fu Albert Einstein a spiegare brillantemente, nel 1905, un fenomeno scoperto anni prima da Heinrich Hertz

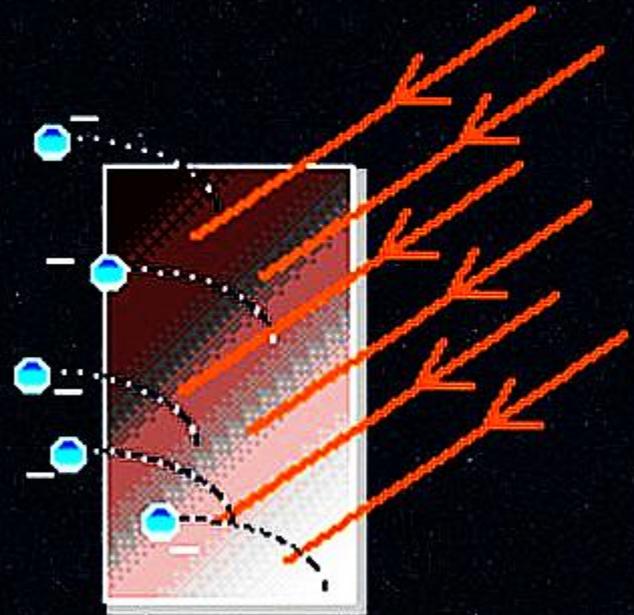


# Effetto fotoelettrico

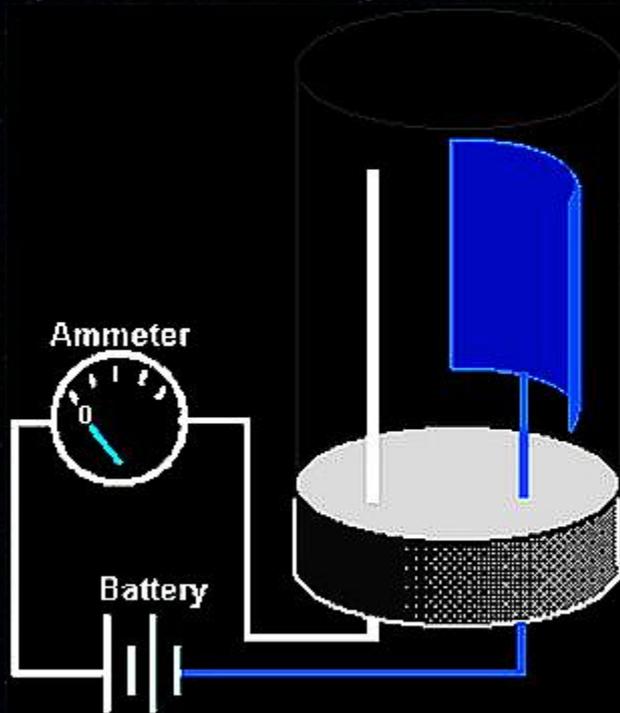
La radiazione incidendo sulla superficie di un metallo causa l'emissione di elettroni



Hertz 1887

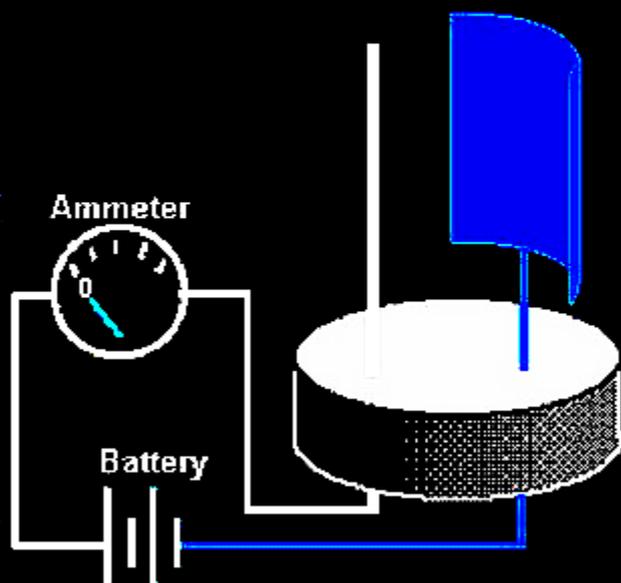


# L'apparato sperimentale



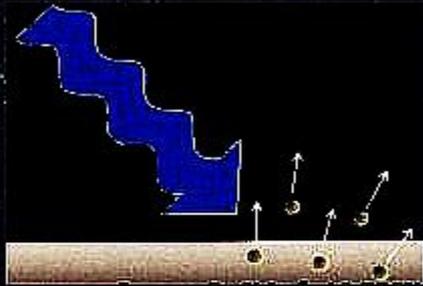
- Catodo ed anodo metallici chiusi in un tubo di vetro in cui è fatto il vuoto.
- Vuoto : gli elettroni possono passare dal catodo all'anodo senza collidere con le molecole.
- Luce monocromatica illumina il catodo: il passaggio di elettroni dal catodo all'anodo è rivelato dal galvanometro.

# L'esperimento

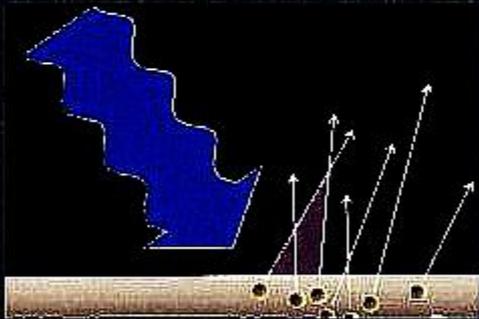


- Se  $\nu < \nu_{\text{SOGLIA}}$   
NON si ha emissione di  $e^-$
- Se  $\nu > \nu_{\text{SOGLIA}}$   
emissione immediata di  $e^-$
- Energia cinetica degli  $e^-$  emessi
  - proporzionale a  $\nu$
  - indipendente da  $I$

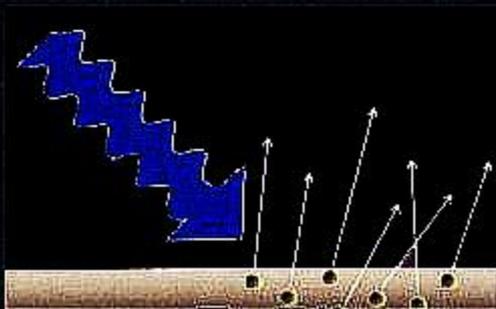
# Secondo la fisica classica...



Continuando a fornire energia si dovrebbe avere liberazione di elettroni.

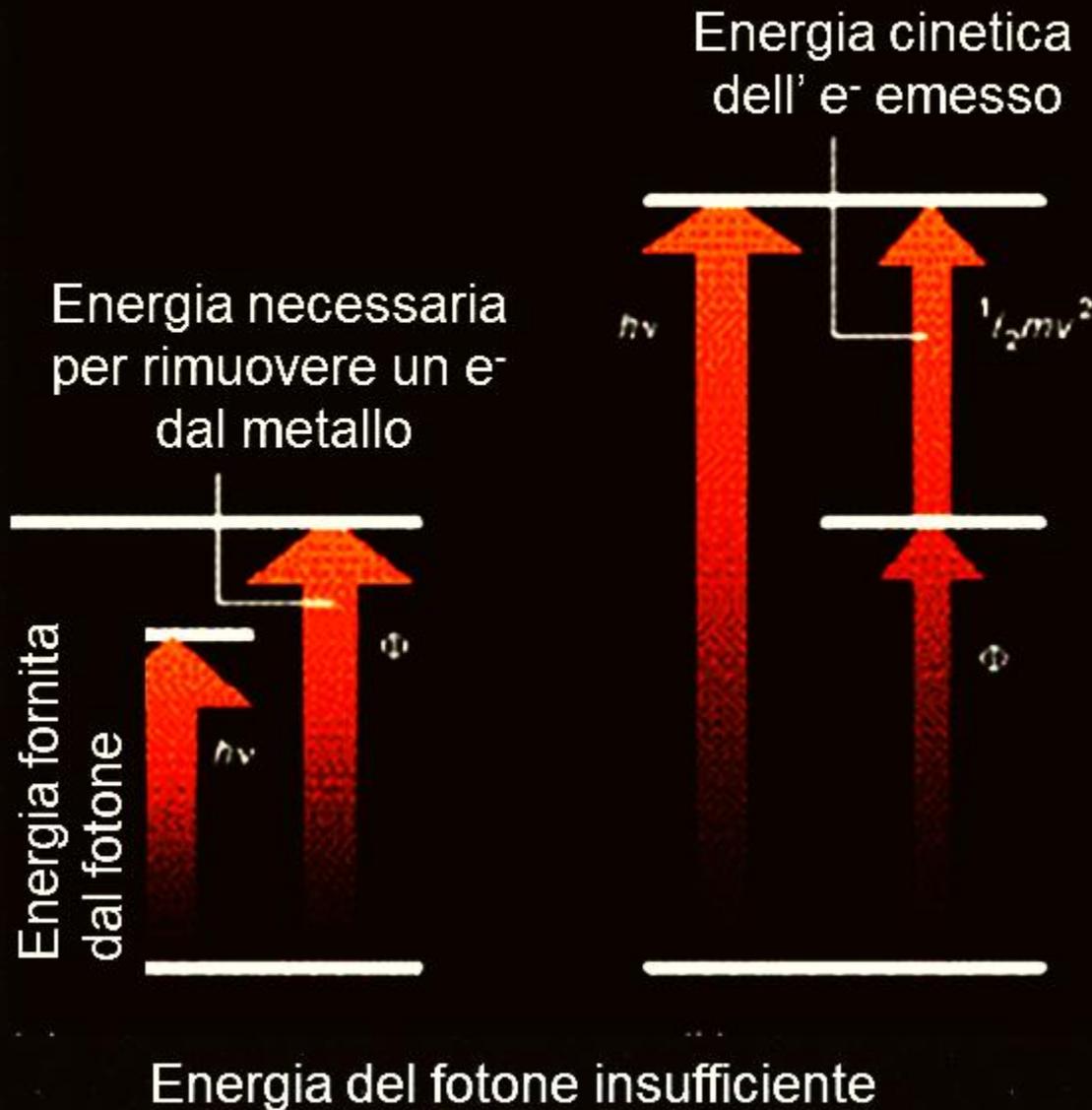


Al crescere dell'intensità dovrebbe crescere il numero degli elettroni liberati e la loro velocità.



Al crescere della frequenza dovrebbe crescere il numero degli elettroni liberati e la loro velocità.

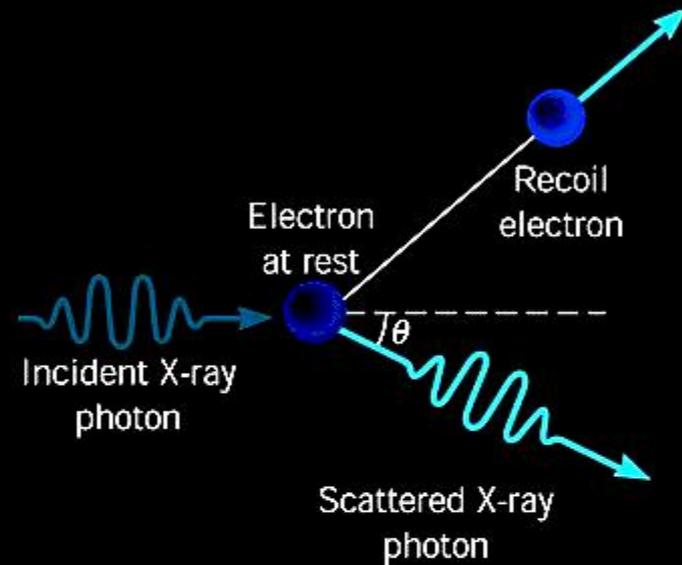
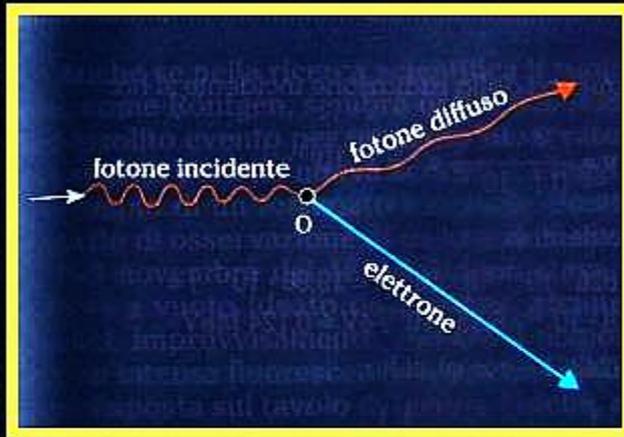
# Secondo invece l'ipotesi quantistica...



Energia del fotone  
sufficiente

Eccesso di energia =  
E cinetica del  
fotoelettrone

# C'è anche l'effetto Compton...



Arthur Compton descrisse negli anni '20 un fenomeno di interazione fra elettroni e fotoni che richiede di pensare ai fotoni come "particelle".

# Tutto chiaro quindi?

- Abbiamo appurato che la luce si comporta sia come onda che come particella.
- Abbastanza sconcertante, senza dubbio!

Ma è bene essere preparati ad altro...

# Arriviamo all'inizio del '900...

- Quando un giovane fisico francese, Louis de Broglie, ipotizzò che la duplice natura della luce fosse anche una caratteristica di tutta la materia!

$$\lambda_B = \frac{h}{p}$$

Costante di Planck

Momento della particella

Lunghezza d'onda  
di de Broglie

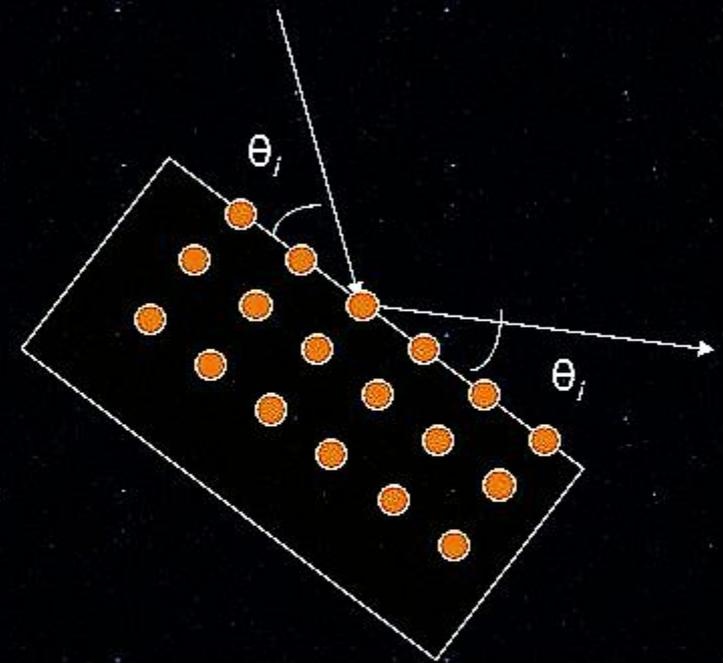
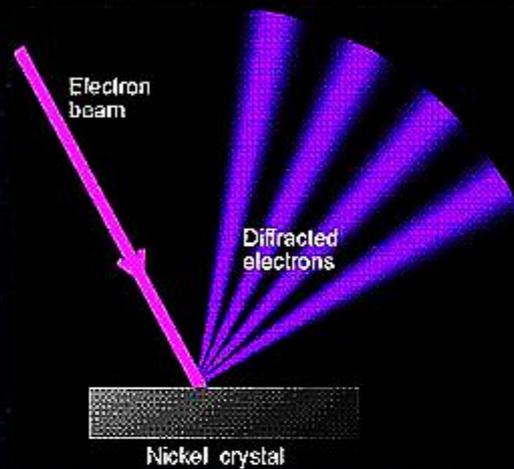


## Ma se la materia ha caratteristiche ondulatorie...

- Dovremmo poter osservare fenomeni di interferenza.
- Ed arriviamo al fondamentale esperimento di Davisson & Germer del 1927.
- Un fascio di elettroni fatto interagire con una struttura cristallina mostra figure di diffrazione!

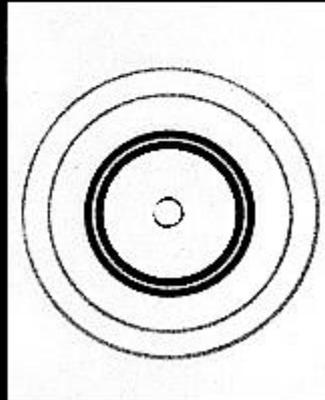


# A lunghezze d'onda confrontabili...

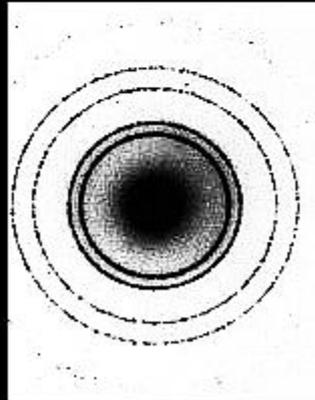


Cristallo di Nickel

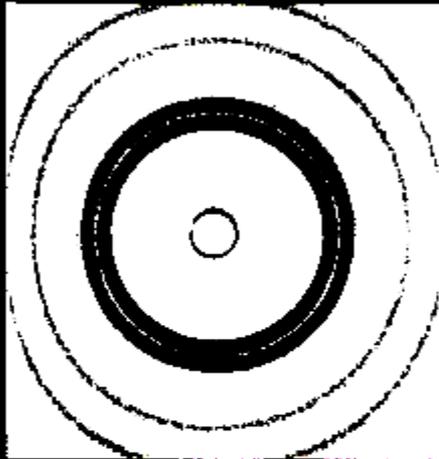
Raggi X



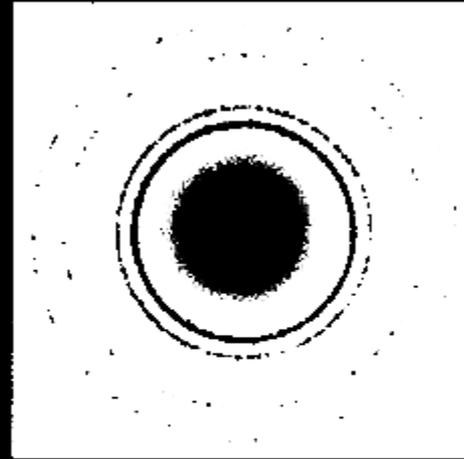
Elettroni



**Se non siete convinti...**



raggi X



elettroni



neutroni

Ogni particella elementare mostra  
comportamenti ondulatori!

Perché non vediamo effetti di tali onde, normalmente? Perché  $h$  è un valore piccolissimo! Ordg:  $10^{-34}$  Js

Ma per gli oggetti del mondo atomico tale valore è grande!!

Infatti nel 1927 Davisson e Germer evidenziarono l'interferenza degli elettroni...

Ma perchè non ce ne siamo mai accorti?

Oggetto macroscopico – pallina da ping pong

$$\lambda(\text{pallina ping-pong}) = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(2 \times 10^{-3} \text{ kg})(5 \text{ m/s})} = 6.6 \times 10^{-32} \text{ m}$$

Oggetto microscopico – “elettrone lento” (1% velocità della luce)

$$\lambda(\text{elettrone}) = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(10^6 \text{ m/s})} = 7.3 \times 10^{-10} \text{ m}$$

E se siete ancora più sorpresi, la compagnia è buona...

Niels Bohr, 1927:

“Chi non resta sbalordito dalla meccanica quantistica evidentemente non la capisce”



Richard Feynman, 1967:

“Nessuno capisce la meccanica quantistica”



## BIBLIOGRAFIA

B. d'Espagnat - I fondamenti concettuali della MQ  
Bibliopolis

G.C. Ghirardi – Un'occhiata alle carte di Dio  
Il Saggiatore

R. Gillmore – Alice nel mondo dei quanti – Cortina

R. Gillmore – Il quanto di Natale – Cortina

G. Boniolo (a cura di) – Filosofia della fisica

Articoli de Le Scienze