

# **Oltre la Fisica Classica: Evidenze Sperimentali di Meccanica Quantistica e Relatività**

**Crisi della Fisica Classica:**  
• **Meccanica Quantistica**  
• **Relatività**

**Cecilia Tarantino**  
**Università degli Studi Roma Tre**  
**Marzo 2013**

# Fisica Classica (<1900)

## MECCANICA

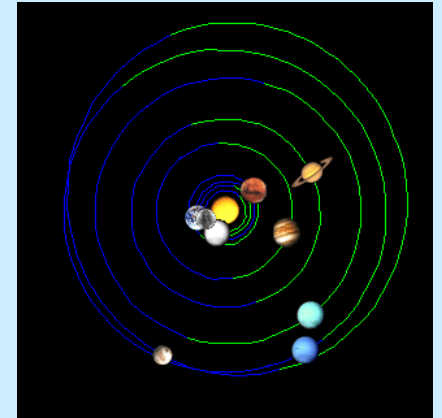
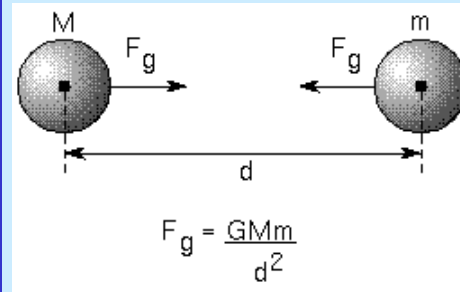


Newton 1686

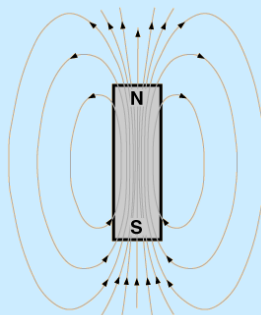
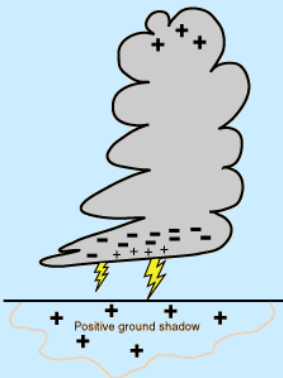
$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

Equazione  
del moto

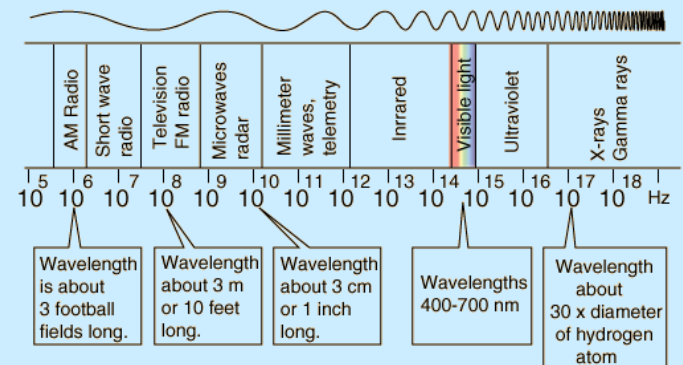
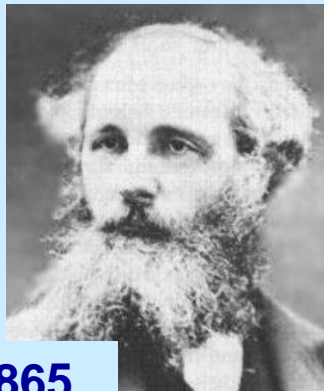
## GRAVITAZIONE UNIVERSALE



## ELETTRO-MAGNETISMO



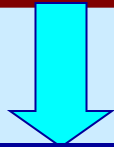
Maxwell 1865



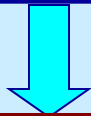
**Fine '800 – Inizio '900**

**Studio di Fenomeni su Scala Atomica:**

**AZIONE  $\approx h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J s}$**

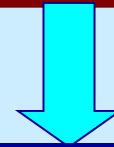


- **Dualismo Onda-Particella**
- **Relazione di Indeterminazione**
- **Probabilismo**
- ...
- ...



**MECCANICA QUANTISTICA**  
[Schrödinger, Heisenberg, Born,...]

**VELOCITA'  $\approx c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$**



- **c: velocità assoluta**
- **Dilatazione dei Tempi**
- **Non-conservazione della Massa**
- ...
- ...

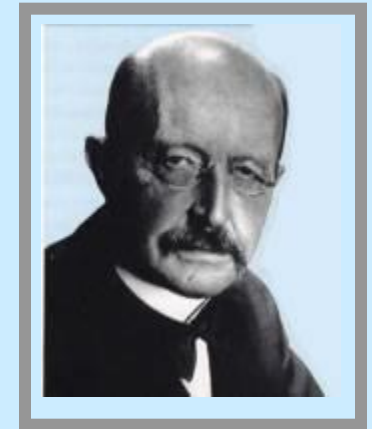
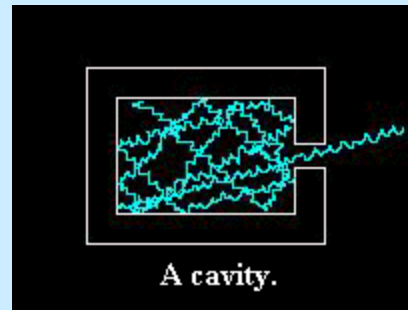
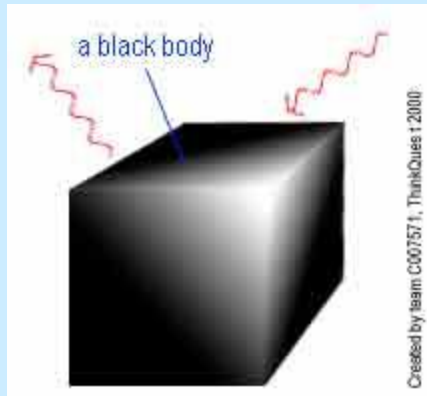


**RELATIVITA'**  
[Einstein]

# MECCANICA QUANTISTICA

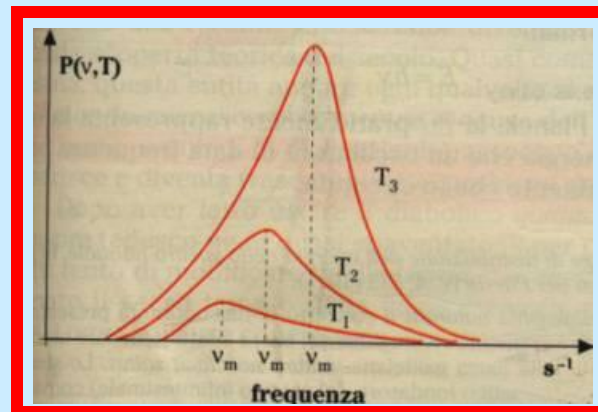
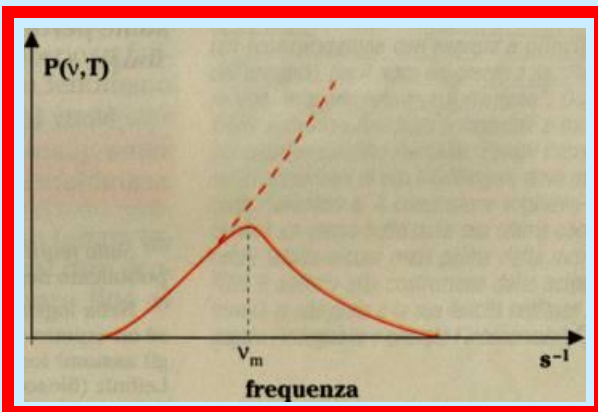
## Proprietà Corpuscolari della Radiazione elettromagnetica

### SPETTRO DEL CORPO NERO



$$h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

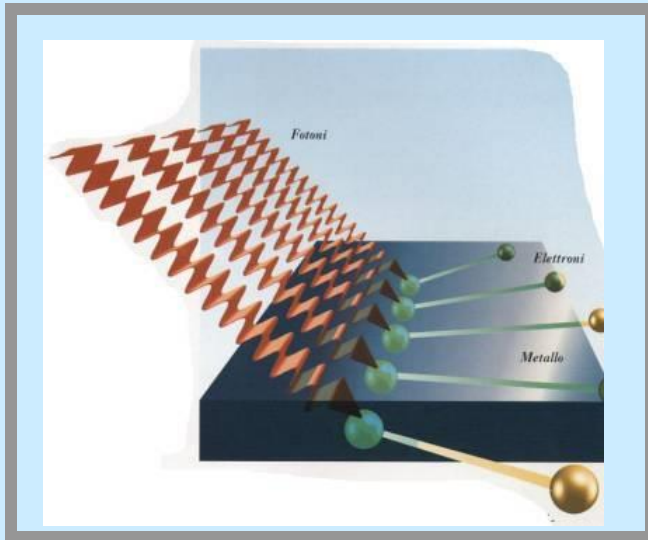
Planck 1900



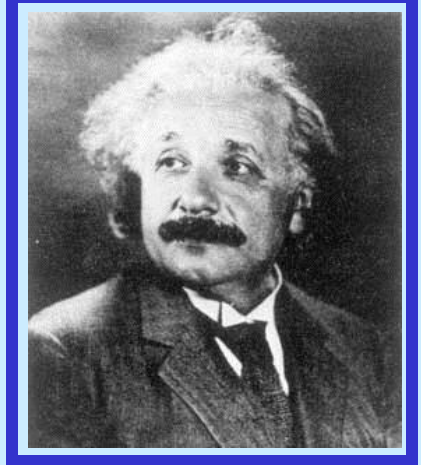
$$u_\nu(\Omega) = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/(kT)} - 1}$$

$$\Delta E = h\nu$$

# EFFETTO FOTOELETTRICO



Scoperta:  
Hertz 1887



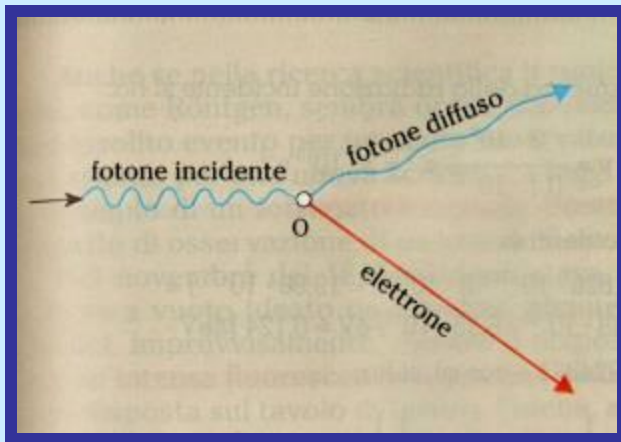
Teoria: Einstein  
1905

- ◆ Effetto a soglia:  $\nu > \nu_s$
- ◆  $E_{\text{elett.}} \sim \text{frequenza } \nu \text{ dell'onda}$
- ◆  $N_{\text{elett.}} \sim \text{intensità dell'onda}$

**FOTONI**

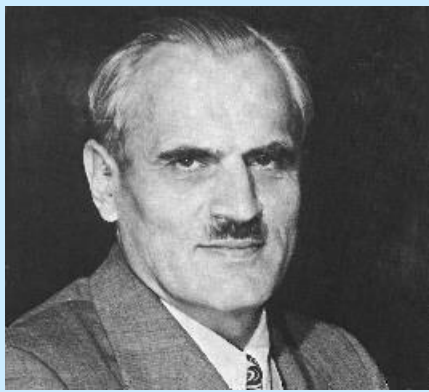
$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W$$

# EFFETTO COMPTON



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \neq 0$$

Urto fotone-elettrone in cinematica relativistica:



Compton 1922

$$E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$$

$$p_\gamma = E_\gamma/c$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/mc) (1 - \cos\theta)$$

# Proprietà Ondulatorie delle Particelle

## DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

**De Broglie 1923:**

anche le "particelle"  
sono "onde"

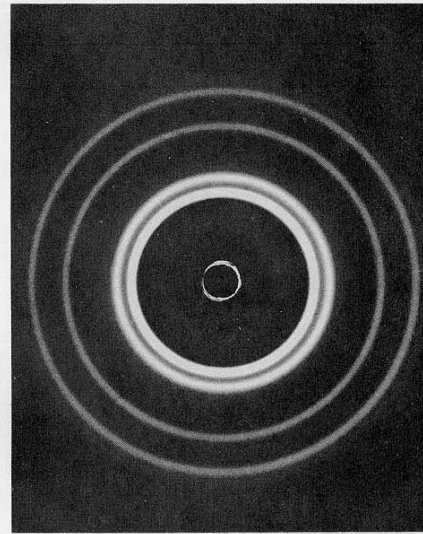


$$p = h/\lambda$$

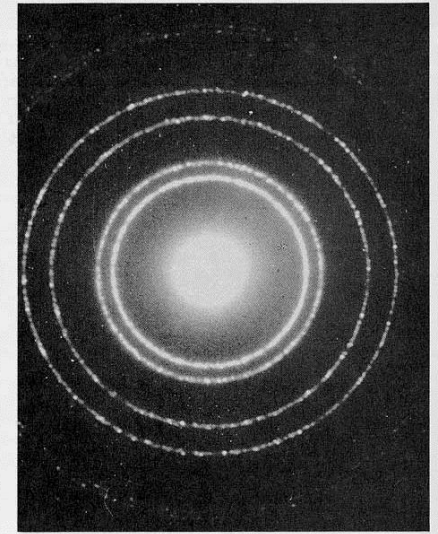


$$\lambda = h/p$$

**Raggi X**



**Elettroni**



**Davisson e Germer 1927**



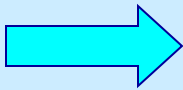
1926-1927:

# Principi Fondamentali della Meccanica Quantistica

Su scala atomica:

• materia e radiazione  $\longleftrightarrow$  onde-particelle

• non è possibile definirne la traiettoria  
[Heisenberg] relazione di indeterminazione

  
 $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$



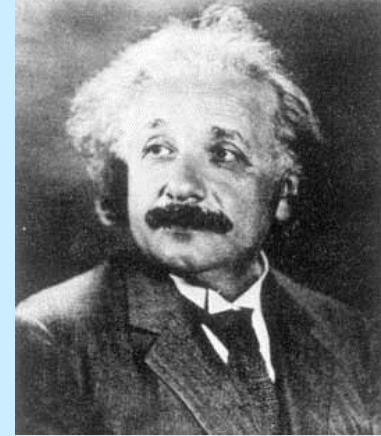
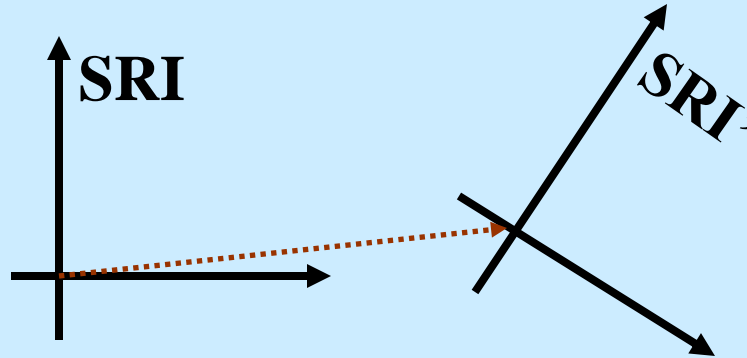
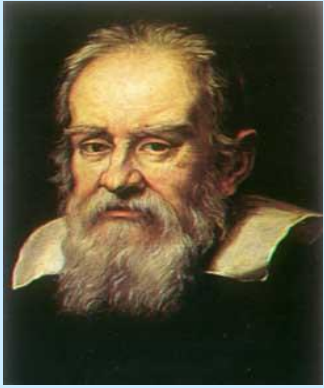
• ~~determinismo~~



probabilismo



# RELATIVITA'



**Galileo ('600):**

Stesse leggi della MECCANICA  
in ogni SRI

**Trasformazioni di Galileo:**

- Tempo assoluto
- Composizione lineare delle velocità

**PROBLEMI:**

- Sperimentalmente "c" in ogni SRI (Michelson-Morley)
- Eq. di Maxwell non invarianti sotto trasformazioni di Galileo

**Einstein (1905):**

Stesse leggi della FISICA in ogni SRI

**Trasformazioni di Lorentz:**

- Tempo relativo
- c: velocità assoluta

**CONSEGUENZE:**

- Dilatazione dei tempi
- Non-conservazione della massa
- ...

# Dilatazione dei Tempi

**Einstein:**

il tempo dipende dal SRI in cui si osserva il fenomeno

**Evidenza sperimentale:**

i muoni prodotti nell'alta atmosfera arrivano sulla terra

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

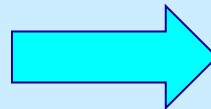
$$N_\mu \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{2.718} \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{(2.718)^2} \xrightarrow{\tau} \dots$$

$$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Tempo proprio  
(nel SR dei muoni)

Nel SR “terra” in cui i muoni sono in moto

$$t = \gamma \tau = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tau \cong 20\tau$$



**Arrivano sulla terra!**

# Conversione tra “massa” e “energia”

energia a riposo

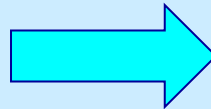
energia cinetica

$$E = E_0 + E_k$$

$$E_0 = mc^2$$

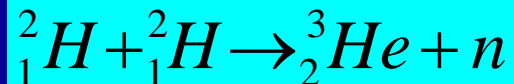
$$E_k = (\gamma - 1)mc^2$$

L'energia totale si conserva



La massa non si conserva

**Evidenza sperimentale:**  
reazioni nucleari



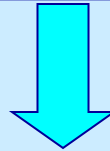
$$M_f < M_i$$

**‘900:**

# **Limiti della Fisica Classica—Nascita della Fisica Moderna**

**Su scala macroscopica:**

- **velocità  $\ll c$**
- **azione  $\gg h$**



**La fisica classica continua a descrivere bene la realtà di tutti i giorni (che conosciamo e capiamo)**

**Niels Bohr, 1927:**

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

**Richard Feynman, 1967:**

**“Nessuno capisce la meccanica quantistica”**