

# **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 2025**

# Fisica Classica (<1900)

## MECCANICA

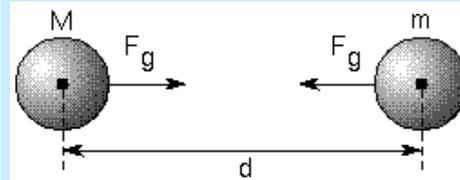


Newton 1686

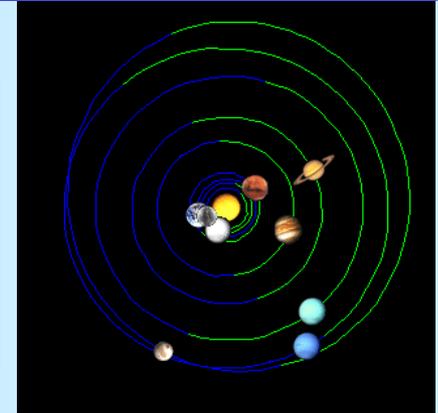
$$F = m \cdot a$$

Equazione  
del moto

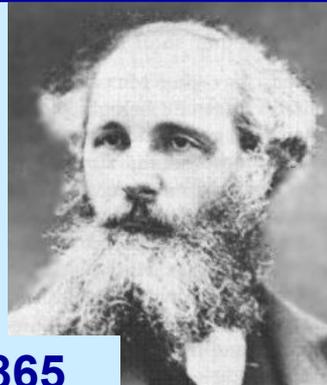
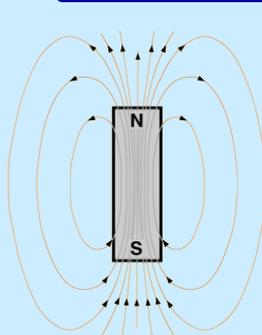
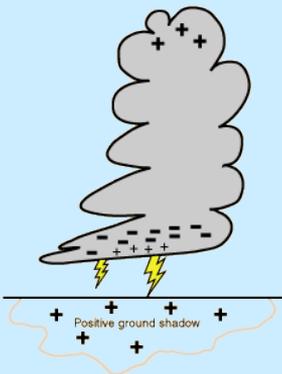
## GRAVITAZIONE UNIVERSALE



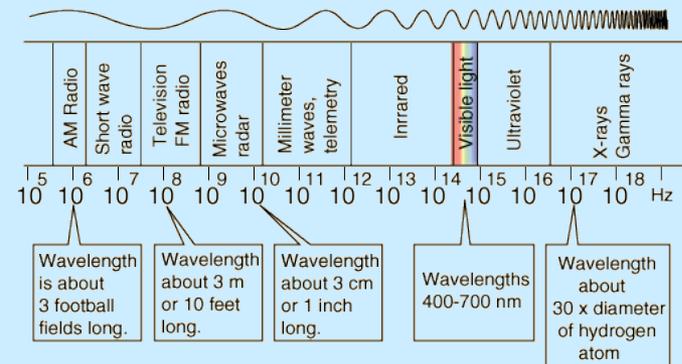
$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$



## ELETTRO-MAGNETISMO



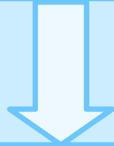
Maxwell 1865



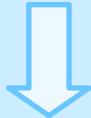
**Fine '800 – Inizio '900**

**Studio di Fenomeni su Scala Atomica:**

**AZIONE**  $\approx h=6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   
(grandezza che caratterizza un sistema  
(e le sue dimensioni)  
e permette di studiarne il moto)



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



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

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



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

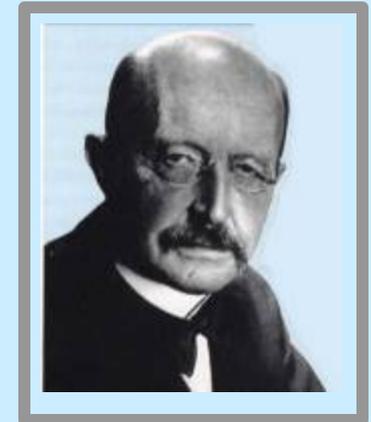
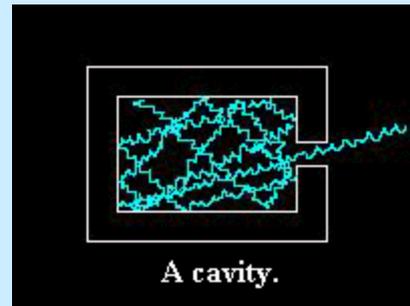
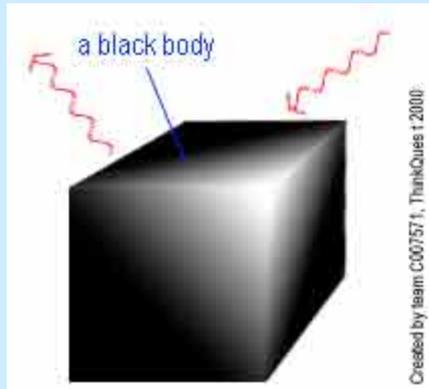


**RELATIVITA'**  
[Einstein]

# MECCANICA QUANTISTICA

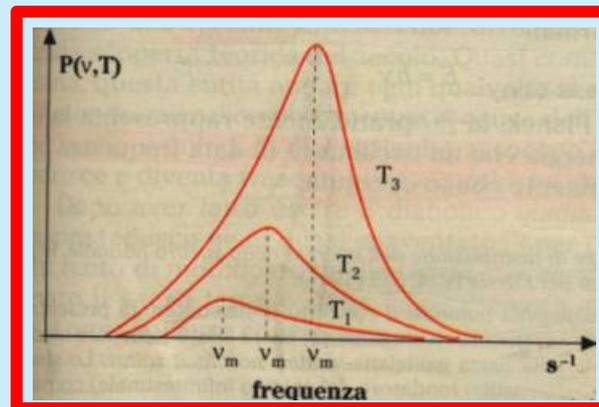
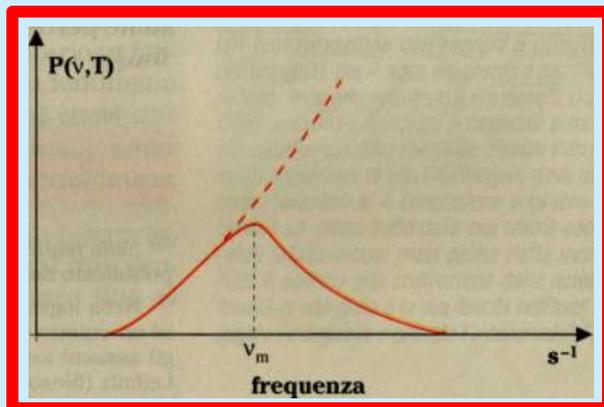
## Proprietà Corpuscolari della Radiazione elettromagnetica

### SPETTRO DEL CORPO NERO



Planck 1900

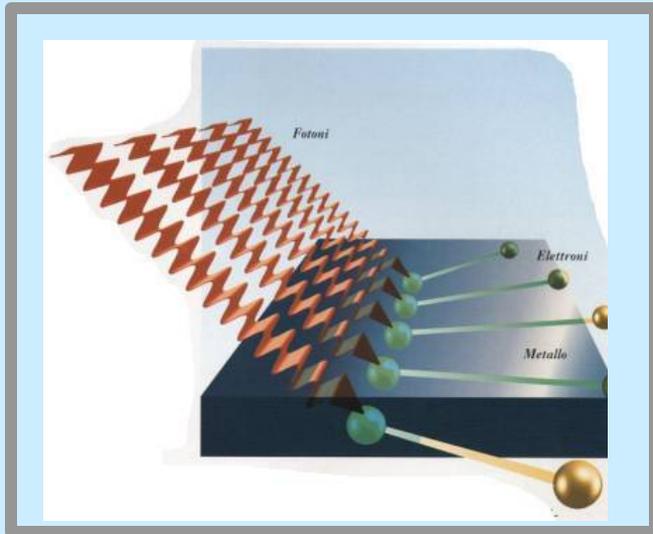
$$h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



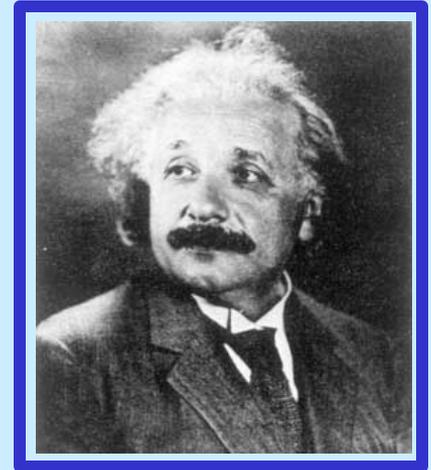
$$u_\nu(\Omega) = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/(kT)} - 1}$$

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

# EFFETTO FOTOELETTRICO



Scoperta:  
Hertz 1887



Teoria: Einstein 1905

Effetto a soglia:  $\nu > \nu_s$

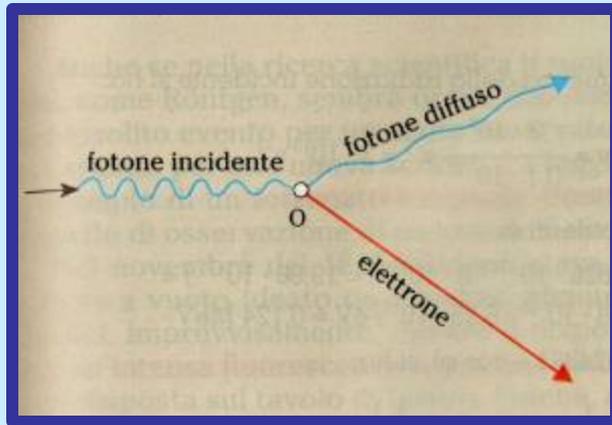
$E_{\text{elett.}} \sim$  frequenza  $\nu$  dell'onda

$N_{\text{elett.}} \sim$  intensità dell'onda

## FOTONI

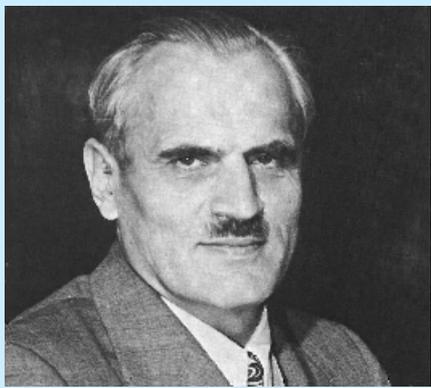
$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W$$

# 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"

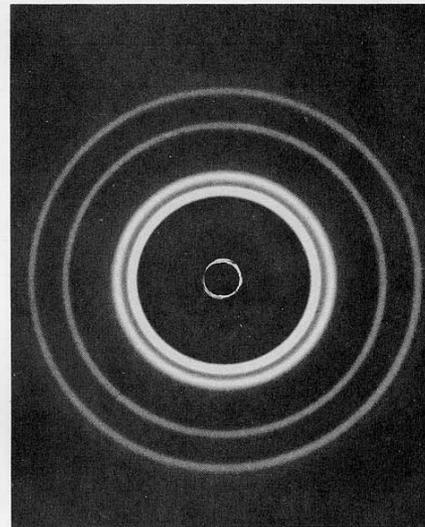


$$p = h/\lambda$$

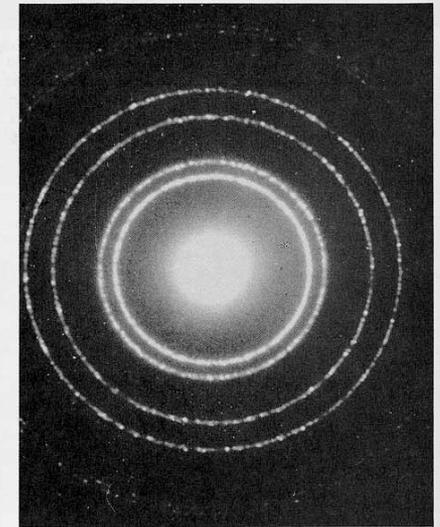


$$\lambda = h/p$$

Raggi X



Elettroni



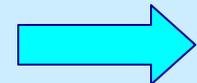
Davisson e Germer 1927

# 1926-1927: Principi Fondamentali della Meccanica Quantistica

## Su scala atomica:

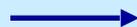
• materia e radiazione  $\longleftrightarrow$  onde-particelle

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


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

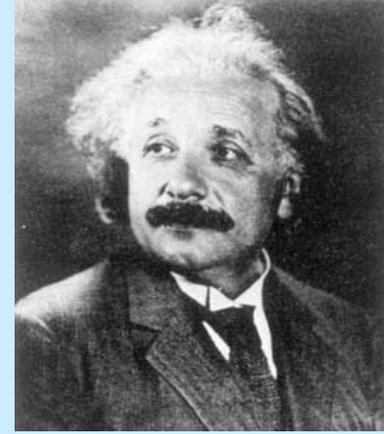
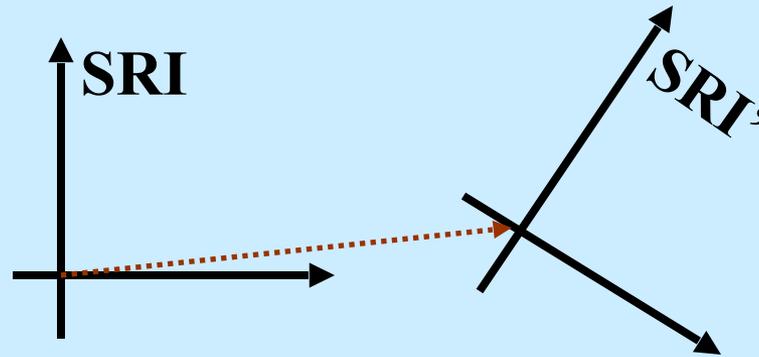
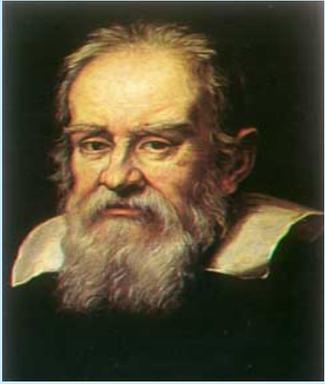


~~• determinismo~~



• probabilismo

# RELATIVITA'



**Galileo ('600):**  
Stesse leggi della MECCANICA  
in ogni SRI

**Einstein (1905):**  
Stesse leggi della FISICA  
in ogni SRI

**Trasformazioni di Galileo:**

- Tempo assoluto
- Composizione lineare delle velocità

**Trasformazioni di Lorentz:**

- Tempo relativo
- $c$ : velocità assoluta

**PROBLEMI:**

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

**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



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

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

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

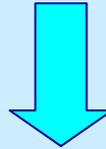


$$M_f < M_i$$

**'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”