

# Elementi di Meccanica Quantistica

I. Masina

A.A. 2010-2011

# Bibliografia

J.J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, 1994

D.J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (2<sup>nd</sup> ed.), Prentice-Hall. 2005

D.J. Griffiths, *Solutions of "Introduction to Quantum Mechanics"*, Prentice-Hall. 2005

Y.K. Lim, *Problems and Solutions on Quantum Mechanics*, World Scientific, 2000

## Sono utili anche:

L.E.Picasso, *Lezioni di Meccanica Quantistica*, ETS Ed., 2000

E.D'Emilio e L.E.Picasso, *Problemi di Meccanica Quantistica*, ETS Ed, 2003

C.Rossetti, *Istituzioni di Fisica Teorica*, Levrotto e Bella Ed., Torino, 1990

R.Feynman, *The Feynman Lectures in Physics Vol.3*

# Lezione 1

# INTRODUZIONE STORICA [rielaborata dal Rossetti]

**Verso fine '800 si sarebbe potuto pensare che la conoscenza raggiunta del mondo fisico fosse praticamente completa:**

- ❖ la meccanica classica aveva bene interpretato i fenomeni della vita quotidiana e quelli celesti. Le sue leggi, sistematizzate in teorie sempre più raffinate (Lagrange, Hamilton, Jacobi, ecc.) ponevano le basi della **tecnologia meccanica**.
- ❖ l'elettromagnetismo classico (Maxwell, etc) aveva spiegato moltissimi fenomeni e posto le basi per incredibili **sviluppi tecnologici**: radio, radar, televisione, microonde, ecc.

**Taluni fenomeni noti mostravano, tuttavia, notevoli difficoltà interpretative**

La loro spiegazione fu possibile solo con l'introduzione, nel primo quarto del '900, di **concetti completamente nuovi**, che portarono alla scoperta di leggi ed alla formulazione di **teorie lontane dal modo di pensare tradizionale**.

# APPAIONO DUE COSTANTI FONDAMENTALI DELLA NATURA

La spiegazione di fenomeni che coinvolgono sistemi in moto con velocità paragonabili a quella della luce si ebbe con la formulazione della teoria della **Relatività Ristretta** (Einstein, 1905).

Uno dei suoi postulati fondamentali è che esiste un **limite superiore per la velocità assoluta**



Altri fenomeni che implicano sistemi microscopici (molecole, atomi e loro componenti) e la loro interazione con la radiazione elettromagnetica, erano ancor più difficili da interpretare.

La spiegazione giunse dopo un lavoro durato un quarto di secolo, con la **Meccanica Quantistica**.

In particolare, era inspiegato lo **spettro della radiazione di un corpo nero**. Nel 1900, Planck lo spiegò postulando la **quantizzazione dell'energia** scambiata tra corpo nero e radiazione elettromagnetica.



c e' una velocita'

$$[c] = L/T$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

c e' una velocita'

$$[c] = L/T$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

h e' un'azione (Energia x T) o momento angolare (Impulso x L)

$$[h] = ML^2/T$$

$$h = 2\pi \times 10^{-34} \text{ J s}$$

~~h~~

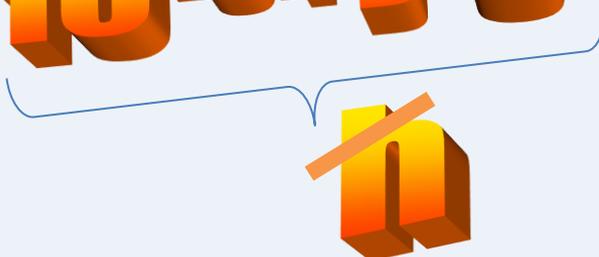
c e' una velocita'

$$[c] = L/T$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

h e' un'azione (Energia x T) o momento angolare (Impulso x L)

$$[h] = ML^2/T$$

$$h = 2\pi \times 10^{-34} \text{ J s}$$


→ Rispettivamente estremamente grande e piccola rispetto a velocita' ed azioni "umane" (Sistema Internazionale: m, kg, s, etc)

[Ricordare che  $J = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 0.24 \text{ cal}$  ]

# La meccanica quantistica e'

una **teoria fisica**, che si è sviluppata nella prima metà del XX secolo, per colmare le lacune della meccanica classica nello spiegare

**FENOMENI MICROSCOPICI**, che avvengono cioè'

a scale di lunghezza inferiori o dell'ordine di quelle dell'atomo ( $\lambda = 10^{-10} \text{ m}$ ) o ad energie della scala delle interazioni interatomiche ( $eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ),

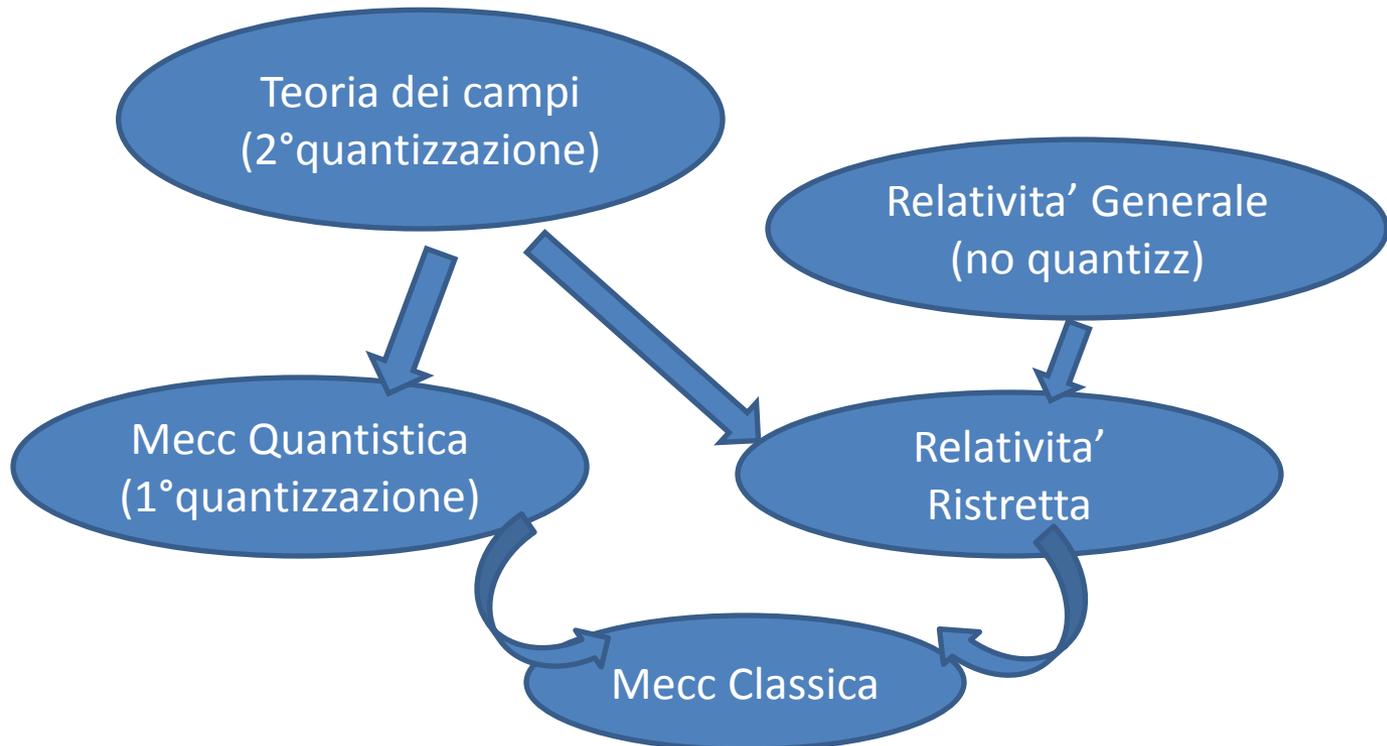
quali:

- spettro della radiazione di corpo nero;
- struttura degli atomi: loro stabilità e righe spettrali;
- effetto fotoelettrico;
- calore specifico dei solidi;
- effetto Compton;
- ...

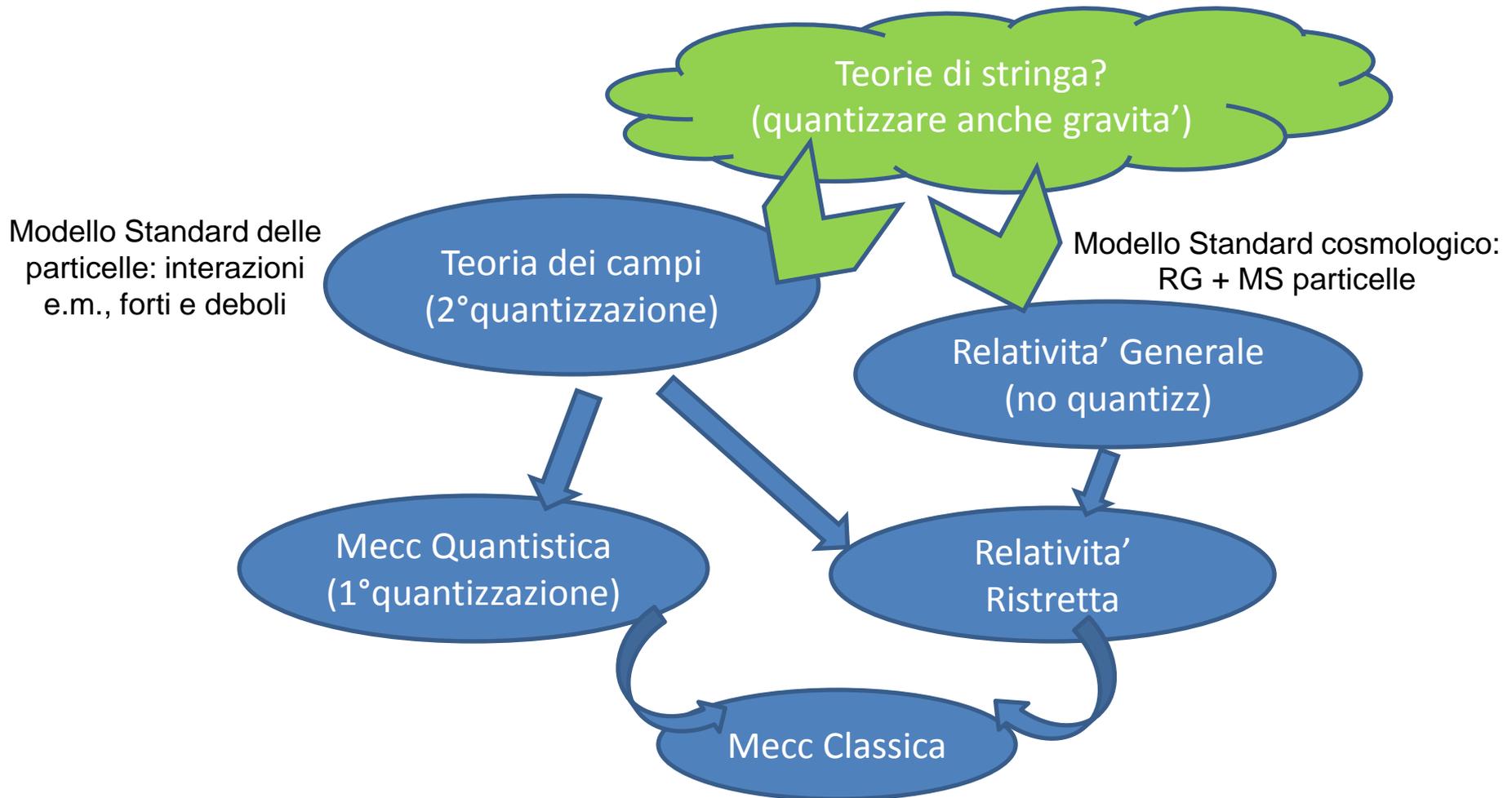
oggetto del  
corso di  
Elementi di  
Struttura  
della  
Materia

# La meccanica quantistica NON e'

la teoria "finale"  
( ...infatti non e' nemmeno relativistica)



# Oggi



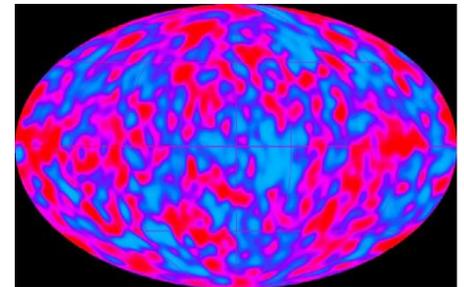
Stringhe a parte, stiamo finalmente capendo tutto?

Ci sono notevoli problemi aperti...

Non sappiamo:

1. come le particelle acquistino massa (meccanismo di Higgs).
2. di cosa e' costituito il 95% dell'energia dell'universo.  
Solo il 5% dell'energia dell'universo e' costituito da particelle a noi note; il 25% e' materia oscura (aggregata in strutture); il 70% e' energia oscura (praticamente uniforme).
3. perche' nell'universo c'e' (molta piu') materia che antimateria.

Le risposte verranno da LHC e dalle misure del CMB?



Cronologia

## IL CROLLO DELLA MECCANICA CLASSICA

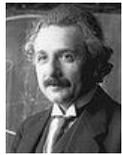
All'inizio del XX secolo furono elaborate alcune teorie euristiche, che ricorrevano a postulati arbitrari, non deducibili a partire dai postulati della meccanica classica. Questo corpo di regole formali elaborato tra il 1900 e il 1925 viene indicato con l'espressione **vecchia teoria dei quanti** (old quantum theory),

1900

**Max Planck** introduce l'idea che l'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica siano quantizzate, riuscendo così a giustificare teoricamente la legge empirica che descrive la dipendenza dell'energia della radiazione emessa da un **corpo nero** dalla frequenza.



1905



Prendendo spunto dalla proposta di Planck (che non era presa molto sul serio), **Einstein** spiega **l'effetto fotoelettrico** sulla base dell'ipotesi che l'energia del campo elettromagnetico sia trasportata da quanti di luce (che nel 1926 saranno chiamati fotoni).

1909

**Hans Geiger e Ernest Marsden**, sotto la supervisione di Ernest Rutherford, fanno collidere particelle alfa su una lamina d'oro e osservando grandi angoli di scattering. Ciò suggerisce che gli atomi hanno un nucleo piccolo e denso di carica positiva.

1911

**Ernest Rutherford** propone il suo modello dell'atomo

1913

**Bohr** interpreta le linee spettrali dell'atomo di idrogeno, ricorrendo alla quantizzazione del moto orbitale dell'elettrone.



1915



**Sommerfeld** generalizza i precedenti metodi di quantizzazione, introducendo le cosiddette regole di Bohr-Sommerfeld.

1922

**Otto Stern e Walther Gerlach** effettuano un esperimento sulla deflessione di particelle. Questo viene spesso utilizzato per illustrare i principi basilari della meccanica quantistica. Esso mostra che gli elettroni e gli atomi hanno proprietà quantistiche intrinseche (spin) e come –nella meccanica quantistica- una misura modifica il sistema che viene misurato.

1924

**Louis de Broglie** elabora una teoria delle *onde materiali*, secondo la quale ai corpuscoli materiali possono essere associate proprietà ondulatorie. È il primo passo verso la meccanica quantistica vera e propria.



1925



**Wolfgang Pauli** formula il principio di esclusione per gli elettroni in un atomo.

**FINE DELLA OLD QUANTUM THEORY E INIZIO DELLA MECCANICA QUANTISTICA**

## FINE DELLA OLD QUANTUM THEORY E INIZIO DELLA MECCANICA QUANTISTICA

1925

**Heisenberg** formula la meccanica delle **matrici**.



1926

**Schrödinger** elabora la meccanica **ondulatoria**, che egli stesso dimostra equivalente, dal punto di vista matematico, alla meccanica delle matrici.



**Max Born** propone l'interpretazione probabilistica della meccanica quantistica

1927

Heisenberg formula il **principio di indeterminazione**.

Pochi mesi più tardi prende forma la cosiddetta **interpretazione di Copenhagen**.

# INIZIO DELLA MECCANICA QUANTISTICA RELATIVISTICA = TEORIA DEI CAMPI

1928

Per descrivere l'elettrone, **P.A.M. Dirac** applica alla meccanica quantistica la relatività ristretta; fa un uso diffuso della teoria degli operatori (nella quale introduce la famosa notazione *bra-ket*).



1931

**Dirac** interpreta le particelle cariche positivamente previste della sua equazione (che chiama positroni) come antiparticelle.

1932



**John von Neumann** assicura rigorose basi matematiche alla formulazione della teoria degli operatori.

In questi anni Hermann **Weyl** studia le caratteristiche di simmetria della meccanica quantistica sulla base della teoria dei gruppi, includendo gli spinori.



1940

**Feynman, Dyson, Schwinger e Tomonaga** formulano l'elettrodinamica quantistica (QED, *Quantum electrodynamics*), che servirà come modello per le successive teorie di campo.

1948

## ANCORA UN ALTRO APPROCCIO ALLA MECCANICA QUANTISTICA

Una rappresentazione ancora differente, nota con il nome di **integrale sui cammini** che riprende ed estende alcuni concetti classici, fu sviluppata nel 1948 da **Richard Feynman**. Con questo metodo il moto di una particella si studia valutando una certa grandezza complessa legata all'azione su tutte le possibili traiettorie che questa può seguire e sommandole assieme: così facendo si può calcolare la probabilità che la particella, dopo un tempo assegnato, si sia spostata in una certa posizione. Questo metodo fornisce anche un mezzo molto immediato per ricavare il principio di minima azione: le traiettorie "classiche", infatti, sono quelle che effettivamente si sommano, mentre le altre interferiscono distruttivamente e si elidono.



eccetera...

# Varie formulazioni...

- Matriciale (Heisenberg)
- Ondulatoria (Schroedinger)
- Path-integral (Feynmann)

...ma in fondo e' sempre la stessa!

Noi cominciamo col primo, poi passiamo al secondo (il terzo in MQ)

# Varie interpretazioni...

Domanda da filosofi: la MQ e' deterministica o indeterministica?

nulla avviene a caso, ma tutto segue in modo  
predeterminato a partire dalle condizioni iniziali  
– Kant, Laplace

caso come fattore di causalita'  
nel divenire della materia

Risposta da fisici: "Shut up and calculate!" (Feynman?)

Interpretazione **di Copenhagen** (Bohr, Heisenberg): in MQ, i risultati delle misurazioni di variabili coniugate sono non deterministici. L'atto della misurazione causa il «collasso della funzione d'onda», che e' costretta dal processo di misurazione ad assumere i valori di uno a caso dei possibili stati permessi.

*"Stop telling God what to do with his dice!" (Bohr)*

Interpretazione **delle Variabili Nascoste** (Einstein): allora la MQ e' incompleta!

*"I am convinced God does not play dice." (Einstein)*

Interpretazione **Statistica** (Born): la funzione d'onda non si applica ad un sistema individuale, come una singola particella, ma è un valore matematico astratto, di natura statistica applicabile ad un insieme di sistemi o particelle

# Quotations

“For those who are not shocked when they first come across quantum theory cannot possibly have understood it.”

[Niels Bohr](#), quoted in Heisenberg (1971). *Physics and Beyond*.

“I do not like it, and I am sorry I ever had anything to do with it.”

[Erwin Schrödinger](#) (unsourced)

“I myself only came to believe in the uncertainty relations after many pangs of conscience... “

[Werner Heisenberg](#) (unsourced)

“I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.”

[Richard Feynman](#), in *The Character of Physical Law* (1965)

“Marvelous, what ideas the young people have these days. But I don't believe a word of it.”

[Albert Einstein](#) (unsourced)