

MASTERCLASS DI PADOVA
3/11/2004

INTRODUZIONE AI CONCETTI
FONDAMENTALI DI FISICA

MECCANICA QUANTISTICA

A. MASIERO

Univ. di Padova e INFN, Padova

- FISICA CLASSICA e MQ A CONFRONTO
- MATERIA - RADIAZIONE I: DALLA DUALITÀ ONDA-PARTICELLA ALL'INTERPRETAZIONE PROBABILISTICA
- DETERMINISMO CLASSICO - INDETERMINISMO QUANTISTICO
- "REALE" e "VIRTUALE" in MQ: PRODUZIONE E DECADIMENTO DI PARTICELLE ELEMENTARI

RICHARD FEYNMAN (1965) :

" C'ERA UN TEMPO IN CUI I GIORNALI
DICEVANO CHE SOLO 12 UOMINI
CAPIVANO LA TEORIA DELLA RELATIVITA'.
NON CREDO CHE QUESTO SIA VERO ...
D'ALTRA PARTE PENSO DI POTER
DIRE IN TUTTA TRANQUILLITA' CHE

NESSUNO CAPISCE LA MECCANICA
QUANTISTICA "

FISICA CLASSICA

1686 PRINCIPIA di NEWTON



1873 TREATISE ON ELECTRICITY
AND MAGNETISM di MAXWELL

● DETERMINISMO

$$F = ma \quad a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \Delta t \rightarrow 0$$

⇒ evoluzione del sistema fisico nel corso del tempo
CONTINUAMENTE DETERMINATO quando sia noto
il suo stato (x_0, v_0) ad un dato istante iniziale t_0 .

● UNIFICAZIONE ("RIDUZIONISMO")

Fenomeni apparentemente "non collegati" vengono
interpretati come manifestazioni di una unica
INTERAZIONE FONDAMENTALE

GRAVITAZIONE UNIVERSALE (sasso che cade, pianeta che orbita)
ELETTROMAGNETISMO (fenomeni elettrici e magnetici)

MATERIA e RADIAZIONE

MECCANICA
CORPUSCOLARE
di Newton

MECCANICA ONDULATORIA
(ONDE ELETTROMAGNETICHE)
di Maxwell

ATOMISMO

LUCE → ONDA

LEGGI DI CONSERVAZIONE

↕
SIMMETRIE

CONSERV.

- QUANTITÀ DI MOTO (MOMENTO)
- MOMENTO DELLA QUANTITÀ DI MOTO (MOMENTO ANGOLARE)
- ENERGIA (MASSA CONSERVATA SEPARATAMENTE)

SIMM.

- TRASLAZIONI SPAZIALI
- ROTAZIONI
- TRASLAZIONI TEMPORALI

CAMPO (ELM., GRAV.) → NO azione a distanza

CRISI DELL' IMPALCATURA CLASSICA

● CORPO NERO (corpo che assorbe la totalità della radiazione che riceve)
↓

DISTRIBUZIONE SPETTRALE (per frequenza)
DELLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA IN
EQUILIBRIO TERMIDINAMICO CON LA MATERIA

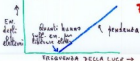
→ SCAMBI DI ENERGIA TRA MATERIA E RADIAZ.
AVVENGONO NON IN MODO CONTINUO, MA
PER QUANTITÀ DISCRETE E INDIVISIBILI

→ QUANTI DI ENERGIA

$$E_\nu = \underbrace{h}_{\substack{\downarrow \\ -4 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec.}}} \nu \quad \rightarrow \text{COSTANTE DI PLANCK}$$

(1 eV = 1.6 × 10⁻¹⁹ Joule)

● EFFETTO FOTOELETTRICO



FOTONI E QUANTI DI LUCE

$$\frac{\Delta E}{\Delta \nu} = h$$

FOTONE: DUALITÀ ONDA-PARTICELLA



INTERFERENZA
(Fors di Young)

DIFFRAZIONE



ONDE EM.

EFFETTO FOTOELETTRICO

EFFETTO COMPTON

(diffusione di fotoni su
elettroni → urto elastico
tipo palla di biliardo...)



FOTONE PARTICELLA

MATERIA: DUALITÀ ONDA-PARTICELLA

ANALOGIA: v ONDA \leftrightarrow E PARTICELLA

lungh. d'onda λ ONDA \leftrightarrow P PARTICELLA

\rightarrow QUANTITÀ DI MOTO

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

orbite di Bohr dell'elettrone \rightarrow onde stazionarie
dell'elettrone

$$\Rightarrow \frac{2\pi L}{\lambda} = n \rightarrow 2\pi m v r = n h$$

\uparrow proprio la relazione
per l'orbita di Bohr!

DUALITÀ ONDA-CORPUSCOLO: PROPRIETÀ
GENERALE DEGLI OGGETTI MICROSCOPICI
(SIA MATERIA CHE RADIAZIONE)

⇒ CORRISPONDENZA TRA VARIABILI
DINAMICHE DELLA FISICA CORPUSCOLARE
E GRANDEZZE CARATTERISTICHE
DELL' ONDA ASSOCIATA



1926
eq. di Schrödinger la cui soluzione descrive
l'onda (associata al sistema quantistico in esame)
in ogni situazione in cui la forza è nota

part. libera: $E = \frac{p^2}{2m}$

$E \rightarrow$ hast. temp. $\frac{\Delta}{\Delta t}$

$p \rightarrow$ hast. spat. $\frac{\Delta}{\Delta x}$

$$i\hbar \frac{\Delta \psi(x,y,z,t)}{\Delta t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\Delta^2}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2}{\Delta y^2} + \frac{\Delta^2}{\Delta z^2} \right) \psi(x,y,z,t)$$

$\hookrightarrow \Delta t \rightarrow 0$ $\hookrightarrow \Delta x \rightarrow 0$ $\hookrightarrow \Delta y \rightarrow 0$ $\hookrightarrow \Delta z \rightarrow 0$

$\psi(x,y,z,t)$ FUNZIONE D'ONDA

GRANDE SUCCESSO → RISOLVENDO EQ. SCHRÖDINGER
SI TROVA LA CORRETTA ESPRESSIONE PER I LIVELLI
DI ENERGIA ATOMICI + APPLICANDO EQS. DI MAXWELL
ALLE SOLUZIONI D'ONDA DI SCHRÖDINGER
SI TROVA CHE LE VARIE CONFIGURAZIONI
NON IRRADIANO, MA RIMANE IL PROBLEMA DI

COS'È $\psi(x, y, z, t)$?

Particella libera con velocità cost.

⇒ PACCHETTO (SOMMAPOSIZIONE) MONDE CONFINATO
IN UNA PICCOLA REGIONE DI SPAZIO

⇒ MA UN PACCHETTO D'ONDA NON È UNA PARTICELLA
RIFIUTA DI RIMANERE CONFINATO IN UN PICCOLO SPAZIO

⇒ ELETTRONE "SPALMATO" SU UN GRANDE
SPAZIO? NO non troviamo mezzo elettrone
qui, mezzo da un'altra parte ...



INTERPRETAZIONE **PROBABILISTICA**
DELLA FUNZIONE D'ONDA $\psi(x, y, z, t)$

$$\begin{matrix} \textcircled{A} & \textcircled{B} \\ \psi(A) & \psi(B) \end{matrix}$$

se $|\psi(A)|^2 = 2 |\psi(B)|^2$

→ la teoria predice che in una sequenza di molte repliche dell'esperimento l'elezione sarà trovata in A DUE VOLTE PIÙ FREQUENTEMENTE CHE IN B, MA L'ESATTO RISULTATO DI UN SINGOLO ESPERIMENTO NON PUÒ ESSERE PREDETTO

→ il meglio che possiamo fare è DARE LA **PROBABILITÀ** CHE UN CERTO RISULTATO POSSA VERIFICARSI (compuro rimane la possibilità di fare un test sperimentale delle predizioni)

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

HEISENBERG → sostituire Meccanica Ondulatoria di Schrödinger con Meccanica Matriciale

(matrici A, B AB può essere ≠ BA
→ AB ≠ BA NON COMMUTATIVITÀ)

CERTE COPPIE DI QUANTITÀ FISICHE NON POSSONO ESSERE DETERMINATE SIMULTANEAMENTE CON ACCURATEZZA GRANDE A PIACERE

POSIZIONE - QUANTITÀ DI MOTO

x	p
ENERGIA -	TEMPO
E	t

$\Delta p \Delta x \geq \hbar$ ← ref. d'indeterminaz. posiz.-quant. di moto

non possibile avere x e $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{p}{m}$ con precisione grande e fissare x_0, v_0 incertezza → cade l'evoluz. determinist.

$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  relaz. d'indeterminat.
energia-tempo

per avere un'energia ben definita uno stato fisico deve durare per un tempo lungo: es., l'energia di uno stato atomico eccitato di breve vita è leggermente "diffusa" (linee dello spettro hanno una larghezza che dipende dalla lunghezza della vita dello stato che lo emette)

Relazioni di indeterminazione: regole che pongono limiti quantitativi alla nostra conoscenza del microcosmo

→ nasce dall'IMPOSSIBILITÀ DI STUDIARE UN FENOMENO SENZA DISTURBARE IL FENOMENO STESSO NEL PROCESSO DI OSSERVAZIONE

12
REAZIONI: Einstein "Dio non gioca
a dadi!"

(Bohr: "Einstein, finiscila di dire a Dio
ciò che può o non può fare")

MQ TEORIA "INCOMPLETA" ?

esperimenti: più confermano le predizioni
della teoria (Hawking "Einstein was
confused, not the quantum theory")

⇒ ma ancora dibattito sull'interpretazione
della MQ

CONSEGUENZA PIÙ SORTRENDENTE

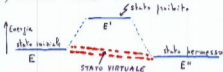
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

↳ "baratto-
tra precisione delle misure di energia
e quanto TEMPO si impiega a farle

Si può "violare" la conserv. dell'energia
("andare a prelevare" di energia) purché
lo si faccia rapidamente!

STATI "VIRTUALI."

1) EFFETTO TUNNEL QUANTISTICO



possibilità di passaggio attraverso uno stato di energia $E' > E$ per raggiungere uno stato di energia $E'' \leq E$

IMPOSSIBILE IN FISICA NEWTONIANA

→ INTROBABILE IN FISICA QUANTISTICA

DURANTE IL PASSAGGIO (STATO VIRTUALE)

IL SISTEMA "VA A TREGITO" DI ENERGIA (per superare la montagna con $E' > E$) \Rightarrow "RESTITUENDO".

PRIMA DI POTERSENE ACCORGERE ΔE μ \approx

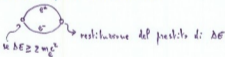
tempo Δt tale che $\Delta E \Delta t \sim \hbar$

(non si riesce a misurare E con una precisione migliore di ΔE durante $\Delta t \Rightarrow$ stato VIRTUALE può non conservare l'energia perché si comporta in modo "reale" rapidamente)

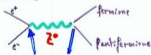
2) PRODUZIONE DI PARTICELLE VIRTUALI

L'indeterminazione non è presente solo quando noi osservabili interveniamo per **MIURARE** le grandezze fisiche

Es: spazio "vuoto" = incertezza su energia e momento $\Rightarrow E, p$ possono fluttuare con ΔE e Δp sempre più grandi quanto più piccola è la dimensione della regione dello spazio o la scala dei tempi che si considerano



ma anche



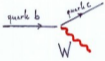
a questi vertici non c'è conservazione dell'energia e del momento Z^0 VIRTUALE

per Z^0 fisica $m_Z^2 c^4 = E_Z^2 - p_Z^2 c^2 \leftarrow$ non vale per Z^0 virtuale



"discrepanza" $\Delta E, \Delta p$ nel vertice A
 "ripagato" nel vertice B in cui ϵ^0 virtuale
 si converte in una coppia fermione-antifermione
 fisica

Altro es.: **decadimento** di una particella



$m_b \sim 5 \text{ GeV}/c^2$

$m_W \sim 80 \text{ GeV}/c^2$

come è possibile?

$b \rightarrow c + W$ non è possibile produrre W
 "particella reale, fisica"



← particelle fisiche

particella elementare instabile: sistema con energia non
 ben definita \Rightarrow CARATTERI ΔE legata alla vita media $\Delta E \tau \sim \hbar$

Schrödinger \Rightarrow MECCANICA QUANTISTICA
NON RELATIVISTICA



\rightarrow TEMPO e SPAZIO trattati in modo
diverso $\frac{\Delta}{\Delta t} \psi$ $\frac{\Delta^2}{\Delta x^2} \psi$

ESTENSIONE RELATIVISTICA DELL'EQ. DI SCHRÖD
Eq. d'onda per una particella (es. elettrone)
ma da $E = mc^2 \rightarrow$ se $E > m_e$,
dato che $E \leftrightarrow m$ conversione
 \Rightarrow non posso limitarmi ad una sola particella

**\rightarrow ESTENSIONE A SISTEMA CON
INFINITI GRADI DI LIBERTÀ**

$\psi(x, y, z, t)$

\uparrow per ogni punto dello spazio-tempo

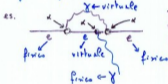
$\psi(x_1) \dots \psi(x_2)$
 $\psi(x_3) \dots \psi(x_4)$

QUANTIZZAZIONE DEL CAMPO
 $\psi(x, y, z, t)$ **TEORIE DI
CAMPO QUANTISTICHE**

Es.: QED Elettrodinamica Quantistica

Campi : e^- e^+ γ
elettroni positroni fotoni

estrema accuratezza delle predizioni
verificate sperimentalmente !



predizioni di QED
verificate con precisione
migliore di una parte
in un miliardo !

correzione a i



$F = ma \rightarrow$ o.t.a. **PROBABILITÀ CHE DATI
QUANTITÀ DI E e p SIANO SCAMBIATE**

LA MQ e i GIOVANI

14 Dicembre 1900 Max Planck presenta $E = h\nu$
"nasce" la MQ
- conoscenza a livello atomico
~ decina di eV

dopo ~ 1 secolo ↓

CONSCENZA "PRECISA" DELLE INTERAZIONI FONDAMENTI.
ELETTROMAGN. DEBOLI e FORTI SINO AD ENERGIE
DI OLTRE 100 MILIARDI di eV

Modello
Standard

predetti: W^{\pm} , Z^0 , quark c, t ... tutto confermato
sperimentalmente

USANDO LA TEORIA QUANTISTICA DEL MODELLO STANDARD
→ PREDIZIONI PER I PRIMI ISTANTI DELL'UNIVERSO
Dopo IL BIG BANG FINO A ~ 1 sec. dopo il
BB (NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE) ...

MA MOLTI (e GRANDI) PROBLEMI APERTI

- Esiste una reale "UNIFICAZIONE" di tutte le interaz. fondamentali, inclusa la GRAVITA' ?
- Esiste una teoria che spieghi le masse con diversi dei fermioni e la loro peculiare sequenzialità ?
- Esiste una spiegazione per la comparsa nella fisica delle interaz. fondam. di scale di energia così tremendamente diverse tra loro (scale elettrodin. ~ 100 GeV, scale di Planck della gravità 10^{19} GeV) ?
- Quale è il confine tra "elementare" e "composito" ?