

**La fisica quantistica, il misurare
che costruisce, un vuoto
pienissimo**

Eliano PESSA

Dipartimento di Psicologia

Università di Pavia

e

**Associazione Italiana per la
Ricerca sui Sistemi**

La concezione tradizionale della Fisica Quantistica

Inizialmente la Fisica Quantistica è nata come strumento di descrizione di alcuni tipi di fenomeni **MICROSCOPICI** (riguardanti molecole, atomi, particelle elementari, ecc.).

Solo dopo molti anni i fisici si sono accorti che esiste un gran numero di fenomeni quantistici **MACROSCOPICI** (come il ferromagnetismo, la superconduttività, la superfluidità, l'effetto laser, ecc.).

Quest'ultima circostanza, anche se molto importante, ha cambiato solo in parte il modo di valutare il ruolo della Fisica Quantistica che, per molti, rimane SOLO una teoria dei processi MICROSCOPICI.

COSA SI INTENDE PER 'FISICA QUANTISTICA' ?

Attualmente il termine 'Fisica Quantistica' designa tre differenti costrutti teorici :

- le **TEORIE SEMICLASSICHE**, che coincidono con la Fisica classica, supplementata da alcune condizioni che fissano l'esistenza solo di valori interi per alcune variabili fisiche
- la **MECCANICA QUANTISTICA**, che si occupa di sistemi costituiti da un numero prefissato e invariabile di componenti, racchiusi entro un volume finito
- la **TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI**, che si occupa di sistemi con un numero variabile di componenti, aventi a disposizione un volume di spazio illimitato

LE TEORIE QUANTISTICHE : TEORIE SEMICLASSICHE

Queste teorie non fanno altro che aggiungere alla Fisica classica opportuni vincoli che stabiliscono come i valori di alcune grandezze fisiche possano essere solo multipli interi di opportuni valori di base.

Il più celebre di tali vincoli riguarda l'ENERGIA elettromagnetica emessa o assorbita che, secondo la celebre formula di Planck :

$$E = N h \nu$$

può essere solo un multiplo INTERO di una quantità elementare $h \nu$, il cosiddetto QUANTO DI ENERGIA (qui h è la costante universale di Planck e ν la frequenza della radiazione).

Un altro vincolo molto celebre è quello che riguarda il **MOMENTO DELLA QUANTITÀ DI MOTO** di un elettrone che ruota attorno al nucleo di un atomo. Esso viene chiamato **REGOLA DI QUANTIZZAZIONE DI BOHR-SOMMERFELD** e, nel caso più semplice, ha la forma:

$$m v r = N (h/2\pi)$$

Questi vincoli hanno dato origine al nome 'teorie quantistiche', dato che essi impongono una specie di **DISCRETIZZAZIONE** dei valori di alcune grandezze fisiche, che variano quindi in modo **DISCONTINUO**, ovvero per multipli interi di un valore di base, il cosiddetto '**QUANTO**'.

Le teorie semiclassiche, pur essendo comode per ricavare valutazioni numeriche e previsioni con calcoli molto semplici, hanno il grosso svantaggio di essere incapaci di spiegare il perché delle varie condizioni di quantizzazione, che quindi appaiono semplicemente come ricette 'ad hoc' per render conto degli andamenti sperimentali osservati.

Inoltre non riescono a tener conto del fatto che in molti fenomeni fisici non si osserva nessuna quantizzazione. Il caso tipico è quello degli SPETTRI (di emissione o di assorbimento) che, accanto a componenti a RIGHE, hanno anche componenti di tipo CONTINUO.

LE TEORIE QUANTISTICHE : LA MECCANICA QUANTISTICA

Presso il pubblico dei fisici (e dei filosofi) la Meccanica Quantistica rappresenta la più famosa tra tutte le teorie quantistiche, nonostante la sua intrinseca limitatezza. Infatti si occupa solo di sistemi costituiti da un numero fisso e invariabile di particelle, racchiuse tipicamente entro un volume finito, interagenti tra loro tramite forze descritte in modo CLASSICO.

A differenza delle teorie classiche e semiclassiche la Meccanica Quantistica comprende due aspetti :

- il **FORMALISMO MATEMATICO** della teoria (quasi universalmente condiviso)
- l'**INTERPRETAZIONE** del formalismo stesso (molto controversa)

I PRINCIPI DI INDETERMINAZIONE

La vera novità della Meccanica Quantistica consiste nell'introduzione di due fondamentali PRINCIPI DI INDETERMINAZIONE (normalmente attribuiti a W.HEISENBERG) che vincolano l'incertezza associata ai valori di coppie di grandezze fisiche tra loro CONIUGATE.

Se le grandezze coniugate sono la POSIZIONE e la QUANTITÀ DI MOTO di una particella, il Principio di Indeterminazione assume la forma :

$$\Delta x \Delta p \geq h/(4 \pi)$$

mentre, se sono l'ENERGIA e il TEMPO, la forma è :

$$\Delta E \Delta t \geq h/(4 \pi)$$

A COSA È DOVUTA L'INDETERMINAZIONE ?

Essenzialmente a due cause concomitanti :

- 1) La perturbazione prodotta dall'apparato di misura sul sistema osservato che, proprio in quanto osservato, diventa intrinsecamente DIVERSO da quello che era in assenza dell'osservazione**
- 2) L'esistenza di una ineliminabile "FLUTTUAZIONE DI FONDO" del mondo e dell'intero Universo. Le fluttuazioni in ogni punto dello spazio-tempo sono correlate con quelle di ogni altro punto dello spazio-tempo creando EFFETTI NON-LOCALI che erano impossibili nella Fisica classica**

I Principi di Indeterminazione hanno come immediata conseguenza che lo STATO DINAMICO di una particella (ad esempio in termini di posizione e quantità di moto) non può essere descritto con arbitraria precisione.

Questa conseguenza ne implica a sua volta un'altra :
non si possono usare delle normali funzioni matematiche per descrivere le grandezze fisiche

Inoltre anche la descrizione dello STATO DI UN SISTEMA FISICO non potrà, in linea di principio, essere effettuata in MODO UNIVOCO.

L'INTERFERENZA QUANTISTICA

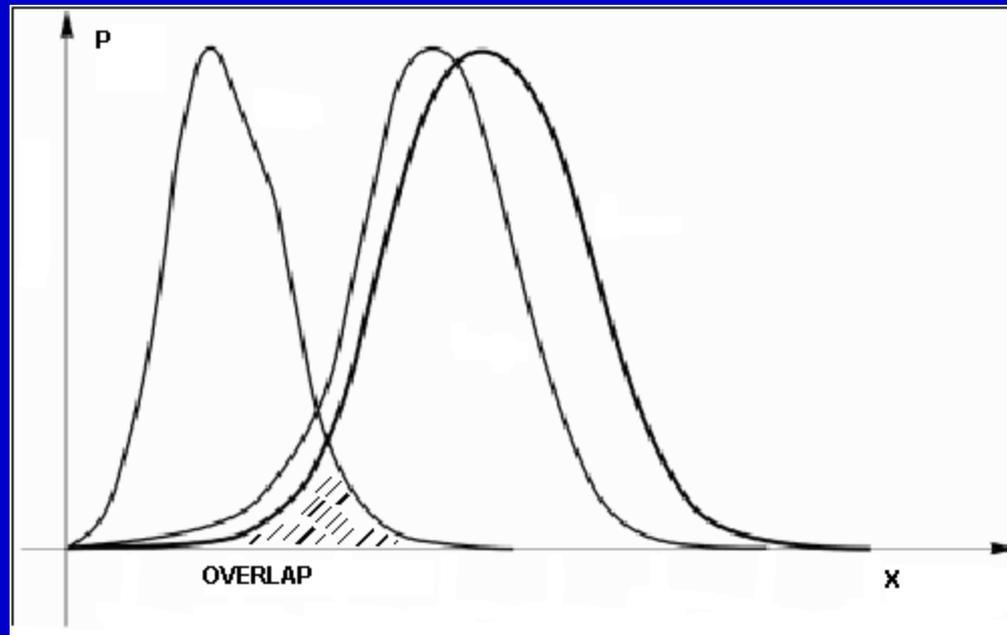
Il fatto che le probabilità dipendano dal modulo (in pratica dal quadrato) della funzione di stato mostra subito che, nel caso di una sovrapposizione lineare di stati, nascono degli EFFETTI DI INTERFERENZA tipicamente quantistici.

Se, ad esempio, abbiamo uno stato $\psi = c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2$, si vede subito che il modulo quadro di ψ è dato da :

$$\psi^2 = (c_1 \varphi_1 + c_2 \varphi_2)^2 = c_1^2 \varphi_1^2 + c_2^2 \varphi_2^2 + 2 c_1 c_2 \varphi_1 \varphi_2$$

Ne consegue che la probabilità di verificarsi dello stato ψ non è pari alla somma pesata delle probabilità di verificarsi dei singoli stati φ_1 e φ_2 ma dipende anche da un TERMINE DI INTERFERENZA proporzionale a $\varphi_1 \varphi_2$, dovuto al fatto che STATI DIFFERENTI INTERAGISCONO TRA DI LORO.

Questa interferenza è dovuta al fatto che normalmente le diverse funzioni di stato relative ai singoli sistemi fisici si ESTENDONO IN TUTTO LO SPAZIO e quindi possono avere ZONE DI SOVRAPPOSIZIONE RECIPROCHE che originano VERE E PROPRIE INTERAZIONI, anche IN ASSENZA DI CAMPI DI FORZE.



LA NON-LOCALITÀ

L'interferenza quantistica permette quindi, grazie all'estensione all'infinito delle differenti funzioni di stato, effetti apparentemente NON-LOCALI, cioè INTERAZIONI tra SISTEMI DISTANTI pressoché Istantanee, ovvero che si propagano a velocità SUPERIORI A QUELLE DELLA LUCE.

Tali effetti sono dovuti al fatto che, grazie all'interferenza quantistica, ogni stato possibile dell'Universo contribuisce, sia pure in modo spesso debolissimo, ad influenzare ogni altro stato dell'Universo stesso.

LA CONDENSAZIONE DI BOSE-EINSTEIN

L'interazione generata dall'interferenza quantistica è all'origine di un curioso fenomeno, teoricamente previsto e forse recentemente testato sperimentalmente, consistente nel fatto che, a temperature sufficientemente basse, tutte le particelle appartenenti ad un sistema cadono simultaneamente nello stesso stato quantistico ed hanno quindi tutte la stessa quantità di moto (si parla quindi di “condensazione”, ma solo nello spazio delle quantità di moto).

Questo fenomeno fornisce un esempio di come le interazioni quantistiche siano in grado di generare **COERENZA** su **SCALA MACROSCOPICA** (in questo caso la correlazione tra velocità di particelle differenti).

Esistono molti altri effetti che possono essere interpretati come generati dalle interazioni quantistiche. Ad esempio:

- l'EFFETTO LASER in cui la comparsa di una RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA COERENTE può essere interpretata come derivante da una condensazione di Bose-Einstein del sistema di fotoni che la costituiscono**
- il FERROMAGNETISMO, in cui le interazioni quantistiche tra gli SPIN di atomi differenti producono uno STATO GLOBALMENTE COERENTE in cui tutti gli spin sono orientati nella stessa direzione**

L'EVOLUZIONE TEMPORALE DI UN SISTEMA QUANTISTICO

La Meccanica Quantistica attuale è in grado di descrivere solo l'evoluzione temporale di sistemi in cui valga il **PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA**.

Nel caso più semplice (una singola particella in una sola dimensione spaziale) l'evoluzione temporale di una funzione di stato ψ (chiamata anche **FUNZIONE d'ONDA**) è descritta dalla celebre **EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER** :

$$i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = - (\hbar^2/2m) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U \psi$$

in cui m è la massa della particella e U l'energia potenziale del campo di forze che eventualmente agisce su di essa.

LA DECOERENZA

I fenomeni di coerenza generati dalle interazioni quantistiche possono essere distrutti dalle interazioni del sistema quantistico con l'ambiente.

Questo fenomeno, noto come DECOERENZA, è caratterizzato da un tempo chiamato TEMPO DI DECOERENZA, coincidente col tempo medio necessario affinché una coerenza quantistica venga distrutta dall'ambiente.

Normalmente il tempo di decoerenza è fantasticamente piccolo, tranne che per alcuni fenomeni su scala atomica o molecolare. Questa circostanza restringe il dominio di applicazione della Meccanica Quantistica solo a quel particolare tipo di fenomeni.

L'ENTANGLEMENT

Quando un sistema si trova in uno stato formato dalla combinazione lineare di due o più autostati, si dice che si trova in uno stato **ENTANGLED** (termine coniato da SCHRÖDINGER). Questo stato contiene, in forma **POTENZIALE**, tutte le informazioni relative ai singoli autostati da cui è composto. Tuttavia, per passare dalla **POTENZIALITÀ** all'**ATTO**, occorre che il sistema interagisca con un **APPARATO DI MISURA**.

L'interazione con l'**APPARATO DI MISURA** **distrugge** le interazioni quantistiche che mantengono il sistema in uno stato **ENTANGLED** e lo fa cadere in **uno degli autostati** che lo componevano (**RIDUZIONE DEL VETTORE DI STATO**).

LE TEORIE QUANTISTICHE : LA TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI

In questa teoria le entità fondamentali non sono più le particelle, ma I CAMPI DI FORZE considerati dalla Fisica. Ora sono i valori assunti dalle GRANDEZZE DI CAMPO che soddisfano relazioni di indeterminazione. Questo ha due conseguenze immediate:

- occorre lavorare in condizioni di VOLUME INFINITO (i campi si estendono a tutto lo spazio)**
- le PARTICELLE appaiono solo come particolari RAPPRESENTAZIONI del comportamento dei campi. Siccome questi ultimi fluttuano, anche il NUMERO STESSO DELLE PARTICELLE DIVENTA VARIABILE : si hanno fenomeni di CREAZIONE e DISTRUZIONE DI PARTICELLE**

Per molti anni la Teoria Quantistica dei Campi (creata da DIRAC nel 1926) è stata applicata solo a problemi riguardanti le particelle elementari. In particolare il primo modello costruito descriveva l'interazione tra il campo elettromagnetico e il campo materiale dell'elettrone (ELETTRODINAMICA QUANTISTICA; SCHWINGER, FEYNMAN, TOMONAGA 1946-1950).

Negli anni Sessanta, tuttavia, emerse la potenzialità di questa teoria anche in altri campi della Fisica, dovuta alla scoperta che in essa NON VALE IL TEOREMA DI VON NEUMANN. In altri termini, essa può descrivere situazioni fisiche tra loro NON EQUIVALENTI, proprio come avviene in quelle profonde trasformazioni di struttura note come TRANSIZIONI DI FASE.

PERCHÉ LA TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI ?

Nella Teoria Quantistica dei Campi, a differenza della Meccanica Quantistica, i tempi di decoerenza sono generalmente molto più lunghi

Ciò dipende dal fatto che essa riguarda non il moto di particelle, ma l'andamento spazio-temporale dei CAMPI, ovvero di entità che, già di per sé, sono estese su tutto lo spazio-tempo e hanno, anche classicamente, una natura intrinsecamente NON-LOCALE (infatti le equazioni di evoluzione di un campo valgono simultaneamente in tutti i punti dello spazio-tempo, senza che si debba trasmettere da un punto all'altro l'informazione che riguarda il tipo di equazioni cui il campo deve obbedire)

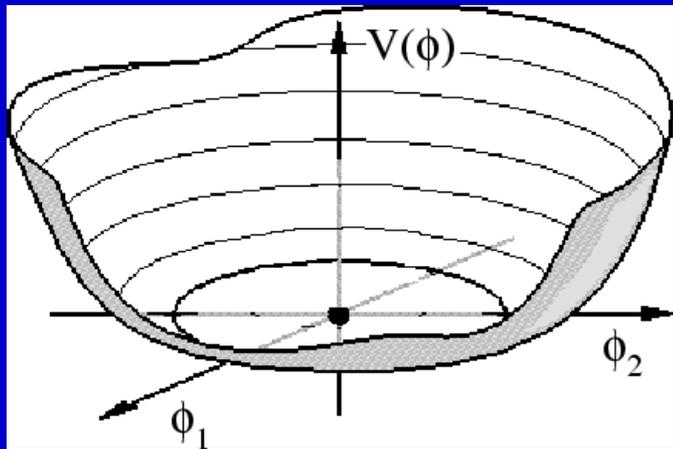
Per questa ragione la descrizione dei fenomeni di coerenza generati dalle transizioni di fase trova la sua cornice di riferimento soprattutto nella Teoria Quantistica dei Campi

Essa permette una trattazione rigorosa di fenomeni come il FERROMAGNETISMO, la SUPERCONDUTTIVITÀ, la SUPERFLUIDITÀ

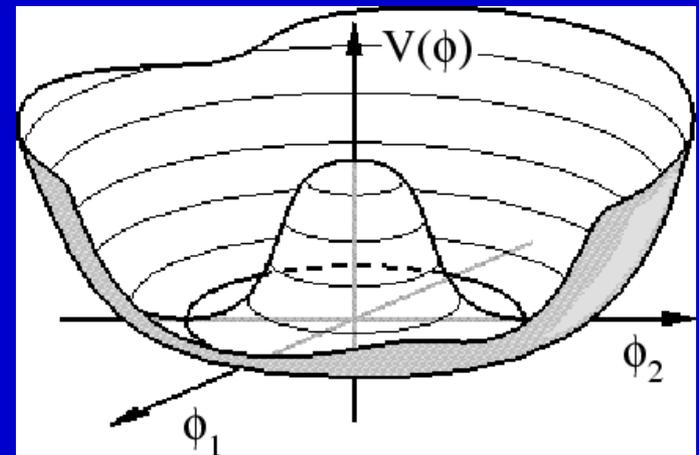
Dunque solo in questo contesto si può formulare una teoria adeguata di processi come la ROTTURA DI SIMMETRIA

LA ROTTURA DI SIMMETRIA NELLA TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI

Questo fenomeno consiste nel fatto che, quando si hanno equazioni che descrivono l'evoluzione di campi di forze, può accadere, quando un opportuno parametro di controllo attraversa un certo VALORE CRITICO, che le equazioni stesse ammettano come soluzioni stabili di minima energia (gli STATI DI VUOTO), anziché una sola soluzione, PIÙ soluzioni differenti ma tutte equivalenti in quanto caratterizzate dalla stessa energia minima



A



B

Se un sistema si trova in fondo alla buca nella situazione A, dove andrà a finire quando, in seguito a un cambiamento dei parametri, si va nella situazione B ?

In tal caso il sistema sceglierà, tra i tanti stati di vuoto possibili, **UNO PARTICOLARE DI ESSI**, ma è assolutamente impossibile **PREVEDERE A PRIORI QUALE SCELTA VERRÀ FATTA**, dal momento che, dal punto di vista fisico, **TUTTE LE SCELTE SONO EQUIVALENTI**

L'aspetto più interessante è che, una volta effettuata una scelta, il sistema **REAGISCE AI TENTATIVI DI MODIFICARLA**. Infatti ogni perturbazione provoca la nascita di **ECCITAZIONI COLLETTIVE A LUNGO RAGGIO D'AZIONE** (chiamate **BOSONI DI GOLDSTONE**), che coordinano i comportamenti dei componenti individuali del sistema, in modo da mantenere una **COERENZA GLOBALE** della scelta fatta

In tal modo gli stati coerenti creati da una rottura di simmetria sono:

- fortemente stabili
- indipendenti dalle condizioni al contorno

Queste proprietà caratterizzano la cosiddetta **RIGIDITÀ GENERALIZZATA**

Inoltre i bosoni di Goldstone possono **INTERAGIRE** tra loro, dando luogo alla comparsa di entità macroscopiche (i cosiddetti **OGGETTI QUANTISTICI**), che a loro volta modificano il comportamento dell'intero sistema da cui hanno avuto origine

NELLA FISICA CLASSICA PUÒ ESISTERE LA RIGIDITÀ GENERALIZZATA ?

La Fisica classica è **INCAPACE DI SPIEGARE
L'ESISTENZA DI CORRELAZIONI A LUNGO RAGGIO**

Infatti essa è basata sulla statistica di Maxwell-Boltzmann, il Principio di Equipartizione dell'Energia e il Principio di Indebolimento delle Correlazioni

Tali principi prevedono la **IMPOSSIBILITÀ DI
QUALSIASI MECCANISMO DI CORRELAZIONE
STABILE** su scala macroscopica o mesoscopica

In altri termini, qualsiasi correlazione **TENDE
INEVITABILMENTE A SCOMPARIRE COL TEMPO**

VANTAGGI E SVANTAGGI DI UN APPROCCIO BASATO SULLE TEORIE QUANTISTICHE

VANTAGGI

- le teorie quantistiche forniscono l'unica descrizione corretta del comportamento di atomi ed elettroni, che sono per l'appunto i costituenti fondamentali anche delle molecole di interesse biologico
- le teorie quantistiche includono vari meccanismi in grado di spiegare la comparsa di correlazioni stabili a lungo raggio su scala mesoscopica o macroscopica (come la **condensazione di Bose-Einstein** o la **Rottura di Simmetria**)

SVANTAGGI

Le teorie quantistiche sono formulate in un linguaggio matematico assai complicato, praticamente ignoto alla maggior parte dei ricercatori

Tuttavia va ricordato che un gran numero di fenomeni interessanti sono intrinsecamente di **NATURA QUANTISTICA** :

-IL FERROMAGNETISMO

-L'EFFETTO LASER

-LA SUPERCONDUTTIVITÀ

-I PASSAGGI DI STATO (TRANSIZIONI DI FASE)

-LE PROPRIETÀ DEI CRISTALLI

-I LEGAMI CHIMICI

CHE ACCADE SE SI È ESATTAMENTE IN CORRISPONDENZA AL PUNTO CRITICO DI UNA TRANSIZIONE DI FASE ?

Man mano che ci si avvicina al punto critico di una transizione di fase le fluttuazioni del sistema tendono a divergere, in quanto si va verso la distruzione della coerenza associata alla fase preesistente, mentre il sistema non è ancora in grado di decidere quale sarà la forma di coerenza associata alla nuova fase.

Al di sotto di una certa distanza dal punto critico il contributo energetico delle fluttuazioni supera quello fornito dalle correlazioni quantistiche, la coerenza viene distrutta e il sistema si comporta come un sistema CLASSICO.

Dunque, pur essendo indispensabile l'uso della Teoria Quantistica dei Campi per descrivere le transizioni di fase, in corrispondenza al punto critico si ha una transizione momentanea ad una dinamica CLASSICA

Varie ricerche (ad esempio Pessa & Vitiello, 2004) hanno evidenziato come questa dinamica sia di tipo CAOTICO DETERMINISTICO

Inoltre, nel caso di una transizione associata ad una ROTTURA DI SIMMETRIA, se i diversi stati possibili di minima energia hanno proprietà topologiche differenti, si vengono a creare, nella fase classica, oggetti MACROSCOPICI che interpolano tra di essi, in modo da uniformare il comportamento del sistema su larga scala.

Tali oggetti sono globalmente chiamati DIFETTI TOPOLOGICI.

Così molti sistemi caratterizzati da correlazioni a lungo raggio e descritti apparentemente da equazioni classiche, come i SOLITONI, i VORTICI o i confini dei DOMINI, non sono altro che PRODOTTI derivanti da una TRANSIZIONE DI FASE tra due differenti forme di COERENZA QUANTISTICA

Si può quindi affermare che tali oggetti conservano una specie di 'firma' dei processi quantistici sottostanti che hanno dato loro origine

La Teoria Quantistica dei Campi dunque fornisce in quadro unitario per studiare tutti questi fenomeni

SOLO LE TEORIE QUANTISTICHE FORNISCONO MODELLI DELLE TRANSIZIONI DI FASE ?

Oggi sappiamo che la risposta è NO.

Certi sistemi descritti da leggi deterministiche, cui è stato aggiunto un RUMORE STOCASTICO DI FONDO, presentano comportamenti identici a quelli dei sistemi quantistici:

Comparsa di correlazioni a lungo raggio, effetti collettivi, ecc.

Per essi si può addirittura introdurre una COSTANTE DI PLANCK 'EFFETTIVA', il cui valore differisce da quello della costante di Planck tradizionale

RIVOLUZIONE O MISTIFICAZIONE ?

Un gran numero di autori sostiene che le teorie quantistiche non sono una vera rivoluzione rispetto alle teorie classiche, ma sono riproducibili semplicemente servendosi di opportune aggiunte alle teorie classiche (RUMORE STOCASTICO, VARIABILI NASCOSTE, POTENZIALI QUANTISTICI, ecc.), senza modificarne la natura.

Tra questi autori vi sono fisici celebri, come EINSTEIN, DE BROGLIE, NELSON, BOHM, BELL, LEGGETT e molti altri.

Alcune teorie alternative riproducono esattamente il formalismo delle teorie quantistiche così come è stato costruito finora.

Altre presentano piccole differenze rispetto al formalismo e alle previsioni delle teorie quantistiche standard.

Finora gli esperimenti hanno sempre confermato le prime, ma non le seconde. Questo significa che le teorie quantistiche contengono un nucleo fondamentale di verità, che tuttavia può essere espresso in molti modi alternativi e probabilmente non riguarda solo i fenomeni atomici e molecolari.

LA FISICA QUANTISTICA COME FRAMEWORK CONCETTUALE

Gli sviluppi fin qui illustrati mostrano che la Fisica Quantistica può anche essere vista come un framework concettuale per descrivere sistemi complessi soggetti a ineliminabili fluttuazioni di fondo.

Nell'ambito di tale framework il valore numerico della "costante di Planck" non ha più nessuna importanza, dato che in tutti questi sistemi si hanno fenomeni quantistici MACROSCOPICI.

L'esistenza di questi ultimi in domini come la PRESA DI DECISIONI o l'UTILIZZO DEI CONCETTI è stata sperimentalmente evidenziata.

CONCLUSIONI

- **Le teorie quantistiche presentano nuovi e affascinanti fenomeni che vanno oltre l'intuizione comune e sembrano allargare le possibilità della Fisica ben oltre quanto consentito dalla Fisica classica**
- **È per ora difficile sfruttare le enormi potenzialità delle teorie quantistiche anche in domini diversi da quelli microscopici perché formulate in un linguaggio matematico eccessivamente complesso e inadatto a descrivere fenomeni biologici e sociali. Tuttavia se queste teorie sono viste come un framework concettuale allora le loro potenzialità possono essere più facilmente sfruttate.**