

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA  
prot. 2005025242

<b>Coordinatore Scientifico</b>	Giancarlo GHIRARDI
<b>Ateneo</b>	Università degli Studi di TRIESTE
<b>Titolo della Ricerca</b>	Problemi aperti in meccanica quantistica: entanglement, macro-oggettivazione, nonlocalità.
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 66.000
<b>Durata</b>	24 Mesi

## Obiettivo della Ricerca

### 1. ENTANGLEMENT.

Esso, considerato da Schrodinger come "il tratto caratteristico della meccanica quantistica, quello che implica il suo piu' completo distacco dalle linee di pensiero classiche", ha giocato un ruolo di primo piano nel campo dei fondamenti della meccanica quantistica, fin dalla sua nascita (bastera' ricordare a tale proposito l'argomento di incompletezza di Einstein-Podolsky-Rosen, il celebre gatto di Schrodinger e le disuguaglianze di Bell). Oggigiorno esso e' considerato una risorsa essenziale nelle moderne teorie dell'informazione e della computazione quantistica. Numerosi sono i problemi tuttora irrisolti e scarsamente compresi connessi all'entanglement. In particolare si intende:

1.a. Investigare le conseguenze di una recente definizione di entanglement valida per sistemi composti da particelle identiche basata sulla possibilita' o meno di attribuire sistemi completi di proprieta' oggettive ad arbitrari sottosistemi. Le relazioni di questa nuova definizione con quelle gia' esistenti in letteratura, valide per sistemi di particelle distinguibili saranno analizzate in dettaglio.

1.b. Cercare nuovi criteri costruttivi per determinare se uno stato quantistico (associato ad un sistema di due o piu' particelle e rappresentato da un operatore statistico) sia entangled o meno. Si cercheranno inoltre di determinare nuove misure per quantificare il grado di correlazioni non locali, ossia di entanglement, presente in tali stati.

1.c. Investigare la natura dell'entanglement all'interno della Meccanica di Bohm al fine di chiarificarne la natura genuinamente topologica. In particolare si studieranno, in tale contesto, le proprieta' topologiche dello spazio delle configurazioni per sistemi di particelle identiche.

### 2. MACRO-OGGETTIVAZIONE.

La natura lineare del formalismo quantistico, unitamente alla pretesa che esso valga anche per i sistemi macroscopici, prevede la non osservata esistenza di sovrapposizioni di stati macroscopicamente e percettivamente distinguibili di tali sistemi. Un passo altamente significativo verso la risoluzione di tale fondamentale problema consiste nella formulazione di modelli alternativi alla meccanica quantistica ordinaria, quali i modelli di riduzione di dinamica.

Un altro punto di vista consiste nello studio degli aspetti di oggettivazione inerenti a tutta la descrizione fenomenologica dei sistemi macroscopici, che tipicamente si avvale di concetti termodinamici, nell'ambito della teoria quantistica, facendo in particolare riferimento alla teoria quantistica dei campi. Obiettivi della nostra ricerca in tal campo sono:

2.a. Studiare le proprieta' matematiche dei processi stocastici in spazi infinito-dimensionali sviluppando applicazioni ai sistemi quantistici aperti, anche in connessione alla problematica della decoerenza.

2.b. Chiarire il ruolo degli operatori quantistici all'interno dei modelli di riduzione dinamica ed analizzare il fenomeno dell'incremento dell'energia in tali teorie proponendo modelli in grado di evitarlo.

2.c. Investigare gli effetti del meccanismo di riduzione sui corpi estesi e contribuire all'elaborazione di una consistente generalizzazione relativistica dei modelli di riduzione dinamica.

2.d. Introdurre gli aspetti di macro-oggettivazione a partire da una teoria quantistica per sistemi macroscopici di non-equilibrio, basata su concetti termodinamici, per quanto si riferisce alla dinamica deterministica dello stato termodinamico. A questa deve poi collegarsi la dinamica stocastica quando la fenomenologia gia' evidenzia dei sottosistemi, situazione da descriversi con la meccanica quantistica nella sua formulazione piu' generale fondata sulla generalizzazione delle osservabili tramite povm (misure a valore di operatore positivo), "operazioni" e "strumenti".

### 3. NONLOCALITA'.

I lavori di Bell hanno dimostrato che la meccanica quantistica ed ogni suo completamento ad esso predittivamente equivalente necessariamente esibiscono peculiari effetti di non localita': eventi che accadono in punti a distanza space-like dello spazio tempo si influenzano dunque istantaneamente, senza tuttavia portare ad una violazione del principio di causalita'. A questo proposito, lo scopo della nostra ricerca sara' quello di analizzare le relazioni, a tutt'oggi non del tutto chiarite, che intercorrono tra l'entanglement, la violazione delle disuguaglianze generalizzate di Bell e l'esistenza di teorie locali che descrivono esperimenti di correlazione. Piu' in dettaglio, si intende:

3.a. Esibire una prova di nonlocalita' senza disuguaglianze che valga per ogni stato entangled comprendente un numero arbitrario di particelle, ciascuna di esse appartenente ad uno spazio di Hilbert di dimensione arbitraria.

3.b. Contribuire alla risoluzione del problema aperto della completa determinazione della classe di disuguaglianze di Bell generalizzate per un fissato numero di particelle, di osservabili e di esiti di misure di queste ultime, e determinare nuove disuguaglianze che coinvolgono varianze o funzioni di correlazione di piu' alto ordine, la cui violazione sia espressione della nonlocalita'.

3.c. Analizzare le strutture comuni della meccanica di Bohm e della teoria Ghirardi-Rimini-Weber, sia per quel che riguarda il ruolo dell'equivarianza nella derivazione del formalismo quantistico convenzionale basato sugli operatori, sia per quel che riguarda il problema dell'invarianza relativistica, con lo scopo di comprendere quanto le leggi quantistiche usuali possano essere modificate,

pur mantenendo una fenomenologia in accordo con l'evidenza sperimentale nota, e quali siano le caratteristiche strutturali della meccanica quantistica che permettono una "coesistenza pacifica" di entanglement, non-località e invarianza di Lorentz. Riteniamo che il raggiungimento di tali obiettivi sia di estrema importanza sia a livello teorico sia a livello applicativo. Nel primo ambito esso consentirebbe una maggiore comprensione del mondo quantistico a livello microscopico e macroscopico, e potrebbe condurre ad individuare aree, quali lo studio dei sistemi mesoscopici, nelle quali potrebbero mettersi in evidenza violazioni del carattere lineare della teoria (un tema ritenuto di grande rilievo tra gli altri da A.Legget, [J.Phys: Cond.Matter., 14, 415 (2002)], R.Penrose ["The Emperor's New Mind", Oxford Univ. Press (2002)], e S.Adler ["Quantum Theory as an Emergent Phenomenon", Cambridge Univ. Press (2004)]). Nel secondo, una maggiore comprensione dell'entanglement, ad esempio, risulta fondamentale per i tentativi di realizzazione pratica dei quantum computers, per i protocolli quantistici di generazione e distribuzione di chiavi crittografiche private, e per le procedure di teletrasporto.

## **Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo**

### **1. ENTANGLEMENT E NONLOCALITÀ**

1a. Come ben noto il fenomeno dell'entanglement comporta strettissime correlazioni tra gli esiti delle misure su due costituenti di un sistema composto. Questo fatto consente, nel caso di stati puri, di derivare delle disuguaglianze (alla Bell) la cui violazione sperimentale rappresenta una prova della nonlocalità quantistica. La situazione è abbastanza chiara per stati puri, ma l'identificazione pratica sia dell'esistenza di stati entangled che degli effetti nonlocali diventano estremamente difficili nei casi di miscele statistiche. Si può addirittura dimostrare che esistono miscele di appropriati stati entangled che non esibiscono caratteristiche nonlocali evidenziabili sperimentalmente. Recentemente sono state elaborate varie prove di nonlocalità che non fanno ricorso alla derivazione di disuguaglianze. Lungo queste linee si pensa di dare un contributo significativo al problema dell'entanglement nel caso più generale di miscele statistiche e di formulare criteri precisi per identificare quegli stati misti che comportano anche una violazione della nonlocalità. Si intende chiarire la relazione tra Entanglement e fondamenti della meccanica statistica quantistica mediante lo studio delle condizioni di equilibrio termodinamico per funzioni d'onda tipiche e della loro dinamica in condizioni di non equilibrio.

### **2. MACRO-OGGETTIVAZIONE.**

- 2a. Si intende proseguire lo studio di carattere fisico-matematico delle principali classi di equazioni differenziali stocastiche in spazi di Hilbert utilizzate nella formulazione dei modelli di riduzione dinamica. A tale riguardo, si intende formulare nuovi teoremi di esistenza ed unicità delle soluzioni, ove possibile fornire le soluzioni esplicite delle equazioni, più in generale studiare l'andamento asintotico delle soluzioni. Questo tipo di analisi manca ancora nella letteratura scientifica.
- 2b. Si intende analizzare in maniera matematicamente rigorosa il processo di misura all'interno del formalismo dei modelli di riduzione. Più specificatamente, si intende dimostrare analiticamente che durante un processo di misura del tipo di von Neumann le equazioni del moto implicano che: a) l'apparato di misura è ad ogni istante localizzato in una posizione definita dello spazio; b) gli esiti dell'esperimento sono quelli previsti dalla meccanica quantistica; c) le probabilità relative a ciascun esito sono praticamente equivalenti alle probabilità quantistiche. Queste proprietà dei modelli di riduzione erano già note da tempo, ma fino ad ora non sono state analizzate con rigore matematico.
- 2c. Si intende chiarire un punto cruciale non ancora esplorato, ovvero il ruolo del formalismo operatoriale quantistico all'interno dei modelli di riduzione dinamica e come esso possa essere recuperato a partire dalle proprietà delle equazioni di evoluzione di tali modelli.
- 2d. Si intende proseguire lo studio del meccanismo di riduzione in ambito relativistico, allo scopo di elaborare soddisfacenti modelli di riduzione dinamica che siano relativisticamente invarianti. Questa è sicuramente la sfida più importante ed impegnativa nell'ambito del programma di riduzione dinamica.
- 2e. Si intende pervenire ad una chiarificazione della struttura comune delle teorie quantistiche senza osservatori e chiarire il ruolo dell'equivarianza nella derivazione del formalismo quantistico usuale.
- 2f. Si intende chiarificare l'origine degli effetti topologici in meccanica quantistica, con lo scopo di arrivare ad una classificazione completa e chiarificazione di problematiche connesse con le para-statistiche; applicazioni al calcolo quantistico geometrico.
- 2g. Si intendono studiare estensioni non lineari della meccanica quantistica al fine di caratterizzare il regime in cui vale il formalismo quantistico usuale basato sugli operatori lineari come osservabili.
- 2h. Si intende descrivere un sistema macroscopico in equilibrio locale soggetto all'azione di un microsistema atto a modificare lo stato macroscopico del sistema complessivo.
- 2i. A questo scopo si costruirà un operatore statistico contenente oltre ai campi classici rappresentanti lo stato oggettivo del sistema anche gli elementi che caratterizzano lo stato del microsistema, come funzioni d'onda e loro pesi statistici.

## **Criteri di verificabilità**

- 1) Si considerano criteri primari di valutazione del programma i lavori scientifici che verranno elaborati dalle varie unità sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.
- 2) Un secondo criterio è la rilevanza del lavoro svolto dedotta dalla risonanza a livello nazionale e internazionale.
- 3) Si valuterà la rilevanza del lavoro anche dagli inviti a presentare i risultati ottenuti a convegni nazionali e internazionali.
- 4) Si prevedono incontri periodici tra le diverse unità impegnate nel programma e il coinvolgimento su invito di studiosi provenienti da istituzioni scientifiche di altri paesi, anche allo scopo di valutare i risultati ottenuti da ogni unità di ricerca in modo da identificare e rafforzare le linee di ricerca più promettenti del programma.

## Elenco delle Unità di Ricerca

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di TRIESTE
<b>Responsabile Scientifico</b>	Giancarlo GHIRARDI
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 24.500

### Compito dell'Unità

#### 1. ENTANGLEMENT.

1.a. Investigare le conseguenze di una recente definizione di entanglement valida per sistemi composti da particelle identiche basata sulla possibilità o meno di attribuire sistemi completi di proprietà oggettive ad arbitrari sottosistemi. Le relazioni di questa nuova definizione con quelle già esistenti in letteratura, valide per sistemi di particelle distinguibili saranno analizzate in dettaglio.

1.b. Cercare nuovi criteri costruttivi per determinare se uno stato quantistico (associato ad un sistema di due o più particelle e rappresentato da un operatore statistico) sia entangled o meno. Si cercheranno inoltre di determinare nuove misure per quantificare il grado di correlazioni non locali, ossia di entanglement, presente in tali stati.

#### 2. MACRO-OGGETTIVAZIONE.

2.a. Studiare le proprietà matematiche dei processi stocastici in spazi infinito-dimensionali sviluppando applicazioni ai sistemi quantistici aperti, anche in connessione alla problematica della decoerenza.

2.b. Chiarire il ruolo degli operatori quantistici all'interno dei modelli di riduzione dinamica ed analizzare il fenomeno dell'incremento dell'energia in tali teorie proponendo modelli in grado di evitarlo.

2.c. Investigare gli effetti del meccanismo di riduzione sui corpi estesi e contribuire all'elaborazione di una consistente generalizzazione relativistica dei modelli di riduzione dinamica.

#### 3. NONLOCALITÀ.

3.a. Esibire una prova di nonlocalità senza disuguaglianze che valga per ogni stato entangled comprendente un numero arbitrario di particelle, ciascuna di esse appartenente ad uno spazio di Hilbert di dimensione arbitraria.

3.b. Contribuire alla risoluzione del problema aperto della completa determinazione della classe di disuguaglianze di Bell generalizzate per un fissato numero di particelle, di osservabili e di esiti di misure di queste ultime, e determinare nuove disuguaglianze che coinvolgano varianze o funzioni di correlazione di più alto ordine, la cui violazione sia espressione della nonlocalità.

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di GENOVA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Pierantonio ZANGHI
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 21.500

### Compito dell'Unità

1. Studio delle strutture comuni delle teorie quantistiche senza osservatori e ruolo dell'equivarianza nella derivazione del formalismo quantistico usuale.

2. Effetti topologici in meccanica quantistica, con lo scopo di arrivare ad una classificazione completa e chiarificazione di problematiche connesse con le para-statistiche; applicazioni al calcolo quantistico geometrico, in particolare allo studio effetti del rumore ambientale esterno per modelli recentemente proposti.

3. Entanglement e fondamenti della meccanica statistica quantistica: studio delle condizioni di equilibrio termodinamico per funzioni d'onda tipiche e della dinamica in condizioni di non equilibrio.

4. Studio di estensioni non lineari della meccanica quantistica al fine di caratterizzare il regime in cui vale il formalismo quantistico usuale basato sugli operatori lineari come osservabili; studio di come possa essere utilizzato a questo scopo lo schema sviluppato da Beltrametti e Bugajski.

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di MILANO
<b>Responsabile Scientifico</b>	Lodovico LANZ
<b>Finanziamento assegnato</b>	<b>Euro</b> 20.000

### **Compito dell'Unità**

- 1. Studiare il collegamento del problema della macro-oggettivazione con la descrizione in teoria di campo di un sistema macroscopico in equilibrio locale.*
  - 2. In questo contesto collegare il concetto di microsistema con il venir meno di un regime di evoluzione deterministica dei parametri di stato macro-oggettivi.*
  - 3. Riconsiderazione del problema della decoerenza nel contesto della teoria quantistica relativistica dei campi.*
-