

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005029421

Coordinatore Scientifico	Mario RASETTI
Ateneo	Politecnico di TORINO
Titolo della Ricerca	Fenomeni cooperativi in sistemi coerenti della materia condensata e loro realizzazione in dispositivi a chip atomico
Finanziamento assegnato	Euro 131.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Obiettivo principale di questo progetto e' di raggiungere una piu` approfondita comprensione teorica dei fenomeni collettivi in sistemi coerenti di materia condensata e di procedere alla loro realizzazione sperimentale mediante dispositivi tipo atom chip, avendo in vista applicazioni mirate all' immagazzinamento e alla manipolazione di informazione quantistica. I piu` importanti obbiettivi sperimentali sono:

A1) la realizzazione di un campione di atomi ultrafreddi di Rubidio sulla superficie di silicio di un microchip. Fasci laser verranno usati per manipolare gli atomi intrappolati in prossimita` della superficie del microchip. Verranno prese in considerazione due diverse configurazioni stazionarie del reticolo ottico: a) un reticolo ottico lineare, b) anelli atomici basti su potenziali reticolari con condizioni al contorno periodiche perfette.

A2) la conseguente realizzazione di due diversi dispositivi ottenuti caricando atomi neutri in potenziali magnetici confinanti con due diverse geometrie: i) un campione atomico coerente elongato, quasi unidimensionale, a simmetria cilindrica, ii) un condensato quasi bidimensionale. Scopo della scelta di queste configurazioni sperimentali e' quello di impiegare l'atom chip come "simulatore quantistico", per studiare problemi aperti relativi alle correlazioni non locali ed ai fenomeni critici quantistici in sistemi condensati. In particolare, l' "anello atomico" dovrebbe consentire lo studio della transizione di Mott metallo-isolante in una geometria chiusa. Dal punto di vista teorico gli obbiettivi prioritari sono lo studio di:

B1) la transizione di fase quantistica superfluido-isolante, il diagramma di fase a temperatura zero e le correlazioni quantistiche non locali per sistemi a molti corpi descritti dai modelli (estesi) di Bose-Hubbard e di Bose-Fermi-Hubbard (o dagli equivalenti modelli di spin) su reticoli con topologia regolare o complessa, su reticoli e su super-reticoli colorati, su strutture spaziali inhomogenee (disordinate) e su cristalli mono e bidimensionali. Un obbiettivo significativo e' in questo caso la valutazione della concorrenza a due siti, del one-tangle e dell'entanglement a blocchi e multipartito in prossimita` dei punti critici quantistici.

B2) l'immagazzinamento e la dinamica coerente di informazione ed entanglement in catene di spin, in anelli ottici e in sistemi atomici reticolari, con particolare attenzione alla dinamica di stati iniziali preparati nella configurazione di massimo entanglement bipartito o di stati iniziali con un genuino entanglement multipartito. Di particolare interesse e' la caratterizzazione della persistenza delle segnature di criticalita` rispetto alla dimensionalita` del reticolo ed alla temperatura.

B3) l'analisi della relazione fra comportamento critico e le proprieta` di entanglement quantistico in tutti i sistemi considerati al punto B1). Verranno considerati altresì array lineari di buche fermioniche, descritte in termini di modelli generalizzati di Fermi-Hubbard.

B4) il comportamento critico all'equilibrio nonche' la dinamica di una classe di modelli antiferromagnetici unidimensionali la struttura del cui stato fondamentale dipende in modo critico da un campo magnetico esterno. In tale contesto verra` anche esaminata la possibile comparsa di uno stato fondamentale completamente fattorizzato sulla dinamica della catena, particolarmente interessante in vista della realizzazione di un canale di comunicazione il cui carattere classico /quantistico sia controllato da un interruttore di entanglement guidato da un campo esterno.

B5) sistemi di spin antiferromagnetici in una o due dimensioni rispettivamente : i) nel regime di transizione di fase di Haldane, ii) in presenza di un campo magnetico uniforme, con l'obbiettivo di metter in relazione il comportamento critico nonche' ogni altra segnatura di fenomeni di crossover con le proprieta` di entanglement.

B6) lo spettro di energia ed il legame fra livelli energetici e regimi classici in array mesoscopici di condensati, quali quelli realizzati mediante la tecnologia atom-chip dal partner sperimentale del progetto.

B7) l'implementazione di processi di manipolazione di informazione quantistica in modelli reticolari con accoppiamento Josephson mediante: i) la caratterizzazione dello stato fondamentale in termini di entropia di von Neumann e la sua relazione con il disordine (decoerenza) che si trova al di sopra del punto critico, ii) la costruzione di codici stabilizzanti resistenti allo shift.

B8) la rappresentazione di modelli reticolari di bosoni e/o fermioni interagenti mediante il modello universale del simulatore quantistico tipo spin network e la conseguente descrizione di porte e circuiti quantistici implementati in sistem con accoppiamento tipo Josephson.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Gli aspetti innovativi sono, dal punto di vista sperimentale,

1) la realizzazione di un campione di atomi ultrafreddi di Rubidio sulla superficie di silicio di un microchip e, utilizzando opportune

configurazioni stazionarie del reticolo ottico, la realizzazione di un anello atomico. Quest'ultimo promette la realizzazione di un modello di Bose-Hubbard (e la possibilità di studiarne la transizione quantistica di fase) in presenza di una geometria chiusa.

2) la conseguente realizzazione di due diversi dispositivi ottenuti caricando atomi neutri in potenziali magnetici confinanti con due diverse geometrie.

Dal lato teorico gli aspetti originali/innovativi della ricerca sono

1) lo studio A) degli effetti della struttura reticolare e dell'accoppiamento (si pensi a reticoli con topologia complessa, reticoli e super-reticoli colorati, strutture spaziali inomogenee (disordinate) ecc.) sulla transizione di fase quantistica superfluido-isolante per sistemi a molti corpi descritti dai modelli di Bose-Hubbard e di Bose-Fermi-Hubbard, B) della relazione tra comportamento critico (nella transizione di fase quantistica superfluido-isolante) e le proprietà di entanglement quantistico (vale a dire della concorrenza a due siti, del one-tangle e dell'entanglement a blocchi e multipartito in prossimità dei punti critici "quantistici") per sistemi a molti corpi descritti dai modelli di Bose-Hubbard e di Bose-Fermi-Hubbard nonché per gli array lineari di buche fermioniche, descritte con modelli generalizzati di Hubbard.

2) lo studio dell'evoluzione coerente di informazione ed entanglement in catene di spin, in anelli ottici e in sistemi atomici reticolari, con particolare attenzione alla dinamica di stati iniziali preparati nella configurazione a) di massimo entanglement bipartito o b) con un genuino entanglement multipartito.

3) lo studio i) della dinamica e del comportamento critico all'equilibrio di una classe di modelli antiferromagnetici unidimensionali con ground state dipendente in modo critico da un campo magnetico esterno, e ii) della relazione tra il comportamento critico (e di altre signature) dei fenomeni di crossover con le proprietà di entanglement in sistemi di spin antiferromagnetici in una (due) dimensione nel regime di transizione di fase di Haldane (in presenza di un campo magnetico uniforme)

4) l'implementazione di processi di manipolazione di informazione quantistica in modelli reticolari con accoppiamento Josephson mediante: i) la caratterizzazione dello stato fondamentale in termini di entropia di von Neumann e la sua relazione con il disordine (decoerenza) che si trova al di sopra del punto critico, ii) la costruzione di codici stabilizzanti resistenti allo shift. Presenta inoltre carattere innovativo la rappresentazione di modelli reticolari di bosoni e/o fermioni interagenti mediante il modello universale del simulatore quantistico tipo spin network.

Criteri di verificabilità

I criteri di verificabilità del lavoro scientifico svolto saranno essenzialmente tre : 1) pubblicazione dei risultati della ricerca su riviste scientifiche internazionali, 2) relazione sull'attività scientifica svolta a distanza di un anno dall'inizio del progetto con verifica dei risultati parziali attesi, 3) relazione scientifica conclusiva con verifica del conseguimento degli obiettivi del progetto.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Politecnico di TORINO
Responsabile Scientifico	Mario RASETTI
Finanziamento assegnato	Euro 28.360

Compito dell'Unità

L'unità di Torino studierà, da una prospettiva teorica, le proprietà dei sistemi many-body reticolari di bosoni e fermioni e la realizzazione di processori di informazione quantistica. Si dedicherà particolare attenzione ai fenomeni cooperativi che contraddistinguono sia le transizioni quantistiche di fase (TQF) sia la dinamica complessa di sistemi ad accoppiamento Josephson quali array di buche bosoniche e di giunzioni Josephson considerando altresì l'influenza della complessità topologica dei reticoli. Gli obiettivi principali sono

1) studio della TQF superfluido-isolante i) in sistemi descritti dalla Hamiltoniana di Bose-Hubbard (BH) in presenza di reticoli con topologia complessa e ii) in array lineari di buche fermioniche descritte con modelli generalizzati di Hubbard con interazione tra i modi rotazionali. Gli approcci usati saranno l'approssimazione mean-field, l'espansione perturbativa strong-coupling, le simulazioni quantum Monte Carlo nelle loro versioni generalizzate per reticoli complessi; si studierà inoltre la relazione tra comportamento critico e le proprietà (quantistiche) di entanglement nella TQF superfluido-isolante di sistemi tipo BH.

2) studio dello spettro di energia in array mesoscopici di bosoni per stabilire un legame significativo tra livelli di energia e regimi semiclassici al fine di caratterizzare quantisticamente le instabilità associate alla comparsa del caos classico. L'analisi sugli array mesoscopici può essere facilmente estesa a modelli tipo BH (con interazione bosonica sia attrattiva che repulsiva) più complessi ed a modelli superfluidi in geometria toroidale con potenziali periodici esterni.

3) realizzazione di modelli di processori di informazione quantistica in modelli ad accoppiamento Josephson e costruzione di shift-resistant code con metodi algebrici che considerano la struttura algebrica di Lie-Hopf dell'Hamiltoniana modello.

4) rappresentazione di modelli reticolari di fermioni e/o bosoni in un simulatore quantistico tipo spin network (modello universale per la manipolazione dell'informazione quantistica).

5) descrizione di porte quantistiche e circuiti in termini di modelli ad accoppiamento Josephson (di fermioni o bosoni) nel contesto del modello di simulatore quantistico tipo spin network

Sede dell'Unità	Università degli Studi di SALERNO
Responsabile Scientifico	Fabrizio ILLUMINATI
Finanziamento assegnato	Euro 27.150

Compito dell'Unità

Il lavoro dell'unità di Salerno sarà orientato verso la fisica dei sistemi di atomi in array di microtrappole ed in reticoli ottici descritti con modelli di Bose-Hubbard e Bos-Fermi-Hubbard per, rispettivamente, atomi bosonici e miscele di fermioni e bosoni. Un obiettivo centrale sarà di acquisire comprensione su natura e comportamento delle correlazioni non locali (CNL) in sistemi atomici al fine di a) verificare l'efficacia della teoria sull'influenza delle CNL sulla comparsa/dinamica delle transizioni di fase quantistiche, b) di confrontare le CNL con le funzioni di correlazione a n-punti usualmente considerate nei fenomeni critici. Gli obiettivi specifici sono

- 1) studio del diagramma di fase a $T=0$ in modelli di Bose-Hubbard e Bos-Fermi-Hubbard estesi su reticoli ottici regolari e omogenei, su reticoli colorati e super-reticoli, su reticoli disordinati e disomogenei. Si useranno tecniche numeriche di diagonalizzazione esatta e simulazioni Monte Carlo.*
- 2) caratterizzazione delle CNL per i modelli summenzionati nel regime hardcore (dove possono cioè essere ridotti in termini di sistemi quantistici di spin) usando misure di CNL quali la two-site concurrence ed il block entanglement tra due partizioni del reticolo.*
- 3) studio delle CNL a carattere multipartito a) determinando il comportamento delle misure di entanglement come l'entanglement localizzabile dei sistemi di spin e b) analizzando il one-tangle in modelli reticolari many-body.*
- 4) misure di entanglement vicino a/nell'attraversamento di punti critici quantistici (in particolare dell'entanglement a blocchi in funzione della dimensione e della topologia dell'interfaccia tra due sottoreticoli) per modelli di atomi e spin su reticoli e anelli ottici.*
- 5) memorizzazione e dinamica coerente dell'informazione e dell'entanglement in modelli di atomi su reticoli, anelli ottici e catene di spin con particolare attenzione alla dinamica di stati iniziali caratterizzati da entanglement bipartito massimale o genuinamente multipartito.*

Sede dell'Unità	Università degli Studi di CATANIA
Responsabile Scientifico	Francesco Saverio CATALIOTTI
Finanziamento assegnato	Euro 60.780

Compito dell'Unità

Il lavoro dell'unità di Catania sarà in modo predominante di tipo sperimentale sebbene le sue attuali competenze consentano altresì lo studio teorico dei fenomeni collettivi nei modelli reticolari many-body. L'obiettivo centrale del lavoro sperimentale è la realizzazione di campioni ultrafreddi di atomi di Rubidio in un campo magnetico basato su fili conduttori posti su un substrato di silicio. I fasci laser verranno usati per manipolare gli atomi intrappolati vicino alla superficie del micro-chip. Sul fronte teorico l'unità studierà modelli quasi 1-d sfruttando sia a) tecniche analitiche esatte (Bethe ansatz e trasformazione di Jordan-Wigner), sia b) metodi numerici (Lanczos o quantum Monte Carlo) insieme a c) argomenti di scala, per determinare le proprietà fisiche da confrontare con i risultati sperimentali. Il lavoro dell'unità è articolato in due fasi.

- 1) Realizzazione di un campione di atomi ultrafreddi sulla superficie di un micro-chip e manipolazione ottica. In tale dispositivo verranno create due configurazioni stazionarie del reticolo ottico: i) un reticolo ottico lineare retroriflettendo un fascio gaussiano vicino alla superficie del micro-chip, e ii) un potenziale reticolare chiuso (cioè con condizioni periodiche al contorno perfette) sfruttando l'interferenza di un fascio di Laguerre-Gauss con un'onda piana. Si studieranno gli atomi di Rubidio intrappolati in tale potenziale descrivendoli con opportuni modelli di spin. Un altro obiettivo è la realizzazione di due dispositivi diversi in cui gli atomi saranno soggetti a due diversi potenziali magnetici: A) il primo dispositivo ha una geometria (caratterizzata da confinamento magnetico armonico con simmetria cilindrica e frequenza assiale assai minore di quella radiale) che produce un campione atomico coerente allungato (quasi 1-d). Su questa base si formerà un reticolo 1-d introducendo un potenziale periodico ottico 1-d. Si studierà la decoerenza del sistema per valutare l'effetto della superficie del chip sulla coerenza spaziale. B) la geometria del secondo dispositivo comporta lo stesso tipo di confinamento del caso A ma la frequenza assiale è assai maggiore di quella radiale (e la dinamica degli atomi risulterà quindi quasi 2-d). Gli effetti di vicinanza della superficie verranno anche in tal caso valutati accuratamente.*
- 2) Applicazione di modelli teorici per lo studio dei fenomeni coerenti nei sistemi della materia condensata. Uno degli scopi di questo punto è di utilizzare i dispositivi del punto 1 come un simulatore quantistico per studiare diversi problemi relativi alle correlazioni in sistemi della materia condensata. Il sistema di riferimento è quello degli atomi confinati in un reticolo 1-d con geometria chiusa (anello atomico). Si prospetta i) lo studio delle proprietà di entanglement, per il caso bipartito (usando la concurrence e il one-tangle) ed il caso multi-partito, in sistemi many-body a carattere sia integrabile sia non integrabile e con reticoli sia omogenei che disordinati; ii) lo studio delle proprietà critiche nei dispositivi a chip atomico e nell'anello atomico con particolare attenzione alla transizione metallo-isolante in una geometria chiusa.*

Sede dell'Unità	Università degli Studi di FIRENZE
Responsabile Scientifico	Alessandro CUCCOLI
Finanziamento assegnato	Euro 14.710

Compito dell'Unità

L'attività dell'unità di Firenze si svolgerà nell'ambito dei fenomeni critici quantistici in sistemi interagenti, definiti su reticoli a bassa dimensionalità, descritti da Hamiltoniane di tipo magnetico o da modelli ad accoppiamento Josephson, con parametri d'interazione variabili ed in diverse geometrie. L'analisi sarà indirizzata sulle proprietà statiche sia a $T=0$ che a T finita, mentre il comportamento dinamico sarà considerato probabilmente solo a $T=0$. Le proprietà di entanglement considerate per rivelare il comportamento critico saranno a) il one-tangle (entanglement di formazione tra uno spin ed il resto del sistema) e b) la "concurrence" (entanglement di formazione tra due dati spin del sistema). Diverse tecniche e metodi, recentemente potenziati dal gruppo di Firenze, verranno applicati per studiare tali sistemi e le loro proprietà critiche. I compiti di Firenze sono riassunti qui di seguito:

- 1) studio del comportamento critico e proprietà di entanglement in transizioni (in particolare quantistiche) di fase vicino e al punto critico per sistemi di spin nel limite semiclassico; persistenza delle signature critiche in relazione alla dimensione del reticolo e alla temperatura; relazione tra comportamento critico ed entanglement bipartito e/o multipartito;*
 - 2) studio del comportamento critico (anche dinamico) di una classe di modelli 1-d antiferromagnetici dove la struttura dello stato fondamentale dipende dal campo magnetico. Tale analisi suggerisce il possibile controllo sulla configurazione del registro quantistico (tale possibilità è ancora da esplorare anche sperimentalmente). Si studierà l'influenza della comparsa di uno stato totalmente fattorizzato di tipo classico sulla dinamica delle catene in vista della realizzazione di canali di comunicazione con carattere classico o quantistico controllabile;*
 - 3) studio di sistemi antiferromagnetici soggetti ad un campo magnetico esterno in un reticolo 2-d: dipendenza del comportamento critico dai parametri e dalle indicazioni di crossover; possibilità di indurre un comportamento tipo XY in sistemi debolmente anisotropi realizzati sperimentalmente;*
 - 4) studio di catene antiferromagnetiche con $S=1$ che mostrano la transizione di fase quantistica di Haldane per certi valori dei parametri hamiltoniani; analisi delle proprietà di entanglement dello stato fondamentale; studio di tale sistema in modelli equivalenti si spin e possibile definizione di indicatori di entanglement non binario;*
 - 5) caratterizzazione dello stato fondamentale di un reticolo di Josephson 2-d in termini di entropia di von Neumann per chiarire l'origine del disordine (decoerenza) mostrata al punto critico quantistico.*
-