

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005025204

Coordinatore Scientifico	Ennio ARIMONDO
Ateneo	Università degli Studi di PISA
Titolo della Ricerca	Calcolo quantistico con particelle confinate, neutre o cariche
Finanziamento assegnato	Euro 154.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Stimolati dalle nuove idee emergenti nel campo del calcolo quantistico, della elaborazione quantistica, della comunicazione quantistica, dell'informazione quantistica, sul piano internazionale esiste al momento presente un grande sforzo di ricerca per esplorare i meccanismi fisici che possono facilitare un forte, coerente accoppiamento di sistemi quantistici controllati, e quindi di utilizzarli per le operazioni fra gli elementi di base, i qu-bits, come richiesto per la realizzazione della computazione quantistica. Sul lungo termine questo vasto campo di ricerca ha la potenzialità per importanti ricadute tecnologiche. Pertanto tale campo sta attirando enorme interesse di ricerca in tutto il mondo con cospicui investimenti da parte di tutte le nazioni tecnologicamente avanzate. Per arrivare alla costruzione di un sistema in grado di effettuare calcolo quantistico si richiede l'attuazione di differenti operazioni, come l'inizializzazione logica dei qu-bits, la realizzazione delle operazioni logiche elementari, la lettura dei qu-bits individuali. Queste operazioni devono essere effettuate in condizioni di grande controllo, a partire da un controllo a livello tecnologico classico sino ad un controllo a livello completamente quantistico.

Differenti sistemi di fisica atomica, di fisica molecolare o di fisica dello stato solido sono attualmente considerati come elementi utili per la realizzazione di qubits.

Scopo del presente programma di ricerca e' di contribuire significativamente, sia dal punto di vista sperimentale che da quello teorico, allo sviluppo di strutture basate su atomi e cariche confinate in maniera regolare nello spazio per applicazioni al calcolo quantistico. Tra i differenti sistemi che sono attualmente esplorati per la realizzazione di qu-bits quantistici, le strutture spazialmente confinate di atomi o di cariche (ioni od elettroni) hanno il vantaggio di un basso livello di decoerenza e la possibilità di effettuare operazioni quantistiche sia seriali che parallele. In particolare queste strutture sono le uniche che promettono un parallelismo ad un livello molto elevato. Il Progetto prevede la realizzazione sperimentale di differenti strutture spazialmente confinate di atomi neutri e di elettroni su cui effettuare operazioni logiche quantistiche. Saranno investigate due differenti configurazioni sperimentali, una basata su atomi confinati all'interno di potenziali periodici prodotti da fasci laser che interferiscono tra loro, ed un'altra basata su elettroni contenuti all'interno di un potenziale periodico prodotto da campi elettrici e campi magnetici. Anche se dal punto di vista della realizzazione le due configurazioni sono fra loro piuttosto diverse, dal punto di vista del calcolo quantistico queste strutture spazialmente confinate di atomi ed elettroni hanno analogie molto strette. Infatti le fasi di inizializzazione, effettuazione di operazioni logiche, lettura dei qu-bits sono esattamente le stesse nei due sistemi. Ambedue le realizzazioni sperimentali richiedono lo sviluppo di nuove tecnologie, di nuove tecniche sperimentali di confinamento stabile, di nuovi metodi per la esecuzione delle operazioni quantistiche, di nuovi metodi di rivelazione delle operazioni quantistiche.

Il programma di ricerca include anche una serie di obiettivi teorici, che da un lato rappresentano un necessario complemento alla ricerca sperimentale sopra descritta, ma che anche affrontano delle questioni di impatto più ampio nell'ambito del calcolo quantistico. Gli obiettivi principali direttamente legati alle finalità sperimentali includono la determinazione del ruolo che la decoerenza e le imperfezioni (tecnologiche o quantistiche, associate sia all'hardware che al software del calcolatore) assumono sul prodotto finale del calcolo quantistico. E' un importante obiettivo della ricerca sul calcolo quantistico un efficiente utilizzo delle risorse associate ai processi quantistici per compensare i difetti associati ai qu-bits. Un'altra parte della ricerca teorica collegata alle investigazioni sperimentali è finalizzata alle instabilità che possono essere indotte dalle interazioni fra i qubits che compongono le strutture sopra elencate e lo sviluppo di schemi per il controllo coerente in strutture confinate. Notiamo anche che reticoli ottici, e più in generale le strutture spaziali periodiche, risultano essere uno strumento particolarmente adatto a simulare modelli hamiltoniani che descrivono il moto di particelle in un potenziale periodico: sono quindi atti a simulare differenti problemi di interesse diretto per la fisica dello stato solido o per la nanoelettronica dove elettroni od altri portatori di carica si muovono all'interno di un potenziale periodico che e' prodotto da un reticolo cristallino. Tale potenziale può essere infatti simulato con un alto grado di controllo dalla struttura periodica che confina le particelle che costituiscono i qu-bits.

Il presente progetto di ricerca sfrutta le differenti competenze sperimentali e teoriche dei suoi proponenti, che hanno già ottenuto eccellenti risultati nei campi del calcolo quantistico, dell'informazione quantistica, dell'ottica quantistica, della condensazione di Bose-Einstein, oltre che in altri campi collegati (fisica statistica, sistemi complessi, non lineari e caotici, ...). La presente coordinazione dei partecipanti, che in precedenza non hanno collaborato in maniera diretta, e' particolarmente importante per lo sviluppo culturale e scientifico della nazione e per il conseguimento di nuovi avanzamenti delle conoscenze in un campo di ricerca avanzato come e' quello dell'elaborazione e della comunicazione quantistica. Data la complessità dei fenomeni e processi fisici che sono affrontati nell'ambito del calcolo quantistico il raggiungimento di obiettivi molto originali, come quelli previsti dal presente progetto, richiede uno sforzo coordinato ed una stretta collaborazione fra gruppi di ricerca che operano su temi complementari negli obiettivi e nei metodi di indagine. Questo metodo di indagine e' necessario per essere competitivi con le ricerche in corso nel resto dell'Europa, negli Stati Uniti ed in Giappone. Ci aspettiamo che attraverso questo progetto, che unisce gruppi sperimentali e teorici che lavoreranno con compiti complementari e strettamente collegati, l'efficacia della ricerca venga amplificata dalla collaborazione diretta fra i partecipanti. Questo risultato contribuirà in maniera essenziale al formarsi di una eccellenza cooperativa in un settore chiave dell'informazione e della comunicazione quantistica.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Lo scopo del presente Programma di ricerca è di contribuire significativamente, sia dal punto di vista sperimentale che da quello teorico, allo sviluppo del calcolo, l'elaborazione, la comunicazione e l'informazione quantistica, utilizzando strutture confinate spazialmente di particelle neutre o cariche.

La possibilità di implementare schemi realistici di computazione e informazione quantistica su qu-bits multipli, con un elevato grado di parallelismo nell'operazione, richiede lo sviluppo di opportune configurazioni con strutture spaziali che confinino i qu-bits stessi e mantengano le proprietà richieste di isolamento dall'ambiente circostante e quindi di bassissima decoerenza. Il Piano dettagliato di questo Progetto è rivolto alla costruzione, alla caratterizzazione, alla modellizzazione ed all'utilizzo di strutture spazialmente confinate che contengono un elevato numero di qu-bits basati su particelle neutre o cariche. Questo Progetto intende quindi ottenere progressi originali nel settore della computazione quantistica sia con atomi neutri ultrafreddi, che con cariche elettriche, realizzando una complementarità ottimale ed un efficace trasferimento di modelli e conoscenze. Accanto agli sviluppi tecnologici necessari per la finalizzazione sperimentale, il Progetto prevede un contributo di carattere teorico, funzionale per l'implementazione dei metodi sperimentali e per l'interpretazione dei risultati, ma dotato anche di un respiro più ampio, di grande interesse per stabilire la stabilità e l'affidabilità di un calcolatore quantistica rispetto alle fluttuazioni dovute all'accoppiamento con il mondo esterno.

Un progetto di ricerca fondamentale, che coordini competenze che spaziano dalla fisica della materia alla fisica teorica, con eventuali contributi dalla matematica e dall'informatica, è in grado di affrontare in modo adeguato le problematiche relative al calcolo quantistico utilizzando atomi/cariche confinati. La fisica della materia infatti fornisce i componenti da utilizzare come qu-bits per la costruzione di un calcolatore e determina le proprietà dei qu-bits stessi. La fisica della materia e la fisica teorica determinano e modellizzano in maniera opportuna le varie interazioni necessarie a realizzare operazioni a singolo qu-bit e le operazioni tipo C-NOT su qu-bits. Ed ancora fisica della materia e fisica teorica caratterizzano e modellizzano i processi di decoerenza ed i difetti che possano impedire agli elementi prescelti di operare correttamente come qu-bits.

Al momento attuale, i risultati più importanti di calcolo quantistico sono stati realizzati utilizzando la risonanza magnetica applicata a differenti molecole: c'è però da registrare uno spostamento di attenzione verso l'utilizzo di sistemi di atomi/cariche confinati all'interno di opportune strutture. Le ragioni di questo spostamento di attenzione, osservabile a livello internazionale, hanno diverse motivazioni:

- la relativamente semplice struttura dei livelli degli atomo/ione da utilizzare;
- la sovrapposizione quantistica di livelli atomici come un'ovvia implementazione del qu-bit realizzato attraverso sistemi a due o più livelli;
- la capacità di utilizzare un singolo atomo/carica come qu-bit;
- la capacità di interrogare tali qu-bits utilizzando le raffinate tecniche di spettroscopia laser ben sviluppate negli ultimi decenni;
- l'uso di transizioni ottiche per una naturale implementazione di connessioni quantistiche attraverso campi ottici quantistici;
- l'utilizzo di confinamento esterno sull'atomo/ione per realizzare una configurazione con elevato isolamento dall'ambiente circostante e quindi bassissima decoerenza.

La base sperimentale e teorica di questo importante utilizzo di atomi/ioni come qu-bits nasce dalla vasta esperienza accumulata nelle misure di altissima precisione e nell'altissimo livello di controllo coerente realizzato attraverso l'ottica quantistica.

Un elemento centrale del presente Progetto, all'interno di un approccio tradizionale basato sull'uso di ioni, è lo sviluppo di strutture spaziali basate su multi-trappole di Penning per il confinamento di molteplici particelle cariche. Ai fini della computazione quantistica basata su cariche confinate, la scalabilità ad un elevato numero di qu-bits verrà realizzata usando delle configurazioni, ad uno o due dimensioni, di trappole di Penning interconnesse. Si tratta della realizzazione di micro multi-trappole con caratteristiche controllabili singolarmente, ciascuna contenente un solo ione oppure un singolo elettrone: le operazioni a due qu-bits possono essere realizzate utilizzando l'accoppiamento delle eccitazioni di elettroni confinati all'interno dei minimi di potenziali contigui formati da una struttura periodica di trappole di Penning, mentre la singola trappola può essere selezionata producendo una disomogeneità spaziale mediante un campo magnetico esterno. Lo scambio di eccitazione del moto dell'elettrone dentro differenti trappole costituisce l'operazione necessaria alla realizzazione di un controllo logico a due qu-bits. Questo controllo logico, unito all'insieme universale di operazioni quantistiche che operano su ogni singolo elettrone, permettono di attivare tutta la dinamica condizionale fra i qu-bits del sistema richiesta per la realizzazione di un calcolatore quantistico.

Per quanto riguarda gli atomi neutri, un sistema di atomi neutri intrappolati costituisce un candidato naturale per lo sviluppo delle operazioni associate ad un computer quantistico, sia a causa delle caratteristiche sopra elencate per un sistema generico di atomi o ioni, sia a causa di addizionali vantaggi:

- il recente, impetuoso sviluppo delle tecniche di manipolazione coerente di atomi neutri ultrafreddi;
- l'abilità sperimentale di intrappolare ed operare su un insieme molto grande di atomi identici;
- la produzione di condensati di Bose-Einstein a dimostrazione dell'elevato livello di controllo attraverso tecniche di ottica quantistica;
- lo stato di coerenza collettiva che caratterizza un condensato di Bose-Einstein, permettendo così l'osservazione di nuovi fenomeni quantistici;
- un sistema di Bose-Einstein è composto di un alto numero di atomi ultrafreddi, ciascuno dei quali può rappresentare un singolo qu-bit nella implementazione di un calcolatore quantistico.

Gli obiettivi sperimentali e teorici del Progetto, tutti originali rispetto al presente status della ricerca internazionale, sono:

- 1) L'applicazione al calcolo ed alla informazione quantistica di una distribuzione lineare o superficiale di trappole di Penning planari, ciascuna confinante un solo elettrone o protone o ione.
- 2) Realizzazione di dispositivi per l'intrappolamento di cariche multiple in trappole magnetiche di dimensioni micrometriche.
- 3) La realizzazione di operazioni logiche quantistiche su una catena unidimensionale di atomi di rubidio nella condizione di isolante

di Mott, dove ciascun atomo della catena rappresenta un qu-bit individuale.

4) Utilizzo della analogia fra la distribuzione, lineare o superficiale, di trappole di Penning e la distribuzione, ad una, due o tre dimensioni, di atomi neutri intrappolati dei reticoli ottici usati per disegnare protocolli di computazione quantistica basati sui moti collettivi dei qu-bits

5) Rivelazione di un singolo qu-bit, basato su una singola carica all'interno delle multi-trappole di Penning od un singolo atomo neutro all'interno del reticolo ottico.

6) Studio della decoerenza e delle imperfezioni nell'hardware del calcolatore, e loro effetto sulla stabilità del calcolo quantistico.

7) Utilizzo dei reticoli ottici per la simulazione di sistemi complessi dissipativi

Criteria di verificabilità

I risultati parziali e finali del Progetto saranno oggetto di pubblicazione su riviste internazionali e di compilazione di rapporti interni sui protocolli sviluppati di calcolo quantistico.

Gli obiettivi sperimentali e teorici del Progetto, tutti originali rispetto al presente status della ricerca internazionale, sono:

1) *L'applicazione al calcolo ed alla informazione quantistica di una distribuzione lineare o superficiale di trappole di Penning planari, ciascuna confinante un solo elettrone o protone o ione. La trappola Penning sarà costruita attraverso tecniche di nanofabbricazione, basate sulla tecnologia di film sottili o spessi, tecnologia ormai ben stabilita e che permette una grande varietà di possibili configurazioni e dimensioni, che possono arrivare fino sotto il micron.*

2) *Realizzazione di dispositivi per l'intrappolamento di cariche multiple in trappole magnetiche di dimensioni micrometriche. Tale realizzazione si baserà su una tecnologia di nanofabbricazione sopra uno strato ceramico. L'utilizzo di tale strato ceramico per alloggiare multi-trappole Penning permetterà la formazione di una disposizione regolare, od anche irregolare, di particelle cariche confinate ed intrappolate.*

3) *La realizzazione di operazioni logiche quantistiche su una catena unidimensionale di atomi di rubidio nella condizione di isolante di Mott, dove ciascun atomo della catena rappresenta un qu-bit individuale. Il caricamento di un reticolo ottico da un condensato di Bose-Einstein permetterà di ottenere atomi nello stato fondamentale delle buche di potenziale individuali create dal reticolo ottico stesso. Attraverso la transizione di un condensato dalla condizione di superfluido a quella di isolante di Mott, accessibile controllando i parametri di operazione dell'esperimento, sarà possibile ottenere una situazione in cui ciascun sito del reticolo ottico sarà occupato da un singolo atomo.*

4) *Utilizzo della analogia fra la distribuzione, lineare o superficiale, di trappole di Penning e la distribuzione, ad una, due o tre dimensioni, di atomi neutri intrappolati dei reticoli ottici usati per disegnare protocolli di computazione quantistica basati sui moti collettivi dei qu-bits. Nel caso di operazioni quantistiche su un numero limitato di ioni intrappolati il moto collettivo è stato veicolo di informazione quantistica per trasferire l'eccitazione fra i diversi ioni, e quindi per generare quei protocolli di operazioni logiche necessarie al calcolo quantistico. Pertanto sarà investigato l'uso dei moti collettivi nelle multi-trappole di Penning come elemento di protocollo di computazione quantistica in tali sistemi.*

5) *Rivelazione di un singolo qu-bit, basato su una singola carica all'interno delle multi-trappole di Penning od un singolo atomo neutro all'interno del reticolo ottico. Per il primo caso i qu-bits associati agli spin dell'elettrone o del protone nelle singole trappole saranno rivelati individualmente attraverso l'applicazione di un piccolo gradiente di campo magnetico. Per i reticoli ottici la rivelazione di un singolo qu-bit rimane un problema di non semplice soluzione. Nel presente Progetto la rivelazione di un singolo qu-bit sarà realizzata attraverso la ionizzazione selettiva degli atomi basata su un processo di assorbimento a due fotoni laser e la rivelazione diretta degli ioni prodotti dall'insieme di atomi neutri.*

6) *Studio della decoerenza e delle imperfezioni nell'hardware del calcolatore, e loro effetto sulla stabilità del calcolo quantistico. Gli algoritmi quantistici per la simulazione di sistemi dinamici saranno usati come esemplificazione per lo studio di queste problematiche associate alla decoerenza ed alle imperfezioni. Gli algoritmi quantistici per la simulazione di sistemi dinamici permetteranno di investigare le scale di tempo fino alle quali il calcolo quantistico risulti affidabile una volta considerati effetti di decoerenza e imperfezioni. L'emergere di instabilità dinamiche nelle strutture spaziali di condensati di Bose-Einstein, legate alla transizione al caos nel limite classico, verrà studiata in dettaglio.*

7) *Utilizzo dei reticoli ottici per la simulazione di sistemi complessi dissipativi. I reticoli ottici appaiono quindi come uno strumento molto prezioso per generare modelli hamiltoniani per il moto di particelle in un potenziale periodico. Inoltre i reticoli ottici possono essere usati per studiare i meccanismi di rettificazione delle fluttuazioni e per generare modelli di moto browniano per particelle in un potenziale periodico. Troveremo le condizioni sperimentali che possano permettere l'osservazione dell'effetto ratchet con condensati di Bose-Einstein in reticoli ottici. Studieremo l'effetto della non linearità di Gross-Pitaevskii sul trasporto direzionale di condensati di Bose-Einstein. Investigheremo la stabilità dell'effetto ratchet quantistico in presenza di rumore termico o di altri tipi di rumore. Inoltre investigheremo come l'effetto ratchet possa essere anche utile per il trasporto direzionale di informazione quantistica all'interno di un reticolo, realizzando in questo caso una situazione, differente dall'usuale, in cui il rumore quantistico può risultare utile, anziché dannoso, all'elaborazione dell'informazione quantistica. Determineremo condizioni sperimentali adatte per l'osservazione della transizione dal collasso all'esplosione mediante condensati di Bose-Einstein in un reticolo ottico. Investigheremo la stabilità del condensato sotto l'effetto congiunto della dinamica caotica e della dissipazione.*

Risultati attesi entro il primo anno del progetto:

UNITA' Operativa di Camerino:

- 1) Determinare l'effetto del gradiente di campo magnetico nel caso in cui siano intrappolati sia elettroni, sia protoni, sia ioni considerando l'effetto della temperatura del bagno nei tre casi.
- 2) Studiare un reticolo bidimensionale di trappole di Penning planari in modo che ciascuna particella intrappolata sia singolarmente indirizzabile in frequenza.
- 3) Realizzazione di un prototipo di amplificatore a basso rumore funzionante alla temperatura di 1 K.

UNITA' Operativa di Como:

- 1) trovare regimi ottimali per il trasporto diretto in sistemi classicamente caotici in presenza di dissipazione, con applicazioni agli atomi freddi;
- 2) capire la transizione quantistico-classica, indotta da misure continue, in sistemi classicamente caotici;
- 3) capire come l'informazione quantistica e l'entanglement vengano diluiti in presenza di bagni di dimensione finita e di effetti di memoria.

UNITA' Operativa di Pisa:

- 1) realizzazione di un reticolo ottico unidimensionale con passo alcuni micron;
- 2) ionizzazione selettiva spazialmente di atomi nel reticolo;
- 3) osservazione sperimentale della transizione di Mott in una catena unidimensionale di atomi di rubidio.

Risultati attesi entro il secondo anno:

UNITA' Operativa di Camerino:

- 1) Costruzione, tramite la tecnologia MBE, di un dispositivo microscopico per la rilevazione di luce a bassa intensità ed alla frequenza desiderata.
- 2) Studio dell'effetto del riscaldamento degli elettrodi delle trappole, dovuto alle cariche immagine delle particelle intrappolate, e dell'effetto delle fluttuazioni dei campi statici utilizzati, per il controllo della coerenza quantistica
- 3) Prototipo di un amplificatore a basso rumore e a banda larga con dissipazione inferiore a 100 micro-W e funzionante alla temperatura di 100 mK.

UNITA' Operativa di Como:

- 1) trovare procedure opportune che sfruttino il rumore per il trasporto diretto di informazione quantistica e entanglement in catene di spin;
- 2) modellizzazione degli effetti di misure non-ideali in protocolli quantistici;
- 3) studio dell'effetto di un rumore non-Markoviano su protocolli di informazione quantistica.

UNITA' Operativa di Pisa:

- 1) sistemi di stabilizzazione spaziale e di fase del reticolo;
- 2) eccitazione selettiva spazialmente a stati di Rydberg dentro il reticolo;
- 3) verifica di operazioni quantistiche dentro il reticolo ottico.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi di PISA
Responsabile Scientifico	Ennio ARIMONDO
Finanziamento assegnato	Euro 57.610

Compito dell'Unità

Il progetto di ricerca dell'Unità operativa locale di Pisa ha il seguente obiettivo: realizzazione di operazioni logiche quantistiche su una geometria di reticoli ottici unidimensionali, paralleli fra loro, che contengono atomi di rubidio nella condizione di isolante di Mott. Il caricamento del reticolo ottico da un condensato di Bose-Einstein attraverso la transizione di fase all'isolante di Mott permetterà di ottenere un singolo atomo nello stato fondamentale di ciascuna buca del potenziale del reticolo ottico, quindi ciascun atomo della catena unidimensionale rappresenterà un qu-bit individuale. I qu-bits contenuti in catene unidimensionali parallele saranno utilizzati come ripetitori delle operazioni logiche quantistiche. Inoltre aumenteranno il segnale nella fase di rivelazione, poiché la misura sarà effettuata su un numero elevato di campioni tutti aventi le stesse caratteristiche e la stessa risposta alle operazioni logiche. Gli stati interni dell'atomo, che saranno utilizzati come i qu-bits nelle operazioni di calcolo quantistico possono essere preparati con grande precisione attraverso tecniche standard di spettroscopia laser e gli atomi dell'isolante di Mott sono intrappolati in due diversi stati, con i fasci laser del reticolo ottico che operano su ambedue gli stati. Utilizzando una configurazione con due fasci laser che si propagano ad un angolo di circa 10° fra loro si realizza un reticolo ottico con una spaziatura fra i minimi di circa 5 micron.

Le operazioni logiche sui singoli atomi saranno effettuate seguendo uno dei due seguenti schemi, recentemente proposti da gruppi teorici di ricerca sulla computazione quantistica. In un primo schema, la barriera fra due siti adiacenti viene abbassata utilizzando

un laser addizionale che si propaga ortogonalmente al reticolo ottico. In queste condizioni la dinamica atomica è determinata dalle collisioni fredde controllate fra i due atomi vicini. Gli atomi possiedono una struttura interna a due livelli preparata dai diversi modi ottici dei laser di controllo. Si realizza quindi un'evoluzione dinamica controllata in uno spazio di Hilbert a quattro dimensioni. In un secondo schema, la logica quantistica condizionata fra gli atomi che occupano due stati interni diversi viene prodotta eccitando atomi individuali della catena ad uno stato eccitato di Rydberg attraverso un processo di assorbimento a due fotoni, ed utilizzando le forti interazioni sugli atomi in tali stati atomici eccitati.

In ambedue i casi la realizzazione sperimentale si basa sulla larga separazione spaziale fra i siti reticolari, che permette la eccitazione di un singolo sito della catena attraverso laser addizionali focalizzati su un beam waist di circa 5 micron. L'operazione quantistica può essere effettuata su tutti gli atomi della catena, spostando progressivamente il reticolo ottico, come da noi già effettuato in precedenza in operazione di trasporto nel reticolo ottico.

La rivelazione quantistica di un singolo qu-bit sarà effettuata attraverso una ionizzazione spazialmente selettiva, utilizzando nuovamente la separazione di alcuni micron fra qu-bits contigui. Operazione di lettura sequenziale possono essere così realizzate. Le procedure di ionizzazione degli atomi di un condensato messe a punto negli esperimenti effettuati in precedenza saranno nuovamente utilizzate. Inoltre si farà uso della rivelazione diretta degli ioni prodotti, come previsto nel nuovo apparato di condensazione la cui operazione è prevista a tempo molto breve.

Per la computazione quantistica si richiederà anche la messa a punto di sistemi addizionali di stabilità spaziale per indirizzare un singolo qu-bit della catena dimensionale, e di sistemi per realizzare la stabilità di fase dei laser per conservare la fase quantistica della funzione d'onda atomica per tutto il tempo richiesto alla computazione quantistica.

Sede dell'Unità	Università degli Studi INSUBRIA Varese-Como
Responsabile Scientifico	Giulio CASATI
Finanziamento assegnato	Euro 34.895

Compito dell'Unità

Il progetto di ricerca dell'Unità operativa locale di Como ha i seguenti obiettivi:

1) Studio degli effetti della decoerenza e delle imperfezioni nell'hardware del calcolatore sulla stabilità del calcolo quantistico, ed inoltre dell'efficienza di codici di correzione degli errori caratterizzati da bassa ridondanza. Gli algoritmi quantistici per la simulazione di sistemi dinamici saranno usati come esemplificazione per lo studio di queste problematiche, ed ancora per investigare le scale di tempo fino alle quali il calcolo quantistico risulti affidabile una volta considerati effetti di decoerenza e imperfezioni. Inoltre investigheremo come i codici di correzione degli errori a bassa ridondanza possano migliorare la fidelity del calcolo quantistico. Poiché sopra ad una soglia per la transizione al caos (tale soglia decade in modo polinomiale con il numero di qubit) l'hardware del calcolatore entra nel regime di caos quantistico, nel quale una generica funzione d'onda caricata nel registro quantistico a molti qubit risulta instabile, e' un'importante problema come questo caos a molti corpi possa essere affrontato in modo efficiente mediante codici di correzione degli errori. Questi studi sul ruolo delle imperfezioni saranno applicati alle strutture confinate di cariche dove un ruolo importante sul risultato finale delle operazioni quantistiche è dovuto alle anarmonicità elettrostatiche, termini di ordine superiore nell'espansione del potenziale coulombiano, e ad una calibrazione imperfetta dei voltaggi applicati.

In tale sistema vogliamo

- i) studiare come il bordo per la transizione al caos scala con il numero di qubit;
- ii) trovare scale di tempo (numero di gates) per un calcolo quantistico affidabile.
- 2) Studio del trasporto direzionale di particelle browniane in un potenziale macroscopicamente piatto (effetto ratchet) come simulazione quantistica di sistemi complessi dissipativi attraverso i reticoli ottici. Mentre e' difficile studiare sperimentalmente i meccanismi dell'effetto ratchet in campioni a stato solido o in quelli biologici, i reticoli ottici sono strutture ideali per lo studio della dinamica non lineare in potenziali periodici, e permettono di generare e simulare sia modelli hamiltoniani per il moto di particelle in un potenziale periodico, che dinamiche non Hamiltoniane dissipative. Vogliamo
 - i) determinare le condizioni sperimentali (parametri sperimentali realistici, asimmetria reticolare e meccanismo di dissipazione appropriati) che possano permettere l'osservazione dell'effetto ratchet con condensati di Bose-Einstein in reticoli ottici;
 - ii) studiare l'effetto della non linearità di Gross-Pitaevskii sul trasporto direzionale di condensati di Bose-Einstein;
 - iii) investigare la stabilità dell'effetto ratchet quantistico in presenza di rumore termico o di altri tipi di rumore;
 - iv) paragonare le previsioni dei modelli ai risultati sperimentali ottenuti a Pisa.
- 3) Studio della dissipazione e transizione quantistico-classica come simulazione quantistica di sistemi complessi dissipativi attraverso i reticoli ottici. Si tratta di simulare la dinamica quantistica dei sistemi caotici Hamiltoniani che è caratterizzata da un'espansione esponenzialmente veloce del pacchetto d'onda quantistico. Risulta che nel caso di dissipazione forte, la funzione d'onda quantistica collassa nello spazio delle fasi su un pacchetto d'onda compatto che segue la dinamica caotica classica e la cui area è proporzionale alla costante di Planck efficace. Al contrario, nel caso di dissipazione debole l'instabilità esponenziale della dinamica quantistica hamiltoniana fino al tempo di Ehrenfest domina e porta all'esplosione del pacchetto d'onda. Vogliamo:
 - i) trovare condizioni sperimentali adatte per l'osservazione della transizione dal collasso all'esplosione mediante condensati di Bose-Einstein in un reticolo ottico;
 - ii) investigare la stabilità del condensato sotto l'effetto congiunto della dinamica caotica e della dissipazione.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di CAMERINO
Responsabile Scientifico	Paolo TOMBESI
Finanziamento assegnato	Euro 61.495

Compito dell'Unità

Il progetto di ricerca dell'Unità operativa locale di Camerino ha i seguenti obiettivi:

Sviluppo di un calcolatore quantistico di piccola scala in maniera che sia possibile scarlo ad un regime di calcolatore tollerante degli errori computazionali. Valutare la possibilità di costruire un processore quantistico universale basato su molteplici particelle cariche (elettroni od ioni) intrappolate nel vuoto in una configurazione lineare, e anche in una configurazione bidimensionale, di trappole planari di tipo Penning. Obiettivo è estendere il campo di operazione delle trappole di Penning alla informazione quantistica. Il sistema si basa su una configurazione di trappole di Penning ciascuna confinante un singolo elettrone oppure protone oppure ione. Saranno considerate trappole di Penning planari, caratterizzate da una geometria aperta. Gli elettrodi della trappola saranno depositati su un substrato ceramico attraverso tecnologie di deposizione di film sottili o spessi, che permettono la produzione di configurazioni e dimensioni differenti. Il meccanismo di intrappolamento si basa sulla applicazione di un campo magnetico ortogonale alla superficie del substrato, insieme con un potenziale quadrupolare elettrostatico. Una singola carica intrappolata è confinata ad una distanza variabile dalla superficie della trappola, con la distanza controllata variando il potenziale applicato agli elettrodi della trappola, composti da un disco centrale ed alcuni elettrodi circolari a potenziale variabile. Uno stesso substrato può contenere varie trappole in modo da creare una serie unidimensionale o bidimensionale. La realizzazione di questa trappola multipla permetterà di ottenere una configurazione equivalente e complementare ai reticoli ottici usati per intrappolare atomi neutri. Al fine di distinguere i qu-bits associati agli spin delle particelle cariche intrappolate, useremo un gradiente di campo magnetico. Il sistema così prodotto risulterà equivalente ad una molecola artificiale adatta ad un calcolo quantistico basato sulla RMN.

Oltre all'analisi teorica degli effetti del gradiente del campo magnetico, una parte importante della ricerca sarà dedicata alle possibilità di realizzare sperimentalmente il sistema progettato. I due gruppi sperimentali di basse temperature e di nanotecnologie cureranno questa parte della ricerca. Per creare una disposizione lineare o superficiale di trappole di Penning, una parte importante della sua realizzazione è la misura dei deboli segnali elettrici generati dall'accoppiamento capacitivo sugli elettrodi. Questo obiettivo sarà ottenuto procedendo su due direzioni, la prima basata sulla realizzazione di un amplificatore a basso rumore ed a larga banda, la seconda basata sulla realizzazione sperimentale di fotorivelatori microscopici, capaci di catturare la radiazione emessa dai siti della trappola dove gli ioni saranno intrappolati. Tale fotorivelatore sarà fabbricato attraverso tecniche di epitassia a fasci molecolari. Un altro possibile obiettivo sperimentale sarà lo sviluppo di un metodo differente di lettura dei qu-bits basato sulla carica a radiofrequenza indotta dalle particelle intrappolate sugli elettrodi della trappola.

I seguenti obiettivi teorici e sperimentali saranno esaminati in profondità:

- mostrare che la configurazione sperimentale proposta rappresenta un buon candidato per la tecnologia di un calcolatore quantistico scalabile, controllando che le risorse fisiche richieste per la scalabilità scalano linearmente con il numero dei qu-bits, e non esponenzialmente;*
 - raggiungere un elevato livello di controllo sul sistema, al fine di inizializzare un registro di qu-bits in uno stato predefinito per effettuare operazioni di calcolo quantistico;*
 - identificare una procedura per attivare un insieme di operazioni quantistiche logiche universali;*
 - identificare un metodo per misurare lo stato finale di ogni singolo qubit nel registro quantistico per determinare il risultato del calcolo.*
-