

Relazione sull'Attività di Ricerca Triennio 2007-2010

Maria Luisa Chiofalo

Facoltà di Farmacia, Dipartimento di Matematica e INFN, Università di Pisa

Link:

Pagina generale su Unimap d'Ateneo <http://unimap.unipi.it> → *chiofalo*

Homepage <http://www.dm.unipi.it/~chiofalo>

Portale dell'e-learning <https://www.dm.unipi.it/elearning>

1. Introduzione - Motivazioni

L'attività di ricerca del triennio 2007-2010 è essenzialmente stata dedicata a sviluppi e applicazioni di precedenti contributi scientifici nell'ambito della fisica di sistemi di molte particelle in condizioni di forte degenerazione quantistica.

La condensazione di Bose-Einstein e la superfluidità di vapori diluiti di atomi alcalini, con statistica sia fermionica che bosonica e intrappolati, è tuttora un campo di ricerca estremamente attivo e di frontiera, da quando nel 1995 i gruppi di Eric Cornell e Carl Wieman al JILA di Boulder (Co) e di Wolfgang Ketterle all'MIT sono riusciti a realizzare e osservare l'evidenza più netta dell'idea originale di Bose e Einstein, ottenendo il premio Nobel per la fisica 2001. Da allora altri quattro Nobel sono stati assegnati a fisici che si sono distinti in queste ricerche sia teoriche ma soprattutto sperimentali. Nei primi esperimenti, poche migliaia di atomi di Rb o Na vengono raffreddate a temperature al di sotto di decine di nanokelvin e si comportano come se costituissero un'unica macroscopica molecola con proprietà di coerenza quantistica.

Le condizioni ottenute in laboratorio sono di forte degenerazione quantistica, e possono essere realizzate agendo su tre parametri che governano i processi: la temperatura, la dimensionalità, e sia l'intensità che il raggio d'azione della forza di interazione tra gli atomi. Inoltre, è possibile lavorare con atomi che si comportano complessivamente secondo la statistica o fermionica o bosonica. Nel caso di atomi con statistica fermionica, come K e Li nei primi esperimenti al JILA (Boulder), all'ENS (Parigi), MIT (Boston), Duke e Rice University (USA), LENS (Firenze, prof. Inguscio), è stato possibile realizzare la transizione allo stato superfluido e studiare il crossover tra la transizione di tipo BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) e la transizione di tipo BEC (Bose-Einstein Condensation).

Negli esperimenti attuali vengono raggiunte temperature fino 450 pK anche con metodi completamente ottici, a differenza dei primi esperimenti in cui il raffreddamento risultava dalla combinazione di raffreddamento laser (per rallentare gli atomi nelle tre direzioni spaziali), intrappolamento con campi magnetici (per aumentare la densità senza pareti fisiche), e raffreddamento evaporativo eliminando gli atomi più caldi con transizioni determinate da campi a radiofrequenza (per ottenere in modo molto efficiente gli ultimi ordini di grandezza nello spazio delle fasi necessari per la degenerazione quantistica). D'altra parte i vapori atomici possono essere confinati in potenziali periodici, che sono reticoli ottici determinati da onde stazionarie di luce laser contropropagante, e possono essere intrappolati anche con metodi solo ottici in geometrie bi- e uni-dimensionali. Infine, l'intensità della forza di interazione tra gli atomi può essere variata mediante campi magnetici esterni attraverso il meccanismo della risonanza di Feshbach, ed è possibile anche ridurre in condizioni di degenerazione quantistica vapori atomici con elevati momenti di dipolo elettrico o magnetico e avere così disposizione forze di interazione di tipo dipolare a lungo raggio e asimmetriche. La possibilità di utilizzare atomi con statistica diversa offre poi un ulteriore vantaggio nel poter discernere gli effetti di correlazione da quelli di statistica.

Una caratteristica fondamentale di tali sistemi è in effetti l'elevata accuratezza e precisione con le quali possono essere manipolati e ingegnerizzati in laboratorio, e la conseguente precisione e accuratezza che viene richiesta alla teoria affinché sia compatibile con i risultati sperimentali. La versatilità e controllabilità hanno reso questi sistemi un laboratorio ideale per lo studio sperimentale e teorico di molti e diversi aspetti connessi con la fisica a molti corpi, l'ottica atomica quantistica, le applicazioni per la computazione quantistica e l'atomtronic, l'indagine di concetti di fisica fondamentale, quali la natura delle forze gravitazionali su piccole distanze.

I precedenti contributi allo studio di tali sistemi con metodi teorici e simulazionali sono stati oggetto di molte pubblicazioni su riviste ad alto fattore di impatto, risultando in più di 1440 citazioni di cui 424 nell'ultimo triennio (71 relative ai lavori pubblicati negli ultimi tre anni). Di particolare rilievo sono risultate le pubblicazioni nelle quali si è predetta e studiata la superfluidità fermionica risonante successivamente realizzata nei primi laboratori (JILA e MIT), e sulla dinamica di condensati di Bose-Einstein in potenziali periodici - reticoli ottici di fatto - unidimensionali (come da CV allegato).

I risultati del lavoro di ricerca sono nelle pubblicazioni [R1.1-R1.4,R2.5-R2.8] e sono stati anche oggetto di seminari su invito presso istituzioni scientifiche italiane e straniere e sono stati presentati come relazioni su invito o come contributi orali a conferenze nazionali e internazionali [C1-C9].

2. Descrizione dei contributi scientifici

Le applicazioni della fisica di questo tipo di sistemi possono essere suddivise essenzialmente in tre categorie secondo gli obiettivi ai quali mirano: comprensione della fisica di sistemi analoghi a molte particelle, tipici della materia condensata e dei solidi, che sono tuttavia di gran lunga meno controllabili in laboratorio; applicazioni tecnologiche legate alle proprietà di trasporto quantistico, in effetti si è introdotto il termine atomtronica in analogia con l'elettronica e la spintronica; e applicazioni alla fisica fondamentale e alle misure di precisione.

L'attività di ricerca del triennio si è in effetti diversificata nelle suddette linee tematiche. In particolare:

1. studi teorici e simulazionali di gas atomici ultrafreddi super-fortemente correlati in dimensioni ridotte: in particolare gas atomici con interazioni dipolari a lungo raggio in una dimensione [R1.1-R1.3], possibili applicazioni di tali studi per la possibile realizzazione di dispositivi di atomtronica [R1.4];
2. studi teorici, in stretto contatto con esperimenti attuali, su gas atomici ultrafreddi in condizioni di interazioni trascurabili, per applicazioni in misure di precisione della gravità, il controllo accurato di meccanismi di trasporto quantistico, e la comprensione di concetti di fisica fondamentale [R2.5-R2.8].

2.1 Teoria per la predizione del comportamento di gas atomici ultrafreddi super-fortemente correlati con interazioni a lungo raggio ed in dimensioni ridotte. Possibili applicazioni.

Motivazioni. Il requisito fondamentale nell'ingegnerizzazione di applicazioni tecnologiche innovative è la possibilità di raggiungere un'estrema degenerazione quantistica in condizioni controllate. In un esperimento fondamentale condotto nel gruppo di T. Pfau, è stata osservata la condensazione di Bose-Einstein in vapori di atomi di Cr che hanno un forte momento magnetico, e attualmente diversi esperimenti sono orientati a produrre vapori ultrafreddi o addirittura superfluidi di molecole con un forte momento di dipolo elettrico, come per esempio SrO, o ancora a realizzare i cosiddetti atomi di Rydberg. E' evidente l'interesse di tali sistemi: si tratta di ottenere in laboratorio condizioni in cui non solo la temperatura è prossima allo zero assoluto, l'intensità delle forze interatomiche può essere variata con l'uso di risonanze di Fano-Feshbach, ma è anche possibile introdurre forze a lungo raggio di tipo dipolare.

Il possibile utilizzo di tali sistemi per le applicazioni è stato oggetto di studio e proposta teorica da parte di diversi autori, tra i quali L. Santos, S. Giovanazzi, G. Shlyapnikov. In particolare nel caso di gas dipolari ridotti efficacemente in una dimensione, Rabl e Zoller hanno previsto la possibilità di realizzare una memoria quantistica. Lozovik *et al.* avevano predetto che un gas di bosoni in una dimensione evolve da un liquido di Tonks-Girardeau a bassa densità ad un sistema quasi-solido ad alta densità, mediante l'uso di tecniche numeriche. Una comprensione teorica di questo fenomeno, in grado poi di fornire predizioni quantitative ed espressioni analitiche come guida per gli esperimenti in corso, era tuttavia mancante.

Contributi. In lavori precedenti al triennio in esame, si è dimostrato per la prima volta che un gas quantistico di atomi bosonici ultrafreddi in presenza di interazioni dipolari e ridotti in una geometria unidimensionale si trova in condizioni di interazione super-forte, più fortemente correlato di un liquido di Tonks-Girardeau. Utilizzando una combinazione di metodi teorici di bosonizzazione e di metodi simulativi di Reptation Quantum Monte Carlo (RQMC), si è potuto dimostrare che la teoria del liquido di Luttinger descrive il sistema in tutto il corso della sua evoluzione dal un liquido di Tonks-Girardeau ad un sistema quasi-ordinato analogo ad un Charge-Density-Wave, in cui gli atomi si dispongono in una struttura apparentemente cristallina. E' stato suggerito che tale sistema e la sua evoluzione dal liquido al sistema quasi-ordinato più fortemente correlato, possono essere osservati in esperimenti in via di realizzazione con molecole polari. Sono state fornite predizioni anche analitiche per quantità osservabili quali la distribuzione degli impulsi o il fattore di struttura statico, che possono essere verificate e costituire una guida utile in esperimenti in via di realizzazione.

Nel triennio in esame si è quindi sviluppata una teoria idrodinamica di Luttinger capace di predire il comportamento del gas dipolare in condizioni sperimentali in cui l'inomogeneità del sistema, dovuta ai tipici confinamenti armonici, non sia trascurabile. Il metodo utilizzato è quello del funzionale di densità: l'energia e la sua derivata prima sono state dapprima determinate con metodo simulazionale Quantum Monte Carlo (QMC), e dunque utilizzati in approssimazione di densità locale per predire le frequenze di oscillazione dei modi di trappola in funzione del parametro che governa il regime di interazione. La tecnica QMC utilizzata è una variante del Path Integral QMC a temperatura

zero, ovvero il Reptation Quantum Monte Carlo, che ha consentito di determinare anche la derivata dell'energia. Le soluzioni ottenute sono in perfetto accordo con quelle derivate indipendentemente attraverso l'uso delle regole di somma. Le soluzioni sono in parte semi-analitiche, specialmente utili per il confronto con i dati sperimentali [R1.1].

Due aspetti di interesse prevalentemente teorico sono stati dunque affrontati, conducendo ad una accurata comprensione del comportamento delle eccitazioni nel sistema omogeneo con le tecniche RQMC. L'RQMC consente di determinare le funzioni di correlazione in tempo immaginario e dunque di ottenere, in approssimazione di poli multipli, il fattore di struttura dinamico. In particolare si determina in modo rigoroso: l'assenza di un minimo rotonico in corrispondenza della prima zona di Brillouin e dunque di superfluidità nel senso di Landau, e l'assenza di un vero ordine a lungo raggio. All'aumentare della densità, mentre il sistema evolve - per quanto appreso nei lavori precedenti - verso uno stato quasi-ordinato, delle gap si possono aprire in corrispondenza della seconda zona di Brillouin e oltre. Queste conclusioni sono un'ulteriore prova del fatto che il sistema è in uno stato di liquido di Luttinger e che lo spettro di eccitazione di Feynman, che si potrebbe ottenere cioè dal fattore di struttura statico e dall'energia di eccitazione di quasi-particella, fornisce nella maggior parte dei casi una descrizione inaccurata. In particolare risultano dunque significativi gli effetti dinamici [R1.2].

Il problema di quali siano osservabili da misurare per mettere alla prova la teoria è stato passato in rassegna in [R1.3]. Inclusa una nuova proprietà che viene messa qui in luce, conseguenza del fatto che il gas dipolare unidimensionale si trova sempre in una condizione di correlazione super-forte: il parametro K di Luttinger è sempre $K < 1$ al variare della densità dal regime di Tonks-Girardeau allo stato quasi-ordinato. In queste condizioni, si può dimostrare che una barriera contro la quale un fascio atomico dipolare 1D gas venisse spinto, sarebbe sempre opaca. Tale proprietà può essere utile per applicazioni di atomtronica.

La visione complessiva della conoscenza ottenuta sino a questo punto, insieme a dettagli sulla teoria idrodinamica del Liquido di Luttinger sono contenuti in un lavoro di rassegna su invito in un numero speciale del New Journal of Physics [R1.4].

2.2 Misure di precisione e Verifica del Principio di Equivalenza con stati quantistici.

Motivazioni. L'accurato controllo sperimentale e la possibilità di rendere - questa volta - trascurabili le interazioni tra gli atomi (utilizzando opportune transizioni atomiche oppure ricorrendo alle risonanze di Fano-Feshbach), accrescono l'interesse di studi teorici e sperimentali sui vapori atomici ultrafreddi finalizzati ad esplorare concetti di fisica fondamentale, il controllo accurato di processi di trasporto quantistico, misure di gravità con oggetti quantistici, e applicazioni di metrologia.

Il controllo accurato dei meccanismi di trasporto quantistico è a sua volta di grande importanza per applicazioni nell'ingegnerizzazione di dispositivi miniaturizzati basati sull'atomtronica.

Le misure di gravità d'altra parte, oltre ad avere possibili applicazioni tecnologiche (come sistemi GPS e strumenti per studi e verifiche geologiche), possono essere utilizzate per verifiche di Relatività Generale, a partire dal Principio di Equivalenza. L'aspetto estremamente significativo qui è che test del Principio di Equivalenza vengono effettuati con oggetti non macroscopici, in particolare con stati che si comportano in modo puramente quantistico. Tali studi sono di grande importanza per stabilire una più profonda comprensione della relazione tra gravitazione e meccanica quantistica, uno dei grandi problemi ancora aperti nella fisica contemporanea.

Tutta questa fisica diventa particolarmente interessante se si confinano i vapori atomici in reticoli ottici, che sono potenziali periodici ottenuti con onde di luce stazionarie. In queste condizioni, le possibilità di ingegnerizzare e manipolare il sistema in modo controllato aumentano notevolmente, e molti modelli della fisica dello stato solido, fino a questo momento più che altro astratti, diventano realizzabili in laboratorio.

Contributi. In questo ambito, si è proposto di utilizzare le proprietà dinamiche di condensati di Bose-Einstein di atomi alcalini in reticoli ottici come schema sperimentale per la realizzazione di misure di precisione di forze esterne, quali quella gravitazionale. All'interno del complessivo progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (di cui sono responsabile per il modulo WP4250 "Aspetti teorici di gravità quantistica con atomi ultrafreddi nello spazio"), è in corso una collaborazione con il gruppo del professor Tino del LENS di Firenze, che conduce esperimenti di frontiera per la misura della costante di gravitazione universale G , per la realizzazione di orologi atomici e la verifica della legge di Newton a piccole distanze. Si è in particolare proposto e studiato sperimentalmente e teoricamente uno schema per la misura dell'accelerazione di gravità con atomi ultrafreddi bosonici di Sr , migliorando di oltre un ordine di grandezza l'accuratezza della misura di g . A questo scopo sono state utilizzate per la prima volta transizioni intrabanda coerenti di Wannier-Stark di atomi di ^{88}Sr in un reticolo ottico disposto verticalmente in direzione della gravità, ottenute sottoponendo il reticolo ad una modulazione di fase. Un vantaggio nell'uso di atomi di ^{88}Sr è di poterli intrappolare in uno stato in cui le interazioni atomiche sono trascurabili. Il pacchetto di atomi nel reticolo

sotto l'azione della gravità esegue le cosiddette oscillazioni di Bloch di frequenza dmg/h con d passo reticolare e h la costante di Planck. In assenza di modulazione, la rottura di simmetria traslazionale determinata dalla gravità spezza la banda di energia del reticolo nelle risonanze di Wannier-Stark separate in frequenza da multipli interi della frequenza di Bloch: il tunneling tra siti adiacenti è soppresso e il pacchetto atomico si localizza. La modulazione di fase del reticolo, a frequenze risonanti con i multipli interi della frequenza di Bloch, riaccende il tunneling tra siti che sono distanti in energia proprio $nmgd$ e dunque tra un numero di siti adiacenti pari al multiplo della frequenza di Bloch di cui si modula. Con questa tecnica sono state osservate risonanze fino alla quarta armonica. Tali risonanze corrispondono ad uno stato coerente, prova ne è il fatto che la loro larghezza è al di sotto del limite di Fourier. Ne segue dunque una delocalizzazione *coerente* del pacchetto di atomi, su una regione che può diventare estesa fino a 50 volte la dimensione del pacchetto prima della modulazione (da circa 200 nm a circa 10 μm) in corrispondenza della risonanza di ordine più elevato che viene osservata. Nelle condizioni dette di reticolo senza e con modulazione, diventa dunque possibile operare reversibilmente e con precisione uno switch tra uno stato Wannier-Stark localizzato e uno stato delocalizzato su molti siti attraverso un meccanismo di tunneling coerente. Le conseguenze di applicazione di tale concetto sono notevoli. Innanzitutto, questa è un'operazione di base per un accurato controllo del trasporto quantistico di pacchetti atomici in reticoli ottici e relative ingegnerizzazioni di dispositivi quantistici per l'atomtronica. Inoltre, si ha che il fattore di qualità della riga di risonanza aumenta di un fattore pari all'indice della risonanza (al multiplo della frequenza di Bloch) o, alternativamente, il periodo di Bloch diventa effettivamente più breve dello stesso fattore. E questo ha consentito nell'esperimento di migliorare di quasi un ordine di grandezza, arrivando fino a 2 ppm, la precisione nella misura di g [R2.5].

La comprensione teorica del fenomeno diventa piena se si considera anche la possibilità di modulare il reticolo anche in ampiezza, oltre che in fase. In entrambi i casi è chiaro il quadro in spazio reale e la conseguente delocalizzazione dinamica coerente del pacchetto. Nello spazio degli impulsi, si può dimostrare come il pacchetto atomico nel reticolo dinamicamente modulato si comporta come se fosse un pacchetto atomico in un reticolo statico con una banda di energia sinusoidale di cui possiamo ingegnerizzare e controllare a piacimento la larghezza, la periodicità e la fase. La periodicità della banda è ridotta di un fattore pari al multiplo della frequenza di modulazione, la fase è controllata dalla tempistica di accensione della modulazione, e la larghezza della banda è determinata dal rate di tunneling. Risulta che nel caso di modulazione di ampiezza, si ha il vantaggio che la larghezza di banda può essere variata in modo lineare in funzione dell'ampiezza della modulazione. Tutto questo conduce a significative applicazioni. Innanzitutto si è dimostrata la possibilità di invertire in modo controllato la velocità di gruppo di un pacchetto atomico nel reticolo, implementando uno schema di tipo echo (echo di Loschmidt). In questo schema, viene applicata al reticolo una sequenza in cui due identiche operazioni di modulazione vengono accese per qualche centinaio di periodi di Bloch, determinando delocalizzazione coerente del pacchetto, e separate da un intervallo variabile di tempo, durante il quale il tunneling è soppresso e si instaurano le oscillazioni di Bloch. Scelte diverse dell'intervallo di tempo che separa le due accensioni determinano effetti diversi. Lo schema può essere utilizzato per fare spettroscopia di sistemi fortemente correlati, studiare fenomeni di decoerenza e condizioni di alta fedeltà per sistemi quantistici, e naturalmente anche per applicazioni di trasporto. Per esempio, nell'esperimento è stato realizzato uno specchio per atomi fissando l'intervallo di spegnimento a metà del periodo di Bloch. Nelle condizioni possibili in questo sistema, lo specchio ha caratteristiche di elevata coerenza, poiché il quasi-momento e dunque la velocità di tutti gli atomi nella zona di Brillouin viene ribaltata contemporaneamente. Per quanto riguarda le misure di precisione e ad esempio misure di gravità, si ottiene una precisione simile al caso di modulazione di fase. Il vantaggio qui è di avere condizioni geometricamente favorevoli per effettuare la modulazione di un reticolo prossimo ad una superficie, e dunque effettuare misure della forza di gravità su distanze micrometriche, e relative verifiche come per esempio (ma non solo) l'effetto di Casimir-Polder [R2.6].

Uno schema differente per incrementare il rapporto segnale/rumore (SNR) in misure di gravità locale con atomi in reticoli ottici verticali è stato proposto e studiato in collaborazione con il gruppo teorico del professor Holland al JILA di Boulder, anche grazie a interessanti discussioni con il professor Jun Ye per gli aspetti sperimentali. L'idea di fondo è rivelare la dinamica degli atomi, determinata da forze esterne che si vogliono eventualmente misurare, attraverso la dinamica dei fotoni. A questo scopo, la proposta è di realizzare uno schema di cavità QED (Quantum ElectroDynamics) alla quale gli atomi sono accoppiati attraverso il potenziale di dipolo ottico. In particolare si propone una cavità ad anello, in cui i modi di due onde viaggianti e contropropaganti di luce laser interagiscono con un gas di atomi ultrafreddi. Si instaurano allo stesso tempo un campo conservativo che ha la funzione di potenziale periodico sul quale gli atomi si muovono, e un campo molto più debole che ha la funzione di provare la dinamica atomica. Il campo di prova è quello che esce dalla cavità e che viene rivelato: la dinamica dei fotoni è sottomessa e, sotto certe condizioni è anche completamente determinata, dalla dinamica degli atomi, con evidenti vantaggi attesi nella precisione delle misure. In particolare, nella proposta si prevede di utilizzare uno schema a eterodina, per migliorare ulteriormente il SNR. I vantaggi di questo schema sono evidenti: innanzitutto il metodo si sviluppa *in situ*

e, considerata la debole interazione con il campo di prova, la misura diviene altamente non distruttiva, avviene cioè senza alterare in modo significativo la dinamica atomica; il campo di prova esiste già nel sistema, è parte del setup necessario per avere il reticolo ottico, e dunque non sono necessari altri campi esterni che perturbino il sistema per effettuare la misura; e infine il SNR rimane sufficientemente alto. I limiti dello schema, almeno nella sua versione più semplice e immediatamente adatta a guidare l'esperimento, sono dati dalla necessità di mantenere trascurabili gli effetti che la dinamica atomica può avere sui entrambi i campi, quello di reticolo e quello di prova. I parametri che governano il processo, l'altezza del reticolo, la forza di accoppiamento luce-atomi, il numero di atomi, e la larghezza di riga della cavità devono soddisfare specifiche e note condizioni rispetto ai parametri della forza esterna che determina la dinamica atomica. Lo schema è stato applicato alla simulazione della misura delle oscillazioni Bloch di atomi in un reticolo verticale, dimostrando la possibilità di realizzare un SNR significativamente elevato, 10^4 . In queste condizioni, lo schema può essere utilizzato per misure di gravità. Altre applicazioni interessanti sono nel campo della spettroscopia, adattando lo schema di misura alla presenza di potenziali esterni variabili nel tempo o alla possibilità di modulare il reticolo in fase o ampiezza. Inoltre, è possibile estendere il metodo alla misura di funzioni di correlazione dei fotoni di ordine superiore al primo, ottenendo dunque maggiori informazioni sulla dinamica atomica in cavità [R2.7].

E' evidente che il campo di ricerca che lega gli atomi ultrafreddi a misure di precisione e test di fisica fondamentale continua ad essere molto attuale. Le conoscenze acquisite dalla comunità scientifica in questi anni iniziano a convergere in grandi progetti comuni, sia in Europa che negli Stati Uniti, dove tutte le competenze e i saperi teorici e sperimentali possano essere integrati. La creazione di reti in questo campo è fondamentale per fare l'ultimo salto di qualità, in buona parte possibile qualora esperimenti e teorie venissero portati nello spazio. Questo richiede, oltre alle conoscenze acquisite dalla comunità, anche un notevole livello di risorse. In questo senso si è costituita la rete Matter Wave Explorer of Gravity, che ha più di recente formulato un'articolata proposta per portare nello spazio da qui a dieci anni un interferometro atomico di precisione [R2.8].

3. Prospettive.

Nella linea di ricerca 2.1 si prevede completare lo sviluppo di applicazioni dei concetti acquisiti, anche in vista di studi sperimentali che possono realizzare sistemi dipolari effettivamente unidimensionali. Nella linea di ricerca 2.2, è attualmente in corso uno studio teorico per sviluppare una proposta di realizzazione di superfluidità ad alta temperatura in cavità. Inoltre, si prevede di proseguire gli studi in [R2.7] secondo quanto delineato, cioè implementazione del metodo per indagini spettroscopiche di sistemi fortemente correlati, anche con l'estensione a funzioni di correlazione di ordine più elevato. E' attualmente in fase di studio in collaborazione con il LENS (prof. Tino) l'implementazione sperimentale della tecnica di misura in cavità QED per misure di gravità, da accoppiare con le tecniche di modulazione in fase e ampiezza già acquisite. Più in generale, si prevede di continuare nello sviluppo di proposte per la realizzazione di verifiche di concetti di fisica fondamentale. Infine, si intende estendere lo studio della superfluidità fermionica risonante con tecniche QMC, in collaborazione con la dott.ssa De Palo, al caso di risonanze strette rispetto al valore dell'energia di Fermi. I risultati di tali studi sarebbero rilevanti per la verifica e lo sviluppo delle diverse teorie esistenti che spiegano il meccanismo della superfluidità in relazione al crossover BCS-BEC.

4. Progetti

- E' responsabile di WP4250 "Aspetti teorici di gravità quantistica con atomi ultrafreddi nello spazio" all'interno di WP4200 "Studi preparatori all'uso di atomi freddi nello spazio" e nell'ambito della più ampia proposta WP4000 "Fisica fondamentale dallo spazio" finanziata da ASI per il triennio 2007-2010.
- Ha partecipato alla formulazione della proposta Matter Wave Explorer of Gravity-MWXG, presentata all'Agenzia Spaziale Europea.

5. Collaborazioni internazionali

- E' stata invitata presso il CNRS di Grenoble (Professors Roberta Citro and Anna Minguzzi) nel Luglio 2008 per un periodo di collaborazione scientifica.
- E' stata ammessa per partecipare al workshop "Frontiers in Quantum Gases" (Pechino) nell'Ottobre 2008.
- E' stata invitata presso il JILA- Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder (Co, USA) (Professor Murray Holland), per un periodo di collaborazione scientifica per due settimane nel Febbraio (11-25) 2009 e per tre settimane nell'Agosto 2009.
- E' stata invitata presso la Harvard University (Professor Eugene Demler) (27-28 Agosto 2009), per sviluppare un progetto di divulgazione scientifica a partire da "Piacere, Scienza!" (di cui alla Relazione sull'Attività di Divulgazione Scientifica).

Bibliografia. Articoli su riviste internazionali peer-reviewed

- [R1.1] P. Pedri, S. De Palo, E. Orignac, R. Citro, and M. L. Chiofalo, Collective excitations of trapped one-dimensional dipolar quantum gases, *Phys. Rev. A* **77**, 015601 (2008).
- [R1.2] S. De Palo, E. Orignac, R. Citro, and M. L. Chiofalo, Low-energy excitation spectrum of one-dimensional dipolar quantum gases, *Phys. Rev. B* **77**, 212101 (2008).
- [R1.3] R. Citro, S. De Palo, E. Orignac, P. Pedri, and M. L. Chiofalo, Probing 1D super-strongly correlated dipolar quantum gases, *Laser Physics* **4**, **19**, 554 (2009).
- [R1.4] R. Citro, S. De Palo, E. Orignac, P. Pedri, and M. L. Chiofalo, Luttinger hydrodynamics of confined one-dimensional Bose gases with dipolar interactions, *New J. Phys.* **10**, 045011 (2008). *Nota: Articolo su invito in un numero speciale del NJP dedicato a questo tema.*
- [R2.5] V. V. Ivanov, A. Alberti, M. Schioppo, G. Ferrari, M. Artoni, M. L. Chiofalo, and G. M. Tino, Coherent Delocalization of Atomic Wave Packets in Driven Lattice Potentials, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 043602 (2008).
- [R2.6] A. Alberti, G. Ferrari, V. V. Ivanov, M. L. Chiofalo, and G. M. Tino, Atomic wave packets in amplitude-modulated vertical optical lattices *New J. Phys.* **12**, 065037 (2010).
- [R2.7] B. M. Peden, D. Meiser, M. L. Chiofalo, and M. J. Holland, Nondestructive cavity QED probe of Bloch oscillations in a gas of ultracold atoms, *Phys. Rev. A* **80**, 043803 (2009).
- [R2.8] W. Ertmer *et al.* (MWXG collaboration), Matter wave explorer of gravity (MWXG), *Experimental Astronomy: An International Journal on Astronomical Instrumentation and Data Analysis*, **23**, pp 611-650 (2009).

Bibliografia. Conferenze, Workshop e Seminari su invito

- [C1] R. Citro, E. Orignac, S. De Palo, and M. L. Chiofalo On the observability of Luttinger liquid behavior in one-dimensional dipolar quantum gases Bose-Einstein Condensation 2007 -Frontiers in Quantum Gases Sant Feliu de Guixols (Costa Brava), Spain, 15 - 20 Settembre 2007 (Poster); *ibid.* Summer School on Non-equilibrium phenomena and novel phase transitions in quantum gases, ICTP, Trieste, 27 Agosto -5 Settembre (2007) (Lezione su invito).
- [C2] S. De Palo, R. Citro, E. Orignac, P. Pedri, M.L. Chiofalo Applications of confined 1D ultracold Bose gases with dipolar interactions MASCOT08 Roma, 23-25 Ottobre 2008 (Seminario su invito, speaker).
- [C3] R. Citro, S. De Palo, E. Orignac, P. Pedri, and M. L. Chiofalo, Probing 1D super-strongly correlated dipolar quantum gases, Perspectives of ultracold quantum gases or BEC to the future LPHYS08, Trondheim (Norway), 30 Giugno-4Luglio 2008 (Invited talk).
- [C4] B. Peden, D. Meiser, M. Chiofalo, and M. Holland Bloch oscillations as a probe of the local gravitational field during optical lattice clock operation American Physical Society, 39th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics, 27-31 Maggio 2008, Volume 53, Number 7, State College, Pennsylvania abstract OPJ.50 (Contributo orale).
- [C5] S. De Palo, E. Orignac, R. Citro, and M. L. Chiofalo Low-energy excitation spectrum of one-dimensional dipolar quantum gases International Conference on Frontier of Degenerate Quantum Gases Sponsored by Center for Advanced Study and Department of Physics of Tsinghua University, Beijing, 20-24 Ottobre 2008 (Poster).
- [C6] R. Citro, M. L. Chiofalo, S. de Palo, P. Pedri, E. Orignac, Low-dimensional dipolar gases, BEC08 Quantum coherence and mesoscopic physics in quantum gases, Grenoble (Fr)3-7 Giugno 2008 (Seminario su invito).
- [C7] A. Alberti, G. Ferrari, V. V. Ivanov, M. L. Chiofalo, G. Tino, Cold Sr Atoms in Optical Lattices for Precision Measurements Ultracold Group II Atoms 2009 Workshop Program, University of Maryland JQI 17-19 Settembre 2009 (Seminario su invito).
- [C8] R. Citro, S. De Palo, E. Orignac, P. Pedri, M. L. Chiofalo, Luttinger hydrodynamics of confined one-dimensional Bose gases with dipolar interactions, JILA and University of Colorado at Boulder (Boulder, Co, USA), Agosto 2009 (Seminario su invito, speaker).
- [C9] B. M. Peden, D. Meiser, M. L. Chiofalo, and M. J. Holland Non-destructive cavity QED probe of Bloch oscillations in a gas of ultracold atoms (Seminario su invito, speaker), LENS, Firenze (Italy), 12 Febbraio 2010.