

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005027517

Coordinatore Scientifico	Sandro STRINGARI
Ateneo	Università degli Studi di TRENTO
Titolo della Ricerca	Gas di Fermi ultrafreddi e reticoli ottici
Finanziamento assegnato	Euro 178.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Lo studio dei gas di Fermi ultrafreddi è uno dei campi di ricerca in fisica più caldi. Una delle ragioni è che l'accoppiamento di fermioni è un problema molto importante nella fisica della materia condensata, dal momento che esso è alla base della superconduttività e della superfluidità fermionica. Per questo motivo, domande del tipo "Qual è la natura delle coppie fermioniche?" oppure "E' il sistema superfluido (o superconduttore)?" sono estremamente importanti in diverse area della fisica. La ricerca di risposte chiare non è un compito facile se il sistema sotto studio ha una struttura complessa e/o è composto da particelle fortemente correlate, come ad esempio nel caso di superconduttori ad alta temperatura critica. In questo senso, la possibilità di studiare gas di Fermi di nuovo tipo, in cui l'interazione è accordabile, non ci sono difetti, i potenziali di confinamento sono aggiustabili, e con la possibilità di creare anche miscele con gas di Bose superfluidi, è un risultato notevole della ricerca recente nel campo degli atomi freddi. Risultati rimarchevoli sono stati ottenuti nell'ultimo anno in molti laboratori: con litio-6 a Parigi, alla Duke University, alla Rice University, al MIT e a Innsbruck, e con potassio-40 a Boulder, Firenze e Zurigo.

Lo scopo del progetto è di combinare gli sforzi dei tre gruppi di Trento, Firenze e Camerino, che sono attualmente i gruppi più attivi in Italia nel campo dei gas di Fermi di atomi ultrafreddi. Ci si aspetta che la loro stretta collaborazione produca un significativo avanzamento nell'osservazione sperimentale e nella comprensione teorica delle proprietà di questi sistemi. Un aspetto importante, che rende questo progetto davvero unico ed innovativo, è l'uso di reticoli ottici, sia come strumento per lo studio dei gas di Fermi che come ingrediente chiave per riprodurre fenomeni della fisica della materia condensata. L'esperienza dei gruppi di Firenze e Trento nella fisica di gas di Bose e di Fermi, e di miscele Fermi-Bose, in reticoli ottici, costituisce una solida base per questa ricerca. Ci si aspetta che i fermioni nei reticoli ottici mostrino una ricca varietà di fenomeni, incluse possibili nuove fasi quantistiche. In questa prospettiva, il background teorico dei gruppi di Trento e Camerino offre un supporto appropriato all'attività sperimentale di Firenze.

Nel contesto di questo progetto si affronteranno vari temi. Questi includono: crossover BCS-BEC per gas di Fermi in trappole ed in reticoli ottici, miscele Fermi-Bose in reticoli ottici e miscele Fermi-Fermi, formazione di molecole, sistemi disordinati, applicazione dei fermioni nei reticoli all'interferometria ed al calcolo quantistico, sistemi con dimensionalità ridotta.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Principali argomenti di ricerca

** BCS-BEC crossover in gas di Fermi in trappole ed in reticoli ottici.*

Questo è uno degli campi attualmente più attivi della ricerca sui gas atomici freddi, in quanto i gas di Fermi atomici ultrafreddi offrono possibilità uniche di esplorare il BCS-BEC crossover. L'enorme tunabilità dell'interazione efficace fra fermioni e l'assenza di complicazioni estrinseche (che sarebbero inevitabili in sistemi a stato solido tipo superconduttori ad alta temperatura critica) rendono questi sistemi candidati ideali per testare i diversi approcci teorici al BCS-BEC crossover. I progressi nella comprensione di base che possono risultare dallo studio del BCS-BEC crossover in gas di Fermi ultrafreddi potrebbe avere conseguenze anche per altri sistemi in cui si pensa che questo crossover possa aver luogo. Il nostro piano è di studiare questo problema da vari punti di vista usando i diversi e complementari strumenti teorici e sperimentali che sono stati sviluppati presso le diverse Unità. L'obiettivo centrale è una caratterizzazione completa delle proprietà di superfluidità di questi sistemi. I punti in cui questo si estrinseca comprendono lo studio dei vortici, delle eccitazioni collettive, e del pairing gap per gas di Fermi intrappolati, e pure della transizione di fase e della dinamica superfluida dei gas di Fermi nei reticoli ottici.

** Miscela Bosone/Fermione e Fermione/Fermione in reticoli ottici*

I gas atomici ultrafreddi offrono l'ulteriore possibilità di esplorare la fisica delle miscele di bosoni e fermioni, e delle miscele di fermioni di massa diversa. Queste sono particolarmente importanti nel contesto di questo progetto per varie ragioni: i) miscele ultra fredde di bosoni e fermioni permettono di studiare il fenomeno generale della superfluidità fermionica indotta dalla presenza dei bosoni, rimasta finora inesplorata nel contesto dei sistemi di atomi ultrafreddi, ma che è alla base della superconduttività ordinaria; ii) è stato predetto che le miscele di bosoni e fermioni nei reticoli presentano nuove fasi quantistiche, alcune delle quali non hanno neppure analogo in sistemi di materia condensata; iii) le miscele di fermioni di specie diverse permettono di verificare le teorie generali della superconduttività in presenza di squilibri fra le superfici di Fermi delle due componenti. Abbiamo in programma di

compiere ricerche sia teoriche che sperimentali lungo tutte queste linee, in modo da ottenere una migliore comprensione del fenomeno generale della superconduttività e della superfluidità fermioniche.

** Formazione di molecole.*

Esperimenti recenti hanno mostrato la possibilità di formare molecole ultrafredde in stato di degenerazione quantistica a partire da gas atomici ultrafreddi di bosoni o fermioni in prossimità di risonanze di Fano-Feshbach. Lo studio della formazione delle molecole è uno degli argomenti principali di questo progetto sui gas di Fermi per vari motivi: i) molecole debolmente legate rappresentano uno degli estremi del BCS-BEC crossover, e le molecole sono intimamente legate a tutta la fisica del crossover; ii) la formazione di molecole fermioniche eteronucleari (che presentano un dipolo statico) è in principio possibile in miscele atomiche di bosoni e fermioni. Procederemo dunque allo studio della formazione di molecole dal punto di vista sia teorico che sperimentale, e in particolare in relazione con i reticoli ottici che dovrebbero modificare profondamente sia la dinamica di formazione che la vita media delle molecole.

** Applicazioni dei fermioni nei reticoli all'interferometria e al calcolo quantistico*

In aggiunta alle varie questioni di natura fondamentale, questo progetto comprende anche un'importante linea di ricerca di tipo più applicativo. L'estrema regolarità del potenziale periodico di un reticolo ottico, combinata con la statistica di Fermi, offre infatti nuove possibilità per specifiche applicazioni come l'interferometria atomica e il calcolo quantistico. Da un lato, studieremo come l'interferenza di fermioni non interagenti nei reticoli possa essere utilizzata per misure precise di forze ad elevata risoluzione spaziale, sfruttando l'assenza dei meccanismi di decoerenza provocati dalle interazioni. Questi sensori di forza a base di fermioni potrebbero per esempio essere impiegati per effettuare studi di natura fondamentale delle forze in prossimità di superfici. Dall'altro lato, i fermioni nei reticoli permettono pure di realizzare cristalli di atomi in pratica esenti da difetti, tali cioè da poter essere usati come registro quantistico per applicazioni di calcolo quantistico. Anche questa linea di ricerca giustifica un'indagine più approfondita sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

** Sistemi disordinati.*

Il disordine è alla base di fondamentali effetti che sono osservati in un gran numero di sistemi fisici diversi, dalla localizzazione di Anderson, ai Bose e Fermi glass, ai vetri di spin. Ci aspettiamo pure che il disordine giochi un ruolo importante nella fenomenologia del BCS-BEC crossover in sistemi a materia condensata. Per questo motivo, abbiamo in programma di occuparci di questo argomento di grande interesse, che finora è rimasto inesplorato nel contesto dei sistemi atomici ultrafreddi. Questo, con l'ausilio dei potenziali ottici disordinati attualmente disponibili, i quali possono essere facilmente modificati e combinati con reticoli ottici. Effettueremo ricerche sperimentali e teoriche in questa direzione, combinando potenziali di questo tipo con gas di Fermi e Bose.

** Sistemi a dimensionalità ridotta.*

Reticoli ottici permettono di produrre campioni di gas di Bose e di Fermi in dimensione ridotta (2D, 1D), e studiare fenomeni molto interessanti che sono già da vari anni oggetto di studio in sistemi fisici diversi (4He, superconduttori). Esempi ne sono la transizione Kosterlitz-Thouless nei gas di Bose a 2D, o il BCS-BEC crossover per gas di Fermi in 1D. Questi due argomenti saranno esaminati nel presente progetto principalmente dal punto di vista teorico, sfruttando l'esperienza accumulata sui gas quantistici in dimensionalità ridotta.

Criteri di verificabilità

Pubblicazione dei risultati su riviste internazionali. Rapporti scientifici dettagliati da inviare ai referee.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi di TRENTO
Responsabile Scientifico	Sandro STRINGARI
Finanziamento assegnato	Euro 34.650

Compito dell'Unità

L'Unità di Trento svolgerà indagini teoriche su vari problemi che sono d'interesse diretto per gli esperimenti programmati a Firenze entro lo stesso progetto. Sulla base di visite frequenti e di incontri comuni, le connessioni già esistenti con il gruppo di Firenze verranno ulteriormente rafforzate. Il gruppo di Trento conta di fornire ai laboratori di Firenze una parte significativa delle basi teoriche necessarie a guidare ed interpretare gli esperimenti. In questo ruolo, il lavoro svolto a Trento risulta complementare a quello programmato a Camerino, dove utili tecniche diagrammatiche di fisica dei sistemi a molti-corpi verranno specificamente sviluppate in base all'esperienza di quel gruppo. D'altra parte, il gruppo di Trento esplorerà anche altre tematiche nel campo dei fermioni ultrafreddi e dei reticoli ottici aventi carattere più generale, allo scopo di raggiungere una comprensione più completa e profonda delle proprietà dei gas quantistici, anche in connessione con esperimenti condotti e da condurre in altri laboratori. Tra le

linee di ricerca che saranno sviluppate a Trento nei prossimi due anni si possono menzionare le seguenti: l'implementazione di tecniche di calcolo Monte Carlo nella regione di BCS-BEC crossover con o senza reticolo ottico; lo studio di gas di Bose e di Fermi in 1D e 2D; lo studio della transizione superfluida in gas quantistici in reticoli ottici; l'equazione di stato e i moti collettivi dei fermioni; l'applicazione del modello di Hubbard agli atomi ultrafreddi fortemente correlati in reticoli ottici; l'interferenza con fermioni; l'interazione tra atomi in onde parziali superiori in prossimità di una risonanza di Feshbach; i processi d'informazione quantistica con singoli fermioni intrappolati; la dinamica di atomi ultrafreddi in potenziali periodici e disordinati.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di CAMERINO
Responsabile Scientifico	Giancarlo STRINATI CALVANESE
Finanziamento assegnato	Euro 34.650

Compito dell'Unità

L'Unità di Camerino focalizzerà il suo lavoro specificamente sulla questione del BCS-BEC crossover in gas di Fermi intrappolati e ultrafreddi. In effetti, vi sono numerose questioni teoriche fondamentali che sono aperte e sono rese urgenti da esperimenti in corso. Scopo dell'Unità di Camerino è quello di dare risposte ad una parte significativa di tali questioni nell'ambito del presente progetto. Queste includono: l'interpretazione delle misure di "pairing gap" nella zona intermedia del BCS-BEC crossover, con le questioni collegate relative alle funzioni peso di singola-particella e i fenomeni di pseudo-gap; l'effetto Josephson: come evolve nel passaggio da deboli a forti interazioni fermioniche attrattive? È possibile usare questo effetto per rivelare la superfluidità in una parte sostanziale della regione di risonanza Fano-Feshbach? Vortici nella regione di BCS-BEC crossover: come cambia il "core" di un vortice attraversando la risonanza di Fano-Feshbach, e come osservarlo? Come misurare la temperatura di un gas di Fermi ultrafreddo passando attraverso la risonanza? Miscele etero-nucleari Fermi-Fermi e Fermi-Bose superfluide: per molti aspetti questo è un terreno incognito, che potrebbe offrire la possibilità di realizzare nuove fasi superfluide esotiche con esperimenti fattibili nel prossimo futuro. Mentre l'Unità di Firenze lavorerà sperimentalmente su questo tema, quella di Camerino sarà impegnata sul fronte della teoria. È chiaro che gli scambi e le collaborazioni tra le due unità sarà particolarmente importante. Questo è altrettanto vero per le tematiche relative all'effetto Josephson, data la stretta relazione esistente con le misure di trasporto nel gas di Fermi nei reticoli ottici programmate a Firenze. D'altra parte, e da un punto di vista più generale, l'intero progetto trarrà grande beneficio dalle competenze piuttosto complementari delle due unità teoriche di Trento e Camerino. In particolare, l'Unità di Camerino apporterà al progetto le proprie competenze nei metodi diagrammatici di fisica dei sistemi a molti-corpi (specialmente per fermioni) e una profonda conoscenza della fisica del BCS-BEC crossover.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di FIRENZE
Responsabile Scientifico	Massimo INGUSCIO
Finanziamento assegnato	Euro 108.700

Compito dell'Unità

Quella di Firenze sarà la sola Unità di ricerca sperimentale partecipante al progetto e farà uso di tre diversi apparati (due dei quali già operanti da anni e un terzo che sarà operativo al momento dell'avvio di questo progetto) per indagare le questioni più interessanti in questo ampio campo di ricerca. L'Unità di Firenze trarrà vantaggio dalla sua posizione di leadership a livello internazionale nelle ricerche sui condensati di Bose-Einstein, sui gas di Fermi e sulle miscele Fermi-Bose in reticoli ottici, al fine di svolgere indagini in varie direzioni promettenti e non ancora esplorate nel contesto internazionale. Tali direzioni, già descritte sopra, sono:

- 1) Miscele Fermi-Bose in reticoli. Su questo tema l'attività sperimentale procederà di pari passo con quella teorica svolta a Camerino e Trento. Ci aspettiamo che la combinazione delle competenze dei tre gruppi possa dare un forte impulso alle ricerche in questa linea.
- 2) Gas di Bose e di Fermi in potenziali disordinati e in reticoli ottici. Quest'attività beneficerà dei legami già esistenti con le attività teoriche condotte a Trento.
- 3) Applicazione dei gas di Fermi non interagenti all'interferometria ad alta risoluzione. Questa linea è caratterizzata da una notevole sinergia tra i gruppi di Firenze e Trento. Quest'ultimo sta prendendosi cura dello studio di modelli relativi a fenomeni fondamentali (come l'effetto Casimir-Polder in prossimità di superfici) che possono essere studiati sperimentalmente con le tecniche sviluppate a Firenze. Scopo iniziale del gruppo di Firenze sarà quello di indagare e curare tutti gli aspetti tecnici coinvolti nella realizzazione di sensori ad alta risoluzione a alta sensibilità basati sulle oscillazioni di Bloch con fermioni.
- 4) Dinamica di gas di Fermi in reticoli ottici nel regime di BCS-BEC crossover. Questa attività sperimentale, che rappresenta un approccio indipendente allo studio delle proprietà superfluide di questi sistemi, si basa su recenti proposte teoriche del gruppo di Trento e beneficerà anche del forte legame con le attività teoriche dell'Unità di Camerino.