

RAPPORTO FINALE SUI RISULTATI DEL PROGETTO COMUNE DI RICERCA
FINAL REPORT ON RESULTS OF JOINT RESEARCH PROJECT

1. Accordo /Agreement CNR / CNPq anni/ years 2010-2011	
2. Titolo del progetto Eccitazione di superfluidi atomici: investigazione di turbolenza, frammentazione e localizzazione 2. Title of the project Exciting atomic superfluids: investigation of turbulence, fragmentation and localization	
Parole chiave (massimo 3): condensato di Bose-Einstein, disordine, localizzazione Key words (max. 3): Bose-Einstein condensate, disorder, localization	
(solo per parte italiana) Area scientifica / Scientific area (tabella 1/ table1): Dipartimento Dispositivi e Materiali	
3. Responsabili del progetto Project leaders	
Responsabile italiano Dr. Giacomo Roati istituto di appartenenza INO-CNR, sezione Sesto Fiorentino Indirizzo Via N. Carrara 1, 50019 Sesto Fiorentino, Italia	Brazilian project leader Prof. Vanderlei Bagnato affiliation University of Sao Paulo USP, Brazil address Instituto de Física de São Carlos, USP, Caixa Postal 369, São Carlos, Sao Paulo, Brazil
4. Obiettivi del progetto	
1) Studio di condensati di Bose-Einstein superfluidi in potenziali sia spazialmente che temporalmente disordinati. 2) Sistemi bosonici fortemente correlati in bassa dimensionalità in presenza di disordine.	
4. Aims of the project	
1) Study of superfluid Bose-Einstein condensates in spatially and temporally disordered potentials. 2) Low dimensional strongly correlated bosons in presence of spatial disorder.	

5. Risultati ottenuti per obiettivo (1 pagina)

Durante il primo anno di questo progetto l'attività di ricerca si è indirizzata allo studio di fenomeni di turbolenza in condensati di Bose-Einstein (BEC). In particolare, lo studio sperimentale è stato prevalentemente condotto presso il laboratorio di fisica atomica dell'università di Sao Carlos, San Paolo, Brasile. Per generare lo stato di turbolenza, abbiamo applicato una modulazione oscillante del potenziale magnetico grazie a particolari bobine poste all'esterno della cella di vetro nella quale sono intrappolati gli atomi. In questo modo, scegliendo l'ampiezza e la frequenza della modulazione della corrente e la posizione delle bobine rispetto alla BEC, siamo stati in grado di produrre delle eccitazioni nel gas superfluido di Bose. Lo studio di questa fenomenologia è il punto iniziale per poter osservare i fenomeni di localizzazione indotti da potenziali dipendenti dal tempo. Infatti la fase turbolenta è considerata la fase precedente a quella detta granulare, nella quale il superfluido si rompe in diverse regioni superfluide che a causa della modulazione esterna divengono più o meno estese nello spazio. Questa situazione è simile a quella che si osserva nel caso dei superconduttori granulari.

Durante il secondo anno abbiamo cercato da un lato di studiare gli effetti di localizzazione in potenziali disordinati statici in particolare in sistemi unidimensionali e dall'altro di completare il nostro studio sulla granulazione. Data la complessità di questo genere siamo stati in grado di osservare fino ad ora solamente la fase di granulazione.

In Fig.1 mostriamo tipiche immagini della BEC per diverse ampiezze di eccitazione.

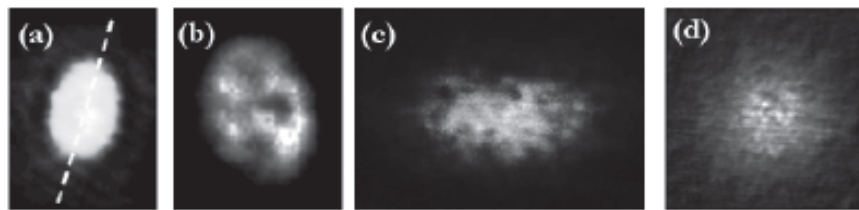


Fig.1. Immagini del condensato per diversi valori dell'ampiezza di modulazione: (a) scissors mode, (b) nucleazione di vortici, (c) regime turbolento, (d) frammentazione.

Le immagini mostrano lo sviluppo delle eccitazioni nel condensato per valori crescenti di ampiezza di modulazione. Inizialmente si osserva la formazione di modi detti a forbice (scissors modes, (a)), poi di vortici (b), e per ampiezze maggiori il sistema entra nel regime turbolento (c) ed infine granulare (d).

Stiamo al momento studiando l'effetto del disordine in campioni unidimensionali. Questi sono realizzati intrappolando il campione atomico degenere all'interno di reticoli ottici bidimensionali. Il tunneling tra i diversi tubi può essere ridotto praticamente a zero controllando l'intensità del laser che genera i reticoli ottici. Lungo la direzione dei tubi pensiamo di sovrapporre un potenziale ottico bicromatico che simulerà la presenza di disordine. In una dimensione studieremo l'effetto combinato di disordine ed correlazione, che è alla base di molti fenomeni fisici interessanti come ad esempio il comportamento di tubi superconduttori unidimensionali.

Durante questi due anni, abbiamo anche contribuito a costruire un nuovo apparato sperimentale in Brasile per studiare la fisica di BEC intrappolate in potenziali disordinati. Questa nuova macchina è stata dotata di un grande accesso ottico in tutte le direzioni spaziali. Questo è il requisito fondamentale per poter manipolare gli atomi per mezzo di potenziali ottici ed anche per poter osservare gli atomi con alta risoluzione spaziale. Nuovi esperimenti sono in arrivo.

5. Achieved results (one page)

During the first year of this project, the research has been directed to the study of turbulence in Bose-Einstein condensates (BEC). In particular, the experimental study was mainly concentrated to the laboratory of atomic physics at the University of Sao Carlos, Sao Paulo, Brazil. To generate the state of turbulence, we applied a modulation of the oscillating magnetic potential due to special coils located outside of the glass cell in which the atoms are trapped. In this way, choosing the amplitude and frequency modulation of the current and the position of the coils with respect to the BEC, we were able to produce excitations in superfluid Bose gases. The study of this phenomenon is the starting point for observing the phenomena of localization induced by time-dependent potentials. In fact, the turbulence is considered the earlier stage of the granular phase, in which the superfluid breaks in different regions of the superfluidity that due to external modulation become more or less extended in space. This situation is similar to the one observed in granular superconductors.

During the second year we have tried to study the effects of localization in disordered static potential in particular in one-dimensional systems, and at the same time to complete our study of the granulation. Given the complexity of this kind of experiments we have been able to observe up to now only the granulation phase.

In Figure 1 we show typical images of the BEC for different excitation amplitudes.

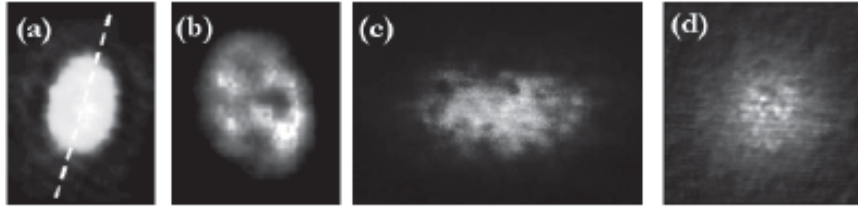


Fig.1. Images of the condensate for different values of amplitude modulation: (a) scissors mode, (b) nucleation of vortices, (c) turbulent, (d) fragmentation.

The images show the development of the excitations in the condensate for increasing values of the amplitude of the modulation. Initially, we observe the formation of these ways scissors (scissors modes, (a)), then vortices (b), and at higher amplitudes the system enters the turbulent (c) and the granular regimes (d).

We are currently studying the effect of disorder in one-dimensional samples. These are produced by trapping the degenerate sample into two-dimensional optical lattices. The tunneling between the different tubes can be reduced to almost zero by controlling the intensity of the laser that generates optical lattices. Along the direction of the tubes we superimpose a bichromatic optical potential to simulate the presence of disorder. In one dimension we study the combined effect of disorder and correlation, which is at the basis of many interesting physical phenomena such as the behavior of one-dimensional superconducting tubes.

During these two years, we have also contributed to set up a new experimental apparatus in Brazil in which to study also the physics of BEC trapped into disordered potentials. This new machine has been designed in order to have a large optical access in almost all the spatial directions. This is the fundamental requirement to manipulate the atoms by means of optical potentials and also to image the atoms with high spatial resolution. New experiments are on the way.

6. Prodotti del progetto / Results obtained	
	n./no.
Pubblicaz. scient. su riviste internaz./ scientific publications on international reviews con IF	4
Pubblicaz. in atti congressi internaz./ publications in international congress proceedings	//
Pubblicazioni in atti congressi nazionali / publications in national congress proceedings	//
Pubblicazione libri nazionali / Publication of national books	//
Pubblicazione libri internazionali / Publication of international books	1
Altre pubblicazioni / other publications	//
Brevetti / Patents	//
Prototipi / Prototypes	//
Strumentazione / Equipment and /or Devices	//
Programmi software / Software	//
Banche dati / Data bases	//
Protocolli / Protocols	//
Nuovi Materiali / New Materials	//
Nuovi processi / New processes	//
Cataloghi/inventari/repertori / Catalogues/Inventories	//
Atlanti/Carte/Mappe / Atlases/Charts/Maps	//
Progetti di ricerca / Reserch project	//
Trasferimento innovazioni / Knowledge transfer	//
Laboratori congiunti / Joint laboratories	//
Alta formazione / Training	//
Altro / Other	//
7. Informazioni dettagliate sui risultati indicati sub 6 Elenco pubblicazioni: 1) J. A. Seman et al., <i>Three-vortex configurations in trapped Bose-Einstein condensates</i>, Physical Review A 82, 033616 (2010). 2) E. Henn et al., <i>Generation of vortices and observation of Quantum Turbulence in an oscillating Bose-Einstein Condensate</i>, JLTP 158, 435, (2010). 3) J. A. Seman et al., <i>Route to turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate</i>, Laser Physics Letters 8, 691-696 (2011). 4) M. Caracanhas et al. <i>Self-similar expansion of the density profile in a turbulent Bose-Einstein condensate</i>, Journal of Low Temperature Physics pp. 1-10, (13 October 2011). Capitolo libro: V.S. Bagnato et al., <i>Characteristics and Perspectives of Quantum Turbulence in Atomic Bose Einstein Condensates</i>, to appear in Springer & Verlag Book on Quantum fluids 7. Detailed information on results indicated under point 6 Publications: 1) J. A. Seman et al., <i>Three-vortex configurations in trapped Bose-Einstein condensates</i>, Physical Review A 82, 033616 (2010). 2) E. Henn et al., <i>Generation of vortices and observation of Quantum Turbulence in an</i>	

oscillating Bose-Einstein Condensate, JLTP 158, 435, (2010).

- 3) J. A. Seman et al., *Route to turbulence in a trapped Bose-Einstein condensate*, Laser Physics Letters 8, 691-696 (2011).
- 4) M. Caracanhas et al. *Self-similar expansion of the density profile in a turbulent Bose-Einstein condensate*, Journal of Low Temperature Physics pp. 1-10, (13 October 2011).

Book chapter:

V.S. Bagnato et al., *Characteristics and Perspectives of Quantum Turbulence in Atomic Bose Einstein Condensates*, to appear in Springer Verlag Book on Quantum fluids

8. Formazione di giovani ricercatori Training of young researchers

During these two years, two young italian scientists Matteo Zaccanti and Eleonora Lucioni, have benefited of the possibility offered by this project.

Matteo Zaccanti has visited Brazil in the summer of 2010 and he has participated to the experiments in which vortices where imprinted on the Bose-Einstein condensate of rubidium atoms. In particular, he has shown his expertise in this field such that he was invited last April as a speaker in the context of an international school/conference kept in Sao Carlos (Matteo is now a senior post-doc in the group of Prof. R. Grimm in Innsbruck, Austria).

Eleonora Lucioni is a PhD students here in Florence and she has joined me during a visit in Brazil in September 2011. Eleonora has worked on final stage of the setting up of the new machine. She has heavily contributed to the final optimization of the experiment that was able to produce a BEC during our visit there.

Eleonora was so enthusiastic that is now thinking to go back in Brazil next year to participate to the measurements on the new machine. She is planning a longer visit to allow an even richer and productive scientific collaboration.

On the other side we had the possibility of having here in Italy working with us Jorge Seman, a young PhD student belonging to the group of Prof. Bagnato.

Jorge has been working for few weeks in the experiment dedicated to the study of tunable BECs trapped into spatial disordered potentials. Jorge is now moving to Italy to be a post-doc in my research group.

The connection between the two experimental groups is now so tight and productive that we have decided to ask for the extension of such joint project.

9. Motivazione degli sviluppi della collaborazione negli anni successivi

(eventuali estensione ad altri paesi, collaborazioni multilaterali, contratti nazionali o internazionali)

Io ritengo che l'estensione di questa collaborazione bilaterale sia giustificata per due motivi essenziali. Innanzi tutto dall'alto livello di produzione scientifica che è ne è scaturito, come dimostrato dalle delle pubblicazioni su riviste peer-reviewed. Secondo, penso che sia stata una magnifica occasione per far conoscere ad alcuni giovani scienziati realtà diverse da quelle abituali.

Questo ha anche significato l'apprendimento di tecniche sperimentali e la comprensione di problemi fisici differenti rispetto a quelli che gli studenti devono affrontare quotidianamente nel proprio laboratorio. Come dicevo in precedenza questo scambio è stato così positivo che due di questi studenti hanno deciso di estendere la loro collaborazione anche nel futuro, evidenziando quindi la bontà del lavoro svolto da entrambe i responsabili del progetto.

Dal punto di vista scientifico voglio sottolineare che, se estesa, questa collaborazione bilaterale

permetterà lo sviluppo dell'attività di ricerca anche verso nuovi obiettivi complementari rispetto a quelli finora studiati. In particolare, abbiamo intenzione di studiare le proprietà termodinamiche di gas atomici degeneri all'equilibrio, sfruttando la misura della densità degli atomi intrappolati. L'idea sarebbe di estendere questo genere di studio anche al caso di atomi fermionici. Infatti, in Italia, ho recentemente intrapreso la costruzione di un nuovo apparato sperimentale volto alla produzione di un gas degenero composto dall'isotopo fermionico del Litio.

Lo studio delle proprietà termodinamiche è particolarmente importante perché permette la derivazione dell'equazione di stato (EdS) che descrive il gas atomico. Essa lega matematicamente ed in maniera univoca quantità termodinamiche come la pressione, il potenziale chimico con la temperatura. Le prime due possono essere estratte sperimentalmente dai profili di densità atomici. La conoscenza dell'EdS fornisce quindi una scala per determinare precisamente la temperatura del campione, ove questo non sia possibile attraverso le usuali tecniche sperimentali. Le informazioni che vengono ricavate dall'EdS possono essere utilizzate per caratterizzare anche sistemi fuori dall'equilibrio termodinamico, come ad esempio sistemi in rotazione o a cui sia stata trasferita al campione energia tramite la variazione dei parametri sperimentali.

Questa è esattamente la situazione sperimentale che abbiamo studiato durante questi due anni di progetto bilaterale, in cui effetti di granulazione (localizzazione) e turbolenza sono stati osservati come conseguenza dell'applicazione di una modulazione esterna.

I dettagli di questa nuova linea di ricerca verranno descritti nella nuova proposta di ricerca per gli anni 2012-2013.

9. Reasons for cooperative project developments in the following years, if any

(extension to other countries, multilateral collaboration, national or international contracts)

I believe that the extension of this bilateral cooperation is justified by two main reasons. First of all, by its high level of scientific production, as demonstrated by publications on peer-reviewed journals. Second, I think that it was a wonderful opportunity to introduce young scientists to new and different research context with respect to their usual ones.

This has also meant learning of experimental techniques and understanding of different physical problems respect to the ones that students face every day in their laboratory. As I said earlier this exchange has been so positive that two of these students have decided to extend their collaboration in the future, thus highlighting the goodness of the work done by both the project leaders.

From the scientific point of view I want to emphasize that, if extended, this bilateral cooperation will allow the development of the scientific research towards new goals that are complementary to those previously studied. In particular, we intend to study the thermodynamic properties of degenerate atomic gases at equilibrium, using the measure of the density of the trapped atoms. The idea would be to extend this kind of study to the case of fermionic atoms. In fact, in Italy, I have recently undertaken the construction of a new experimental apparatus designed to produce a degenerate gas of fermionic lithium atoms.

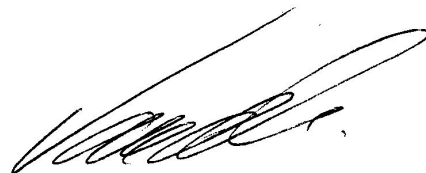
The study of thermodynamic properties is particularly important because it allows the derivation of the equation of state (EOS), which describes the atomic gas. It binds mathematically and uniquely thermodynamic quantities such as pressure, the chemical potential with temperature. The first two can be extracted experimentally by the atomic density profiles. Knowledge of the EOS then provides a scale to determine precisely the temperature of the sample, where this is not possible through the usual experimental techniques. The information that is obtained from the EOS can also be used to characterize systems out of equilibrium thermodynamic systems such as rotating or has been transferred to the sample through the energy variation of experimental parameters. This is exactly the situation that we have studied experimentally during the last two years of bilateral project, in which granulation effects (localization) and turbulence have been observed as a consequence of the application of an external modulation.

The details of this new line of research will be described in new research proposal for the years 2012-2013.

Firma del responsabile italiano del progetto

Signature of the Brazilian project leader
(Prof. V. Bagnato)

Giacomo Roetti



Firma del direttore

ISTITUTO NAZIONALE DI OTTICA
IL DIRETTORE F.F.
Dr. PAOLO DE NATALE

date:

11 NOV. 2011



TABELLA 1

1 – Dipartimento Terra e Ambiente	7 – Dipartimento Materiali e Dispositivi
2 – Dipartimento Energia e Trasporti	8 – Dipartimento Sistemi di Produzione
3 – Dipartimento Agroalimentare	9 – Dipartimento Tecnologie dell'Informazione e delle Comunicazioni
4 – Dipartimento Medicina	10 – Dipartimento Identità Culturale
5 – Dipartimento Scienze della Vita	11 – Dipartimento Patrimonio Culturale
6 – Dipartimento Progettazione Molecolare	