

Leonardo Fallani

# Liquidi di fermioni a molti colori

*Multi-colored liquids of fermions*

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze

The logo for 'Il Colle di Galileo' features a circular, textured, light-colored emblem on a dark brown background. The text 'Il Colle di Galileo' is written in a white serif font below the emblem.

Il Colle di  
Galileo

**Sommario.** Un esperimento realizzato nei laboratori del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze ha messo in evidenza il comportamento di fermioni fortemente interagenti in una dimensione. Controllando il numero di stati interni in un gas di atomi ultrafreddi, si è osservata per la prima volta la transizione da un comportamento fermionico a un comportamento bosonico, in accordo con recenti previsioni teoriche.

**Parole chiave.** Atomi ultrafreddi, gas di Fermi, sistemi unidimensionali

I fermioni sono i mattoni fondamentali del nostro Universo. Le proprietà della materia che ci circonda dipendono, in ultima analisi, da come le particelle fermioniche elementari (quarks e leptoni) interagiscono tra loro per formare aggregati di complessità maggiore. Un ruolo fondamentale nella fisica dei fermioni interagenti è dato dalla molteplicità con cui queste particelle si presentano in Natura: ad esempio, gli elettroni si possono presentare in due stati possibili di spin, mentre i quarks, oltre allo spin, sono contraddistinti da tre possibili “colori”.

In un recente lavoro sperimentale, pubblicato alcuni mesi fa su *Nature Physics*, abbiamo sintetizzato in laboratorio un sistema di fermioni nel quale il numero di

**Abstract.** An experiment performed in the labs of the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence has demonstrated the behavior of strongly-interacting one-dimensional fermions. By controlling the number of internal states in a gas of ultracold atoms, we have observed for the first time the crossover from fermionic to bosonic behavior, in agreement with recent theoretical predictions.

**Keywords.** Ultracold atoms, Fermi gases, one-dimensional systems

Fermions are the fundamental building blocks of the Universe. The properties of our world depend, ultimately, on how the elementary fermionic particles constituting matter (quarks and leptons) interact to form larger aggregates. In the physics of interacting fermions, a fundamental role is played by the multiplicity exhibited in Nature by these particles: for instance, electrons show up in two possible spin states, while quarks, in addition to their spins, can be

“colori”, invece di essere fissato dalla Natura, può essere controllato sperimentalmente. Questo è stato possibile utilizzando gas di atomi di itterbio (Yb), che nel 2012 siamo riusciti a raffreddare fino a temperature di pochi miliardesimi di grado sopra lo zero assoluto (un simile risultato era stato ottenuto dieci anni prima con atomi di potassio, proprio sul colle di Galileo, dove Fermi elaborò la statistica che porta il suo nome). Gli atomi di  $^{173}\text{Yb}$  possiedono uno spin nucleare  $I=5/2$ , quindi si possono presentare in  $2I+1=6$  stati diversi, che possono essere selezionati attraverso tecniche di pompaggio ottico. A causa della struttura elettronica dell'itterbio, le interazioni tra atomo e atomo non dipendono dall'orientazione dello spin nucleare, per cui possiamo trattare questo grado di libertà come se fosse soltanto un “colore” degli atomi, un'etichetta della loro distinguibilità. Questa proprietà ci ha permesso di mettere in evidenza come il comportamento di un sistema di fermioni dipende dal numero di stati in cui questi si possono presentare.

Nell'esperimento, realizzato nei laboratori del Dipartimento di Fisica e Astronomia di Sesto Fiorentino, gli atomi di itterbio vengono resi fortemente interagenti grazie al loro intrappolamento in “guide” di luce, che permettono di creare liquidi di fermioni fortemente correlati in cui il moto delle particelle è ristretto a una sola dimensione (1D). L'effetto delle interazioni repulsive tra gli atomi è stato osservato misurando proprietà statiche e dinamiche del sistema, come la funzione di distribuzione nello spazio degli impulsi e lo spettro di eccitazione. In bassa dimensionalità il ruolo delle interazioni è fortemente amplificato, a tal punto che anche il concetto stesso di statistica quantistica diventa molto più “sfumato”. A questo riguardo, misurando le frequenze di oscillazione collettiva degli atomi

found in three different “colors”.

In a recent experimental study, reported a few months ago in *Nature Physics*, we synthesized a system of fermions in which the number of “colors”, rather than being fixed by Nature, can be controlled experimentally. This has been made possible thanks to the properties of Ytterbium (Yb) atoms, which in 2012 were cooled in our labs down to temperatures of a few billionths of a degree above absolute zero (a similar result was achieved ten years before with potassium atoms, on the very same Galileo's hill where Fermi developed “his” statistics).  $^{173}\text{Yb}$  atoms have a nuclear spin  $I=5/2$ , so they can be found in  $2I+1=6$  different states, which can be experimentally selected by optical pumping techniques. Because of the Yb electronic structure, atom-atom interactions do not depend on the nuclear spin orientation; therefore, we can treat the nuclear spin state of the atoms as if it were just a “color”, a tag which can be used to distinguish them. This property has allowed us to show how the behavior of a system of fermions depends on the number of states in which they can be found.

In the experiment, carried out in the labs of the Department of Physics and Astronomy of Sesto Fiorentino, the Yb atoms are rendered strongly interacting by trapping them in “tubes” of light, permitting the production of quantum liquids of strongly-correlated fermions in which the motion of the particles is restricted only to one dimension (1D). The effect of the repulsive interactions between atoms was observed by measuring static and dynamic properties of the system, such as its momentum distribution function and its excitation spectrum. In low dimensions, the role of interactions is strongly amplified, to the point that the very meaning of

intrappolati abbiamo messo in evidenza un comportamento molto particolare: all'aumentare del numero di colori, il principio di esclusione di Pauli gioca un ruolo sempre meno importante e la frequenza di oscillazione passa da quella di un gas di fermioni a quella di un gas di bosoni. Questa è la prima verifica sperimentale di una proprietà molto generale di sistemi di fermioni 1D a molte componenti. Sebbene il problema fosse stato già introdotto nel 1968 da Sutherland, è soltanto nel 2010 che Chen Ning Yang (classe 1922, premio Nobel per la Fisica 1957 per la violazione di parità nell'interazione debole e personaggio di primo piano nello sviluppo della fisica dei sistemi 1D a molti corpi) ha dimostrato teoricamente che, nel limite di un numero infinito di componenti, un sistema di fermioni 1D possiede la stessa energia di un sistema di bosoni.

Le prospettive di questa nuova attività sperimentale avviata a Firenze sono molteplici, e non sono soltanto ristrette allo studio della fisica unidimensionale. Gas ultrafreddi di itterbio possono rendere possibili nuovi importanti sviluppi nel campo delle misure di precisione (infatti, vengono già utilizzati, ad es. all'INRIM, per la costruzione di orologi atomici estremamente precisi) e della simulazione quantistica, ad esempio per la realizzazione di campi di gauge per atomi neutri e per la simulazione di modelli teorici con simmetria di interazione  $SU(N)$  di interesse per la fisica delle alte energie.

Si ringraziano Massimo Inguscio, Jacopo Catani e Carlo Sias per i loro contributi fondamentali di ricerca e di discussione.

quantum statistics becomes quite “blurred”. As a matter of fact, by measuring the collective oscillation frequency of the trapped atoms, we were able to discern very peculiar behavior: with the increase in the number of colors, the Pauli exclusion principle becomes progressively less important and the oscillation frequency changes from that of a fermionic gas to that of a gas of bosons. This is the first experimental demonstration of a very general property of multi-component 1D fermionic systems. Although the problem had first been considered by Sutherland as far back as 1968, it was only in 2010 that Chen Ning Yang (born 1922, Nobel prize for Physics 1957 for parity violation in weak interaction and one of the most prominent figures in the development of 1D many-body quantum physics) demonstrated theoretically that, in the limit of an infinite number of components, a system of 1D fermions has the same energy as that of a system of spinless bosons.

This new experimental activity in Florence opens several interesting perspectives, not only connected to the study of 1D quantum physics. Ultracold ytterbium gases can enable important developments in the fields of high-precision measurements (indeed, they are already being used, e.g. at INRIM, for building extremely precise atomic clocks) and of quantum simulation, e.g. for the realization of gauge fields for neutral atoms and for the simulation of theoretical models with  $SU(N)$  interaction symmetry that can be relevant for high-energy physics.

We thank Massimo Inguscio, Jacopo Catani and Carlo Sias for their fundamental research contributions and discussions.

## Bibliografia

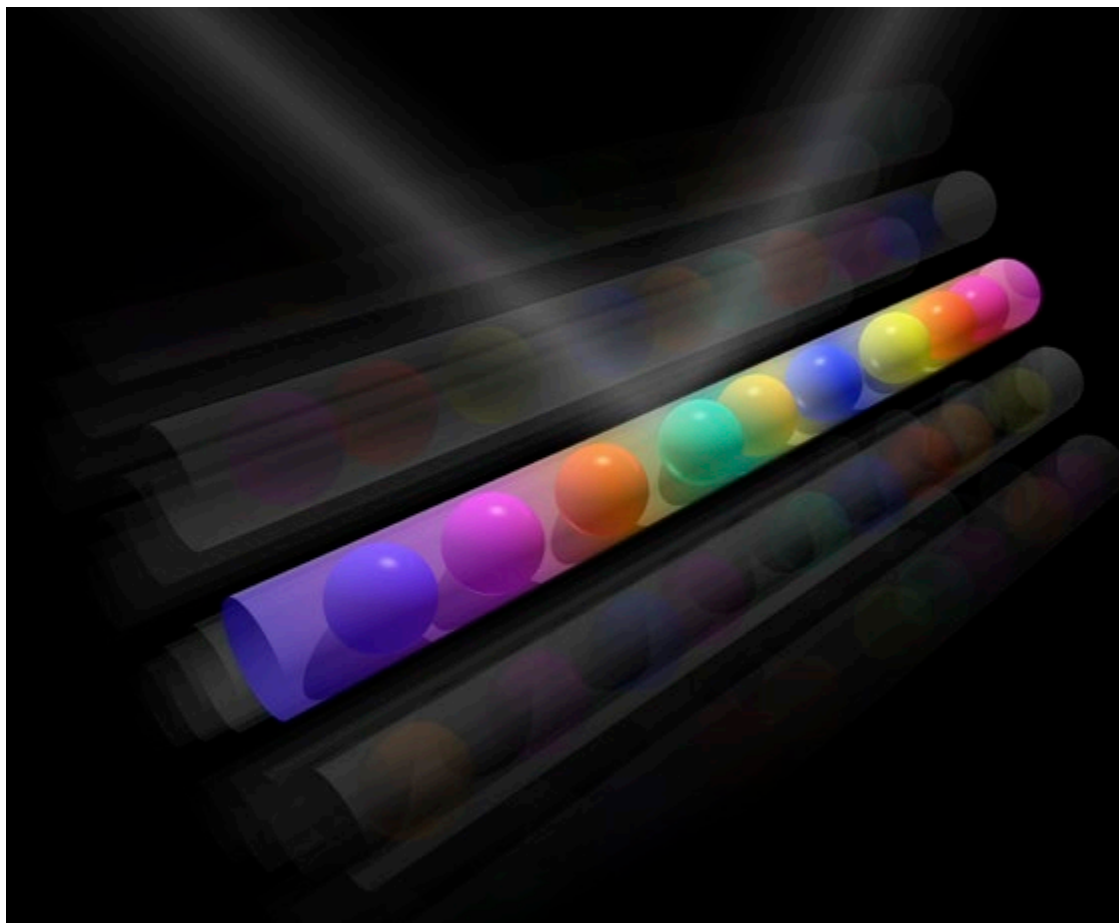
G. Pagano et al., A one-dimensional liquid of fermions with tunable spin, *Nature Physics* 10, 198 (2014)

*Leonardo Fallani* è un ricercatore del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze e membro dello staff scientifico del LENS (Laboratorio Europeo di Spettroscopia Nonlineare). La sua esperienza di ricerca, nel campo della fisica atomica e dell'ottica, riguarda principalmente i seguenti ambiti: spettroscopia di precisione, raffreddamento laser, gas quantistici ultrafreddi, reticoli ottici, simulazione quantistica con atomi ultrafreddi, sistemi atomici disordinati. È responsabile di progetti di ricerca europei e italiani e di un'attività sperimentale su gas quantistici di atomi a due elettroni. È autore di 50 pubblicazioni su riviste e libri a diffusione internazionale e co-autore di un libro di fisica atomica. Ha partecipato come invited speaker a più di 30 conferenze nazionali e internazionali.

## Bibliography

G. Pagano et al., A one-dimensional liquid of fermions with tunable spin, *Nature Physics* 10, 198 (2014)

*Leonardo Fallani* is assistant professor in the Department of Physics and Astronomy of the University of Florence, and a member of the scientific staff of LENS (European Laboratory for Non-Linear Spectroscopy). His research expertise is in the field of optics and atomic physics, in particular in the subjects: high-precision spectroscopy, laser cooling, ultracold quantum gases, optical lattices, quantum simulation with ultracold atoms and disordered atomic systems. He is principal investigator for European and Italian research grants and leads an experimental activity studying quantum gases of two-electron atoms. He is author of 50 papers published in international and national journals and books, and he is co-author of a book on atomic physics. He has been invited speaker at more than 30 international and national conferences.



La figura illustra, in maniera schematica, il sistema realizzato in laboratorio. Atomi di  $^{173}\text{Yb}$ , a pochi milionesimi di grado sopra lo zero assoluto, vengono intrappolati in “guide di luce” unidimensionali e resi fortemente interagenti dal forte confinamento. Attraverso tecniche di manipolazione ottica è possibile controllare il numero dei loro “colori” e si possono studiare le loro proprietà.

Diagram of the experimental system produced in the lab.  $^{173}\text{Yb}$  atoms, cooled down to a few billionths of a degree above absolute zero, are trapped in one-dimensional “tubes” of light and are made strongly interacting by the extreme confinement. Optical manipulation techniques allow us to control the number of their “colors” and to investigate their properties.

