

Giovanni Modugno

La fase supersolida della materia

The supersolid phase of matter

Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Firenze, Laboratorio Europeo di Spettroscopia Nonlineare e Istituto Nazionale di Ottica del CNR

Riassunto. Il supersolido è una fase della materia intermedia tra un cristallo e un superfluido, prevista più di cinquanta anni fa, cercata a lungo nell'elio solido e scoperta solo recentemente in un gas quantistico di atomi magnetici. In questo articolo si racconta come si è arrivati alla scoperta del supersolido, come se ne sono già caratterizzate alcune sorprendenti proprietà e quali altre sono ancora da scoprire.

Parole chiave. Fasi quantistiche della materia, cristalli, superfluidi, condensati di Bose-Einstein.

La materia, una volta portata a temperatura sufficientemente bassa così da eliminare gli effetti termici, mostra proprietà affascinanti dettate dalle leggi della meccanica quantistica. Le due fasi quantistiche della materia più conosciute sono i cristalli e i superfluidi. Nei primi, gli atomi sono localizzati nei siti di un reticolo periodico, grazie alle forze esistenti tra gli atomi stessi. Questa localizzazione dà luogo alle proprietà note dei materiali solidi, come ad esempio la loro rigidità. Nei superfluidi, invece, gli atomi non solo sono liberi di muoversi lungo il materiale ma sono anche completamente delocalizzati, così che non è possibile individuarne la posizione individuale. Questo dà luogo alla capacità dei superfluidi di scorrere senza attrito e di muoversi senza inerzia. Il fenomeno della superfluidità è generale, si estende a tutte le particelle di natura bosonica, è legato al fenome-

Summary. The supersolid is a phase of matter intermediate between a crystal and a superfluid. It was predicted more than fifty years ago, long sought in solid helium and only recently discovered in a quantum gas of magnetic atoms. This article explains how we came to discover the supersolid, how some surprising properties have already been characterized and which others have still to be unveiled.

Keywords. Quantum phases of matter, crystals, superfluids, Bose-Einstein condensates.

Once it is brought to a temperature low enough to eliminate thermal effects, matter shows fascinating properties, which are dictated by the laws of quantum mechanics. The two best-known quantum phases of matter are crystals and superfluids. In the former, atoms are located at the sites of a periodic lattice, due to the forces between the atoms themselves. This localization gives rise to the known properties of solid materials, such as their rigidity. In superfluids,



no della condensazione di Bose-Einstein ed è alla base di fenomeni insieme spettacolari e utili, come ad esempio le supercorrenti elettriche nei superconduttori.

Circa 50 anni fa, fu ipotizzata l'esistenza di una nuova fase fondamentale della materia che combina le proprietà dei cristalli e dei superfluidi: i supersolidi [1,2,3]. In un supersolido, le particelle che lo compongono dovrebbero avere una struttura spaziale periodica come in un cristallo ma, allo stesso tempo, dovrebbero essere completamente delocalizzate lungo tutto il reticolo come in un superfluido. Anche se le due proprietà possono sembrare inconciliabili, lavori di importanti scienziati hanno dimostrato che la loro combinazione è concettualmente possibile, in sistemi di natura bosonica. Anche se, come hanno dimostrato molti decenni di ricerca infruttuosa a livello sperimentale, le condizioni di esistenza del supersolido sono molto particolari e difficili da raggiungere nella materia usuale. Infatti, il supersolido si basa su un delicatissimo bilanciamento tra un tipo di energia che favorisce la delocalizzazione delle particelle (come l'energia cinetica di punto zero) e un altro tipo di energia che ne favorisce la disposizione secondo un reticolo periodico (come l'energia di repulsione tra gli atomi).

A partire dagli anni 70 del secolo scorso, si è cercato di osservare il supersolido in solidi costituiti da atomi di elio [4]. Era noto già da molto tempo che l'elio a bassissima temperatura e ad alta pressione si trova in una fase solida, in particolare l'isotopo bosonico, He-4. L'idea era che l'energia di punto zero, data la piccolissima massa degli atomi, fosse sufficientemente grande da permettere lo scambio di atomi tra i siti del reticolo del solido, realizzando così un solido un po' "fluidico". Dato che l'elio liquido è naturalmente un superfluido, si pensava che l'elio solido

however, atoms are not only free to move along the material but are also completely delocalized, so that it is not possible to identify their individual positions. This gives rise to the ability of superfluids to flow frictionlessly and move without inertia. The phenomenon of superfluidity is general: it extends to all bosonic particles, is linked to the phenomenon of Bose-Einstein condensation and is the basis of spectacular and useful phenomena, such as the electric supercurrents in superconductors.

About 50 years ago, the existence of a new fundamental phase of matter was hypothesized that combines the properties of crystals and superfluids: supersolids [1,2,3]. In a supersolid, the particles should have a periodic spatial structure, as in a crystal, and at the same time be completely delocalized along the entire lattice, as in a superfluid. Although the two properties may seem irreconcilable, work by leading scientists has shown that their combination is conceptually possible in systems of a bosonic nature. However, as many decades of unsuccessful research on an experimental level have shown, the conditions of existence of the supersolid are very particular and difficult to achieve in normal matter. The supersolid is indeed based on a very delicate balance between a type of energy that favors the delocalization of particles (such as zero point kinetic energy) and another type of energy that favors their arrangement on a periodic lattice (such as the repulsion energy between atoms).

Since the 1970s, attempts have been made to observe the supersolid in solids consisting of helium atoms [4]. It has long been known that helium is in a solid phase at very low temperature and high pressure, especially the bosonic isotope, He-4. The idea was that given the very small

potesse essere supersolido, almeno in piccola misura. Dopo decenni di ricerche infruttuose, circa 15 anni fa ci fu l'annuncio della scoperta di un comportamento supersolido nell'elio, sotto forma di una riduzione del momento di inerzia di un cilindro di elio posto in rotazione [5]. Questa era stata infatti indicata A. J. Leggett (premio Nobel nel 2003 per lo studio teorico della superfluidità) come la principale caratteristica di un supersolido [3]. Purtroppo, studi successivi hanno dimostrato che il segnale osservato aveva una spiegazione meno affascinante, legata alle proprietà elastiche dell'elio solido, escludendo invece la presenza di un supersolido [6].

Nel frattempo, i tentativi per osservare il supersolido si erano già allargati ad altri tipi di sistemi, ovviamente tutti di natura bosonica e tutti superfluidi. Un sistema di particolare interesse per la comunità scientifica sono i cosiddetti gas quantistici, gas di atomi e molecole a bassissima temperatura e a bassa pressione che realizzano il fenomeno della condensazione di Bose-Einstein e perciò sono naturalmente superfluidi. Già nel 2003 fu proposto che in un condensato di atomi o molecole con interazioni a lungo raggio, come ad esempio l'interazione dipolo-dipolo, potesse realizzarsi un fenomeno di cristallizzazione analogo a quello della transizione liquido-solido, realizzando così le condizioni per la formazione di un supersolido [7]. Anche se all'epoca non era per niente chiaro come in un gas potesse esistere una fase con le caratteristiche di stabilità di un solido. Si tenga conto che la distanza media tra gli atomi in un gas quantistico è circa mille volte maggiore di quella in un solido.

Negli ultimi dieci anni ho avuto la fortuna di partecipare con i miei collaboratori alla ricerca del supersolido in gas quantistici con interazione dipolo-dipolo.

mass of atoms the zero-point energy was large enough to allow the exchange of atoms between the sites of the solid lattice, thus creating a somewhat "fluid" solid. Since liquid helium is naturally a superfluid, it was thought that solid helium could be supersolid, at least to a small extent. After decades of fruitless research, about 15 years ago there came the announcement of the discovery of supersolid behavior in helium, in the form of a reduction in the moment of inertia of a rotating helium cylinder [5]. This was in fact referred to by A. J. Leggett (Nobel laureate in 2003 for his studies of superfluidity) as the main feature of a supersolid [3]. Unfortunately, subsequent studies have shown that the observed signal had a less fascinating explanation, which was linked to the elastic properties of solid helium and therefore excluded the presence of a supersolid [6].

Meanwhile, attempts to observe the supersolid had already expanded to other types of systems, obviously all bosonic in nature and all superfluids. A system of particular interest to the scientific community is that of so-called quantum gases. These are gases of atoms and molecules at very low temperatures and low pressures that realize the phenomenon of Bose-Einstein condensation and therefore are naturally superfluids. As early as 2003, researchers proposed that a crystallization phenomenon similar to the usual liquid-solid transition could occur in a condensate of atoms or molecules with long-range interactions, such as the dipole-dipole interaction, thus realizing the conditions for the formation of a supersolid [7]. At the time, however, it was not at all clear how the stability characteristics of a solid could be found in a gas. Note that the average distance between atoms in a quantum gas is about a thousand times greater than in a solid.

La ricerca è iniziata quando abbiamo evidenziato la presenza di un'interazione di quel tipo in un gas quantistico di atomi di potassio. Purtroppo, data l'esiguità del momento magnetico degli atomi alcalini (circa un magnetone di Bohr), l'interazione era troppo piccola per dar luogo al processo di cristallizzazione. Abbiamo allora provato a realizzare un gas quantistico di molecole con un forte momento di dipolo elettrico (molecole KRb), cosa che si è rivelata purtroppo molto difficile, dato il delicato e complesso meccanismo di formazione controllata di molecole nei gas quantistici. Così, qualche anno fa siamo passati allo studio di un gas quantistico di atomi con forte dipolo magnetico, scegliendo il disprosio, che ha uno dei massimi momenti magnetici della tavola periodica (circa dieci magnetoni di Bohr). Dato che l'energia di interazione dipolo-dipolo scala come il quadrato del momento magnetico, questo sistema era previsto mostrare il fenomeno di cristallizzazione. Ma come il supersolido potesse stabilizzarsi non era ancora chiaro.

Il problema è che le due interazioni di campo medio in gioco nei gas quantistici dipolari, la già citata interazione dipolo-dipolo e l'interazione di van der Waals, hanno la stessa dipendenza lineare della densità. Questo fa sì che quando la prima interazione diventa fortemente attrattiva poiché i dipoli atomici si allineano in configurazione testa-coda, la seconda non riesce a contrastarla e il sistema tende a collassare verso il vero stato solido, rilasciando molta energia e perdendo così le proprietà di coerenza quantistica. Pochi anni fa si è però scoperto che esiste una debole interazione oltre il campo medio (l'energia di punto zero delle fluttuazioni quantistiche, l'analogo del Lamb shift nell'energia dei singoli atomi), che è repulsiva e ha una diversa dipendenza dalla densità, fornendo così un mec-

In the last ten years, I have been fortunate enough to participate, with my collaborators, in the search for the supersolid in quantum gas with dipole-dipole interaction. The research began when we highlighted the presence of such an interaction in a quantum gas of potassium atoms. Unfortunately, given the small magnetic moment of alkaline atoms (about a Bohr magneton), the interaction was too small to give rise to the crystallization process. We then tried to make a quantum gas of molecules with a strong electric dipole moment (KRb molecules), which unfortunately proved very difficult, given the delicate and complex mechanism of controlled molecule formation in quantum gases. So a few years ago we took up the study of a quantum gas of atoms with a strong magnetic dipole, choosing dysprosium, which has one of the maximum magnetic moments of the periodic table (about ten Bohr magnetons). Since the dipole-dipole interaction energy scales as the square of the magnetic moment, this system was expected to show the crystallization phenomenon. But how the supersolid could be stabilized was not yet clear.

The problem is that the two mean-field interactions at play in dipole quantum gases, the dipole-dipole and the van der Waals interactions, have the same linear dependency on density. As a result, when the first interaction becomes highly attractive, because the atomic dipoles align in head-tail configuration, the second fails to counteract it. The system then tends to collapse to the true solid state, releasing a lot of energy and thus losing its quantum coherence properties. A few years ago, however, it was discovered that a weak interaction is present beyond those of the mean field (the zero-point energy of quantum fluctuations, the analogue

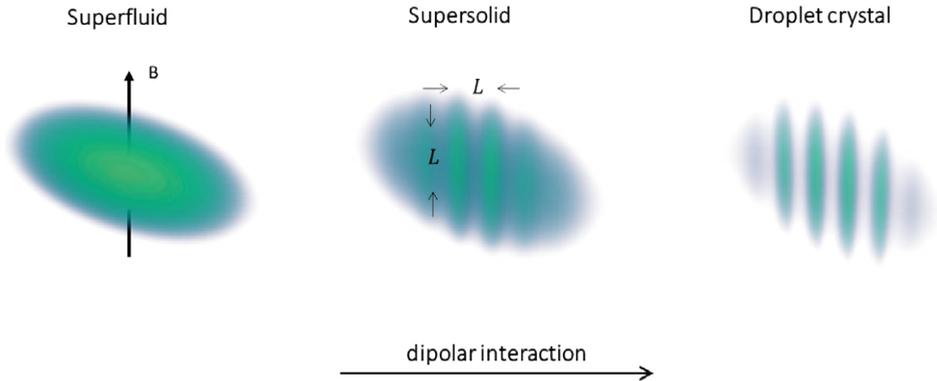


Figura 1. Schematizzazione del supersolido osservato in un gas quantistico dipolare, che esiste per valori dell'interazione dipolare intermedi a quelli propri del superfluido e del cristallo di gocce quantistiche. I siti reticolari del supersolido sono dei macro-dipoli magnetici composti da migliaia di atomi, che si respingono a distanze comparabili con la loro lunghezza. Il tunneling quantistico tra i siti assicura la superfluidità del sistema.

Figure 1. Schematization of the supersolid observed in a dipolar quantum gas, which exists for strengths of dipole interaction intermediate to those proper for a normal superfluid and a quantum droplet crystal. The lattice sites of the supersolid are magnetic macro-dipoles composed of thousands of atoms, which mutually repel at distances comparable to their length. Quantum tunneling between sites ensures superfluidity.

canismo di stabilizzazione analogo alla repulsione a piccola distanza tra gli atomi in un vero solido. Una differenza importante però è che in un gas quantistico questa repulsione è debole e permette di avvicinare tra loro un grande numero di atomi, dell'ordine delle migliaia, creando così dei clusters macroscopici. Abbiamo scoperto che questi clusters, chiamati gocce quantistiche in analogia con le

of the Lamb shift in the energy of individual atoms), which is repulsive and has a different dependence on density, thus providing a stabilization mechanism analogous to small-distance repulsion between atoms in a true solid. An important difference, however, is that in a quantum gas this repulsion is weak and allows a large number of atoms, of the order of thousands, to be brought together, thus creating macroscopic clusters. We found that these clusters, called quantum droplets in analogy with superfluid helium droplets, are self-bound, superfluid, and exist not only in quantum dipolar gases, but more generally in quantum gases with two competing interactions [8].

At this point, we have all the ingredients to explain the formation of the supersolid. In the presence of an external magnetic field, the dipoles align in head-tail configuration, lowering the energy of the system and tending to form a quantum droplet, which is in fact a macro-dipole composed of thousands of atoms. However, the system is confined by harmonic potential along the direction of the field. This causes the droplets to have a maximum length L of the order of the length of the harmonic oscillator; in terms of its energy, therefore, it is convenient for the system to break into several droplets. On the basis of a classical model, it is easy to estimate that two dipoles of length L tend to stay exactly at a distance of L , such that we get a periodic structure of droplets arranged at a fixed distance. At this point, the only ingredient missing to make a supersolid is the possibility for atoms to move from droplet to droplet. This is only possible if the quantum droplets are not strictly self-bound, which only happens in a narrow intensity range of the interactions, so that the atoms can quantum tunnel along the

gocce di elio superfluido, sono auto-confinanti, superfluidi ed esistono non solo nei gas quantistici dipolari, ma più in generale nei gas quantistici con due interazioni in competizione [8].

A questo punto abbiamo tutti gli ingredienti per spiegare la formazione del supersolido. In presenza di un campo magnetico esterno, i dipoli si allineano in configurazione testa-coda abbassando l'energia del sistema e tendendo a formare una goccia quantistica, che di fatto è un macro-dipolo composto da migliaia di atomi. Il sistema è però confinato da un potenziale armonico lungo la direzione del campo. Questo fa sì che le gocce possano avere una lunghezza massima L dell'ordine della lunghezza dell'oscillatore armonico, e che pertanto al sistema sia energeticamente conveniente spezzarsi in più droplets. È facile stimare da un modello classico che due dipoli di lunghezza L tendono a stare proprio ad una distanza L e così, nel caso in cui le gocce siano tante, si ottiene una struttura periodica di gocce disposte a distanza fissata. A questo punto l'unico ingrediente che manca per realizzare un supersolido è la possibilità per gli atomi di spostarsi da una goccia all'altra. Questa si realizza solo se le gocce quantistiche non sono strettamente auto-confinanti, cosa che avviene solo in un intervallo ristretto di intensità delle interazioni in gioco, così che gli atomi possano fare tunneling quantistico tra le gocce. È importante notare che il supersolido non è complessivamente auto-confinante e ha perciò bisogno di una pressione esterna (così come l'elio solido), che negli esperimenti è fornita da un potenziale armonico tridimensionale.

Alla fine del 2018 abbiamo compiuto la prima osservazione sperimentale del supersolido [9], utilizzando una tecnica analoga alla diffrazione di luce da un re-

droplets chain. It is important to note that the supersolid is not self-bound overall and that it therefore requires external pressure (similarly to solid helium), which in experiments is provided by a harmonic potential in all directions.

At the end of 2018, we made the first experimental observation of the supersolid [9], using a technique analogous to diffraction of light from a lattice. By releasing the supersolid from the harmonic potential, in fact, waves of matter expand and interfere with each other in a way similar to light waves, giving rise to a diffraction pattern in momentum space, from which it is possible to reconstruct the density structure of the system. A measure of the phase coherence of the diffraction revealed the coherence of atoms in the supersolid. This observation, which can be considered the verification of the original prediction of a condensed state with periodic modulation of density [2], has stimulated great interest in the scientific community and has been successfully replicated by other research groups [10].

With subsequent experiments we revealed the other fundamental properties of the supersolid predicted in the seminal works of fifty years ago. A first study involved the simultaneous presence of two symmetry breakings in the supersolid: gauge invariance symmetry, which breaks when the Bose–Einstein condensation phenomenon appears, and translation symmetry, which breaks when a periodic structure appears. Any spontaneous symmetry breaking implies the presence of system excitation, so-called Goldstone excitation, which is the analogue of the originally predicted sound excitation [1]. We in fact observed that the supersolid has two simultaneous excitations, one related to the superfluid oscillations of atoms along the periodic

ticolo. Rilasciando il supersolido dal potenziale armonico, infatti, le onde di materia espandono e interferiscono tra di loro in modo analogo alle onde luminose, dando luogo ad un pattern di diffrazione nello spazio degli impulsi dal quale è possibile ricostruire la struttura di densità del sistema. Una misura della coerenza di fase della diffrazione ci ha rivelato la coerenza degli atomi nel supersolido. Questa osservazione, che può essere considerata la verifica della previsione originale di uno stato condensato con modulazione periodica di densità [2], ha suscitato un grande interesse nella comunità scientifica ed è stata replicata con successo da altri gruppi di ricerca [10].

Con esperimenti successivi abbiamo rivelato le altre proprietà fondamentali del supersolido previste nei lavori seminali di cinquanta anni fa. Un primo studio ha riguardato la presenza simultanea di due rotture di simmetria nel supersolido: la simmetria per invarianza di gauge, che si rompe quando appare il fenomeno della condensazione di Bose-Einstein, e la simmetria per traslazione, che si rompe quando appare la struttura periodica. Ogni rottura spontanea di simmetria implica la presenza di una eccitazione del sistema, la cosiddetta eccitazione di Goldstone, che è l'analogo dell'eccitazione sonora prevista originariamente [1]. E infatti abbiamo osservato che il supersolido ha due eccitazioni simultanea, una legata alle oscillazioni superfluide degli atomi lungo il reticolo periodico e l'altra legata alle oscillazioni del reticolo stesso [11]. Abbiamo anche capito che il supersolido è connesso da transizioni di fase quantistiche sia a un normale superfluido (il condensato di Bose-Einstein) sia a un cristallo classico di gocce quantistiche. In queste due fasi, sopravvive solo uno dei due modi di eccitazione, dato che una sola simmetria è rotta.

lattice and the other related to the oscillations of the lattice itself [11]. We also understood that the supersolid is connected by quantum phase transitions to both a normal superfluid (the Bose-Einstein condensate) and a classical quantum droplet crystal. In these two phases, only one of the two modes of excitation survives, since only one symmetry is broken.

In a subsequent study, we addressed the question of the moment of inertia, carrying out an experiment similar to that originally hypothesized by Leggett and conducted on solid helium with torsion pendulums. We thus excited a rotational oscillation of the supersolid in the harmonic potential - the so-called scissors mode, analogous to the rotation observed in atomic nuclei - and from the oscillation frequency we reconstructed the value of the moment of inertia of the system. Surprisingly, we observed that the supersolid has practically zero moment of inertia, although its density structure is very similar to that of a classical crystal. This stems from the fact that the individual sites of the supersolid lattice, the quantum droplets, are individually superfluid. We thus have evidence that the supersolid is a highly non-classical solid, with a clear superfluid nature [12].

These first results not only demonstrate the existence of the supersolid as initially conceived, but also pave the way for in-depth study of the properties of this new phase of matter. For example, a very important goal is to measure the rigidity of the supersolid, a solid-type property that one would not expect in a gaseous system in which a supersolid is formed. Supersolids are then predicted to show a whole series of exotic quantum phenomena compared to ordinary matter, such as non-quantized vortexes, a barrierless Josephson

Con uno studio ulteriore abbiamo affrontato la questione del momento di inerzia, svolgendo un esperimento analogo a quello ipotizzato originariamente da Leggett ed effettuato sull'elio solido con i pendoli di torsione. Abbiamo così eccitato un'oscillazione di rotazione del supersolido nel potenziale armonico - il cosiddetto scissors mode, analogo alla rotazione osservata nei nuclei atomici - e dalla frequenza di oscillazione abbiamo ricostruito il valore del momento di inerzia del sistema. Sorprendentemente, si è osservato che il supersolido ha praticamente un momento di inerzia nullo, anche se la sua struttura di densità è molto simile a quella di un cristallo classico. Questo deriva dal fatto che i singoli siti del reticolo del supersolido, le gocce quantistiche, sono individualmente superfluide. Abbiamo così l'evidenza che il supersolido è un solido altamente non classico, con un comportamento prettamente superfluido [12].

Questi primi risultati non solo dimostrano l'esistenza del supersolido come inizialmente previsto, ma aprono anche la strada allo studio approfondito delle proprietà di questa nuova fase della materia. Ad esempio, un obiettivo molto importante è misurare la rigidità del supersolido, una proprietà di tipo solido che può sembrare inaspettata per il sistema gassoso nel quale si forma il supersolido. Ci si aspetta poi che i supersolidi mostrino tutta una serie di fenomeni quantistici esotici rispetto alla materia ordinaria, così come vortici non quantizzati, l'effetto Josephson senza barriera, la capacità di deformarsi senza attrito, etc., tutti fenomeni affascinanti e finalmente a portata di mano negli esperimenti. Una domanda forse ancora più affascinante è se sia possibile osservare fenomeni analoghi al supersolido nei superfluidi di tipo fermionico, come ad esempio i condensati di

effect, the ability to deform frictionlessly, etc., all fascinating phenomena whose verification is finally within reach through experimentation. Perhaps even more fascinating is the question about the possible existence of supersolid-like phenomena in fermion-type superfluids, such as Cooper pair condensates of electrons in superconductors, for which translational symmetry breaking phenomena have in fact already been observed, and what the technological implications might be.

The research I have summarized here began at LENS when it was still located on the hill of Arcetri. It continued at the Polo Scientifico in Sesto Fiorentino and then developed at the Pisa section of CNR-INO. Over the years, I have been lucky to interact with talented colleagues and students, on both experimental and theoretical levels.

References

- [1] A. F. Andreev, I.M. Lifshitz, Quantum theory of defects in crystals. *Sov. Phys. JETP* 29, 1107 (1969).
- [2] G. V. Chester, Speculations on Bose-Einstein condensation and quantum crystals. *Phys. Rev. A* 2, 256 (1970).
- [3] A. J. Leggett, Can a solid be "superfluid"? *Phys. Rev.* 25, 1543 (1970).
- [4] M.H.W. Chan, R.B. Hallock, L. Reatto, Overview on solid 4He and the issue of supersolidity. *J. Low Temp. Phys.* 172, 317 (2013).

coppie di Cooper di elettroni nei superconduttori, per i quali sono in effetti già stati osservati fenomeni di rottura di simmetria traslazionale, e quali potrebbero essere le ricadute in campo tecnologico.

La ricerca su supersolido che ho raccontato è iniziata al LENS quando era ancora situato sulla collina di Arcetri, è proseguita al Polo Scientifico di Sesto Fiorentino, e poi si è sviluppata alla sede di Pisa del CNR-INO. Negli anni ho avuto la fortuna di interagire con bravissimi colleghi e studenti, sia sul lato sperimentale che su quello teorico.

Bibliografia

- [1] A. F. Andreev, I. M. Lifshitz, Quantum theory of defects in crystals. *Sov. Phys. JETP* 29, 1107 (1969).
 - [2] G. V. Chester, Speculations on Bose-Einstein condensation and quantum crystals. *Phys. Rev. A* 2, 256 (1970).
 - [3] A. J. Leggett, Can a solid be “superfluid”? *Phys. Rev. Lett.* 25, 1543 (1970).
 - [4] M.H.W. Chan, R.B. Hallock, L. Reatto, Overview on solid 4He and the issue of supersolidity. *J. Low Temp. Phys.* 172, 317 (2013).
 - [5] E. Kim, M.H.W. Chan, Probable observation of a supersolid helium phase. *Nature* 427, 225 (2004).
 - [6] J. Day, J. Beamish, Low-temperature shear modulus changes in solid 4He and connection to supersolidity. *Nature* 450, 853 (2007).
-
- [5] E. Kim, M.H.W. Chan, Probable observation of a supersolid helium phase. *Nature* 427, 225 (2004).
 - [6] J. Day, J. Beamish, Low-temperature shear modulus changes in solid 4He and connection to supersolidity. *Nature* 450, 853 (2007).
 - [7] L. Santos, G. V. Shlyapnikov, and M. Lewenstein, Roton-maxon spectrum and stability of trapped dipolar Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. Lett.* 90, 250403 (2003).
 - [8] G. Semeghini, G. Ferioli, L. Masi, C. Mazzinghi, L. Wolswijk, F. Minardi, M. Modugno, G. Modugno, M. Inguscio, M. Fattori, Self-bound quantum droplets in atomic mixtures. *Phys. Rev. Lett.* 120, 235301 (2018).
 - [9] L. Tanzi, E. Lucioni, F. Famà, J. Catani, A. Fioretti, C. Gabbanini, R.N. Bisset, L. Santos, G. Modugno, Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties. *Phys. Rev. Lett.* 122, 130405 (2019).
 - [10] T. Donner, Dipolar quantum gases go supersolid, *Physics* 12, 38 (2019).
 - [11] L. Tanzi, S.M. Roccuzzo, E. Lucioni, F. Famà, A. Fioretti, C. Gabbanini, G. Modugno, A. Recati, S. Stringari, Supersolid symmetry breaking from compressional oscillations in a dipolar quantum gas. *Nature* 574, 382 (2019).
 - [12] L. Tanzi et al., Evidence of superfluidity in a dipolar supersolid from non-classical rotational inertia, *Science*, 371, 1162 (2021).

- [7] L. Santos, G. V. Shlyapnikov, and M. Lewenstein, Roton-maxon spectrum and stability of trapped dipolar Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. Lett.* 90, 250403 (2003).
- [8] G. Semeghini, G. Ferioli, L. Masi, C. Mazzinghi, L. Wolswijk, F. Minardi, M. Modugno, G. Modugno, M. Inguscio, M. Fattori, Self-bound quantum droplets in atomic mixtures. *Phys. Rev. Lett.* 120, 235301 (2018).
- [9] L. Tanzi, E. Lucioni, F. Famà, J. Catani, A. Fioretti, C. Gabbanini, R.N. Bisset, L. Santos, G. Modugno, Observation of a dipolar quantum gas with metastable supersolid properties. *Phys. Rev. Lett.* 122, 130405 (2019).
- [10] T. Donner, Dipolar quantum gases go supersolid, *Physics* 12, 38 (2019).
- [11] L. Tanzi, S.M. Rocuzzo, E. Lucioni, F. Famà, A. Fioretti, C. Gabbanini, G. Modugno, A. Recati, S. Stringari, Supersolid symmetry breaking from compressional oscillations in a dipolar quantum gas. *Nature* 574, 382 (2019).
- [12] L. Tanzi et al., Evidence of superfluidity in a dipolar supersolid from non-classical rotational inertia, *Science*, 371, 1162 (2021).

Giovanni Modugno è professore associato di Fisica della Materia all'Università di Firenze e ricercatore associato dell'Istituto Nazionale di Ottica. Dalla fine del dottorato alla Scuola Normale Superiore su spettroscopia laser, si occupa di ricerca sperimentale sui gas quantistici ultrafreddi. Il suo principale interesse è il comportamento quantistico della materia in condizioni difficili da raggiungere in sistemi ordinari, come la localizzazione di Anderson, il vetro di Bose in presenza di disordine e il supersolido.

Giovanni Modugno is Associate Professor of Physics of Matter at the University of Florence and Associate Researcher at the National Institute of Optics. Since taking his PhD at Scuola Normale Superiore with a dissertation on laser spectroscopy, he has carried out experimental research on ultra-cold quantum gases. His main interest is the quantum behavior of matter in difficult-to-reach conditions in ordinary systems, such as Anderson localization, the Bose glass in the presence of disorder, and the supersolid.