



Il Colle di
Galileo

La cristallizzazione di un superfluido: il supersolido

The crystallization of a superfluid: the supersolid

Nicolò Antolini, Giulio Biagioni

Sommario. I superfluidi possono cristallizzare, acquistando rigidità e plasticità analogamente ai solidi classici, ma mantenendo le loro tipiche proprietà di coerenza quantistica. Il risultato è un supersolido, recentemente osservato in un esperimento di gas quantistici dipolari. Abbiamo studiato la transizione di fase dal superfluido al supersolido, mettendo in luce le analogie e le differenze con la corrispondente transizione classica da liquido a solido.

Keywords. Fasi quantistiche della materia, cristalli, superfluidi, condensati di Bose-Einstein, transizioni di fase.

La trasformazione di un liquido in un solido è uno dei fenomeni fisici più elementari, e al tempo stesso affascinanti, che abbiamo quotidianamente sotto gli occhi. Nella sua apparente semplicità, la cristallizzazione dei liquidi è una transizione di fase ampiamente studiata nell'ambito della meccanica statistica. In un recente esperimento, condotto al CNR-INO di Pisa e LENS di Firenze, abbiamo studiato un nuovo tipo di transizione [1], che riguarda la cristallizzazione di un superfluido in un supersolido, gli analoghi quantistici dei liquidi e solidi.

I superfluidi, noti ormai da decenni, sono costituiti da atomi le cui funzioni d'onda sono completamente delocalizzate e si sovrappongono le une alle altre.

Summary. Superfluids can become crystals, obtaining rigidity and plasticity in analogy with classical solids, but keeping their typical properties of quantum coherence. The resulting phase is a supersolid, recently observed experimentally in a dipolar quantum gas. We have studied the phase transition from the superfluid to the supersolid, highlighting the analogies and differences with the corresponding classical transition from liquid to solid.

Keywords. quantum phases of matter, superfluids, Bose-Einstein condensates, phase transitions.

The transformation of a liquid into a solid is one of the most elementary, as well as fascinating, physical phenomena that we witness every day. Despite its apparent simplicity, the crystallization of liquids is a phase transition widely studied in the field of statistical mechanics. In a recent experiment, performed at the CNR-INO in Pisa and LENS in Florence, we studied a

Questo dà luogo ad alcuni spettacolari effetti macroscopici, come la possibilità di scorrere senza attrito, muoversi senza inerzia e trasportare corrente elettrica senza dissipazione. Il primo superfluido realizzato è stato l'elio liquido, ma oggi le proprietà superfluide vengono studiate approfonditamente anche negli esperimenti di gas quantistici, di cui l'Università di Firenze, il CNR-INO e il LENS sono pionieri.

La fase supersolida, d'altro canto, è stata realizzata per la prima volta in un esperimento di gas quantistici dipolari guidato dal Prof. Giovanni Modugno [2]. Partendo da un condensato di Bose-Einstein (superfluido) e sfruttando le interazioni magnetiche tra gli atomi, è possibile indurre il superfluido a formare dei *clusters* contenenti migliaia di atomi ciascuno, distribuiti in strutture regolari. Ogni cluster rappresenta l'equivalente di un sito reticolare di un solido classico, conferendo rigidità al sistema. Il punto cruciale è che, almeno in un piccolo regime di parametri, le funzioni d'onda dei costituenti rimangono sovrapposte anche tra *clusters* diversi, mantenendo quindi le proprietà superfluide.

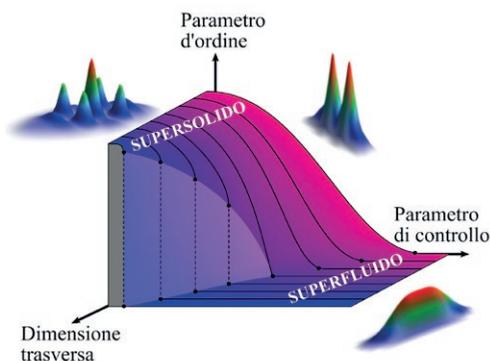
Al contrario dei solidi classici, dove la transizione di fase avviene abbassando la temperatura, ovvero rallentando le molecole e permettendogli di localizzarsi in un reticolo, nel caso del supersolido la transizione avviene a temperatura zero. Parliamo quindi di transizione di fase quantistica: il parametro di controllo, invece della temperatura, è l'intensità delle interazioni dipolari, che possiamo variare nell'esperimento. Il parametro d'ordine consiste invece nel contrasto di densità tra i picchi e le valli del supersolido: è uguale a zero nel superfluido e cresce entrando nel supersolido (vedi figura).

new type of transition [1] concerning the crystallization of a superfluid into a supersolid, the quantum analogs of liquids and solids.

Known for decades, superfluids are made of atoms whose wave functions are completely delocalized and overlap each other. This gives rise to some extraordinary macroscopic effects, such as the ability to flow without friction, move without inertia, and carry electric current without dissipation. The first superfluid created was liquid helium, but today the properties of superfluids are also studied in depth in quantum gases experiments, a field in which the University of Florence, LENS and CNR-INO are pioneers.

The supersolid phase, on the other hand, was recently realized for the first time in a dipolar quantum gas experiment led by Prof. Giovanni Modugno [2]. Starting from a Bose-Einstein condensate (superfluid) and exploiting the magnetic interactions between the atoms, it is possible to induce the superfluid to spontaneously form clusters containing thousands of atoms each, arranged in regular structures. Each cluster represents the equivalent of a lattice site of a classic solid, giving rigidity to the system. The crucial point is that, at least in a small window of parameters, the wave functions of the constituents are still overlapping even between different clusters, thus maintaining the superfluid properties.

Unlike classical solids, where the phase transition occurs by lowering the temperature, hence slowing down the molecules and allowing them to localize in a lattice, in the case of the supersolid the transition occurs at zero temperature. We, therefore, call it a quantum phase transition: the control parameter, instead of temperature, is the intensity of the dipolar interactions,



Nei solidi con un numero macroscopico di siti reticolari la transizione classica è discontinua, con un salto del parametro d'ordine. Il supersolido realizzato negli esperimenti, invece, ha pochi siti reticolari ed è confinato in una trappola armonica che ne influenza la dimensionalità. Nel nostro recente articolo abbiamo scoperto che questa configurazione offre uno spettro più ricco di transizioni possibili.

Quando il sistema è debolmente confinato troviamo supersolidi di grandi dimensioni con struttura cristallina triangolare. In questi casi la transizione da superfluido a supersolido avviene in maniera discontinua. Nel limite opposto, quando il supersolido viene compresso da un forte confinamento trasverso, la struttura cristallina si crea lungo una sola direzione ottenendo una singola fila di

which we can vary in the experiment. The order parameter, on the other hand, is the density contrast between the peaks and valleys of the supersolid: it is equal to zero in the superfluid and grows as the supersolid forms (see figure).

In solids with a macroscopic number of lattice sites, the classical transition is discontinuous, with a jump in the order parameter. The supersolid produced in the experiments, on the other hand, has only a few lattice sites and is confined in a harmonic trap which affects its dimensionality. In our recent article, we found that this setup offers a richer spectrum of possible phase transitions.

When the system is weakly confined we have large supersolids with a triangular crystal structure. In these cases, the transition from superfluid to supersolid occurs discontinuously. In the opposite limit, when the supersolid is compressed by strong transverse confinement, the crystalline structure is created along one direction obtaining a single row of density peaks (see figure). In this regime the transition is continuous, without jumps in the order parameter.

By studying the crossover between these two regimes, we found that the discontinuous transition persists even in strongly confined supersolids, thanks to the presence of the superfluid background which maintains a triangular structure. The discovery of a region of continuous transitions offers new possibilities for experimental investigations, allowing the creation of less excited supersolids, a necessary requirement for studying delicate phenomena such as the production of entanglement.

picchi di densità (vedi figura). In questo regime la transizione è continua, senza salti nel parametro d'ordine.

Studiando il *crossover* tra questi due regimi, abbiamo scoperto che la transizione discontinua persiste anche in supersolidi fortemente confinati, grazie alla presenza del background superfluido che mantiene una struttura triangolare. La scoperta di una regione di transizioni continue offre nuove possibilità di indagine, permettendo di formare supersolidi meno eccitati, un requisito necessario per studiare fenomeni delicati come la produzione di entanglement.

Bibliografia

- [1] G. Biagioni, N. Antolini, A. Alaña, M. Modugno, A. Fioretti, C. Gabbanini, L. Tanzi, and G. Modugno, *Dimensional Crossover in the Superfluid-Supersolid Quantum Phase Transition*. Phys. Rev. X 12, 021019 (2022).
- [2] 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).

Giulio Biagioni è dottorando in fisica presso l'Università di Firenze. Nicolò Antolini è dottorando in fisica presso il LENS. Entrambi sono ricercatori associati presso l'Istituto Nazionale di Ottica. Svolgono la loro attività sperimentale presso il CNR-INO sezione di Pisa e si occupano dello studio della fase supersolida della materia in un gas quantistico dipolare.

Bibliography

- [1] G. Biagioni, N. Antolini, A. Alaña, M. Modugno, A. Fioretti, C. Gabbanini, L. Tanzi, and G. Modugno, *Dimensional Crossover in the Superfluid-Supersolid Quantum Phase Transition*. Phys. Rev. X 12, 021019 (2022).
- [2] 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).

Giulio Biagioni is a PhD student at the University of Florence. Nicolò Antolini is a PhD student at LENS. Both are researchers at the Istituto Nazionale di Ottica. They carry out experimental activities at the CNR-INO in Pisa, where they study the supersolid phase of matter in a dipolar quantum gas.