

L'enigma della supersolidità

Per 10 anni ci si è sforzati di capire come fosse possibile, per un cristallo di elio, essere simultaneamente elastico e infinitamente fluido.

Alla fine si è scoperto che i suoi atomi sono disposti su piani che possono scivolare uno sull'altro come i fogli di carta in una stampante.

Sébastien Balibar,

Laboratorio

Pierre Aigrain,

École Normale

Supérieure, Parigi

Gennaio 2006. Pierre-Gilles de Gennes, Premio Nobel per la Fisica nel 1991, mi aveva fatto inviare un messaggio dalla sua segretaria:

Egregio Signore,

P.-G. de Gennes mi prega di farLe avere l'articolo allegato, nella speranza di avere la Sua opinione e le Sue critiche a riguardo.

Colgo l'occasione per porgerLe i miei auguri più vivi,

Marie-F. Lancastre

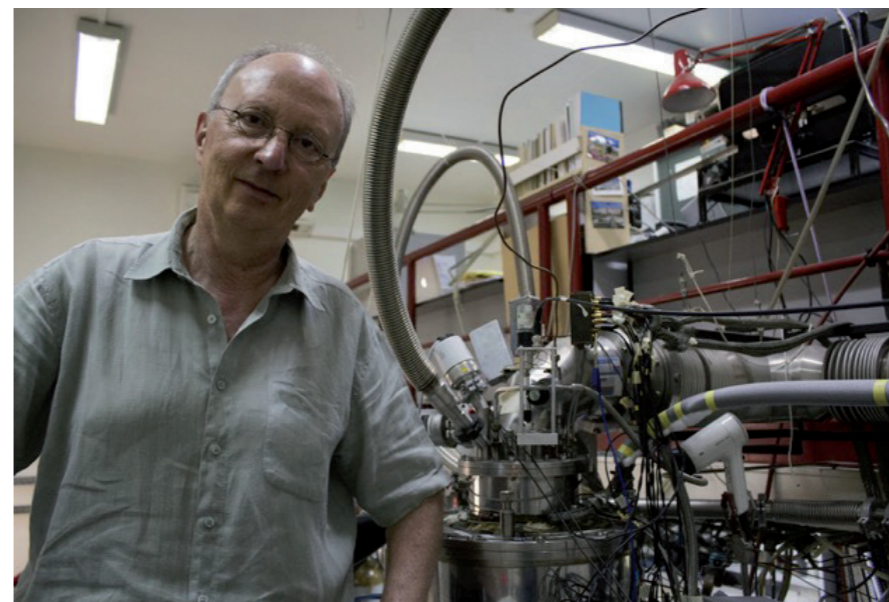
Era la bozza di un articolo: prima di pubblicarlo, de Gennes desiderava discuterne con me. Moses Chan, un professore cinese naturalizzato americano, e il suo studente coreano Eunseong Kim, entrambi ricercatori della Pennsylvania State University, ritenevano di aver scoperto che un cristallo ultrafreddo di elio solido fluiva come un liquido totalmente privo di attrito [1]! La notizia era talmente controintuitiva da essere finita sulle prime pagine di varie riviste scientifiche. Figuriamoci se un solido può scorrere come un fluido! La cosiddetta fisica quantistica, però, è celebre per le sue stranezze. Dopotutto, si è scoperto che un elettrone può attraversare simultaneamente due fenditure diverse...

Phil Anderson, un professore di Princeton insignito del Nobel 14 anni prima di Pierre-Gilles de Gennes, aveva appena pubblicato sulla rivista *Science* un'interpretazione ardita di quel bizzarro fenomeno, che nel 1969 era stato battezzato da diversi teorici "supersolidità". La scelta del nome era stata, a mio avviso, piuttosto infelice. Si potrebbe pensare che un "supersolido" sia più solido

degli altri, ma non è così. Esistono liquidi infinitamente fluidi, detti appunto "superfluidi", che rappresentano un'altra stranezza della fisica quantistica: i loro atomi si comportano come un'onda collettiva. I primi teorici che intuirono la possibilità di uno stato della materia elastico come i solidi tradizionali, ma anche superfluidi, coniarono una di quelle che Lewis Carroll chiamava "parole-macedonia", formate dalla fusione di due termini (come "metalmecanico", formata da "metallurgico" e "meccanico"). Nelle loro intenzioni, "supersolido" indicava qualcosa di "superfluido" e al tempo stesso "solido".

Essere una cosa e il suo contrario non è semplicemente strano. È paradossale. La supersolidità è paradossale da quando è nata, e nessuno è ancora riuscito a dimostrarne l'esistenza. Phil Anderson proponeva un'interpretazione delle osservazioni di Kim e Chan che faticavo a capire. Pierre-Gilles de Gennes aveva avuto un'idea più semplice, basata sul possibile movimento dei difetti della struttura cristallina dell'elio, ma voleva parlarne prima di spingersi più in là. Un cristallo è un insieme di atomi disposti in maniera ordinata uno di fianco all'altro, come le arance sul bancone di un fruttivendolo. Può accadere che il negoziante metta un'arancia nel posto sbagliato: nel cristallo,

Un solido è quantistico se le sue proprietà riflettono la natura ondulatoria degli atomi.



Sébastien Balibar accanto alla parte superiore del suo "frigorifero" (fotografia di J. F. Dars).

ciò equivale ad avere un difetto, ovvero un atomo, o una fila di atomi, in una posizione diversa da quella ideale. Nella scienza dei materiali, lo spostamento di una fila di atomi rispetto alla posizione normale è detto "dislocazione".

La fiducia che de Gennes mostrava nei miei confronti mi lusingava. Credeva veramente che potessi insegnargli qualcosa? Spedii all'indirizzo e-mail

La supersolidità è paradossale da quando è nata, e nessuno è ancora riuscito a dimostrarne l'esistenza.

della segretaria una pagina di osservazioni. Ero d'accordo sul fatto che i difetti, le "dislocazioni", dovessero avere un ruolo, ma erano davvero così mobili a bassa temperatura come pensava lui? Un anno più tardi ne discutevamo ancora, e quando de Gennes ci lasciò, nel marzo del 2007, né lui né io avevamo trovato una spiegazione realmente convincente.

In quei primissimi giorni del 2006, però, mi ero detto che se il solido era davvero fluido lo si sarebbe dovuto vedere, e lo avrei verificato [2].

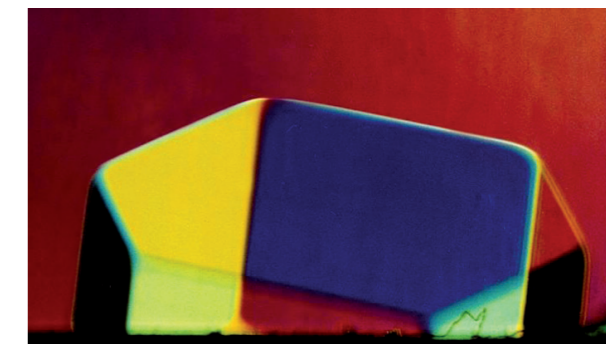
Va detto che da quindici anni osservavo la forma di quei cristalli, e avevo scoperto che dipendeva dalla temperatura. Per valori molto bassi della temperatura, i cristalli erano aguzzi come il quarzo allo stato naturale, leggermente meno freddi diventavano arrotondati come per-

le. Insieme ai miei studenti di allora, avevamo misurato molte proprietà della loro superficie, e con Philippe Nozières avevamo capito da cosa dipendeva la loro forma. Studiando quei cristalli, che nonostante il loro aspetto esotico costituiscono un modello, avevo l'impressione di aver fatto progredire la fisica delle superfici cristalline. E si dà il caso che tutta l'elettronica moderna abbondi di superfici cristalline...

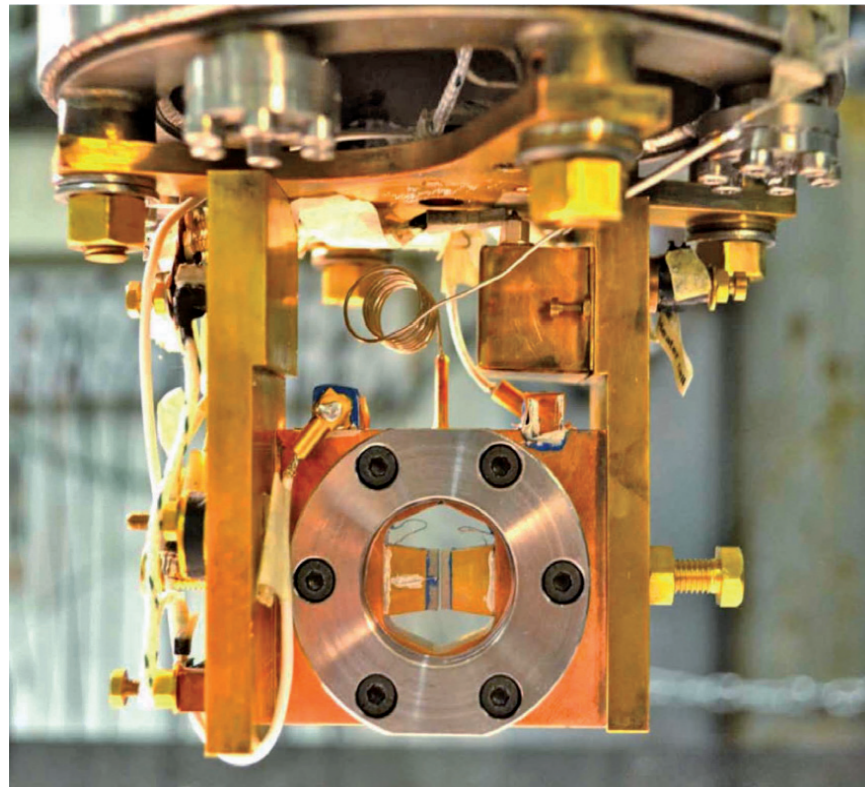
In sostanza, sapevamo far crescere quei cristalli,

osservarne l'orientazione e alterarne la purezza. Tra i vari strumenti indispensabili, c'era un frigorifero di nostra fabbricazione, che permetteva di arrivare a un centesimo di grado dallo zero assoluto (0,01 K, cioè $-273,14$ °C) nonostante le grandi finestre di cui era dotato. Riuscire a vedere la materia in prossimità dello zero assoluto ci dava un certo vantaggio sulla concorrenza straniera. Le nostre ricerche erano state notate, tra gli altri, da de Gennes.

Grazie a due studenti giapponesi, Satoshi Sasaki e Ryosuke Ishiguro, riuscimmo a osservare l'elio solido mentre riempiva una provetta per poi uscirne: ci sembrò che un cristallo potesse fluire solo quando conteneva dei difetti, ma non trovammo il cambiamento di comportamento osservato da Kim e Chan in prossimità di 0,1 K. De Gennes sembrava avere parzialmente ragione, ma il mistero persisteva.



Per capire come è orientato un cristallo di elio basta osservarlo. Nella foto, scattata nel 1994 con E. Rolley e C. Guthmann, i colori sono ottenuti illuminando il cristallo attraverso un prisma.



La cella dell'École Normale Supérieure è una cavità praticata in una lastra di rame dorato, chiusa da due finestre di zaffiro trasparente. I cristalli crescono dal basso, riempiendo gradualmente la fessura verticale larga 0,7 mm che separa i due trasduttori piezoelettrici grigi al centro della figura.

Fu a quel punto che a Edmonton, in Canada, John Beamish e il suo studente James Day scoprirono che il cosiddetto supersolido era ancora più rigido dell'elio solido ordinario [3] e che per deformarlo bisogna sottoporlo all'azione di una forza, come un materiale elastico qualsiasi. Dalle loro misure risultava che al di sotto di 0,1 K bisognava "spingere" più forte che a 0,2 K. Eppure, se almeno una parte dell'elio fosse riuscita a fluire attraverso il resto, il solido sarebbe dovuto risultare più molle! La supersolidità si faceva sempre più enigmatica.

L'esperimento di Kim e Chan, tuttavia, era stato ripetuto con successo in diverse università (Cornell, Rutgers, Keio, Tokyo, Manchester e altre ancora). Si trattava di far oscillare un contenitore pieno di elio solido attorno a un asse di torsione in bronzo. La frequenza delle oscillazioni, dell'ordine di 1000 Hz, aumentava leggermente a temperatura più bassa, come se una parte dell'elio, invece di essere trascinato dalle pareti del contenitore, restasse immobile mentre il resto girava. Era come se l'1% dell'elio fluisse attraverso il resto, sebbene si trattasse di un solido.

dei giovani ricercatori e dotarci di un'elettronica più moderna per migliorare il nostro frigorifero e la precisione delle misure.

Insieme a un giovane dottorando, Xavier Rojas, all'inizio del 2010 dimostrammo che le anomalie meccaniche dei cristalli erano dovute effettivamente al moto delle loro dislocazioni, come ipotizzato da Day e Beamish. Inoltre, grazie all'aiuto dell'americano Humphrey Maris, scoprimmo che i nostri cristalli non erano anormalmente rigidi al di sotto di 0,1 K, ma anormalmente molli in un intervallo di temperatura compreso tra 0,1 e 0,3 K. Insomma, de Gennes aveva ragione per metà e torto per l'altra metà. Quanto ad Anderson, secondo il quale un su-

In ogni esperienza di fisica dei solidi conviene disporre dei migliori campioni possibili. Grazie alla possibilità di controllare a vista la crescita dei cristalli, avevamo imparato a prepararne di bellissimi a forma di prisma esagonale. Eravamo persino in grado di purificarli a un livello che avrebbe fatto ingelosire un metallurgista: nessuna traccia di impurità chimiche, e meno di quattro impurità isotopiche (elio-3) per 10 miliardi di atomi di elio-4.

Proponemmo quindi di ripetere gli esperimenti su cristalli di qualità eccellente di cui conoscevamo l'orientazione al posto dei solidi disordinati sui quali i nostri concorrenti operavano alla cieca. Inoltre, ebbi la fortuna di ricevere da Bruxelles i fondi necessari per assumere

Quando eliminammo tutte le impurità dai cristalli, i piani atomici continuarono a scivolare fino alle temperature più fredde che riuscimmo a raggiungere.

La fisica delle basse temperature è il regno della meccanica quantistica.

aveva attratto nuovi studenti: Ariel Haziot, Andrew Fefferman e, qualche tempo dopo, Fabien Souris.

Alla fine del 2010 arrivarono anche Moses Chan e il suo studente Josh West con una microbotiglia in zaffiro trasparente da riempire con un bel cristallo. Riuscimmo a far girare dei cristalli nel microrecipiente, ma cominciavamo a nutrire qualche dubbio. Il nostro cristallo non girava come un solido ordinario, ma nemmeno come quelli di Kim e Chan. Per poter disporre di una verità, almeno parziale, i fenomeni fisici devono essere riproducibili, e in questo caso non lo erano. La supersolidità esisteva realmente nell'elio solido o viveva solo nell'immaginazione di teorici illustri come Lifshitz, Leggett e Anderson?

Una plasticità gigante

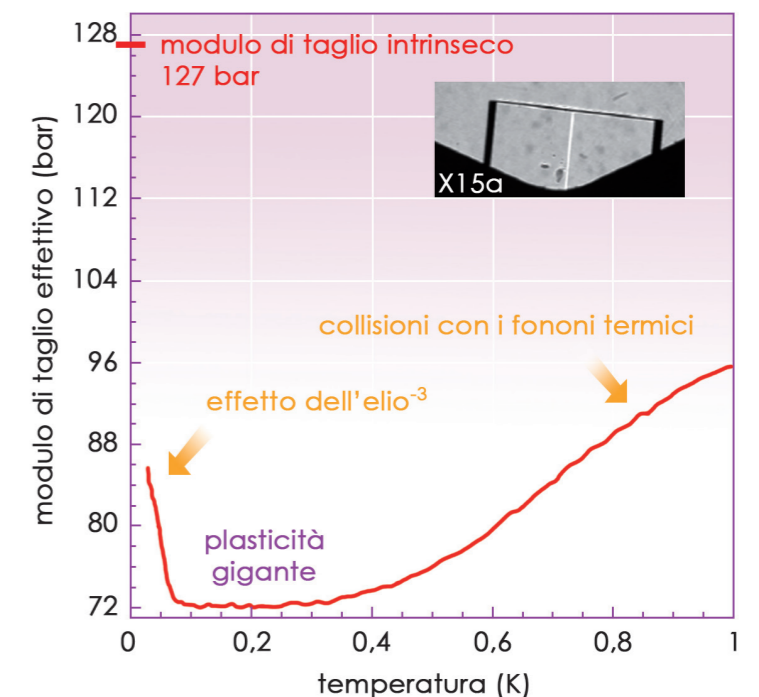
Fu a quel punto che John Beamish, anche lui attratto dal nostro frigorifero, arrivò con dei piccoli trasduttori piezoelettrici per aiutarci a misurare la forza necessaria a deformare i nostri cristalli orientati. Le nostre misure avevano raggiunto una precisione insperata. Eravamo in grado di deformare i cristalli di un millesimo di raggio atomico applicando una pressione dell'ordine del miliardesimo di atmosfera. Ciò che facevamo aveva dell'incredibile.

Con mio grande stupore, dimostrammo anzitutto che, nei nostri cristalli, i piani formati dagli atomi scivolavano gli uni sugli altri grazie al moto delle loro dislocazioni, come i fogli di carta in una stampante, facendo oscillare una sezione del cristallo tra la forma di un rettangolo e quella di un parallelogrammo! Tra 0,1 K e 0,3 K, inoltre, lo scivolamento avveniva senza attrito. La deformazione avveniva con una facilità tale che battezzammo il fenomeno "plasticità gigante" [4]. In seguito capimmo che

persolido era più rigido di un solido ordinario, gli spiegai che non era il caso dell'elio. La questione stava assumendo i toni di un giallo, e il nostro gruppo

al di sotto di 0,1 K il movimento poteva essere bloccato dalle impurità e al di sopra di 0,3 K il disordine dovuto all'agitazione termica della materia cominciava a ostacolarlo. E quando riuscimmo a eliminare tutte le impurità dai cristalli, grazie a una tecnica presa in prestito dalla metallurgia classica, i piani atomici continuarono a scivolare fino alle temperature più fredde che riuscimmo a raggiungere. La plasticità superava l'80%!

Gli idraulici sanno bene che per torcere più facilmente un tubo di rame bisogna scaldarlo. I metallurgisti ne hanno capito il motivo: le dislocazioni possono spostarsi solo se l'agitazione termica è tale da permettere agli atomi di superare le piccole barriere energetiche la cui esistenza fu teorizzata per primo da Rudolf Peierls. L'elio, però, è il cristallo quantistico per antonomasia, e i suoi atomi, anziché scavalcare le barriere, le attraversano. E perché questo possa avvenire, il cristallo di elio, a differenza di quelli classici, deve essere freddissimo. La fisica delle basse temperature è il regno della meccanica quantistica.



Tra 0,1 e 0,3 K, il cristallo ultrapuro manifesta una "plasticità gigante": la sua resistenza agli sforzi di taglio diminuisce del 40% rispetto al suo valore normale (da 127 bar a 72 bar). La plasticità anomala è dovuta all'enorme mobilità delle dislocazioni. A temperatura molto bassa, tracce di impurità isotopiche (dovute all'elio-3) si legano alle dislocazioni, impedendone il movimento. Se si eliminano tutte le impurità, tuttavia, la rigidità dei cristalli resta debolissima fino a temperature prossime allo zero assoluto (0 K), un comportamento tipicamente quantistico, molto diverso da quello dei cristalli classici.

E la supersolidità, in tutto ciò?

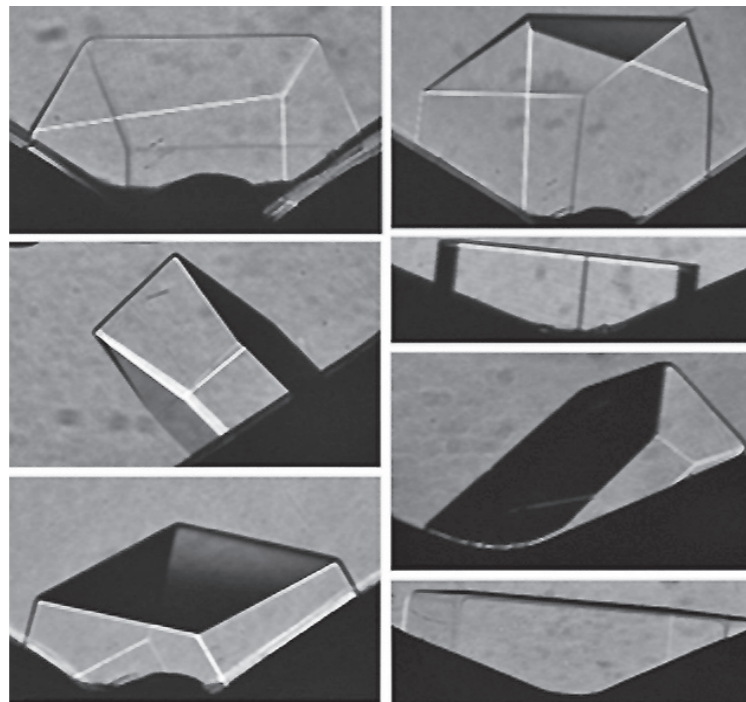
I ricercatori non producono merci, ma articoli che vengono pubblicati su riviste specializzate. Prima, però, devono superare l'esame di altri specialisti che verificano scrupolosamente ogni dettaglio. Fu nell'ambito di questa collaborazione minuziosa, fondamento della conoscenza scientifica globale, che nel febbraio del 2012 mi fu inviato un articolo sugli oscillatori a torsione perché lo valutassi. A forza di discuterne, all'improvviso scoprimmo che l'oscillatore utilizzato dagli autori era troppo leggero e fragile, e che la sua frequenza di oscillazione doveva dipendere più dalla rigidità dell'elio solido al suo interno che dalla massa di elio oscillante. Bastarono pochi calcoli per persuaderci che l'interpretazione dei loro esperimenti era sbagliata. Ciò che Kim e Chan avevano scambiato per un'anomalia della rotazione, sinonimo di supersolidità, era in realtà una conseguenza della plasticità gigante da noi descritta. Nel 2014, tutti i colleghi della ventina di laboratori coinvolti nella vicenda lo ammisero. In altri termini, cercavamo tutti la supersolidità ma abbiamo trovato qualcos'altro: una plasticità gigante.

Chi cerca trova

La supersolidità non esiste nell'elio. Dobbiamo esserne delusi? Da un lato, è possibile che in un futuro prossimo toccherà ad altri ricercatori scoprirla in altri sistemi. In realtà, però, la nostra plasticità gigante non era meno interessante. Avendo spiegato come mai le dislocazioni si spostano nell'elio come nel cobalto o nello zinco, ma non come nel titanio, abbiamo suscitato l'interesse dei metallurgisti. Inoltre abbiamo misurato tutte

Cercavamo tutti la supersolidità ma abbiamo trovato qualcos'altro: una plasticità gigante.

le proprietà delle dislocazioni: la lunghezza (frazioni di millimetro), la velocità di spostamento (metri al secondo), la loro disposizione secondo una rete di linee parallele, la



Sette cristalli con orientazioni diverse, fotografati nella cella dell'École Normale Supérieure di Parigi nel 2013.

densità, l'energia del legame con gli atomi di elio-3 e altre ancora [5].

I cristalli di elio-4 sono al tempo stesso un modello, perché mostrano meglio di tutti l'universalità di alcuni fenomeni nella scienza dei materiali, e un'eccezione, perché in condizioni estreme lasciano apparire il carattere quantistico della loro dinamica.

Personalmente, vedo nell'interesse dei metallurgisti per i nostri risultati la dimostrazione più chiara dell'importanza dei nostri cristalli. Non abbiamo registrato un brevetto per ricostruire la torre Eiffel, ma abbiamo aggiunto un mattone al grande edificio della scienza dei materiali.

Riferimenti bibliografici

- [1] E. KIM, M.H.W. CHAN, "Probable observation of a supersolid helium phase", *Nature*, 427, 2004, pp. 225-227.
- [2] S. BALIBAR, *Chercheur au quotidien*, Raconter la Vie-Seuil, Paris 2014.
- [3] J. DAY, J. BEAMISH, "Low-temperature shear modulus changes in solid ⁴He and connection to supersolidity", *Nature*, 450, 2007, pp. 853-856.
- [4] A. HAZIOT *et al.*, "Giant Plasticity of a Quantum Crystal", *Physical Review Letters*, 110, 3, 2013.
- [5] F. SOURIS *et al.*, "Movement of dislocations dressed with ³He impurities in ⁴He crystals", *Physical Review B*, 90, 2014.