

2022年12月1日

新潟大学
理化学研究所

極低温の量子流体中に現れる普遍的な力

－ 量子揺らぎが導く原子超流動体中の分子間力 －

万有引力の法則に代表されるように、「物質間に働く力」という概念は、物理学において重要な位置を占め続けてきました。新潟大学自然科学系（理学部）の本郷優助教（理化学研究所数理創造プログラム客員研究員）とドイツ・ハイデルベルク大学の藤井啓資研究員・Tilman Enss 教授の国際共同研究グループは、極低温の量子流体中に浮かべられた粒子間に、長距離ではファンデルワールス力と呼ばれる分子間力と同じ力が働くことを理論計算から明らかにしました。レーザー技術によって絶対零度近く（数十ナノケルビン程度）まで冷却された原子集団は、量子状態を高精度に制御可能な系として近年注目されており、ミクロな世界における力を調べる上でも格好の舞台となっています。本研究は、極低温で実現する原子超流動体中の不純物粒子に、量子揺らぎに起因した普遍的な長距離力が作用することを新たに明らかにしたものです。

【本研究成果のポイント】

- 絶対零度に近い極低温の超流動原子気体中で現れる長距離力の存在を理論的に示した
- 長距離力は超流動体中に生じる音波の量子揺らぎにより引き起こされることを発見
- 発見された長距離力はファンデルワールス力という分子間力に似た性質を持つことが判明

1. 研究の背景

私たちの身の回りの物質は、多数の原子・分子が集まり、力を及ぼし合っていて出来ています。原子・分子たちがどのような力を及ぼし合っているのかを理解することは、物質の成り立ちを理解し、その応用を考えていく上で重要な問題となっています。物質間に生じる力は、ミクロな世界を記述する量子力学の観点からは、量子的な粒子（あるいは量子力学における粒子と波動の二重性[注1]によってそれと等価な波）のキャッチボールのような交換によって引き起こされると理解されています。

近年のレーザー技術の発達により、絶対零度に近い極低温（数十ナノケルビン程度）の原子気体を高精度で制御することが可能となり、ミクロな世界の物理法則を支配する量子力学の効果を調べるための理想的な舞台が整ってきています。特に、極低温まで冷却された原子気体では、原子の集団が一斉に同じ状態を占めることで、マクロな世界で量子力学的な性質が露わとなる超流動[注2]と呼ばれる興味深い状態が実現されます。1990年代に原子気体における超流動状態が実験的に実現

してから、その性質は理論・実験の両面から詳細に調べられ、最近ではさらに超流動体中に浮かべられた不純物の性質が盛んに研究されています。

超流動体中に置かれた不純物の性質として、近年特に注目を集めているものの一つに「不純物間に働く力」があります。これまでの研究では、超流動を記述するボゴリューボフ理論[注 3]と呼ばれる手法などを用いて、不純物間には湯川ポテンシャルと呼ばれるポテンシャルエネルギーで記述される力が働くことが示されてきました。その名前が示すとおり、湯川ポテンシャルは湯川秀樹博士が原子核に働く力を記述するために導入したもので、十分に長距離ではほとんど力を伝えないという特徴を持ちます。では、超流動体中に置かれた不純物を十分離すと、不純物間に作用する力は本当になくなってしまふのでしょうか。

II. 研究の概要・成果

超流動体は多数の原子によって構成されており、短距離では個々の原子の運動により複雑なふるまいを示します。しかし、その長距離でのふるまいは、超流動フォノン（超流動体中の音波を表す）と呼ばれる多数の原子が参加する集団運動によって表され、単純化された理論的記述ができることが知られています。さらに「超流動体の長距離でのふるまいは個別原子の詳細な性質に依存せずと同じである」という普遍性が成立することも、南部陽一郎博士らにより発展させられた理論[注 4]を用いて示すことができます。本研究グループは、この超流動体が示す「長距離での普遍的な理論記述」に注目して研究を行いました。

本研究グループはまず、南部理論を応用することで、超流動フォノンと不純物の長距離でのふるまいを有効的に記述する理論を一般に書き下せることに注目しました。南部理論に基づいて構築される超流動体の有効理論は、短い距離スケールで起きている現象を記述できない一方、長距離での普遍的なふるまいを効率よく記述することができます。有効理論が持つそのような特徴を活用すると、従来の理論解析では量子揺らぎに起因する力が考慮されていないこと、さらに不純物間のポテンシャルへの量子揺らぎの寄与を効率的に計算できることが明らかになります。この計算を実行することにより、長距離でほとんど作用しない湯川ポテンシャルからの力とは別に、長距離でも作用し続ける分子間力に似た力が存在することを理論的に示しました。

本研究グループのより詳細な解析方法は以下のようになっています。まず、湯川博士が明らかにしたように、現代物理において力は「粒子を記述する量子的な励起の交換」により引き起こされると理解されています。ここで、超流動体中の不純物に働く長距離で働く力を媒介する「粒子を記述する量子的な励起」は、南部理論でその存在が保証されている超流動フォノンになるはずですが、しかし、湯川理論がパイ中間子[注 5]と呼ばれる粒子を1つ交換することで原子核内部の力（核力）を導くのと対照的に、超流動体中の不純物の場合には超流動フォノンを1つ交換することでは力が生じないことを示すことができます。本研究グループは、量子揺らぎの存在を考慮すると、この他に超流動フォノンを2つ同時に交換することで生じる力が存在することに気づきました（図 1）。そして、超流動フォノンを2つ交換することで生じるポテンシャルを評価することで、不純物間にファンデルワールスポテンシャルで記述される分子間力と類似した引力が働くことがわかりました。南部理論から導かれる普遍性により、本研究グループが新たに発見した力の大きさは、超流動フォノンの伝搬速度（つまり、超流動中の音速）によって簡潔に表されることも示されます。

本研究で新たに導かれたファンデルワールス力は、超流動フォノンが音波として長距離を伝わる

ことができるため、不純物を長距離に離しても作用することがわかります。そのため、不純物間の距離を離していくと、既存の理論で知られていた湯川ポテンシャルからの力が減衰した後は、本研究で発見されたファンデルワールスポテンシャルからの力が支配的に作用するということが示されます。この超流動体中において長距離で働く新しい力の発見は、極低温の量子流体中に置かれた複数の不純物の挙動を理論的に記述するための基盤を与える結果と期待できます。

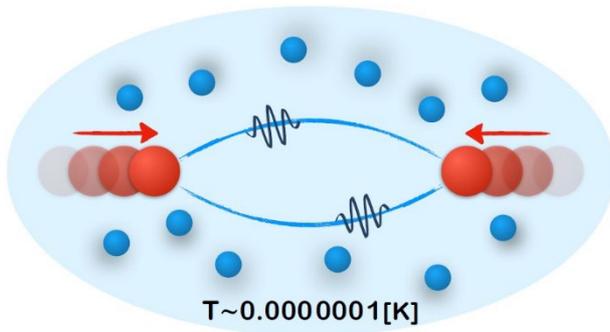


図 1

極低温の原子気体（青色の粒子）の超流動体中に浮かべられた不純物粒子（赤色の粒子）の間に働く長距離力の模式図。2つの超流動フォノン（超流動体中の音波）を同時に交換することで分子間力に似た引力が生じる。

III. 今後の展開

本研究により、極低温の超流動流体中に置かれた不純物には、分子間力に似た長距離力が作用していることがわかりました。この新たに見い出した力からどのような構造が生まれるのかを調べることは、本研究から直接発展する興味深い課題です。具体的には、核力から「原子核」という物質の存在形態が生まれるのに類似して、不純物が超流動流体中でどのような存在形態を実現するのか明らかにしていくことが、今後の展開として期待できます。さらに、超流動体中の不純物は固体中の電子と類似した性質を持つことも指摘されているため、本研究で得られた力の理論と極低温の原子気体の実験結果とを組み合わせることで、固体中の電子系など別の物理系の理解に貢献する可能性も期待できます。

また、本研究では、近年発展の著しい超流動体中の不純物という対象に焦点を当てましたが、気体・液体中に置かれた不純物にはじまり、固体中の電子や原子核物質中の陽子・中性子など、「媒質中に置かれた不純物粒子」という状況は広く一般に見られます。本研究で用いた南部理論は、超流動体を構成する個々の原子の詳細に依らず、普遍的に適用できる応用性の高い理論です。そのため、問題として考える媒質と不純物に合わせて南部理論を応用していくことで、極低温の原子気体中の不純物だけでなく、他の様々な物理系で見られる「媒質中に置かれた不純物粒子」の普遍的な性質を調べていくことが可能になると期待できます。

IV. 研究成果の公表

本研究成果は、米国の科学雑誌『Physical Review Letters』オンライン版に2022年11月30日に掲載されました。

論文タイトル：“Universal van der Waals force between heavy polarons in superfluids”

著者：Keisuke Fujii, Masaru Hongo, and Tilman Enss

doi: 10.1103/PhysRevLett.129.233401

V. 謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業 研究活動スタート支援（研究課題/領域番号 22K20369）、U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Nuclear Physics under Award Number DE-FG0201ER41195、Deutsche Forschungsgemeinschaft (project-ID 273811115)、Germany's Excellence Strategy EXC2181/1-390900948、U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Nuclear Physics under Award Number DEFG0201ER41195、ならびに理化学研究所数理創造プログラム（RIKEN iTHEMS）の支援を受けて行われました。

【用語解説】

[注 1] 量子力学における粒子と波動の二重性：ミクロな世界の物理法則を記述する量子力学では、物質のふるまいは粒子と波の両側面を併せ持つ「量子」として記述されます。このため、光のような電磁波も「光子」と呼ばれる粒子としての側面を持ち、逆に電子のような粒子も回折や干渉といった波の性質を示します。このような性質のことを、量子力学における粒子と波動の二重性と言います。

[注 2] 超流動：冷やしても結晶化しないヘリウムなどの流体は、絶対零度に近い極低温状態で粘性が消失したかのようにふるまう「超流動状態」を実現することが知られています。超流動は、個々の原子が同じ状態を占めることによって、量子力学の効果がマクロスケールに現れる現象として理解することができます。

[注 3] ボゴリューボフ理論：ロシアの物理学者、ニコライ・ボゴリューボフにより 1947 年に提案された超流動体を記述するための理論。粒子間の相互作用が小さいときに、超流動体の中で現れる音波（超流動フォノン）の性質などを正しく記述することができます。

[注 4] 南部理論：時間発展の前後で保存する量が存在するとき、数えられる保存量については対応する「連続対称性」が存在することが示されています。しかしながら、時間発展の規則は対称性を持っていても、その解として得られる定常状態が対称性を破ってしまうことが多くあります。このような現象を「対称性の自発的破れ」と言います。1960 年代に南部陽一郎博士らにより発展させられ、2008 年のノーベル賞の受賞対象となった南部理論は、対称性が自発的に破れたときにエネルギーの小さな波が必然的に現れることを示したものです。また、その発展形として、エネルギーの小さな波のふるまいを記述する方法を与えることもできます。

[注 5] パイ中間子：正電荷をもつ陽子同士の間には電気的な斥力が働くにも関わらず、陽子や中性子を構成要素として持つ原子核は安定な状態として存在します。このことから、1935 年に湯川秀樹博士は、陽子や中性子を結合させる力を媒介する粒子が存在することを理論的に提唱しました。パイ中間子と名付けられたこの粒子は 1947 年に実験的に発見され、湯川博士のノーベル賞受賞に繋がりました。

本件に関するお問い合わせ先

【研究に関すること】

新潟大学自然科学系（理学部）

助教 本郷 優（ほんごう まさる）

E-mail : hongo@phys.sc.niigata-u.ac.jp

ハイデルベルク大学

研究員 藤井 啓資（ふじい けいすけ）

【報道に関すること】

新潟大学広報室

TEL : 025-262-7000 E-mail : pr-office@adm.niigata-u.ac.jp

理化学研究所広報室 報道担当