

超流動体における自発的な回転の強さを理論的に解明

～40 年来の未解決問題の決着～

1. 発表者：

多田 靖啓（東京大学物性研究所 助教）

聶 文星（ニエ・ウェンシン）（中国・清華大学高等研究所 研究員、研究当時：東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程学生）

押川 正毅（東京大学物性研究所 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆構成粒子（原子や電子）が二つずつペアを組んでそれらが回転しているような超流動体（超伝導体）において、超流動体全体の回転の強さがどうなるかは、40 年来の未解決問題であった。
- ◆この問題を数学的に厳密な方法によって解析し、従来考えられていたよりも一般化したうえで理論的に解決した。
- ◆超流動体における長年にわたる問題の解明により、超流動・超伝導現象に関する基礎的理解がさらに進展することが期待される。

3. 発表概要：

超流動体（超伝導体）においては、流体の構成粒子（原子や超伝導体中の電子）がペアを組んで動くことによって、流体が摩擦なしで流れたり電気抵抗がゼロになったりすることが知られています（注1）。その中でも、液体ヘリウム3などで実現している、特殊な超流動（カイラル超流動（注2））においては、粒子ペアが自らその中心回りに一定方向に回転しており、この自発的回転に関連した興味深い物理的性質が世界中で活発に研究されてきました。しかし、そのような超流動体において、各ペアの回転により生じる超流動体全体の回転量（軌道角運動量（注3））がどのくらいの大きさになるのかという問題は、「軌道角運動量パラドックス」（注4、図1）として知られ、約40年間にもわたる未解決問題でした。

東京大学物性研究所の多田靖啓助教と押川正毅教授、中国・清華大学の聶文星研究員（研究当時：東京大学大学院博士課程学生）は、カイラル超流動体における軌道角運動量を数学的に厳密な方法によって解析し、この問題を従来考えられていたよりも一般化したうえ

で理論的に解決しました。その結果、一つのペアが持つ軌道角運動量が最小値の 1 である場合のみ、全体の軌道角運動量が、全ての粒子がペアを組んで回転している場合に期待できる巨大な値と完全に一致することが厳密にわかりました。一方、一つのペアが持つ角運動量が 2 以上の場合には、ペア毎の角運動量は大きいにも拘わらず、超流動体全体の軌道角運動量はほとんどゼロになることが示されました。

長年の謎であった超流動体における軌道角運動量の問題が解決し、その隠れた性質が明らかにされたことにより、超流動現象の基礎的理解がさらに進展することが期待されます。本研究成果の詳細は、Physical Review Letters 誌（オンライン版 2015 年 5 月 13 日付、雑誌版 5 月 15 日付）に掲載されます。

4. 発表内容：

① 研究の背景・先行研究における問題点

超流動体（超伝導体）は物性物理学の中心的課題の一つであり、流体が摩擦なく流れたり電気抵抗が消失したりするという際立った特徴を持っています（注 1）。そのような基本的性質は、超流動体の構成粒子（原子や超伝導体における電子）が量子力学的なペアを組みながら動いていることによって理解されます。通常はこれらのペアは回転していることはありませんが、液体ヘリウム 3 など で実現される、ある種の超流動状態（カイラル超流動体（注 2、図 1））においては、各ペアが自発的にその中心の回りを一定方向に回転していることが知られおり、この自発的回転に関連した様々な興味深い物理的性質が世界中で研究されてきました。しかしながら、超流動体全体の回転量（軌道角運動量（注 3））は各ペアの回転運動の最も直接的な帰結の一つであるにも拘わらず、その大きさについては長い間論争が続いており、「軌道角運動量パラドックス」（注 4、図 1）として知られ約 40 年間にもわたって未解決の問題でした。

② 研究内容

この長年の問題を解決するために、東京大学物性研究所の多田靖啓助教と押川正毅教授、中国・清華大学の聶文星研究員（研究当時：東京大学大学院博士課程学生）は、パラドックスの原因となりうるカイラル超流動体の量子力学的性質を注意深く取り扱える理論を構成しました。従来の理論は何らかの仮定や近似に基づいており、その正当性が曖昧であることがパラドックスの一因になっていました。これに対し、今回発表した理論では、基本的なモデルに対して、曖昧な仮定や近似を用いずに軌道角運動量を厳密に計算することができます。計算の結果、粒子ペア一つが持つ軌道角運動量が最小値である 1 の場合には、超流動体全体の軌道角運動量の大きさは、全ての粒子が回転しながらペアを作る場合に期待される巨大な値に厳密に等しいことを示しました。これにより、長年のパラドックスを理論的に解決しました。

さらに研究グループは、粒子ペア一つが持つ軌道角運動量が 2 以上の場合についても問題を一般化し計算を行いました。驚くべきことに、この場合にはペア毎の軌道角運動量が大きいにも拘わらず、超流動体全体としては軌道角運動量がほとんどゼロとなることが分かりました。これは、これまで理論的取り扱いが困難であった、超流動体を入れている容器に粒子が衝突する影響（超伝導体の試料表面に電子が衝突する影響）を精密に計算することによって初めて得られた結果です。この衝突効果は、カイラル超流動体に固有の量子力学的性質であり、その理論的解明は軌道角運動量に関する従来理解に大きな修正を迫るものです。

本研究は、40 年来の未解決問題であったパラドックスを解決しただけでなく、この問題をより一般的な形で議論することを通して、カイラル超流動体に潜む隠れた性質を理論的に解明しました。長年にわたる問題の解明により、超流動現象に関する基礎的理解がさらに進展することが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」2015 年 5 月 13 日（オンライン版）、5 月 15 日（雑誌版）掲載

論文タイトル：Orbital Angular Momentum and Spectral Flow in Two Dimensional Chiral Superfluids

著者：Yasuhiro Tada, Wenxing Nie, and Masaki Oshikawa

DOI 番号：10.1103/PhysRevLett.114.195301

アブストラクト URL：

<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.114.195301>

6. 問い合わせ先：

東京大学物性研究所 助教 多田靖啓

E-mail: tada@issp.u-tokyo.ac.jp

Tel: 04-7136-3278

東京大学物性研究所 教授 押川正毅

E-mail: oshikawa@issp.u-tokyo.ac.jp

Tel: 04-7136-3275/ 04-7136-3296

7. 用語解説：

(注1) 超流動・超伝導

私たちが通常目にする物体が動くときには、必ず摩擦力を受けます。液体についても同じで、パイプの中に液体を通して放っておくと壁面との摩擦によって勝手に液体の動きは止まります。しかし、極低温の液体ヘリウムは、全く壁面からの摩擦力を受けずに動き続けることが知られています。この現象を超流動と呼びます。

金属は電気を流しますが、これは金属中を電子が運動するためです。電子の運動も液体と同様に摩擦力を受け、これが電気抵抗を生みます。しかし、低温では電子が超流動液体と同様の状態になり、電気抵抗なしに電流を半永久的に運びつづける状態が実現することがあります。この現象を超伝導と呼びます。

これらのことは、より専門的には以下のように説明されます。超流動や超伝導は、多数の構成粒子（超流動の場合は原子、超伝導の場合は電子）が一つの状態に量子力学的に凝縮することによって起こります。量子力学では、粒子はボース粒子とフェルミ粒子に分類されます。ヘリウム4のようなボース粒子は、そのまま凝縮して超流動状態になることができます。一方、ヘリウム3や電子などのフェルミ粒子はそのままでは凝縮できません。しかし、2つずつのフェルミ粒子がクーパー対と呼ばれるペアをつくと、このクーパー対はボース粒子としてふるまい、凝縮して超流動状態になることができます。極低温の液体ヘリウム3では超流動が、また、さまざまな物質について低温で超伝導が実際に確認されていますが、これらはクーパー対の形成によるものです。

(注2) カイラル超流動体（カイラル超伝導体）

超流動状態はそれを構成する粒子が、クーパー対と呼ばれる量子力学的な粒子ペアを組みながら動いている状態です。この状態が実現すると、流体が摩擦なしで流れたり、電気抵抗ゼロで電流が流れたりできるようになります。通常、粒子ペアは回転しませんが、ある種の超流動体ではペアがその中心回りに一定方向に回転運動しており、そのような超流動状態をカイラル超流動状態と呼びます。粒子ペアの回転運動は外部から与えられるものではなく、粒子間に働く力によって流体の内部で自発的に生じるものです。そのため、この回転に関連した現象を解明することは、カイラル超流動体の本質を理解するために非常に重要となります。カイラル超流動状態は液体ヘリウム3で実現しているほか、いくつかの金属化合物がカイラル超伝導体の候補物質として知られています。

(注3) 軌道角運動量

軌道角運動量は回転運動の強度を表す物理量です。例えば、粒子が円のような軌道を回っているとその粒子は軌道角運動量を持ち、その値は粒子の回転速度が速いほど大きくなります。通常は、粒子集団全体の軌道角運動量はそれぞれの粒子の軌道角運動量の単純な足

し算となります。

(注4) 軌道角運動量パラドックス

カイラル超流動体における軌道角運動量の大きさに関するパラドックスです(図1)。単純に考えると、超流動体全体の軌道角運動量は各ペアのもつ軌道角運動量の単なる足し算になると期待され、実際にいくつかの理論でそのことが支持されています。しかし、別の理論ではその100分の1以下、場合によっては100,000分の1以下の小さな値が予想される上、これらのどの考え方も一見妥当であるためにパラドックスと呼ばれてきました。粒子ペアの回転が流体の量子力学的な性質を反映したものであるためにその理論的解析は困難であり、この問題は約40年間にもわたって議論されてきましたが、決着がなされていませんでした。

8. 添付資料:

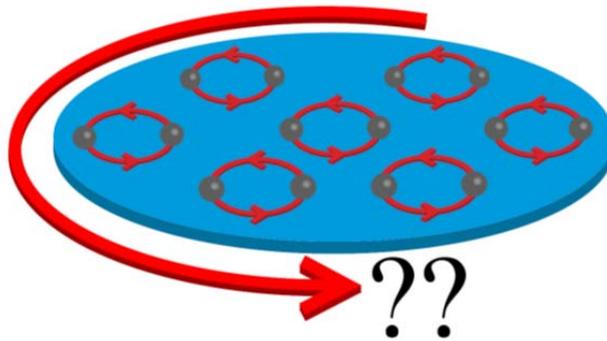


図1: 軌道角運動量パラドックスの概念図。各粒子ペアが回転しているときに、超流動体全体の回転量(軌道角運動量)がどれくらいの大きさになるのかという問題は、超流動研究において40年来の未解決のパラドックスでした。