

# アトムトロンクス



内野 瞬

日本原子力研究開発機構  
uchino.shun@jaea.go.jp

ミクロとマクロの中間領域の量子現象を扱うメソスコピック系は、物性物理において盛んに研究が行われてきた。特に、半導体等の微細加工技術を駆使したサブミクロンスケールでの制御により、バルク系では観測の難しい様々な物性が明らかとなっている。

最近では、真空中に捕獲された原子集団を扱う冷却原子気体が、メソスコピック系研究の新たなプラットフォームとして登場している。冷却原子気体は、原子間相互作用、量子統計性、内部自由度といった系の性質を特徴づける自由度の多くを制御することができる。このため、複雑な量子現象の本質を検証するシミュレーターとして、様々な用途が現在議論されている。特に、近年の量子気体顕微鏡技術の発展によって、マイクロメートルスケールでの系の制御が可能となっており、その応用の一つとして、メソスコピック系がクローズアップされている。冷却原子気体におけるメソスコピック系研究は、「アトムトロンクス」ともよばれており、欧米のグループを中心に実験報告が相次いでいる。

特に、スイス連邦工科大学 (ETH) の実験グループにより実現されている **2成分フェルミ原子気体** を用いた 2 端子の量子ポイントコンタクト系では、原子間相互作用を変化させることで、多彩な量子輸送現象が発現する。原子間相互作用の影響がほとんど無視できる場合には、コンダクタンス量子化などのコンストリクションの詳細によらない普遍的な輸送現象が観測され、これまで半導体系で行われていた実験とコンシステントな結果を与える。しかし、原子

間の引力相互作用を強くすることで到達可能な超流動転移の近傍領域では、量子化値を超えるコンダクタンスが観測された。その後、この異常なコンダクタンスの振る舞いは、超流動揺らぎに起因する Cooper ペアの輸送により理解できることがわかった。また、原子間相互作用を特徴づける s 波散乱長が発散するユニタリー極限では、超流動転移温度がフェルミ温度の 1/5 程度と非常に高いため、現在の冷却技術でも超流動ポイントコンタクト系の輸送現象を観測することができる。このユニタリー極限において実験で観測された非 Ohmic な輸送特性は、多重 **Andreev 反射** を考慮した輸送理論と良い一致を示すことがわかった。さらに、フェルミ原子間の引力相互作用が非常に強い領域では、系はボース粒子である分子の集まりとみなすことができる。このとき、分子の熱的ド・ブロイ波長が平均粒子間距離に比べて十分長ければ、系は弱く相互作用するボース-アインシュタイン凝縮体となる。このような場合の量子ポイントコンタクト輸送では、凝縮体と自発的対称性の破れに伴う南部-Goldstone モード間の交差効果が重要な役割を果たし、Ohmic な DC 輸送や **Wiedemann-Franz 則** の破れなどが予言される。

ともに操作性の高い人工量子系と形容される冷却原子気体と固体のメソスコピック系が、接点をもつことは自然なことである。ただ、これらの系では得意・不得意とする領域が異なるのも事実である。今後は、お互いが相補的な役割を果たしていくことで、メソスコピック領域で生じる量子現象の包括的な理解につながることを期待される。

## 用語解説

### アトムトロンクス：

アトムとエレクトロニクスを合わせた造語。冷却原子気体で実現されている 2 端子系や SQUID などを用いて、非自明な量子現象の観測とその制御を目指している。

### 2成分フェルミ原子気体：

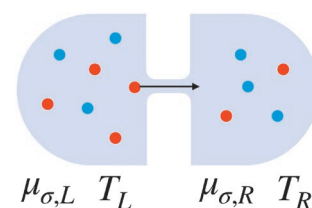
${}^6\text{Li}$  や  ${}^{40}\text{K}$  などのフェルミ原子には超微細構造に由来する複数の磁気副準位が存在するが、その中の適当な 2 つを選択的に捕獲することで得られる原子気体。このような系は、電子系や核子系と類似の性質を有する。

### Andreev 反射：

超伝導体と常伝導体の界面において、常伝導体から入射した準粒子 (ホール) がホール (準粒子) として反射する現象。

### Wiedemann-Franz 則：

熱伝導度とコンダクタンスの比が温度に比例することを示したもの。



冷却原子気体における 2 端子輸送系の概念図。熱浴間に化学ポテンシャルや温度に関するバイアスを印加することで、粒子カレントや、スピнкаレント、熱カレントを誘起させることができる。伝導領域が 1 次元的な構造をもつ場合は量子ポイントコンタクトとよばれる。