

アルカリ原子気体のボーズ凝縮における量子渦

岡山大学大学院自然科学研究科 町田一成

1995年にRbやNa, Liを用いてボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)にアメリカの実験グループが成功した。その後、原子種はH, He, K等がレーザー冷却法によってBECに到達した。それらの原子集団を用いて新しい巨視的量子現象がさまざまな角度から理論的、実験的に研究されている。とりわけ、BEC系の超流動性と密接に結びついた渦について多くの関心をもたれ、数年前にその生成にアメリカとフランスのグループが成功した。超流動 ^4He や ^3He とは異なる視点からの研究が現在各地で進行中である。以下では我々のグループの行なっている量子渦に関する研究を中心に紹介する。

1) スカラー-BECにおける渦生成の臨界角速度

原子集団を冷却する際、系の閉じ込めに磁場を用いると個々の原子のもっている内部自由度は凍結する。したがって、BECは超流動 ^4He と同様のスカラーのオーダー・パラメーターで記述することができる。このようなスカラー-BECに対しては、希薄な弱く相互作用するボーズ系に成り立つBogoliubov理論を適用することが可能になる。この理論形式は凝縮相を表すGross-Pitaevskii方程式と系の励起を表すBogoliubov方程式とが連立した閉じた方程式系を構成する。この分子場近似の枠組みの中で、円筒対称な場合に渦が中心に一本入った場合の渦の諸性質を記述することができる。

調和型の閉じ込めポテンシャルを用いた渦生成のための臨界角速度の計算の結果は以下の通りである。

- A) 臨界角速度には幾つかの可能なタイプがあり、実験の状況に応じてその中のどれかが、実際の臨界角速度に対応する。
- B) 渦が一本入っている状態と入っていないときとのエネルギー差が交差する臨界角速度と渦が入っていない状態が回転を上げていったときに不安定になる臨界角速度を比べると一般には後者の方が角速度は大きい。
- C) しかし、系の回転を上げていった時に必ずしも前者の臨界角速度に達したからといって渦が系に生成されるわけではない。
- D) 実際、フランスのグループによる渦生成の実験では後者の臨界角速度にむしろ近い値が観測されている。実験は光学スプーンと呼ばれる方法で非円筒対称な系をかき回して角運動量を与える。系は回転が上がってもぎりぎり渦無し状態を維持して、ついにはそれが不安定になったとき渦状態に移行する。
- E) このような状況では渦は渦無しの表面振動を用いて表面から侵入する。この様子は坪田達のシミュレーションでもとらえられている。
- F) 最近、系を回転したまま、冷却してBECに到達するという実験がおこなわれた。これは円筒

対称性を維持して渦生成が観測できるので理論の計算にもっとも近い実験になっている。いまのところ温度の制御が十分でなく角速度と温度の平面でどのような経路をたどって BEC に至るのかは不明である。更にこの実験が進むと理論との対応が精密にできる可能性があり、渦生成の臨界角速度の進歩がみられると期待できる。

2) スピノール BEC における渦

原子集団を磁場ではなく、光学的に閉じ込めて冷却して BEC を実現すると個々の原子の有している内部自由度、この場合は微細構造状態が異なるものが同時に BEC になる。簡単にこれをスピノールと呼ぶことにする。このスピノールの生きた BEC は複数個のオーダー・パラメーターで記述できるので、しばしばスピノール BEC とよばれる。フェルミ系の超流動 ^3He と似た超流動状態になっている。3成分系のハミルトニアンは密度とスピンの2種類の相互作用で特徴づけられ、Na は反強磁性的に Rb 強磁性的になっている。この系は先の Bogoliubov 理論を拡張すると同様な理論形式にまとめることができる。その枠組みの中でスピノール BEC の基本的性質を調べた。

更に、興味深いのは渦の研究である。超流動 ^3He でもよく知られているように内部自由度に応じて豊富な渦が系の磁化や外部回転の関数として安定化する。

A) 反強磁性スピノール BEC

Na では実際この反強磁性スピノール BEC が実現していることは実験的に確認されている。この場合、渦の分類は大きくわけて、円筒対称か否かである。

特に、強磁性スピノール BEC の場合と比べて特徴的なのは非円筒対称な渦が磁化の小さな場合に安定するということである。反強磁性スピン相互作用を有利にするように3成分を配置しようとするとき非円筒対称な渦が実現しうることが容易にわかる。もちろん磁化が大きい領域や高回転下では円筒対称渦も安定化する。

B) 強磁性スピノール BEC

Rb では強磁性スピン相互作用が働いていて、強磁性スピノール BEC が実現しているのではないかとされている。この場合の渦は更に興味深い。空間が一様な系では強磁性スピン相互作用のために spin-up と spin-down の成分は相分離する。回転下ではこの相分離を利用しながら、回転による回転エネルギーを利得するような渦が安定化する。詳しい計算によると Mermin-Ho 構造や Anderson-Toulouse 構造のような位相欠陥が系の磁化と角速度の平面のかなり広い領域で安定に出現する。この非特異的な渦は通常の特異的渦よりも安定であることは3成分の配置をみると明らかである。Mermin-Ho 構造では3成分は同心円状に配置しており、いわば動径方向に相分離している状態となっている。

以上のような理論的考察に呼応したスピノール BEC の渦生成の実験がなされることを期待したい。

参考文献

- 1) T. Isoshima and K. Machida, Phys. Rev. A60 (1999) 3313.
- 2) T. Mizushima, T. Isoshima and K. Machida, Phys. Rev. A64 (2001) 043610.
- 3) T. Ohmi and K. Machida, J. Phys. Soc. Jpn., 67 (1998) 1822.