

A02-002 多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス

学習院大学理学部

平野琢也

電気通信大学情報理工学研究所

斎藤弘樹

学習院大学理学部

高橋雅裕

学習院大学理学部

衛藤雄二郎

本研究班では、多成分量子凝縮体を非平衡系として捉え、そこに現れる非平衡構造の時間発展とゆらぎ、秩序形成について、理論と実験の密接な協力体制で研究を進めている。そして、領域内の他の研究班とも連携することで普遍的な現象の解明を目指している。

実験研究では、光トラップ中のスピン自由度を持った ^{87}Rb ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) を用いている。今年度はスピノール BEC の磁気双極子相互作用による空間構造形成に関する研究、2成分 BEC の自発的な空間構造形成と流動性に関する実験等を行った。

磁気双極子相互作用に関する研究では、BEC のスピン自由度と高い空間コヒーレンスを巧みに利用し、BEC スピンの空間構造形成を観測することに成功した[1,2]。バイアス磁場に対して直交した方向(図1左)に偏極したスピノール BEC を準備し、3 mG/cm の磁場勾配を印加後、百数十ミリ秒経過すると、縦磁化の空間変調が観測された(図1右)。この空間変調効果は、磁気双極子相互作用の効果を含んだ Gross-Pitaevskii 方程式によってのみ再現され、磁気双極子相互作用による有効磁場中でのスピン回転を表すものである。本研究成果は、スピン状態によっては、微弱な磁気双極子相互作用が BEC スピンのダイナミクスに大きな影響を与えることを示すものである。

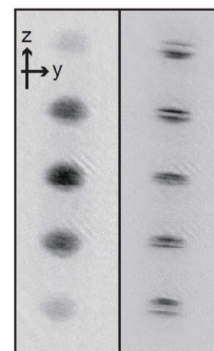


図1 スピノール BEC のイメージング画像[1,2]。左：横方向に様に偏極したスピン状態。右：磁場勾配中で数百ミリ秒経過後の測定結果。磁気双極子相互作用による縦磁化の空間変調により、z方向に分布が分裂。

空間的に重なり合った immiscible (非混和) な性質を持つ 2 成分 BEC を均一な捕獲ポテンシャル中に準備した場合、空間的に互いに分離するよう時間発展する。この非混和性により形成される自発的な空間構造形成が 2 成分 BEC の流動性にどのような影響をもたらすのかを実験と理論シミュレーションから明らかにした。実験では、ラジオ波パルスを用いて光トラップ中に異なる磁気副準位の immiscible な 2 成分 BEC を準備する。次に、自発的に構造が形成される前と形成後のそれぞれの場合に、2 成分に対して異なる大きさのポテンシャル勾配を印加し、その後の重心のダイナミクスを観測した。本実験から、自発的な構造形成が、勾配ポテンシャルにより生成される 2 成分 BEC の流れを妨げるような働きを持つことが示された。本成果は現在、論文投稿準備中である。

電通大理論グループでは、スピノール BEC に関する研究、量子渦生成に関する研究、およびリングトラップ中のスピノール BEC に関する研究を行った。

スピン 1 の原子からなる BEC には磁化が向きを揃える強磁性相と磁化をゼロにするポー

ラー相の2種類の磁性相があり、それぞれの相の対称性に応じて、トポロジカルな欠陥である量子渦（スピン渦）の種類も異なる。そこで我々は、空間のある部分では強磁性相、別の部分ではポーラー相となるような状況を設定し、量子渦対が磁性相間の界面を通過するようなダイナミクスを研究した。その結果、量子渦対のトポロジカルな性質もダイナミカルに変化し、通過後に様々なスピン渦対が生成されることが明らかになった[3]。

BEC 中で障害物ポテンシャルを移動させると、ある臨界速度以上で量子渦が発生することが知られている。これまでは、速度を徐々に上げていった時に量子渦が生成する速度と、速度を徐々に下げていった時に量子渦生成が止まる速度は一致すると考えられていた。我々はこれら二つの速度が異なることを示し、ヒステリシスが存在することを明らかにした[4]。

近年実現しているリングトラップ中の BEC の実験を念頭に置き、回転するリングトラップ中のスピン 1 BEC におけるスピントクスチャーの性質について平均場近似の範囲で研究を行った。その結果、スピントクスチャー状態を示す Gross-Pitaevskii 方程式の解析解を得た。励起エネルギーの解析からこのスピントクスチャー状態は準安定に存在できることを示した。また、この状態における Nambu-Goldstone モードの数がリングトラップの回転速度を変化することで order parameter の連続対称性を変えること無く、変化する現象(type-I-type-II transition)を見いだした[5]。

学習院大学グループの理論面での研究としては、量子渦糸乱流における非平衡臨界現象に着目して研究を行った。乱流状態は、代表的な非平衡現象である。今回注目した量子流体の系では外部揺動の下、渦糸乱流が実現する。これまでの先行研究では強い外部揺動の下での発達乱流の研究が公募班 A02 の小林氏、A04 の坪田氏等によって盛んに行われてきた。また、古典系での 2 次元液晶においては、渦欠陥を含む乱流転移の普遍クラスが、実験的に A01 班竹内氏らにより確かめられている。

一方、層流-乱流転移といった非平衡臨界現象の研究は行われていない。本研究では研究班をまたいで、小林氏、竹内氏と協力しながら、量子流体の層流-乱流転移の普遍クラスを特定することを目標に研究を進めてきた。量子流体の実験結果を定量的にもよく表現する Gross-Pitaevskii 方程式を数値的に解くことによって、すべての独立な臨界指数を測定し、それが、3次元の異方的浸透現象(directed percolation: DP)クラスに一致することを見いだした。

参考文献:

- [1] Y. Eto, H. Saito, T. Hirano, Phys. Rev. Lett. **112**, 185301 (2014).
- [2] 平野琢也, 衛藤雄二郎, パリティ vol. **30**, no. 1, pp. 6-7 (2015/1), ISSN 0911-4815.
- [3] T. Kadokura, J. Yoshida, and H. Saito, Phys. Rev. A **90**, 013612 (2014).
- [4] T. Kaneda and H. Saito, Phys. Rev. A **90**, 053632 (2014).
- [5] M. Kunimi, Phys. Rev. A **90**, 063632 (2014).