

## 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

本研究の目的は、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を実時間で観測し、秩序形成についての物理的理解を深めることである。理論と実験の密接な協力体制で研究を進め、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  $^{87}\text{Rb}$  ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を用いており、今年度は、非平衡現象を研究する際に重要となる磁場の制御や、勾配磁場中のスピントクスチャのダイナミクス観測などの成果が得られた。また、光トラップ中 BEC の非破壊イメージングの測定技術の開発など実験装置の整備も行った。

磁場の精密な制御は、フェッシュバハ共鳴による相互作用の制御や、磁場勾配による非平衡界面の制御など、BEC の非平衡ダイナミクスの実験的な研究を行う上で鍵となる技術の1つである。今年度、我々は、BEC をトラップした場所の磁場を、BEC 自身をプローブとして用いて精密に測定する技術を開発し、環境磁場の変動を低減することに成功した[1]。この測定技術は、 $^{87}\text{Rb}$  スピン 2 BEC にスピンエコーの技術を応用したもので、DC 的な磁場変動の影響を打ち消しつつ、3つの RF パルス ( $\pi/2 - \pi - \pi/2$ ) の照射タイミングを変えることで交流的な応答特性を制御できるという特徴がある。達成した磁場感度は、 $100\mu\text{m}^2$  の空間分解能に対して  $12\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  であり、原子スピンの射影に伴うショット雑音限界に近い値であった。そして、この交流磁力計を用いて、実験室内の電源ラインに同期した交流磁場ノイズを検出し、更に、交流磁場ノイズと逆位相の  $50\text{Hz}$  および  $100\text{Hz}$  の磁場を人為的に印加することにより、磁場ノイズを  $1\text{nT}$  オーダーまで低減することに成功した (図 1)。

磁場勾配のあるバイアス磁場中で BEC 原子のスピンを歳差運動させると、周波数の場所依存性により、スピンのラセン構造が生成される。我々は、このようなラセン構造が形成された状況下において、磁気双極子相互作用による特徴的なスピントクスチャが観測されることを実験的に見出した (論文は投稿準備中)。実験結果は、理論による数値シミュレーションと良く一致しており、原子気体 BEC において、磁気双極子相互作用の効果を初めて明確に観測したといえる。磁気双極子力は、非一様で非中心な遠距離力であり、非平衡ダイナミクスの可能性を広げるものと期待される。

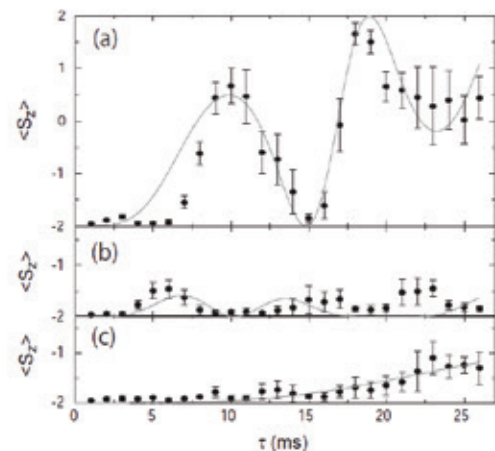


図 1 (a) スピンエコーによる環境交流磁場の測定。実線はフィッティング。(b)  $50\text{Hz}$  磁場、(c)  $100\text{Hz}$  磁場印加による低減。

電気通信大学の理論グループは今年度、主に二つの研究成果を上げた。一つは、引力相互作用する BEC の崩壊について、もう一つは BEC 中を運動する障害物ポテンシャル後方の量子渦生成についてである。

引力相互作用する原子の BEC は、ある臨界原子数以下の場合には準安定であり、臨界原子数を超えると自らの引力に耐え切れずに崩壊することが知られている。先行研究では、臨界原子数の近傍で量子トンネル効果により準安定なエネルギーバリアを通過して崩壊する可能性が指摘されていたが、半古典的な議論しかなされていなかった。崩壊に関する平均場理論を用いた研究は数多く存在するが、平均場近似では量子トンネル効果による崩壊は記述できない。そこで、本研究では直接量子多体計算を行い、量子トンネル効果による BEC の崩壊を初めて直接的に示すことに成功した[2]。トンネル確率の相互作用依存性および粒子数依存性などが計算された。本研究は崩壊のダイナミクスを量子多体計算によって示した最初の結果であり、その手法は今後、量子揺らぎの研究に応用できる可能性がある。

BEC 中を運動する障害物ポテンシャル後方の量子渦生成については、これまで電気通信大学の理論グループで継続的に研究されてきたが、今年度は新たな現象が発見された。それは、静的な層流の状態と量子渦が連続的に生成される状態という二つの状態間のヒステリシスである。障害物ポテンシャルの速度を徐々に上げていくと、ある臨界速度以下では層流の状態(図2上)であるが、臨界速度  $v_1$  を超えると量子渦が規則的に生成され始める(図2下)。一方、量子渦が規則的に出ている状態から速度を徐々に下げていくと、ある臨界速度  $v_2$  以下で層流に戻る。今回見出したのは  $v_1 > v_2$  という双安定領域の存在である。古典流体力学でも双安定な流れの例はいくつか報告されているが、このような単純な系での双安定性は知られていない。この研究成果については現在論文にまとめているところである。

学習院大学の理論グループは、本年度は非平衡系における諸分野の課題・問題点の情報収集を行った。液晶で実現されている Directed Percolation の実験は冷却原子気体の系においても実現する可能性がある。この点において数値解析を行いその有無と特性の議論を行っていく。

#### 参考文献:

- (1) Y. Eto, *et al.*, *Phys. Rev. A* **88**, 031602(R) (2013).
- (2) H. Saito, *Phys. Rev. A* **89**, 023610 (2014).
- (3) M. Takahashi, T. Mizushima, and K. Machida, *Phys. Rev. B*, 掲載予定.

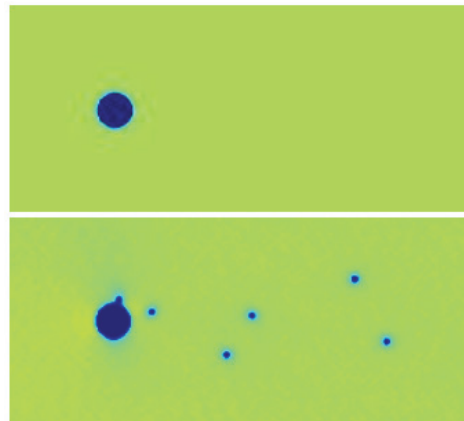


図2. BEC を移動する障害物ポテンシャル。上図は層流、下図は量子渦列。