

## 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科	斎藤弘樹
学習院大学理学部	高橋雅裕
産業技術総合研究所	衛藤雄二郎
学習院大学理学部	柴田康介

A02-002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た。また、領域内の他の研究班とも連携し、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)に現れる普遍的な現象の解明を目指した。このような有機的な連携は非常に有意義であり、以下に述べるような様々な成果を得ることができた。

実験と理論の密接な共同研究により実現した成果の一つは、磁気双極子相互作用による空間構造形成に関する研究である。 $^{87}\text{Rb}$  原子の BEC を光トラップにより保持すると、全てのスピン状態の原子を保持することができ、スピン自由度を持ったスピノール BEC を実現することができる。本研究では、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 のスピンの空間構造形成を観測することに成功した(1)。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り、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ことができた。

多成分 BEC は、それらを空間的に重ね合わせて生成した場合に、その後混ざり合ったままなのか、もしくは相分離を起こすかという混和性によって特徴づけることができる。本研究では、系に大きなエネルギーを加えたよりダイナミックな状況において、混和性の違いがどのような影響をもたらすのかを明らかにする研究を行った。実験では、Rb 原子の豊富な内部自由度を利用して様々な大きさの混和性を持つ多成分 BEC を生成し、磁場勾配パルスを用いて多成分 BEC を衝突させ、その後のダイナミクスを観測した。その結果、混ざり合う BEC 間の反発やドメイン形成、混和性に敏感な混ざり合わない BEC 間の通過など、一見直観に反する多様なダイナミクスの観測に成功した。理論シミュレーションから、観測された非平衡ダイナミクスが系の全エネルギーには直接依らず、局所的な構造に起因する複雑な現象であることが明らかになった(2,3)。また、スピン 1 とスピン 2 の混合スピノール BEC 系を生成し、2つのスピンの相対的な角度や方向を制御する方法を提案・実証した。この方法は、スピン 1 とスピン 2 の同時ラムゼイ干渉計を用いて、2つのスピンのラーモア歳差運動周期の僅かな違いを抽出することにより、混合スピンの制御を実現するものである。そして、本手法により実現した混合系を利用して、2つのスピン間の相互作用により誘起されるスピン 1 歳差運動の dephasing 及び rephasing の観測にも成功した(4)。

さらに、スピン 2 BEC を用いた実験では、磁気副準位が 0 ( $m_F=0$ ) のみを占有する状態を準備し、その後のスピノールダイナミクスを観測した。量子化軸方向 (バイアス磁場方向) と平行な方向だけでなく、直交する方向を軸としたスピンの射影測定も行い、この 2つの異

なる軸による測定から、 $m_F=0$ を初期状態とするスピン2のBECが、100ms程度の時間スケールで、強磁性スピンの基底状態へと時間発展することを見出した。また、2次元的に広がりを持った形状のBECを光トラップ装置の改良により実現し、多彩な相分離を観測した。

電気通信大学の理論グループでは、BECの非平衡ダイナミクスを始めとして、BECの様々な性質を理論的に研究した。また、学習院大学が行ったBECの実験に対して理論的サポートを行った。理論的研究の中では特にスピン自由度を持つ原子のBECや多成分BECに関する研究に力を入れた。例えば、強磁性状態にあるBECにおいてスピン状態の励起（マグノン励起）が磁気双極子相互作用によってエネルギーシフトを受けること(5)やマグノンの励起エネルギーに対する解析的上限(6)を見出した。多成分BECにおいては、一成分系では見られないトポロジカルな励起が存在する。その中でSkyrmionと呼ばれるトポロジカル励起に着目し、複数のSkyrmionが互いに衝突する非平衡ダイナミクスを数値的に明らかにした(7)。スピン自由度と空間の自由度が結合したいわゆるスピン軌道相互作用を持つBECに関する研究も精力的に行った。スピン軌道相互作用と磁気双極子相互作用の両方が存在する系では、螺旋状のスピン構造を持つ基底状態となることを見出した(8)。

また、スピン軌道相互作用するBECにおいては、量子渦が特有の構造を持つことを明らかにし、そのようなBECの中を障害物が運動すると、障害物後方にできる量子渦やスピン波、またそれらが発生する臨界速度がスピン軌道相互作用によって大きく影響を受けることを見出した(9)。スピン1とスピン2の原子からなる混合BECに関しては、学習院大学の実験に関連して、基底状態の相図を研究した。その結果、スピン1とスピン2間の相互作用係数に関して非常に多様な磁性相が存在することを明らかにした(10)。学習院大学グループの理論面での研究では、超流動体における層流-渦糸乱流転移の非平衡臨界現象の研究を行った(11)。この研究では、空間・時間に連続なランダムな外部ポテンシャルの下では、その強さを大きくすることで、層流状態から渦糸乱流状態に転移し、その普遍クラスが、Directed-Percolation (DP) クラスであることを明らかにした。

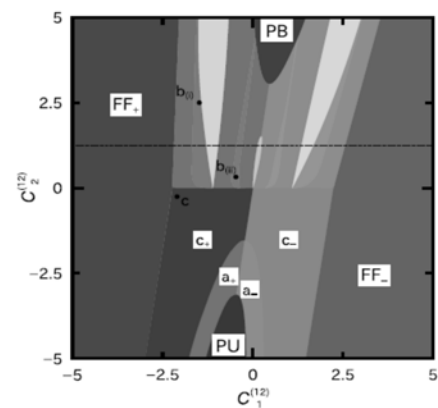


図1. スピン1・2混合BECの基底状態の相図

- (1) Y. Eto, H. Saito, T. Hirano, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 185301 (2014).
- (2) Y. Eto et al., *Phys. Rev. A* **93**, 033615 (2016).
- (3) Y. Eto et al., *New J. Phys.* **18**, 073029 (2016).
- (4) Y. Eto, H. Shibayama, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. A* **97**, 021602(R) (2018).
- (5) H. Saito and M. Kunimi, *Phys. Rev. A* **91**, 041603(R) (2015).
- (6) M. Kunimi and H. Saito, *Phys. Rev. A* **91**, 043624 (2015).
- (7) T. Kaneda and H. Saito, *Phys. Rev. A* **93**, 033611 (2016).
- (8) M. Kato, X.-F. Zhang, D. Sasaki, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **94**, 043633 (2016).
- (9) M. Kato, X.-F. Zhang, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **95**, 043605 (2017); **96**, 033613 (2017).
- (10) N. Irikura, Y. Eto, T. Hirano, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **97**, 023622 (2018).
- (11) M. Takahashi, M. Kobayashi, and K. A. Takeuchi, arXiv:1609.01561.