

## 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

$^{87}\text{Rb}$ 原子のスピンの1・スピン2混合ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) やスピン2のBECにおいて生じる非平衡スピノールダイナミクスの解明に向けて、学習院大学と電気通信大学の実験・理論グループの共同で研究を行った。

$^{87}\text{Rb}$  原子の基底状態にあるスピン1とスピン2の2つの超微細準位を利用して、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。提案した方法では、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した。更に、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。これらの実験結果は、スピン混合系に対するグロス・ピタエフスキー方程式による数値シミュレーションと非常に良い一致を示している。現在投稿論文の準備中である。

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。学習院大学で行った以前の研究[1]と比較して、本実験ではシュテルン・ゲルラッハ法によるスピンの測定の前に、磁気副準位間に共鳴するラジオ波パルス照射している。これにより、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が可能となる。我々はこの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。現在この観測された新規な緩和過程の解明に向けて、理論グループと共同で研究を進めている。

学習院大学の実験グループでは、更に2次元的に広がりを持った形状のBECの実現に向けて、光トラップ装置の改良を行った。楕円型の断面を持つ光トラップ光源を新たに導入し、これまでに使用してきた葉巻型の光トラップと切り替えて使用できるように改良した。

昨年度報告した多成分 BEC の非平衡衝突ダイナミクスに関する研究と2成分 BEC の空間構造の非平衡ダイナミクスに関する研究は、それぞれ *Physical Review A* 誌[2]と *New Journal of Physics* 誌[3]に掲載された。

電通大理論グループでは、(a)スピン軌道相互作用する多成分 BEC に関する研究[4]、(b)励起子ポラリトン凝縮体における同期現象[5]、(c)強く磁気双極子相互作用する BEC の自己束縛状態に関する研究[6]を行った。(a)ではスピン1の BEC に Rashba 型のスピン軌道相互作用と磁気双極子相互作用を入れ、葉巻型のトラップでの基底状態を調べた。スピン軌道相互作用は短軸面内にスピントクスチャを作る傾向があり、磁気双極子相互作用は長軸に沿ってパターンを形成する傾向がある。これらの相乗効果によりスピン渦のらせん構造など新奇な基底状態を見出し、基底状態の相図を明らかにした。(b)ではあるパラメータ領域で一様な励

起子ポラリトン凝縮体が不安定になる事実に着目し、波束が自ら定常的に回転運動を行う現象を見出した。これはエネルギー注入と散逸のある系に特有な自励振動の一種である。さらに二つの回転運動する波束を接近して置くと、周波数同期および位相同期が発生し、それらの波束が揃って回転するという同期現象が起こることを明らかにした。(c)では経路積分モンテカルロ法を用いて、強く磁気双極子相互作用する BEC の量子多体計算を行った。平均場近似では、双極子相互作用の引力部分により系が崩壊してしまうことが予想されているが、ドイツの実験グループにより BEC が崩壊せずに安定であることが観測された。この現象を理解するため、平均場近似を用いなくて、厳密な量子多体計算を行うことにより、確かに BEC が安定に存在することを確かめた。この結果は、強く磁気双極子相互作用する BEC では、系の定性的性質を変えるほど量子ゆらぎの効果が大きいことを示している。

学習院大学グループの理論面での研究では、引き続き、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。特に一連の研究に一つの区切りができたので、論文にまとめて発表した[7]。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ている。その根拠は、数値シミュレーションを行い、3 つの独立した臨界指数全てが一致したことである。臨界点付近で DP 普遍クラスの振る舞いと大きく異なるものも得られるが、これは外部ポテンシャルによる熱的な効果であることが、渦長さの確率密度関数を計測することで明らかになった。渦密度の高い状況下では、発達乱流の研究で得られている Kolmogorov 則が出ており、クエンチのシミュレーションでは、特異な 2 段階緩和が起きていて興味深い。より広範囲のパラメータ空間で同じ普遍性が本当に出るのか、より頑強な議論ができるよう引き続き数値計算を進めている。

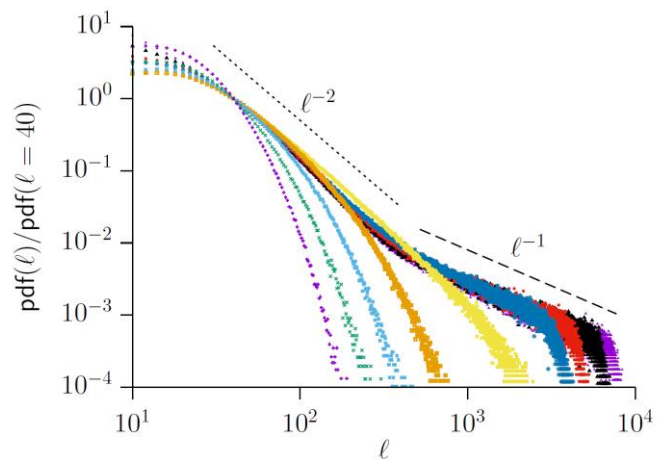


図 1. 外部ポテンシャルの大きさ  $V = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20$  での渦長さ  $\ell$  の確率密度関数。臨界現象が起こる領域 ( $V > 14$ ) では、 $\ell^{-1}$  のべきが現れる。

- [1] T. Kuwamoto *et al.*, *Phys. Rev. A* **72**, 063604 (2004).
- [2] Y. Eto *et al.*, *Phys. Rev. A* **93**, 033615 (2016).
- [3] Y. Eto *et al.*, *New J. Phys.* **17**, 073029 (2016).
- [4] M. Kato, X.-F. Zhang, D. Sasaki, and H. Saito, *Phys. Rev. A* **94**, 043633 (2016).
- [5] H. Saito and R. Kanamoto, *Phys. Rev. B* **94**, 165306 (2016).
- [6] H. Saito, *J. Phys. Soc. Jpn.* **85**, 053011 (2016).
- [7] M. Takahashi, M. Kobayashi, and K. A. Takeuchi, arXiv:1609.01561.