

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
学習院大学理学部 衛藤雄二郎

A02-002 班では、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の混和性が流れや空間構造形成のような非平衡ダイナミクスにどのような影響を与えるのかを明らかにするために、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。また、電気通信大学と学習院大学の理論グループでは、スピノール BEC のマグノン励起に関する研究、超流動体における層流-渦糸乱流転移の非平衡臨界現象に関する研究等も行った。

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。我々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ことを目的に研究を行った。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、局所的な構造が大きく起因する複雑な現象であることが明らかになった。本研究は現在、論文投稿中である[1]。

パターン形成のような空間的な非平衡ダイナミクスを誘起するためには、空間的に不安定な状態を生成する必要がある。混ざり合わない性質を持つ 2 成分 BEC 系では、空間的に重なり合った状態を準備することにより相分離ダイナミクスを誘起することができ、これまで混和性の大きさに敏感な多様な空間構造形成の観測が報告されている [2]。一方、混ざり合う 2 成分系において不安定な状態を生成するためには、2 成分の重なり合いが少ないより複雑な構造を作り出す必要があり、空間構造を十分制御した上での非平衡ダイナミクスの観測はこれまで報告されていない。我々は、混ざり合わない BEC における相分離ダイナミクスと外場による原子の内部状態遷移を利用することにより、混ざり合う BEC の空間構造を制御することに成功した。更に、本手法を利用し、空間的な非平衡ダイナミクスを誘起し、振動的に変化する多様な空間パターンの観測に成功した。理論シミュレーションとの比較から、振動のダイナミクスが系の全エネルギーと密に関連することを明らかにした。本研究は現在、論文投稿中である[3]。

また、昨年度報告した 2 成分 BEC 中に生成されるドメイン構造による流動抵抗の観測に関する研究は、Physical Review A 誌に掲載された[4]。

電通大理論グループでは、スピノール BEC のマグノン励起に関する研究および量子流体に関する研究を行った。

強磁性相互作用するスピン 1 の BEC には、強磁性体におけるマグノンに類似した素励起が

存在する。最近、UC バークレーの実験グループによってスピン 1 のルビジウム原子の BEC におけるマグノン励起が観測され、分散関係が高精度で測定された。その結果、これまで予想されていた分散関係（自由原子と同じ分散関係）からのずれが見出された。そこで我々は、磁気双極子相互作用の効果を取り入れた平均場方程式を数値的に解くことにより、実験で測定された分散関係のずれが確かにルビジウム原子間の磁気双極子相互作用によるものであることを定量的に確かめた。また、磁場の向きを変えるだけで、ずれの符号が逆転することを理論的に予想した [5]。

上記の系におけるマグノン分散関係のずれの原因として、他にも、量子揺らぎの効果が存在する。我々は、もし磁気双極子相互作用のような長距離相互作用がない場合には、マグノンの励起エネルギーに上限が存在することを解析的方法で厳密に証明した。この結果は、フェルミ粒子系や格子系にも応用できるものであり、量子多体計算などによる補正に対して、厳密な指針を与えることができる [6]。

超流動体は粘性を持たない流体として知られているが、その中を変形する物体が自己推進できるか、すなわち、超流動体中で泳ぐことができるかを、平均場近似の範囲内で数値的に研究した。その結果、泳者が量子渦を発生する場合、しない場合ともに自己推進が可能であることが示された [7]。

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詳細な研究を行った。この研究は、研究班をまたいで、小林未知数氏と竹内一将氏との共同で行っている。前年までの結果として、同転移が異方的浸透現象 (directed percolation: DP) 普遍クラスであることが明らかになったが、定常状態観測におけるオーダーパラメーター (渦密度) の振る舞いが臨界点付近とその下で DP 普遍クラスと異なっており、この理解に向けてより詳細な計算を行った。

具体的に各揺動の大きさに対して現れる全ての渦の個別の長さを計測できるようにプログラムを改良し、渦長に対する確率密度関数を導いた。すると、転移点よりも下で、ランダムな揺動による効果を受けて渦の生成が起こっていることが明らかになり、それらの統計性はボルツマン分布と一致することから、熱的效果が入っていることが明らかになった。また、その熱的な効果は、比較的強い揺動下では、渦密度が上昇するにつれて、渦間の相互作用により効果が小さくなり DP 普遍クラスを邪魔しないと考えることができる。さらに DP 普遍クラスが明確に現れる領域での渦の統計性を見ると、べき的な振る舞いをしており、それが何らかのスケール普遍性を持った状態であることが明らかになった。この結果はより強く本研究の現象が臨界現象であるということの裏付けとなった。

[1] Y. Eto, *et al.*, arXiv:1512.01331.

[2] 例えば、H.-J. Miesner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2228 (1999).

[3] Y. Eto, *et al.*, arXiv:1511.01624.

[4] Y. Eto, *et al.*, *Phys. Rev. A* **92**, 013611 (2015).

[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] H. Saito, *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 114001 (2015).