

A02 スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮におけるトポロジカル欠陥のダイナミクス

京都大学大学院理学研究科 小林未知数

本研究の目的は、スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる、多種多様かつ非自明なトポロジカル欠陥が引き起こす新奇なダイナミクスを探索し、またその普遍的な性質を理解することである。

本年度私が着目したのは、スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮体における量子乱流のダイナミクスと統計である。近年、冷却原子気体における量子乱流が実験で実現され、大きな注目を浴びている。これまで実現しているのはスカラーの凝縮体における量子乱流であり、渦の定性的な振る舞いは超流動ヘリウム4と同じである。スカラー凝縮体における発達量子乱流では、古典乱流の統計則であるコルモゴロフ則が成り立つと予想されている。

一方、スピノル凝縮体ではスカラー凝縮体における整数量子渦とは異なる、多種多様なトポロジカルチャージを持つトポロジカル欠陥が可能となる。また、異なるトポロジカル欠陥の間にエネルギー的ではなくトポロジー的な相互作用が働くこともある。今回私は面欠陥（磁壁）、線欠陥（量子渦）、点欠陥（モノポール）の3つのトポロジカル欠陥に着目し、それぞれがトポロジー的な相互作用をするようなスピノル凝縮体およびその量子乱流状態の統計的な性質を、数値シミュレーションによって調べた。トポロジー的な相互作用とは、トポロジカル欠陥を持つトポロジカルチャージの非可換性であり、本研究では(i)面欠陥と線欠陥が非可換となる凝縮体：スピン1イジング強磁性状態、(ii)点欠陥と線欠陥が非可換となる凝縮体：スピン1ゼロ磁場ポーラー状態、(iii)異なる線欠陥同士が非可換となる凝縮体：スピン2ゼロ磁場サイクリック状態、の3つのスピノル凝縮体に着目した。これらの系では、トポロジカル欠陥間の非可換性により、新しいタイプのトポロジカル欠陥が現れる。(i)の系ではバルクに存在する量子渦が磁壁上で消えるような構造を持つブレンソリトンが現れ、磁壁上の回転流を与える。(ii)の系では渦輪でありながらモノポールチャージをも持つアリスリングが現れる。(iii)の系における量子渦は非可換量子渦と呼ばれ、非可換なチャージを持つ量子渦同士が衝突することによって、ラング渦と呼ばれる衝突する渦同士をつなぐ新たな渦が現れる。私はこれらの系に対して発達定常量子乱流状態を数値シミュレーションによって実現し、質量流運動エネルギースペクトルの非圧縮成分を計算した。

(i)の系では、バルク中に存在する量子渦によって引き起こされる3次元的な量子乱流と、ブレンソリトンによって引き起こされる磁壁上の2次元的な量子乱流状態の共存状態が期待される。その結果、エネルギースペクトルは3次元的な乱流スペクトルと2次元的な乱流スペクトルの両方が異なるスケールにおいて共存するようなスペクトルが得られた。

(ii)の系では、アリスリングとしてモノポールチャージを持つ量子渦は乱流状態においてモノポールとなったり、量子渦となったりする。平均モノポール間距離を境に、異なるエネルギースペクトルのスケールリング指数が得られた。

(iii)の系ではラング渦を介して、渦同士が結合し、大規模な量子渦のネットワーク構造が構成される。その結果、エネルギー注入よりも大きなスケールから、エネルギー散逸の小

さなスケールまでの、スカラー凝縮体における乱流状態よりもずっと広いスケールにおいて、
コルモゴロフ則が得られた。

上記3つの例は古典乱流の渦には見られない、量子渦を中心としたトポロジカル欠陥のト
ポロジカルな性質を利用して得られる、量子乱流特有の結果であるといえよう。またトポロ
ジーを利用することで、量子乱流の統計的性質を制御できることを示した最初の研究でもあ
る。

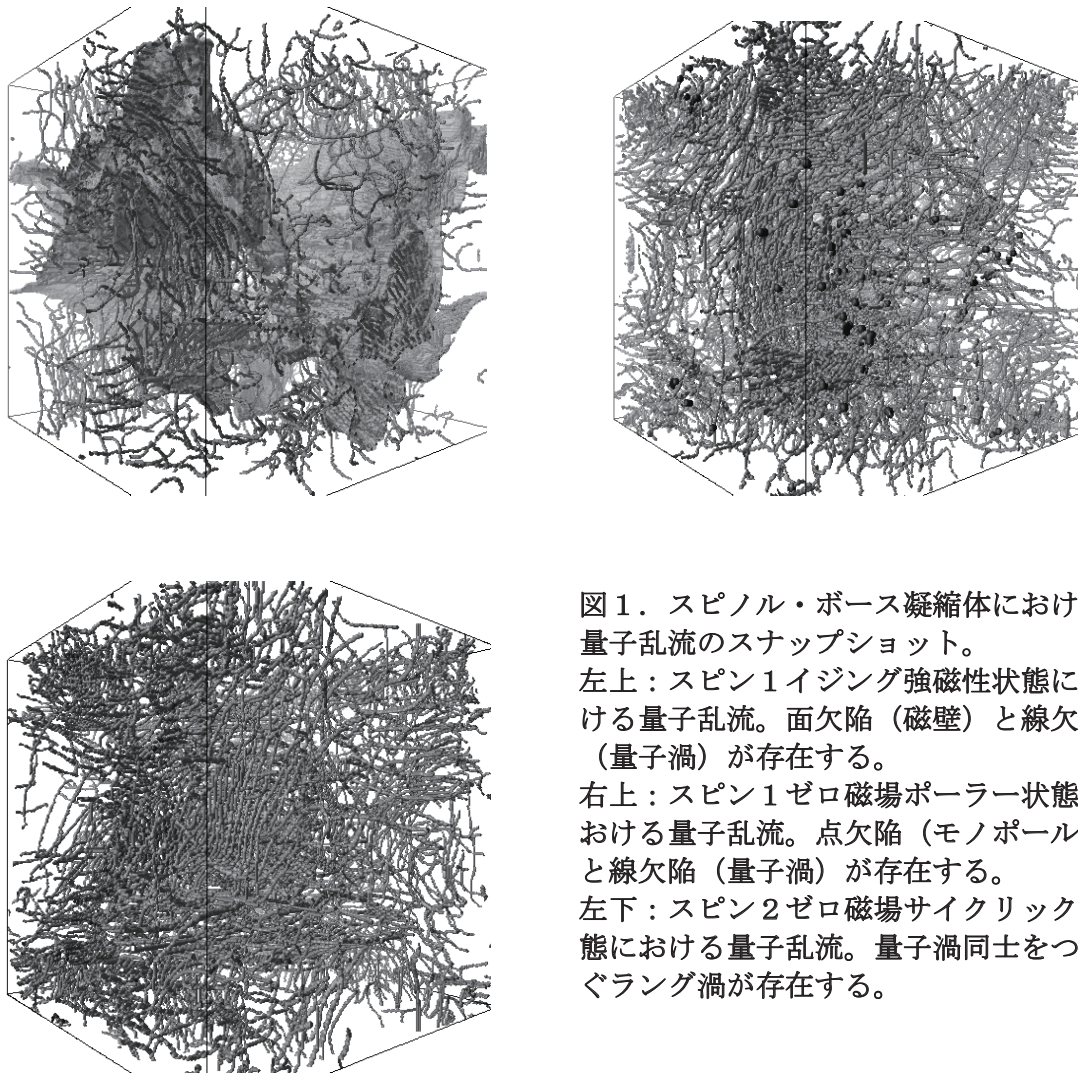


図1. スピノル・ボース凝縮体における
量子乱流のスナップショット。

左上：スピン1 イジング強磁性状態にお
ける量子乱流。面欠陥（磁壁）と線欠陥
（量子渦）が存在する。

右上：スピン1 ゼロ磁場ポーラー状態に
おける量子乱流。点欠陥（モノポール）
と線欠陥（量子渦）が存在する。

左下：スピン2 ゼロ磁場サイクリック状
態における量子乱流。量子渦同士をつな
ぐラング渦が存在する。