

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、一次元光格子ポテンシャルによって実現される、二次元スピノル・ボース系における熱平衡状態である。二次元系では強い熱ゆらぎの効果により、連続自由度に対する長距離秩序が存在しない。しかし渦対の束縛・乖離に伴って、動的な量である線形応答係数に特異性が現れる、いわゆる Kosterlitz-Thouless 転移が現れることはよく知られているが、スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮体に現れる量子渦のトポロジカルな性質が Kosterlitz-Thouless 転移に反映されるのかどうかを、大規模な数値シミュレーションを用いて調べた。

スピンの1のスピノル・ボース系の場合、粒子間相互作用の強さ、および磁場あるいはレーザーによって作られる2次ゼーマン効果によって、絶対零度における基底状態は6つの典型的な状態に分類される。図1に相互作用の強さと2次ゼーマンの係数に対する6つの基底状態および、そこで現れるトポロジカル欠陥の特徴を示す。図の左側が強磁性的相互作用、右側が反強磁性的相互作用である。また図中の絵は基底状態および欠陥状態に対するスピン空間の形であり、強磁性側ではトーラス状に、反強磁性側ではダンベル状になっている。2次ゼーマン係数が零でないときは、スピン量子化軸に平行な軸まわりに2次元的に回転し、零のときは3次元的に回転できる。

欠陥の特徴として最も重要なのは、欠陥を構成する自由度が位相部分とスピン部分の2つからなり、(ゼロ磁場強磁性相以外では)それぞれの自由度に対して欠陥のトポロジカルチャージを与えることができることである。6つの基底状態の欠陥に対して簡単に説明すると、反強磁性相互作用かつ2次ゼーマンが正の場合にはスピン自由度が存在せず、位相部分のみが通常の量子渦となり、Kosterlitz-Thouless 転移もよく知られたものと同じである。しかし、2次ゼーマンが零、または負の場合には位相部分のトポロジカルチャージとスピン部分のトポロジカルチャージが非可換に結合し、位相・スピン結合量子渦となる。また、2次ゼーマンが零のときには、スピン部分は反対のチャージを持つ渦が自分自身になるという、いわゆる Z_2 渦のトポロジカルチャージとなる。強磁性相互作用の方では、2次ゼーマンが正の場合、位相部分とスピン部分が完全に独立な、お互いに可換なトポロジカルチャージとなる。また2次ゼーマンが零のときは位相とスピンがお互いに区別できなくなり、結合して Z_2 渦のトポロジカルチャージを構成する。最後に2次ゼーマンが負のときは、スピン自由度が離散的になり、トポロジカル欠陥としては磁壁となる。ただし、磁壁と位相部分における量子渦のトポロジカルチャージは非可換に結合しており、独立ではない。また、磁壁の中にだけ存在できる量子渦もあり、実は Kosterlitz-Thouless 転移で重要な役割を果たすのはこの渦であることも分かった。

前述のとおり 2 次ゼーマンが零のときには、 Z_2 渦のトポロジカルチャージが現れるが、このトポロジカルチャージが現れる場合、その自由度に対する Kosterlitz-Thouless 転移は起こらないことが分かった。これは渦—反渦のペアが連続的に渦—渦のペアに変形して、準長距離秩序すら破壊してしまうことが原因である。また、2 次ゼーマンが負の方では位相自由度とスピン自由度に対するトポロジカルチャージが非可換に結合しているため、両者の自由度に対して全く同じ転移温度で転移が生じる。唯一強磁性相互作用かつ 2 次ゼーマンが正のときのみ、位相自由度とスピン自由度が異なる転移温度を持ち、2 段階転移する。

このように二次元系の Kosterlitz-Thouless は、三次元系の相転移とは異なって、量子渦のトポロジカルな性質を強く反映することが分かった。Kosterlitz-Thouless 転移は線形応答係数という動的な物理量の特異性であり、渦のトポロジカルな性質と動的な性質が結合している様子を見ることの出来る、非常に興味深い現象である。

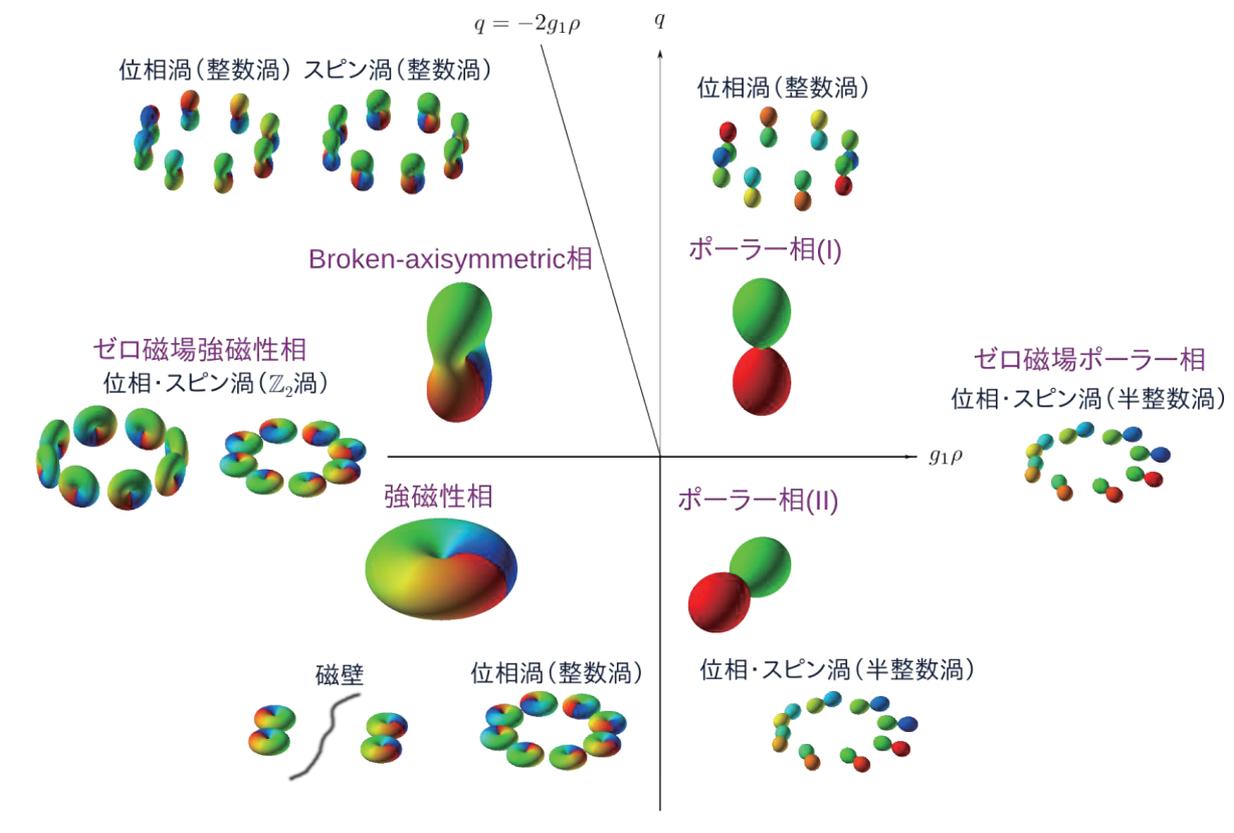


図 1. スピンが 1 のスピノル・ボース系における基底状態とトポロジカル欠陥の、スピン空間における形。図中の g_1 は相互作用の強さ、 q は 2 次ゼーマン効果の強さである。