

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（スピノル BEC）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トポロジカル欠陥が引き起こす新奇なダイナミクスを模索し、その普遍的な性質を理解することである。本研究では特に 2 つのテーマに着目して研究を行ってきた。1 つは量子渦によって引き起こされると考えられているベレジンスキー＝コステリッツ＝サウレス転移（BKT 転移）とスピノル BEC に現れる量子渦のトポロジーとの関係の解明、もう 1 つは量子乱流と構成要素である量子渦、あるいは別種のトポロジカル欠陥のトポロジーが引き起こす新奇な統計性の探索である。

BKT 転移は量子渦などのトポロジカル欠陥によって引き起こされる相転移として、超流動ヘリウムにおける研究を先駆けに古くから研究されてきたが、量子渦のトポロジーと BKT 転移との正確な関係は未だによく分かっていない点が多い。スピノル BEC は、外部磁場やスピンの依存する相互作用の大きさによって、多種多様なトポロジー的性質を持つ量子渦が現れるため、この問題を究明するための絶好の系であるといえる。今回は磁場による 2 次ゼーマン項を持つスピン 1 のスピノル BEC に焦点を当て、2 次ゼーマン項、およびスピン依存する相互作用項の大きさを変えることによって 7 種類の相：(i) ゼロ磁場強磁性相、(ii) 有限磁場強磁性相、(iii) Broken-axisymmetric 相、(iv) ゼロ磁場ポーラー相、(v) 有限磁場ポーラー相、(vi) 反強磁性相、および対応する量子渦：(i) Z_2 渦、(ii) 磁壁と共存する整数質量渦、(iii) 整数質量渦と整数スピン渦、(iv) 半整数質量渦と Z_2 スピン渦、(v) 整数質量渦、(vi) 半整数質量渦と半整数スピン渦、が実現する。この中で (v) 以外はすべて通常の超流動系とは異なる性質を持っている。これらすべての相に対して BKT 転移の性質を調べたところ、(i) BKT 転移が起こらない、(ii) 質量 BKT 転移と自発的対称性の破れを伴う磁性相転移がほぼ同時に起こる、(iii) 質量 BKT 転移とスピン BKT 転移が異なる転移温度で起こる、(iv) 通常の BKT 転移と異なる普遍性クラスを持つ質量 BKT 転移のみが起こる、(vi) 質量 BKT 転移とスピン BKT 転移が同時に起こる、という結果を得た。これらは量子渦のトポロジーを反映した結果であるといえる反面、質量部分とスピン部分の両方に対して BKT 転移や秩序構造の可能性が示唆されるなど、非常に新しい結果である。

量子乱流は量子渦を構成要素とする、超流動流体によって実現される乱流状態であり、時間空間的に非常に複雑な量子渦構造を持つ。近年の研究により、液体ヘリウムのような単純な超流動系において、古典流体とのアナロジーが成り立つことが示されている反面、スピノル BEC では多種多様なトポロジカル欠陥が現れるため、新奇な量子乱流が期待される。私は面欠陥（磁壁）、線欠陥（量子渦）、点欠陥（モノポール）の 3 つの欠陥に着目し、それぞれがトポロジカルな相互作用をするスピノル BEC の相を考え、その乱流状態を調べた。トポロジカルな相互作用とは、トポロジカル欠陥が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) 磁壁と量子渦が非可換となるスピン 1 強磁性相、(ii) モノポールと量子渦が非可換となるスピン 1 ポーラー相、(iii) 量子渦同士が非可換となるスピン 2 サイクリック

相の量子乱流状態を調べた。(i)ではバルクに存在する量子渦が磁壁上にのみ存在できる別種の量子渦へと分裂するブレインソリトン構造が現れ、磁壁上の回転流を与える。その結果、バルクに存在する3次元的な量子乱流と、磁壁上に存在する2次元的な乱流状態が共存するような複合乱流が観測された。(ii)ではモノポールが量子渦輪へと変形することによって、量子渦が乱流中で従来持つ統計性を激しく乱すことが分かった。(iii)において現れる量子渦は非可換量子渦と呼ばれ、量子渦同士が衝突することにより、乱流中においてほぼすべての量子渦が繋がった大規模ネットワーク構造を形成することが分かった(図1)。また乱流中において従来観測されるはずのエネルギーのカスケードが観測されず、一方でヘリシティと呼ばれる別の物理量のカスケードが観測された。その原因として、通常2次元の乱流でしか起こらないはずのエネルギーの逆方向へのカスケードがあることが分かった。

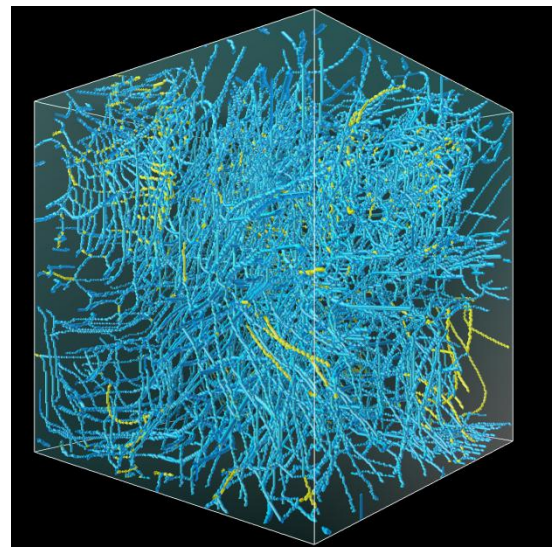


図1：非可換渦によって構成される量子乱流のスナップショット。蜘蛛の巣のようにほぼすべての渦が絡まって繋がっている

参考文献：

- (1) M. Kobayashi, M. Eto, and M. Nitta, arXiv:1802.08763.
- (2) M. Kobayashi and L. F. Cugliandolo, Phys. Rev. E **94**, 062146 (2016).
- (3) M. Kobayashi and L. F. Cugliandolo, Europhys. Lett. **115**, 20007 (2016).
- (4) M. Kobayashi and M. Ueda, arXiv:1606.07190.