

回転するバリオン物質における  
トポロジカル項と  $\pi^0$  中間子と  $\eta'$  中間子の  
カイラルソリトン格子状態

2021 年度

西村健太郎

| 報告番号  | Ⓜ 乙 第 号 | 氏 名 | 西村健太郎 |
|---|---------|-----|-------|
| 主 論 文 題 名 :   |         |     |       |
| 回転するバリオン物質におけるトポロジカル項と $\pi^0$ 中間子と $\eta'$ 中間子のカイラルソリトン格子状態  |         |     |       |
| (内容の要旨)   |         |     |       |
| <p>有限温度・有限密度における量子色力学 (Quantum Chromodynamics, QCD) の相構造を理解することは、素粒子標準模型の未解決問題の一つである。近年、高温・高密度物質に加えて、高速で回転する QCD 物質が注目されている。実際、2017 年に Relativistic Heavy Ion Collider における非中心重イオン衝突実験によって生成された物質は、これまで地上で実現された最大の渦度を持っており、一秒間に約 <math>10^{22}</math> 回転していると報告された。一般的にクォークのような相対論的なカイラルフェルミオンで構成された物質を回転させると、回転軸に沿った方向に粒子数カレントである「カイラル渦効果 (Chiral Vortical Effect, CVE)」が現れる。CVE は相対論的な場の量子論において、理論の古典的に持つ軸性対称性が量子効果によって破れるカイラルアノマリーや、理論の持つトポロジ的性質と密接に関係している。しかしながら、回転する QCD 物質の相構造に対するこれまでの解析では、このような CVE に関するトポロジの効果が無視されていた。</p> <p>本博士論文では、CVE に対するトポロジカル項を QCD の低エネルギー有効理論の枠内で導出し、この新しいトポロジカル項によって、十分速く回転する QCD 物質において従来の基底状態が不安定になることを示した。まず、CVE の輸送係数がトポロジカルな性質によってエネルギースケールに依らず厳密であることに着目し、QCD の低エネルギー自由度である中間子に対して、CVE を再現する新しいトポロジカル項を導出した。一つは有限バリオン化学ポテンシャルの場合の <math>\eta'</math> 中間子に対するトポロジカル項で、もう一つは有限バリオン・アイソスピン化学ポテンシャルの場合の <math>\pi^0</math> 中間子のトポロジカル項である。</p> <p>次に、回転する QCD 物質で現れるトポロジカル項を考慮した低エネルギー有効理論を用いて、十分速く回転する QCD 物質の基底状態がトポロジカル数を持つ周期構造を示し、同時にパリティ対称性を自発的に破る「カイラルソリトン格子 (Chiral Soliton Lattice, CSL)」と呼ばれる状態であることを解析的に示した。特に、<math>\eta'</math> 中間子の CSL は低密度のハドロン相と高密度のカラー超伝導相両方で生じ、これらの対称性の破れのパターンが一致することから二つの相は相転移なしにつながると予想した。これはクォーク・ハドロン連続性の回転系への拡張を与えている。さらに、新しいトポロジカル項の物理的帰結として、バリオン化学ポテンシャルの勾配と垂直方向にエネルギー流が生じる異常ホール効果や、系を回転させることで磁化が生じる (またはその逆の) 角運動量と磁化の間の交差応答を導出した。</p> |         |     |       |

## Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

|  |   |      |                   |
|--|---|------|-------------------|
| Registration Number  | <input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU"<br>No. _____ *Office use only | Name | Kentaro Nishimura |
| Thesis Title<br>Topological terms and chiral soliton lattice states of $\pi^0$ and $\eta'$ mesons in rotating QCD matter   |   |      |                   |
| Thesis Summary<br><p>Understanding the phase diagram of quantum chromodynamics (QCD) at finite temperature and/or density is one of the important problems in the Standard Model of particle physics. In recent years, rotating QCD matter has also attracted much attention. In 2017, it has been reported that quark-gluon plasmas produced in non-central heavy ion collisions at Relativistic Heavy Ion Collider have the largest vorticity observed so far, where the angular velocity is about <math>10^{22}/s</math>. In general, relativistic matter made up of chiral fermions under rotation exhibits the particle number current along the direction of the rotational axis, called the chiral vortical effect (CVE). The CVE is closely related to the violation of the axial symmetry by quantum effects known as the chiral anomaly, and to the topological nature of relativistic quantum field theories. However, such topological effects tied to the CVE have been neglected in the studies of the QCD phase diagram so far.</p> <p>In this thesis, I derived the topological term for the CVE in the low energy effective theory of QCD and showed that, under sufficiently fast rotation, the conventional ground state becomes unstable due to this new term. First, based on the exactness of the transport coefficient of the CVE due to its topological nature, I derived the topological term for mesons that reproduces the CVE. One is the topological term for the <math>\eta'</math> meson at finite baryon chemical potential and the other is that for the <math>\pi^0</math> meson at finite baryon and isospin chemical potentials.</p> <p>Next, based on the low energy effective theory with the topological term, I analytically showed that the ground state of QCD matter under fast rotation is the "chiral soliton lattice (CSL)," which has a periodic lattice structure with topological charge and spontaneously breaks parity symmetry. In particular, the CSL of the <math>\eta'</math> meson appears in both the low-density hadron and high-density color-superconducting phases. Since these symmetry breaking patterns match, I conjectured that the two phases are smoothly connected without any phase transition. This provides an extension of the quark-hadron continuity conjecture in the presence of rotation. Moreover, as a result of this topological term, I derived two new physical consequences. One is the anomalous Hall energy current, in which an energy current flows perpendicular to the gradient of the baryon chemical potential. The other is cross-correlated responses between the angular momentum and magnetization that the rotation induces the magnetization (and vice versa).</p> |   |      |                   |