

## 極限高密度物質を回転させるとカラー磁場の渦が発生する

物質が極限状態で、どうなっているのかということは素朴な疑問である。日常感覚では及びもつかない高温や高密度な環境下において、物質はどのような様子を示すのだろうか？物質は原子の集まりで、原子は原子核とその周りを回る電子から成る。原子核は陽子と中性子からできているが、陽子や中性子はクォーク3つから成る。不思議なことに現在の宇宙の温度ではクォークは単独で存在できず、陽子や中性子の中に閉じ込められている。ところが、宇宙の始まりのビックバンから数十マイクロ秒後の初期宇宙までさかのぼると、宇宙は非常に高温で原子や原子核の構造は融けてしまい、クォークが解放されてスープのような状態になっている。この状態はクォーク・グルーオン・プラズマ状態と呼ばれており、近年盛んに理論と実験の両面から研究されている。

さて、この宇宙で最も高密度な状態は、中性子星の内部で実現されていると思われている。物質をそこまで高密度の状態にすると、やはり原子核の構造が融けてしまい、陽子や中性子でできた「核物質」になる。本論文ではこうした状況で起こる興味深い現象を主に取り上げる。中性子は2つずつ組になり粘性なしに流れる、いわゆる**超流動**状態になり、陽子も2つずつ組になり電気抵抗なしに電流を運ぶ、いわゆる**超伝導**状態になる。中性子星は高速で回転しているので、回転軸に沿って渦が形成される。しかも超流動体であるために、超流動渦という、強さが量子化された渦（水中の渦と異なり渦の強さを1つ2つと数えることができる渦）になる。また中性子星には超強磁場があるので、磁場も量子化され超伝導渦に閉じ込められる（1つ2つと数えることができる磁場）。これらの渦が中性子星のダイナミクスに様々な影響を与える。

核物質をさらに圧縮してより高密度にすると、今度はクォークが解放されクォーク物質になる。特に低温で高密度の状態では、クォーク物質は**カラー超伝導体**になる。通常の金属は低温にすると超伝導体になるが、そこでは電子が2つずつ組んで電気抵抗を受けずに電流を運ぶ。一方、カラー超伝導体中では、クォークが2つずつ組んでカラー電流（電子のような電荷を持つ粒子の流れを電流というが、カラー電流はカラー電荷を持つクォークの流れのこと）が抵抗なしに流れる。特に高密度の極限では、同時に超流動状態でもあることが予想されている。もし、カラー超伝導体が高速回転している中性子星の中心部で実現していると、その回転のために必ず超流動渦が生成され、三角形の格子状に整列する。この渦は**非アーベリアン渦**と呼ばれ、超流動渦であると同時にカラー超伝導渦でもある。この新しい渦により、金属超伝導と類似の、あるいは新奇的な現象が現れる。

非アーベリアン渦は、遠方では普通の超流動渦と同じように振る舞い、図(a)

のように渦で輪を作ると、安定に形を保ったまま進行する。しかし、渦の内部に近づくと新しい性質が見えてくる。最も基本的な構造は渦の色と香りである。この色と香りは渦周辺に局在する新しい軽い粒子（南部ゴールドストーン粒子）によるもので、その粒子が渦内部の低エネルギー励起に対応する。電磁波が渦格子に入射すると、渦に局在する南部ゴールドストーン粒子によって渦に平行な方向の電場が減衰し、渦格子は偏光板の役割をする[図(b)]。

ところで、異なる相の境界に渦が突き刺さると、ブージャムという構造が現れる。ブージャムという名前は超流動ヘリウム3の境界に現れる構造に対してマーミンが初めて用いたものである。ブージャムは、もともとはルイス・キャロルの詩「*The Hunting of the Snark*」に出てくる怪物の名前であり、アリゾナの砂漠にあるサボテンのことでもある。超流動ヘリウム3と同様に、カラー超伝導と核物質の境界には「カラフルな」ブージャムが現れる[図(c)]。このようなカラフルなサボテン状の構造が中性子星内部で発生しているかもしれない。

現在の宇宙は、クォークが単独で存在できない「閉じ込め相」であり、高密度な環境で起こるカラー超伝導相は全く異なる状態である。しかし、両者は双対性あるいは連続性という特別な関係で結ばれているという予想がある。ところで、閉じ込め相でクォークが核子の中に閉じ込められているのはなぜか、という疑問は未だ明確な答えが与えられていない素粒子物理学の大問題であるが、答えの候補の一つにモノポール(磁気単極子)の凝縮仮説がある。磁荷を帯びたモノポールの凝縮が電荷を持つクォークを閉じ込めるのである。一方、カラー超伝導で凝縮を起しているのは、カラー電荷を持つクォーク対である。それならば、カラー磁荷をもつモノポールが閉じ込められているのではないだろうか？実際、量子的なカラーモノポールと反モノポールが非アーベリアン渦によって閉じ込められることが示された。このことは、逆に、双対性を認めるならば、閉じ込め相でのモノポール凝縮によるクォークの閉じ込めを示している。

ところで、通常、超伝導体の渦の内部にはフェルミオンが局在する。 $s$ 波超伝導ではフェルミオンのエネルギーはゼロではないが、カイラル  $p$  波超伝導ではフェルミオンのエネルギーがゼロになることが理論的にわかっている。さらにこのゼロ・エネルギーのフェルミオンは、粒子自身が反粒子と同じなので、マヨラナ・フェルミオンと呼ばれる。マヨラナ・フェルミオンが渦に局在すると、通常のボソン、フェルミオン、エニオンとも異なる、非アーベリアン・エニオンという不思議な粒子として振る舞うことがイワノフによって理論的に示された。さらに、非アーベリアン・エニオンの交換は、交換する際の経路の詳細によらずに、そのトポロジーだけによるので、雑音に強い「トポロジカル量子計算」に使えるということがキタエフによって提唱されている。このために、マヨラナ・フェルミオンを実験的に検出しようと世界中で激しい競争が繰り広げ

られている。一方、カラー超伝導においては、非アーベリアン渦にゼロ・エネルギーのマヨラナ・フェルミオンが3つ局在することが示された。カラー超伝導に特有な点は、1つの渦にマヨラナ・フェルミオンが3つ存在するため、イワノフの非アーベリアン・エニオンを多自由度に拡張したものになっていることである。

高密度極限のカラー超伝導相では、カイラル対称性も自発的に破れており、フラックスを伴わない別種の非アーベリアン（軸性）渦が存在する。ただし、軸性量子異常の効果で軸性ドメイン壁が接合している[図(d)]。軸性量子異常の効果で、軸性ドメイン壁は背景磁場中で強磁場を発生することが、ソンらによって明らかにされた。この機構は、マグネターという宇宙最強の磁場をもつ中性子星の強磁場の起源を説明する一つの候補として提唱された。

このように、高密度クォーク物質には、多種多様な渦やドメイン壁が存在しており、理論的に興味深いばかりでなく、様々な現象が予言されている。

## 原論文

Vortices and Other Topological Solitons in Dense Quark Matter,  
Minoru Eto, Yuji Hirono, Muneto Nitta, Shigehiro Yasui, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 012D01 (2014), DOI:10.1093/ptep/ptt095, [arXiv:1308.1535 [hep-ph]]

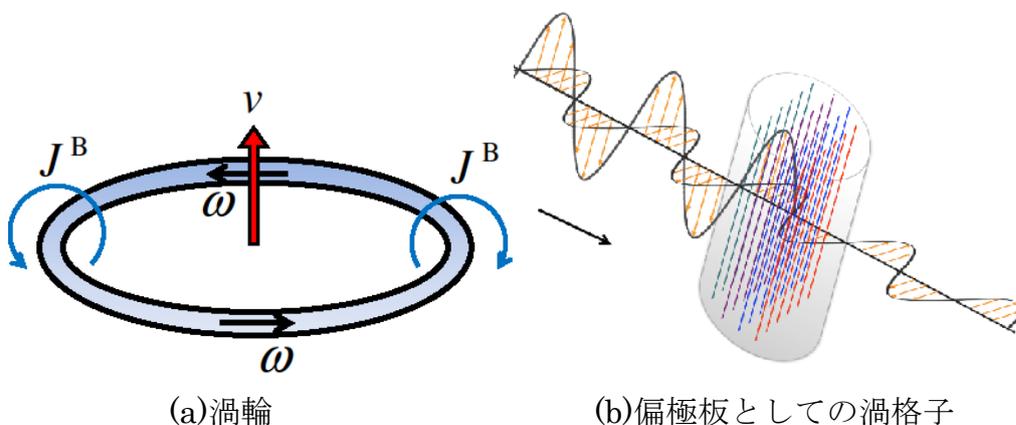
問い合わせ先 :

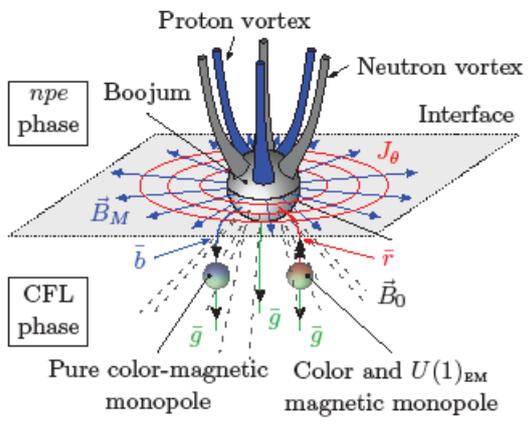
新田宗土 (慶應義塾大学日吉物理学教室(商学部)准教授)

電子メール : [nitta@phys-h.keio.ac.jp](mailto:nitta@phys-h.keio.ac.jp)

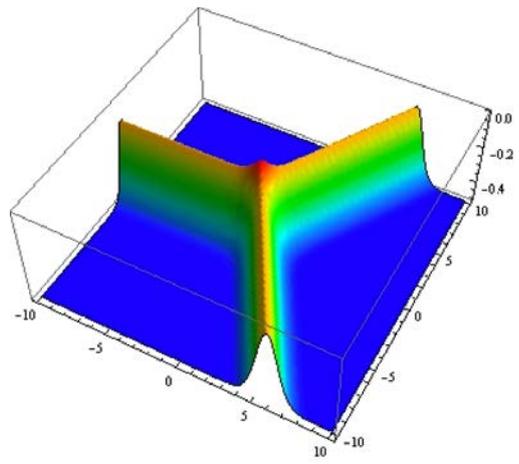
URL:

<http://www.sci.keio.ac.jp/member/detail.php?eid=00010&katagaki=3&status=1>





(c) ブージャム



(d) ドメイン壁接合