

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887032

研究課題名(和文)トポロジーに基づく高エネルギー・物性現象の統一的研究

研究課題名(英文)Unified study of high-energy and condensed-matter physics based on topology

研究代表者

山本 直希 (YAMAMOTO, Naoki)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：80735358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：電子やニュートリノ等の素粒子は、左右を区別するカイラリティという性質をもつ。この性質のために、電子やニュートリノから構成される相対論的なプラズマでは、空気や金属等の通常の物質では起きないようなトポロジカル輸送現象を示す。例えば、通常の金属では、電場をかけると電流が流れるオームの法則がよく知られているが、右巻き電子のプラズマでは、磁場をかけると電流が流れるような現象が現れる。本研究では、このような新奇な輸送現象が、大質量星の最期である超新星爆発や、マグネターと呼ばれる「宇宙最強の磁石星」の起源に、本質的な役割を果たす可能性があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Elementary particles, such as electrons and neutrinos, have the property called the chirality that distinguishes between the left and right. This property leads to topological transport phenomena in relativistic plasmas made up of electrons and/or neutrinos, which do not appear in ordinary matter like air and metals. One such example is the electric current along a magnetic field in right-handed electron plasmas. This should be contrasted with the electric current along an electric field in usual metals, known as Ohm's law. In our study, we have revealed that these novel transport phenomena should potentially play important roles in the origins of supernova explosions and gigantic magnetic fields of magnetars in the Universe.

研究分野：数物系科学

キーワード：トポロジー 初期宇宙 超新星爆発 マグネター ワイル半金属

1. 研究開始当初の背景

「対称性とその自発的な破れ」の概念は、現代物理学の根幹をなしている。実際、物性物理学における超流動・超伝導などの性質から、原子核・素粒子物理学における物質の質量の起源に至るまで、様々な物理現象を自発的な対称性の破れという共通の概念によって説明することができる。

一方、近年、動的な対称性の破れによる秩序とは独立の、系のもつ非自明なトポロジーに基づいた秩序(トポロジカル秩序)が、物性物理の新しいタイプの絶縁体や超伝導体(トポロジカル絶縁体・超伝導)において広く議論されている。このようなトポロジーの概念は、高エネルギー物理学において果たして重要になりうるだろうか? 高エネルギー物理学の標準言語である相対論的場の量子論では、理論が古典的にもつ対称性が量子効果によって破れる「量子異常」という現象が一般に現れ、トポロジーと深く関係していることが古くから知られている。しかしながら、初期宇宙のような超高温状態や中性子星内部のような超高密度状態など、物質の極限状態における平衡・非平衡ダイナミクスに、どのようにトポロジーの効果が関係し、何らかの形で発現する可能性については、これまで十分理解されていなかったのが現状である。

2. 研究の目的

本研究は、トポロジーという視点から、初期宇宙や中性子星内部などの超高温・超高密度状態という物質の極限状態における平衡・非平衡ダイナミクスを解明し、トポロジーという共通の概念を軸として、素粒子・原子核・宇宙・物性物理の様々な現象の統一的理解を目的とする。実際、従来の相対論的な輸送理論では、存在しているはずのトポロジーの効果が見落とされてきた、という重大な問題点に独自に着目し、このようなトポロジーの効果を考慮した初めての系統的な解析を行う。

特に、互いに密接に関係した以下の3項目を主要な研究テーマとする。

- ・トポロジカルな輸送理論の相対論的プラズマへの応用(トポロジーと原子核・素粒子物理)

- ・カイラルプラズマ不安定性とマグネターの起源の解明(トポロジーと宇宙物理)

- ・トポロジカルな輸送理論の物性系への応用とカイラルトロンクス(トポロジーと物性物理)

3. 研究の方法

山本らはこれまでに、素粒子のカイラリティの性質に起因するトポロジーの効果をとり入れた輸送理論(トポロジカルな輸送理論)を初めて構築した。本研究では、このト

ポロジカルな輸送理論を、初期宇宙・相対論的重イオン衝突実験(素粒子・原子核物理)、マグネター(宇宙物理)、ワイル半金属(物性物理)といった様々な分野へ応用する。研究対象は多岐にわたるが、共通するトポロジーの性質に基づいて解析するのが本研究の特徴である。

トポロジカルな輸送理論は粒子の分布関数に対するボルツマン方程式であるが、低エネルギースケールでは、ランジュバン型の低エネルギー有効理論や流体力学に帰着することがこれまでの研究から既に分かっている。初期宇宙における電弱プラズマや、重イオン衝突実験におけるクォーク・グルオン・プラズマについては、このようなランジュバン型の方程式や流体力学の方程式を数値的・解析的に解いて、その動的な性質を明らかにする。超新星におけるカイラル物質については、流体力学の時間発展を調べ、新しいタイプの磁気的不安定性の可能性とそのマグネター磁場との関係性を検討する。さらに、物性系での新しい物質「ワイル半金属」に対して、トポロジカルな輸送理論を応用して、新奇な輸送現象の可能性を探る。

4. 研究成果

(1) 非相対論的な系の基底状態で永久電流が流れないという「Bloch の定理」を相対論的な系を含む一般的な場合に拡張した。さらに、相対論的な系におけるトポロジカル輸送現象である「カイラル磁気効果」が、物性系における量子ホール効果と同様に、Bloch の定理の非平衡定常状態への一般化として理解できることを示した。一方、軸性電流についてはBloch の定理が適用できず、相対論的な物質のスピン偏極として理解できることを示した。この一般化されたBloch の定理は、物性系だけでなく、高エネルギー物理学で現れるような全ての系に適用できるもので、基礎的な重要性があると考えられる。

このようなBloch の定理の一般化によって、本研究開始当初に考えていた「基底状態での散逸のないトポロジカル輸送現象の可能性」は否定的に解決されることになった。

(2) 左右の対称性を破るカイラルプラズマの1つである初期宇宙の電弱プラズマにおいて、カイラルプラズマに特有のトポロジカル輸送現象「カイラル渦効果」のために、新しいタイプの波が現れることを明らかにし、「カイラル アルヴェン波」と名付けた。カイラルアルヴェン波は、これまで知られている様々な波(音波、電磁波、重力波、ゼロ音波、アルヴェン波等)とは異なり、空間反転(パリティ)対称性を破るような横波の初めての例となっている。このような初期宇宙でのパリティの破れた波は、宇宙背景放射のスペクトルを通して観測できる可能性がある。

(3) 電弱プラズマのような非可換ゲージ理

論のカイラルプラズマの時間発展を、その低エネルギー有効理論であるランジュバン型の方程式に基づいて数値的に解析した。その結果、従来無視されていたカイラルプラズマに特有のプラズマ不安定性の影響によって、初期宇宙でバリオン数を変化させる過程の起こる速さが変わることを明らかにした。これは、現在の宇宙に何故粒子(バリオン)だけが存在していて反粒子が存在しないのか、というバリオジェネシスの問題に対して、従来の解析結果を定量的に変更しようと考えられる。

(4) 超新星において、物質の密度が十分高い領域では、ニュートリノ物質がカイラルな流体として振舞うことが分かっている。ここでは、ニュートリノ数が量子効果のために保存されず、流体のヘリシティに転化するという新しいメカニズムを見出した。このメカニズムは、流体力学の枠内でニュートリノ数が常に保存するという従来の「常識」を修正するものであり、超新星爆発の起源そのものに重要な役割を果たすと期待される。さらに、このメカニズムによって生成された流体ヘリシティが新たな磁気不安定性を誘起することも明らかにした。これは、マグネター磁場の起源と関係している可能性がある。

(5) 初期宇宙の電弱プラズマ、重イオン衝突実験におけるクォーク・グルーオン・プラズマや超新星爆発におけるニュートリノ物質など、カイラルな物質に対する流体力学の方程式がもつスケール対称性を見出した。この対称性のために、カイラルな物質での乱流は、普通の物質での乱流とは異なり、エネルギーが小さいスケールから大きいスケールへと移送される「逆カスケード」過程が起きることを明らかにした。

このことは、特に超新星において、ニュートリノが左巻きのカイラリティをもつことを考慮することによって、従来の数値シミュレーションで見られる「順カスケード」過程とは異なり、超新星爆発が定性的に起こりやすくなることを示唆している。従って、将来的に超新星爆発の起源を理解するためには、このようなニュートリノのカイラリティの効果を適切に取り入れることが重要になると考えられる。

本研究課題の開始当初には、素粒子のもつカイラリティがマグネター磁場の起源に重要になりうるということ想定していたが、その超新星爆発の起源への重要性までもが本研究によって明らかになった。

(6) 相対論的な系で起こりうる全ての非線形の輸送現象を対称性に基づいて分類し、相対論的な系に特有のトポロジーの効果によって起こる新しい輸送現象を見出した。さらに、山本らがこれまでに構築したトポロジカルな輸送理論を用いて、その輸送係数を評価

した。このような新奇な輸送現象は、高エネルギーの相対論的な系で現れるだけでなく、ワイル半金属でも実現できると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

Naoki Yamamoto, “Scaling laws in chiral hydrodynamic turbulence,” *Physical Review D* (2016) に掲載決定、査読有

URL: <http://arxiv.org/abs/1603.08864>

Naoki Yamamoto, “Axion electrodynamics and nonrelativistic photons in nuclear and quark matter,” *Physical Review D*, vol. 93, 8 (2016), 085036(1-5), 査読有
10.1103/PhysRevD.93.085036

Yukinao Akamatsu, Alexander Rothkopf, Naoki Yamamoto, “Non-Abelian chiral instabilities at high temperature on the lattice,” *Journal of High Energy Physics*, vol. 3 (2016), 210, 査読有
DOI: [10.1007/JHEP03\(2016\)210](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2016)210)

Naoki Yamamoto, “Chiral transport of neutrinos in supernovae: Neutrino-induced fluid helicity and helical plasma instability,” *Physical Review D*, vol. 93, 6 (2016), 065017(1-13), 査読有
DOI: [10.1103/PhysRevD.93.065017](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.065017)

Takuya Kanazawa, Naoki Yamamoto, “U(1) axial symmetry and Dirac spectra in QCD at high temperature,” *Journal of High Energy Physics*, vol. 1 (2016), 141, 査読有
DOI: [10.1007/JHEP01\(2016\)141](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2016)141)

Naoki Yamamoto, “Generalized Bloch theorem and chiral transport phenomena,” *Physical Review D*, vol. 92, 8 (2015) 085011(1-9), 査読有
DOI: [10.1103/PhysRevD.92.085011](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.085011)

Naoki Yamamoto, “Chiral Alfvén Wave in Anomalous Hydrodynamics,” *Physical Review Letters*, vol. 115, 14 (2015), 141601(1-4), 査読有
DOI: [10.1103/PhysRevLett.115.141601](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.141601)

Takuya Kanazawa, Naoki Yamamoto, “Quasi-instantons in QCD with chiral symmetry restoration,” *Physical*

Review D, vol. 91, 10 (2015)
105015(1-5), 査読有
DOI: [10.1103/PhysRevD.91.105015](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.105015)

〔学会発表〕(計 9 件)

Naoki Yamamoto, “Chirality, Topology, and Astrophysics,” Topological Science Kick-off Symposium, 2016 年 3 月 14 日、慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市)

Naoki Yamamoto, “Chiral Instabilities in Quark-Gluon Plasma and Supernovae,” QCD Workshop on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions, 2016 年 2 月 23 日、Los Angeles (USA)

山本 直希、「トポロジカル輸送現象：物性から宇宙物理まで」、QCD Club, 2016 年 2 月 9 日、理化学研究所 (埼玉県・和光市)

山本 直希、新学術 地下素核研究「第 2 回超新星ニュートリノ研究会」、2016 年 1 月 6 日、富山商工会議所 (富山県・富山市)

山本 直希、「カイラル輸送現象」、KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の理論的課題と将来」、2015 年 11 月 25 日、高エネルギー加速器研究機構 (茨城県・つくば市)

山本 直希、「カイラル輸送現象」、基研研究会「熱場の量子論とその応用」、2015 年 9 月 2 日、京都大学基礎物理学研究所 (京都府・京都市)

Naoki Yamamoto, “Generalized Bloch theorem and chiral magnetic effect,” Intersection Between QCD and Condensed Matter, 2015 年 3 月 6 日、Schladming (Austria)

Naoki Yamamoto, “Chiral Plasma Instabilities in Quark Gluon Plasma and Magnetars,” High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, 2014 年 9 月 22 日、Wuhan (China)

Naoki Yamamoto, “Kinetic theory with anomalies and its applications,” Aspects of holography, 2014 年 7 月 18 日、Pohang (Korea)

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/nyama0509/>

/

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山本 直希 (YAMAMOTO, Naoki)

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：80735358