

令和元年5月28日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17703

研究課題名(和文)カイラル輸送現象による超新星爆発・初期宇宙の新物理

研究課題名(英文) New physics of supernovae and the early Universe due to chiral transport phenomena

研究代表者

山本 直希 (Yamamoto, Naoki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：80735358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子のカイラリティを考慮した輸送理論を、超新星コアなどで現れる相対論的なカイラル物質に応用した。その結果、通常物質では存在しないカイラル輸送現象によって、衝撃波の進行方向が素粒子のカイラリティによって決まるカイラル衝撃波や、エネルギーが小さなスケールから大きなスケールへと転化される乱流のカスケード現象(逆カスケード)という新しい物理現象が現れることを明らかにした。また、カイラル輸送理論を光子(電磁波)やグラビトン(重力波)に拡張し、特に、重力場中で右巻きと左巻きの重力波が分離する現象(重力波のスピンホール効果)を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、素粒子のカイラリティに起因するカイラル輸送現象によって、超新星内部における衝撃波や乱流の振る舞いが定性的に変わりうることが明らかになったが、これは宇宙物理学の未解決問題である超新星の爆発メカニズムに重要な役割を果たす可能性がある。また、本研究で理論的に見出した「重力波のスピンホール効果」の将来的な観測によって、古典的な一般相対性理論を超えたグラビトンの量子性の検証ができると期待される。

研究成果の概要(英文)：We applied the transport theory taking into account the chirality of elementary particles to relativistic chiral matter that appears, e.g., at the core of supernovae. As a result, we found new physical phenomena due to the chiral transport phenomena that are absent in usual matter: one is the chiral shock wave, whose propagation direction is determined by the chirality of elementary particles. The other is the inverse cascading turbulence, where the energy is transferred from small to larger scales. We also extended the chiral transport theory to photons (electromagnetic waves) and gravitons (gravitational waves). In particular, we found the splitting of the trajectories of right- and left-handed gravitational waves in a gravitational field (spin Hall effect of gravitational waves).

研究分野：原子核理論

キーワード：カイラル輸送現象 超新星 衝撃波 乱流 重力波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

物理学の様々な分野において、系のもつ幾何学的な性質(トポロジー)が、物理現象に重要な役割を果たすことが知られている。例えば、物性系では、磁場中の空間2次元電子系において、量子ホール効果というトポロジカル量子輸送現象が現れる。近年では、高エネルギー重イオン衝突実験の文脈で、クォークのカイラリティに起因するトポロジーの効果によって、磁場の方向に電流が流れる「カイラル磁気効果」と呼ばれる量子輸送現象が、理論的にも実験的にも注目されている。しかしながら、このような素粒子のもつカイラリティに起因する量子輸送現象である「カイラル輸送現象」の重要性は、超新星爆発などの宇宙物理学の文脈では、殆ど認識されていなかった。

超新星爆発では、もとの星の重力エネルギーの99%以上をニュートリノが星の外部に持ち去るため、超新星爆発の起源や、その後の星の進化を理解するためには、ニュートリノの輸送を適切に取り扱うことが必要不可欠である。それにもかかわらず、超新星で用いられていた従来の輸送理論では、素粒子の基本的性質であるカイラリティが考慮されておらず、その結果、カイラル輸送現象の効果が完全に無視されていたという問題点がある。

また、電弱相転移の前の初期宇宙におけるハイパー電磁場は、通常の電磁場とは異なり、左巻き・右巻き粒子との結合が異なるため、電弱プラズマの非平衡時間発展を理解するには、やはりカイラル輸送現象の効果を考慮する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、超新星や初期宇宙において、素粒子のカイラリティに起因する量子輸送現象であるカイラル輸送現象の引き起こす新しい物理現象を解明することを目的とする。

特に、以下の項目を主要なテーマとする。

- ・カイラル輸送理論の拡張
- ・カイラル輸送理論の超新星におけるニュートリノ物質への応用
- ・カイラル輸送理論の初期宇宙における電弱プラズマへの応用

3. 研究の方法

(1) 素粒子のカイラリティを考慮したカイラル輸送理論を、超新星や初期宇宙などで現れるカイラル物質に応用し、流体や電磁場の振舞い・時間発展がカイラル輸送現象によってどのように影響を受けるかを調べる。特に、新しいタイプの衝撃波や流体力学的不安定性が現れるかどうかを明らかにする。

(2) これまでに既に構築されたスピン1/2のフェルミオンに対するカイラル運動論を、スピン1の光子やスピン2のグラビトンに拡張し、それらに対するカイラル輸送現象を調べる。そのためにまず、光子やグラビトンに対するハミルトニアンを経路積分表示し、断熱近似を行うことによって、粒子のヘリシティによる量子効果を含む半古典的な運動方程式を導く。さらに、系の回転や重力場などの外場に対する光子やグラビトンの応答を考える。

(3) カイラル輸送現象は系のトポロジーと関係しているため、系の対称性の自発的な破れの有無に依らないと期待される。強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)において、カイラル対称性の自発的破れに伴って現れるNambu-Goldstoneモードであるパイ中間子について、カイラル輸送現象を再現するようなトポロジカル項を導出し、その物理的な帰結を探る。

4. 研究成果

(1) 超新星コアにおけるニュートリノ物質のような相対論的カイラル物質に対して、カイラル流体力学を応用し、衝撃波の性質を調べた。まず、カイラル物質では、通常物質では起きないカイラル輸送現象のために、従来の衝撃波の基本的な関係式であるRankine-Hugoniot関係式が修正されることがわかった。さらに、カイラル輸送現象が重要になる領域では、通常物質では禁止される膨張衝撃波が可能になり、衝撃波の進行方向がマイクロな素粒子のカイラリティによって決まる「カイラル衝撃波」が現れることを明らかにした。このようなカイラル衝撃波は、超新星だけでなく、初期宇宙における電弱プラズマでも重要になりうる。

また、超新星コアにおける電子のカイラル物質に対して、カイラル輸送現象の効果を取り入れた電磁流体力学(カイラル電磁流体力学)を定式化し、その非線形の時間発展である乱流の振舞いについて数値解析を行った。この結果、カイラル物質の電磁乱流では、通常の3次元電磁流体の乱流とは異なり、磁場と流体ともにエネルギーが小さなスケールから大きなスケールへと転化されるカスケード現象(逆カスケード)が起きることがわかった。これは、超新星の爆発メカニズムに重要な役割を果たす可能性がある。

(2) 光子やグラビトン（重力波）のヘリシティを考慮した新しいカイラル運動論を構築し、これらの粒子についてもカイラル輸送現象が生じることを解析的に示した。光子については、系が回転していると、回転軸に沿って右巻きと左巻きの光子流が逆方向に流れる「フォトニックカイラル渦効果」という新しい現象が起きることを明らかにし、ベリー曲率を用いて非平衡状態での一般的な表式を導出した。グラビトンについては、曲がった時空中で、右巻きと左巻きの重力波の軌道が分離する「重力波のスピンホール効果」が起きることを明らかにした。この物理現象の将来的な観測によって、古典的な一般相対性理論を超えたグラビトンの量子性の検証ができると期待される。

(3) 強磁場中での高密度 QCD 物質の基底状態が、カイラル磁気効果に関係するパイ中間子のトポロジカル項によって、「カイラルソリトン格子」という空間的な並進対称性とパリティ対称性を破る周期的なトポロジカルソリトンの状態になることを解析的に示した。さらに磁場を大きくしていくと、荷電パイ中間子が Bose-Einstein 凝縮を起こすことがわかった。このようなカイラルソリトン格子状態は、物性系でのカイラル磁性体において既に実験的に観測されているが、本研究結果は、中性子星内部のような高密度物質でも十分に強い磁場が実現されれば、それと本質的に同じ構造をもつ状態が現れうることを示している。

また、回転する高密度 QCD 物質においても、カイラル渦効果と関係するパイ中間子のトポロジカル項を導出した。この項の存在によって、高速回転している高密度 QCD 物質もカイラルソリトン格子状態になることを解析的に示した。これは、将来的な低エネルギーの重イオン衝突実験で観測できる可能性がある。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

Youhei Masada, Kei Kotake, Tomoya Takiwaki, [Naoki Yamamoto](#), “Chiral magnetohydrodynamic turbulence in core-collapse supernovae,” *Physical Review D* 98, 083018(1-17), 2018, 査読有 .
DOI: 0.1103/PhysRevD.98.083018

[Naoki Yamamoto](#), “Spin Hall effect of gravitational waves,” *Physical Review D (Rapid Communication)* 98, 061701(1-5), 2018, 査読有 .
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.061701

Xu-Guang Huang, Kentaro Nishimura, [Naoki Yamamoto](#), “Anomalous effects of dense matter under rotation,” *Journal of High Energy Physics* 2, 69(1-15), 2018, 査読有 .
DOI: 10.1007/JHEP02(2018)069

[Naoki Yamamoto](#), “Photonic chiral vortical effect,” *Physical Review D (Rapid Communication)* 96, 051902(1-5), 2017, 査読有 .
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.051902

Srimoyee Sen, [Naoki Yamamoto](#), “Chiral Shock Waves,” *Physical Review Letters* 118, 181601(1-5), 2017, 査読有 .
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.181601

Tomáš Brauner, [Naoki Yamamoto](#), “Chiral soliton lattice and charged pion condensation in strong magnetic fields,” *Journal of High Energy Physics* 4, 132(1-18), 2017, 査読有 .
DOI: 10.1007/JHEP04(2017)132

[学会発表](計 18 件)

[山本 直希](#), 「超新星におけるカイラル電磁乱流」, KEK 連携コロキウム・研究会エディション「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」, 2019 年 .

[Naoki Yamamoto](#), “Chiral Matter and Topology in Astrophysics,” *Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology*, 2018 年.

[Naoki Yamamoto](#), “Chiral Transport Phenomena and Turbulence in Supernovae,” *Quantum Anomalies and Chiral Magnetic Phenomena*, 2018 年.

[Naoki Yamamoto](#), “Chiral soliton lattice in magnetic fields and rotation,” *4th Workshop on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions*, 2018 年.

Naoki Yamamoto, “Chiral soliton lattice in strong magnetic fields,” Phases of Quantum Chromodynamics and Beam Energy Scan Program with Heavy Ion Collisions, 2017 年.

山本 直希, 「カイラル輸送現象:ニュートリノから超新星爆発へ」, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2017」, 2017 年 .

Naoki Yamamoto, “Neutrino Chiral Matter in Supernovae,” Chiral Matter 2016, 2016 年.

Naoki Yamamoto, “Chiral transport of neutrinos in supernovae,” Quarkyonic matter from theory to experiment, 2016 年.

Naoki Yamamoto, “Topological transport phenomena in strong and electroweak matter,” Strong and Electroweak Matter 2016, 2016 年.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

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