

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03948

研究課題名（和文）重いクォークを不純物として含むQCD物質の強磁場中輸送理論

研究課題名（英文）Magnetotransport phenomena in QCD matter with heavy-quark impurities

研究代表者

服部 恒一（Hattori, Koichi）

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：10730252

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カイラル凝縮と近藤凝縮の競合効果に焦点を当て、強磁場下でのディラック方程式に従うフェルミオン系の相構造を解析した。競合効果によって新たな層構造が現れる。弱磁場中の真空ではカイラル凝縮が優勢であり、強磁場では近藤凝縮が優勢になる新しい量子臨界点の存在を示唆した。また、臨界磁場を超えるとカイラル凝縮が一定値に飽和すること、近藤凝縮が消失する臨界温度の上側においてカイラル凝縮が特異な増加を示すことを競合現象のシグナルとして提案した。臨界磁場の解析的な表式を与えた。これらの成果は、多層グラフェンや格子QCDシミュレーションでの検証の可能性を示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究成果の意義は、強磁場下でのディラックフェルミオン系におけるカイラル凝縮と近藤凝縮の競合効果を明らかにし、新たな量子臨界点の存在を示唆した点にある。従来の研究では、これらの効果が個別に研究されていたが、本研究ではその競合に初めて着目し、相構造を詳細に解析した。近年の物性実験ではディラック方程式に従う準粒子が多く発見されているため、量子色力学で記述されるクォーク物質から物性分野に跨る強相関係の新たな方向性を示唆している。特に、カイラル凝縮が強磁場で一定値に飽和する現象や、特異な増加を示すことを競合のシグナルとして提案し、多層グラフェンでの実験的実現の可能性を議論した。

研究成果の概要（英文）：We studied the phase structure of a fermion system governed by the Dirac equation under a strong magnetic field. The phase structure becomes rich when there is competition between the chiral condensate and the Kondo condensate. We suggested the existence of a new quantum critical point at a certain critical magnetic field strength, where vacuum switches over from the one dominated by the chiral condensate to the one dominated by the Kondo condensate. We proposed two observable behaviors that serve as signals of the competition phenomenon. First, the chiral condensate saturates at a constant value beyond the critical magnetic field. Second, the chiral condensate exhibits a peculiar increase as temperature increases above the critical temperature for the Kondo condensate; The chiral condensate is liberated from the competition. These findings suggest experimental and numerical confirmation by using multilayer graphene and lattice QCD simulations.

研究分野：高エネルギー核物理

キーワード：強磁場 近藤効果 ディラック粒子 カイラル対称性 クォーク・グルーオンプラズマ

1. 研究開始当初の背景

相対論的重イオン衝突実験や中性子星・マグネターでは非常に強い磁場が形成されるため、強磁場中の場の量子論が盛んに研究されている。相対論的重イオン衝突では強磁場の物理が既に大きな潮流になっている。また、物性系でも相対論的な基本方程式であるディラック方程式に従うような準粒子が発現するディラック半金属・ワイル半金属が造られ、外部から印加された強電磁場の下、対応する実験がなされている。特に、磁場に平行な電流が流れるカイラル磁気効果は2008年頃から相対論的重イオン衝突実験の分野で研究が盛んになり[1,2]、2016年にはワイル半金属で実験的検証が報告された[3]。

一方、強磁場下のフェルミオン系と有限密度系でのフェルミオン系の類似性に基づいた研究も同時期に進んでいた。これら二つの系では、運動量空間二次元面内でエネルギー縮退が起こるといった類似性がある。有限密度系では二次元フェルミ球上の縮退がある。強磁場下では荷電粒子がサイクロトロン運動に従うことから、量子論においてランダウ量子化が起こると共に、磁場に垂直な運動量に対して縮退が起こる。サイクロトロン運動の中心座標を横平面のどの位置に置いてもエネルギー的に等価なためである。有限密度系ではクーパー不安定による超伝導が発現するが、強磁場下での対応する現象はカイラル対称性の破れである[4]。カイラル対称性は量子色力学における重要な対称性であるため、盛んに研究が行われた。特に、量子色力学の強結合領域に対する数値シミュレーションが大いに進展した。

有限密度系の超伝導は伝導電子間の相互作用が低温で強結合になる事で生じる。これは、繰りこみ群の発展にランダウポールが現れることから理解できる。理論的に同様な現象として、不純物と伝導電子間の相互作用が低温で強結合になる近藤効果がある。近藤効果が量子色力学で発現する可能性が指摘されていた[5,6]。また、上述の強磁場系と有限密度系の類似性から、強磁場中でも近藤効果が発現する可能性も指摘されていた[7]。

2. 研究の目的

有限密度系のフェルミ面近傍で起こる従来の近藤効果ではなく、有限密度系と強磁場系の類似性から予言されている新たな「磁場近藤効果」が物質の相構造・輸送現象にもたらす帰結を探索する。対象とする系は、量子色力学で記述されるクォーク物質系と共に、上述のディラック半金属・ワイル半金属や二次元のディラック準粒子が現れるグラフェンである。これらの系における実験的検証に向けた提案と共に、強磁場中での数値シミュレーションの可能性を提案する事が研究目的である。

3. 研究の方法

ディラック方程式に従うフェルミオン系の相構造を解析するために、強磁場下でのディラック方程式を解き、熱力学ポテンシャルを構成する。ディラック粒子間、及びディラック粒子と不純物の間の相互作用は4点相互作用で取り入れる。相構造はオーダーパラメータであるカイラル凝縮と近藤凝縮の値によって決定する。平均場近似を適用して、これら二つのオーダーパラメータに対する連立のギャップ方程式を導く。方程式の解を温度と磁場の関数として求め、相構造を決定する。

4. 研究成果

本研究では、ディラック方程式に従うフェルミオン系の相構造に対する、強磁場と不純物の効果を解析した。強磁場下では、カイラル対称性が必ず自発的に破れる事と、磁場近藤効果が発現する事が知られていた。従来の研究では、これら二つの効果の競合については研究されていなかった。連立のギャップ方程式を解くことで、競合の関係を明らかにした。

主な研究成果は以下の通りである。

● 新しい量子臨界点の示唆

カイラル凝縮と近藤凝縮のうちどちらが優勢になるかに依って、ゼロ温度における安定な真空が変化する量子臨界点の存在を示した。磁場が比較的弱い領域ではカイラル凝縮が優勢だが、ある臨界磁場が存在して、強磁場では近藤凝縮が優勢になることを示した。臨界磁場の解析的な表式と共に、この量子相転移が二次転移である事を示した。

- カイラル凝縮の飽和

競合がない場合には、カイラル凝縮は磁場の関数として単調に増加するが、競合が存在して臨界磁場より大きな磁場中では一定値に飽和する事を示した。この飽和現象を、競合の存在を示すシグナルのひとつとして提案した。

- 有限温度における相転移の次数

競合がない場合、カイラル凝縮は有限温度でクロスオーバー転移、近藤凝縮は一次転移である。クロスオーバー転移のカイラル凝縮が高温でも残存することに比べ、近藤凝縮は臨界温度で完全に消失する。競合の効果から予想されるように、近藤凝縮の臨界温度が低下することを示した。有限温度での一次相転移線は、ゼロ温度での二次臨界点に繋がっている。

- 特異なカイラル凝縮の増加

近藤凝縮が消失する臨界温度より上側の領域で、カイラル凝縮が増加することを示した。通常は温度の上昇と共に単調に減少するため、増加が起こることは特異な振舞いであると言える。増加の原因は、近藤凝縮が消失することにより、カイラル凝縮が競合から解放されるためである。この振舞いを、競合の存在を示す二つ目のシグナルとして提案した。

まとめとして、本研究では、量子多体系の中心課題であるカイラル対称性の破れと近藤効果の競合の下での相構造を解析した。新しい量子臨界点の存在を示唆し、そのシグナルとして磁場の強度に対するカイラル凝縮の飽和効果と、温度に対する特異な増加現象を観測量として提案した。これらに基づいて、近年注目されている多層グラフェンでの実験的検証の可能性を議論した。また、磁場中の格子 QCD シミュレーションは符号問題がないため、シミュレーションによる検証も期待できる。

- [1] D. Kharzeev, L. McLerran, H. Warringa, "The Effects of topological charge change in heavy ion collisions: 'Event by event P and CP violation,'" Nucl. Phys. A 803 (2008) 227-253.
- [2] K. Fukushima, D. Kharzeev, H. Warringa, "The Chiral Magnetic Effect," Phys. Rev. D 78:074033, (2008).
- [3] Q. Li et al., "Chiral magnetic effect in ZrTe₅," Nature Phys. 12, 550-554 (2016).
- [4] V. Gusynin, V. Miransky, I. Shovkovy, "Dimensional reduction and dynamical chiral symmetry breaking by a magnetic field in (3+1)-dimensions," Phys. Lett. B 349 (1995) 477-483.
- [5] S. Yasui, K. Sudoh, "Heavy-quark dynamics for charm and bottom flavor on the Fermi surface at zero temperature," Phys. Rev. C 88 (2013) 1, 015201.
- [6] K. Hattori, K. Itakura, S. Ozaki, S. Yasui, "QCD Kondo effect: quark matter with heavy-flavor impurities," Phys. Rev. D 92 (2015) 065003.
- [7] S. Ozaki, K. Itakura, Y. Kuramoto, "Magnetically induced QCD Kondo effect," Phys. Rev. D 94 (2016) 074013.
- [8] K. Hattori, D. Suenaga, K. Suzuki, S. Yasui, "Dirac Kondo effect under magnetic catalysis," Phys. Rev. B 108 (2023) 24, 245110.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Koichi Hattori, Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 276
2. 論文標題 Phase diagram of the QCD Kondo effect and inactivation of the magnetic catalysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web Conf.	6. 最初と最後の頁 1015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202327601015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hongo Masaru, Hattori Koichi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Revisiting relativistic magnetohydrodynamics from quantum electrodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2021)011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Hattori Koichi, Taya Hidetoshi, Yoshida Shinsuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Di-lepton production from a single photon in strong magnetic fields: vacuum dichroism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2021)093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Hattori Koichi, Hidaka Yoshimasa, Yamamoto Naoki, Yang Di-Lun	4. 巻 2021
2. 論文標題 Wigner functions and quantum kinetic theory of polarized photons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2021)001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Koichi Hattori, Kazunori Itakura, Sho Ozaki	4. 巻 133
2. 論文標題 Strong-field physics in QED and QCD: From fundamentals to applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 104068
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnpnp.2023.104068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Patrick Copinger, Koichi Hattori, Di-Lun Yang	4. 巻 107
2. 論文標題 Euler-Heisenberg Lagrangian under an axial gauge field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 56016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.056016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Koichi Hattori, Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 108
2. 論文標題 Dirac Kondo effect under magnetic catalysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.245110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koichi Hattori, Xu-Guang Huang, Masaru Hongo	4. 巻 14
2. 論文標題 New Developments in Relativistic Magnetohydrodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 1851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym14091851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 QCD phase diagram in strong magnetic fields: Competition between the magnetic catalysis and the QCD Kondo effect
3. 学会等名 Strangeness Quark Matter (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 The QCD Kondo effect and chiral symmetry breaking in strong magnetic fields
3. 学会等名 黎明ワークショップ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 Vacuum and in-medium polarization phenomena in strong magnetic fields
3. 学会等名 Physics in Strong Fields 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 QCD phase diagram in strong magnetic fields: Competitive growths of the chiral and Kondo condensate
3. 学会等名 14th Particle Physics Phenomenology Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 QCD phase diagram in strong magnetic fields from competition between the magnetic catalysis and the QCD Kondo effect
3. 学会等名 The 20th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 MHD from QED
3. 学会等名 ECT* online workshop "Spin and Hydrodynamics in Relativistic Nuclear Collisions" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 服部恒一
2. 発表標題 強電磁場中におけるクォーク・ハドロン物理の最近の進展から
3. 学会等名 KEK 理論センター研究会 (オンライン)「原子核・ハドロン物理2020」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 Transport phenomena in magnetic fields
3. 学会等名 Chirality and Criticality: Novel Phenomena in Heavy-Ion Collisions" (INT Program INT-20-1c) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 Gyro-hydrodynamics under strong vorticity
3. 学会等名 The 7th International Conference on Chirality, Vorticity and Magnetic Field in Heavy Ion Collisions (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 Recent Developments in Strong Field Physics
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 Magneto-birefringence and axial Ward identity at finite temperature and density
3. 学会等名 15th workshop on QCD Phase Transition and Relativistic Heavy Ion Collisions (QPT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koichi Hattori
2. 発表標題 Quantum critical point from competition between Dirac Kondo effect and chiral symmetry breaking
3. 学会等名 XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------