

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05366

研究課題名(和文)クォーク物質における近藤効果：重いクォークによる不純物効果がもたらす新しい物性

研究課題名(英文)Kondo effect in quark matter: new properties induced by heavy-quark impurities

研究代表者

板倉 数記 (Itakura, Kazunori)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：30415046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：物性物理学で最も重要な概念の一つと考えられている近藤効果とは、軽い粒子からなる媒質中に微量に不純物として混入した重い粒子がもたらす物性の変化を言う。この現象は軽い粒子と重い粒子の間の非可換相互作用、フェルミ面の存在、量子効果などによって実現することが分かっており、電子物性系に限らず、様々な系において実現できるはずである。本研究では、軽いクォークから構成される高密度クォーク物質中に、不純物として重いクォークを入れたときに起こる近藤効果に関して、その場の理論的記述方法の整備を行った。特にカイラル対称性の破れとの類推から、軽いクォークと重いクォークの組の凝縮を平均場的に扱うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、我々の身近な物質の電子系で見られる近藤効果という現象が、宇宙の遥か彼方に存在する中性子星のさらにその中心部に存在するかもしれない「クォーク物質」においてもみられる可能性があるということを探求するものである。このように全く異なる階層においても同様の現象が見られるということは、物理学の自然に対する普遍性の一つの表れであると言える。現象に現れる主体が異なっても、現象の本質は変わらない。そのような理解を進めることは、我々の自然に対する理解がまた一歩進んだとも言えるだろう。

研究成果の概要(英文)：Kondo effect, which is one of the most important concepts in condensed matter physics, is a phenomenon where bulk properties of light particles are significantly affected by few impurities of heavy particles. This effect takes place when there are non-Abelian interactions, a Fermi surface, and a quantum effect and thus can be seen in principle in various matter. In this research, we considered a Kondo effect of light quark matter induced by small amount of heavy quarks. In particular, we constructed theoretical framework in analogy to quantum field theory of spontaneous breaking of chiral symmetry. The new condensate is for the coupling between a light quark field and a heavy quark field.

研究分野：高エネルギーハドロン物理

キーワード：クォーク物質 近藤効果 重いクォーク

1. 研究開始当初の背景

中性子星の中心部や、相対論的重イオン衝突の衝突点に生成する超高密度の物質は、陽子や中性子内に閉じ込められた状態から解放されたクォークが構成する「クォーク物質」と呼ばれる状態にあると考えられる。昔からその状態の物性は議論されていたが、同じフェルミ粒子系である電子ガス系などに比べ、その理解はそれほど進んではいない。クォーク物質の特徴であるカイラル対称性の側面に特化した研究が多く、また電子系との類推で現れるカラー超伝導(クォーク対の凝縮)に関係した研究も多いが、それ以外については定性的に新しい議論はほとんど存在しなかった。一方で、物性物理でその重要性が認識されている近藤効果について、クォーク物質でも発現するのではないかという論文を発表した。そこで、本科研費を用いてさらなる研究を進めていこうと思いついた。

2. 研究の目的

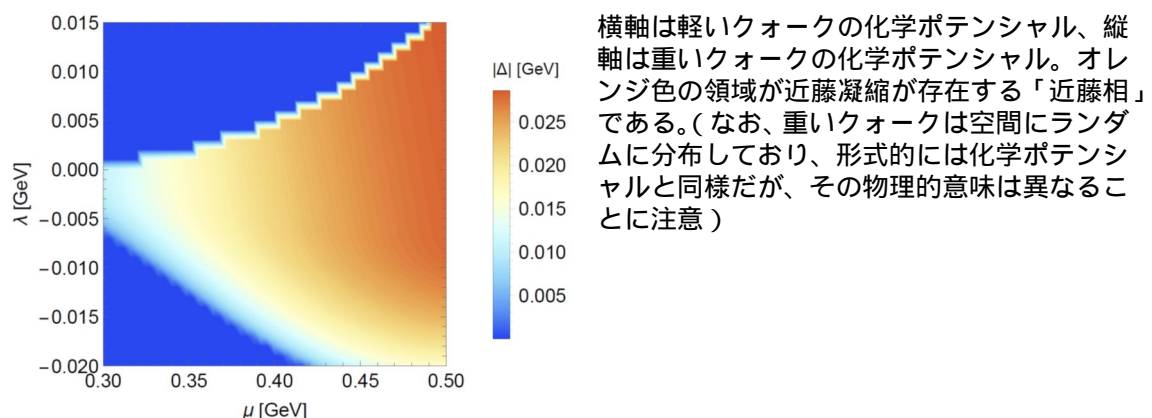
物性物理の分野で盛んに研究されている近藤効果が、クォーク物質の中でどのように現れ、クォーク物質の性質を如何に変化させるのかを明らかにするとともに、近藤効果の非摂動的な場の理論的な取り扱いを定式化することを目指した。また、そのような研究を通じて、自然界の異なる階層で普遍的に存在する現象の例を新たに加えること。

3. 研究の方法

現象を場の理論の枠内で扱い、それに合った手法で記述することは重要である。そこで、この非摂動的な現象を記述するうえで、非摂動的現象の典型例であるカイラル対称性の自発的破れの記述方法を参考にした。すなわち、最も素朴ではあるが本質を捉えた近似である平均場近似である。具体的には、軽いクォークと重いクォークの間に4体フェルミ的な相互作用(グルーオン交換で正当化ができる)を導入し、その相互作用を「軽いクォークと重いクォークの結合」に相当する平均場を定義する。その平均場に関する非摂動的なギャップ方程式を解くことで、近藤効果を記述するのである。また、このような場の理論的な記述を通して、近藤効果のトポロジカルな側面も明らかになってくると期待された。

4. 研究成果

実際に、軽いクォーク場と重いクォーク場の積が凝縮するという形で近藤効果が記述できることが分かった。平均場近似においてはこの凝縮によって軽いクォークと重いクォークが混ざることになり、ちょうどニュートリノ振動のような状況が実現する。そして、この凝縮が有限の値を持つ領域として新たに「近藤相」と呼ぶべき領域が(軽いクォークと重いクォークの化学ポテンシャルで張られる相図内で)存在することが分かった(下図参照)。また、凝縮の生成に伴って実現する基底状態はトポロジカルに非自明であることや、凝縮の周りの揺らぎの解析を行うことで、基底状態が安定であること、励起状態がエキシトンのような状態であることなども明らかになった。



もう一つの近藤効果の普遍性を示す例として、「磁場によって引き起こされる QCD 近藤効果」と

いうものを明らかにした。電子物性系では近藤効果は電子のスピンと不純物のスピンに関係した相互作用が重要であるため、そこに強い磁場をかけてしまうとスピンの揃い、近藤効果自体が消失してしまう。しかし、クォーク物質での近藤効果では、軽いクォークと重いクォークの非可換相互作用は（スピンではなく）グルーオン交換によって実現されるため、磁場を印可することに意味がある。さらに、磁場をかけると、荷電粒子はランダウレベルを構成し、各レベルは縮退度を持つ。これはフェルミ面の存在と同様の効果を持ち、従ってクォーク物質では磁場が近藤効果を引き起こすというユニークな状況を実現させるのである。この現象は、クォーク物質の特殊性を示すことと同様に、近藤効果という現象の実現条件が、電子系で考えられていたものよりも広いことを意味する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shigehiro Yasui, Kei Suzuki, Kazunori Itakura	4. 巻 A983
2. 論文標題 Kondo phase diagram of quark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 90-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysa.2018.12.025	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 Kei Suzuki, Shigehiro Yasui, Kazunori Itakura	4. 巻 96
2. 論文標題 Interplay between chiral symmetry breaking and the QCD Kondo effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.114007	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 Shigehiro Yasui, Kei Suzuki, Kazunori Itakura	4. 巻 96
2. 論文標題 Topology and stability of the Kondo phase in quark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.014016	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 S.Ozaki, K.Itakura and Y.Kuramoto	4. 巻 94
2. 論文標題 Magnetically induced QCD Kondo effect	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.94.074013	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 安井繁宏、鈴木溪、板倉数記
2. 発表標題 クォーク物質における新しい相 “ Kondo phase ”
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 鈴木溪、安井繁宏、板倉数記
2. 発表標題 クォーク物質における近藤凝縮とカイラル凝縮の競合
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安井繁宏、鈴木溪、板倉数記
2. 発表標題 クォーク物質の近藤凝縮相における励起モード
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----