

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17641

研究課題名(和文) チャームに拡張されたマルチフレーバー原子核構造とヘビークォーク対称性

研究課題名(英文) Heavy quark symmetry and multi-flavor nuclear structure extended to charm quark

研究代表者

安井 繁宏 (Shigehiro, Yasui)

東京工業大学・理学院・特任助教

研究者番号：00535346

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)：重いクォークが現れる新しいマルチバリオン系としてチャームやボトムフレーバーをもつ原子核が存在すると考えられている。これらは「チャーム原子核」や「ボトム原子核」と呼ばれている。本研究では重いクォークに特有の対称性である「重いクォーク(スピン)対称性」に基づいて、重いハドロンと核子の相互作用に基づいて核物質の中の重いハドロンのダイナミクスについて理論的予言を行った。重いハドロンとして最も簡単な構造をもつheavy-lightメソン(重い反クォークと軽いクォークの束縛状態)について束縛や崩壊などの性質を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We consider the new type of nuclei which contain charm or bottom flavor as multi-baryon systems with heavy quarks. Those are called “charm nuclei” or “bottom nuclei”. In this study, focusing on the “heavy quark (spin) symmetry” which is a characteristic symmetry for a heavy quark, we constructed the inter-hadron interaction between a heavy hadron and a nucleon as the heavy-hadron effective theory, and gave theoretical predictions about the properties of heavy hadrons in nuclear systems. We considered the heavy-light meson (a bound state of a heavy antiquark and a light quark) as one of the simplest systems, and investigated their masses and decays in nuclear systems by applying the obtained interaction to the many-body calculations.

研究分野：ハドロン理論

キーワード：チャーム ボトム 原子核 重いクォークの対称性 近藤効果 重イオン衝突 クォーク物質 エクソチックハドロン

## 1. 研究開始当初の背景

20世紀に入って、世界各地の高エネルギー加速器実験施設において、チャームやボトムのような重いクォーク(フレーバー)を含むハドロン(=クォークが束縛した複合状態)の新しい多数の状態が実験的に発見された。これらは「エキゾチックハドロン」を呼ぶ。多くのエキゾチックハドロンは通常よりも多くのクォークを含んでおり(「マルチクォーク」)、すでに知られているバリオンやメソンとは全く異なる新しい状態である。エキゾチックハドロンの構造を調べることは、クォーク(下部構造)からハドロン(上部構造)がどのように構成されるのかを理解するための新しい道筋を与えると期待されている。

一方で、チャームやボトムが活躍する舞台は、ハドロンだけではなく原子核にも拡張される。ただしチャームやボトムは非常に重いため弱相互作用に対して不安定であるが、強い相互作用について安定あるいは準安定であると考えられている。このような原子核は「チャーム原子核」あるいは「ボトム原子核」と呼ばれる。最近、実験研究として高エネルギー加速器実験施設においてこのような原子核の生成の可能性が検討されており、将来の実験に向けてチャーム原子核あるいはボトム原子核の性質を理論的に解明することが必要とされている。

「チャーム原子核」や「ボトム原子核」の研究はそれ自身の興味だけではなく「ストレンジネス原子核」の重いフレーバー版としての興味も持たれている。ストレンジネスからチャーム・ボトムにフレーバー拡張することによって、原子核のダイナミクスにおけるフレーバーの役割を明確に理解できると期待される。それによって地上実験におけるフレーバー原子核研究のみならず、中性子星のような超高密度天体の構造について深い知見が得られる可能性がある。ストレンジネスとの比較において着目すべき点は、チャームやボトムはストレンジネスと比べて非常に大きな質量をもつために、系の基本的な対称性は本質的に異なっていることである。ストレンジネスは軽い対称性は「カイラル対称性」であるが、チャームやボトムは「重いクォーク(スピン)対称性」である。これらの対称性の違いが原子核中のダイナミクスにどのように現れるのかは新しい観点である。

## 2. 研究の目的

「チャーム原子核」や「ボトム原子核」における基本的問題として次の3つが挙げられる：(i) チャームハドロンやボトムハドロンと核子の相互作用を解明すること、(ii) チャーム原子核やボトム原子核に現れる新しい核構造を明らかにすること、(iii) 核媒質におけるQCD真空の変化とチャームハドロンやボトムハドロンの性質の変化の対応をつけて、QCD変化を探るプローブとしての役割

を明らかにすること。とくにストレンジネス核物理との対比として、チャーム原子核やボトム原子核において初めて現れる新規な現象を探ることが非常に重要である。そして全てのフレーバーに共通する性質とフレーバーごとに異なる性質の相違点を明確にすることによって、フレーバーを軸とする新しい次元における原子核の姿を浮かび上がらせることができる。

さらに有限密度の繋がりとして高密度核物質の極限的状态としてクォーク物質における重いクォークの振る舞いについても研究を行う。チャームやボトムを含む、低密度から高密度までの核物質状態を俯瞰することによって、核物質における重いクォークの新しい役割を解明する。

## 3. 研究の方法

本研究では「重いクォーク(スピン)対称性」を基軸とした多体問題を手法として用いる。重いクォーク(スピン)対称性は、ハドロンレベルのみならずクォークレベルで成り立つ量子色力学の基本的対称性である。したがって、重いクォーク(スピン)対称性を通してハドロンのダイナミクスとクォークのダイナミクスの対応関係を探ることができる。

具体的方法は以下のとおりである。まず重いハドロンの有効場理論を導入する。本研究ではチャームハドロンあるいはボトムハドロンとして主にheavy-lightハドロン(重い反クォークと軽いクォークが束縛したハドロン)を考える。これは単純なフレーバー構造をもつ重いハドロンなので、比較的明確な理論展開が可能であるという特徴をもつ。Heavy-lightハドロンは重いクォーク成分について「重いクォーク(スピン)対称性」による変換に従って軽いクォーク成分について「カイラル対称性」による変換に従う。したがって、二つの対称性を同時に反映させて核物質中のハドロンダイナミクスを探ることができるという利点がある。

「重いクォーク(スピン)対称性」は重いクォークの極限(質量無限大)で成り立つとき近似的対称性であることに注意する必要がある。実際のチャームクォークやボトムクォークの質量(およそ1 GeV, 5 GeV)は、原子核内部の典型的なエネルギースケール(最大数十 MeV)に比べて非常に大きいので、最低次の近似としては妥当であると考えられる。より定量的な議論をするためには、重いクォークの有限質量を考慮する必要がある。これは重いハドロンの有効場の再定義(velocity-rearrangement)によって取り入れることが可能である。

核物質中の(不純物としての)チャームハドロンやボトムハドロンの性質(有効質量や寿命の変化など)を探るために重要な情報の一つは重いハドロンと核子の相互作用である。本研究では問題の具体的な状況に応じて様々なタイプの相互作用(コンタクト相互作用、

パイオン交換, シグメメソン交換, ベクトルメソン交換)などを考えた。これらの相互作用は全て「重いクォーク(スピン)対称性」を反映している。そして場の理論的手法として媒質中の核子のループを考慮することによって平衡系における有限密度の情報を取り入れた多体計算を行った。そして熱力学的ポテンシャルや媒質中の自己エネルギーを計算することによって、核物質中の重いハドロンの質量や寿命を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) アイソスピン-スピン近藤効果(核物質)

物性論において重い不純物による量子効果として「近藤効果」が知られている。これは伝導電子系にスピンをもつ不純物が含まれるとき、フェルミガス(伝導電子)と不純物の間のスピン交換相互作用の強さが非常に大きくなる現象であり、様々な輸送係数に影響を与えることが知られている。「近藤効果」が発現する本質は、重い不純物が存在することに加えて、(i)フェルミ面(無限自由度が縮退した状態)が存在すること、(ii)ループ効果(粒子-ホール)の仮想的励起状態が存在すること、(iii)フェルミガスと不純物の相互作用が非可換(SU(N)対称性)であること、の3つであることが知られている。核物質中のheavy-lightハドロンはちょうどこれら3つの条件を満たしている：(i)核物質における核子によるフェルミ面の存在、(ii)核子-ホールの生成、(iii)heavy-lightハドロンと核子のスピン交換相互作用およびアイソスピン交換相互作用の存在。したがって、核物質中のheavy-lightハドロンは近藤効果を引き起こすと考えられる。

上記の考えを元にして、有限サイズ原子核における近藤効果を議論した。とくに物性論における近藤効果の研究でしばしば用いられる非摂動的手法である平均場近似を用いて、この近似の妥当性の評価を行った。具体的には原子核の核子について内部自由度をもつ1準位のモデル(Lipkinモデル)を考えた。Lipkinモデルは厳密解を与えるので、近似計算の妥当性を評価するために便利なモデルである。反Dメソンと核子の間にアイソスピン交換(SU(2)対称性)を導入して、近藤効果がある場合の全体的なエネルギー損得を平均場近似で評価した。さらに平均場近似の妥当性を詳しく評価するために量子揺らぎ(RPAモード)を取り込んだエネルギーの評価を行った。これらの近似的解を厳密解と比較して平均場近似が妥当な近似であること、RPAモードを取り込むことによって非常に良い精度で厳密解に近づくことを示した。

近藤効果はアイソスピン交換のみならずスピン交換についても存在する。ただしここでのスピン交換は、heavy-lightメソン内部の軽いクォーク成分と核子の間のスピン交換であることに注意する。重いクォークのスピン交換の強さは重いクォークの質量の逆

数で抑制されるので、重いクォーク成分についてはスピン交換相互作用を無視することができる。これが「重いクォーク(スピン)対称性」のひとつの役割である。具体的には $D_s^-$ メソン(反cクォークとsクォーク)を考えて、 $D_s^-$ メソンと核子の相互作用をコンタクト型とした。相互作用ラグランジアンは「重いクォーク(スピン)対称性」によって一意に決定されるので、相互作用に関する不定性を取り除くことができる。まず摂動的な方法として、核物質中の $D_s^-$ メソンと核子の相互作用の強さの変化を評価した。その結果、スピン交換相互作用はエネルギースケールとともに大きく変化し、赤外領域(近藤スケール)において結合定数の大きさは対数発散して、系は強結合系になることがわかった。近藤スケールよりも低いエネルギースケールのダイナミクスを探るために、非摂動的手法として平均場近似を導入して、基底状態におけるエネルギーの損得を評価した。その結果、 $D_s^-$ メソンと核子の平均場が有限になることによって、系は安定化することが示された。このとき基底状態において $D_s^-$ メソンの周りに核子が集まった状態ができて共鳴状態(近藤共鳴)が現れることが示された。

近藤効果は重いハドロンに特有の現象である。したがって、チャーム原子核やボトム原子核で近藤効果を観測することはひとつの挑戦的な課題である。

##### (2) エキゾチックハドロンのスペクトロスコピー

重いハドロンの内部構造を理解することはクォークレベルからハドロンダイナミクスを理解する上で重要な課題である。最近多くの研究者の注目を集めているエキゾチックハドロン(X, Y, Z, Pc)について、研究の現状を纏めたレビュー論文を発表した。このレビュー論文は実験研究者と理論研究者の共著であり、KEK-Belleで行われた実験を中心に研究成果を収集するとともにこれを理解するための理論的な議論を整理した。

バリオン内部のダイクォークは永らくハドロン物理の重要な課題である。そこでチャームバリオン内部のダイクォークの波動関数がチャームバリオンの励起状態の崩壊幅に与える影響を詳細に調べた。「重いクォーク(スピン)対称性」に基づいてチャームバリオン内部のダイクォーク波動関数を構築した。クォークモデルの範囲内でパラメータを制限して、現在観測されているいくつかのチャームバリオンの可能な量子数についていくつか制限を与えることができた。

エキゾチックハドロンとして最近注目を集めているPc(チャームペンタクォーク)について、軽いフレーバー(u, d, s)のシングルレット状態について質量スペクトラムを議論した。cクォークと反cクォークについてカラーオクテット状態の波動関数を考慮して、様々な内部量子数の組み合わせによって量

子数 ( $J^{PC}$ ) の違いによる質量パターンを予言した。これは今後の実験研究に役立つ理論的予言である。

### (3) 重イオン反応によるチャーム原子核生成

チャームあるいはボトムを含むエキゾチックハドロンおよび原子核をどのように生成するのかが非常に重要な問題である。このひとつの可能性として相対論的重イオン反応が考えられている。国際的なコラボレーションとして相対論的重イオン反応の専門家との共同研究として、RHIC や LHC におけるチャーム原子核およびボトム原子核の生成率を評価した。相対論的重イオン反応では、高エネルギーで原子核が衝突することによって、核子内部のクォークが溶け出した「クォークグルーオンプラズマ (QGP)」が生成される。QGP が冷えてハドロンに戻るときに、チャーム原子核やボトム原子核が生成される可能性がある。具体的には統計モデルと融合モデルのそれぞれを用いた。それぞれのモデルのパラメータは通常のハドロン (メソンやバリオン) の生成率の実験データを再現するように決定して、少数バリオン系のチャーム原子核およびボトム原子核の生成率の計算に適用した。その結果、実際の実験で観測可能な量が生成されることが分かった。

### (4) 反 D メソンと少数系計算

加速器実験において実際に生成されるチャーム原子核は核物質ではなく有限サイズの原子核である。そこで反 D メソンと核子のパイオン交換およびベクトルメソン交換ポテンシャルをもとにして、反 D メソンと原子核の有効ポテンシャル (フォールディングポテンシャル) を構築した。それを元に様々なバリオン数 (数十～数百) をもつ原子核における反 D メソンの束縛状態を議論した。同様に B メソンの束縛状態も議論した。バリオン数が大きくなるほど反 D メソンの準位の数は飛躍的に多くなることが示された。

### (5) $D_0^*$ メソン (スカラー) とカイラル対称性

核物質におけるカイラル凝縮の大きさは真空のものよりも小さくて、カイラル対称性の自発的破れが部分的に回復していると考えられている。核物質におけるカイラル凝縮の変化は重いハドロンの性質にも影響を与える。とくにカイラル対称性が支配的である性質が影響を受けやすい。そこで heavy-light メソンのカイラルパートナーである反 D メソンと反  $D_0^*$  メソン (スカラー) の質量変化を調べて、核物質中のカイラル対称性の変化を探るためのプローブとしての役割を調べた。カイラル対称性の回復を反映した核物質モデルを考えるために線形  $\sigma$  モデルを用いた。カイラル凝縮が小さくなることによって反 D メソンと反  $D_0^*$  メソンの質量差が小さくなるとともに、反 D メソンの質量が増加すること、反  $D_0^*$  メソンの質量が減少することが示され

た。

### (6) カラー近藤効果 (高密度物質)

超高密度の核物質はクォークを自由度とする物質状態 (クォーク物質) が現れると予想されている。この状態にチャームクォークやボトムクォークのような重いクォークが不純物として存在するとき近藤効果が起こると考えられている。実際に近藤効果が起こる 3 つの条件として、(i) 軽いクォークガスによるフェルミ面の存在、(ii) 軽いクォークとホールの生成、(iii) 重いクォークと軽いクォークの間のカラー交換相互作用、が満たされているので、カラー交換による近藤効果が起こる。

近藤効果の大きな特徴の一つは不純物と軽いクォークの低エネルギー散乱において、近藤スケール近傍のエネルギースケールでは非常に強結合になって摂動論が破綻することである。クォーク物質は漸近的自由性のために摂動的な系であるが、近藤効果によって非摂動的効果が重要になることが興味深い。そこで近藤スケールよりも低いエネルギースケールにおける非摂動ダイナミクスを探るために平均場近似を導入した。1 つの重いクォークを考えて、軽いクォークと重いクォークの複合場を導入して、この複合場が凝縮 (平均場) することによって、系全体が安定化することを示した。この複合場では軽いクォークが重いクォークの周りに局在することによって共鳴状態 (近藤共鳴) を作ることを示された。

クォーク物質における近藤効果の発展的な課題として、(運動量空間における) トポロジカルな性質、RPA 方程式によるエキシトンモードの解析、近藤凝縮とカイラル凝縮の競合関係、近藤効果が輸送係数に与える影響について相対論的流体力学と相対論的ボルツマン方程式に基づいて評価を行った。

### (7) 核物質中ハドロンのレビュー論文

核物質中の重いハドロンについてのこれまでの理論研究を纏めた招待レビュー論文を発表した。1980 年代の初期段階の研究から最新の研究のほとんどの成果を網羅するとともに、初学者 (学生も含む) にも分かりやすいように十分なイントロダクションを設けた。内容はチャームやボトムを含むすべてのハドロン (クォーコニウム, heavy-light メソン, バリオン) についての理論研究を紹介した。今後、原子核における重いハドロンを研究を展開する上で一つの道案内としての役割が期待される。

## 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 13 件)

① Shigehiro Yasui, “Kondo effect in charm

and bottom nuclei”, Phys. Rev. C53, 065204-1-15 (2016). (査読あり)

DOI: 10.1103/PhysRevC.93.065204

② Shigehiro Yasui and Kazutaka Sudoh, “Kondo effect of  $\bar{\Psi}\{D\}$ s and  $\bar{\Psi}\{D\}^*$  mesons in nuclear matter”, Phys. Rev. C95, 035204-1-8 (2017). (査読あり)

DOI: 10.1103/PhysRevC.95.035204

③ Shigehiro Yasui, “Kondo cloud of single heavy quark in cold and dense matter”, Phys. Lett. B773, 428-434 (2017). (査読あり)

DOI: 10.1016/j.physletb.2017.08.066

④ Shigehiro Yasui, Kei Suzuki, Kazunori Itakura, “Topology and stability of the Kondo phase in quark matter”, Phys. Rev. D96, 014016-1-24 (2017). (査読あり)

DOI: 10.1103/PhysRevD.96.014016

⑤ Shigehiro Yasui, Sho Ozaki, “Transport coefficients from the QCD Kondo effect”, Phys. Rev. D96, 114027-1-23 (2017). (査読あり)

DOI: 10.1103/PhysRevD.96.114027

⑥ Atushi Hosaka, Tetsuo Hyodo, Kazutaka, Sudoh, Yasuhiro Yamaguchi, Shigehiro Yasui, “Heavy Hadrons in Nuclear Matter”, Progress in Particle and Nuclear Physics 96, 88-153 (2017). (査読あり)

DOI: 10.1016/j.pnnp.2017.04.003

[学会発表] (計 26 件)

① Shigehiro Yasui, “Structure of charm nucleus”, J-PARC Workshop 2016: From Exotic hadrons to QGP, 2017 年

② Shigehiro Yasui, “Kondo effect of heavy hadrons in nuclear matter”, Meson in Nucleus (MIN) 2016, 2016 年

③ 安井繁宏, “重イオン衝突におけるエキゾチックハドロン生成”, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (招待講演), 2016 年

④ Shigehiro Yasui, “QCD Kondo effect in quark matter”, Compact Stars and Gravitational Waves, 2016 年

⑤ Shigehiro Yasui, “Kondo effect for charm hadrons in nuclear medium”, International Molecule-type: “Realistic” hadron interactions in QCD, 2016 年

⑥ Shigehiro Yasui, “Kondo effect in dense matter”, Quarks and Compact Stars 2017,

2017 年

⑦ Shigehiro Yasui, “Heavy flavors and exotic hadrons”, 53th Karpacz Winter School of Theoretical Physics and THOR COST Action Training School (招待講演), 2017 年

⑧ Shigehiro Yasui, “Kondo effect for charm hadrons in nuclear matter”, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2017 (招待講演), 2017 年

⑨ Shigehiro Yasui, “QCD Kondo effect for heavy quarks in dense matter”, International Workshop on “Strangeness and charm in hadrons and dense matter”, 2017 年

⑩ Shigehiro Yasui, “Kondo effect of heavy hadron in nuclear matter”, 2nd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (招待講演), 2017 年

⑪ Shigehiro Yasui, “Kondo effect in dense matter”, The Charm and Beauty of Strong Interactions, 2017 年

⑫ Shigehiro Yasui, Tetsuo Hyodo, Yan-Rui Liu, Makoto Oka, “Exotic doubly-charmed meson production in high-energy electron-positron collisions”, International workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017, 2017 年

⑬ 安井繁宏, 重いクォークのエキゾチックハドロンと原子核, KEK 理論センター研究会, 2017 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安井繁宏 (YASUI, Shigehiro)

東京工業大学・理学院・特任助教

研究者番号: 00535346