

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：54101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654071

研究課題名(和文)現実的クォーク模型によるクォーク多体系の統一的理解の研究

研究課題名(英文)Study for unified understanding of multi-quark system in the realistic quark model

## 研究代表者

仲本 朝基 (NAKAMOTO, Choki)

鈴鹿工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：10311036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：バリオン間相互作用に関して現実的記述を与えるクォーク模型と同じ枠組みにおいて、ハイペロンまで含めたバリオン8重項による3体バリオン系のノルム核の固有値問題を解くことにより、各種3体バリオン系におけるクォーク・パウリ効果による斥力的効果の評価を行った。3核子系、 $NN$ 系においては目立ったクォーク・パウリ効果は見られなかったが、 $NN(I=2)$ 系、 $NN(I=1/2)$ 系においてはクォーク・パウリ効果による強い斥力的効果が見られることがわかった。このことは中性子星の内部構造において必要と考えられているフレイバーに依存しない斥力的効果に対して、クォーク・パウリ効果はその候補にはなりえないことを示唆している。

研究成果の概要(英文)：We investigate the quark-Pauli effect, which often brings important repulsive effects in the two-baryon system, in the nine-quark  $B8B8B8$  (three octet-baryon) system. The effect of the Pauli repulsion is estimated by resolving the eigenvalue problem for the resonating-group method (RGM) norm kernel.

It turns out that the strong Pauli repulsion exists in the  $NN(I=2)$  and  $NN(I=1/2)$  systems, but no strong Pauli repulsion appears in the  $NN$  and  $NNN$  systems. The Pauli repulsion is not the origin of the universal repulsion that is proposed to resolve the too soft equation of state of hyperonic neutron-star.

研究分野：原子核理論

キーワード：クォーク模型 バリオン間相互作用 パウリ原理 構造的斥力芯

### 1. 研究開始当初の背景

クォーク多体系としての重粒子(以下、バリオン)間相互作用(クォーク6体系)とハドロン分光(クォーク2または3体系)の統一的理解が未だ得られていない中で、散乱実験等の技術的進展により、これらの系に留まらず、更なるクォーク多体系(核子2個とK中間子1個のクォーク8体系や、バリオン3個すなわちクォーク9体系など)に対するクォークの観点からの理論的理解が求められている。

また、宇宙空間に露わに存在する巨大原子核である中性子星核物質の研究においても、2010年及び2013年に、従来認識されてきたバリオン間相互作用だけでは理解することが出来ない太陽質量の2倍もの重い中性子星が観測され、その構造を解明する上でもバリオン3個以上の多体効果についての新しい知見が求められている。

### 2. 研究の目的

上記背景を動機付けとして、バリオン間相互作用(クォーク6体系)、ハドロン分光(クォーク2~5体系)に加え、バリオン3体系(クォーク9体系)をも視野に入れて、クォーク模型の立場から統一的理解を得ることを目的とした。

(1) バリオン間相互作用に関しては、我々のグループは既に現実的な記述を与えるクォーク模型 fss2 を確立しているが、その模型において(対称性だけからは現実的記述が叶わなかった為に)現象論的取り扱いを施した箇所についての改善を目的とする。その改良版ハミルトニアンを用いることによって、我々が以前に $\Lambda(1405)$ 粒子をクォーク5体系からなるエキゾチックハドロンとみなして計算を行った経験を活かし、エキゾチックハドロンの分光計算を行う。

(2) バリオン3体系については、昨今大きな関心が持たれている中性子星核物質の研究への重要な寄与を意識して、核子のみから構成される通常の3体原子核に留まらず、ハイペロン( $\Lambda, \Sigma, \Xi$ の各粒子)を含んだハイパー核におけるバリオン3体効果を調べることを目的とする。とりわけバリオンがクォークから構成されているという観点から、バリオン間の構造的斥力芯の存在の有無(すなわち、クォーク・パウリ効果の強さ)を調べることによって、最近観測された従来よりも重い中性子星の理解が得られるかどうかについて検討する。

### 3. 研究の方法

以下、「研究の目的」(1)(2)に対応する研究の方法について述べる。

(1) これまでに我々京都・新潟グループが提唱してきた現実的クォーク模型バリオン間相互作用 fss2 の改善版の構築を試みた。具体的には以下の通りである。

NN(核子-核子)、YN(ハイペロン-核子)における中間子質量の使い分けをやめ、統一した値を用いる。Fermi-Breit 相互作用からの反対称スピン・軌道力効果が目減りすることを避けるために、スカラー中間子交換から寄与する反対称スピン・軌道力項の効果を見捨てる。

$\Sigma^*p$ 系においてのみ他とは異なる1重項-8重項混合角を使用しているという不具合をなくして共通混合角を採用する代わりに、クォーク-中間子バーテックスにおける形状因子の導入を実施する。

(2) クォークの3体クラスター系としての多体バリオン間の相関を調べるために、共鳴群法(RGM)を採用する。今回は3体バリオン系におけるRGMノルム核の固有値問題を解くことによって、構造的斥力芯の存在の有無の検証を行う。ハイペロンまで含めたバリオン8重項による3体バリオン系の組合せは、その分類構造が複雑かつ膨大で、計算とそのチェックに時間がかかる。先行研究がなされている3核子(NNN)系における計算のチェックを実施した後、ここでは主に中性子星の内部構造を知る上で重要なANN(アイソスピン1)系、 $\Sigma$ NN(アイソスピン2)系、 $\Xi$ NN(アイソスピン3/2)系に焦点をあてる。この方法を実施していく上で、実際に多大な労力と時間を必要とするのはRGM核の解析的な計算であり、とりわけハイペロンを含むバリオン8重項全体による組合せを考えることによって、スピン・フレイバー因子の計算において、従来の核子しか扱っていなかったときのスピンSU(2)×アイソスピンSU(2)計算から、スピンSU(2)×フレイバーSU(3)計算へ拡張されることによる計算量は膨大なものとなる。計算間違いが起こらないよう、系統的な枠組みと手順に沿って注意深く計算を実行していく必要がある。

### 4. 研究成果

以下、「研究の方法」(1)(2)の実施によって得られた研究成果について述べる。

(1) 中間子質量及び1重項-8重項混合角を共通化し、かつスカラー中間子交換から寄与する反対称スピン・軌道力項の効果の除外を行い、クォーク-中間子バーテックスにおける形状因子として、クォーク模型との相性が良いと思われるガウス型関数を導入することで、NN及びYN散乱実験データとの整合性の再現を試みた。形状因子パラメータの導入によって、上

記 3 つのパラメータ除外による自由度の削減は補うことができるものと期待したが、結果として、混合角の共通化による  $\Sigma^p$  全散乱断面積の振る舞いが、他の実験データとの整合性を考慮した場合、その再現が困難であるという現実に直面し、先のモデルである fss2 以上のモデル精度向上は実現できなかった。これに関する報告は、学会発表 と においてなされた。形状因子の他のタイプの採用や、形状因子による補完以外の可能性も含めて、fss2 の精度向上を目指した研究は、現在も引き続き検討中である。

- (2) ハイペロンまで含めたバリオン 8 重項による 3 体バリオン系の RGM ノルム核の固有値問題を解いた。ここでは 9 個のクォークが全て軌道部分において S 状態にある (すなわち  $(0s)^9$ ) という、エネルギー的に最も低い配位構造を仮定して計算を行った。

まずは 9 クォークから成る粒子系の分類上、最も単純な SU(3) 対称性をもつ NNN (アイソスピン 1/2) 系と  $\Xi\Xi\Xi$  (アイソスピン 1/2) 系についての結果が得られ、NNN 系については、先行研究における結果との一致を確認できた。クォーク・パウリ効果の強さに関しては、NNN 系においては目立たないが、 $\Xi\Xi\Xi$  系においてはかなり強く現れるという、これまで提唱されたことのない全く新しい結果が得られた。この成果については、学会発表 と において報告がなされた。奇しくも 2014 年に岐阜大学の仲澤教授らのグループによって  $\Xi$  粒子の一体ポテンシャルが引力的であることが実験的に立証され、これによって中性子星内部において  $\Xi$  粒子の存在が確実視されることを受けて、もし  $\Xi$  核物質が実際に実現していたとしたならば、この結果は中性子星内部において強い斥力的効果を生み出す大きな原因である可能性が高い、と言える。

続いて、計算のチェックを兼ねて、パウリ禁止状態が予想されるところの NNN (アイソスピン 3/2),  $\Lambda\Lambda\Lambda$ ,  $\Sigma\Sigma\Sigma$  (アイソスピン 3),  $\Xi\Xi\Xi$  (アイソスピン 3/2) 系について RGM ノルム核を計算したところ、複雑なフレイバー SU(3) 状態間の組合せを通じた計算であるにも関わらず、全て 0 となる (すなわちパウリ禁止状態) ことが確認され、実施している計算の確かさについての保証が得られた。この成果については、学会発表 において報告された。

ハイペロンを一個だけ含んだ系、すなわち  $\Lambda\text{NN}$ ,  $\Sigma\text{NN}$ ,  $\Xi\text{NN}$  の各系については、中性子星核物質の研究において、最も興味が集まる 3 バリオン系であるといえる。中性子星内部ほどの高密度であれば、その内部におけるハイペロンの存在は確実

視されており、それに伴う状態方程式の軟化を支えるためには、従来のバリオン間相互作用以外からの何らかの強い斥力的効果が必要とされている。その候補として考えられているのが 3 バリオン系における斥力的 3 体力の効果であり、それらはハイペロンの種類に関係しない「ユニバーサルな斥力」であるとの説もあるが、その理論的根拠は未だ示されていない。そういう点から考えて、このクォーク・パウリ効果という動力学的効果は相互作用に全く依存しないため、これによって構造的斥力芯が示されれば、確固たる理論的根拠として提示できる。その意味において、(通常であれば閾値の低い順番に)  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$  の各粒子が中性子星内部において出現したとき、クォーク・パウリ効果による 3 体斥力効果があるかどうかを見ることは大変有用である。中性子星内部に存在することが期待されるアイソスピンが最大となるケース (すなわち  $\Lambda\text{nn}$ ,  $\Sigma\text{nn}$ ,  $\Xi\text{nn}$ ) を中心に、以下の表 1 に結果を示す。

表 1: 各 3 バリオン系における固有値

$B_8B_8B_8$ (isospin)	固有値 $\mu$	
	非結合	結合
NNN(1/2)	100/81	-
$\Lambda\text{NN}(0)$	25/27	0,
$\Sigma\text{NN}(0)$	25/81	100/81
$\Lambda\text{NN}(1)$	25/27	0,
$\Sigma\text{NN}(1)_0$	125/243	200/243,
$\Sigma\text{NN}(1)_1$	50/81	100/81
$\Sigma\text{NN}(2)$	4/81	-
$\Xi\text{NN}(3/2)$	10/27	-
$\Xi\Xi\Xi(1/2)$	4/81	-

表 2: 非結合計算における固有値の内訳

$B_8B_8B_8$	D	2B	3B	非結合
NNN(1/2)	1	1/3	-8/81	100/81
$\Lambda\text{NN}(0)$	1	1/9	-5/27	25/27
$\Lambda\text{NN}(1)$	1	1/9	-5/27	25/27
$\Sigma\text{NN}(2)$	1	-1	4/81	4/81
$\Xi\text{NN}(3/2)$	1	-5/9	-2/27	10/27
$\Xi\Xi\Xi(1/2)$	1	-1	4/81	4/81

表 1 の値において、 $\mu = 0$  はパウリ禁止状態であり、 $\mu \ll 1$  であればクォーク・パウリ効果による斥力効果が強いと言える。クォーク・ダイアグラムにおいて、バリオン間のクォーク交換を含まないものを直接項 D、2 バリオン間に跨ったクォーク交換効果を含む項を 2B、3 バリオン間に跨ったクォーク交換効果を含む項を 3B と表し、固有値におけるそれぞれからの固有値への寄与の内訳を表 2 に示す。表 1 及び 2 からわかることを以下に述べる。最も閾値の低い  $\Lambda\text{NN}(1)$  系は、同じアイソスピンをもつ  $\Sigma\text{NN}(1)$  系の独立

な2つの状態と結合する。そのチャンネル結合計算を実行すると、一つのパウリ禁止状態が得られるが、他の2つの固有値が200/243及び100/81であり、この系においてクォーク・パウリ効果による斥力があるとは言い難い。非結合計算において、閾値が最も低いANN(1)系における3B項からの寄与を見てみると、-5/27と比較的大きな値で斥力的に効いており、かつ2B項よりも絶対値が大きいので、定性的に竹内・清水の先行研究における結果と同じ性質を示していると言えるかも知れない。ΣNN(2)系においては定性的特徴がANN(1)系とは逆で、3B項からの寄与はむしろ固有値を大きくする方向に働くが、D項と2B項からの寄与同士が打ち消し合うために、全体では小さな固有値をもち、非常に強いパウリ斥力が現れる。これらの成果については、学会発表<sup>1)</sup>において報告がなされた。

以上の結果が、他の研究等に与える予想される影響について、以下に挙げる。

クォーク・パウリ効果すなわち構造的斥力芯は、明確にフレーバー依存性をもち、中性子星核物質の研究において必要とされるハイペロンを含んだ3体バリオン系におけるユニバーサルな(すなわちフレーバーに依存しない)斥力的効果の候補にはなり得ないことが示されたと言える。我々はクォーク9体系としての観点から3バリオン系を記述することによって、ここで示した系以外にもバリオン8重項内における様々な組合せの3バリオン系による固有値計算を実施しており、どういった系においてパウリ禁止状態が生じているかを把握できている。このことは、今後、ハイペロンを含んだバリオン少数多体計算やハイパー核の計算をするにあたって、パウリ禁止状態を含まないような現実的な波動関数を得るために、どういった3バリオン系の配位と直交させるべきかについての貴重な情報提供が可能となる。

本研究によって、9クォーク系までのクォーク多体系を統一的に理解する試みを実施されただけでなく、ハイペロンを含む3体バリオン系におけるクォーク模型の観点からの系統的な3体力計算を遂行する足がかりをも得ることができた。この流れで、未だ理解が得られていない3体力の解明を目指して研究を進めていく所存である。

#### 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0件)

平成27年6月28日現在執筆中

[学会発表](計9件)

仲本朝基、鈴木宜之、“クォーク模型によるYNN系におけるクォーク・パウリ効果”、日本物理学会第70回年次大会、March 20-24, 2015, 早稲田大学、東京

仲本朝基、鈴木宜之、“3バリオン系におけるクォーク・パウリ効果”、新学術領域研究会「中性子星核物質」、March 12-14, 2015, 京都大学基礎物理学研究所、京都市

仲本朝基、鈴木宜之、“3バリオン系におけるクォーク・パウリ効果”、RCNP研究会「QCDを基礎とする核子多体系物理の理解」、December 19-20, 2014, 大阪大学核物理研究センター、茨木市

Choki NAKAMOTO and Y. Suzuki, “Quark-Pauli effect in the three-baryon systems consisted of baryon-octet”, Workshop on Progress on J-PARC hadron physics in 2014, November 30-December 2, 2014, いばらき量子ビーム研究センター、東海村

仲本朝基、鈴木宜之、“ハイペロンを含む3バリオン系におけるクォーク・パウリ効果”、日本物理学会第69回年次大会、March 27-30, 2014, 東海大学、平塚市

仲本朝基、鈴木宜之、“クォーク模型による3バリオン系におけるパウリ効果”、日本物理学会2013年秋季大会、September, 20-23, 2013, 高知大学、高知市

仲本朝基、鈴木宜之、“クォーク模型による3バリオン系におけるパウリ効果”、RCNP/九大研究会「ハドロン物理と原子核物理のクロスオーバー」、September 4-6, 2013, 九州大学、福岡市

仲本朝基、藤原義和、鈴木宜之、“Baryon-baryon interactions in the SU(6) quark model”, Workshop on S=-2 and related Nuclear Physics in HIDA-Takayama 2012, November 25-27, 2012, 高山市

仲本朝基、藤原義和、鈴木宜之、“Baryon-baryon interactions in the SU(6) quark model”, 「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会、July 12-13, 2012, 名古屋大学、名古屋市

[その他]

特記事項無し

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

仲本朝基 (NAKAMOTO, Choki)

鈴鹿工業高等専門学校・教養教育科・准教授

研究者番号：10311036