

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2005～2008

課題番号：17540264

研究課題名 (和文) クォーク相関を考慮したモデルによるペンタクォーク及び中間子-バリオン散乱の研究

研究課題名 (英文) Study of pentaquark and meson-baryon scattering with quark-quark correlations

研究代表者

清水 清孝 (Shimizu Kiyotaka)

上智大学 理工学部 教授

研究者番号：00143363

研究成果の概要：

Spring 8 において、質量がおおよそ 1540MeV、崩壊幅が 20MeV 程度のペンタクォーク Θ^+ と呼ばれる粒子の発見が報告され、これに対して構成子クォーク模型を使って考察した結果、単純な模型では記述することは非常に難しいことを示した。現在は実験的にもいくつかのグループから問題点が指摘されている。同様に、クォーク 5 体系と示唆されている $\Lambda(1405)$ に対しても、バリオン-メソン散乱に、「連続状態中の束縛状態」を含む、準相対論的散乱問題を扱った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	800,000	0	800,000
2006 年度	500,000	0	500,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,300,000	300,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核 (理論)

1. 研究開始当初の背景

2003 年の夏に Spring 8 において、コンプトン散乱で加速された光子を炭素原子核にあて $\gamma + n \rightarrow K^- + K^+ + n$ 反応により、 $n + K^+$

の不変質量分布から質量がおおよそ 1540MeV、崩壊幅が 20MeV 程度の粒子 Θ^+ が発見された。この粒子は崩壊過程より、ストレンジネスが +1 のバリオンであると考えられるが、

s-bar クォークを含むために、3 個のクォークでは記述できない。K 中間子と核子の共鳴状態と考えられるが、崩壊幅がかなり小さく長い寿命を持つことから、K 中間子・核子系とはかなり異なる状態で記述されるクォーク 5 体系であろうと考えられ、ペンタクォークと呼ばれた。

ペンタクォークに関する理論的な取り扱い、QCD に基づくいろいろな模型、つまり、格子ゲージ計算、QCD 和則、カイラルソリトン模型、カイラル構成子クォーク模型などにより、世界中で精力的に研究され、このテーマに限った国際会議も多く開催された。しかしながら、ペンタクォークの構造や崩壊幅に関する満足出来る結果は得られていない。それどころか、ペンタクォーク Θ^+ のスピン、パリティについてさえも決定的な結果が得られていないのが現状である。

元々、ペンタクォークはカイラルソリトン模型によって 1997 年に存在の可能性が示唆されたのであるが、各種のクォーク模型において、どのような相互作用がペンタクォークの存在に関して重要な役割を果たしているのかさえ明確ではない。そこで、我々は構成子クォーク模型を使い、バリオンの記述で成功を取めている、グルオン交換相互作用 (OGEP) を基本とする模型、およびカイラル対称性の自発的破れに伴い現れるゴールドストーンボソン交換 (GBE) が主要な役割を果たす模型を用いて、ペンタクォークの記述を試み始めた。

2. 研究の目的

我々はここ数年、バリオンの構造に関する詳細な解析を、構成子クォーク模型を使って行なってきた。簡単なクォーク模型では、バリオンの波動関数は球対称と仮定され、その範囲内でクォーク間相互作用を考慮する。例えば核子と Δ 共鳴の質量差は、OGEP 中のスピンに依存するカラー磁気相互作用で説明される。

一方、GBE 模型では、フレーバー・スピンに依存する相互作用が Δ と核子の質量差に大きく寄与することが分かっている。さらにこの模型を SU(3) の 8 重項と 10 重項まで拡張した場合も、基底状態の記述に関しては両者共に満足できる成功を取めている。しかしながら、同じ模型で、励起状態である P 波共鳴や、S 波の Roper 共鳴まで記述しようとするとそれほど簡単ではない。

これらの状態を統一的に記述することに成功した模型がカイラルクォーク模型である。そこでは GBE が中心的な役割を果たし、スピンとアイソスピンが共に 0 のクォークペアの特に短距離の相関が重要となる。我々はこれらの相関を考慮でき、運動エネルギー一項に対して相対論的な形を用いる準相対論的

クォーク模型である Diquark 的模型を構築し SU(3) の 8 重項と 10 重項の基底状態、P 波および S 波の励起状態を同時に記述できることを示した。

上記の研究で明らかになったことは、準相対論的取扱いの必要性和多体系を正確に解くと言う 2 点である。この模型を 5 体系に拡張したクォーク相関を考慮出来る模型に基づいて、ペンタクォークに対して、バリオンの記述でかなりの成功を取めているクォーク模型のハミルトニアンを詳細に解析することがこの研究を開始した時点での本研究の主目的であった。

ここ数年、ペンタクォークの実験的データに関する詳細な解析が行われいくつかのグループを除いて、存在についてかなり懐疑的な結果が数多く報告されている。我々の計算結果は、すでに Physical Review 誌に発表したが、当初予想されていたスピン=1/2 では理論的説明することが非常に難しく、存在するとすればスピン=3/2 の可能性が大きいことを示した。

その後、研究の方向として、やはりクォークの 5 体系の可能性が示唆されている $\Lambda(1405)$ について、同様にバリオン-メソン散乱の立場から研究を開始した。

最初に述べた準相対論的なクォーク模型である Diquark 的模型はほとんどのバリオンの記述に成功しているが、SU(3) の 1 重項の P 波のバリオンと考えられている励起状態の記述は非常に困難であることを 2004 年度の研究で示した。

この共鳴に対して、最近ではクォーク 3 体系ではなく、バリオン-メソン散乱でのいわゆるフェッシェンバツハ共鳴として記述する研究がなされている。この共鳴を、 $\Sigma\pi$ 散乱における共鳴とすると、これと同じ量子数をもつ状態である N K の閾値が 1405MeV より 30MeV くらい高いところに存在する。もし、N K の間に束縛状態を作るほどの強い引力が存在すると、この状態と $\Sigma\pi$ の結合で鋭い共鳴が生じる。したがって問題となるのは、この量子数をもつ $\Sigma\pi$ や N K の間に働く相互作用である。この結合チャネル散乱問題に対して、カイラル摂動論から導かれるバリオンと中間子の相互作用を使った計算がいくつかあり、 $\Lambda(1405)$ 共鳴を非常にうまく再現している。ただし、この相互作用は、ポイント相互作用で、強さは、 π 中間子の崩壊定数 f で決まっているが、高運動量部分をカットするための cut-off パラメーターに結果は強く依存する。バリオンの大きさから予想される Form Factor を用いると、結果的に共鳴位置や幅も変化する。

我々は、 $\Lambda(1405)$ 共鳴を 3 クォーク状態で記述しようと試みて、結果的に実験値より 160MeV くらい高い位置にしか再現できな

かったのであるが、散乱状態と結合させる計算では、これらの共鳴の位置を下げる事が可能である。そこで今回は、通常のバリオン-メソン散乱に、その連続状態中に存在する3クォーク状態を、「連続状態中に存在する束縛状態」として扱い、結合チャンネルの散乱問題を試みる。

同様に、準相対論的な Diquark 的模型では記述が難しいとされている、S波の Roper 共鳴に対しても「連続状態中に存在する束縛状態」との結合は重要と考えられる。むしろ、この共鳴の閾値の上に、強く結合するチャンネルが存在していないために、単純なフェッシュェバハ共鳴とは考え難く、より3クォーク状態との結合が重要な役割を果たすと予想される。ただし、Diquark 的模型においても、カイラルクォーク模型と呼ばれる相互作用、つまり、クォーク間にパイ中間子交換相互作用を考慮する模型では、Roper 共鳴をかなりうまく説明できることが分かっている。このことを考慮すると、バリオン-メソン散乱と3クォーク状態との結合を考慮することと、クォーク間にパイ中間子交換相互作用を考慮する模型は、お互いに密接に関係しているはずであると予想される。この点に関する詳細な解析を行うことも、重要な研究課題の一つである。

3. 研究の方法

(1) ペンタクォーク Θ^+ は非常に狭い幅を持つ。そのために Θ^+ を記述する波動関数が得られたら、この波動関数を使って $K+n$ への崩壊幅を計算する。しかし厳密な議論においては、連続状態である $K+n$ のチャンネルが開いているわけだからペンタクォーク状態を求める場合にもこの連続状態との結合チャンネルの計算が必要である。この点を考慮する方法としては、 $K+n$ の散乱問題をクォーク・クラスター模型で記述する方法がある。

我々は、バリオン・バリオンの散乱問題をクォーク・クラスター模型で扱った豊富な経験を持っているので、この方法でペンタクォークを記述することを試みた。しかしながら、この方法で問題となるのは、単純なクラスター模型では多分入らない非常に特異な配位をもつペンタクォーク状態と散乱状態を結合させることであり、この様なクォークの多体問題を扱うのは容易ではない。

クォーク間の相関をきちんと考慮して、5体問題を正確に解くと、必然的に $K+n$ の状態が考慮され、これが連続状態であるため、 Θ^+ を記述する相関をもつ状態を得ることは変分計算では難しい。そこで我々はとりあえず閉じ込めポテンシャルを調整することで、連続状態である $K+n$ のチャンネルを除き、非常にコンパクトな系となると予想される状態について考察した。

(2) P-波の $\Lambda(1405)$ 共鳴及び、S-波の Roper 共鳴については、準相対論的な Lippmann-Schwinger 方程式を「連続状態中に存在する束縛状態」まで考慮できるように拡張して計算を行う。P-波の共鳴である $\Lambda(1405)$ 共鳴については、 $1/2^+$ のバリオンと擬スカラーメソン (0^-) が $1/2^-$ バリオンと結合するために、その間の遷移相互作用が必要となる。この相互作用の導出には、通常のメソンとクォークの Vertex を仮定し、クォーク模型から得られる3体クォーク系の波動関数を用いた。本質的には、遷移ポテンシャルの、バリオンとメソンの相対運動量 k の依存性を決めることになる。

4. 研究成果

(1) ペンタクォーク Θ^+ に対して、クォーク4体と反クォークの5体系として、構成子クォーク模型を使って考察した。通常のクォーク3体系及び、2バリオン系を記述できる相互作用を用いて、さらにクォーク間の2体相関を考慮した計算を行った。その結果、負パリティの状態の中では一番軽い質量となると予想される、スピン・パリティが $1/2^-$ の状態は核子・K中間子の散乱状態との重なりが大きく、クォーク相関を考慮しても崩壊幅がかなり大きくなり実験を説明できないことが分かった。

一方、次に軽いと考えられるアイソスピンが0でスピンの状態は、崩壊にテンソル力が必要であることから、崩壊幅が狭くなり、観測された状態に対応する可能性があることを示した。しかし、この状態が報告された軽い質量を持つためには、相互作用に関してより詳細な解析が必要であると思われる。

ペンタクォーク Θ^+ の報告から、数多くのモデル計算が行われた。その中でも、我々の計算は、3クォーク系としてのバリオンやバリオンの2体系をきちんと説明できる模型であり、そこに重要と思われるクォーク相関を考慮した計算である。その模型に基づく我々の結論は、かなり詳細な計算を行っても、報告されたあたりに、幅の狭い5クォーク系を再現することは非常に難しい。そして、可能性としては、通常言われているアイソスピンが0でスピン・パリティが $1/2^-$ の状態はまず可能性がなく、もし存在するとすればスピン・パリティが $3/2^-$ の状態が考えられると言うことである。

(2) 次に同じクォーク5体系の共鳴と考えられている $\Lambda(1405)$ 共鳴について研究した。まず、ペンタクォークと同じように、クォーク・クラスター模型に基づいてバリオンとメソンの散乱問題を検討した。クォーク・クラスター模型はバリオンの質量やバリオン-バリオン散乱では定量的にも成功を取めているが、メソン、特に擬スカラーメソンに対

しては不十分である。我々は、擬スカラームソンをクォークと反クォークの集団的な状態であるとして、その効果を相互作用に繰りこんで計算を行った。このような枠組みの中で、クォーク・クラスター模型を使った散乱問題を解いた。

$\Lambda(1405)$ 共鳴に対しては、カイラル摂動論に基づく解析が共鳴の記述に成功を取めている。この模型の特徴は、 $\Lambda(1405)$ 共鳴の30MeVほど上に閾値がある、NとK-barの間に束縛状態を作るほどの強い引力が存在することである。このために、 Σ と π の散乱において、いわゆるフェッシェバツハ共鳴が生じる。

我々の用いた模型では、相互作用はOGEPと呼ばれるグルオン交換相互作用である。これに基づいた計算では、NとK-barの間には引力は存在しない。カイラル摂動論に基づく相互作用は、フレーバー・フレーバー型の相互作用である。OGEPに基づく相互作用は、クォーク交換による項が寄与する。そのためにチャンネル依存性は全く異なっている。共通点は、 Σ と π の間に働く近距離の強い引力であるが、これは π 中間子が非常に軽いためにそれほど重要ではない。大きな差は、前者はNとKの間に強い引力が存在するが、後者はNKでは何も存在しないが、 Σ と π とNKの間に強い遷移ポテンシャルが存在することである。

以上の相互作用の特徴から、単純なバリオン-メソン散乱では共鳴は生じないことが分かる。しかしながら、SU(3)の1重項である3クォークの状態を、「連続状態中に存在する束縛状態」として導入し、 Σ と π やNKの状態と結合させると、非常にうまく $\Lambda(1405)$ 共鳴を記述できることが分かった。

(3)クォーク・クラスター模型は非相対論的取り扱いである。基本的には、相互作用をエネルギー依存の形で求めておいて、準相対論的な取扱いをすることは可能である。問題としている $\Lambda(1405)$ 共鳴を、 Σ と π の散乱での共鳴として扱うためには、 π 中間子が非常に軽いために相対論的に扱う必要がある。そこで準相対論的なLippmann-Schwinger方程式を使って、結合チャンネルのバリオン-メソン散乱問題を扱った。相互作用としては、クォーク・クラスター模型から得られるものや、カイラル摂動論から得られるポテンシャルを用いて詳細に解析した。

まず、グルオン交換相互作用に基づく取り扱いでは、このような取り扱いでもクラスター模型と本質的に同じ結果を得られることを示した。そして、準相対論にした取り扱いについて検討した。 $\Lambda(1405)$ 共鳴を記述するためには、3クォーク状態との結合は不可欠であり、また3クォーク状態との結合の、相対運動量 k の依存性が、幅の広い $\Lambda(1405)$ 共

鳴を生じさせるために本質的であることを示した。

カイラル摂動論に基づく相互作用においても、バリオンの大きさに対応するForm Factorを使うと、 $\Lambda(1405)$ 共鳴を再現するのは難しいことを示した。このことから、この場合も3クォーク状態との結合が必要であるとの結論を得た。種々の相互作用を用いて、「連続状態中の束縛状態」を考慮できる準相対論的なLippmann-Schwinger方程式を解くことで、3クォーク状態とNKチャンネルとの結合の相対的な重要性を定量的に議論できた。

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 3 件)

Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Physical Review C71, 062202(1-5), 2005
Pentaquark as a NK* Bound State with $TJ = 0 \ 3/2$. 査読有

Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Physical Review C76, 035204(1-11), 2007
 $\Lambda(1405)$ as a resonance in the baryon-meson scattering coupled to the q^3 state in a quark model. 査読有

Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Physical Review C79, 045204(1-12), 2009
 $\Lambda(1405)$ resonance in baryon-meson scattering with a bound state embedded in the continuum. 査読有

[学会発表] (計 2 件)

Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Proceedings of the 11th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon.
IKP, Juelich, Germany, Sep.10-14, 2007.
 $\Lambda(1405)$ as a resonance in the baryon meson scattering coupled to the q^3 state in a quark model. 査読有

Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Proceedings of the Sendai International Symposium on Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems. Sendai, Dec. 15-18, 2008.

$\Lambda(1405)$ in a baryon meson scattering described from a quark-model viewpoint.

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 清孝 (Shimizu Kiyotaka)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：00143363

(2)研究分担者 (2005～2007)

竹内 幸子(Takeuchi Sachiko)

日本社会事業大学・社会福祉学部・教授

研究者番号：90251503

井上 貴史(Inoue Takashi)

上智大学・理工学部・助教

研究者番号：80407353

(3)連携研究者(2008)

竹内 幸子(Takeuchi Sachiko)

日本社会事業大学・社会福祉学部・教授

研究者番号：90251503