

平成21年5月20日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2005～2008

課題番号：17540272

研究課題名（和文） バリオン間二体相互作用の統一的模型構築に関する研究

研究課題名（英文） Study on constructing the unified model for two-body baryon interaction

研究代表者

永田 純一 (NAGATA JUNICHI)

広島大学・入学センター・准教授

研究者番号：70330959

研究成果の概要：

バリオン間の相互作用を統一的に記述するため、実験データの解析、大規模数値計算実験、モデル計算等を行った。特に、大規模数値計算実験では、格子QCD理論に基づいた世界で初めて得られた二体系の計算結果を提示した。また、同様の手法を用いることで、他の二体系にも適用可能であることがわかった。一方、非常に長期間の計算を要するため、今後、計算コードの改良を実施することで、これまでに結果が得られていない二体系へ展開することが可能である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,400,000	0	1,400,000
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	3400,000	330,000	3,730,000

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：理論核物理，素粒子論，計算物理

1. 研究開始当初の背景

歴史的に二核子散乱のスピンの偏極に関する膨大な実験データから核力の詳細が明らかにされてきた。これは陽子が電荷を持つこととスピン自由度を持つことがその主たる理由である。位相差分析と呼ばれる手法を用いて、これら膨大なデータを解析することにより、相互作用を完全に決定することが可能であり、日本、米国、フランス、そしてオランダのグループが長年にわたって分析を行ってきた。このようにして決定された位相差のエネルギー依存性を再現する模型が模索

され、世界各地で模型の提案がなされた。模型の妥当性は、実験データから位相差分析により分析して得られた位相差を、いかに忠実に再現できるかどうか、によって判断される。

一方、強い相互作用については、より内部の構成粒子であるクォーク・グルーオンによる自由度から生ずる相互作用がハドロンのより基本的な相互作用であることが明らかとなった。バリオン相互作用は、このように、二核子相互作用からクォーク・グルーオン自由度による相互作用へと発展し、これら二つの関係に大変興味を持たれることとなった。

このような中、ストレンジネスを持つバリオオンであるハイペロン粒子を含めた実験が可能となり、バリオオン相互作用を統一的に記述する模型が提案された。この模型構築に関しては、主にオランダ、ドイツ、日本のグループがあり、実験データから得られたパラメータをもとに、さまざまな物理量を計算することが可能である。

ハイペロンを含めた実験データは、その実験の難しさから、量的にみれば二核子散乱のものには及ばず、実験データからのみ相互作用を完全に解明することが不可能な状況であった。

このような中、実験の困難な散乱系に対し、第一原理であるQCD(量子色力学)理論に基づいた数値実験によるさまざまな物理量の測定に大変大きな期待が持たれる背景が生じた。

2. 研究の目的

本研究では、バリオオン二体系を統一的に記述する模型構築を大きな目標とする。この為には、前節で述べたとおり、関連する実験データの収集と位相差の決定が大変重要であり、構築される模型は、これら実験から得られた物理量を矛盾なく再現できる必要がある。したがって、実験データと同様に扱える程度に精度の高い位相差等の物理量の導出が必要不可欠である。このことからまず、これまでに得られている位相差の再検討を行い、どのような系において、この位相差が十分な精度で決定されているのか、あるいはいないのか、の検討を行い、実験が困難な散乱系を決定し、大規模数値計算実験の対象となる系を決定しなければならない。

一方、大規模数値計算実験を実行する場合、より精度の高い結果が得られる系を慎重に選定する必要がある。これは、数か月にわたる数値計算の結果を可能な限り有効に活用するためであり、用いる計算方法が有効に適用可能な系を吟味しなければならない。バリオオン二体系でいえば、長距離力の寄与は、 π 交換力から生じるので、この π 交換力のない系をまず対象とするのが妥当であると考えられる。本研究では、このような系として、proton と Λ 粒子の系である $p\Lambda$ 散乱を対象とした。

一方、これまでの予備的計算によれば、バリオオン二体系の散乱に関する物理量を、格子QCD理論により実行すると、非常に長時間の計算を要すると考えられたので、本研究では、新しい手法として、改良されたノイズ法の導入を行う。そして、この方法の妥当性確認のため、まず、メソン二体散乱の物理量を数値計算実験で測定することとした。中でも、ハイペロン散乱とも非常に関係がある K メソンを含んだ系である、 $K\pi$ 散乱に着目した。

この系には、二つのアイソスピン状態 ($1/2$ と $3/2$) が存在するが、これまでに、格子QCD理論に基づく計算はこのうち $3/2$ のものだけが報告されている。今回、我々は、世界で初めてアイソスピン $1/2$ 状態に対する数値計算実験を実行し、散乱物理量の決定を行うこととした。この系は、ストレンジネスを持つスカラーメソンとの関係や、ハイペロンが関わる散乱系においても関係を持つことから、大変重要な系である。

さらに、このようにして得られた改良された手法をもとに、 $p\Lambda$ 散乱や Λ 散乱の物理量を測定する計算コード開発への着手が可能となる。

数値計算実験によって得られた結果をもとに、バリオオン二体系を統一的に記述する模型に対し、重要な制約条件として用いることが可能であり、結果的に、より高い再現能力をもった模型を得ることができる。

このようにして決定された模型は、原子核物理学の様々な場面で利用可能である。例えば、ハイペロンを含んだ原子核であるハイパー核の束縛エネルギーの計算や、粒子生成を伴う散乱実験におけるデータ解析等である。

3. 研究の方法

大きくわけて、本研究では以下のステップをとる：

- (1) 模型構築のための実験データの解析
- (2) 大規模数値計算実験の実行
- (3) 制約条件のもとでの模型構築

(1) については、これまでにも得られている結果があり、分析するエネルギー範囲の拡張と、分析対象となる散乱系の拡張を実行する。これには、計算コードを新たに開発する必要がある。特に、我々のこれまでの計算コードは、エネルギー独立型のものであったことから、これを新たにエネルギー依存型の計算コードに改良する必要がある。これにより、実験データの少ないエネルギー点でも、模型構築に必要な物理量の提供を行うことが可能になる。

(2) については、これまでに得られている予備的結果にもとづき、精度をあげること、他の系への拡張を実行する。これまでの経験から、大規模数値計算実験を行うために必要な条件がいくつか示されており、計算コードの開発、得られた結果からどのように物理量を求めるか、といった分析手法の検討も必要であることがわかっている。特に、proton と Λ 粒子との $p\Lambda$ 系に対する予備的数値計算実験から、前節でも述べたとおり、通常の相関関数を求める手法では非常に長時間の計算時間を必要とするため、今回新たに改良されたノイズ法を導入した。この改良されたノイズ法の検証のため、バリオオン二体系ではなく、バリオオン・メソン散乱系の π と K

からなる系を対象とする計算コードの開発を行った。

(3)については、(1)、(2)で得られた結果を用いて、模型への制約を課しながら、フリーパラメータの決定を行うものである。現在、運動量表示による計算コードがあるため、バリオン散乱のうち、まだ含まれていない散乱系を記述する計算コードを追加する。

4. 研究成果

前節の方法(1)の位相差分析を用いる研究では、これまでの我々のプログラムと異なり、エネルギー依存型のプログラム開発に着手した。ここでは、位相差と吸収係数を直接エネルギーの関数とした表式を用いることとした。予備的な結果では、弾性散乱領域のみならず、非弾性散乱領域においてもこの手法が適用可能であることがわかった。今後、実際に広いエネルギー領域で実行可能となるようさらに計算コードの改良を行う必要がある(発表論文2, 学会発表8)。

方法(2)については、改良したノイズ法を用いる計算コードを $K\pi$ 散乱に適用できるよう開発し、数値計算実験を行った。特に、物理量としては、実験データとの比較、他グループとの比較、さらに、模型構築への制約条件となる適性を考え、散乱長を計算対象とした。 $K\pi$ 散乱では、二つのアイソスピン状態が対応し、クォークダイアグラムをそれぞれに描けば、全部で22種類のダイアグラムが出現する。しかし、実際の散乱過程を検討すると、測定量に寄与するものは、図1にある3種類のみであることがわかった。アイソスピン状態の相異は、これら3つのダイアグラム(ダイアグラムA, H, X)からの寄与の相異に帰着されることになる。あるものはグルーオン交換力に対応し、あるものはメソン交換力に対応するものになると考えられる。

したがって、3つのダイアグラム毎に改良されたノイズ法にもとづく表式を求め、計算コード化し、複数の研究機関(高エネルギー加速器研究機構, 大阪大学, 広島大学)のスーパーコンピュータを利用し、結果を得た。

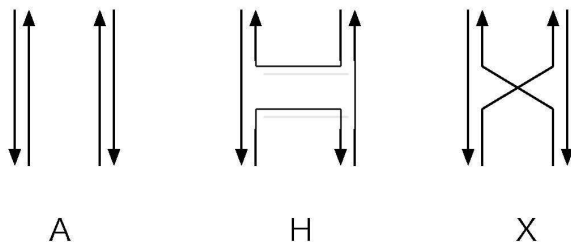


図1 $K\pi$ 散乱に関するクォークダイアグラム。ライン一つがクォーク一つに対応する。

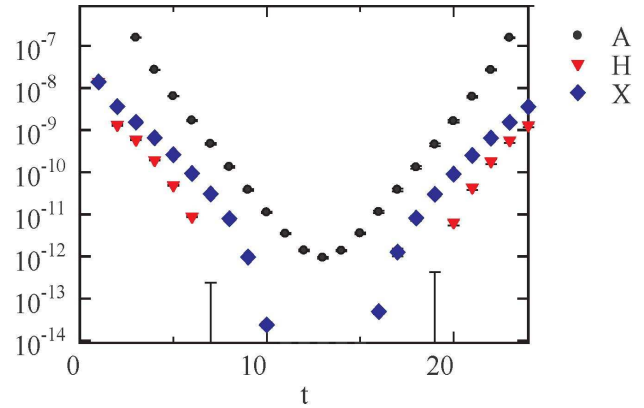


図2 数値計算実験により得られた異なるクォークダイアグラム別の4点相関関数。横軸は時間。

図2に得られた結果を示す。この図は、ホッピングパラメータと呼ばれる値が0.158のもので、 π 中間子の質量は観測値よりも重い状態である。この図からわかるように、ダイアグラムA, H, Xごとに異なる振る舞いを示しているのがわかる。アイソスピン状態の違いは、この3つのダイアグラムからの寄与の相異であることから、アイソスピン状態の違いが明らかであることがわかった。その他、境界条件に対する検討から、Lattice Artifactに対する処方も今回新しい方法を用いた。

このような数値計算実験を、複数のホッピングパラメータに対応したもので実行し、メソンの値が現実の測定値となる値への外挿を行った。得られた値をもとに、格子QCD理論と散乱物理量との関係を表す公式を用いて、現実の実験から求めることが可能な散乱長を、アイソスピン1/2と3/2のいずれの状態に対しても示すことができた。このうち、1/2状態は、世界で初めて我々のグループが格子QCD理論に基づき計算結果を示すことができた。

得られた値のうち、アイソスピン3/2の $K\pi$ 散乱の散乱長は、これまでに報告されている中国や米国のグループの値と矛盾は示していない。一方、アイソスピン1/2状態については、いくつかのモデル計算があるが、これらとは異なる値を示している。今後、さらに数値計算実験のデータを蓄積することで、今回の我々の結果の精度をより向上させることが重要な課題であると考えられる。

一方、ハイペロンを含むバリオン散乱においても、 K メソンと π メソンの相互作用は、大変重要であると考えられるので、今回の結果を他の散乱過程において検証する必要も

ある。また、方法(3)において述べられた、模型構築への制約条件として、今回得られた結果をどのように利用するか、も今後の検討課題である。

以上をまとめると、統一的模型構築に必要な、実験データとして利用可能な物理量を、格子QCD理論により求める手法について、本研究により、一定の妥当性を示したといえる。今後、数値計算実験の技術的改良に加え、対象とすべき散乱系を適切に選定することで、バリオン散乱をクォーク・グルーオン自由度に基づき記述することに、本研究の結果が資するものと期待される。

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2件)

1. J. Nagata, A. Nakamura, S. Muroya, “Lattice Study of πK Scattering Length,” Nuclear Physics A, 査読有, **790**, 2007, p414-417.

2. J. Nagata, H. Yoshino, M. Matsuda, “Energy-Dependent Phase-Shift Analyses for Elastic pp Scattering in COSY-Date Region,” Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, 査読無, 2007, p263-266.

[学会発表] (計8件)

1. 室谷心, 永田純一, 中村 純, 「 $K\pi$ チャンネルの散乱長」, 文部科学省科学研究費補助金特定領域「ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会, 2009年2月27日, KKRホテル熱海(熱海市).

2. 室谷心, 永田純一, 中村 純, 「格子QCD理論による π -K散乱の散乱長 II」, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月21日, 山形大学.

3. 室谷心, 永田純一, 中村 純, “いっしょに箱に入れて散乱をみる -格子シミュレーションによる散乱長の研究-”, 大阪大学サイバーメディアセンター平成19年度スーパーコンピュータシンポジウム, 2007年8月3日, 大阪大学.

4. J. Nagata, S. Muroya, A. Nakamura, “Lattice Study of Hadron Scattering,” -学術フロンティア- 「粒子線と物質の相互作用に関するシミュレーション科学の新たな

る展開を目指す総合研究」研究会, 2007年3月14日, 岡山理科大学.

5. S. Muroya, J. Nagata, A. Nakamura, “Lattice Study of $K\pi$ Scattering -- A Trial for Hadron-Nuclear Physics based on QCD-,” Workshop on Hadronic and Nuclear Physics 2007, 2007年2月23日, Pusan, Korea.

6. S. Muroya, J. Nagata, A. Nakamura, “Lattice Study of πK Scattering Length,” International Conference on Few Body Problems in Physics, 2006年8月24日, Santos, Brasil.

7. 室谷心, 永田純一, 中村 純, “格子QCD理論による πK 散乱の散乱長,” 第61回日本物理学会年次大会, 2006年3月29日, 愛媛大学.

8. J. Nagata, H. Yoshino, M. Matsuda, “Energy-dependent phase shift analyses for elastic pp scattering in COSY-data region,” The Third Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, 2005年7月28日, Suranaree University of Technology, Thailand.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 純一 (NAGATA JUNICHI)
広島大学・入学センター・准教授
研究者番号: 70330959

(2) 研究分担者

吉野 浩生 (YOSHINO HIRO)
広島国際大学・保健医療学部・准教授
研究者番号: 90309683

室谷 心 (MUROYA SHIN)
松本大学・総合経営学部・教授
研究者番号: 70239557

中村 純 (NAKAMURA ATSUSHI)
広島大学・情報メディア教育研究センター・教授
研究者番号: 30130876

(3) 連携研究者