

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月11日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540270

研究課題名（和文）

レプトンによる中間子生成反応とエキゾチックバリオンの研究

研究課題名（英文）

Lepton induced meson production reaction and exotic baryon

研究代表者

佐藤 透 (Sato Toru)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10135650

研究成果の概要（和文）：バリオン共鳴は強く相互作用する系の力学に関して重要な情報を与える。とくにエキゾチックな量子数を持つハドロンや、ハドロン分子構造を持つバリオンの存在は低エネルギーにおける強い相互作用を理解する鍵なる。ここでは（1）電子線・光子をプローブとする中間子生成反応の解析から（2）ストレンジダイバリオン生成反応の解析かハドロン共鳴のスペクトル、遷移形状因子、ハドロン共鳴の構造を明らかにしていった。

研究成果の概要（英文）：Spectrum and form factors of the baryon resonances provide basic information on the dynamics of the non-perturbative strong interaction at low energy. In this study, we have investigated (1) spectrum and form factors of baryon excited states from the analysis of the photon and electron induced meson production reaction, (2) signal of the strange dibaryon in the meson production reaction. From those studies we have revealed the hadronic structure of the excited hadron states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1170,000
2009年度	800,000	240,000	1040,000
2010年度	800,000	240,000	1040,000
2011年度	800,000	240,000	1040,000
年度			
総計	3300,000	990,000	4290,000

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、レプトン反応、ハドロン共鳴

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初のバリオン共鳴、ストレンジダイバリオン共鳴に関する世界の研究状況はそれぞれ以下のものであった。

## (1)電子線・光子による中間子発生反応とバリオン共鳴

デルタ共鳴の電磁形状因子については詳細な解析が世界的に進められていた。一方で高励起のバリオン共鳴については JLab の高

精度のデータをもとに解析が始まろうとしていた。また質量が 1.8GeV 付近の核子共鳴はその存在が疑問視され再解析の必要性が認識され始めていた。この中で様々な中間子生成過程を包括的に解析する反応理論の開発が遅れていた。

## (2)ストレンジダイバリオン共鳴

ストレンジネスをもつハドロンの研究は、J-PARCにおける K 中間子実験により飛躍的

に進むことが期待されている。特に Lambda(1405)が主要な役割を果たす原子核状態である K 中間子原子核は主要な研究課題の一つとされている。そのなかで最も基本となる K 中間子原子核である Kpp の系に共鳴状態が存在する可能性が指摘されはじめていた。

## 2. 研究の目的

バリオン共鳴はハドロンの構造を解明するうえで重要な役割を果たしている。とくに Theta+ のようなエキゾチックハドロンやスタンダードな 3 クォークの構造を持たない可能性がある N\*(1440) や Lambda(1405) はバリオンのクォーク・グルーオン構造を理解するうえで鍵となる情報を与えると考えられる。本研究の目的はバリオン共鳴のスペクトル、ストレンジダイバリオン共鳴の解析から、エキゾチックハドロンの構造を解明していくことにある。

### (1) 電子線・光子による中間子発生反応とバリオン共鳴

パイ中間子および電子線・光子と核子の反応による 2 つのパイ中間子生成を含む  $\pi$ 、エータ、K 中間子生成反応を統一して記述するモデルを構築する。これにより最新の精度のよい実験データを解析し、核子共鳴のスペクトル、構造に関する情報を得る。

### (2) ストレンジダイバリオン共鳴の生成反応とその解析

ストレンジダイバリオンのエネルギー、結合定数の KN 散乱モデル、Lambda(1405) のモデル依存性を調べる。また中間子生成反応における共鳴状態のシグナルの出現とこれらのモデル依存性の検証可能性について解析する。

## 3. 研究の方法

### (1) 電子線・光子による中間子発生反応とバリオン共鳴

3 粒子 (pipi N) ユニタリ性を満たす中間子生成反応の定式化を行う。これを用い  $\pi$  N 弾性散乱、 $\gamma\pi$  反応の解析を出発点とし、Jefferson Lab., Spring8, Bonn, Mainz の電子線、光子による pi N, eta N, omega N, pipi N 生成反応データを統一的に記述するモデルを構築する。反応モデルから得られる部分波振幅の解析を行い、共鳴の電磁形状因子、共鳴スペクトルについて明らかにする。その際、非物理的 Riemann 面へ散乱振幅を解析接続する方法を用いて散乱振幅の極および residue を

得る。

### (2) ストレンジダイバリオン共鳴の生成反応とその解析

KNN- $\pi$ YN 系に対する Faddeev 方程式の定式化を用いる。Lambda(1405) のモデル依存性を代表する、カイラルユニタリモデルに特徴的なエネルギー依存型と通常の現象論的モデルに使われる非依存型 KN 相互作用モデルを構築する。また 3 粒子系の反応を扱うために実運動量空間における 3 粒子散乱方程式の解法を開発する。これにより中間子生成反応におけるストレンジダイバリオン共鳴のシグナルを調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 電子線・光子による中間子発生反応とバリオン共鳴

SU(3) 8 重項の基底状態 Goldstone Boson とスピン 1/2 バリオンからなるバリオン・メソンチャンネルをすべて取り入れた世界的に例を見ない 3 粒子ユニタリ性を満足するチャンネル結合中間子生成反応のモデルの定式化を行った。これを用いて pi N, eta N, omega N, pipi N 生成反応データ統一的に記述するモデルを構築した。

中間子発生反応の解析により得られた振幅を用い、核子共鳴の構造を特徴付ける共鳴の崩壊分岐比の解析を行った。この際共鳴極および residue を決定するためにチャンネル結合の散乱振幅を解析接続する方法、また自明でない 3 粒子崩壊に対する Residue を用いた分岐比を導出する方法を開発した。不変質量が 2 GeV 以下の質量領域における共鳴粒子のスペクトル、崩壊幅、分岐比の研究を完成した。共鳴極の residue として曖昧さなく共鳴の質量、結合定数を導いた研究は世界でも例がなく非常に重要な核子共鳴の系統的情報を得ることが出来た。とくにハドロンの分子的共鳴状態と言われている P11 に関する研究から、'Roper' 共鳴は  $\pi\Delta$  閾エネルギー近傍の異なるリーマン面上の 2 つの極から構成されることが解った。

### (2) ストレンジダイバリオン共鳴の生成反応とその解析

Faddeev 方程式によるチャンネル結合 3 体問題を解くことによりストレンジダイバリオン共鳴エネルギーの KN 相互作用のモデル依存性を調べた。カイラルユニタリモデルが予言するエネルギー依存型 KN 相互作用を用いると

従来の模型とは異なり2つのストレンジダイバリオン共鳴が現れることが解った。この結果は、ストレンジダイバリオン共鳴の実験的研究により KN 相互作用模型を検証するあらたな可能性を与えることが解った。またストレンジダイバリオン生成反応の解析を行い3粒子散乱振幅に共鳴のシグナルが実際現れることを検証した。またこのシグナルから KN 相互作用の模型依存性が判別できる可能性を示した。

#### 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24件)

(1)T. Sato, Theoretical Status of Neutrino Cross Sections, AIP Conf. Proc. 1382, pp. 34-37 (2011) 査読あり

(2)T. Sato, Neutrino - nucleus scattering in the QE and  $\Delta(1232)$  peak regions, AIP Conf. Proc. 1382, pp. 164-166 (2011) 査読あり

(3)H. Kamano, S. X. Nakamura, T. S. H. Lee, T. Sato, Unitary coupled-channels model for three-mesons decays of heavy mesons, Phys. Rev. D84 114019, 1-20 (2011) 査読あり

(4)C. Alexandrou, E. B. Gregory, T. o Korzec, G. Koutsou, J. W. Negele, T. Sato, and A. Tsapalis, The Delta(1232) axial charge and form factors from lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 107 141601 1-5 (2011) 査読あり

(5)Y. Ikeda, T. Hyodo, D. Jido, H. Kamano, T. Sato and K. Yazaki, Structure of Lambda(1405) and Threshold Behavior of pi Sigma Scattering, Prog. Theor. Phys. 125 (2011) 1205-1224 査読あり

(6)N. Suzuki, T. Sato and T. -S. H. Lee, Extraction of electromagnetic transition form factors for nucleon resonances with a dynamical coupled-channels model, Phys. Rev. C82 (2010) 045206 1-12 査読あり

(7)Y. Ikeda, H. Kamano and T. Sato, Energy dependence of KN interactions and resonance pole of strange dibaryons, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 533-539 査読あり

(8)H. Kamano, S. X. Nakamura, T. -S. H. Lee, T. Sato, Extraction of P11 resonances from pi N data, Phys. Rev. C81 (2010) 065207 1-8 査読あり

(9)Y. Ikeda, H. Kamano and T. Sato, On the resonance energy of the strange dibaryon, Nucl. Phys. A835 (2010) 386-389 査読あり

(10)S. Nakamura, T. Sato, T. -S. H. Lee, B. Szczerbinska, and K. Kubodera, Dynamical Model of Coherent Electroweak Pion Production on Nuclei, Phys. Rev. C81 (2010) 035502 1-22 査読あり

(11)N. Suzuki, B. Julia-Diaz, H. Kamano, T. -S. H. Lee, A. Matsuyama, and T. Sato, Disentangling the Dynamical Origin of P11 Nucleon Resonances, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 042302 1-4 査読あり

(12)H. Kamano, B. Julia-Diaz, T. -S. H. Lee, A. Matsuyama and T. Sato, Double and single pion photoproduction within a dynamical coupled-channels model, Phys. Rev. C80 (2009) 065203 1-10. 査読あり

(13)S. X. Nakamura, K. Sumiyoshi, and T. Sato, Neutrino deuteron reaction in the heating mechanism of core-collapse supernovae, Phys. Rev. C80 (2009) 035802 1-6. 査読あり

(14)V. Dmitrasinovic, T. Sato, and M. Suvakov, Smooth crossover transition from the Delta-string to the Y-string three-quark potential, Phys. Rev. D80 (2009) 054501 1-10. 査読あり

(15)B. Julia-Diaz, H. Kamano, T. -S. H. Lee, A. Matsuyama, T. Sato, and N. Suzuki, Dynamical coupled-channels analysis of p(e, e' pi)N reactions, Phys. Rev. C80 (2009) 025207 1-9. 査読あり

(16) Y. Kim, T. Sato, F. Myhrer, K. Kubodera, Two-pion-exchange and other higher-order contributions to the pp  $\rightarrow$  pi pi0 reaction, Phys. Rev. C80 (2009) 015206 1-8 査読あり

(17) V. Dmitrasinovic, T. Sato, and M. Suvakov, Low-lying spectrum of the Y-string three-quark potential using

hyper-spherical coordinates, Eur. Phys. J. C62 (2009) 383-397 査読あり

(18) T. Sato, and T. -S. H. Lee, Dynamical Models of the Excitations of Nucleon Resonances, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36, (2009) 073001 1-39 査読あり

(19) B. Julia-Diaz, H. Kamano, T.S.H. Lee, A. Matsuyama, T. Sato, N. Suzuki, On the Methods for Constructing Meson-Baryon Reaction Models within Relativistic Quantum Field Theory. Chin. J. of Phys. 47 (2009), 142-158 査読あり

(20) Y. Ikeda, T. Sato, On the resonance energy of the KNN - pi YN system, Phys. Rev. C79 (2009) 035201 1-6 査読あり

(21) H. Kamano, B. Julia-Diaz, T. -S.H. Lee, A. Matsuyama, and T. Sato, Dynamical coupled-channels study of pi N -> pi pi N reactions, Phys. Rev. C79 (2009) 025206 1-11 査読あり

(21) N. Suzuki, T. Sato, T. -S.H. Lee, Extraction of Resonances from Meson-Nucleon Reactions, Phys. Rev. C79(2009) 025205 1-16 査読あり

(22) KNN resonance and KNN-pi YN Coupled channel Faddeev Equation, T. Sato and Y. Ikeda, Mod. Phys. Letters A 24 (2009) 895-900 査読あり

(23) B. Julia-Diaz, T. -S. H. Lee, A. Matsuyama, T. Sato and L. C. Smith, Dynamical coupled-channel model of pion Photoproduction, Phys. Rev. C77 (2008) 045205 1-9 査読あり

(24) S. Capstick, A. Svarc, L. Tiator, J. Gegelia, M.M. Giannini, E. Santopinto, C. Hanhart, S. Schere, T. -S. H. Lee, T. Sato and N. Suzuki, The physical meaning of scattering matrix singularities in coupled-channel formalisms, Eur. Phys. J A 35 (2008) 253-266 査読あり

[学会発表] (計 9 件)

(1) T. Sato, Methods for nucleon resonance extraction (overview), Invited preinary talk at The 8th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons, May 17-20, 2011 Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News,

Virginia USA

(2) T. Sato, EBAC overview, invited talk at Partons in Nucleons and Nuclei, Sep. 26-30, 2011, Marrakech, Morocco

(3) T. Sato, Neutrino-nucleus scattering in the QE and Delta(1232) peak regions, Invited talk at 12th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Beta Beams October 20-25, 2010, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

(4) T. Sato, Theoretical Status of Neutrino Cross Sections, Plenary talk at 12th International Workshop on Neutrino Factories, Superbeams and Beta Beams October 20-25, 2010, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India

(5) T. Sato, Summary of three-day discussion on extraction of N\* properties from meson production reactions, EBAC workshop on Extractions and interpretations of hadron resonances and multi-meson production reactions with 12 GeV upgrade, May 27 - 28, 2010, Newport News, USA

(6) T. Sato, Extraction of resonance parameters from meson production reaction, Plenary talk at NSTAR 2009, April 19-22, 2009, Beijing, China

(7) T. Sato, Extraction of resonance parameters from meson production reactions, Invited talk at Electromagnetic N=N\* Transition Form Factors Workshop, October 13-15, 2008 Jefferson Lab, Newport News, USA

(8) T. Sato, KNN\$ resonance and KNN-pi YN coupled channel Faddeev equation, Plenary talk at Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 19-23 August, 2008, Depok Indonesia,

(9) T. Sato, Nucleon resonance and dynamical model of meson production reaction, Workshop on 'Hadron Electromagnetic Form Factors' at European Center for theoretical studies in nuclear physics and related areas, May 12-23 2008, Trento, Italy

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 透 (SATO TORU)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 10135650

### (2) 研究協力者

鎌野 寛之 (KAMANO HIROYUKI)  
大阪大学・核物理研究センター・助手  
研究者番号: 00625361

T.-S. H. Lee  
Argonne National Laboratory (USA)

中村 聡 (NAKAMURA SATOSHI)  
Jefferson National Laboratory (USA)

久保寺 国晴 (KUBODERA KUNIHARU)  
University of South Carolina (USA)