

令和元年6月22日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05354

研究課題名(和文)ニュートリノ原子核反応とニュートリノ振動

研究課題名(英文) Neutrino Oscillation and Neutrino-Nucleus reaction

研究代表者

佐藤 透 (Sato, Toru)

大阪大学・核物理研究センター・招へい教授

研究者番号：10135650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：長基線ニュートリノ振動実験の研究では、高エネルギー領域のニュートリノ原子核の反応を通して、ニュートリノ振動が調べられる。本研究では、ニュートリノ原子核反応の中で、精密な理論解析が最も難しいパイ中間子発生反応の研究を行った。パイ中間子角度分布におけるパリティ非保存及び重陽子における終状態相互作用などの反応機構の解析を行った結果、ニュートリノ原子核反応の基礎となるニュートリノ核子反応の標準模型が構築された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ニュートリノ混合角、質量階層性、時間反転不変性の破れの研究のため不可欠な精度の良い理論解析を進める基礎を与えたものである。我々の開発した核子共鳴領域のニュートリノ反応模型は、現在入手が可能なパイ中間子や電子、光子による反応データを包括的に解析した結果得られたもので、世界的にも例がない。この模型を原子核反応解析に組み入れる試みや、反応断面積等の情報を研究者コミュニティへ提供することも始められている。

研究成果の概要(英文)：In neutrino-oscillation experiments with the long-base-line accelerator neutrino and atmospheric neutrino, neutrino properties are extracted through the neutrino-nucleus reaction in the high energy region. We have studied the neutrino induced pion production reactions in the nucleon resonance region. Parity violating the angular distribution of pion and the rescattering mechanisms of the neutrino-deuteron reaction have been investigated. Significant reduction of the spectra of spectator nucleon due to the final-state interaction was found for the neutrino-deuteron reaction. Our reaction model has been constructed by the comprehensive analysis of the world available data of pion, electron and photon induced meson production reaction, which has never been done before. Applications of our model for the neutrino-nucleus reaction have just started and the cross sections of the model are distributed to the analysis groups of neutrino data.

研究分野：原子核理論

キーワード：ニュートリノ振動 核子共鳴 ニュートリノ原子核反応

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノが飛行中に異なるフレーバーのニュートリノに変化するニュートリノ振動は、2000年前後に大気ニュートリノおよび太陽ニュートリノの実験により確立され、原子炉ニュートリノの実験から、未知であった混合角 θ_{13} が比較的大きい値であることが明らかにされた。今後のニュートリノ物理の中心課題は、CP非保存位相、質量、質量の階層性、マヨラナ粒子かディラック粒子かというニュートリノの未知の性質を解明することにある。

加速器ニュートリノによる長基線ニュートリノ振動実験では、検出器におけるニュートリノ原子核反応の解析からニュートリノ振動パラメタが得られる。原子核反応模型の不確定性がニュートリノ振動パラメタの高精度化を制限する大きな要因の一つになりつつあり、原子核反応模型の精密化は緊急の課題である。特に核子共鳴領域のパイ中間子生成反応に関する理論的扱いを進展させることが求められている。

2. 研究の目的

本研究課題では準弾性散乱から核子共鳴のエネルギー領域における、軽い原子核・ニュートリノ反応の解析を行う。核子多体系の原子核における反応機構を検証し、次世代ニュートリノ実験によるCP非保存ニュートリノ振動パラメタ、質量階層性の探索に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ニュートリノ重陽子散乱におけるパイ中間子生成反応と終状態相互作用の解析

核子共鳴領域のニュートリノ重陽子反応の研究を行う。共鳴領域のニュートリノ反応で主要な寄与を与えるデルタ(1232)のN遷移の軸性ベクトル流形状因子は、重陽子を標的としたデータ(ANL, BNLの泡箱実験)から得られている。従来のニュートリノ・重陽子反応を自由核子との反応とする解析では見落とされていた、終状態相互作用が非常に大きな寄与を及ぼす可能性がある。本研究では、我々が開発したニュートリノ・核子反応の電子散乱などのデータで検証された共鳴領域のチャンネル結合中間子生成模型の振幅を用いて、ニュートリノエネルギーが2GeV以下の領域におけるニュートリノ・重陽子反応の解析を行う。その際、核子およびパイ中間子の終状態相互作用を考慮に入れ、ニュートリノ反応機構を調べる。

(2) 3, 4核子系におけるニュートリノ反応の研究

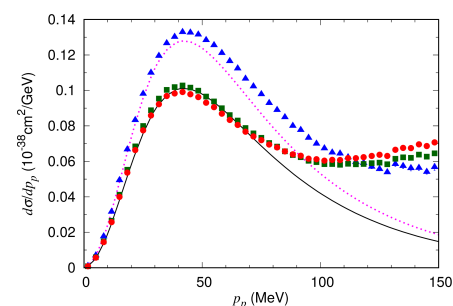
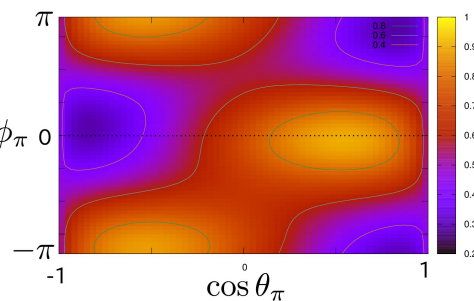
少数核子系における連続状態へのInclusive反応を解析する手法の検討を行い、A=3, 4におけるニュートリノ反応理論計算を再評価する。

4. 研究成果

(1) ニュートリノ重陽子散乱におけるパイ中間子生成反応と終状態相互作用の解析

パイ中間子の角度分布及びパリティ非保存について研究した。ニュートリノによるパイ中間子発生反応角度分布の定式化を行い、パリティ非保存の観測量が現れる機構を明らかにした。我々が開発した電弱電流によるチャンネル結合中間子発生反応模型と、バレンシア大学グループによる模型を用いて、共鳴領域における電子散乱とニュートリノ反応の角度分布について実験データとの比較を含め検討した。その結果、全断面積などの積分された物理量は両者の模型がよく一致したが、角度分布には差異が見られた。角度分布などの物理量では、中間子発生振幅がユニタリティ条件を満たすことが特に重要であることが分かった。この研究はバレンシア大学、サラマンカ大学との国際共同研究により行われた。

共鳴領域のニュートリノ反応で、主要な寄与を与えるデルタ(1232)励起過程では、N遷移の軸性ベクトル流形状因子が主要な理論的不確定因子である。理論研究では、重陽子を標的としたANL, BNLの泡箱実験のデータが形状因子決定に用いられてきた。我々は、重陽子反応における終状態の2核子、パイ・核子の再散乱を



取り入れた解析を行い、終状態相互作用のニュートリノエネルギー依存性、陽子と中性子におけるチャンネル依性を明らかにした。ニュートリノ原子核反応の解析に用いられるデルタ共鳴付近の素過程断面積模型改良のために ANL・BNL データに対する終状態相互作用補正因子を提唱した。

(2) 少数核子系のニュートリノ反応解析方法の開発。

少数核子系の電磁反応に用いられるローレンツ積分変換(LIT)法では、その逆変換から実際に必要な構造関数が得られる。ここではその逆変換の機構について検討を行った。その結果、LIT関数が十分精度よく得られるならば、強度関数のエネルギー依存性をあらかじめ仮定せずに最大エントロピー法を用いた逆変換の方法が機能する可能性を見出した。さらに、フーリエ変換を用いて、LIT 関数の逆変換が解析的に実行できることを示した。これから、離散化した基底を用いて連続状態における強度関数を得る LIT 法の実態は、強度関数を平滑化するひとつの方法に過ぎないことを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

(1) S. X. Nakamura, H. Kamano, T. Sato

“Impact of final state interactions on neutrino-nucleon pion production cross sections extracted from neutrino-deuteron reaction data” Phys. Rev. D99 (2019) 031301, 1-6
DOI: 10.1103/PhysRevD.99.031301 査読あり

(2) J. E. Sobczyk, E. Hernandez, S. X. Nakamura, J. Nieves, T. Sato

“Angular distributions in electroweak pion production off nucleons: odd parity hadron terms, strong relative phases and model dependence” Phys. Rev. D98 (2018) 073001, 1-39
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.073001 査読あり

(3) L. Alvarez-Ruso, M. S. Athar, M. B. Barbaro, D. Cherdack et al. (T. Sato 25名中
23番目)

“NuSTEC(Neutrino Scattering Theory Experiment Collaboration)White Paper: Status and challenges of neutrino-nucleus scattering” Prog. in Part. and Nucl. Phys., 100 (2018), 1-68
DOI: 10.1016/j.pnnp.2018.01.006 査読あり

(4) T. Sato

“Exclusive Meson Electroweak production off Bound Nucleon”, Few-Body-Sys. 31, 1-4 (2018)
DOI: 10.1007/s00601-018-1346-2 査読あり

(5) S. X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato, Y. Suzuki

“Towards a Unified Model of Neutrino-Nucleus Reactions for Neutrino Oscillation Experiments” Rep. Prog. Phys. 80 (2017) 056301, 1-38
DOI: 10.1088/1361-6633/aa5e6c 査読あり

[学会発表](計 13 件)

(1) Neutrino induced meson production in the resonance region below 2 GeV,

T. Sato,

12th international workshop on neutrino-nucleus interaction in the few-GeV region, Oct. 15-19, 2018, Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, Italy

(2) Neutrino Induced Meson Production Reaction in the Resonance Region,

T. Sato

Gordon research conference ``From quarks to nuclei in photonuclear reactions'', Aug. 5-10, 2018, Holderness, NH, USA

(3) Theory of pion production for nu-d,

T. Sato

INT workshop: From nucleons to nuclei: enabling discovery for neutrinos, dark matter and more, June 25-28, 2018, Seattle, WA, USA

(4) Exclusive Meson Electroweak production off Bound Nucleons,
T. Sato
11th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons, Aug. 20-23, 2017, Columbia,
SC, USA

(5) Neutrino induced meson production reactions on nucleon and nucleus,
T. Sato
International Nuclear Physics Conference, Sep. 11-16, 2016, Adelaide, Australia

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

(1) ホームページ <http://nuint.kek.jp/>

(2) 研究会

以下の研究会を主催した。

研究会「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」2019年2月22日 KEK 東海一号館

<http://j-parc-th.kek.jp/workshops/2019/02-22/>

「Workshop on Neutrino-nucleus interaction in a few GeV region」

KEK 東海一号館 2017年11月18-19日

<http://nuint.kek.jp/workshop/2017/nnint/program-nov-ws.txt>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名(ローマ字氏名):

中村 聡 (NAKAMURA, Satoshi)

村田知也 (MURATA, Tomoya)

今井藍子 (IMAI, Aiko)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。