

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105010

研究課題名(和文)ニュートリノで探る原子核のクォーク・グルーオン構造と標準反応モデルの構築

研究課題名(英文)Constructing model of Neutrino-nucleus reaction and probing quark gluon structure of nucleus

研究代表者

佐藤 透(Sato, Toru)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10135650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノ振動を解明していく為に、MeVからGeVの広いエネルギー領域にわたるニュートリノと原子核反応を精密に理解することが必要とされている。

本研究では、特に核子の励起状態を通じてパイ中間子や様々な中間子を生成する共鳴領域の過程や、さらに高エネルギーにおいて原子核内部のクォークが叩きだされる深非弾性散乱と呼ばれる過程のニュートリノ反応に関する理論的研究を行った。その結果、共鳴領域から深非弾性散乱領域にまたがるニュートリノ反応モデルが開発された。

研究成果の概要(英文)：The properties of neutrino oscillation are extracted by analyzing the neutrino-nucleus reaction in the wide region of neutrino energy. To complete the task, a precise knowledge of neutrino-nucleus reaction plays crucial role. In this project, we have studied the neutrino reactions in the nucleon resonance region and also in the deep inelastic region. We have developed a model of neutrino reaction in those energy regions. The model of resonance region is capable to describe for the first time multi-pion production reactions which smoothly interpolate to the DIS region.

研究分野：原子核理論

キーワード：ニュートリノ原子核反応 核子共鳴 中間子生成反応 深非弾性散乱

1. 研究開始当初の背景

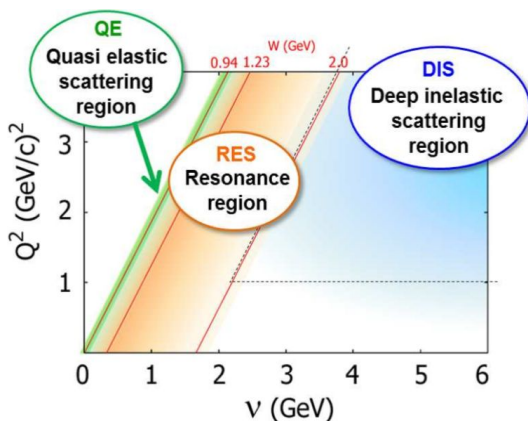
ニュートリノ振動現象を特徴付ける物理量は、ニュートリノ反応過程のシミュレーションを通して実験データから抽出される。ニュートリノ実験が高統計になるにつれ、原子核反応モデルの不確定性は、抽出されるニュートリノ振動パラメタの高精度化を制限する大きな要因の一つになりつつあり、MeV から GeV の広いエネルギー領域にわたる原子核標的のニュートリノ反応も高精度で記述することが緊急の課題となっている。核子共鳴領域のニュートリノ反応においては、電子線による高精度の反応データを取り入れて構築された「標準的な」ニュートリノ反応モデルはいまだない。また深非弾性散乱領域においては、原子核構造関数を小さい x から、大きい x 領域までの広い力学的領域を記述できるモデルが提案されている。これをレプトン反応の包括的な解析によりニュートリノ反応に用いることが求められている。

2. 研究の目的

核子共鳴領域から深非弾性散乱のエネルギー領域にわたる、ニュートリノ・原子核反応の基準モデルの構築を目的とする。

(1) 電子線・光子及びパイ中間子をプローブとする中間子生成反応データを元に不変質量 $W < 2\text{GeV}$ の核子共鳴領域におけるニュートリノ核子反応モデルを構築し、原子核反応に応用する。

(2) レプトン原子核反応データの解析から深非弾性領域のニュートリノ原子核反応における原子核効果について解析する。また Regge 領域への拡張を検討する。



レプトンからのエネルギー、運動量移行と特徴的な反応機構

3. 研究の方法

(1) 共鳴領域のニュートリノ反応モデルに関しては、電子線・光子及びパイ中間子をプローブとする共鳴領域の中間子生成反応の包括的モデルを全ての入手可能な中間子生成反応データをもとに構築する。さらに軸性ベクトル流を含むモデルに拡張し、ニュートリノ反応データを含めた解析により、ニュートリノ核子反応モデルを構築する。原子核効果を取り入れ、電子線及び光子プローブの実験データで校正された共鳴領域のニュートリノ原子核モデルを解析する。

(2) 深非弾性領域のニュートリノ原子核反応モデルに関しては、最新の JLab と NuTeV の深非弾性散乱のデータを含めた解析を行うことにより、大きい x 領域を含めてパートン分布関数の原子核補正を正確に把握する。この結果を用いてニュートリノ原子核深非弾性散乱断面積を計算する基準モデルを構築し、また $Q^2 \rightarrow 0$ の領域に拡張する。

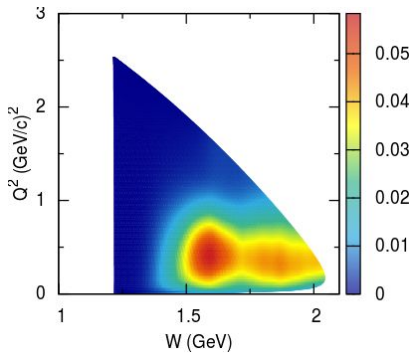
4. 研究成果

(1) 共鳴領域のパイ中間子・光子・陽子反応の約 30000 を超える角度分布、偏極などデータを解析し、チャンネル結合反応モデルを開発した。その反応モデルの解析から、核子共鳴 (N^*) の質量、共鳴粒子崩壊分岐比、電磁結合定数の情報を得た。

(2) 中性子における中間子光発生反応の解析を行い、荷電電流および中性電流による反応を記述するために必要となる、ベクトル流のアイソベクトル、アイソスカラー振幅の抽出を行った。

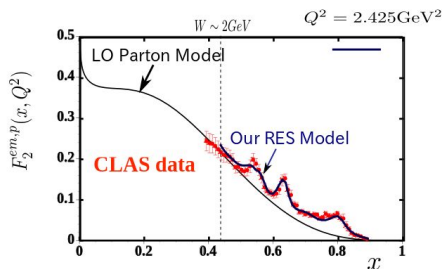
(3) K-p 反応による中間子生成反応の解析を行った。これはストレンジネスをもったバリオン共鳴 Y^* の探索における初めての動的チャンネル結合モデルによる解析であり、 Y^* 共鳴の質量、幅を得た。またこの反応モデルはストレンジネスを変える荷電電流反応の解析の際に有用となる。

(4) (1) ~ (3) において開発された、パイ中間子光子及び電子を入射粒子とする核子における中間子生成反応モデルを拡張し、共鳴領域におけるニュートリノ反応モデルが構築された。これは現在入手可能なすべての共鳴領域におけるデータを、包括的に記述する世界初のモデルである。このモデルを用いて、ニュートリノ反応における共鳴粒子、非共鳴過程の役割を解析した。また、得られた反応振幅を、ニュートリノ原子核反応解析する実験研究者に提供する準備を開始した。



Cross section of $\mu^- p \rightarrow \mu^- + \nu_e p$

(5)共鳴・DISの遷移領域におけるパートン描像による記述とハドロンで記述する反応模型の整合性の検討を開始した。パリティ非保存電子散乱データの解析から、電磁流・中性電流ともによく記述されていることが判明した。一方エネルギー、高運動量領域では反応強度が不足している可能性が、パートン模型との比較より判明した。これは軸性ベクトル流形状因子を適切にすることで、修正される可能性が示された。



structure function F_2 of proton

(6)ニュートリノ反応における中間子生成過程で最も重要な寄与をする $(1\ 2\ 3\ 2)$ 共鳴領域の素過程の情報を与えている ANL、BNL のニュートリノ重陽子反応を解析した。新たに取り入れた終状態再散乱の効果が大きく寄与する場合が判明し、データを再解析する必要性が示された。

(7)少数核子系の精密理論計算によるニュートリノ反応の解析を行った。超新星爆発における軽元素によるニュートリノ加熱の一つの重要な過程である 4He のニュートリノ反応の解析を開始した。相関ガウス関数法および複素座標スケリング法を用いて得られた応答関数を用いて解析した結果、従来の理論計算による温度平均断面積は大きく過大評価されている可能性が明かになった。

(8)ミュー原子の荷電レプトン数非保存 (CLFV)崩壊 ($\mu^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$) 過程の研究を行った。原子核電荷分布の広がりや考慮したクーロン相互作用を取り入れた詳細

な解析を行った結果、クーロン相互作用により、 208Pb における反応では、簡単な従来の評価に比べて約7倍近く遷移確率が増大し、CLFV 検出の感度が大きく向上する可能性が分かった。

(9)ニュートリノ原子核非弾性散乱の断面積実験データを収集し、その中で特に統計的に有意なデータセットである NuTeV, CHORUS, CDHSW の断面積を用いて分布関数に対する原子核補正の研究を開始した。この結果、ニュートリノ反応と荷電レプトン反応における原子核補正には多少差異がある可能性が見出された。これはニュートリノ散乱における原子核補正メカニズムの解明のために有用な成果である。

(10)深非弾性散乱領域とレッジ領域 ($W^2 > 4\text{ GeV}^2, Q^2 < 1\text{ GeV}^2$) を系統的に記述する研究を進め、深非弾性散乱領域の解析で得られた原子核効果の結果を低運動量移行領域へ接続する方法を解析した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 56 件)

(1)S. X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato and Y. Suzuki, "Towards a unified model of neutrino-nucleus reactions for neutrino oscillation experiments", 査読有, Rep. Prog. Phys., 80 (2017) 056301, 1-38. DOI:10.1088/1361-6633/aa5e6c

(2)S. X. Nakamura, H. Kamano, and T. Sato, "Dynamical coupled-channels model for neutrino-induced meson productions in resonance region", 査読有, Phys. Rev. D92 (2015), 074024, 1-33. DOI:10.1103/PhysRevD.92.074024

(3)S. Nasu, S. X. Nakamura, T. Sato, K. Sumiyoshi, F. Myhrer, K. Kubodera, "Neutrino Emissivities from Deuteron-Breakup and Formation in Supernovae", 査読有, Astrophys. Jour. 801 (2015), 78, 1-12. DOI:10.1088/0004-637X/801/2/78

(4)H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee, and T. Sato, "Nucleon resonances within a dynamical coupled-channels model of N and N reactions", 査読有, Phys. Rev. C88(2013), 035209, 1-51. DOI:10.1103/PhysRevC.88.035209

[学会発表](計 219 件)

(1)Analysis of bubble chamber data on neutrino-induced pion production off the deuteron ,S.X. Nakamura ,NuInt17 , June 25-30, 2017, Toronto, Canada

(2)Exclusive Meson Electroweak production off Bound Nucleons , T. Sato, NSTAR2017, Aug. 20-23, 2017, Columbia, SC, USA

(3)Modern dynamical coupled-channels calculations for extracting and understanding the nucleon spectrum, H. Kamano, MENU16, July 25-30, 2016, Kyoto, Japan

(4)Neutrino-nucleus interaction in DIS region, S. Kumano, NuInt15, Nov. 16-21, 2015, Osaka, Japan.

(5)Electroweak responses of helium isotopes, W. Horiuchi, NNR14, Nov. 5-6, 2014, Ibaraki, Japan

〔図書〕(計 2 件)

(1)熊野俊三,共立出版, **KEK 物理学シリーズ 第2巻「原子核物理学」**, (2015), 1- 320

(2)Y. Suzuki and W. Horiuch, World Scientifi, "Emergent Phenomena in Atomic Nuclei from Large-Scale Modeling:A Symmetry Guided Perspective", Chap7, 199-227 (2017)

〔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:

(1)研究成果

<http://nuint.kek.jp/>

(2)国際会議 10th international workshop on neutrino-nucleus interactions in the few-Gev region(NuINT15)
<http://bit.ly/nuint15/>

解説:

(1)堀内 涉、**反応断面積と原子核半径**、原子核研究(原子核物理用語・キーワード解説), Vol. 61 No.1, September 2016, p.17-18.

(2)鎌野 寛之、中村 聡、松山 晶彦、佐藤 透、**反応理論から探るバリオン励起状態**、日本物理学会誌, Vol. 69 No.2, pp.74-82 (2014)

一般向け講演・セミナー

(1)熊野 俊三、**変わりゆく原子核物理学の世界**、KEK 素粒子原子核研究所セミナー「素粒子・原子核物理の展望」、2015 年 5 月 12 日、KEK つくばキャンパス

(2)佐藤 透、**ニュートリノが解きあかす不思議**、Science Cafe at Machikaneyama 2015 年 1 月 31 日、大阪大学 総合学術博物館 待兼山修学館

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)研究分担者

熊野 俊三 (KUMANO, Shunzo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・教授

研究者番号: 10253577

(3)連携研究者

齋藤 晃一 (SAITO, Koichi)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号: 40170500

鎌野 寛之 (KAMANO, Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・特任助教

研究者番号: 00625361

堀内 涉 (HORIUCHI, Wataru)

北海道大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 00612186

(4)研究協力者

中村 聡 (NAKAMURA, Satoshi)

大阪大学・理学研究科・特任助教

平井 正紀 (HIRAI, Masanori)

日本工業大学・非常勤講師

上坂 優一 (UESAKA, Yuichi)

大阪大学・理学研究科・博士後期課程

今井 藍子 (IMAI, Aiko)

大阪大学・理学研究科・博士前期課程

村田 知也 (MURATA, Tomoya)

大阪大学・理学研究科・博士後期課程

那須 翔太 (NASU, Shota)

大阪大学・理学研究科・博士後期課程

早戸 良成 (HAYATO, Yoshinari)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

作田 誠 (SAKUDA, Makoto)

岡山大学・理学部・教授