

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400292

研究課題名(和文) ニュートリノ酸素中性カレント反応によるガンマ線生成の研究

研究課題名(英文) Study of the gamma-ray generation via neutrino-oxygen neutral current interaction

研究代表者

小汐 由介 (Koshio, Yusuke)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：80292960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はT2K実験におけるニュートリノの酸素原子核との反応で発生する脱励起ガンマ線の測定により、これまで測定されていなかった中性カレント準弾性散乱反応を高精度で測定することである。初年度にはこの反応を世界で初めて測定することに成功した。しかしその測定誤差は大きく、本研究では最も大きな中性子の水中での反応による誤差を低減するために、中性子ビームを用いた全く新たな実験を提案し、遂行した。これまで中性子と水との反応は系統的に理解されていなかったが、本研究により反応断面積や発生するガンマ線のエネルギーの測定に成功し、その理解が格段に進んだ。

研究成果の概要(英文)：This study is to measure the neutral current quasielastic scattering which has not been measured so far with high accuracy by measuring the deexcited gamma rays generated by the reaction of neutrinos with oxygen nuclei in the T2K experiment. In the first year we succeeded in measuring this reaction for the first time in the world. However, the measurement error is quite large. In this study, we have proposed and performed a completely new experiment using a neutron beam to reduce the largest error due to the reaction of the neutron in water, which was not systematically understood. In this study, the reaction cross section and the energy of gamma rays generated have been measured, and the understanding thereof has advanced dramatically.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 原子核反応 中性カレント 脱励起ガンマ線 超新星爆発

1. 研究開始当初の背景

2010年に開始したT2K実験は、2013年には茨城県東海村のJ-PARCで発生させたミュー型ニュートリノが、295km離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデへの飛来中に電子型ニュートリノへ変化する事象の発見という大きな成果を得た。T2K実験ではこの測定のみならず様々な研究目的があるが、その一つが本研究のニュートリノと酸素原子核における中性カレント準弾性散乱反応の精密な測定である。この反応により核内の陽子または中性子が叩き出され、そのholeへの核子のガンマ線遷移を伴う事象を捉える。この反応は超新星ニュートリノや核子崩壊、暗黒物質探索など様々な物理への応用も可能である。本研究開始当時のT2Kデータ解析により、その反応の発見が示唆されていたが、統計誤差も系統誤差も大きく、公式の結果として報告できる状況にはなかった。

2. 研究の目的

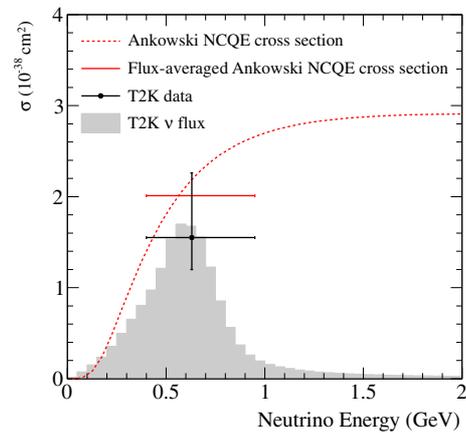
本研究は、ニュートリノ物理学への様々な展開の可能性を持つニュートリノと酸素原子核との中性カレント反応をT2K実験により精密に測定することを目的とした。また、ハドロンビームを使って酸素原子核との反応を測定し、必要な基礎データを得ることも目的とする。特にT2K実験における後置検出器であるスーパーカミオカンデ水中での核子の振る舞いはほとんど測定されていない。本研究はニュートリノ反応の解明が主目的であるが、同時に原子核物理学への寄与も目的とした。

3. 研究の方法

- (1) T2K実験のデータ解析を行い、中性カレント反応の断面積を求める。ここでは特に反応時に発生するガンマ線(一次ガンマ線)を検出する。ガンマ線のエネルギーは10MeV前後であり、T2K実験では高い効率で検出可能である。
- (2) ハドロンビームを用いた実験を行い、(1)の測定の精度を向上させる。上記の一次ガンマ線起源の誤差は陽子ビームを用いて、また核子の水中での反応により発生するガンマ線(二次ガンマ線)は中性子ビームを用いた実験を計画した。特に後者は研究開始時には全くデータがなく理解が進んでいない状況であった。
- (3) (1)の結果を様々な物理学のテーマに反映させる。例えば、超新星爆発が起こった時、この反応によるニュートリノ事象を見積もる。中性カレント反応では、ニュートリノ振動の影響を受けないことから、超新星爆発時のニュートリノの数を見積もることが可能である。他にもニュートリノ振動の影響を受けないことは、ステライルニュートリノに感度をもつことを意味する。

4. 研究成果

初年度(H26)は、まずT2K実験の中性カレント反応のデータ解析を行った。特にニュートリノの酸素原子核との反応で発生する脱励起ガンマ線の予測分岐比を、その分野のエキスパートであるAnkowski氏と協力して最新の理論モデルに置き換えた。また事象選別手法やシミュレーションプログラムの調整を行った。その結果、 3.01×10^{20} protons on targetのデータで中性カレント反応事象の候補が43事象(うち雑音事象は16.2)観測されたことを確認し、反応断面積を導出した。ここで観測された断面積が予測値と良く合っていること(図)、さらにそのエネルギー分布も予測通りであることも示した。この結果は世界で初めてのニュートリノと酸素原子核との中性カレント反応の測定であり、大きなインパクトを与えた。結果はPhysical Review D誌①に掲載され、国内外で開催された会議でも報告した。⑩, ⑭, ⑰, ⑱

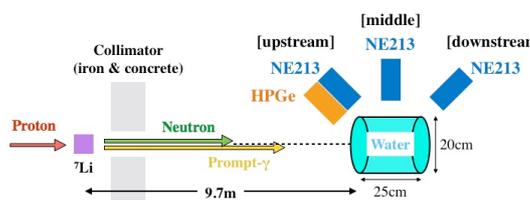


観測された断面積(黒)と予測値(赤)

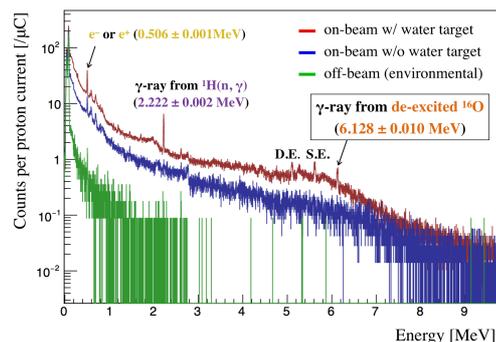
さらにこの結果を用いて、銀河系内で超新星爆発が起こった時にスーパーカミオカンデで観測される数の見積もりを行った。その結果、全体の5%程度がこの中性カレント反応によることを示し、物理学会で報告した。⑭⑯ またステライルニュートリノ探索の感度を計算し、現在、測定結果を用いた解析を進めている。一方で、初めての中性カレント反応の測定に成功はしたが、図にある通り測定誤差は20%と非常に大きい。その誤差の低減のために、本研究ではハドロンビームを使った実験をいくつか提案していたが、その中でも最も誤差の大きい中性子の酸素原子核との二次反応起源の測定誤差(13%)の低減を考えた。様々な可能性を当たったが、その実験に最も適しているのは大阪大学核物理研究センター(RCNP)にある中性子を発生させるビームラインであると結論づけた。その理由は、発生される中性子のエネルギーはT2K実験でのエネルギーと同等(最大392MeV)かつ、ほぼ単色エネルギーの生成が可能なことである。

さらに後方には検出器が設置できる約 100m のトンネルがあり、Time of Flight 法でビーム起源の即発ガンマ線との区別が容易なこともあげられる。実験方法を検討した結果、ビームラインに水標的を設置し、周りをガンマ線検出器で覆い、中性子が水と反応して発生するガンマ線を捉える手法に決定した。⑭ 代表者は RCNP の研究者に連絡を取り、実験実現性を探ったところ 2015 年 1 月に予備実験として E361 のパラサイト実験が認められ、初めての実験を遂行した。その結果、大きな雑音事象がないことから本実験も十分可能であることを示し、物理学会で報告した。⑮ 続いて 2015 年 6 月にも二度目のパラサイト実験 (E400) が認められた。ここでは中性子ビームの広がりや測定し、標的の大きさ、設置場所、検出器の種類を具体的に決定した。⑦, ⑧, ⑨, ⑩ 2 度の予備実験の結果を元に、RCNP の委員会に本実験を提案したところ、実験が正式に承認された。2016 年 3 月には RCNP でのビーム実験の前に、J-PARC におけるテスト実験 (T64) を遂行した。この実験は J-PARC のニュートリノ前置検出器施設に、本実験と同じ検出器を設置し、ニュートリノと物質との反応により発生する中性子やガンマ線事象の測定を目的とした。この実験により検出器のセットアップや電子回路、データ取得プログラムの開発を行い、RCNP での実験準備が完了した。

最終年度 (H28) の 2016 年 6 月には 80MeV の中性子ビームを用いて本実験を遂行した。(E465) 直径 20cm 高さ 25cm のアクリル容器に水を満たし、それを標的とした上で、周りにゲルマニウム検出器と液体シンチレータ検出器を設置し、発生するガンマ線の測定を行った。(下図) その結果 (1) Time of Flight 法を用いて、中性子と即発ガンマ線の区別が可能であること (2) 到達時間から中性子エネルギーを測定 (3) 中性子と酸素原子核反応により発生した 6.13MeV ガンマ線の検出に成功 (右図) (4) その断面積は 11mb で、理論予測値と良く一致していることなどを示し、様々な研究会で報告した。①~⑥ その結果をもとに、再度、より詳細な実験を提案したところ、E487 実験として承認され 2017 年 3 月に実験を遂行した。また 2017 年 2 月には中性子エネルギーが 392MeV の実験 (E493) でのパラサイト実験が認められ、データを取得した。これらのデータは現在解析中であり、近々、論文として報告する予定である。



実験のセットアップ



中性子の酸素原子核との反応により発生したガンマ線のエネルギー分布

E465 実験では液体シンチレータを用いた測定も同時に行ったが、その結果、前方散乱の中性子事象が雑音事象になることが確認された。そのため今後、実験精度をより高めるためには、中性子とガンマ線を区別でき、かつ、様々な脱励起ガンマ線エネルギーを測定できる分解能を持つ検出器の選定が必要であることがわかった。そこで東北大学 CYRIC での中性子ビームを用いた中性子・ガンマ線識別実験を遂行した。液体シンチレータは高い識別能力を持つが、十分な分解能を持たない。一方でゲルマニウム検出器は高い分解能を持つが、中性子との区別は困難で、かつ高価なため大きな立体角を覆うことが難しい。そこで候補として CsI (Tl) 検出器を中性子ビームに照射したところ、きれいに識別が可能であることを実証した。この結果も現在論文執筆中であり、近々投稿する予定である。

本研究の目的として「本実験に興味を持つ内外の研究者の組織化を行う」こともあった。申請時には代表者とその学生のみで始めた研究だったが、年々参加者が増えていき、最終的には京都大、神戸大、TRIUMF 研究所 (カナダ)、トロント大 (カナダ)、パドバ大 (イタリア) など総勢 13 名からなる国際的な研究グループとして、組織化にも成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Abe, Y. Koshio, et. al. (T2K collaboration), Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation γ rays, Physical Review D, 査読有, 90, 2014, 072012, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.072012>
- ② Y. Koshio (T2K collaboration), The observation of gamma rays via neutral current interaction at Super-Kamiokande using the T2K neutrino beam, PoS (NUFACT2014), 査読有, 2014, 063,

<https://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/contribution.cgi?id=226/063>

〔学会発表〕(計 27 件)

- ① 芦田洋輔, ニュートリノ中性カレント反応精密測定のための核子・酸素原子核反応に関する研究(実験と解析結果), 日本物理学会, H29. 3. 19, 大阪大学
- ② 永田寛貴, ニュートリノ中性カレント反応精密測定のための核子・酸素原子核反応に関する研究(シミュレーションと今後)日本物理学会, H29. 3. 19, 大阪大学
- ③ 芦田洋輔, Study on Nucleon-160 Reaction for the Precise Estimation of Neutrino's Neutral Current Interaction Cross Section, ニュートリノフロンティアの融合と進化, H28. 11. 28-30, ゆのくに天祥, 石川県加賀市
- ④ 永田寛貴, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応からのガンマ線測定, ニュートリノフロンティアの融合と進化, H28. 11. 28-30, ゆのくに天祥, 石川県加賀市
- ⑤ 芦田洋輔, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応から放出されるガンマ線測定(I), 日本物理学会, H28. 9. 22, 宮崎大学
- ⑥ 永田寛貴, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応から放出されるガンマ線測定(II), 日本物理学会, H28. 9. 22, 宮崎大学
- ⑦ 白髭哲也, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応によるガンマ線測定に向けた基礎研究 概要と予備実験の準備状況, 日本物理学会, H28. 3. 19, 東北学院大学
- ⑧ 永田寛貴, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応によるガンマ線測定に向けた基礎研究 検出器シミュレーション, 日本物理学会, H28. 3. 19, 東北学院大学
- ⑨ 芦田洋輔, ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応によるガンマ線測定に向けた基礎研究 検出器開発の現状, 日本物理学会, H28. 3. 19, 東北学院大学
- ⑩ K. Huang, Super-Kamiokande における T2K ニュートリノビームの NC 起因のガンマ線事象解析の改善, 日本物理学会, H. 27. 9. 25, 大阪市立大学
- ⑪ 永田寛貴, 中性子の酸素原子核との反応によるガンマ線測定に関する研究, 日本物理学会, H. 27. 9. 25, 大阪市立大学
- ⑫ 茅野翼, 水チェレンコフ検出器における超新星爆発ニュートリノ検出のシミュレーション, 日本物理学会, H27. 3. 21-24, 早稲田大学
- ⑬ 白髭哲也, 中性子の酸素原子核との反応によるガンマ線に関する研究, 日本

- ⑭ 物理学会, H27. 3. 21-24, 早稲田大学
- ⑮ K. Huang, Super-Kamiokande における T2K ニュートリノビームの中性カレント起因の低エネルギー事象解析, 日本物理学会, H26. 9. 18-21, 佐賀大学
- ⑯ 白髭哲也, 中性子の酸素原子核との反応によるガンマ線に関する研究, 日本物理学会, H26. 9. 18-21, 佐賀大学
- ⑰ 茅野翼, 水チェレンコフ検出器における超新星爆発ニュートリノ検出のシミュレーション-ニュートリノと酸素原子核との反応-, 日本物理学会, H26. 9. 18-21, 佐賀大学
- ⑱ Y. Koshio, The observation of gamma rays via neutral current interaction at Super-Kamiokande using the T2K neutrino beam, NuFACT2014, H. 26. 8. 25-30, Glasgow (UK)
- ⑲ K. Huang, The observation of gamma rays after neutral current interactions at Super-Kamiokande by using the T2K neutrino beam., Neutrino2014, H26. 6. 2-7, Boston (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小汐 由介 (Koshio, Yusuke)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 80292960

(2) 研究協力者

芦田 洋輔 (ASHIDA, Yosuke)
永田 寛貴 (NAGATA, Hiroataka)
白髭 哲也 (SHIRAHIGE, Tetsuya)
HUANG, Kunxian
茅野 翼 (KAYANO, Tsubasa)