

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340073

研究課題名(和文)ニュートリノ酸素実験のための陽子酸素反応でのガンマ線生成の研究

研究課題名(英文) Study of gamma-rays from proton-oxygen interaction for neutrino-oxygen reaction experiment

研究代表者

作田 誠 (SAKUDA, MAKOTO)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：40178596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、阪大核物理センターにおいて実験を実施し、酸素・炭素標的で各40時間、30時間のデータを取得した。標的共に励起エネルギー $Ex=2-30\text{MeV}$ において巨大共鳴を含む励起スペクトル(精度 100keV)が確認できた。さらに、炭素酸素巨大共鳴状態からの線も各2万、1万事象測定できた。解析により、巨大共鳴状態から核子崩壊後の娘核の励起状態から線を放出するという理論予想が定性的に正しいと結論された。この結果は、最終年度の日本物理学会や国際会議で発表した。現在、我々の目標である全データの較正と巨大共鳴状態からの線の分岐比の評価を行い、分岐比を Ex の 1MeV 毎に 10% の精度で決める予定である。

研究成果の概要(英文)：We collected data of $O, C(p,p')$ at RCNP and measured both the excitation energy ($Ex=5-30\text{MeV}$) and the energy of γ -rays (E_γ) in the the proton scattering angles of $0^\circ-3.5^\circ$, and for γ -ray above 2MeV . The purpose was to measure the branching ratios of γ -ray emission from excited states above 5MeV including giant resonances of ^{16}O and ^{12}C . We looked at the correlation between Ex and E_γ . We found that the observed γ -rays are consistent with the picture which was predicted originally by Langanke et al.(Phys.Rev.Lett.76,2629,1996). Namely, the giant resonances mainly decay by nucleon emission. Some of these decays go to excited states in daughter nuclei. These excited states will decay by γ emission. We observe γ -rays about $5-7\text{MeV}$ and almost no γ -rays above 10MeV for ^{16}O data. We expect to determine the γ -ray emission probability from the giant resonances ($Ex=16-27\text{MeV}$) with accuracy of 10% systematic error for each 1MeV step of Ex soon.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ酸素反応 酸素炭素巨大共鳴

1. 研究開始当初の背景

(1)申請代表者はスーパーカミオカンデ(以下 SK と略)実験の中で超新星ニュートリノの探索解析を行い(Ref.1)、超新星背景ニュートリノ発見のためのガドリニウム入り水チェレンコフ検出器の開発(基盤 S、東大宇宙線研中畑雅行代表)で分担していた(Ref.2)。その超新星背景ニュートリノ解析を進める内に、未だに測定されていないニュートリノ酸素反応での線生成断面積を岡大グループと RCNP のグループと共同で実験を行うこととなったのがこの研究である。

陽子酸素反応やニュートリノ酸素反応でのガンマ線生成は、(A) 散乱反応前方の低運動量移行領域($Q < 100 \text{ MeV}/c$)と(B) 角度が大きい運動量移行領域($Q > 200 \text{ MeV}/c$ (フェルミ運動量))では機構が異なる。まず(A)の超前方領域の低運動量移行領域では酸素原子核全体が 10-30MeV の巨大共鳴に励起される。その巨大共鳴状態は、多くの場合、中性子や陽子の分離エネルギーを超えるため陽子や中性子を出して崩壊する。一部は ^{15}N や ^{15}O の励起状態になり、それらがガンマ線を放出する。

(2)本研究は陽子酸素反応実験において 5-20MeV 領域のガンマ線生成について系統的かつ基礎的データを(A)の低運動量移行領域で世界初の実験データを収集すること、と(B)の大きい運動量移行領域($Q > 200 \text{ MeV}/c$ (フェルミ運動量))で、ニュートリノ酸素弾性反応でのガンマ線生成の世界初の理論計算を行うことであった。それにより、ニュートリノ物理への格段の展開を図った。

Ref.1) M.Ikeda, M.Nakahata, M.Sakuda et al., Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande, *Astrophys.J.* **669**, 519, 2007; 池田一得, 岡山大学修士論文, 2007年3月; 作田誠, 基盤研究 B(H18-20)報告書。

Ref.2) H. Watanabe, M.Nakahata, M.Sakuda, et al., First Study of Neutron Tagging with a Water Cherenkov Detector, *Astropart.Phys.* **31**, 320,

2009; M.Malek, M.Nakahata, M.Sakuda, et al., Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande, *Phys.Rev. Lett.* **90**, 061101, 2003.

2. 研究の目的

(1)本研究「ニュートリノ酸素実験のための陽子酸素反応でのガンマ線生成の研究」は、大阪大学核物理研究センター(RCNP)において、陽子酸素反応実験を行い、前方の陽子のエネルギーを高分解能($\Delta E = 20 \text{ keV}$)で測定できる Grand-Raiden 装置と新たに設置するガンマ線検出器群(E_γ)とで同時計測し、各励起エネルギー(Missing Energy ΔE)毎のガンマ線生成と分岐比を研究期間内に測定する。

(2)この測定実験を低運動量移行(超前方)領域での酸素の巨大共鳴励起状態領域で実施し解析する。ニュートリノ酸素反応でのガンマ線生成は、超新星爆発ニュートリノ検出において重要な信号となる反応であり、本研究が世界初の重要な情報を与える。

(3)それに加え、ニュートリノ酸素・炭素原子核反応の理論的研究を行う。

3. 研究の方法

(1)H23 年度からの本研究では、岡大グループが RCNP グループと協力して線検出器計 30 本の読出し回路を整備、性能確認しながら検出器を製作する。また岡大グループは標的槽や支持架台を岡大工作センターで製作する。

(2)H24 年度に前方散乱実験、H25 年度に準弾性反応領域の実験を行い、以後は解析である。平行して、岡大・阪大グループは、ハドロノ酸素反応実験データからニュートリノ酸素反応の応用を研究する。

4. 研究成果

(1)我々は、最終年度に阪大核物理センターの陽子ビーム実験を実施し、酸素・炭素標的で各 40 時間、30 時間のデータを取得した。実験装置はグランドライデン測定装置に

我々の NaI 線検出器を用いて行われ、酸素炭素標的共に励起エネルギー $E_x = 2 - 30 \text{ MeV}$ において巨大共鳴を含む励起スペクトル(精度 100 keV)が確認できた。それらの分布は、過去のデータとも合っている。

(2) さらに、目的の巨大共鳴状態からの線も測定できた。測定された線は、巨大共鳴状態から核子崩壊後の娘核の励起状態に移り、その励起状態から線を放出するという理論予想と定性的に正しいとあると結論された。

(3) これらの予備結果は、最終年度の日本物理学会や国際会議で発表した。

(4) 展望：現在、我々の目標である全データの較正と巨大共鳴状態からの線の分岐比の評価を行っている。世界初の線分岐比が系統誤差 10% より良く決定できそうである。統計精度は数%である。

東北大震災が研究期間中に起こった結果、施設の耐震補強工事が入り、1年間実験が遅れたのは残念だったが、最終年度に順調にデータが取得できた。1年遅れではあるが、今年度に論文出版まで出来るように努力する。

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8件)

H26

1) A. Ankowski, O. Benhar and M. Sakuda, "Improving the accuracy of neutrino energy reconstruction in charged-current quasielastic scattering off nuclear targets", Physical Review D誌、査読有、D91(033005), 2015, pp1-11, DOI:10.1103/PhysRevD.91.033005

2) I. Ou, Y. Yamada, T. Mori, T. Yano, M. Sakuda, A. Tamii, T. Suzuki, M. Yosoi, N. Aoi, E. Ideguchi, T. Hashimoto, K. Miki, T. Ito, C. Iwamoto, T. Yamamoto, and H. Akimune, RCNP E398 160, $^{12}\text{C}(p, p')$ experiment: Measurement of the γ -ray emission probability, from giant resonances in relation to $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}(\gamma, \gamma')$ reactions, AIP Conference Proceedings 1663 ,

1200012-1-4 (2015); 査読有、doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4919518>
H25

3) A. Ankowski, O. Benhar, T. Mori, R. Yamaguchi, M. Sakuda, Gamma-ray production in neutral-current neutrino-oxygen interactions at energies above 200 MeV, Journal of Physics: Conference Series, 012055-1-5, 2013, 査読有.

H24

4) C. Iwamoto, A. Tamii, M. Sakuda et al., Separation of Pygmy Dipole and M-1 Resonances in Zr-90 by a High-Resolution Inelastic Proton Scattering Near 0-degrees, Phys.Rev.Lett.108, 262501-1-4, 2012. 査読有.

5) A. Ankowski, O. Benhar, T. Mori, R. Yamaguchi and M. Sakuda, Analysis of gamma-ray production in neutral-current neutrino-oxygen quasi-elastic interactions above 250 MeV, Phys.Rev.Lett. 108,052505-1-4, 2012 , 査読有.

6) T. Yano, I. Ou, T. Izumi, R. Yamaguchi, T. Mori and M. Sakuda, Proposed experiment to measure gamma-rays from the thermal neutron capture of gadolinium, AIP Conf.Proc.1484,442-444, 2012. 査読有.

7) T. Mori, T. Izumi, I. Ou, T. Yano, M. Sakuda, A. Tamii, T. Suzuki and M. Yosoi, Development of gamma-ray detector for $O(p, p'\gamma)$ experiment, AIP Conf.Proc. 1484,451-453, 2012. 査読有.

H23

8) T. Mori, R. Yamaguchi, M. Sakuda, A. Ankowski, O. Benhar, The γ -ray production in neutral-current neutrino oxygen interaction in the energy range above 100 MeV., AIP Conf.Proc.1405:121-126, 2011. 査読有

[学会発表](計17件)

H26

1) M. Sakuda, Charged current and Neutral current neutrino-nucleus interaction, NNR14 Workshop, RCNP, Osaka University, 2014/11/5~11/6,

2) M. Sakuda, Charged current and Neutral current neutrino-nucleus interaction from 100MeV to 1 GeV, Elba2014 Workshop, Elba Island, 2014/6/23-28, 2014

3) I. OU, Y. Yamada, T. Yano, T. Mori, T. Kayano, M. Sakuda, A. Kimura, and H. Harada, "Measurement of the Multiplicity and Energy Spectrum of γ -rays from the

Thermal Neutron Capture Reaction $Gd(n, \gamma)$ ”, Neutrino2014 国際会議, 2014/6/2~6/7, US Boston.

4) I.Ou, M. Sakuda, Y. Yamada, T. Shirahige, D. Fukuda, Y. Koshio, T. Yano, T. Mori, A. Tamii, T. Suzuki 他 “Measurement of γ -rays from giant resonances of ^{12}C and ^{16}O ”, 日米合同物理学会 Hawaii2014, 2014/10/7~10/14, US Hawaii

5) 王岩 “Measurement of γ -rays from giant resonances of ^{12}C and ^{16}O ” NNR14 workshop, 2014/11/5~11/6, RCNP, Osaka University

6) 王岩、酸素炭素原子核巨大共鳴からの線測定と中性カレントニュートリノ反応検出、新学術「地下素核研究」第一回超新星ニュートリノ研究会、東京理科大学、2015年3月16~17日

7) 王岩、作田誠、民井淳、鈴木智和他、酸素炭素原子核巨大共鳴状態から放出される線の測定：E398 データ解析、日本物理学会、2015年3月24日、早稲田大キャンパス

8) A. Tamii, Giant Resonances and Their Gamma Emissivity, International Workshop on Neutrino Physics and Astrophysics (□IST2015 招待講演), Findikli Campus of Mimar Sinan Fine Arts University, Istanbul H25

9) 王岩 “The Measurement of gamma-rays branching ratio from giant resonances of ^{12}C and ^{16}O (E398) and possible extension at GRFBL GR 前方モードビームラインによる物理の展開、2013/11/28~11/28, RCNP, 大阪大学核物理センター

10) 作田誠, Gamma production in NC neutrino-oxygen and RCNP-E398 experiment to measure gamma-ray branching ratio from giant oxygen and carbon 第8回「レプトン原子核反応モデルの構築に向けて」検討会、2014/2/9~2/9, KEK 理論センター・J-PARC 分室

11) 作田誠, NC Neutrino O/C interaction in 10-100MeV region, CC and NC Neutrino-Nucleus interactions and Supernova neutrinos 2014/3/24~3/24, 岡山大学国際交流会館

12) 王岩 “The Measurement of gamma-rays branching ratio from giant resonances of ^{12}C / ^{16}O (E398) and possible extension at GRFBL CC and NC Neutrino-Nucleus interactions and Supernova neutrinos、2014/3/24~3/24, 岡山大学国際交流会館 H24

13) 王岩、矢野孝臣、作田誠、民井淳、鈴木智和他、酸素・炭素原子核の巨大共鳴状態からの放射線測定実験の設計、日本物理学会 2012年9月11 - 14日(京都産業大学)

14) 王岩、作田誠、民井淳、鈴木智和他、酸素・炭素原子核の巨大共鳴状態からの放射線測定実験、日本物理学会 2013年3月26 - 29日 (広島大学)

15) Makoto Sakuda, Neutrino-nucleus interactions relevant to atmospheric neutrinos & neutrino oscillation experiments, Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM12), 2012年6月11 - 15日 (奈良東大寺総合文化センター) H23

16) 泉卓宏、森俊彰、山口竜太、作田誠、民井淳、鈴木智和、與曾井優、RCNPでの $^{16}O(p,p')$ 実験で使用するガンマ線検出器の性能評価、日本物理学会2011年秋季大会、弘前大学(弘前市)、9月16~19日

17) M. Sakuda, Proposed experiment to measure gamma-rays from $O(p,p')O^*$ in relation to $O(\nu,\nu')$. RIBF and CNS Symposium on Frontier of gamma-ray spectroscopy (Gamma 11), June 30-July 2 理化学研究所(和光)

[図書](計2件)

1) S.K. Singh, Jorge G. Morfin, Makoto Sakuda, K.D. Purohit, NuInt11: The 7th International Workshop on Neutrino-nucleus interactions in the few GeV region (NUINT11): Dehradun, India, March 7-11, 2011, 2011. 383 pp., AIP Conf. Proc. 1405 (2011) pp.1-383 DOI: 10.1063/1.3661548

2) Hélio da Motta, Jorge G. Morfin and Makoto Sakuda, AIP Conference Proceedings 1663 (2015), NuInt12: The 8th International Workshop on Neutrino-nucleus interactions in the few GeV region, Rio de Janeiro, Brasil, 22-27 October 2012, Page 1-296; ISBN: 978-0-7354-130

[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
<http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~sakuda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

作田 誠 (SAKUDA MAKOTO)
岡山大学・自然科学研究科・教授
研究者番号：40178596

(2) 研究分担者

民井 淳 (TAMII ATSUSHI)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号：20302804

鈴木 智和 (SUZUKI TOMOKAZU)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号：80506395

(3) 連携研究者

中畑雅行 (NAKAHATA MASAYUKI)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：70192672

佐藤透 (TORU SATO)

大阪大学・理学研究科・准教授
研究者番号：10135650

與曾井優 (YOSOI MASARU)
大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：80183996