

平成21年 4月15日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340066
 研究課題名 (和文) MeV から GeV 領域のニュートリノ原子核反応の研究
 研究課題名 (英文) Development of Neutrino-Nucleus Interactions From MeV to GeV Energy Region.
 研究代表者
 作田 誠 (SAKUDA MAKOTO)
 岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
 研究者番号：40178596

研究成果の概要：

電子とニュートリノ原子核反応の中で一番重要な準弾性反応と・生成反応を同時に記述するモデルを、詳細なデータがある電子核子・原子核反応を駆使して、作成、提案した。また、SK 実験では系統的な超新星ニュートリノ探索解析を行い、SN1987A 以来の SK 実験期間の超新星探索の論文を出版した。超新星背景ニュートリノの発見のためには、信号以外のバックグラウンドのニュートリノ反応を無くする中性子同時検出開発が重要と判断し、水にガドリニウム化合物を加える設計・開発を開始した。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2006年度 | 6,400,000 | 1,920,000 | 8,320,000 |
| 2007年度 | 5,200,000 | 1,560,000 | 6,760,000 |
| 2008年度 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,800,000 | 4,440,000 | 19,240,000 |

研究分野：数物系科学、素粒子・原子核

科研費の分科・細目：物理学、4301素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：(F)素粒子実験、(B)原子核理論、(G)原子核実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 1998年のスーパーカミオカンデ実験によるニュートリノ質量と混合の発見以来、2004年には1-2世代間、2-3世代間のニュートリノ振動は決定された。現在はJPARCを初め、1-3世代のニュートリノ振動の精密実験が始まろうとしている。これらの実験には数%の精度でのGeV領域のニュートリノ原子核反応の知識が必須である。

(2) 宇宙物理、特に超新星ニュートリノの物理の関心が世界的に高まり、数10MeV-100MeV領域でのニュートリノ反応も盛んに研究されてきた。

この研究の代表者、分担者はこのような研究背景の下に、関連する素粒子実験、宇宙線実験、原子核実験を推進してきた実績を基に

この研究を開始した。

2. 研究の目的

この研究の目的は、超新星ニュートリノ反応や精密ニュートリノ振動実験に関わる100MeVからGeV領域でのニュートリノ原子核反応の精密化である。たとえばスーパーカミオカンデ実験の低エネルギー事象(超新星ニュートリノ等)の解析では、100-500MeVの大気ニュートリノ事象がバックグラウンドとなり、このエネルギー領域の反応の知識は両方の解析に取って重要である。

3. 研究の方法

目的を達成するため、以下の方法を用いる。(1) MeV-GeV領域のニュートリノ原子核反応(準弾性散乱、共鳴生成)を電子-原子核反応と合わせて定量的に開発し、その精密な計算を超新星ニュートリノ反応や大気ニュー

トリノ反応の解析に活用する。具体的には、ニュートリノ原子核反応の主な2つは準弾性反応、 ν (パイ中間子)生成反応である。それを決定するには2反応のベクトル型と軸型核子形状因子の両方と共にその原子核効果を決める必要がある。ニュートリノ反応実験より、電子反応実験の方がベクトル型核子形状因子と原子核効果については格段に精度良く決定できる。この研究は電子散乱実験データを駆使して、精度の良いニュートリノ原子核反応のモデルを構築することである。

(2) SK 実験での超新星ニュートリノ等の低エネルギー事象 (10–100MeV) の物理解析を改良するための検出器開発を行う。最終年度は、超新星ニュートリノの検出感度向上のため、今まで達成できていない中性子検出のための開発 (予備実験、検出器シミュレーション) を精力的に行なった。

4. 研究成果

(1) 2006 年度 : 分担者中畑と協力し SK 実験で系統的な超新星ニュートリノ探索解析を行い、SN1987A 以来の SK 実験期間の超新星探索論文を出版した。

また、この年に購入した窒素レーザは、2006 年 SK3 実験や 2008 年 SK4 実験の開始時に必須の PMT の応答時間補正や荷電応答の線形性の補正に使われた。2008 年には超新星ニュートリノバーストや T2K 実験のため、データ収集の新エレクトロニクス回路が導入されたが、その荷電応答の線形性の補正にも使われた。これは実験を始めるに際して、基本的な役割を果たした。

(2) 2007 年 : 準弾性反応と ν 生成反応を同時に記述するモデルを提案し、Physical Review C 誌に出版した。同時に 2 つの国際会議に発表しプロシーディングとして出版した。また、超新星背景ニュートリノ解析では、100–200MeV 領域のミュー型大気ニュートリノの原子核反応による事象がバックグラウンドとして混入するため、100–200MeV 領域のニュートリノ原子核反応の改良を現存する電子原子核反応データで較正することにより行っている。

(3) 2008 年 : 超新星背景ニュートリノの発見のために、信号以外のバックグラウンドのニュートリノ反応を無くする中性子同時検出開発が重要と判断し、水にガドリニウム化合物を加える設計を開始した。この研究は SK の研究責任者中畑と協力して行っている。超新星背景ニュートリノとは、宇宙の始まりから平均 1 秒に一回起こっている超新星爆発の際に生成され、宇宙に漂っているニュートリノである。この超新星背景ニュートリノが世界最大のスーパーカミオカンデ装置でも反応

する割合は、年間 1–5 個である。それを発見するには、現在の水中にガドリニウムを溶かし、反ニュートリノ反応で検出器に生成される陽電子だけでなく中性子をガドリニウムと反応させ、同時計測をする事によってバックグラウンドを減らすことが必要と判断した。本年度の研究では、小型実証機 (純水 + ガドリニウム) の設計のための詳細な計算機シミュレーションを行った。その結果は Geant4 国際会議や日本物理学会で発表した。開発は論文 1 に出版されている。

(4) 分担者酒見は、 $(3\text{He}, t)$ 反応による高分解能 0 度測定を阪大・核物理研究センターの 450MeV 3He ビームを用いて行い、 ^{138}La と ^{180}Ta のガモフテラー共鳴の強度分布を測定した。この結果を用いて、超新星爆発で大量に発生するニュートリノによる反応 $^{138}\text{Ba}(\nu, e)^{138}\text{La}$ で ^{138}La が生成される寄与の評価を行った。この解析では、ニュートリノ元素合成のモデルでほぼ理解できることがわかった。 ^{180}Ta に関しても、同様の結果が得られたが、その生成確率は、まだ測定されていない長寿命のアイソマー準位への分岐比に依存することを示した。

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 10 件)

1. First study of neutron tagging with a water Cherenkov detector, H. Watanabe et al. (SK 実験), M. Nakahata (130 人中 12 番目), M. Sakuda (130 人中 106 番目), *Astropart. Phys.* 31, 320–328, 2009. [査読あり]
2. Pion production and quasielastic interactions in electron- and neutrino-nucleus scattering. H. Nakamura, T. Nasu, M. Sakuda and Omar Benhar, *AIP Conf. Proc.* Vol. 981, 234–236, 2008. [査読あり]
3. Measurement of single charged pion production in the charged-current interactions of neutrinos in a 1.3 GeV wide band beam, A. Rodriguez, et al. (K2K Collab.) M. Sakuda (作田誠 155 人中 115 番目), *Physical Review, D* 78, 032003, 2008 [12pages] [査読あり]
4. “固有振動と断熱遷移についての教育” 日本物理学会, 大学の物理教育誌, 作田誠, 西山由弘, 園田英徳, Vol. 14. No. 1, 36–41, 2008. [査読あり]
5. “ニュートリノと標準理論—最近の実験を中心に—”, 「素粒子物理学の発展—未解決問題への多彩なアプローチ—」, 作田誠, 数理科学 2007 年 10 月別

- 冊号, p122-130, 小林誠氏総編集. [査読あり]
6. Inclusive electron spectrum in the region of pion production in electron-nucleus scattering and the effect of the quasi-elastic interaction, H. Nakamura, M. Sakuda, T. Nasu, and O. Benhar, Phys. Rev. C76, 065208, 2007. [4pages] [査読あり]
 7. Measurement of the quasielastic axial vector mass in neutrino interactions on oxygen, Phys. Rev. D74, 052002-1-15, 2006, R. Gran et al. (K2K Collab.) M. Sakuda (作田誠161人118中番目) [査読あり]
 8. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment. Phys. Rev. D74, 072003-1-39, 2006, M. H. Ahn et al. (K2K Collab.) M. Sakuda (作田誠220人157中番目) [査読あり]
 9. Lepton-nucleus scattering in the impulse approximation regime, O. Benhar, N. Farina, H. Nakamura, M. Sakuda, R. Seki, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 155:254-256, 2006. [査読あり]
 10. Gamow-Teller Strength in the Exotic Odd-Odd Nuclei La-138 and Ta-180 and Its Relevance for Neutrino Nucleosynthesis. A. Byelikov et al., Y. Sakemi (25人中17番目) 査読付 Phys. Rev. Lett. 98:082501, 2007(4pages)
- [学会発表] (計 7件)
1. Makoto Sakuda (Invited), Measurement of Neutrino Interactions in K2K Experiment, International Workshop on Electron Scattering (Elba X), June 23-27, 2008, Elba, Italy
 2. Makoto Sakuda (Invited), Measurement of Neutrino Interactions in K2K Experiment, ローマ大学物理部コロキウム, June 20, 2008, Roma, Italy.
 3. Makoto Sakuda (Invited), Measurement of Neutrino Interactions in K2K Experiment, Dortmund大学物理部セミナー, July 1, 2008, Dortmund, Germany.
 4. 作田 誠 (Invited) ニュートリノ振動の精密測定のためのニュートリノ原子核反応の研究、東京大学宇宙線研究所共同利用研究 発表会、2008年12月19-20日、東大柏キャンパス
 5. M. Nakahata (Invited talk), Supernova

- detection, 23rd International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2008), Christchurch, New Zealand, 26-31 May 2008, Published in J. Phys. Conf. Ser. 136:022042, 2008.
6. Atsuko Kibayashi (非常勤研究員), H. Ishino, Y. Koshio, M. Nakahata, H. Sekiya, M. Smy, M. Vagins Simulation for Gadolinium dissolved Water Cerenkov Detector 13th Geant4 Collaboration Workshop, October 6-11, 2008, Kobe, Japan
 7. Proton induced coherent pion production. K. Fujita, Y. Sakemi, et al. (13人中2番目) 査読付, 17th International Spin Physics Symposium (SPIN06), Kyoto, Japan, 2-7 Oct2006. Published in *AIP Conf. Proc. 915:803-806, 2007*. Also in Kyoto 2006, Spin physics, 803-806

[図書] (計 0件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

なし

○取得状況 (計 0件)

なし

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

作田 誠 (SAKUDA MAKOTO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40178596

(2) 研究分担者

中畑 雅行 (NAKAHATA MASAYUKI)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：70192672

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東北大学・サイクロトロンラジアイソトープセンター・教授

研究者番号：90251602

(3) 連携研究者

海外研究協力者：

Omar Benhar, ローマ大学物理学教授