

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月25日現在

機関番号：15301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26104006

研究課題名(和文)超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究

研究課題名(英文) Research on history of star formation through observations of supernova relic neutrinos

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) 128,500,000円

研究成果の概要(和文)：1987年カミオカンデにより超新星爆発のニュートリノが世界で初めて発見されたが、それ以後発見されない。本研究目標は、過去に起こった超新星爆発ニュートリノの発見のために、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウム(Gd)添加し、ニュートリノ反応で生成される中性子の遅延同時計測を可能にするSK-Gd計画を期間内に開始させることであった。本研究の成果として、Gd原料そのものと、SKに0.2%添加した際の水循環装置内でのU、Th、Rn、Ra等の放射線不純物除去を達成し、SK-Gd実験は開始できた。さらに実験に必要な超新星爆発ニュートリノ検出の実験・理論的な基礎的開発も進展し、目標は達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

領領域内の連携により原料Gd化合物中の放射性不純物除去開発と水循環装置での陽イオン交換樹脂の開発を行い、低放射線バックグラウンドかつ高い水透過率(水15mに対するチェレンコフ光の透過率77%)が実現できた。従って、本研究の第1目標であった世界最先端のSK-Gd実験(超新星背景ニュートリノSRN観測)開始条件を達成できた。SRNだけでなく太陽ニュートリノも低閾値で継続観測できる。実験開始に伴うSRNモデルの理論的精密化もWeb公開され、Gd熱中性子捕獲線生成モデルの精密化もWeb公開された。本研究は、当初目標を完全に達成し、今後、SK-Gd実験開始により世界初のSRN観測が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The SK-Gd project is a new experiment in which 0.2% gadolinium sulfate octahydrate will be loaded into the water Cherenkov detector of SK. The main goal of SK-Gd is to discover supernova relic neutrinos. When the material of gadolinium sulfate octahydrate is manufactured commercially at a company, it contains radioactive impurities (U, Th, Rn). After developing how to measure those impurities in the material and also in a test at a 200-ton Gd-loaded water Cherenkov detector, we have found that the level of radioactive impurities in the material after reducing those impurities at the production stage is less than our goal (0.3mBq/(Gd sulfate)kg) and the water transparency is better than 77% (at 15m of water). The results have fulfilled our initial goal and convinced the SK collaborators to start the SK-Gd project. In addition, the theoretical development of supernova relic neutrinos and the development of gamma-ray decay model of the thermal neutron capture were successfully performed.

研究分野：素粒子原子核物理学実験

キーワード：超新星背景ニュートリノ 超新星爆発ニュートリノ 極低放射線環境 ガドリニウム熱中性子捕獲線

1. 研究開始当初の背景

1987年カミオカンデIIにより超新星爆発のニュートリノが世界で初めて発見されたが、それ以後発見されてない。本研究目標は、過去に起こった超新星爆発ニュートリノ(超新星背景ニュートリノ、SRNと略)の発見のために、スーパーカミオカンデ検出器(SK)にガドリニウム(Gd)添加し、ニュートリノ反応で生成される中性子の遅延同時計測を可能にするSK-Gd計画を期間内に開始させることであった。現在でもSKはSRNには世界一の感度を持っており、世界の他実験に1桁以上の感度の差をつけているが、今のSKのままではバックグラウンドのため信号に達することはできない。このSK-Gd実験開始により、低閾値でのニュートリノ観測が可能になり、SKは世界初のSRN発見に向け、先陣を切ることができる。また、SRN発見に至った時には、星形成の歴史解明研究が開始できる。

2. 研究の目的

本研究ではSKにGdを導入し実験開始にできるために必要な低放射能技術開発を第一目標とする。一方、SRN観測実験が開始する時までに、SRNに関する理論的開発により超新星爆発モデルや星形成史モデルを精密化し、かつ実験的にも超新星ニュートリノ事象検出を精密化することを目標とする。

3. 研究の方法

計画研究C01では以下の3項目を行う。

第一目標として、計画研究「極低放射能技術」D01班との連携により、原料のガドリニウム(Gd)化合物からウランU、トリウムTh、その娘核種ラジウムRaをそれぞれ5、0.05、0.5mBq/原料kg以下まで取り除く開発研究を行う。そのために、Gd化合物溶液用ラドン検出器を製作する。さらにそこで開発したシステムを用いて、放射性不純物除去樹脂の不純物除去能力の測定を行い、200トン検出器を用いて実験の要求である目標値が達成できているか、水透過率が観測できる基準を満たすかを確認する。

SK-Gd計画では天然Gdの熱中性子捕獲ガンマ線を利用するが、本期間中に天然Gd、濃縮Gd155、157の熱中性子捕獲反応のガンマ線エネルギーの分布をJPARC熱中性子ビームと精密Ge検出器を用い高統計で測定し、ガンマ線生成モデルを精密化する。超新星ニュートリノの中性カレント反応による検出法を実験的に開発する。

理論的な研究としては、重元素量の進化に伴う星形成率や初期質量関数などの変化を考慮した超新星背景ニュートリノのスペクトル計算を行う。本研究の成果は、宇宙の初期から現在に至るまでのSRNの低閾値での観測が可能になり、星形成の歴史解明の観測が開始できる。また、この理論研究開発により、SRN観測データが実験で得られた際に、星形成史モデルの妥当性を詳しく議論できるようになる。成果公開・発信、領域Web公開、高校生・一般へのアウトリーチ活動にも努める。

4. 研究成果

目標に対する成果は以下の通りである。

主実験開発：SK実験へのGd導入計画(SK-Gd)に向け、超高純度硫酸Gdの開発・製造は最重要課題であった。まずICPMS測定とGe測定による高感度評価方法を確立した。そして大量生産した硫酸ガドリニウム原料のサンプルの不純物は、U 0.02mBq/kg、Th 0.02mBq/kg、Ra <0.33mBq/kgと測定され、目標値を大きく上回る純度を実現した。原料中の不純物Ra、Rnの測定は、Ra吸着樹脂でRa濃縮しGe検出器で測定することに成功し、結果を論文出版した。さらに200トン装置を使い、原料を純水に導入し、陽イオン交換樹脂を循環系に導入して試験を行った。そして水の透過率の向上を確認し、本番のSK-Gd検出器の純化装置へ導入することを決定した。また、Gd水溶液中のRn/Ra測定では、mBq/(溶液m³)精度の測定に成功した。これは、SK-GdにおけるRnバックグラウンドを常にモニターするために基礎となる成果で、低バックグラウンドでの宇宙ニュートリノ観測を継続するために極めて重要な結果である。本研究での超高純度硫酸Gd開発の成功を受け、令和元年中には10トンクラスの硫酸Gdの製造を行い、SK検出器に導入しSRN発見のための観測を開始予定である。

Gdを用いるニュートリノ検出の精密化：SK-Gd計画ではGdの熱中性子捕獲ガンマ線を利用する。我々は天然Gd、濃縮Gd155、157の熱中性子捕獲反応のガンマ線エネルギーの分布をJPARC熱中性子ビームと精密Ge検出器を用い高統計で測定した。その測定と我々の

開発した Gd ガンマ線生成モデル(ANNRI-Gd モデル)を論文出版した。この ANNRI-Gd モデルは SK-Gd 実験のみならず、Gd を使った世界のニュートリノ検出器や暗黒物質実験で使われるようになった。

超新星背景ニュートリノモデルの理論的精密化：超新星背景ニュートリノ (SRN)に関する理論研究として、銀河の金属量進化などを考慮した SRN のエネルギースペクトルの研究を行った。特にブラックホール形成に起因する成分も含め、SRN に対する金属量進化、星形成率密度、衝撃波復活時間、状態方程式の影響を調べた結果、星形成率密度の影響は低エネルギー成分に現れ、衝撃波復活時間と状態方程式の影響は高エネルギー成分に現れることがわかった。SK-Gd 実験観測では 10-18MeV 領域で 4-9 事象/10 年が期待される。SRN の予想スペクトルはデータベースとして出版・公開した。また実験的に求められている核力ポテンシャルを使った状態方程式数値テーブルが完成し、出版・公開した。さらに核密度以下で多核種が混在する核統計平衡を考慮した状態方程式の改良も行った。そして様々な状態方程式を用いて系統的に原始中性子星の冷却段階の数値計算を行い、対称エネルギーの密度依存性などの違いがニュートリノ放出に及ぼす影響を詳しく解析した。

理論・実験班の共同研究として、最新の殻模型に基づいて超新星ニュートリノの酸素荷電カレント反応によるエネルギー分布と事象数評価を行い出版した。また、実験データに基づいた超新星ニュートリノの酸素炭素中性カレント反応のガンマ線事象の評価も行われている。

学術的なインパクトと今後の展望：領域内の連携により、原料 Gd 化合物中の放射性不純物除去開発と水循環装置での陽イオン交換樹脂の開発を行い、低放射線バックグラウンドかつ高い水透過率(水 15m に対するチェレンコフ光の透過率 77%)が実現できた。これにより、超新星背景ニュートリノ (SRN)だけでなく、太陽ニュートリノも低閾値で継続観測できる。また、SRN モデルの理論的精密化も論文出版・Web 公開され、Gd 熱中性子捕獲線モデルの精密化の論文出版・Web 公開された。以上の成果により、SK-Gd 実験実施のための条件を全て達成したと同時に、SK-Gd の観測データの解析準備も整えることができた。今後、SK-Gd 実験開始により世界初の SRN 観測が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 31 件、全て査読有。Corresponding Author の左に*を付けた)

- (1) *Ken'ichiro Nakazato and Hideyuki Suzuki, Cooling timescale for protoneutron stars and properties of nuclear matter: Effective mass and symmetry energy at high densities, 2019 年 4 月 The Astrophysical Journal に出版受理, arXiv:1905.00014, pp.1-11.
- (2) K.Hagiwara, *Makoto Sakuda(14 番目),*Ajmi Ali(22 番目),他総著者 23 名(ANNRI-Gd Collab.), Gamma-ray spectrum from thermal neutron capture on gadolinium-157, Prog.Theor.Exp.Phys.2019, 023D01,pp.1-26. DOI: 10.1093/ptep/ptz002
- (3) *Ken'ichiro Nakazato, Toshio Suzuki and Makoto Sakuda, Charged-current scattering off the ^{16}O nucleus as a detection channel for supernova neutrinos, Prog.Theor.Exp.Phys.2018,123E02,pp.1-14, DOI: 10.1093/ptep/pty134.
- (4) ▲*S.Ito, K.Ichimura,Y.Takaku, K. Abe, M.Ikeda, Y.Kishimoto, Development of the measurement of radium using a germanium detector with molecular recognition resin, Prog.Theor.Exp.Phys.2018,091H01, pp.1-6, DOI:10.1093/ptep/pty096
- (5) *Ken'ichiro Nakazato, Hideyuki Suzuki and Hajime Togashi, Heavy nuclei as thermal insulation for protoneutron stars, Phys.Rev.C97 (2018) 035804,pp1-5. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.97.035804>
- (6) *Ajmi Ali, Makoto Sakuda (15 番目), 他総著者 23 名(ANNRI-Gd Collab.), Analysis of Gd(n,gamma) reaction with 155, 157 and natural Gd targets taken with JPARC-ANNRI and development of Gd(n,gamma) decay model for Gd-doped neutron/neutrino detectors, PoS (ICHEP 2018)120, pp.1-4. <https://pos.sissa.it/340/>
- (7) *P.K.Das, K.Hagiwara, T.Tanaka Y.Yamada, I.Ou, M.S.Reen, T.Yano, T.Mori, T.Kayano, R.Dhir, Y.Koshio, M.Sakuda, A.Kimura, N.Iwamoto, S.Nakamura and H.Harada, Measurement of the relative intensities of the discrete rays from

the thermal neutron capture reaction $^{155,157}\text{Gd}(n, \gamma)$ using ANNRI detector (JPARC), PoS (KMI 2017) 045, pp.1-4. <https://pos.sissa.it/294/>

- (8) *K.Hagiwara, T.Tanaka, P.K.Das, T.Yano, Y.Yamada, I.Ou, T.Mori, T.Kayano, M.S.Reen, R.Dhir, Y.Koshio, M.Sakuda, A.Kimura, S.Nakamura, N.Iwamoto and H.Harada, Comparison of γ production data from thermal neutron capture on gadolinium with the Monte Carlo simulation, PoS (KMI2017)035, pp.1-6. <https://pos.sissa.it/294/>
- (9) ▲*S. Ito, Y.Takaku, M.Ikeda, Y. Kishimoto, Determination of trace levels of uranium and thorium in high purity gadolinium sulfate using the ICP-MS with solid-phase chromatographic extraction resin, Prog.Theor.Exp.Phys.2017,113H01,pp.1-11. DOI:10.1093/ptep/ptx145

*【学会発表】(国際学会 56 件、国内学会 80 件、計 136 件)

*【国際学会発表】以下含め全 56 件

- (1) H. Suzuki, Supernova Overview, International symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, March 7-9, Tohoku Univ.,2019.国際学会、招待。
- (2) M. Sakuda, Study of $\text{Gd}(n,\gamma)$ reaction and gamma rays from giant resonances of ^{120}C and ^{160}O , International symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, March 7-9, Tohoku Univ.,2019.国際学会、招待。
- (3) M. Nakahata, NNN2018 Summary, 19th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN18), 1-3 Nov 2018, Vancouver. 国際学会、招待。
- (4) Ken'ichiro Nakazato, Astrophysical implications of the nuclear symmetry energy, 8th international symposium on nuclear symmetry energy (NuSYM18)、2018.国際学会、招待。
- (5)M. Sakuda, A Close Link Between Electron-Nucleus and Neutrino-Nucleus Scattering, Mini-Symposium: Intersections of Neutrino and Charged Lepton Scattering in 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 23-27, 2018, Hawaii. 国際学会、基調講演。
- (6) H. Suzuki, K. Nakazato and H. Togashi, Protoneutron star cooling and heavy nuclei as thermal insulation, International symposium: Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures, 2018, Oct. 8-10, Toyama. 国際学会、一般講演。
- (7) Ajmi Ali, Analysis of $\text{Gd}(n,\gamma)$ reaction with 155 , 157 and natural Gd targets taken with JPARC-ANNRI and development of $\text{Gd}(n,\gamma)$ decay model for Gd-doped neutron/neutrino detectors, The 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018), Seoul, Korea, 4th -11th July, 2018. 国際学会、一般講演。
- (8) M. Ikeda, Solar neutrino measurement at Super-Kamokande, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics(Neutrino2018), 4-9 June, Hamburg, 2018. 国際学会、招待。

*【国内学会発表】以下含め全 80 件

- (1)中里健一郎、背景ニュートリノとブラックホール、第 32 回 ニュートリノ研究会、柏、2019 年 3 月。招待。
- (2)池田一得、SK-Gd 計画、2017 年度 CRC 将来計画タウンミーティング、東大宇宙線研究所、2017 年 6 月 24 日。
- (3)鈴木英之、超新星理論開発、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究・2017 年領域研究会、岡山大学、2017 年 5 月 21-23 日。
- (4)作田誠、炭素・酸素の巨大共鳴からの γ 線生成データ(RCNP-E398)と光学模型を使った崩壊計算、京都大学基礎物理学研究所研究会「核力に基づく核構造・核反応物理の展開」、2017 年 3 月 28 日、一般講演。

【図書】(なし)【産業財産権】 出願状況 取得状況(なし)

***その他〔若手育成・国際スクール開催〕**以下含め 16 件。

(1) 第 5 回 超新星ニュートリノ研究会 2019 年 1 月 7-8 日(月-火), 国立天文台 (三鷹) 講義室、計画研究 C01, C02 班主催

<http://www.lowbg.org/ugnd/workshop/groupC/sn20190107/>

(2) 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」第三回新学術領域研究会 2017 年 5 月 21-23 日, 岡山大学主催、一般公開講演、岡大金光ホール (約 80 名)

1) 「Studying the Cosmos from Underground」村山斉氏

2) 「From Einstein to Gravitational Waves and Beyond」

Barry Barish 氏 (カルテック、2011 年米国物理学学会会長)

(3) Louis Lyons (Oxford 名誉教授) 「少数統計の解析 Feldmann-Cousins 法」集中講義・演習 (英語) 2016 年 5 月 16 日-19 日 岡山大学 [16 名]

(4) NuSTEC-15 ニュートリノ原子核反応国際スクール (Nov.8-14, 2015, 岡山大学) 開催、新学術領域「地下素核研究」・岡山大学共催 (報告書あり)、42 名参加 (海外半数)

URL: <http://indico.ipmu.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=71>

(5) 第一回 超新星ニュートリノ研究会 2015 年 3 月 16 日-17 日 東京理科大学, 計画研究 C01, C02 班主催

URL: <http://www.lowbg.org/ugnd/workshop/groupC/sn20150316/>

***〔アウトリーチ活動〕** (一般講座、高校生対象) 計 16 件

(1) 池田一得 「ニュートリノとスーパーカミオカンデ」 神岡中学校事前授業 神岡中学校 2019 年 2 月 22 日。

(2) 池田一得 「見えない粒子を見てみよう - 素粒子実験の世界 -」 4 年 1 組学級 PTA 活動 富山大附属小学校 2018 年 11 月 12 日

(3) 鈴木英之、「星の一生と元素の起源」全国同時七夕講演会 2018 年 7 月 7 日 東京理科大学野田キャンパス。

(4) 鈴木英之、「星の一生と超新星爆発、ニュートリノ天文学」東京理科大生涯学習センター一般講座、2017 年 10 月 28 日 東京理科大神楽坂キャンパス。

(5) 作田誠 「ニュートリノ観測から宇宙の歴史を紐解く」、日本熱物性学会シンポジウム・招待講演、2016 年 11 月 29 日 (岡山国際交流センター) [参加者 200 名]。

(6) 作田誠 「ニュートリノ観測から宇宙の歴史を読む」、岡山大学全学公開講座、2016 年 11 月 26 日 (岡山大学) [参加者 50 名]

(7) 小汐由介、森俊彰、「ニュートリノで探る宇宙・素粒子物理学」、2014 年物理チャレンジ大会 (岡山) でのフィジクスライブでのポスター発表、8 月 20 日, 2014 年。

***〔報道関係〕** 5 件

(1) 2018 年 9 月 16 日 30 面掲載 日経新聞「太古の宇宙素粒子で探る」(東大宇宙線研)。

(2) 2018 年 9 月 11 日 30 面掲載 毎日新聞「スーパーカミオカンデ 12 年ぶり公開」(東大宇宙線研、SK-Gd 計画のための改造)。

(3) 2017 年 10 月 30 日 9 面掲載 日経新聞「宇宙の進化謎に迫る」(東大宇宙線研の SK-Gd 計画)。

(4) 山陽新聞 2017 年 10 月 4 日朝刊 32 面「5 月に新学術領域研究会主催で岡大にて招待講演をされた Barry Barish 氏がノーベル物理学賞を受賞」。

(5) 山陽新聞 2017 年 5 月 24 日 29 面掲載、新学術領域・岡山大学共催「重力波発見と宇宙に関する 2 つの公開講演」(岡山大学) -Barry Barish 氏と村山斉氏 (東大カブリ IPMU 機構長)

***〔成果ホームページ公開〕**

-計画研究 URL: http://www.lowbg.org/ugnd/?page_id=51

-超新星背景ニュートリノモデル <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/srn/>

-超新星爆発ニュートリノモデル: <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

-Gd 熱中性子捕獲ガンマ線モデル(ANNRI-Gd Model): http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~sakuda/ANNRI-Gd-EG_v3.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 池田 一得

ローマ字氏名: IKEDA, motoyasu

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：助教

研究者番号（8桁）：90583477

研究分担者氏名：鈴木 英之

ローマ字氏名：SUZUKI, hideyuki

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：90211987

研究分担者氏名：井上 睦夫

ローマ字氏名：INOUE, mutsuo

所属研究機関名：金沢大学

部局名：環日本海域環境研究センター

職名：准教授

研究者番号（8桁）：60283090

研究分担者氏名：高久 雄一

ローマ字氏名：TAKAKU, yuichi

所属研究機関名：公益財団法人環境科学技術研究所

部局名：環境影響研究部

職名：研究部長

研究者番号（8桁）：40715497

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中里 健一郎

ローマ字氏名：NAKAZATO ken' ichiro

研究協力者氏名：小汐 由介

ローマ字氏名：KOSHIO, yusuke

研究協力者氏名：伊藤 慎太郎

ローマ字氏名：ITO, shinrato

研究協力者氏名：関谷 洋之

ローマ字氏名：SEKIYA, hiroyuki

研究協力者氏名：中畑 雅行

ローマ字氏名：NAKAHATA, masayuki

研究協力者氏名：ALI, Ajmi

ローマ字氏名：ALI, Ajmi

研究協力者氏名：PRONOST, guillaume

ローマ字氏名：PRONOST, guillaume

研究協力者氏名：BENHAR, omar

ローマ字氏名：BENHAR, omar

研究協力者氏名：ANKOWSKI, artur

ローマ字氏名：ANKOWSKI, artur

研究協力者氏名：LORENZ, sebastian

ローマ字氏名：LORENZ, sebastian

研究協力者氏名：DHIR, rohit

ローマ字氏名：DHIR, rohit

研究協力者氏名：PRONOST, guillaume

ローマ字氏名：PRONOST, guillaume

研究協力者氏名：富樫 甫

ローマ字氏名：TOGASHI, hajime

研究協力者氏名：古澤 駿

ローマ字氏名：FURUSAWA, shun

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。