

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

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：26104007

研究課題名(和文)近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究

研究課題名(英文)Development of the integrated systems for nearby supernova neutrinos and study of stellar evolution

研究代表者

石徹白 晃治(Ishidoshiro, Koji)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：20634504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 44,500,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の歴史の"今"に起こる最大の爆発現象である超新星爆発を解明するために、近傍超新星ニュートリノを中心とした研究を行った。世界でもユニークな超新星前兆ニュートリノを使った爆発前の超新星アラームをKamLAND検出器で実現した。また、最新の宇宙観測や恒星進化の発展を組み込んだ超新星前兆ニュートリノのモデルを開発した。さらに、SK、KamLAND、XMASSでは近傍超新星爆発に備えたデータ収集系の改良を行い、安定的な超新星ニュートリノ観測を実現した。神岡に限らず、世界中のニュートリノ検出器や重力波検出器と共同で超新星を観測、解析する体制を確立させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超新星前兆ニュートリノの研究を劇的に進めることができた。これは、前兆ニュートリノを使った爆発前の超新星アラームを実現するユニークなものである。情報は広く公開されており、全世界の天文学者や物理学者に提供されている。また、近傍天体に備えた体制を確立した。上記により、次の超新星爆発のときに、神岡グループ(SK, KamLAND, XMASS)が中心となり、世界中で協力した観測&解析を行い、超新星爆発にいたる星進化を解明できる準備が整った。これにより、宇宙の歴史の"今"起こる最大の現象を究明できる。

研究成果の概要(英文)：We aim to study of the most energetic phenomena, supernova, from observations of nearby supernovae. KamLAND developed the unique supernova alarm system that used pre-supernova neutrinos emitted from nearby stars in core burning phase. Based on recent progress of astronomical observations and theory of stellar evolution, we established modern pre-supernova neutrino model. SK, KamLAND and XMASS updated their DAQ system for nearby supernovae and made a success of stable observations for supernovae. We started the collaboration with not only the Kamioka group, but also world-wide neutrino and gravitational wave detectors.

研究分野：宇宙線

キーワード：超新星爆発 超新星ニュートリノ 前兆ニュートリノ 電子回路 DAQ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、超新星爆発以前のコア燃焼時に放出されるニュートリノ(以下、前兆)が理論的に示された。そして、研究代表者は限られた条件下であるが実際に前兆ニュートリノが検出可能であることを初めて定量的に示した。1ktの液体シンチレータ型ニュートリノ検出器(KamLAND)を使うと、近日の爆発が示唆されるベテルギウス(地球から約200 pc に位置)やアンタレス(170 pc)など近傍天体における前兆を爆発の約20時間前から観測できるのである。神岡地下実験室で稼働する2台のニュートリノ検出器(Super-KamiokandeとKamLAND)及び、1台の暗黒物質検出器(XMASS)を組み合わせることで近傍天体(<1kpc)の超新星爆発の場合は、超新星ニュートリノの全種類を観測可能で、前兆観測と合わせて超新星爆発の描像を解明できることが期待されている。

しかし、いずれの検出器も極めて稀な事象を探索することを目的としており、近傍超新星のような超高頻度事象に対応していない。また、前兆の理論研究もまとまったものが存在せずに、本格的に前兆を超新星アラームに組み込むにはさらなる理論研究が必要である。

2. 研究の目的

上述の背景のもとに本研究では以下を目的とした研究を行い、超新星爆発を介して宇宙の歴史の“今”を解明する。

- A. 前兆を使った超新星アラームの実現
- B. 近傍超新星爆発に備えたデータ収集系の改良
- C. 前兆の理論モデル構築
- D. 天体活動を解明する超新星観測体制の構築
- E. 近傍天体起源の信号探索

3. 研究の方法

それぞれの方法を以下で行う。

- A. KamLANDのオンラインモニターシステムに超新星前兆のアラームシステムを組み込む。過去三ヶ月の平均バックグラウンドから検出の有意性をリアルタイムで更新して、その値を外部に公表する。登録はwebベースとして、広く広報する。
- B. SKでは近傍超新星爆発に備えた専用電子回路を開発し、実際に導入する。これにより、光電子増倍管のヒット数だけを確実に記録できる体制を確立する。KamLANDでも、SKと同様に専用トリガー電子回路を導入することで、光電子増倍管のヒット数だけを確実に記録できる体制を確立する。さらに、KamLANDではKamLAND2に備えて、ヒット数だけでなく、光電子増倍管の波形までも確実に記録できる次期電子回路の開発を進める。XMASSでもトリガーシステムのファームウェアをアップデートして高頻度イベントに備える改良を行う。また、万全の状態にそなえるべくSKがタンクオープン中などで止まっている間はKamLANDとXMASSは確実に動いているように調整する。
- C. 最新の天体観測や恒星進化モデルの発展を考慮し、ベテルギウスを対象とした前兆の詳細計算を行う。また、ベテルギウスを超えて広い質量範囲での前兆の計算や爆発直前のプレバウンスでの前兆を評価する。
- D. XMASSでの超新星に対する感度を定量的に評価する。さらに、SK、KamLANDとXMASSを合わせて可能となる新しいサイエンスの検討と統合解析の準備を行う。
- E. SK、KamLANDとXMASSにおいて近傍天体起源の信号を探索する。

4. 研究成果

- A. KamLANDでは2015年10月から外部に対してアラーム情報を公開した。現在、世界中の重力波グループやニュートリノ実験グループにデータを公開している。さらに、世界的な超新星早期警報システム(Supernova Early Warning System、SNEWS)に参加して、超新星のアラームを共有している。
- B. SKのDAQシステムに近傍超新星爆発用の専用電子回路をインストールした。様々な試験をおこない、既存のDAQシステムには影響が無いことを確認した。ファームウェアの開発も完了し、専用電子回路で安定したデータ取得を続けている。KamLANDでも専用電子回路をインストールして、問題なく稼働している。また、次期電子回路の試作品を開発した(図1)。試作品は2入力であるがEthernet出力を持ち、高頻度事象に対応する高速読み出しを実証することに成功した。合わせて、新型トリガー回路を開発し動作試験を終えることができた。XMASSでは近傍天体からの超新星ニュートリノをコヒーレント弾性散乱を通して観測するために、トリガーの低閾値化、データ収集システムの高速度化、デッドタイムの削減を行い、5年間にわたり安定したデータ収集を行った。また、KamLANDから配信されている前兆ニュートリノアラームの常時監視や、スーパーカミオカンデの水タンク補修作業中の観測中断期間の補完的な役割を果たすなど、他のニュートリノ検出器との包括的観測体制を構築した。
- C. 大質量星のケイ素燃焼から重力崩壊に至るまでに放出されるニュートリノの特徴と観測可能性を調べるためにペアニュートリノ過程によるニュートリノスペクトルを計算するコードを開発した。そして、複数の星について大質量星の最終進化におけるニュー

トリノスペクトルの時間進化を調べた。これらの星では特に順質量階層の場合に ~ 200 pc程度で星が重力崩壊する場合にはKamLANDで最大その1日程度前に前兆ニュートリノを確認できることを示した。また、より大きな低エネルギーニュートリノ検出器を用いると、ニュートリノイベントの時間進化から星内部の燃焼や対流の状況を推定できる可能性があることを示した。また、超新星内部を通過する時のニュートリノ集団振動によるスペクトル進化を計算するコードを開発し、failed supernovaにおけるニュートリノシグナルの特徴について調べた。

- D. XMASSは中性コヒーレント散乱を使った超新星 ν 探索の可能性を定量的にまとめ上げた。また、神岡に限らず世界中のニュートリノ検出器と重力波検出器と連携して将来の超新星爆発に備えるためにデータ交換に関するMoUを結んだ。さらに、解析方法の開発とシミュレーションでの検証を行うことができた。現在はこの結果をベースに、さらに深く議論するためのMoUを準備中である。
- E. 研究期間中に重力波の検出があった。そのために、近傍ではないものの重力波に付随する信号の探索を試みた。また、KamLANDでは線バーストや太陽フレアに起因するニュートリノ探索を行った。XMASSでは太陽起源のエキゾチック粒子(カルツァ・クラインアクシオン)の探索など天体活動に伴った素粒子の幅広い研究を行った。

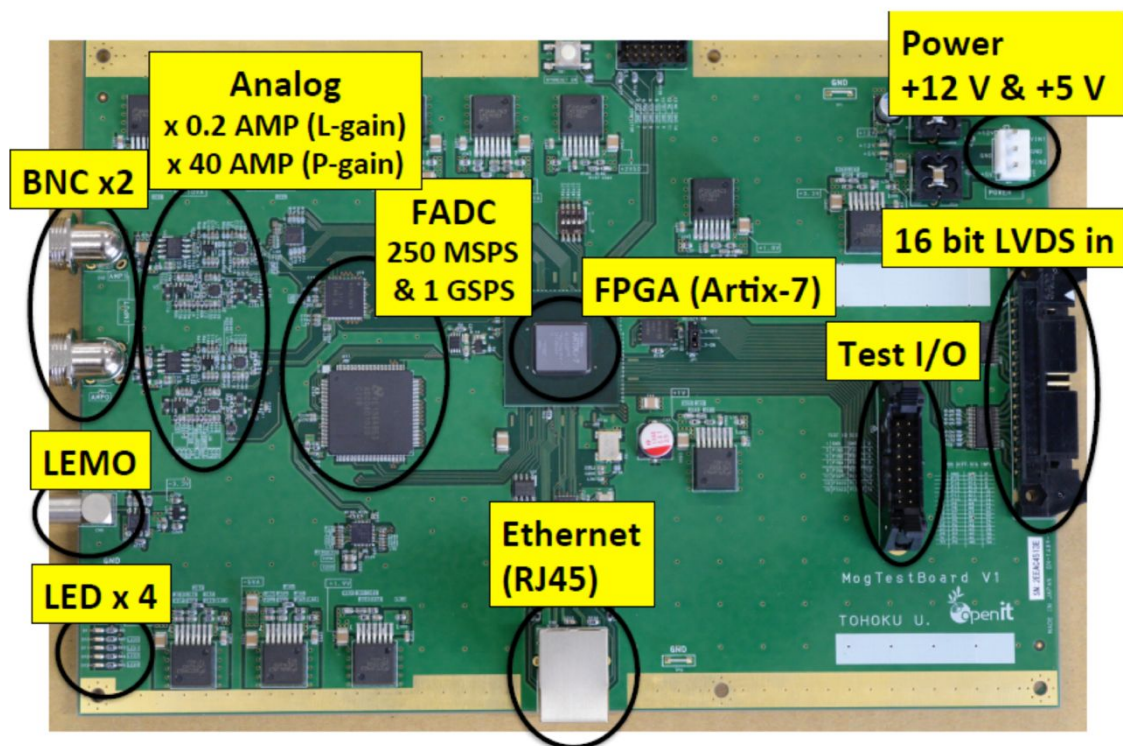


図 1: KamLAND 次期電子回路の試作品

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 27 件)

- [1] N. Oka, K. Hraide et al., “ Search for solar Kaluza-Klein axion by annual modulation with the XMASS-I detector ”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2017) 103C01, 査読有, <http://10.1093/ptep/ptx137>
- [2] C. Kato, S. Yamada, H. Nagakura, S. Furusawa, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, and K. Ishidoshiro, “ Neutrino emissions in all flavors up to the pre-bounce of massive stars and the possibility of their detections ”, Astrophysical Journal 848, 48 (2017), 査読有, <http://10.3847/1538-4357/aa8b72>
- [3] K. Abe, K. Hiraide et al., “ Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS ”, Astroparticle Physics 89, 51-56 (2017), 査読有, <http://10.1016/j.astropartphys.2017.01.006>
- [4] A. Gando, K. Ishidoshiro et al., “ A search for electron antineutrinos associated with gravitational-wave events GW150914 and GW151226 using KamLAND ”, Astrophysical Journal Letter, 829 L34 (2016), 査読有, <http://10.3847/2041-8205/829/2/L34>
- [5] T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, “ Supernova neutrino events relating to the final evolution of massive stars ”, Physical Review D 93, 123012 (2016), 査読有, <http://10.1103/PhysRevD.93.123012>

[6] K. Asakura, K. Ishidoshiro et al “KamLAND sensitivity to neutrinos from pre-supernova stars,” *Astrophysical Journal*, 818 91 (2016), 査読有, 10.3847/0004-637X/818/1/91

[7] C. Kato, M. D. Azari, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, “Pre-supernova neutrino emissions from ONe cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of Fe cores?,” *Astrophysical Journal*, 808, 168 (2015), 査読有, 10.1088/0004-637X/808/2/168

〔学会発表〕（計 114 件）

[1] K. Hiraide, “Latest results from XMASS” , Internationa workshop on “Double beta decay and underground science” , 2018

[2] T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, “Neutrinos from Presupernova Stars” , 15 the International Symposium on Nuclei in the Cosmos XV, 2018

[3] K. Ishidoshiro, “KamLAND” , International workshop on ‘Supernova at Hyper-Kamiokande’ , 2017

[4] H. Umeda, “Recent progress in supernova progenitor theories,” International Symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2016,

[5] K. Ishidoshiro, “Future Supernova neutrino experiments” , 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region, 2015

[6] A. Orii and T. Tomura, “Development of New Data Acquisition System at Super-Kamiokande for Nearby Supernova Bursts,” International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics 2015

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

Web ページ

超新星モニター

<https://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/SNmonitor/regist/index.html>

アウトリーチ

[1] 石徹白晃治, 熊本工業高等専門学校「ニュートリノで探る宇宙・素粒子の謎」, 出前授業, 2018 年

[2] 石徹白晃治, 仙台市天文台×東北大学大学院理学研究科公開サイエンス講座第 4 回「ニュートリノからさぐる宇宙の謎」, ニュートリノで予報する超新星爆発, 2017 年

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：平出 克樹

ローマ字氏名：Hiraide Katsuki

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：特任助教

研究者番号（8 桁）：10584261

研究分担者氏名：梅田 秀之

ローマ字氏名：Umeda Hideyuki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：60447357

研究分担者氏名：梅田 秀之

ローマ字氏名：Umeda Hideyuki

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：60447357

研究分担者氏名：戸村 友宣
ローマ字氏名：TOMURA Tomonobu
所属研究機関名：東京大学
部局名：宇宙線研究所
職名：特任助教
研究者番号（8桁）：60361317

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

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。