

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707014

研究課題名(和文) 超高感度マヨラナニュートリノ探索

研究課題名(英文) High sensitive search for majorana neutrino

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) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はニュートリノのマヨラナ性(マヨラナニュートリノ)を証明することで、素粒子物理学に残された「軽いニュートリノ質量」と「物質優勢宇宙」という大きな問題を解決に導くことである。マヨラナニュートリノを示すには、特定原子核(例えば $^{76}\text{Ge}$  や $^{136}\text{Xe}$ )のニュートリノ放出を伴わない2重( $0\nu 2\beta$ )崩壊事象の検出すれば良いことが知られている。本研究は、 $^{136}\text{Xe}$ の $0\nu 2\beta$ 崩壊探索実験(KamLAND-Zen)の高感度化を目指したR&Dを行った。特に、光るバルーンとイメージングカメラという2つの新しいバックグラウンド低減方法の技術実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：Majorana neutrinos could play the central role in explaining the origin of our matter-dominated universe and light neutrino mass. Neutrinoless-double-beta decay is only unique scheme to study Majorana neutrino. We have developed several scheme to improve KamLAND-Zen sensitivity. KamLAND-Zen is one of the experiments to search for neutrinoless-double-beta decay. We experimentally demonstrated two unique ideas to reduce backgrounds; scintillating balloon and imaging camera.

研究分野：ニュートリノ実験

キーワード：ニュートリノ マヨラナ 2重ベータ崩壊

## 1. 研究開始当初の背景

近年明らかになったニュートリノの振動現象はニュートリノが質量を持つということの決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している素粒子の標準理論を越えた枠組みを要求する。同時に宇宙論や $\beta$ 崩壊の研究から来るニュートリノ質量の上限は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示している。このことはニュートリノが質量を持ち、しかも特別軽いという二重の問題を意味している。「軽いニュートリノ質量」問題を解く鍵が、ニュートリノのマヨラナ性(粒子と反粒子に区別が無いという性質)にある。マヨラナ性を持つニュートリノ(マヨラナニュートリノ)はシーソー機構を通じて軽いニュートリノ質量を自然に説明することができる。それだけでなく、マヨラナニュートリノはレプトン数の非保存を意味しており、「物質優勢宇宙(宇宙には反物質でなく物質が卓越しているという事実)」を説明できる可能性がある。

マヨラナニュートリノを証明する最良の方法として、原子核で起こる2重 $\beta$ 崩壊を利用する方法が良く知られている。2重 $\beta$ 崩壊は、原子核間の準位により単発の $\beta$ 崩壊は禁止されるが2つ同時なら許容されるときに起こり、2つの反ニュートリノを放出する。マヨラナニュートリノであれば、この2つの反ニュートリノが互いに対消滅を起こし、ニュートリノ放出を伴わない2重 $\beta$  (0 $\nu$ 2 $\beta$ )崩壊となり得る。この0 $\nu$ 2 $\beta$ 崩壊はニュートリノがエネルギーを持ち出せないために、特徴的な高エネルギー事象として観測される。0 $\nu$ 2 $\beta$ 崩壊こそマヨラナニュートリノの決定的証拠であり、世界中でのその探索実験が行われている。現在までのところ、Hidelberg-Moscorグループのみが76Geを使って6 $\sigma$ で0 $\nu$ 2 $\beta$ 崩壊検出を主張している(KKDCクレーム)がKKDCクレームは疑わしきバックグラウンドの存在や信号の振る舞いのために疑念がもたれている。

## 2. 研究の目的

日本国内でも、東北大学を中心としてKamLAND-Zen実験を進めている。これは、岐阜県神岡鉱山内地下1,000mになる1kt液体シンチレータ検出器(KamLAND)を使って世界最高レベルでの0 $\nu$ 2 $\beta$ 探索を成功させている。さらに、既KKDCクレームの否定に成功している。

本研究では、KamLAND-Zen次期フェーズへ向けたR&Dを行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、新しい2つのアイデア(光るバルーンとイメージングカメラ)を中心とした様々なR&Dを行う。また、KamLAND検出器を利用して、0 $\nu$ 2 $\beta$ に拘らず広く新しい物理を検討して、データ解析を進める。

## 4. 研究成果

研究成果は大きく以下の4項目に分けられる。

(1) 光バルーン: KamLAND-Zen次期フェーズで問題になると考えられているのが、Xe含液体シンチレータの入れ物であるミニバルーン中の $^{214}\text{Bi}$ である。本研究では、 $^{214}\text{Bi}$ 崩壊後に生じる $^{214}\text{Po}$ が $\alpha$ 線を放出して直ぐに崩壊することに注目して、この $\alpha$ 線を高い効率で検出できる光るバルーンを提案した。 $\alpha$ 線を検出できれば $^{214}\text{Bi}$ もタギング可能となるのである。光るバルーンの素材として、帝人(株)の協力のもとシンチレックス(ポリエチレンナフタレート)の評価を行った。液体シンチレータに対する耐性やフィルム上にした場合の発光量の測定から開始して、 $\phi$ 80cmのテストバルーンを開発した(図1)。一部の測定値(シンチレックスの吸収波長)がKamLAND-Zenに必要な要求値を満たしていないことを判明したが、これは液体シンチレータにBis-MSBなどの波長変換剤をドープすることで回避できることを確認した。



図1.  $\phi$ 80cmのテストバルーン。部屋を暗くした後、ブラックライトを照射した状態である。バルーンが青く光っていることが視覚的にわかる。

(2) イメージングカメラ:  $^{214}\text{Bi}$ と並んで、KamLAND-Zen次期フェーズで問題になると考えられているのが、宇宙線による原子核破壊で生じる10Cの崩壊である。この崩壊は、 $\gamma$ 線を伴うものであり、複数回のコンプトン散乱が起こると考えられている。一方、信号の0 $\nu$ 2 $\beta$ 崩壊は $\beta$ 線を放出するために、反応点の広がりを撮像することで識別するというのが本研究のアイデアである。このアイディ

アを実証するために、広角光学システムとマルチアノードPMTを組み合わせたイメージングカメラ(図2)を開発し、液体シンチレータの $\gamma$ 線反応と $\beta$ 線反応の識別を試みた。図3は、線源として $^{90}\text{Sr}$ と $^{60}\text{Co}$ を用いた場合に、撮像画像を重ね合わせたものである。 $\gamma$ 線事象の場合に明らかに反応点が広がっていることがわかる。ただし、 $\gamma$ 線の初期反応点位置の広がり効果を含んでいることに注意。



図2. 開発したイメージングカメラ

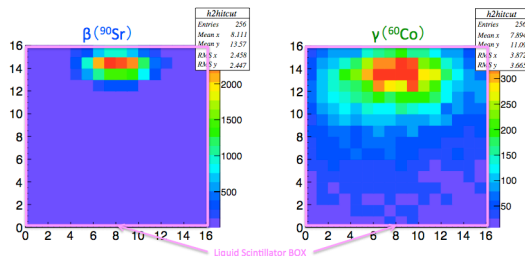


図3. イメージングした反応の例

(3) 高光子効率PMTの性能評価: 項目(1)や(2)の研究により、それらのバックグラウンドの低減に成功した場合に、究極的に問題になるのが通常の2重 $\beta$ 崩壊(2v2b)の染み出しである。染み出しを防ぐには、エネルギー分解能を上げるしか方法は無い。そこで、浜松ホトニクスが開発した20inch高光子効率PMTの性能評価を行い、応答速度、暗電流、アフターパルスや磁場効果などの観点で次期KamLAND-Zenで使用可能かを検証した。本研究により、初期測定結果を得た。現在は、浜松ホトニクスとさらなる高性能化を議論している。

(4) デッドタイムフリーな電子回路開発: KamLAND-Zen次期フェーズでの安定したデータ取得を目指した電子回路の開発を進めている。プロトタイプ製造の前に、アナログ特性やEthernet読み出しの検証を目的にテストボードを開発した。テストボードの評価により、電源回路の重要性を確認して、Ethernet読み出しの安定性などを確認する

ことに成功した。図4は開発したテストボードの写真である。

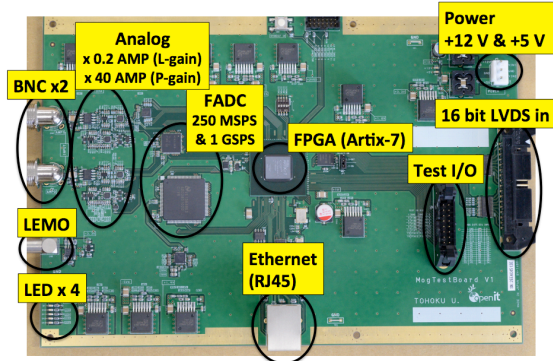


図4. 開発したテストボード

(5) KamLANDを用いた宇宙天文研究: 宇宙で最も激しい天体現象である $\gamma$ 線バーストに付随した数10MeVニュートリノ探索を行い、 $\gamma$ 線バーストに対するニュートリノフリーエンスの上限値を与えた。また、近傍天体に限れば、KamLANDで超新星の前兆現象であるケイ素燃焼段階からニュートリノを検出可能であることを指摘し、爆発前の超新星アラームのシステムを開発した。現在、既に複数のニュートリノ実験や重力波実験にアラームを提供中である。

## 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 10 件)

1. KamLAND Sensitivity to Neutrinos from Pre-Supernova Stars (査読有)  
K Asakura, K Ishidoshiro et al.,  
The Astrophysical Journal 818, 91, 2016  
10.3847/0004-637X/818/1/91
2. Search for double-beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  to excited states of  $^{136}\text{Ba}$  with the KamLAND-Zen experiment, (査読有)  
K Asakura, K Ishidoshiro et al.,  
Nuclear Physics A 946, 171-181, 2016  
10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011
3.  $^{7}\text{Be}$  solar neutrino measurement with KamLAND, (査読有)  
A Gando, K Ishidoshiro, et al.,  
Physical Review C 92, 055808, 2015  
10.1103/PhysRevC.92.055808
4. Search for the proton decay mode  $p \rightarrow \nu^- K^+$  with KamLAND, (査読有)  
K Asakura, K Ishidoshiro et al.,  
Physical Review D 92, 052006, 2015  
10.1103/PhysRevD.92.052006
5. Pre-supernova Neutrino Emissions from One Cores in the Progenitors of

Core-collapse Supernovae: Are They Distinguishable from Those of Fe Cores? (査読有)

C Kato, K Ishidoshiro et al., The Astrophysical Journal 808, 168, 2015  
10.1088/0004-637X/808/2/168

6. Results from KamLAND-Zen, (査読無)  
K Asakura, K Ishidoshiro, et al.,  
AIP conf. Proc 1666, 170003, 2015  
10.1063/1.4915593

7. Study of electron anti-neutrinos associated with gamma-ray bursts using KamLAND, (査読有)  
K Asakura, K Ishidoshiro et al.,  
The Astrophysical Journal 806, 87, 2015  
10.1088/0004-637X/806/1/87

8. Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, (査読有)  
A Shoda, K Ishidoshiro, et al.,  
Physical Review D 89 (2), 027101, 2014  
10.1103/PhysRevD.89.027101

9. Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND, (査読有)  
A Gando, K Ishidoshiro et al.,  
Physical Review D 88 (3), 033001, 2013  
10.1103/PhysRevD.88.033001

10. The Q/U imaging experiment instrument, (査読有)  
C Bischoff, K Ishidoshiro et al.,  
The Astrophysical Journal 768, 9, 2013  
10.1088/0004-637X/768/1/9

[学会発表] (計 45 件)

1. 本田佳己, KamLAND2-Zen のための電子回路の開発, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 発表日 2016 年 3 月 22, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
2. 白幡豊, 液体シンチレータによる反電子ニュートリノの到来方向測定に向けた研究 II, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 発表日 2016 年 3 月 21, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
3. 相馬圭吾, 液体シンチレータによる反電子ニュートリノの到来方向測定に向けた研究 I, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 発表日 2016 年 3 月 21, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
4. 高井貴行, イメージング検出器を用いた液体シンチレータ中の粒子識別へ向けた研究, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 発表日 2016 年 3 月 20, 東北学院大学 (宮城県, 仙台市)
5. 石徹白晃治, 大型液体シンチレータ検出器による超新星ニュートリノ研究の可能

性, 日本天文学会 2016 年春季年会, 2016 年 3 月 16, 首都大学東京 (東京都, 八王子市)

6. 本田佳己, KamLAND における超新星前兆ニュートリノの研究, 第二回超新星ニュートリノ研究会, 2016 年 1 月 6-7 日, 富山商工会議所 (富山県, 富山市)
7. 林田眞悟, KamLAND における近傍超新星事象観測に対応した DAQ システムの開発, 第二回超新星ニュートリノ研究会, 2016 年 1 月 6-7 日, 富山商工会議所 (富山県, 富山市)
8. 石徹白晃治, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, 新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会, 2015 年 12 月 3 日, ニューウェルシティ一湯河原 (静岡県, 熱海市)
9. 石徹白晃治, Future Supernova Neutrino Experiments, NuInt2015, 2015 年 11 月 20 日, 大阪大学 (大阪府, 吹田市)
10. 石徹白晃治, 超新星ニュートリノの振動現象とフーリエ解析, SKE f2f meeting, 2015 年 10 月 17 日, 大阪市立大学 (大阪府, 大阪市)
11. 石徹白晃治, 天体活動と超新星ニュートリノ, 重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質, 新学術 3 領域合同シンポジウム「多面的アプローチで解きあかす宇宙と天体」, 2015 年 7 月 25 日, 東北大学 (宮城県, 仙台市)
12. 石徹白晃治, Low-energy Neutrino Astrophysics in KamLAND, KEK physics seminar, 2015 年 6 月 30 日, KEK (茨城県, つくば市)
13. 高井貴行, KamLAND-Zen バックグラウンド除去に向けたイメージング検出器開発, 新学術領域「地下素核研究」第 2 回領域研究会, 2015 年 5 月 15-17 日, 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
14. 石徹白晃治, 天体活動と重元素生成の解明へ向けた超新星ニュートリノ観測システムの高度化, 新学術領域「地下素核研究」第 2 回領域研究会, 2015 年 5 月 15 日, 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
15. 林田眞悟, Super-Kamiokande 及び KamLAND による重元素合成起源解明の可能性, 新学術領域「地下素核研究」第 2 回領域研究会, 2015 年 5 月 15-17 日, 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
16. 小原脩平, KamLAND-Zen 将来計画へ向けた発光性バルーンフィルムの開発研究, 新学術領域「地下素核研究」第 2 回領域研究会, 2015 年 5 月 15-17 日, 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
17. 大石奈緒子, 銀河系内超新星候補天体リストに基づく観測ネットワーク構築, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学 (東京都, 新宿区)
18. 小原脩平, KamLAND-Zen 実験の将来計画

- へ向けたシンチレーションバルーンの開発研究, 日本物理学会第 70 回年次大会. 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京都, 新宿区)
19. 林田眞悟, Super-Kamiokande 及び KamLAND による超新星ニュートリノ観測の相補的解析による可能性, 日本物理学会第 70 回年次大会. 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京都, 新宿区)
  20. 朝倉康太, KamLAND2-Zen 実験に向けた新型 PMT の性能評価, 日本物理学会第 70 回年次大会. 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京都, 新宿区)
  21. 白幡豊, 液体シンチレータを用いた反電子ニュートリノの方向検出に向けた研究 1, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京都, 新宿区)
  22. 高井貴行, 液体シンチレータを用いた反電子ニュートリノの方向検出に向けた研究 2, 日本物理学会第 70 回年次大会. 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京都, 新宿区)
  23. 石徹白晃治, 液シン型検出器による超新星ニュートリノ研究の現状と展望, 第一回超新星ニュートリノ研究会, 2015 年 3 月 16 日, 東京理科大学(千葉県, 野田市)
  24. 小原脩平, バックグラウンド除去のための発光性バルーンフィルムの開発研究, 新学術「極低放射能技術」研究会, 2015 年 3 月 9 日, 淡路国際夢舞台(兵庫県, 淡路市)
  25. 石徹白晃治, KamLAND-Zen, 東京大学安東研セミナー, 2014 年 12 月 2 日, 東京大学(東京都, 文京区)
  26. 石徹白晃治, カムランドによる超新星前兆ニュートリノ観測と爆発前超新星アラームの可能性, 東北大学天文学教室談話会, 2014 年 10 月 27 日, 東北大学(宮城県, 仙台市)
  27. 石徹白晃治, KamLAND-Zen, DBD14, 2014 年 10 月 7 日, Hawaii, US
  28. 石尾昌平, KamLAND-Zen 実験の粒子識別に向けたイメージ検出装置の開発, 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学(佐賀県, 佐賀市)
  29. 小原脩平, KamLAND-Zen 実験の将来計画に向けたシンチレーションバルーンの研究, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 20 日, 佐賀大学(佐賀県, 佐賀市)
  30. 林田眞悟, KamLAND2 へ向けたデータ収集回路開発, 日本物理学会 2014 年秋季大会 2014 年 9 月 20 日, 佐賀大学(佐賀県, 佐賀市)
  31. 石徹白晃治, カムランドにおける超新星前兆ニュートリノの検出可能性, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 2014 年 9 月 13 日, 山形大学(山形県, 山形市)
  32. 石徹白晃治, 超新星(前兆)ニュートリノ, 新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」研究会, 2014 年 8 月 24 日, 大阪大学(大阪府, 豊中市)
  33. 林田眞悟, The next-generation KamLAND electronics, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 4 月 28 日, パシフィック横浜(神奈川県, 横浜市)
  34. 小原脩平, KamLAND2-Zen にむけたシンチレーションフィルムの研究, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学(神奈川県, 平塚市)
  35. 林田眞悟, KamLAND における近傍超新星観測体制の強化, 日本物理学会第 69 回年次大会. 東海大学, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学(神奈川県, 平塚市)
  36. 石徹白晃治, Nearby supernova with KamLAND, 新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」第 2 回シンポジウム, 2014 年 1 月 13 日, 東工大.(東京都, 目黒区)
  37. 林田眞悟, Development of electronics system at KamLAND for nearby supernova, 新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」第 2 回シンポジウム, 2014 年 1 月 13 日, 東工大.(東京都, 目黒区)
  38. 石徹白晃治, KamLAND, NNN13, 2013 年 11 月 11 日, 東大 IPMU(千葉県, 柏市)
  39. 石尾昌平, KamLAND-Zen 実験における粒子識別へ向けたイメージング検出装置の研究, 2013 年 9 月 21 日, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市)
  40. 林田眞悟, KamLAND における近傍超新星観測, 2013 年 9 月 21 日, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市)
  41. 小原脩平, KamLAND2-Zen に向けたシンチレーションフィルムの研究, 2013 年 9 月 20 日, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市)
  42. 大木悠平, KamLAND を用いたガンマ線バーストの研究, 2013 年 9 月 21 日, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市)
  43. 石徹白晃治, KamLAND 実験における計測システム, 計測システム研究会, 2013 年 7 月 11 日, 核融合研究所(岐阜県, 多治見市)
  44. 石徹白晃治, Imaging camera at KamLAND, MNR2013, 2013 年 7 月 26 日, 庭のホテル東京(東京都, 文京区)
  45. 石徹白晃治, Geo-Neutrino Measurements with KamLAND, Goldschmidt2013, 2013 年 8 月 27 日, Florence, Italy

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

KamLAND 公式ページ

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：