

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800123

研究課題名(和文)カムランド禅実験における0 探索の感度向上のための基礎研究

研究課題名(英文) Study for the sensitivity improvement of the neutrino less double beta decay by the KamLAND-Zen experiment

研究代表者

大谷 将士(Otani, Masashi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・博士研究員

研究者番号：90636416

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超稀事象ニュートリノレス二重崩壊(以下0)の発見は素粒子物理における最重要課題の1つである。本研究は0 探索実験KamLAND禅における感度向上のために

(1)新データ取得回路を運用した高精度解析方法の樹立(2)高感度光検出の開発(3)次世代発光バルーン製作にむけたフィルムの研究

を行った。最終的には、次世代発光フィルムによってバルーンバックグラウンドを除去し、5年間のデータ取得でニュートリノ有効質量が約40meVまで探索可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Search for neutrino-less double beta decay is one of the most important issues on elementary particle physics. We have mainly studied following in order to improve the sensitivity at the KamLAND-Zen experiment:

(1)establish of the high precision analysis method with new data-taking electronics (2)development of the new photo-sensor toward high sensitivity (3)study of light emitting film towards next generation of the Xe balloon

Finally, it was found by the simulation that we are able to search for effective neutrino mass up to about 40 meV by rejecting the balloon backgrounds with new balloon made the light emitting film.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 2重ベータ崩壊 マヨラナ レプトン数非保存 シンチレーター 光検出器 位置再構成

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の発見によって質量ゼロとされていたニュートリノに質量があることが分かった。しかしその値はニュートリノを除くと最も小さい電子質量より遥かに小さい値($<10^{-6}$)であり、我々に新たな問題を突き付けた。これを解決する有力な理論モデルがシーソー機構である。この理論ではニュートリノを粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子と仮定する。そして、非常に大きな右巻きニュートリノ質量と、電子と同程度の左巻きニュートリノ質量の混合により小さなニュートリノ質量が実現される。そのため、ニュートリノがマヨラナかどうかはシーソー機構の検証の試金石である。加えて、大質量の右巻きニュートリノは物質優勢宇宙の創生を担っていた可能性があり、宇宙物理ならびに人間の存在そのものにまで波及する問題である。

ニュートリノのマヨラナ性を証明する最も有効な手段はニュートリノレス二重 β 崩壊(以下 $0\nu\beta\beta$)の発見である。 $0\nu\beta\beta$ とはニュートリノを伴わずに β 崩壊が2回同時に起こる現象である。通常はニュートリノを伴う2重 β 崩壊(以下 $2\nu\beta\beta$)しか起こらないが、ニュートリノがマヨラナ粒子ならば $0\nu\beta\beta$ が起こり、その半減期は電子ニュートリノ有効質量の二乗に反比例する。 $0\nu\beta\beta$ は非常に稀な崩壊(半減期 $>10^{25}$ 年)であるため、バックグラウンドとなる環境放射性不純物などを極力除いた超純度の検出システムが必要となる。

2. 研究の目的

「1.研究開始当初の背景」で述べたように、超稀事象ニュートリノレス2重 β 崩壊(以下 $0\nu\beta\beta$)の発見は素粒子物理における最重要課題の1つである。しかしその半減期($>10^{25}$ 年)ゆえに放射性不純物を極力除いた超純度検出システムが必要となる困難な実験である。KamLAND 禅は2011年から実験を開始して世界最高感度(上限値 6.2×10^{24} 年)を達成したが、発見の示唆される半減期 $\sim 10^{27}$ 年領域まで探索するにはさらなるバックグラウンドの低減と感度向上が必要不可欠であった。

また、 $0\nu\beta\beta$ 探索はその重要性から熾烈な国際競争分野となっている。事実、アメリカで行われている EXO 実験は我々と同時期に測定を開始して同程度の感度を達成し、また Ge 半導体を用いる GERDA 実験も近年実験を開始した。このような激しい国際競争の中で KamLAND 禅が競争力を維持し世界をリードするには、高クオリティのデータを継続取得する必要がある。

本研究は以下のようにソフトウェアとハードウェア両方からのアプローチにより、KamLAND 禅実験におけるバックグラウンドの低減と感度向上を目指す。

(1) 新データ取得回路による高精度解析を樹立し、現行カムランド禅実験によるデ

ータの感度を最大化する。

- (2) カムランド検出器アップグレードに向けて、高感度光検出器の開発を行う。
- (3) バルーンバックグラウンドの低減をめざし発光フィルムの研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 新データ取得回路による高精度解析方法の樹立

近年 KamLAND 検出器にインストール・稼働開始した新データ取得回路による新解析方法を確立し、位置再構成精度の向上によって現行最も問題となっているバルーンバックグラウンドの低減を目指す。

KamLAND 検出器では全1800本の光電子増倍管の時間情報を用いて、イベント位置の再構成を行う。ここで、新データ取得回路は現行回路より優れた時間応答を持っているため、原理的には高精度の位置再構成を行うことが可能である。しかし、研究開始当初は新データ取得回路のデータ処理・再構成ソフトウェアなどは未構築であった。

そこで、全1万チャンネルに及ぶ T2 前置検出器の解析をゼロから樹立した研究代表者のソフトウェアの手腕を活かし、新データ取得回路によるデータ解析ソフトの開発・樹立を行う。

(2) 高感度光検出器の開発

ニュートリノを伴う2重ベータ崩壊は0探索にとって不可避のバックグラウンドであるが、エネルギー分解能の向上によって低減が可能である。そこで、近年浜松ホトニクスで開発された高量子効率アノード材料を用いた高量子効率光電子増倍管(PMT)の試験を行う。研究代表者は近年浜松ホトニクスで開発された光検出器 MPPC の基礎特性・大量試験に精通しており、そこで培った経験を応用することが可能である。

(3) 次世代型発光フィルムの研究

検出器アップグレードに伴い内部バルーンも新調する予定であるが、再製作したバルーン内の放射性不純物量を予想することは難しい。事実、現在のバルーンは放射線不純物を極力含まないフィルムを選定してクラス1のクリーンルームでフィルムを溶着しバルーンを製作したが、見積り10倍程度の放射性不純物が含まれていた。そこで、バルーンバックグラウンドを積極的に除去するために、それ自体が発光するフィルムを開発を行う。それ自体が発光すればフィルム内で生じた放射線不純物由来のイベントを同定することができ、積極的にバックグラウンドを除去することが可能となる。

4. 研究成果

(1) 新データ取得回路による解析方法の確立

優れた時間応答を持つ新データ取得回路を駆使した新解析方法の確立により、高精度位置再構成を実現しバルーンバックグラウンドの低減を行った。

「3.研究の方法」で述べたように、近年稼働を開始した新データ取得回路(MoGURA)に

よるデータ処理ソフトウェア(キャリブレーション, エネルギー・位置再構成ソフトウェアなど)は未構築であった。

そこで本研究ではまず, 各光電子増倍管の波形データから観測電荷量および観測時間を抽出するためのソフトウェアを構築した。特に同様の検出器である Borexino 検出器で応用されている観測時間の光量依存性を導入し, 光量によらない高感度の観測時間抽出に成功した。これによって観測光量にばらつきが生じる検出器の端面近くで生じる再構成位置のバイアスを最小化することに成功した。

次に, 高精度位置再構成のためのソフトウェアを開発した。既にデータ取得が終了していた位置のよく分かっている外部放射線源データの用いることでソフトウェアの各種パラメータを微調整し, 最終的には現行データ取得回路より優れた位置再構成に成功した(図 1, 日本物理学会 2013 年秋季大会にて発表, 学会発表 No.56)。さらに, エネルギー再構成精度についても現行データ取得回路による解析結果と同等であることを示した。

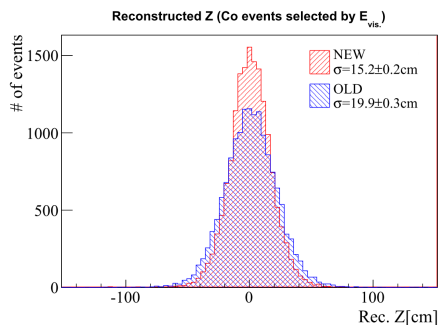


図 1. 再構成位置分布。青色が現行データ取得回路, 赤色が新データ取得回路によるデータ解析結果。

(2) 高量子効率光電子増倍管の開発

ニュートリノを伴う 2 重崩壊は 0 探索に不可避のバックグラウンドであるが, エネルギー分解能によって低減が可能となる。そこで, カムランド検出器のアップグレードに向けて高感度光検出器の開発を行った。特に, 近年浜松ホトニクスで開発された高量子効率 PMT に着目し, 基礎特性の測定を行った。

まず, 次期光検出器の要求性能を決定するために, 現行カムランド検出器における光電子増倍管の特性及び長期安定性を評価した。その中で, 約 10% あまりの PMT に増幅率が低下していることを発見し, 10 年以上の長期安定運転には高電圧分配回路の設計の強化の必要性を示唆した(日本物理学会 2013 年秋季大会にて発表, 学会発表 No.49)。

次に, 近年浜松ホトニクスで開発された高量子効率 PMT の基礎特性の評価を行った。特に, 現行 PMT は時間分解能の一様性を確保するために, 有効面を 17inch に制限している。一方, 新たに開発された PMT では近年の高い計算機パワーを駆使した高精度電磁場解析による設計のために, 20inch 全面を使

ってシンチレーション光を収集すると同時に, 優れた時間分解能を確保できる可能性がある。そこで, レーザ光源を用いた測定システムを構築し, 時間分解能の評価を行った。その結果, 20inch 全面で現行 17inch PMT と同程度の時間分解能を持っていることを実証した(図 2, 日本物理学会 2014 年年次大会にて発表, 学会発表 No.2)。

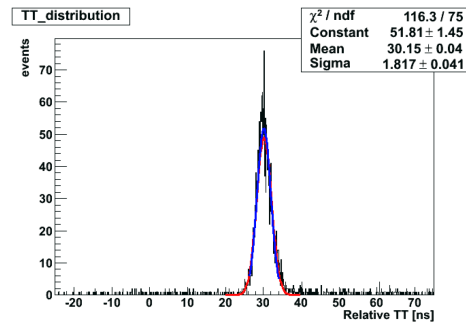


図 2. 新型 PMT の時間分解能。1 標準偏差で 1.8nsec, FWHM で 4.4nsec で, 現行 PMT と同程度の性能を持っている。

(3) 次世代発光型バルーンフィルムの開発

バルーンフィルムに含まれる放射性不純物をコントロールするのは非常に困難なため, イベント観測によって積極的にバックグラウンドを除去するために, 発光性フィルムの開発を行った。特に近年開発された PET (PolyEthyleneTerephthalate)、及び PEN (Poly Ethlene Naphthalate) に着目し, 基礎特性の評価を行った。

まず, 放射線源を用いた発光量の測定を行い, PEN フィルムがバックグラウンド源となる MeV 程度の線に対して十分な光量を持っていることを実証した(図 3, 日本物理学会 2013 年秋季大会にて発表)。さらに, バルーン製作に向けた接着試験やガスバリア試験を行い, バルーン製作に必要な力学強度及びバルーン内部の Xe に対する十分なシールド効率を持っていることを確認した。最終的には, bis-MSB を用いた液体シンチレーターを用いた場合の感度をシミュレーションによって評価し, 現行カムランド検出器に発光フィルムによるバルーンを導入することで 5 年間のデータ取得によりニュートリノ有効質量 40meV まで探索可能であることを示した。

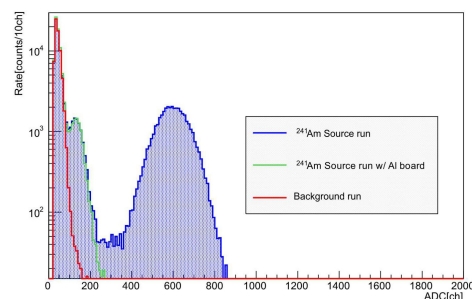


図 3. PEN フィルムによる発光量分布。線源は ^{241}Am からの 5.5MeV 線を用いた。600ADC 程度に線ピークが観測できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 5件)

K. Asakura, A. Gando, Y. Gando, T. Hachiya, S. Hayashida, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, T. Ishikawa, S. Ishio, M. Koga, R. Matsuda, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, K. Nakamura, S. Obara, Y. Oki, M. Otani, et al.

“Results from KamLAND-Zen”

査読無, XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), 14.60 page

T. O'Donnell for the KamLAND-Zen collaboration

“Recent results from the KamLAND-Zen experiment”

査読無, Proceedings for 48th Recontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, 2013, p.193-198

A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, H. Ishikawa, M. Koga, R. Matsuda, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Oki, M. Otani, et. al,

“Reactor On-Off Antineutrino Measurement with KamLAND”

Phys. Rev. D88 (2013) 3, 033001

査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.88.033001

Junpei Shirai for the KamLAND-Zen Collaboration

“KamLAND-Zen: Status and Future”

Nucl. Phys. Proc. Suppl. 237-238 (2013) 28-30, 査読無

A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, R. Kato, M. Koga, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, T. Nakada, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Ono, M. Otani, et. al,

“Limits on Majoron-emitting double-beta decays of Xe-136 in the KamLAND-Zen experiment”

Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 062502

査読有

DOI:10.1103/PhysRevLett.110.062502

[学会発表](計 79件)

1. 大浦智也

「KamLAND2-Zen 実験用液体シンチレーター開発の現状」

日本物理学会第70回年次大会, 2015/3/21~3/24, 早稲田大学

2. 朝倉康太, 他 KamLAND Collaboration

「KamLAND2-Zen 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, 2015/3/21~3/24, 早稲田大学

3. 清水格

「マヨラナニュートリノ-ダブルβ崩壊探索-」

日本物理学会第70回年次大会, 2015/3/21~3/24, 早稲田大学

4. 蜂谷尊彦

「KamLAND2-Zen 実験に向けた液体シンチレータの研究とバックグラウンドシミュレーション」

日本物理学会第70回年次大会, 2015/3/21~3/24, 早稲田大学

5. 清水格

「KamLAND」

Neutrino Telescopes 2015, 2015/3/2~3/6, Venice Italy

6. 石徹白晃治

「KamLAND-Zen」

DBD2014, 2014/10/5~10/7, Hawaii US

7. 林田

「KamLANDにおける次期エレクトロニクス開発」

Open-It 若手の開 若手研究会 2014, 2014/10/2~10/4, 宮崎

8. 上島考太

「KamLAND-Zen Purification methods and R&D」

ANT2014, 2014/9/22~9/24, UCLA US

9. 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, 2014/9/18~9/21, 佐賀大学

10. Xe Benda

「Event Reconstruction for kton Scale Liquid Scintillation Detector」

日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014/9/18~9/21, 佐賀大学

11. 大浦智也

「KamLAND2-Zen 実験用液体シンチレーター開発の現状」

日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014/9/18~9/21, 佐賀大学

12. 寺島亜寿紗

「KamLAND-Zen 純化後データを用いた¹³⁶Xe 二重ベータ崩壊の寿命測定」

日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014/9/18~9/21, 佐賀大学

13. 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, 2014/9/18~9/21, 佐賀大学

14. 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, 2014/9/13, 山形大学

15. 丸藤祐仁

「Latest results from KamLAND-Zen second phase」

ICHEP2014, 2014/7/2-7/9, Valencia

- Spain
16. 清水格
「Results from KamLAND-Zen」
Neutrino 2014, 2014/6/2~6/7, Boston US
 17. 上島考太
「Status of KamLAND-Zen and purification methods」, TIPP2014, 2014/6/2~6/6 Amsterdam, The Netherlands
 18. Xe Benda
「Anti-Neutrino Directionality at KamLAND」
日本地球惑星連合大会, 2014/4/28, パシフィコ横浜
 19. 清水格
「KamLAND: Geo-Neutrino Result」
日本地球惑星連合大会, 2014/4/28, パシフィコ横浜
 20. 渡辺寛子
「Tracking geo-neutrinos towards the future geo-neutrinoigraphy」
日本地球惑星連合大会, 2014/4/28, パシフィコ横浜
 21. 松田さゆり
「CeLAND 実験:シミュレーションによるバックグラウンド事象の評価」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 22. 丸藤亜寿紗
「First Results of Neutrinoless Double Beta Decay Search with KamLAND-Zen」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 23. 本木大資
「KamLAND-Zen 感度向上に向けた BG 除去のための純化及び Xe 再導入」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 24. 丸藤祐仁
「KamLAND-Zen 実験の現状と将来」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 25. 丸藤亜寿紗
「KamLAND-Zen の現状」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 26. 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, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 27. 渡辺寛子
「地球ニュートリノで拓く地球熱史」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 28. 白旗豊
「KamLAND における位置識別性能向上に向けた開発研究」
 29. 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 29. 蜂谷尊彦
「KamLAND2-Zen 用バッファオイルの選定」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 30. 大浦智也
「KamLAND2-Zen 実験用液体シンチレーター開発の現状」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 31. 中村健吾
「CeLAND 実験:KamLAND 検出器への Ce 反ニュートリノ源の導入」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 32. 玉江京子
「KamLAND における陽子崩壊探索」
日本物理学会第 69 回年次大会, 2014/3/27~3/30, 東海大学
 33. 丸藤祐仁
「KamLAND-Zen 実験によるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索」, 益川塾セミナー, 2014/2/17, 京都産業大学
 34. 丸藤祐仁
「KamLAND-Zen 実験」
第 27 回宇宙ニュートリノ研究会, 2014/1/20, 東京大学宇宙線研究所
 35. 石徹白晃治
「Nearby supernova with KamLAND」
新学術領域研究会“重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開”, 2014/1/13~1/14, 東京工業大学
 36. 井上邦雄
「ダブルベータ崩壊のニュートリノのマヨラナ粒子検証」
第 4 回領域研究会「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」, 2013/12/19~12/21, 名古屋大学
 37. 清水格
「CeLAND: KamLAND を用いたステラいるニュートリノ探索実験」
ニュートリノフロンティア研究会, 2013/12/7~12/8, クロス・ウェーブ府中
 38. Xu Benda
「Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decays of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen」, NNN13: International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, 2013/11/11~11/13, Kavli IPMU
 39. 石徹白晃治
「KamLAND」, NNN13: International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, 2013/11/11~11/13, Kavli IPMU
 40. 渡辺寛子
「KamLAND:directional measurement

- study and future」, Workshop on Particle Geophysics, 2013/10/30, 東北大学
41. 三井唯夫
「KamLAND:geo-neutrino」, Workshop on Particle Geophysics, 2013/10/30, 東北大学
 42. Xe Benda
「Measurement of Kr-85 Concentration by Pileup at KamLAND」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 43. 林田眞悟
「KamLAND における近傍超新星観測」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 44. 石田昌平
「KamLAND-Zen 実験における粒子識別に向けたイメージング検出装置の研究」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 45. 大木悠平
「KamLAND を用いたガンマ線バーストの研究」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 46. 吉田学立, 竹本康浩
「KamLAND 実験のための DAQ 監視・自動通報システム」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 47. 朝倉康太, 大谷将土
「KamLAND2-Zen に向けた PMT の改良」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 48. 立花創
「KamLAND2-Zen 実験用集光ミラー開発の現状」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 49. 松田さゆり
「KamLAND でのステライルニュートリノ探索に向けた研究」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 50. 山内祐貴子
「カムランド検出器における宇宙起源反ニュートリノの研究」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 51. 清水格
「KamLAND2-Zen 実験用大光量液体シンチレータ開発の現状」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 52. 本木大資
「KamLAND-Zen の現状」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 53. 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」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 54. 大谷将土
「KamLAND における位置再構成精度向上のための研究」
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20~9/23, 高知大学
 55. 清水格
「Past and Present Experiments of Geo Neutrinos」, 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, 2013/9/8~9/13, Asilomar, US
 56. 石徹白晃治
「Geo-neutrino measurements with KamLAND」, Goldschmidt2013, 2013/8/26~8/30, Florence, Italy
 57. 白井淳平
「The Status of KamLAND-Zen for neutrino less Double Beta Decay of ^{136}Xe 」, 16th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 2013/8/22~8/28, Department of Theoretical Physics Moscow State University, Russia
 58. 石尾昌平
「Imaging device study with KamLAND」
Muon and Neutrino Radiography 2013, 2013/7/25~7/26, 庭のホテル東京
 59. 渡辺寛子
「What we found with KamLAND」
Muon and Neutrino Radiography 2013, 2013/7/25~7/26, 庭のホテル東京
 60. 渡辺寛子
「Review of KamLAND and Geo-neutrinos」
Muon and Neutrino Radiography 2013, 2013/7/25~7/26, 庭のホテル東京
 61. 大谷将土
「Recent Results from KamLAND」
The 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013/7/14~7/19, 幕張メッセ国際会議場
 62. 大谷将土
「KamLAND について」
計測システム研究会, 2013/7/10~7/11, 富山県小劇場 ORBIS
- 〔図書〕(計 0 件)
〔産業財産権〕
○出願状況(計 0 件)
○取得状況(計 0 件)
6. 研究組織
(1)研究代表者
大谷 将土 (OTANI, Masashi), 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 博士研究員, 研究者番号: 90636416
(2)研究分担者 (3)連携研究者