

徹底した放射性背景事象除去による 最高感度マヨラナニュートリノ探索への挑戦

Highly sensitive search for Majorana neutrinos with intensive radioactive background rejection

(個人推薦)

代表研究者	東北大学 学際科学フロンティア研究所 Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University	小原脩平 Shuhei OBARA
協同研究者	東北大学 ニュートリノ科学研究センター 東北大学 ニュートリノ科学研究センター 東北大学 ニュートリノ科学研究センター Research Center for Neutrino Science, Tohoku University Research Center for Neutrino Science, Tohoku University Research Center for Neutrino Science, Tohoku University	清水格 池田晴雄 丸藤祐仁 Itaru SHIMIZU Haruo IKEDA Yoshihito GANDO

Majorana nature of neutrinos ($\nu = \nu^c$) has an important role to reveal the neutrino mass mechanism and supporting the matter dominant universe. Various experiments have searched for the evidence via neutrino-less double-beta decay (0vbb), but still not been observed yet due to the remaining radioactive backgrounds. The KamLAND-Zen experiment, a leading project of 0vbb search, is also limited by the radioactivity, especially contamination on the surface of a nylon-made balloon (one of the inner detector vessels). We newly developed a polyethylene naphthalate (PEN) based balloon. It has a sensitivity to radioactivity via scintillation emission and could reduce 99.7% of backgrounds for 0vbb. In this study, we established the fabrication techniques of the PEN-based balloon vessel, improved the background rejection capability with pulse-shape discrimination, and started to proto-type test at the Kamioka mine, Gifu, Japan. In addition, the current running phase of the KamLAND-Zen 800 released a new result on the 0vbb search. This is the most restricted lower limit on the half-life of 0vbb decay, however, the radioactive backgrounds on the nylon remain. In the future upgrade program, so-called KamAND2, it is expected most of their background would be rejected by introducing our developed PEN balloon.

研究目的

本研究では、いまだ解明されていないニュートリノのマヨラナ性の検証を最終目的として、国際共同実験で世界最先端を走っている KamLAND-Zen 実験に新しい検出器(発光性バルーン)を新規導入することで、徹底した背景事象除去およびさらなる高感度化に挑戦する。

ニュートリノは近年の日本人ノーベル物理学賞受賞にもあったように、ニュートリノ振動という現象

をとらえたことで、質量をもつことが明らかになった。しかしながらニュートリノが自身の反粒子と同一であるという性質(マヨラナ性, $\nu = \nu^c$)を持つかどうか未だ明らかになっていない。この問題を解決するために唯一現実的な実験的検証方法がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(0vbb)の探索である。0vbb が見つければ、それはニュートリノがマヨラナ性を持つことの証明になり、またこの性質があることで現在の物質優勢宇宙の成り立ちにおいてニ

ニュートリノが重要な役割を果たしたことがわかる。さらに 0vbb 信号探索の過程においてニュートリノの質量機構の解明にもつながる。

0vbb 信号は世界中で精力的に探索されているものの未発見であり、現在は KamLAND-Zen 実験がその崩壊寿命に対して厳しい制限を与えている[1]。ここで感度を制限しているのは、検出器中心部にあり 0vbb 崩壊を起こす原子核 ^{136}Xe を保持しているナイロンフィルム製バルーン(25 μm 厚、直径約 2m)の表面や素材内部に付着している放射性不純物である。これはすでに徹底的に洗浄することで $0(10^{-12})$ g/g までは低減できるが、我々の目指す 0vbb 発見のためにはさらに減らす必要がある。

フィルムの洗浄や原料見直しで低減できる放射性物質除去には限界があるため、新たにバルーン自体に発光性能をもたせることを提案した[2,3]。ポリエチレンナフタレート(PEN)をバルーンフィルム材料として採用する。これにより放射線があった場合に自己発光することで信号と背景事象を分離することが可能になり、この不純物由来の背景事象を 99.7% 除去できる見通しである。本研究ではこの発光性バルーンのテストサイズ作成のための技術確立を行い、将来的に KamLAND-Zen 実験に導入した際に確実に背景事象除去ができるようにするものである。

研究経過

KamLAND 検出器内部へ導入する際には、開口部が狭くなっているために傘のように折り畳んで検出器内部へ入れ、その後膨らませる必要がある(Fig.1)。

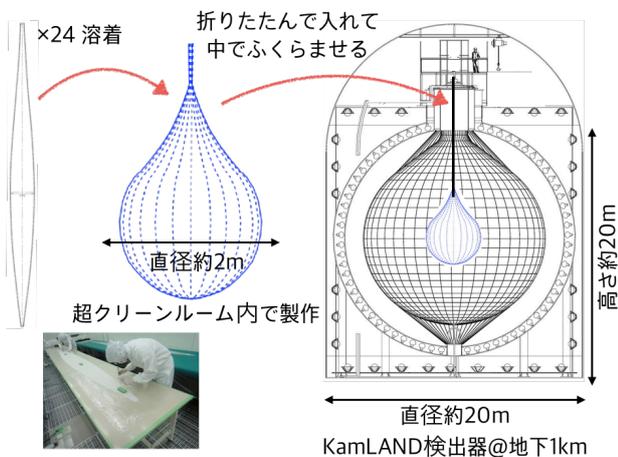


Figure 1

このため薄いフィルムでバルーンを作成し折り畳み可能なようにする必要がある。バルーンは計 24 個の

ゴアを熱溶着にて接着して成型するが、かなり薄いフィルムのためピンホールが存在してしまう。これの補修のため、従来のナイロンフィルムではアロンアルファ等の瞬間接着剤にてパッチを当てていたが、PEN では瞬間接着剤の類では接着ができなかった。これについては、温度調整機能付きの半田ごての先端を用いてピンポイントで簡易的に熱溶着することで補修が可能であるとの見通しを得た。加熱温度は最大でも約 237°C であり、十分半田ごてで対応可能な範囲であることが幸いした。接着剤と違いフィルム以外の不要な追加素材を使わずに済むため放射性不純物の付着・含有を防ぐ面でも非常に好ましい。接着剤の選定も並行して進めたが、接着までに乾燥時間が 1 日程度必要で、実際の作業手順・必要日数を考えるとあまり現実的とは言えなかった。さらに熱溶着の際には(1)237°C まで升温し(2)3.5 秒間キープ(3)加熱を切り 80°C まで冷却という過程を辿るが、作業室内の温度、特に湿度によって最適なパラメータが微妙に変わることが経験的にわかっていた。これはフィルム中に含まれる水分量に依存すると予想しており、水分の増減によって加熱時の気泡のできやすさが異なり、ひいてはピンホールリークの原因となりうる。部屋の湿度とフィルム水分量、溶着パラメータの相関を明らかにすれば、作業時の湿度から溶着パラメータの微調整が可能になると思われた。雨天時・晴天時で PEN フィルム中に含まれる水分量を測定比較したが、雨天時にすぐに水分量が上昇するというよりもややゆっくりと上昇し、またややゆっくりと減少していく傾向が見られた。作業日の湿度というよりは 1 週間以上の長期的な天候に依存することがわかり、湿度と溶着パラメータの微調整は自明ではなかった。実際に熱溶着作業を行う際には、人間が手で溶着機を抑える必要があり、前後左右均等に一定の力を数秒間キープできるかどうかの人為的誤差による影響の方が大きい場合が多い。ナイロンに比べて融点の高い PEN では比較的加熱しすぎでのピンホールは少ないものの、加熱して溶出、ガラス化の時に若干すべりやすい印象があった。ピンホールについては上述の半田ごてで対応可能であるので、人為的な溶着バラつきを防ぐために練習を繰り返すか、現行の KamLAND-Zen 800 のナイロン製バルーン制作時[4]のように特注で溶着機を設定していく必要がある。同じ機器を保管しているため再調整すれば再利用が可能である。

バルーン製造経験のある会社・工場での打ち合わせを当初検討していたが、コロナ禍における移動制限もあって実現しなかった。一方で打ち合わせを経ずともバルーン形状までの熱溶着パラメータの選定と補修方法までを確立できたことは幸いであった。

将来的に実際に KamLAND 内部へ導入した際、背景事象除去を行うためには KamLAND 検出器が本来

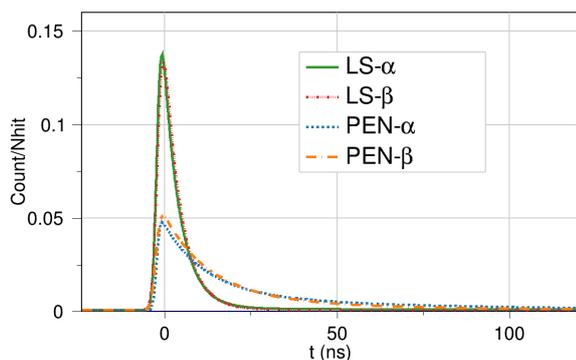


Figure 2

用いている液体シンチレータ(LS)の発光波形と、今回開発しているPEN製バルーンの発光波形が異なることが重要である。仮に同一波形であった場合にはどちらの発光かを見極める必要があり、背景事象除去能力が落ちる。これについては実験室でバイアルサイズであるがそれぞれの発光スペクトルを α 線・ β 線に対して測定し比較した。さらに粒子追跡シミュレーション(Geant4)上に KamLAND 検出器を再現し、実際に背景事象除去が可能であることを示した(Fig. 2, TIPP2021 国際会議での発表資料から再掲)。PENの発光波形がLSの波形と明らかに異なることがわかり、さらにPENでの α ・ β 線に対する波形も違いがみられる。背景事象除去能力に問題ないことが確認できた。本内容は国際会議 TIPP2021 で報告済みである。後述する地下テストスタンドでの試験ではPEN製バルーン内部に液体シンチレータを入れて、実際に放射線による発光をバルーン由来のものか液体シンチレータ由来のものか区別できることを実証する予定である。バイアルサイズでの発光波形の違いを利用した背景事象除去には、機械学習を使わずとも十分な効果が見られたが、実機に近くなるほど複雑な要因が絡むためそう単純ではない。ここで得られたデータをもとにシミュレーションを組みなおし、また機械学習の教師データとして利用することで、本番機導入時の背景事象除去性能を向上させる予定である。

また今回導入するPENを用いた場合、素材の吸収波長帯が現在のKamLANDの液体シンチレータの発光波長帯(~375 nm)と被ってしまうため、液体シンチレータにも改造が必要である。これには波長変換剤(bis-MSB, 発光波長 ~420 nm)を導入することで有効な発光波長へシフトさせることができる。シフト後の波長は光検出器(浜松ホトニクス光電子増倍管)の感度波長帯域に収まっている。現在KamLANDで保有する蒸留器ではbis-MSBを蒸留純化できるほどの高温まで昇温できないため、実機導入前に十分きれいな波長変換剤を選定しておく必要がある。今回いくつかの試料を準備し比較検討を行ったが同じメーカーでもロット差があるため、今後詳細を詰めていく予定である。bis-MSB以外の波長変換剤についての比較検討も行ったが、価格と入手のしやすさ、また液体シンチレータへの溶けやすさの観点からbis-MSBが最も現実的であった。

KamLAND 検出器内部にバルーンを保持するため、上部から固めのホース(コルゲート管、CYLG-95B)で接続しているが、このホース同士の接続作業時に削りカスが発生しやすいことがわかっている。予期しない不純物混入は感度低下を招くため、これを改善するために現在のKamLANDのものとは異なる素材や異なる方法での接続を検討した。液体シンチレータ自体が強い腐食性を示すため、使用可能な素材は限定される。市販の耐油ホース(カナフレックスV.S.-C型耐油性)と配管接続カプラを用いての接続試験も行ったが、含有放射性不純物量が質量比で現在のものよりも多く、さらに重量があるため、合計での放射性不純物量が無視できなかった。ICP-MSでの分析結果はウラン・トリウム・カリウムの含有量がそれぞれ0.004, 0.001, 2.4 $\mu\text{g/g}$ であり、要求値を満たさなかった。使用するホースは従来そのまま、接続方法を再検討していく余地はあると考えている。

KamLAND 検出器のある岐阜県神岡鉱山地下において、将来のKamLAND 検出器のアップグレード(KamLAND2)のためのテストスタンドの建設が進んでいる。KamLAND2では本研究で開発しているPENを用いた発光性バルーンのほかに、新たな液体シンチレータ、新たな量子効率改善型の光検出器、集光ミラーの導入が計画されており、これらの試験を行う予定である。テストスタンドでは第一段階として集光ミラーによって光を効率的に光検出器に集められることを実証し、詳細なミラー形状設計へ反映さ

せる。ここへさらに発光性バルーンを導入し、波形弁別の実証実験を行っていく予定である。現在までにまず地下空洞と実験用タンクの準備、光検出器とミラーの設置が行われている。光ファイバーを中に通しての時間応答キャリブレーションも行い、線源を用いた検出器応答も行う予定である。実際の KamLAND 検出器と違い約 1/10 程度の大きさではあるが、球形状の液体シンチレータとそれを取り囲む光検出器という基本的な構造は再現できているため、実証実験としては十分であると考えられる。

現行の KamLAND-Zen 実験では約 400 kg のキセノンを用いた KamLAND-Zen 400 の結果を受け、崩壊核を約 800 kg に増やした KamLAND-Zen 800 実験が進んでいる。この測定フェーズではまだ発光性バルーンの導入はされておらず、ナイロン製バルーンが導入されている。ここでは先に宇宙線が液体シンチレータ中の炭素原子核やキセノン原子核をたたいて励起させて起きる放射線を解析的に低減することに成功しており、現在 0vbb 崩壊の半減期に対して $T_{1/2}^{0\nu} > 2.3 \times 10^{26}$ yr (90%信頼度)と、世界で最も厳しい制限を更新している(arXiv:2203.02139)。マヨラナニュートリノ有効質量としては $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 36 - 156$ meV の上限値を与えており、3 種ニュートリノの質量の大きさの順番についても逆階層構造と呼ばれる順番をしているかどうかの検証が可能な範囲に食い込んできている。今後さらに感度向上を行うことでもし 3 種のニュートリノ質量の大きさの順番が逆階層構造であった場合には、0vbb 発見の可能性がある領域まで到達したともいえる。これからは、テストスタンドでの発光性バルーンの試験(およびその他のアップグレード項目の性能確認)をクリアしたのち、KamLAND-Zen 実験の高感度化のためのアップグレード(KamLAND2 計画)へ取り組んでいく。

考察

液体シンチレータに溶かす波長変換剤の純化や、バルーンと KamLAND 検出器上部をつなぐコルゲート管の放射線物質低減などいくつか課題は残るものの、PEN 素材を用いてバルーン形状まで成型する方法はほぼ確立されたと言える。導入後の背景事象除去性能は自身の先行研究[2,3]および今回の波形弁別の結果でほぼ実証され、あとは地下テストスタンドで実際の検出器を想定した試験を控えるのみである。

フィルムの表面汚染を防ぐ方法は今回の KamLAND-Zen 800 建設時に確立されており[4]、同様の手法を用いることが可能である。

現行の KamLAND-Zen 800 実験では KamLAND-Zen 400 [1]と同様にナイロン製バルーンを導入しているが、徹底したクリーン環境を実現できたことにより放射性不純物が $O(10^{-12})$ g/g と、原料中の不純物量のまま、1 年以上におよぶ成型作業中に汚さずに実験開始を迎えることができた[4]。しかし実験領域をすべて使うにはまだ含有放射性不純物量が多く、ナイロン製バルーン表面に近い領域については解析から除外する方針となった。放射線は距離を離すことで低減されるがその分だけ実験領域が狭まり、実効的な 0vbb 崩壊核数が少なくなり、本来可能なはずの最大限の実験感度までは達成できない。将来的に本研究の発光性バルーンが導入されれば、この表面付近の背景事象が 99.7%除去できることでほぼ全体積が実験に有効活用できる。宇宙線由来の背景事象が低減されてきているいま、本研究によって導入される発光性バルーンでバルーン由来の背景事象を落としていくことが今後のニュートリノマヨラナ性解明のために重要であることが再確認された。

参考文献

- [1] A.Gando, *et.al.*, *PhRvL.*, **117**, 082503 (2016)
- [2] S.Obara, *NIMA*, **845**, 410 (2017)
- [3] S.Obara, *et.al.*, *PTEP*, **2019**, 7, 073H01 (2019)
- [4] Y.Gando *et.al.*, *JInst*, **16**, 8, 08023 (2021)

研究の発表

口頭発表

1. S.Obara *et.al.*, “A study of self-vetoing balloon vessel for liquid-scintillator detectors”, *International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2021)*, Online, May 24—28, 2021
2. 中村陸生, “KamLAND2-Zen: 発光性ミニバルーンでの背景事象除去に向けた研究開発”, *日本物理学会第 76 回年次大会*, オンライン, 2021 年 3 月 12 日—15 日

誌上発表

1. S.Obara *et.al.*, “A study of self-vetoing balloon vessel for liquid-scintillator detectors”, Proceedings in the International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2021) (unpublished yet)
2. S.Abe *et.al.*, “First Search for the Majorana Nature of Neutrinoless in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen”, arXiv:2203.02139 [hep-ex] (2022) (unpublished yet)
3. 中村陸生, “KamLAND2-Zen における発光性バルーンでの波形弁別による ^{212}Bi - ^{212}Po 背景事象除去に向けた開発研究”, 東北大学修士論文 (2021 年 3 月)