

KamLAND2-Zen に向けた ^{10}C 除去効率の研究

Study on ^{10}C Tagging Efficiency for KamLAND2-Zen

東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻
竹内敦人

1 背景

現代の素粒子・原子核物理学における課題の一つとして、ニュートリノのマヨラナ性の検証が挙げられる。その方法として、現状唯一の現実的なものがニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索である。

我々が行う KamLAND-Zen 実験は、 ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ の半減期に対して最も厳しい制限を与えている実験で、ナイロン製ミニバルーンに ^{136}Xe 含有液体シンチレータを入れ、KamLAND 検出器に導入することで、そのシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) で観測する。

KamLAND-Zen 実験の将来計画として、検出器改良により集光量を向上させる KamLAND2-Zen 実験が計画されている。集光量を KamLAND の 5 倍まで増やし、Q 値付近でのエネルギー分解能 (RMS) を 4% から 2.5% 以下まで改善することで、通常の二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$) によるバックグラウンドを減らし、ニュートリノの質量階層構造において逆階層構造ほぼ全体を網羅するマヨラナ有効質量 ($m_{\beta\beta}$) $\simeq 20$ meV 程度まで感度を上げることを目標としている。

2 KamLAND2-Zen のバックグラウンド

KamLAND-Zen 実験のこれまでの観測では、 $2\nu\beta\beta$ 、 ^{214}Bi の β^- 崩壊、 ^{10}C の β^+ 崩壊が主要なバックグラウンドとなっている。一方、KamLAND2-Zen では検出器の改良の結果、 $2\nu\beta\beta$ バックグラウンドは 1/10 以下に減少すると見込まれている。また、 ^{214}Bi についても対策が進められており、 ^{10}C が最も大きなバックグラウンドになると考えられている。 ^{10}C は宇宙線ミューオンが液体シンチレータ中の ^{12}C を破碎して生じるため、ミューオン、破碎時に放出された中性子、 ^{10}C の崩壊を遅延同時計測することでタグできる。しかし、KamLAND におけるタグ効率は 64% にとどまっている。これは、ミューオン事象における大光量の入射により、PMT にハイレートのアフターパルスが生じているためだと考えられている。アフターパルスでトリガーが連続的にかかると、データ

収集回路のメモリがフルになり、データ収集がスタックするため、タグに必要な中性子事象の検出ができなくなる。KamLAND2-Zen で集光量が増加すると PMT のアフターパルスが増えるため、中性子の検出精度が悪くなり、 ^{10}C のタグ効率がさらに下がってしまうことが懸念される。

3 課題

KamLAND2-Zen で ^{10}C のタグ効率が悪化する可能性を踏まえ、新しいデータ収集回路 MoGURA2 と、ボードヒット判定と呼ばれる、ローカルヒット判定によりアフターパルスにかかるトリガーを減らす新しいトリガースキームが提案された [1]。先行研究で、PMT への適当な光量を仮定した上でこのスキームによる ^{10}C のタグ効率の評価が行われたが、この評価は実際に KamLAND2 で生じる光量を反映していないこと、実際に組み込まれる仕様を想定していないことなどから不完全であり、より精密な評価が必要である。加えて、アフターパルスが擬似信号となるため、中性子事象のデータを取得できたとしても事象の再構成がうまくいかない可能性がある。このことを踏まえて KamLAND2-Zen における ^{10}C のタグ効率を評価する必要がある。

4 PMT のアフターパルス測定

現在 KamLAND2 で用いる PMT の候補は Box and Line 型の R12860 HQE である。これに加えて Venetian Blind 型の PMT を用いることが ^{10}C のタグ効率の改善につながる可能性がある。ダイノード構造が異なればアフターパルスのタイミングやレートが異なるため、中性子の検出に与える影響も異なると考えられるからである。そこで、Venetian Blind 型 PMT である R3600 HQE についてアフターパルス性能を調べた。図 1 に示すように、R12860 に比べて、R3600 はアフターパルスレートが 2-3 倍低いことが確認でき、R3600 の使用が ^{10}C のタグ効率の改善に有効である可能性が示唆された。

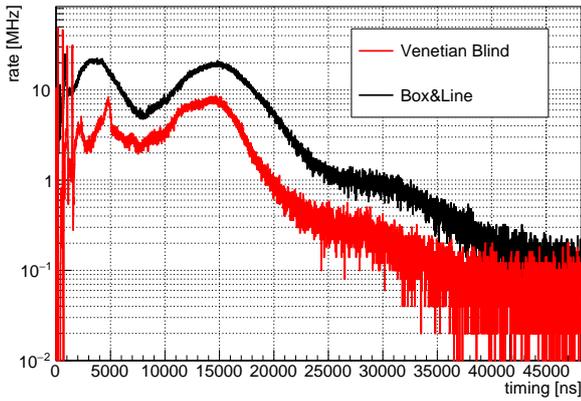


図 1: 2 種類の HQE-PMT のアフターパルスレート

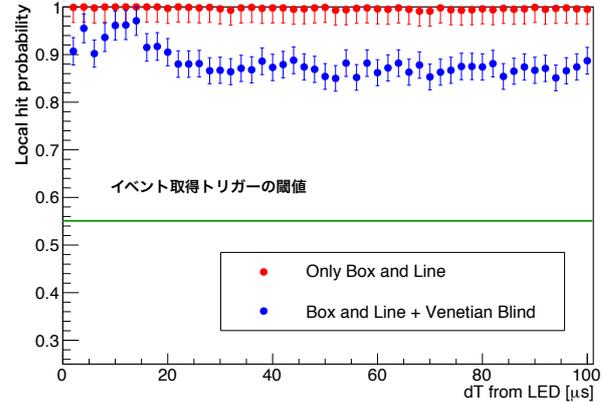


図 3: ローカルヒットの確率。緑線を超えているとイベント取得のトリガーがかかる。

5 ^{10}C タグ効率の評価

4 節で示した結果を踏まえ、R12860 HQE のみを用いた場合と、R3600 HQE を合わせて用いた場合について、ボードヒット判定の有効性を確認し、中性子の検出効率を評価した。評価にあたっては、

- 適切にトリガーがかかるか
- 得られた信号波形から事象の再構成ができるか

の二点に注目した。そのために、LED でミュオン事象を模した大光量を、レーザーで擬似中性子信号を、PMT に入射することで KamLAND2 で生じるであろうレベルのアフターパルスを実測した (図 2)。測定データを元にし

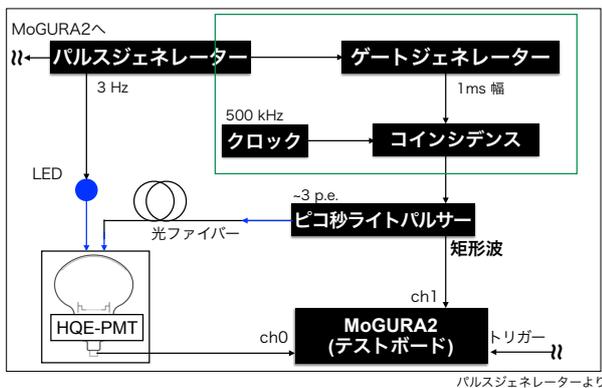


図 2: 測定のセットアップ

てシミュレーションを行うことで、中性子事象に対してトリガーがかかることを確認し、ミュオン事象後からの経過時間の関数として、事象の再構成率を評価した。また、 ^{10}C が作られる際に同時に発生する中性子の数をシミュレーションすることで、 ^{10}C のタグ効率も評価した。

6 結果

図 3 にローカルヒットする確率を、また、ミュオン事象後の中性子検出数の期待値を図 4 に示す。このグラフを全時間で積分することで中性子の検出効率が

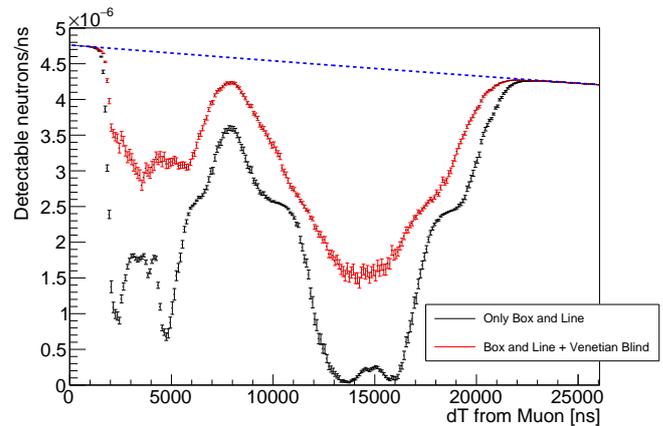


図 4: 検出される中性子の数の期待値。青線で中性子事象を逃すことなく測定できた場合を示す。

得られる。現行の KamLAND における中性子の検出率は 80% 程度と見積られるのに対し、ボードヒット判定を用いると、Box and Line 型 PMT のみを用いる場合 $94.8\% \pm 2.6\%$ 、Venetian Blind 型 PMT を合わせて用いる場合には $96.9 \pm 3.1\%$ になることがわかった。このことから、中性子の検出効率という観点から考えると、Venetian Blind の使用が有効であることが実証できた。FLUKA を用いたシミュレーションから、 ^{10}C が生成された際に 1.6 m 以内に存在する中性子の数を調べたところ、ほとんどの事象で複数の中性子を伴うことから、 ^{10}C のタグ効率は Box and Line のみの場合は 98.87%、Venetian Blind 型 PMT を合わせて用いる場合は 98.90% となった。従って ^{10}C のタグ効率も Venetian Blind PMT の導入で改善されるが、集光量低下による $2\nu\beta\beta$ バックグラウンドの増加を考慮すると導入の必要がないことが確認できた。

参考文献

[1] 本田 佳己, “KamLAND2-Zen に向けた ^{10}C バックグラウンド低減のための新手法の研究開発”, 修士論文, 東北大学, (2018)