

KamLAND2-Zen 実験に向けた長寿命核破砕背景事象の除去のための イメージングディテクター開発

Development of an imaging detector to reduce the long-lived spallation background
in the KamLAND2-Zen experiment

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻

森田大暉

1 研究背景

現代の素粒子物理学において、ニュートリノのマヨラナ性は大きな問題である。マヨラナ性とは、粒子と反粒子の区別がない性質のことで、電荷を持つ素粒子はマヨラナ性は持ち得ない。しかし、ニュートリノは電荷を持たないためマヨラナ性を持つ可能性がある。また、もしニュートリノがマヨラナ性を持っていた場合、ニュートリノの質量が極端に軽いことや物質優勢宇宙が理論的に解明できるため、ニュートリノのマヨラナ性を実験的に確認することは物理的に非常に意義がある。

確認方法には、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の観測がある。二重ベータ崩壊とは、原子核内で2つの β 崩壊が同時に起こる事象で、通常2つの電子と2つのニュートリノが放出される。しかし、ニュートリノがマヨラナ性を持つ場合は放出されるニュートリノ同士が打ち消しあい、2つの電子だけが放出される $0\nu\beta\beta$ 崩壊がおこる。そのため、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測でマヨラナ性を直接証明できる。また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測ではニュートリノ質量の階層性に制限を与えることもでき、物理への意義は深い。以上のことから、世界中で $0\nu\beta\beta$ の観測実験が進められている。

2 KamLAND2-Zen 実験と 長寿命核破砕背景事象 (LLBG)¹

KamLAND2-Zen 実験は、神岡鉱山内地下 1000 m に 1 kt の液体シンチレーター (LS) を有し、中心部に二重ベータ崩壊核である ^{136}Xe を溶かした XeLS を設置した、現在世界最高感度の $0\nu\beta\beta$ 崩壊観測実験である。更なる感度向上の為、LS の発光量向上や集光ミラー付き光電子増倍管の使用など、KamLAND の刷新を行う KamLAND2-Zen 実験計画も進行中である。

一方、克服が必要な課題のひとつに LLBG の除去がある。LLBG は宇宙線ミュオンによって ^{136}Xe が破砕されることで生じる放射性原子核で、多核種存在し、数分～数時間と比較的長い半減期を持つ特徴がある。この長い半減期のため、現在 KamLAND で主流な背景事

象除去手法である遅延同時計測による除去が難しい。また、検出器運転中に観測対象事象源から自然発生するため、物理的に原子核を検出器内から除去することはできない。LLBG は KamLAND-Zen 実験で現在最大の背景事象であり、KamLAND2-Zen 実験においても主要な背景事象になると予想されている。そこで、新たな除去手法を開発することが求められている。

3 本研究の目的

本研究の目的は、「イメージング」によって $0\nu\beta\beta$ 崩壊と LLBG を識別する技術を開発することである。

シグナルである $0\nu\beta\beta$ 事象は β 線のみ発して発光分布は一点に集中するのに対し、LLBG はほとんどの核種で γ 線を伴い、LS 中で γ 線がコンプトン散乱を起こすことから複数の発光点が空間的に広がって分布する (図 1)。LLBG がこのような特徴的な発光点分布を持つことに着目し、これまで点として捉えていた発光点を 2 次元的なイメージで捉える新たな検出手法の開発に着手した。

本研究では、KamLAND2-Zen 実験で LLBG を 90% 識別することを目指し、撮像を行う「イメージングディテクター」の装置構造の決定や、KamLAND2-Zen 実験に導入時の粒子識別アルゴリズムの開発までを包括的に行った。

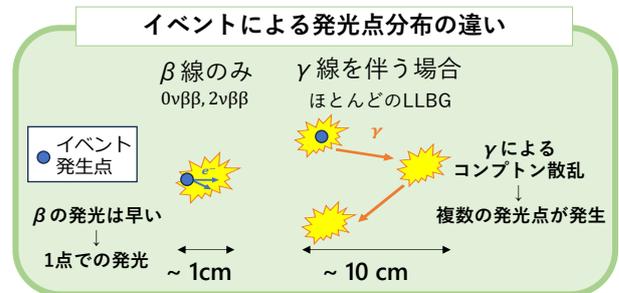


図 1 イメージングによるイベント識別の原理

4 イメージングディテクターの設計

イメージングディテクターでは、光学系で発光点分布を結像させ、光学センサーによって像を検出する。本研究では、光学系の構造を考案・形状最適化することで、識別に十分な性能をもつ検出器を設計した。

設計ではまず、イメージングディテクターの使用方法を定めた。図2右のようにKamLAND2のタンク壁面に $\mathcal{O}(100)$ 台設置し、検出器中心から半径2mの領域(^{136}Xe がある領域)を観測して、その領域内で $0\nu\beta\beta$ とLLBGが十分識別できることを要求した。

次に、光学系の構造を考案し、Zemaxを用いて光学性能を最大化するよう形状を最適化した。発光点の広がりや位置分解能を持つ必要がある。これを満たした上でサイズ、コスト、集光量などを考慮しながら考案と最適化を繰り返すことで、最良の設計を求めた。

本研究で最終的に得られた設計を図2左に示す。これはレンズ→球面ミラーと光が進み、光学センサーの球面状の像面に結像される構造になっている。

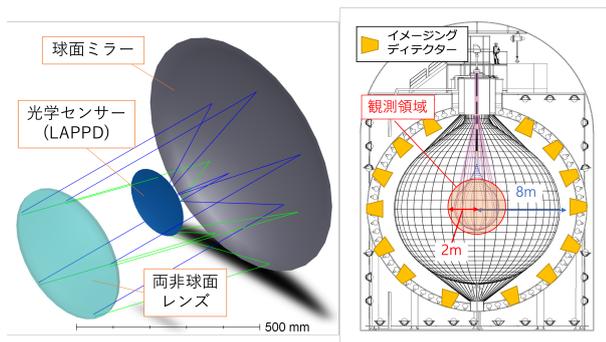


図2 左: イメージングディテクターの構造
右: KamLAND2 への導入イメージ

また、識別アルゴリズムには、Cluster Charge Ratio (CCR) という、光子発生点の密集率に相当するパラメーターを独自に定義した。CCR は複数のイメージングディテクターで光子発生点を再構成した結果から計算され、CCR の大小からイベント種の識別を行なう。

5 識別性能と導入時の感度評価

設計したイメージングディテクターと識別アルゴリズムを用いて、KamLAND2 での $0\nu\beta\beta$ と LLBG の識別効率をシミュレーションで求めた。シミュレーションでは、Geant4 で検出器内での原子核崩壊やシンチレーション光の発生・輸送を、ROBAST で各イメージングディテクター内部の光線追跡・検出を行なった。そして、結果に識別アルゴリズムを適用することで、識別効

率を評価した。この時仮定として、イメージングディテクターは 180 台設置し、KamLAND2 で液体シンチレーターが現在より大光量化されたとした。

図3に示すように、 $0\nu\beta\beta$ 事象(青)と LLBG(橙)の CCR 分布に明確な違いがあり、CCR=0.774 でカットすることでシグナルを 92.3% 残しながら LLBG を 90.1% 除去できることを示した。

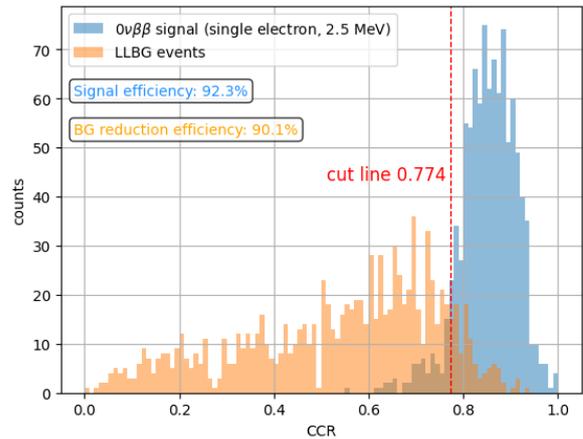


図3 イメージングディテクターの識別性能

また、本研究の識別手法を KamLAND2-Zen 実験に導入した際の、有効マヨラナ質量 ($m_{\beta\beta}$) に対する感度も評価した。評価はシミュレーションで行い、背景事象として LLBG と太陽ニュートリノが残る状況を想定した。その結果、導入した場合は $\langle m_{\beta\beta} \rangle < [13, 42]$ meV (計算に使用する原子核のモデルによる不定性の上下限)、しなかった場合は $\langle m_{\beta\beta} \rangle < [18, 58]$ meV と、感度を大きく向上できることが示された。

6 結論

本研究では KamLAND2-Zen 実験で主要な背景事象になる LLBG を新たな検出手法により克服することを目指した。レンズ + 球面ミラー + 球面の像面という独自の光学設計によりイメージングディテクターの設計を行い、目標性能を達成した上でサイズやコストといった面でも現実的に制作可能である設計を実現した。更に、粒子識別アルゴリズムに CCR という新たなパラメーターを導入することで発光点分布の特徴を有効に抽出することにも成功し、90.1% の除去効率を達成した。本研究で開発した手法を KamLAND2 実験に導入することで有効マヨラナ質量に対する感度を大きく向上できると結論づけられた。

参考文献

- [1] S. Abe et al., (2023)., PhysRevC, 107(5), 054612.