

修士論文

KamLAND2 実験に向けた
ソフトウェアトリガーの研究開発
Development of Software Trigger for KamLAND2

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

浅見祥宏

令和三年

概要

ニュートリノ振動の発見でニュートリノが質量を持つことが明らかとなり、ニュートリノがマヨラナ性を持つ可能性が浮上してきた。ニュートリノがマヨラナ粒子であることを現実的に示す唯一の方法が、ニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) 探索である。KamLAND では、液体シンチレータを用いて、2重ベータ崩壊核 ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の検出を目指す、KamLAND-Zen800 実験が現在進行中である。現在、エネルギー分解能の向上や背景事象の低減を狙う KamLAND2 実験が計画されている。これに伴い、新たなデータ収集システム (DAQ) が開発中である。新型 DAQ システムは、生産終了となった修理部品への対応やミューオン事象後の長時間波形取得、超新星爆発事象の全検出などを目的としている。これら目的の達成を可能とするために、RFSoc を使用した新型フロントエンド回路 (FEE) や、コンピュータを用いてソフトウェア的に物理事象判定を行うソフトウェアトリガーの導入を予定している。ソフトウェアトリガーは従来使用されてきたハードウェアトリガーよりも複雑なトリガーロジックを実装することが可能である。FEE から送られてくる PMT の位置情報やヒット時間、電荷などの情報を取得し、位置に依存したトリガーしきい値を設けることができる。

本研究では KamLAND-Zen800 実験に先行導入するに当たり、KamLAND 初となるソフトウェアトリガーの現行トリガーからの優位性及び、現実的な処理速度で解析を行えるかの検証を行った。優位性の確認では位置依存のトリガーしきい値を設けることによって、検出器外側の背景事象のトリガーレートを変えることなく、中心部の 0.3MeV 以下の低エネルギー事象検出率を向上させることができることを確認した。処理速度では、想定データサイズに対して十分処理可能な高速な処理速度を実現できていることが確認できた。

目次

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 1 |
| 第 2 章 | ニュートリノ物理学 | 3 |
| 2.1 | 標準模型とニュートリノ | 3 |
| 2.2 | ニュートリノ振動と質量階層構造 | 4 |
| 2.2.1 | ニュートリノ振動 | 4 |
| 2.2.2 | ニュートリノ振動の観測 | 5 |
| 2.2.3 | ニュートリノの質量階層構造 | 5 |
| 2.3 | マヨラナニュートリノ | 6 |
| 2.3.1 | マヨラナ粒子 | 6 |
| 2.3.2 | シーソー機構 | 7 |
| 2.3.3 | ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索 | 7 |
| 第 3 章 | KamLAND | 11 |
| 3.1 | KamLAND 実験 | 11 |
| 3.2 | KamLAND のニュートリノ検出原理 | 11 |
| 3.2.1 | 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出 | 11 |
| 3.2.2 | 電子散乱によるニュートリノの検出 | 12 |
| 3.3 | KamLAND 検出器 | 13 |
| 3.3.1 | 外部検出器 (Outer Detector, OD) | 13 |
| 3.3.2 | 内部検出器 (Inner Detector, ID) | 13 |
| 3.4 | KamLAND-Zen 実験 | 15 |
| 3.5 | KamLAND2 実験 | 16 |
| 3.5.1 | エネルギー分解能の向上 | 16 |
| 3.5.2 | 低バックグラウンド化 | 17 |
| 3.5.3 | KamLAND2-Zen 実験での到達感度 | 18 |
| 第 4 章 | データ収集システム | 21 |
| 4.1 | KamLAND のデータ収集システム | 21 |
| 4.2 | KamDAQ | 21 |
| 4.2.1 | KamFEE | 22 |
| 4.2.2 | トリガーとトリガー回路 | 22 |
| 4.3 | MogDAQ | 24 |
| 4.3.1 | ベースライン回復回路 (BaseLine Restorer, BLR) | 25 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------|----|
| 4.3.2 | MoGURA | 25 |
| 4.3.3 | MoGURA Trigger | 26 |
| 4.4 | KamLAND2 実験におけるデータ収集システム | 28 |
| 第 5 章 | トリガーデザイン | 31 |
| 5.1 | ハードウェアトリガーとソフトウェアトリガー | 31 |
| 5.2 | ソフトウェアトリガーへの要求 | 31 |
| 5.3 | トリガーフロー | 32 |
| 5.3.1 | Level0 Trigger | 32 |
| 5.3.2 | Level1 Trigger | 33 |
| 5.3.3 | Level2 Trigger | 34 |
| 第 6 章 | ソフトウェアトリガーの評価 | 37 |
| 6.1 | 低エネルギー事象の検出 | 37 |
| 6.2 | シミュレーションの概要 | 37 |
| 6.2.1 | Geant4 | 37 |
| 6.2.2 | 物理事象 | 37 |
| 6.2.3 | ダークノイズ | 38 |
| 6.3 | TOF 減算型トリガーのロジックとパラメータ | 38 |
| 6.3.1 | パラメータの最適化 | 40 |
| 6.3.2 | トリガー効率 | 41 |
| 6.3.3 | インナーバルーン中の ^{214}Po の検出率 | 41 |
| 6.4 | ソフトウェアトリガーの処理速度評価 | 44 |
| 6.4.1 | インプットデータ | 44 |
| 6.4.2 | Level2 Trigger の処理速度 | 44 |
| 第 7 章 | 結論と今後の展望 | 47 |
| 7.1 | 結論 | 47 |
| 7.2 | 今後の展望 | 47 |
| 付録 | | 49 |
| A | TOF ポイント 135 点の場合の位置とトリガー効率 | 49 |
| 謝辞 | | 51 |
| 参考文献 | | 51 |

目次

| | | |
|------|------------------------------------------------|----|
| 2.1 | KamLAND 実験によって観測された反電子ニュートリノの生存確率 | 5 |
| 2.2 | ニュートリノの有効マヨラナ質量と最も軽いニュートリノの質量の関係 | 6 |
| 2.3 | $2\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram | 8 |
| 2.4 | $0\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram | 8 |
| 2.5 | 二重ベータ崩壊における電子の合計エネルギー | 8 |
| 3.1 | KamLAND の位置と神岡鉱山内部 | 11 |
| 3.2 | 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出 | 12 |
| 3.3 | PMT の内部構造 | 14 |
| 3.4 | 典型的な 1 p.e. 信号 | 14 |
| 3.5 | KamLAND 検出器 | 15 |
| 3.6 | KamLAND-Zen 実験の検出器の構造 | 16 |
| 3.7 | ニュートリノの有効マヨラナ質量と最も軽いニュートリノの質量の関係 | 17 |
| 3.8 | ^{238}U 崩壊系列 | 18 |
| 3.9 | エネルギー分解能の向上による KamLAND2-Zen での到達感度目標 | 19 |
| 4.1 | KamLAND の DAQ システム | 21 |
| 4.2 | KamFEE ボード | 22 |
| 4.3 | KamDAQ のトリガー回路とその動作模式図 | 23 |
| 4.4 | ミュオン信号のオーバーシュートとアフターパルス | 25 |
| 4.5 | MoGURA ボード | 26 |
| 4.6 | ヒットベーストリガーコマンド発行概略図 | 26 |
| 4.7 | ゼロサプレッション 概念図 | 27 |
| 4.8 | ミュオン信号後の NHit 分布 | 28 |
| 4.9 | データフォーマット | 29 |
| 4.10 | KamLAND2 実験の DAQ システム全体図 | 30 |
| 5.1 | トリガーフロー | 32 |
| 5.2 | Level1 Trigger のトリガー概念図 | 33 |
| 5.3 | 中心から外れた物理事象のヒットタイミング分布 | 34 |
| 5.4 | TOF 減算型トリガーで用いる TOF ポイント | 35 |
| 6.1 | PMT の瞬間的なヒットレート | 39 |
| 6.2 | ダークノイズ混入率 | 39 |

| | | |
|------|------------------------------------------------------------|----|
| 6.3 | TOF ポイントのしきい値 | 39 |
| 6.4 | NHit Window の違いによる事象位置の決定精度 | 40 |
| 6.5 | 検出器中心からの距離に対するエネルギーしきい値 | 41 |
| 6.6 | 異なる領域における現行トリガーとソフトウェアトリガーのトリガー効率 | 42 |
| 6.7 | 発生点ごとの ^{214}Po のエネルギースペクトル | 43 |
| 6.8 | インナーバルーン領域におけるトリガー効率 | 43 |
| 6.9 | シミュレーションデータ | 44 |
| 6.10 | ソフトウェアトリガーの処理速度 | 45 |
| 7.1 | KamLAND2-Zen 実験の検出器構想 | 48 |
| A.1 | TOF ポイント 135 点の位置 | 49 |
| A.2 | TOF ポイント 135 点の異なる領域における現行トリガーとソフトウェアトリガーのトリガー効率 | 50 |

表目次

| | | |
|-----|----------------------------------------|----|
| 2.1 | 物質を構成する素粒子一覧 | 3 |
| 3.1 | 液体シンチレータの成分 | 14 |
| 3.2 | バッファオイルの成分 | 15 |
| 4.1 | KamLAND と KamLAND2 の DAQ システムやそのツールの比較 | 30 |
| 6.1 | トリガーパラメータ | 42 |

第 1 章

序論

素粒子物理学において、素粒子の性質や反応を記述する理論として標準模型が広く知られている。標準模型では素粒子ニュートリノの質量はゼロとされてきたが、ニュートリノ振動の発見により非常に小さいがゼロではない質量を持つことが明らかとなった。もし、ニュートリノがマヨラナ粒子であると仮定すれば、シーソー機構によりニュートリノが他の素粒子に比べて質量が極端に軽いことを説明でき、さらには我々の物質優勢宇宙の様相を解明するレプトジェネシスへと繋がる。ニュートリノがマヨラナ粒子であることを現実的に示す方法がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の検出である。現在、世界中で $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索が進んでいる。

KamLAND では、光電子増倍管 (PMT) を用いた液体シンチレータ型粒子検出器を保有し、その検出器を用いた KamLAND 実験によってこれまで原子炉ニュートリノで起こるニュートリノ振動 [1] や地球ニュートリノの初観測 [2] などで成果を挙げてきた。現在は ^{136}Xe を用いた $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の KamLAND-Zen 実験を行っている。液体シンチレータはナイロンで作られた直径 13m のアウターバルーンに包まれおり、さらにその内側に ^{136}Xe 含有液体シンチレータを包むインナーバルーンがある。 ^{136}Xe を含む約 380 kg のキセノンを用いた KamLAND-Zen400 実験では、4 年間のデータの解析により ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期に対して $T_{1/2}^{0\nu} > 10.7 \times 10^{25}$ year という制限 [3] を与えた。2019 年 1 月からはキセノンを約 745 kg の倍に増やした KamLAND-Zen800 実験が現在まで進行中である [4]。

現在、現行の KamLAND 実験からエネルギー分解能の向上や背景事象の低減を図る KamLAND2 実験が計画されている。分解能の向上には高量子効率 PMT や集光ミラー、大光量液体シンチレータの使用が予定されている。背景事象の低減には発光性バルーンが導入され、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の背景事象であった $^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po}$ 連続崩壊事象のタギング効率が改善される。

また、KamLAND2 実験へ向けて新型のデータ収集システム (DAQ) が開発中である。DAQ には PMT にヒットした信号の波形やその情報を取得するフロントエンド回路 (FEE) があり、新型 FEE ではミューオン事象後の不安定核崩壊による中性子捕獲事象の検出のための長時間波形取得や近傍超新星爆発事象の全検出が可能となった [5]。さらに、本研究でもある、物理事象の検出 (トリガー) をコンピュータで処理を行うソフトウェアトリガーや、コンピュータ同士のネットワーク転送を行う DAQ フレームワークが開発されている。

KamLAND では現在まで、ADC (Analog to Digital Convertor) や FPGA (Filed Programable Gate Array) を用いたハードウェアトリガーが使用されてきた。ハードウェアトリガーは高速な演算を得意とするが、その一方で高度なトリガーロジックを実装するのが困難である。KamLAND ではアウターバルーンの放射性不純物が背景事象となることが問題であり、現行のハードウェアトリガーではこの問題の解決が困難であった。しかし、近年のソフトウェア技術の向上により、CPU で演算を行うソフトウェアトリガーの実装が現実味を帯びてきた。ソフトウェアトリガーは FEE から送られてくる PMT の位置情報やヒット時間、電荷などの情報から、高度なトリガーを実装することができる。このようなソフトウェアトリガーを KamLAND-Zen800 実験へ先行導入するに当たり、ソフトウェアトリガーの現行からの優位性や、それを実装した上で現実的な速度で処理できるかを検証することが本研究

の目的である。

本論文では第 2 章でニュートリノの基本的性質を述べ、第 3 章及び第 4 章で KamLAND 実験とそのデータ収集システムの概要を説明する。第 5 章では本研究の本題である、ソフトウェアトリガーのトリガーデザインを述べ、その第 6 章、第 7 章でソフトウェアトリガーの有用性・処理速度をそれぞれ論じる。最後に第 8 章として、本研究の結論、及び今後の展望について述べる。

第 2 章

ニュートリノ物理学

素粒子は物質を構成する最小単位である。素粒子には幾つか種類があり、ニュートリノはその素粒子の一種である。素粒子物理学において、ニュートリノの性質や現象は標準模型という理論によって記述されている。本章では、現在までの理論や実験から解明されているニュートリノの性質や、標準模型を超える理論から予想される性質・現象について述べる。なお、途中式では自然単位系を用いる。

2.1 標準模型とニュートリノ

現在、素粒子物理学において素粒子の性質や反応を記述する理論として「標準模型」が広く知られている。標準模型における物質を構成する素粒子を表 2.1 に示す。自然界には、4 つの基本的相互作用 (重力相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用) が存在することがわかっている。このうち重力相互作用を除いた 3 つの相互作用により標準模型の素粒子のうち物質を構成する粒子はクォークとレプトンに分けられる。その中でもニュートリノは電荷をもたないレプトンに属し、弱い相互作用を介してのみ他の粒子と相互作用をする。そのため、同じレプトンである電子やミューオンなどに比べて観測が難しい。

標準理論では従来の実験からニュートリノの質量はゼロとされてきたが、ニュートリノ振動の発見により、非常に小さいが 0 ではない質量を持つことが明らかとなった。標準模型ではニュートリノの質量を説明できないため、標準模型を超えた新たな理論が必要とされている。

表 2.1 物質を構成する素粒子一覧

| 名称 | 電荷 | 第 1 世代 | 第 2 世代 | 第 3 世代 |
|------|---------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| クォーク | $\frac{2}{3}$ | u (アップ) | c (チャーム) | t (トップ) |
| | $\frac{1}{3}$ | d (ダウン) | s (ストレンジ) | b (ボトム) |
| レプトン | 0 | ν_e (電子ニュートリノ) | ν_μ (ミューニュートリノ) | ν_τ (タウニュートリノ) |
| | -1 | e (電子) | μ (ミューオン) | τ (タウオン) |

2.2 ニュートリノ振動と質量階層構造

2.2.1 ニュートリノ振動

それぞれのクォークとレプトンには3世代存在し、これをフレーバーという。ニュートリノが時間発展に伴ってフレーバーを変えるような現象を「ニュートリノ振動」と言う。これはニュートリノに3つの質量の異なる粒子が存在するために起こる。素粒子は粒子であるとともに同時に波でもあり、質量の異なる固有状態を持つ ν_1, ν_2, ν_3 はそれぞれ異なる振動数を持つ波として空間を伝わる。実際に観測されるニュートリノは3波の合成であり、ニュートリノが空間を飛ぶ間に合成波の位相が変化し、フレーバーが移り変わる。

以下、時間発展でニュートリノ振動が起こることを導出する。まず、あるニュートリノのフレーバ固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) の関係は以下で表される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (2.1)$$

ここで、 $U_{\alpha i}$ はフレーバーと質量固有状態の混合度合いを表す行列であり牧-中川-坂田 (MNS) 行列と呼ばれる。各質量固有状態同士の混合を回転行列によって表すことで MNS 行列は以下のようにかける。

$$\begin{aligned} U_{\alpha i} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_\nu} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_\nu} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta_\nu} \\ -s_{12}s_{13}c_{12}e^{i\delta_\nu} - c_{23}s_{12} & -s_{23}s_{13}s_{12}e^{i\delta_\nu} + c_{23}c_{12} & s_{23}c_{13} \\ -c_{23}s_{13}c_{12}e^{i\delta_\nu} + s_{23}s_{12} & -c_{23}s_{13}s_{12}e^{i\delta_\nu} - s_{23}c_{12} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

なお、 i 番目の質量固有状態と j 番目の質量固有状態の混合角を θ_{ij} として

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij} \quad (2.3)$$

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} \quad (2.4)$$

としている。また、 δ_ν は CP 位相角と呼ばれ、CP 対称性の破れ度合いを表している。

ここで、各質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の時間発展は、はエネルギー固有値 E_i を用いて

$$|\nu_i\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \quad (2.5)$$

と表されるので、フレーバー固有状態の時間発展は

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle e^{-iE_i t} \quad (2.6)$$

簡単のため、 ν_e 及び ν_μ の2世代のニュートリノ混合を考えると、式 2.2 の MNS 行列は、

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle \quad (2.7)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta_{12} |\nu_1\rangle + \cos \theta_{12} |\nu_2\rangle \quad (2.8)$$

となる。よって、 $t = 0$ で ν_e として放出されたニュートリノが ν_μ として観測される確率は

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu(0) | \nu_\mu(t) \rangle|^2 \\ &= 2 \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \theta_{12} + 2 \operatorname{Re} \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \theta_{12} \exp\left(-i \frac{\Delta m_{12}^2 L}{2E}\right) \\ &\simeq \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

となる。ここで Δm_{12}^2 は 2 世代間の質量 2 乗差であり、この式からニュートリノの存在確率は、その飛行距離 L に従って振動することがわかる。ただし、ニュートリノの質量は非常に小さく、相対論的近似ができるとし、式 2.6 中の E_i は

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.10)$$

のように計算した。

2.2.2 ニュートリノ振動の観測

ニュートリノ振動が世界で初めて確認されたのは 1998 年である。日本の Super-Kamiokande 実験が大気ニュートリノの $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ の振動を観測した [6]。

さらに、KamLAND 実験では原子炉から飛来するニュートリノのニュートリノ振動を観測した [1]。図 2.1 のように 2 周期分、反電子ニュートリノの生存確率が振動していることが確認された。

前節で述べたようにニュートリノ振動が起こるためにはニュートリノが 0 でない質量を持つ必要がある。ニュートリノ振動が起きていることを実験的に確認したことで、標準理論では質量を持たないと仮定したニュートリノが有限の質量を持つことが逆説的に示された。

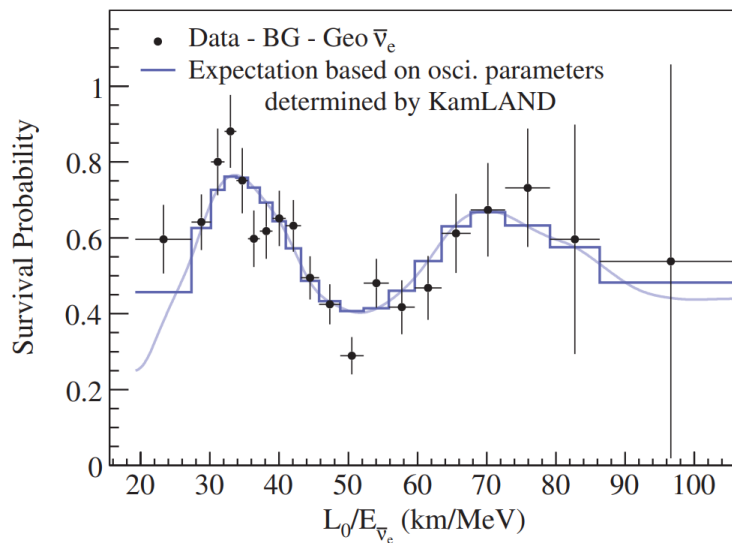


図 2.1 KamLAND 実験によって観測された反電子ニュートリノの生存確率 [1]

2.2.3 ニュートリノの質量階層構造

ニュートリノ振動の結果から 3 つの異なる質量を持つニュートリノの混合であることがわかったが、得られるのは相互の質量の差、つまり相対質量であり、絶対質量は解明されていない。現在のニュートリノ振動の結果から 3 つの質量の関係は以下の候補がある。

- 正常階層構造 (Normal Hierarchy, NH): $m_1 < m_2 \ll m_3$
- 逆階層構造 (Inverted Hierarchy, IH): $m_3 \ll m_1 < m_2$
- 準縮退構造 (Quasi Degenerate, QD): $m_1 \simeq m_2 \simeq m_3$

ここで、 m_1 と m_2 の大小関係が決まっているのは、電子ニュートリノが物質中を通過する際に周囲の大量の電子の

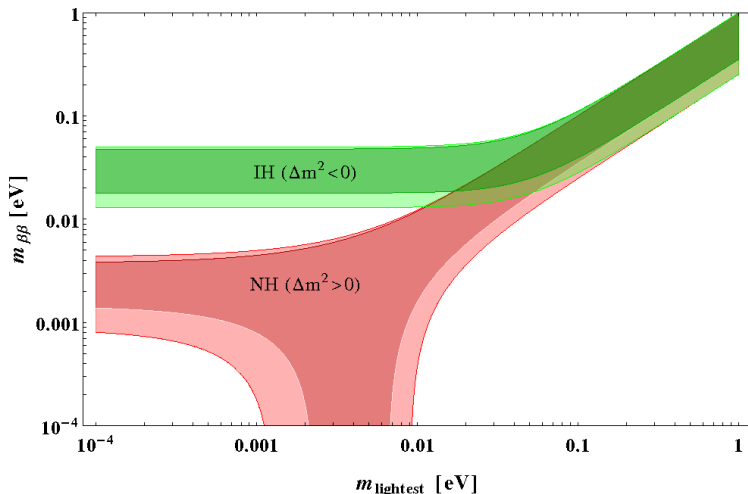


図 2.2 ニュートリノの有効マヨラナ質量と最も軽いニュートリノの質量の関係 [7]。緑色の帯が逆階層構造 (IH) を、赤色の帯が正常階層構造 (NH) の理論的な制限を示している。

存在によりポテンシャルを感じるという MSW 効果による。

ニュートリノの質量階層構造は様々な実験によって検証されているが、後述するニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索では質量階層構造に制限をかけることもできる。これはニュートリノがマヨラナ性を持つ場合、最も軽い質量と電子ニュートリノの質量の期待値に相当する有効マヨラナ質量の関係から制限をかけることができるというものである。

2.3 マヨラナニュートリノ

2.3.1 マヨラナ粒子

標準模型において、クォークやレプトンのディラック粒子はそれぞれ逆電荷の反粒子を持つ。ニュートリノは電荷を持たないので中性的な反ニュートリノが存在する。ニュートリノ振動の観測により、ニュートリノが有限の質量を持つ事が示されたため、ある左巻きニュートリノ ν_L をそのニュートリノよりも速い座標系から見ると、スピンの向きが右巻きのように見える。つまり、ニュートリノは左巻きと右巻きの両方の成分を持っているはずである。ところが、ニュートリノにはスピンの向きが左巻きのニュートリノ、右巻きの反ニュートリノしか実験的に観測されていない。これを理論的に解釈付けるマヨラナ粒子の存在が仮説立てられた。マヨラナ粒子は、粒子と反粒子が同一であるという性質 (マヨラナ性) を持ち、1937 年に Ettore Majorana によって定式化された [8]。また、マヨラナ性を持つニュートリノをマヨラナニュートリノと呼ぶ。

マヨラナ粒子は粒子と反粒子に区別がないため、荷電共役変換において、

$$\psi = \psi^C \quad (2.11)$$

と表される。右巻きと左巻きのニュートリノが存在するとき、一般的な質量項は

$$\mathcal{L}_{mass} = \frac{1}{4}(\overline{\phi_L})^C m_L \phi_L - \frac{1}{4}(\overline{\phi_R})^C m_R \phi_R - \frac{1}{2}\overline{\phi_R} m_D \phi_L + h.c. \quad (2.12)$$

で与えられる。 m_D, m_R, m_L はそれぞれディラック質量、右巻きマヨラナ質量、左巻きマヨラナ質量である。

2.3.2 シーソー機構

ディラック粒子は右巻き粒子と左巻き粒子の結合によって質量を獲得するため、左巻きの粒子しかないニュートリノは他の素粒子に比べて極端に質量が軽い。ニュートリノのみが電子などの荷電レプトンに比べてヒッグス場との結合定数を小さくしなければならないのは不自然であるため、別の説明が必要である。ニュートリノがマヨラナ粒子であった場合、左巻き成分と右巻き成分で異なる質量を独立にもつことが可能であるため、重い右巻きニュートリノを導入することで、ディラック粒子よりも非常に軽い左巻きニュートリノを説明できる。式 2.12 を変形してディラック質量項とマヨラナ質量項をまとめると、次のような質量項が現れる。

$$\begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$m_L = 0$ とし、これを対角化して得られる固有値 m_1, m_2 について、右巻きニュートリノが発見されていないことから、 $m_D \ll m_R$ と仮定すれば、

$$m_1 = \frac{m_D^2}{m_R} \ll m_D \quad (2.14)$$

$$m_2 = m_R \left(1 + \frac{m_D^2}{m_R}\right) \sim m_R \quad (2.15)$$

となる。以上から、左巻きニュートリノの質量がディラック質量に比べ極めて小さい事が説明できる。この機構をシーソー機構と呼ぶ。

2.3.3 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索

ニュートリノのマヨラナ性を検証するための現実的でもっとも有効な手段は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の検出であると考えられている。

まず、原子核番号 Z 、質量数 A の原子は、原子核内の中性子が次の式 2.16 のようにベータ崩壊を起こし、電子と反電子ニュートリノを放出する。



ある特定の原子核では、このベータ崩壊がほぼ同時に起こる二重ベータ崩壊 ($2\nu\beta\beta$ 崩壊) という事象が確認されている。 $2\nu\beta\beta$ 崩壊は、式 2.3 のように原子核内でベータ崩壊を 2 回同時に起こすことでより安定な原子核に崩壊する現象である。



$2\nu\beta\beta$ 崩壊は質量数 A が偶数の場合にのみ起こる現象であり、さらに、原子番号 Z が 2 つ変われば安定化するという崩壊核に限られる。その数は 36 種類であり、これまでに 10 種類の原子核で $2\nu\beta\beta$ 崩壊が直接観測されている。 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram を図 2.3 に示す。

ここで、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、式 2.18 のように $2\nu\beta\beta$ 崩壊の過程でニュートリノと反ニュートリノの打ち消しあい、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) が許される場合がある。



$0\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram を図 2.4 に示す。また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊はニュートリノによるエネルギー損失がないため、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊によって放出される 2 つの電子の運動エネルギーの合計が、図 2.5 のように Q 値でピークを持つ。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の実験では、このピークが観測できると思われる。

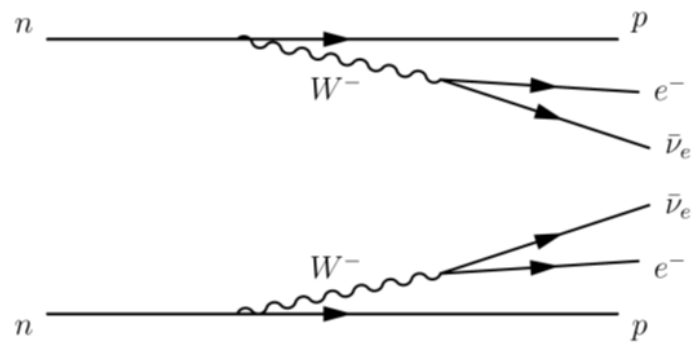


図 2.3 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram。原子核の中で 2 個の中性子が陽子に変化する。2 個の電子と 2 個の反電子ニュートリノは崩壊によって放出される。

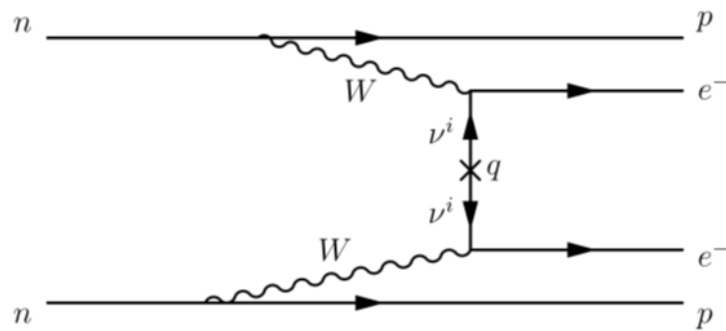


図 2.4 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の Feynman diagram。原子核の中で 2 個の中性子が陽子に変化する。2 個の電子が放出されるは崩壊し、ニュートリノは放出されない。

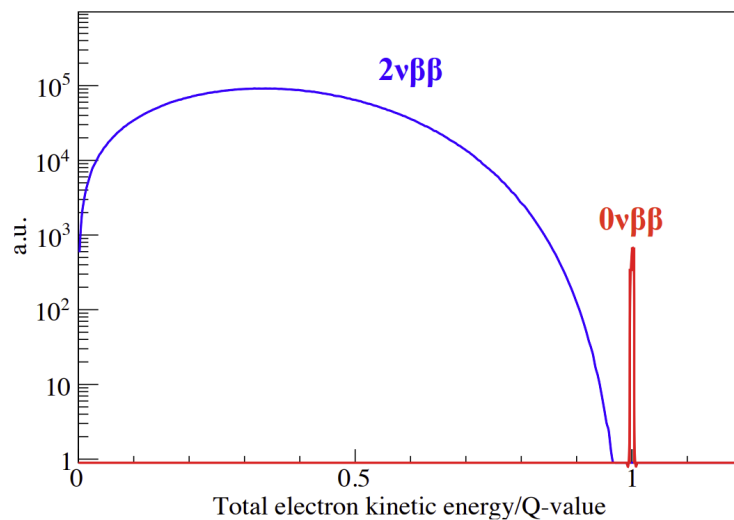


図 2.5 二重ベータ崩壊における電子の合計エネルギー

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測によってニュートリノがマヨラナ粒子であることを証明できれば、前述したシーソー機構により、ニュートリノの質量が他の素粒子と比べて極めて小さいことを説明できる。また、ニュートリノがレプトン数保存則を破ることが分かれば、我々の物質優勢宇宙の様相を解明するレプトジェネシスへと繋がる。

さらに、その崩壊率(半減期)からニュートリノ質量に対する制限を得ることができる。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ は、

$$T_{1/2}^{0\nu} = \frac{1}{G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2} \quad (2.19)$$

と表される。 $G^{0\nu}(Q, Z)$ は Q 値と質量数によって決まる位相因子と呼ばれる量であり、 $M^{0\nu}$ は原子核内での $0\nu\beta\beta$ 崩壊の起こりやすさを表すパラメータである。この関係から、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索によって 2.2.3 節で述べたようなニュートリノの質量階層構造及び、有効マヨラナ質量に制限をつけることができる。

第 3 章

KamLAND

この章では KamLAND 実験および KamLAND-Zen 実験、またその将来計画について述べる。

3.1 KamLAND 実験

KamLAND では液体シンチレータを用いてニュートリノを検出する実験をしている。実験場所は岐阜県飛騨市神岡町神岡鉱山の池ノ山山頂地下 1000 m に位置している。地下深くに設置している理由は、宇宙から飛来する宇宙線ミュオンの影響を抑える為であり、地表の 10 万分の 1 に低減されている。KamLAND 検出器は、液体シンチレータを 1 kton 格納しており、液体シンチレータが放射線によって生じさせられる光を光電子増倍管 (PMT) で検出している。主に反電子ニュートリノによる物理事象が観測対象であり、地球内部で生成されるニュートリノや、日本国内の原子炉から発生するニュートリノを観測し、成果を上げてきた。また、後述するように、2011 年からは二重ベータ崩壊核である ^{136}Xe を検出器内に導入し、ニュートリノを伴わない二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊探索を行う KamLAND-Zen 実験を行っている。

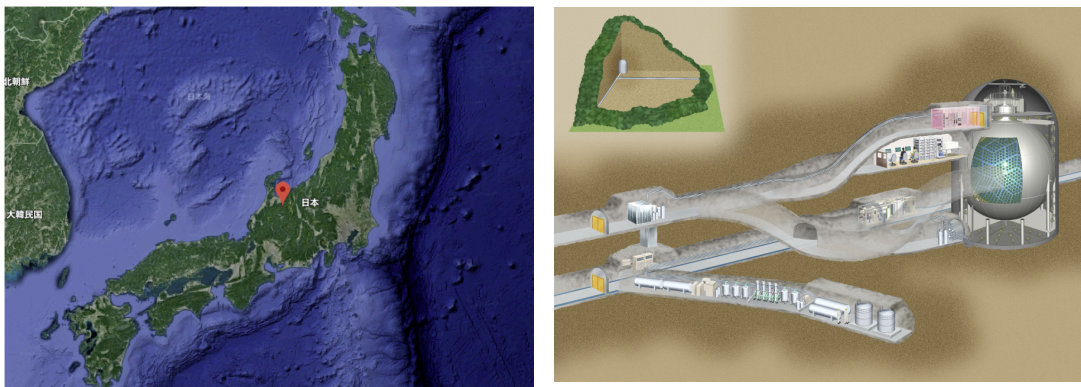


図 3.1 KamLAND の位置 (左) と神岡鉱山内部 (右)

3.2 KamLAND のニュートリノ検出原理

3.2.1 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出

液体シンチレータ内の陽子がニュートリノと逆ベータ崩壊を起こすことを利用して、反電子ニュートリノを検出することができる。反電子ニュートリノの例として、原子炉で核分裂する際に生じるニュートリノである原子炉

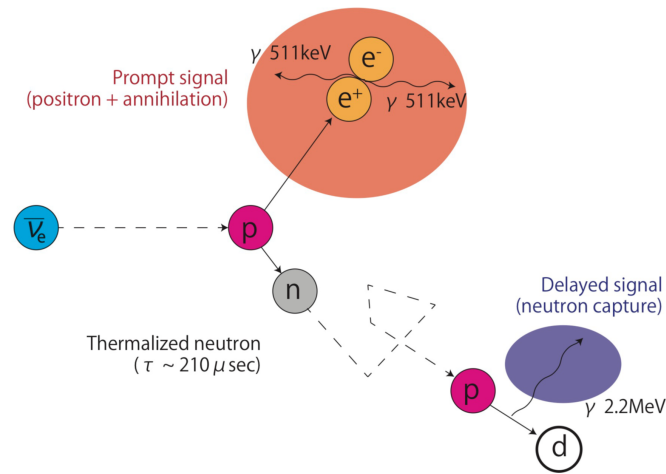


図 3.2 逆ベータ崩壊による反電子ニュートリノの検出

ニュートリノが上げられる。

逆ベータ崩壊は次の式で表される。

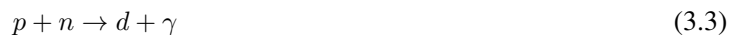


この反応で中性子と陽電子が放出される。陽電子は式 3.2 のように電子と対消滅し、511 keV の 2 本の γ 線を放出する。



この際、 e^+ 及び γ 線により液体シンチレータが発光して、物理事象の信号として観測される。これを先発信号 (Prompt signal) と呼ぶ。

一方、中性子は周囲の原子核と弾性散乱を繰り返し、210 μ s の寿命で陽子に捕獲される。その際に 2.2 MeV の γ 線を放出し、重陽子となる。



この γ 線と液体シンチレータの反応を後発信号 (Delayed signal) と呼ぶ。逆ベータ崩壊の一連の流れをまとめたものが図 3.2 である。

これら 2 つの信号を検出し、その時間差を用いて逆ベータ崩壊であることを解析する、遅延同時計測 (Delayed Coincidence) を行うことで極めて背景事象の少ない反電子ニュートリノを観測することができる。

3.2.2 電子散乱によるニュートリノの検出

電子散乱はニュートリノが液体シンチレータ中の電子を散乱させる反応である。散乱電子が荷電粒子として液体シンチレータを発光させる。電子散乱では全てのフレーバーのニュートリノにおいて反応する。式 3.4 中の x はフレーバーを表す。



電子散乱では反応に必要なエネルギー閾値が存在しないため、低エネルギーの太陽由来のニュートリノを観測することができる。ただし、逆ベータ崩壊のような後発信号を持たない単発信号であるため、背景事象との区別が難しくなる。

3.3 KamLAND 検出器

KamLAND 検出器は大きく分けて、図 3.5 のように外部検出器と内部検出器の 2 層から成る。

3.3.1 外部検出器 (Outer Detector, OD)

外部検出器は、直径 19 m・高さ 20 m の円柱形タンク内部に白色反射材と光電子増倍管が取り付けられており、純水で満たされている。検出器のタイプとしては水チェレンコフ検出器であり、岩盤からの放射線の遮蔽、また岩盤を透過してくる宇宙線ミュオンを検出する機能を持つ。当初は東京大学のカミオカンデで使用されていた PMT を 225 本を使用していたが、実験開始当初から故障する PMT が増え始め、ミュオンの検出効率が低下したため、2016 年の 1 月から 4 月にかけて改修が行われた。改修では 225 本すべての PMT が取り除かれ、新しく 140 本の PMT が導入された [9]。

3.3.2 内部検出器 (Inner Detector, ID)

内部検出器は直径 18 m のステンレス球とその内部構造を差す。内部には、液体シンチレータやバッファオイル、液体シンチレータの発光を観測する光電子増倍管などがある。また、PMT とバッファオイルの間にはアクリル版があり、PMT やステンレスタンクに残存する放射性不純物のラドンを遮蔽する役割を持つ。

内部検出器の主な構成要素の詳細を述べる。

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT)

PMT は 1 光電子 (photo electron, p.e.) 相当の微弱な光信号を検出できる高時間分解能光センサである。図 3.3 に PMT の内部構造を参考に示す。PMT の光電面に光子が入射すると光電効果により電子が放出される。この光電子が複数のダイノードにより 5×10^6 倍まで電荷が増幅される。PMT からの典型的な 1 p.e. 信号は図 3.4 のように現れる。この信号は第 4 章で説明されるデータ収集システムによって検出と記録がされる。また、非物理事象の 1 p.e. としてダイノードから熱的に光電子が放出されることがあり、これをダークノイズと呼ぶ。一般的にそのダークレートは 20 kHz 程度である。KamLAND では 20-inch PMT と 17-inch PMT という二種類の PMT が使われており、20-inch PMT は 544 本、17-inch PMT は 1325 本、計 1879 本の PMT がステンレス球内部に取り付けられている。20-inch PMT はカミオカンデ検出器で使用されていた PMT に耐油加工を施したもので、電子増幅部 (ダイノード) がベネチアンブラインド型と呼ばれる大口径 PMT に適した構造となっている。一方 17-inch PMT は、ダイノードがボックスアンドライン型と呼ばれる構造を採用しており、時間分解能や線形性の面で 20-inch PMT に優れた特性を持つ。17-inch PMT は 20-inch PMT と同一のサイズであるが、光電面の時間分解能の悪い円周部をマスクしているために 17-inch PMT と呼ばれる。

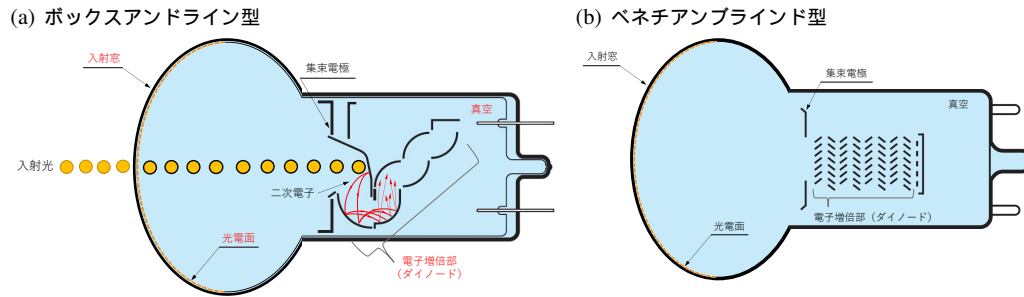


図 3.3 PMT の内部構造 [5]([10] の図 4-12 を一部使用)

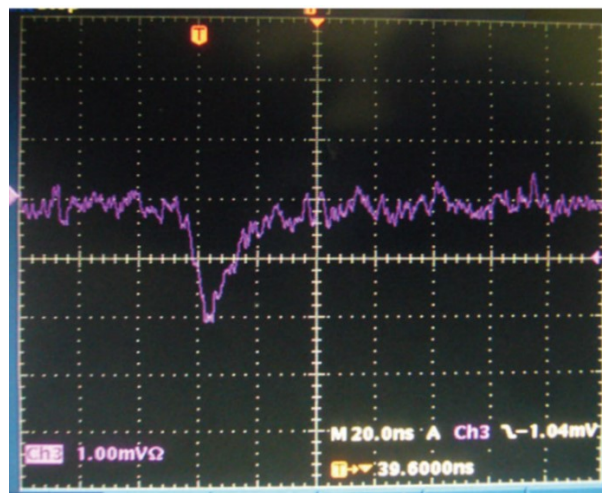


図 3.4 典型的な 1 p.e. 信号。(author?) [11] より引用。グリッドは横軸が 20 nsec 間隔、縦軸が 1 mV 間隔である。

液体シンチレータ (Liquid Scintillator, LS)

シンチレータは放射線により励起されることにより発光する特性を持つ物質である。液体シンチレータは個体のシンチレータよりも液液抽出や蒸留による純化が可能である点で優れている。集光量や発光波長での減衰長などのほか、放射性不純物を取り除くための純化が容易であるか・経年劣化しにくいかなども考慮した成分構成になっている。なお、後述する KamLAND-Zen 実験で新たにキセノンを溶かした LS が導入されたため、アウターバルーン内部の LS は Kam-LS と呼ばれる。また、液体シンチレータは厚さ約 135 μm 、直径 13 m のナイロンで作られたアウターバルーンに包まれている。液体シンチレータの成分を表 3.1 に示す。

表 3.1 液体シンチレータの成分

| 成分 | 組成式 | 体積比率 (濃度) |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| ドデカン (N12) | $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ | 80% |
| 1,2,4-トリメチルベンゼン (ブサイドクメン, PC) | C_9H_{12} | 20% |
| 2,4-ジオフェニルオキサゾール (PPO) | $\text{C}_{15}\text{H}_{21}\text{NO}$ | 1.36 g/l |

バッファーオイル

PMT・アクリル板・アウターバルーンのそれぞれの間はバッファーオイルで満たされている。バッファーオイルは外部からの γ 線がアウターバルーン内部の LS での発光を防ぐ役割の他に、アウターバルーンに浮力を与えて保持する役割もある。バッファーオイルの成分を表 3.2 に示す。

表 3.2 バッファーオイルの成分

| 成分 | 組成式 | 体積比率 (濃度) |
|------------|----------------|-----------|
| ドデカン (N12) | $C_{12}H_{26}$ | 53% |
| イソパラフィン | C_nH_{2n+2} | 47% |

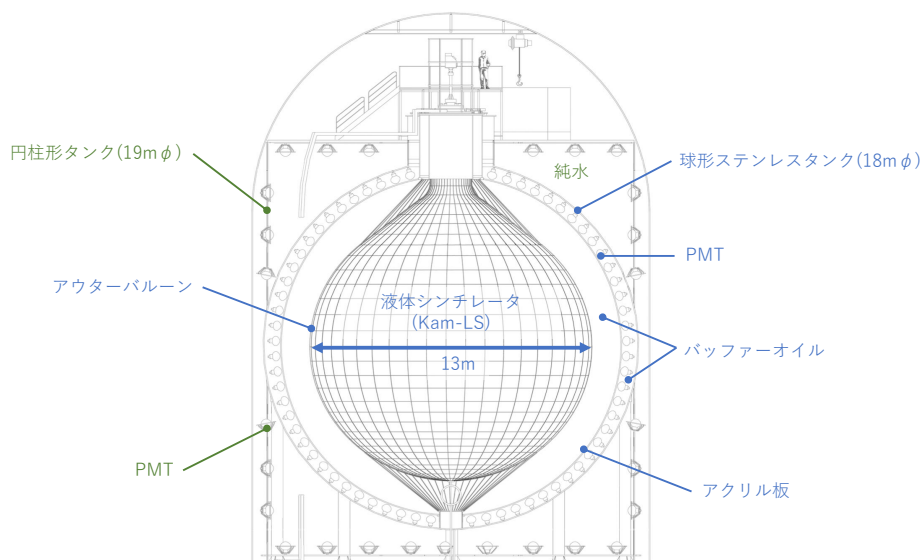


図 3.5 KamLAND 検出器

3.4 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索を目的とする実験である。崩壊核である ^{136}Xe を溶解させた LS を満たしたインナーバルーンを、図 3.6 のように KamLAND 内部にインストールした。

KamLAND 実験から追加したのは以下 2 つである。

インナーバルーン (Inner Balloon, IB)

インナーバルーンは $25\ \mu\text{m}$ 厚のナイロン製フィルムを溶着して貼り合わせた構造になっている。また、背景事象を極限まで抑えるために ^{238}U および ^{232}Th などの放射性不純物の混入量を $10^{-12}\ \text{g/g}$ のオーダーまで抑えたフィルムを特注して製作された。

キセノン含有液体シンチレータ

インナーバルーンは ^{136}Xe を濃縮したキセノンガスを溶解した液体シンチレータで満たされている。液体シンチレータの成分構成は、デカンが 82%、プソイドクメンが 18%、PPO が $\sim 2.5\ \text{g/L}$ 、キセノンガスが $\sim 3\%$ となっている。なお、Kam-LS と区別するために Xe-LS と呼ばれる。

2011 年から 2015 年まで、 ^{136}Xe を含む約 380 kg のキセノンを用いて実験を行った。このフェーズを KamLAND-Zen400 実験と呼ぶ。4 年間のデータの解析により、 ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期に対して $T_{1/2}^{0\nu} >$

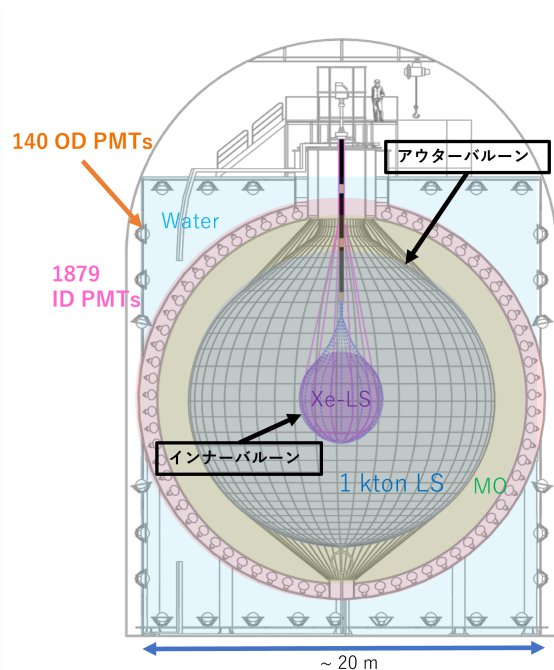


図 3.6 KamLAND-Zen 実験の検出器の構造

10.7×10^{25} year という制限 [3] を与えた。これは 2020 年 9 月に GERDA 実験の最終結果 $T_{1/2}^{0\nu} > 18 \times 10^{25}$ year の制限 [12] が与えられるまで、世界で最も厳しい制限であった。また、式 2.19 より与えられる有効マヨラナ質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ については、核行列要素の不定性を考慮したうえで $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61\text{--}165$ meV という制限を与えている。こちらについては、GERDA 実験の最終結果 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 79\text{--}180$ meV を上回る制限を現在も与えている。これにより、2 章の 2.2.3 節で説明したニュートリノの質量階層構造について図 3.7 に示すような制限を与えている。

現在、キセノンを約 745 kg の倍に増やした、KamLAND-Zen800 実験を行っており、2019 年 1 月からデータを取得している [4]。

3.5 KamLAND2 実験

現在、現行の KamLAND 実験からエネルギー分解能や向上や背景事象の低減を図る、KamLAND2 実験が計画されている。本節では現在考えられている改良案を以下に紹介する。

3.5.1 エネルギー分解能の向上

エネルギー分解能を向上させるには光収量を増加させればよい。KamLAND2-Zen 実験においては、以下のアップデートにより ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊 Q 値 (= 約 2.5 MeV) 付近で現状の 4.2% から約 2% まで改善し、主要背景事象である $2\nu\beta\beta$ の Q 値領域へのしみ込みが低減される。

高量子効率 PMT

PMT は光電面から入射した光子全てを光電子に変換できるわけではない。これを量子効率といい、現在の KamLAND で使われている PMT は最大で 20% 程度であるが、KamLAND2 実験では約 30% に向上させた高量子効率 PMT が導入される予定である。これにより光収量の増加が期待できる。候補として浜松ホトニクス製 R12860 HQE があり研究が進められている [13]。

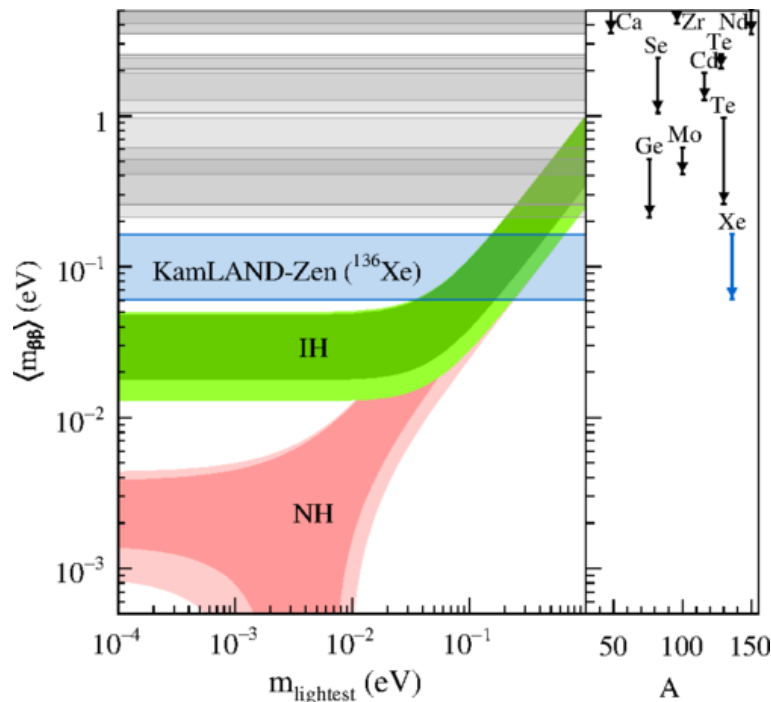


図 3.7 ニュートリノの有効マヨラナ質量と最も軽いニュートリノの質量の関係 [3]。緑色の帯が逆階層構造 (IH) を、赤色の帯が正常階層構造 (NH) の理論的な制限を示している。KamLAND-Zen400 実験から制限がかけられる。図中右側は探索に用いられる原子核の質量数 A と、それぞれの原子核による有効マヨラナ質量が探索された範囲を示している。

集光ミラー

ID PMT の光電面の被覆率は 20-inch PMT が 12%、17-inch PMT が 22% の計 34% である。残り 66% の光子が徒に失われているので、これを PMT に多角形状のミラーを取り付けることで被覆率を大幅に向上させることができる。光収量は最終的に約 2 倍の向上が見込めるため、ミラー形状の最適化や素材評価が研究されている [14]。

大光量液体シンチレータ

エネルギー当たりの発光量が高い LS を導入する。また、透過率も改良することで集光量を増加させる。候補となる溶媒にはリニアアルキルベンゼンがあるが、後述の発光性パルーンとの兼ね合いにより波長変換材 bis-MSB の導入も予定されている [15]。

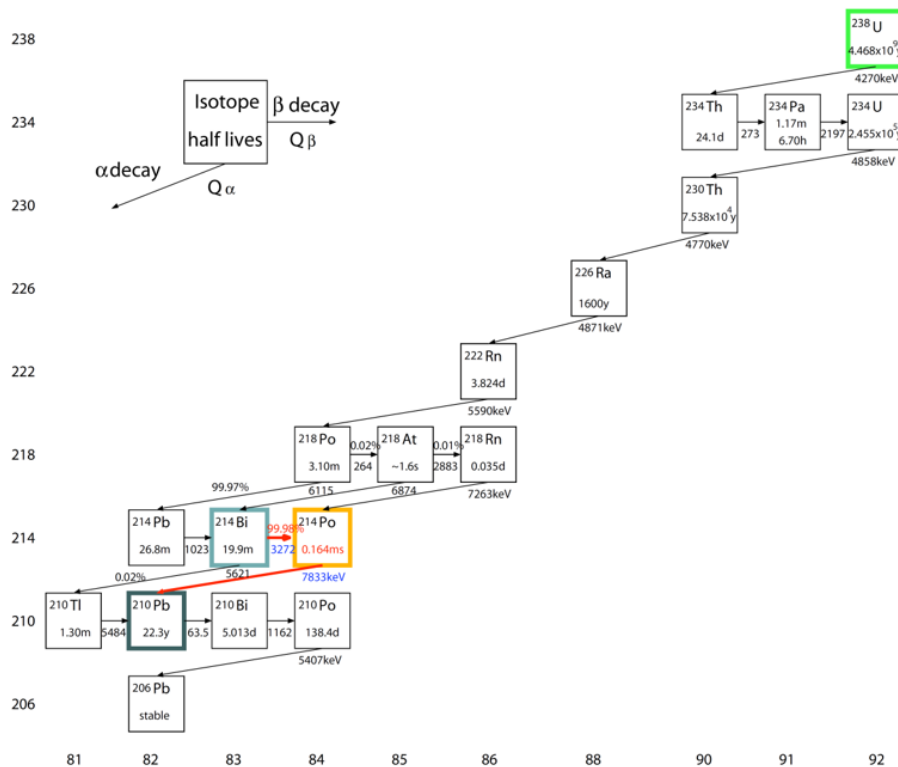
3.5.2 低バックグラウンド化

$0\nu\beta\beta$ 崩壊における背景事象の例として、インナーパルーンの ^{214}Bi の β 崩壊が挙げられる*¹。この背景事象を取り除くために、KamLAND2-Zen 実験で発光性パルーンが導入される予定を以下に説明する。

インナーパルーン中の ^{214}Bi 崩壊事象

^{214}Bi は図 3.8 のように、 ^{238}U 崩壊系列の放射性不純物である。 ^{214}Bi は、 Q 値 3.272 MeV で β 崩壊し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊のエネルギー関心領域 (Region Of Interest, ROI) を覆ってしまう。これは ^{214}Bi 崩壊後の ^{214}Po が α 崩壊す

*¹ その他、背景事象として $2\nu\beta\beta$ 、 ^{232}Th 系列などの放射性不純物、ミューオン核破砕生成物、太陽ニュートリノ、検出器外部からの γ 線が挙げられる [16]

図 3.8 ^{238}U 崩壊系列

る、 ^{214}Bi - ^{214}Po 連続崩壊事象 (パイルアップ) を同時遅延計測によって解析的に除去できる。しかし ^{214}Po が α 崩壊はインナーバルーン内部、もしくはその表面で崩壊した場合、バルーンに吸収され発光しない場合がある (クエンチング)。そのため、インナーバルーン付近では同時遅延計測が行えず $0\nu\beta\beta$ 崩壊の背景事象となる。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の解析にはインナーバルーン中心部の領域のみに制限する事でこの背景事象を除去している。

発光性バルーン

前述した ^{214}Bi による背景事象を取り除く方法として発光性バルーンの導入が考えられている。発光性バルーンは、素材に従来のナイロンではなくポリエチレンテレフタレート (PEN) を用いている。これを導入したことでナイロンバルーンでは問題にならなかった ^{212}Bi - ^{212}Po の背景事象が新たに浮き彫りにされてしまう。この対策として、LS と PEN の発光波形の違いを利用した波形弁別法により解析的な除去により、86.2% 低減することが可能である [17]。

3.5.3 KamLAND2-Zen 実験での到達感度

KamLAND2-Zen 実験でのこれまで述べてきた新たな導入により、5 年間の測定でニュートリノのマヨラナ有効質量の到達感度は 16.7-45.1meV となり [18]、図 3.9 のように逆階層構造領域をほとんど網羅できると見込まれている。

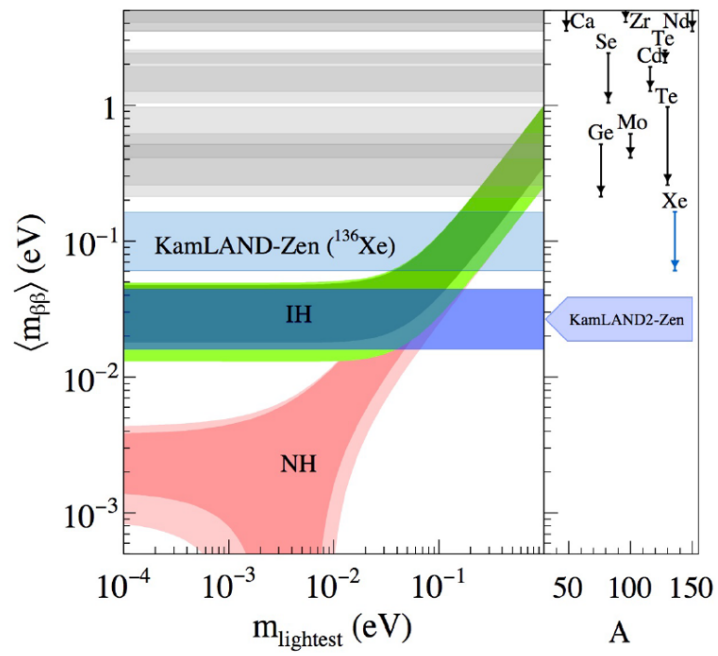


図 3.9 エネルギー分解能の向上による KamLAND2-Zen での到達感度目標 [18]

第 4 章

データ収集システム

この章では KamLAND においてデータ収集 (Data Acquisition, DAQ) を行う二系統の DAQ システム、KamDAQ 及び MogDAQ について述べる。

4.1 KamLAND のデータ収集システム

KamLAND では KamDAQ と MogDAQ (MoGURA DAQ) と呼ばれる二系統の DAQ システムによって PMT からの出力信号を検知・記録している。KamDAQ は KamLAND 完成当初 (2001 年 1 月) から使用されている。一方の MogDAQ は、KamDAQ のフロントエンド回路 (Front End Electronics, FEE) における問題を解決するためのバックアップ用として開発され 2010 年に導入された。これら DAQ システムの構成を図 4.1 に示す。Signal Divider で信号を二手に分け、それぞれが独立にデータ収集を行っている。

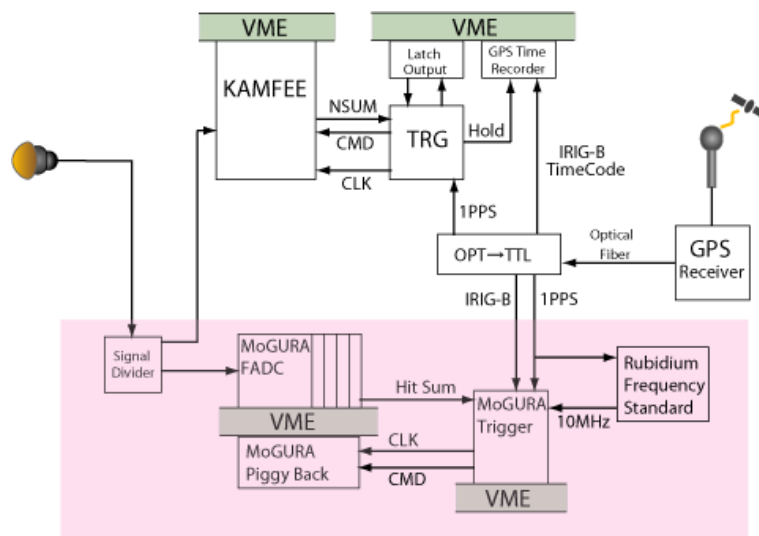


図 4.1 KamLAND の DAQ システム [5]。図中、白背景部分が KamDAQ、薄赤色部分が MogDAQ である。

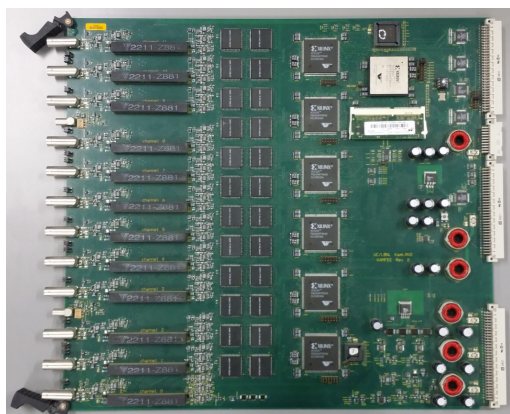
4.2 KamDAQ

KamDAQ は KamFEE と呼ばれる FEE ボードとトリガー回路によって DAQ コンピュータへデータを記録している。KamDAQ は GPS と同期された 40 MHz のクロックにより、全ての KamFEE ボードとトリガ回路が同一システムクロックで稼働している。

4.2.1 KamFEE

KamFEE は図 4.2 に示すように、1 ボードにつき PMT が 12 チャンネル接続可能であり、KamLAND 全体で約 200 枚のボードによって全チャンネルが接続されている。PMT から入力されたアナログ信号は二手に分けられ、一方は PMT 信号の波高に対し、ディスクリミネータがアナログ的にしきい値判定を行う (これを hit 判定と呼ぶ)。もう一方は ATWD(Analog Transient Waveform Digitizer) のキャパシタアレイを使用してアナログ波形がそのまま保持される。KamFEE 上で 12 チャンネル分の hit 判定の和 (hit-sum) を計算しトリガー回路へと送られる。トリガー回路からデータ取得コマンドが発行された場合、ATWD 内コンデンサアレイに保存されていたアナログ信号をデジタル化し、ボード状のメモリに記録する。メモリに記録されたデータは VME 経由で逐次外部のコンピュータに転送される。

(a) KamFEE ボードの写真



(b) KamFEE ボードの概略図

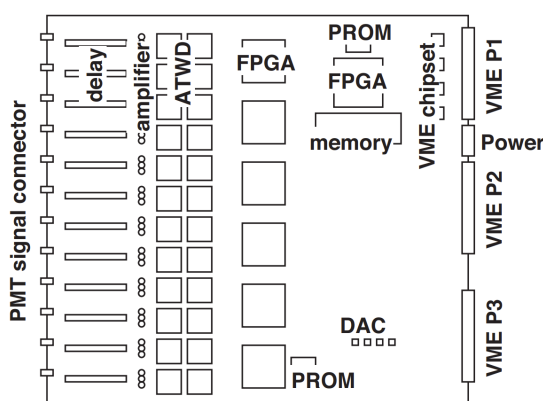


図 4.2 KamFEE ボード [19]

4.2.2 トリガーとトリガー回路

トリガ回路の動作模式図を図 4.3 に示す。トリガー回路では PMT の信号波形の取捨選択をするトリガーを行う。各 PMT の hit 信号は 125 nsec の長さのゲート (ヒットゲート) に引き伸ばすことにより hit 信号を保持 (ラッチ) する。一枚の KamFEE から 4 bit の hit-sum 信号入力を全 KamFEE ボードについて 40 MHz で並列に受ける。この hit-sum をクロック毎に集計した NSum がトリガーしきい値を超えていればデータ取得コマンドが KamFEE へ送られる。KamDAQ では基本的にこの NSum を用いてトリガーを発行している。

また、トリガ回路は神岡鉱山の跡津坑口に設けられた GPS レシーバによる時間情報と同期している。更に、GPS 時刻により校正された 1 Hz のクロックを元に 40 MHz のシステムクロックを生成して、全 KamFEE にシステムクロックを供給している。

トリガータイプ

トリガー回路は、KamLAND 全体や各所での NSum やヒットパターンに基づいてデータ取得コマンドを発行する。データ取得コマンドの種類のことをトリガータイプといい、KamDAQ で扱っている全トリガータイプを挙げる。ここで、強制トリガーは hit 信号に関係なく直接 KamFEE に全チャンネルの波形を取得させ、グローバルトリガーは hit 信号があったもののみトリガーを発行する。

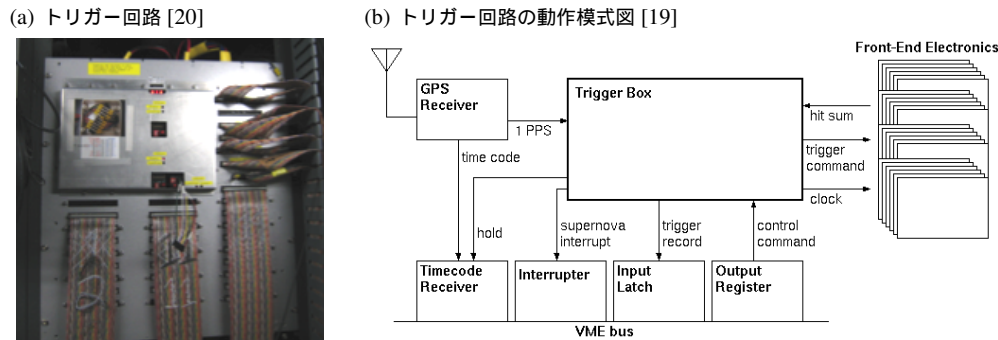


図 4.3 KamDAQ のトリガー回路とその動作模式図

- GPS Triggers

- 1PPS Trigger: 外部トリガー発行に関係なく、GPS の 1PPS 信号を基準としたトリガー。
- 1PPS Global Acquisition Trigger: 外部トリガー発行に関係なく、GPS の 1PPS 信号を基準に、全ての ID と OD に対する強制 DAQ トリガー。
- GPS Trigger: 32 秒毎の強制 DAQ トリガー。

- ID NSum Triggers

- ID Singles Trigger: ID のヒット数 (N_{ID}) が ID-Singles-Trigger Threshold を超えた場合に、ID 全体に発行される DAQ トリガー。
- ID Prompt Trigger: ID のヒット数 (N_{ID}) が ID-Prompt-Trigger Threshold を超えたときに、ID 全体に発行される DAQ トリガー。その後、DAQ が Delayed Time Window の時間幅だけ、ID Delayed Trigger を受け付ける。
- ID Delayed Trigger: ID のヒット数 (N_{ID}) が Delayed Time Window の時間幅内に、ID-Delayed-Trigger Threshold を超えたときに、ID 全体に発行される DAQ トリガー。
- ID Prescale Trigger: ID のヒット数 (N_{ID}) が ID-Presale-Trigger Threshold を超えた場合に、ID 全体に発行される DAQ トリガー。ID-Singles-Trigger Threshold よりも低い Threshold で設定され、主にダークノイズレートの確認のために設置されている。
- OD to ID Trigger: OD NSum Triggers が発行されたときに、ID 全体に発行される DAQ トリガー。

- OD NSum Triggers

- OD Top Singles Trigger: OD Top のヒット数 (N_{top}) が OD-Top-Singles-Trigger Threshold を超えた場合に、OD 全体に発行される DAQ トリガー。
- OD Middle Singles Trigger: OD Middle のヒット数 (N_{middle}) が OD-Middle-Singles-Trigger Threshold を超えた場合に、OD 全体に発行される DAQ トリガー。
- OD Bottom Singles Trigger: OD Bottom のヒット数 (N_{bottom}) が OD-Bottom-Singles-Trigger Threshold を超えた場合に、OD 全体に発行される DAQ トリガー。
- OD Global Singles Trigger: OD 全体のヒット数 (N_{global}) が OD-Global-Singles-Trigger Threshold を超えた場合に、OD 全体に発行される DAQ トリガー。
- ID to OD Trigger: ID NSum Triggers が発行されたときに、OD 全体に発行される DAQ トリガー。

- History Triggers

- **ID History Trigger:** History Time Window の時間幅だけ、ID のヒット数 (N_{ID}) が ID-History-Trigger Threshold を超えたとき、ID 全体に発行されるトリガー。このトリガーでは波形は記録せず、25 nsec 毎に最大 200 nsec の NSum が記録され、その合計が Threshold を超えれば発行される。
- **OD Top History Trigger:** History Time Window の時間幅だけ、OD Top のヒット数 (N_{top}) が OD-Top-History-Trigger Threshold を超えたとき、OD 全体に発行されるトリガー。その他、ID History Trigger と同じようにふるまう。
- **OD Middle History Trigger:** History Time Window の時間幅だけ、OD Middle のヒット数 (N_{middle}) が OD-Middle-History-Trigger Threshold を超えたとき、OD 全体に発行されるトリガー。その他、ID History Trigger と同じようにふるまう。
- **OD Bottom History Trigger:** History Time Window の時間幅だけ、OD Bottom のヒット数 (N_{bottom}) が OD-Bottom-History-Trigger Threshold を超えたとき、OD 全体に発行されるトリガー。その他、ID History Trigger と同じようにふるまう。
- **OD Global History Trigger:** History Time Window の時間幅だけ、OD 全体のヒット数 (N_{global}) が OD-Global-History-Trigger Threshold を超えたとき、OD 全体に発行されるトリガー。その他、ID History Trigger と同じようにふるまう。

• Calibration Triggers

- **ID Calibration Forced Trigger:** レーザ・LED 用の校正装置からボードへ外部トリガーを入力し、ID の KamFEE ボードへ発行される強制トリガー。強制トリガーは該当する全 PMT の波形データを取得する。
- **ID Calibration Global Trigger:** 外部トリガーを入力し、ID の KamFEE ボードへ発行されるグローバルトリガー。グローバルトリガーはヒットした PMT のみの波形データを取得する。
- **OD Calibration Forced Trigger:** 外部トリガーを入力し、OD の KamFEE ボードへ発行される強制トリガー。
- **OD Calibration Global Trigger:** 外部トリガーを入力し、OD の KamFEE ボードへ発行されるグローバルトリガー。
- **Acquire Trigger:** KamFEE の自動校正を行うためのデータ所得 (ベースライン測定, 40 MHz のクロック波形, テスト波形等) に用いられるトリガー。DAQ コンピュータの要求により発行される。

• Other Triggers

- **Supernova Trigger:** NSum によるトリガーロジックで超新星候補となる事象を検出した時、DAQ コンピュータへ超新星候補検出の通知を行い、超新星トリガモードへ移行する。超新星トリガモードは 1 分間継続し、この間はデータ保存のためデータ収集システムに対する一切の操作は禁止される。
- **Disable Trigger:** データバッファがフルに近い状態になった時、トリガーを無効状態にする。
- **Enable Trigger:** データバッファがフルの状態から回復した時、トリガーを有効状態にする。

4.3 MogDAQ

MogDAQ は KamFEE のミューオン信号後のデッドタイム問題を解決するために開発された。デッドタイムは図 4.4 のようなオーバーシュートとアフターパルスにより引き起こされる。

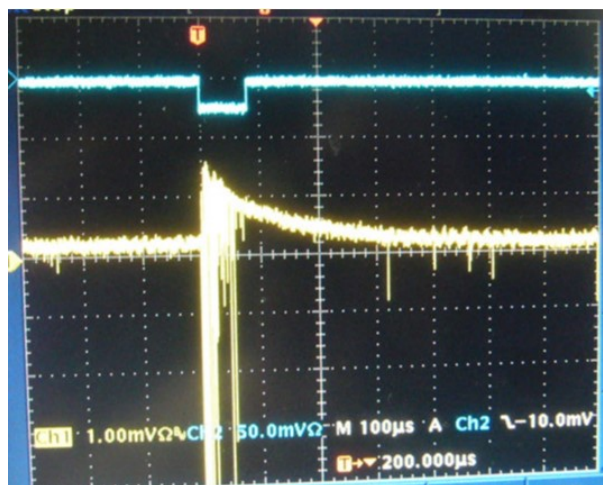


図 4.4 ミューオン信号のオーバーシュートとアフターパルス [11]。信号直後にオーバーシュートが発生し、その間にアフターパルスによる小信号が大量に現れている。

オーバーシュート

KamLAND 検出器には宇宙線に由来するミューオンがおよそ 0.2 Hz の頻度で入射する。ミューオン事象は PMT 一本当たり 1000 p.e. を超えるような大光量イベントとして検出される。このような大光量の入射後は、低周波遮断回路中のコンデンサが再充電されるまでに通常より長い時間がかかり、多少の直流成分が後段に漏れ出す。すると、直流成分が流れることでベースラインの電位が一時的に上昇する現象（オーバーシュート）が起こる。ベースラインからの電位差に対し閾値を設定するディスクリミネータは実効的にヒット閾値が高くなってしまいうため正常に機能しなくなる。これによりミューオン信号後約 1 msec 程のデッドタイムが生じる。

アフターパルス

アフターパルスにはミューオン信号後、速く現れる成分（速い成分）と遅れて現れる成分（遅い成分）が存在する。速い成分は主に光電面に最も近いダイノードでの弾性散乱電子により生じる。遅い成分は PMT 内部の残留ガスが電子によりイオン化されることによって生じる。

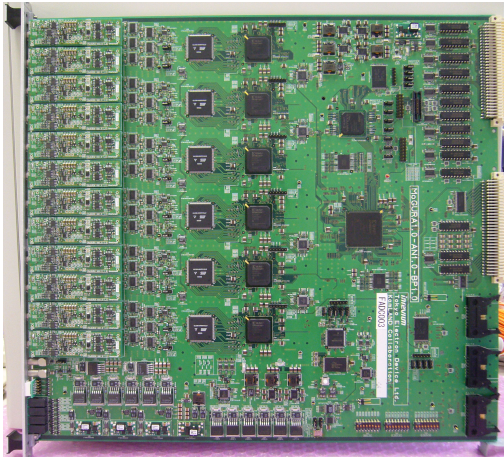
4.3.1 ベースライン回復回路 (BaseLine Restorer、BLR)

BLR 回路はオーバーシュートしたアナログ信号を通常のベースラインに戻させる働きをし、竹本 [11] により開発された。まず信号を二つに分岐させ、片方の信号の正の電圧のみを抽出、さらにそこから正の電圧の中の低周波成分のみを取り出す。最初に分岐させたもう片方の信号との差分を取ることによってベースラインを素早く元の状態に回復させることができる。

4.3.2 MoGURA

Module for General-Use Rapid Application、通称 MoGURA は MogDAQ における FEE である。図 4.5 に MoGURA ボードとその動作模式図を載せる。MoGURA 基板には、ADC インターフェイス用の Front End FPGA(FEF) と基板制御用の System FPGA の他、拡張機能を組み込める User FPGA が搭載されている

(a) MoGURA ボードの写真



(b) MoGURA ボードのチャンネルの動作模式図

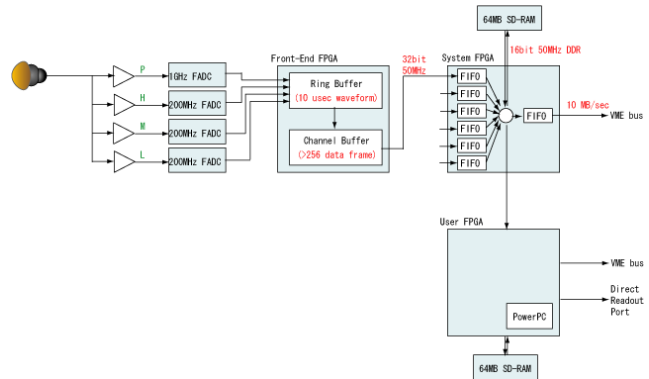


図 4.5 MoGURA ボード

4.3.3 MoGURA Trigger

MoGURA Trigger は、基本的に HitSum の和である NHit に基づいてトリガーコマンドが発行される。NHit は過去一定時間の全ボードの HitSum を集計し、NHIT Thershold を超えればトリガーコマンドが発行される。この NHit の集計に使われる間の時間を NHIT Window と言い、現在は 6 CLK (= 120 ns) である。図 4.6 に、NHIT Window = 3 CLK, TRG Window = 5 CLK, NHIT Threshold = 20 NHIT の場合のトリガーコマンド発行例を示す。

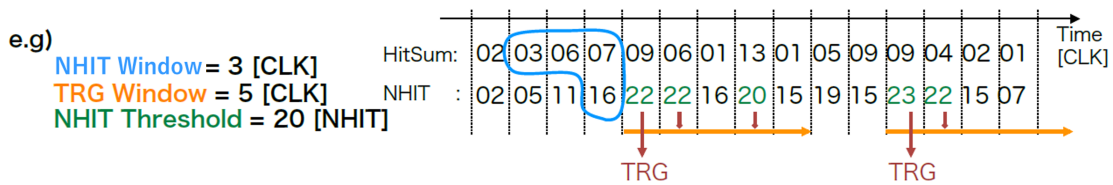


図 4.6 ヒットベーストリガーコマンド発行概略図

また、データ取得コマンドはコマンドには以下の 2 種類がある。

- **Acquire-Range**

データ取得コマンドが発行されてからの一定期間の全データを取得するコマンドである。この一定期間は Event Window と呼ばれる。

- **Acquire-Hit**

Acquire-Range で取得する波形データの内、しきい値を下回っている期間やサチレーションを起こしている波形データをカットする機能を加えたコマンドである。この機能をゼロサプレッションと呼ぶ。図 4.7 にゼロサプレッションの概念図を示す。なお、カットされた波形データの代わりに、データ取得コマンドが発行されてからの時間が記録される。これを LaunchOffset という。

通常は Acquire-Hit モードでデータ取得が行われる。なお、既に述べた Event Window や、ヒット判定をおこな

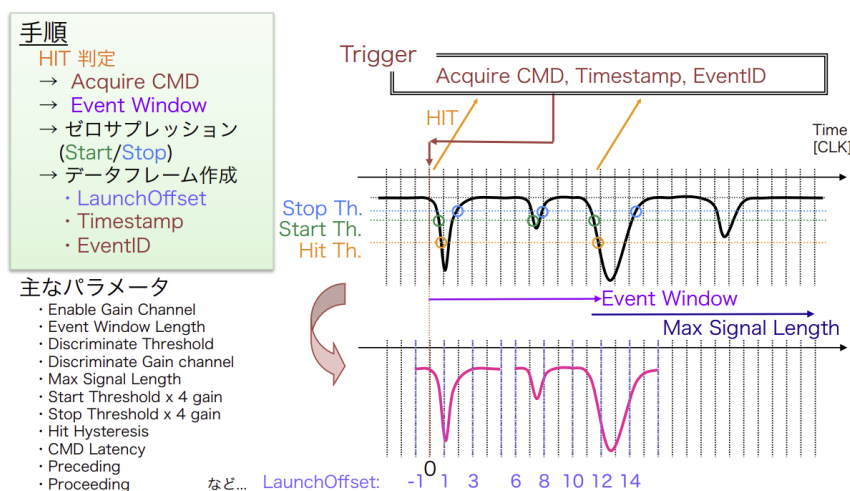


図 4.7 ゼロサプレッション 概念図 [20]

うしきい値*1などは、MoGURA ボードごとにトリガ回路を介さずに設定することができる。また、MoGURA Trigger はヒット数集計方法が前述した KamDAQ における NSum 方式とは異なる。NSum はヒットゲートを開いている間、hit 信号を受け付けないが、MoGURA では短時間に連続的なパルスが入力された場合、クロック毎に hit 信号が出力される可能性がある。これより NSum と NHit の違いについて、NSum は全 PMT の本数を超えないが NHit は全 PMT の本数を超える可能性があるという点がある。

MoGURA Trigger のトリガータイプを次に述べる。

- **Single Trigger**

NHit が Single Threshold を超えた場合にトリガーコマンドを発行する。NHit トリガーの中で最も基本的なトリガーである。

- **Prescaled Trigger**

NHit が Prescaled Threshold を超えた場合に発行されるトリガー。Hit Window を連続ではなく一定間隔あけることで、Single Threshold よりも低い値に設定することが可能である。

- **Launch Trigger**

NHit が Launch Threshold を超えた場合に発行されるトリガー。Single Threshold よりも高いしきい値に設定しており、ミュオン信号などの大光量イベントが対象である。

- **Adaptive Trigger**

Launch Trigger が発行された後に 1 msec の間有効になる。この間、Single Trigger および Launch Trigger は発行されない。これはミュオン信号後のおよそ 200 μ sec 以降の中性子捕獲事象をターゲットとしたトリガー [21] である。

*1 取得開始のしきい値を Start Threshold、取得終了のしきい値を Stop Threshold と呼ぶ。Start Threshold を超えて Stop Threshold を下回った部分が取得される。

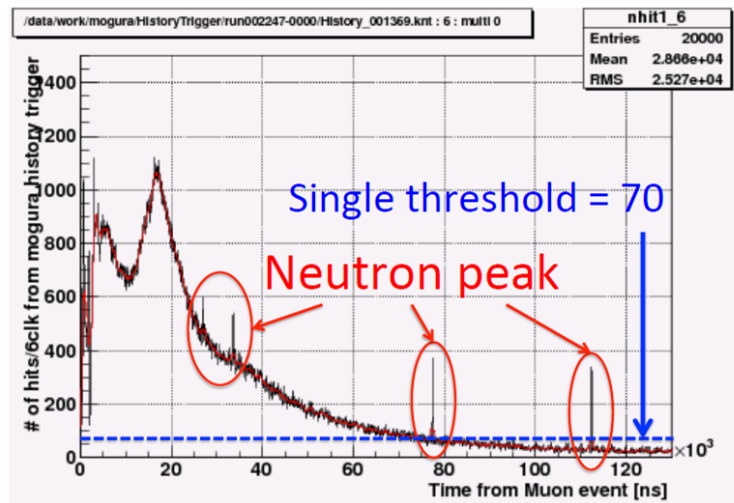


図 4.8 ミューオン信号後の NHit 分布 [21]

図 4.8 に示すように、ミューオン信号後の NHit 分布の中には中性子捕獲事象によるピークが見られる。Adaptive Trigger はこの NHit の増加分を検知してデータ取得コマンドを発行する。

以下、現在実装されていないが過去に実装されたトリガータイプを述べる。

- **Successive Trigger**

Launch Trigger 後の数 μsec の間有効になり、Acquire-Range コマンドを発行することでベースライン変動によってヒットしない期間を強制的に取得する。現在は Adaptive Trigger の実装につき使用を取りやめたため、ミューオン信号直後の波形データは取得が困難である。これにより、ミューオン信号直後の中性子捕獲事象やミューオンの寿命 ($2.2 \mu\text{sec}$ 程度) で放出される Michel electron の検出が困難である。

- **Rollback + Retrieve Trigger**

Rollback Trigger は通常の Single トリガーと同じ挙動をするが、Rollback Trigger の発行は、Retrieve Trigger の発行条件となる。Rollback Trigger イベントを後発信号として過去に遡り、より低い閾値でしか検出されない先発信号を探し、Retrieve Trigger が発行される。通常、Single Trigger では取得できない低エネルギーイベントを取得することができる。KamLAND では、 ^8Be 太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる ^{85}Kr のタギングをするために開発された。

4.4 KamLAND2 実験におけるデータ収集システム

現在、KamLAND2 実験に向けた新型 DAQ システムを開発している。次の開発動機から新型 FEE では Xilinx 社製の RFSoc[22]、トリガー部ではソフトウェアによるトリガーを用いる研究開発が進んでいる。

- ミューオン核破砕による中性子捕獲事象の全検出

Xe 原子核破砕による長寿命崩壊核は $0\nu\beta\beta$ 探索における深刻な BG になり得る。核破砕事象と、その際に生成される中性子の数には相関関係があるため、ミューオン事象後の中性子捕獲事象の全検出が求められている。MoGURA を使用したデータ取得でもミューオン信号直後 $10 \mu\text{sec}$ 間の中性子捕獲事象は検出できていなかったが、RFSoc を用いることによって約 $34 \mu\text{sec}$ の間、バッファリングすることが可能になった [5]。

現在はより S/N 比をあげるためにノイズ除去を行うデジタル信号処理の開発が進められている。

- 近傍超新星時のロスなしデータ取得

近傍超新星は、地球から 300 pc 以内を差す。MoGURA の超新星爆発事象のデータ取得限界は (author?) [23] で研究され、70 msec 程度でデータ取得が停止してしまう。これを新型 FEE では、ミュオン同様に RFSoc 大容量バッファを用いることで、ペテルギウスを想定した超新星爆発時の 1 秒以上の間、全てのイベントの波形データを取得できる [5]。

- 老朽化による故障と修理部品の生産終了への対応

現行 FEE は長年の稼働により故障が相次いでいる。FEE の主要部品は生産終了になっているため、修理をしつつ安定してデータを取得し続けることが困難になってきている。そこで新型 FEE の迅速な開発が求められている。

- ソフトウェアトリガー

KamLAND2 では MoGURA Trigger 部をコンピュータに置き換えて CPU を基本としたソフトウェアによる演算で物理事象の検出を行うことを目指している。これは現行のハードウェアトリガーでは困難であった高度なトリガーロジックを実装することが容易であるため、トリガー部で複雑な物理事象の選り分けが可能となる。

ソフトウェアトリガーの実装に伴い、KamLAND2 では主に FairMQ[24] を用いたネットワーク構造の新型 DAQ システムの開発が進められている。現在考えられている DAQ システムを図 4.10 に示す。ネットワークポロジールを設計するに当たり、データレート、スケーラビリティ、レイテンシ、コンピュータ処理能力等の問題は常に付きまとう。FairMQ はこれらを考慮した上で大規模なデータ処理ワークフローの実装を可能としているため採用した。

KamLAND と KamLAND2 の DAQ システムの比較を表 4.1 に示す。FEE で信号を検知としてから情報を記録するレコーダーへは、ヒットした情報がデータフォーマットに沿って転送される。データフォーマットを図 4.9 に示す。このデータフォーマットには PMT の ID・タイムスタンプ・電荷情報等を格納したヘッダ・フッタ、及び波形データから成る (ヘッダ、及びフッタをヒットデータと呼ぶ)。

| HEADER0[7:0] (0xAA) | CH_ID[11:0] | Frame length[11:0] | FRAME_INFO[7:0] | TRIGGER_INFO[7:0] | Reserved |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| HEADER1[7:0] (0xAB) | Reserved | | TIME_STAMP[47:0] | | |
| SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] |
| SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] |
| COMBINED_ID[15:0] (0xCC00) | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignalData(L_gain) [15:0] | SignalData(L_gain) [15:0] |
| COMBINED_ID[15:0] (0xCC00) | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (900MS/s) [11:0] | SignalData(L_gain) [15:0] | SignalData(L_gain) [15:0] |
| SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] |
| SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] | SignExtension[3:0] SignedData (1GS/s) [11:0] |
| FOOTER[7:0] (0x55) | CHARGE_SUM[23:0] | | Object_ID[31:0] | | |

図 4.9 データフォーマット

KamDAQ や MogDAQ と異なる点は、物理事象か非物理事象かに関係なくすべてのヒット判定に対してデータフレームが生成され、読み出しコンピュータ、ひいてはトリガーコンピュータに転送される点である。

なお、新型 DAQ は現時点でも構想中の段階であるため、今後この DAQ システムは大きく変わる可能背もある。

表 4.1 KamLAND と KamLAND2 の DAQ システムやそのツールの比較

| 名称 | KamLAND | KamLAND2 |
|---------------|------------|----------------|
| DAQ ソフトウェア | KiNOKO | Python, FairMQ |
| データ転送 | VME | 10 GbE |
| 通信プロトコル (ツール) | TCP | TCP(ZeroMQ) |
| FEE | ATWD, FPGA | RFSoc |
| FEE のシステムクロック | 40 MHz | 125 MHz |
| トリガー | トリガー回路 | ソフトウェアトリガー |

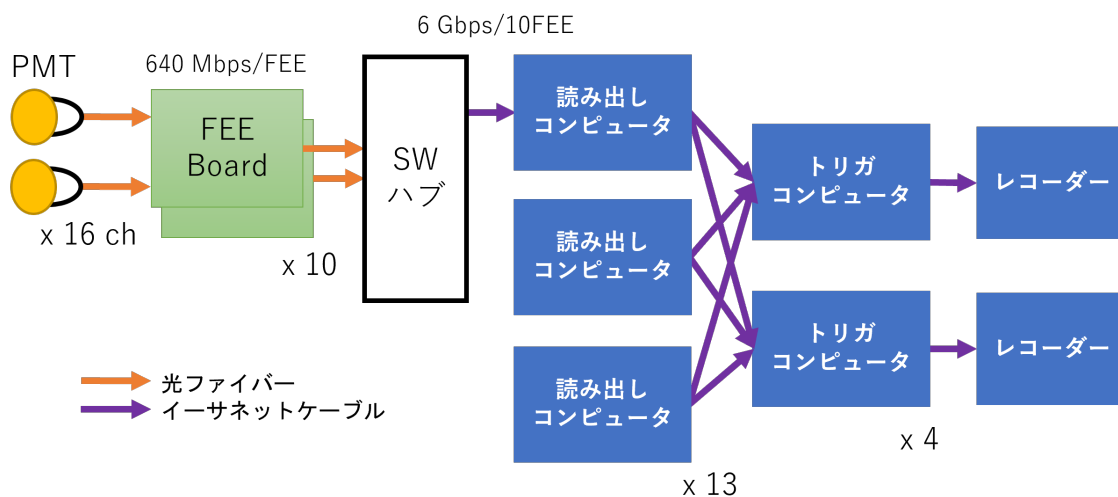


図 4.10 KamLAND2 実験の DAQ システム全体図

第 5 章

トリガーデザイン

この章では新型のトリガーに対するトリガーデザインについて述べる。

5.1 ハードウェアトリガーとソフトウェアトリガー

KamLAND では従来より、FPGA を主としたハードウェアによるトリガーのみで物理事象の観測を行ってきた。ハードウェアトリガーは高速な演算を得意とするが、その一方で高度なトリガーロジックを実装するのが困難である。KamLAND ではバルーンに含まれる、あるいは表面に付着している放射性不純物により、観測したい物理事象が隠れてしまうことが問題である。そこで $0\nu\beta\beta$ の観測のため、より優れたトリガー機構が必要とされて来ている。

ソフトウェアトリガーはコンピュータの CPU を用いた演算を行う。そのため、ハードウェアトリガーに比べて速度は遅いが、高度なトリガーロジックを容易且つ迅速に実装することが可能である。また、トリガーロジックのうち、処理に時間のかかる箇所を GPU や FPGA に拡張することで速度の向上を図ることも可能である。

5.2 ソフトウェアトリガーへの要求

本研究は KamLAND では初となるソフトウェアを用いたトリガーを試みるため、まずは「ソフトウェアトリガーの現行からの有用性」及び「現実的な処理時間内でトリガー判定を行う」ことを検証する必要がある。これを言い換えるとソフトウェアトリガーへの要求は以下になる。

要求 1: 位置依存しきい値による 0.3 MeV 以下の低エネルギー事象検出率の向上

要求 2: トリガーレート 100 Hz の恒常的な処理

要求 1 について、現在の KamLAND-Zen 実験ではアウトervalン付近の背景事象が多く、トリガーしきい値を高く保つことによってトリガーレートを制限している。ソフトウェアトリガーでは、位置に依存したトリガーしきい値を導入する事が可能である。これにより中心付近のしきい値を下げ、低エネルギー事象の検出率の向上を狙う。低エネルギー事象にはインervalン中の ^{214}Po の α 崩壊、液体シンチレータ中の ^{14}C の β 崩壊 [25]、さらに太陽ニュートリノなどが挙げられる。

要求 2 について、現在の KamLAND の物理事象のトリガーレートは 100 Hz 程度である。そのため、このトリガーレートを恒常的に処理を行えるトリガーロジックを開発する必要がある。

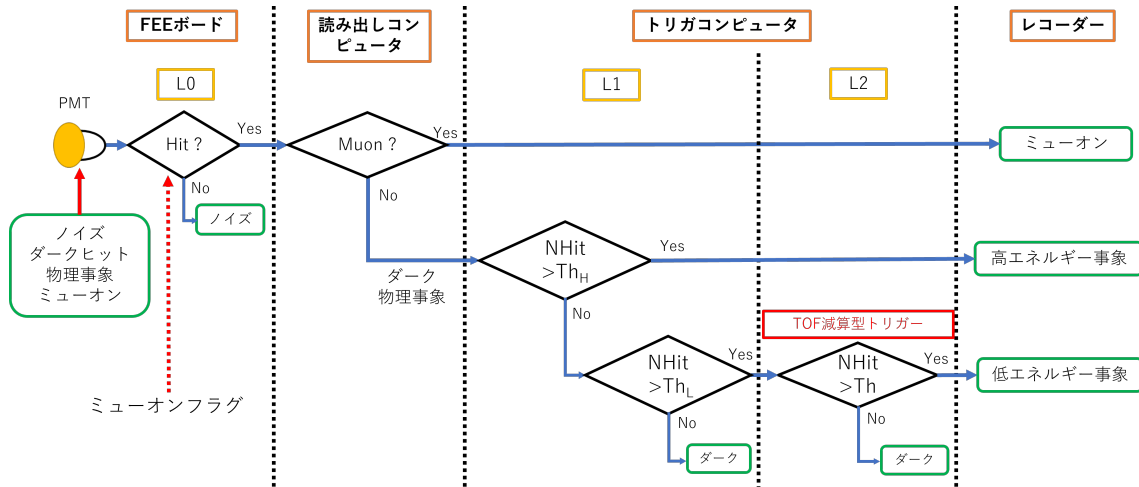


図 5.1 トリガーフロー

5.3 トリガーフロー

FEE で信号を検知してからレコーダーへ記録されるまでの全体のトリガーフローを図 5.1 に示す。PMT 信号は大きく分けてアナログ波形のノイズ、1 p.e. 以上のダークノイズ及び物理事象による hit 信号、ミュオン信号がある。これらは以下のトリガーレベルによって取捨選択される。

まず、FEE で Level0 Trigger によって 1 p.e. 以上のヒットを検出する。ここでミュオン信号か否かの判定を行うミュオンフラグが立てられ、ミュオン信号であれば読み出し PC へ送られた後トリガー PC を介さずにレコーダーへと転送される。

トリガー PC での 2 段階のトリガープロセスを設けて、それぞれ Level1 Trigger、Level2 Trigger とした。Level1 Trigger ではアウターバルーン内の液体シンチレータで検出される反電子ニュートリノを検出する目的がある。反電子ニュートリノは 3.2 節で述べたように逆ベータ崩壊によって検出される。エネルギーしきい値は KamLAND の反電子ニュートリノ解析で使用されているエネルギーよりも十分に低い $E_{vis} = 0.5 \text{ MeV}$ としている。Level2 Trigger では中心付近の $E_{vis} = 0.5 \text{ MeV}$ よりも低いエネルギーの物理事象を観測する。低エネルギー事象インナーバルーン中の ^{214}Po や ^{14}C の検出が挙げられる。背景事象の多いアウターバルーン付近のトリガーレートを変えずに、中心部のみで低エネルギー事象を観測するには位置に依存したトリガーしきい値を導入する必要がある。そこで今回実装したものが後述する TOF 減算型トリガーである。

5.3.1 Level0 Trigger

PMT 信号のベースラインからの電位差に対してしきい値を設定し、そのしきい値をディスクリミネータを用いてヒット判定を行う。さらに ADC データの波高からノイズと 1 p.e. 信号を識別し、PMT の ID・タイムスタンプ・電荷情報等を格納したヒットデータ及び波形データが記録され、データフォーマットにしたがってデータフレームが生成される。

5.3.2 Level1 Trigger

Level1 Trigger では PMT へのヒットが時間的に集中しているようなクラスターを探す役割を持つ。このクラスター単位で Level2 Trigger のプロセスヘータを送る。トリガー判定には第 4 章の 4.3 節で説明した MoGURA Trigger で使われている NHit をソフトウェア的に実装している。

トリガーしきい値は高・低エネルギー事象を選別するため 2 種類あり、それぞれ High Threshold(Th_H)、Low Threshold(Th_L) を設けている。これらを用いて、この Level1 Trigger で様々なトリガーフラグを実装する予定である。本研究ではトリガーフラグの中でも最も基本的な Single Trigger のトリガーについてのみ実装をしている。

以下に Single Trigger のトリガーフローを述べる。

1. NHit を求める。この時の NHit Window(NW) は現行と同じ 120 ns である。この NW の値は 1 イベント分のヒット数を網羅する範囲である。MoGURA Trigger で実際のデータによって調整されたため、今回も同じ値を用いている。
2. NHit が Start Threshold を上回った点 (Start point) から Stop Threshold を下回る点 (Stop point) まで TRG Window を開く
3. Start point 及び Stop point の前後 120 ns だけ TRG Window を広げる。
4. TRG Window 内の NHit のうち、最大の NHit(これを NHITmax と呼ぶ) が High Threshold を超えていれば High Energy Event としてレコーダーへ TRG Window 内のデータ (TRG Data) を転送する。
5. High Threshold を下回るが、Low Threshold を超えていた場合、Low Energy Event として Level2 Trigger へ TRG Data を転送する。

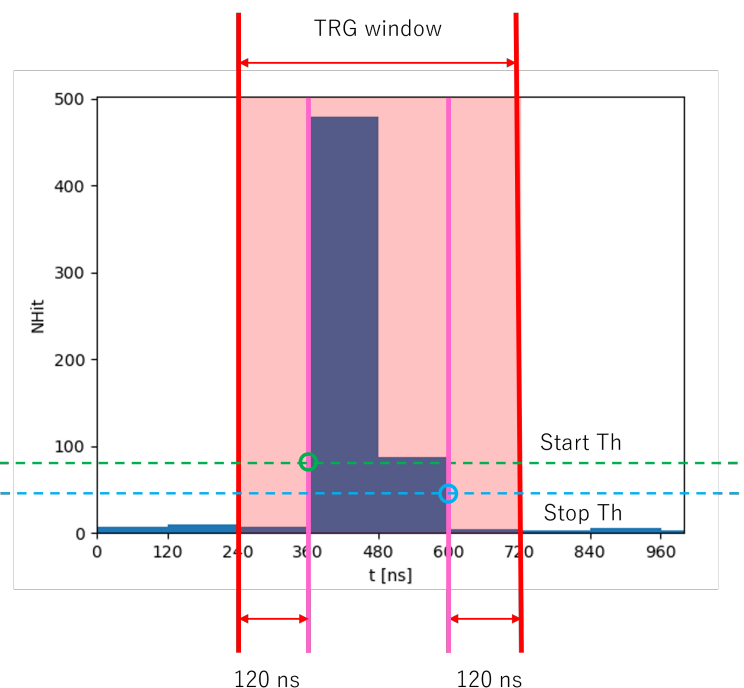


図 5.2 Level1 Trigger のトリガー概念図

5.3.3 Level2 Trigger

Level2 Trigger は現行のハードウェアトリガーロジックよりも物理事象を検出しやすくするために実装した。そこで考えられたのが TOF 減算型トリガー (TOF Subtracted Trigger) である。

TOF 減算型トリガー

今、 i 番目の PMT が時間 T_i で物理事象からの信号を得たとする。次のように、ある点 $r(x, y, z)$ と i 番目の PMT の位置 $R_i(x_i, y_i, z_i)$ との光の飛行時間、通称 TOF(Time Of Flight) を差し引く。

$$t_i = T_i - \text{TOF}_i \quad (5.1)$$

$$\left(\text{TOF}_i = \frac{|r(x, y, z) - R_i(x_i, y_i, z_i)|}{\text{LS 中の光速}} \right)$$

この TOF の減算を行う点を TOF ポイントと呼び、図 5.4 のように 1055 点をアウターバルーン内に格子状に一様分布させた。ここで、アウターバルーンは半径 6.5 m の完全な球と仮定した。物理事象が中心付近で発生した場合はほぼ同じタイミングで届く*¹が、中心から遠い場合は PMT に届くまでの時間差が生じるため、ヒットタイミング分布は時間方向に広がる。式 5.1 のように TOF 減算を行うと、得られる全てのヒットした PMT の t_i によるヒットタイミング分布は、事象位置と近い TOF ポイントではピークが立つ (図 5.3)。このように、中心から外れた物理事象の検出率を上げるロジックを TOF 減算型トリガーと呼ぶ。

また、データ取得後の解析ではこの TOF 減算を用いて、仮想敵に事象位置を $r(0, 0, 0)$ から段階的に移動させて本来の事象位置を再構成することが可能である*²。

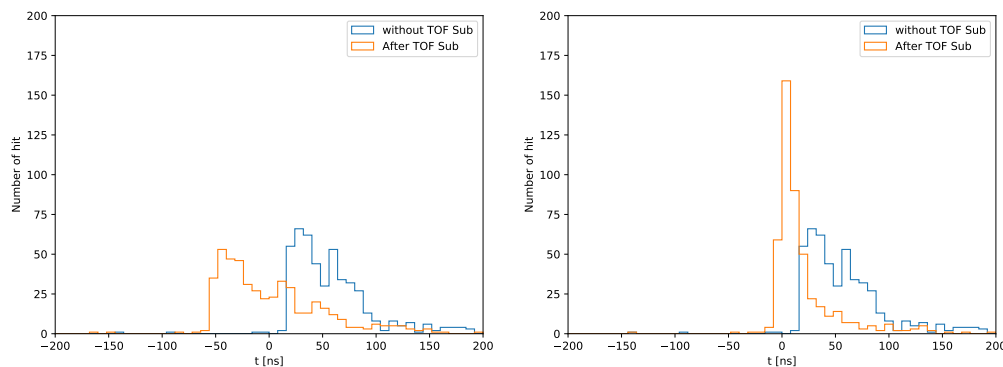


図 5.3 中心から外れた物理事象のヒットタイミング分布。電子を液体シンチレータ中に 2.5 MeV で $R(500 \text{ cm}, 0, 0)$ から発生させた。青は TOF 減算なし、オレンジは TOF 減算後のヒットタイミング分布であり、左は発生点から遠い TOF ポイントから TOF 減算を行ったもの、右は発生点に一番近い TOF ポイントで TOF 減算を行ったものである。

*¹ 厳密には吸収再発光や多重ヒットにより遅れて信号が検出される hit 信号が存在する。

*² KamLAND では LTVertex Fitter や V2 Fitter と呼ばれるものがある [16]

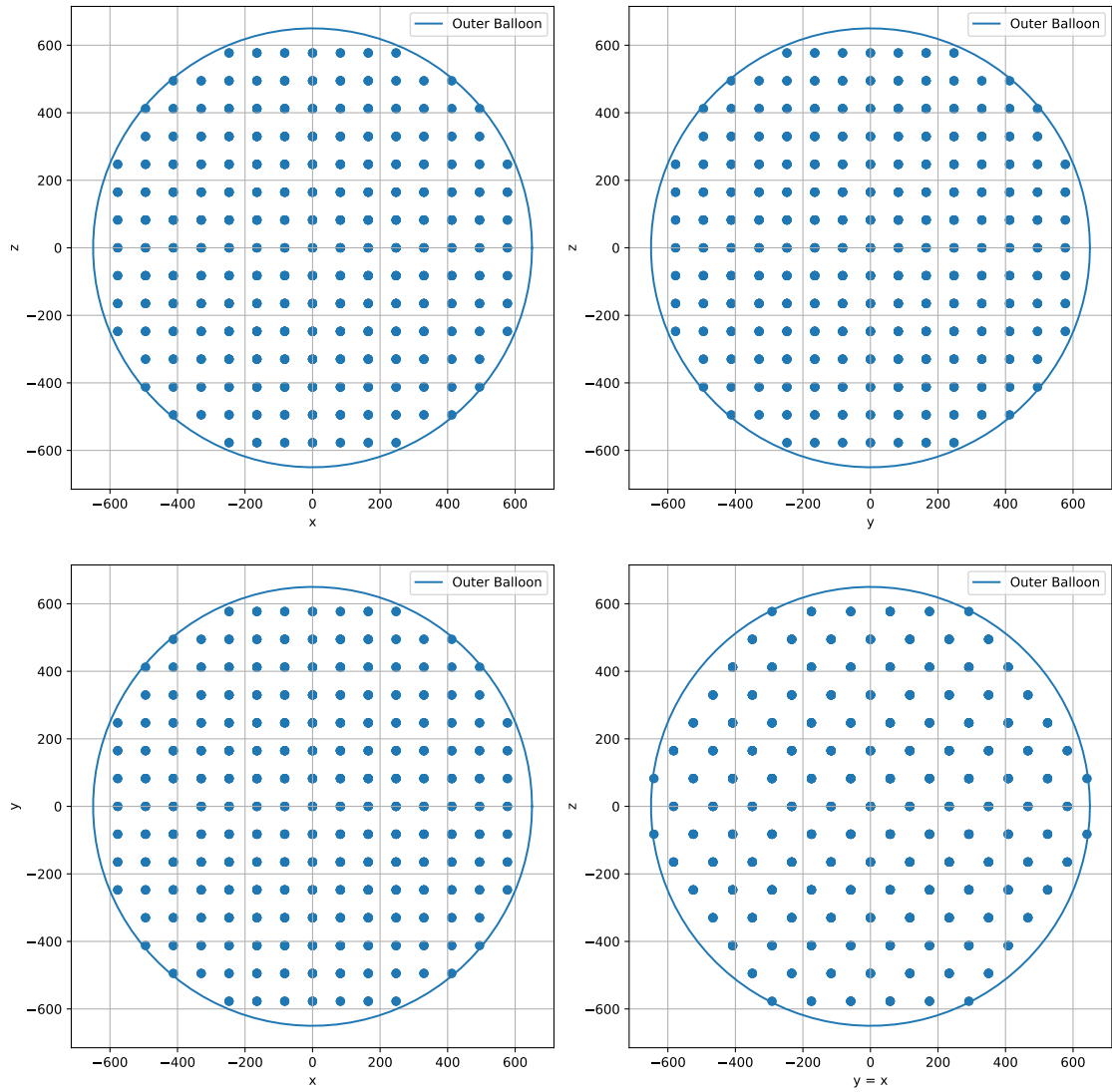


図 5.4 TOF 減算型トリガーで用いる TOF ポイント。この図では 1055 点存在する。

第 6 章

ソフトウェアトリガーの評価

この章では、現行のトリガーに対するソフトウェアトリガーの有用性、またその処理速度について述べる。

6.1 低エネルギー事象の検出

KamLAND ではアウターバルーン付近に背景事象が多いため、KamDAQ のトリガー回路や MoGURA Trigger のハードウェアによるトリガー (ハードウェアトリガー) では高いトリガーしきい値を余儀なくされている。ここで、TOF 減算型トリガーを用いると、外側の TOF ポイントにおけるしきい値は現行と同じ値にすることで背景事象のトリガーレートを抑えたまま、中心付近のみしきい値を下げることにより、低エネルギー事象の検出率の向上が見込める。ソフトウェアトリガーの KamLAND-Zen800 実験への先行導入に向けて、KamLAND-Zen800 実験におけるシミュレーションを用いて物理事象のエネルギーの違いによるトリガー効率を検証する。

6.2 シミュレーションの概要

6.2.1 Geant4

シミュレーションを行うソフトウェアは Geant4 を採用した。Geant4 は α 線や β 線などの粒子が物質中で起こす相互作用をモンテカルロ法を用いてシミュレートできるソフトウェアである。主に素粒子・原子核物理学や宇宙線物理学分野で用いられている。ソフトウェア言語に C++ を用いており、ジオメトリ設計・物質定義・物理プロセス定義などを設定する上で有用なクラスが多数用意され、さらにユーザーが目的に応じてクラスを改良することが容易にできる。今回、KamLAND-Zen800 実験のジオメトリを設計した KLG4 を用いた。これは尾崎 [16] によってそのシミュレーションパラメータがチューニングされている。

6.2.2 物理事象

KamLAND ではバルーンに含まれる不純物、検出器外部からの γ 線など、多くの背景事象がある。本来はそれらを考慮したシミュレーションを行い実際のイベントレートを見積る必要があるが、今回は簡単のため、液体シンチレータ中に一様に単発の e^- イベントを発生させた。また、KamLAND-Zen800 実験が開始してから一年間経過し、データ・検出器ともに安定している時期を今回シミュレーションに用いた。

以下にシミュレーションを行ったイベントの条件を述べる。

- Run Number: 15974
- 17inch PMT bad channel: 359 本

- ヒット判定は 17inch PMT のみ
- $0 \leq R < 500 \text{ cm}$
- $0.2 \text{ MeV} \leq E_{\text{vis}} \leq 0.5 \text{ MeV}$

Bad Channel はゲイン性能が著しく低下した PMT であり、PMT にかかる HV がオフになっているものである。トリガーで用いるヒット判定は現在の KamLAND 同様、時間分解能に優れている 17 inch PMT のみ用いている。また、アウターバルーン付近はチューニングがうまく行われていないため、半径 500 cm まででイベントを生成した。ここで Evis は KamLAND における観測エネルギー (Visible Energy) である。Evis は中性子捕獲事象の際の γ 線などを用いて、実際のデータのエネルギーとキャリブレーションが行われている。

6.2.3 ダークノイズ

現在の 17inch PMT の瞬間的なヒットレートを図 6.1 に示す。瞬間的なヒットレートは物理事象のないダークノイズのみのヒットレートだと考えることができる。現在の KamLAND の PMT は典型的なダークレートの 20 kHz を超え、100 kHz 以上のダークレートを持つ PMT が存在する^{*1}。ピークが 25 kHz であることと、高レートの PMT が存在することから平均 30 kHz のランダムなダークノイズを仮定し、シミュレーションに組み込んだ。

また、ランダムなダークノイズは NHit Window 内に一定の確率で混入するため、その NHit 分布はポアソン分布に従うことがわかる。図 6.2 にダークノイズの混入率を示す。混入率はトリガーレートでもある。ダークノイズの NHit 分布から NHit が高い方から低いほうへと積分をすることで混入率を求めた。

6.3 TOF 減算型トリガーのロジックとパラメータ

TOF 減算型トリガーはまず、本来の事象位置に最も近いような TOF ポイントを探し、その点においてトリガーを行う。基本的に NHit を用いてトリガー判定を行っている。今回、TOF ポイント数は格子状に配置した 1055 点とした。

以下に TOF 減算型トリガーのトリガーフローを述べる。

1. ある TOF ポイントで PMT のヒットタイミングから NHit を計算。この NHit は事象位置を推測するために使われ、この時の NHit Window を NW_{vertex} とする。
2. Hit Window の中で最大の NHit である $NHIT_{\text{max}}$ を求める。
3. 1 から 2 まで全ての TOF ポイントで行う
4. 3 で求めた全 TOF ポイントの $NHIT_{\text{max}}$ のうち、最大のものを事象位置に一番近い TOF ポイント TP_{closest} とする。
5. TP_{closest} で再度 NHit を求める。この NHit はトリガー判定に使われ、この時の NHit Window を NW_{trg} とする。
6. TP_{closest} での NHit Threshold でトリガーをかける。

NHit Window について、事象位置を推測する際の NW_{vtx} と、トリガーをかける際の NW_{trg} は値が異なる。 NW_{trg} は MoGURA Trigger の 120 ns と同じ値にしたが、 NW_{vtx} は後述するようにそれよりも小さい値に設定した。しきい値は、図 6.3 のように中心からの距離に応じた二段階のしきい値を設けた。二つのしきい値を分ける半径を R_{div} 、内側を Th_{in} 、外側を Th_{out} とした。

^{*1} KamLAND では、このような高レートの PMT を「発狂した PMT」や「Hot Tube」などと呼ぶ事がある。

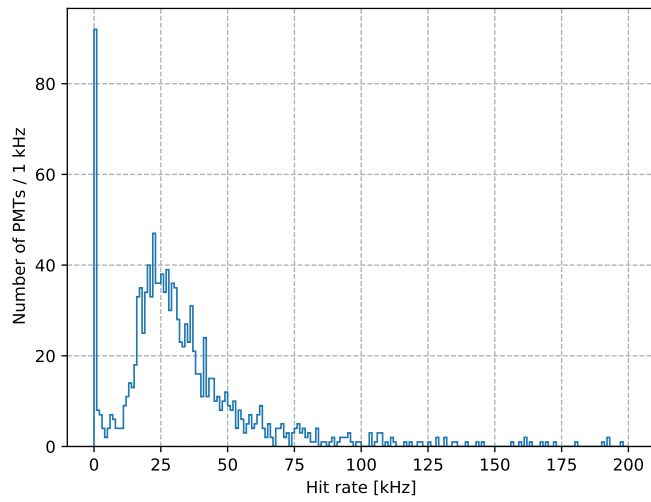


図 6.1 PMT の瞬間的なヒットレート

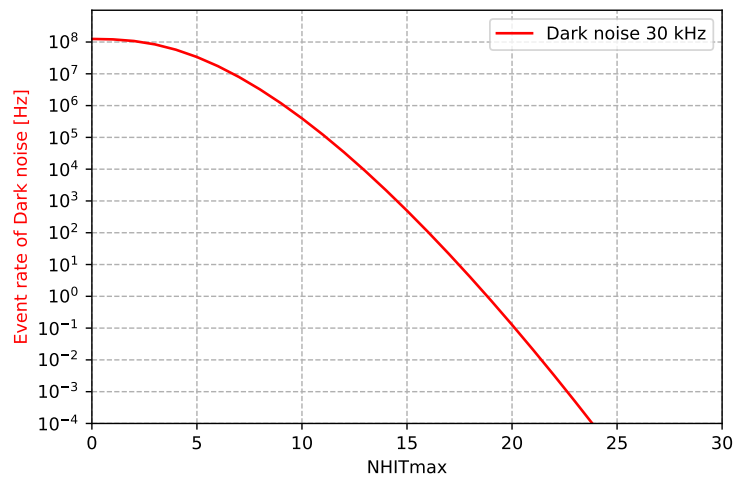


図 6.2 ダークノイズの混入率。ダークノイズの NHit 分布から NHit が高い方から低いほうへと積分をすることで混入率を求めた。

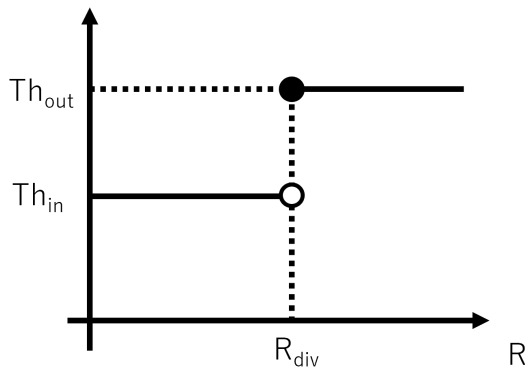


図 6.3 TOF ポイントのしきい値。縦軸がトリガーしきい値、横軸が中心からの距離である。

6.3.1 パラメータの最適化

アウターバルーンに一樣に生成したイベントに対して、TOF 減算型トリガーのパラメータの最適化を行った。調整すべきパラメータは NW_{vtx} , R_{div} , Th_{in} , Th_{out} である。

NW_{vtx} の決定

事象位置を推測する際は狭い範囲内にヒットが集中しているような TOF ポイントを探す必要があるため、できるだけ NHit Window は狭い方が好ましい。実際、MoGURA Trigger と同じ 120 ns の広い値にした場合、イベント由来の PMT の全ヒットのうちほとんど網羅してしまうため、TOF ポイントの位置の違いで NHitmax に差はあまり見られなくなる。しかし、狭すぎる NHit Window では NHit にばらつきが生じやすくなるため、本来の事象位置に近い TOF ポイントを求めることが難しくなる。そこで、狭すぎず広すぎない NHit Window を求める必要がある。

そこで、1 万イベントを用意し、NHit Window を変えて事象位置 $R_{vtx}(x_{vtx}, y_{vtx}, z_{vtx})$ と、事象位置に一番近いであろう TOF ポイントの位置 $R_{TP_{closest}}$ との距離 $dR = |R_{vtx} - R_{TP_{closest}}|$ を計測した。図 6.4 に NW_{vtx} を 8 ns, 16 ns, 24 ns, 32 ns, 48 ns, 64 ns のそれぞれで計測したものを示す。

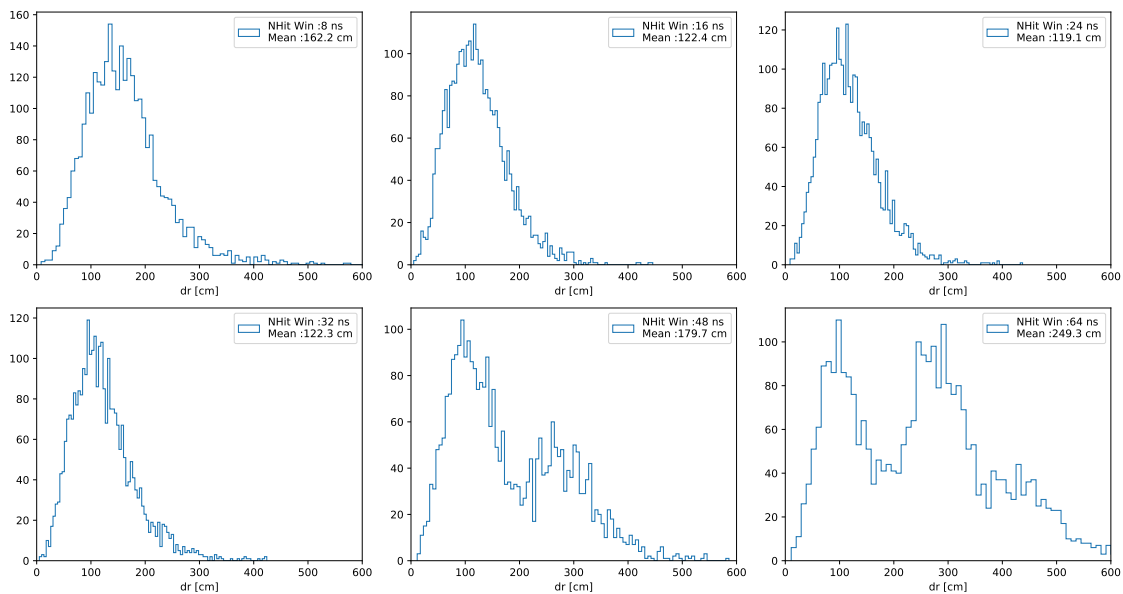


図 6.4 NHit Window の違いによる事象位置の決定精度。横軸は事象位置と、事象位置に一番近いと推測された TOF ポイントとの距離である。

これより、 dR の平均が一番小さい 119.1 cm の 24 ns が妥当だとわかったので、 $NW_{vtx} = 24$ ns とした。

R_{div} の決定

中心部のエネルギーしきい値をアウターバルーン付近のトリガーレートは現状と同等にする必要がある。 R_{div} が中心から遠い場合、低いしきい値を持つ内側の TOF ポイントが増え、エネルギーしきい値が下がってしまうため、基本的には R_{div} はできるだけ遠くに設置したい。しかしそれと同時に外側のイベントが誤って内側の TOF ポイントでトリガーされてしまう割合が増えるため、遠すぎると外側のエネルギーしきい値が上がる。

図 6.5 に検出器中心からの距離に対するエネルギーしきい値を示す。エネルギーしきい値はトリガー効率が 50%

以上となるエネルギーとした。よって $R_{\text{div}} = 300 \text{ cm}$ とした。

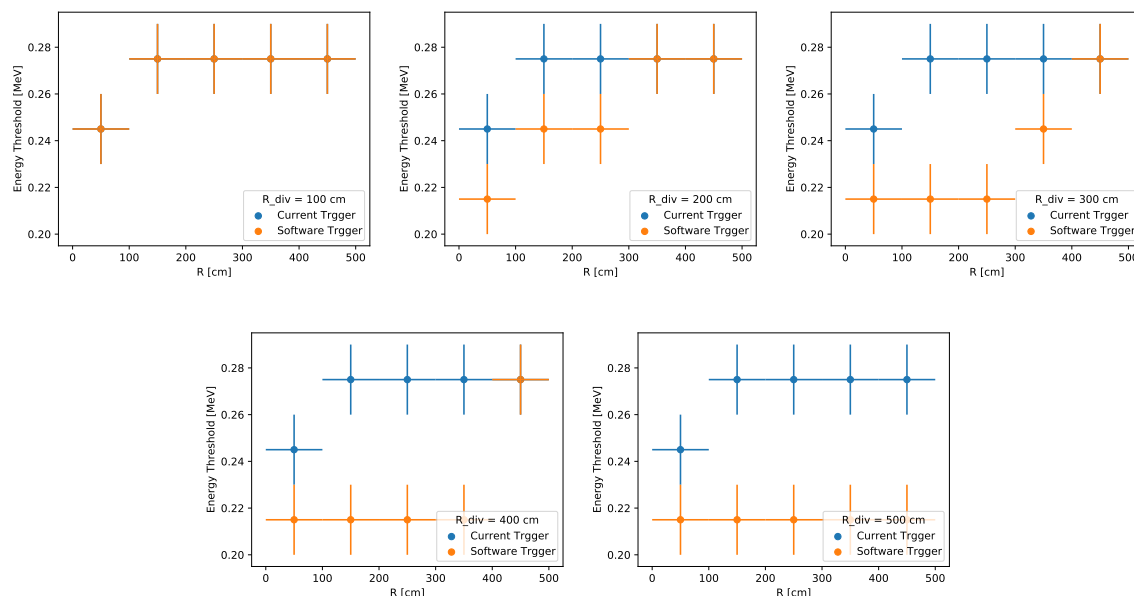


図 6.5 検出器中心からの距離に対するエネルギーしきい値

Th_{in}, Th_{out} の決定

Th_{out} については半径 $R \geq R_{\text{div}}$ の検出器外側では現行のトリガーと同じ検出率にする動機から現行トリガー同様の 47 に設定した。Th_{in} では半径 $R < R_{\text{div}}$ の NHit Threshold を下げる。しきい値を下げるとトリガー効率が上がる半面、ダークノイズのトリガーレートが増加してしまう。図 6.2 から、ダークノイズトリガーレートが 10^{-3} Hz となる値に設定した。

6.3.2 トリガー効率

トリガーロジックによる単発事象のエネルギーに対するトリガー効率の違いを検証した。現行トリガーには今回 KamDAQ の NSum によるトリガーロジックをソフトウェア上で再現した。クロックは KamLAND2 実験に合わせた 125 MHz であり、ヒットゲートは 1 タイムスタンプの倍数である 120 ns に設定した。半径 100 cm 毎の領域別のトリガー効率を図 6.6 に示す。これより、ソフトウェアトリガーを実装することで、外側のトリガーレートを制限したまま、中心付近の 0.3 MeV 以下の低エネルギー事象検出効率が飛躍的に向上している事が確認できた。また、TOF ポイント 135 点の場合のトリガー効率を付録に載せる。

また、最終的なソフトウェアトリガーのパラメータを表 6.1 にまとめる。Th_H は 0.5 MeV 以上をトリガーする値、Th_L は Level2 Trigger の Th_{in} と同じ値の 22 に設定した。

6.3.3 インナーバルーン中の ^{214}Po の検出率

5.2 節で述べたように、現在の KamLAND-Zen 実験で観測不十分となっているインナーバルーン中の ^{214}Po の検出率の評価を行った。今回用いた KLG4 では 0.2 MeV 以下のイベントに対して十分に調整が行われていないため、現行トリガーとソフトウェアトリガーの相対的な評価は可能である。そこで、インナーバルーン領域 $161 \leq R < 223 \text{ cm}$ のイベントに対して 0 ~ 0.8 MeV まで拡張したトリガー効率(図)と図 6.7 の発生点がインナー

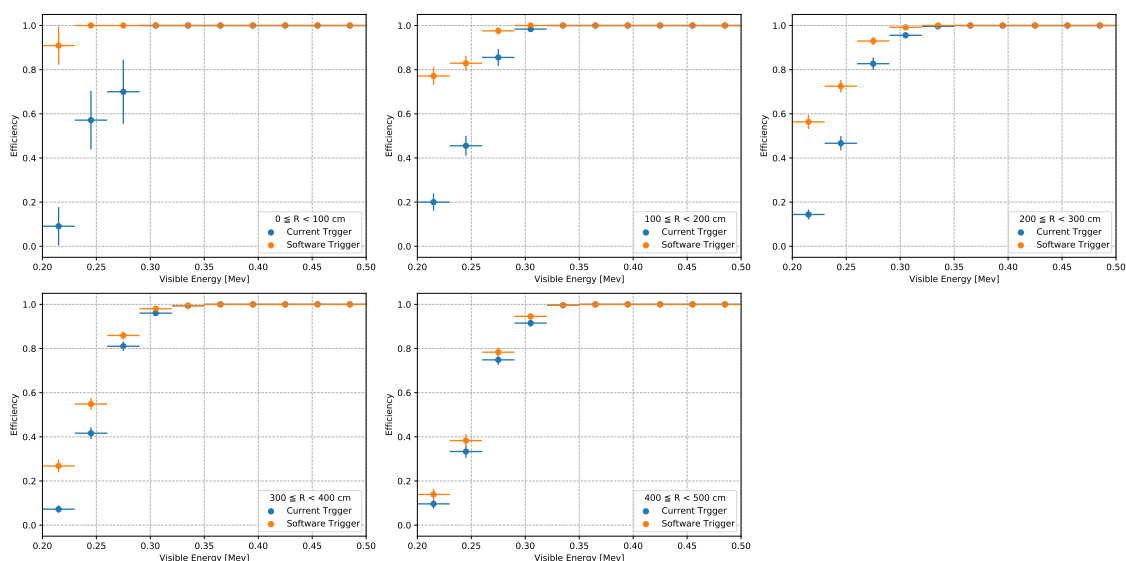


図 6.6 異なる領域における現行トリガーとソフトウェアトリガーのトリガー効率

表 6.1 トリガーパラメータ

| トリガーレベル | パラメータ | 値 | 説明 |
|----------------|------------------------|------|-------------------------------|
| Level1 Trigger | NW[ns] | 120 | NHit Window |
| | Th _H | 80 | 高エネルギー事象のしきい値 |
| | Th _L | 22 | 低エネルギー事象のしきい値 |
| Level2 Trigger | NW _{vtx} [ns] | 24 | 事象位置推測時の NHit Window |
| | NW _{trg} [ns] | 120 | トリガー時の NHit Window |
| | N _{TTP} | 1055 | TOF ポイント数 |
| | R _{div} [cm] | 300 | しきい値を分割する半径 |
| | Th _{in} | 22 | R ≤ R _{div} におけるしきい値 |
| | Th _{out} | 47 | R > R _{div} におけるしきい値 |

バルーン中のエネルギースペクトルとを掛け合わせることで検出率を導出した。なお、インナーバルーン中の ^{214}Po の LS 中への発光確率は 78.67% であるため、この発光確率が検出率の最大値となる。

結果として、現行トリガーでは 58.9% であるのに対し、表 6.1 のようにパラメータ設定されたソフトウェアトリガーでは 69.6% と、現行トリガーから約 11% の向上、約 7 割近い検出率に飛躍させることができた。このソフトウェアトリガーの導入によって KamLAND-Zen800 実験へも同様に ^{214}Po の検出率の向上が見込めるため、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の背景事象である ^{214}Bi の除去効率が上がると期待できる。 ^{214}Bi の除去効率を正確に評価するためには、 $^{214}\text{Bi} - \text{Po}$ 連続崩壊事象のシミュレーションを行い、実際にそのタグ効率を測定する必要がある。

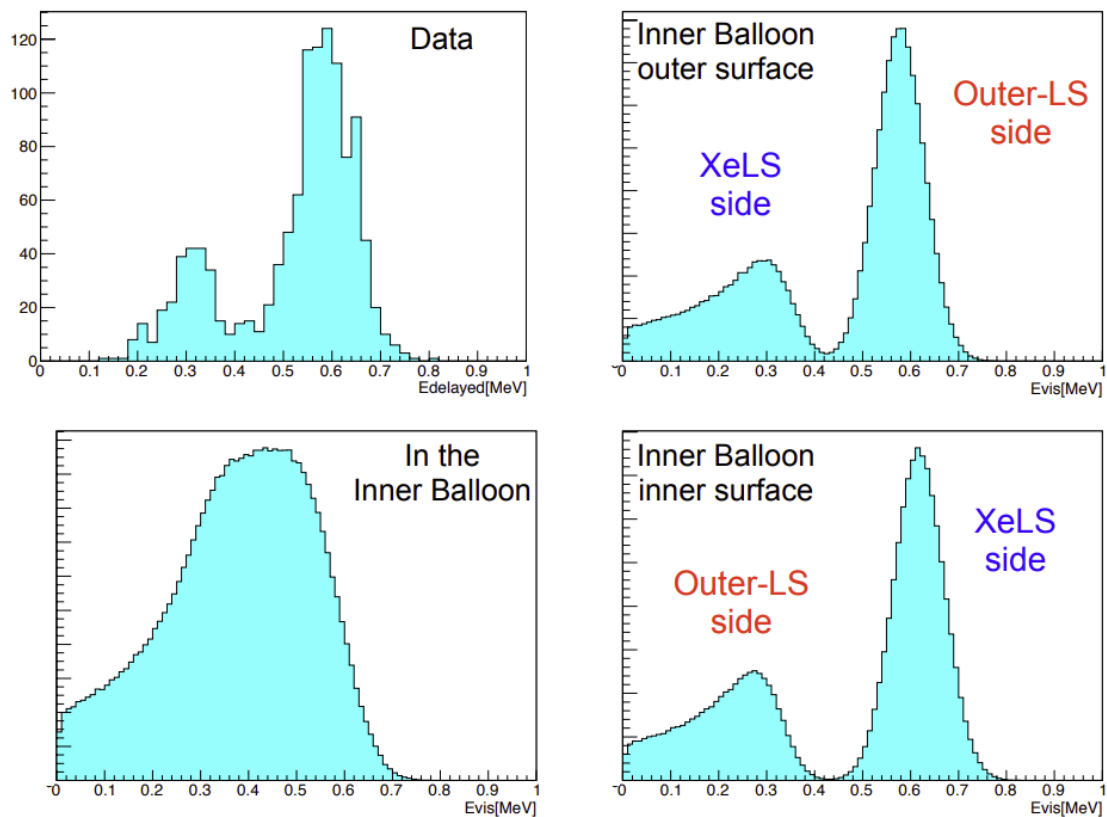


図 6.7 発生点ごとの ^{214}Po のエネルギースペクトル [26]。実際のデータを解析して得られたもの (左上)、インナーバルーンの KamLS 側表面 (右上)、インナーバルーン中 (左下)、インナーバルーンの Xe-LS 側表面それぞれでシミュレーションを行ったものである。KamLAND-Zen400 実験で得られたデータでチューニングされた KLG4 によりシミュレーションされた。

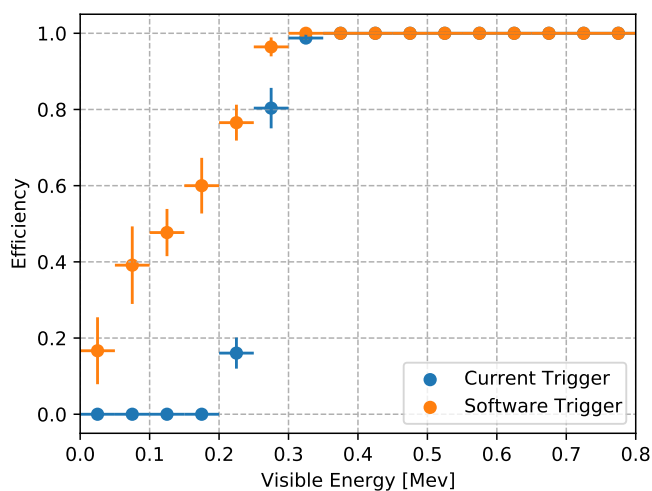


図 6.8 インナーバルーン領域におけるトリガー効率

6.4 ソフトウェアトリガーの処理速度評価

ソフトウェアトリガーが現行の 100 Hz のトリガーレートを恒常的に処理を行う必要がある。そこで、ソフトウェアトリガーが現実的な処理時間で解析を行えるか、その処理速度を計測した。

6.4.1 インプットデータ

処理速度を計測するデータはダークノイズとイベントを組み込んで作成した。ソフトウェアトリガーとしての処理は Level1 Trigger 及び Level2 Trigger のプロセスがある。Level1 Trigger で 0.5 MeV 以上の高エネルギー事象がトリガーされるので、0.5 MeV 以下のイベントが Level2 Trigger で処理されることになる。また、Level1 Trigger の処理ではほとんどがダークノイズを占めるため、高エネルギー事象は今回は考えない。よってインプットデータには 30 kHz のダークノイズの中にイベントを組み込んだ。

また、イベントの時間間隔は図 6.9 のように 1000 ns 毎とした。これはイベントの時間幅が約 200 ns 程度であるため、1000 ns 毎であれば十分に離れた単発事象とすることができるためである。

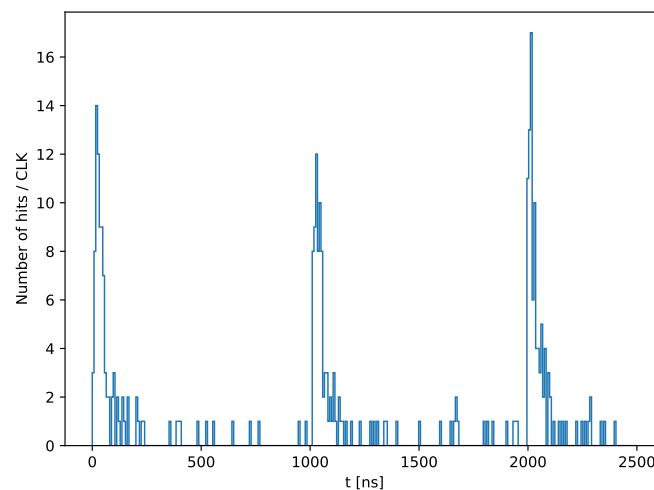


図 6.9 シミュレーションデータ。ダークノイズの中にイベントを 1000 ns 毎に入れている。

6.4.2 Level2 Trigger の処理速度

処理速度はトリガーレート及び、TOF ポイント数を変えて測定した。現在の TOF 減算型トリガーは全 TOF ポイントについて TOF 減算を行っているため、TOF ポイント数があるまま処理速度に影響する。リアルタイムで常にデータが供給され続けるので、1s のデータであれば、1s 以内に処理を完了させる必要がある。実際のトリガー判定は DAQ ネットワークを用いたマルチプロセスにより、各コンピュータ内でプロセスを分散して処理するが、本研究では、単発事象を含む実際のデータをシミュレートしたファイルを読み込み、1 プロセスでトリガー解析を行い、トリガープロセス全体の合計処理速度を見積った。トリガーコンピュータのスペックは、32 コア CPU の 4 台、つまり 128 プロセスを想定している。今回、10ms のファイルを用いたため、 $10\text{ms} \times 128\text{プロセス} = 1280\text{ms}$ 以内の処理が要求される。

処理速度の結果を図 6.10 に示す。この結果から本研究で想定している TOF ポイント数約 1000 個において、500 Hz まで 128 プロセス以内の処理が行えていることがわかり、要求値の 100 Hz を超えて恒常的な処理を行うこ

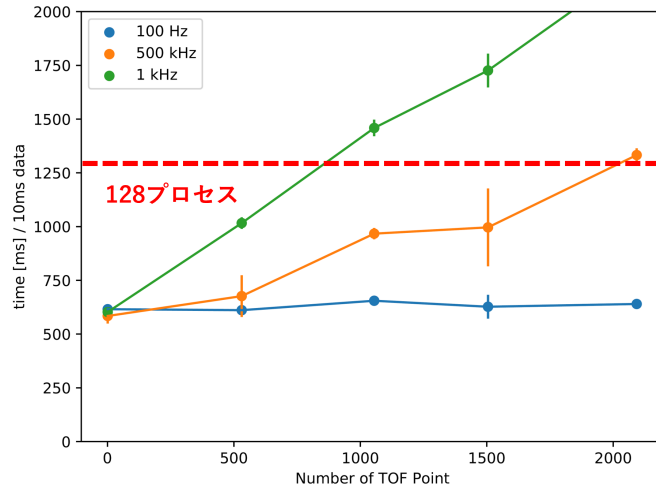


図 6.10 ソフトウェアトリガーの処理速度

とができとっていると見て取れる。

また、今回ファイルのサイズ、つまり、一度に処理するデータ量は 10 ms としたが、FairMQ の処理速度との兼ね合いで今後最適なデータサイズを検証する必要がある。

第 7 章

結論と今後の展望

この章では本研究の目的であるソフトウェアトリガー開発の結論及び、今後の展望を述べる。

7.1 結論

本研究では KamLAND では初となるソフトウェアトリガーを導入するに当たり、ソフトウェアトリガーの現行からの有用性及び、現実的な処理速度で解析を行えるかの検証を行った。

有用性の確認では位置依存のトリガーしきい値を設けることによって、検出器外側の背景事象のトリガーレートを変えることなく、0.3 MeV 以下の低エネルギー事象を現行よりも大幅に検出することができた。低エネルギー事象検出の向上には、インナーバルーン中の ^{214}Po 崩壊事象や、 ^{14}C などの背景事象の低減が期待できる。

処理速度では、現状のトリガーレート 100 Hz に対して、500 Hz まで恒常的なトリガー判定が行えることが分かった。

7.2 今後の展望

まず、KamLAND-Zen800 実験への導入へ向けて、現在使用されているトリガーに足してソフトウェアトリガーが完全に可換であることが必要である。このためには KamLAND の実際のイベントレートを想定したシミュレーションや、FairMQ を用いて通信速度やバッファサイズを吟味した上で現実的な処理速度でデータ転送が行えることの確認が必要がある。

また、トリガーロジックの面において決定精度・処理速度ともに優れたオンライン事象位置再構成の改良があり、以下にそれらを述べる。

TOF ポイントの最適化

今回、TOF ポイントは格子状で一様に配置した。しかし、単位半径当たりのイベント数は半径が大きくなるほど増加するので、TOF ポイントは一様に配置するのが好ましいとは限らない。そこで今後は様々なパターンで TOF ポイントの配置方法を検証する必要がある。また、遺伝的アルゴリズムを用いて、TOF ポイントの最適化を図る方法も上げられる。

TOF 減算型トリガーの改良

TOF 減算型トリガーは全 TOF ポイントについて事象位置の探索を行っている。しかし、事象位置から遠い TOF ポイントでは計算する必要がなく、その計算の大部分が無駄になっている。そこで、最初は数点のみ TOF ポイントを設置し、また、KamLAND でデータ解析で使われている事象位置再構成のロジックをトリガーに組み込む案も

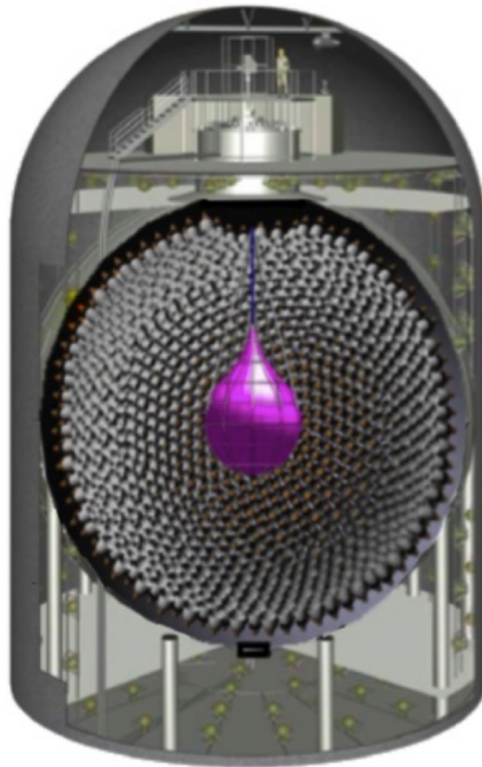


図 7.1 KamLAND2-Zen 実験の検出器構想

ある。

ニューラルネットワーク (Neural Network) による事象位置再構成

ニューラルネットワークは機械学習の一種であり、脳神経系のニューロンを数理モデル化したもの、つまり、脳の構造をコンピュータ上で模したものである。実際に実装する際は、入力層と出力層の間の中間層に厚みを持たせることで、複雑な選り分けを行う (これを「ディープラーニング」と呼ぶ)。こうした機械学習を用いてリアルタイムでの事象位置再構成が可能となる。しかし、層が厚ければ厚いほど処理に時間がかかるので、リアルタイムで解析するトリガーでは層の厚みが処理時間との兼ね合いになる。また、FPGA を用いてニューロン同士を並列に処理することで高速化を図る研究も進んでいる [27]。

アウトバールンなしの構造の検証

現在の KamLAND 実験ではアウトバールンに含まれる放射性不純物による背景事象が多い。そこで図 7.1 のようにアウトバールンの無い構造が検討されている。ここで、現在の KamLAND 実験はバッファオイルにより検出器外部からの γ 線による背景事象を低減しているが、アウトバールンなしでは同時にバッファオイルも削除される。このため、外側のイベントレートが現状に比べ急激に増えることが予想される。ここで本研究で用いた TOF 減算型トリガーを用いると外側のトリガーレートを制限することが可能であるため、ソフトウェアトリガーの研究を進めることでアウトバールンなしの構造の可能性を検証することが可能である。つまり、ソフトウェアトリガーの処理速度から背景事象のイベントレートの制限や、必要最低限の純水層の厚みに対して逆説的に論じることができる。

付録

A TOF ポイント 135 点の場合の位置とトリガー効率

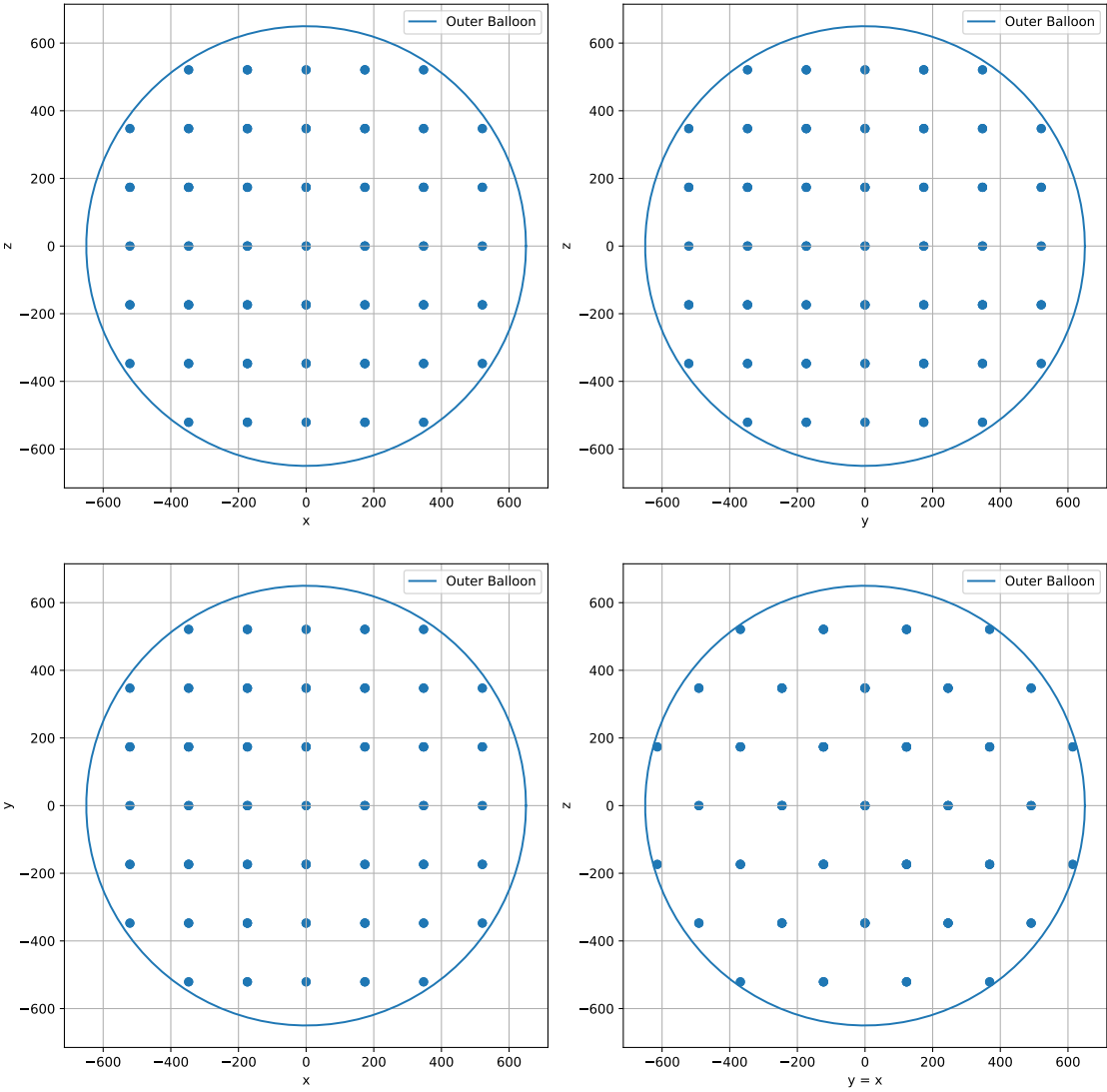


図 A.1 TOF ポイント 135 点の位置

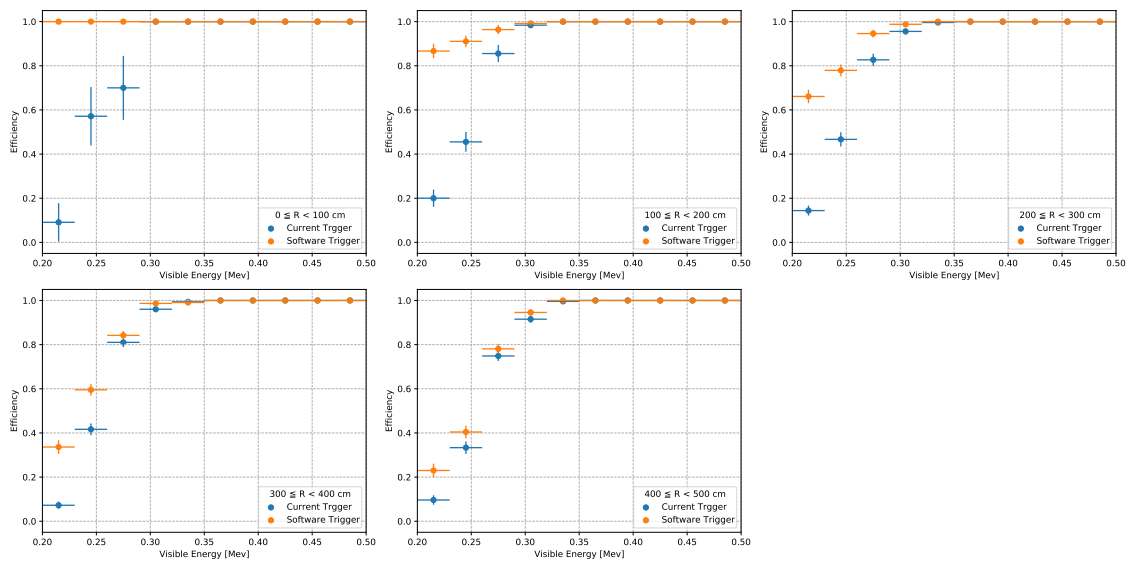


図 A.2 TOF ポイント 135 点の異なる領域における現行トリガーとソフトウェアトリガーのトリガー効率。なお、ソフトウェアトリガーのパラメータは表 6.1 の TOF ポイント数以外の値と同じである。

謝辞

まずは本研究において一番お世話になった石徹白先生に感謝を申し上げます。石徹白先生には研究の相談以外にも就活や進学で相談に乗っていただいたり、石徹白先生宅にお邪魔させて頂いて美味しい料理を頂いたり、沢山のご教授とご厚意に感謝しています。また研究設備を整えて下さり、大変快適な研究を行うことができました。石徹白先生が私の指導教員で良かったと心から思っています。そして MoGURA の関係者の皆様には大変お世話になりました。細川さんには常に研究や私生活に気を使って頂き、その人柄がとても魅力的でした。もしまたお会いした際は失礼を働かないよう十分に気をつけて、あらためてお礼を伝えさせていただきたいです。家城さんには DAQ のシステム周りや KLG4sim で何度も助けて頂いてとても有難く、同時にその優秀さがとても印象的でした。川田さんは自分の研究外にも関わらず気にかけて下さったり、ミーティングで鋭い指摘を頂いたり、第三者目線として貴重な意見を沢山頂きました。ありがとうございます。中畑君は飲んだら気が大きくなるのが面白かったです。二木さんはまたゲームで語り合しましょう。庄司君へは、もし自分の作ったライブラリが迷惑を掛けたら申し訳ないです。これからの活躍を応援しています。また先に卒業した公亮さんからはライブラリやスライドなど多く参考にさせて頂きました。その知識量の多さや技術力の高さを今も尊敬しています。

続いてニュートリノセンターの関係者皆様にお礼を申し上げます。古賀さんにはシフトの際に、とても楽しく勉強になるようなお話を聞かせて頂いてありがとうございました。池田さんにはシフトで困ったときや質問に快く対応頂いたり、自分の研究にも何度かお世話になってとても助かりました。市村さんはシフトトレーニングでお世話になったり、何かと気をかけて頂いて優しさが身に沁みました。寺島さんには計算機講習会でお世話になりました。後半出られませんでした。とても分かりやすい説明で C++ を学ぶ事が出来ました。玉江さんにはホームページの作成や計算機関連で何かとお世話になりました。蜂谷さんはお隣としてとても心強く、気軽に質問に受け答えて頂きとても感謝しています。竹内さんは一緒に夜遅くまで研究室に残ることが多く、勝手に仲間意識を持っていました。また忙しい中何度か研究の相談にも乗っていただいてとてもお世話になりました。山田さんにはセンター入退室など技術面で相談させて頂くことが何度かあり、工学的な技術的要素についてともに語りあって頂いてありがとうございました。また、井上先生をはじめ、沢山の先生先輩方からはスライドや修論発表に関わることについて沢山助言を頂きとても感謝しています。

最後に本学で学生生活を共に過ごした同期や先輩後輩方、ニュートリノセンターの事務や技官の方々、私生活を支えてくれた家族に深く感謝をし、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] S Abe, T Ebihara, S Enomoto, K Furuno, Y Gando, K Ichimura, H Ikeda, K Inoue, Y Kibe, Y Kishimoto, et al. Precision measurement of neutrino oscillation parameters with KamLAND. *Physical Review Letters*, Vol. 100, No. 22, p. 221803, 2008.
- [2] T Araki, K Eguchi, S Enomoto, K Furuno, K Ichimura, H Ikeda, K Inoue, K Ishihara, T Iwamoto, T Kawashima, et al. Measurement of neutrino oscillation with kamland: Evidence of spectral distortion. *Physical Review Letters*, Vol. 94, No. 8, p. 081801, 2005.
- [3] Azusa Gando, Y Gando, T Hachiya, A Hayashi, S Hayashida, H Ikeda, K Inoue, K Ishidoshiro, Y Karino, M Koga, et al. Search for Majorana neutrinos near the inverted mass hierarchy region with KamLAND-Zen. *Physical review letters*, Vol. 117, No. 8, p. 082503, 2016.
- [4] Yoshihito Gando, et al. First results of kamland-zen 800. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1468, p. 012142. IOP Publishing, 2020.
- [5] 中村公亮. KamLAND2 実験に向けた新型フロントエンド回路の研究開発. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2021.
- [6] Yoshiyuki Fukuda, T Hayakawa, E Ichihara, K Inoue, K Ishihara, Hirokazu Ishino, Y Itow, T Kajita, J Kameda, S Kasuga, et al. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters*, Vol. 81, No. 8, p. 1562, 1998.
- [7] Stefano Dell’Oro, Simone Marcocci, Francesco Vissani. New expectations and uncertainties on neutrinoless double beta decay. *Physical Review D*, Vol. 90, No. 3, p. 033005, 2014.
- [8] Ettore Majorana. Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone. *Il Nuovo Cimento (1924-1942)*, Vol. 14, No. 4, pp. 171–184, 1937.
- [9] Hideyoshi Ozaki and Junpei Shirai. Refurbishment of KamLAND outer detector. *PoS, ICHEP2016*, Vol. 1161, , 2017.
- [10] 浜松ホトニクス株式会社編集委員会. 光電子増倍管 –その基礎と応用–. 浜松ホトニクス株式会社, 2017.
- [11] 竹本康浩. Cno サイクル太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路の開発. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2009.
- [12] M Agostini, GR Araujo, AM Bakalyarov, M Balata, I Barabanov, L Baudis, C Bauer, E Bellotti, S Belogurov, A Bettini, et al. Final results of GERDA on the search for neutrinoless double- β decay. *Physical Review Letters*, Vol. 125, No. 25, p. 252502, 2020.
- [13] 朝倉康太. KamLAND-Zen 次期計画へ向けた新型 PMT の性能研究. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2015.
- [14] 三本杉洗斗. KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーの形状最適化. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2021.
- [15] 和田佳樹. KamLAND2-Zen 実験における発光性バルーンのための高発光液体シンチレータの開発. 修士論文,

- 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2020.
- [16] 尾崎秀義. *High Sensitivity Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in KamLAND-Zen with Double Amount of ^{136}Xe* . 博士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2020.
- [17] 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. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2021.
- [18] 林歩美. KamLAND2-Zen に向けた集光ミラーの最適化. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2016.
- [19] 榎本三四郎. *Neutrino Geophysics and Observation of Geo-Neutrinos at KamLAND*. 博士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2005.
- [20] 吉田学立. 液体シンチレータでの粒子識別による α 線バックグラウンド除去の研究. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2011.
- [21] 大木歩. 新トリガーによる KamLAND-Zen 実験での ^{10}C バックグラウンド除去. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2013.
- [22] Xilinx Inc. Zynq UltraScale+ RFSoc. <https://xilinx.com/products/silicon-devices/soc/rfsoc.html>.
- [23] 石川貴寛. KamLAND における近傍超新星ニュートリノ観測に向けた新規トリガー機能開発. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2014.
- [24] FairMQ. <https://github.com/FairRootGroup/FairMQ>.
- [25] G Alimonti, G Angloher, C Arpesella, M Balata, G Bellini, J Benziger, S Bonetti, L Cadonati, FP Calaprice, G Cecchet, et al. Measurement of the ^{14}C abundance in a low-background liquid scintillator. *Physics letters B*, Vol. 422, No. 1-4, pp. 349–358, 1998.
- [26] 松田さゆり. 第一期 kamland-zen 実験における ^{136}Xe のニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊に対する制限. 修士論文, 東北大学大学院理学研究科物理学専攻, 2013.
- [27] Zhen Qian, Vladislav Belavin, Vasily Bokov, Riccardo Brugnera, Alessandro Compagnucci, Arsenii Gavrikov, Alberto Garfagnini, Maxim Gonchar, Leyla Khatbullina, Ziyuan Li, et al. Vertex and energy reconstruction in JUNO with machine learning methods. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, p. 165527, 2021.