

修士論文

KamLAND-Zen 高感度化のための粒子識別用イメージ検出装置の
開発

Development of imaging device for particle identification in
KamLAND-Zen

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

石尾 昌平

平成 26 年

目次

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 1 | 序論 | 4 |
| 2 | ニュートリノと二重ベータ崩壊反応 | 5 |
| 2.1 | ニュートリノ | 5 |
| 2.2 | ニュートリノ振動 | 5 |
| 2.3 | ニュートリノ質量階層構造 | 6 |
| 2.4 | マヨラナ粒子 | 8 |
| 2.5 | ニュートリノレス二重ベータ崩壊 | 8 |
| 2.6 | 他の競合実験 | 11 |
| 3 | KamLAND と KamLAND-Zen | 13 |
| 3.1 | KamLAND | 13 |
| 3.1.1 | 検出原理 | 13 |
| 3.1.2 | KamLAND 実験の構造 | 14 |
| 3.1.3 | KamLAND 実験の結果 | 16 |
| 3.2 | KamLAND-Zen | 18 |
| 3.2.1 | KamLAND 実験からの変更点 | 18 |
| 3.3 | KamLAND-Zen 実験の結果 | 20 |
| 3.3.1 | KamLAND-Zen のバックグラウンドイベント | 21 |
| 3.4 | KamLAND-Zen の将来計画 | 22 |
| 4 | イメージ検出装置のデザイン設計 | 25 |
| 4.1 | イメージ検出装置 | 25 |
| 4.1.1 | 研究目的 | 25 |
| 4.1.2 | 検出原理 | 25 |
| 4.2 | 先行研究 | 27 |
| 4.3 | 先行研究の最解析 | 30 |
| 4.4 | 光学系の設計条件 | 35 |
| 4.5 | 光検出器 | 37 |
| 4.6 | イメージ検出装置のデザイン設計 | 38 |
| 5 | イメージ検出装置の性能シミュレーション | 47 |
| 5.1 | 評価の枠組み | 47 |
| 5.1.1 | 粒子の崩壊からイメージ検出装置の付近までの光の追跡 | 47 |
| 5.1.2 | イメージ検出装置の光線追跡 | 47 |

| | | |
|----------|---------------------------------|-----------|
| 5.1.3 | 撮像画像の解析 | 48 |
| 5.2 | 理想的状況のシミュレーション | 51 |
| 5.3 | 現実的設定でのシミュレーション | 54 |
| 5.3.1 | シミュレーション方法 | 54 |
| 5.3.2 | 設置数7個でのシミュレーション | 55 |
| 5.3.3 | 大量イメージ検出装置設置のシミュレーション | 58 |
| 5.4 | シミュレーション結果まとめ | 60 |
| 6 | イメージ検出装置の試作品評価 | 62 |
| 6.1 | 作成光学系 | 62 |
| 6.2 | 実験設定 | 63 |
| 6.2.1 | 反射率測定実験 | 63 |
| 6.2.2 | 集光能力評価の実験 | 65 |
| 6.2.3 | 集光能力評価実験のまとめ | 70 |
| 6.3 | 判明した問題点とその原因考察 | 71 |
| 6.4 | 導入に向けた改善点まとめ | 76 |
| 7 | 結論と今後の課題 | 78 |

1 序論

ニュートリノレス二重ベータ崩壊反応を観測することで、ニュートリノ有効質量の観測や、宇宙の物質反物質の非対称性などに関する解決の糸口になることが期待されている。

岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山にある KamLAND 実験施設では、 ^{136}Xe を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊反応の観測を行う KamLAND-Zen 実験が行われている。現在までのところ、世界最高感度でのニュートリノレス二重ベータ崩壊反応の探索に成功している。しかし、更なる感度の向上によって逆質量階層構造の観測やそれ以上の感度向上を目指すためには、KamLAND 内でのバックグラウンドイベントを取り除かなくてはならない。

多くのバックグラウンドイベント（例えば ^{10}C や $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ）は、 γ 線を放出するとともに、 β 線を放出することが分かっている。この β 線を観測することができれば、そうしたバックグラウンドイベントを識別することができる。

そこで、我々の研究グループでは、撮像方法を用いて識別する、イメージ検出装置による KamLAND-Zen 実験のバックグラウンドイベントの識別可能性を研究している。その先行研究として、花籠氏が行った先行研究が有る。当時の研究では、“迷光”という想定外の光によって識別が難しいということが分かっていたが、私はその迷光の経路を追求し除去に成功した。

しかし、この光学系をそのまま実装することは実験施設の構造上難しいということがわかっており、そのため新規光学系を一から設計することが必要になった。今回の論文では、光検出器として浜松ホトニクスのマルチアノード PMT (H9500) の 2×2 アレイを想定して、実際の KamLAND の内部構造を考慮したイメージ検出装置の光学系を開発する。また、そのイメージ検出装置のバックグラウンド識別能力について、今まで含まれていなかった KamLAND 内の液体シンチレータ中での吸収・散乱・再発光を考慮した現実的な評価をする。さらに、1/2 スケールでイメージ検出装置の試作品を作成し、光学系の性能評価実験とそこから見えてきた今後の課題について議論する。

2 ニュートリノと二重ベータ崩壊反応

2.1 ニュートリノ

ニュートリノとは素粒子の一種で、もともとは崩壊反応のエネルギー保存のためにパウリによって提唱された粒子である。崩壊とは原子核中の中性子が陽子に変化し、より安定な原子核に変化する反応で、このとき電荷の保存から同時に電子を外部に放出する反応である。

$$n \rightarrow p + e^- \quad (2.1.1)$$

もしニュートリノが存在しないで、この反応で崩壊が完結するならば、エネルギーの保存から放出される電子の運動エネルギーは静止質量の差で表される一定の値になるはずである。しかし、実際の電子の運動エネルギーはこの静止質量の差を最大とした連続分布をすることが分かった。そこで、このエネルギー保存則を破らないようにするために、提唱された粒子がニュートリノである。実際に、この反応では同時に反電子ニュートリノが生じている。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2.1.2)$$

現在ニュートリノは3世代のレプトンとそれぞれ対応して存在することが分かっており、電子ニュートリノ (ν_e) ミューニュートリノ (ν_μ) タウニュートリノ (ν_τ) の3世代で構成されている (表 2.1)。

| | 第一世代 | 第二世代 | 第三世代 |
|------|---------|-----------|------------|
| クォーク | u | c | t |
| | d | s | b |
| レプトン | e | μ | τ |
| | ν_e | ν_μ | ν_τ |

表 2.1: 素粒子

2.2 ニュートリノ振動

標準理論では、ニュートリノには質量がないと考えられている。もしニュートリノが質量を持つのであれば、ニュートリノ振動という現象が有ると考えられる。ニュートリノが質量を持つとき、ニュートリノのフレーバー固有状態は質量固有状態の重ね合わせで書き表すことができる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{j=1}^3 U_{\alpha j} |\nu_j\rangle \quad (2.2.1)$$

ここで、 $U_{\alpha j}$ は MNS 行列と呼ばれているもので、次のようなものである。

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{13} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}c_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{13} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (2.2.2)$$

ここで、 $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$ を表している。先ほどの式のニュートリノの質量固有状態は、それぞれが別個に時間発展をしていくため、ニュートリノの伝搬する際には、混合の状態が変化していく。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j(0)\rangle e^{-iE_j t} \quad (2.2.3)$$

$$E_j = \sqrt{p^2 + m_j^2} \simeq p + \frac{m_j^2}{2p} \quad (2.2.4)$$

ここで、簡単に二世代の間での混合を考えると、行列 U は、

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (2.2.5)$$

と書き表せる。従って二世代間での混合は、

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \quad (2.2.6)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \quad (2.2.7)$$

と表現でき、この二世代の間での状態遷移の確率は次のようになる。

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [m]}{E [MeV]} \right) \quad (2.2.8)$$

このように、飛行距離 L が変化することで状態が変化することから、この現象をニュートリノ振動と呼んでいる。実際に、KamLAND 実験では 2 周期分のニュートリノ振動の観測に成功している (図 2.1 はその結果)。

2.3 ニュートリノ質量階層構造

このニュートリノ振動の観測ができたことから、ニュートリノには質量二乗差が有るということが分かった。しかし、ニュートリノ振動で分かることは、ニュートリノの質量二乗差の値のみで、具体的なニュートリノの質量値を求めることはできなかった。このニュートリノの質量差が分かっているので、その差から現在 3 種類の質量階層構造が考えられている。一つ目は標準階層構造という状態で、質量は $m_1 < m_2 \ll m_3$ という順番になっている。二つ目は、逆質量階層構造という状態で、質量は $m_3 \ll m_1 < m_2$ となっている。最後は縮退型という状態で、全ての質量がほぼ同じ状態になる状態である (図 2.2 は質量階層構造に関する模式図)。

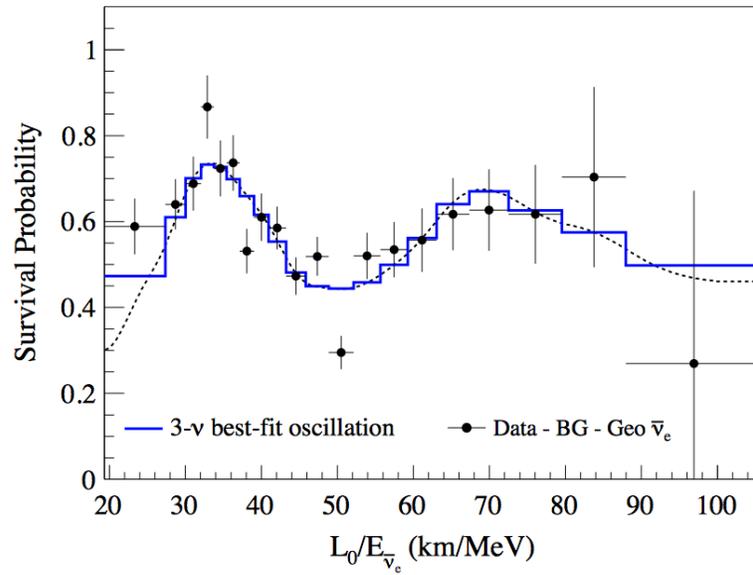


図 2.1: KamLAND でのニュートリノ振動観測

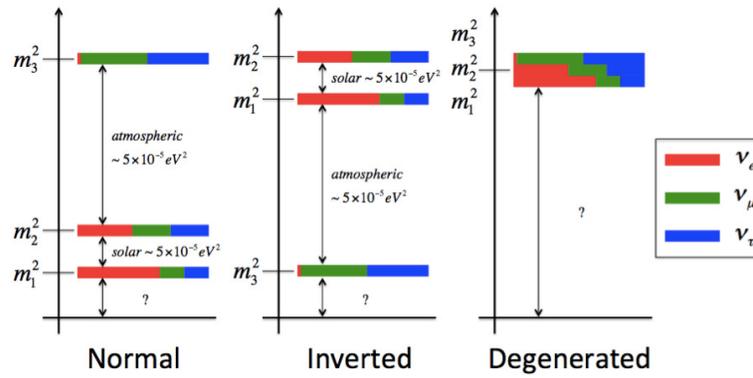


図 2.2: 質量階層構造

2.4 マヨラナ粒子

ニュートリノの質量が存在することが分かったが、標準理論では説明ができないということになる。そこで、標準理論を超えた理論を構築しなくてはならない。その一つがニュートリノがマヨラナ粒子であるという考え方である。

標準理論中の粒子はディラック粒子と考えられている。ディラック粒子は、右巻きと左巻きが存在し、その混合状態を用いて質量を記述している。ニュートリノも粒子を持つことが分かったが、左巻きニュートリノと右巻き反ニュートリノしか観測が行われていない。残りの状態のニュートリノが観測できない理由として考えられたことが、ニュートリノが粒子と反粒子が同じ粒子であるマヨラナ粒子だからという考えである。このように、ニュートリノがマヨラナ粒子であるならば、観測が行われていないと思われた種類も、実は右巻きと左巻きの観測で完結していることになる。

また、ニュートリノの質量が非常に軽いことや右巻きニュートリノが観測できていないことも、このニュートリノがマヨラナ粒子であることで説明ができる。マヨラナ粒子である場合には、ディラック粒子と異なり右巻きと左巻きで別々の質量をとることができる。そのため、左巻きニュートリノを非常に軽い質量とし、逆に右巻きニュートリノの質量を非常に重いものと仮定する。この状態ならば、右巻きニュートリノが通常存在が難しくなるため、軽い左巻きニュートリノのみが観測されるという事実に矛盾が生じなくなる。

2.5 ニュートリノレス二重ベータ崩壊

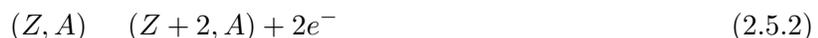
ニュートリノの質量に関しての問題の解決につながる、ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを直接確認する実験として、ニュートリノレス二重崩壊反応の観測が挙げられる。

原子核は不安定状態から変化する際に、中性子が陽子に変化し、同時に電子と反電子ニュートリノを放出する、ベータ崩壊という反応を起こす。この反応で、原子核の構成が変化し、より安定な状況へと移行する。しかし、時には一度のベータ崩壊反応では現在よりも安定状態ではないが、二重ベータ崩壊反応を起こすことで現在より安定な原子核になるという場合がある（図 2.3 のように二重崩壊を起こし初めてより安定な状態になる）。

このときに、二重ベータ崩壊を起こして、その安定な原子核まで一気に移行することが起こりうる。これが二重ベータ崩壊と呼ばれる反応である。



その際、もしもニュートリノが粒子と反粒子が同じであるマヨラナ粒子ならば、二重ベータ崩壊によって放出した反電子ニュートリノ同士が反応して、ニュートリノの外部放出のない反応が起こると考えられる（図 2.4 にその模式図）。



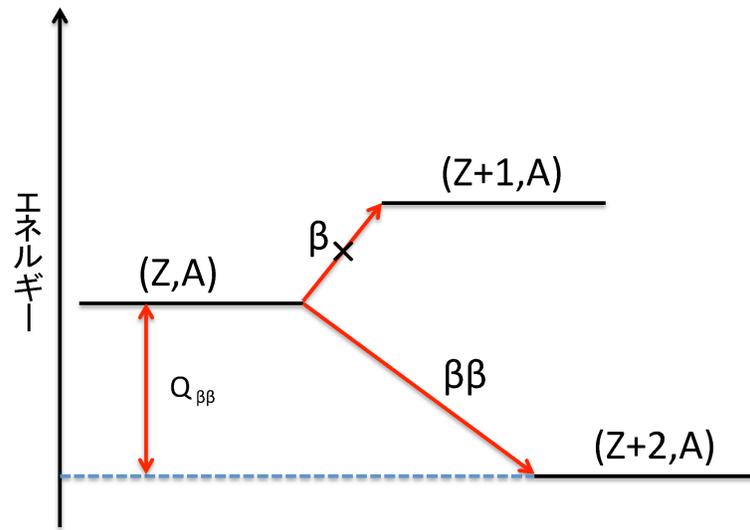


図 2.3: 原子核のエネルギー状態

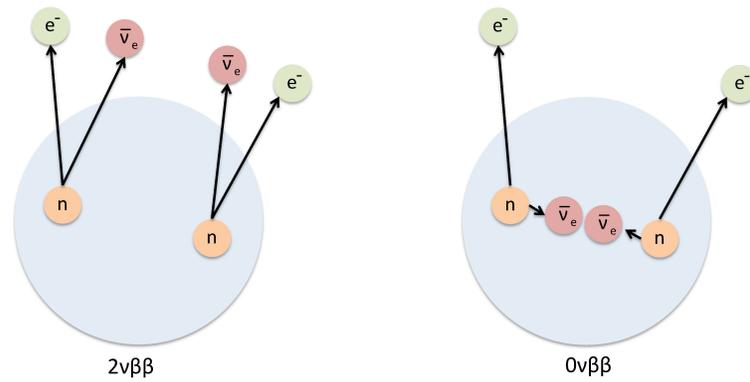


図 2.4: ニュートリノレス二重崩壊

これをニュートリノレス二重ベータ崩壊反応といい、通常の二重ベータ崩壊反応とは大きく異なる反応である。その大きな特徴としては、外部に放出された2つの電子のエネルギーが挙げられる。エネルギーを外部に持ち出すニュートリノの存在しないニュートリノレス二重崩壊反応は、2つのエネルギーの和は原子核のエネルギー差のQ値という定数になるが、ニュートリノを同時に放出する二重崩壊では電子のエネルギー和はQ値以下の連続的なエネルギースペクトルとなる(図2.5)。

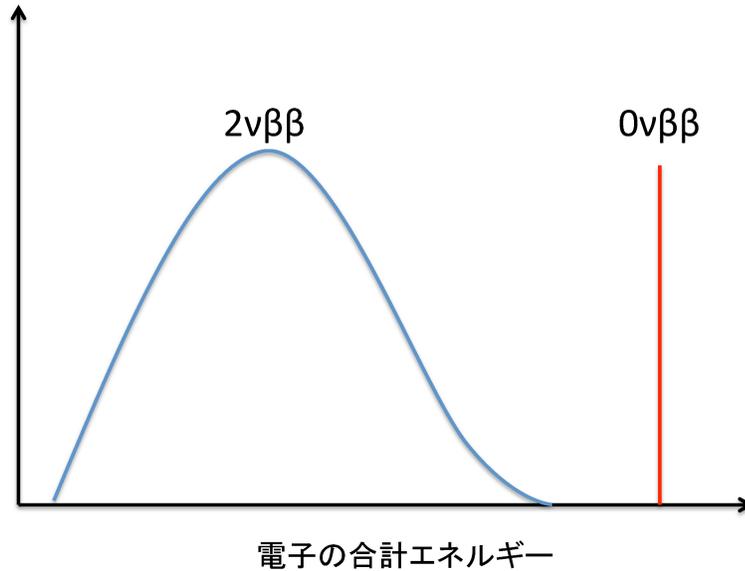


図 2.5: 二重崩壊の電子のエネルギースペクトル

このニュートリノレス二重崩壊反応を観測する目的として、次のようなことの証明が挙げられる。

・ニュートリノがマヨラナ粒子であることの証明

これはニュートリノレス二重崩壊反応がマヨラナ粒子であるが故に起きる現象だから、その観測はすなわちニュートリノがマヨラナ粒子であると決まるということになる。

・ニュートリノ有効質量の観測

ニュートリノの有効質量は、ニュートリノレス二重崩壊反応の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ と次のような関係式で表すことができる。

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle \quad (2.5.3)$$

ここで、 $G^{0\nu}(Q, Z)$ は位相空間因子、 $M^{0\nu}$ は核行列要素を表す。

・物質優勢宇宙の説明可能性

現在、宇宙では物質と反物質の比が1対1ではなく圧倒的に物質が多く存在している。しかし、標準理

論ではこの物質優勢に関する説明ができないため、現在でも問題となっている。しかし、これを説明できる可能性があるのが、マヨラナニュートリノの存在である。標準理論にない仮定として、右巻きマヨラナニュートリノの存在を仮定すると、その右巻きマヨラナニュートリノが崩壊し、レプトン数を生成することが考えられる。そのため、宇宙の物質優勢の説明可能性の一つとして、マヨラナニュートリノの存在が挙げられるのである。

これらのことがわかることから、ニュートリノレス二重崩壊実験の測定は非常に有意義な実験であるため、世界の多くの場所で行われている。我々の実験施設である KamLAND でも、現在ニュートリノレス二重崩壊反応の観測を目指し、KamLAND-Zen 実験がおこなわれている。

2.6 他の競合実験

ニュートリノレス二重崩壊反応の観測実験は世界中で行われている。我々の KamLAND-Zen 実験もその一つであるが、いくつかの競合実験について簡単に紹介する。

GERDA

GERDA はイタリアの LNGS で ^{76}Ge 検出器を用いた検出実験である。特徴としては、高分解能の検出器を用いており、また同時に ^{76}Ge 自身が二重崩壊核としても機能しているのが特徴である。実験結果によると、半減期の下限値は、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.1 \times 10^{25} \text{yr} \quad (2.6.1)$$

という結果になっている。[14]

EXO-200

EXO は我々 KamLAND-Zen 実験と同じく ^{136}Xe を用いた実験である。特徴としては、濃縮や精製の容易な液体 ^{136}Xe を用いた TPC (time projection chamber) 方式の検出器である。2014 年の結果によると、 $0\nu\beta\beta$ の半減期は、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.1 \times 10^{25} \text{yr} \quad (2.6.2)$$

となっている。[13]

NEMO3

NEMO3 はフランスの Frejus underground laboratory で行われている、 ^{100}Mo や ^{82}Se などを用いた 7 種類の崩壊核を用いた探索実験である。特徴としては、25Gauss の磁場をかけカロリメーターとド

リフトチェンバーを用いた実験を行っている。この中で、 ^{100}Mo に関してのニュートリノレス二重崩壊の半減期は、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.1 \times 10^{24} \text{yr} \quad (2.6.3)$$

という結果になっている。[12]

これ以外にも多くの実験が行われており、例えば高 Q 値をもつ ^{48}Ca を崩壊核とする CANDLES や、高分解能な検出器として TeO_2 ボロメータを用いる CUREO など様々な実験が行われている。

3 KamLAND と KamLAND-Zen

3.1 KamLAND

KamLAND とは、Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector の略称で、岐阜県飛騨市神岡町にあるニュートリノ観測装置である。KamLAND 実験装置の特徴としては、図 3.1 のように池ノ山山頂から 1km 下の地中に存在するため、宇宙線からくるミュオンが非常に少なくなり、宇宙線バックグラウンドの非常に少ない、低バックグラウンド環境での実験を実現しているにある。KamLAND 実験は、直径 13m のバルーンの内部に 1000t の液体シンチレータを検出用に用いて、検出を行っている巨大な検出施設である。液体シンチレータと反ニュートリノが反応することでシンチレーション光を放出し、それを KamLAND 全体に取り付けてある光電子増倍管で観測することで、反ニュートリノの観測を行っている。

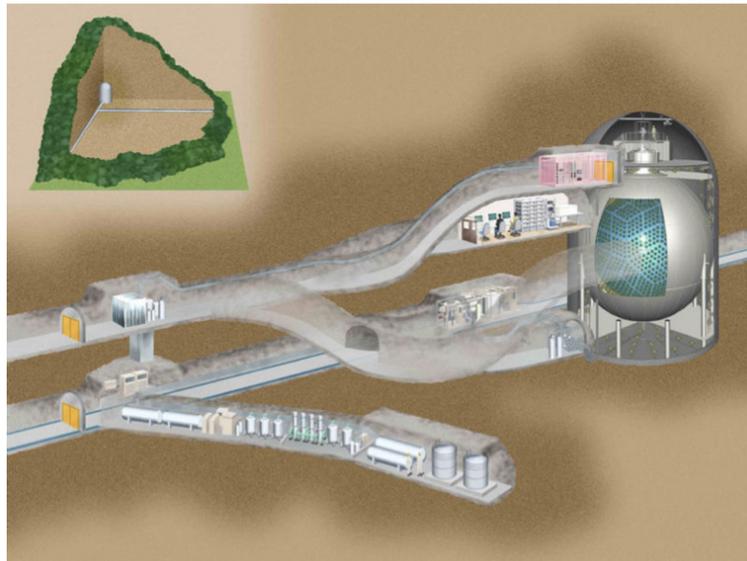


図 3.1: KamLAND 装置図

3.1.1 検出原理

KamLAND でのニュートリノの検出原理について説明する。まず反電子ニュートリノが液体シンチレータ中の陽子との相互作用を起こし、中性子と陽電子を放出する。



このうちの陽電子は液体シンチレータ中の電子との対消滅によって、2本の線へと変化する。一方、放出された中性子は液体シンチレータ中に存在する原子核との弾性散乱によってエネルギーを落としていく。エネルギーを失った中性子は、最終的に陽子による中性子捕獲反応によって、線と重水素に変化する。



この二種類の線を、先発信号の陽電子対消滅と後発信号の中性子捕獲として、遅延同時計測を行うことで、バックグラウンドイベントと反電子ニュートリノイベントの2つを特定することができる。また、陽子・中性子・電子の質量が $m_e + m_n > m_p$ であることから、逆ベータ崩壊反応が発生するニュートリノの運動エネルギーに制限がかかる。相対論的效果をふまえると、そのエネルギーしきい値は以下のように表される。

$$E_{\bar{\nu}_e}^{threshold} = \frac{(m_e + m_n)^2 + m_p^2}{2m_p} = 1.806 \text{ MeV} \quad (3.1.4)$$

3.1.2 KamLAND 実験の構造

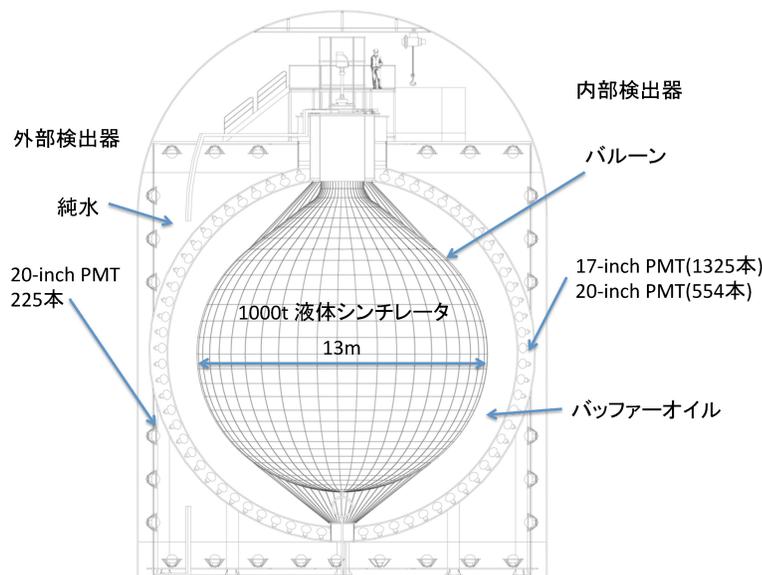


図 3.2: KamLAND 実験装置

ここでは図 3.2 にある KamLAND 検出器に関して説明をする。

外部検出器

KamLAND は、大きく二つの構造に分かれており、外部は直径 20m、高さ 20m の円柱形タンクになっている。そして、更にその内部は球形のステンレスタンクになっている。ここで呼ぶ外部検出器とは、ステンレスタンクと円柱タンクとの間の箇所をさしている。外部検出器の円柱タンク中に、宇宙線由来のミュオンを識別するための検出器として、20inch 光電子増倍管を 225 本取り付けている。また、球形タンクとの間を鉱山内の水源を利用している純水で満たしてやることで、環境放射線の除去や、実験装置の温度状況の管理などの役割を担っている。

内部検出器

球形タンク内部は大きくバルーンで二層に分かれている。一番外側には光電子増倍管を設置しており、その数は 17inch 光電子増倍管が 1325 本、20inch 光電子増倍管が 554 本と、合計 1879 本の光電子増倍管が設置されている。光電子増倍管の内側にはバッファオイルと呼ばれるミネラルオイルがはいっており、その間はアクリル板で仕切られている。その内側には、バルーンとよばれるナイロンフィルムがあり、直径 13m にも及ぶ巨大バルーンの内部は 1000t の液体シンチレータによって満たされている。

光電子増倍管 (PMT)

先ほどから述べているように、17inch と 20inch の光電子増倍管を KamLAND の検出器として利用している。17inch の光電子増倍管は、KamLAND 用に新調したもので、20inch の光電子増倍管は以前のカミオカンデ時代に利用していたものを改良したものである。また、17inch 光電子増倍管は端の部分を覆うことで、時間分解能の悪いところを使わないようにしているので、PMT のサイズは 20inch であるが光電面のサイズは 17inch になっている (図 3.3)。

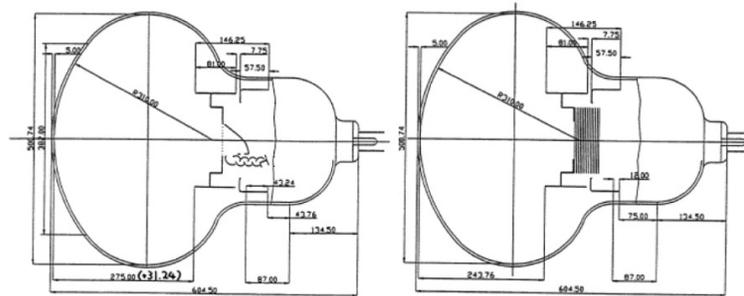


図 3.3: 17inch (左) と 20inch (右) の光電子増倍管

液体シンチレータ

KamLAND の特徴の一つとしては、液体シンチレータと呼ばれている放射線に反応して光を放出する液体を用いていることである。KamLAND で使用している液体シンチレータは、ドデカン ($C_{12}H_{26}$) とブソイドクメン (C_9H_{12}) と PPO($C_{15}H_{11}NO$) を使用した液体シンチレータを用いている。具体的な体積比としては、ドデカンが 80 %、ブソイドクメンが 20 % という構成に、PPO($C_{15}H_{11}NO$) を 1.36g/l 使用している。この配分は、長期安定性や、発光量の大きさから決定された。

3.1.3 KamLAND 実験の結果

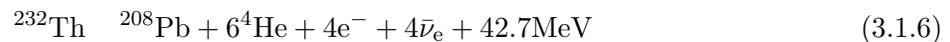
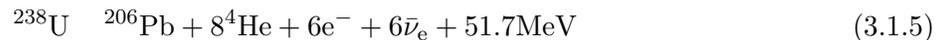
KamLAND 実験は低バックグラウンド環境での巨大ニュートリノ検出装置ということで、その環境からさまざまな結果が得られている。ここでは、特に大きな 2 つの成果に関して紹介する。

ニュートリノ振動

原子炉で起きる核分裂の際に、反電子ニュートリノが放出されることが分かっている。そうした原子炉由来のニュートリノを捕獲し解析することで、原子炉の稼働状況などの情報を得ることができる。KamLAND は周囲に多くの原子炉が存在し稼働している状況で実験を行っていたため、様々な条件の距離とエネルギーの比のデータを取ることができた。その結果として、KamLAND ではニュートリノ振動の観測を成功することができた。

地球ニュートリノ

地球内部の放射性原子核である、ウラン・カリウム・トリウムなどは、熱放射を起こしながら最終的には安定状態へと落ち着いてゆく。この際同時に反電子ニュートリノを放出することが分かっており、そのニュートリノを解析することで、地球内部の情報を獲得することができる。



実際に KamLAND では地球由来のニュートリノの観測に成功して、地熱全体の 44TW のうちのおよそ半分の 21TW が放射性原子核由来の熱であるということを解析した (図 3.4 が地球ニュートリノの観測結果)。

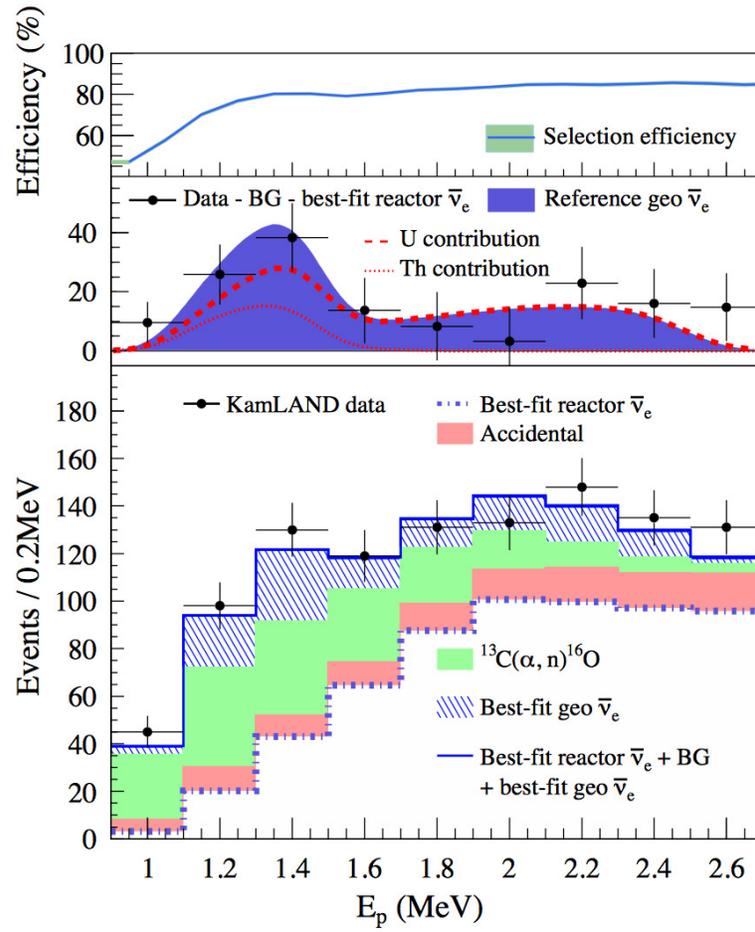


図 3.4: 地球ニュートリノの観測結果

3.2 KamLAND-Zen

KamLAND 検出器の低バックグラウンド環境を利用して、現在 KamLAND ではニュートリノレス二重ベータ崩壊反応の観測実験を行っている。この実験を略称して、KamLAND-Zen (Zero Neutrino double beta decay) 実験と呼んでいる。現在世界最高感度での実験精度で、観測を達成している実験であるが、現象の発見にまでは至っていない。

KamLAND-Zen

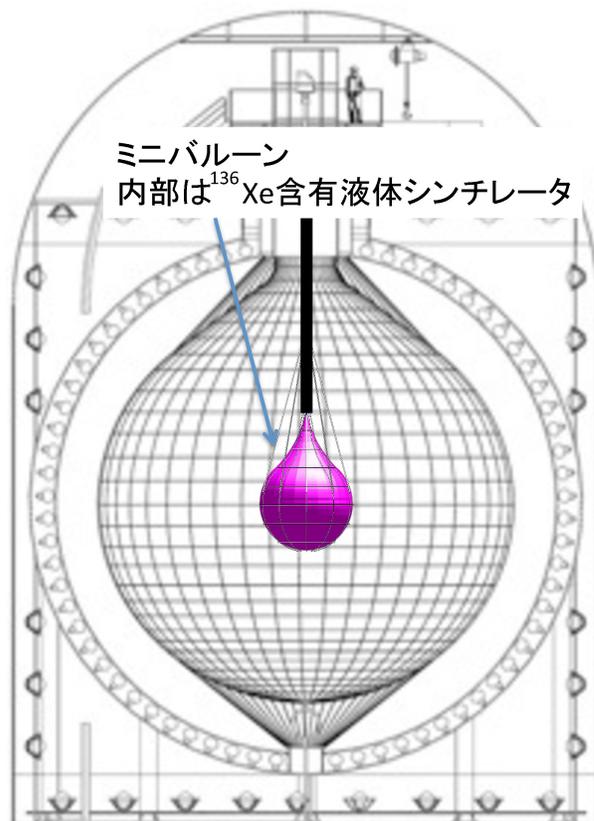


図 3.5: KamLAND-Zen 実験装置図

3.2.1 KamLAND 実験からの変更点

KamLAND 実験から変更した点としては、まず最大の変更点として、内部に二重ベータ崩壊核である ^{136}Xe を導入するために、内部に直径 3.16m のミニバルーンを導入したことである。図 3.5 が装置全体

図で、中央の紫色のものがミニバルーンである。そして、そのミニバルーン内部に Xe を溶かし込んだ液体シンチレータを入れて、二重ベータ崩壊反応を観測しようとしている。

Xe 含有液体シンチレータ

二重崩壊観測のために二重崩壊核である ^{136}Xe を導入している。他にも二重崩壊を起こす原子核は存在するが、今回 ^{136}Xe を選択した理由としていくつか存在する。

- ・ ^{136}Xe が安定した希ガスなので、安全性が高い
- ・ 2ν モードの半減期が長く、 0ν モードの半減期が短い
- ・ 液体シンチレータへの溶解が容易である
- ・ 濃縮方法が確立している

以上のような理由があり、KamLAND にとって適していると考えられる。

液体シンチレータに新しく ^{136}Xe を含めるので、液体シンチレータの構成も以前のものと少し変化している。具体的な組成比は次の表 3.1 のようになっている。

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| デカン | 82.3 % |
| ブソイドクメン | 17.7 % |
| PPO | 2.7g/l |
| ^{136}Xe | $2.96 \pm 0.01\text{wt \%}$ |

表 3.1: Xe 液体シンチレータ組成比

ミニバルーン

Xe 含有液体シンチレータを入れているのは、ミニバルーンという新規に導入するものになる。このミニバルーンは、厚み $25\mu\text{m}$ の非常に薄いナイロン製で、薄く作成した理由はナイロンに含まれる放射線を低減することで、実験のバックグラウンドを低減させるためである。具体的なミニバルーンの様子は、次の図 3.6 のようになっている。

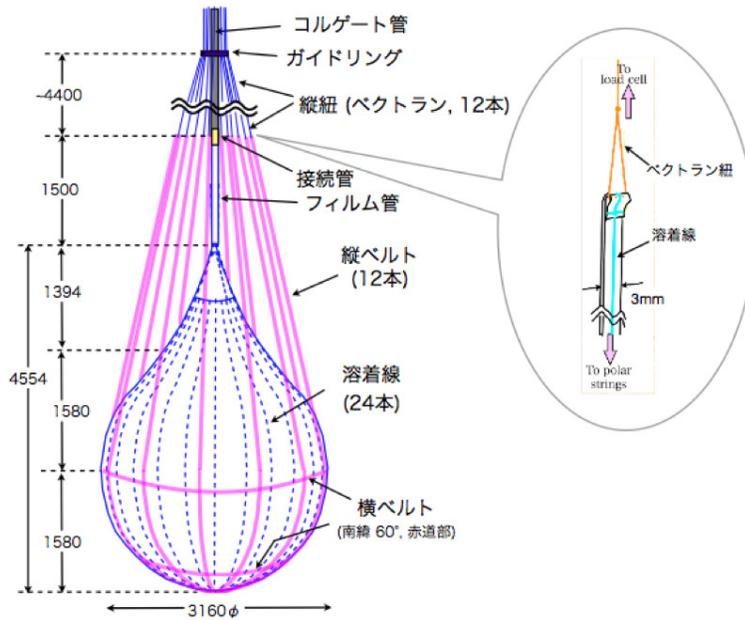


図 3.6: ミニバルーン

3.3 KamLAND-Zen 実験の結果

KamLAND-Zen 実験の最新の結果について紹介する。次の図 3.7 はその結果であり、観測されたエネルギースペクトラムに関しての、2013 年 12 月から 2014 年 5 月までの 118.4 日分のデータについての現在の最新結果である。この期間の結果から、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.3 \times 10^{25} \text{ yr} \quad (3.3.1)$$

となった。また、KamLAND-Zen 実験の全期間での半減期の結果は、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.6 \times 10^{25} \text{ yr} \quad (3.3.2)$$

となった。この結果から、ニュートリノの有効質量の上限値は、

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (140 - 280) \text{ meV} \quad (3.3.3)$$

になった。

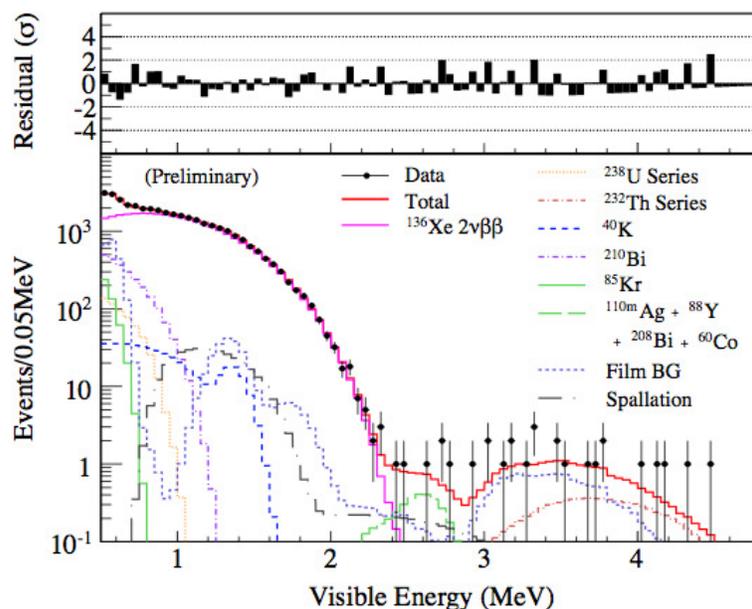


図 3.7: KamLAND-Zen 実験結果

3.3.1 KamLAND-Zen のバックグラウンドイベント

今後ニュートリノレス二重崩壊を観測するために KamLAND-Zen 実験の感度向上を行う必要が有る。感度向上のためにはバックグラウンドイベントの低減が必要になる。そこでここでは KamLAND-Zen 実験で問題になっているバックグラウンドイベントに関していくつかをまとめておく。

$2\nu\beta\beta$

ニュートリノレス二重崩壊の観測はエネルギーが Q 値によって固定するため、理想的には一点にイベントが集まるはずである。しかし、実際の実験では、エネルギー分解能による広がりがあるスペクトルになってしまう。こうした広がりがあると、 $2\nu\beta\beta$ イベントからのしみ込みが出てくる。そのため、エネルギー分解能の改善によって $2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ の分離を行うことがバックグラウンド低減には不可欠である。

^{10}C

KamLAND は地上と比較すると非常に低レートにはなっているが、それでも宇宙線を完全に無くすことはできない。そうして入り込んだ宇宙線ミュオンにより、液体シンチレータを構成している ^{12}C を

破碎して、 ^{10}C を生成する。この ^{10}C はその後の崩壊で1.75 から 3.65[MeV] までの広いエネルギー領域に及ぶため特に問題となるバックグラウンドイベントの一つである。

$^{110\text{m}}\text{Ag}$

当初は想定していなかったバックグラウンドとして $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が挙げられる。これは混入経路が確定はしていないが、福島第一原子力発電所の事故で大気中に増加した $^{110\text{m}}\text{Ag}$ が付着した可能性などが考えられる。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ に関しては液体シンチレータの純化により低減したことが確認されている。

^{214}Bi

ミニバルーンにはウラン、トリウム、カリウム系列の放射線不純物が混入している。特にその中でも ^{214}Bi は、エネルギー領域が2.2 から 3.0[MeV] と問題のあるバックグラウンドになっている。この ^{214}Bi の識別方法は ^{214}Po の寿命が短いことを利用した遅延同時計測が挙げられている。

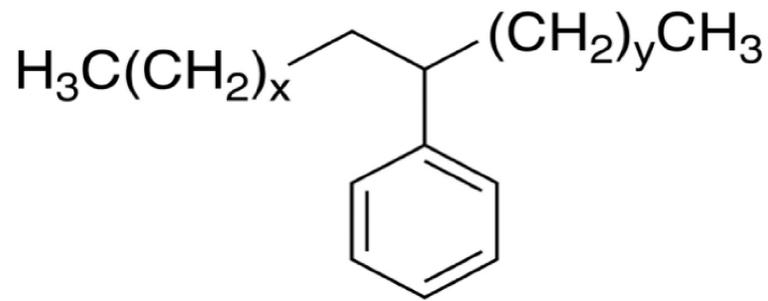
3.4 KamLAND-Zen の将来計画

KamLAND2-Zen

現在の KamLAND-Zen 実験から有効質量の上限値の更新をしたが、より高精度なニュートリノレス二重崩壊反応の観測を目指すためには、様々な改良が必要になってくる。今後の目標としては、逆階層構造を含んだ $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20\text{meV}$ 領域である。そのために、KamLAND では将来的に大きく改良を加えることを考えている。そのうち最も大きな変更計画として考えているのは、KamLAND2-Zen 計画である。大きな変更点として計画していることは、以下のような点である。

・大光量液体シンチレータの導入

現在の KamLAND に使われている液体シンチレータよりも、およそ1.2倍程度の発行量の増加が見込まれている、新規の液体シンチレータを導入することによって、集光量の増加を目指している。新規の液体シンチレータとしては、図 3.8 にあるようなリニアアルキルベンゼン (Linear Alkylbenzene : LAB) を使用候補として現在研究している。



LAB

図 3.8: LAB の組成式

・ウィンストンコーンの設置

KamLAND での集光効率上昇の方法の一つとして、図 3.9 のような集光ミラーのウィンストンコーンの設置を計画している。図 3.9 は、黒い部分が光電子増倍管であり、青い部分のような形状の集光ミラーを設置することで、集光量増加を目指すものである。この設置によって、集光量をおよそ 1.6 倍近く上げることが可能なことが見込まれている。

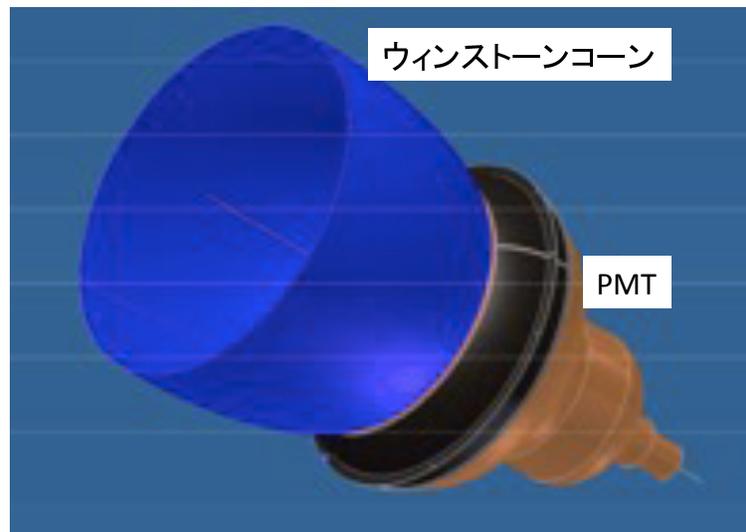


図 3.9: ウィンストンコーン

- ・高量子効率の光電子増倍管の使用

現在の KamLAND で使用している光電子増倍管をより高量子効率なものに変更することで、獲得光量の増大を目指している。量子効率としては、21 %から 30 %前後までの向上が見込まれている。また PMT のサイズを 17inch から 20inch に変更することで、受光面積の拡大による獲得光量の増加も期待できる。

これ以外にも、シンチレーションフィルムの導入によるバックグラウンドイベントタギングや、イメージ検出装置の導入も視野に入れている。

- ・シンチレーションフィルム

ミニバルーンの素材としてシンチレーションフィルムを用いることを研究している。新しくシンチレーションミニバルーンを用いることで、ミニバルーン中の ^{214}Bi バックグラウンドのうちでミニバルーン中でトラップされるような今まで判別できなかったものに関し、新しくタギングできることが期待される。

- ・イメージ検出装置

本研究内容であるイメージ検出装置は、一部の光電子増倍管を置き換えて、そのかわりにバックグラウンドイベントを識別するためのイメージ検出装置を導入して、ニュートリノレス二重崩壊反応の観測精度の向上を行おうというものである。

4 イメージ検出装置のデザイン設計

4.1 イメージ検出装置

4.1.1 研究目的

KamLAND-Zen 実験の高感度化にはバックグラウンド低減が課題である。本研究は β 線を伴うバックグラウンドに着目する。 β 線と γ 線の間では、バーテックスの広がり方が大きく異なり、 β 線は点のようにしか広がらないのに対して、 γ 線はコンプトン効果でエネルギーを落としながらも遠方までバーテックスが広がっていく。イメージ検出装置では、 $0\nu\beta\beta$ 信号と γ 線を伴うバックグラウンドの間のバーテックスの広がり方の違いを、撮像系で集光し、イメージとして識別してやり、KamLAND のバックグラウンドイベントの除去を目的としている。

4.1.2 検出原理

目的としている ^{10}C と $^{110\text{m}}\text{Ag}$ はマルチバーテックスイベントである。具体的にそれぞれの原因と識別に関してをまとめてゆく。

^{10}C のバーテックス

^{10}C の生成由来は、宇宙線ミューオンによって液体シンチレータ中の ^{12}C の原子核の破壊が生じて、その結果 ^{10}C の生成が起きるためである。 ^{10}C は β^+ 崩壊によって ^{10}B に崩壊する (図 4.1)。



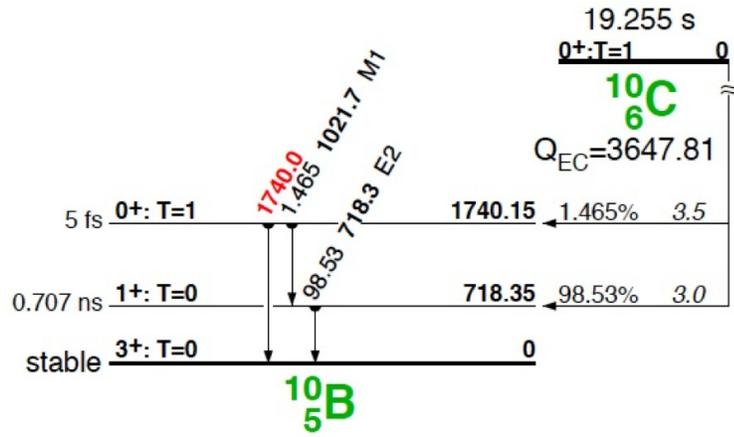


図 4.1: ^{10}C の崩壊図

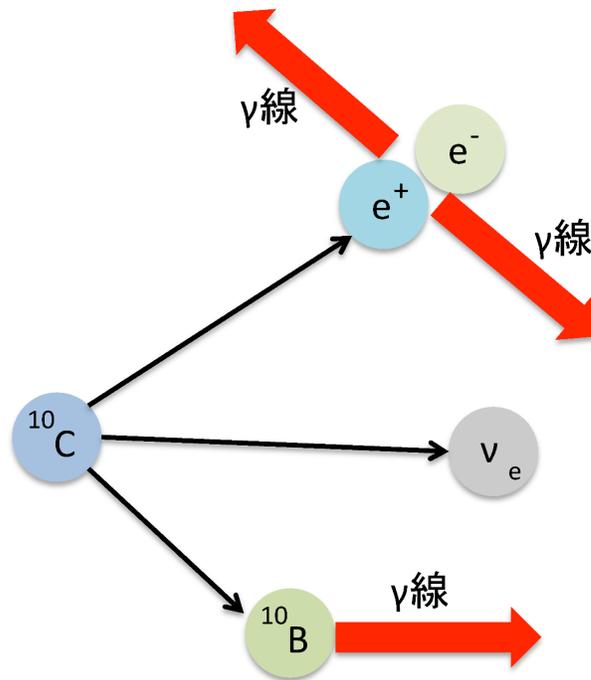


図 4.2: ^{10}C のパーテックス

この ν_e の持ち出すエネルギーが 1.75 から 3.65[MeV] まで幅広いため、 $0\nu\beta\beta$ 観測のためには、識別が

必要になる。

^{10}C によるバーテックスは以下のように分けることができる (図 4.2)。

- ・陽電子による電子のシンチレーション光
- ・陽電子の対消滅によって起こる 2 本の γ 線が作るシンチレーション光
- ・ ^{10}B が励起状態から基底状態になるときに生じる γ 線によるシンチレーション光

このように、 ^{10}C イベントはマルチバーテックスイベントである。

$^{110\text{m}}\text{Ag}$ のバーテックス

$^{110\text{m}}\text{Ag}$ の混入原因ははっきりとはしていない。可能性として考えられるのは、福島第一原子力発電所の事故による $^{110\text{m}}\text{Ag}$ がミニバルーンに付着した可能性や、 ^{136}Xe の輸送中の宇宙線による原子核破壊などが考えられる。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ も β^- 崩壊を起こし、計 2.89MeV のエネルギーを落とす。その後、安定状態の ^{110}Cd に到達するまでの間に様々な経過で γ 線を落としてゆく。こうした様々な γ 線によって $^{110\text{m}}\text{Ag}$ もマルチバーテックスイベントになる。

以上のように、マルチバーテックスイベントなバックグラウンドイベントに対して、我々の求める $0\nu\beta\beta$ のイベントは、電子の放出のみで、電子の飛行距離は短いので、バーテックスの大きな違いが見られる。その違いからバックグラウンドを識別するというのが本研究であるイメージ検出装置の目的である。

4.2 先行研究

このイメージ検出装置を用いたバックグラウンド低減の研究の初期結果は花籠氏の修士論文にまとめられている [1]。先行研究では、KamLAND の内部の液体シンチレータの屈折率の関係から、屈折型光学系での集光が難しいと判断し、反射型の集光光学系を設計した。先行研究での光学系は図 4.3 のようなミラー三枚を用いた複雑な形状の光学系であり、三枚のミラーを用いて、図 4.4 のような反射で集光する設計になっている。

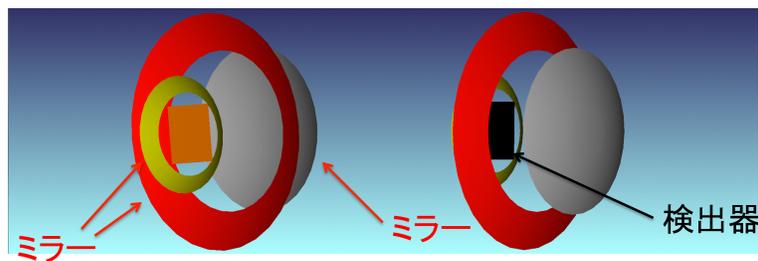


図 4.3: 先行研究の光学系

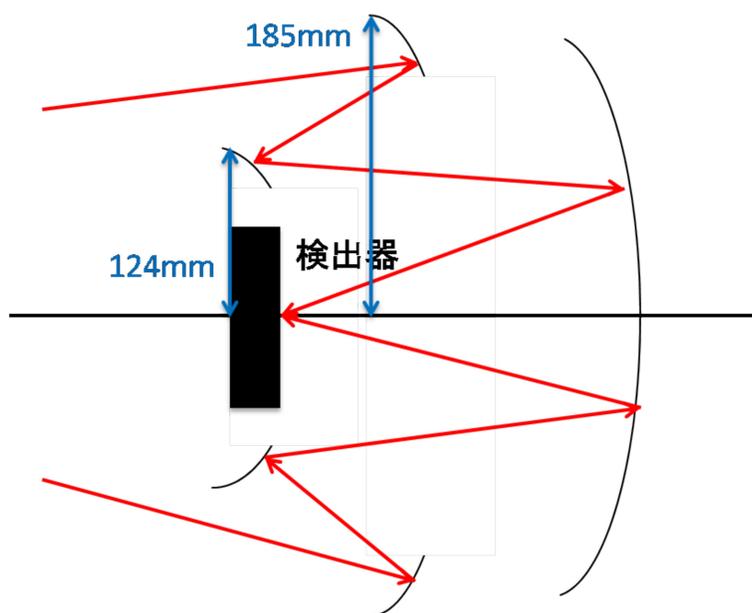


図 4.4: 先行研究の光学系の集光の様子

そして設計された光学系での粒子の識別が可能かどうかを確認した結果、識別が難しいという結果になった。具体的な結果は図 4.5 と図 4.6 で、赤色が $0\nu\beta\beta$ で青色が ^{10}C 、緑色が $^{110\text{m}}\text{Ag}$ である。結果として、識別効率は、表 5.1 のようになり、 $0\nu\beta\beta$ の 10% の誤除去に対しての粒子識別は $^{110\text{m}}\text{Ag}$ は 48% で ^{10}C については 16% とほとんどの識別が不可能な結果になってしまった。

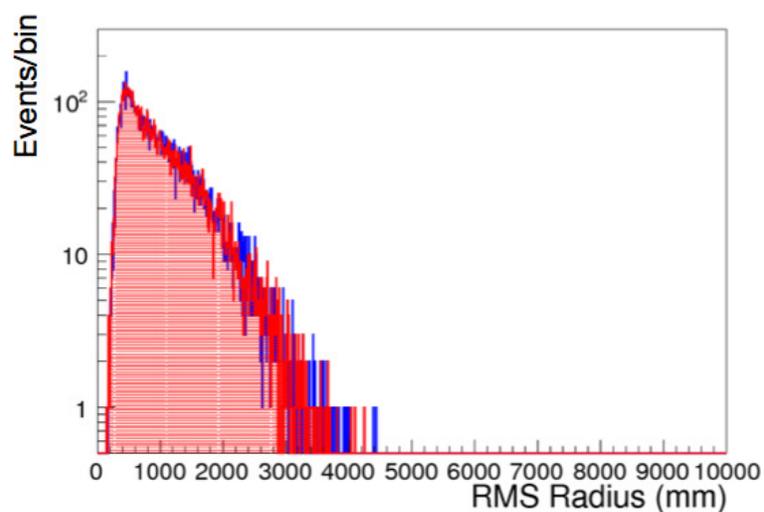


図 4.5: 先行研究の解析結果 ($0\nu\beta\beta$ vs ^{10}C)

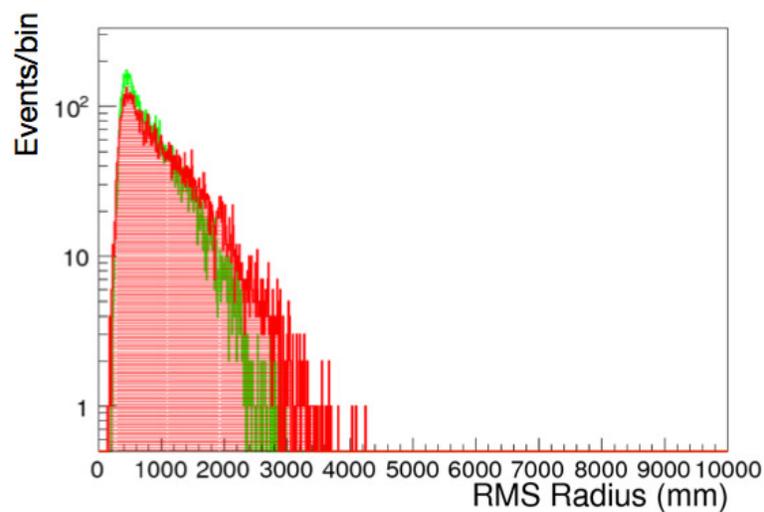


図 4.6: 先行研究の解析結果 ($0\nu\beta\beta$ vs $^{110\text{m}}\text{Ag}$)

先行研究で識別が難しいという原因になっていたのは、迷光と呼ばれる想定外の光が入ってきていたからである。迷光とは、想定している光学系の経路以外を通過して最終的に撮像されてしまう光のことである。先行研究の論文では、迷光の存在があるため識別が難しくなることがわかった。

そこで、先行研究の光学系を用い、迷光の原因となっている経路の同定を行い、その除去を目指し、

| 粒子 | 除去率 [%] |
|--------------------|---------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 |
| ^{110m}Ag | 48.5 |
| ^{10}C | 16 |

表 4.1: 先行研究の粒子識別効率

識別性能に関する最解析を行うことにする。

4.3 先行研究の最解析

迷光の原因究明

まずは、先行研究で存在が明らかになり、先行研究では経路が同定されていなかった迷光の原因究明を行うことにした。

一般に、こうした反射型光学系の迷光としてよく考えられるものは、想定した反射面を通らず別の反射を行い（あるいは反射を行わずにそのまま）検出器部分にあたるパターンである。今回の先行研究での光学系に関しても検出器にあたる光の方向を解析したところ、迷光として検出器にあっていた光の通過箇所としては次の図 4.7 のようになることがわかった。そこで、図 4.8 の位置に光を吸収する障壁を作成した結果、本来の光を遮ることなく迷光のみを取り除くことに成功した。その効果が図 4.9 のようになっている。これは、光学系の焦点距離の位置に点光源を置いた場合の集光画像になっており、どちらの画像も迷光がなければ本来なら中心部分にのみ集光するはずの画像である。しかし、左側のように迷光となる光が入ってしまっていることが分かる。しかし、先ほどの障壁を置いてやることで、目立っていた迷光が右側のようにほとんどなくなることを確認した。

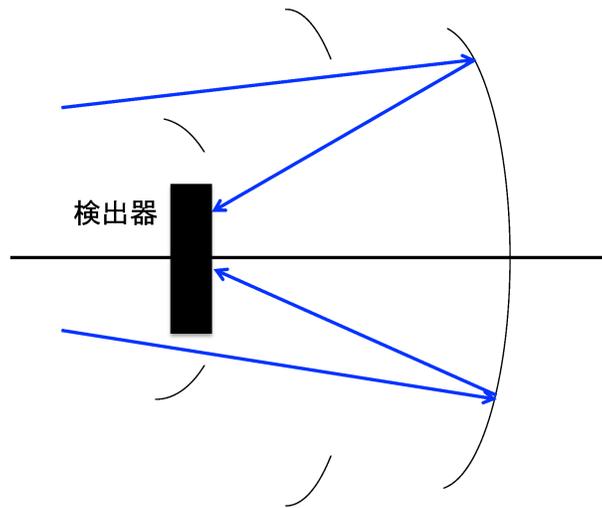


図 4.7: 先行研究の迷光経路

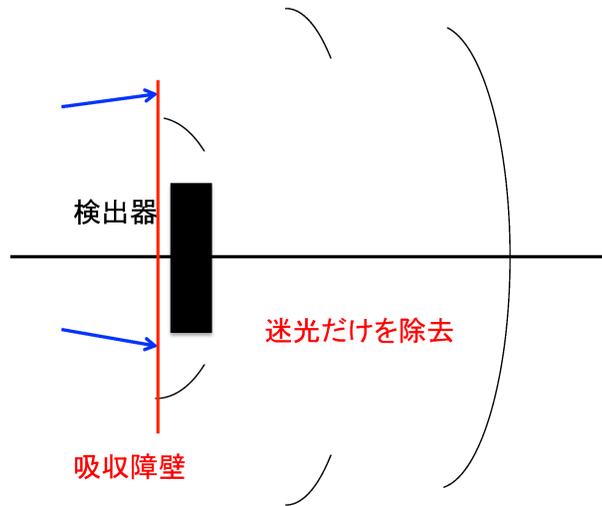


図 4.8: 光学系の迷光除去

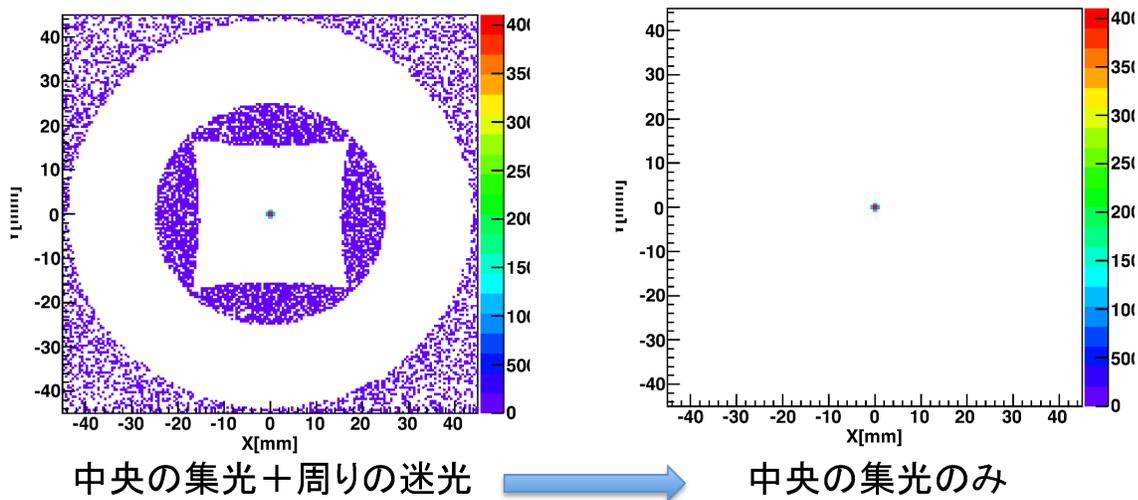


図 4.9: 迷光除去の画像前後

識別効率の妨げになっていた迷光を取り除くことに成功したので、改めてこの光学系を用いた粒子の識別性能を確認した。

識別性能最解析

この光学系の粒子識別の性能確認を行うシミュレーションの方法に関しては、この後の5章のシミュレーションの所で説明する。今回は識別粒子として KamLAND-Zen 実験で問題になっている ^{10}C と $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の二種類についての識別性能を評価した。

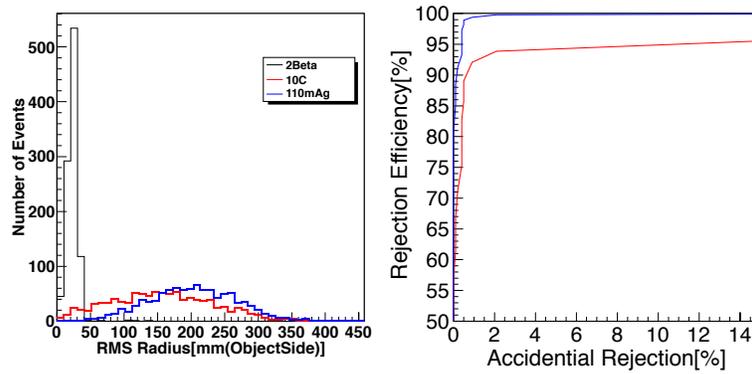


図 4.10: 中心の崩壊イベントに関する識別

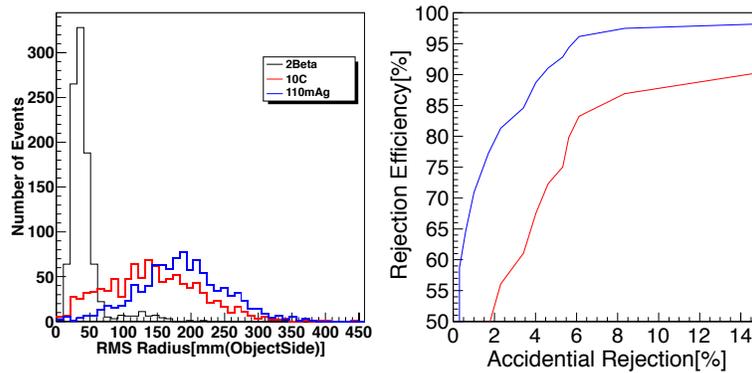


図 4.11: バルーン内部のランダム位置での崩壊イベントに関する識別

| 粒子 | 中央のみの除去率 [%] | ランダム崩壊での除去率 [%] |
|--------------------|--------------|-----------------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 | 10 |
| ^{110m}Ag | 99 | 99 |
| ^{10}C | 95 | 91 |

表 4.2: 粒子識別効率

この光学系の識別性能を確認したところ、非常に粒子識別効率がよく、図 4.10 と図 4.11 のような結果になった。この結果から、求める $0\nu\beta\beta$ のイベントを同時に 10 % の誤除去を伴うが、今回の光学系では 90 % 以上のバックグラウンドイベントを識別することが可能であることを成功した。

光学系の問題点

しかし、先行研究での光学系には問題点がいくつかある。

一つは、光学系の設計そのものが複雑なことである。この光学系を実用化するには、リング状の3枚のミラーの作成が必要で、さらに空中に浮いている設計になっているので、固定を厳重にする必要がある。そうした固定と設計上の複雑さを考えると、一つ一つの費用が大きくなってしまふ点が問題としてあげられる。

二つ目には、設計個数の問題点である。バックグラウンドイベントの識別には、光量を稼ぐことがとにかく必要であるので、先行研究や今回の最解析では光量を稼ぐために、90個という多くの光学系の設置を行っていた（図 4.12 はその様子）。しかし、先程述べたように、一つ一つの設計が複雑であり、大量の設置は向いていないというのが問題点である。

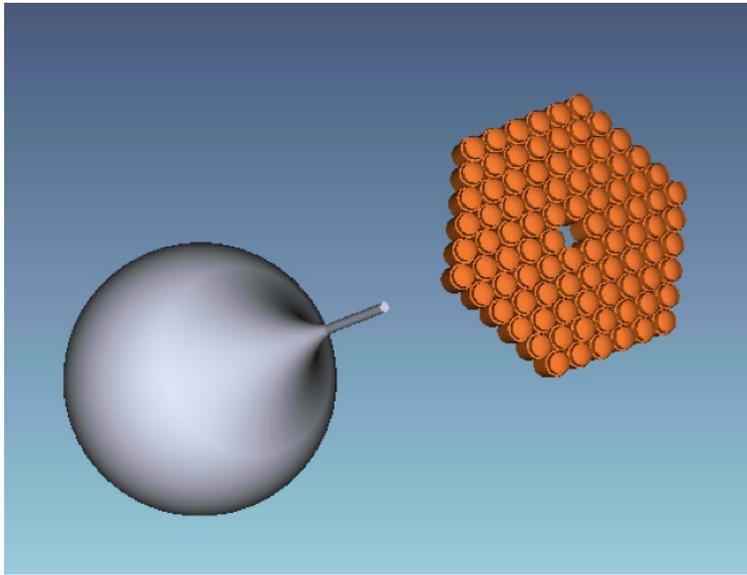


図 4.12: 先行研究でのイメージ検出装置の設置

他にも、検出器の設置箇所の問題から、検出器の読み出し箇所を考慮すると KamLAND 内部に向かってコードが出てしまうこと（図 4.13 の右の図のように、KamLAND 内部の方向に検出器の後ろの読み出し回路にあたる箇所がのびてしまい、その後ろに接続するケーブル等も内部にはみ出してしまふ形状になっていること）や、次で定義する光学系の集光率が迷光を除くと 28% になってしまい、集光率が非常に小さいなどの問題がある。

$$(\text{光学系の集光率} [\%]) = \frac{(\text{光検出器に当たる光の数})}{(\text{光学系の最大半径の円にあたる光の数})} \times 100$$

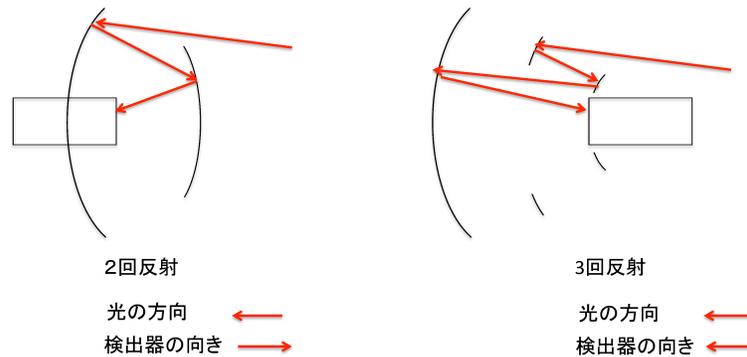


図 4.13: 反射光学系の検出器方向

先行研究最解析まとめ

先行研究の問題点であった迷光をうまく取り除けたことから、改めて光学系の粒子識別の性能評価を行うことができた。その結果、粒子識別の性能としては非常に優れた光学系であることが判明した。しかし、同時に様々な問題点も含んでいることがわかった。

今回は先行研究の光学系ではシミュレーション上、粒子識別の能力があることは確認できたが、様々な問題点が光学系に有ることも判明したため、そのまま KamLAND に導入するという事は難しいという結論になった。そこで、現実的に光学系の導入を目指すために新しく光学系の設計を行い、その光学系で粒子識別を行うことを考えることにする。

4.4 光学系の設計条件

先行研究の光学系は、光学系の粒子識別性能としては申し分ない性能であるというシミュレーション結果だったが、実装には向いていないということが分かった。そこで、光学系の設計性能に関しての条件に変更を加えて、実現可能な新しい光学系の設計を目指す。

具体的な設計構想としては、KamLAND の PMT の位置から内部のミニバルーン位置の全体を撮像可能な光学系の設計を目指す (図 4.14 はその模式図)。KamLAND 内部の設置位置の条件として出てくるのは、焦点距離 9000mm (ピントの一番合う場所はミニバルーン中心) の条件と、被写界深度 1500mm

(ピントの合わない位置の許容具合、ここでは中心前後 1500mm のミニバルーン内部全体でピンぼけを許容できる設計) の条件である。また、ミニバルーン全体を光学系で見るためには、光学系の視野として円錐頂点の断面角度が 22° なくてはいけないと分かる。この角度を画角と呼び、光軸からの角度を半画角と呼び、今回は半画角が 11° 必要になる。

γ 線のイベントの広がり条件から、粒子識別の性能として 100mm を要求性能として求めることにする。これは、 β 線のイベントと γ 線のイベントのバーテックスの広がりを Geant4 で見た条件から得た結果である。

その他にも、先行研究の設計が複雑であり、実際の実装には向いていないという結論になったため、今回はシンプルなデザイン設計として二枚のミラーでの反射型望遠鏡のような光学系で設計を行うという条件を加える。これらの条件を満たした上で、光学系の獲得光量を最大化するように設計を目指すことが必要である。以上の粒子識別に必要なさまざまな条件をまとめると、目指す光学系の持つ識別性能としては、次の表 4.3 のようになっている。

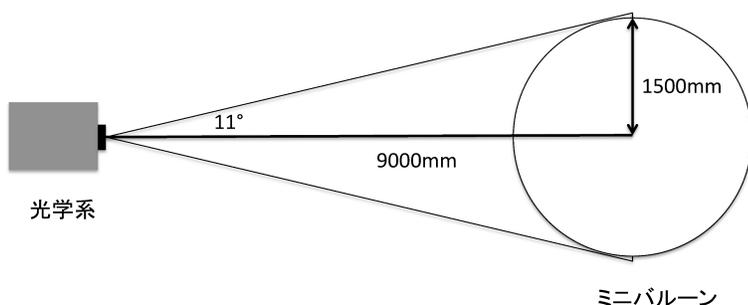


図 4.14: 構造上の設計条件

| | |
|--------|------------|
| 焦点距離 | 9000mm |
| 被写界深度 | 1500mm 以上 |
| 半画角 | 11° |
| 位置分解能 | 100mm |
| 獲得光量 | 可能な限り多く |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー |

表 4.3: 光学系設計条件まとめ

表 4.3 の条件のうち、上の三つは KamLAND の構造上の制限から加わる条件であり、下の三つは実際に現実的な粒子識別のために必要な条件である。このうちの KamLAND の構造上の条件に関しては、先行研究の光学系でも達成している。実際に、先行研究ではこのうち位置分解能 (2つの光源を光学系の

集光像で分別可能な距離)のステータスは非常によかったが、下二つの獲得光量の条件が厳しかったことと、構造の複雑さを持っていたので、そのまま実装は難しいという判断になった。そのため、新しい条件として下の二つが今回の設計に加わっている。

4.5 光検出器

実装を目指した光学系を設計するにあたって、今回新しく検出器に関する条件を加える。光学系の設計に際して、検出器に関する条件を加えることも必要になる。そこで、具体的に検出器を想定することで、設計のサイズ情報などを決定することができ、実装に向けた条件を一つクリアすることになる。今回は図 4.15 の浜松ホトニクス社のマルチアノード PMTH9500 というものを使用することを想定して光学系の設計を行う。



図 4.15: マルチアノード PMT H9500

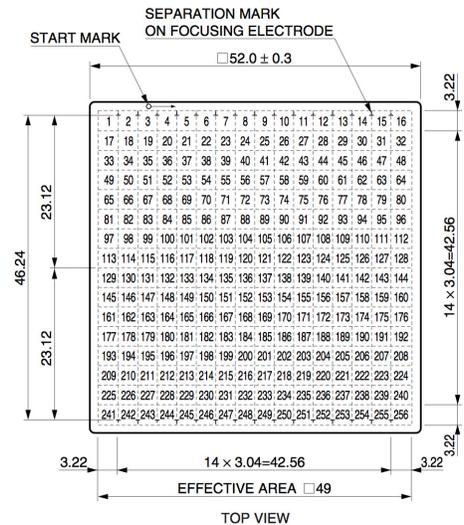


図 4.16: マルチアノード PMT H9500 のチャンネルサイズ (単位は mm)

今回このマルチアノード PMT を検出器として選定した理由は、光検出器のマス目が細かく、細かな位置分解能が期待できるからである。粒子識別の位置分解能の制約から、ミニバルーン側の 100mm 以下を 1 マス以内には収めたい。この制約をクリアするためにはなるべく細かなマス目が必要である。マルチアノード PMTH9500 は 16×16 のマス目を持っている光検出器である (図 4.16)。従って、16×100=1600mm というので、ミニバルーン領域全体の直径 3080mm のサイズに対して 1 マス辺り 100mm 以下の分解能を確保するためには、各辺二個ずつの設置が必要になる。

今回の設計条件としては、およそ 50mm 四方の大きさのこの H9500 型検出器を 4 つ用いるということで、100mm 四方の光検出器サイズという設計条件で設計を行った。

4.6 イメージ検出装置のデザイン設計

以上の条件をもとに、設計を行った。設計は光線追跡ツール ZEMAX というソフトを使い作成した。いくつかパターンを試行錯誤してきたので、その例をいくつか挙げていく。

パターン 1

図 4.17 は設計光学系のパターン 1 である。このパターンでは検出器の場所をミラーの穴部分に固定して考えて設計を行った例である。この場合、二枚目のミラーの場所ちょうどに設置してある。しかし、

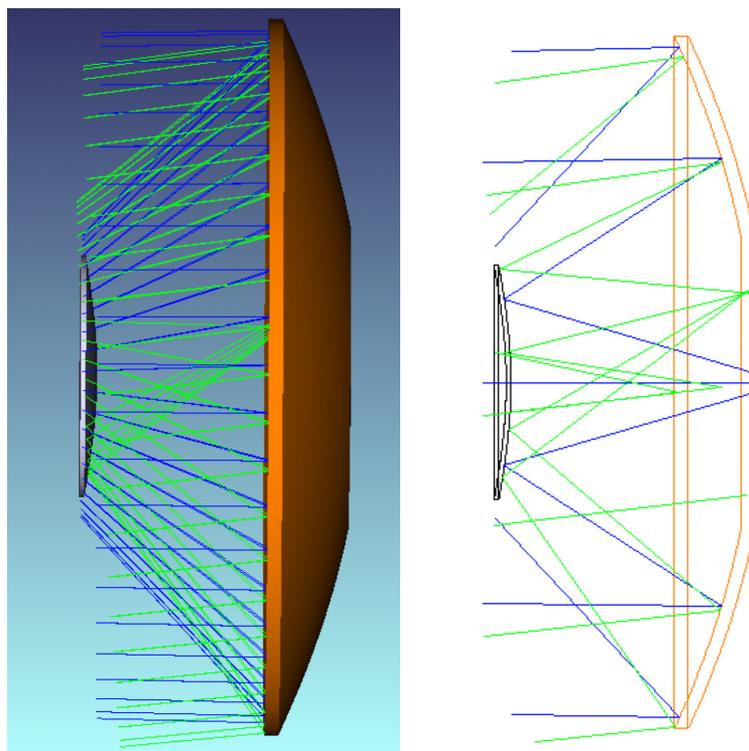


図 4.17: 光学系パターン 1

この設計では視野角が 11° まではいかず、もう少し数を獲得する必要があるため、再度設計を行うことにした。

| 条件 | 設計値 | 達成 |
|--------|---------------------|----|
| 焦点距離 | 9000mm | |
| 被写界深度 | 1500mm | |
| 半画角 | 8 ° | × |
| 位置分解能 | 0.4mm(ミニバルーン側 10mm) | |
| 獲得光量 | 55 % | |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー | |

表 4.4: 光学系パターン 1

パターン 2

図 4.18 の光学系パターンは、光量と分解能に関して比重を置いた設計になっている。視野角は数でカ

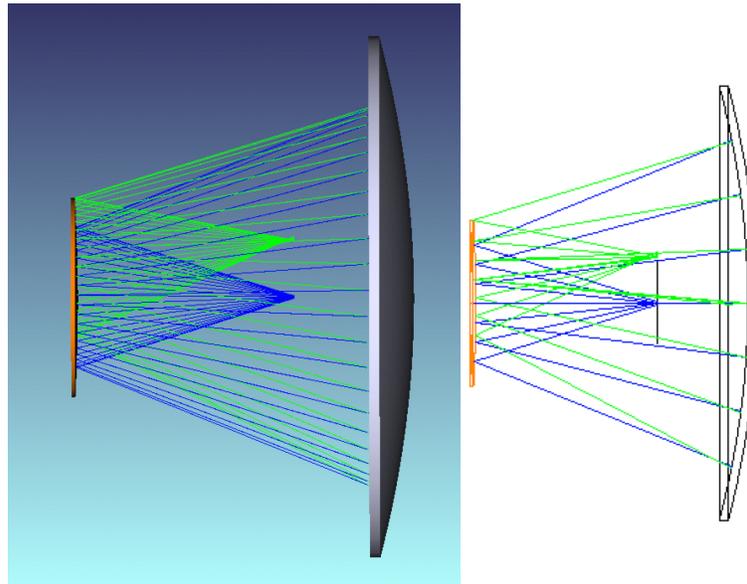


図 4.18: 光学系パターン 2

バーできる可能性もあると考えており、視野角は様々な場合で設計を行っていたが、これは視野角が目標値の半分程度の 5 °で、あまりにも狭い設計だったため、再設計を行った。

| 条件 | 設計値 | 達成 |
|--------|-------------------|----|
| 焦点距離 | 9000mm | |
| 被写界深度 | 1500mm | |
| 半画角 | 5 ° | × |
| 位置分解能 | 2mm(ミニバルーン側 30mm) | |
| 獲得光量 | 75 % | |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー | |

表 4.5: 光学系パターン 2

パターン 3

図 4.19 にしめすのは、検出器の場所を鏡面の後ろに置いた光学系パターンの例である。

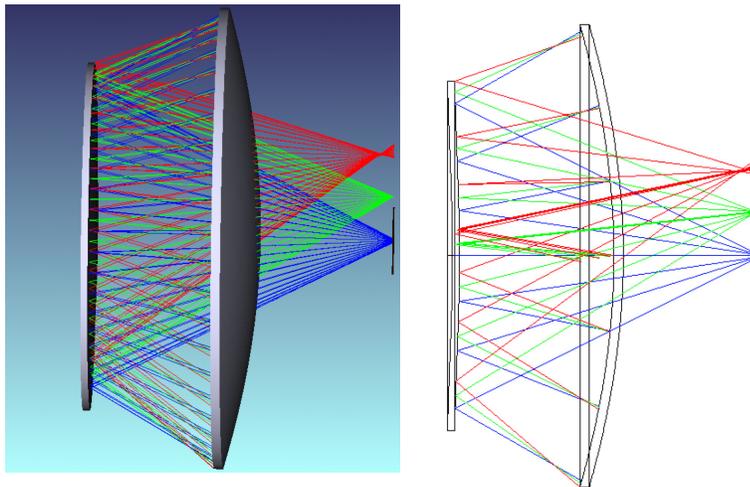


図 4.19: 光学系パターン 3

こちらはあまり精査していないが、すぐに視野角の条件が厳しいことが分かり、再度設計を行うことになった。この設計光学系では、半画角 5 °の確保もできていない。

パターン 4

図 4.20 のパターンは視野角を広くとる設計で作成された光学系の例である。

| 条件 | 設計値 | 達成 |
|--------|-------------------|----|
| 焦点距離 | 9000mm | |
| 被写界深度 | 1500mm | |
| 半画角 | 4 ° | × |
| 位置分解能 | 4mm(ミニバルーン側 50mm) | |
| 獲得光量 | 75 % | |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー | |

表 4.6: 光学系パターン 3

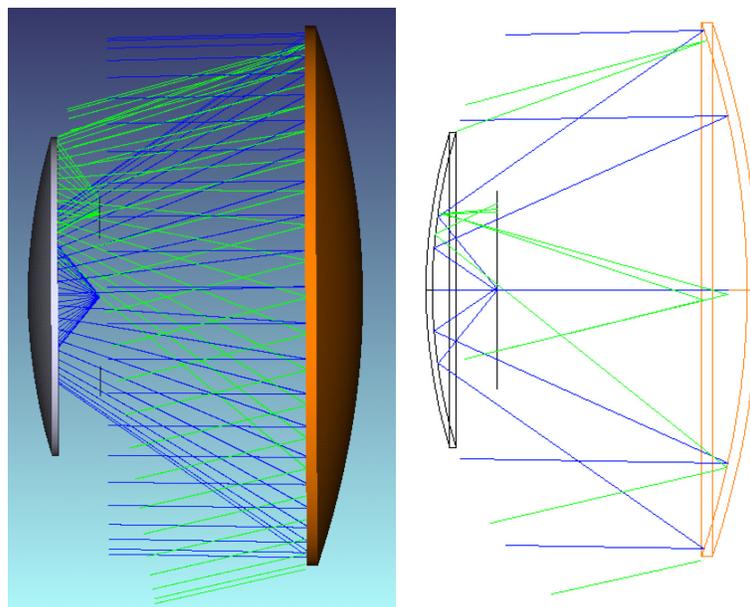


図 4.20: 光学系パターン 4

この設計では視野角に関しての問題はなかったが、ミラーのサイズがあまり大きくなかった関係で、最終的な獲得光量が少ないということが分かった。そのため、光学系のサイズの調整を行うために再設計をした。

| 条件 | 設計値 | 達成 |
|--------|-------------------|----|
| 焦点距離 | 9000mm | |
| 被写界深度 | 1500mm | |
| 半画角 | 13 ° | |
| 位置分解能 | 1mm(ミニバルーン側 41mm) | |
| 獲得光量 | 45 % | |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー | |

表 4.7: 光学系パターン 4

このように試行錯誤を繰り返して、さまざまな二枚ミラーのパターンを設計していった。最終的に条件を満たしながら条件項目がバランスよく作成され、獲得光量の良い光学系が図 4.21、図 4.22 である。

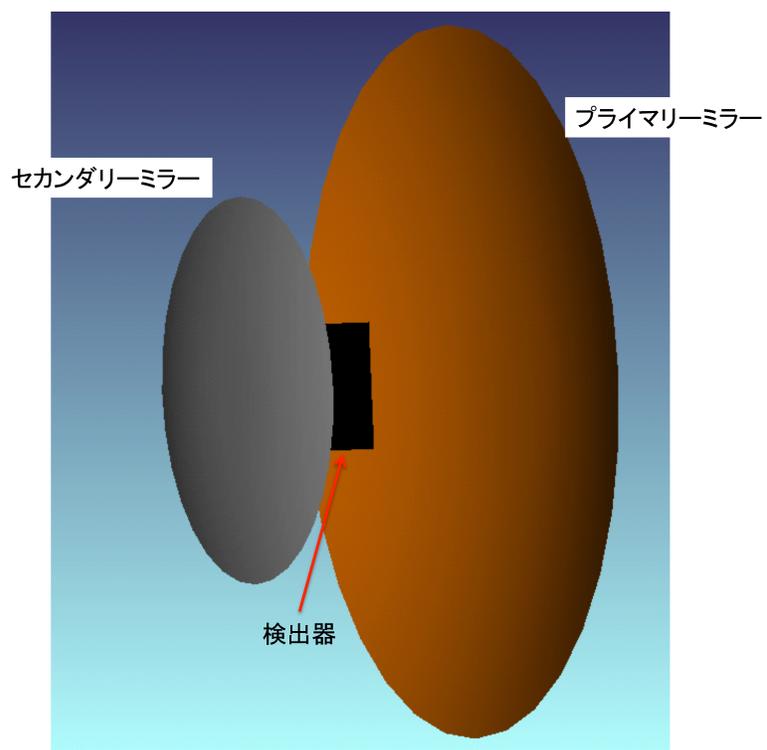


図 4.21: 最終光学系

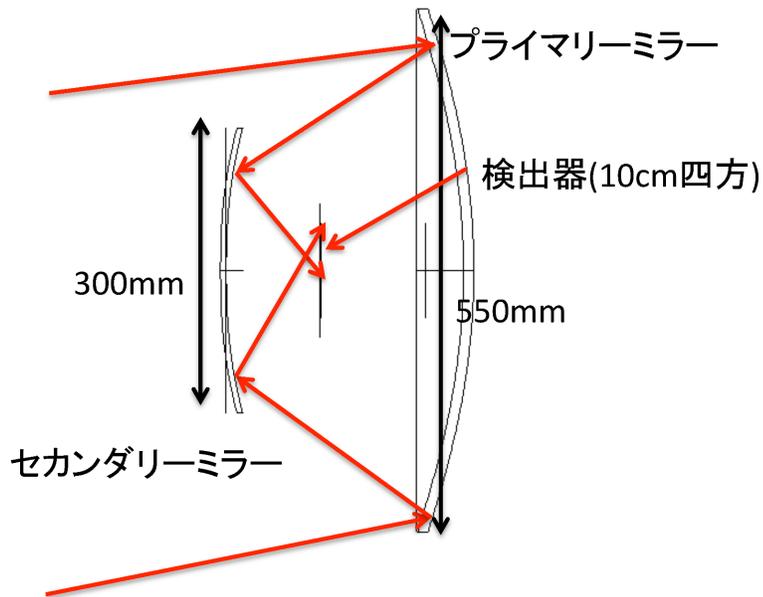


図 4.22: 最終光学系の集光の様子

| 条件 | 設計値 | 達成 |
|--------|---------------------|----|
| 焦点距離 | 9000mm | |
| 被写界深度 | 1500mm | |
| 半画角 | 11 ° | |
| 位置分解能 | 0.7mm(ミニバルーン側 21mm) | |
| 獲得光量 | 62 % | |
| 光学系の構造 | 二枚ミラー | |

表 4.8: 光学系パターン 4

光学系のデザインは、設計条件に有るようにカセグレン型反射望遠鏡のような反射型の二枚ミラーで集光を行うように設計を行った。構造上の注意点としてここで挙げておきたいことは、検出器のマルチアノード PMTH9500 が突き出すような設計になっている点である。これは、半画角を広くとり、その上で二枚ミラー形状での設計を行う条件に対して、ミラーの後ろ側に光を集める設計は難しく、ミラーの前に突き出したような設計にすることで視野領域を広くとることができている。しかしながら、今回は上の表で挙げた条件を満たしており、かつ光学系のサイズが今までのパターンより大きく、そこまで含めて考えると、獲得光量の条件が優れているということで、この構造を完成形ということにすること

にした。

この光学系の性能に関して簡単に確認してゆく。点光源を動かしたときに、どのように像サイズが変動するかを図 4.23 で示した。横軸は光源の位置で、ミニバルーンの位置を中心とした光軸上の変化を見ている。縦軸は、像サイズで RMS 広がりによって評価している。この像サイズは、検出器側のサイズになっており、実際バルーン側に換算するには、およそ 30 倍すれば良い。従って、3.3mm 程度の広がりまでに収まっていれば、分解能の性能としては十分であることが分かる。また一番ピントの合う位置での像の様子は図 4.24 になる。

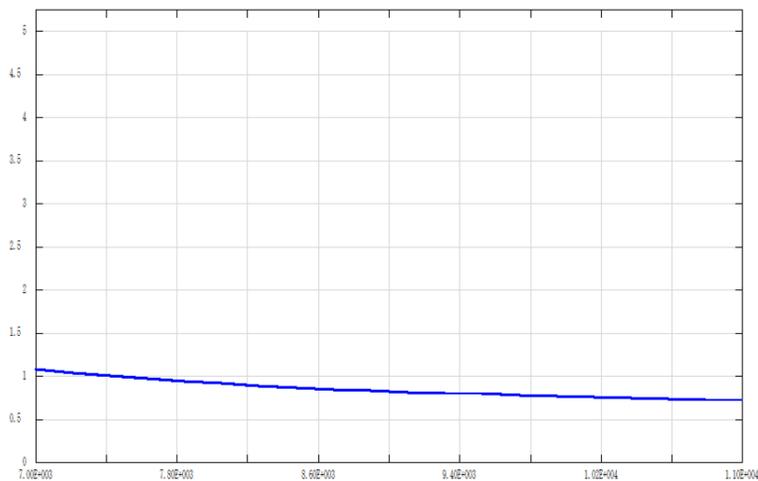


図 4.23: 光学系の像サイズ、縦軸は像サイズ [mm]、横軸は光源の位置 [mm]

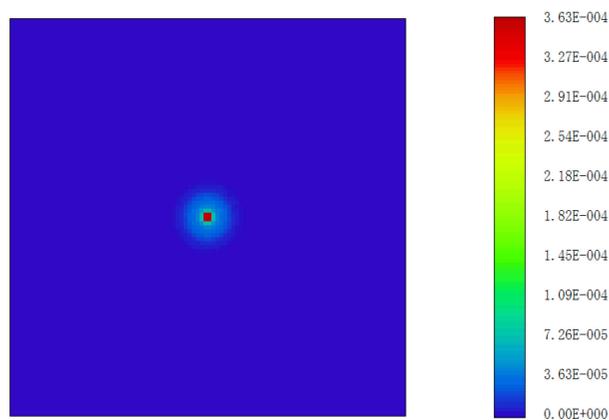


図 4.24: 光学系の集光像の様子

次に、光軸から垂直な方向にずらしたときの像サイズの変化を図 4.25 で示した。これは、先ほどと同じように像サイズの変化を縦軸で見ているが、横軸が光軸からの垂直方向の距離で見ている。このグラフを見ると、像サイズ 3mm (=バルーン側での 90mm サイズ) のところで、バルーンの端まで見ることができていることが分かる。このことから、光軸からの垂直方向のずれに関しても、十分位置分解能を満たしていることが分かった。

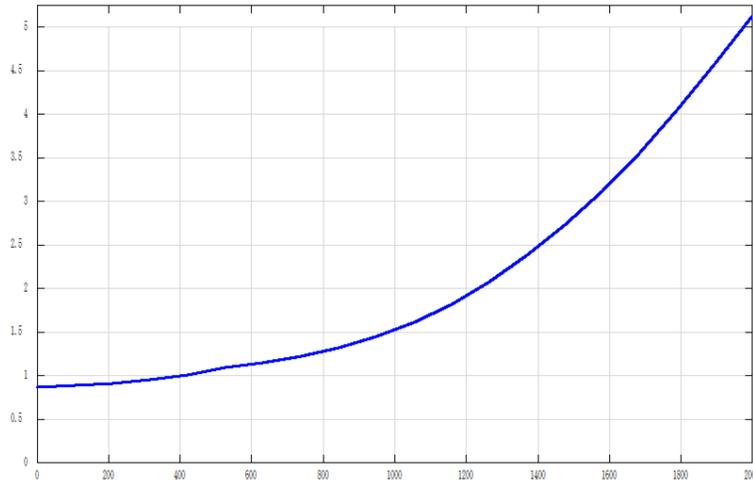


図 4.25: 光学系の像サイズ、縦軸は像サイズ [mm]、横軸は光源の位置 [mm]

今後、図 4.21 及び図 4.22 の右側の先に光を反射する鏡をプライマリーミラー、左側の二回目の反射を起こす鏡をセカンダリーミラーと呼ぶ。

5 イメージ検出装置の性能シミュレーション

4章で作成された光学系と光検出器を含めたイメージ検出装置に関して様々なシミュレーションをおこない、実際に粒子識別が可能なのかどうかということを確認する。

5.1 評価の枠組み

粒子識別のシミュレーションと、最初に全体の流れに関して説明をする。

- 1、粒子が崩壊を起こして、液体シンチレーションで発光する。
- 2、液体シンチレータの反応や KamLAND の構成物の影響を受けながら、イメージ検出装置や PMT に向けて進む。
- 3、光学系に入射したら光学系での光の追跡を行い、最終的に光検出器にあたるかどうかを判定する。
- 4、光検出器に当たった光を撮像する。撮像画像の解析を行い、粒子識別の可能性を見る。

イメージ検出装置の性能評価として、大きく分けて以下の二つのシミュレーションを行うことにする。

- ・液体シンチレータの反応や KamLAND の構成物の影響を考えない理想的なシミュレーション（ステップ 2 の効果を含めないシミュレーション）
- ・液体シンチレータの反応や KamLAND の構成物の影響も含めた現実的なシミュレーション（ステップ 2 の効果も含めたシミュレーション）

光学系が十分な識別性能を持っているかどうかを上記のシミュレーションで確認して、その後より下の現実的な状況でのシミュレーションを行う。まずは、各ステップに関して説明を加えていく。

5.1.1 粒子の崩壊からイメージ検出装置の付近までの光の追跡

粒子崩壊から液体シンチレータで反応した光をイメージ検出装置付近までの追跡は Geant4 というツールで行っている。今回は、KLG4sim という KamLAND での液体シンチレータ反応や構成物を Geant4 で再現するように調整されている解析ツールを使っている。従って、このツールを用いることで KamLAND での状況を想定したシミュレーションを行うことができる（図 5.1 の左側）。また、今回は二種類のシミュレーションとして、ステップ 2 の KamLAND 内部の構成物の影響や液体シンチレータの反応を含めるかどうかの二種類のシミュレーションを検証した。

また、ステップ 2 の具体的な方法に関しては後ほど詳しく説明する。

5.1.2 イメージ検出装置の光線追跡

イメージ検出装置の付近から、イメージ検出装置の光検出器にあたるまでを ZEMAX という光線追跡ツールを用いる（図 5.1 の右側）。今回設計した光学系とその追跡を行えるので、これを用いてイメージ検

出装置の光検出器部分に光が当たるかどうかを判定する。今回、光検出器の量子効率としては KamLAND の 17inchPMT の値と同じく 24.87 % という数値を用いている。実際のマルチアノード PMT の量子効率の数値は量子効率がより高い可能性がある。

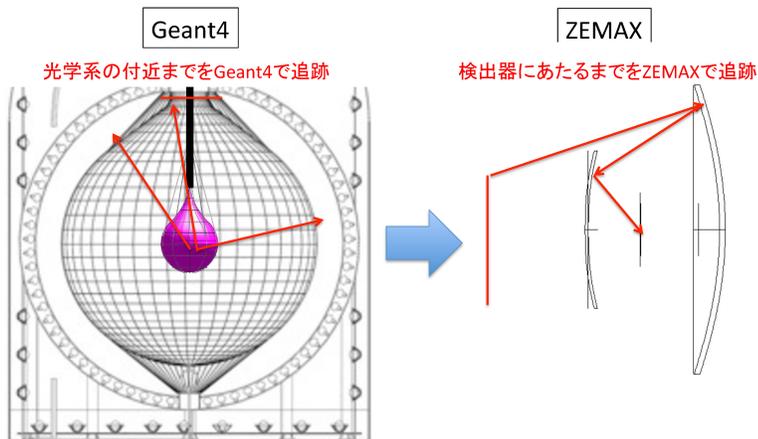


図 5.1: シミュレーションの流れ

5.1.3 撮像画像の解析

光検出器にあたったという光の情報のみを抽出し、その解析を行い粒子識別を行う。シミュレーションで設置した各検出器からは、それぞれ別の画像が得られる。しかし、同一イベントに関するの情報ならば、同じ情報として統合して扱う必要が有る。そこで、撮像でとることができた画像の解析方法について説明する。

画像解析の方法は次のような順番で行った。

- 1、各検出器で各イベント毎に 2 次元画像をとる
- 2、各検出器ごとの画像を再結合して、画像情報を各崩壊イベント毎にまとめる
- 3、各画像での x 座標と y 座標の中央値を確定させる
- 4、一定のしきい値を決め、中央値からしきい値の範囲内に入らない光は除外する
- 5、除外をした後に平均値をとり、RMS 値を求める

以上のような過程を踏まえて、画像の広がり具合を確定している。より具体的に各ステップを説明する。

各検出器での画像を再結合する

各イメージ検出装置ごとの光検出器の中心座標 (x_0, y_0, z_0) とバルーン中心から見た光検出器位置のオイラー角 (α, β, γ) が決まっている。また、崩壊の起きた座標 (X, Y, Z) の情報と光検出器にあたった位置

(x, y, z) を用いて各検出器で撮像された画像の結合を行っていく。

まず、第一に光検出器のどの位置に当たっている光なのかを確認するために、 $(x_1, y_1, z_1) = (x - x_0, y - y_0, z - z_0)$ のベクトルを求める。このベクトルを回転角 (α, β, γ) を使って、 $z_2 = 0$ になるように持っていく。この回転によって、KamLAND での頂点部分に検出器を回転してやったことになる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (5.1.1)$$

この回転の後には完全に平面のどこかに有るという情報に置き換わったので、2次元情報として画像のピクセル座標 (x_3, y_3) に直してやる。一方、検出器に回転を施して同一座標へと持っていったので、崩壊起源の場所も同じように回転させて相対座標に直す必要が有る。そこで、 (X, Y, Z) に対しても同じように (α, β, γ) の回転を施してやって、検出器と崩壊点の間の相対座標を保つようにする。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5.1.2)$$

相対座標を保ったが、元々の起きたイベントは同じイベントなので、これらを同じ情報として集めるために、相対座標 (X', Y', Z') ごとの補正が必要になる。そこで、その補正として、ミニバルーン全体が光検出器全体に入るという倍率の補正を加えてやる。

$$\begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 - X' \frac{32}{3080} \frac{9000}{9000 - Z'} \\ y_3 - Y' \frac{32}{3080} \frac{9000}{9000 - Z'} \end{pmatrix} \quad (5.1.3)$$

ここで、 $\frac{9000}{9000 - Z'}$ は検出器から見たミニバルーンの中心位置 (9000mm) に倍率換算しており、それに加えて $\frac{32}{3080}$ というのは、3080mm というミニバルーンの直径サイズを検出器サイズの 32pixel に換算し直している。

このように、位置情報 (x_4, y_4) を使いながら検出器の画像を結合する (図 5.2)。今回のシミュレーションでは、7個の光学系が一つの群として近い場所に設置してある。そこで、今回の結合ではこの7個ごとの群で一つずつ画像をとるようにしている。

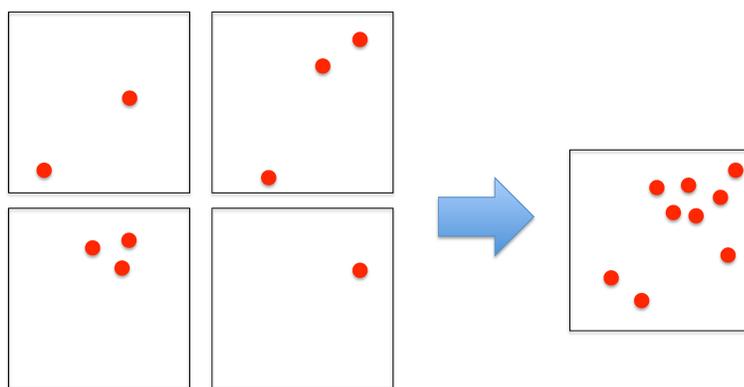


図 5.2: 画像結合

パーテックス広がりの評価方法

このように画像をうまくまとめることができたなら、その画像の広がり具合を評価してやる。広がりを評価してやる方法として、まずは各画像の x 座標・ y 座標の中央値を決定する。そして、その中央値から有る一定範囲内にはない光の情報は落として、再度中央値からの RMS で評価を行い、その画像の RMS をイベントの広がりとして評価している (図 5.3)。

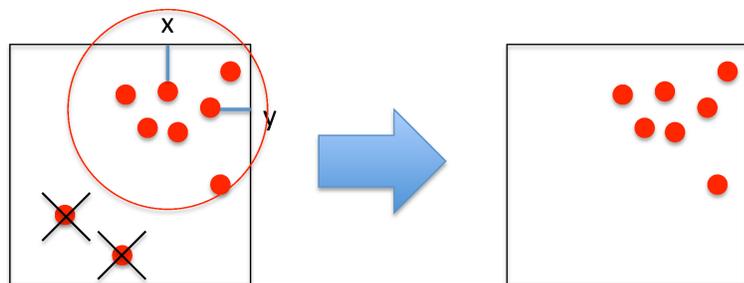


図 5.3: 画像解析方法

これは、平均値による RMS の評価を行う時に、あまりに離れた光が有ると、その点に引きずられて広がりの結果に影響してしまうからである。この作業は、液体シンチレータの再発光の影響などによって、想定外の方向から来る光を排除して、ある一定範囲内の光のみで RMS を評価することで、よりパーテックス広がりを評価しやすくするための作業になっている。

このような画像解析を行いながら、各状況でのシミュレーションに対してのバックグラウンドイベントの識別効率を確認してゆく。

5.2 理想的状況のシミュレーション

最初のシミュレーションとして、光学系がバーテックスの広がり方の違いをきちんと識別できるかどうかの確認を行った。シミュレーションの設定としては、まずバーテックスの広がり具合を Geant4 で作成し、そのイベントが起きた場所を以下の二種類に分別する。

- 1、ミニバルーンの中でのみ崩壊イベントが起きた場合
- 2、ミニバルーン内部のランダム位置で崩壊が起きた場合

この二種類に関して、シミュレーションを行った。

まず先行研究と比較するために、同じ設置箇所にも設置を行い条件を同じにした。光学系のサイズが先行研究と比較して大きくなったため、光学系の設置個数を大幅に減らすことになり、90個から7個に設置個数を減らすことができた(図 5.4、図 5.5)。先の4章で述べた先行研究の最解析結果は図 5.6 及び 5.7 であり、一方で今回の7個のイメージ検出装置に対しての粒子識別のシミュレーションの結果は、次の図 5.8、図 5.9 のようになった。

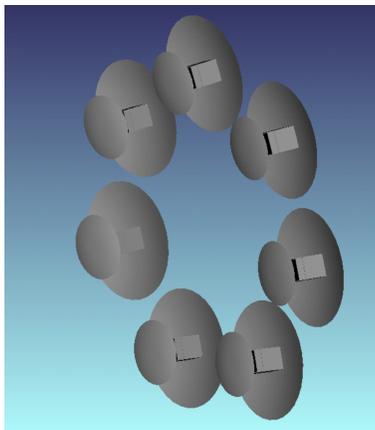


図 5.4: 7個イメージ検出装置配置

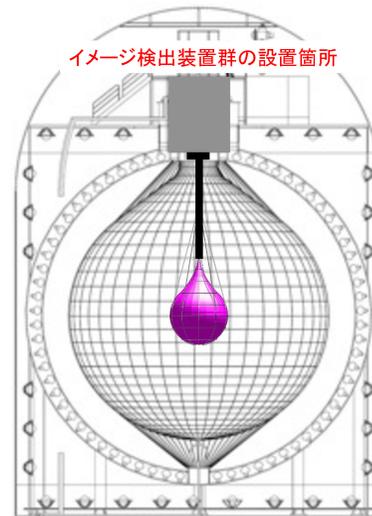


図 5.5: イメージ検出装置群の設置の様子

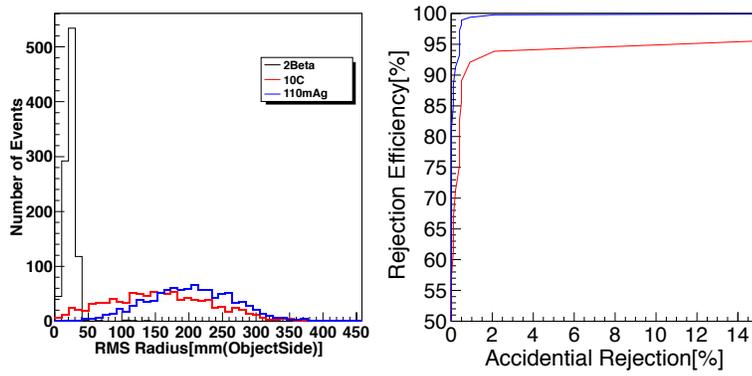


図 5.6: 中心の崩壊イベントに関する識別 (先行研究光学系)

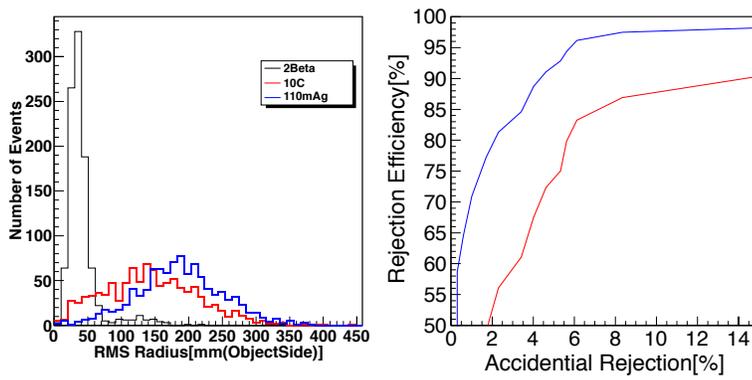


図 5.7: バルーン内部のランダム位置での崩壊イベントに関する識別 (先行研究光学系)

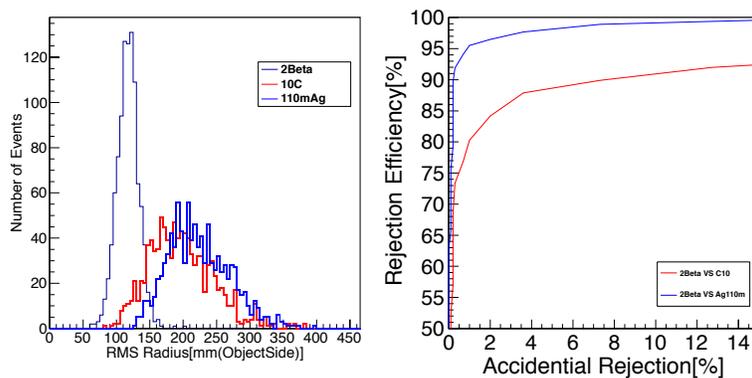


図 5.8: 中心の崩壊イベントに関する識別 (新規光学系)

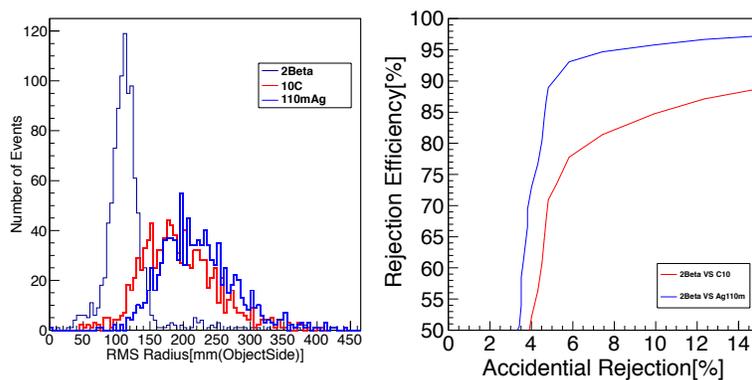


図 5.9: バルーン内部のランダム位置での崩壊イベントに関する識別 (新規光学系)

| 粒子 | 中央のみの除去率 [%] | ランダム崩壊での除去率 [%] |
|--------------------|--------------|-----------------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 | 10 |
| ^{110m}Ag | 99 | 99 |
| ^{10}C | 95 | 91 |

表 5.1: 先行研究光学系による粒子識別効率

| 粒子 | 中央のみの除去率 [%] | ランダム崩壊での除去率 [%] |
|--------------------|--------------|-----------------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 | 10 |
| ^{110m}Ag | 99 | 96 |
| ^{10}C | 91 | 86 |

表 5.2: 新規光学系の粒子識別効率

この表 5.2 の結果をみると、先ほどの先行研究と比較すると識別効率はやや悪くはなっている。これは光学系の性能条件の方で緩くした結果なので、想定される結果である。しかし悪化しながらも、85 % 以上のバックグラウンドイベントの除去効率を達成していることがわかる。

この結果から、今回作成された光学系でバーテックスの広がりを識別することは可能だということで、次に現実的な KamLAND の液体シンチレータの効果や実際の障害物（ミニバルーンやそれを吊るしている紐に関する効果など）の影響など含めた、より現実的な状況でのシミュレーションを行ってゆくことにした。

5.3 現実的設定でのシミュレーション

5.3.1 シミュレーション方法

現実的なシミュレーションとして、二つのツールを用いたシミュレーションを行う。一つは KLG4sim という Geant4 で KamLAND の状況を再現したツールで、こちらは粒子の崩壊が KamLAND 内部で起きて、そこから光学系の付近までの KamLAND での液体シンチレータの反応や実際のミニバルーンの影響などを考慮しながら追うことにしている。もう一つは、ZEMAX という光線追跡ツールで、ここでは光学系の付近にまで来た光線を光学系の反射を経て検出器にあたるまでの追跡をおこなっている（図 5.10）。

今回のシミュレーションではこの二つのツールの組み合わせによって、完全に厳密なシミュレーションではないが、いままで全く考慮に入れていなかった、KamLAND 内部での現実的な効果をシミュレーションに含めることができるようになった。

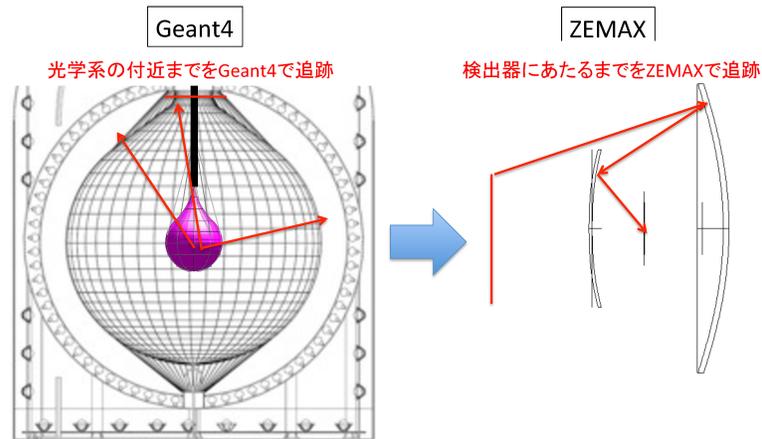


図 5.10: 現実的状況に沿ったシミュレーション

5.3.2 設置数 7 個でのシミュレーション

このシミュレーションで、先ほどと同じように KamLAND の頂点部分にのみ光学系を設置した結果が、次の図 5.11 のようになった。

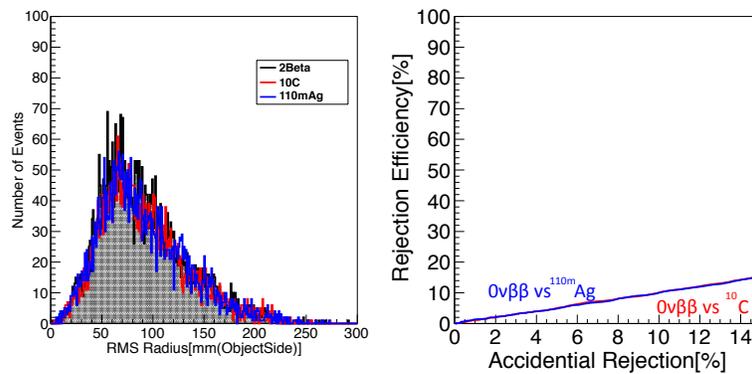


図 5.11: 頂点部分でのイメージ検出装置 7 個設置での崩壊座標ランダムでの結果

この結果から、設置数 7 個での現実的な識別効率は表 5.3 のようになる。
 このように非常に悪い結果になってしまったのは、様々な原因が考えられる。
 一つには、KamLAND 内部の効果で、液体シンチレータでの再発光の効果があると分かっているが、その再発光の効果で、光学系が目的としている視野範囲から外れた光が入ってきてしまっていることが原

| 粒子 | ランダム崩壊での除去率 [%] |
|--------------------|-----------------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 |
| ^{110m}Ag | 10.0 |
| ^{10}C | 10.0 |

表 5.3: 7 個の光学系による現実的な粒子識別効率

困であると考えられる。このように視野範囲から外れた光が、迷光のように想定していない光になっているので、識別効率を妨げることが原因の一つである。もう一つが、獲得光量数の減少である。KamLAND 内部の実情に合わせると、液体シンチレータによる減衰なども含まれている。しかし、バーテックスのみの識別の方では、そうした減衰の効果を含めておらず、減衰の効果を含めて考えたので、結果がこのように大幅に変化したと考えられる。

もう一つが、獲得光量数が少ないということである。これも液体シンチレータの再発光が原因かもしれないが、今回のシミュレーションで得られた結果は、1 イメージ検出装置辺りに 1 $0\nu\beta\beta$ イベントで 0.6p.e しか検出されていなかった。これは 7 個のイメージ検出装置の画像を合わせても各イベントで平均 4.2p.e しか獲得できておらず、そのため識別が難しいイベントが多かったのではないかと考えられる (図 5.12)。

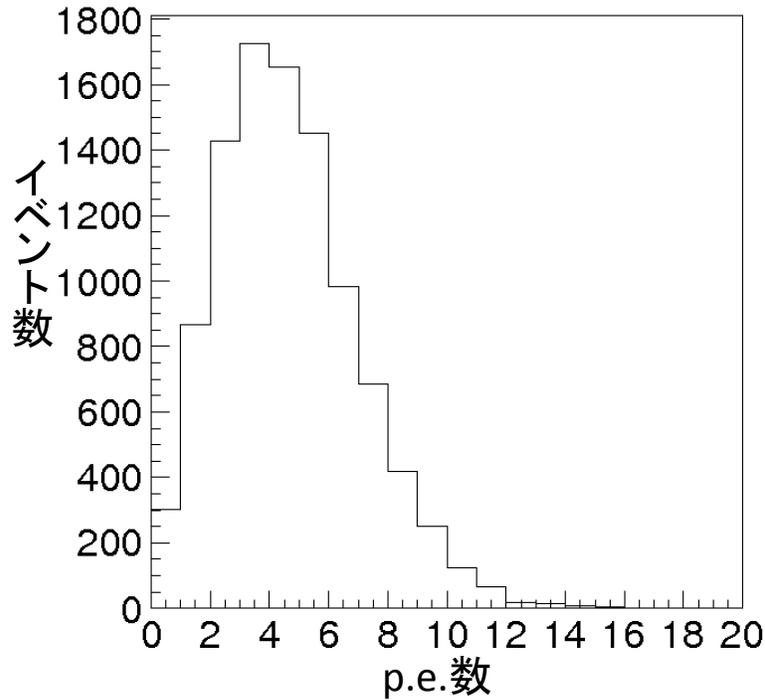


図 5.12: $0\nu\beta\beta$ の一様位置崩壊での p.e. 数分布

現在の識別性能ではうまくいかないということが分かった。今回のシミュレーションデータを調べると、問題であったかということ、獲得光量が少なく、判別が難しいと言うのが原因の一つである。この画像識別方法では、画像に対して一つの光や二つの光しかこない場合は、全く判別がつかないという解析方法になっているため、獲得光量数に依存した結果になるはずである。従って、各画像ごとにある程度光がはいらなくては広がりでの識別はできない。そのため、何かしらの方法で獲得光量数の改善を考える必要がある。獲得光量数の改善方法として考えられることは、大きく分けて2種類考えられる。

一つはシミュレーション上での液体シンチレータの発光量を増加させる方法である。これは、現在の液体シンチレータを改良して発光量が増加するという事に該当する。また、シミュレーション上では光検出器の量子効率として KamLAND の光電子増倍管と同じものとして効果を含めて考えているので実際に使用する光検出器の量子効率による効果もここに含めることになる。

もう一つは、単純に光学系の設置個数を増設することである。これは光学系の数を増やすことで、純粹に各イベント毎の有効な受光面積を増加させるというものである。受光面積が増加することで、各イベントに対する獲得光量数も増加するはずである。

5.3.3 大量イメージ検出装置設置のシミュレーション

発光量の増大と光学系の設置数を増加することで識別効率の上昇が考えられるが、実際には発光量の改善は現在の KamLAND の液体シンチレータの 1.4 倍と、光検出器の量子効率の向上で 1.5 倍程度と行うことで、およそ 2 倍程度までが限界だと考えられる。

そこで、もう一つの方針として、イメージ検出装置を大量設置することで、光量を獲得することを考える。具体的にイメージ検出装置の設置個数を指定する根拠はないが、現実的な数値として KamLAND の PMT との交換を行い設置することを考えると、せいぜい一割程度までが限界だと考えられる。そこで、今回設置する個数を 150 個程度で、最大個数の設置を行い、シミュレーションを行ってみる。

将来的に KamLAND2-Zen での実装を目指すために、発光量を 1.4 倍にして可能な限りイメージ検出装置の設置個数を多くして識別効率の上昇を目指す。今回のシミュレーションでは、光学系の設置数を 147 個にして、粒子識別のシミュレーションを行う。具体的な設置箇所は、次の図 5.13 のように KamLAND の頂点 30° 傾く場所に先ほどのような 7 個の群を設置し、最終的に合計 21 カ所に設置したものになる。

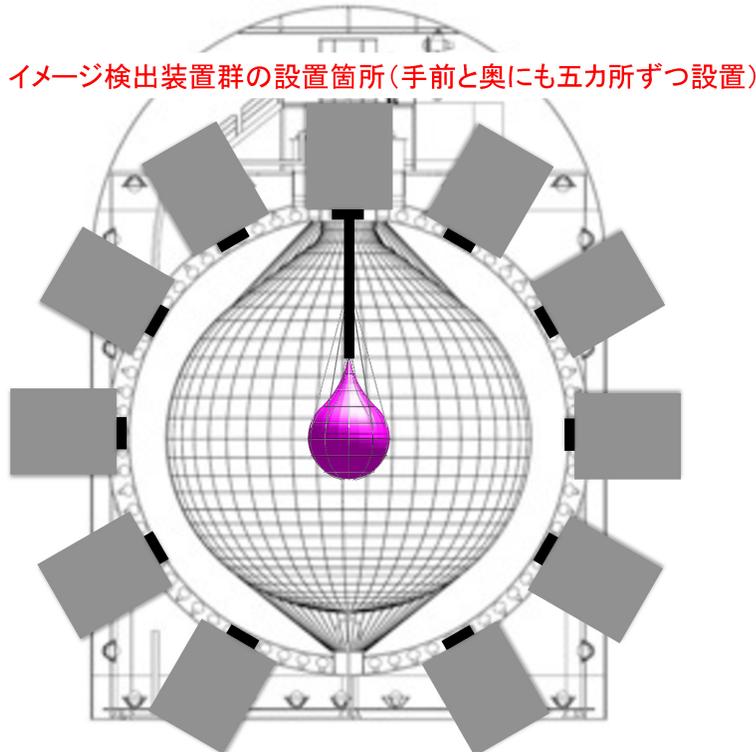


図 5.13: イメージ検出装置群の設置の様子

また、今回の大量イメージ検出装置の設置を行ったシミュレーションの RMS 値は、各 7 個のイメー

ジ検出装置群で撮像した画像ごとに RMS 値を求めて、21 個の各群の RMS 値のうち、RMS 値が 0 以上の値の平均を持って広がりとしている。

このシミュレーションの結果は次の図 5.14 から図 5.17 のようになった。

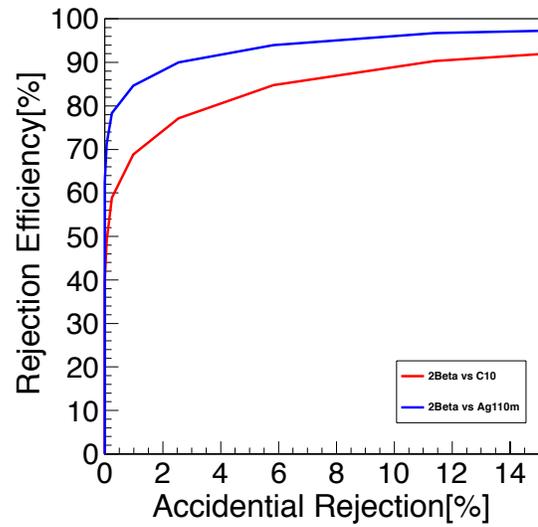
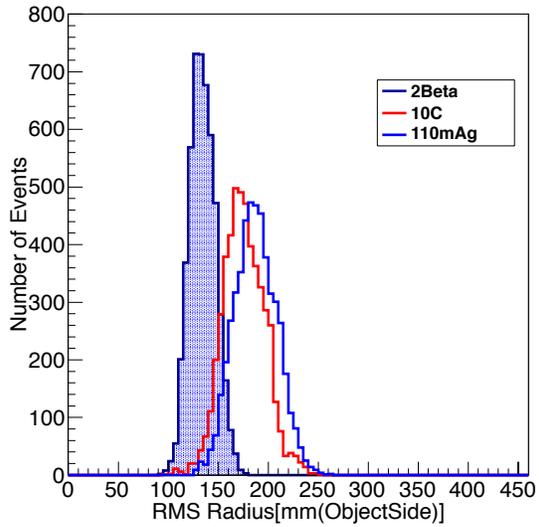


図 5.14: 21 カ所設置中央崩壊の RMS 値の広がり

図 5.15: 21 カ所設置中央崩壊での最終識別効率

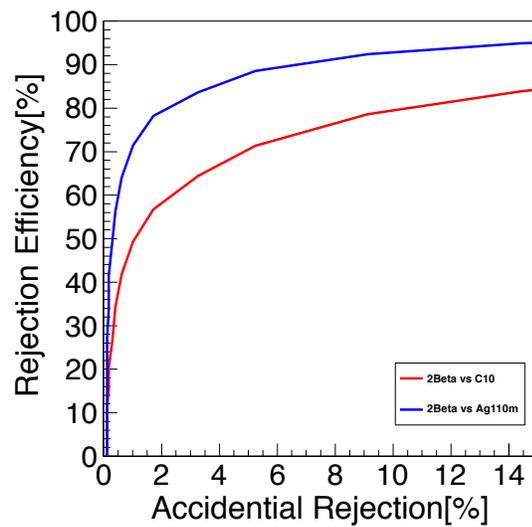
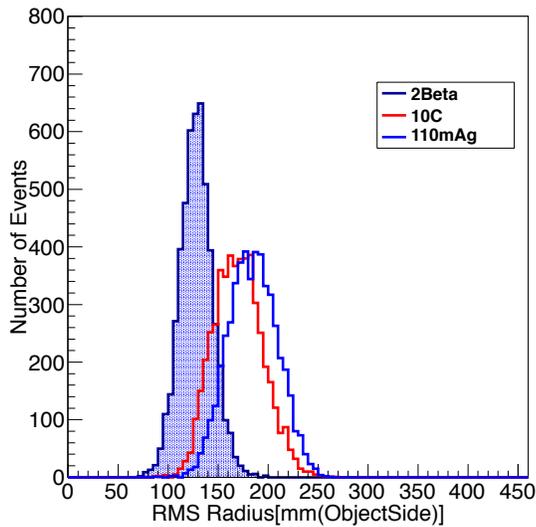


図 5.16: 21 カ所設置ランダム座標での RMS 値の広がり 図 5.17: 21 カ所設置ランダム崩壊座標での最終識別効率

| 粒子 | 中央のみの除去率 [%] | ランダム崩壊での除去率 [%] |
|--------------------|--------------|-----------------|
| $0\nu\beta\beta$ | 10 | 10 |
| ^{110m}Ag | 96.1 | 93.0 |
| ^{10}C | 89.6 | 79.3 |

表 5.4: 21 カ所設置での粒子識別効率

この結果から、イメージ検出装置の 147 個設置での識別効率は表 5.4 のようになり、 ^{110m}Ag や ^{10}C のバックグラウンド粒子に対して、イメージ検出装置による β イベントと γ 混じりのイベントの識別というのは十分可能であることが分かった。

5.4 シミュレーション結果まとめ

以上の結果から、シミュレーション上でイメージ検出装置はバーテックスの広がり方の違いを見るのは可能であることが分かった。また、現実的な状況を想定したシミュレーションに関しても十分な識別効率を達成することができた。この結果から、今後の KamLAND の粒子識別への十分な貢献を目指せると分かった。

この結果に関しての今後の更なる改善課題点としては、いくつか挙げる事ができる。
ひとつは、今回設置したイメージ検出装置は設置箇所やイメージ検出装置群の個数について最適解である訳ではないため、その改善が考えられる。特に、イメージ検出装置群の各群の個数は各群の個数を増やすと、各撮像画像の情報が増えるため改善する可能性が考えられる。

他にも、イメージ検出装置群の設置場所を利用し、反対側の撮像画像とうまく組み合わせた3次元的な解析による、解析方法の改善や、検出器の量子効率の上昇による獲得光量の増加による改善も考えられる。

6 イメージ検出装置の試作品評価

先ほどのシミュレーションの結果から、今回のイメージ検出装置は粒子識別が十分可能であり、粒子識別に有効な設計であるということがわかった。そこで、次のステップとしてイメージ検出装置の縮小光学系を作成して、その縮小型光学系を用いて粒子識別を目指してゆく。その第一歩として、光学系の基本的な性能評価を行い、設計値との違いを確認し、もし問題点があるならばその原因究明を行う。

6.1 作成光学系

今回はシミュレーションを行ったサイズの光学系ではなく、およそ半分に近いような大きさの光学系を作成した(図 6.1)。

具体的なサイズの値としては、次のようになっている。

| パラメータ | 設計光学系 | 試作品光学系 |
|------------------|-------|--------|
| プライマリーミラー半径 [mm] | 275 | 145 |
| セカンダリーミラー半径 [mm] | 150 | 75 |
| 設置光検出器個数 | 4 個 | 1 個 |

表 6.1: 試作品光学系のサイズ

この光学系を用いて、光学系の性能評価として、理想的な場合とシミュレーションでの間での差異を見る。

試作品の材質としては、アクリルをくり抜いてアルミ蒸着を施したようなものになっている。また蒸着の膜厚は 40nm で製作をお願いしており、鏡面の表面のコーティングに関しては、光学系の形状の方を重視するため、さほど行っていない。プライマリーミラーに四角い穴があいており、図 6.1 のように検出器として想定しているマルチアノード PMTH9500 を差し込むための穴になっている。ここにマルチアノード PMT を差し込み、二枚の鏡面の間で集光して、マルチアノード PMT で結像した像の情報を得ることができるようなミラーになっている。

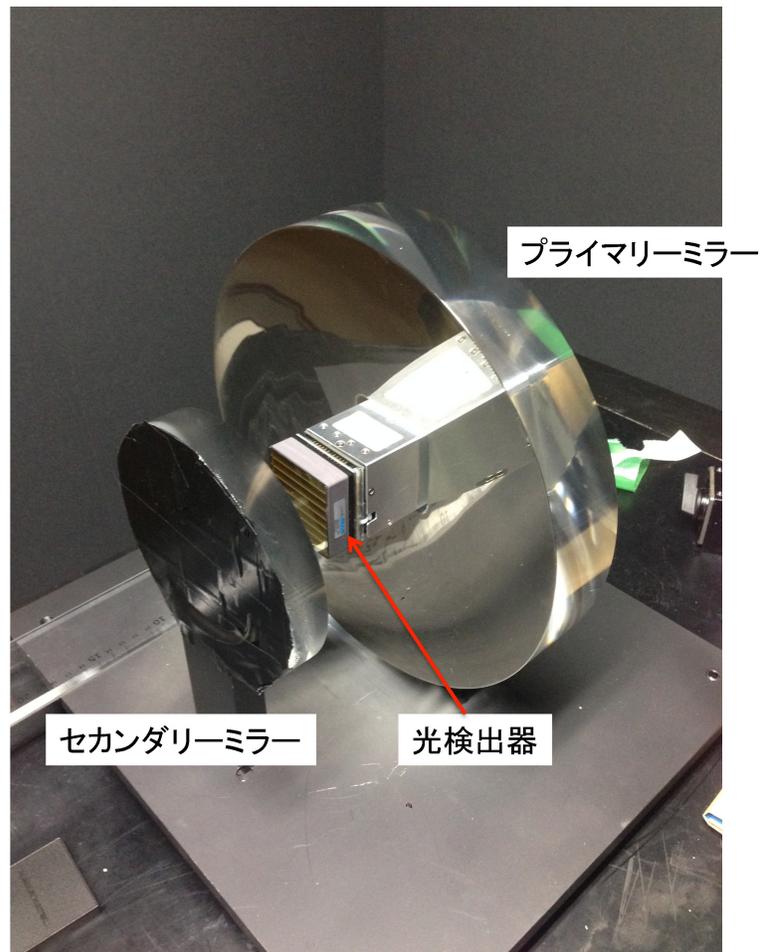


図 6.1: 試作品の様子

6.2 実験設定

今回は試作品の評価実験として、次のような簡単な実験で光学系の問題点を探ってみた。

6.2.1 反射率測定実験

基本的なこととして、設計されたものはどの程度の反射性能なのかを調べるために、レーザーポインタを用いて、反射率の性能評価を簡潔に行う。

実験のセットアップとしては、次の図 6.2 のようになっている。まずはレーザーポインタを用い、図 6.3

のパワメーターに対してどの程度の出力になっているかを距離ごとに調べ、その後、ミラーを挟んで同じ距離と比較して、どの程度落ち込むかによって簡易な評価を行う。

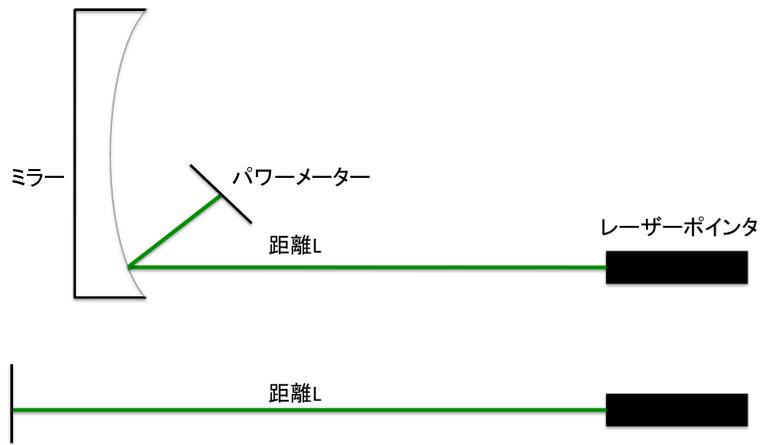


図 6.2: 反射率測定実験の概略図



図 6.3: パワーメーター

この実験から、パワーメーターによる値は表 6.2 のようになり、47.8 %の反射率しか達成できていな

いということが分かった。この原因としては、表面の膜厚が薄く、レーザーポインタでは肉眼で確認できるほどの透過光の確認ができていないことが原因としてあげられる。

| | ミラーなし | ミラーあり |
|--------------|-------------|-------------|
| パワーメーター [mW] | 2.493±0.002 | 1.191±0.002 |

表 6.2: 反射率計測結果

6.2.2 集光能力評価の実験

次に、実際に LED を用いて光学系の結像の問題点を確認してゆく。実際の結像の様子とシミュレーションで行った理想的な設計値の結像とを比較し、光学系にどのような問題点があるかを評価する。実験の状況としては、縮小型光学系の高さに合うように LED(波長 400 ~ 410nm) を設置し、理論的に一番ピントが合う点から前後させて、そのときの像の形状を確認していく。像面としては方眼紙を使用し、その方眼紙に写ったものを後ろから CCD カメラで撮像をするという実験のセットアップである(図 6.4)。

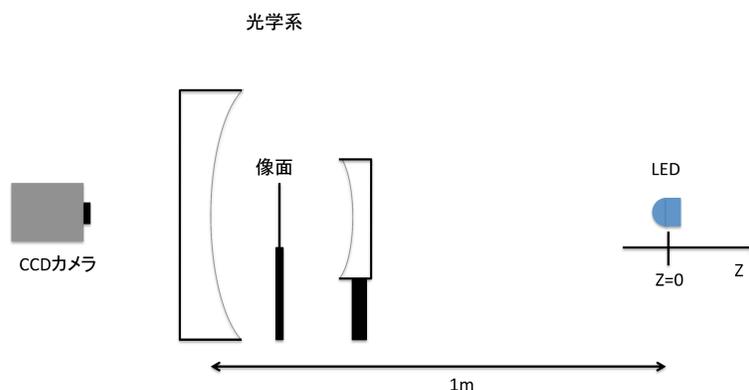


図 6.4: 実験セットアップ

具体的な実験でのピントの合わせ方は、次のように行った。まず、光学系の設計上と合致する箇所に方眼紙を設置する。そして、その場所にピントが合うように図 6.5 の CCD カメラ (C9300-201) を設置する。その上で、一番像面のピントが合う箇所を LED の基準点として、LED を前後に動かして結像面の変化の様子を観察した。



図 6.5: CCD カメラ

また、像面で方眼紙を用いている理由は、CCD カメラのピクセル数は 640×480 というのは分かっているが、撮像倍率が分からないので、方眼紙による画像サイズのキャリブレーションを行っている（図 6.6 はその様子）。この方眼紙によるキャリブレーションの結果から、撮影している画像サイズは横 27mm × 縦 20mm の画像であるとわかった。

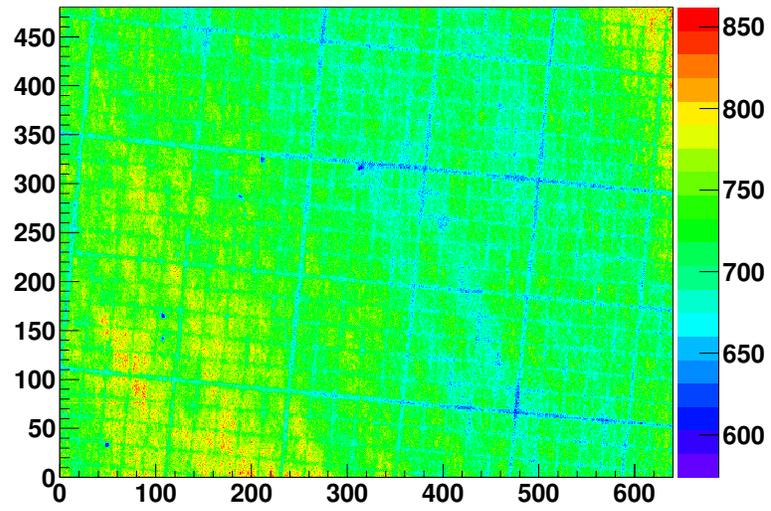


図 6.6: 方眼紙撮像の様子

CCD を用いた撮像の結果は、次の図 6.7 のようになった。

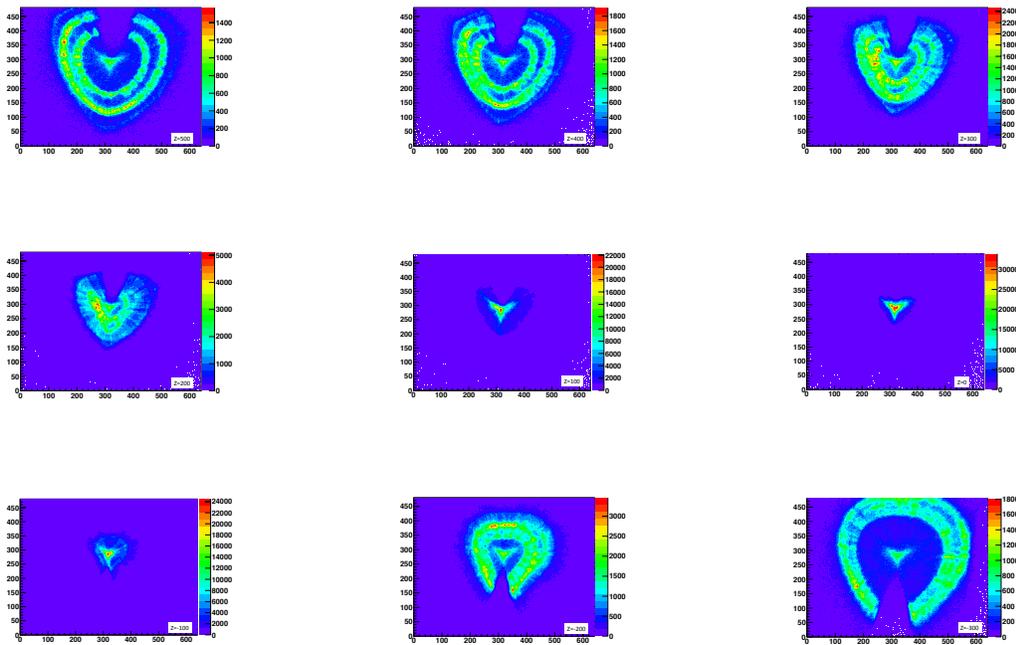


図 6.7: Z を変化させたときの撮像画像の様子

一方で、図 6.8 のように理想的な設計条件で再現した光学系のシミュレーションでの結像の様子との比較を行った。このとき、LED の位置は先ほどの Z と対応させてある。その結果が、次の図 6.9 ようになる。

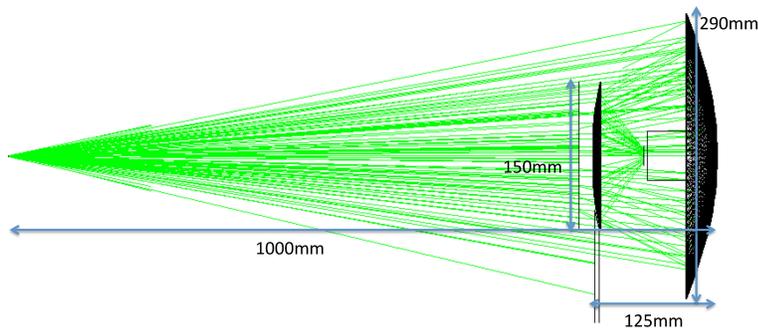


図 6.8: 実験シミュレーションの設計

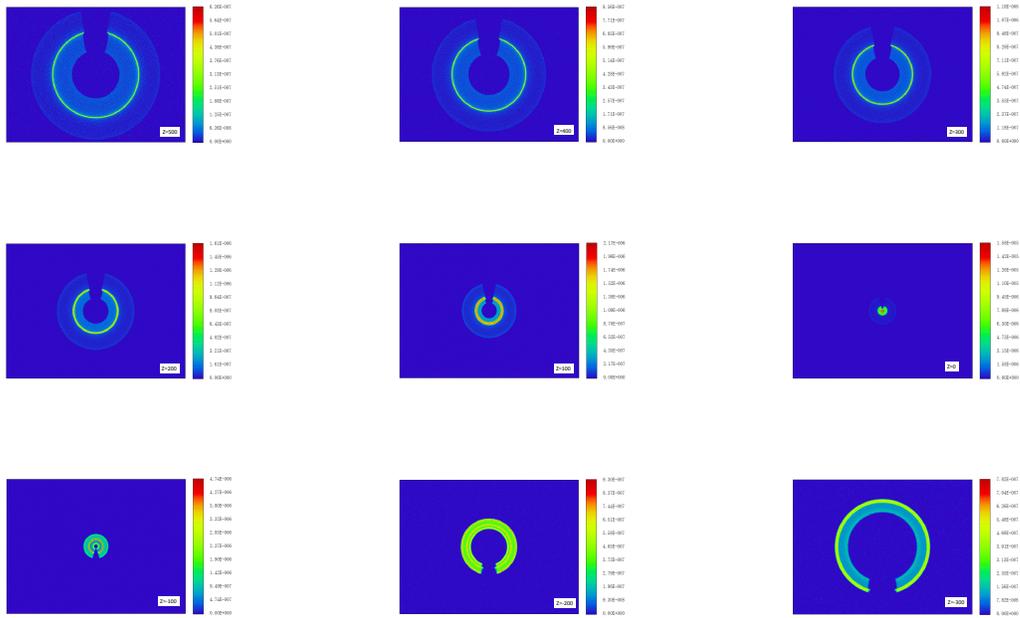


図 6.9: Z を変化させたシミュレーションでの結像

まずは、この二種類の像のサイズについて調べた。

実物の像のサイズは、ピントの合っているところでの最大光量となっている点の座標を中心として、その中心座標から x 軸方向の広がり（最大光量の $\frac{1}{4}$ の場所で定義）を Z の 100mm ごとに調べた。またシミュレーションの方は中心座標から同じように x 軸方向の広がりを Z の 100mm ごとに調べた。この像のサイズについてまとめた結果が次の図 6.10 のようになっている。ここで、実物のサイズの方についている誤差は、LED の座標が Z 座標が前後 1cm までずれている可能性があるとし、それを考慮した誤差として入力している。

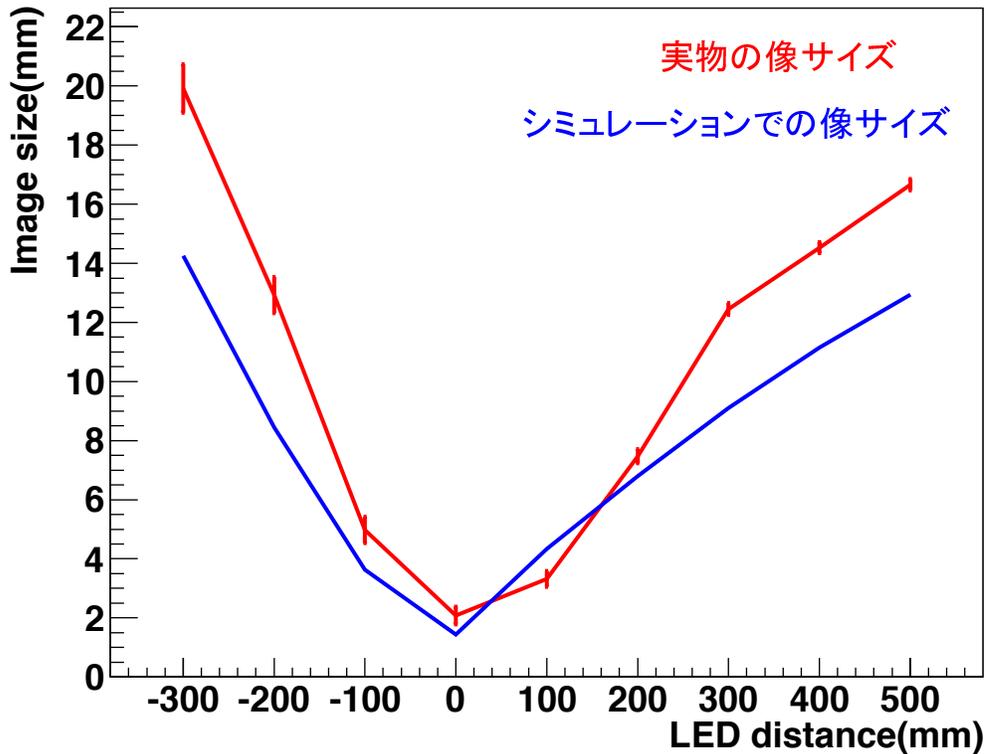


図 6.10: シミュレーションと実際の像の広がり比較

この結果から、光学系が集光を行っており、その集光の様子が図 6.10 のようにシミュレーションを再現するような図の形状になっていることが分かった。

6.2.3 集光能力評価実験のまとめ

今回の集光能力評価の実験から様々なことが分かった。

まず目的としていた集光ミラーとしての役割を果たすことができていたことが分かった。実際にシミュレーションと広がり比較を考えると、 $Z=0$ 近辺では近い値であることが分かる。しかし、 $Z=0$ から離れた箇所についての再現性は達成していない。

同時に問題点として、次の二つがあることも分かった。一つ目は像の中央部分に集光が起きていることで、二つ目は像の形状が三角形のような形状になっていることである。

像の中央部分への集光は、 $Z=0$ から離れて、像が広がっている場合に判明したものであり、シミュレーション上では起きていないので、光学系の何かしらが原因であると考えられる。もう一つの問題の像の

形状が三角形になっているという問題である。こちらでもシミュレーション上では起きていないので、実験上の何かしらが原因であると考えられる。

特に、像形状の方は像の広がりに影響を与えている可能性がある。像形状が仮に円と完全に同面積の正三角形の場合だと、今回広がり指標とした中心（三角形の場合は重心）の横の長さは、三角形の方が0.90倍に縮小されていることになる。しかし、実際の像を見る限りでは面積が同じではなく、むしろ像面積が拡大しているため、像形状の問題からサイズの違いが生じている可能性がある。原因が像の形状のみの違いに起因するならば、これは今後像形状問題解決の方から改善する可能性はある。

以上をまとめると、光学系の集光を確認したが、同時に結像の問題点も明らかになり、判明した結像の問題点は次の2つである。

- 1、実物の像の中心への集光が起きていること
- 2、実物の像は形状が三角形になってしまっていること

6.3 判明した問題点とその原因考察

光学系は集光能力をきちんと持つと分かったが、光学系や結像した像についての問題点も明らかになった。そこで、今回の実験結果から判明した問題点に関してまとめて、その原因考察を行う。

・ミラーの反射率が低い

問題点の一つに、ミラーの反射率が47.8%と低いことが分かった。これは、ミラーの反射面の膜厚が薄く、その結果起きてしまったものだと考えられる。実際、図6.11のようにレーザーポインタのような光を一点に当てるような場合は透過光が肉眼で確認できてしまう程度の反射性能でしかないことが確認された。対策として、次回以降は膜厚も考慮した作成をすることになる。



図 6.11: レーザーポインタの透過光

- ・ 結像面に中央部分に光が入っている

実物の結像面を確認してみると、中心部分にシミュレーションでは入っていない想定外の集光が起きていることが分かった。この集光の原因として、考えられることはいくつか有る。

1、透過光がそのまま反映されている場合

原因として考えられる最もシンプルなものは、透過光がそのまま入っている場合である。しかしこれは、セカンダリーミラーの後面をブラックシートで覆っていたため、影響はほとんどないと考えられる。実際、レーザーポインタをセカンダリーミラー近くで当てたときに全く CCD カメラに写らなかったことから、透過光が原因ではないと分かる。

2、ミラーの反射による場合

次に考えられることは、ミラーの反射によって像が中心に現れてしまったケースである。これは、ミラーの鏡面作成の際に削りだしの要領で作成されたため、円対象な構造になっていることが原因ではないかと考えられる。削りだした円形の各点に関して、垂直方向に乱反射のようなことが起けると、中心付近では密度が高くなるのでそれが影響するのではないかとというのが一つ考えられる。

実際に、レーザーポインタを当てた場合にも放射線上の反射を行っている（図 6.12）ことから、2 が原因なのではないかと考えることができる。



図 6.12: レーザーポインタの反射光の様子

・像が三角形の形状になっている

これも実物の結像の問題である。原因として考えられる可能性としては以下の3つ考えられる。

- 1、LED 光源そのものが三角形である
- 2、CCD カメラでの撮像で三角形に歪んでしまっている
- 3、光学系の反射特性

このうち、1か2であるならば、LED 光源を CCD カメラで直接撮ってしまえば三角形に見えるはずである。そこで、実際に LED 光源を CCD カメラのピントの合う箇所（結像面の箇所）に持っていくと、強弱に差はあるものの、しっかりと円形になっていることが分かった（図 6.13）。

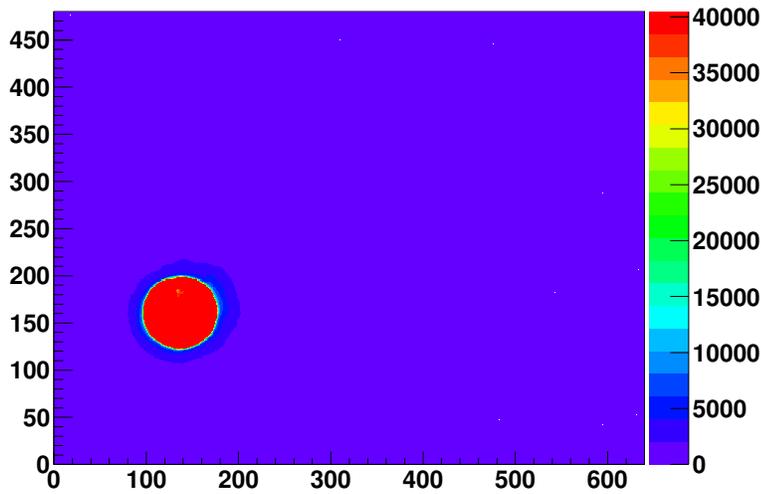


図 6.13: LED 光源を直接 CCD で撮像した画像

そのため、光学系の反射特性と考えられる。ではなぜこのような形状になってしまったのかという原因を考えてみると、重力による鏡面形状の歪みではないかと思われる。

具体的な原因箇所を調べるために、光学系の二枚のミラーのうち一枚目と二枚目を別々にして LED 光源を当てて結像の様子を観察した (図 6.14 と図 6.15) ところ、プライマリーミラーである大きなミラーの方は三角形になるような像形状の影響があまり見られず、逆に小さなセカンダリーミラーの方が三角形の像形状に影響を大きく与えていることが分かった。(図 6.16 と図 6.17)

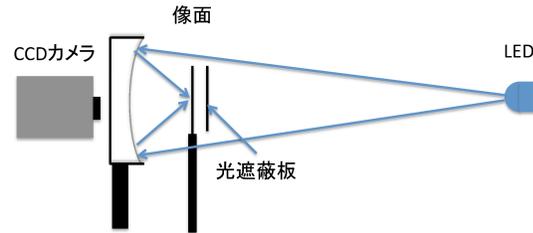
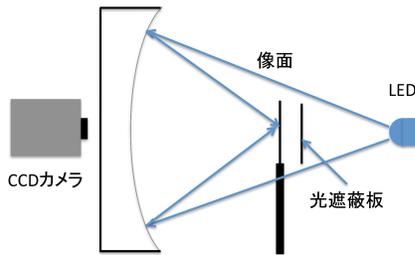


図 6.14: プライマリーミラーのみでの集光の様子

図 6.15: セカンダリーミラーのみでの集光の様子

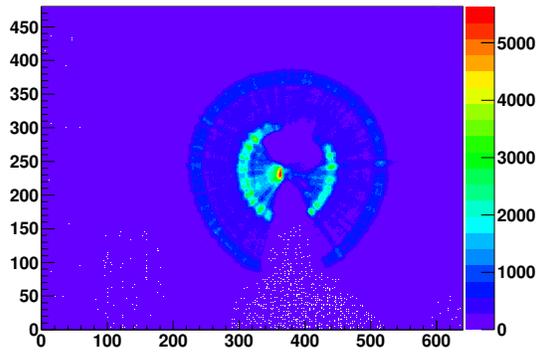


図 6.16: プライマリーミラーのみでの集光像

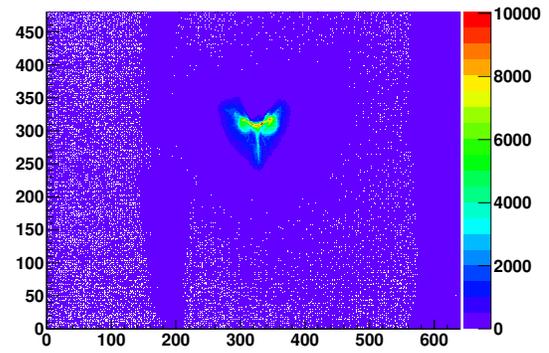


図 6.17: セカンダリーミラーのみでの集光像

また、原因となる箇所に関して調べる実験として、単純に一部をかくしてどこが三角の頂点を作るかを調べる実験を行った（図 6.18）。結果、間延びする原因となる箇所は、図 6.19 の赤丸にあるようにセカンダリーミラーのうち、右下と左下の箇所と上部に有ということが分かった。

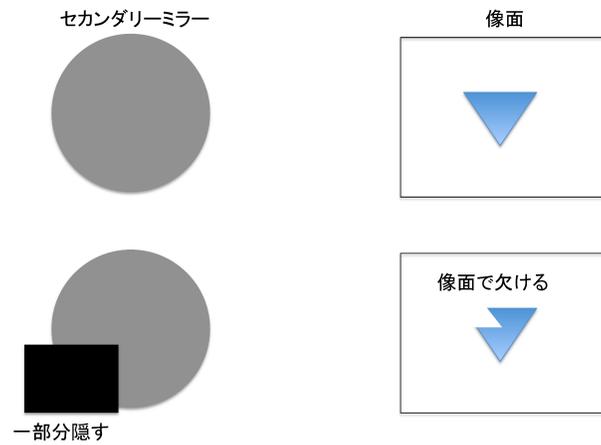


図 6.18: 像形状歪みの原因調査実験

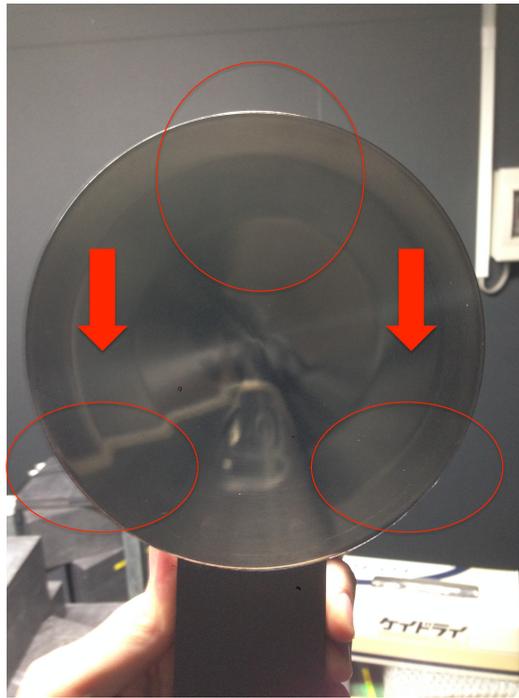


図 6.19: 像形状の歪みの原因箇所

以上のことから、この形状になっている原因というのは、ミラーの固定台から外れた箇所では自重による歪みのようなことが起きているのではないかと考えられる。具体的には、固定台から外れたような箇所が下に歪んでいるような影響が起きていると思われる。実際に、像形状が間延びする原因になっている場所というのが、セカンダリーミラーの上方部は固定台の支えのある箇所であり、右下左下部分は逆に固定台の支えのない箇所になっている。さらに、あまり像形状に影響を与えていなかったプライマリーミラーは固定台の幅が広がったため、こうした歪みの影響が少なかったと考えられる。以上のことから、セカンダリーミラーの固定台から外れた箇所が、自重の歪みによって結像の問題点を起こす原因となっているのではないかと考えられる。

6.4 導入に向けた改善点まとめ

以上のような問題点から、今後の作成に関しては、以下のようなことを新しく要求値として求めることが必要になる。

- 1、ミラーの膜厚をより厚くする。
- 2、ミラーの鏡面の粗さをより精密にする。

- 3、ミラーの歪みをもっと精度よく定められるようにする。
- 4、ミラーの固定方法をより厳密にする。

1はミラーの反射率の低さからを解消するための要求であり、2は像の中央部分に光が集まるという現象を防ぐための要求で、3と4は像形状が三角形になっている現象から、ミラーの歪みが生じないように考えなくてはならないことからくる要求になっている。これらを今後の設計では条件として加えたうえで KamLAND への設置することが必要になるので、設置方法も含めてこうした問題点をどう解決してゆくかが今後の課題になる。

7 結論と今後の課題

今回の研究であるイメージ検出装置の開発は、現在 KamLAND-Zen 実験で問題となっているバックグラウンドイベントの識別を目的としたものである。そこで、私はイメージング検出装置の光学系部分の開発と、イメージ検出装置の識別可能性検証及び光学系の試作品性能評価を行った。その結果に関してまとめていく。

・ 識別可能性検証

粒子識別の可能性検証として、今回私は KamLAND の内部の効果も含め、現実的な状況を加味したシミュレーションを行った。その結果、カメラの 147 台設置で、除去効率が ^{10}C で 79 % $^{110\text{m}}\text{Ag}$ で 93 % という結果になった。以上のような結果から、イメージ検出装置を用いることで、効率よく除去が可能であるという結果になった。

このシミュレーション結果についてだが、更なる改善の余地はまだ残されており、次のようなことを改善することでイメージ検出装置の高効率化が可能かもしれない。一つ目としては、集光率を上げる光学系を設計することである。その考え方としては、一回目の反射鏡を大きくして二回目の反射鏡を小さくすれば反射鏡のせいで隠れる箇所は減るので、イメージ検出装置に入る光の集光率の向上につながるはずである。二つ目に、単純に設置数を多くして光量を稼ぐという方法である。設置箇所に関しては今現在詳細に調べていないので、設置箇所を調整して、効率よく識別を行うように設置が行えるのなら、集光率をカバーが可能だと考えられる。最後に、画像解析方法の改良である。今回の研究では RMS を用いた画像解析方法を行い、その広がり具合で評価を行っている。解析のときに途中で挟んだしきい値はおおよそ最適に近いもので固定してあるが、しきい値を挟む回数を増やす等の検討は行えてはいない。従って、今後画像解析方法の改良により更なる改善も考えられる。

・ 試作品の性能評価

光学系の試作品の性能評価を行ったので、その性能評価と問題点に関してまとめていく。まず一番重要な点として、光学系による像の集光が確認できたことである。これは設計値と像の大きさが違うので、完全に厳密な再現ではないが、全く集光しないということは起きなかった。

しかし同時に様々な問題点も同時に発覚した。まず反射率に関してだが、各ミラーの反射率が 47.8 % ほどで、二回反射の間に像面の光量が 22.8 % まで減少してしまう。元々の光学系の集光率の問題も有るので、非常に集光能力が悪いことが分かった。反射率の低い原因となっているのは、ミラーの反射膜が非常に薄く、レーザー光などだと透過する光が肉眼で確認できる程度に透過してしまうことが分かってしまうことが問題点であると思われる。また表面での散乱により、反射しても想定していないような反射光になってしまうことも確認できた。そのことから、今後のミラー作成には、反射面の厚みや表面のコーティング等をより細かく設定する必要があるだろう。

他の問題点としては、光学系による結像の問題点が挙げられる。像面での結像に関しては大きく2つの問題点が判明した。一つは中央付近への想定外の集光が起きることである。これは先ほどの光学系の表面の粗さから反射光が中心向きの放射光になってしまうことに起因していると考えられる。もう一つが、像が三角形の形状になってしまっている点である。その原因として考えられるのは、固定部分以外の鏡面が自重によって歪んでしまったことである。この二つ目の結果から、光学系の固定方法に関してや、鏡面の歪みなどが生じないようにするためにも、より厳密に光学系を固定する方法を考える必要が有ると分かった。

これらを踏まえて更に細かな作成条件を設定をする必要が有る。

まとめと今後の展望

以上の結果をまとめて、本研究に関する今後の展望をまとめる。イメージング検出装置のシミュレーションでは、十分なバックグラウンドの識別が可能になるという結果が得られた。設置箇所や設置個数、画像解析の方法等は今後も改善の見込みが有ると思われる。また、試作品の評価では、様々な問題が上がったが、特に今後注意しなくてはいけないのが、光学系の固定方法である。実際に今回はその固定方法の影響で、像に影響が出てしまったことが分かった。

この先、イメージング検出装置での研究としては、上のような課題をクリアすることで実装に大きく前進し、KamLAND-Zen 実験のバックグラウンドの識別への貢献から、 $0\nu\beta\beta$ 観測の精度向上に大きく貢献が可能になるだろう。

謝辞

本論文の執筆と大学院での研究に当たり、多くの方々にご協力いただきました。改めて御礼を申し上げます。

指導教官の井上先生には、修士論文発表の練習での鋭いコメントや、ミーティングなどでもさまざまな助言をいただきました。イメージングの研究グループの中では出なかった意見などもあり、非常に参考になり、研究の成果につながりました。ありがとうございます。

白井先生にも、ミーティングでコメントをいただきました。自分が想定していない点を指摘されることが多く、こうした点も研究してゆくのかといつも感心し、とても勉強になりました。本当にありがとうございました。

同じイメージング研究グループの三井先生、石徹白先生、渡辺先生には研究に関して特にお世話になりました。今回の研究結果に至るまでにいろいろな議論を積み重ね、ようやく試作品の作成とその評価までできました。イメージ検出の一つの結果としてこうしてまとめることができることに先生方も感慨深いものがあると思いますが、私の方でもここまで到達できたのは先生方の助力のおかげだと思うので、本当に感謝いたします。三井先生には光学系の設計に関して特にお世話になりました。光学系の設計にいろいろと試行錯誤して様々な議論を重ねて、今回の条件を満たした設計の完成に至ることができました。ここに感謝の意を表します。石徹白先生は、研究の全般のことのアドバイスや相談をしていただきました。今回のシミュレーションの方法の指導や、解析方法のアドバイスもいただいて、誠に感謝しております。渡辺先生には、Geant4のアドバイスや解析の相談、発表のコメントなどいろいろとご指導ありがとうございました。もう一つのイメージ検出装置の活用案であるニュートリノの方向検出の方の研究もうまく進むことを祈っております。光学系の研究グループでは特に就職活動などで私がかつた時期もあつたり、非常にご迷惑をおかけしました。改めまして御礼を申し上げます。

本木さんには、Geant4の相談で大変ご迷惑をおかけしました。どういった設定にしたいのか、どこを変更することでなができるのか、Geant4が全く分からないような状態から指導していただきありがとうございました。

松田さんにも、Geant4の助言をいただいたり、解析プログラムの相談などでいろいろとご迷惑をおかけいたしました。いつもがんばっている姿勢は励みになりました。本当にありがとうございました。

また、同じイメージングの研究グループの後輩の白旗君と高井君にも、いろいろと相談をしたりコメントをもらったりでご迷惑をおかけしました。白旗君には、研究で同じ部分が少なかったので、あまり助言ができず申し訳なかったと思います。高井君には私の研究を一部投げってしまうようになってしまい、申し訳ありません。今後は研究が本格的になって大変だと思いますが、うまく結果を出せるようにがんばってください。二人の今後の研究もうまく進み、活躍することを祈ってます。

同期の皆にも御礼を申し上げます。学部4年の後半から突然入ってきた訳の分からないやつだったと

と思いますが、小原君・立花君・林田君・坂井君は2年半の間お世話になりました。学部時代からゼミであったり分からないことを聞いたりとずいぶんお世話になりました。小原君とは初期に研究でかぶっていて、苦勞をかけたと思います。結局研究が分かれてしまいました。感謝します。立花君の京都土産はいつも楽しみで、おいしかったです。林田君はよく一緒に話して愚痴を聞いてくれてありがとう。坂井君も飲み会の帰りとかに一緒の方向で愚痴を言い合った気がします。大学院から一緒になった榎本君と朝倉君は2年間の間でしたが、二人にも苦勞をかけてしまったと思います。榎本君はTAで一緒だったりしていろいろ話したりしてくれてありがとう。朝倉君はなぜか私に聞いても分からないことを聞いてきました。ほとんど答えられなかったと思いますが、ありがとう。同期のみなどは苦樂をともにしたからこそ、大変支えてもらいました。私の方でも皆の支えに少しでもなれていたのなら幸いです。本当に感謝しています、ありがとうございました。

最後になりましたが、研究を見守っていただいた研究室と Collaborator の皆様に改めて感謝の意を表します。本当に2年半の間ありがとうございました。今後 KamLAND 実験がより大きな成果を達成することを祈っております。

参考文献

- [1] 花籠紘 修士論文「KamLAND 用高位置分解能イメージング検出装置の開発」 東北大学平成 24 年度
- [2] メレスグリオ株式会社 基礎光学. <http://www.cvimgkk.com/index.html>.
- [3] 浜松ホトニクス <http://jp.hamamatsu.com/>.
- [4] 斎藤晴司 絵とき光学基礎のきそ 日刊工業新聞社 2011 年
- [5] K.Asakura, et al. 「Results from KamLAND-Zen」 arXiv:1409.0077v1.
- [6] 渡邊靖志 新物理学シリーズ 33 素粒子物理入門 基本概念から最先端まで 2002 年
- [7] LLC Radiant ZEMAX. Zemax. <http://www.radiantzemax.com/>.
- [8] LLC Radiant ZEMAX. ZEBASE 6 Optical Design Database. Radiant ZEMAX, LLC, 2011.
- [9] 松田涼太 修士論文「加圧環境下におけるニュートリノレスに重ベータ崩壊探索の高感度化に向けた開発研究」 東北大学平成 25 年度
- [10] 大木歩 修士論文「新トリガーによる KamLAND-Zen 実験での 10C バックグラウンド除去」 東北大学平成 24 年度
- [11] 小畑旭 修士論文「Xe を用いた二重ベータ崩壊実験のための 集光ミラーと大光量液体シンチレータの開発」 東北大学平成 24 年度
- [12] R.Arnold, et al. 「Search for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo with the NEMO-3 Detector」 arXiv:1311.5695v3.
- [13] J.B. Albert, et al. 「Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data」 arXiv:1402.6956v2.
- [14] M.Agostini et al. 「Results on Neutrinoless Double- Decay of Ge^{76} from Phase I of the GERDA Experiment」 Phys. Rev. Lett. 111, 122503
- [15] A. Gando, et al. 「Measurement of the double- decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment」 arXiv:1201.4664v2.
- [16] A. Gando, et al. 「Reactor On-Off Antineutrino Measurement with KamLAND」 arXiv:1303.4667v2.