

KamLAND用高位置分解能 イメージング検出器の開発

東北大学理学研究科
物理学専攻
花籠 紘
平成24年

概要

KamLAND-Zen による ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験が現在行われているが、種々のバックグラウンドにより、未だ観測に至っていない。 $0\nu\beta\beta$ 探索の主なバックグラウンドは ^{10}C 、 ^{110m}Ag であると見積もられており、それらの除去が課題である。

本研究では、 ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊に対し、 ^{10}C 、 ^{110m}Ag の崩壊が大きな空間的広がりをもつ事を利用して、タギングする方法を提案し、GEANT4 シミュレーションによりその実現可能性を示した。

さらにそれを実現するためのイメージング検出器の設計を行った。設計したイメージング検出器を実際に KamLAND 内にインストールすることを想定し、GEANT4 と ZEMAX を組み合わせたシミュレーションを行った。その結果、 $0\nu\beta\beta$ 誤除去率 5% に対し、 ^{10}C 60%、 ^{110m}Ag 55% の除去率を達成することができるとわかった。

目次

第 1 章 序論	1
1.1 ニュートリノ	1
1.1.1 β 崩壊とニュートリノ	2
1.1.2 ニュートリノ振動	2
1.2 KamLAND 実験	3
1.2.1 KamLAND における反電子ニュートリノの検出原理	4
1.2.2 KamLAND 実験のこれまでの成果	4
1.3 0ν 二重ベータ崩壊	8
1.3.1 マヨラナ粒子とディラック粒子	8
1.3.2 二重ベータ崩壊	8
1.3.3 二重ベータ崩壊の半減期とニュートリノの有効質量	8
1.3.4 検出方法	9
1.4 KamLAND-Zen 実験	9
1.4.1 KamLAND-Zen 実験の現在の結果	11
1.4.2 KamLAND-Zen 実験におけるバックグラウンド	11
1.4.3 KamLAND-Zen 実験の今後	13
第 2 章 実験に対するの要求	14
2.1 $0\nu\beta\beta$ の崩壊と粒子識別	14
2.2 ^{10}C に対する原理実証	15
2.2.1 ^{10}C のマルチバーテックス	15
2.2.2 ^{10}C と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ によるシンチレーション光の広がり比較	15
2.2.3 位置分解能に対する要求値	17
2.3 ^{110m}Ag に対する原理実証	17
2.3.1 ^{110m}Ag のマルチバーテックス	17
2.3.2 ^{110m}Ag と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ によるシンチレーション光の広がり比較	17
2.3.3 位置分解能に対する要求値	17
2.3.4 被写界深度と画角に対する要求値	19
2.4 基礎光学	19
2.4.1 光学用語の解説 [1][2]	19
2.4.2 収差	21
2.4.3 ザイデル 5 収差と色収差	22
第 3 章 検出器設計	26
3.1 光線追跡シミュレーション	26
3.1.1 スポットダイアグラム	26
3.1.2 像の広がり	27

3.1.3	位置分解能	27
3.2	光学設計	27
3.2.1	オリジナルレンズ 1	28
3.2.2	オリジナルレンズ 2	29
3.2.3	オリジナルミラー 1	31
3.2.4	オリジナルミラー 2	32
3.2.5	光学系の選定	33
3.3	KamLAND 検出器への導入	33
3.3.1	KamLAND 検出器の構造	34
3.3.2	導入に向けたカスタマイズ	35
3.3.3	ディテクタ	36
第 4 章	シミュレーションによる性能評価	39
4.1	迷光とは	39
4.2	シミュレーションのセッティング	39
4.2.1	MCシミュレーションの流れ	41
4.3	画像から光子発生位置への再構成	45
4.4	画像解析による評価	45
4.4.1	RMS による評価	45
4.4.2	光の集中度による評価	46
4.5	結果と考察	46
4.6	考察	48
第 5 章	まとめと課題	49
付 録 A	反電子ニュートリノ方向測定の可能性	50
A.1	反電子ニュートリノの方向検出	50
A.1.1	方向検出の原理	50
A.1.2	オリジナルミラー 2 を使った方向測定の可能性	52
付 録 B	作製した光学系のパラメータ	53
付 録 C	^{110m}Ag のレベルスキーム	58

目 次

1.1	KamLAND	3
1.2	液体シンチレータ内反ニュートリノの発光様式	4
1.3	KamLAND による原子炉ニュートリノの生存確率の L/E 分布	5
1.4	KamLAND による地球ニュートリノ観測の結果 1	6
1.5	二重ベータ崩壊の模式図	8
1.6	予想されるニュートリノの質量構造	10
1.7	^{136}Xe 二重ベータ崩壊のレベル図	10
1.8	二重ベータ崩壊のエネルギースペクトル	10
1.9	KamLAND-Zen 実験のエネルギースペクトル	11
2.1	本実験の概略図	14
2.2	^{10}C のマルチバーテックス	15
2.3	上図: ^{10}C マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の空間的広がり、下図: ^{10}C マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の 2 次元広がり	16
2.4	上図: ^{110m}Ag マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の空間的広がり、下図: ^{110m}Ag マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の 2 次元広がり	18
2.5	被写界深度と画角の要求	19
2.6	厚肉レンズの焦点距離と焦点	20
2.7	集光した光の分布と位置分解能	21
2.8	被写界深度	21
2.9	球面収差	23
2.10	コマ収差	23
2.11	非点収差と歪曲収差	24
2.12	歪曲収差	24
2.13	色収差	25
3.1	スポットダイアグラム	26
3.2	特殊な光学系で集光された点光源の像	27
3.3	オリジナルレンズ 1 のレイアウト	28
3.4	オリジナルレンズ 1 のレイアウト	29
3.5	オリジナルレンズ 2 のレイアウト	29
3.6	オリジナルレンズ 2 のレイアウト	30
3.7	オリジナルミラー 1 のレイアウト	31
3.8	オリジナルミラー 1 のレイアウト	32
3.9	オリジナルミラー 1 の反射率 [3]	32
3.10	オリジナルミラー 2 のレイアウト	33
3.11	オリジナルミラー 2 の Spot 半径	34

3.12	ミラー検出器一個あたりの受光率 (ディテクタの量子効率は 100% とする) . . .	37
3.13	イメージインテンシファイアと MPPC	38
3.14	イメージインテンシファイア C9016 の量子効率	38
4.1	迷光の例	39
4.2	KamLAND 液体シンチレータとバッファオイルの屈折率	40
4.3	ミラー光学系の配置	41
4.4	$0\nu\beta\beta$ イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例	42
4.5	^{10}C イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例	43
4.6	^{110m}Ag イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例	44
4.7	画像再構成アルゴリズム	45
4.8	集中度の計算手法	46
4.9	^{10}C と $0\nu\beta\beta$ の RMS 半径の比較 (赤: $0\nu\beta\beta$ 、青: ^{10}C)	47
4.10	^{110m}Ag と $0\nu\beta\beta$ の RMS 半径の比較 (赤: $0\nu\beta\beta$ 、緑: ^{110m}Ag)	47
4.11	集中度のヒストグラム (赤: $0\nu\beta\beta$ 、青: ^{10}C 、緑: ^{110m}Ag)	48
A.1	Li 含有シンチレーター内でのニュートリノの発光様式	51
A.2	オリジナルミラー 2 のニュートリノ方向測定に対する被写界深度 (赤: 位置分解能 10 mm に対する許容錯乱円、青: 錯乱円)	52
C.1	^{110m}Ag のレベルスキーム	58
C.2	^{110m}Ag のレベルスキーム	59

表 目 次

1.1	KamLAND で観測されたニュートリノのイベント数	7
1.2	KamLAND-Zen 実験で見積もられるバックグラウンドレート	12
2.1	位置分解能とイベントの ^{10}C の 2 次元的広がり	17
2.2	位置分解能 ^{110m}Ag とイベントの 2 次元的広がり	17
2.3	光学的要求	19
2.4	ザイデル 5 収差と入射瞳、半面角の関係	22
3.1	光学的要求	28
3.2	オリジナルレンズ 1 の焦点距離、F 値とミラー最大半径	28
3.3	オリジナルレンズ 2 の焦点距離、F 値とミラー最大半径	30
3.4	オリジナルミラー 1 の焦点距離、F 値とミラー最大半径	31
3.5	オリジナルミラー 2 の焦点距離、F 値とミラー最大半径	33
3.6	KamLAND 液体シンチレータの組成	34
3.7	KamLAND-Zen 用 ^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成	35
4.1	ZEMAX シミュレーションの設定	40
A.1	^6Li の中性子捕獲性能	51
A.2	Li 含有液体シンチレータの物質と混合比	51
B.1	オリジナルレンズ 1	54
B.2	オリジナルレンズ 2	55
B.3	オリジナルミラー 1	56
B.4	オリジナルミラー 2	57

第1章 序論

1930年、Pauliにより β 崩壊におけるエネルギーの非保存問題を解決するために、ニュートリノという新しい素粒子の存在が予言された。その後、ニュートリノが実際に観測されたのはそれから26年経った1956年のことである。

長い間謎に包まれきたこの素粒子は、近年のニュートリノ観測実験の発展によりその性質が徐々に明らかになってきている。

ニュートリノの予言から数十年が経ち、さまざまなニュートリノ実験が世界中で行われている。現在、KamLAND-Zen 実験ではニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の観測に挑戦しており、観測に成功すれば標準理論を超える事象の発見となるため多に期待されている。

しかし、KamLAND-Zen 実験では非常に稀にしか起きない ^{136}Xe による二重ベータ崩壊を観測しているため、自然環境や検出器に含まれる放射性物質によるバックグラウンドが大きな問題となっている。

現状、KamLAND-Zen 実験の ^{136}Xe の 0ν モード崩壊におけるバックグラウンドの中で主なものは、 ^{110m}Ag と ^{10}C である。

そこで、現在 KamLAND-Zen 実験では ^{110m}Ag 除去を目的として ^{136}Xe 含有液体シンチレータの純化を行っており、純化後は ^{10}C が主たるバックグラウンドとなる。 ^{10}C は、宇宙線ミューオンが液体シンチレータ中の ^{12}C を破砕することで生成され、その崩壊で放出されるエネルギーが $0\nu\beta\beta$ で放出されるエネルギーと同程度である。そのため、 $0\nu\beta\beta$ 探索への大きなバックグラウンドとなっている。

本論文では、 ^{10}C と ^{110m}Ag がマルチバーテックスイベントであることを利用して、イメージング検出器によりその発光一広がりを評価することで ^{10}C と ^{110m}Ag バックグラウンドを除去する手法を提案し、それを実現するためのイメージング検出器の設計を行った。第1章で、本実験の目的と導入を示す。第2章でシミュレーションにより ^{10}C 、 ^{110m}Ag それぞれのイベントのバーテックス広がりを実験的に評価し、要求される光学性能を決定した。第3章で、2章で求めた性能の要求を満たす、新たに設計されたイメージング検出器を示す。第4章で、設計したイメージング検出器のKamLAND内での性能をシミュレーションで評価し、バックグラウンド除去方法、バックグラウンド除去率を算出した。第5章で、まとめと今後の可能性について議論する。

1.1 ニュートリノ

ニュートリノは質量が極めて軽く、電荷を帯びていない粒子であり、物質を構成する基本的な素粒子の一種である。さらにニュートリノは電子ニュートリノ(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世代があり、それらは質量が異なる。本研究で扱う反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)は、電子ニュートリノの反粒子である。

1.1.1 β 崩壊とニュートリノ

反電子ニュートリノは原子核の β 崩壊の過程で生成される素粒子である。 β 崩壊には β^- 崩壊、 β^+ 崩壊、軌道電子捕獲がある。いずれも弱い相互作用で起こる反応である。

β^- 崩壊

β^- 崩壊は以下のように中性子 n が電子 e^- (β 線) と反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を放出する反応である。



崩壊のエネルギーは e^- と $\bar{\nu}_e$ に分配される。分配比は連続的な値をとる。

β^+ 崩壊

この反応は陽子 p が陽電子 e^+ (β 線) と電子ニュートリノ ν_e を放出する反応である。



β^- 崩壊同様に、崩壊のエネルギーは e^+ と ν_e に分配され、連続的な値をとる。

軌道電子捕獲

陽子 p が軌道電子 e^- を捕獲し、電子ニュートリノ ν_e を放出して中性子 n にかわる過程である。



このとき捕獲された電子軌道は空位となるため、それより外側の準位の軌道の電子が次々と落ち込んで、それぞれが特性 X 線を出す。

1.1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはニュートリノが飛行するにつれて、 e, μ, τ ニュートリノ間で別の世代のニュートリノに遷移が起こる現象である。

ニュートリノには質量があるため、波動方程式におけるニュートリノの質量固有状態とフレーバー (e, μ, τ) 固有状態が一致しない。そのためニュートリノ振動が起こる。生成されるニュートリノのフレーバー $|\nu_{\alpha=e,\mu,\tau}\rangle$ とニュートリノの質量固有状態を $|\nu_{i=1,2,3}\rangle$ とすると、一般にフレーバー固有状態は質量固有状態の線形結合で書ける。

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.4)$$

$$\left(|\nu_{\alpha}\rangle = \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_{\mu} \\ \nu_{\tau} \end{pmatrix}, |\nu_i\rangle = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \right)$$

ここで、 U は MNS 行列 (Maki-Nakagawa-Sakata 行列) で以下のように表される。

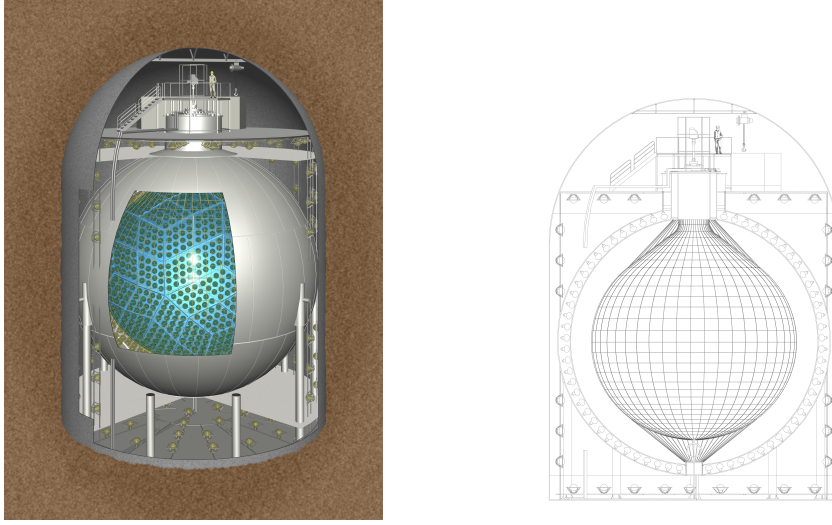


図 1.1: KamLAND

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

($s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij}$)

ここでは ν_e, ν_μ だけの振動を考える。すると、式 (1.5) は

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

と書くことができる。ここからニュートリノ振動の確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ を求めると、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]} \right) \quad (1.7)$$

($\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2, L =$ 飛行距離, $E = \nu$ のエネルギー)

となる。

1.2 KamLAND 実験

KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) は岐阜県飛騨市神岡町にある 1000t の液体シンチレータ (ドデカン 80%、1,2,4-トリメチルベンゼン 20%、2,5-ジフェニルオキサゾール 1.36g/l) を用いたニュートリノ検出器である。

液体シンチレータは粒子が反応を起こすと発光するので、その発光を光電子増倍管でとらえることで反電子ニュートリノを観測することができる。

1.2.1 KamLAND における反電子ニュートリノの検出原理

反電子ニュートリノの検出には反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が陽子 p に衝突し、荷電粒子である陽電子 e^+ をたたき出すという反応を利用する。荷電粒子は物質中では周りの粒子をイオン化するので容易に検出できる。

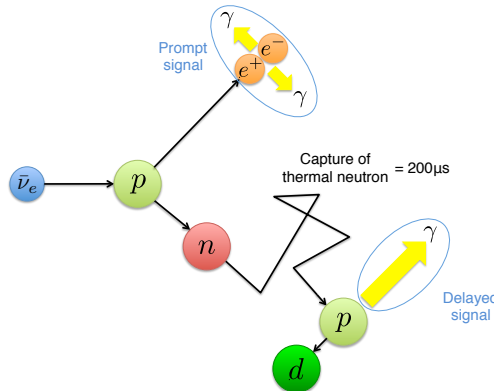
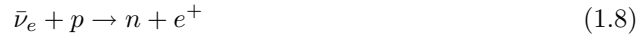


図 1.2: 液体シンチレータ内反ニュートリノの発光様式

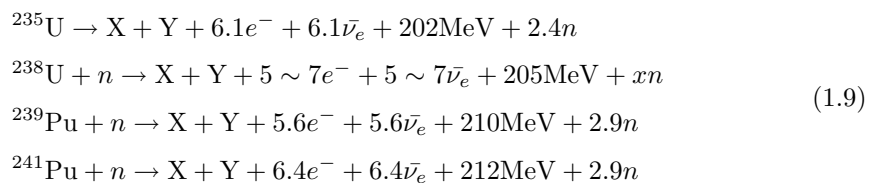
しかし、この相互作用（弱い相互作用）は極めて弱いので、反応断面積が小さく検出が非常に困難である。そのため、ニュートリノ源とターゲットとなる陽子が多量にあれば反応を検出できる。そこで、KamLAND では 1000t の液体シンチレータをニュートリノのターゲットとして用いている。

液体シンチレータ中では反電子ニュートリノが陽子と反応を起こすと、陽電子が即座に電子と対消滅を起こして、0.511MeV のエネルギーを持つ γ 線を 2 本 180° 方向に出す。これらの γ 線は互いに逆方向に 10cm ほど飛行した後コンプトン効果や光電効果を繰り返してエネルギーを放出する。また、時間差信号としてこのイベントを観測することにより、バックグラウンドを除去できるというメリットがある。

1.2.2 KamLAND 実験のこれまでの成果

原子炉ニュートリノ

原子炉ニュートリノは原子力発電所から飛来する反電子ニュートリノである。原子炉では ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu の 4 種の核種の β 崩壊で生成される。



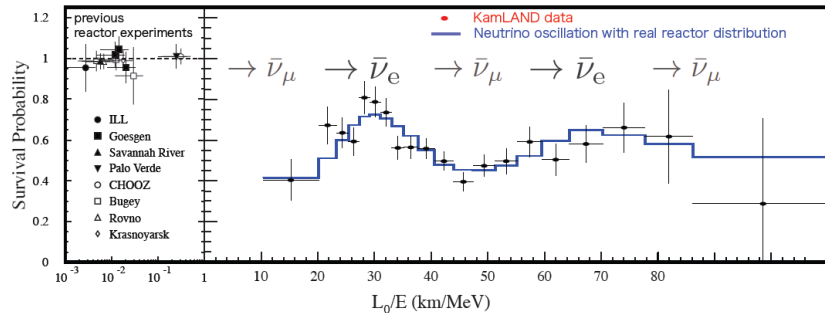
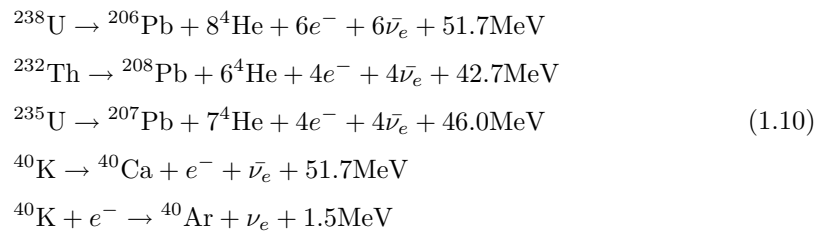


図 1.3: KamLAND による原子炉ニュートリノの生存確率の L/E 分布

地球ニュートリノ

地球ニュートリノは地球内部に含まれる放射性元素の β 崩壊で生成される。以下にその崩壊の式を示す。



このうち地球内部での崩壊のほとんどは ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{40}\text{K}$ によるものである。地球ニュートリノも KamLAND での観測対象の一つである。

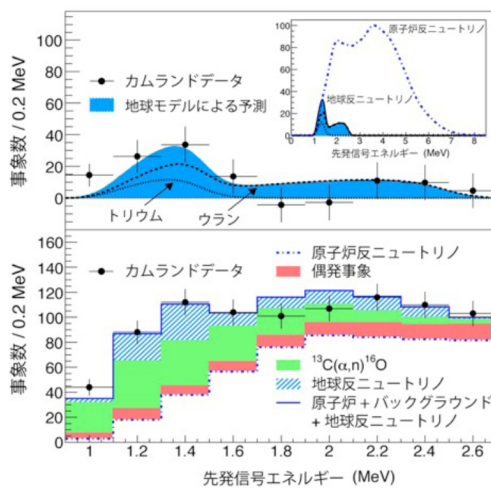
前述の通り、地球ニュートリノは地球内部に存在する放射性元素の β 崩壊によって生成される。主に ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{40}\text{K}$ (式 (1.10)) によるものである。

放射性元素の反ニュートリノを観測することができれば地球内部の放射性元素の理解へ繋がる。

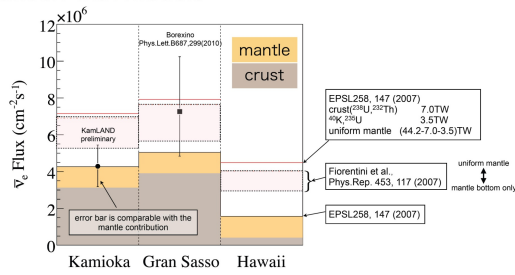
地表における地殻の熱流量の測定から、地球全体の発熱量は $44 \pm 1\text{TW}$ [4] もしくは $46 \pm 3\text{TW}$ となっている。地球科学では、地球内部に存在する U、Th や K の総量は、主にコンドライト隕石の化学組成を分析することにより推定されている。コンドライト隕石の分析により求められた地球の化学組成モデルである BSE(bulk silicate Earth) モデル [5] によると、地球全体の発熱量のうち 8TW が U、同じく 8TW が Th、そして 3TW が K によるものである。残りが地球の冷却熱、コアの凝固熱などである。このことから、地球内部の放射性元素を知ることが地球全体の熱収支を理解する上で重要なことであるが、実際のところ理解がそれほど進んでいない。

現在、地球深部の化学組成を知るためには、隕石解析や高圧実験、地震波測定などの間接的な方法に頼らざるを得ない。しかし、ニュートリノによる地球科学はそれらの化学組成の情報を直接的な観測で得ることができ、地球科学へ新たな知見を与えることができると期待されている。

2005年7月、KamLAND 実験グループは世界で初めて地球ニュートリノの観測に成功した [6]。観測期間 749.1 日、ターゲット陽子数 7.09×10^{31} target proton years で観測された全事



Comparison with models



The observed geo-neutrino flux is quite consistent with the model prediction.
 For the first time, fully radiogenic models start to be disfavored. (KL only 2.4σ, KL+Bxino 2.3σ)

図 1.4: KamLAND による地球ニュートリノの結果

象のうち、地球ニュートリノイベントは 25^{+19}_{-18} event であった。以下に実際の観測結果を示す。

ニュートリノイベント	予想事象数
偶発同時計数	2.38 ± 0.01
$C^{13}(\alpha, n)O^{18}$	42 ± 11
原子炉ニュートリノ (短寿命)	80.4 ± 7.2
原子炉ニュートリノ (長寿命)	1.9 ± 0.2
バックグラウンド合計	127 ± 13
全事象	152
地球ニュートリノ	25^{+19}_{-18}

表 1.1: KamLAND で観測されたニュートリノのイベント数

イベント数をニュートリノフラックス ($\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu}$) に換算するには、以下の式 (1.11) を使う。

$$N = N_{proton} \cdot \tau \cdot \varepsilon \cdot \int dE_\nu \sigma(E_\nu) \frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} \quad (1.11)$$

N : 地球ニュートリノイベント数

N_{proton} : ターゲット陽子数

τ : 検出器の運転時間

ε : 検出器の運転効率

$\sigma(E_\nu)$: 反応断面積 ($\sigma(E_\nu) \sim 10^{-35} \times E_\nu$)

また、地球モデルから予想されるニュートリノフラックスは以下の式から求められる。

$$\frac{d\phi(E_\nu, \mathbf{r})}{dE_\nu} = A \frac{dn(E_\nu)}{E_\nu} \int_{V_\oplus} d^3\mathbf{r}' \frac{a(\mathbf{r}')\rho(\mathbf{r}')P(E_\nu, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \quad (1.12)$$

A : 単位質量当たり崩壊数

$\frac{dn(E_\nu)}{E_\nu}$: 単位エネルギー当たりのニュートリノ崩壊数

$a(\mathbf{r}')$: 岩石単位質量当たりの放射性物質の質量

$\rho(\mathbf{r}')$: 岩石密度

ニュートリノ生存確率 $P(E_\nu, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)$ は、式 (1.7) から

$$P(E_\nu, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{1.27\Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| [\text{m}]}{E_\nu [\text{MeV}]} \right) \quad (1.13)$$

となる。パラメータは既にわかっており [7]、 $\Delta m_{12}^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{12} = 0.82$ である。また地球ニュートリノに対しては、 $P(E_\nu, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \simeq 0.59$ と近似してよい。式 (1.11)~(1.13) より、観測されたニュートリノフラックスと地球参照モデル [6] から予想されるニュートリノフラックスを比較すると、観測値が地球参照モデルとほぼ一致した。

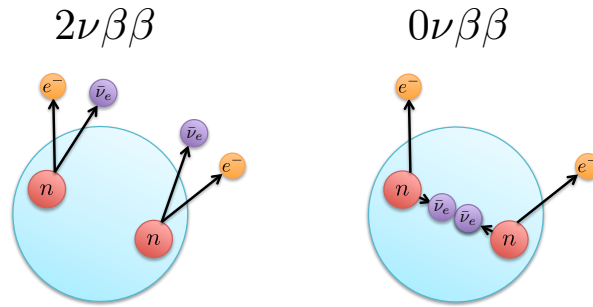


図 1.5: 二重ベータ崩壊の模式図

1.3 0ν 二重ベータ崩壊

1.3.1 マヨラナ粒子とディラック粒子

電子やクォークのように粒子と反粒子の区別がある粒子をディラック粒子という。一方、粒子と反粒子の区別がなく、自分自身が反粒子である粒子をマヨラナ粒子という。マヨラナ粒子であり得るのは、電気的に中性なフェルミオンだけであり、ニュートリノがマヨラナ粒子である可能性が示唆されている。

1.3.2 二重ベータ崩壊

二重ベータ崩壊とは原子核が電子を 2 個放出して原子番号が 2 大きいエネルギー準位の低い原子核になる反応で、 2ν モードと 0ν モードの二種類がある。 0ν モードは標準理論のもとでは禁止される課程であるため、現在世界中で活発に検出実験が進められている。

$$\begin{aligned} 2\nu : (A, Z) &\rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + \bar{\nu}_e \\ 0\nu : (A, Z) &\rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- \end{aligned} \quad (1.14)$$

1.3.3 二重ベータ崩壊の半減期とニュートリノの有効質量

2ν モードは通常の β^- 崩壊が核内で二重に起きる反応で、弱い相互作用の高次の効果として期待できるものであるためその半減期は非常に長い。 2ν モードの半減期は以下の式で表される。

$$(T_{1/2}^{2\nu})^{-1} = G^{2\nu} |M^{2\nu}|^2 \quad (1.15)$$

$G^{2\nu}$: 位相空間要素

$M^{2\nu}$: 核行列要素

このモードにおいては放出するニュートリノにもエネルギーが配分されるため、観測されるエネルギースペクトルは最大値が Q 値の連続スペクトルとなる。

一方、 0ν モードの半減期はニュートリノの質量に比例し、

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_\nu^2 \rangle \quad (1.16)$$

$G^{0\nu}$: 位相空間要素

$M^{0\nu}$: 核行列要素

(1.17)

m_ν^2 はニュートリノの有効質量で、二重ベータ崩壊で観測できる質量である。有効質量は主に電子ニュートリノによるものであるが、種の中に混合があるので、有効質量は以下のように表される。

$$\langle m_\nu \rangle = \left| \sum_i |U_{ei}|^2 m_{\nu i} e^{i\alpha_i} \right| \quad (1.18)$$

ここで、U は種の中の混合行列、 α はマヨラナ位相である。二重ベータ崩壊で観測できるニュートリノの有効質量は、3種のニュートリノの質量パターンによって異なる。ニュートリノの質量のパターンは3つある。

1. 縮退:(degenerate) : 3種類のニュートリノの質量がその差よりも大きく殆ど同じ質量を持つ ($\langle m_\nu \rangle > 0.1\text{eV}$)
2. 逆階層 (inverted hierarchy) : 電子ニュートリノが最も重い ($0.03\text{eV} < \langle m_\nu \rangle < 0.1\text{eV}$)
3. 順階層 (normal hierarchy) : 電子ニュートリノが最も軽い ($\langle m_\nu \rangle < 0.01\text{eV}$)

1.3.4 検出方法

$0\nu\beta\beta$ 崩壊検出には、二重ベータ崩壊核を用いるが半減期が極めて長く最も短い核種でも 10^{19} 年程度である。そのため、二重ベータ崩壊を起こす核種が大量に必要である。特に KamLAND-Zen 実験で ^{136}Xe を用いて $0\nu\beta\beta$ を観測する方法について説明する。

^{136}Xe は二重ベータ崩壊を起こす際、約 2.6MeV のエネルギーを放出する。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊を起こした場合、そのエネルギーをすべて2個の電子が受け継ぐため 2.6MeV のエネルギー領域にピークができる。

一方、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊を起こした場合、2.6MeV のエネルギーは2個の電子だけでなく2個の反電子ニュートリノが持ち去る。よって、KamLAND-Zen で観測するエネルギー分布は連続分布となる。

1.4 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は KamLAND 検出器を改良した $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験である。KamLAND-Zen 実験では前述の通り二重ベータ崩壊核として、 ^{136}Xe を用いている。実際には、KamLAND 検出器の液体シンチレータ層に、検出器上部のチムニー部から直径 3.16m のミニバルーンを吊り、その中に ^{136}Xe を 400kg を溶かした液体シンチレータを満たしている。 ^{136}Xe の二重ベータ崩壊の際の電子による液体シンチレータの発光を観測し、 $0\nu\beta\beta$ の探索を行っている。

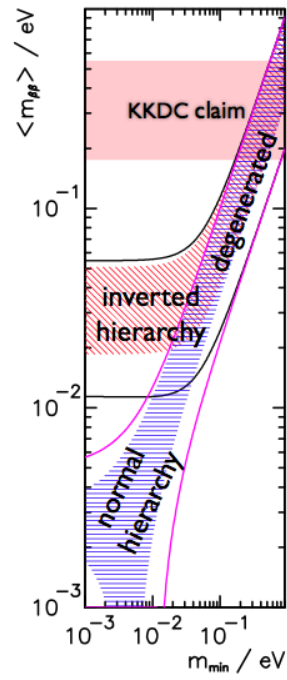


図 1.6: 予想されるニュートリノの質量構造

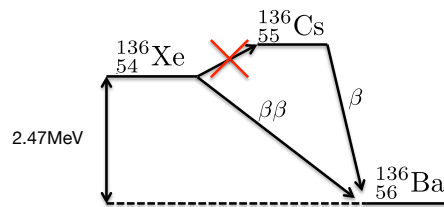


図 1.7: ^{136}Xe 二重ベータ崩壊のレベル図

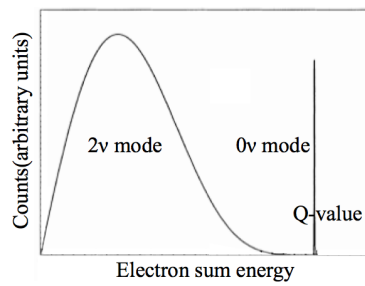


図 1.8: 二重ベータ崩壊のエネルギースペクトル

1.4.1 KamLAND-Zen 実験の現在の結果

図 1.9 が、KamLAND-Zen 実験の最新の結果である。

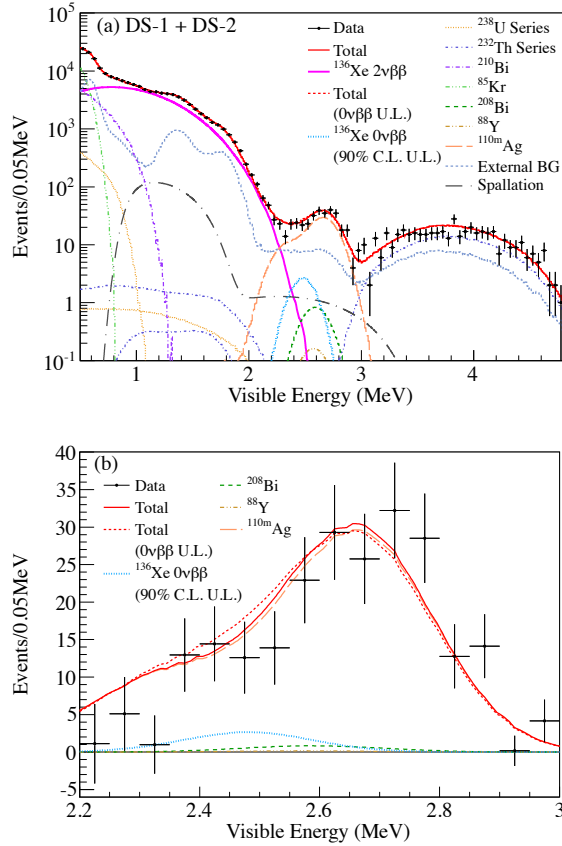


図 1.9: KamLAND-Zen 実験のエネルギースペクトル

1.4.2 KamLAND-Zen 実験におけるバックグラウンド

KamLAND-Zen 実験では非常に稀にしか起きない ^{136}Xe による二重ベータ崩壊を観測しているため、自然環境や検出器に含まれる放射性物質によるバックグラウンドが大きな問題となっている。 ^{136}Xe の 0ν モード崩壊のエネルギー領域 ($Q = 2.47$ [MeV]) に存在するバックグラウンドは表 1.2 のように見積もられている。主に ^{136}Xe のエネルギー領域のバックグラウンドとなるのは ^{110m}Ag 、 ^{10}C であることがわかる。

図 1.9 からわかるように、2.6MeV 付近のバックグラウンド除去が $0\nu\beta\beta$ 観測のために非常に重要になってくる。バックグラウンド源となる核種が空間相関を持つ特徴的な反応を起こす核種であれば、高位置分解能検出器で除去可能であると考えられている。

Isotope	Event rate (ton day) ⁻¹
External (radioactivity in IB)	
²²² Rn – ²¹⁰ Pb	$(3.2 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
²²⁸ Th – ²⁰⁸ Pb	$(3.5 \pm 0.3) \times 10^{-2}$
⁴⁰ K	0.21 ± 0.16
¹³⁴ Cs	0.50 ± 0.07
¹³⁷ Cs	0.37 ± 0.06
Residual radioactivity in Xe-LS	
²³⁸ U – ²²² Rn(²³⁴ Pa)	< 1.5
²²² Rn – ²¹⁰ Pb	4.9 ± 0.2
²³² Th – ²²⁸ Th(²²⁸ Ac)	< 0.7
²²⁸ Th – ²⁰⁸ Pb	0.58 ± 0.06
⁸⁵ Kr	196 ± 8
²¹⁰ Bi	103 ± 3
⁴⁰ K	< 9.6
¹³⁴ Cs	< 0.4
⁹⁰ Y	< 0.8
¹³⁷ Cs	< 1.1
Spallation product from ¹² C	
¹⁰ C	$(2.11 \pm 0.44) \times 10^{-2}$
¹¹ C	1.11 ± 0.28
Spallation product from xenon with lifetime < 100s	
1.2 < E < 2.0 MeV	< 0.3
2.2 < E < 3.0 MeV	< 0.02
Around ¹³⁶ Xe 0νββ (ENSDF search)	
⁶⁰ Co, ⁸⁸ Y, ¹¹⁰ Ag ^m , ²⁰⁸ Bi	0.22 ± 0.04

表 1.2: KamLAND-Zen 実験で見積もられるバックグラウンドレート

1.4.3 KamLAND-Zen 実験の今後

KamLAND-Zen 実験では現在 Xe 含有液体シンチレータの純化によって、 ^{110m}Ag の除去が進められている。純化後、 ^{110m}Ag が除去されれば $0\nu\beta\beta$ の信号領域での主なバックグラウンドは ^{10}C である。また、 ^{10}C も東北大学ニュートリノセンター開発の新エレクトロニクス MoGURA で 80%以上除去可能である。

それらバックグラウンド除去により、KamLAND-Zen 実験では再稼働後に約 80meV までのニュートリノ質量探索を目指している。一方、KamLAND デさらに小さなニュートリノ質量の探索を行うには粒子識別によるバックグラウンド除去等、新たな手法を用いる必要があり現在研究が進められている。

第2章 実験に対するの要求

現在、KamLAND-Zen 実験では、 ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ といったバックグラウンドが $0\nu\beta\beta$ 崩壊の妨げとなっている。MoGURA を用いても除去できない ^{10}C や液体シンチレータ純化後に残ってしまう可能性のある $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の除去が今後の課題である。

そこで本研究では、KamLAND-Zen 実験において ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ のようなマルチバーテックスイベントの発光位置広がりを利用した、新たなバックグラウンド除去法を提案する。また、それを実現するための高位置分解能検出器の設計を行い、実現可能性を評価した。

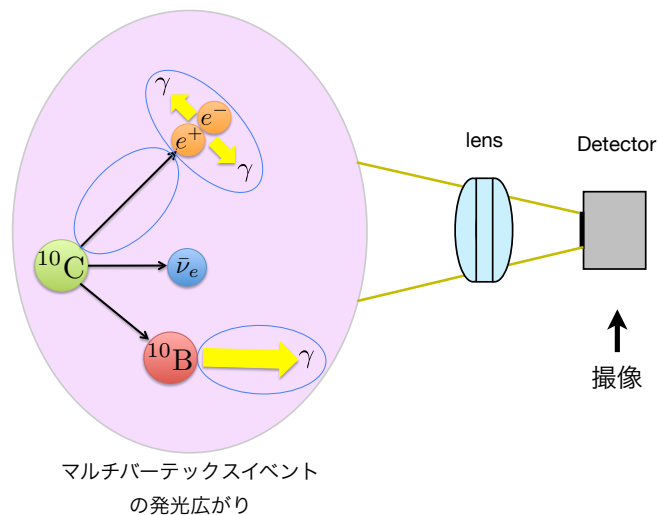


図 2.1: 本実験の概略図

本章では、モンテカルロ (MC) シミュレーションを行って、発光位置広がりによる ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 除去の原理実証を行った。さらに KamLAND への導入に向け、高位置分解能検出器に必要な仕様を見積もった。

2.1 $0\nu\beta\beta$ の崩壊と粒子識別

$0\nu\beta\beta$ の崩壊は e^- を 2 個放出する。液体シンチレータ中で電子は長く飛行しないと考えられる。一方、 γ を放出するような崩壊を起こす粒子は、 γ 線が液体シンチレータ中を長く飛行するため、光子の発生点が大きく広がる可能性がある。したがって、このような発光点広がりを捉えることができれば粒子識別が可能となる。

以下で KamLAND-Zen における ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ とその信号領域のバックグラウンドである ^{10}C 、 ^{110m}Ag の発光点の広がりと比較した。

2.2 ^{10}C に対する原理実証

本セクションでは、上記に上げた収差を考慮し、KamLAND-Zen バックグラウンド除去に向けてどのような光学設計を行うべきか議論する。

2.2.1 ^{10}C のマルチバーテックス

^{10}C は電子捕獲後図 (2.2) のように 4 つの信号を出す。

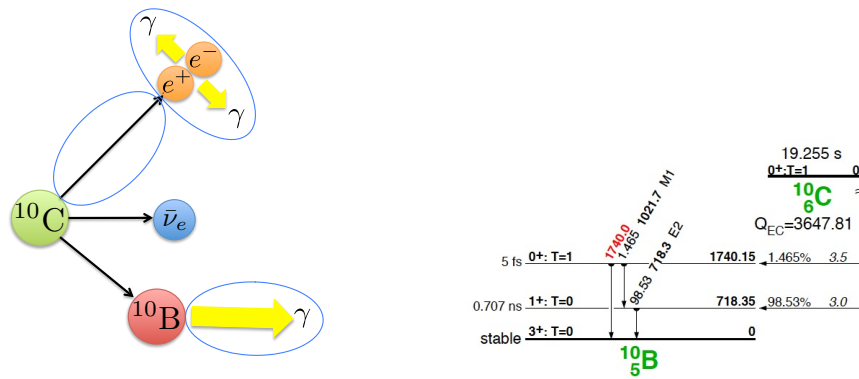


図 2.2: ^{10}C のマルチバーテックス

1. 陽電子により弾かれた電子によるシンチレーション光
2. 陽電子の対消滅による γ 線 $\times 2$ が作るシンチレーション光
3. 励起状態 ^{10}B が基底状態へと移る際に放出される γ 線が作るシンチレーション光

2.2.2 ^{10}C と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ によるシンチレーション光の広がり比較

KamLAND-Zen ^{136}Xe 液体シンチレータ内で ^{10}C マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ が作り出すシンチレーション光の空間的広がりを見積もるために、GEANT4 シミュレーションを行った。

KamLAND-Zen ミニバルーン内で ^{10}C と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ をそれぞれ 10000 イベントずつ発生させ、 ^{10}C のマルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の空間的広がりを見積もった (図 2.3)。空間的広がりには光量重心からの距離を RMS で評価した。

また、イメージング検出器では 3 次元信号を 2 次元プロジェクションして検出するため、RMS 広がりを 2 次元でも評価した (図 2.3)。

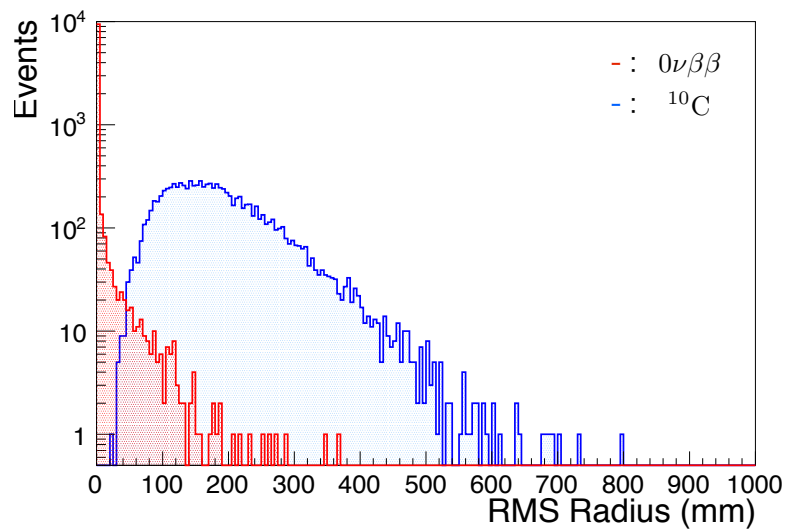
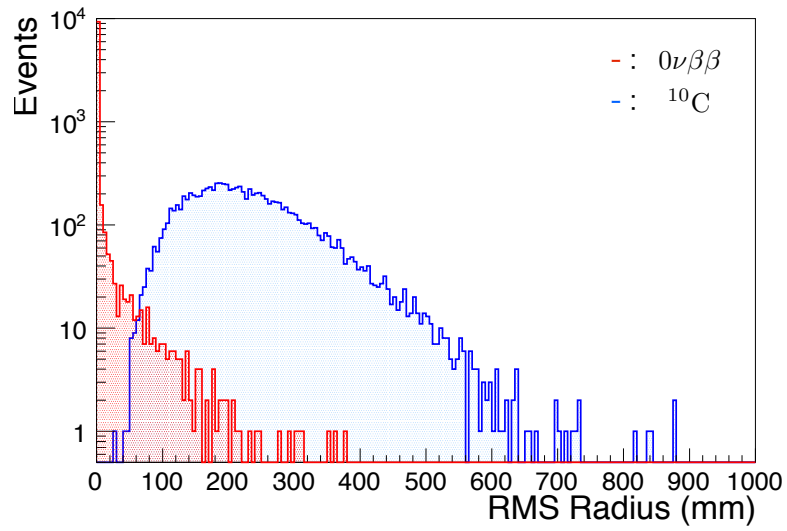


図 2.3: 上図: ^{10}C マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の空間的広がり、下図: ^{10}C マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の 2次元広がり

2.2.3 位置分解能に対する要求値

図 2.3 より、2次元で 50mm、100mm、200mm を超えて広がる ^{10}C 、 ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ イベント率は

	^{10}C	^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$
50mm	$99.46 \pm 1.41\%$	$1.48 \pm 0.12\%$
100mm	$87.90 \pm 1.29\%$	$0.53 \pm 0.07\%$
200mm	$36.86 \pm 0.71\%$	$0.09 \pm 0.03\%$

表 2.1: 位置分解能とイベントの ^{10}C の 2 次元の広がりとの関係

である。以上の結果から、イメージング検出器の位置分解能が 50mm あれば、99%以上の ^{10}C バックグラウンドを除去することができると考えられる。

2.3 ^{110m}Ag に対する原理実証

2.3.1 ^{110m}Ag のマルチバーテックス

^{110m}Ag は 98.64%の割合で約 240 日の半減期で β^- 崩壊し、合計で 2.89MeV のエネルギーを放出する (図??)。しかし、 β^- の後、安定なエネルギーレベルに落ちるまで、通る経路により、様々な γ 線を放出する。そのため ^{110m}Ag も ^{10}C 同様マルチバーテックスイベントであり、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊に対し大きなイベントの広がりを持つ可能性がある (付録参照)。

2.3.2 ^{110m}Ag と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ によるシンチレーション光の広がりとの比較

^{110m}Ag の崩壊も ^{10}C 同様広がりを持つ可能性がある。そこで ^{110m}Ag と ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ によるシンチレーション光の広がりとの違いを評価するため、 ^{10}C と同じ条件で GEANT4 シミュレーションを行った。そしてシンチレーション光発生点の空間的広がり、2次元広がり、RMS で評価した。

2.3.3 位置分解能に対する要求値

図 2.3 より、2次元で 50mm、100mm、200mm を超えて広がる ^{10}C 、 ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ イベント率は

	^{10}C	^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$
50mm	$99.26 \pm 0.74\%$	$1.48 \pm 0.12\%$
100mm	$98.90 \pm 1.40\%$	$0.53 \pm 0.07\%$
200mm	$67.17 \pm 1.06\%$	$0.09 \pm 0.03\%$

表 2.2: 位置分解能 ^{110m}Ag とイベントの 2 次元の広がりとの関係

である。以上の結果から、イメージング検出器の位置分解能が 50mm あれば、99%以上の ^{110m}Ag バックグラウンドを除去することができると考えられる。

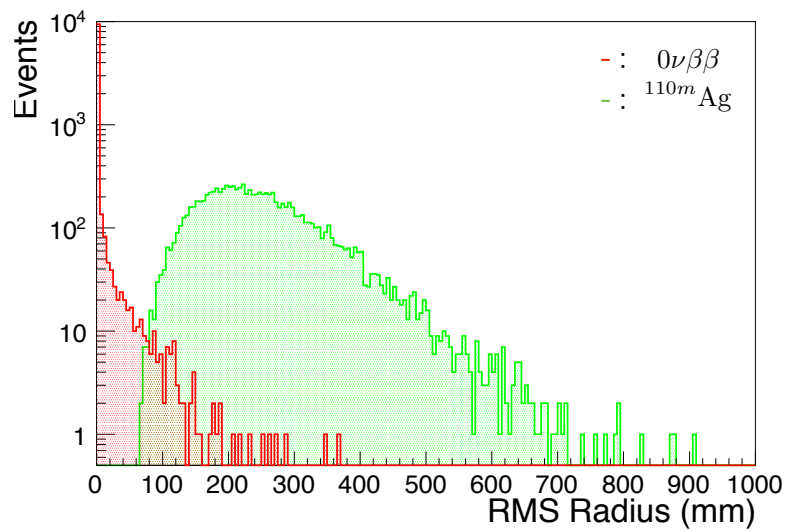
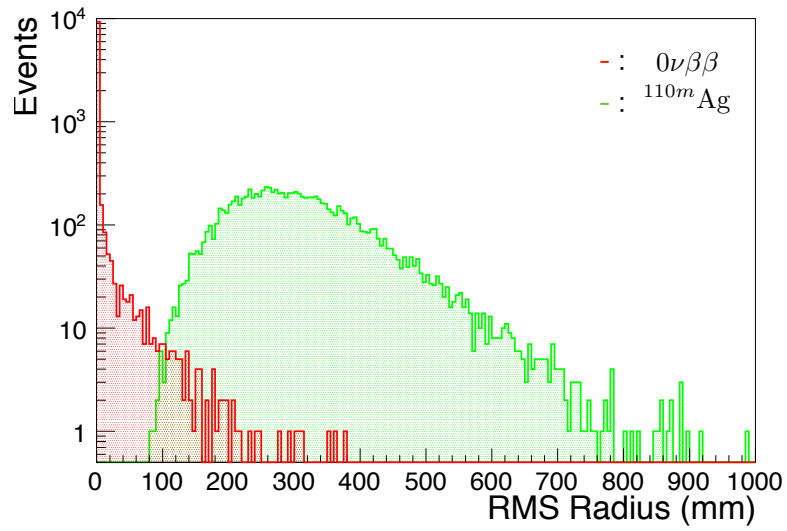


図 2.4: 上図: ^{110m}Ag マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の空間的広がりと、下図: ^{110m}Ag マルチバーテックスと ^{136}Xe 由来 $0\nu\beta\beta$ の 2次元広がりと

2.3.4 被写界深度と画角に対する要求値

被写界深度と画角はミニバルーンとイメージング検出器の位置によって決まる。イメージング検出器を KamLAND のチムニー直下に配置することを想定すると (検出器からミニバルーン中心までの距離は 9036 mm)、ミニバルーンは半径 1.580m であり、ミニバルーン全体をカバーするためには、被写界深度 3.160m 以上、半画角 10° 以上が必要である。

	要求値
位置分解能	50 mm 以上
被写界深度	3160 mm 以上
半画角	10° 以上

表 2.3: 光学的要求

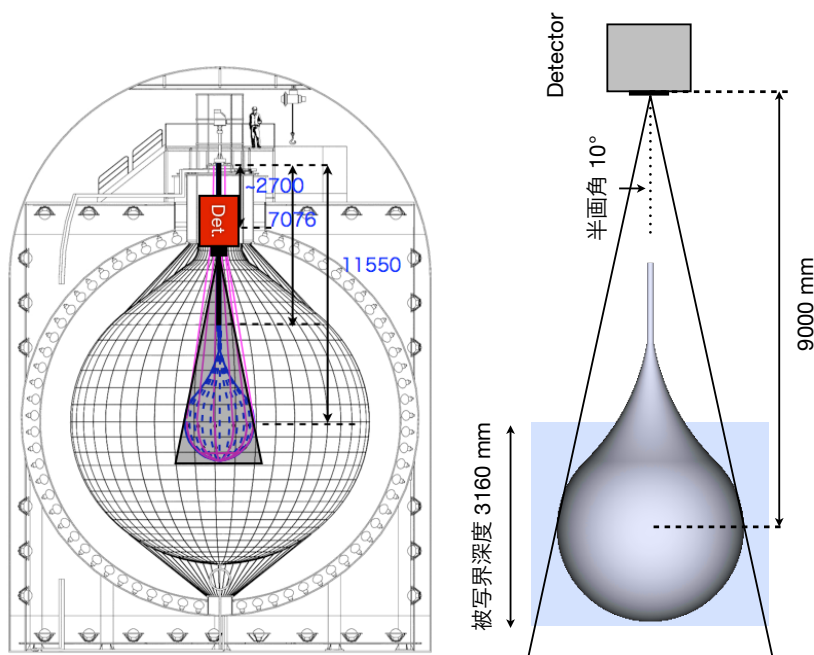


図 2.5: 被写界深度と画角の要求

2.4 基礎光学

2.4.1 光学用語の解説 [1][2]

焦点距離

図 2.6 における、第 1 主面から前側焦点 (第 2 主面から後側焦点) までの距離を焦点距離といい、 f と表記する。前側焦点距離、後側焦点距離と区別するために有効焦点距離 (EFL) とも

いう。

焦点を通る、もしくは焦点から発する光線はレンズを通過後、光軸と平行になる。逆に無限遠から届く光線はレンズを通過後、焦点を通る。

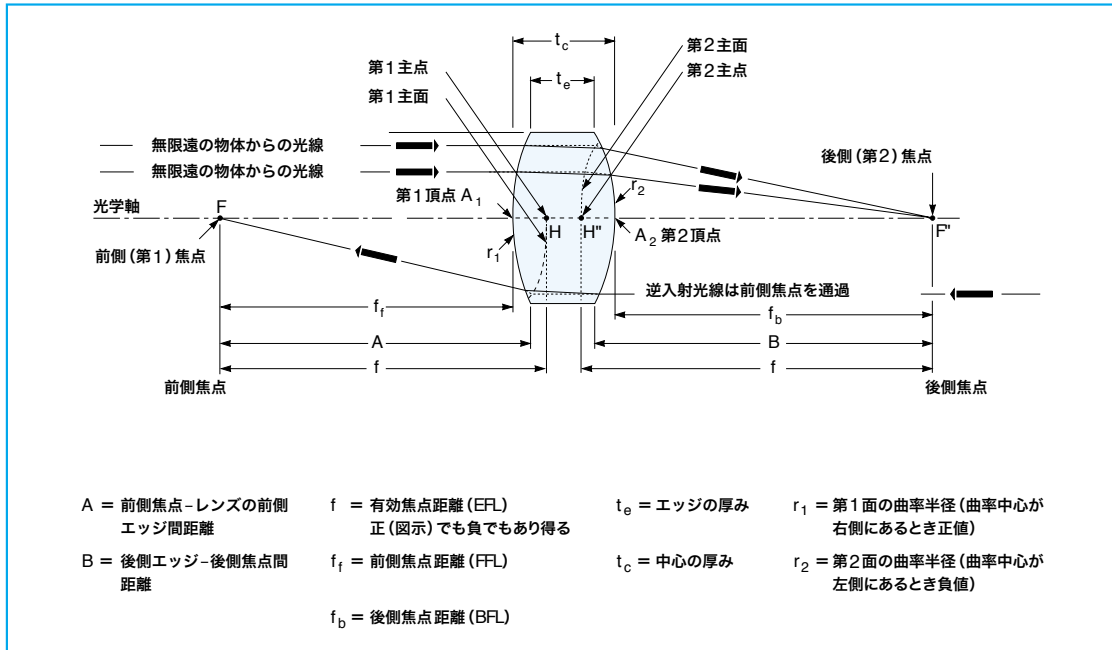


図 2.6: 厚肉レンズの焦点距離と焦点

画角

画角とは光学系から物体を見込む角度のことである。画角内に収まる範囲がその光学系の視野となる。また、本実験で用いている「半画角」とは画角の半分の値である。

F 値

F 値 (F ナンバー) とは光学系によって結ばれた像の明るさを表す数値である。F 値が小さいほど明るい光学系である。光学系の有効焦点距離と、レンズの有効径 D により、以下の式で定義される。

$$F \equiv \frac{f}{D} \quad (2.1)$$

実効 F 値

物体が有限距離にある場合、像の明るさは無限遠の物体が作る像より暗くなる。物体が無限遠にある場合、像は光学系の後側焦点にできるが、物体が有限距離にある場合は光学系から結像面までの距離が伸びる。そこで、実効 F 値 Fe を以下の式で定義し、有限距離の物体が作る像の明るさを実効 F 値で表す。

$$Fe \equiv (1 + M)F \quad (2.2)$$

ここで、F は F 値、M は倍率である。

位置分解能

一般に、レンズ集光した光はガウス分布の光の強度分布を持っている。光学系における位置分解能は、集光した光の分布の半値全幅で定義される。

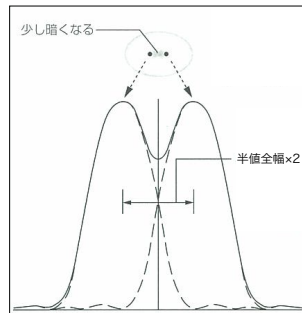


図 2.7: 集光した光の分布と位置分解能

被写界深度 (DOF)

光学系において物体面をピントが合う位置から $\pm\Delta Z$ 前後しても、像のボケが許容される範囲がある。その範囲 $\pm\Delta Z$ を被写界深度という。許容される像のボケは使用目的により異なる。

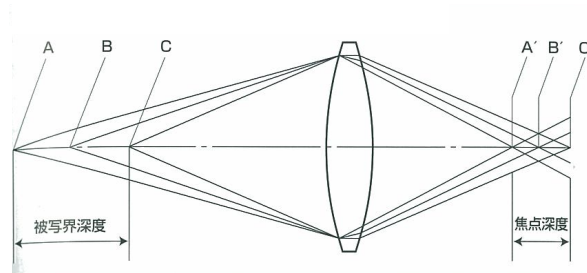


図 2.8: 被写界深度

2.4.2 収差

実際の光学系で結像する光線群は、近軸計算で求められる結像点からずれることがある。この理想結像点からのズレを収差という。光学系が設計される際に設定された理想結像の条件をできるだけ満たすように配慮されているが、理想結像の条件を完全に満たすことは一般に不可能で、実際には結像に収差を伴うことは避けられない。

光線が互いに異なる屈折率の媒質の境界面で屈折を受けたとき、入射角と屈折角の関係はスネルの法則により、 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ で表される。ここで θ_1 は入射角、 θ_2 は屈折角、 n_1 、 n_2 は媒質 1、2 それぞれの屈折率である。

次に、スネルの法則に含まれる \sin 関数をテイラー展開すると、

$$\sin \theta = \theta - \theta^3/3! + \theta^5/5! - \theta^7/7! + \theta^9/9! - \dots \quad (2.3)$$

となる。

$\sin \theta = \theta$ と近似したときの結像点を近軸近似に基づく理想的な結像点と呼ぶ。そして、 θ の 3 次以上の項を取差といい、特に 3 次の項はザイデル取差と呼ばれる。

上記ザイデル 5 取差について名称と、それぞれの取差が入射瞳 R 、半画角 ω とどのような関係にあるのかをまとめたのが表 2.4 である。

取差名	R 、 ω との関係
球面取差	R^3 に比例
コマ取差	R^2 、 ω に比例
非点取差	R 、 ω^2 に比例
像面湾曲	R 、 ω^2 に比例
歪曲取差	ω^3 に比例

表 2.4: ザイデル 5 取差と入射瞳、半画角の関係

2.4.3 ザイデル 5 取差と色取差

ザイデル取差は上記の 5 つの取差に分類される。表 2.4 から、高光収集率、高画角化を目指して光学設計するためにはすべての取差を考慮しなければならず、設計は困難を極める。通常光学系設計においては、取差を補正するために複数のレンズやミラーを組み合わせることになるが、このことが光学設計を複雑化させている。(さらに、実際の光学系の設置の際は光学系を構成している個々の面の曲率中心が共通の基準軸上に並ばないで、わずかに横にずれる。このような誤差を光学系の偏心という。偏心が存在する光学系は厳密には回転対象ではなくなるので、ザイデル 5 取差とは異なる性質の取差が新たに発生し、結像性能を低下させることになる。)

以下にザイデル 5 取差と色取差の特徴を示す。

球面取差

光線がレンズに入射した位置によって、光路差が生じ、一点に集光しない。このような像のボケを球面取差という。軸上物点からでた入射光線が入射瞳平面を切る高さを R とし、その光線が像側で近軸像平面から光線方向に ΔX を横軸にとると図 2.9 のようになる。

コマ取差

軸上の物点と光線とを含む平面を光学系の子午切断面という。光軸が光学系の回転対称軸であることから、光学系はこの子午切断面の両側に対称である。そして、その軸外物点の結像に

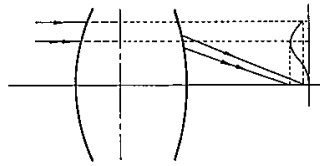


図 2.9: 球面収差

関係する光線束のこの切断面に平行な成分を子午的成分、垂直な方向の成分を球欠的成分という。

軸上物点の結像を考える場合に基準となる主光線は子午切断面上にあるので、主光線に対して光線群の球欠的成分は対称になるが、子午成分は一般に対称にならない。このような子午成分が対称にならないことにより、像がボケる現象をコマ収差という。

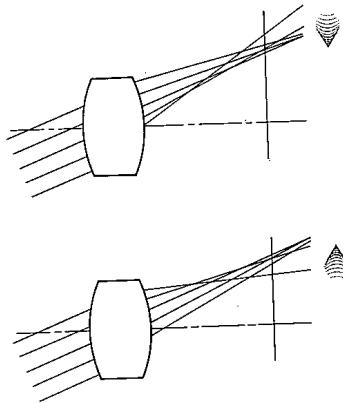


図 2.10: コマ収差

非点収差

レンズ中心から外れた位置に入射する光線は縦倍率と横倍率が異なる。それにより物点が完全な点として結像されずに球欠成分と子午成分とに分離して結像される現象を非点収差という。

像面湾曲

縦倍率と横倍率が異なることにより、球欠成分と子午成分によって形成される像面が近軸像面と一致せず、湾曲した曲面になる現象を像面湾曲という。

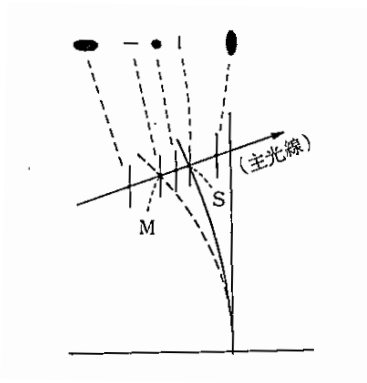


図 2.11: 非点収差と歪曲収差

歪曲収差

これまで紹介した収差は像のボケを表す収差であった。しかし、レンズに入射する光線の角度により、光線がボケずに集光しているのに像が歪曲する現象が起こる。この収差を歪曲収差と呼ぶ。歪曲収差は入射瞳半径 R には無関係である。

通常、歪曲を定量的に表すのに、像平面上の実際の像高 Y' が理想像高 \bar{Y}' に対する百分率の形で表したものが用いられる。

$$Dist(\%) = \frac{Y' - \bar{Y}'}{\bar{Y}'} \times 100 \quad (2.4)$$

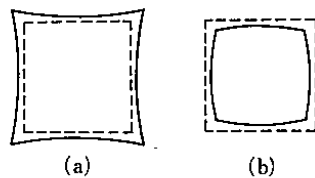


図 2.12: 歪曲収差

色収差

屈折率が波長によって異なるもので構成された光学系を光が通過すると、入射光線の波長により集光する点にズレが生じることがある。これを色収差と呼ぶ。

色収差には高次のものと低次のものがあり、最も低次の色収差は軸上色収差と倍率色収差の2種類ある。軸上色収差は波長の変化に伴って結像位置が光軸方向にずれる現象であり、それに対して倍率色収差は波長の変化により像の倍率が変わる現象をいう。

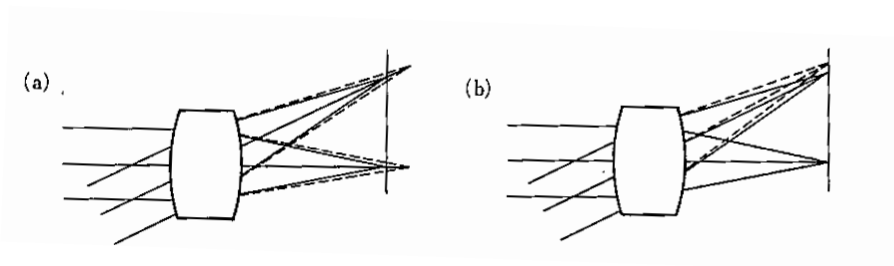


图 2.13: 色収差

第3章 検出器設計

前章でこれから設計するイメージング検出器が満たすべき光学的性能を求めた。

本章では、前章で求めた光学的要求値を踏まえ、イメージング検出器の設計を行った。イメージング検出器の設計には光学 CAD ソフトを用いた。

3.1 光線追跡シミュレーション

光学シミュレーションには Radiant ZEMAX 社の光学 CAD ソフト (ZEMAX) を用いた。以下に ZEMAX の光学系解析手法を示す。

3.1.1 スポットダイアグラム

ZEMAX では、入射瞳平面を多数の面積の等しい領域に分割し、その中心に入射する光線が像平面と交わる点をプロットしたものをスポットダイアグラムという。点が集中しているところが、強度の強いところとなる。

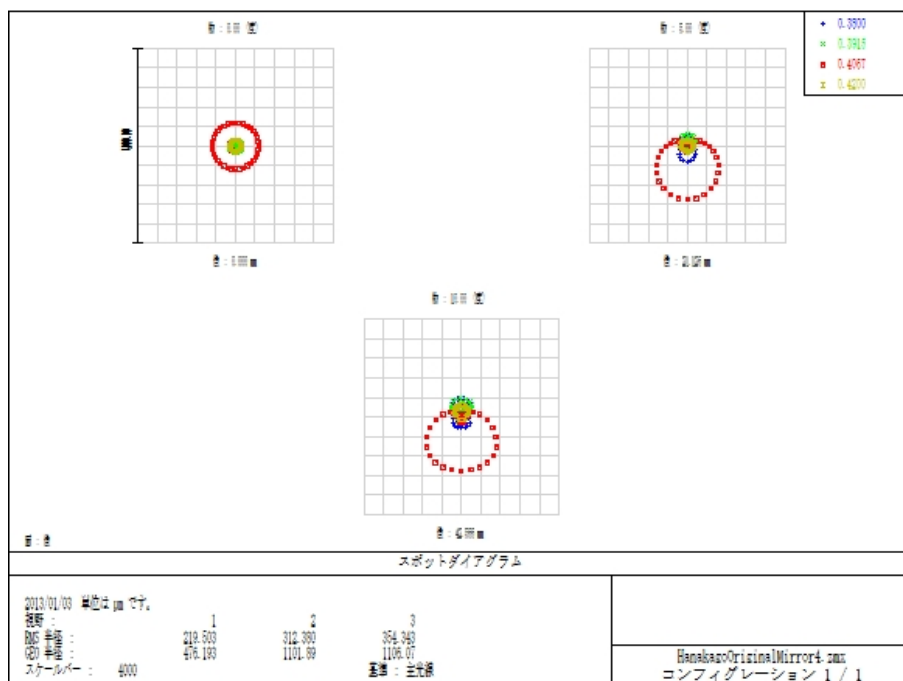


図 3.1: スポットダイアグラム

3.1.2 像の広がり

ZEMAX ではスポットダイアグラムの結果から、参照点 (例えば光量重心、主光線など) からの像の広がりを平均二乗根 (RMS) で評価する。ここでは参照点に光量重心を使用しているため、

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{\sum(r_i)^2}{n}} \quad (3.1)$$

となる。ただし r_i は参照点からそれぞれの結像点までの距離、 n は光線数である。

3.1.3 位置分解能

光学系における位置分解能は、集光された光の分布の半値全幅で定義されることは既に述べた。しかし、本研究で設計したミラー型光学系のような特殊な光学系で集光された光は、ガウス分布に従わない。従って、半値全幅が定義できないため、位置分解能を求めることができない。そこで、本研究では位置分解能を集光された光の RMS 半径で定義し評価した。よって、式 (3.1) より、位置分解能 = R_{rms} である。

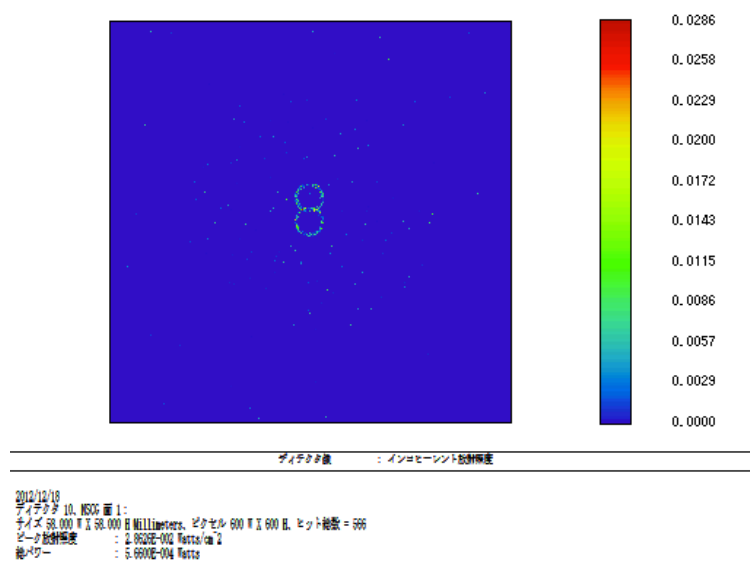


図 3.2: 特殊な光学系で集光された点光源の像：本研究で設計したミラー検出器で 50mm 離れた 2 つの点光源を集光した像。集光された光はガウス分布に従わず、特殊な分布をする。2 つの点光源は検出器から 3000mm 離れたところにある。

3.2 光学設計

イベントの発光点広がりから、光学系への要請を見積もった。しかし、より現実的な光学系を設計するには光収集率や像面の大きさなども考慮しなければならない。そこで、光学設計に向けて考慮しなければならない点を以下に挙げた。

要求	パラメータ
位置分解能 (mm)	50
光子数	より多く
半画角 (°)	10
被写界深度 (mm)	3016

表 3.1: 光学的要求

^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ を検出するために算出した光学的要求値を踏まえて、光学系を設計し、ZEMAXで評価した。光学系は屈折型と反射型2つの光学系の可能性を探った。

以下、設計したレンズ、ミラーを紹介する。(詳細なパラメータは付録を参照のこと)

3.2.1 オリジナルレンズ1

KamLAND 検出器の導入を目的として、前章で求めた要求値を満たすような屈折型のオリジナルのレンズを設計した。

オリジナルレンズ1の光学性能	
焦点距離 (mm)	250
F 値	3.57
半画角 (°)	15
受光率	96.8

表 3.2: オリジナルレンズ1の焦点距離、F 値とミラー最大半径

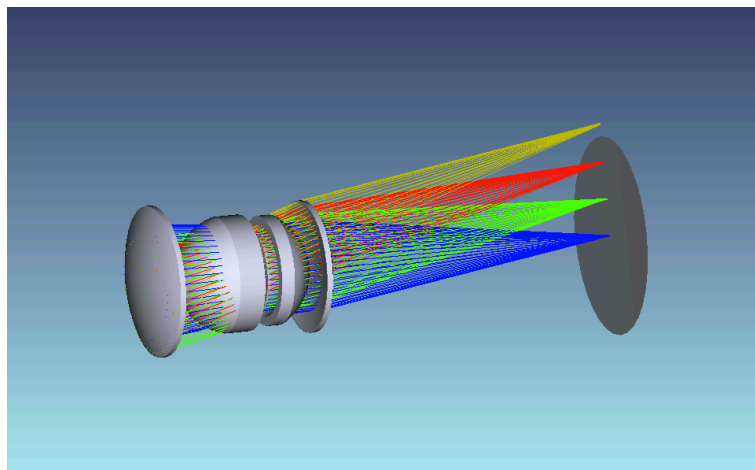


図 3.3: オリジナルレンズ1のレイアウト

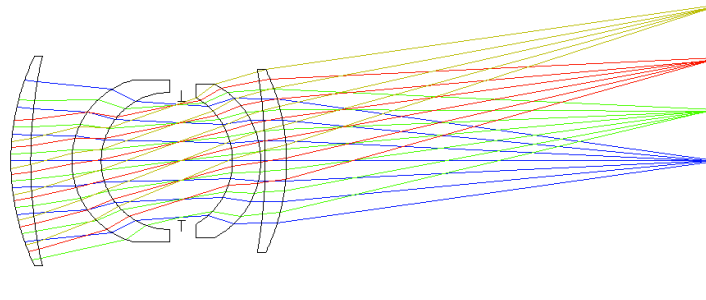


図 3.4: オリジナルレンズ 1 のレイアウト

3.2.2 オリジナルレンズ 2

本レンズの特徴はレンズ 6 枚一群とし、受光率の向上に重点を置き設計した。オリジナルレンズ 1 よりレンズ枚数が多いがケラレを少なくすることで、受光率の向上を達成することができた。

しかしながら、本光学系のようなレンズ光学系を KamLAND 検出器に導入するには大きな問題がある。液体シンチレータ中ではレンズの屈折率が空気中と異なる。そのため、シンチレータの屈折率に合わせて、レンズの材質をより密度の大きなガラスに変更しなければならないが、相当するガラスの材質は存在しない。また、本レンズをアクリル容器に入れ KamLAND に導入することも考えられるが、液体シンチレータ層から空気層へ光が伝播する際に大きな収差を生んでしまう。

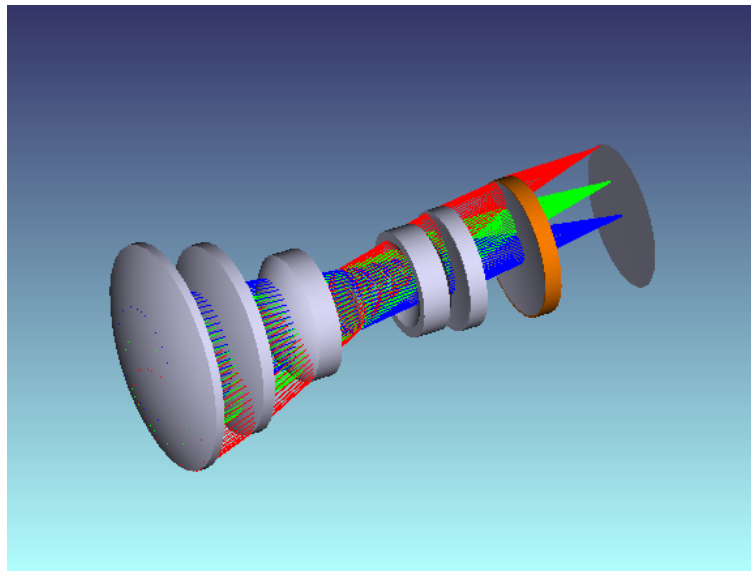


図 3.5: オリジナルレンズ 2 のレイアウト

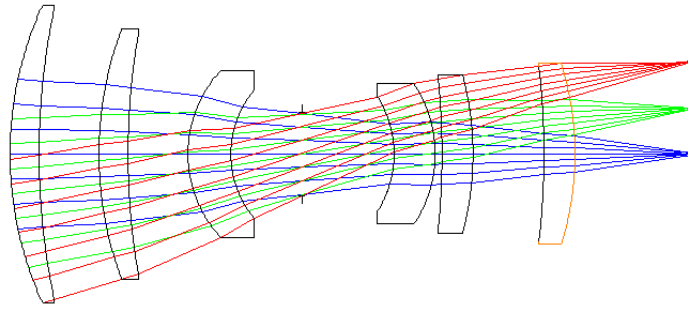


図 3.6: オリジナルレンズ 2 のレイアウト

オリジナルレンズ 2 の光学性能	
焦点距離 (mm)	250
F 値	3.48
半画角 (°)	10
受光率	100%

表 3.3: オリジナルレンズ 2 の焦点距離、F 値とミラー最大半径

3.2.3 オリジナルミラー1

上記のレンズ光学系の問題が生じず、液体シンチレータ中でも屈折率が変わらないミラー光学系をに設計し、レンズ同様にその性能をシミュレーションで評価した (図 3.10)。

通常、ミラー光学系は画角が小さいのが難点で、大きなものでもせいぜい半画角 5° 程度である。そのため、ミラーに加えレンズを使用するなどして画角を大きくしているものなどがあるが、KamLAND 内部液体シンチレータの屈折を考えるとそれは本研究に適さない。そこで、ミラーのみを使い、新たな光学系を設計した。

本光学系の特徴は光収集率の一部を削ることで、レンズを使用せずに大きな画角を達成しているのが特徴である。また収差も非常に小さい。

ミラーの反射率はシグマ光機株式会社製の TFA/TFAN/OPBA/OPSQA に使われている Al のみ蒸着のデータを想定している (図 3.9)。

オリジナルミラー1の光学性能	
焦点距離 (mm)	250
F 値	1.10
半画角 ($^\circ$)	5
受光率	18.0

表 3.4: オリジナルミラー1の焦点距離、F 値とミラー最大半径

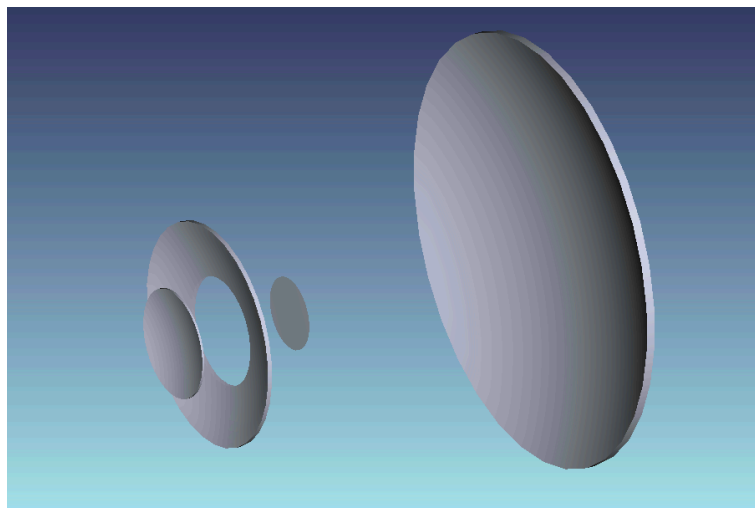


図 3.7: オリジナルミラー1のレイアウト

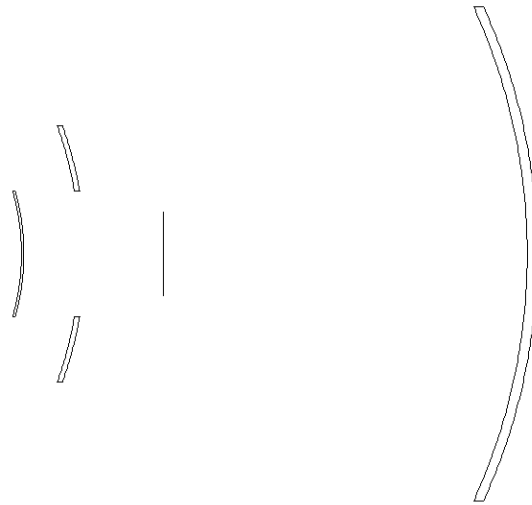


図 3.8: オリジナルミラー 1 のレイアウト

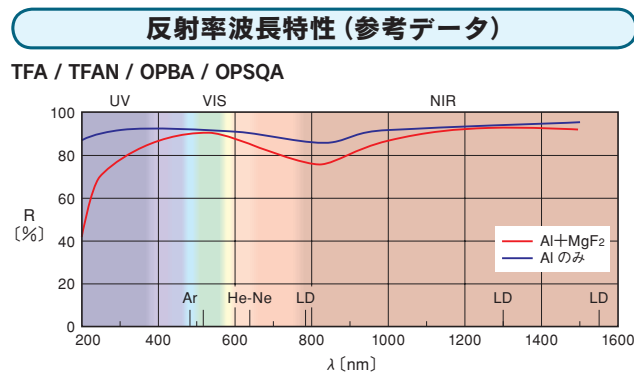


図 3.9: オリジナルミラー 1 の反射率 [3]

3.2.4 オリジナルミラー 2

高光収集率を達成するために、オリジナルミラー 1 をさらに改良した。

本光学系 (図 3.10) は、オリジナルミラー 1 で光路上にあったディテクタ位置を第一ミラーの前面に置くことで、ディテクタが光を遮り光収集率を悪くしてしまうことを防いでいる。また、ミラー光学系のみで設計しているため液体シンチレータ中でも扱いやすいのが大きなメリットである。

オリジナルミラー 1 同様シグマ光機 TFA/TFAN/OPBA/OPSQA [3] のコーティングを想定している。

オリジナルミラー 2 の光学性能	
焦点距離 (mm)	250
F 値	0.80
半画角 (°)	10
受光率	24.7

表 3.5: オリジナルミラー 2 の焦点距離、F 値とミラー最大半径

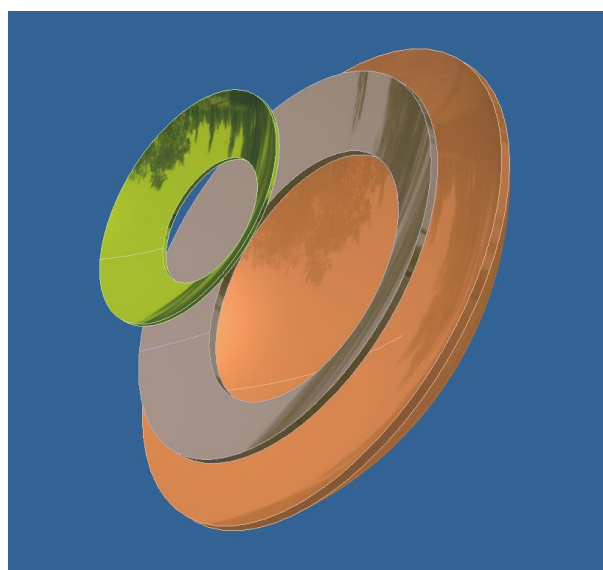


図 3.10: オリジナルミラー 2 のレイアウト

3.2.5 光学系の選定

上記で紹介した 5 つの光学系のうち液体シンチレータへの耐性、光学的性能からオリジナルミラー 2 を選定した。

また、オリジナルミラー 2 の被写界深度は以下の図 3.11 のようになった。図 3.11 のスポット半径が許容錯乱円より小さい領域が被写界深度といえ、オリジナルミラー 2 は KamLAND バルーン全体を観測できる被写界深度をもっている。

3.3 KamLAND 検出器への導入

^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 除去のための光学的要求を満たす光学系の設計に成功した。しかし、KamLAND 内部へ導入するための構造上の制限を考慮し修正を加えなければならない。

例えば、光学系によるイメージング検出器の光収集率は、PMT のそれに対して非常に小さいため、多数の光学イメージング検出器を配置することで光検出率を上げる必要がある。しかし、実際に KamLAND ヘミラー検出器を導入するためには、KamLAND 内部の構造により

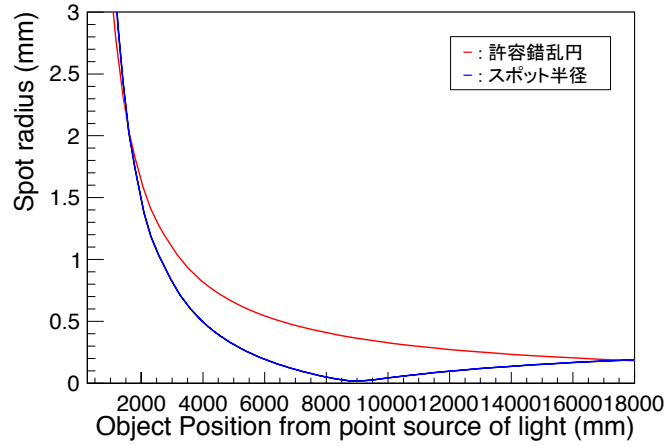


図 3.11: オリジナルミラー 2 の Spot 半径

配置場所や個数が制限される。よって、以下で KamLAND に設置した際に十分な光検出率を実現するために必要なミラー検出器の配置場所や数を見積もる。

3.3.1 KamLAND 検出器の構造

KamLAND 検出器は大きく分けて以下の構造から成る。

液体シンチレータ

KamLAND 液体シンチレータの組成を以下の表 (3.6) に示す。液体シンチレータの主成分であるドデカン¹⁾は直鎖構造のパラフィンオイルである。パラフィンオイルは C_nH_{2n} の組成を持つ有機物で、H/C 比が大きくターゲット陽子数が多いためニュートリノ逆ベータ崩壊の観測に適している。また、シンチレーション光の波長領域に対して透過率が高いため、シンチレーション光検出に有利である。

KamLAND 液体シンチレータの組成	
ドデカン	80%
プソイドクメン	20%
PPO	1.36%
密度	0.77721g/cm ³

表 3.6: KamLAND 液体シンチレータの組成

バルーン

液体シンチレータを収める球形バルーンは厚さ約 $135\mu\text{m}$ の光透過性の高いフィルムでできている。バルーンの形状は液体シンチレータそうに内圧を加えることにより保たれている。

^{136}Xe 含有液体シンチレータ

KamLAND-Zen 実験用に使用されている ^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成を以下の表 (3.7) に示す。

^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成	
デカン	82%
プソイドクメン	18%
PPO	2.7%
^{136}Xe 溶解度	3.0wt%
密度	$0.77752\text{g}/\text{cm}^3$

表 3.7: KamLAND-Zen 用 ^{136}Xe 含有液体シンチレータの組成

ミニバルーン

上記の ^{136}Xe 含有液体シンチレータを KamLAND 内に沈めるために、KamLAND 液体シンチレータ層の内部に半径 1.58m 、膜厚 $25\mu\text{m}$ のナイロンフィルムで作製されたミニバルーンがインストールされている。

3.3.2 導入に向けたカスタマイズ

イメージング検出器を KamLAND に導入するためには、KamLAND の形状や検出できるフォトン数などの制限より全セクションで設計したイメージング検出器の光学系部分をカスタマイズしなければならない。

見積もらなければならない項目は、

1. KamLAND に導入するために必要なイメージング検出器の個数
2. ミニバルーンから検出器までの距離

である。

ミラー検出器の個数と光収集率

光学性能と耐液体シンチレータ性からオリジナルミラー 2 を選んだ。しかし、KamLAND 内で微弱なシンチレーション光を観測するためには、オリジナルミラー 2 を用いた検出器一個では検出できる光子数が十分でなく、複数個のミラー検出器を設置して多くの光子を検出できるようにしなければならない。

KamLAND へ検出器を設置するにあたり、何個の検出器を設置する必要があるのかを見積もるために、次のようなシミュレーションを行った。

1. ミラー検出器を KamLAND 液体シンチレータ内に配置する。
2. ミニバルーン内でランダムな位置に 1000000 回光子を発生させ、ミラー検出器一個のディテクタ部分に届く光子数をカウントする。ただしディテクタの量子効率 η は 100%であるとしている。
3. カウントされた光子数/1000000 をミラー光学系の光収集率とする。

図 3.12 より、KamLAND のチムニー直下にミラー検出器を置くことを考慮すると、ミニバルーン最下部 (10080 mm に相当) で 0.005% の光量の検出効率がある。

^{10}C 、 $0\nu\beta\beta$ を検出するためには、最低でも 2.6MeV のシンチレーション光を検出できる必要がある。図 3.12 より、50 個のミラー検出器があればミニバルーン直下で発生した 2.6MeV シンチレーション光はディテクタ面まで届く。しかし、この結果はディテクタの量子効率を考慮していない。ディテクタの量子効率で検出できる光子数がさらに減ることを考えると、ミラー検出器は KamLAND に設置できる限り多く設置した方が良い (Image Intensifier を利用すると仮定すると、KamLAND 液体シンチレータの波長領域における量子効率は 0.34% 程度となる)。

結局、KamLAND チムニーのサイズによる制約により設置できるミラー検出器の数は 90 個であるため最大数の数を設置することを想定することにした。

3.3.3 ディテクタ

上記まででイメージング検出器の結像系への要求を見積もった。それに加え検出器部分の選定も行う必要がある。

図 3.12 から、本検出器一個あたりが 2.6MeV イベントのシンチレーション光のうち受光できる光子数は数光子程度である。そのため、1 光子を検出できるディテクタが必要である。代表的なものとして、イメージインテンシファイア [8] や、マルチアノード PMT [8] などが挙げられる。

近年の、イメージセンサの発展は目覚ましく冷却 CCD や MPPC など 1 光子を検出できるセンサの開発が進められており、今後、シングルフォトン検出器として選択肢が増えることが期待される。そこで、本研究では、今後の検出器の選定のため量子効率 100% の理想的なシングルフォトン検出器を仮想して研究を進めていくこととする。

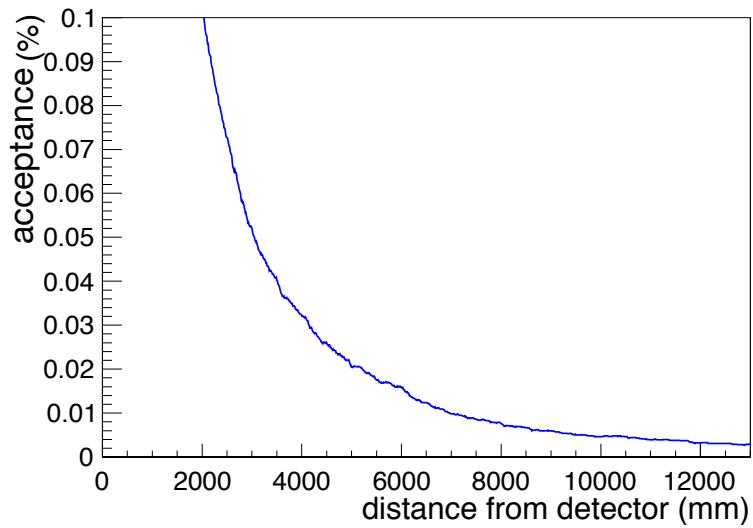
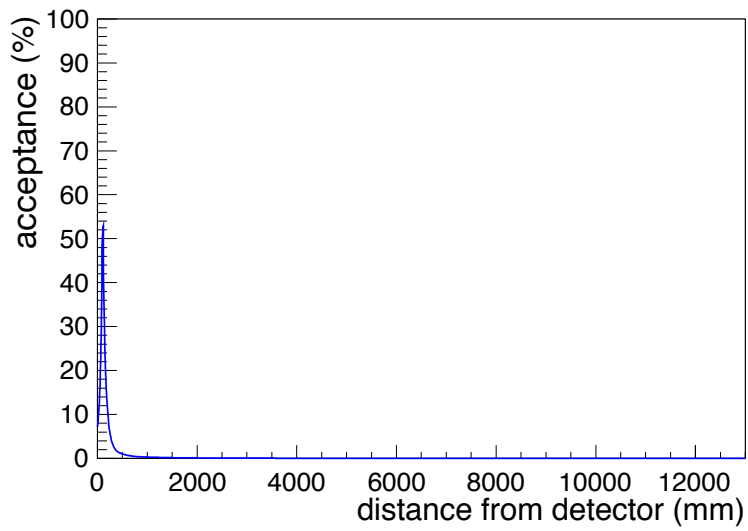


図 3.12: ミラー検出器一個あたりの受光率：上図がイメージング検出器の受光率を示した図、下図がその図を拡大した図である。両図ともディテクタの量子効率 η は100%としている。



図 3.13: イメージインテンシファイアと MPPC

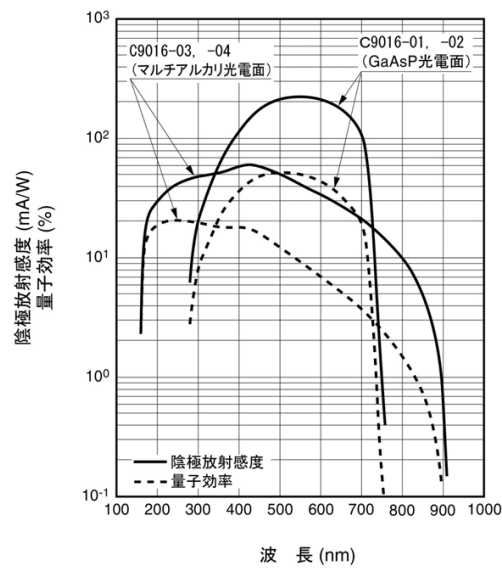


図 3.14: イメージインテンシファイア C9016 の量子効率

第4章 シミュレーションによる性能評価

本章では光線追跡シミュレーションにより前章で設計したオリジナルミラー2を KamLAND に設置した際の性能を見積もる。本シミュレーションの目的は以下の2点である。

1. 迷光の影響の見積もり
2. KamLAND 内部でのイメージング検出器の性能評価

4.1 迷光とは

迷光とは、ミラー(レンズ)の縁で発生する散乱光や、想定外の光路を通る光線により理想的な像とは異なる位置に光が到達しノイズとなる現象である。図4.1のように迷光が原因で理想的な像(画像中心)以外の場所に光が到達している。ミラー(レンズ)の使用環境により異なる迷光が現れるため光学設計の段階では見積もることができない。そのため、実際の使用環境を想定したシミュレーションを行い見積もる必要がある。

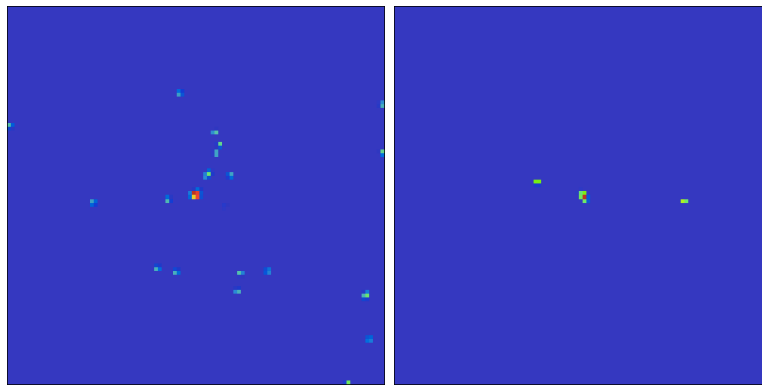


図 4.1: 9000 mm 離れた位置からミニバルーン中心が画像の中心となるように撮影した画像 (左図: ミニバルーン中心にある点光源から 100 万光線を発生させた場合、右図: ミニバルーン中心にある点光源から 10 万光線を発生させた場合)

4.2 シミュレーションのセッティング

KamLAND チムニー直下(ミニバルーン中心から 9036 mm)に 90 個のミラー検出器を配置した。ただし、すべてのミラー検出器はミニバルーン中心の方向を向いており、ミニバルーン中心からの距離は 9036 mm である。

以下に ZEMAX で行った光線追跡シミュレーションの条件を示す。

使用したミラー光学系 イメージング検出器の個数 各検出器からミニバルーン中心までの距離 ミラーの反射率 デテクタの量子効率 バルーン内液体シンチレータ ミニバルーン内液体シンチレータ ミニバルーンフィルムの効果 イベント発生点	f250 90 個 9036 mm シグマ光機製 Al 蒸着のデータを用いた (図 3.9) 100% 図 4.2 の透過率、屈折率は 1.441 を使用 KamLAND LS 同様の値を使用 無視できるとした ミニバルーン内でランダム
---	--

表 4.1: ZEMAX シミュレーションの設定

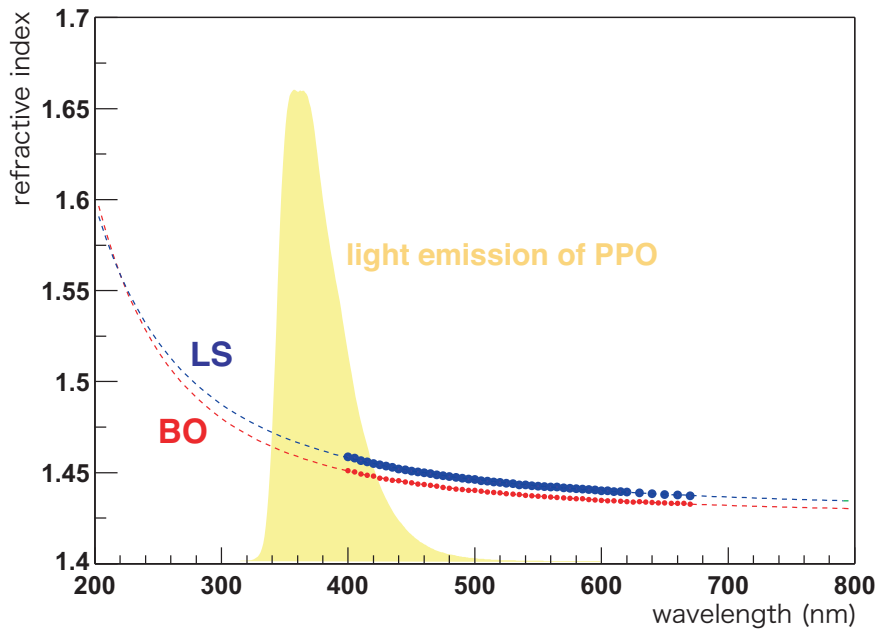


図 4.2: KamLAND 液体シンチレータとバッファオイルの屈折率

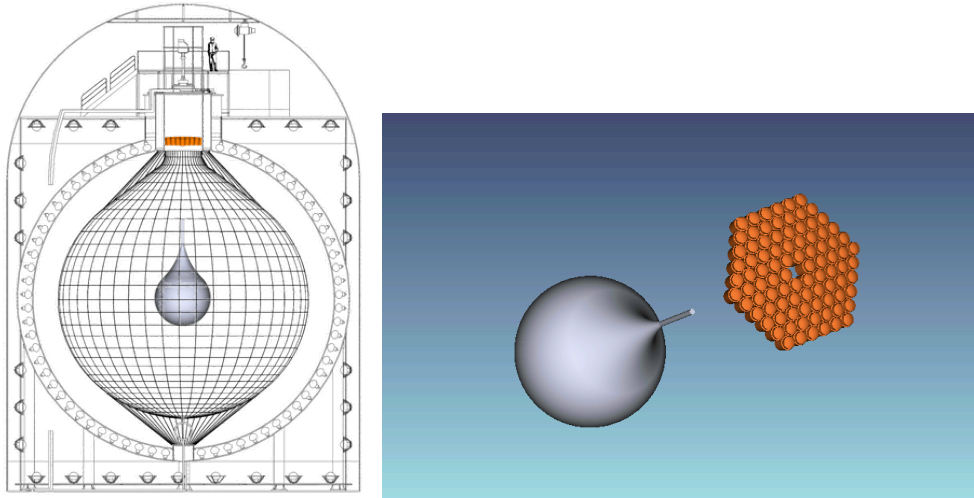


図 4.3: ミラー光学系の配置

4.2.1 MC シミュレーションの流れ

上記の設定に沿って仮想検出器を設定し、MC シミュレーションにより性能評価を行う。粒子追跡、シンチレーション光の発生については GEANT4、発生した光子の光線追跡には ZEMAX を使用した。

以下に、本シミュレーションの流れを示す。

1. GEANT4 によりミニバルーン内で ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{136}Xe 由来の $0\nu\beta\beta$ が作り出すシンチレーション光をランダムな位置で 10000 回発生させた。その際、光子の位置、方向ベクトルを記録し、それぞれの粒子の光子のリストを作った。
2. ZEMAX により、光子のリストから全光子の軌跡を追跡し、90 個のミラー検出器で得られる画像を 612×612 ピクセルで再現した。

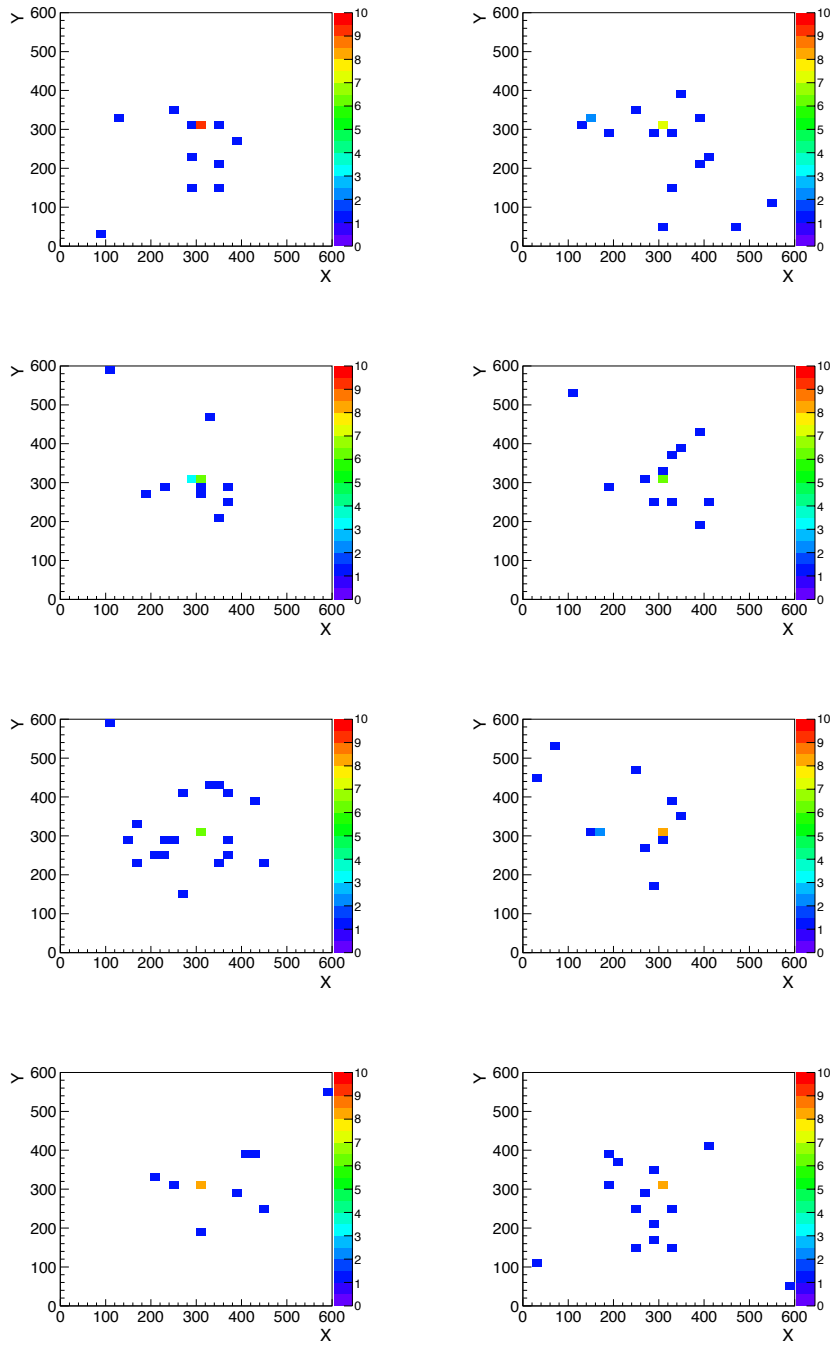


図 4.4: $0\nu\beta\beta$ イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例

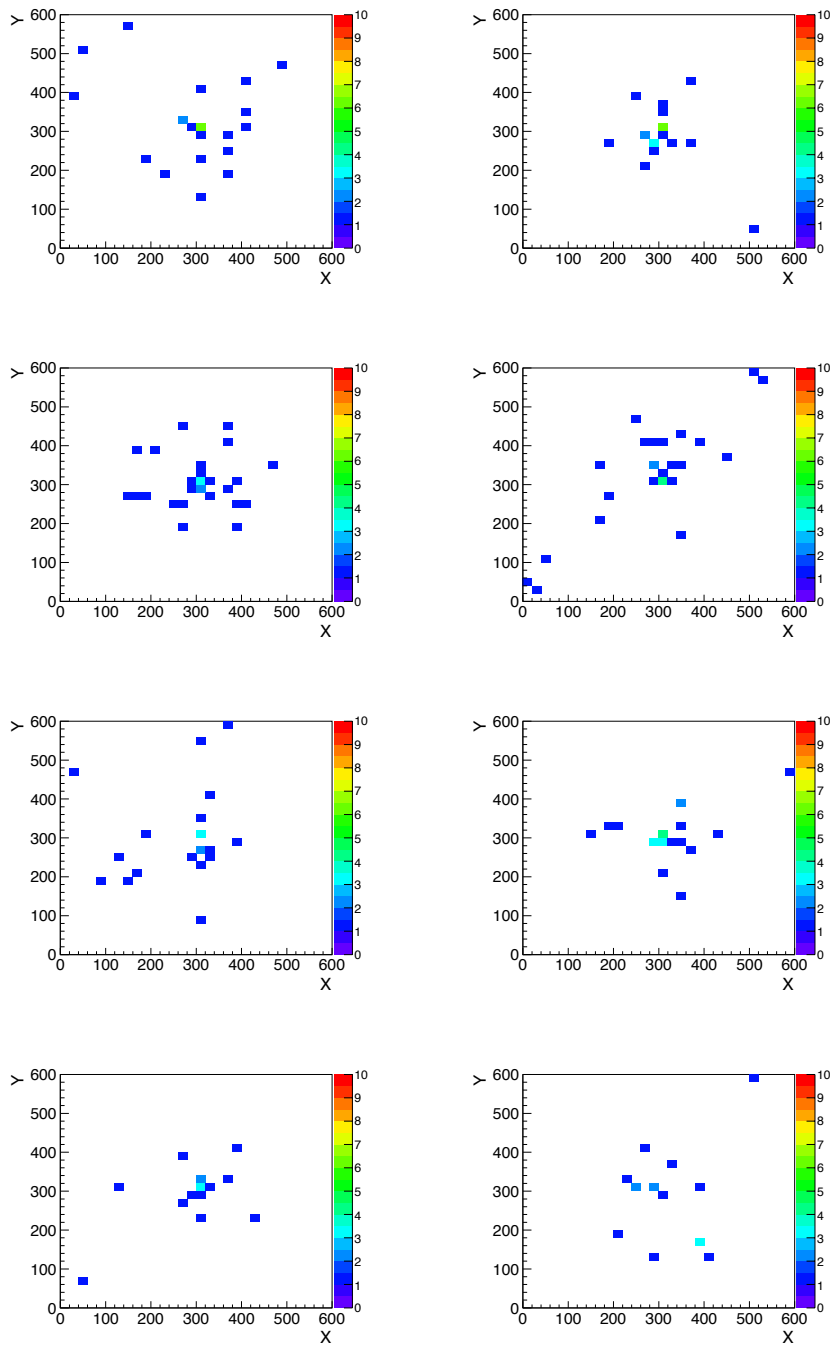


図 4.5: ^{10}C イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例

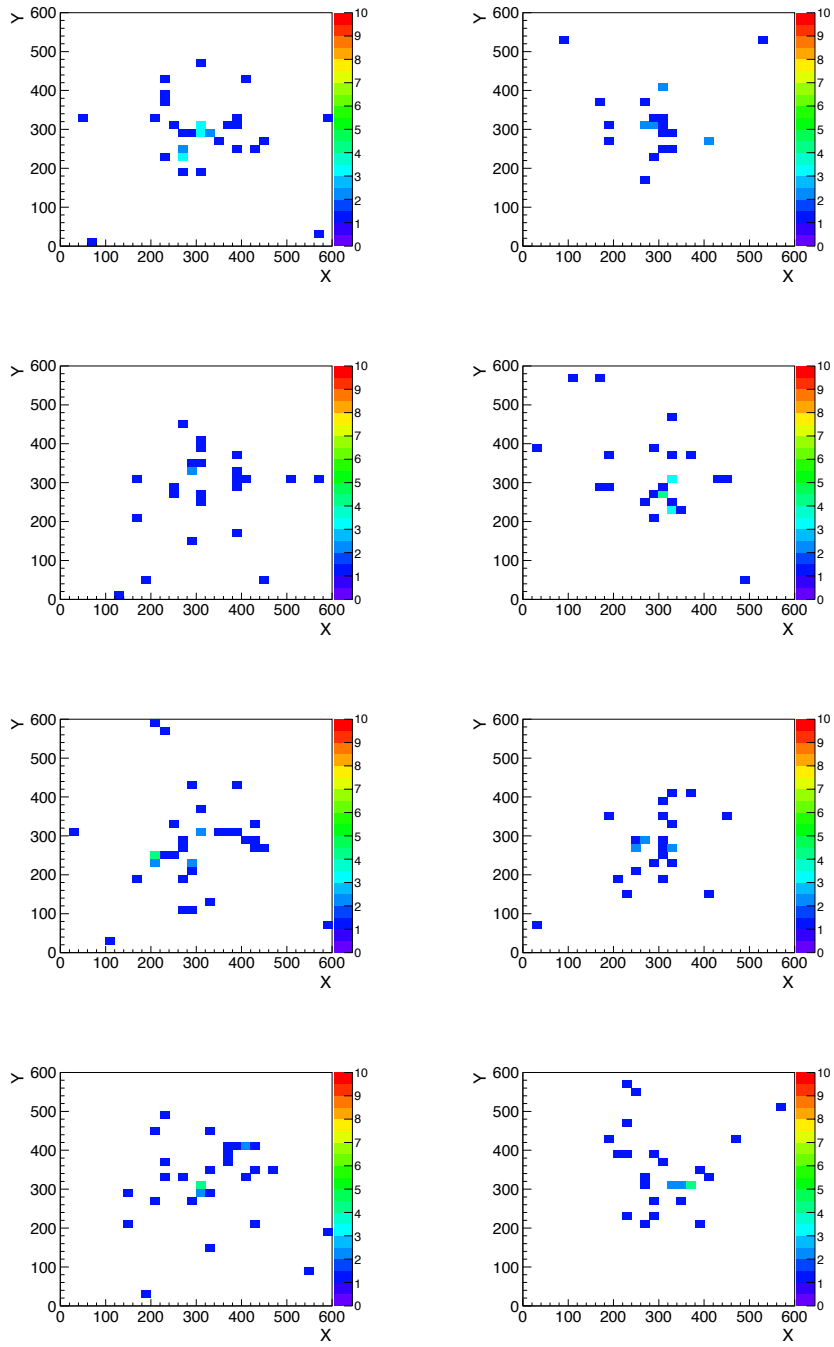


図 4.6: ^{110m}Ag イベント: 90 枚の画像の重ね合わせ例

4.3 画像から光子発生位置への再構成

各ミラー検出器で得られた画像から、実際の光子発生位置への変換は特殊なアルゴリズムを用いる。各ミラー検出器の画像は2次元情報であるため、それだけでは位置を再構成できない。

そこで、KamLANDに既に設置されているPMTからの情報を使うことにする。PMTにより、KamLANDでは $150/\sqrt{E}$ (MeV) mmのVertex分解能を実現している。よって、2.6 MeVのイベント発生点が最大で $150/\sqrt{2.6}$ mmずれると仮定して、イベント発生点を93.03 mmランダムにずらして位置再構成を行った。

倍率の基準はミニバルーン中心から9000 mmの位置に検出器を置いている際の倍率である。

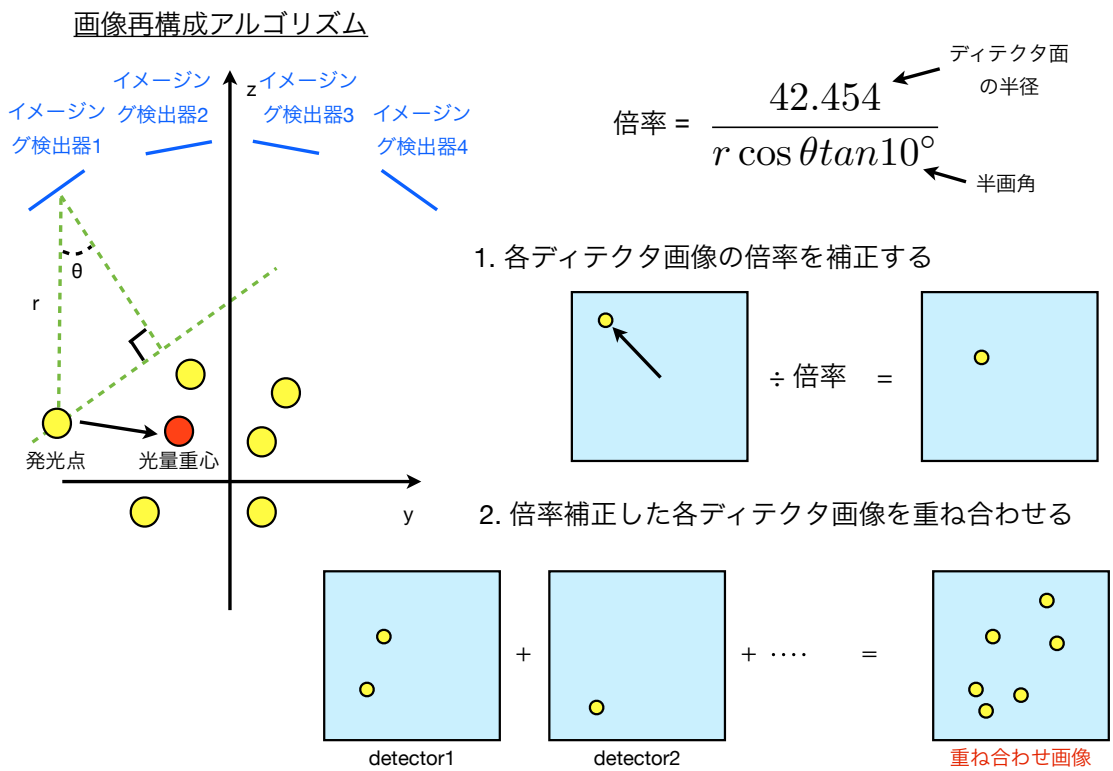


図 4.7: 画像再構成アルゴリズム

4.4 画像解析による評価

4.4.1 RMS による評価

2次元再構成後の画像データから ^{10}C と ^{110m}Ag 、 $0\nu\beta\beta$ のRMS半径広がりの評価を行い比較した。

4.4.2 光の集中度による評価

前セクションで2次元再構成した画像では ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ は一様に光子が分布しているのに対し、 $0\nu\beta\beta$ はある一点に光が集中しているような傾向が見られた。そこで、光の集中度合いを評価するために、以下のような操作を行った。

1. 612×612 ピクセルの画像を 100 分割して bin に詰める。
2. 最大 bin の中心位置を求める。
3. (中心位置から半径 5pixel(25mm に相当) 以内にある光子数)/(全光子数) を集中度とした。

上記のような操作を行い、画像の光子の密集具合を評価した。5pixel 半径で光子を探索したのは 5pixel が $0\nu\beta\beta$ の発光点広がり 50mm に相当しているためである。

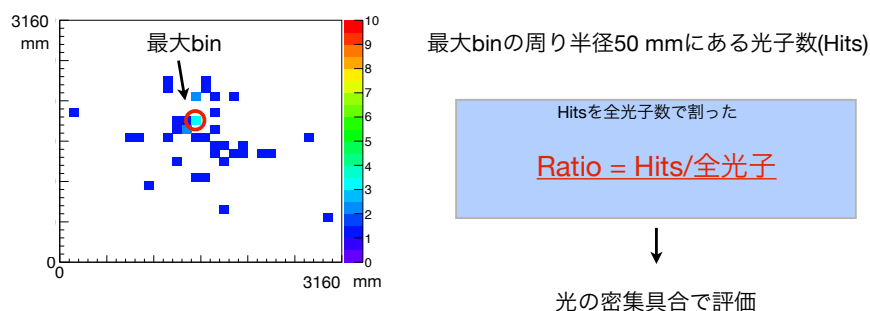


図 4.8: 集中度の計算手法

4.5 結果と考察

まず、RMS による発光点広がりの評価の結果を示す。図 4.9～4.10 がその結果得られた RMS 広がり分布である。

RMS による発光点広がり評価では $0\nu\beta\beta$ から ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ に有意な差は見られなかった。KamLAND チムニーにオリジナルミラー 2 を配置した環境では迷光の影響が大きく、真の RMS 広がりかわからなくなることが原因であると考えられる。

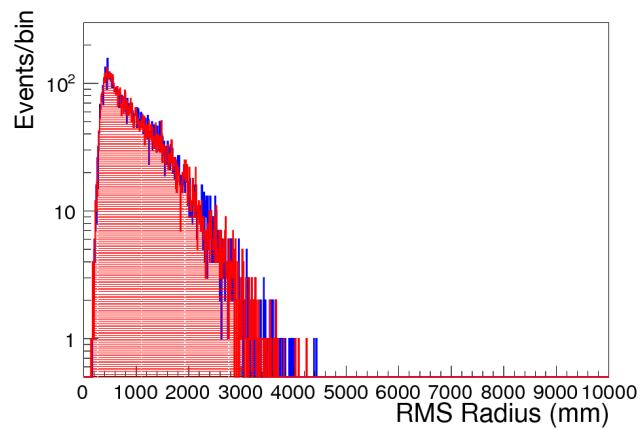


図 4.9: ^{10}C と $0\nu\beta\beta$ の RMS 半径の比較 (赤: $0\nu\beta\beta$ 、青: ^{10}C)

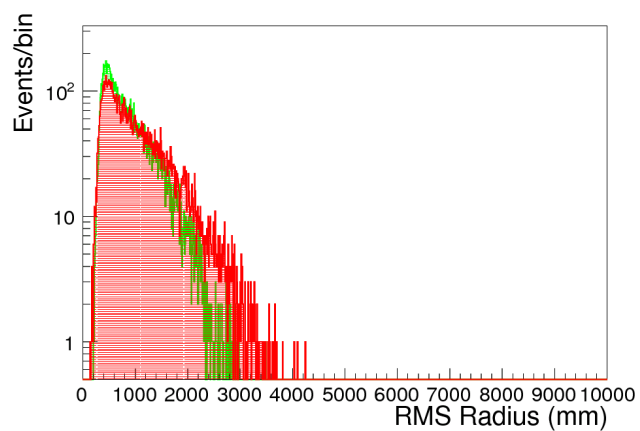


図 4.10: ^{110m}Ag と $0\nu\beta\beta$ の RMS 半径の比較 (赤: $0\nu\beta\beta$ 、緑: ^{110m}Ag)

一方、光の集中度による画像の評価は図 4.11 のようになった。図 4.11 から求めたバックグラウンド除去率は、 $0\nu\beta\beta$ 誤除去率 10% に対して ^{10}C 除去率 16%、 ^{110m}Ag 除去率 48.5% であった。迷光の影響が大きな環境下でバックグラウンドを分離できたのは 1 つの成果である。

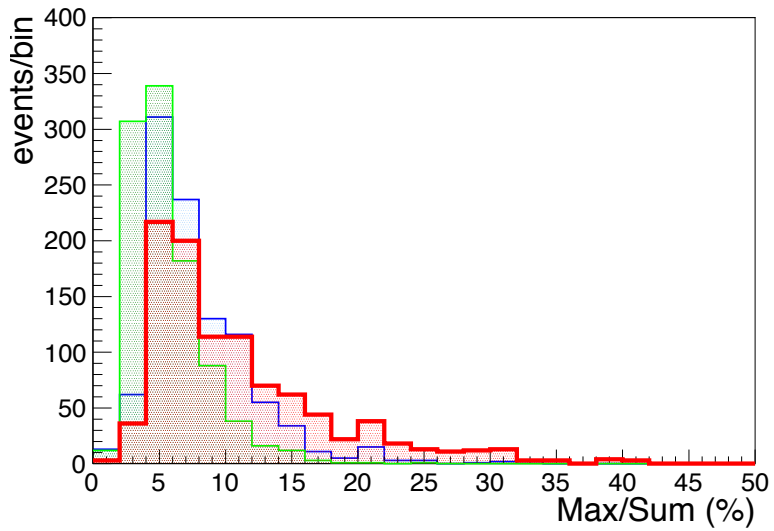


図 4.11: 集中度のヒストグラム (赤: $0\nu\beta\beta$ 、青: ^{10}C 、緑: ^{110m}Ag)

4.6 考察

実際に KamLAND チムニーにオリジナルミラー 2 を設置することを想定して光線追跡シミュレーションを行ったが、RMS 広がりの評価では迷光が原因で第 2 章で期待した結果は得られなかった。しかし、画像解析手法の考案により、 $0\nu\beta\beta$ と ^{10}C 、 ^{110m}Ag をある程度分離することができた。このような画像解析手法をさらに改良することにより、迷光の影響下でも高い除去率を達成できる可能性がある。また、 $0\nu\beta\beta$ と ^{10}C 、 ^{110m}Ag それぞれの画像に特徴的なパターンが見られることから、フーリエ変換 (もしくはその改良) も有効である可能性が高い。

第5章 まとめと課題

KamLAND でより小さなニュートリノ質量を探索するためには、粒子識別によりバックグラウンドを除去することが有効である。また、KamLAND-Zen 実験では現在 $0\nu\beta\beta$ イベントに対するバックグラウンドである、 ^{10}C 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の除去が課題となっており、この問題に対しても粒子識別が有効であると考えられる。しかし、既存の KamLAND にインストールされている PMT では位置分解能の不足からそれは困難である。

本研究ではイベントの発光点広がり撮像し評価する手法によって粒子識別ができる可能性を示した。さらに、発光点広がり撮像する検出器として独自のミラーと光検出器を組み合わせたイメージング検出器を設計し、シミュレーションによりその性能を評価した。その結果 $0\nu\beta\beta$ 誤除去率 10% に対して ^{10}C 除去率 16%、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 除去率 48.5% になることがわかった。また、RMS 広がり評価よりも除去率が低下したのは迷光の影響であることがわかった。今後迷光対策が課題となるが、画像の空間相関を利用した画像解析手法の改善により除去率の改善が見込めることがわかった。 ^{10}C バックグラウンドと $0\nu\beta\beta$ のように、大きく異なるシンチレーション光の空間的広がりを利用したバックグラウンド除去の手法は、高位置分解能検出器を設置することで実現可能である。さらに、本研究で設計したミラー検出器を用いれば、シンチレーション光の空間的広がり大きな他のバックグラウンドも除去できる可能性がある。

しかし、実際に制作し KamLAND に設置するためにはいくつかの課題が残る。

1つは迷光対策である。画像解析により迷光の影響下でも粒子識別を行うことはできるが、限界がある。より高精度な粒子識別を行うにはハードウェア的に迷光を除去する必要がある。

またミラー光学系の工作精度も考慮しなくてはならない。本研究では理想的なミラー光学系を仮定してシミュレーションを行ったが、実際のミラー検出器ではミラーの形状の精度、アルミ蒸着精度、3枚のミラーの設置精度などの要因によるイベント検出精度の誤差が発生してくる。

ディテクタ部分の選定も課題である。本研究ではディテクタの量子効率を 100% としたが、実際はディテクタの性能によって検出率が下がる可能性もある。本ミラー検出器一個あたりが検出できる光子数は非常に少ないためディテクタが 1 光子を検出できるものである必要がある。イメージインテンシファイアが有力な候補として挙げられるが、1 台あたりの単価が高額であり、多数のミラー検出器を設置することを考えると、より少額かつ 1 光子を検出できるディテクタを探した方がよい。

さらに、KamLAND へ設置する際の耐液容器の設計なども今後問題となってくるであろう。

しかしながら、本研究により KamLAND におけるバックグラウンドレス $0\nu\beta\beta$ 崩壊検出実現への可能性が見出せた。画像解析手法、位置再構成アルゴリズムの改善や、ハードウェア部分の改善によりさらに検出率が上がる可能性がある。PMT では実現できない高位置分解能を KamLAND のような大型検出器において実現し、反電子ニュートリノ方向検出への応用も考えられる。

これから、イメージング検出器の実際の導入に向けより現実的な検出器の開発や解析アルゴリズムの向上に取り組んでいく。

付録A 反電子ニュートリノ方向測定の可能性

高位置分解能検出器の開発は、素粒子実験におけるバックグラウンドの除去の他に反ニュートリノの方向検出という目的がある。以下でその可能性について考察する。

A.1 反電子ニュートリノの方向検出

SK(Super Kamiokande) や SNO 実験のような、水 (SNO は重水) をターゲットとしてチェレンコフ光を発生させてニュートリノを観測するタイプの検出器では、ニュートリノの飛来方向を計測することができるが、KamLAND のような液体シンチレーターを用いたニュートリノ検出器では、反電子ニュートリノが飛来したかどうかという情報が高感度で得られる代わりに、どの方向から来たのかという情報は失われてしまっている。よって、それがどこから飛来したものなのかということを知る術がない。ここでは、KamLAND のような液体シンチレーター型の検出器でニュートリノの方向測定をする意義と、現在研究されている方向測定の方法やその原理について論ずる。

A.1.1 方向検出の原理

KamLAND のような液体シンチレーターを用いた検出器でニュートリノの方向が失われてしまうのは、

1. 逆 β 崩壊で生じる熱中性子が水素に捕獲されるまでに拡散してしまうため
2. "Delayed signal" として検出される γ 線の飛行が長すぎるため
3. 検出器の位置決定精度が低い

である。そのため、これらの弱点を克服できれば液体シンチレーターによる検出でもニュートリノの飛来方向情報を得ることができると考えられる。

液体シンチレーターによる方向検出

液体シンチレーターの弱点

1. 中性子の熱拡散
2. γ 線の飛行

の問題を克服する、新しい液体シンチレーターが開発されている [9]。

⁶Li 含有液体シンチレーター

⁶Li は中性子の捕獲断面積が大きく、かつ捕獲後に α 粒子 (⁴He²⁺) を放出する。よって、拡散する前に熱中性子を捕獲し、放出する α 粒子が反応点からほとんど移動しないため ⁶Li は中性子捕獲原子核としての条件を満たしている物質である。以下に中性子捕獲の反応式 (式 (A.1)) と ⁶Li の性能 (表 A.1) を示す。



中性子捕獲原子核	反応断面積 (barn)	放出粒子
<i>p</i>	0.3	γ
⁶ Li	9.4×10^2	α

表 A.1: 中性子捕獲原子核の反応断面積と放出粒子 [9]

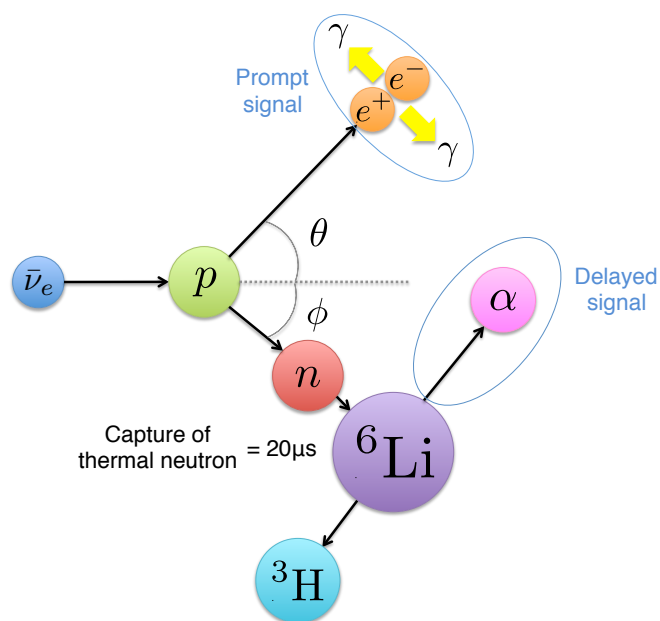


図 A.1: Li 含有シンチレーター内でのニュートリノの発光様式

	物質名	混合比
有機溶媒	プソイドクメン	40 wt%
界面活性剤	ポリオキシエチレン (10) ノニルフェニルエーテル	40 wt%
リチウム化合物	臭化リチウム水溶液	20 wt%
発光物質	PPO	5.0 g/l

表 A.2: Li 含有液体シンチレータの物質と混合比 [9]

イメージング検出器

KamLAND でニュートリノ方向検出を行うには、検出器の弱点

3. 検出器の位置決定精度が低い

という問題も克服しなければならない。そのためには、位置分解能の高い新たな検出器を導入する必要がある。ニュートリノ方向測定をするための位置分解能要求は 10 mm と見積もられている [9]。

A.1.2 オリジナルミラー 2 を使った方向測定の可能性

オリジナルミラー 2 の位置分解能は 10 mm を十分満たしている。しかし、被写界深度は 1500 mm 程度で KamLAND 領域すべてを観測対象とするためには不十分であるとわかった (図 A.2)。そのため、KamLAND に実装し KamLAND バルーン全体を観測対象とするためには複数のオリジナルミラーを組み合わせる必要がある。また、現状では迷光が原因で真の信号を捉えられていないため迷光対策として光学系の改良も必要である。

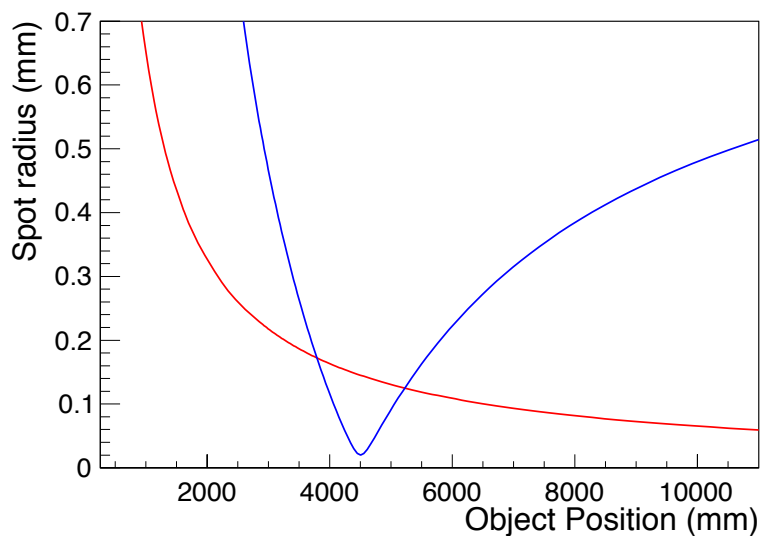


図 A.2: オリジナルミラー 2 のニュートリノ方向測定に対する被写界深度 (赤: 位置分解能 10 mm に対する許容錯乱円、青: 錯乱円)

付 録 B 作製した光学系のパラメータ

本研究にて設計したオリジナルレンズ 1、オリジナルレンズ 2、オリジナルミラー 1、オリジナルミラー 2 の詳細なパラメータを以下の表に記載する。表の形式は ZEMAX のシーケンシャルモードに従っている。また、シーケンシャルモードではミラーのコーティングを表現できないためオリジナルミラー 1、2 のコーティングは記載していないので注意されたい。

#	Type	Comment	Curvature	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Parameter 0	Parameter 1	Parameter 2	TCE	Coating
0	STANDARD		0.00E+00	9.00E+03		1.59E+03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
1	STANDARD	lens1	6.65E-02	1.23E+00	QUARTZ	6.31E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
2	STANDARD		3.37E-02	2.53E+00		6.17E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
3	STANDARD	lens2	6.65E-02	1.23E+00	QUARTZ	5.29E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
4	STANDARD		3.37E-02	2.53E+00		5.05E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
5	STANDARD	lens2	1.93E-01	1.81E+00	QUARTZ	3.54E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
6	STANDARD		2.37E-01	3.00E+00		2.71E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
7	STANDARD		0.00E+00	3.90E+00		1.77E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
8	STANDARD	lens5	-2.21E-01	1.74E+00	QUARTZ	2.41E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
9	STANDARD		-1.87E-01	2.88E-01		2.97E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
10	STANDARD	lens6	-3.12E-02	1.31E+00	QUARTZ	3.18E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
11	STANDARD		-7.69E-02	3.00E+00		3.35E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
12	STANDARD	lens6	-3.12E-02	1.31E+00	QUARTZ	3.71E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
13	STANDARD		-7.69E-02	4.95E+00		3.82E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
14	STANDARD		0.00E+00	0.00E+00		4.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

表 B.1: オリジナルレンズ 1

#	Type	Comment	Curvature	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Parameter 0	Parameter 1	Parameter 2	TCE	Coating
0	STANDARD		0.00E+00	1.81E+05		4.85E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
1	STANDARD	lens1	3.31E-03	2.47E+01	QUARTZ	1.30E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
2	STANDARD		1.68E-03	5.09E+01		1.30E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
3	STANDARD	lens2	9.61E-03	3.64E+01	QUARTZ	1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
4	STANDARD		1.18E-02	9.96E+01		1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
5	STANDARD		0.00E+00	6.30E+01		7.38E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
6	STANDARD	lens5	-1.10E-02	3.49E+01	QUARTZ	7.82E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
7	STANDARD		-9.30E-03	5.78E+00		9.45E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
8	STANDARD	lens6	-1.56E-03	2.63E+01	QUARTZ	1.11E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
9	STANDARD		-3.83E-03	5.30E+02		1.13E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
10	STANDARD		0.00E+00	0.00E+00		1.71E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

表 B.2: オリジナルレンズ 2

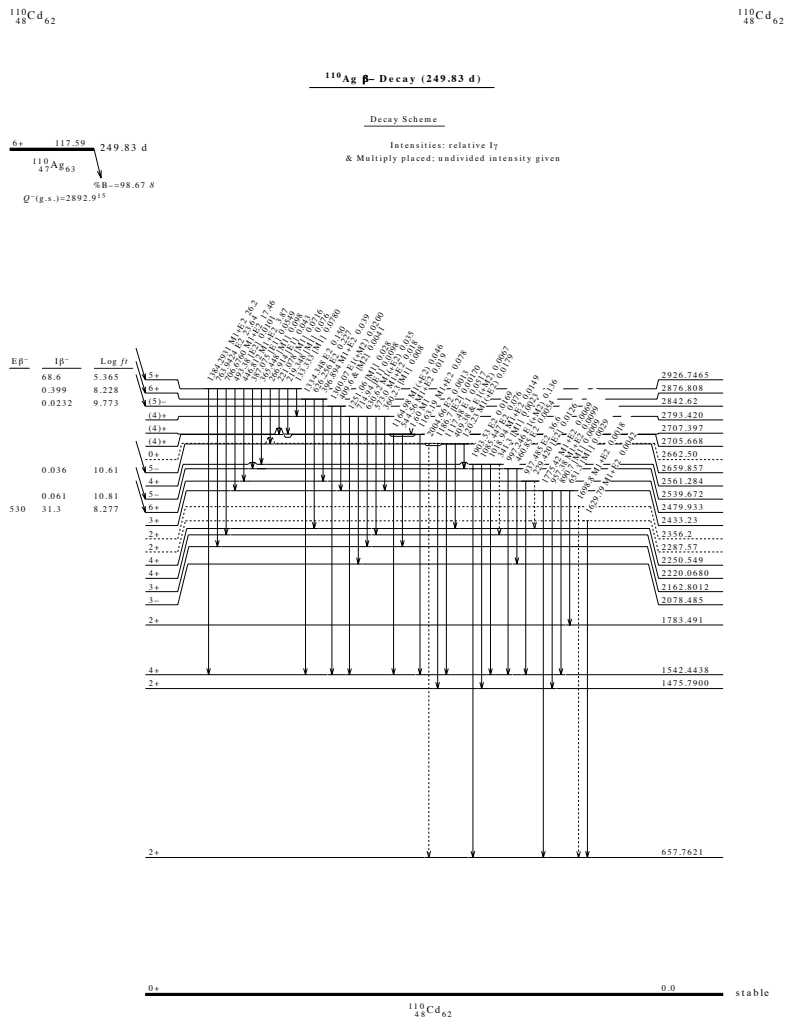
#	Type	Comment	Curvature	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Parameter 0	Parameter 1	Parameter 2	TCE	Coating
0	STANDARD		0.00E+00	3.00E+03		5.29E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
1	EVENASPH	MIRROR1	-1.05E-03	-1.34E+02	MIRROR	3.10E+02	-1.72E+00	0.00E+00	-5.09E-05	-1.03E-10	0.00E+00	
2	EVENASPH	MIRROR	-1.98E-03	1.21E+03	MIRROR	1.50E+02	-1.16E+00	0.00E+00	6.46E-05	-5.25E-10	0.00E+00	
3	EVENASPH	MIRROR	-8.75E-04	-1.08E+03	MIRROR	5.92E+02	-1.59E-01	0.00E+00	8.88E-05	2.20E-11	0.00E+00	
4	STANDARD		0.00E+00	0.00E+00		1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

表 B.3: オリジナルミラー1

#	Type	Comment	Curvature	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Parameter 0	Parameter 1	Parameter 2	TCE	Coating
0	STANDARD		0.00E+00	9.00E+03		1.59E+03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
1	EVENASPH	MIRROR1	-3.70E-03	-9.12E+01	MIRROR	1.56E+02	-1.25E+00	0.00E+00	5.14E-04	-7.29E-10	0.00E+00	
2	EVENASPH	MIRROR	-9.69E-03	1.74E+02	MIRROR	7.50E+01	-1.53E+00	0.00E+00	1.70E-03	-7.68E-08	0.00E+00	
3	EVENASPH	MIRROR	-4.07E-03	-1.84E+02	MIRROR	1.87E+02	-7.09E-02	0.00E+00	2.26E-04	1.02E-09	0.00E+00	
4	STANDARD		0.00E+00	0.00E+00		4.25E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

表 B.4: オリジナルミラー 2

付録C ^{110m}Ag のレベルスキーム



CITATION:
Nuclear Data Sheets (2012)

2

From NNDC(BNL)
program ENSDAT

図 C.1: ^{110m}Ag のレベルスキーム

$^{110}_{48}\text{Cd}_{62}$

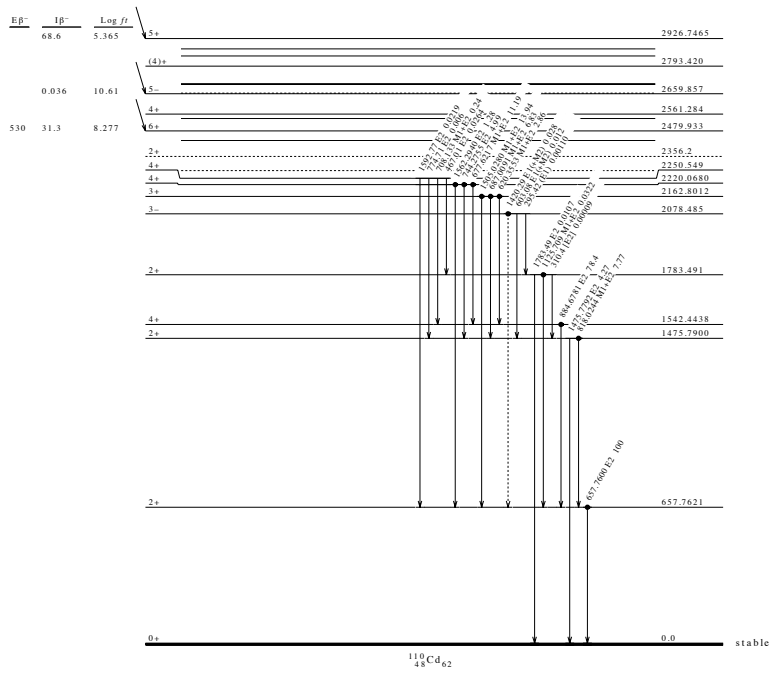
$^{110}_{48}\text{Cd}_{62}$

^{110}Ag β^- Decay (249.83 d) (continued)

Decay Scheme (continued)

Intensities: relative I γ
& Multiply placed: undivided intensity given

$^{110}_{47}\text{Ag}_{63}$ 249.83 d
Q $^-$ (g.s.)=2892.9 $^{+5}$ eV
%B $^-$ =98.678



CITATION:
Nuclear Data Sheets (2012)

3

From NNDC(BNL)
program ENSDAT

図 C.2: ^{110m}Ag のレベルスキーム

参考文献

- [1] 松井吉哉. 結像光学入門 光学系取扱いの基礎. 啓学出版株式会社, 1988.
- [2] メレスグリオ株式会社. 基礎光学. <http://www.cvimgkk.com/index.html>.
- [3] シグマ光機株式会社. ミラーコーティング (tfa/tfan/tfaq/tfaqn). <http://www.sigma-koki.com>.
- [4] H. N. Pollack et al. Heat flow from the earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, Vol. 31, No. 3, pp. 267–280, 1993.
- [5] W. F. McDonough and S. s. Sun. The composition of the earth. *Chemical Geology*, Vol. 120, No. 3-4, pp. 223 – 253, 1995. Chemical Evolution of the Mantle.
- [6] T. Araki et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with kamland. *Nature*, Vol. 436, No. 7050, pp. 499–503, 2005.
- [7] T. Araki et al. Measurement of neutrino oscillation with kamland: Evidence of spectral distortion. *Physical Review Letters*, Vol. 94, No. 8, 2005.
- [8] 浜松ホトニクス. <http://jp.hamamatsu.com/>.
- [9] 渡辺寛子. 電子型反ニュートリノの方向検出に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発. Master's thesis, 東北大学, 2009.
- [10] S. Enomoto et al. Neutrino geophysics with kamland and future prospects. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 258, No. 1-2, pp. 147 – 159, 2007.
- [11] A.M. Hofmeister and R.E. Criss. Earth's heat flux revised and linked to chemistry. *Tectonophysics*, Vol. 395, No. 3-4, pp. 159 – 177, 2005.
- [12] 阿部真悟. 電子型反ニュートリノの方向検出へ向けた開発研究. Master's thesis, 東北大学, 2009.
- [13] A. Sato et al. Scintillating track image camera-scitic. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1, Vol. 43, pp. 1593–1601, 2004.
- [14] CERN. Root. <http://root.cern.ch/>.
- [15] 社団法人日本アイソトープ協会. 新ラジオアイソトープ 講義と実習. 丸善株式会社, 平成元年.
- [16] 原康夫. 裳華房テキストシリーズ—物理学 素粒子物理学. 株式会社 裳華房, 2008.

- [17] C. Jaupart, S. Labrosse, and J.-C. Mareschal. Temperatures, heat and energy in the mantle of the earth. In Gerald Schubert, editor, *Treatise on Geophysics*, pp. 253 – 303. Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [18] A. Gando, et al. Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of Xe-136 from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in Ge-76. 2012.
- [19] Azusa Gando. *First Results of Neutrinoless Double Beta Decay Search with KamLAND-Zen*. PhD thesis, Tohoku University, 2012.
- [20] LLC Radiant ZEMAX. Zemax. <http://www.radiantzemax.com/>.
- [21] LLC Radiant ZEMAX. *ZEBASE 6 Optical Design Database*. Radiant ZEMAX, LLC, 2011.
- [22] MILTON LAIKIN. *LENS DESIGN FORTH EDITION*. CRC Press, 2012.