

KamLAND-Zen実験における 長寿命核バックグラウンドの低減に向けた 新型イメージングディテクターの開発

森田大暉, 清水格, 井上邦雄, 渡辺寛子

東北大学ニュートリノ研究センター

他 KamLAND-Zen Collaboration

11/24 第3回「地下宇宙」若手研究会

つくば国際会議場



目次

1, 物理の目標

- KamLAND-Zen実験
 - 概要
 - KamLANDの高感度化
 - 主要なバックグラウンド
- イメージングによる粒子識別

2, イメージングディテクター開発

- 開発の方針
- 先行研究
- 現在開発していること
- Baker-Nunn光学系
- 現在の設計
 - 視野
 - 獲得光量
- 今後の課題&展望

1, 物理の目標

KamLAND-Zen実験

KamLAND検出器

- 岐阜県神岡池の山の地下1000mに設置されたニュートリノ検出器
- 1ktの液体シンチレーターで数MeVの反応を観測
- 極低放射能環境

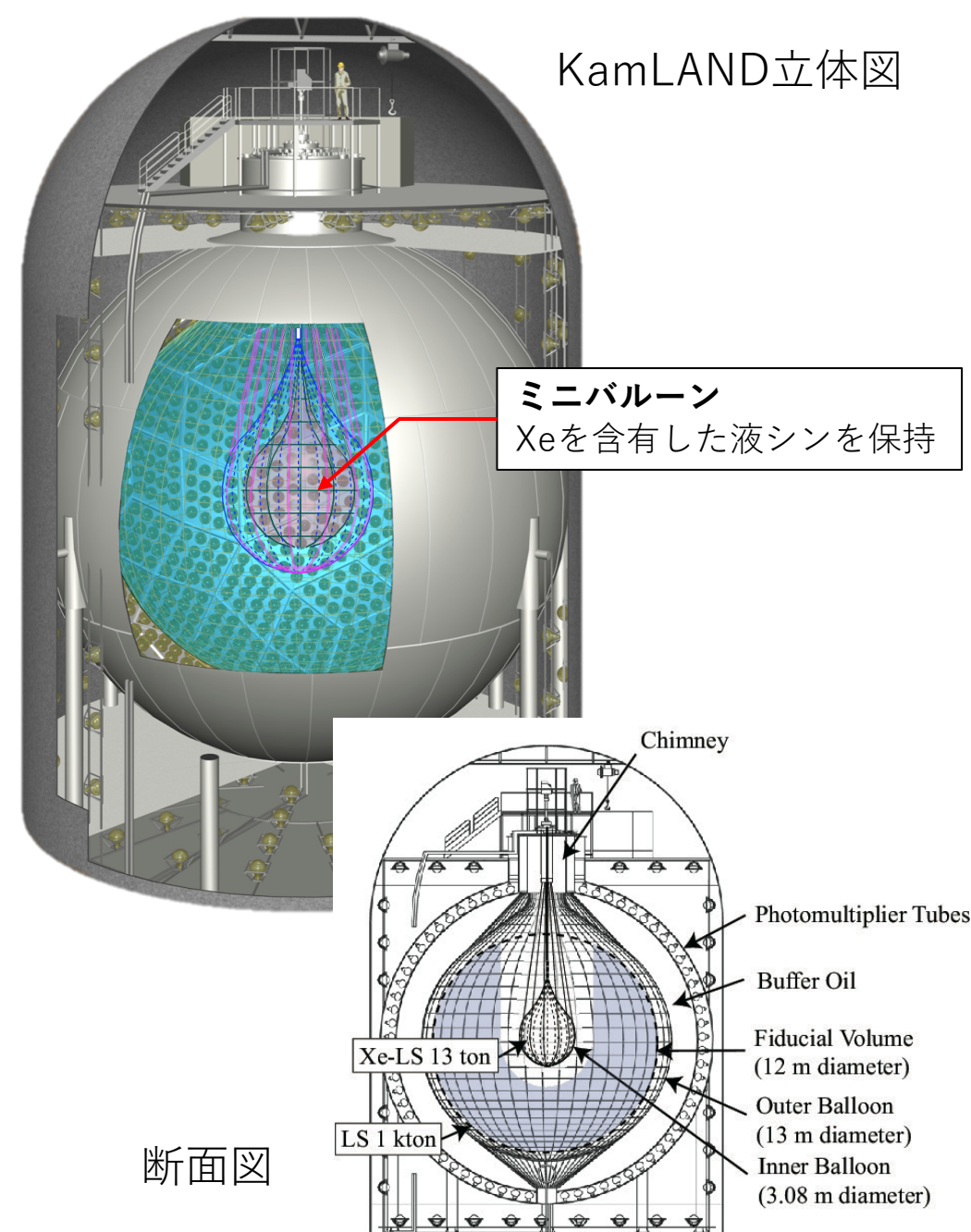
KamLAND-Zen実験

- ^{136}Xe が起こす $0\nu\beta\beta$ 崩壊の検出を目指す
- 約750kgのXeを含有した液シンをナイロン製バルーンで保持し、検出器中心に導入

最新結果

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期への制限 (世界最高感度)

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.29 \times 10^{26} \text{ [year]}$$



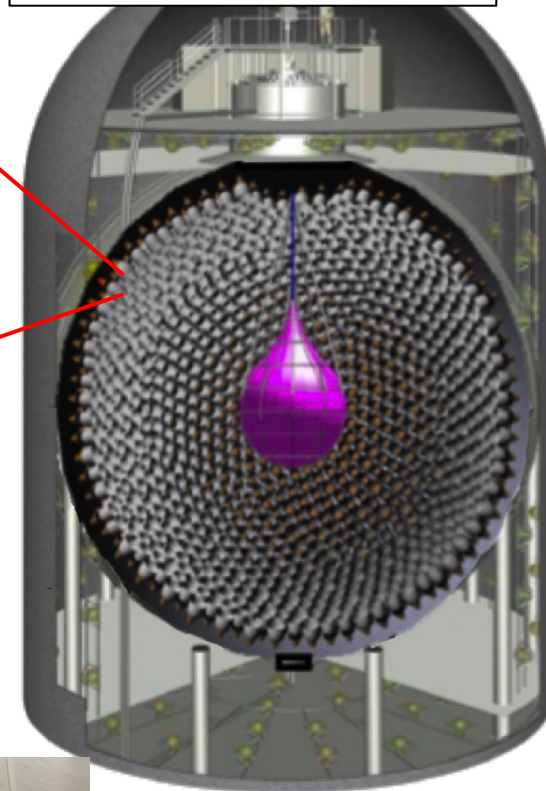
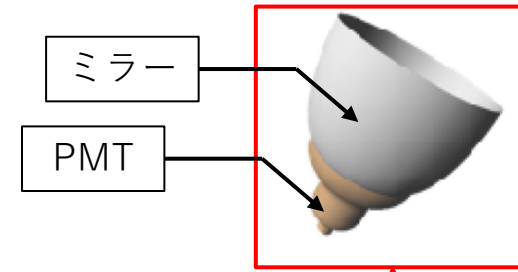
断面図

KamLANDの高感度化

将来計画 KamLAND2-Zen実験

- Xe量 約750 kg → 約1 t
- 集光量の増加
 - ▶ 大光量 & 高透過率液体シンチレーターの導入
~10000 photon/MeVの発光
 - ▶ PMT用集光ミラー & 高量子効率PMTの導入

→エネルギー分解能の向上



プロトタイプ検出器

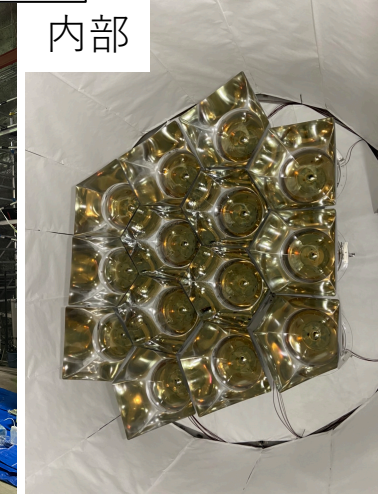
- 小型のタンクを用いた集光量増加の実証実験
- 現在、タンクを水で満たしミラー付きPMTの性能試験が開始

プロトタイプ検出器

外観



内部



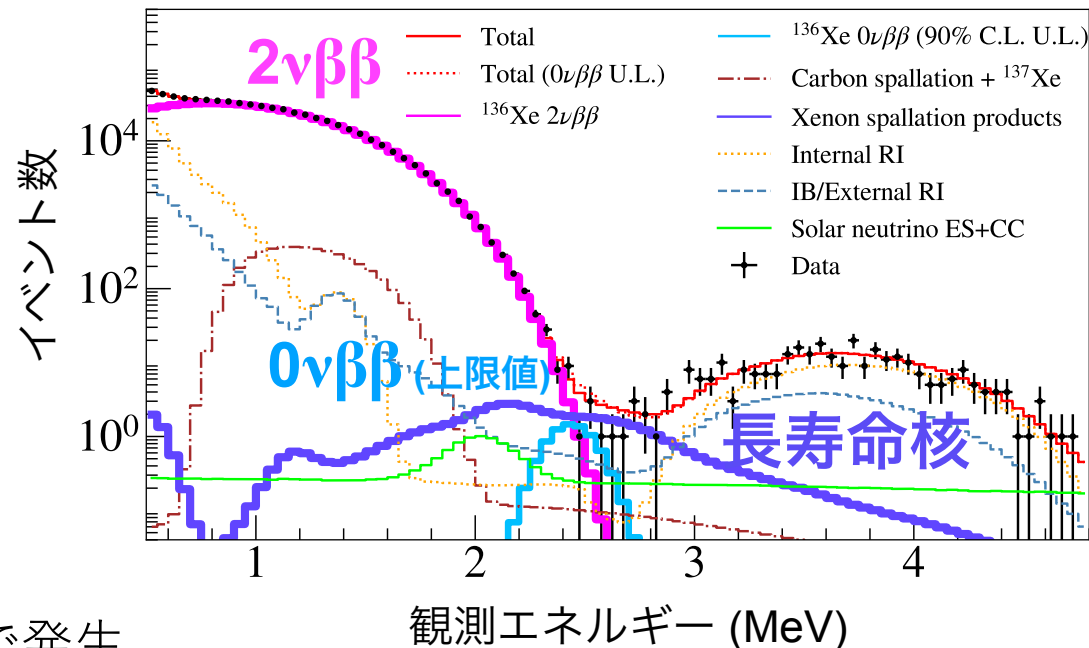
KamLAND-Zen実験のバックグラウンド

観測エネルギースペクトル

主要なバックグラウンド (2.35~2.7 MeV)

種類	イベント数[/day/kton]
$2\nu\beta\beta$	11.98
RI in XeLS	0.98
Solar ν	1.69
長寿命不安定核	12.52

エネルギー分解能向上により低減

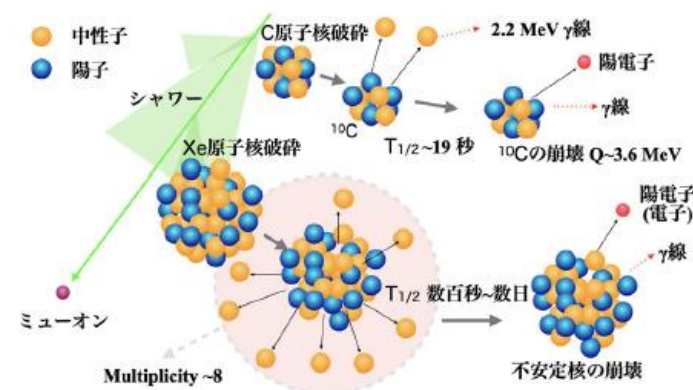


長寿命不安定核

- 寿命が数分~数日の原子核
- 宇宙線ミュオンがXe原子核を破砕することで発生
- 現在の検出器 & 解析手法では除去が難しい

→ 除去に向けた解析手法 & 装置開発が進行中

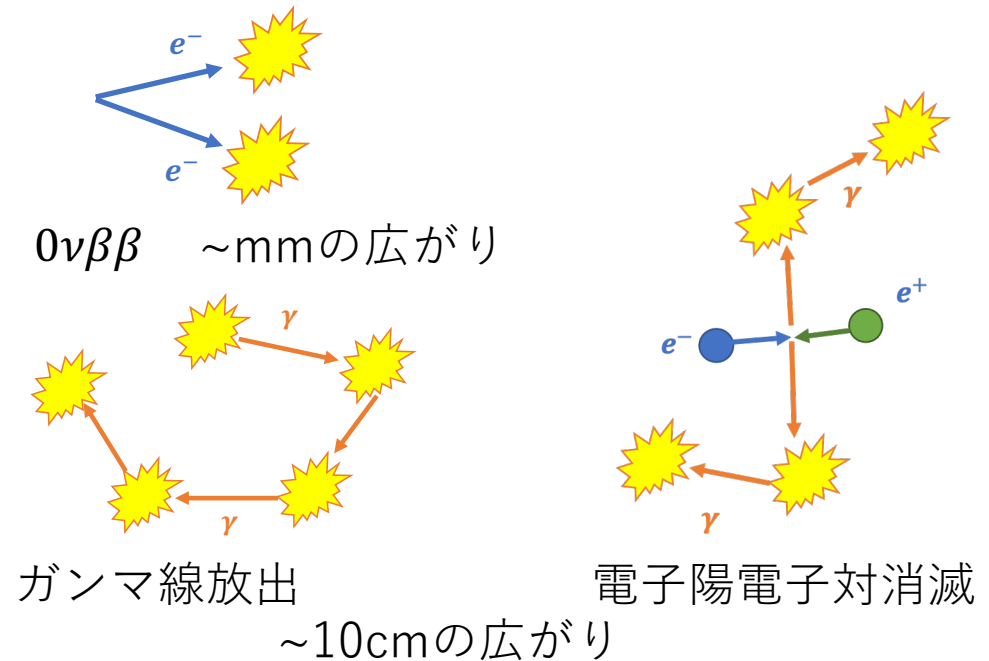
- イメージングディテクターによるPID 今回のテーマ
- 中性子検出効率増加のための新型FEEボード開発
- 機械学習を用いた解析的な除去 etc...



イメージングによる粒子識別

液シン中での発光点分布の違い

- ベータ線のみイベント ($0\nu\beta\beta$ など)
→ 反応点周りでエネルギーを落とす
発光はほとんど反応点周辺で起こる
- ガンマ線を含むイベント (一部の長寿命核)
→ コンプトン散乱による発光が支配的
反応点から離れた位置でも発光が起こる



発光点を2or3次元的に撮影し、発光量や発光分布の広さを捉えることで、ベータ/ガンマの識別ができる可能性
長寿命核バックグラウンドの除去へ応用

$0\nu\beta\beta$ のROI (2.35~2.7 MeV)で発生頻度が高い長寿命核BG
他にも30種ほど存在

核種	イベント数 [/day/kton]
^{124}I (EC/ β^+ γ)	0.18
^{130}I (β^- γ)	0.17
^{122}I (EC/ β^+ γ)	0.11
^{88}Y (EC/ β^+ γ)	0.11
^{118}Sb (EC/ β^+ γ)	0.11

2, イメージングディテクター (ID) 開発

開発の方針

KamLAND2イメージ図

目標

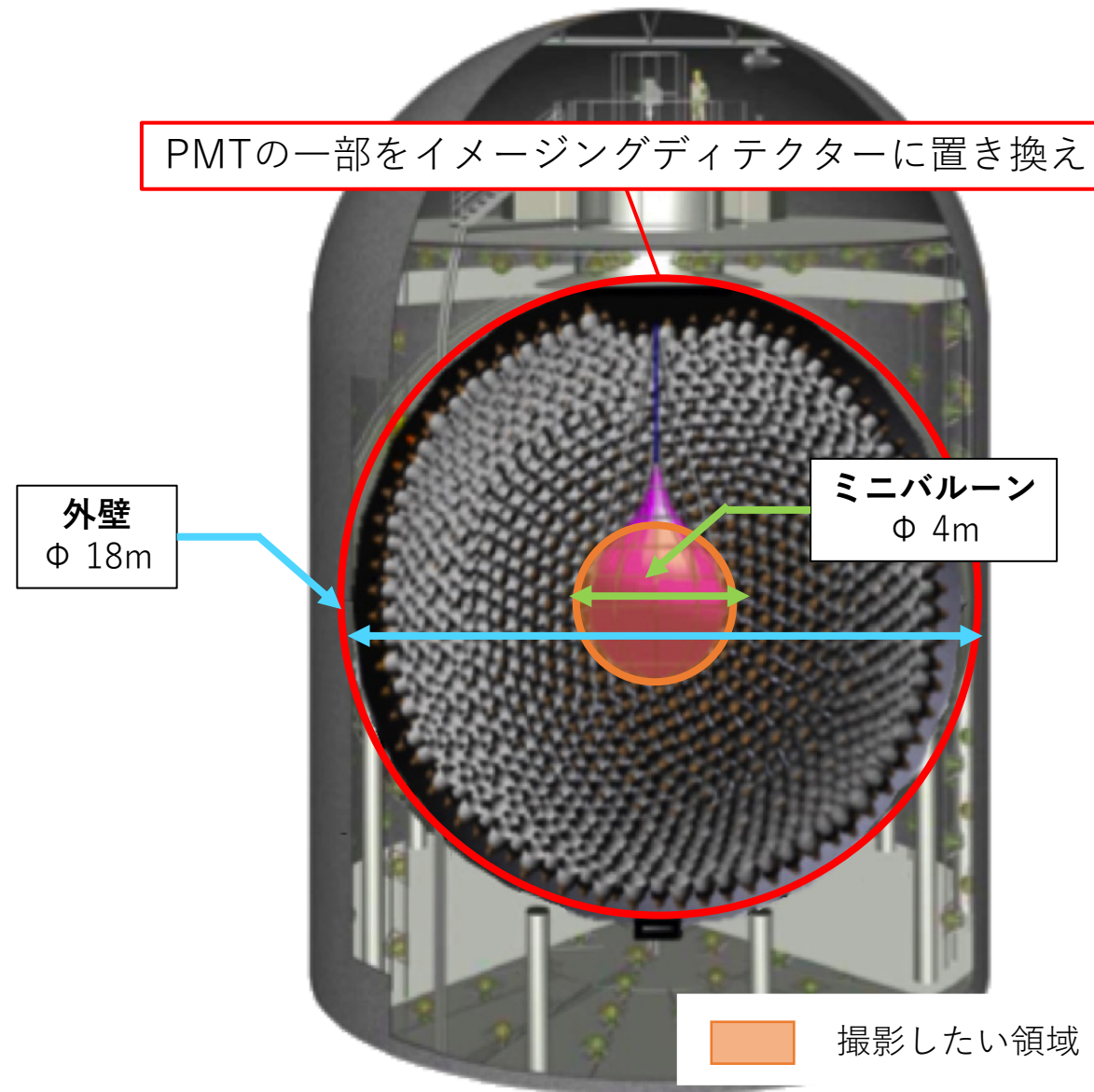
KamLAND2-Zenでの
長寿命核バックグラウンドを90%除去

方法

- KamLAND2にイメージングディテクターを複数台設置
- ミニバルーンを多方向から撮影し、液シン発光の広がりを3次元的に捉える
- 発光点分布や発光量から粒子識別

イメージングディテクターの開発項目

- 光学系
- 撮像素子
- イベント識別アルゴリズム

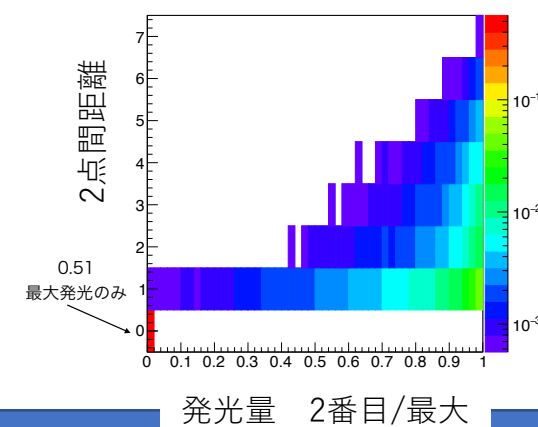
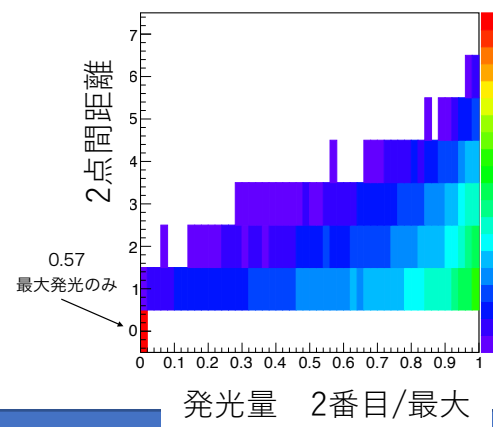
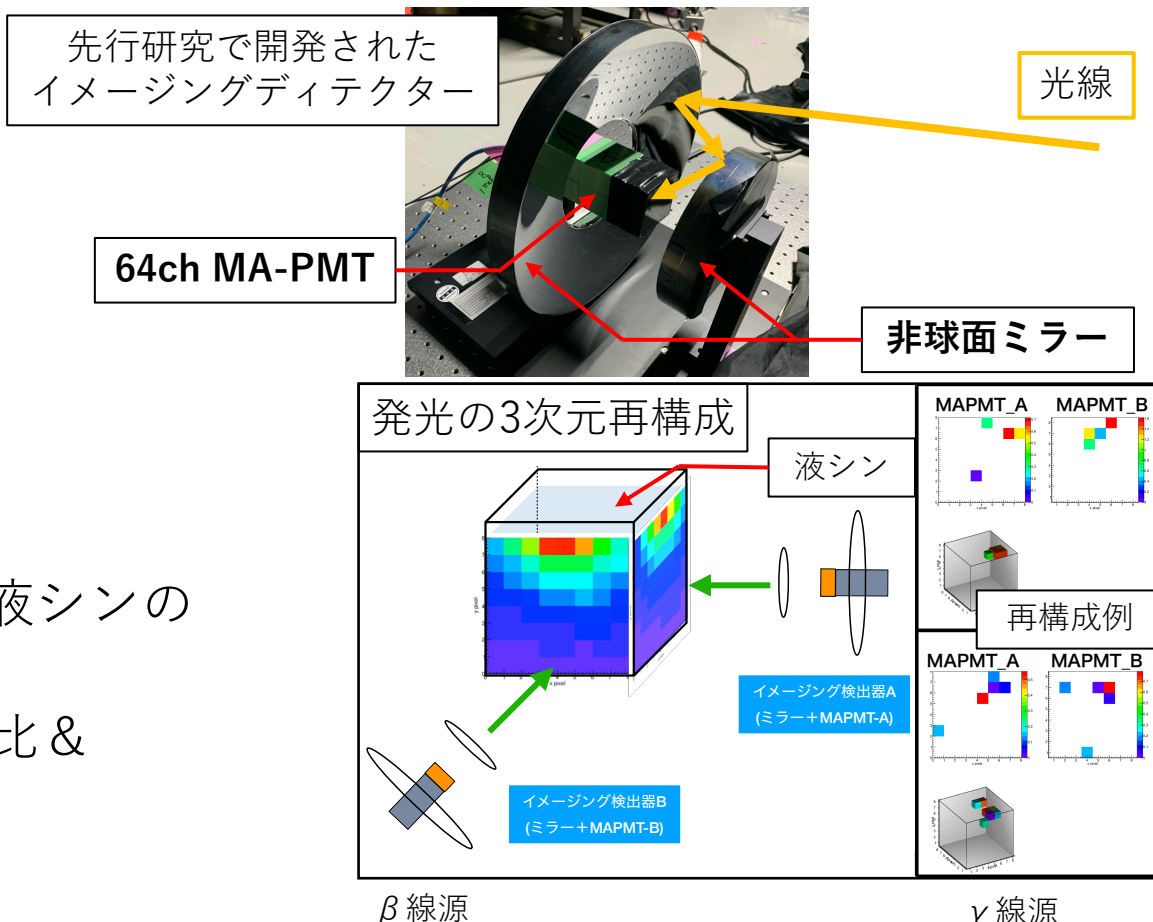


先行研究

先行研究

- イメージングディテクターの構成
光学系：ミラーのみ
撮像素子：64ch マルチアノードPMT
- ディテクターは2台作成
 γ 線源 (^{60}Co) と β 線源 (^{90}Sr) それぞれに対し液シンの発光を2方向から撮影 & 位置再構成
- 最大発光、2番目に発光した位置の発光量比 & 2点間距離からPIDを試みた → 分布に違い

液シン発光点の3次元的な広がりからPID
実現可能性が実験室レベルで示せた



現在開発していること

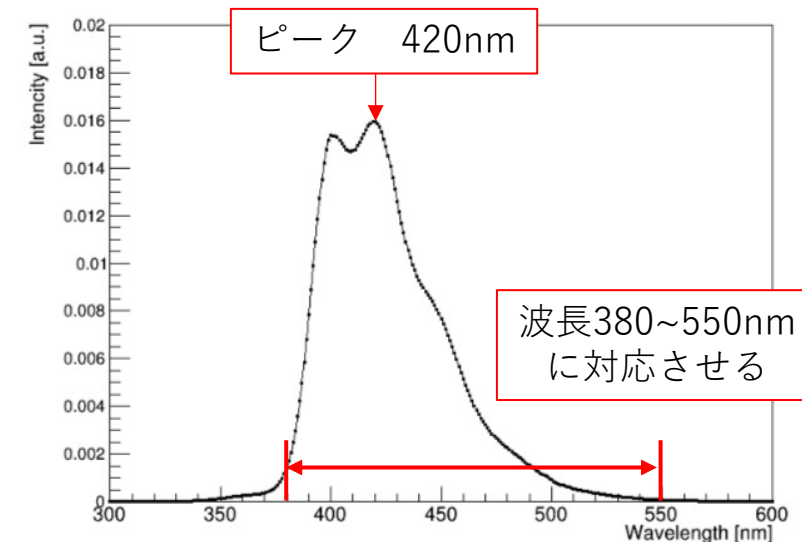
現在 光学系から新しく開発中

- KamLAND2-Zenに合わせた設計に
 - バルーン全体を見るために視野の広角化
 - ミラー付きPMTと大きさを揃える
 - 液シン中での使用に対応 etc...

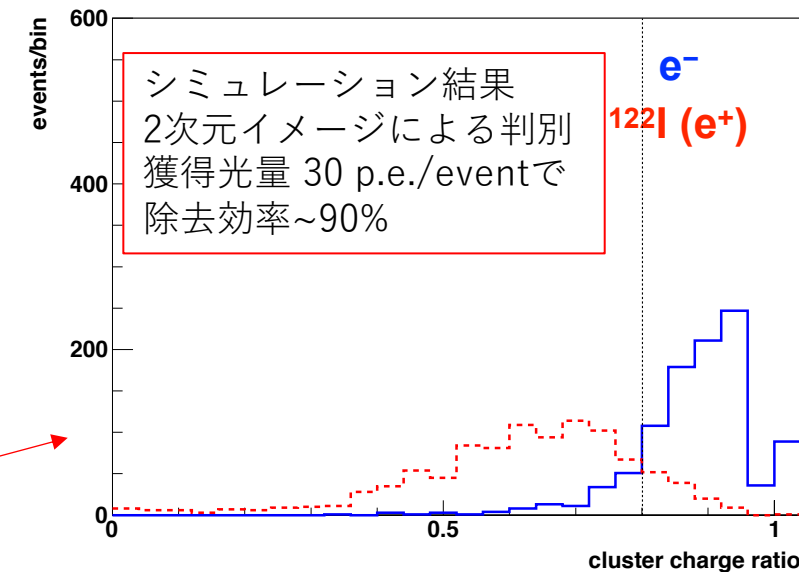
光学系で目標とする性能

- 視野 ピント位置 レンズ第一面から8m程度
奥行方向 ピント位置から±2m
垂直方向 ±2m@ピント位置
- 位置分解能 ~3cm 現在のKamLANDの位置分解能 12 cm/ \sqrt{E}
- 倍率 1/20倍
- 視野全体で像面での点光源像のRMS（収差）が<1.5 mm
 - 位置分解能&倍率からの要請
- 波長 液シンの発光スペクトルに対応
- 獲得光電子数 > 30 p.e./event (2.35~2.7 MeV)
全イメージングディテクターの合計

KamLAND2液シンの発光スペクトル



長寿命核除去効率 (^{122}I のみ)



Baker-Nunn光学系

Baker-Nunn光学系の一例
青線：光線

構成

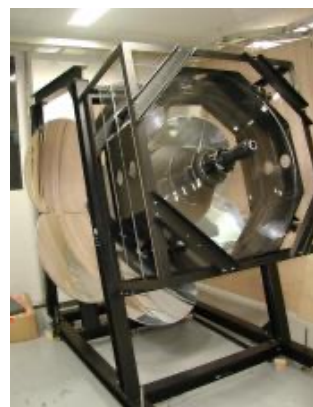
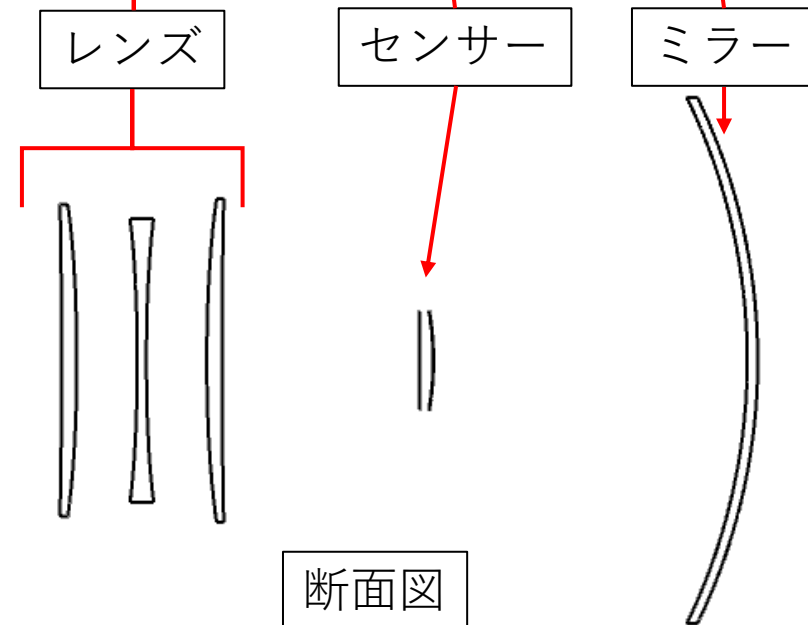
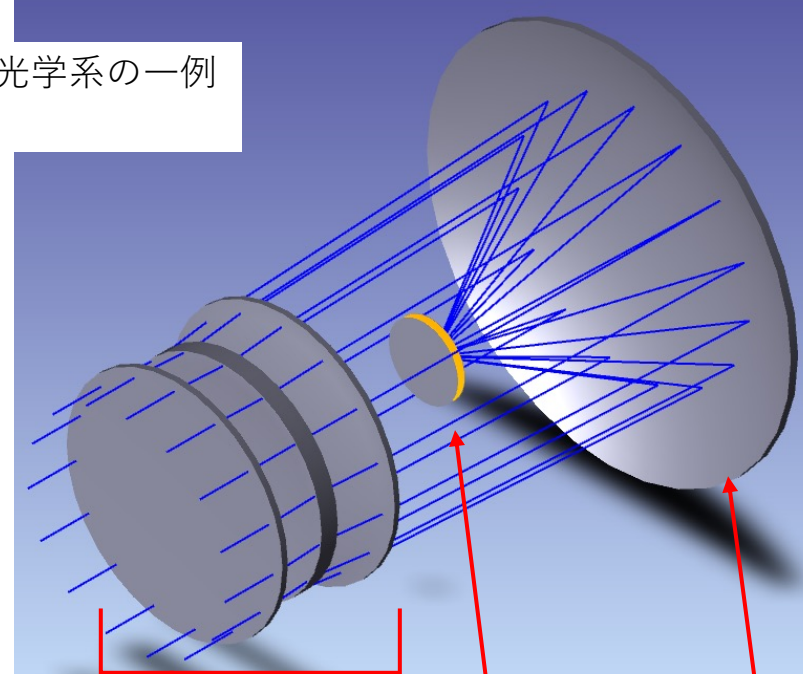
- 非球面レンズ 3 枚 + 球面ミラー + 球面センサー

利点

- 広角かつ視野内で獲得光量が均一
- 他の光学系では
レンズのみ：高額になる
ミラーのみ：画角が広くとれない
→レンズ&ミラー両者のバランスをとった光学系
- PMT集光ミラーの経験も活かせる

要求を満たす光学系として有力な候補

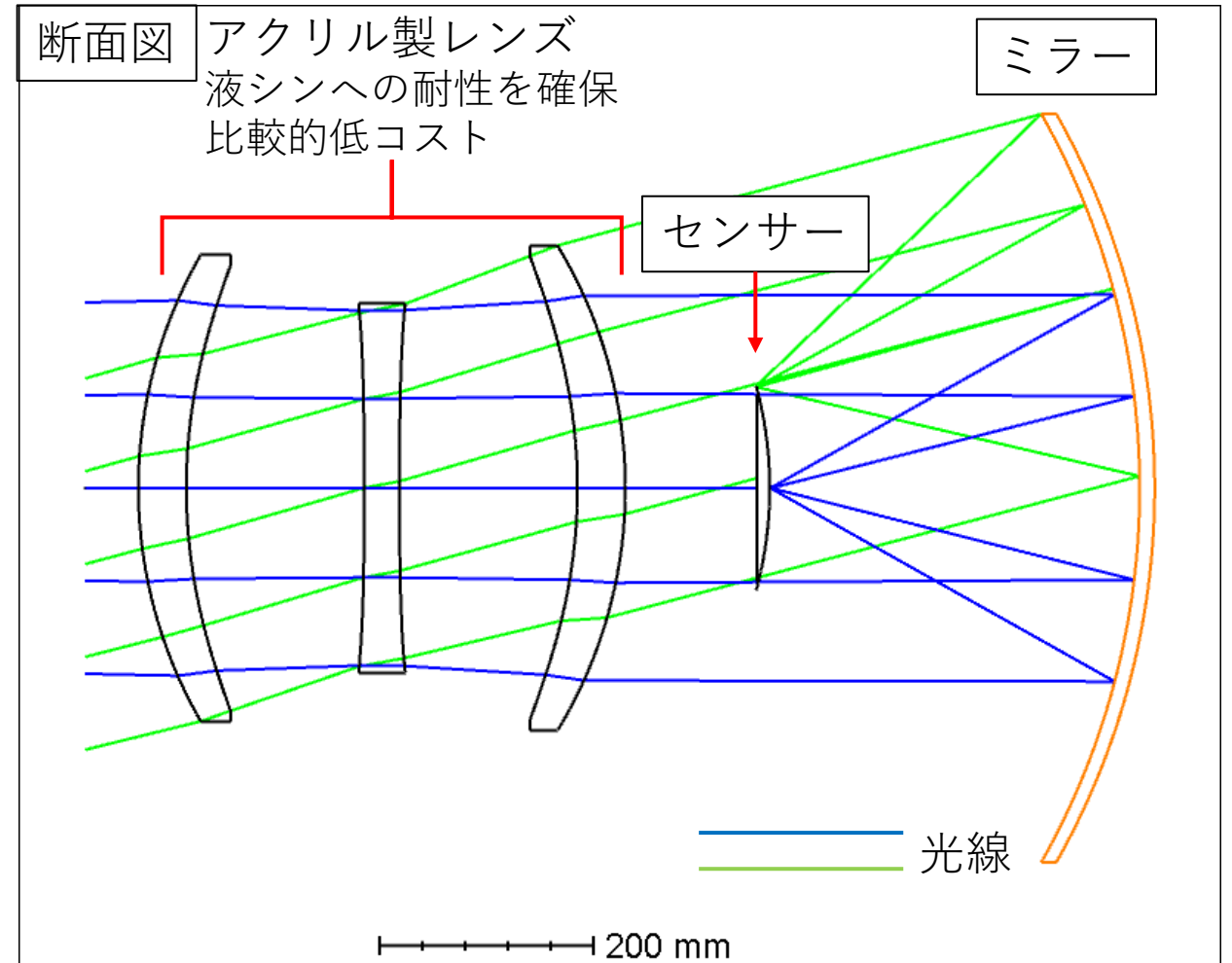
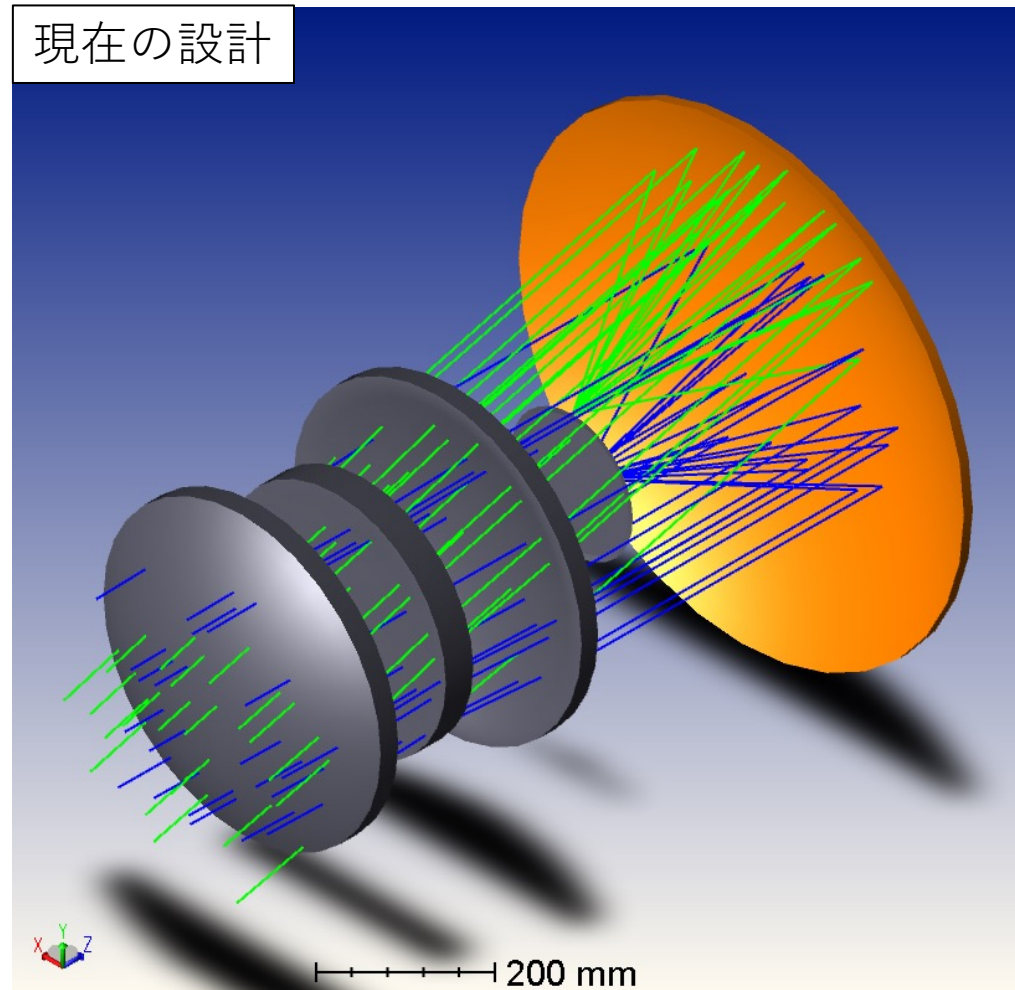
Baker-Nunn光学系はAshra実験で
大気チェレンコフ光メーキングに使われた実績がある



現在の設計

※液シンの屈折率も考慮した調整はまだ

光学設計ソフトZemaxでレンズやミラーの形状 & 配置を調整

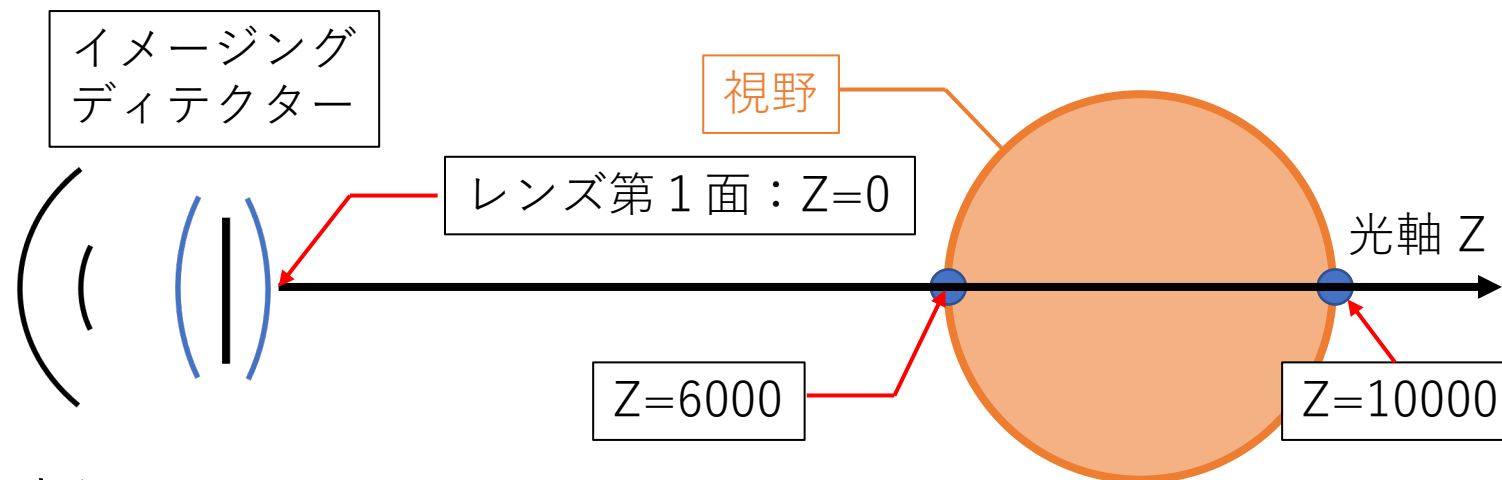


収差の評価 奥行方向

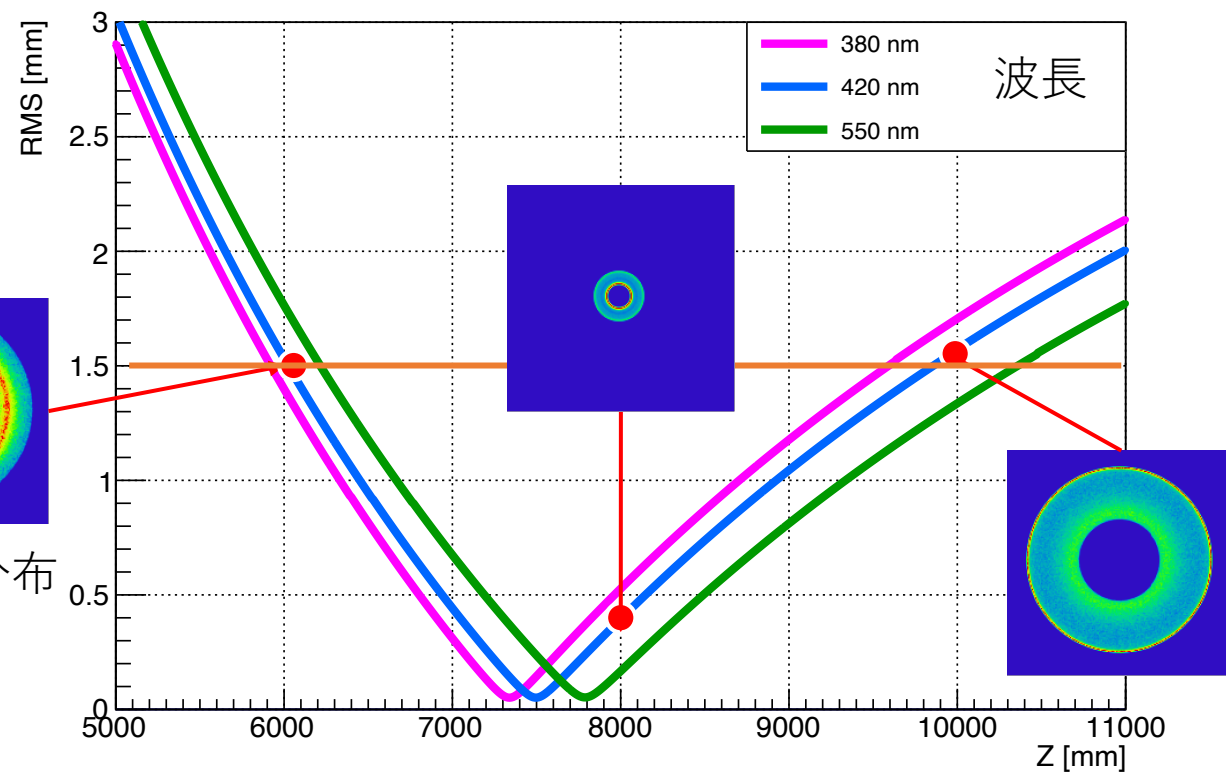
Zemaxでのシミュレーション

- 光軸上の様々な距離にある点光源における像のRMSを評価
- 光線を光源からディテクターに入射するように追跡
センサーまで届かない光線は無視
- 干渉は考えない

目標とする領域で収差を十分小さくできている



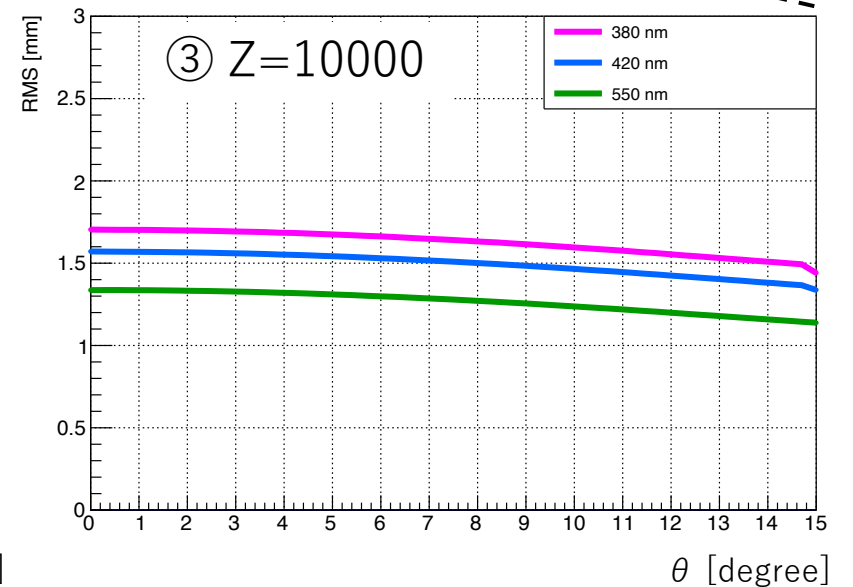
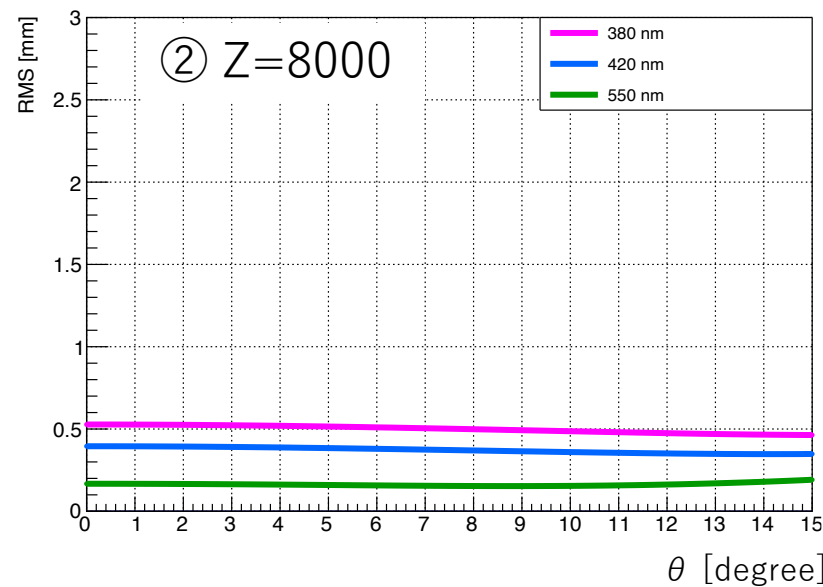
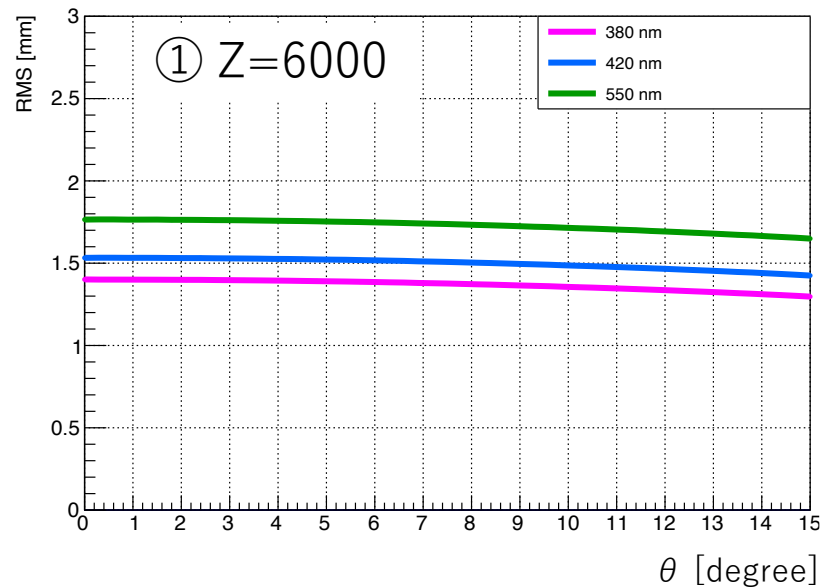
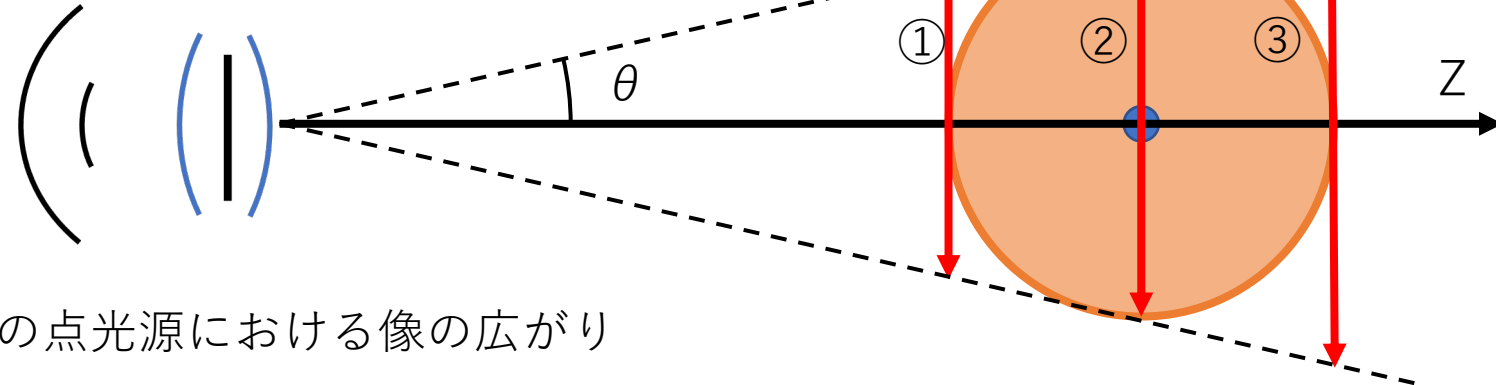
光軸上の光源における像の広がり



$$RMS = \sqrt{\sum_{Ray} \sum_x \sum_y (\text{各光線の到達位置} - \text{全光線到達位置の平均})^2}$$

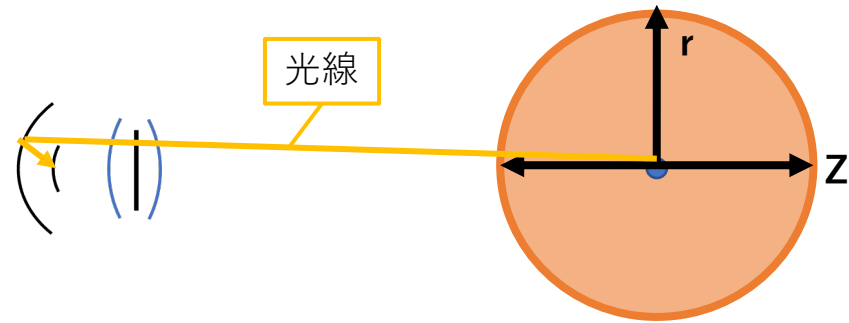
収差の評価 垂直方向

- 見たい範囲の手前、中心、奥の3箇所において垂直方向の広がりを評価



- 像のRMSは点光源の垂直方向の位置にほぼ依存しない
- 垂直方向でも目標を十分達成

獲得光電子数



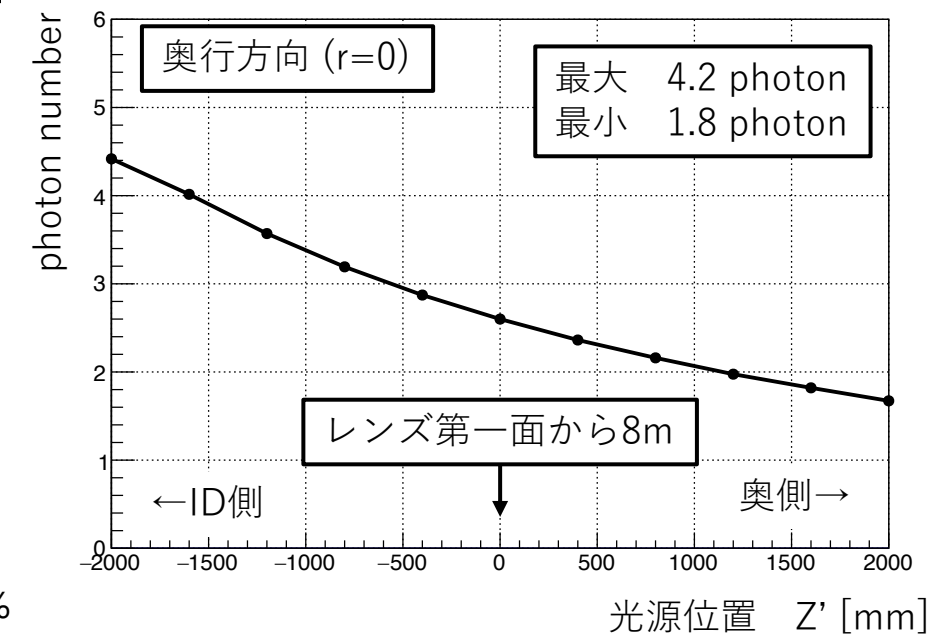
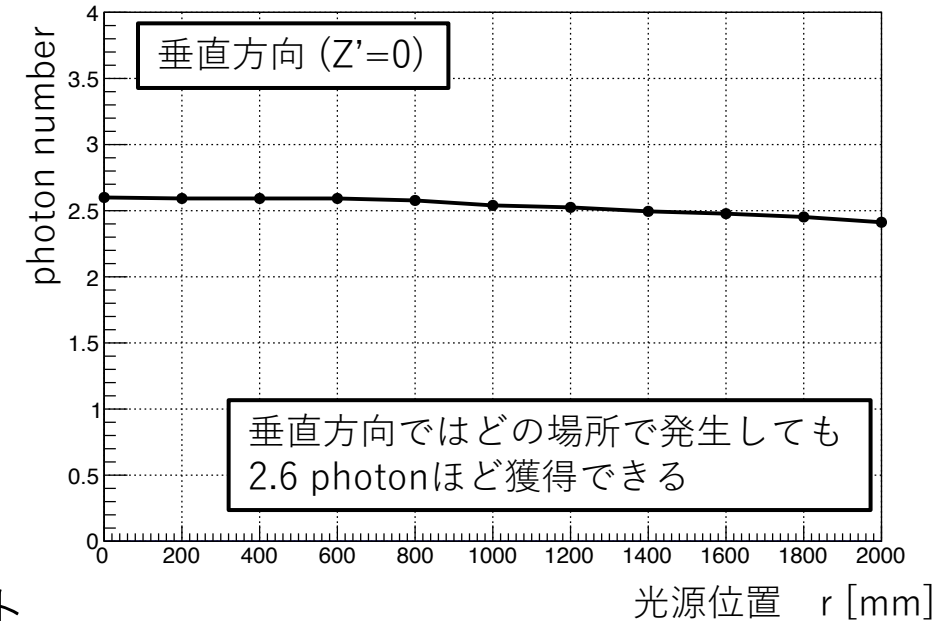
光線追跡による獲得光量推定 with Zemax

- 光源から1000万本の光線を全方向に発射し $0\nu\beta\beta$ のROI 1イベントあたりの獲得光量を推定
- 波長420 nmの単色光と仮定
- レンズ→ミラー→センサーと進んだ光線数をカウント
- 獲得光量 (*photon number*) =
$$\frac{\text{到達した光線数}}{\text{発射した光線数}} \times 10000 [\text{photon/MeV}] \times 2.5 [\text{MeV}]$$

KamLAND2-Zenに必要な台数

- $Y=0, Z'=0$ の点での獲得光量 2.6 photonから計算
- 液シンの減衰長 8.5 mの効果も考慮
- 30 p.e./event 獲得には **60 ~ 74 台** w/ MPPC Q.E. 40~50%

イメージングディテクター1台あたりの獲得光量



今後の課題 & 展望

設計

光学系の調整

- 液シンの屈折率も考慮
- 工作精度に合わせた設計

撮像素子の選定

- MA-PMT or MPPC ? 他にも?

アルゴリズム開発

- 複数の検出画像を組み合わせ
3次元再構成をする手法
- PIDのためのパラメータを選定

シミュレーション

- 部材のひずみや工作精度による光学性能の変化を評価
- バックグラウンド識別能力の評価



実機試験

- 実験室での試験 (空气中)
- プロトタイプ検出器での試験 (液中)
 - PMTの一部をイメージングディテクターに変えて試験

まとめ

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測を目指しているKamLAND-Zen実験ではさらなる観測精度の向上を目指し、長寿命不安定核の除去手法を新たに開発している。
- 発光点の広がりがあるベータ線のみイベントとガンマ線を含むイベントで異なることに着目し、イメージングによる除去手法の開発を進めている。
- 現在は光学系の開発を進めており、Baker-Nunn光学系を検討している。今後、光学系の細かな調整をシミュレーションと合わせて行い、実機試験でバックグラウンド識別能力を評価していく。

目次

1, 物理の目標

- KamLAND-Zen実験
 - 概要 p.3
 - KamLANDの高感度化 p.4
 - 主要なバックグラウンド p.5
- イメージングによる粒子識別 p.6

2, イメージングディテクター開発

- 開発コンセプト p.8
- 先行研究 p.9
- 現在開発していること p.10
- Baker-Nunn光学系 p.11
- 現在の設計 p.12
 - 視野 p.13~14
 - 獲得光量 p.15
- 今後の課題&展望 p.16

Back Up

ニュートリノとは

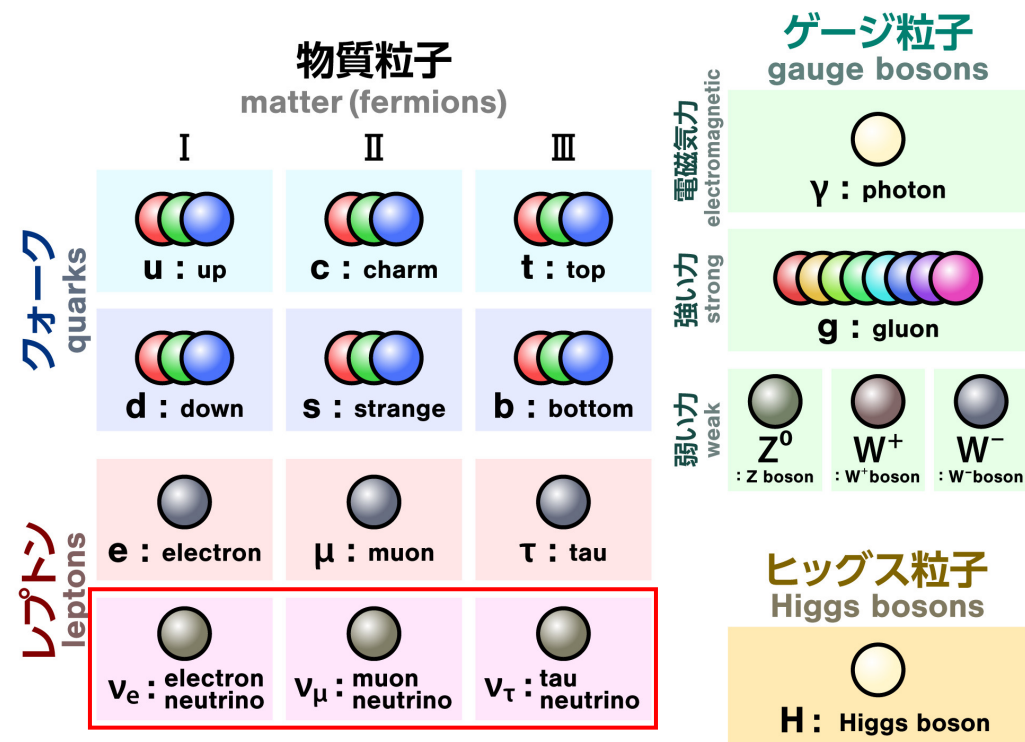
特徴

- 重力 & 弱い相互作用しか受けない中性レプトン
- 3種類存在（電子、ミュー、タウ）
- 質量が存在 ← 標準模型と矛盾
しかし、非常に小さい

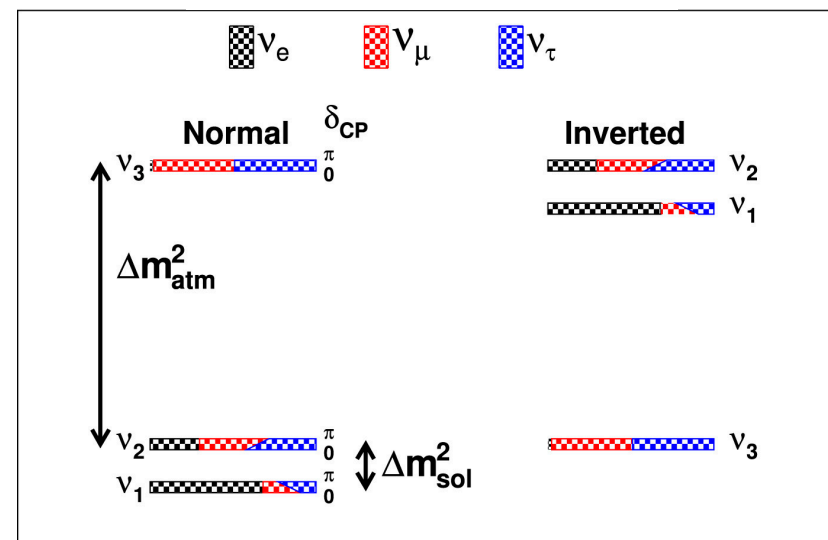
理論的に完全に説明できていない

マヨラナ性

- ニュートリノ = 反ニュートリノとなる性質
- ニュートリノにマヨラナ性があると、質量の小ささが自然に説明できる
- 質量階層性にも制限を与える
- 現在まで未確認



ニュートリノの質量階層性



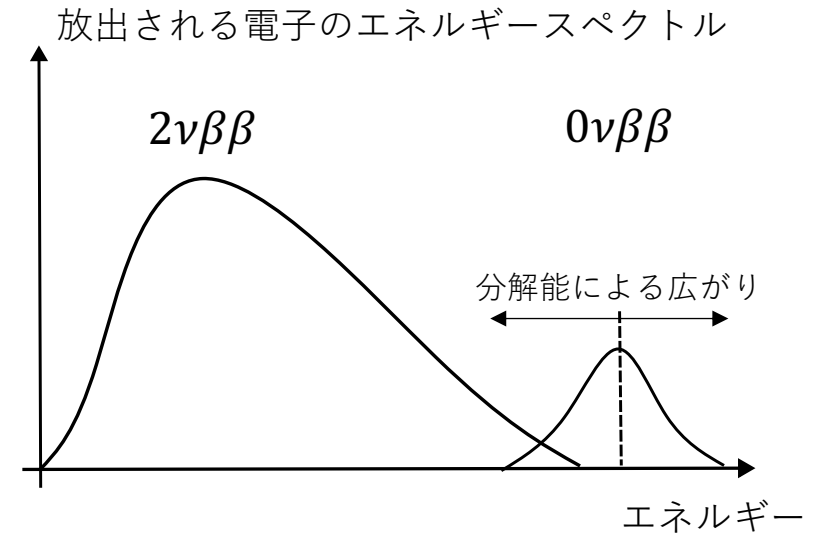
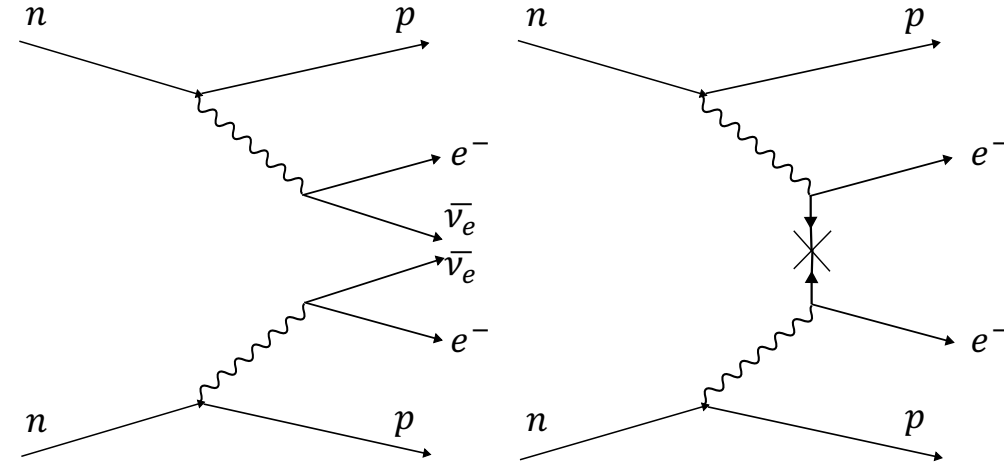
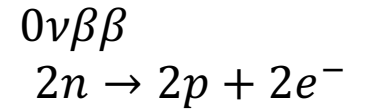
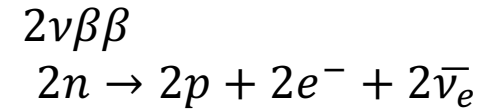
0νββ崩壊

2重β崩壊

- 2つのβ崩壊が同時に起こる現象
- 崩壊を起こす核種が限られており、かつ寿命が非常に長い → 非常に稀なイベント
- 2νββと0νββの2つの崩壊モードが存在

0νββ崩壊

- β崩壊で発生したニュートリノがもう一つの核子に吸収され、ニュートリノが発生しないモード
- 電子が単一のエネルギースペクトルを持つ
 - ※エネルギー分解能のため観測されるスペクトルは広がりを持つ
- ニュートリノにマヨラナ性がある場合のみ起こる → 0νββの観測 = ニュートリノのマヨラナ性の証明
- 世界各地で観測を目指し様々な実験が進行中



長寿命崩壊核種

Nucleus	Q-value [MeV]	half-life[sec]	Expected rate (ROI) [/day/kton]	Background rate (ROI) [/day/kton]	Background rate in Long-lived vetoed (ROI) [/day/kton]
⁸⁸ Y	3.62(β^+)	9.215×10^6	0.14(0.110)	0.14(0.11)	0.00012(9.6e-05)
^{90m1} Zr	2.32(β^-)	809.2×10^{-3}	0.093(0.012)	0.059(0.0076)	0.034(0.0044)
⁹⁰ Nb	6.11(EC)	5.220×10^4	0.095(0.024)	0.022(0.0056)	0.014(0.0035)
⁹⁶ Tc	2.97(EC)	9.900×10^3	0.059(0.012)	0.055(0.011)	0.0040(0.00082)
⁹⁸ Rh	5.06(EC)	5.220×10^2	0.076(0.011)	0.0016(0.00023)	0.059(0.0085)
¹⁰⁰ Rh	3.63(EC)	7.488×10^4	0.23(0.088)	0.20(0.075)	0.035(0.013)
¹⁰⁴ Ag	4.28(EC)	4.152×10^3	0.16(0.012)	0.020(0.0015)	0.14(0.010)
^{104m1} Ag	4.29(EC)	2.010×10^3	0.11(0.018)	0.011(0.0018)	0.096(0.016)
¹⁰⁷ In	3.43(EC)	1.944×10^3	0.14(0.019)	0.0040(0.00057)	0.068(0.0096)
¹⁰⁸ In	5.16(EC)	3.480×10^3	0.19(0.089)	0.019(0.0085)	0.17(0.077)
¹¹⁰ In	3.89(EC)	1.764×10^4	0.24(0.053)	0.087(0.020)	0.15(0.033)
^{110m1} In	3.94(EC)	4.146×10^3	0.35(0.066)	0.13(0.025)	0.19(0.036)
¹⁰⁹ Sn	3.85(EC)	1.080×10^3	0.12(0.027)	0.0044(0.00098)	0.11(0.023)
¹¹³ Sb	3.92(EC)	4.002×10^2	0.23(0.036)	0.0066(0.0010)	0.16(0.025)
¹¹⁴ Sb	5.88(β^+)	2.094×10^2	0.30(0.020)	0.0096(0.00064)	0.22(0.015)
¹¹⁵ Sb	3.03(EC)	1.926×10^3	0.84(0.031)	0.087(0.0032)	0.63(0.023)
¹¹⁶ Sb	4.71(EC)	9.480×10^2	0.94(0.071)	0.19(0.015)	0.68(0.051)
¹¹⁸ Sb	3.66(EC)	2.160×10^2	1.29(0.17)	0.86(0.11)	0.23(0.030)
¹²⁴ Sb	2.90(β^-)	5.201×10^6	0.054(0.016)	0.054(0.016)	0.00018(5.3e-05)
¹¹⁵ Te	4.64(EC)	3.480×10^2	0.12(0.012)	0.0036(0.00035)	0.093(0.0090)
¹¹⁷ Te	3.54(β^+)	3.720×10^3	0.59(0.052)	0.11(0.0097)	0.44(0.039)
¹¹⁹ I	3.51(EC)	1.146×10^3	0.53(0.053)	0.052(0.0052)	0.39(0.038)
¹²⁰ I	5.62(EC)	4.896×10^3	0.95(0.091)	0.25(0.024)	0.64(0.061)
¹²² I	4.23(EC)	2.178×10^2	1.97(0.29)	0.78(0.11)	0.76(0.11)
¹²⁴ I	3.16(EC)	3.608×10^5	1.65(0.19)	1.54(0.18)	0.058(0.0066)
¹³⁰ I	2.95(β^-)	4.450×10^4	1.19(0.20)	1.01(0.17)	0.18(0.029)
¹³² I	3.58(β^-)	8.262×10^3	0.43(0.15)	0.28(0.098)	0.14(0.048)
¹³⁴ I	4.18(β^-)	3.150×10^3	0.18(0.043)	0.10(0.024)	0.075(0.018)
¹²¹ Xe	3.75(EC)	2.406×10^3	0.54(0.10)	0.092(0.017)	0.40(0.074)
¹²⁵ Cs	3.10(EC)	2.802×10^3	0.27(0.012)	0.064(0.0029)	0.17(0.0075)
¹²⁶ Cs	4.82(EC)	9.84×10^1	0.080(0.011)	0.0063(0.00086)	0.043(0.0059)
¹²⁸ Cs	3.93(EC)	2.17×10^2	0.23(0.031)	0.034(0.0046)	0.12(0.016)
Total 32 species	-	-	14.4(2.11)	6.28(1.06)	6.46(0.84)
Total All	-	-	16.0(2.34)	6.96(1.17)	7.14(0.93)

P.10 獲得光量シミュレーションの仮定

1. KLG4とROBASTを使用
2. イメージングディテクターを検出器内に配置
 - 検出器中心から3mの位置
 - 角度をずらしながら6台設置
3. 検出器中心で崩壊を起こす粒子を生成、イメージングディテクターの入射面まで光子を輸送 (KLG4)
4. イメージングディテクターの入射面から撮像素子面まで光線追跡 (ROBAST)
5. 6台それぞれで得た画像を検出器中心を軸に回転、重ね合わせる。
6. Vertex reconstruction
重ね合わせた画像からヒット位置の中央値を計算。Vertexとする。
7. Vertexと光線のヒット位置から、電荷比($Q_{\Delta R < 7 \text{ cm}}/Q_{\text{total}}$)を計算

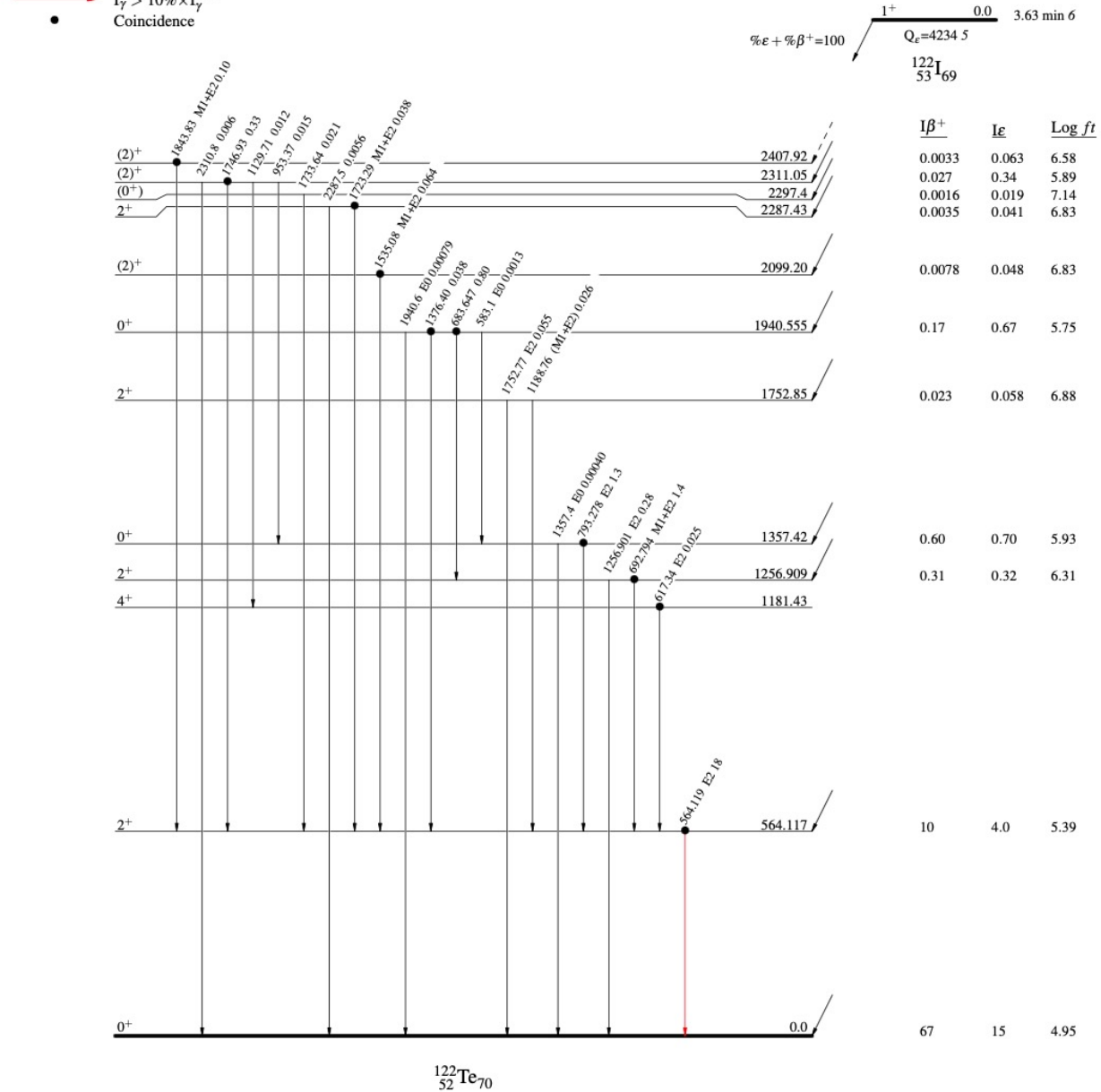
122I 崩壊図式

¹²²I ε decay 1981Ng04,1969Gf01

Decay Scheme (continued)

Intensities: I_(γ+ce) per 100 parent decays

- Legend
- I_γ < 2% × I_γ^{max}
 - I_γ < 10% × I_γ^{max}
 - I_γ > 10% × I_γ^{max}
 - Coincidence



現在の設計

※液シンの屈折率も考慮した調整はまだ

光学設計ソフトZemaxでレンズやミラーの形状&配置を調整

