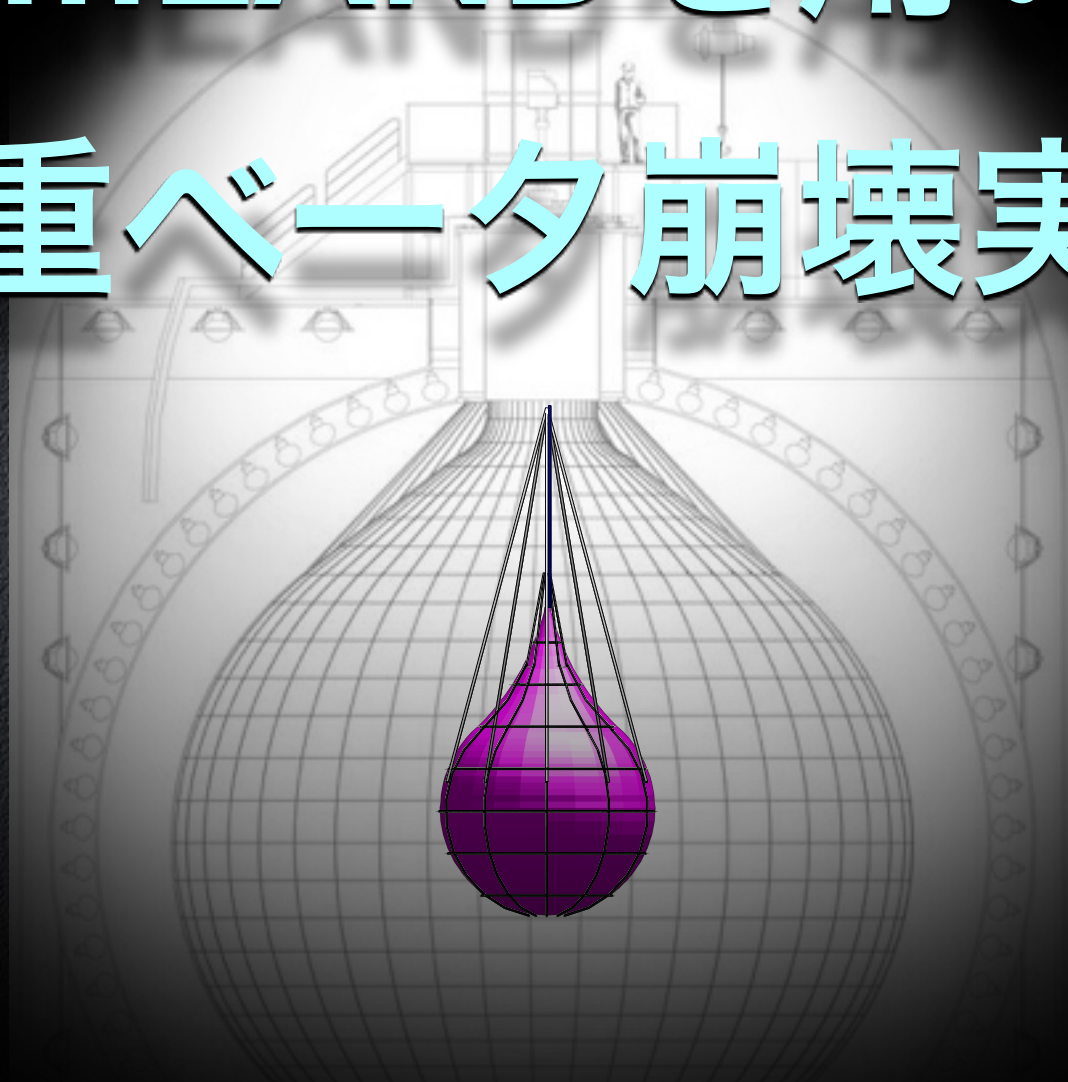
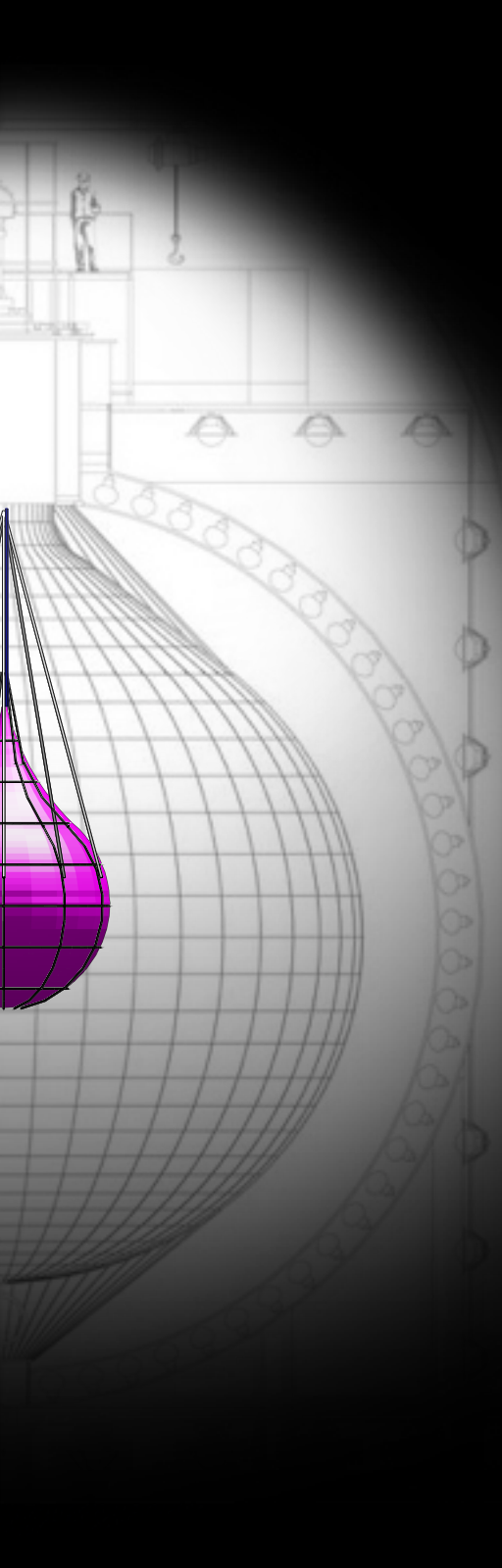


KamLANDを用いた 二重ベータ崩壊実験



東北大学 ニュートリノ科学研究センター
D1 渡辺 寛子

A technical drawing of a detector structure, likely for neutrino experiments. It features a large, curved, grid-like structure with a purple sphere at the bottom left. The drawing is in a perspective view, showing the internal components and the overall shape of the detector.

Outline

1. 二重ベータ崩壊の観測意義
2. KamLAND実験のプロジェクトプラン
3. シミュレーションによるバックグラウンドと検出感度の評価
4. 現状報告
5. まとめ

1. 二重ベータ崩壊の観測意義

- 二重ベータ崩壊とは

- 観測意義

二重ベータ崩壊とは

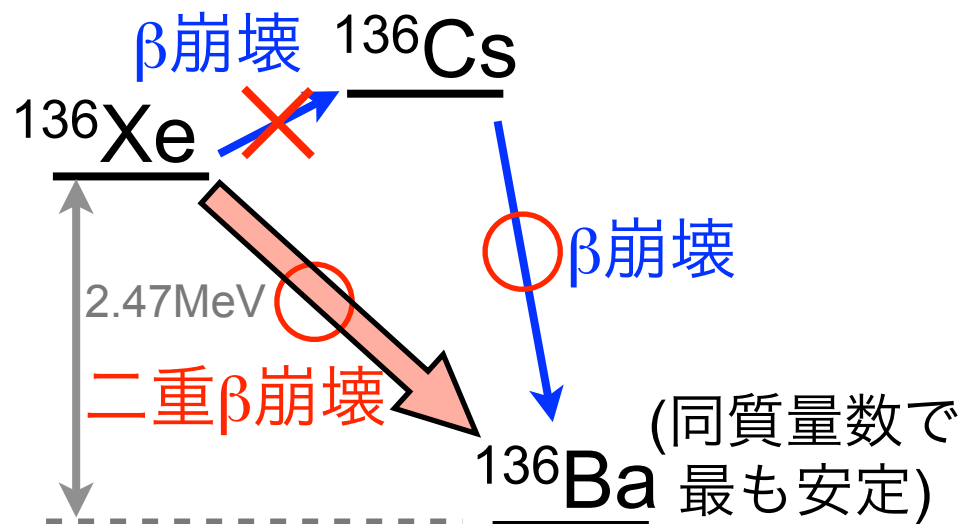
特別な準位の安定同位体によりのみ許される、原子核の最も稀な崩壊過程

▶ 準位の条件

例) 質量数=136の原子核

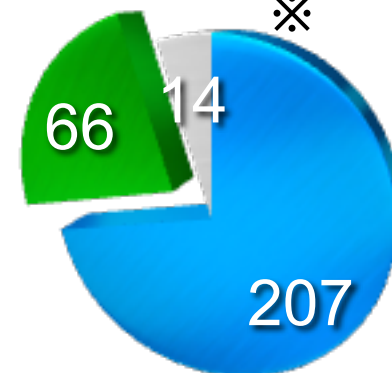
質量 $^{136}\text{Xe} < ^{136}\text{Cs} \rightarrow$ β 崩壊出来ない

質量 $^{136}\text{Xe} > ^{136}\text{Ba} \rightarrow$ 二重 β 崩壊によって ^{136}Ba に壊変



☑ 同質量数の原子核中で二番目に質量が小さく、通常の β 崩壊がエネルギー的に許されない

▶ 二重ベータ崩壊核 [安定同位体の内訳]



- 崩壊しない
- 崩壊可能(二重ベータ崩壊)
- 崩壊可能(その他)

- ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr ,
 ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te ,
 ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd 等

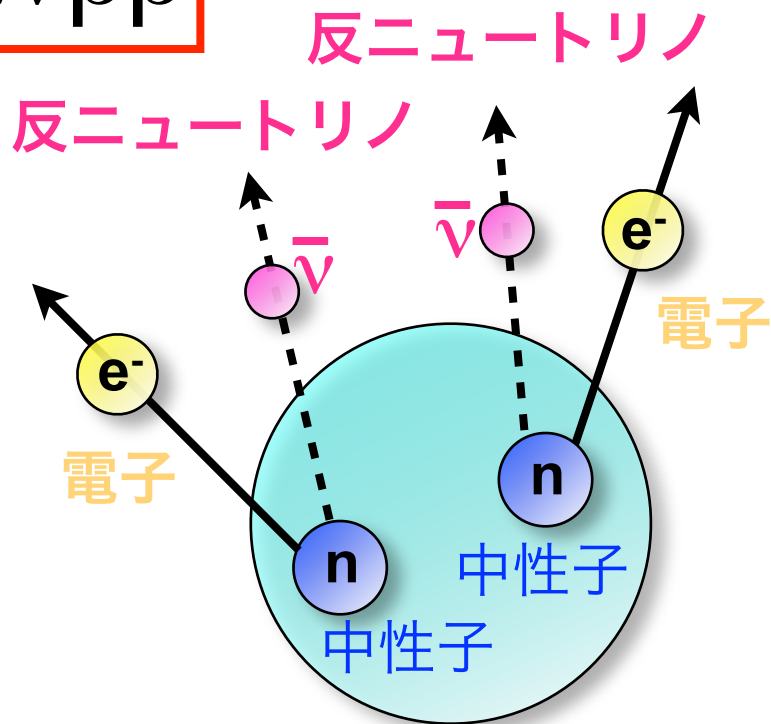
- 極めて長い半減期
最も短い核種でも $\sim 10^{19}$ 年。
放射性同位体より3桁以上長い。

※自然界に常に一定の割合で存在する原子核

観測意義

▶ 2つの二重ベータ崩壊モード

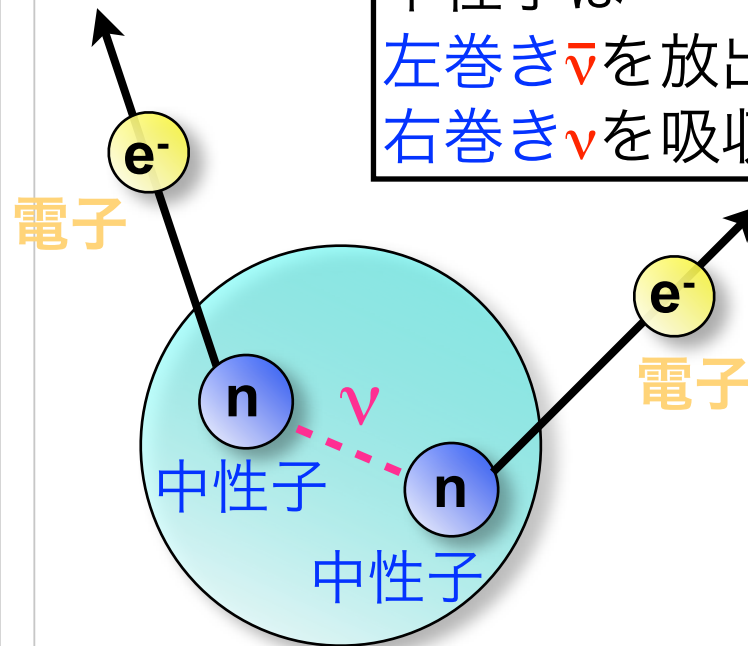
$2\nu\beta\beta$



1つの原子核中で2つの中性子がβ崩壊

- 電弱相互作用の標準模型の枠内で起こりうる。
- 約10の核種で崩壊寿命を測定済み。

$0\nu\beta\beta$



ニュートリノが放出されない

標準模型では禁止される、
レプトン数非保存の過程

[標準模型]

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

$$\bar{\nu} + n \rightarrow p + e^-$$

中性子は

左巻き $\bar{\nu}$ を放出し

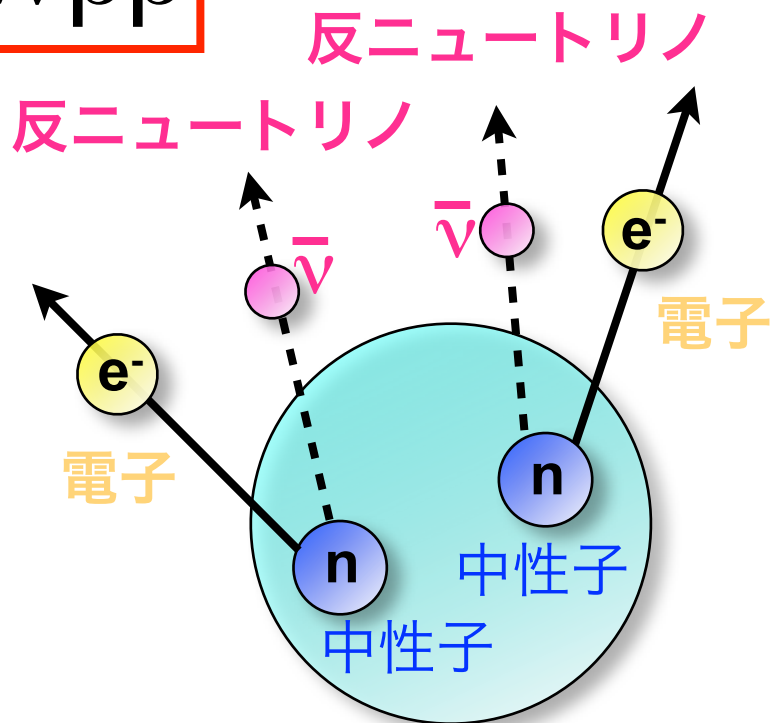
右巻き ν を吸収する



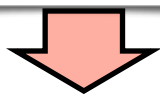
観測意義

2つの二重ベータ崩壊モード

$2\nu\beta\beta$

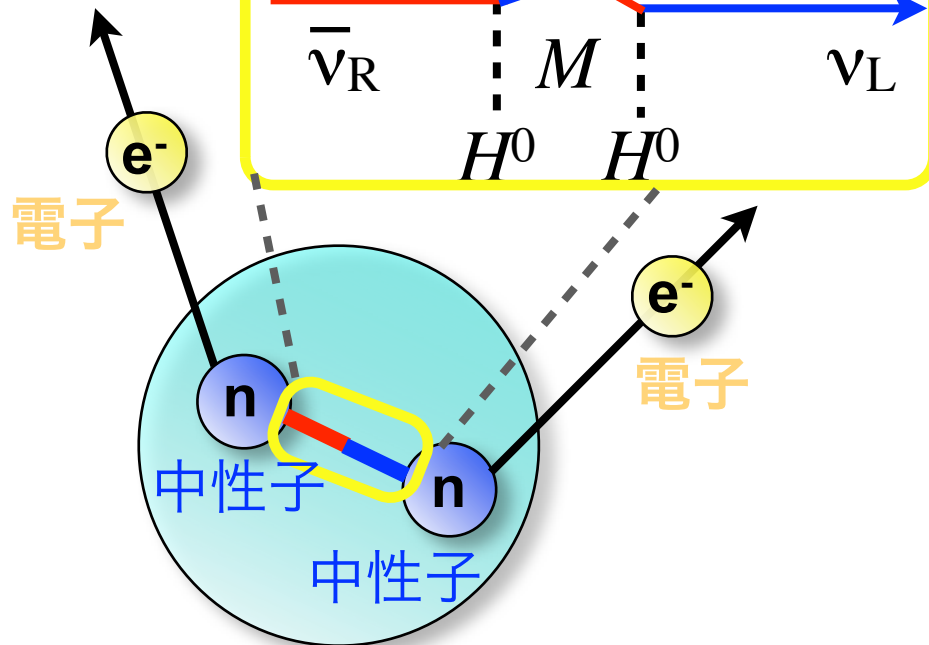


1つの原子核中で2つの中性子がβ崩壊



- 電弱相互作用の標準模型の枠内で起こりうる。
- 約10の核種で崩壊寿命を測定済み。

$0\nu\beta\beta$



ニュートリノが放出されない



標準模型では禁止される、
レプトン数非保存の過程

☑ ニュートリノがマヨラナ性
を持てば可能

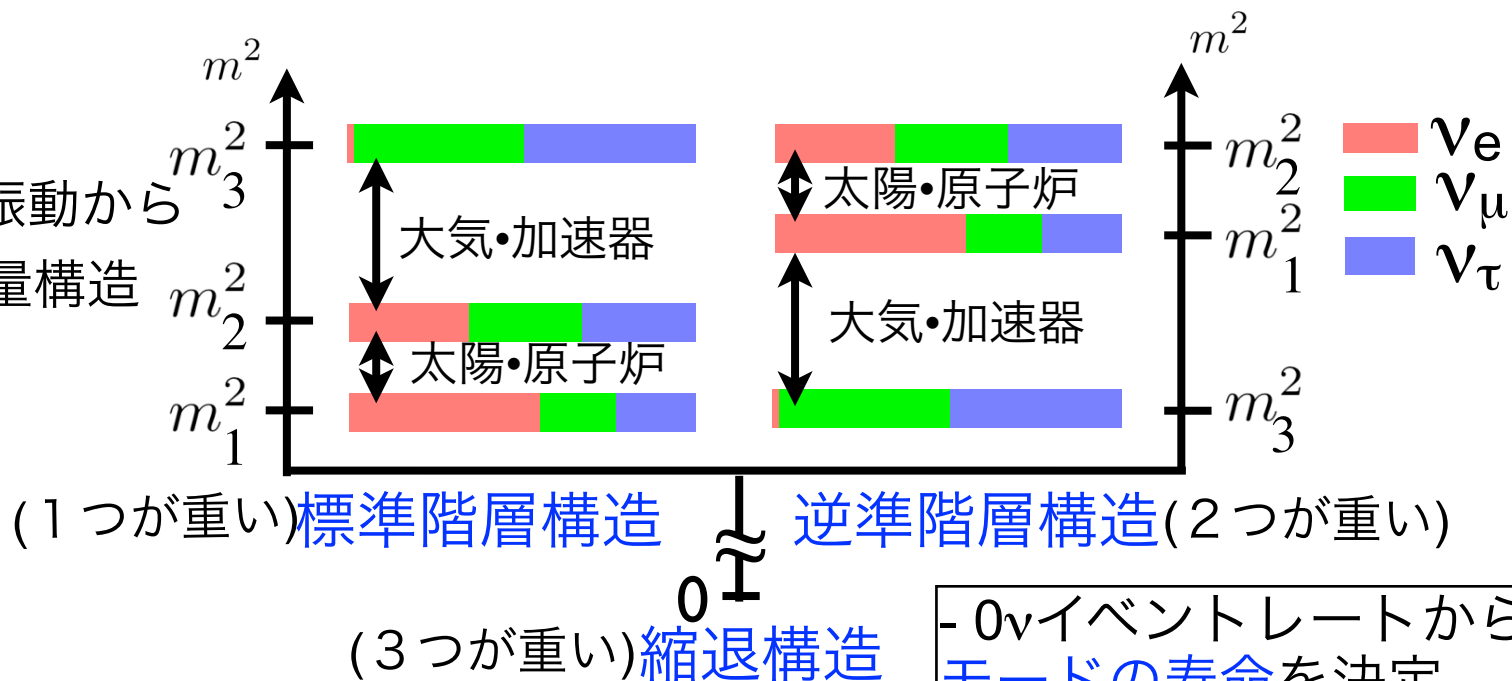
観測意義

- マヨラナニュートリノの確証を得る
- ニュートリノの質量構造を決定

$$\nu \stackrel{?}{=} \bar{\nu}$$

質量構造

ニュートリノ振動から
予想される質量構造



ニュートリノ振動

質量二乗差

質量絶対値

宇宙論

現在の感度 0.2~0.7eV
将来計画 0.05eV
(間接的測定)

ベータ崩壊

現在の感度 2eV
将来計画 0.2eV

二重ベータ崩壊

現在の感度 0.2~0.4eV
将来計画 0.01~0.03eV
高感度

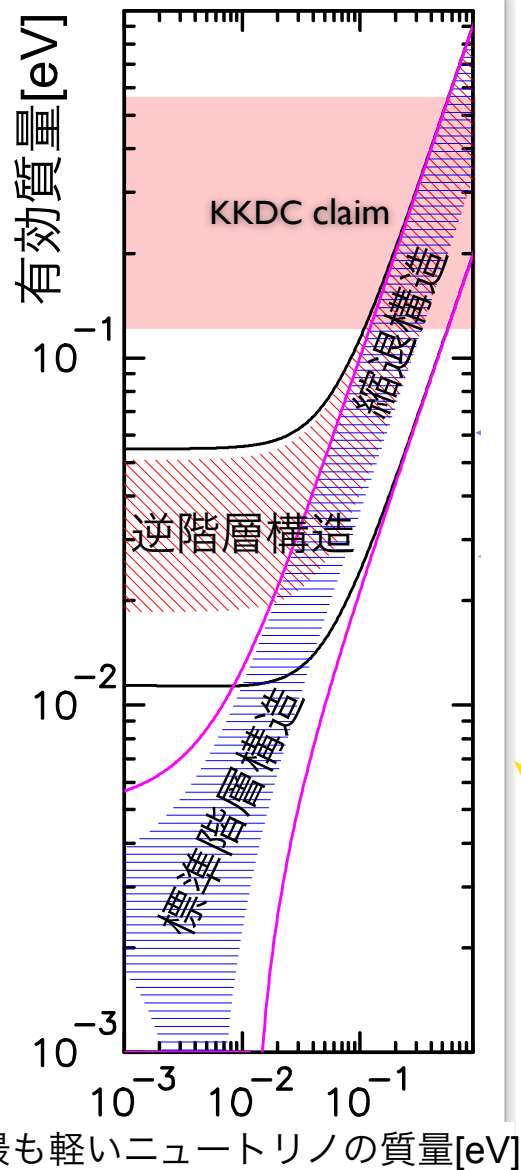
- 0ν イベントレートから崩壊モードの寿命を決定
- 0ν の発生確率 $\propto$ 有効質量の二乗
→ 質量の絶対値を求められる

- ☑ マヨラナニュートリノの確証を得る
- ☑ ニュートリノの質量構造を決定

※有効質量

U_{ej} : ニュートリノの混合振幅

$$\langle m_\nu \rangle = \sum_j m_j U_{ej}^2$$



※KKDC claim

Heidelberg Moscow実験の一部

11kg ^{76}Ge , 71kg・年

$T_{0\nu 1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25}$ 年

$\langle m_\nu \rangle = 320 \pm 20$ meV

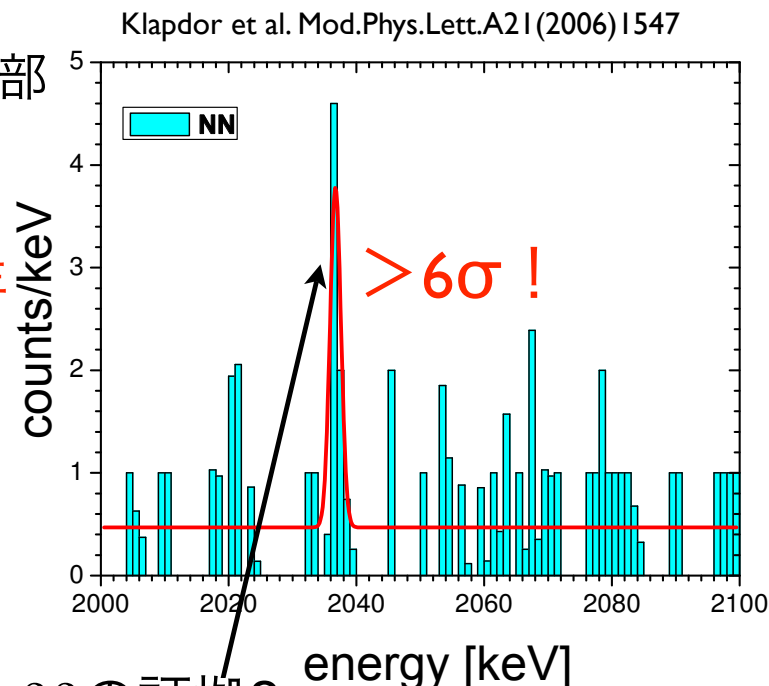
理論の誤差は無視

統計的優位性は高いが

バックグラウンドが多い

ため信用されていない。

$0\nu\beta\beta$ の証拠?



波及する研究

- なぜニュートリノは軽いのか?
- 真の大統一理論は?
- なぜ物質は生き残れたのか?

シーソー機構

レプトジェネシス理論

素粒子・宇宙研究の謎を
解き明かすきっかけ

▶測定方法

放出される一対の電子をつかまえば良い

1. 地球科学的方法

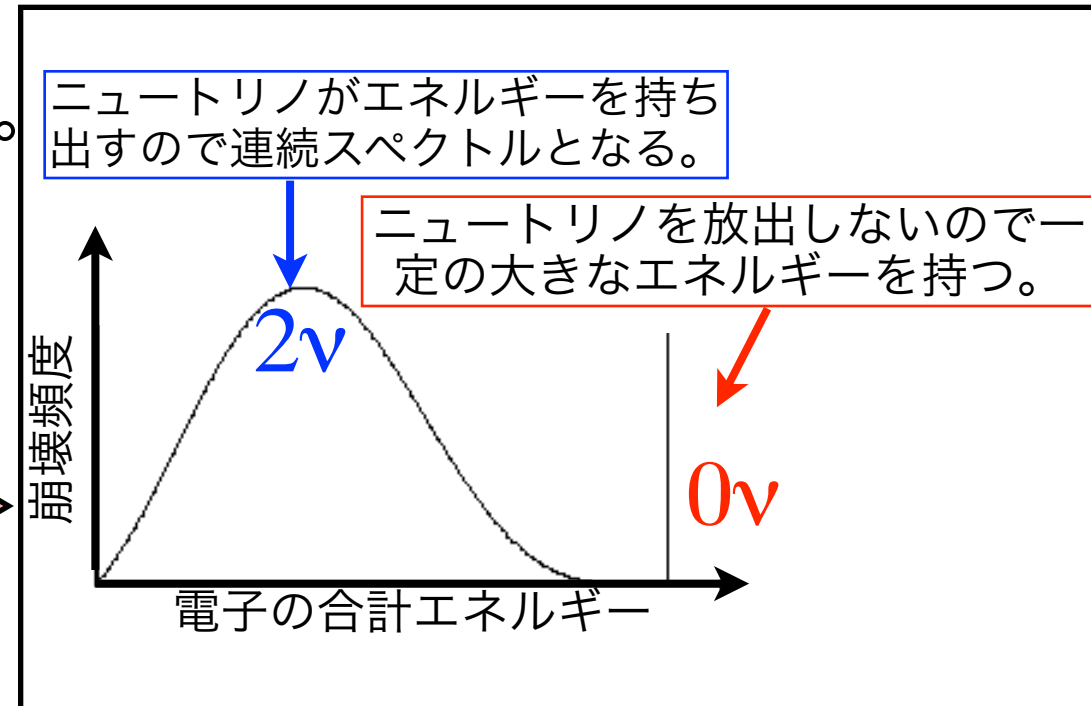
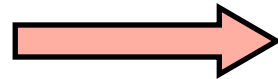
鉱石を化学的に処理し質量分析。

0ν と 2ν を区別出来ない。

2. 放射科学的方法(^{238}U)

3. 直接測定

0ν と 2ν を区別出来る。



☑ ニュートリノの **マヨラナ性** を確認出来る唯一の現実的方法

2. KamLAND実験のプロジェクトプラン

- KamLANDを使うメリット

- ^{136}Xe を使うメリット

- 実験の概要

☒ 低コストで迅速かつタイムリーに
世界最先端の感度を実現出来る

ニュートリノレス二重ベータ崩壊は非常に稀なイベント

検出器への要求性能

1. 低バックグラウンド環境
2. 多量な二重ベータ崩壊核を検出器に導入

KamLANDの得意分野！

KamLANDを使うメリット

1. 極低放射能環境をすでに実現済み。

超純液体シンチレータ & 半径9mに及ぶアクティブシールド

$$^{238}\text{U} < 3.5 \times 10^{-18} \text{g/g}, \quad ^{232}\text{Th} < 5.2 \times 10^{-17} \text{g/g}$$

2. ほぼ無改造で二重ベータ崩壊核を導入出来るため低コスト。

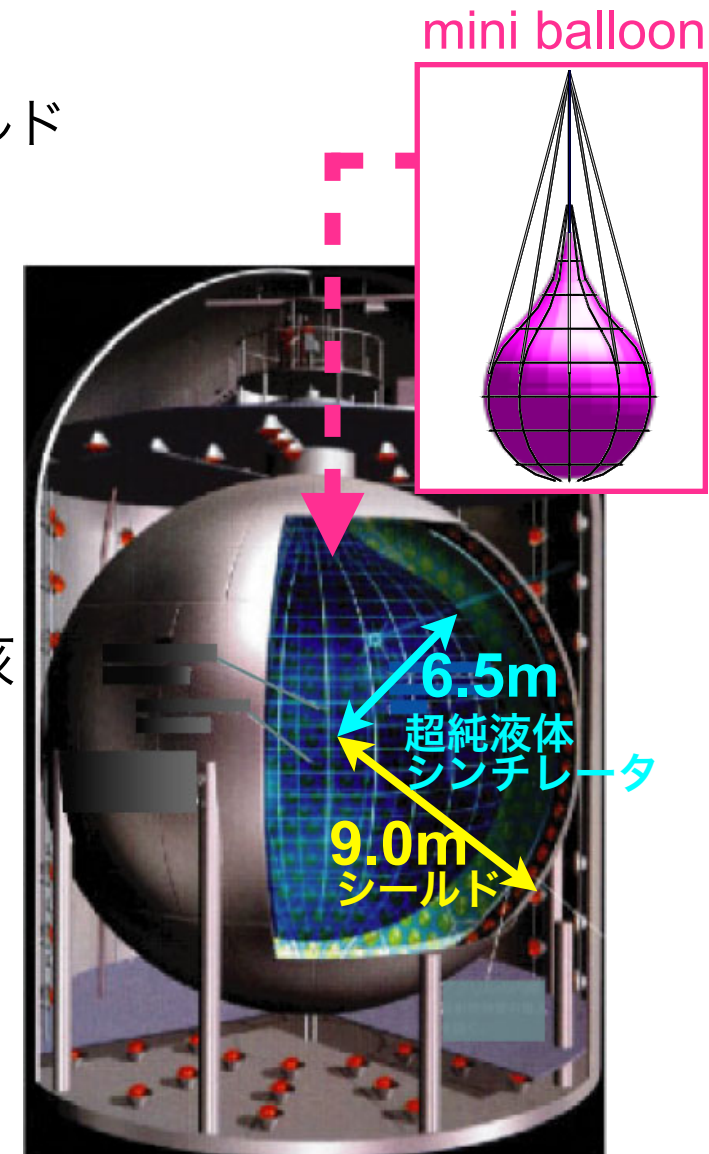
① mini balloon を上部からKamLANDに入れる

② ^{136}Xe 含有液体シンチレータを注入

3. 巨大であるため、予算に応じて二重ベータ崩壊核を増やして高感度を目指す。(10トンまで可能)

4. 集光ミラーや高性能液体シンチレータで高分解能化も可能。

5. 原子炉・地球ニュートリノも継続出来る。



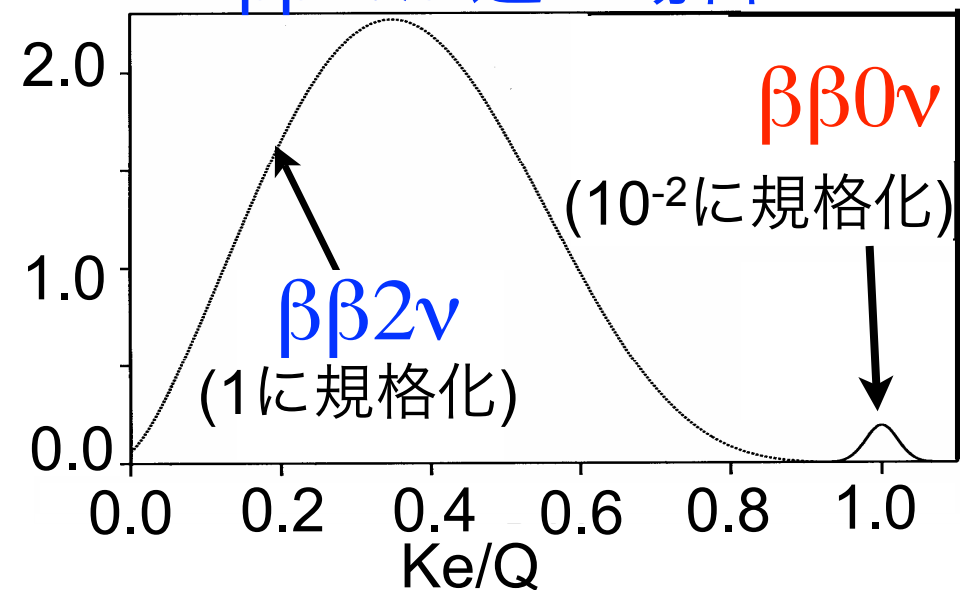
^{136}Xe を使うメリット

- ✓同位体濃縮、純化手法が確立している。
- ✓シンチレータに3wt%以上可溶で回収も容易。
- ✓ $\beta\beta 2\nu$ の半減期が長く、分解能への要求が緩い。

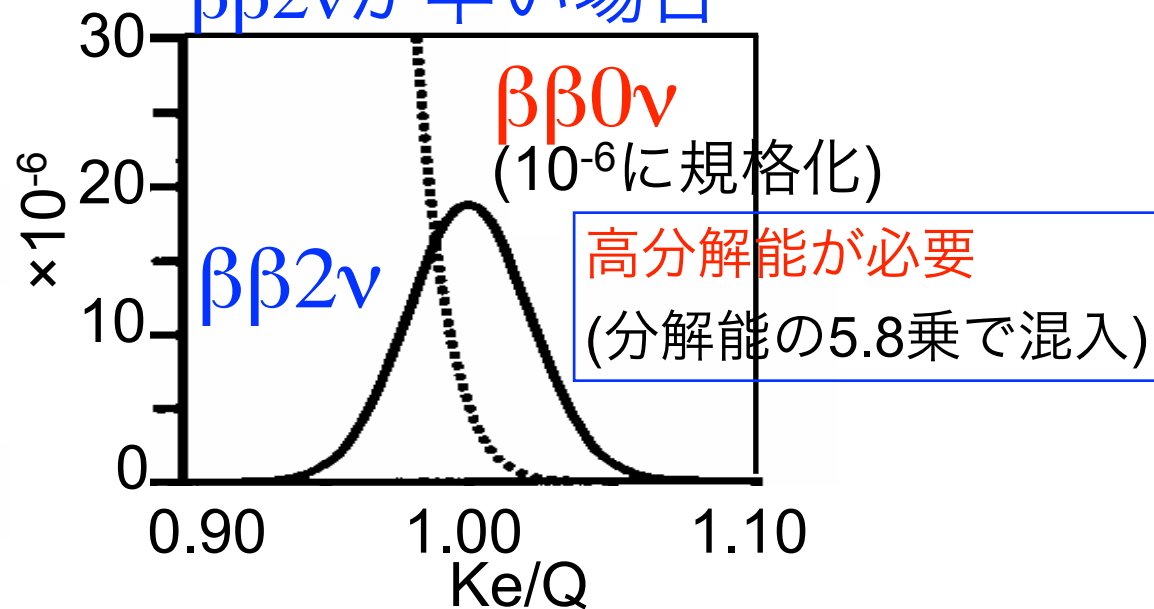
▶二重ベータ崩壊核の比較

原子核	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ 実験値 (year)	自然存在比 (%)	Q値 (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	最大のQ、2ν早い
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	0.86×10^{27}	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	7.8	2039	半導体
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.44×10^{26}	$(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$	9.2	2995	
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	0.98×10^{27}	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$	2.8	3351	
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	2.37×10^{26}	$(7.1 \pm 0.4) \times 10^{18}$	9.6	3034	2ν早い
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.86×10^{26}	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	7.5	2805	
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	4.53×10^{27}	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{24}$	31.7	867	
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.16×10^{26}	$(0.9 \pm 0.1) \times 10^{21}$	34.5	2529	存在比大
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	4.55×10^{26}	$> 10^{22}$	8.9	2476	2ν遅い、希ガス
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	2.23×10^{25}	$(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$	5.6	3367	0ν、2ν早い

$\beta\beta 2\nu$ が遅い場合



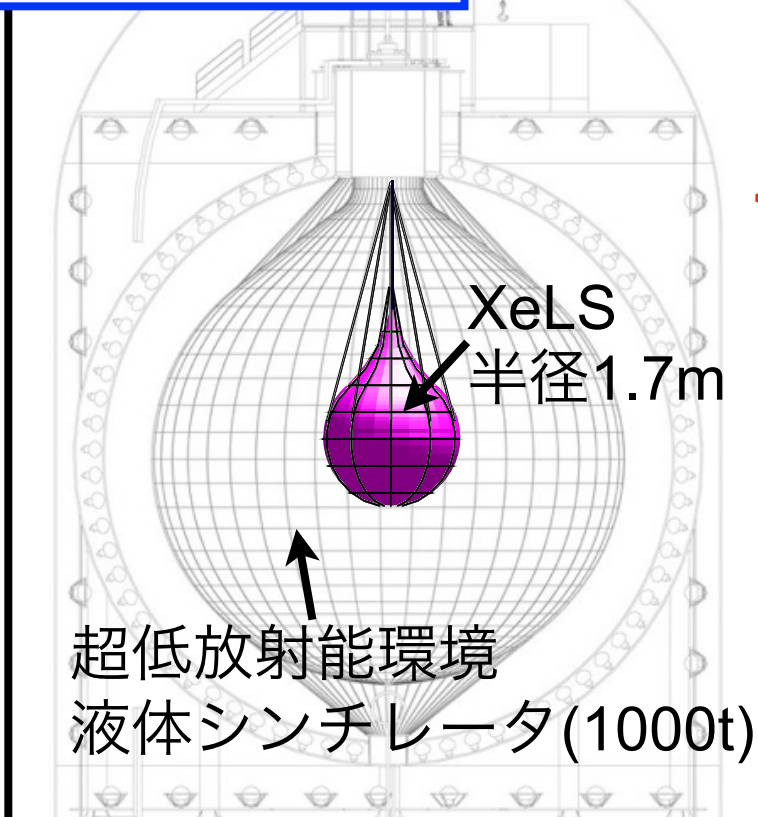
$\beta\beta 2\nu$ が早い場合





実験の概要

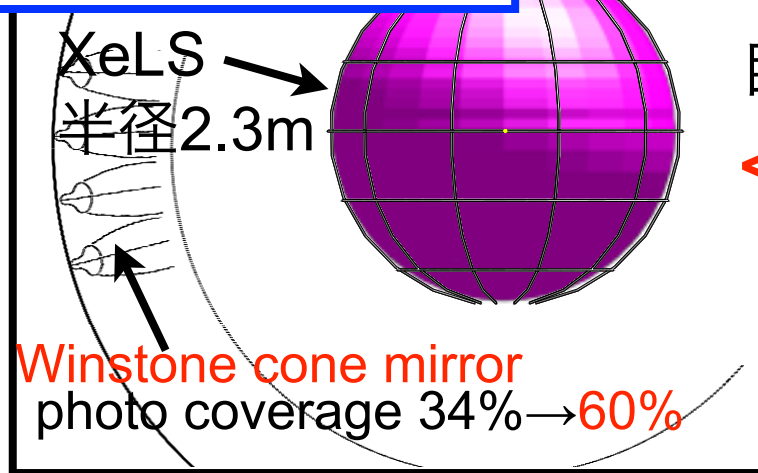
1st phase **400kg** 2011~ 予算有り



目標感度(2年)
 $\langle m_\nu \rangle \sim 50 \text{ meV}$

 KKDCクレイム,
 縮退構造

2nd phase **1000kg** 2014~

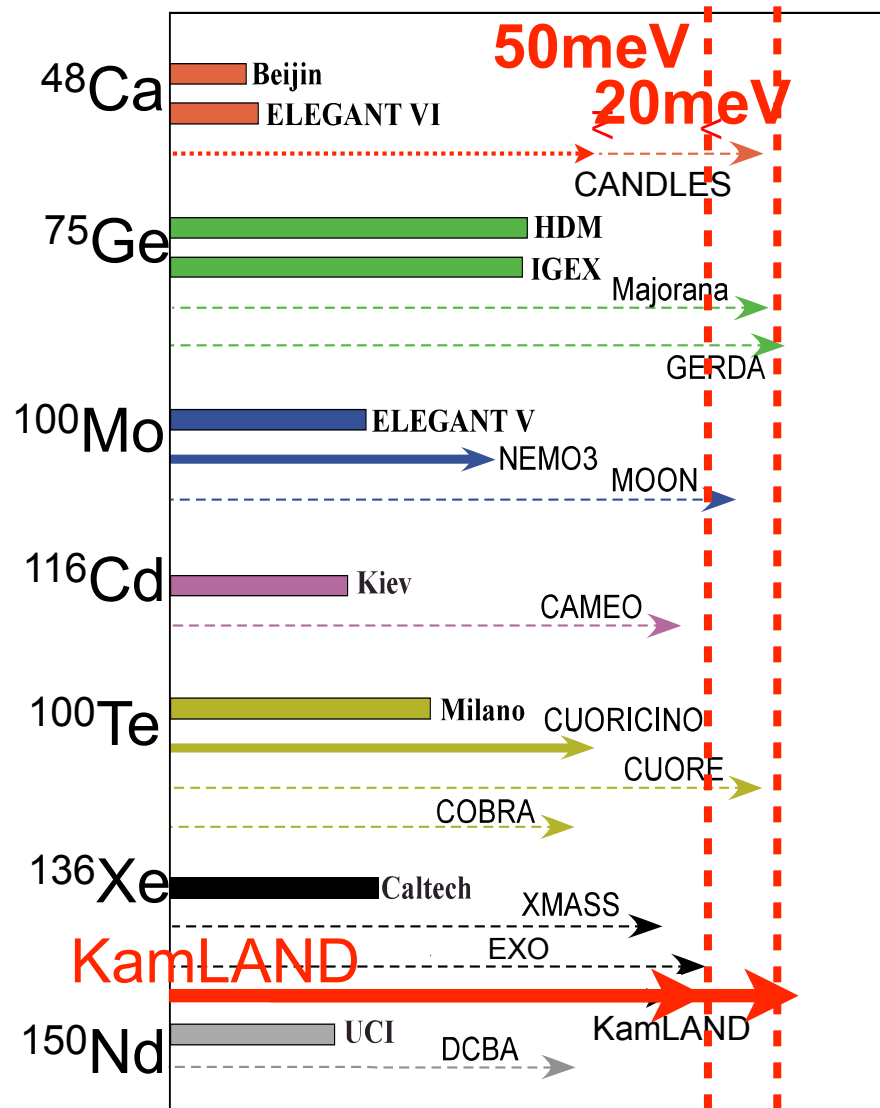


目標感度(5年)
 $\langle m_\nu \rangle \sim 20 \text{ meV}$

 逆階層構造

[競合実験との比較]

マヨラナニュートリノ質量[eV]
 10 1 0.1 0.01



世界最先端感度を実現

3. シミュレーションによる バックグラウンドと検出感度の評価

- バックグラウンド
- 検出感度の評価

バックグラウンド

1. ^{136}Xe $2\nu\beta\beta$

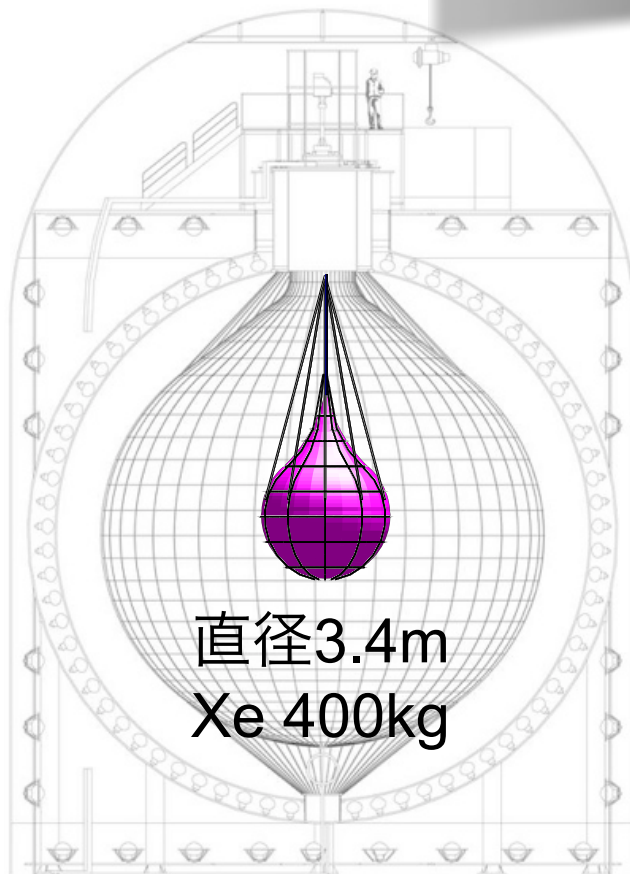
2. 核破砕反応: ^{10}C , ^{11}Be

3. ^8B 太陽ニュートリノ

4. mini balloonの不純物: ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{40}K

5. 液体シンチレータの不純物: ^{208}Tl

主要なバックグラウンド



▶ シミュレーション条件: geant4 (v4.9.1)

- mini balloon

直径3.4m, 厚さ $15\mu\text{m}$, nylon6製, 質量700g

- XeLS

Xe 400kg含有, KamLAND LSと同密度、同発光量

- 分解能

Energy : $6.8\%/\sqrt{E}$

Vertex : $12.5\text{cm}/\sqrt{E}$

予想スペクトル(カット条件無し)

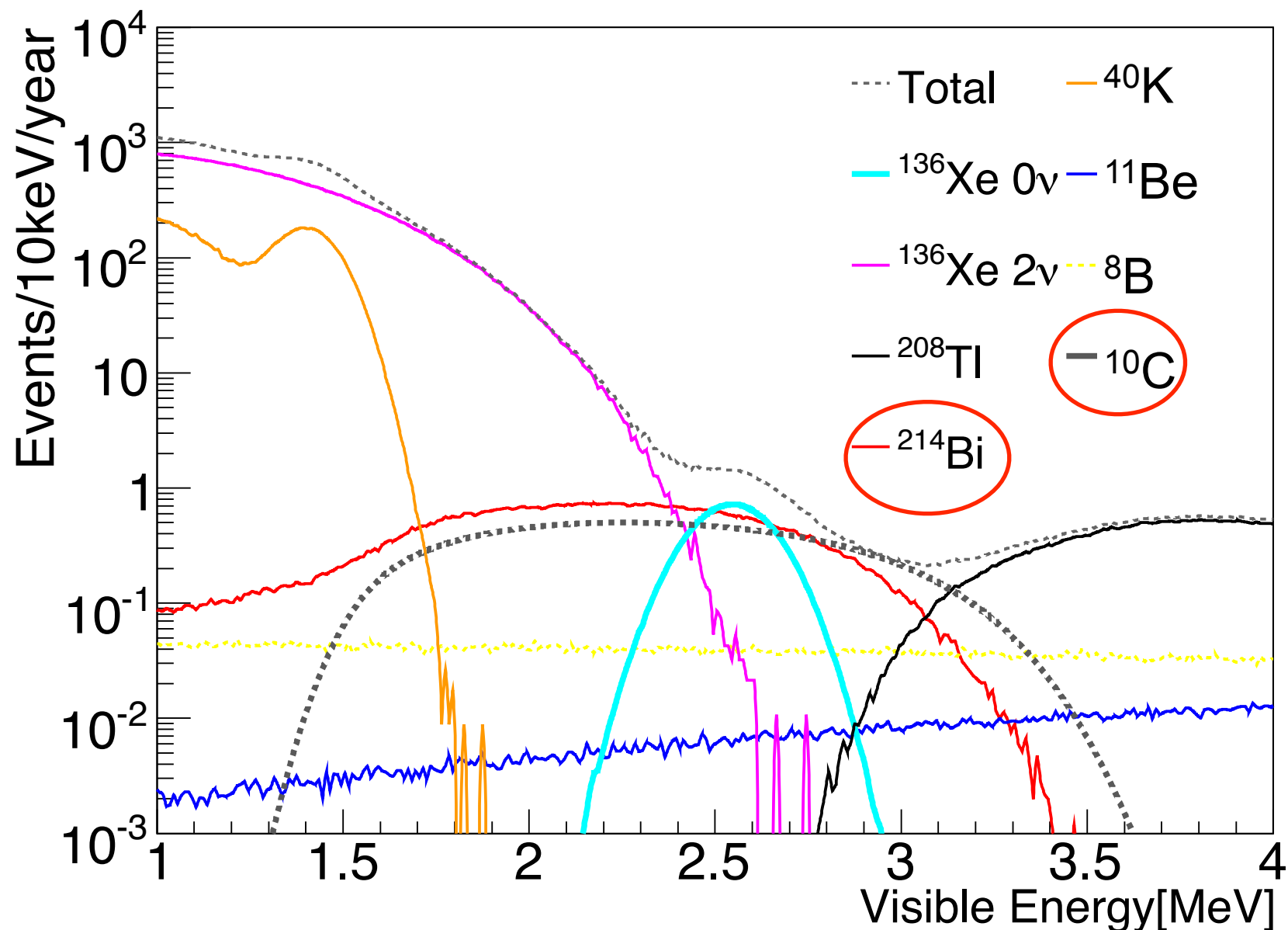
mini balloon

^{232}Th , $^{238}\text{U} = 10^{-12} \text{ g/g}$, $^{40}\text{K} 10^{-11} \text{ g/g}$

$\langle m_\nu \rangle = 0.15 \text{ eV}$ (minimum KKDC)

$T_{1/2}(0\nu) = 9.8 \times 10^{25} \text{ y}$

$T_{1/2}(2\nu) = 1.0 \times 10^{22} \text{ y}$



0ν エネルギー領域では ^{10}C , ^{214}Bi のバックグラウンドが支配的

▶ 支配的なバックグラウンドの除去

- ^{10}C : 宇宙線ミュオン起源

3 事象の遅延同時計測タギング

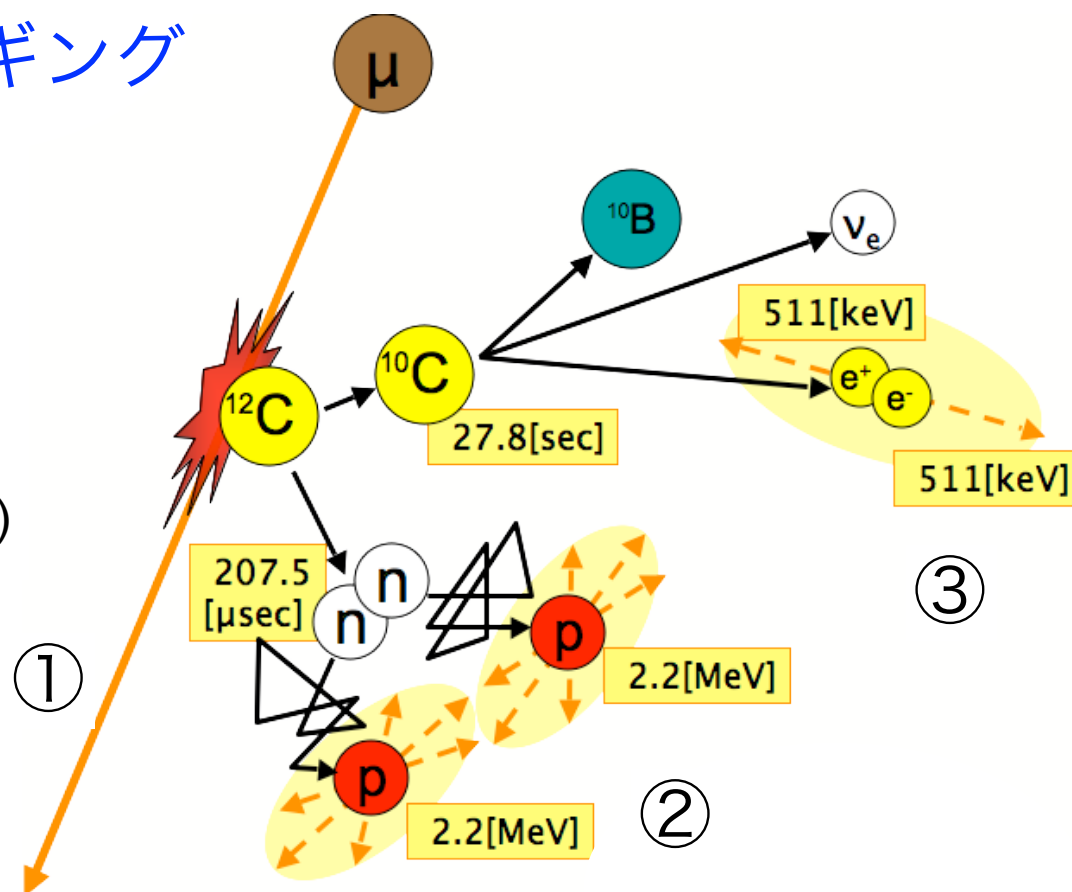
① ミュオン ($> 100\text{MeV}$)

↓ $210\mu\text{sec}$

② 中性子捕獲イベント ($\sim 2.2\text{MeV}$)

↓ 28sec

③ ^{10}C 崩壊イベント ($1.5 \sim 3.5\text{MeV}$)



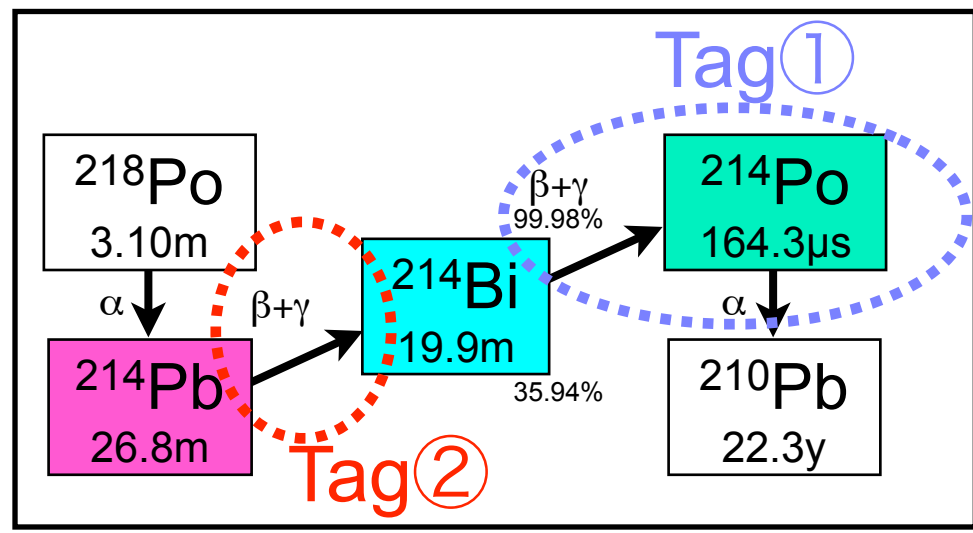
ミュオンの大信号後でも小信号を記録
できるようなデッドタイムフリーの回路

☑ 開発済み, KamLANDへの
インストール完了

90%のタグが可能

- ^{214}Bi : mini balloon中の ^{238}U 起源

• 2つのタグ方法を使用



1. Tag① $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$ 遅延同時計測

2. Tag② $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ events

- $^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ α 線

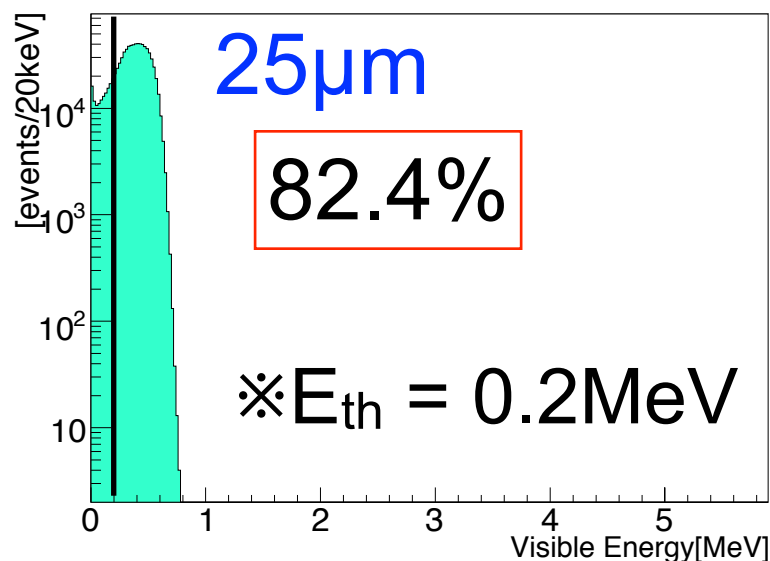
mini balloonが薄い程効率が良い

厚さ	α 線の出てくる割合
50 μm	58.6%
25 μm	80.1%
15 μm	88.8%

1. Tag① $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$ 遅延同時計測

- $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po}$ β 線

energy threshold以上のイベント

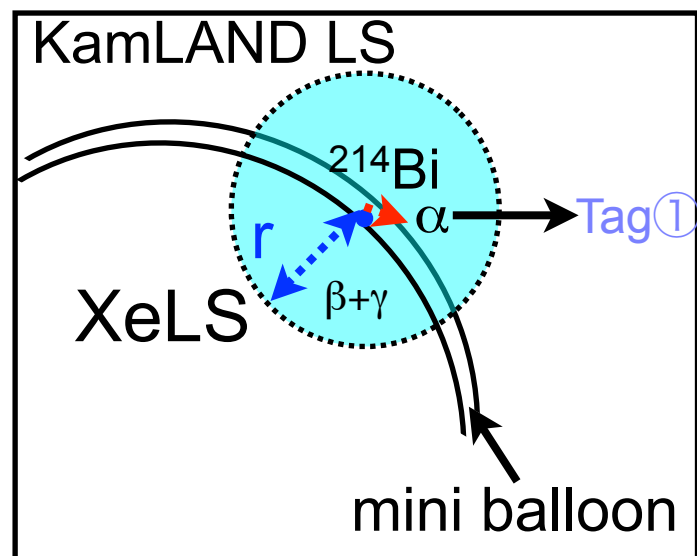


total

厚さ	α 線 タグ割合	$E > 0.2\text{MeV}$	Total
50 μm	58.6%	63.5%	37.2%
25 μm	80.1%	82.4%	66.0%
15 μm	88.8%	89.7%	79.7%

2. Tag② $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ events

^{214}Bi (半減期19.3分)のイベントからさかのぼって、 ^{214}Pb イベントを探す
→低バックグラウンド環境が必要



パラメータ

1. ^{214}Bi 周りの選択範囲(r)
2. 時間間隔
3. mini balloon中の ^{40}K 濃度

1. ^{214}Bi 周りの選択範囲 : $r = 40\text{cm}$ →

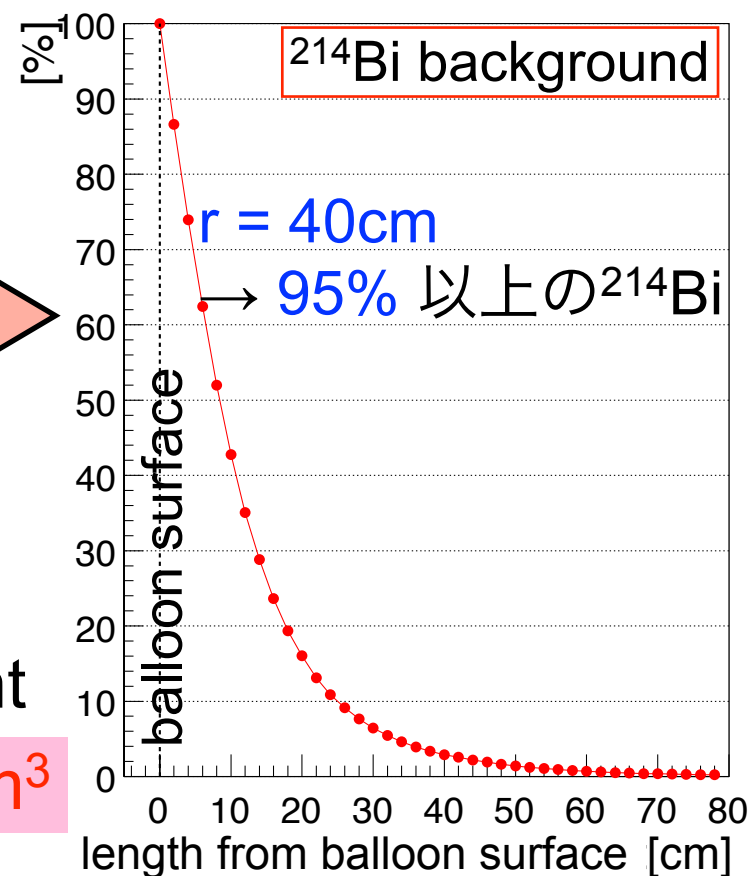
2. 時間間隔 : 1時間 → 87.6% タグ

3. バックグラウンドレートの見積もり

$$x\text{Bq/m}^3 \times \frac{4}{3}\pi(40\text{cm})^3 \times 3600\text{sec} < 0.1\text{event}$$

$$\text{バックグラウンドレート}(x) < 0.1\text{m Bq/m}^3$$

→ $^{40}\text{K} < 10^{-11}\text{g/g}$ (これを超えるとTag②が出来ない)

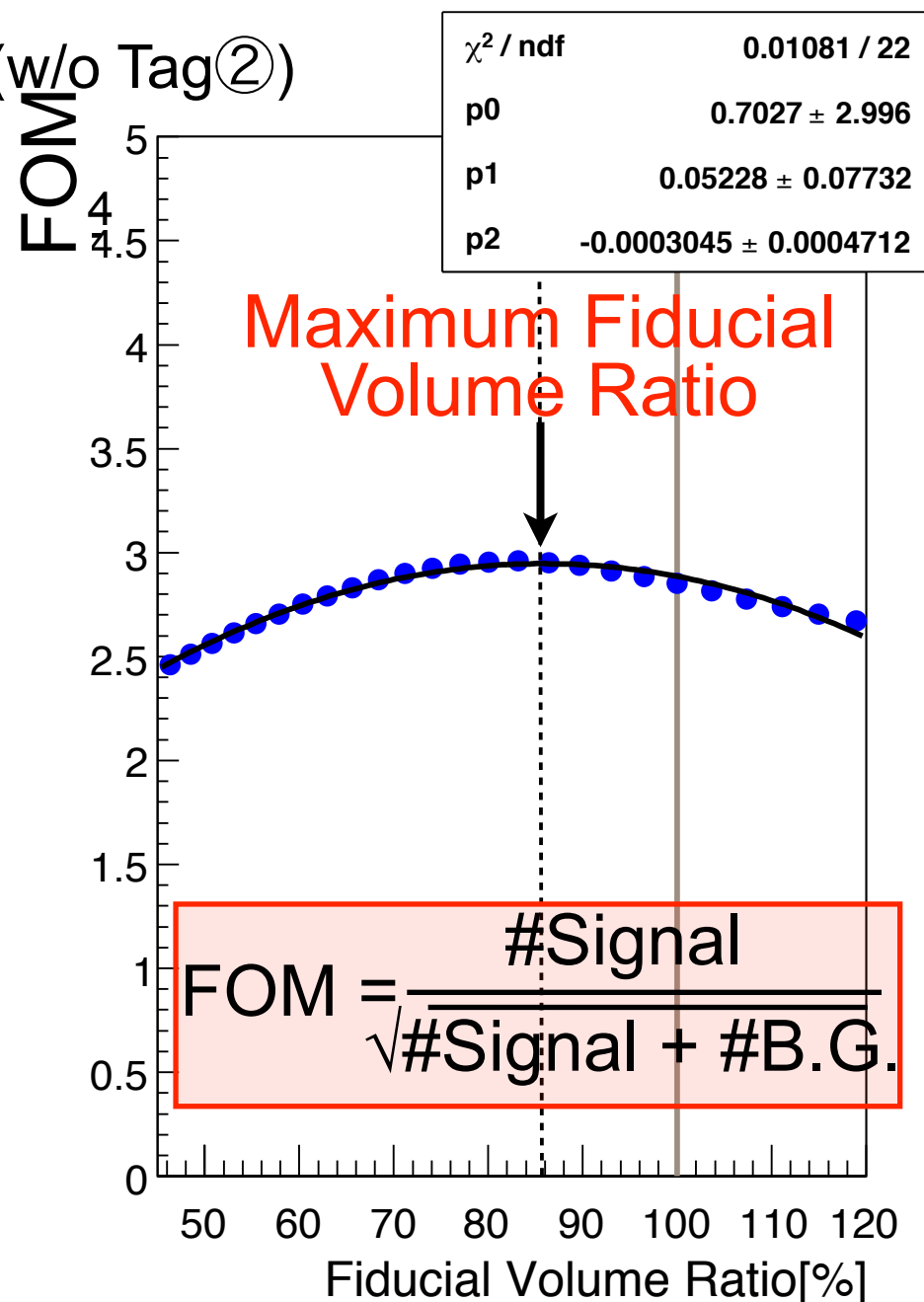
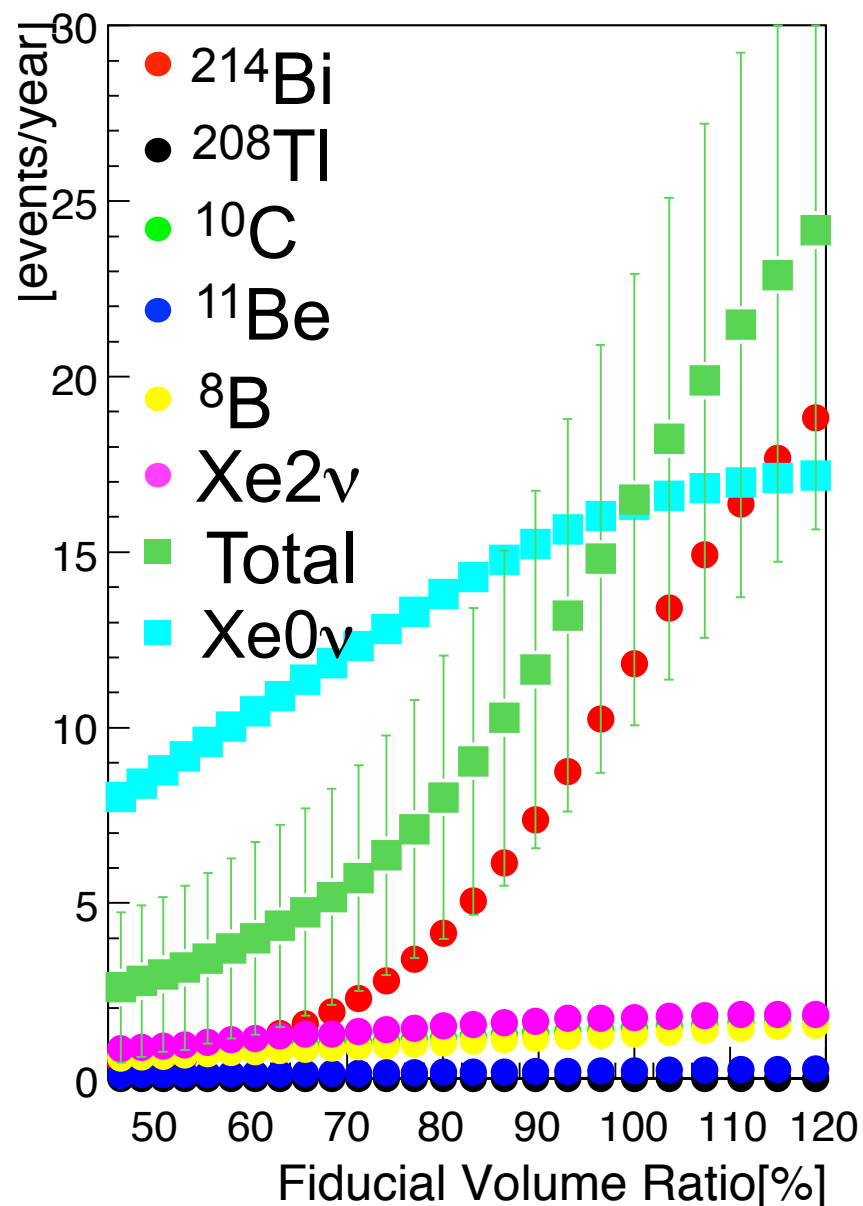


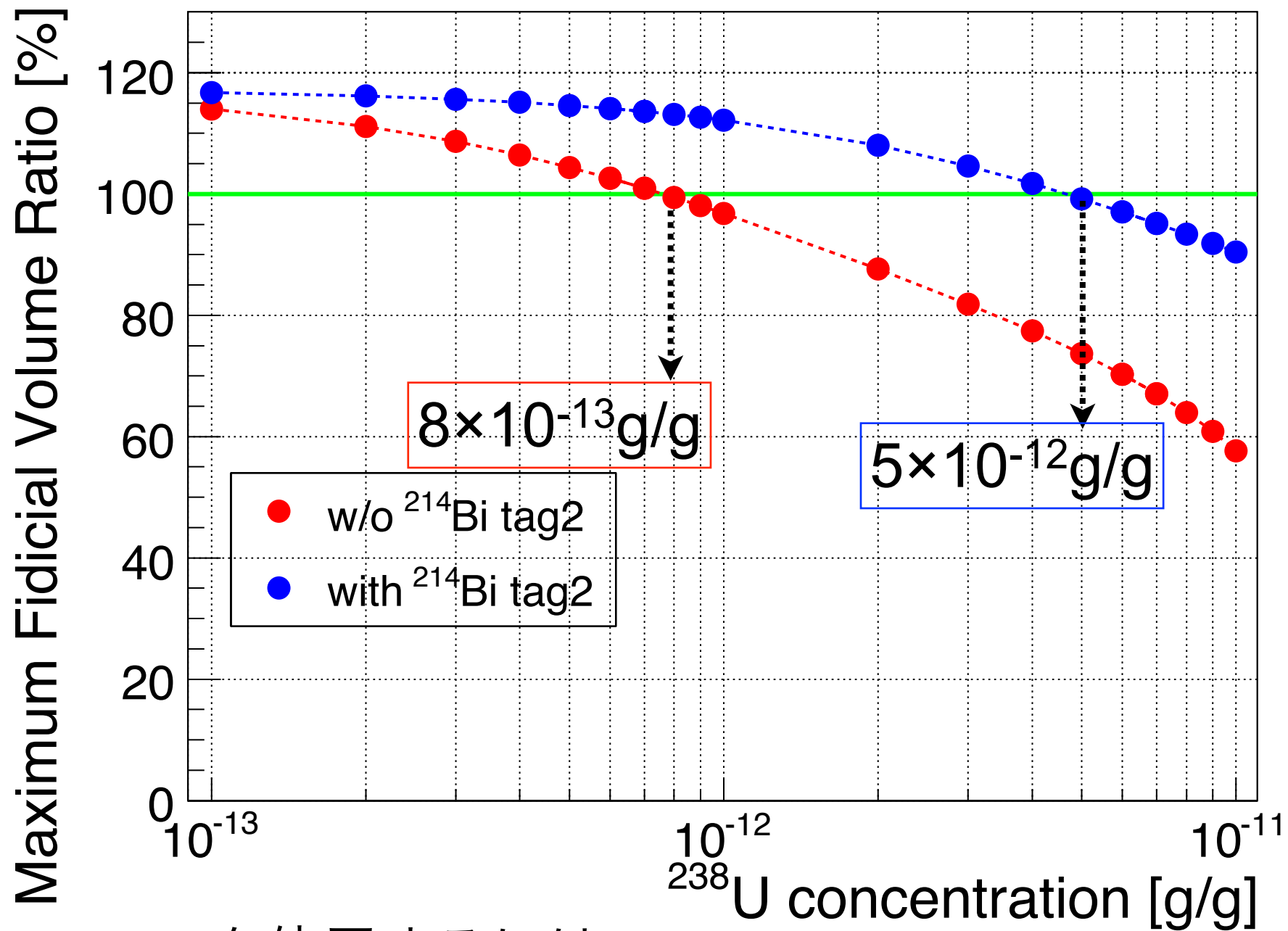
● ^{238}U 濃度とfiducial volumeの関係

fiducial volumeを決める支配的な要素→ ^{214}Bi

各 ^{238}U 濃度の時のfigure of meritを計算→最大となるfiducial volumeを計算

ex) ^{238}U , ^{232}Th : 10^{-12} [g/g], ^{40}K : 10^{-9} [g/g](w/o Tag②)





XeLS 100%を使用するには

Tag②不可能: $^{238}\text{U} < 8 \times 10^{-13} \text{ g/g}$

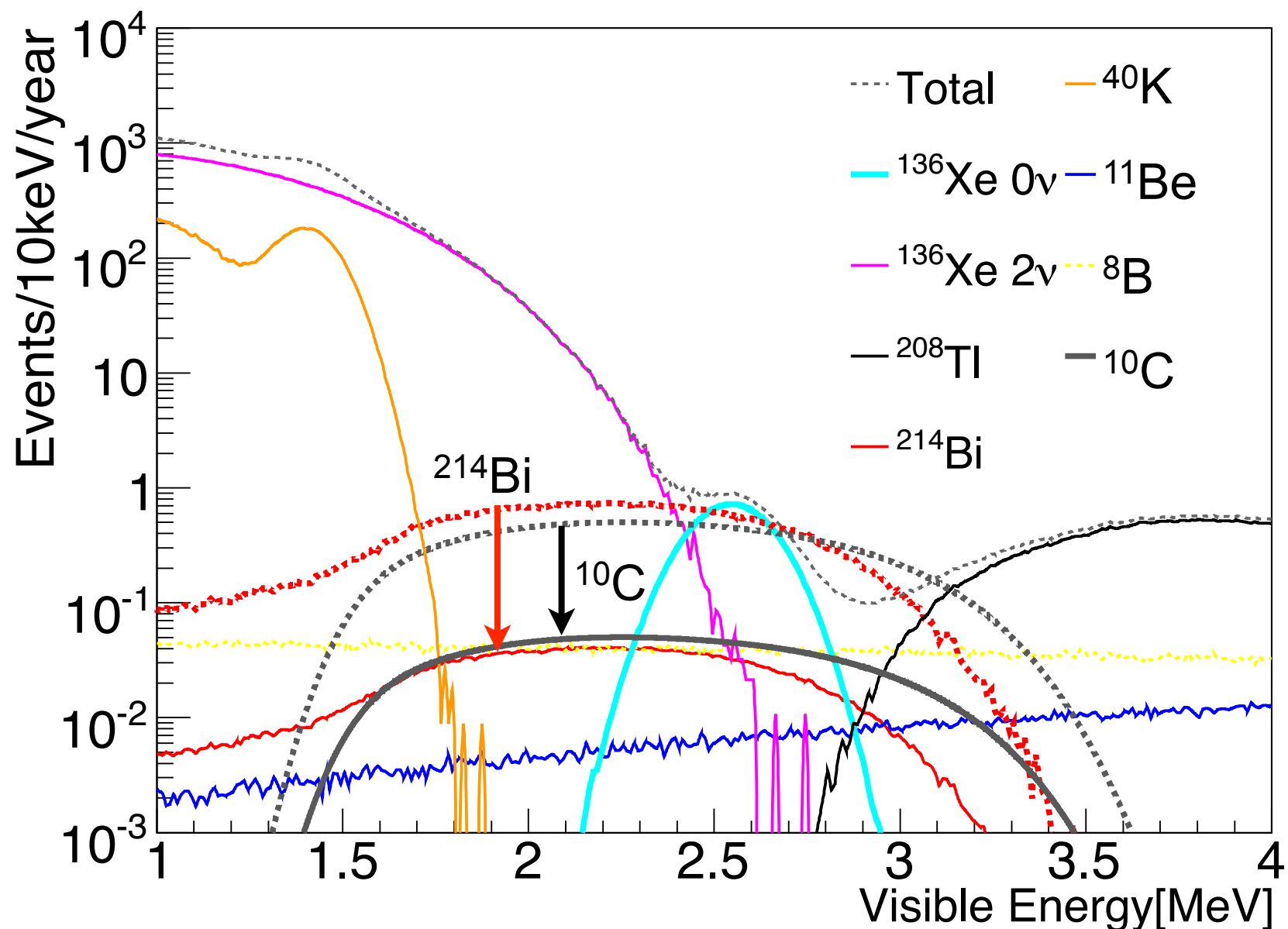
Tag②可能: $^{238}\text{U} < 5 \times 10^{-12} \text{ g/g}$

☑ 極低バックグラウンド
のバルーン素材が必要

タグ後の予想スペクトル

mini balloon

^{232}Th , $^{238}\text{U} = 10^{-12} \text{ g/g}$, $^{40}\text{K} 10^{-11} \text{ g/g}$



各タグによって大幅なバックグラウンドの除去が可能

▶バックグラウンドの詳細

1年間の観測で期待されるイベント数 $\langle m_\nu \rangle = 0.15 \text{ eV}$, QRPAモデル

$^{136}\text{Xe } 2\nu$	^{208}Tl	^{214}Bi	^{10}C	^{11}Be	^8B	Total	$^{136}\text{Xe } 0\nu$
1.75 ± 0.18	1.56×10^{-2} $\pm 0.22 \times 10^{-2}$	2.01 ± 0.01	2.90 ± 0.03	0.21 ± 0.01	1.30 ± 0.01	8.17 ± 3.83	18.31 ± 0.01

※mini balloon中の放射性不純物

	達成値 (KamLAND)	目標値	希望値
^{238}U	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
^{232}Th	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}
^{40}K	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	10^{-11}	10^{-12}

KamLANDのballoonより一桁上の純度を目指す。

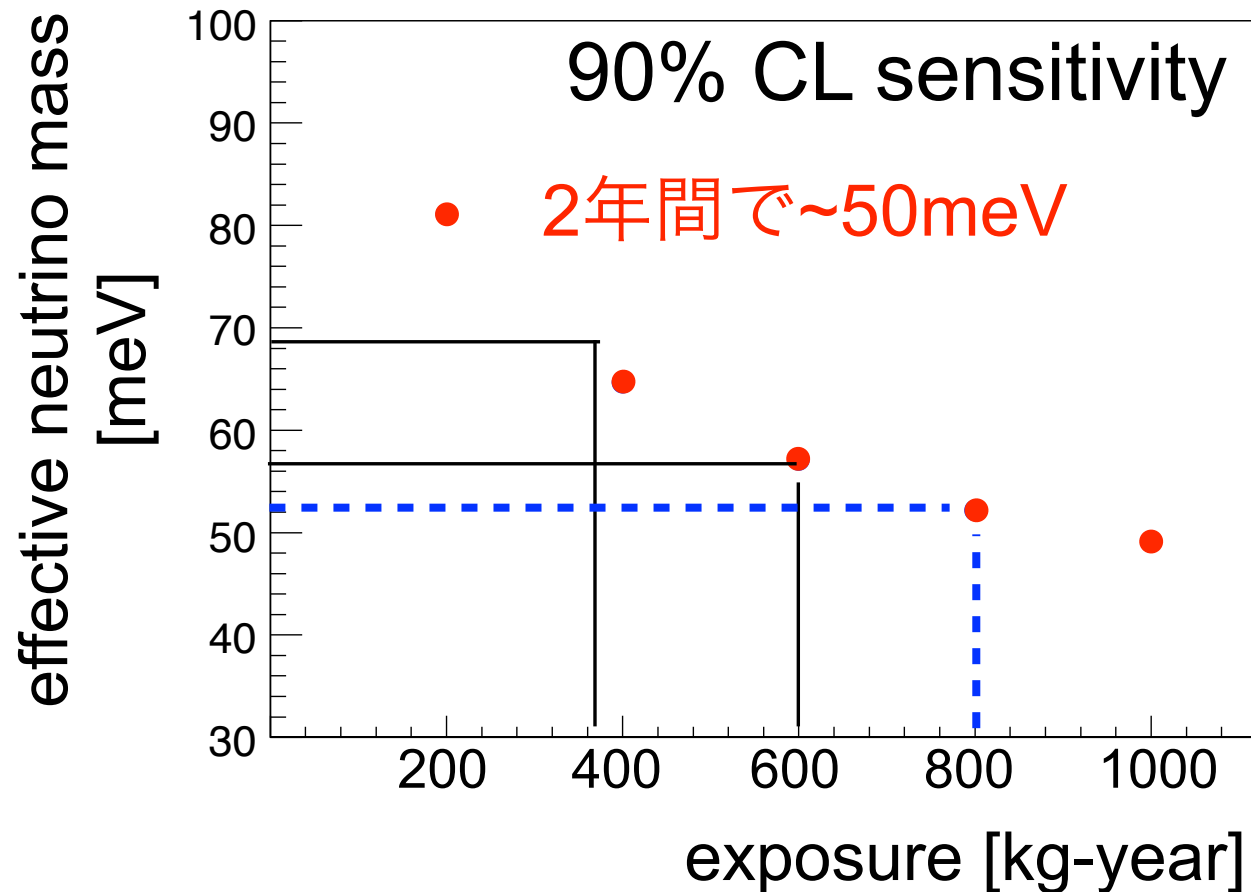
- pelletではほぼ実現済み。フィルム化の技術を模索中。

↳ $^{238}\text{U} < 5.0 \times 10^{-12} \text{ g/g}$, $^{232}\text{Th} < 5.0 \times 10^{-12} \text{ g/g}$, $^{40}\text{K} < 1.2 \times 10^{-11} \text{ g/g}$

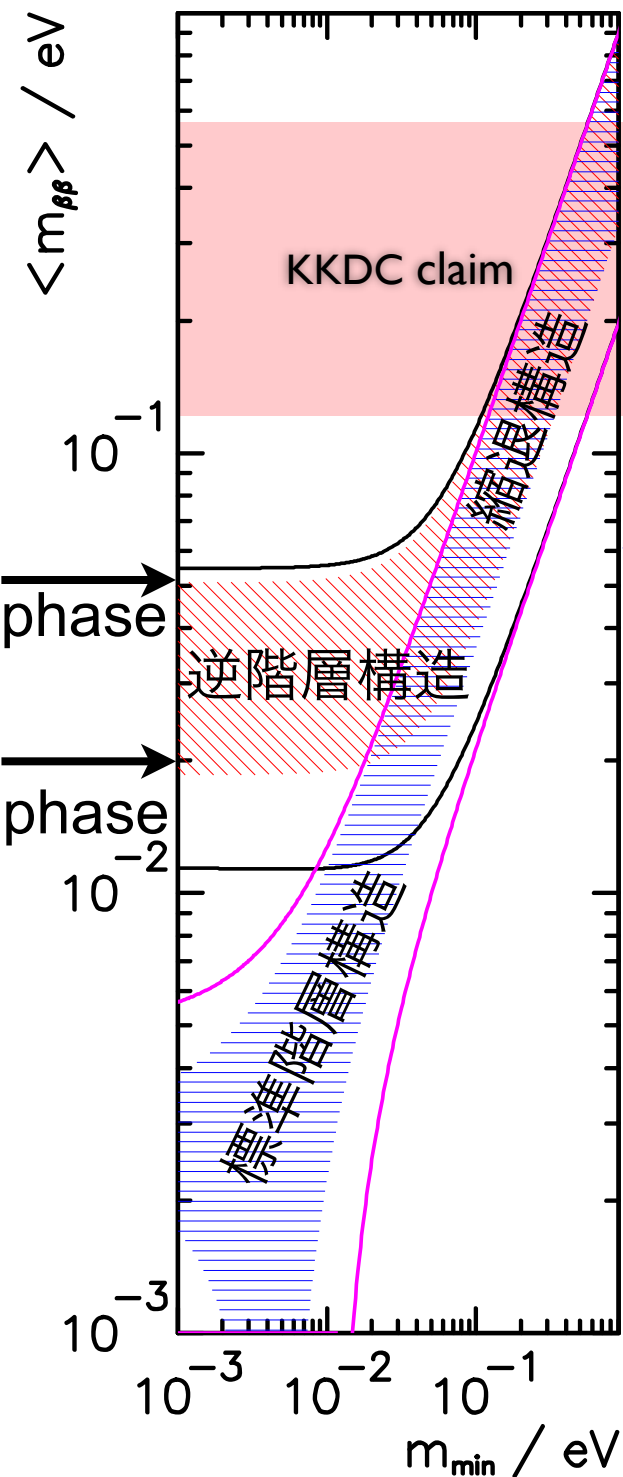
- KamLAND balloonではラミネート材を使用。不純物の原因なので今回は使用しない。

検出感度の評価

▶ 1st phase : KKDC claim, 縮退構造



▶ 2nd phase : 逆階層構造
5年間で~20meV



4. 現状報告

- ^{136}Xe 含有液体シンチレータの開発
 - mini balloonの開発
 - キセノンの純化、保守、回収
 - 新開発デッドタイムフリー回路



開発状況

▶ ^{136}Xe 含有液体シンチレータ

- KamLAND LSと同じ密度、光量、透過率をもつ

☒ 開発済み

KamLAND LS

ドデカン	80%
プソイドクメン	20%
PPO	1.36g/l

Xe含有 LS

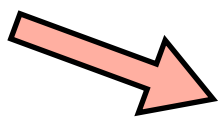
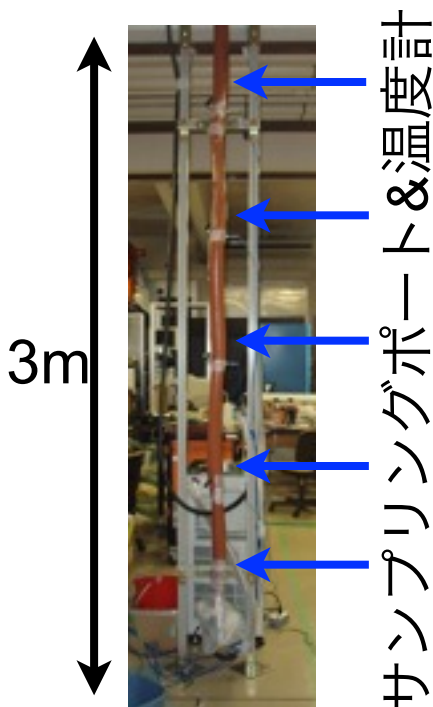
デカン	81.8%
プソイドクメン	18.2%
PPO	2.7g/l

Xenon

2.5wt%

目標精度 : 0.1%

● 進行中 : Xe溶解度の温度、
圧力依存性のチェック

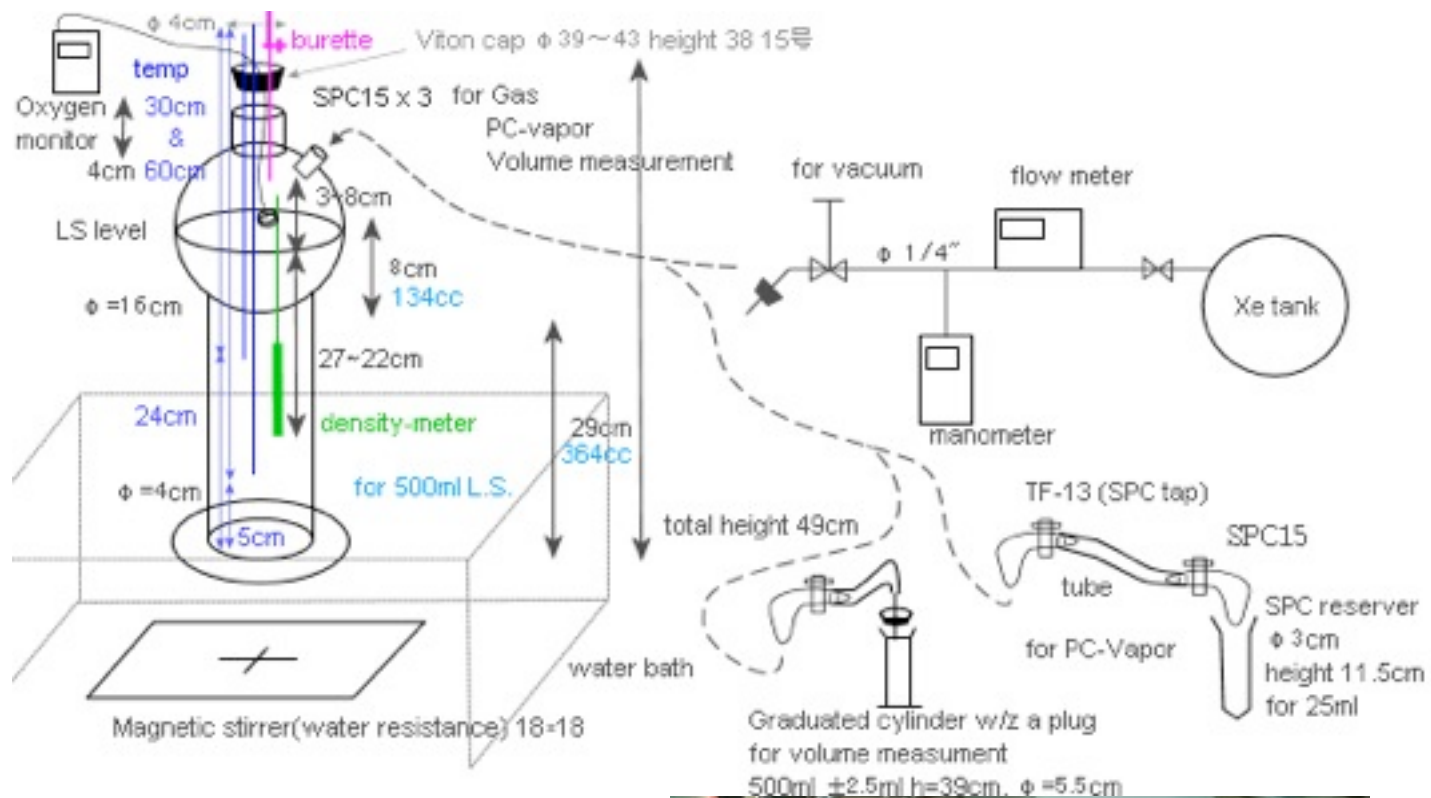


ガスクロマトグラフィーでXe濃度を測定



●進行中：XeLS 密度の精密測定 目標精度：0.1%

測定系



▶mini balloon

※バルーンの作成はKamLANDのバルーン(直径13m)で経験済み

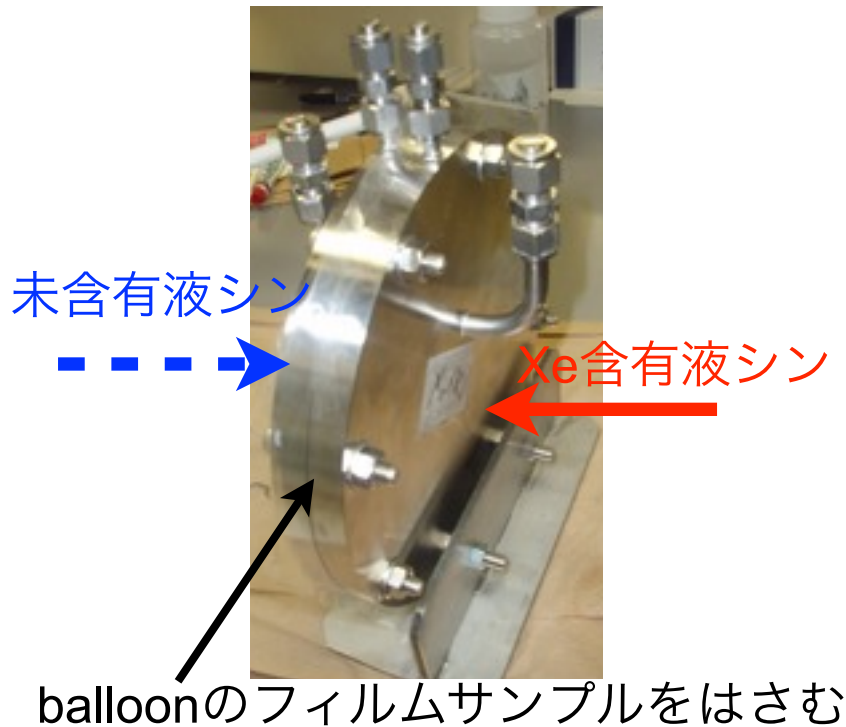
目標

1. 薄い：15~25 μm
2. 低放射性不純物： ^{238}U , ^{232}Th 10^{-12}g/g , ^{40}K 10^{-11}g/g
3. 化学的耐性とガスバリア性
4. 力学的強度

●進行中：素材の選定

- 化学的耐性、ガスバリア性

- 力学的強度



恒温槽で加速試験後、未含有液シンにXeが溶け出していないか確認



破断強度、溶着強度を確認

●進行中：テストバルーンの作成

テストバルーンNo1.

- 厚さ15 μ m、EVALで作成
- 溶着法のテスト



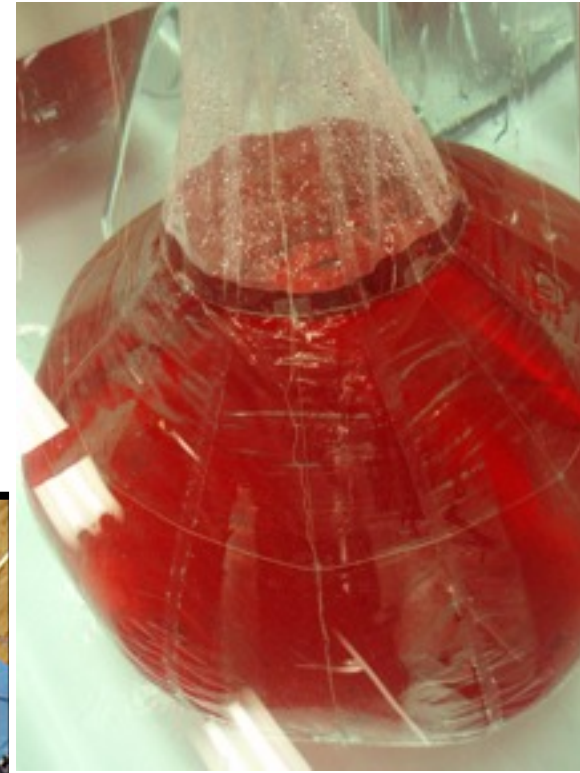
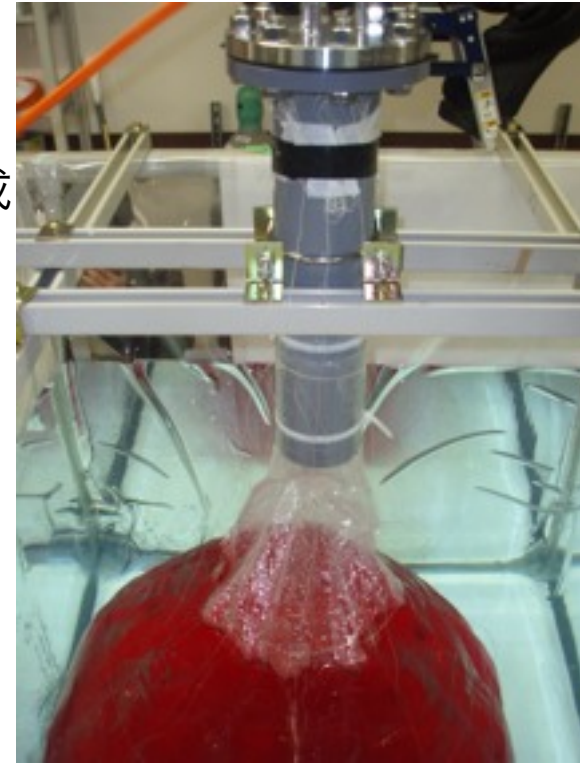
1/4スケール(直径80cm)

テストバルーンNo2.

- 厚さ80 μ m、ポリエチレンで作成
- 注水テスト



1/4スケール(直径80cm)



※実装サイズのバルーンのテスト：2/18～

- 厚さ80 μ m、ポリエチレンで作成
- ハンドリングテスト
- 深さ20mのプールを用いて入水テスト

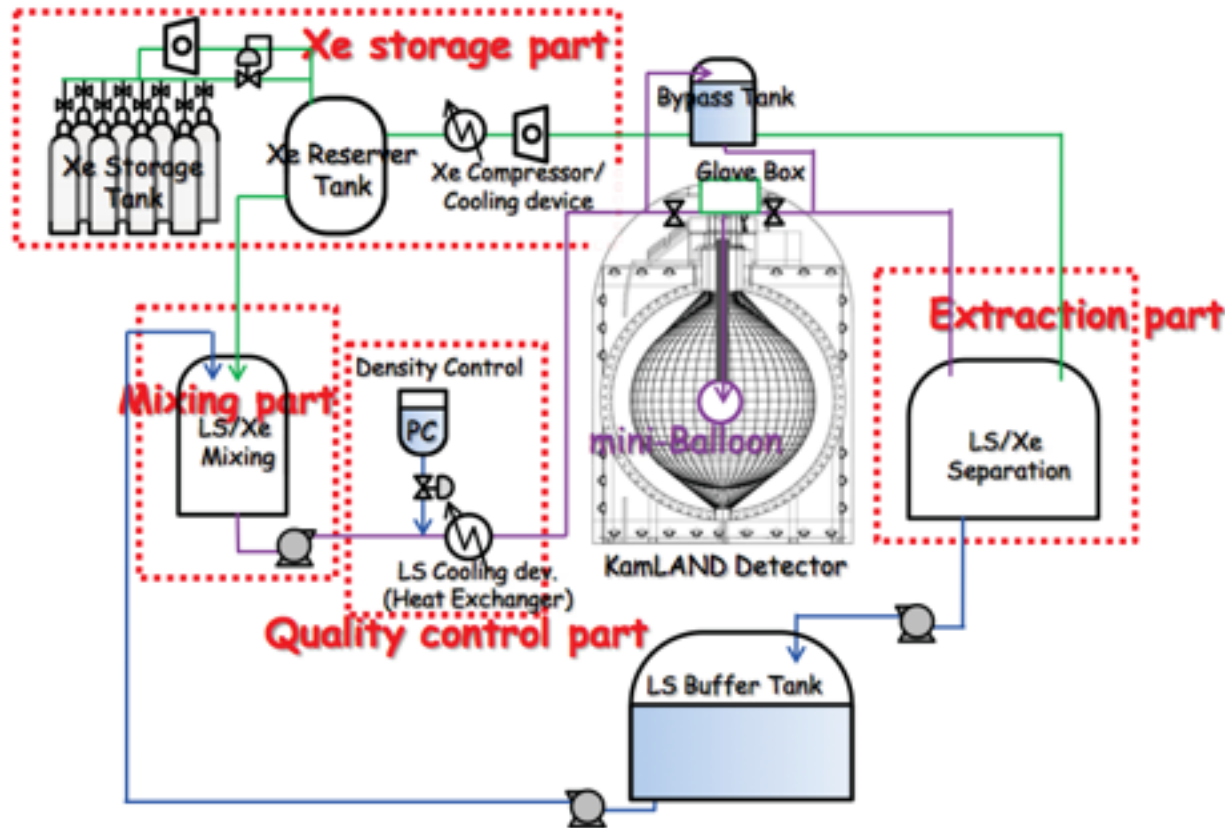
<イメージ>



▶キセノンの純化、保守、回収

※巨大蒸留装置、高純度窒素製造の経験有り

緊急時のキセノンガス回収システム案



- 99.97%/1cycleの回収を目指す
- 70m³, 50m³タンク用の場所を掘削中

▶新開発デッドタイムフリー回路 (詳細は吉田くんの発表)

宇宙線起源バックグラウンドの除去に効果的

☑開発済み, KamLANDへのインストール完了, 動作確認中

✓これまでの経験を生かして開発済み or 開発中

5. まとめ

▶ニュートリノレス二重ベータ崩壊の重要性

☑マヨラナニュートリノの確証を得る

☑ニュートリノの質量構造を決定

→素粒子・宇宙研究の謎を解き明かすきっかけ

▶KamLANDでは既に”巨大”な”極低放射能環境”を実現

☑低コストで迅速かつタイムリーに世界最先端の感度を実現出来る

1st phase(2011~) : $\langle m\nu \rangle \sim 50\text{meV}$ (2年)

2nd phase(2014~) : $\langle m\nu \rangle \sim 20\text{meV}$ (5年)

[key point] mini balloon の開発

厚さ : 25 μm 程度

放射性物質 : KamLAND balloonの1/10

▶これまでの経験を生かして各開発を進行中