



カムランド禅実験における
 ^{136}Xe の二重ベータ崩壊探索
のためのバックグラウンド評価

Feb. 21st. 2012

Hakuba Symposium

東北大学RCNS M1 松田さゆり



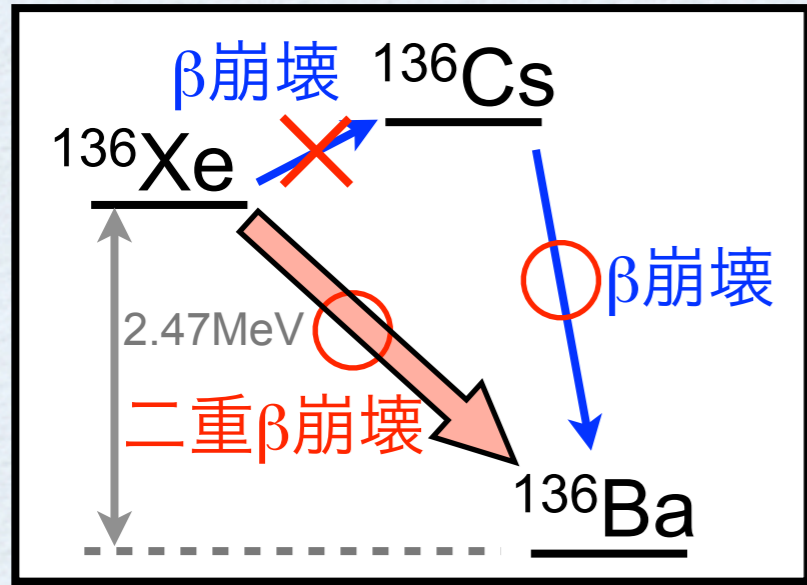
二重ベータ崩壊



二重ベータ崩壊とは

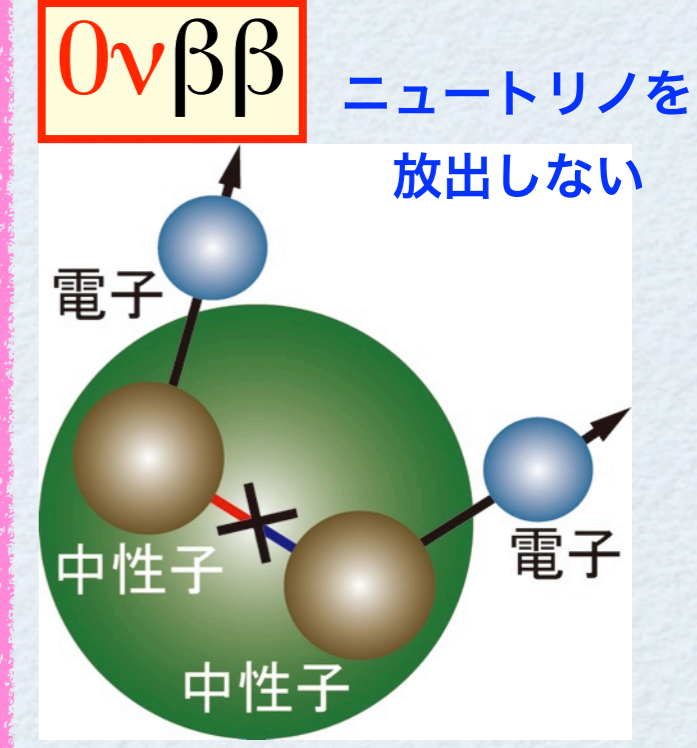
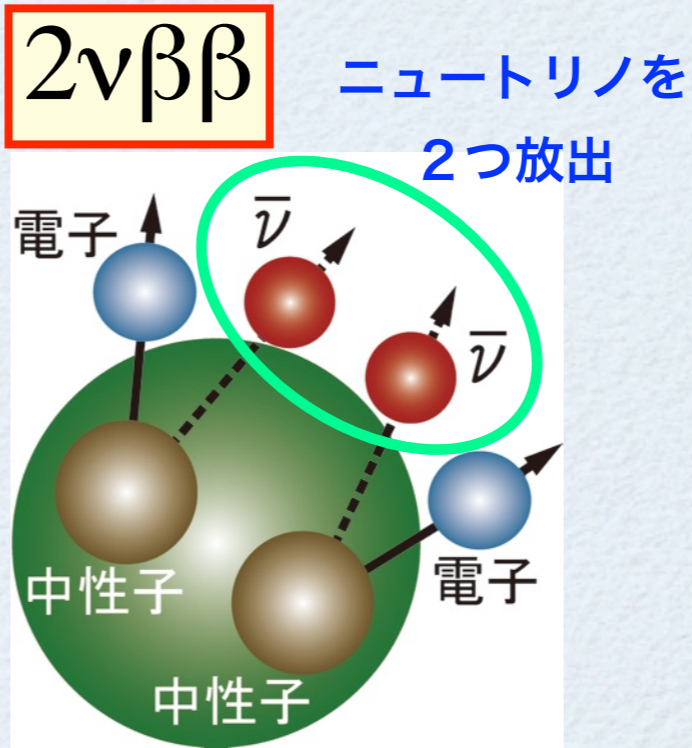
▶ 原子核の最も稀な崩壊過程

ex) ^{136}Xe の場合



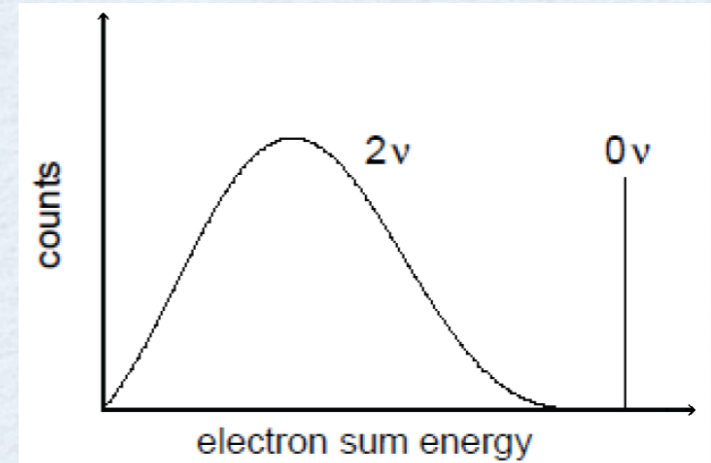
$$\left| \sum_i U_{ei}^2 m_{\nu_i} \right|$$

▶ 2つの崩壊モード



- 標準模型の枠内で可能
- 約10種類の核種で観測
- 半減期が長い
- 一番短くて $\sim 10^{19}$ 年

- **標準模型では禁止**
- まだ観測されていない



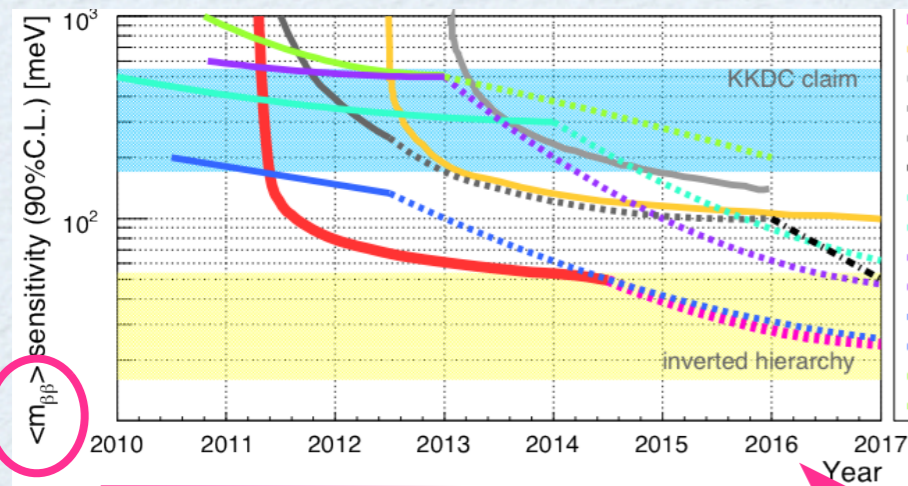
$0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期

ニュートリノ有効質量

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

位相空間因子

核行列要素



観測時間

感度 UP

ニュートリノのマヨラナ性の検証

ディラック粒子 $\nu \neq \bar{\nu}$

マヨラナ粒子 $\nu = \bar{\nu}$

0ν2ββから何がわかるか？

(1)ニュートリノはマヨラナ粒子である

左巻きニュートリノ
の質量

$$m_L = m_D^2 / M_R$$

~10¹⁶GeV

大統一理論のスケール

(2)レプトン数非保存の過程

物質優勢に至るプロセスの
解明へ (レプトジェネシス)

(3)ニュートリノ有効質量の測定

質量階層構造への制限

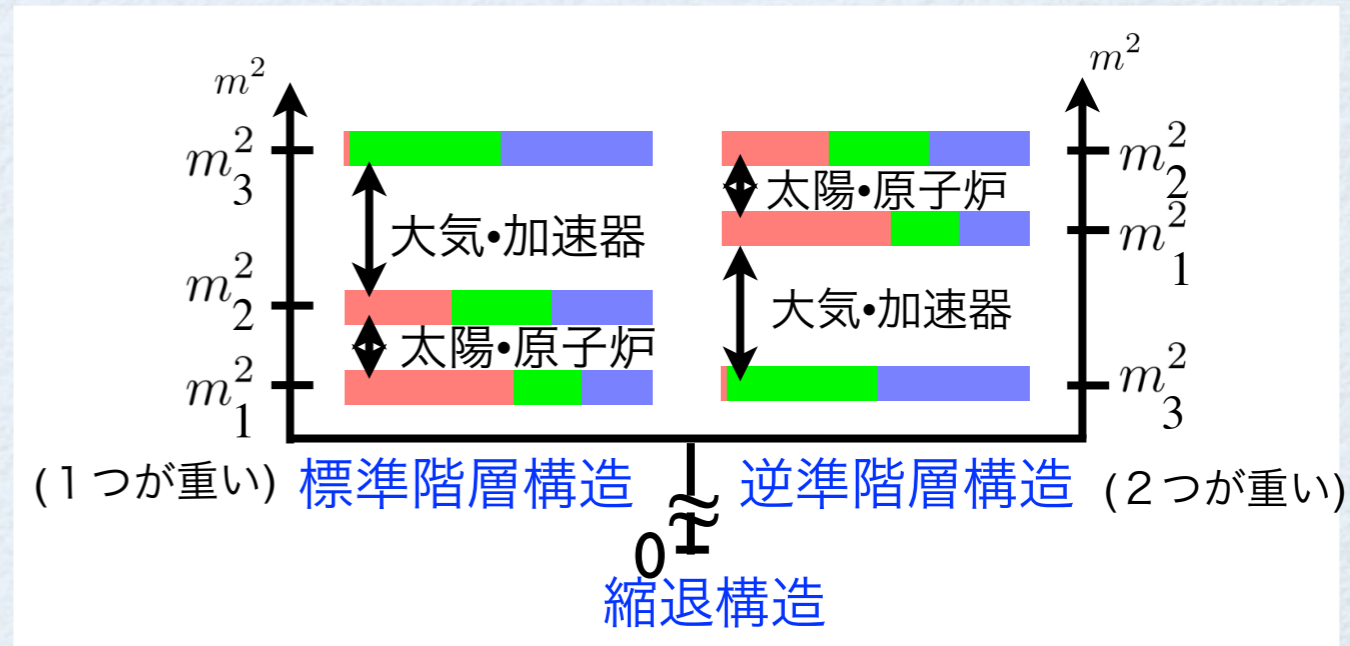
▶どちらが正しい？

¹³⁶Xe 2νββの半減期 $T_{1/2}^{2\nu}$

DAMA: 1.0×10²²yr (2002)

↑
5倍！

EXO: 2.11×10²¹yr (2011)



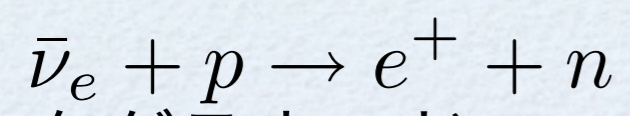
Phys. Lett. B 546, 23(2002) : DAMA
 Phys. Rev. Lett. 107, 212501(2011) : EXO-200
 Phys. At. Nucl. 69,2129(2006)

KamLAND-Zen実験



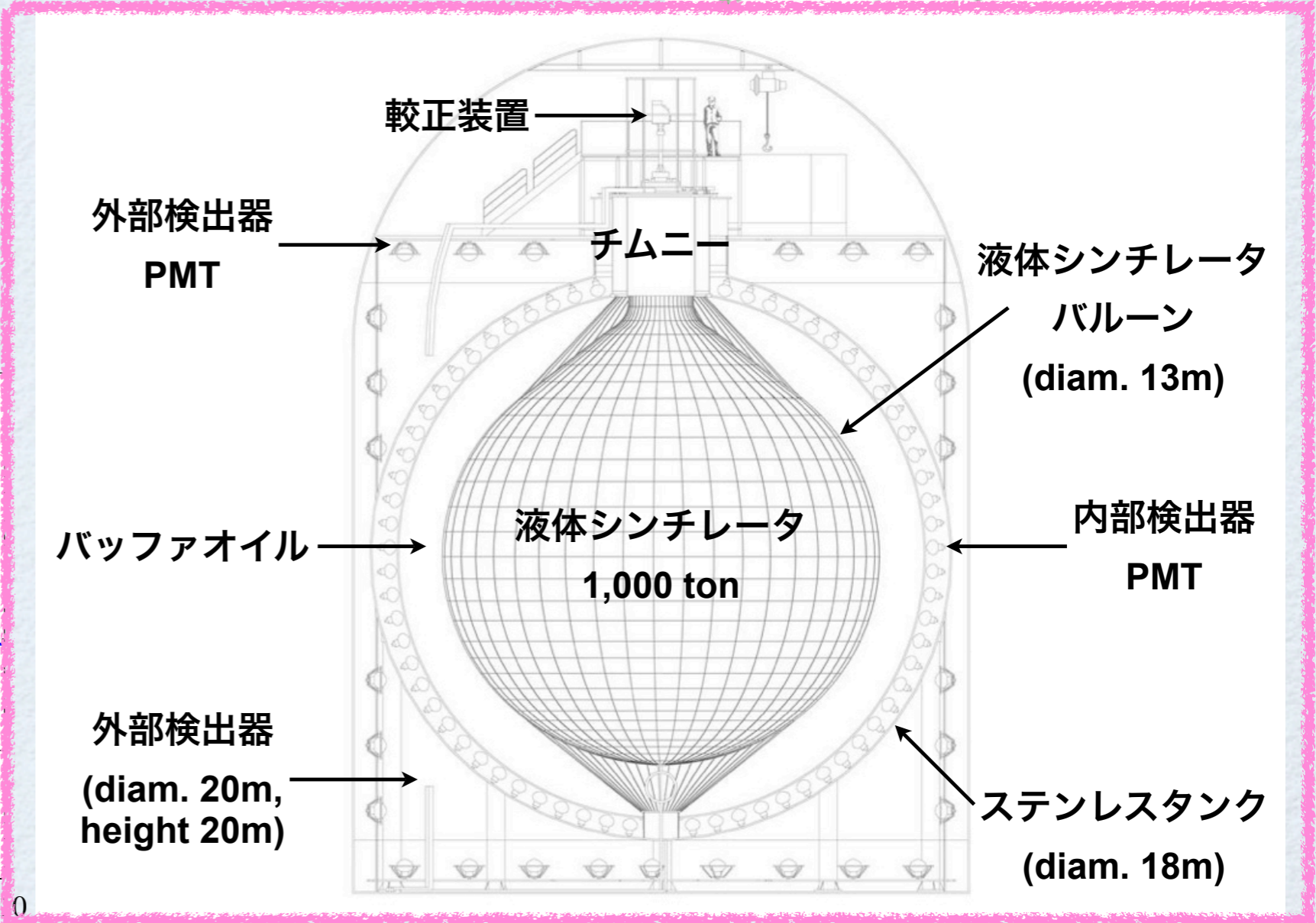
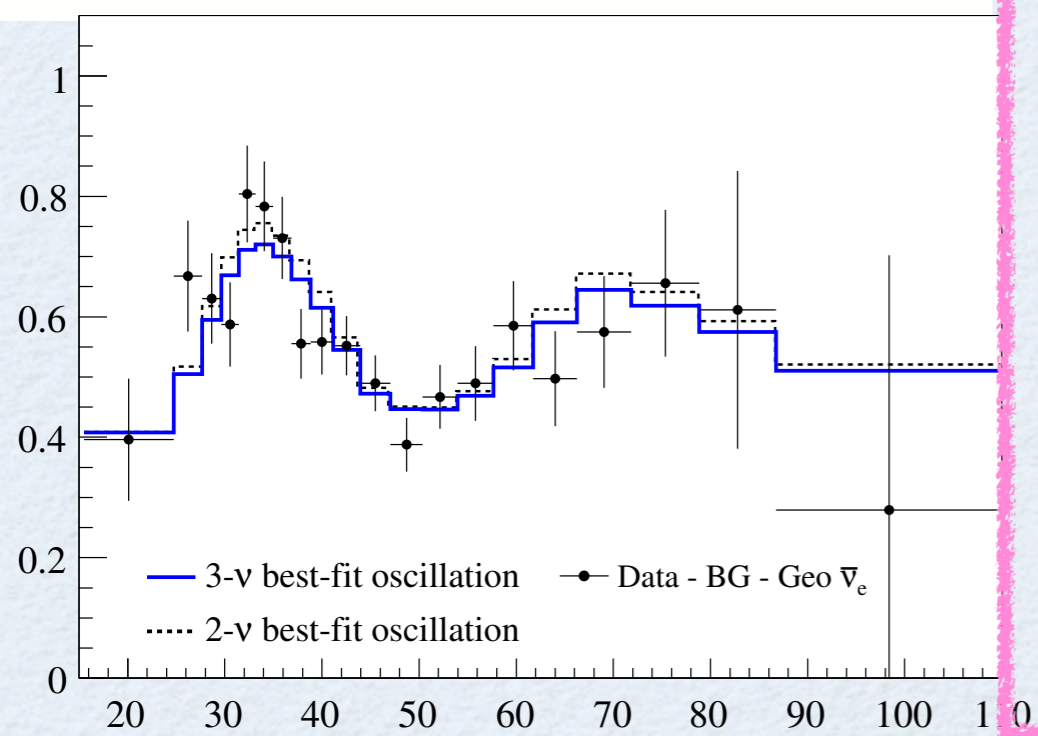
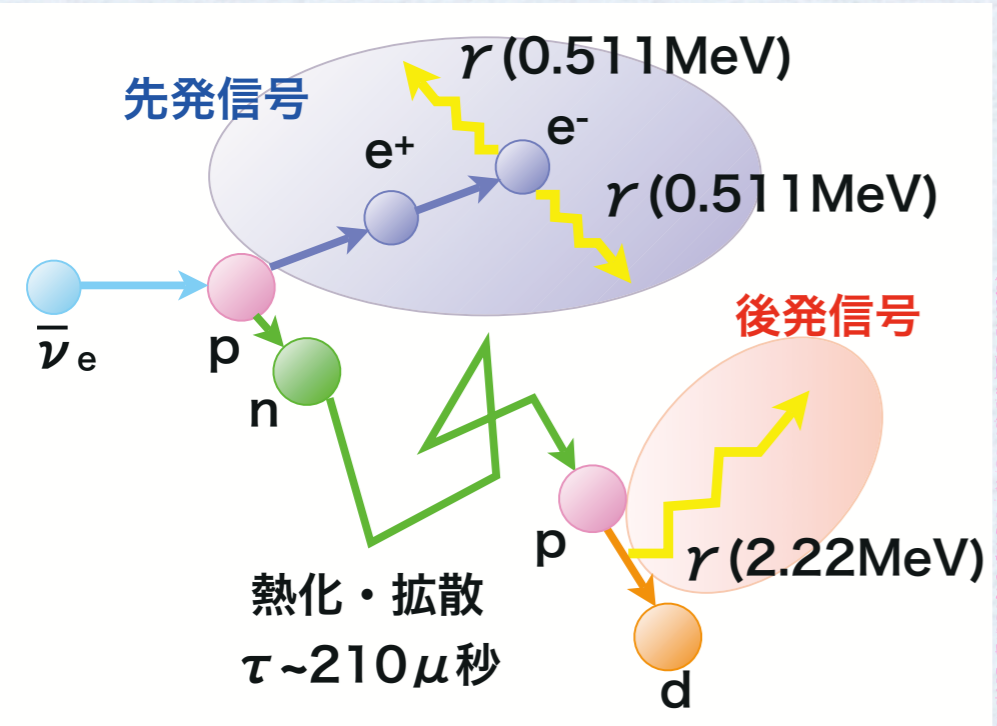
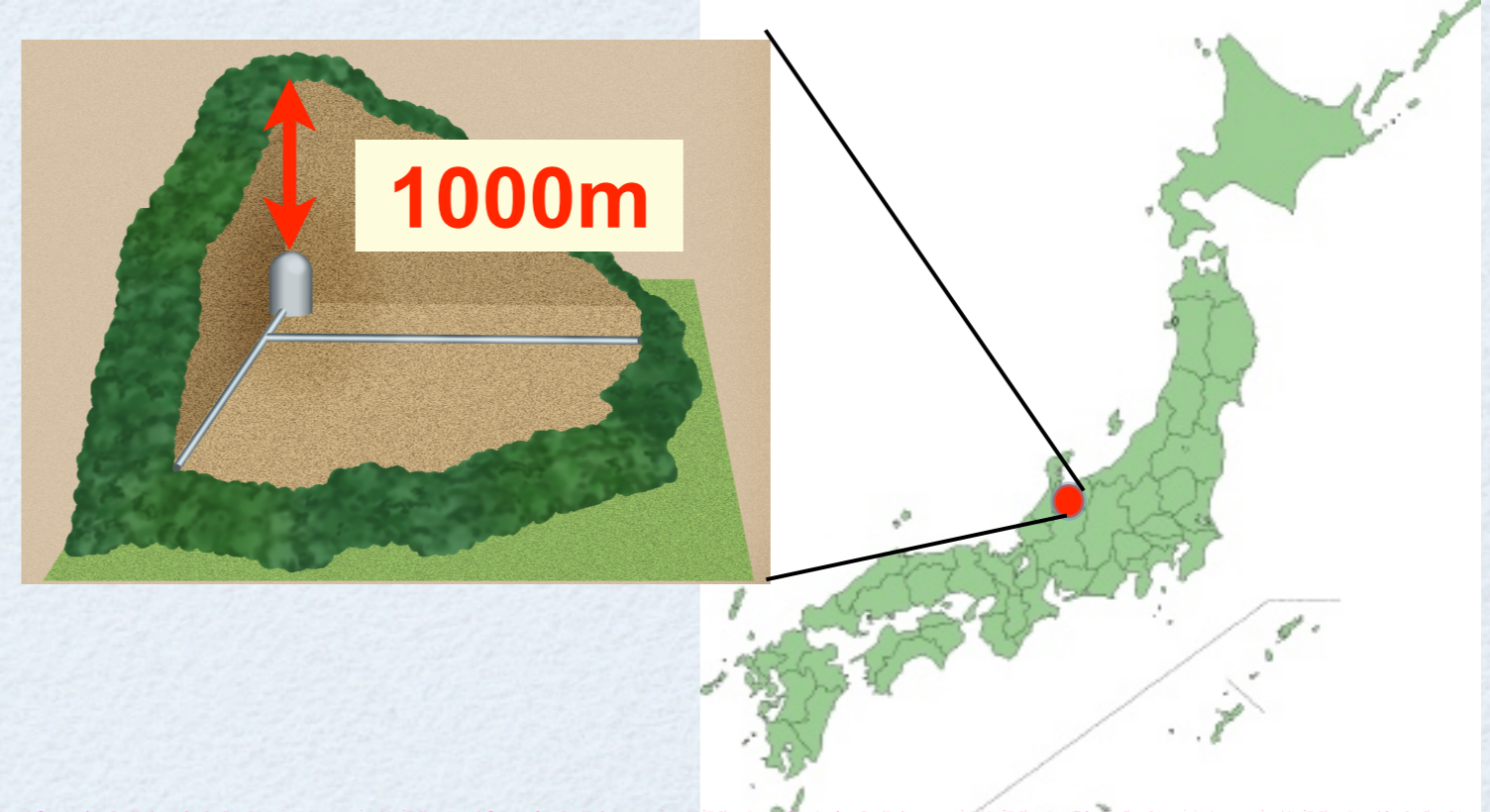
KamLAND検出器

逆ベータ崩壊を利用した



低バックグラウンド

ニュートリノ検出器



KamLAND with Zero Neutrino double beta decay search

- ミニバルーン(ナイロン製)

半径1.54m, 厚さ25 μ m

- **Xe-LS**

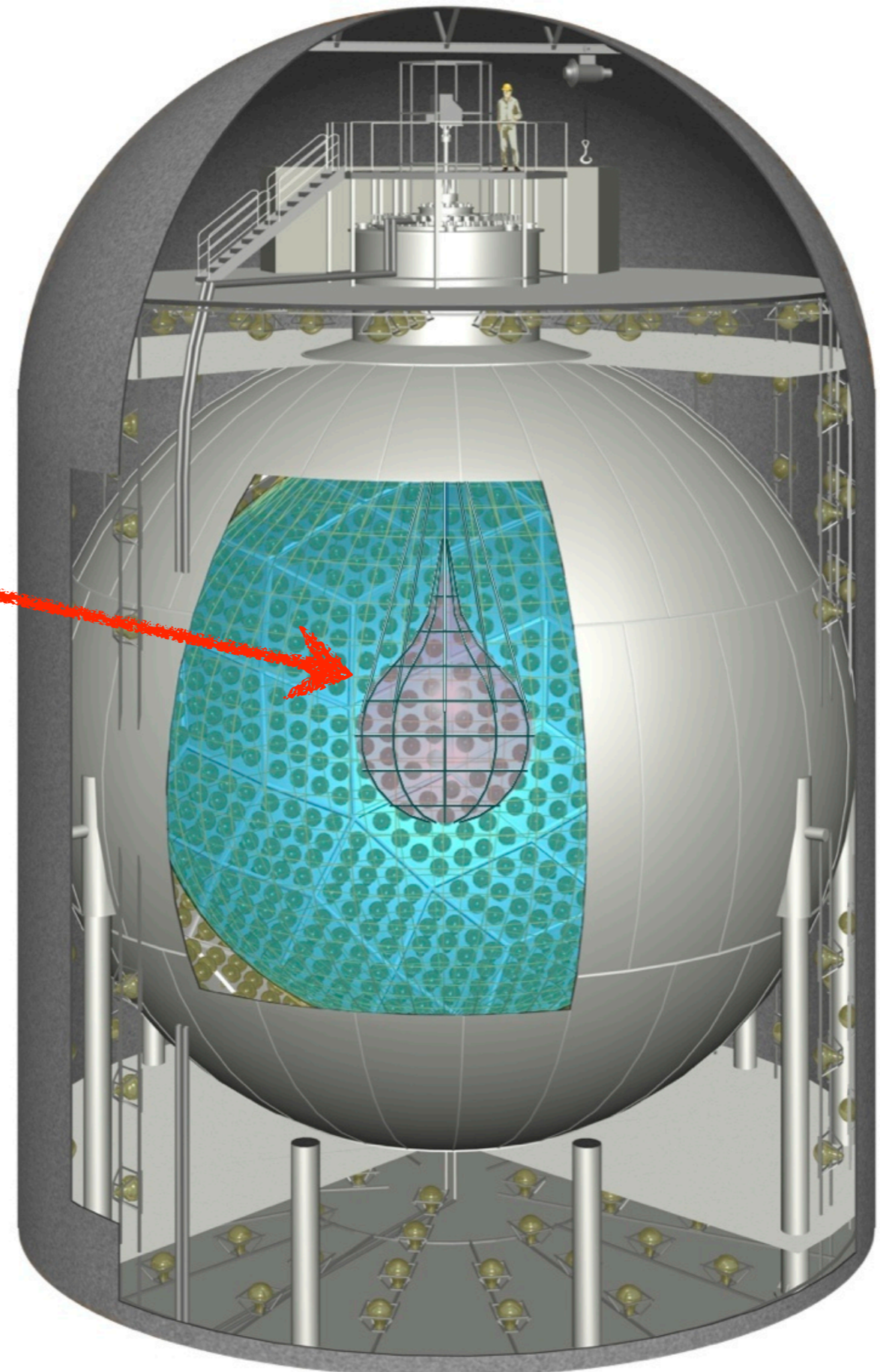
82%: デカン

18%: プソイドクメン

2.7g/l: PPO

(2.52 \pm 0.07)wt% 濃縮Xe

(90.93% ^{136}Xe , 8.89% ^{134}Xe)



キャリアブレーション



エネルギーキャリアブレーション

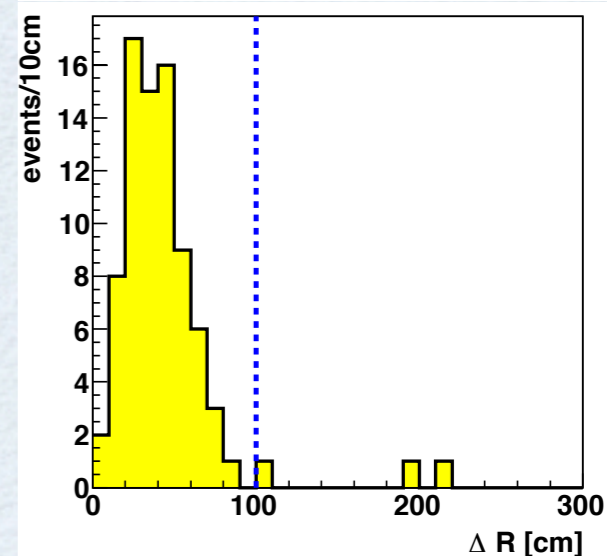
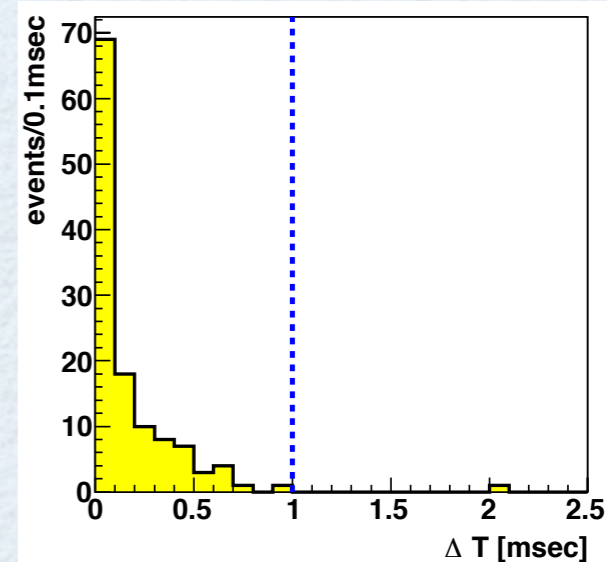
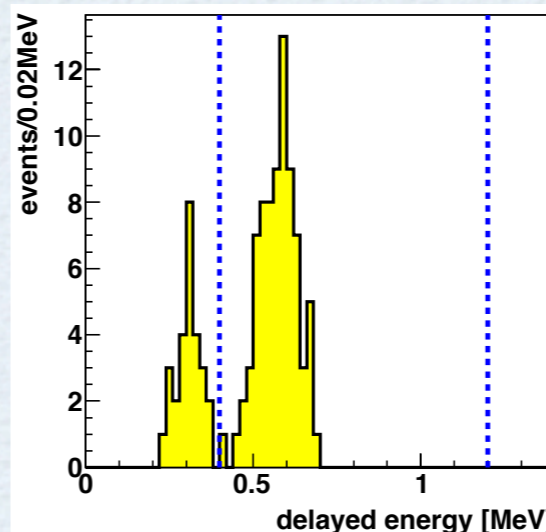
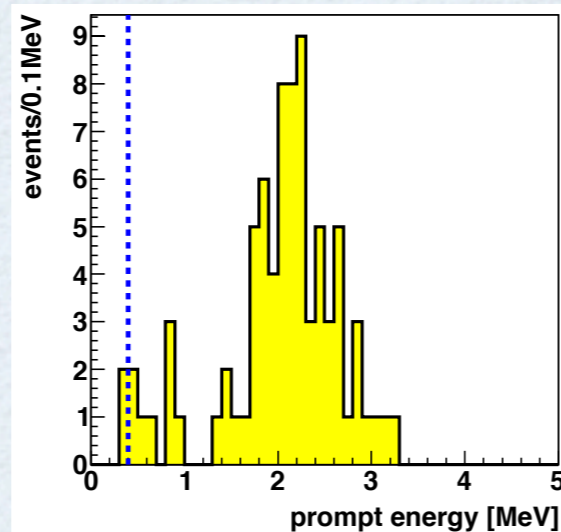
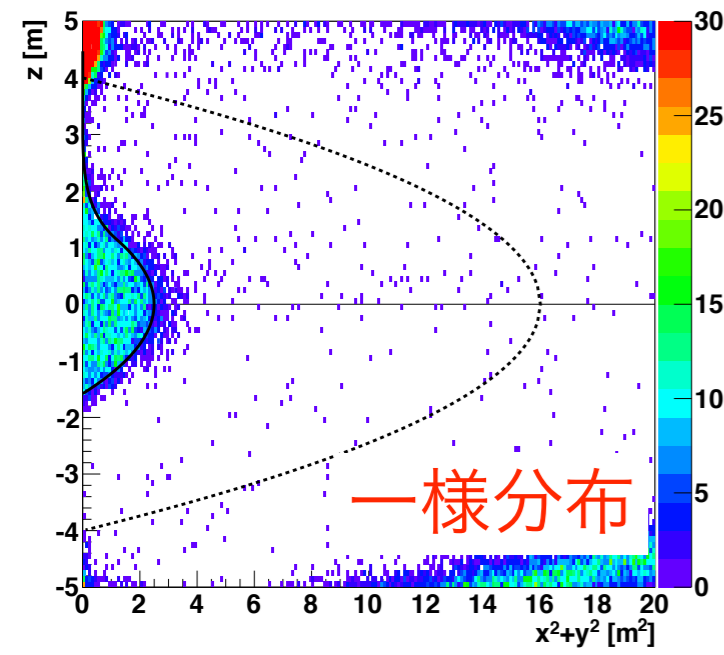
- vertex-time-charge テスト

- (1) ^{222}Rn 由来の ^{214}Bi ($\beta+\gamma$'s)
- (2) ^{208}Tl (2.614MeV γ)

0ν のピーク
(2.46MeV)を含む

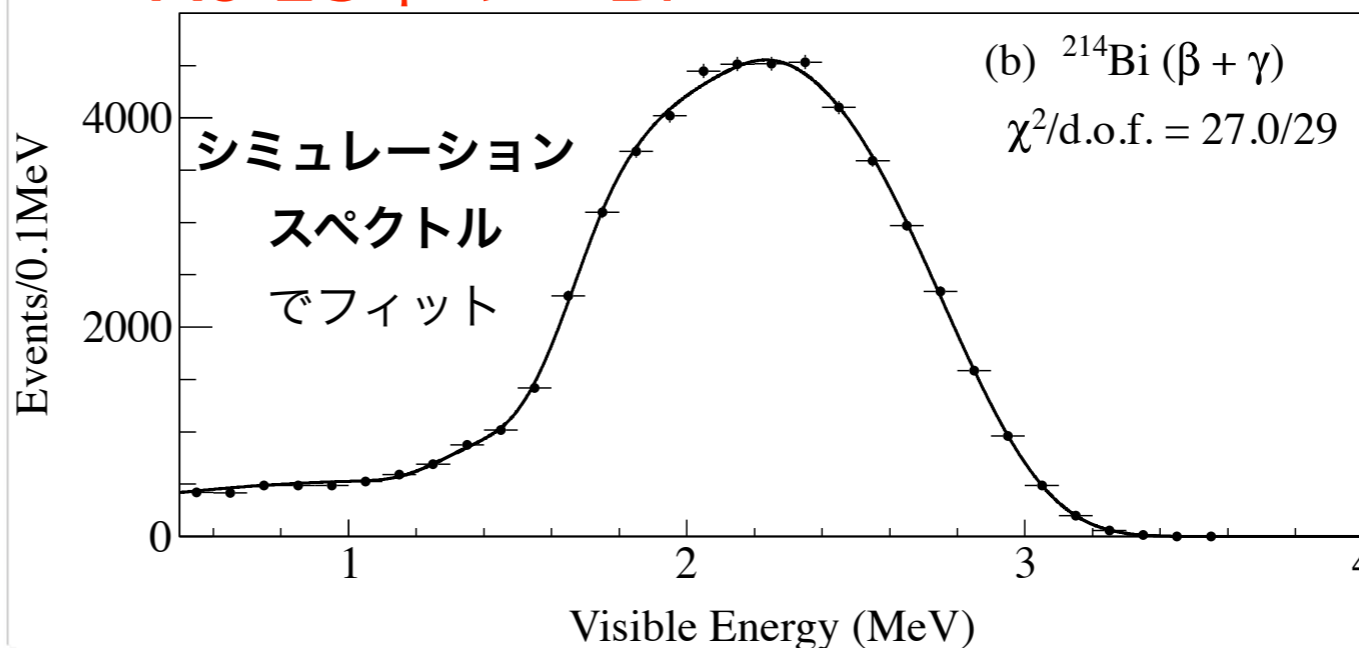
(1) ^{214}Bi

主要なバックグラウンド



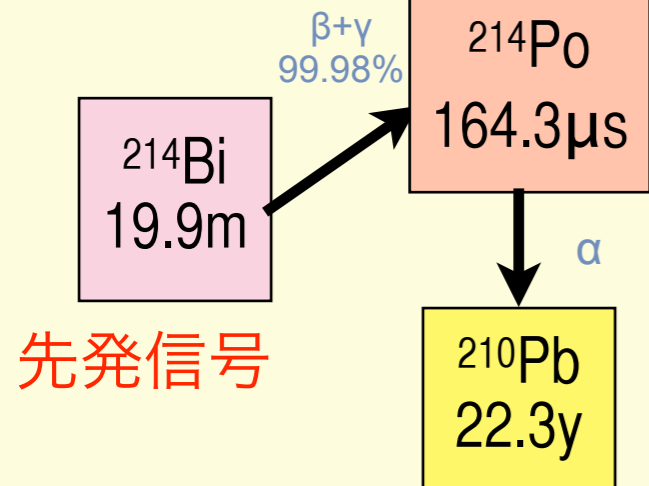
→除去率(99.97±0.01)%

Xe-LS中の ^{214}Bi



遅延同時計測

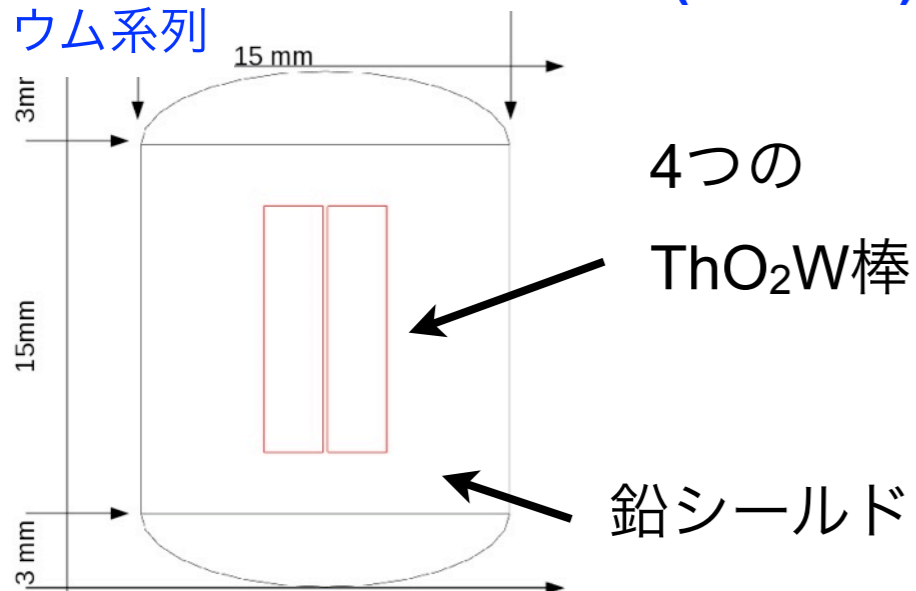
後発信号



(2) ^{208}Tl

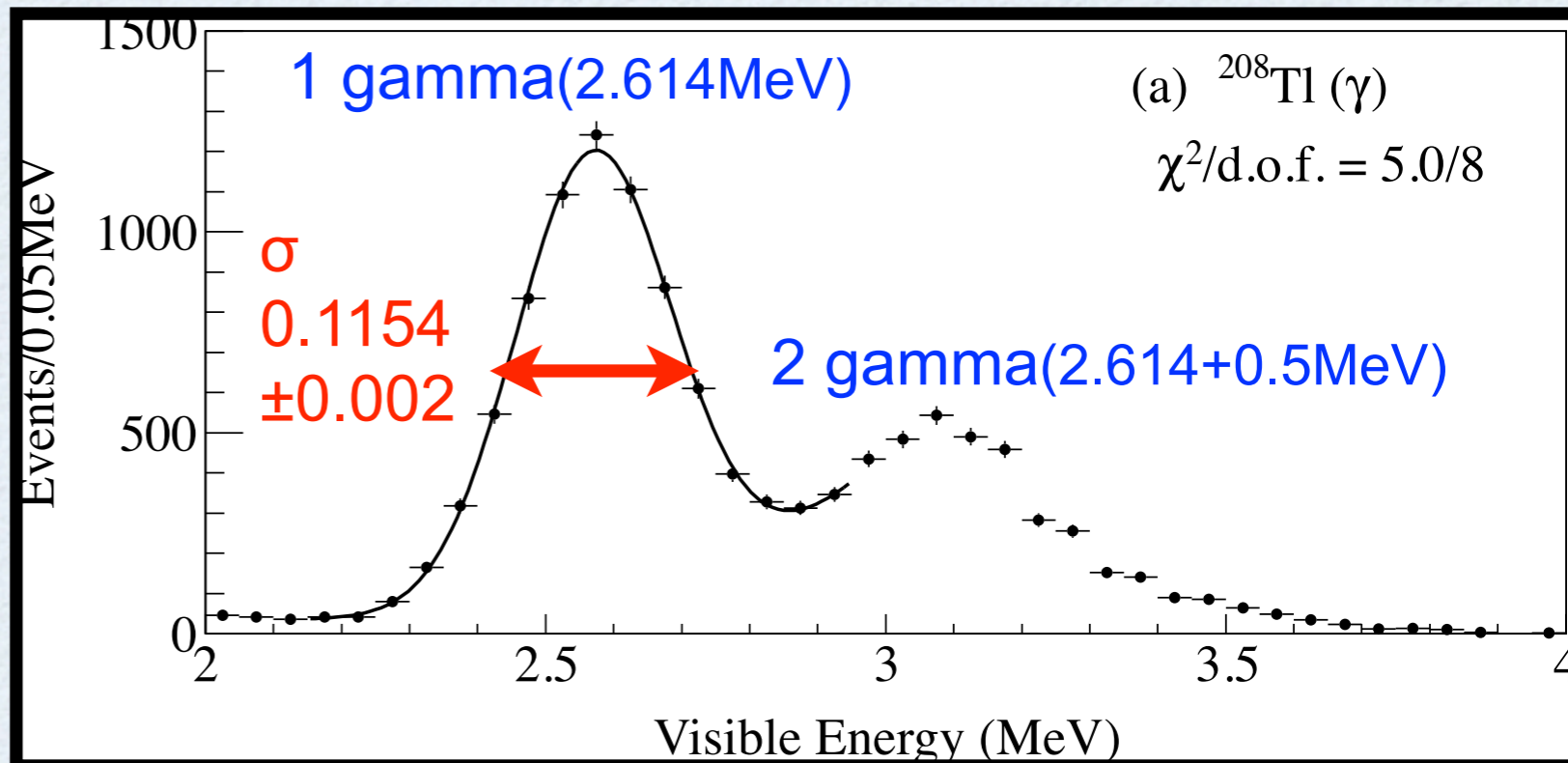
ソース(ThO_2W)のジオメトリ

$(^{232}\text{Th} \text{ 2~4wt\%}) \rightarrow ^{208}\text{Tl}(35.94\%)$
トリウム系列



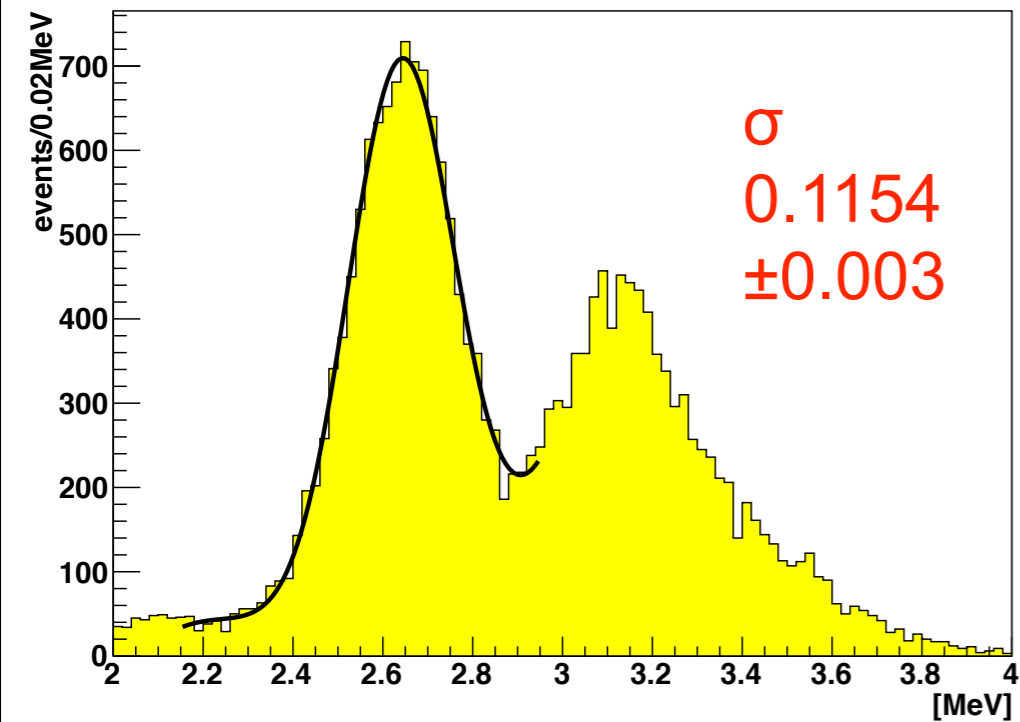
バルーン付近に投入

gaussian + 3次多項式 でfit



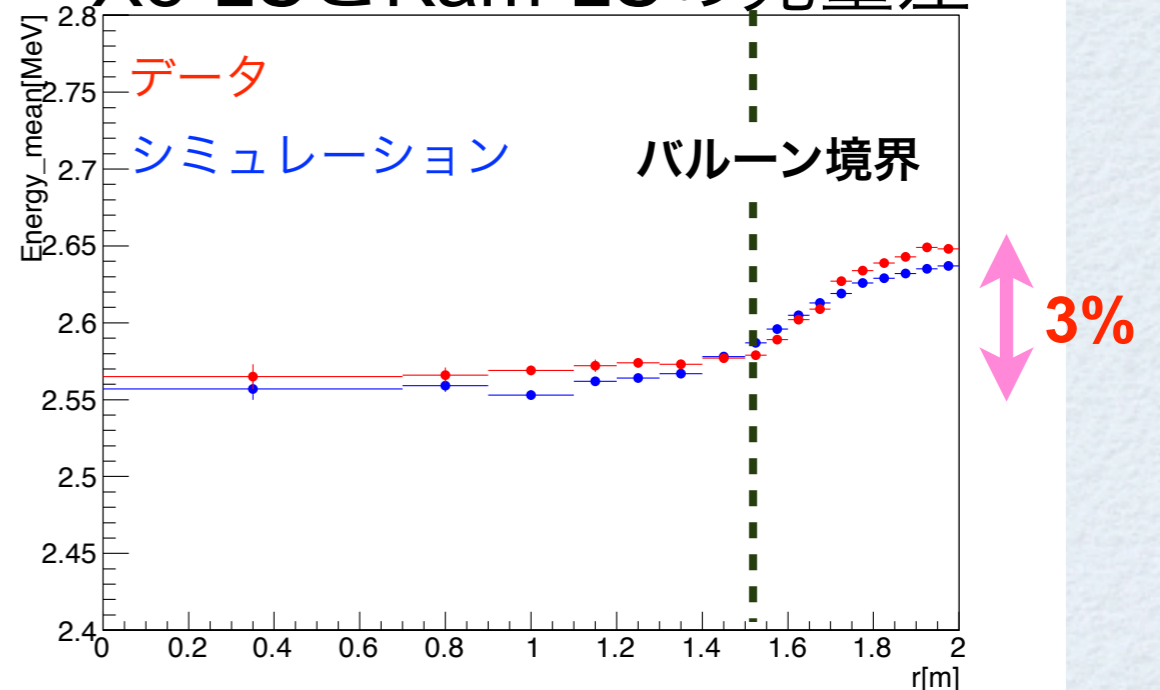
▶ エネルギー分解能

MCシミュレーションのスペクトル



σ を合わせる **$(6.6 \pm 0.3)\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$**

Xe-LSとKam-LSの光量差

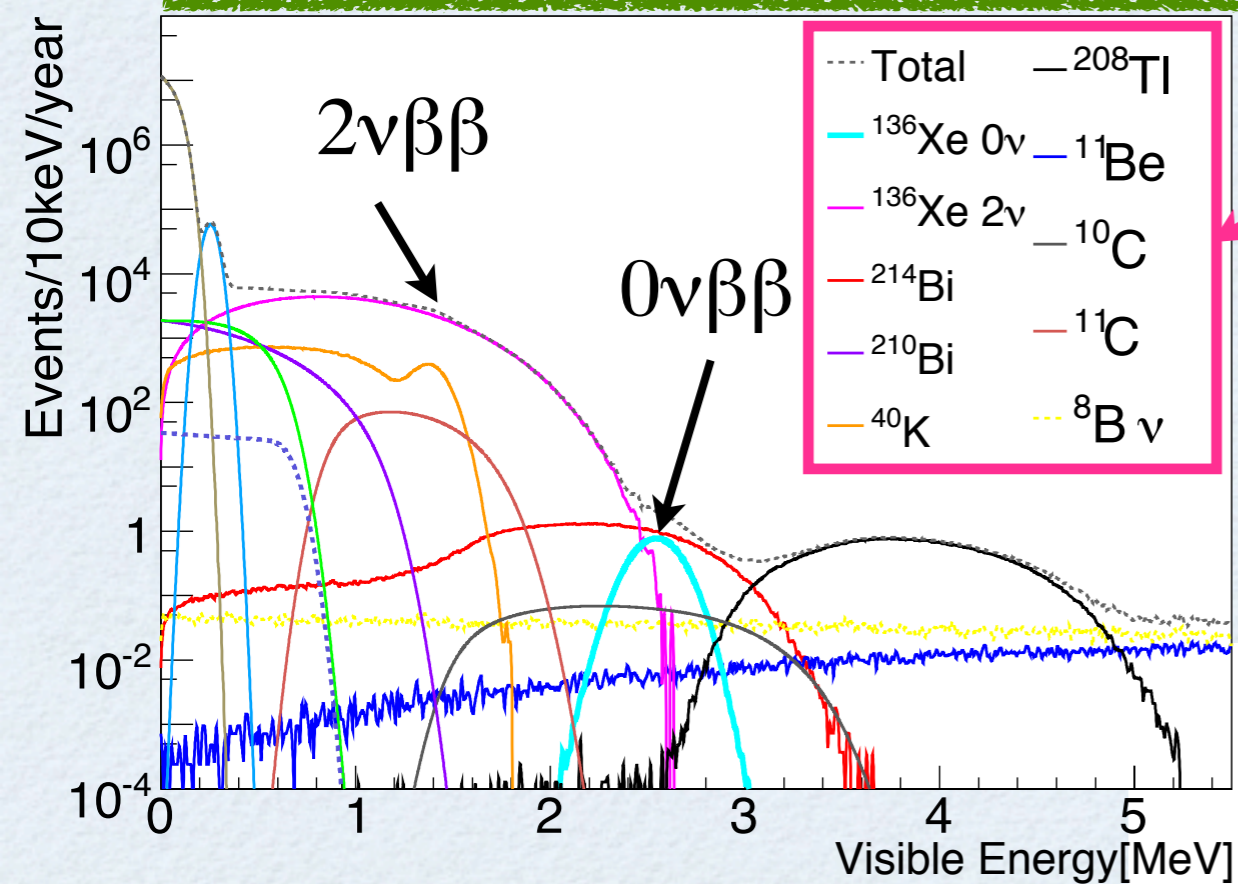


バックグラウンドの概観



全体のエネルギースペクトル

予想されるエネルギースペクトル



KamLAND実験から

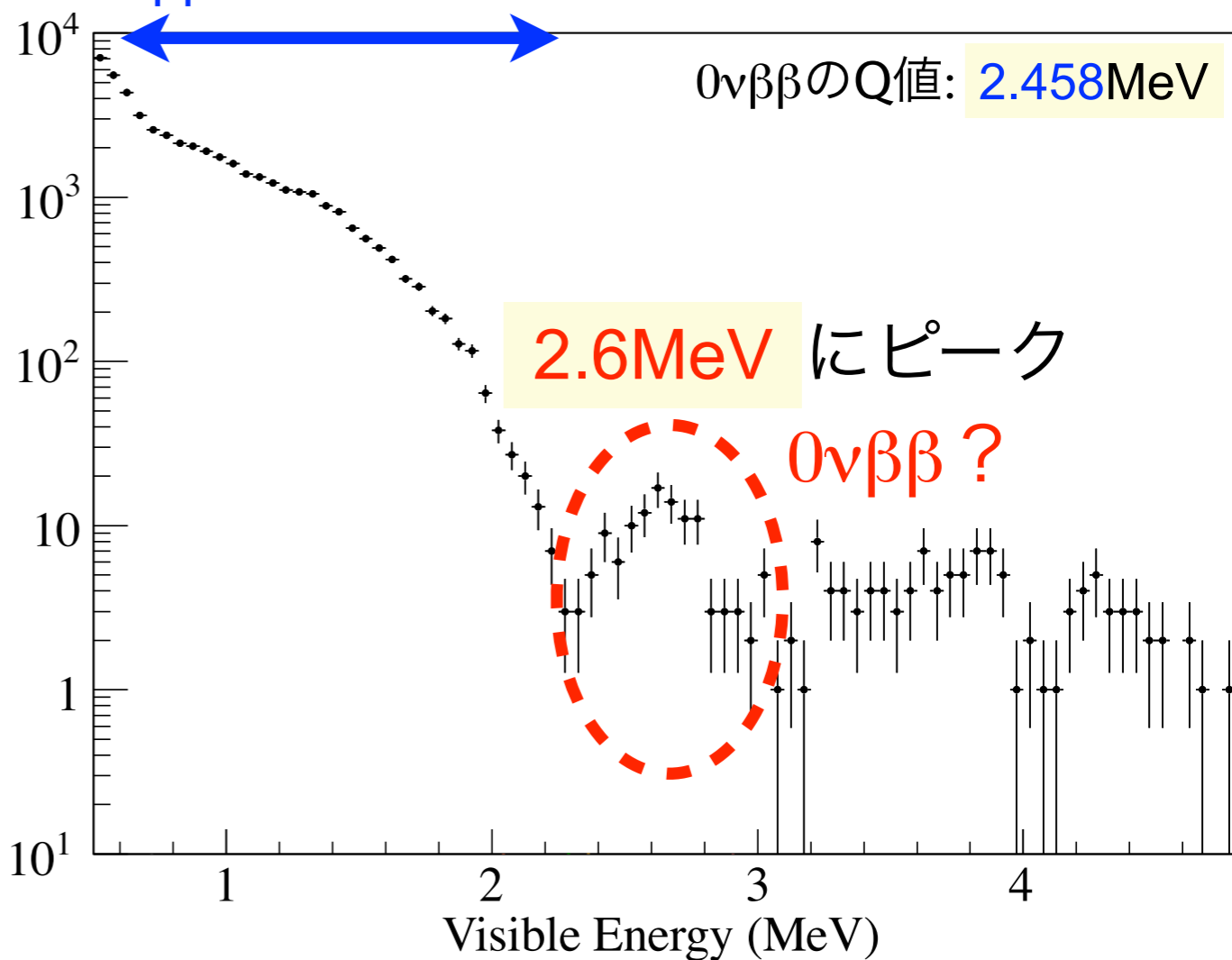
予想されるバックグラウンド

データの再構成は適切か？

未知のバックグラウンドがあるか？

実際のエネルギースペクトル

2νββエネルギー領域



あらゆる可能性を考慮した
バックグラウンド評価
が重要

データ日数: 77.6日

バックグラウンドの起源

(1) バルーンに混入または付着

制作



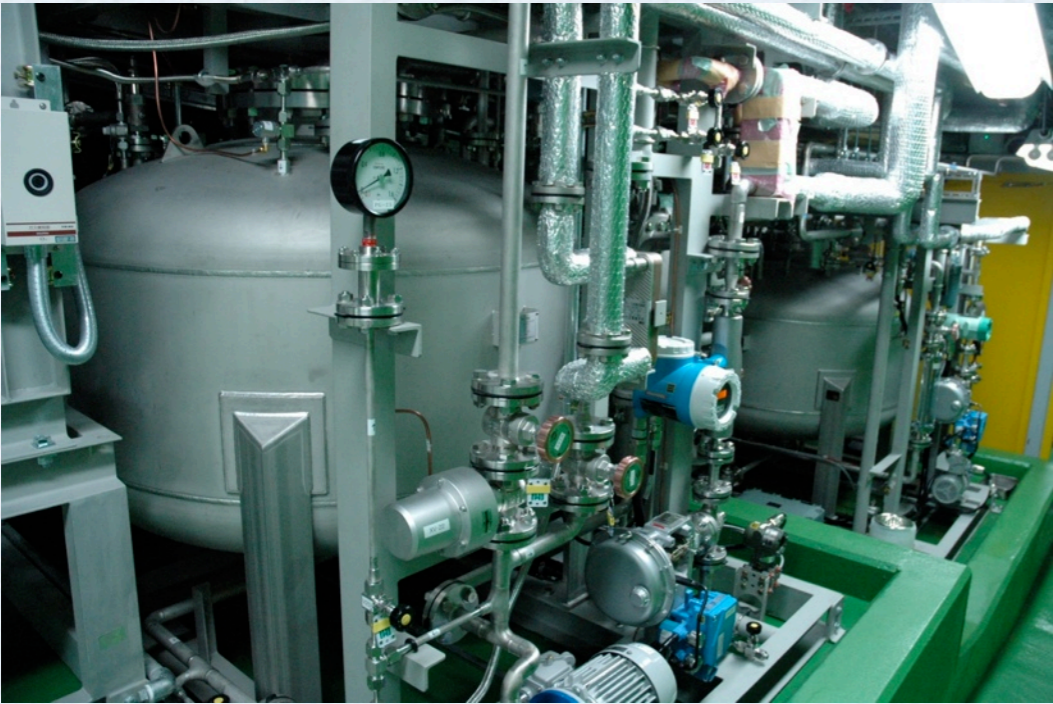
輸送



インストール

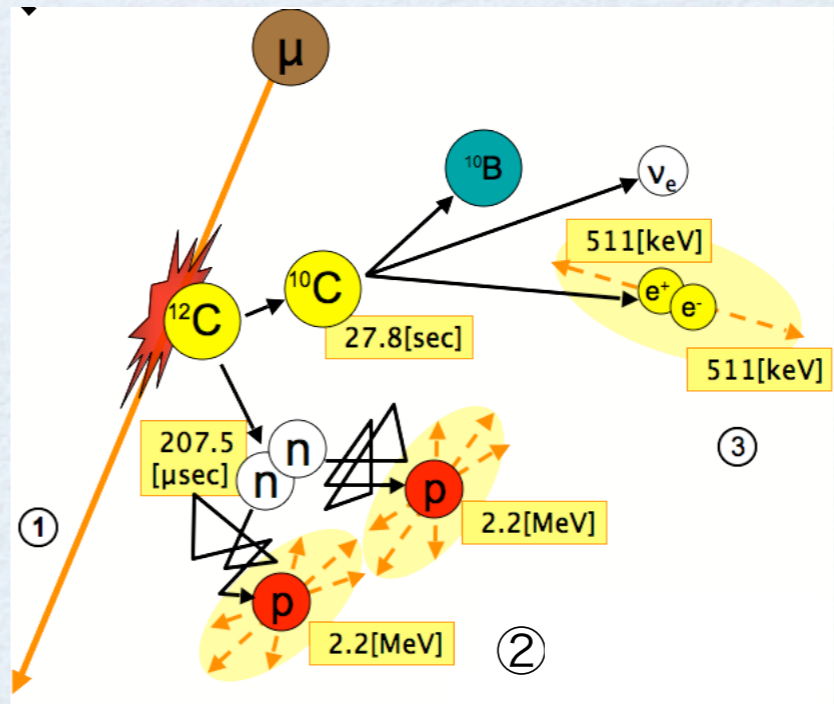


(2) Xe-LS送液システムに混入



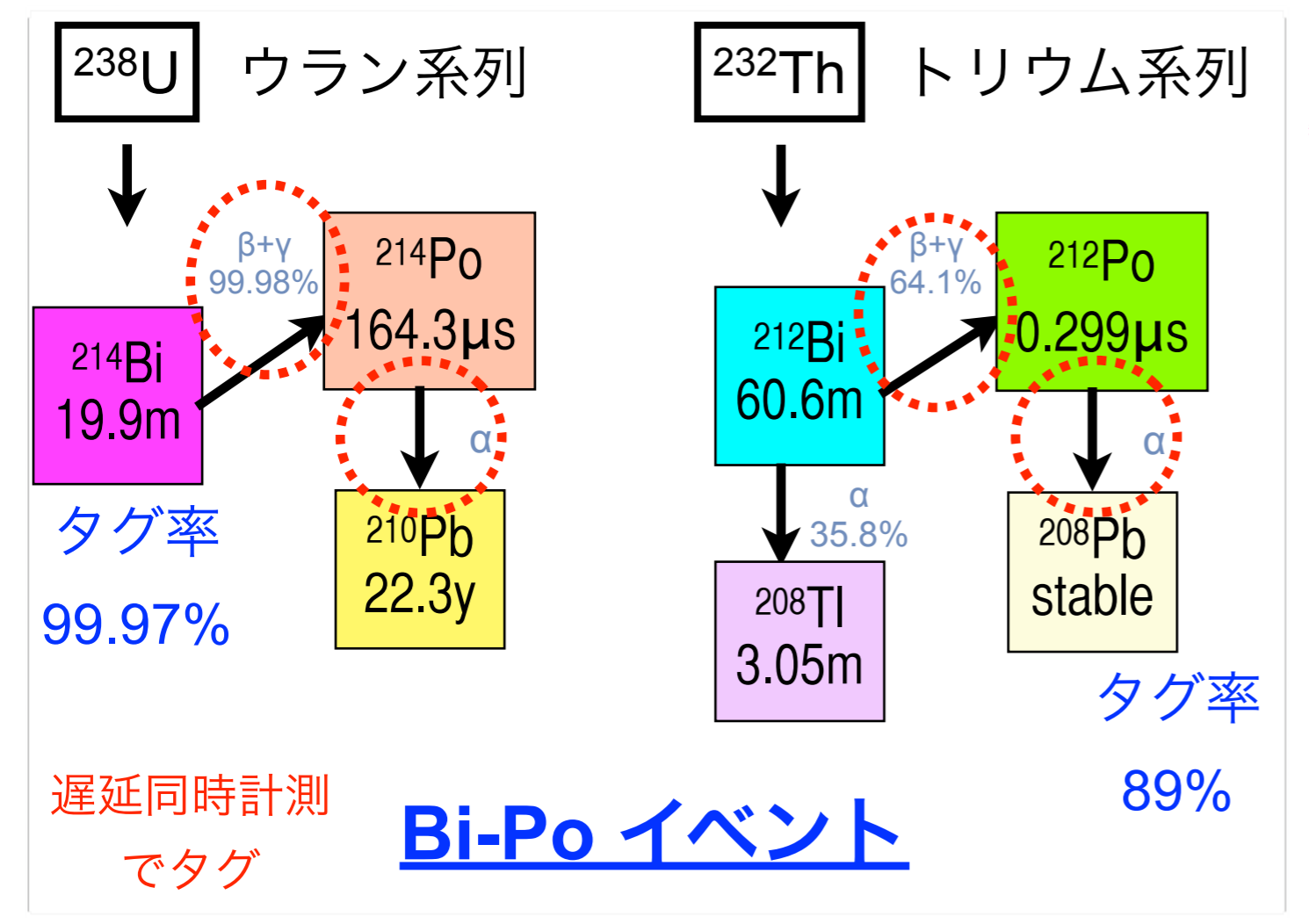
(3) 原子核破砕 (spallation)

ex) 宇宙線ミュオンによる ^{12}C 破砕



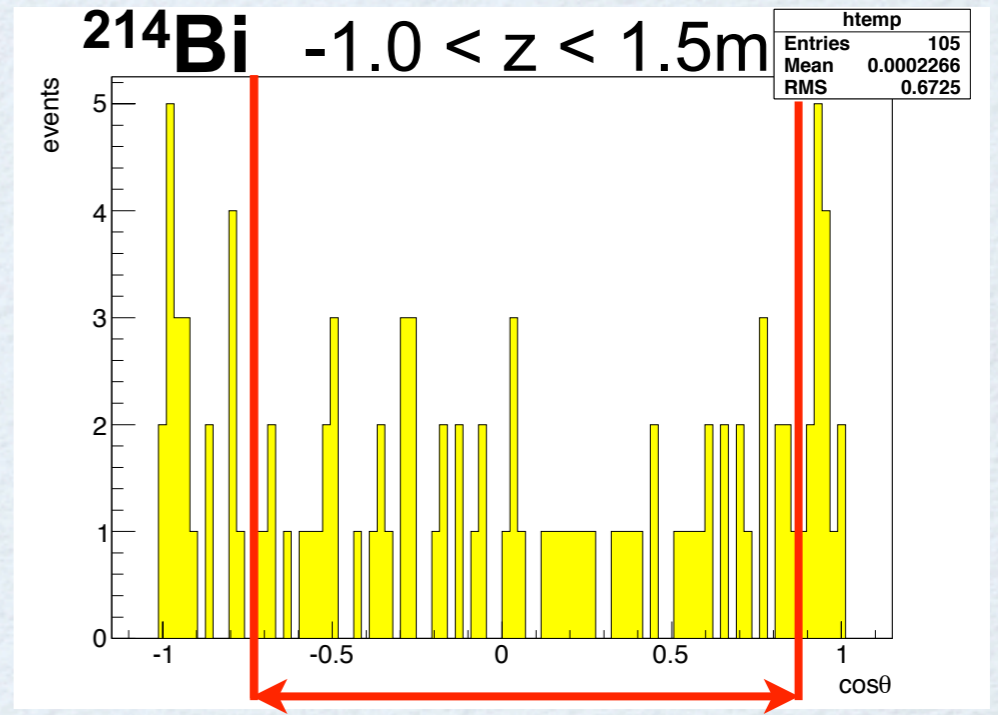
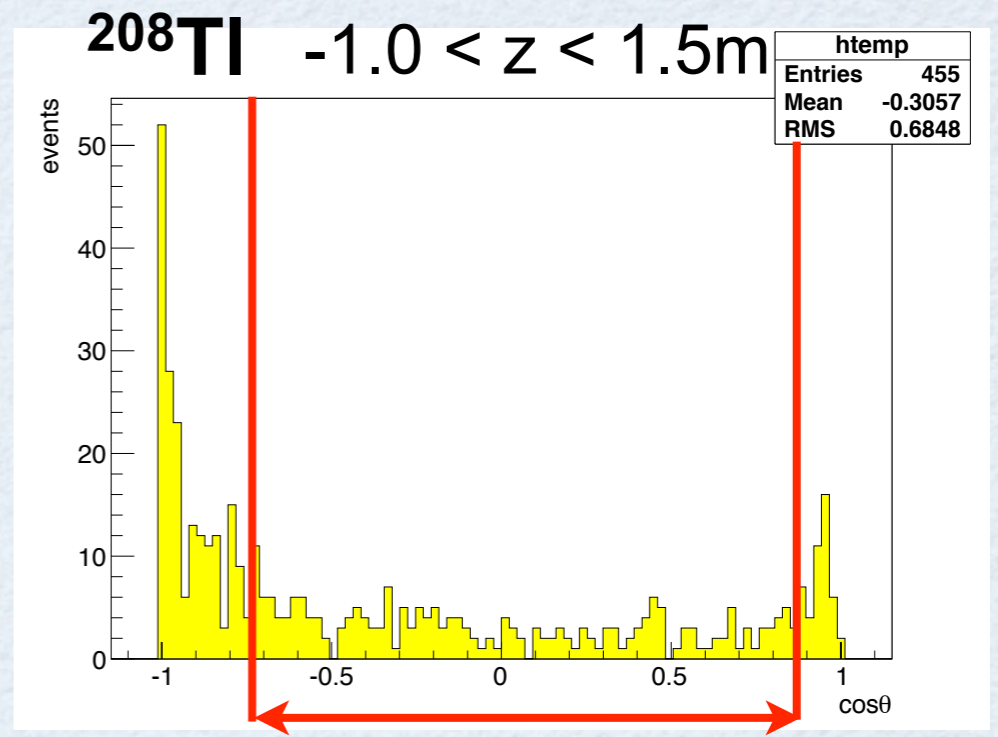
^{136}Xe 破砕
の可能性

主要バックグラウンド



(全イベント) - (Bi-Po イベント)
 = **Single イベント**

▶ 一様分布する領域の選定



▶ U,Thの見積もり方

- 放射平衡を仮定し、 ^{212}Bi , ^{214}Bi のレートを求める
- R分布をMCスペクトルでフィット
 (Xe-LSとバルーンそれぞれスペクトルを指定)

^{238}U : ^{214}Bi (Bi-Po イベント) → ^{214}Bi のレート

^{232}Th : ^{208}Tl (Single イベント) → ^{212}Bi のレートに変換

Xe-LS中に含まれるU, Thの量

^{214}Bi in Xe-LS
 4.88 ± 0.83 events/day



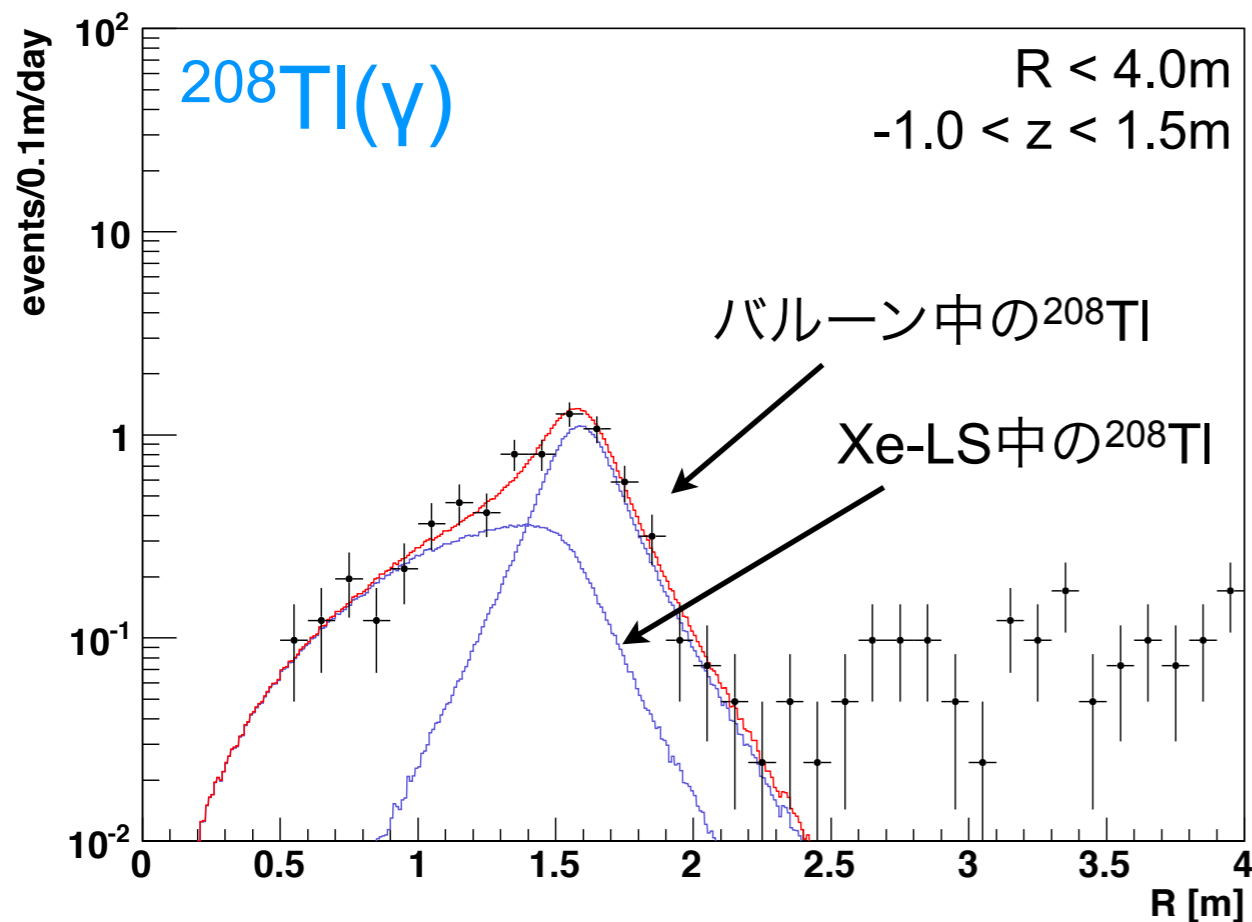
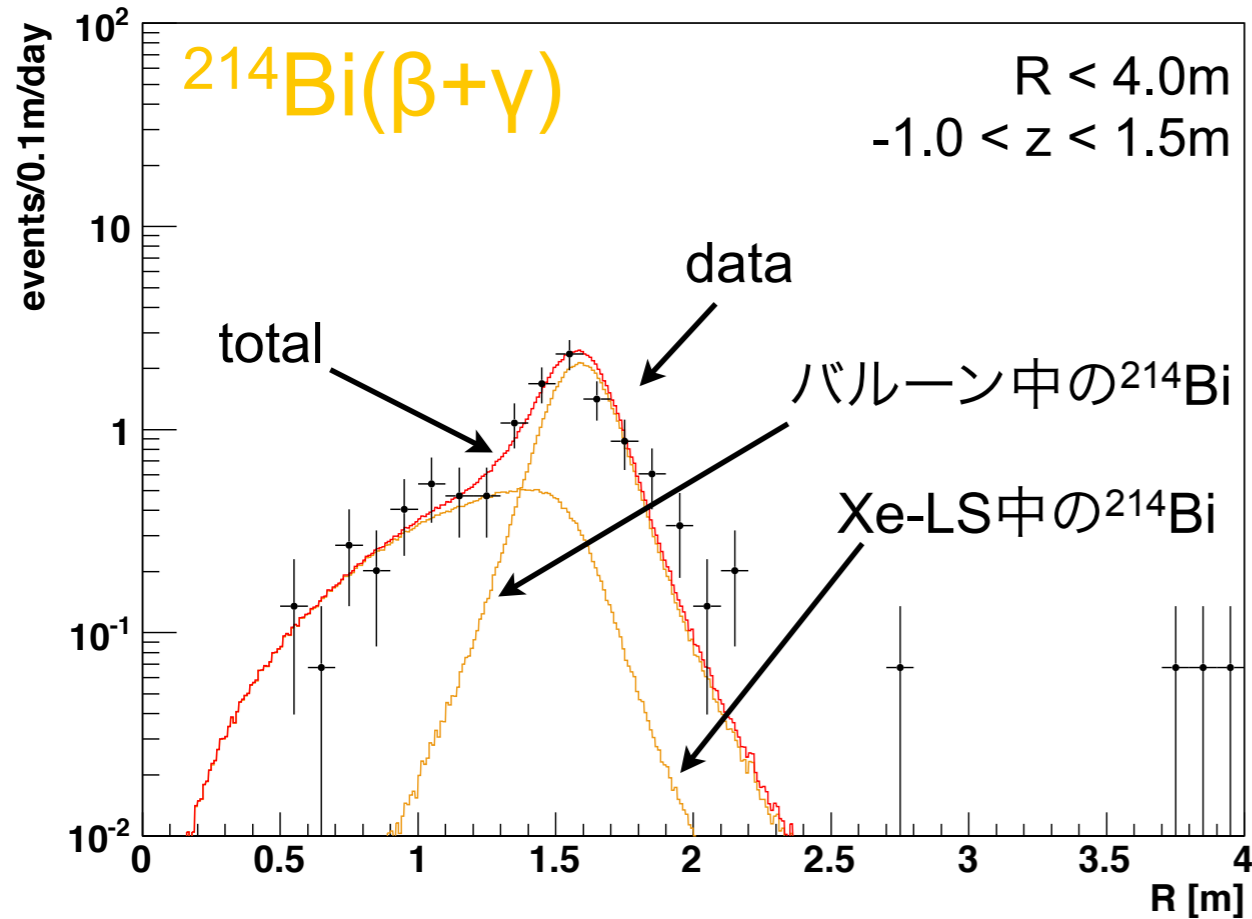
^{238}U in Xe-LS: $(3.5 \pm 0.6) \times 10^{-16}$ g/g
 ^{238}U in balloon: $(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ g/g

^{212}Bi in Xe-LS
 10.1 ± 1.3 events/day



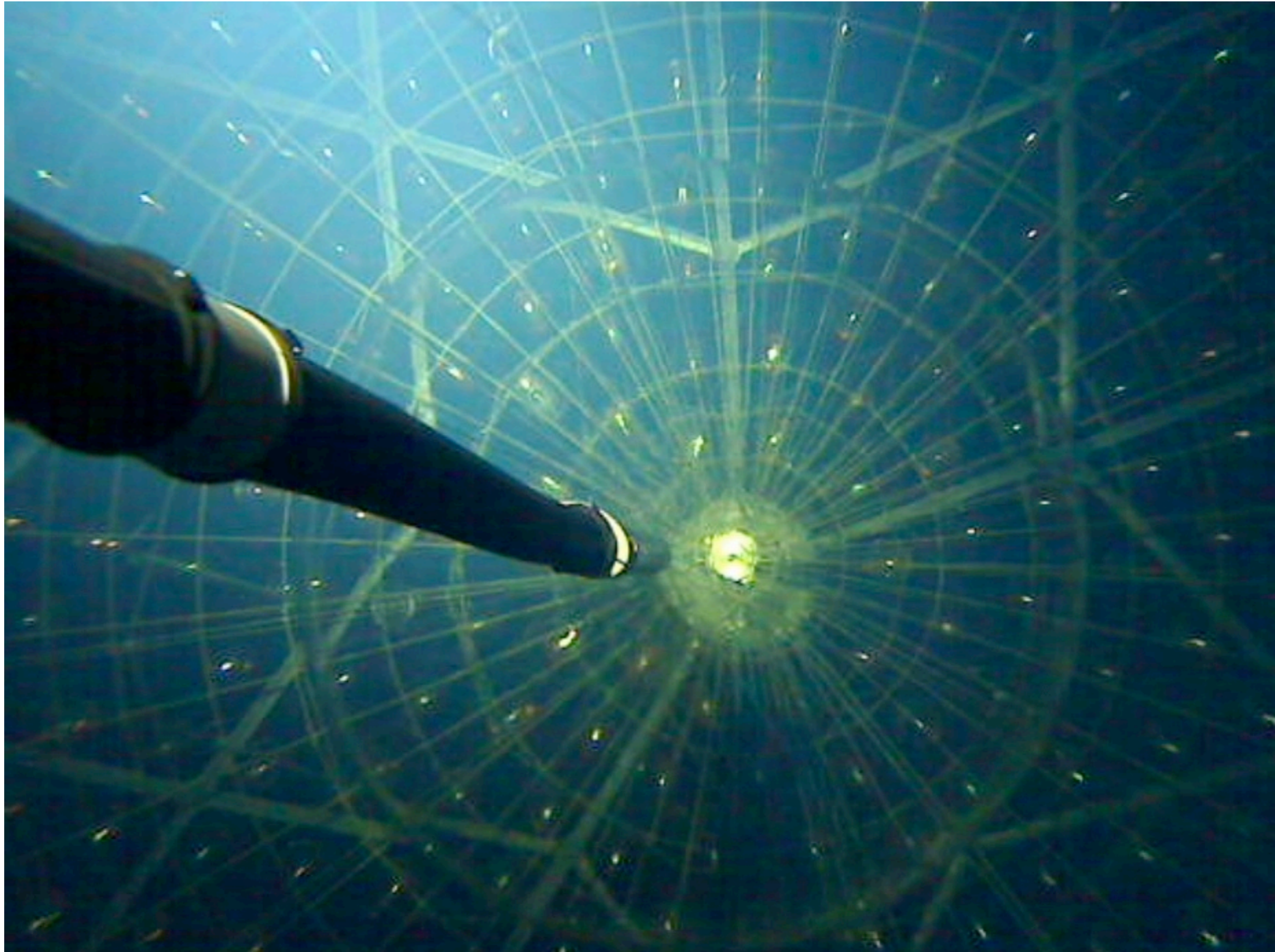
^{232}Th in Xe-LS: $(2.2 \pm 0.3) \times 10^{-15}$ g/g
 ^{232}Th in balloon: $(3.7 \pm 0.4) \times 10^{-11}$ g/g

U, Th以外のバックグラウンドは？

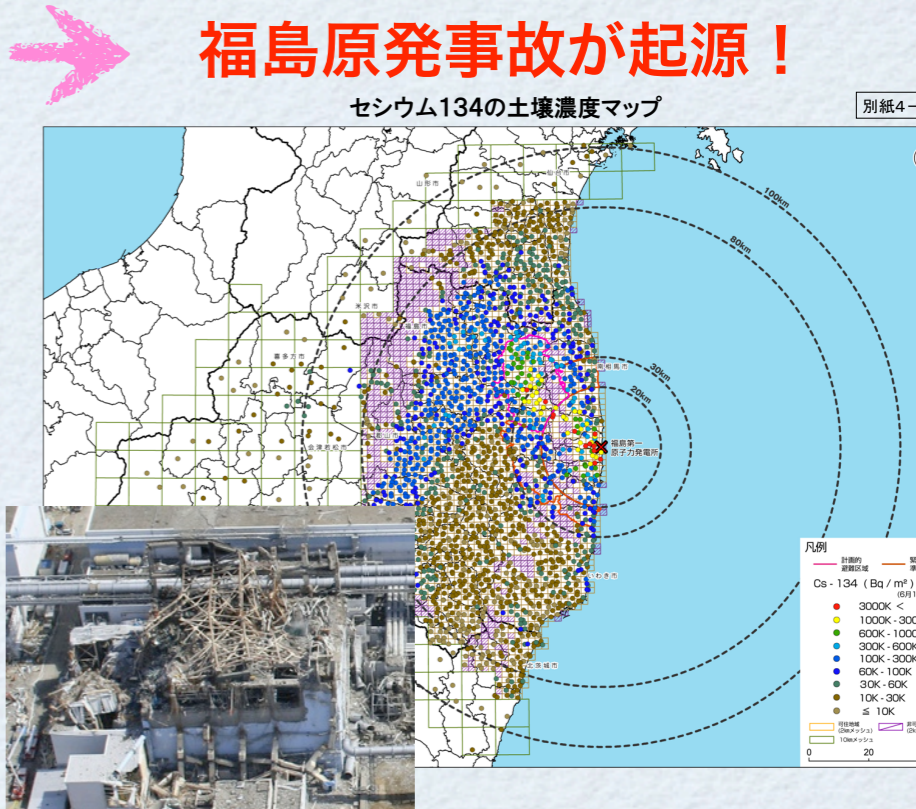
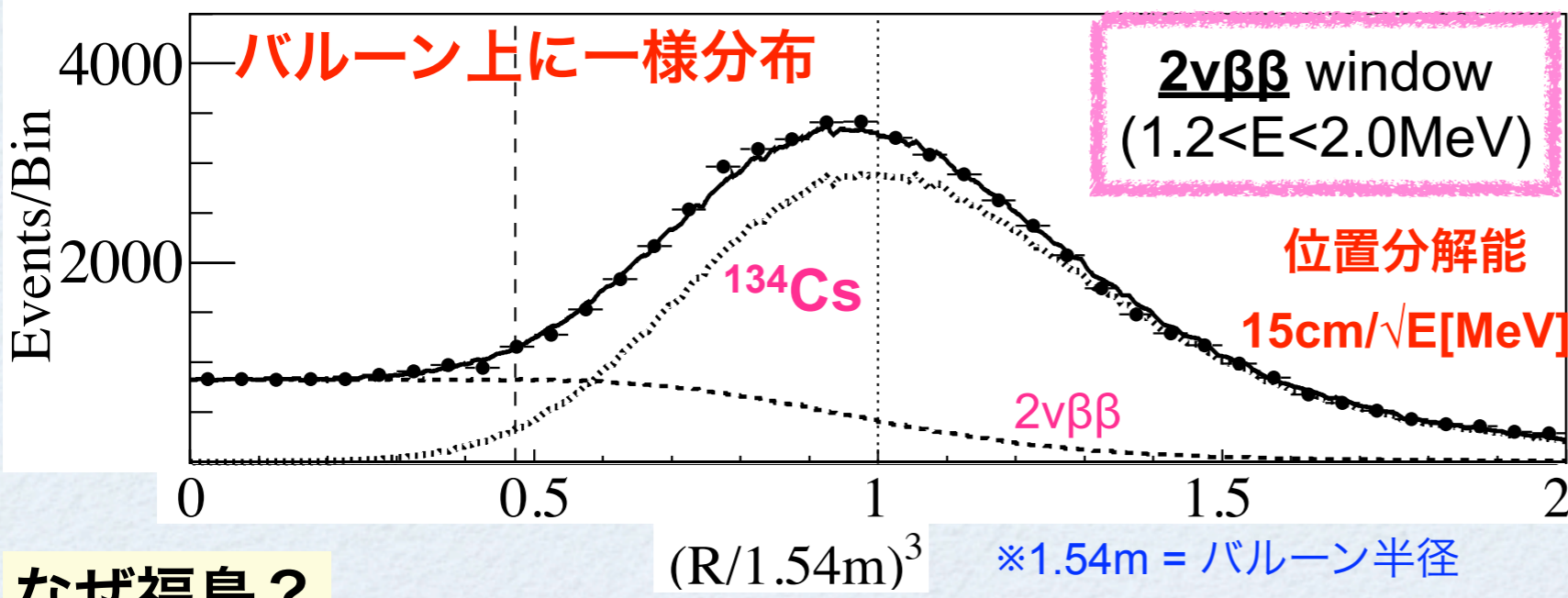


※これらの図は不純物量計算にのみ使用

二重ベータエネルギー領域の バックグラウンド特定



2νββエネルギー領域のバックグラウンド



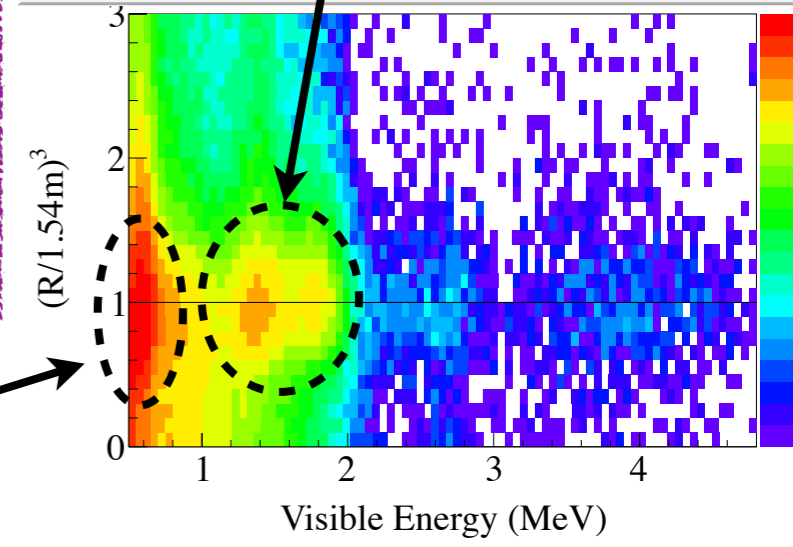
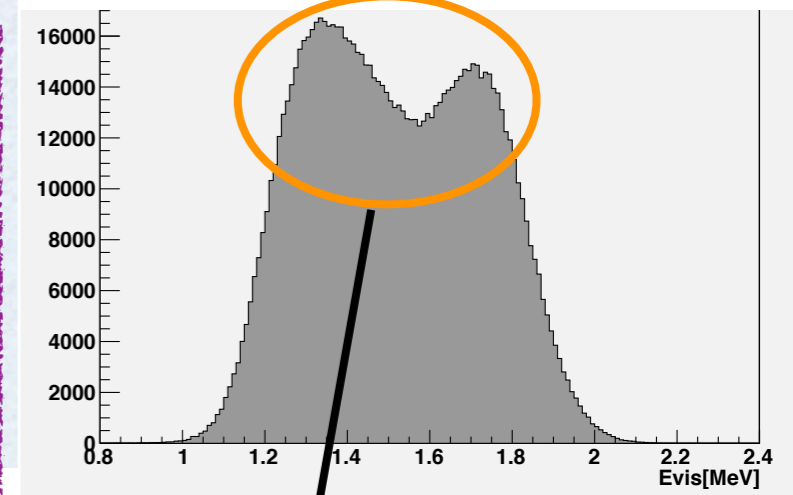
なぜ福島?

- Csは自然界に存在しない
 - Xeのspallation?
- ¹³⁷Csをspallationで作ろうとすると
 - ¹³⁶Xeより質量数大きく
 - 反応が起こりにくい
- データと福島のも
 - ¹³⁴Cs/¹³⁷Csがほぼ一致 (~0.8 大)**
 - ¹³⁷Csの多さがspallationでは説明できない

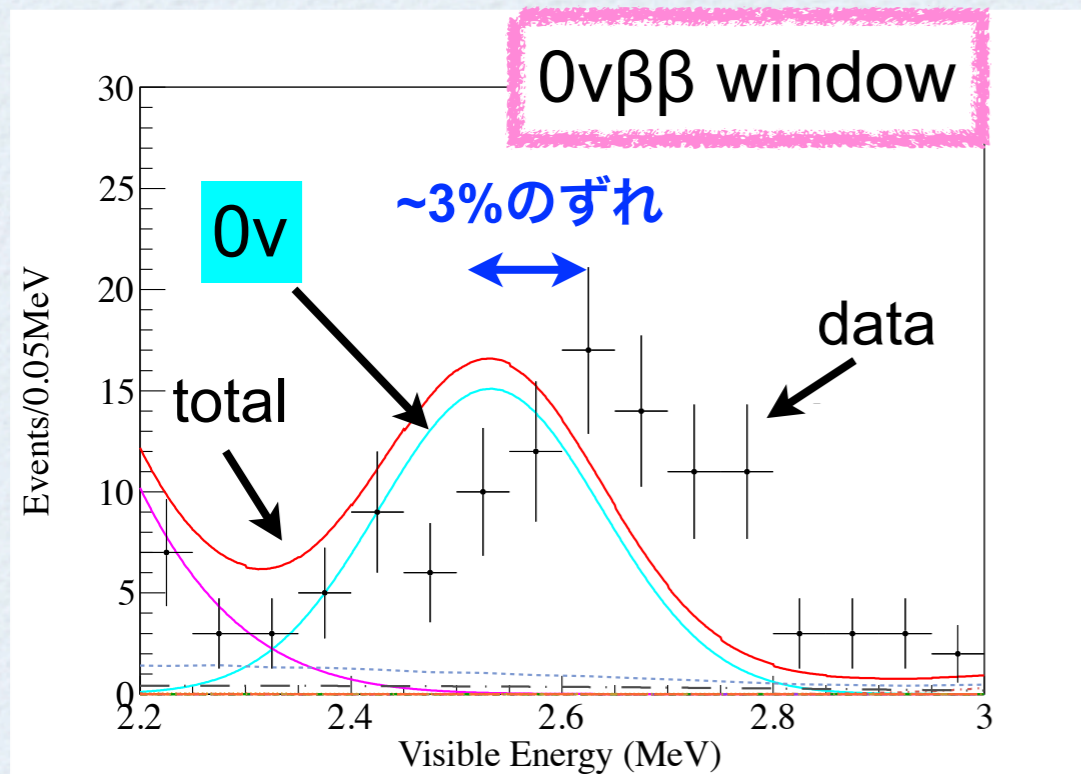
なぜバルーンに分布?

- バルーンを仙台で制作
- **仙台の土壌からCs検出** (Ge検出器で測定)
- R³分布で精度よくフィット
- CsはLSに溶けない (土壌をLSに投入→濾過、LSからCs検出されず)

¹³⁴Csのシミュレーションスペクトル



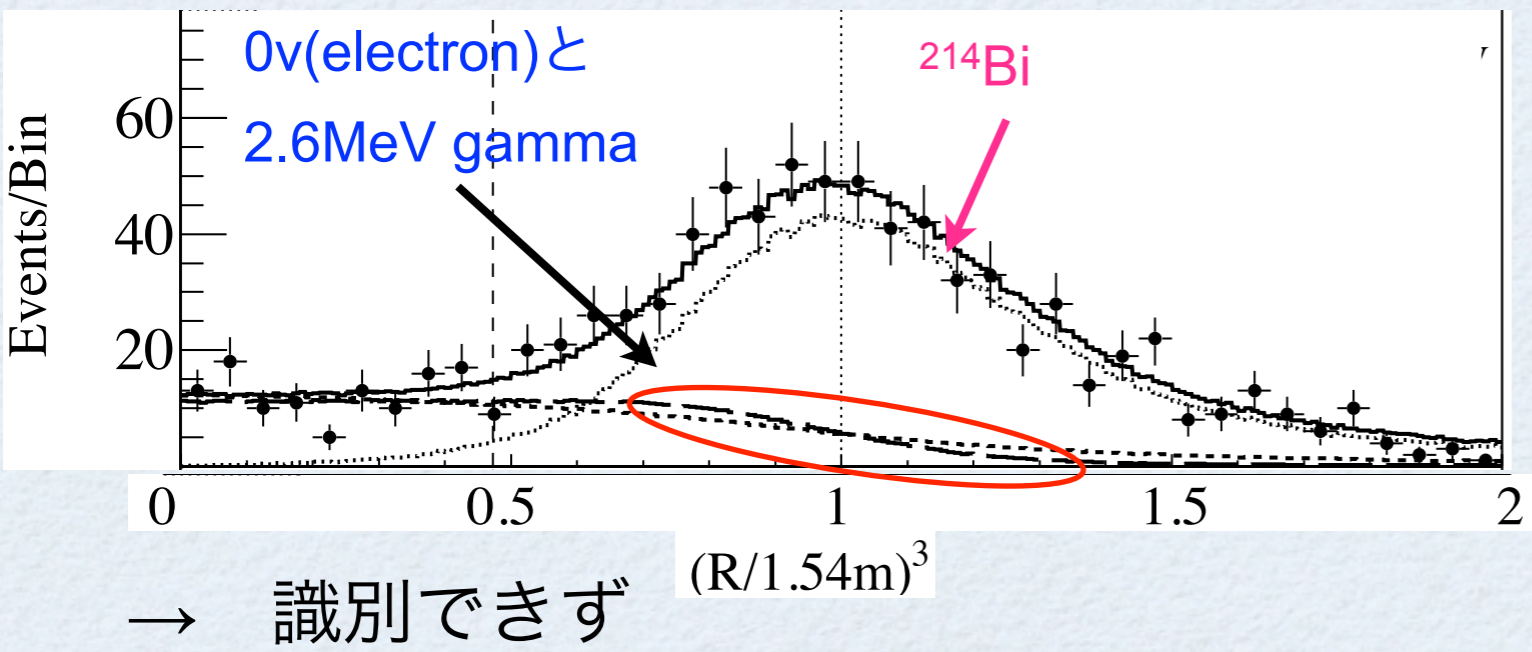
0νββエネルギー領域のバックグラウンド



- ▶ わかっていること
- 物理イベントである (位置、エネルギーのmiss reconstructionなし)
 - Xe-LSに一様に分布
 - 寿命がある程度長い (イベントレートの時間安定性)
 - KamLAND-LSには見られないイベント

バックグラウンドの寄与がないという仮定は、
5σ以上の信頼度で否定される

▶ R³分布による粒子識別は？



放射性同位体の探索へ

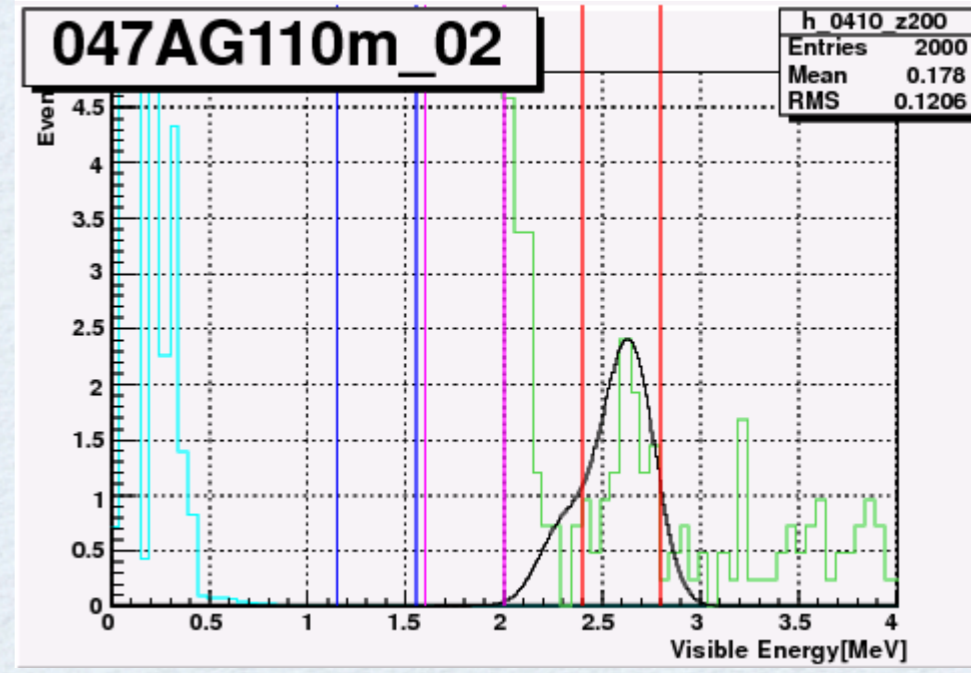
0νββエネルギー領域の放射性同位体探索

▶ 手順

1. 原子核の崩壊系列の情報をリストアップ
2. それを元に

β崩壊(β⁻) $(Z, A) \rightarrow (Z + 1, A) + e^{-} + \bar{\nu}_e$
 逆β崩壊(β⁺) $(Z, A) \rightarrow (Z - 1, A) + e^{+} + \nu_e$
 電子捕獲(EC) $(Z, A) + e^{-} \rightarrow (Z - 1, A) + \nu_e$

チェックしたスペクトルの例



2.6MeVに
ピークがあるか？

3. KamLANDで期待されるエネルギースペクトルを作る

- エネルギー分解能: $6.9\%/\sqrt{E}[\text{MeV}]$
- KamLANDのquenching factor
- ~200nsのtime windowに入っているか

4. ENSDFの全原子核の崩壊をチェック

<http://ie.lbl.gov/databases/enndfserve.html>

5. 残ったスペクトルに対してさらに寿命の制限を加える

※30日以内のXe

(有力な原子核の崩壊系列を遡って、
寿命30日以上の親核があれば候補に入れる)

spallationについても確認した

0νββエネルギー領域の放射性同位体探索

▶ 残った候補

	崩壊モード	寿命	Q値[MeV]
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$\beta^- + \gamma$	360日	3.01
^{88}Y	EC + γ	154日	3.62
^{208}Bi	EC + γ	5.31×10^5 年	2.88
^{60}Co	$\beta^- + \gamma$	7.61年	2.82

← 有力！

Xe spallationによって生成し、
Xeガスと共にLSに混入した？

▶ 考察

- Xeガスが輸送中に大量の宇宙線を浴びて

^{136}Xe が破砕された？

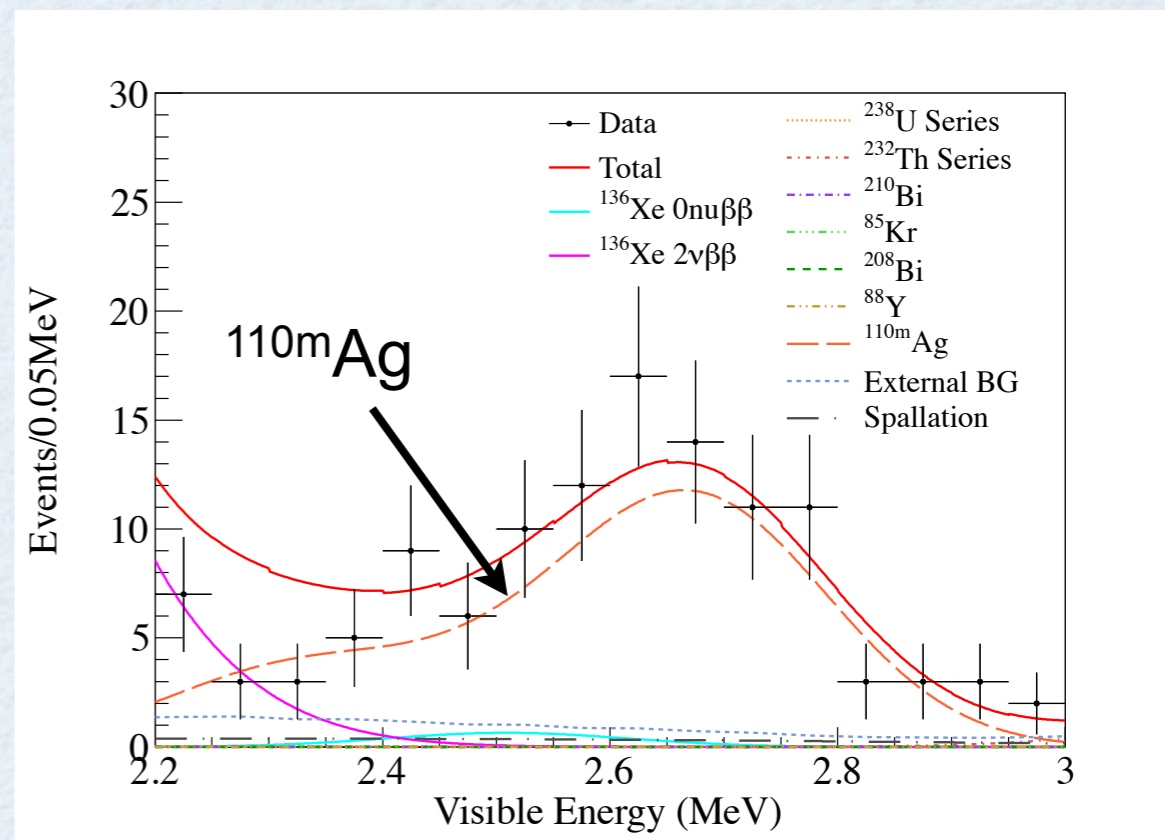
→ XeガスをLSに溶かす際には
混入していた可能性あり

- LS中に一様に分布しているように見える

→ インストール時XeガスはLSに溶かして循環

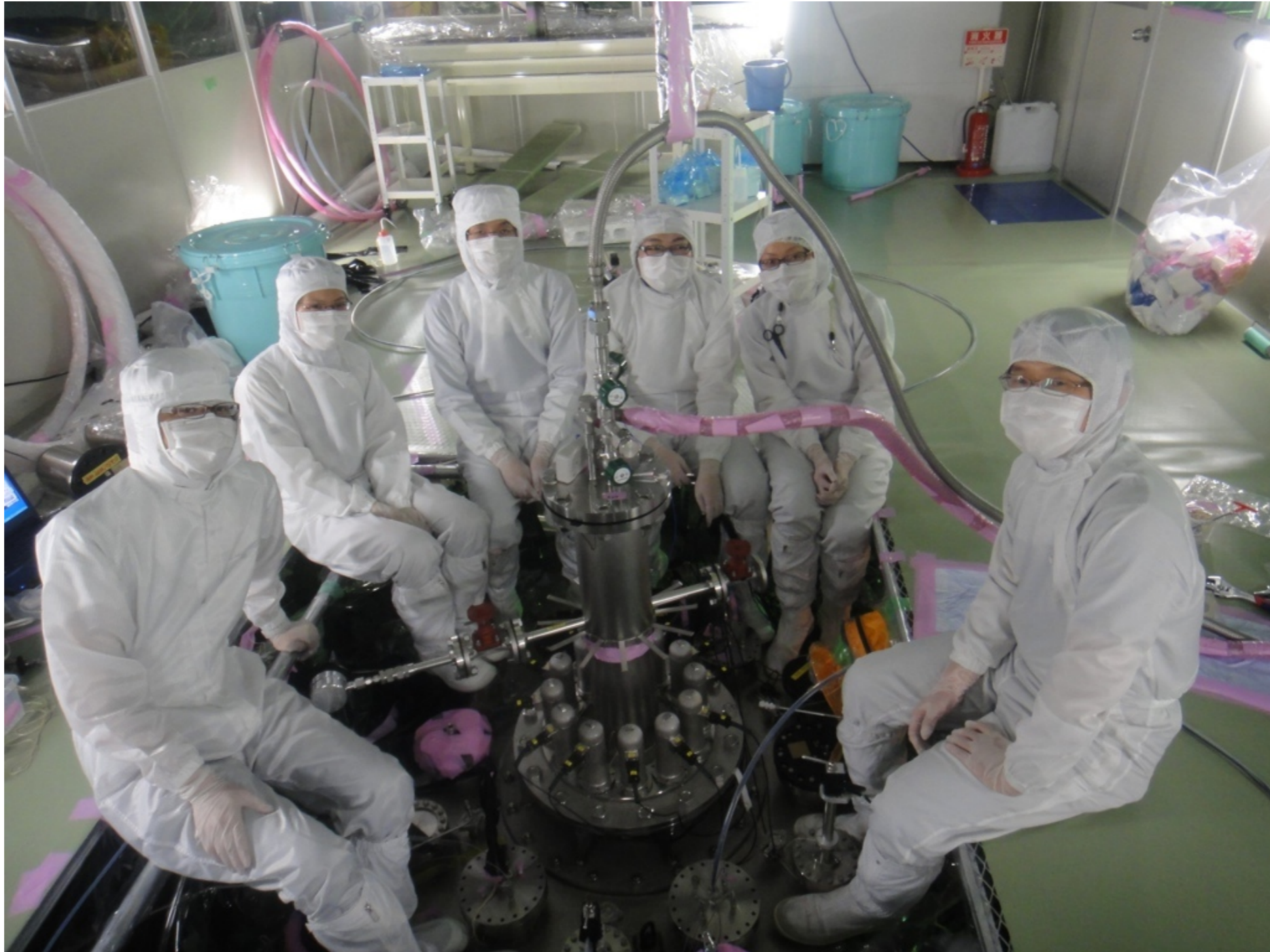
→ Xeガスと共に混入して分散？

福島起源の可能性もあり

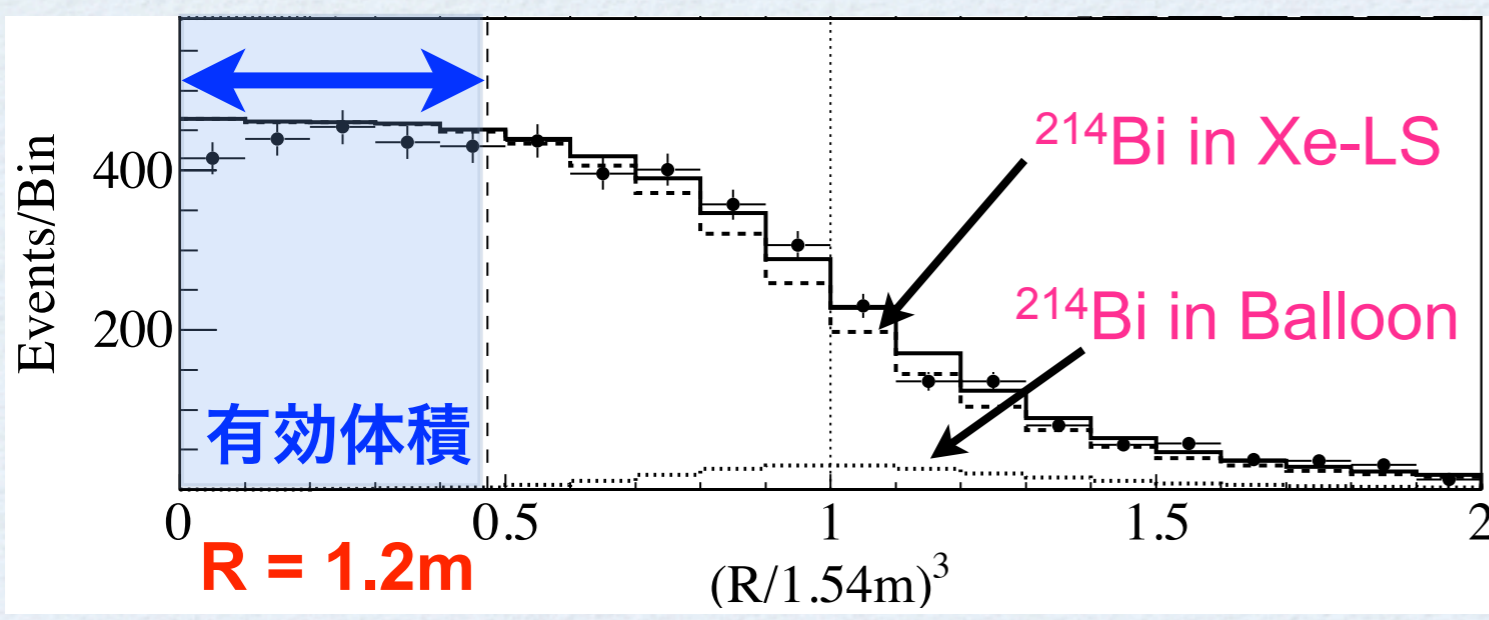


$^{110\text{m}}\text{Ag}, ^{88}\text{Y}, ^{208}\text{Bi}, ^{60}\text{Co}$
 $0.22 \pm 0.04 \text{ (ton} \cdot \text{day)}^{-1}$

二重ベータ崩壊の半減期と ニュートリノ有効質量の上限値



有効体積の決定



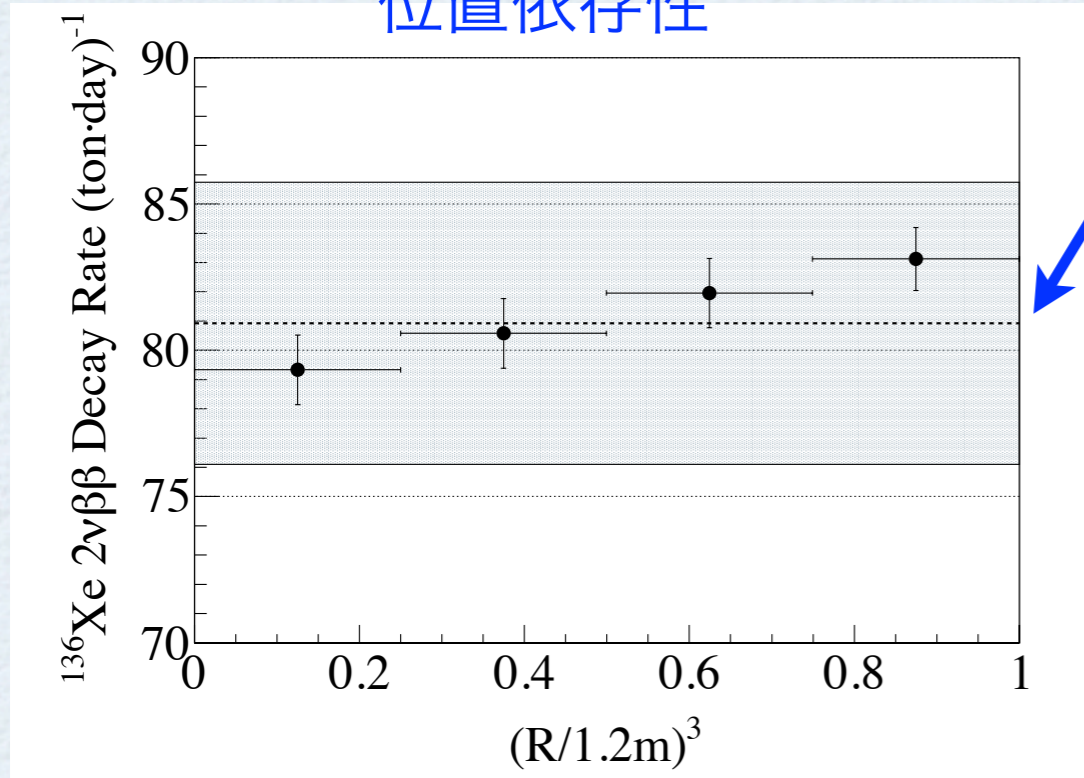
Systematic Uncertainty

体積の決定精度	5.2%
濃縮 ¹³⁶ Xe	0.05%
Xe濃度	2.8%
Energy Scale	0.3%
Xe-LSのedge effect	0.06%
	5.9%

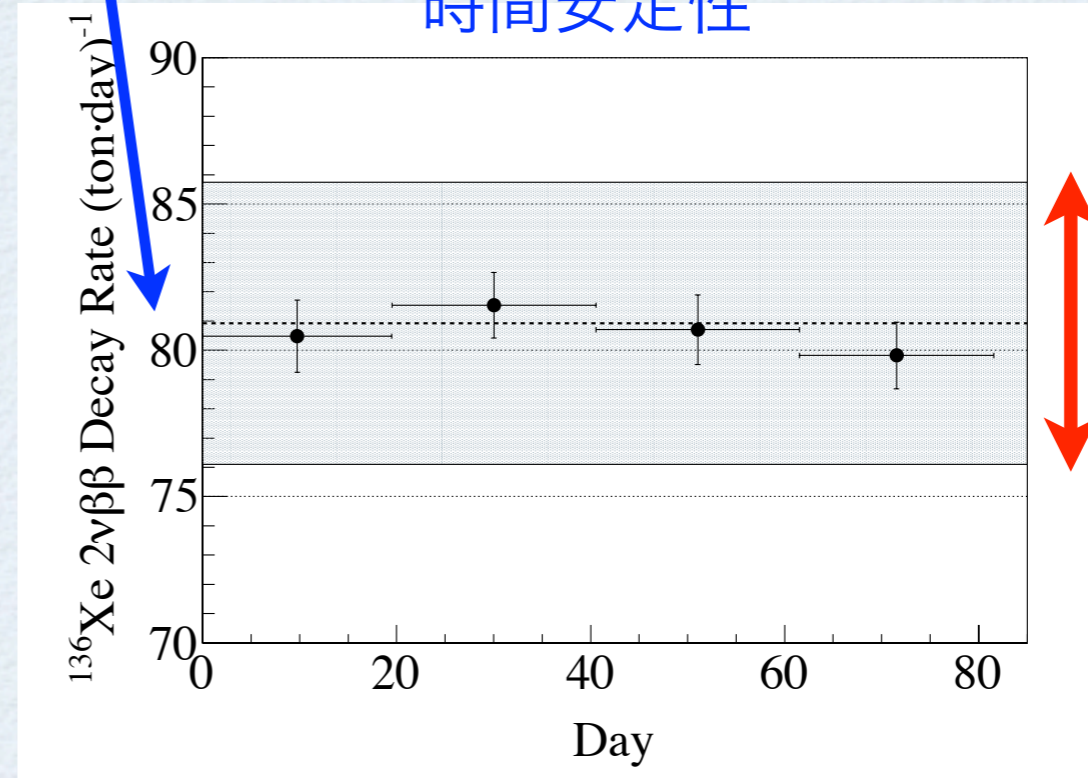
▶ 有効体積における $2\nu\beta\beta$ の安定性

最適値: $80.9(\text{ton}\cdot\text{day})^{-1}$

位置依存性

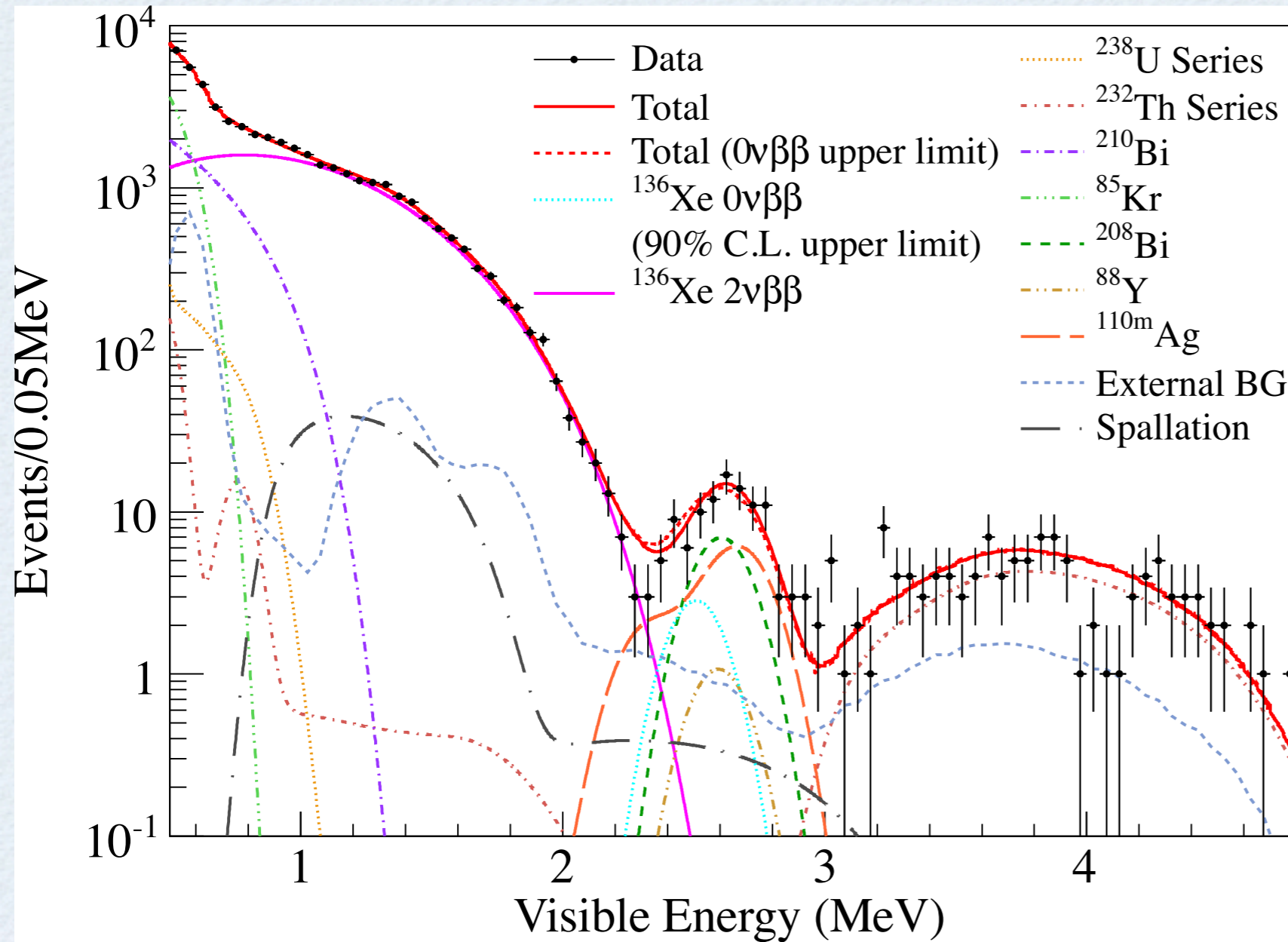


時間安定性

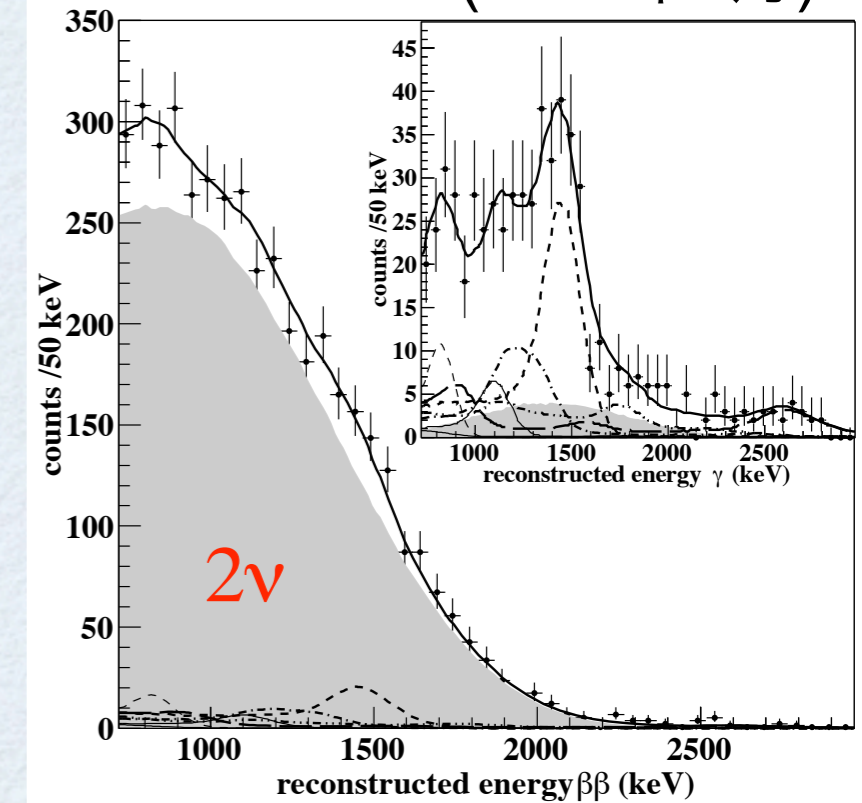


systematic error

全体のエネルギースペクトル



EXO-200 (2011年8月)



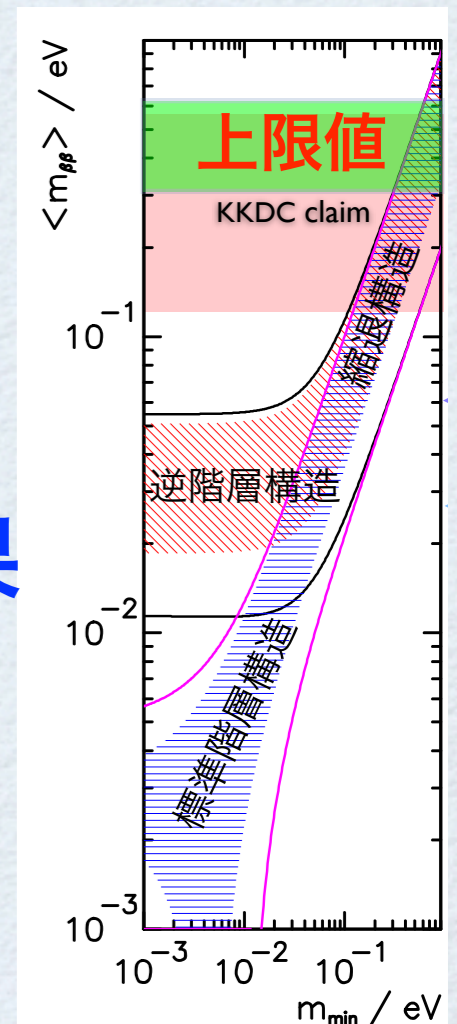
$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ yr}$$

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.11 \pm 0.24(\text{stat}) \pm 0.21(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ yr (EXO-200)}$$

$$T_{1/2}^{0\nu} > 5.7 \times 10^{24} \text{ yr (90\% C.L.)} \rightarrow \langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.3 - 0.6 \text{ eV}$$

QRPA(CCM SRC)モデルを使用 Phys. Rev. C 79 055501(2009)

**EXOの結果
と一致!**



まとめ

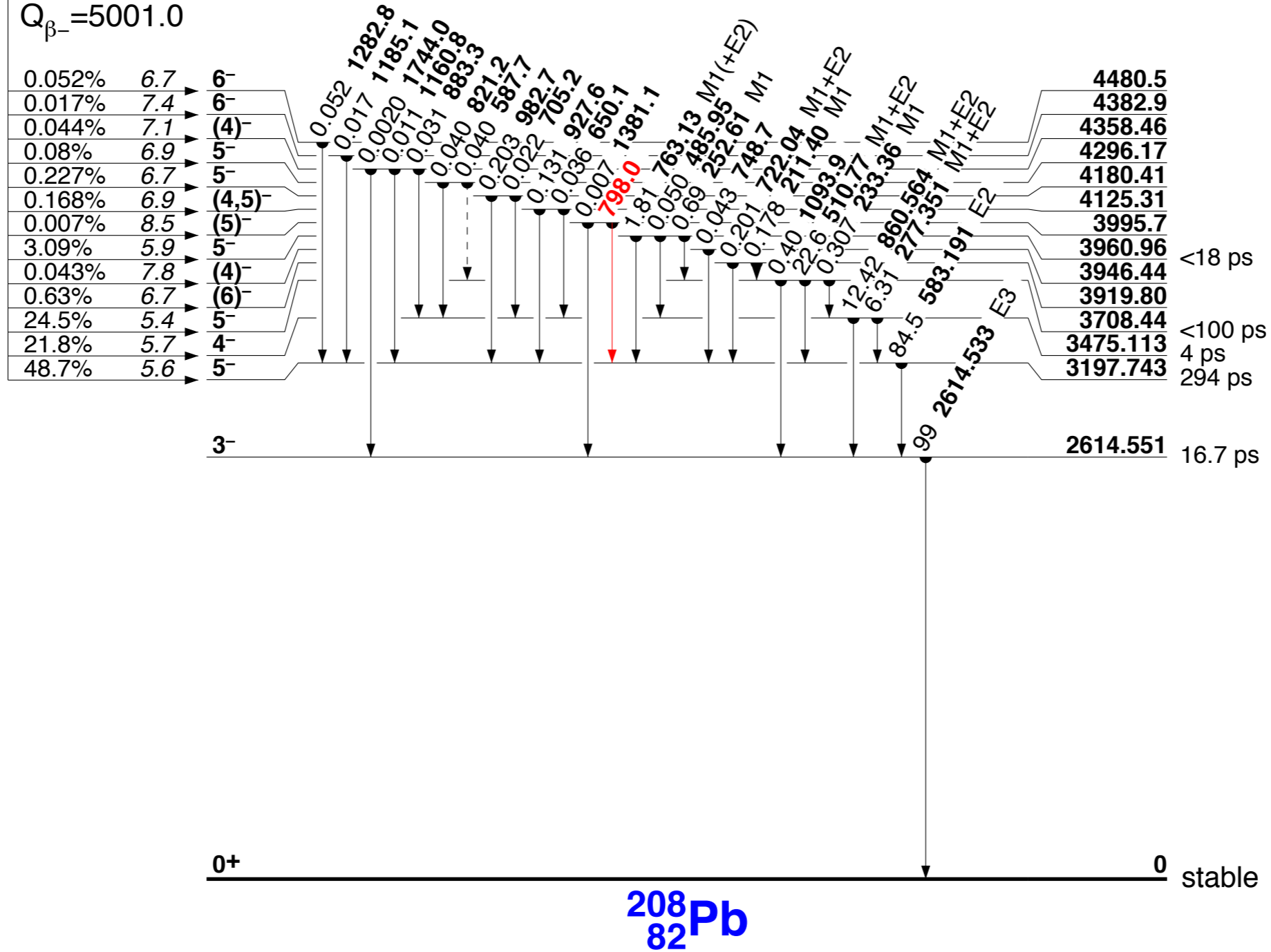
- 9月にカムランド禅実験開始, 1月に最初の結果を発表
- 高精度な二重ベータ崩壊の半減期を測定
(^{136}Xe を使った実験で世界一)

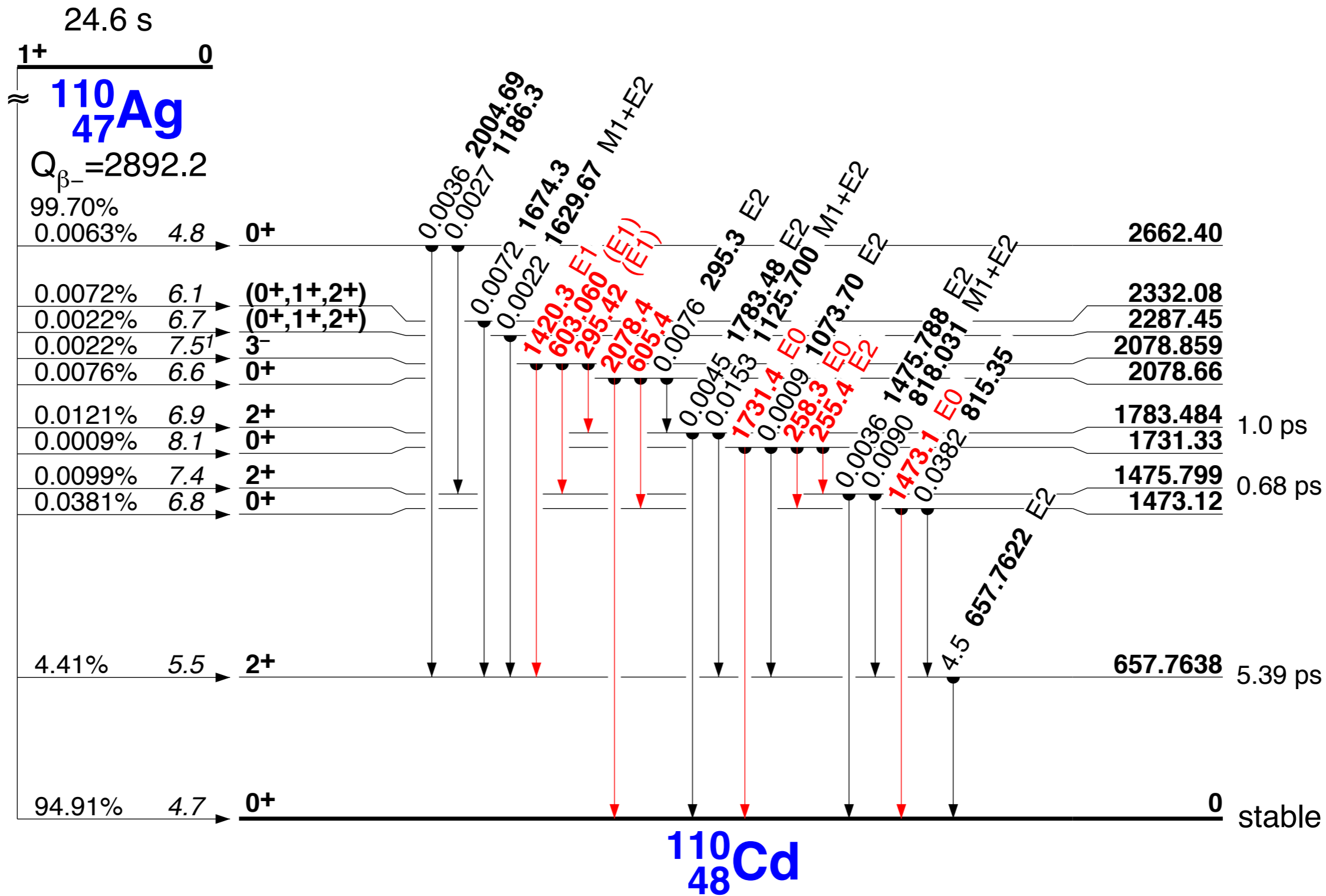
今後の展望

- バックグラウンドの更なる詳細解析、起源特定
- 2月にはフィルトレーションを実施
- Xe-LSの蒸留、精留等による
バックグラウンド除去の強化

Back Up

3.053 m
 5(+) 0
 \approx $^{208}_{81}\text{Tl}$
 $Q_{\beta^-} = 5001.0$



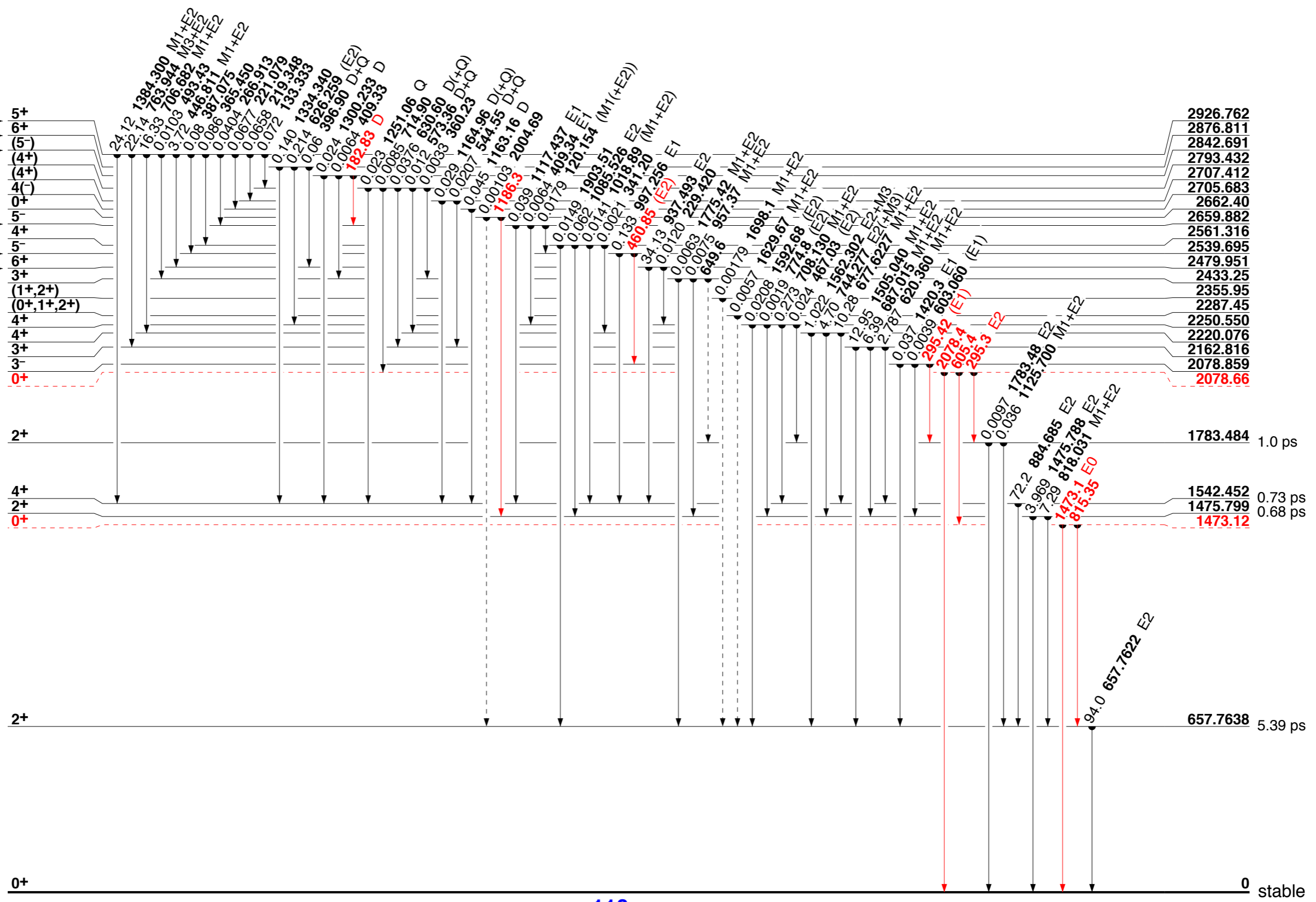


249.79 d
 6+ 117.59
 0

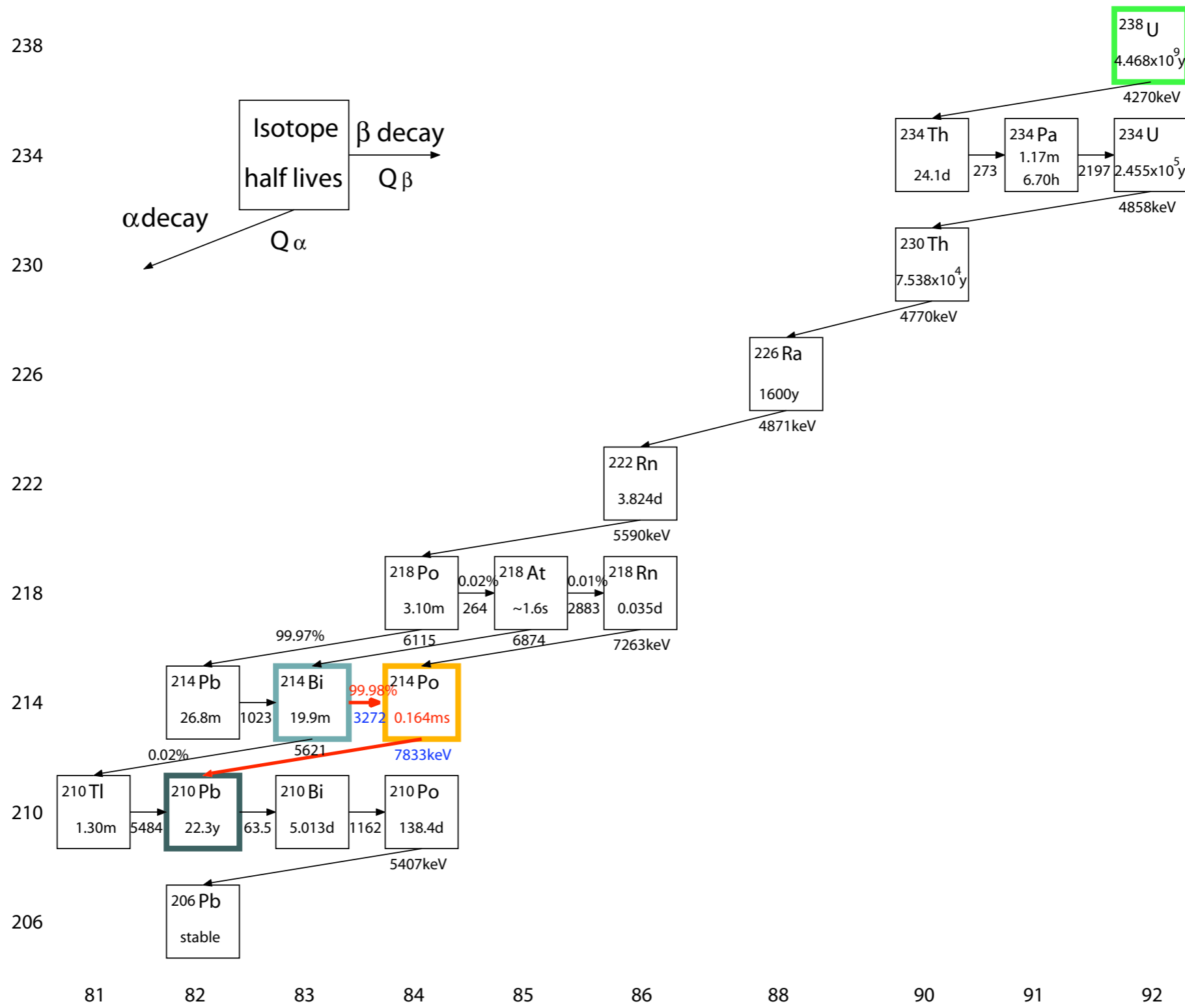
¹¹⁰₄₇Ag

$Q_{\beta^-} = 2892.2$

98.64%
 66.8% 5.4
 0.41% 8.2
 0.030% 9.7
 0.023% 10.8
 <0.08% >10.7
 30.45% 8.3



¹¹⁰₄₈Cd



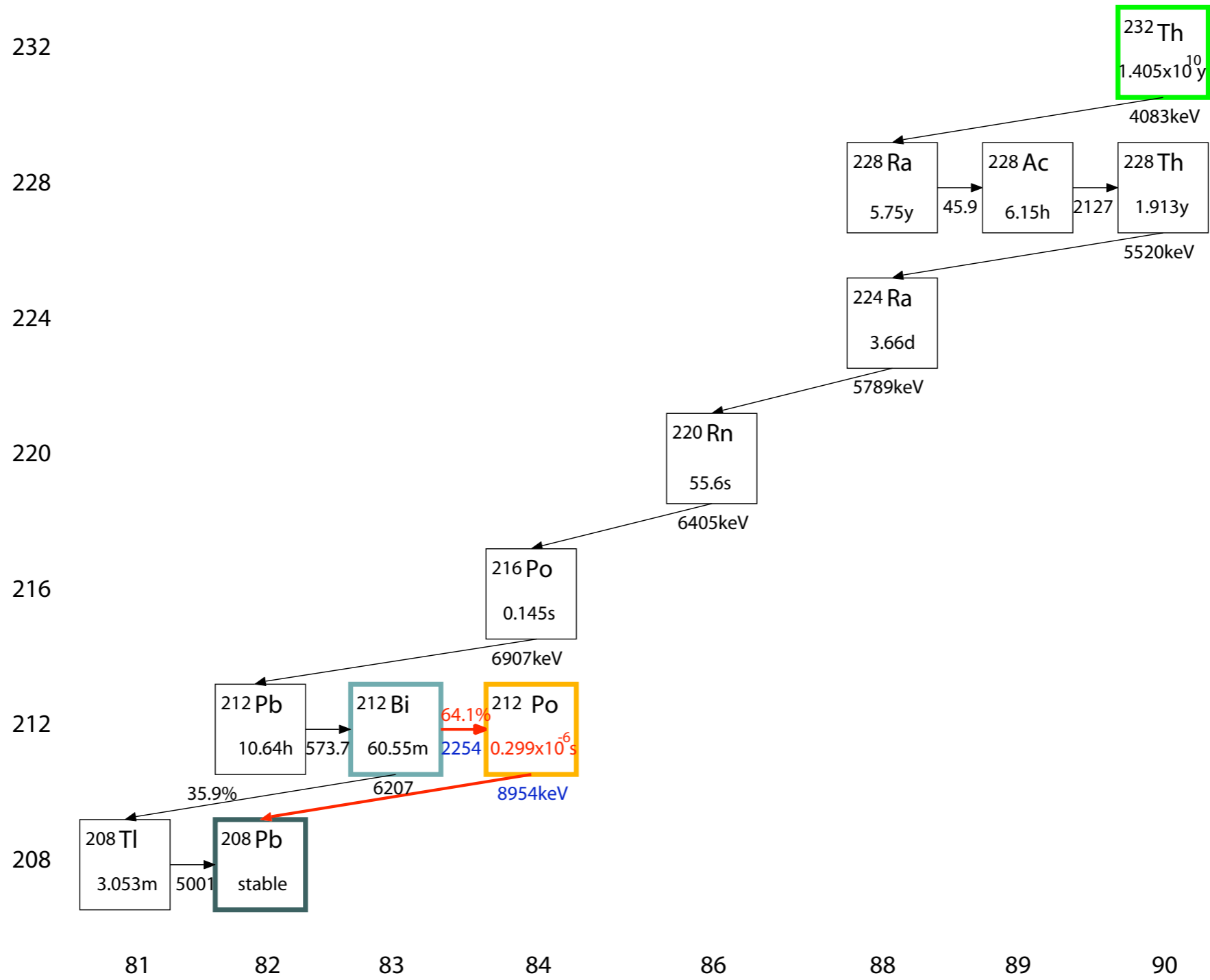


Figure A.2: ^{232}Th decay series