

136Xeを用いた実験、関連するバックグラウンド

亀井雄斗

東北大学ニュートリノ科学研究センター

ミグダル観測検討会@神戸大 2020年12月09日

ミグダル効果と ^{136}Xe

cf. 中村輝石さんのトーク
[arXiv:2009.05939](https://arxiv.org/abs/2009.05939)

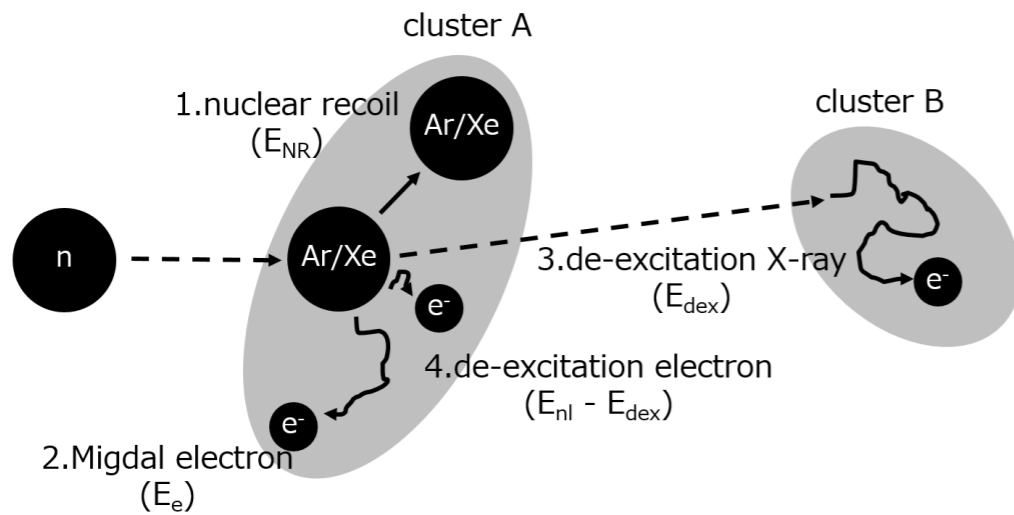


Fig. 1 Schematic mechanism of the reactions related to the Migdal effect.

ミグダル効果観測に
 濃縮 ^{136}Xe の使用が有効的



^{136}Xe の先行実験についてトーク
 (ミグダル効果と関係なく)

isotope ratio of neutron BG

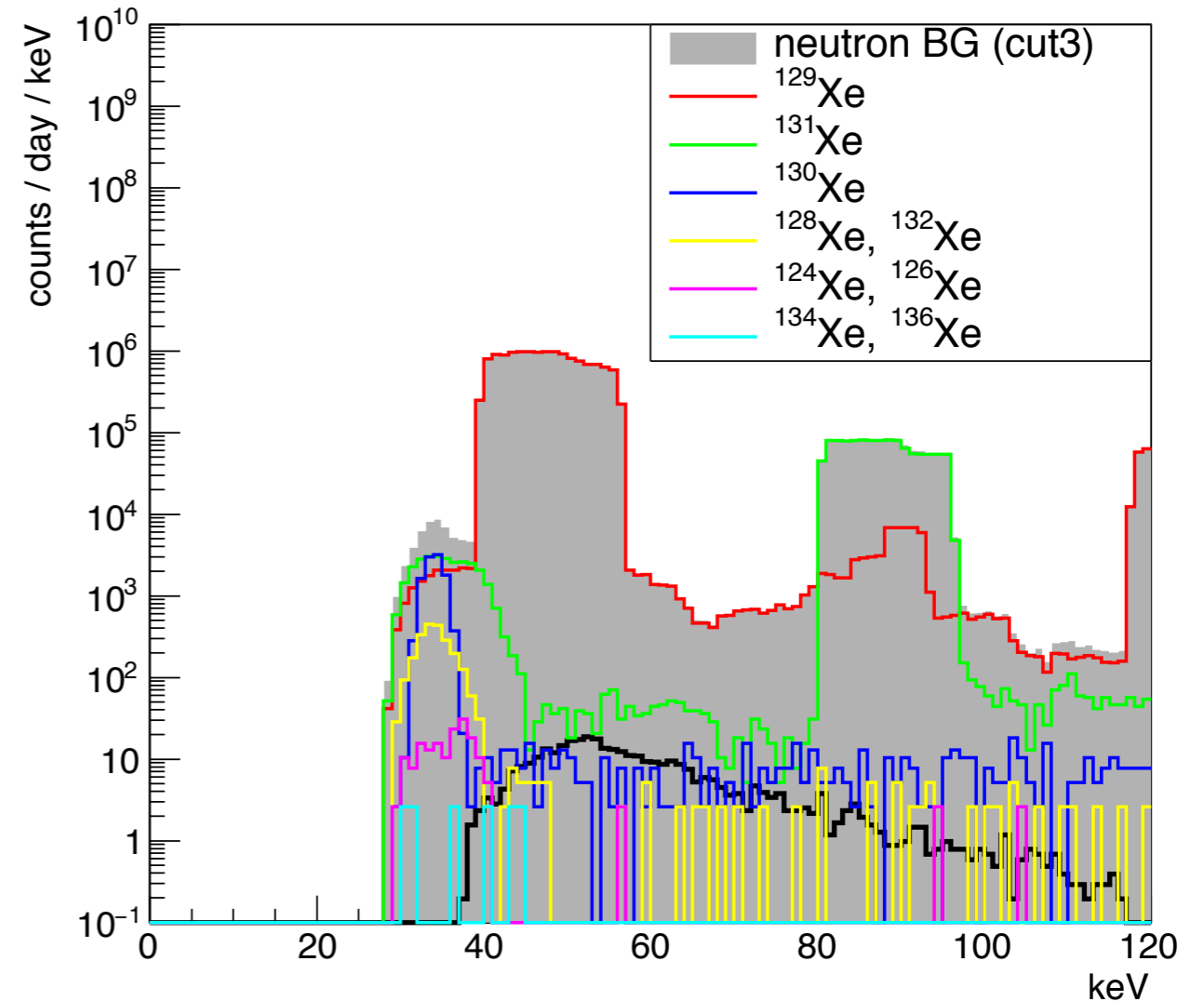


Fig. 7 Isotope-breakdown of the intrinsic neutron background events for the xenon target.

^{136}Xe を用いた実験

^{136}Xe

原子番号54, 質量数136 自然同位体比8.9%

融点 -111.9°C 、沸点 -108.1°C

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊候補核の一つ

- 三態が利用可能
- 純化技術が確立している
- 通常の $2\nu\beta\beta$ の崩壊寿命が比較的長い \longrightarrow 低BG化
- 液体キセノンの高い自己遮蔽力

- 比較的濃縮が容易 \longrightarrow 高感度化
- 大容量化が容易

- 大光量シンチレーションも利用可能

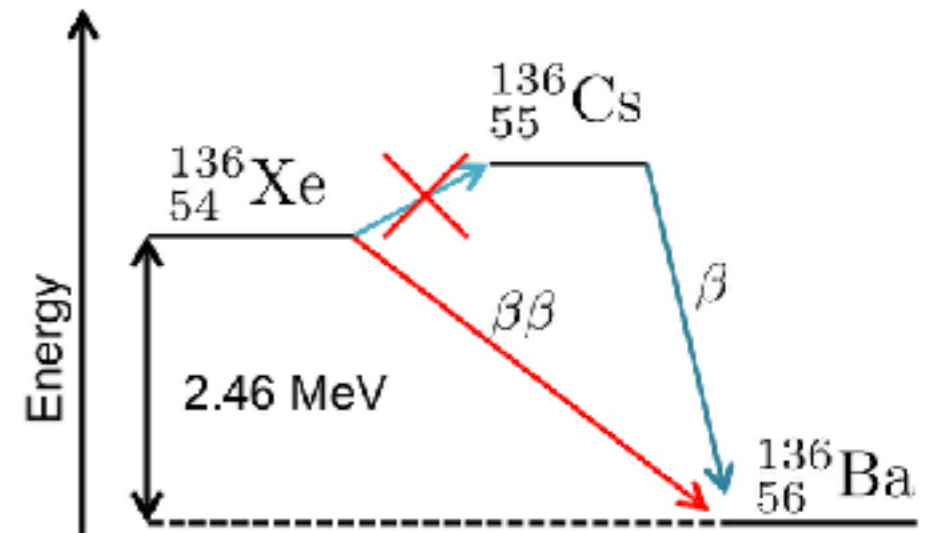
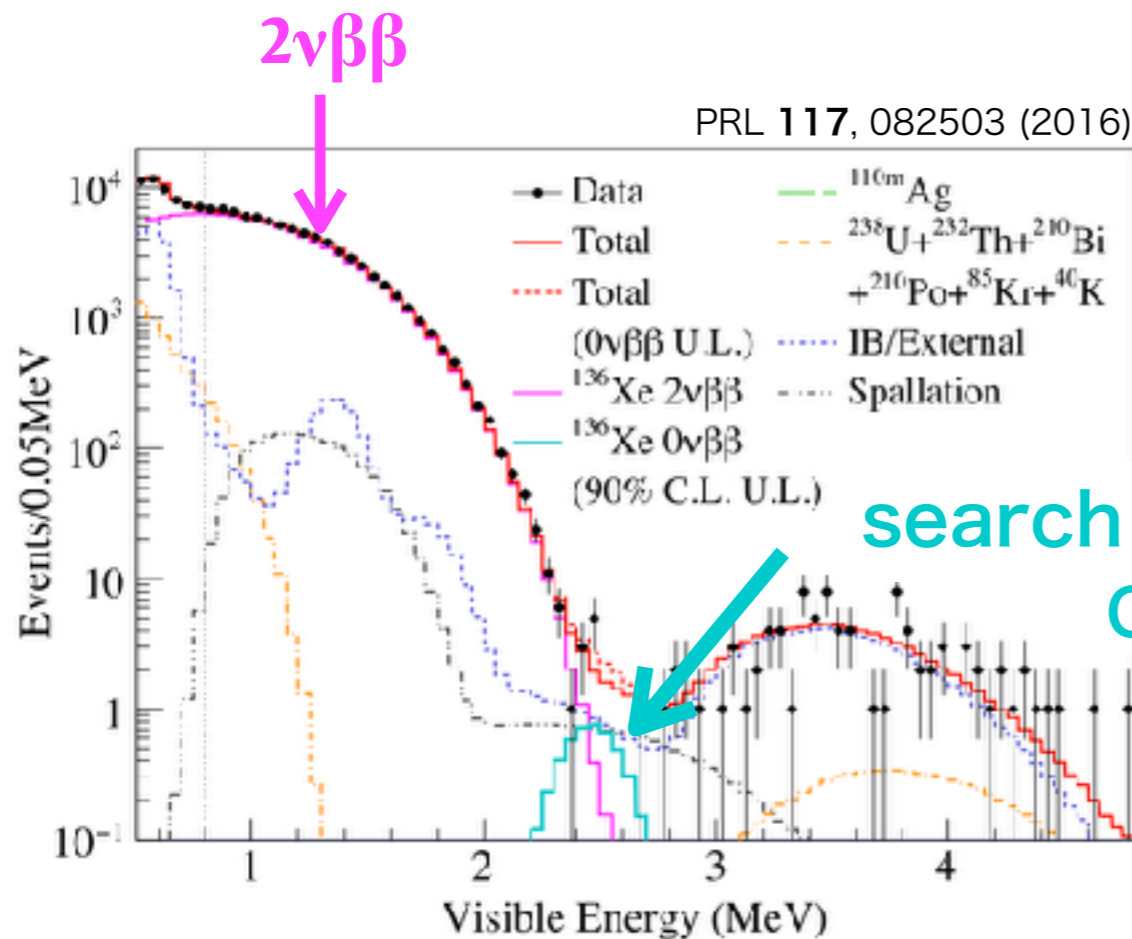
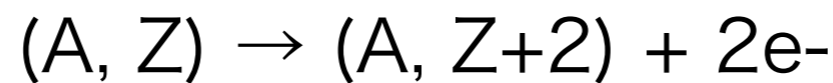
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

二重ベータ崩壊($2\nu\beta\beta$)

通常のベータ崩壊がエネルギー準位的に禁止

標準理論を超えたニュートリノを伴わない崩壊モード ($0\nu\beta\beta$) の可能性

ニュートリノがマヨラナ粒子 ($\nu = \bar{\nu}$) である場合にのみ起きうる



半減期は 10^{18} 年以上

(他に ^{130}Te , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo などが候補核)

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)を発見すれば...

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

$0\nu\beta\beta$ の半減期 (測定量) 位相空間因子 (Q, Zから計算) 核行列要素 (理論計算、不定性大) マヨラナ有効質量

マヨラナ有効質量

- $0\nu\beta\beta$ に寄与するニュートリノの有効質量

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \equiv \left| |U_{e1}^L|^2 m_1 + |U_{e2}^L|^2 m_2 e^{i\phi_2} + |U_{e3}^L|^2 m_3 e^{i\phi_3} \right|$$

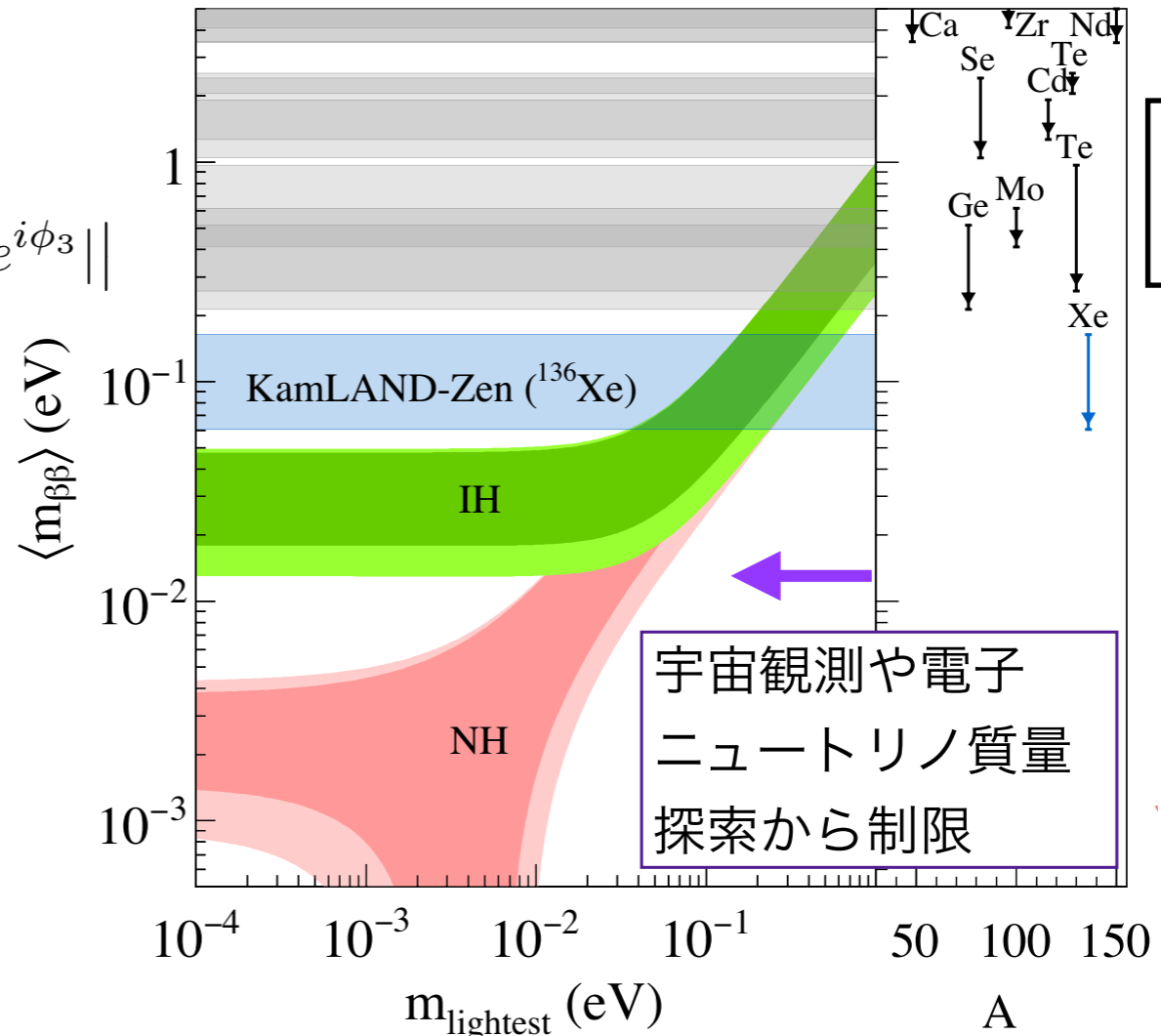


ニュートリノ質量の階層構造

標準階層(NH): $m_1 < m_2 \ll m_3$

逆階層(IH) : $m_3 \ll m_1 < m_2$

絶対質量へのヒント



ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)を発見すれば...

ニュートリノが**マヨラナ粒子**($\nu = \bar{\nu}$)である証拠となる

マヨラナ粒子

中性フェルミオンのみなり得る。→ニュートリノ

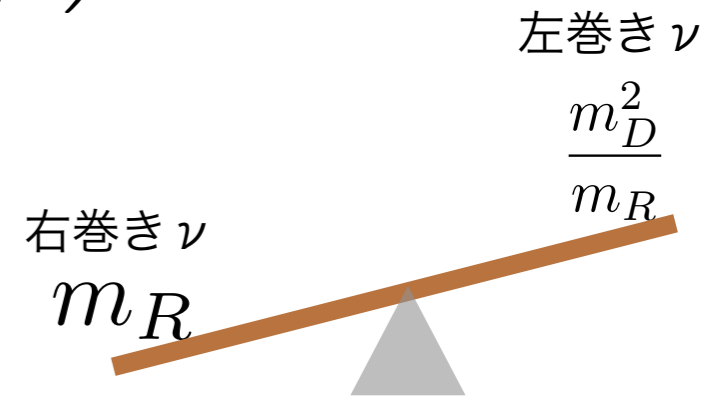
ディラック質量項+マヨラナ質量項が許される。→右巻きニュートリノ

$$\mathcal{L}_{mass} = (\bar{\nu}_R^c \quad \bar{\nu}_R) \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_L^c \end{pmatrix} + h.c.$$

シーソー機構による軽いニュートリノ質量の説明

標準理論に重い右巻きニュートリノを導入

$m_L = 0, m_R \gg m_D$ とすることで**小さな質量を説明**



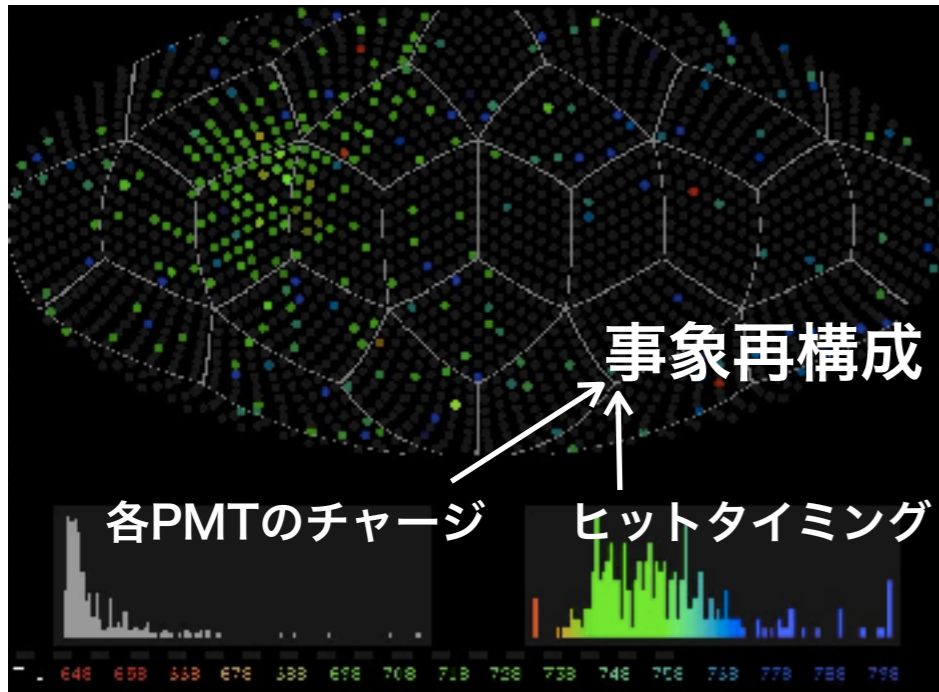
レプトジェネシス – 物質優勢宇宙の説明への鍵

重いニュートリノの崩壊がレプトン数を生成、

スファレロン過程(B+Lを破り、B-Lを保存)によりバリオン数が生成

KamLAND-Zen実験

KamLAND *Zero-neutrino double beta decay search*



$0\nu\beta\beta$ 探索実験

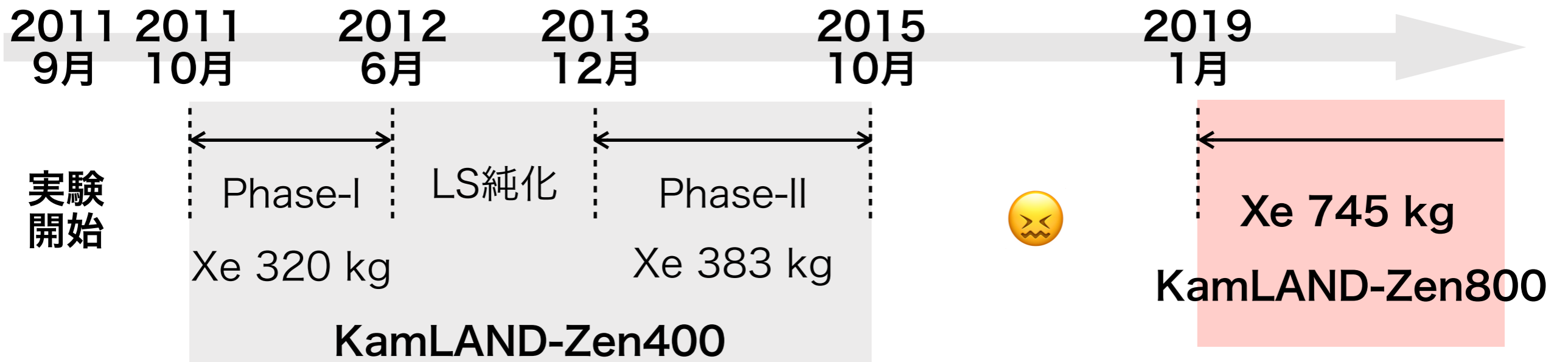
検出器：KamLAND

→低BG環境を実現した液体シンチレータ検出器

ターゲット崩壊核： ^{136}Xe

→同位体濃縮Xe (91% ^{136}Xe , 9% ^{134}Xe)
~3 wt%

バルーンによる容易な拡張、ON-OFF測定



世界で最も厳しい制限： $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61 - 165 \text{ meV}$

将来：KamLAND2-Zen
Xe ~1 ton & 検出器改良

EXO実験

Enriched Xenon Observatory

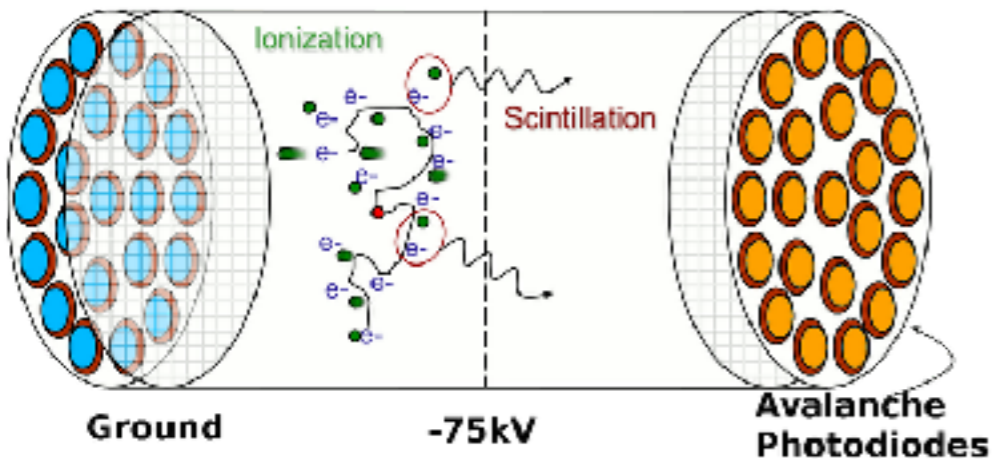
$0\nu\beta\beta$ 探索実験

検出器：TPC(time project chamber) +
APD(Avalanche Photodiodes)

→2種類の検出器で信号とBGを区別
高エネルギー分解能 1.2% σ/E

ターゲット崩壊核：液体Xe (LXe)

→同位体濃縮Xe(81% ^{136}Xe)



アメリカ、WIPP

EXO-200 (LXe 175 kg)

Phase-I : 2011年9月- 2014年2月

Phase-II: 2016年1月-2018年12月

$$T_{1/2} > 5.0 \times 10^{25} \text{ yr}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 93 - 286 \text{ meV}$$

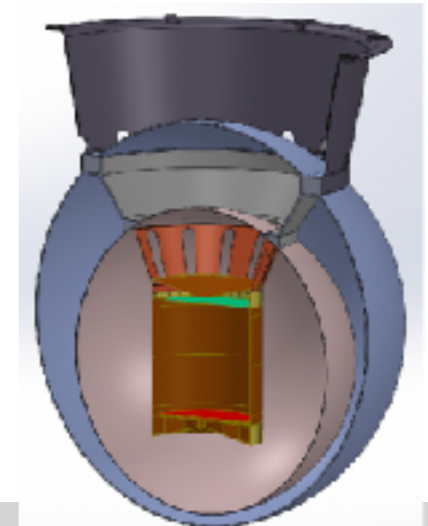
PRL 123, 161802 (2019)

→次期計画nEXOへ $\sim 10^{28}$ yr

nEXO Xe \sim 5ton

濃縮Xe >90%

高分解能<1.0%



高圧XeガスTPCを用いた将来計画

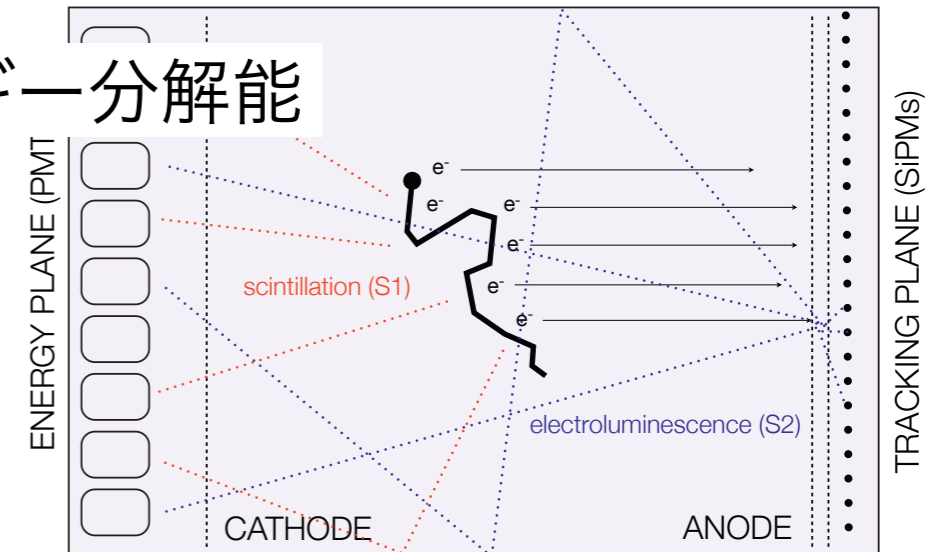
Jose A. Hernando / Physics Procedia 61 (2015) 251 -

検出器：TPC(time project chamber)

→Electro Luminescenceを利用した高エネルギー分解能

ターゲット崩壊核：気体Xe 高圧10 - 15bar

トポロジーを利用した低BG化



PandaX-III

Particle and Astrophysical Xenon experiments

140 kg 90% ^{136}Xe

NEXT-100

Neutrino Experiment with a Xenon TPC

100 kg 90% ^{136}Xe

2021年DAQ始動予定

AXEL

A Xenon ElectroLuminescence

KamLAND-Zen 800実験

^{136}Xe のニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)探索実験@神岡



~50 Collaborators



ZOOMでのコラボレーション会議
@2020年10月

KamLAND-Zen検出器

Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector

水チェレンコフ検出器(OD)

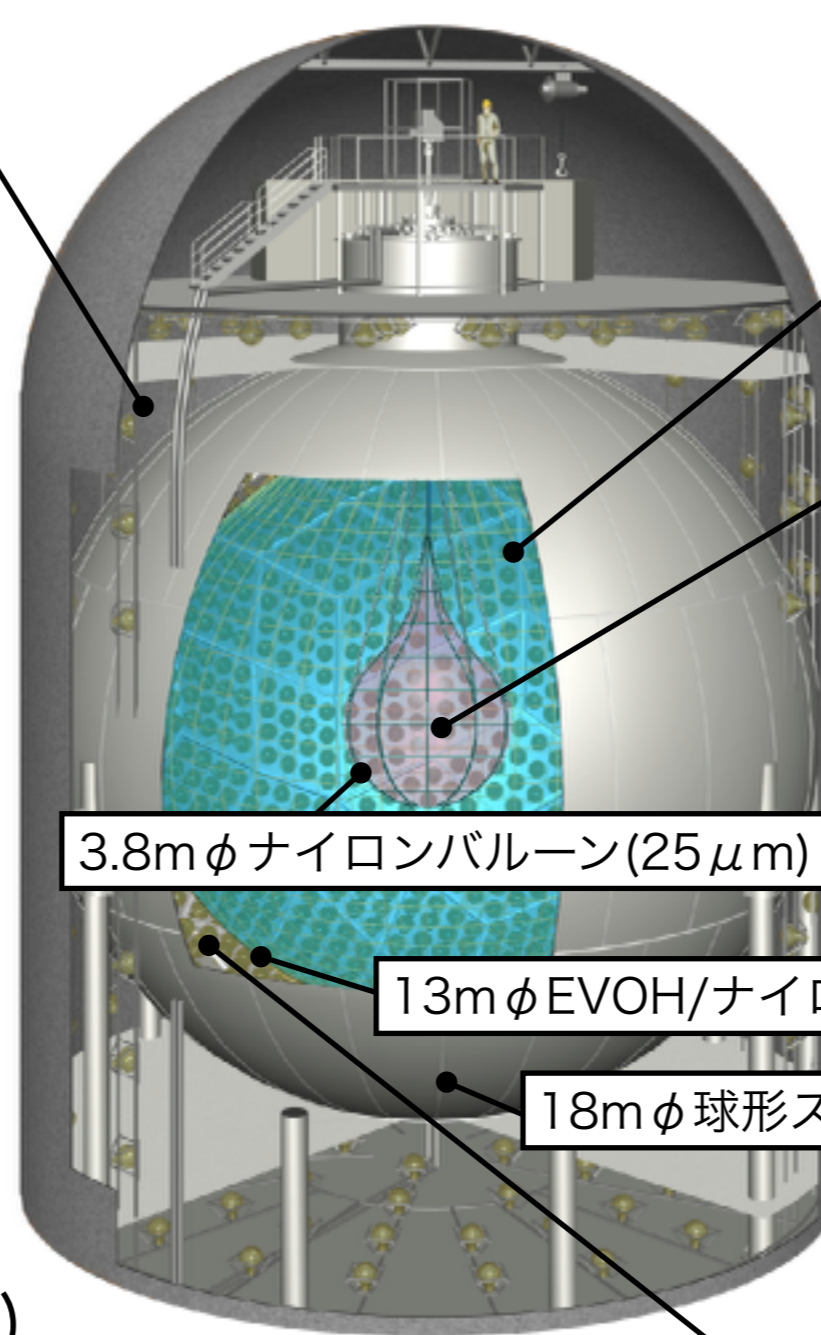
純水 3.2 kton
225本のPMTを使用
宇宙線 μ を検知
岩盤からの中性子の遮蔽

液体シンチレータ検出器(ID)

1879本のPMTを使用
(17" PMT 1325本, 20" PMT 554本)
KamLAND-LS 1 kton
(PC 20%, N12 80%, PPO 1.36 g/L)

Xe-LS 30 m³
(PC 18%, N10 82%, PPO 2.4 g/L)
Xe 3.1 wt%

$^{238}\text{U} \sim 5.0 \times 10^{-18} \text{ g/g}$
 $^{232}\text{Th} \sim 1.3 \times 10^{-17} \text{ g/g}$



3.8m ϕ ナイロンバルーン(25 μm)

13m ϕ EVOH/ナイロンバルーン

18m ϕ 球形ステンレスタンク

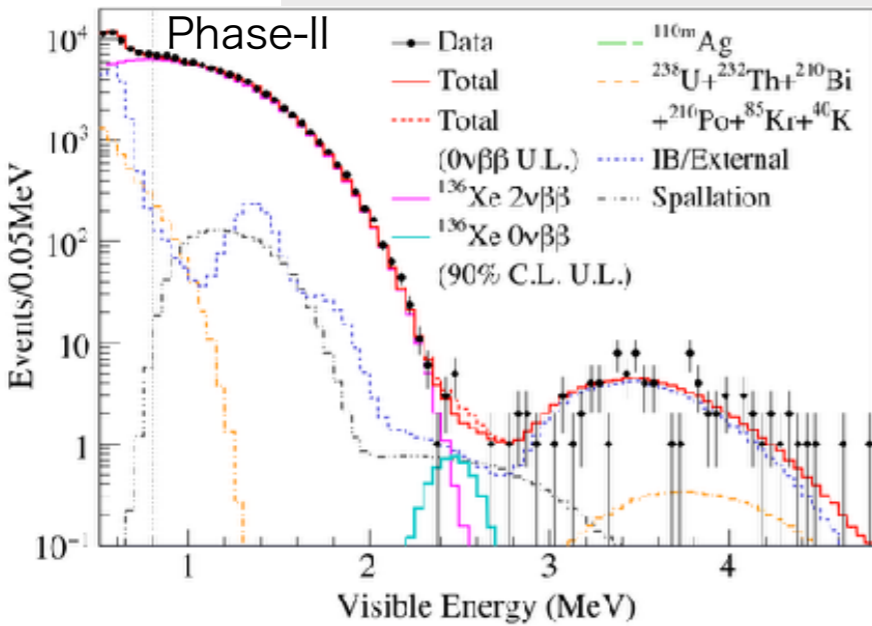
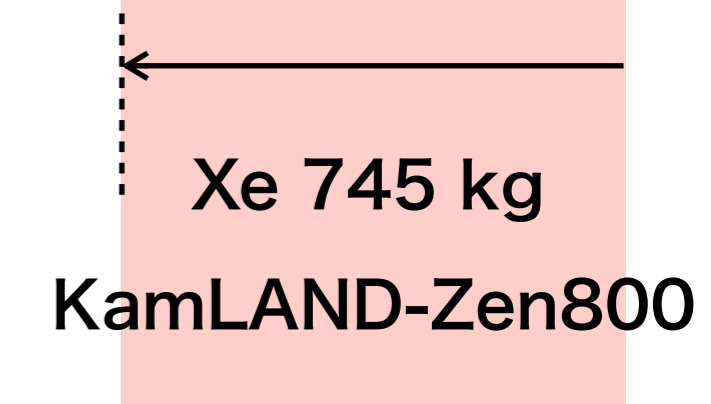
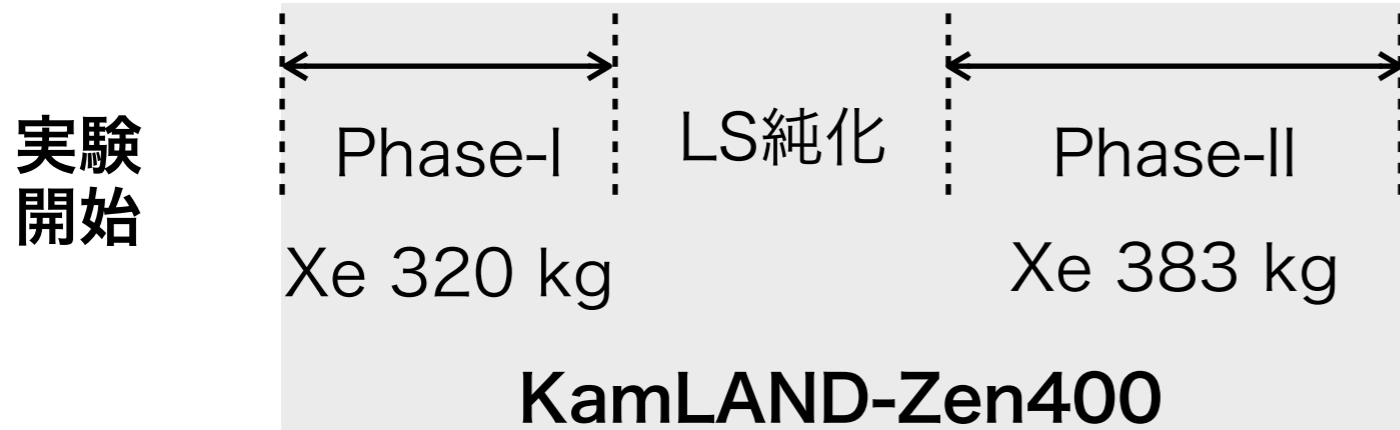
バッファオイル(光らない)

地下1000m (2700 m w.e.)

宇宙線 μ レートが地上の 10^{-5} ($\sim 0.3 \text{ Hz}$)

KamLAND-Zen実験

KamLAND *Zero-neutrino double beta decay search*



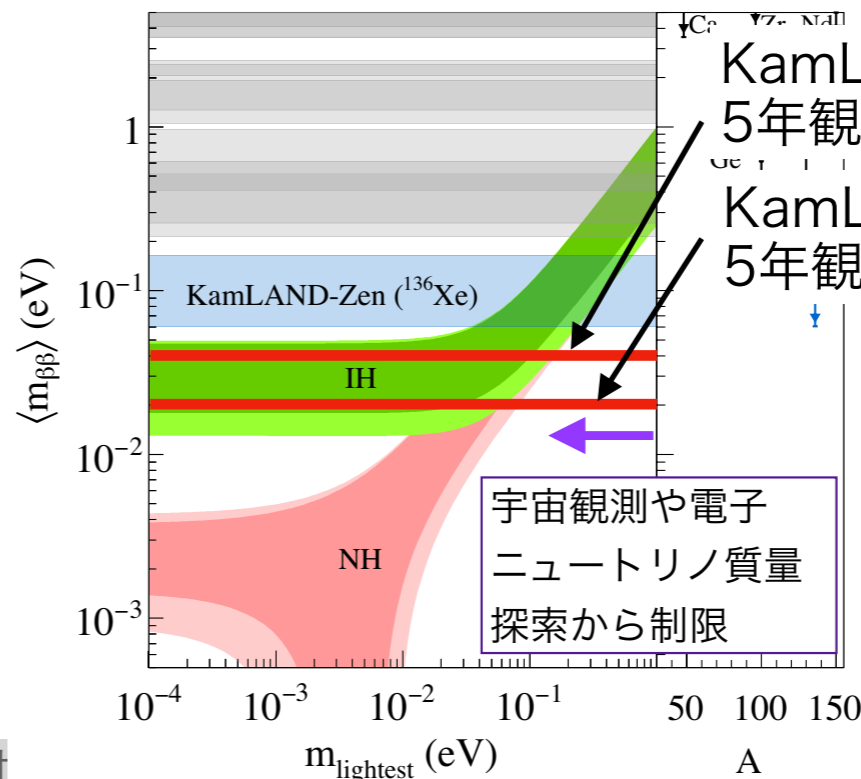
2016年、1度zen800に向けて
 インナーバルーンをインストール
 しかし、リーク発覚…再作成を余儀なくされた

将来：KamLAND2-Zen
 Xe ~1 ton & 検出器改良

Phase-Iでは予想外の ^{110m}Ag が混入
 LS, Xeの純化で背景事象を削減に成功

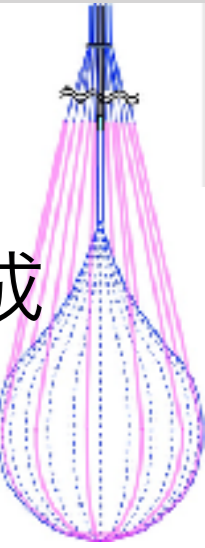
$0\nu\beta\beta$ 半減期(Phase-I+II) : $T_{1/2} > 1.07 \times 10^{26}$ yr

世界で最も厳しい制限 : $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61 - 165$ meV



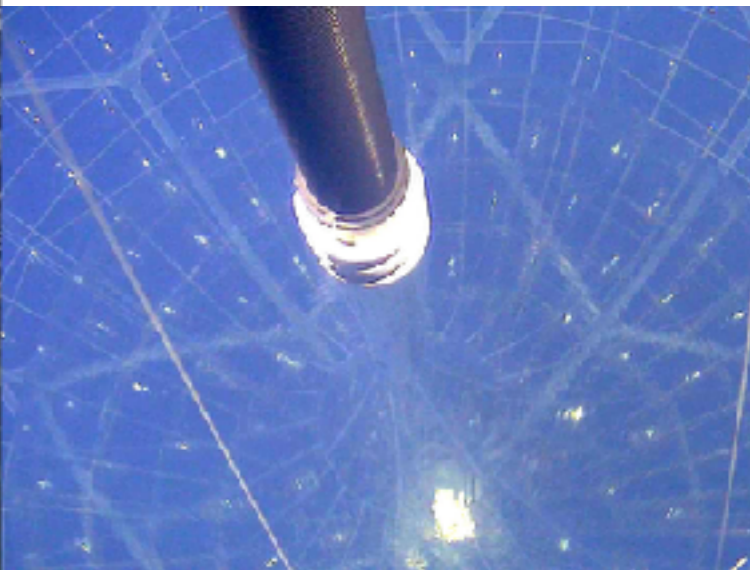
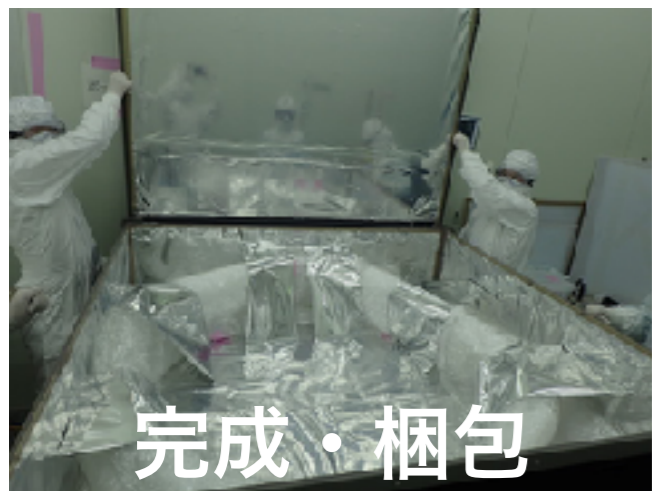
集光ミラー
 HQE PMT
 大発光量LS
 →分解能の改善
 Xe 1ton

Xe-LS容器 (Inner-balloon) の製作



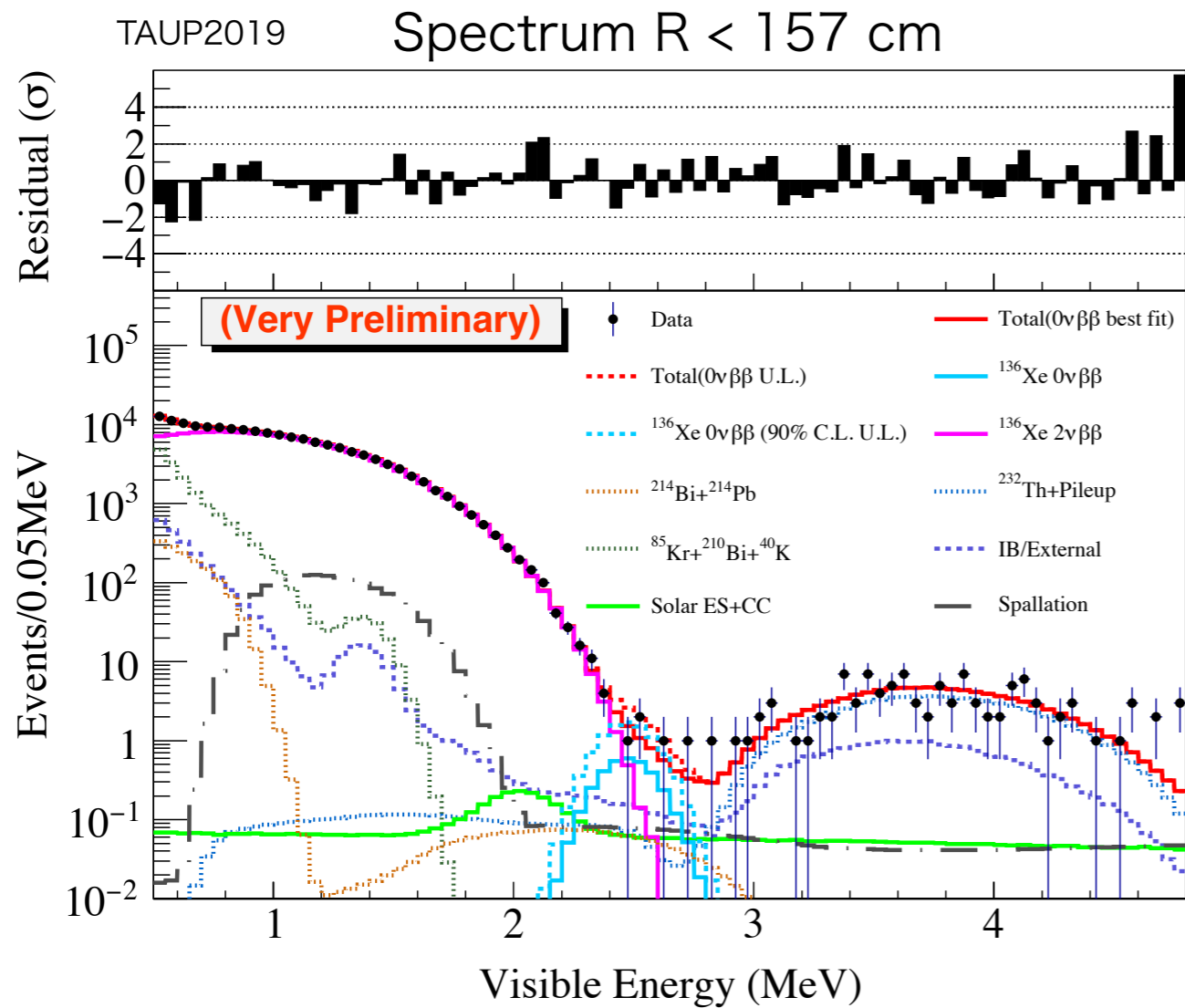
直径3.8mのInner-balloonを仙台のクラス1のクリーンルームで作成
25 μ m厚のナイロンフィルムを熱溶着

一般的な手術室はクラス10,000



少し重いLSで膨らませた後、Xe-LSを充填[Xe 745 \pm 3 kg]

KamLAND-Zen800での背景事象



背景事象

$2\nu\beta\beta$



エネルギー分解能による浸み込み
分解能向上以外に除去は不可能

宇宙線 μ による原子核破砕生成物

ミューオンがLS中の原子核を破砕して不安定核種を生成し、その崩壊が背景事象となる。

^{12}C の破砕物 [^{10}C など]

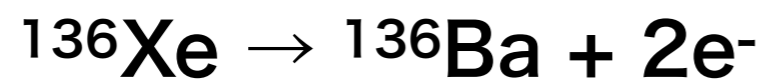
^{136}Xe の破砕物 [^{88}Y , ^{128}Sb , ^{122}I など]

バルーンフィルム由来のBG

インナーバルーンに付着した ^{214}Bi

観測対象

$0\nu\beta\beta$



ROI : 2.35 - 2.7 MeV

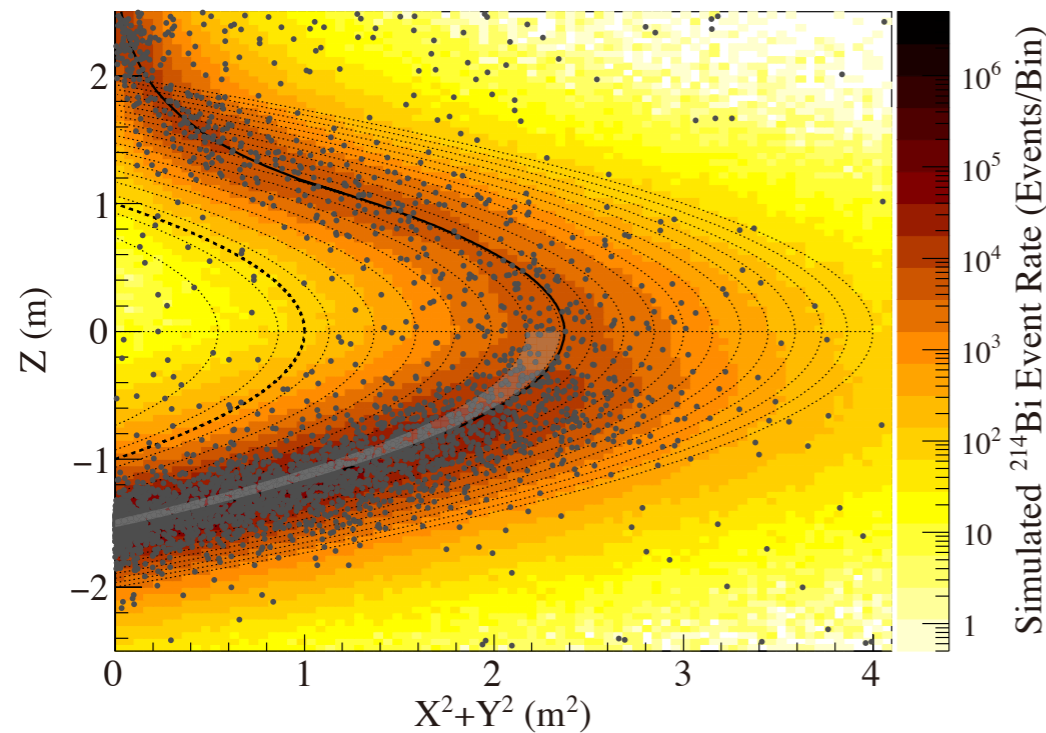
Inner-balloon由来の背景事象

インナーバルーンの ^{214}Bi の分布とデータ

$0\nu\beta\beta$ 候補イベントとMC分布をプロット
MC分布はdataを再現

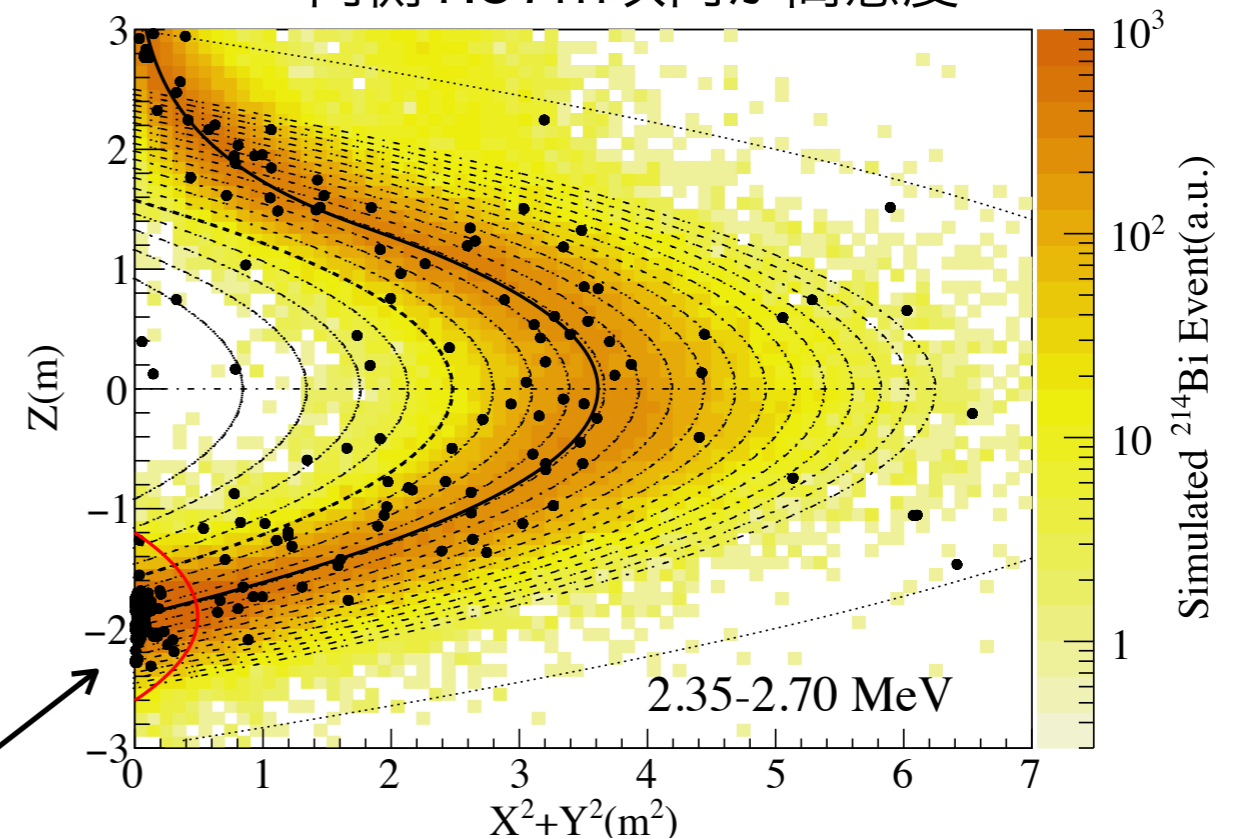
Zen400

内側1.06m以内が高感度



Zen800

内側1.57m以内が高感度



バルーンの底にhot spot

フィルムに付着していたゴミが沈澱したと思われる

インナーバルーンの ^{214}Bi はKamLAND-Zen400 Phase-IIの **~1/10**

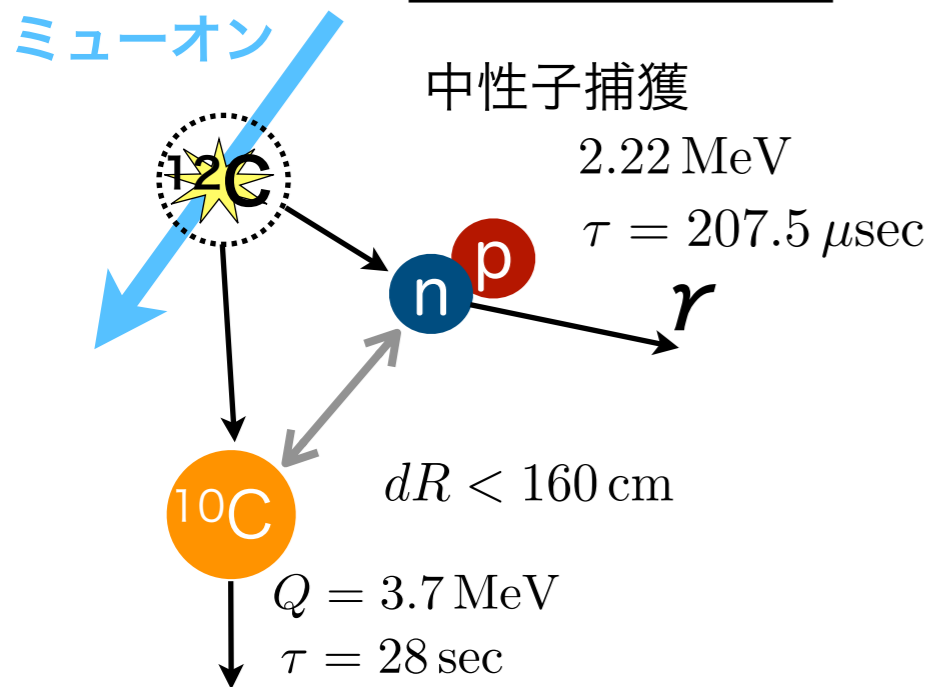
有効体積は**3倍以上**に増加

宇宙線ミュオン由来の背景事象

宇宙線ミュオンが原子核を破砕し、不安定核種を生成。
それらの崩壊が背景事象となる。

^{12}C の核破砕

短寿命 < 30 s



^{136}Xe の中性子捕獲による ^{137}Xe

^{137}Xe の崩壊： $Q = 4.2 \text{ MeV}$, $\tau = 5.5 \text{ min}$

^{136}Xe の核破砕

長寿命 $10^2 - 10^5 \text{ s}$ 以上

様々な核種が生成される、各々の生成量は微量
だが合計すると**無視できない量**となる。
破砕に伴って放出される中性子が多い。

除去手法

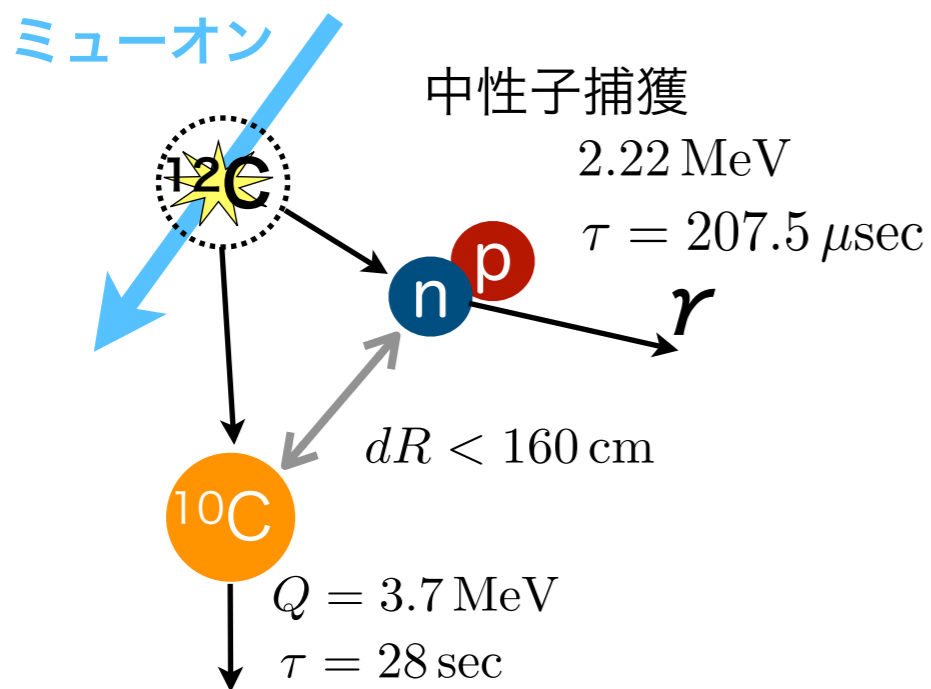
muon直後のveto (150 ms)

基本的には、デッドタイムフリーなSub-DAQ[MoGURA]を用いた中性子捕獲事象タグ
シャワーとの相関を使ったlikelihoodによるタグも有効

^{12}C の核破砕生成物の除去

^{10}C 生成の例

三点(μ -n-崩壊核)同時遅延計測

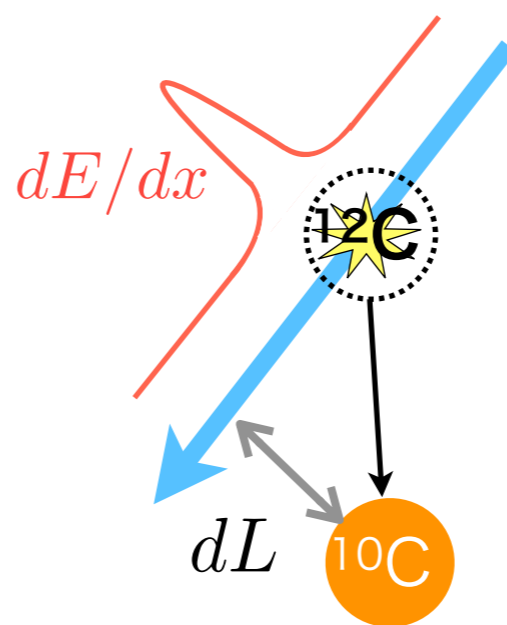


シャワーを用いたLikelihood法

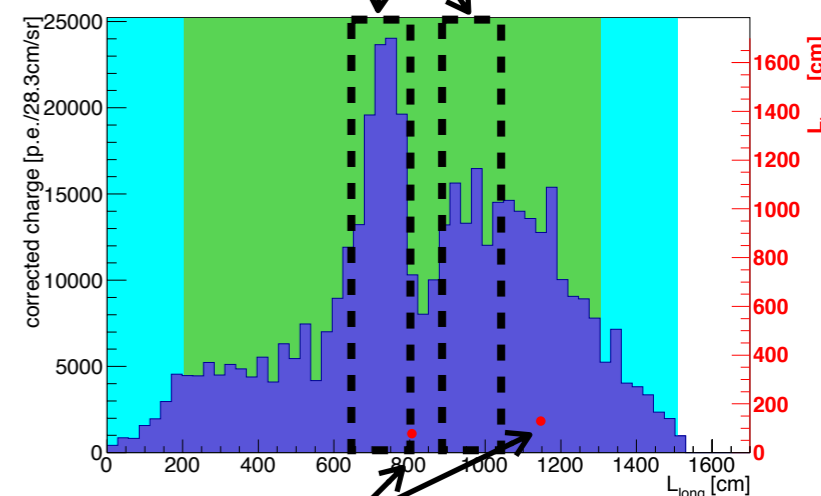
核破砕点を特定

Likelihood($dE/dx, dL, dT$) を作成

中性子イベントなしで生成物をタグ

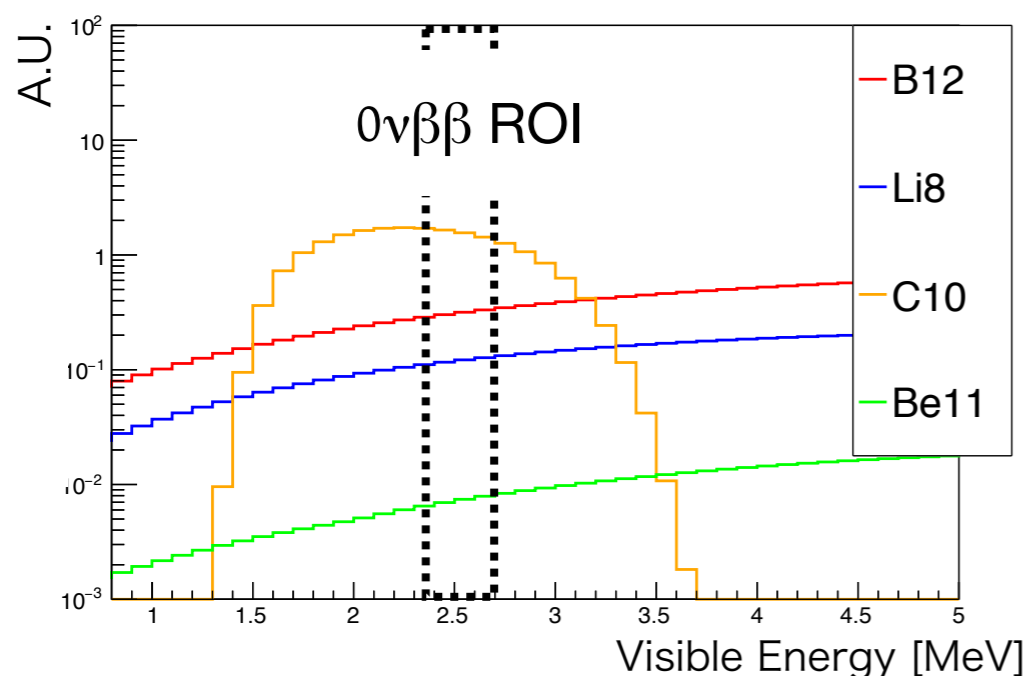


large dE/dx



^{12}B イベント

東北大学修論 狩野祐喜 2017



時間分布をエネルギー毎にフィットし、レートを算出:

除去前のイベントレート in ROI

$$8.4 + 0.4 - 0.3 \text{ /day/kton}$$

除去後のイベントレート in ROI

$$\underline{0.07 + 0.09 - 0.05 \text{ /day/kton}}$$

^{136}Xe の核破砕生成物の除去

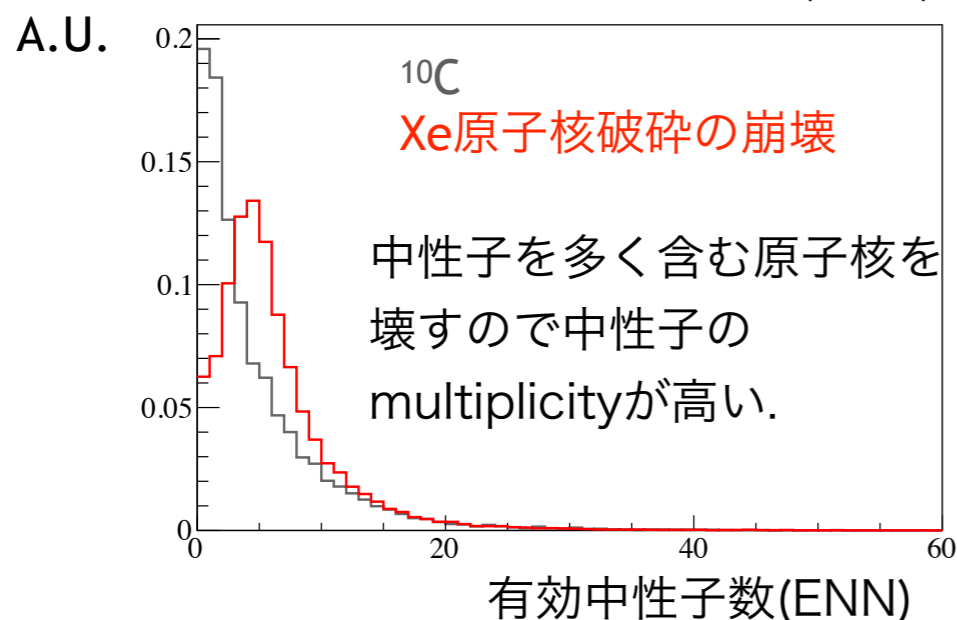
^{136}Xe の核破砕

長寿命 $10^2 - 10^5$ s以上

様々な核種が生成される、各々の生成量は微量だが合計すると無視できない量となる。

破砕に伴って**放出される中性子が多い。**

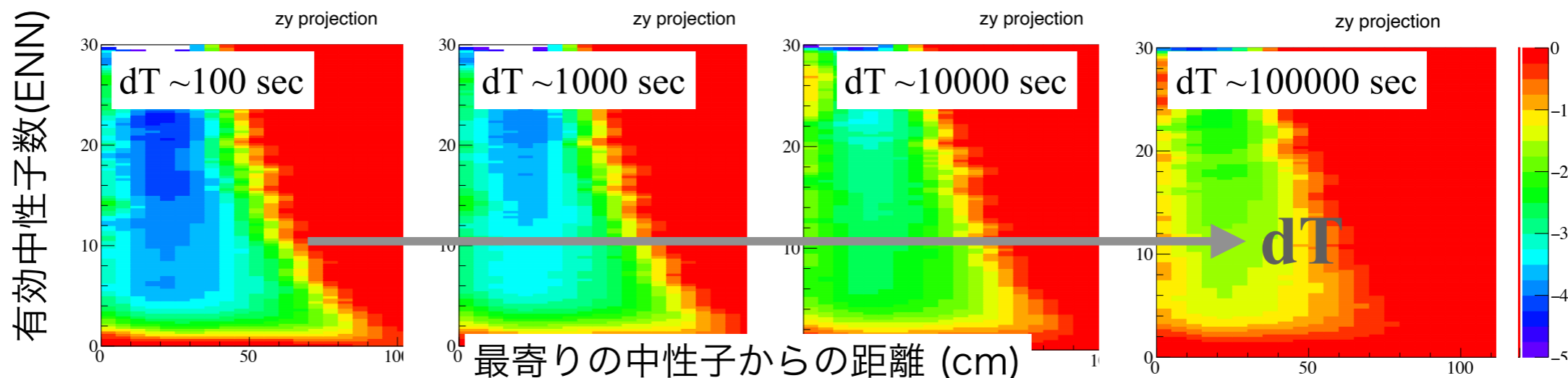
FLUKAをもとにした有効中性子数(ENN)の分布



この特徴を利用し、Likelihoodを作成

Likelihood(dR, dT, ENN)

dR, ENN はFLUKAシミュレーションをもとにLikelihoodを作成し、タグに用いる。



まとめ

- ^{136}Xe はニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)候補核種
- 様々な実験が進行・計画中
- KamLAND-Zen 800実験は液体シンチレータ検出器を用いた ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 探索実験
 - 2019年1月から観測を始め、安定してデータ収集中
 - クリーンなインナーバルーンや宇宙線ミュオンによる原子核破砕生成物による背景事象の解析的な除去などの結果、低BG化を実現
 - 現在は宇宙線ミュオンによるXe原子核破砕でできる長寿命核種の崩壊が主なBG
 - 最新結果はもうまもなく！