

KamLAND-Zenによる 最新結果とO_νBB探索実験の展望

2022/09/10

尾崎 秀義, RCNS 東北大学

@2022年秋季大会 共催シンポジウム

~地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化~

マヨラナニュートリノ

ニュートリノはディラックなのかマヨラナなのかわからていない

ディラックニュートリノ

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

$$v_L, \overline{v}_R, \overline{v}_L, \overline{v}_R$$

観測できない。

他の粒子同様ディラック質量。
結合定数がすごく小さくなる…



マヨラナニュートリノ

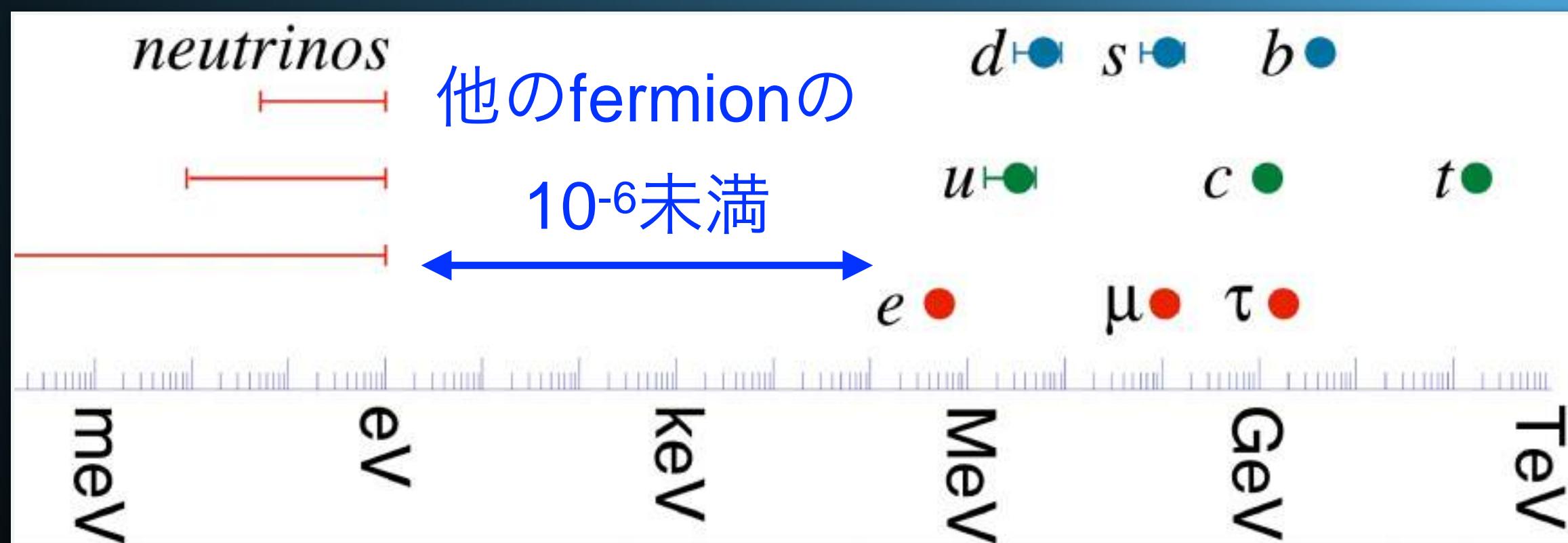
$$\nu = \bar{\nu}$$

$$v_L, v_R, N_L, N_R$$

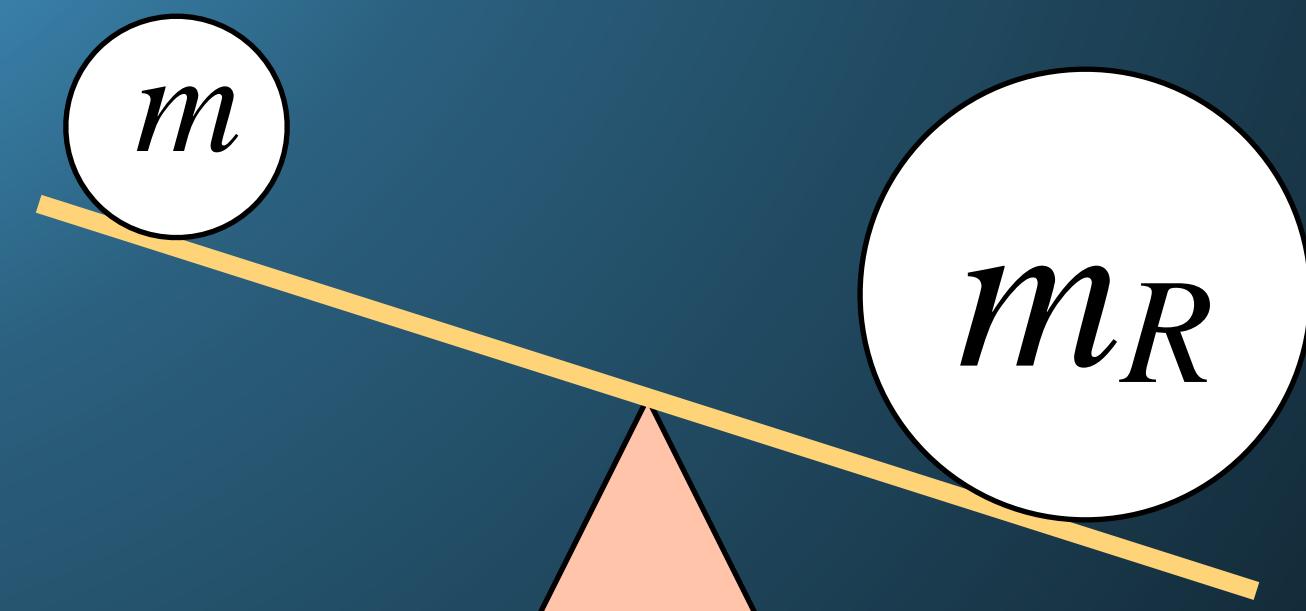
非常に重い

- レプトン数を破る。

→ 標準理論を超えた物理の緒



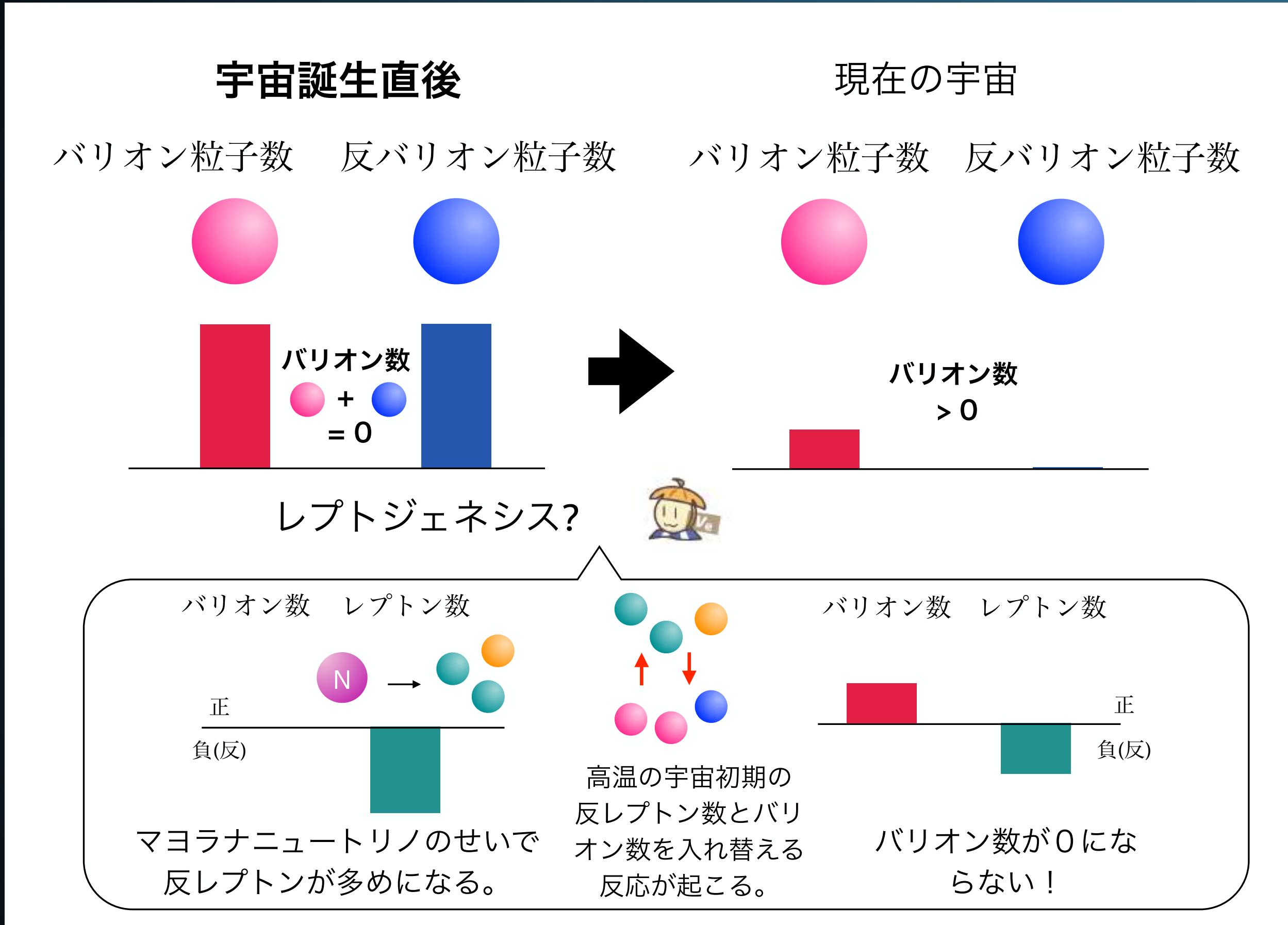
シーソー機構



$$m \sim \frac{m_D^2}{m_R}$$

ニュートリノの軽い質量が説明できる。

マヨラナニュートリノ～レプトジェネシス～



マヨラナニュートリノがレプトン数を破ること
がバリオン数の破れの起源 (レプトジェネシス)

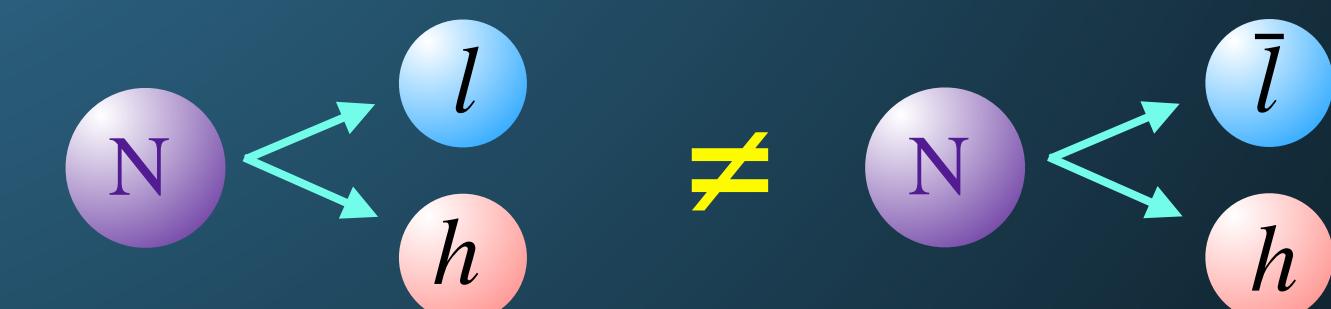
ビッグバン元素合成, CMBの観測から

$$n_B/n_\gamma \sim 6.1 \times 10^{-10}$$

→ サハロフの3条件を満たす物理過程が必要。

サハロフの3条件

- ・バリオン数の破れ
- ・CとCPの破れ
- ・平衡状態からの離脱



ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)

- 二重ベータ崩壊は限られた核種でのみ起こる極めて稀な現象

(^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd ...).

弱い相互作用の二次の崩壊 → 半減期が長い: $T_{1/2} > 10^{18-24}$ year.

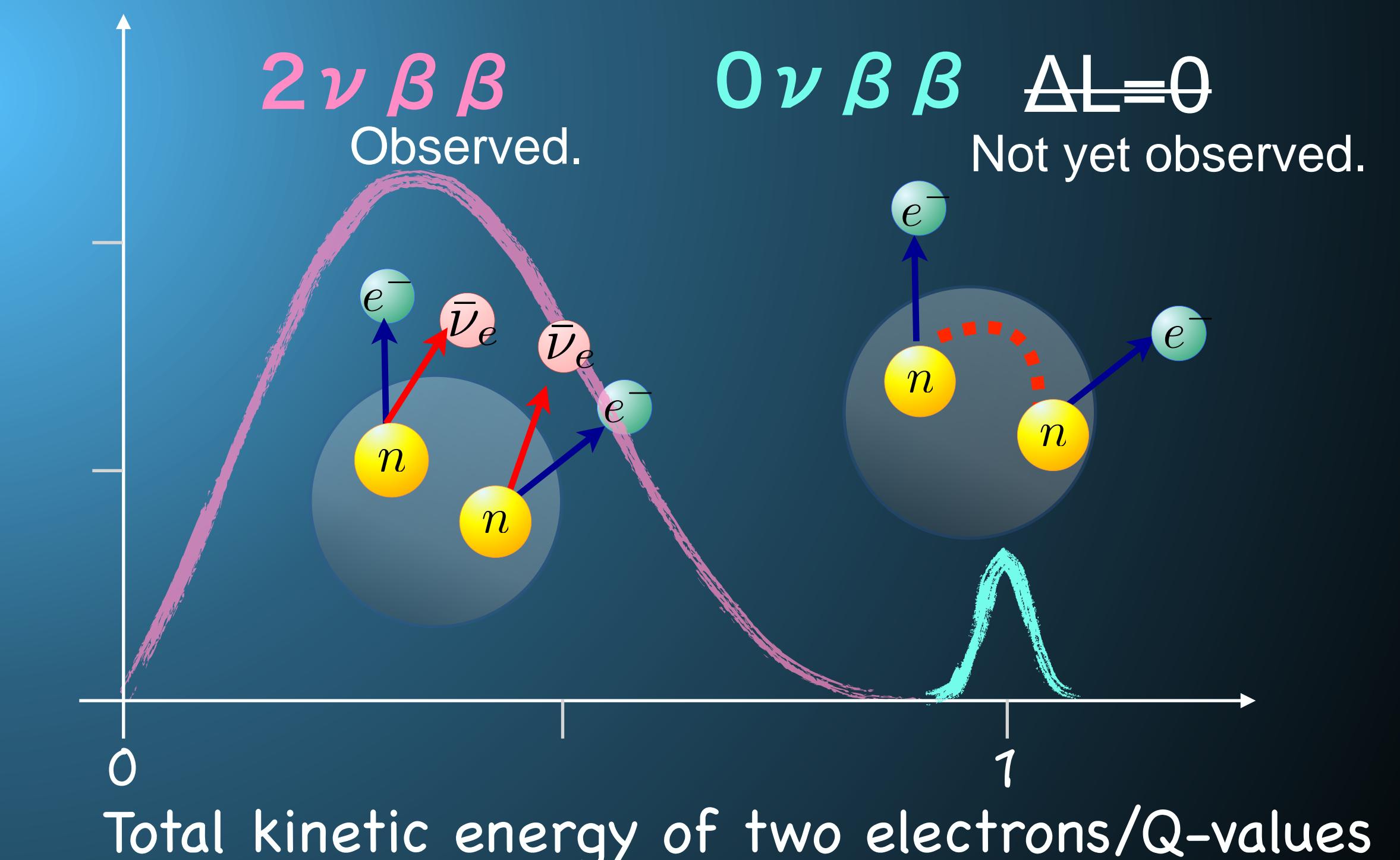
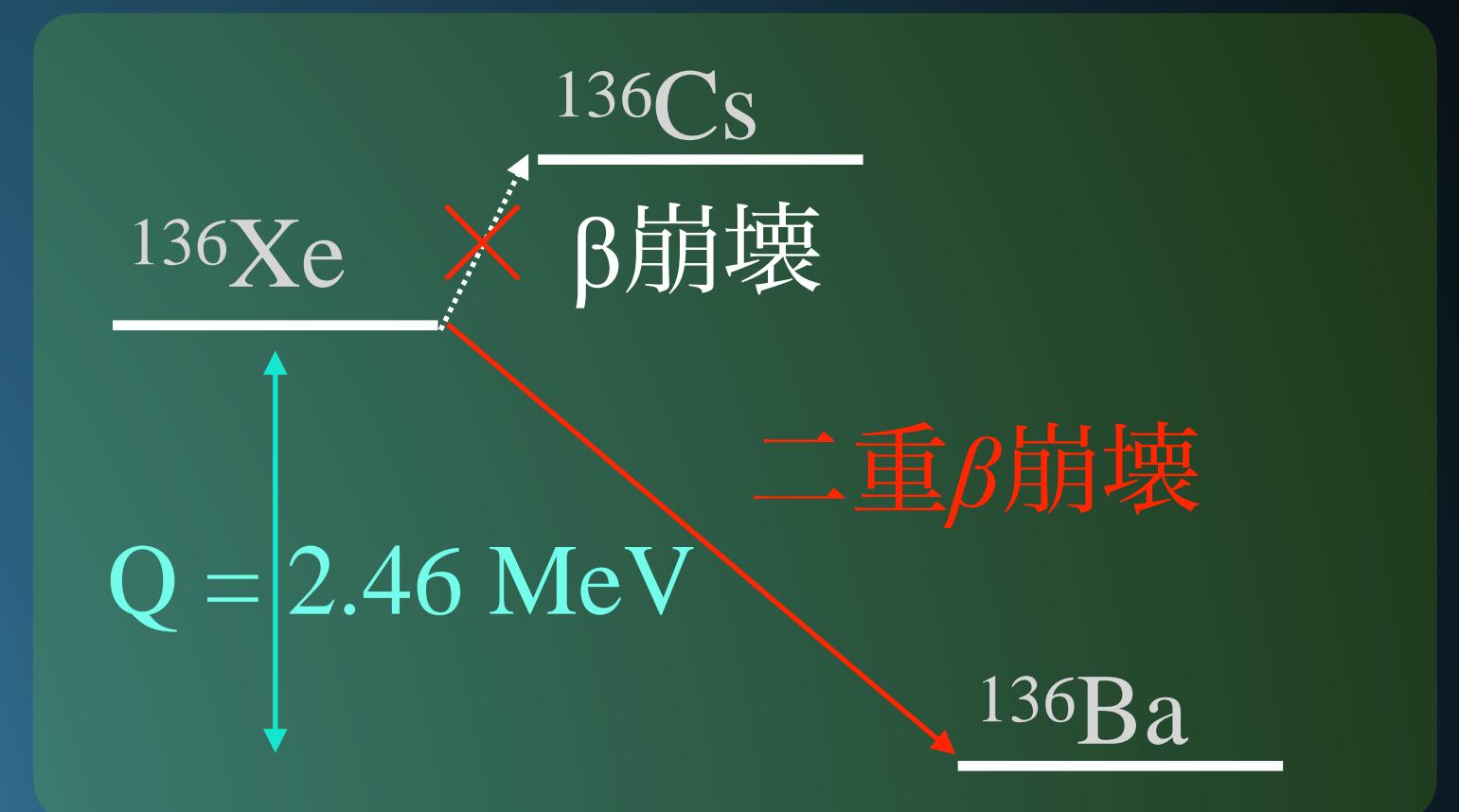
- ニュートリノがマヨラナ粒子である場合のみ

ニュートリノレスモード($0\nu\beta\beta$)が許される。

ニュートリノのマヨラナ性の直接証拠

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\nu\beta\beta : (A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\nu_e \\ 0\nu\beta\beta : (A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- \end{array} \right.$$

実験では、Q値にあるモノクロピークを探す。



0νBB探索実験

観測量

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} (g_{A,\text{eff}}/g_A)^4 |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

マヨラナ質量

$$\text{実験の感度} : T_{1/2}^{0\nu} \propto \begin{cases} \sqrt{\frac{M \times t}{B \times \Delta E}} & (\text{w/ BG}) \\ Mt & (\text{w/o BG}) \end{cases}$$

M ... 崩壊核の量, t ... 観測時間, B ... BG rate, ΔE ... energy resolution

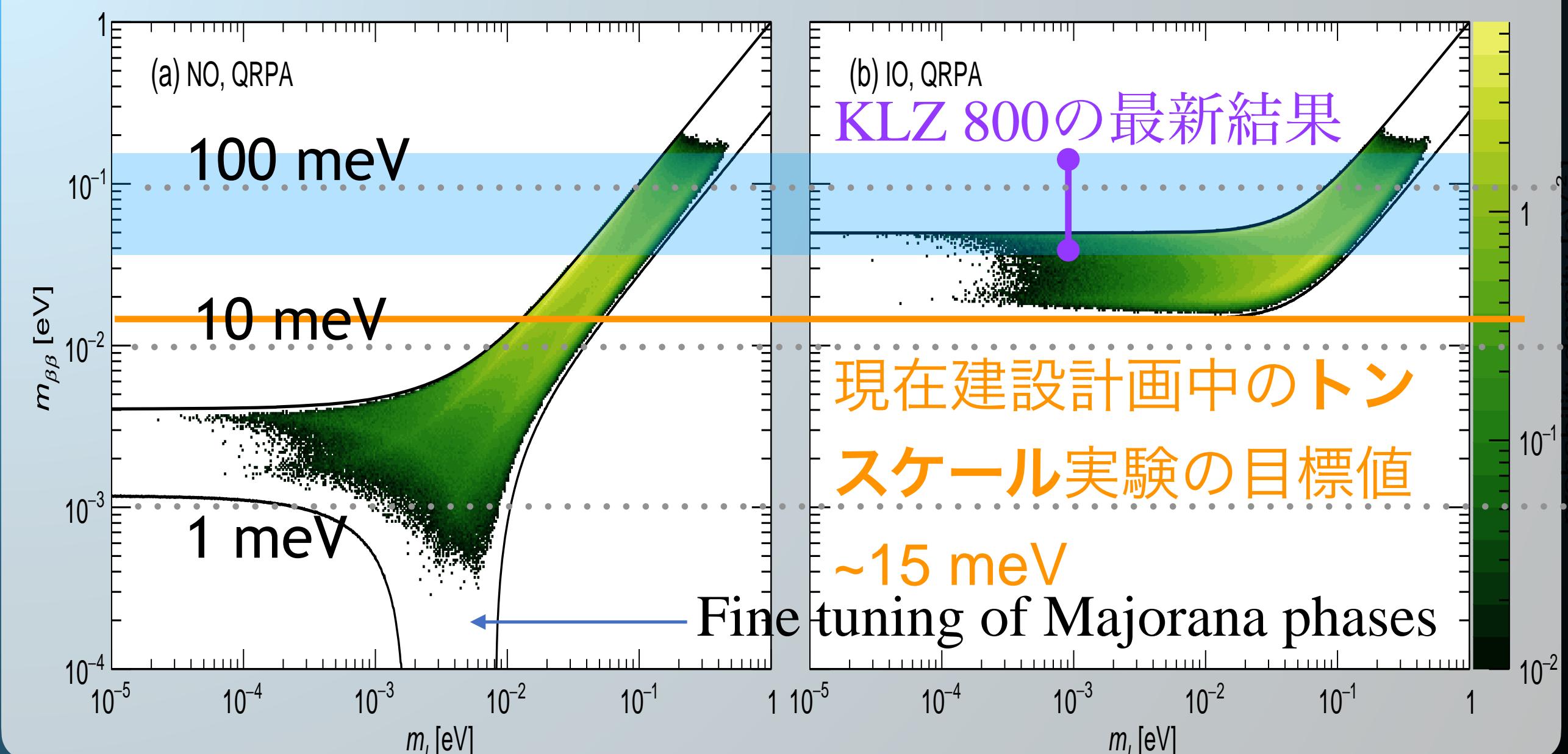
1. 大量の二重β崩壊核 (M)
2. 低背景事象環境で(B)
3. 高エネルギー分解能な検出器(ΔE)

検出器

- ・ 地下に建設、シールドで囲む
- ・ $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ などの少ない検出器・ソース
- ・ 高いQ値と高いエネルギー分解能
- ・ バックグラウンドの弁別技術
 - ・ トラッキングやチェレンコフリング
- ・ 粒子識別($\beta/\gamma/\alpha$ の識別)

AGOSTINI, BENATO, and DETWILER

PHYSICAL REVIEW D 96, 053001 (2017)



ν BB実験

LS検出器

- ・カムランド禅(~800 kgフェーズ)
- ・SNO+(Teなしでデータ収集)
- ・すでにある低BG検出器を利用
- ・大型化が容易
- ・エネルギー分解能に課題 数% σ
- ・PIDやチェレンコフ光技術の開発

Ge半導体検出器

- ・GERDA(完了) → LEGEND-200
- ・ほぼBGフリーを達成 (高純度+PID+シールディング)



- ・高エネルギー分解能 0.05% σ



TPC

- ・液体：EXO-200(完了) → nEXO
- ・気体：NEXT, AXEL ~100 kgフェーズを準備中
 - ・エネルギー分解能 $<\sim 1\% \sigma$
 - ・イベントのトラッキングが可能

ボロメータ

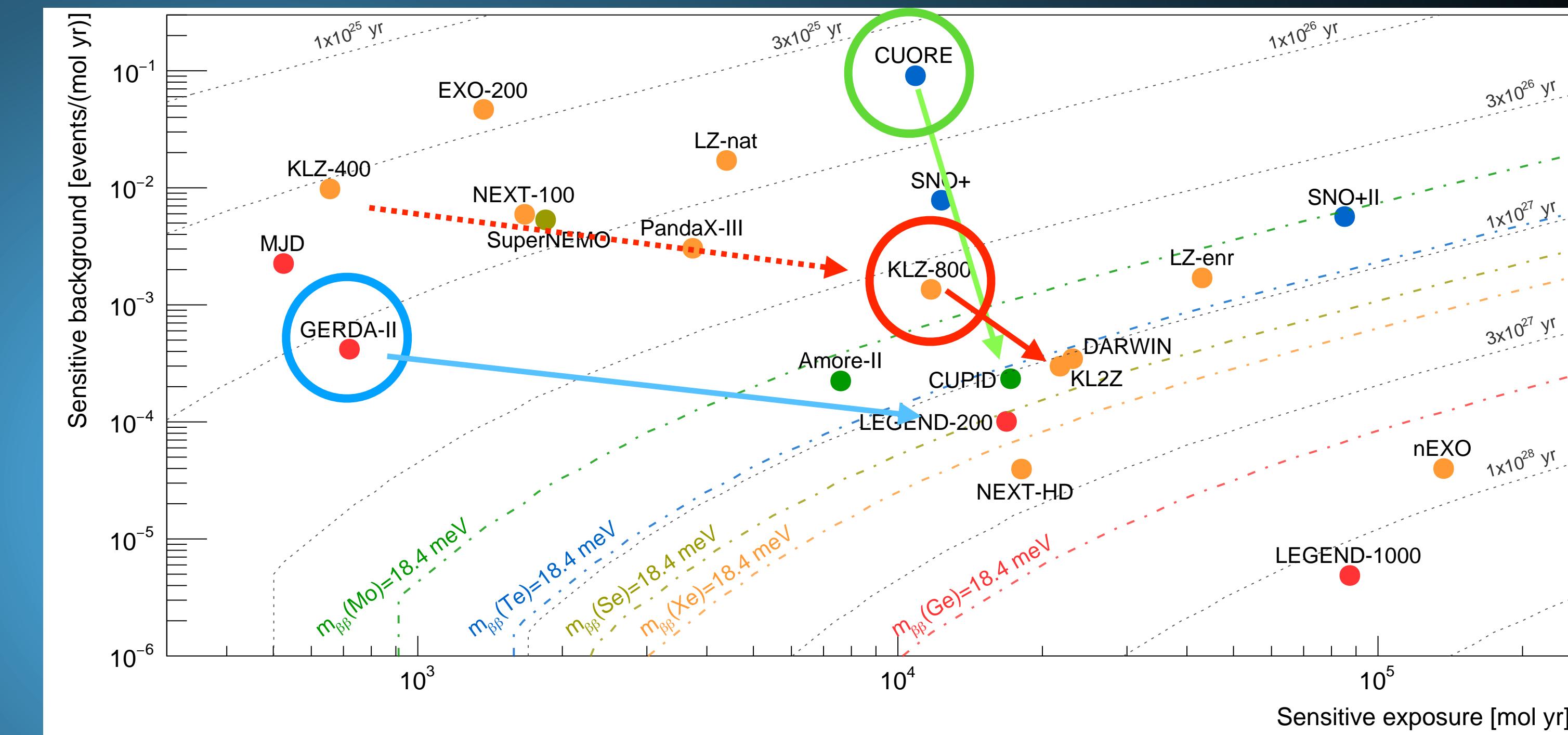
- ・CUORE (~750 kgフェーズ) → CUPID
- ・CANDLES(将来)
 - ・高エネルギー分解能 ~0.1% σ
 - ・シンチレーションボロメータの開発で PIDが可能
 - ・様々な核種を利用可能

0x8B探索実験のまとめ

arxiv 2202.01787

現在の結果

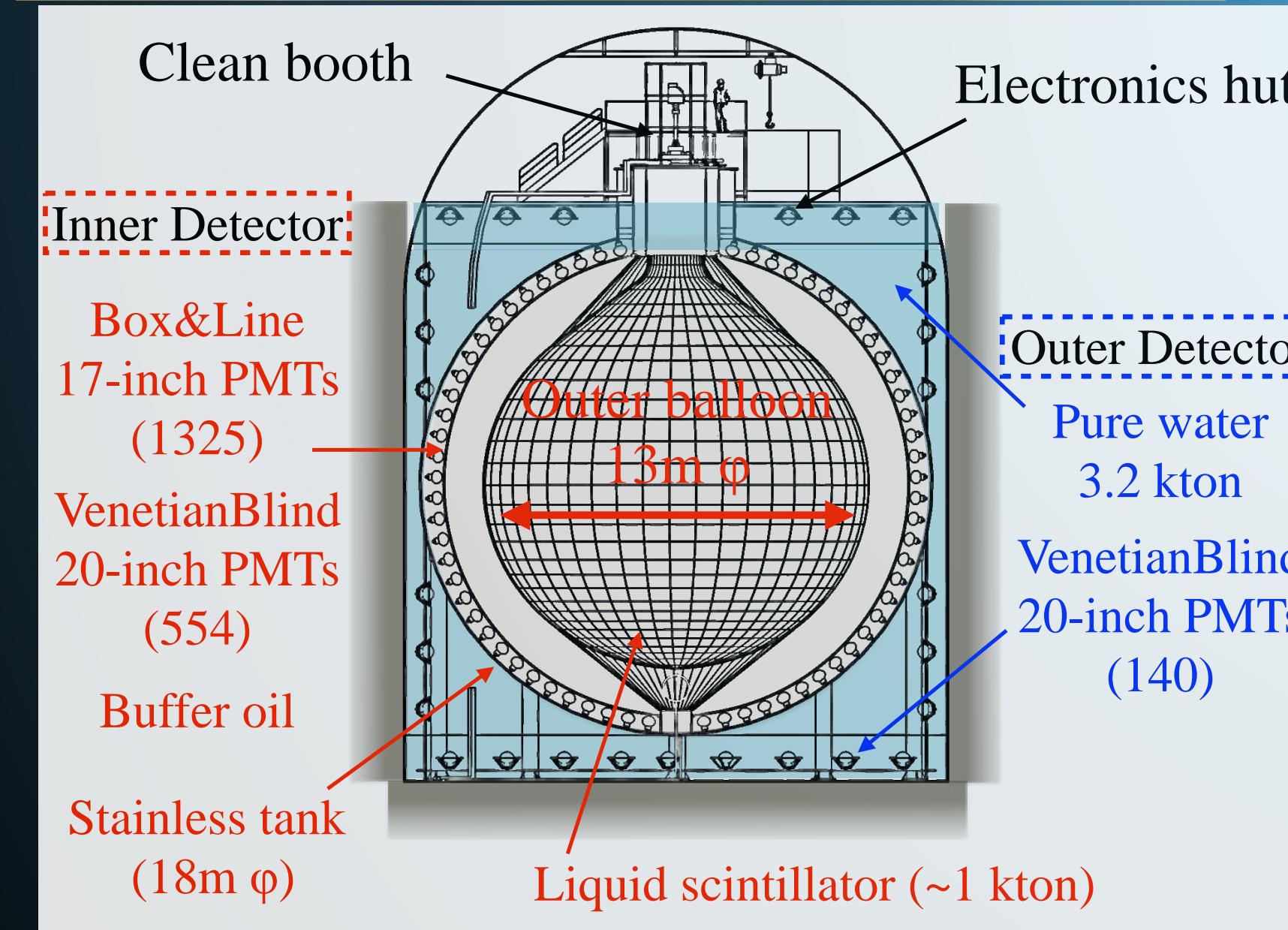
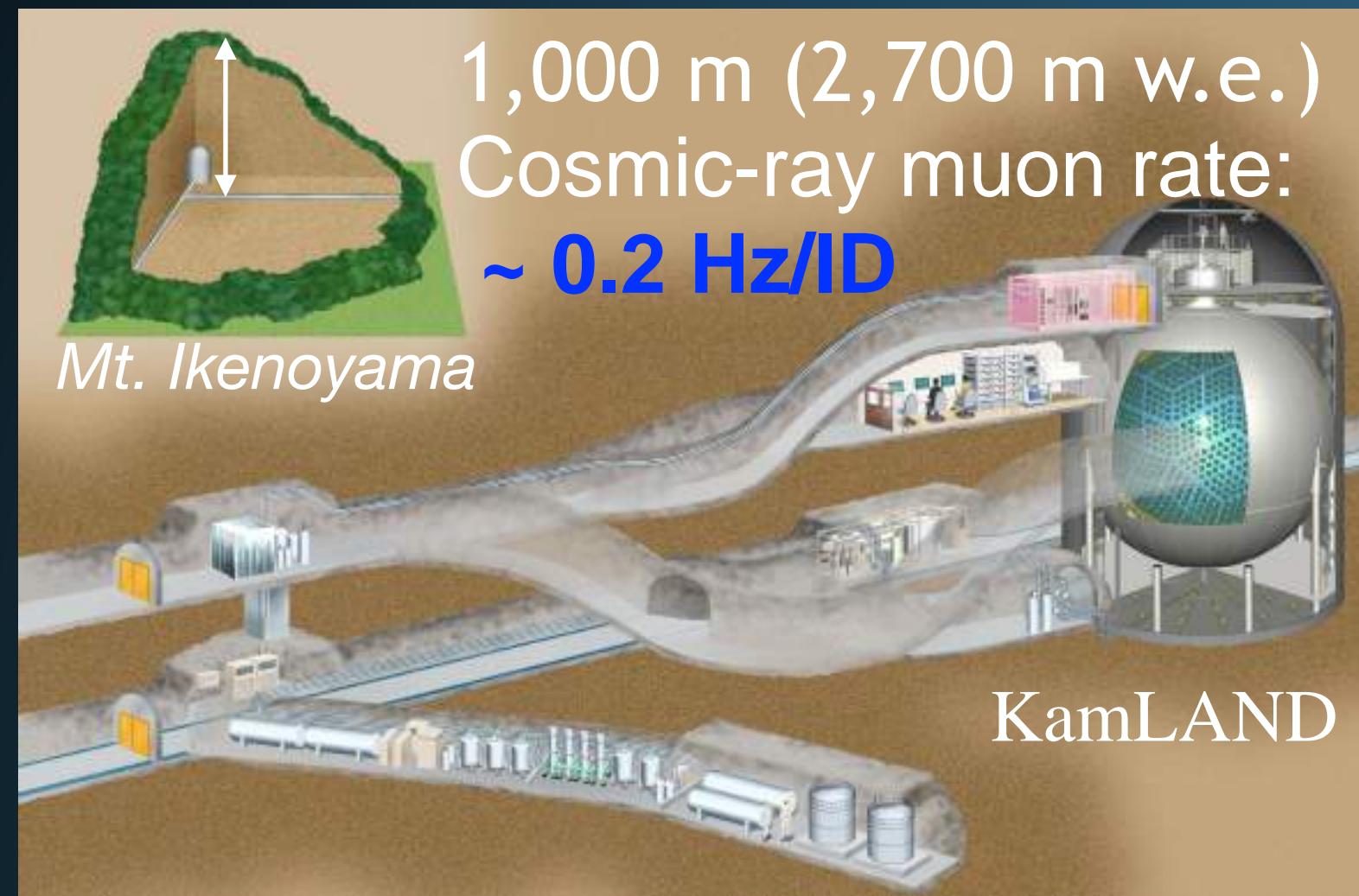
原子核	崩壊核量 [kg]	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の上限 [meV]
^{48}Ca	0.35	290–1600
^{82}Se	4.65	311–638
^{100}Mo	2.26	310–540
^{130}Te	2.0×10^2	75–350
^{76}Ge	3.5×10^2	79–180
^{136}Xe	7.5×10^2	36–156



現在は、~数百 kgの崩壊核で
 $m_{\beta\beta} < O(10)\sim O(100)$ meVの制限

$m_{\beta\beta} \sim 15$ meV にある逆階層構造の網羅が
直近の目標.

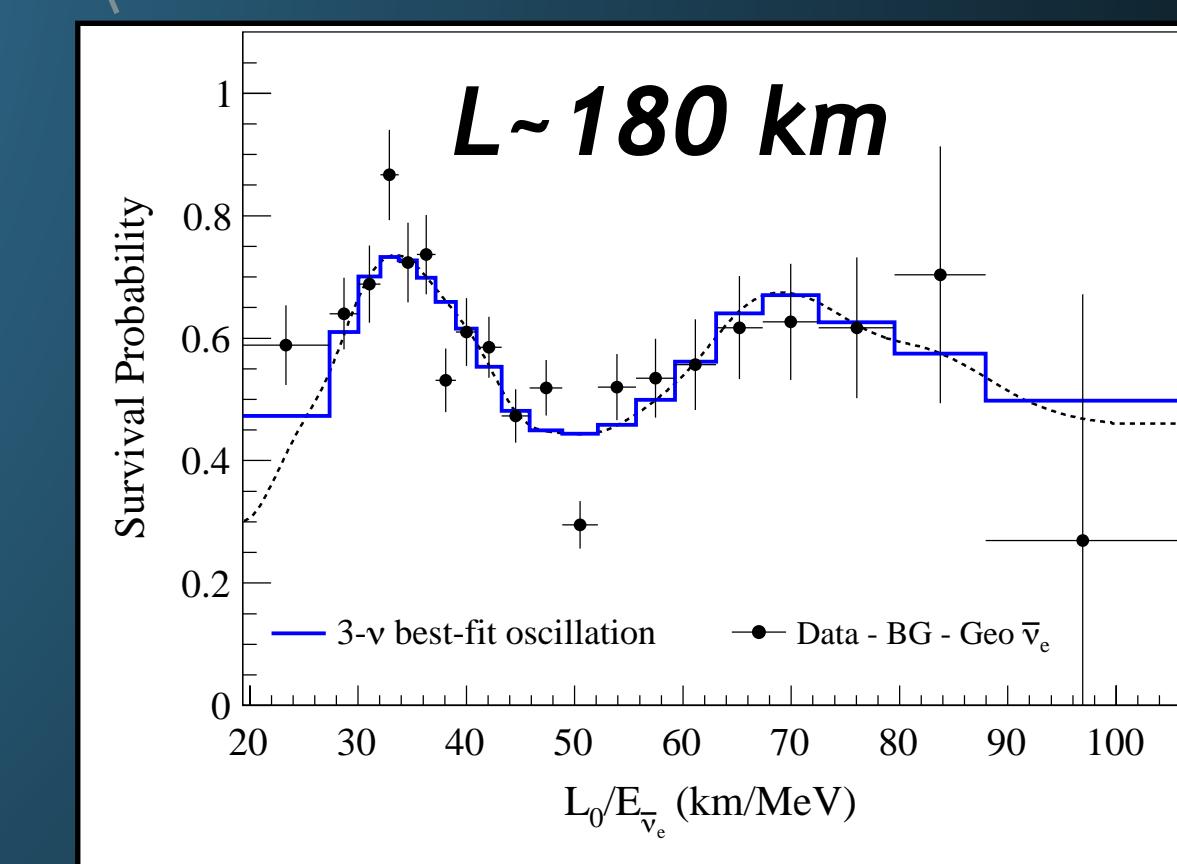
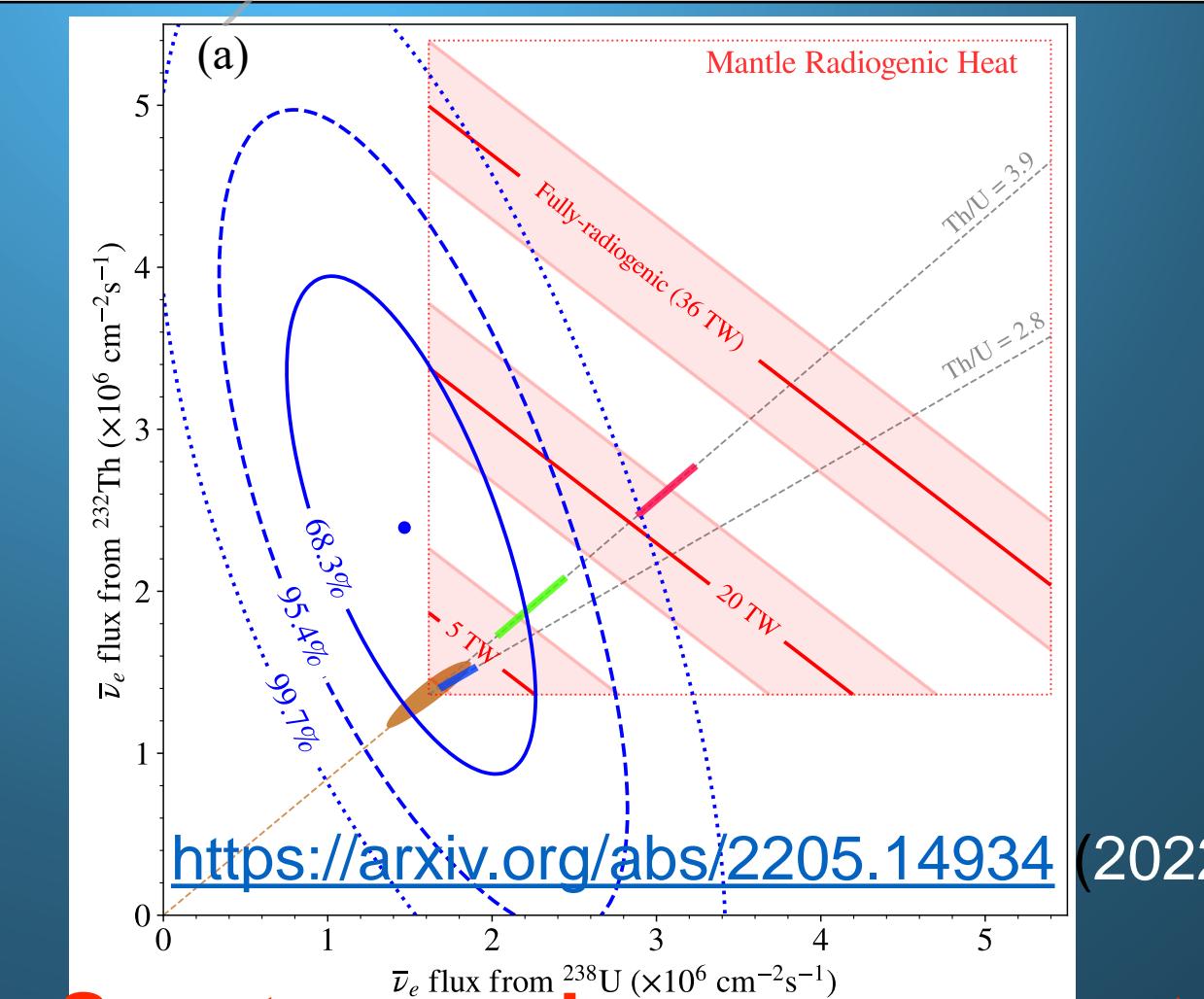
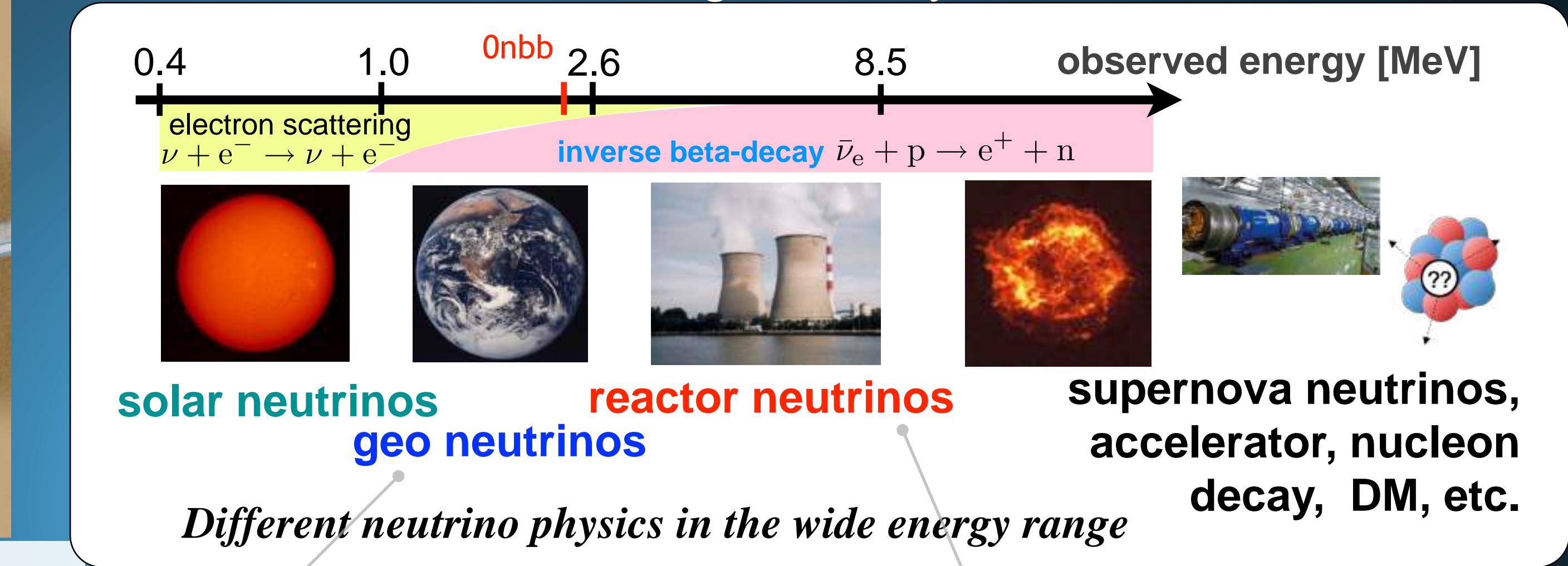
KamLAND



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

Resolutions:
 $\Delta E \sim 6.7\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$
 $\Delta X \sim 13.7 \text{ cm}/\sqrt{E(\text{MeV})}$

Data taking for ~20 years since 2002.

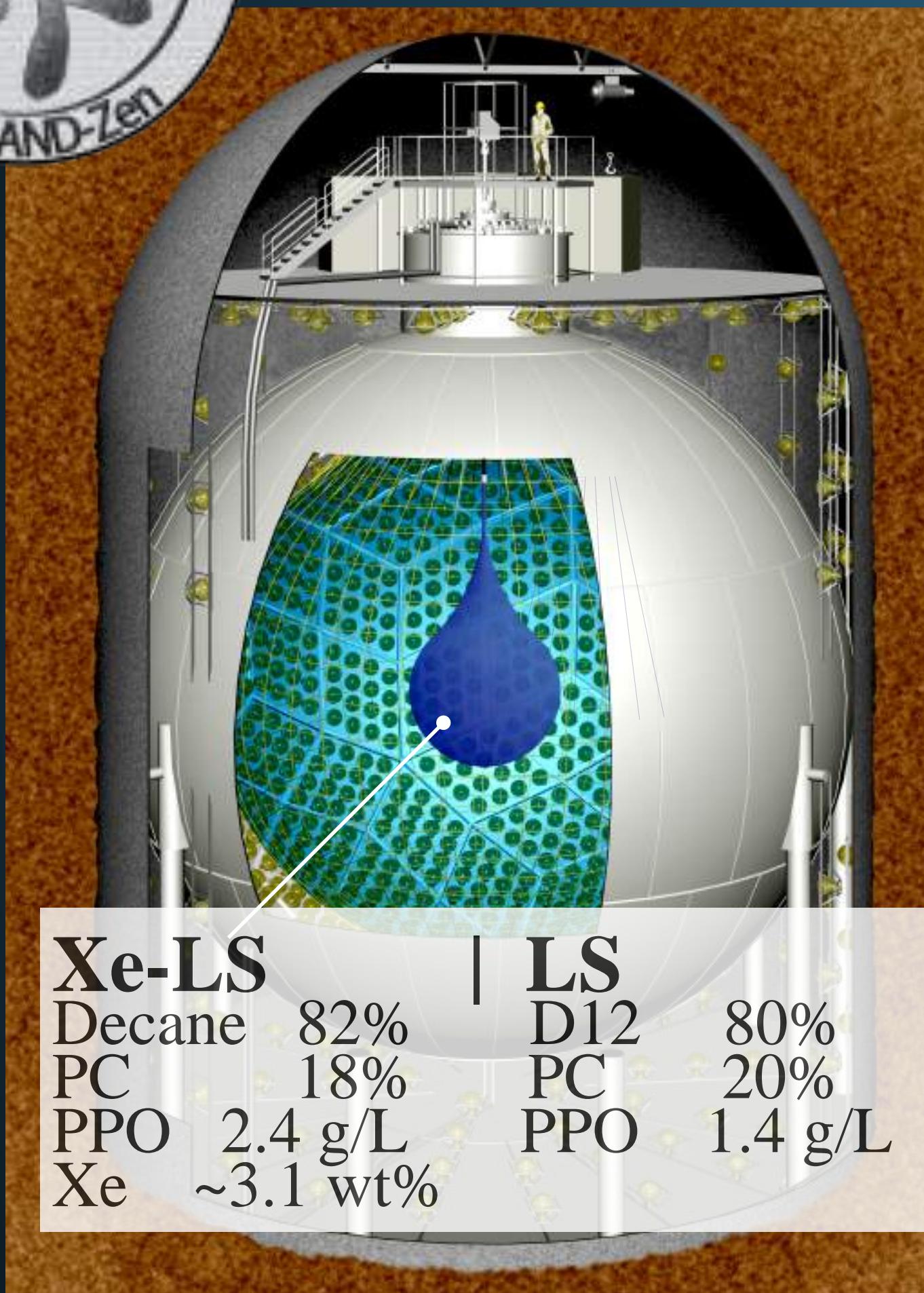


Spectroscopic measurement of geo- $\bar{\nu}$ from U and Th!

Two cycles of oscillation were measured!



カムランド禅 Xenon-136 loaded LS

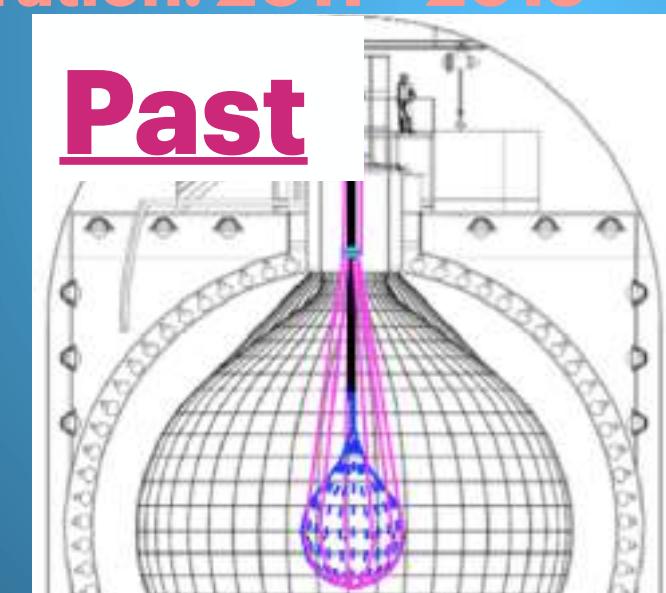


Demonstrated scalability!!

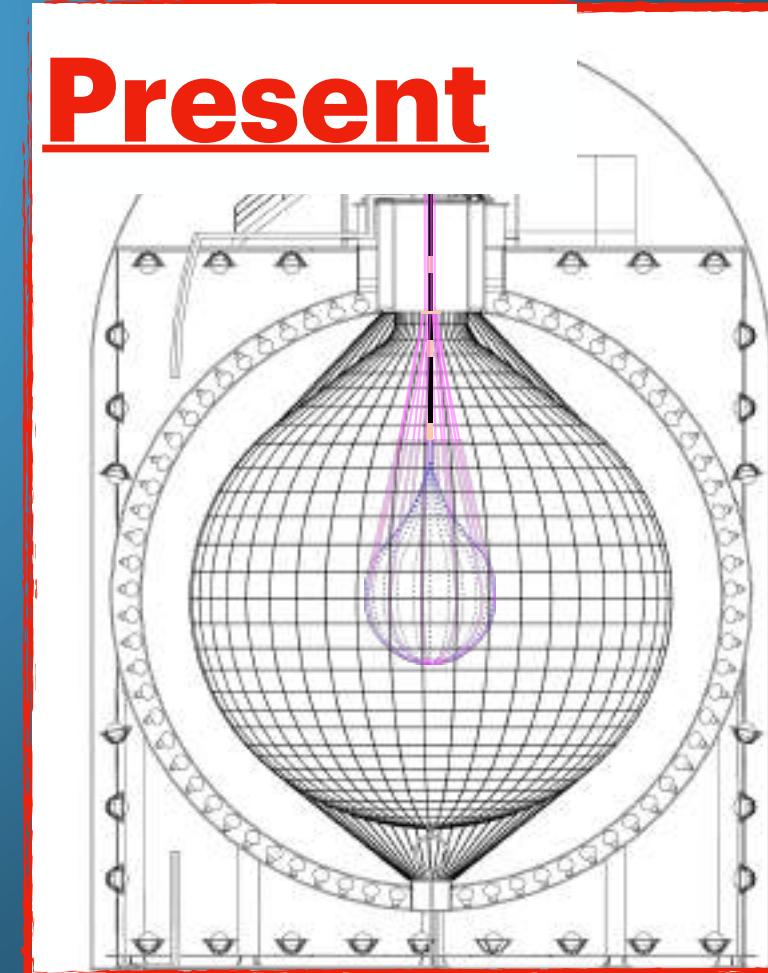
- ~ほぼton-scaleの実験を開始!!

- 745 ± 3 kg of Xe enriched with ^{136}Xe by ~91wt%
- 蒸留純化によって極低バックグラウンド
- アクティブシールティング
- 見つかった際にはソースオフも可能

Duration: 2011 ~ 2015



Phase I + Phase II:
 $T_{1/2} > 1.07 \times 10^{26}$ yr (90% C.L.)
 Phys. Rev. Lett. 117, 082503



RI in XeLS:
 $^{238}\text{U} \sim 1.5 \times 10^{-17}$ g/g,
 $^{232}\text{Th} \sim 3 \times 10^{-16}$ g/g



KamLAND-Zen 400:

- Mini-balloon Radius = 1.54 m
- Xenon mass = 320 ~ 380 kg

KamLAND-Zen 800:

- Mini-balloon Radius = 1.90 m
- Xenon mass = 745 ± 3 kg

KamLAND2-Zen:

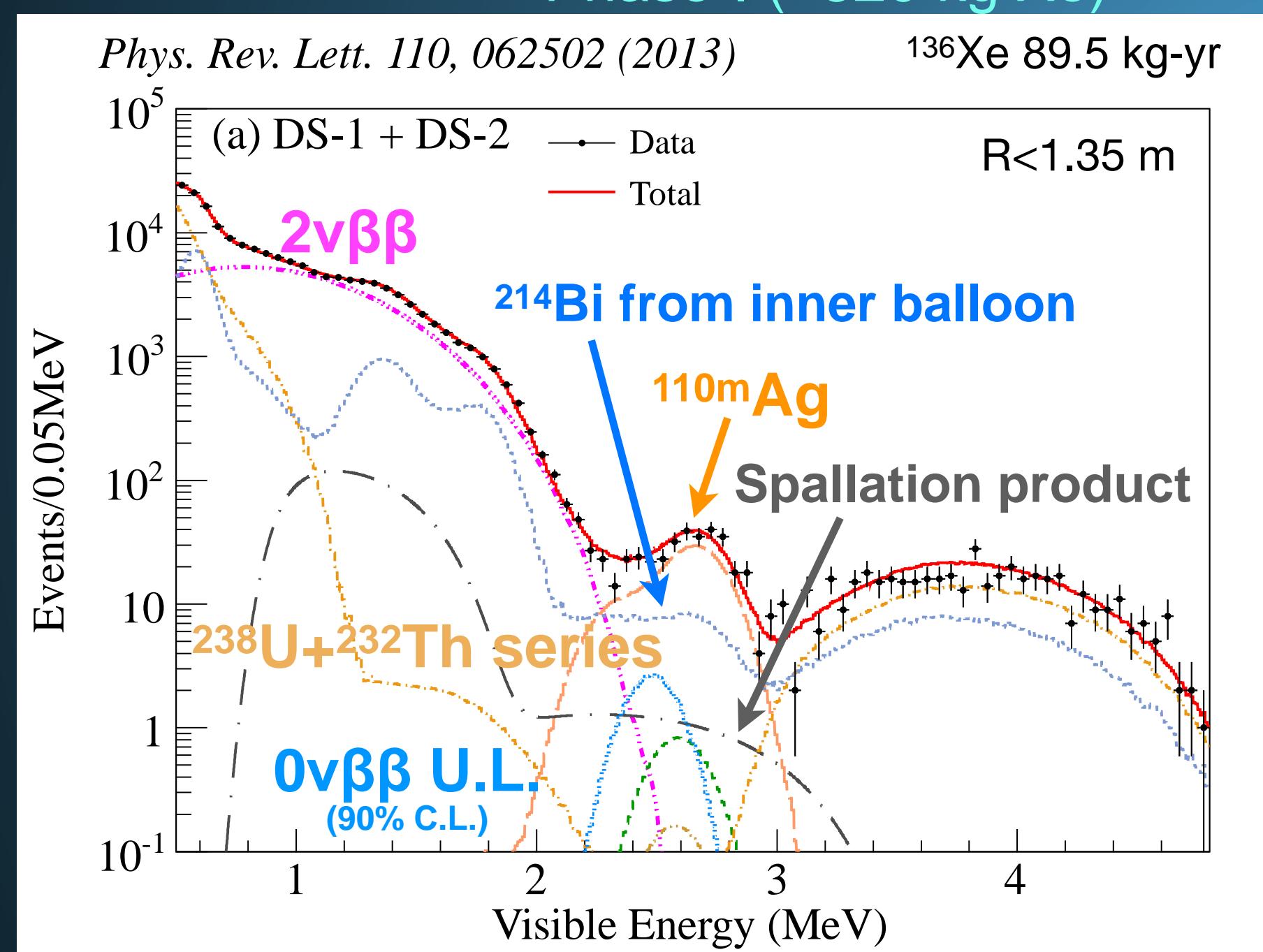
- Xenon mass ~ 1ton
- Aiming at 100% Photocoverage



カムランド・ゼン400

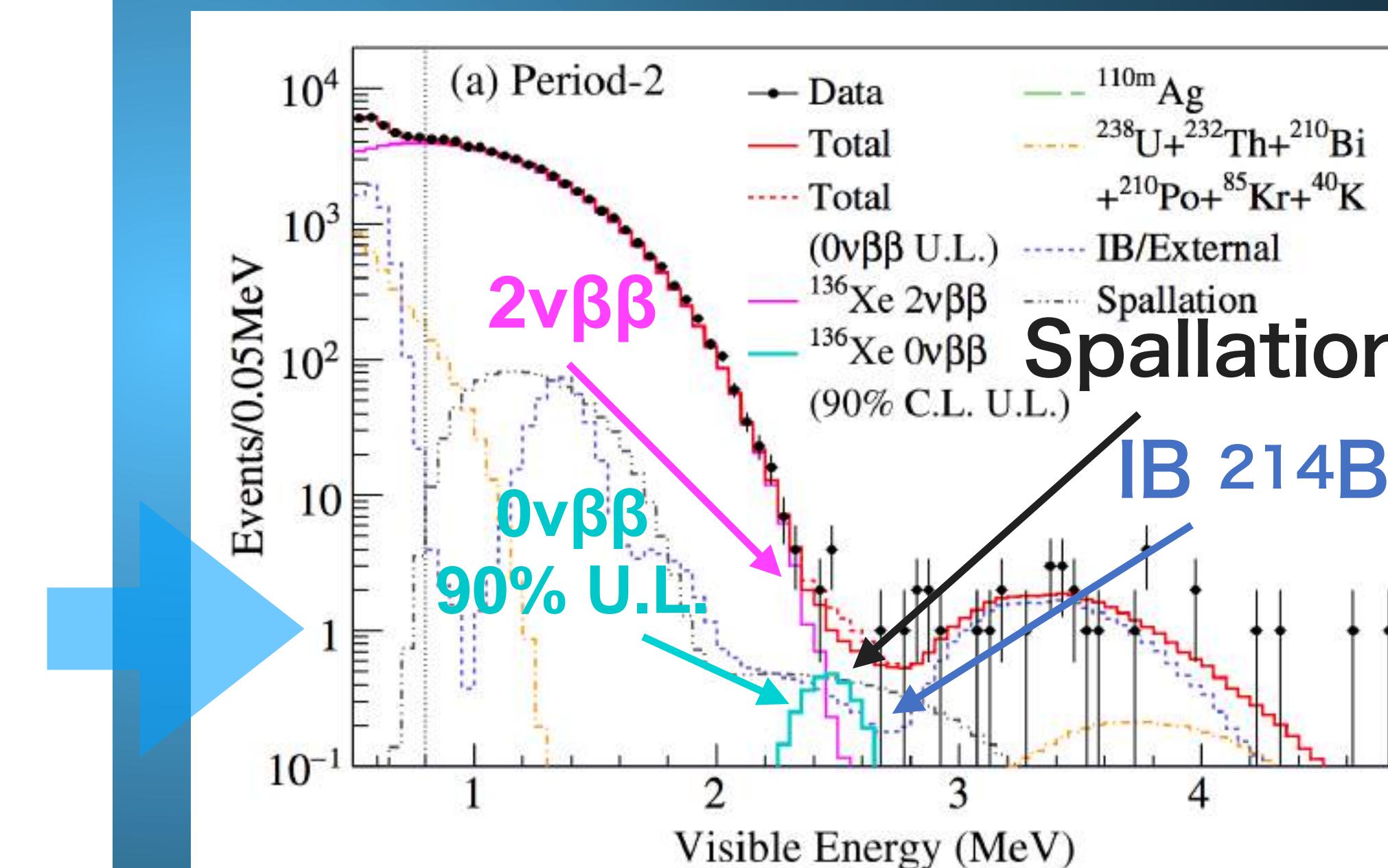


Phys- RevLett.117.082503
(August 2016) pp.1-6.



Lower limit for $0\nu\beta\beta$ in phase I
 $T^{1/2} > 1.9 \times 10^{25} \text{ yr}$ (90% C.L.)

原発事故由来の ^{110}mAg BGが...



LS and Xe gas purification

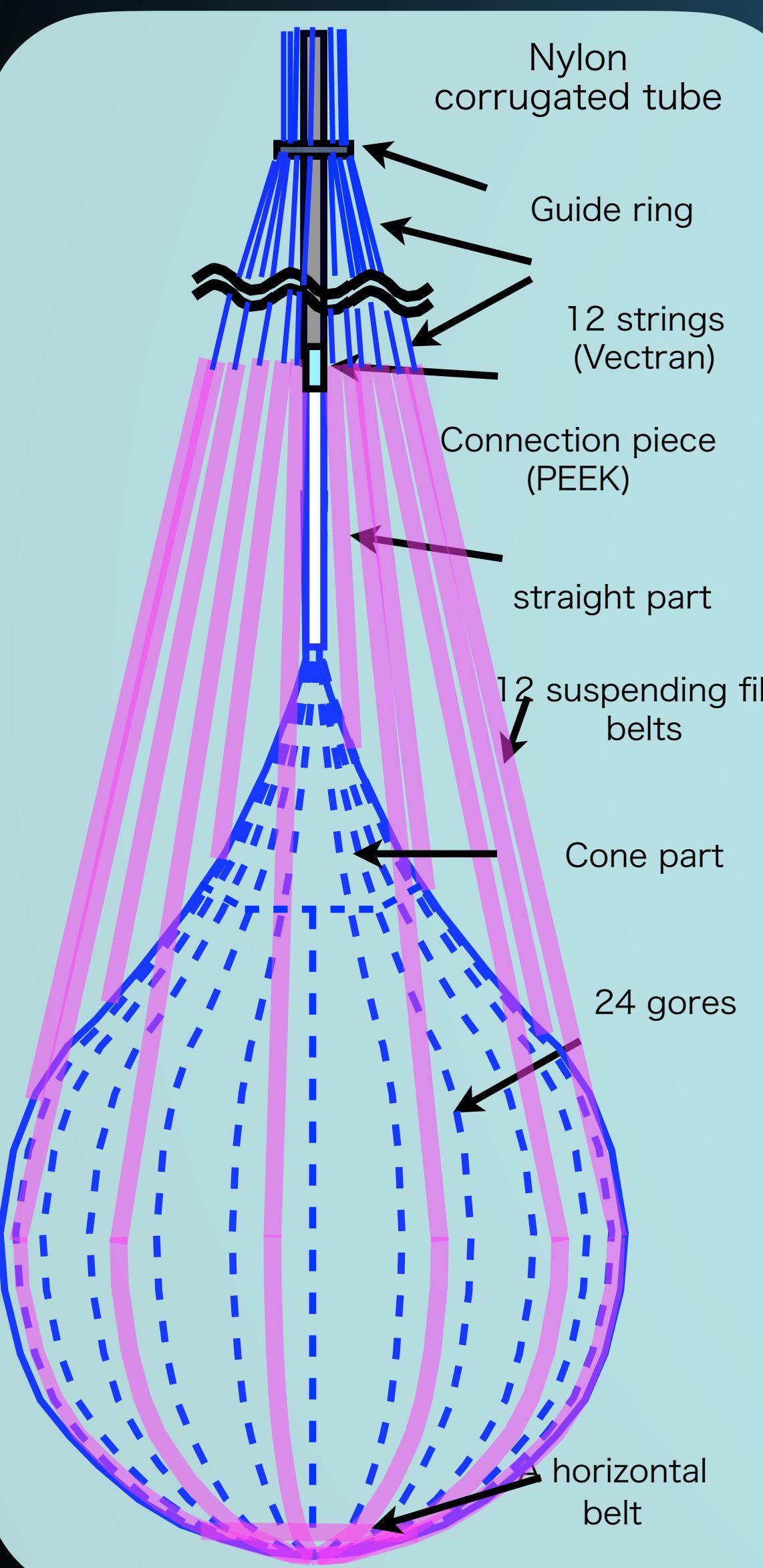
Result(I+II) $T^{1/2} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$ (90% C.L.)

^{110}mAg BGの除去達成!!

Obtained the very stringent limit!

禅800フェーズ

The KamLAND-Zen collaboration
et al 2021 JINST **16** P08023



Inner-ballon fabrication in class-1 cleanroom, Sendai

Spring 2017



Washing



Cutting



Welding



Leak hunt & repairing



May 2018

Install!

人からのダストが汚染源!!

10x clean IB from KLZ-400

2018年5月 IBの導入

2018年BGの確認

とLSの純化

Requirement: $^{232}\text{Th} < 10^{-15} \text{ g/g}$

Bf. purif. $^{232}\text{Th} \sim 10^{-15} \text{ g/g}$

Af. purif. $^{232}\text{Th} \sim 3 \times 10^{-16} \text{ g/g}$

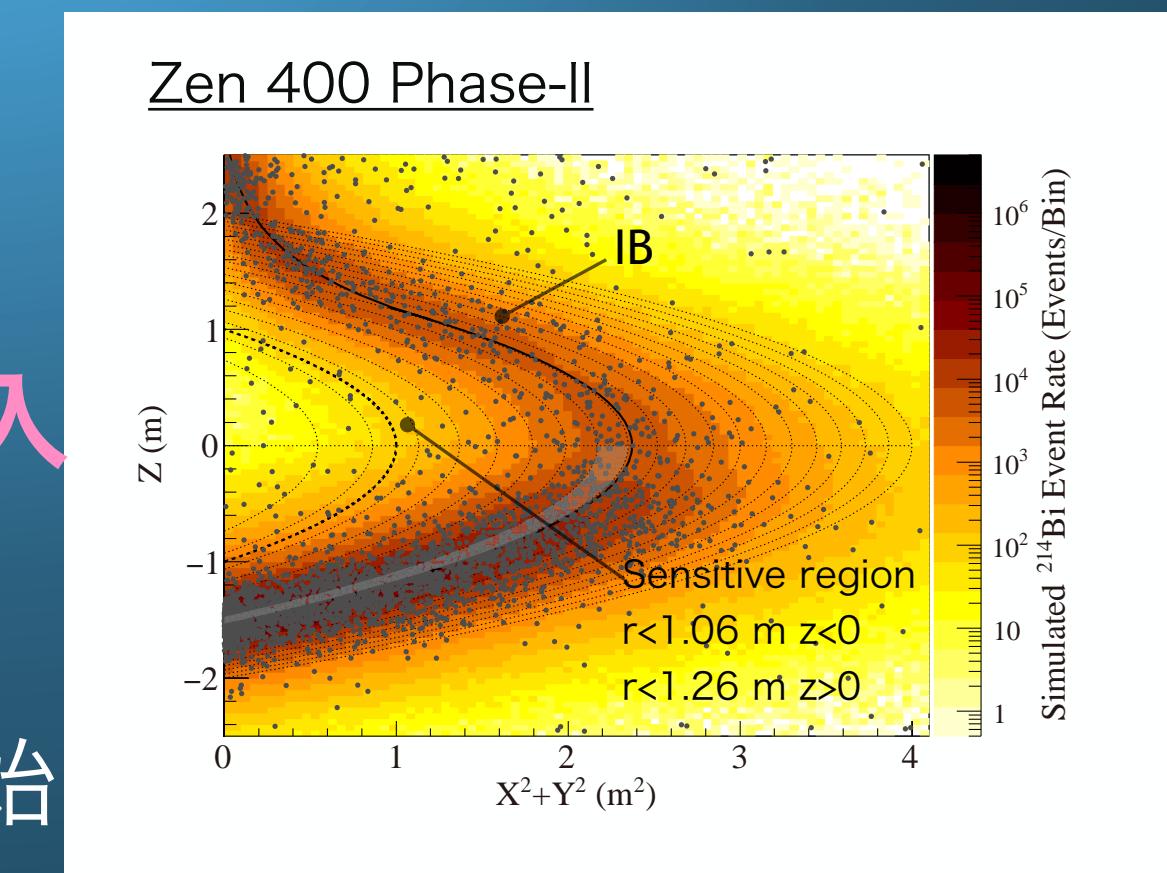
750 kgのキセノン導入

2019年1月~

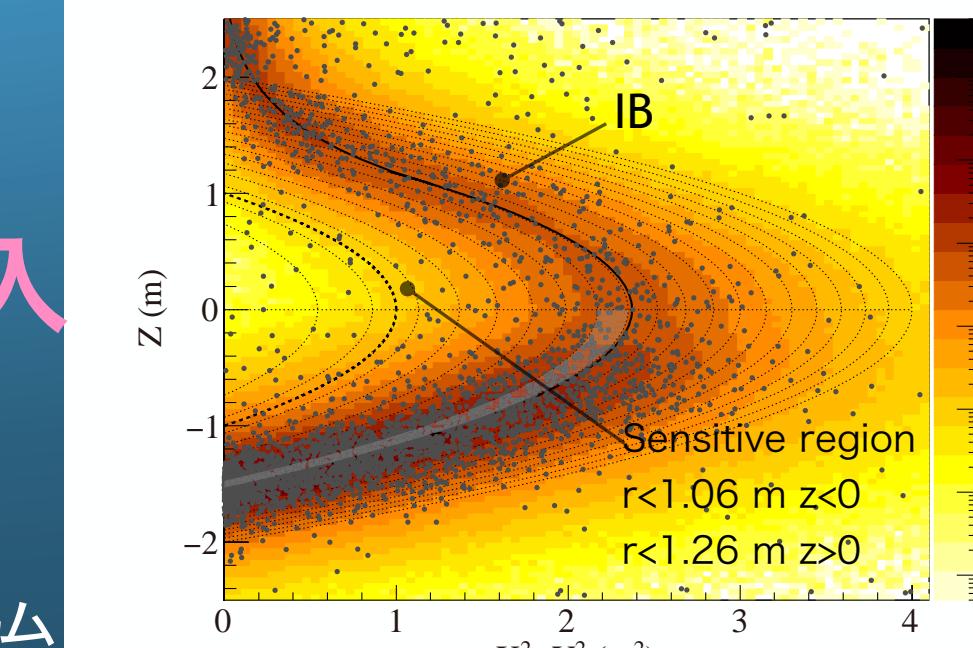
Zen800のデータ収集開始

	U-238 (g/g)	Th-232 (g/g)	Volume (m ³)
Zen400 Phase-II	$\sim 5 \times 10^{-11}$	$\sim 3 \times 10^{-10}$	16.7
Zen800	$\sim 3 \times 10^{-12}$	$\sim 4 \times 10^{-11}$	~ 2

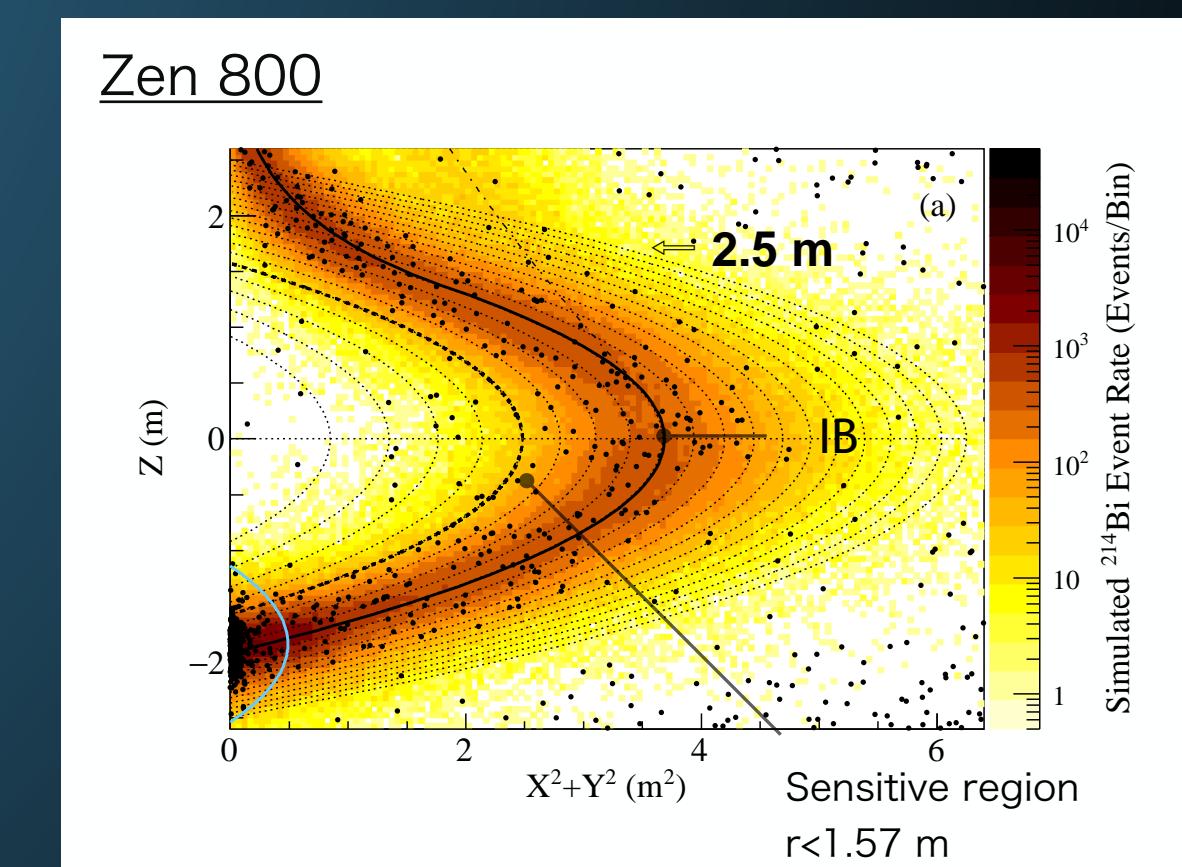
^{137}Cs and ^{134}Cs were not detected in the Zen800 IB.



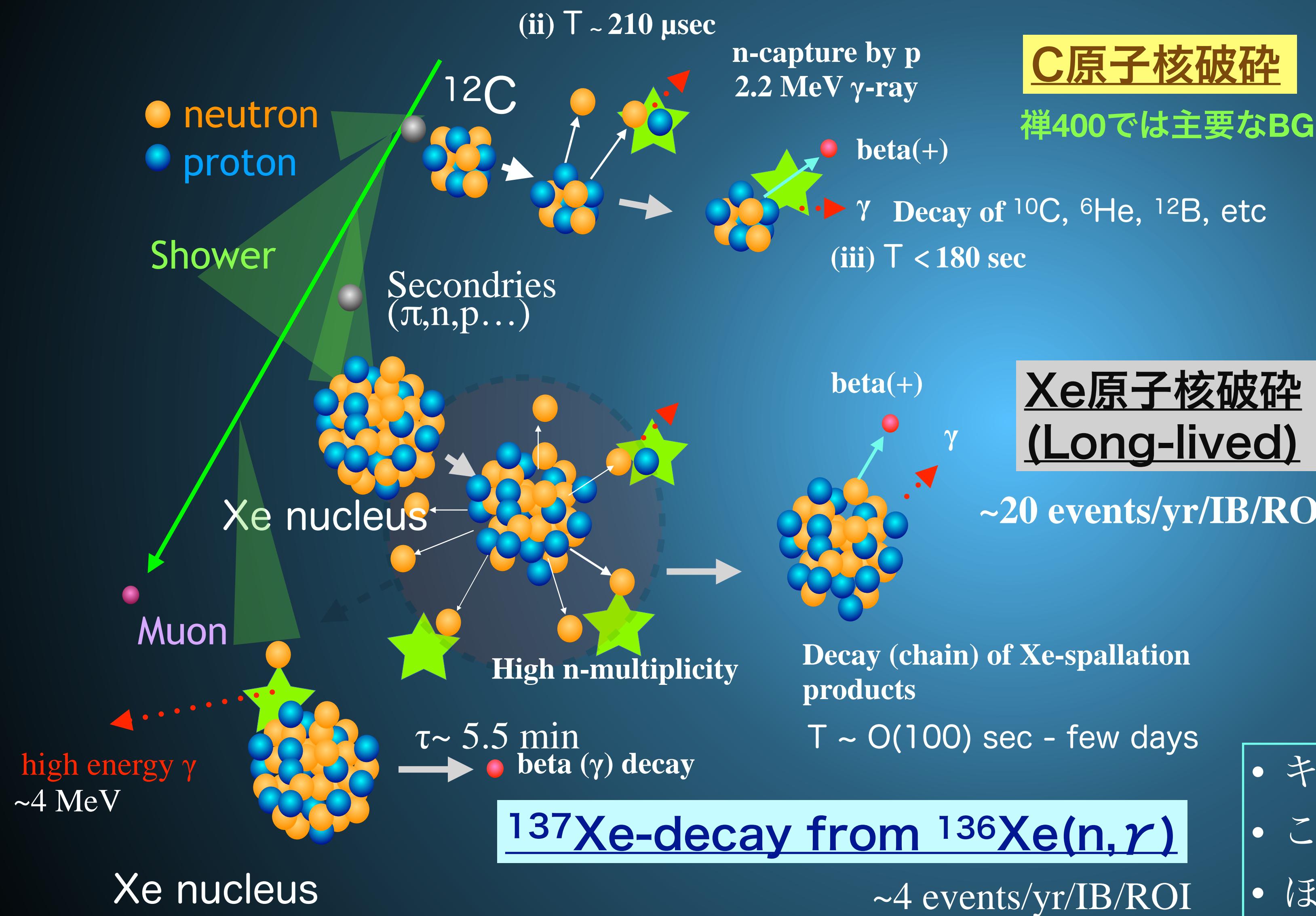
Zen 400 Phase-II



Zen 800



宇宙線起源の背景事象



C原子核破砕

禪400では主要なBG

Decay of ^{10}C , ^6He , ^{12}B , etc

- カムランドLSで測定可能
- カット前の主要BGの一つ
- $\sim 70 \text{ events/yr/IB/ROI}$
- 除去手法の改善で禪800では無視できるBGに!! 5%以下に

禪800で主要な背景事象

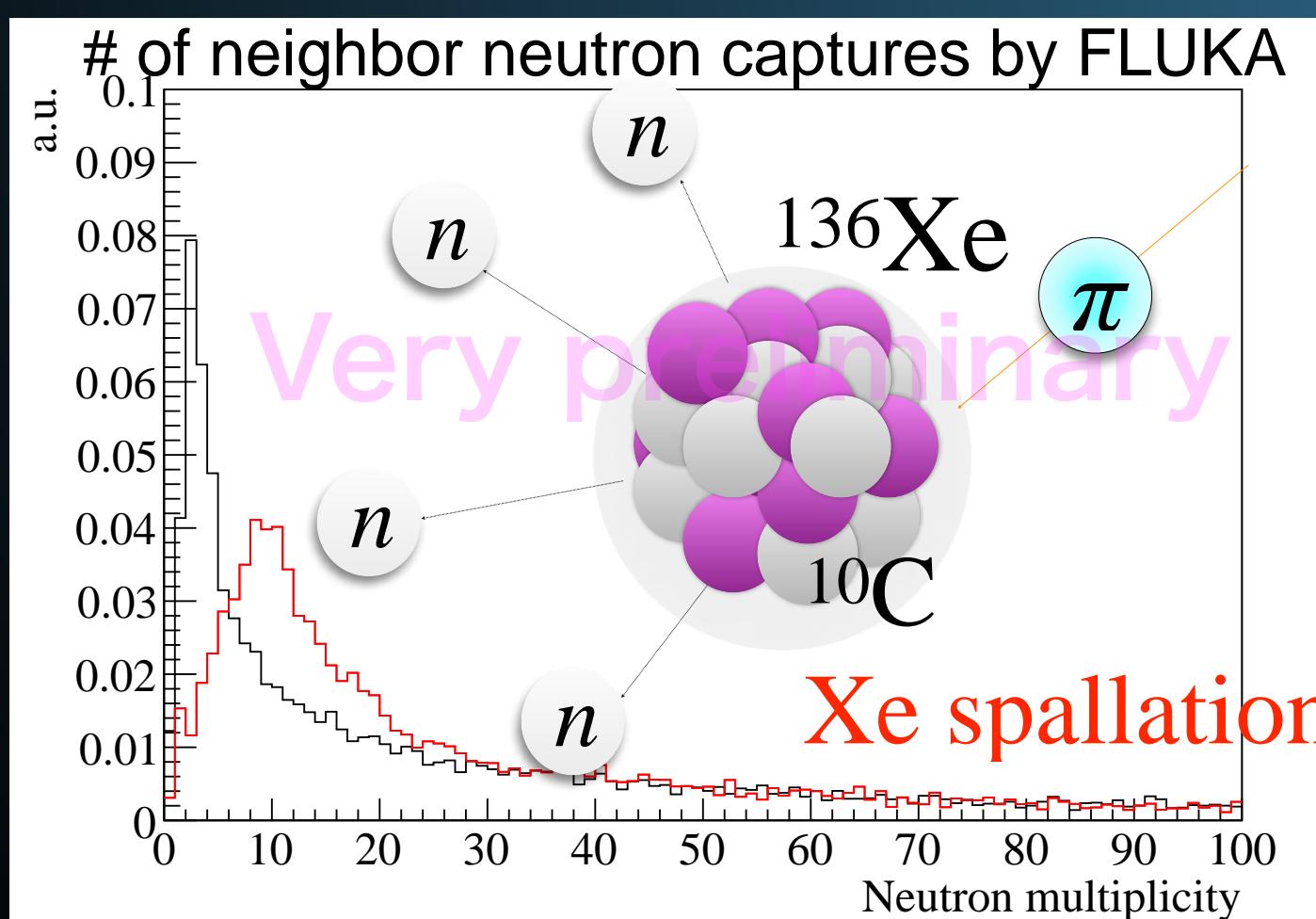
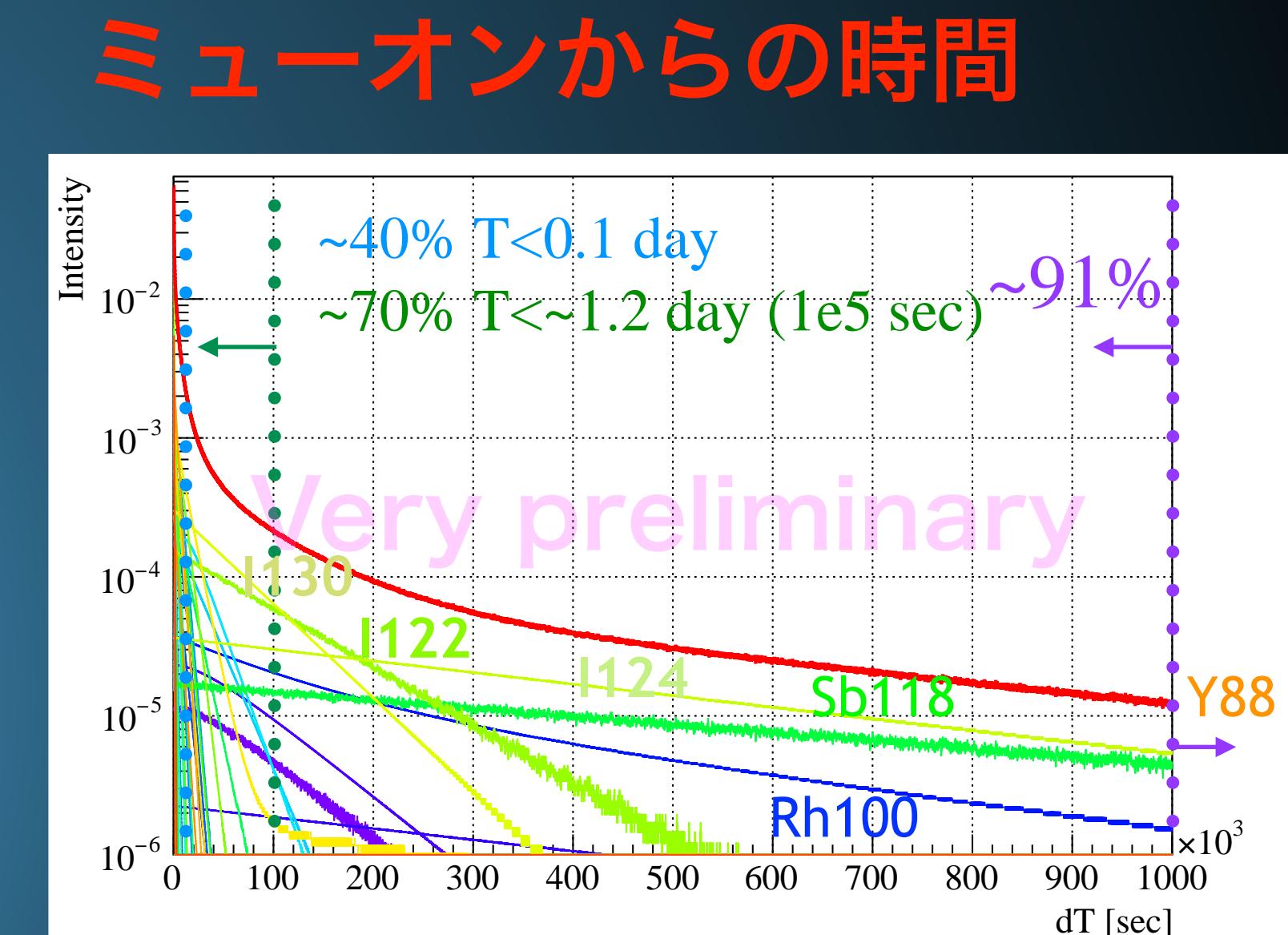
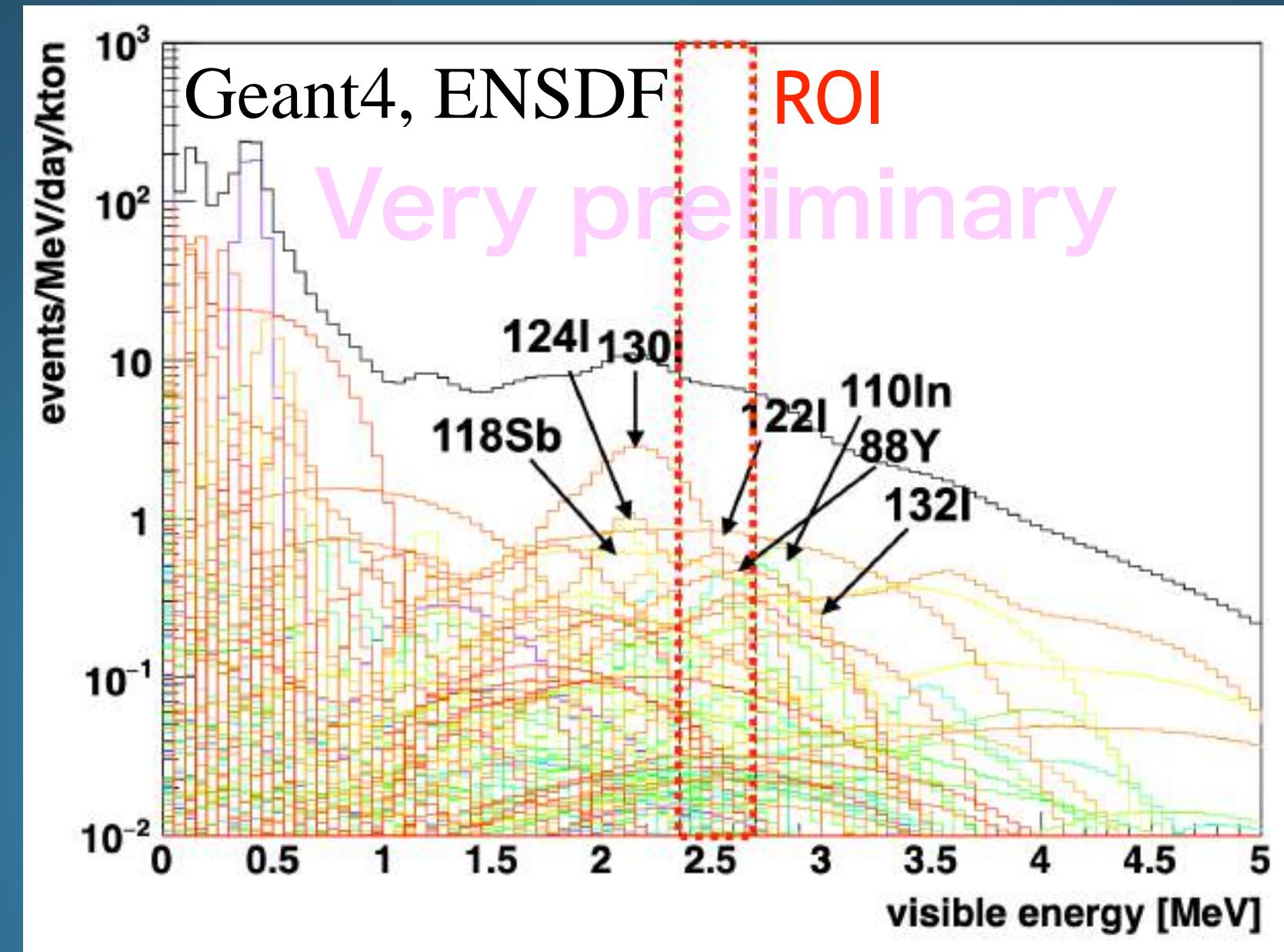
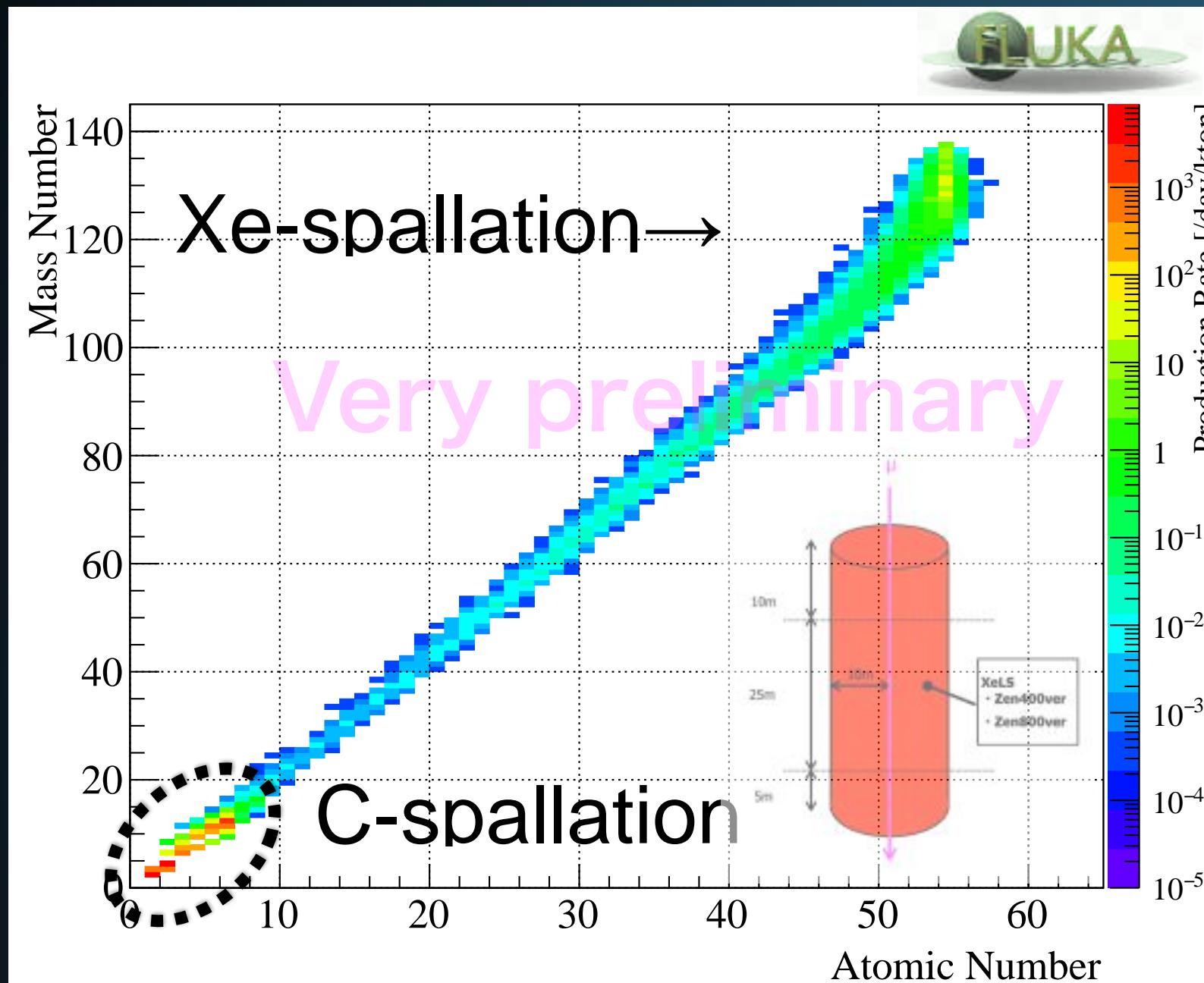
Xe原子核破砕 (Long-lived)

$\sim 20 \text{ events/yr/IB/ROI}$

- 禪800の主要な背景事象
- たくさんの生成物
- ほとんどが長寿命
- ほとんどが γ か陽電子を放出

- キセノン原子核の中性子捕獲で生成
- これまでの手法の応用で~75%が除去可能
- ほぼベータのみの崩壊

宇宙線起源の背景事象

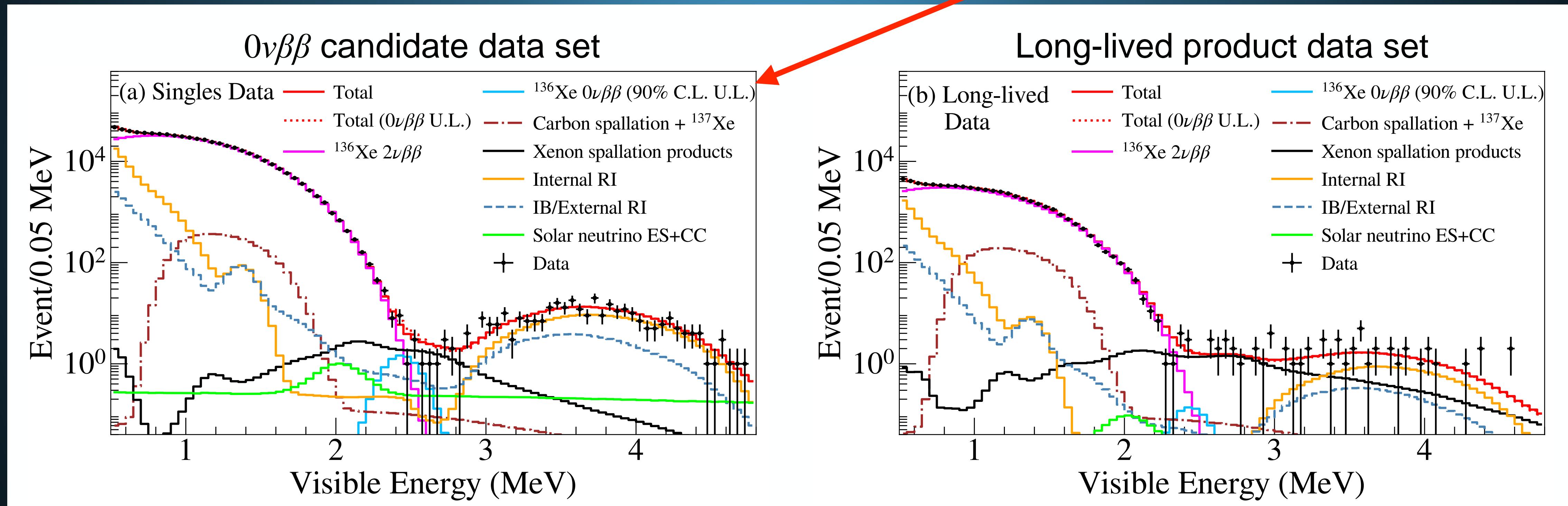
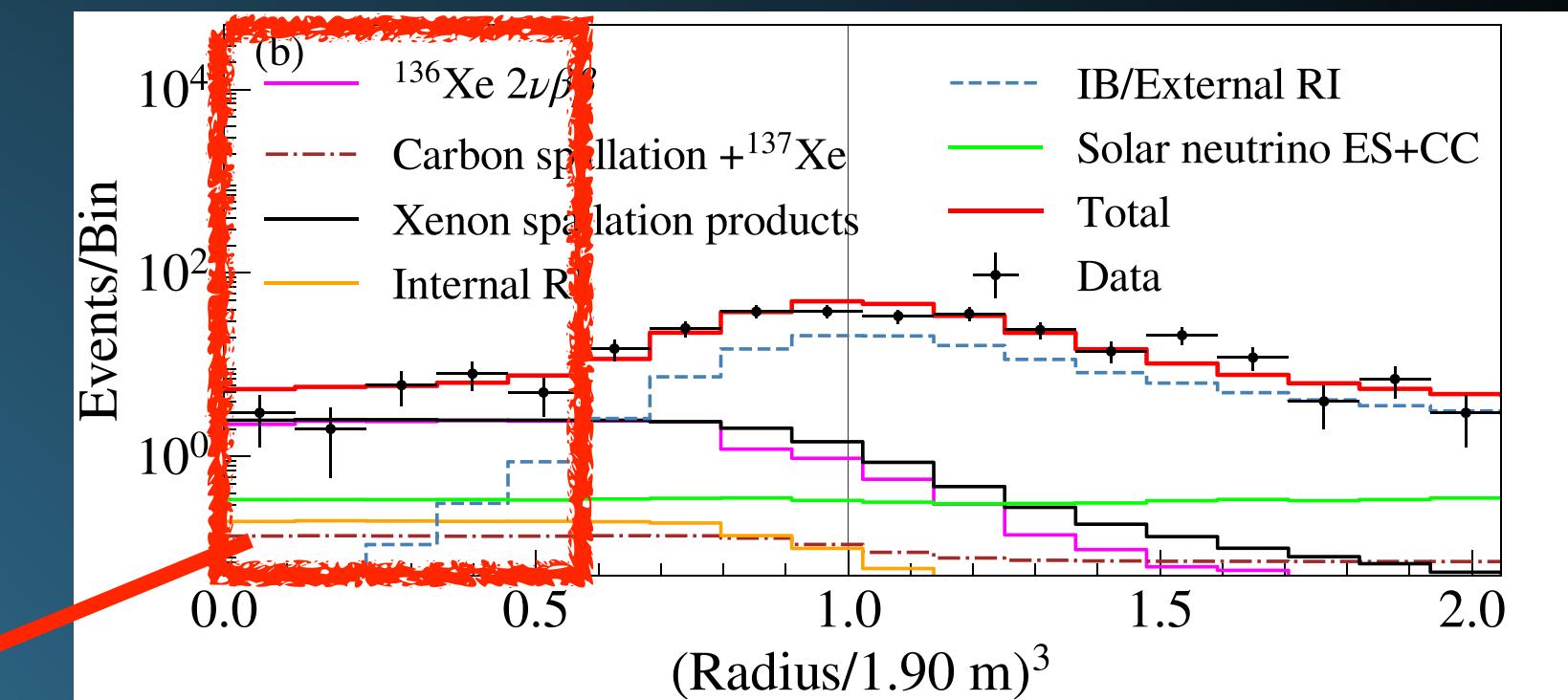


- Expected event rate: 0.082 event/day/Xe-ton/ROI.
- 主要な 32 核種で全体の~90%
- High neutron multiplicity, 長寿命
- Likelihoodカットを開発。~40%が除去可能。

津800のエネルギースペクトル

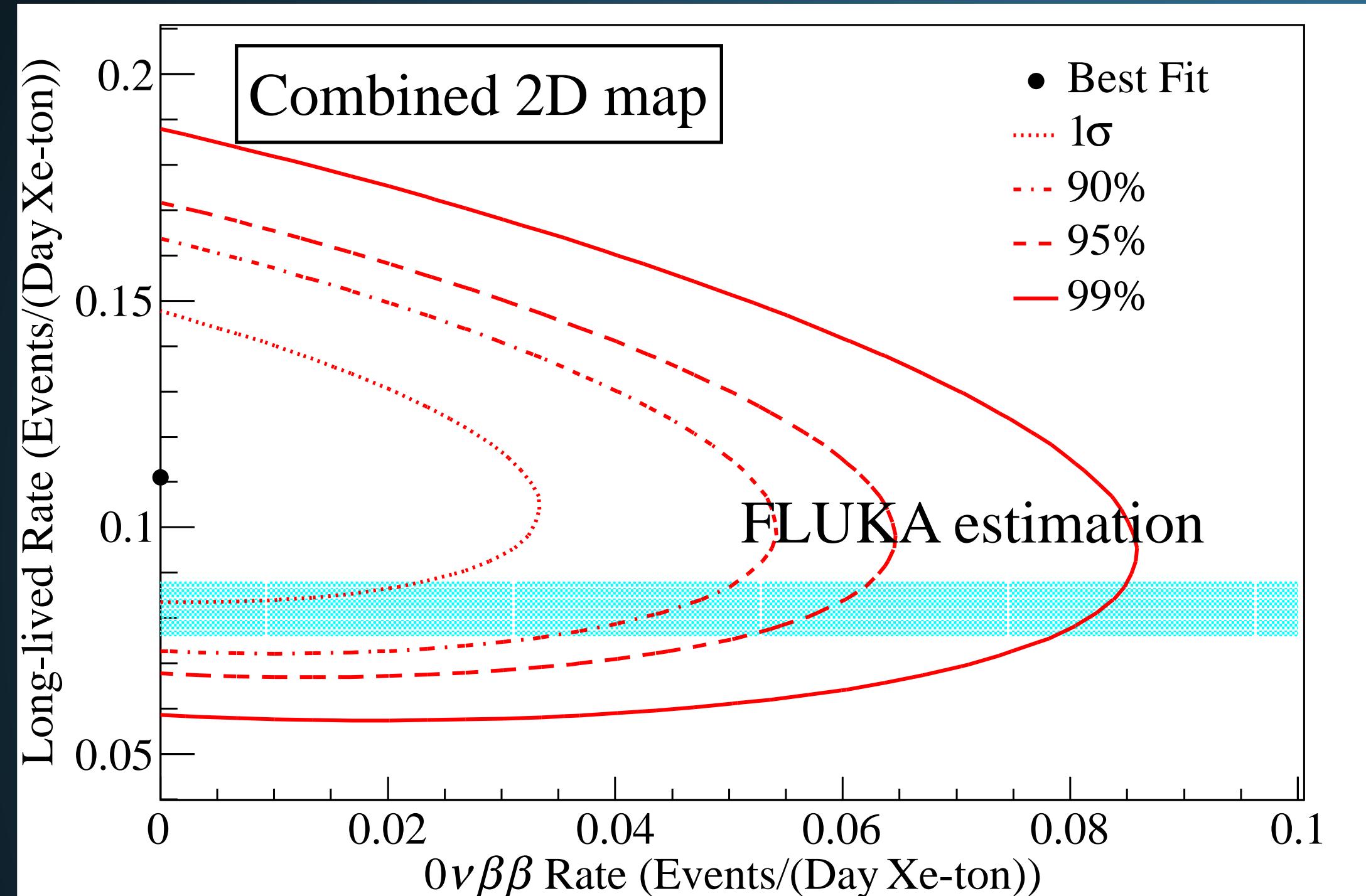
ほぼ1トン*年分のデータを解析!!

- データ期間：523 日分 (LL dataset は、49日分)



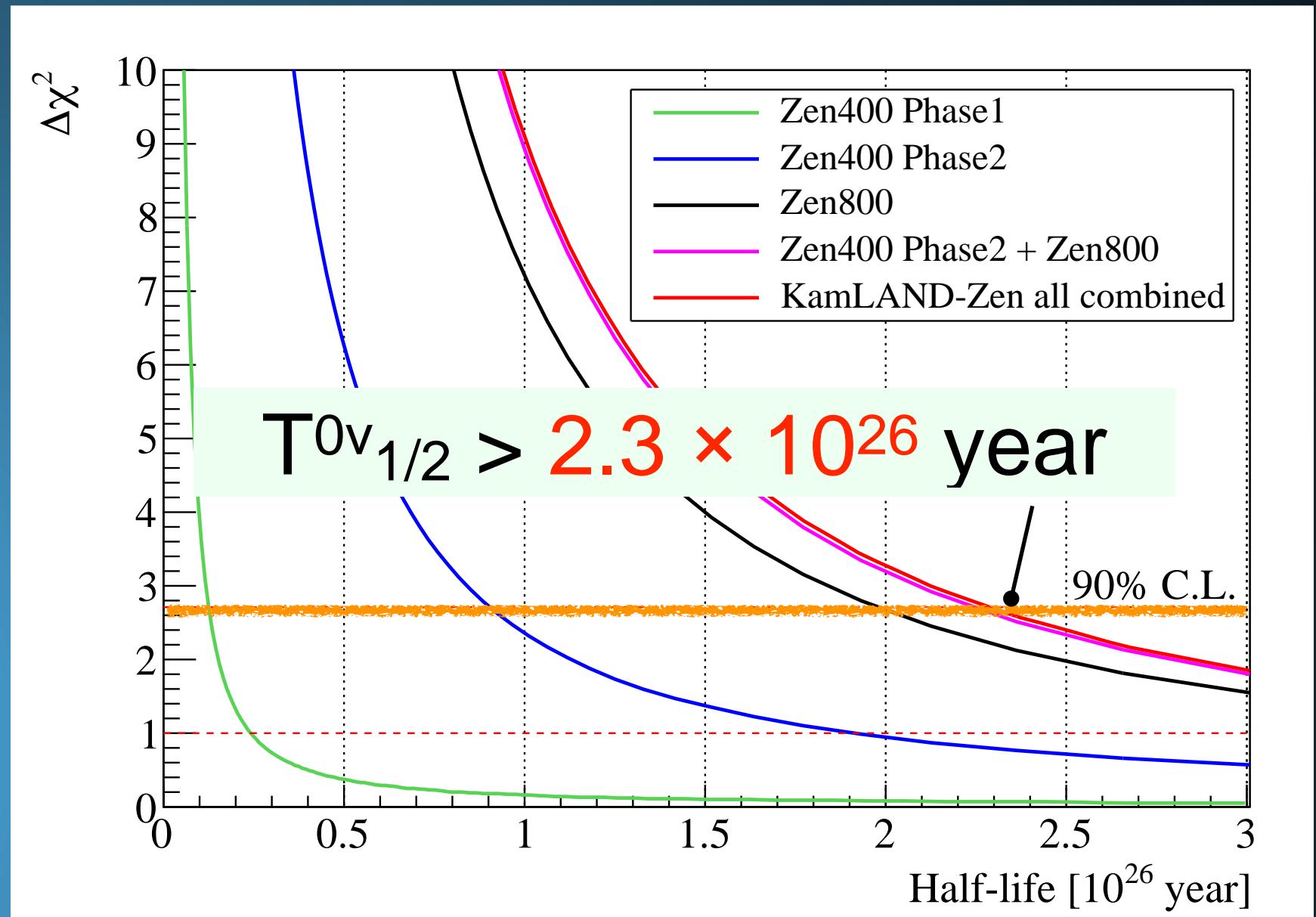
- 0νBBは見つからなかった。
- 0νBB崩壊レートに対する上限値 < 10.3 evts/XeLS(30.5 m³)/yr (90% C. L.)

カムランド禅の最新結果



LL rate in ROI (2.35MeV-2.70MeV)@KamLAND site
 0.111 ± 0.019 event/day/Xe-ton
 (FLUKA : 0.082 ± 0.006 event/day/Xe-ton)

LL tag efficiency(scanned)
 $= 40.1^{+10.2}_{-8.2}\%$ \Rightarrow consistent with the estimation ($42.0 \pm 8.8\%$)!!



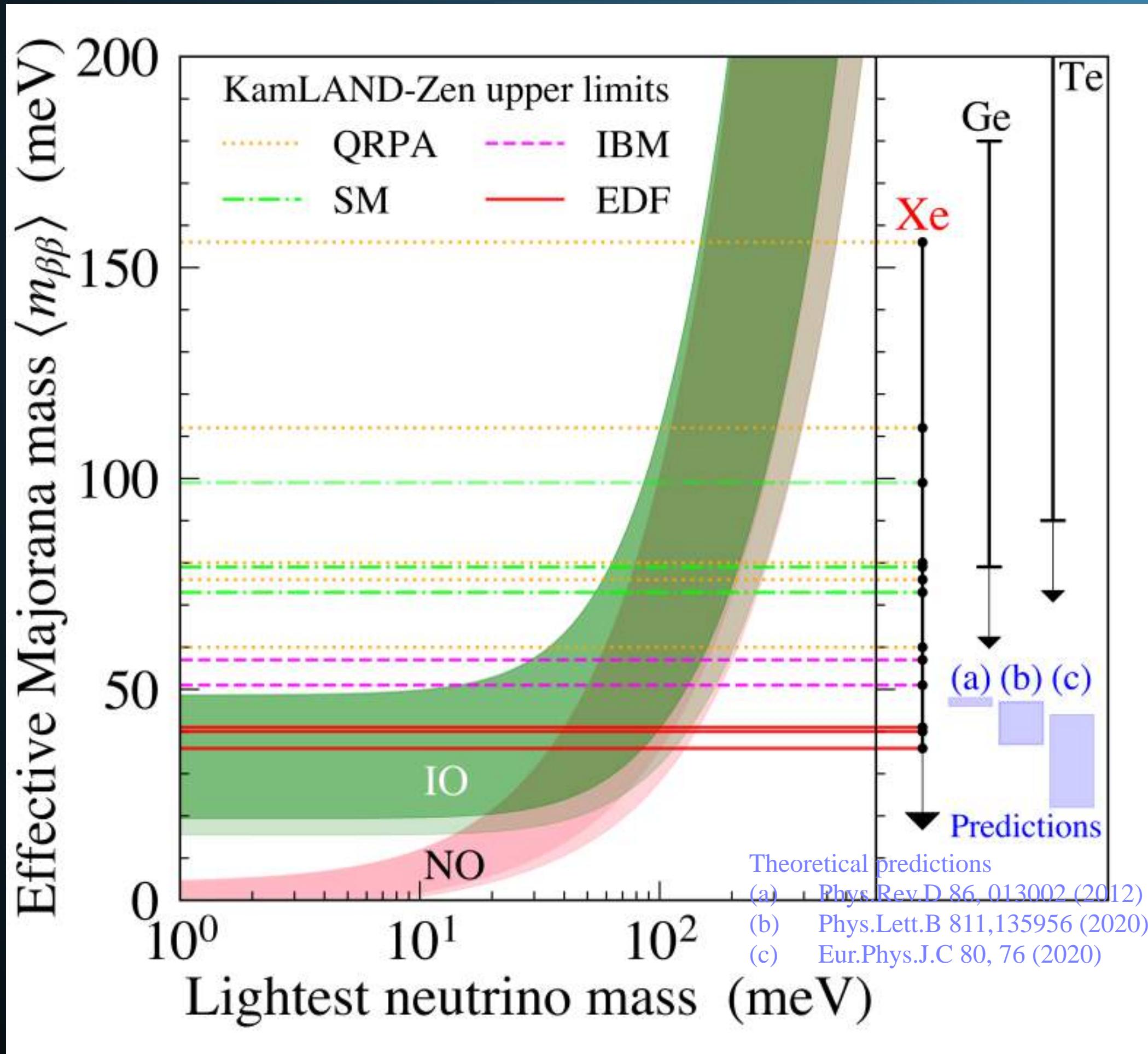
- 禅400の結果も再解析!!
- バックグラウンドとの相関を正しく解析に取り込めた。
- 宇宙線によるキセノン原子核破砕のバックグラウンドを測定!!
- 前回の結果を2倍更新!

$m_{\beta\beta}$ への制限

NME

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} (g_{A,\text{eff}}/g_A)^4 |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

$g_A = 1.27$, following NMEs



Quasi-particle Random Phase Approximations

- * Phys. Rev. C 102, 44303(2020)
- * Phys. Rev. C 91, 024613(2015)
- * Phys. Rev. C 87, 045501(2013)
- * Phys. Rev. C 87, 064302(2013)
- * Phys. Rev. C 97, 045503(2018)

Interacting boson models

- * Phys. Rev. D 102, 095016(2013)
- * Phys. Rev. C 91, 034304(2015)

Shell models

- * Phys. Rev. C 101, 044315(2020)
- * Phys. Rev. C 91, 024309(2015)
- * Phys. Rev. A 818, 139 (2009)

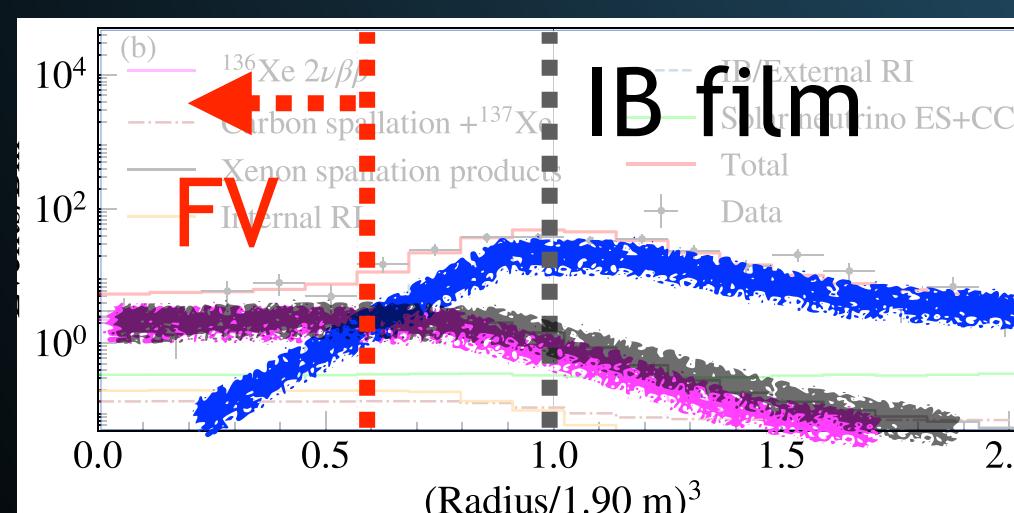
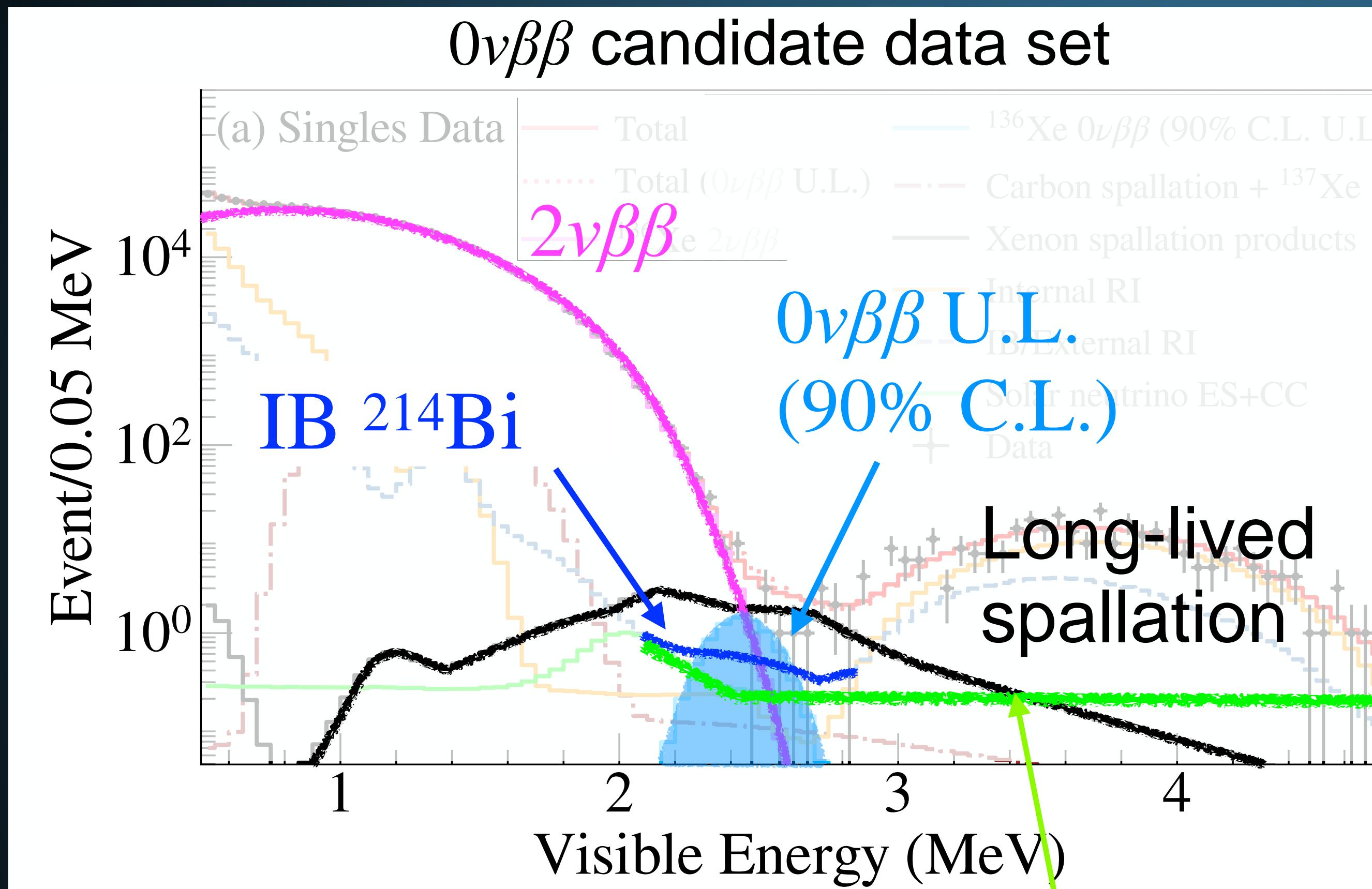
カムランド禅全ての期間を合わせた結果

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.3 \times 10^{26} \text{ year} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 36-156 \text{ meV}$$

世界で初めてOバンド内の探索結果!
理論予想の検証も可能に!

カムランド禅800の背景事象まとめ



Solar neutrino
electron scattering

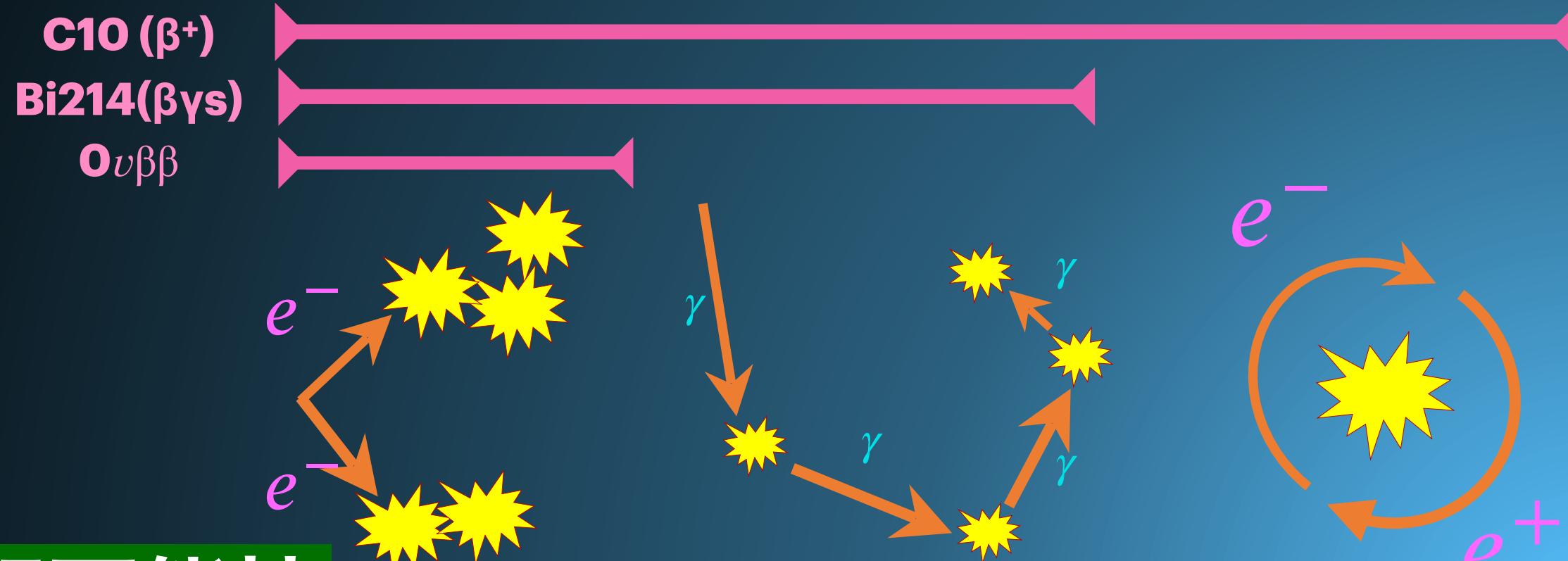
Frequentist confidence limit (Wilks'):

$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.98 \times 10^{26} \text{ yr (90 \% C . L.)}$$

Background	Best-fit	
	Frequentist	Bayesian
¹³⁶ Xe 2 $\nu\beta\beta$	11.98	11.95
Residual radioactivity in Xe-LS		
²³⁸ U series	0.14	0.09
²³² Th series	0.84	0.87
External (Radioactivity in IB)		
²³⁸ U series	3.05	3.46
²³² Th series	0.01	0.01
Neutrino interactions		
⁸ B solar νe^- ES	1.65	1.65
Spallation products		
Long-lived	12.52	11.80
¹⁰ C	0.00	0.00
⁶ He	0.22	0.21
¹³⁷ Xe	0.34	0.34

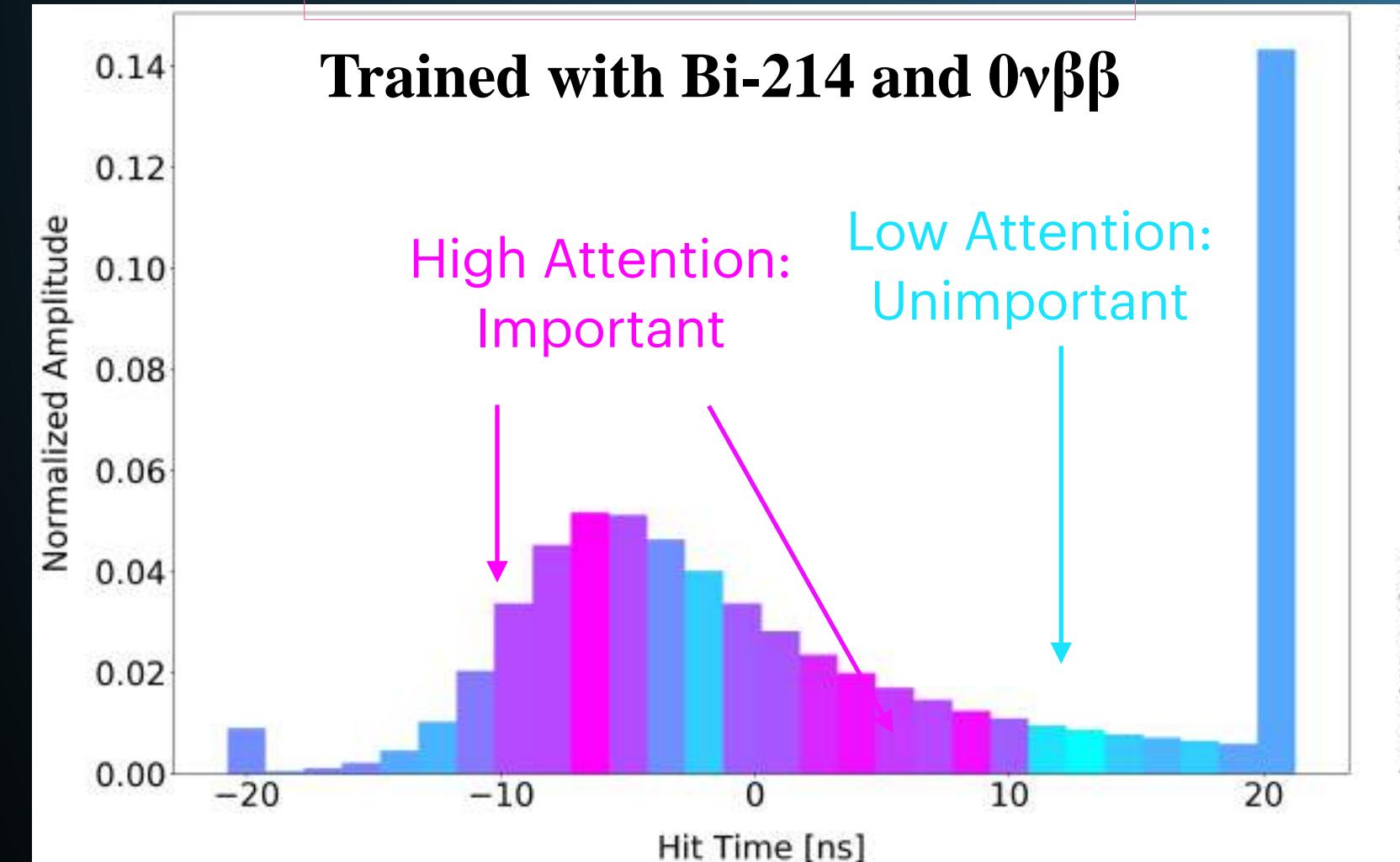
機械学習を使った粒子識別

arXiv:2203.01870

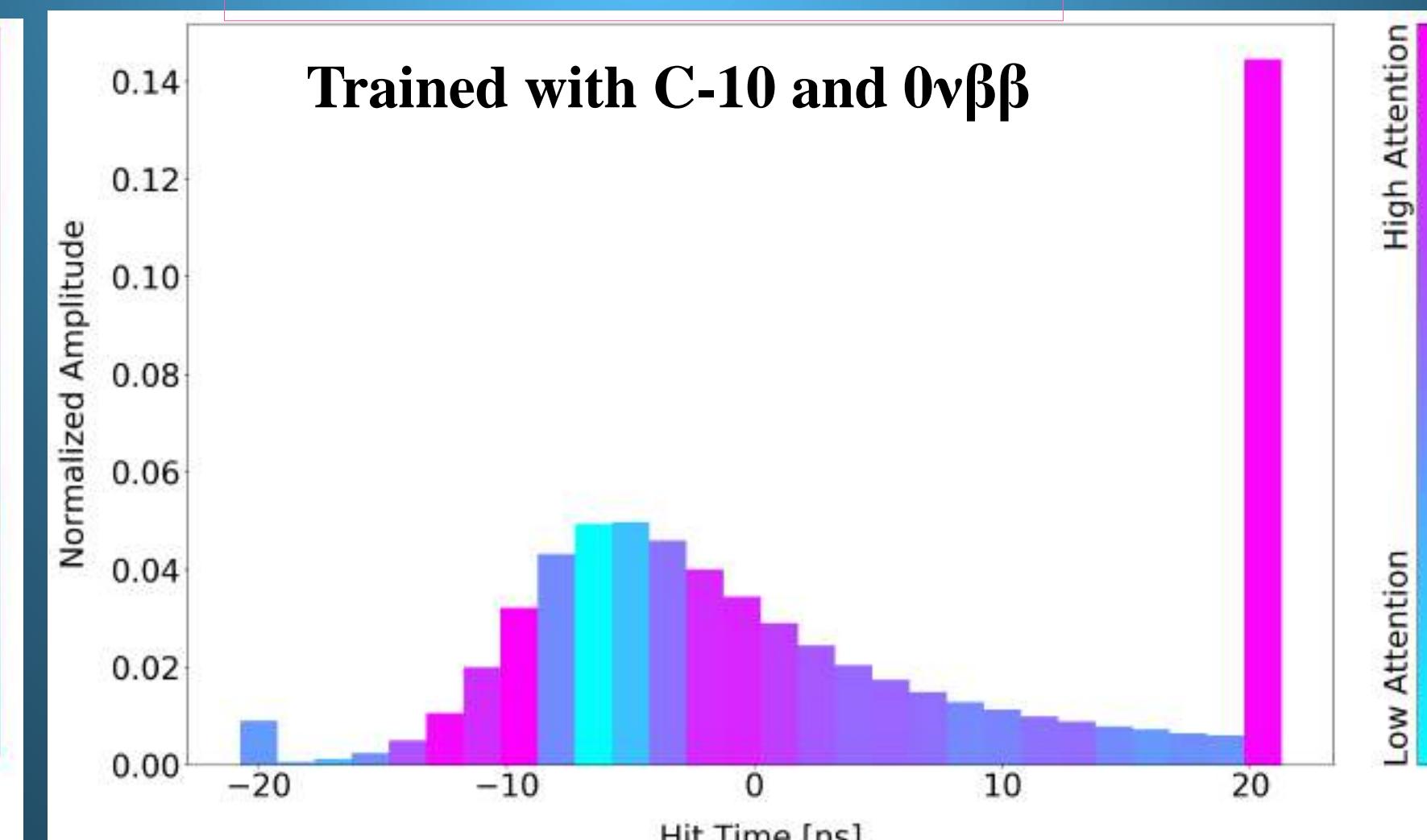


解釈可能性

^{214}Bi Attention Score



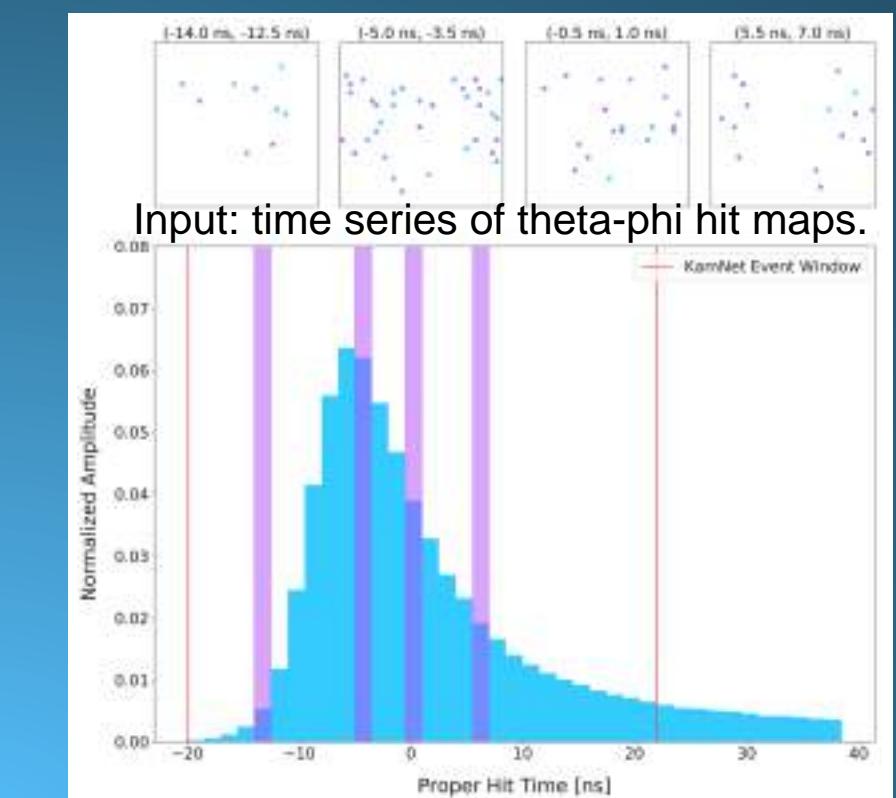
^{10}C Attention Score



KamNet
Maximal information extraction for spherical LS detector

AttentionConvLSTM
for Spatiotemporal symmetry

Spatiotemporal Data



[28, 38, 38]

AttentionConvLSTM + Pooling

[22, 38, 38]

S2_Conv + ReLU + Drop

[36, 28, 28]

SO3_Conv + ReLU + Drop

[63, 20, 20, 20]

SO3_Conv + ReLU + Drop

[74, 12, 12, 12]

SO3_Conv + ReLU

[128, 4, 4, 4]

SO3_Integrate

[128,]

FC + ReLU + Norm + Drop

[1080,]

FC + ReLU + Norm + Drop

[864,]

FC + ReLU + Norm + Drop

[432,]

FC + ReLU

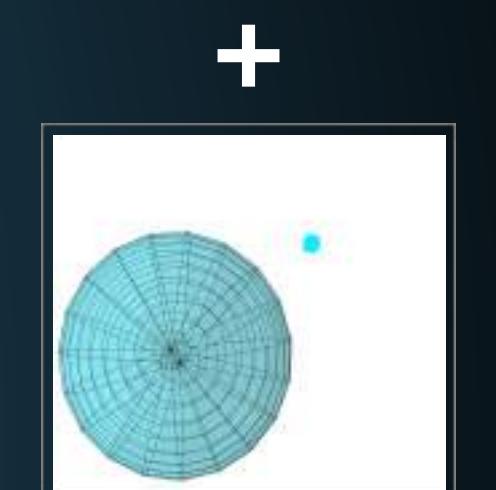
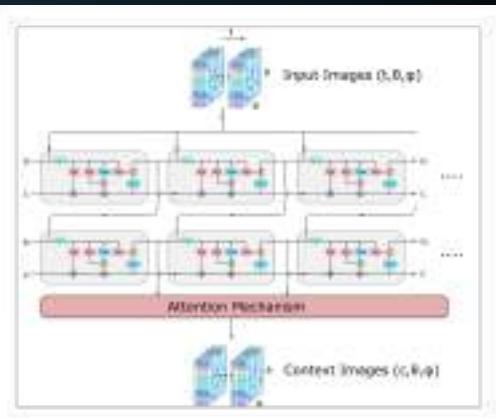
[216,]

FC + ReLU

[55,]

FC + Sigmoid

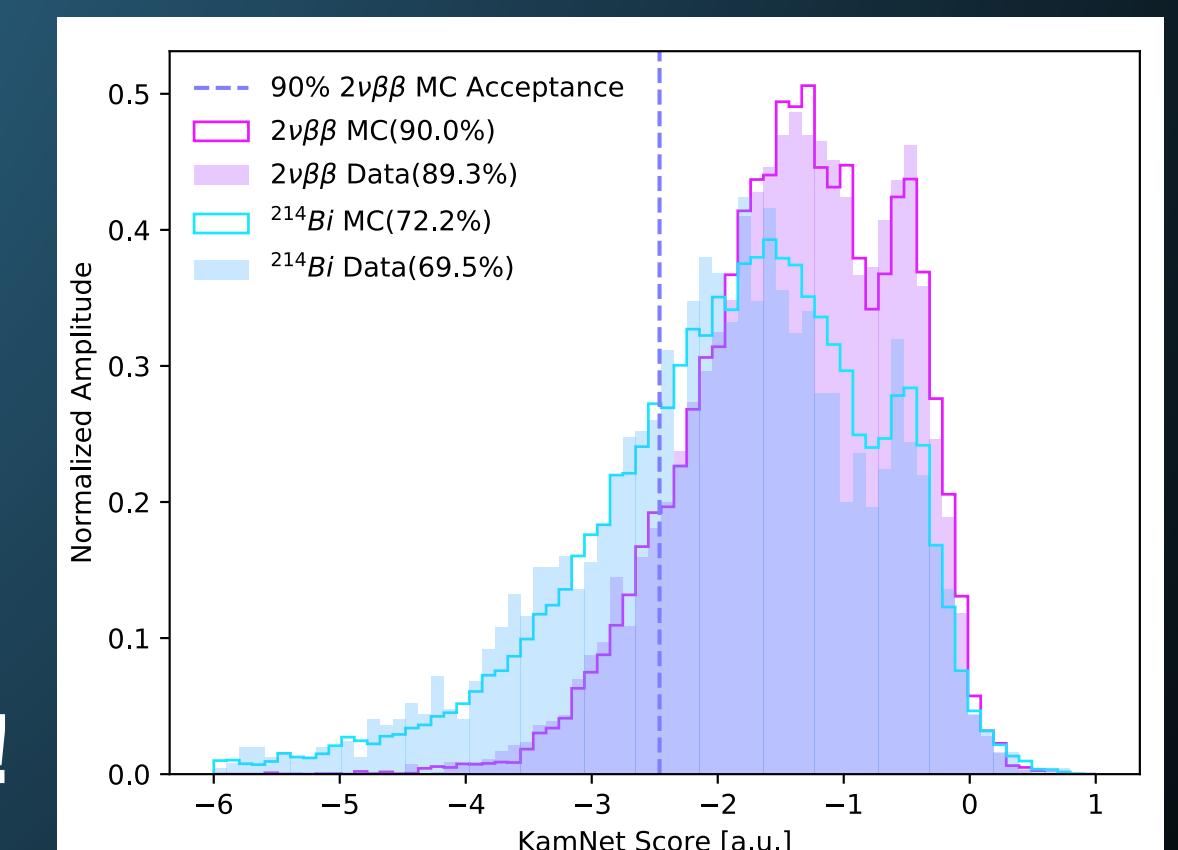
KamNet Score



for $\text{SO}(3)$ symmetry in spherical detector

BG like

SG like

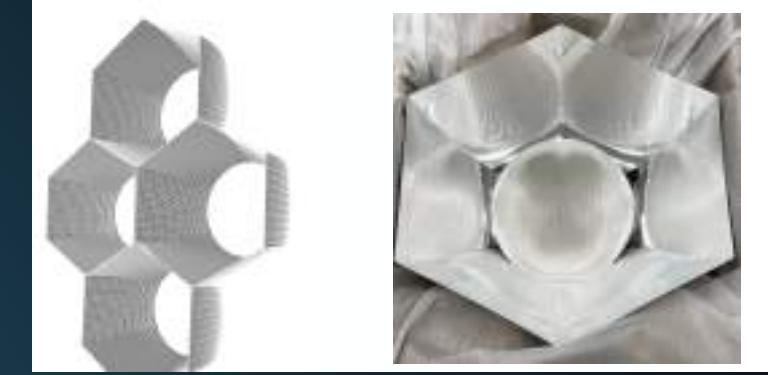


大型LS検出器でのPIDを開発!! 長寿命核~27%とフィルムBi ~59% の除去効率を達成!!



カムランド2禪

KamLAND2-Zen will be sensitive to $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20$ meV

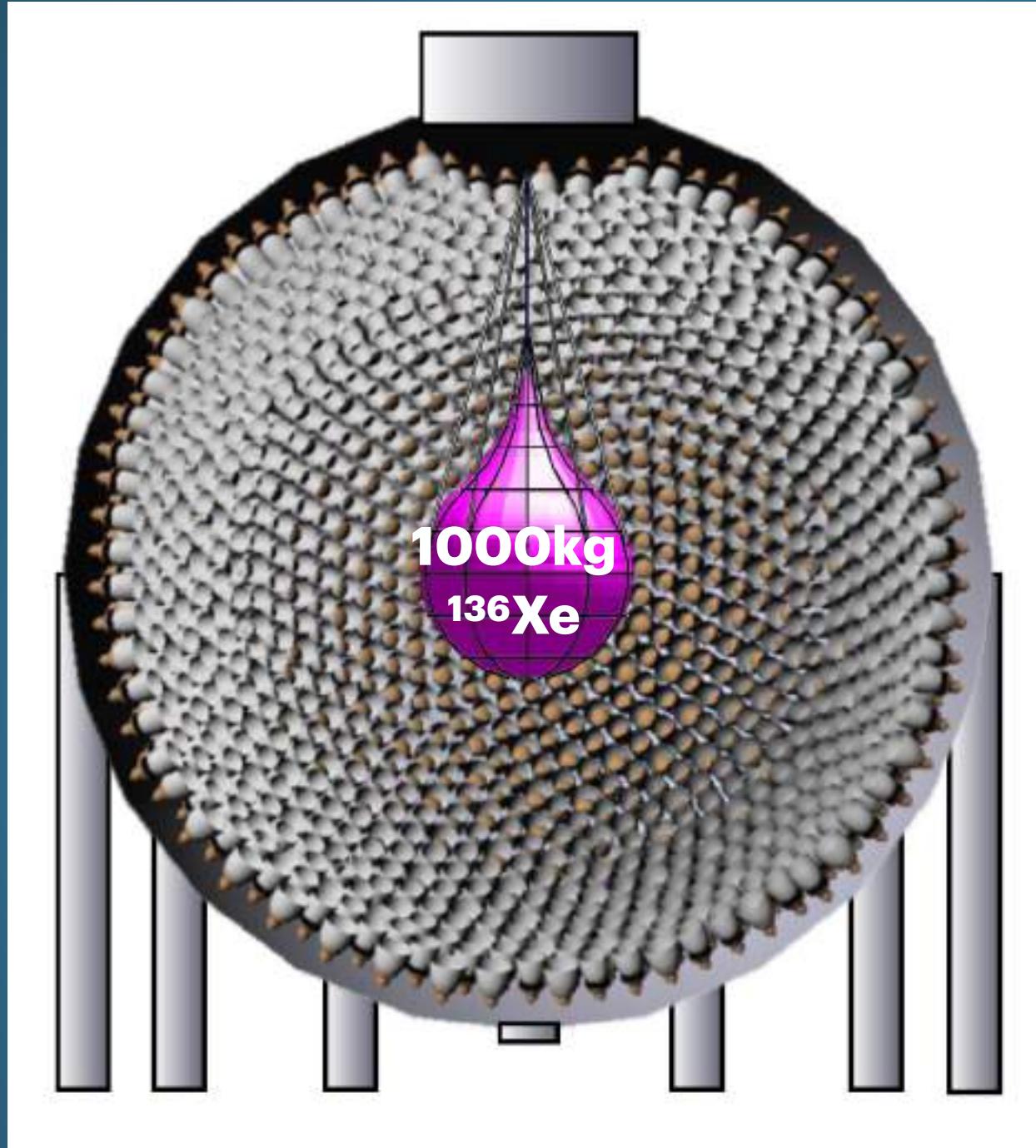


2. State-of-the-art electronics

Purpose: Improve background suppression. Tagging long lived isotope from cosmic ray spallation.

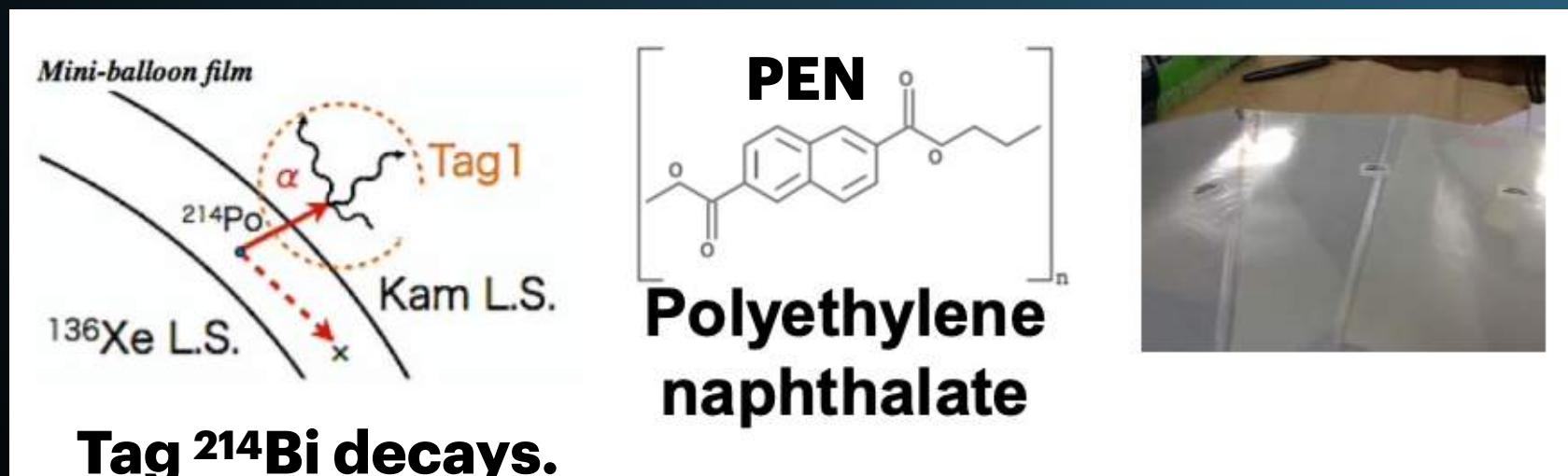


宇宙線後の中性子捕獲事象検出効率を100%に!
Xe原子核破碎の背景事象を減少



3. Improved inner balloon

Purpose: reduce backgrounds originating from balloon.



IBのバックグラウンドを除去し100% FVを達成する!!

1. Improved energy resolution

Purpose: further separate 2νββ from the 0νββ.

- Light collection with Winston Cones (x1.8)
- High light yield scintillator (x1.4)
- High QE 20" PMTs (x1.9)

4% → 2% energy resolution

2νBBの背景事象を100分の1に!

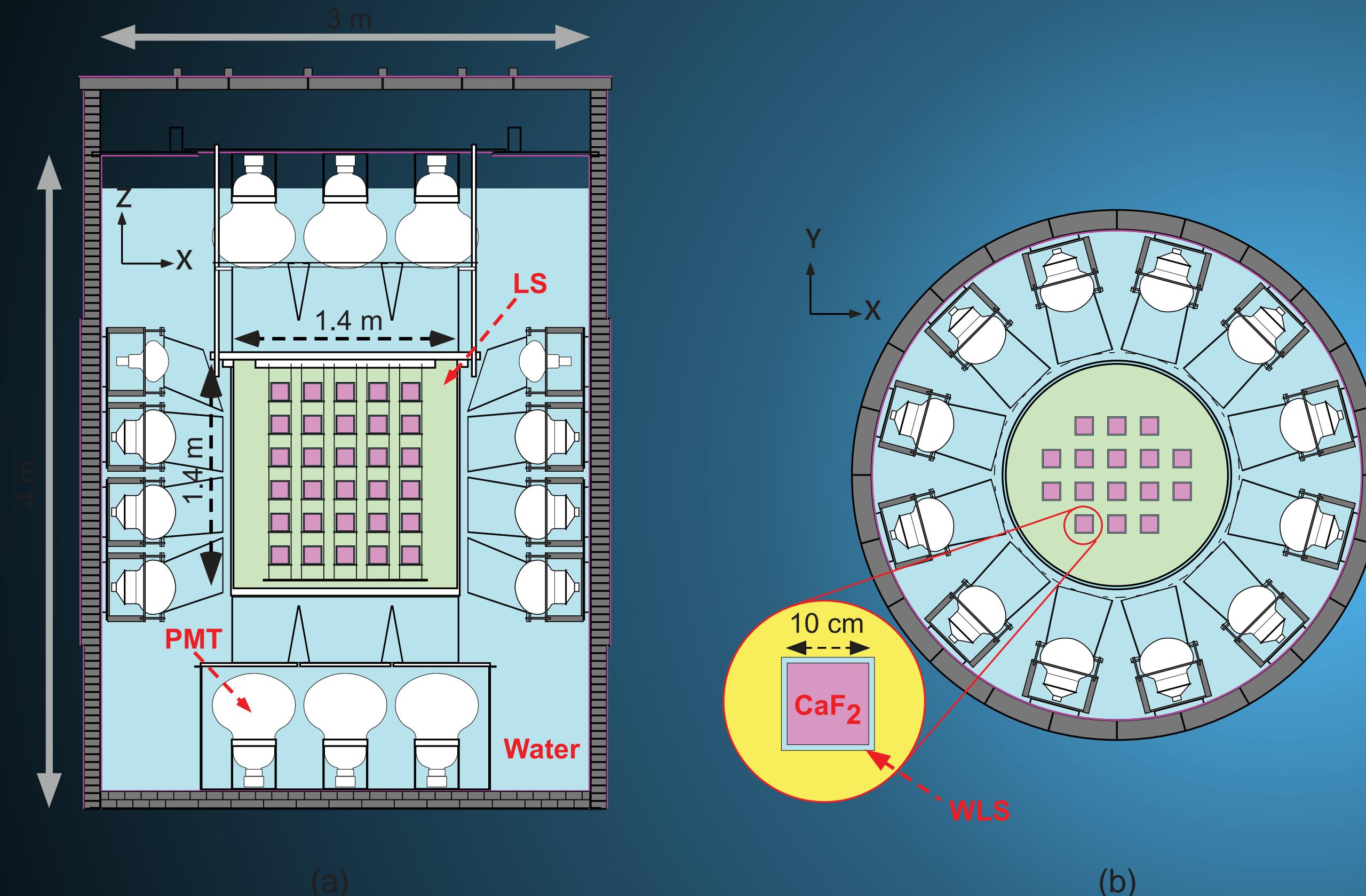
PIDの効率を大幅にアップできる!

→Xe原子核破碎の背景事象を減少

50 m³タンクでの収光量増加などの
実証実験を開始に向け準備中!!

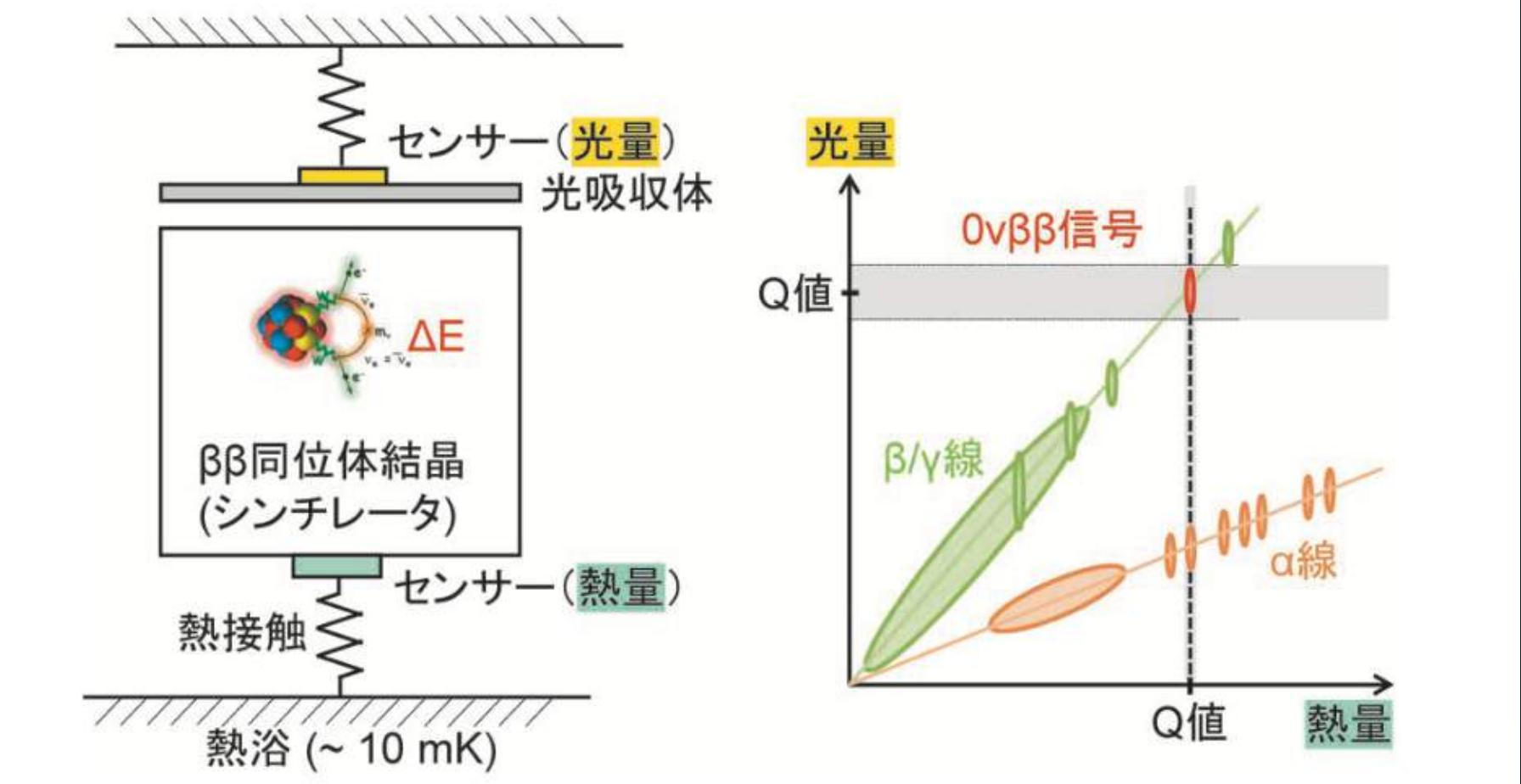


標準階層カバーへ:CANDELS実験



- 現在は、 CaF_2 結晶 305 kg のシンチレーション検出器
- ${}^{48}\text{Ca}$ は 350 g

日本物理学会誌 vol. 77, No. 8, 2022 吉田&梅原

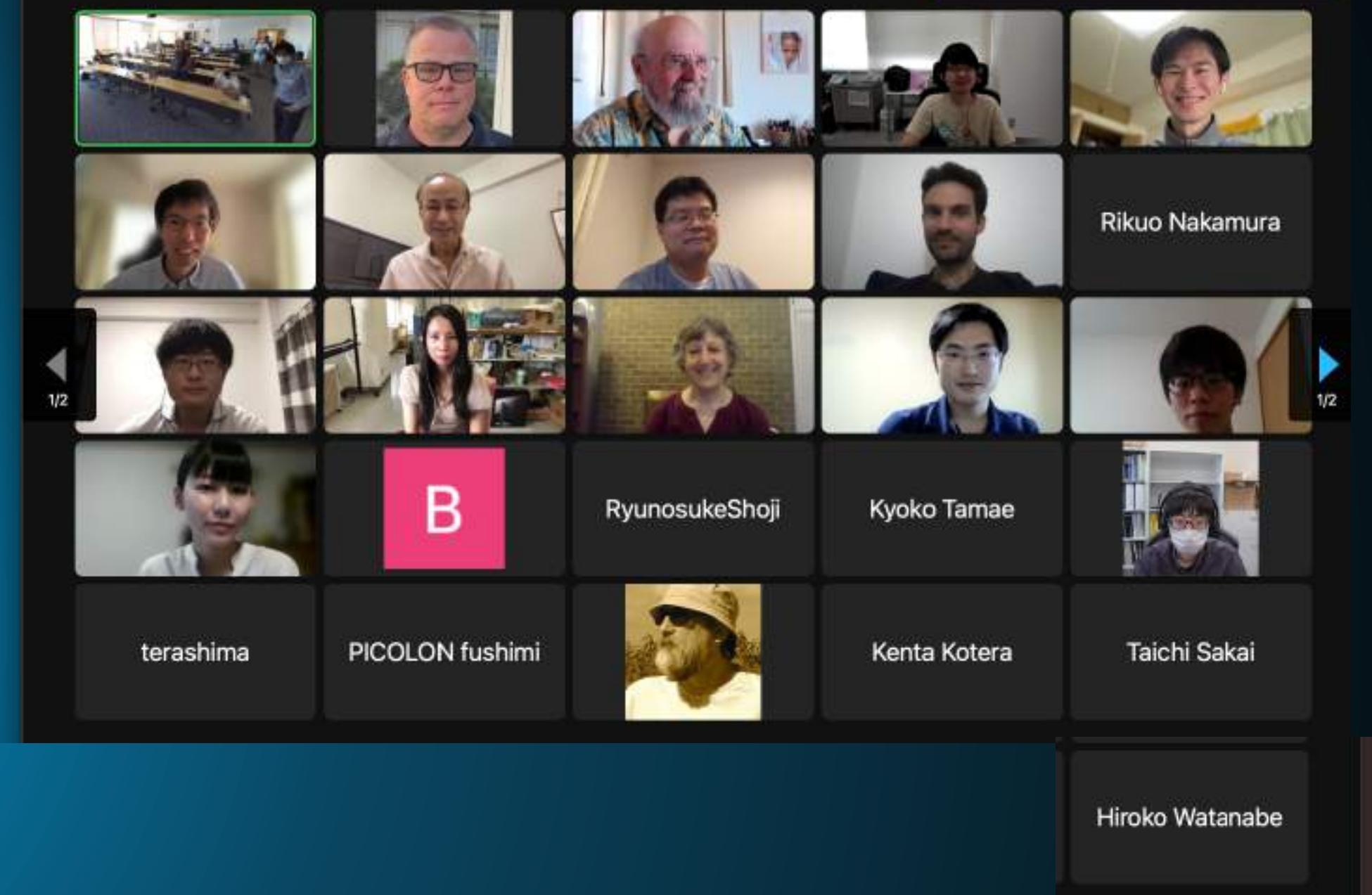


- 非常に高いQ値 4.27 MeV
- 濃縮技術の開発が必須
- シンチレーティングボロメータの開発中

まとめ

- ・ $\mathrm{O}\nu\mathrm{BB}$ は、世界中で様々な検出器技術、原子核を使って探索されている。
- ・近い将来逆階層をカバーする実験が計画されている。発見は近いかもしれない。
- ・カムランド禪が現在は世界最高感度で探索中。最新結果を公表した。

KamLAND(-Zen) Collaboration



>50 researchers are collaborating
on the KamLAND-Zen experiment.

