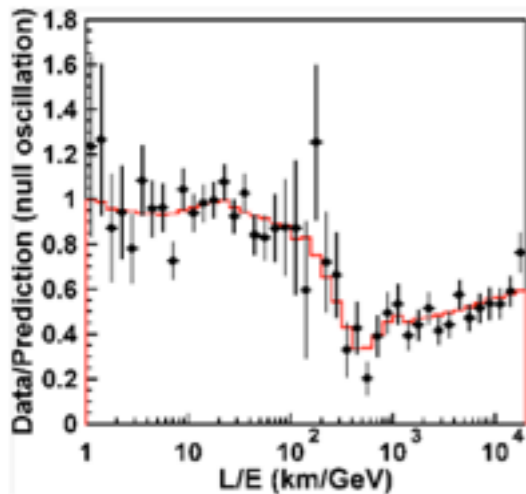


KamLAND2-Zen

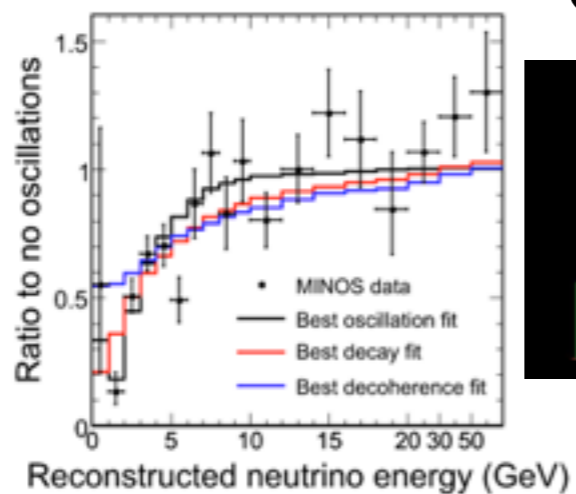
東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

KamLAND-Zen collaboration

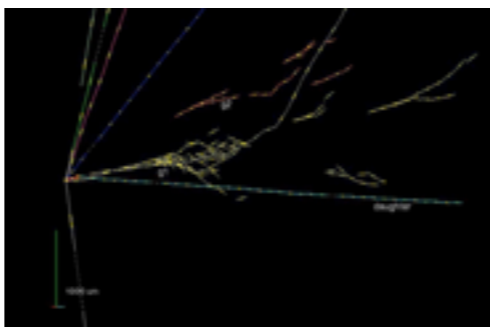
SK 大気 半周期



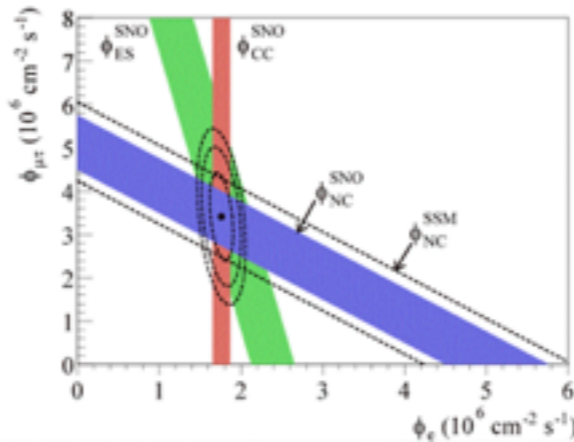
MINOS 半周期



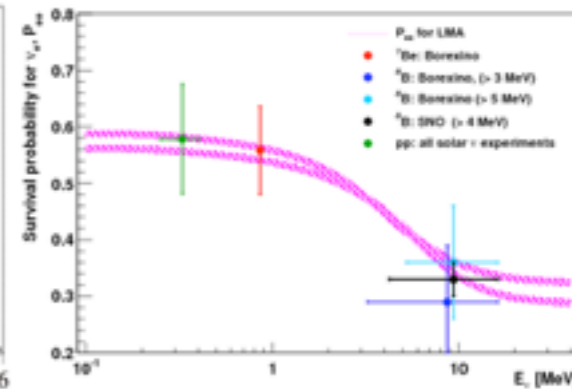
OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



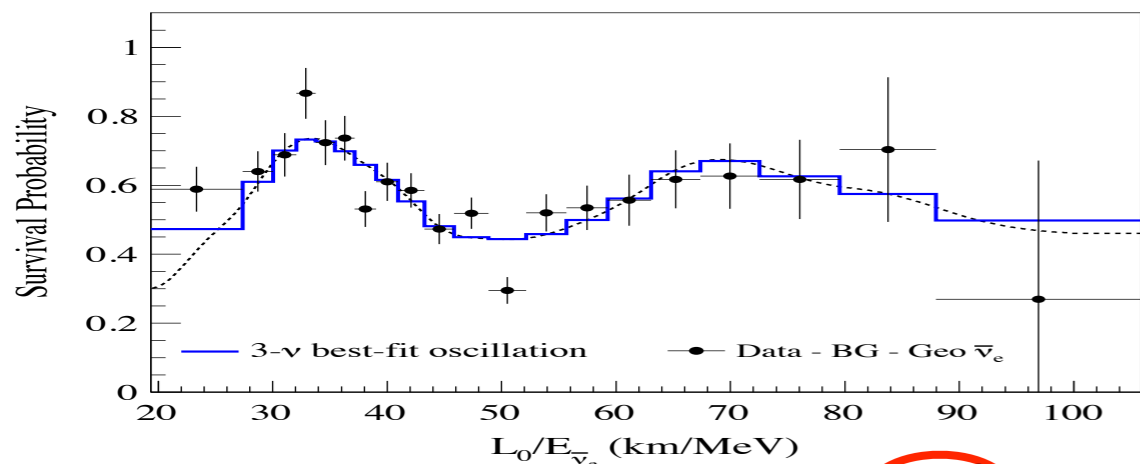
SNO CC/NC



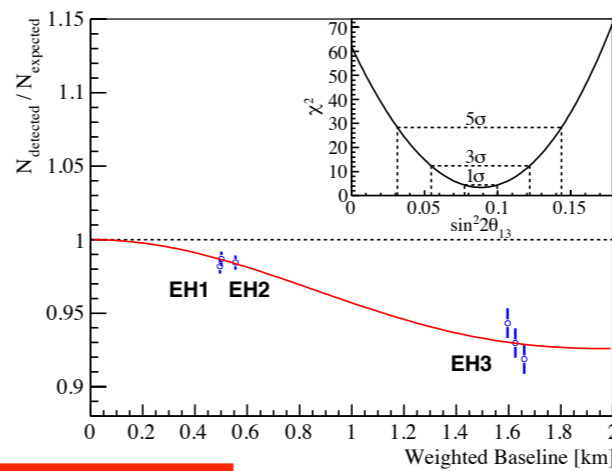
Borexino MSW



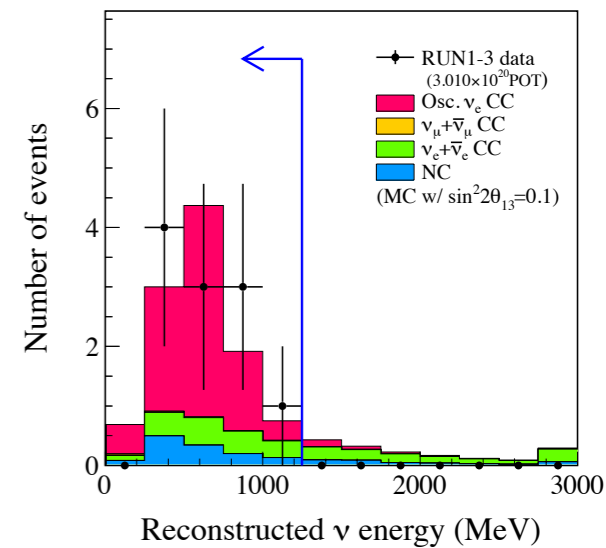
KamLAND 2 周期



原子炉短基線



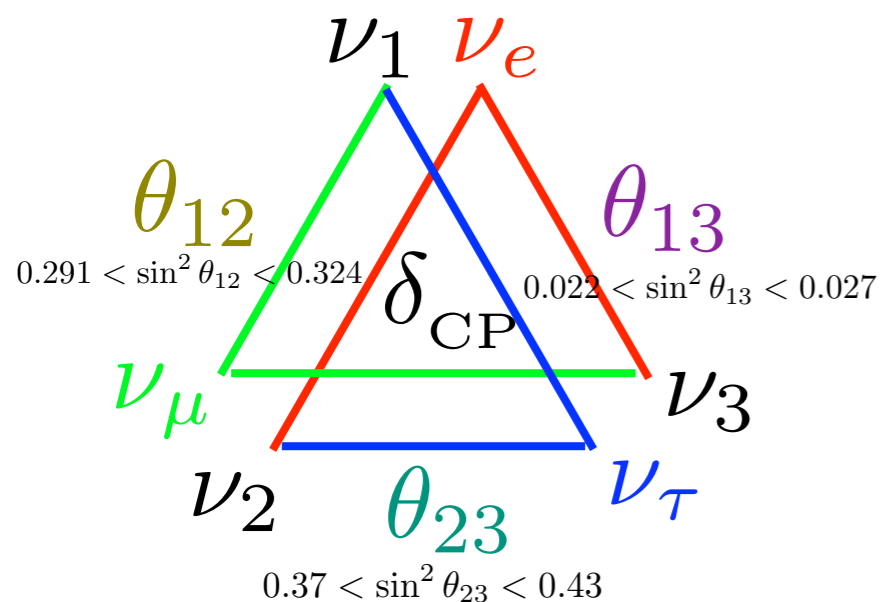
T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



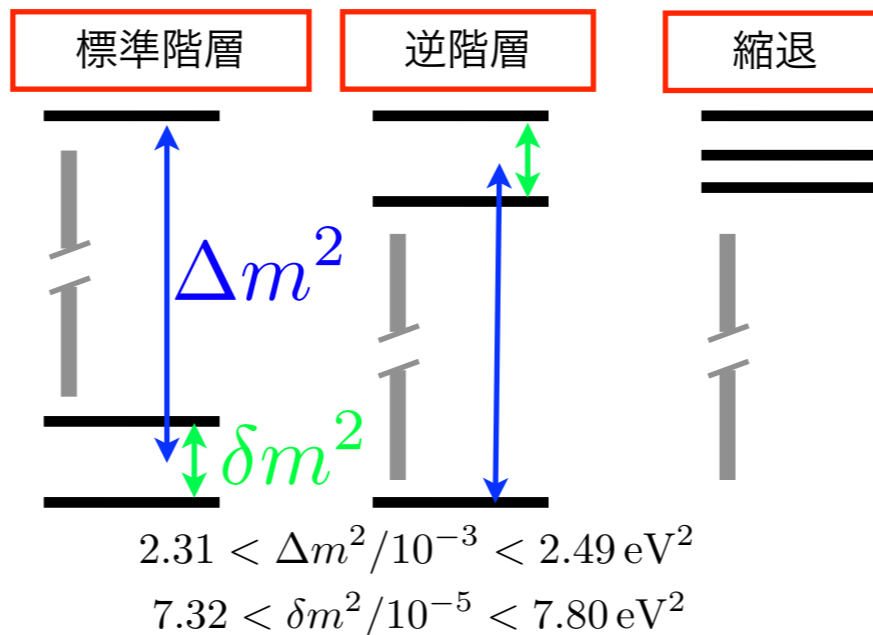
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta m^2 L}{4E}\right)$$

質量の2乗差

混合



質量階層構造



未解明の性質

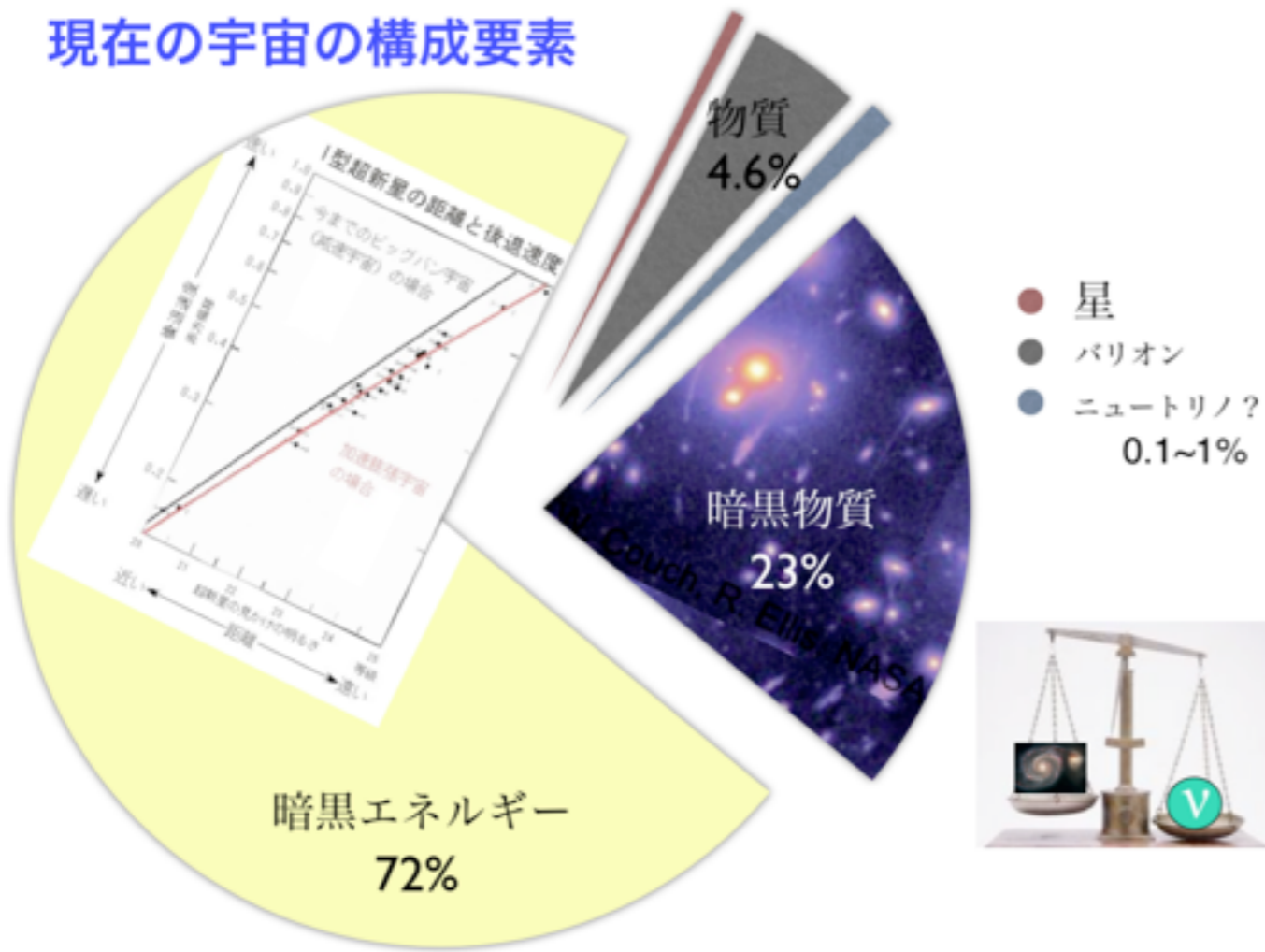
CP位相

質量 (絶対値) 階層構造

マヨラナ? ディラック?

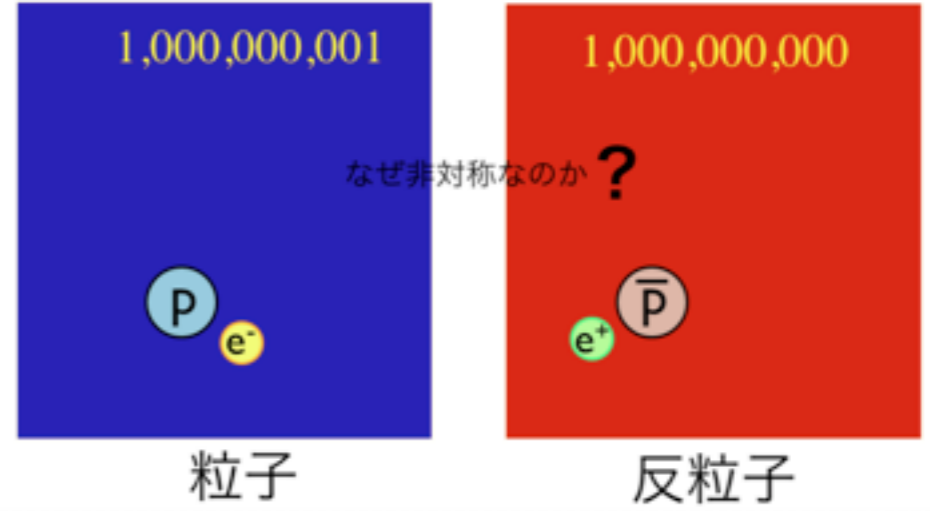
世代数

現在の宇宙の構成要素



宇宙物質優勢の謎

宇宙開闢

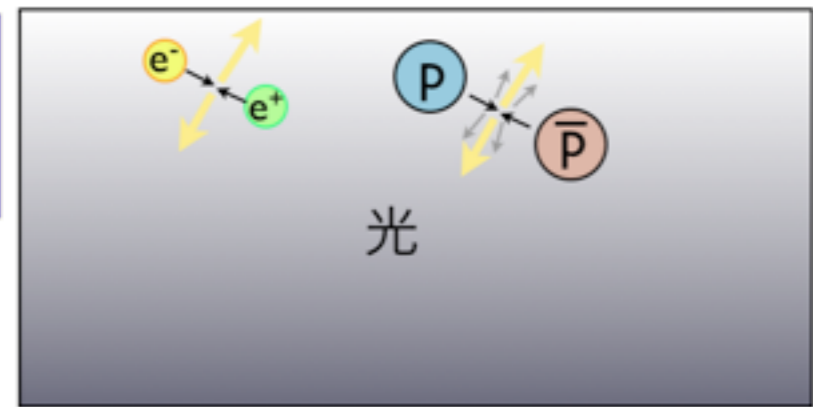


現在



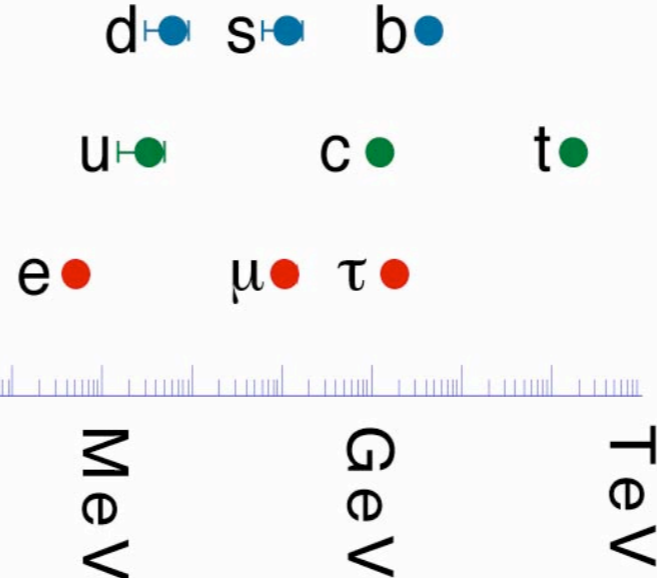
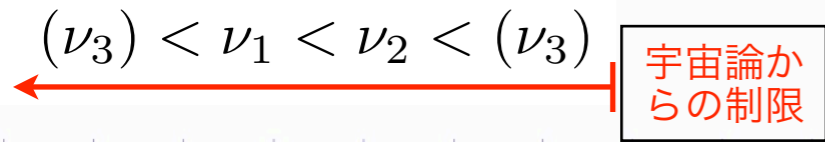
物質

なぜ我々物質は生き残れたのだろうか?

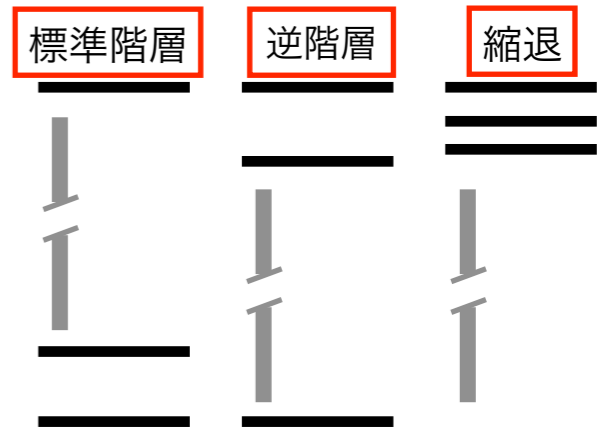


fermion masses

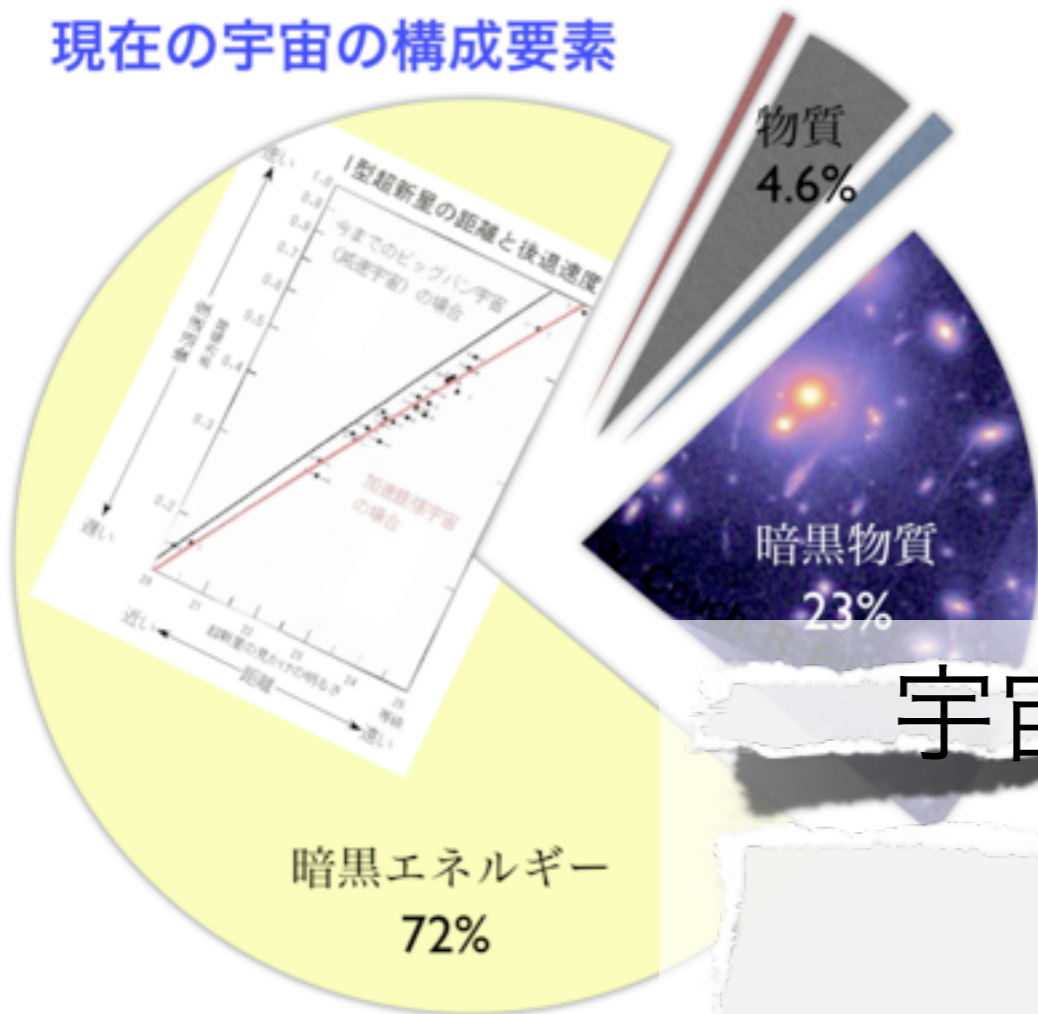
ニュートリノは突出して軽い



ニュートリノの質量階層構造 および有効質量は未解明

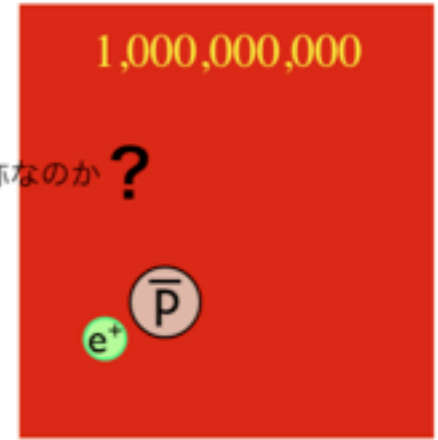
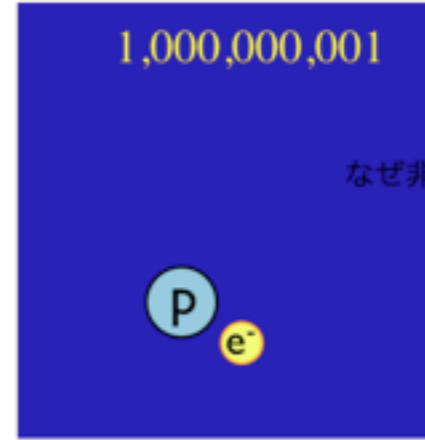


現在の宇宙の構成要素



宇宙物質優勢の謎

宇宙開闢



なぜ非対称なのか？

- 星
- バリオン
- ニュートリノ？ 0.1~1%

宇宙・素粒子の大きな謎

暗黒物質

暗黒エネルギー

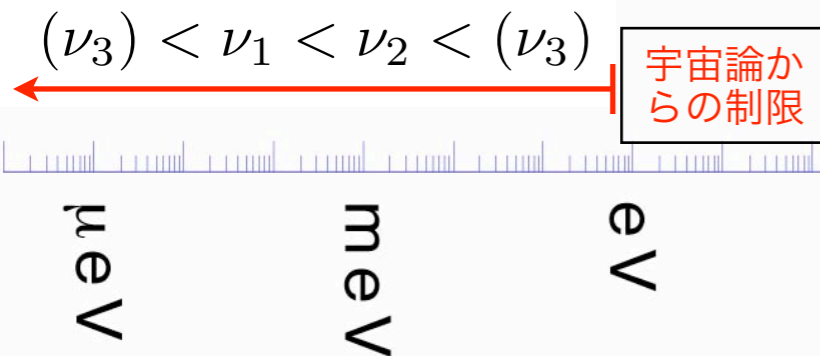
宇宙物質優勢

小さなニュートリノ質量

の質量階層構造

および有効質量は未解明

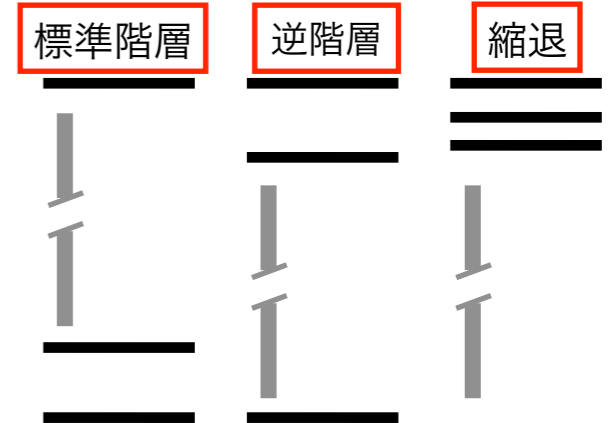
ニュートリノは突出して軽い



d ● s ● b ●

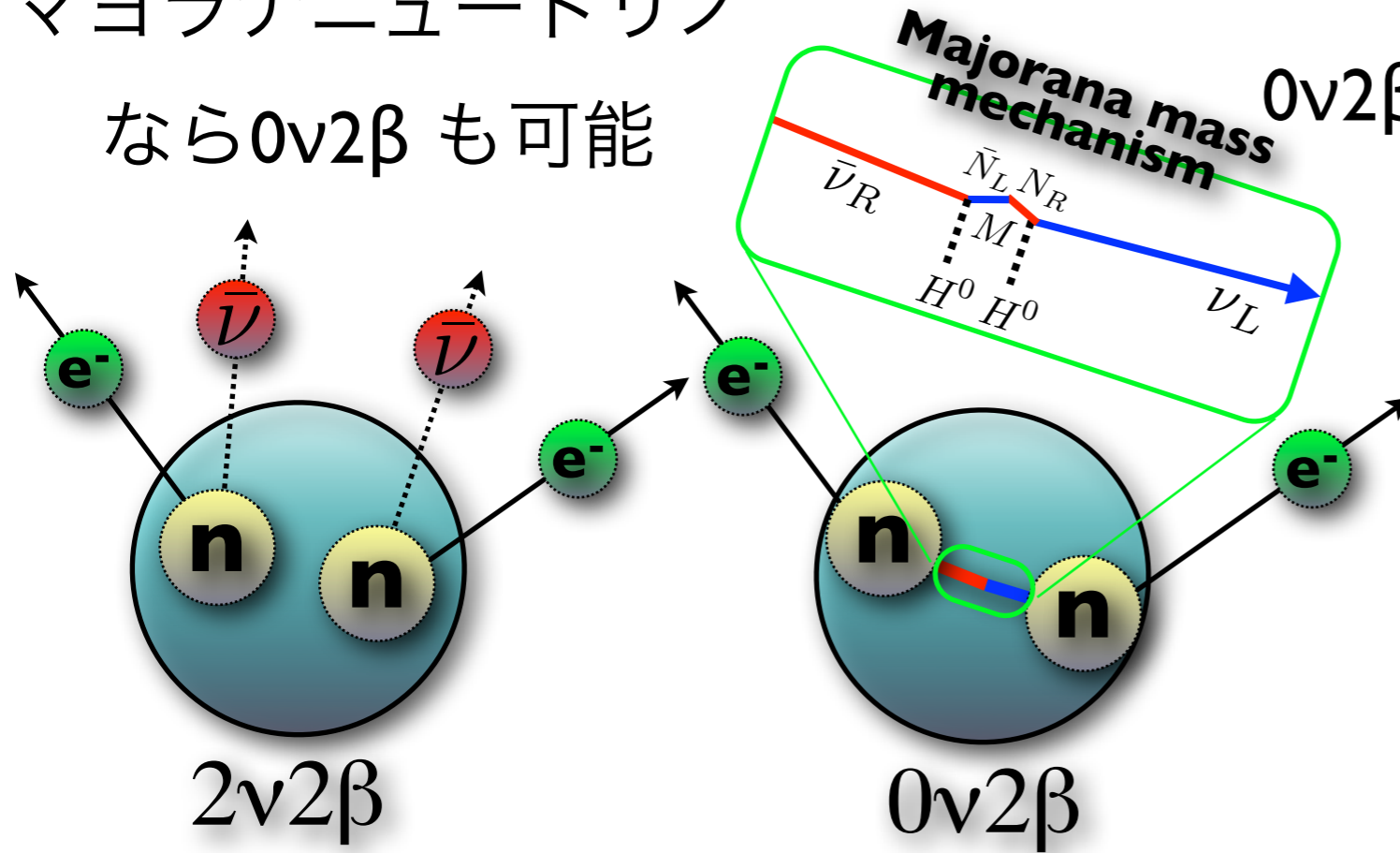
u ● c ● t ●

e ● μ ● τ ●



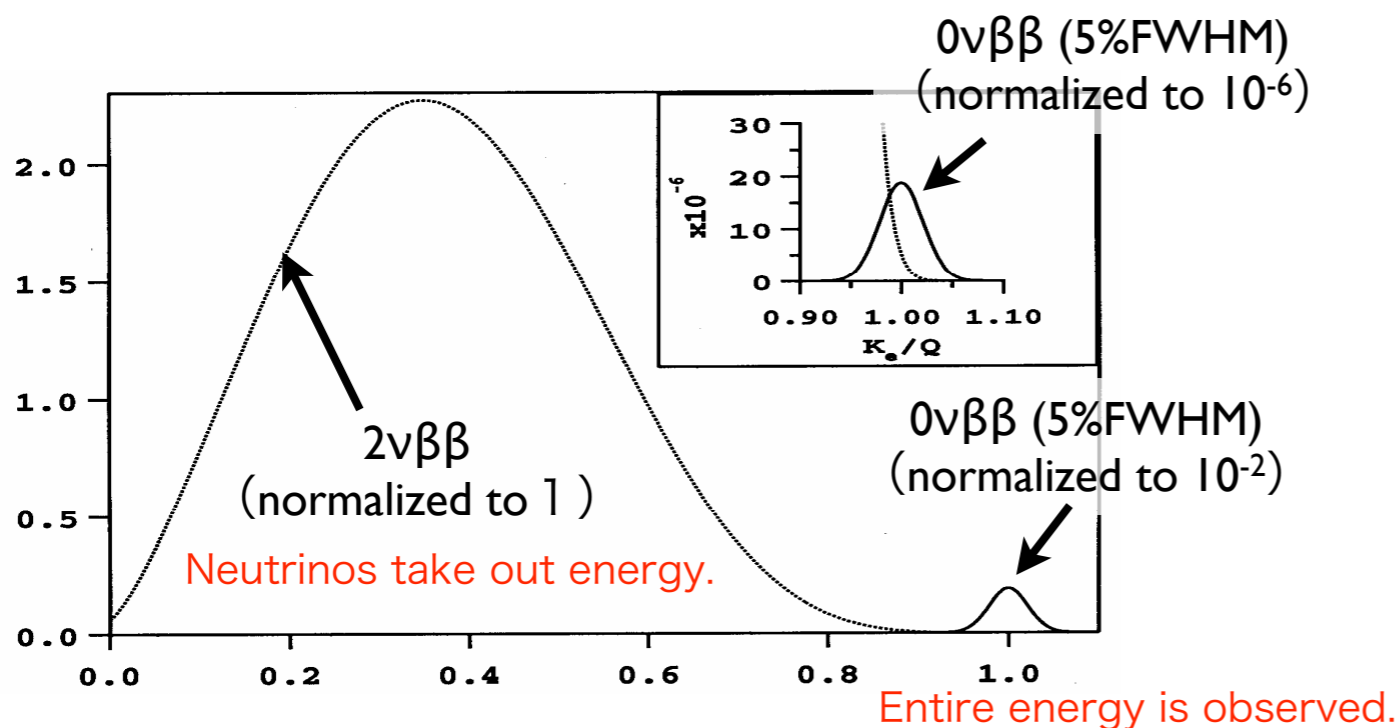
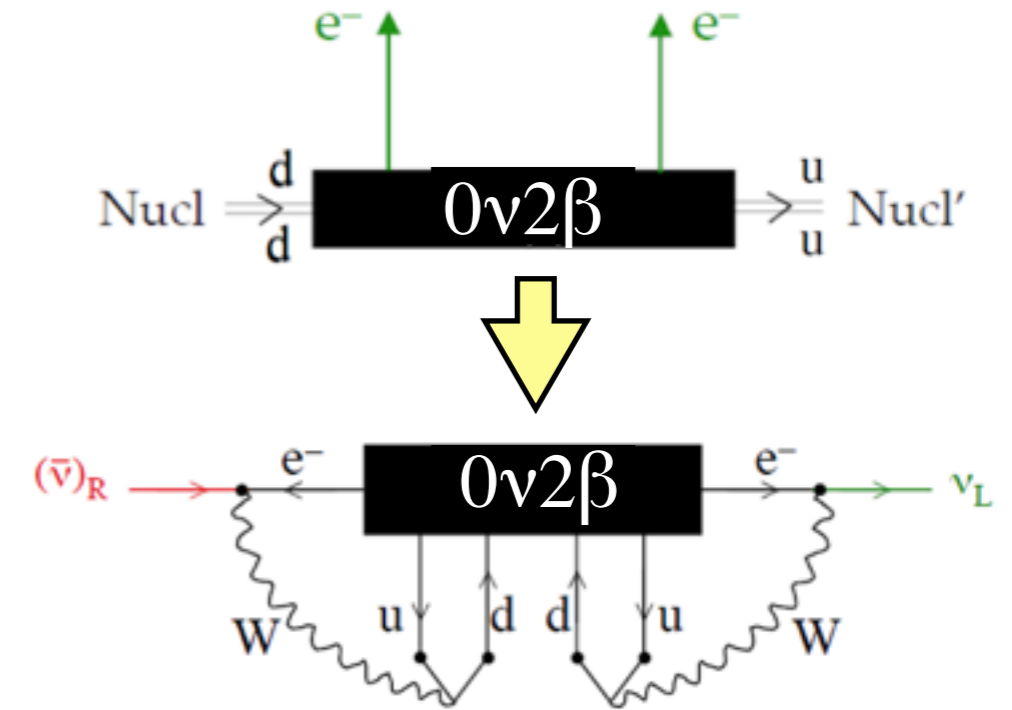
二重 β 崩壊

マヨラナニュートリノ
なら $0\nu 2\beta$ も可能



背景となる物理にかかわらず

$0\nu 2\beta$ はマヨラナニュートリノの証拠
(Schechter-Valle theorem)



$0\nu 2\beta$ 崩壊率は、マヨラナ有効質量の
2乗に比例するので、質量の絶対値に対
する情報が得られる。

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

$$\frac{1}{T_{1/2}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

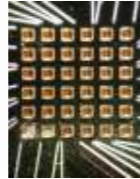
Single beta decay

KATRIN

^3H 18.7 KeV



MARE-II
 ^{187}Re 2.47 KeV



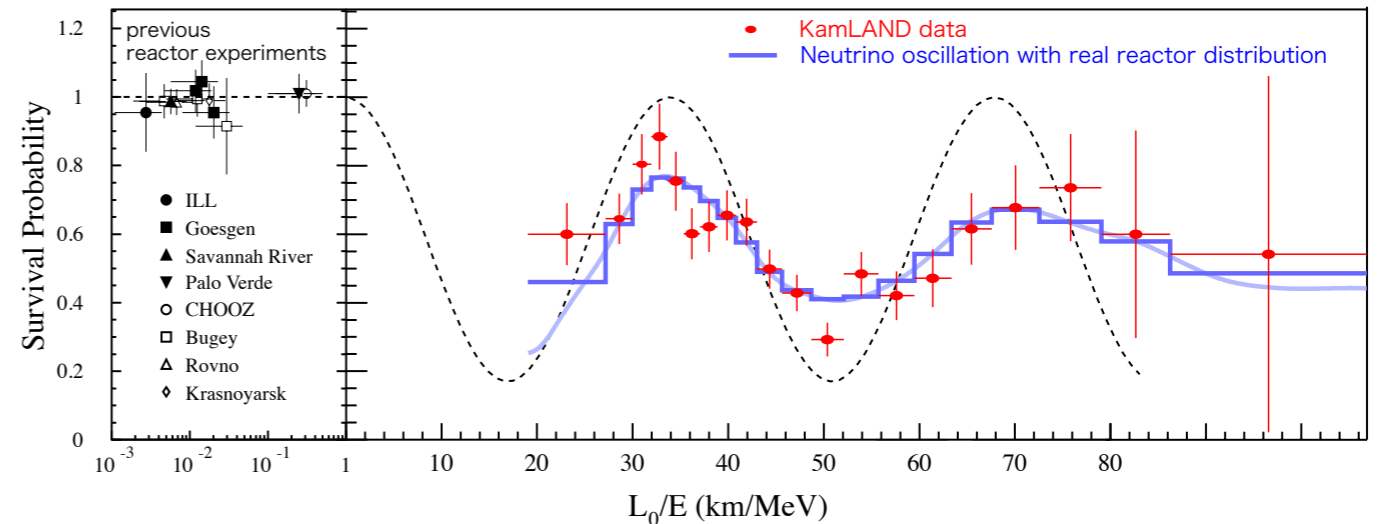
$$\langle m_\beta \rangle^2 = \sum m_i^2 |U_{ei}|^2$$

現在の結果
< 2 eV (95%)

予想感度
0.2 eV

Neutrino oscillation

solar, reactor, atmospheric, accelerator



$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

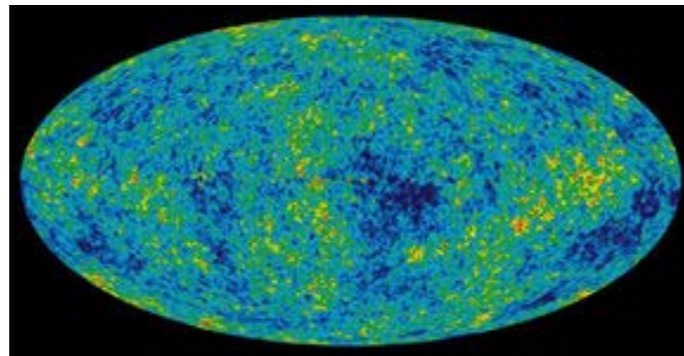
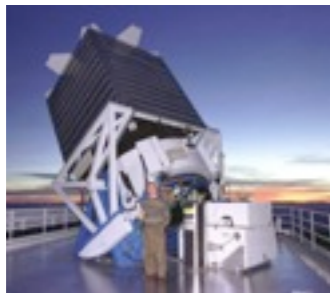
$$\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{atm}^2 = (2.4 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{sol}^2 = (7.5 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

m_ν

Cosmology

CMB satellite, galaxy survey, weak gravitational lensing,...



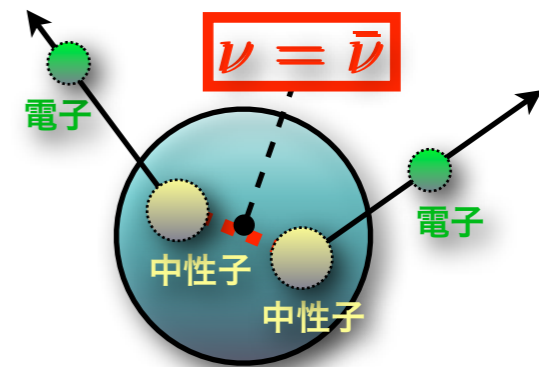
$$M = \sum m_i$$

< 0.2 ~ 0.7 eV

0.05 eV

Double beta decay

Ge, Te, Mo, Cd, Ca, Xe, Se, ...



$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

< 0.1 ~ 0.3 eV

0.01 ~ 0.03 eV

0ν2β探索で挑む宇宙・素粒子の大きな謎

- ニュートリノのマヨラナ性

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

未知の重いニュートリノ
を自然に導入できる。

ニュートリノが軽い謎を究明

- レプトン数の破れ
& (B-L) の破れ

スファレロン過程を生き残
る。

宇宙物質優勢の謎を究明

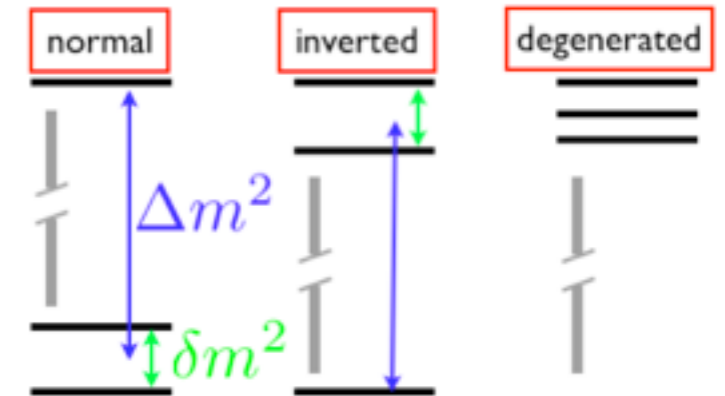
- ニュートリノ質量絶対値

マヨラナ質量機構を仮定

ニュートリノ質量構造
を究明するのに最重要

背景となる物理(RPV SUSY, V+Aなど)を
特定するには、**角分布やエネルギー分
配の測定、多核種での測定が重要**

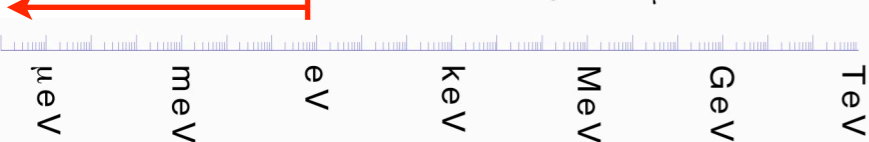
mass structure



particle mass

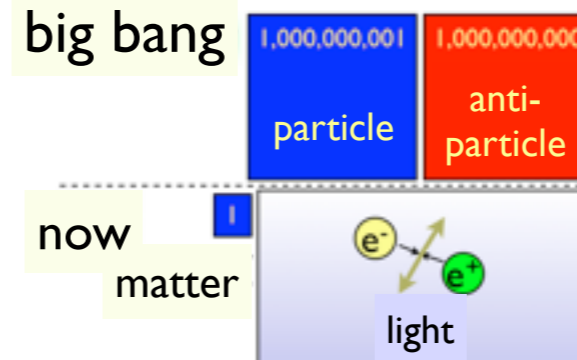
neutrinos are extraordinary light

$$(\nu_3) < \nu_1 < \nu_2 < (\nu_3)$$



なぜニュートリノ
は軽い？
(シーソー機構)
大統一理論？

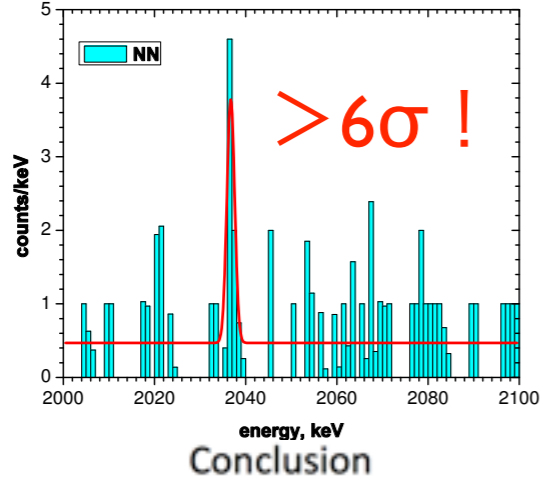
big bang



なぜ反物質が無く物質が
生き残った？
(レプトジェネシス理論)

二重ベータ崩壊研究のマイルストーン

KKクレイム



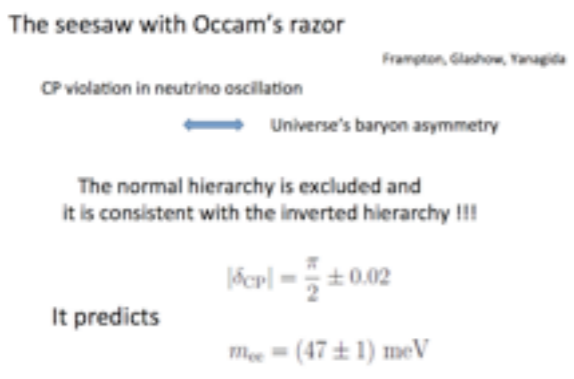
データ量 71 kg・年

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

$m_{\beta\beta} = 320 \pm 30$ meV 理論の誤差は無視

バックグラウンドが多く検証が必要

柳田予測

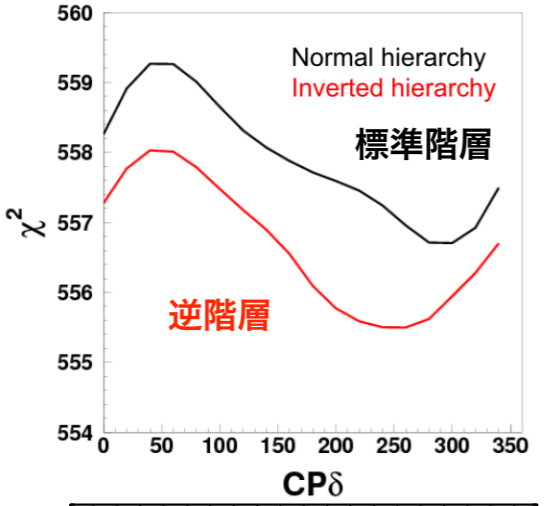


パラメータを最小限にした理論的予測

$m_{\beta\beta} = 47 \pm 1$ meV

neutrino2012国際会議にて

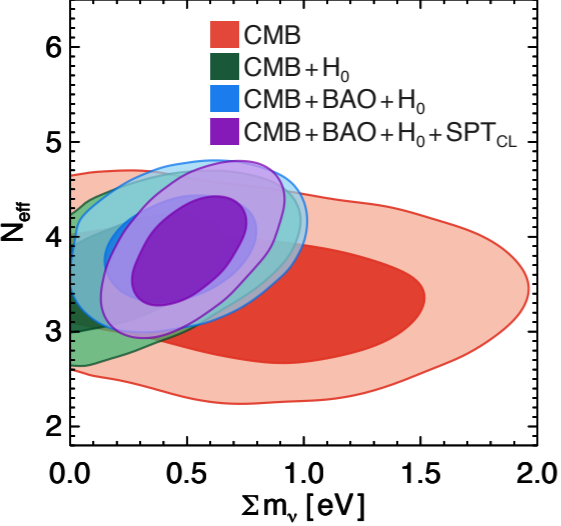
ニュートリノ振動 SK, MINOS



SKの大気ニュートリノ観測は、逆階層(20~60meV)または縮退(60meV以上)を少し好む。

$\chi_{\min}(\text{標準階層}) - \chi_{\min}(\text{逆階層}) = 1.2$

宇宙観測

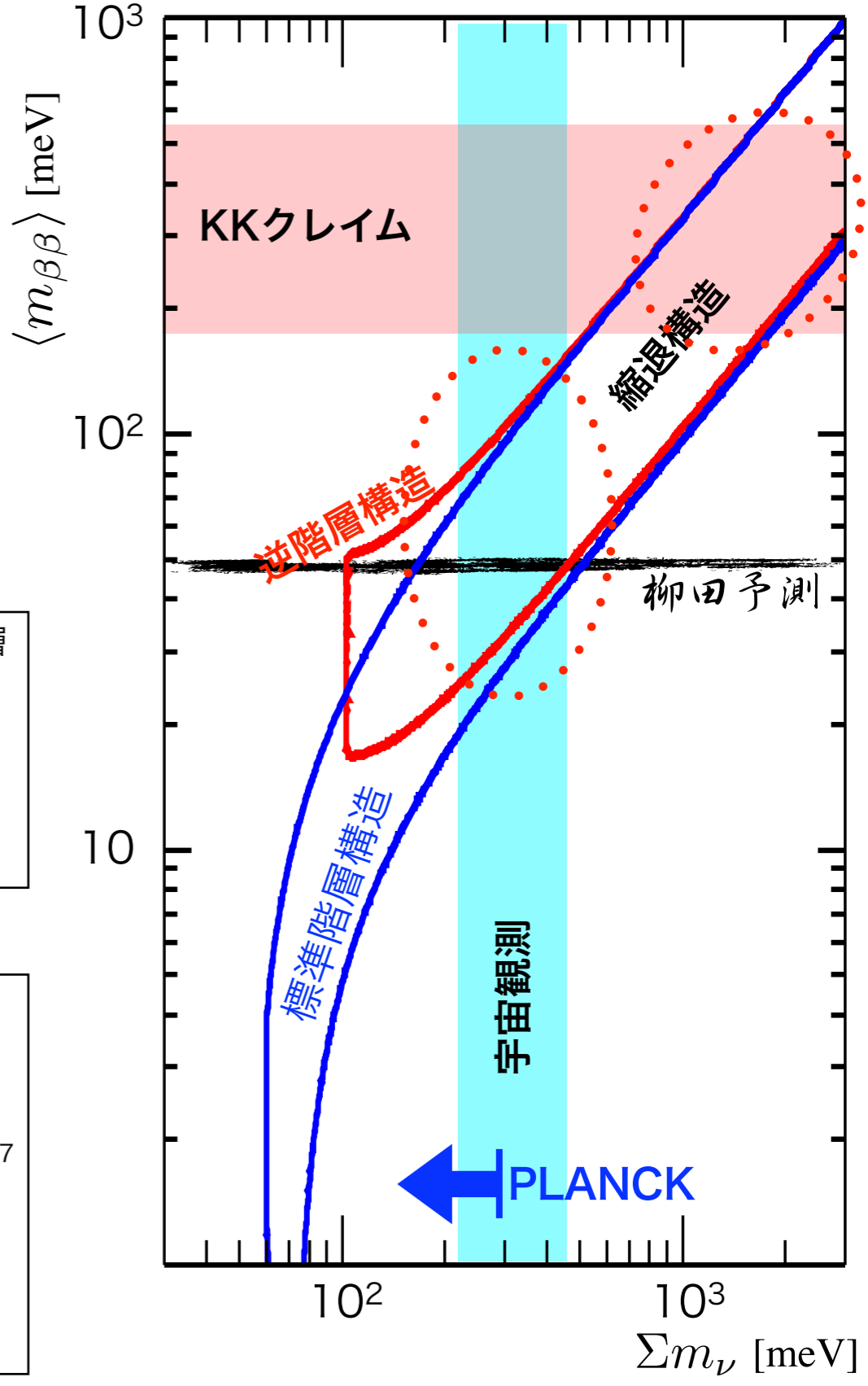


$\Sigma m_{\nu} = 0.32 \pm 0.11$ eV (3世代に固定)

arXiv:1212.6267

$m_{\beta\beta} = 26 \sim 145$ meV (PLANCK以前)

ニュートリノ振動研究から 標準階層・逆階層・縮退構造の3つの候補が残っている



- 最近の宇宙観測では有限で探索可能なニュートリノ質量を示唆するものがある。
- ニュートリノ振動でも逆階層構造を好むものがある。



いつ見つかってもし思議でない。

- 最先端の感度を維持し続け、まず発見をめざすことが重要。
 - 現在は確実な技術でスケーラビリティを確保

- 最近の宇宙観測では有限で探索可能なニュートリノ質量を示唆するものがある。
- ニュートリノ振動でも逆階層構造を好むものがある。



いつ見つかってもし思議でない。

マヨラナ性の証明
有効質量（質量階層構造）の測定
「軽いニュートリノ質量の謎」の究明
「宇宙物質優勢の謎」の究明

- 最先端の感度を維持し続け、まず発見をめざすことが重要。
 - 現在は確実な技術でスケールビリティを確保

- 最近の宇宙観測では有限で探索可能なニュートリノ質量を示唆するものがある。
- ニュートリノ振動でも逆階層構造を好むものがある。



いつ見つかってもし思議でない。

マヨラナ性の証明
有効質量（質量階層構造）の測定
「軽いニュートリノ質量の謎」の究明
「宇宙物質優勢の謎」の究明

- 最先端の感度を維持し続け、まず発見をめざすことが重要。
 - 現在は確実な技術でスケールビリティを確保
- $0\nu 2\beta$ 発見が無くても価値の高いプロジェクトとするためには、
 - **逆階層構造をカバーする感度が重要。**
 - ・ 宇宙観測、ニュートリノ振動と矛盾したら → ニュートリノはディラック
 - ・ ニュートリノはマヨラナと信じれば → 消去法で標準階層構造
 - **多目的にし、堅い成果も用意する。**
 - 地球ν観測、第4世代ν探索、太陽ν観測、暗黒物質探索など

- 最近の宇宙観測では有限で探索可能なニュートリノ質量を示唆するものがある。
- ニュートリノ振動でも逆階層構造を好むものがある。



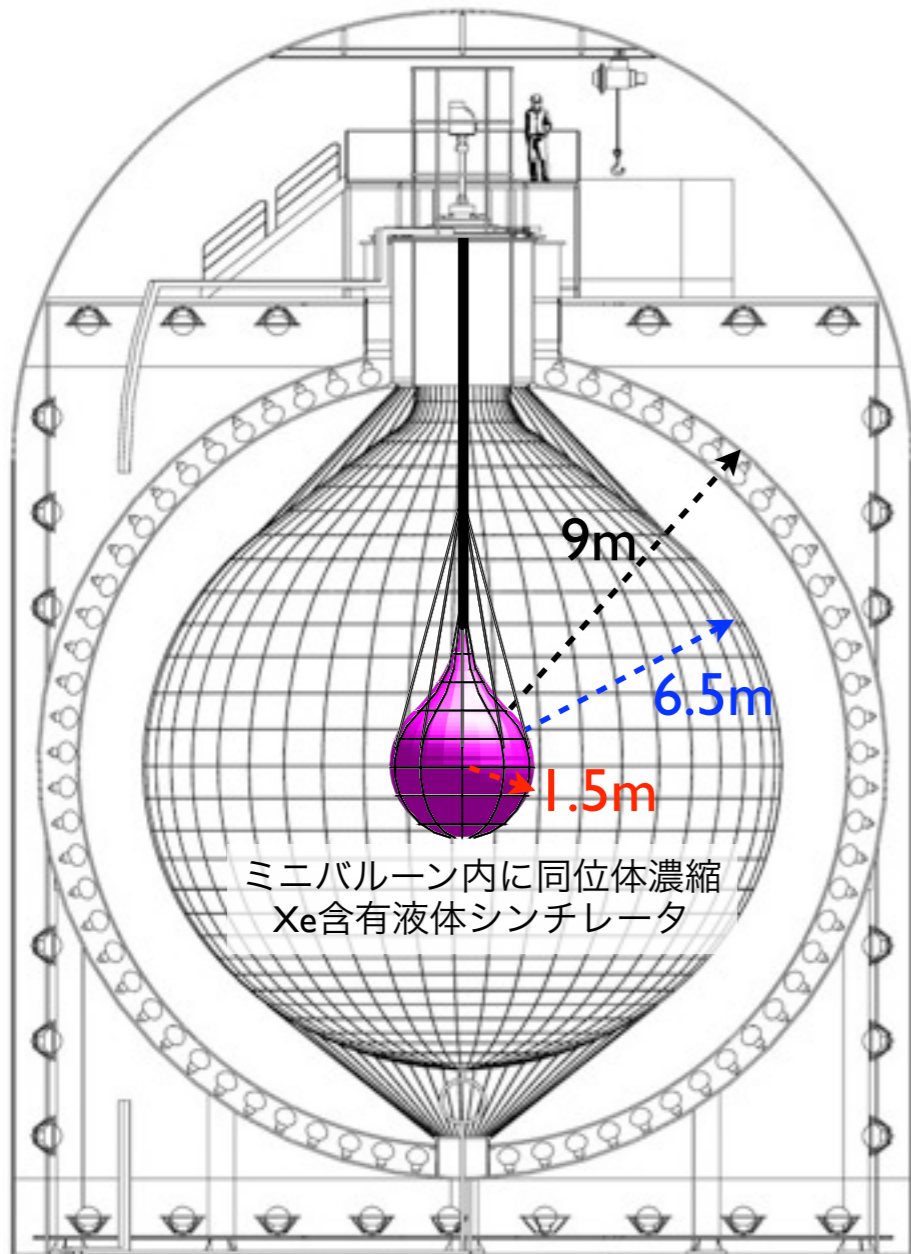
いつ見つかったとしても不思議でない。

マヨラナ性の証明
有効質量（質量階層構造）の測定
「軽いニュートリノ質量の謎」の究明
「宇宙物質優勢の謎」の究明

- 最先端の感度を維持し続け、まず発見をめざすことが重要。
 - 現在は確実な技術で**スケーラビリティ**を確保
- $0\nu 2\beta$ 発見が無くても価値の高いプロジェクトとするためには、
 - **逆階層構造をカバーする感度が重要。**
 - ・ 宇宙観測、ニュートリノ振動と矛盾したら → ニュートリノはディラック
 - ・ ニュートリノはマヨラナと信じれば → 消去法で標準階層構造
 - **多目的にし、堅い成果も用意する。**
 - 地球 ν 観測、第4世代 ν 探索、太陽 ν 観測、暗黒物質探索など
- $0\nu 2\beta$ 発見が発見されたなら、
 - 高精度測定
 - 他核種での測定 → 核行列要素の不定性低減、背景物理の選別 **技術の多様性**
 - トラックの測定 → 背景物理の選別 **技術の多様性**
 - 宇宙観測や β 崩壊との統合解析 → 背景物理の選別、マヨラナCP測定も視野に

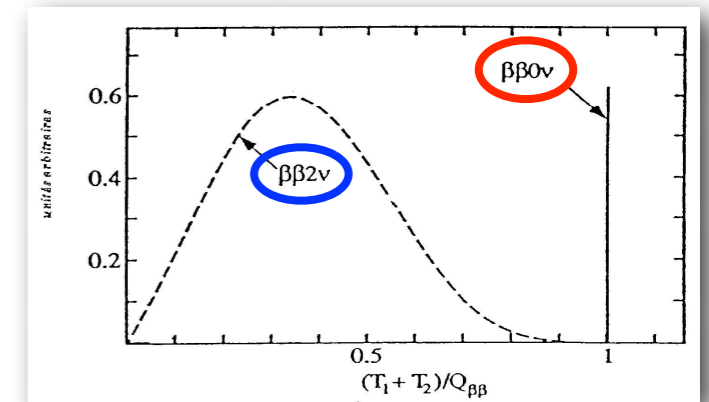
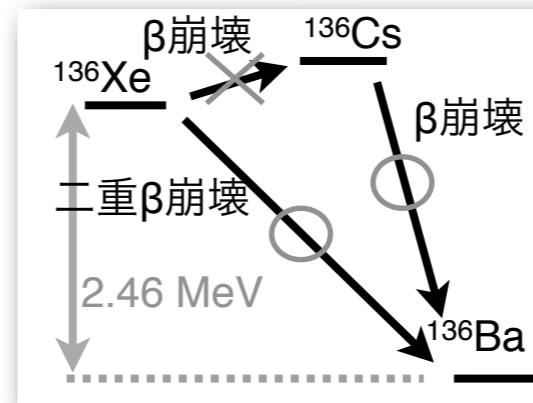
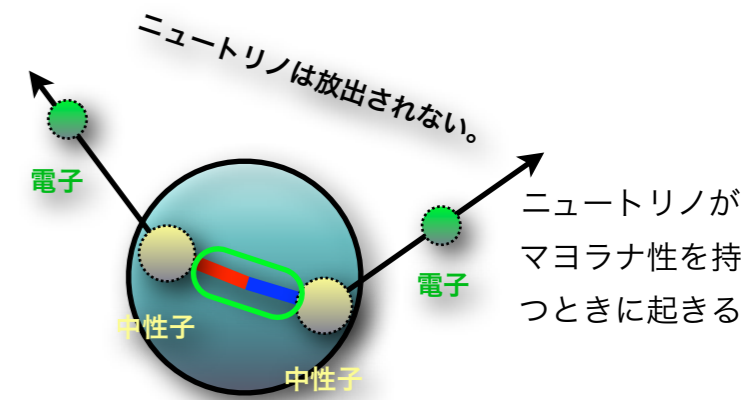
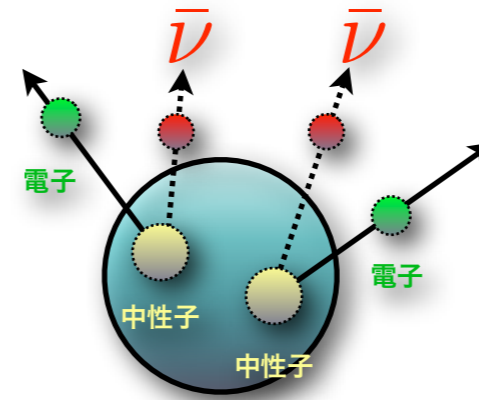
KamLAND-Zen

Zero Neutrino
double beta decay search



~320kg 90% 同位体濃縮 ^{136}Xe を導入
将来800kg~1000kgに拡張

ニュートリノを伴う二重 β 崩壊と伴わない二重 β 崩壊



KamLANDを使うメリット

- 稼働中の装置
 - 相対的に低コストで迅速に開始可能
- 巨大かつ清浄 (1200m³, U: 3.5x10⁻¹⁸ g/g, Th: 5.2x10⁻¹⁷)
 - 外部の放射線が問題にならない (Xe とミニバルーンには高清浄が必要)
- (必要時は低コストで) Xe含有液体シンチレータの純化、ミニバルーンの換装が可能
 - 拡大も容易 (数トンのXeにも対応可能)
- β, γを漏らさず観測
 - バックグラウンド識別が相対的に容易
- 反ニュートリノ観測を並行できる
 - 原子炉停止時の良質の地球ニュートリノデータ

Prototype Mini-balloon and rehearsal of deployment



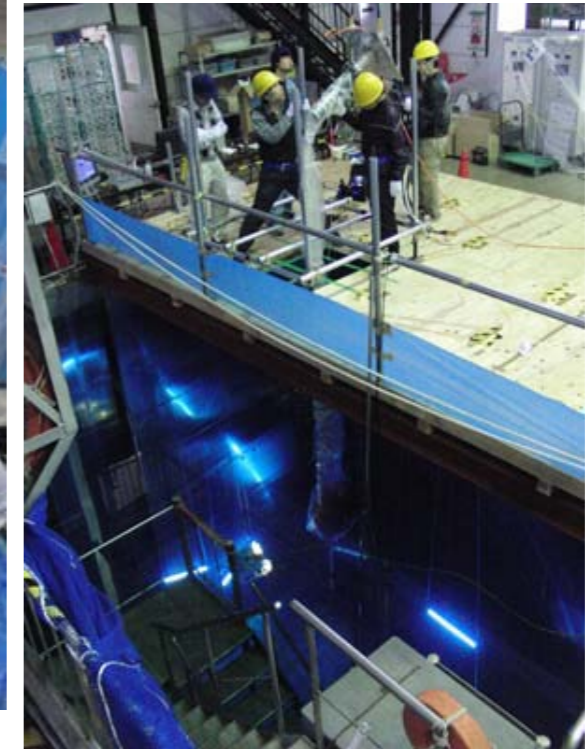
80 μm thick polyethylene



25 μm thick Nylon 6



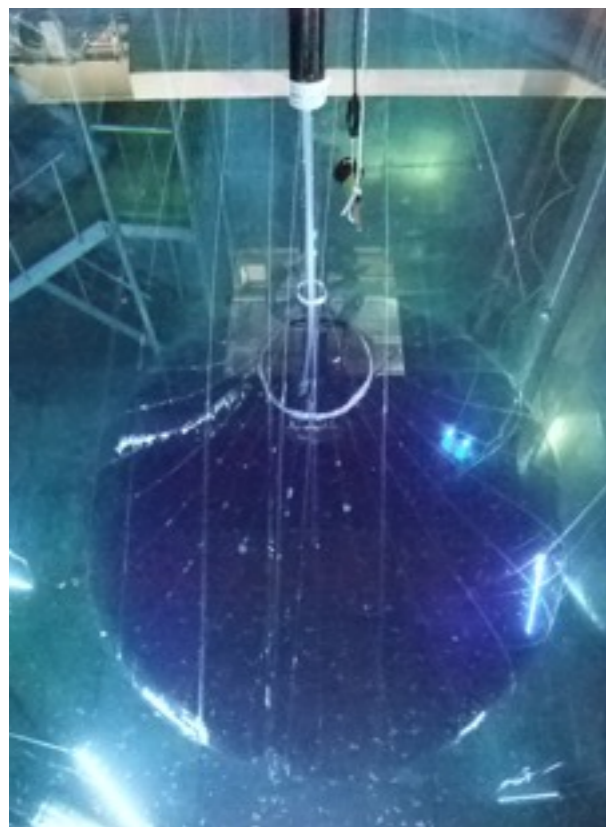
10 m length when folded



rehearsal at 8 m depth pool



suspension structure



established deployment, inflation,
liquid replacement

Prototype Mini-balloon and rehearsal of deployment



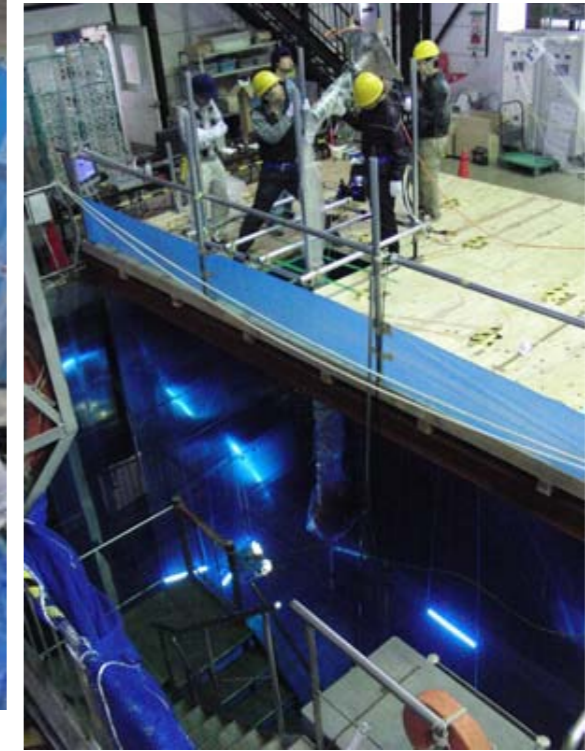
80 μm thick polyethylene



25 μm thick Nylon 6



10 m length when folded



rehearsal at 8 m depth pool



suspension structure

Xenon handling system



Xenon mixer and density control system



Xenon extraction and storage system



established deployment, inflation, liquid replacement

Prototype Mini-balloon and rehearsal of deployment



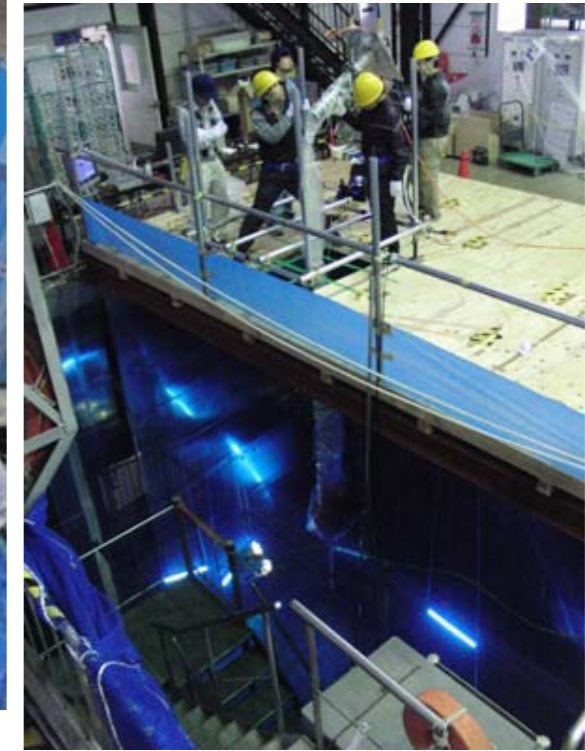
80 μm thick polyethylene



25 μm thick Nylon 6



10 m length when folded



rehearsal at 8 m depth pool



suspension structure

Xenon handling system



Xenon mixer and density control system



Others



Clean room in the dome



New cavity and LS storage



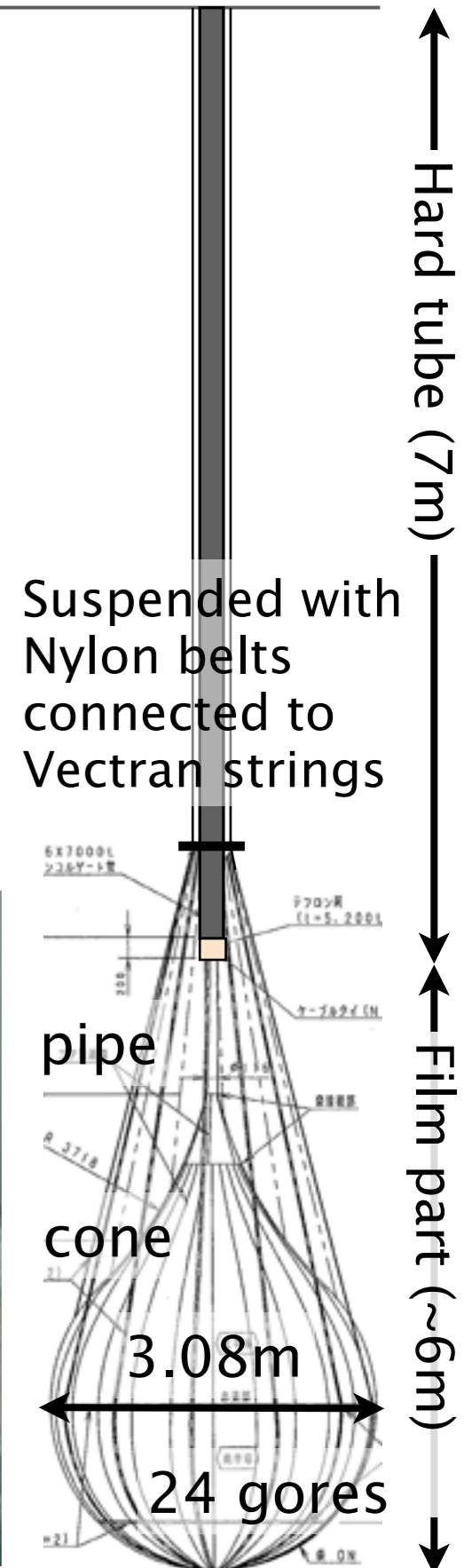
established deployment, inflation, liquid replacement

Production of real Mini-balloon

- 🌐 fabrication in Class 1 super-clean-room
 (class 1 = less than one 0.5 micron particle in 1 cube feet)

minimum material → **25 μm Nylon 6**
 transparency 99.4% @400nm
 strength 19.4 N/cm
 Xe permeability < 220 g/year
 low radioactive impurity
 → specially made no filler film

U	:	150	→	2×10^{-12} g/g
Th	:	59	→	3×10^{-12} g/g
^{40}K	:	140	→	2×10^{-12} g/g



- 🌐 All tools and parts washed here



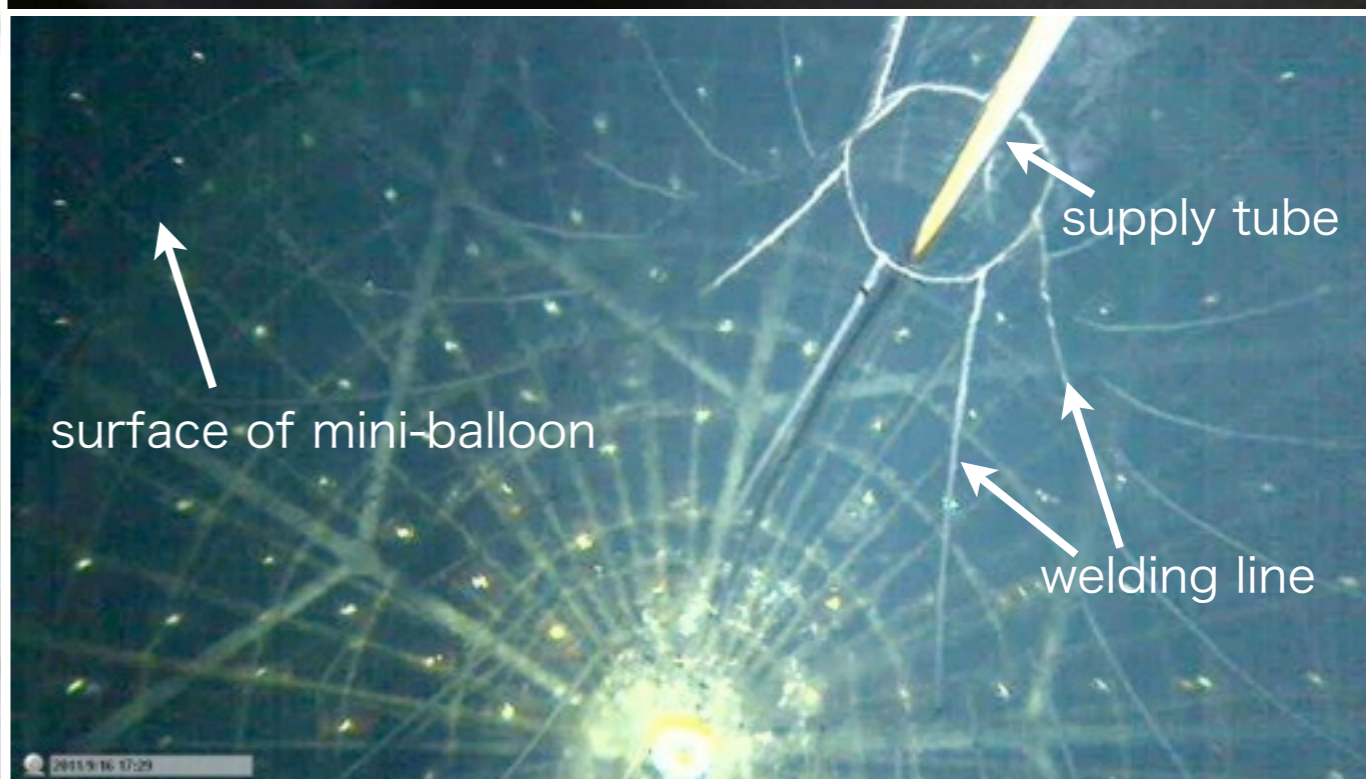
Deployment of balloon and tube



balloon going through light shield

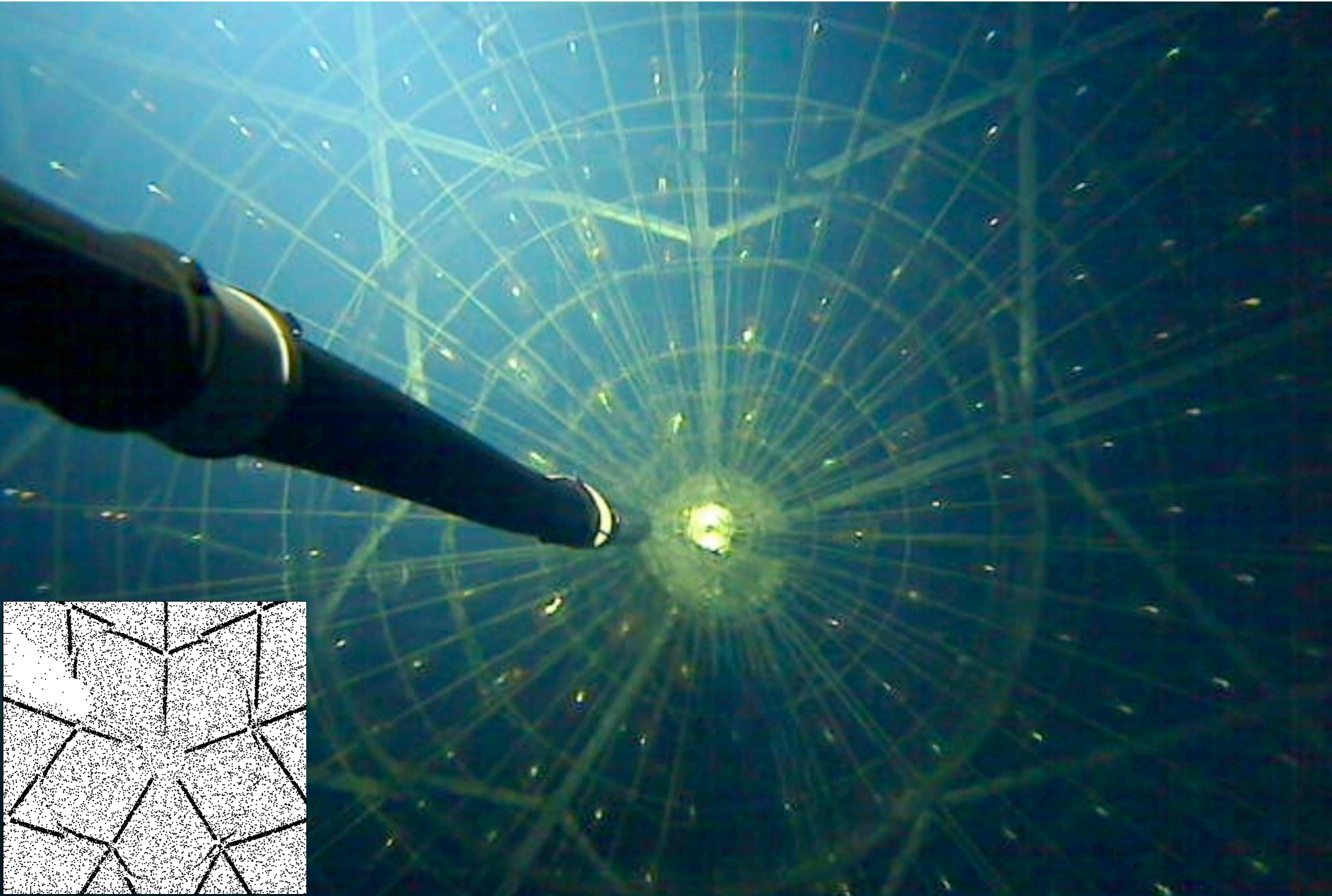


Good job



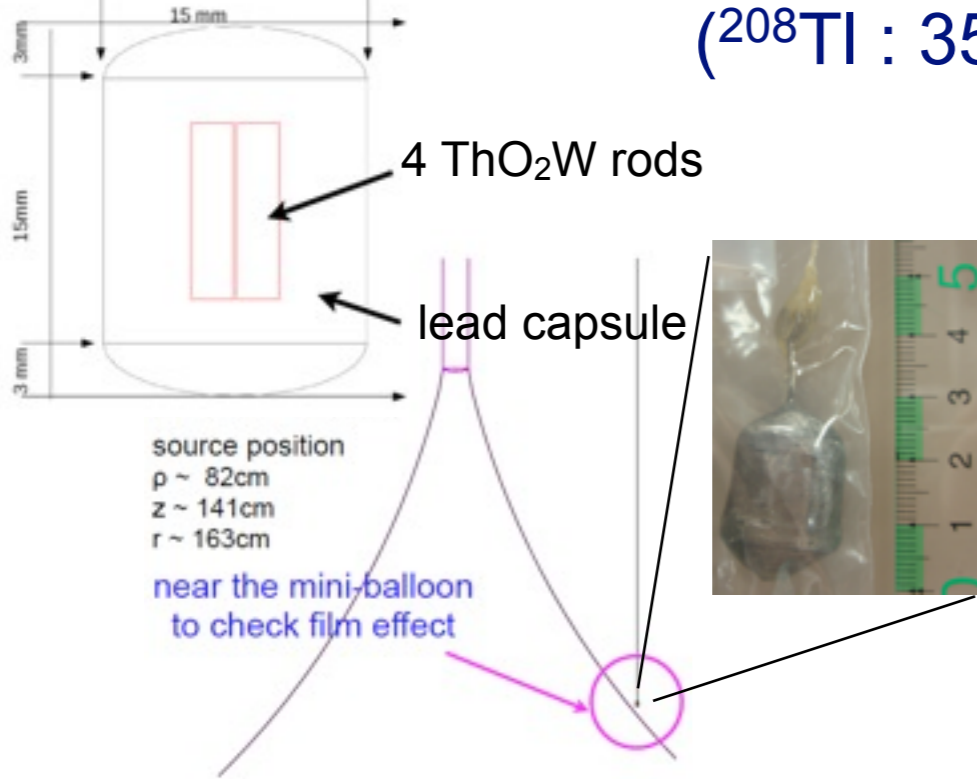
**inflate with dummy LS and then replace with Xe-loaded LS
density adjustment and tube extraction follow**

DAQ started on September 24, 2011
(only 2 years from the project start)

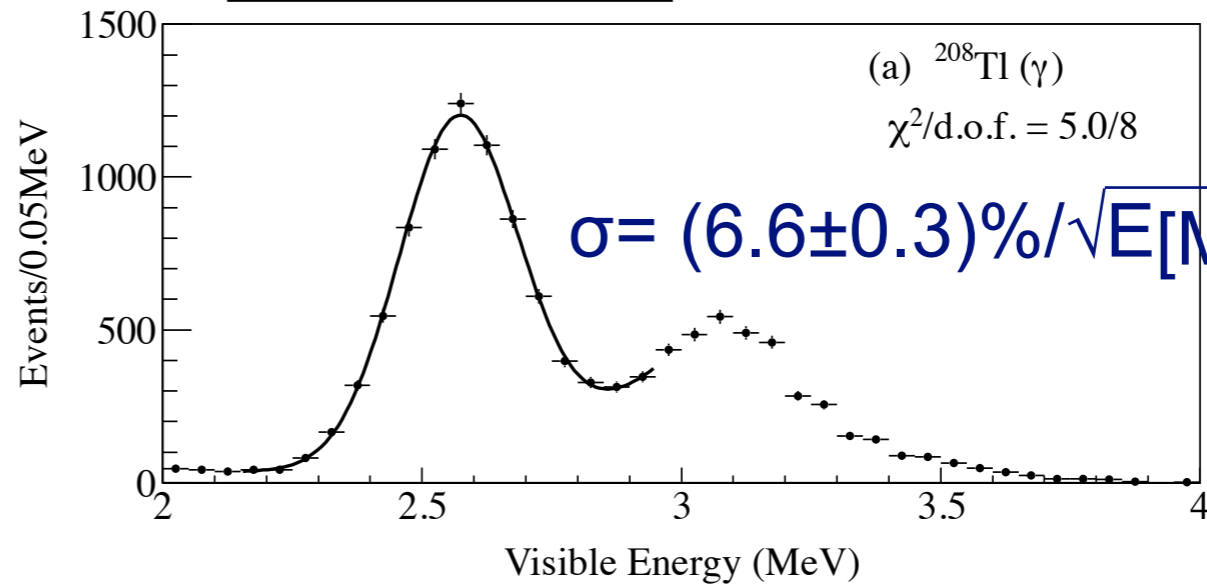
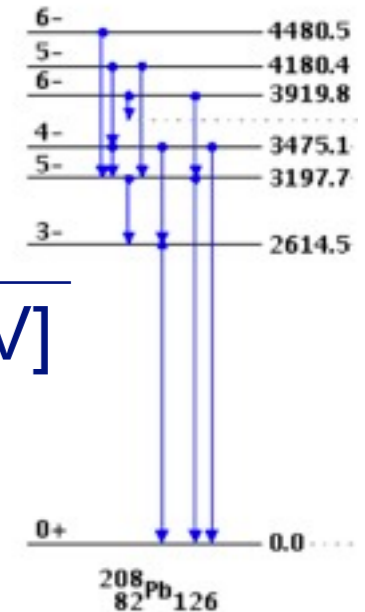
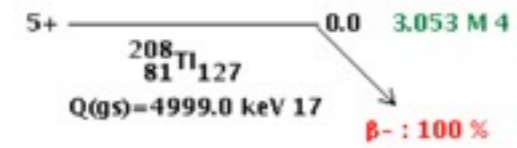


Energy Calibration

ThO₂W electrode w/ ²³²Th 2~4 wt%
(²⁰⁸Tl : 35.9%)

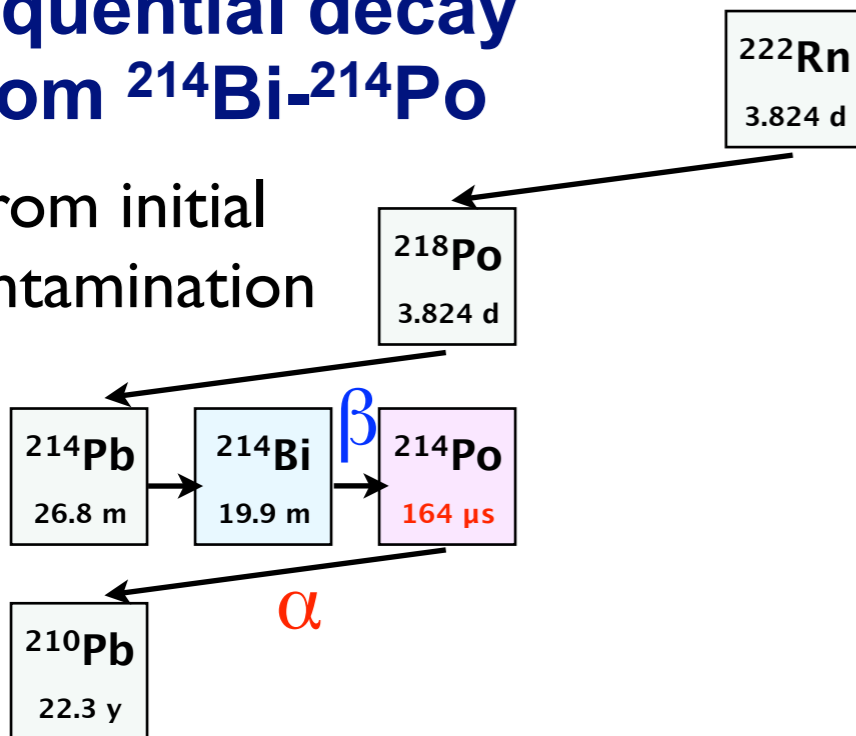


²⁰⁸Tl decay
(2.6 MeV γ)

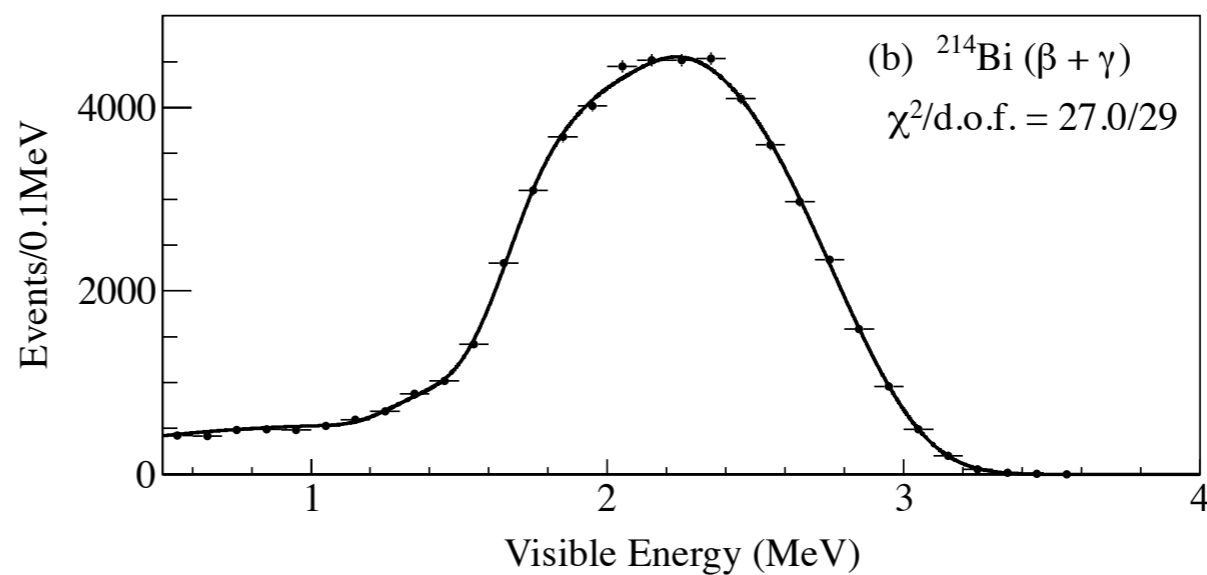
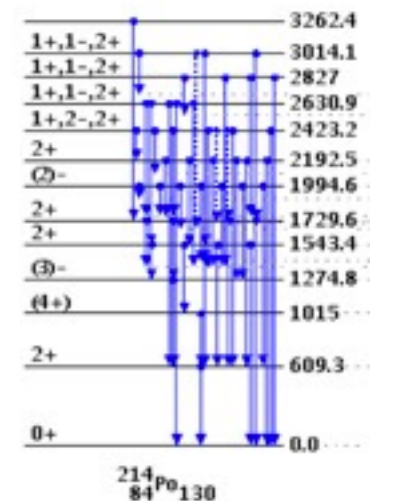


Sequential decay
from ²¹⁴Bi-²¹⁴Po

from initial
contamination



²¹⁴Bi decay
($\beta + \gamma$)



Measurement of the $2\nu 2\beta$ half life

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

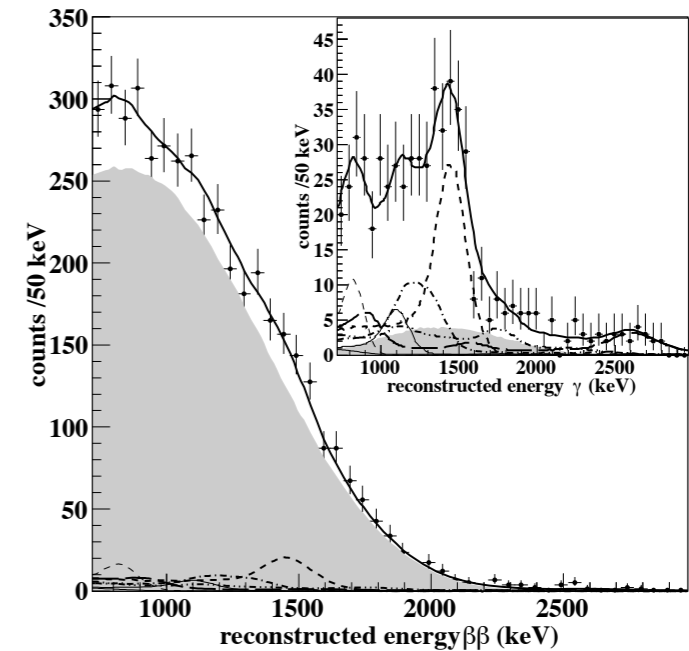
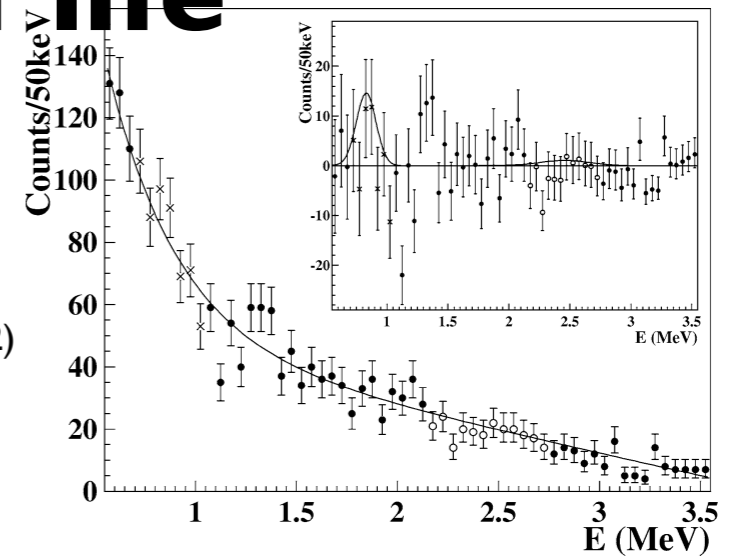
$$T_{1/2}^{2\nu} > 1.0 \times 10^{22} \text{ years at 90\% CL} \quad \text{Phys.Lett.B546,23(2002)}$$

約 5 倍の矛盾

EXO-200 (2011) 液体キセノン TPC + シンチレータ

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.11 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.21(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

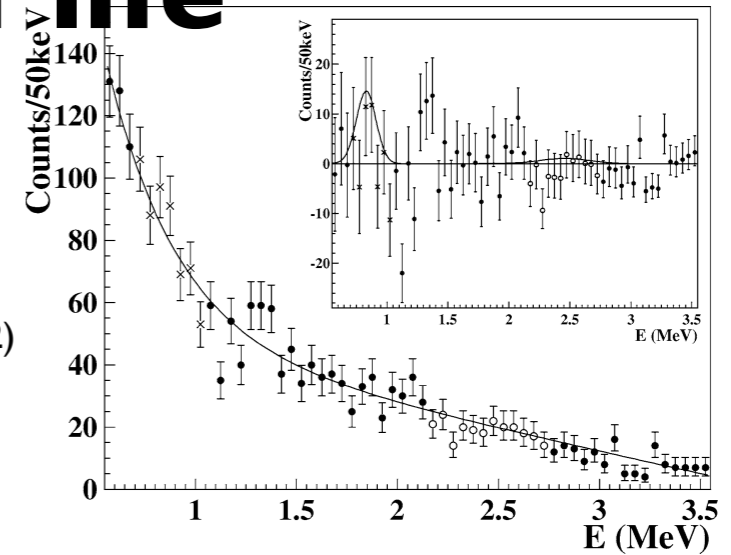
Phys.Rev.Lett.107,212501(2011)



Measurement of the $2\nu 2\beta$ half life

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

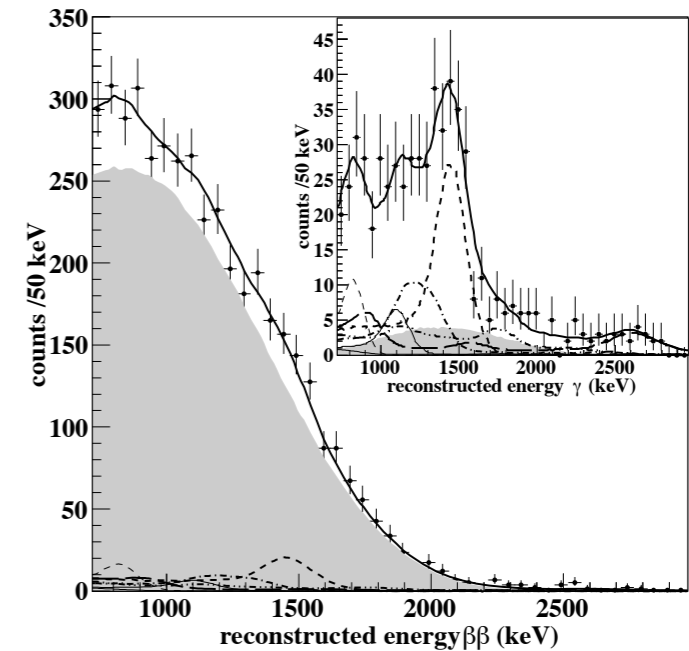
$$T^{2\nu}_{1/2} > 1.0 \times 10^{22} \text{ years at 90\% CL} \quad \text{Phys.Lett.B546,23(2002)}$$



EXO-200 (2011) 液体キセノン TPC + シンチレータ

$$T^{2\nu}_{1/2} = 2.11 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.21(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

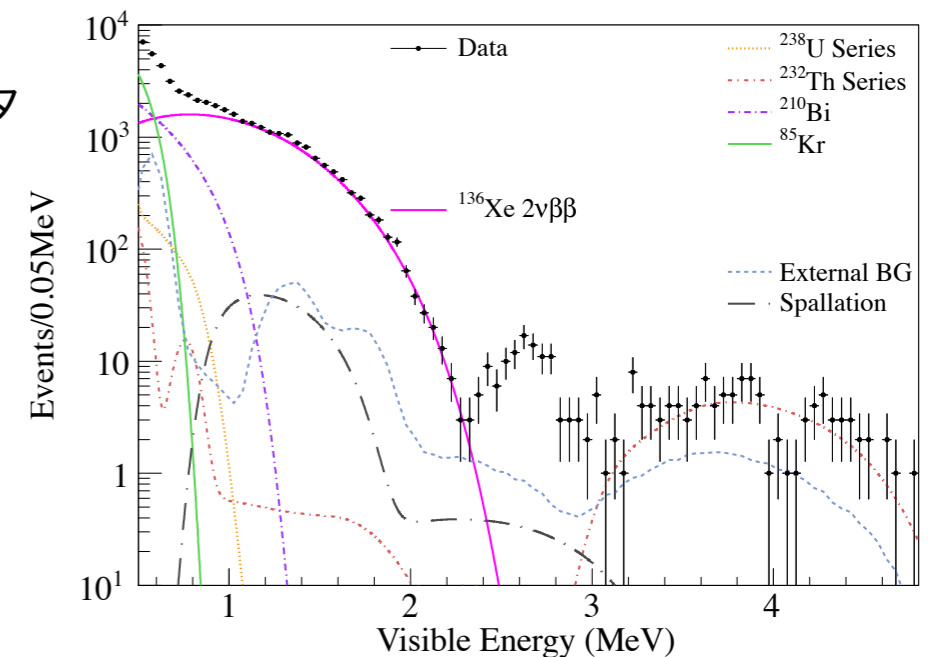
Phys.Rev.Lett.107,212501(2011)



KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

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

Phys.Rev.C85,045504(2012)



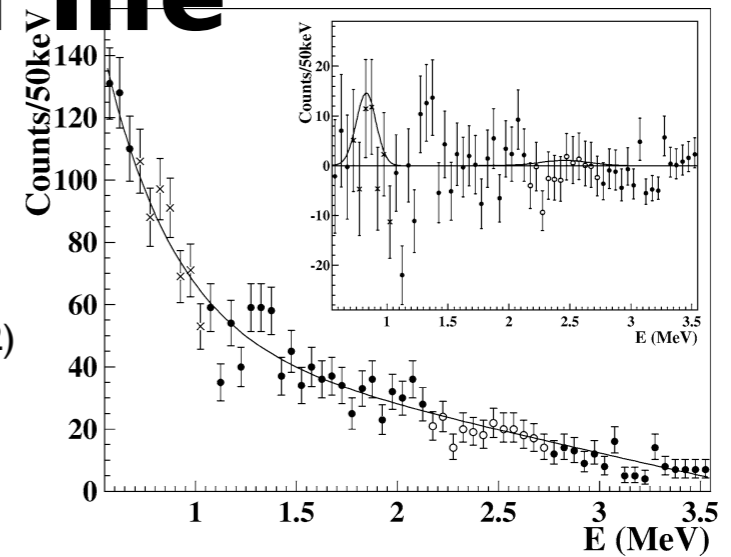
約 5 倍の矛盾

KamLAND-Zen は EXO-200 を支持

Measurement of the $2\nu 2\beta$ half life

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

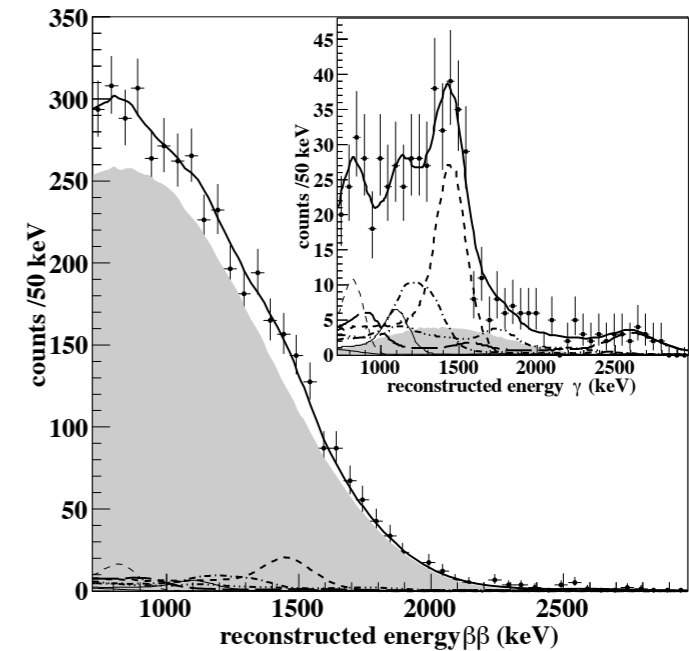
$$T_{1/2}^{2\nu} > 1.0 \times 10^{22} \text{ years at 90\% CL} \quad \text{Phys.Lett.B546,23(2002)}$$



EXO-200 (2011) 液体キセノン TPC + シンチレータ

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.11 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.21(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

Phys.Rev.Lett.107,212501(2011)



update $T_{1/2}^{2\nu} = 2.23 \pm 0.017(\text{stat}) \pm 0.22(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$

Phys.Rev.Lett.109,032505(2012)

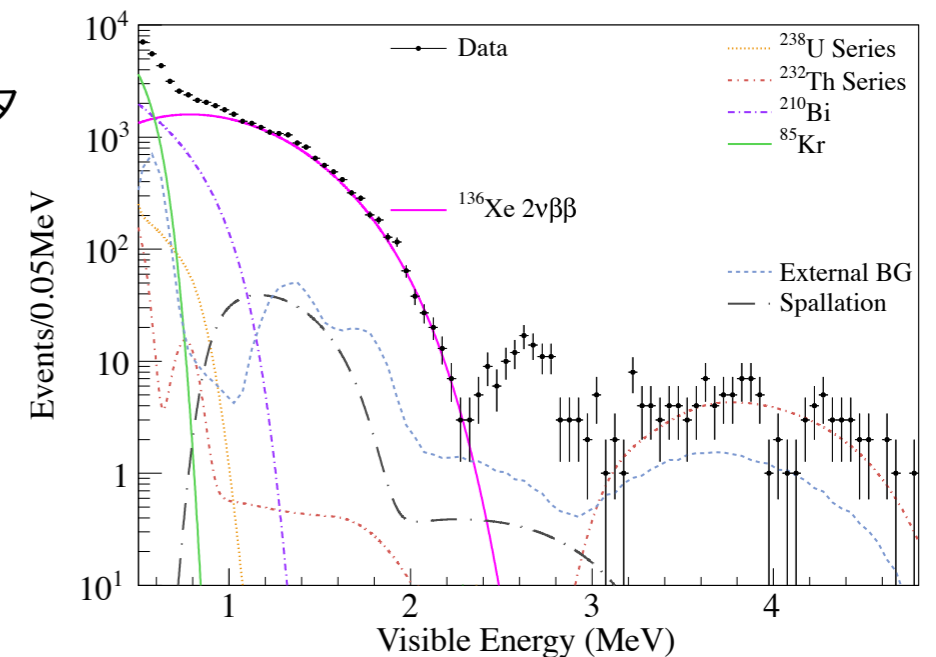
KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

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

Phys.Rev.C85,045504(2012)

update $T_{1/2}^{2\nu} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$

Phys.Rev.C86,021601(R)(2012)

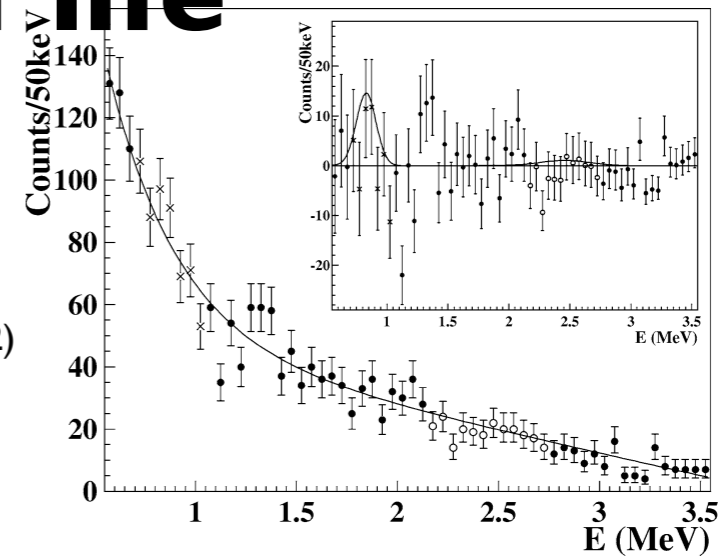


約 5 倍の矛盾

Measurement of the $2\nu 2\beta$ half life

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

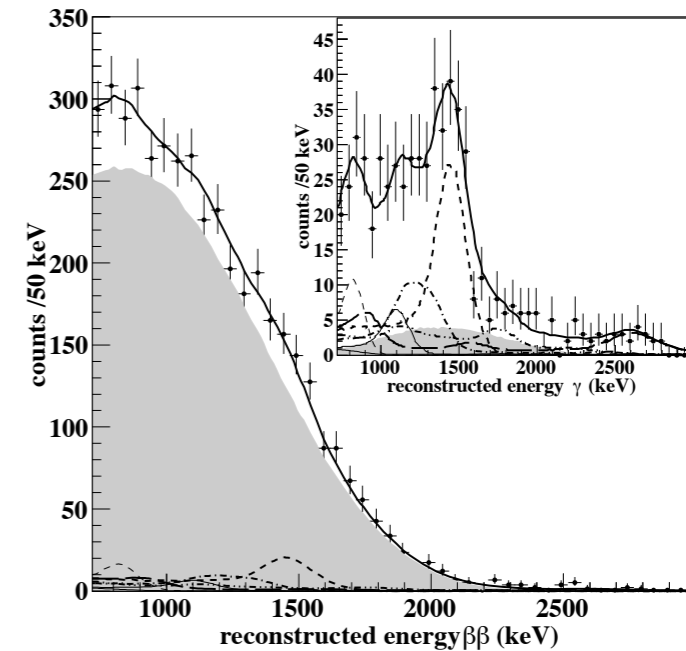
$$T_{1/2}^{2\nu} > 1.0 \times 10^{22} \text{ years at 90\% CL} \quad \text{Phys.Lett.B546,23(2002)}$$



EXO-200 (2011) 液体キセノン TPC + シンチレータ

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.11 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.21(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

Phys.Rev.Lett.107,212501(2011)



update $T_{1/2}^{2\nu} = 2.23 \pm 0.017(\text{stat}) \pm 0.22(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$

Phys.Rev.Lett.109,032505(2012)

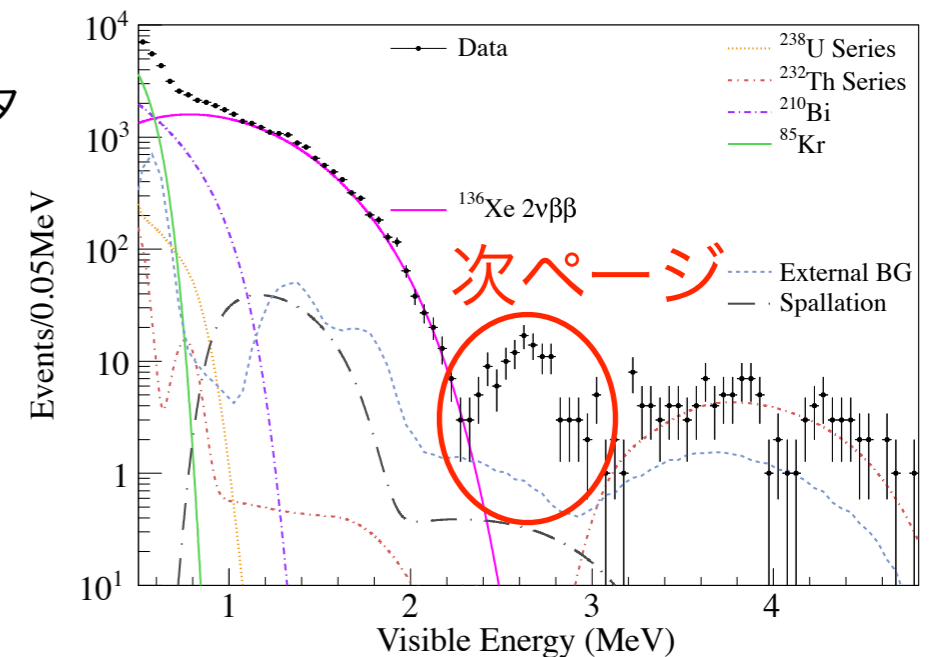
KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

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

Phys.Rev.C85,045504(2012)

update $T_{1/2}^{2\nu} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$

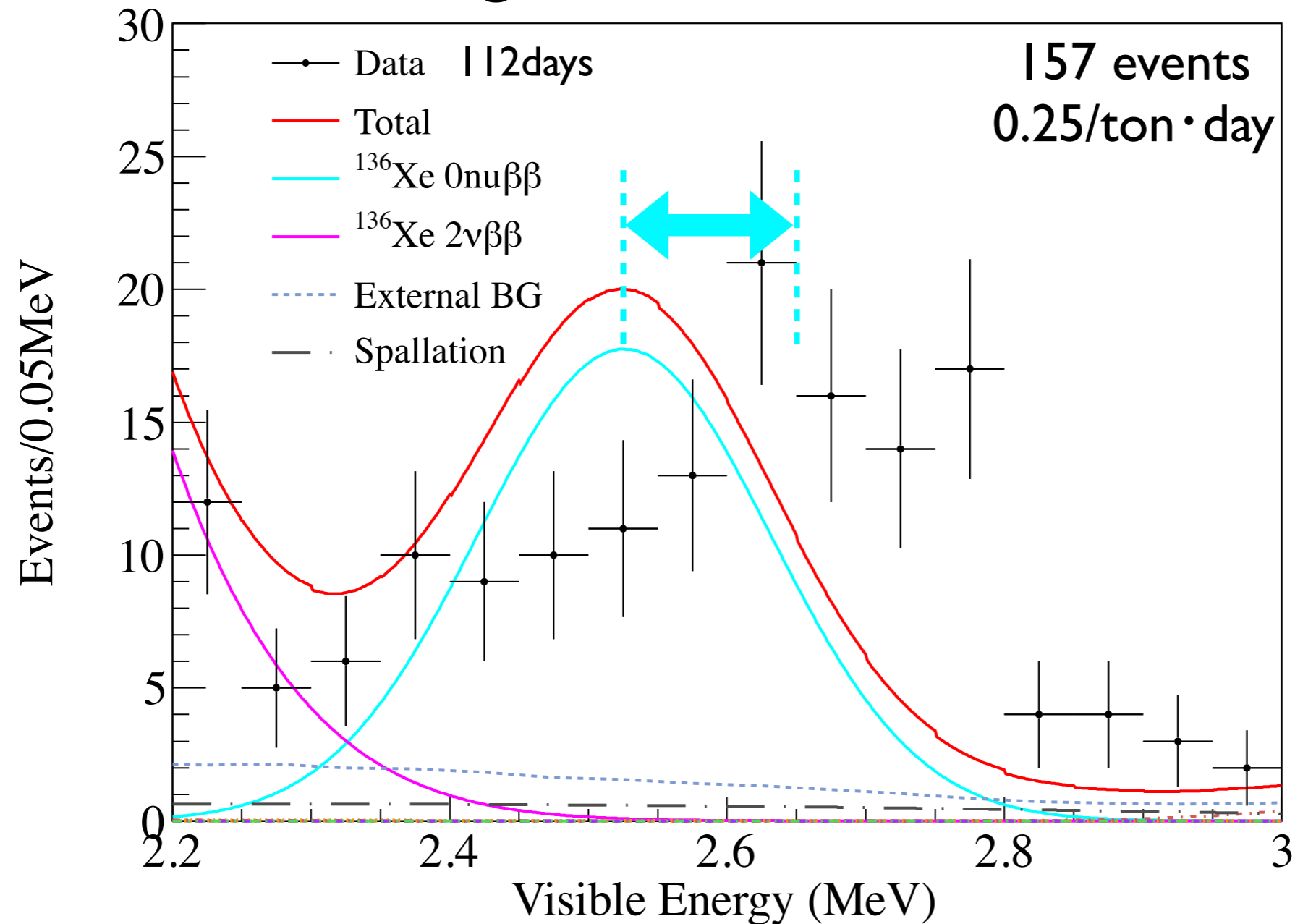
Phys.Rev.C86,021601(R)(2012)



約 5 倍の矛盾

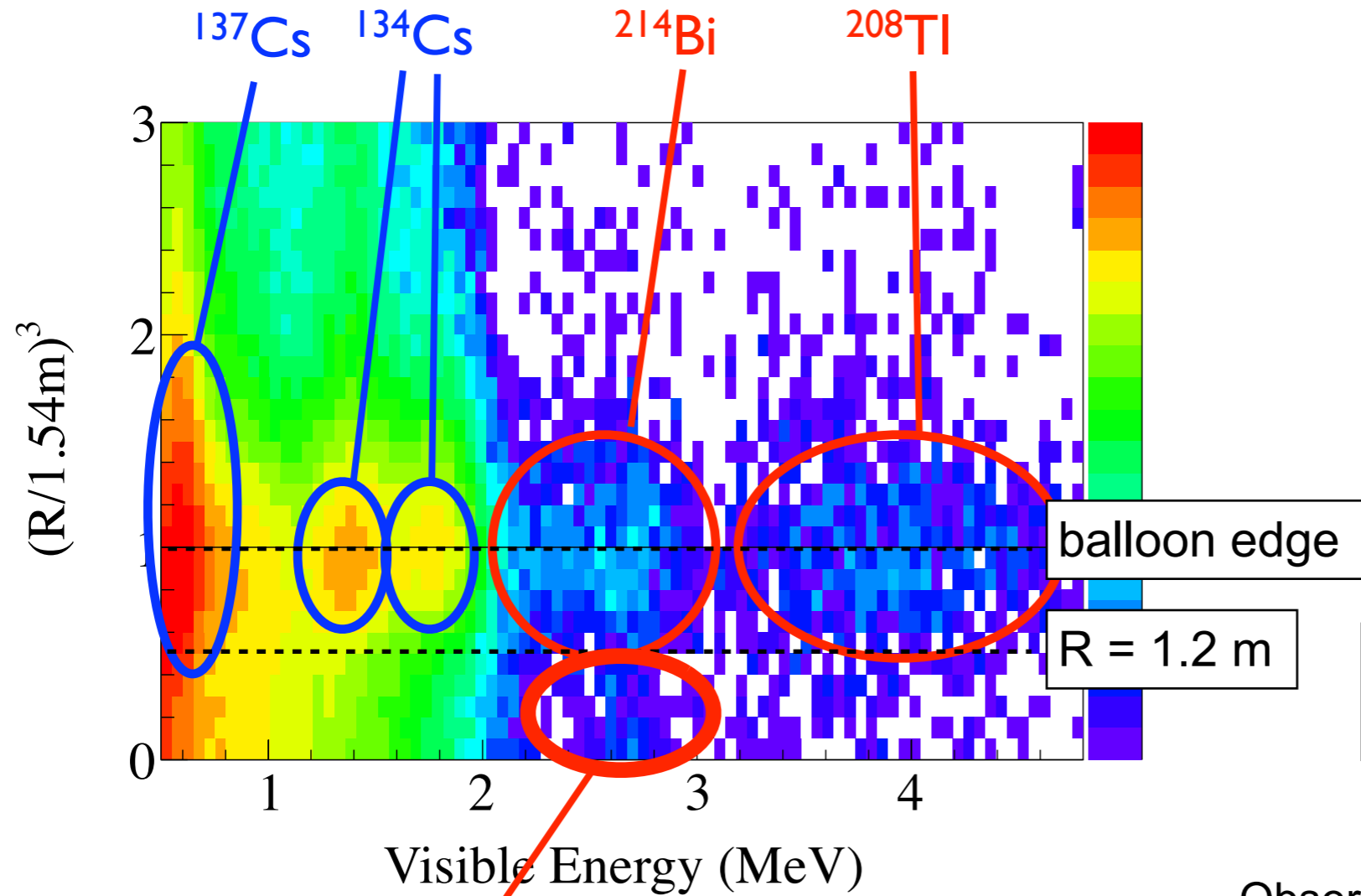
Background situation

Peak fit with 0v signal

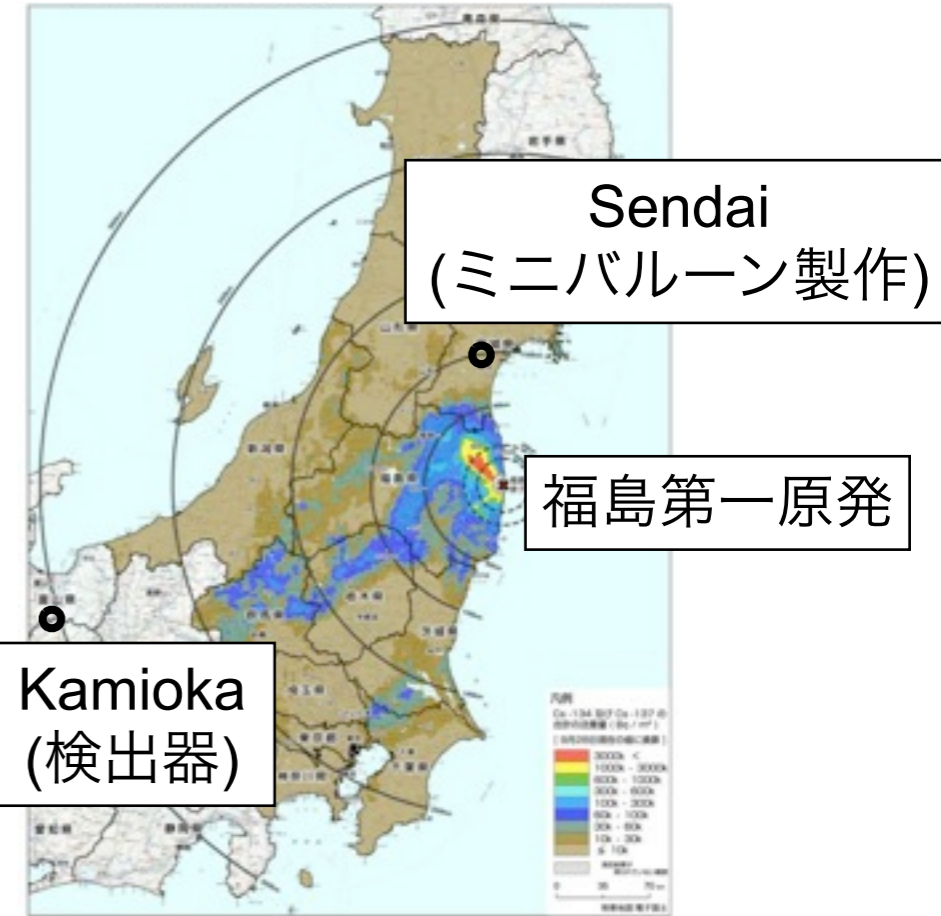


Peak position is different from that of expected 0v.
0v only is rejected at more than 8σ level.

放射性不純物



$^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ fallout



Observed ratio of $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ (~ 0.8) is consistent with Fukushima-I reactor fallout

- 福島第一のフォールアウトであるセシウムは、 $0\nu 2\beta$ 探索ではあまり問題にならず、幸いしみ出してきたくない。
- ミニバルーン上の ^{214}Bi は有効体積を制限している。
- ^{208}Tl は、 $0\nu 2\beta$ ピークより十分高いエネルギーにあるため問題にならない。

2.6MeV 近辺のピークは何か？

2つの可能性:

- 放射性不純物 なら長寿命なはず。
- 宇宙線による原子核破砕 ならミューオンとの相関がみえるはず。

ENSDF の全原子核の崩壊を調査。
thousands of millions of

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

100秒以下の時間相関を <0.007 /ton·day (90% CL). → small

100秒~30日の時間相関を持つものは、A,Zの近い原子核の
エネルギースペクトルを調査して制限 → negligible

核反応 (α, γ), ($\alpha, \alpha\gamma$), (n, γ) はどれも断面積が小さい。 → negligible

30日以上寿命で 0ν に近いピークを作るものは、4つの候補。

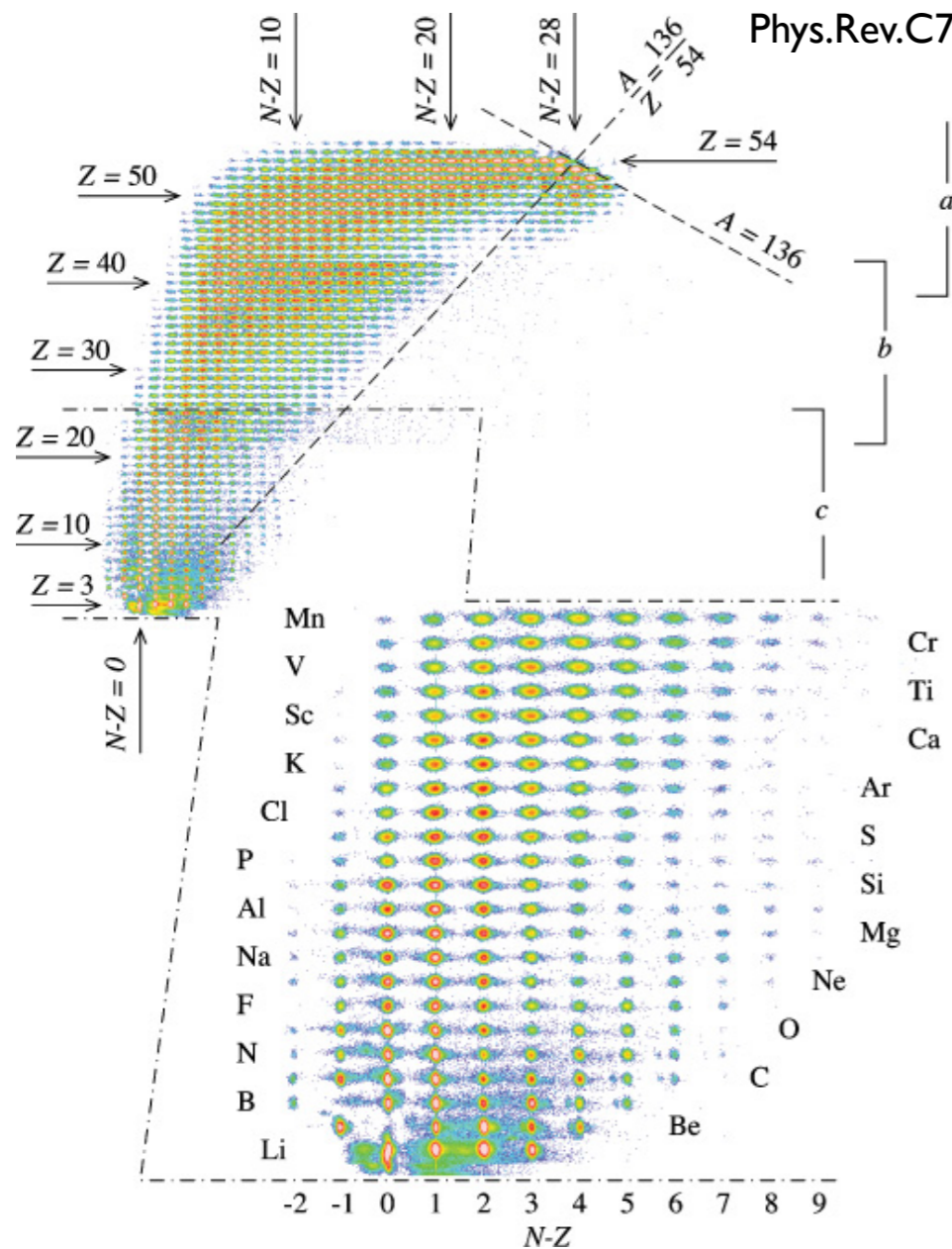
^{110m}Ag ($T_{1/2}=250\text{d}$), ^{208}Bi ($3.68 \times 10^5\text{y}$), ^{88}Y (107d), ^{60}Co (5.27y)

原子核破碎からのBG

加速した ^{136}Xe を水素標的に照射

(1 GeV陽子衝突相当)

Phys.Rev.C76,064609(2007)



GEANT4 はオーダー評価には十分使える。

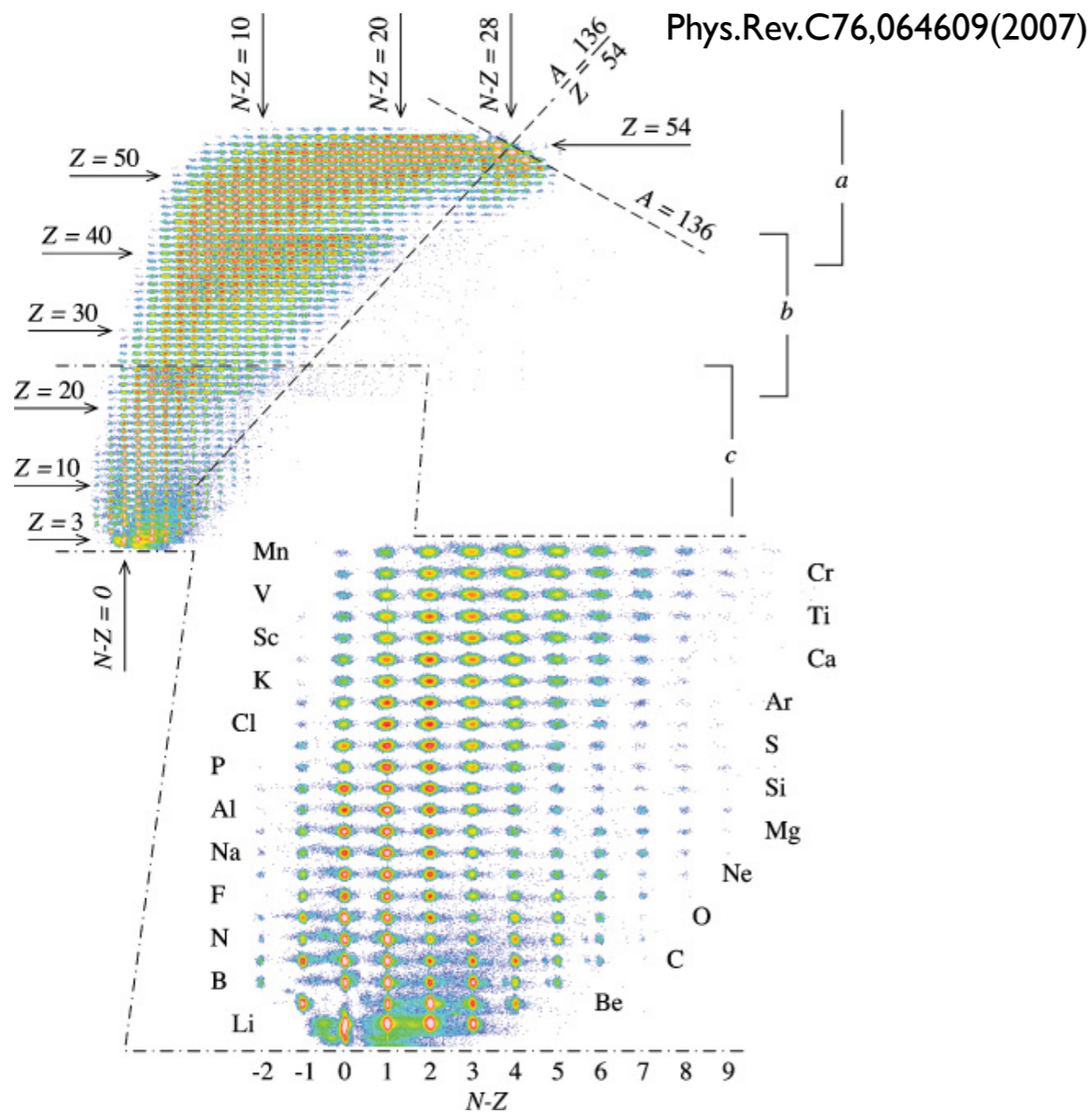
地下での原子核破碎は小さい。(GEANT4)

原子核破碎からのBG

加速した ^{136}Xe を水素標的に照射

(1 GeV陽子衝突相当)

Phys.Rev.C76,064609(2007)

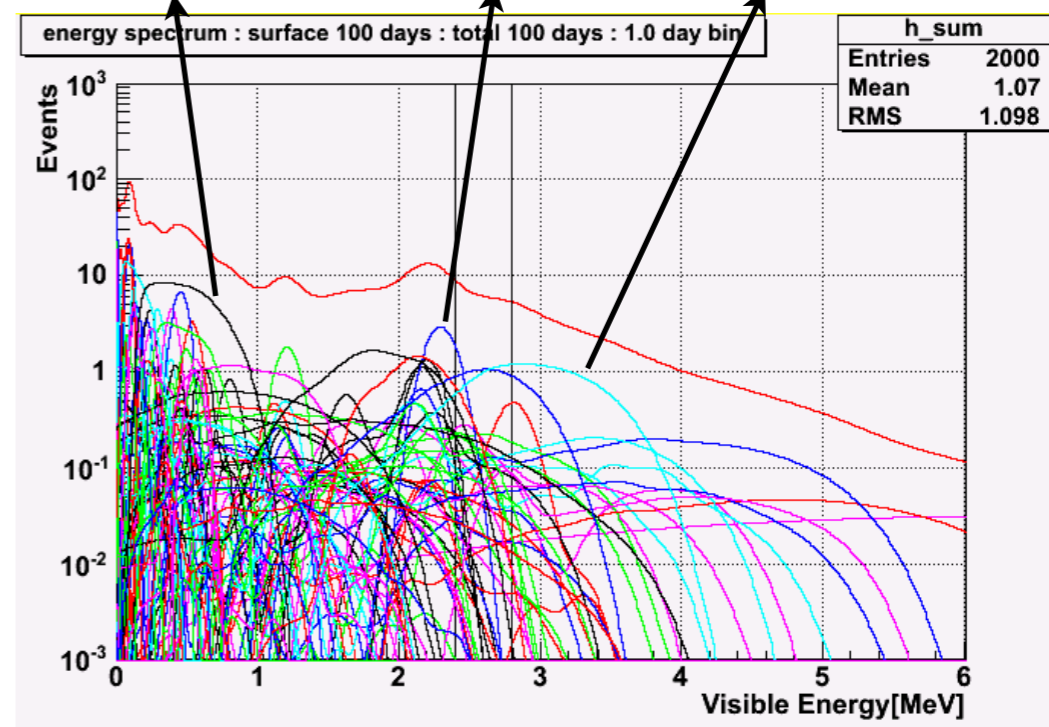


GEANT4 はオーダー評価には十分使える。

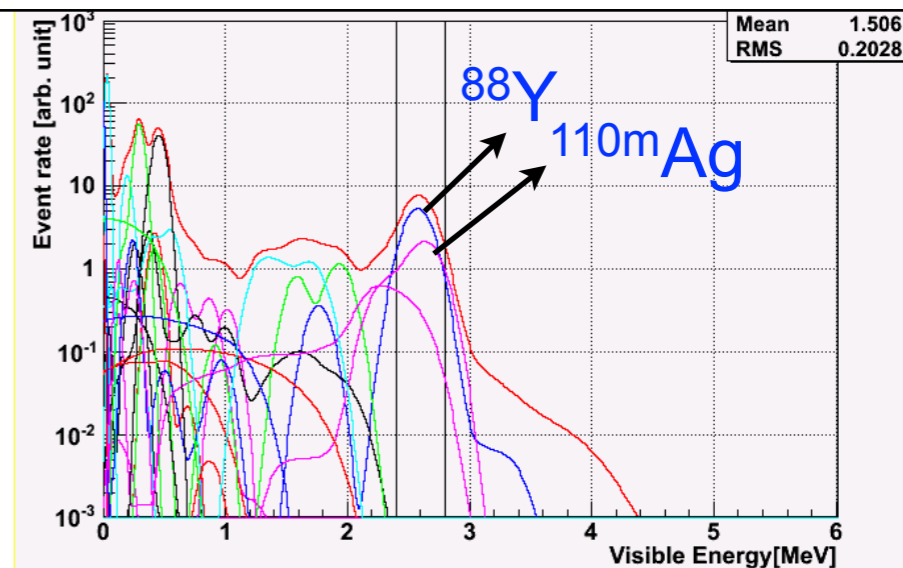
地下での原子核破碎は小さい。(GEANT4)

100 days on the surface, 0 day in the mine

$\beta^-: ^{135}\text{Xe}$ $\beta+\text{EC}: ^{118\text{m}}\text{Sb}$ $\beta^-: ^{134}\text{I}$
 54.7mb, $T_{1/2}=9.14\text{h}$ 13.3mb, $T_{1/2}=5.0\text{h}$ 21.9mb, $T_{1/2}=52.5\text{m}$



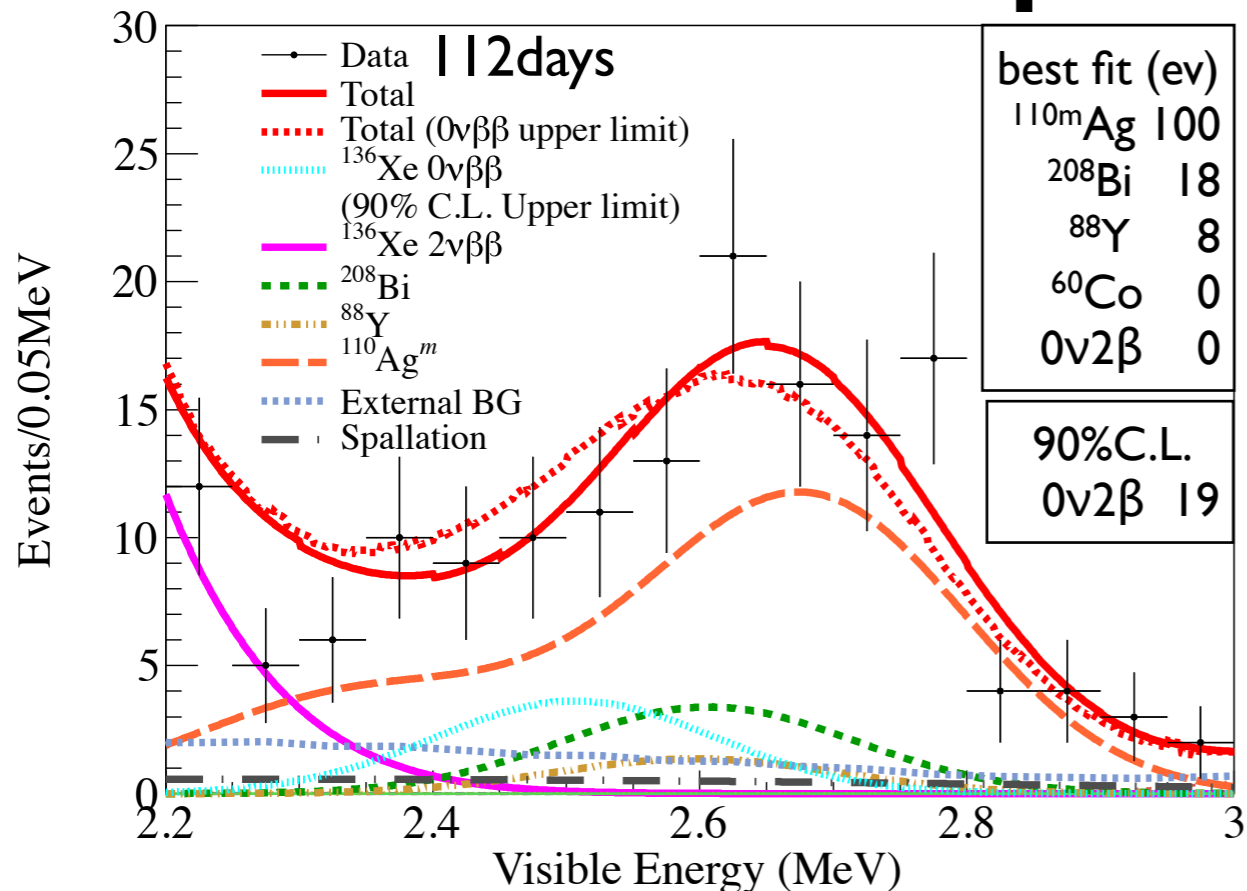
100 days on surface, 300 days in the mine



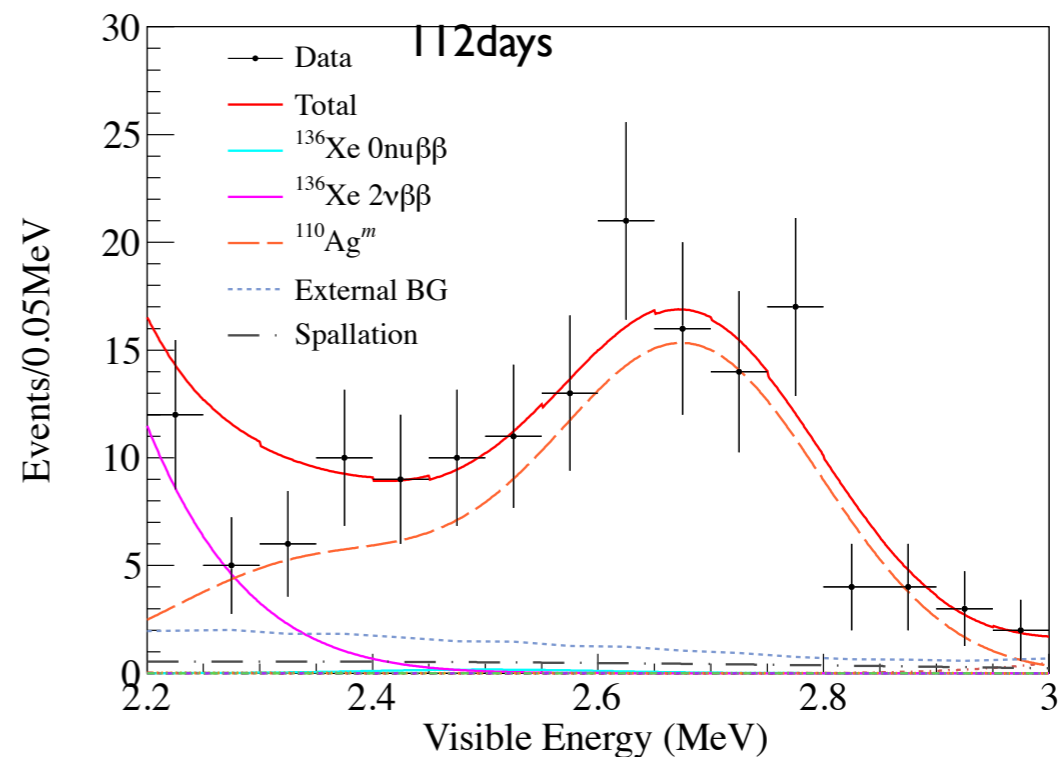
Estimated ^{110}Ag production rate (aboveground) is
 $\sim 30/\text{day}/400\text{kg-}^{136}\text{Xe}$

Measured BG rate (underground) is
 $\sim 3/\text{day}/300\text{kg-}^{136}\text{Xe}$

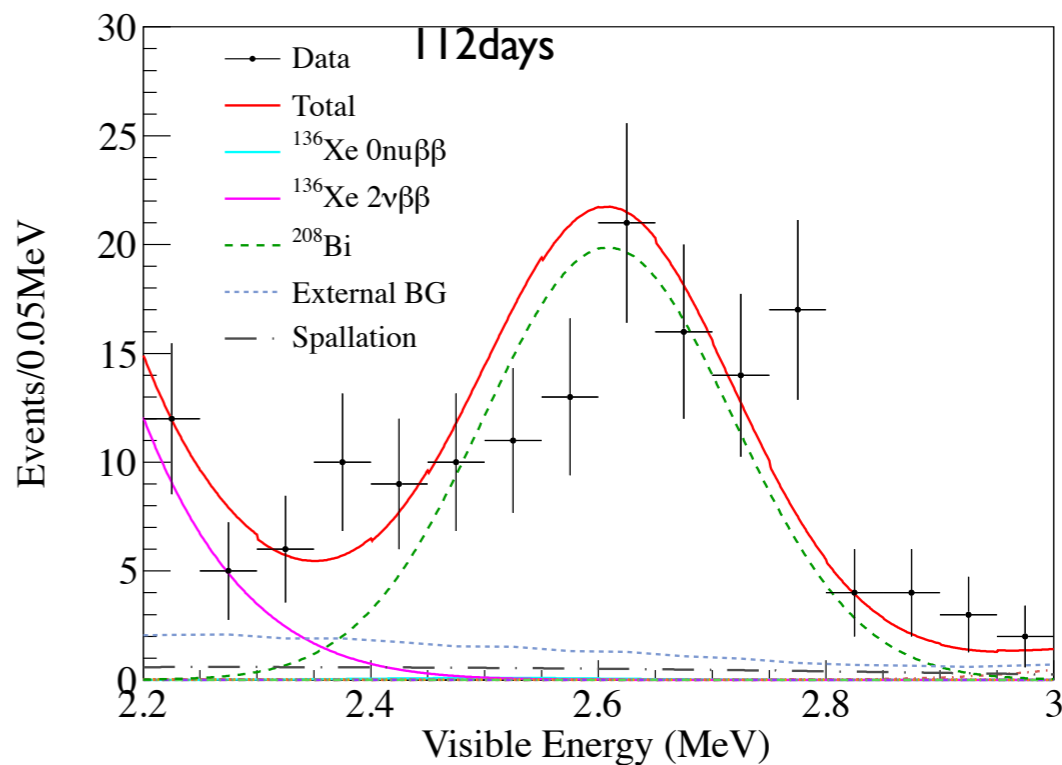
Limit on the $0\nu 2\beta$ half life



最適解と $0\nu 2\beta$ の上限 (90%CL)

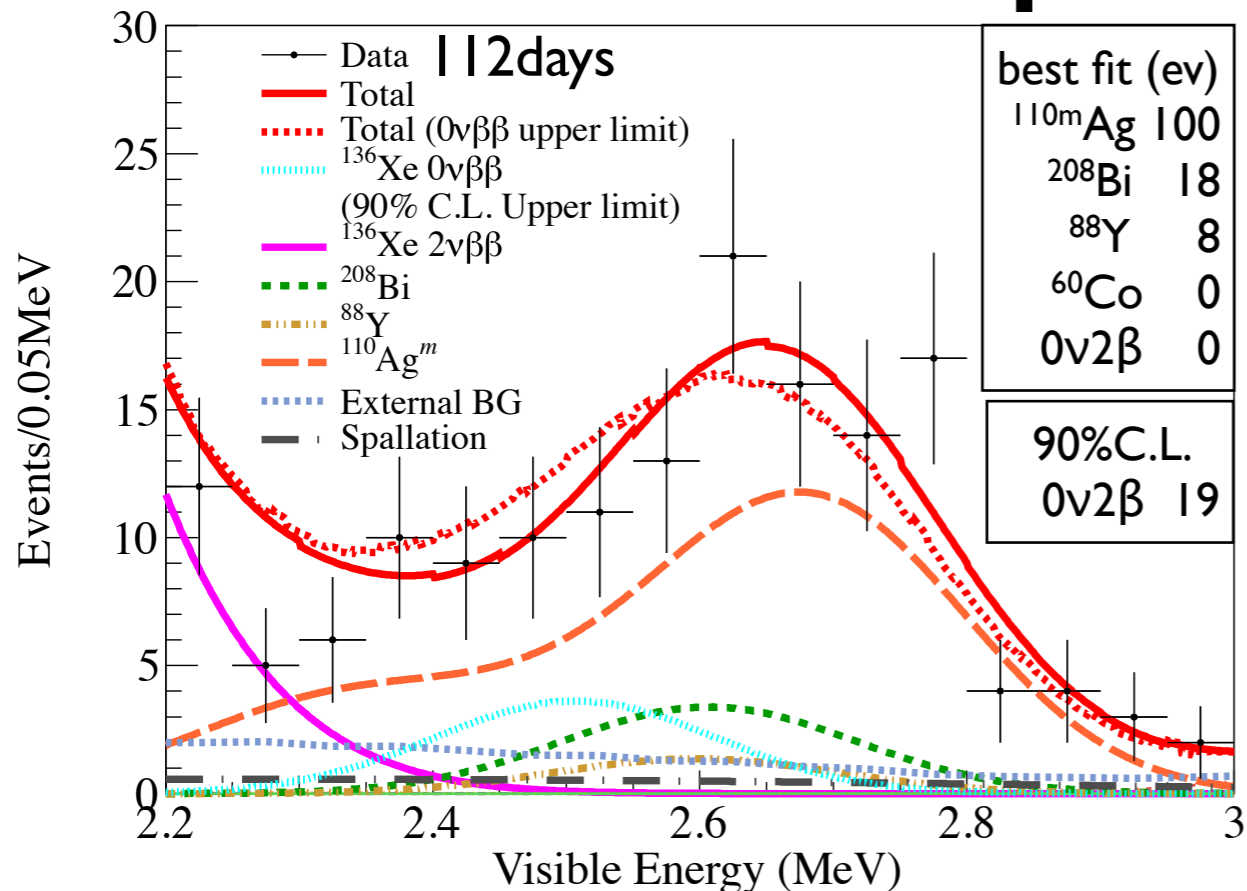


^{110m}Ag は良く合う。



^{208}Bi は合わない。

Limit on the $0\nu 2\beta$ half life

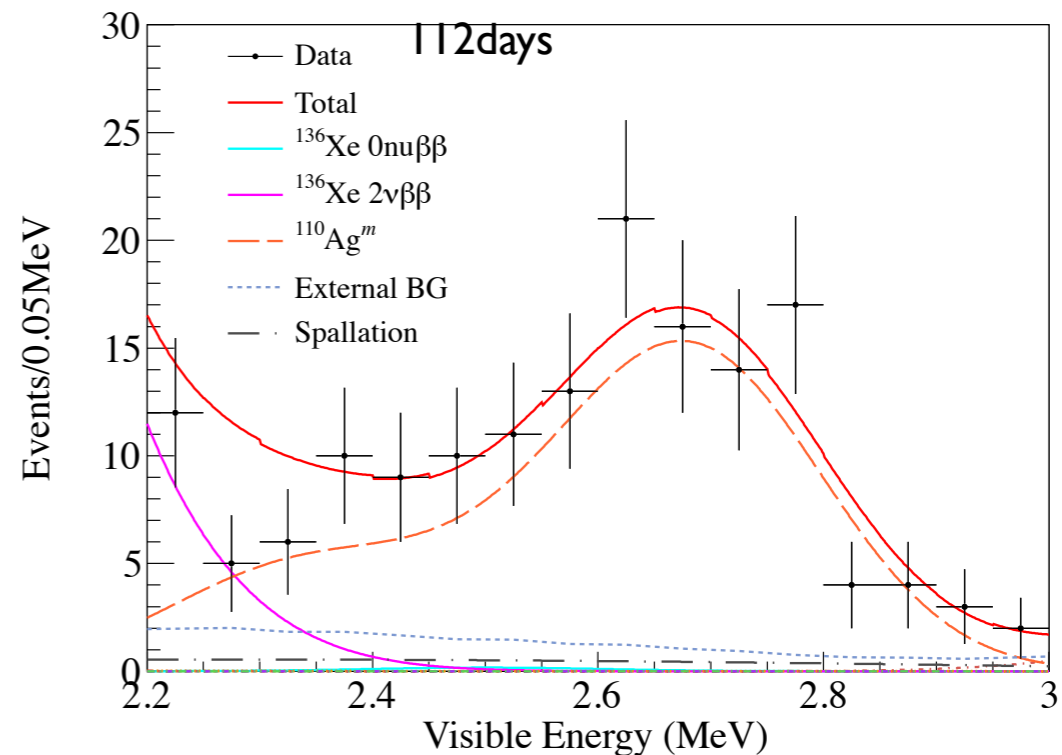


最適解と $0\nu 2\beta$ の上限 (90%CL)

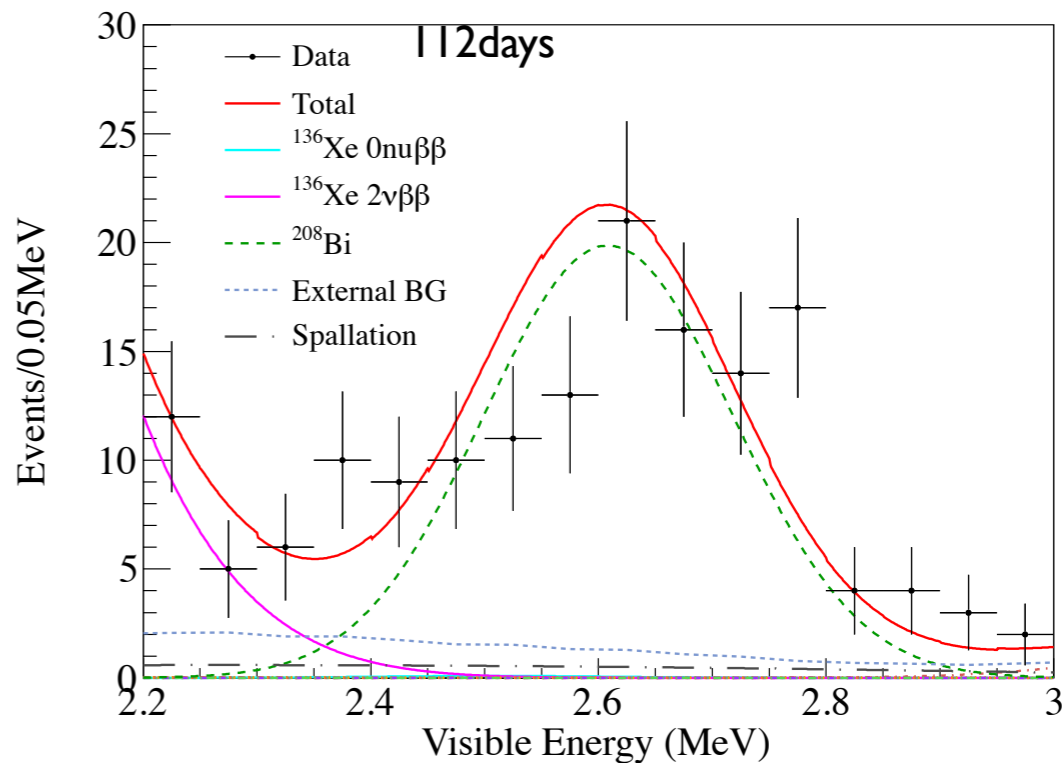
(χ^2 at 2.2~3.0MeV)

	χ^2 112日のデータ	
simul. fit	11.6	
$0\nu + ^{110m}\text{Ag}$	13.1	
$0\nu + ^{208}\text{Bi}$	22.7	△
$0\nu + ^{88}\text{Y}$	22.2	△
$0\nu + ^{60}\text{Co}$	82.9	×
0ν only	85.0	×

BGは ^{110m}Ag らしい。



^{110m}Ag は良く合う。



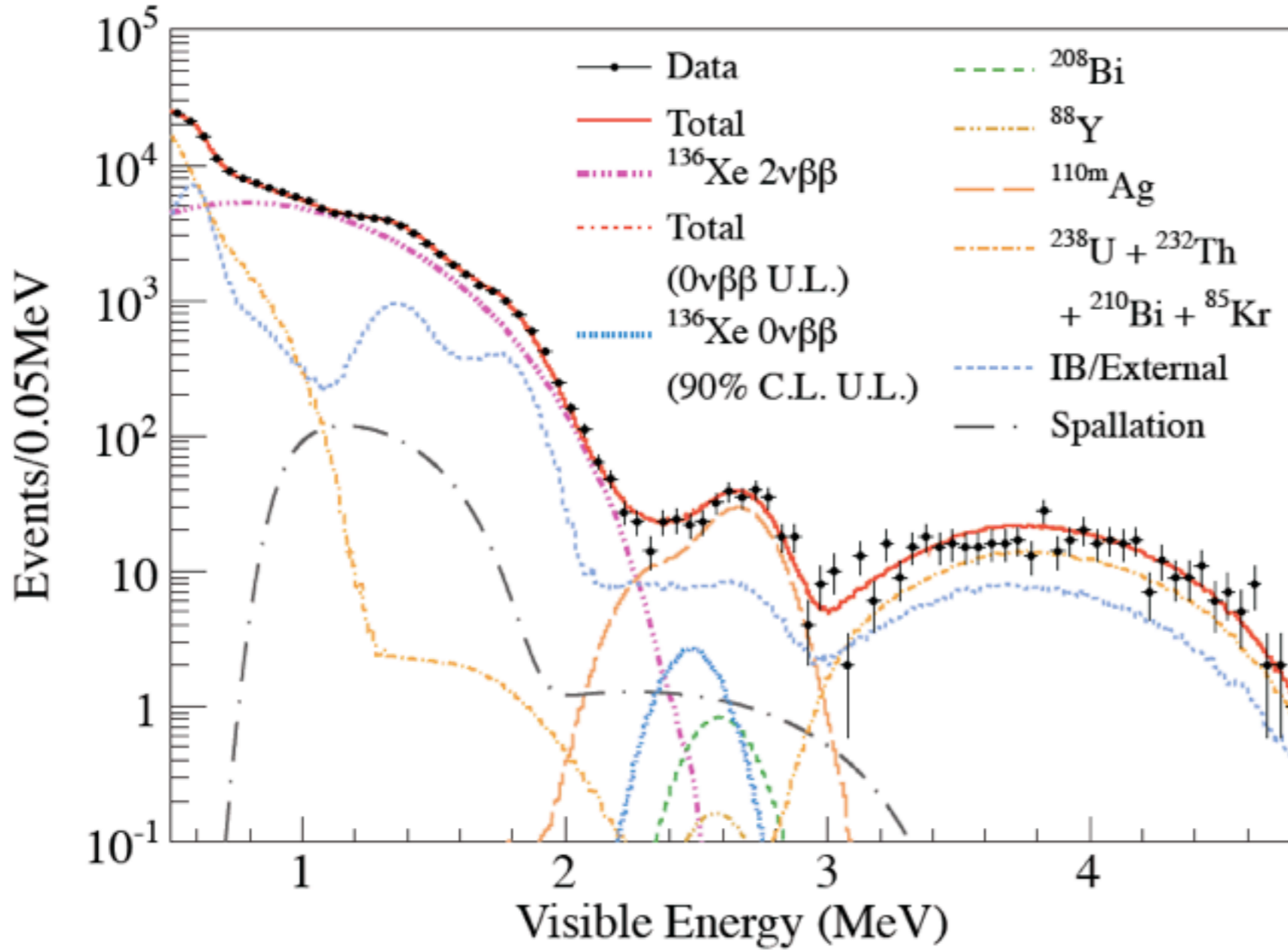
^{208}Bi は合わない。

ENSDFデータベースの全探索でこれら4各種のみが、BG候補

KamLAND-Zen phase I の結果

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 062502

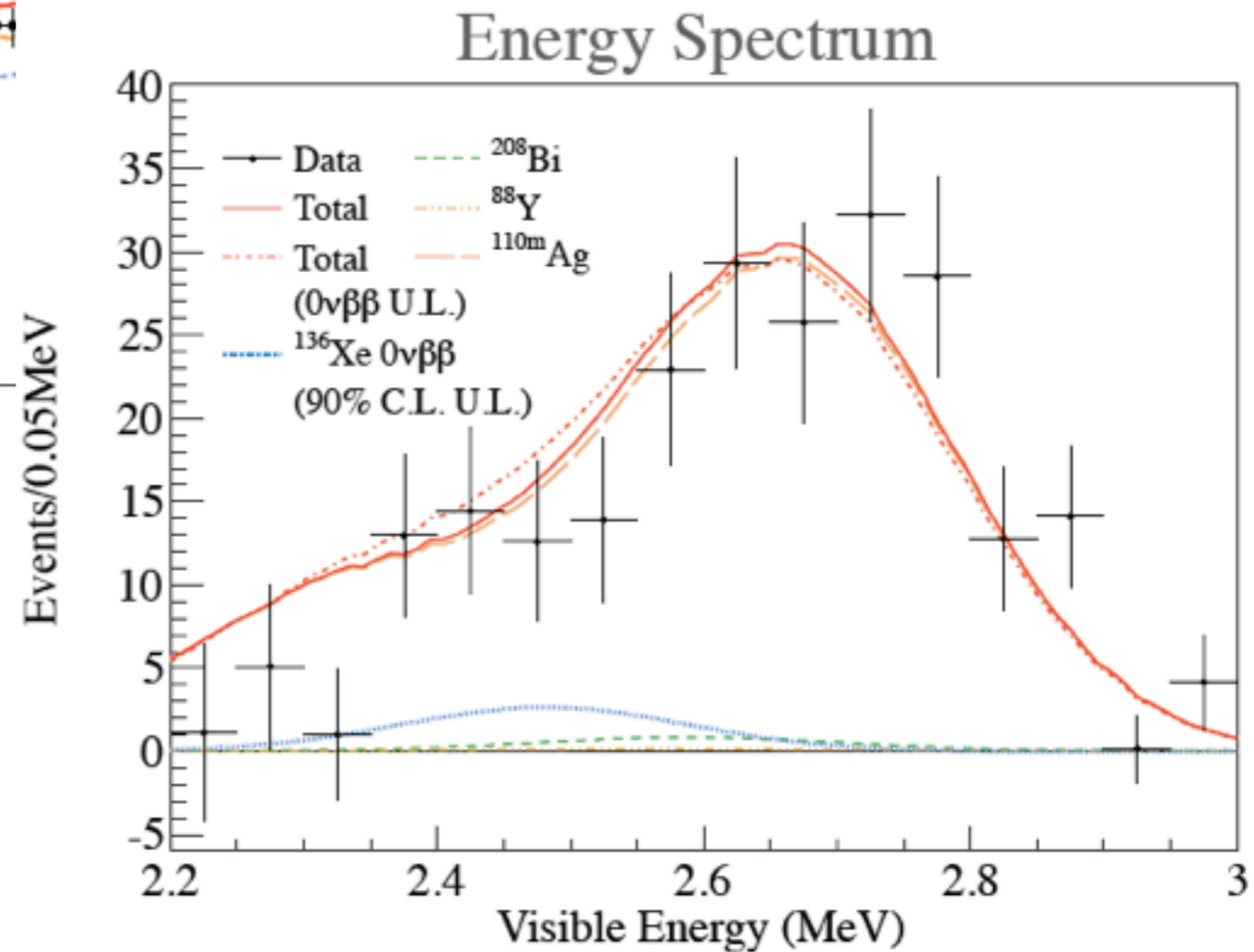
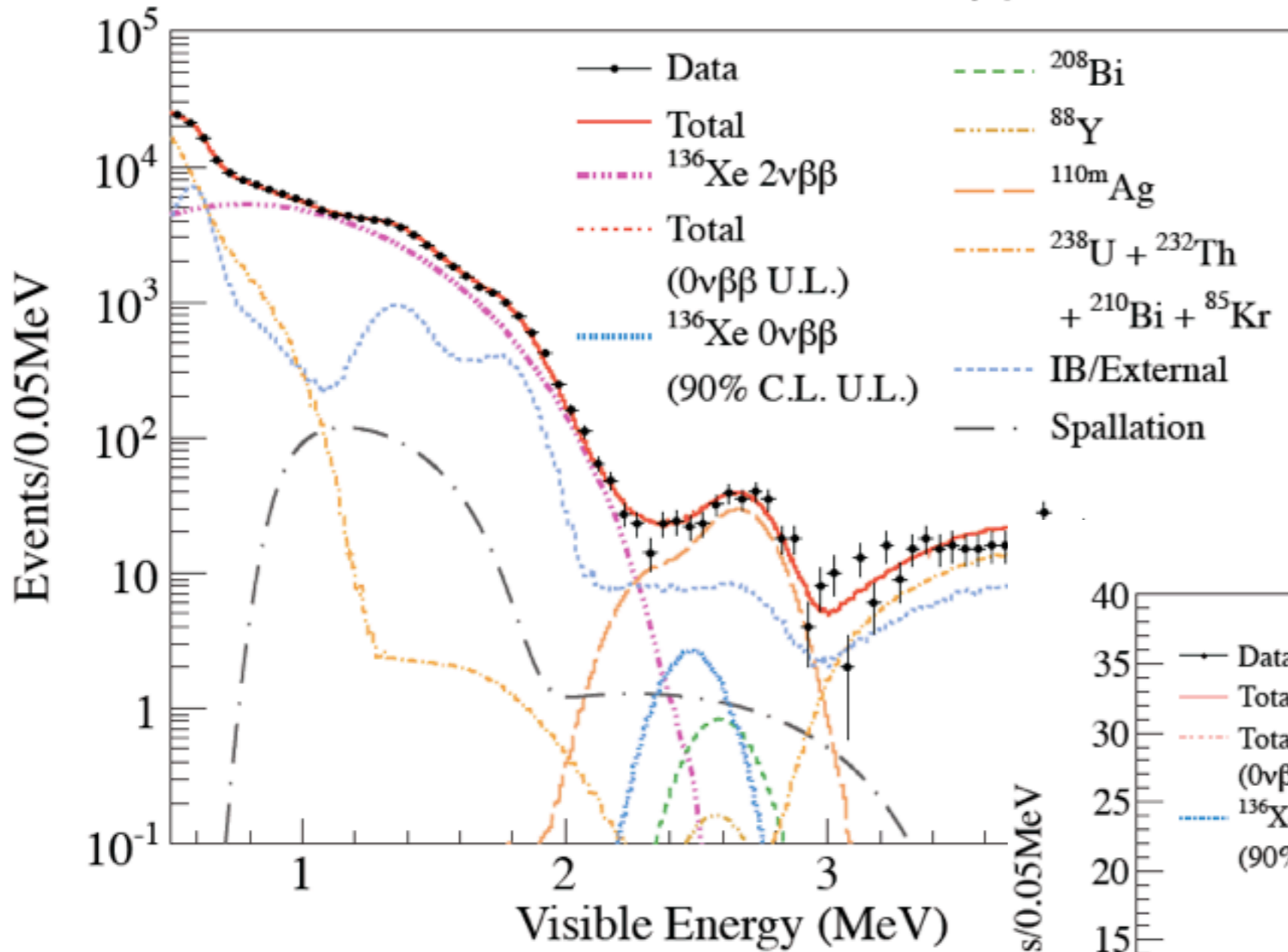
DS-1 + DS-2 : 213.4日



KamLAND-Zen phase I の結果

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 062502

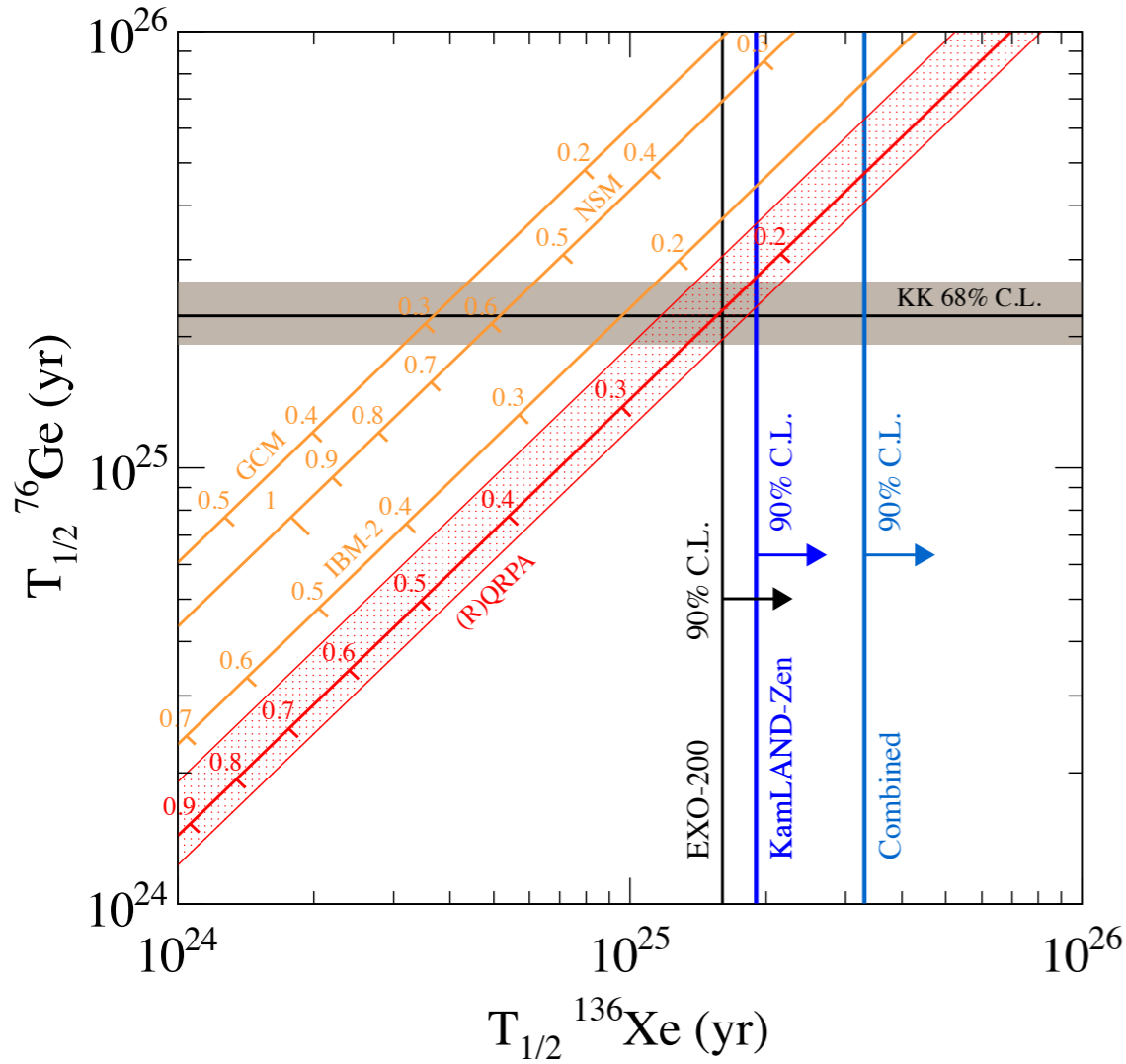
DS-1 + DS-2 : 213.4日



KamLAND-Zen phase I の結果

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 062502

KKクレイムの検証



$$T_{1/2}(^{136}\text{Xe}) \rightarrow \langle m_{ee} \rangle \rightarrow T_{1/2}(^{76}\text{Ge})$$

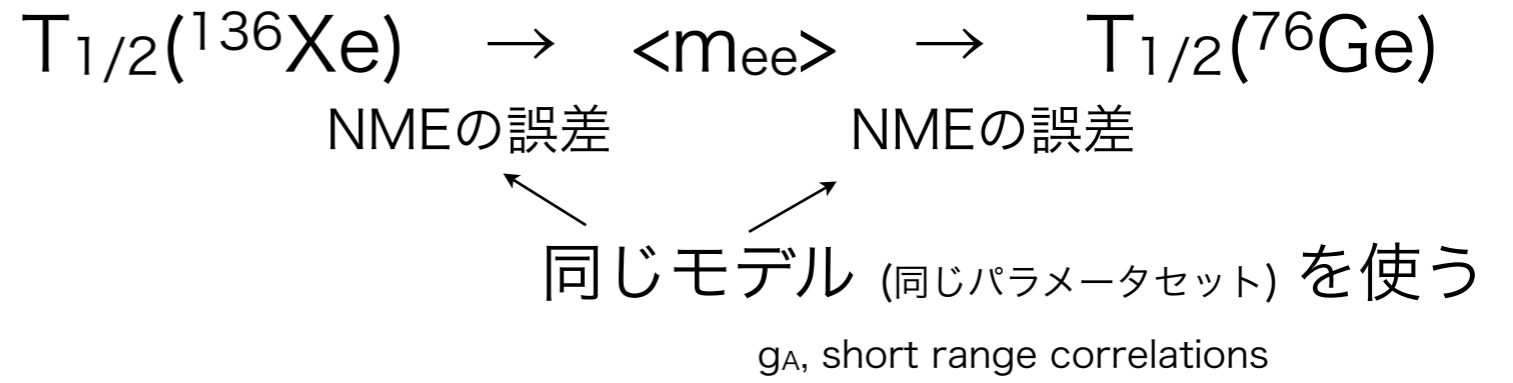
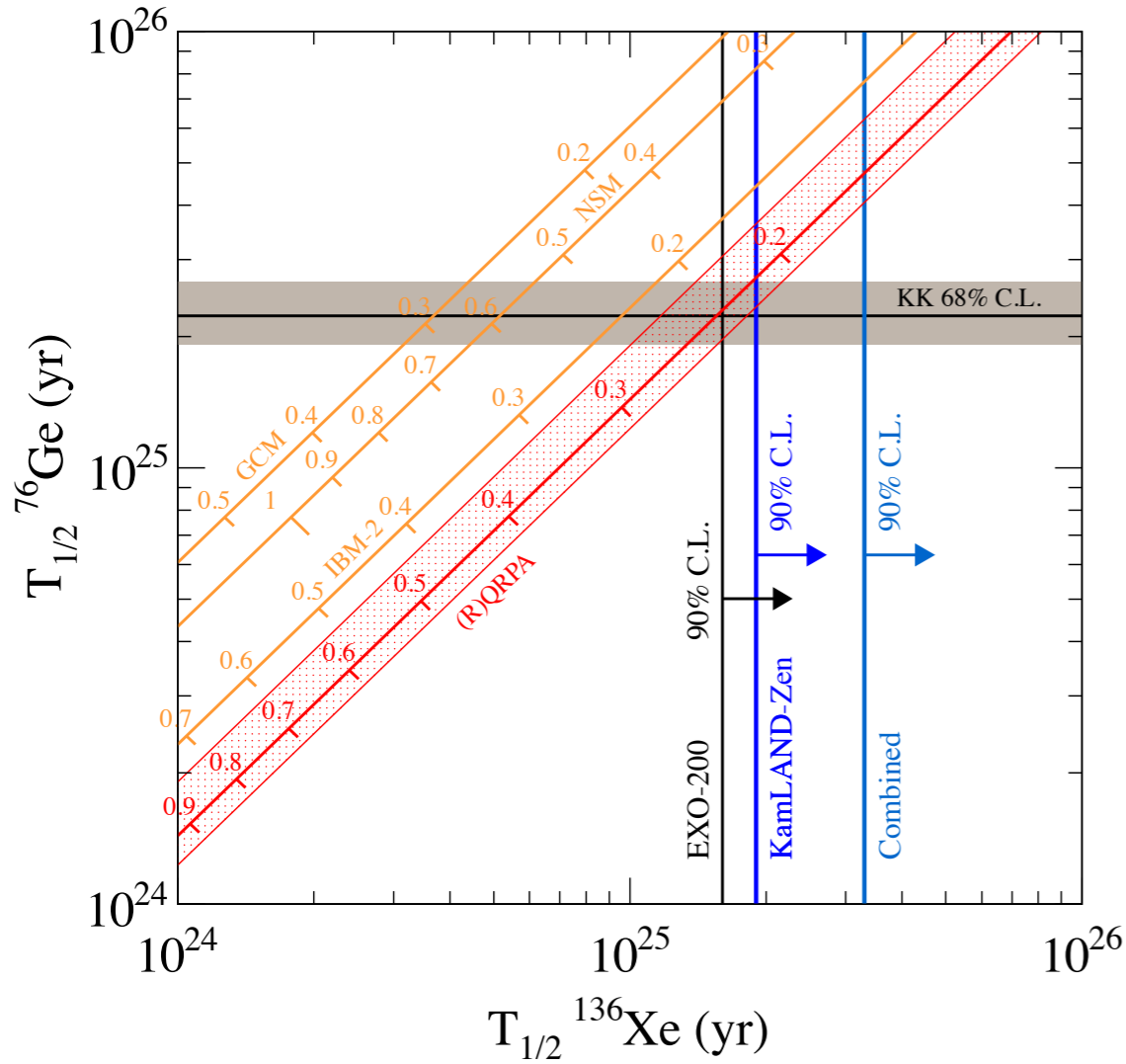
NMEの誤差

NMEの誤差

同じモデル (同じパラメータセット) を使う

g_A , short range correlations

KKクレイムの検証



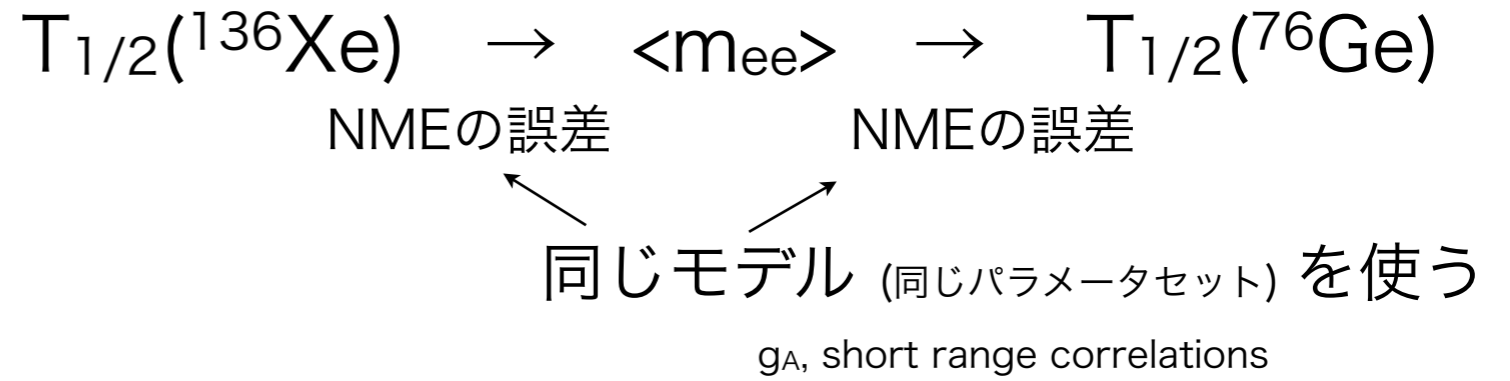
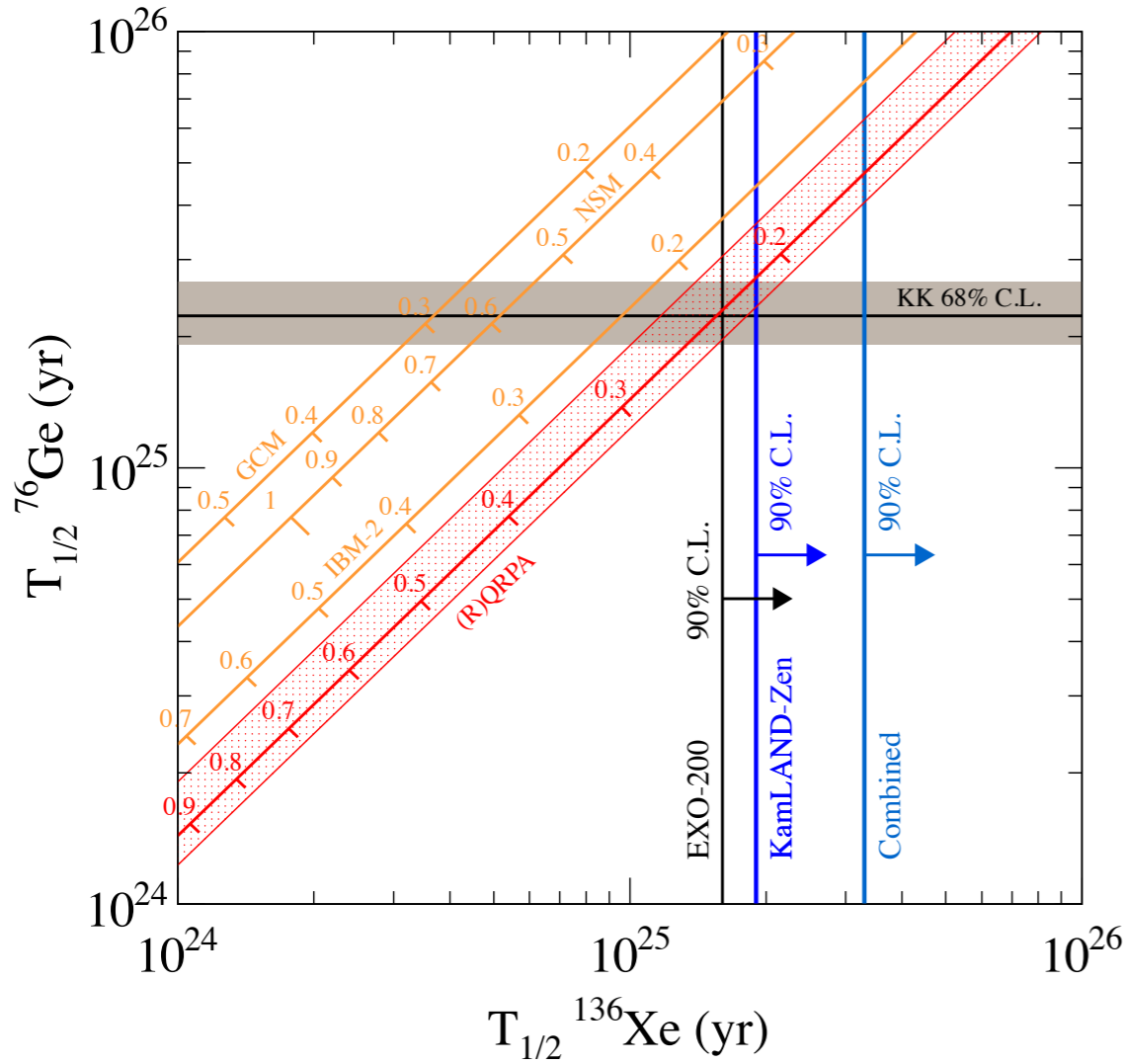
成果 1

世界最高感度を達成

$T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ 年 (KL-Zen)
 $> 3.4 \times 10^{25}$ 年 (combined)

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$ meV

KKクレイムの検証



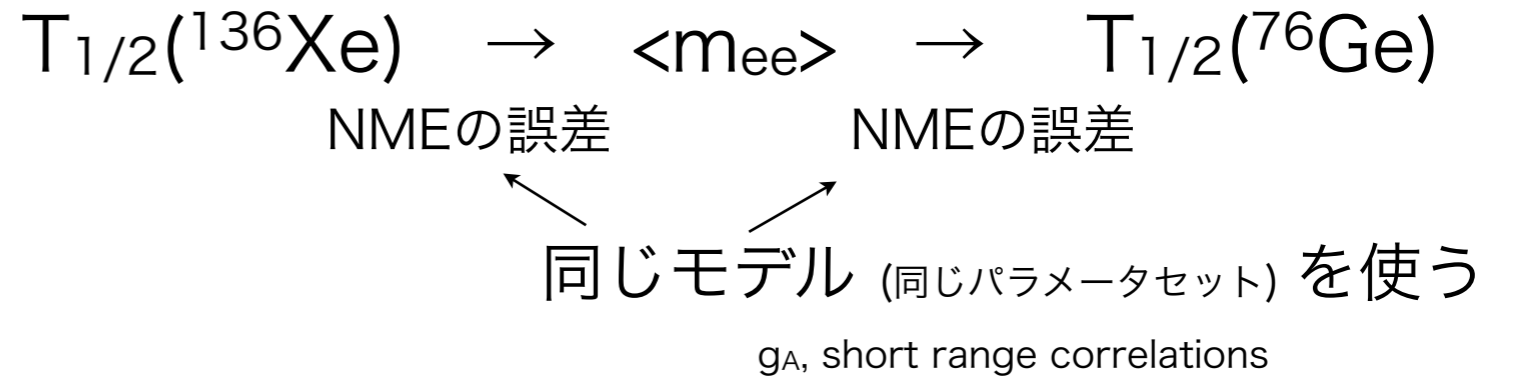
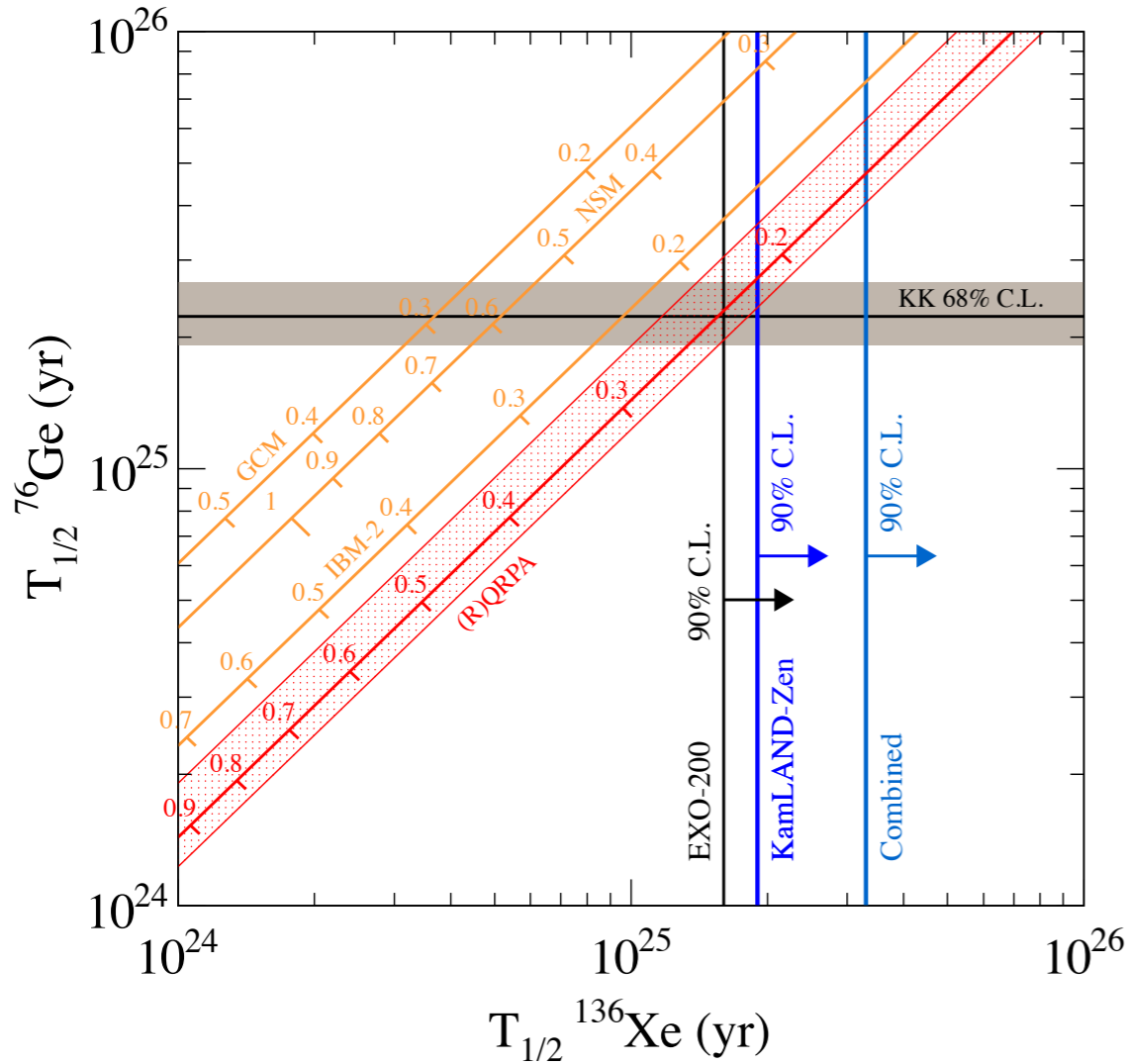
成果 1 世界最高感度を達成

$T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ 年 (KL-Zen)
 $> 3.4 \times 10^{25}$ 年 (combined)

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$ meV

成果 2 軽いマヨラナニュートリノを仮定して現在の原子核モデルの不定性のもと、ついに97.5%CL (combined) で**KKクレイムを排除**した。

KKクレイムの検証



成果 1 世界最高感度を達成

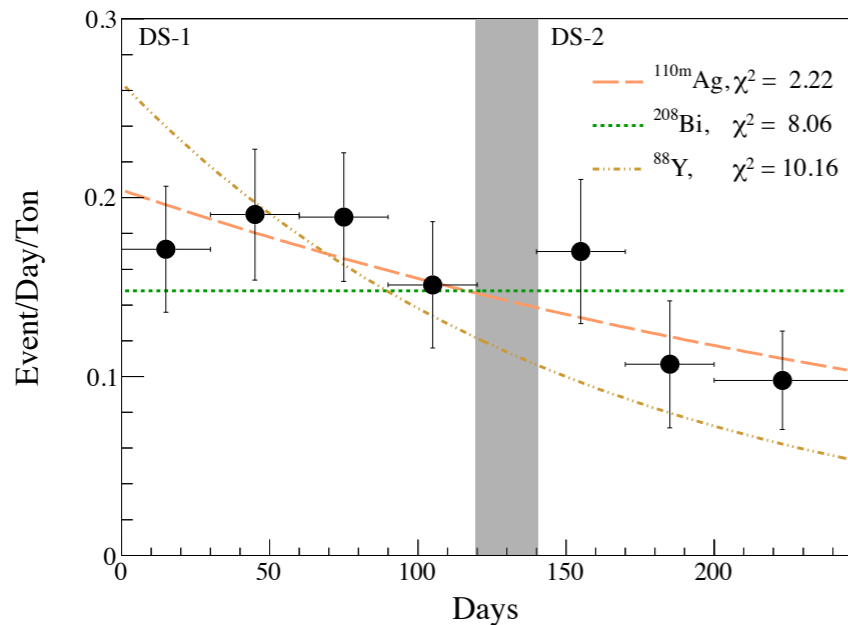
$T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ 年 (KL-Zen)
 $> 3.4 \times 10^{25}$ 年 (combined)

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250 \text{ meV}$

成果 2 軽いマヨラナニュートリノを仮定して現在の原子核モデルの不定性のもと、ついに97.5%CL (combined) で**KKクレイムを排除**した。

成果 3

- 長期観測で主要BGを $^{110\text{m}}\text{Ag}$ と特定。
- 宇宙線起源 (地上) か福島原発起源かは未確定だが、いずれも対策できる。
- キセノン有り無しで信号の検証が可能であることを確認。



世界の競争状況

Nucleus	Experiment	Exposure (kg-yr)	$T^{0\nu}_{1/2}$ limit (yr) @ 90% C.L.	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (eV)
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	ELEGANT VI	0.025	$> 5.8 \times 10^{22}$	$< 3.5-22$
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	Heidelberg-Moscow	35.5	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.2-0.32^*$
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	NEMO-3	4.2	$> 3.2 \times 10^{23}$	$< 0.8-1.4$
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	NEMO-3	0.031	$> 9.2 \times 10^{21}$	$< 9.3-13.7$
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	NEMO-3	31.2	$> 1.0 \times 10^{24}$	$< 0.4-0.7$
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	Solotvina	0.14	$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1.2-2.2$
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	(Geo chemical)	-	$> 7.7 \times 10^{24}$	$< 0.7-1.2$
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	CUORICINO	19.75	$> 2.8 \times 10^{24}$	$< 0.44-0.81$
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	KamLAND-Zen	89.5	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.16-0.33$
	EXO-200	32.5	$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.16-0.33$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	NEMO-3	0.093	$> 1.8 \times 10^{22}$	$< 4.0-6.3$

*グループの一部が有限値を主張 (KK クレイム)

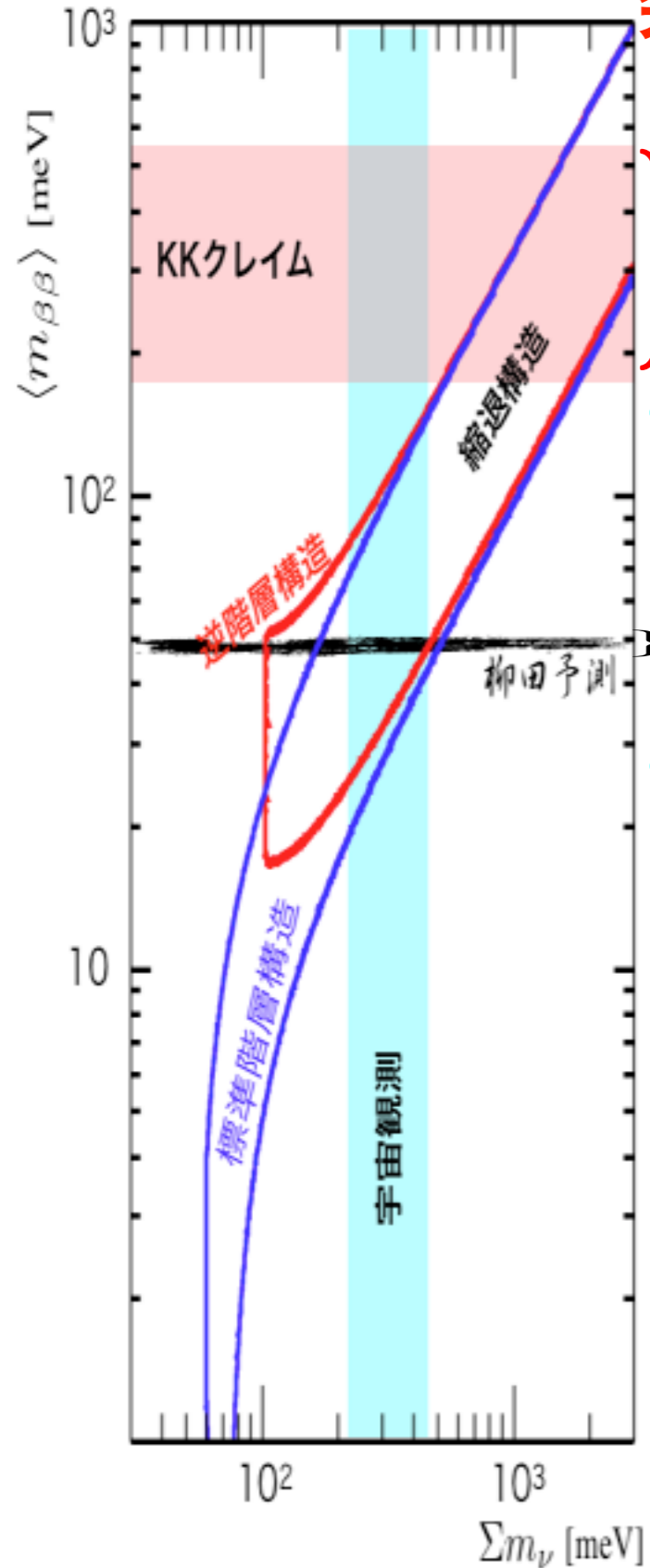
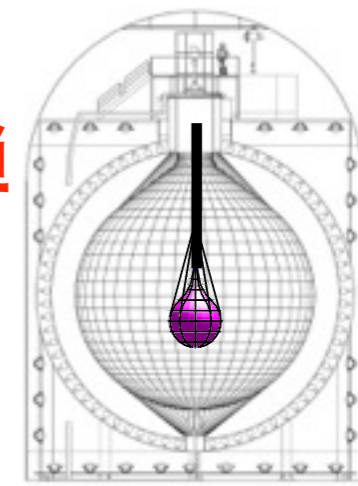
$$T^{0\nu}_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25} \text{ yr} \quad \langle m_{\beta\beta} \rangle = 0.18-0.43 \text{ eV @ } 2\sigma \text{ C.L. (QRPA model)}$$

KKクレイムの検証 → ^{76}Ge (GERDA) ではなく、 ^{136}Xe (KamLAND-Zen + EXO) が一番乗り
 感度競争 → ^{136}Xe (KamLAND-Zen, EXO), ^{130}Te (CUORE)

将来展望

いつ発見しても不思議でない。

発見に最も近いのはカムランド禅



KamLAND-Zen 89.5 kg-yr

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @ 90\% \text{ C.L.}$

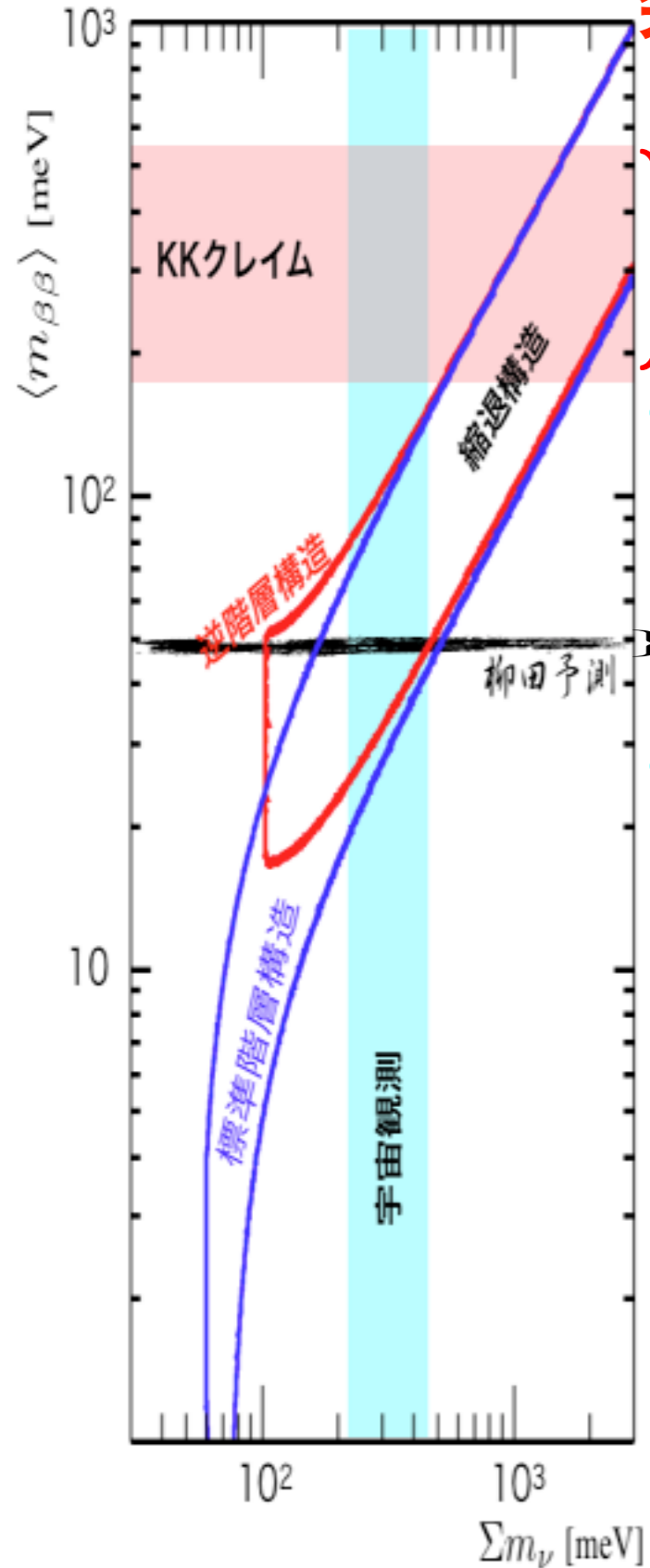
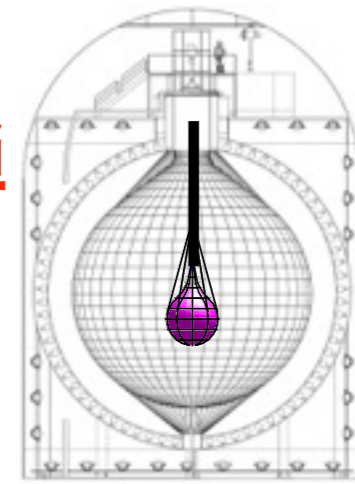
現在世界最高感度

理論計算
の誤差

将来展望

いつ発見しても不思議でない。

発見に最も近いのはカムランド禅



KamLAND-Zen 89.5 kg-yr

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @ 90\% \text{ C.L.}$

現在世界最高感度

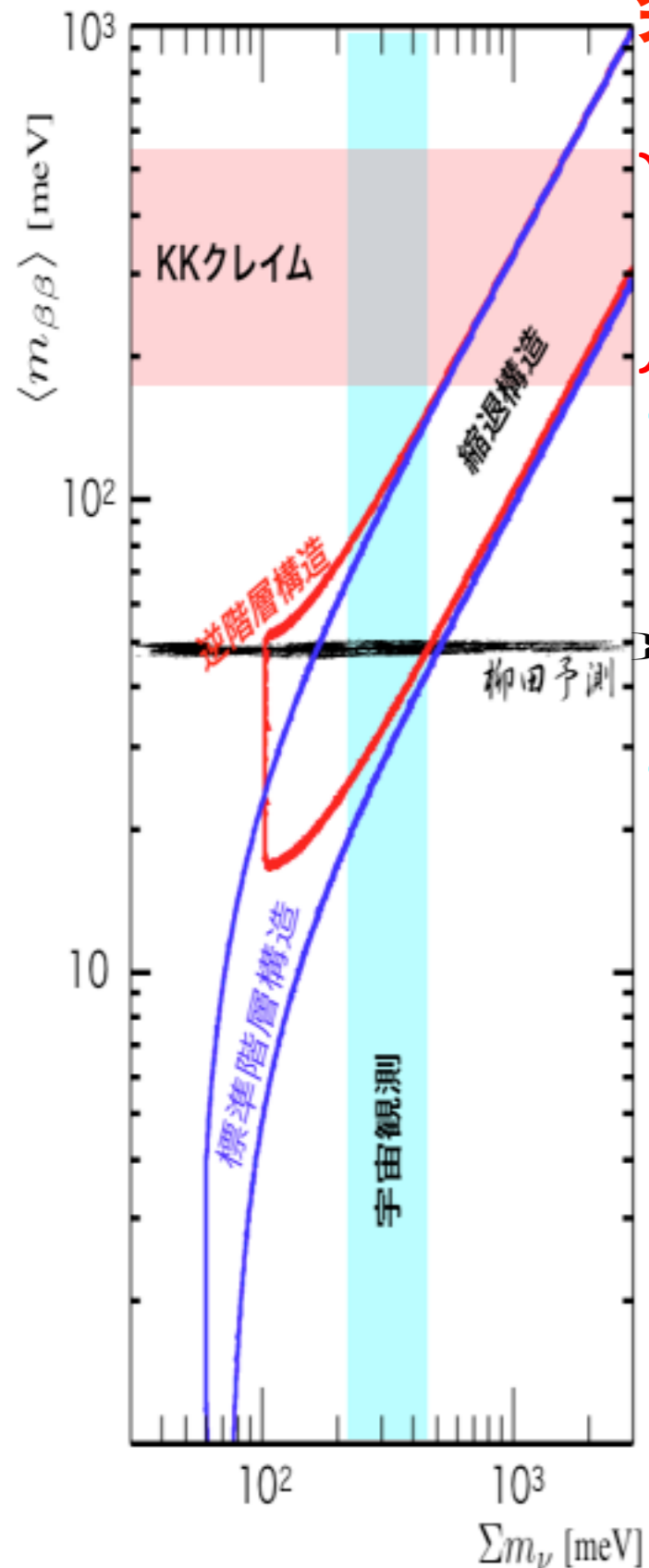
KamLAND-Zen

放射性不純物100分の1に低減後

将来展望

いつ発見しても不思議でない。

発見に最も近いのはカムランド禅



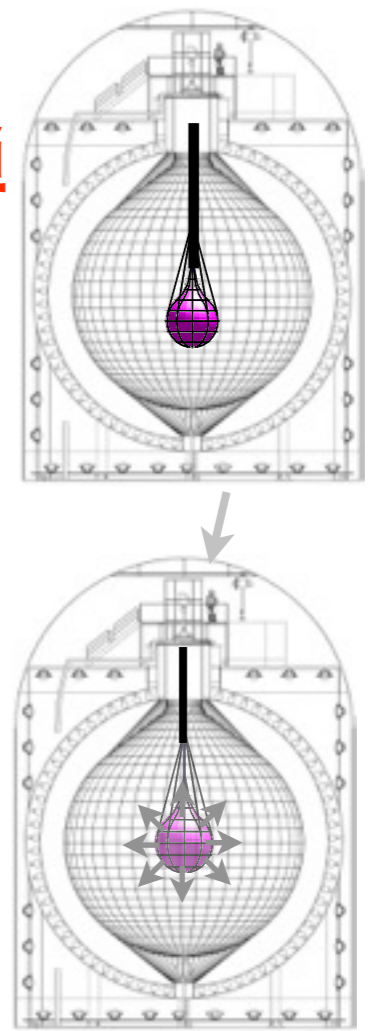
理論計算の誤差

純化後

来年以降

KamLAND-Zen 89.5 kg-yr
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @ 90\% \text{ C.L.}$
 現在世界最高感度

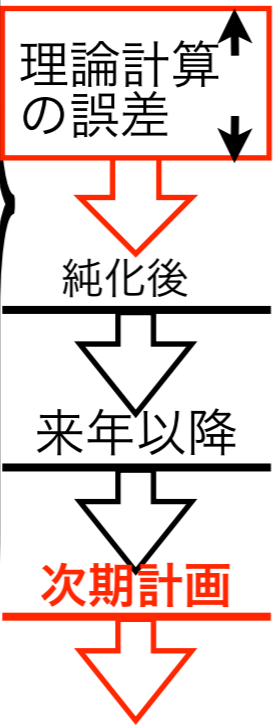
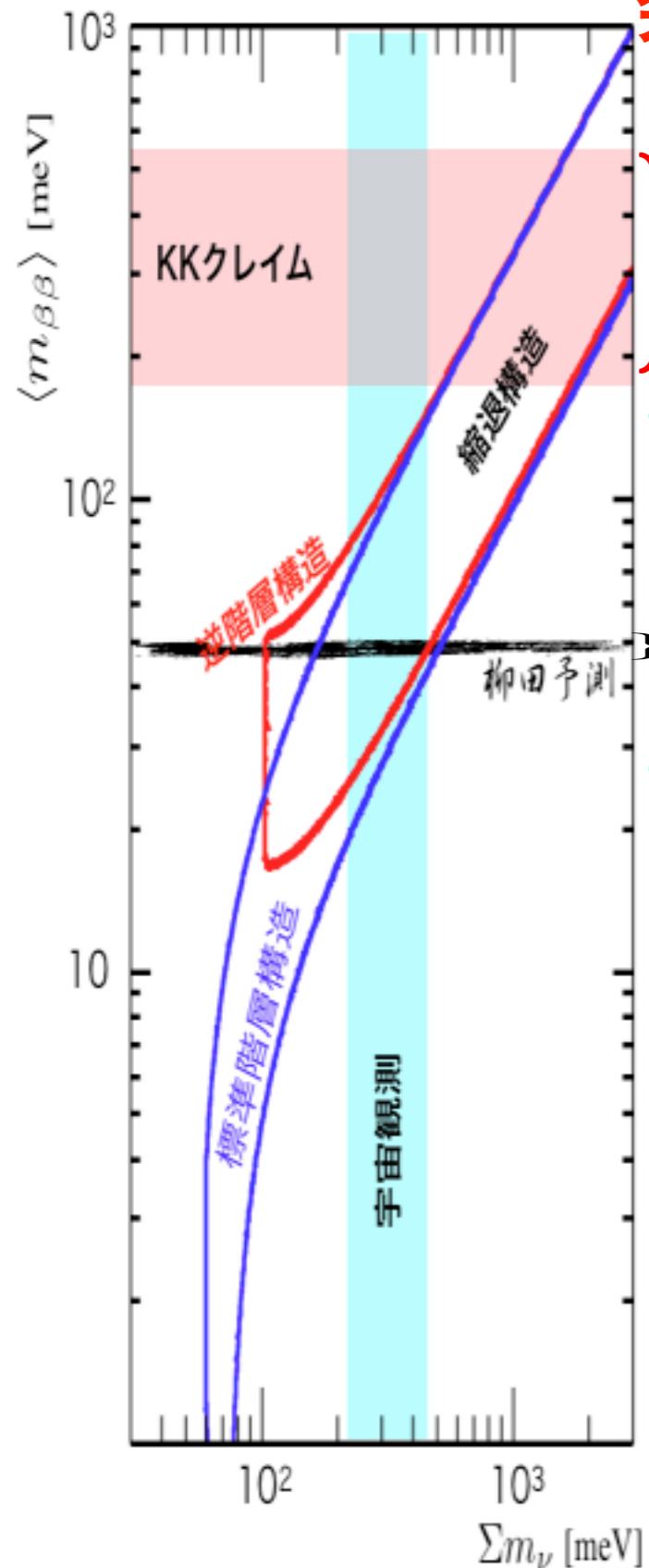
KamLAND-Zen
 放射性不純物100分の1に低減後
 KamLAND-Zen
 600kg超に増量、高潔淨ミニバルーン



将来展望

いつ発見しても不思議でない。

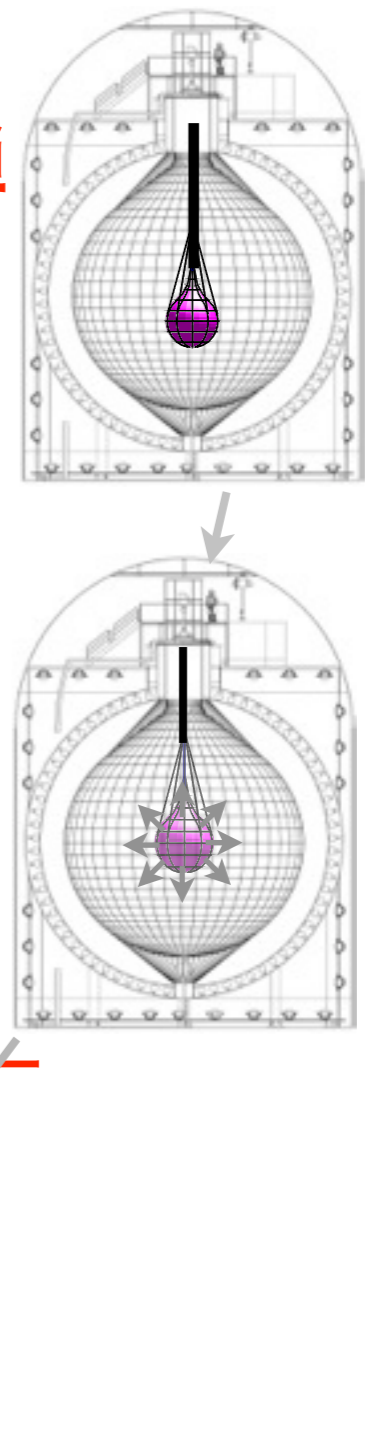
発見に最も近いのはカムランド禅



KamLAND-Zen 89.5 kg-yr
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @90\% \text{ C.L.}$
 現在世界最高感度

KamLAND-Zen
 放射性不純物100分の1に低減後
 KamLAND-Zen
 600kg超に増量、高潔淨ミニバルーン

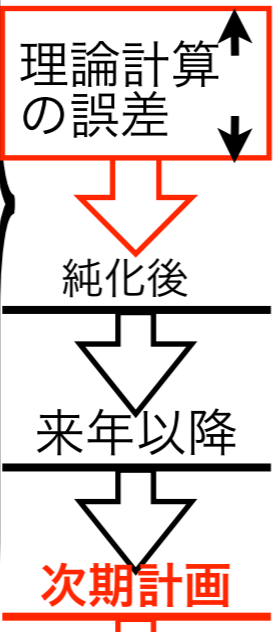
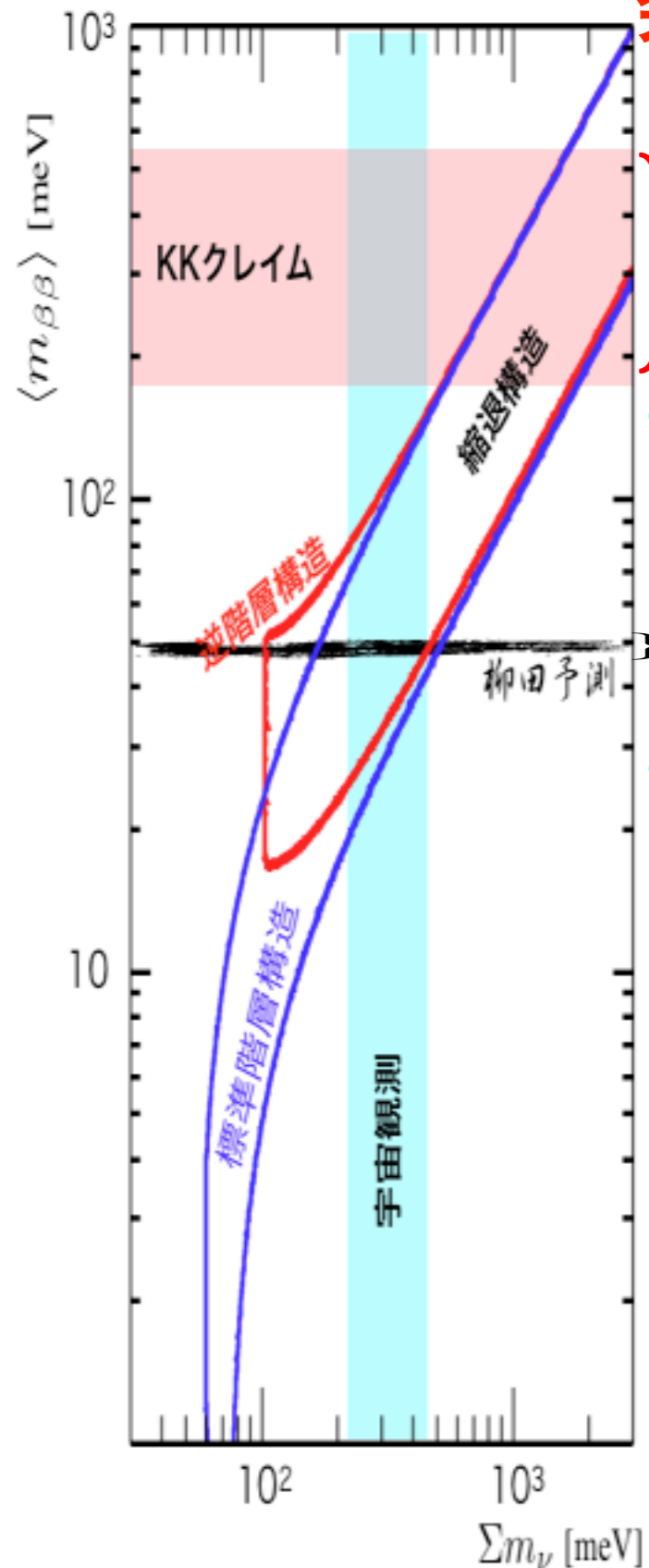
KamLAND2-Zen 高発光LSと集光ミラー
 $\sigma_E(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2.5\%$



将来展望

いつ発見しても不思議でない。

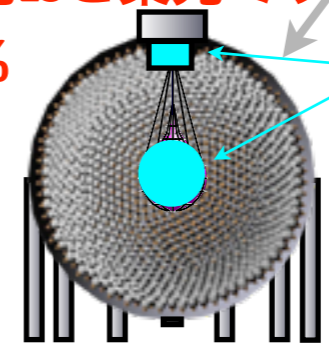
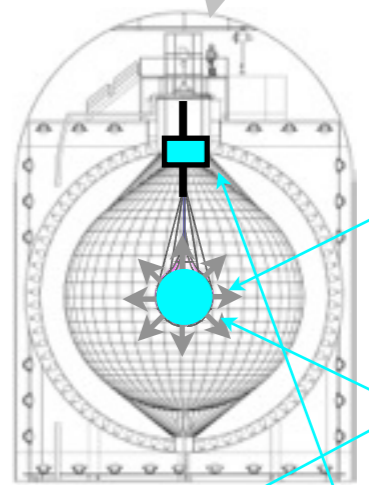
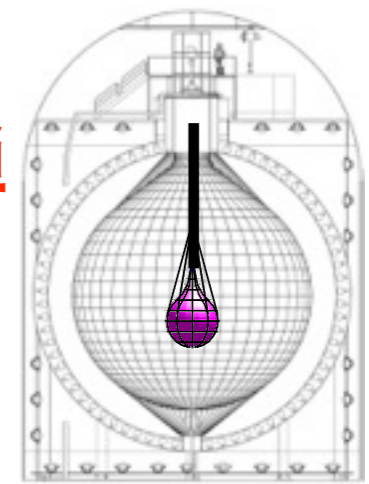
発見に最も近いのはカムランド禅



KamLAND-Zen 89.5 kg-yr
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @90\% \text{ C.L.}$
 現在世界最高感度

KamLAND-Zen
 放射性不純物100分の1に低減後
 KamLAND-Zen
 600kg超に増量、高清浄ミニバルーン

KamLAND2-Zen 高発光LSと集光ミラー
 $\sigma_E(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2.5\%$

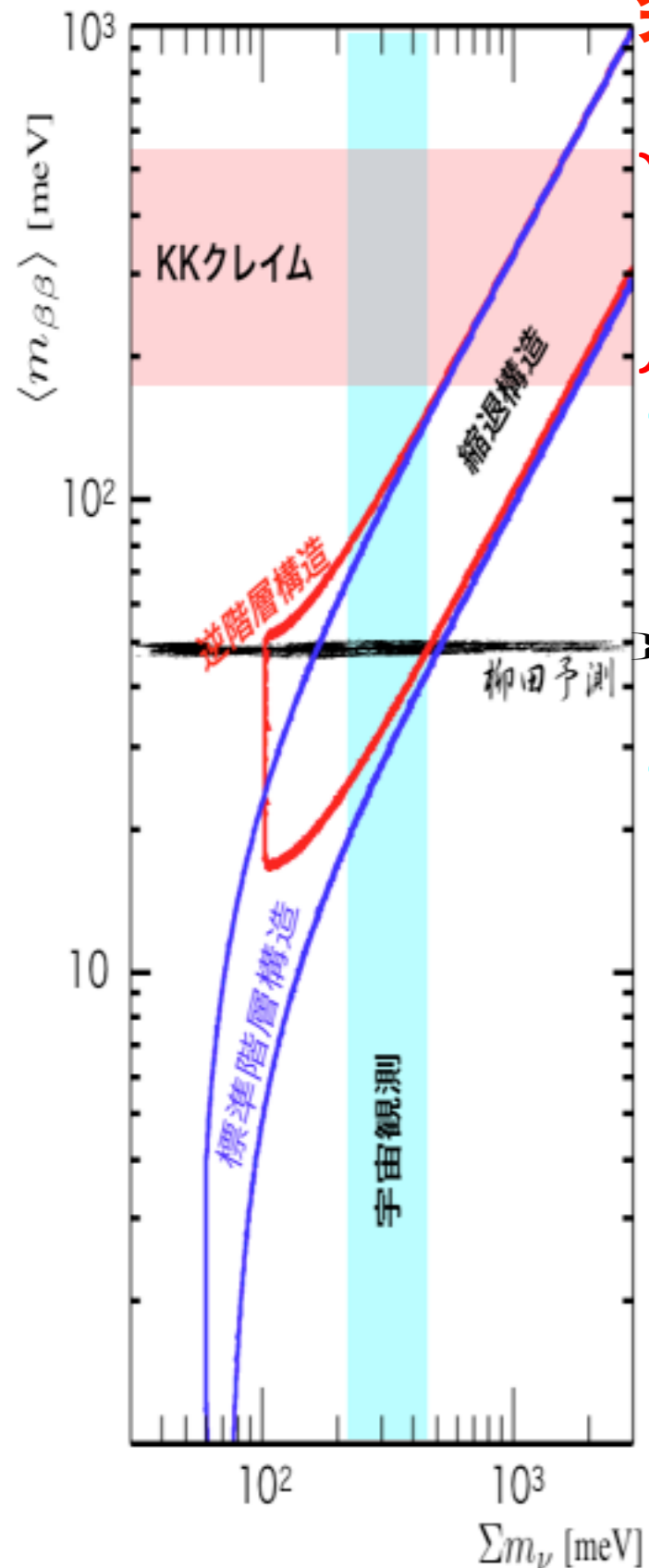


- Xe高濃度化の開発
- 発光フィルムの開発
- β / γ 識別用撮像技術の開発

将来展望

いつ発見しても不思議でない。

発見に最も近いのはカムランド禅



理論計算の誤差

純化後

来年以降

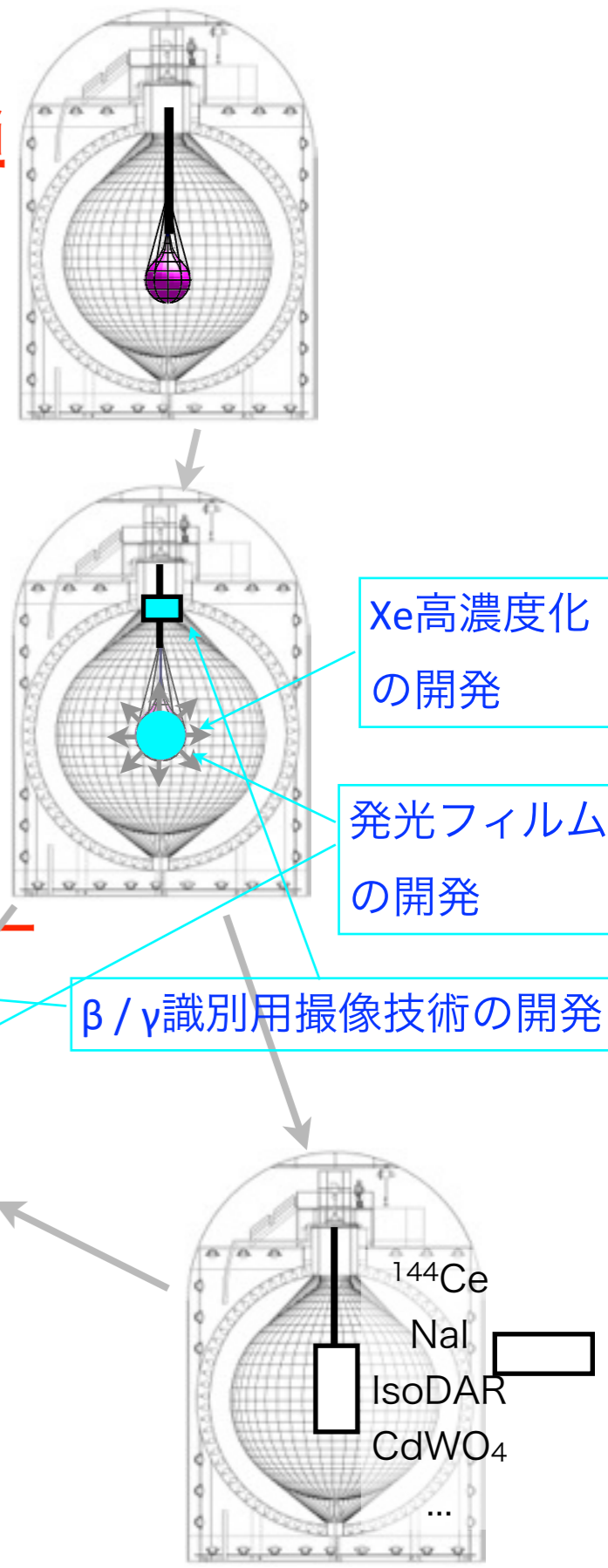
次期計画

KamLAND-Zen 89.5 kg-yr
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @90\% \text{ C.L.}$
 現在世界最高感度

KamLAND-Zen
 放射性不純物100分の1に低減後

KamLAND-Zen
 600kg超に増量、高清浄ミニバルーン

KamLAND2-Zen 高発光LSと集光ミラー
 $\sigma_E(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2.5\%$



Xe高濃度化の開発

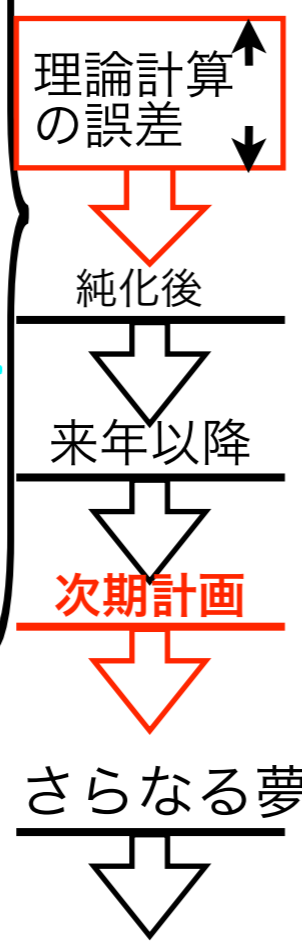
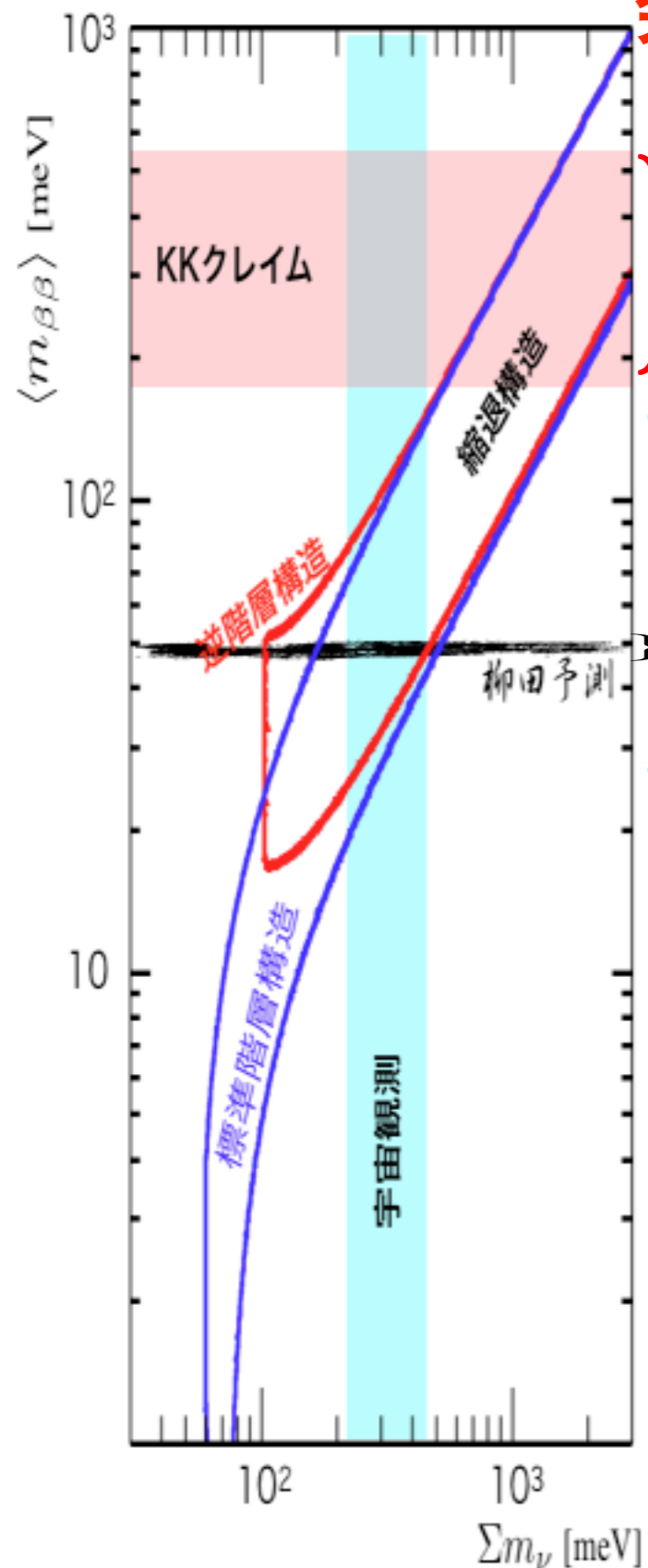
発光フィルム
の開発

β / γ識別用撮像技術の開発

種々の極低放射能
 科学研究の実施

将来展望

いつ発見しても不思議でない。
発見に最も近いのはカムランド禅

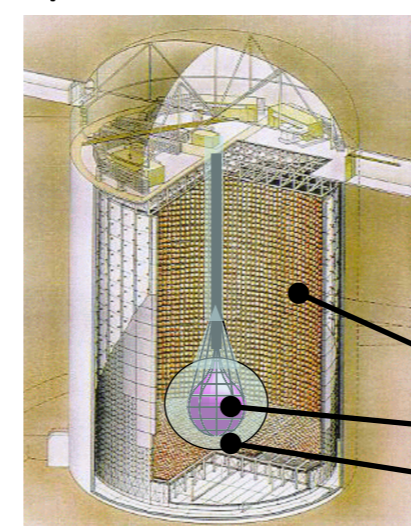


KamLAND-Zen 89.5 kg-yr
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 \text{ meV} @ 90\% \text{ C.L.}$
 現在世界最高感度

KamLAND-Zen
 放射性不純物100分の1に低減後
 KamLAND-Zen
 600kg超に増量、高潔浄ミニバルーン

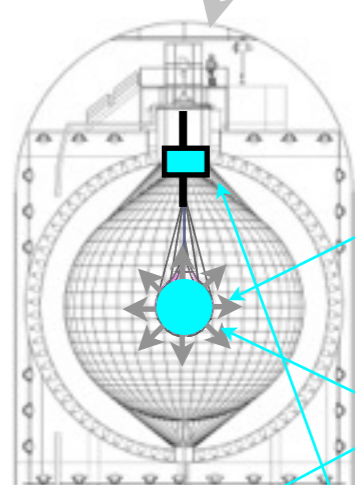
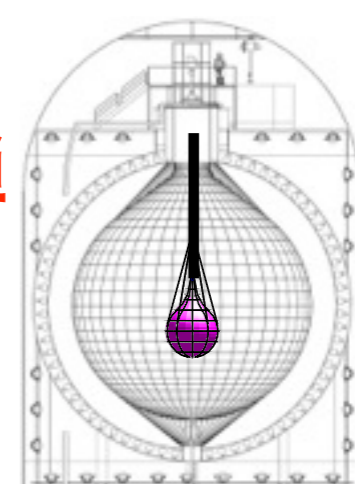
KamLAND2-Zen 高発光LSと集光ミラー
 $\sigma_E(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2.5\%$

Super-KamLAND-Zen



water or LS
 Xenon-LS
 normal LS

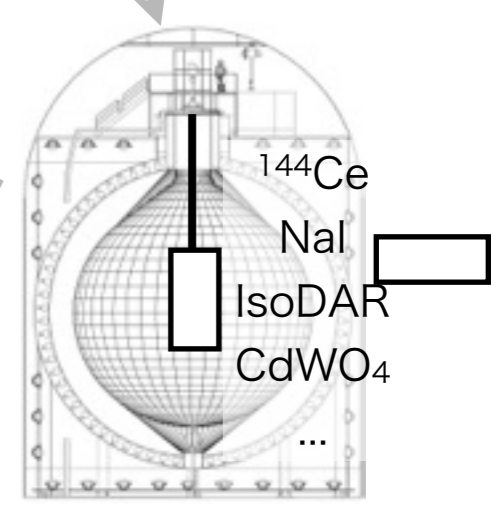
超精密反ニュートリノ物理
 $p \rightarrow \nu K^+$ なども可能



Xe高濃度化の開発

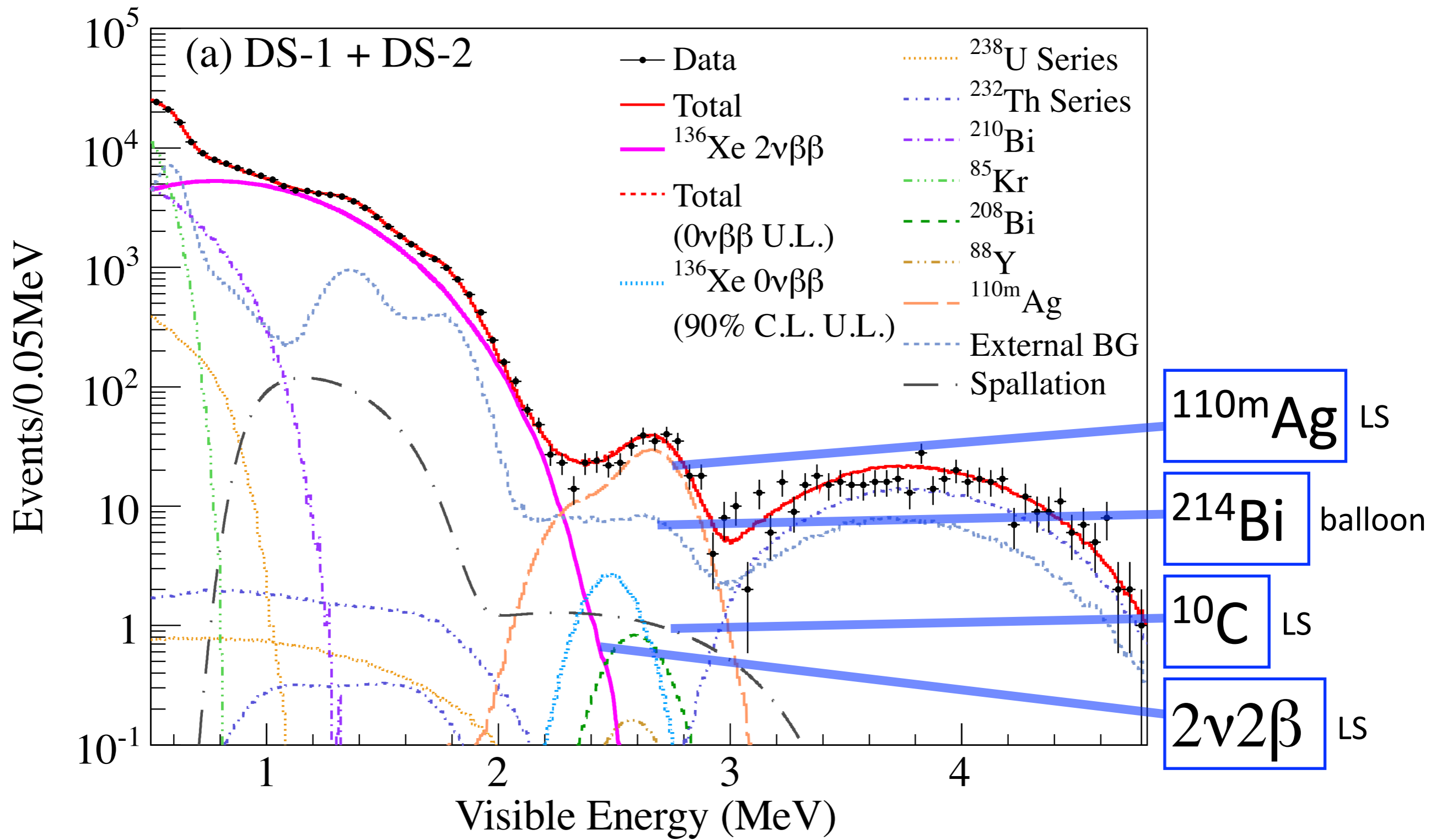
発光フィルムの開発

β / γ 識別用撮像技術の開発



種々の極低放射能
 科学研究の実施

主要バックグラウンドと対策



主要バックグラウンドと対策つづき

^{110m}Ag 地上での原子核破砕 (249.79d) or 福島原発由来、マルチバーテックス ($\beta^- + \gamma$ s)

対策 **Xe-LS純化**、高潔浄ミニバルーン、撮像、**高分解能**

^{214}Bi ミニバルーン不純物、マルチバーテックス ($\beta^- + \gamma$ s)、 ^{214}Bi - ^{214}Po 遅延二重

対策 高潔浄ミニバルーン、**有効体積**、発光フィルム、撮像、**高分解能**

^{10}C 地下での原子核破砕 (19.255s)、マルチバーテックス ($\beta^+ + \gamma$)、 $\mu\text{-n-}^{10}\text{C}$ 遅延三重

対策 **新型電子回路**、昇圧キセノン、撮像、**高分解能**

$2\nu 2\beta$ 不可避 対策 **高分解能** (分解能の5~6乗で低減)

ν_{solar} 不可避 対策 昇圧キセノン、**高分解能** (分解能の1乗で低減)

開発状況

昇圧キセノン → 圧力に比例したキセノン濃度向上は確認済み

発光フィルム → PETシンチレータをテスト中

^{110m}Ag → Xe-LS純化中

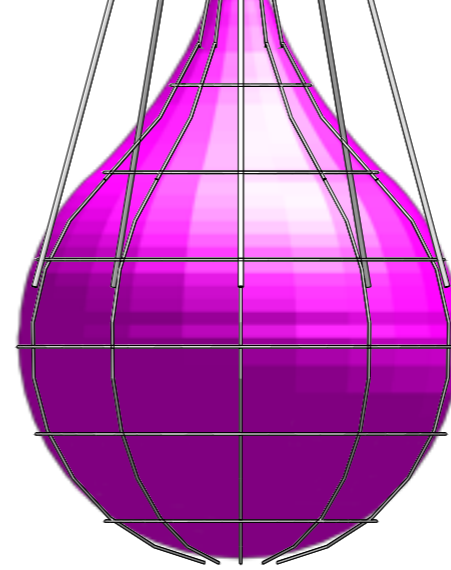
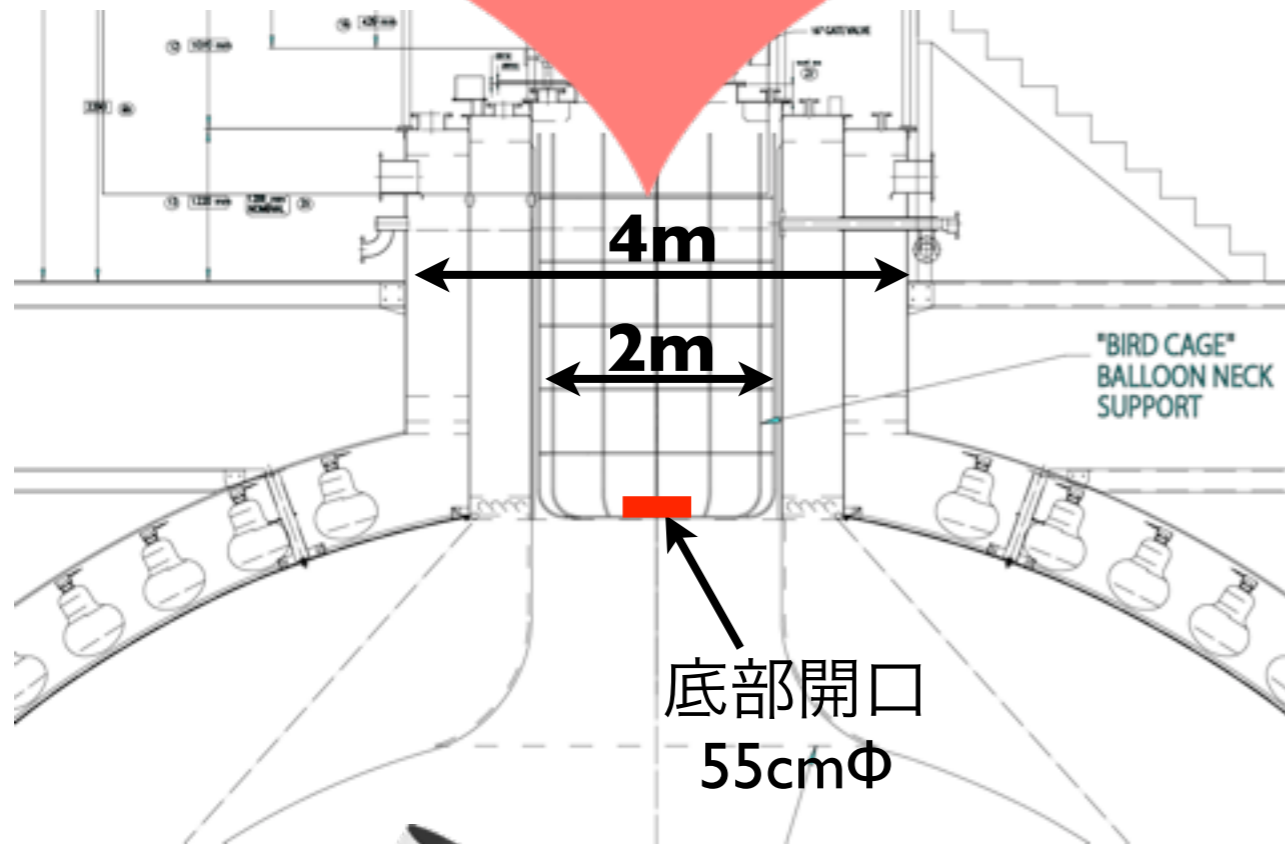
$\mu\text{-n-}^{10}\text{C}$ 遅延三重 → 新型電子回路 (プロトタイプ2/3で稼働)

マルチバーテックス → 撮像

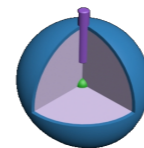
高分解能 → 集光ミラー、大光量LS、高量子効率PMT → **KamLAND2**
 $\times 1.8$ ($\times 1.4$) $17''\Phi \rightarrow 20''\Phi, \epsilon=22\% \rightarrow 30+\%$ $\times 1.9 = \times 4.8$

Hyper-Kの開発に参加

KamLAND2での展開



大型バルーン
Xe 1000kg超



75kCi ^{144}Ce
第4世代ニュートリノ探索



NaI 1 ton
暗黒物質探索

KamLAND2で
付加される目標

継続的運転が必
要なもの

- 二重β崩壊： ^{136}Xe （逆階層構造全体） 5年 ●
- 多核種測定： CdWO_4 , CaF_2 , Nd-LS など 各5年 ○
- 第4世代ニュートリノ探索： $75\text{kCi } ^{144}\text{Ce}$ 2年 ○
- 暗黒物質探索：高純度NaI 2年 ○
- 太陽CNOニュートリノ（ ν 天体物理） 3年 ○
- 地球反ニュートリノ（ ν 地球物理） 10年 ●
- 第4世代 ν 精密測定：サイクロトロン 5年 ●

併存できないものがある↑

汎用化

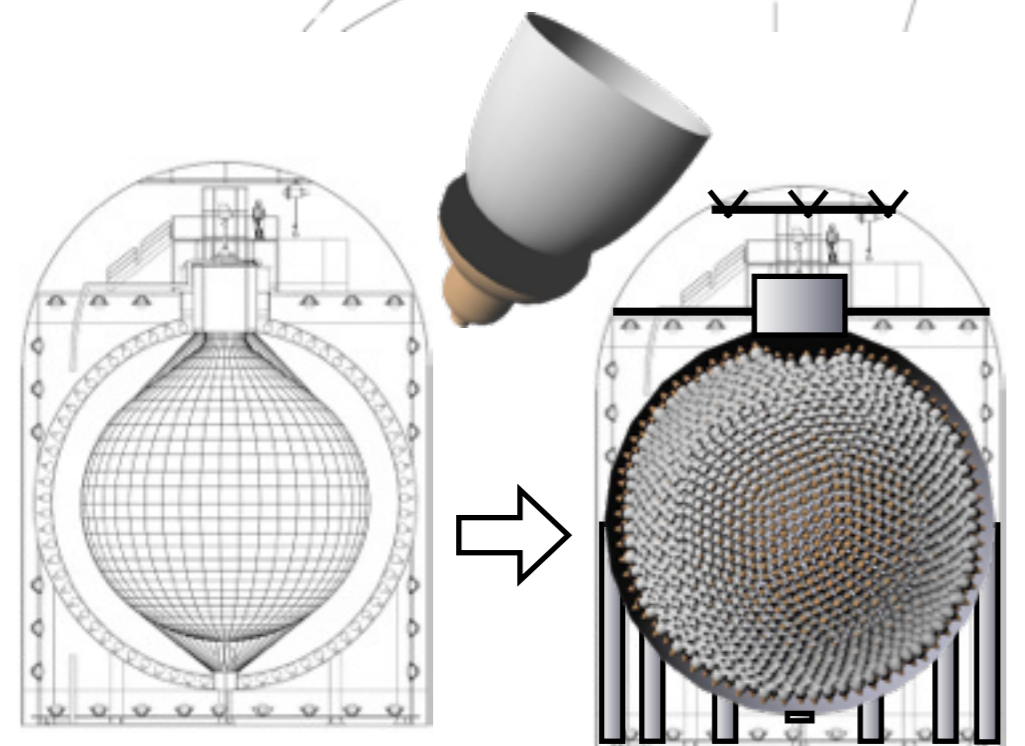
クレーン強化
床補強
開口部拡大

高性能化

大光量シンチレータ
集光ミラー
高量子効率PMT
(発光フィルム)
(撮像装置)

修理

外水槽水漏れ補修
外部PMT交換修理



KamLAND

KamLAND2

KamLAND2-Zen

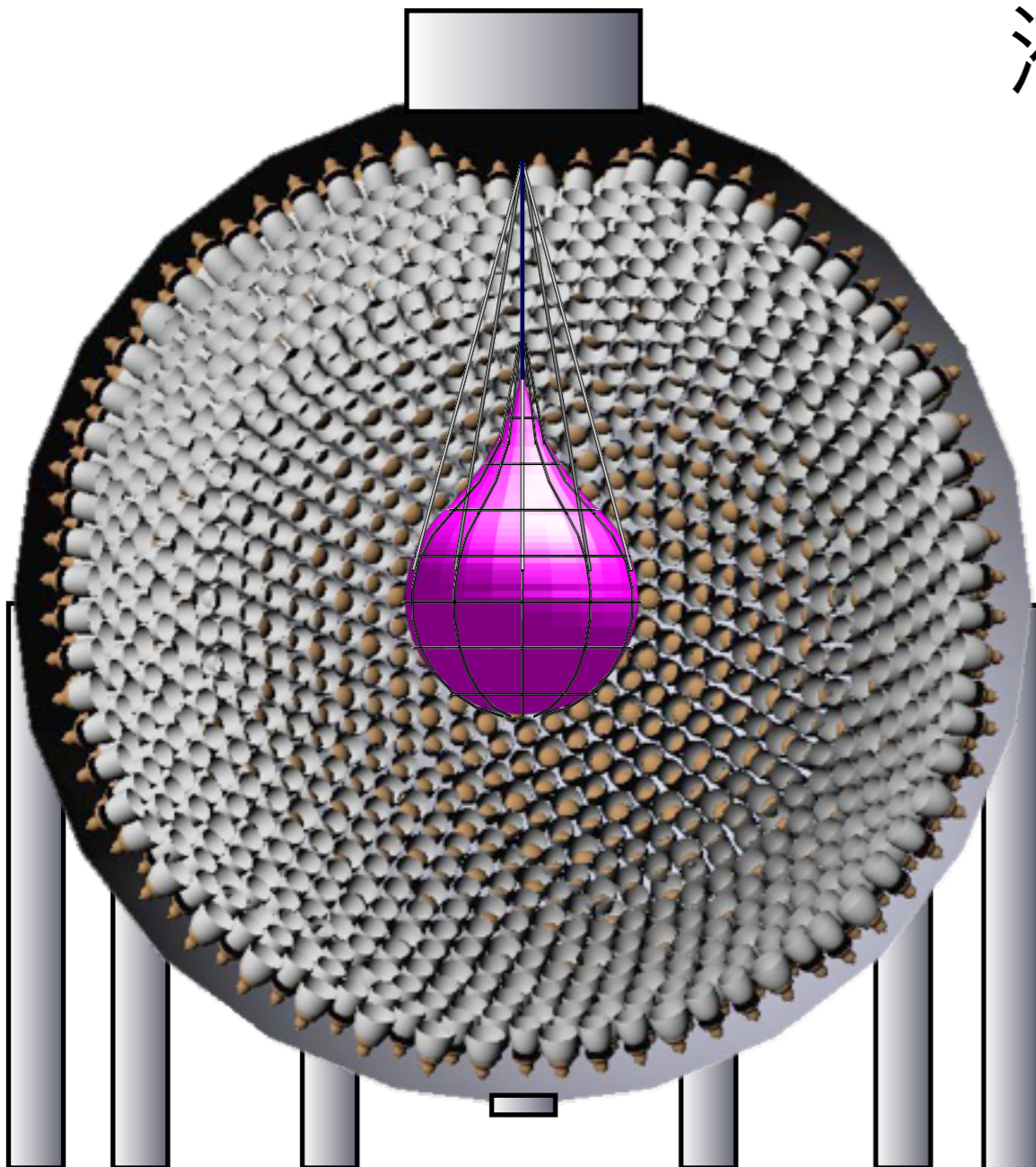
導入部拡大

5トン程度の釣り下げ能力

いろいろな装置を導入できる。

CaF₂, CdWO₄, ¹⁴⁴Ce, NaI 他

1000kg 濃縮キセノン



Winston cone (集光ミラー)



光被覆率 > x2

光収集量 > **x1.8**

液体シンチレータ改良

カムランド液体シンチレータ 8,000 光子/MeV

標準的な液体シンチレータ 12,000 光子/MeV

x1.4

高量子効率PMT または HPD

17"Φ→20"Φ, ε=22% → 30+%

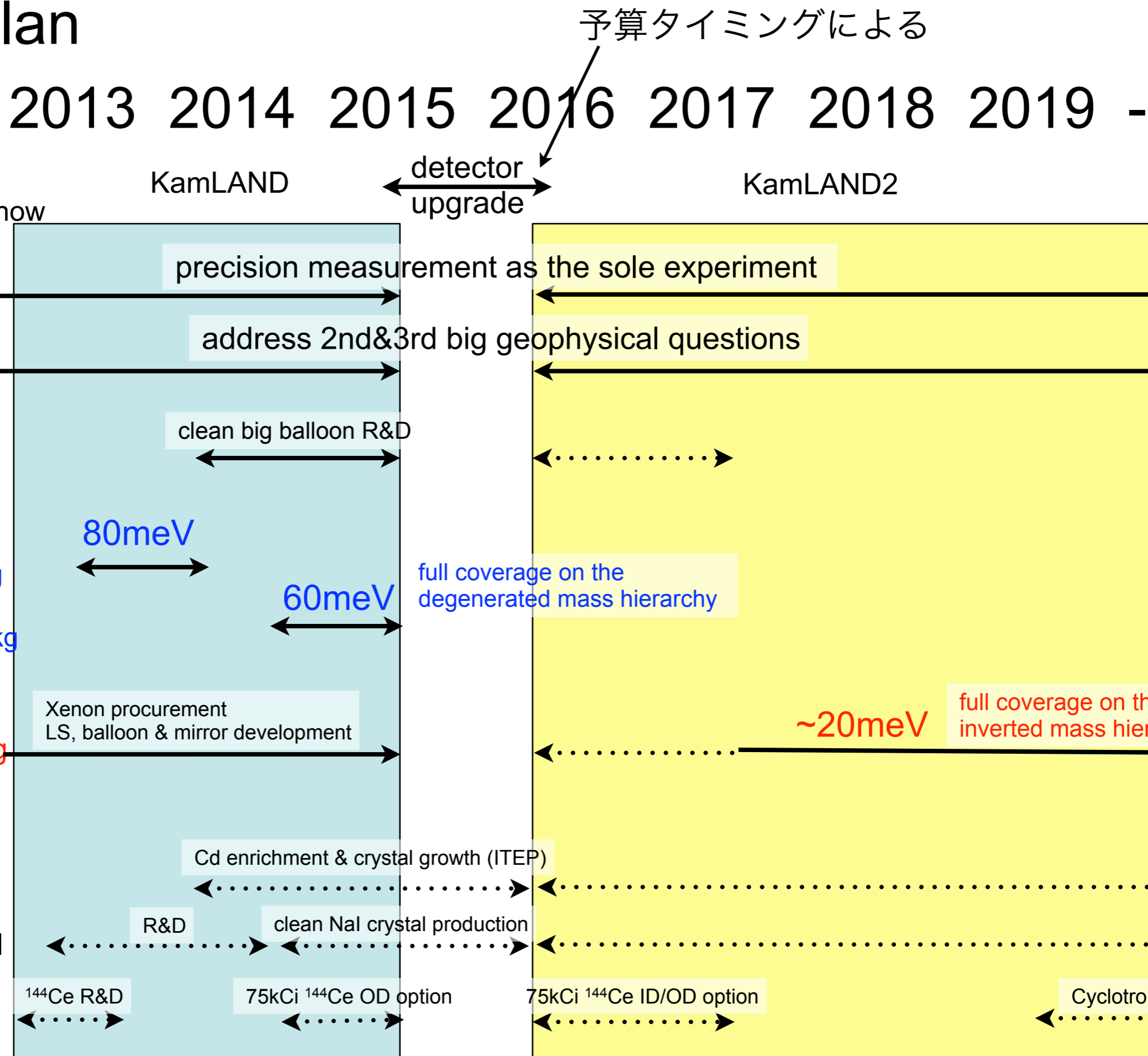
x1.9

目標 σ (2.6MeV) = 4% → < 2.5%

単純計算 < 2%

目標感度 ~20meV/5年

Future Plan



極低放射能環境でのニュートリノ研究

研究
目的

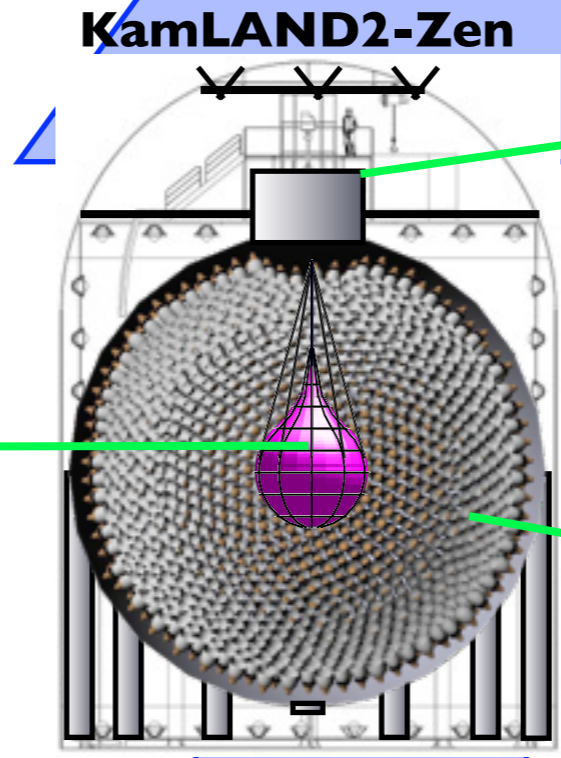
宇宙物質優勢の謎
軽いニュートリノ質量の謎
ニュートリノのマヨラナ性
ニュートリノ質量の大きさ

地球形成
地球ダイナミクス
地球深部の組成・構造

素粒子世代数の謎
暗黒物質の謎

カムランドの
高分解能化・
汎用化など

高S/N化
キセノン1000kg
低放射能バルーン
新型電子回路
(高圧キセノン)
(高感度撮像)
(発光バルーン)



汎用化
導入部拡大
重量物つり下げ機構

高分解能化 4%@Q→2%
高発光液体シンチレータ
集光ミラー
高量子効率光センサー

特徴

高いスケラビリティ
複数テーマの共存 (多目的)

原子炉の低稼働率による良質
の地球ニュートリノデータ

既存設備活用により
迅速・低コスト・高感度

実績

世界最高感度を達成
KKクレイムの排除

ニュートリノ地球科学の創出
地球形成時の熱の残存を証明

世界最高レベルの
極低放射能環境

研究
手法

ニュートリノを伴わない
二重β崩壊の探索

地球ニュートリノ
観測

その他極低放射能科学研究
第4世代ニュートリノ探索
暗黒物質季節変動の検証

稼働時期 2016年度以降

必要人員 建設期 60人程度 (2015年度以降)

20人程度不足 学生アルバイト・技術職員等に期待

必要経費 合計27億円 (運転経費のぞく)

内訳

○高エネルギー分解能化

大光量液体シンチレータ(+バッファオイル)3000立方メートル	7億円
高量子効率光センサー	6億円
集光ミラー	1億円

○汎用化

導入口拡張+クレーン設置	1億円
--------------	-----

○極低放射能環境の増強

低放射能バルーン	1億円
デッドタイムフリー電子回路	2億円
革新技術開発(発光バルーン、高感度撮像、高圧キセノン導入)	1億円

○二重β崩壊核の増量

Xe136追加 400kg (合計1000kg)	8億円
--------------------------	-----

KamLAND-Zen Collaboration



A. Gando,¹ Y. Gando,¹ H. Hanakago,¹ H. Ikeda,¹ K. Inoue,^{1,2} K. Ishidoshiro,¹ R. Kato,¹ M. Koga,^{1,2} S. Matsuda,¹ T. Mitsui,¹ D. Motoki,¹ T. Nakada,¹ K. Nakamura,^{1,2} A. Obata,¹ A. Oki,¹ Y. Ono,¹ M. Otani,¹ I. Shimizu,¹ J. Shirai,¹ A. Suzuki,¹ Y. Takemoto,¹ K. Tamae,¹ K. Ueshima,¹ H. Watanabe,¹ B.D. Xu,¹ S. Yamada,¹ H. Yoshida,¹ A. Kozlov,² S. Yoshida,³ T.I. Banks,⁴ S.J. Freedman,^{2,4} B.K. Fujikawa,^{2,4} K. Han,⁴ T. O'Donnell,⁴ B.E. Berger,⁵ Y. Efremenko,^{2,6} H.J. Karwowski,⁷ D.M. Markoff,⁷ W. Tornow,⁷ J.A. Detwiler,⁸ S. Enomoto,^{2,8} and M.P. Decowski^{2,9}

(The KamLAND-Zen Collaboration)

¹*Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan*

²*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), University of Tokyo, Kashiwa, 277-8583, Japan*

³*Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan*

⁴*Physics Department, University of California, Berkeley, and*

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

⁵*Department of Physics, Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523, USA*

⁶*Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA*

⁷*Triangle Universities Nuclear Laboratory, Durham, North Carolina 27708, USA and*

Physics Departments at Duke University, North Carolina Central University, and the University of North Carolina at Chapel Hill

⁸*Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA*

⁹*Nikhef and the University of Amsterdam, Science Park, Amsterdam, the Netherlands*

42名 (カムランドのサブセット)

徳島大学が参加