



東北大学



A01班：大型液体シンチレータ検出器での  
ニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究

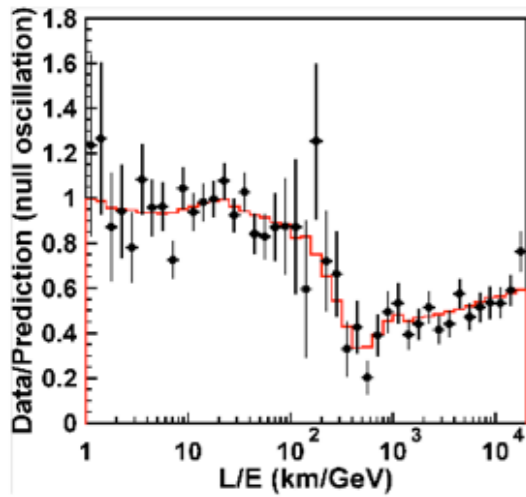
# KamLAND-Zen

東北大学ニュートリノ科学研究センター  
井上邦雄

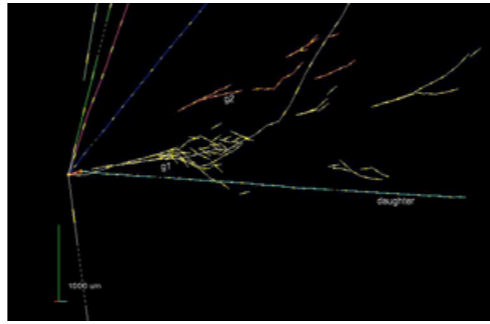
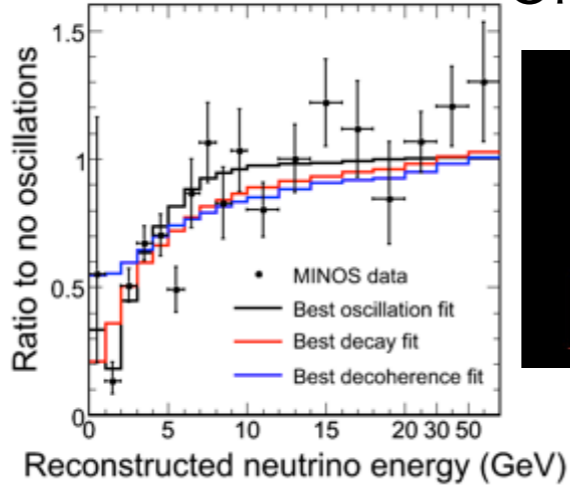
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>



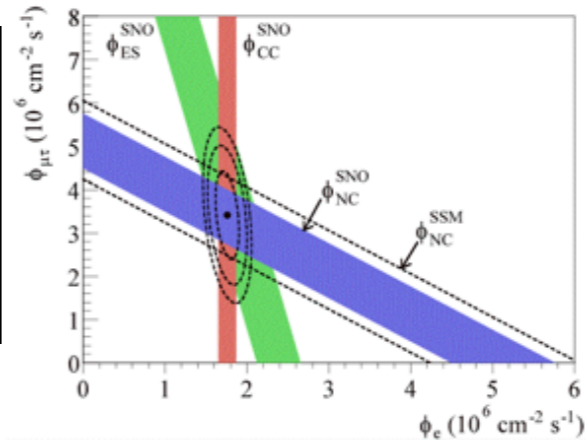
# SK 大気 半周期



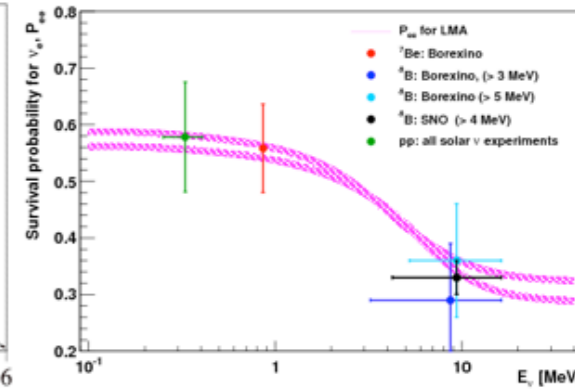
# MINOS 半周期 OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



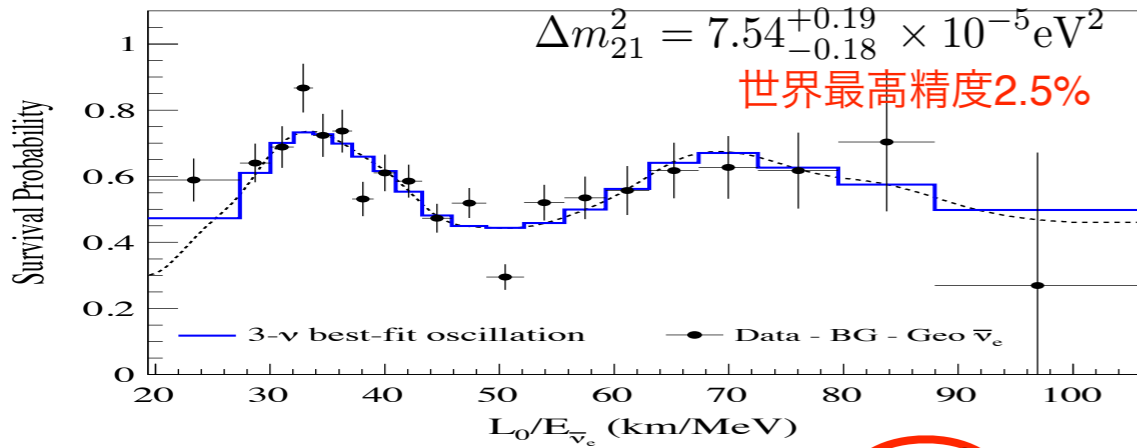
# SNO CC/NC



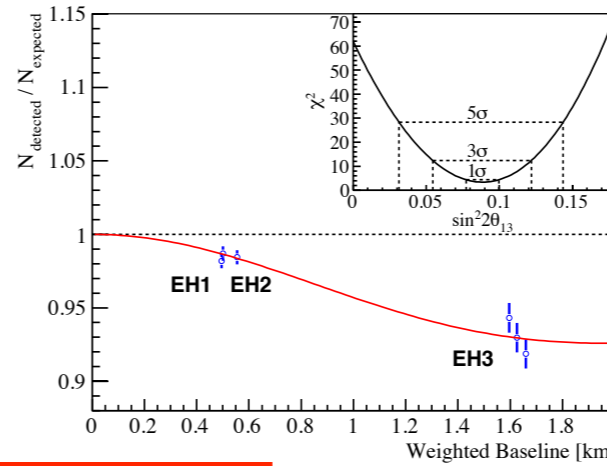
# Borexino MSW



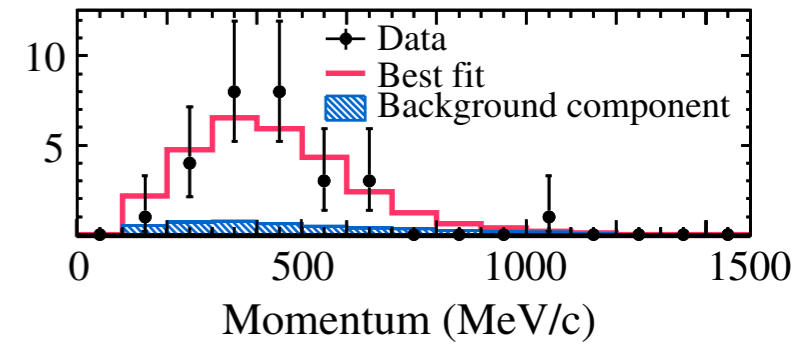
# KamLAND 2 周期



# 原子炉短基線



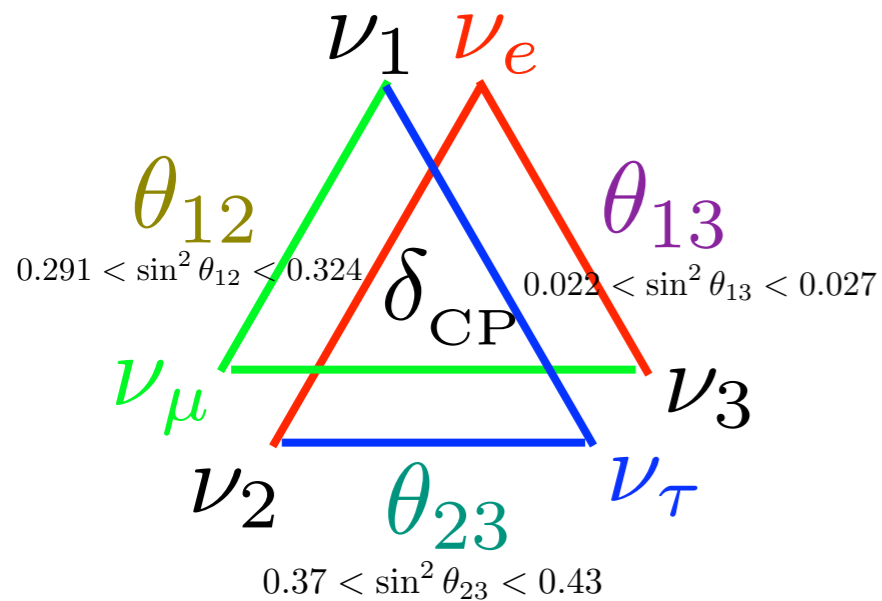
# T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



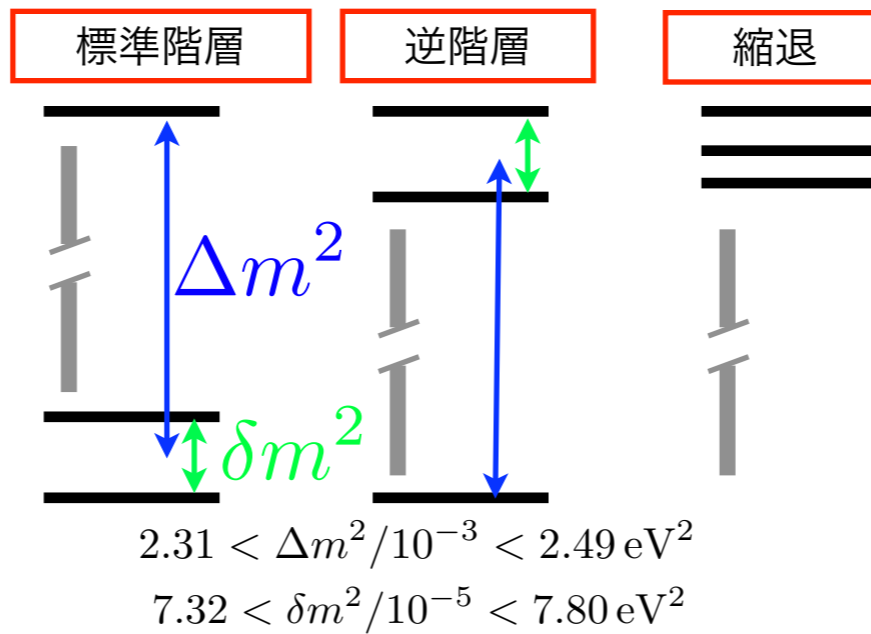
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta m^2 L}{4E}\right)$$

質量の2乗差

## 混合



## 質量階層構造



## 未解明の性質

(1つまたは3つの) CP位相  
 質量 (絶対値) 階層構造  
 マヨラナ? ディラック?  
 世代数



# 未解明のニュートリノの性質

- 1つまたは3つのCP位相
- 質量（絶対値）階層構造
- マヨラナ？ディラック？
- 世代数

ニュートリノ振動で測定

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\lambda_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\lambda_{31}} \end{pmatrix}$$

ニュートリノ振動  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$

二重ベータ崩壊  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = |\sum m_i |U_{ei}|^2 \epsilon_i|$

宇宙論的観測  $M = \sum m_i$

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

これは必須

## 二重ベータ崩壊

現実的マヨラナ性検証

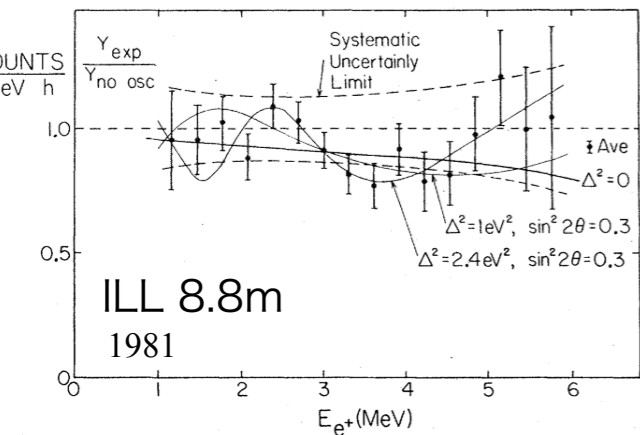
質量絶対値測定も期待

マヨラナCP測定の入り口

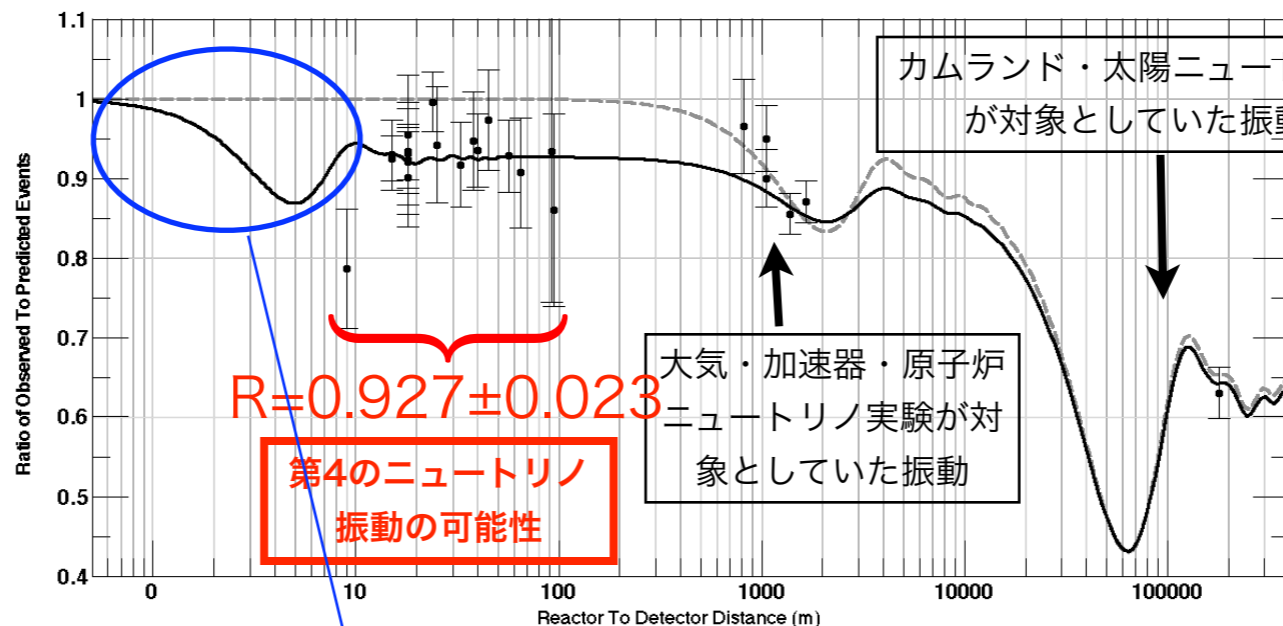


# 世代数

至近距離でスペクトルの歪み？

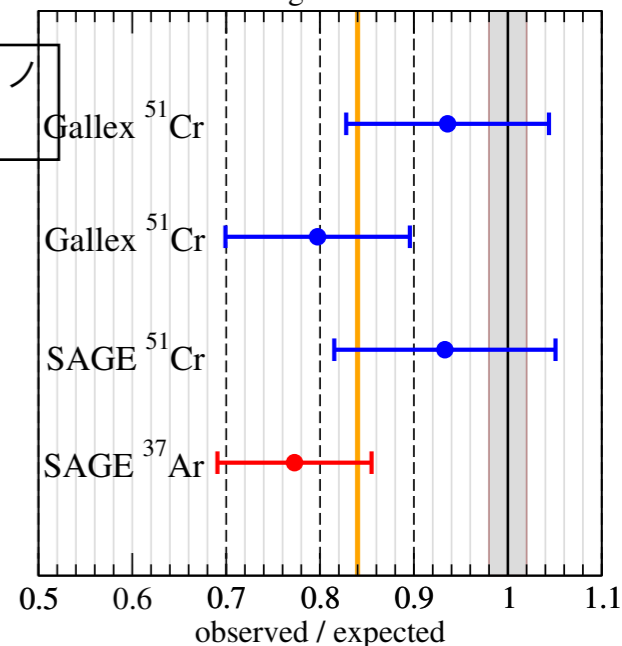


過去の原子炉反ニュートリノ測定結果



ガリウム太陽ニュートリノ観測装置でのニュートリノ線源による実験

Gallium data using Frekers et al PLB11



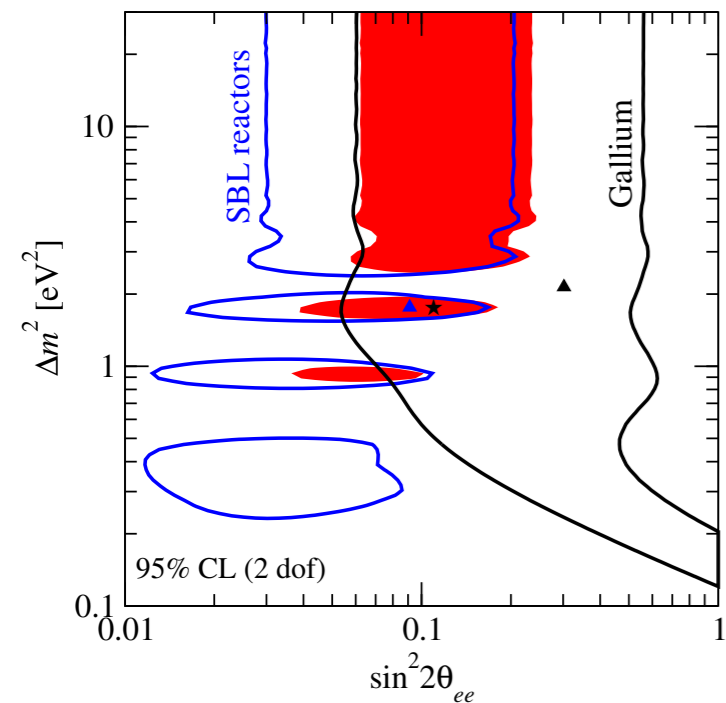
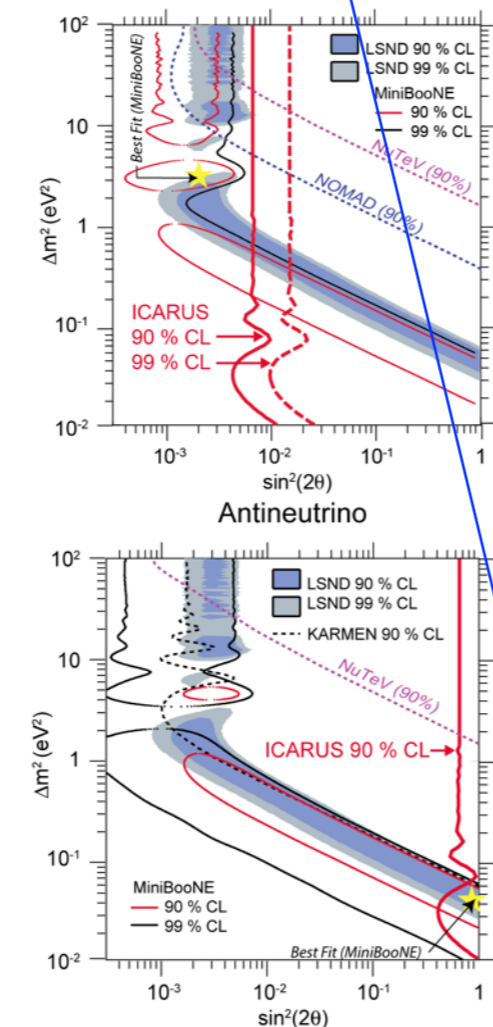
第4のニュートリノ振動の可能性

## ステライルニュートリノのヒント

	ニュートリノ源	対象	有意さ
原子炉	$\beta$ 崩壊	$\bar{\nu}_e$ 欠損	$3.0\sigma$
ガリウム	電子捕獲	$\nu_e$ 欠損	$2.7\sigma$
LSND	静止状態での崩壊	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	$3.8\sigma$
MiniBoone	短基線加速器	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	$3.8\sigma$
宇宙論	ビッグバン	有効世代数	$\sim 2\sigma$

超短距離での実験が重要、

カムランド内で振動が見えるのでは？

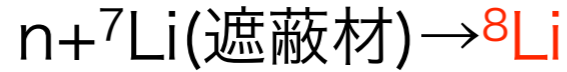
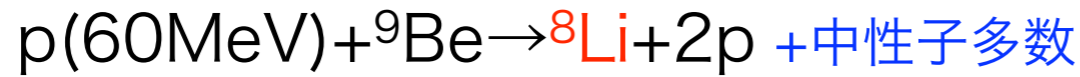
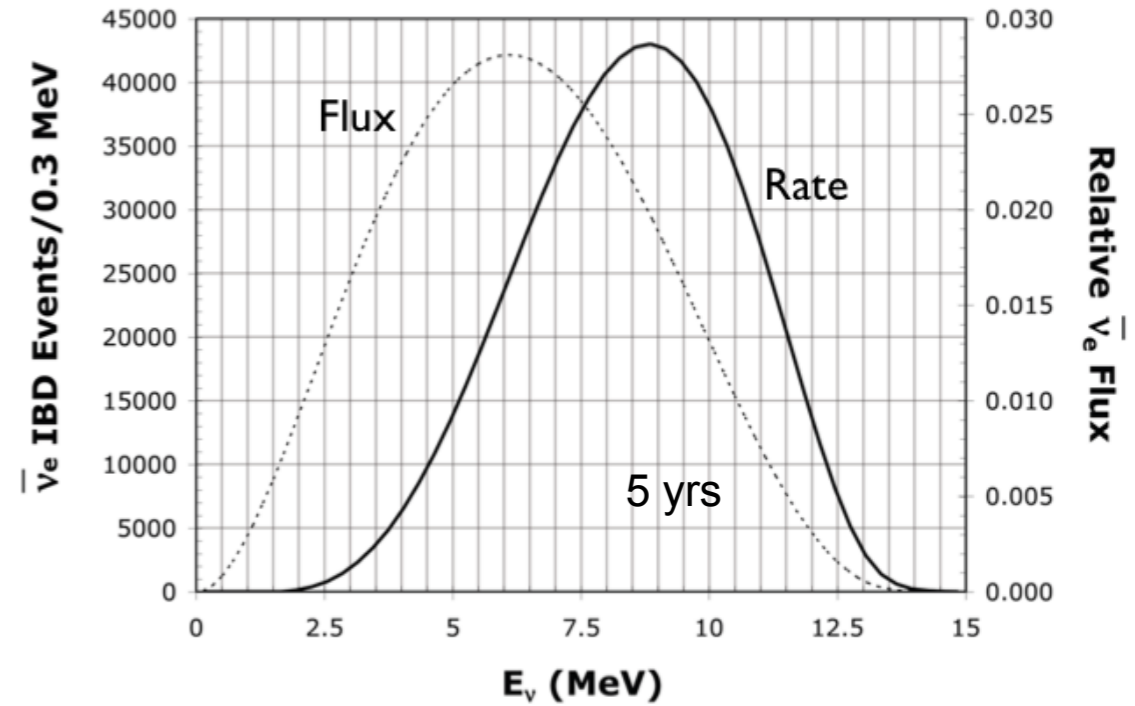
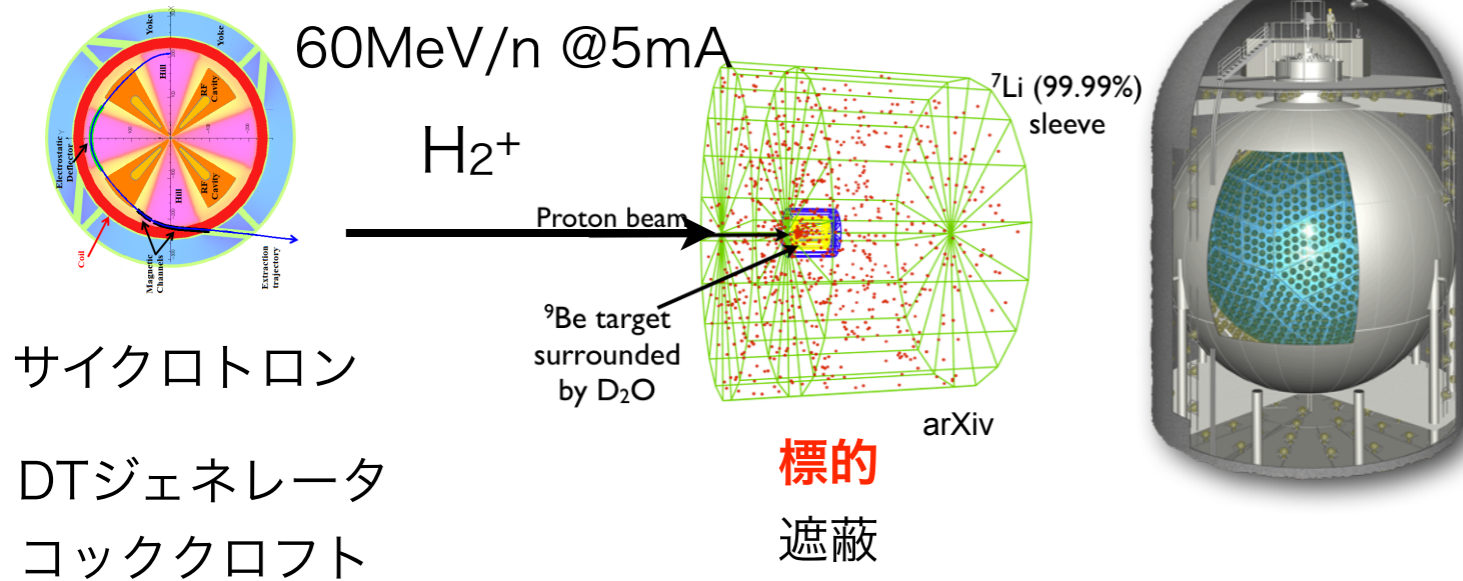


1 eV程度のステライルニュートリノのヒント



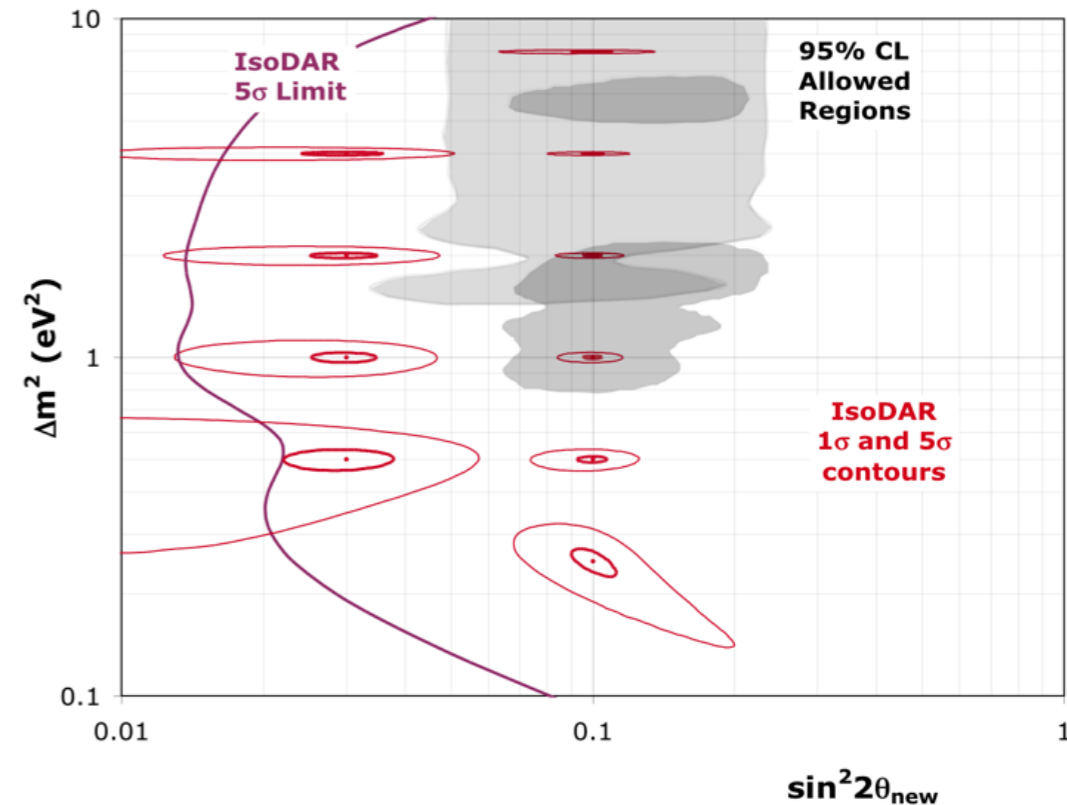
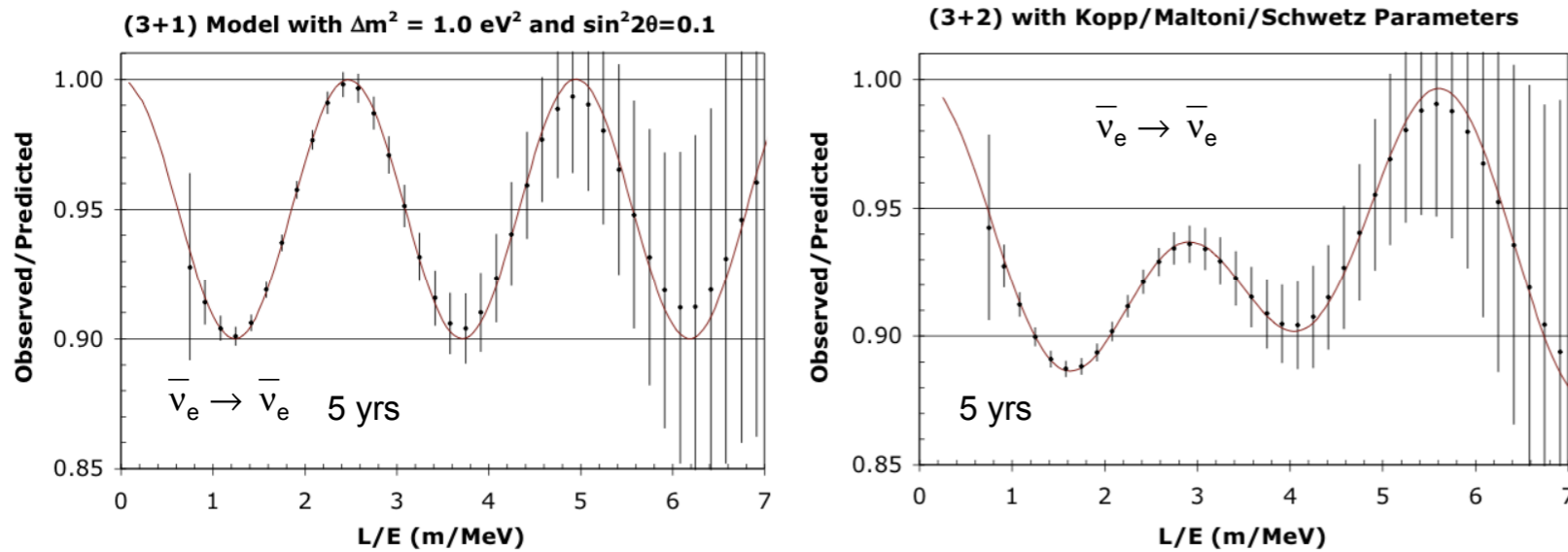
# IsoDAR

arXiv:1205.4419



16万事象/年

IsoDAR abilities (5 years @ KamLAND)



第4世代ニュートリノ振動の精密測定



マヨラナ性が確認できたら、

宇宙・素粒子の大問題解明に貢献

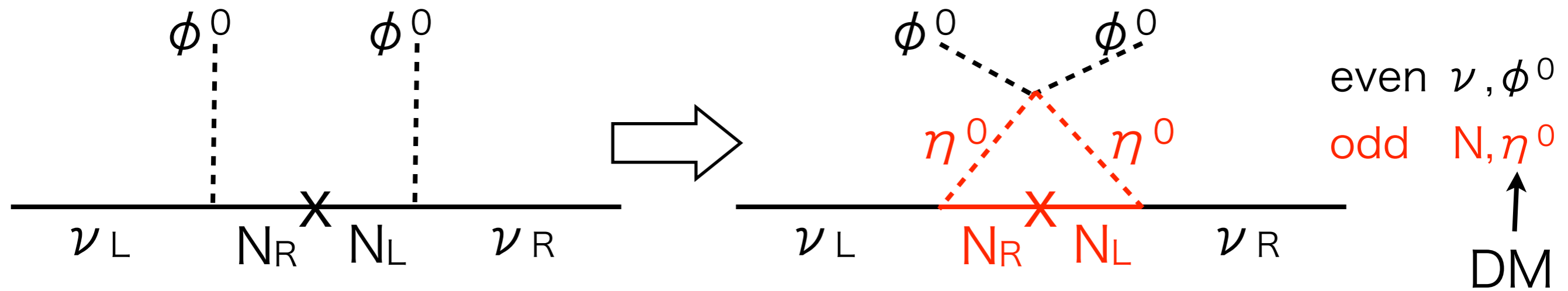
○ **軽いニュートリノ質量** Seesaw機構

○ **宇宙物質優勢** Leptogenesis機構

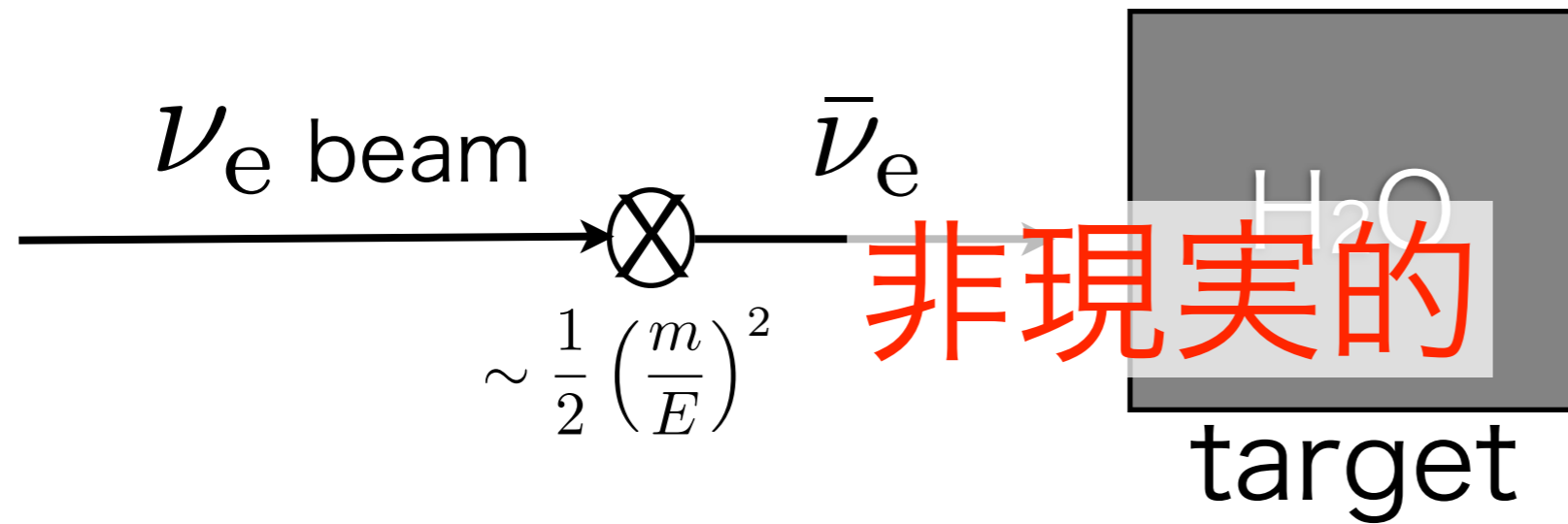
○ **暗黒物質** Asymmetric dark matter, 輻射Seesaw機構  
第4世代ニュートリノ？

○ 暗黒エネルギー

輻射シーソー模型の例



# Straight forward method to verify Majorana nature



look for

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

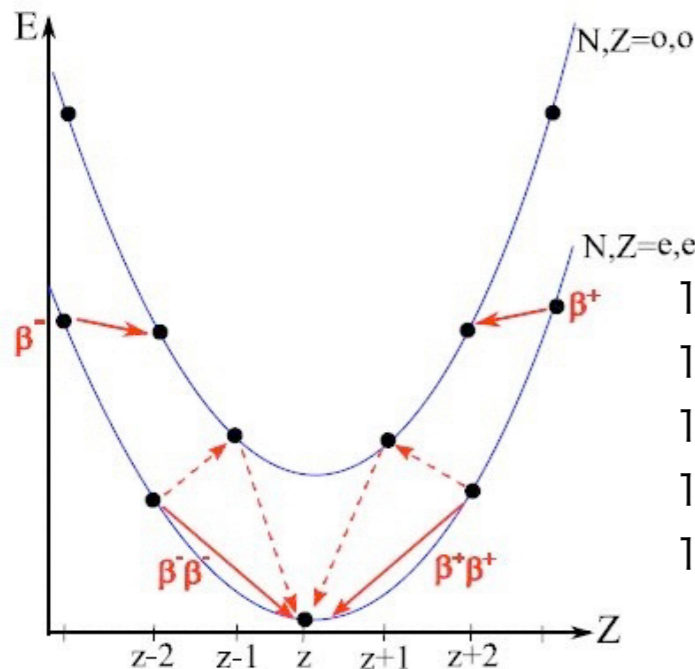
$$\sigma \propto E^2$$

小質量(eV)、大エネルギー(MeV)のため、ヘリシティ反転は起きにくい。  
断面積自体も非常に小さい。

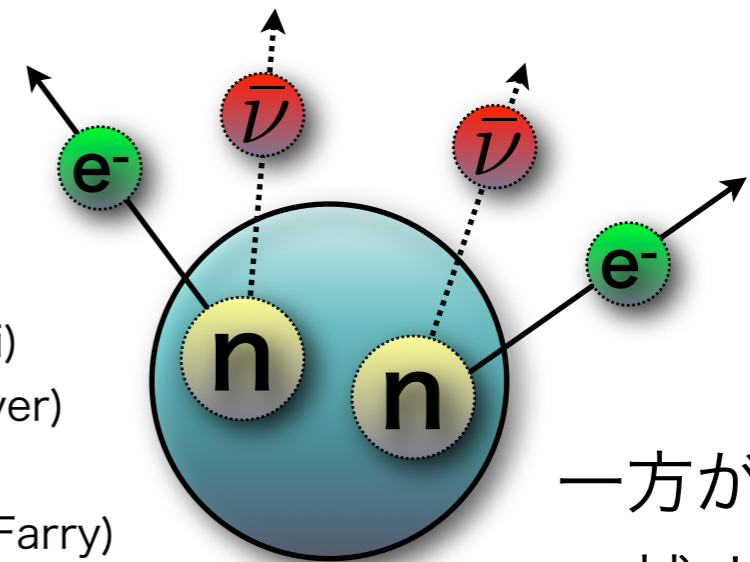
幸い自然は親切で、

数十の原子核が二重β崩壊する。

2つのニュートリノが、フェムトメートルの空間に作られる。



- 1930 light neutral particle (W.Pauli)
- 1933 neutrino, beta decay theory (E.Fermi)
- 1935 double beta decay (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
- 1939 neutrino-less double beta decay (W.Furry)

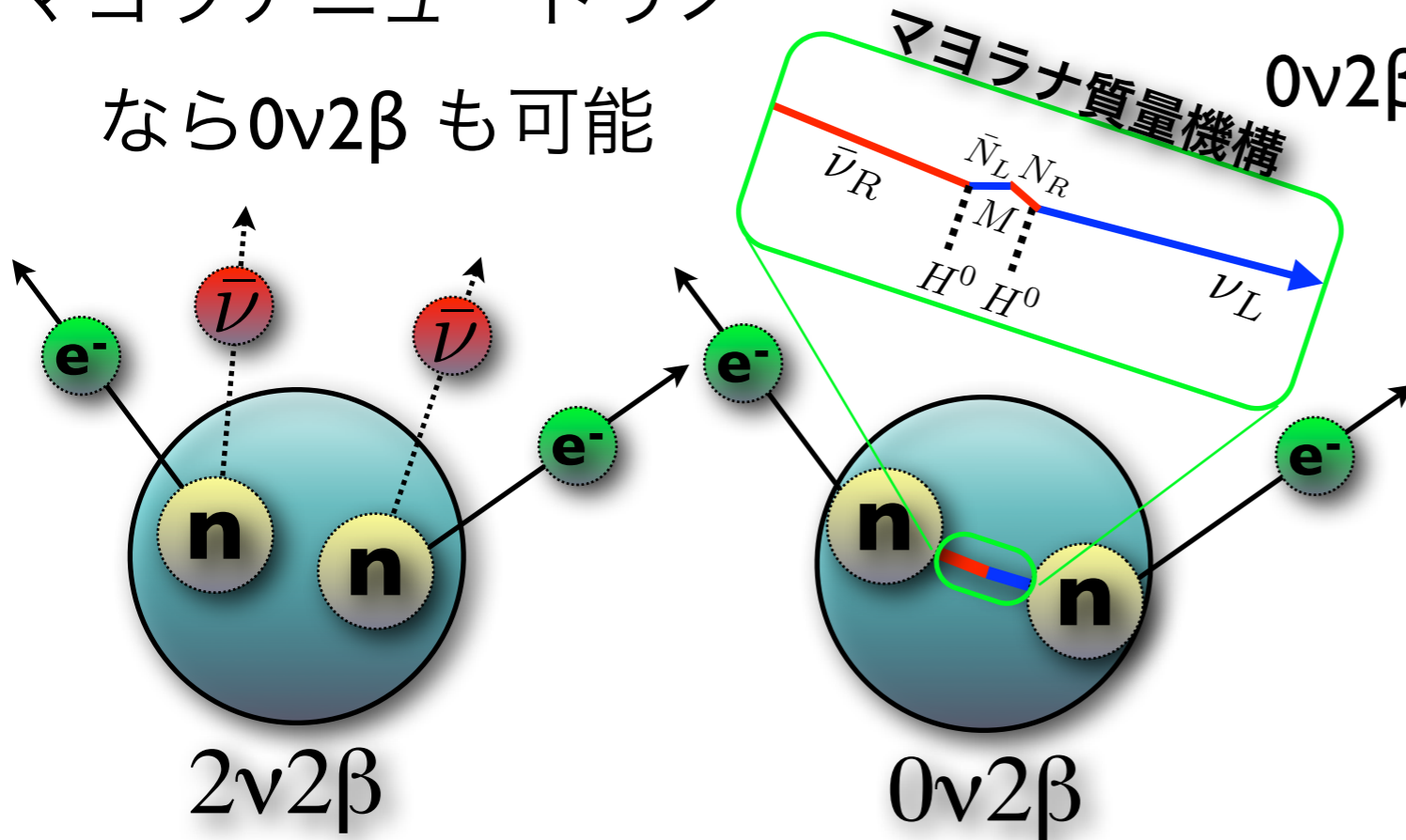


一方が他方を追い越す事も可能



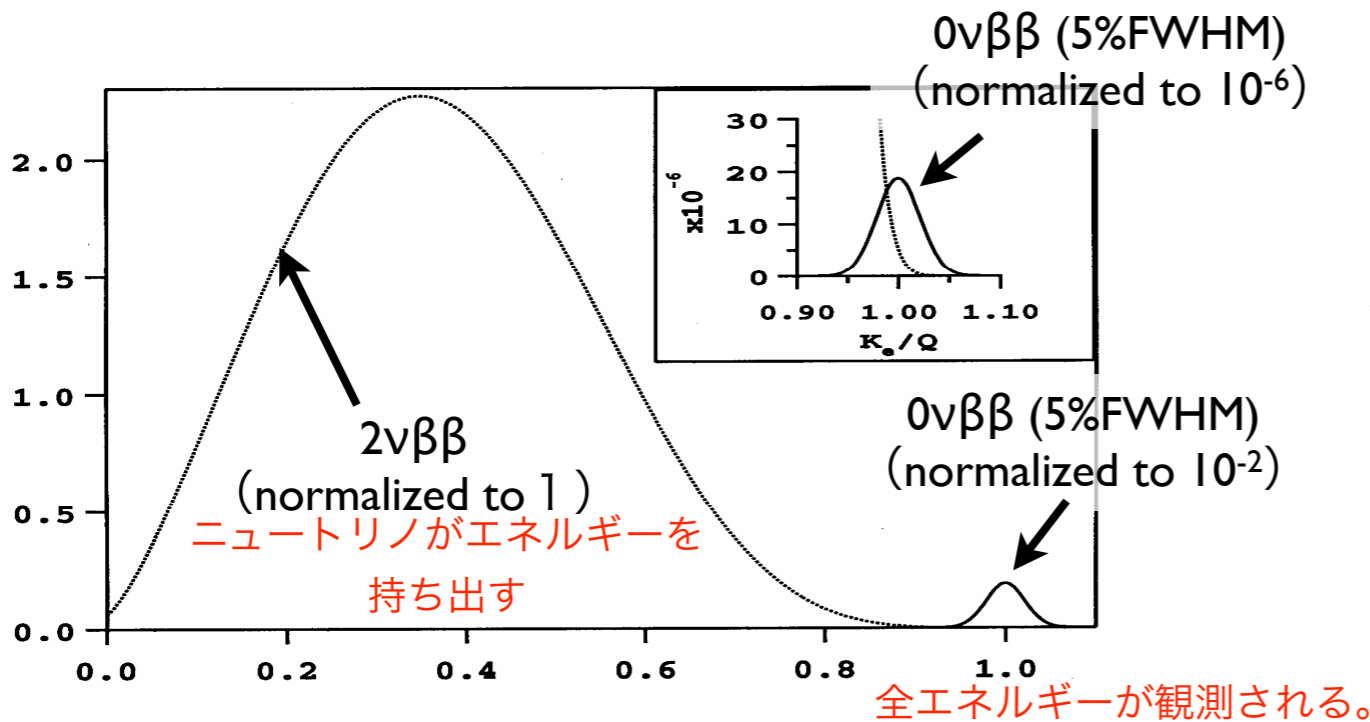
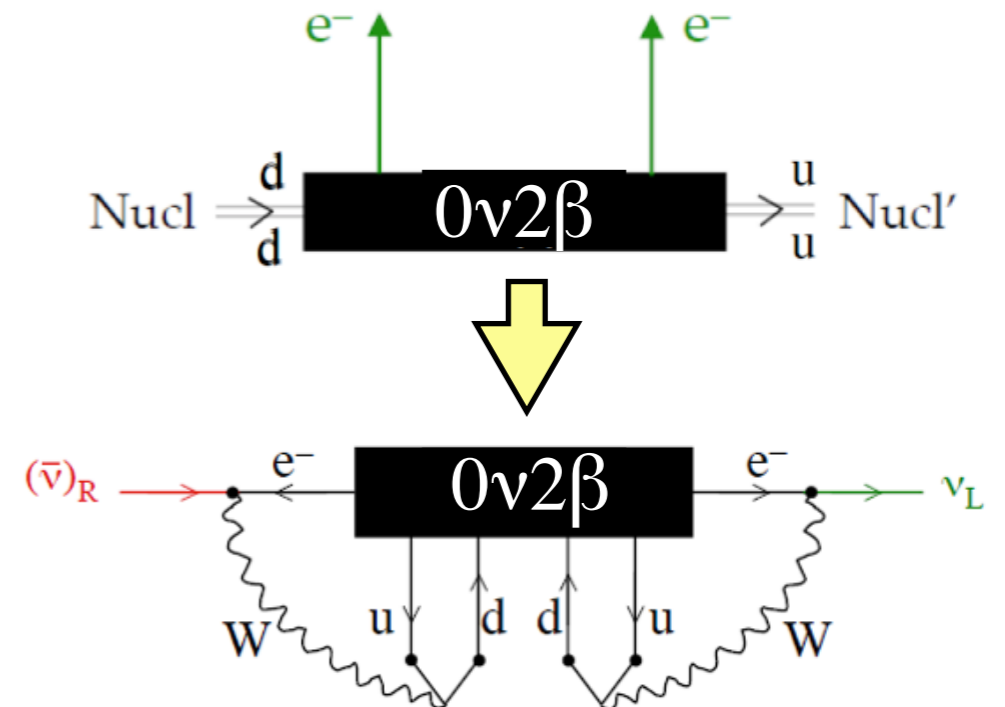
# 二重β崩壊

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)



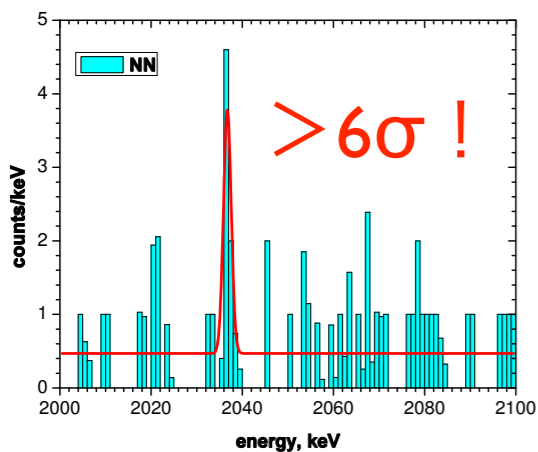
$0\nu 2\beta$  崩壊率は、マヨラナ有効質量の  
2乗に比例するので、質量の絶対値に対  
する情報が得られる。 マヨラナCP

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

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

# 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

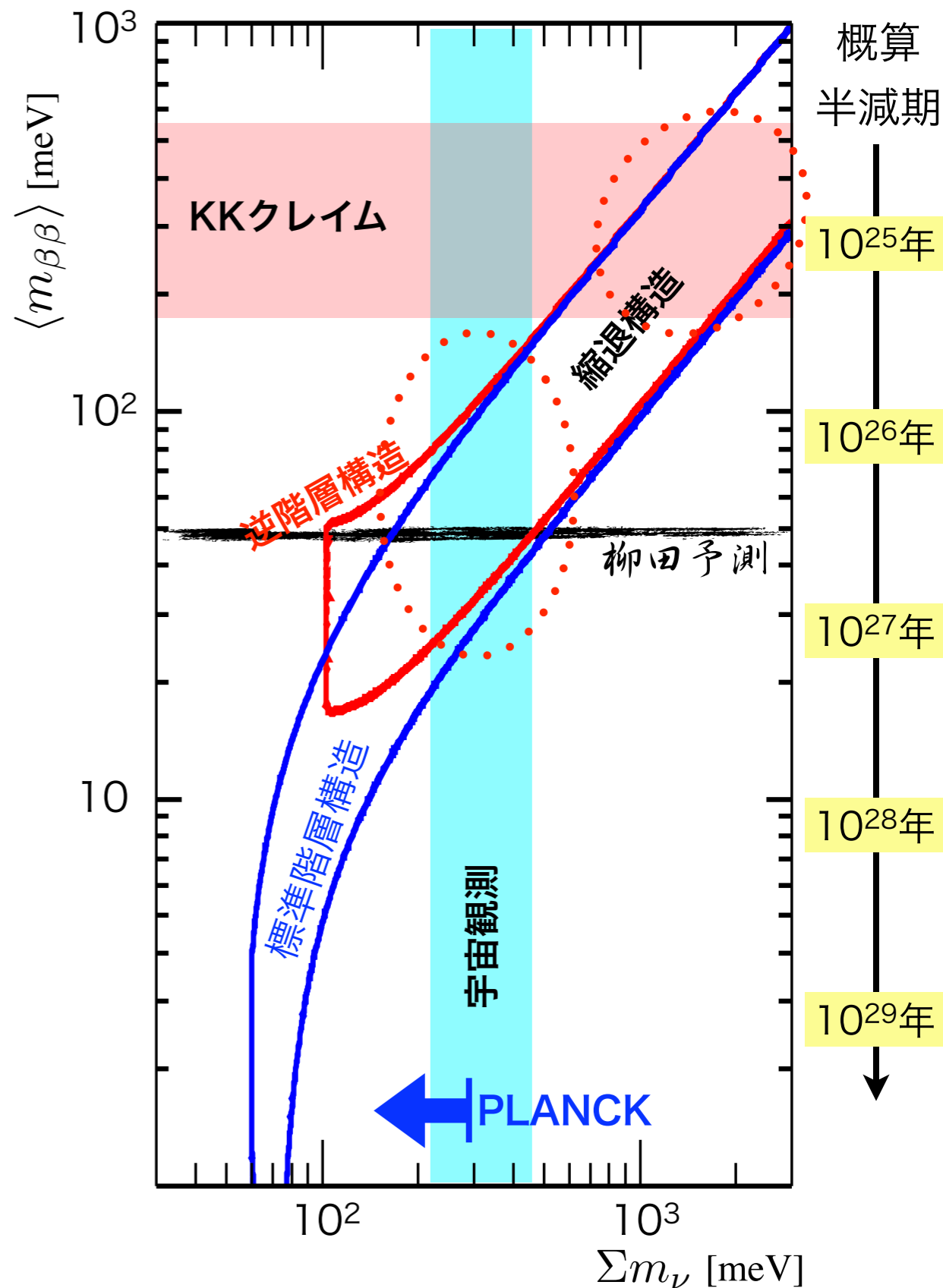
$T_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25}$  年

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

Mod.Phys.Lett.A21, 1547 (2006)

バックグラウンドが多く検証が必要

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



## 柳田予測

### Conclusion

The seesaw with Occam's razor  
Frampton, Glashow, Yanagida

CP violation in neutrino oscillation  
↔ Universe's baryon asymmetry

The normal hierarchy is excluded and  
it is consistent with the inverted hierarchy !!!

$|\delta_{CP}| = \frac{\pi}{2} \pm 0.02$

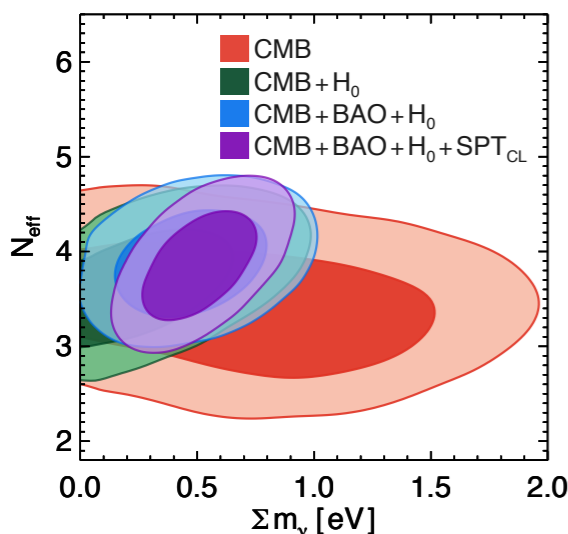
It predicts  
 $m_{ee} = (47 \pm 1)$  meV

パラメータを最小限に  
した理論的予測

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

neutrino2012国際会議にて  
Phys.Rev.D86, 013002 (2012)

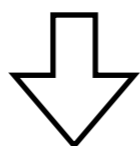
## 宇宙観測



$$\Sigma m_\nu = 0.32 \pm 0.11 \text{ eV}$$

(3世代に固定)

arXiv:1212.6267  
ApJ782, 74 (2014)



$$m_{\beta\beta} = 26 \sim 145 \text{ meV}$$



- 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。



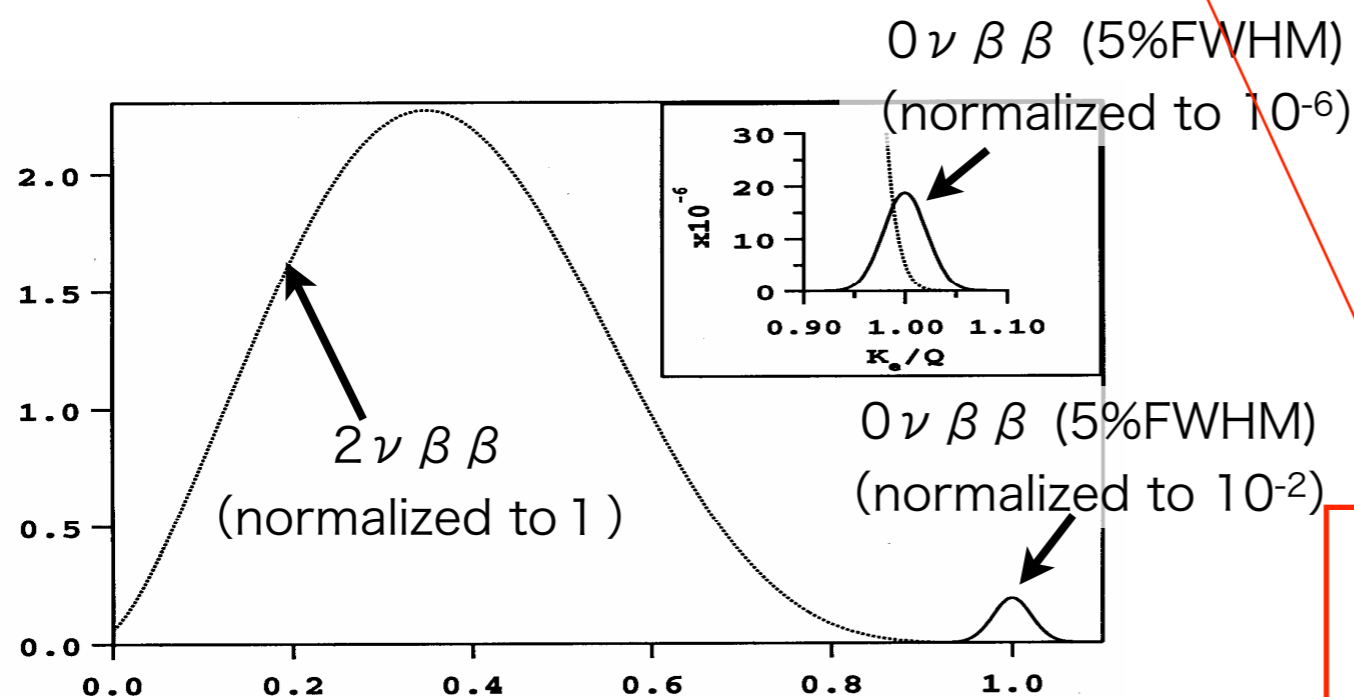
**いつ見つかっても不思議でない。**

- 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
- $0\nu 2\beta$  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 $\nu$ 観測、第4世代 $\nu$ 探索、太陽 $\nu$ 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 $\beta$ 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

# comparison of double beta decay nuclei

Rodin et al., Nucl. Phys. A793 (2007)213-215

Nucleus	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ measured (year)	Nat. Abundance (%)	Q-value (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	max. Q, fast 2v
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$0.86 \times 10^{27}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	7.8	2039	semiconductor
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	$2.44 \times 10^{26}$	$(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$	9.2	2995	
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	$0.98 \times 10^{27}$	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$	2.8	3351	
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	$2.37 \times 10^{26}$	$(7.1 \pm 0.4) \times 10^{18}$	9.6	3034	fast 2v
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$2.86 \times 10^{26}$	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	7.5	2805	
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	$4.53 \times 10^{27}$	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{24}$	31.7	867	
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	$2.16 \times 10^{26}$	$(0.9 \pm 0.1) \times 10^{21}$	34.5	2529	large nat. abundance
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	$4.55 \times 10^{26}$	$(2.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$	8.9	2476	slow 2v, rare gas
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	$2.23 \times 10^{25}$	$(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$	5.6	3367	0v, fast 2v



$2\nu$  BGはエネルギー分解能の約5.8  
 乗に比例して増加するため、 $2\nu$ が  
 早いと高分解能が必要となる。

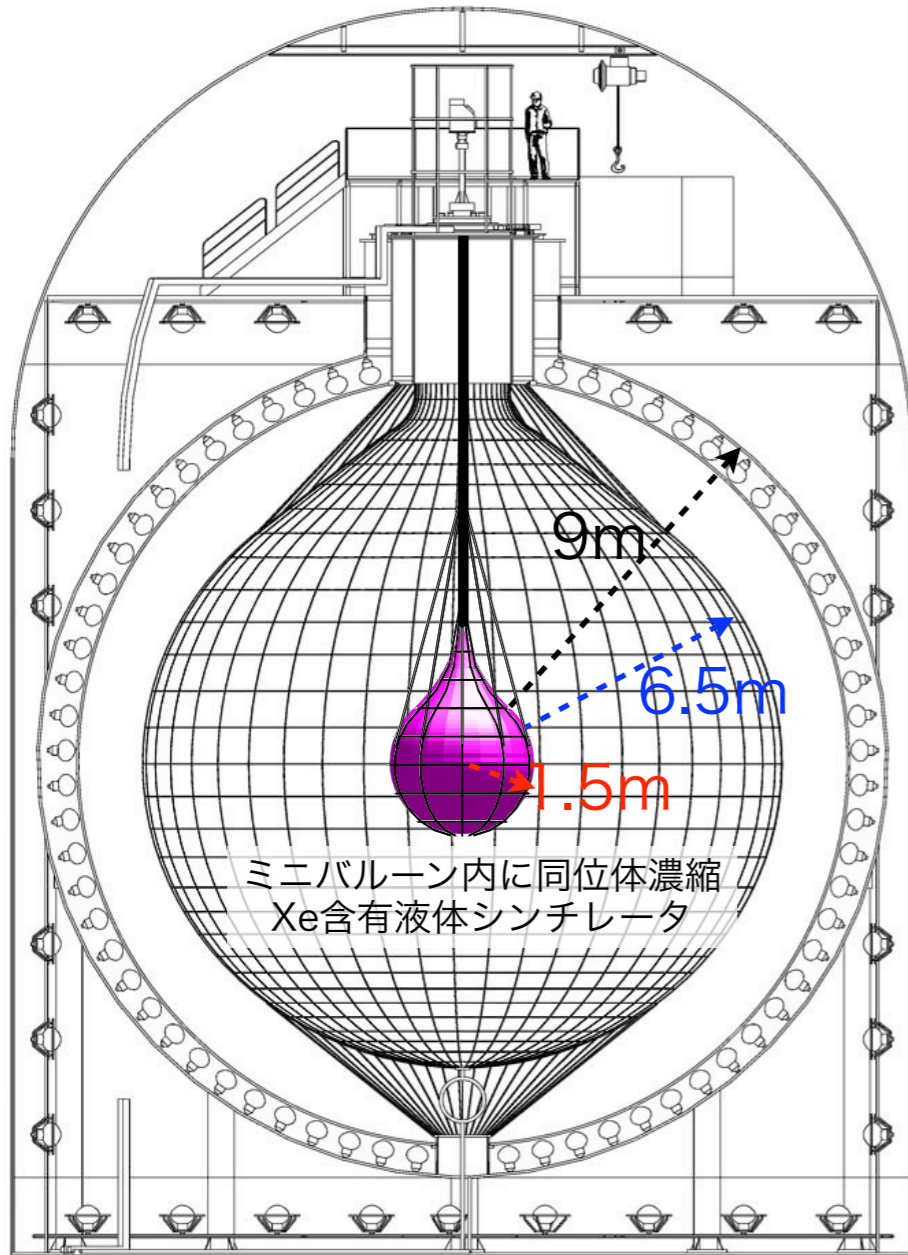
$T^{0\nu} / T^{2\nu}$  比が小さく、エネルギー  
 分解能に対する要請がゆるい。



# KamLAND-Zen



Zero neutrino  
double beta decay search



~320kg 90% 同位体濃縮  $^{136}\text{Xe}$  を導入  
現在380kg、将来600kg~1000kgに拡張

とても希な現象なので、  
大量の原子核  
(100~1000kg)と  
極低放射能環境が必要

## 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 ( $1200\text{m}^3$ , U:  $3.5 \times 10^{-18}\text{g/g}$ , Th:  $5.2 \times 10^{-17}$ )  
→ 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)
- $\beta$ ,  $\gamma$  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



# ミニバルーン試作とプールでの導入リハーサル



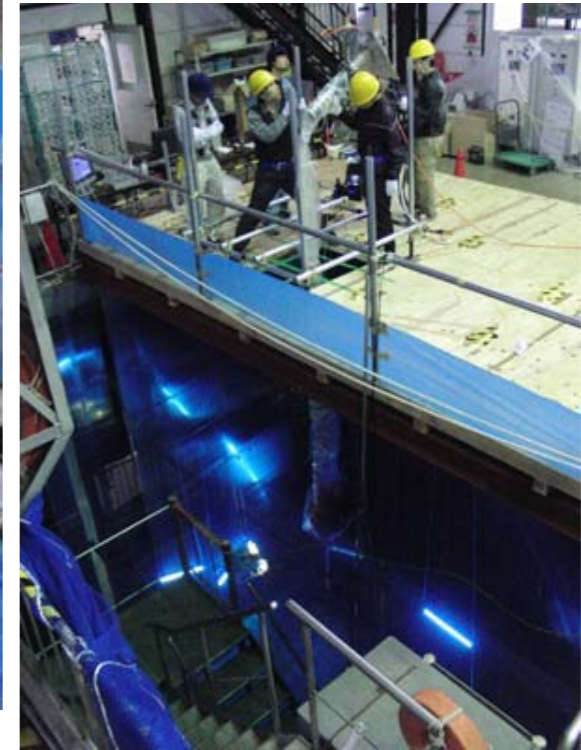
80ミクロン厚ポリエチレンでの試作  
ミニバルーンの構造を決定



25ミクロン厚ナイロン6での試作



畳んだ状態で長さ約10m



水深8mのプールで導入テスト



バルーン吊下部

## キセノン取り扱い装置



キセノン溶解・密度制御装置



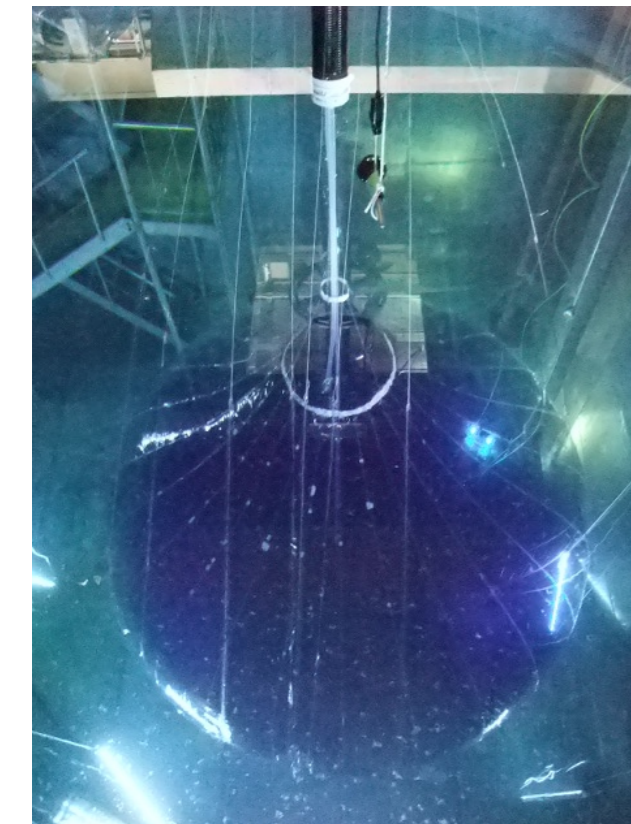
## その他



ドーム内クリーンルーム



新空洞・LS貯蔵タンク



導入、膨張、液の入れ替え方法を確立



# 本番用ミニバルーン製作

🌐 クラス1 スーパークリーンルームでの作業

(class 1 = 0.5ミクロン粒子が1立方フィートあたり1個以下)

小物質質量 → 25 μm厚 ナイロン6

透明度 99.4% @400nm

強度 19.4 N/cm

Xe 透過度 < 220 g/year

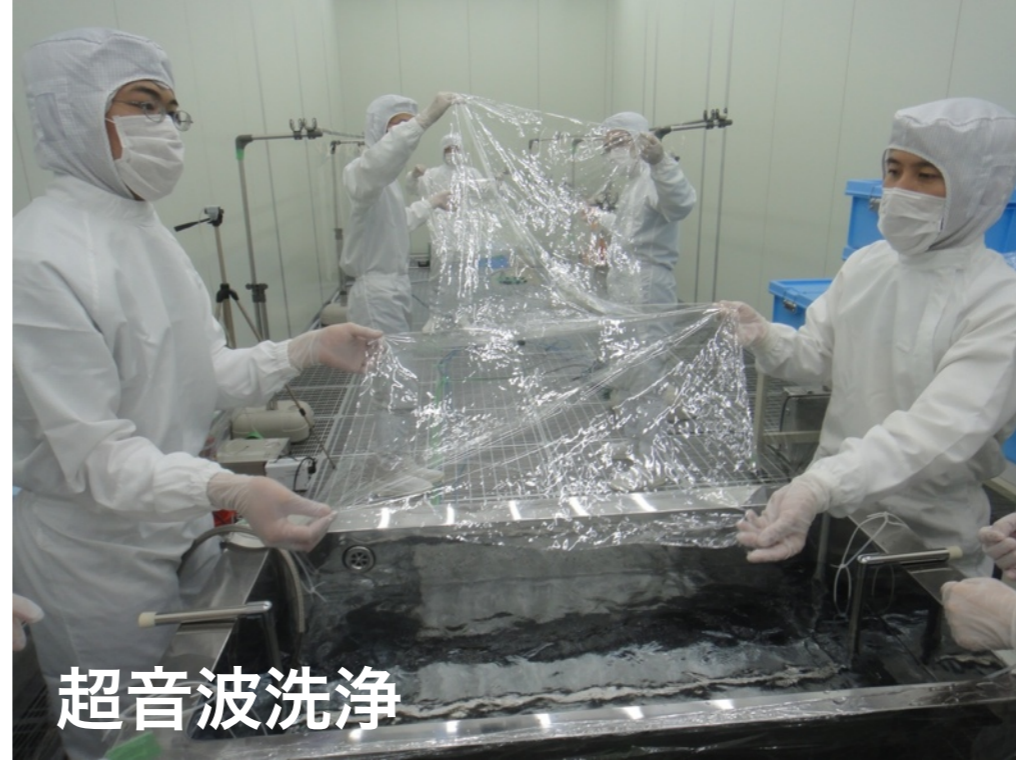
低放射能

→ 充填剤無し特注フィルム

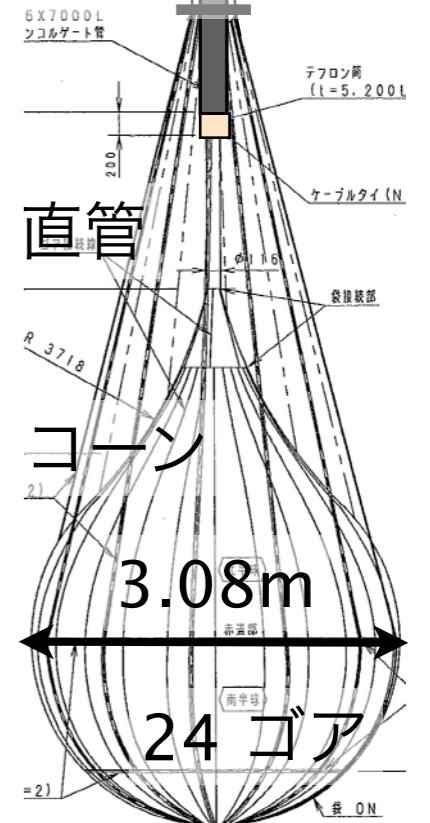
U : 150 →  $2 \times 10^{-12}$  g/g

Th : 59 →  $3 \times 10^{-12}$  g/g

$^{40}\text{K}$  : 140 →  $2 \times 10^{-12}$  g/g



Vectran 紐につ  
ながった12本の  
ナイロンベルト  
で吊り下げ



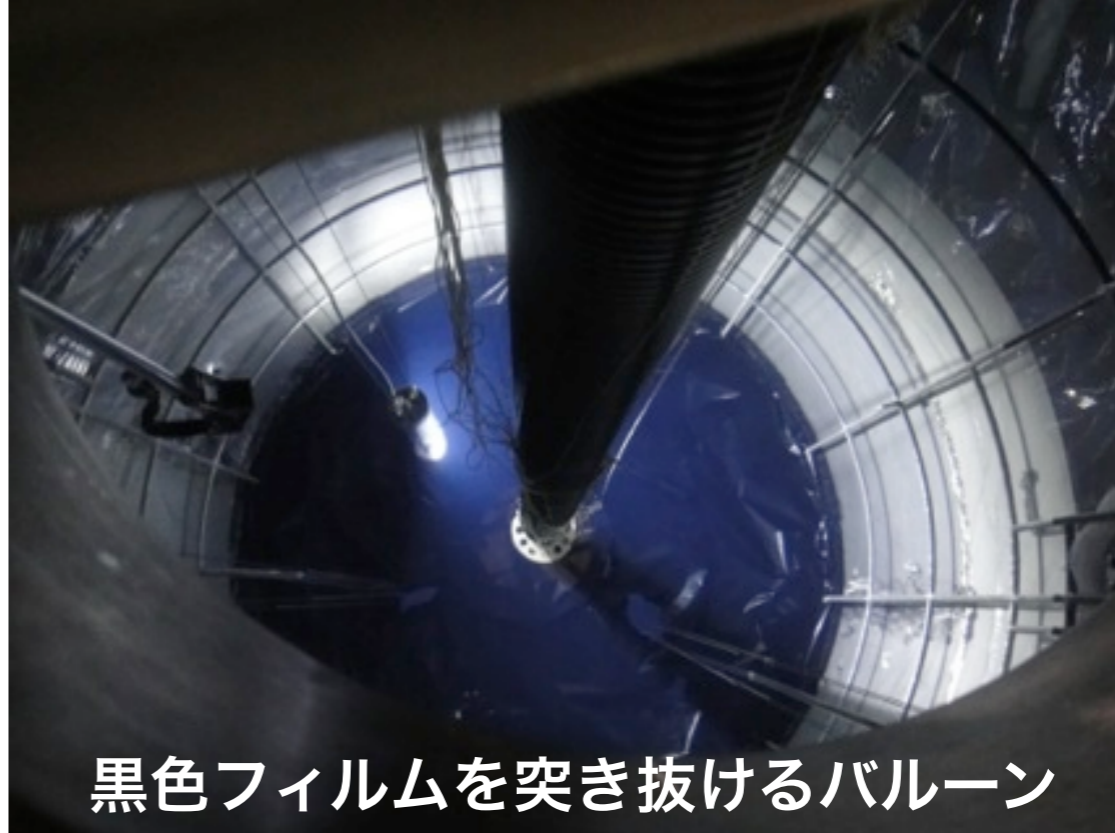
↑ 堅いチューブ(7m) ↓  
↑ フォイルム部分(~6m) ↓

🌐 全ての道具や部品もここで洗浄

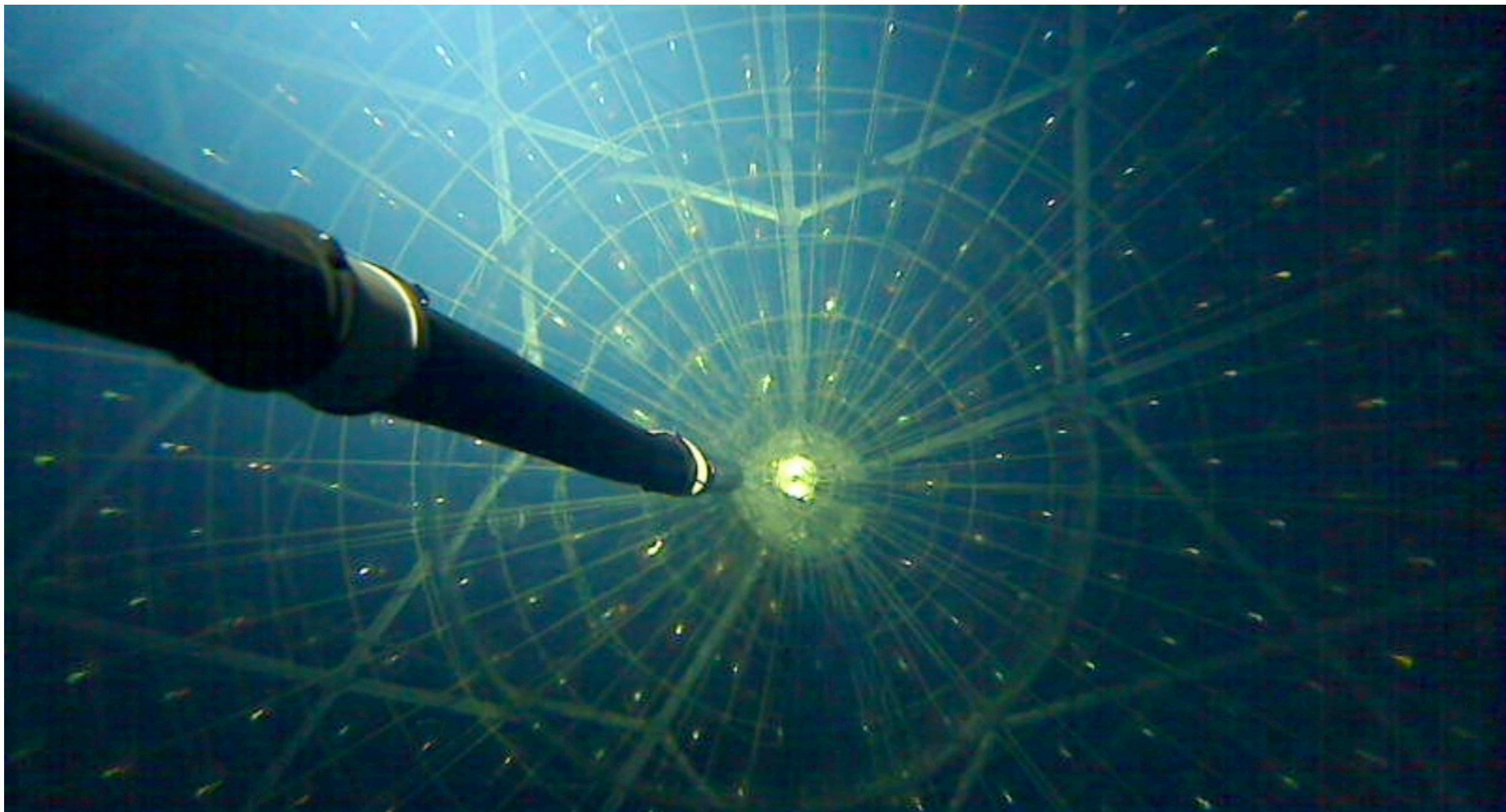




バルーンとチューブの導入



黒色フィルムを突き抜けるバルーン

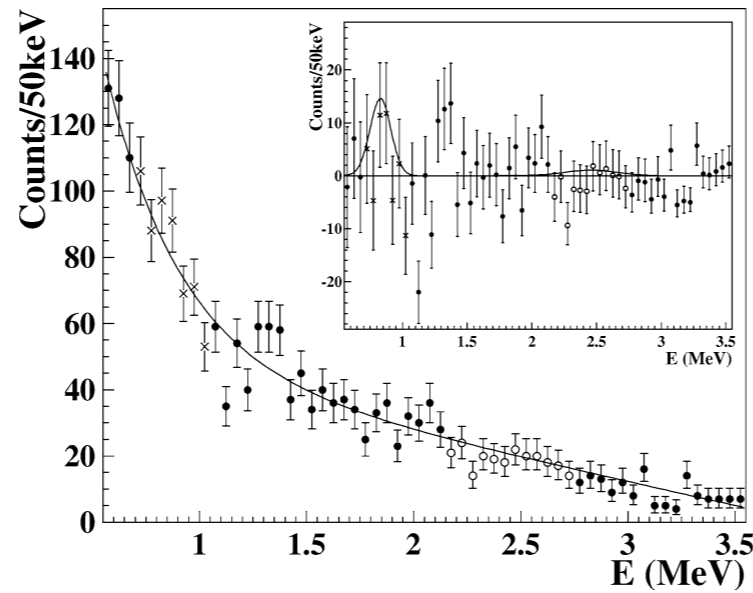




# Measurement of the $2\nu 2\beta$ half life

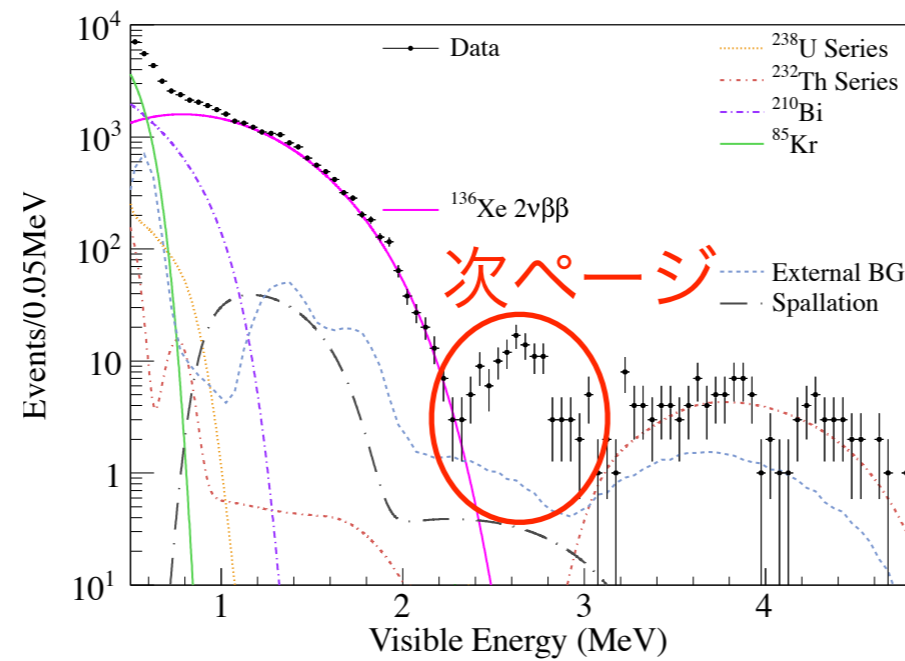
DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

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



KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

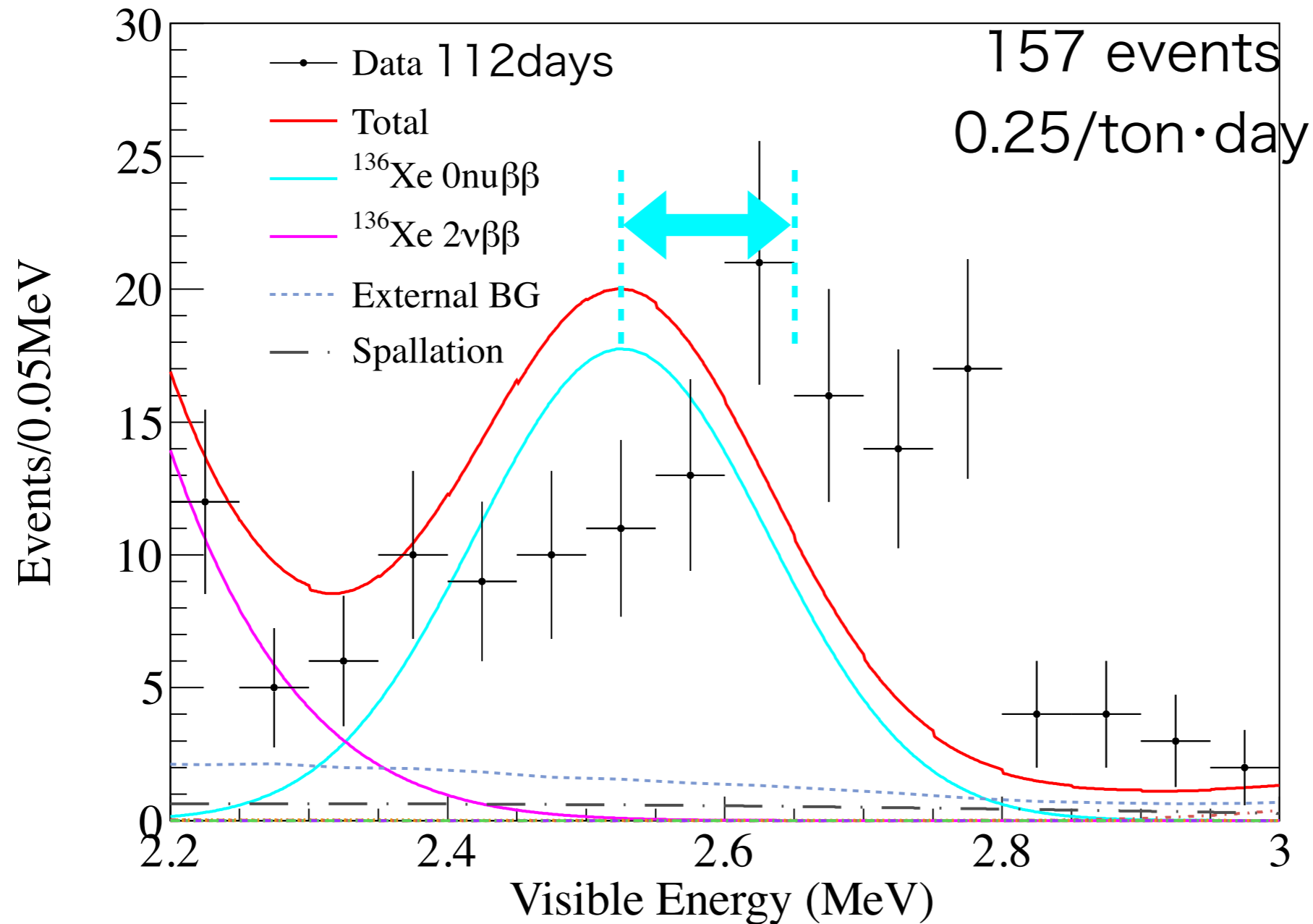
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21}$  years Phys.Rev.C86,021601(R)(2012)





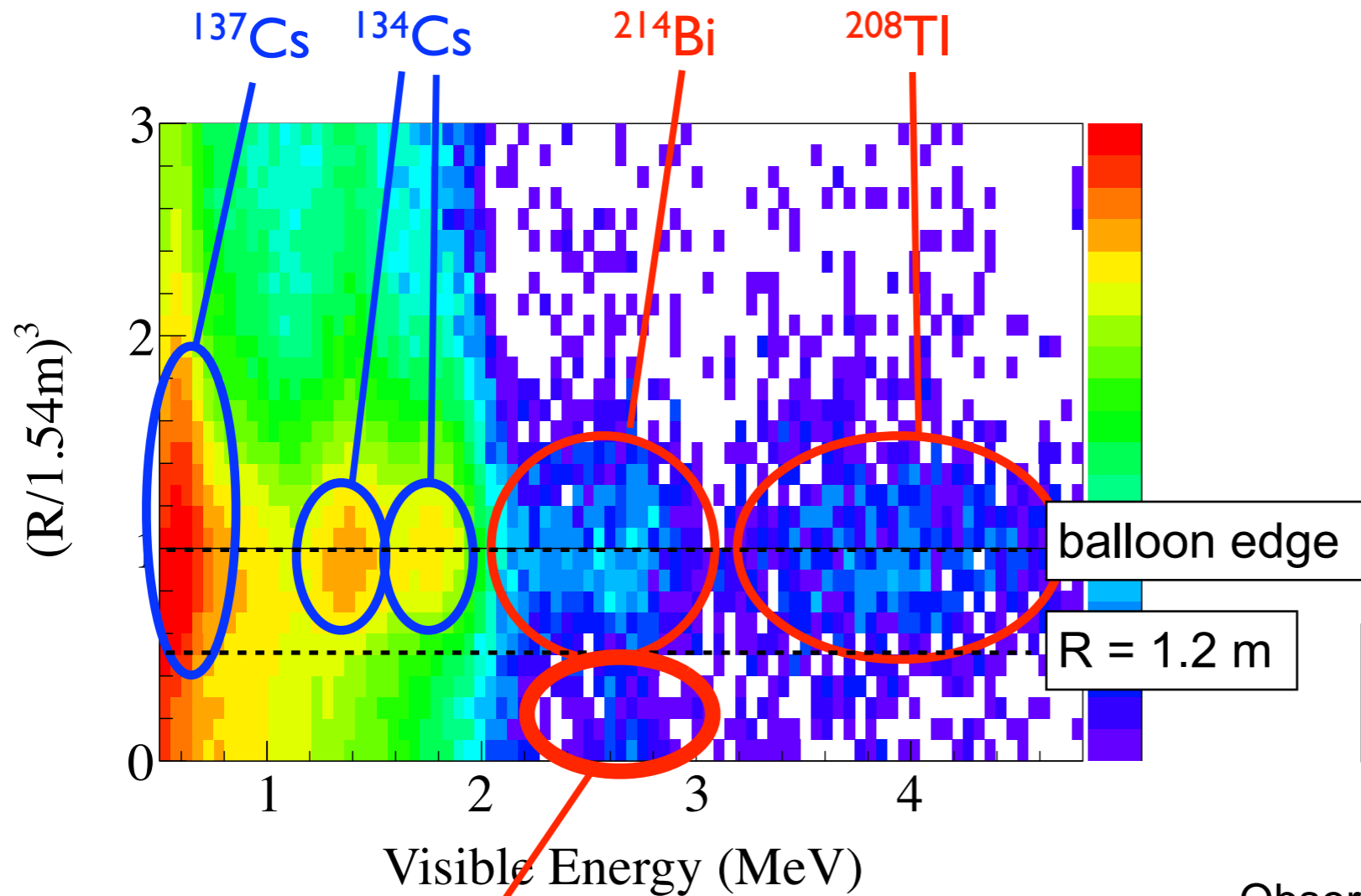
# Background situation

Peak fit with  $0\nu$  signal

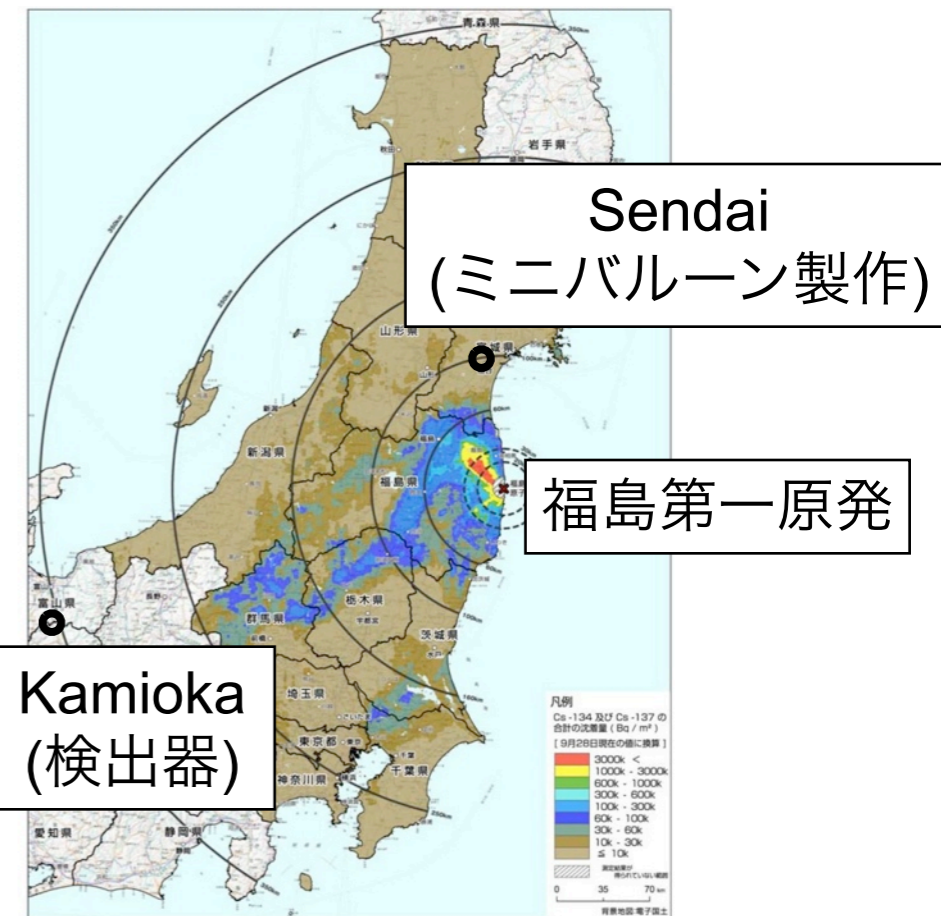


Peak position is different from that of expected  $0\nu$ .  
 $0\nu$  only is rejected at more than  $8\sigma$  level.

# 放射性不純物



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



Observed ratio of  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  ( $\sim 0.8$ ) 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、幸いしみ出してきていない。
- ミニバルーン上の $^{214}\text{Bi}$ は有効体積を制限している。
- $^{208}\text{Tl}$ 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

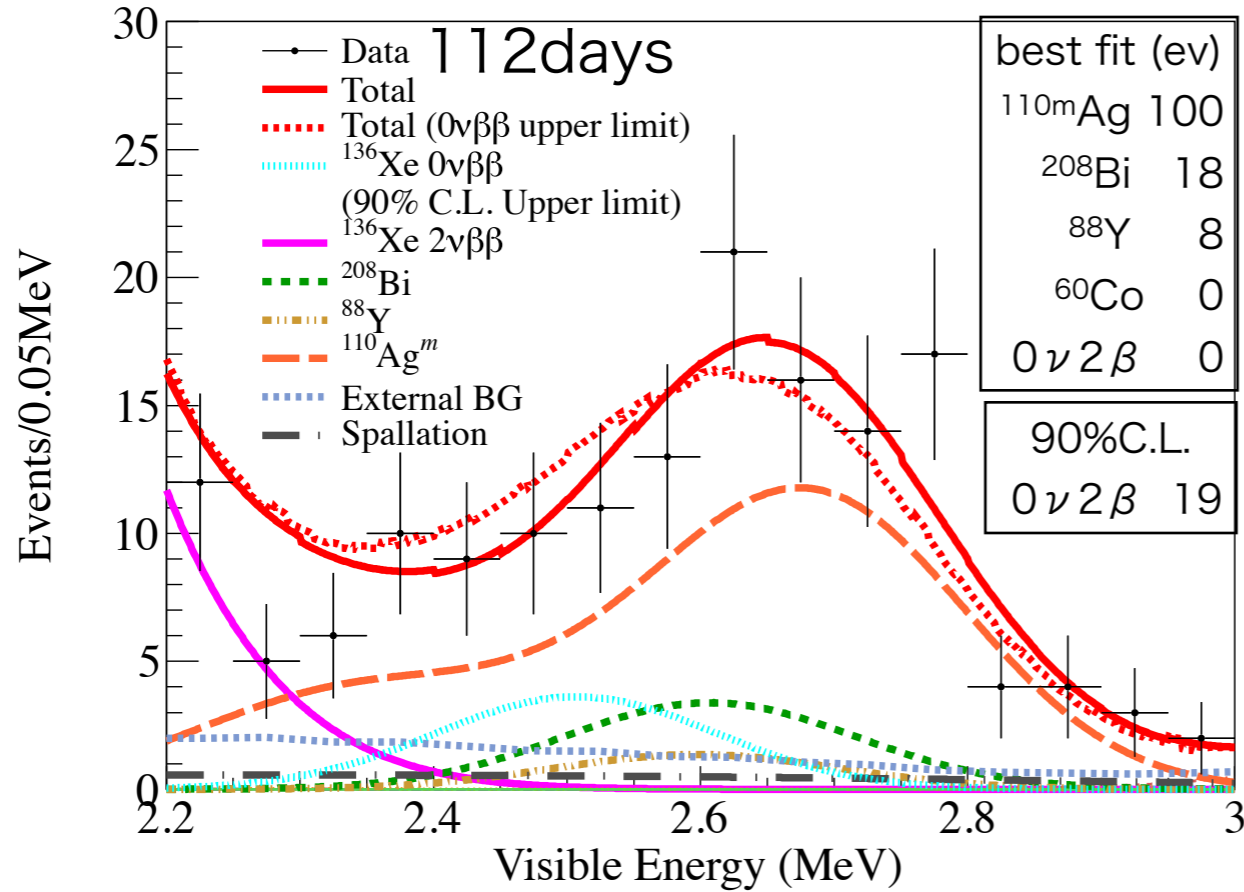
核反応 ( $\alpha, r$ ), ( $\alpha, \alpha r$ ), ( $n, r$ ) はどれも断面積が小さい。      → negligible

30日以上で  $0\nu$  に近いピークを作るものは、4つの候補。

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



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



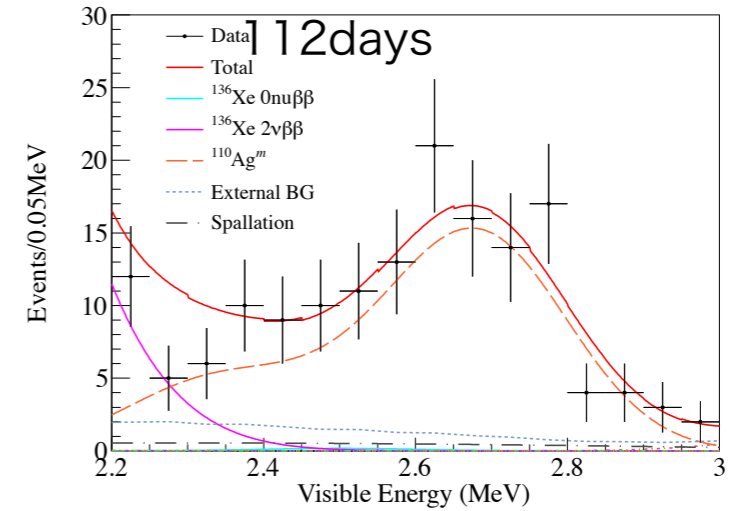
最適解と $0\nu 2\beta$ の上限 (90%CL)

( $\chi^2$  at 2.2~3.0MeV)

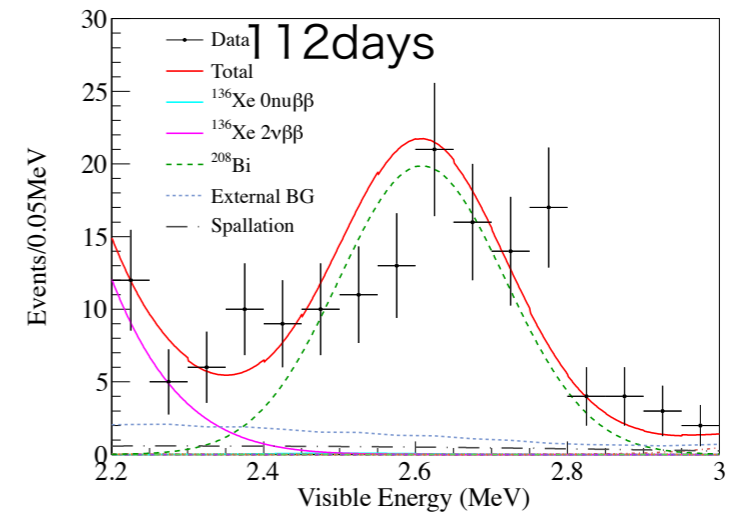
ENSDFデータベースの全探索でこれら4各種のみが、BG候補

	$\chi^2$ 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	×
$0\nu$ only	85.0	×

BGは $^{110m}\text{Ag}$ らしい。



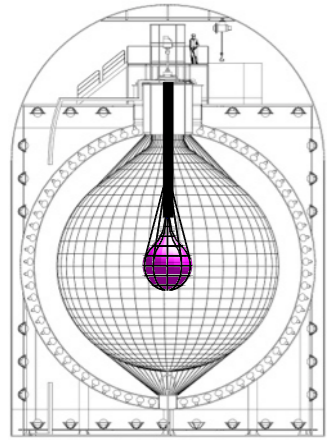
110mAg は良く合う。



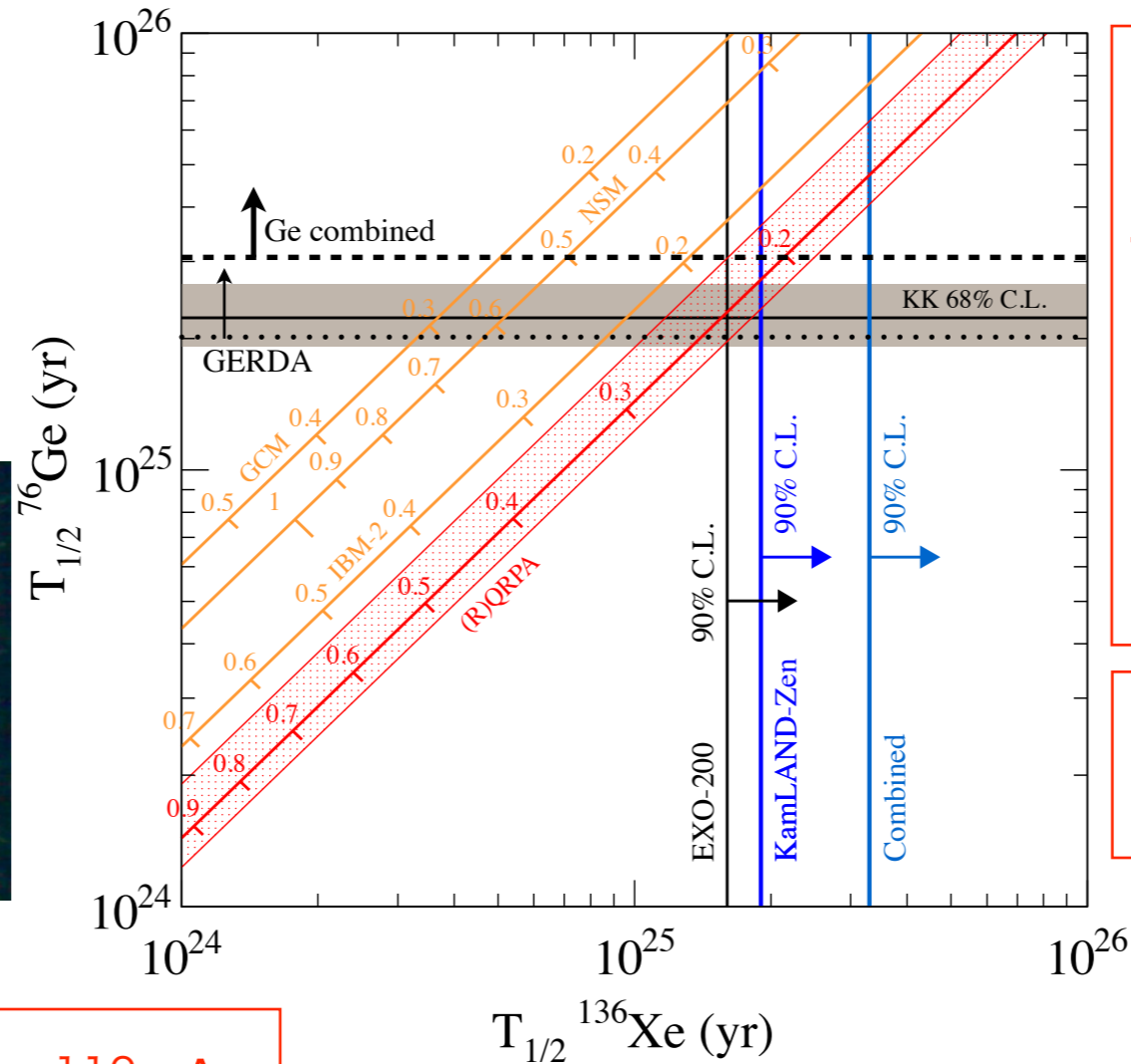
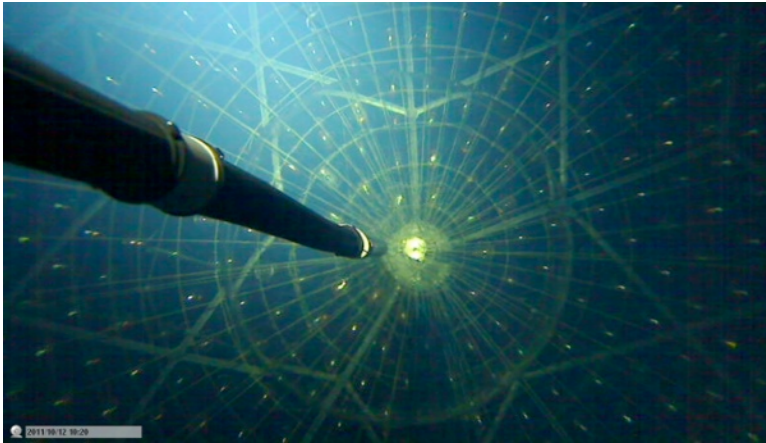
208Bi は合わない。

# KamLAND-Zen status 89.5kg-yr

Phys.Rev.Lett, 110, 062502 (2013)



~320kg 90% enriched  $^{136}\text{Xe}$  installed so far

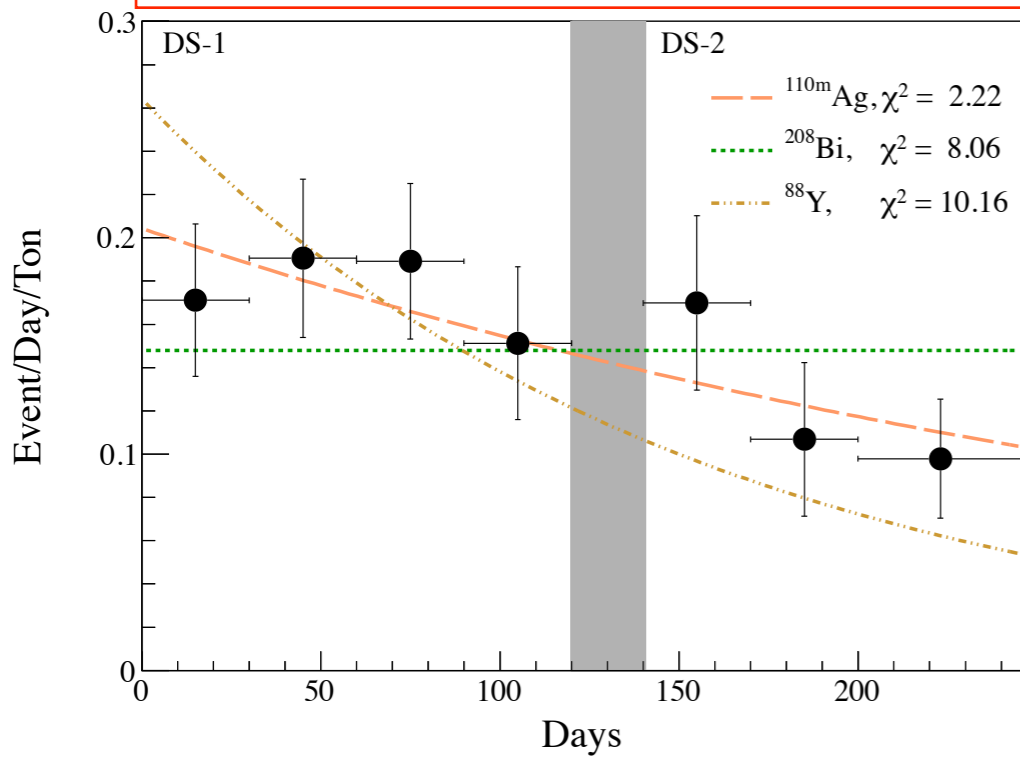


**1.** the world best limit  
 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$  yrs (KL-Zen)  
 $> 3.4 \times 10^{25}$  yrs (combined)

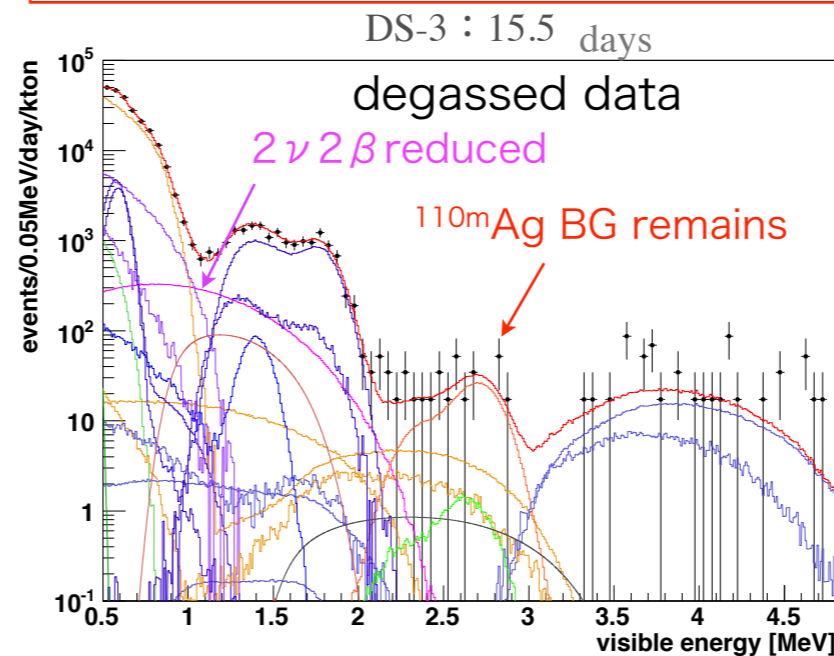
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$  meV

KK-claim refuted at  
 97.5% CL

## 2. BG identified as $^{110m}\text{Ag}$



## 3. Xe on-off measurement demonstrated



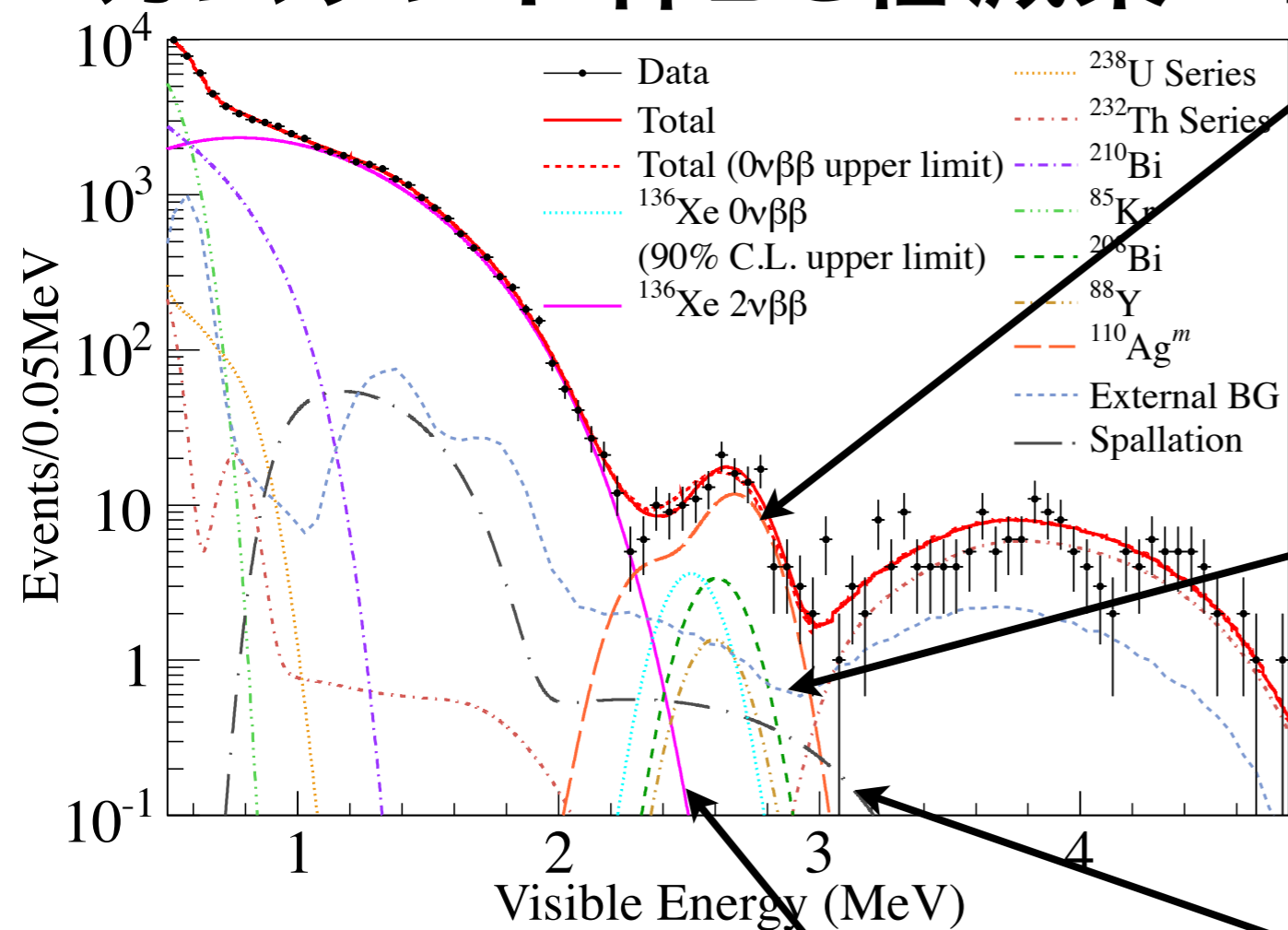
**4.** purification done,  
 DAQ resumed with the  
 increased mass of ~380kg



# カムランド禅BG低減策

現状

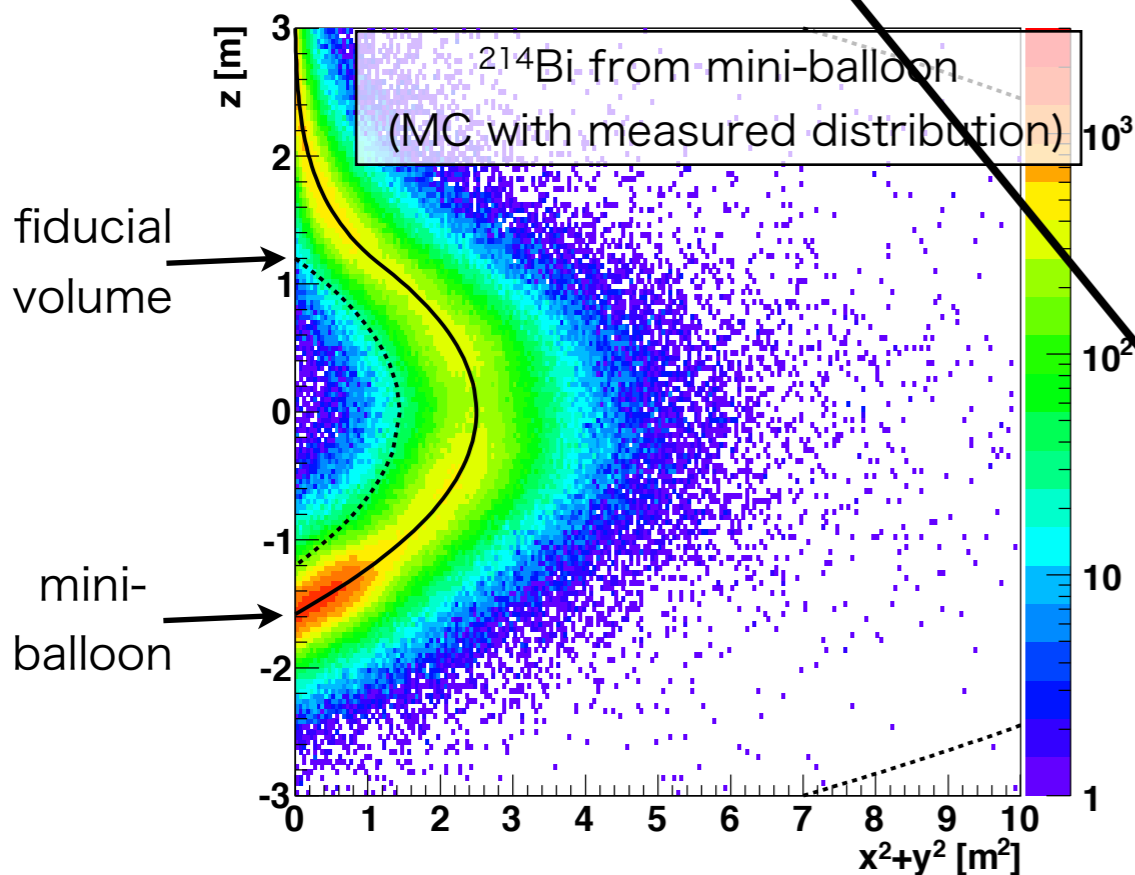
目標感度：~80meV



Xe-LS 中の  $^{110m}\text{Ag}$  あるいは  $^{208}\text{Bi}$ ,  $^{88}\text{Y}$  は、キセノンの回収/精留/吸着で除去する。LS は新品と入れ替える。  
不純物低減目標: 100分の1 (10分の1以下を確認)

ミニバルーン上の  $^{214}\text{Bi}$  を大幅に低減するには、ミニバルーンの再制作が必要で、キセノンの増量にあわせて行う。  
有効体積の最適化も期待できる。

原子核破碎起源の  $^{10}\text{C}$  は、 $\mu\text{-n-}^{10}\text{C}$  三重遅延同時計測で低減できる。(未適用)



今後

目標感度：~40meV

キセノン増量と低放射能ミニバルーン加圧によるキセノン濃度向上の可能性

将来

目標感度：~20meV

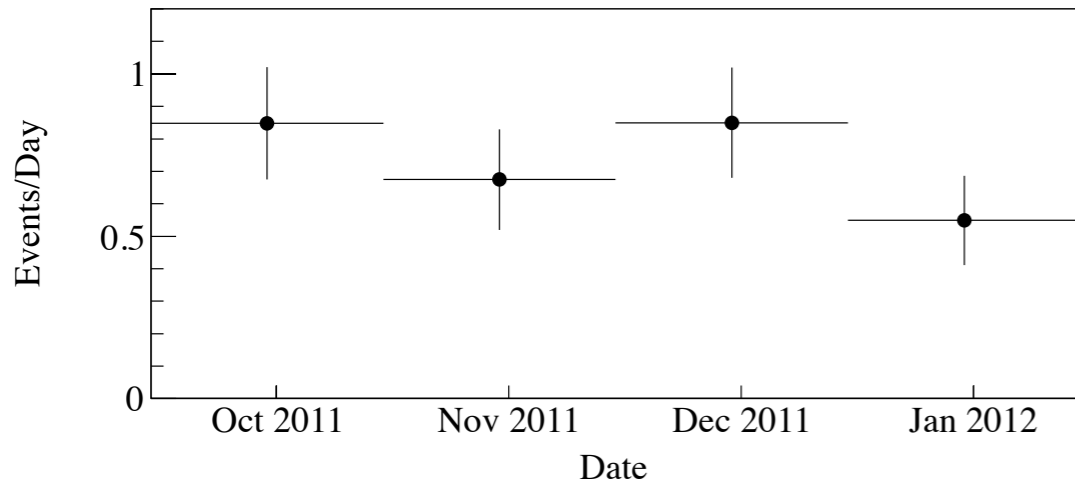
$2\nu 2\beta$  低減には、高発光LS, 集光ミラ一導入を計画 ---> KamLAND2-Zen



# $^{110m}\text{Ag}$ Background Reduction

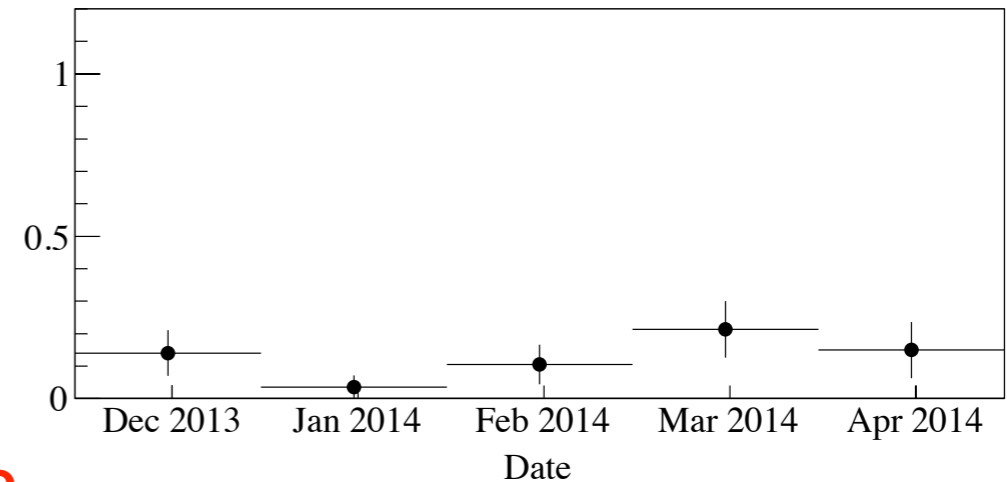
## Phase 1 (first 112.3 days)

$2.2 < E < 3.0$  MeV,  $R < 1$  m

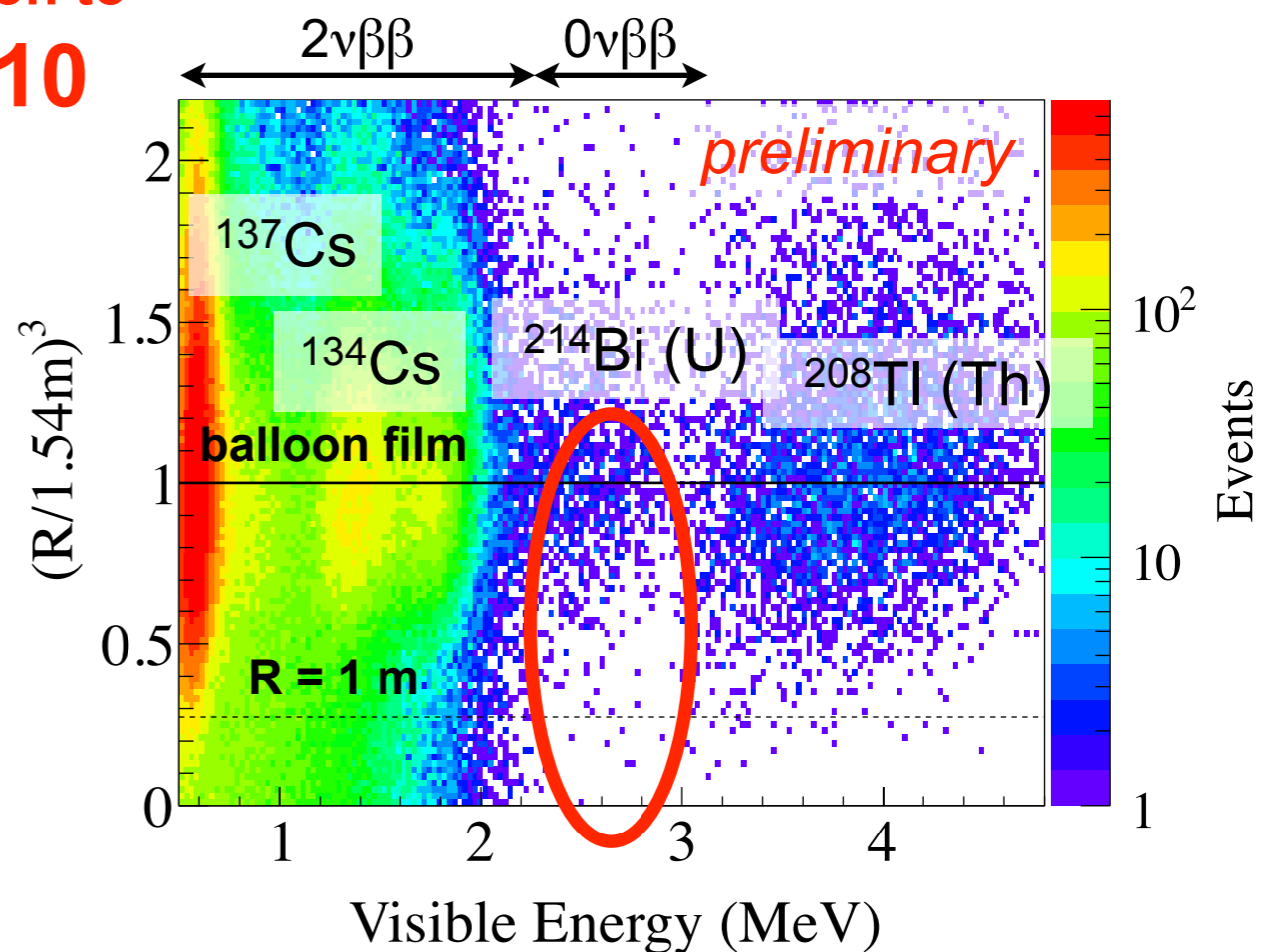
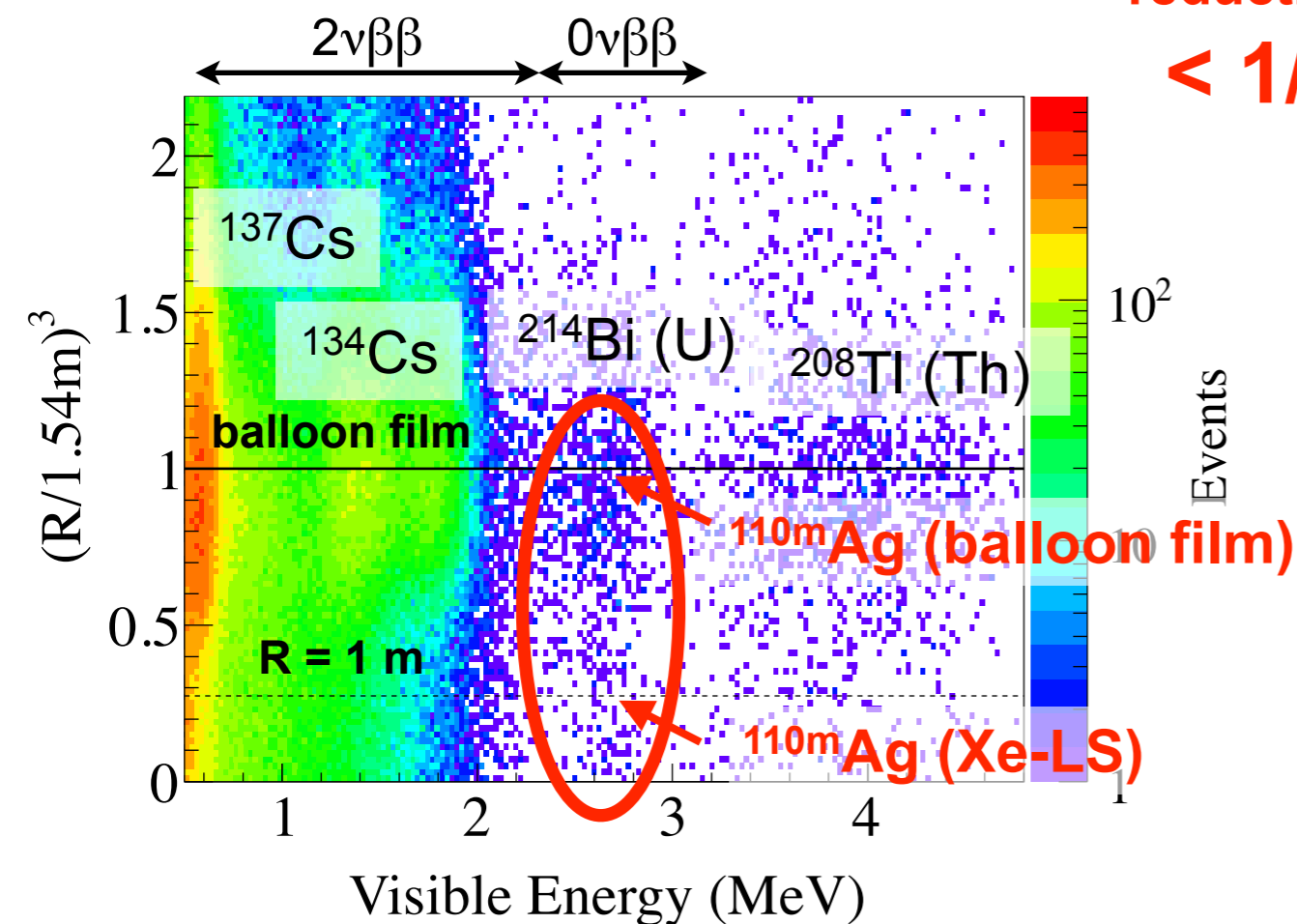


## Phase 2 (first 114.8 days)

$2.2 < E < 3.0$  MeV,  $R < 1$  m



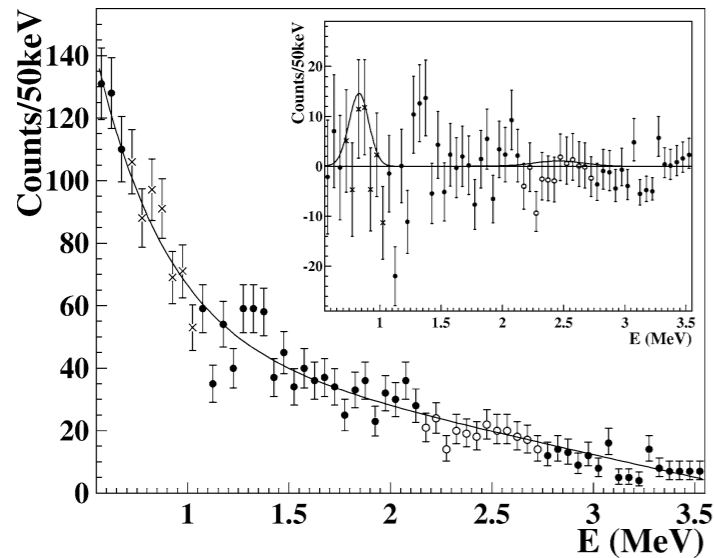
**110mAg BG reduction to < 1/10**



Primary BG :  $^{214}\text{Bi}$  (U) at balloon / spallation  $^{10}\text{C}$  / remaining  $^{110m}\text{Ag}$ ?

# Fit to Energy Spectrum for $2\nu\beta\beta$

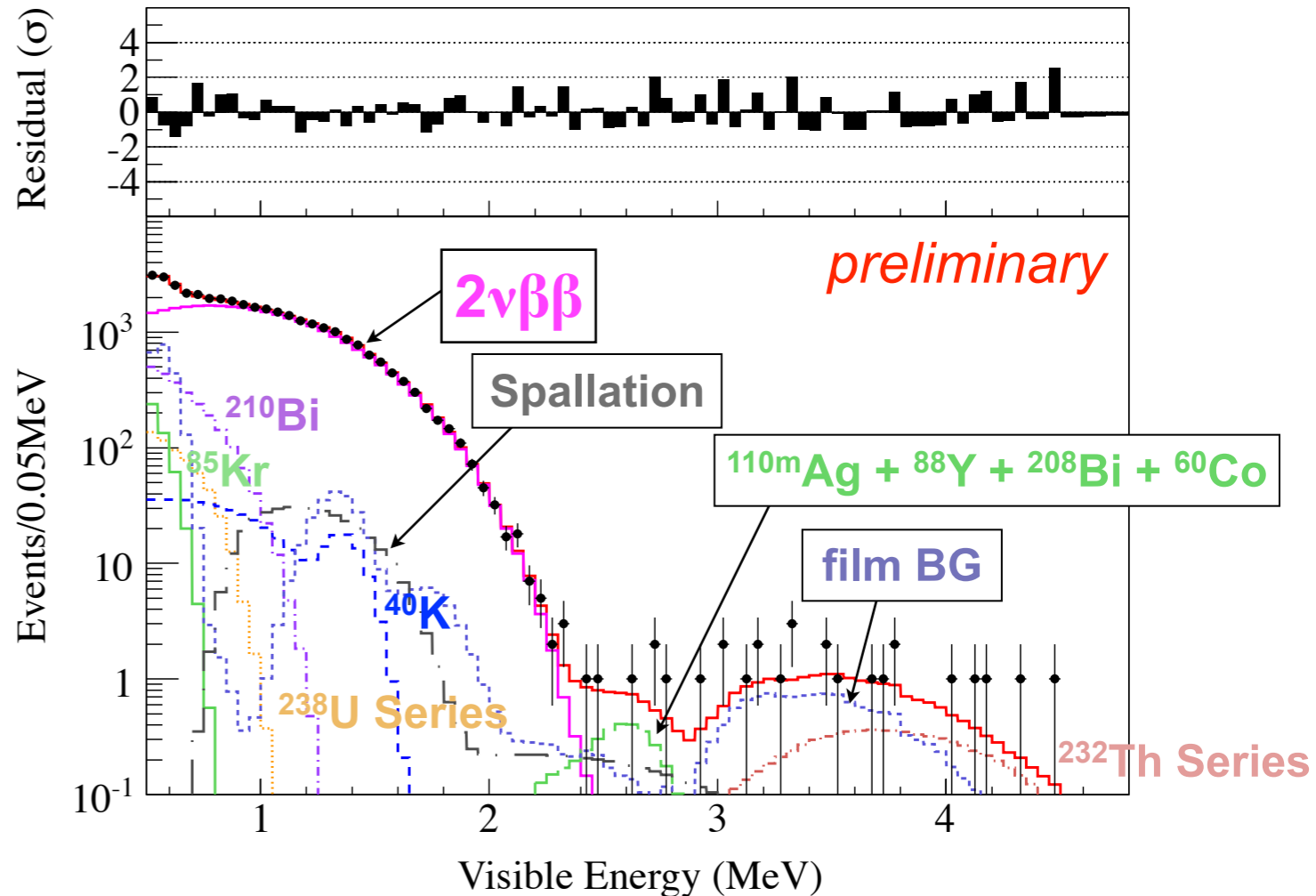
DAMA (2002) Liquid Xe scintillator



$T^{2\nu}_{1/2} > 1.0 \times 10^{22}$  yr at 90% C.L.

KamLAND-Zen (2014) Xe loaded liquid scintillator

**Phase 2 Internal (R < 1.0 m)**



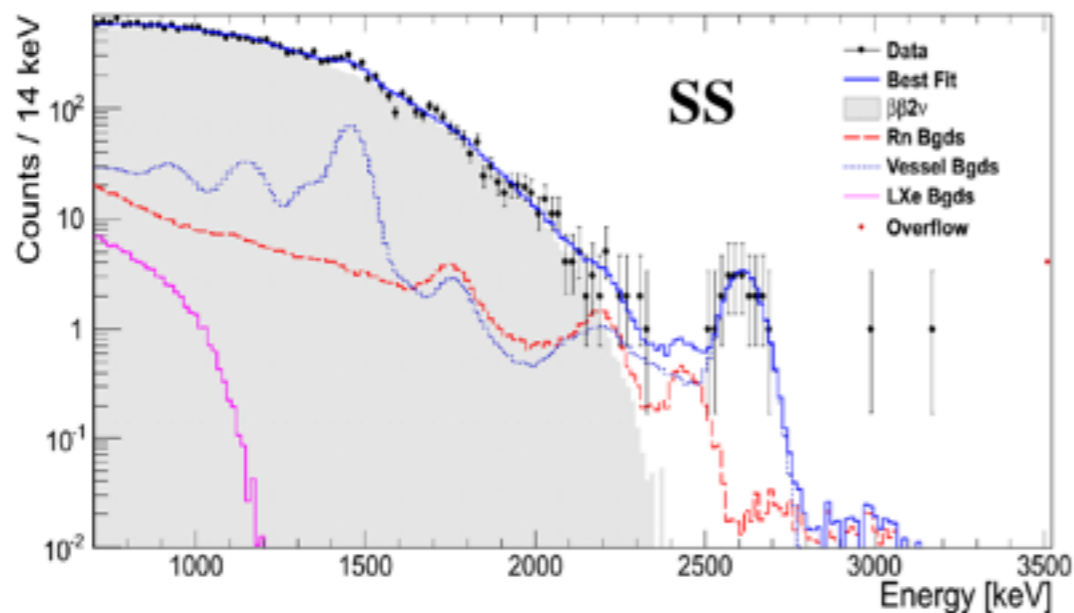
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.32 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

consistent with KamLAND-Zen Phase 1



$T^{2\nu}_{1/2} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

EXO-200 (2013) Liquid Xe TPC + scintillator



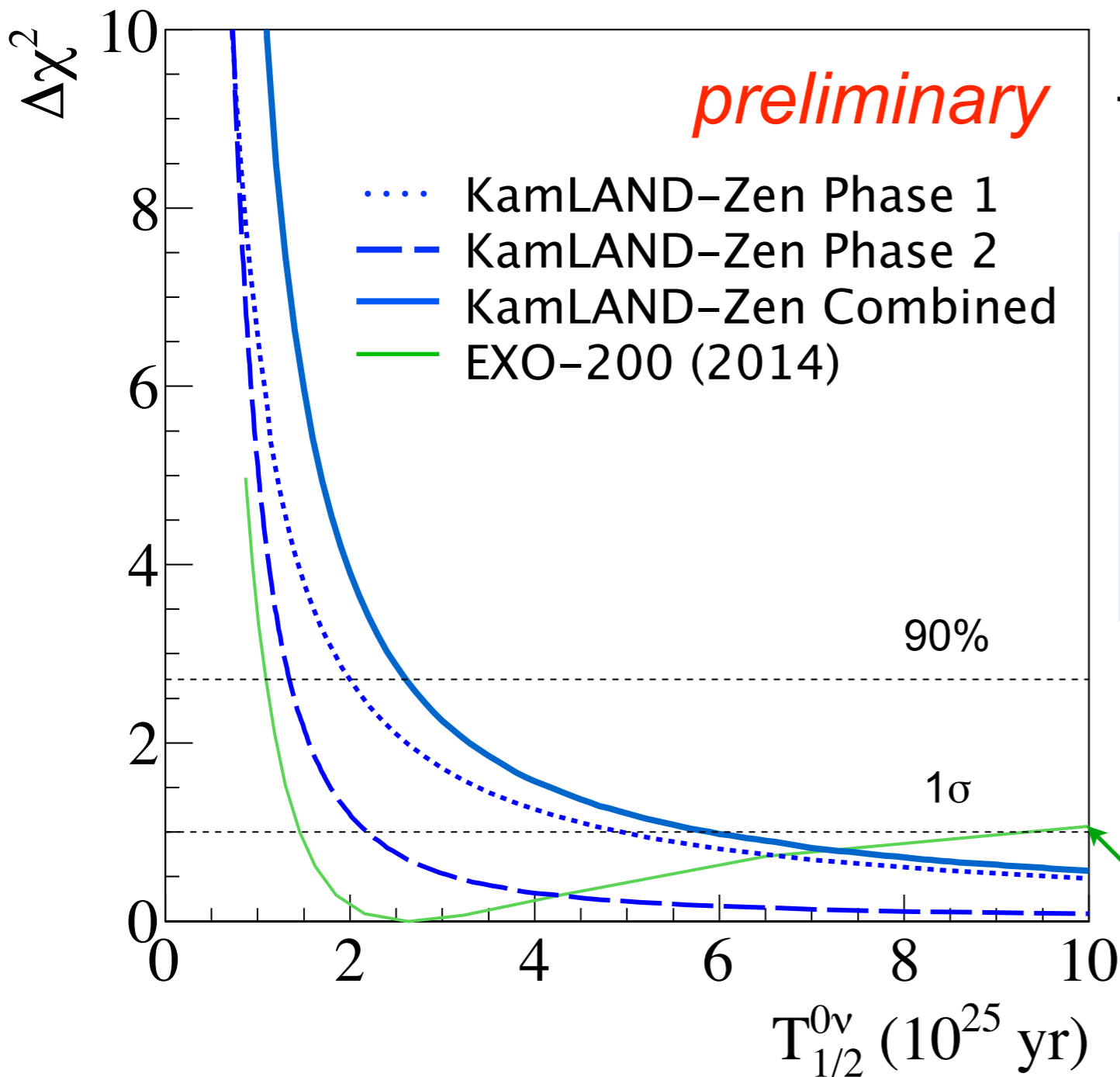
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.165 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.059(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

← consistent with EXO-200



# $^{136}\text{Xe}$ $0\nu\beta\beta$ Decay Half-life

combined result (Phase 1 + 2)



Half-life limit at 90% C.L.

**KamLAND-Zen**

Phase 1  $T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25}$  yr

Phase 2  $T_{1/2}^{0\nu} > 1.3 \times 10^{25}$  yr

Combined  $T_{1/2}^{0\nu} > 2.6 \times 10^{25}$  yr

QRPA NME model  
J. Phys. G 39 124006 (2012)

$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.14-0.28$  eV

EXO-200  $> 1.1 \times 10^{25}$  yr  
(123.7 kg yr)

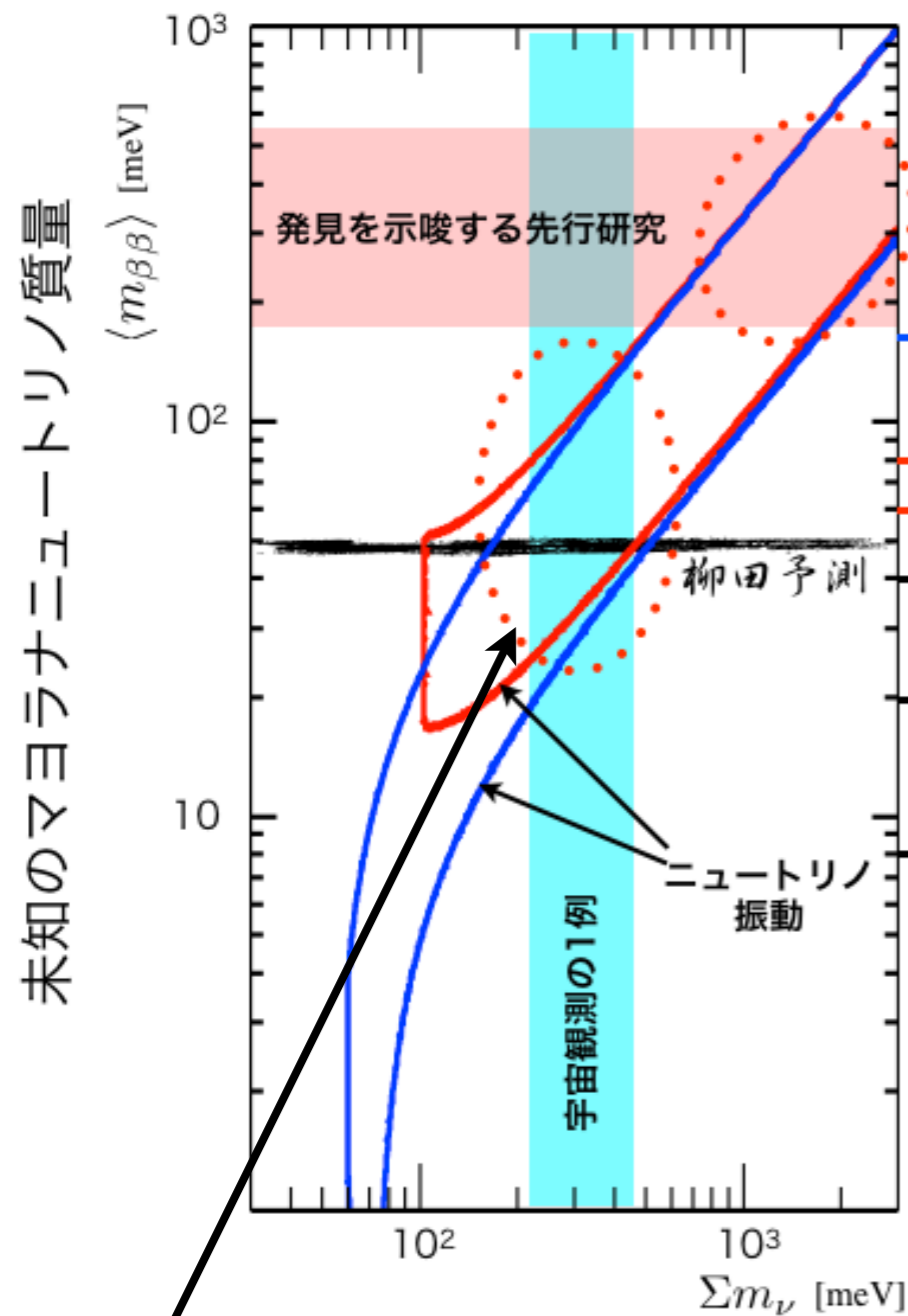
Limits on  $^{136}\text{Xe}$  half-life and effective neutrino mass are improved

# 世界の競争状況

Nucleus	Experiment	$T_{1/2}^{0\nu}$ limit (yr) @ 90% C.L.	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (eV)
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	ELEGANT VI	$> 5.8 \times 10^{22}$	$< 3.5-22$
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	GERDA	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 0.19-0.30^*$
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	NEMO-3	$> 3.2 \times 10^{23}$	$< 0.8-1.4$
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	NEMO-3	$> 9.2 \times 10^{21}$	$< 9.3-13.7$
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	NEMO-3	$> 1.0 \times 10^{24}$	$< 0.4-0.7$
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	Solotvina	$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1.2-2.2$
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	(Geo chemical)	$> 7.7 \times 10^{24}$	$< 0.7-1.2$
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	CUORICINO	$> 2.8 \times 10^{24}$	$< 0.44-0.81$
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	KamLAND-Zen	$> 2.6 \times 10^{25}$	$< 0.14-0.28$ preliminary
	EXO-200	$> 1.1 \times 10^{25}$	$< 0.21-0.43$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	NEMO-3	$> 1.8 \times 10^{22}$	$< 4.0-6.3$

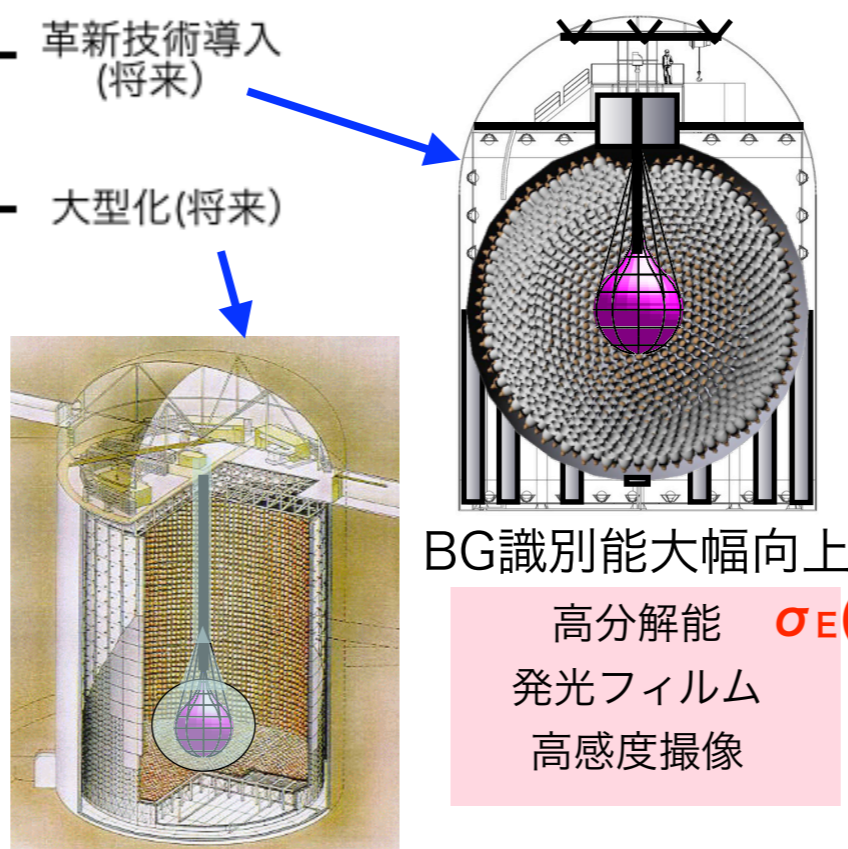
現在世界最高感度を更新中！

# 現状と展望



← これらを排除

ここに大発見を期待！！



BG識別能大幅向上

高分解能  $\sigma_E(2.6\text{MeV})=4\% \rightarrow 2.5\%$   
 発光フィルム  
 高感度撮像

極低放射能フィルム  
 キセノン増量(700~800kgへ)

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

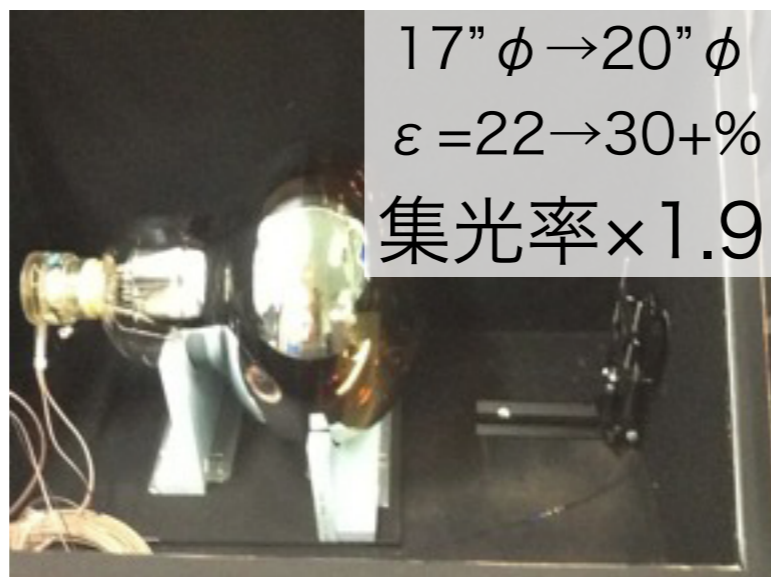


# 技術開発

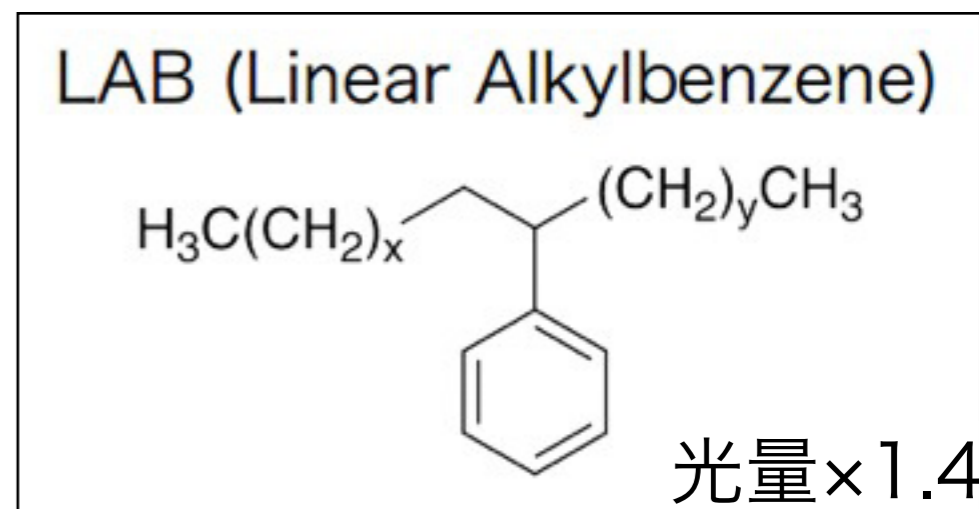
## ○集光ミラー



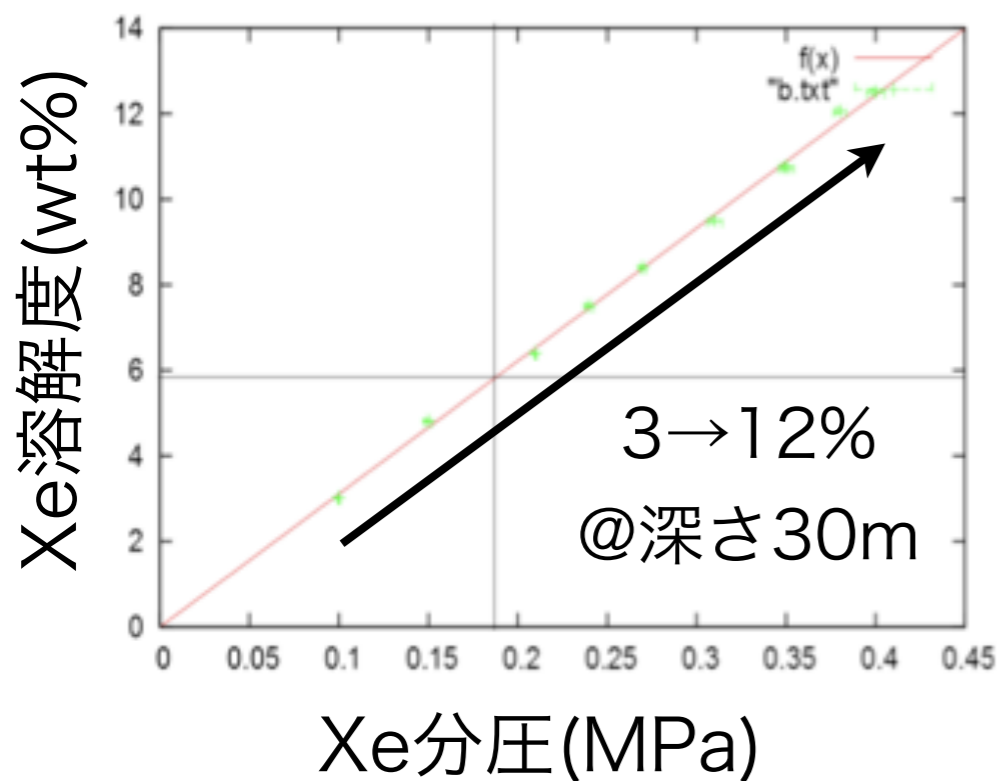
## ○高量子効率PMT



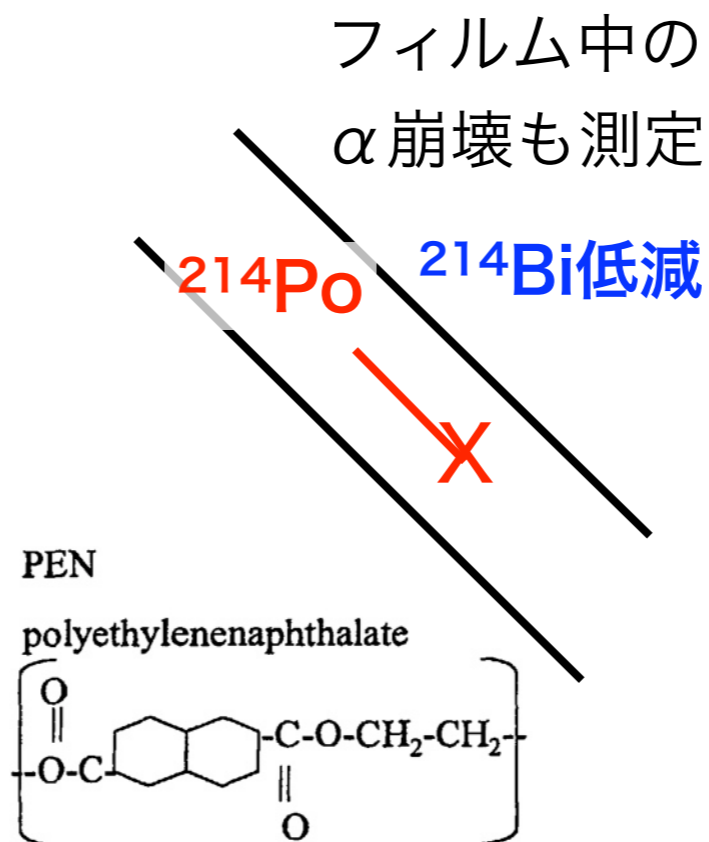
## ○高発光LS



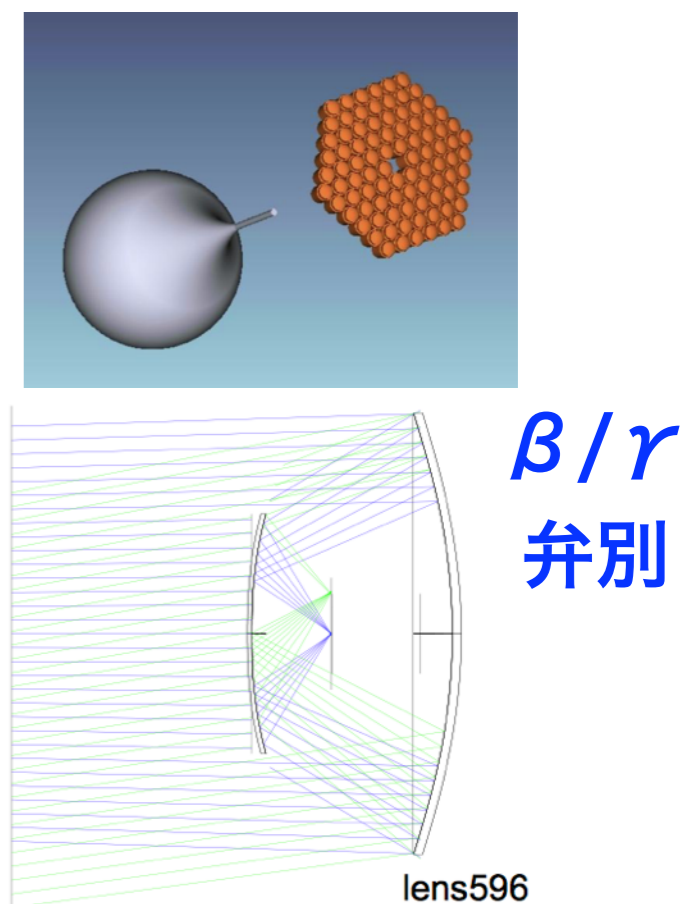
## ○キセノン高濃度化



## ○発光フィルム

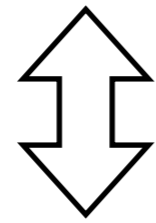


## ○高感度撮像



# ニュートリノ実験は難しいが、

1930 Pauli 軽い中性フェルミオンを導入 (理論予測された最初の粒子)

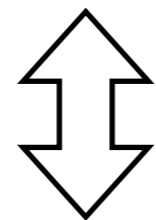


26年

1956 Reines, Cowan ニュートリノの発見 (Savannah river原子炉)

1957 Pontecorvo  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$  の可能性を指摘

1962 Maki, Nakagawa, Sakata フレーバー混合の模型

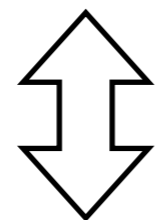


41年

1998 Super-Kamiokande 大気ニュートリノ振動の証拠

1937 Majorana  $\nu = \bar{\nu}$  の表現を発見

1939 Furry ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊を指摘



77+年

201X K○○○○○○○○-○○n ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊の発見、マヨラナ性を証明

ご支援よろしくお願ひします。  $m(\_ \_)m$  したい。