



東北大学



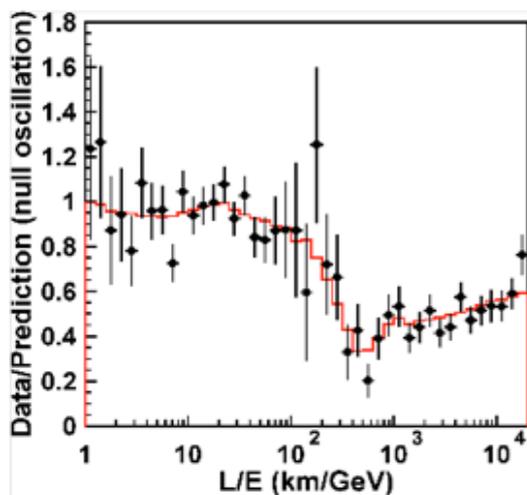
A01班：大型液体シンチレータ検出器での
ニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究

KamLAND-Zen

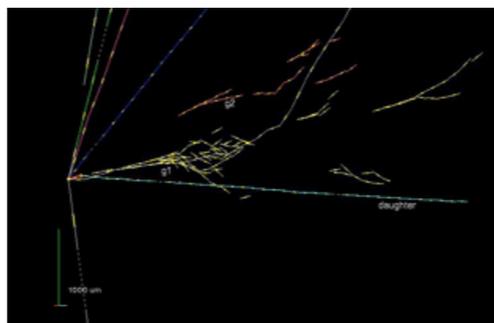
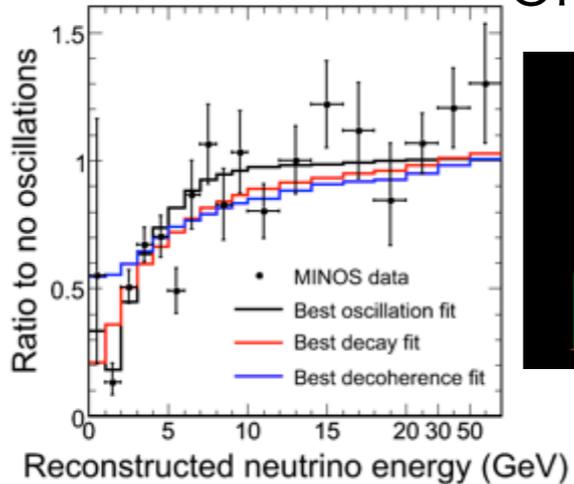
東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

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

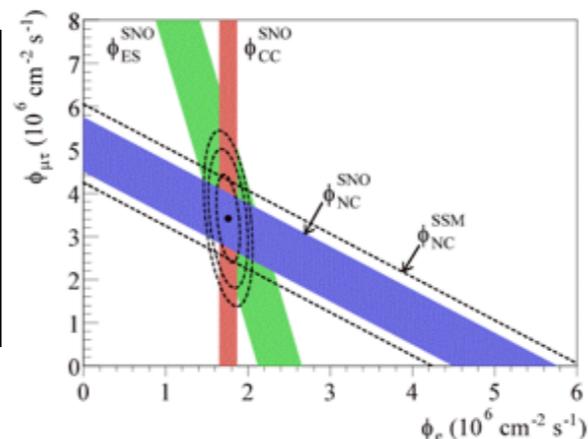
SK 大気 半周期



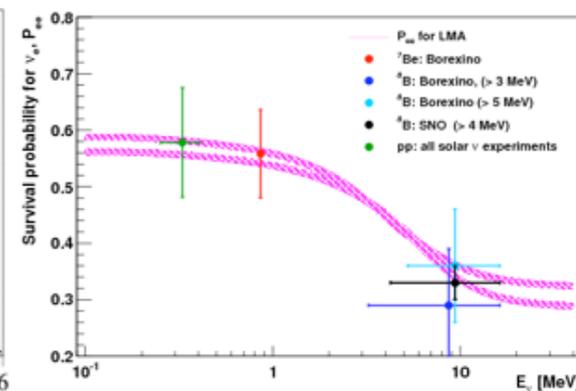
MINOS 半周期 OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



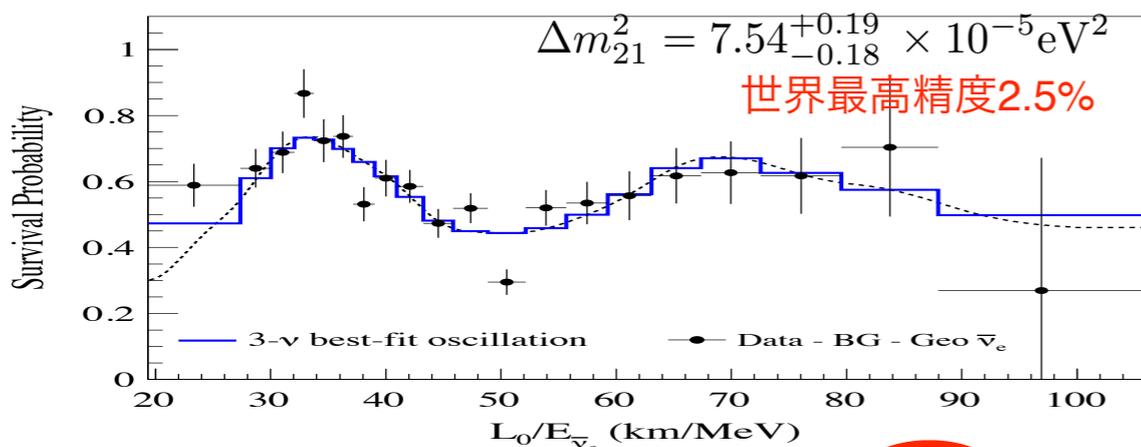
SNO CC/NC



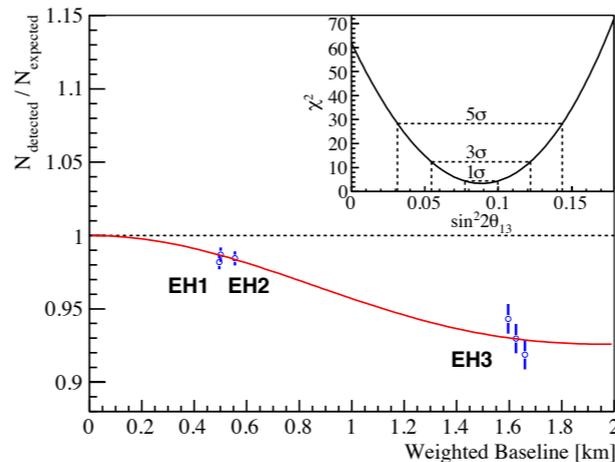
Borexino MSW



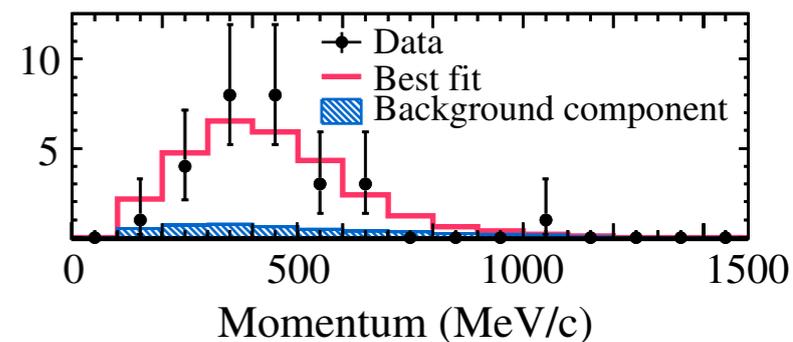
KamLAND 2 周期



原子炉短基線



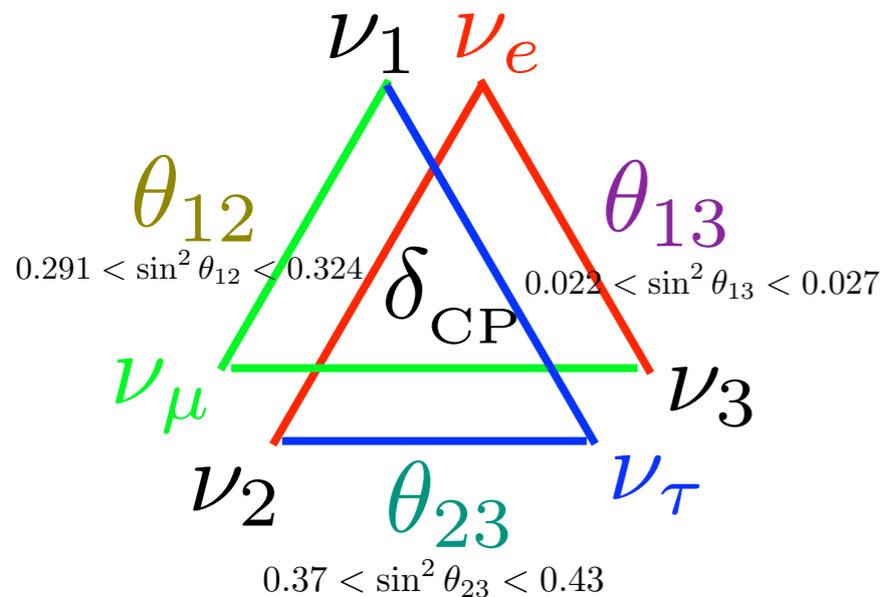
T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



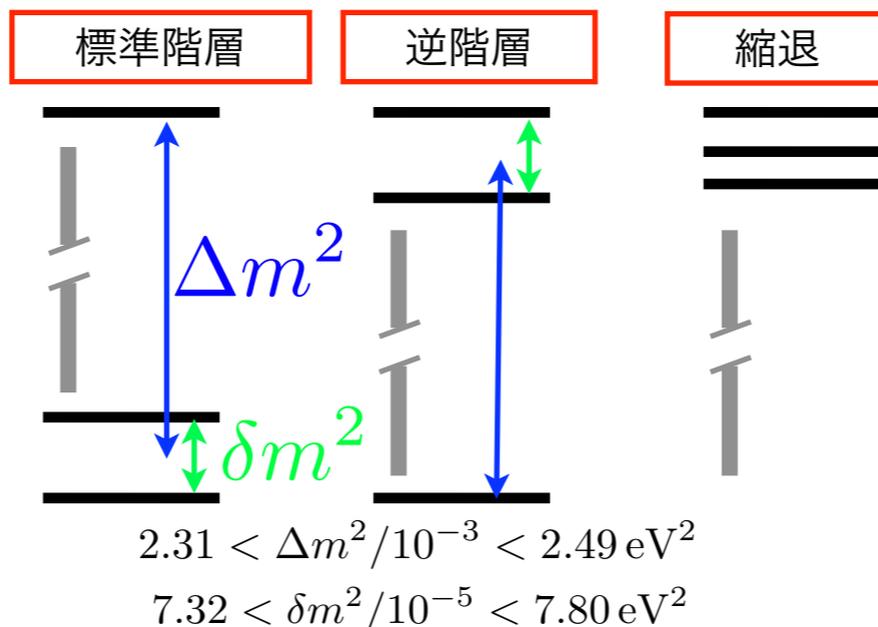
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta m^2 L}{4E}\right)$$

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

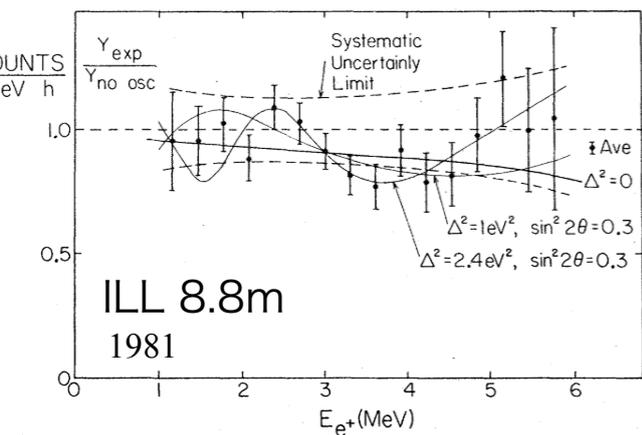
現実的マヨラナ性検証

質量絶対値測定も期待

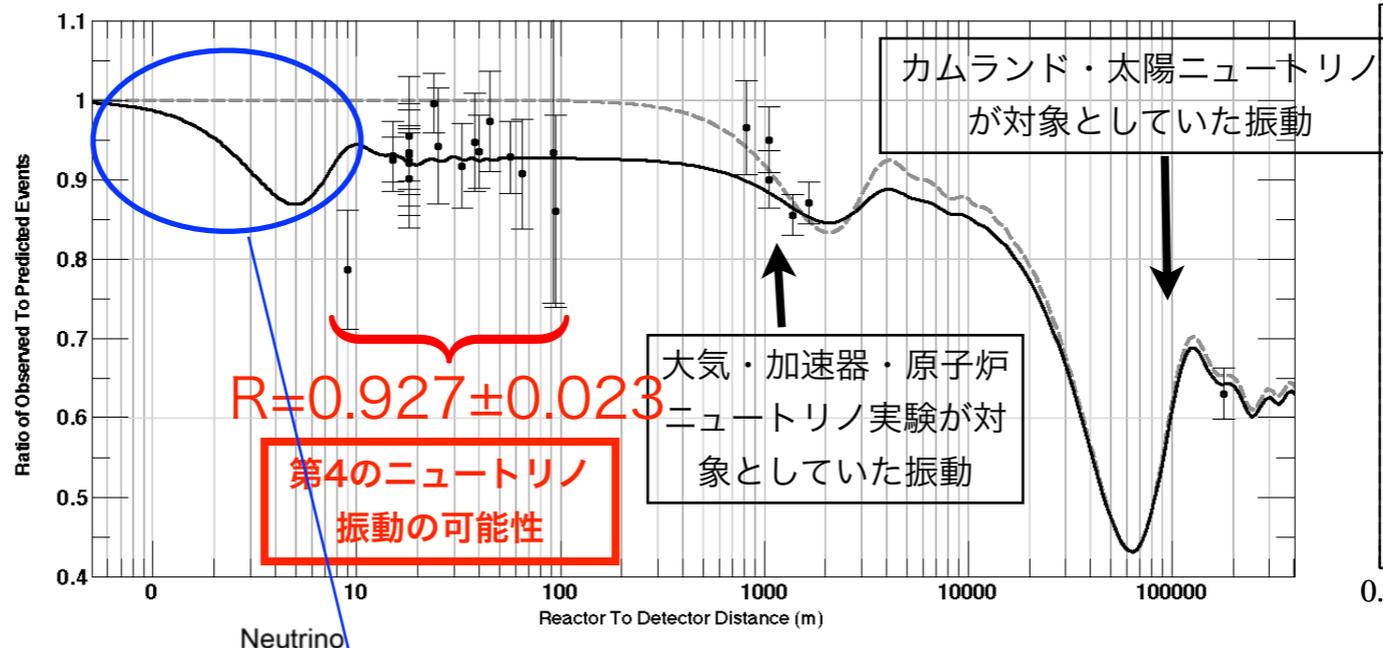
マヨラナCP測定の入り口

世代数

至近距離でスペクトルの歪み？

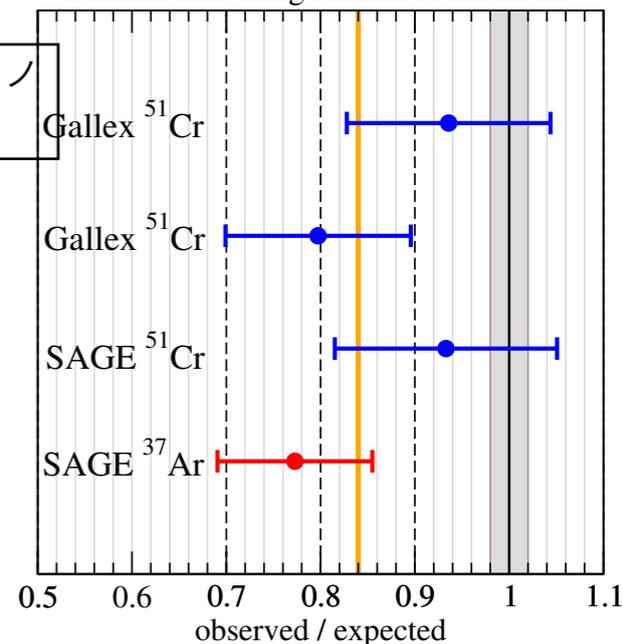


過去の原子炉反ニュートリノ測定結果



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



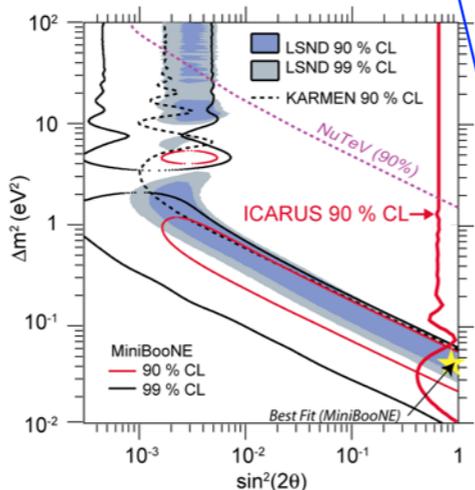
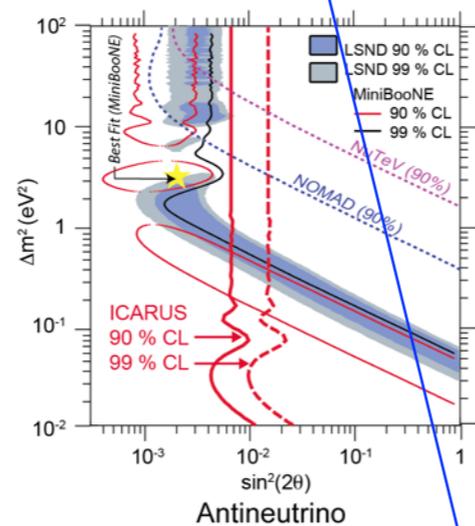
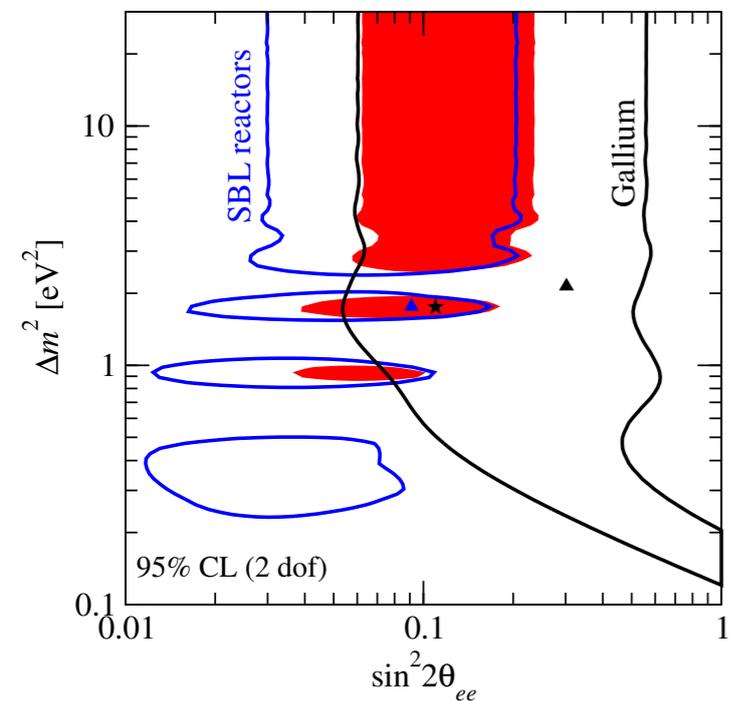
ステライルニュートリノのヒント

| | ニュートリノ源 | 対象 | 有意さ |
|-----------|------------|--|----------------|
| 原子炉 | β 崩壊 | $\bar{\nu}_e$ 欠損 | 3.0σ |
| ガリウム | 電子捕獲 | ν_e 欠損 | 2.7σ |
| LSND | 静止状態での崩壊 | $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ | 3.8σ |
| MiniBoone | 短基線加速器 | $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ | 3.8σ |
| 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、

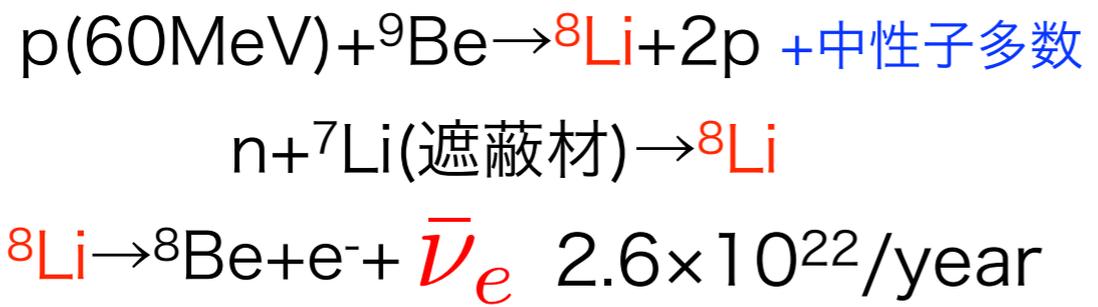
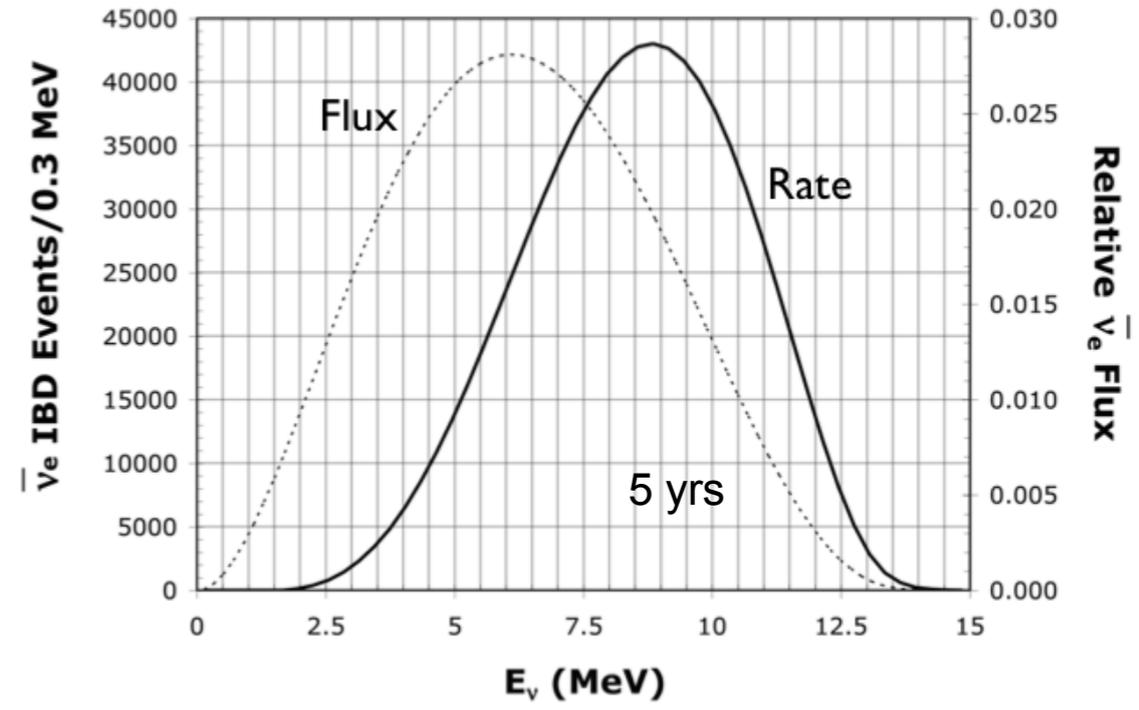
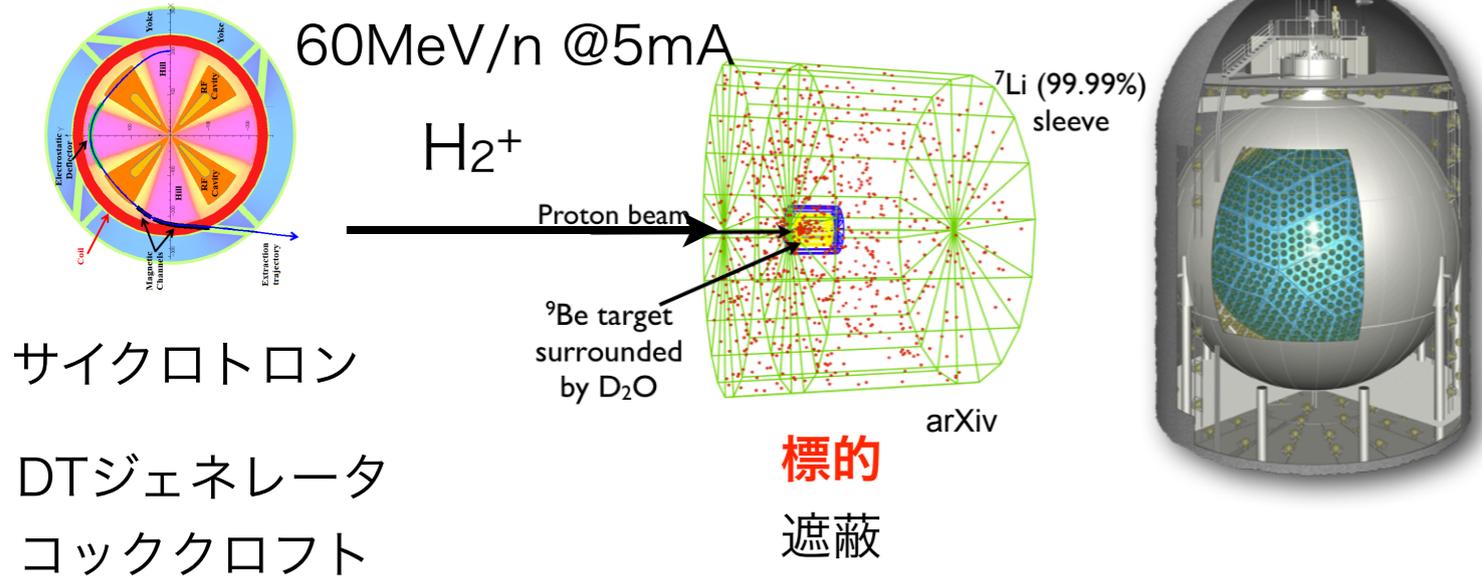
カムランド内で振動が見えるのでは？

1 eV程度のステライルニュートリノのヒント



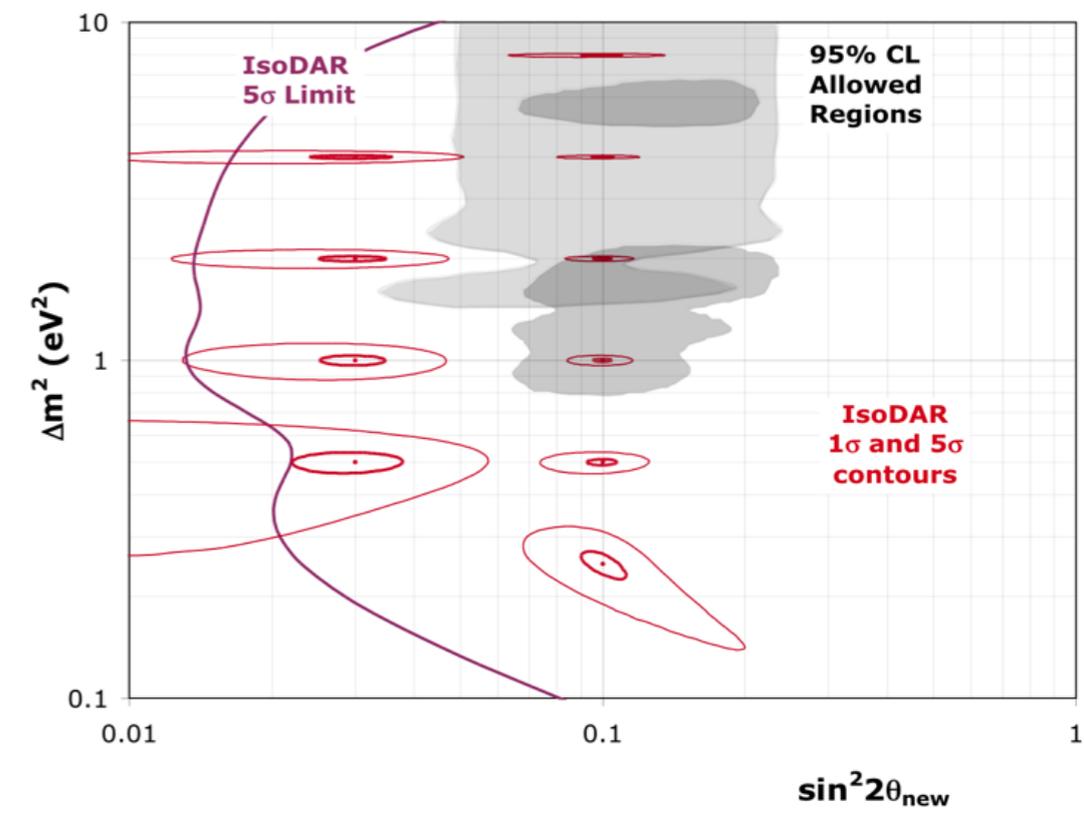
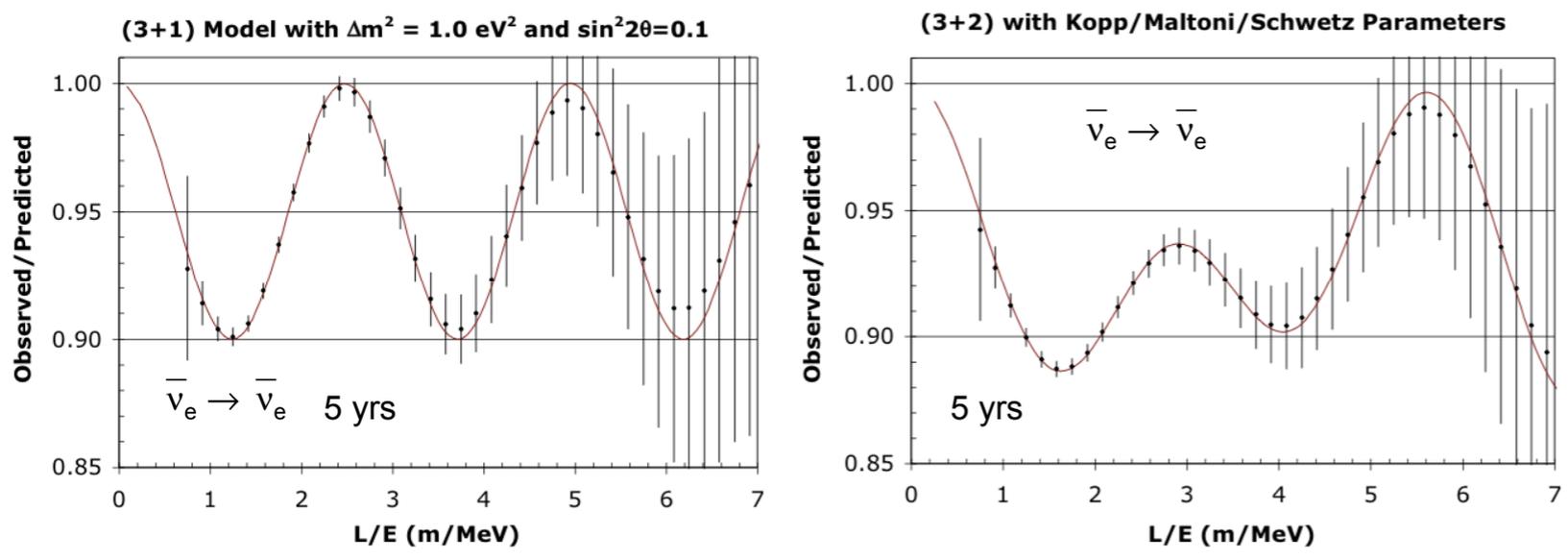
IsoDAR

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

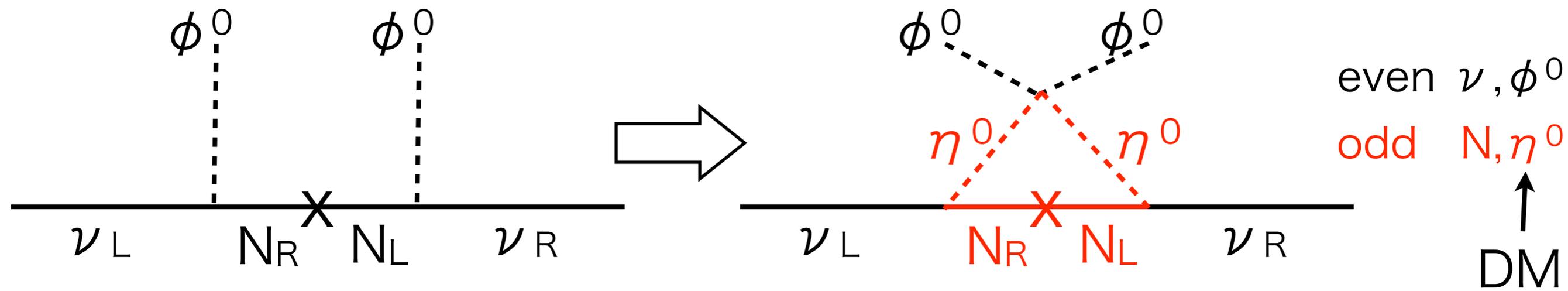
○ **軽いニュートリノ質量** Seesaw機構

○ **宇宙物質優勢** Leptogenesis機構

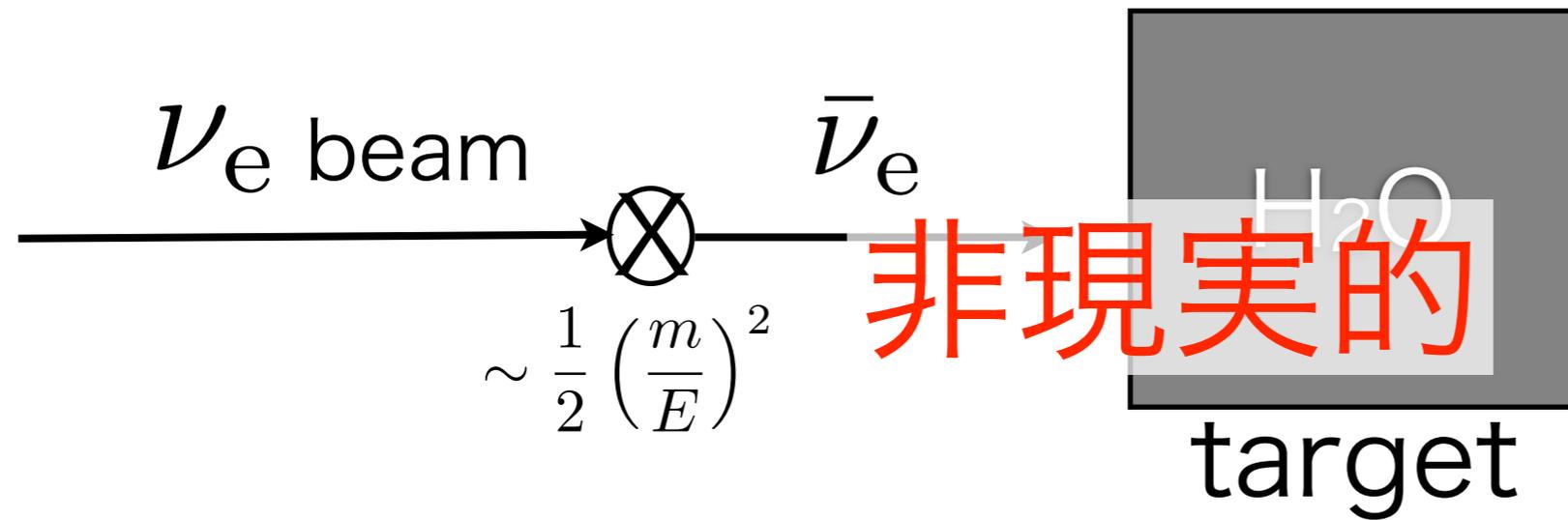
○ **暗黒物質** Asymmetric dark matter, 輻射Seesaw機構
第4世代ニュートリノ？

○ 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

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

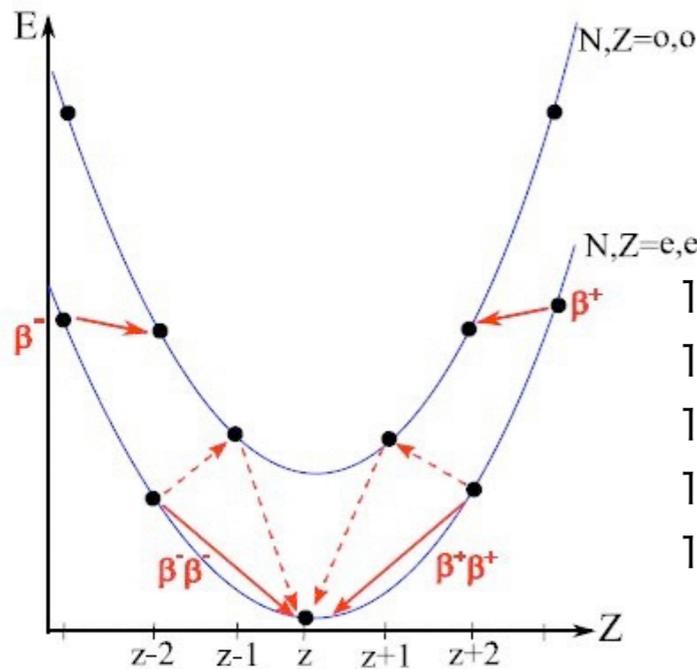
$$\sigma \propto E^2$$

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。

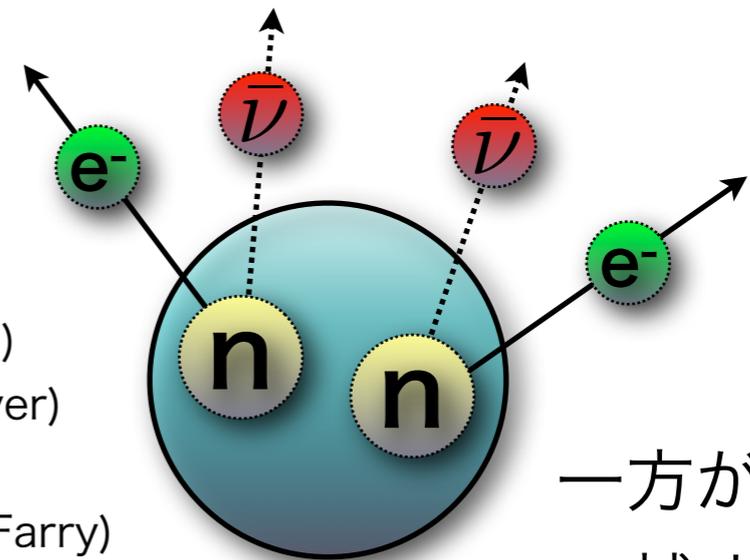
幸い自然は親切で、

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。



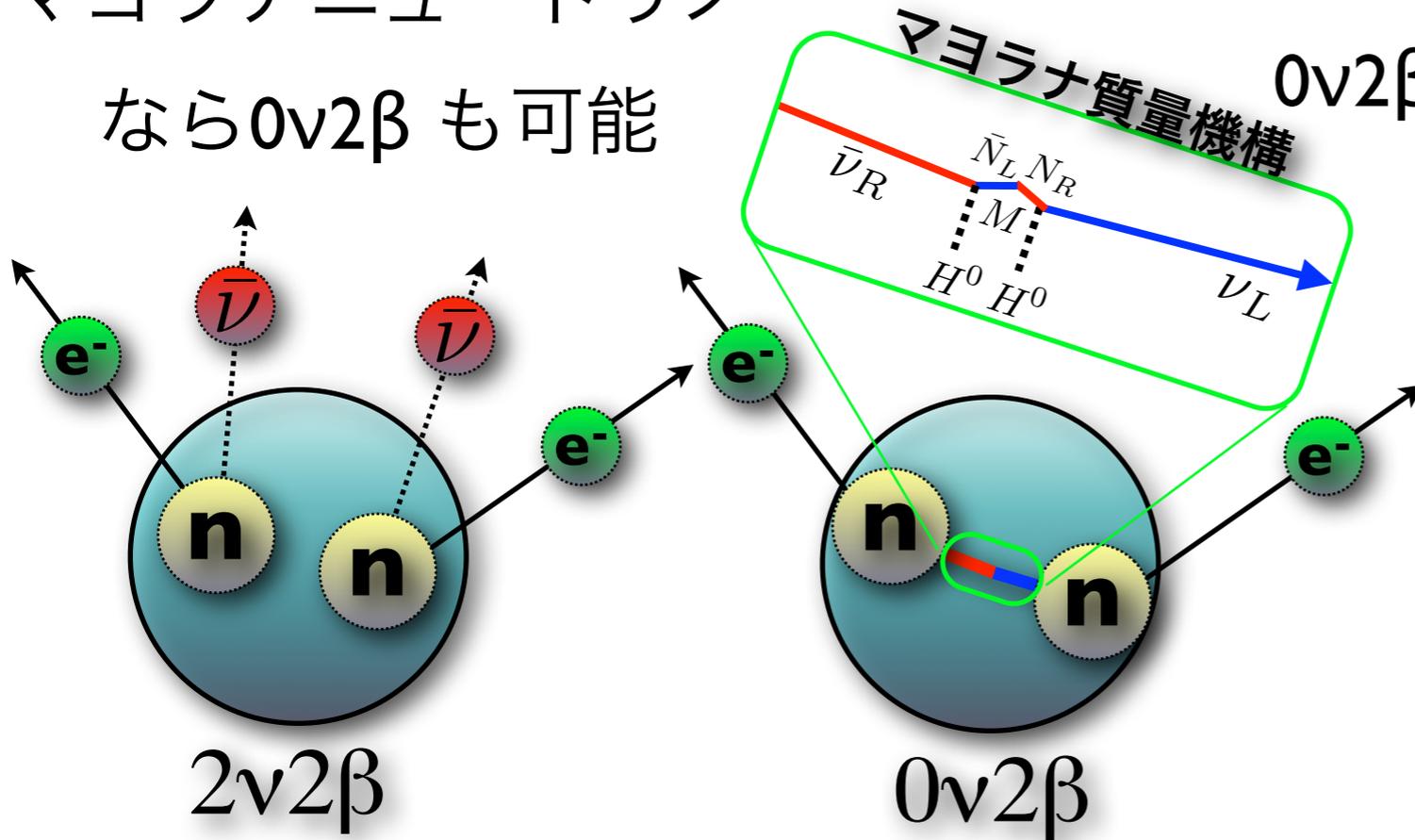
- 1930 light neutral particle (W.Pauli)
- 1933 neutrino, beta decay theory (E.Fermi)
- 1935 double beta decay (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
- 1939 neutrino-less double beta decay (W.Furry)



一方が他方を追い越す事も可能

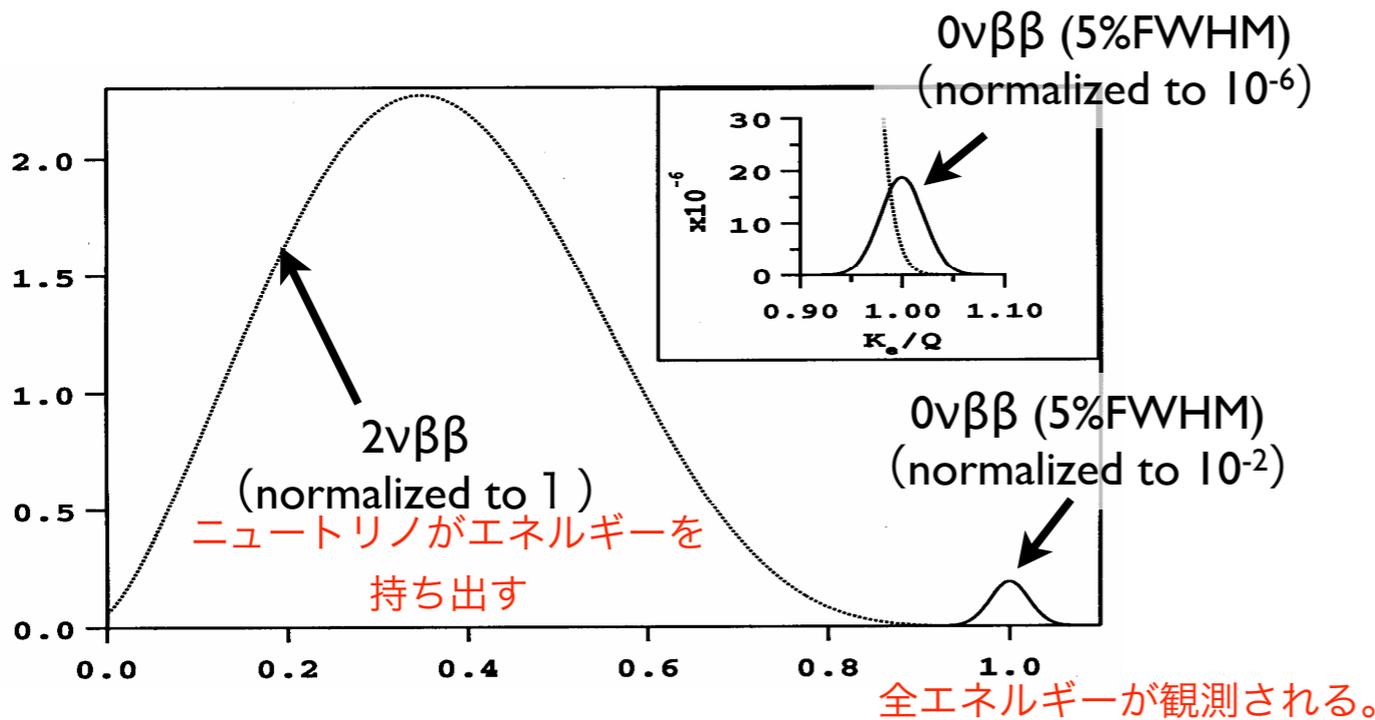
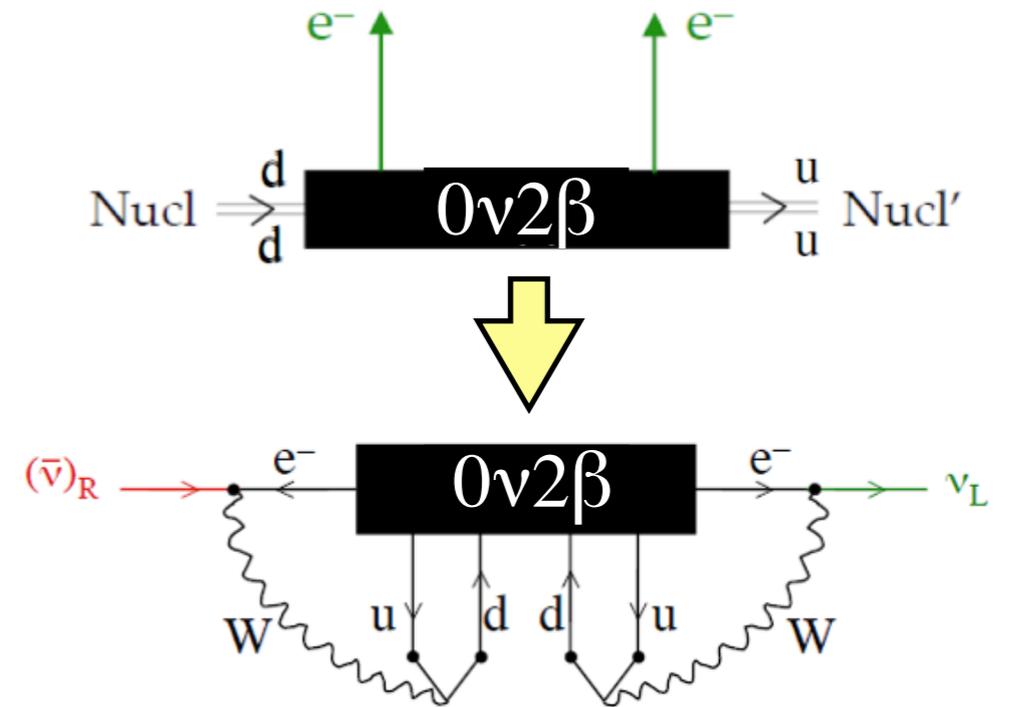
二重β崩壊

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)



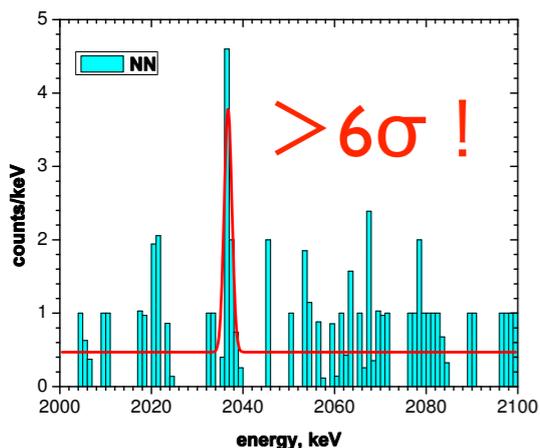
$0\nu 2\beta$ 崩壊率は、マヨラナ有効質量の
2乗に比例するので、質量の絶対値に対
する情報が得られる。 マヨラナCP

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

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

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

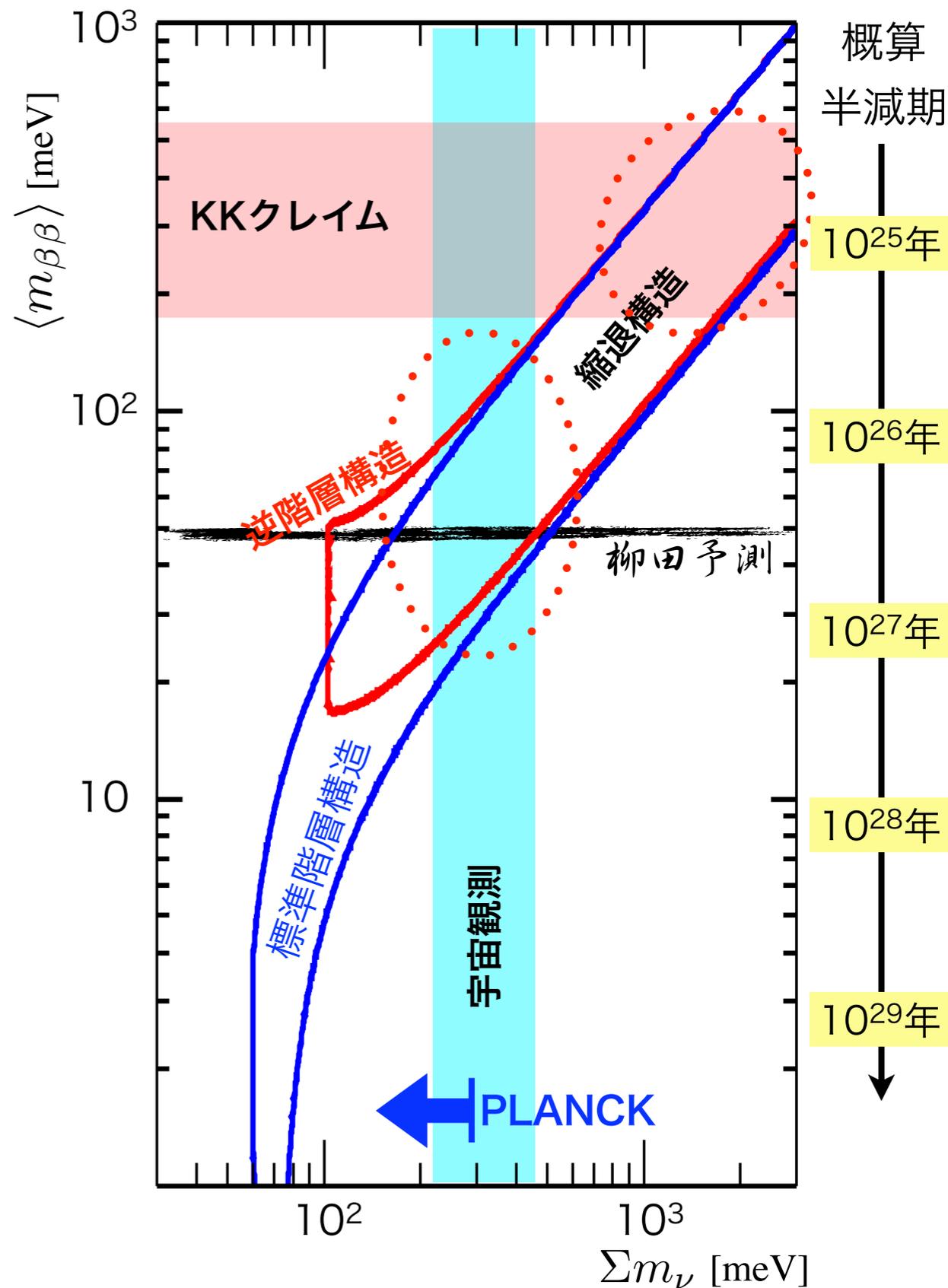
$T_{1/2} = 2.23^{+0.44}_{-0.31} \times 10^{25}$ 年

$m_{\beta\beta} = 320 \pm 30$ 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

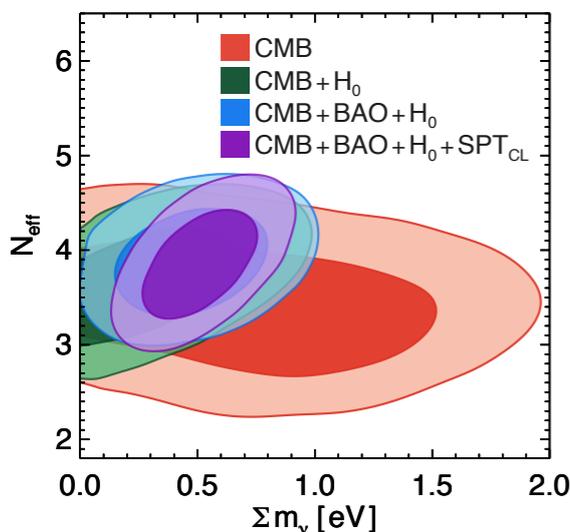
$m_{ee} = (47 \pm 1)$ meV

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)

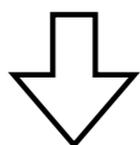
宇宙観測



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

(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。

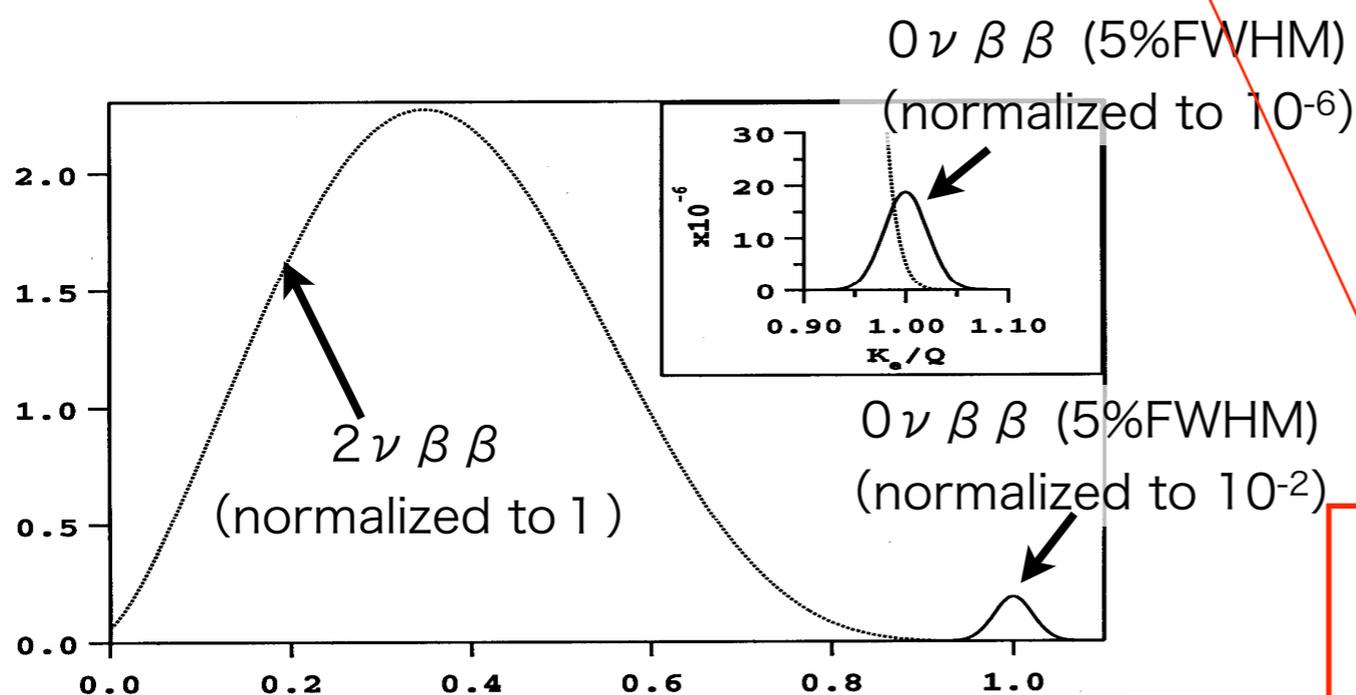


いつ見つかったとしても不思議でない。

- 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
- $0\nu 2\beta$ 発見が無くと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

comparison of double beta decay nuclei

| 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 |
| $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$ | 0.86×10^{27} | $(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$ | 7.8 | 2039 | semiconductor |
| $^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$ | 2.44×10^{26} | $(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$ | 9.2 | 2995 | |
| $^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$ | 0.98×10^{27} | $(2.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$ | 2.8 | 3351 | |
| $^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ | 2.37×10^{26} | $(7.1 \pm 0.4) \times 10^{18}$ | 9.6 | 3034 | fast 2v |
| $^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$ | 2.86×10^{26} | $(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$ | 7.5 | 2805 | |
| $^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$ | 4.53×10^{27} | $(2.5 \pm 0.3) \times 10^{24}$ | 31.7 | 867 | |
| $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ | 2.16×10^{26} | $(0.9 \pm 0.1) \times 10^{21}$ | 34.5 | 2529 | large nat. abundance |
| $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ | 4.55×10^{26} | $(2.3 \pm 0.1) \times 10^{21}$ | 8.9 | 2476 | slow 2v, rare gas |
| $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ | 2.23×10^{25} | $(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$ | 5.6 | 3367 | 0v, fast 2v |



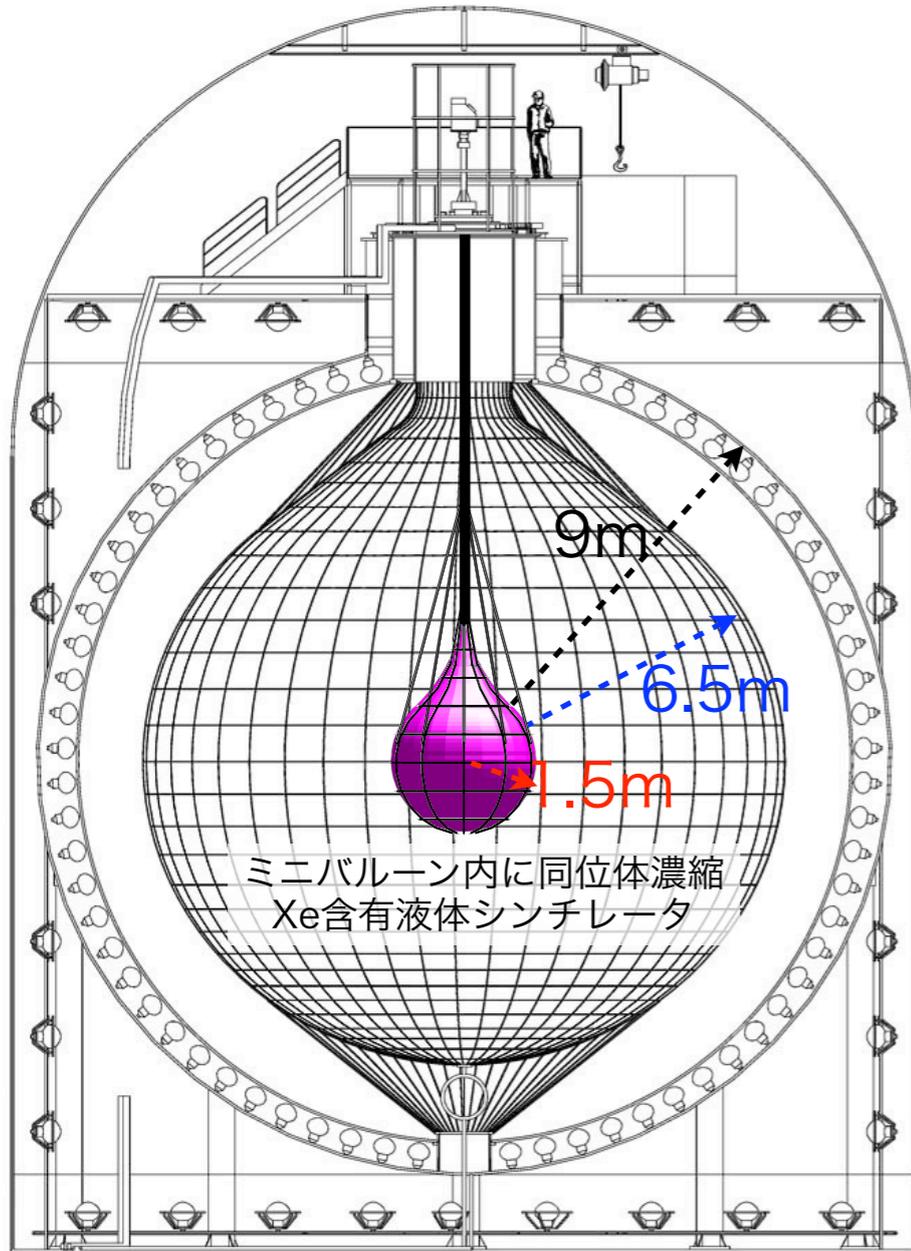
2ν BGはエネルギー分解能の約5.8
 乗に比例して増加するため、 2ν が
 早いと高分解能が必要となる。

$T^{0\nu} / T^{2\nu}$ 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}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 (1200m^3 , U: $3.5 \times 10^{-18}\text{g/g}$, Th: 5.2×10^{-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)
- 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

ミニバルーン試作とプールでの導入リハーサル



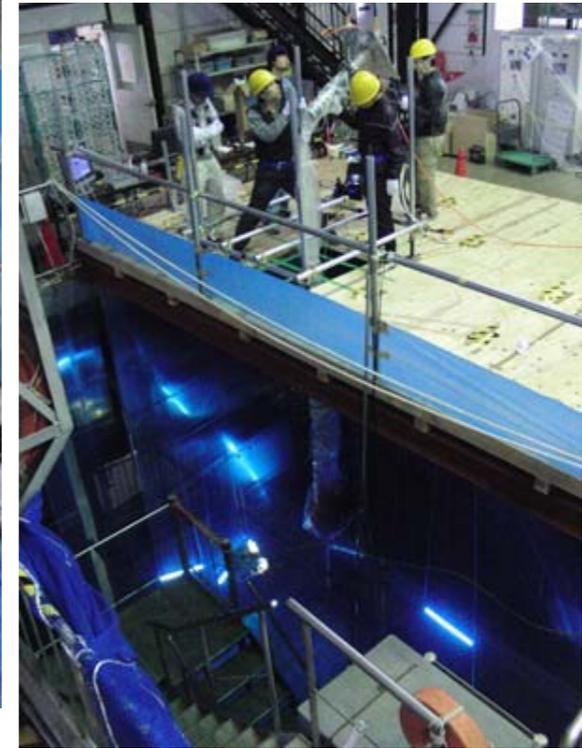
80ミクロン厚ポリエチレンでの試作
ミニバルーンの構造を決定



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



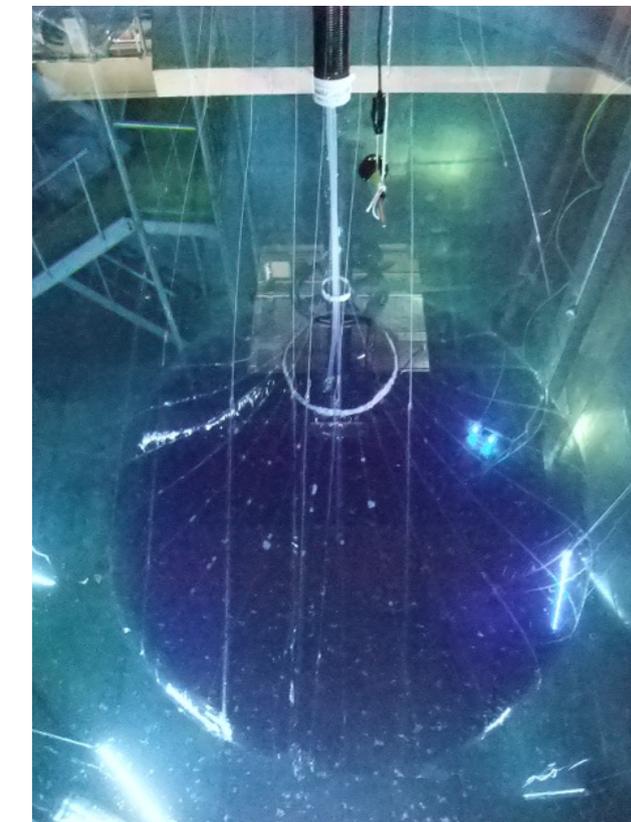
その他



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

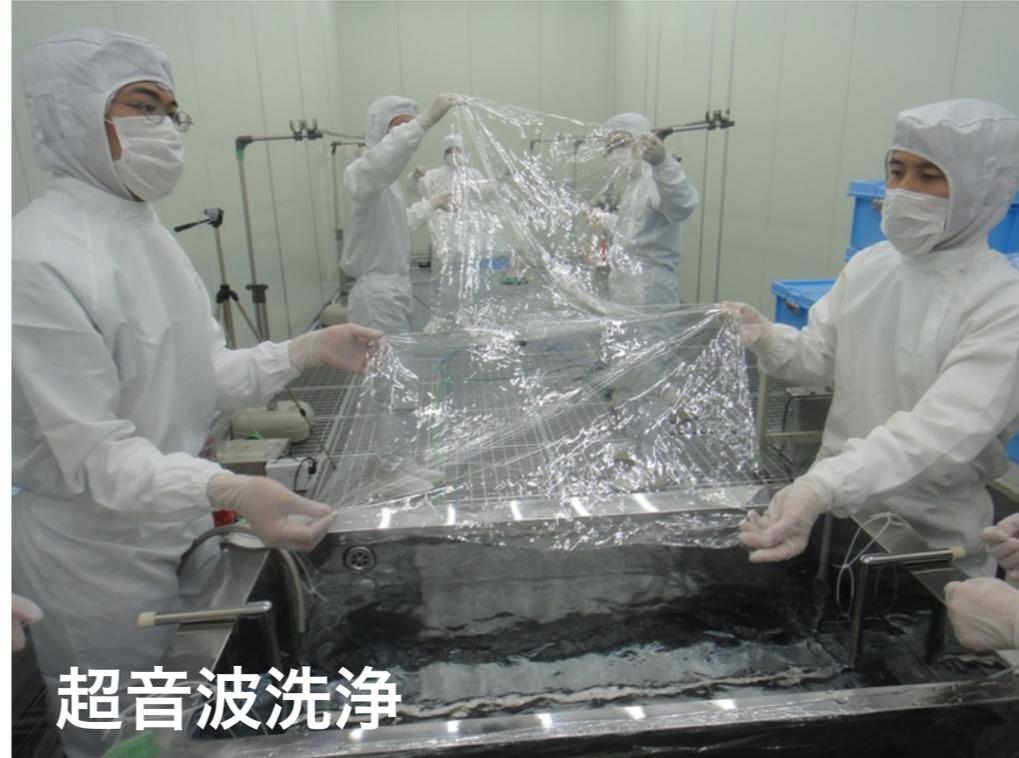
低放射能

→ 充填剤無し特注フィルム

U : 150 → 2×10^{-12} g/g

Th : 59 → 3×10^{-12} g/g

^{40}K : 140 → 2×10^{-12} g/g



超音波洗浄

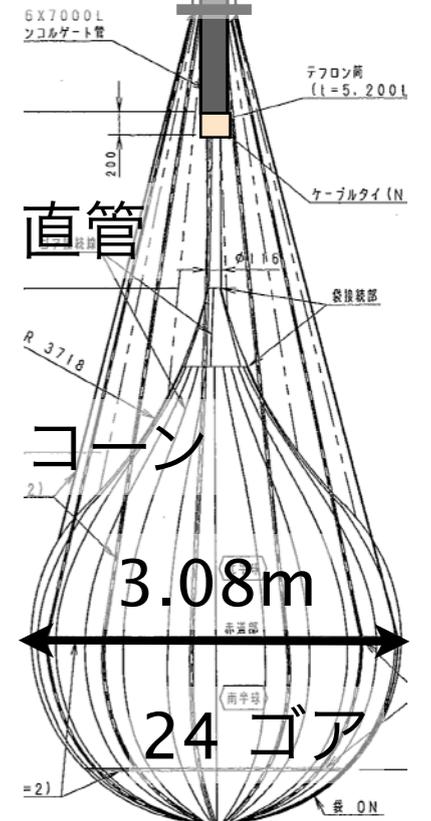


24ゴアをフィルムから切出し



新開発溶着法

Vectran 紐につ
ながった12本の
ナイロンベルト
で吊り下げ

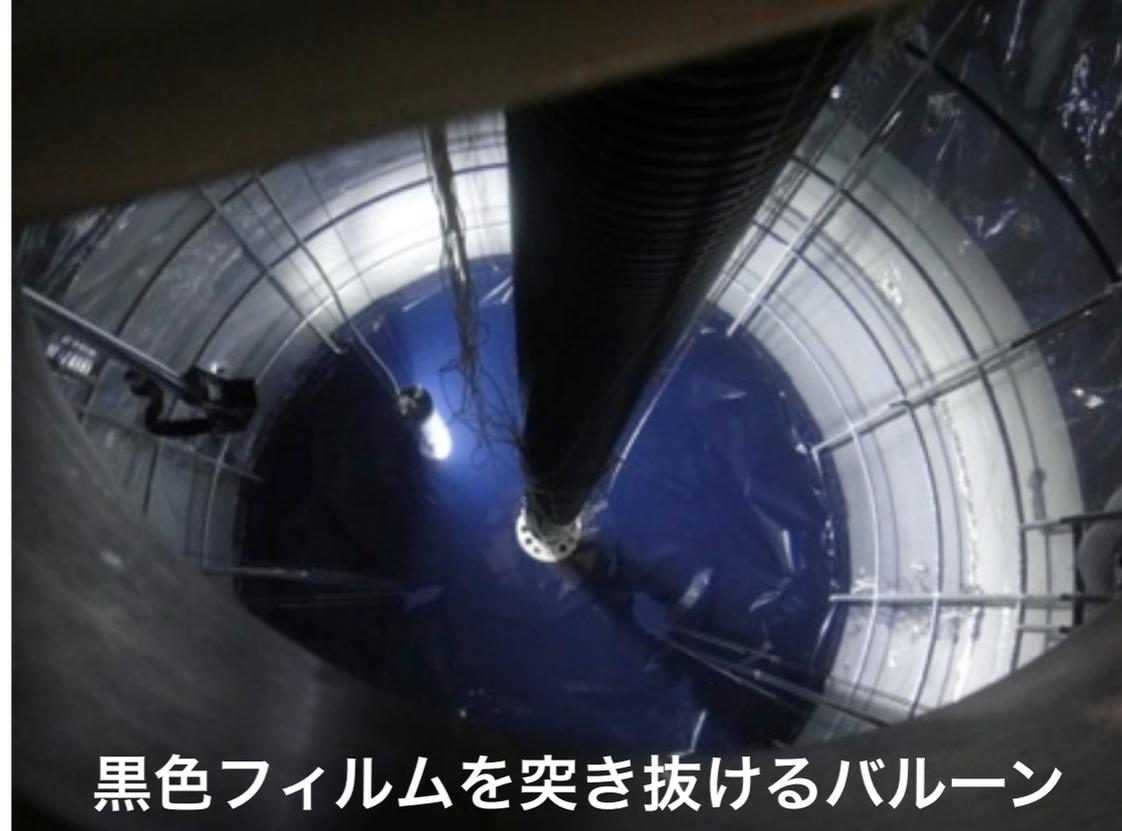


↑ 堅いチューブ(7m) ↓
↑ フォイルム部分(~6m) ↓

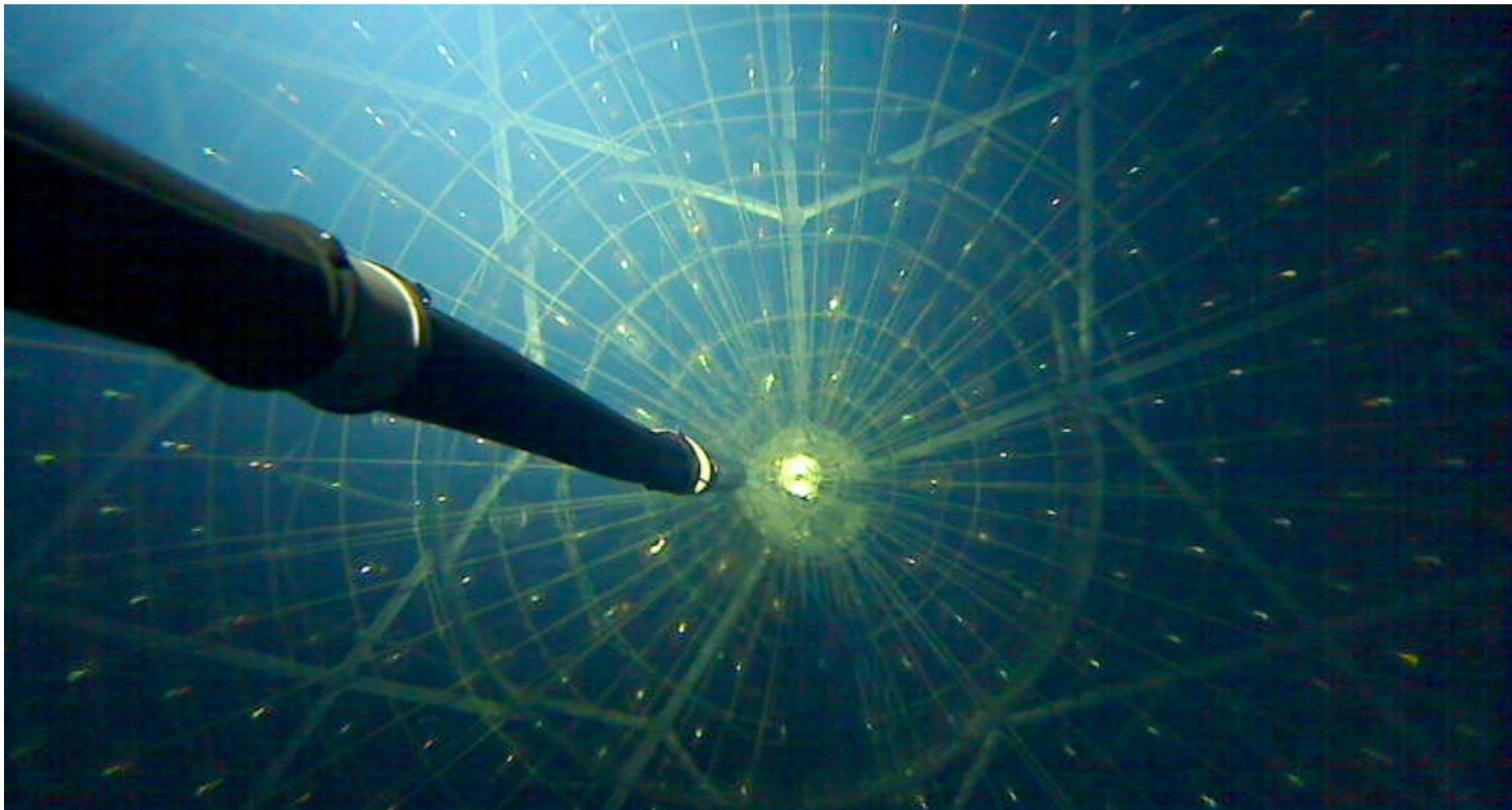
🌐 全ての道具や部品もここで洗浄



バルーンとチューブの導入



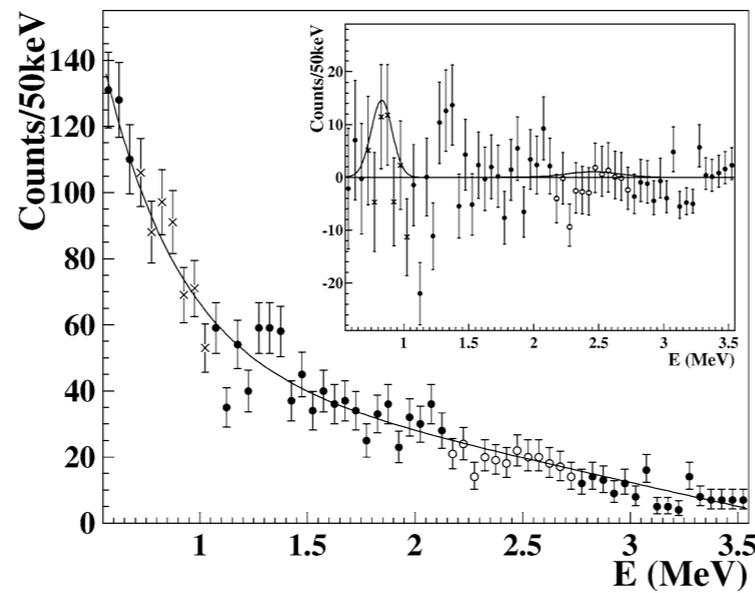
黒色フィルムを突き抜けるバルーン



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

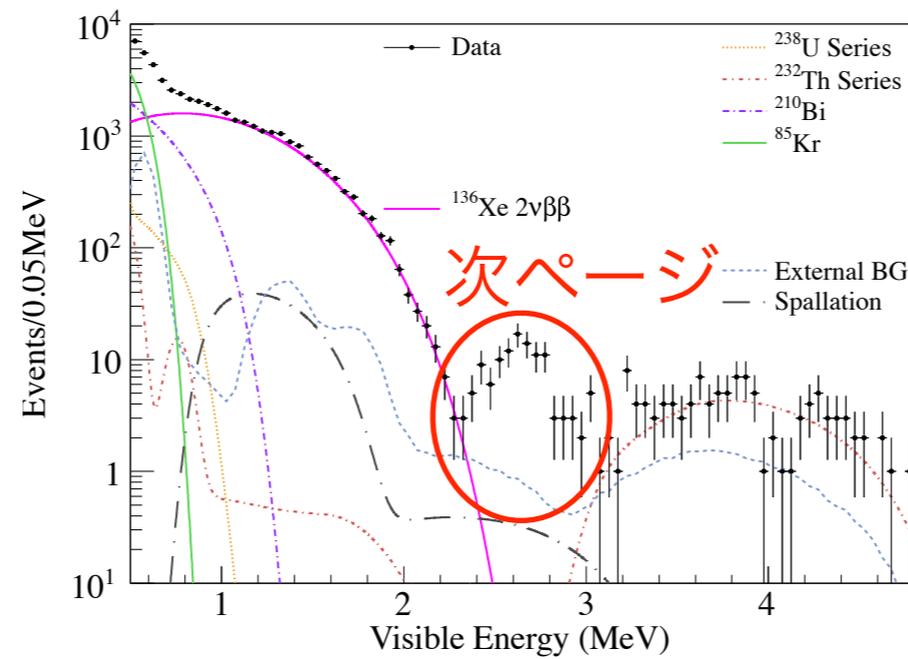
DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

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



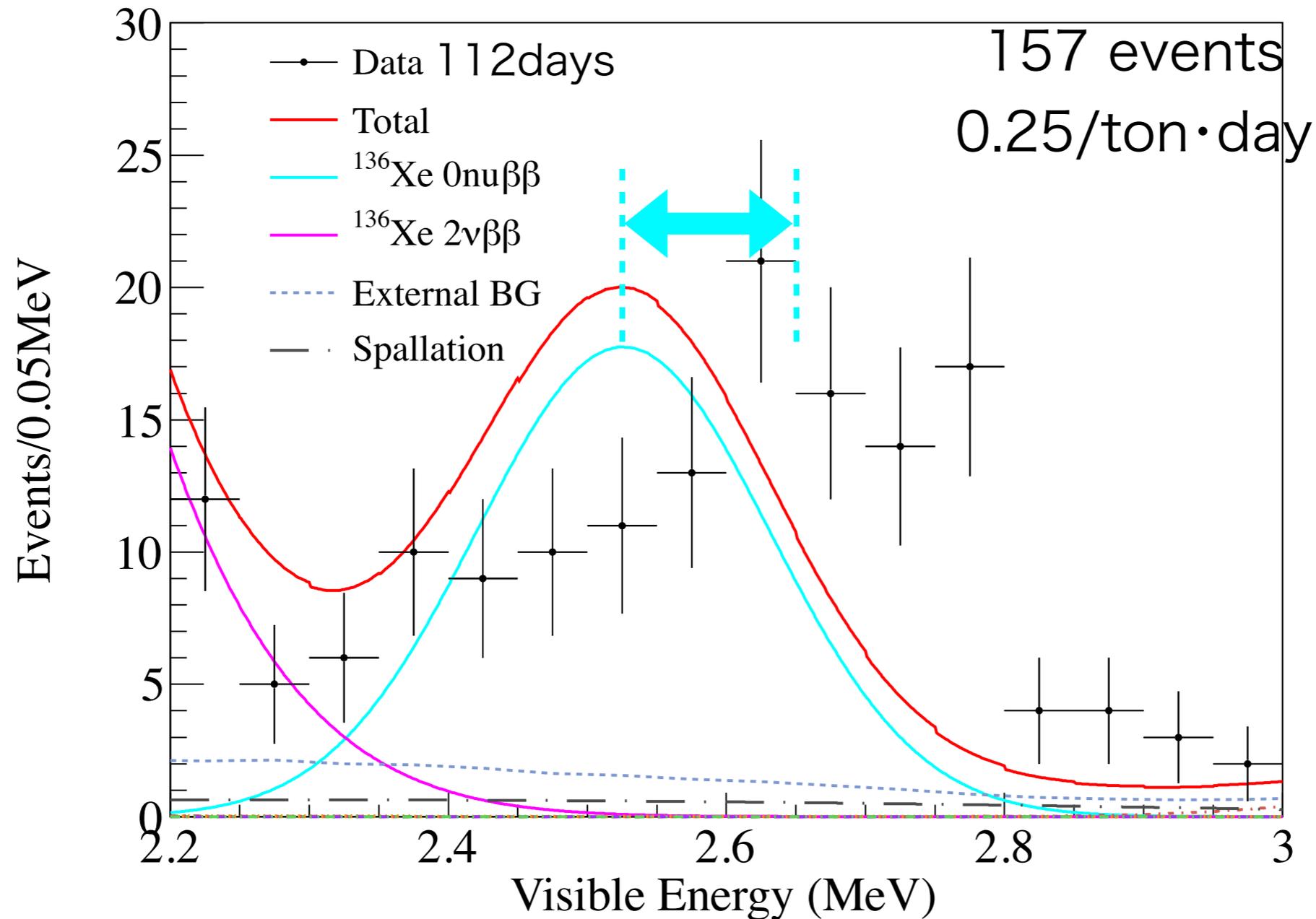
KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

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



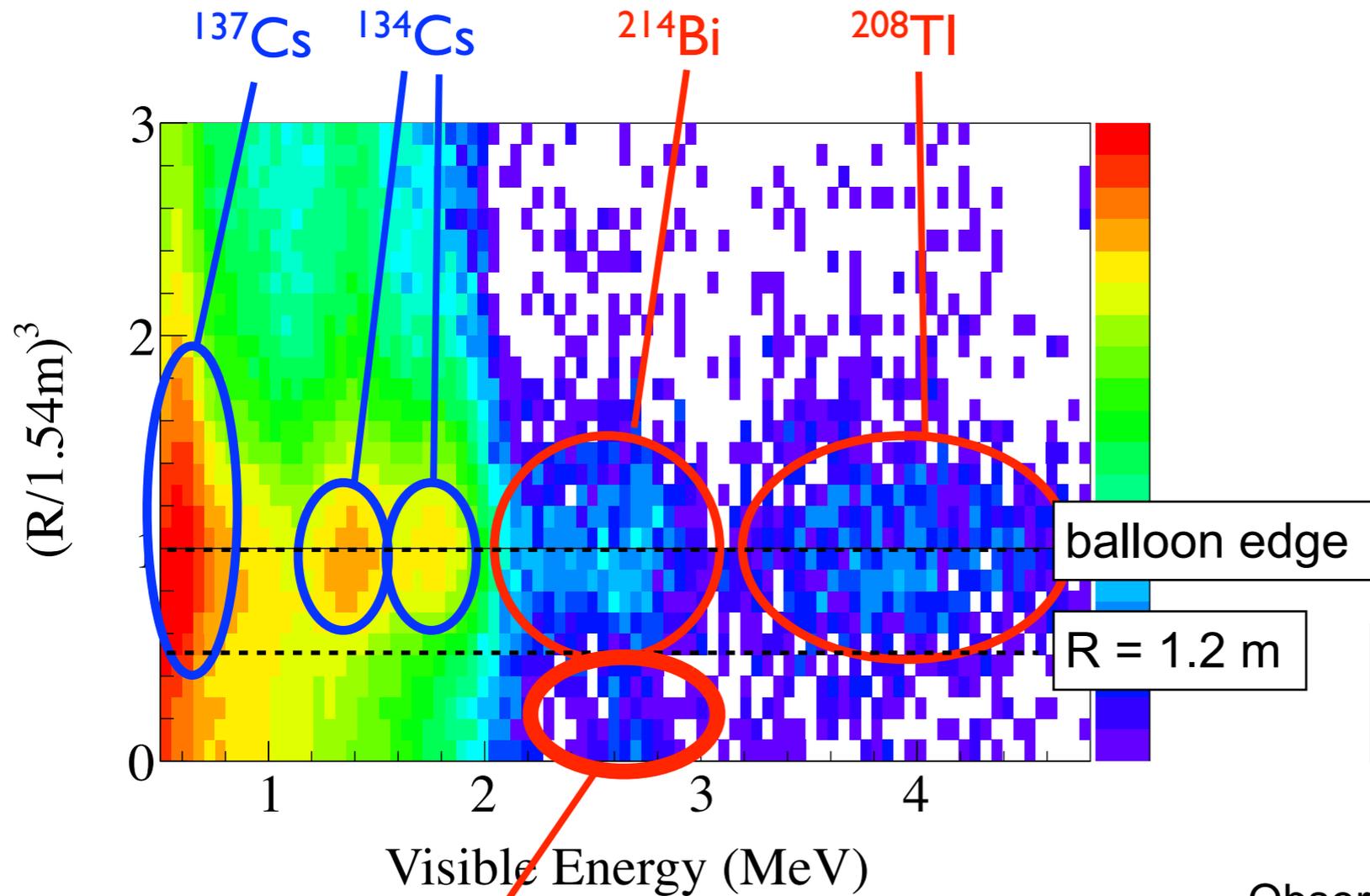
Background situation

Peak fit with 0ν signal

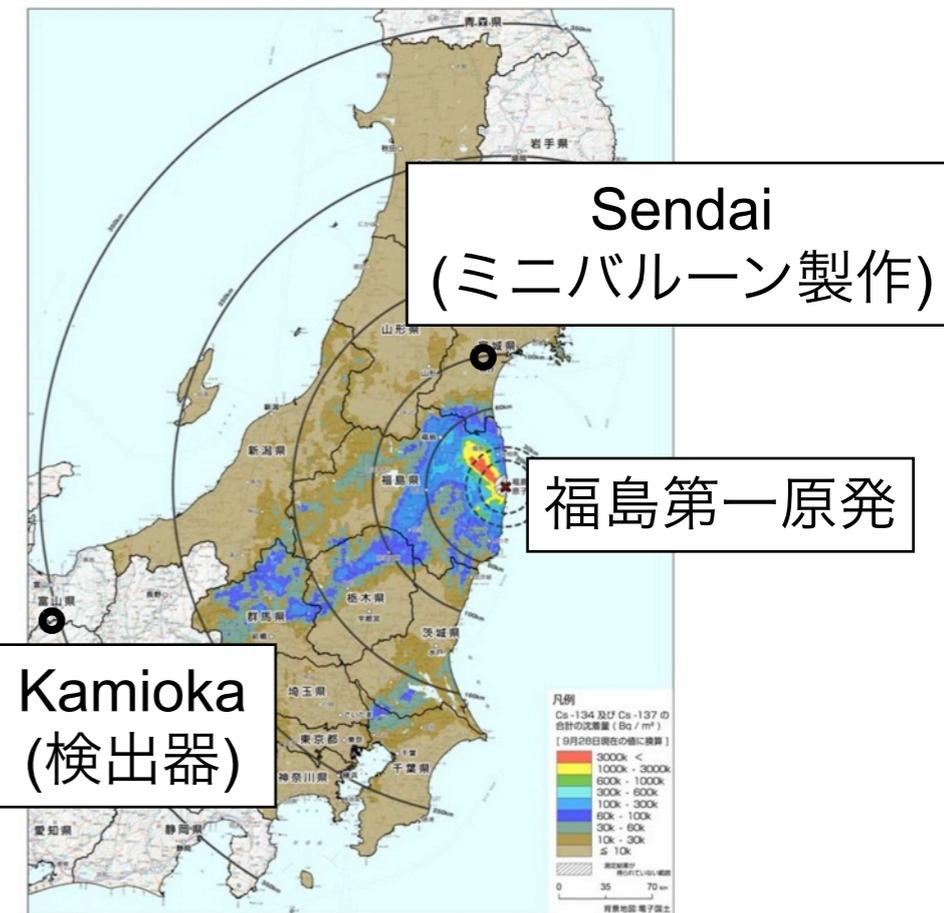


Peak position is different from that of expected 0ν .
 0ν only is rejected at more than 8σ level.

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、幸いしみ出してきていない。
- 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。

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

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

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

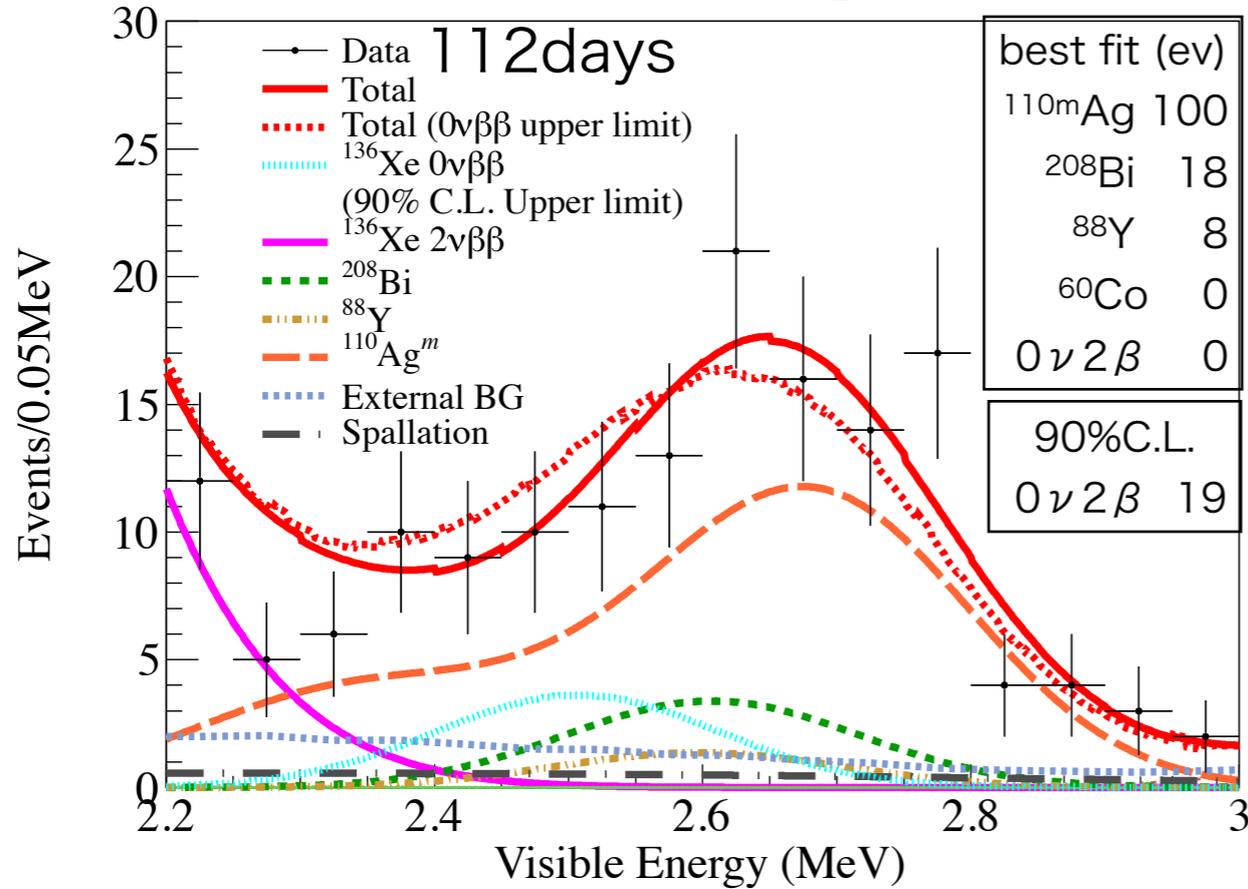
100秒~30日の時間相関を持つものは、A,Zの近い原子核の
エネルギースペクトルを調査して制限 → negligible

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

30日以上で 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)

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



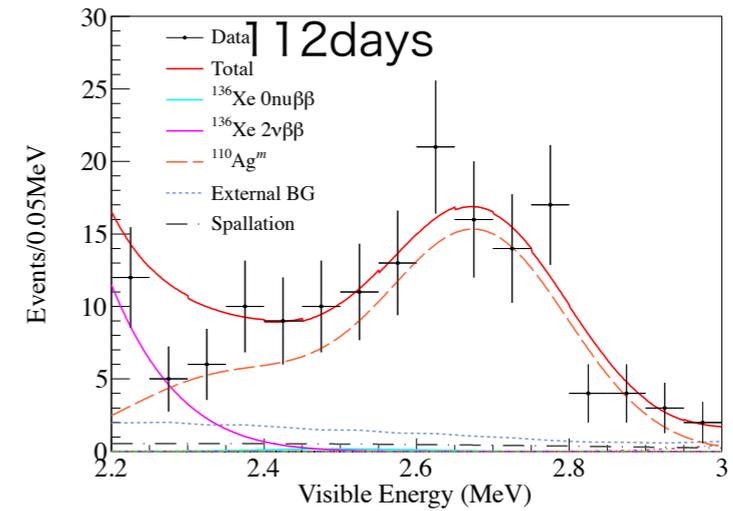
最適解と $0\nu 2\beta$ の上限 (90%CL)

(χ^2 at 2.2~3.0MeV)

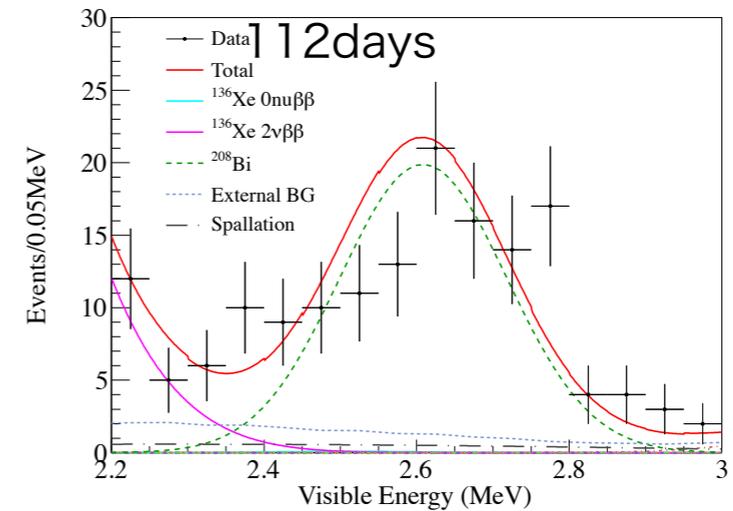
ENSDFデータベースの全探索でこれら4各種のみが、BG候補

| | 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。



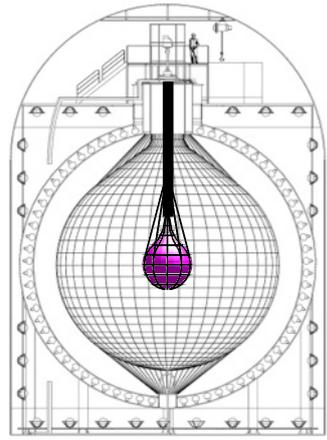
^{110m}Ag は良く合う。



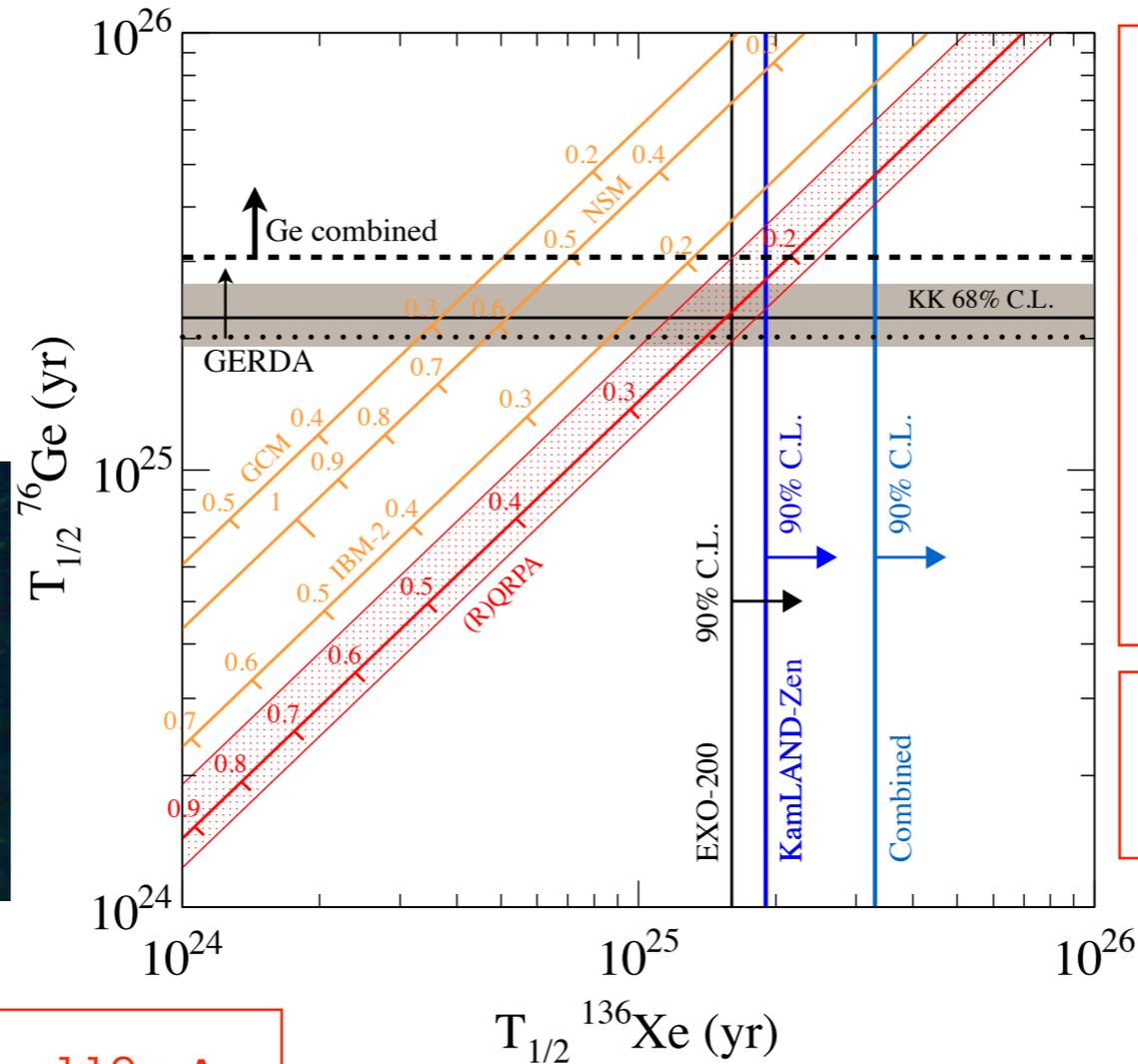
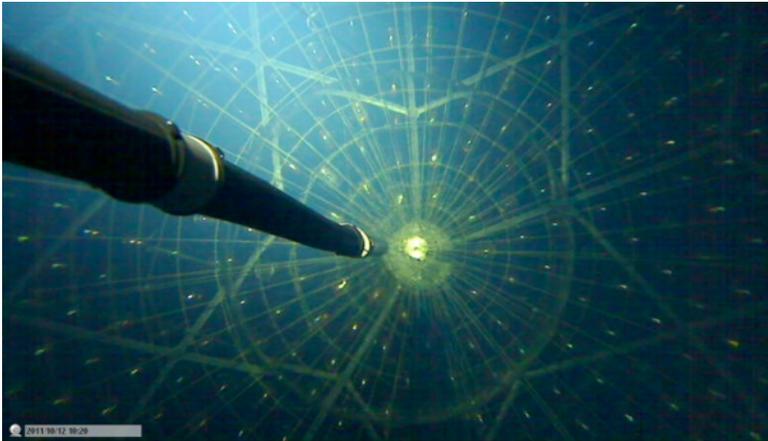
^{208}Bi は合わない。

KamLAND-Zen status 89.5kg-yr

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



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

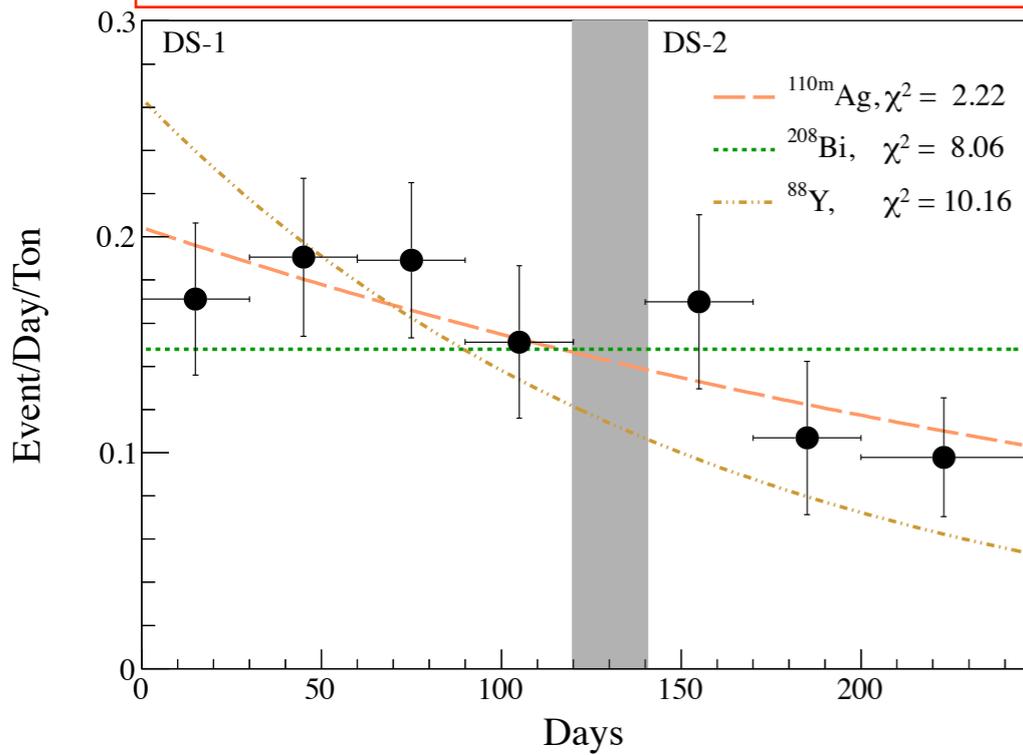


1. the world best limit
 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ yrs (KL-Zen)
 $> 3.4 \times 10^{25}$ yrs (combined)

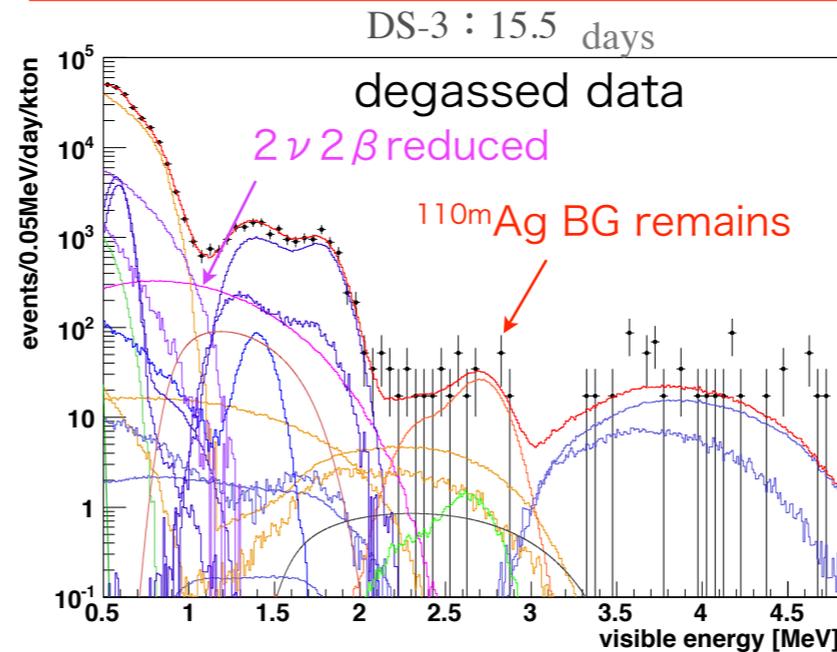
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$ meV

KK-claim refuted at
 97.5% CL

2. BG identified as ^{110m}Ag



3. Xe on-off measurement demonstrated

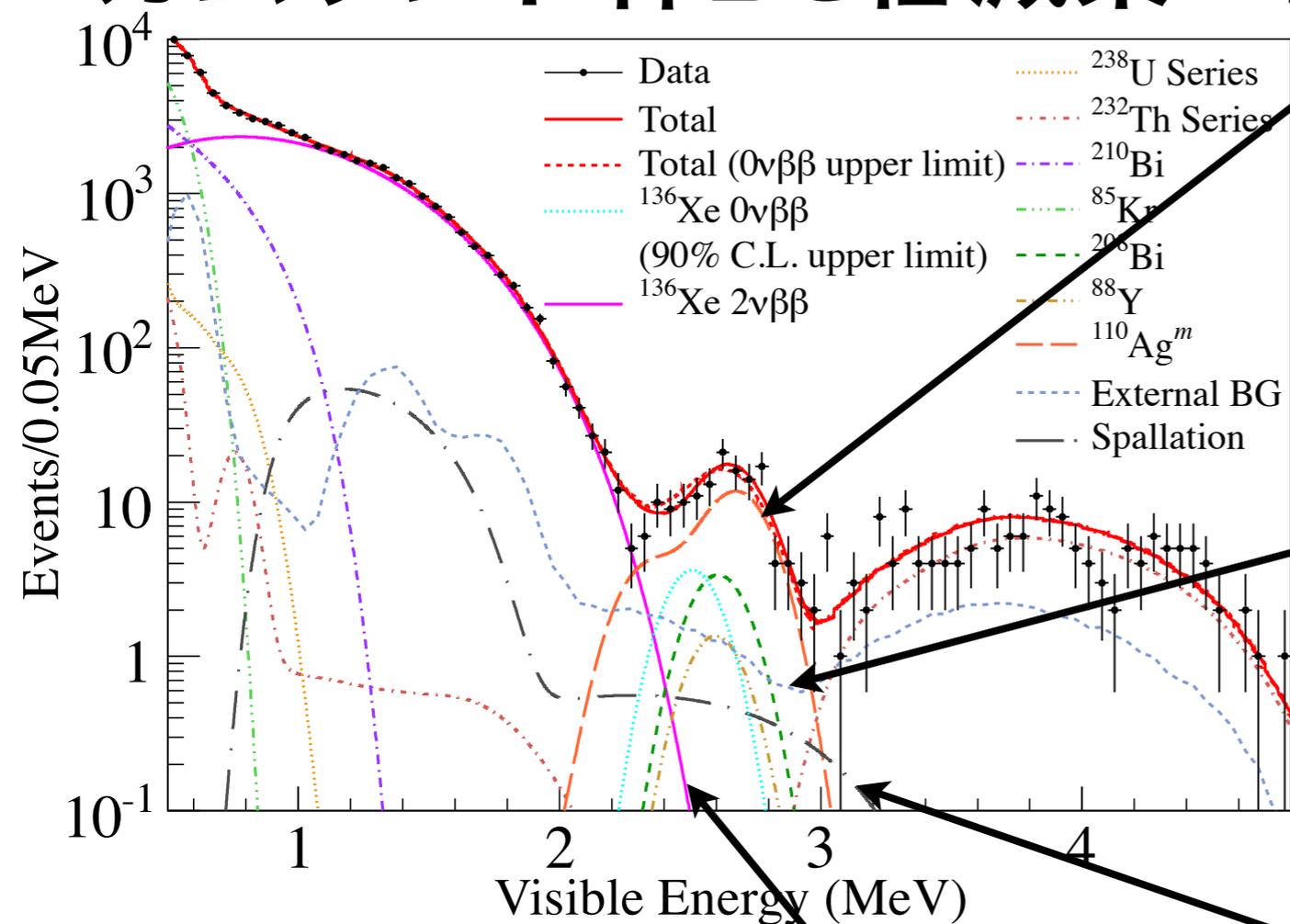


4. purification done,
 DAQ resumed with the
 increased mass of ~380kg

カムランド禅BG低減策

現状

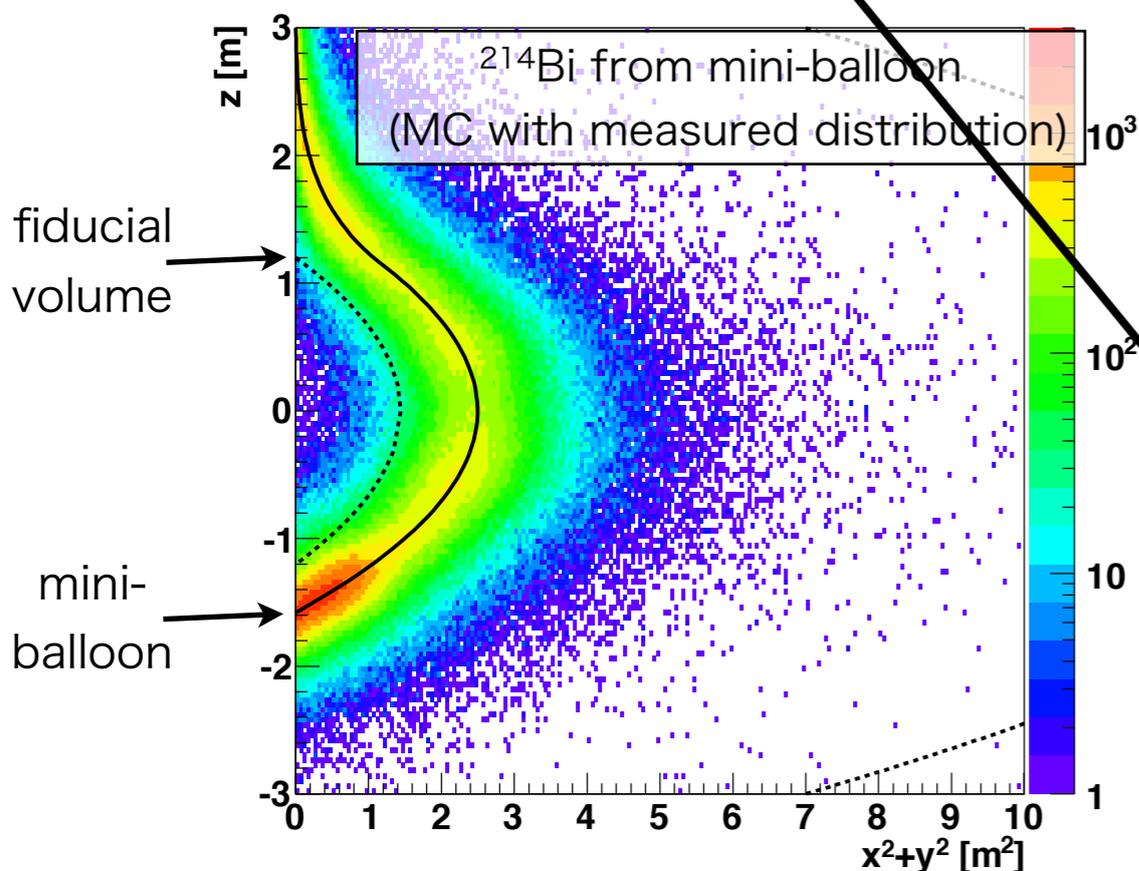
目標感度：~80meV



Xe-LS 中の ^{110m}Ag あるいは ^{208}Bi , ^{88}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}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}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

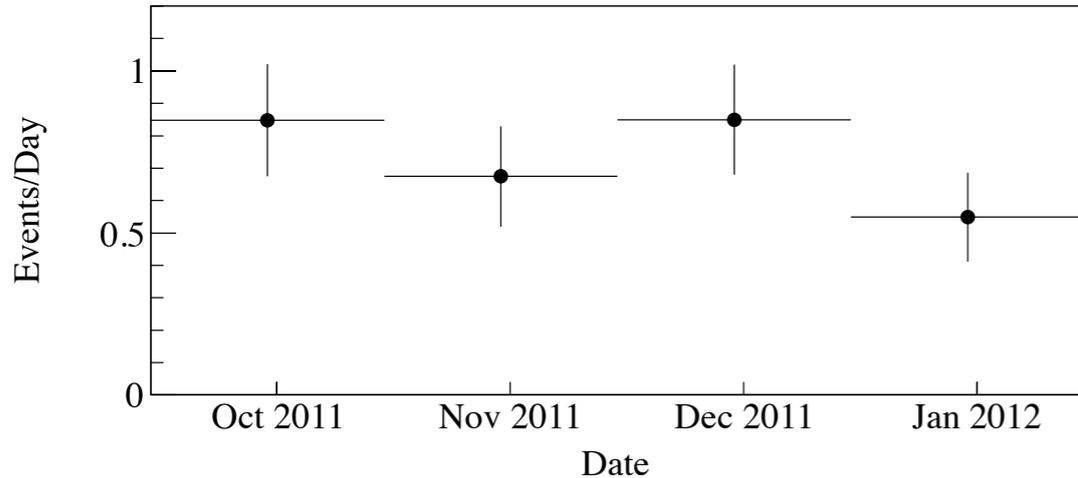
$2\nu 2\beta$ 低減には、高発光 LS, 集光ミラ一導入を計画 ---> KamLAND2-Zen



^{110m}Ag Background Reduction

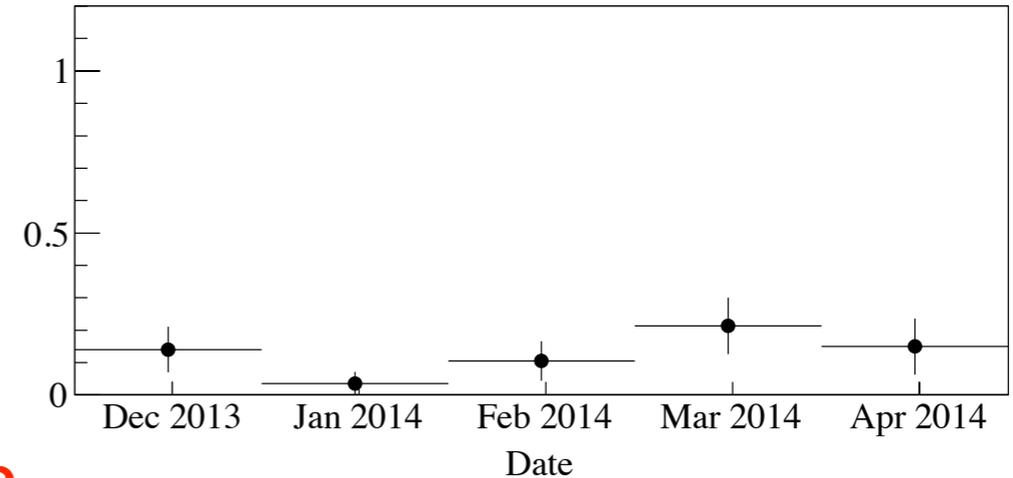
Phase 1 (first 112.3 days)

$2.2 < E < 3.0 \text{ MeV}, R < 1 \text{ m}$

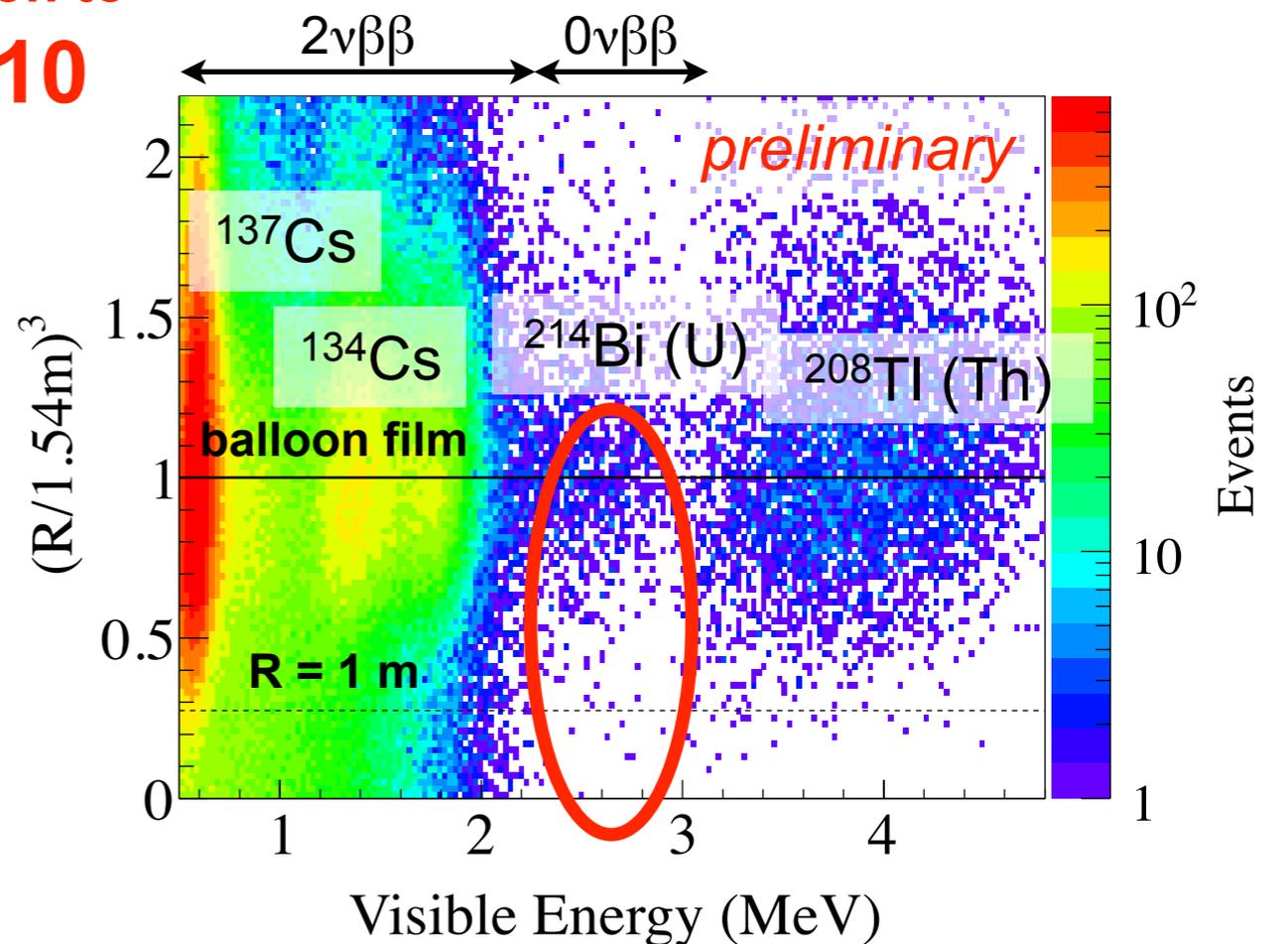
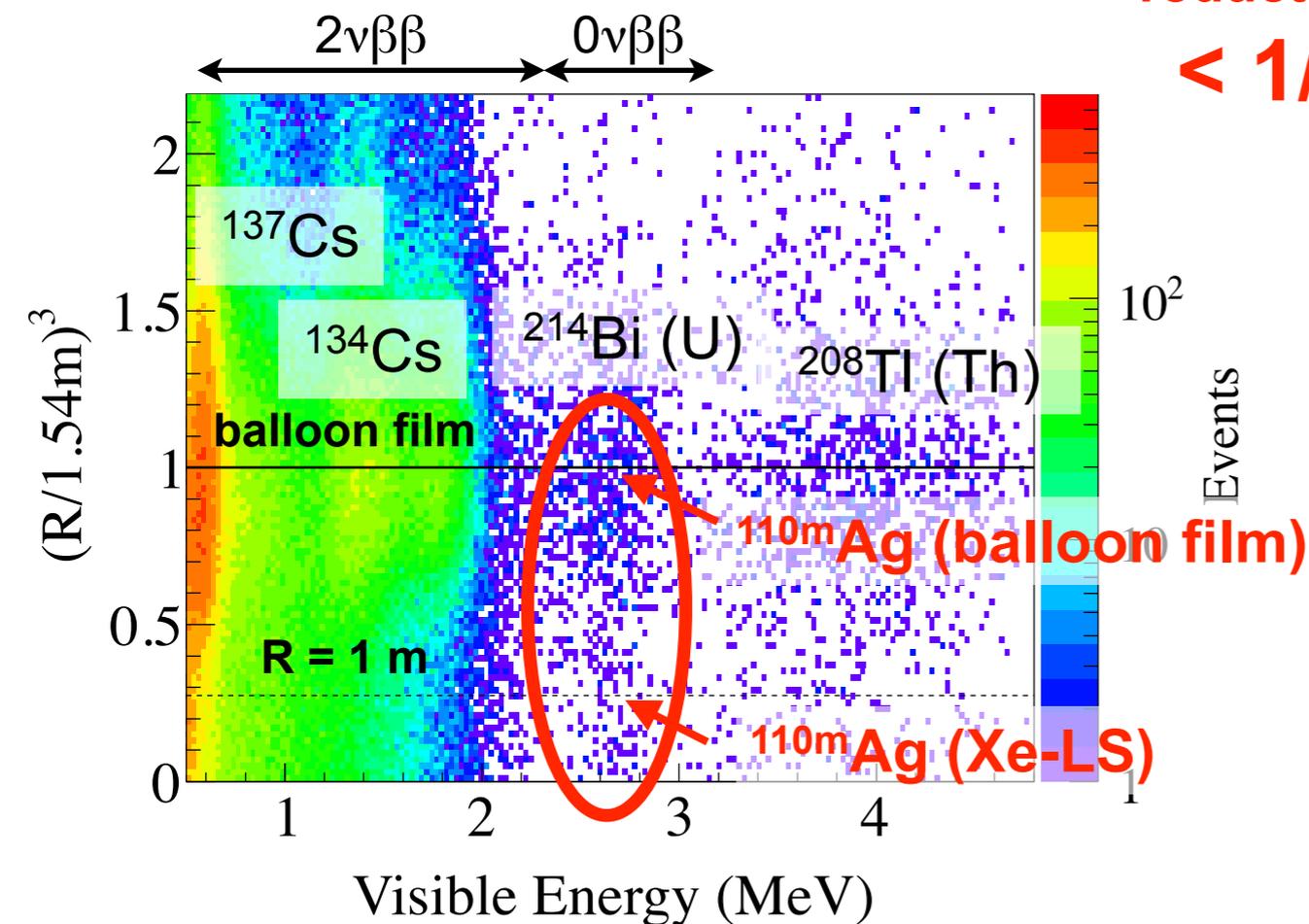


Phase 2 (first 114.8 days)

$2.2 < E < 3.0 \text{ MeV}, R < 1 \text{ m}$



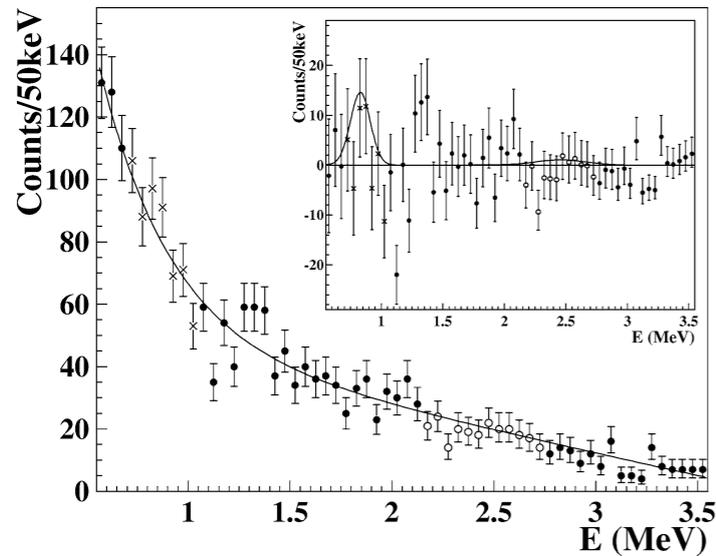
110mAg BG reduction to < 1/10



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

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

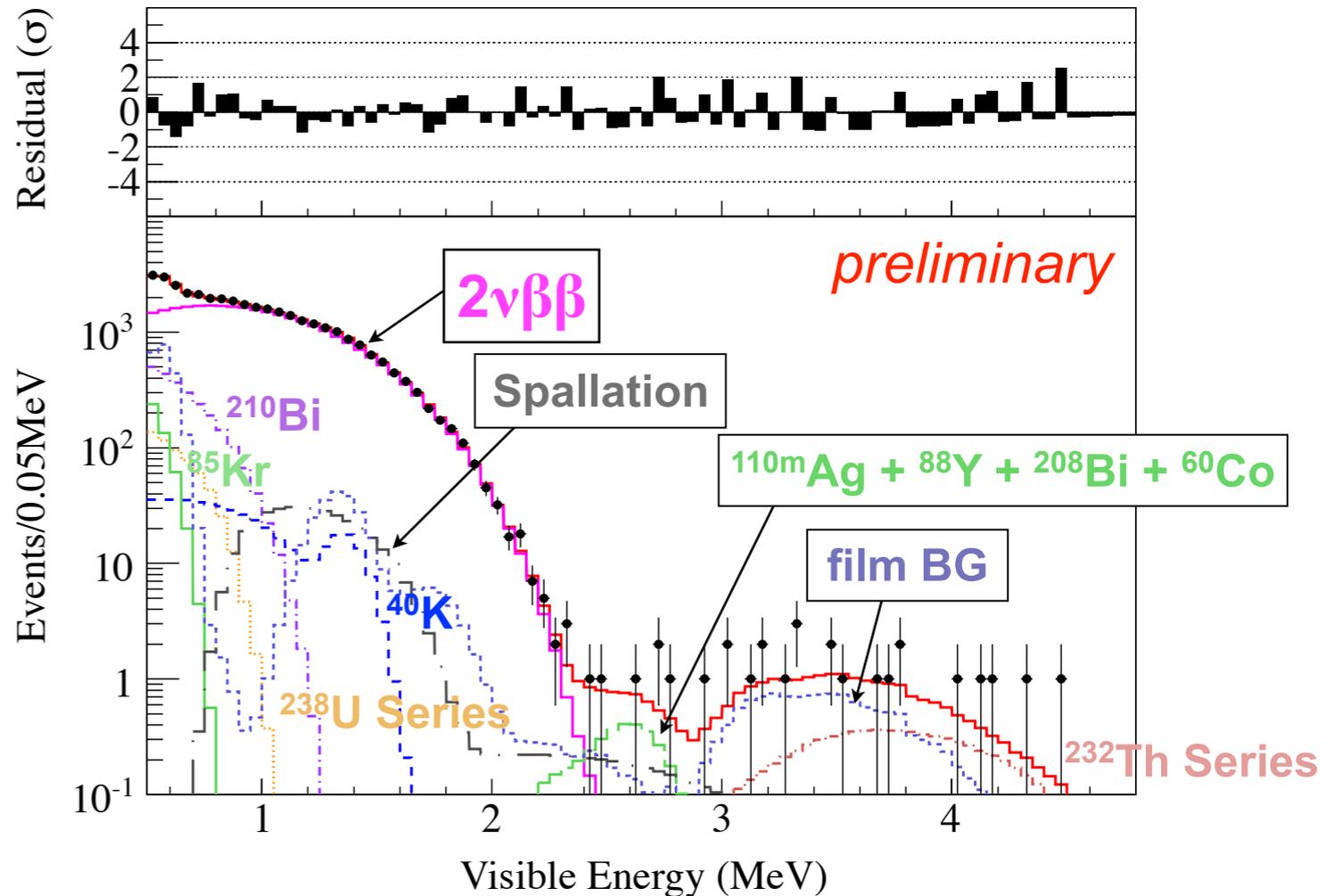
DAMA (2002) Liquid Xe scintillator



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

KamLAND-Zen (2014) Xe loaded liquid scintillator

Phase 2 Internal (R < 1.0 m)



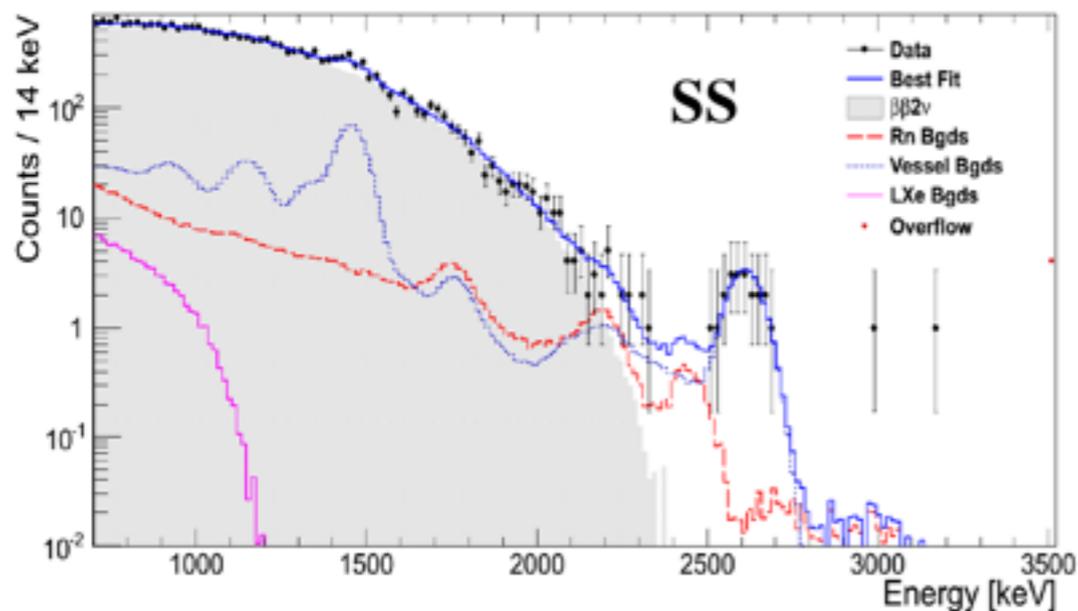
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.32 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \times 10^{21}$ yr

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

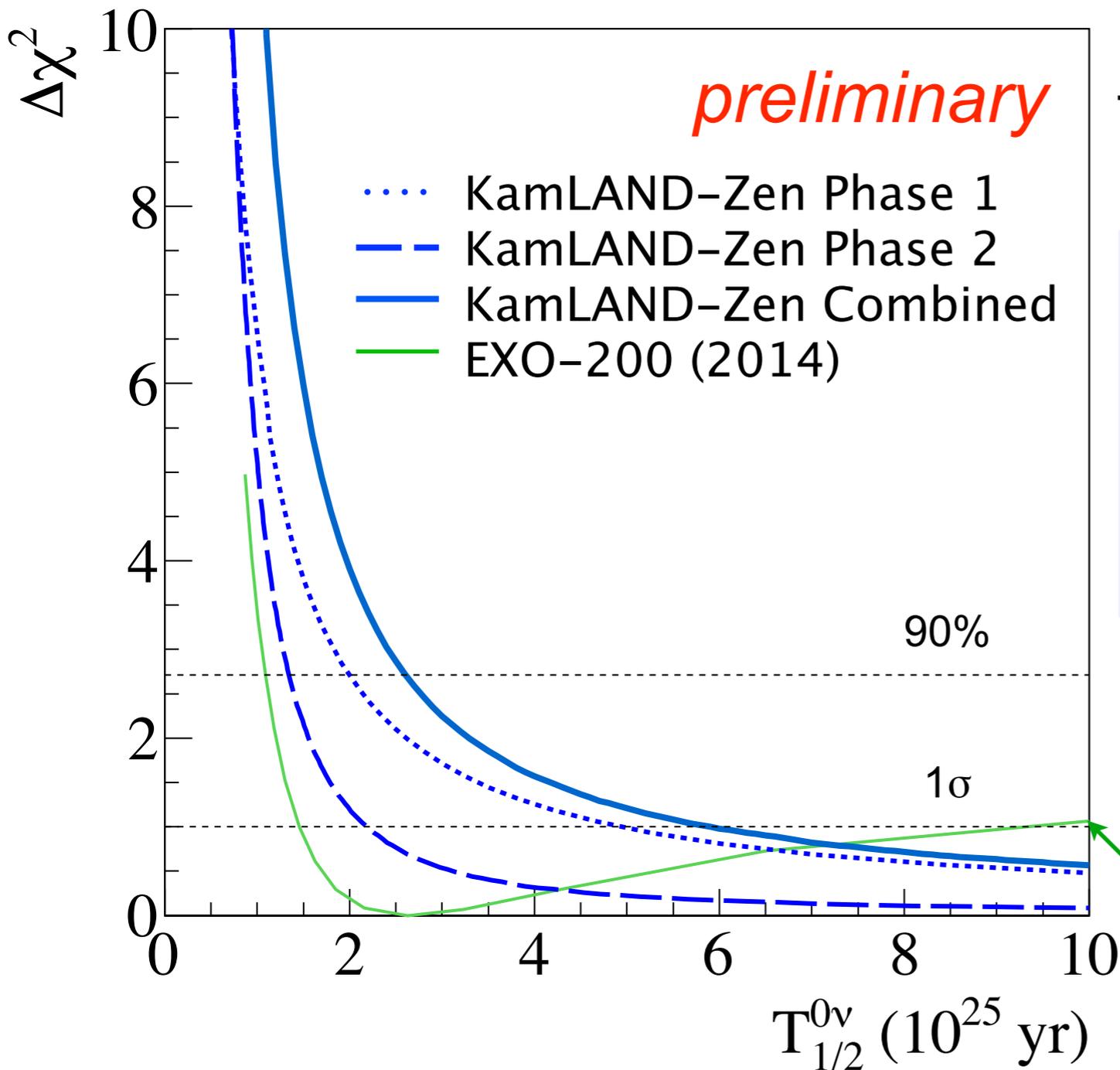


$T^{2\nu}_{1/2} = 2.165 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.059(\text{syst}) \times 10^{21}$ yr

← consistent with EXO-200

^{136}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)

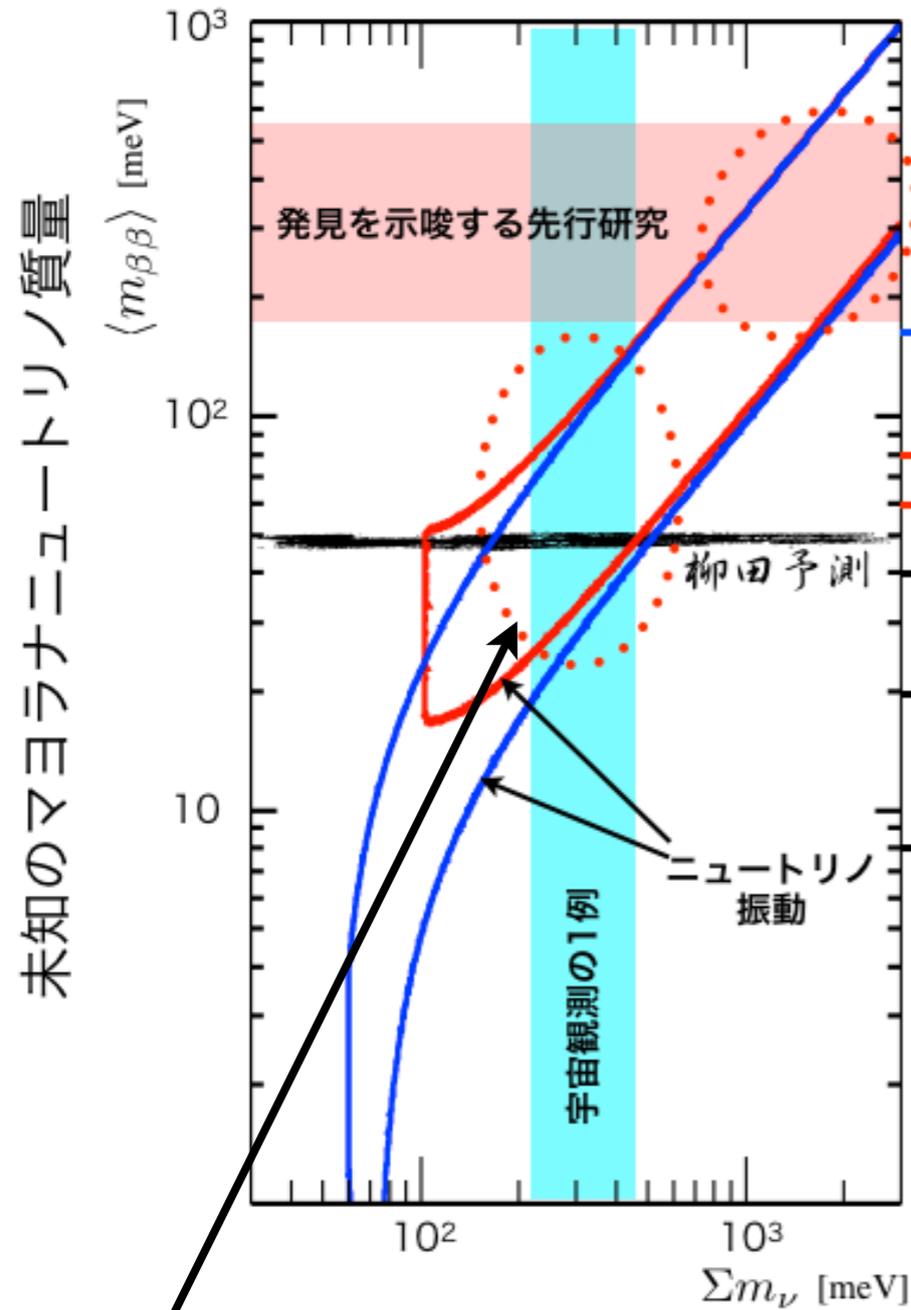
Limits on ^{136}Xe half-life and effective neutrino mass are improved

世界の競争状況

| Nucleus | Experiment | $T^{0\nu}_{1/2}$ limit (yr) @ 90% C.L. | $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (eV) |
|---|----------------|---|--|
| $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ | ELEGANT VI | $> 5.8 \times 10^{22}$ | $< 3.5-22$ |
| $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$ | 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 | $> 1.8 \times 10^{22}$ | $< 4.0-6.3$ |

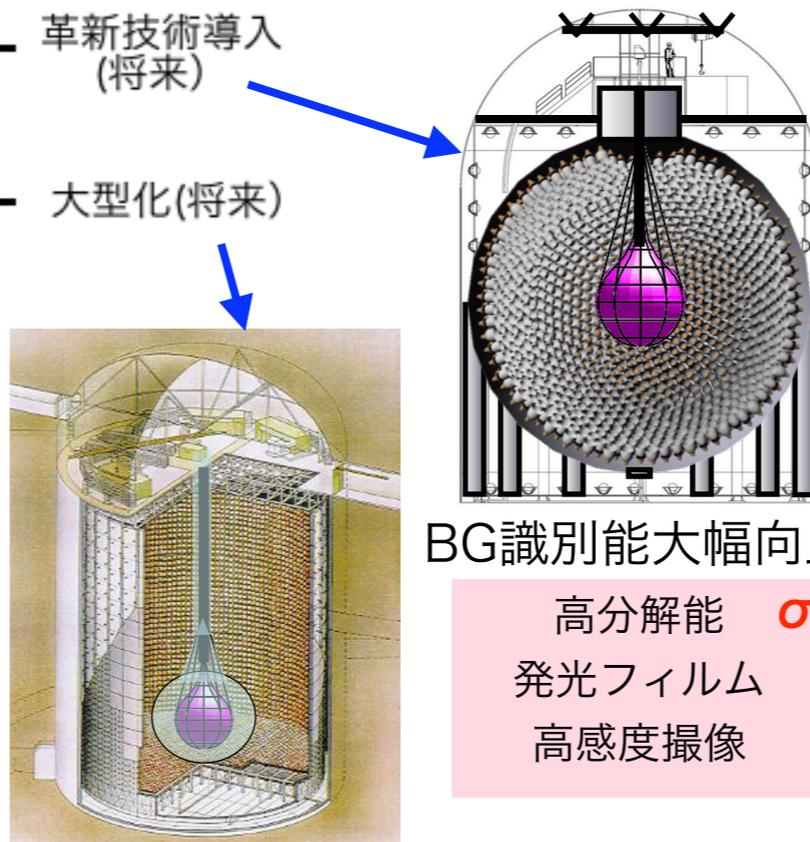
現在世界最高感度を更新中！

現状と展望



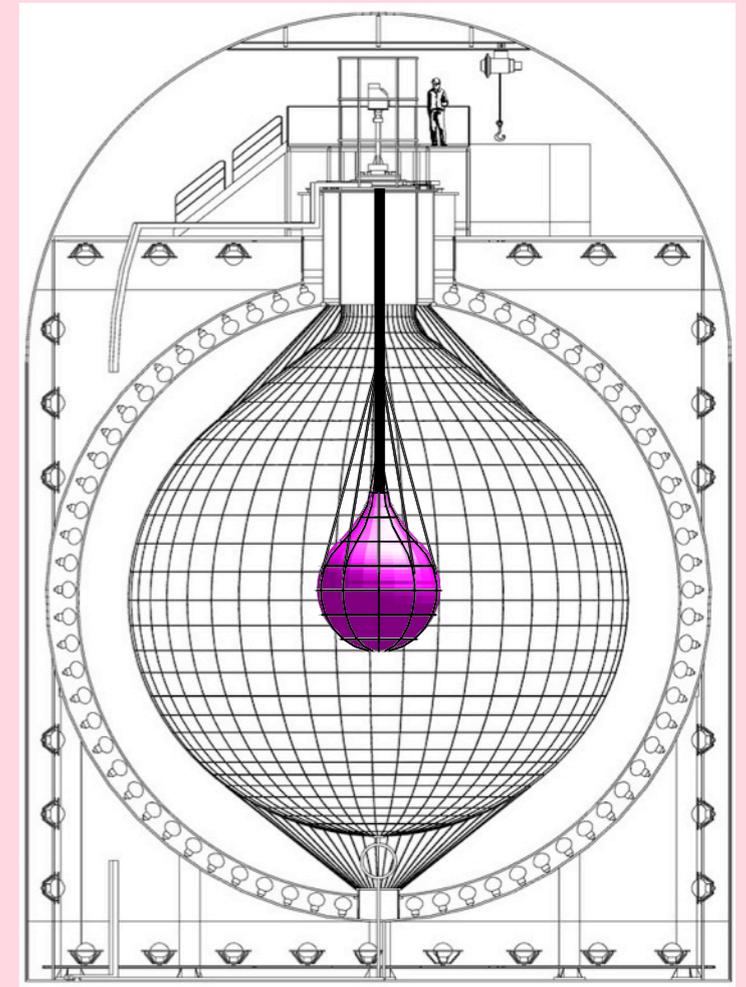
← これらを排除

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)

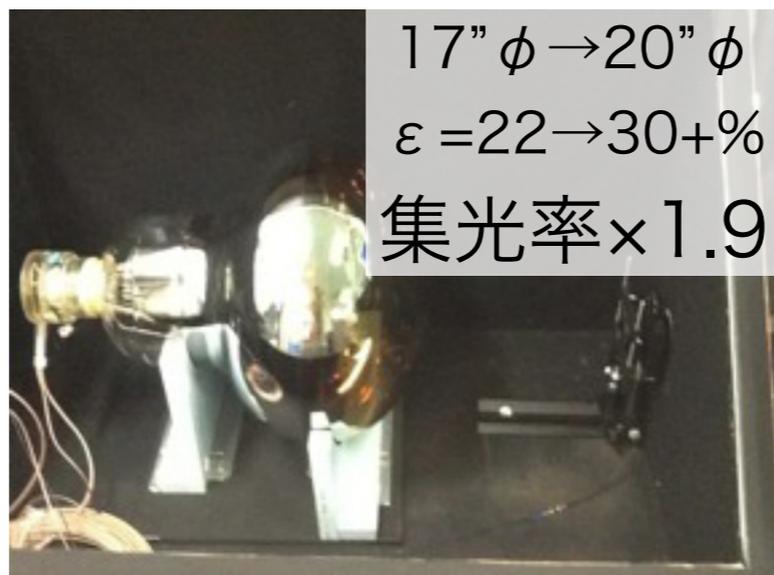
いつ発見しても不思議でない。
 発見に最も近いのはカムランド禅

技術開発

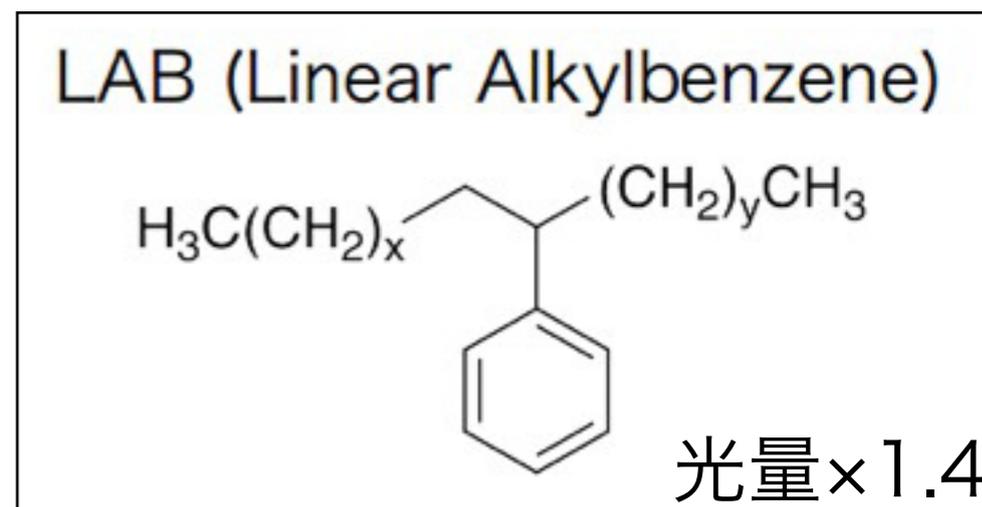
○集光ミラー



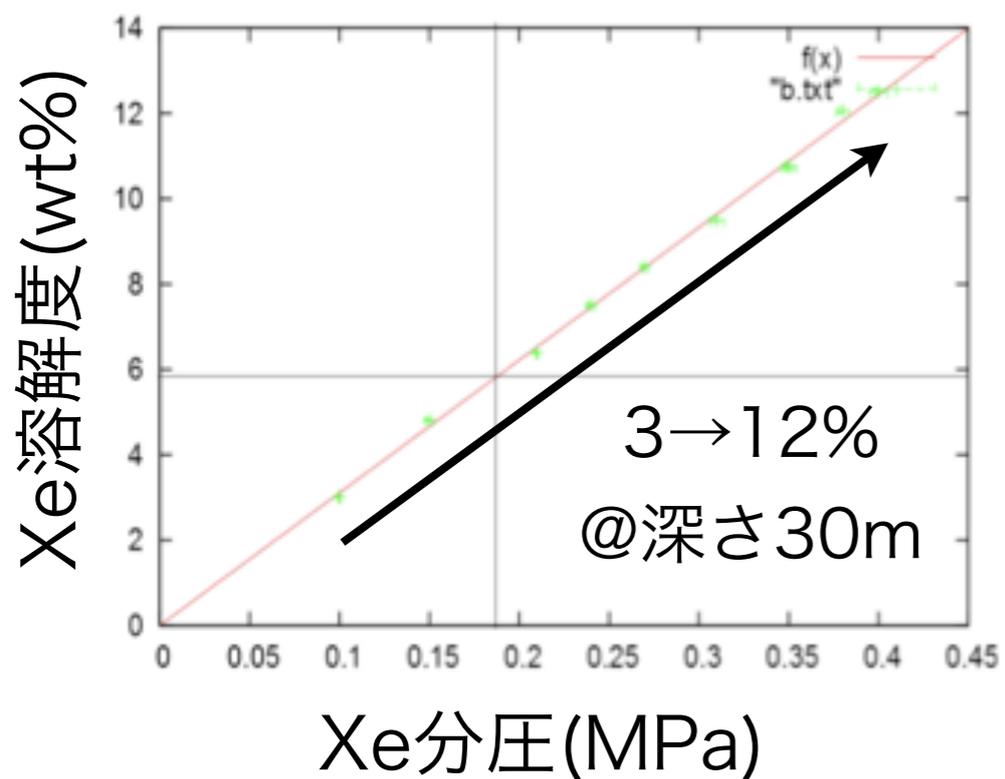
○高量子効率PMT



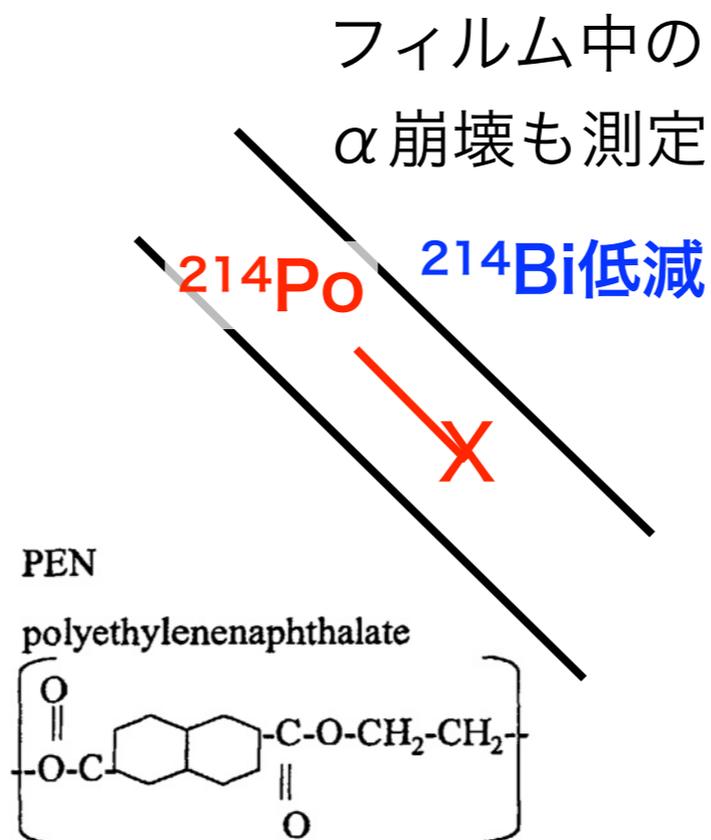
○高発光LS



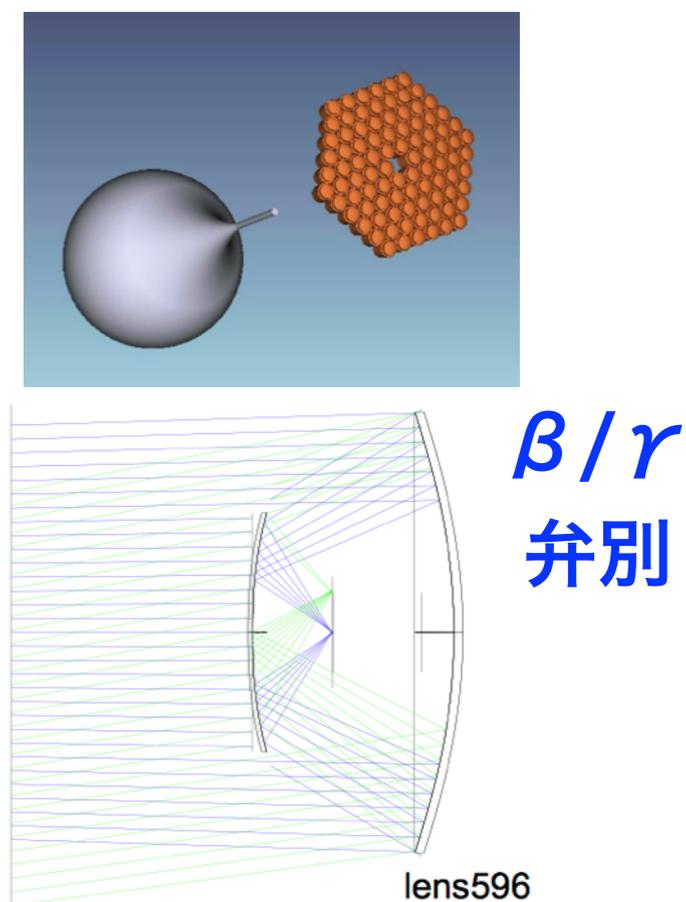
○キセノン高濃度化



○発光フィルム

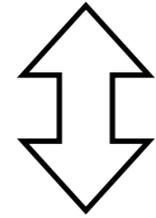


○高感度撮像



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)

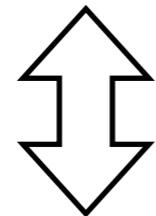


26年

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

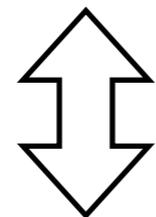


41年

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 β 崩壊を指摘



77+年

201X K○○○○○○○○-○○n ニュートリノレス二重 β 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。