



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 の現状と将来計画

東北大学ニュートリノ科学研究センター
井上邦雄

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会

2015年5月15-17日 神戸大学百年記念館六甲ホール

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

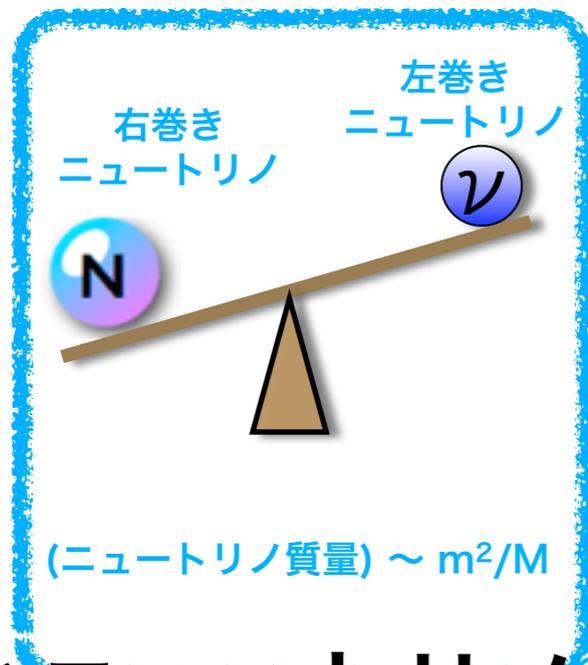
現実的マヨラナ性検証

質量絶対値測定も期待

マヨラナCP測定の入り口

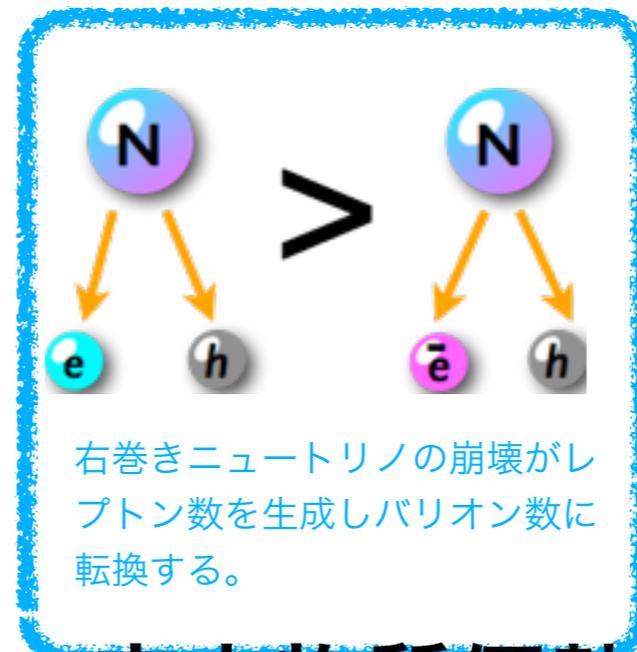
ニュートリノマヨラナ性は 宇宙・素粒子の大問題を解く鍵

Seesaw機構と
ニュートリノ質量



軽いニュートリノ質量

Leptogenesisによる物
質生成



宇宙物質優勢

宇宙・素粒子の大問題

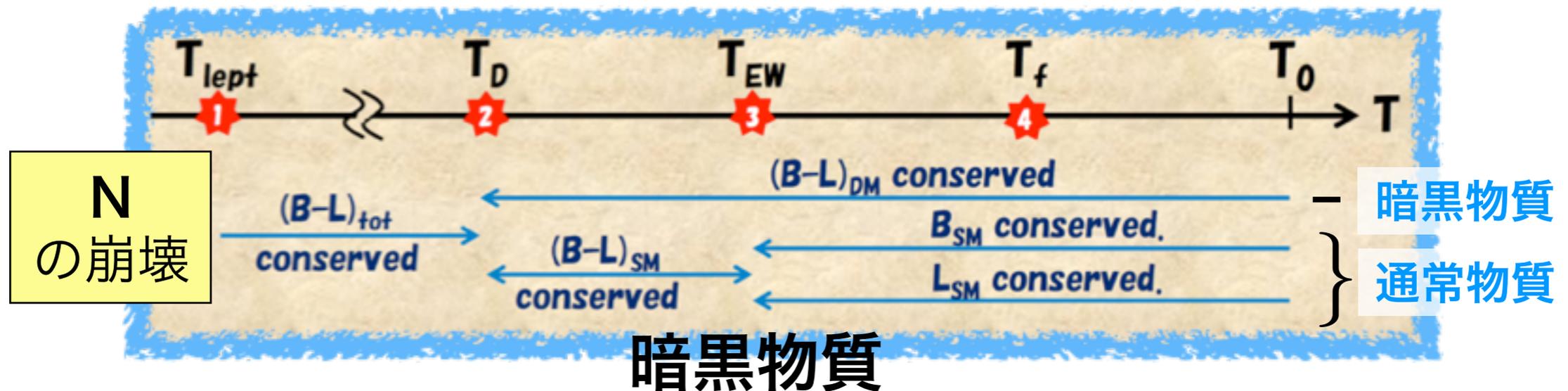
軽いニュートリノ質量

宇宙物質優勢

暗黒物質

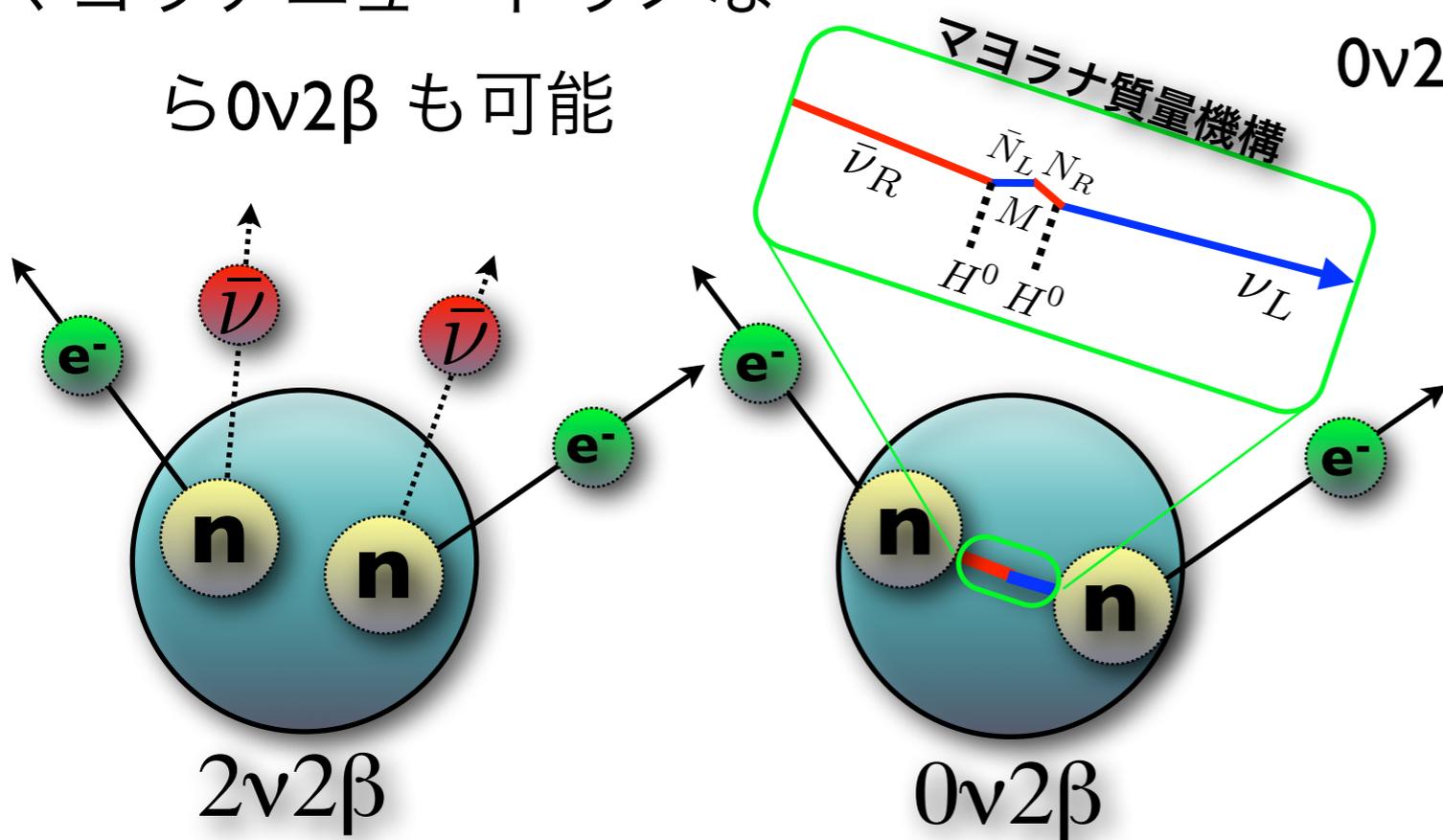
暗黒エネルギー

Asymmetric Dark Matter (Leptogenesisでの暗黒物質)



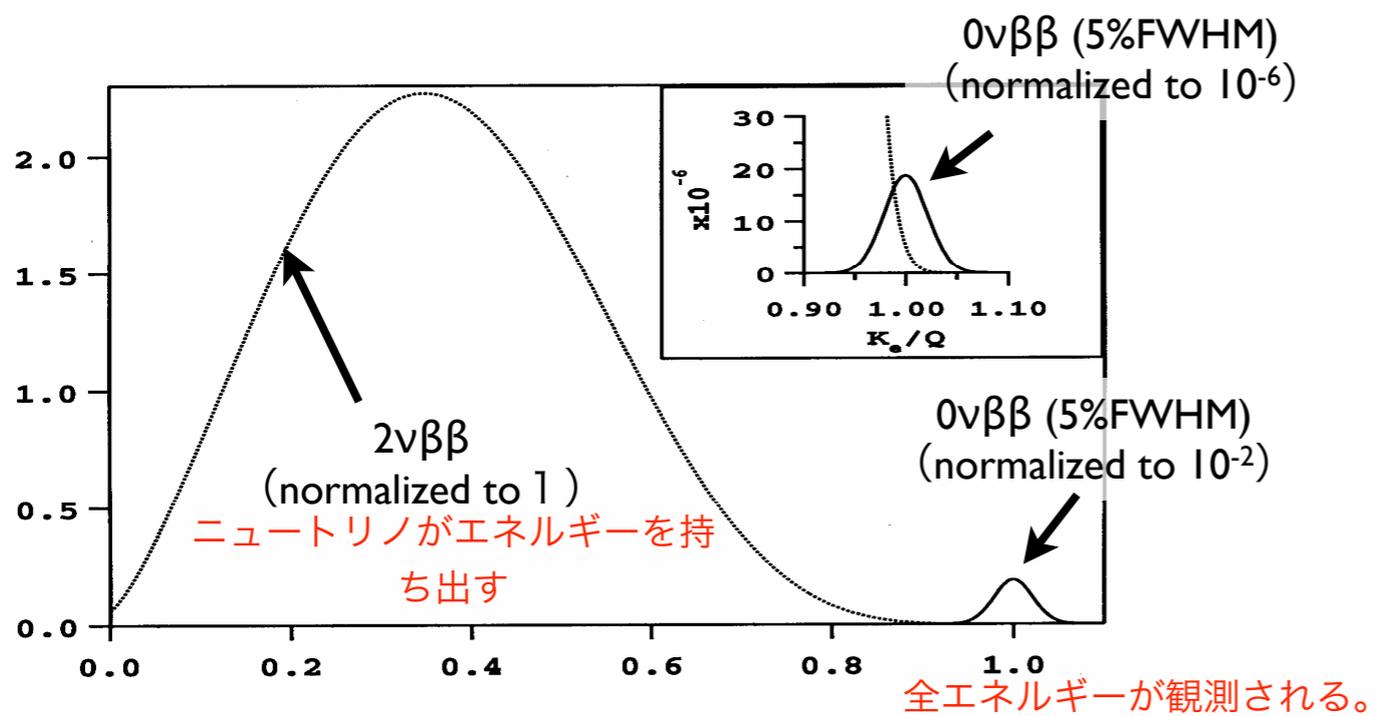
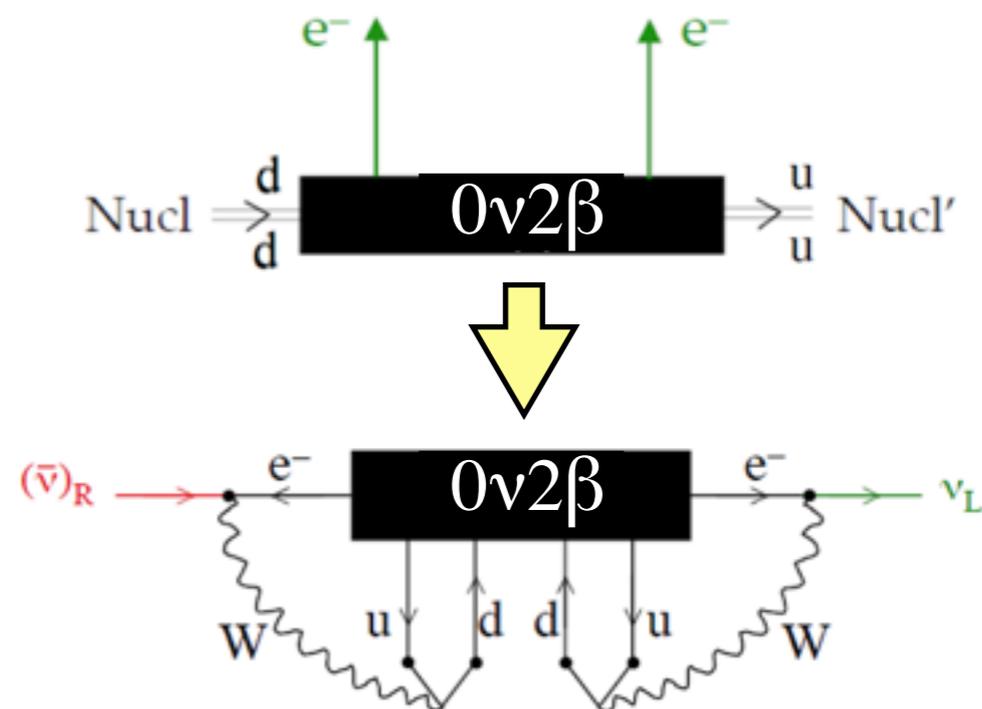
二重β崩壊

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。

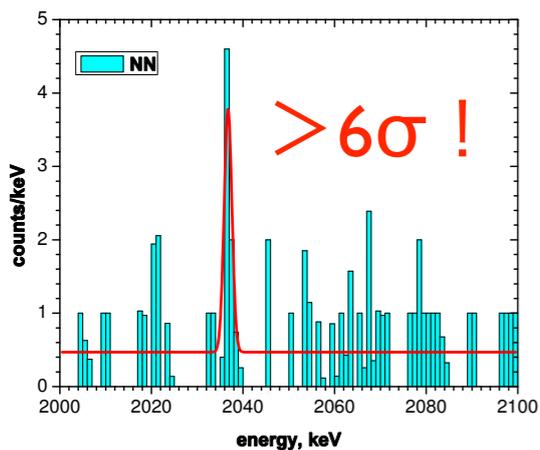
マヨラナCP

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

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

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

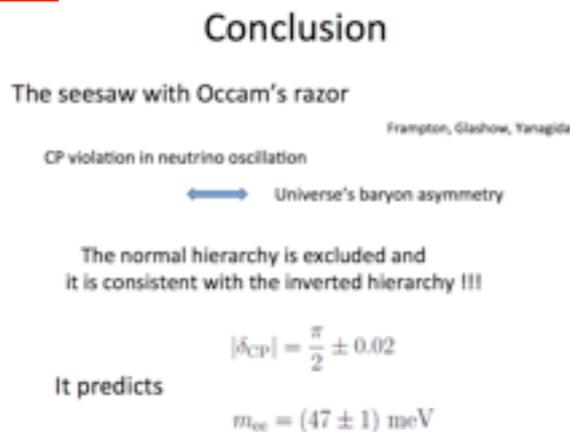
$m_{\beta\beta} = 320 \pm 30$ meV 理論の誤差は無視

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

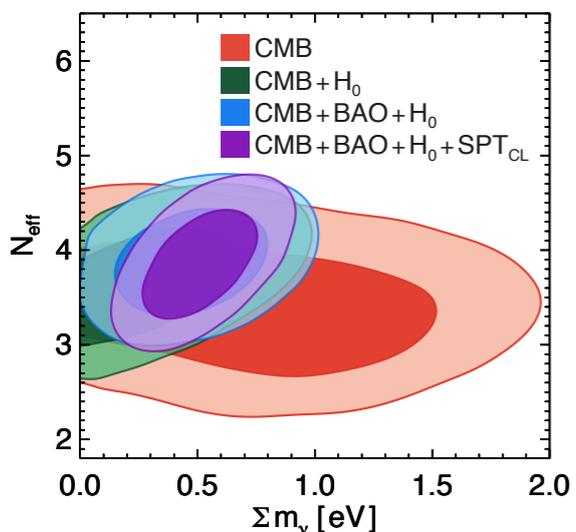


パラメータを最小限にした理論的予測

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

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

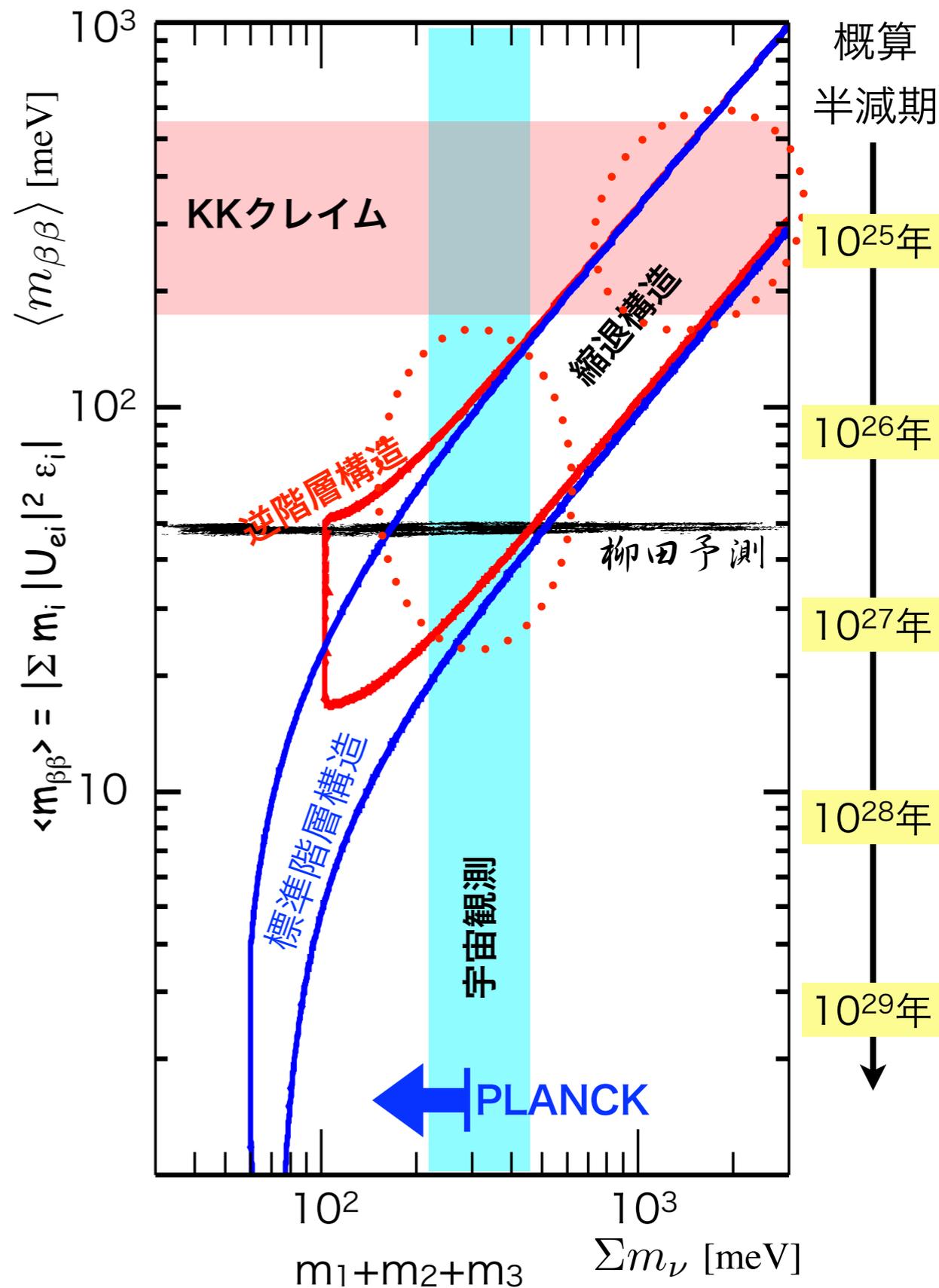
宇宙観測



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

arXiv:1212.6267
ApJ782, 74 (2014)

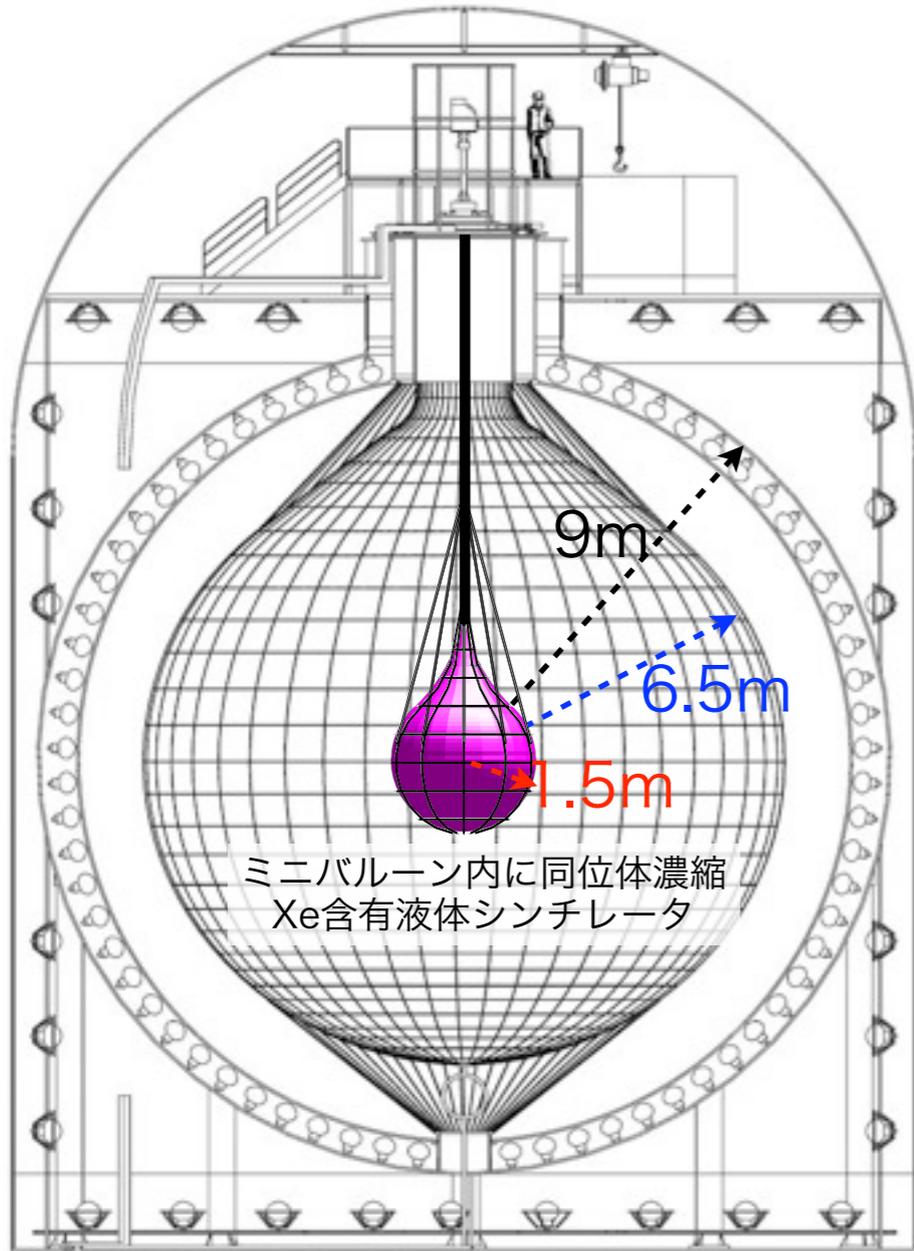
$m_{\beta\beta} = 26 \sim 145$ meV



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

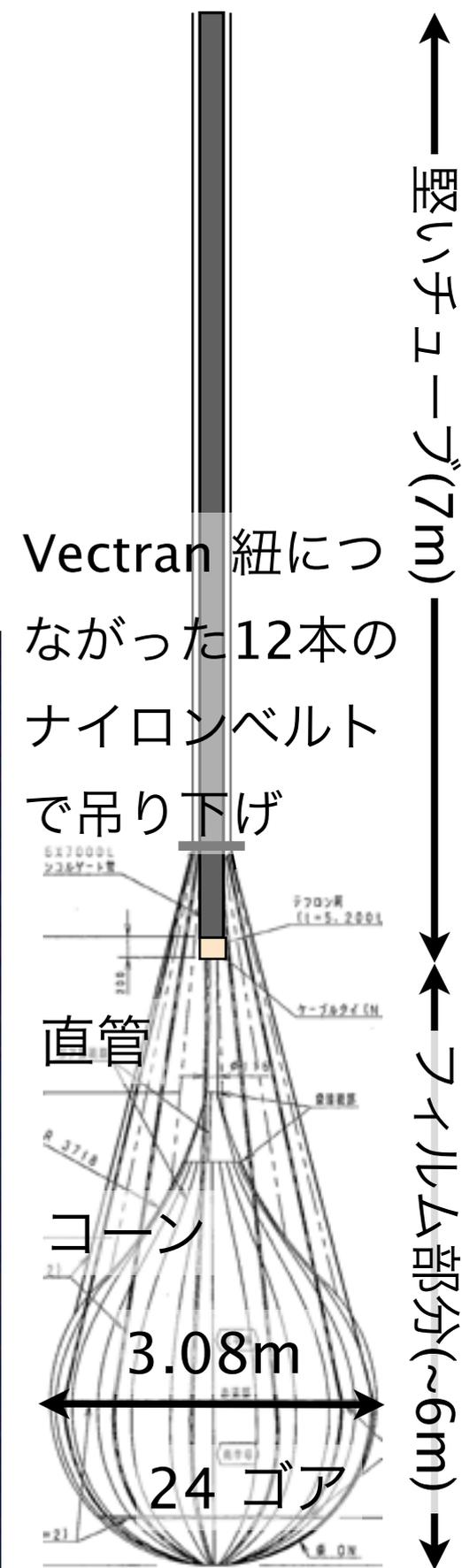
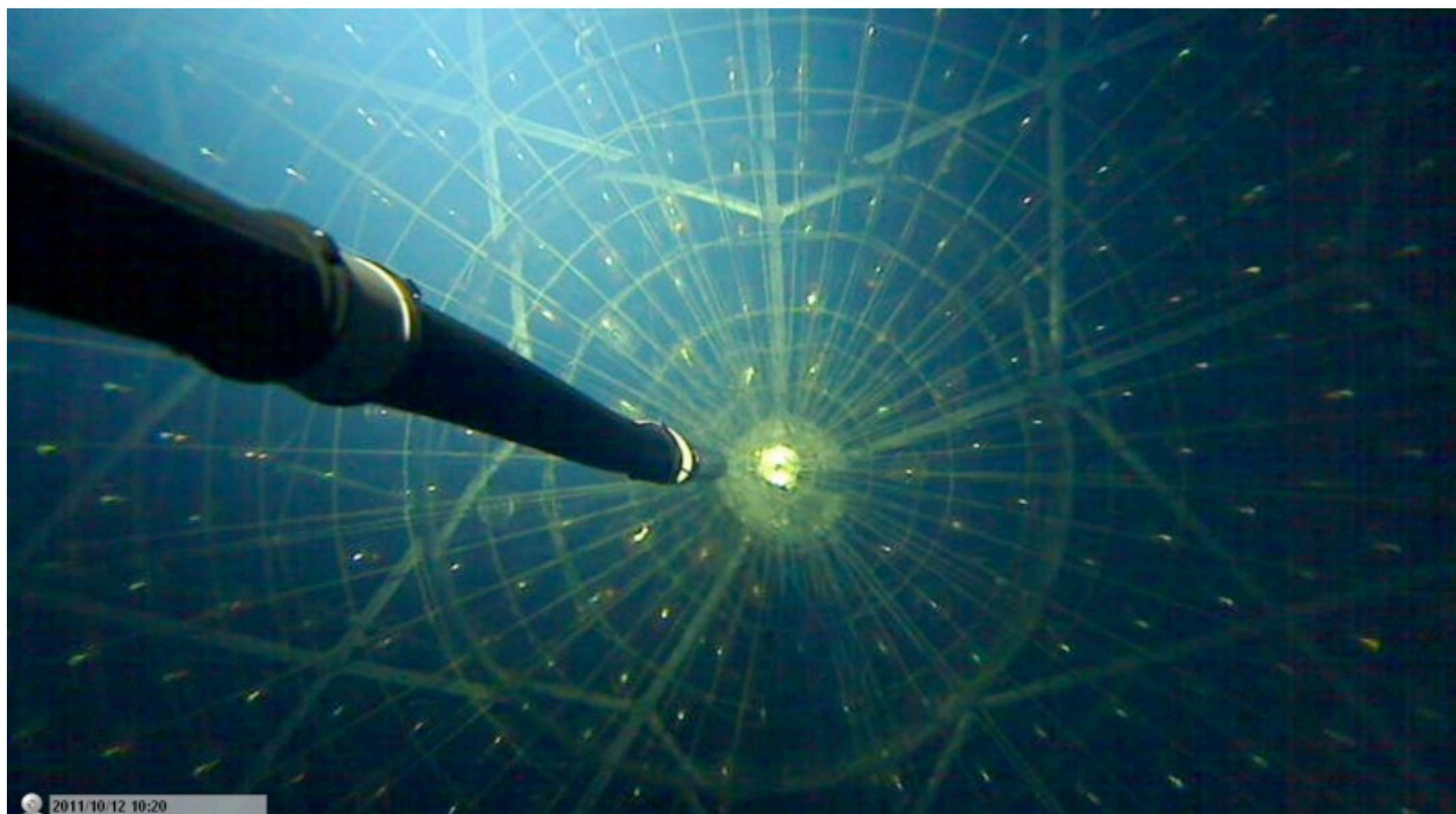
- 稼働中の装置
→ 相対的に低コストで迅速に開始可能
- 巨大かつ清浄 (1200m^3 , U: $3.5 \times 10^{-18}\text{g/g}$, Th: 5.2×10^{-17})
→ 外部の放射線が問題にならない
(Xe とミニバルーンには高清浄が必要)
- (必要時は低コストで) Xe含有液体シンチレータの純化、ミニバルーンの換装が可能
→ 拡大も容易 (数トンのXeにも対応可能)
- β , γ を漏らさず観測
→ バックグラウンド識別が相対的に容易
- 反ニュートリノ観測を並行できる
→ 原子炉停止時の良質の地球ニュートリノデータ



スーパークリーンルームでの
ミニバルーン製作

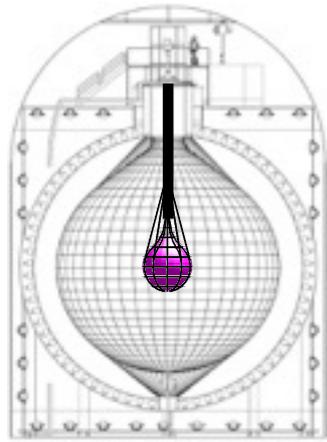


バルーンとチューブの導入

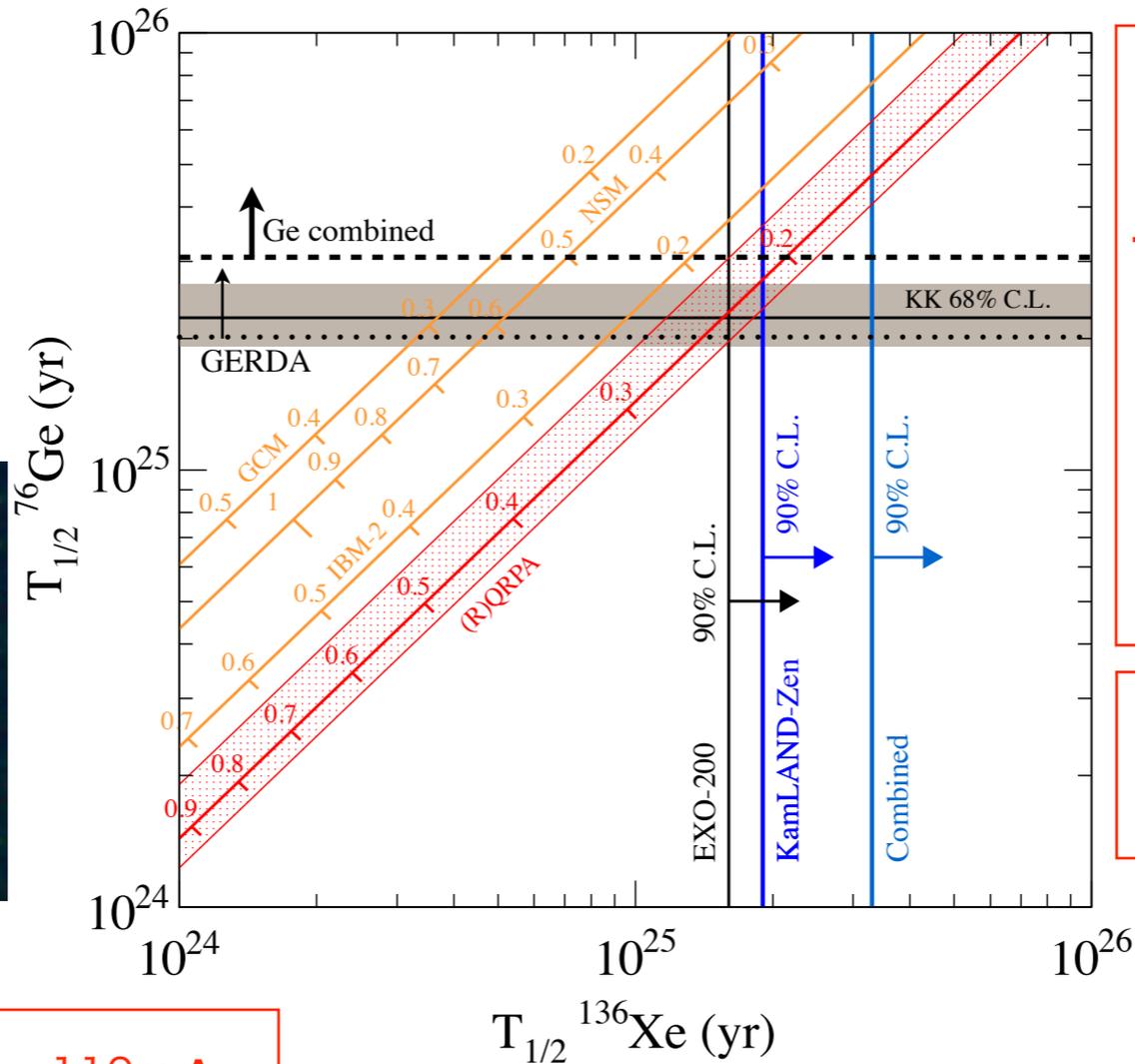


KamLAND-Zen status 89.5kg-yr

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



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

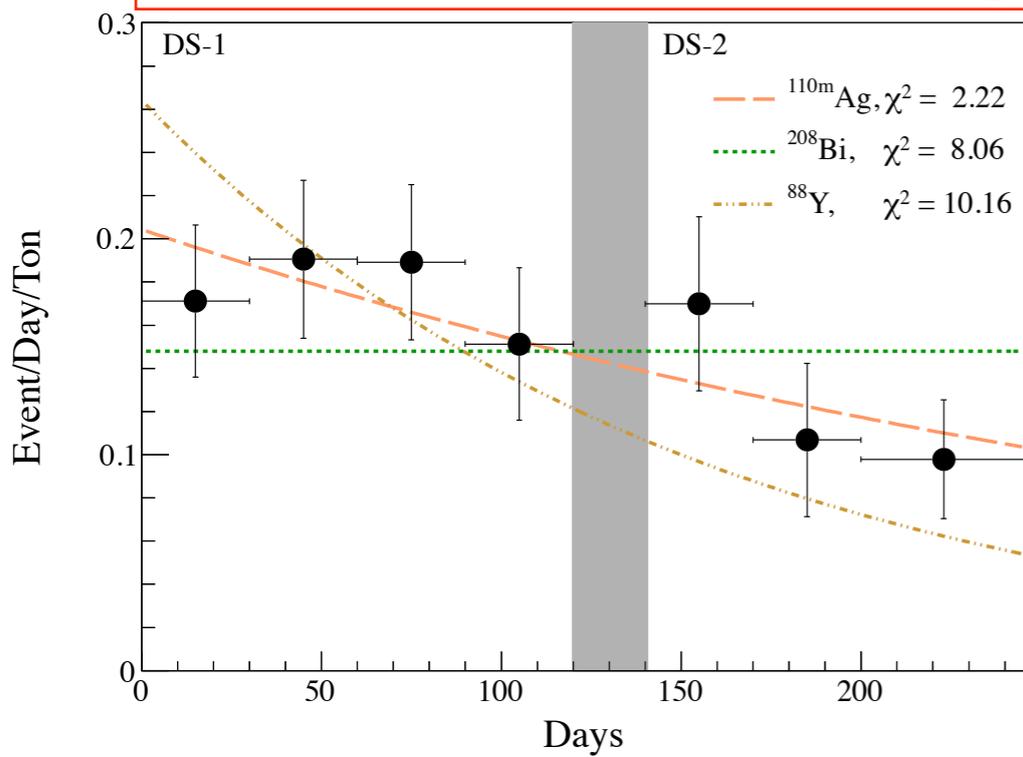


1. the world best limit
 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$ yrs (KL-Zen)
 $> 3.4 \times 10^{25}$ yrs (combined)

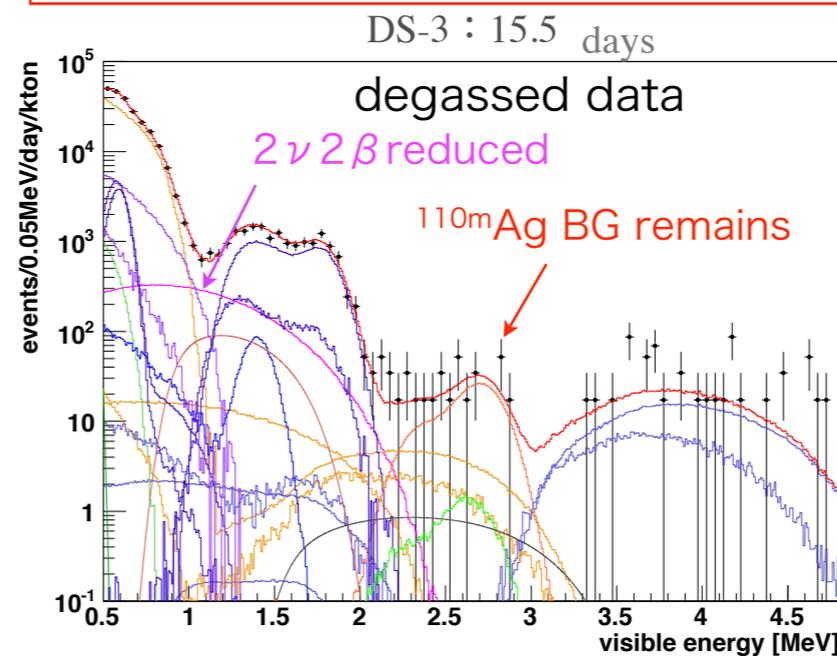
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$ meV

KK-claim refuted at
 97.5% CL

2. BG identified as ^{110m}Ag



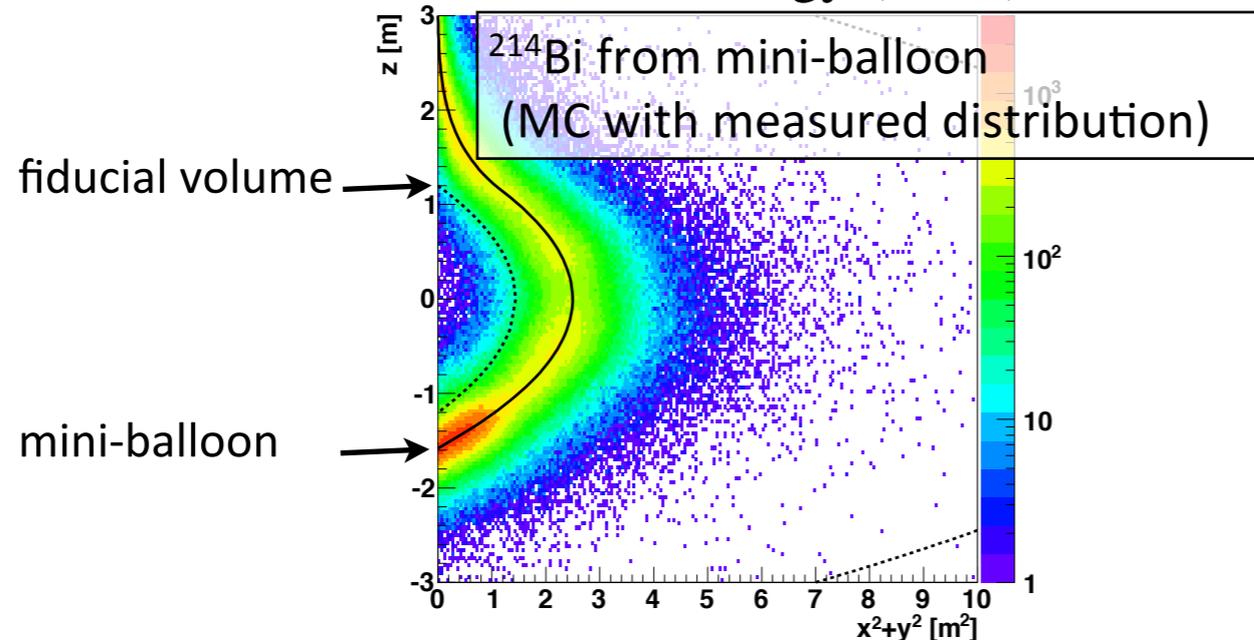
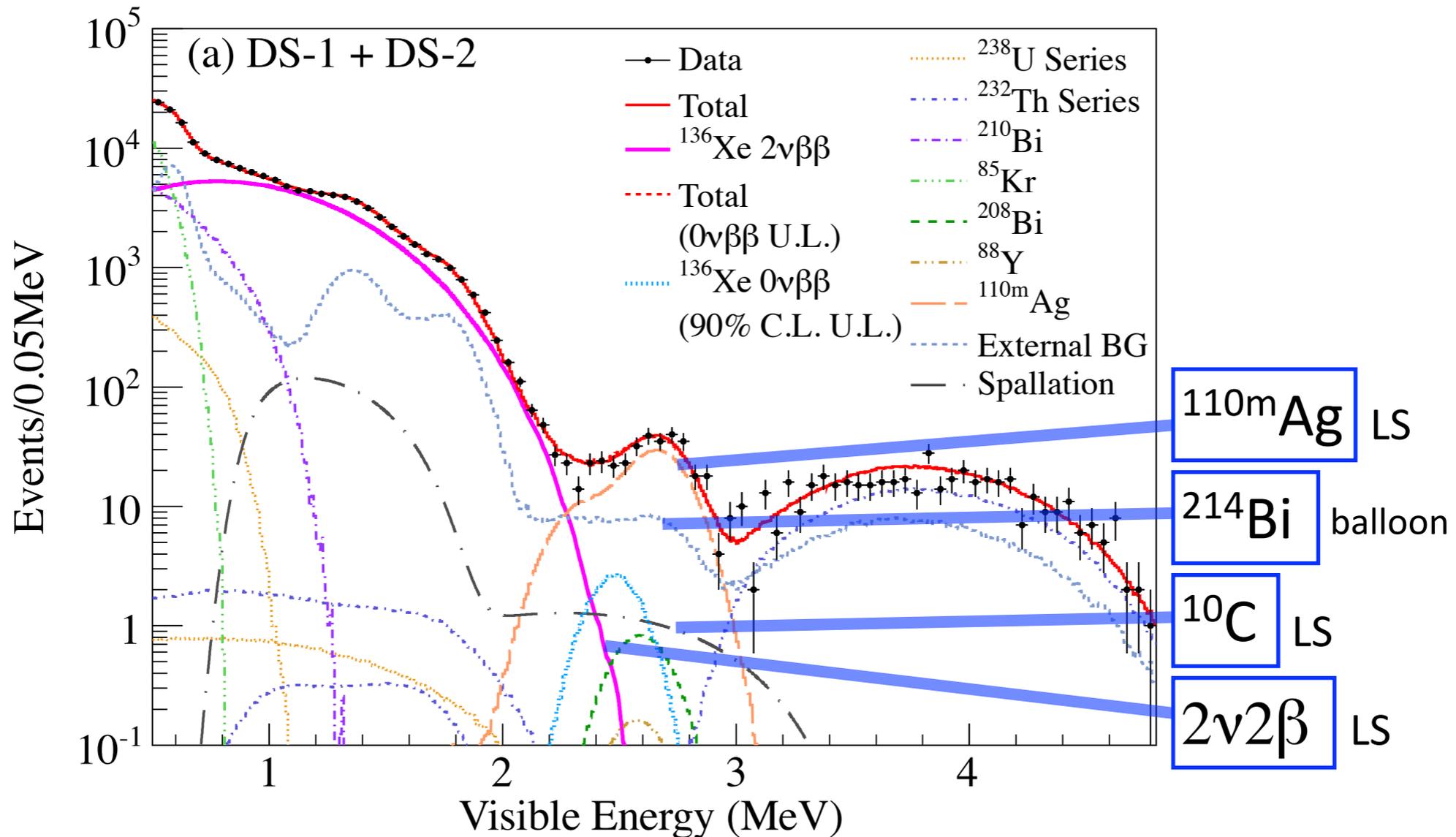
3. Xe on-off measurement demonstrated



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

Major BG and measures

If there were no ^{110m}Ag , KamLAND-Zen would have provided much better sensitivity.... But....



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 ($\beta^+ + \gamma$)、 μ -n- ^{10}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 → PENフィルムをテスト中

^{110m}Ag → Xe-LS純化済

μ -n- ^{10}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

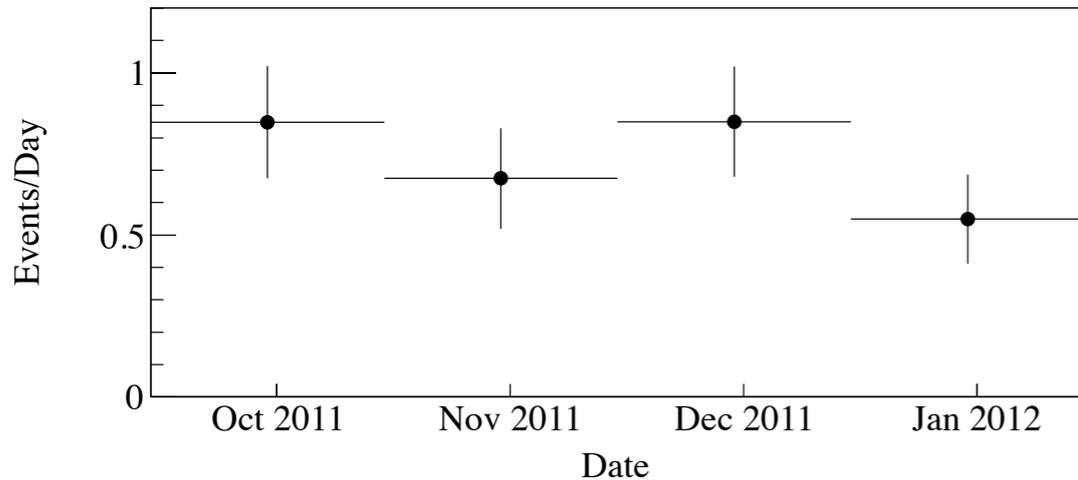
高分解能 → 集光ミラー、大光量LS、高量子効率PMT → **KamLAND2**
 $\times 1.8$ ($\times 1.4$) $17''\Phi \rightarrow 20''\Phi, \epsilon=22\% \rightarrow 30+\%$ $\times 1.9 = \times 4.8$

Hyper-Kの開発に参加

^{110m}Ag Background Reduction

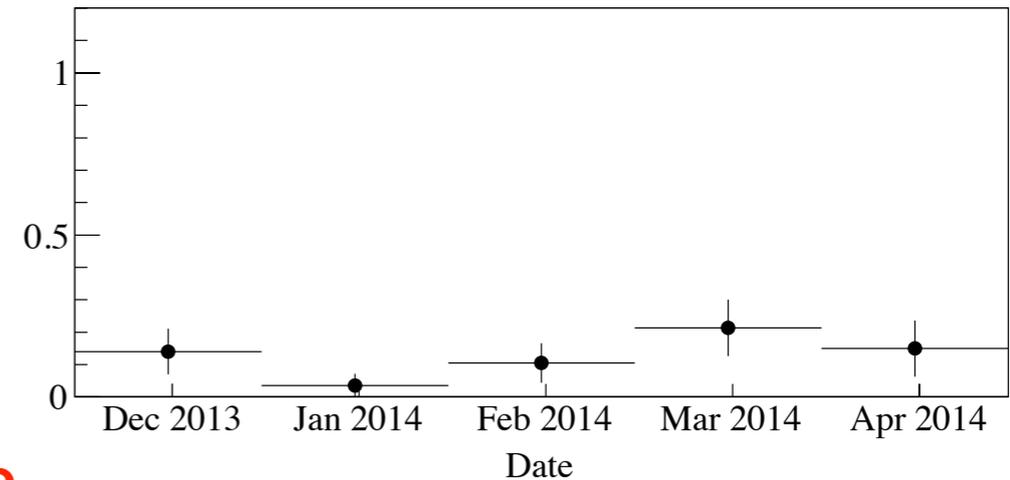
Phase 1 (first 112.3 days)

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

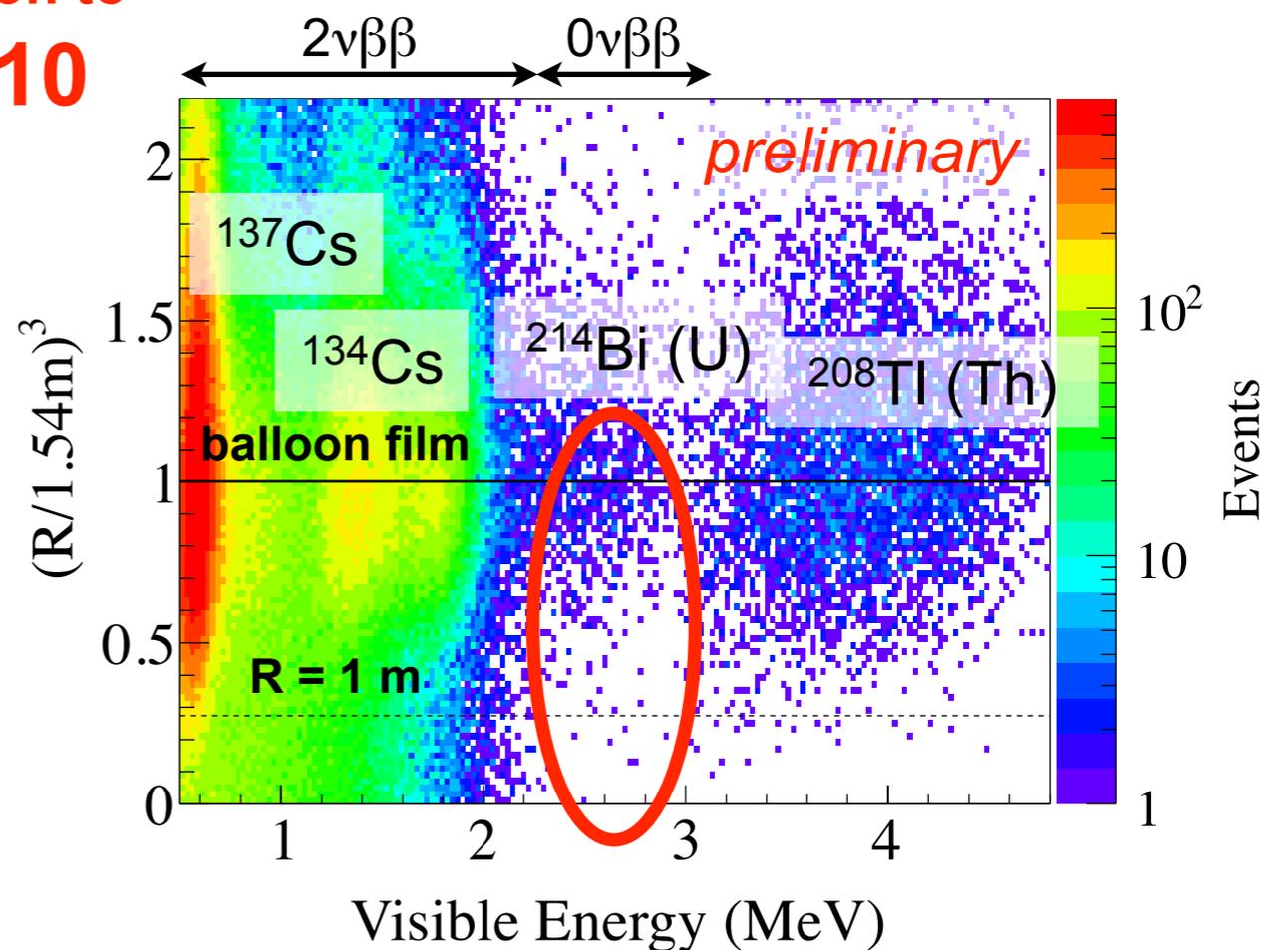
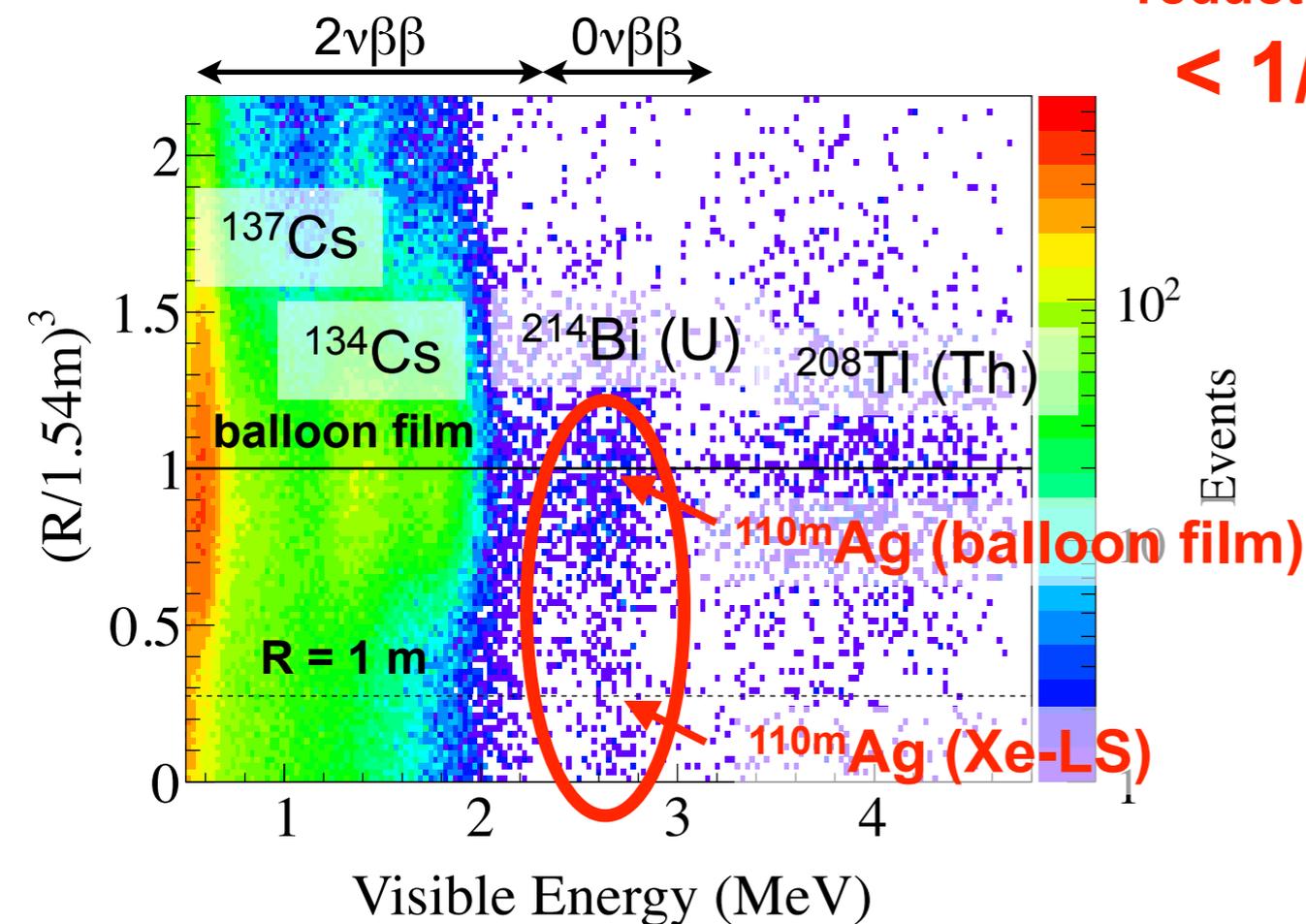


Phase 2 (first 114.8 days)

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

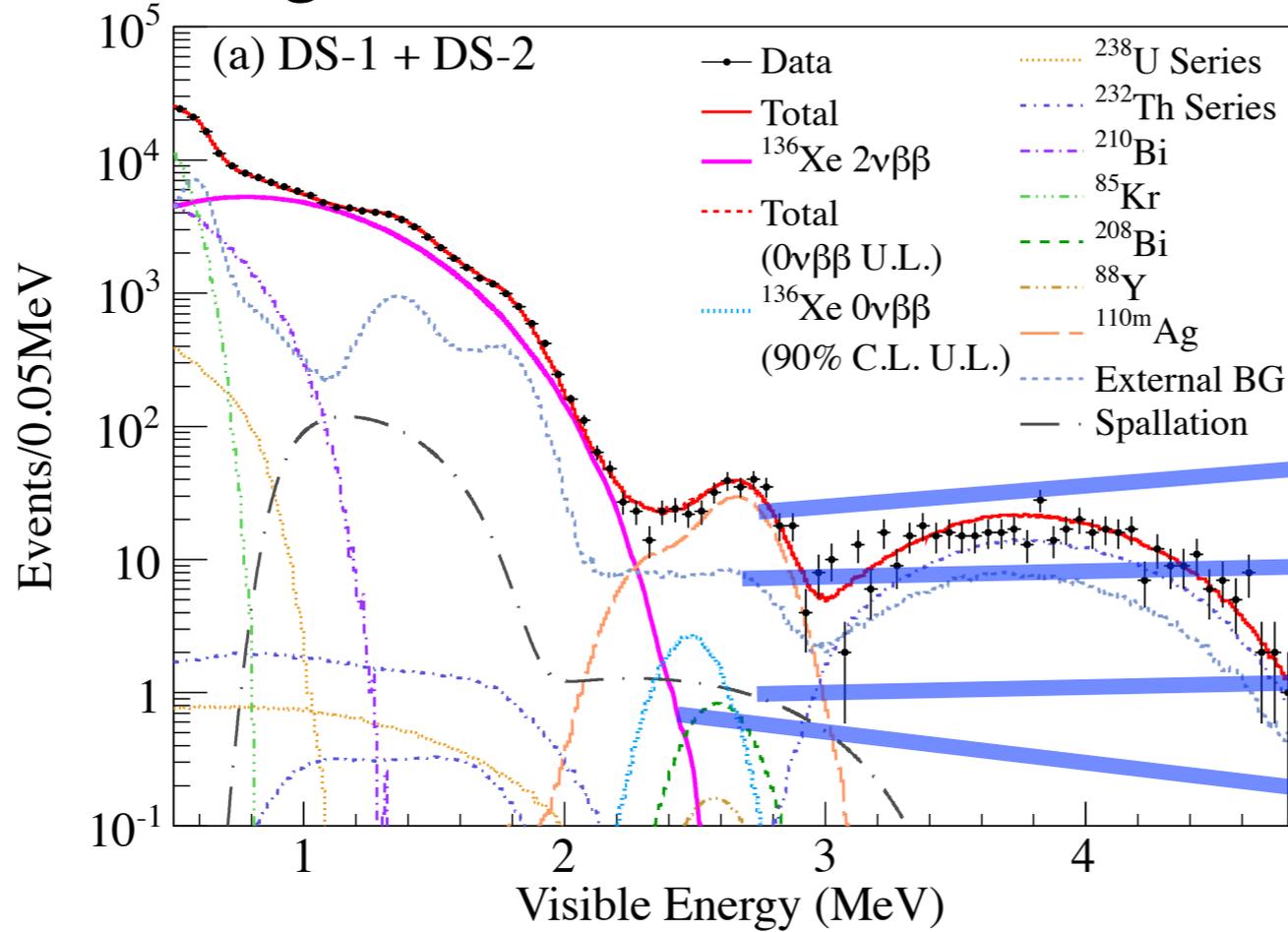


110mAg BG reduction to < 1/10



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

Phase-1 320kg

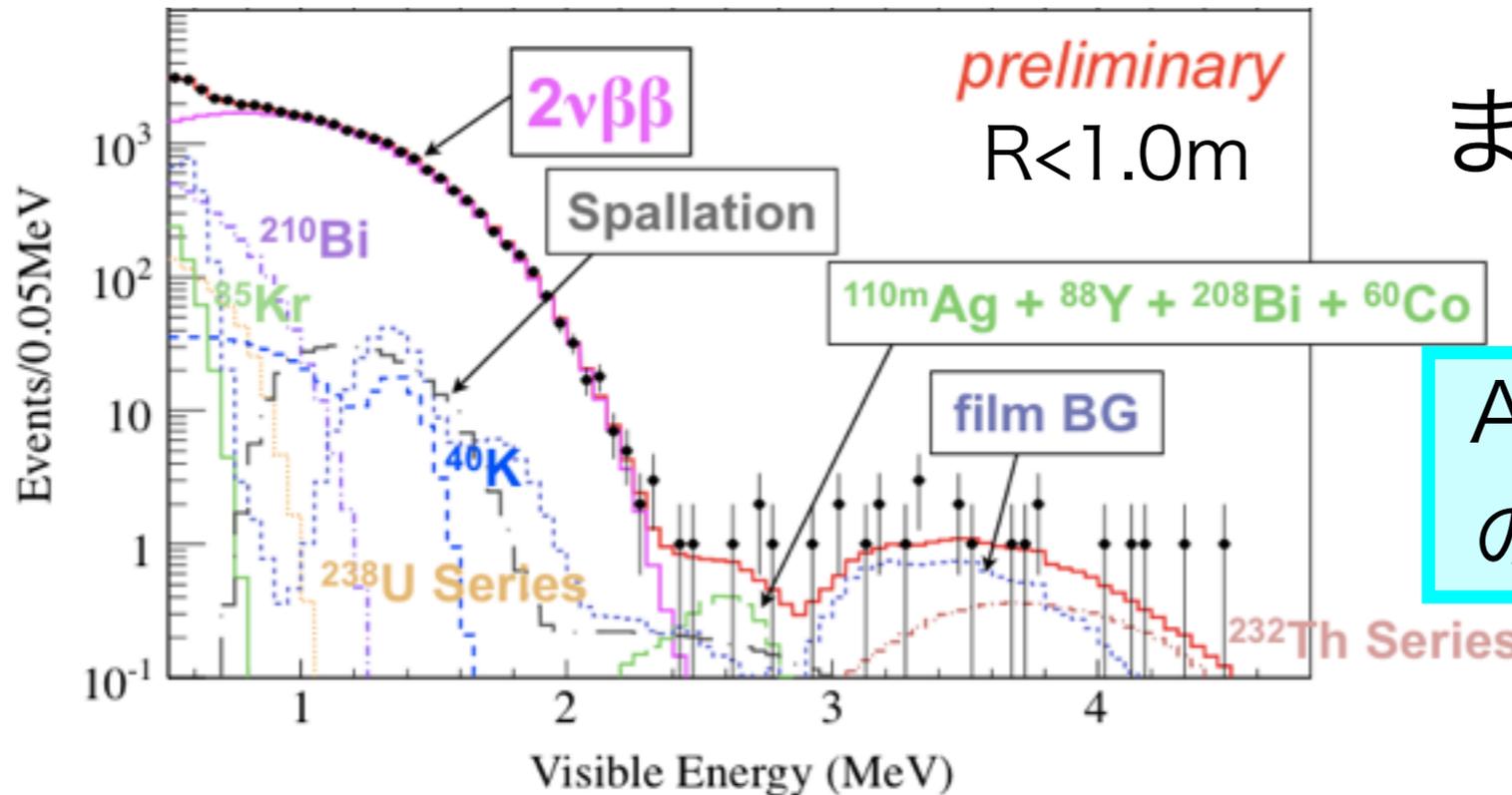


対策

- 110mAg LS
- 214Bi balloon
- 10C LS
- 2ν2β LS

- ① 純化により ~80meV
- ② バルーン更新と大型化 ~40meV
- ③ μ-n-¹⁰C 三重遅延同時計測
- ④ エネルギー分解能向上 ~20meV

Phase-2 380kg



まずは①に成功！

^{110m}Agは10分の1以下

A01班では②③と④のための開発を行う

現在公表している結果

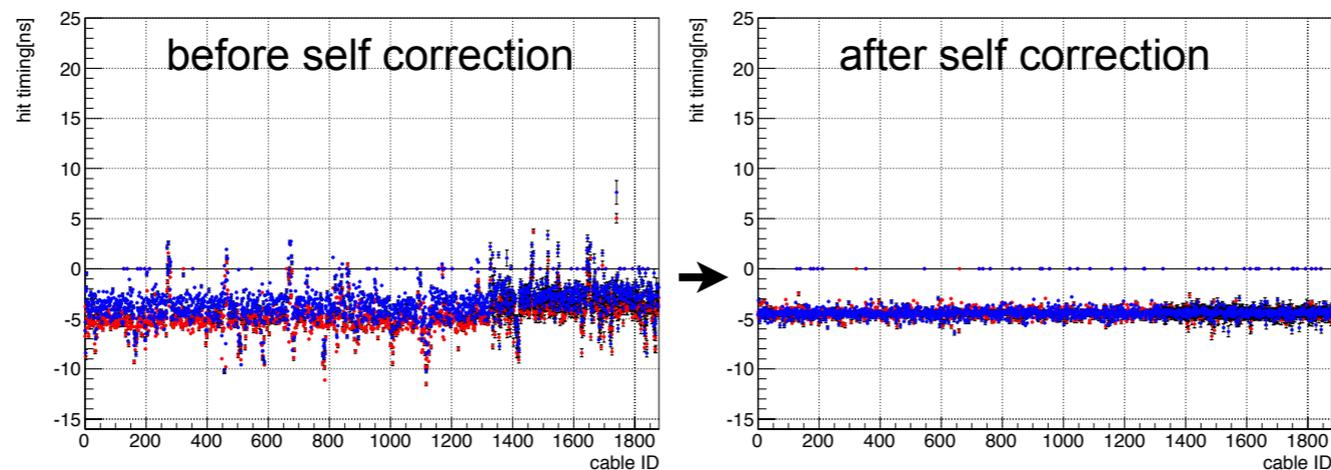
320kg	2013.12.11-2014.5.1	213.4日	$>1.9 \times 10^{25}$ y	published
380kg	2013.12.11-2014.5.1	114.8日	$>1.3 \times 10^{25}$ y	preliminary hep-ex1409.0077
			combined	$>2.6 \times 10^{25}$ y preliminary
			cf. EXO-200	$>1.1 \times 10^{25}$ y

マヨラナ質量に対する制限(単独) $<140 \sim 280$ meV

QRPA

J. Phys. G39, 124006 (2012)

キセノン回収(H27.10)までの期間で 100meV近辺の感度を期待
解析も改善(タイミング補正)、位置分解能 $14 \rightarrow 13$ cm/ \sqrt{E}



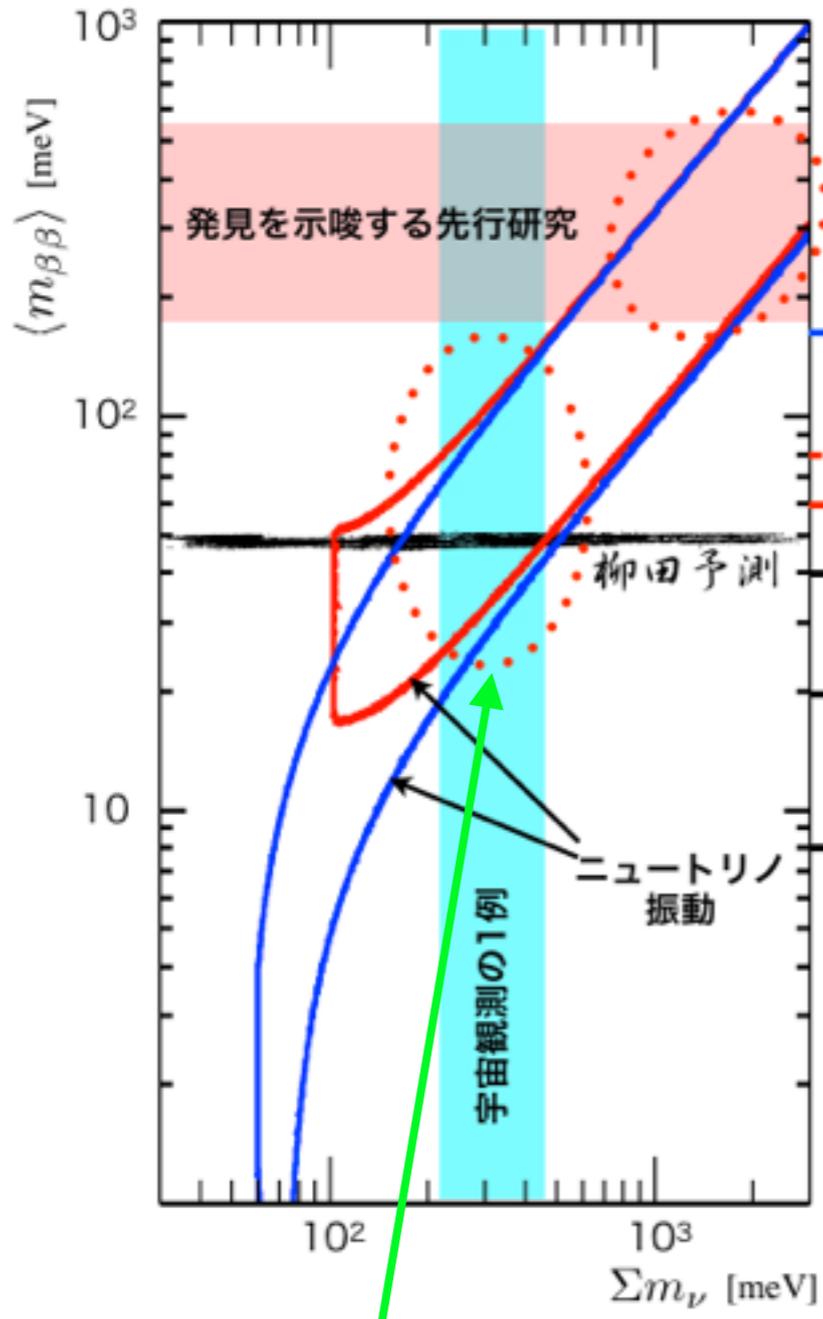
世界の競争状況

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	$> 2.6 \times 10^{25}$	$< 0.14-0.28$
	EXO-200	$> 1.1 \times 10^{25}$	$< 0.21-0.43$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	NEMO-3	$> 1.8 \times 10^{22}$	$< 4.0-6.3$

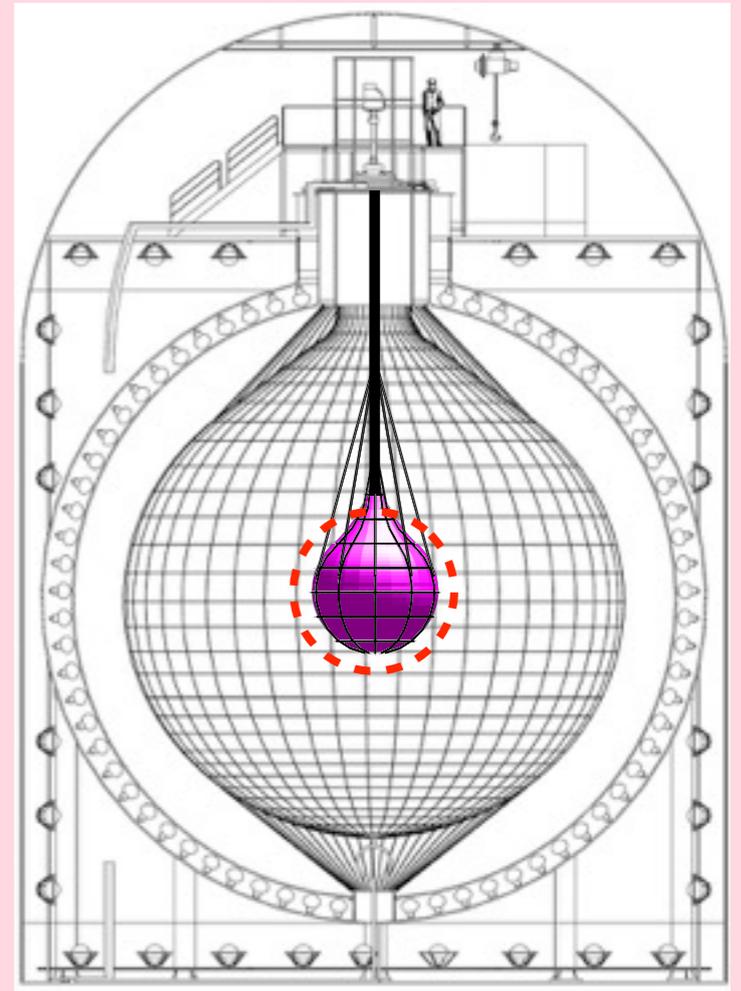
現在世界最高感度を更新中！

逆階層構造をカバーする感度にむけて

未知のマヨラナニュートリノ質量



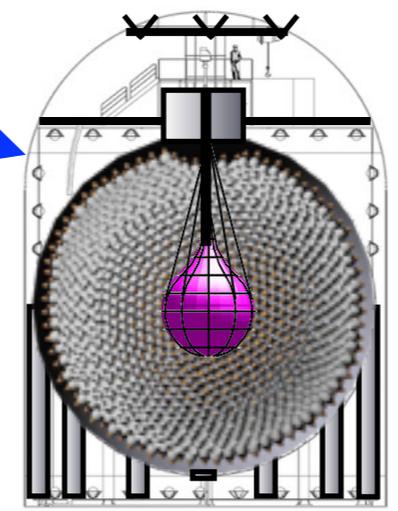
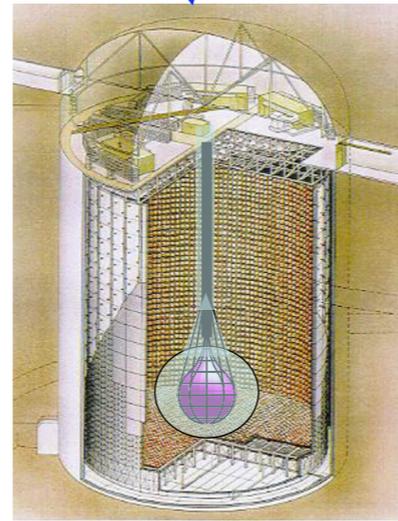
こちらを排除



極低放射能フィルム
キセノン増量

新学術

KamLAND2-Zen



BG識別能大幅向上
高分解能
(発光フィルム)
(高感度撮像)

ここに大発見
を期待

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

キセノン増量の予定

H27.5~9 800kg用ミニバルーン製作

- ・可視化技術によるホコリ・フローのコントロール
- ・クリーンスーツ（インナー、アウター）を半日毎にクリーニング
- ・スーパークリーンルーム内の最終更衣室
- ・フィルムラミネートによるホコリ付着の防止

H27.10~12 キセノン回収とミニバルーン撤去

H28.1~4 外水槽の改修 Poster 尾崎

消防検査

キセノン純化再生

H28.春~夏 ミニバルーン導入 キセノン量 (650~750kg)

H28.夏 観測再開

400kg用ミニバルーン製作の様子

🌐 クラス1 スーパークリーンルームでの作業

(class 1 = 0.3ミクロン粒子が1立方メートルあたり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

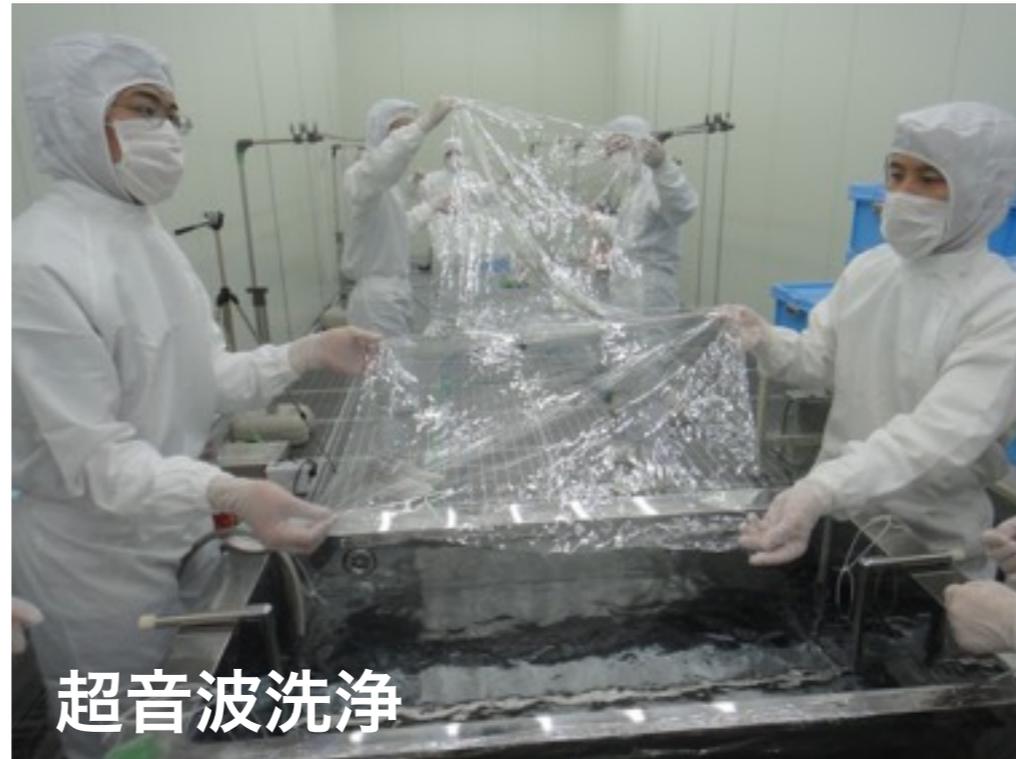
低放射能

→ 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



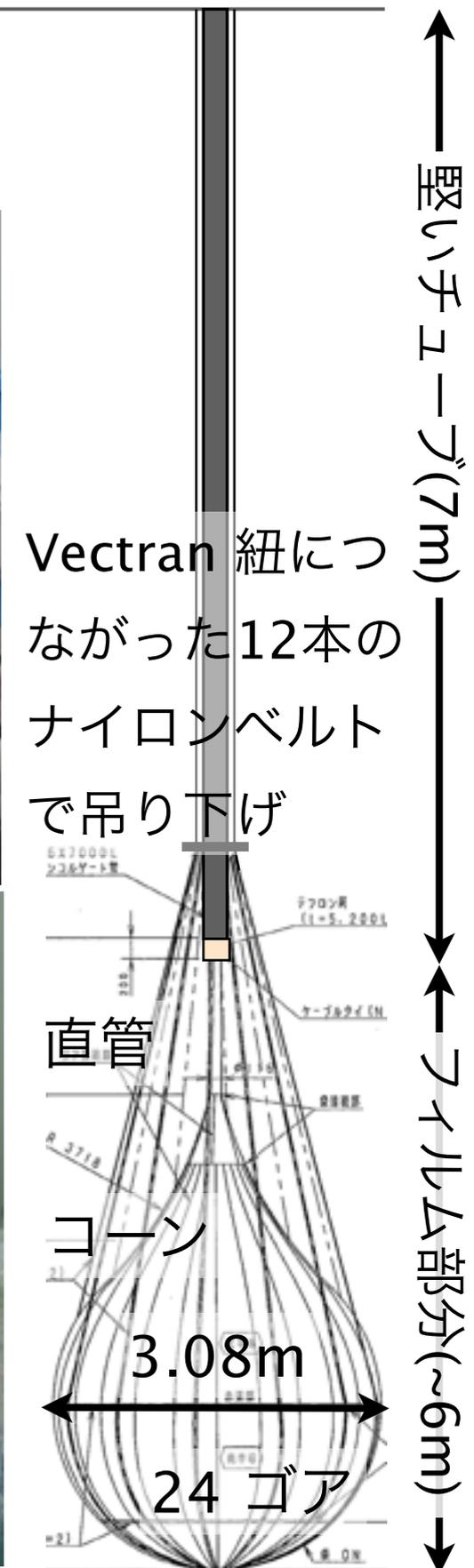
超音波洗浄



24ゴアをフィルムから切出し



新開発溶着法



🌐 全ての道具や部品もここで洗浄

微細なホコリの可視化を導入

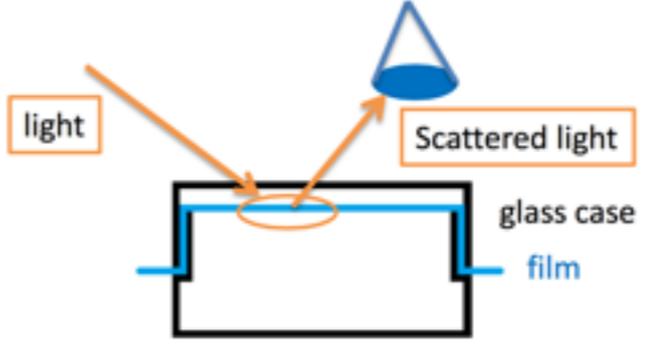
レーザーの散乱を動画撮影

クリーニング方法の確認 フィルム状態の確認

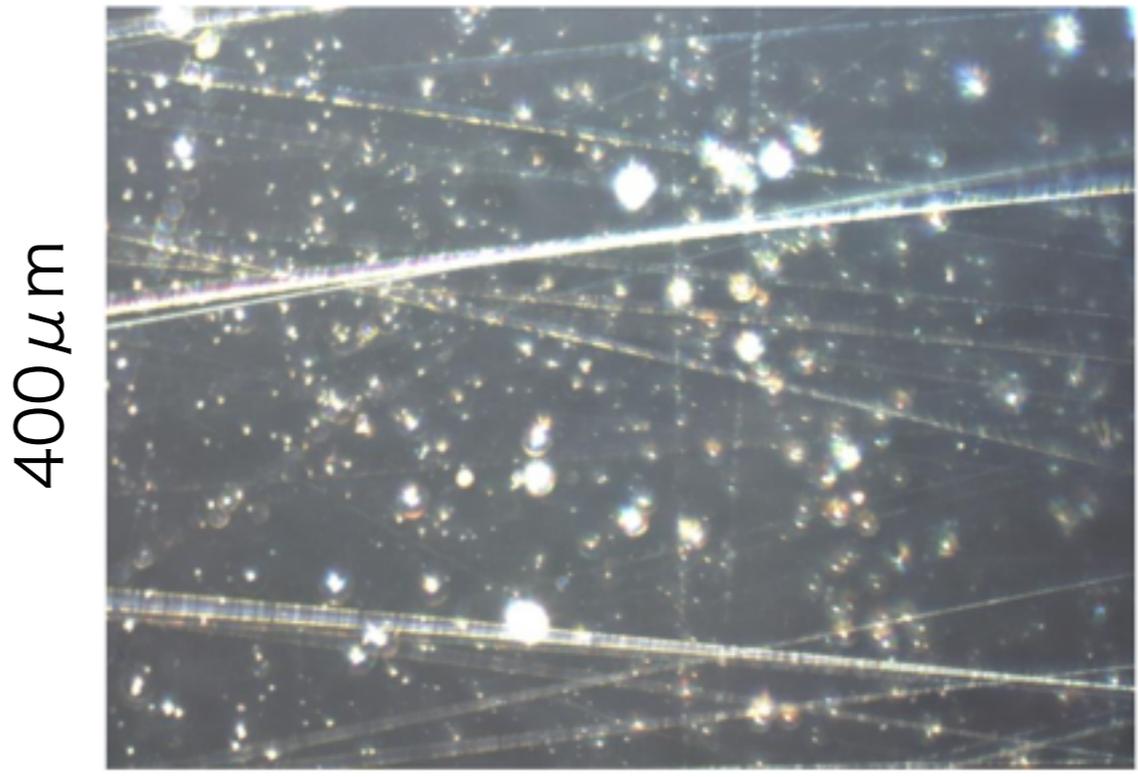
顕微鏡



新日本空調(株)



IPA + Bemcot



600 μm

何が、どういう動作がホコリを
だすか、付着させるかを分析。

製作後のクリーニング方法を調査

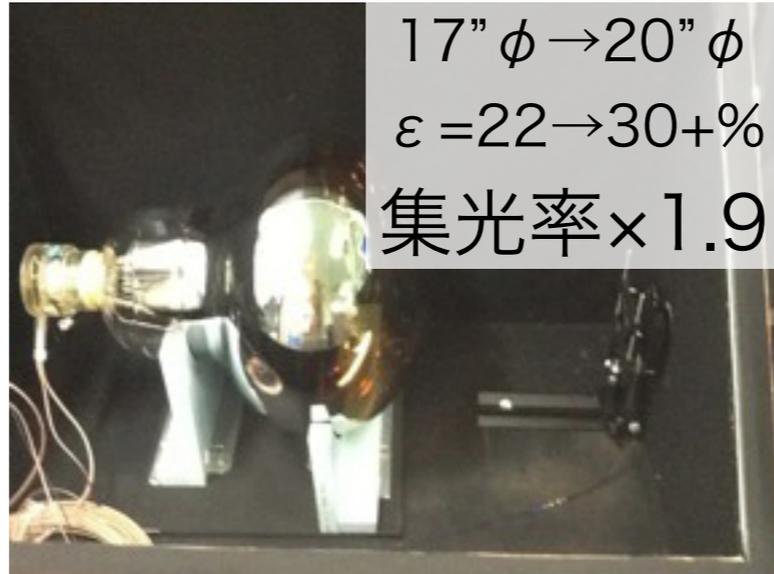
技術開発

Poster 蜂谷

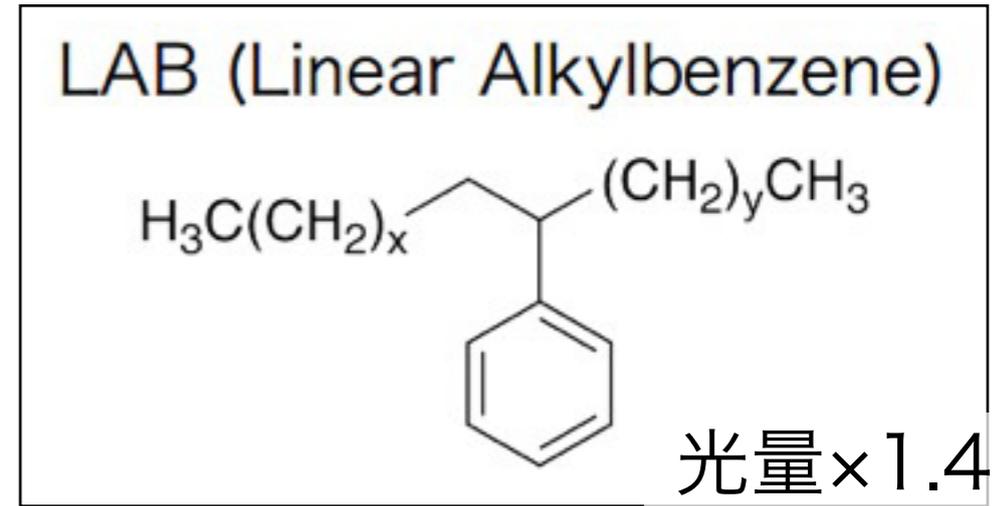
○集光ミラー



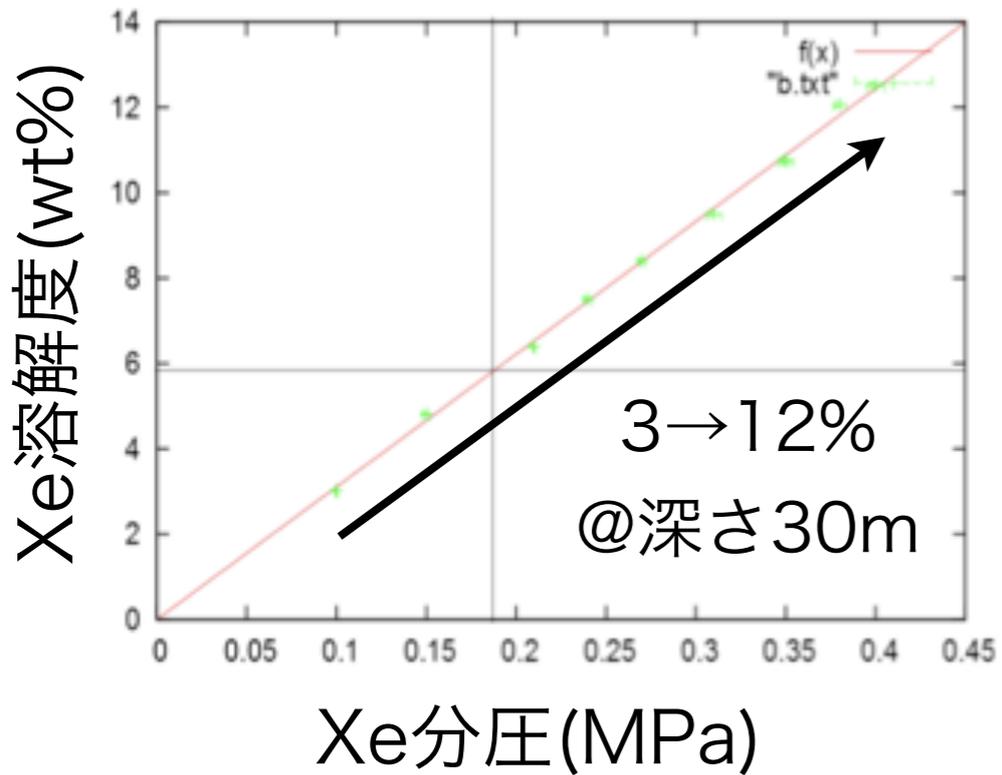
○高量子効率PMT



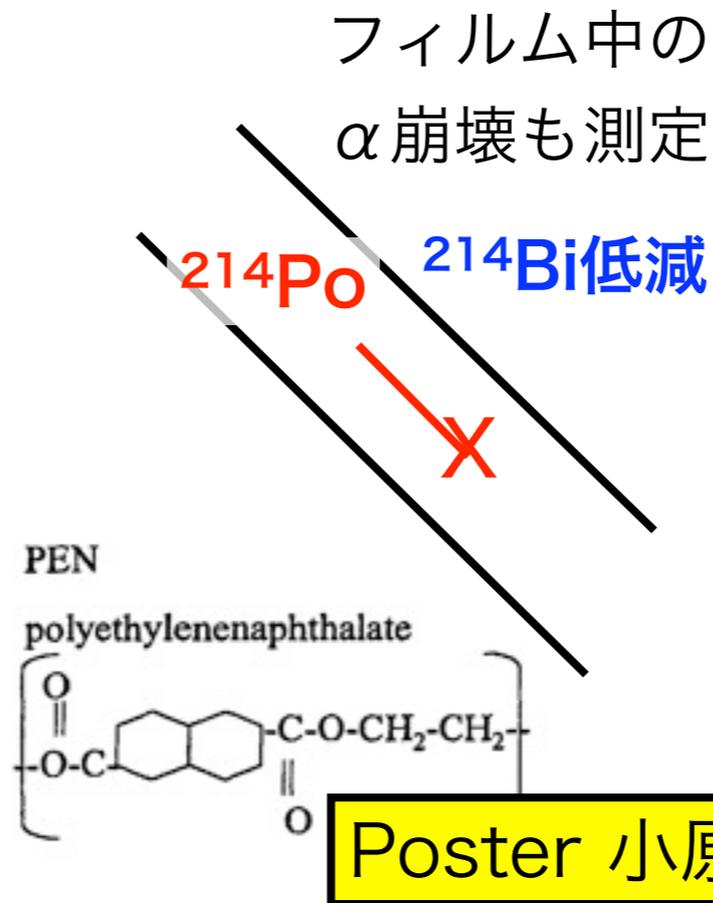
○高発光LS



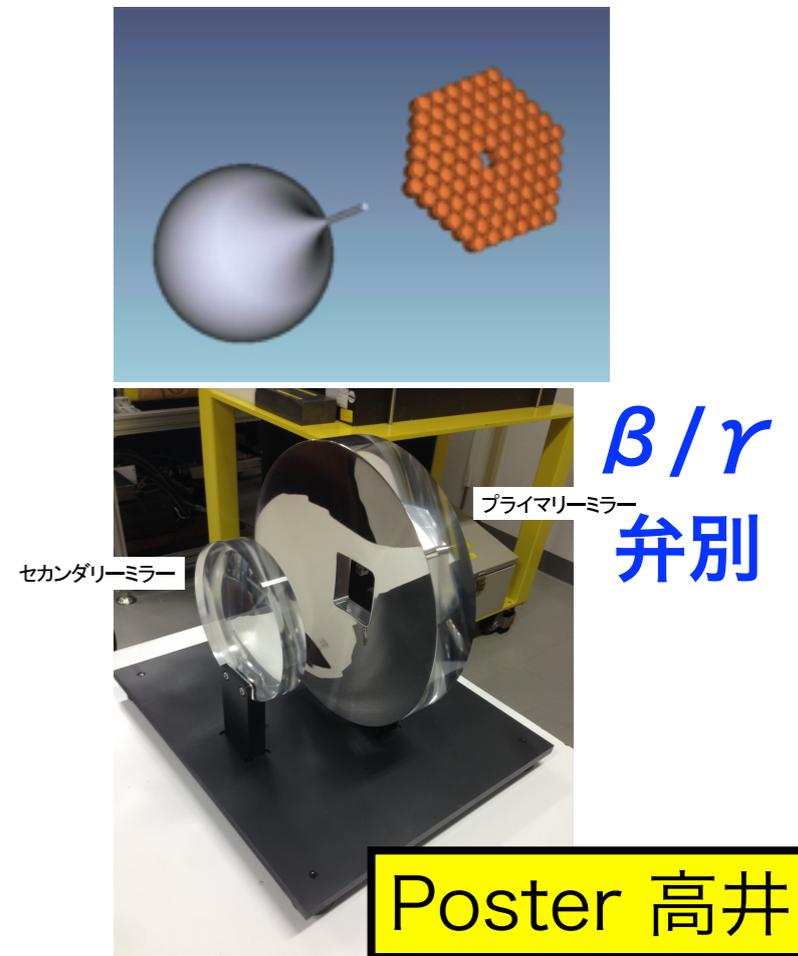
○キセノン高濃度化



○発光フィルム

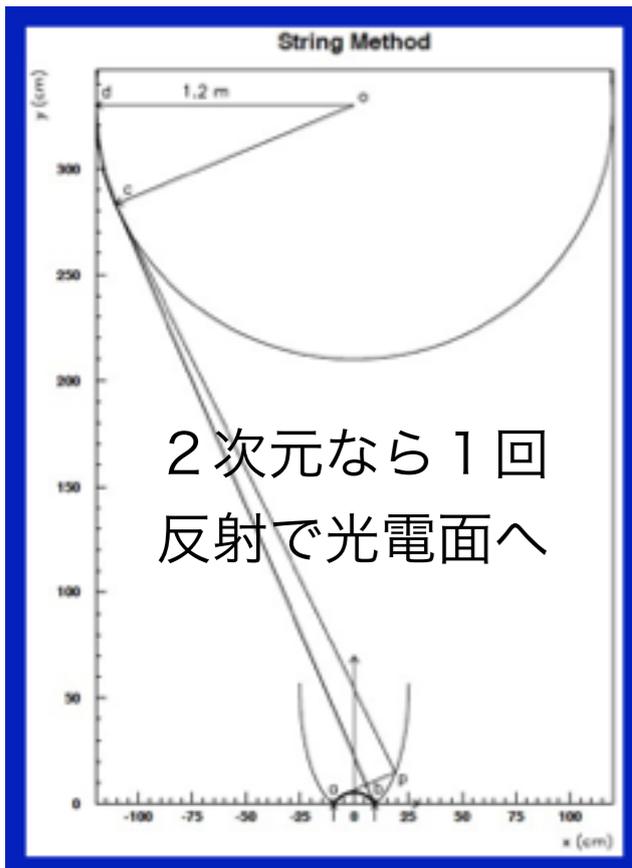


○高感度撮像

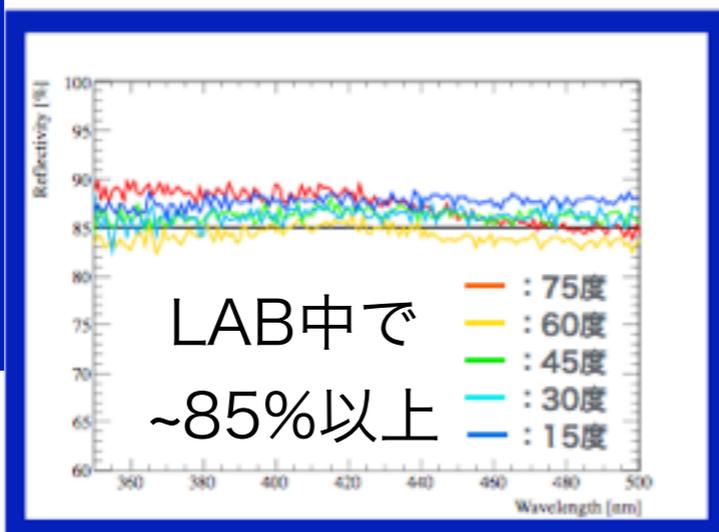
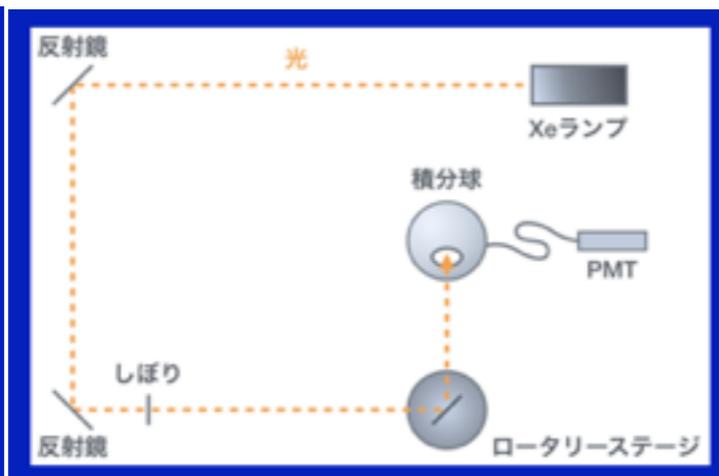


集光ミラー

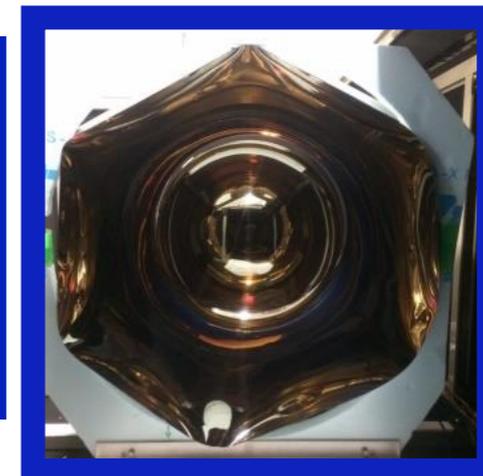
形状



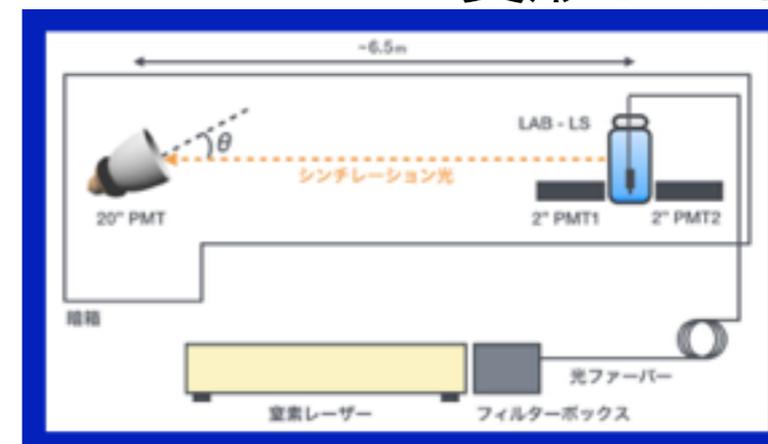
反射率



実機測定



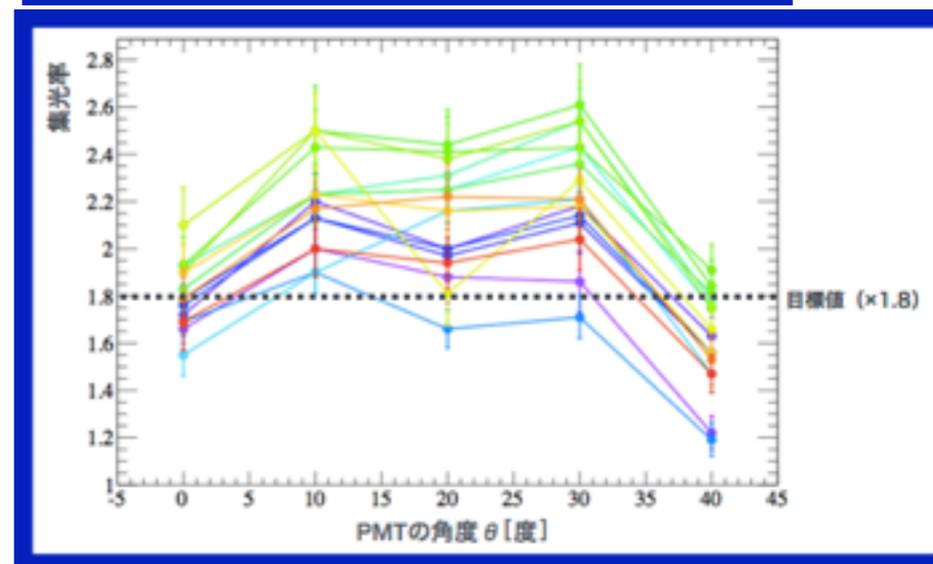
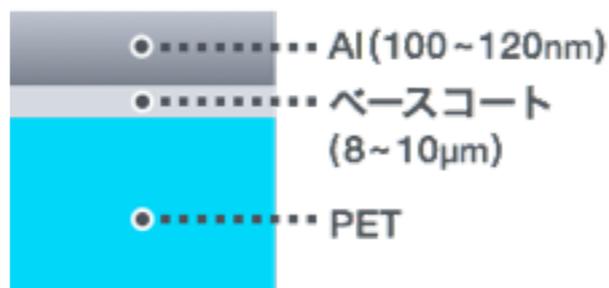
変形しても性能維持



素材

U・Th・⁴⁰Kの定量分析結果(単位:g/g)

元素	ペレット	シート	PMT
U	8.0×10^{-12}	7.0×10^{-12}	4.8×10^{-7}
Th	$< 5.0 \times 10^{-12}$	$< 5.0 \times 10^{-12}$	4.7×10^{-7}
⁴⁰ K	$< 1.0 \times 10^{-11}$	$< 1.0 \times 10^{-11}$	8.0×10^{-8}



目標値 (x1.8) 達成

昨年度の修士論文

- KamLANDにおける近傍超新星ニュートリノ観測に向けた新規トリガー機能開発
- KamLAND-Zen高感度化のための粒子識別用イメージ検出装置の開発
- KamLAND2-Zen実験のための集光ミラーの研究開発
- 次期KamLAND実験へ向けたフロントエンドエレクトロニクスの開発
- KamLAND-Zen次期計画へ向けた新型PMTの性能研究
- KamLAND-Zen実験における ^{214}Bi バックグラウンド除去のための発光性バルーンフィルムの開発研究

まとめ

- 世界最高感度の状態から、さらに最大のBKGを1/10以下に低減できている。 $m_{\beta\beta} < 140\sim 280$ meV
- ミニバルーンが汚れていて有効体積が小さい。
- データ取得は順調で、今年中に100meV付近の感度を期待。来年の報告を期待して下さい。
- ミニバルーンの更新、キセノン増量を準備中。
ホコリに対してより厳格な手順を構築。
来年夏に650~750kgのキセノンで観測開始予定。
- エネルギー分解能向上のための開発を精力的に実施。