



東北大学



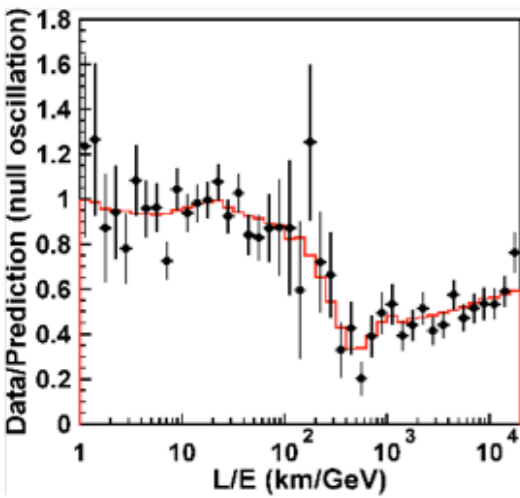
# ニュートリノ実験の現状と 将来展望

東北大学ニュートリノ科学研究センター  
井上邦雄

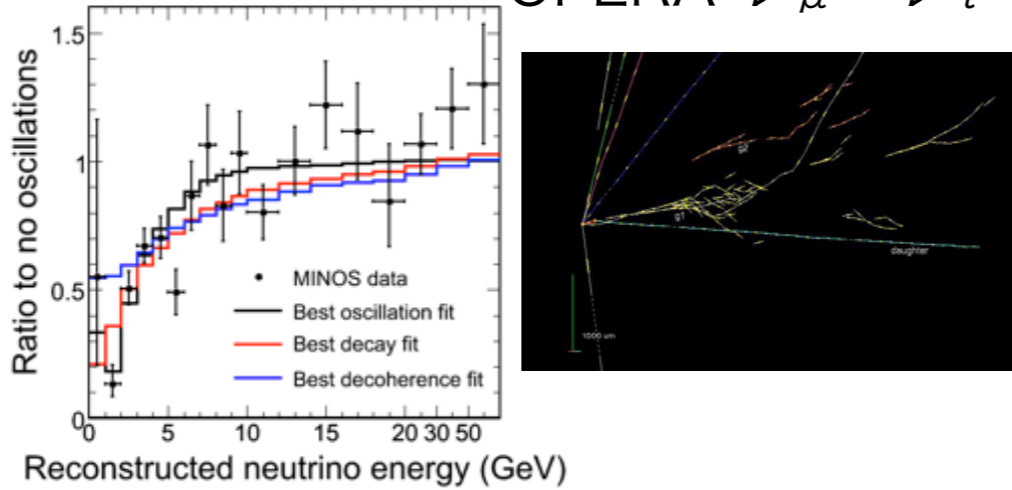
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

基研研究会「素粒子物理学の進展2014」 2014年7月29日

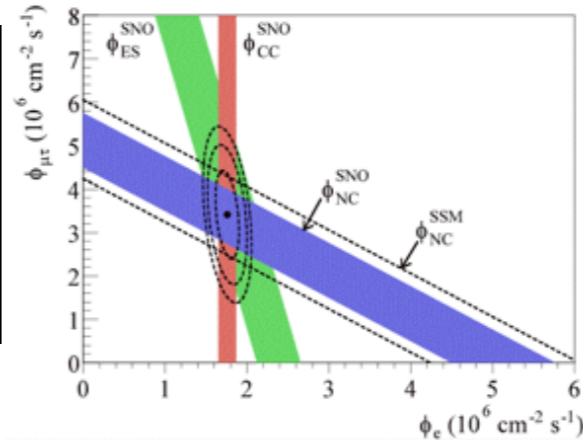
# SK 大気 半周期



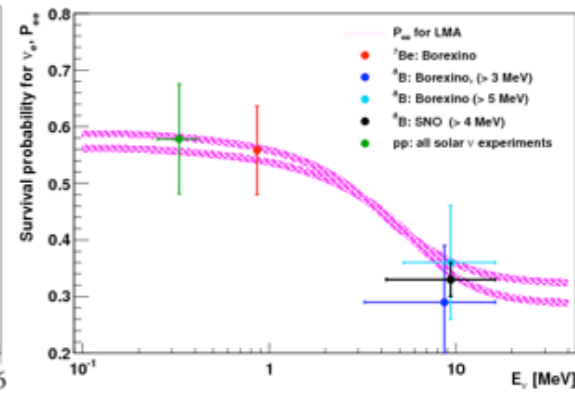
# MINOS 半周期 OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



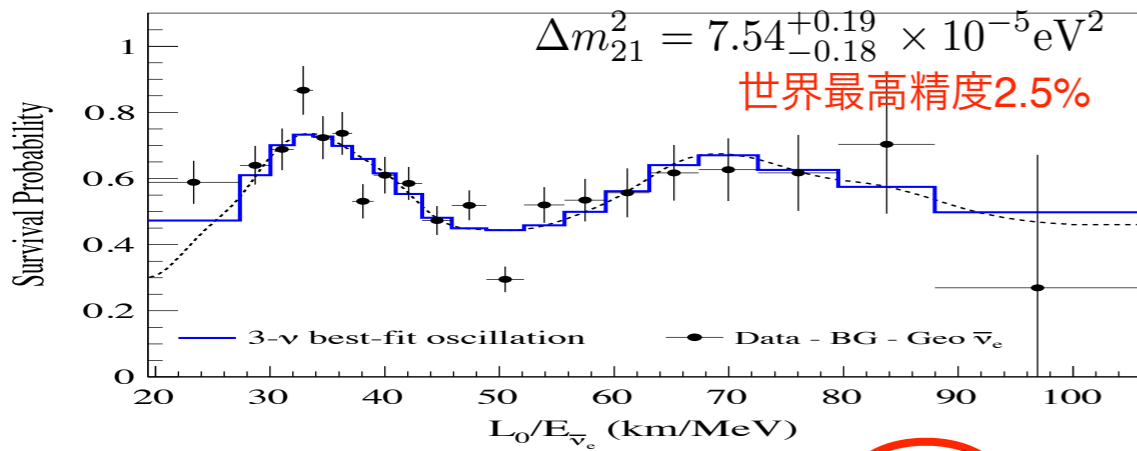
# SNO CC/NC



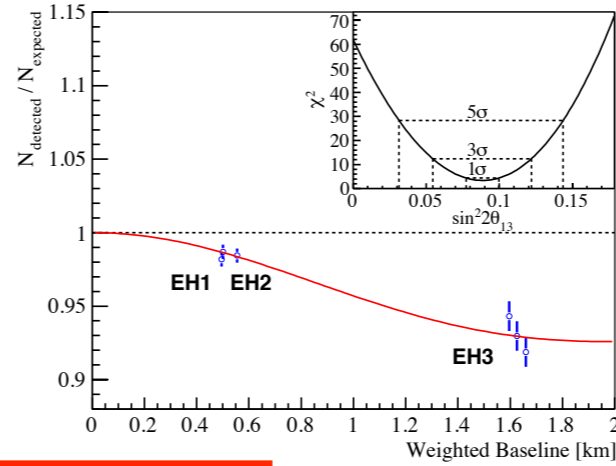
# Borexino MSW



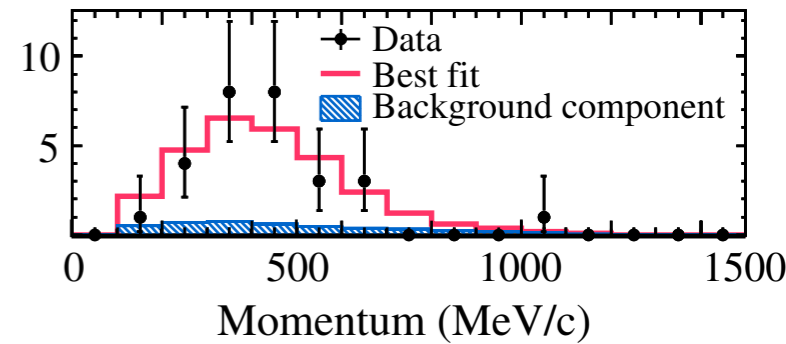
# KamLAND 2 周期



# 原子炉短基線



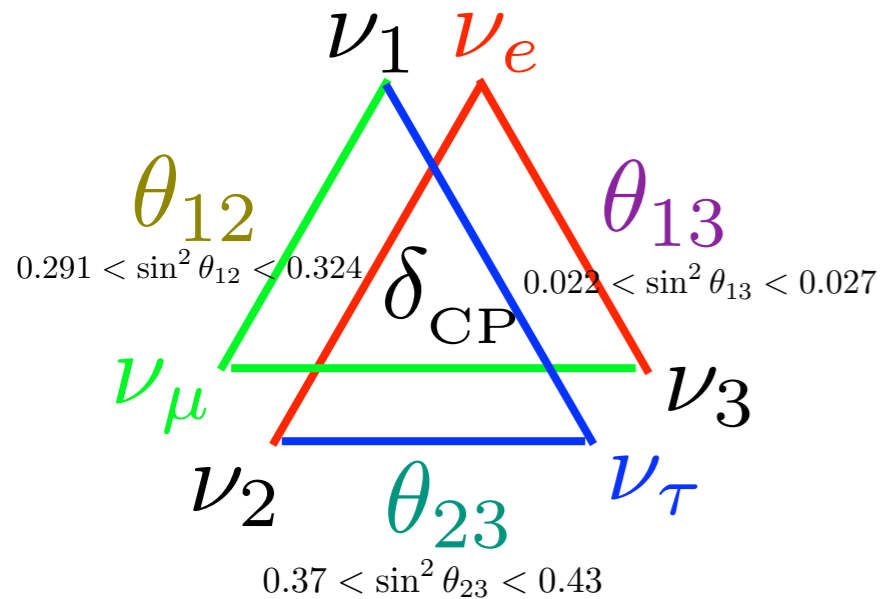
# T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



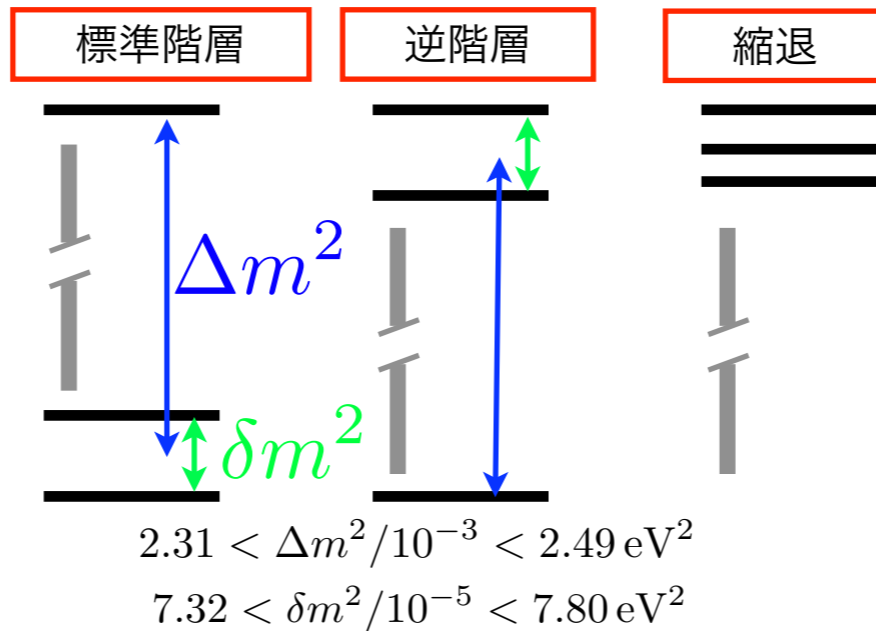
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta m^2 L}{4E}\right)$$

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

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

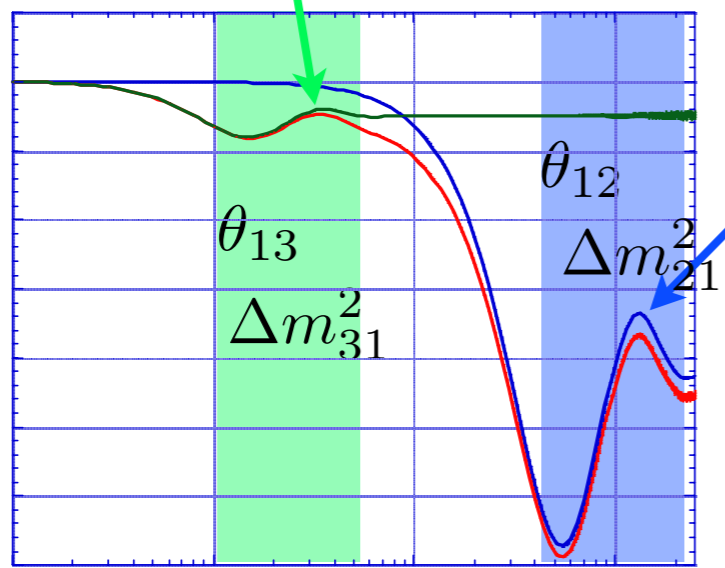
← Dirac neutrino 電子等と同様に粒子・反粒子が異なる

← Majorana neutrino 粒子・反粒子が同じ

フレーバーの固有状態  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$  質量の固有状態

### 原子炉ニュートリノでの観測対象

$$P_{\bar{e}\bar{e}} \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)$$



### T2Kの観測対象

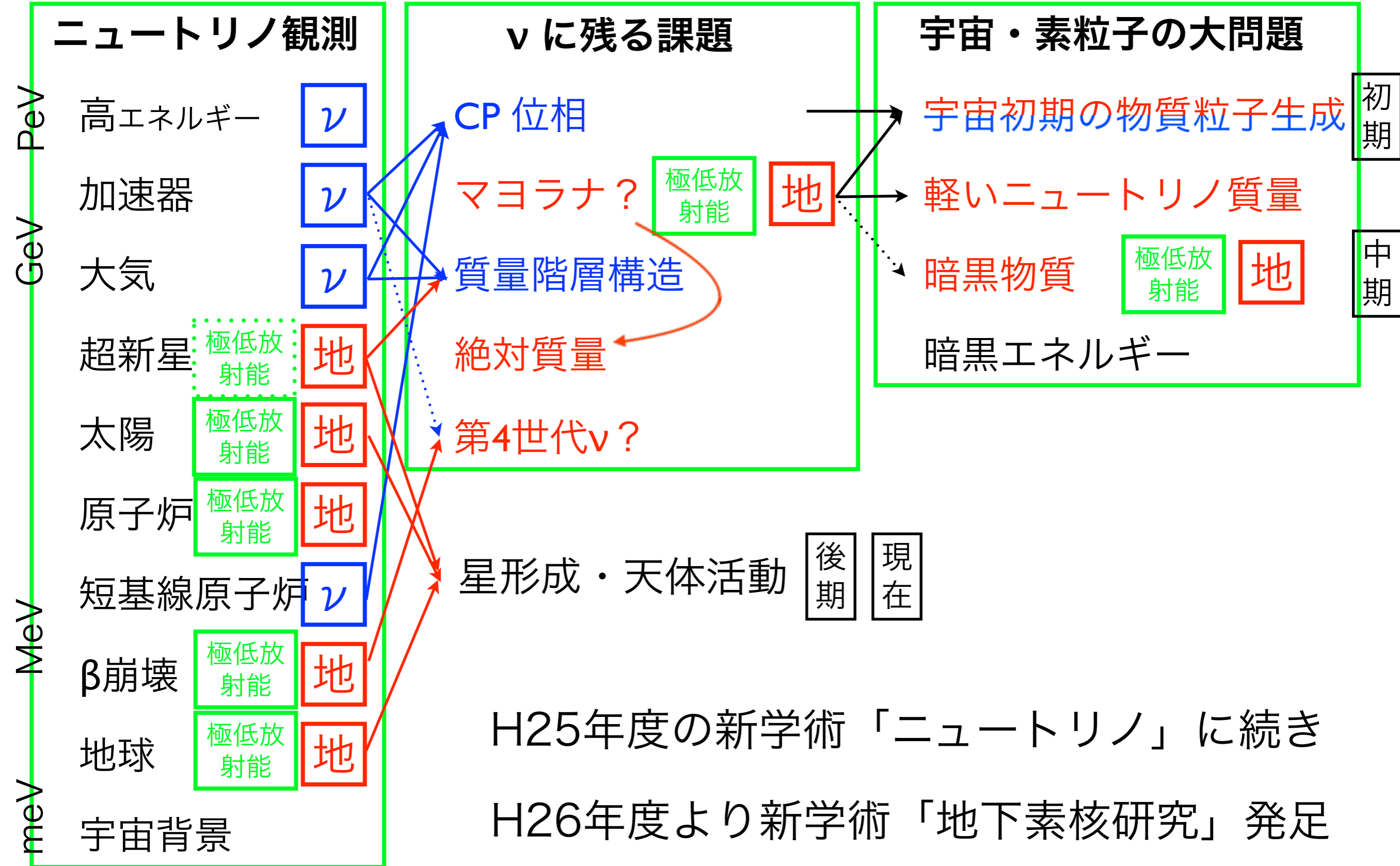
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2(A-1)\Delta}{(A-1)^2} + 2\alpha \sin \theta_{13} \cos \delta \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta \sin(A-1)\Delta}{A(A-1)} \cos \Delta - 2\alpha \sin \theta_{13} \sin \delta \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta \sin(A-1)\Delta}{A(A-1)} \sin \Delta$$

$$\alpha \equiv \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2}$$

$$\Delta \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

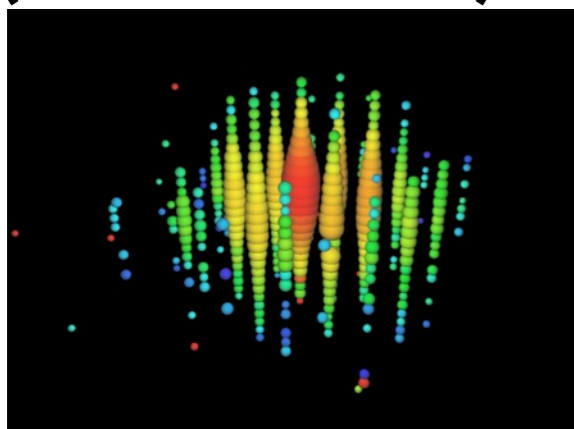
$$A \equiv \frac{G_f n_e L}{\sqrt{2}\Delta} \approx \frac{E}{11 \text{ GeV}}$$

# 様々なニュートリノ

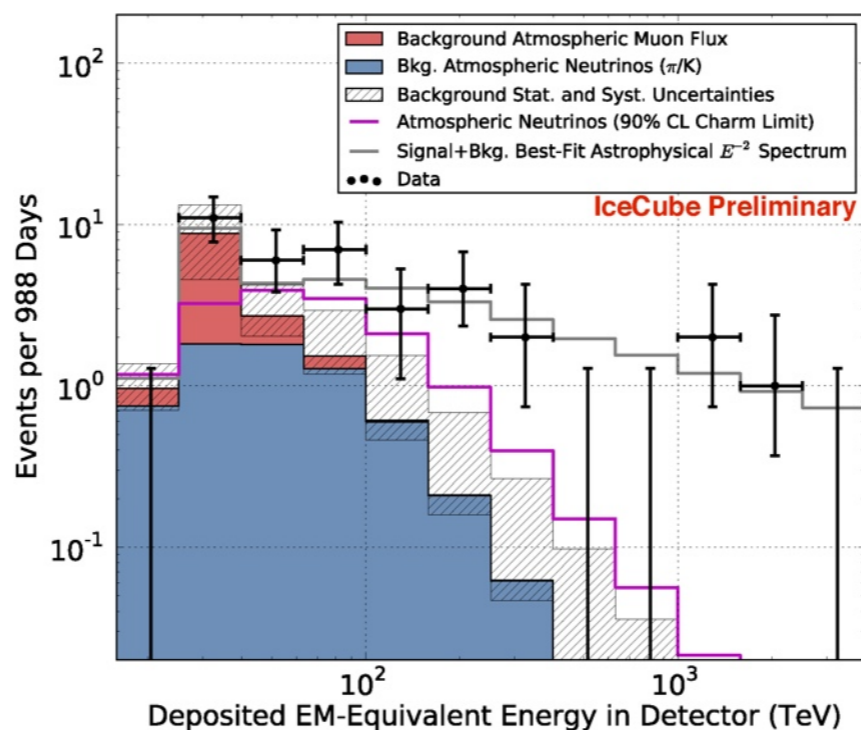


# 高エネルギー (IceCube)

# 高エネルギーニュートリノ天文学の創出



PeVニュートリノ 3事象  
点源? GRB?

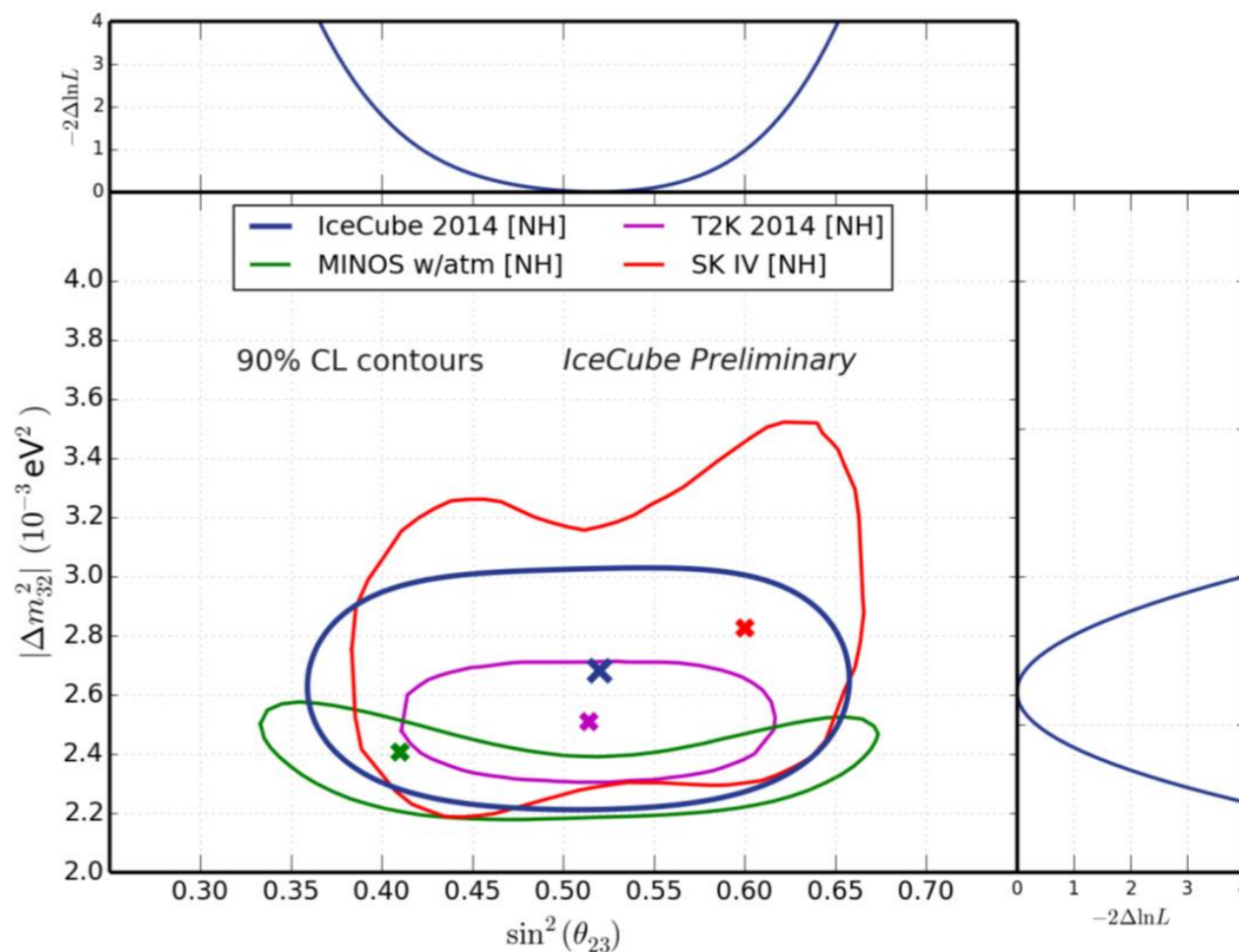
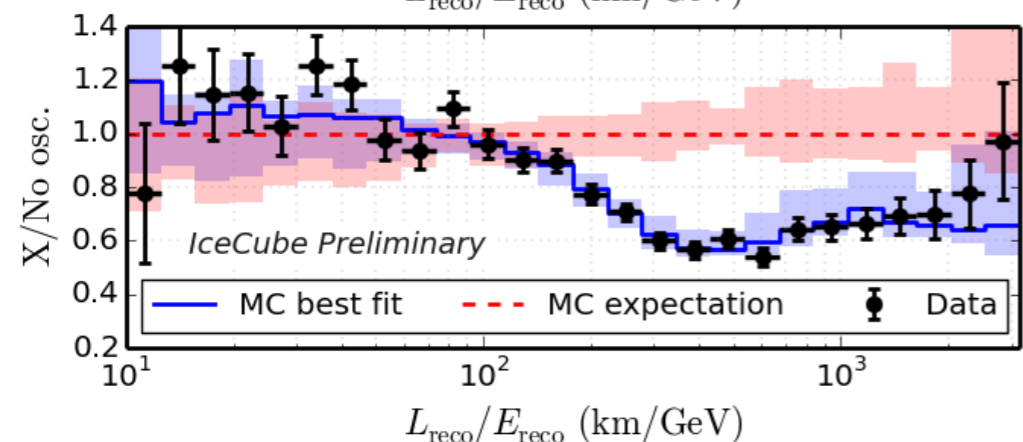
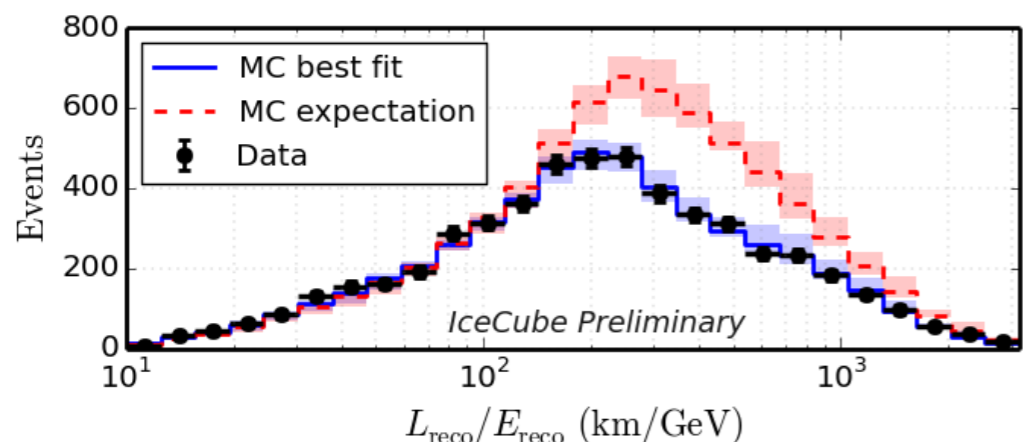


5.7  $\sigma$  (contained)

3.9  $\sigma$  (upgoing)

excess from  $\nu_{atm}$

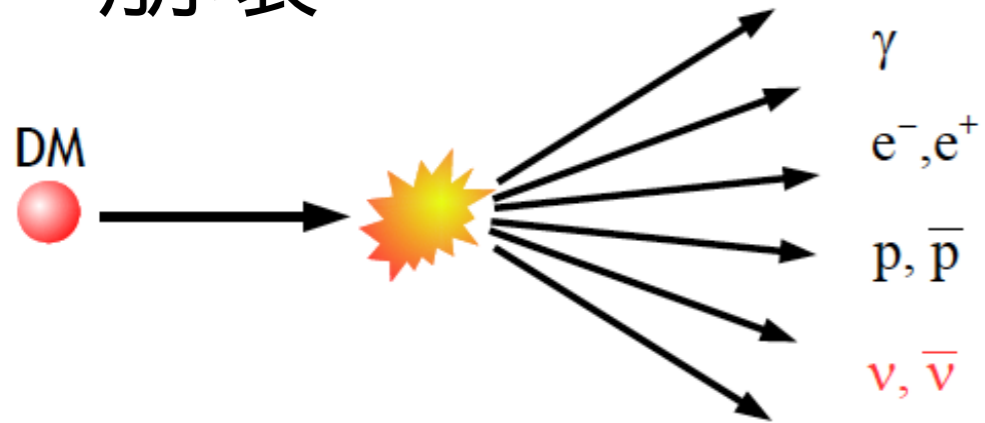
## 大気ニュートリノ振動 @ IceCube



# ニュートリノ vs 暗黒物質

ニュートリノを通して間接測定ができるはず。

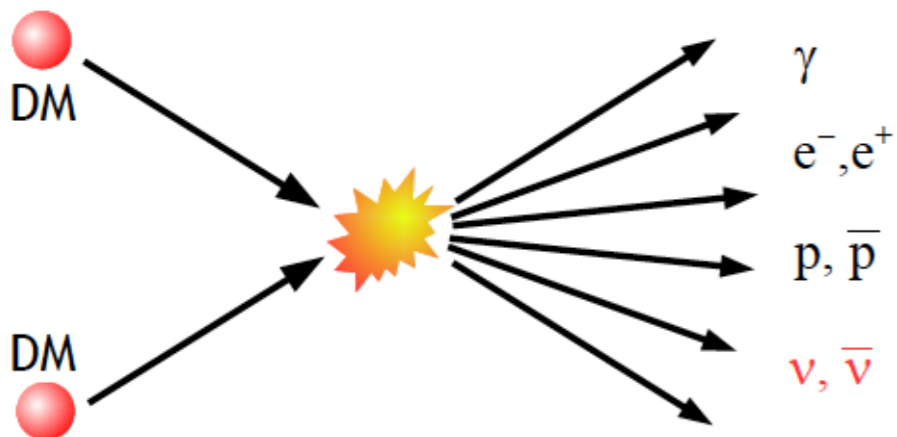
## 崩壊



$$\frac{dJ_{\text{halo}}}{dE_\nu} = \frac{1}{4\pi} \underbrace{\left[ \frac{1}{\tau_{\text{DM}} m_{\text{DM}}} \sum_f \frac{dN_\nu^f}{dE_\nu} B_f \right]}_{\text{Source term (particle physics)}} \times \underbrace{\int_{\text{l.o.s.}} \rho(\vec{l}) d\vec{l}}_{\text{Line-of-sight integral (astrophysics)}}$$

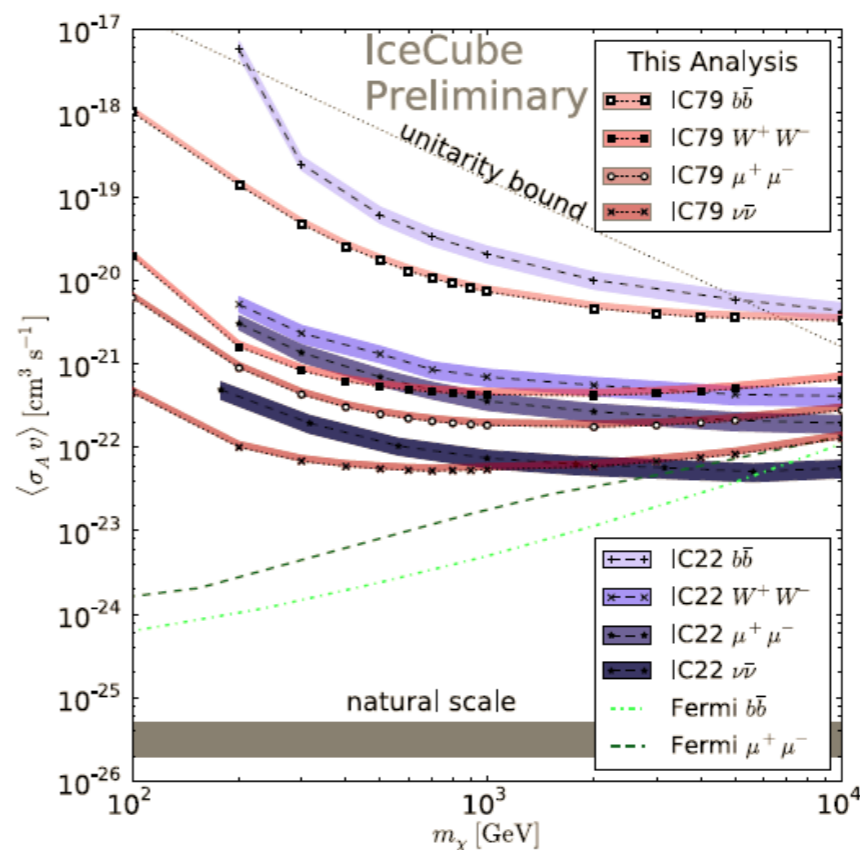
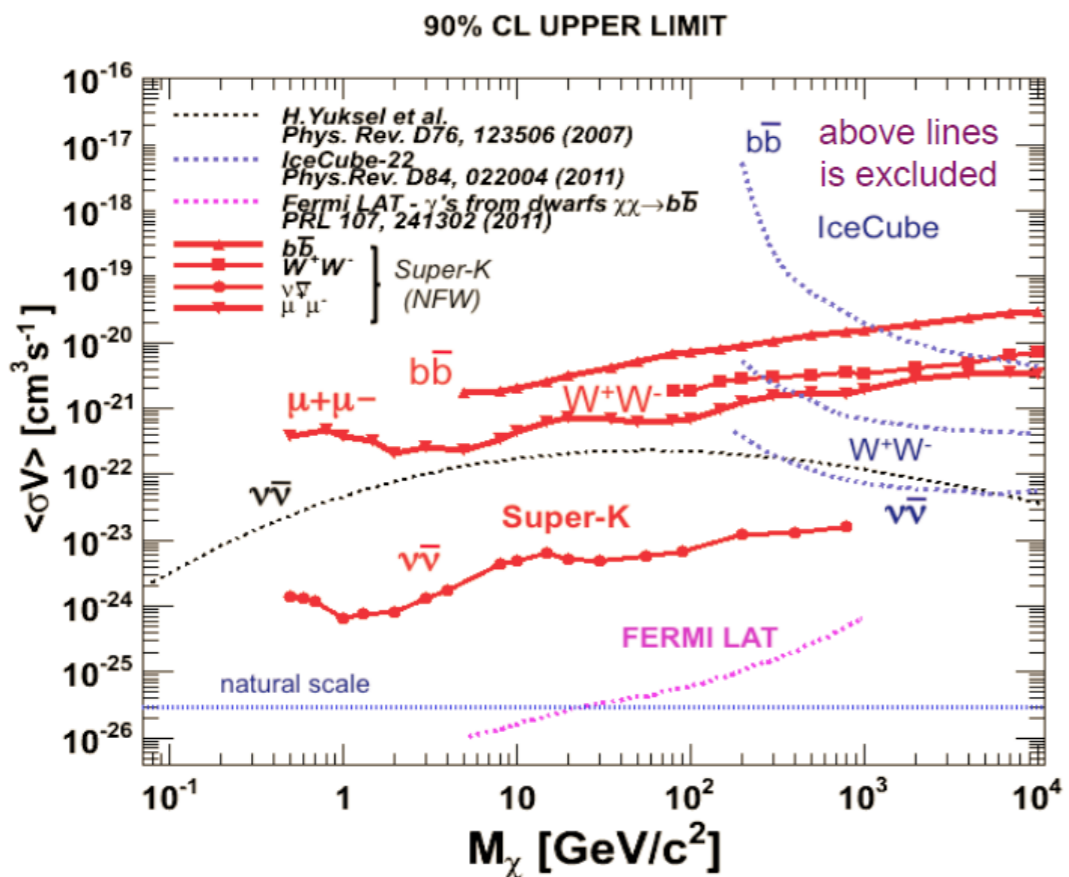
銀河ハローからのニュートリノを探索

## 対消滅

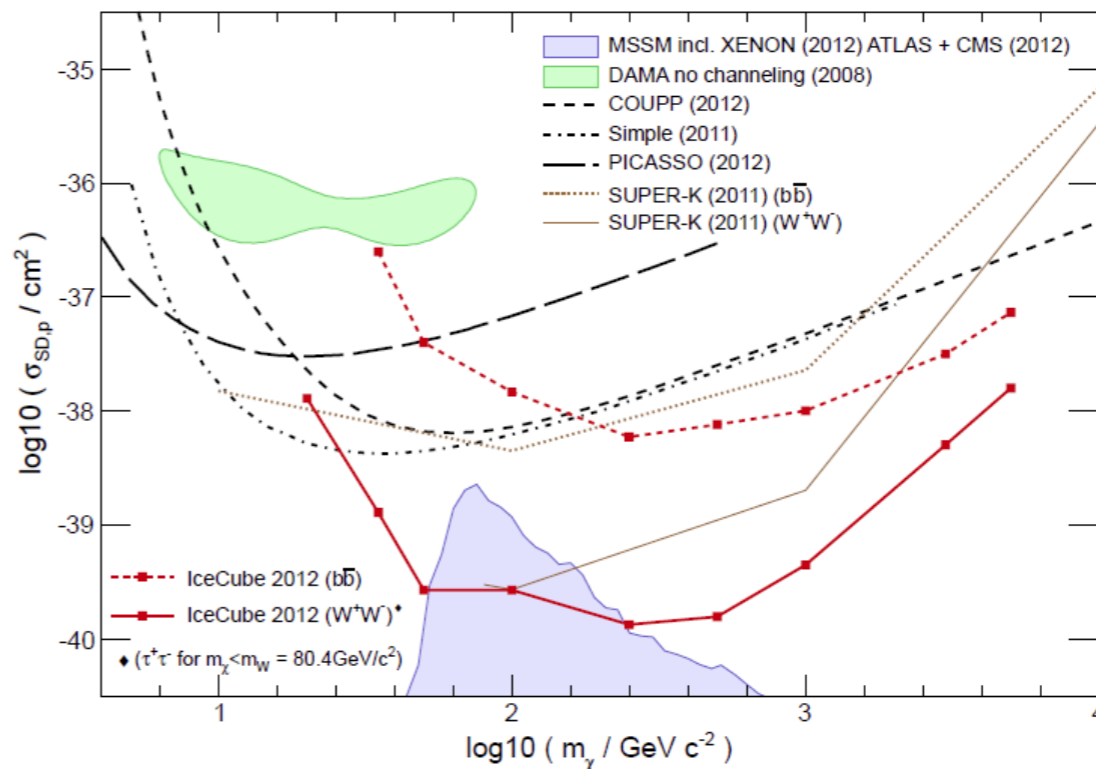
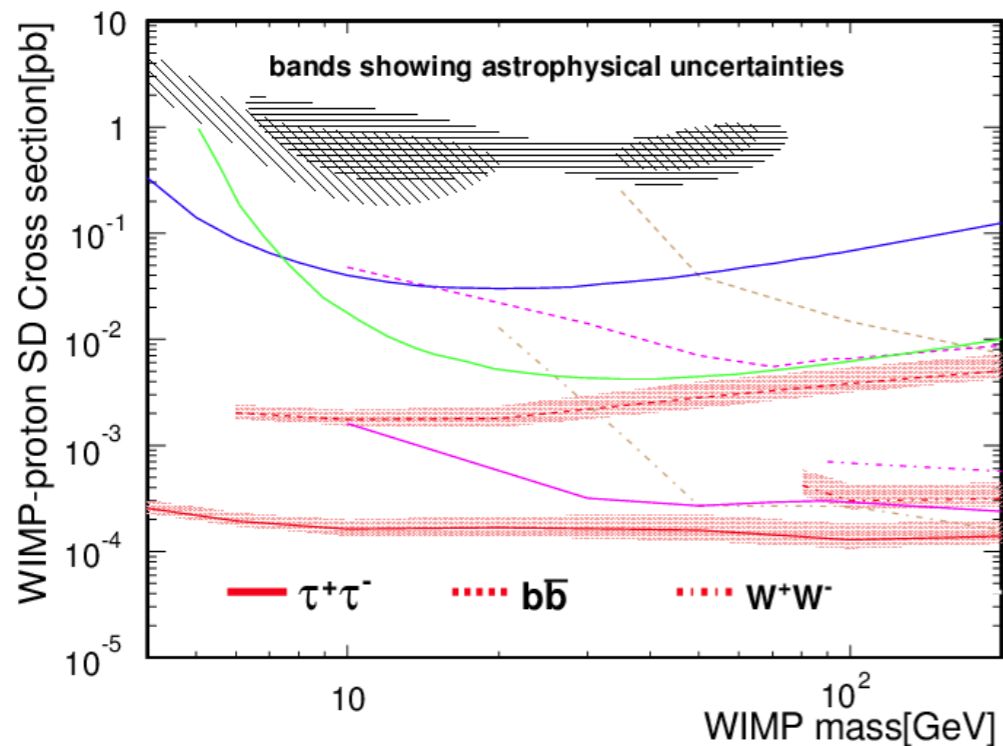


$$\frac{dJ_{\text{halo}}}{dE_\nu} = \frac{1}{4\pi} \underbrace{\left[ \frac{\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle}{2m_{\text{DM}}^2} \sum_f \frac{dN_\nu^f}{dE_\nu} B_f \right]}_{\text{Source term (particle physics)}} \times \underbrace{\int_{\text{l.o.s.}} \rho^2(\vec{l}) d\vec{l}}_{\text{Line-of-sight integral (astrophysics)}}$$

# 銀河ハローからの制限



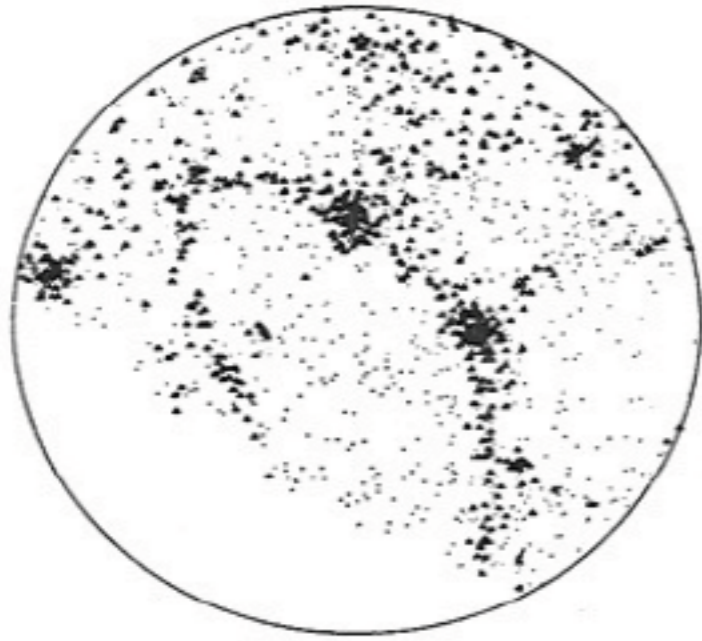
# 太陽・地球からの制限



1108.3384  
 1212.4097  
 (1301.1138)  
 (1212.2416)

# ニュートリノ vs 暗黒物質

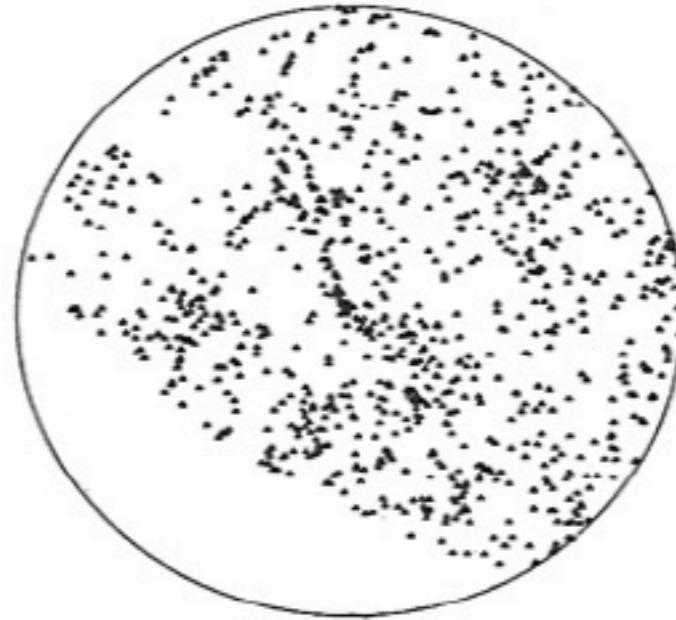
ニュートリノ自身が暗黒物質では？



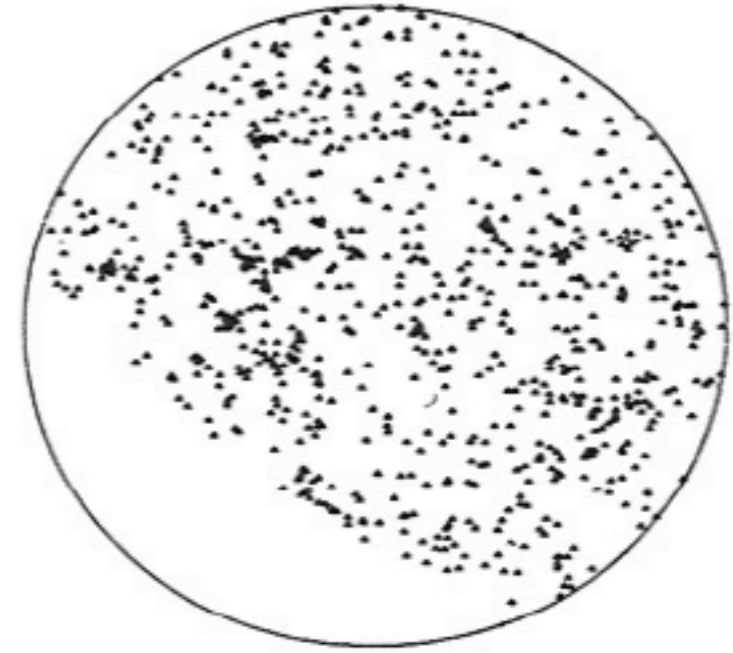
HDM

relativistic

(neutrino dark matter)



Observed Galaxy Distribution



CDM

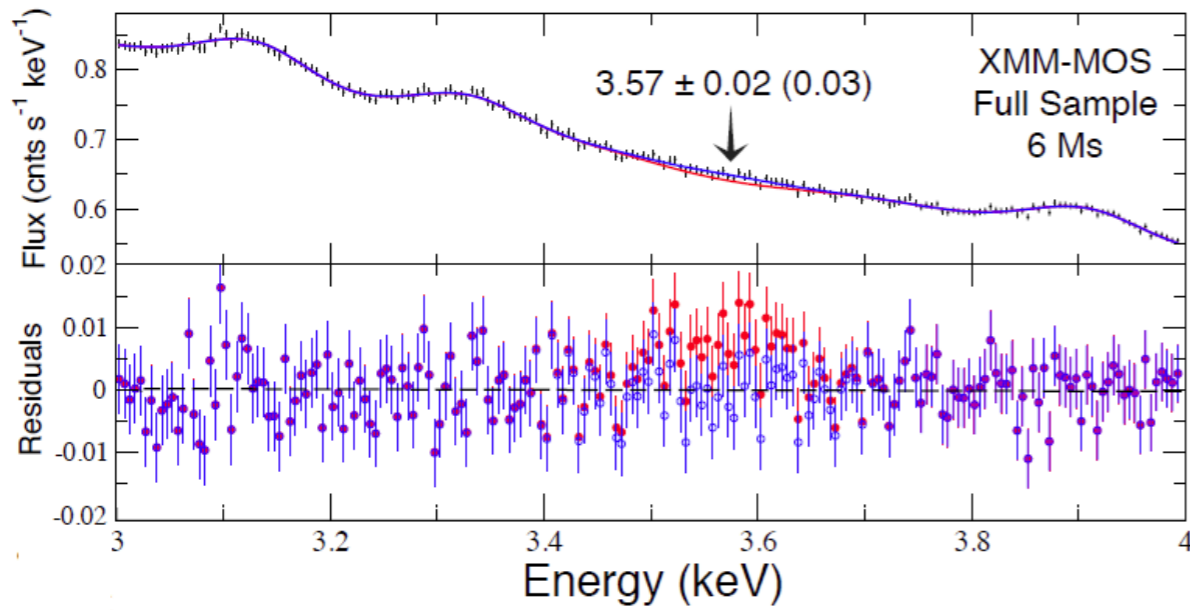
non-relativistic

warm? mixture?  
(eV - keV neutrino)  
↓  
should be sterile



# Recent hints for an unidentified X-ray line signal

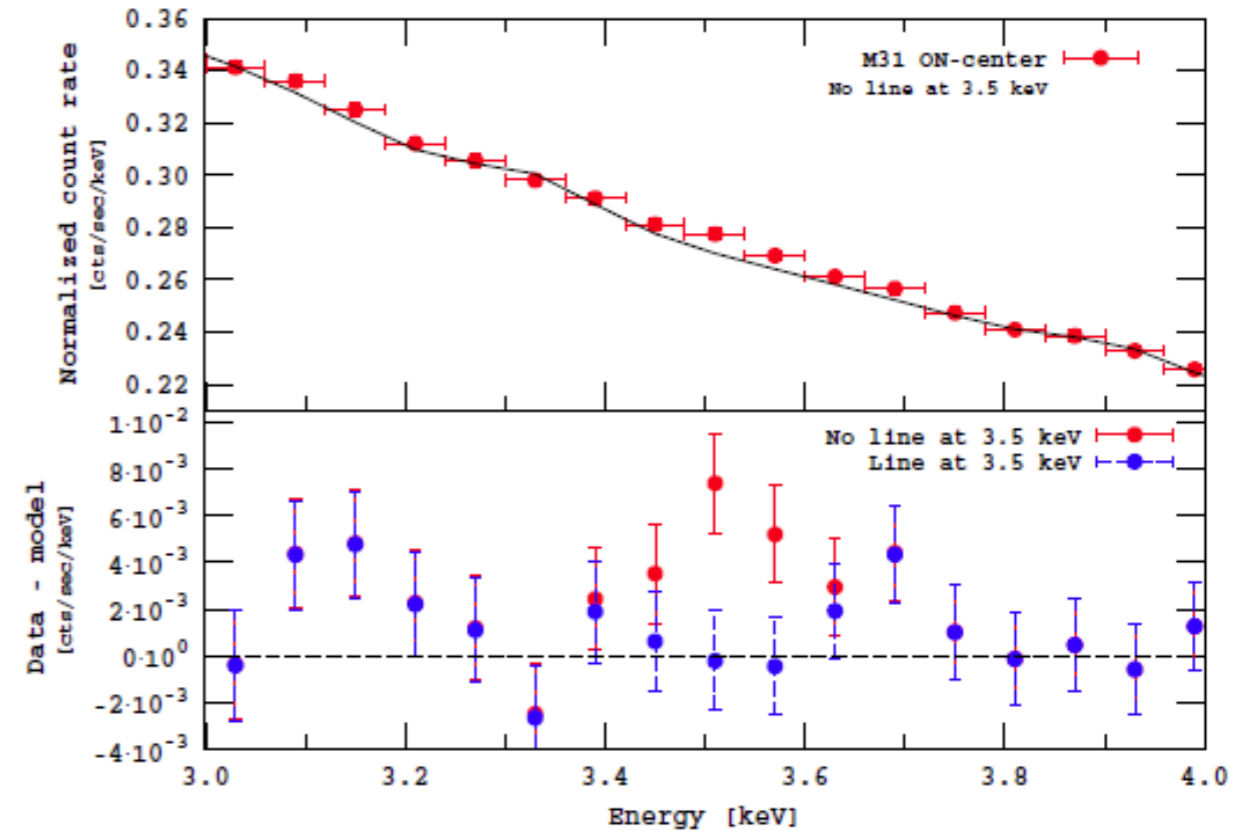
Bulbul et al., 1402.2301



$$m_{\text{DM}} = 7.1 \text{ keV}$$

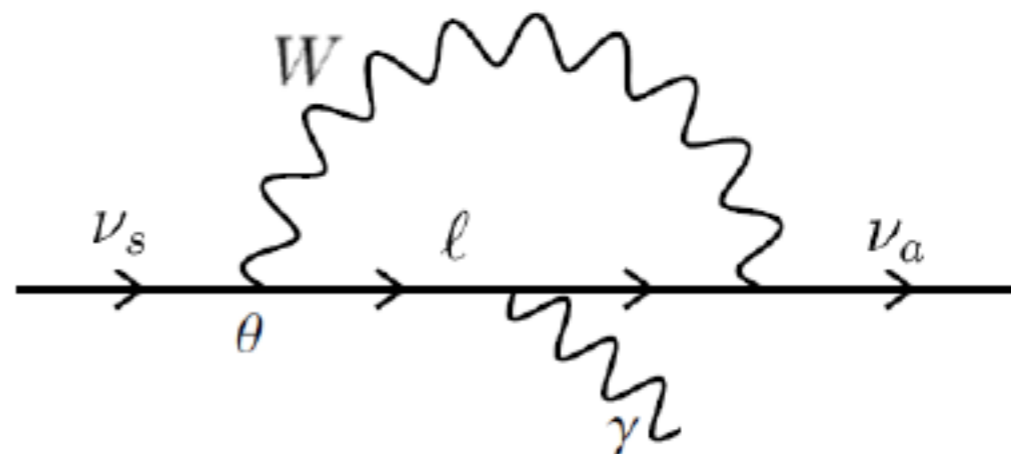
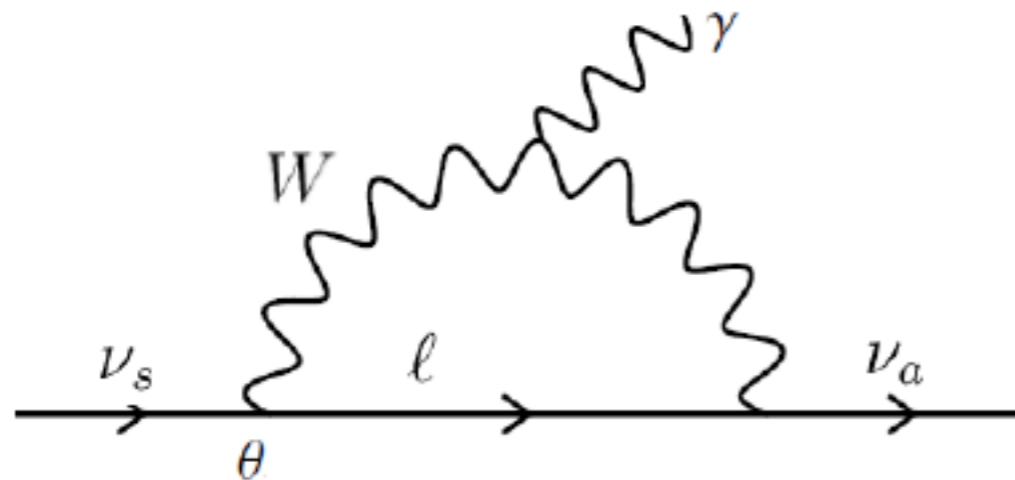
$$\sin^2 2\theta \approx 7 \times 10^{-11}$$

Boyarsky et al., 1402.4119



$$m_{\text{DM}} = 7.06 \pm 0.05 \text{ keV}$$

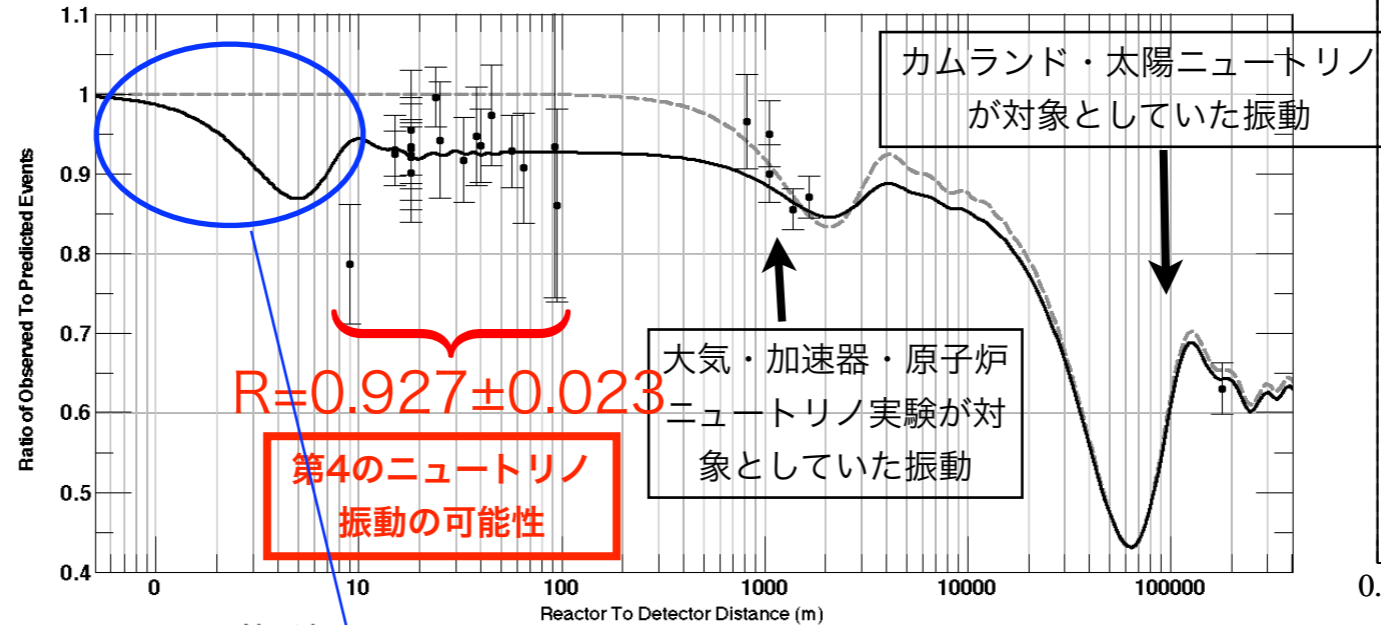
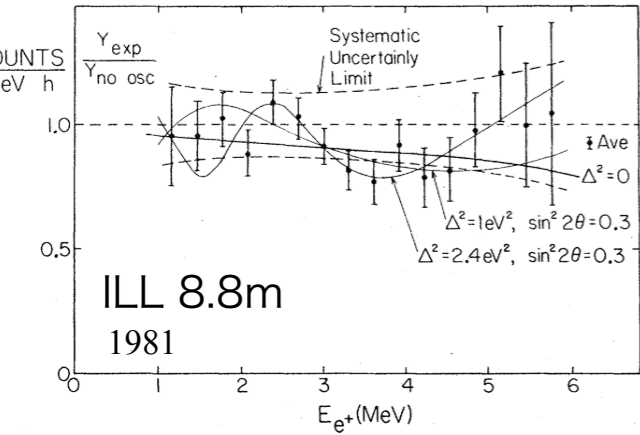
$$\sin^2 2\theta = (2.2 - 20) \times 10^{-11}$$



# 第4世代ニュートリノ

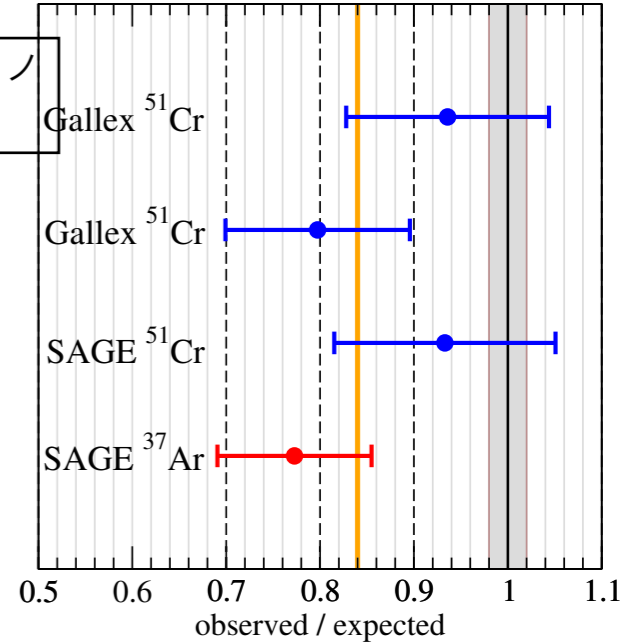
## 過去の原子炉反ニュートリノ測定結果

至近距離でスペクトルの歪み？



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

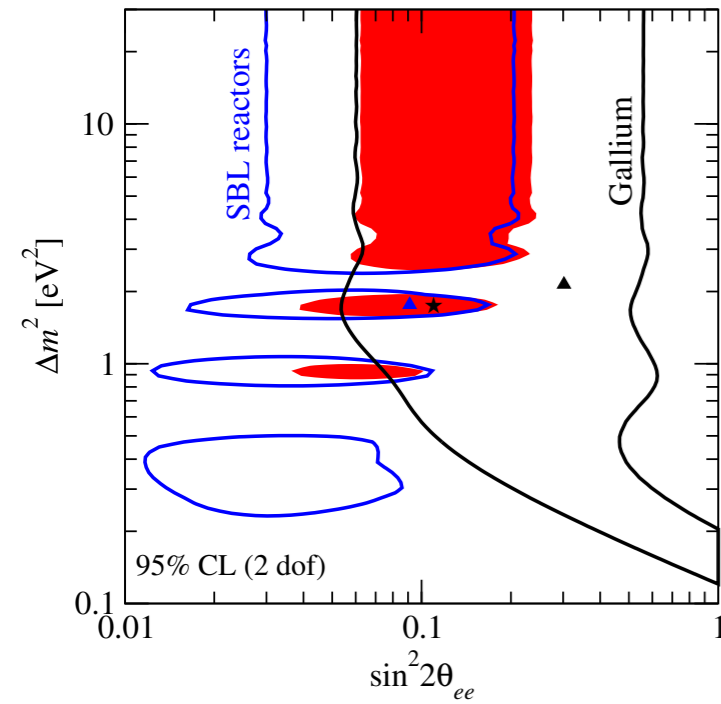
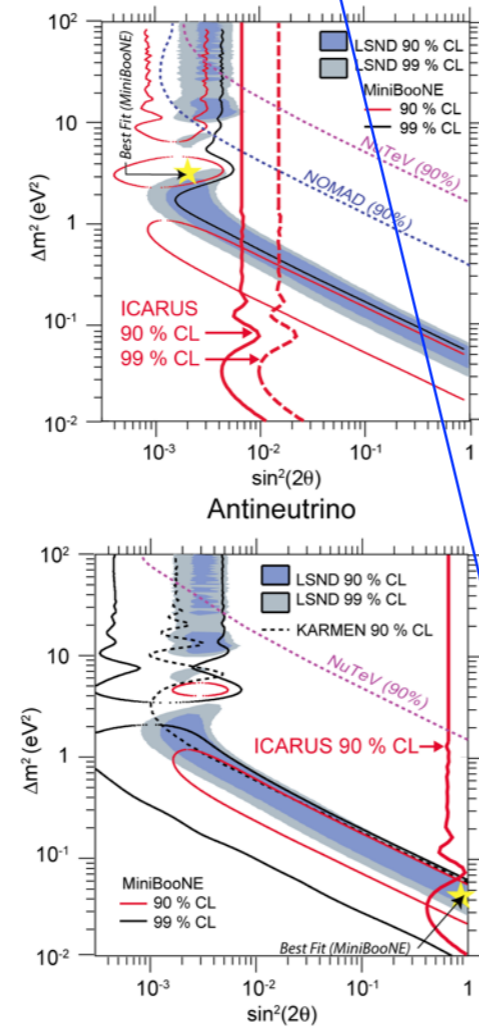


## ステライルニュートリノのヒント

	ニュートリノ源	対象	有意さ
原子炉	$\beta$ 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	$\sim 2\sigma$

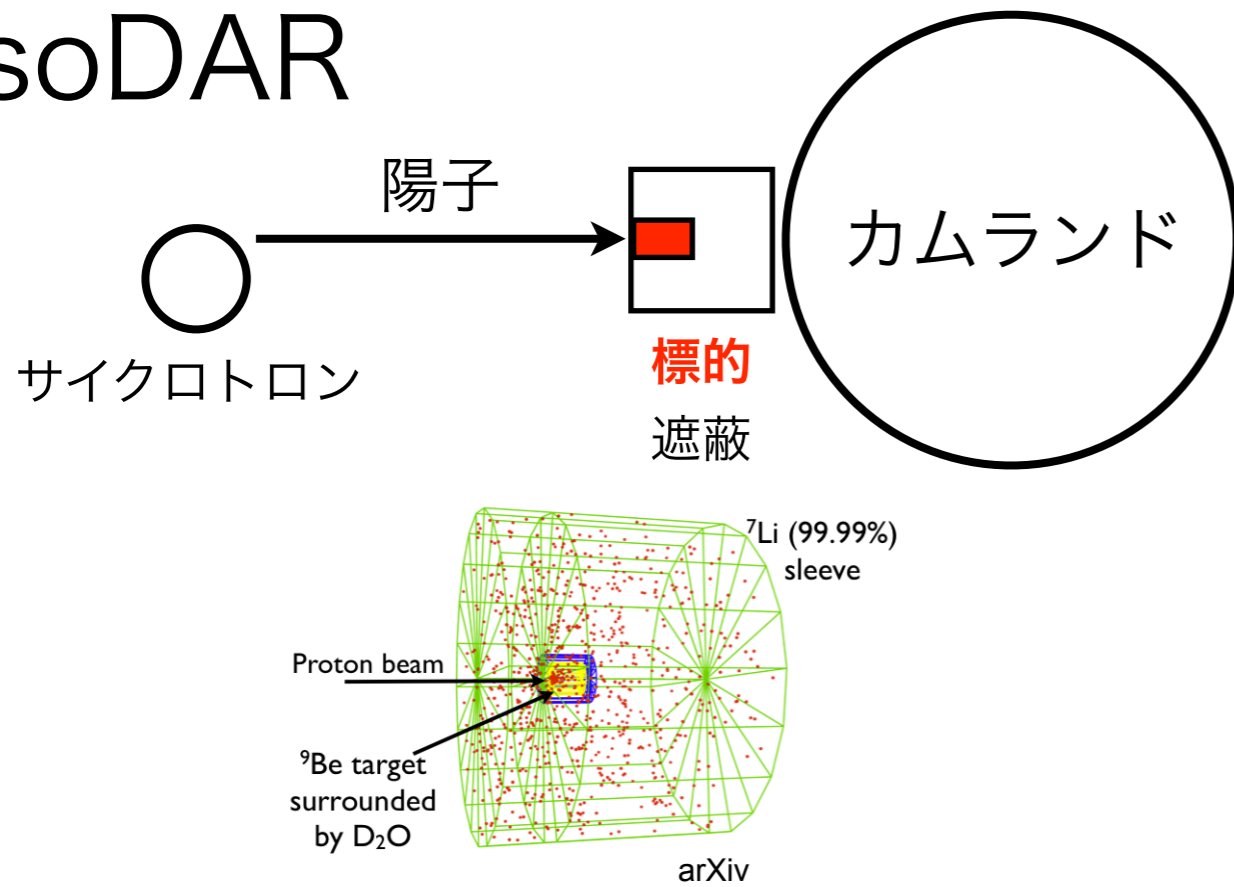
超短距離での実験が重要、

**カムランド内に反ニュートリノ源を設置！**

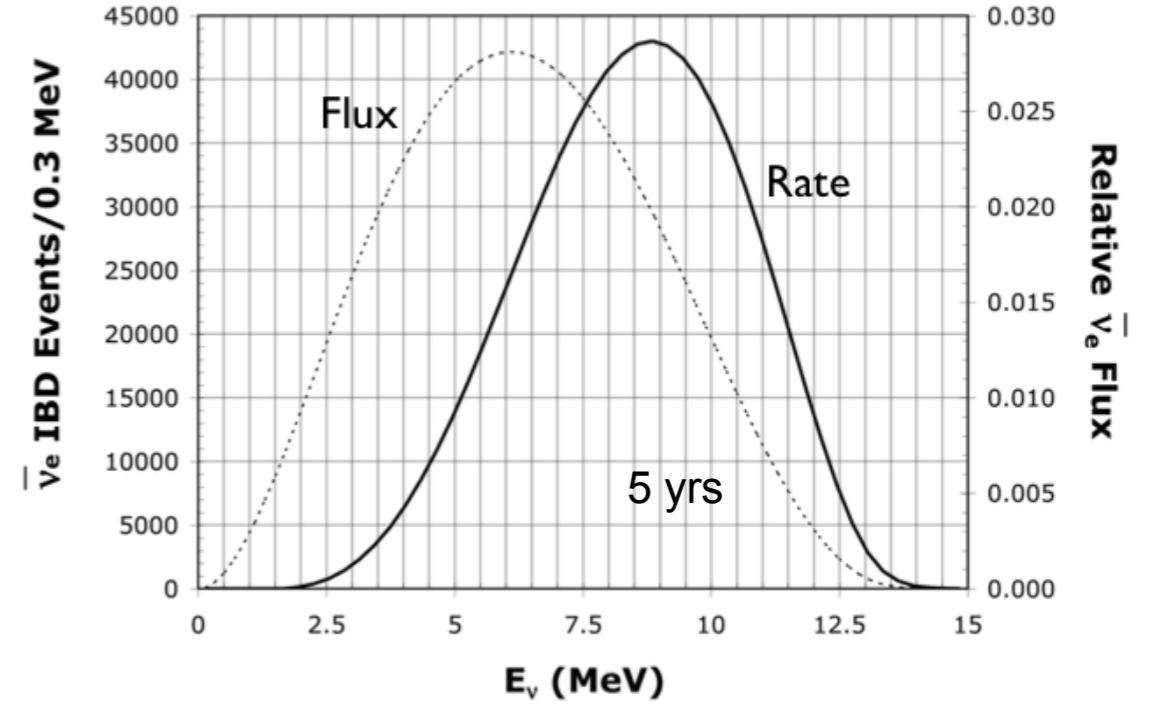


1 eV程度のステライルニュートリノのヒント

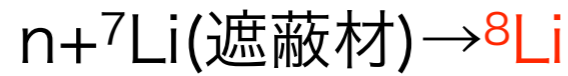
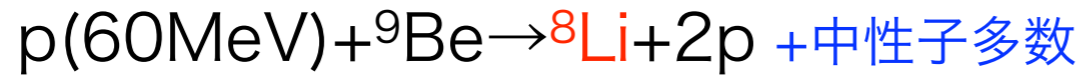
# IsoDAR



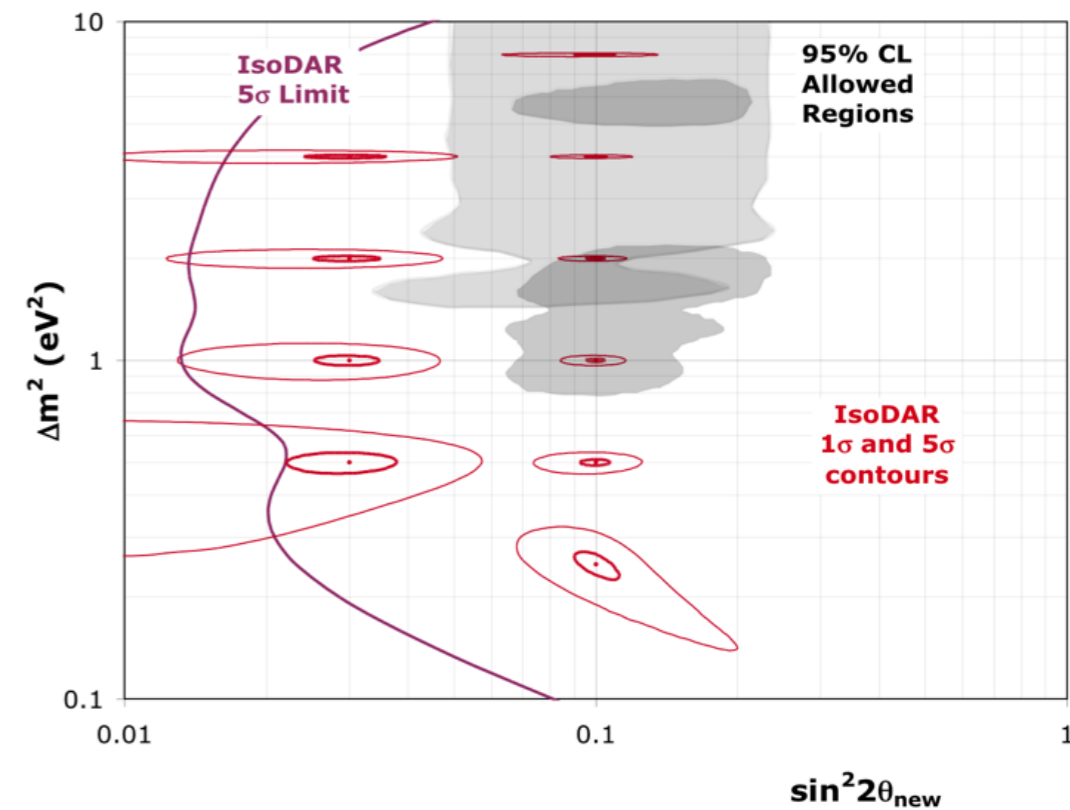
arXiv:1205.4419



16万事象/年

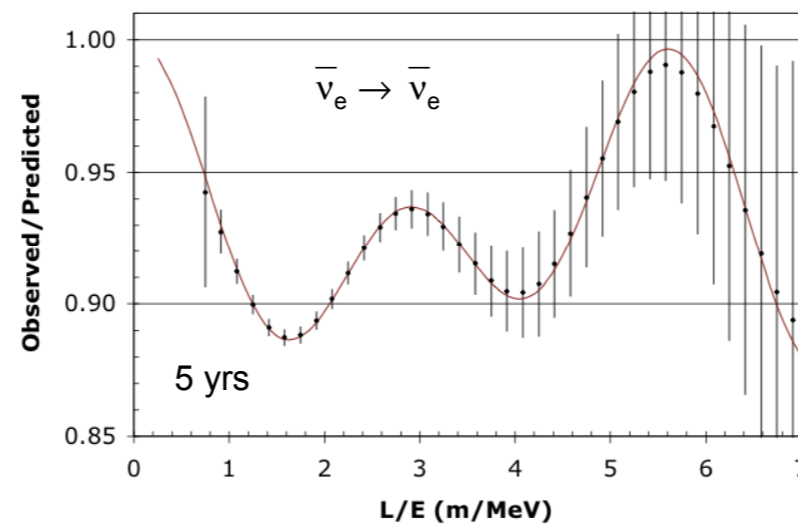
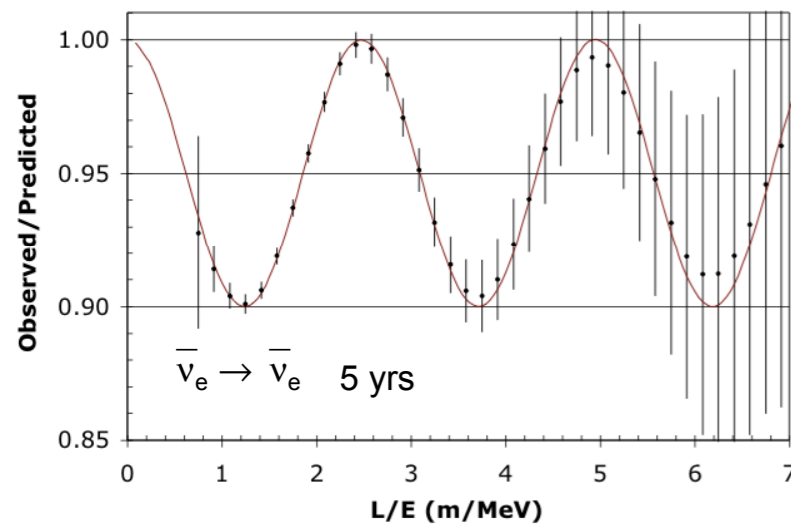


IsoDAR abilities (5 years @ KamLAND)



(3+1) Model with  $\Delta m^2 = 1.0 \text{ eV}^2$  and  $\sin^2 2\theta = 0.1$

(3+2) with Kopp/Maltoni/Schwetz Parameters

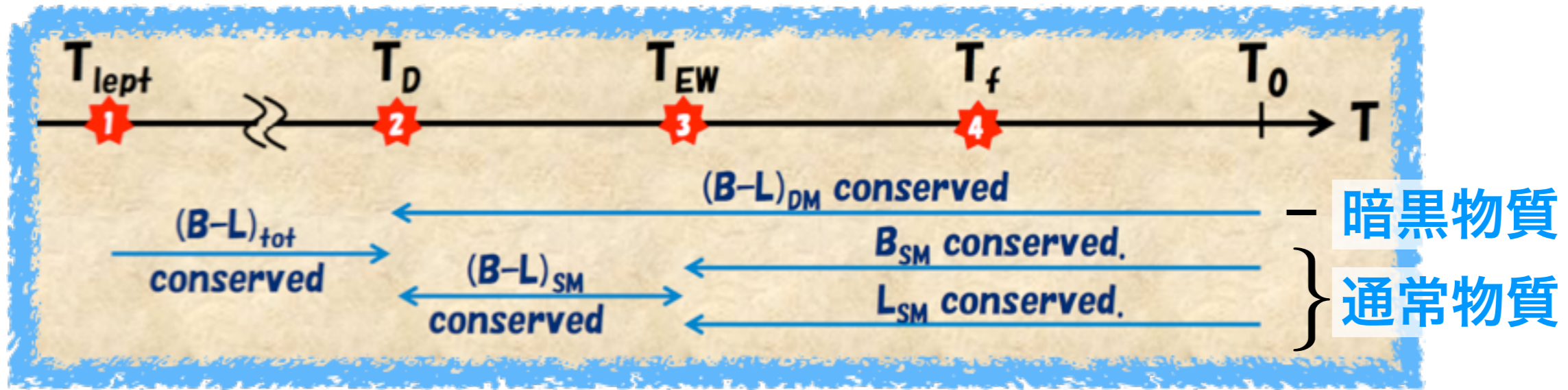


第4世代ニュートリノ振動の精密測定

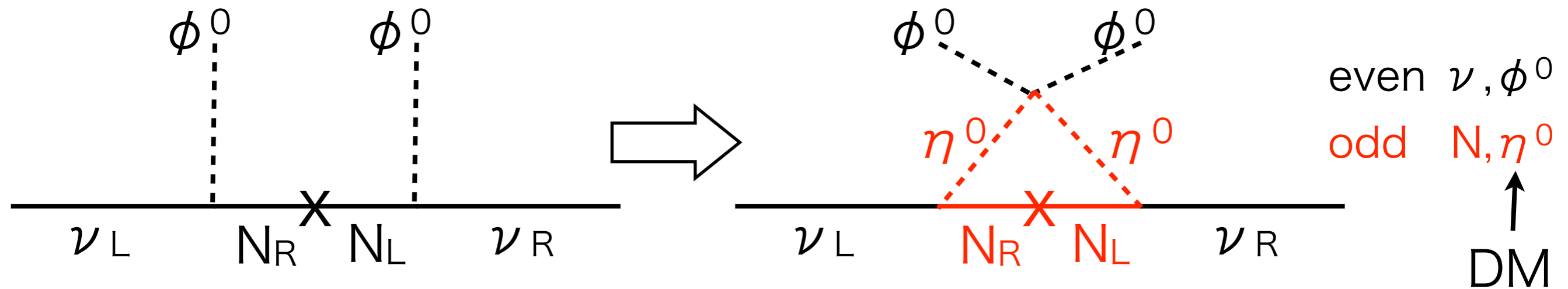
# ニュートリノ vs 暗黒物質

暗黒物質生成に右巻きニュートリノが関係しているかも。

## Asymmetric Dark Matter (Leptogenesisでの暗黒物質)



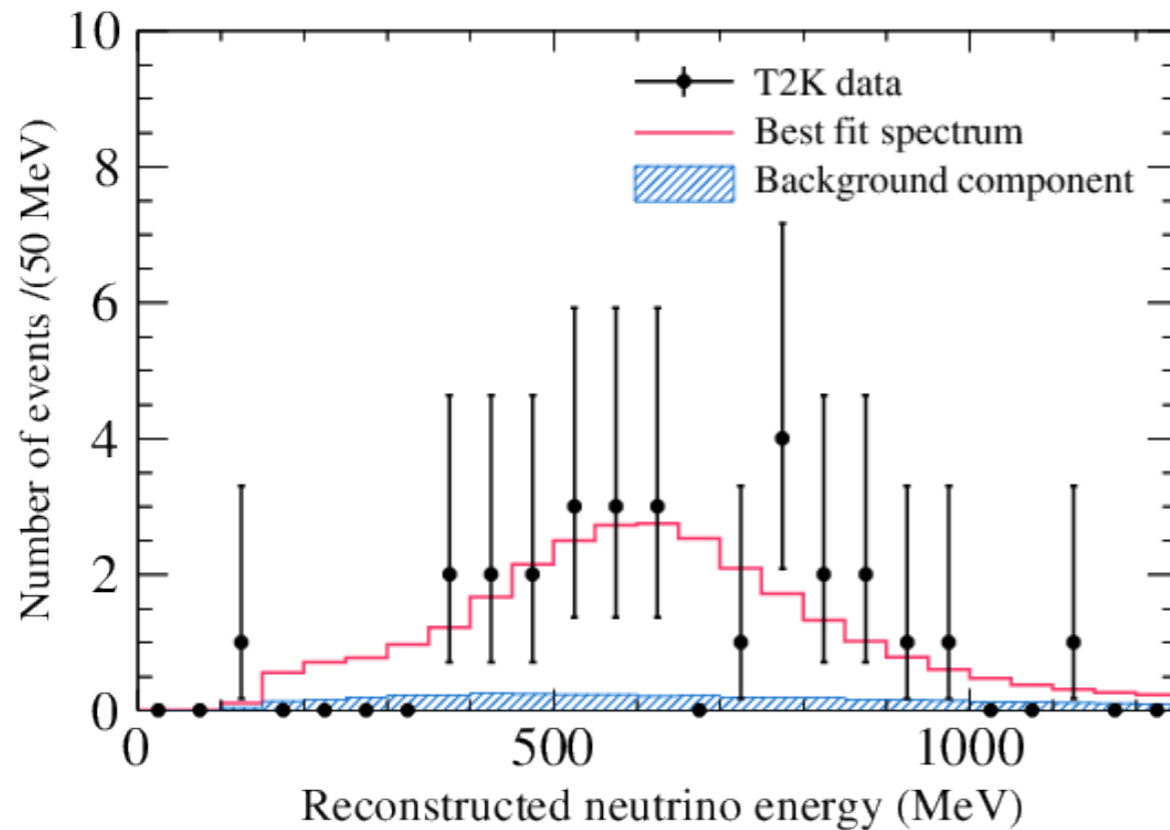
## 輻射シーソー模型



# CP位相、質量階層構造

Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014)

## T2K observation of $\nu_e$ Appearance



$4.92 \pm 0.55$  events expected background

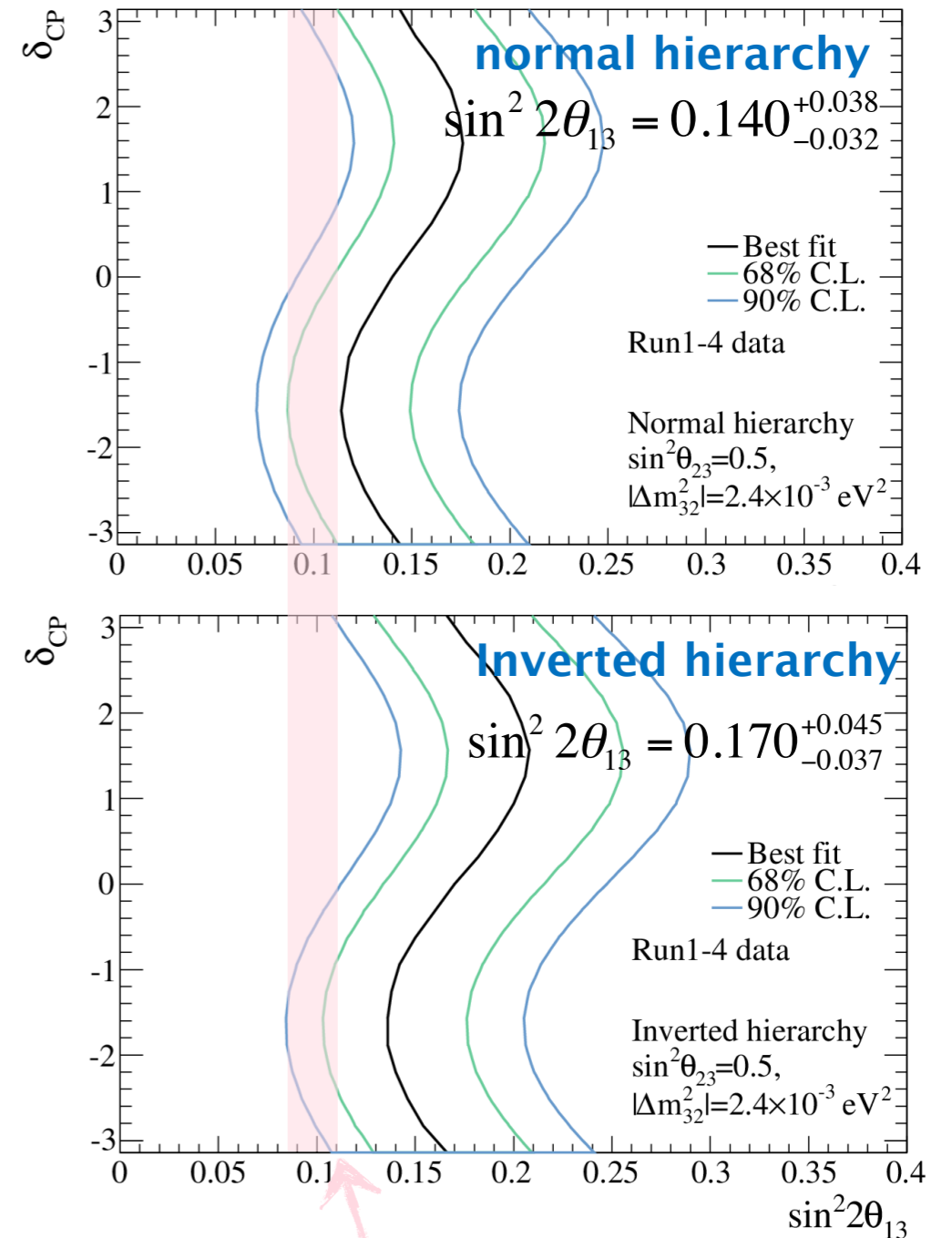
**28 events** observed

21.6 events expected @  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$

$\delta_{CP} = 0, \sin^2 \theta_{23} = 0.5$

**7.3  $\sigma$**  significance for non-zero  $\theta_{13}$

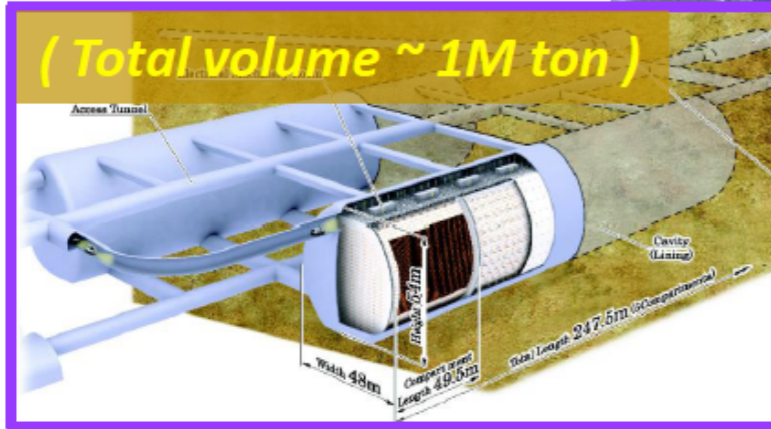
First ever observation ( $>5\sigma$ ) of an explicit  $\nu$  appearance channel



Reactor PDG2012,  $1\sigma$

# Hyper-Kamiokande with J-PARC neutrino beam

## Hyper-Kamiokande



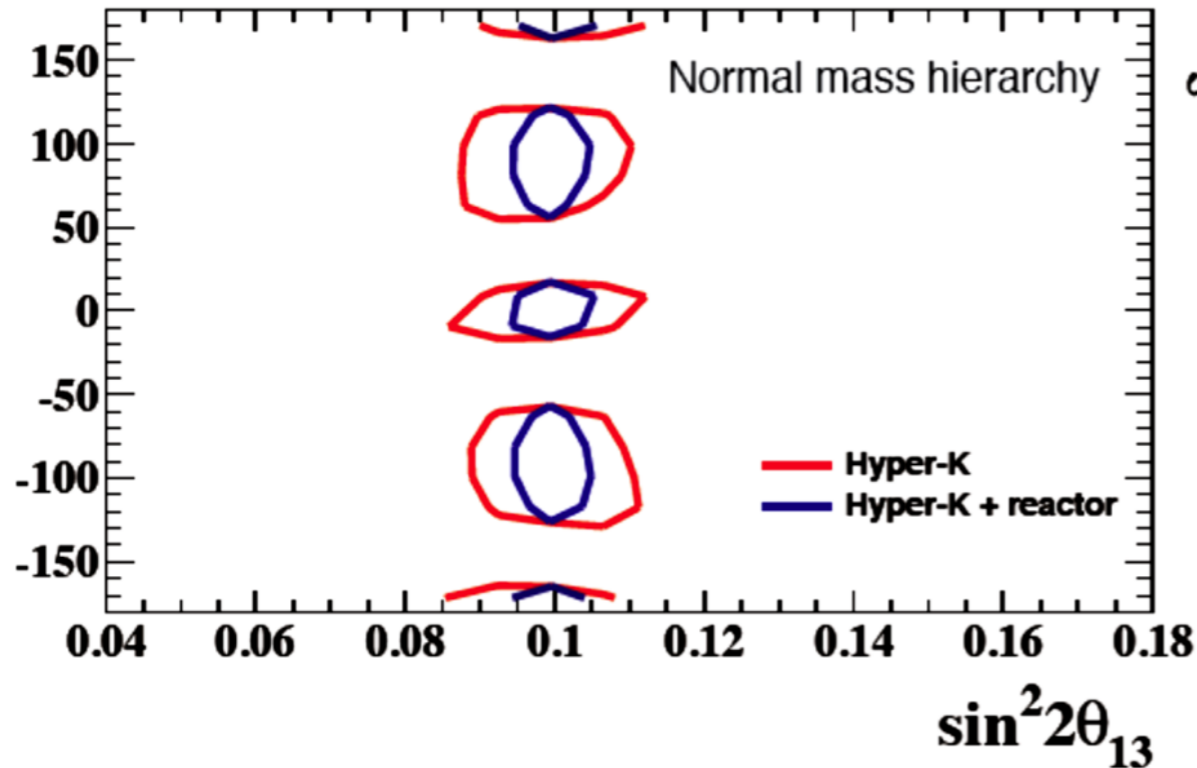
J-PARC Main Ring  
Neutrino beamline  
( KEK – JAEA )



750 kW

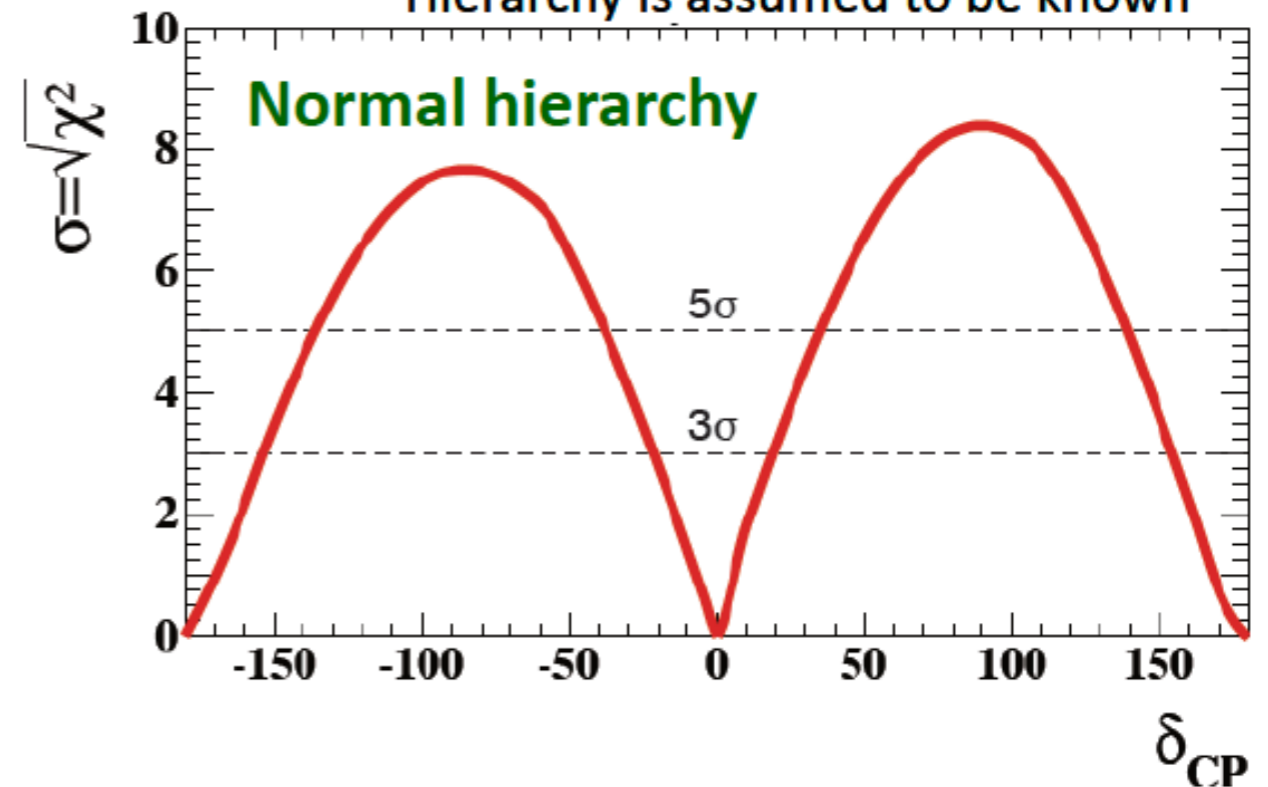
FV 560 kt  
~25× SK

CP measurement  
 $7.5 \times 10^7$  MW sec  $\nu : \text{anti-}\nu = 1:3$



sensitivity  
(exclusion of  $\sin\delta=0$ )

Hierarchy is assumed to be known

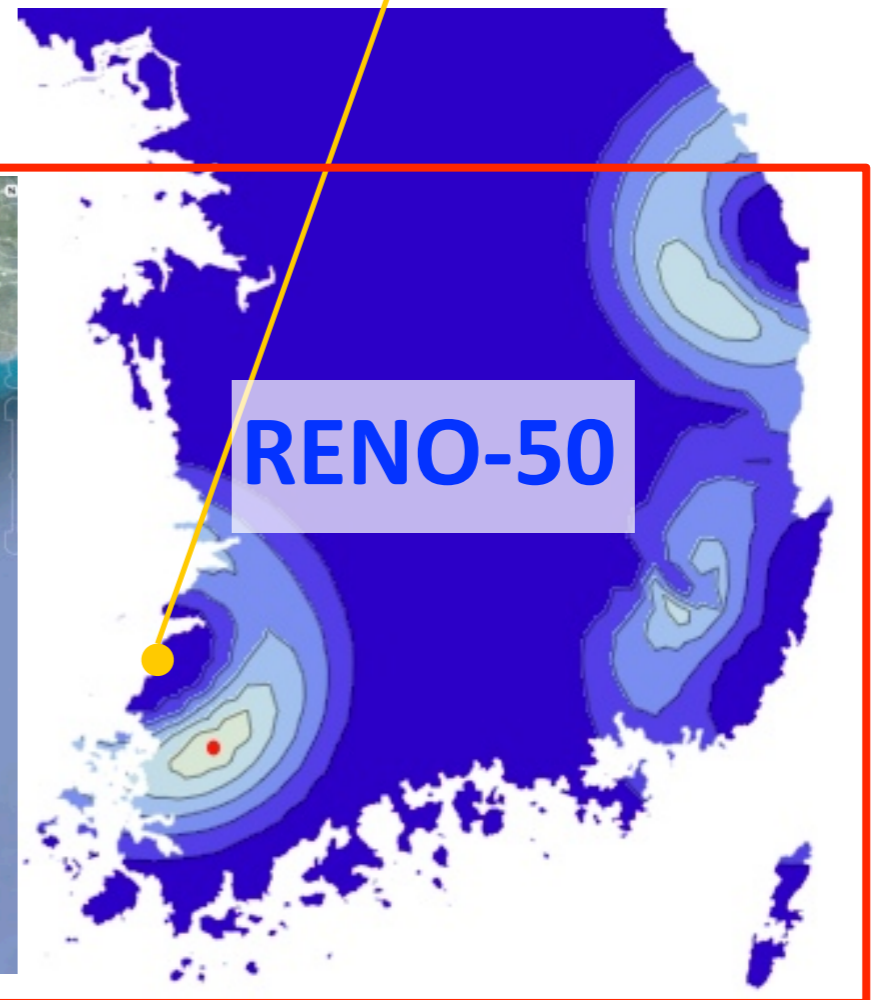


# $\theta_{13}$ companies



Mass Hierarchy

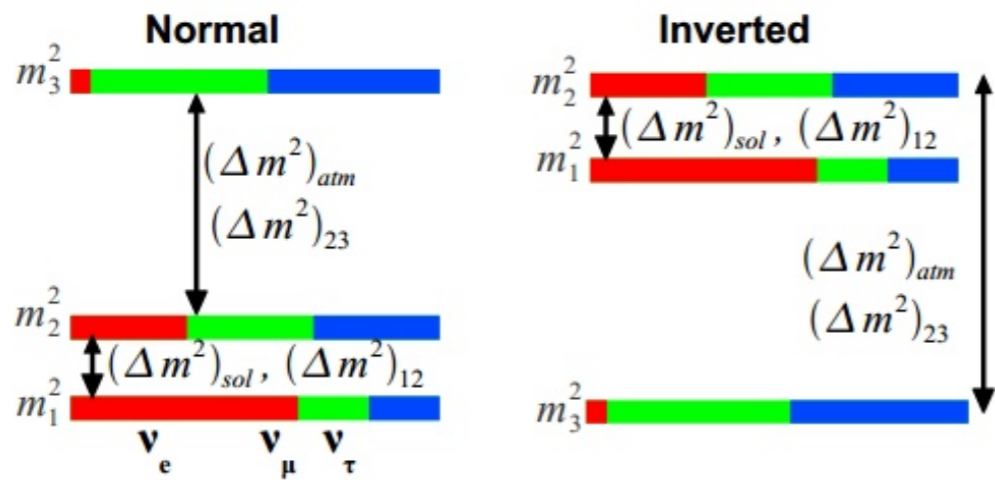
~60km



20ktonLS ~300M\$

to start in 2020

18ktonLS ~100M\$

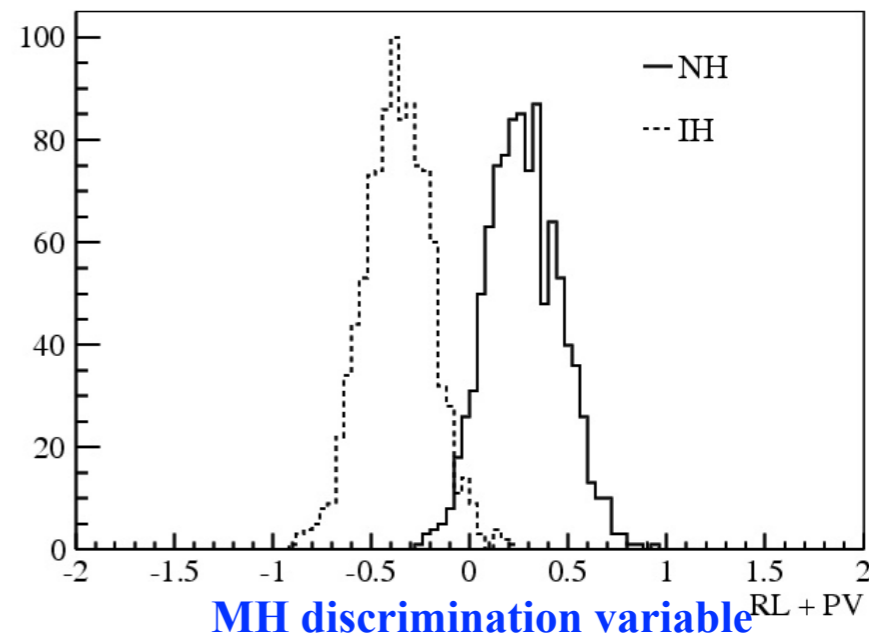
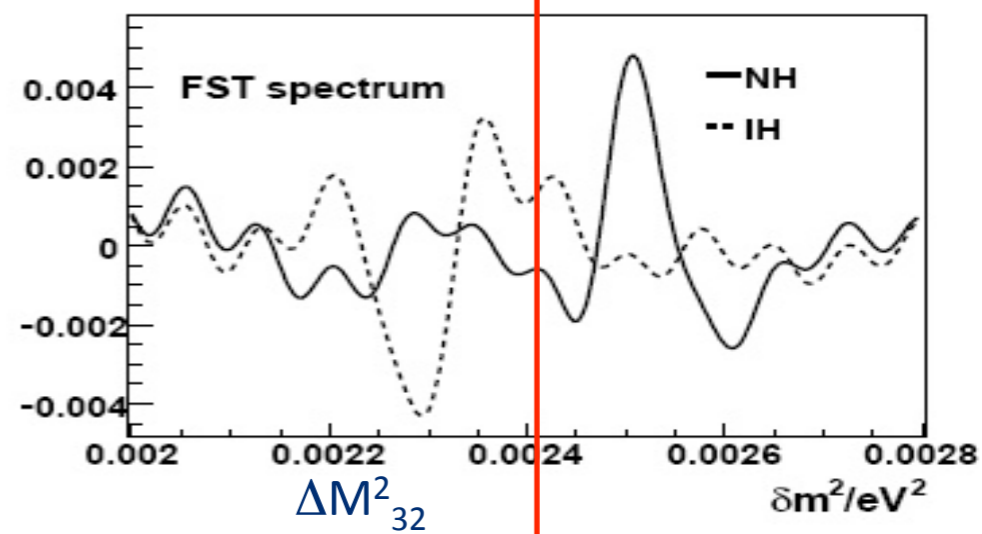
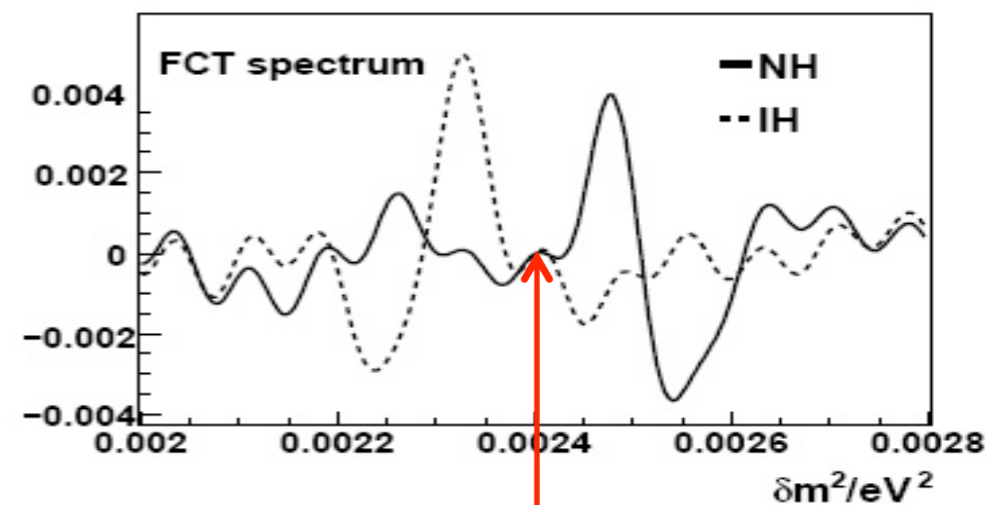
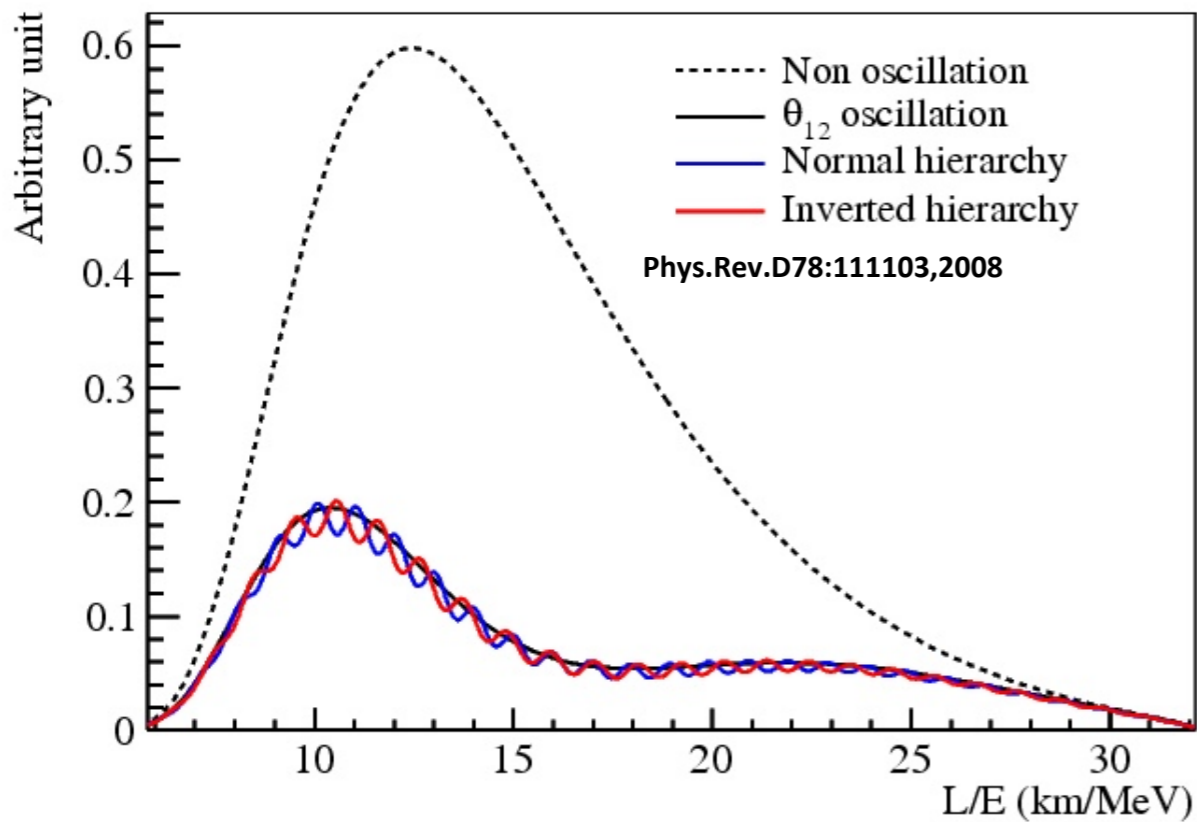


$$P_{ee}(L/E) = 1 - P_{21} - P_{31} - P_{32}$$

$$P_{21} = \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta_{21})$$

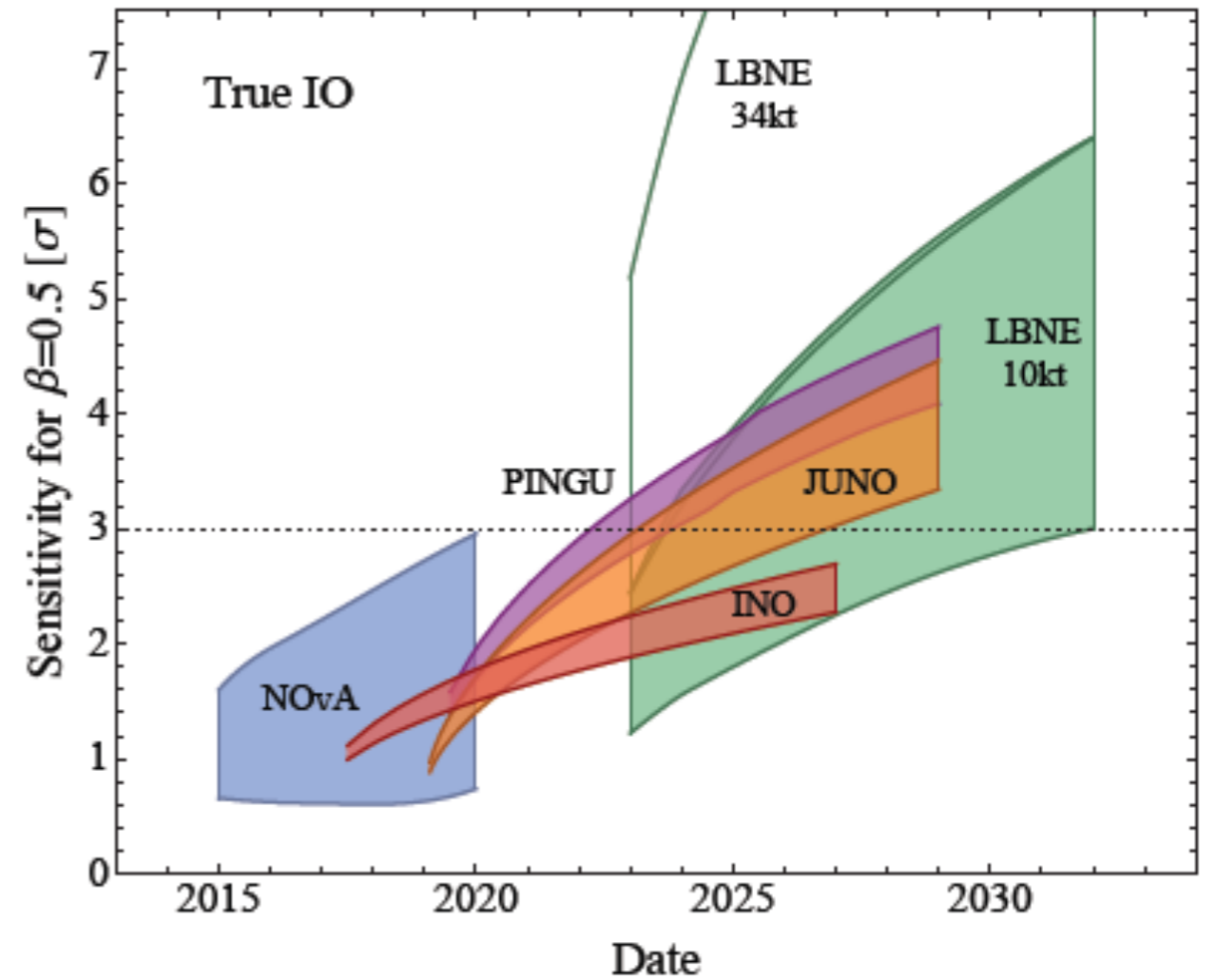
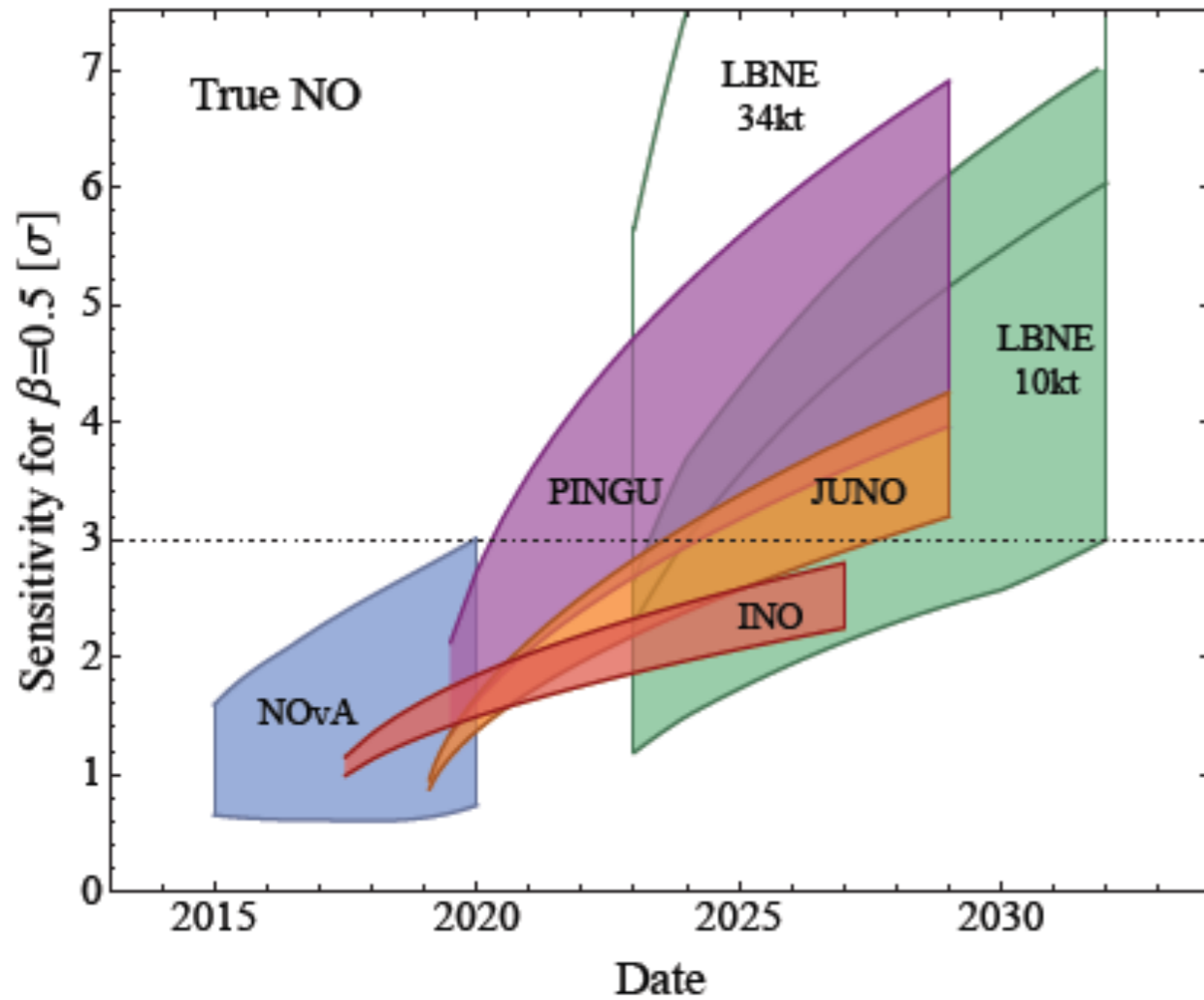
$$P_{31} = \cos^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{31})$$

$$P_{32} = \sin^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{32})$$



L. Zhan et al, PRD78:111103,2008; PRD79:073007,2009





Measuring MH with reactors is **Competitive** in schedule and **Complementary** in physics.

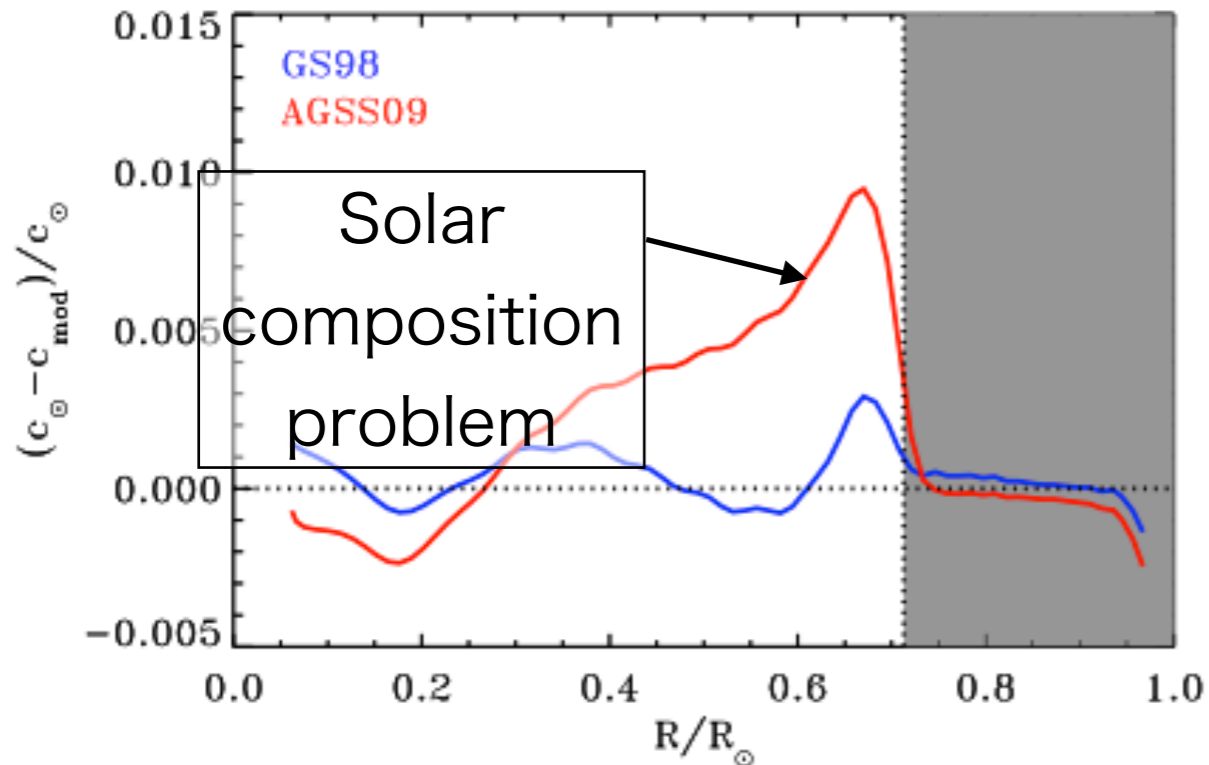
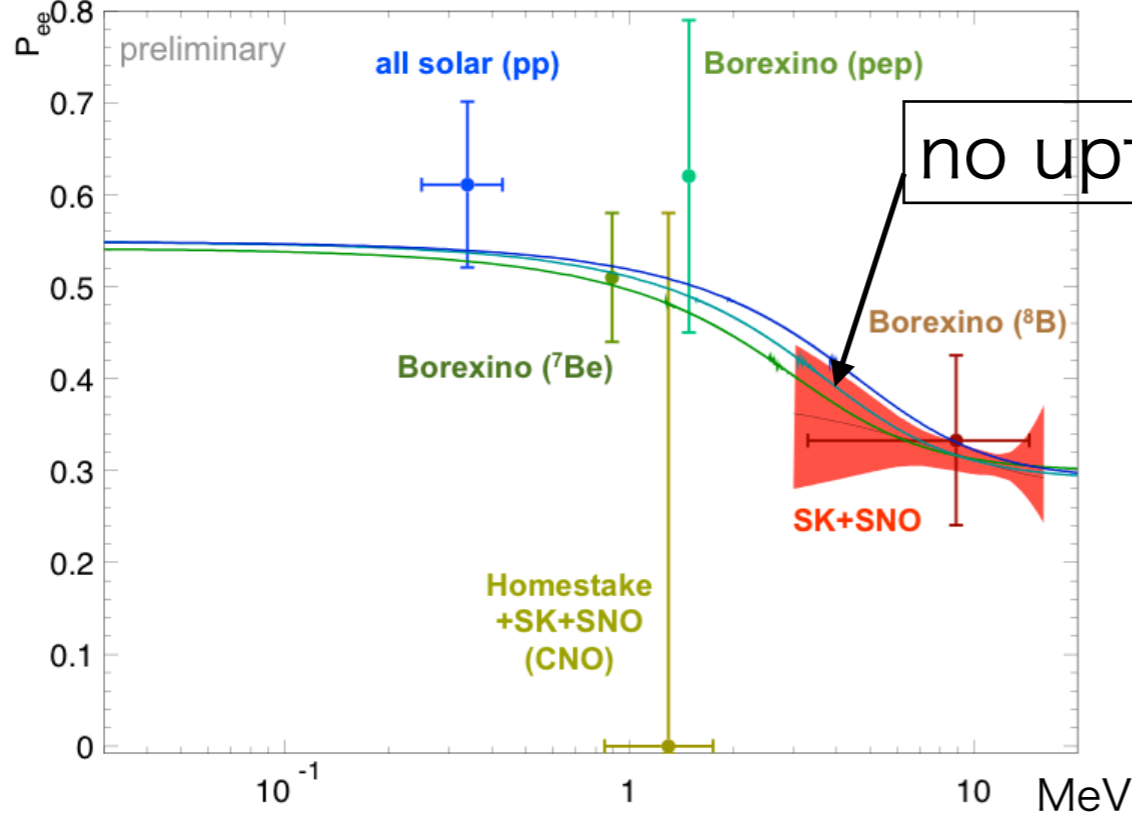
- independent of the unknown CP phase and  $\theta_{23}$

Other rich physics

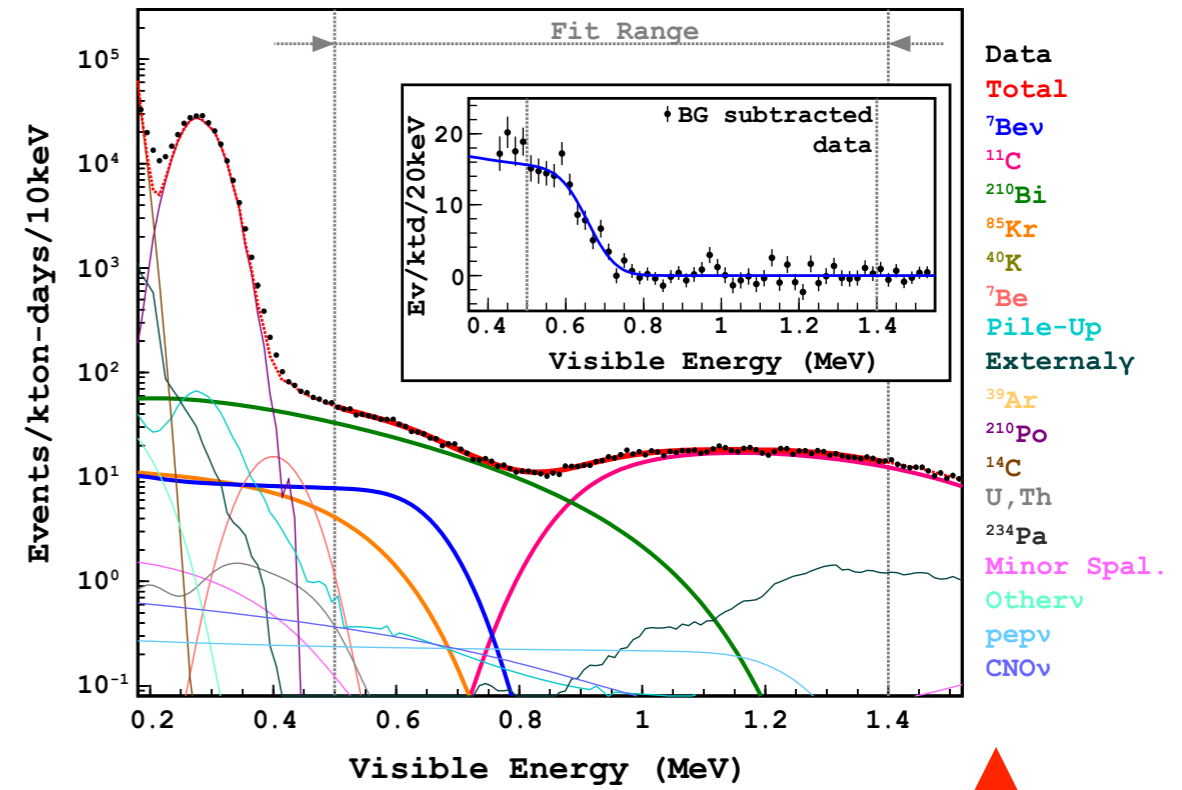
- precise  $\Delta m_{31}^2$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{21}^2$ , geo, solar, supernova, ..., neutrinos

# 道具としてのニュートリノ

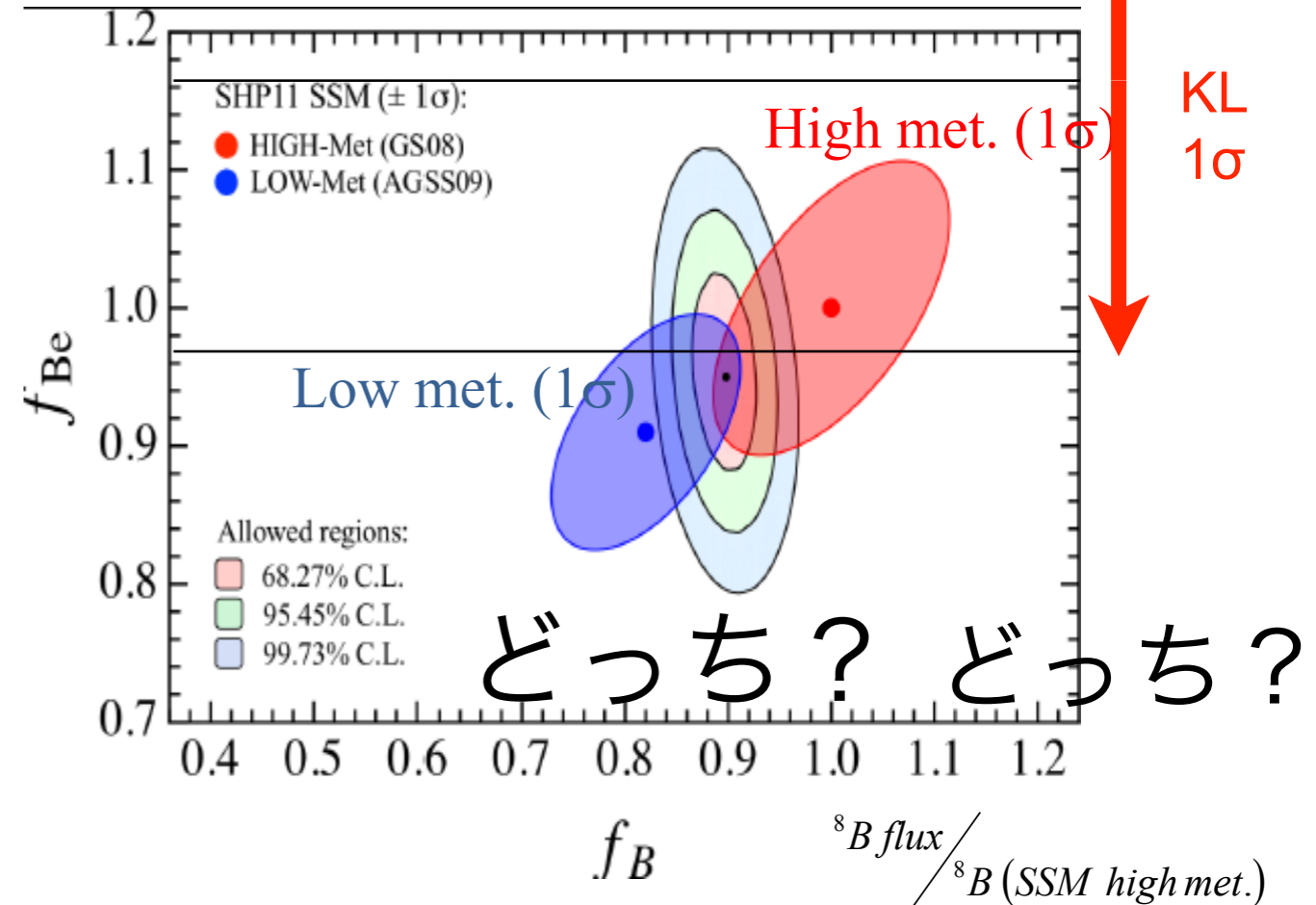
## 太陽ニュートリノ



KL  $^7\text{Be}$  arXiv:1405.6190

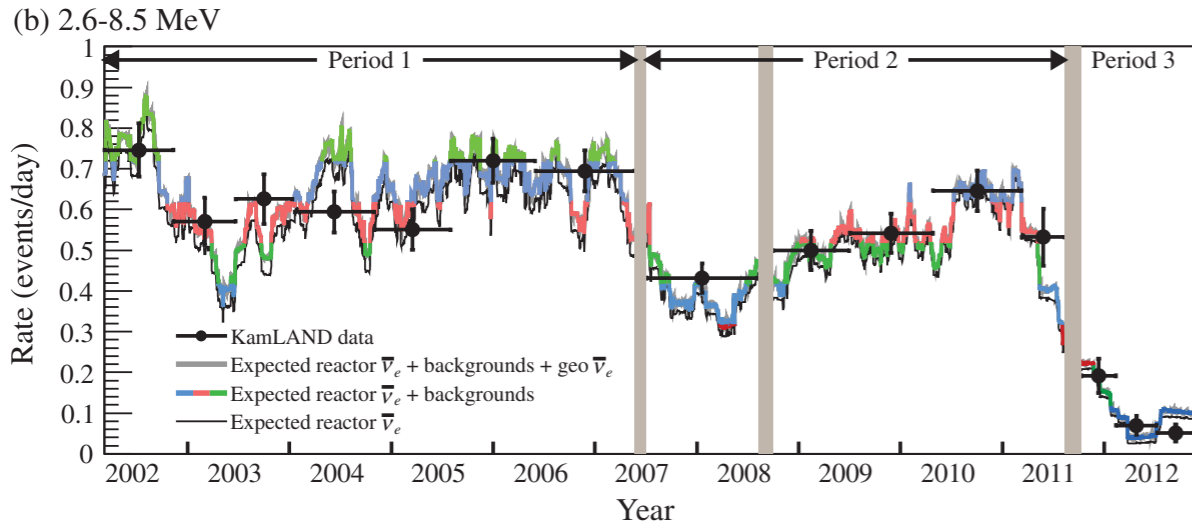


$^7\text{Be flux} / ^7\text{Be (SSM high met.)}$

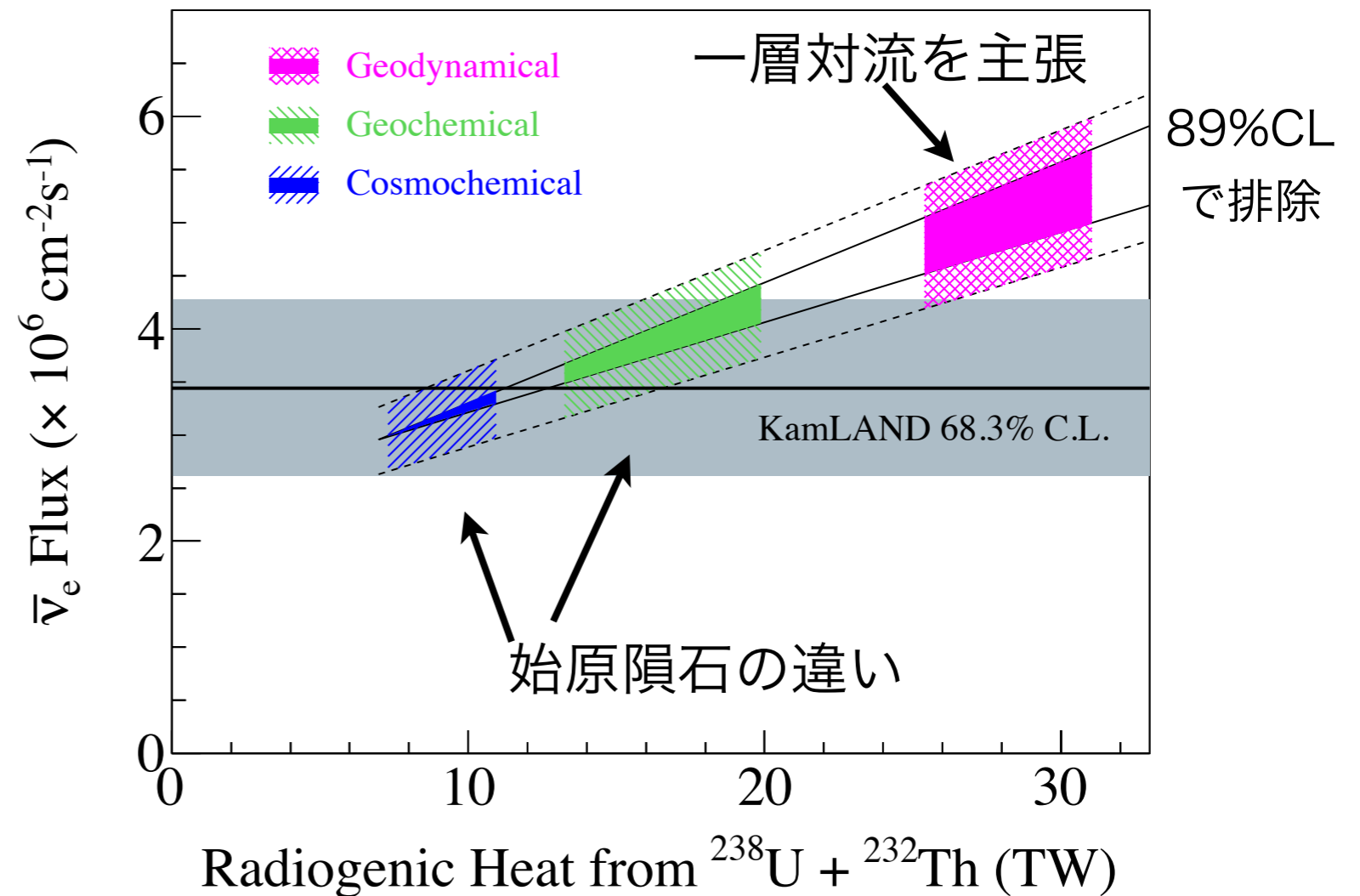
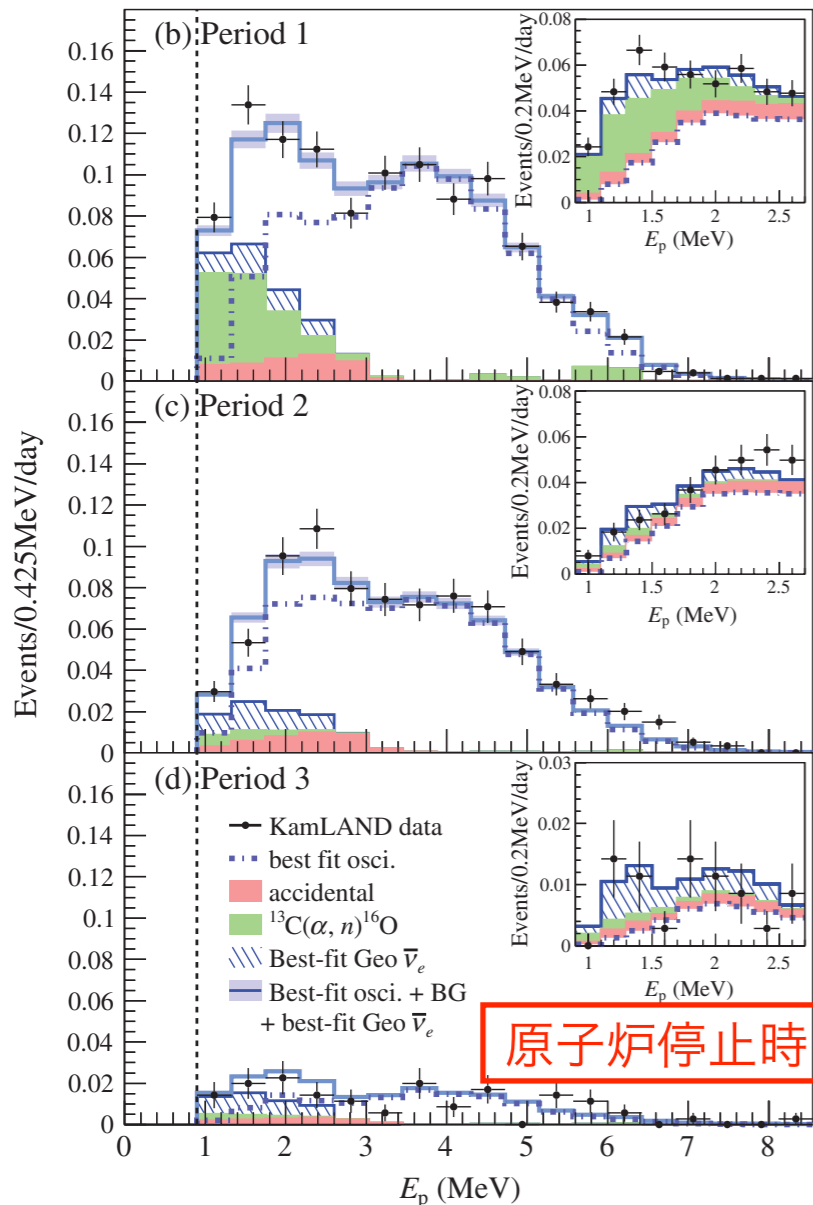


# 道具としてのニュートリノ

## 地球ニュートリノ Phys. Rev. D88, 03301 (2013)



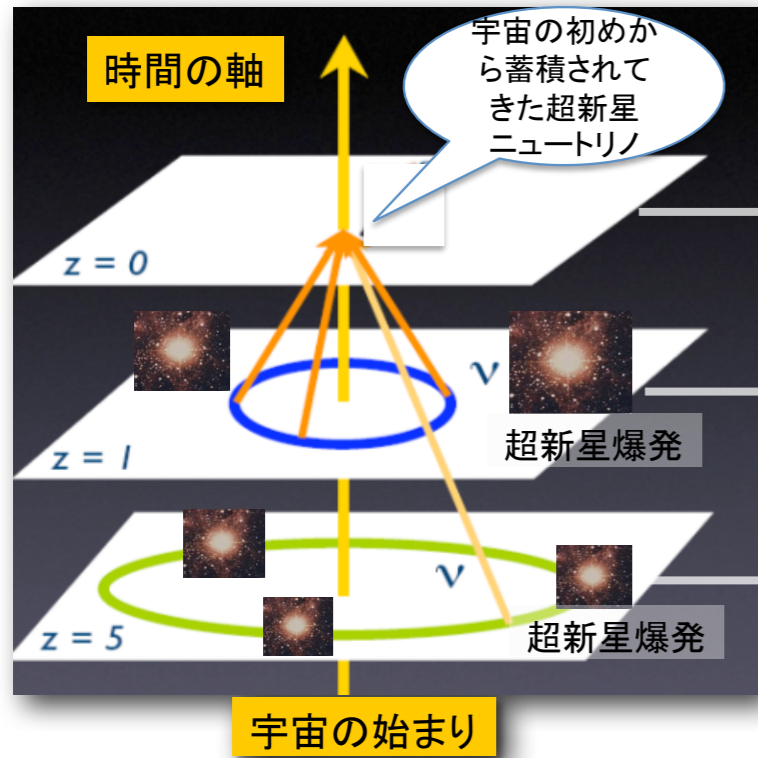
原子炉運転との完璧な相関で 原子炉  
 ニュートリノ領域でBGが正しく理解  
 できていることを確認



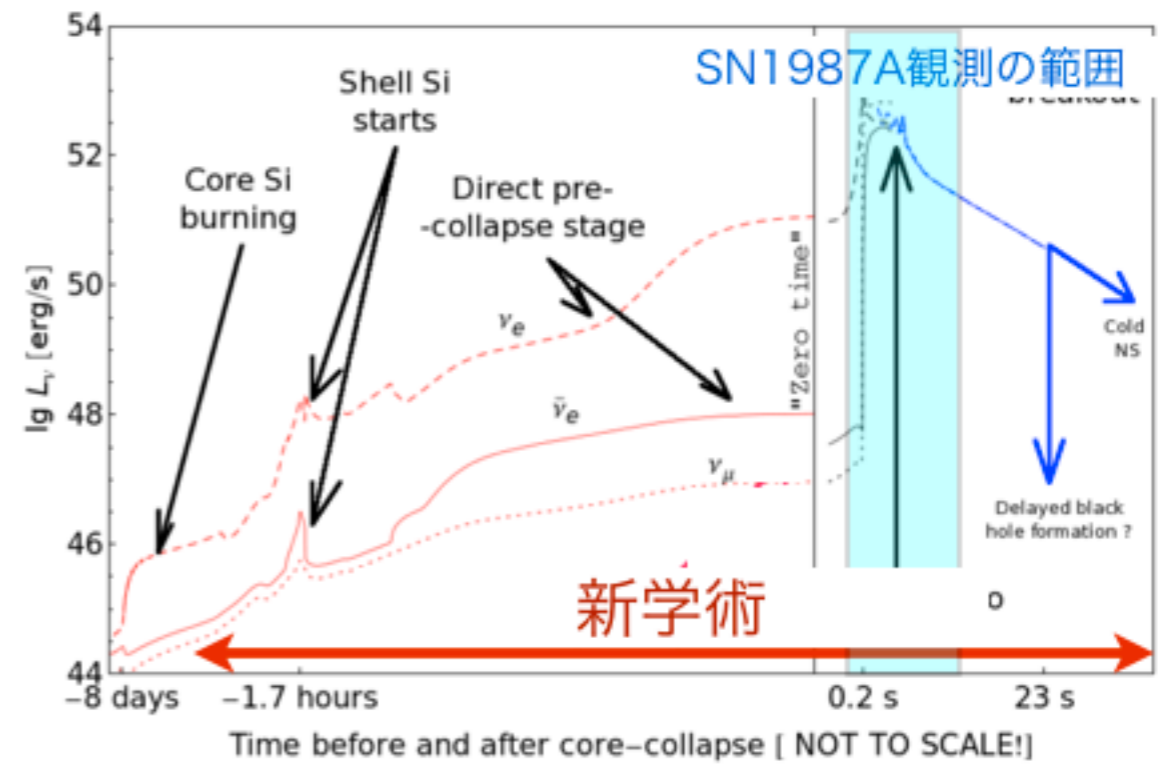
# 道具としてのニュートリノ

## 超新星ニュートリノ

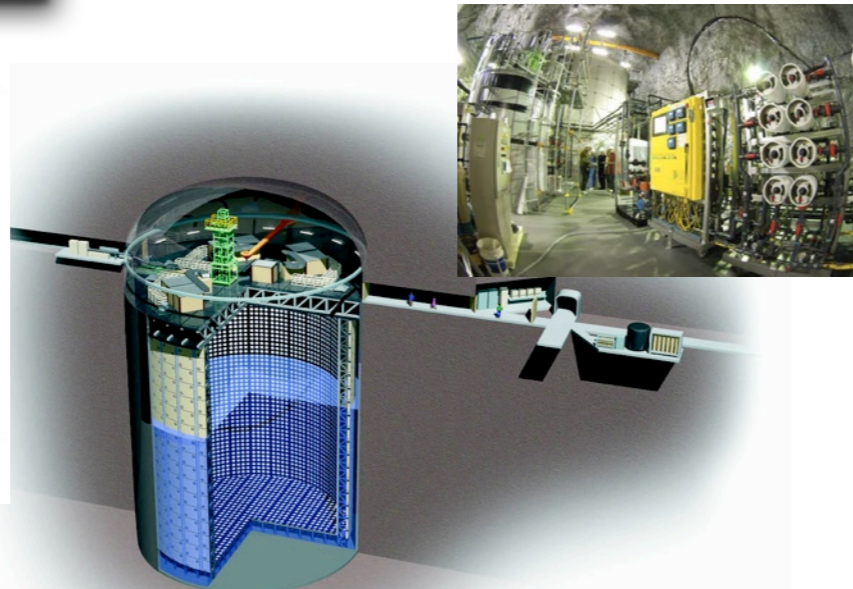
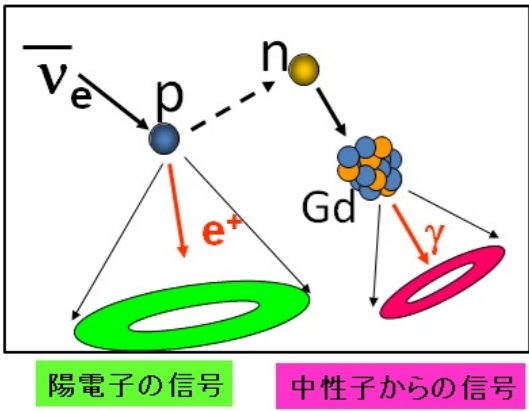
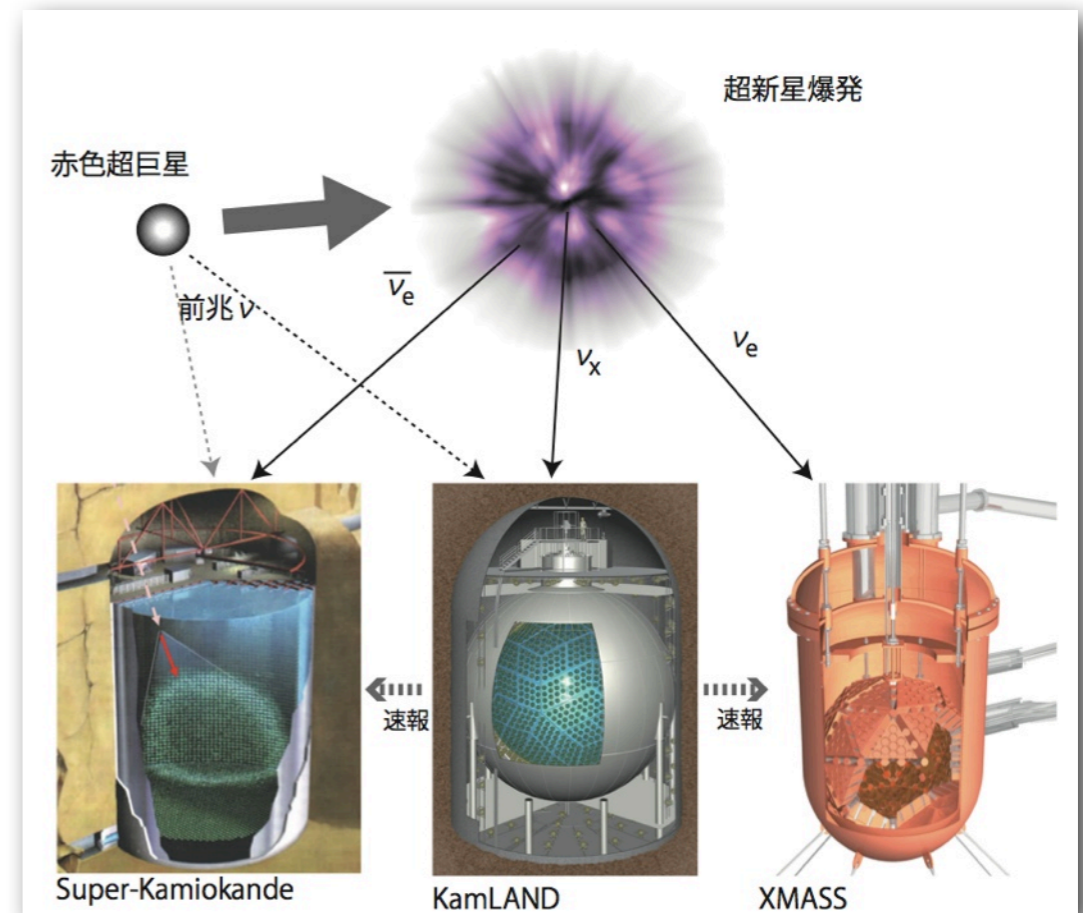
### 超新星背景ニュートリノ



## 超新星前兆ニュートリノ



ベテルギウス、アンタレス、帆座ガンマなど近傍天体



特別推進

SK→GADZOOKS!

新学術 (純化)

75億年→125億年前

標準理論で説明できない

# 宇宙・素粒子の大問題

## 軽いニュートリノ質量

Seesaw

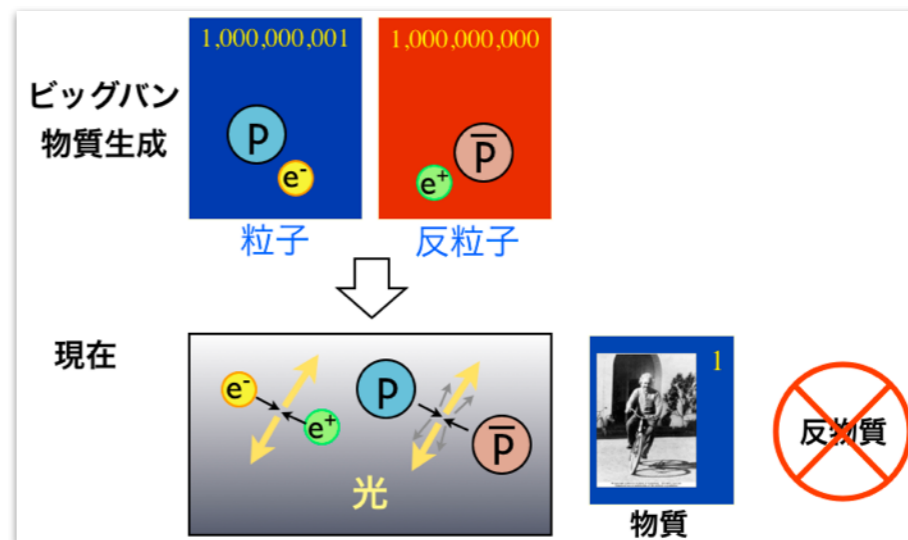
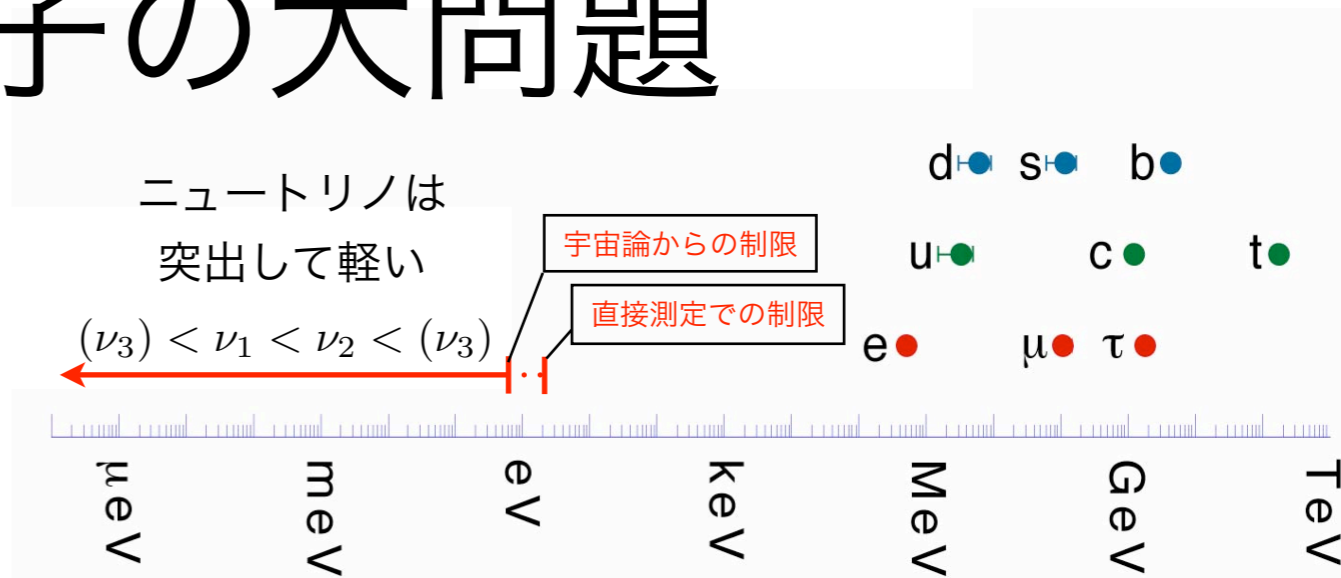
## 宇宙物質優勢

Leptogenesis

## 暗黒物質

## 暗黒エネルギー

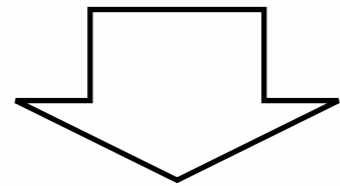
ニュートリノが持ちうる  
**マヨラナ性**と関係  
しているかもしれない。



# マヨラナニュートリノ

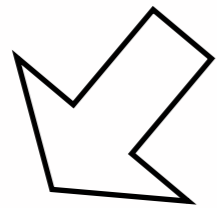
特殊相対性理論  $E^2 = p^2 + m^2$

fermion spin  $\uparrow \downarrow$



Dirac 方程式  $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$

$\psi$  is >4 components spinor (if  $m \neq 0$ )



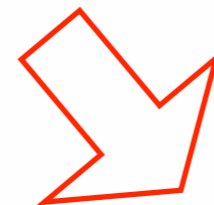
$\nu_L \quad \nu_R \quad \bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R$

somehow, we haven't observed

only light neutrinos

Dirac Neutrino

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



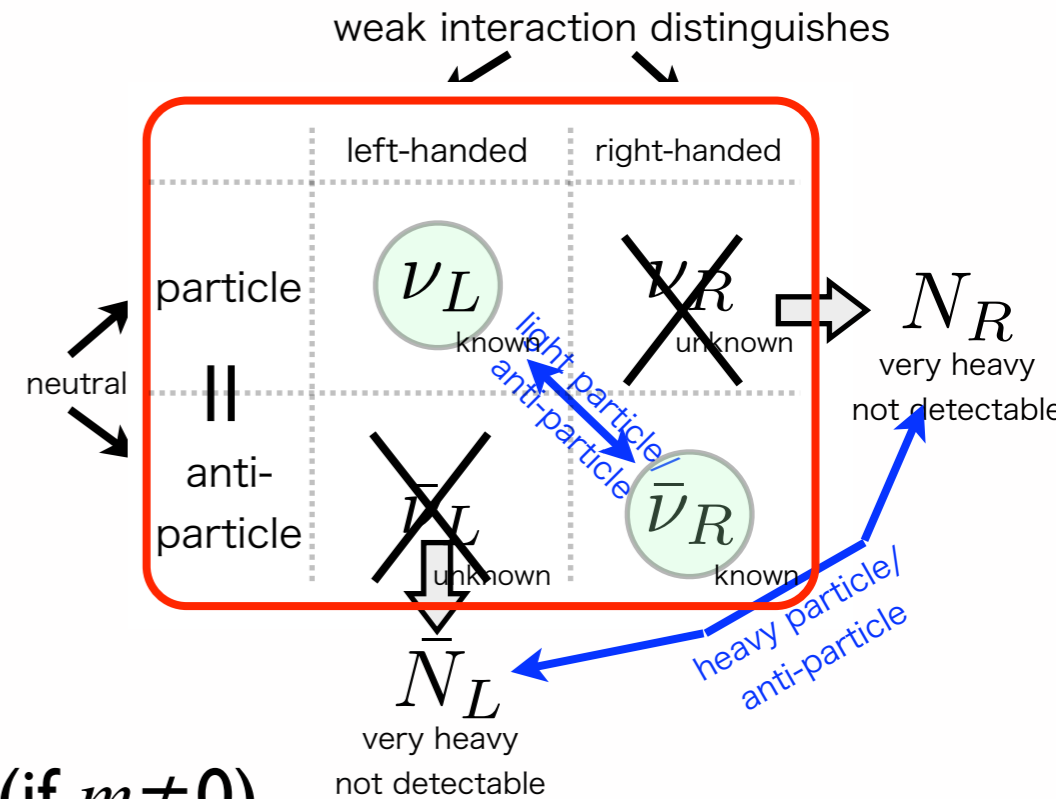
$\nu_L \quad \bar{\nu}_R \quad \bar{N}_L \quad N_R$

we haven't observed because heavy(?)

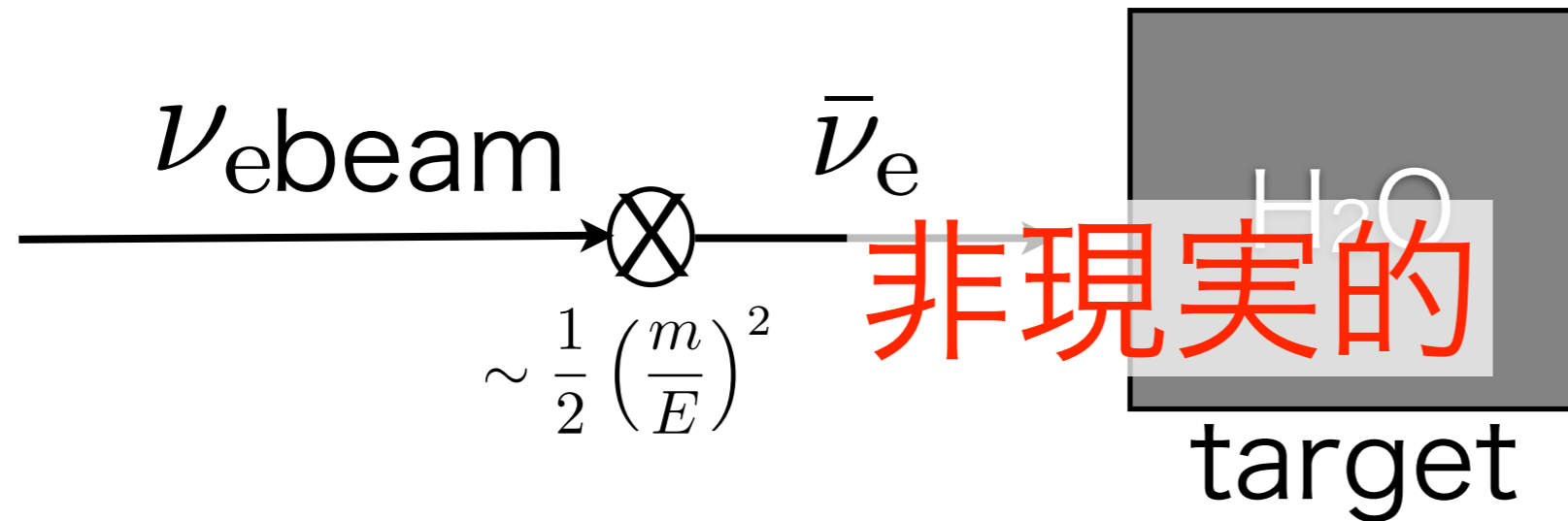
heavy neutrino can be naturally introduced

Majorana Neutrino

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



# Straight forward method to verify Majorana nature



look for

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

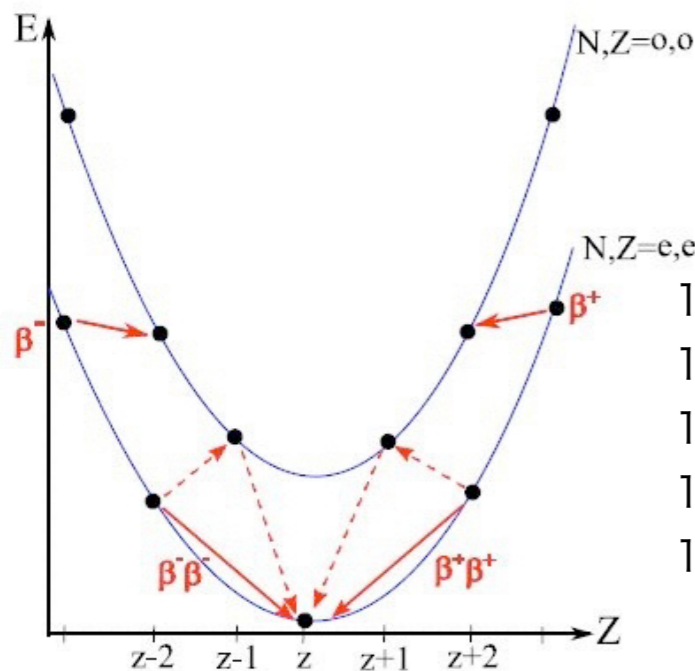
$$\sigma \propto E^2$$

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。

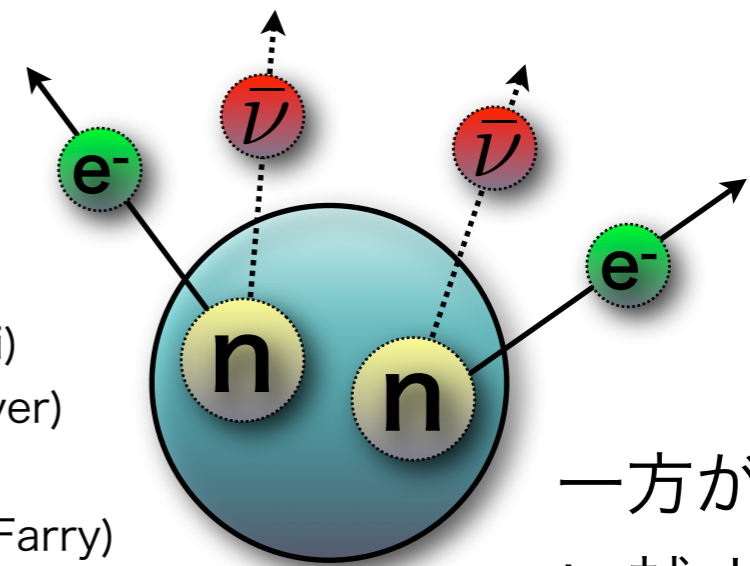
幸い自然は親切で、

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反応が増幅される。



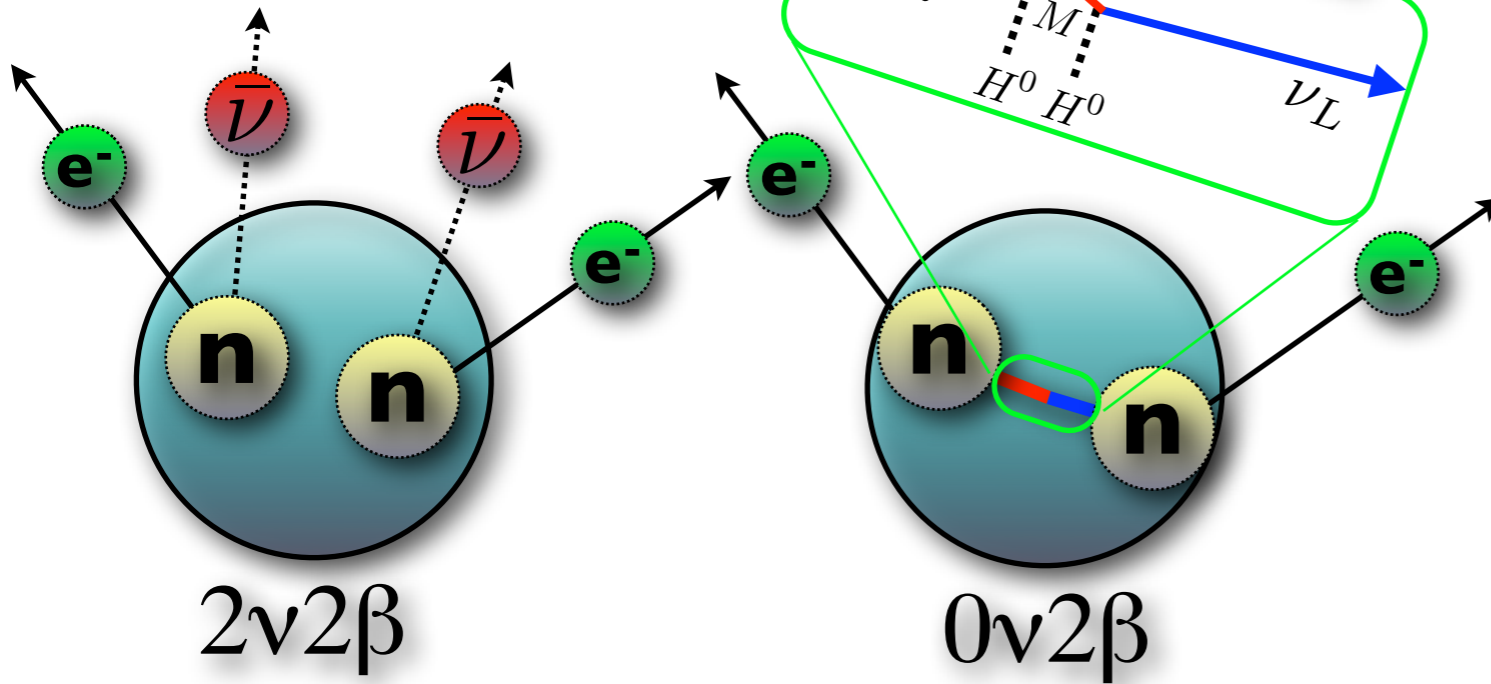
- 1930 light neutral particle (W.Pauli)
- 1933 neutrino, beta decay theory (E.Fermi)
- 1935 double beta decay (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
- 1939 neutrino-less double beta decay (W.Farry)



一方が他方を追い越す事も可能

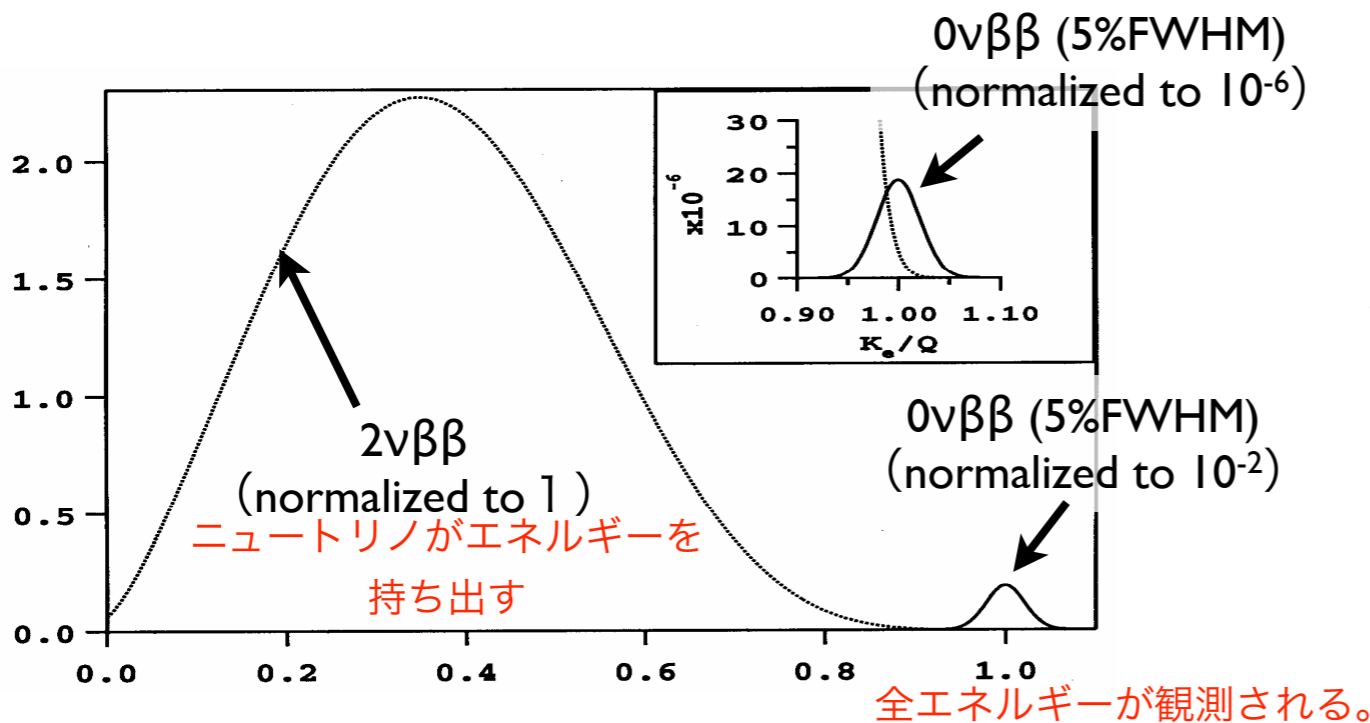
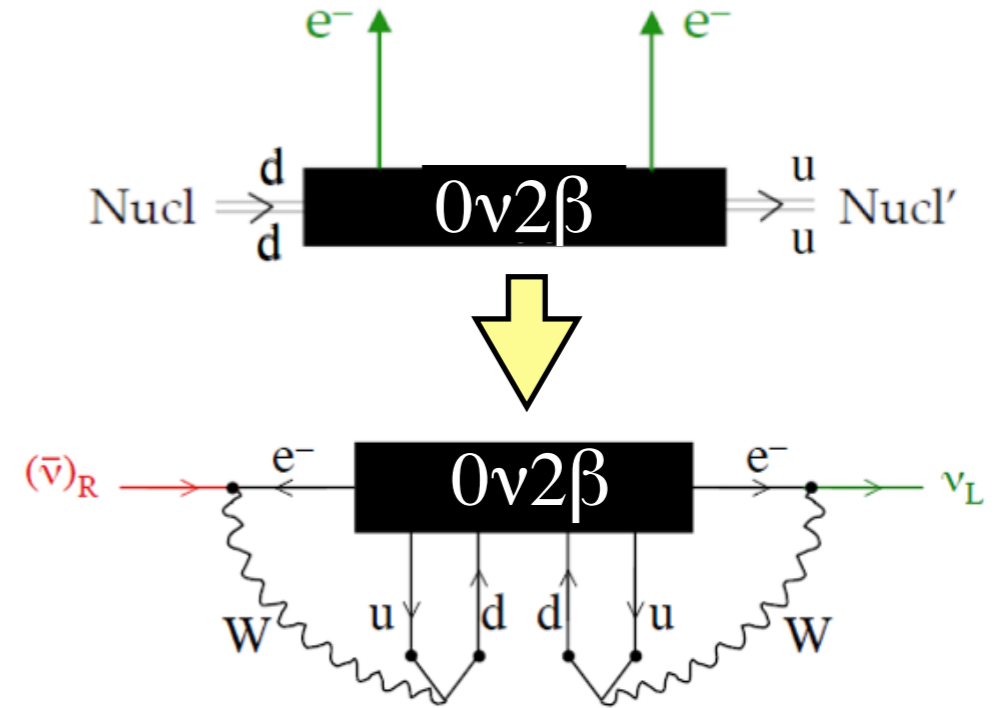
# 二重β崩壊

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

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

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



# Single beta decay

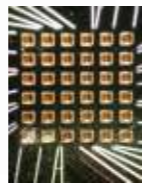
KATRIN

$^3\text{H}$  18.7 KeV



MARE-II

$^{187}\text{Re}$  2.47 KeV



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

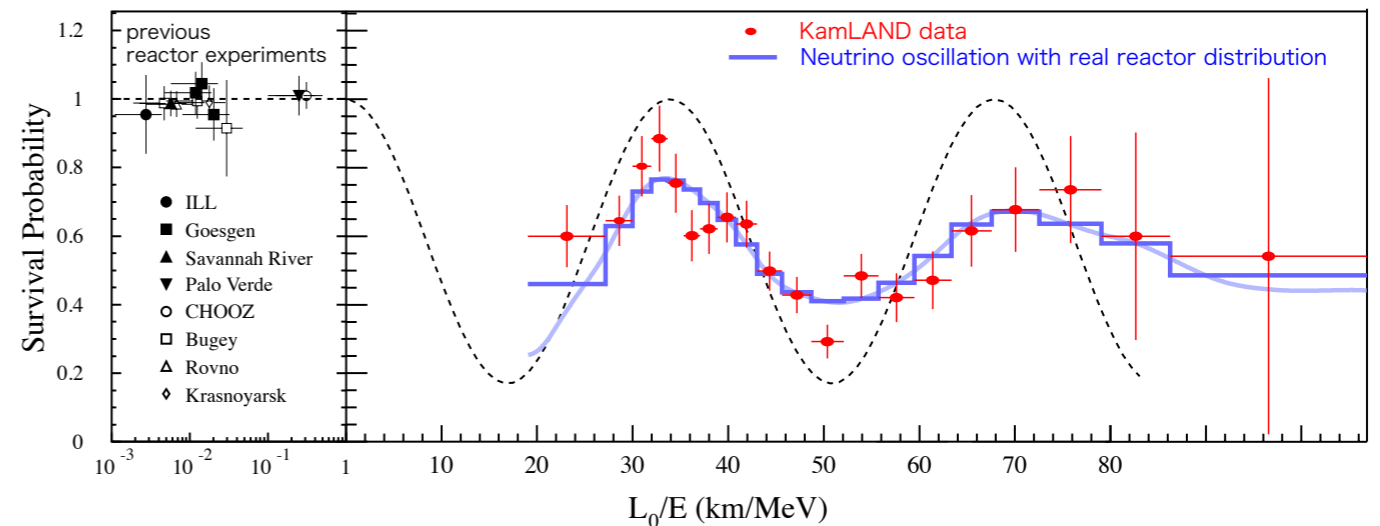
現在の結果  
< 2 eV (95%)

予想感度  
0.2 eV

$m_\nu$

# Neutrino oscillation

solar, reactor, atmospheric, accelerator



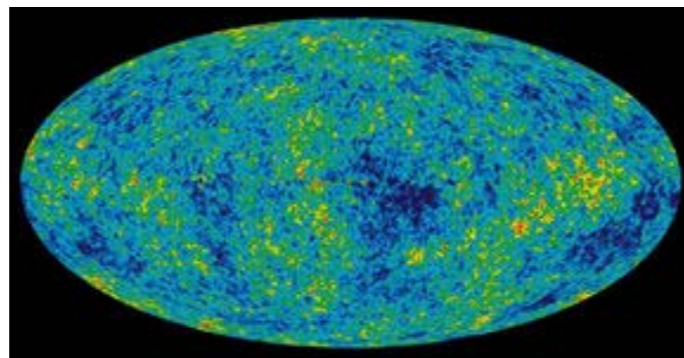
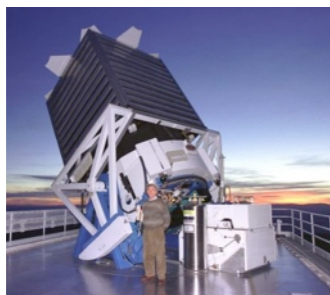
$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

$$\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{atm}^2 = (2.6 \pm 0.4) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{sol}^2 = (7.6 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

# Cosmology

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



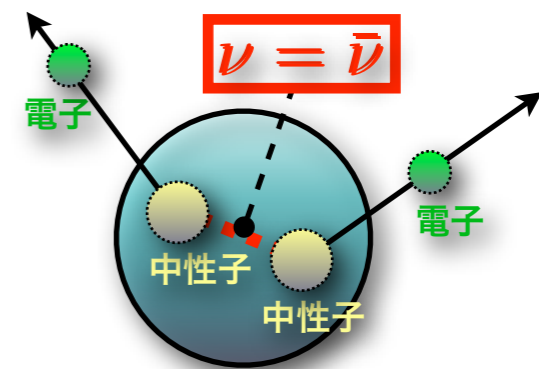
$$M = \sum m_i$$

< 0.2 ~ 0.7 eV

0.05 eV ?

# Double beta decay

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

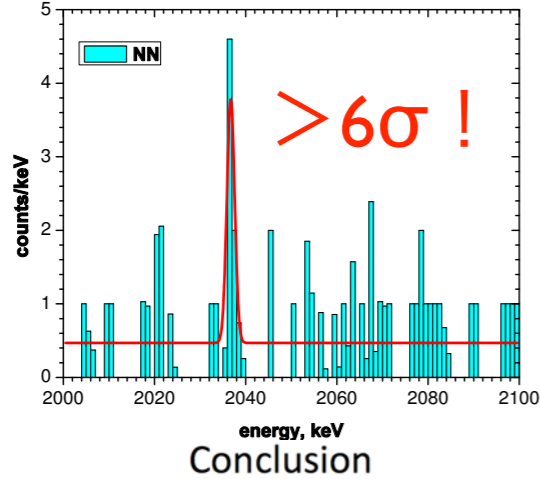


$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

< 0.2 ~ 0.4 eV 0.01 ~ 0.03 eV

# 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)

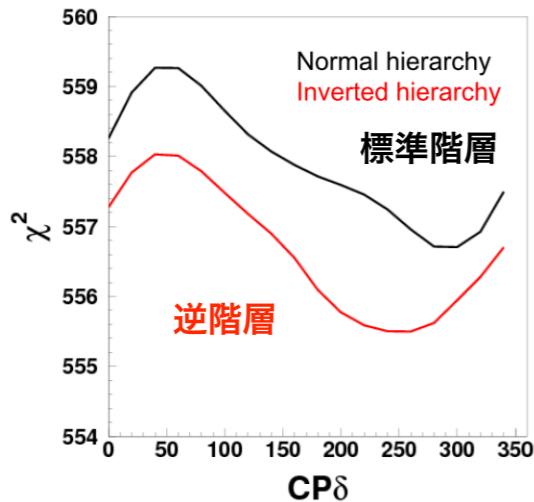
バックグラウンドが多く検証が必要

柳田予測

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

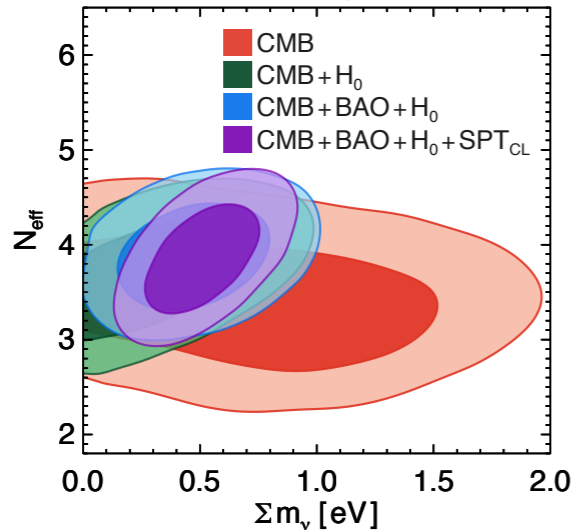
パラメータを最小限にした理論的予測  
 $m_{\beta\beta} = 47 \pm 1$  meV  
 neutrino2012国際会議にて  
 Phys.Rev.D86, 013002 (2012)

ニュートリノ振動  
 SK, MINOS



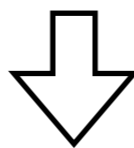
SKの大気ニュートリノ観測は、逆階層(20~60meV)または縮退(60meV以上)を少し好む。(neutrino2014では逆転)  
 $\chi_{\min}(\text{標準階層}) - \chi_{\min}(\text{逆階層}) = 1.2$

宇宙観測



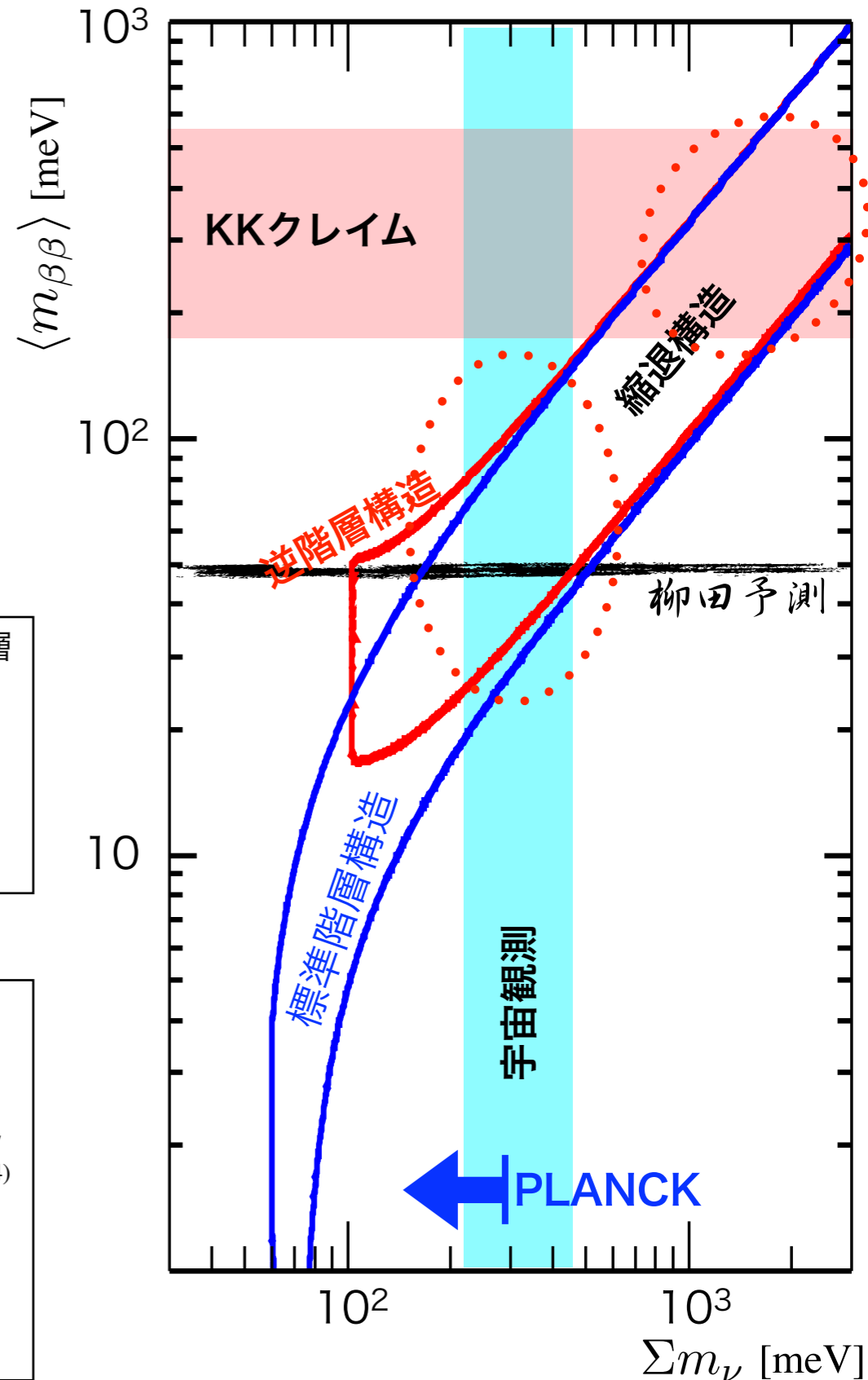
$\Sigma m_{\nu} = 0.32 \pm 0.11$  eV  
 (3世代に固定)

arXiv:1212.6267  
 ApJ782, 74 (2014)



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

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。



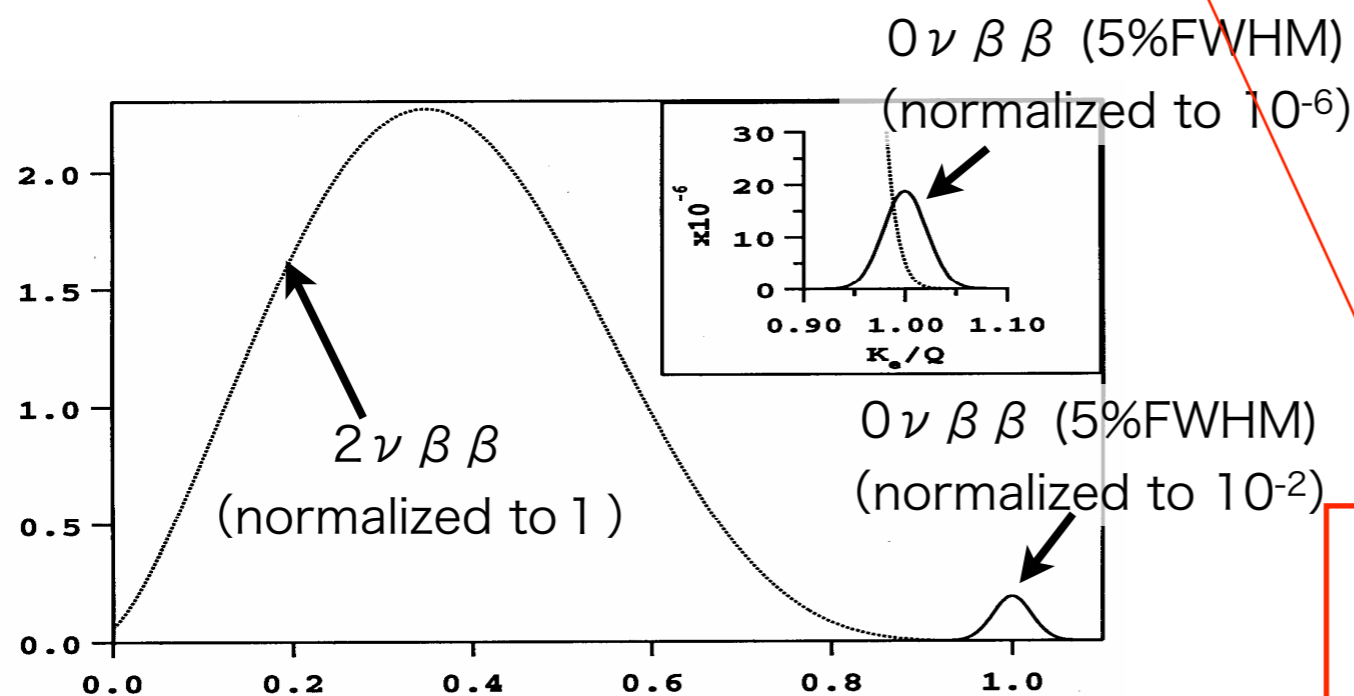
**いつ見つかってもし思議でない。**

- 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
- $0\nu 2\beta$  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

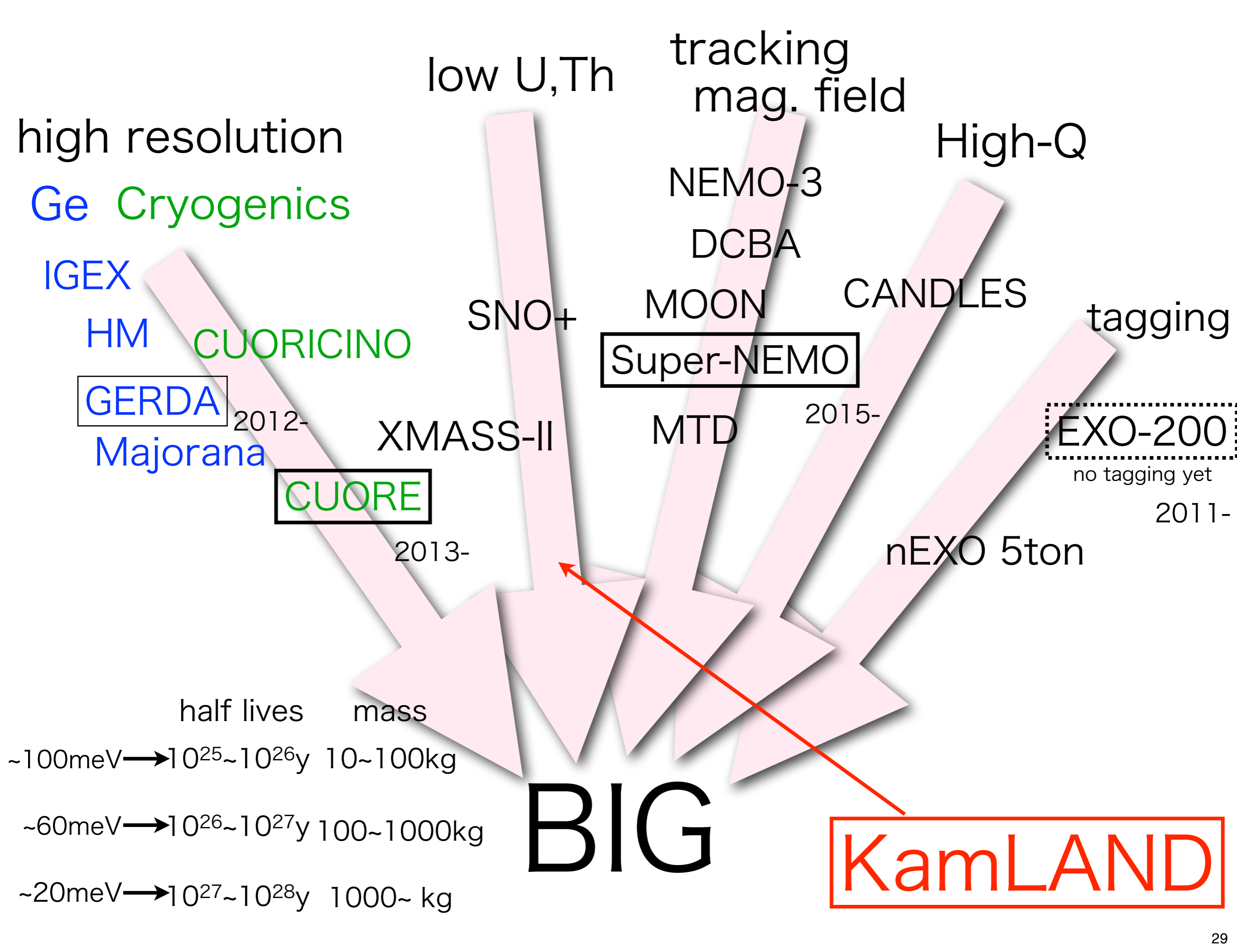
Rodin et al., Nucl. Phys. A793 (2007)213-215

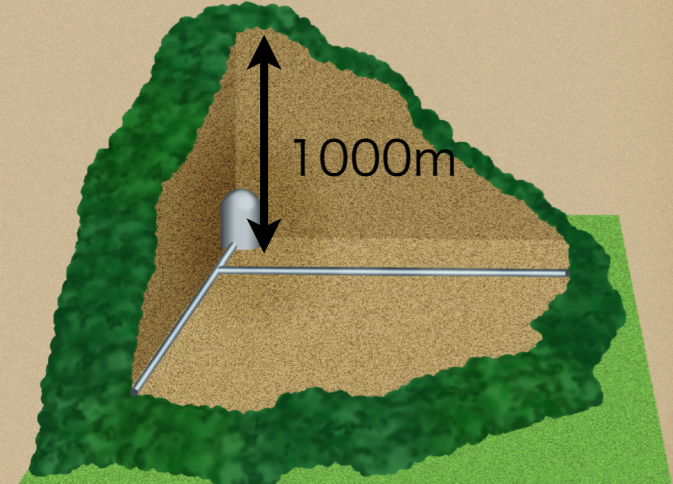
Nucleus	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ measured (year)	Nat. Abundance (%)	Q-value (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	max. Q, fast 2ν
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$0.86 \times 10^{27}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	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 2ν
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$2.86 \times 10^{26}$	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	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 2ν, 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	0ν, fast 2ν



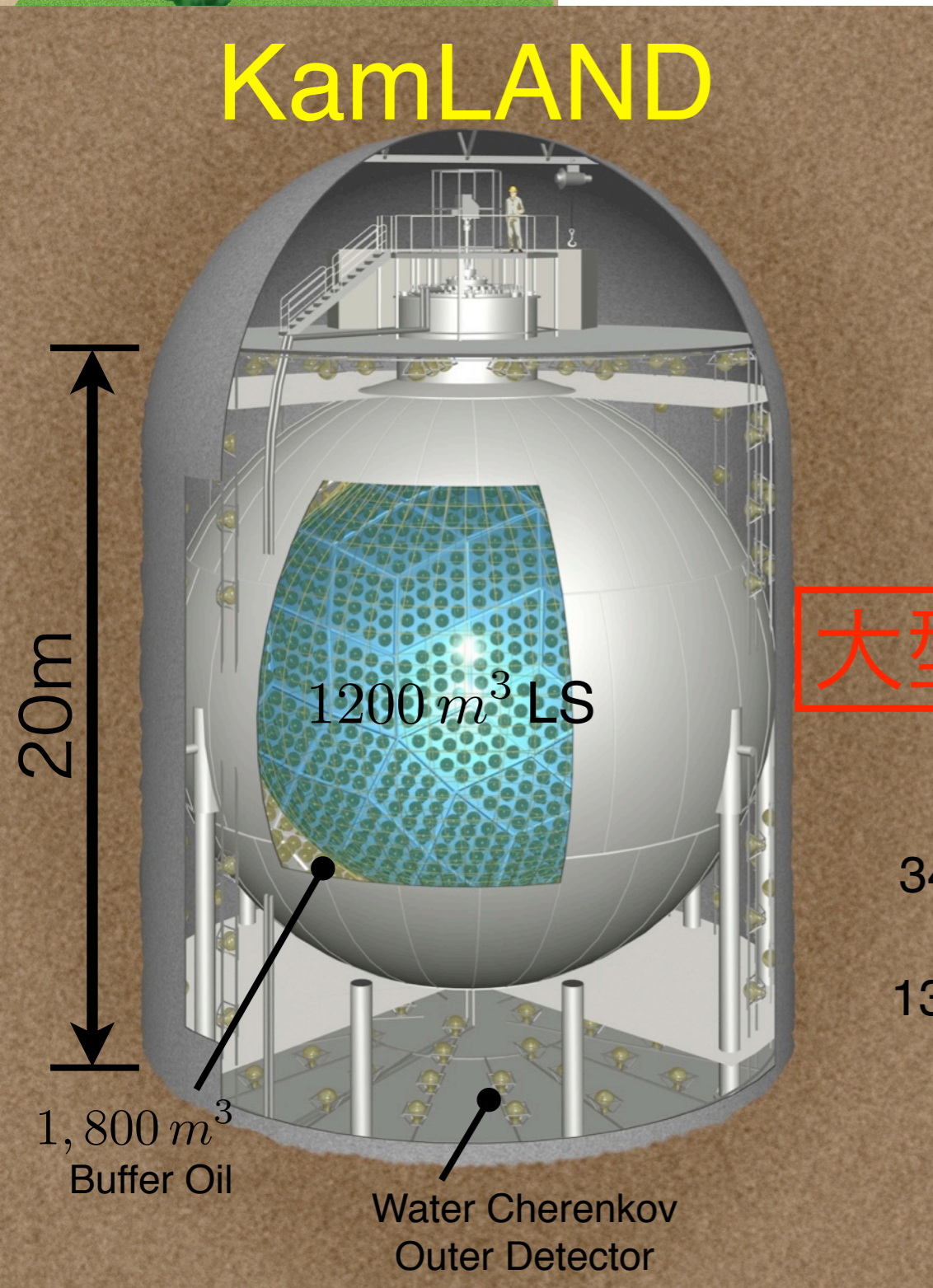
2ν BGはエネルギー分解能の約5.8乗に比例して増加するため、2νが早いと高分解能が必要となる。

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





# KamLAND



34% photo-coverage with  
1325 17" and 554 20"  
photo-tubes

~500p.e./MeV



after water-extraction  
& distillation

<sup>238</sup>U  $3.5 \times 10^{-18}$  g/g

<sup>232</sup>Th  $5.2 \times 10^{-17}$  g/g

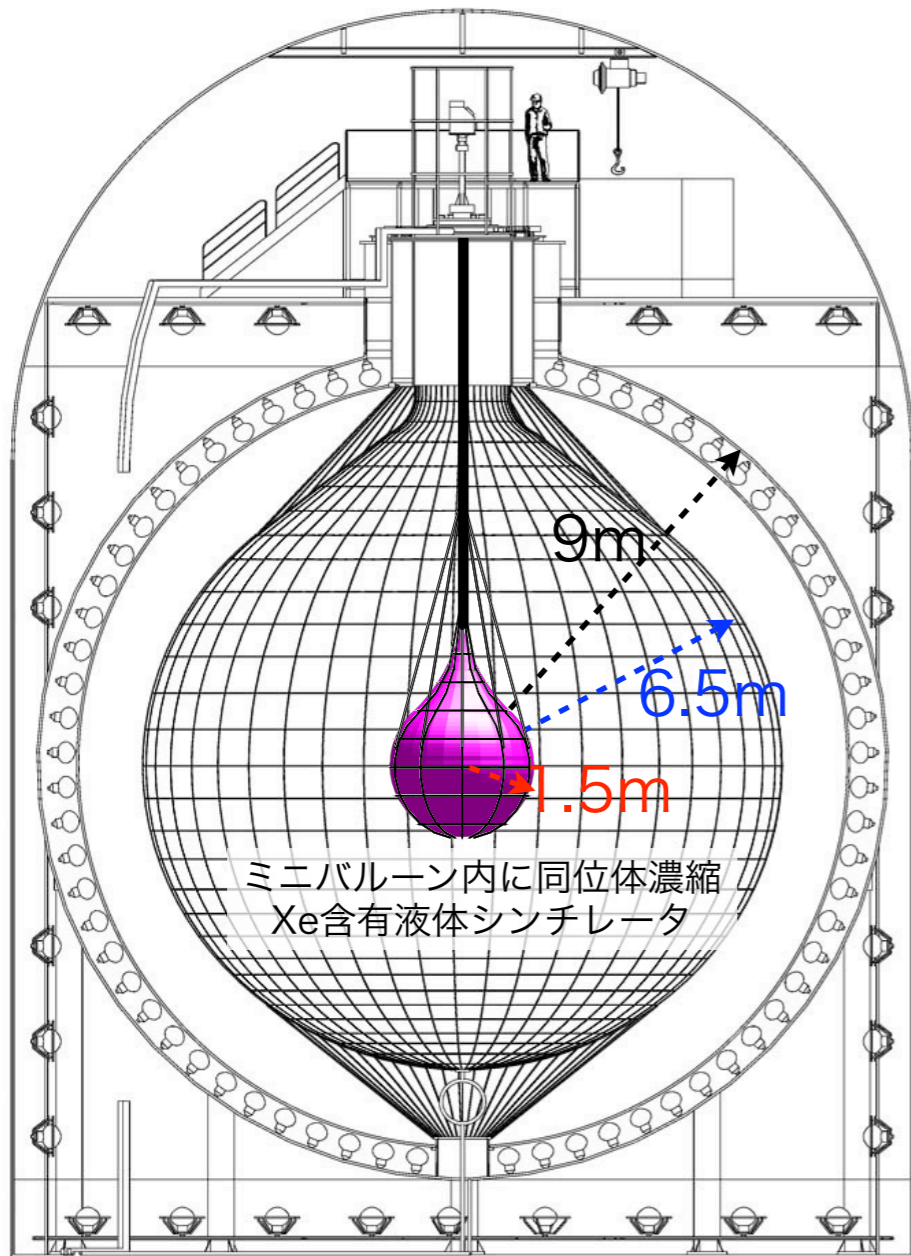
**極低放射能環境**

稀な現象の研究に適している

# KamLAND-Zen

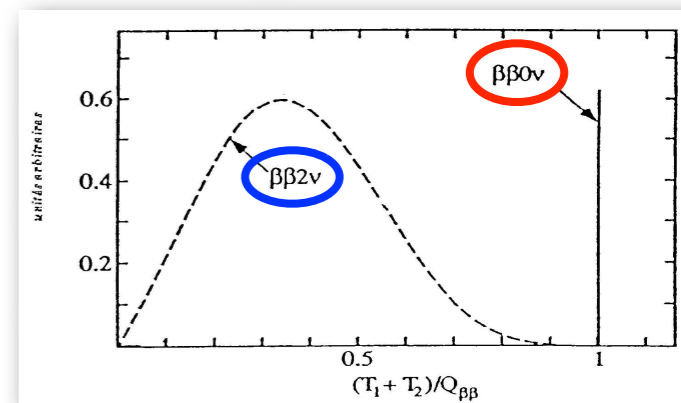
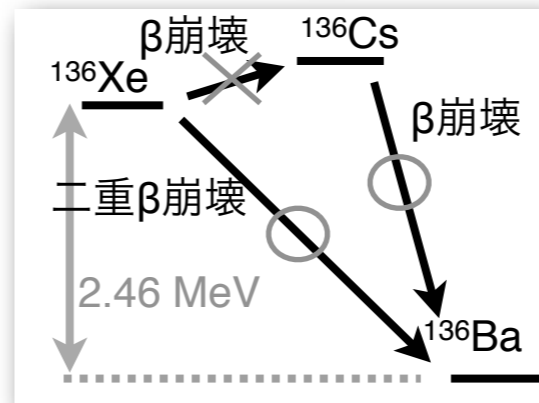
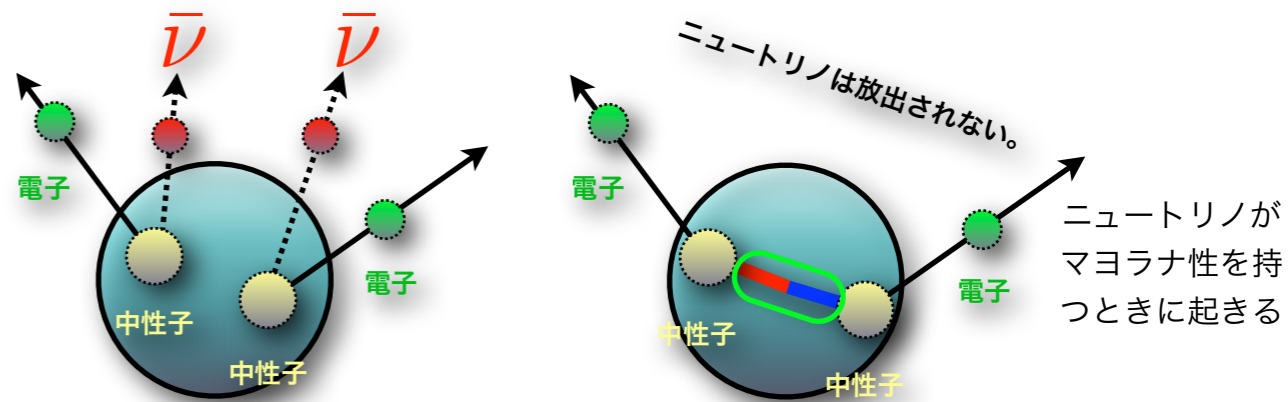


Zero neutrino  
double beta decay search



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

ニュートリノを伴う二重 $\beta$ 崩壊と伴わない二重 $\beta$ 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 (1200m<sup>3</sup>, U: 3.5x10<sup>-18</sup>g/g, Th: 5.2x10<sup>-17</sup>)  
→ 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

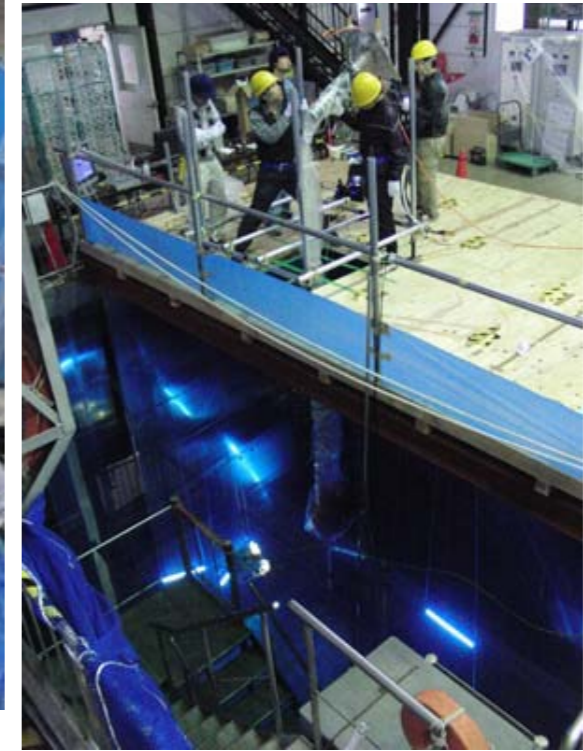
# ミニバルーン試作とプールでの導入リハーサル



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



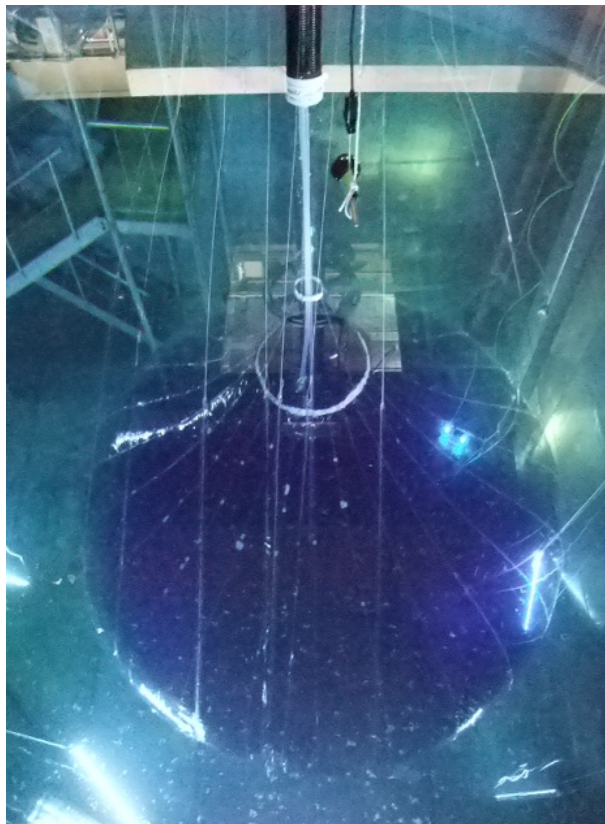
水深8mのプールで導入テスト



バルーン吊下部

## キセノン取り扱い装置

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



導入、膨張、液の入れ替え方法を確立



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



# 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

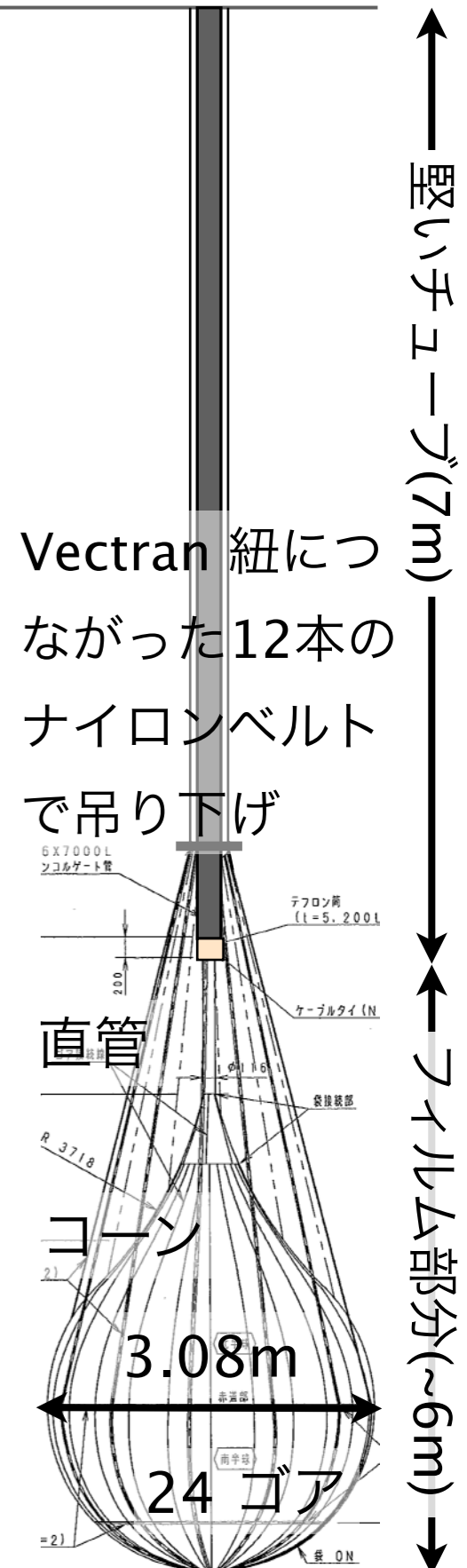
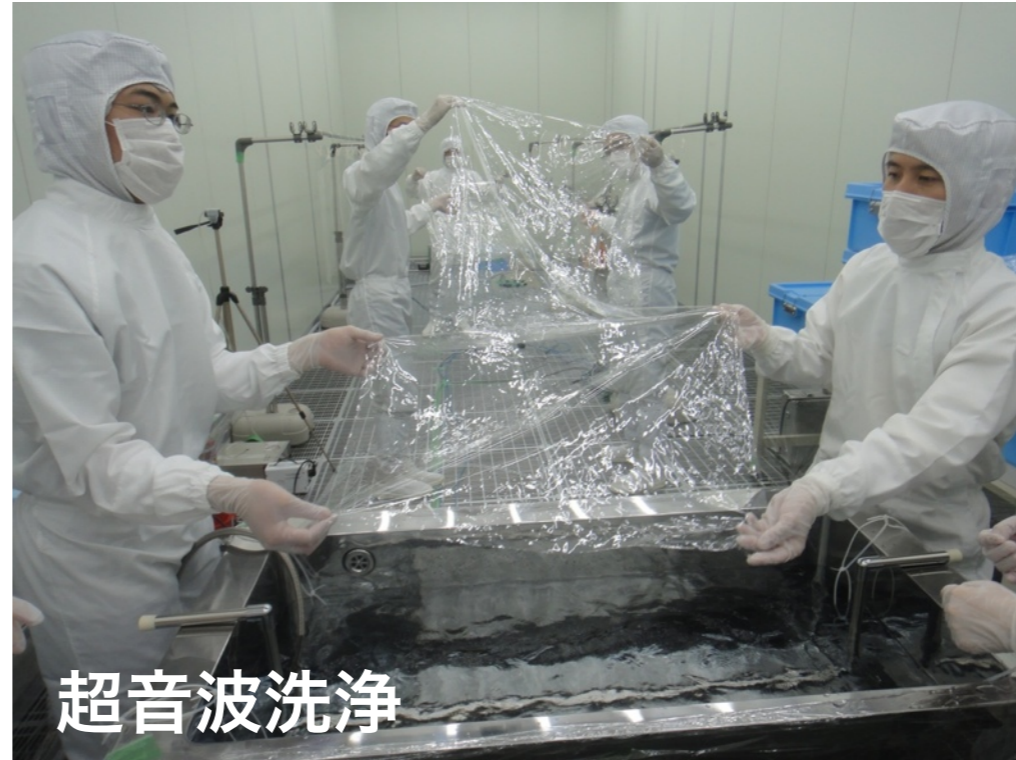
低放射能

→ 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



● 全ての道具や部品もここで洗浄



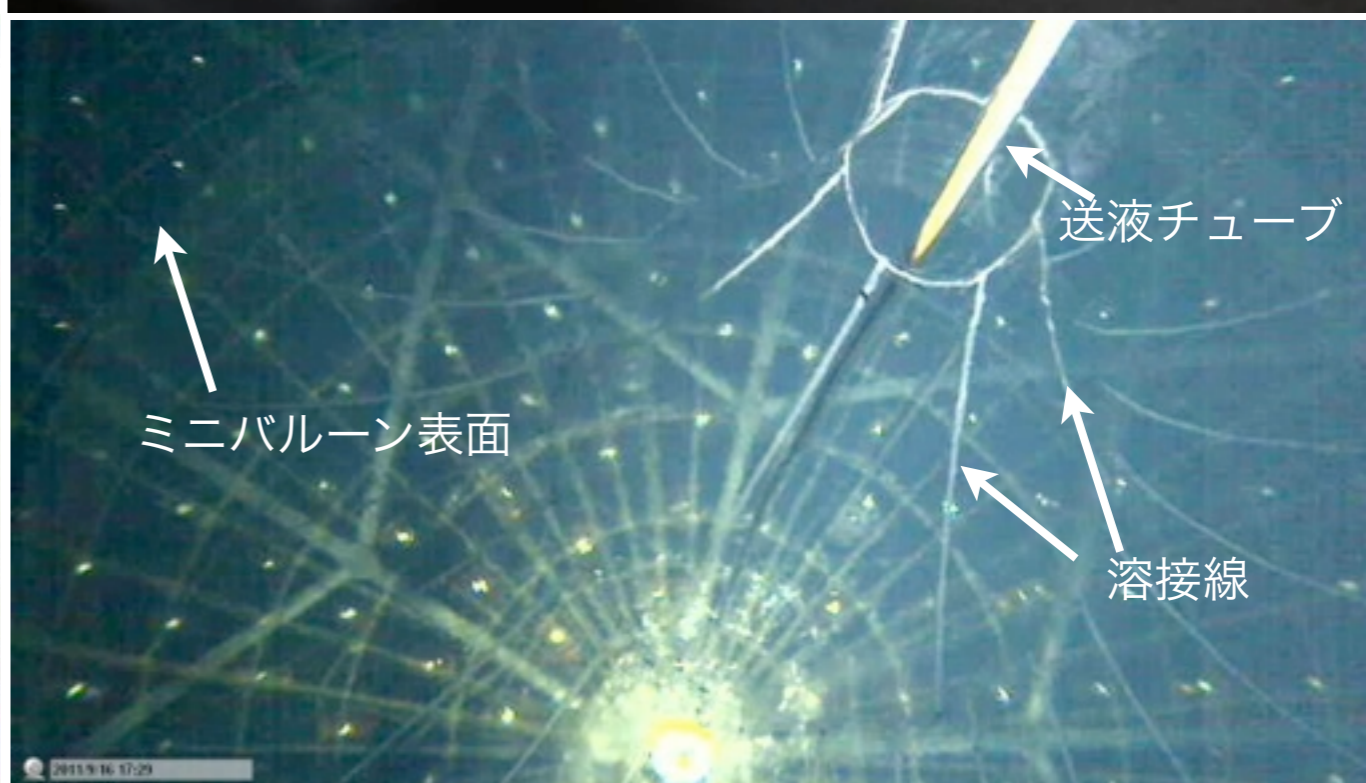
バルーンとチューブの導入



黒色フィルムを突き抜けるバルーン

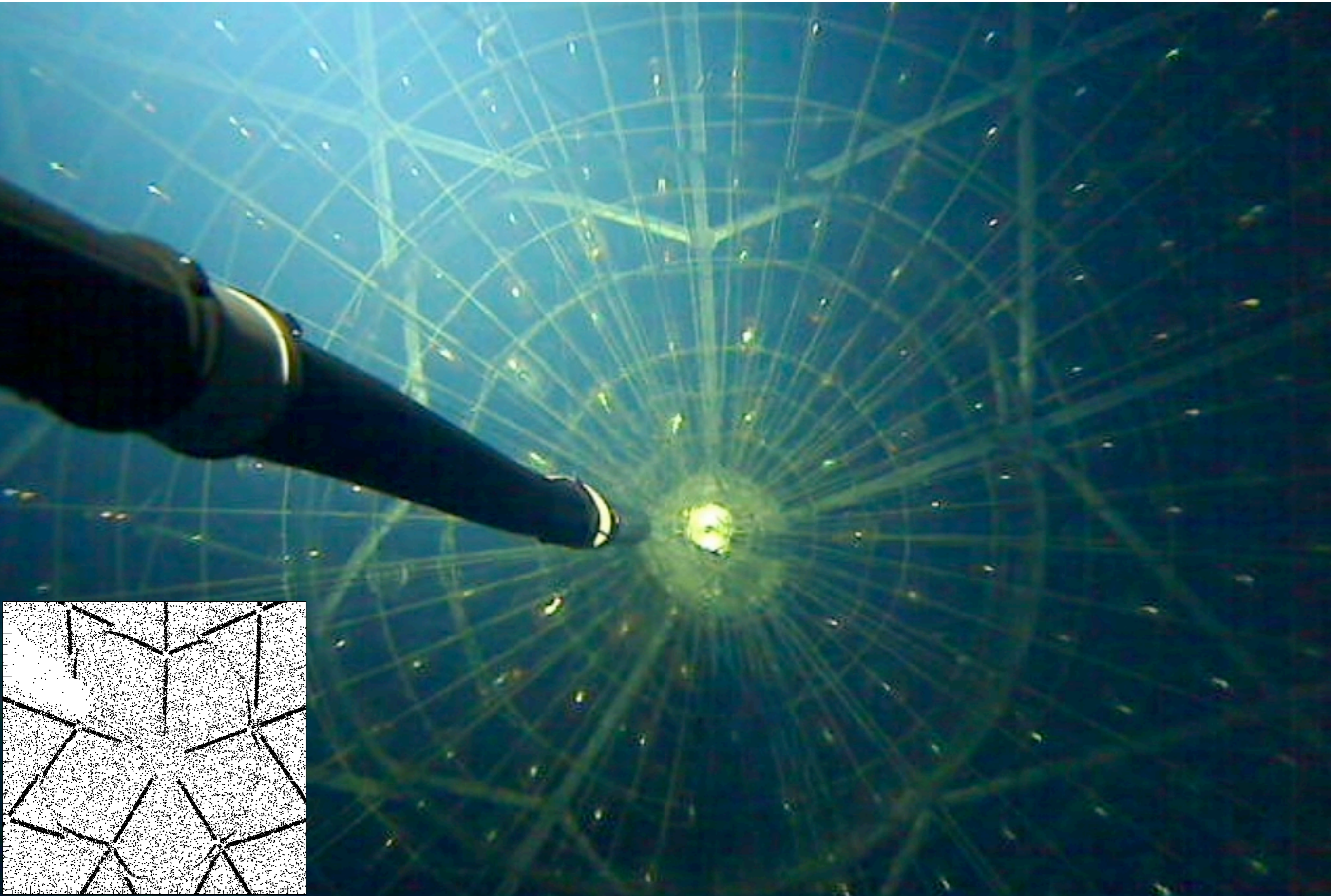


お疲れ様でした



ダミー LS で脹らませた後 キセノン含有 LS で置換  
その後密度調整しチューブの撤去

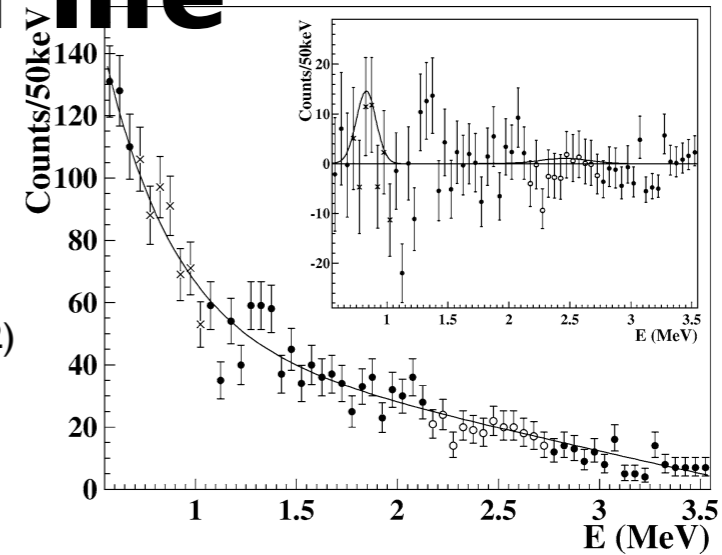
2011年9月24日観測開始 (当初計画を半年以上前倒し)



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

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

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

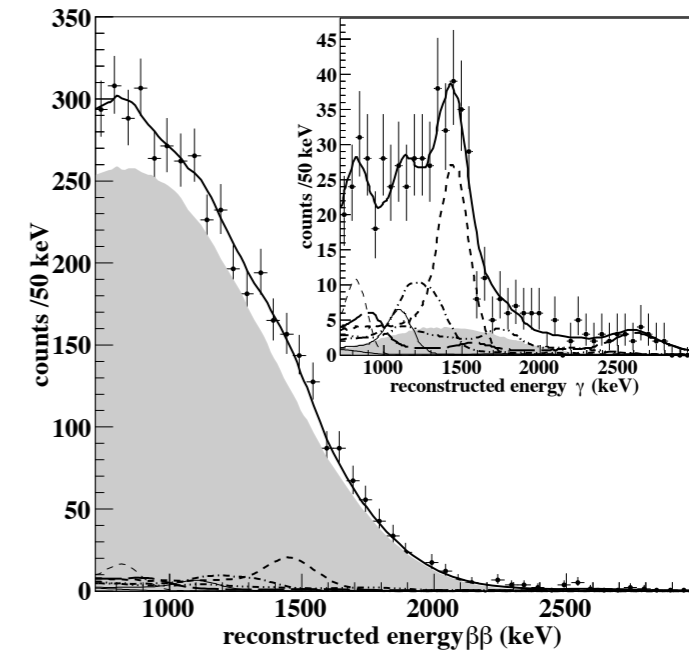


約 5 倍の矛盾

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)



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)

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.172 \pm 0.017(\text{stat}) \pm 0.060(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

arXiv:1306.6106

KamLAND-Zen (2012) キセノン含有液体シンチレータ

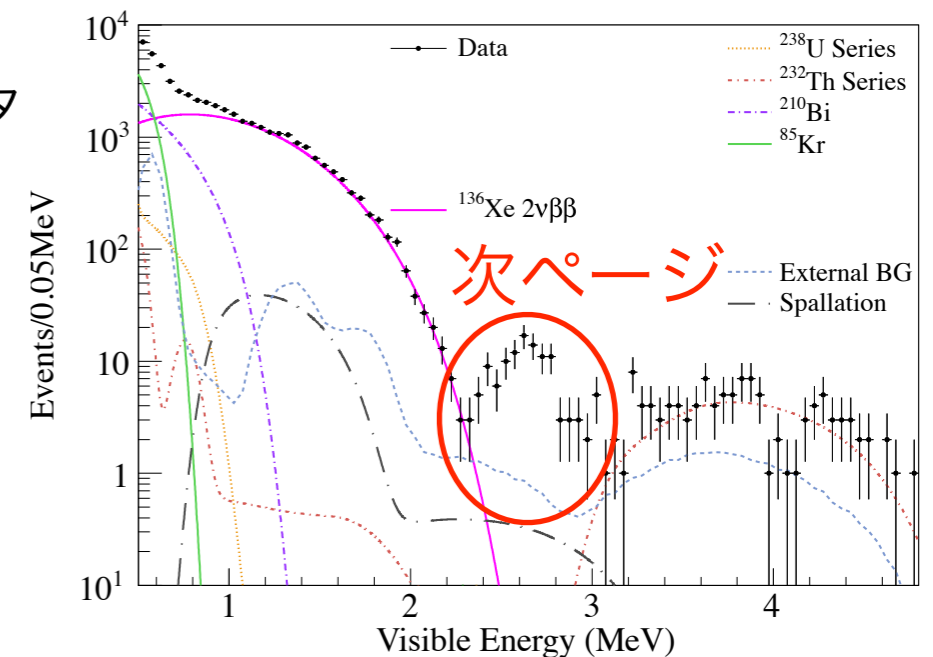
$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

Phys.Rev.C85,045504(2012)

update

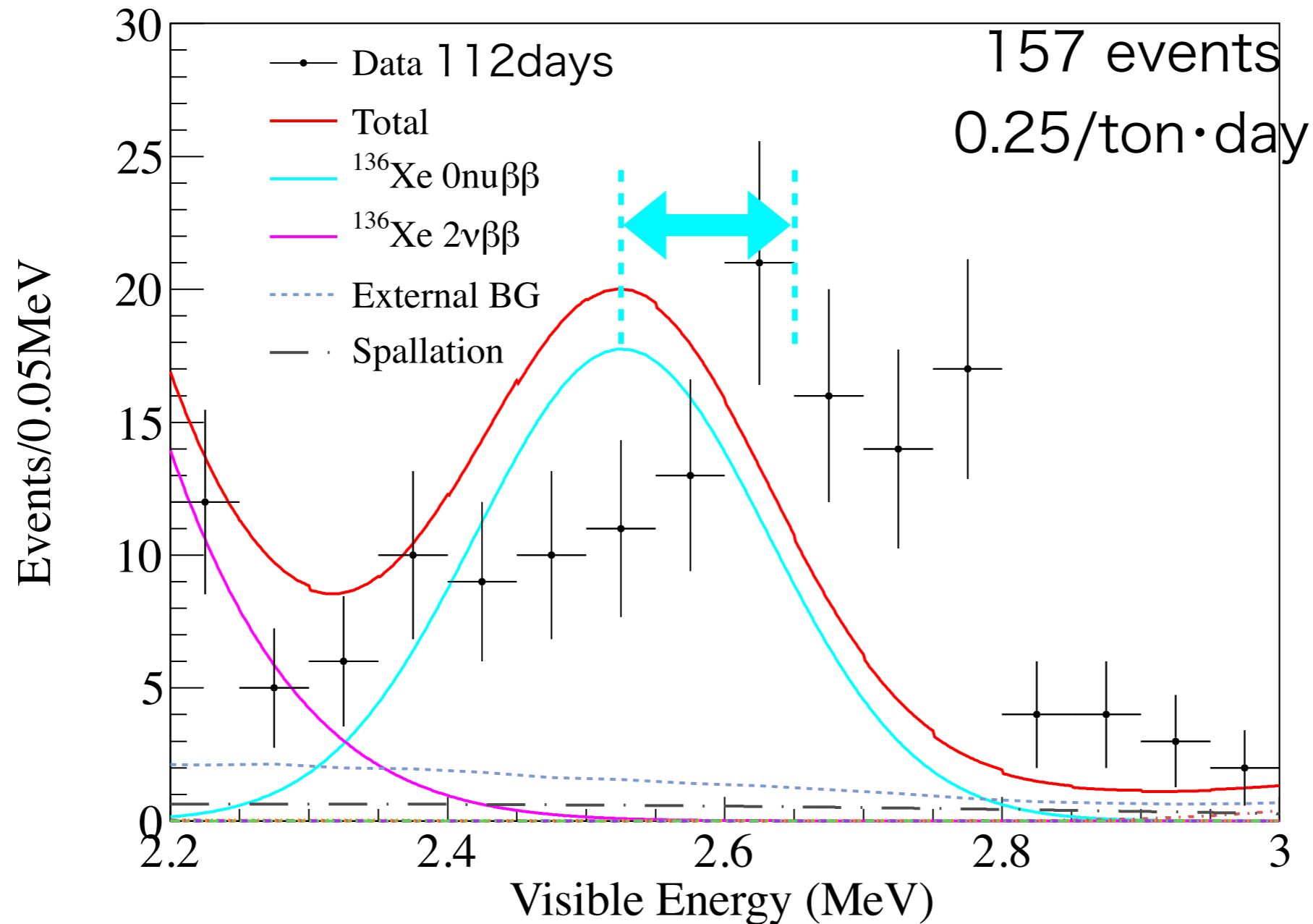
$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

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



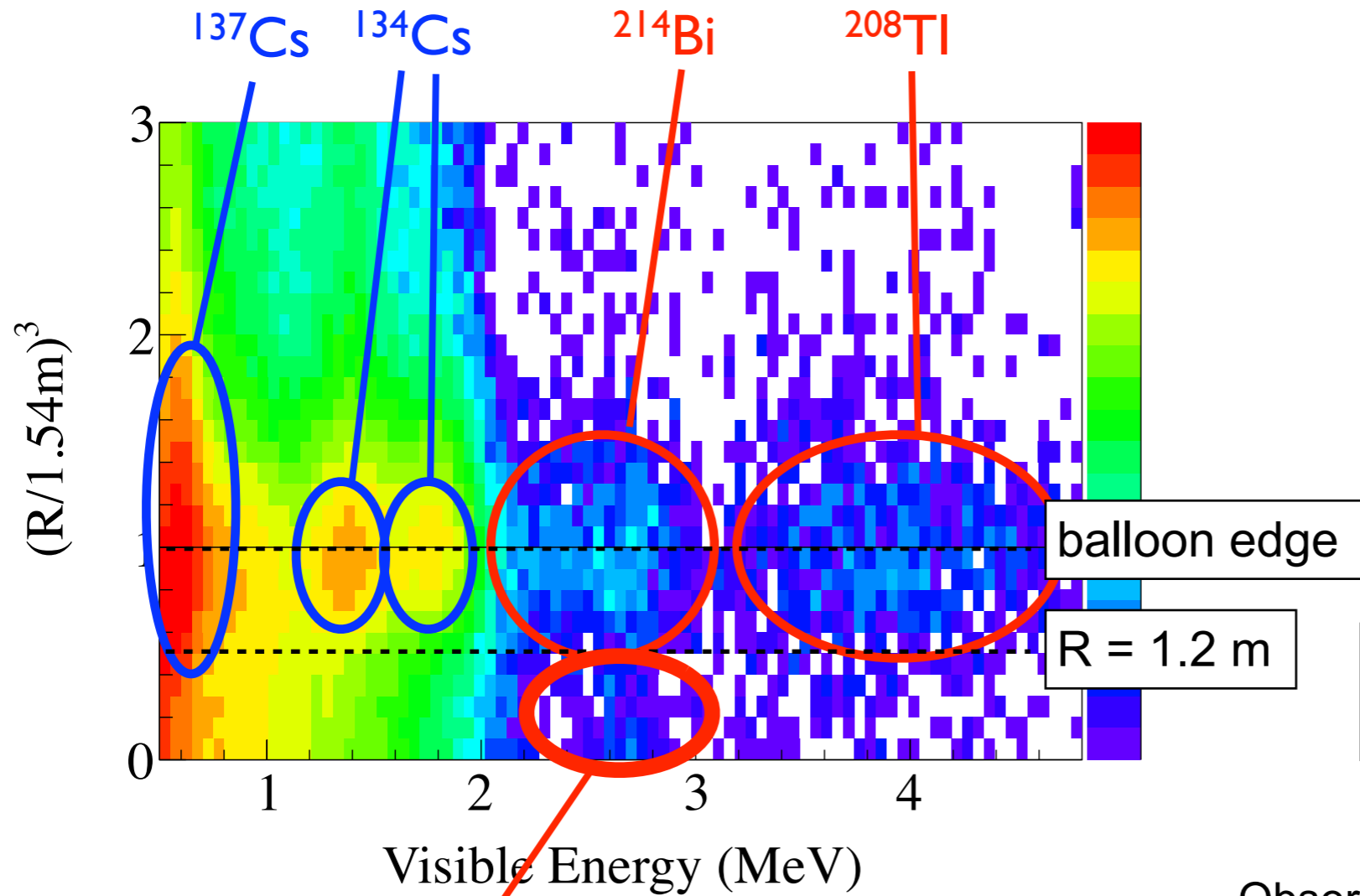
# Background situation

## Peak fit with $0\nu$ signal

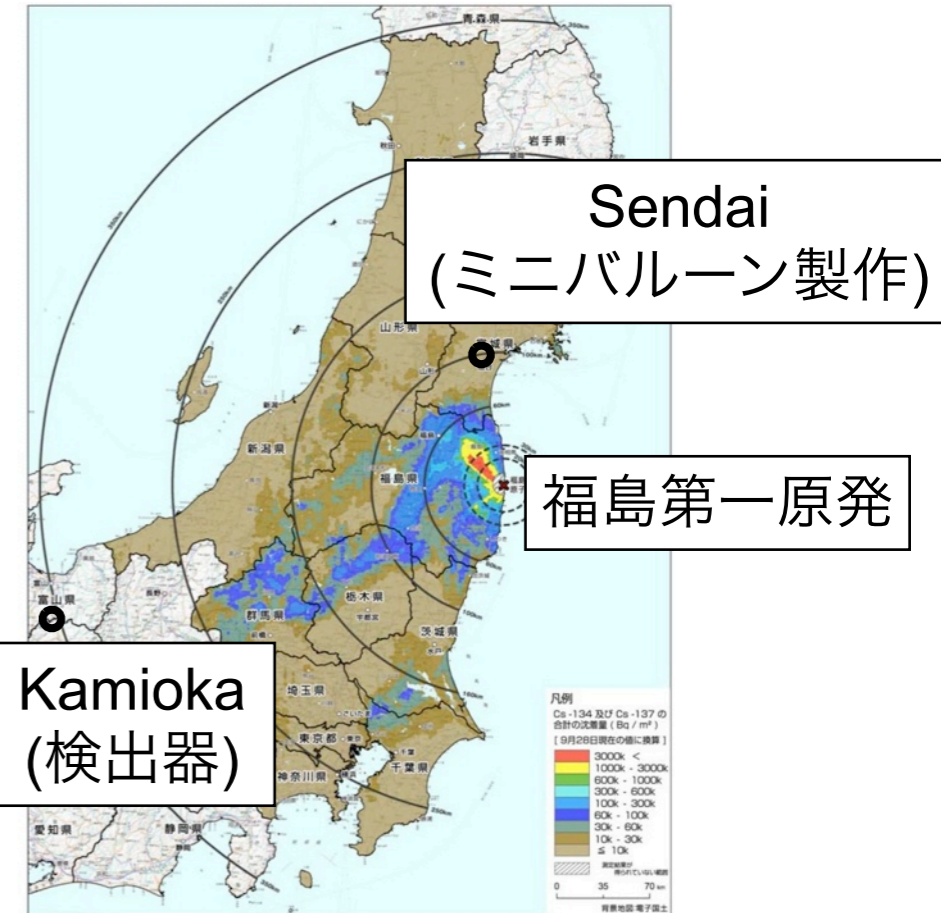


Peak position is different from that of expected  $0\nu$ .  
 $0\nu$  only is rejected at more than  $8\sigma$  level.

# 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、幸いしみ出してきたくない。
- 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/ensdfsserve.html>

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

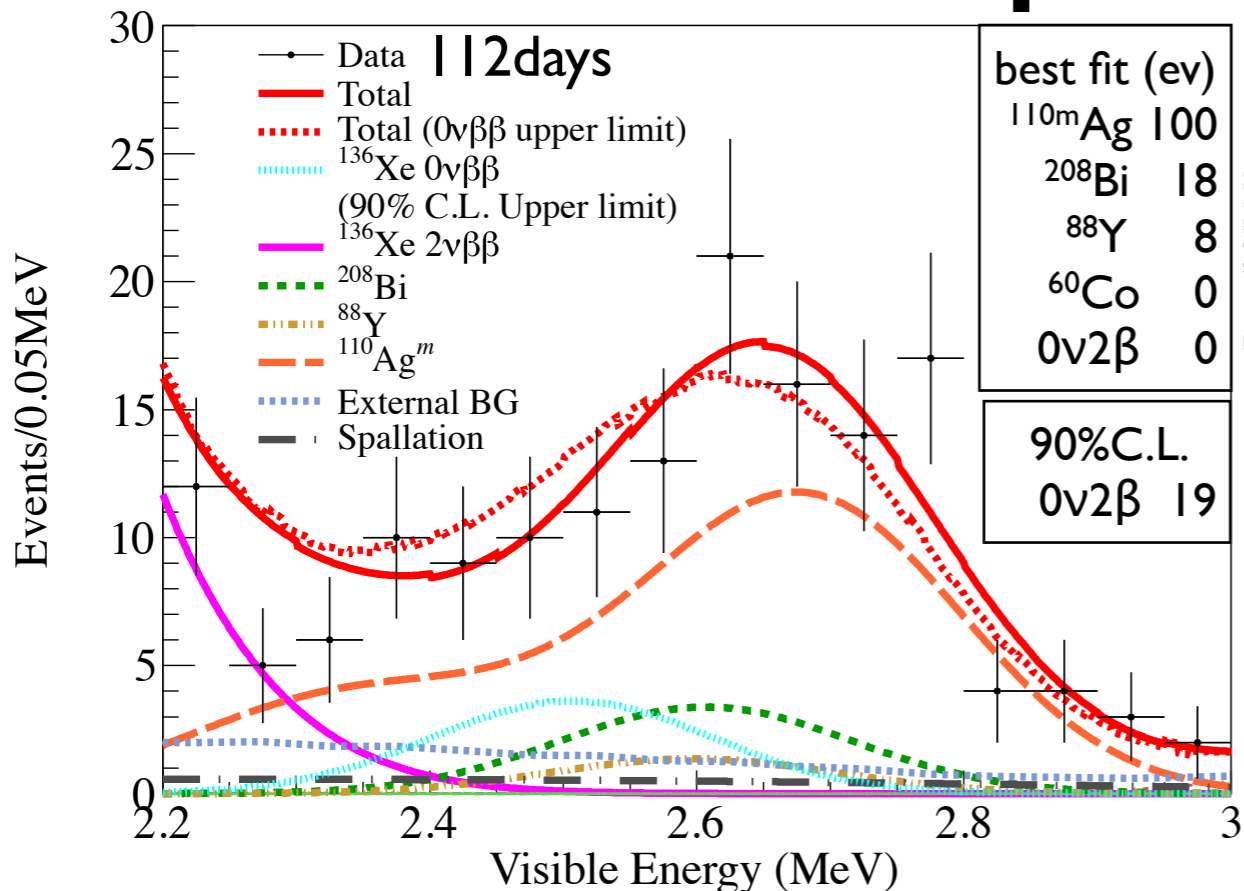
100秒~30日の時間相関を持つものは、A,Zの近い原子核の  
エネルギースペクトルを調査して制限      → negligible

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

30日以上で 0v に近いピークを作るものは、4つの候補。

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

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

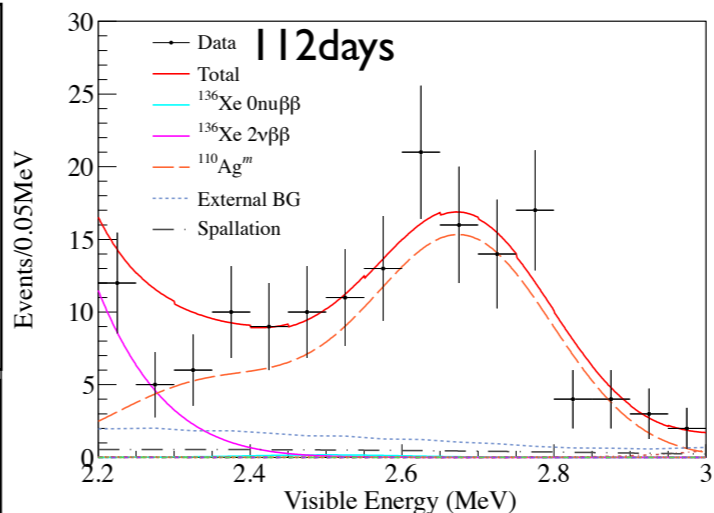


最適解と  $0\nu 2\beta$  の上限 (90%CL)

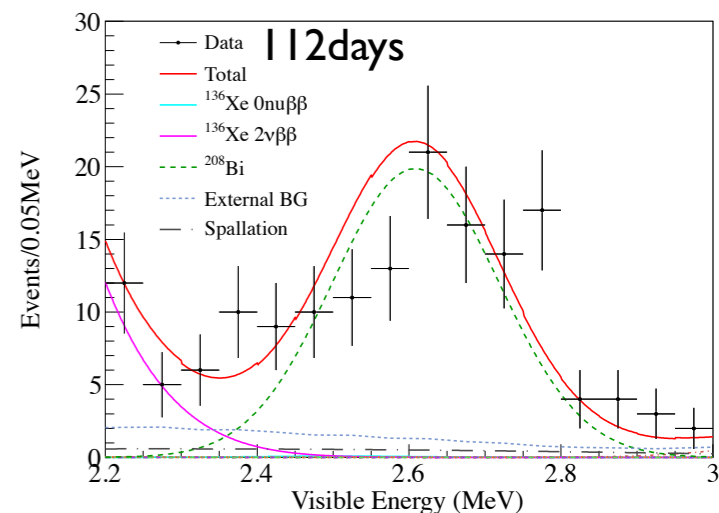
( $\chi^2$  at 2.2~3.0MeV)

	$\chi^2$ 112日のデータ
simul. fit	11.6
$0\nu + ^{110m}\text{Ag}$	13.1
$0\nu + ^{208}\text{Bi}$	22.7 <span style="color:red">△</span>
$0\nu + ^{88}\text{Y}$	22.2 <span style="color:red">△</span>
$0\nu + ^{60}\text{Co}$	82.9 <span style="color:red">×</span>
$0\nu$ only	85.0 <span style="color:red">×</span>

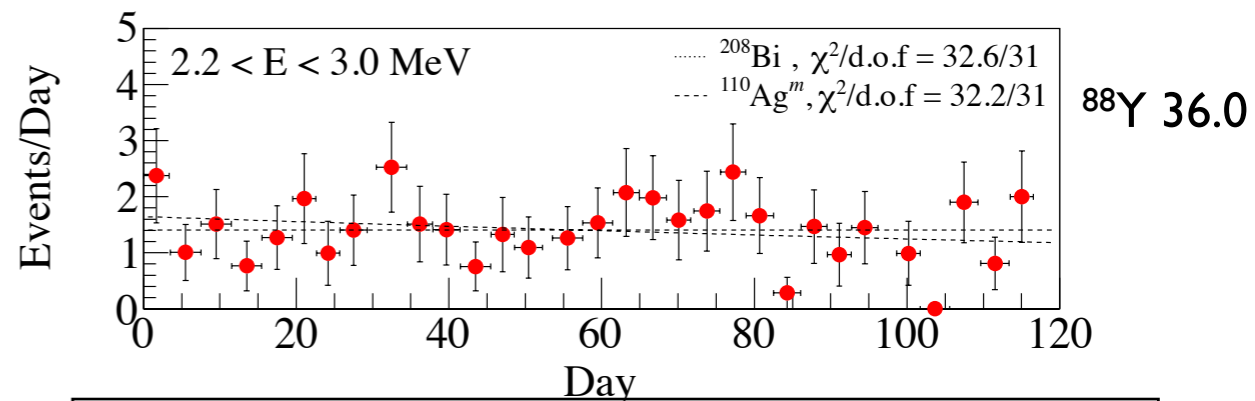
BGは  $^{110m}\text{Ag}$  らしい。



$^{110m}\text{Ag}$  は良く合う。



$^{208}\text{Bi}$  は合わない。



時間変化を使った原子核の区別には感度不足  
投稿準備中の追加データではより明確に銀の半減期を再現

$T^{0\nu}_{1/2} > 5.7 \times 10^{24}$  年 @90% C.L. (78日)

DAMAから5倍の改善

$T^{0\nu}_{1/2} > 6.2 \times 10^{24}$  年 (112日)



(R)QRPA (CCM SRC)  
Phys.Rev.C79,055501 (2009)

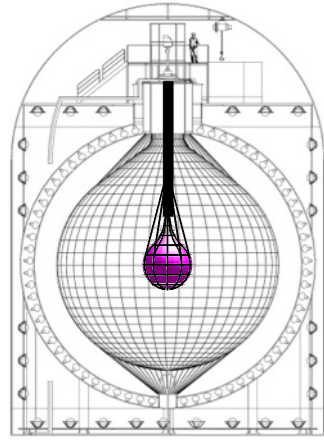
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.26 \sim 0.54$  eV @90% C.L.

ENSDFデータベースの全探索でこれら4各種のみが、BG候補

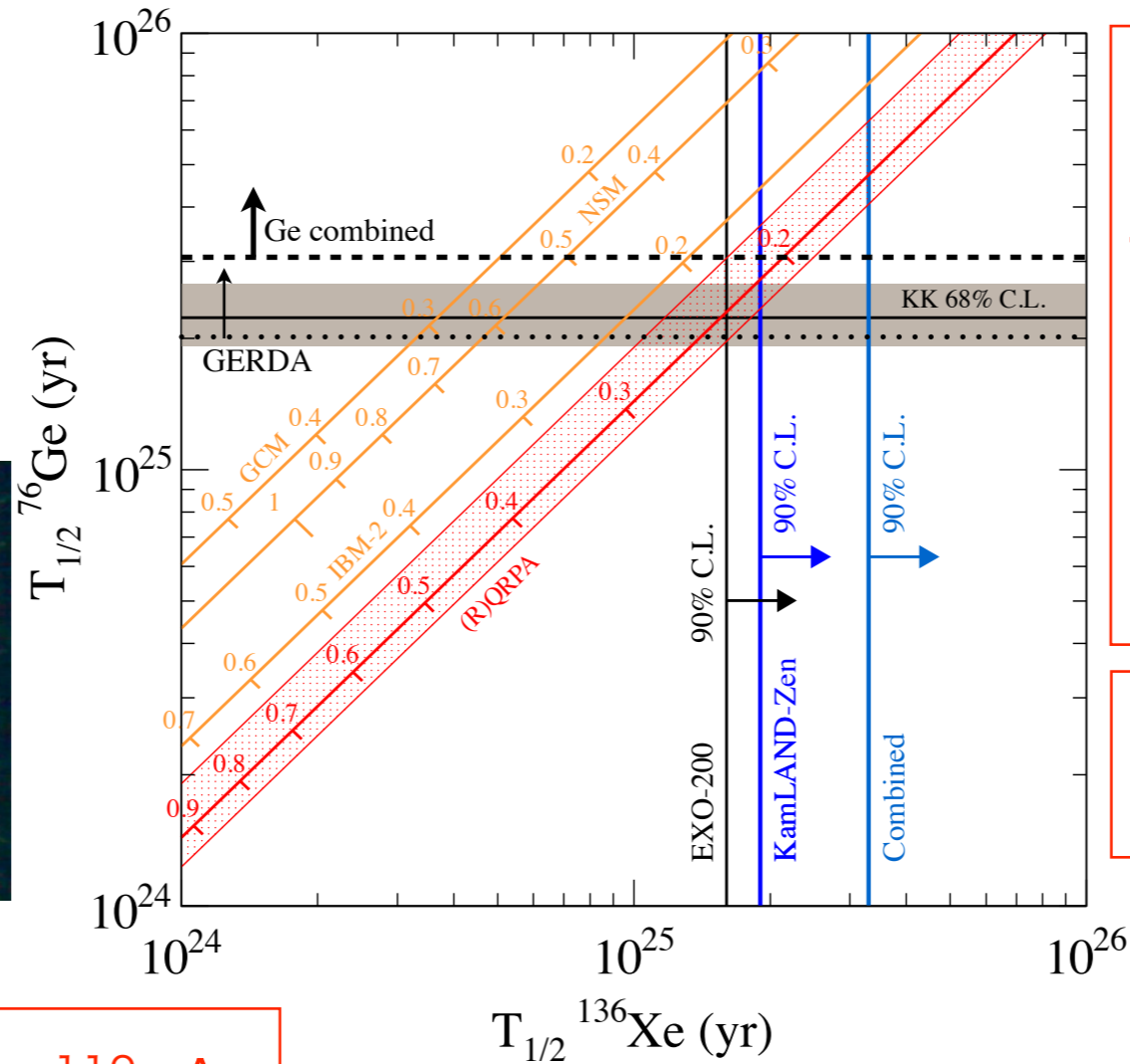
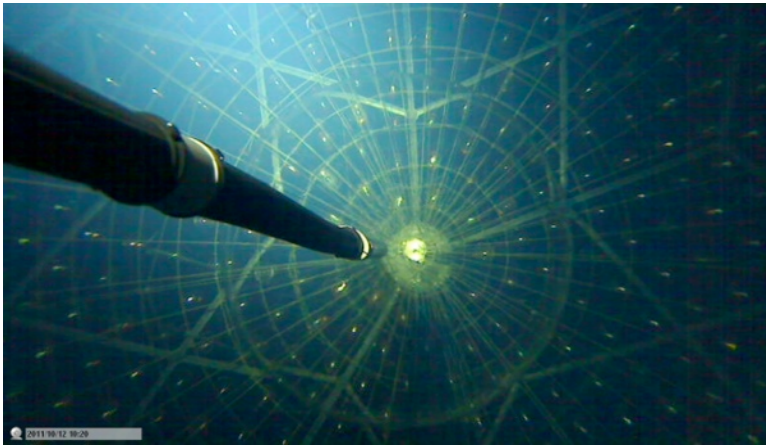


# KamLAND-Zen status 89.5kg-yr

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



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

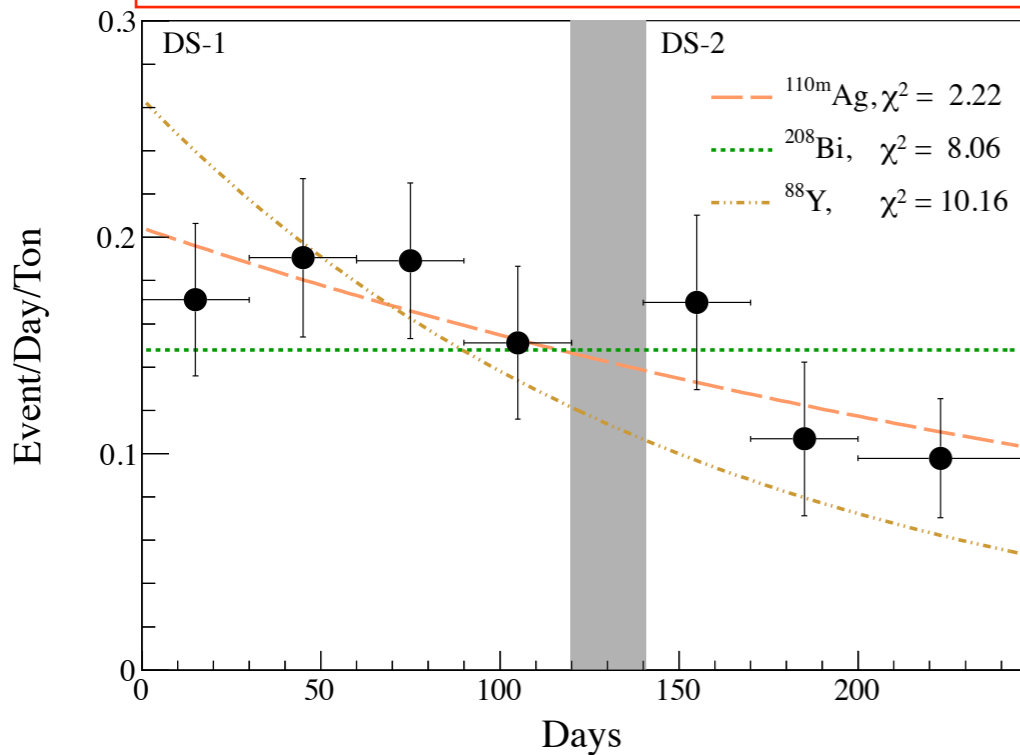


**1.** the world best limit  
 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$  yrs (KL-Zen)  
 $> 3.4 \times 10^{25}$  yrs (combined)

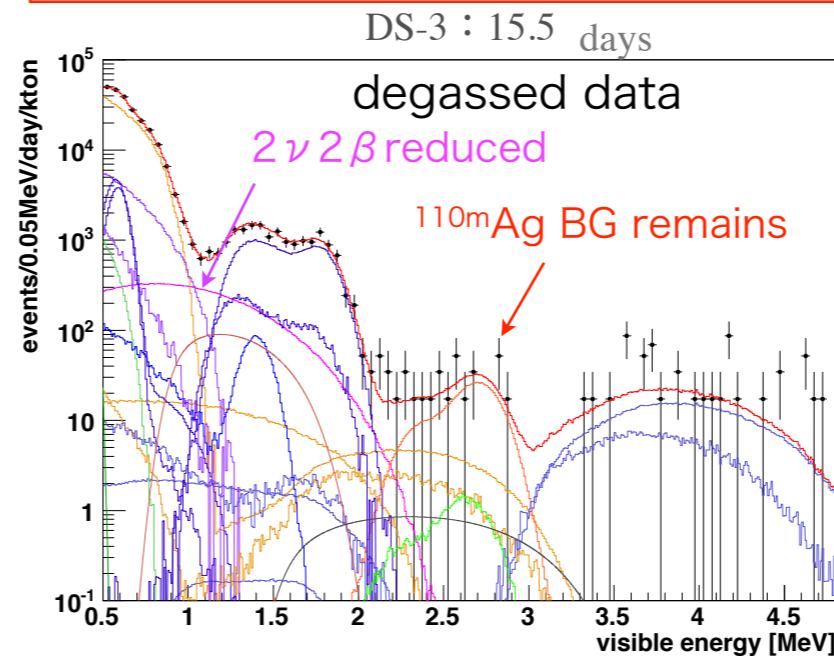
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$  meV

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

# 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	$> 5.8 \times 10^{22}$	$< 3.5-22$
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	GERDA	21.6	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 0.19-0.30^*$
	$^{76}\text{Ge}$ combined		$> 3.0 \times 10^{25}$	$< 0.16-0.25$
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	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	$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.18-0.36$
	$^{136}\text{Xe}$ combined		$> 3.4 \times 10^{25}$	$< 0.12-0.25$
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	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)

123.7

$> 1.1 \times 10^{25}$

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

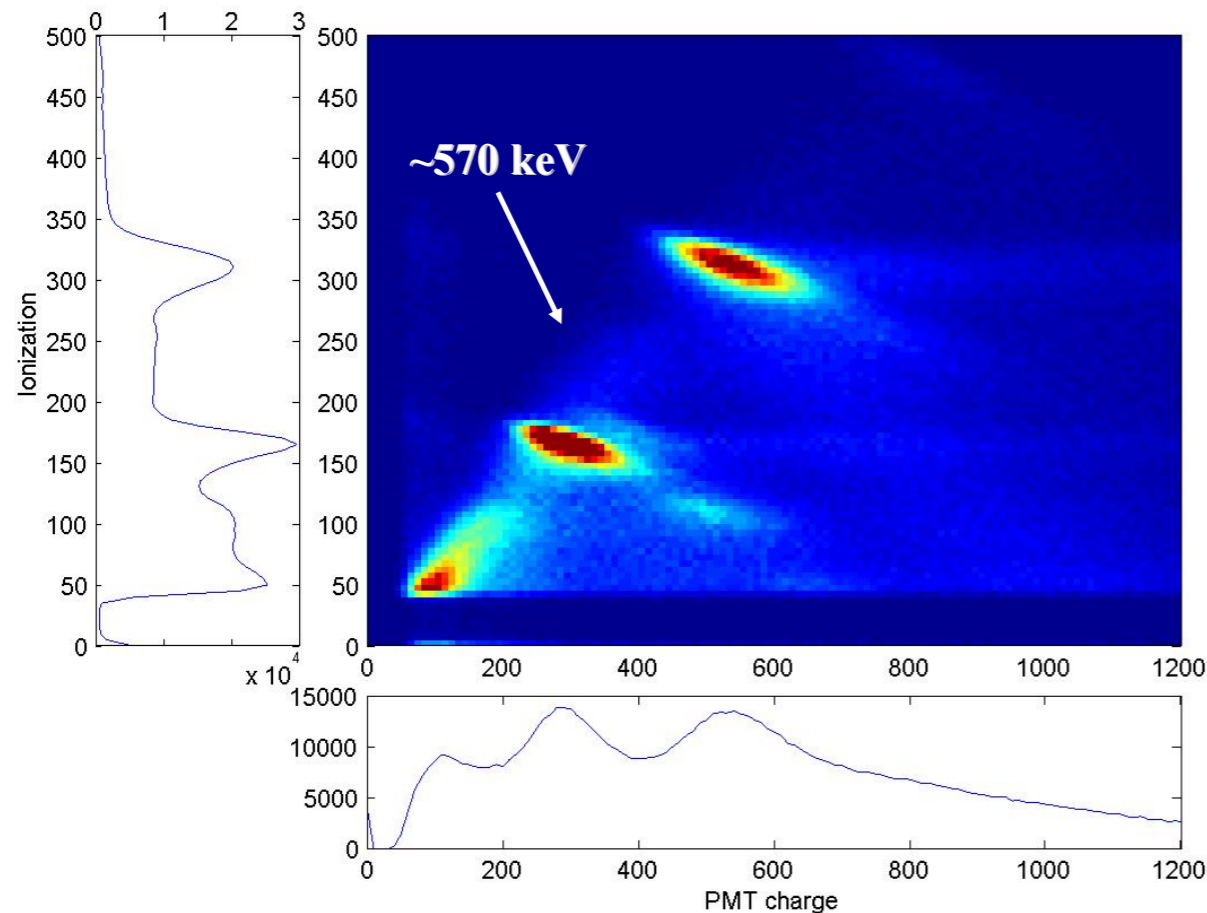
# EXO-200 @ WIPP (2010~)

liquid Xenon 200 kg (80% enrichment)

sensitivity  $\sim 150$  meV  
(2 years)

external  $^{208}\text{Tl}$   $\gamma$  limited

ionization + scintillation

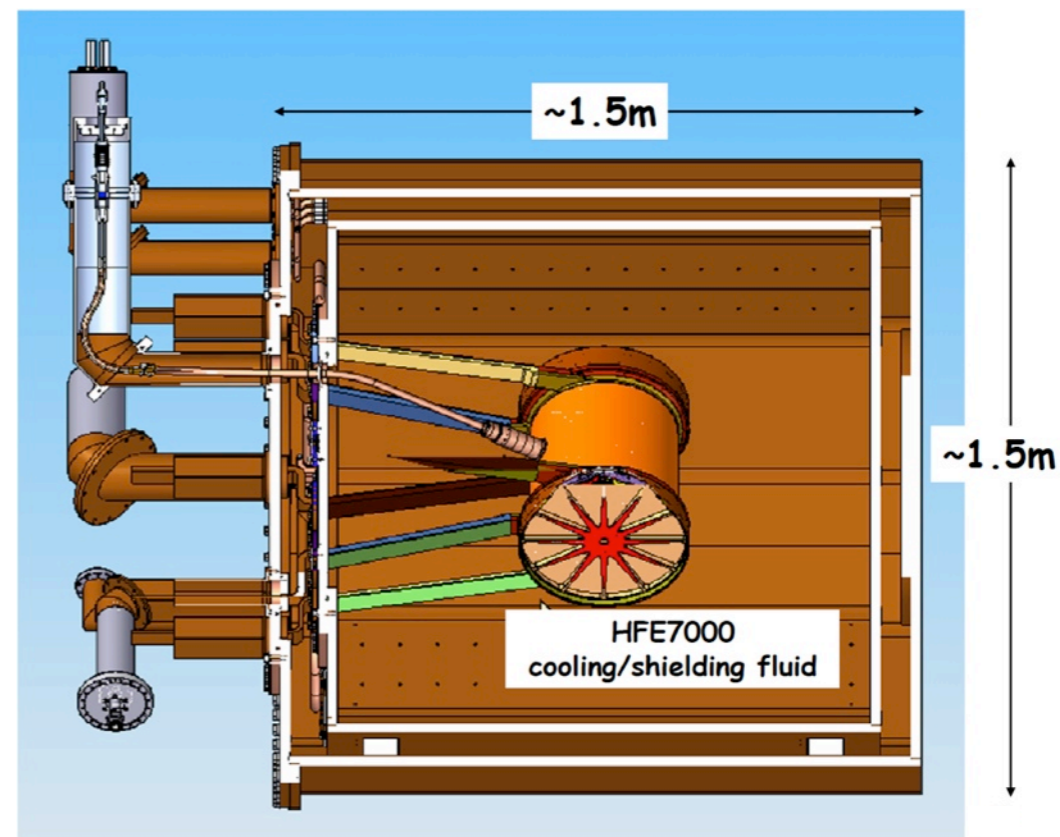
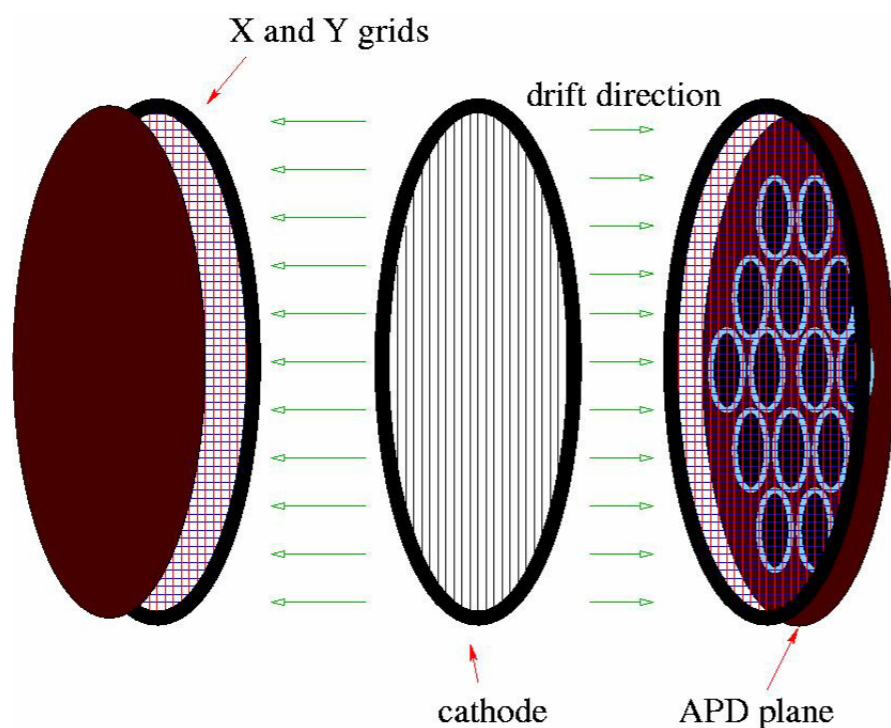


ionization alone

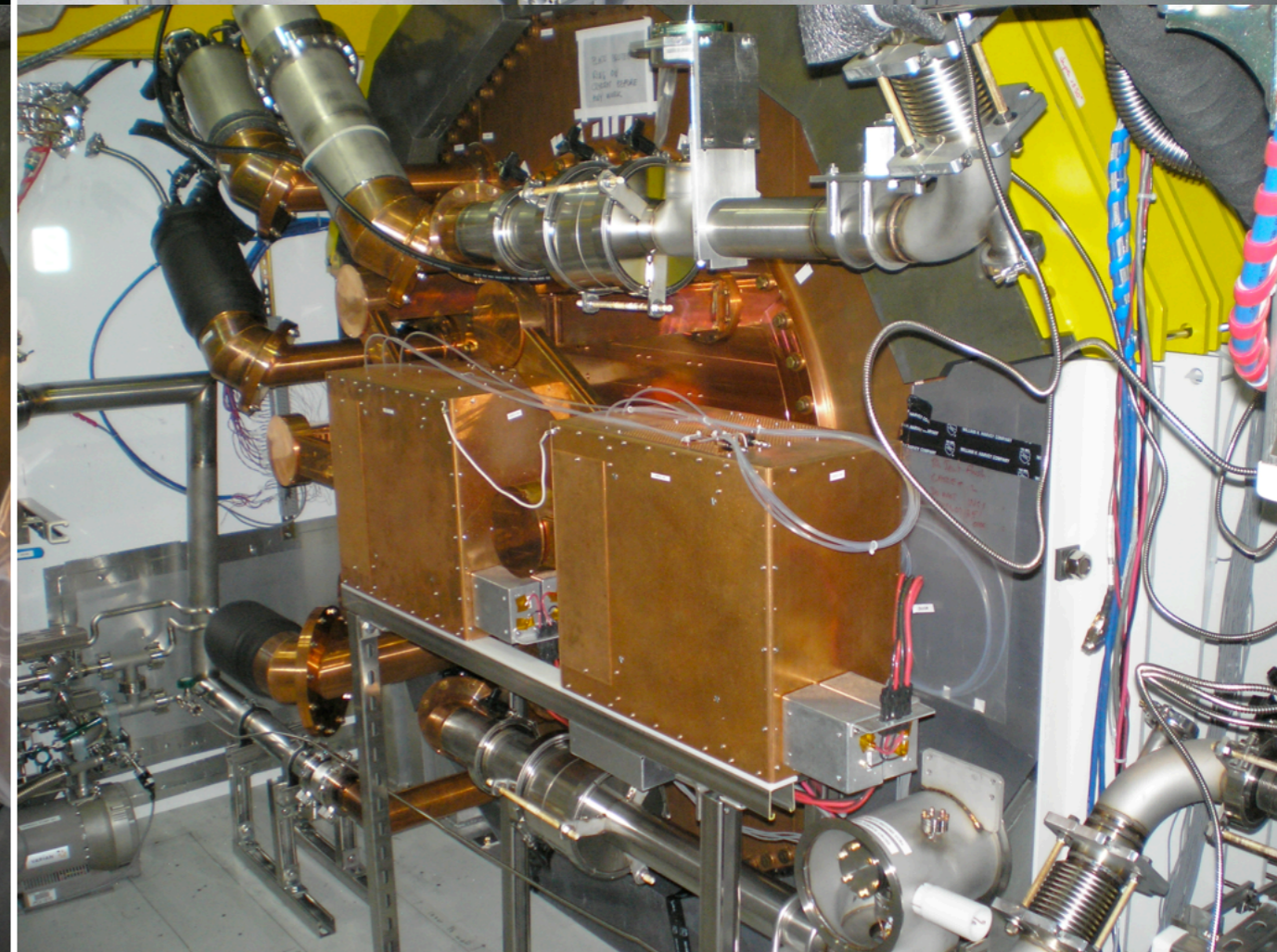
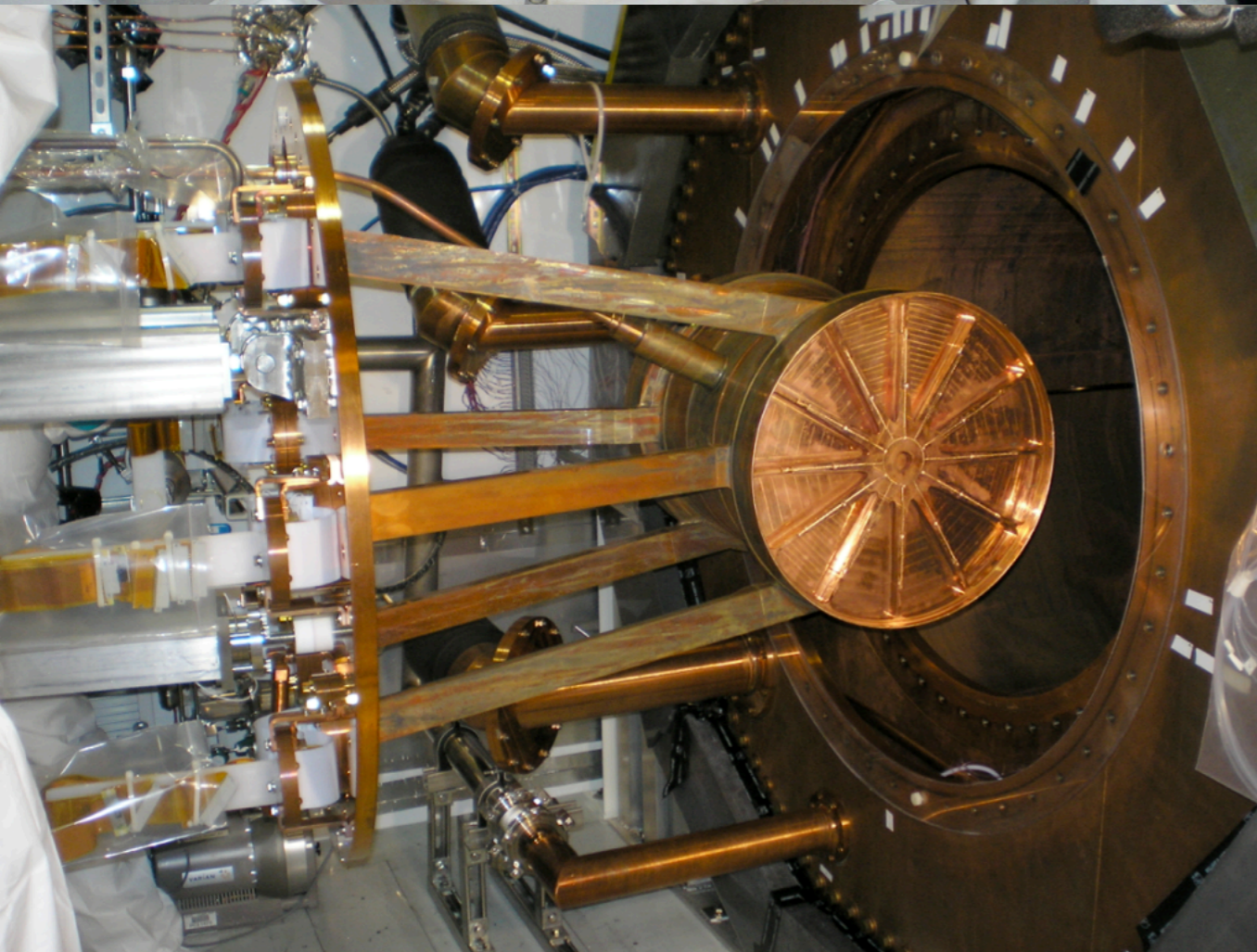
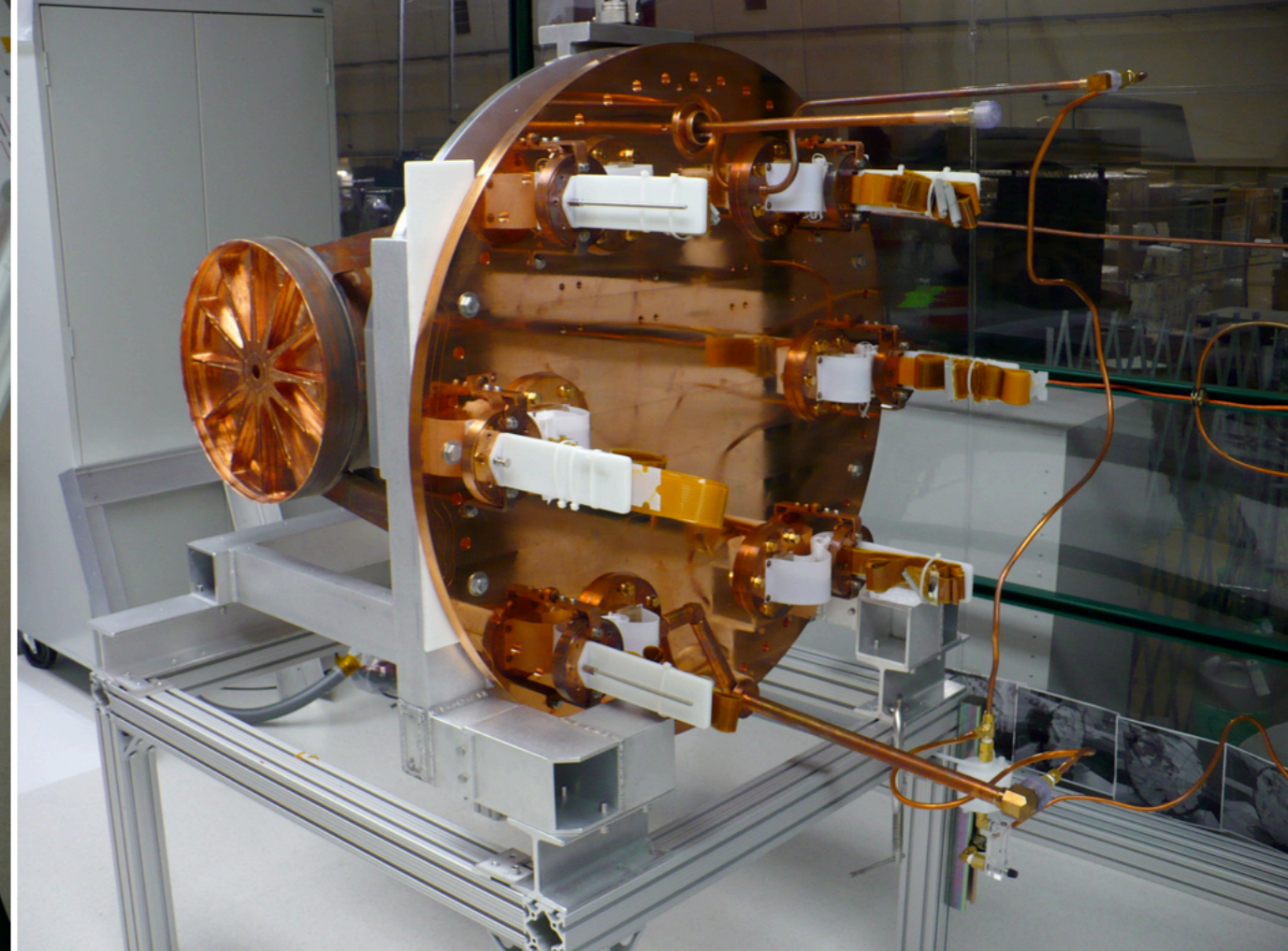
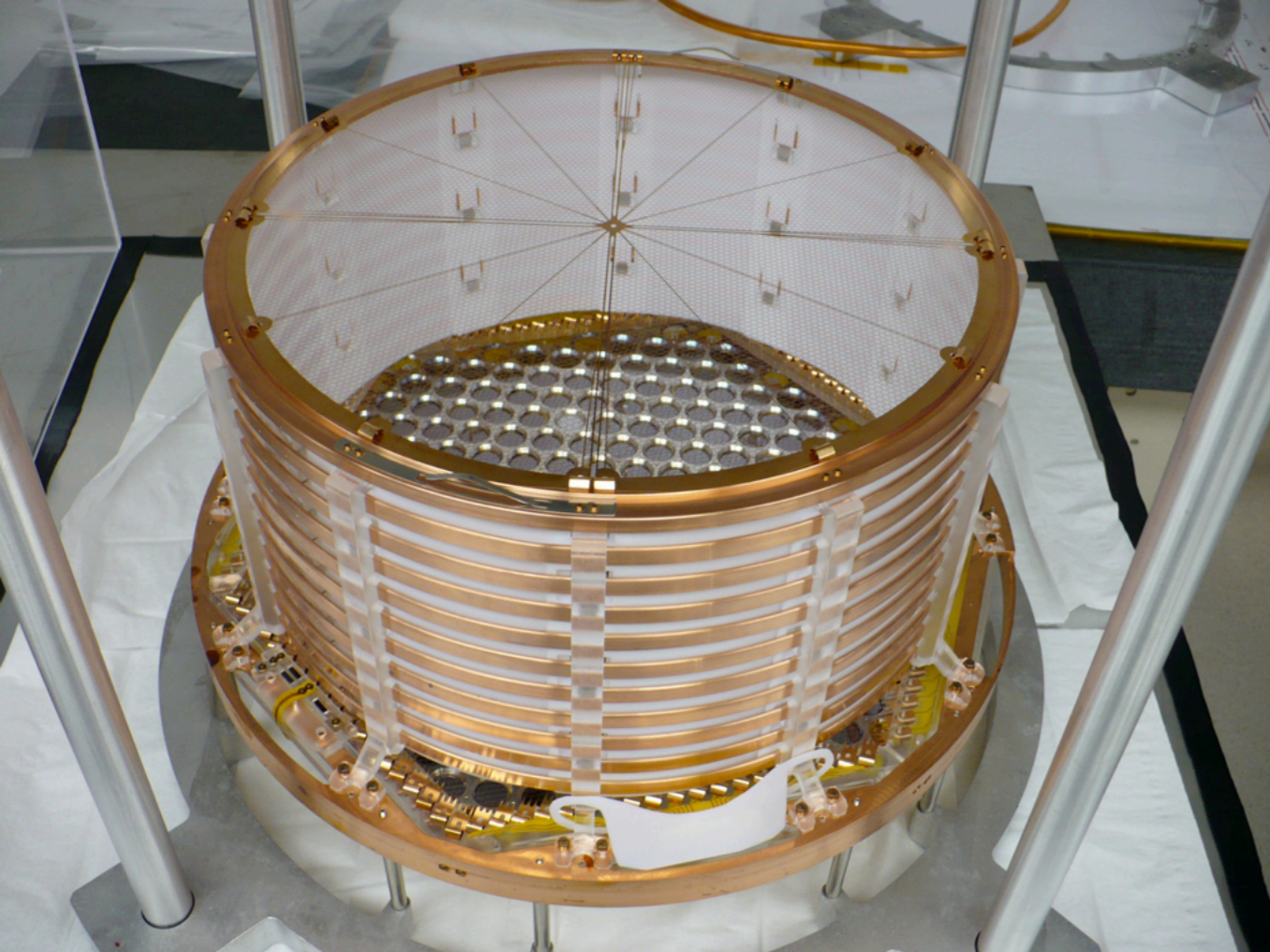
$$\sigma/E = 1.8\% @ Q_{\beta\beta}$$

ionization + scintillation

$$\sigma/E = 1.4\% @ Q_{\beta\beta}$$

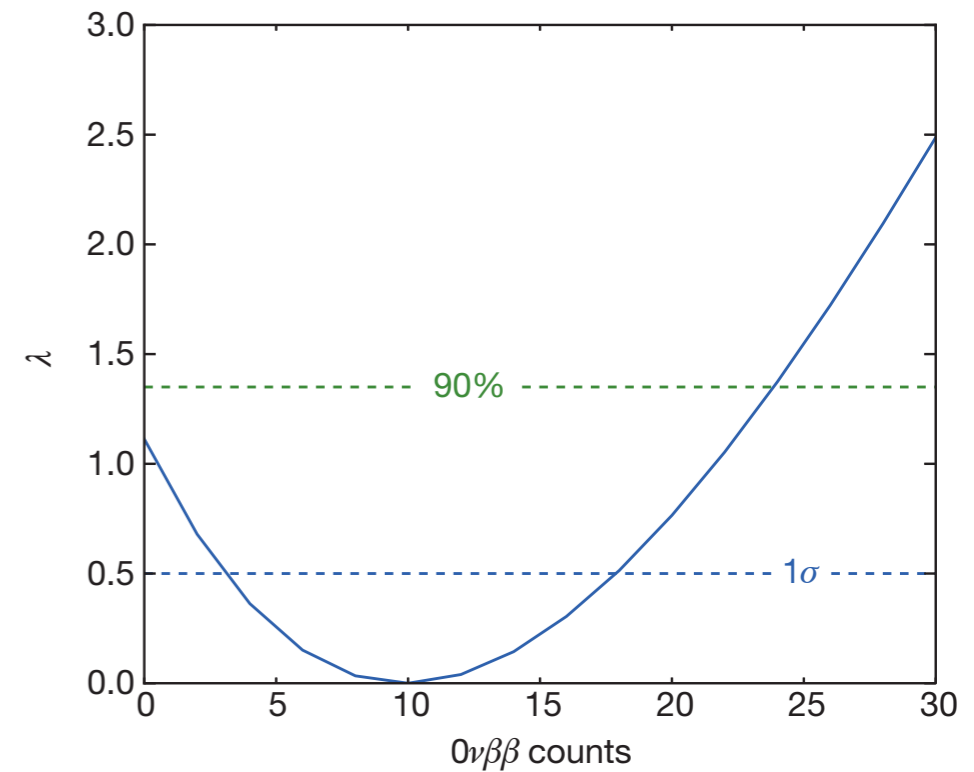
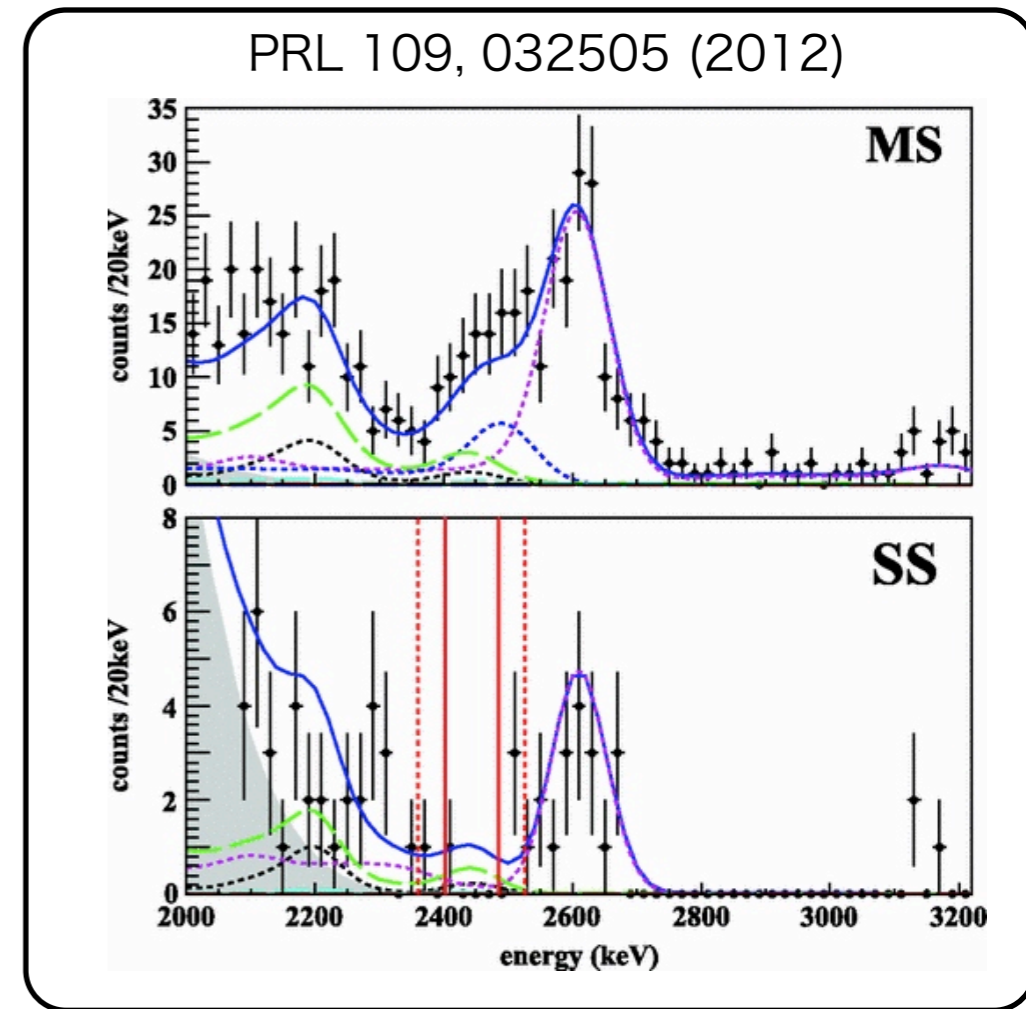
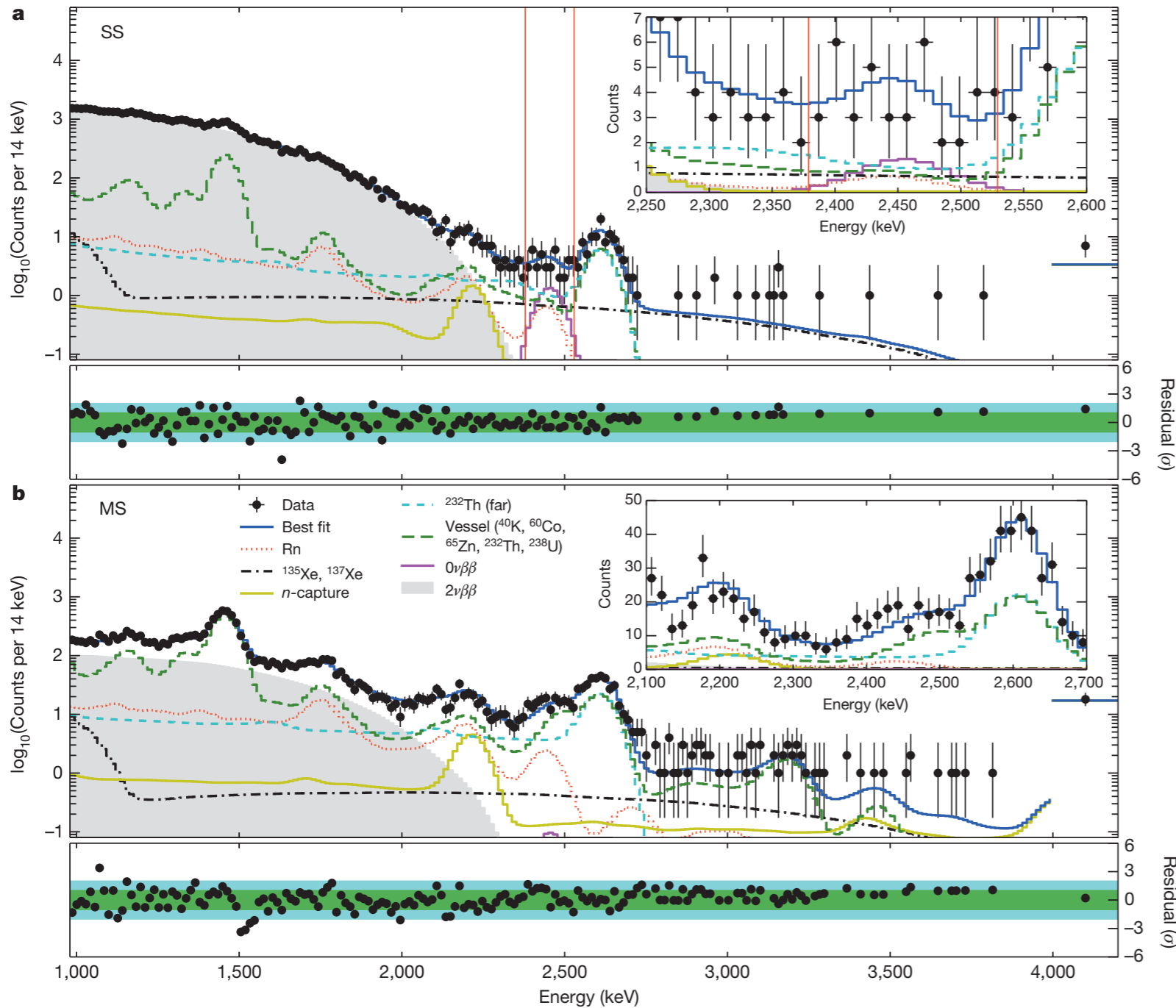


15 M\$



# EXO-200 (2014)

Nature 510, 229-234 (2014)



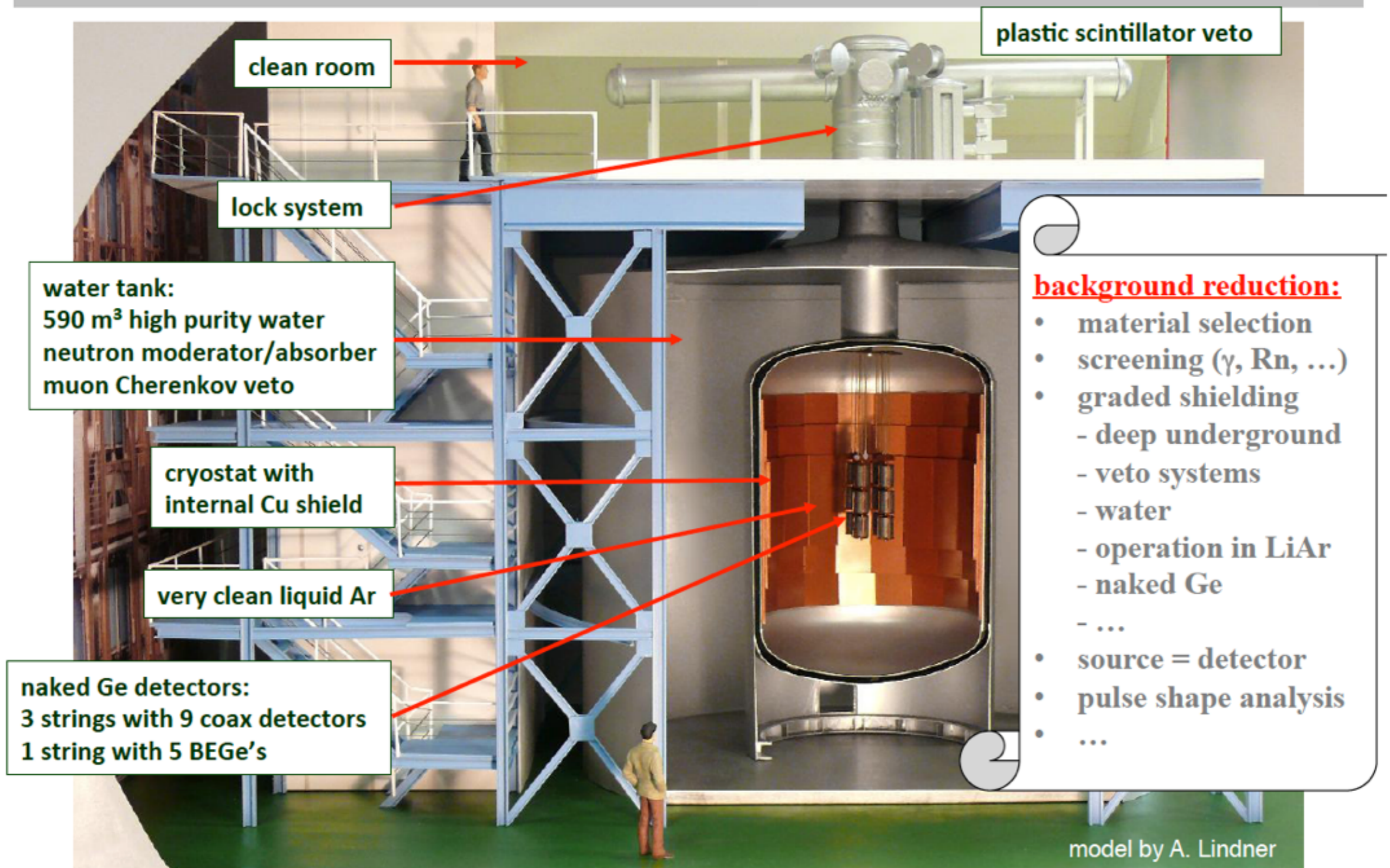
$1.6 \times 10^{25}$  yrs (32.5 kg-yr)

→  $1.1 \times 10^{25}$  yrs (123.7 kg-yr)

1.2 σ excess  
1 σ range (3.1, 18)

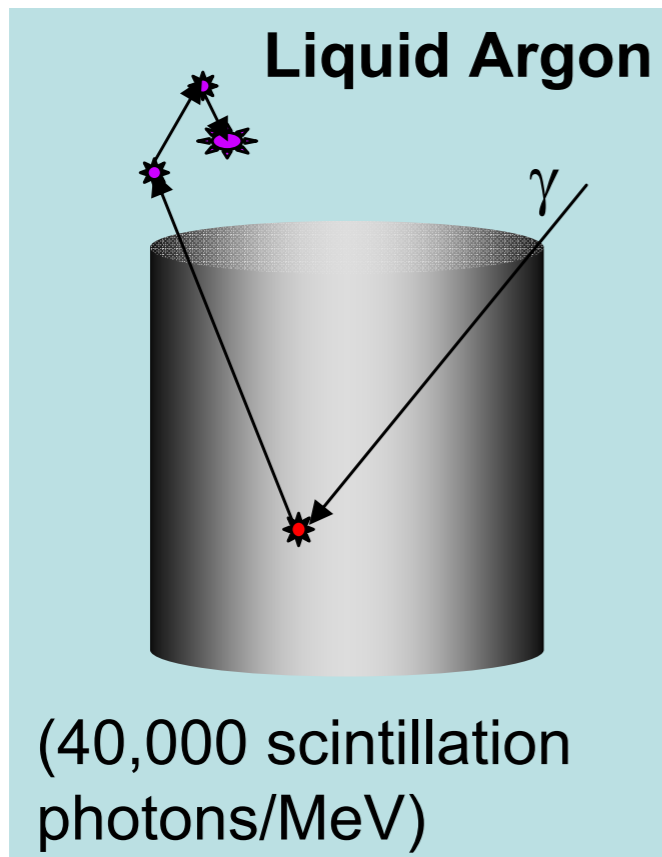
# The GERDA Detector

@Gran Sasso



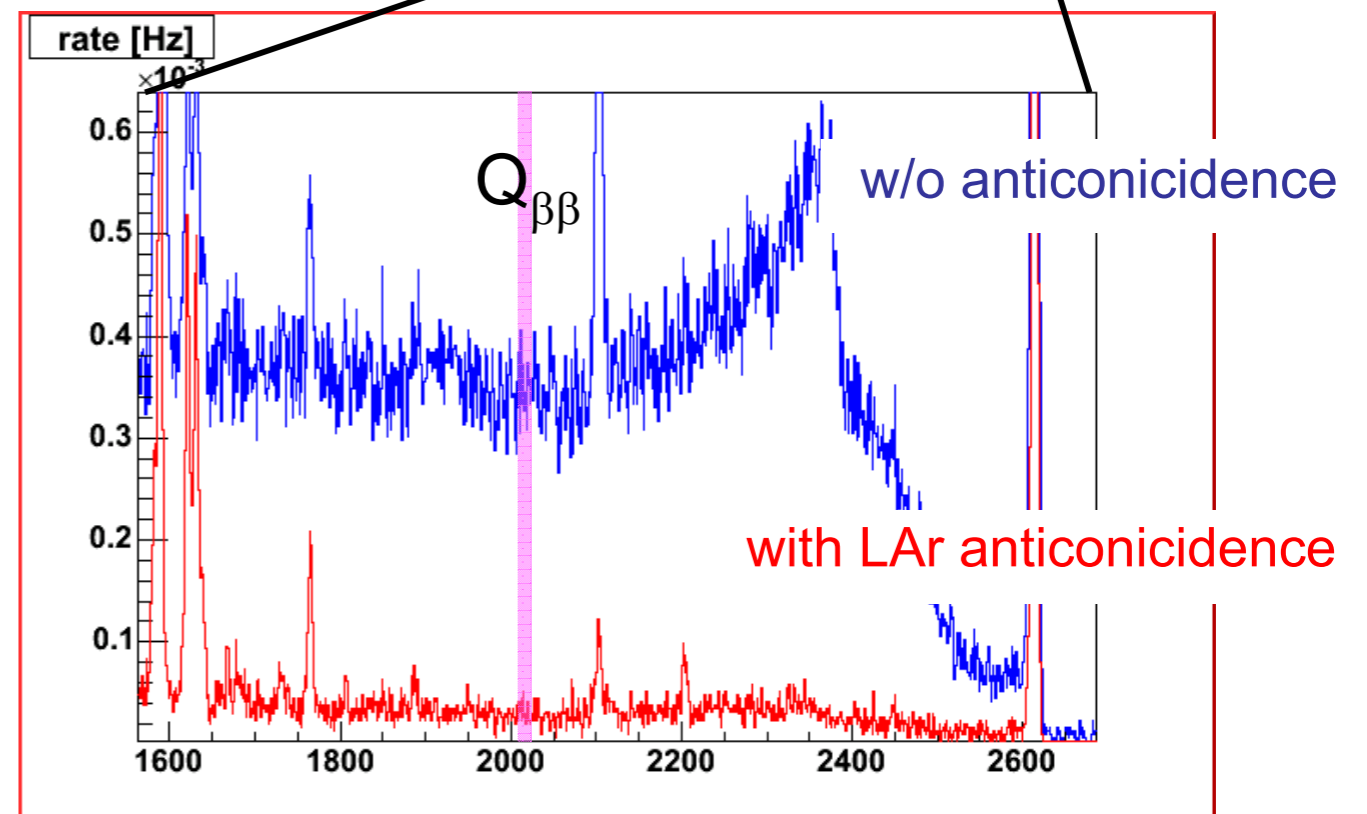
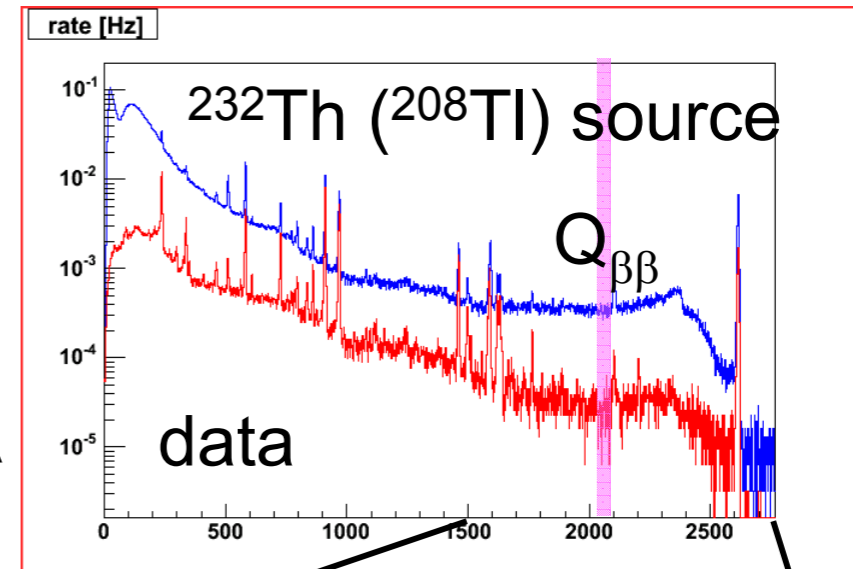
# Background suppression techniques:

Discrimination of Multi Site Events (MSE) (e.g. Compton bkg.) from Single Site Events (SSE) (e.g.  $0\nu\beta\beta$ ) by: **liquid argon scintillation anti-coincidence (LArGe)**



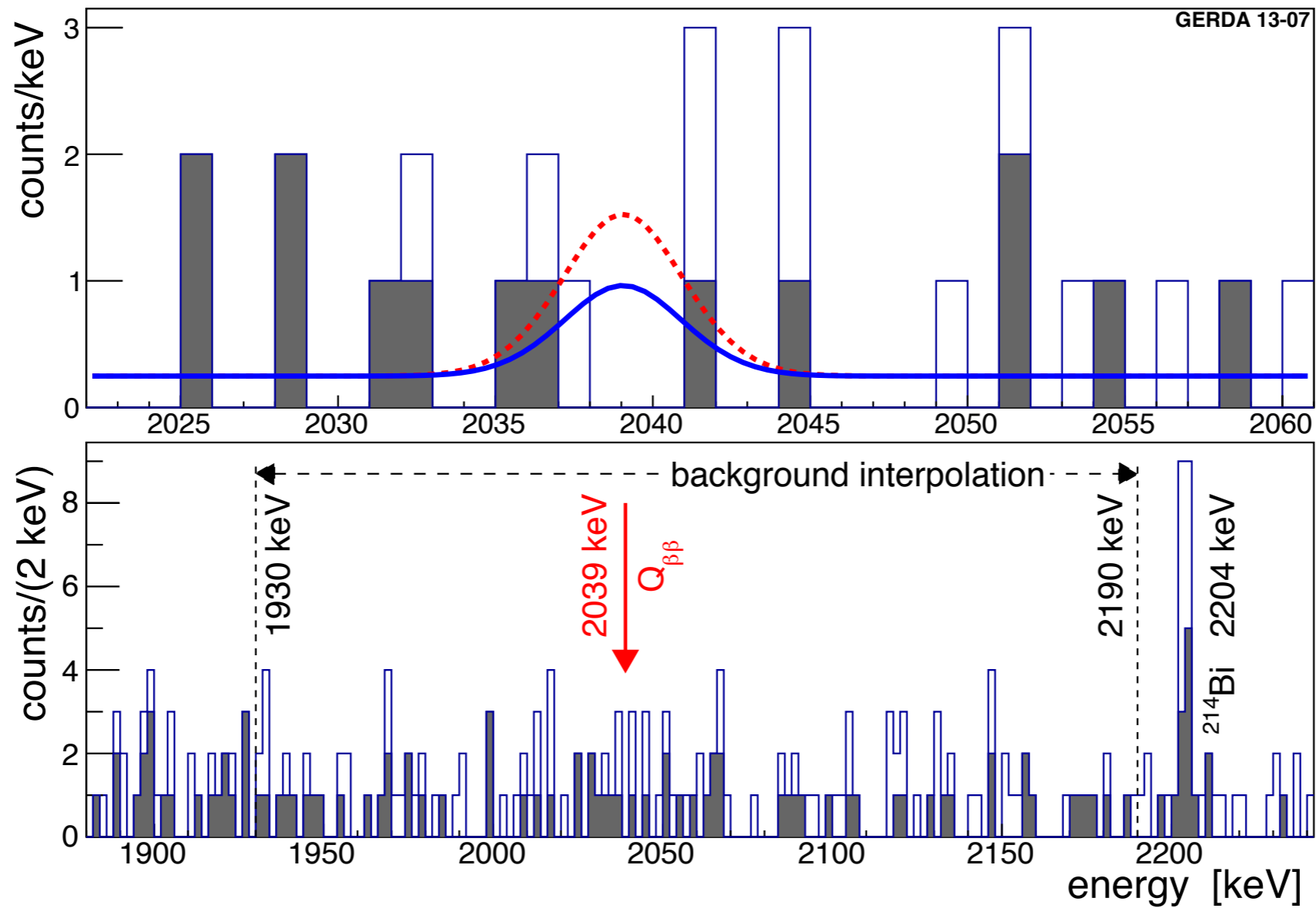
- 20 cm diameter test setup
- Suppression factor (~20) limited by escape from setup

GERDA data



# GERDA (2013)

PRL 111, 122503 (2013)

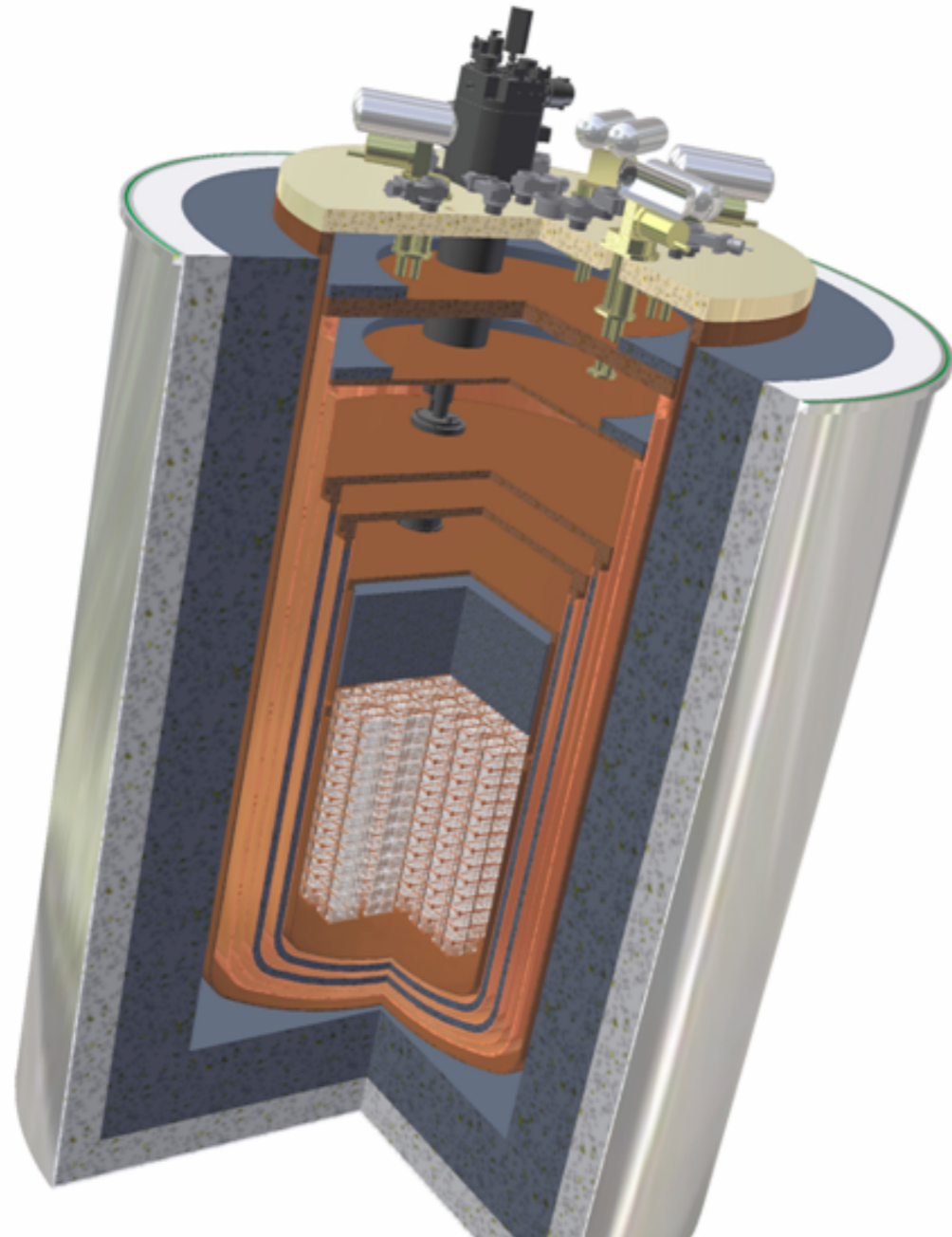


$2.1 \times 10^{25}$  yrs (21.6 kg-yr)

$3.0 \times 10^{25}$  yrs (past combined)  $\rightarrow \langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.16 \sim 0.25$  eV  
都合のいいのだけ



# CUORE @ Gran Sasso

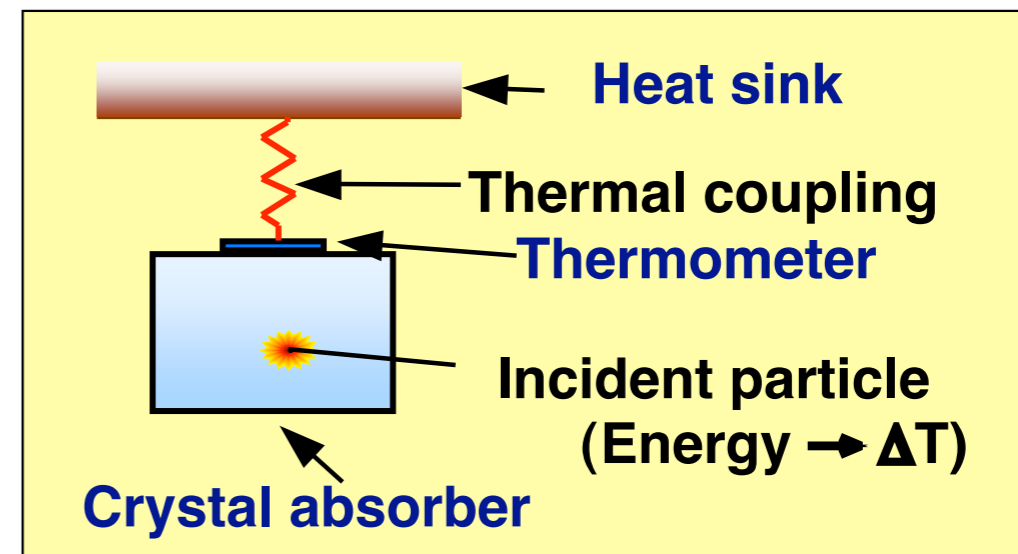


19 towers

988 detectors

741 kg of  $\text{TeO}_2$

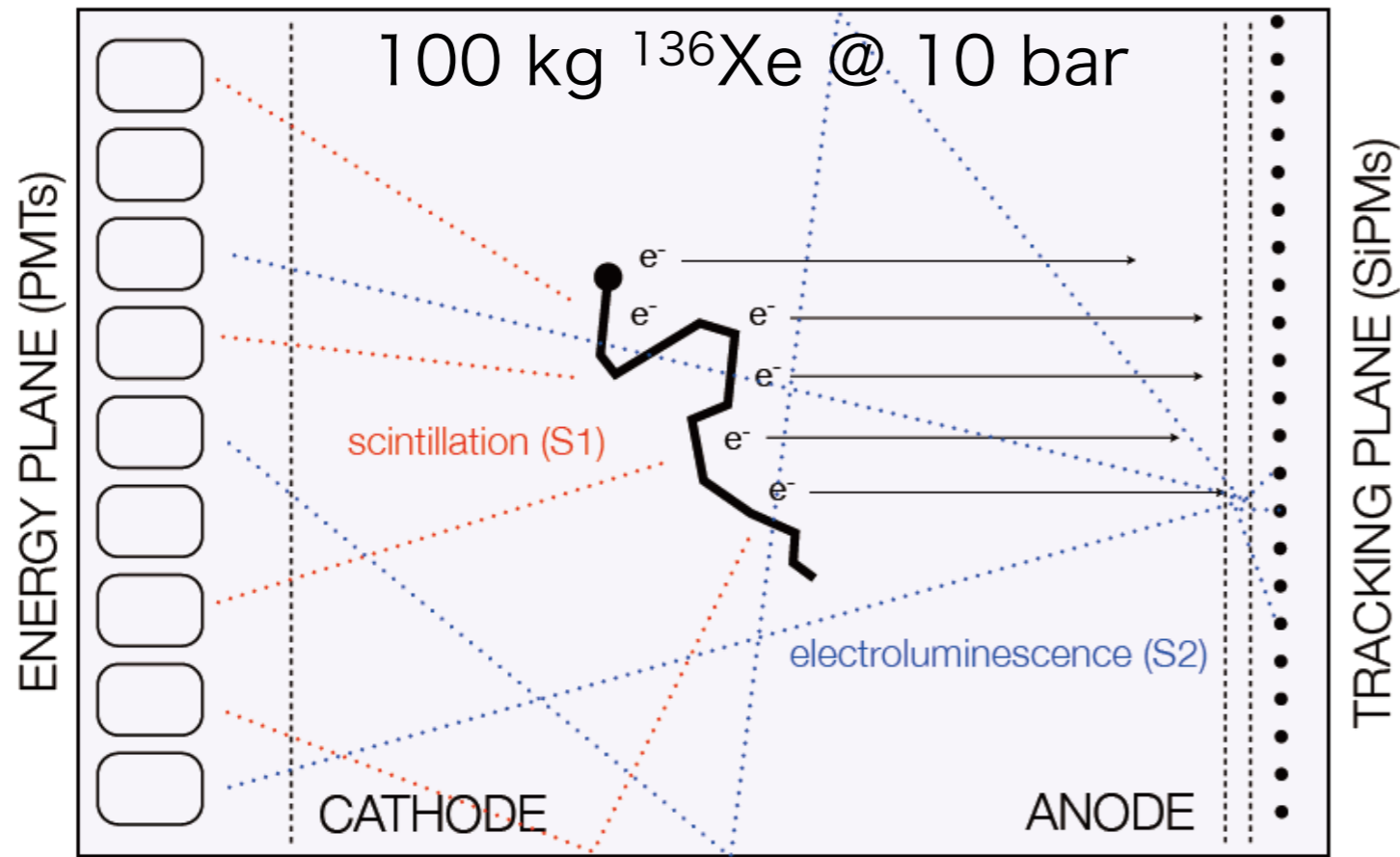
204 kg of  $^{130}\text{Te}$



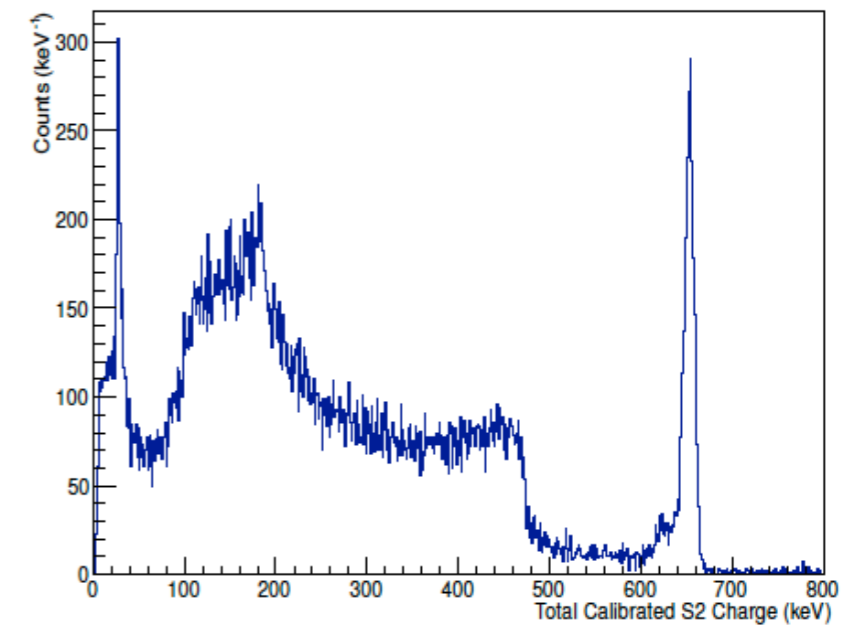
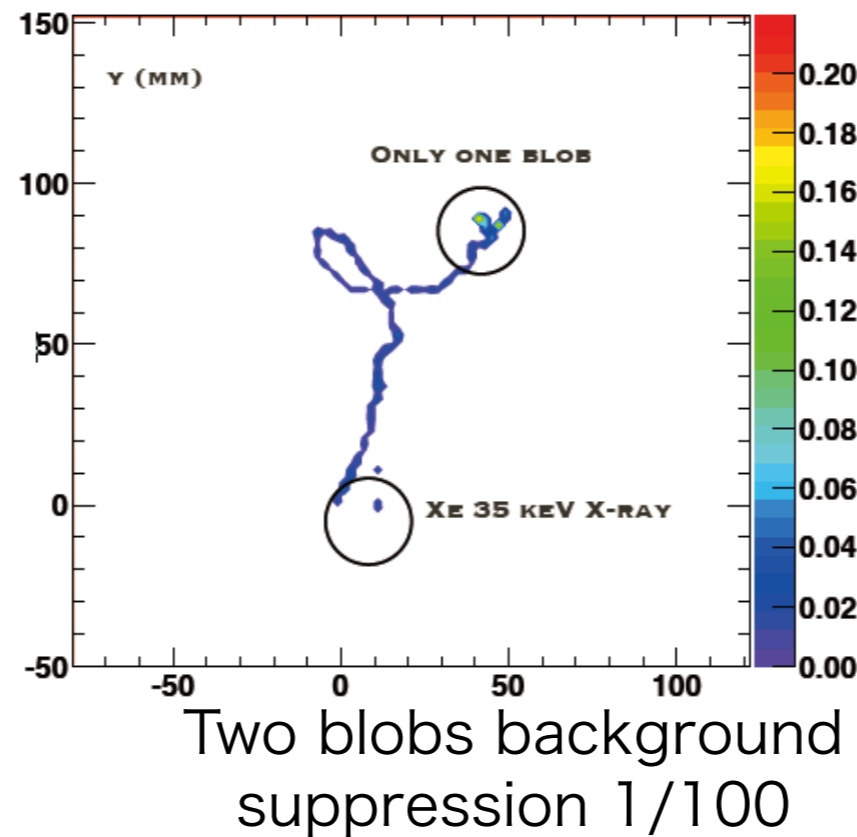
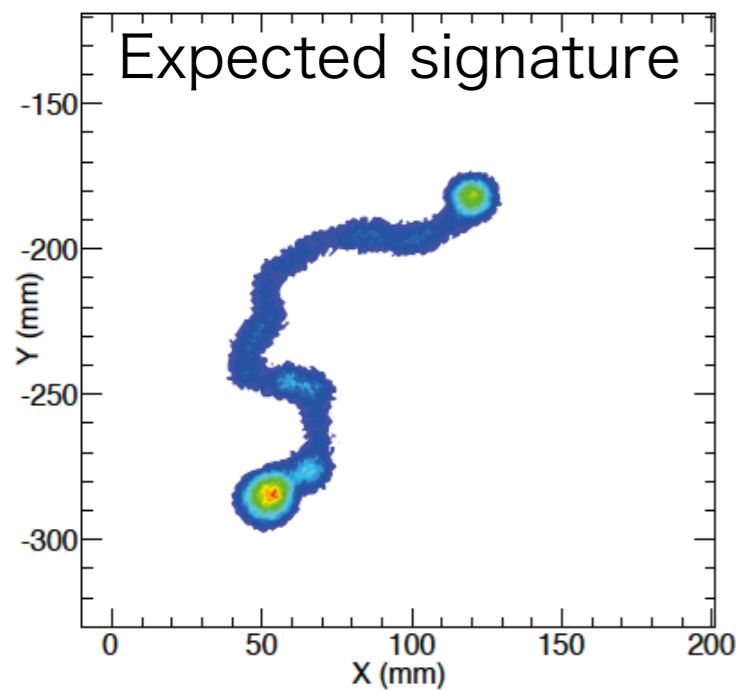
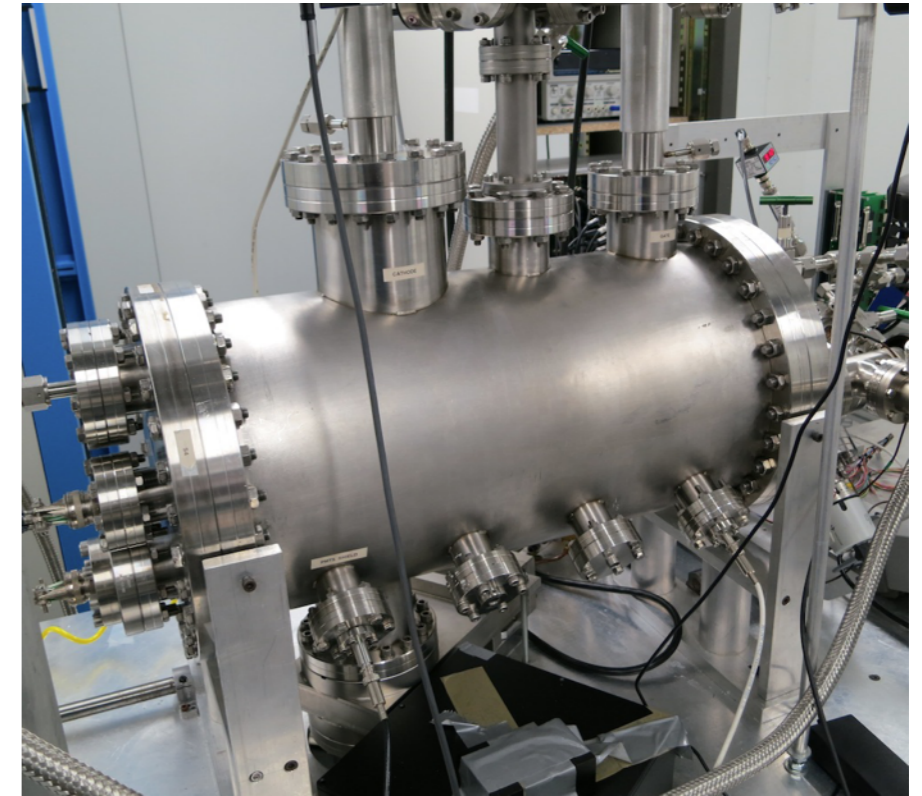
$$C_V = 1944 \left(\frac{V}{V_m}\right) \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \text{ J/K} \quad \Delta E = \xi \sqrt{k C_V T^2}$$

$$\Delta E \sim \text{keV} \quad @ \quad 2 \text{ MeV} (\sim 10 \text{ mK} \sim 1 \text{ kg})$$

# NEXT @Canfranc



NEXT-DEMO 5kg Xe contained

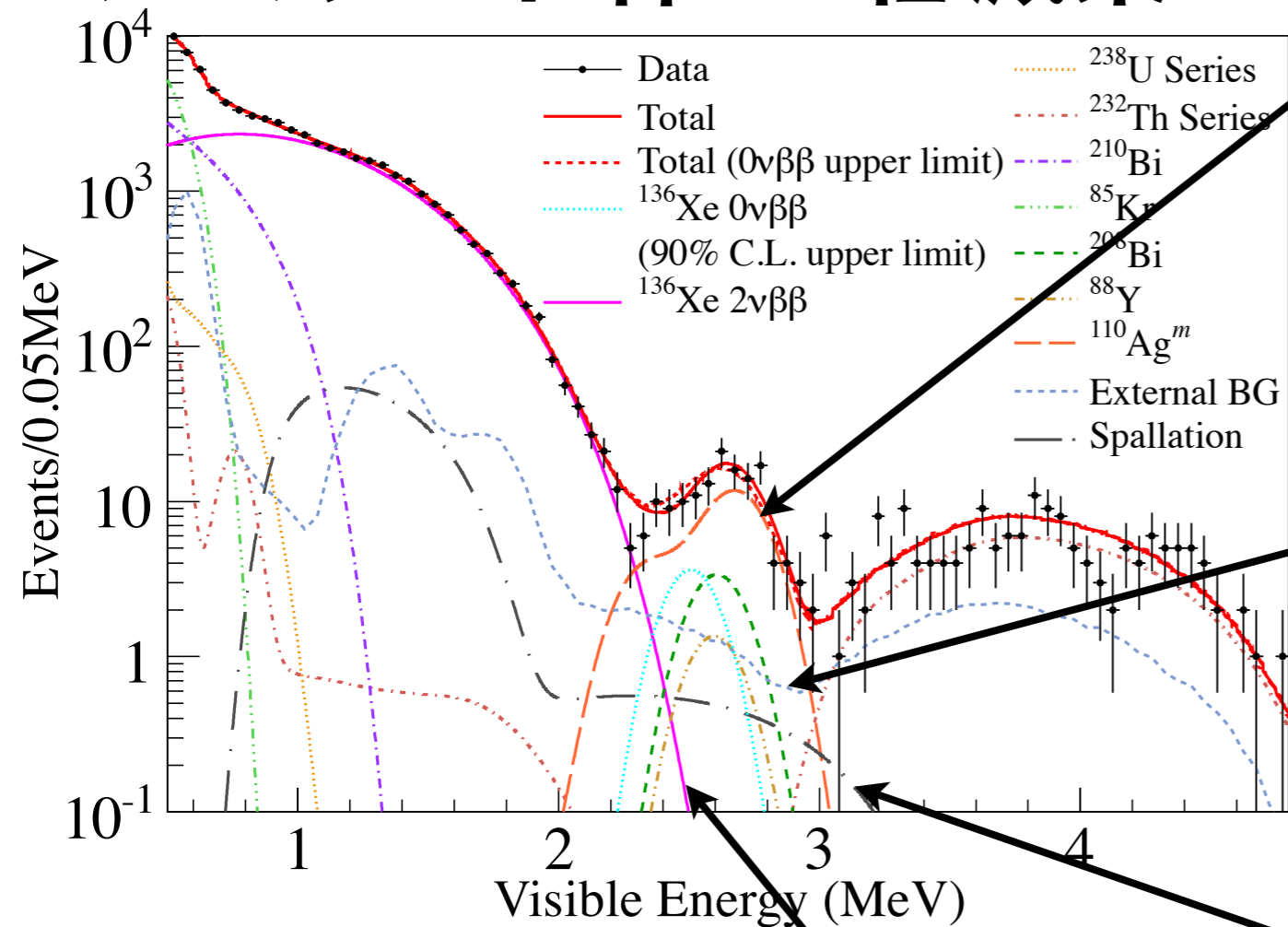


FWHM@ $Q_\beta$   $\beta = 1\%$

# カムランド禅BG低減策

現状

目標感度: ~80meV



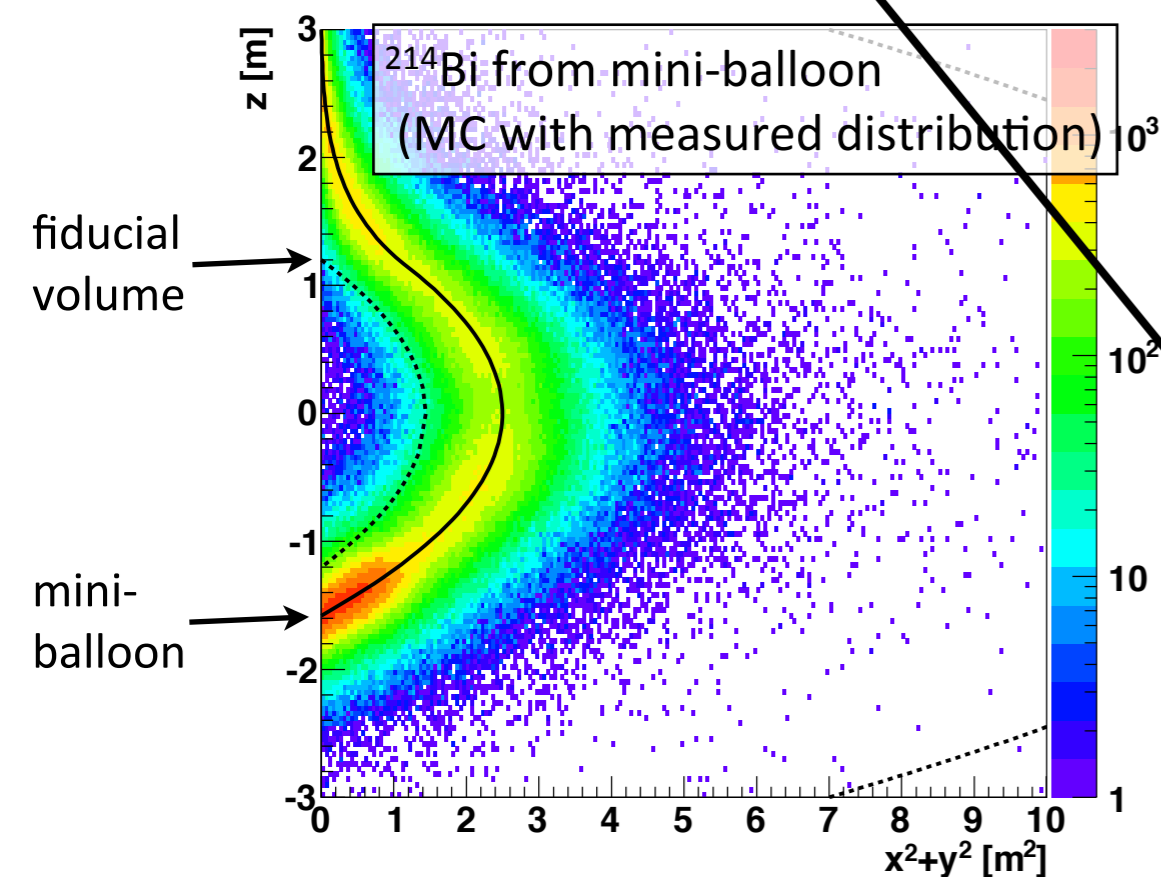
Xe-LS 中の  $^{110m}\text{Ag}$  あるいは  $^{208}\text{Bi}$ ,  $^{88}\text{Y}$  は、キセノンの回収/精留/吸着で除去する。LS は新品と入れ替える。

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。

原子核破砕起源の  $^{10}\text{C}$  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

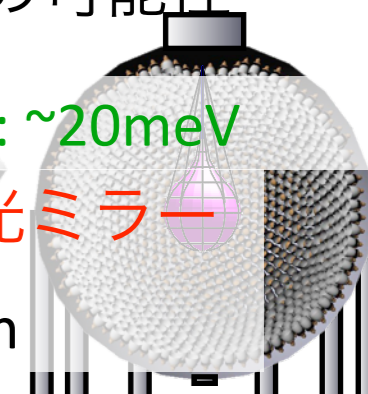
目標感度: ~40meV

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

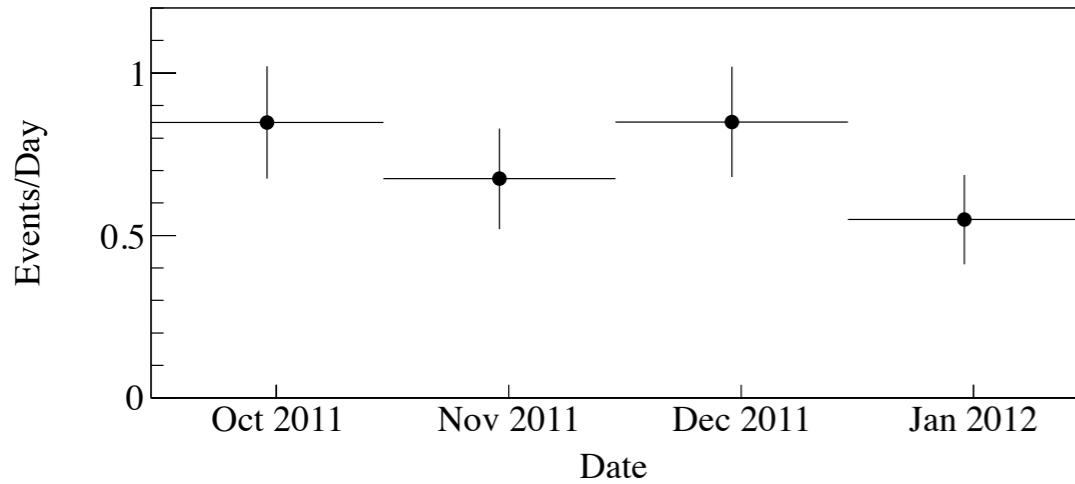
$2\nu 2\beta$  低減には、高発光LS, 集光ミラー  
導入を計画 ---> KamLAND2-Zen



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

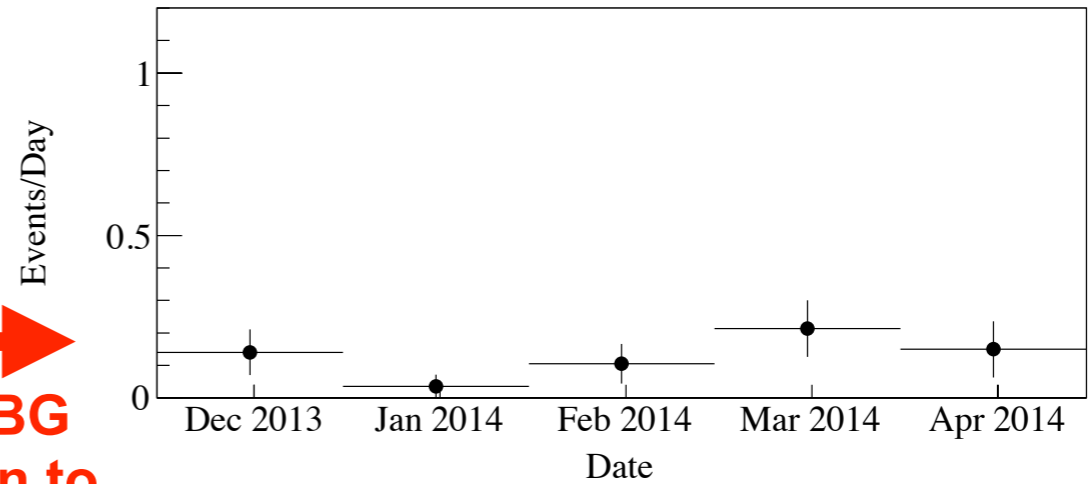
## Phase 1 (first 112.3 days)

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

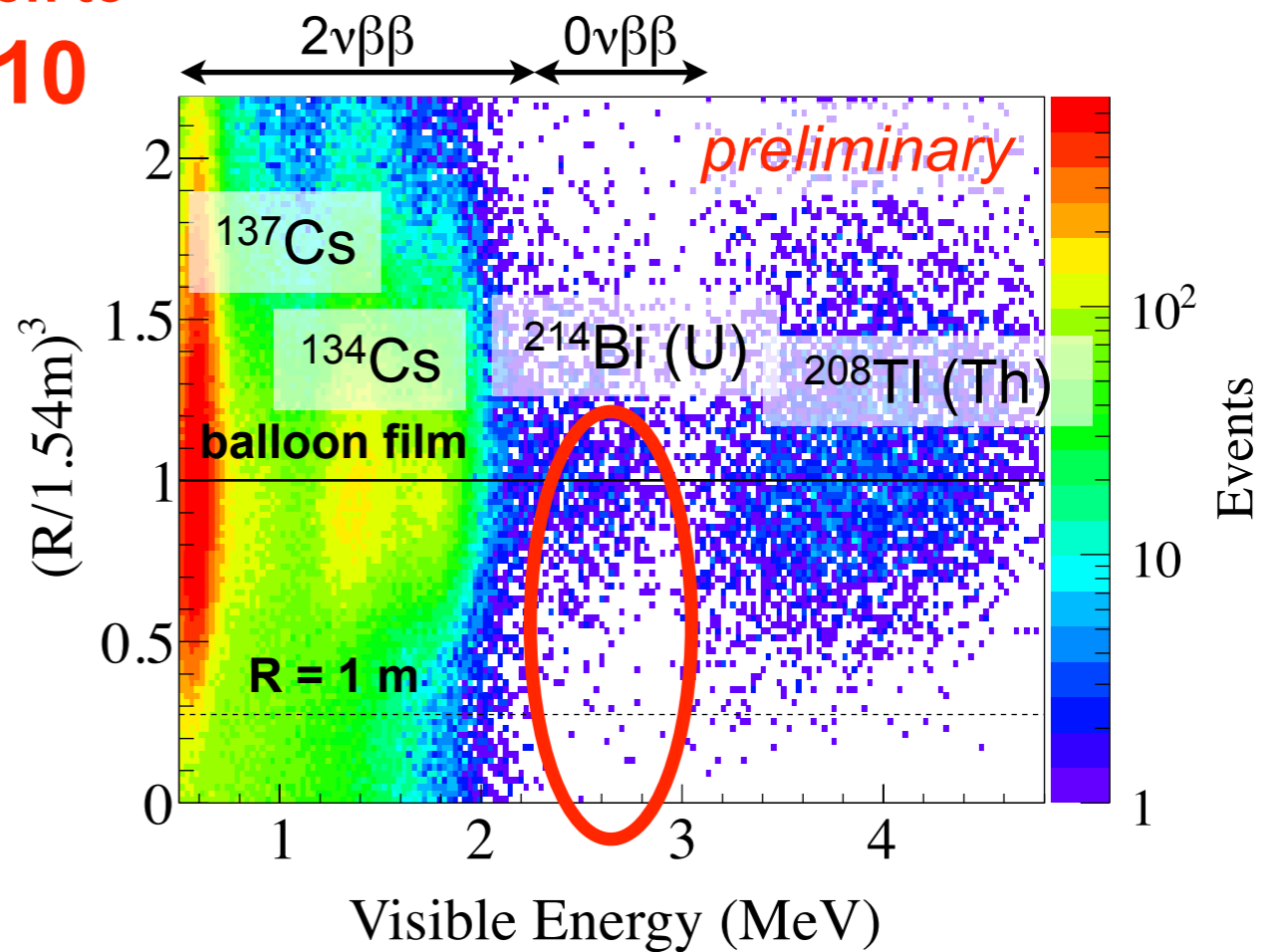
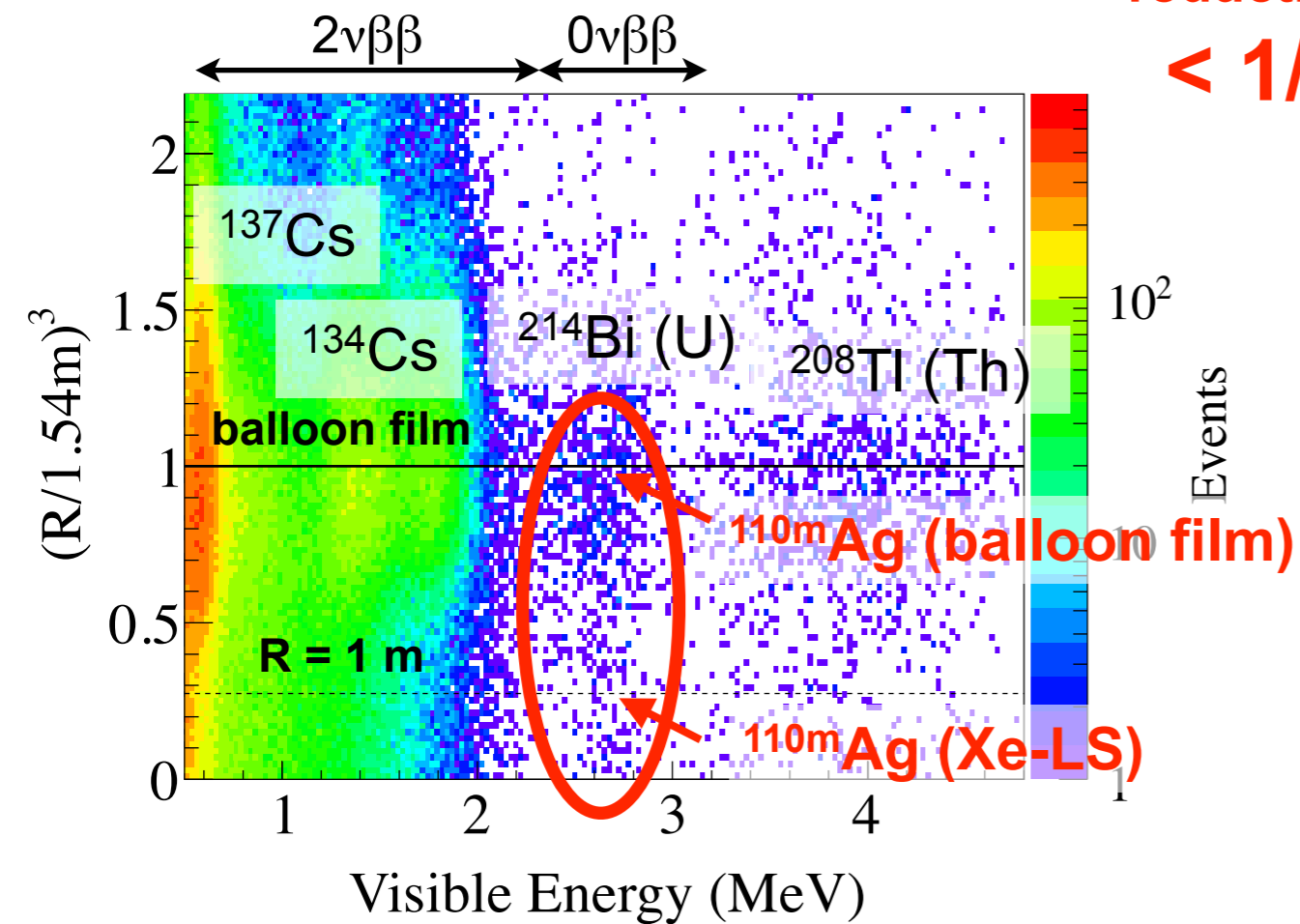


## Phase 2 (first 114.8 days)

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



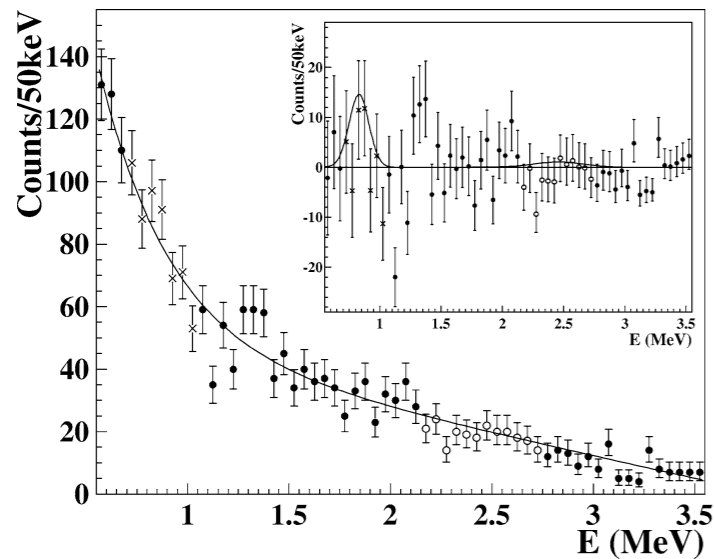
**110mAg BG reduction to < 1/10**



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

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

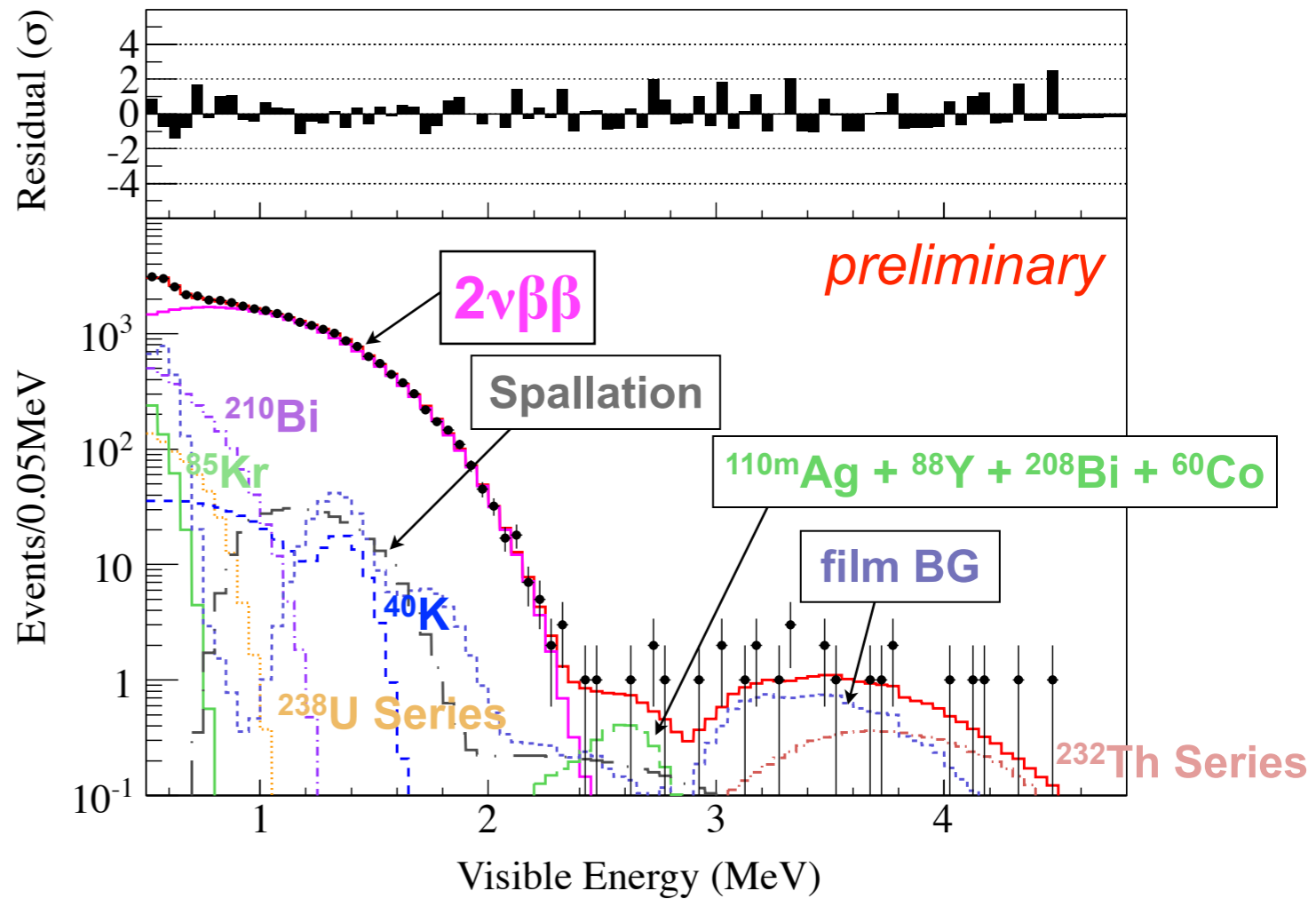
DAMA (2002) Liquid Xe scintillator



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

KamLAND-Zen (2014) Xe loaded liquid scintillator

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



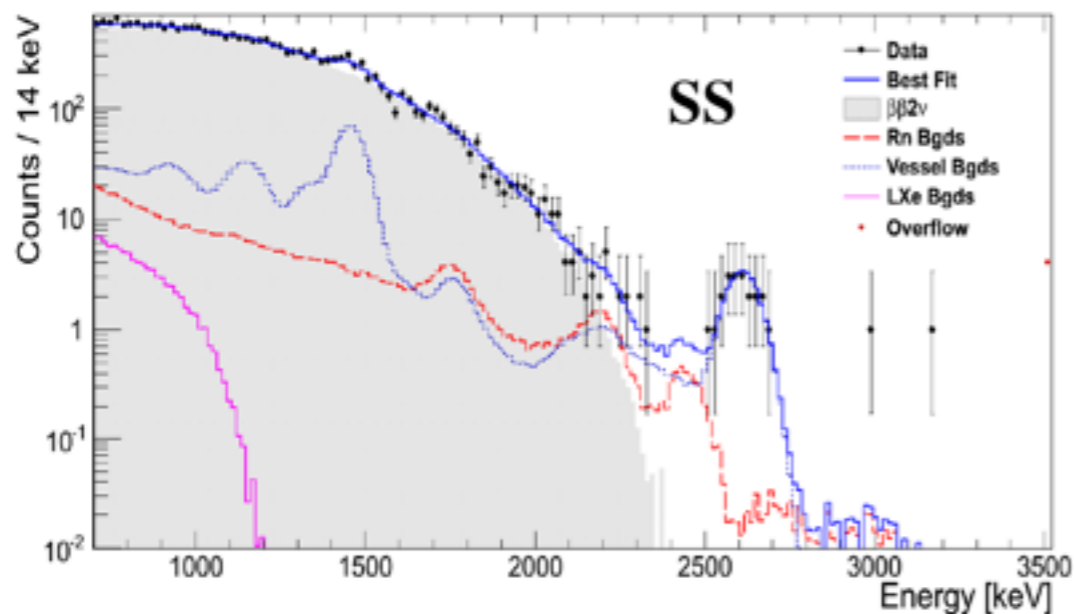
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.32 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

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

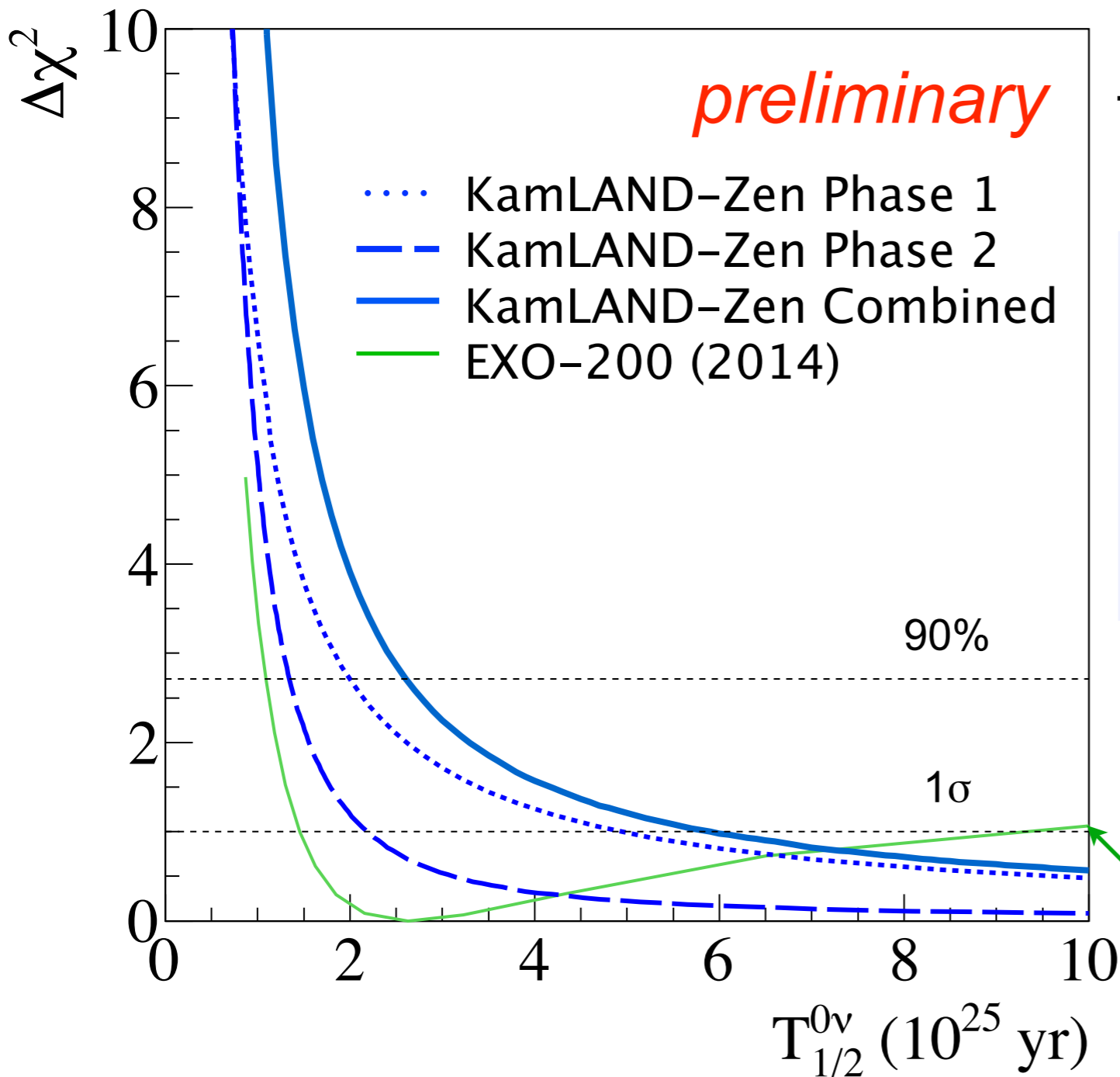


$T^{2\nu}_{1/2} = 2.165 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.059(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

← 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**

# 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

どうぞ期待！

KamLAND-Zen 89.5 kg-yr

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

現在世界最高感度

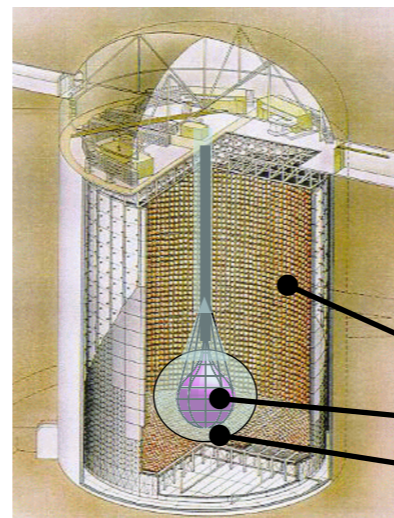
KamLAND-Zen  
放射性不純物低減後

KamLAND-Zen  
700kg超に増量、高純度ミニバルーン

KamLAND2-Zen 高発光LSと集光ミラー

$\sigma_E(2.6\text{MeV}) = 4\% \rightarrow 2.5\%$

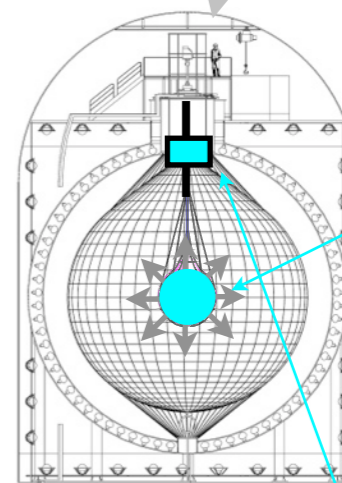
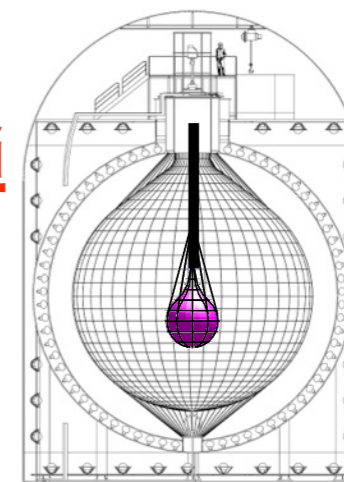
Super-KamLAND-Zen



water or LS  
Xenon-LS  
normal LS

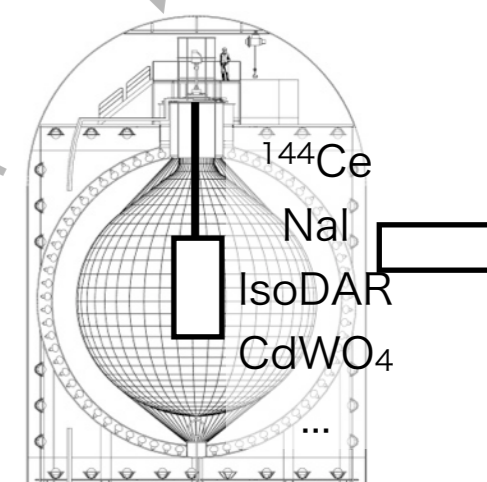
超精密反ニュートリノ物理

$p \rightarrow \nu K^+$ なども可能

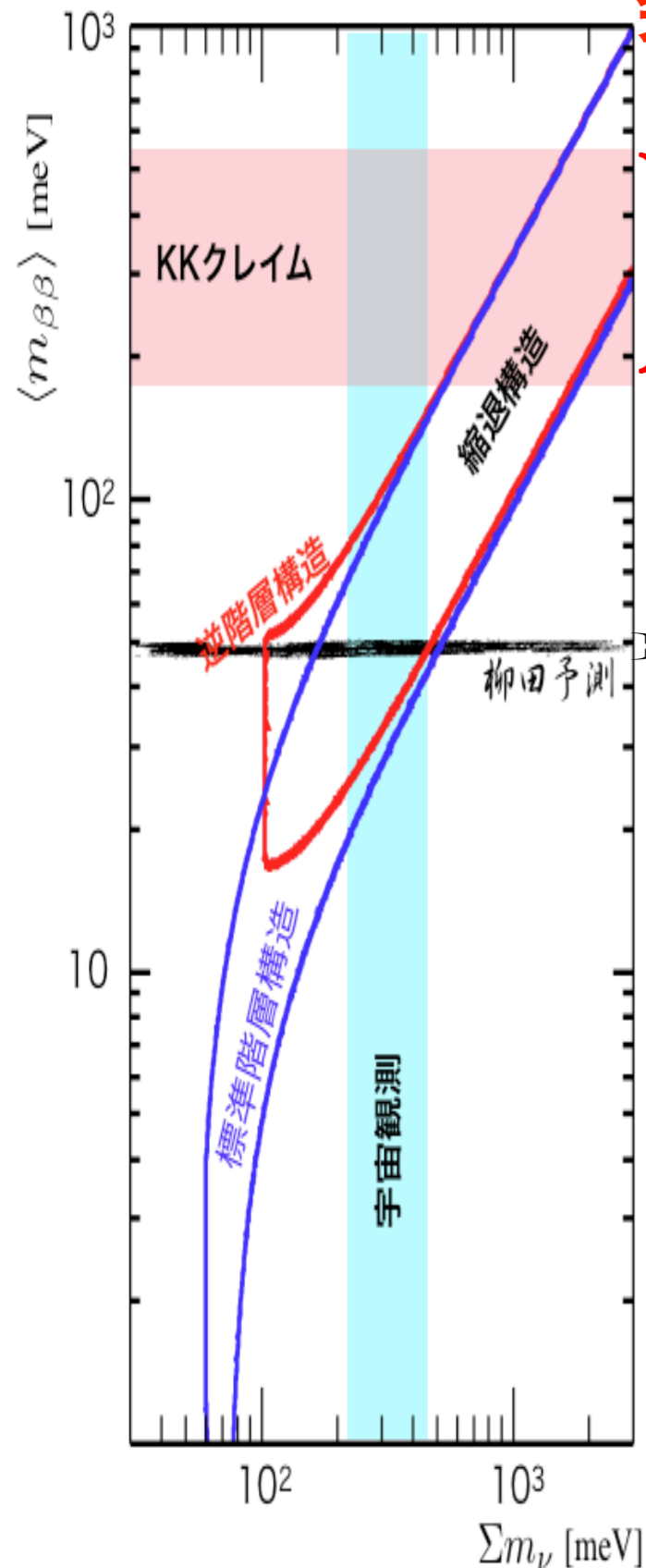


Xe高濃度化  
の開発

$\beta / \gamma$ 識別用撮像技術の開発

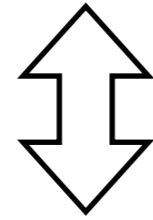


種々の極低放射能  
科学研究の実施



# 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)

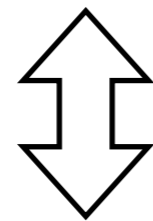


26年

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

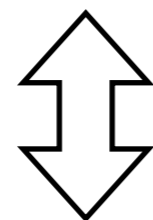


41年

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



67+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。 したい。  
m( \_ \_ )m