



東北大学



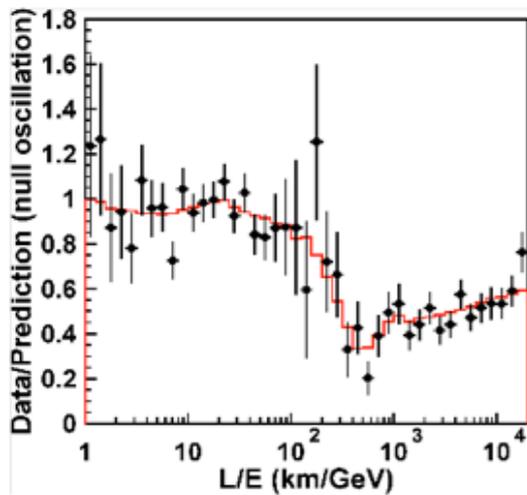
# ニュートリノ実験の現状と 将来展望

東北大学ニュートリノ科学研究センター  
井上邦雄

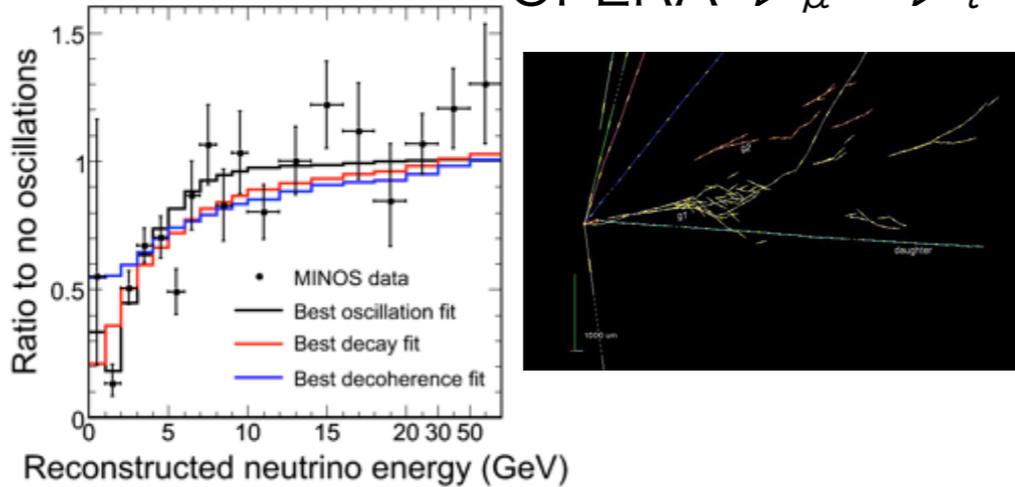
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

基研研究会「素粒子物理学の進展2014」 2014年7月29日

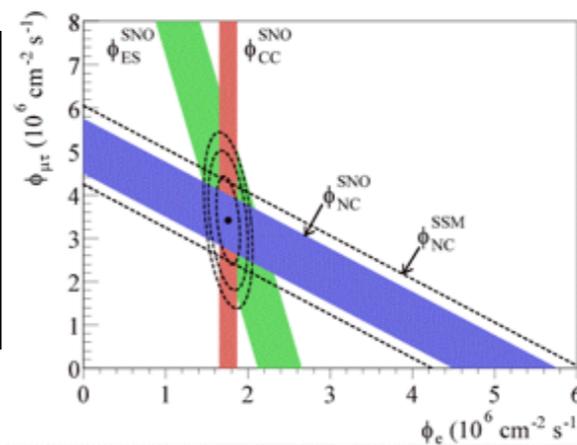
# SK 大気 半周期



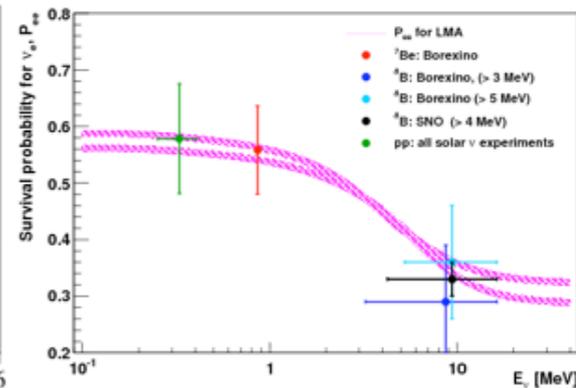
# MINOS 半周期 OPERA $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



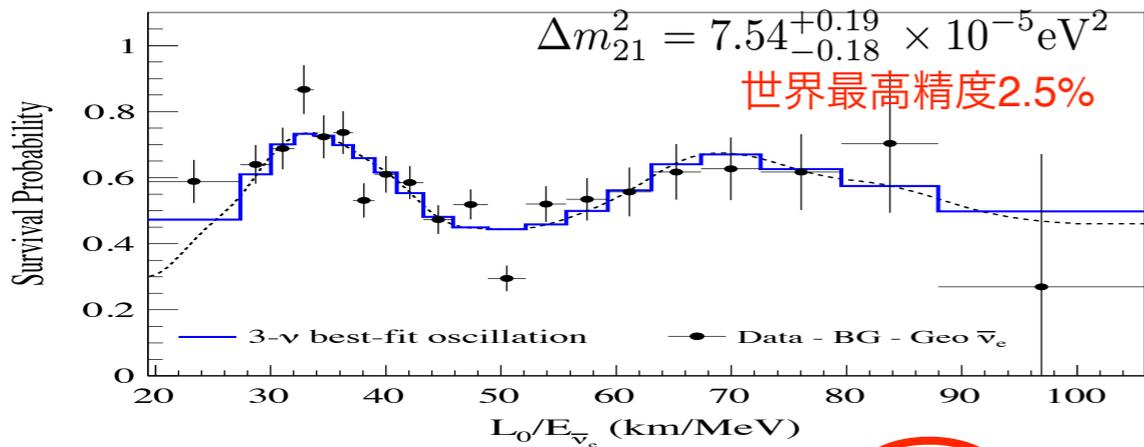
# SNO CC/NC



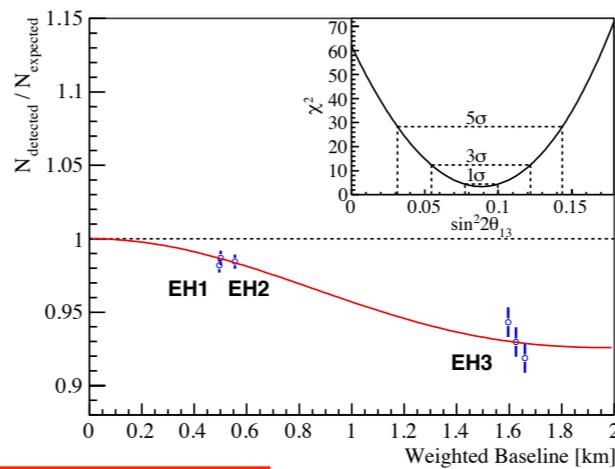
# Borexino MSW



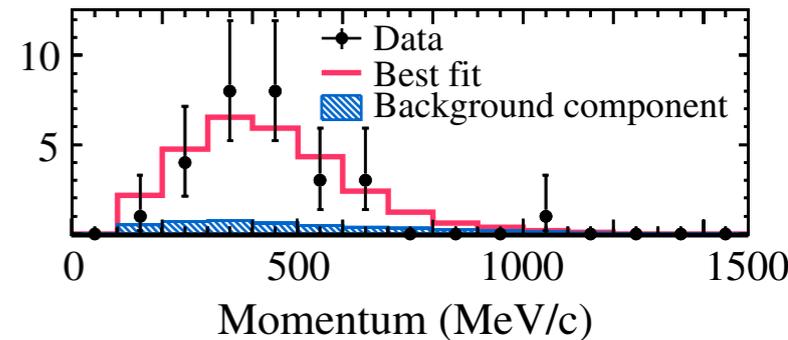
# KamLAND 2 周期



# 原子炉短基線



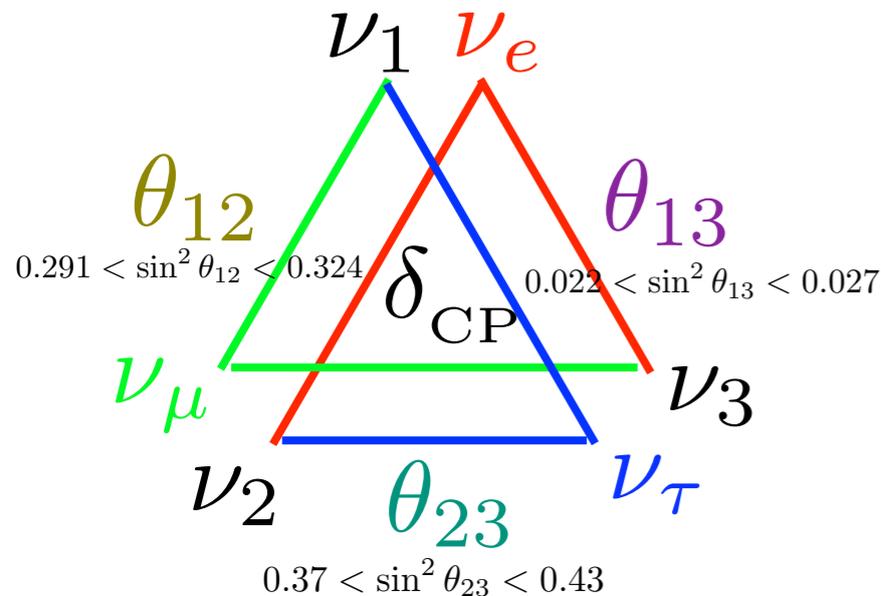
# T2K $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



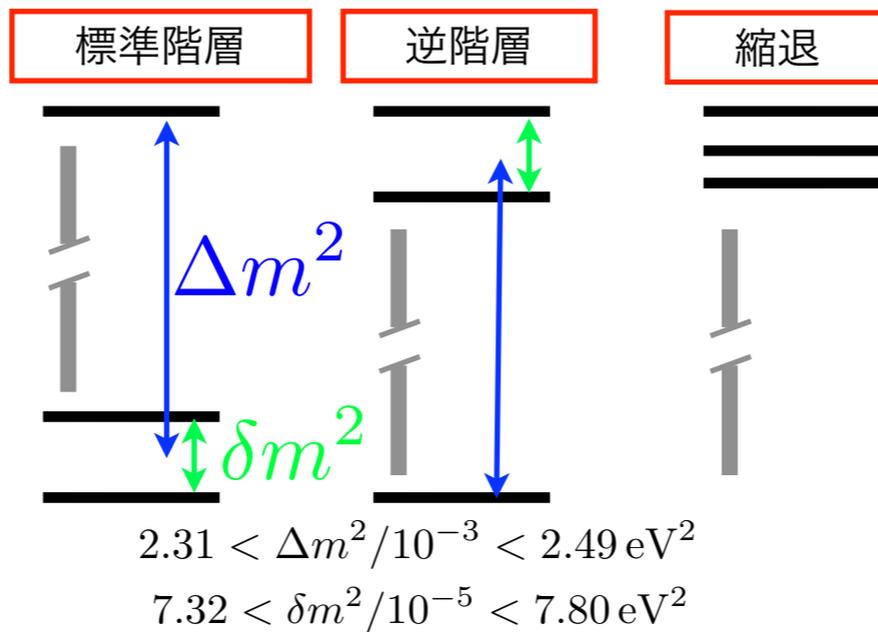
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\delta m^2 L}{4E}\right)$$

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

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

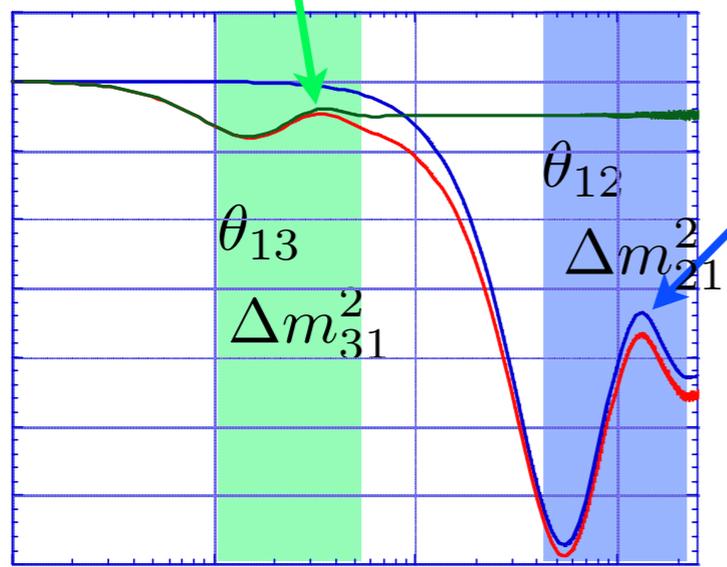
← Dirac neutrino 電子等と同様に粒子・反粒子が異なる

← 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

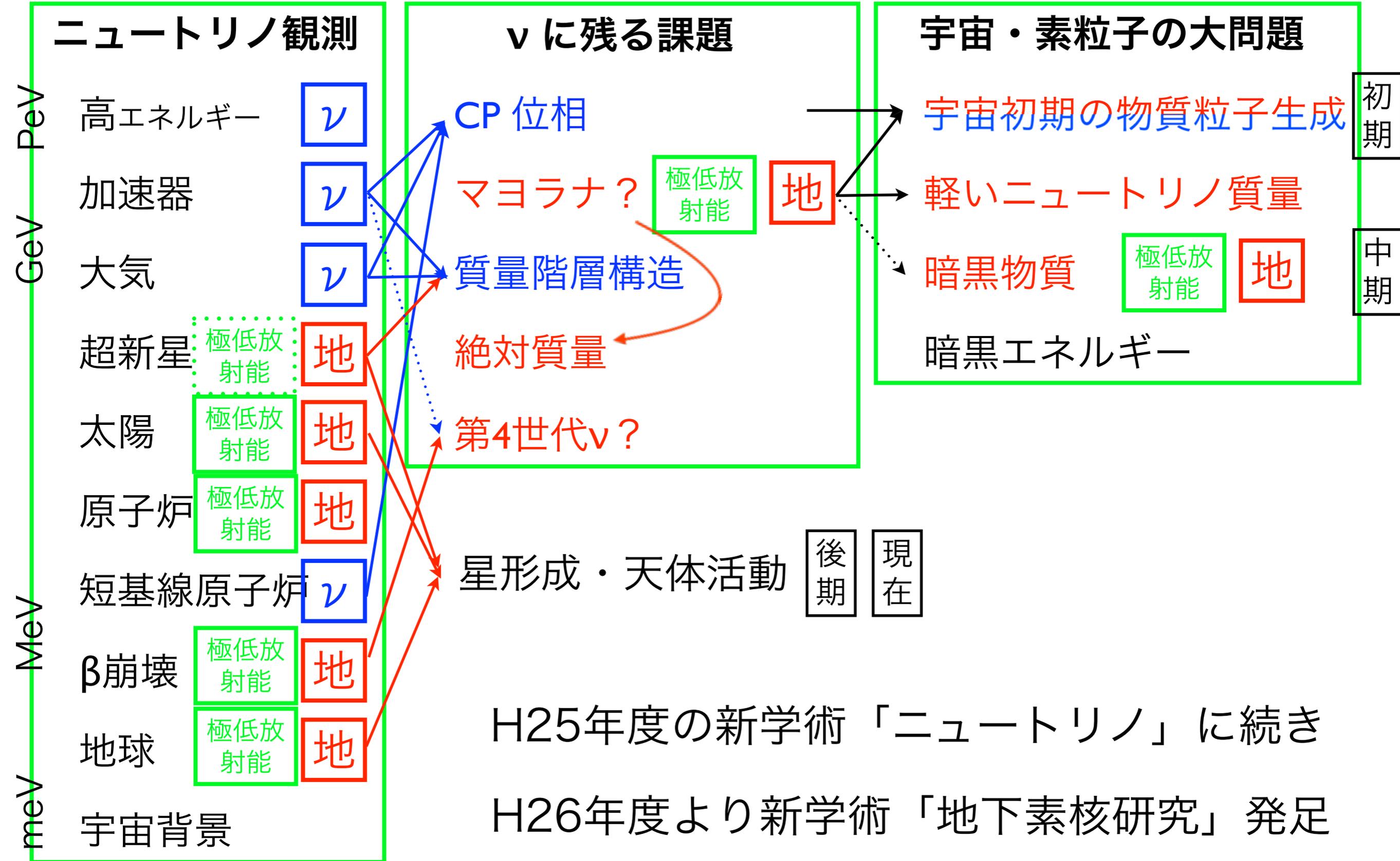
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2(A-1)\Delta}{(A-1)^2} + 2\alpha \sin \theta_{13} \cos \delta \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta}{A} \frac{\sin(A-1)\Delta}{(A-1)} \cos \Delta - 2\alpha \sin \theta_{13} \sin \delta \sin 2\theta_{12}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

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

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

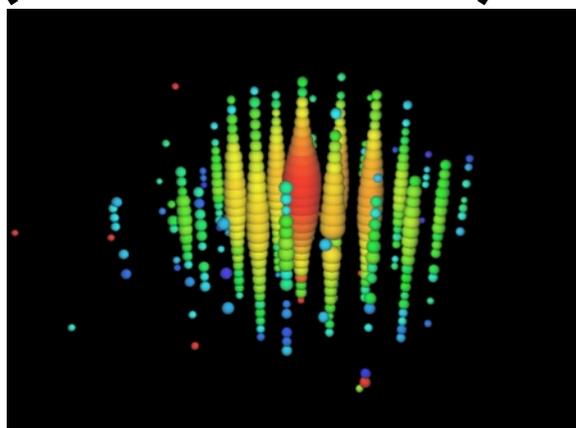
$$A \equiv \frac{G_f n_e L}{\sqrt{2}\Delta} \approx \frac{E}{11 \text{ GeV}}$$

# 様々なニュートリノ

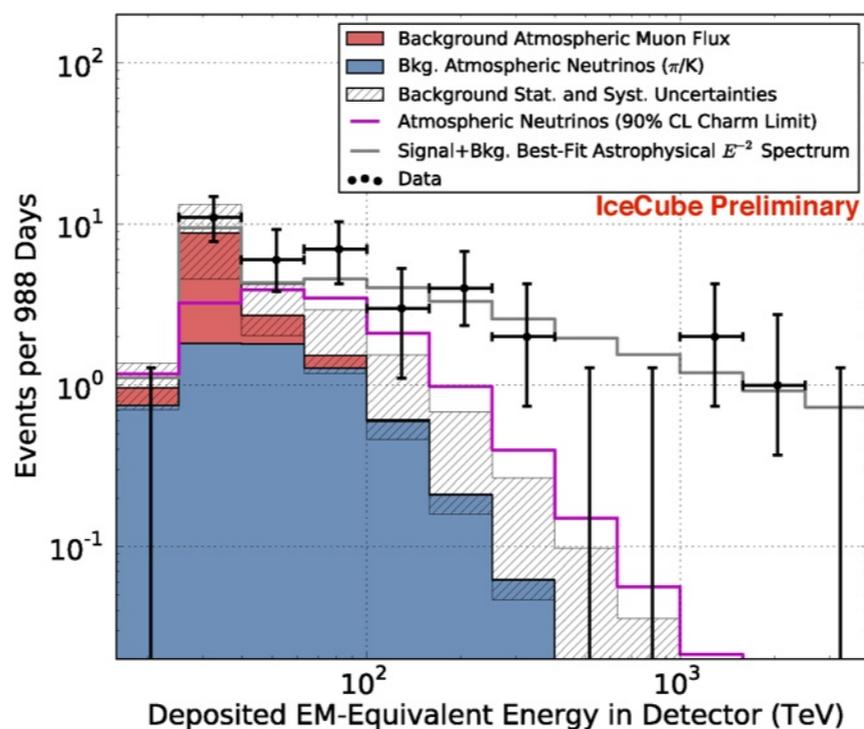


# 高エネルギー (IceCube)

# 高エネルギーニュートリノ天文学の創出



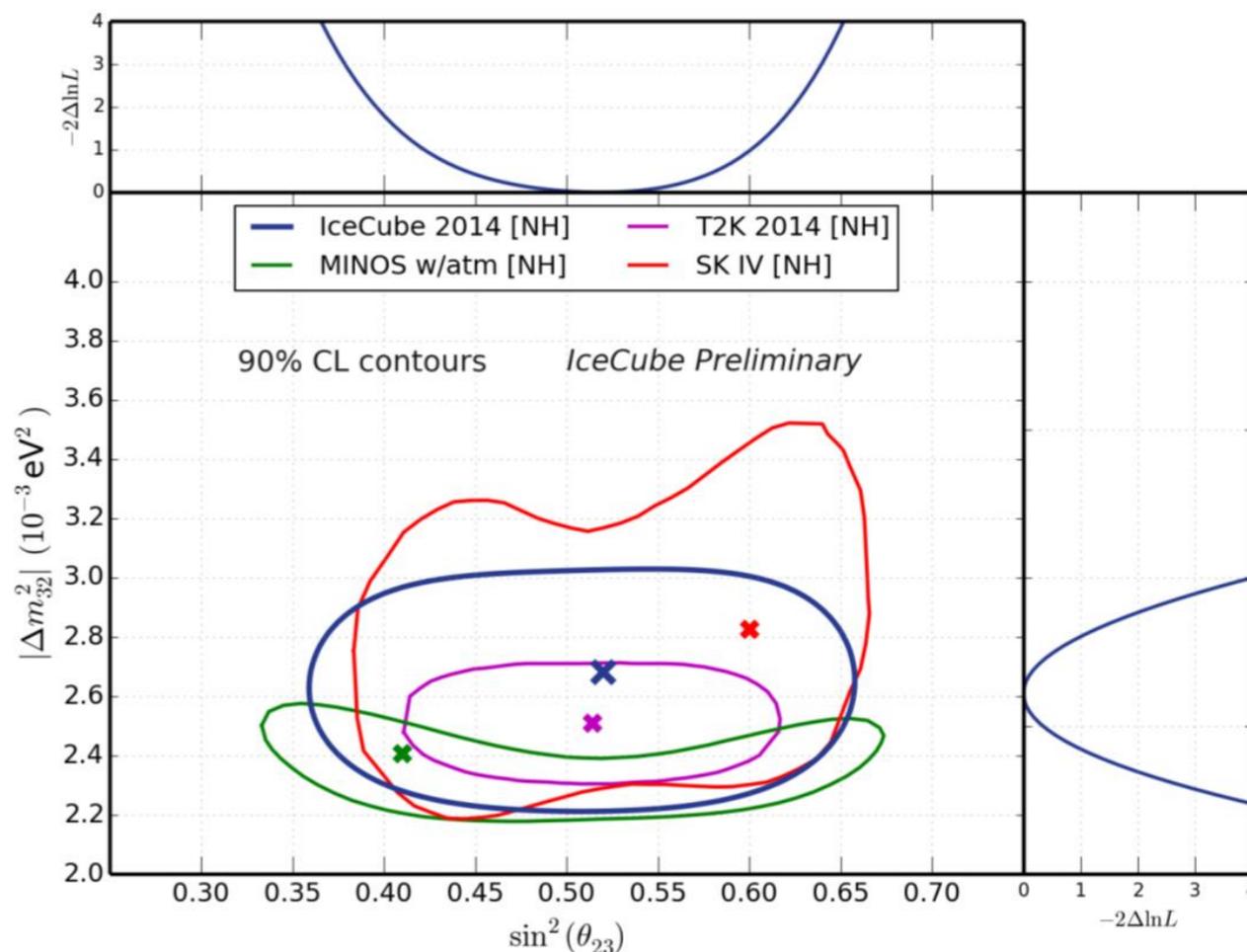
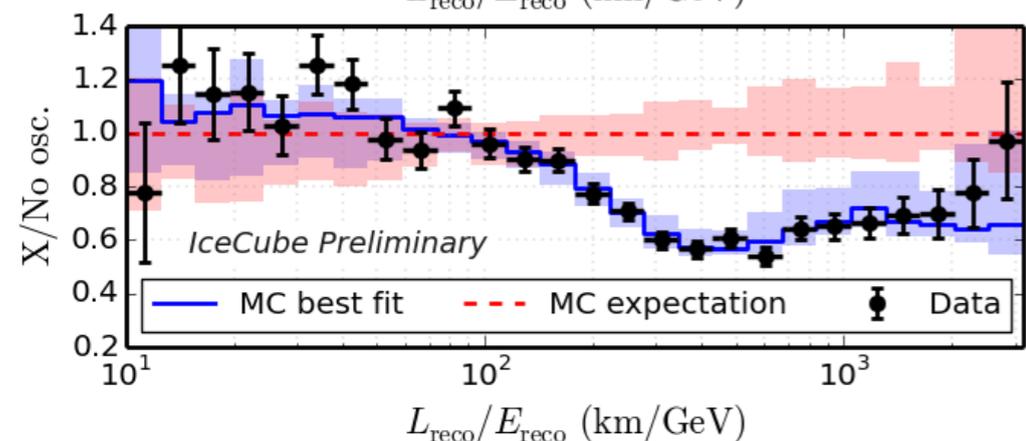
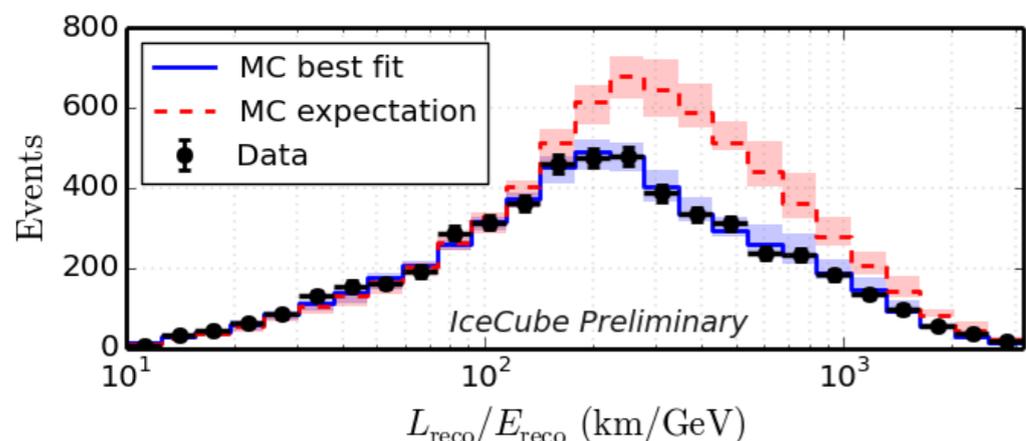
PeVニュートリノ 3事象  
点源? GRB?



5.7  $\sigma$  (contained)  
3.9  $\sigma$  (upgoing)

excess from  $\nu_{atm}$

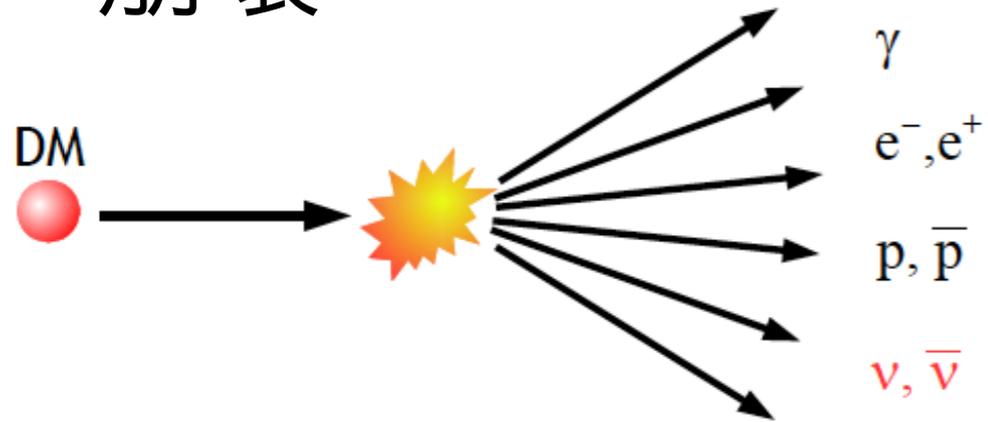
## 大気ニュートリノ振動 @ IceCube



# 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。

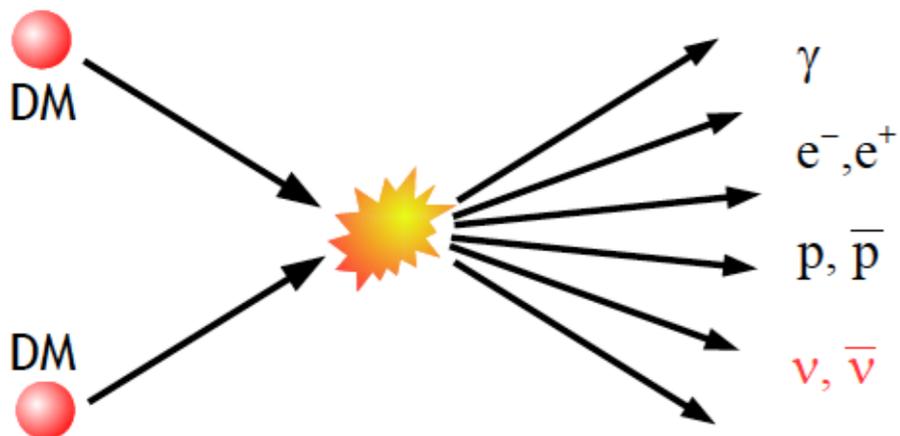
## 崩壊



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

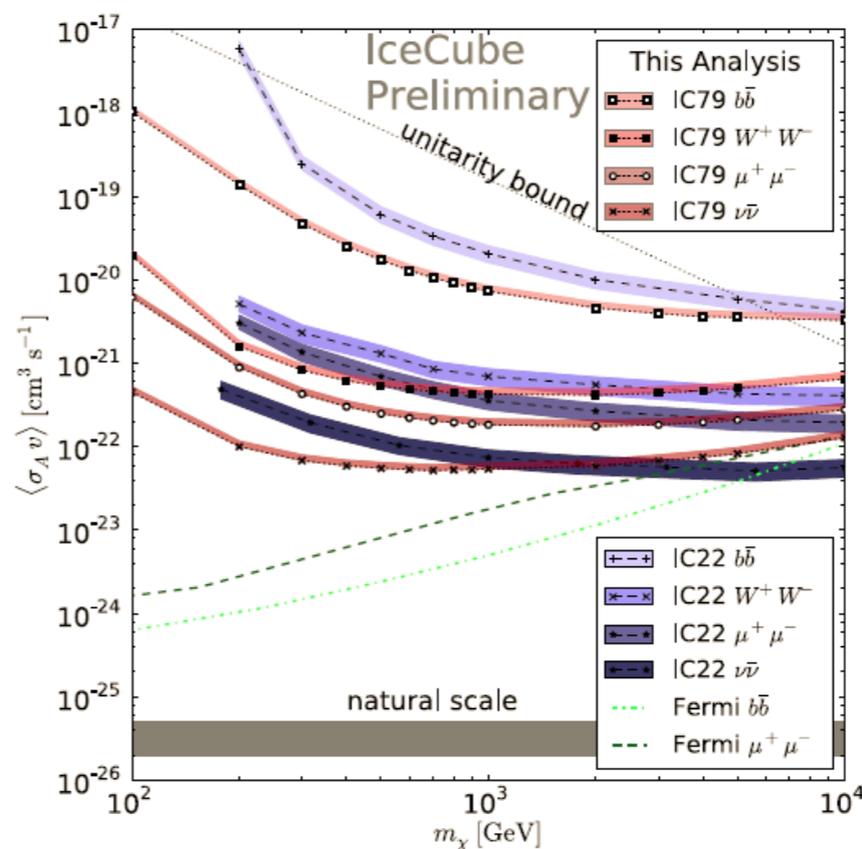
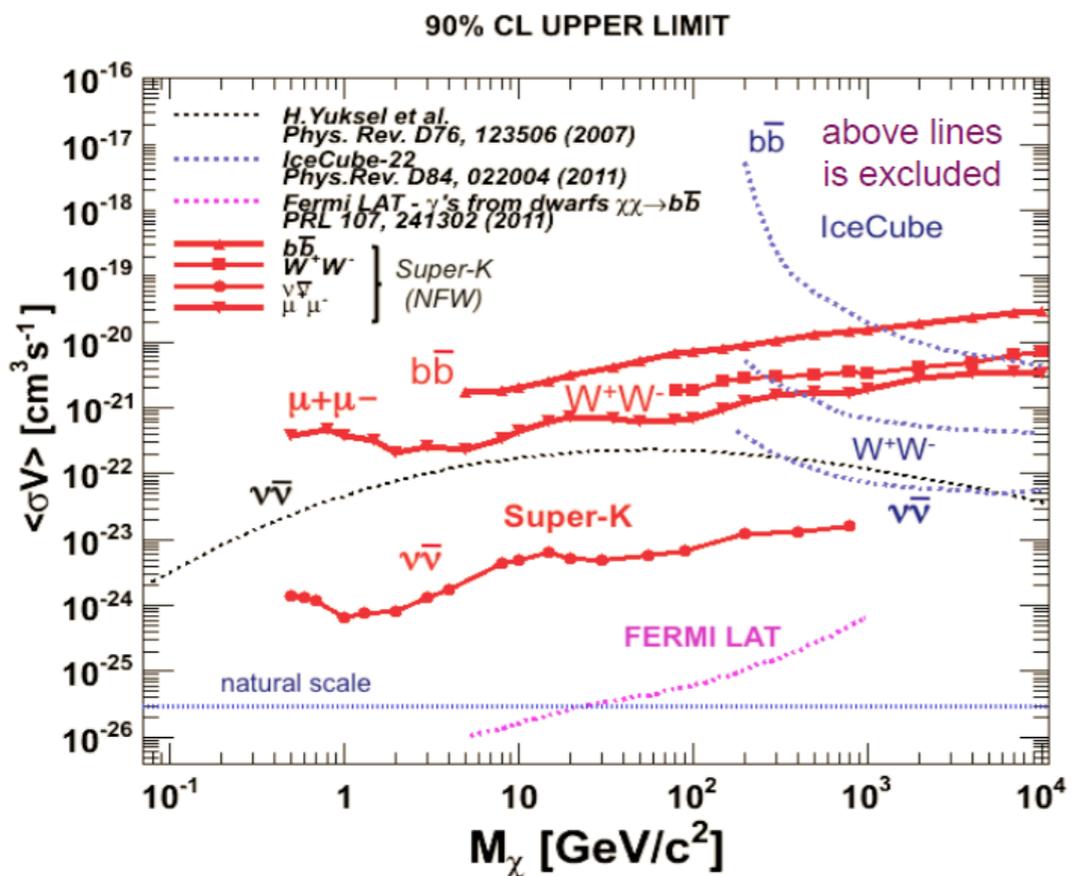
銀河ハローからのニュートリノを探索

## 対消滅

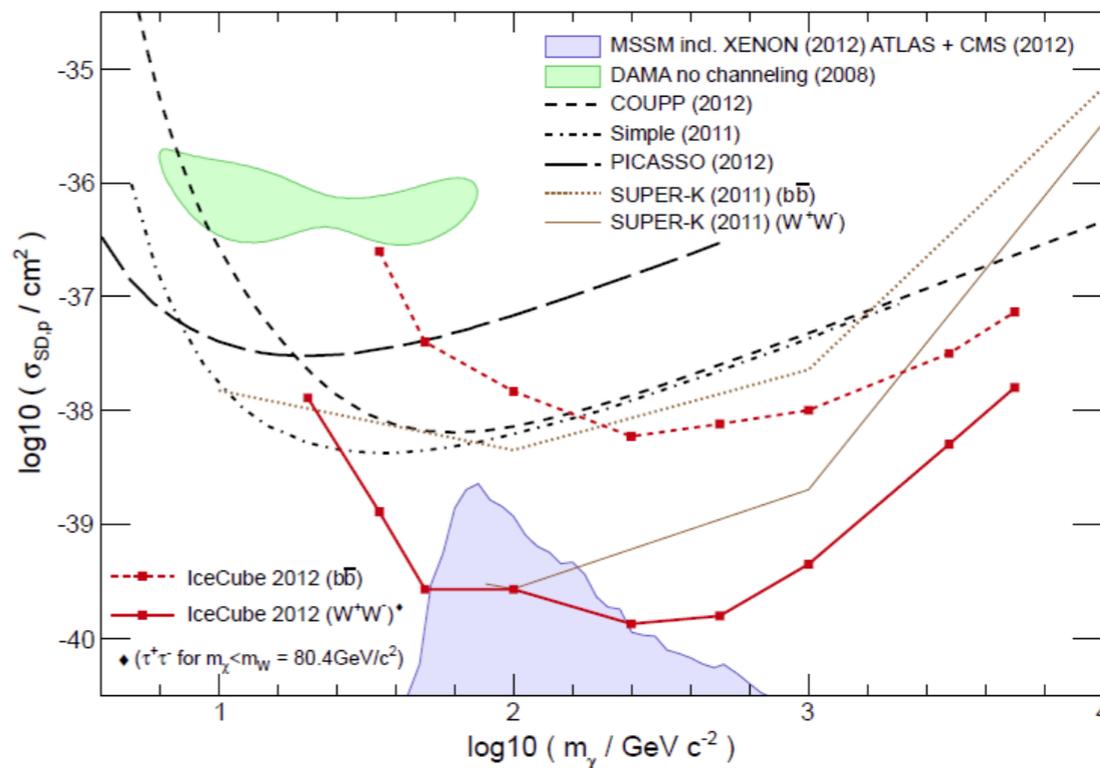
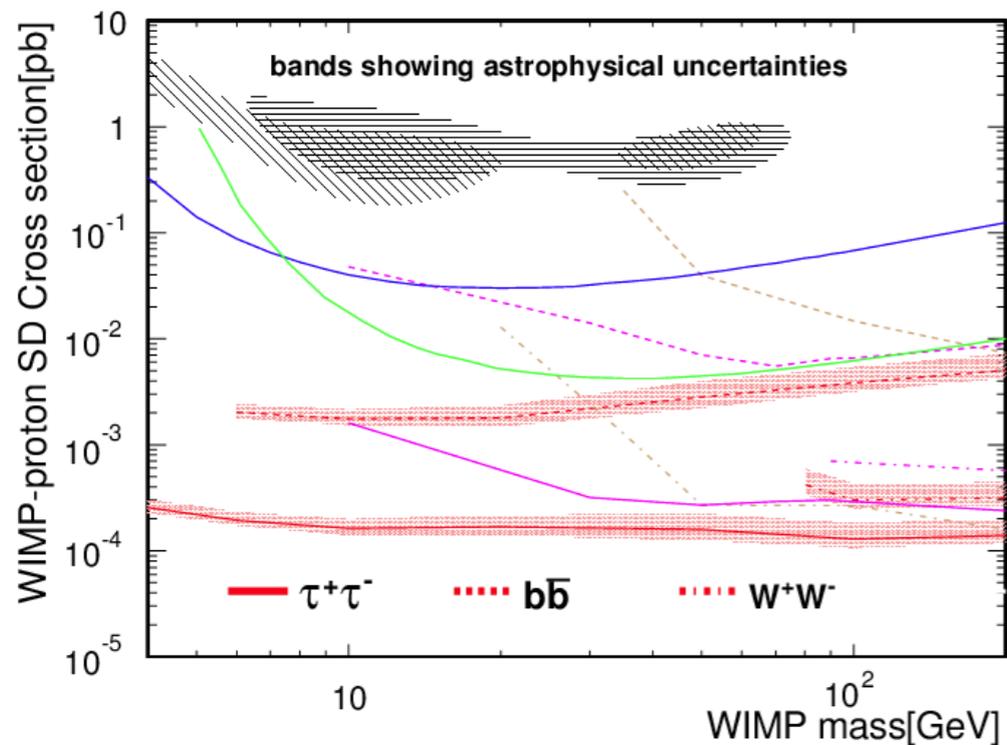


$$\frac{dJ_{\text{halo}}}{dE_\nu} = \frac{1}{4\pi} \underbrace{\left[ \frac{\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle}{2m_{\text{DM}}^2} \sum_f \frac{dN_\nu^f}{dE_\nu} B_f \right]}_{\text{Source term (particle physics)}} \times \underbrace{\int_{\text{l.o.s.}} \rho^2(\vec{l}) d\vec{l}}_{\text{Line-of-sight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

# 銀河ハローからの制限



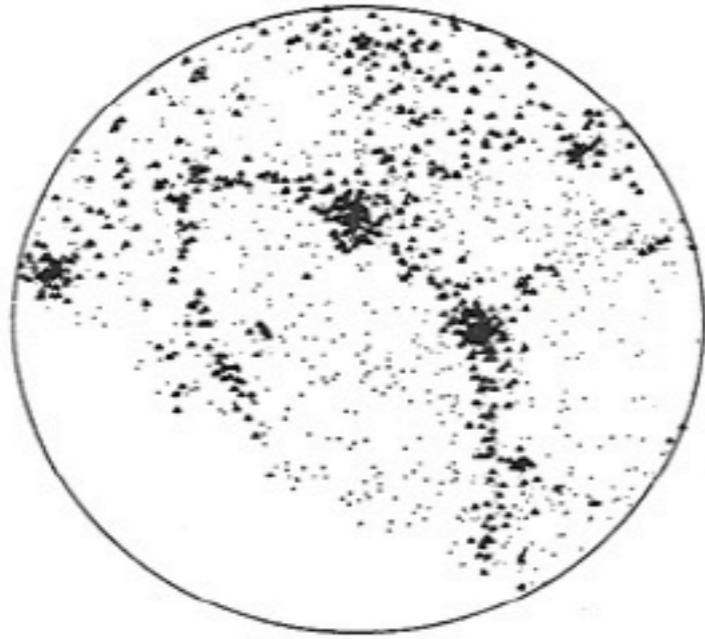
# 太陽・地球からの制限



1108.3384  
 1212.4097  
 (1301.1138)  
 (1212.2416)

# ニュートリノ vs 暗黒物質

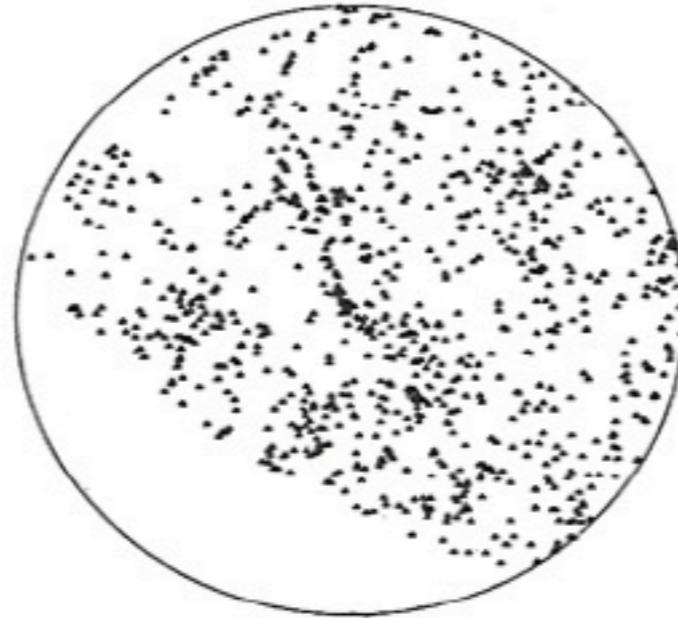
ニュートリノ自身が暗黒物質では？



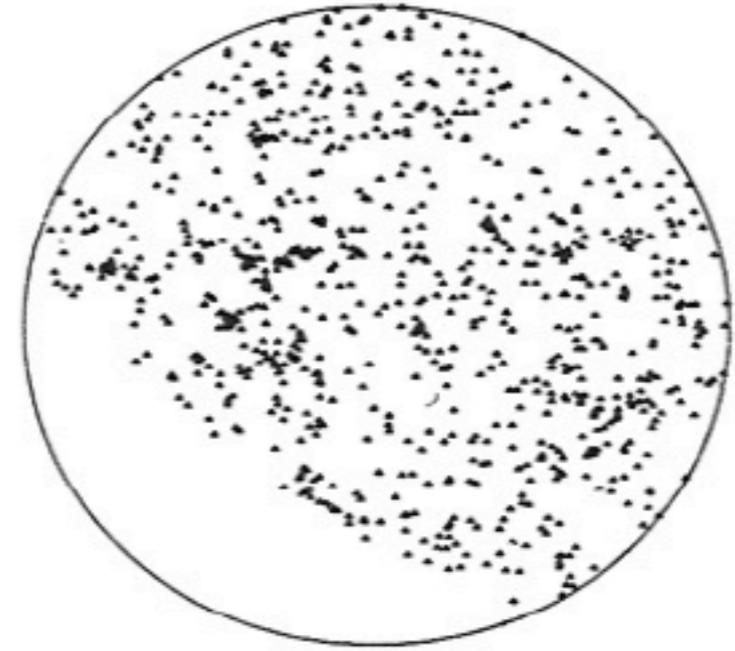
HDM

relativistic

(neutrino dark matter)



Observed Galaxy Distribution



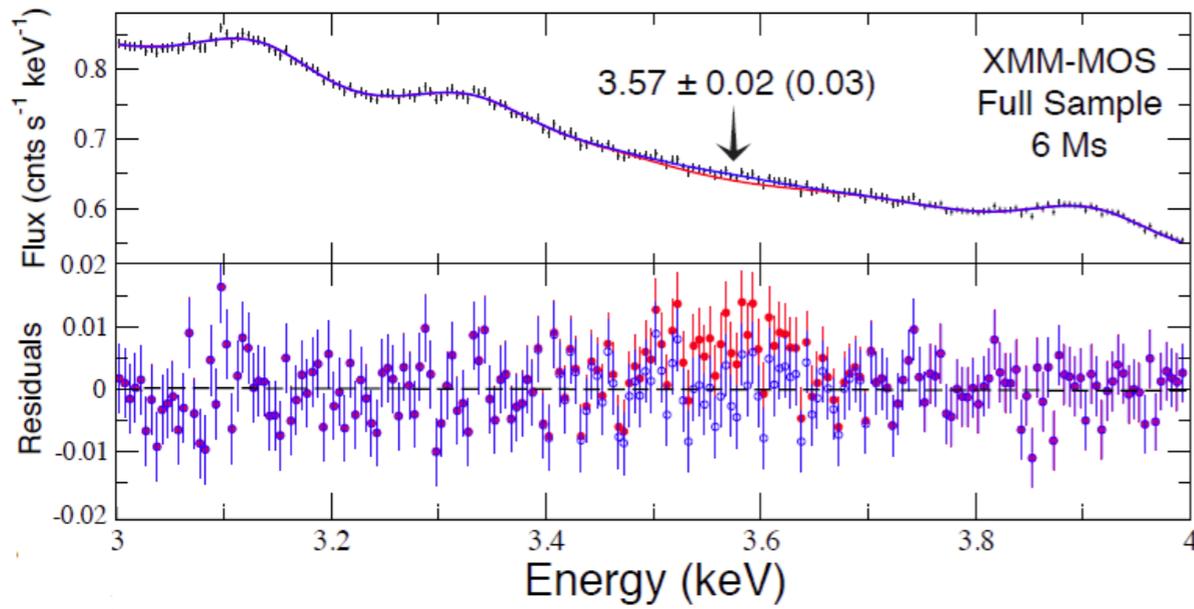
CDM

non-relativistic

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

# Recent hints for an unidentified X-ray line signal

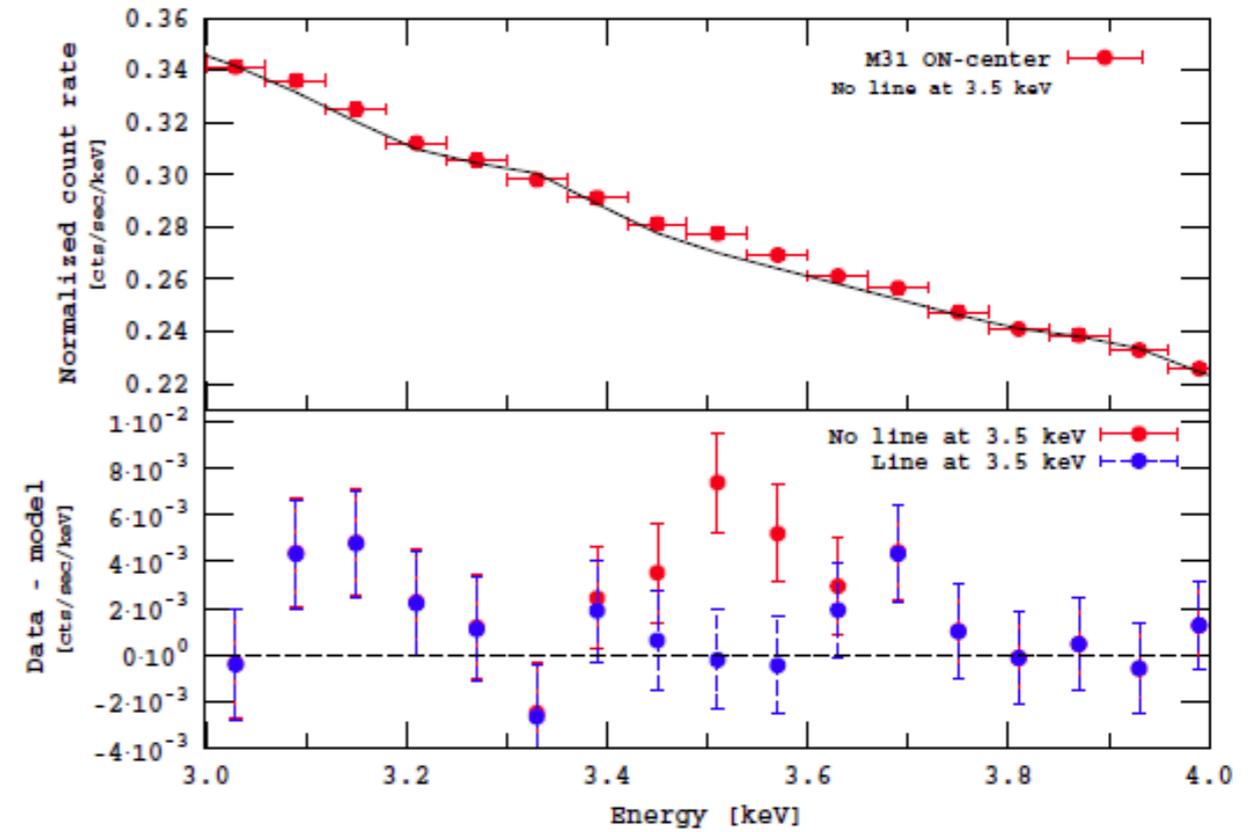
Bulbul et al., 1402.2301



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

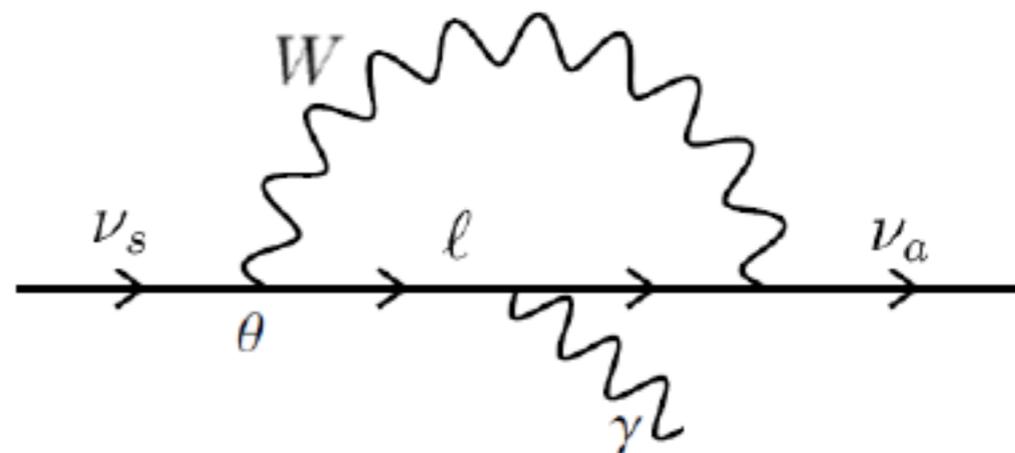
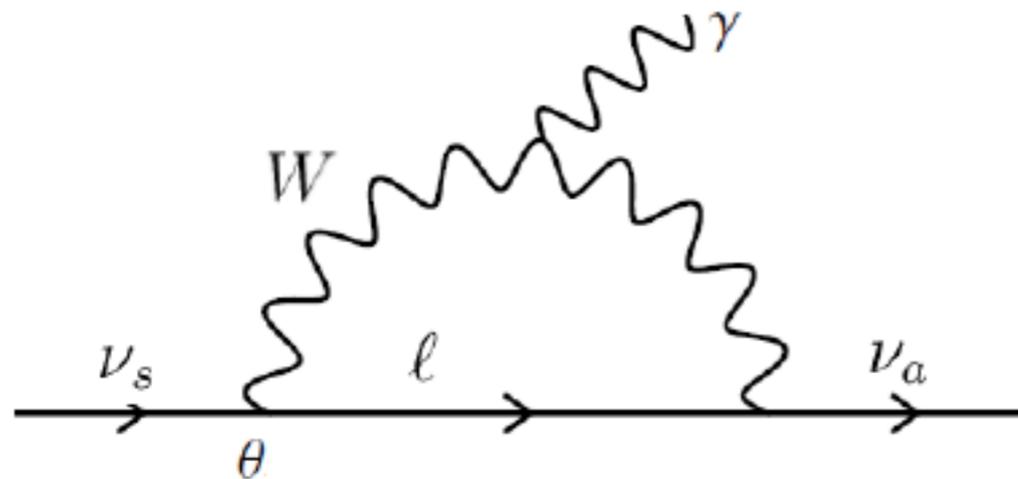
$$\sin^2 2\theta \approx 7 \times 10^{-11}$$

Boyarsky et al., 1402.4119



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

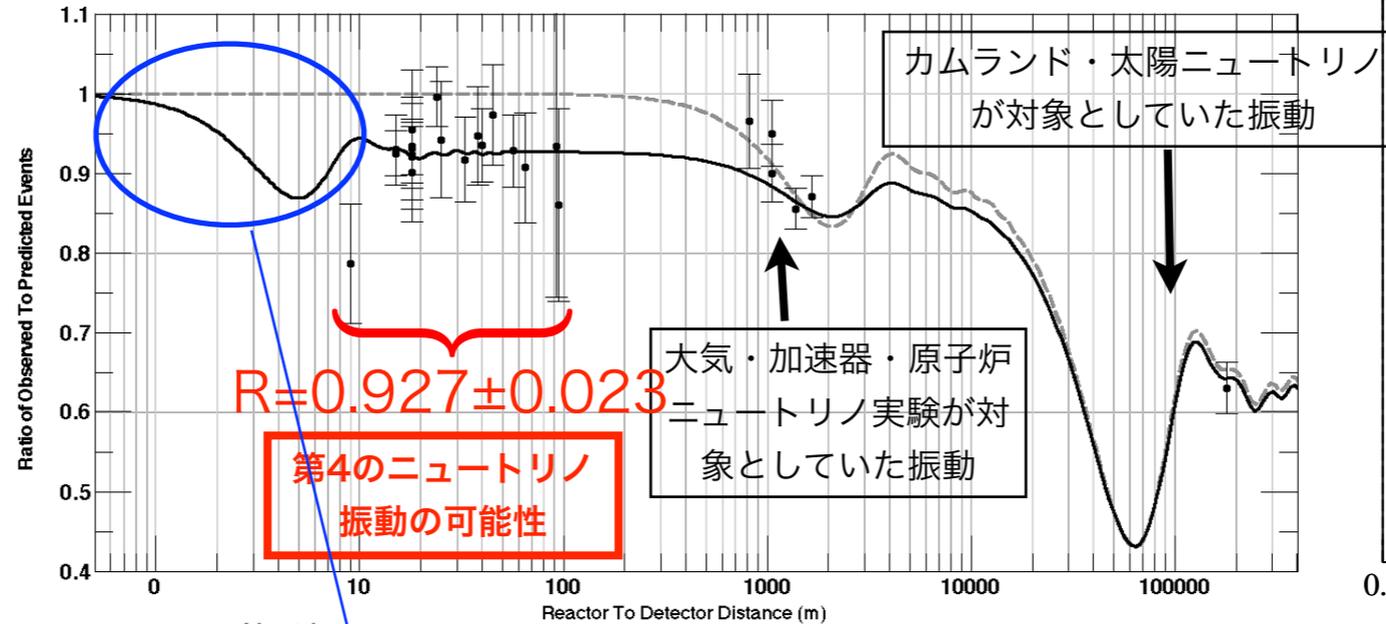
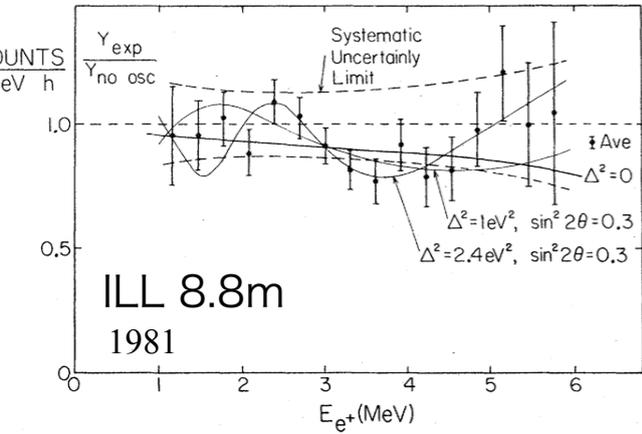
$$\sin^2 2\theta = (2.2 - 20) \times 10^{-11}$$



# 第4世代ニュートリノ

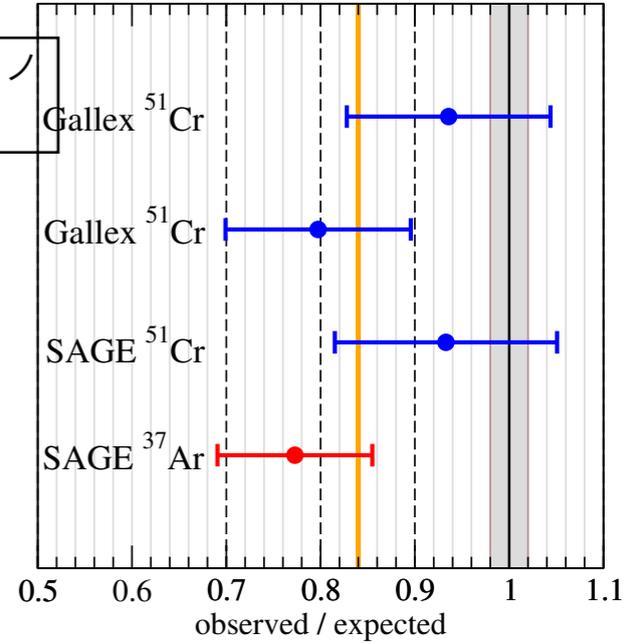
## 過去の原子炉反ニュートリノ測定結果

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

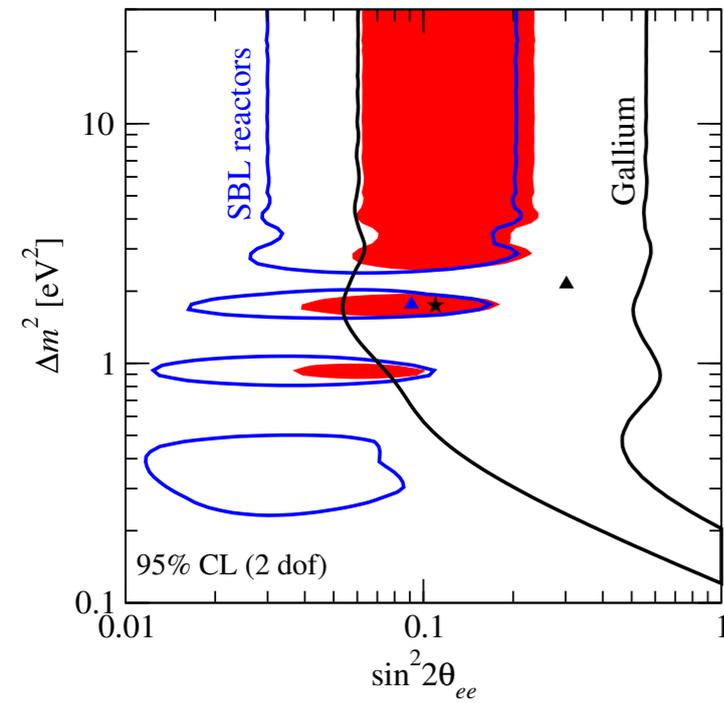
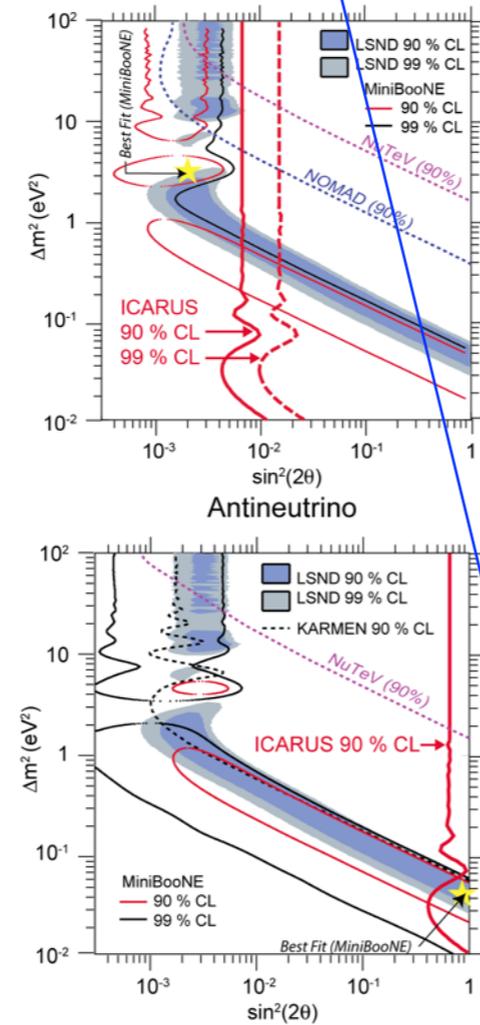


## ステライルニュートリノのヒント

	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	$\sim 2\sigma$

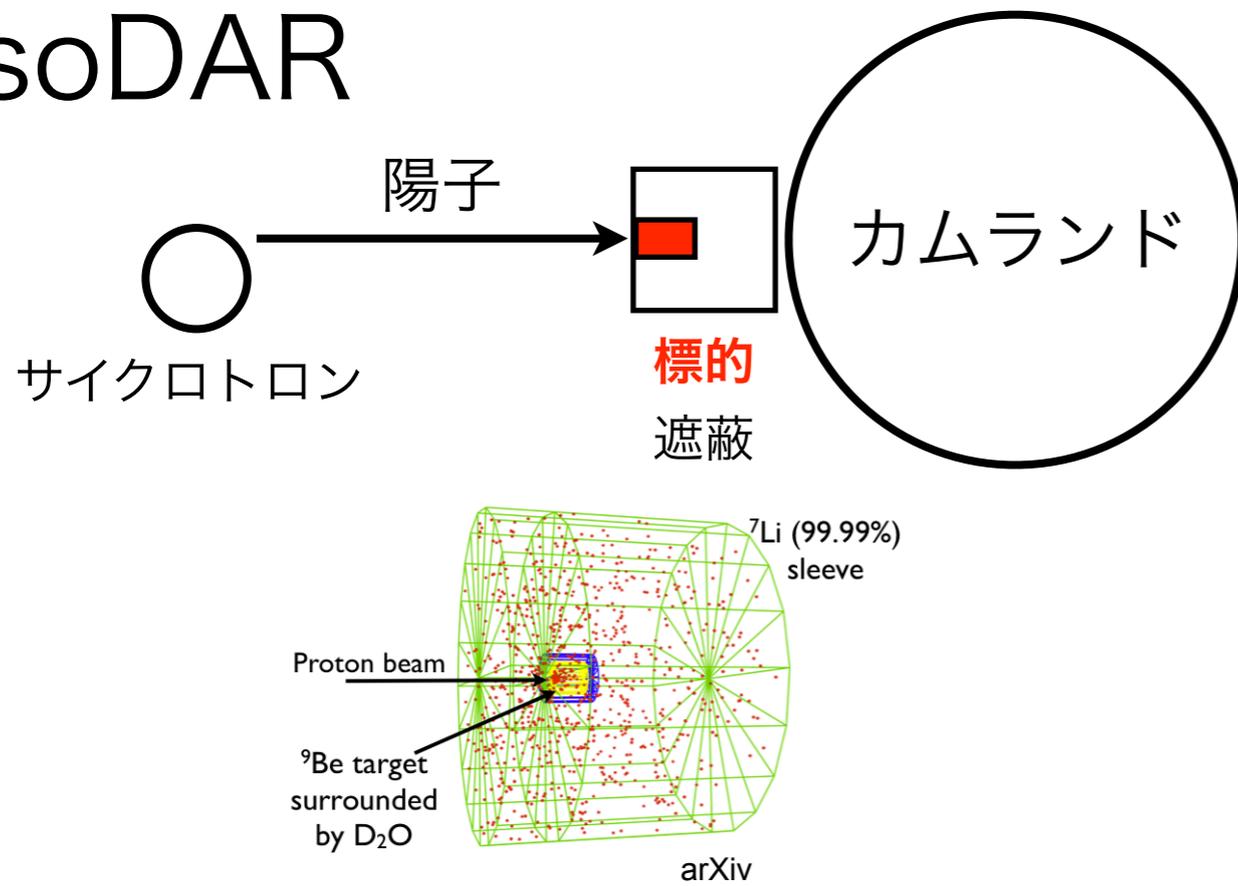
超短距離での実験が重要、

**カムランド内に反ニュートリノ源を設置！**

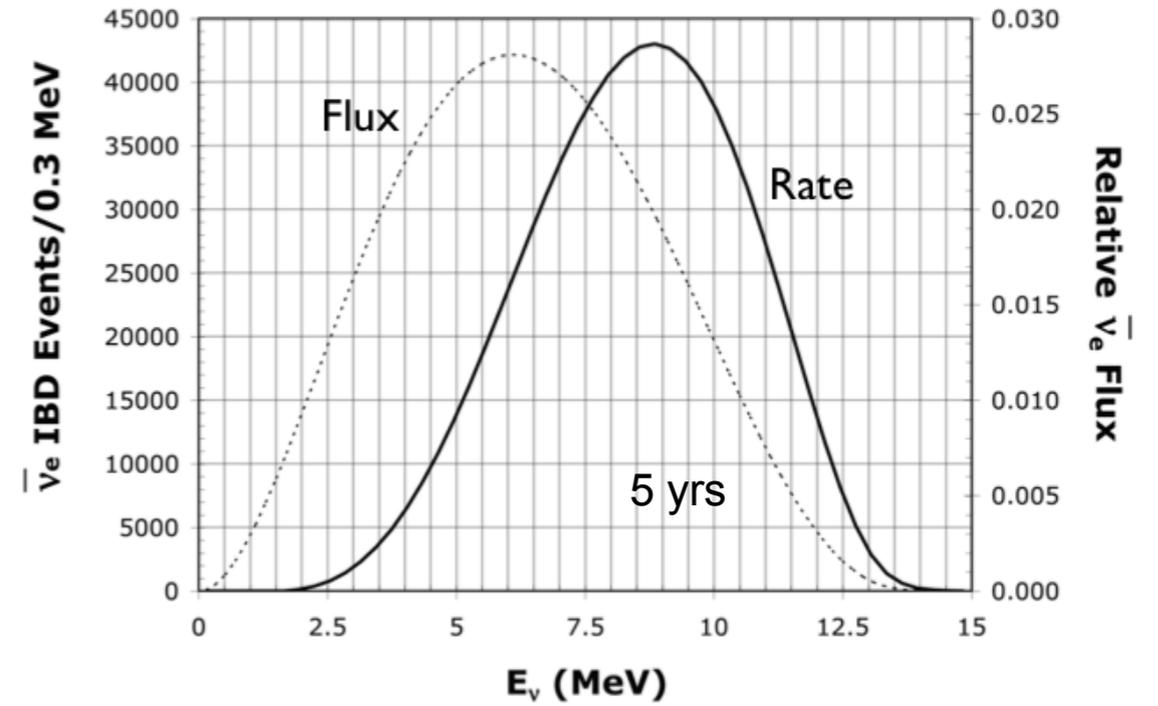


1 eV程度のステライルニュートリノのヒント

# IsoDAR



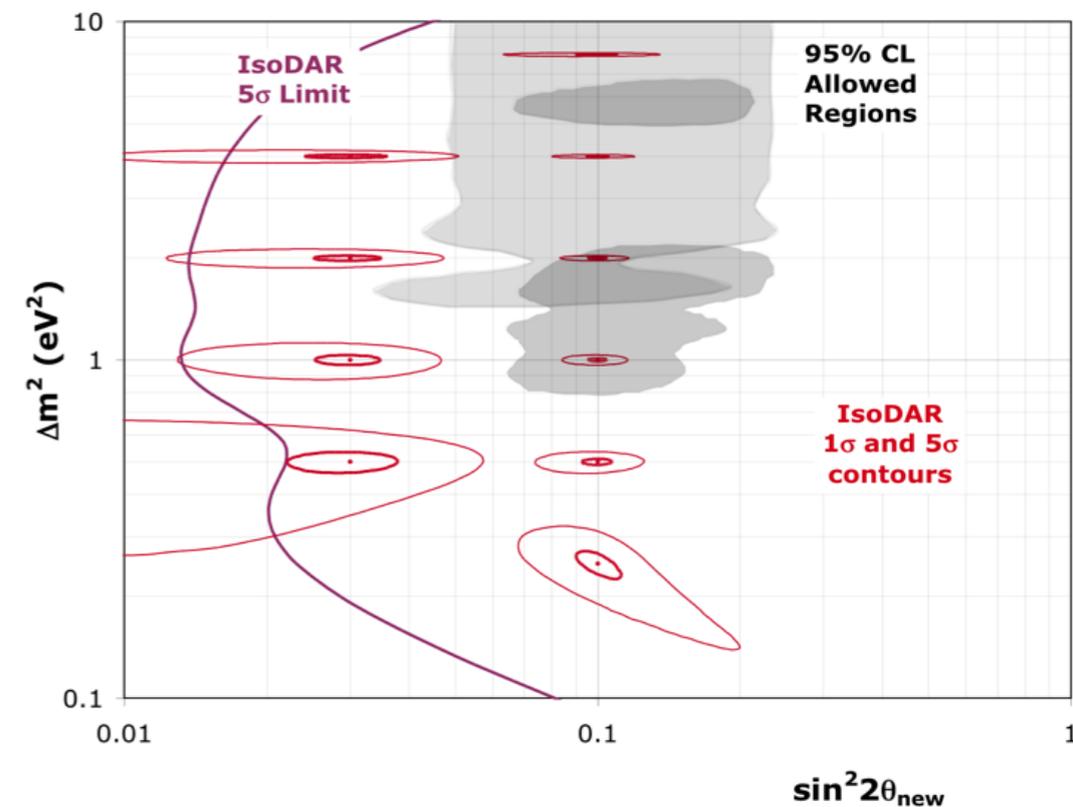
arXiv:1205.4419



16万事象/年

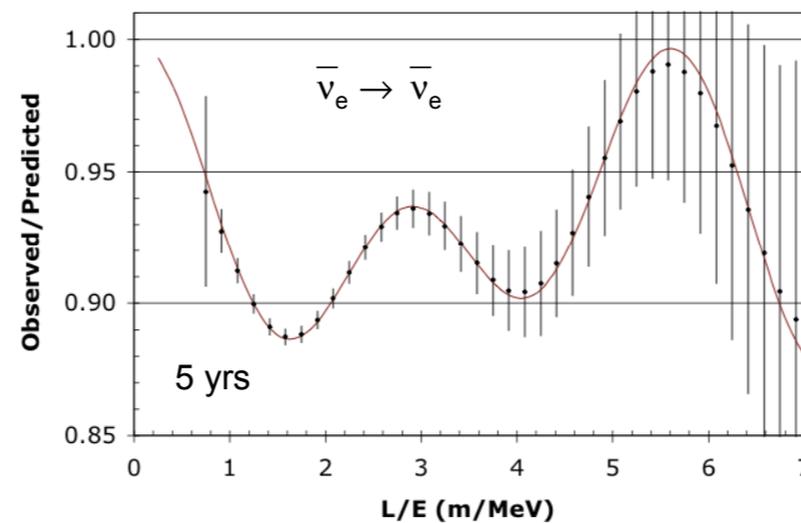
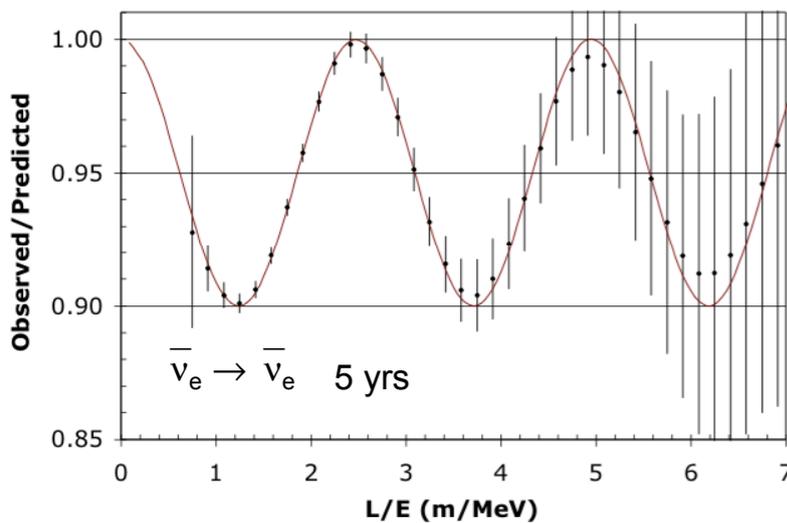


IsoDAR abilities (5 years @ KamLAND)



(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

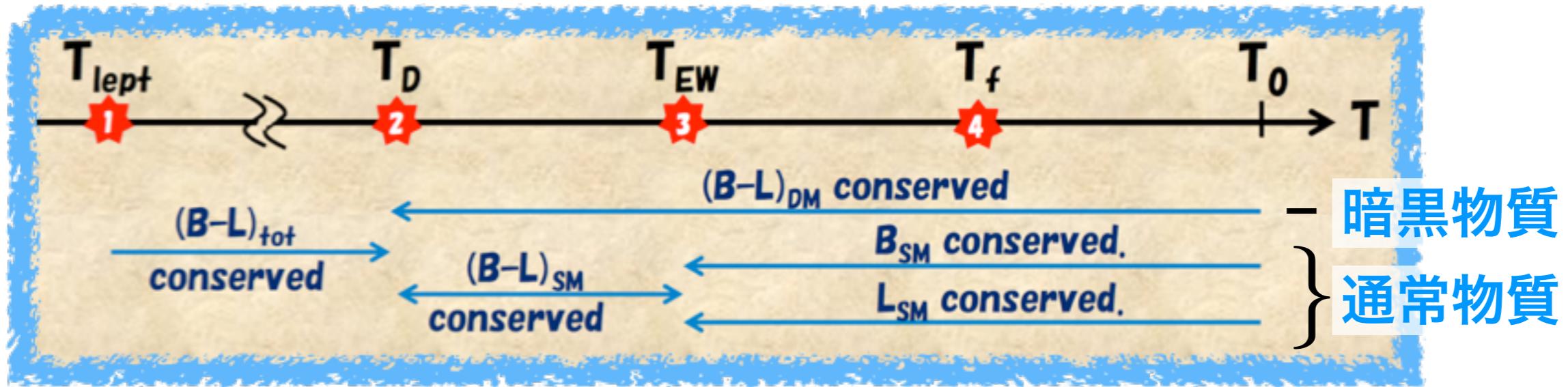


第4世代ニュートリノ振動の精密測定

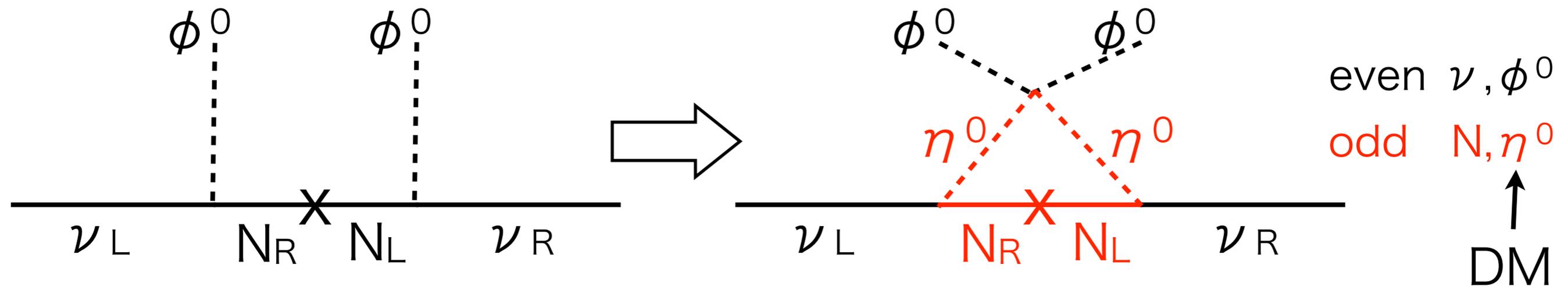
# ニュートリノ vs 暗黒物質

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)



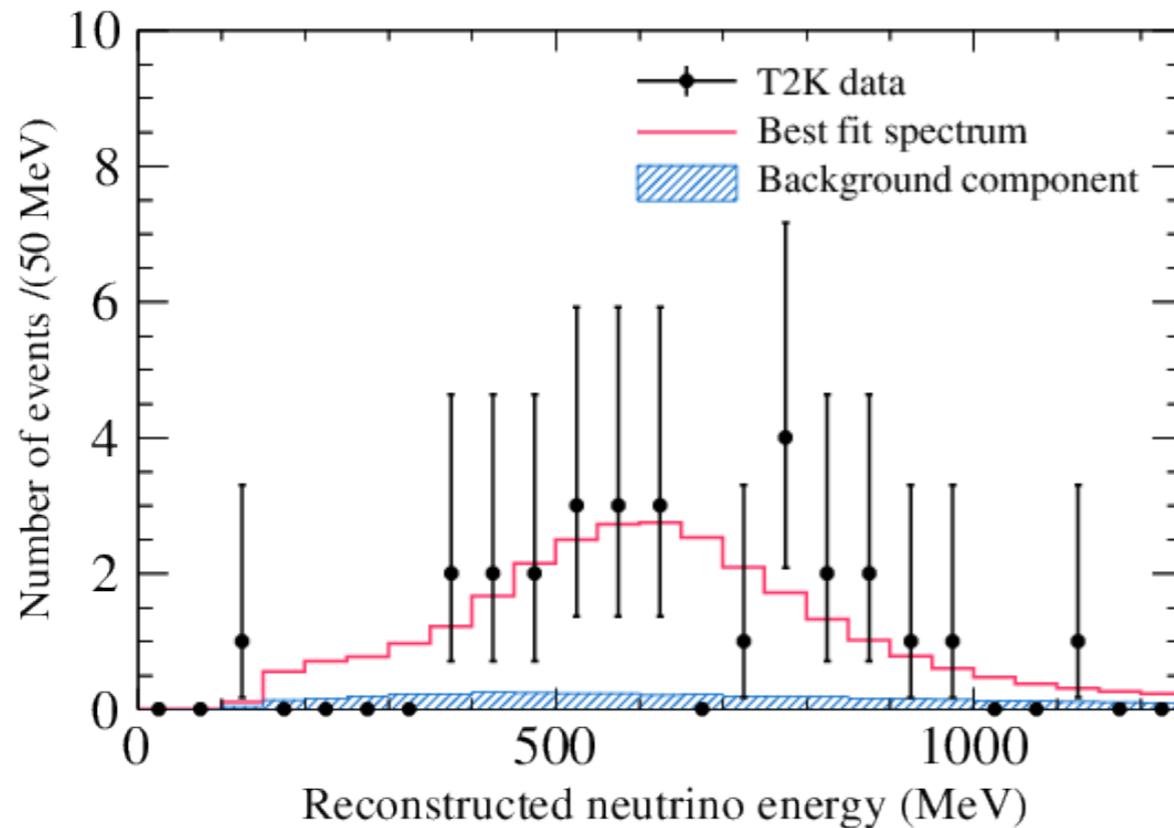
## 輻射シーソー模型



# 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

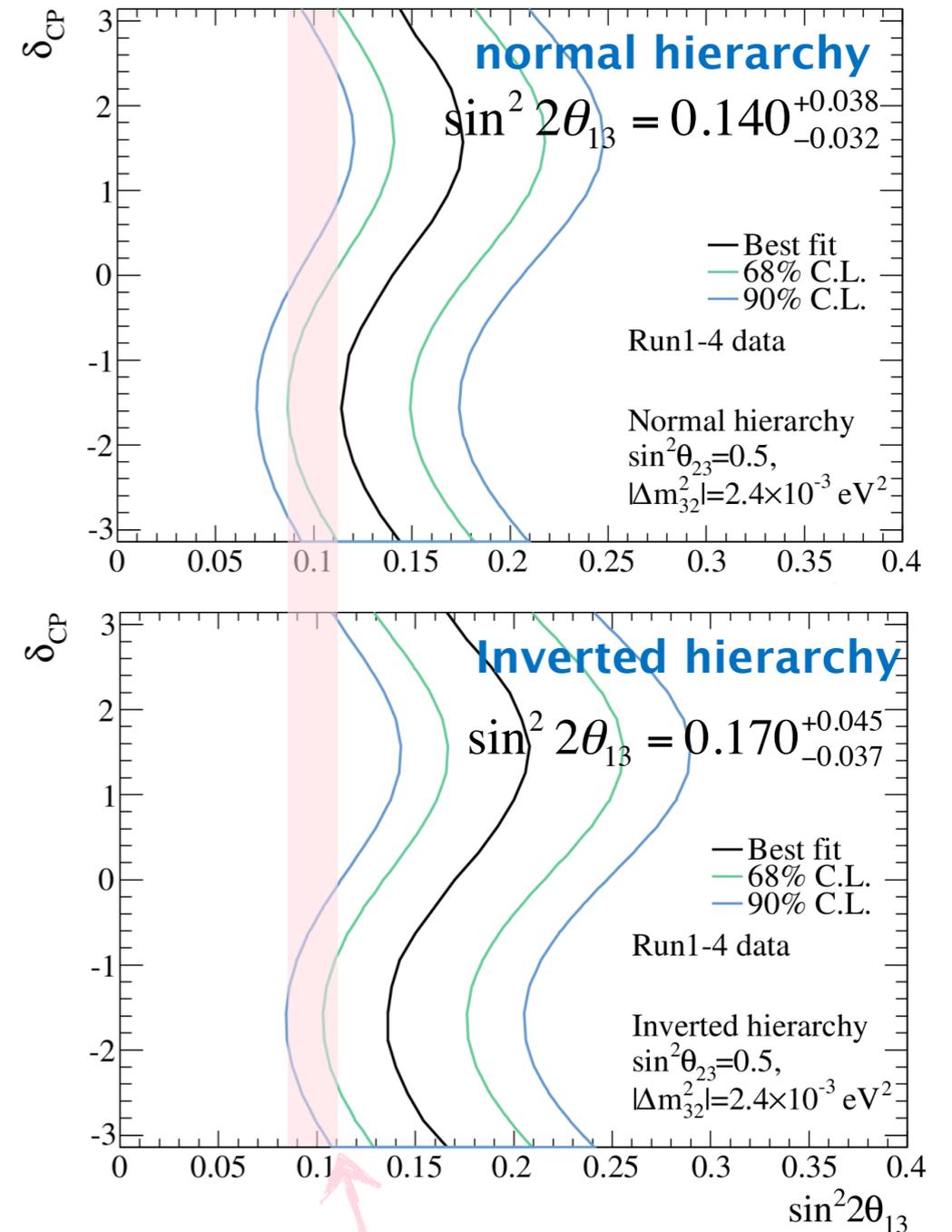
**28 events** observed

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  $\theta_{13}$

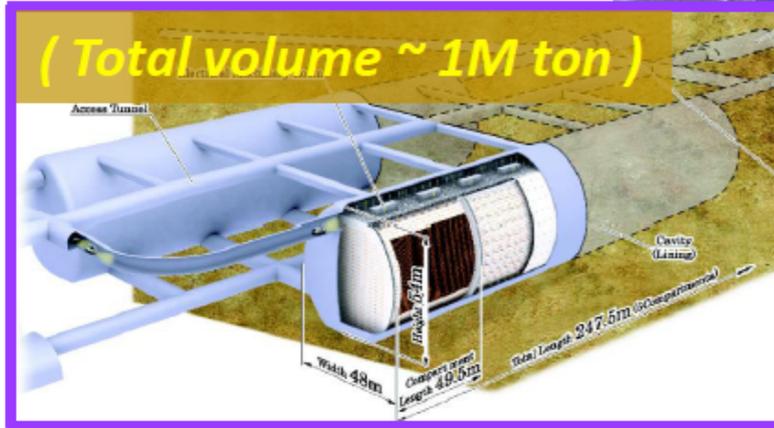
First ever observation ( $>5\sigma$ ) of an explicit  $\nu$  appearance channel



Reactor PDG2012,  $1\sigma$

# Hyper-Kamiokande with J-PARC neutrino beam

## Hyper-Kamiokande



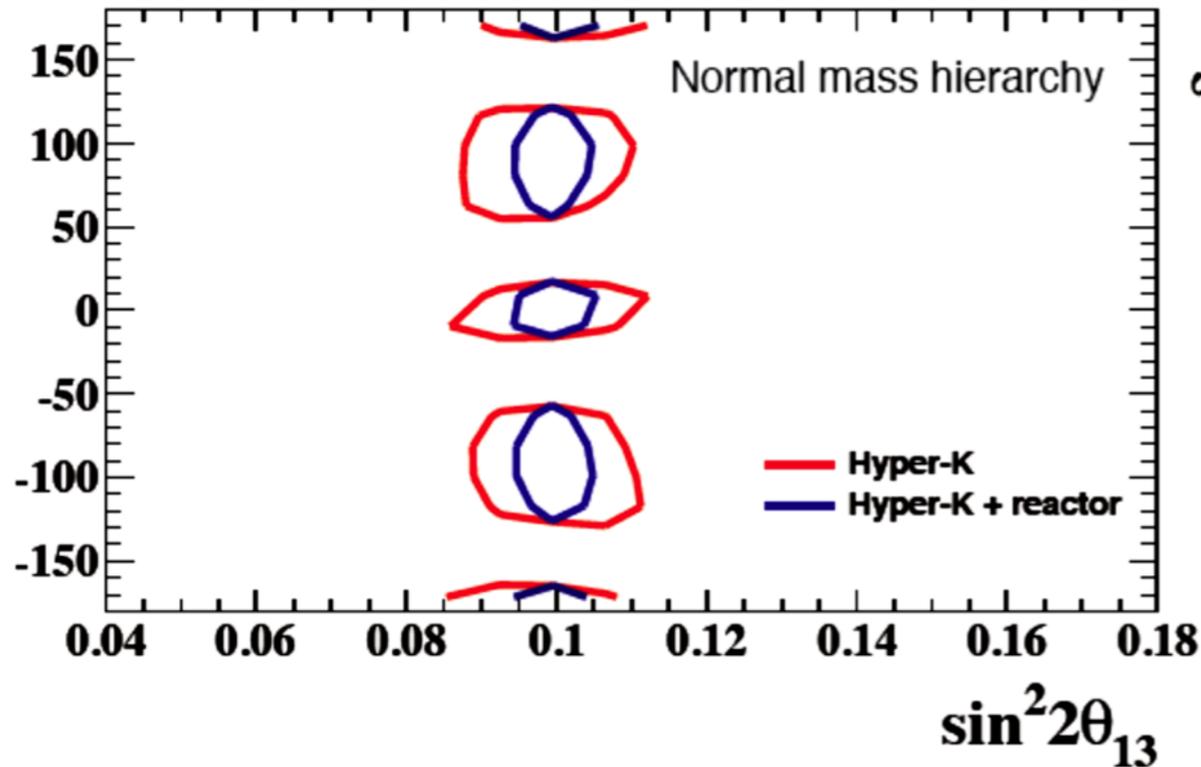
J-PARC Main Ring  
Neutrino beamline  
( KEK – JAEA )



750 kW

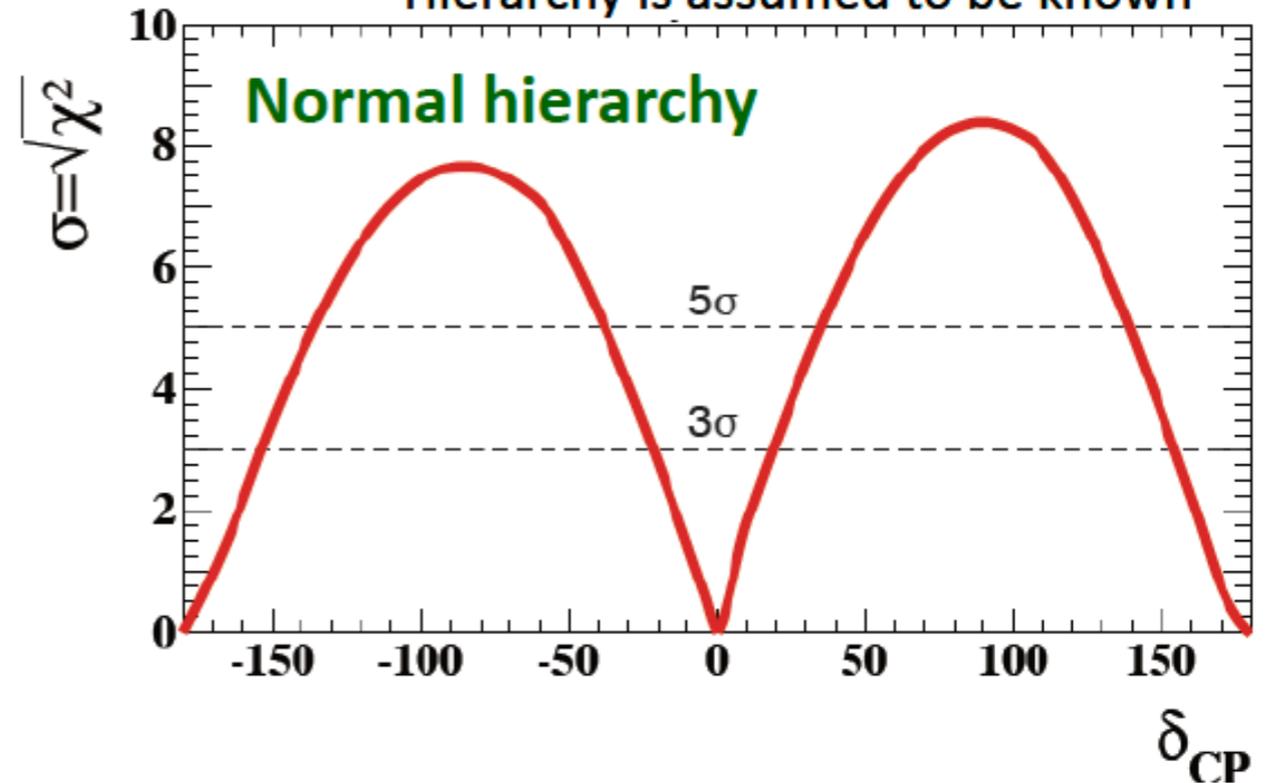
FV 560 kt  
~25× SK

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

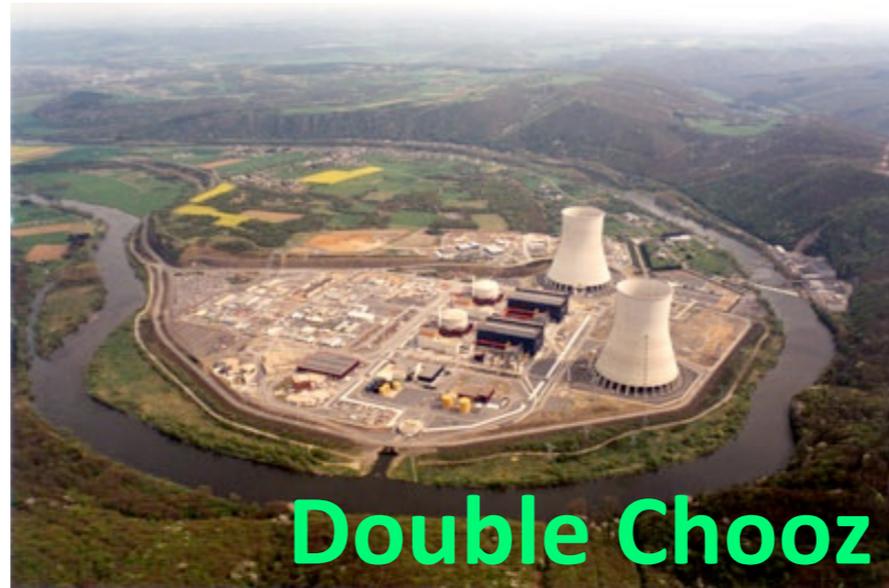


sensitivity  
(exclusion of  $\sin\delta=0$ )

Hierarchy is assumed to be known

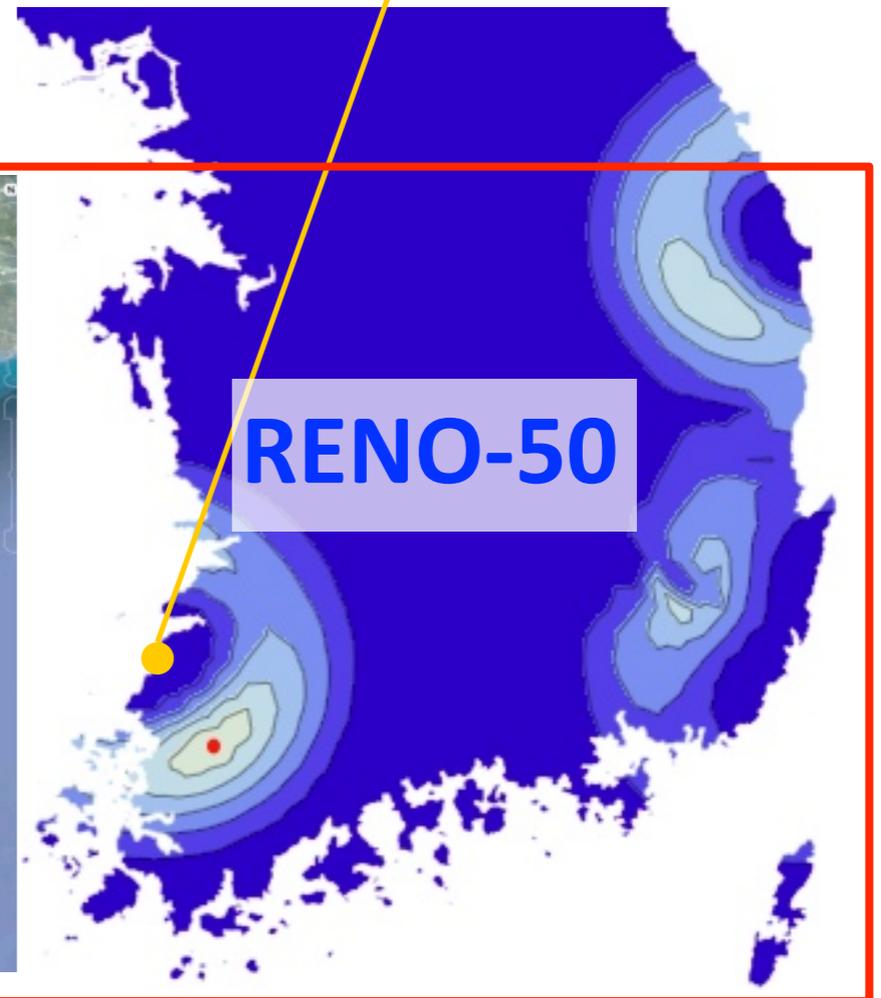


# $\theta_{13}$ companies



Mass Hierarchy

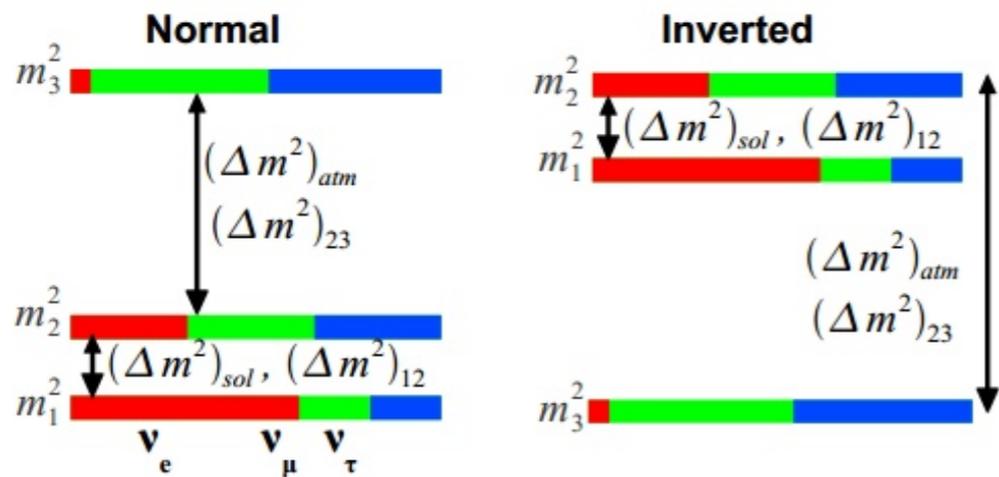
~60km



20ktonLS ~300M\$

to start in 2020

18ktonLS ~100M\$

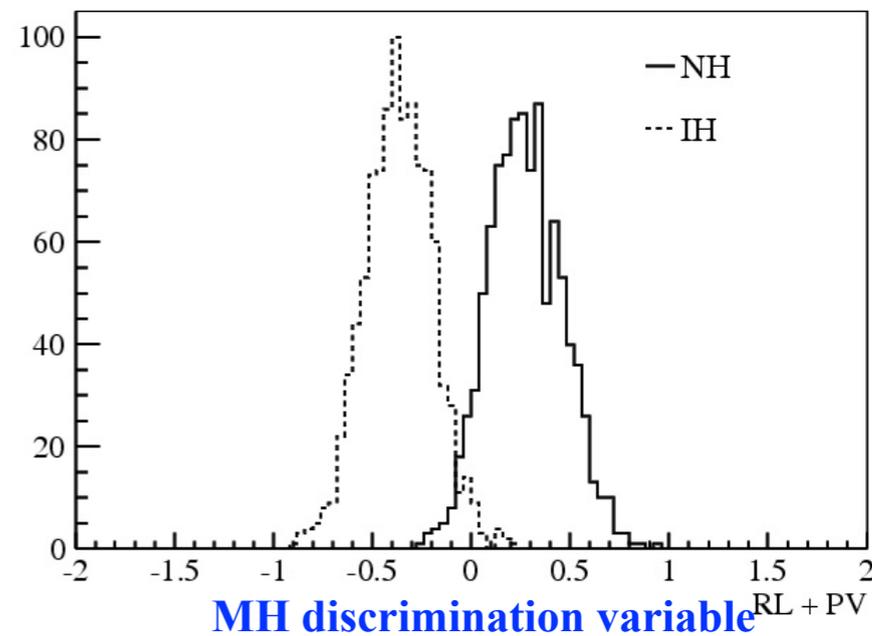
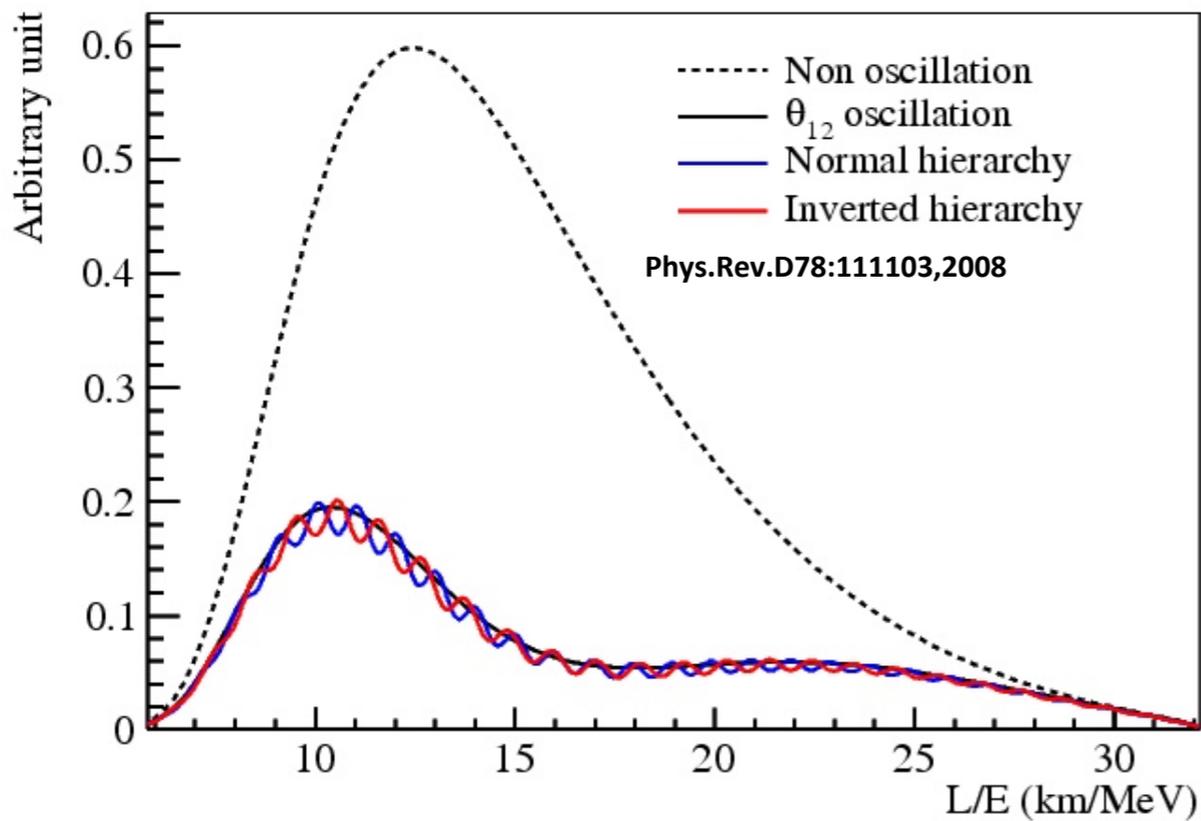
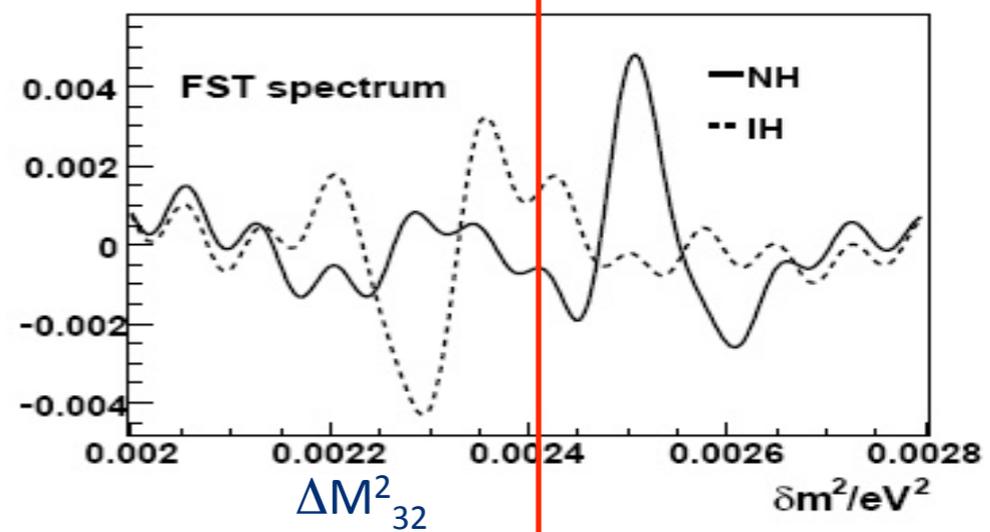
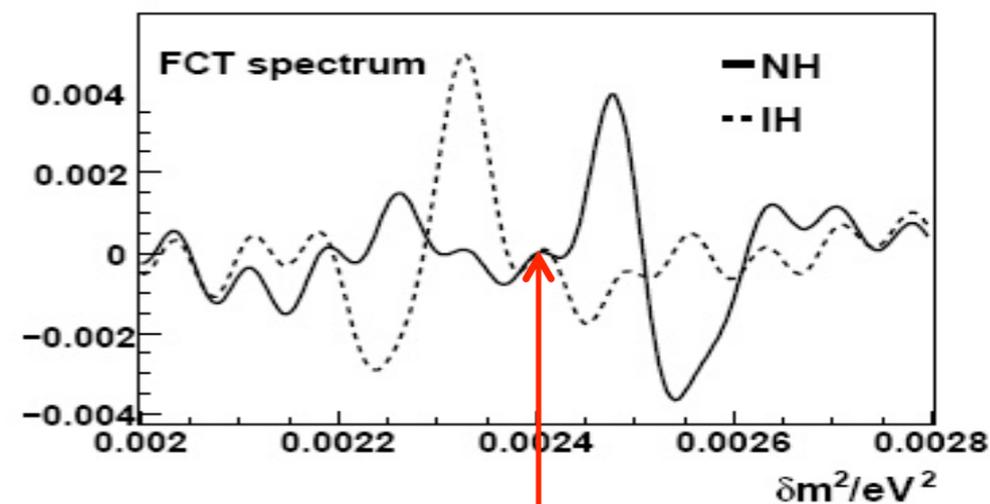


$$P_{ee}(L/E) = 1 - P_{21} - P_{31} - P_{32}$$

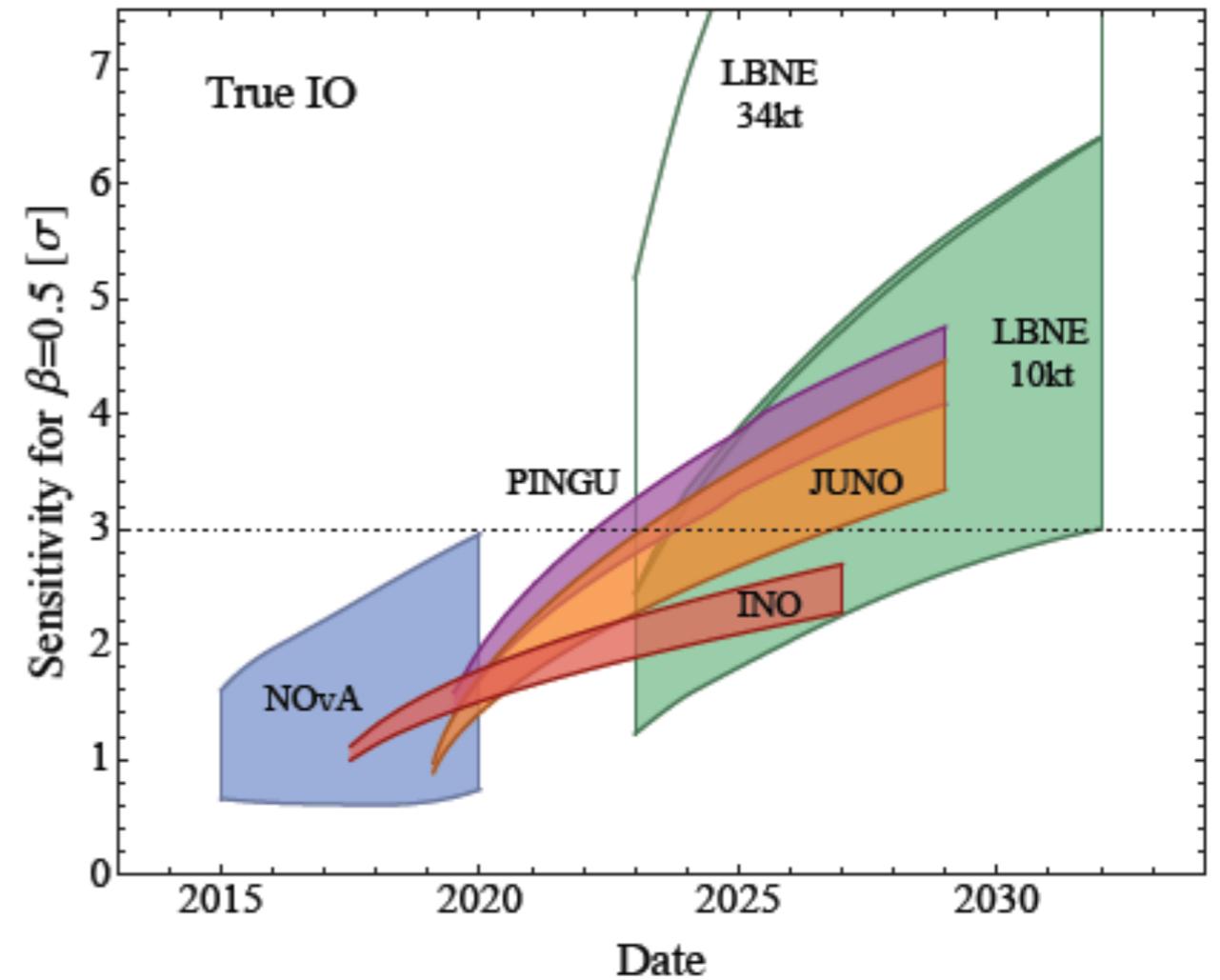
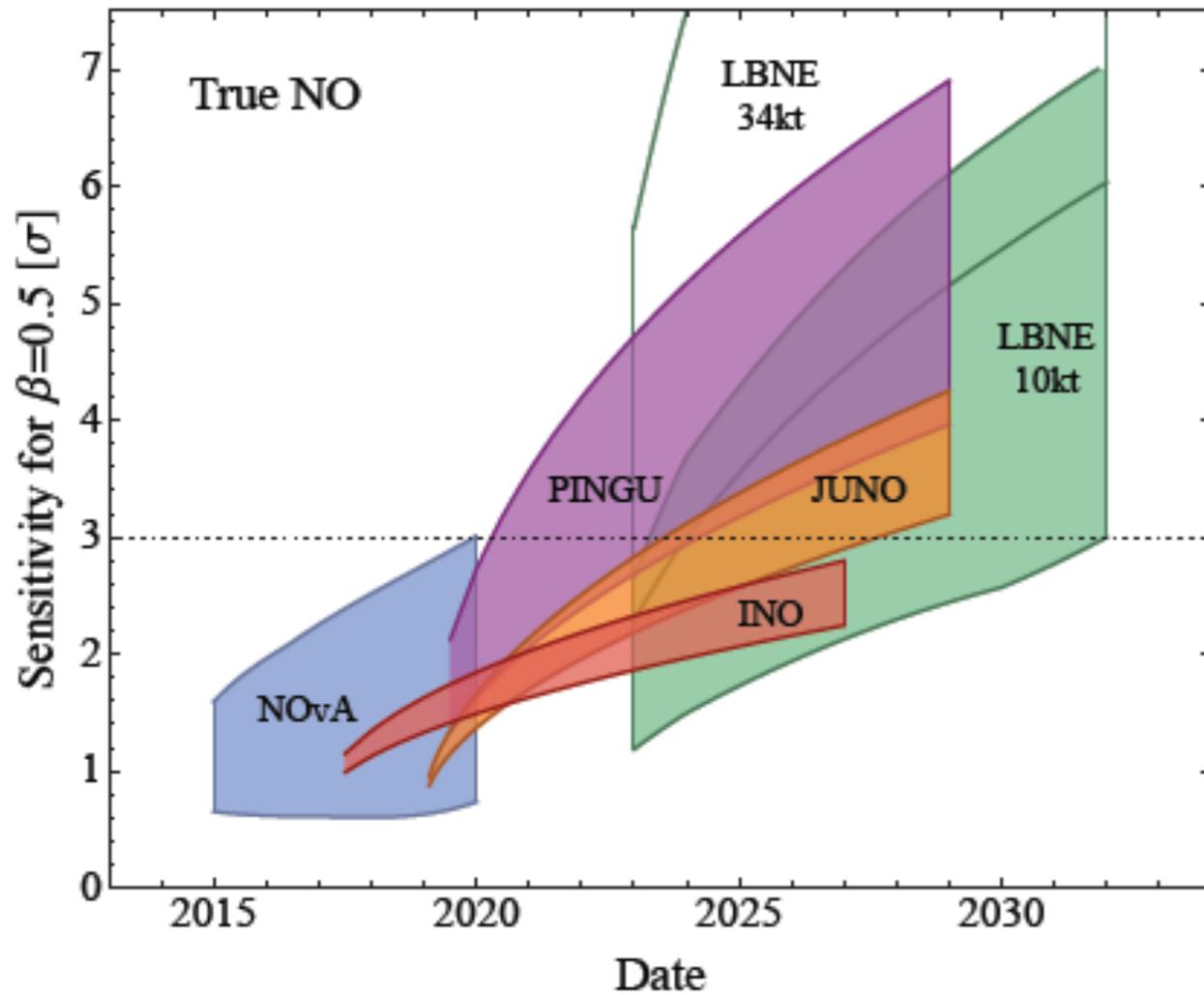
$$P_{21} = \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta_{21})$$

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

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



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



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

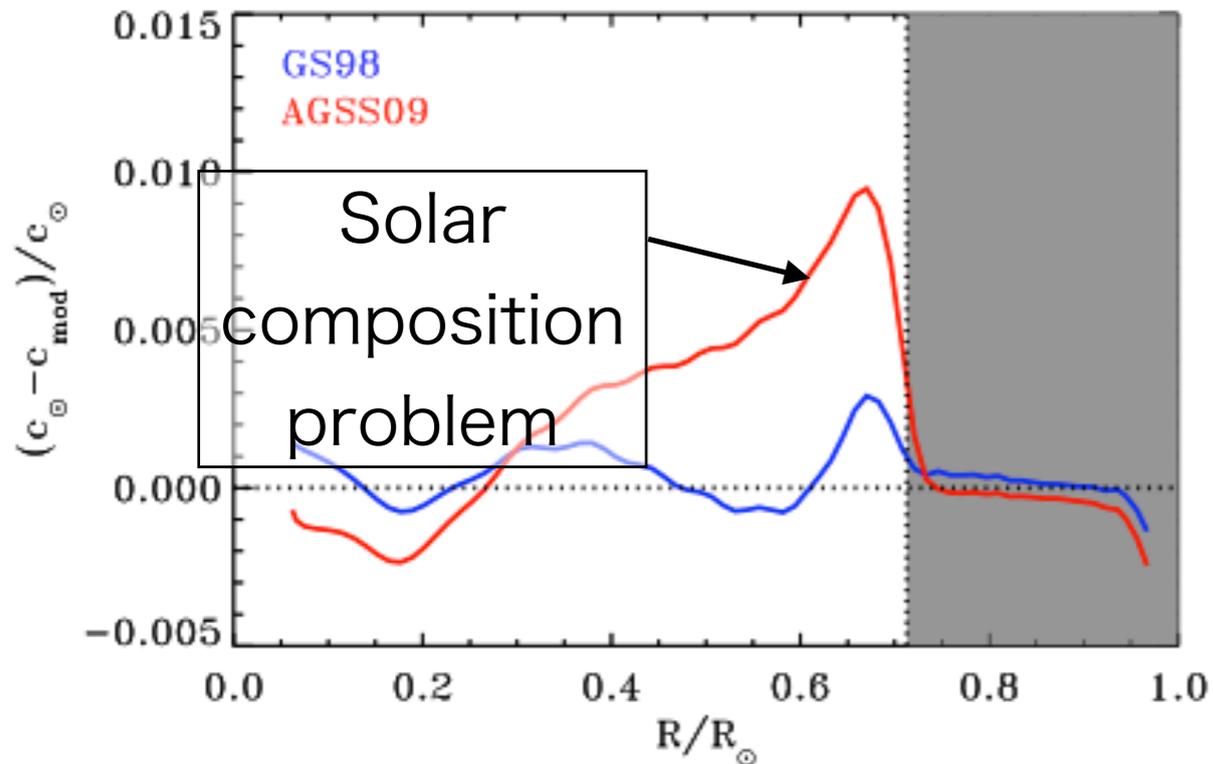
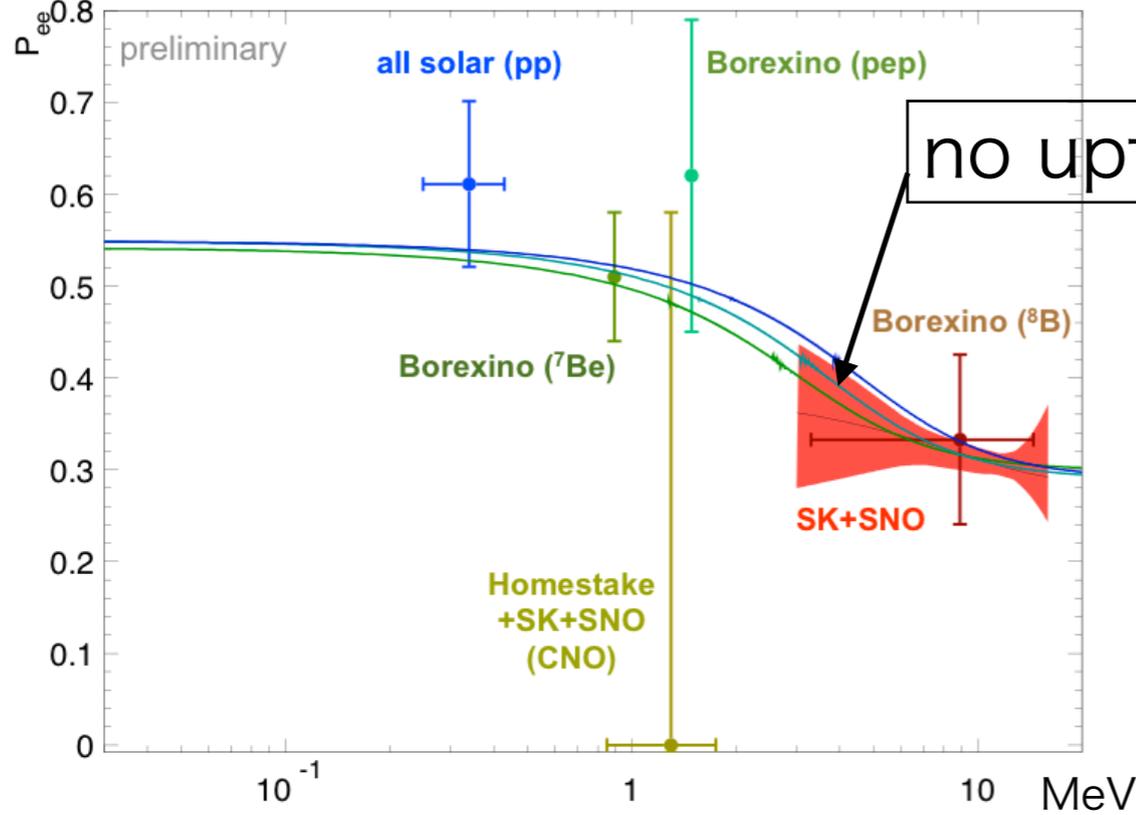
- independent of the unknown CP phase and  $\theta_{23}$

Other rich physics

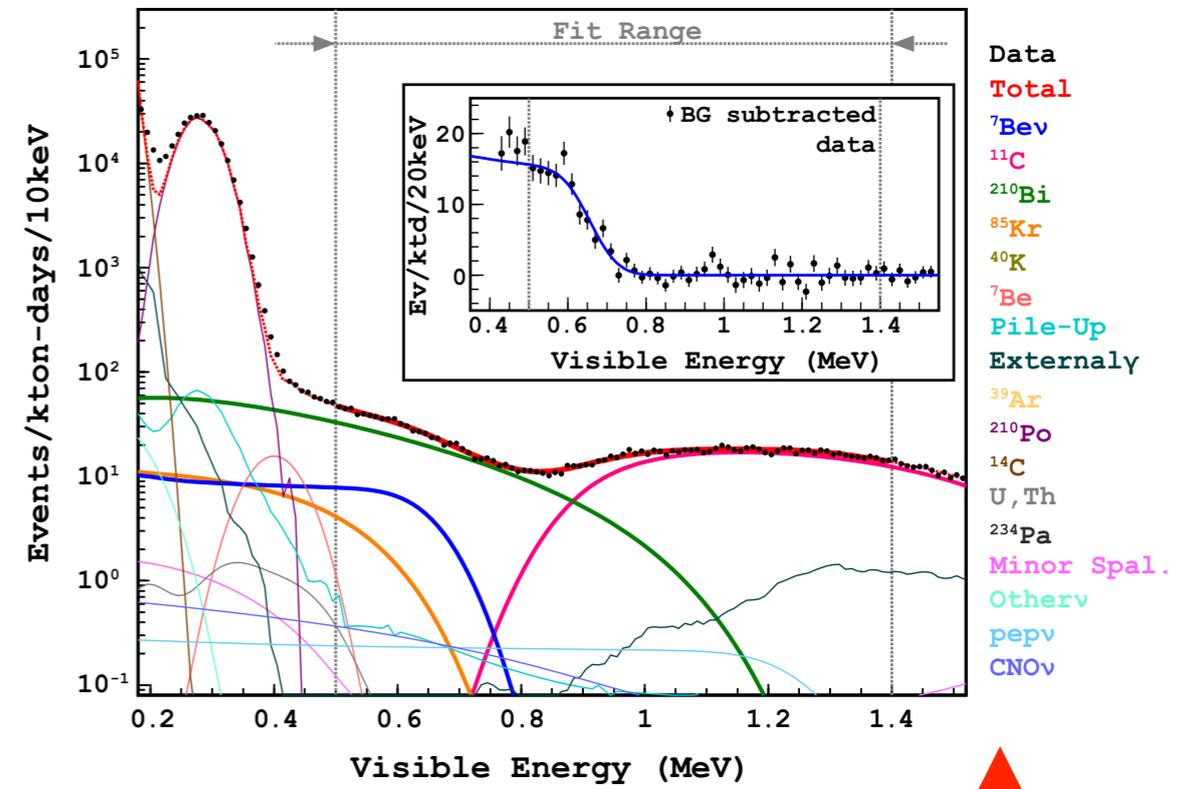
- precise  $\Delta m^2_{31}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\Delta m^2_{21}$ , geo, solar, supernova, ..., neutrinos

# 道具としてのニュートリノ

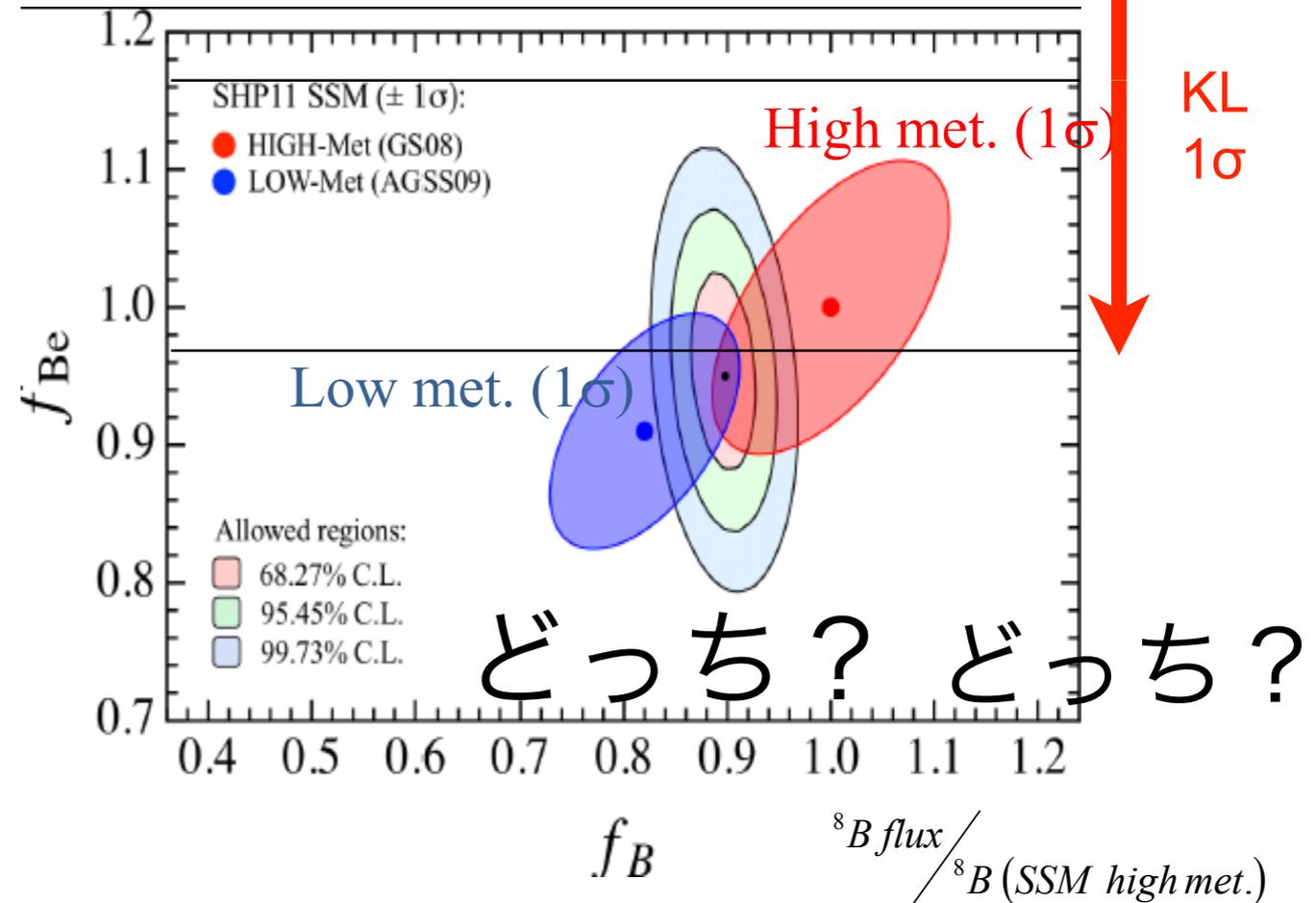
## 太陽ニュートリノ



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

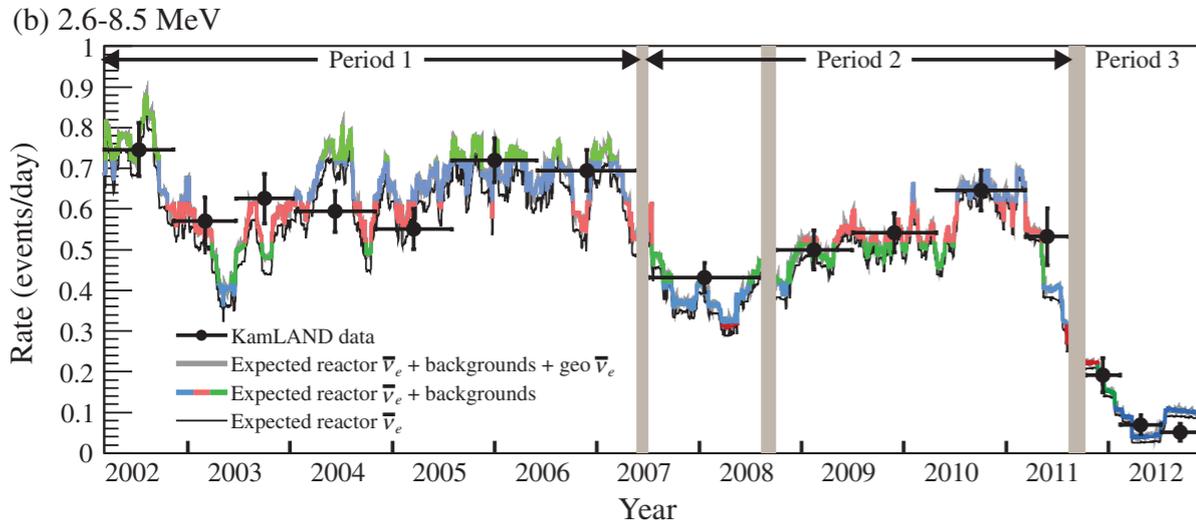


${}^7\text{Be flux} / {}^7\text{Be (SSM high met.)}$

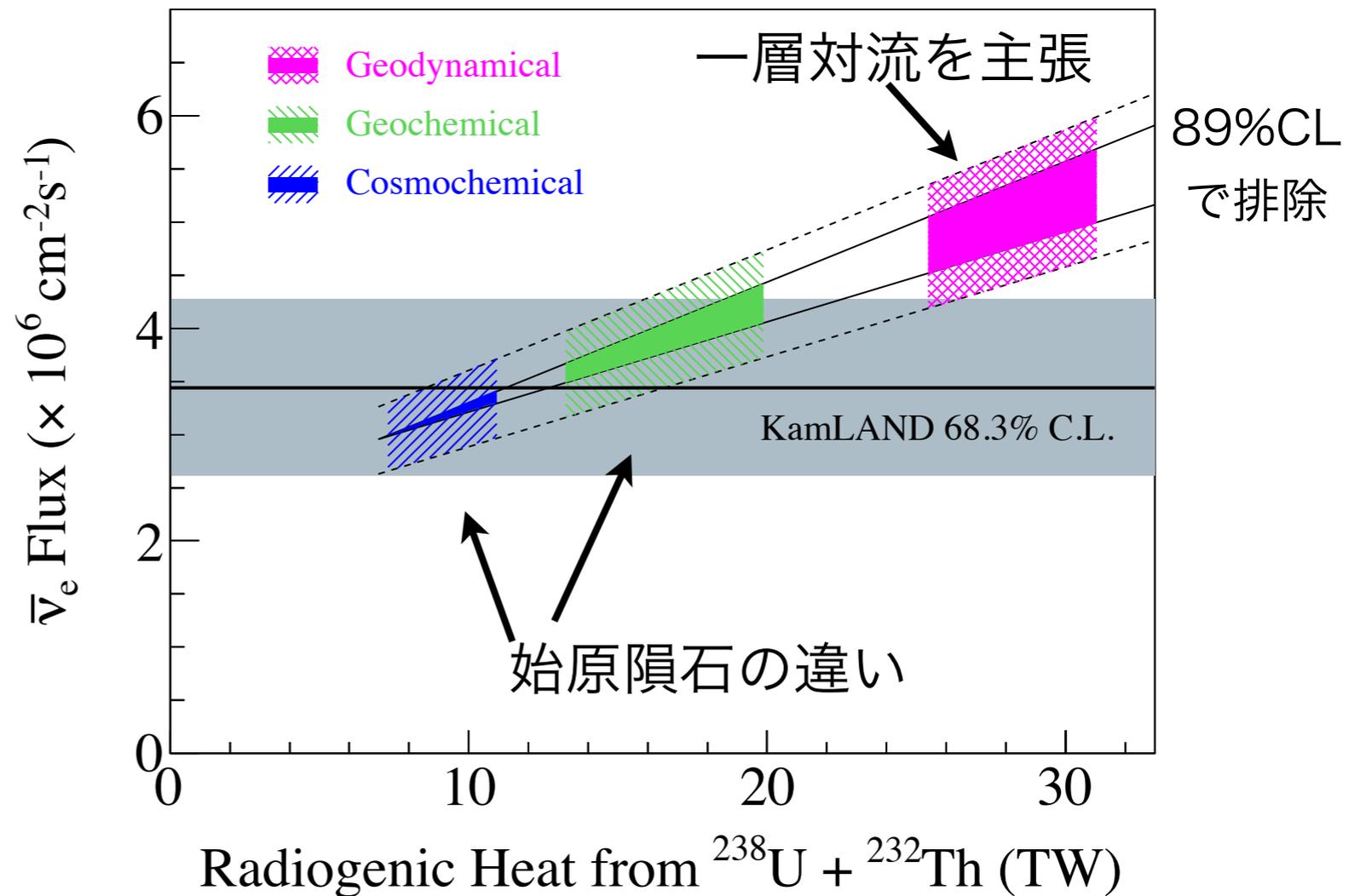
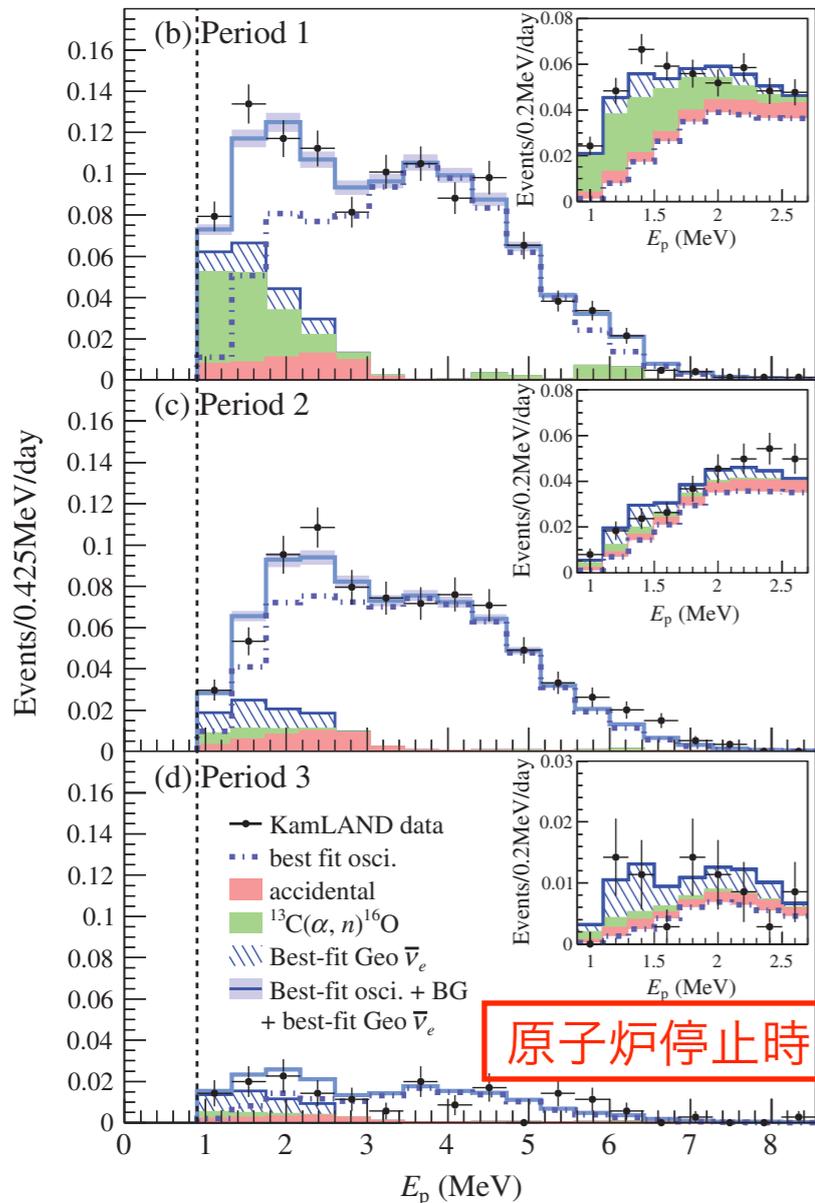


# 道具としてのニュートリノ

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



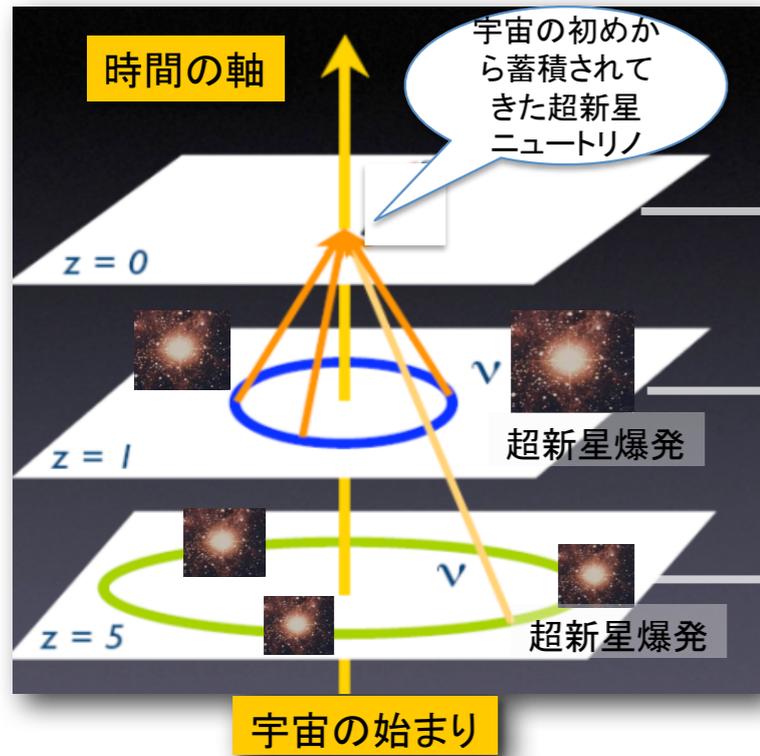
原子炉運転との完璧な相関で 原子炉  
ニュートリノ領域でBGが正しく理解  
できていることを確認



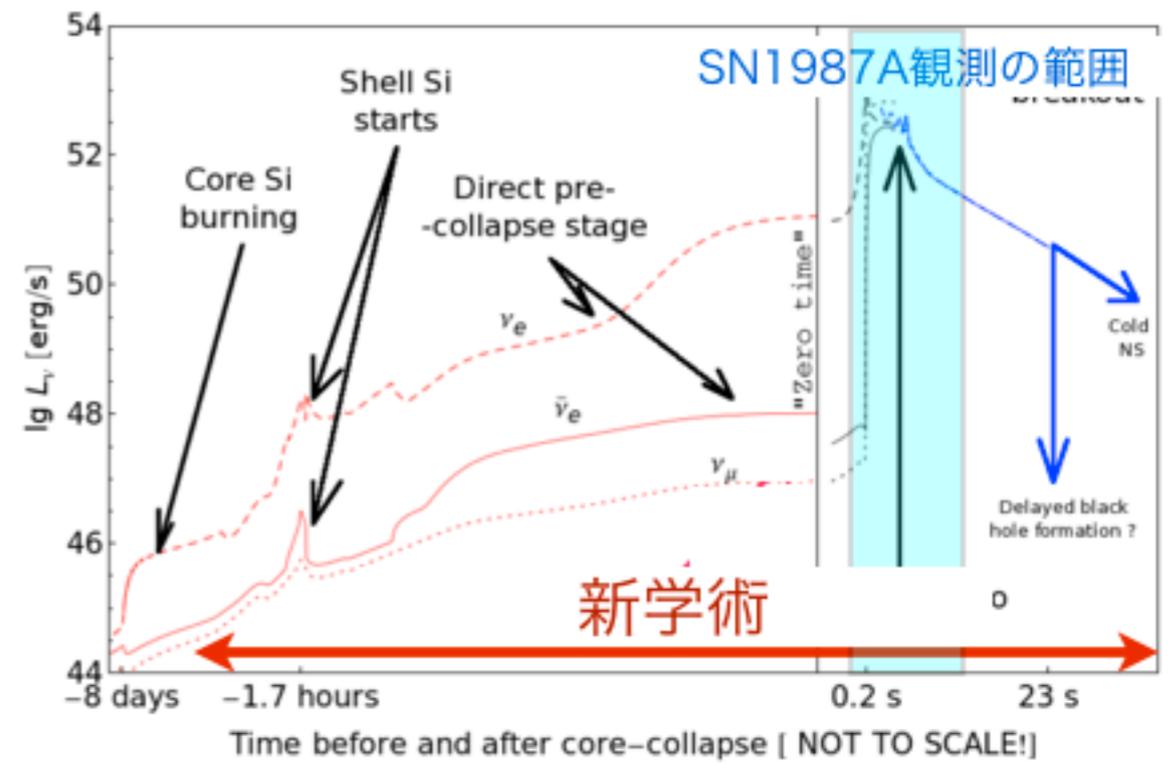
# 道具としてのニュートリノ

## 超新星ニュートリノ

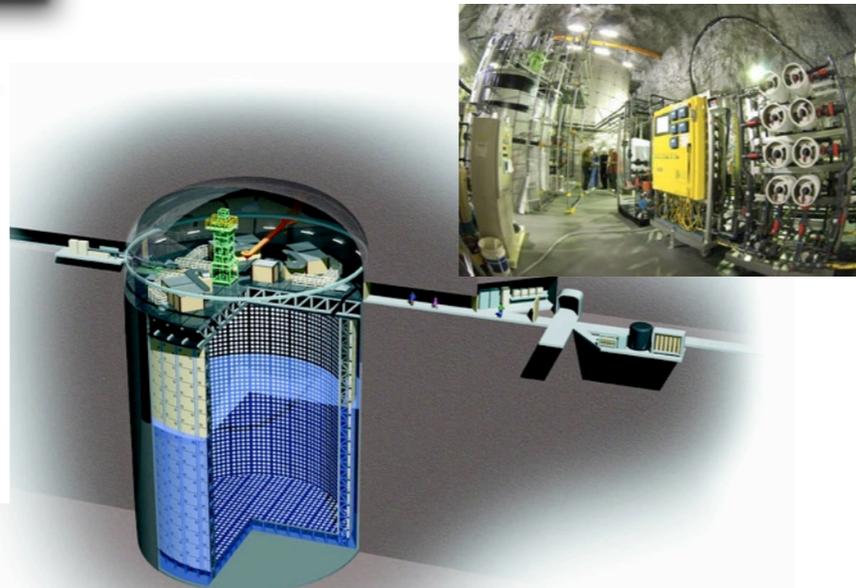
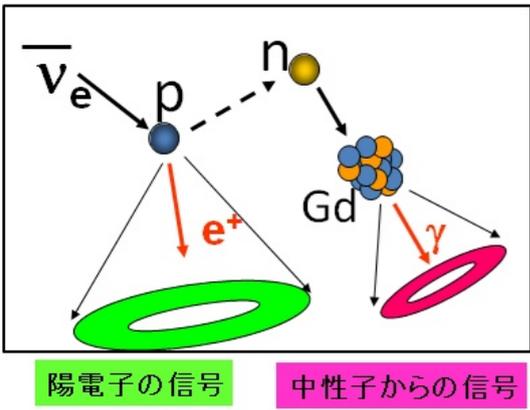
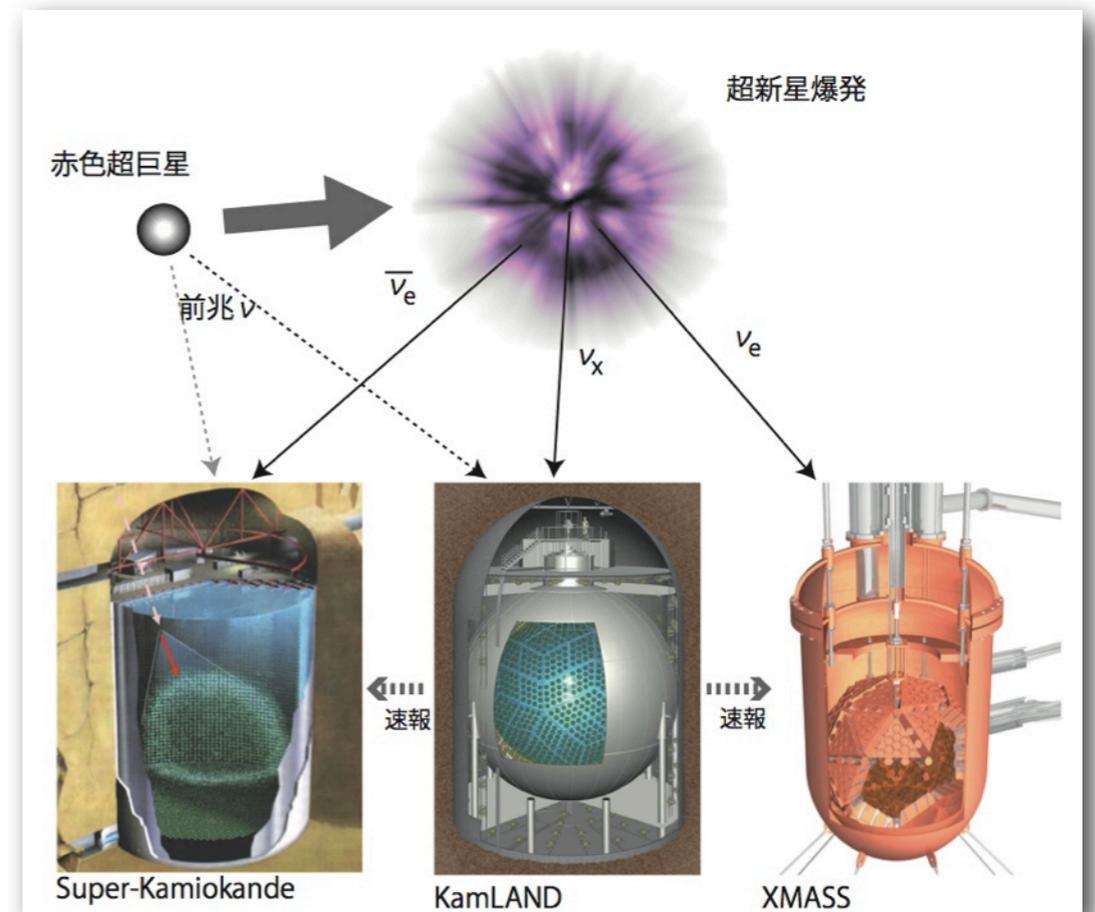
### 超新星背景ニュートリノ



## 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

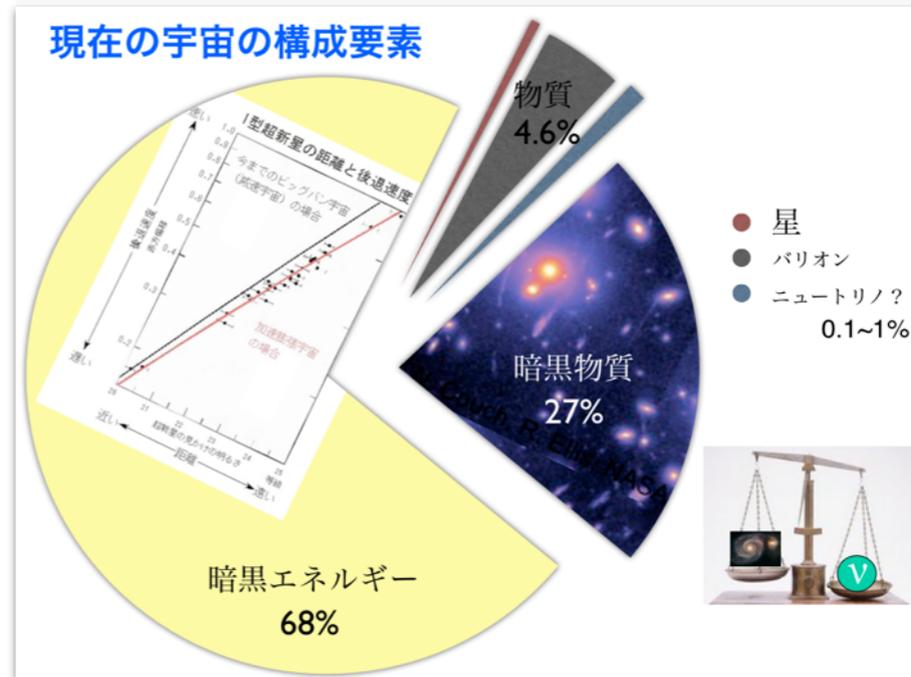
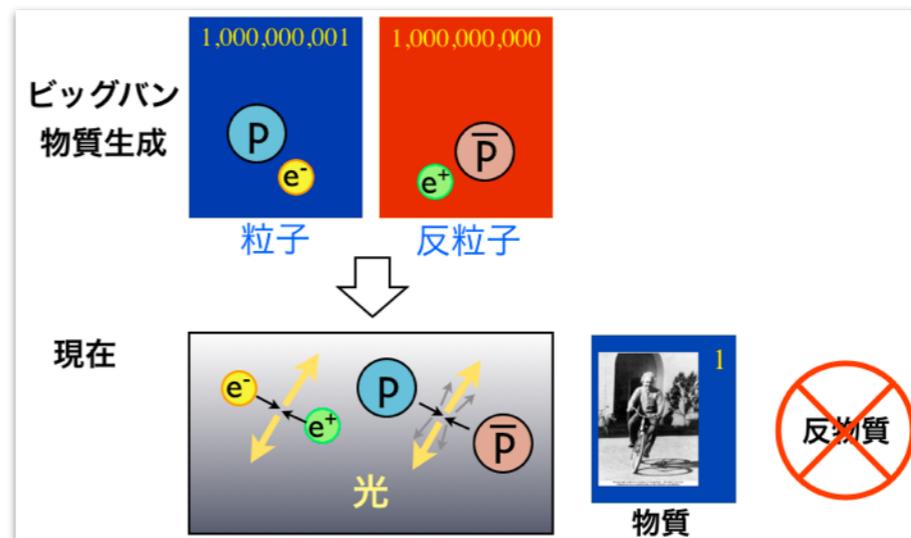
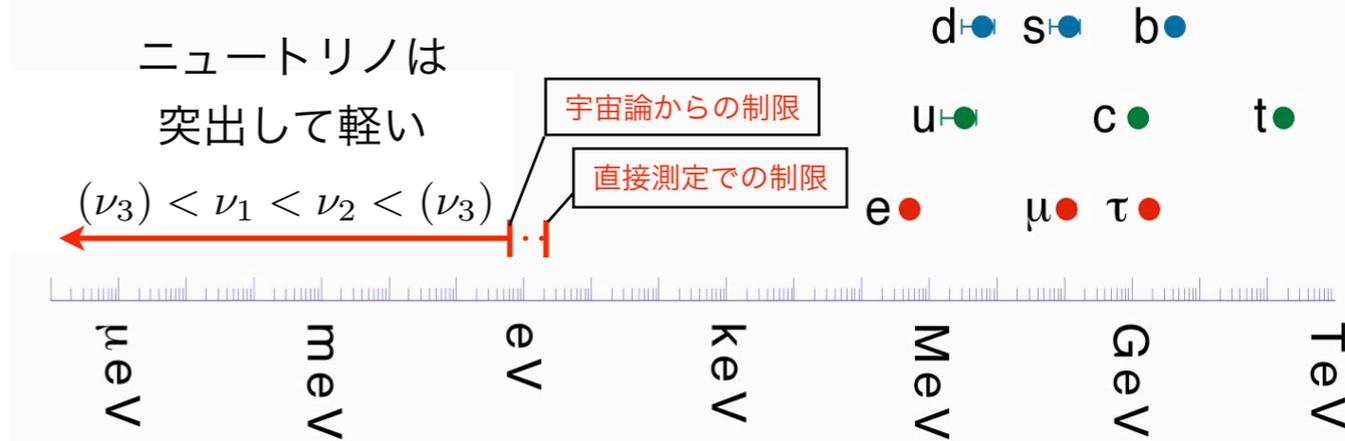
## 宇宙物質優勢

Leptogenesis

## 暗黒物質

## 暗黒エネルギー

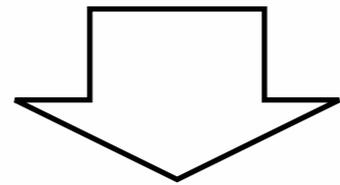
ニュートリノが持ちうる  
**マヨラナ性**と関係  
しているかもしれない。



# マヨラナニュートリノ

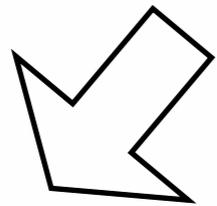
特殊相対性理論  $E^2 = p^2 + m^2$

fermion spin  $\uparrow \downarrow$



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

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



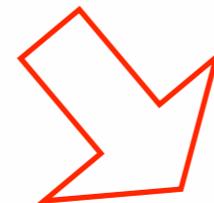
$\nu_L \quad \nu_R \quad \bar{\nu}_L \quad \bar{\nu}_R$

somehow, we haven't observed

only light neutrinos

Dirac Neutrino

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



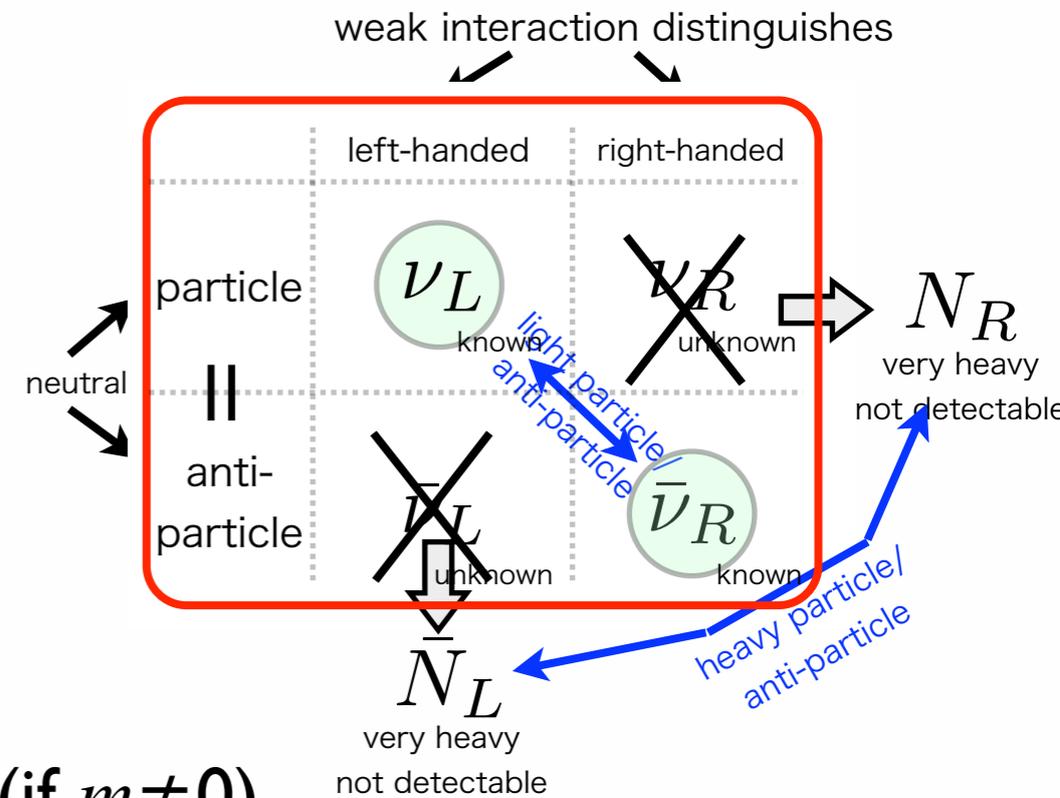
$\nu_L \quad \bar{\nu}_R \quad \bar{N}_L \quad N_R$

we haven't observed because heavy(?)

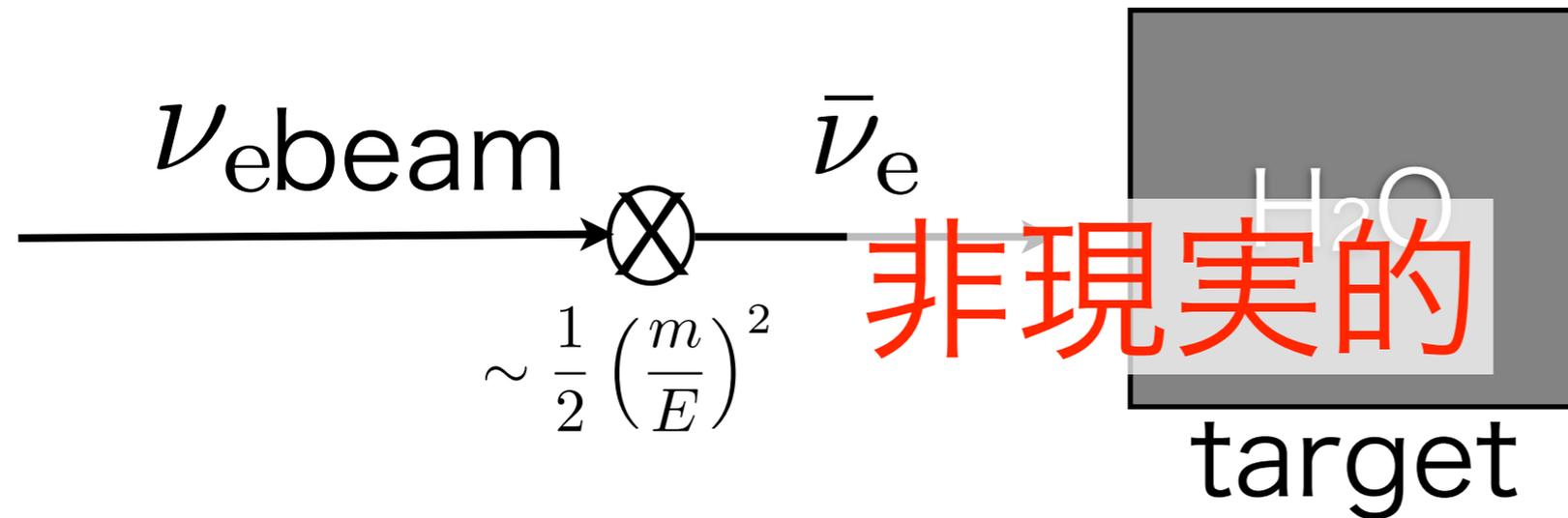
heavy neutrino can be naturally introduced

Majorana Neutrino

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



# Straight forward method to verify Majorana nature



look for

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

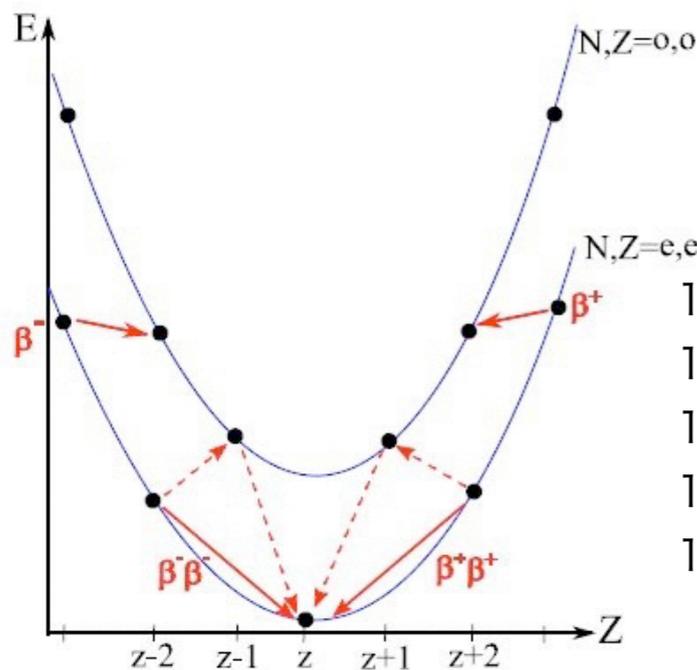
$$\sigma \propto E^2$$

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。

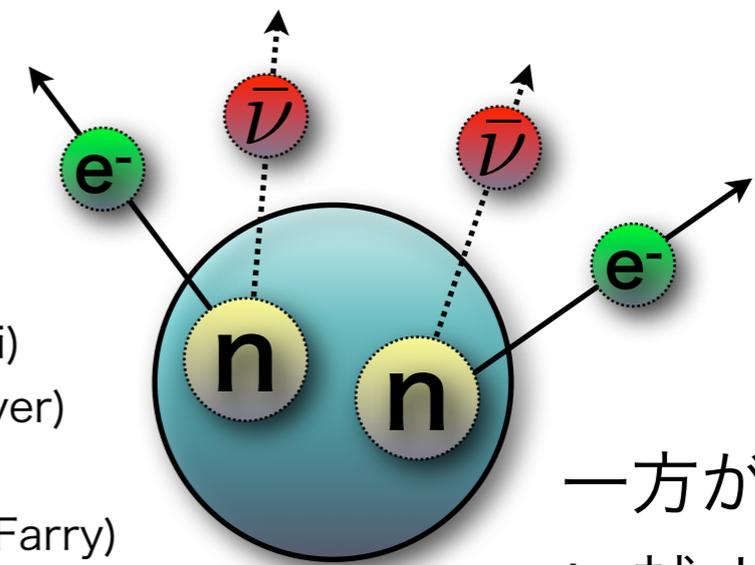
幸い自然は親切で、

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。



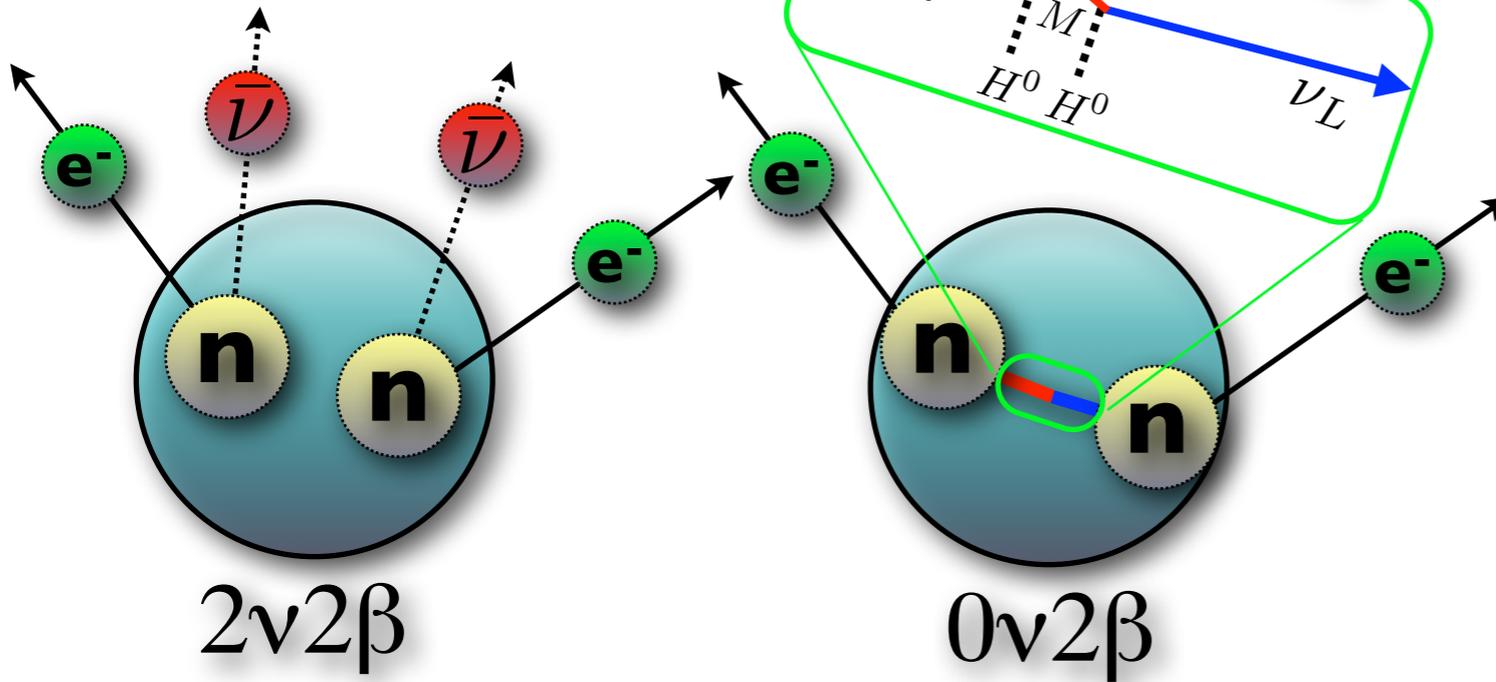
- 1930 light neutral particle (W.Pauli)
- 1933 neutrino, beta decay theory (E.Fermi)
- 1935 double beta decay (M.Goeppert-Mayer)
- 1937 Majorana neutrino (E.Majorana)
- 1939 neutrino-less double beta decay (W.Furry)



一方が他方を追い越す事も可能

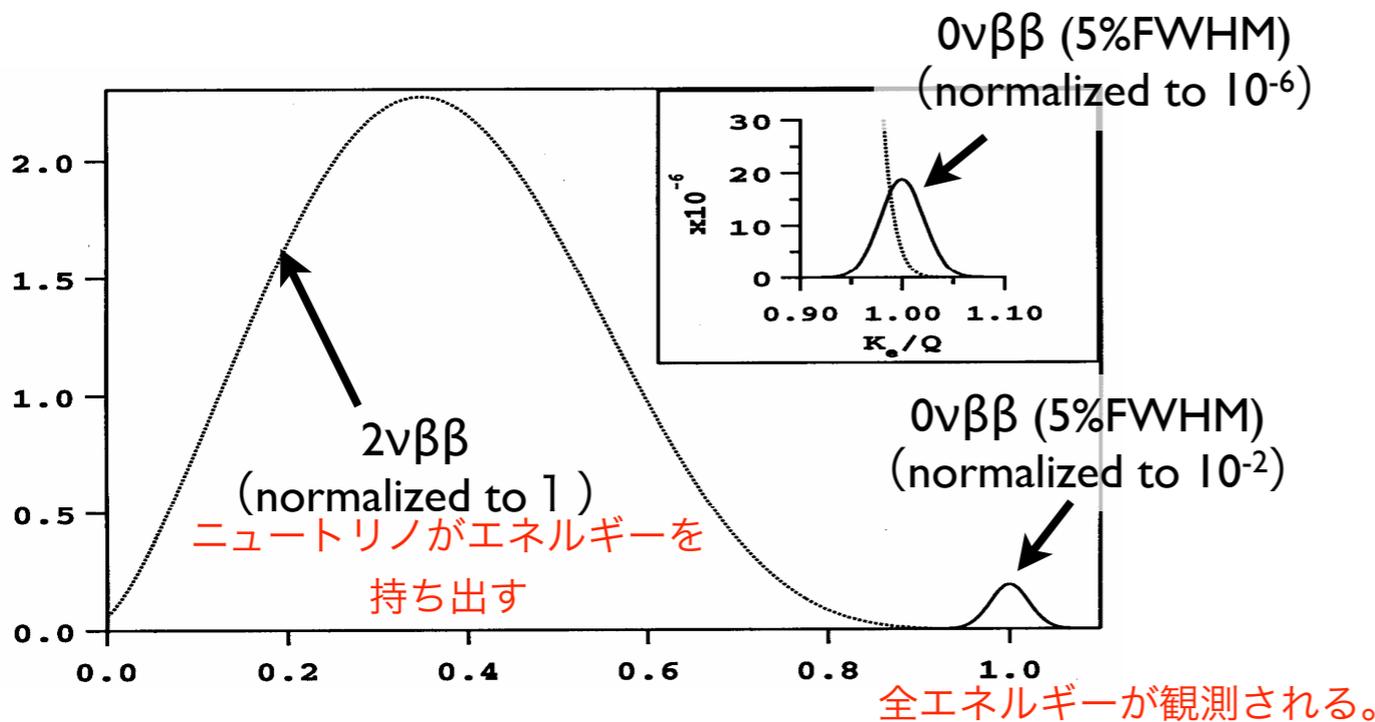
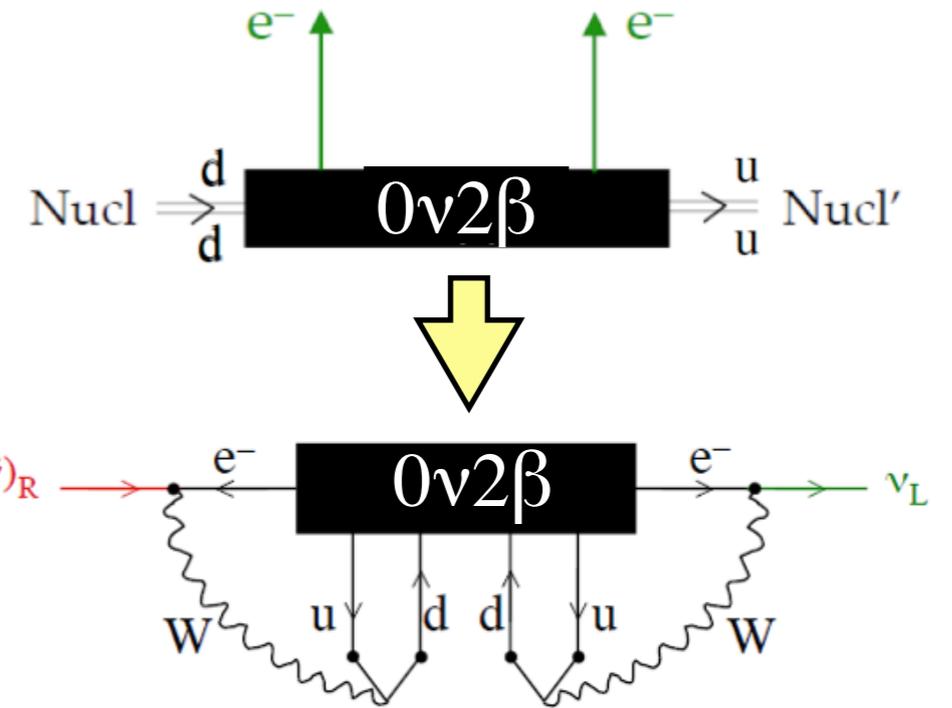
# 二重β崩壊

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

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

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

# Single beta decay

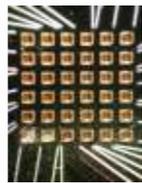
KATRIN

$^3\text{H}$  18.7 KeV



MARE-II

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



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

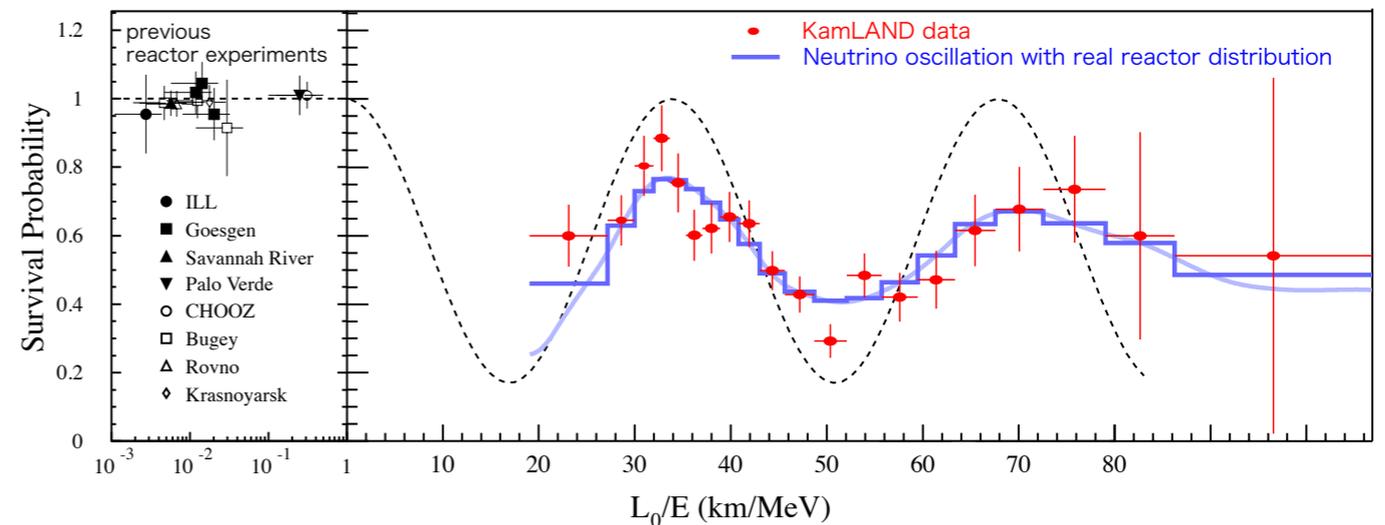
現在の結果  
< 2 eV (95%)

予想感度  
0.2 eV

$m_\nu$

# Neutrino oscillation

solar, reactor, atmospheric, accelerator



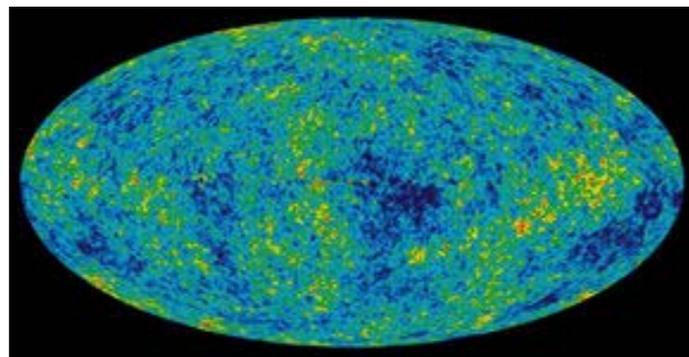
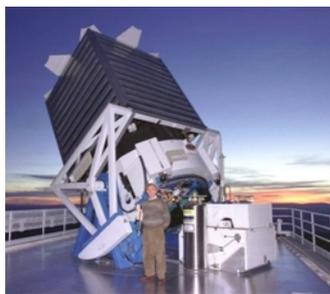
$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

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

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

# Cosmology

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



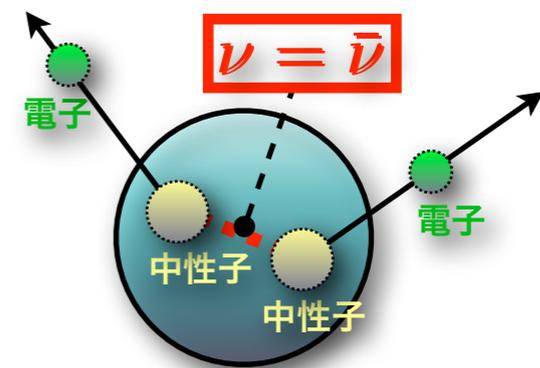
$$M = \sum m_i$$

< 0.2 ~ 0.7 eV

0.05 eV ?

# Double beta decay

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

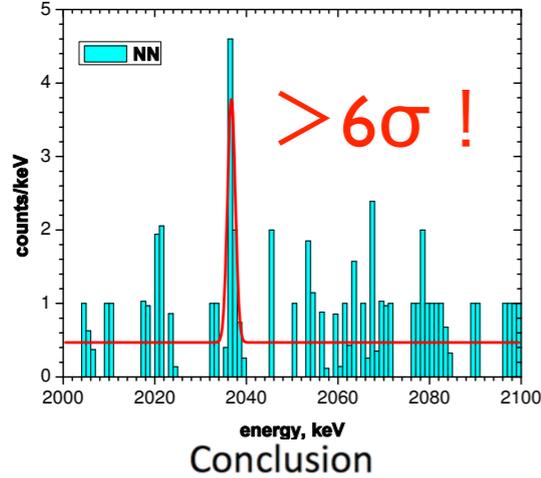


$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \varepsilon_i \right|$$

< 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

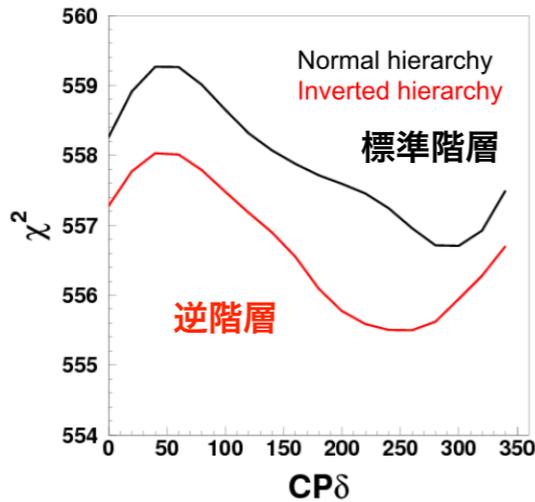
$m_{ee} = (47 \pm 1)$  meV

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)

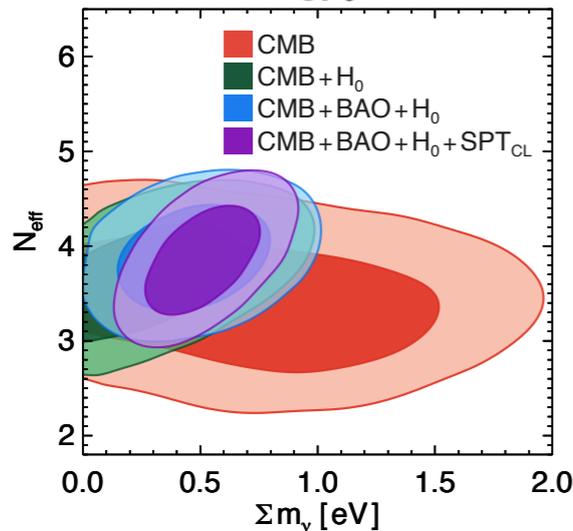
ニュートリノ振動  
SK, MINOS



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)

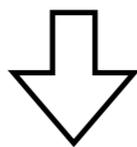
$\chi_{\min}(\text{標準階層}) - \chi_{\min}(\text{逆階層}) = 1.2$

宇宙観測



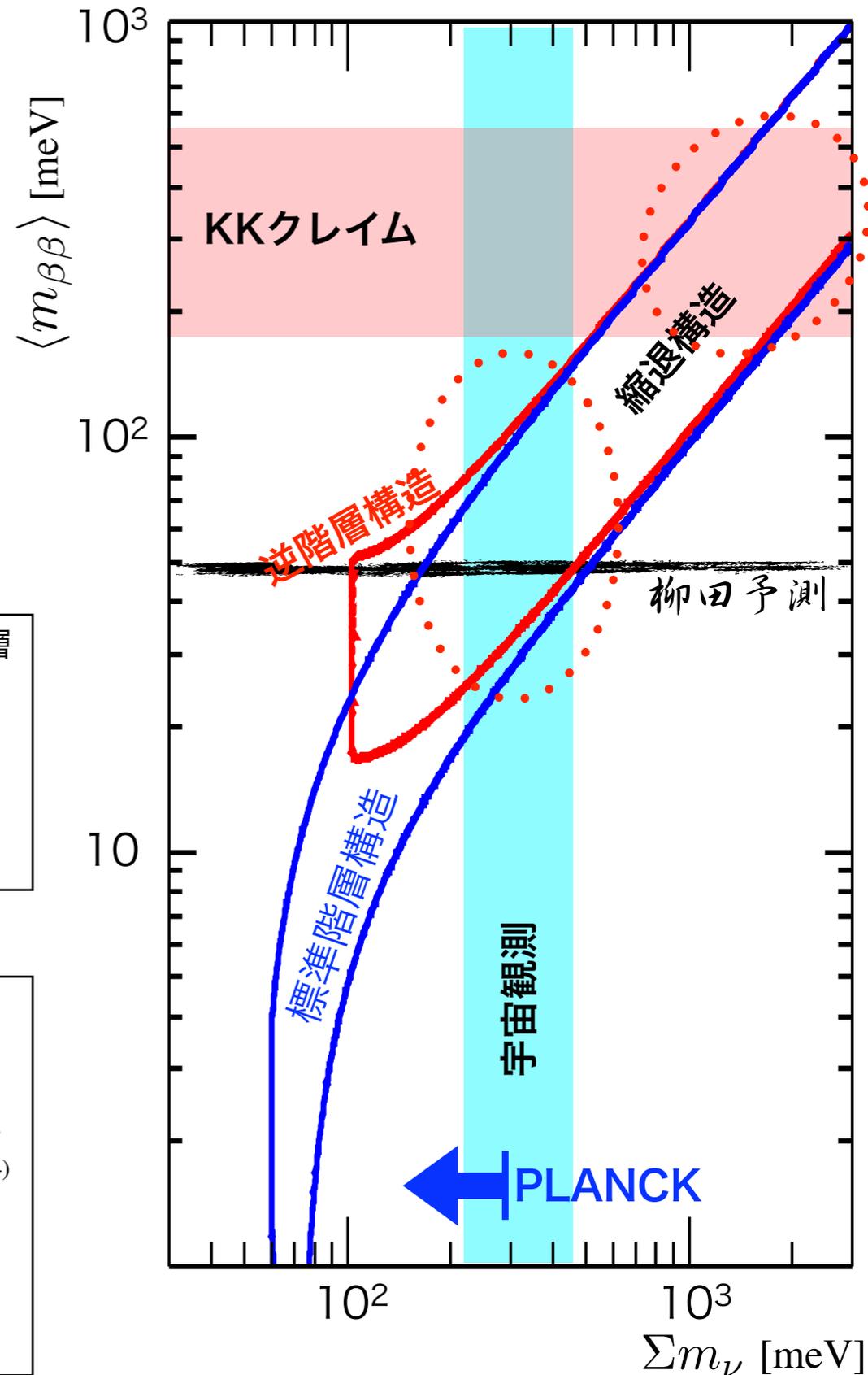
$\Sigma m_\nu = 0.32 \pm 0.11$  eV  
(3世代に固定)

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。



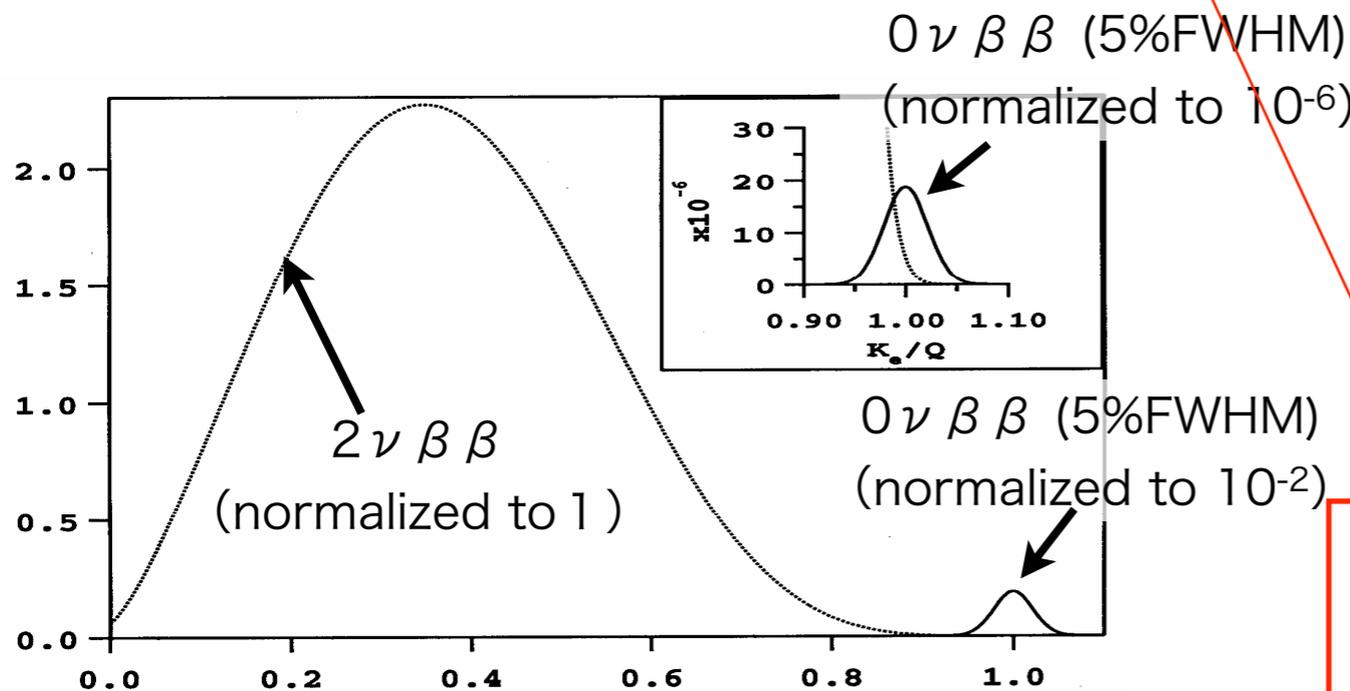
**いつ見つかってもし思議でない。**

- 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

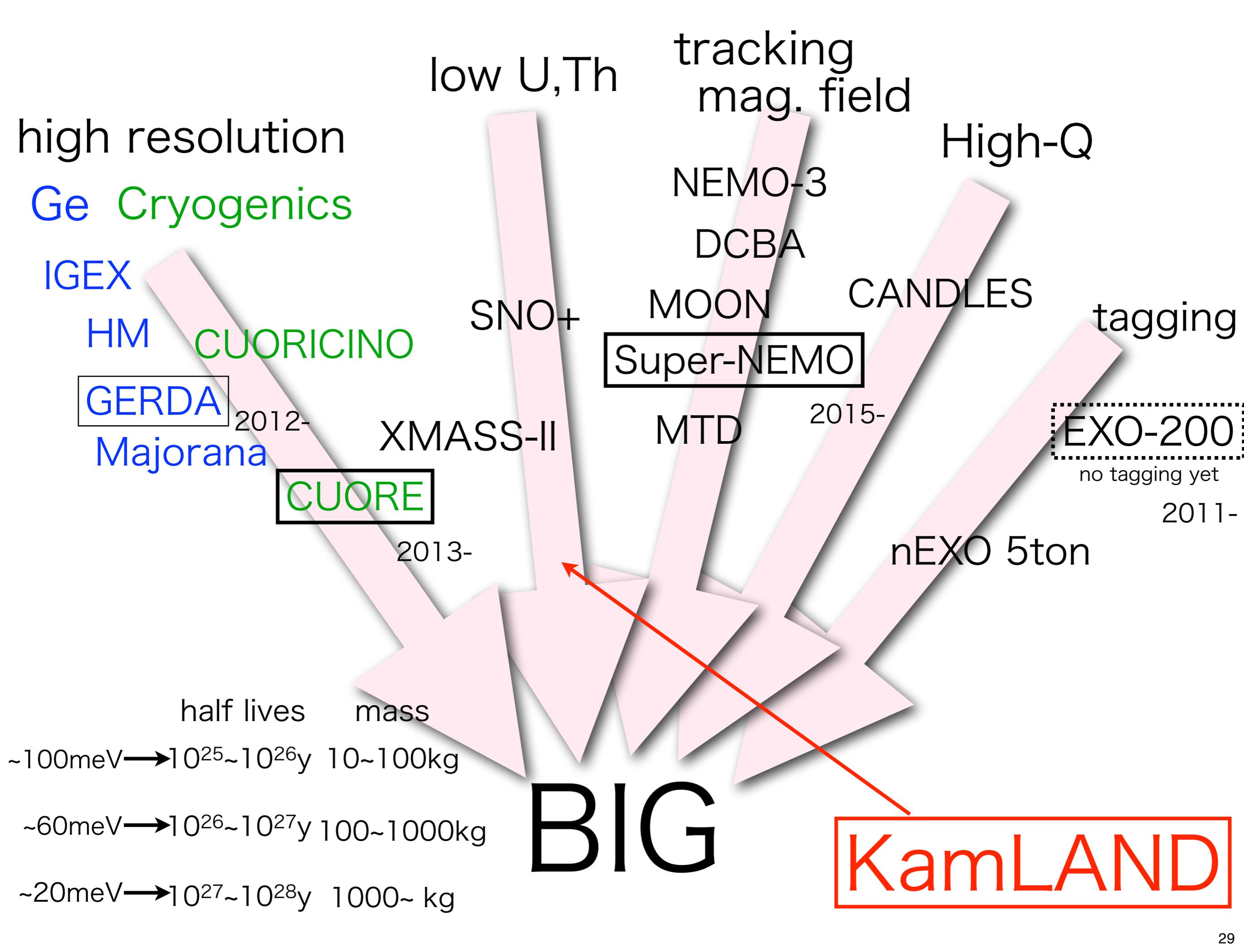
Rodin et al., Nucl. Phys. A793 (2007)213-215

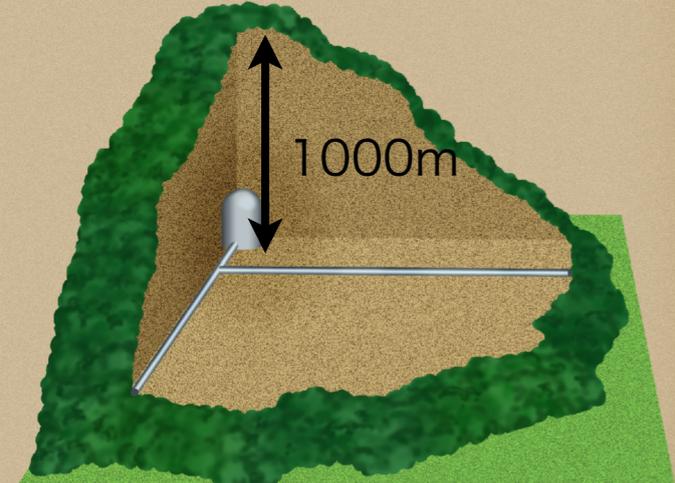
Nucleus	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ measured (year)	Nat. Abundance (%)	Q-value (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	max. Q, fast 2v
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$0.86 \times 10^{27}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$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



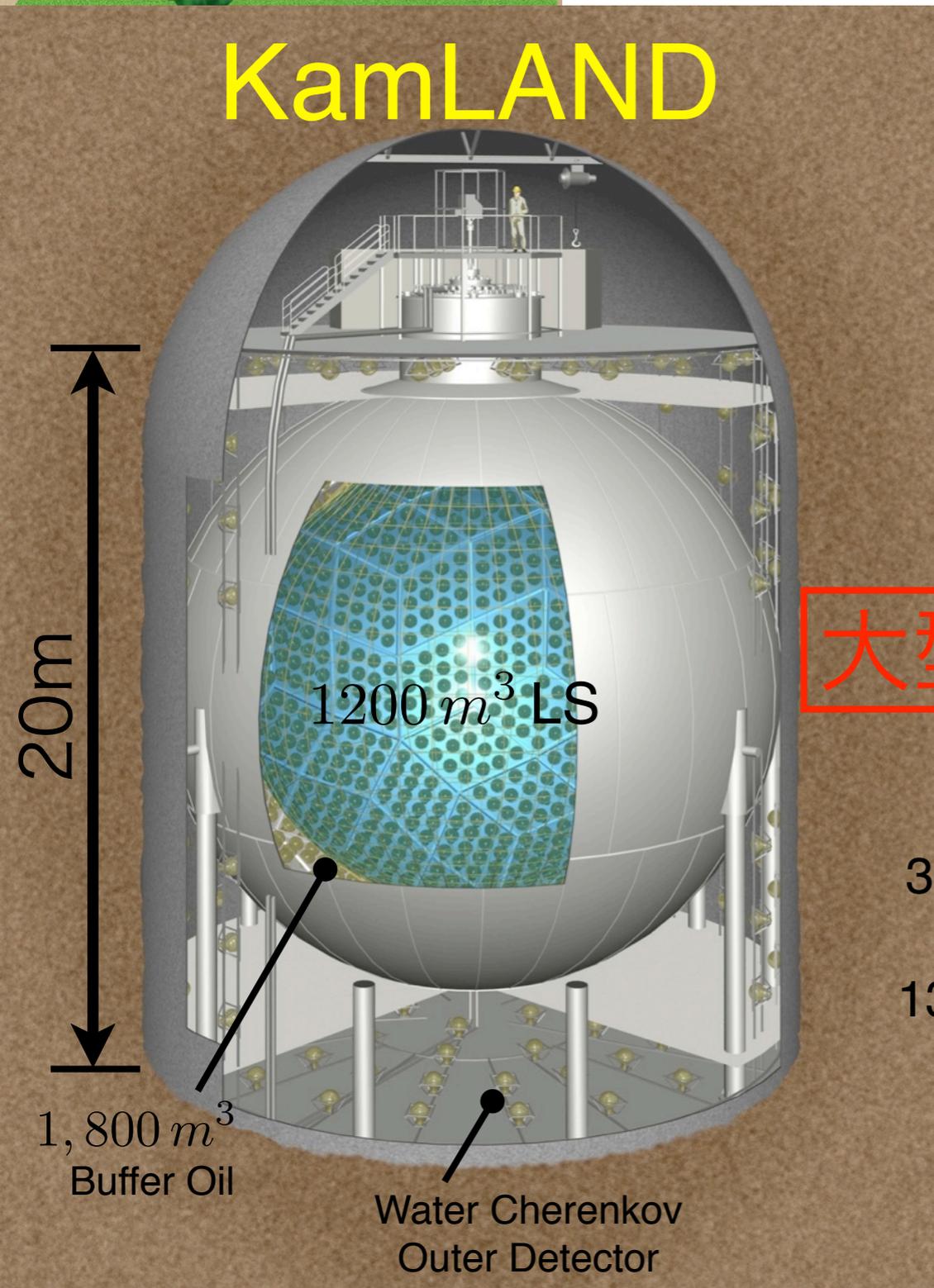
$2\nu$  BGはエネルギー分解能の約5.8乗に比例して増加するため、 $2\nu$ が早いと高分解能が必要となる。

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





# KamLAND



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

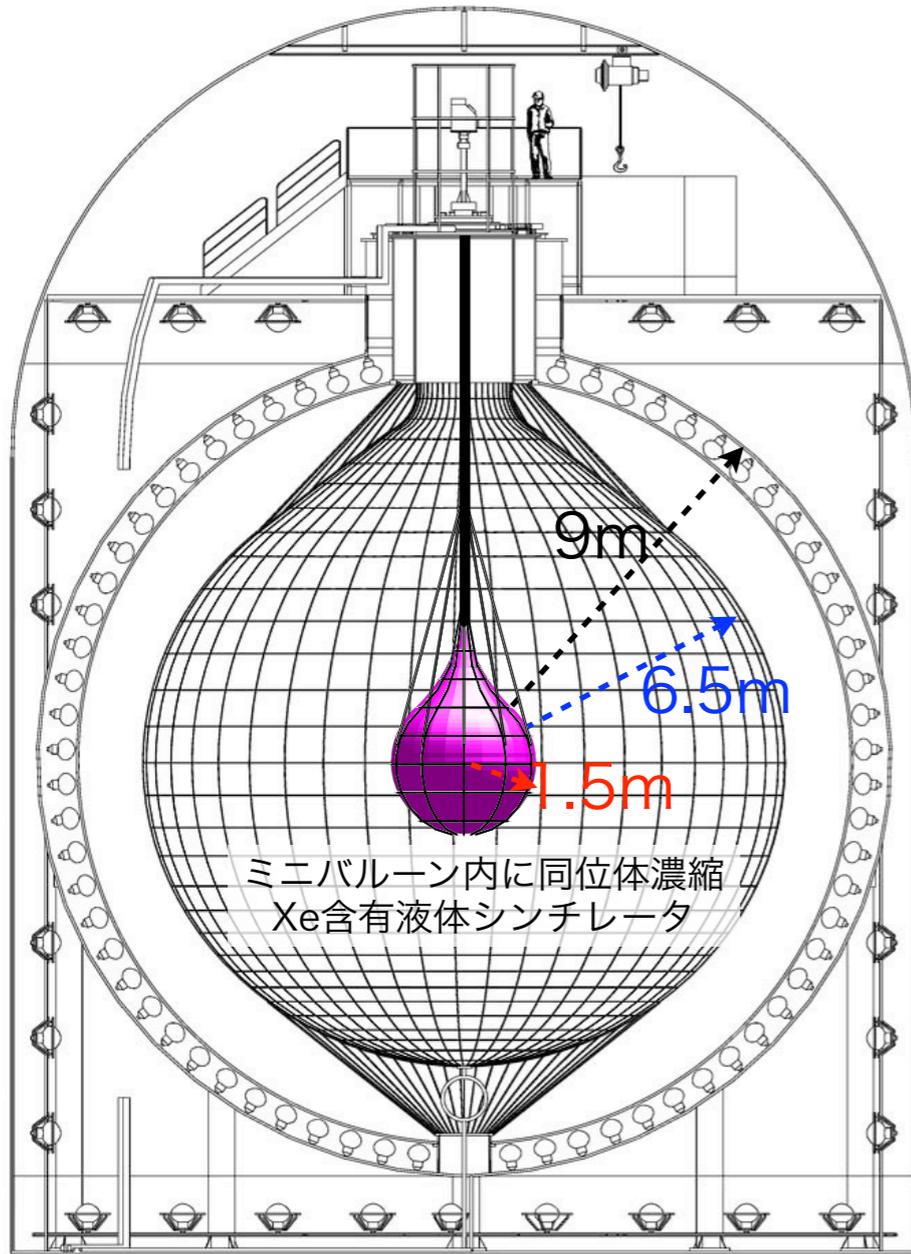
**極低放射能環境**

稀な現象の研究に適している

# KamLAND-Zen

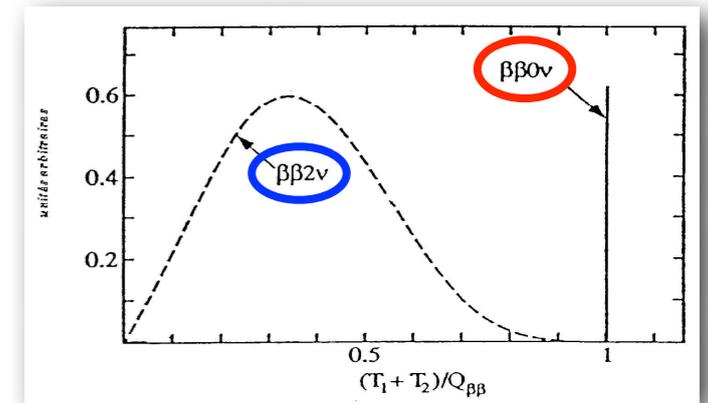
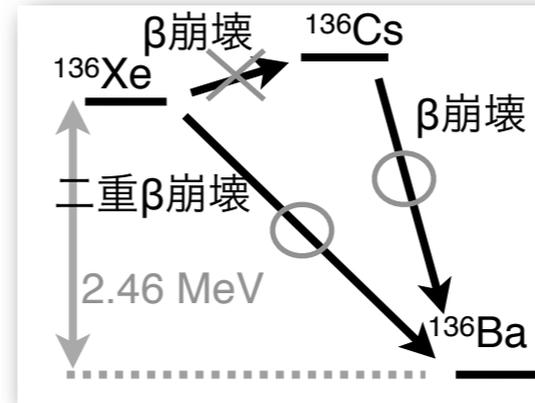
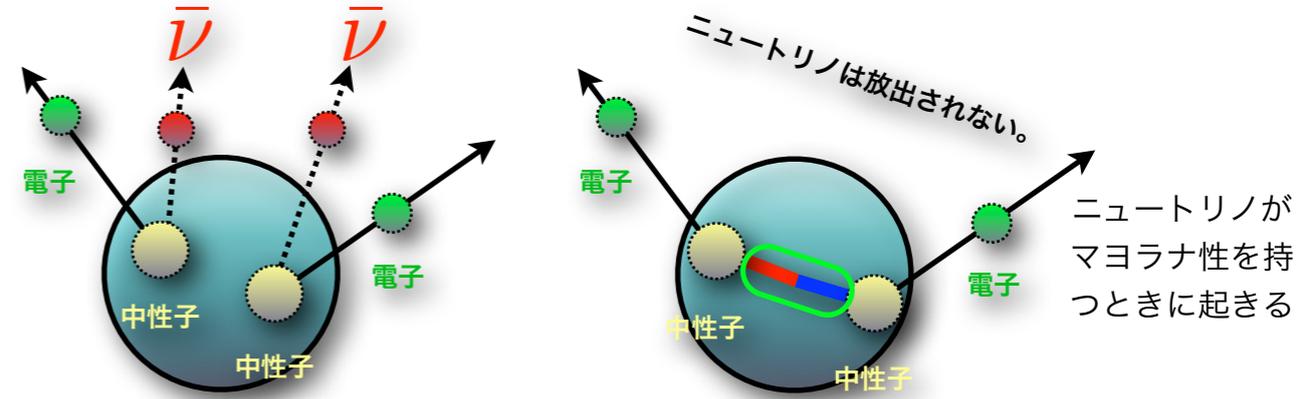


Zero neutrino  
double beta decay search



~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

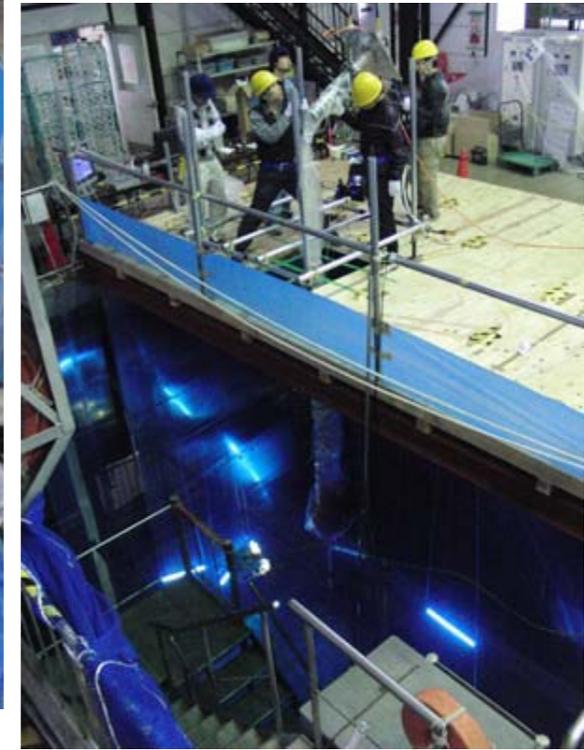
# ミニバルーン試作とプールでの導入リハーサル



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



キセノン溶解・密度制御装置



## その他



ドーム内クリーンルーム



新空洞・LS貯蔵タンク

導入、膨張、液の入れ替え方法を確立

# 本番用ミニバルーン製作

● クラス1 スーパークリーンルームでの作業

(class 1 = 0.5ミクロン粒子が1立方フィートあたり1個以下)

小物質質量 → 25 μm厚 ナイロン6

透明度 99.4% @400nm

強度 19.4 N/cm

Xe 透過度 < 220 g/year

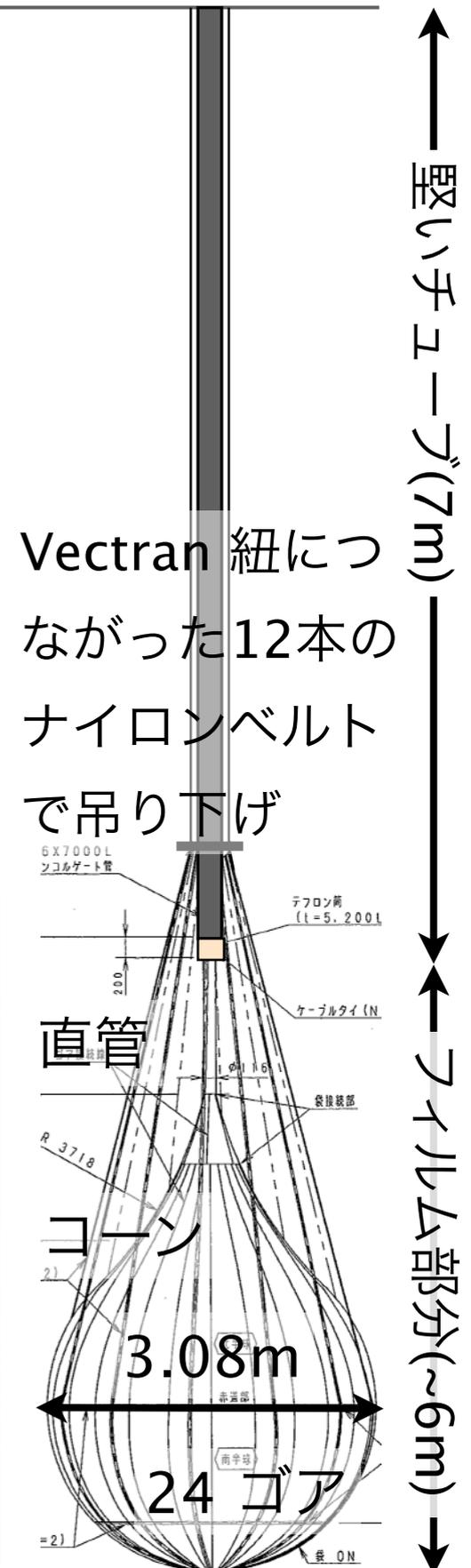
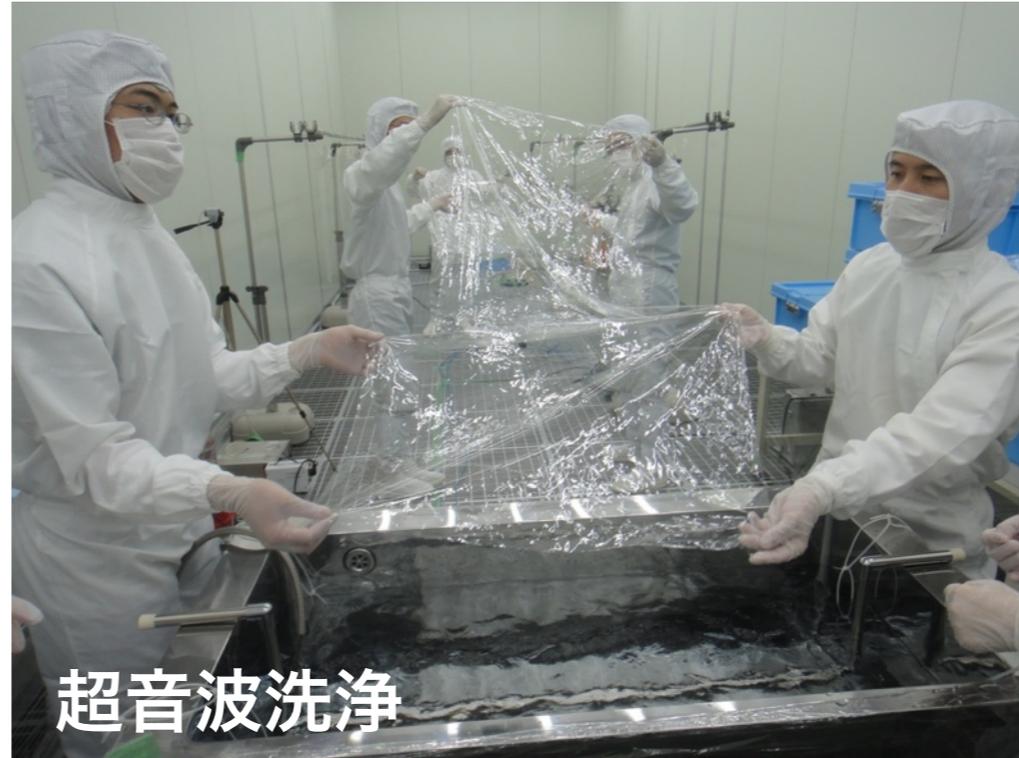
低放射能

→ 充填剤無し特注フィルム

U : 150 →  $2 \times 10^{-12}$  g/g

Th : 59 →  $3 \times 10^{-12}$  g/g

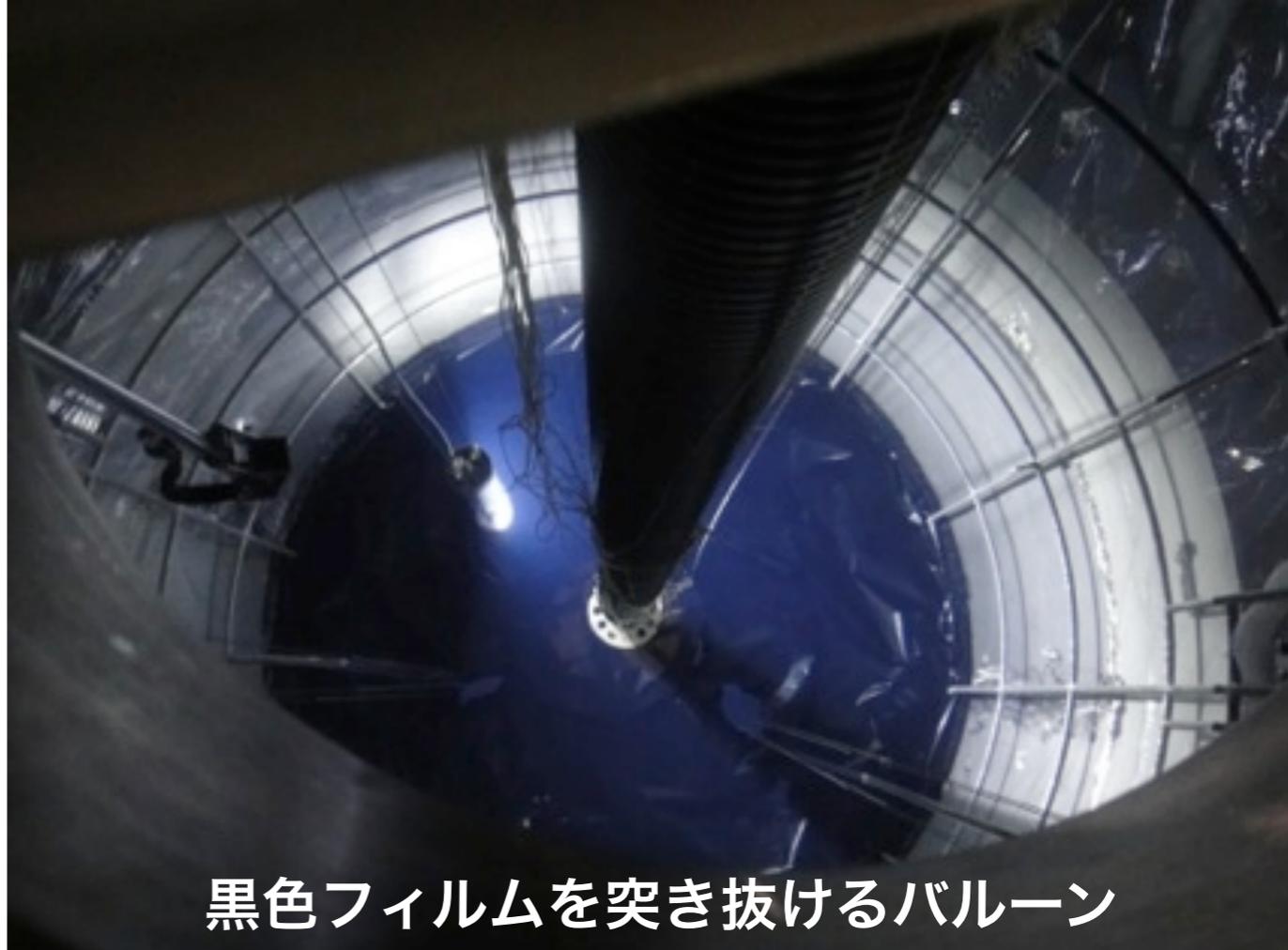
$^{40}\text{K}$  : 140 →  $2 \times 10^{-12}$  g/g



● 全ての道具や部品もここで洗浄



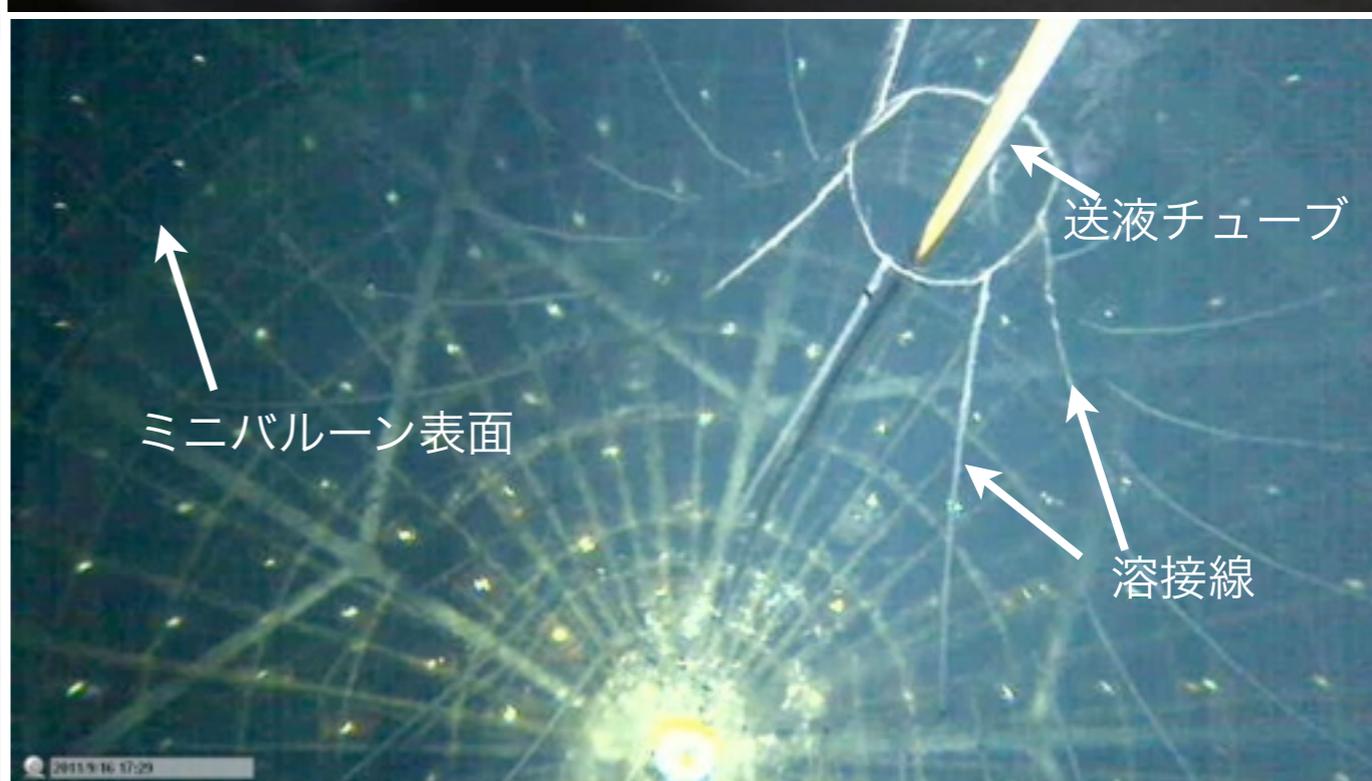
バルーンとチューブの導入



黒色フィルムを突き抜けるバルーン

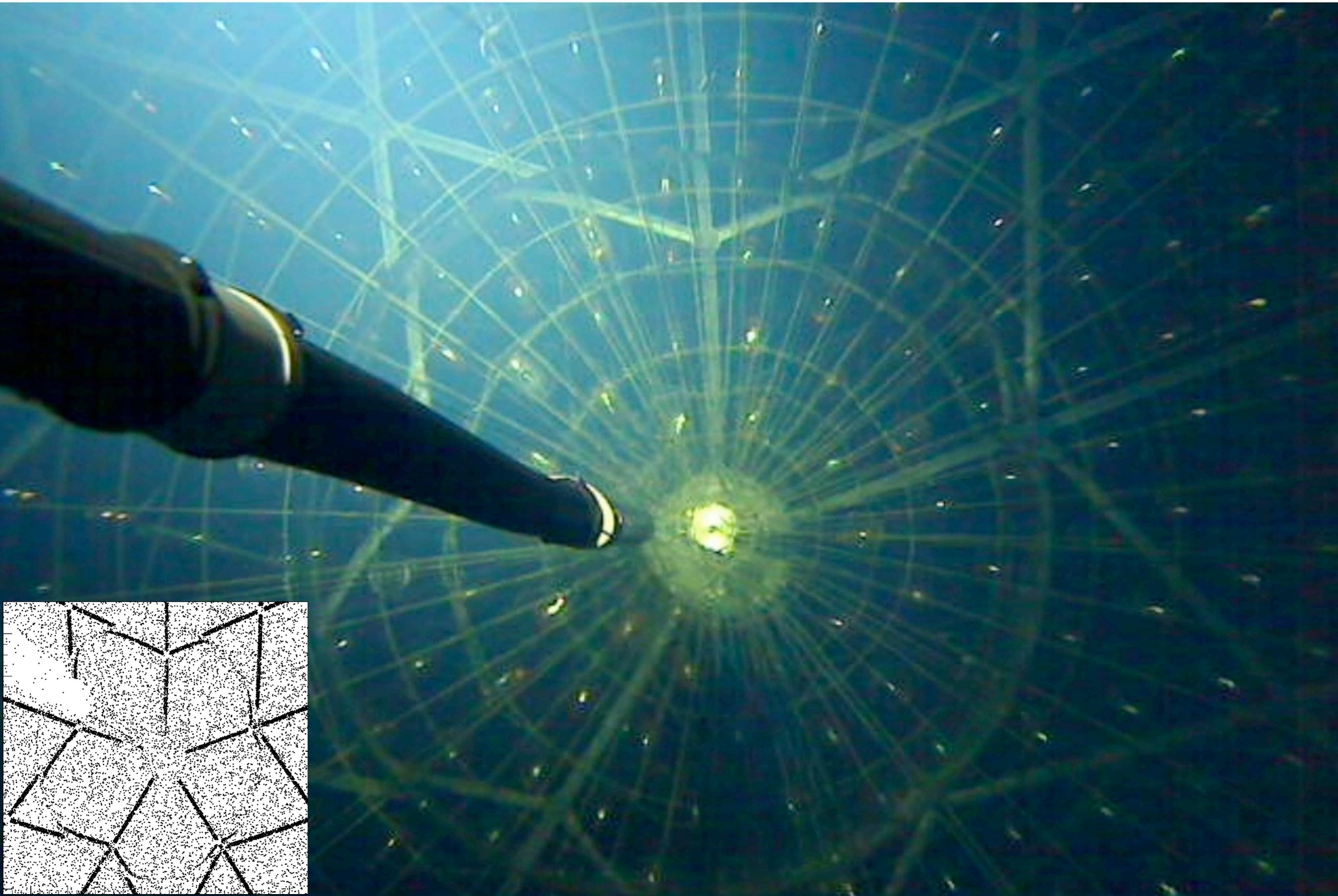


お疲れ様でした



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

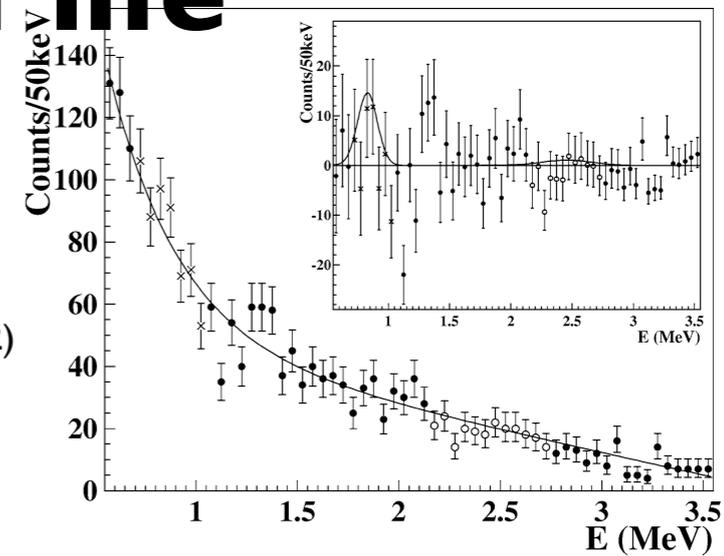
2011年9月24日観測開始 (当初計画を半年以上前倒し)



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

DAMA (2002) 液体キセノンシンチレータ

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

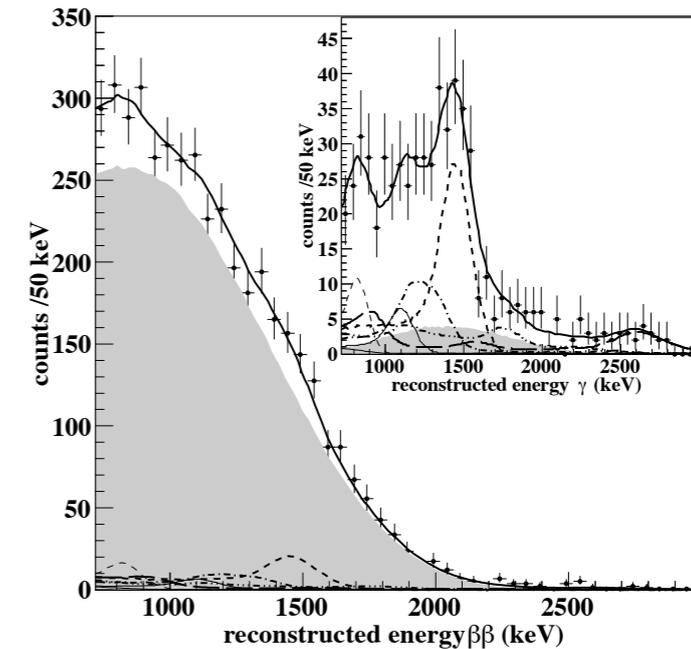


約 5 倍の矛盾

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

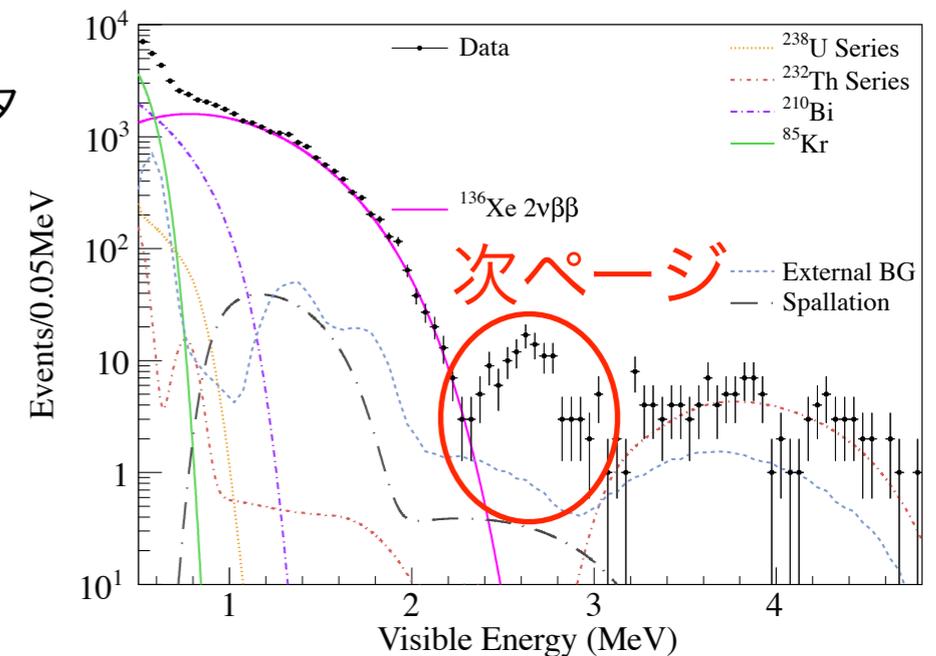
$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

Phys.Rev.C85,045504(2012)

update

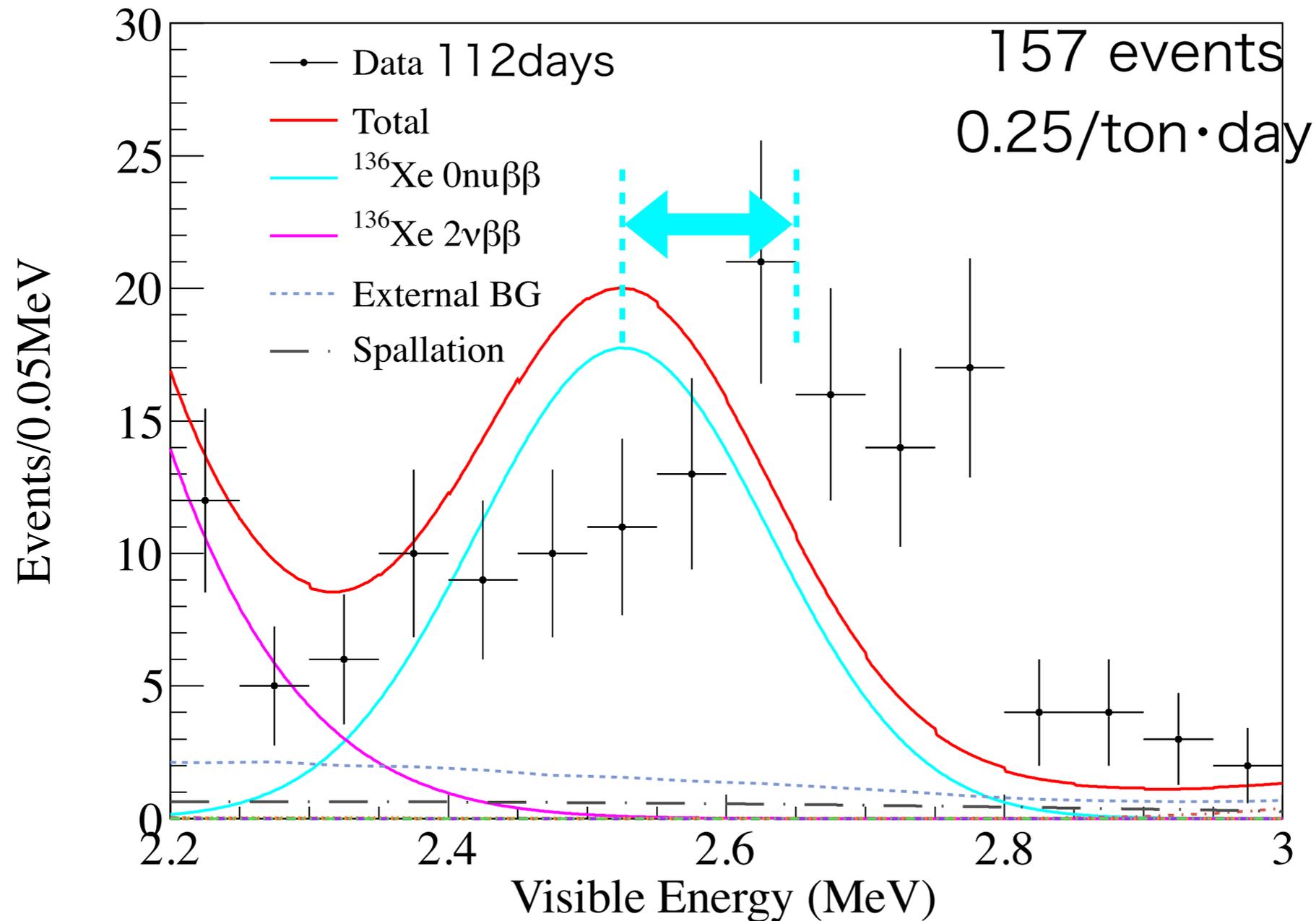
$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ years}$$

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



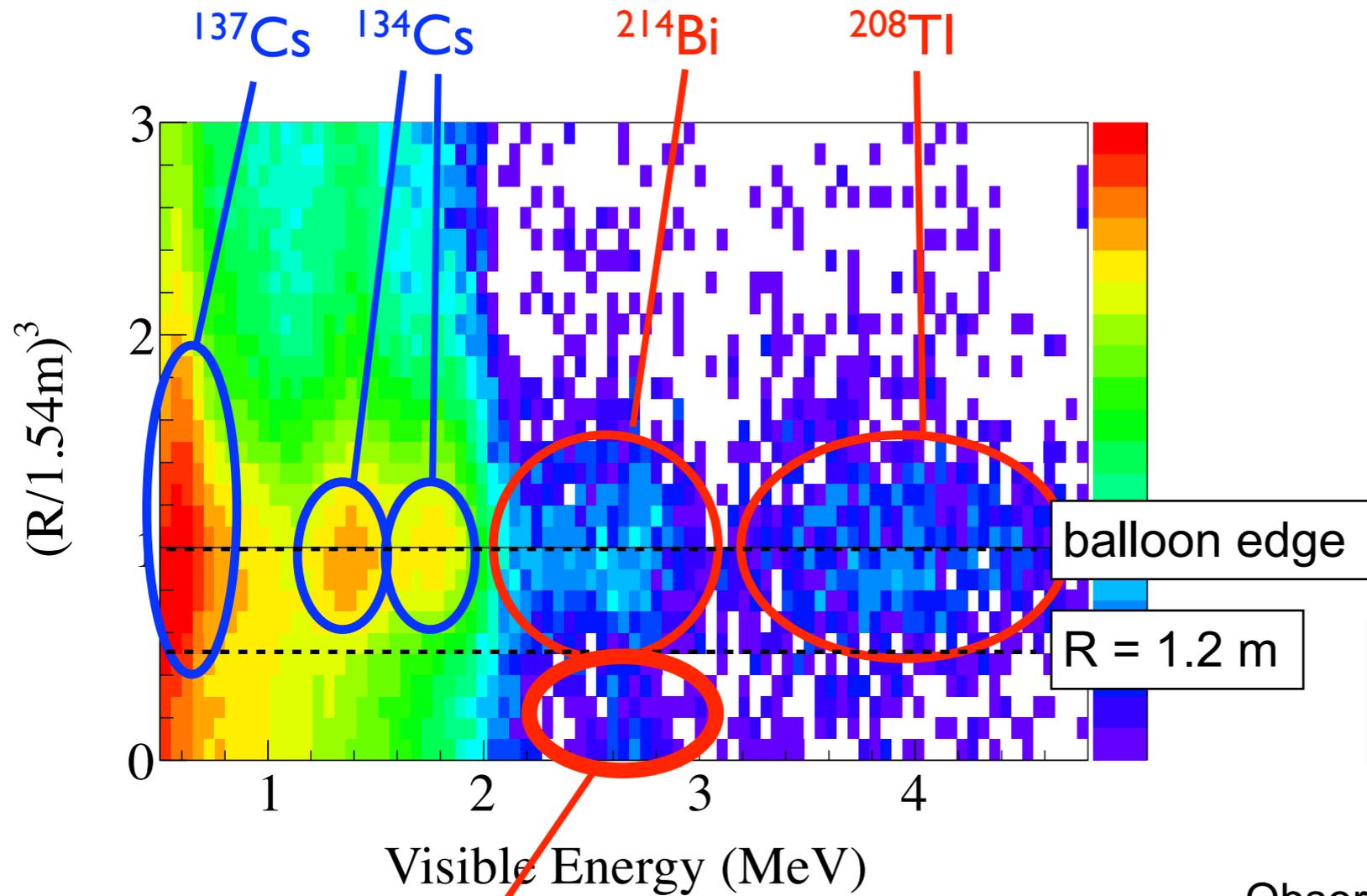
# Background situation

## Peak fit with $0\nu$ signal

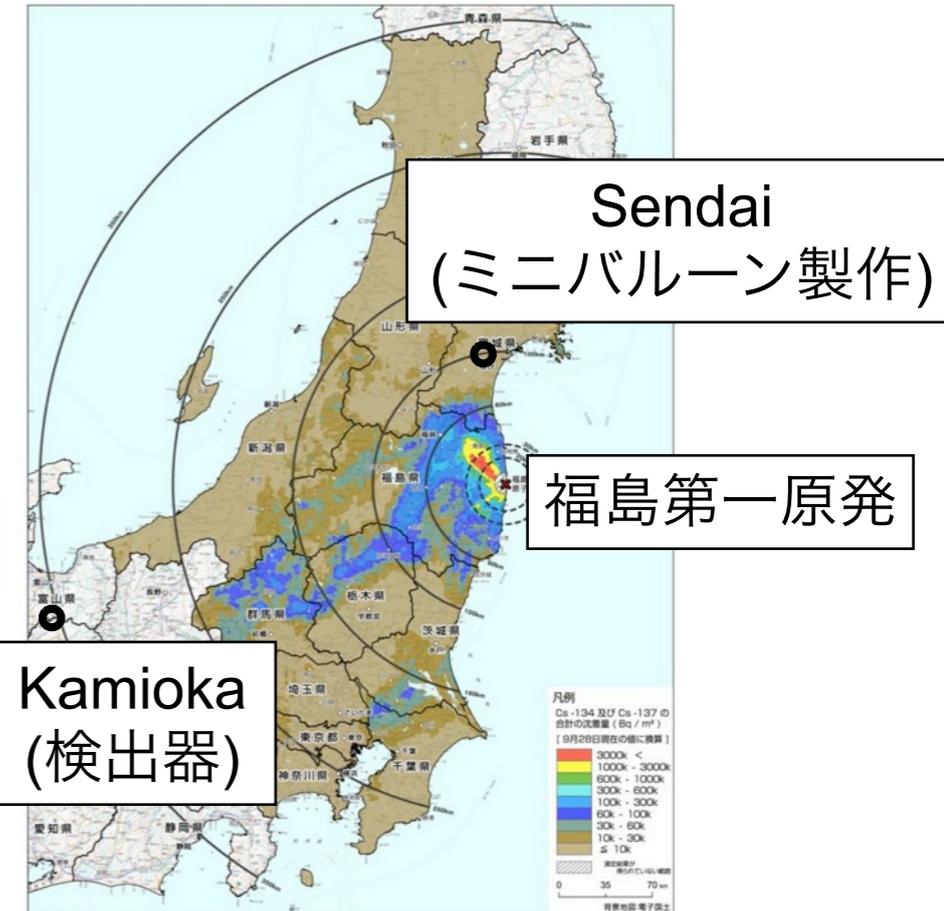


Peak position is different from that of expected  $0\nu$ .  
 $0\nu$  only is rejected at more than  $8\sigma$  level.

# 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/ensdfserve.html>

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

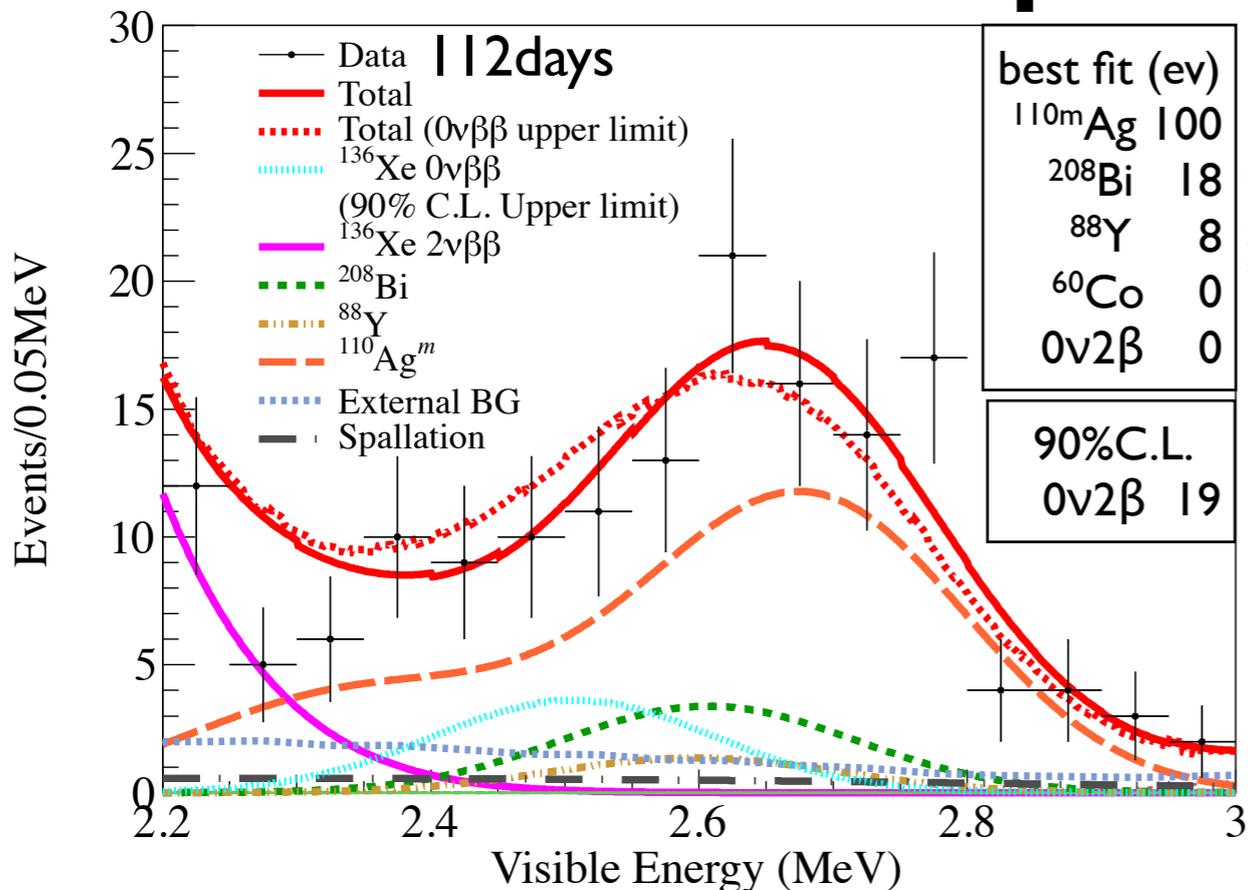
100秒~30日の時間相関を持つものは、A,Zの近い原子核の  
エネルギースペクトルを調査して制限      → negligible

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

30日以上寿命で  $0\nu$  に近いピークを作るものは、4つの候補。

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

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

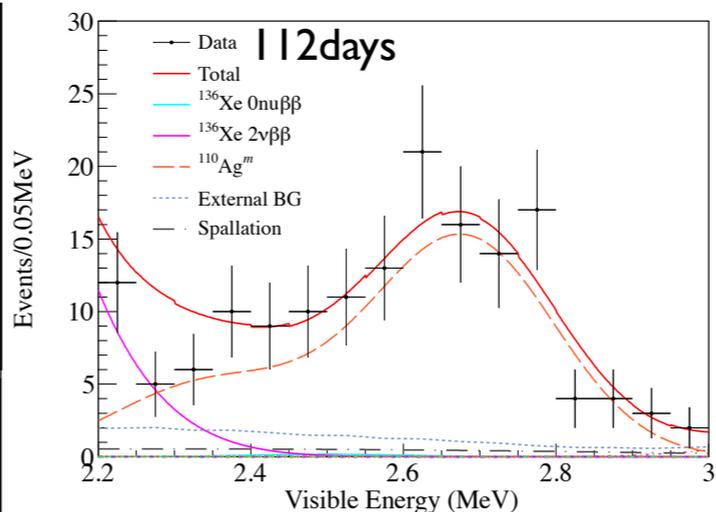


最適解と  $0\nu 2\beta$  の上限 (90%CL)

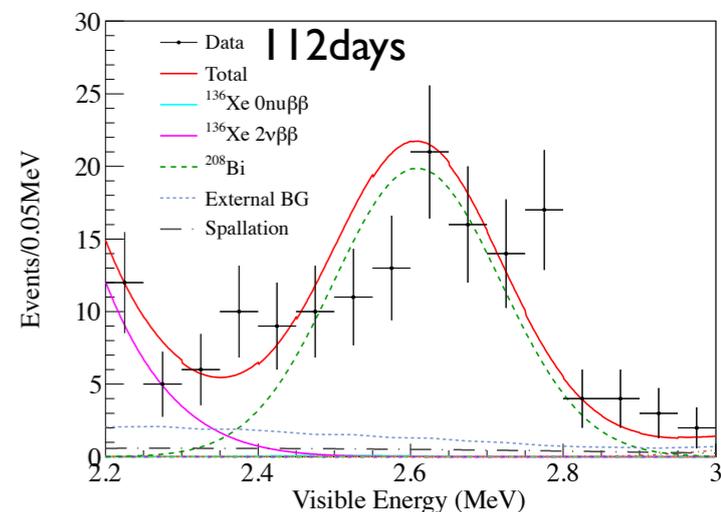
( $\chi^2$  at 2.2~3.0MeV)

	$\chi^2$ 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>

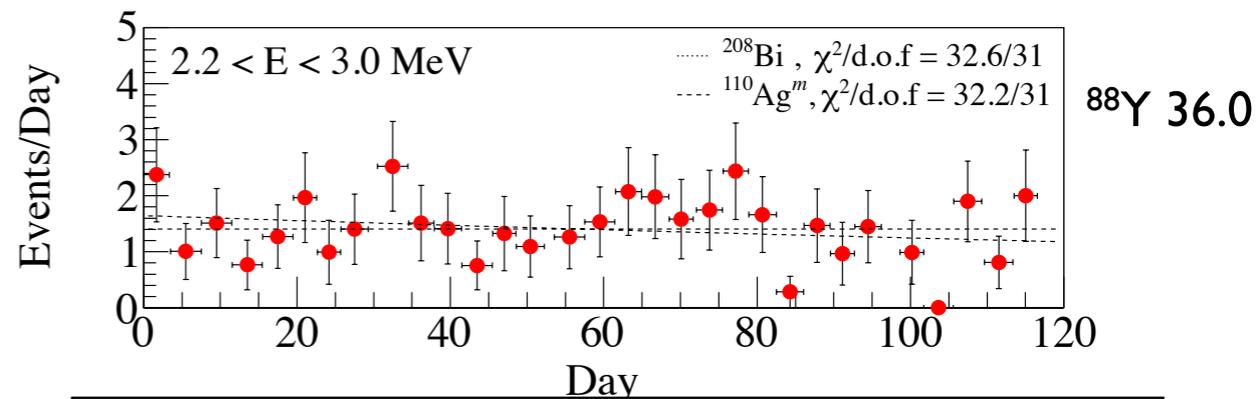
BGは  $^{110m}\text{Ag}$  らしい。



$^{110m}\text{Ag}$  は良く合う。



$^{208}\text{Bi}$  は合わない。

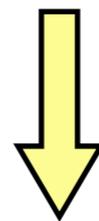


時間変化を使った原子核の区別には感度不足  
投稿準備中の追加データではより明確に銀の半減期を再現

$T^{0\nu}_{1/2} > 5.7 \times 10^{24}$  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)



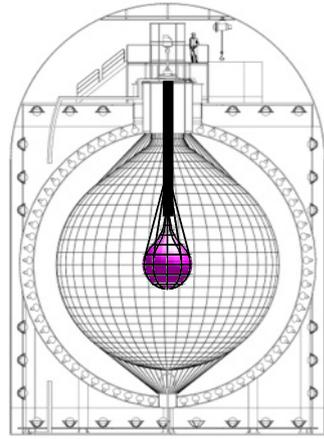
(R)QRPA (CCM SRC)  
Phys.Rev.C79,055501 (2009)

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

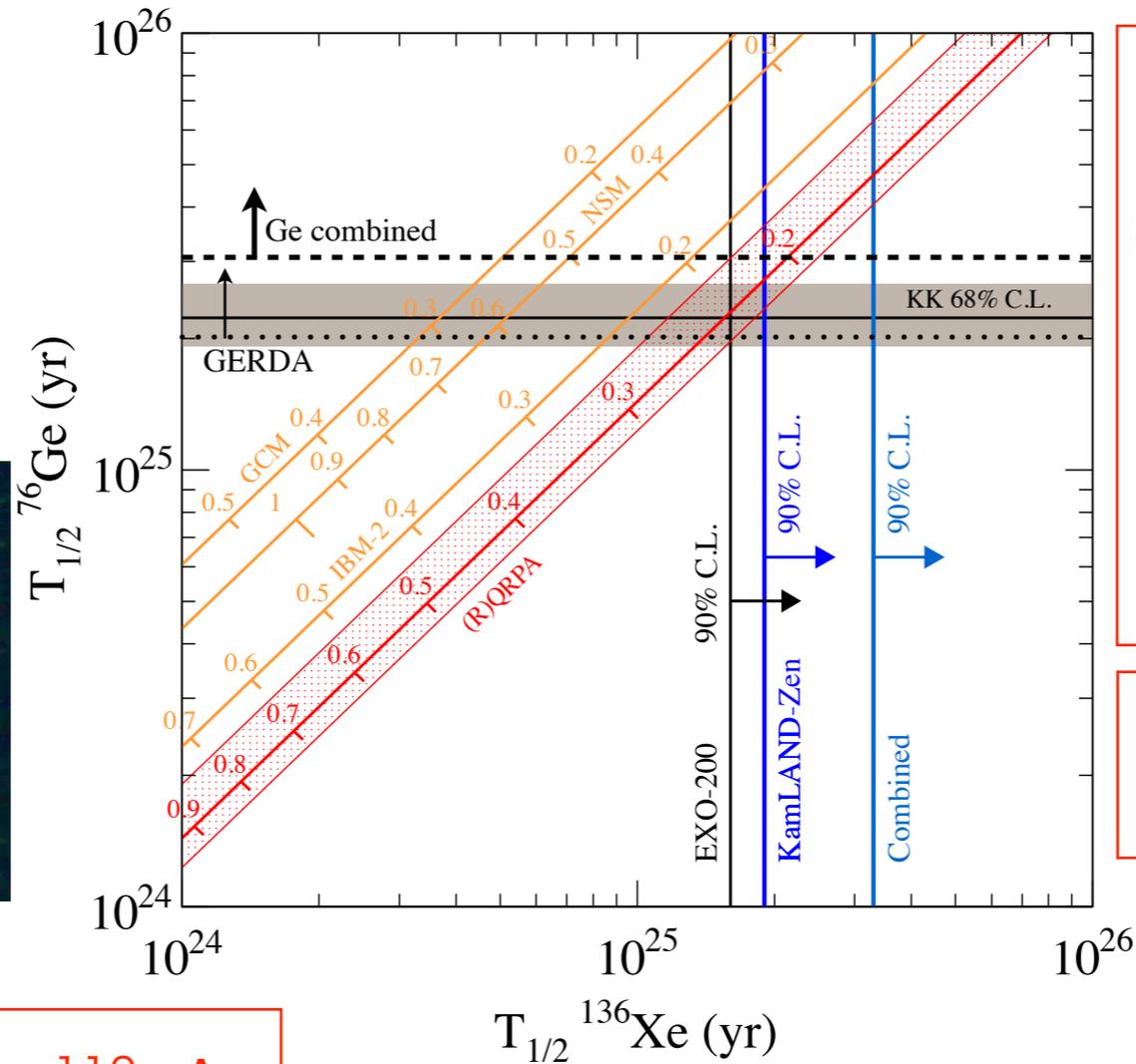
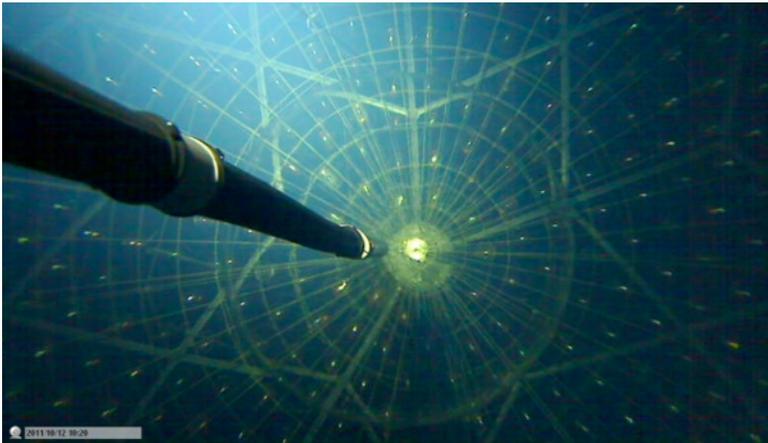
ENSDFデータベースの全探索でこれら4各種のみが、BG候補

# KamLAND-Zen status 89.5kg-yr

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



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

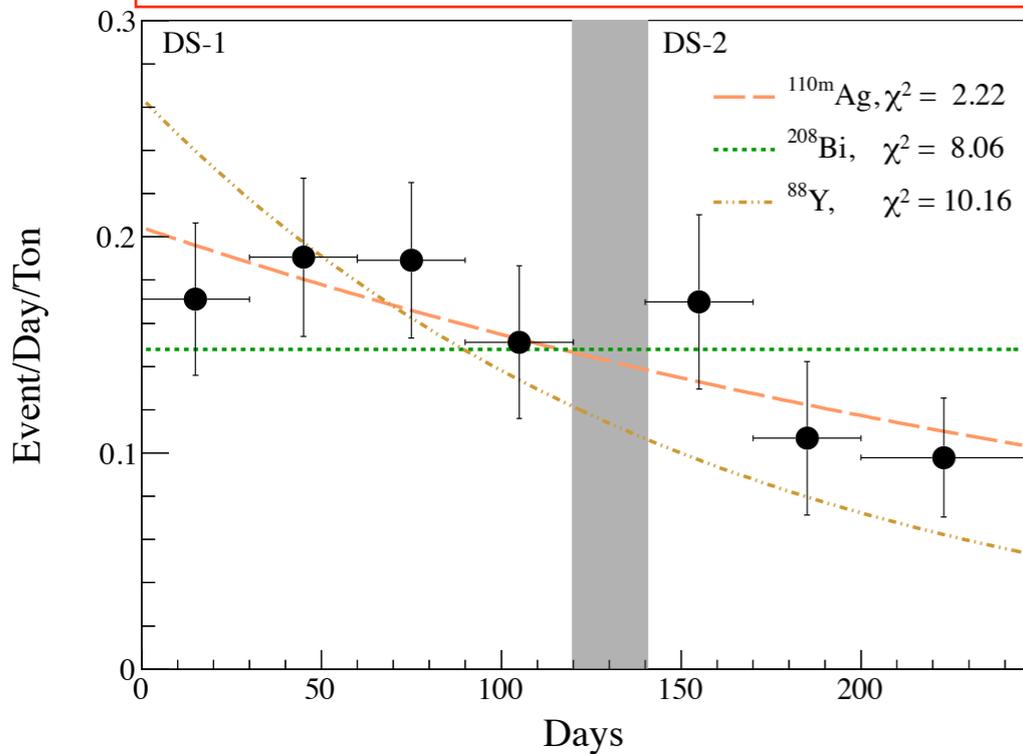


**1.** the world best limit  
 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25}$  yrs (KL-Zen)  
 $> 3.4 \times 10^{25}$  yrs (combined)

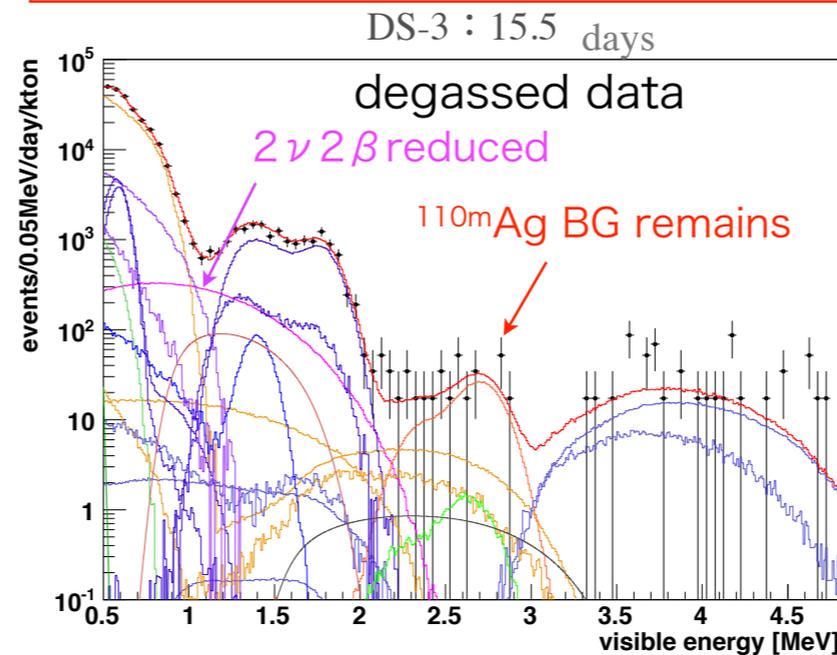
$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250$  meV

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)

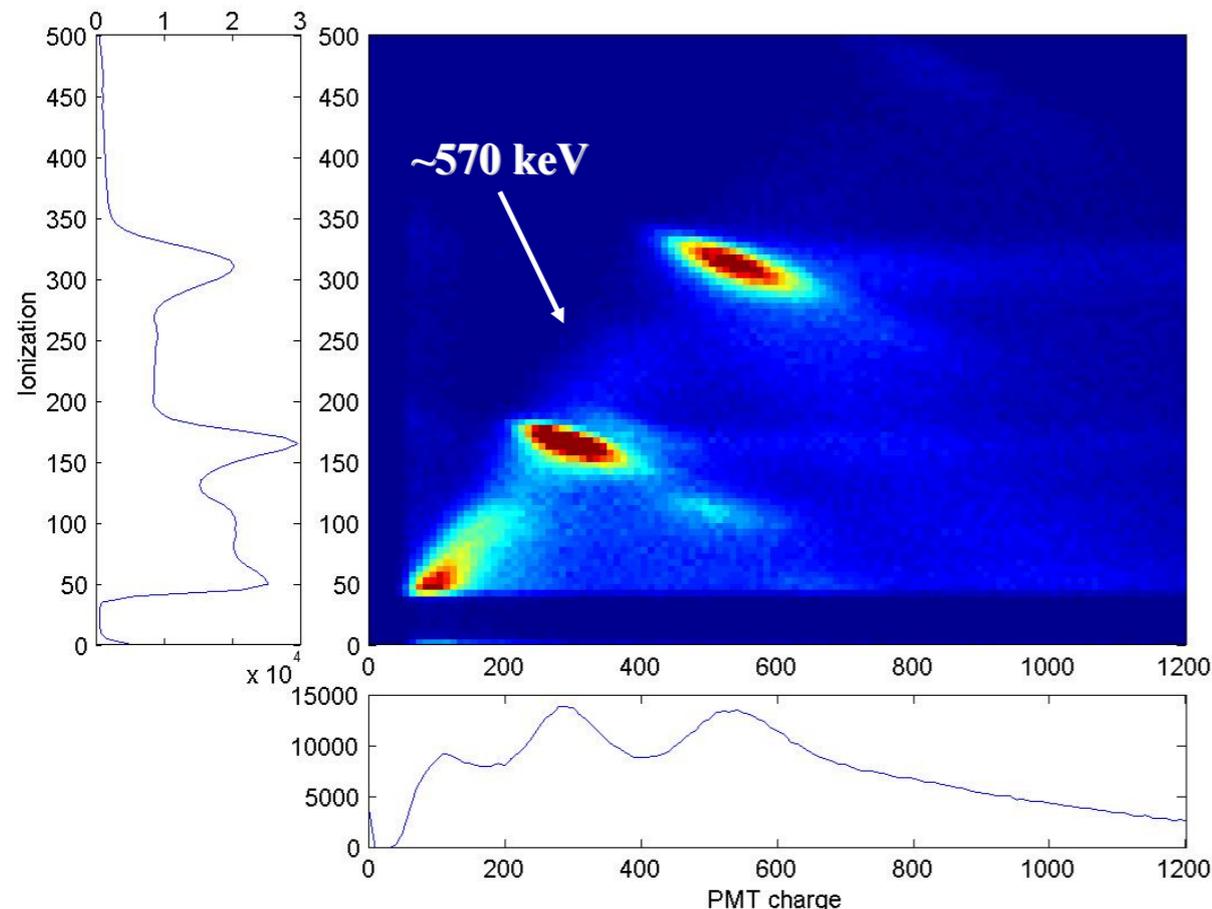
# EXO-200 @ WIPP (2010~)

liquid Xenon 200 kg (80% enrichment)

sensitivity  $\sim 150$  meV  
(2 years)

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

ionization + scintillation

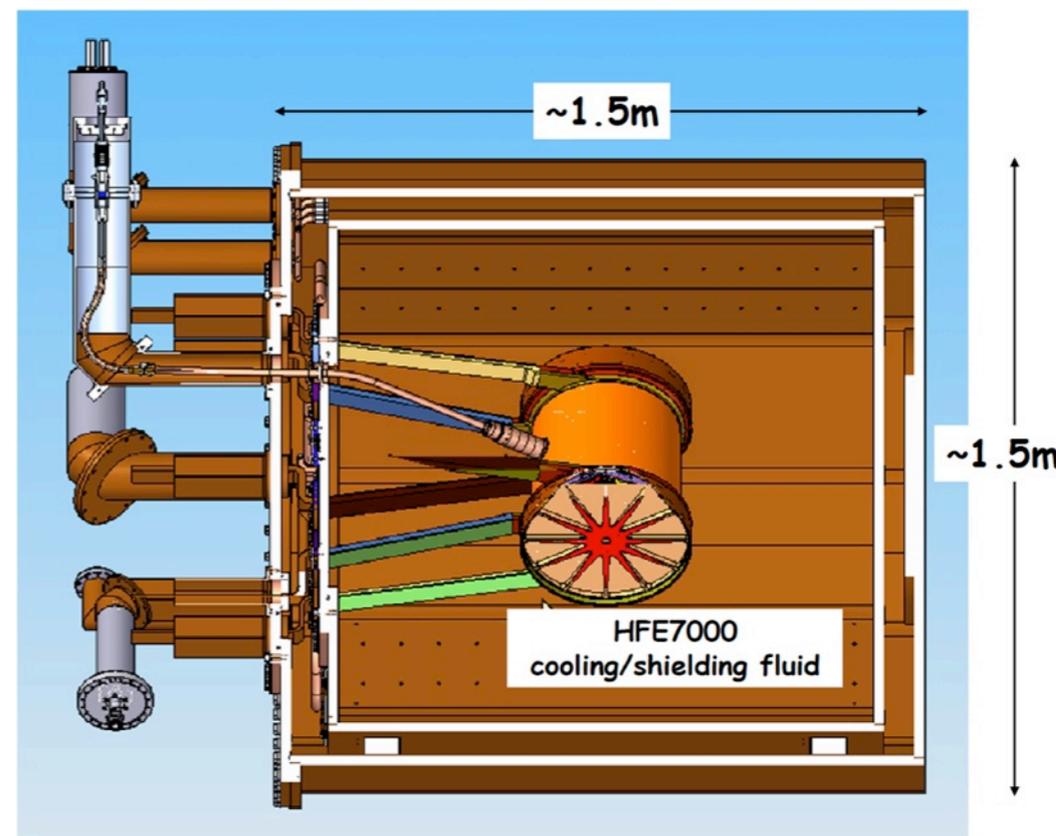
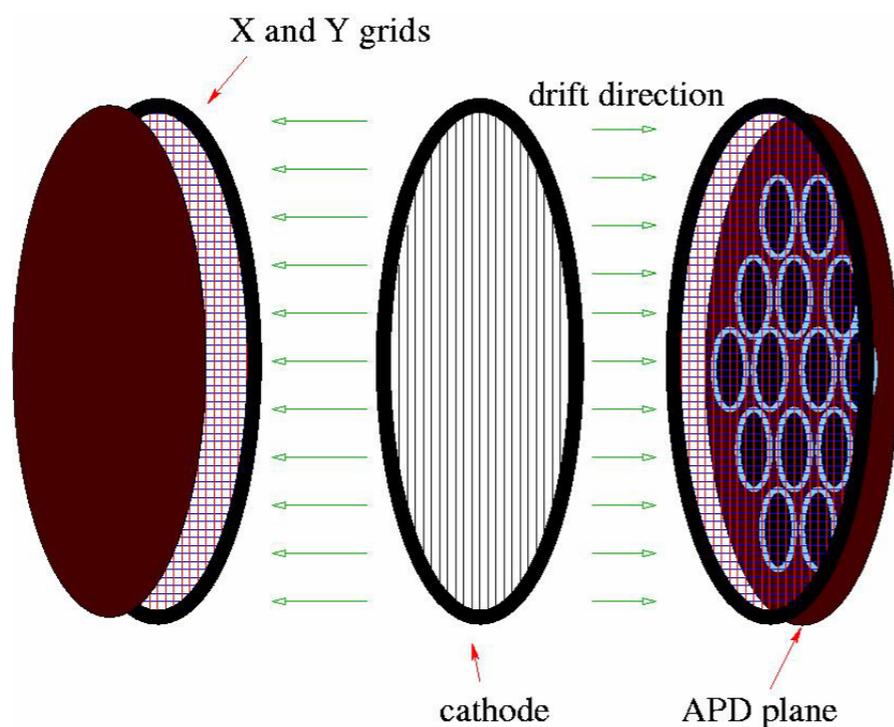


ionization alone

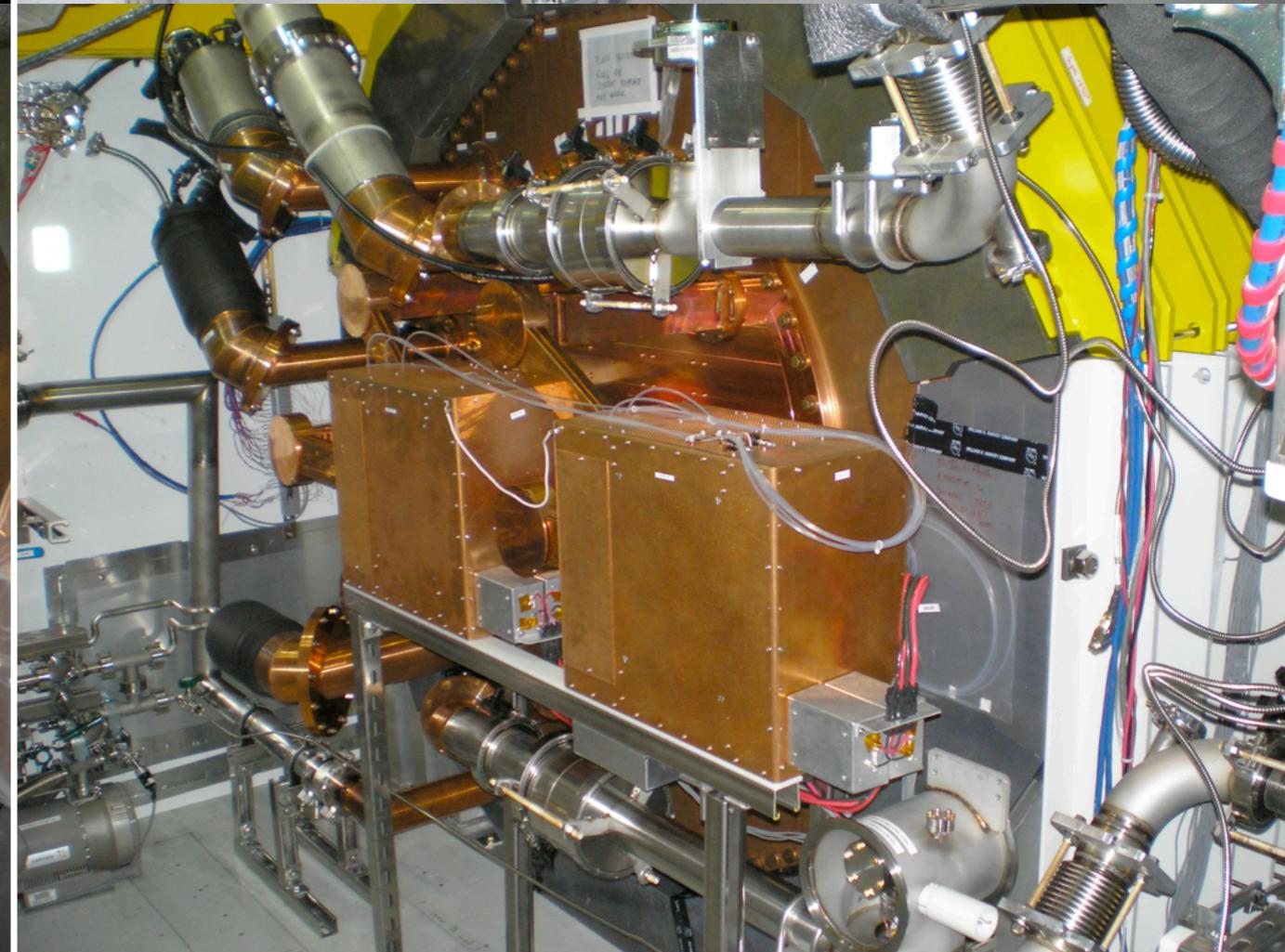
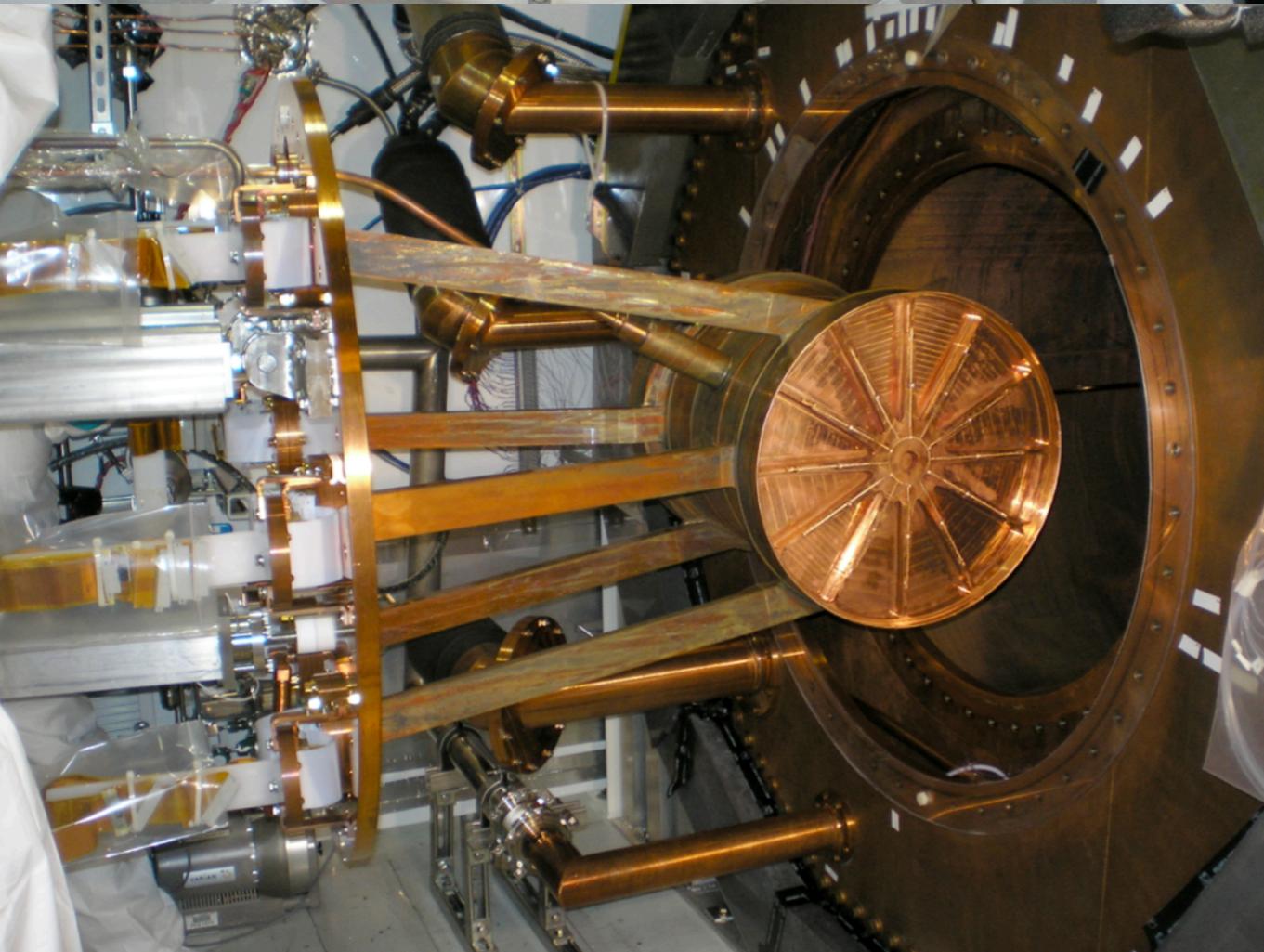
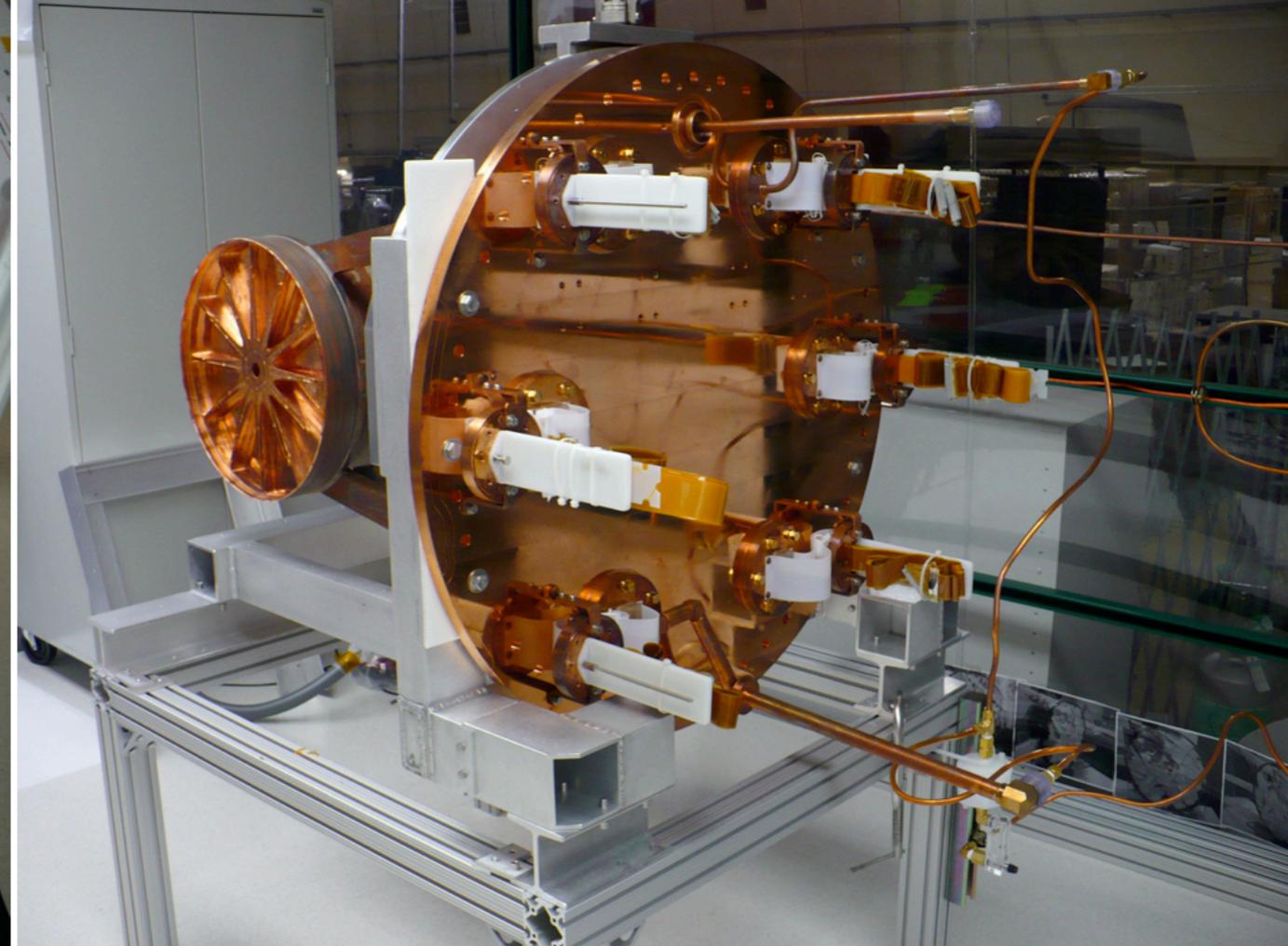
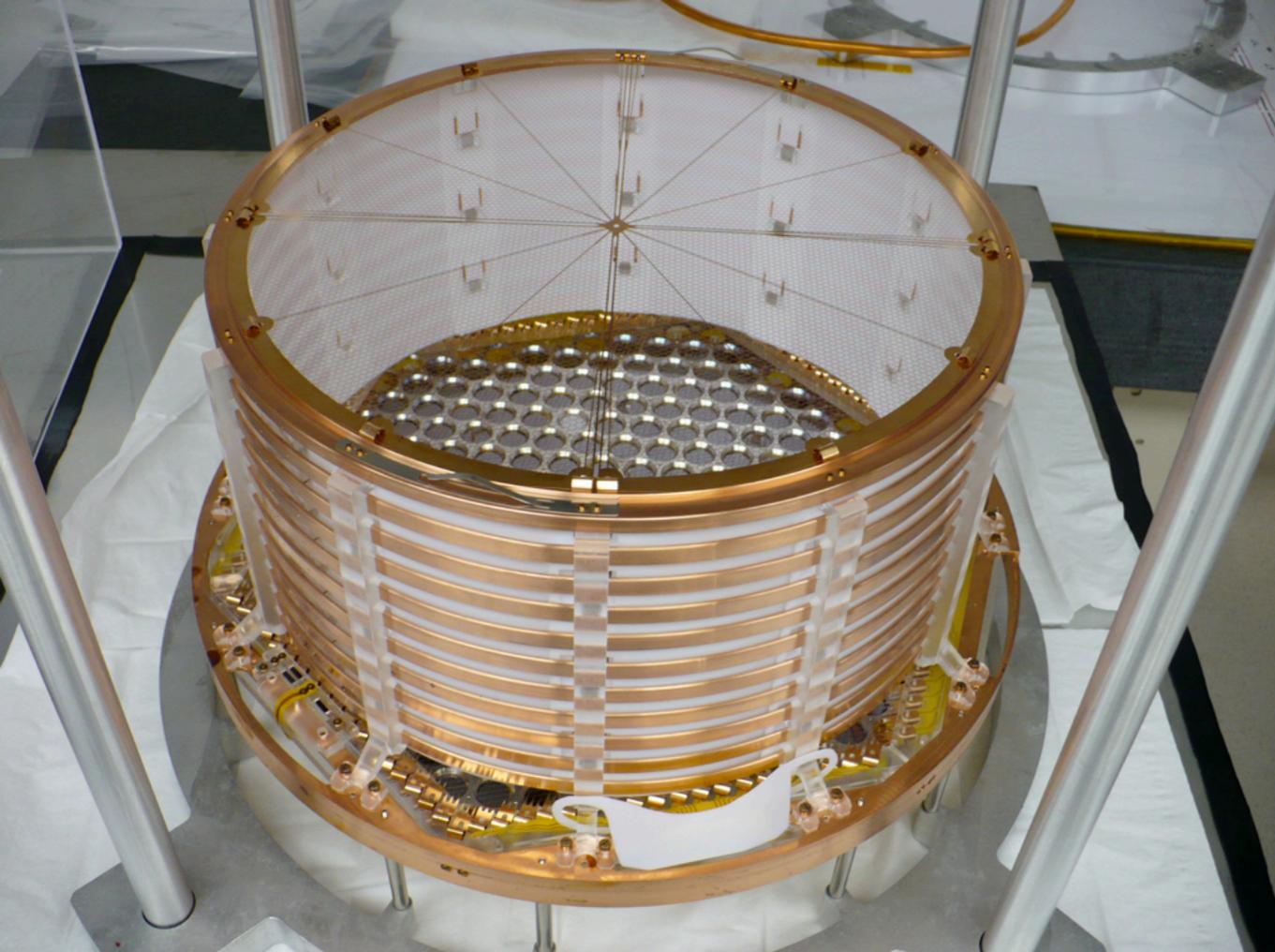
$$\sigma/E = 1.8\% @ Q_{\beta\beta}$$

ionization + scintillation

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

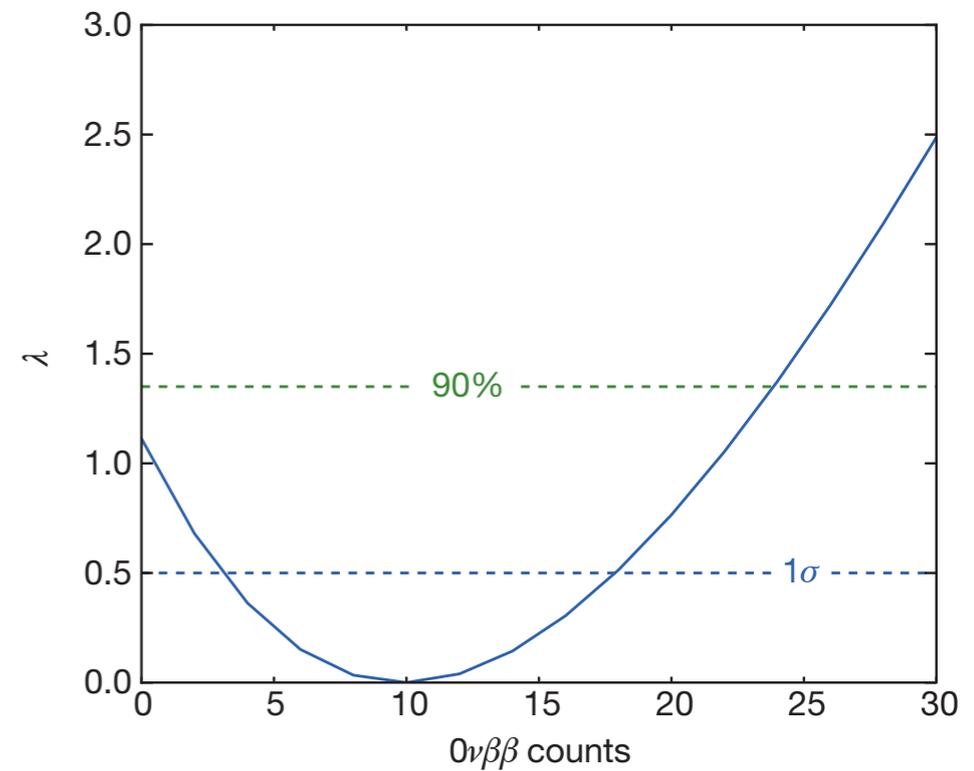
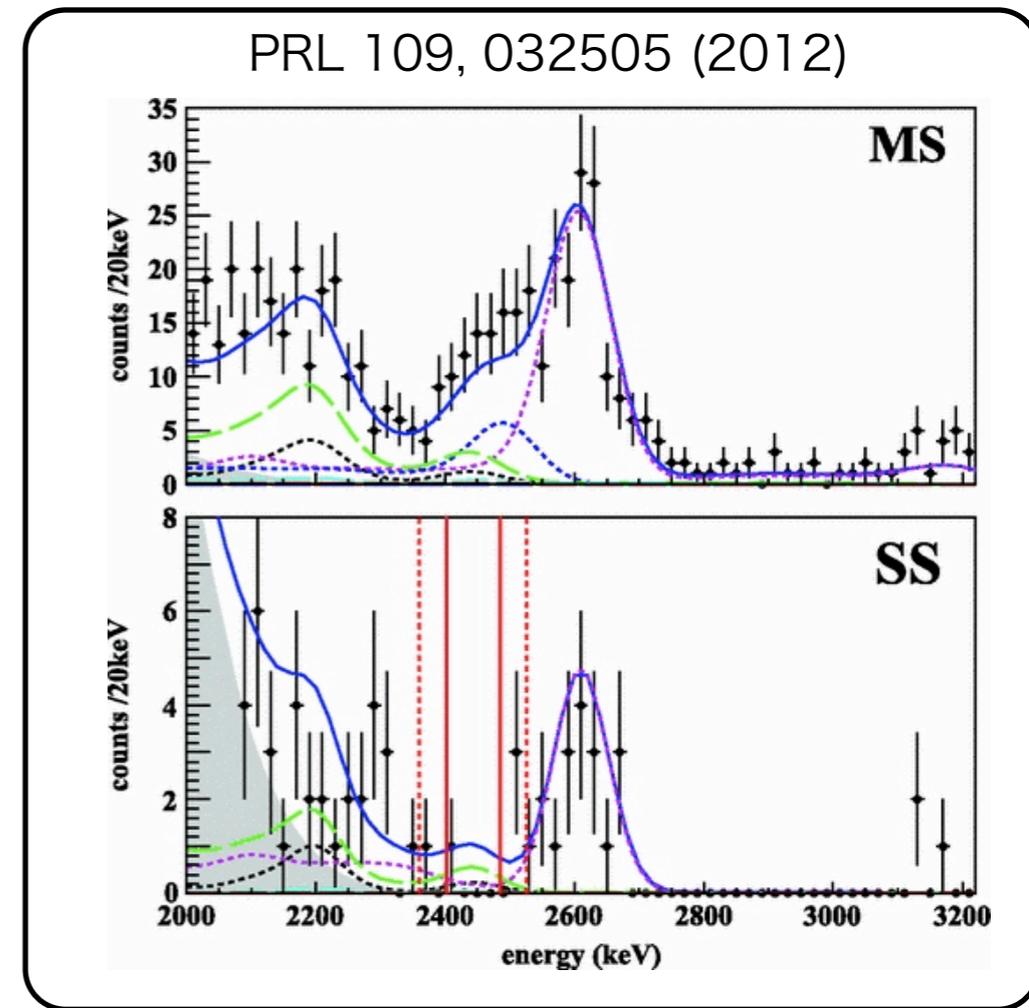
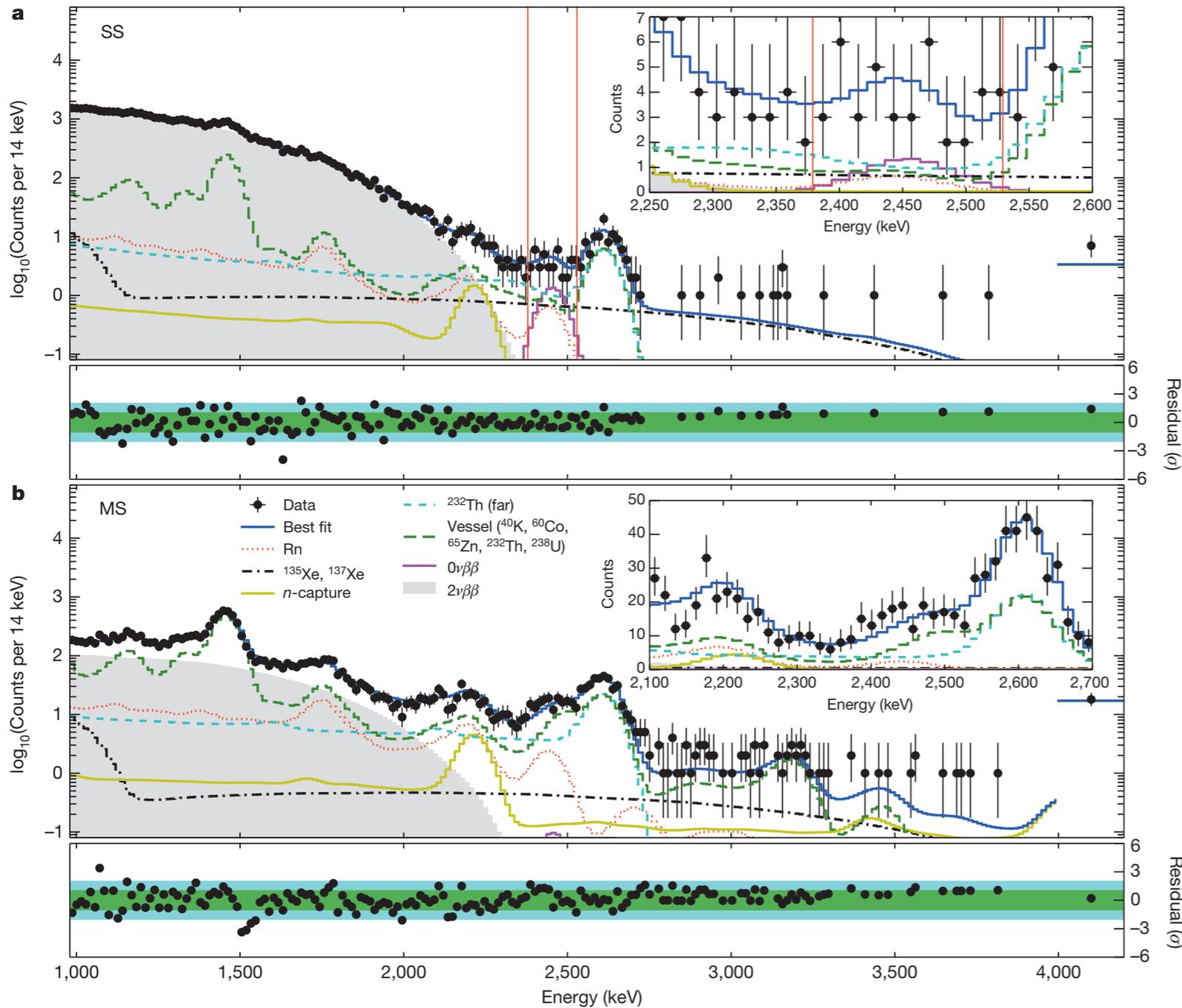


15 M\$



# EXO-200 (2014)

Nature 510, 229-234 (2014)



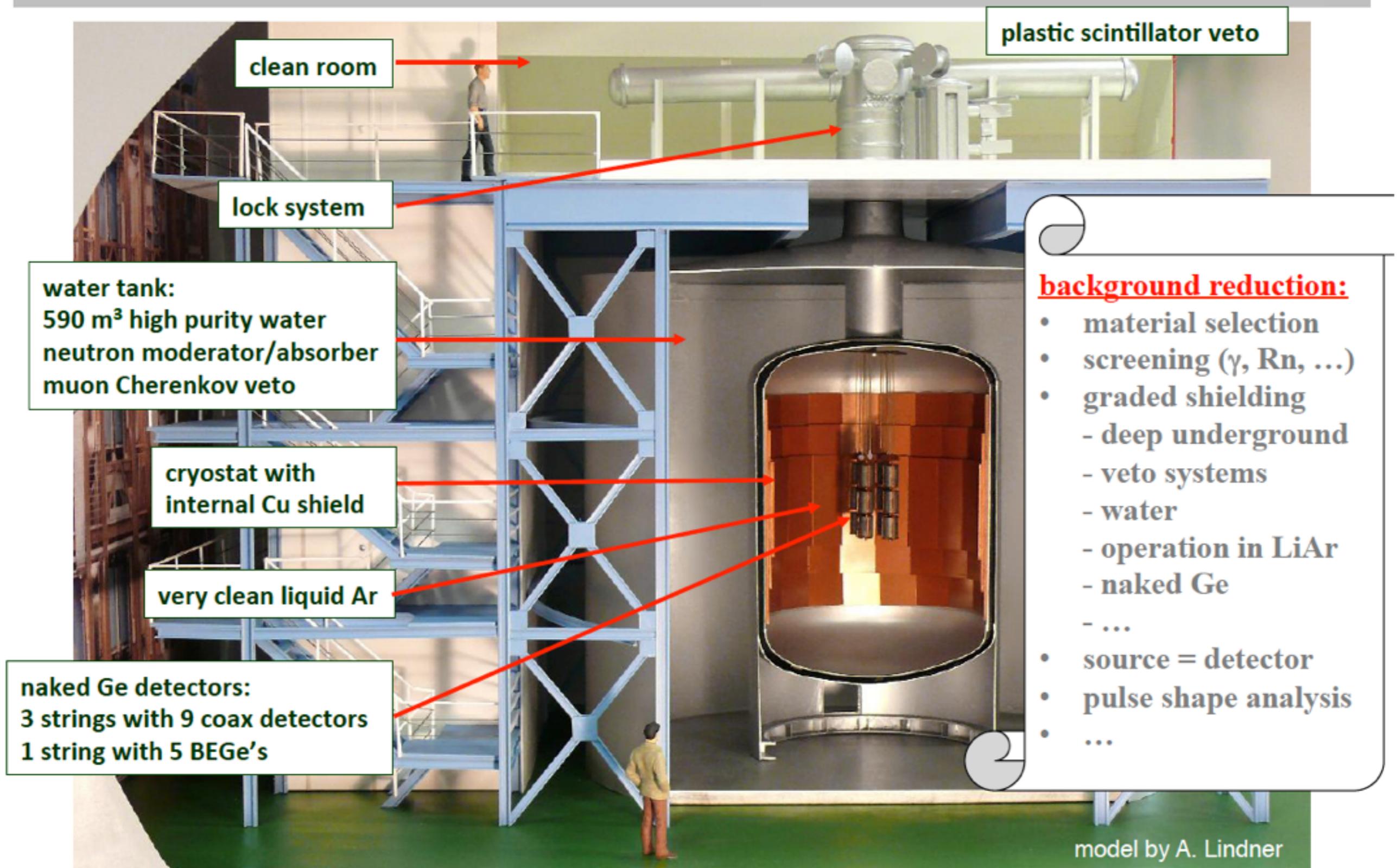
$1.6 \times 10^{25}$  yrs (32.5 kg-yr)

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

1.2 σ excess  
1 σ range (3.1, 18)

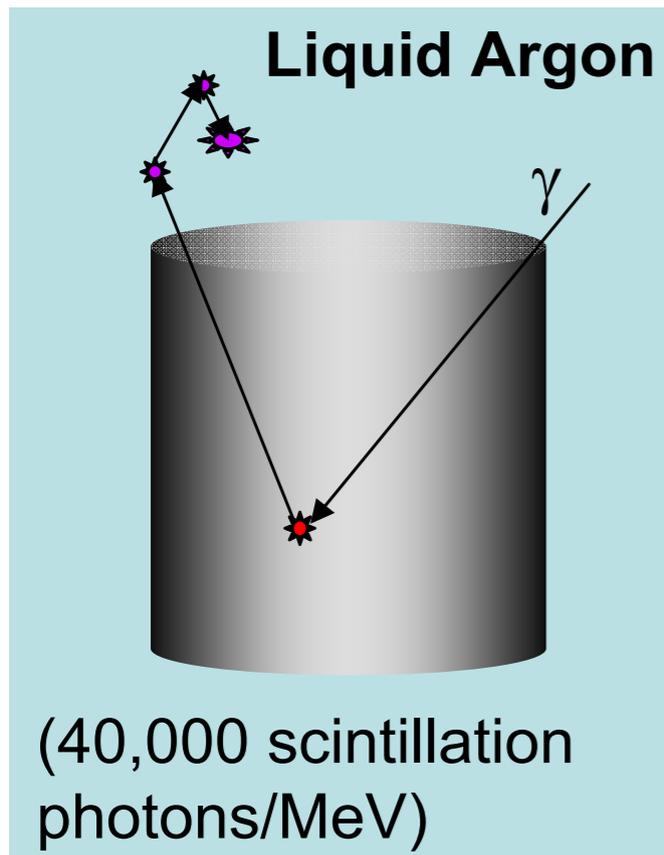
# The GERDA Detector

@Gran Sasso



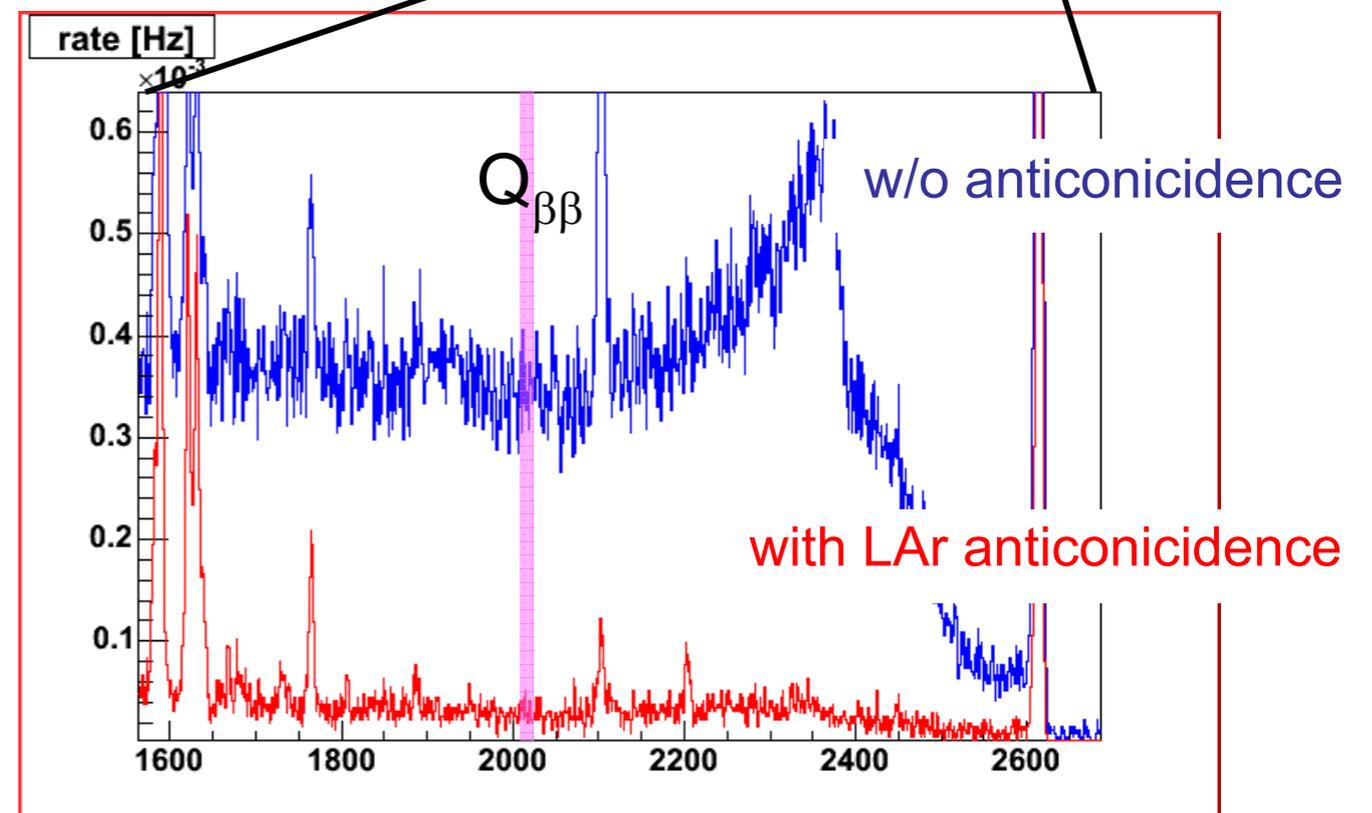
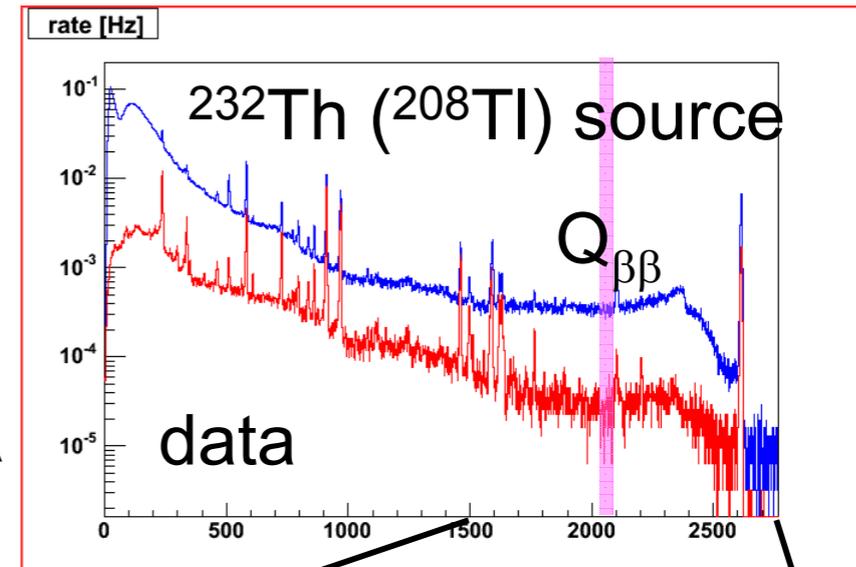
# Background suppression techniques:

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



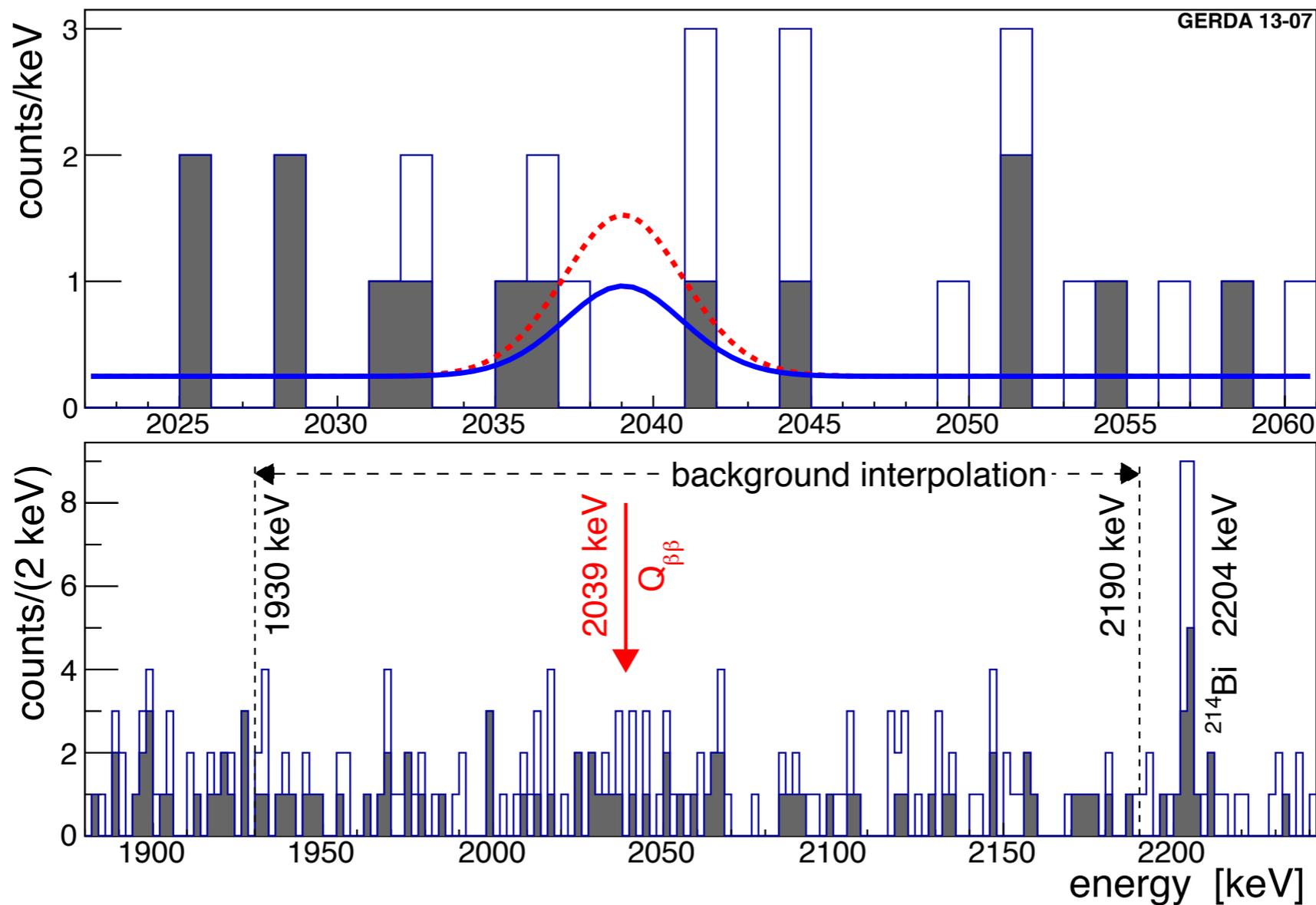
- 20 cm diameter test setup
- Suppression factor (~20) limited by escape from setup

GERDA data



# GERDA (2013)

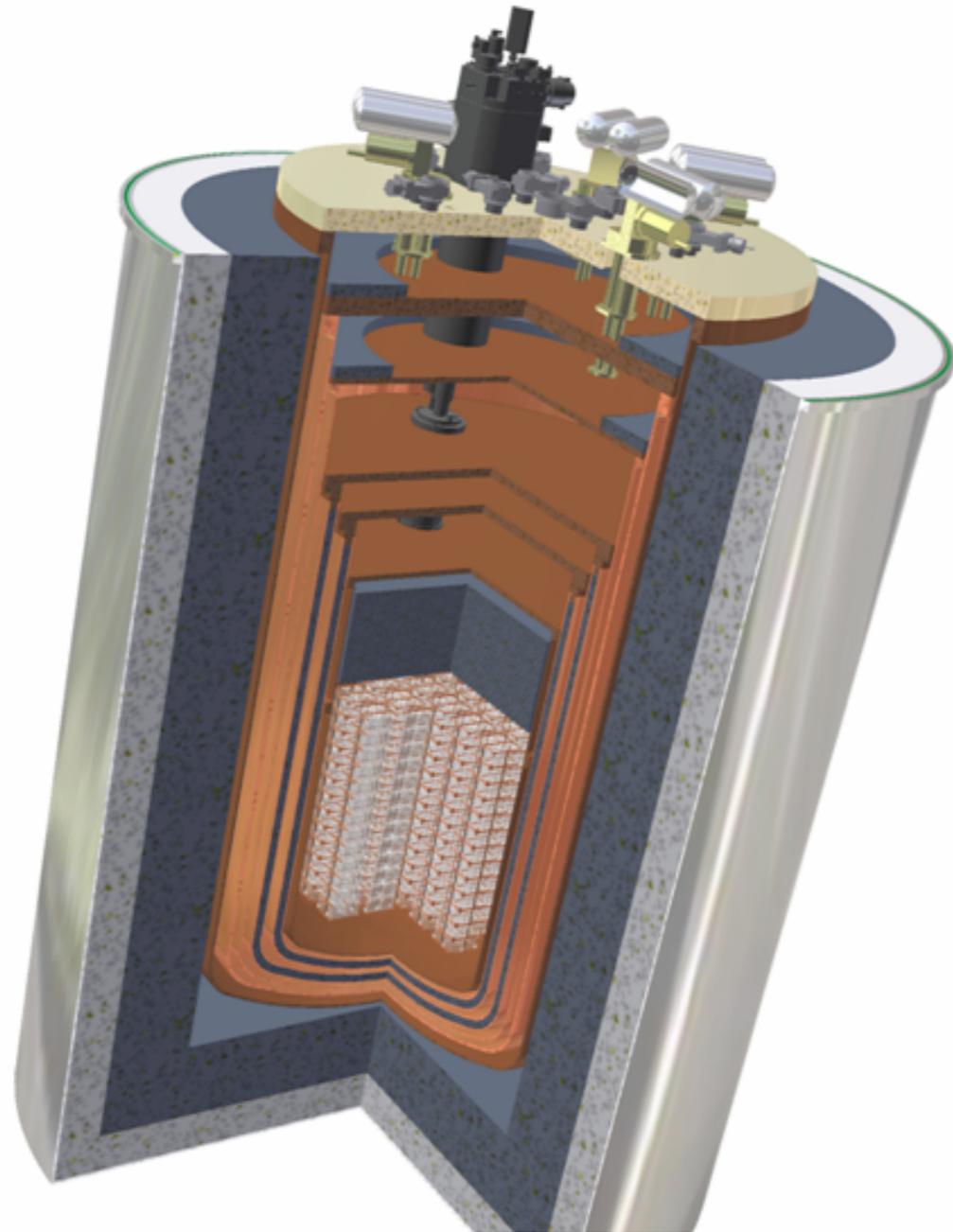
PRL 111, 122503 (2013)



$2.1 \times 10^{25}$  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

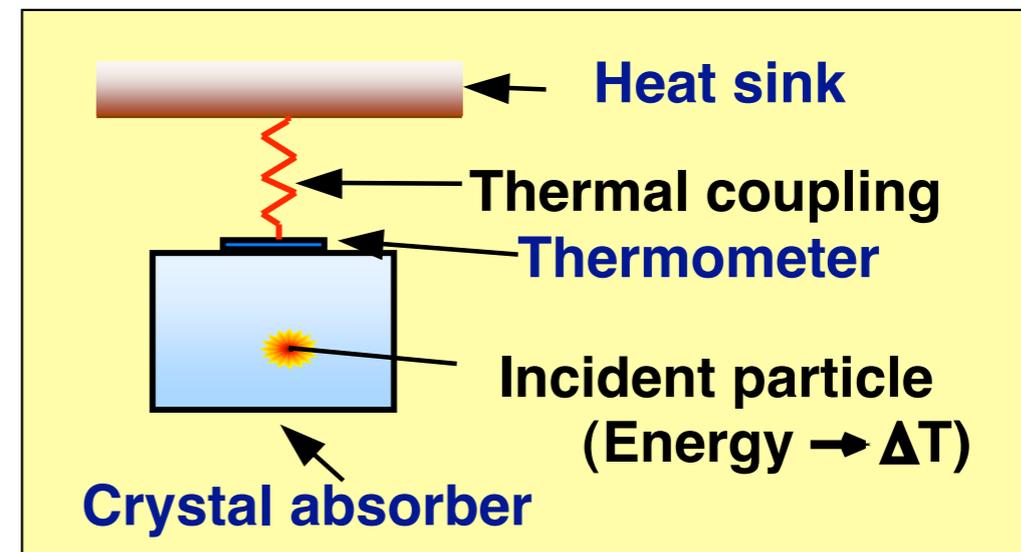


19 towers

988 detectors

741 kg of  $\text{TeO}_2$

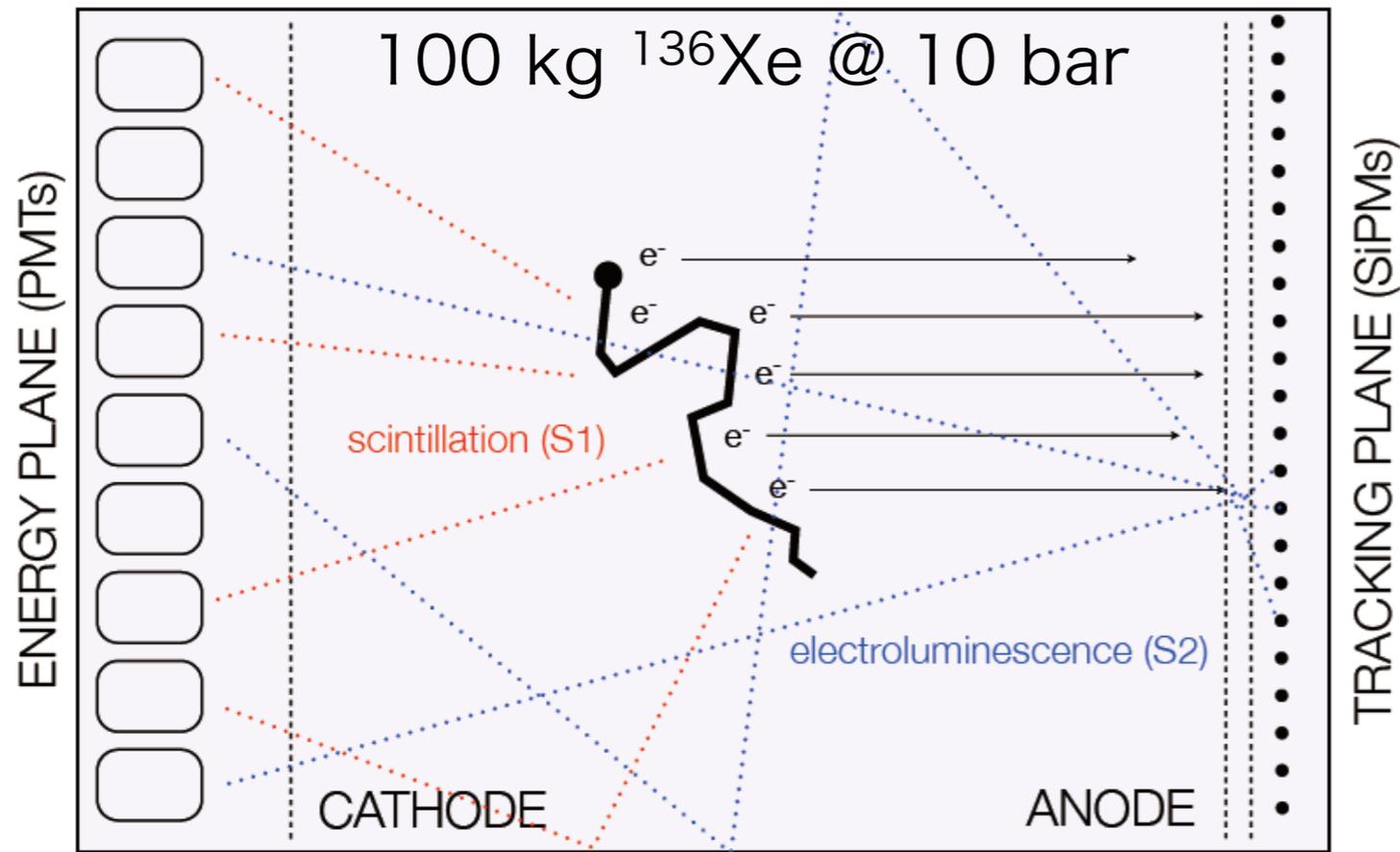
204 kg of  $^{130}\text{Te}$



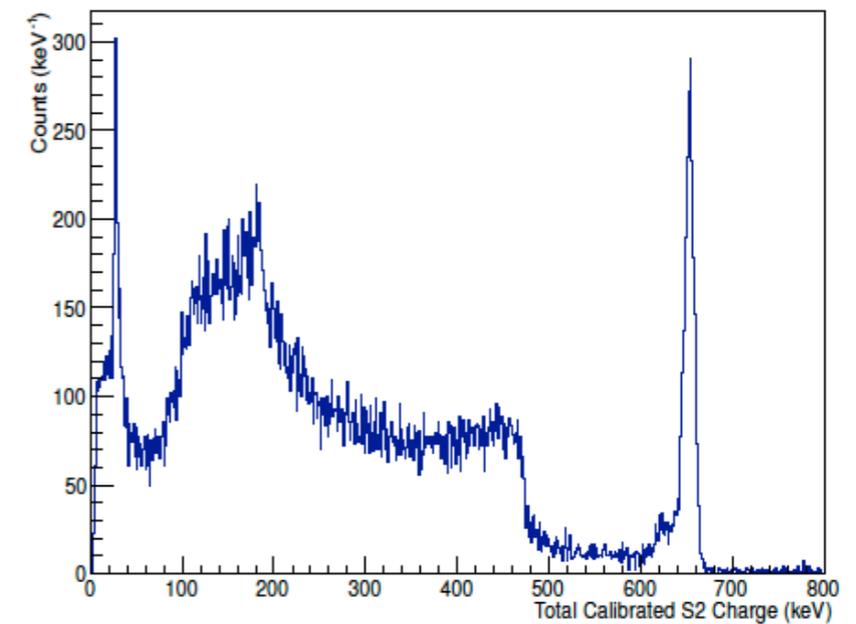
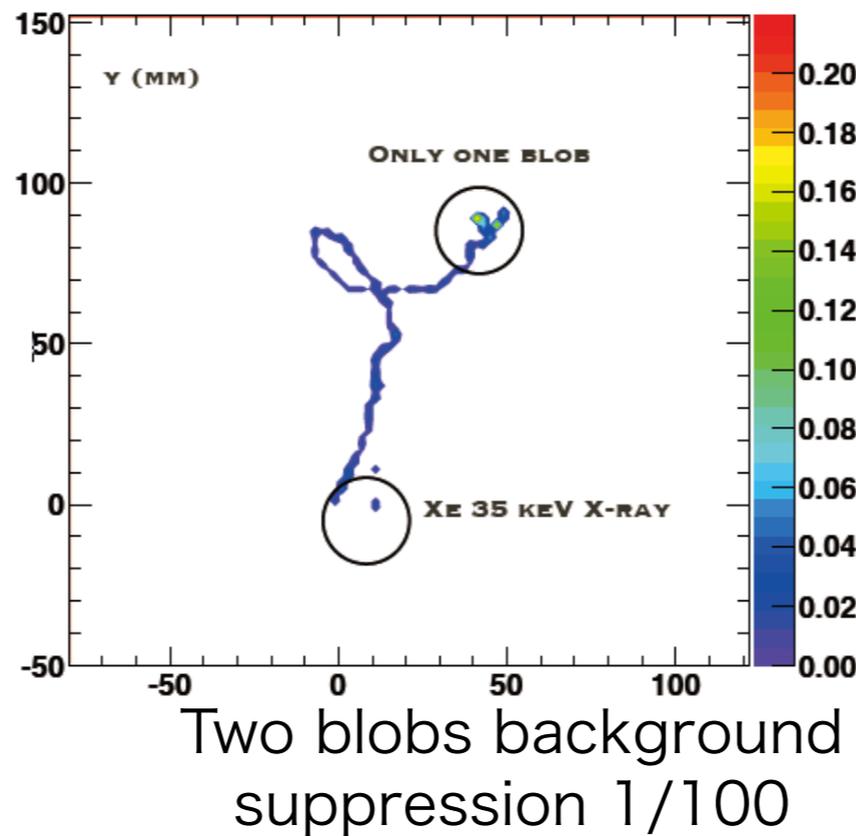
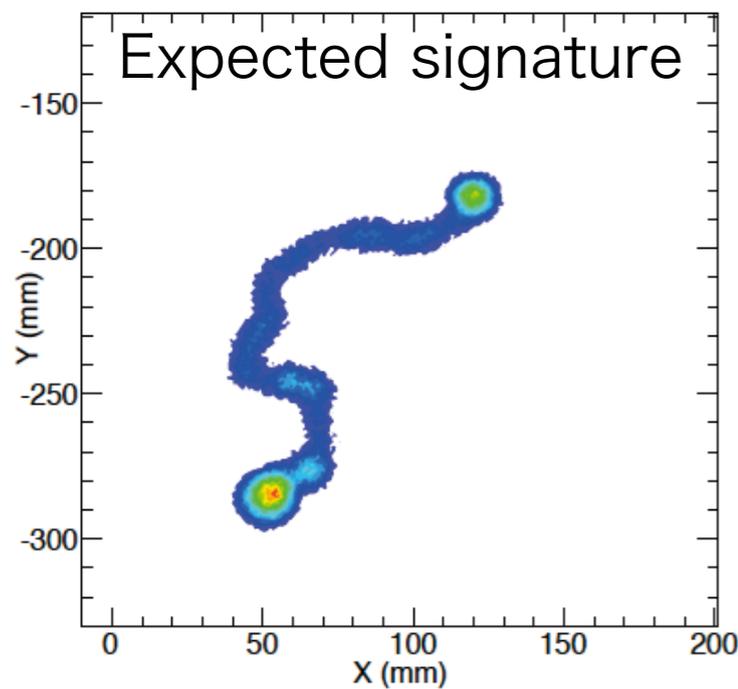
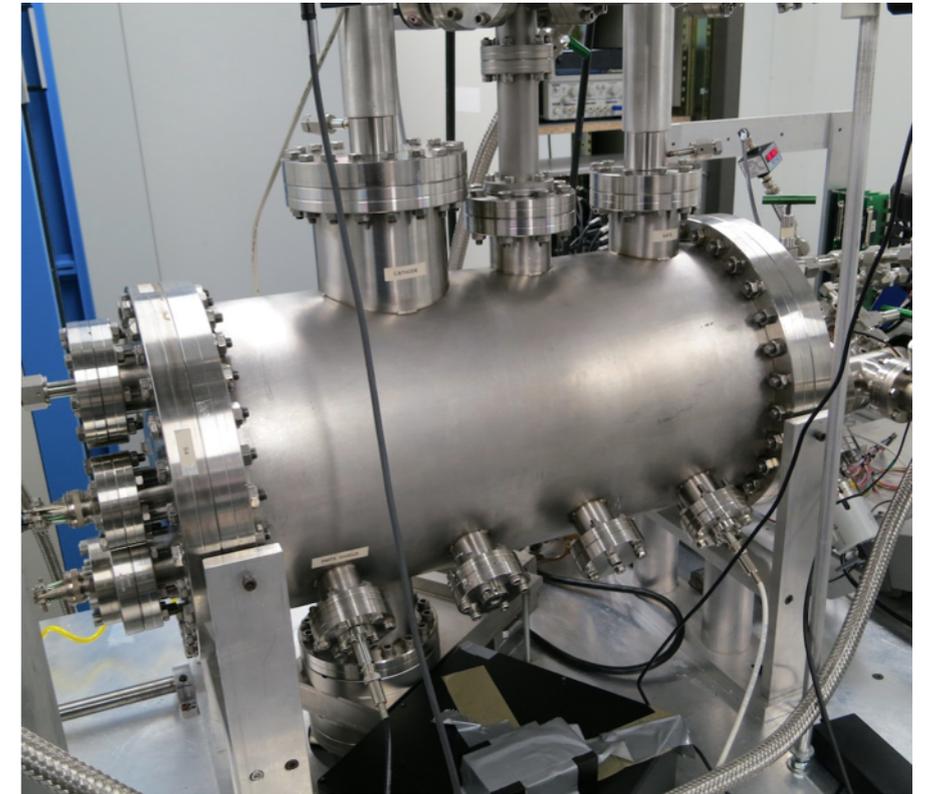
$$C_V = 1944 \left(\frac{V}{V_m}\right) \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \text{ J/K} \quad \Delta E = \xi \sqrt{k C_V T^2}$$

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

# NEXT @Canfranc



NEXT-DEMO 5kg Xe contained

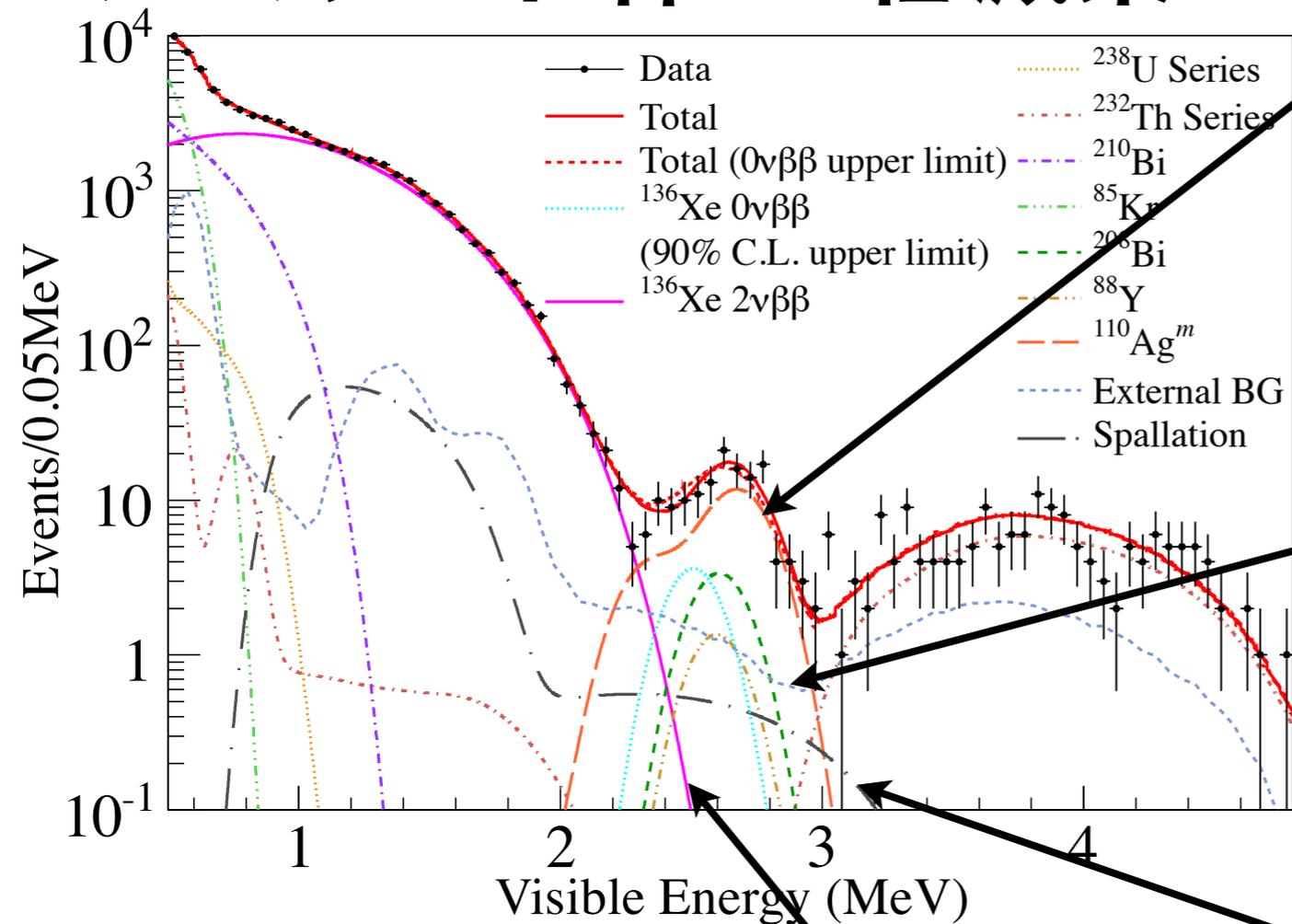


FWHM@ $Q_\beta$   $\beta = 1\%$

# カムランド禅BG低減策

現状

目標感度: ~80meV



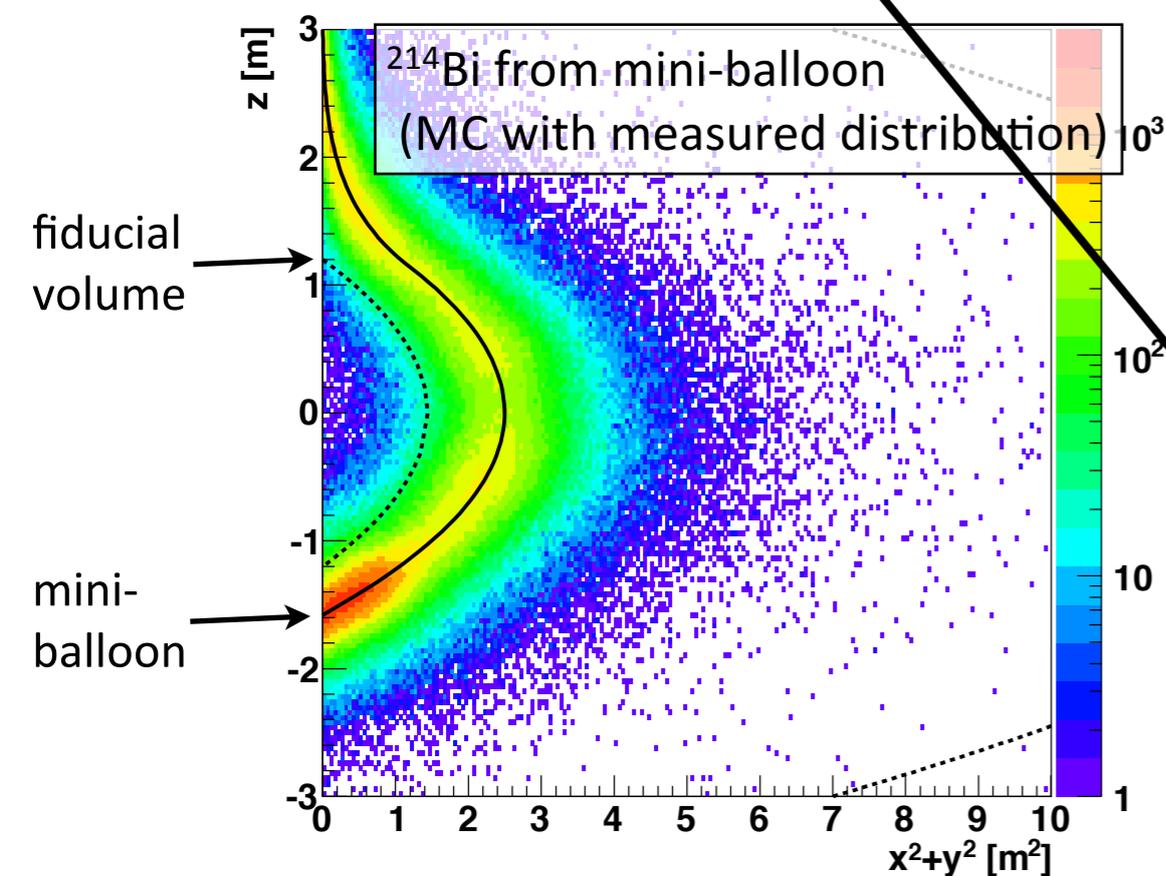
Xe-LS 中の  $^{110m}\text{Ag}$  あるいは  $^{208}\text{Bi}$ ,  $^{88}\text{Y}$  は、キセノンの回収/精留/吸着で除去する。LS は新品と入れ替える。

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

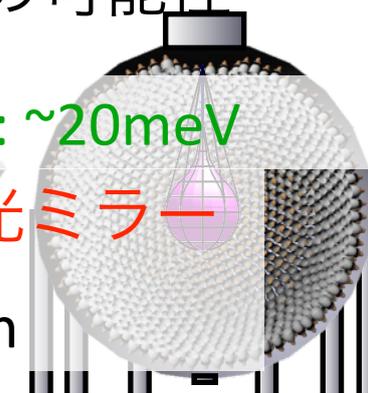
目標感度: ~40meV

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

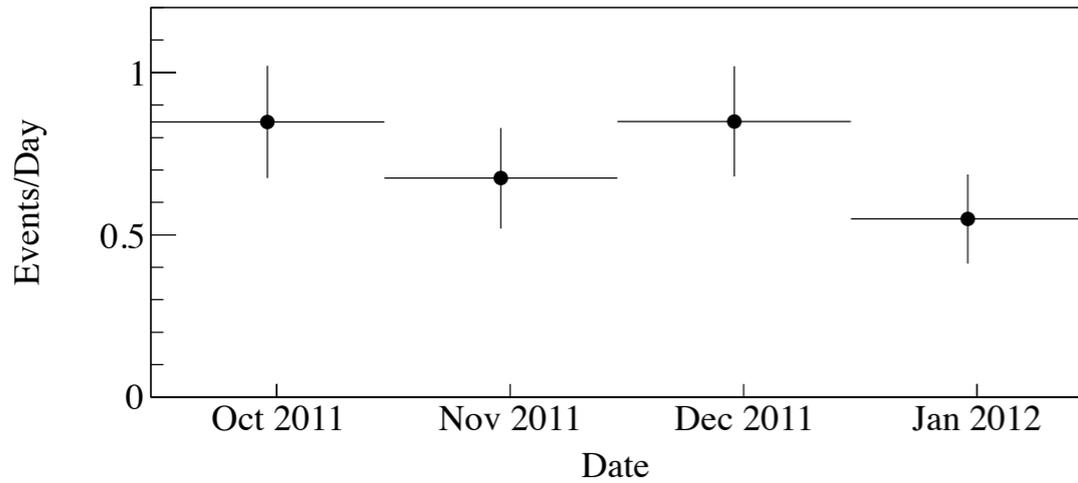
$2\nu 2\beta$  低減には、高発光LS, 集光ミラー  
導入を計画 ---> KamLAND2-Zen



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

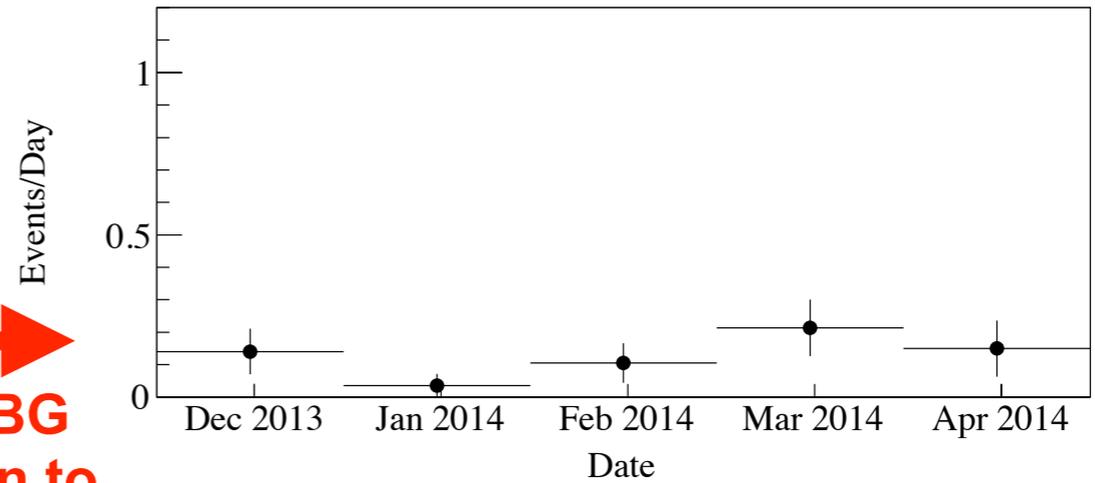
## Phase 1 (first 112.3 days)

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

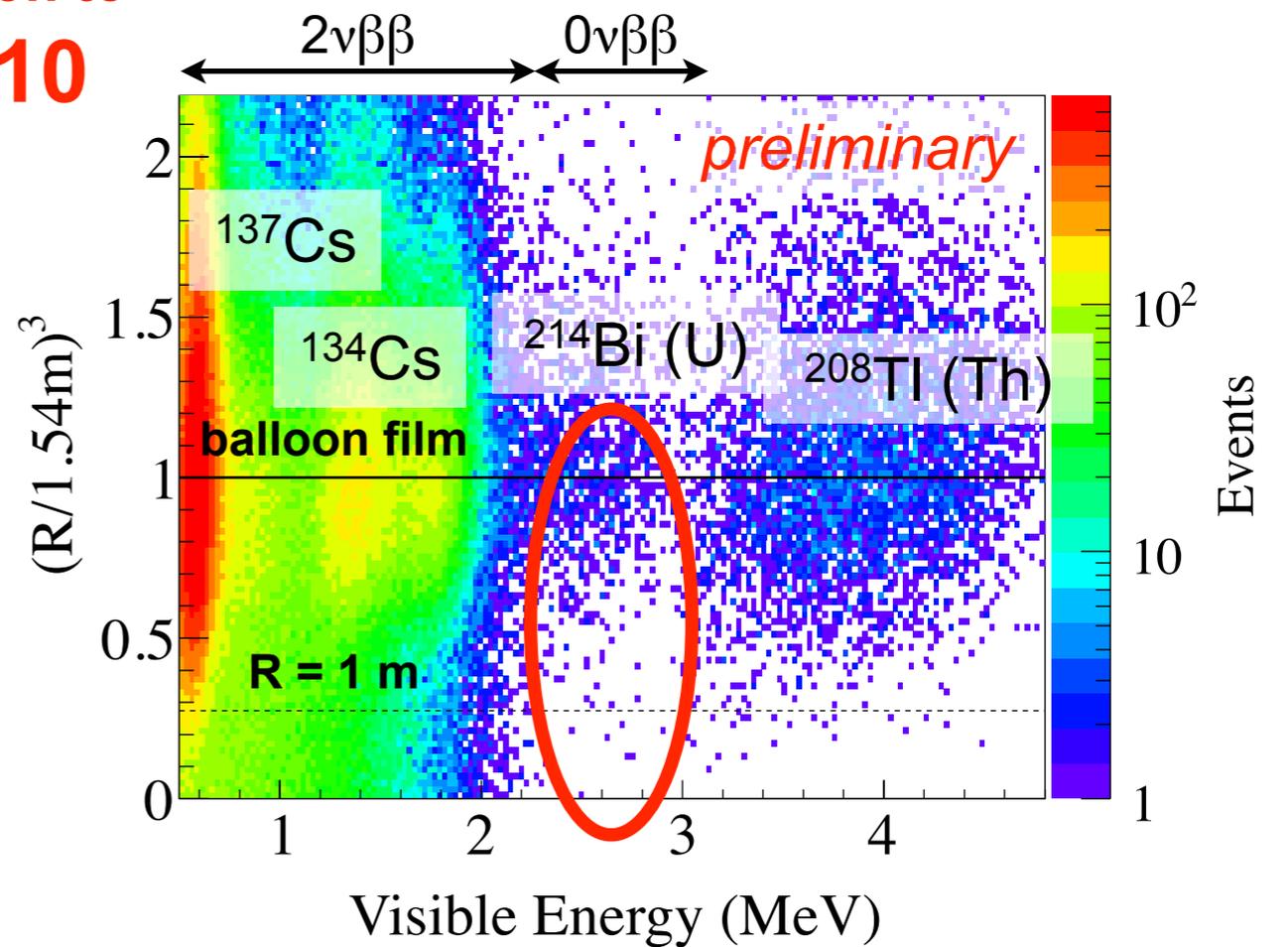
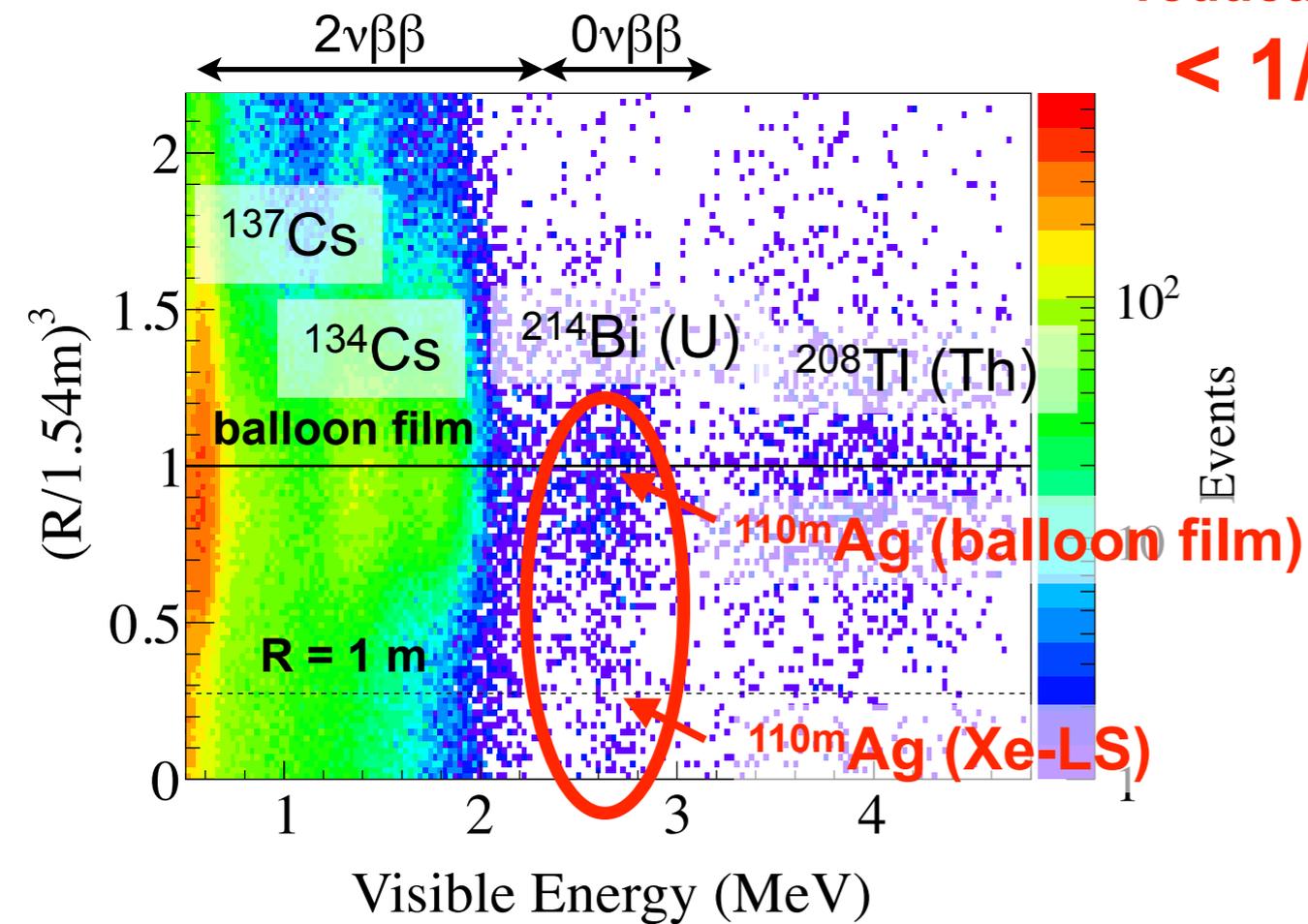


## Phase 2 (first 114.8 days)

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



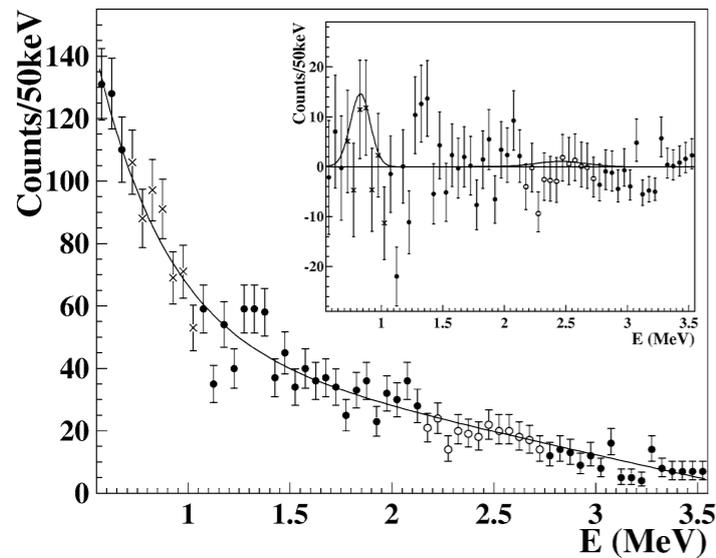
**110mAg BG reduction to < 1/10**



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

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

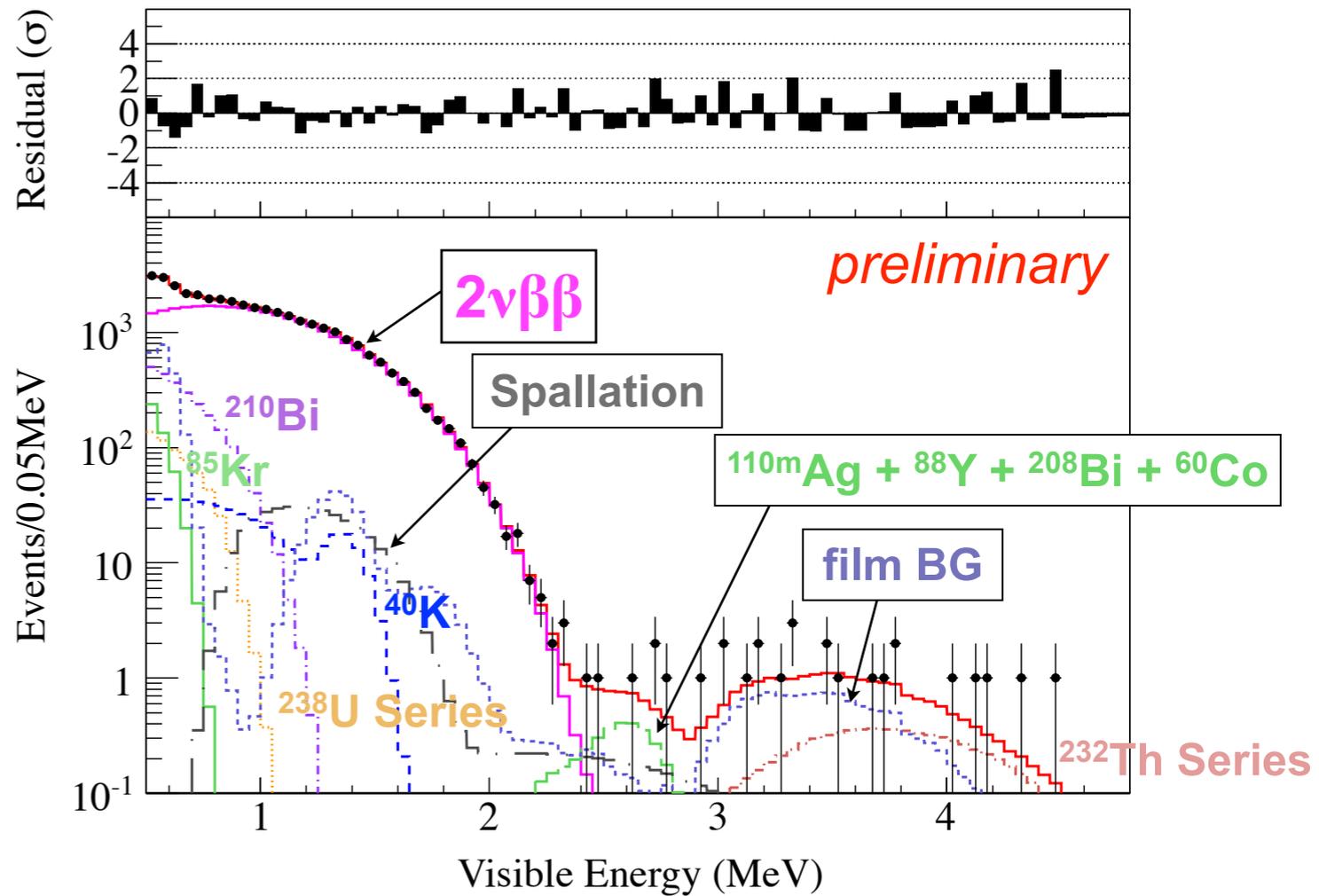
DAMA (2002) Liquid Xe scintillator



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

KamLAND-Zen (2014) Xe loaded liquid scintillator

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



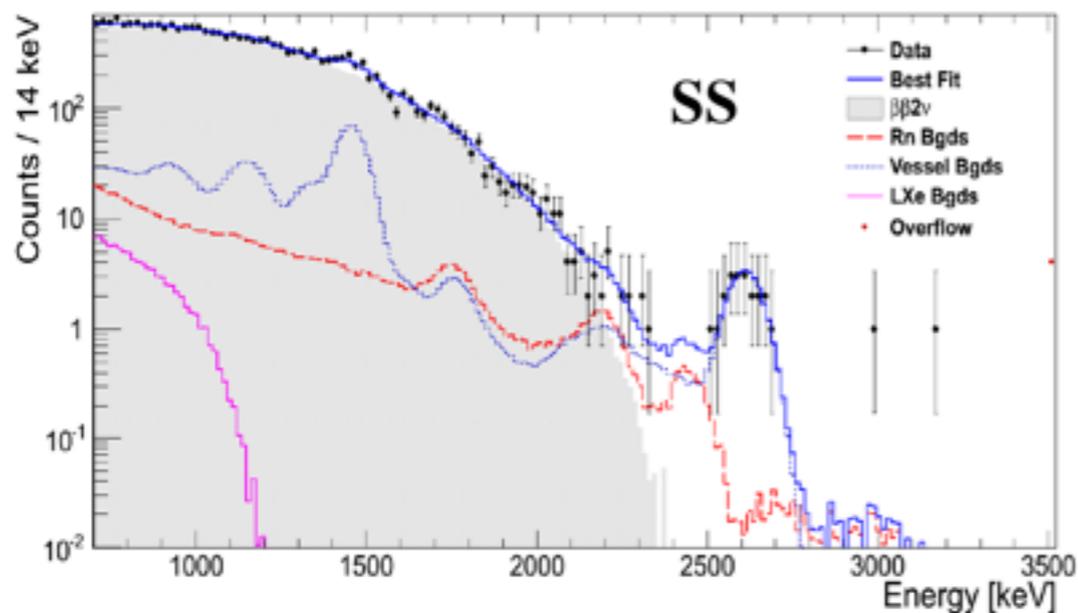
$T^{2\nu}_{1/2} = 2.32 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

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

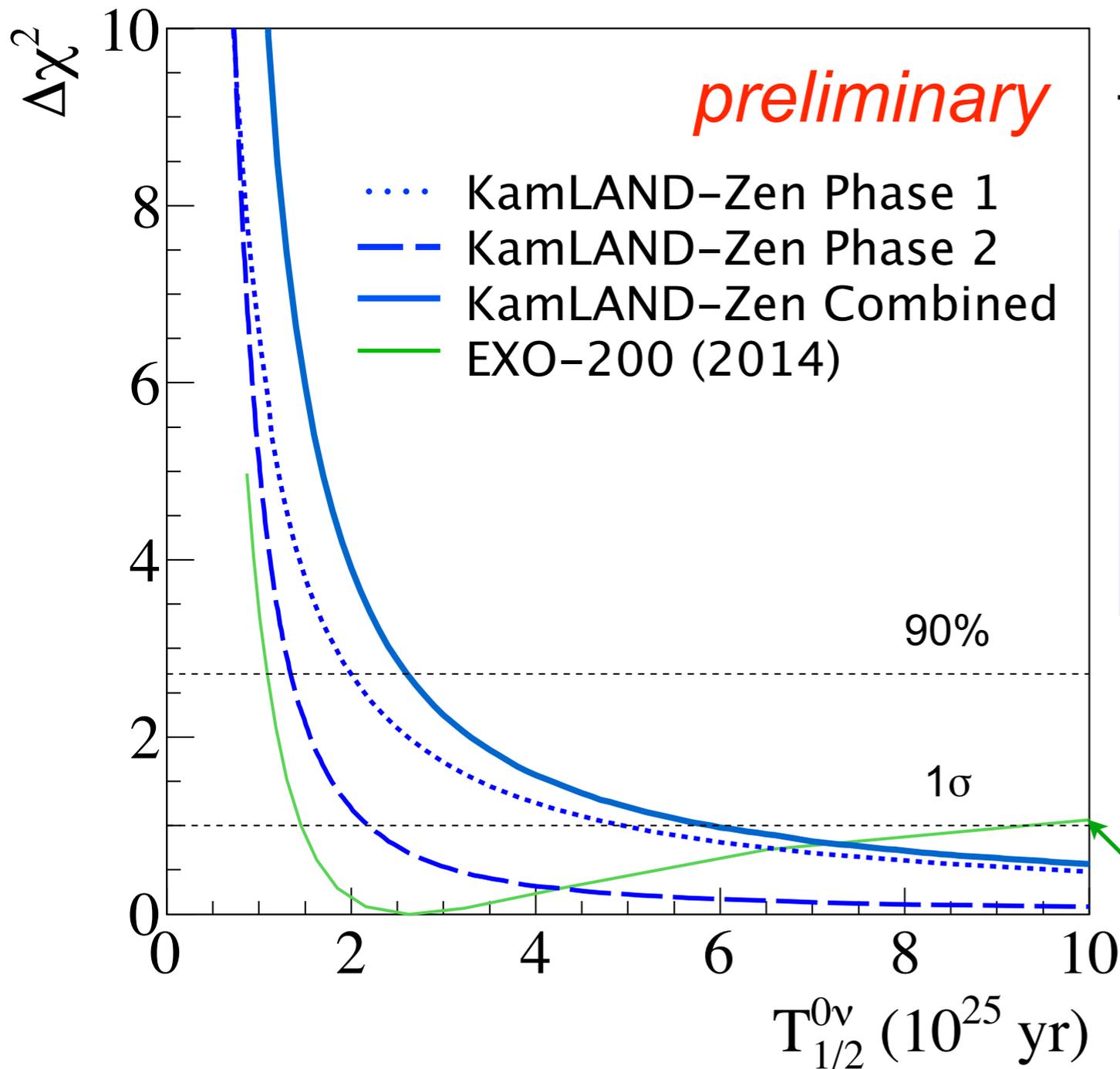


$T^{2\nu}_{1/2} = 2.165 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.059(\text{syst}) \times 10^{21}$  yr

← 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

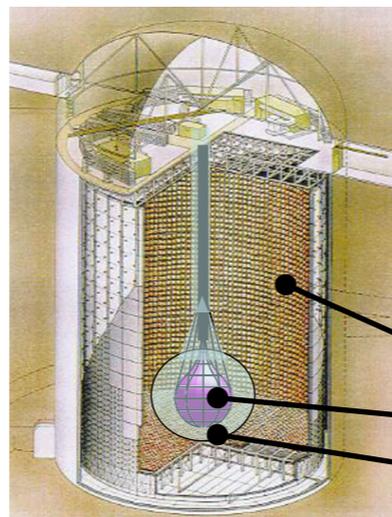
KamLAND-Zen  
放射性不純物低減後

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

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

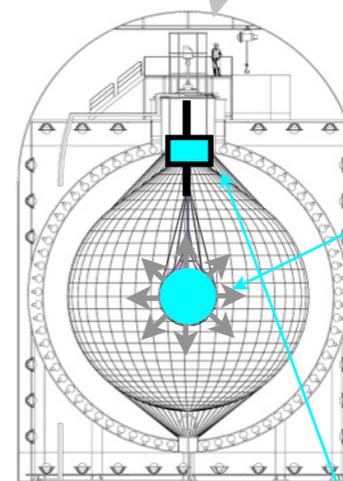
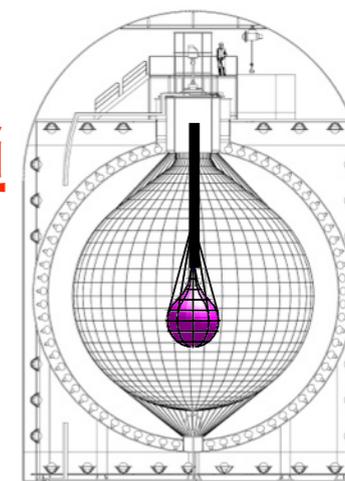
Super-KamLAND-Zen



water or LS  
Xenon-LS  
normal LS

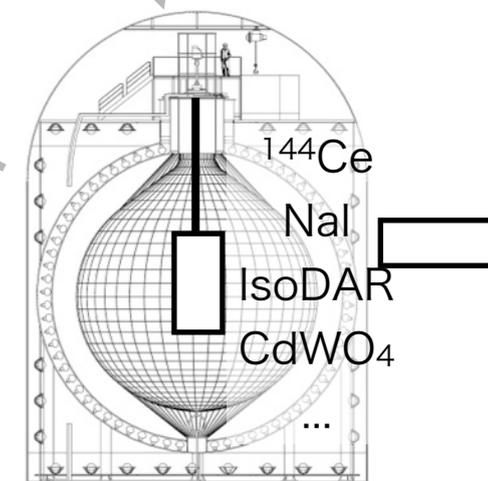
超精密反ニュートリノ物理

$p \rightarrow \nu K^+$ なども可能

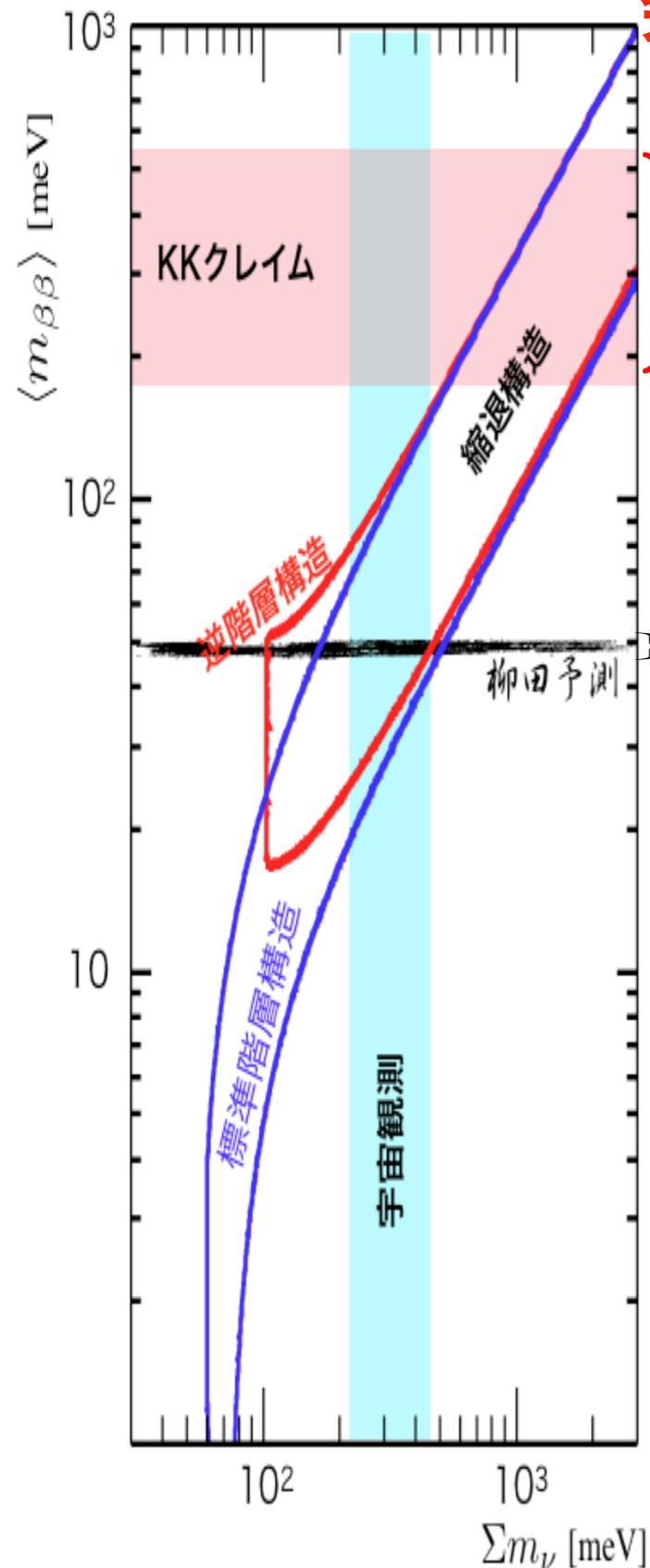


Xe高濃度化  
の開発

$\beta / \gamma$ 識別用撮像技術の開発

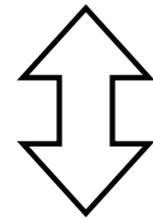


種々の極低放射能  
科学研究の実施



# 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)

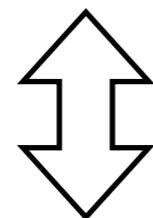


26年

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

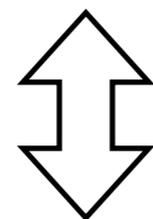


41年

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。  $m(\_ \_)m$