

# カムランド禅の 最新結果と現状

東北大学ニュートリノ科学センター  
大谷 将士  
京都大学高エネルギーセミナー

2013/3/15

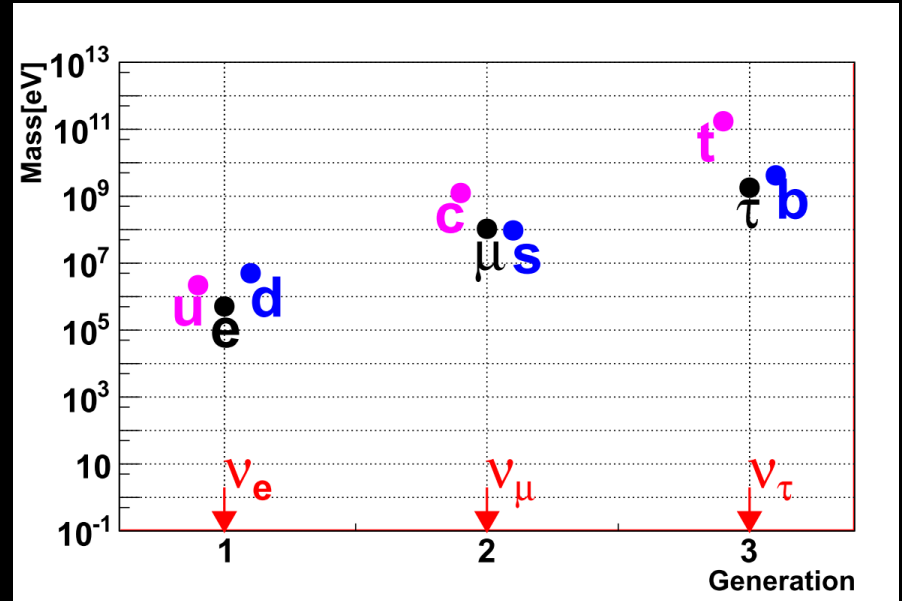
1. イントロダクション( $\nu$ と $0\nu\beta\beta$ )
2. カムランド禅実験
3.  $0\nu\beta\beta$ 測定結果
4. 現状
5. 展望とまとめ



# ニュートリノ

## 素粒子の質量

クォーク Quarks	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
			I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	up (u)	charm (c)	top (t)
	-1/3	1/2	down (d)	strange (s)	bottom (b)
	-1	1/2	electron (e)	muon (μ)	tau (τ)
レプトン Leptons	0	1/2	electron neutrino (ν <sub>e</sub> )	muon neutrino (ν <sub>μ</sub> )	tau neutrino (ν <sub>τ</sub> )



### ニュートリノをめぐる謎

- 質量=? ← **0νββ探索で解明!**
- 粒子=反粒子(マヨラナ)? ← **0νββ探索で解明!**
- クォークと全く異なる混合なのは何故?
- CP非保存?
- 3種類+α?

# 二重β崩壊( $2\nu\beta\beta$ & $0\nu\beta\beta$ )

- ある種の原子核

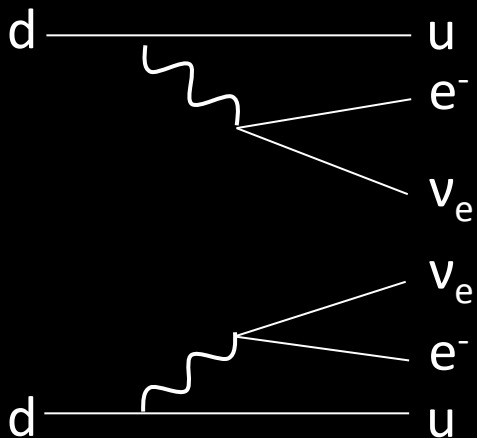
☹  $\beta$ 崩壊

☺  $\beta\beta$ 崩壊

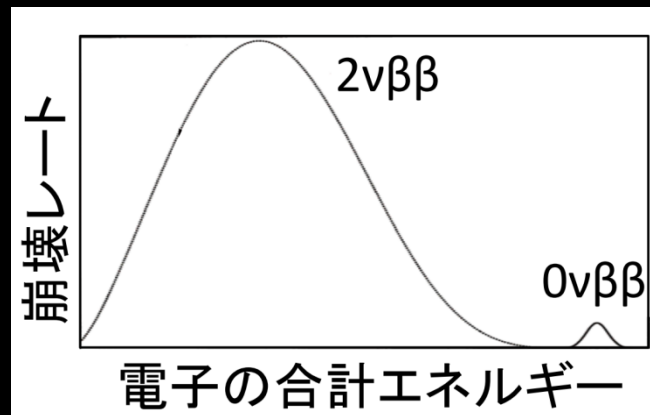
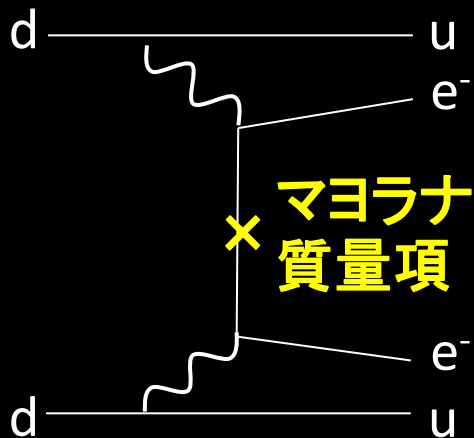


- ニュートリノがマヨラナで質量があれば $0\nu\beta\beta$ が可能( $T_{1/2} \propto 1/\langle m \rangle^2$ )  
電子の合計エネルギーで $2\nu\beta\beta/0\nu\beta\beta$ を識別

$2\nu\beta\beta$



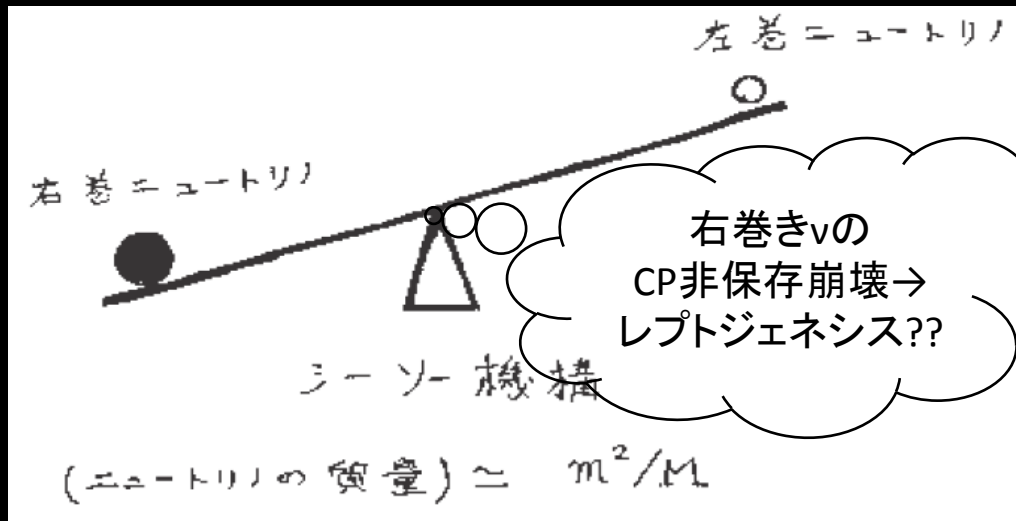
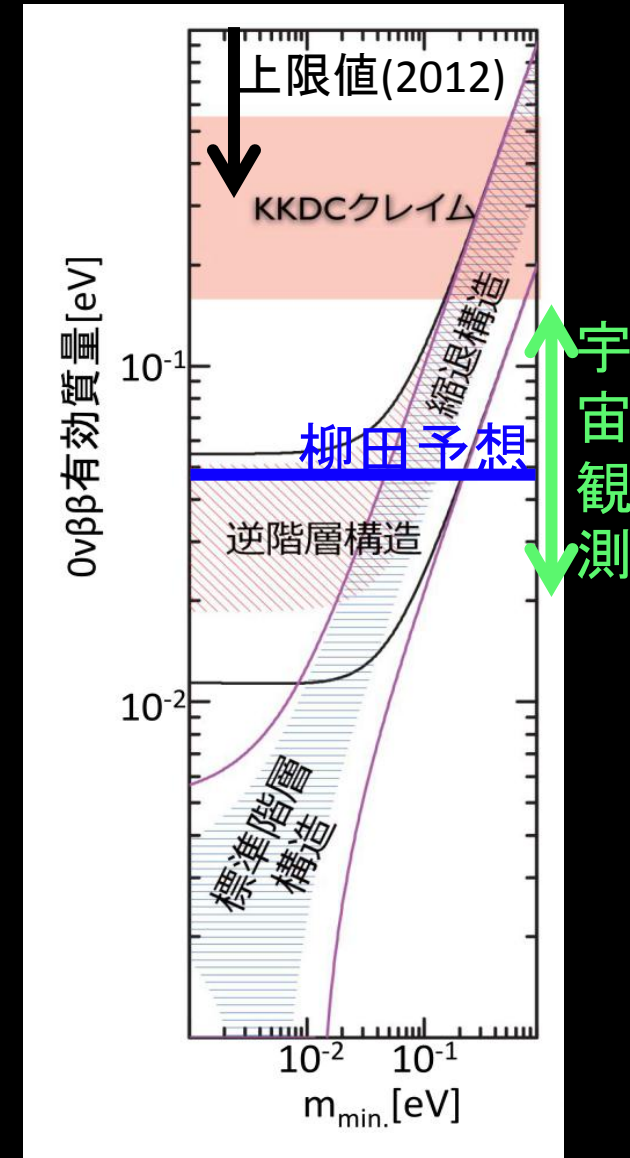
$0\nu\beta\beta$



# $0\nu\beta\beta$ 探索の背景

1. ニュートリノ振動の精密測定結果  
宇宙観測  
過去の $0\nu\beta\beta$ 実験(KKDCクレーム)  
柳田予想@Neutrino2012  
→そろそろ $0\nu\beta\beta$ 発見...かも。

2. 宇宙創成の謎が解き明かされる...かも。

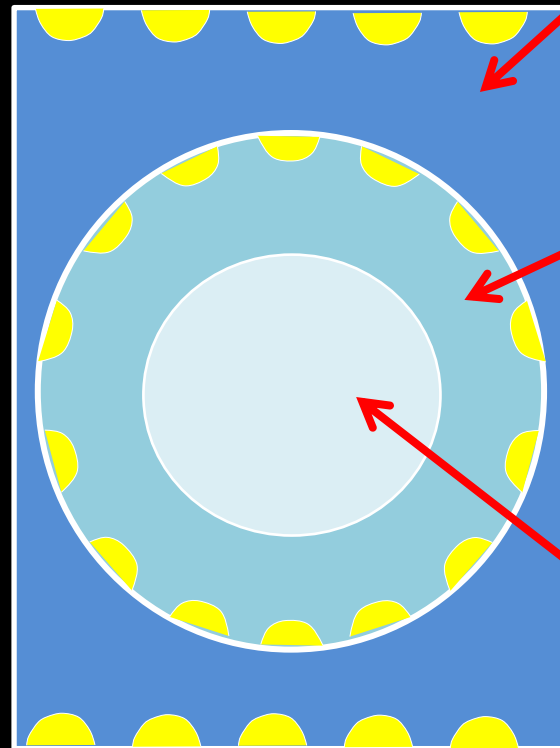
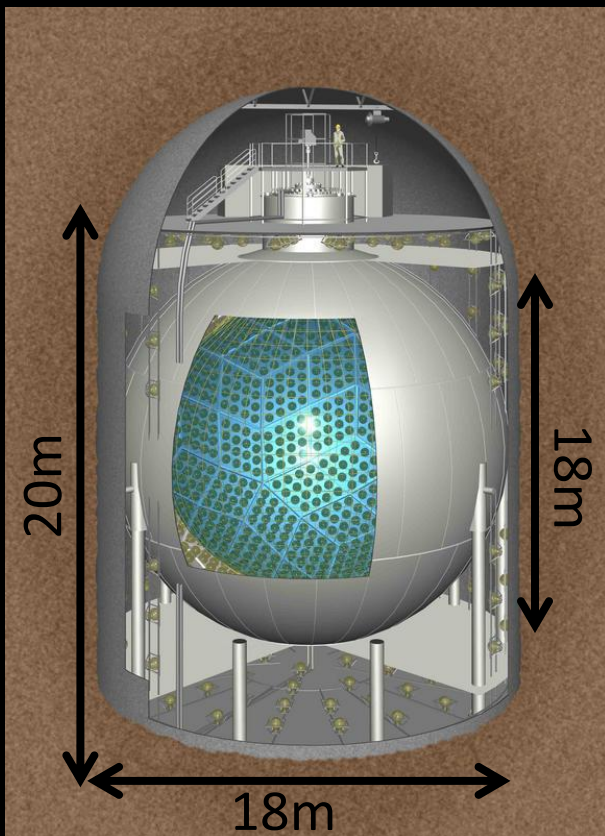


$0\nu\beta\beta$ 探索は今最も重要な実験の1つ

0vββ探索実験カムランド禅

# カムランド検出器

- 1kton液体シンチレーター検出器@神岡鉱山地下1km
- PMTヒット数でトリガー→ $> \sim 0.2 \text{ MeV}$  ( $Q_{0\nu\beta\beta} = 2.5 \text{ MeV}$ )のデータ取得
- 極低放射線環境:  $^{238}\text{U} \sim 10^{-18} \text{ g/g}$ ,  $^{232}\text{Th} \sim 10^{-17} \text{ g/g}$



## 外部検出器

- 純水
- 20inch PMT x 225

## 内部検出器

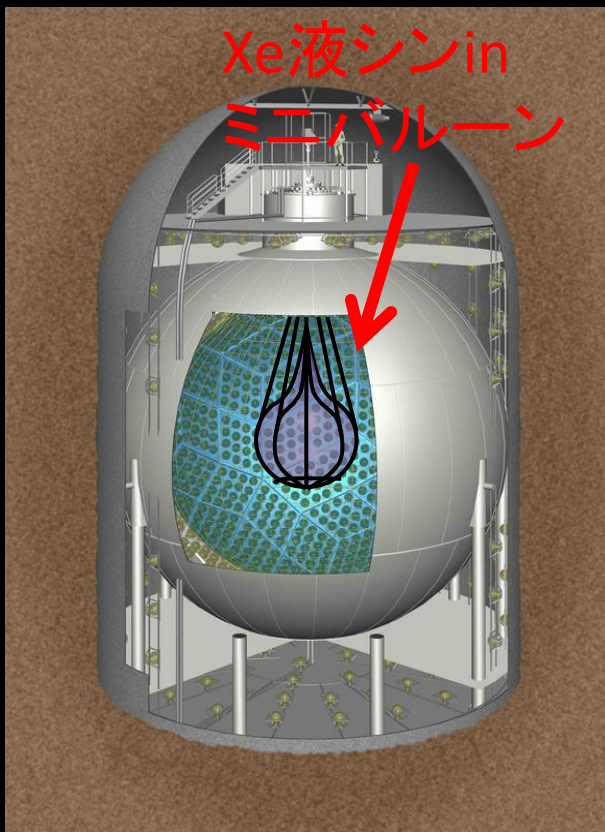
- ミネラルオイル
- 20inch PMT x 554  
+ 17inch PMT x 1325

## 検出領域

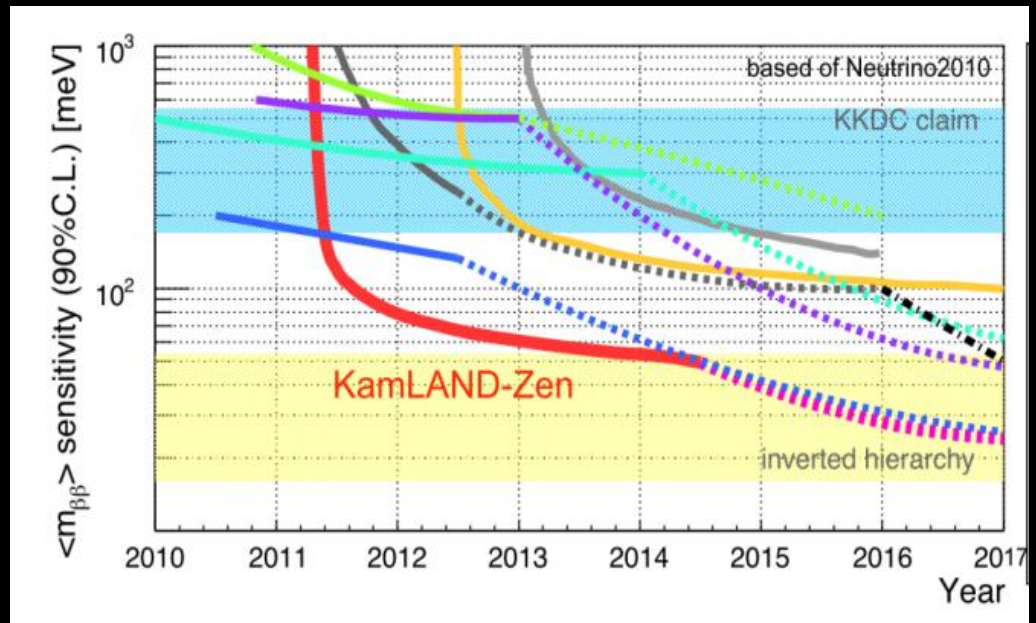
- 液体シンチレーター
- 13m $\Phi$

# カムランド禅実験

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊核 $^{136}\text{Xe}$ 入り液体シンチレーターを封入したミニバルーン( $\Phi=3.08\text{m}$ )を検出領域に導入
  - ☺確立した極低放射線環境,  
大量(300kg)の $0\nu\beta\beta$ 崩壊核 (過去の実験 $\sim 10\text{kg}$ )  $\rightarrow$  高S/N
  - ☺容易にXe溶解・脱気  $\rightarrow$  シグナル検証が可能



## 実験開始前の感度見積もり



目標:  $\sim 60\text{meV}$ まで $0\nu\beta\beta$ を探索

# 0νββシグナル&バックグラウンド

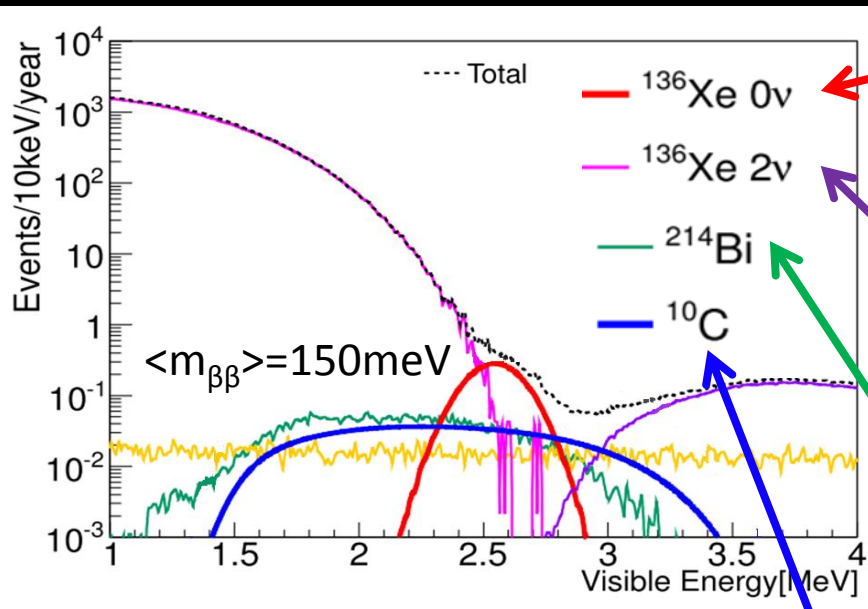
ヒットPMT  
波形データ

電荷  
& タイミング

エネルギー  
& 反応点

イベント選択

## 予想エネルギー分布



### 0νββイベント

- ・2.46MeVピーク
- ・Xe液シンに一様分布

### 2νββイベント

- ・2.46MeVを終点とした連続分布
- ・分解能の6乗程度で0ν領域に侵入

### <sup>214</sup>Bi(<sup>238</sup>U系列)

- ・<sup>214</sup>Bi → <sup>212</sup>Po(6.2MeVα)による遅延同時測定で除去
- ・ミニバルーン由来  
→ 遅延同時+FVカット

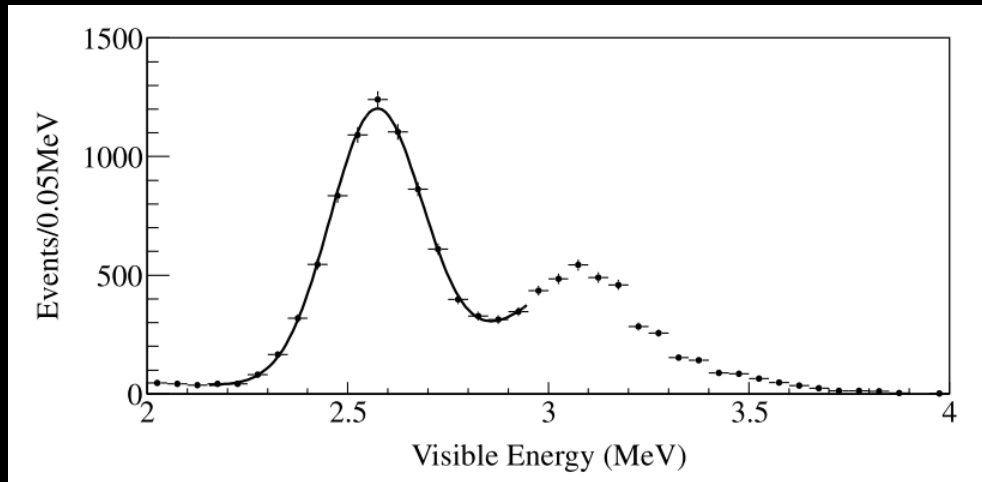
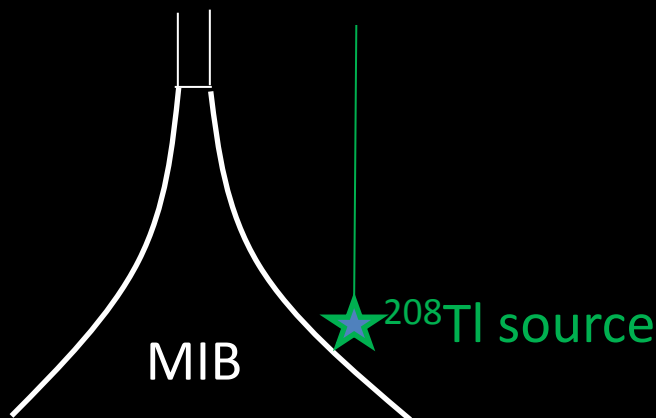
### <sup>10</sup>C

- ・液シン主成分<sup>12</sup>Cの宇宙線核破碎
- ・宇宙線後VETO or/and 同時発生する中性子でタグ



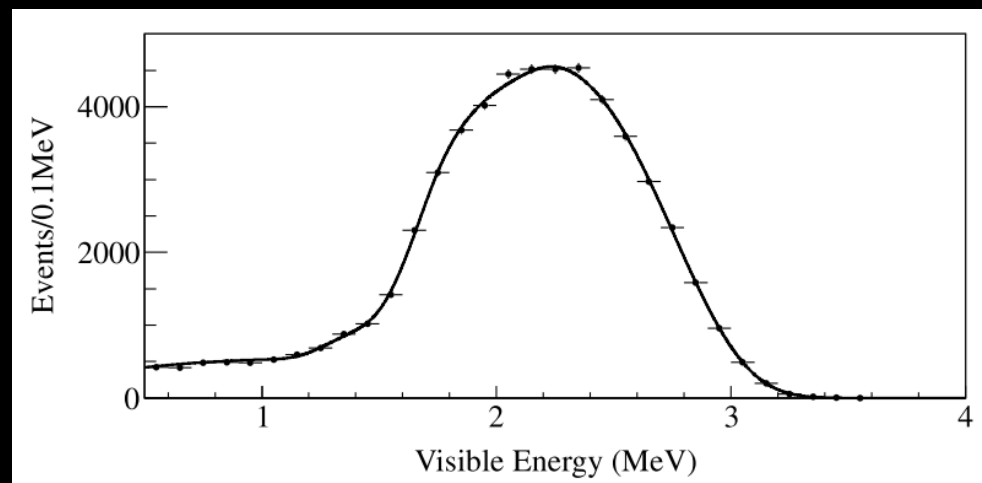
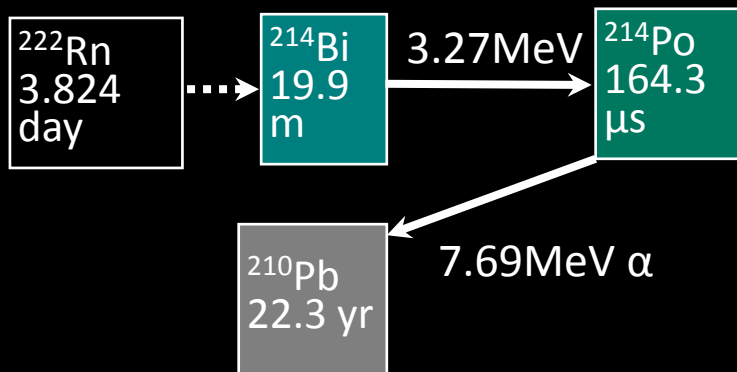
# エネルギーキャリブレーション

- $^{208}\text{Tl}$  (2.6MeV  $\gamma$ ) @ near the mini inner balloon



$$\sigma_E = 6.6\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$$

- $^{214}\text{Bi}$  ( $Q_\beta = 3.27$ ,  $\beta + \gamma$ 's) from initial contamination



# $0\nu\beta\beta$ 測定結果

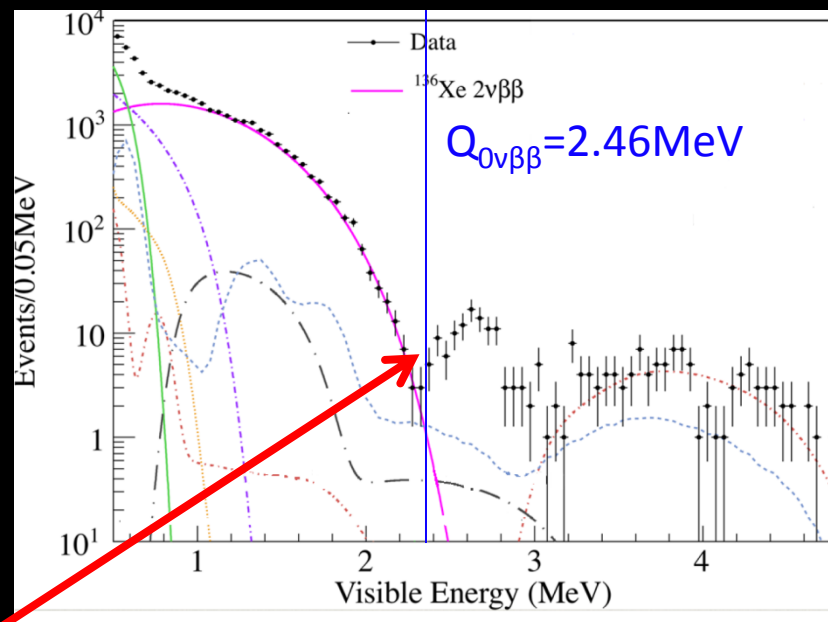
# 1<sup>st</sup> Result

- 2012年1月に初の結果を発表
- 77.6日分、27.4kg・yrデータ

## イベント選択

1. 1.2m FVカット
2. 宇宙線後2msec VETO
3. 遅延同時測定によるBi-Po除去
4. 原子炉ニュートリノ除去
5. エネルギー・位置再構成時のバッドネスによるノイズカット

## エネルギー分布



2.6MeVに予期せぬBG  
データベース検索から  
候補は4つ

$^{110m}\text{Ag}$	$Q=3.01\text{MeV } \beta^-$	$\tau=360\text{d}$
$^{88}\text{Y}$	$Q=3.62\text{MeV } \text{EC}$	$\tau=154\text{d}$
$^{208}\text{Bi}$	$Q=2.88\text{MeV } \text{EC}$	$\tau=5.31\text{yr}$
$^{60}\text{Co}$	$Q=2.82\text{MeV } \beta^-$	$T=7.61\text{yr}$

# 1<sup>st</sup> Result

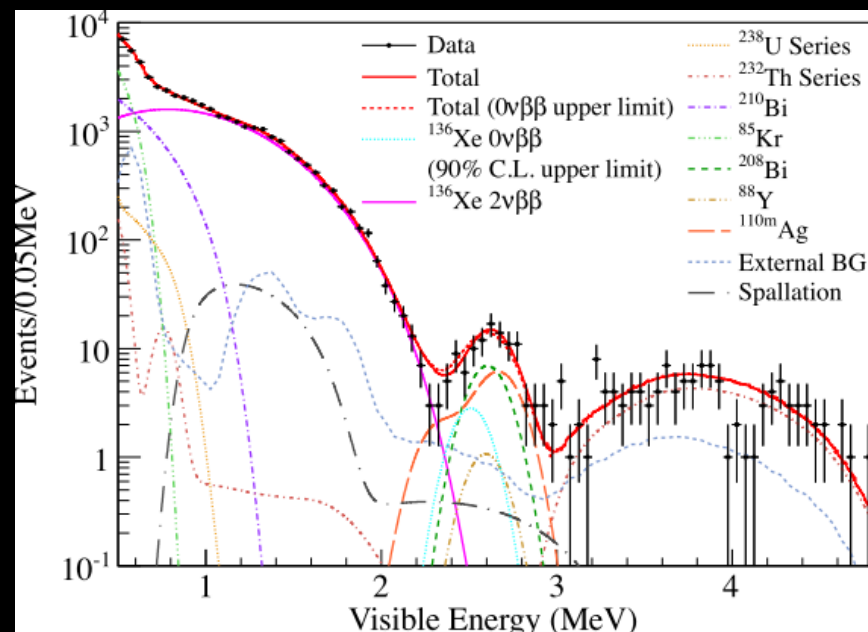
- 予期せぬBGも考慮して $2\nu\beta\beta$ ,  $0\nu\beta\beta$ レートを算出。

## 解析方法:

### エネルギー分布を $\chi^2$ フィット

- バルーンBG, 核破砕イベントは実測値より制限
- $2\nu\beta\beta$ ,  $0\nu\beta\beta$ はフリー
- 2.6MeV付近のBG( $^{110m}\text{Ag}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ...)もフリー

## フィット結果



$$\underline{T_{1/2}^{2\nu} = (2.38 \pm 0.02 \pm 0.14) \times 10^{21} \text{ yr}, T_{1/2}^{0\nu} > 5.7 \times 10^{24} \text{ yr}}$$

世界最高レベルの $2\nu\beta\beta$ 測定・ $0\nu$ 探索

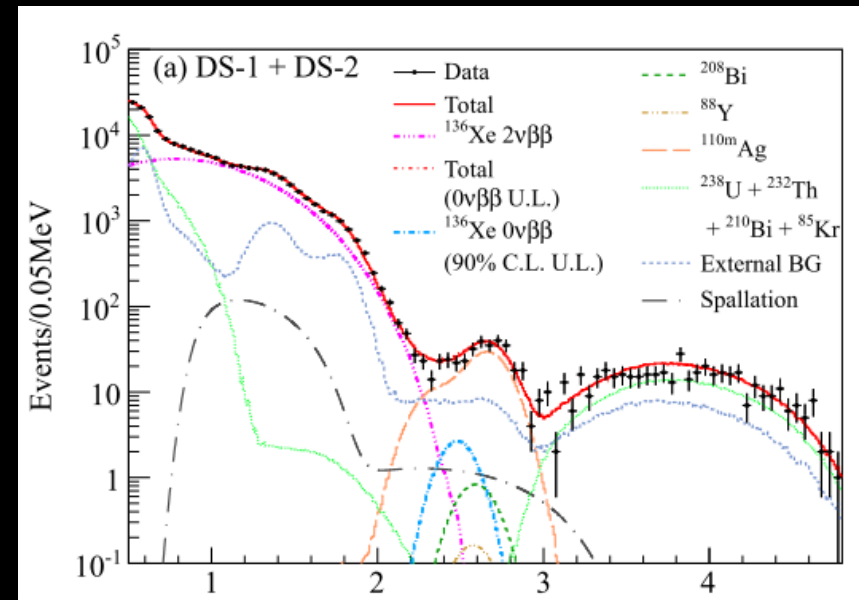
# 最新結果

- 2012/11に~2012/6/14のデータ解析結果を発表  
(1<sup>st</sup> resultからの改善点

- exposure 27.4kg-yr → 89.5kg-yr  
(Live time: 77.6 days → 213.4 days,  
バルーンBG分布から  
FVを最適化: 1.2m → 1.35m)

- バルーンBGの精密評価

## フィット結果



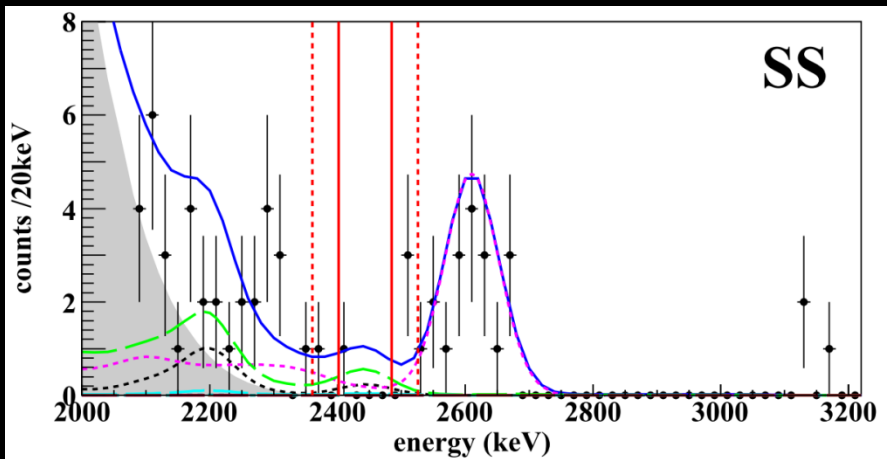
世界最高感度で $0\nu\beta\beta$ を探索:  $T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25}$ yr

# 最新結果 ~cont'd

- EXO-200最新結果と組み合わせてKKDCクレームを検証

- Xe TPCによる $0\nu\beta\beta$ 探索

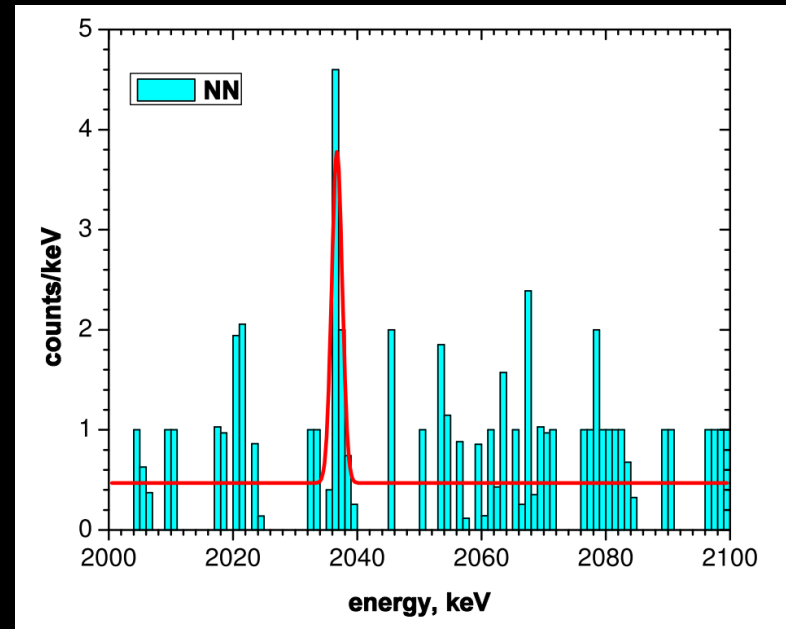
☺ $\gamma/\beta$  粒子識別...



カムランド禅と同程度まで探索

$$\underline{T_{1/2}^{0\nu} > 1.6 \times 10^{25} \text{ yr}}$$

- Ge半導体検出器による $0\nu\beta\beta$ 探索
- 一部メンバーが $0\nu\beta\beta$ 発見を主張



BG評価に誤り?

別実験による検証が必要

# 最新結果 ~cont'd

- $^{136}\text{Xe}$ と $^{76}\text{Ge}$ の結果比較には理論計算で求めた核行列要素が必要  
 主要な全理論について結果を比較。

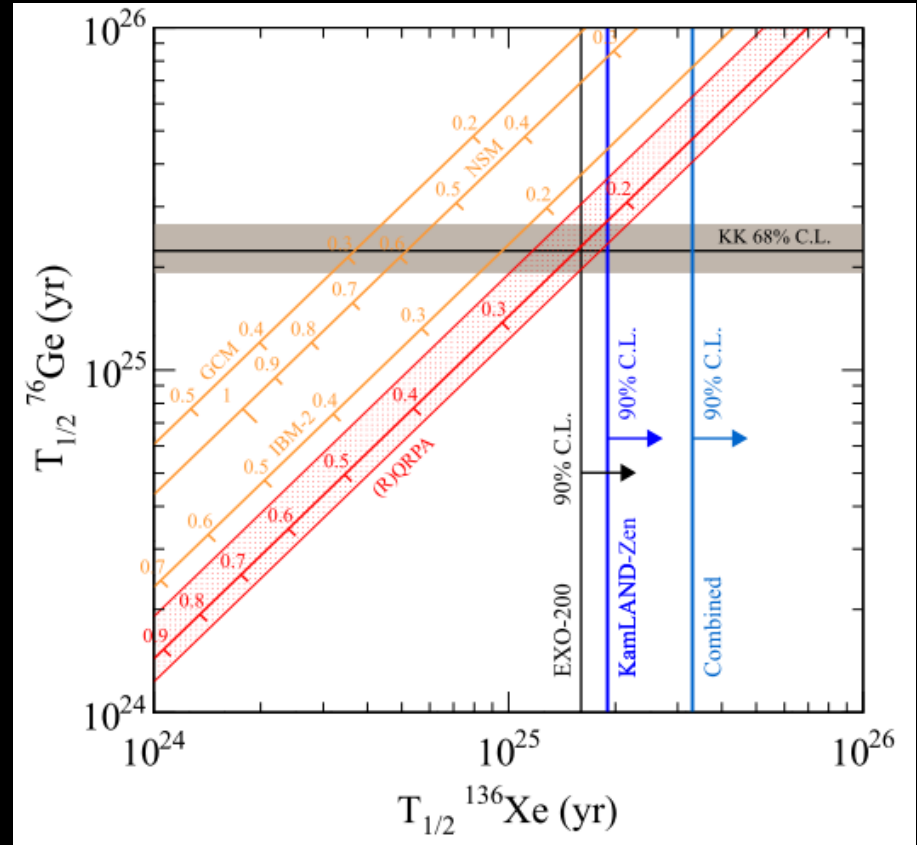
$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = GM^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

$\langle m_{\beta\beta} \rangle$  : ニュートリノ有効質量

$G$  : Phase space

$M$  : 核行列要素

理論毎に数十%の違い



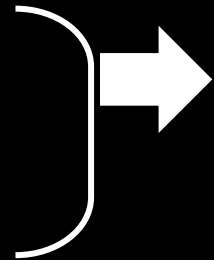
KKDCクレイムを97.5% CLで排除

現状



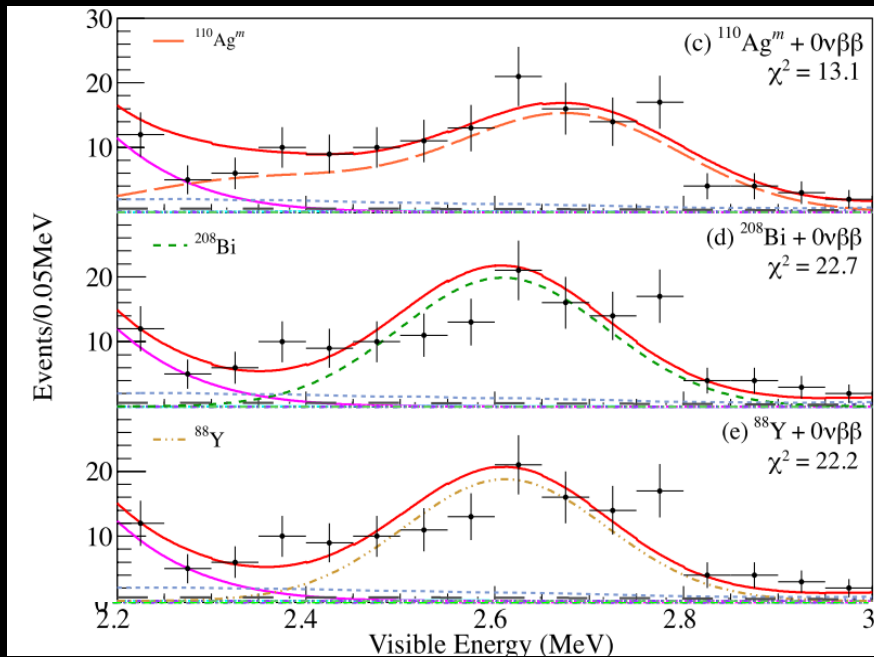
# 2.6MeV付近のバックグラウンド

- データベース検索  
エネルギー分布  
崩壊定数

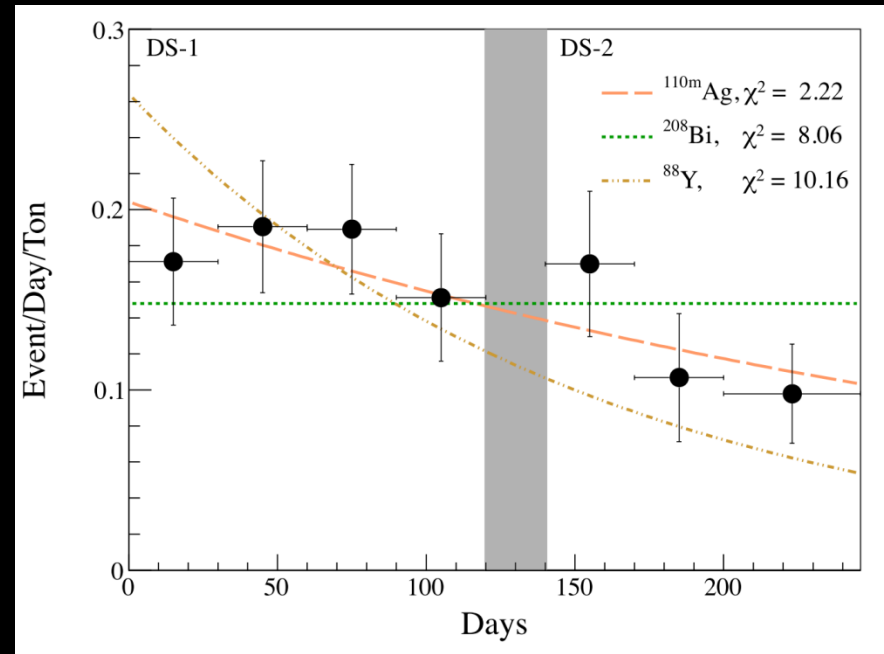


$^{110m}\text{Ag}$ と同定  
(混入経路は輸送中のXe核破砕  
もしくは福島原発由来)

## エネルギー分布の比較



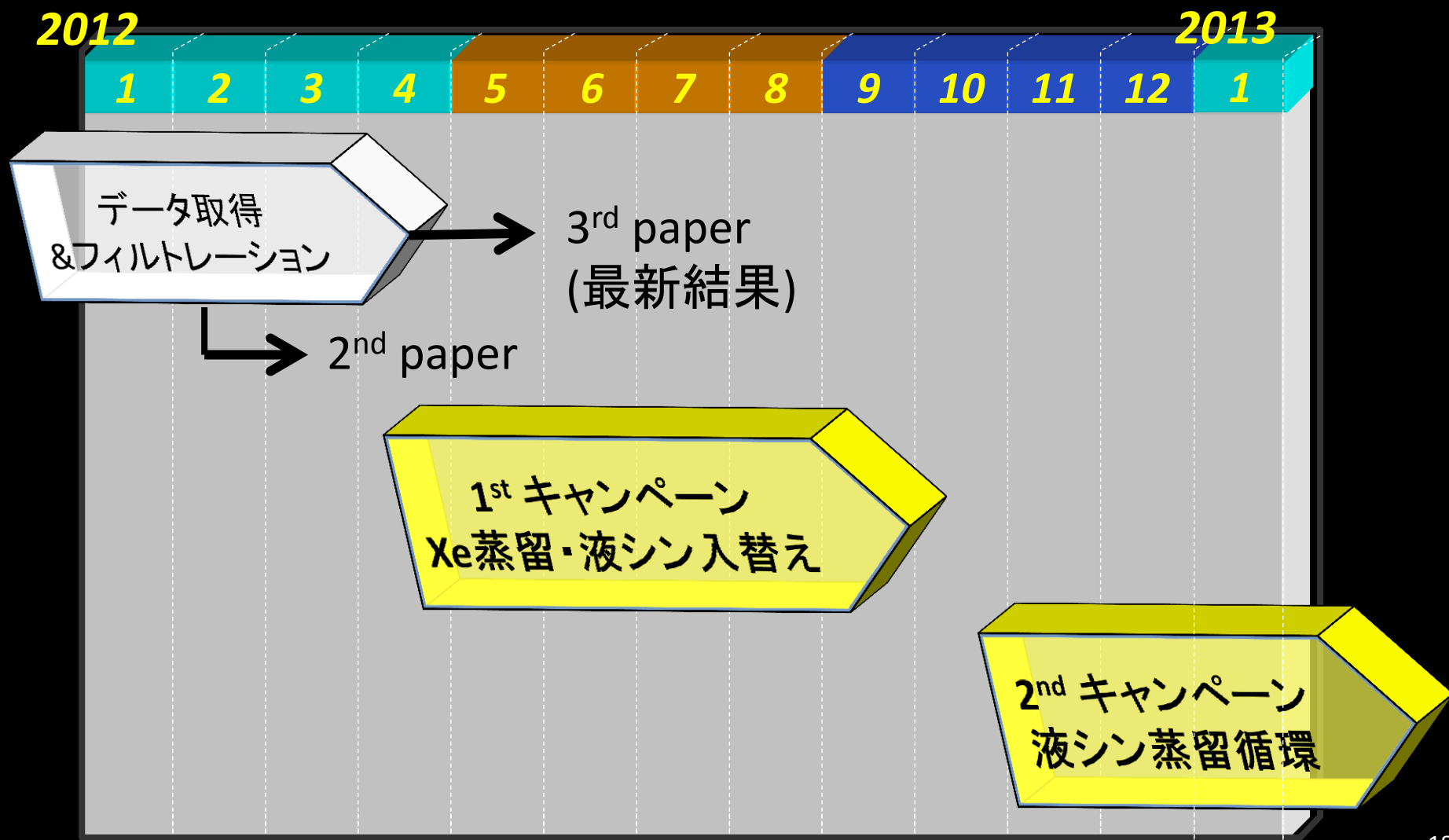
## 崩壊定数



さらなる感度向上には $^{110m}\text{Ag}$ 除去が不可欠

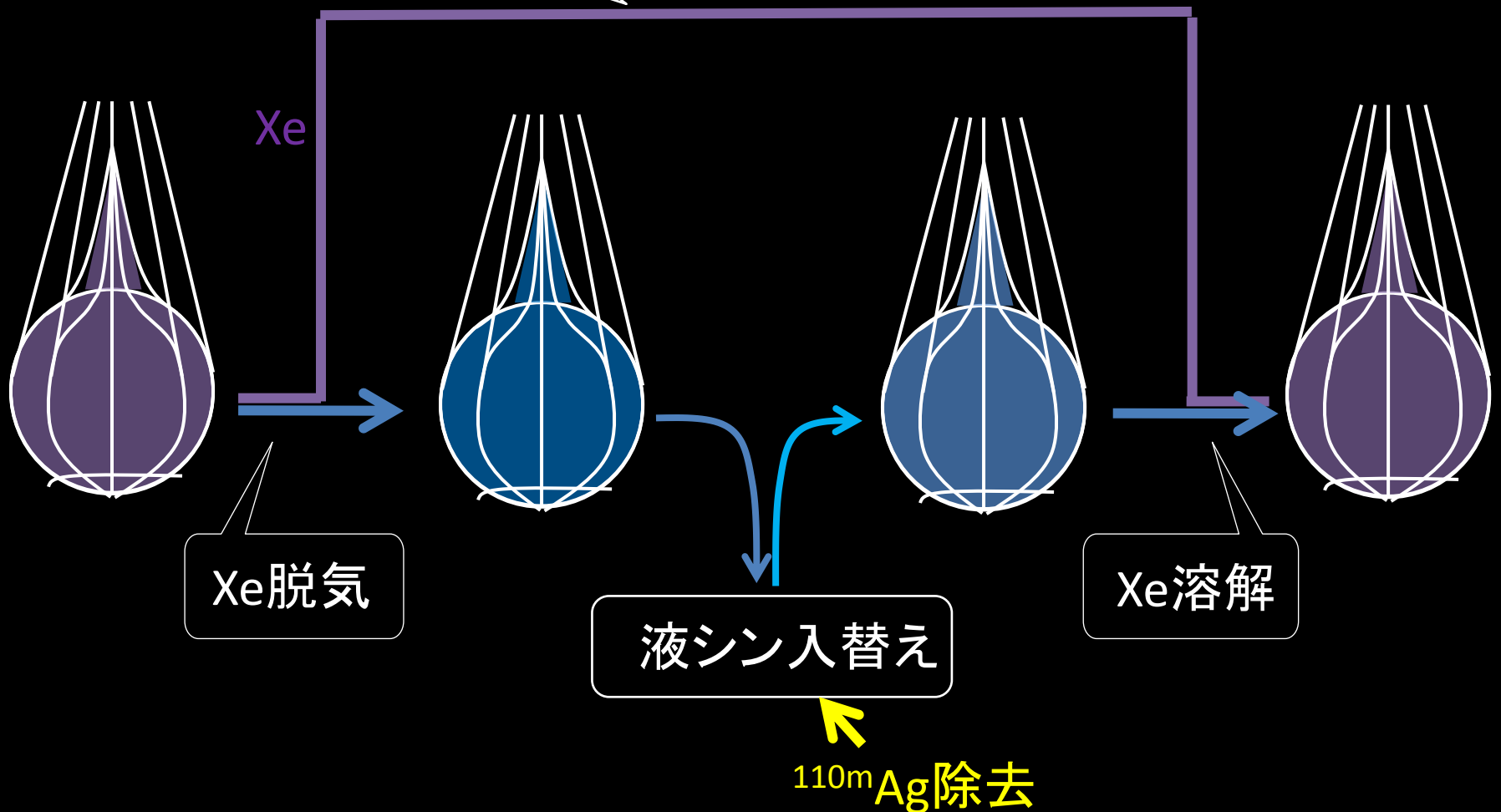
# スケジュール

- $^{110m}\text{Ag}$ 除去のために2つのキャンペーンを実施



# Xe蒸留 & 液シン入替え

- ・Xe蒸留 (XMASS装置を拝借)
- ・ゲッター&フィルターによる不純物除去

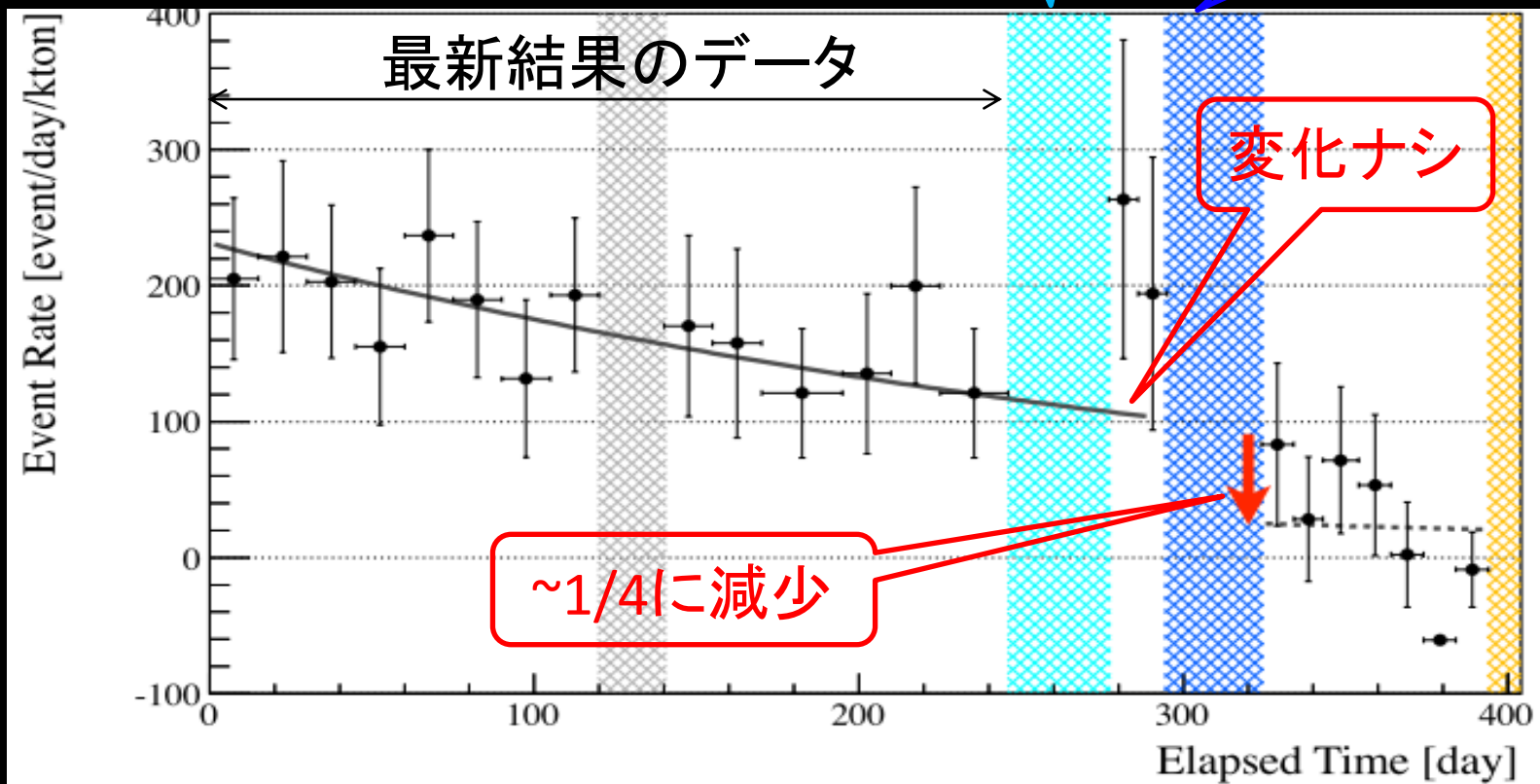


# 結果

## 2.6 MeV付近のイベントレート

Xe脱気

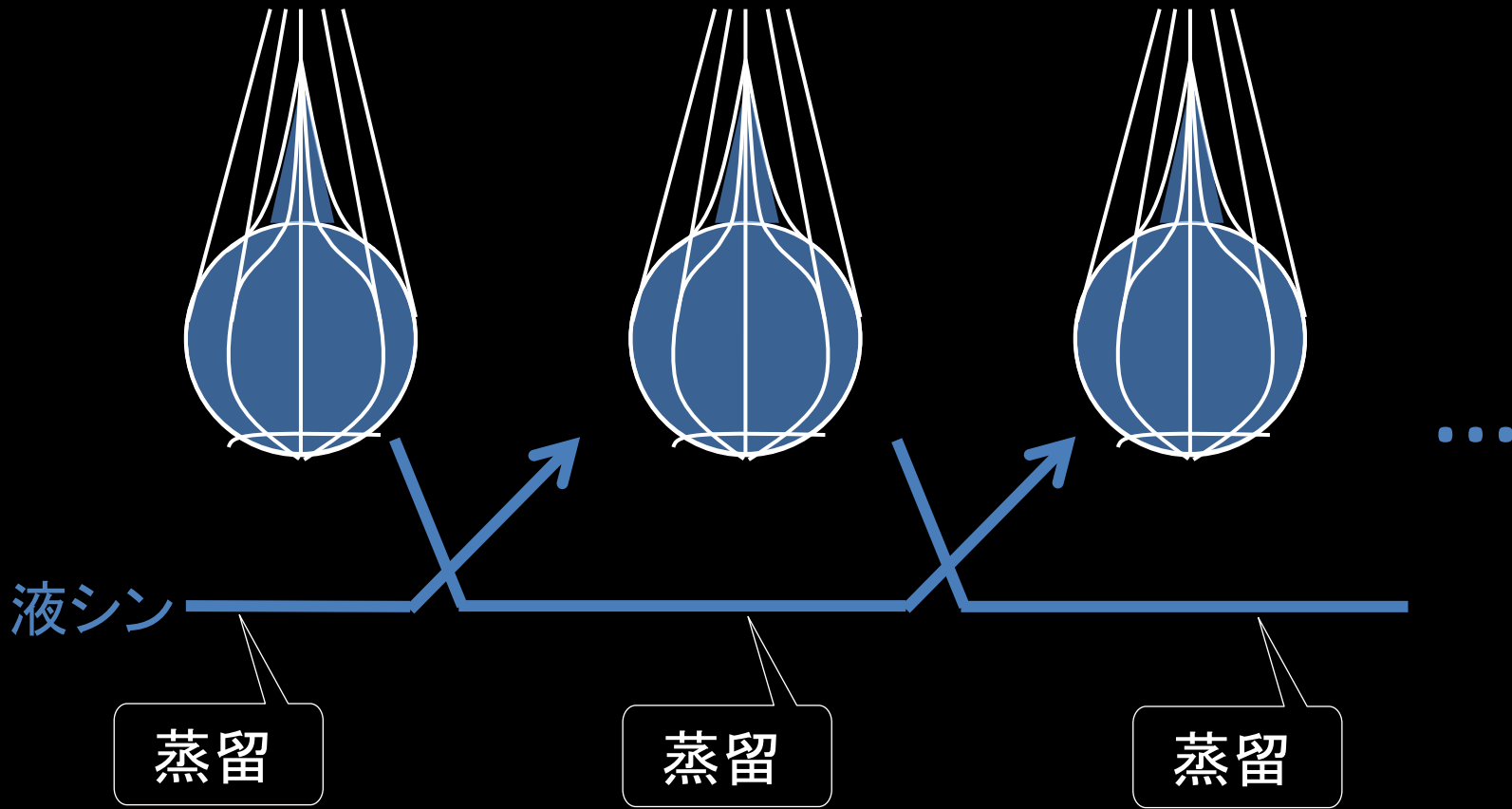
液シン入替え



- ・2.6MeVバックグラウンドはXe由来でないことを確認
- ・液シン入替えによって $^{110m}\text{Ag}$ が~1/4に低減  
しかし、この程度では不十分(目標~1/100)

# 液シン蒸留循環

- Xe溶解を延期して、液シン蒸留循環作戦をスタート：  
液シンを蒸留しながら入替えて $^{110m}\text{Ag}$ を $(\sim 1/4)^n$ に低減



~1/100低減に必要な3~4循環に要する期間~2か月

# 火災発生

- 循環2順目開始直後の11/20に蒸留エリア付近で火災発生 (エリア付近の装置解体中の事故)

11/21日経

11/21毎日

**東北大研究所で火災**  
10人搬送、ケーブール損傷

20日午前11時半ごろ、岐阜県飛騨市神岡、蒸留エリア付近で火災が発生した。原因は不明だが、火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。

火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。




【平塚 大】


**金を資金洗浄か 隠匿容疑で中国人逮捕**  
神奈川県警

（資金洗浄に使われた）と容疑を掛けられて、名義の口座に1回に分けて入金された約1億5千万円が、隠匿容疑で逮捕された。隠匿容疑で逮捕された。隠匿容疑で逮捕された。隠匿容疑で逮捕された。

**ニュートリノ施設で火災**  
岐阜、検出器には損傷なし

20日午前11時50分ごろ、岐阜県飛騨市神岡、蒸留エリア付近で火災が発生した。原因は不明だが、火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。火災発生直後に、蒸留エリア付近の装置解体中の事故と見られる。

火災が発生した、東北大のニュートリノ科学研究所センターの機室入り口（20日、岐阜県飛騨市）



- 現地の適切な判断により最小限の被害で済んだ
  - けが人はほぼなし(軽微なやけど程度)
  - 検出器本体に直接の影響は無し
- が、蒸留エリア関連機器(電源ラインなど)が損傷

# 火災当時の写真など

火災現場

焼失ケーブル

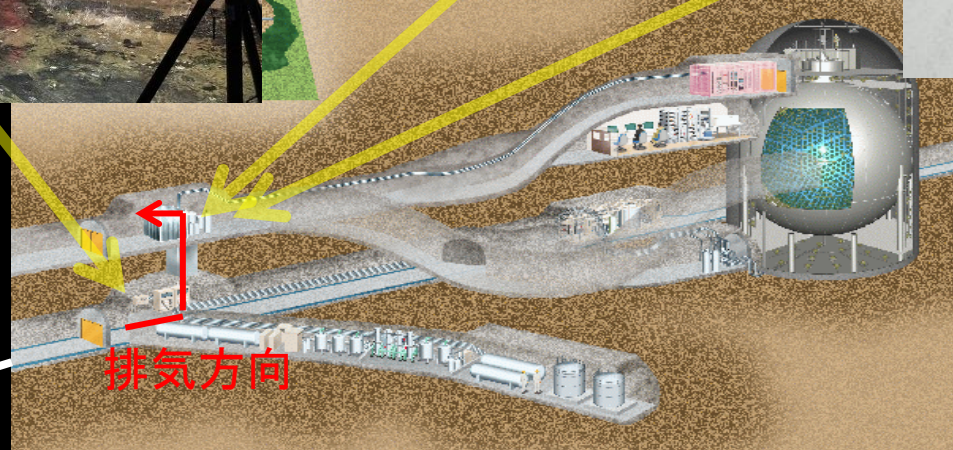


トイレも真っ黒



煙熱による  
損傷

SK, XMASS



# 復旧作業

## 地道な掃除



## 機器の点検



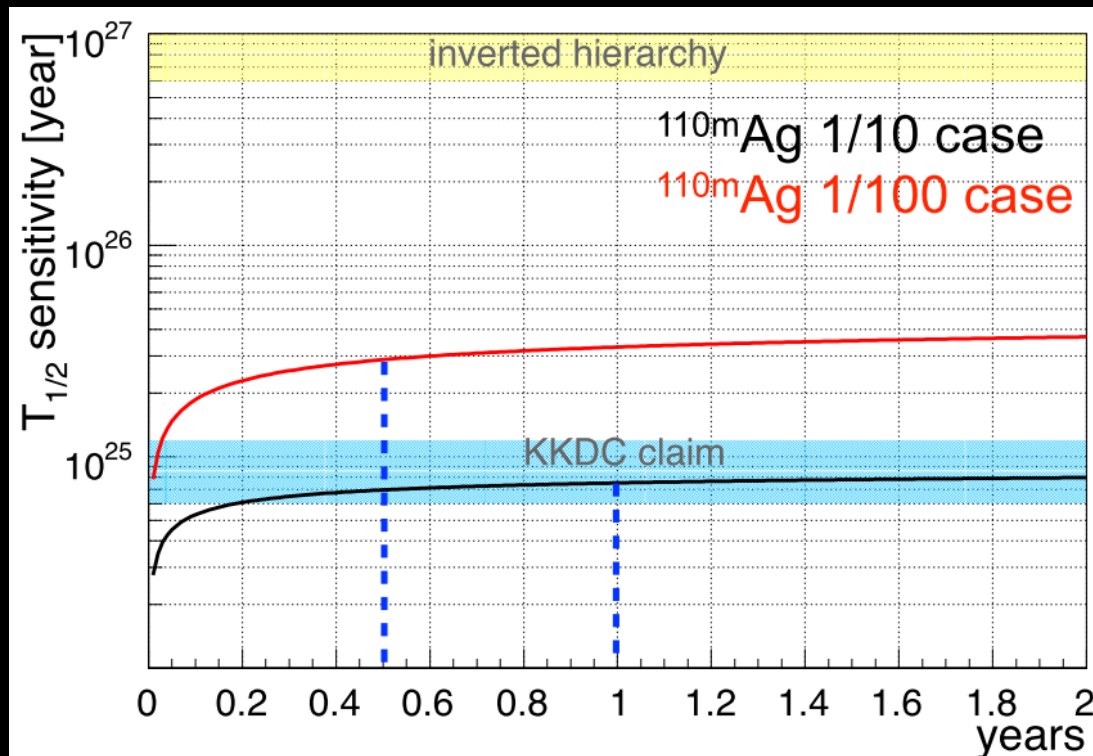
## 火災現場も復旧 (蒸留エリアはまだ)



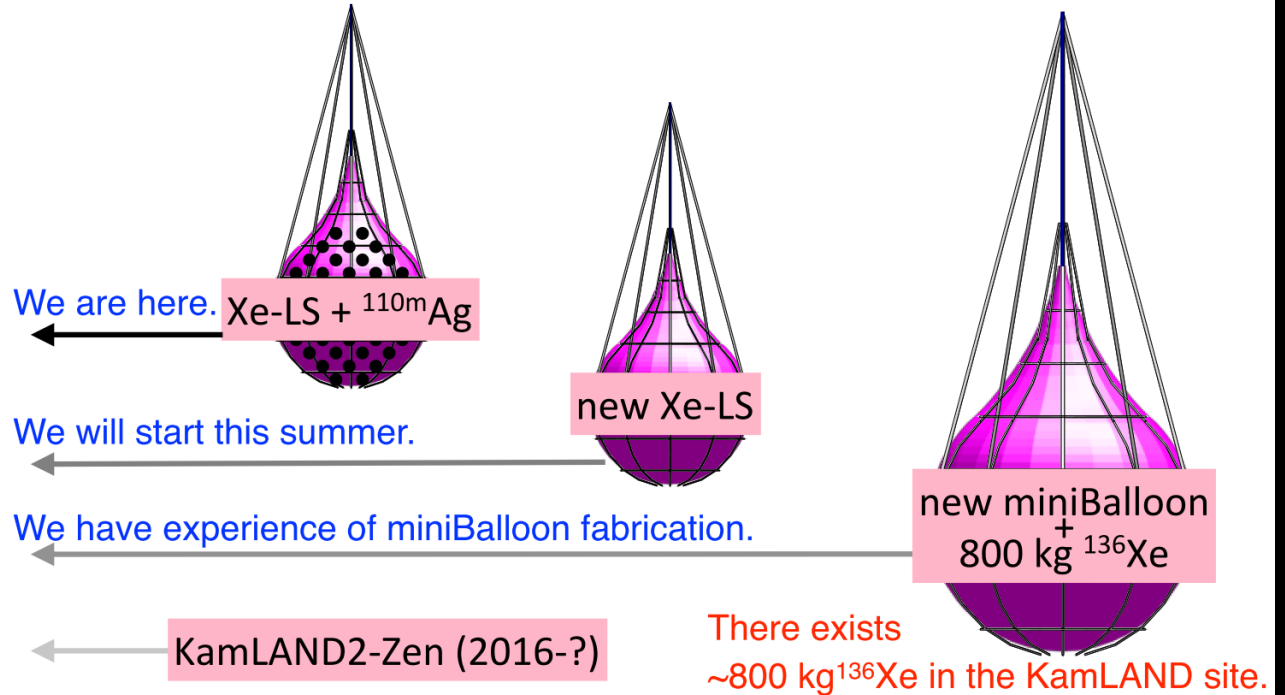
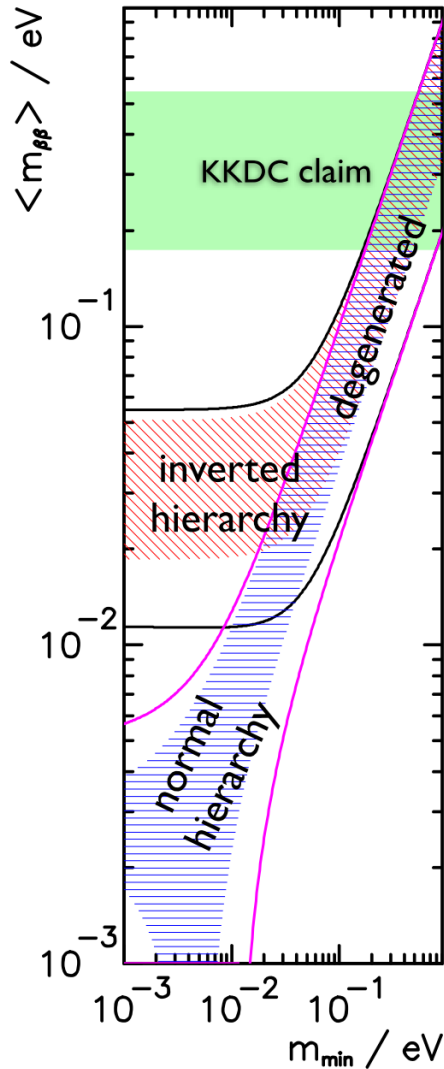


# 復旧までのスケジュール

- 作業工程計画を元に復旧に向けて作業が進行中。
- 2013年7月以降に液シン蒸留を再開。  
結局、実験としては半年+ $\alpha$ の遅れ。
- $^{110m}\text{Ag}$ が1/100に低減すれば<半年の測定で単独でKKDCクレイムを排除可能



# 今後の展望



## Ongoing R & D

- Light collector
- LS replacement
- $\gamma/\beta$  discrimination
- **Open KamLAND**
- New photo sensor
- 
- 

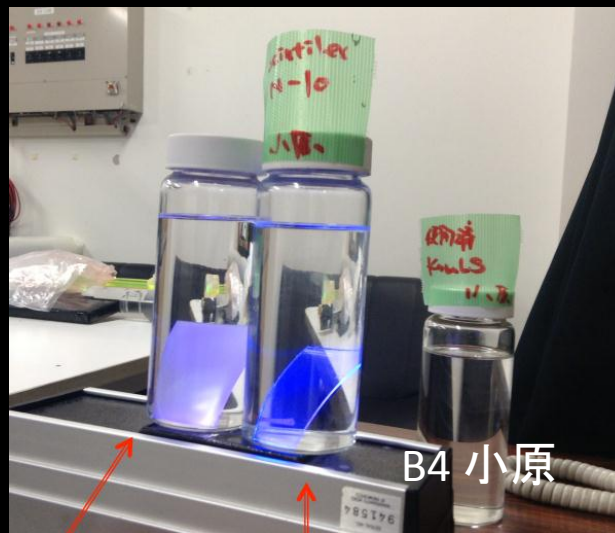
Need detector upgrade to cover inverted region.

# KamLAND 2 ZENにむけたR&D

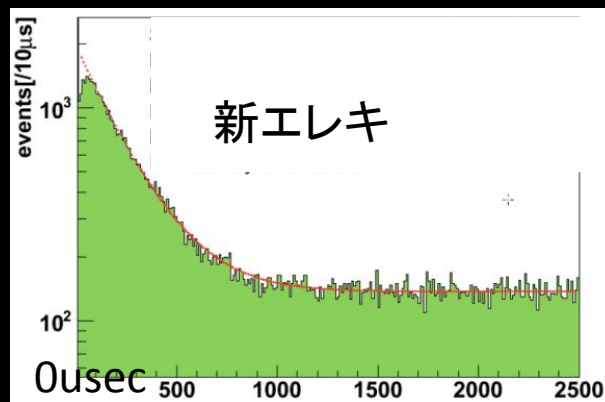
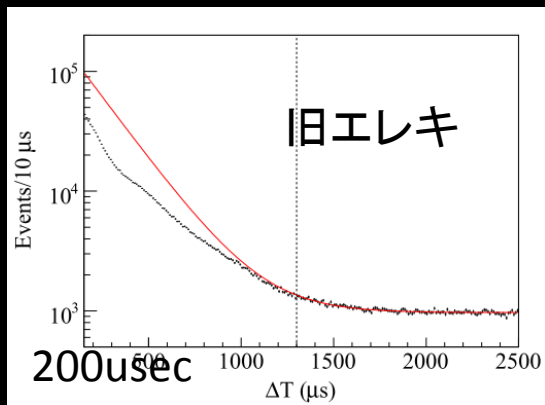
・PMT集光ミラー開発  
⇒2v66 BG低減



・発光性バルーン新素材の開発  
⇒バルーンBGの低減



・新エレキによる $^{10}\text{C}$ 除去に向けたstudy



- ・New LS
- ・Camera
- ・OD PMT upgrade
- ・ID PMT upgrade ...

M2 大木

# まとめ

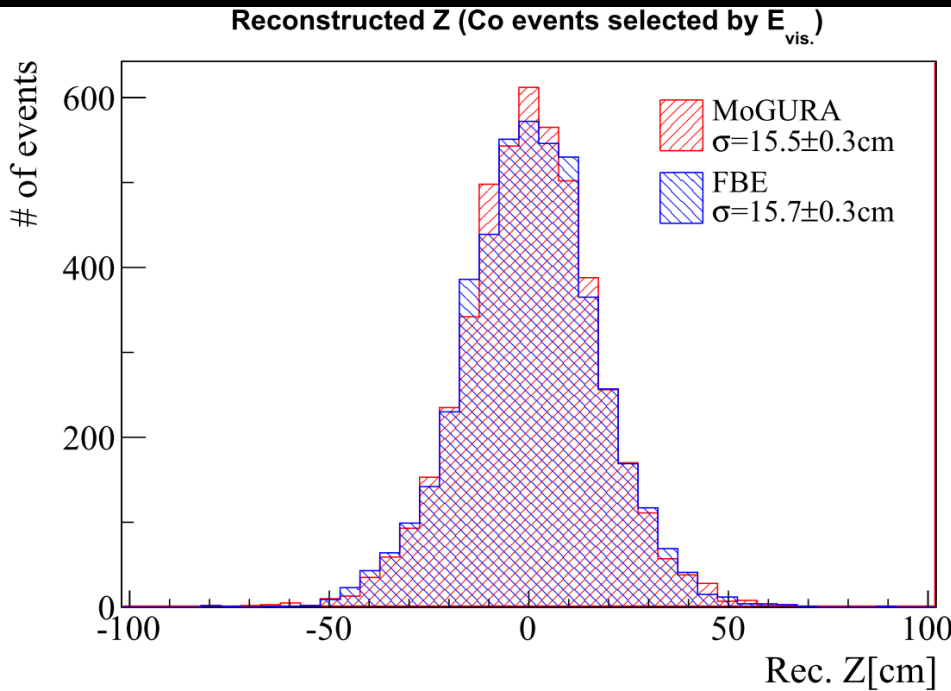
- $0\nu\beta\beta$ 探索はニュートリノ質量・マヨラナ性を解明する、今最も重要な実験の一つである。
- カムランド禅実験は $0\nu\beta\beta$ 探索実験で、世界最高感度の結果 ( $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120-250\text{meV}$ )を発表した。
- 更なる感度向上には $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 除去が必須。除去作業中に火災事故があったが、半年+ $\alpha$ くらいの遅れで再開できそう
- 逆階層領域探索に向けたR&Dも進行中

# Backup

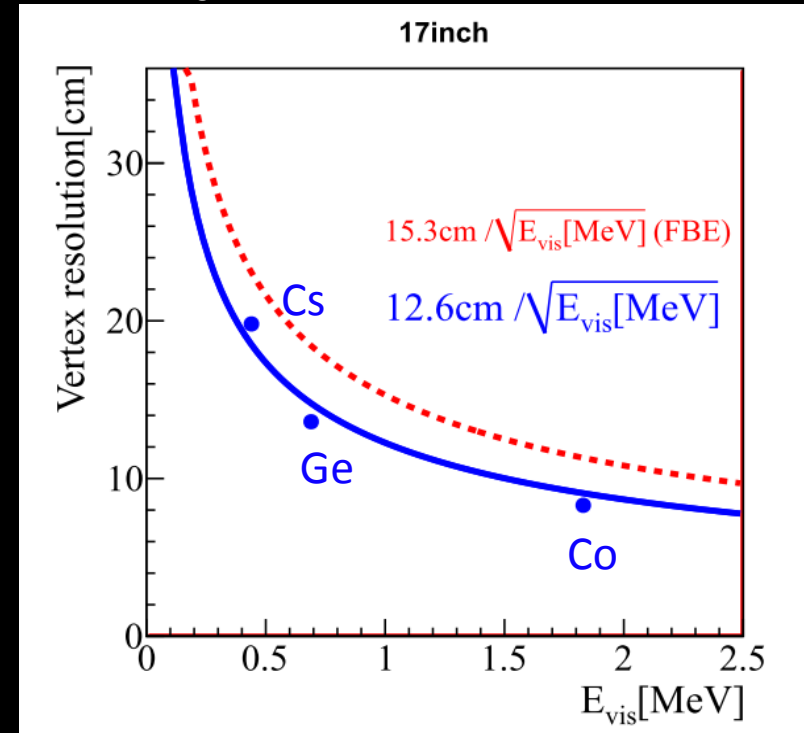
# 僕のお仕事

- 新エレキ(MoGURA)のデータ解析・性能評価

## Vertex distribution with source calibration data



## $E_{vis.}$ VS vertex resolution



解析アルゴリズムの改良→**現行エレキと同程度の性能を証明**

- 検出器の安定性をチェック
  - PMTについて問題を早期に発見し、解決に向けて奮闘中。

# Backup

SUBMITTED TO APJ  
Preprint typeset using L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X style emulatej v. 08/22/09

## CONSTRAINTS ON COSMOLOGY FROM THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POWER SPECTRUM OF THE 2500-SQUARE DEGREE SPT-SZ SURVEY

Z. HOU,<sup>1</sup> C. L. REICHARDT,<sup>2</sup> K. T. STORY,<sup>3,4</sup> B. FOLLIN,<sup>1</sup> R. KEISLER,<sup>3,4</sup> K. A. AIRD,<sup>5</sup> B. A. BENSON,<sup>3,6</sup> L. E. BLEEM,<sup>3,4</sup> J. E. CARLSTROM,<sup>3,4,6,7,8</sup> C. L. CHANG,<sup>3,6,8</sup> H.-M. CHO,<sup>9</sup> T. M. CRAWFORD,<sup>3,7</sup> A. T. CRITES,<sup>3,7</sup> T. DE HAAN,<sup>10</sup> R. DE PUTTER,<sup>12,13</sup> M. A. DOBBS,<sup>10</sup> S. DODELSON,<sup>3,7,11</sup> J. DUDLEY,<sup>10</sup> E. M. GEORGE,<sup>2</sup> N. W. HALVERSON,<sup>14</sup> G. P. HOLDER,<sup>15</sup> W. L. HOLZAPFEL,<sup>2</sup> S. HOOVER,<sup>3,4</sup> J. D. HRUBES,<sup>3,4</sup> M. JOY,<sup>15</sup> L. KNOX,<sup>1</sup> A. T. LEE,<sup>2,10</sup> E. M. LEITCH,<sup>3,7</sup> M. LUEKER,<sup>13</sup> D. LUONG-VAN,<sup>2</sup> J. J. MCMAHON,<sup>17</sup> J. MEHL,<sup>8,2</sup> S. MEYER,<sup>3,4,10,7</sup> M. MILLEA,<sup>1</sup> J. J. MOHR,<sup>18,19,20</sup> T. E. MONTRON,<sup>21</sup> S. PADIN,<sup>3,7,13</sup> T. PLAGGE,<sup>3,7</sup> C. PRYKE,<sup>3,6,7,22</sup> J. E. RUIH,<sup>21</sup> J. T. SAYRE,<sup>21</sup> K. K. SCHAFFER,<sup>3,6,23</sup> L. SHAW,<sup>10</sup> E. SHIROKOFF,<sup>2</sup> H. G. SPIELER,<sup>16</sup> Z. STANISZEWSKI,<sup>21</sup> A. A. STARK,<sup>21</sup> A. T. VAN ENGELEN,<sup>10</sup> K. VANDERLINDE,<sup>10</sup> J. D. VIEIRA,<sup>13</sup> R. WILLIAMSON,<sup>3,7</sup> AND O. ZAHN<sup>25</sup>

Submitted to *ApJ*

### ABSTRACT

We explore extensions to the standard  $\Lambda$ CDM cosmological model using new measurements of the cosmic microwave background (CMB) from the South Pole Telescope (SPT). Adding SPT measurements to *WMAP7* significantly improves constraints on possible extensions to the  $\Lambda$ CDM model; the addition of low-redshift measurements of the Hubble constant ( $H_0$ ) and baryon acoustic oscillation feature (BAO) leads to further improvements. Before combining these datasets, we check for consistency in the  $\Lambda$ CDM model between measurements of the CMB (SPT+*WMAP7*),  $H_0$  and BAO, and find evidence for some tension between the datasets. Within the CMB data alone, we find only weak support for physics beyond the  $\Lambda$ CDM model due to a slight trend of decreasing power at smaller angular scales, relative to the prediction of the  $\Lambda$ CDM model. This trend could be due to a logarithmic scale dependence of the power-law index of the primordial power spectrum,  $dn_s/d\ln k$ . Alternatively, the trend could arise either from adjustments at small or large scales. The power at small scales is sensitive to the damping scale which is influenced by both the helium abundance,  $Y_p$  and the effective number of neutrino species,  $N_{\text{eff}}$ . The power at large scales is affected by the integrated Sachs-Wolfe effect which is sensitive to the sum of neutrino masses,  $\sum m_\nu$ . These extensions have similar observational consequences and are partially degenerate when considered simultaneously. These degeneracies can weaken or enhance the apparent deviation of any single extension from the  $\Lambda$ CDM model. Of the 6 one-parameter model extensions considered, we find the CMB data to have the largest statistical preference for running with  $-0.046 < dn_s/d\ln k < -0.003$  at 95% confidence. This preference for  $dn_s/d\ln k < 0$  strengthens to  $2.7\sigma$  for the combination of CMB+BAO+ $H_0$ . Running of this magnitude is difficult to explain in the context of single-field, slow-roll inflation models. When varying the effective number of massless neutrino species, we find  $N_{\text{eff}} = 3.62 \pm 0.48$  for the CMB data. Adding  $H_0$  and BAO measurements tightens the constraint to  $N_{\text{eff}} = 3.71 \pm 0.35$ ,  $1.9\sigma$  above the expected value for three neutrino species. Larger values of  $N_{\text{eff}}$  relieve the mild tension between the CMB,  $H_0$ , and BAO datasets in  $\Lambda$ CDM. Instead fixing  $N_{\text{eff}}$  to the standard value and allowing the sum of neutrino masses to be free, we find the combined data from the CMB, BAO,  $H_0$ , and Sunyaev-Zel'dovich selected galaxy cluster abundances prefer nonzero neutrino masses at  $3.0\sigma$ . The median value is  $\sum m_\nu = (0.32 \pm 0.11)$  eV, a factor of six above the lower mass bound set by neutrino oscillation observations. All datasets except  $H_0$  show some preference for massive neutrinos; data combinations including  $H_0$  favor nonzero masses only if BAO data are also included. We also constrain the two-parameter extensions  $N_{\text{eff}} + \sum m_\nu$  and  $N_{\text{eff}} + Y_p$  to explore constraints on sterile neutrinos and big bang nucleosynthesis respectively.

*Subject headings:* cosmic microwave background, cosmological parameters, early Universe

<sup>1</sup> Department of Physics, University of California, One Shields Avenue, Davis, CA, USA 95616

<sup>2</sup> Department of Physics, University of California, Berkeley, CA, USA 94720

<sup>3</sup> Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL, USA 60637

<sup>4</sup> Department of Physics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL, USA 60637

<sup>5</sup> University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL, USA 60637

<sup>6</sup> Enrico Fermi Institute, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL, USA 60637

<sup>7</sup> Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL, USA 60637

<sup>8</sup> Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Avenue, Argonne,

IL, USA 60439

<sup>9</sup> NIST Quantum Devices Group, 325 Broadway Mailcode 817-03, Boulder, CO, USA 80305

<sup>10</sup> Department of Physics, McGill University, 3600 Rue University, Montreal, Quebec H3A 2T8, Canada

<sup>11</sup> Center for Particle Astrophysics, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, USA 60510

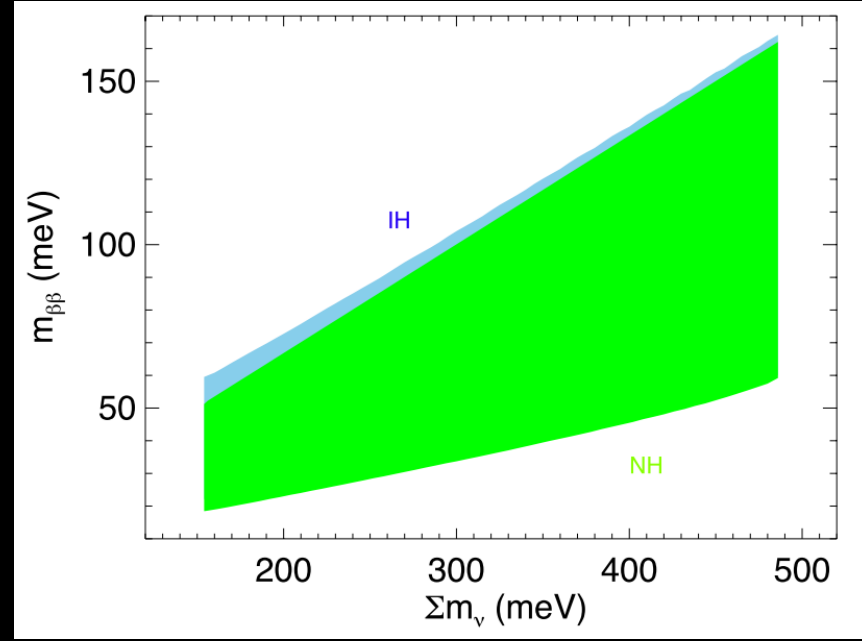
<sup>12</sup> Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA, USA 91109

<sup>13</sup> California Institute of Technology, MS 249-17, 1216 E. California Blvd., Pasadena, CA, USA 91125

<sup>14</sup> Department of Astrophysical and Planetary Sciences and Department of Physics, University of Colorado, Boulder, CO, USA 80309

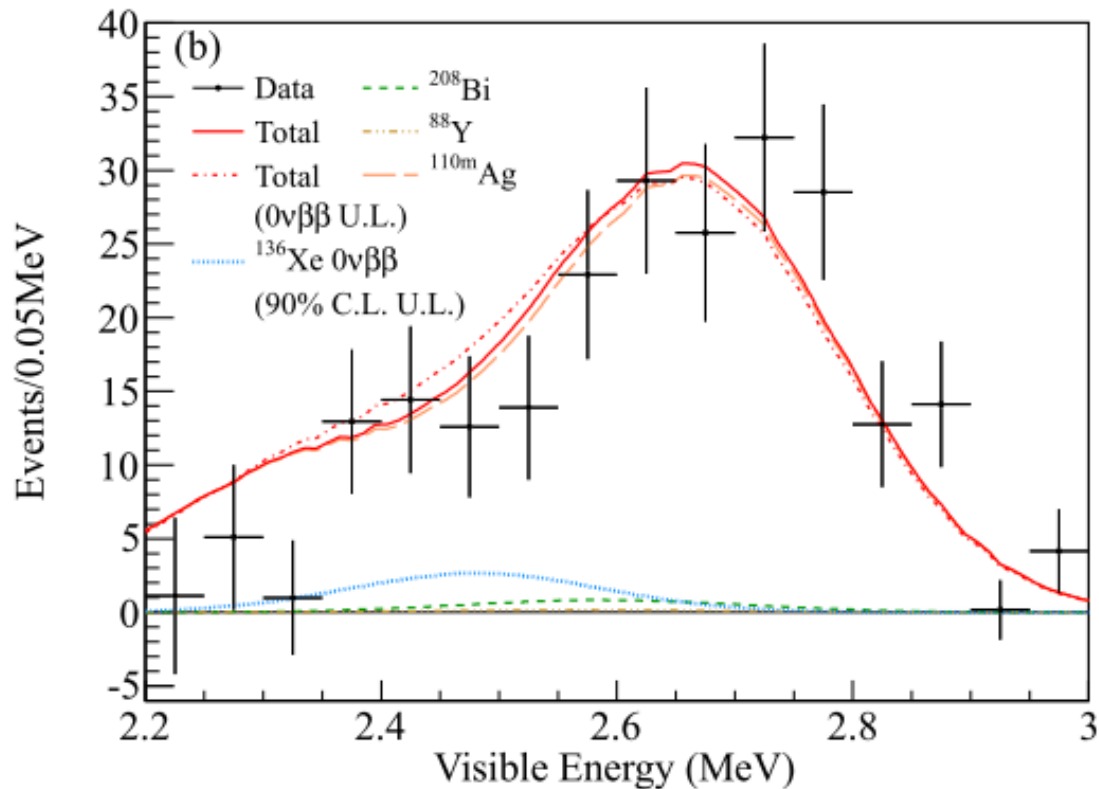
<sup>15</sup> Department of Space Science, VP62, NASA Marshall Space

The median value is  $\sum m_\nu = (0.32 \pm 0.11)$  eV



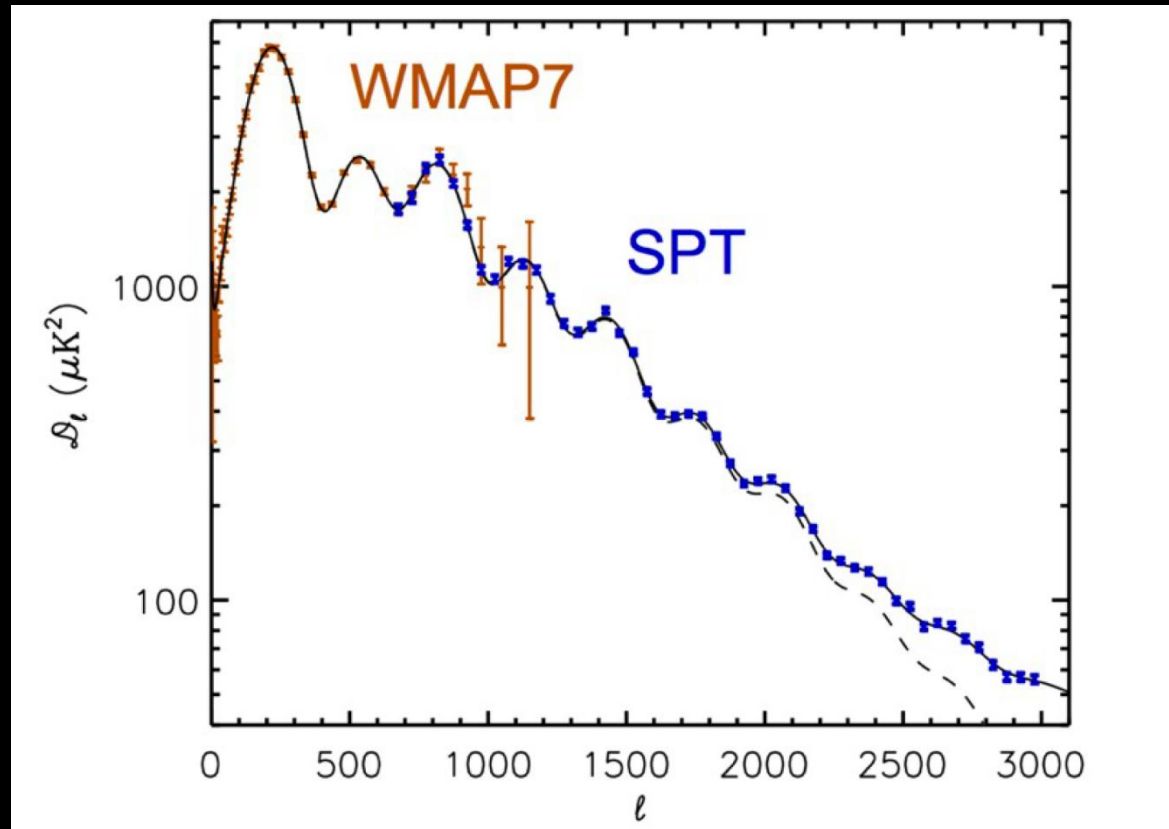
arXiv:1301.2901v1 J.J.Gomez etc

# Backup





# Backup



# Backup

