

# KamLANDの現状と将来

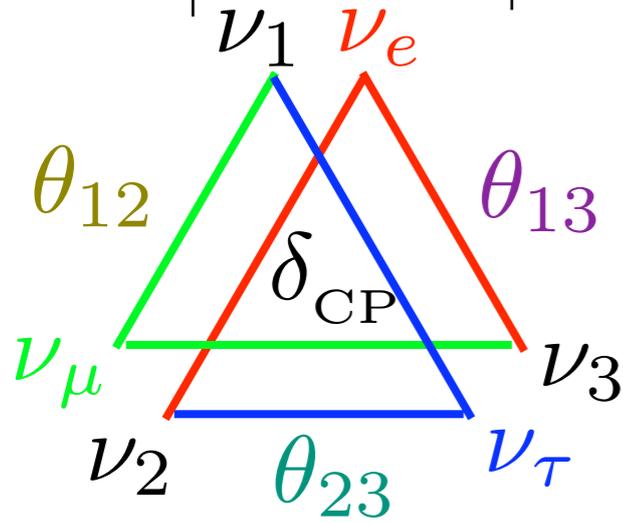
原子炉ニュートリノ

地球ニュートリノ

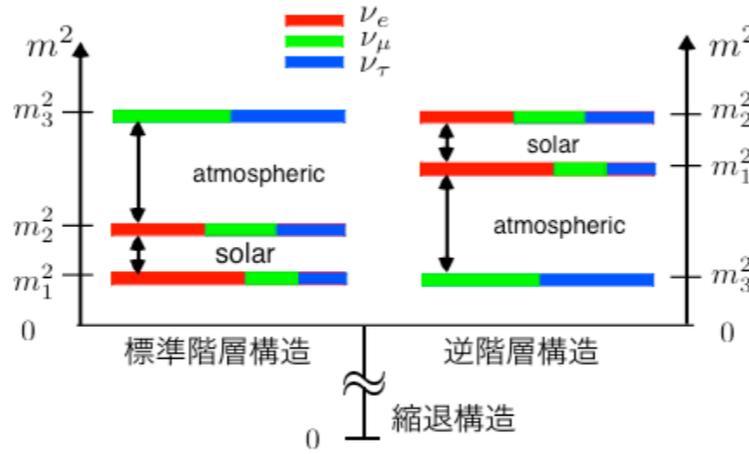
太陽ニュートリノ

ニュートリノレス二重ベータ崩壊

# 混合角



# 質量



# マヨラナ性

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

## ニュートリノ振動

(スーパー) カミオカンデ、カムランド、K2K、T2K (建設中) の活躍により日本が世界を大きくリード

## 質量二乗差

## 質量絶対値

## 二重ベータ崩壊

現在の感度 0.2~0.4eV  
将来計画の感度 0.01~0.03eV

いつ大発見があっても不思議でない。

## ベータ崩壊

現在の感度 2eV  
将来計画の感度 0.2eV

あまり感度が  
高くない。

## 宇宙論

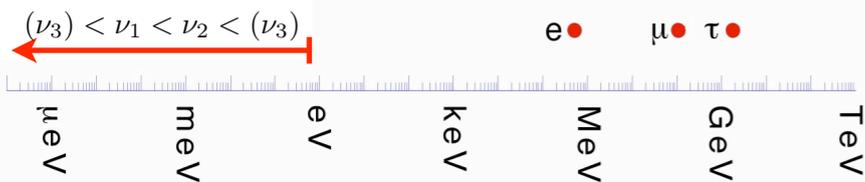
現在の感度 0.2~0.7eV  
将来計画の感度 0.05eV

間接的な測定

波及する研究

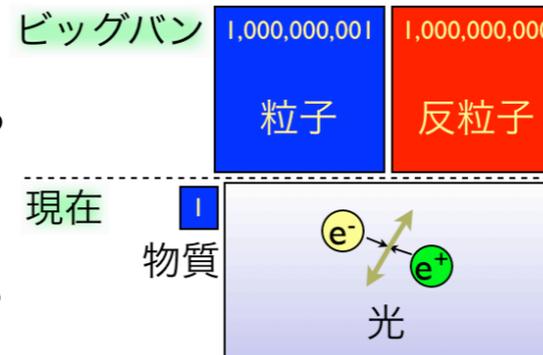
## 素粒子の質量

ニュートリノは突出して軽い



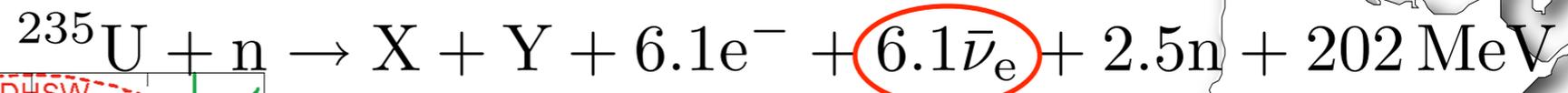
なぜ  $\nu$  は軽いのか?  
(シーソー機構)

真の大統一理論は?

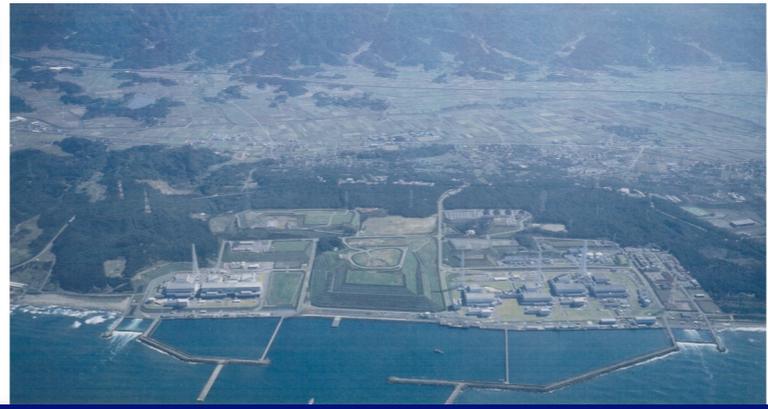
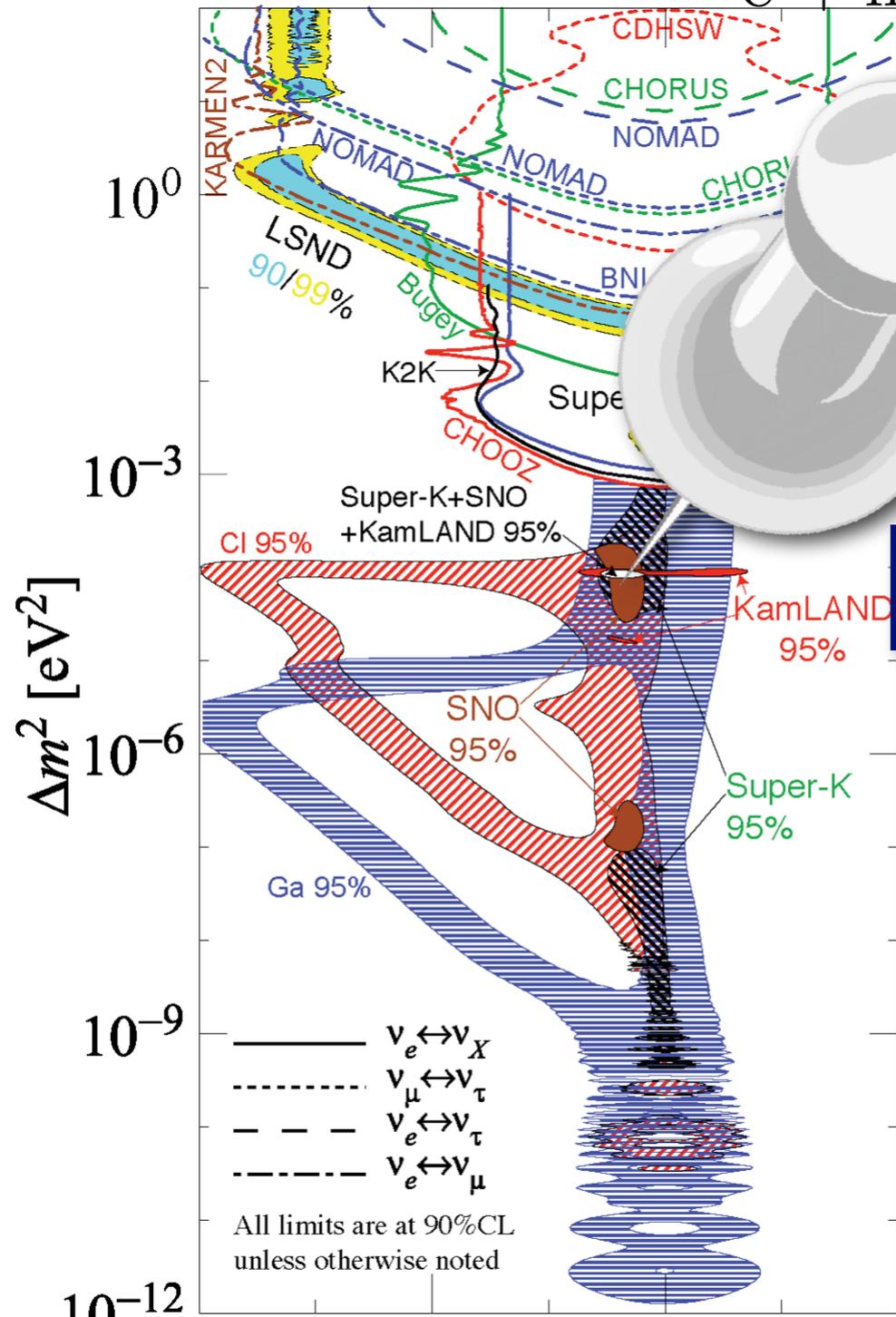


なぜ物質は生き残ったのか?  
(レプトジェネシス理論)

# 1. 原子炉起源反電子ニュートリノの高精度精密測定

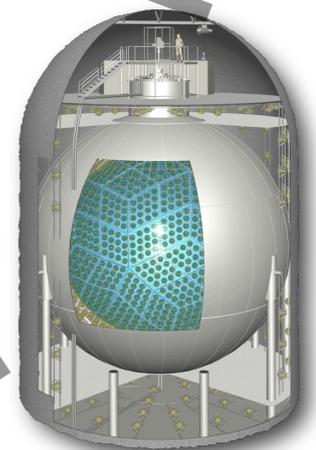
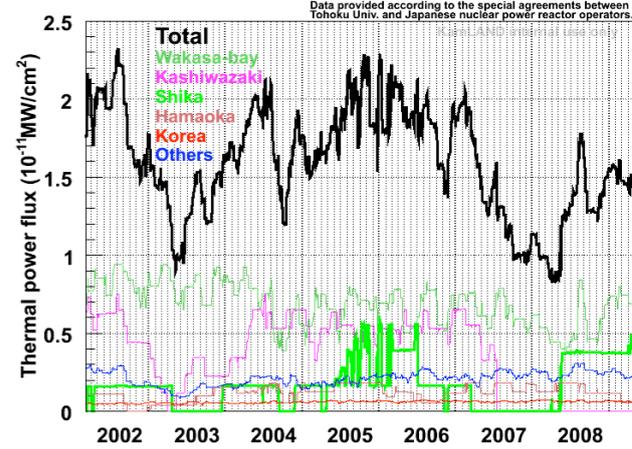


その他  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{241}\text{Pu}$



Tomari

(175 ± 35) km の距離に70GW (世界の総原子力発電量の~7%) が集中



原子炉ニュートリノによる  
 太陽ニュートリノ問題の解決と  
 ニュートリノ振動パラメータの精密測定

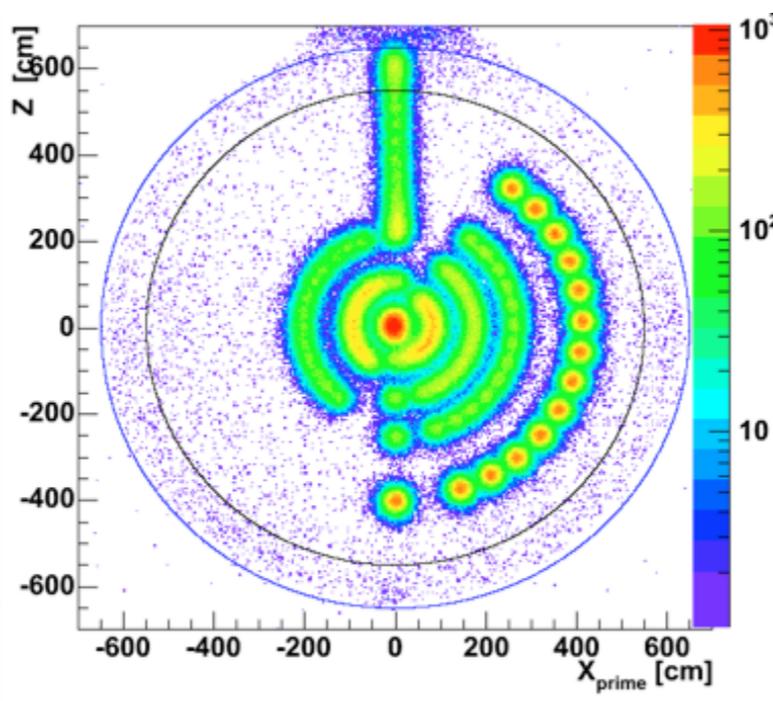
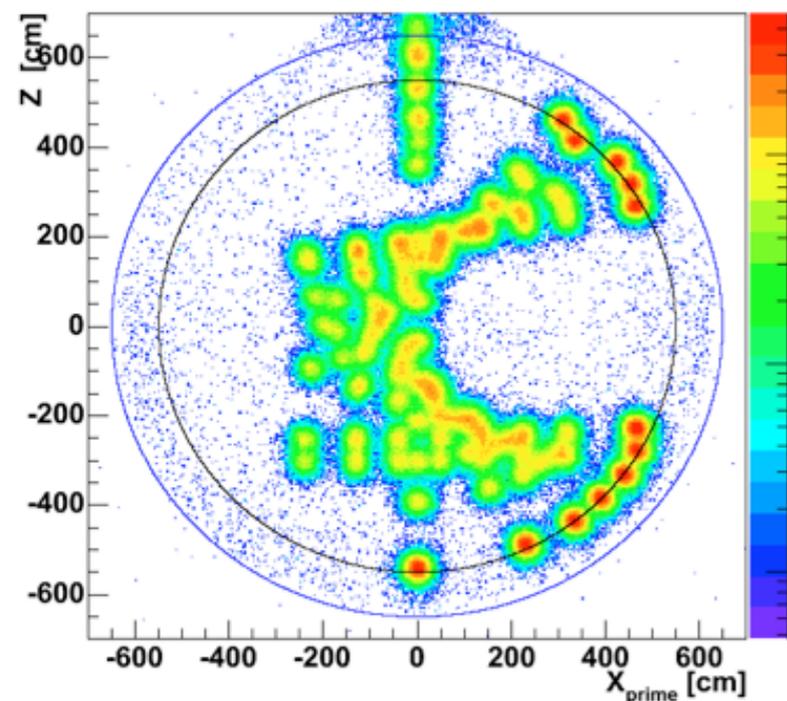
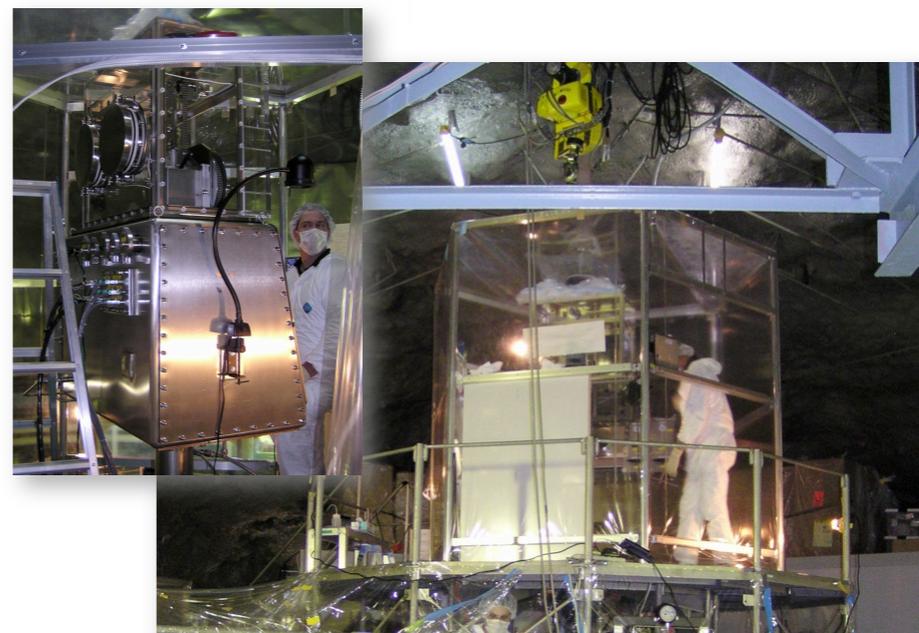
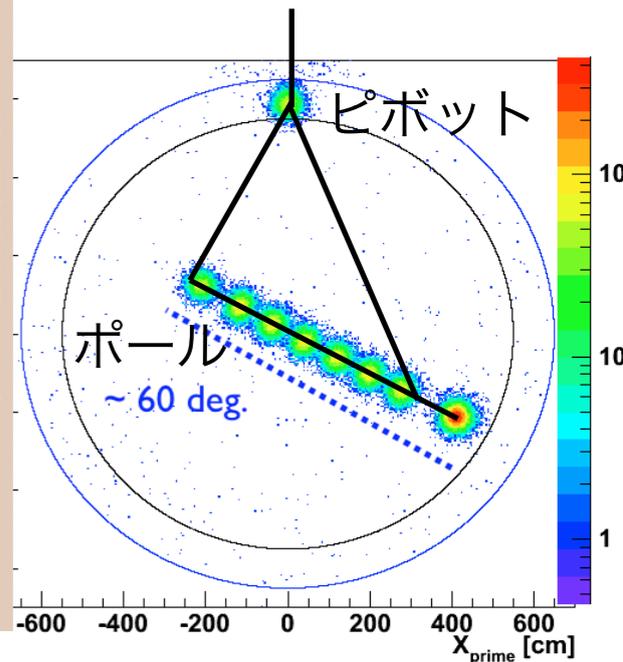
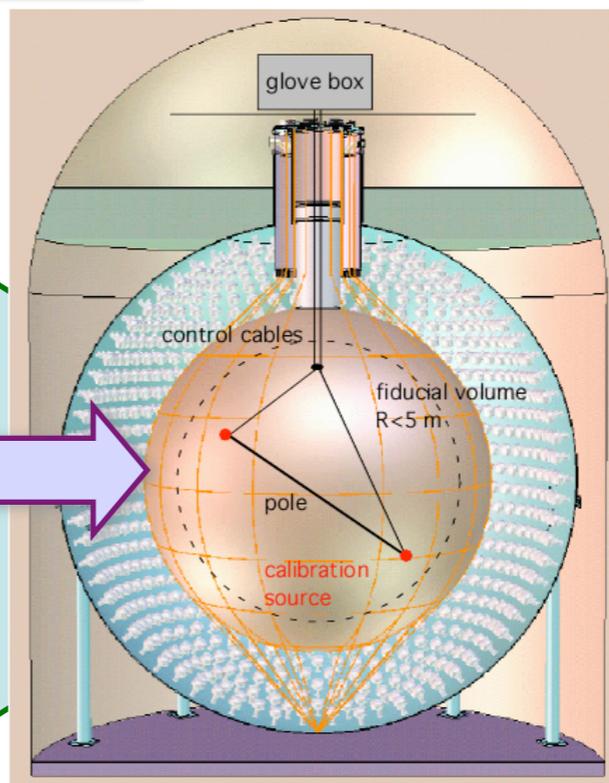
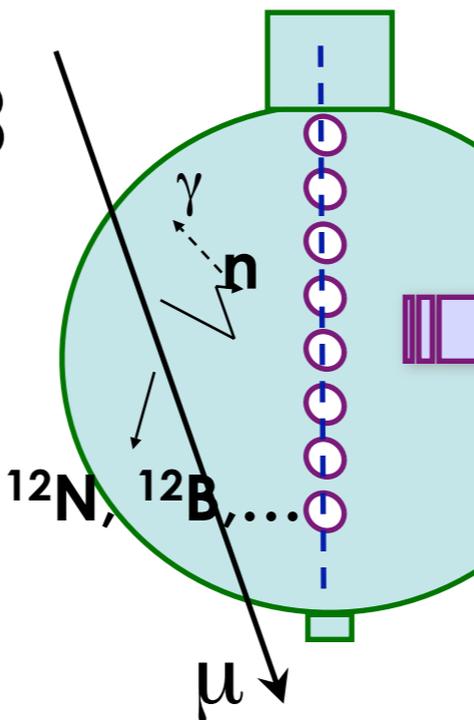
# 4π校正装置の導入

JINST 4 (2009) P04017

PRL94,081801 (2005)での系統誤差

Systematic	%
Fiducial volume	4.7
Energy threshold	2.3
Efficiency of cuts	1.6
Livetime	0.06
Reactor power	2.1
Fuel composition	1.0
$\bar{\nu}_e$ spectra	2.5
Cross section	0.2
Total	6.5

1.8



多種の放射線源を用いた全位置での校正

$^{203}\text{Hg}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , PoC, AmBe

# 210Po13C線源によるバックグラウンドの直接評価

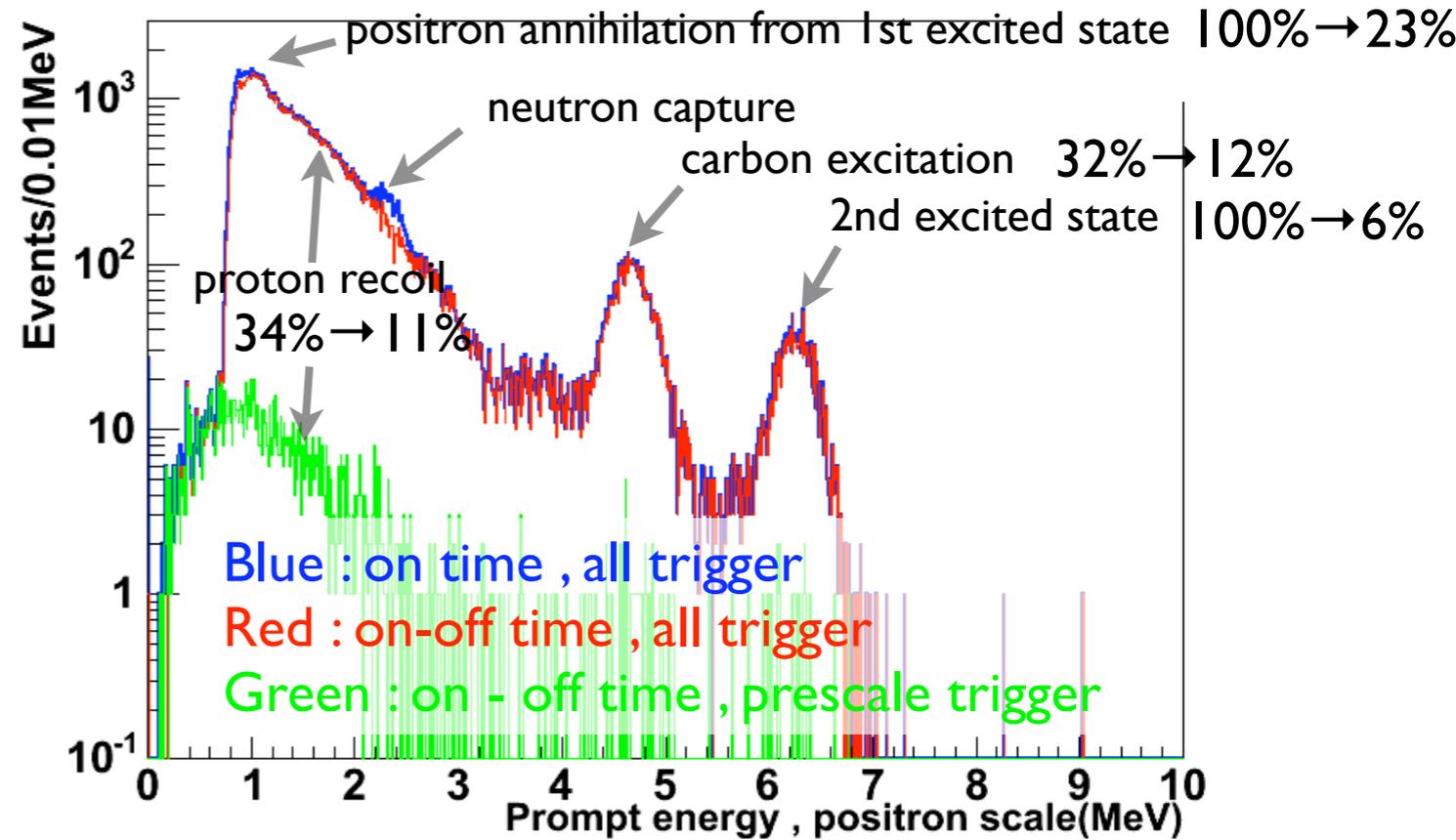
## カムランドでの210Po13C線源による校正

PRL94,081801(2005) でのBG (>2.6MeV)

偶発同時事象	2.69 ± 0.02
宇宙線起源	4.8 ± 0.9
高速中性子	< 0.9
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	10.3 ± 7.1
<b>Total</b>	<b>17.8 ± 7.3</b>

誤差の主因は生成断面積の不定性

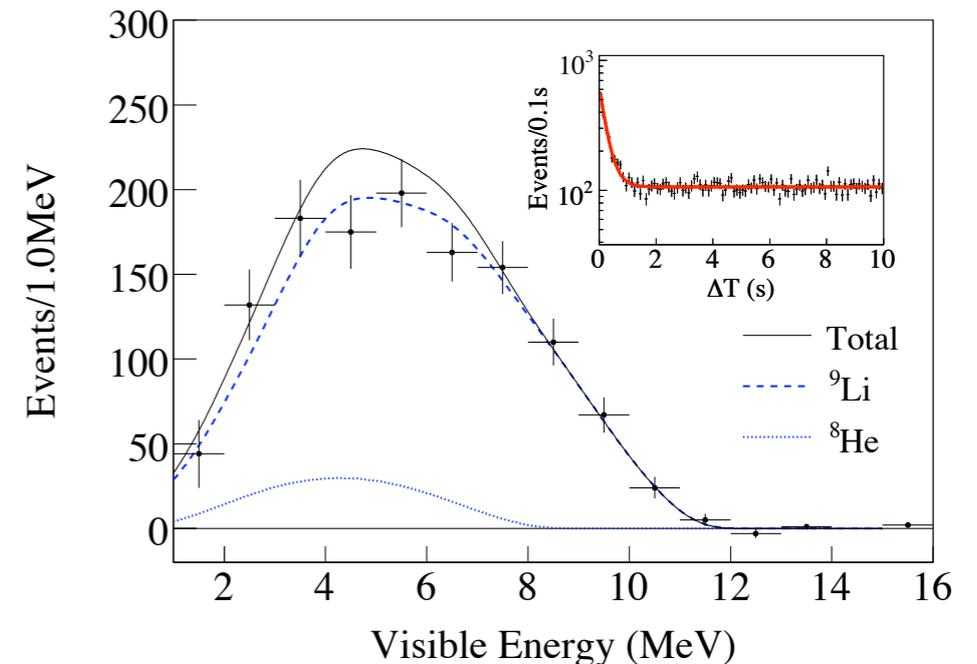
2009以降このバックグラウンドは消滅。



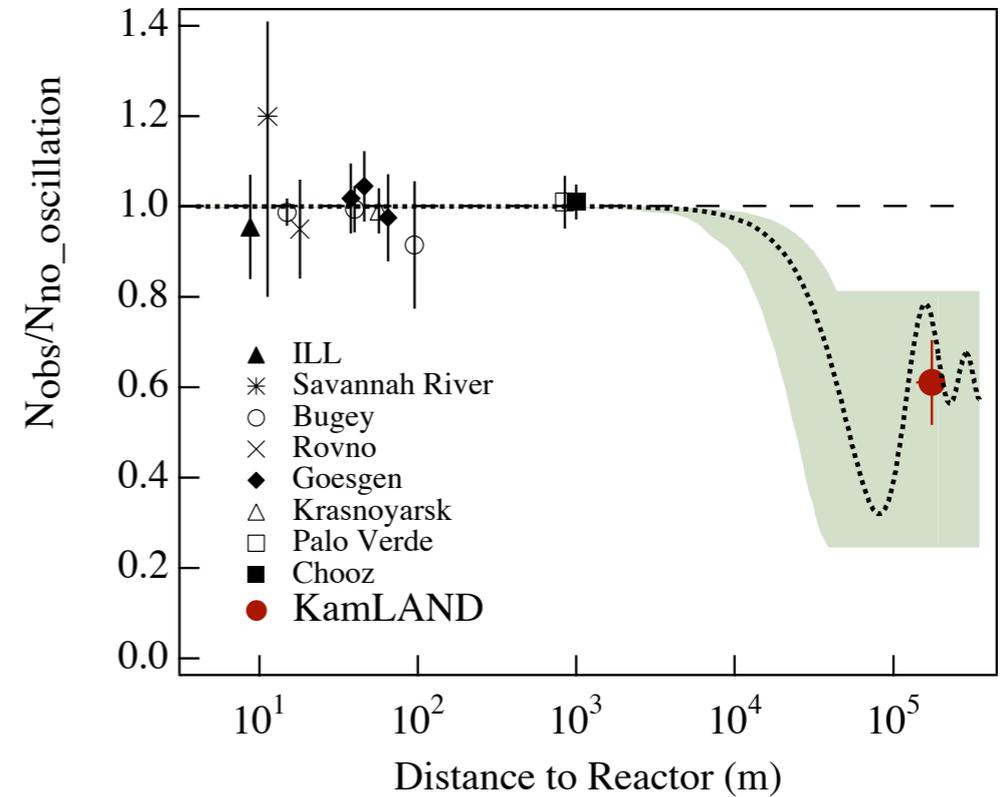
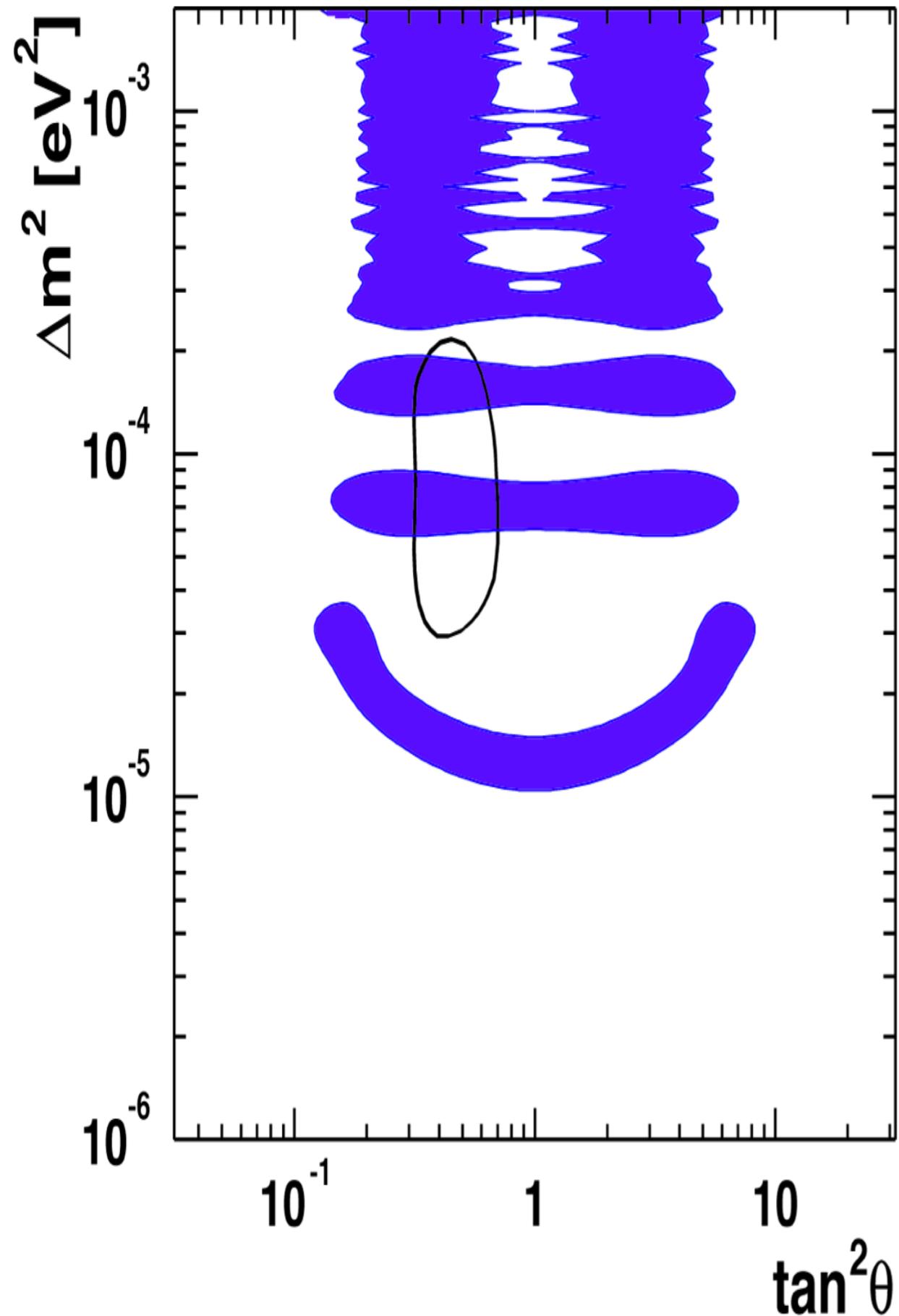
# 宇宙線起源バックグラウンドの精密評価

PR C に投稿中 (arXiv 0907.0066)

原子核	寿命	崩壊様式	生成率 ( $\times 10^{-7}(\mu \cdot (\text{g}/\text{cm}^2))^{-1}$ )	シャワーミュオン当 たりの生成割合
$n$	207.5 $\mu\text{s}$	2.225 MeV (capt. $\gamma$ )	2787 ± 311	64 ± 5%
$^{12}\text{B}$	29.1 ms	13.4 MeV ( $\beta^-$ )	42.9 ± 3.3	68 ± 2%
$^{12}\text{N}$	15.9 ms	17.3 MeV ( $\beta^+$ )	1.8 ± 0.4	77 ± 14%
$^8\text{Li}$	1.21 s	16.0 MeV ( $\beta^- \alpha$ )	12.2 ± 2.6	65 ± 17%
$^8\text{B}$	1.11 s	18.0 MeV ( $\beta^+ \alpha$ )	8.4 ± 2.4	78 ± 23%
$^9\text{C}$	182.5 ms	16.5 MeV ( $\beta^+$ )	3.0 ± 1.2	91 ± 32%
$^8\text{He}$	171.7 ms	10.7 MeV ( $\beta^- \gamma n$ )	0.7 ± 0.4	76 ± 45%
$^9\text{Li}$	257.2 ms	13.6 MeV ( $\beta^- \gamma n$ )	2.2 ± 0.2	77 ± 6%
$^{11}\text{C}$	29.4 min	1.98 MeV ( $\beta^+$ )	866 ± 153	62 ± 10%
$^{10}\text{C}$	27.8 s	3.65 MeV ( $\beta^+ \gamma$ )	16.5 ± 1.9	76 ± 6%
$^{11}\text{Be}$	19.9 s	11.5 MeV ( $\beta^-$ )	1.1 ± 0.2	74 ± 12%



# 達成状況 1 原子炉反ニュートリノ観測

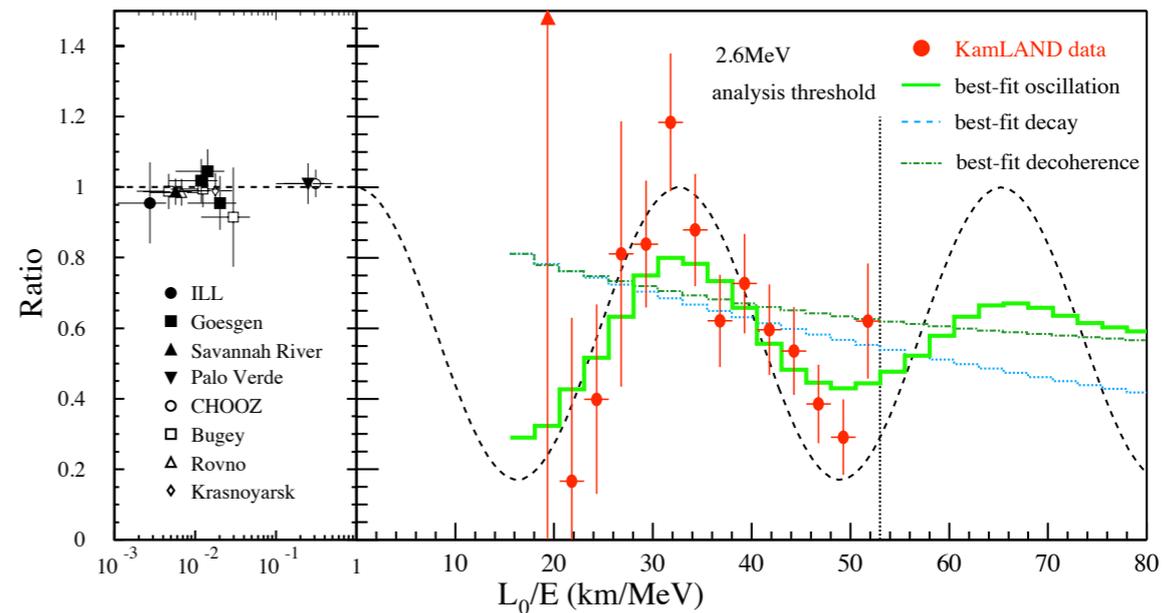
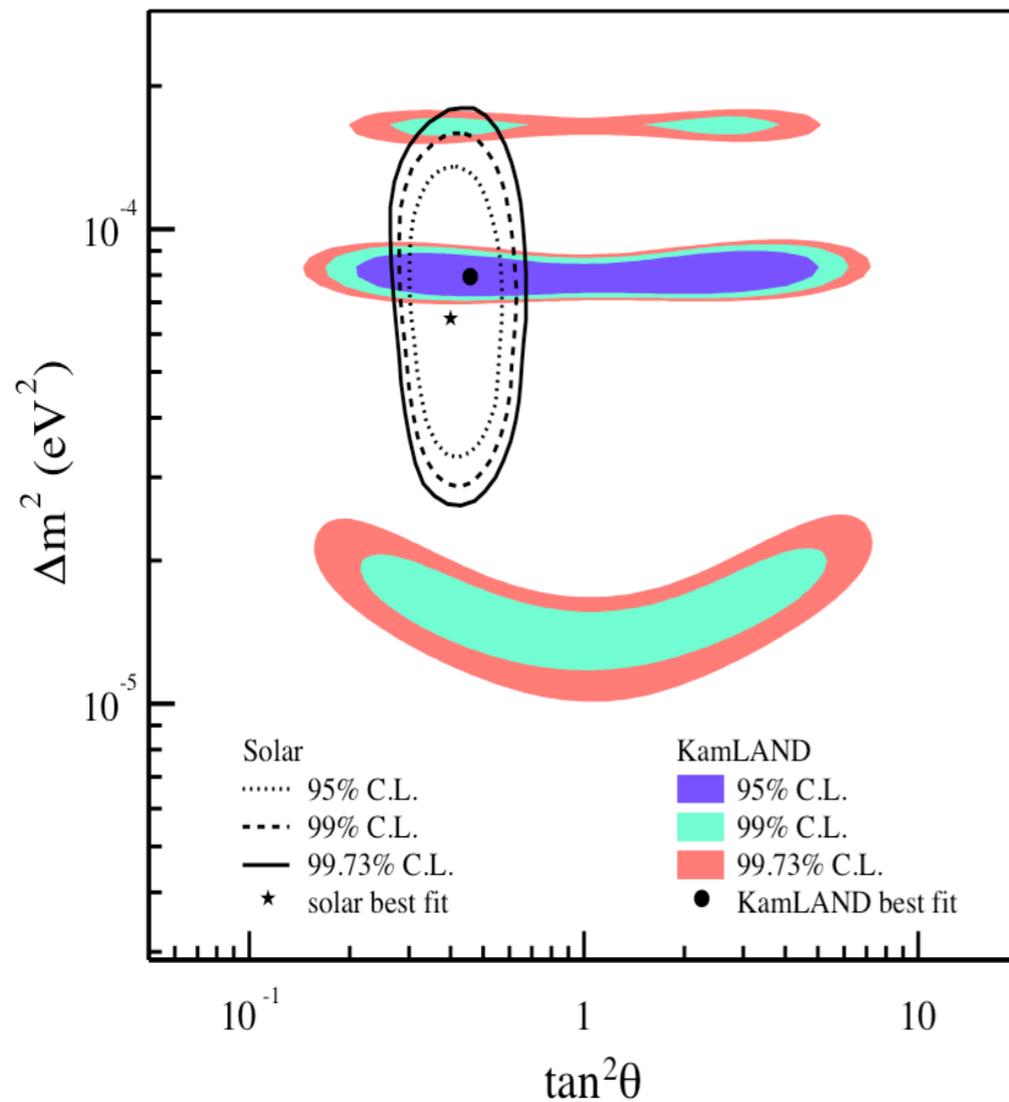


原子炉ニュートリノ消失の証拠  
30年来の  
太陽ニュートリノ欠損問題を解決

原子炉反電子ニュートリノ消失の初検出

Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 021802 (1608)

# 達成状況 1 原子炉反ニュートリノ観測



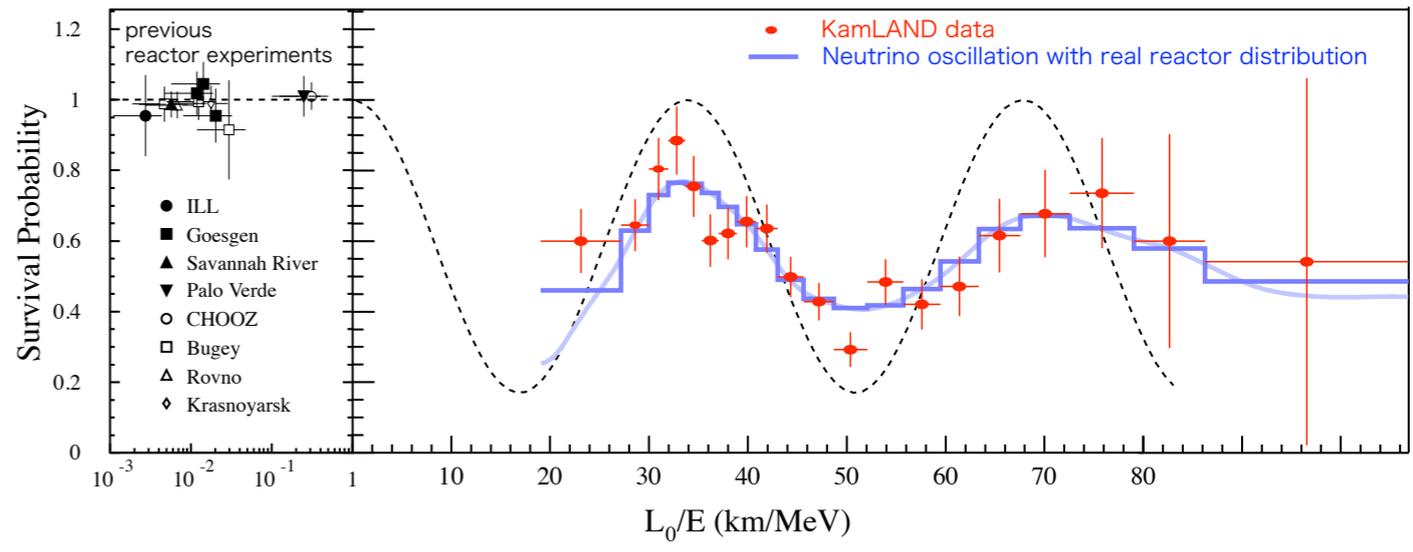
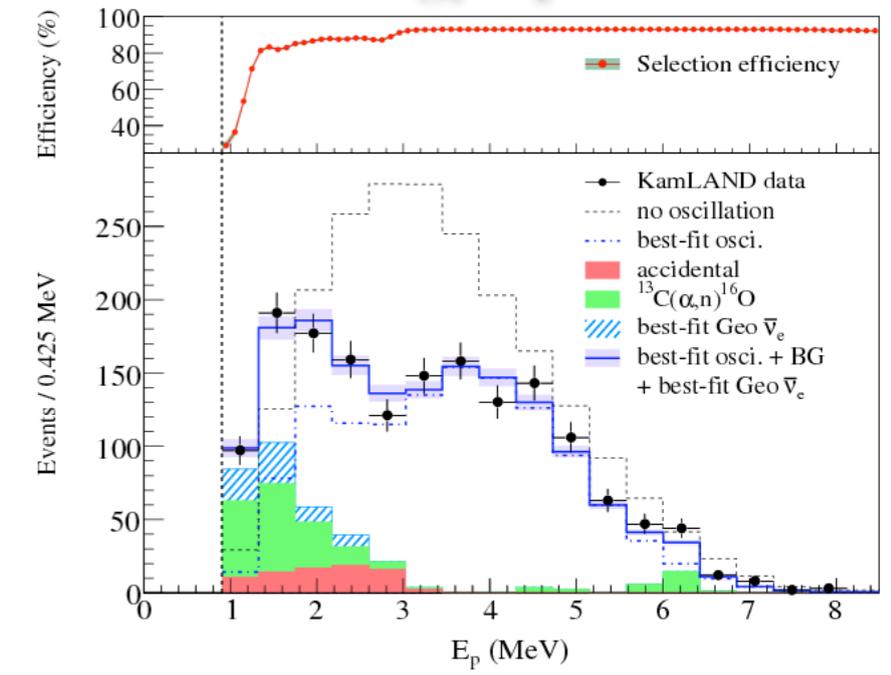
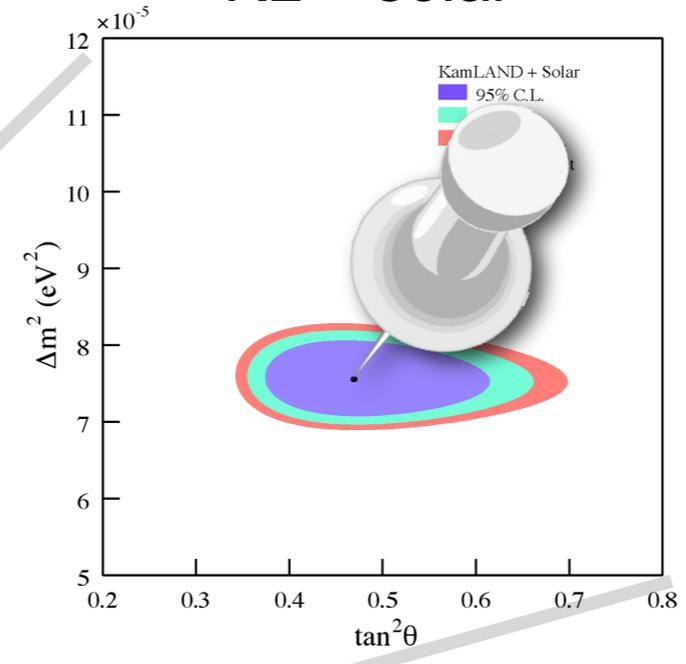
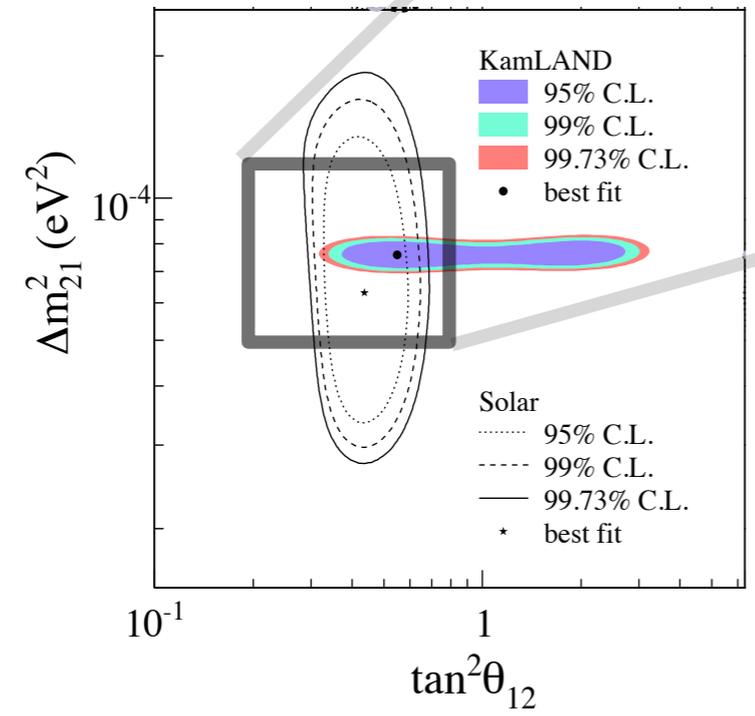
## ニュートリノ振動の証拠

ニュートリノ振動の直接証拠

# 達成状況 1

KL + solar

Energy Spectrum



ニュートリノ振動パラメータの精密測定を達成

振動の2サイクルを観測

$$\tan^2 \theta = 0.56^{+0.14}_{-0.09}$$

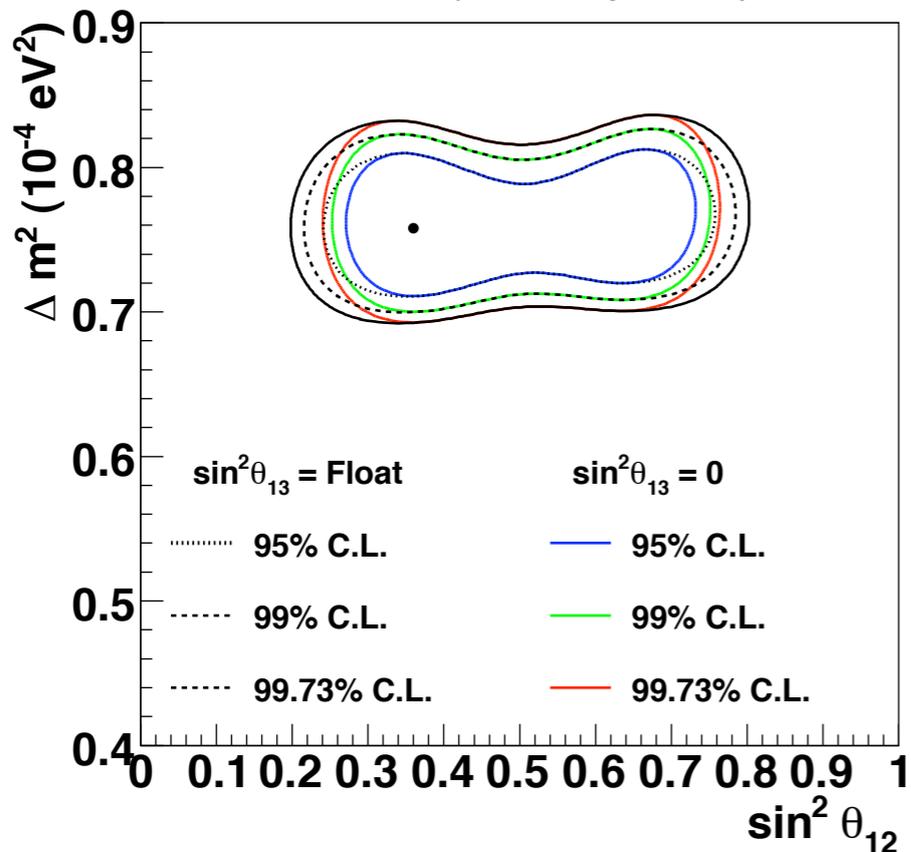
$$\Delta m^2 = 7.58^{+0.21}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

精度2.8% !!

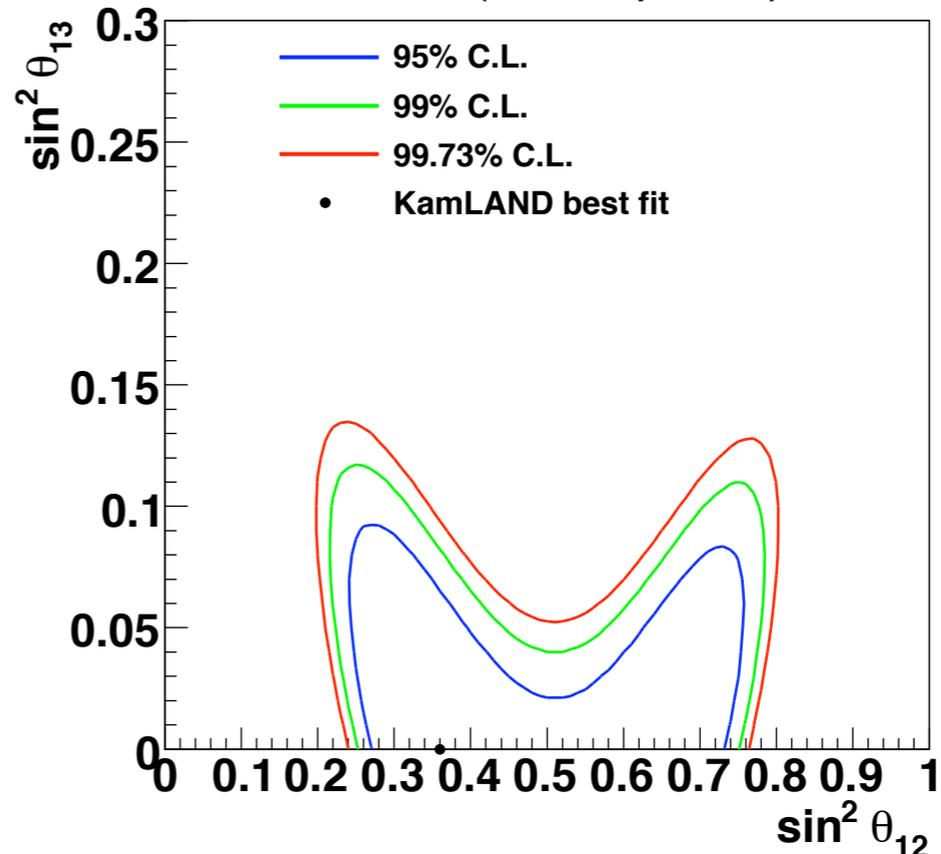
ニュートリノ振動の精密測定

# Some sensitivity on $\theta_{13}$

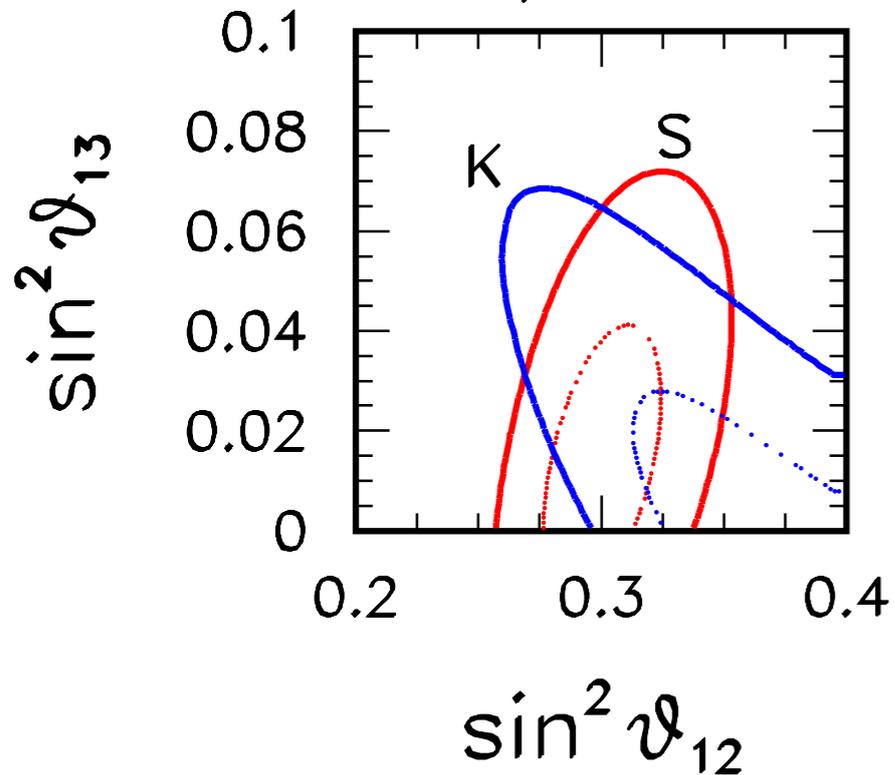
KamLAND(Rate+Shape+Time)



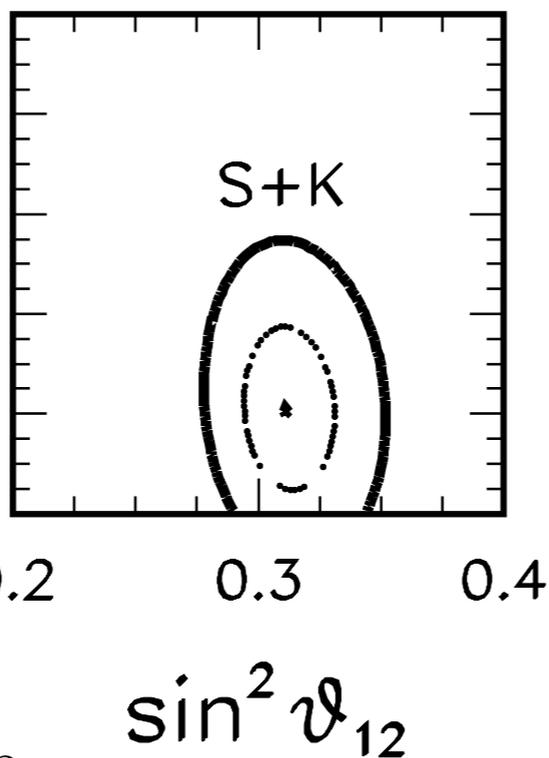
KamLAND(Rate+Shape+Time)



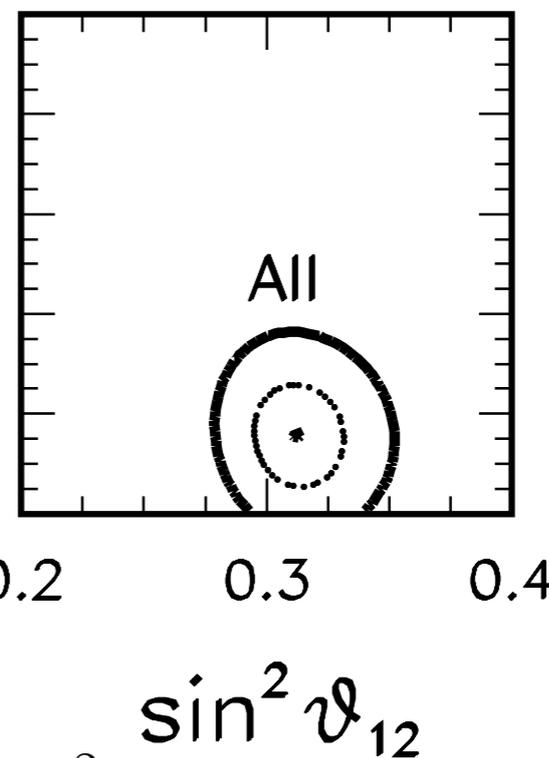
Solar, KamLAND



Solar & KamLAND



+ Atm. & LBL & CHOOZ



PRL101:141801(2008)

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.021 \pm 0.017 \quad \sin^2 \theta_{13} = 0.016 \pm 0.010$$

混合核の誤差はまだちいさくできるか？

# さらなる高精度化

TABLE I. Estimated systematic uncertainties relevant for the neutrino oscillation parameters  $\Delta m_{21}^2$  and  $\theta_{12}$ .

	Detector-related (%)		Reactor-related (%)	
$\Delta m_{21}^2$	Energy scale	1.9	$\bar{\nu}_e$ -spectra [7]	0.6
Event rate	Fiducial volume	1.8	$\bar{\nu}_e$ -spectra	2.4
	Energy threshold	1.5	Reactor power	2.1
	Efficiency	0.6	Fuel composition	1.0
	Cross section	0.2	Long-lived nuclei	0.3

原子炉 $\theta_{13}$ 実験に期待  
新炉の横での測定も可能か？

2.4 → 1%?  
2.1 → 0.8%?    4.1% → <3%?

炉出力の誤差を統計的に扱えるか検討中    J.Phys.G36:045002,2009

最大誤差要因の熱水流量測定 (ベンチュリ式 → 超音波式)

スケールで誤差が蓄積    東電は全炉に装備

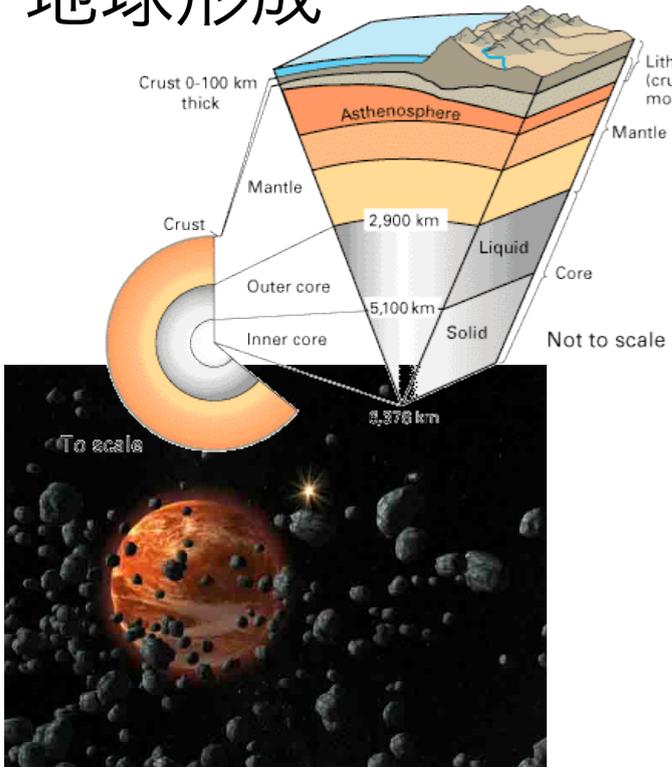
TABLE II. Estimated backgrounds after selection efficiencies.

Background	Contribution
Accidentals	$80.5 \pm 0.1$
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	$13.6 \pm 1.0$
Fast neutron & Atmospheric $\nu$	$<9.0$
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}_{gs}, np \rightarrow np$	<del><math>157.2 \pm 17.3</math></del>
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}_{gs}, {}^{12}\text{C}(n, n'){}^{12}\text{C}^* (4.4 \text{ MeV } \gamma)$	<del><math>6.1 \pm 0.7</math></del>
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 1st exc. state (6.05 MeV $e^+e^-$ )	<del><math>15.2 \pm 3.5</math></del>
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 2nd exc. state (6.13 MeV $\gamma$ )	<del><math>3.5 \pm 0.2</math></del>
Total	$276.1 \pm 23.5$

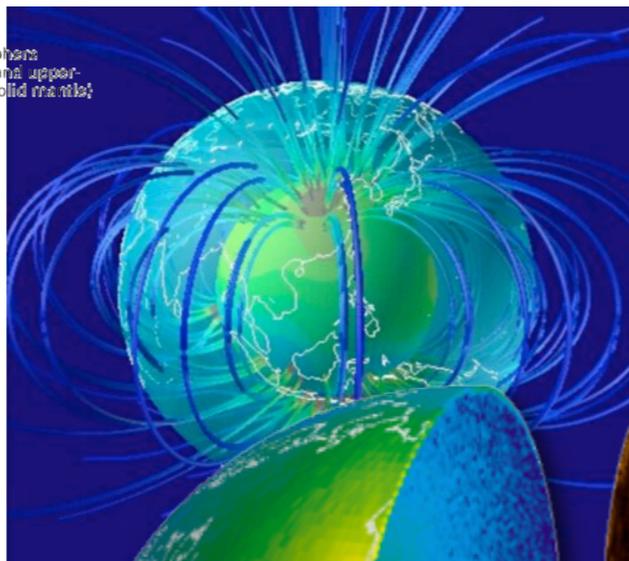
純化によりほぼ無視できる。

# 2. 地球起源反電子ニュートリノの高精度精密測定

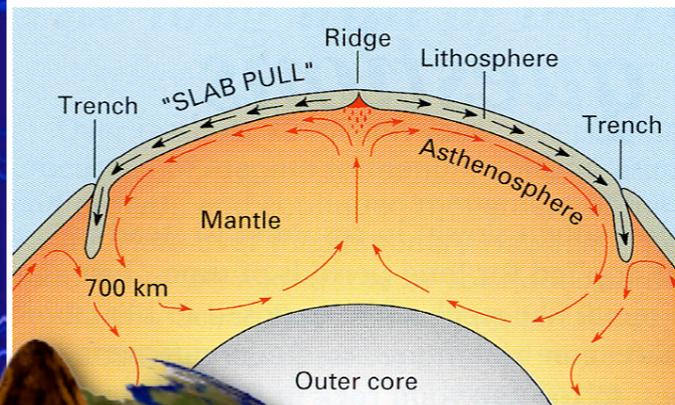
## 地球形成



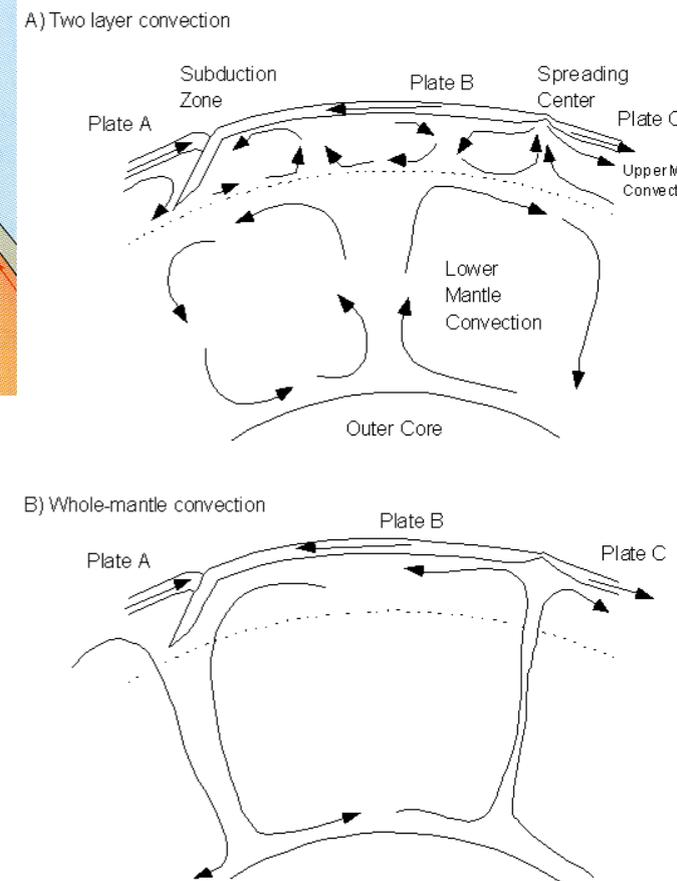
## 地磁気生成機構



## 地球ダイナミクス



## 長年の謎へ



# ニュートリノ 地球物理の推進

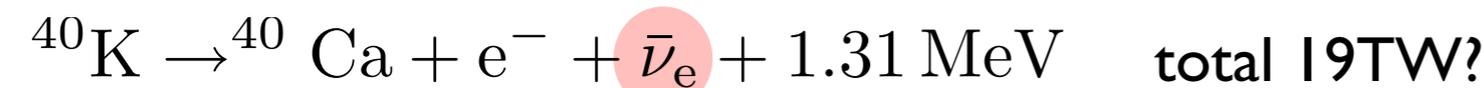
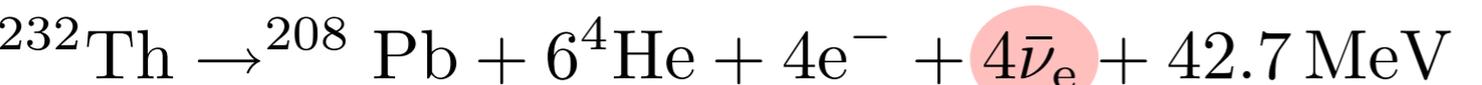
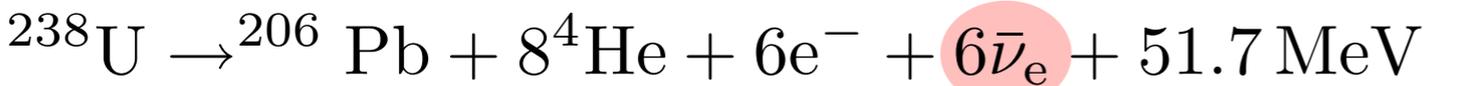
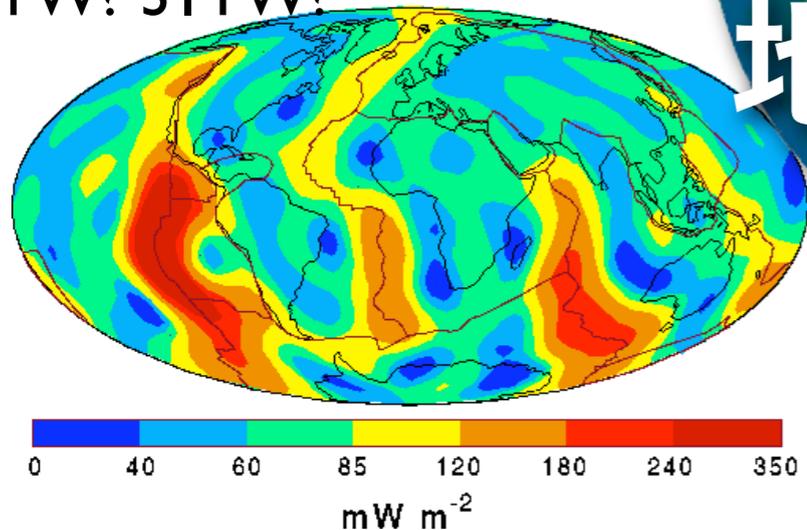
地球科学の5大問題に関連

### 5 Big Questions:

McDonough in neutrino 2008

- △ What is the Planetary K/U ratio?  
*Potassium neutrino detection!* *planetary volatility curve*
- Radiogenic contribution to heat flow?  
*secular cooling*
- Distribution of reservoirs in mantle?  
*whole vs layered convection*
- △ Radiogenic elements in the core??  
*directional measurement?* *Earth energy budget*
- Nature of the Core-Mantle Boundary?  
*geo-reactor* *hidden reservoirs*

Heat Flow  
44TW? 31TW?



# 達成状況 2

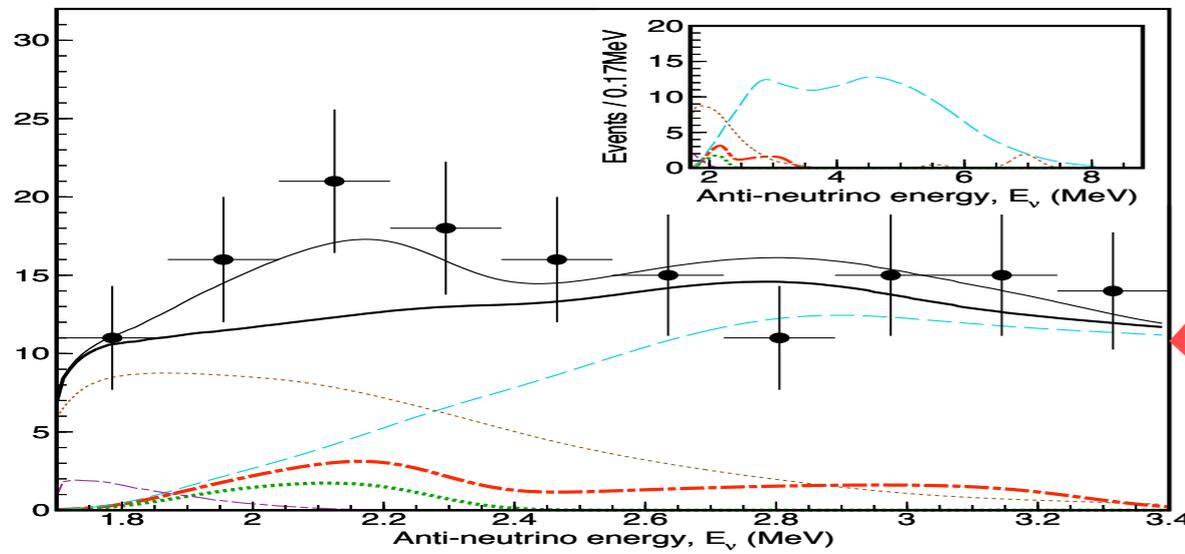
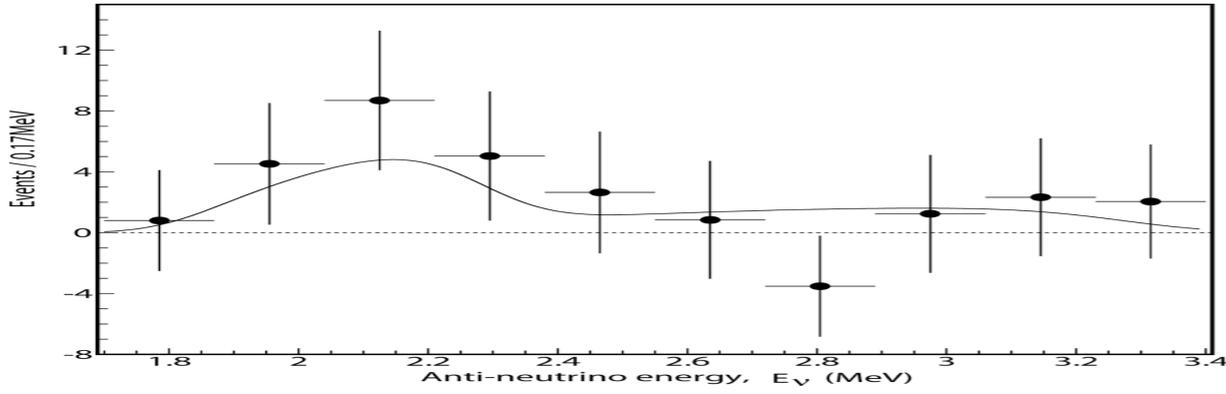
# 地球ニュートリノ観測



## 地球ニュートリノの初検出

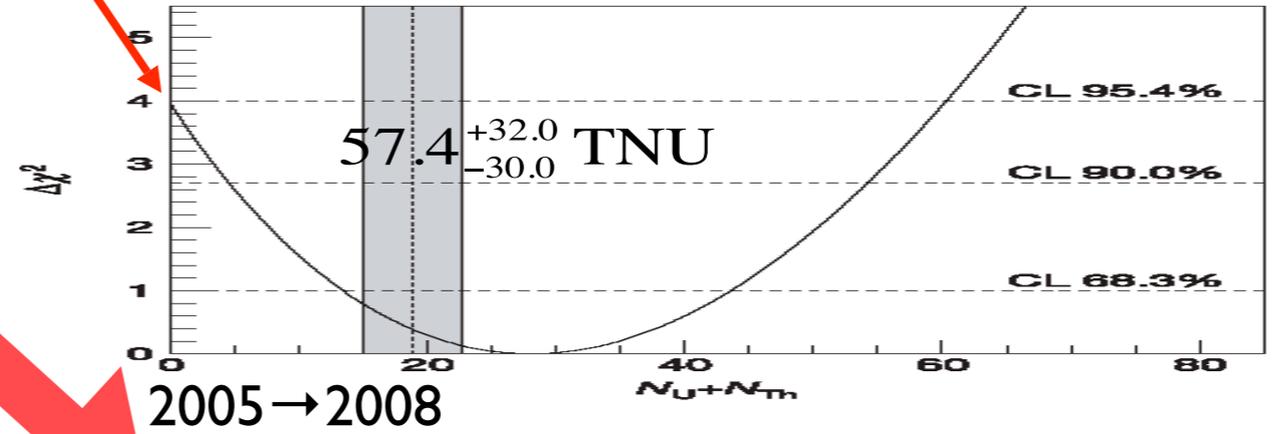
Nature 436 (2005) 499-503 (46)

Natureの表紙を飾り、地球物理の専門家から革命的だとの評価を受けた。



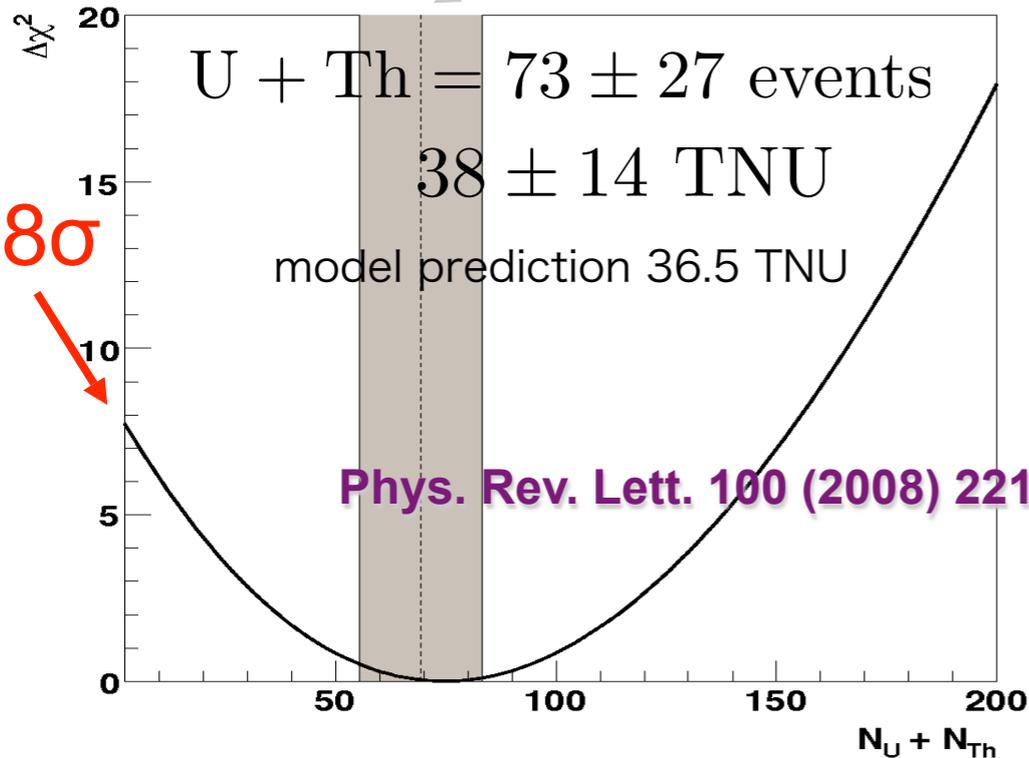
2σ

モデルの予測

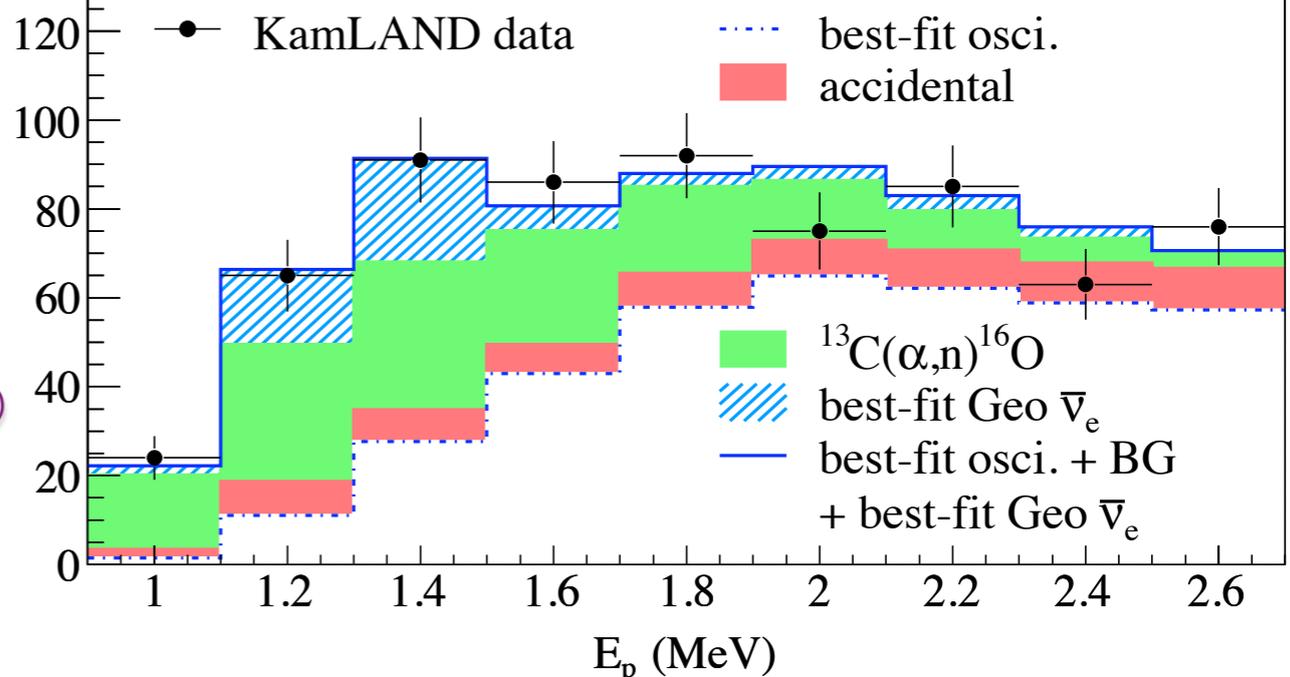
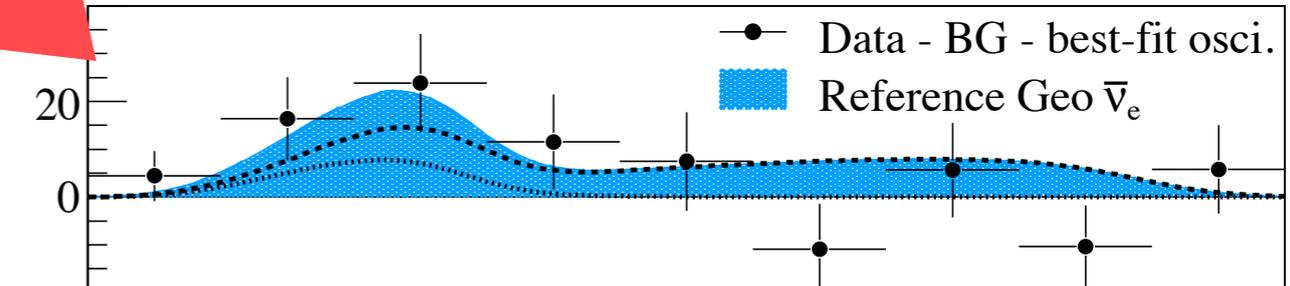


モデルの予測

2.8σ



Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 221803 (117)



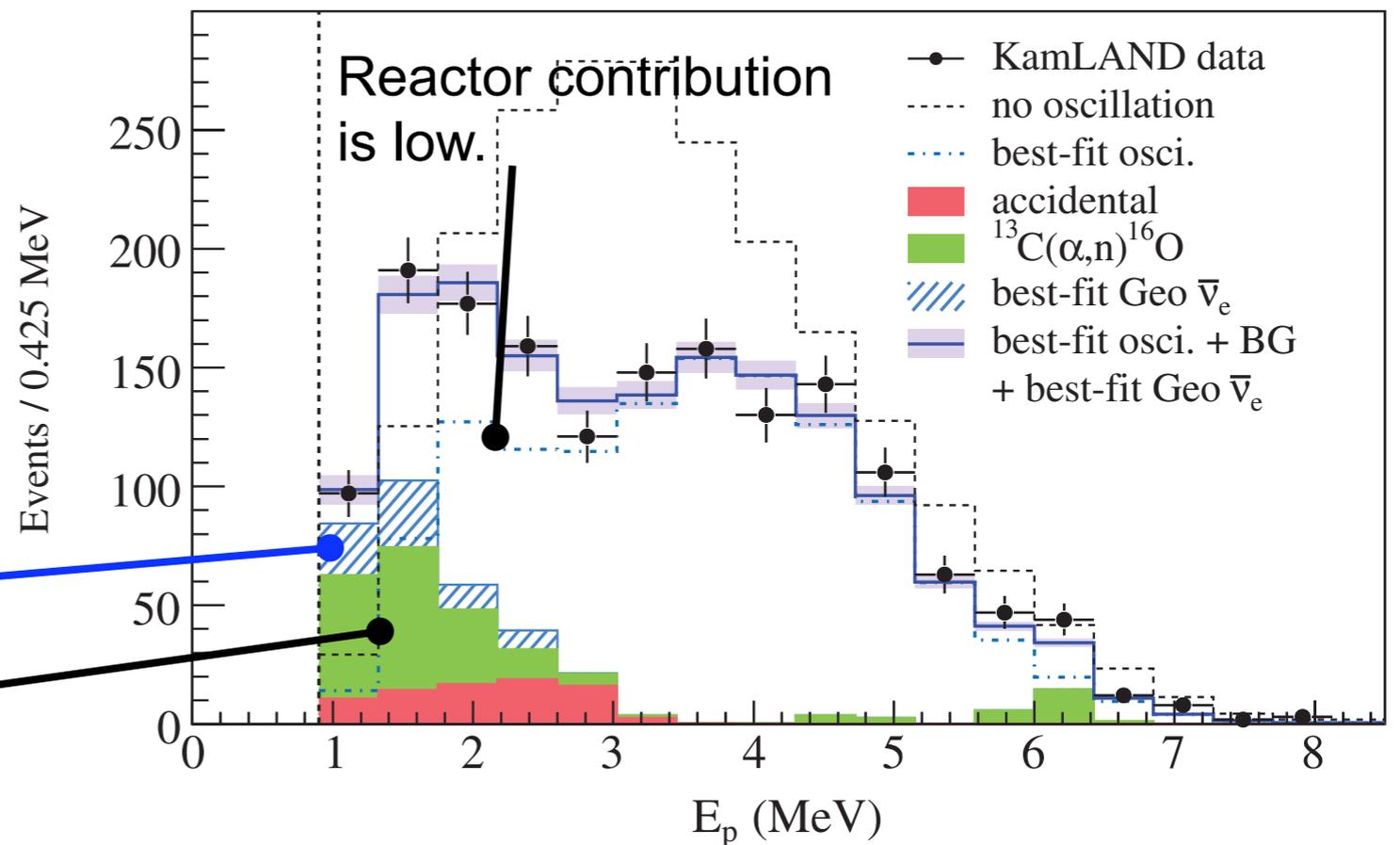
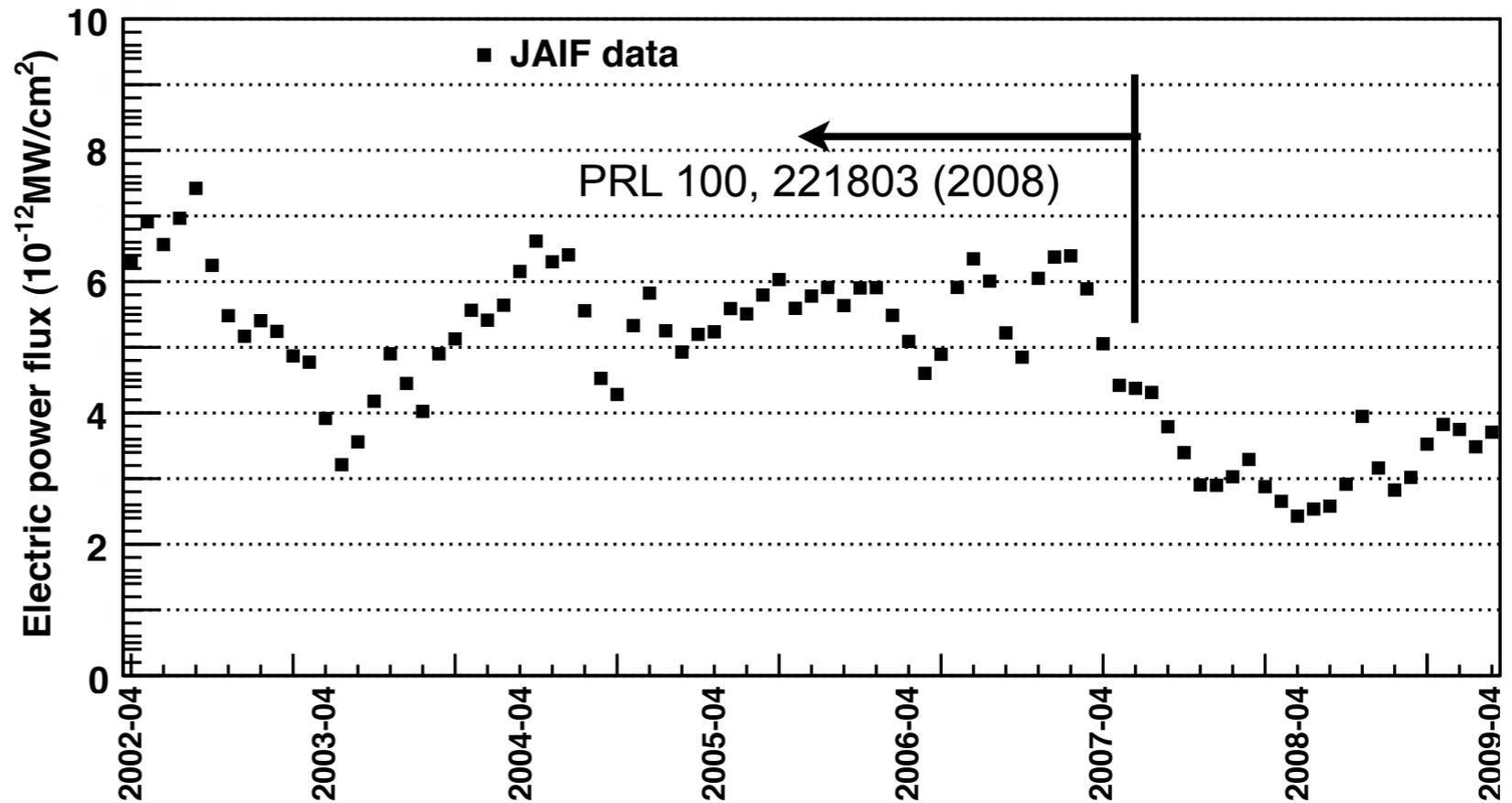
地球モデル検証が現実的になった。再純化後は<sup>13</sup>C(α,n)<sup>16</sup>Oバックグラウンドは除去された。

# Good data for geo-neutrino observation

After preformed distillation, KamLAND is acquiring low background data for **geo-neutrino** observation. Lower operation of nuclear reactors also help geo-neutrino observation. Significance will reach more than **4-5 sigma** with a little more exposure and the precision will become equivalent with the current earth model. **Practical verification of the earth model** will start soon.

Geo-neutrinos are being highlighted.

These BGs are eliminated.



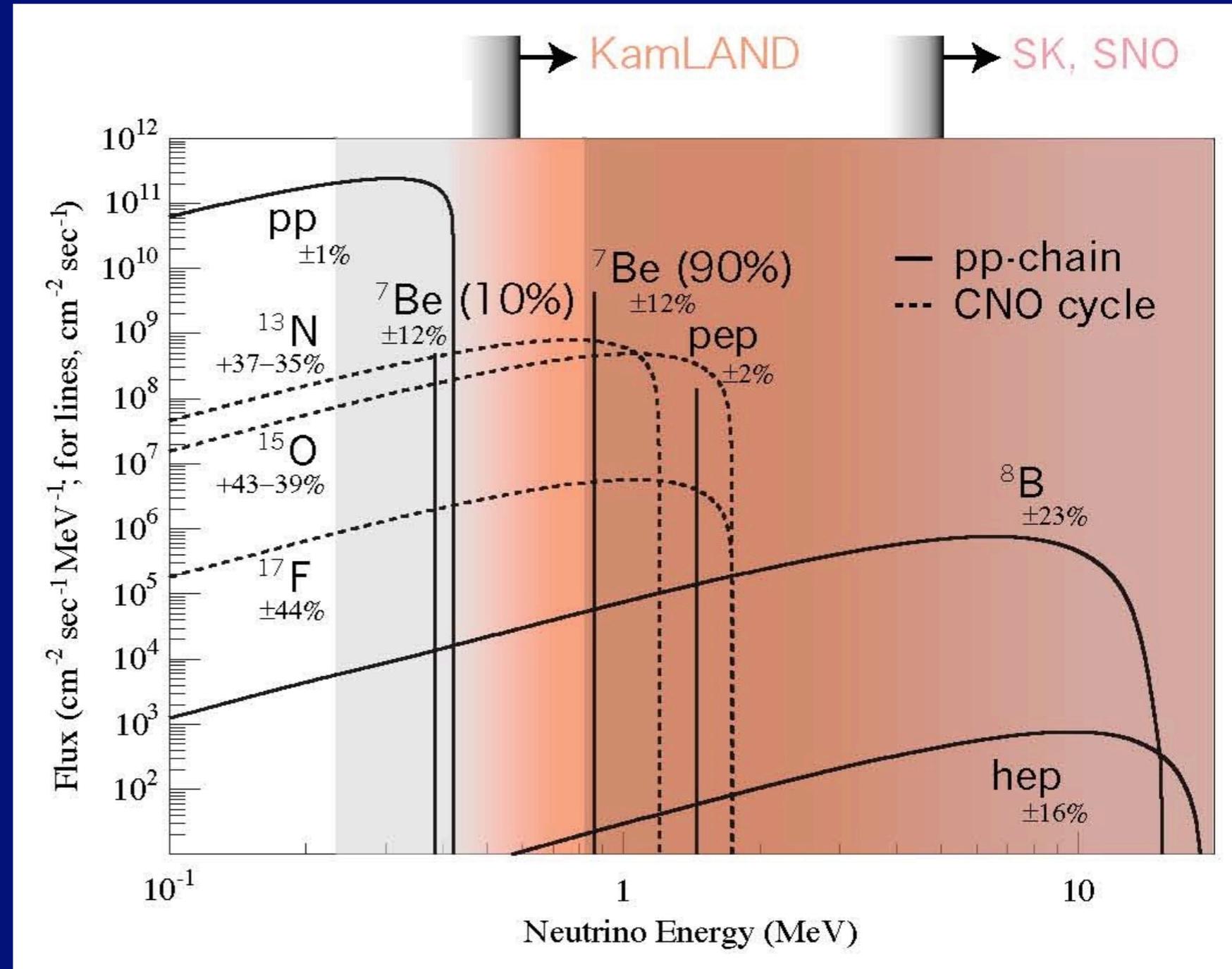
# 3. 太陽起源電子ニュートリノの高精度精密測定

太陽ニュートリノ欠損現象  
の発見

R.デービス  
実験開始  
(1968~)

**Ray Davis**  
Wins Nobel Prize  
in Physics

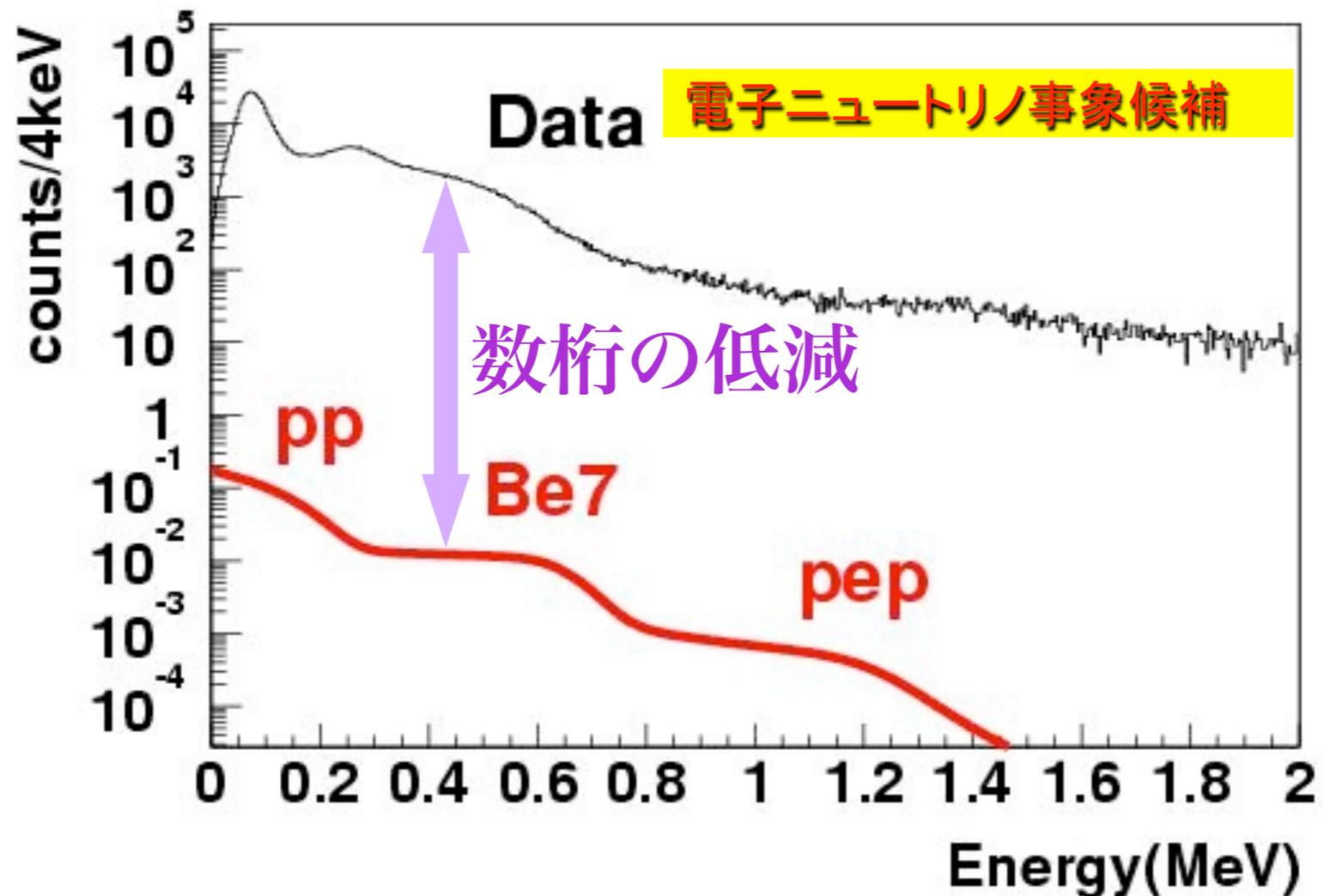
Member of BNL's  
Chemistry Department for  
more than 35 years  
has won the Nobel Prize  
in Physics for  
pioneering contributions  
to astrophysics, in  
particular for the detection  
of solar neutrinos.  
Davis shares the prize with  
Masatoshi Koshiba of Japan,  
and Riccardo Giacconi of the U.S.



- $^7\text{Be}$ ニュートリノの初検出
- 星の進化の過程の実験的検証

- 原子炉反電子ニュートリノ振動  
との比較：CPT対称性の検証

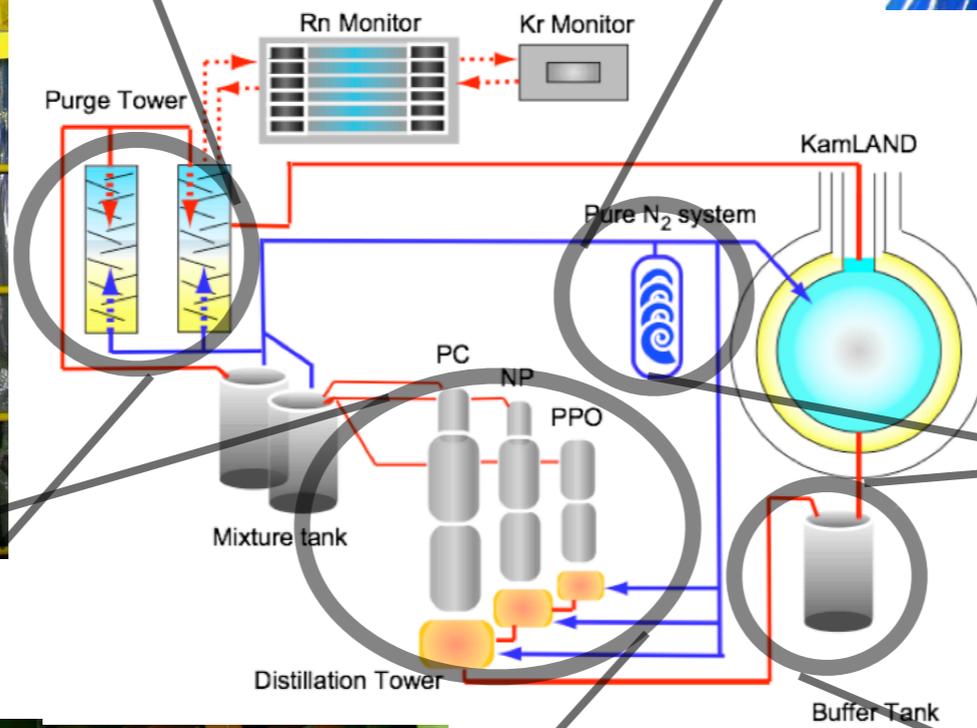
# 液体シンチレータ内の放射性物質の徹底的除去



impurities	present	goal	reduction	蒸留	脱気
$^{238}\text{U}$	$(3.5 \pm 0.5) \times 10^{-18} \text{ g/g}$	$10^{-16} \text{ g/g}$	OK	$< 10^{-2}$ $< 10^{-5}$ $< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
$^{232}\text{Th}$	$(5.2 \pm 0.8) \times 10^{-17} \text{ g/g}$	$10^{-16} \text{ g/g}$	OK		
$^{40}\text{K}$	$< 2.7 \times 10^{-16} \text{ g/g}$	$10^{-18} \text{ g/g}$	$10^{-2}$		
$^{85}\text{Kr}$	$< 2.7 \times 10^{-16} \text{ g/g}$	$\sim 1 \mu\text{Bq/m}^3$	$10^{-6}$		
$^{210}\text{Pb}$	$\sim 1 \text{ Bq/m}^3$	$\sim 10^{-25} \text{ g/g}$	$10^{-5}$		
	$\sim 10^{-20} \text{ g/g}$				

# 純化装置建設の様子

2006年

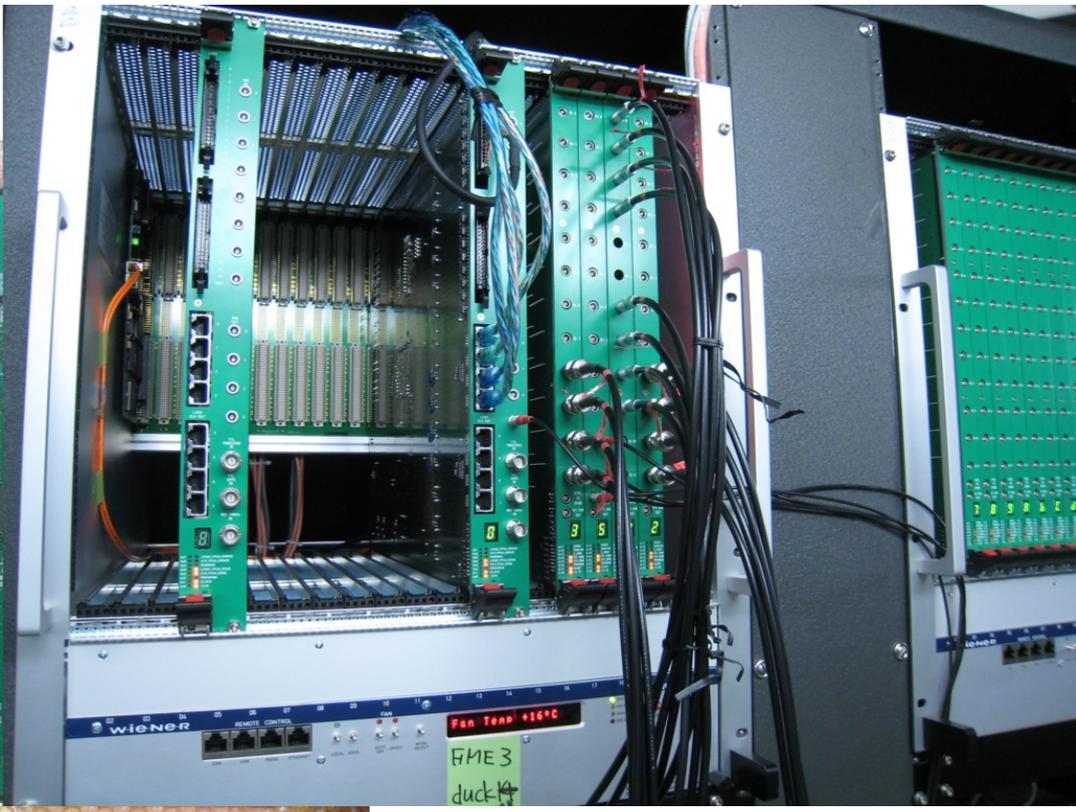
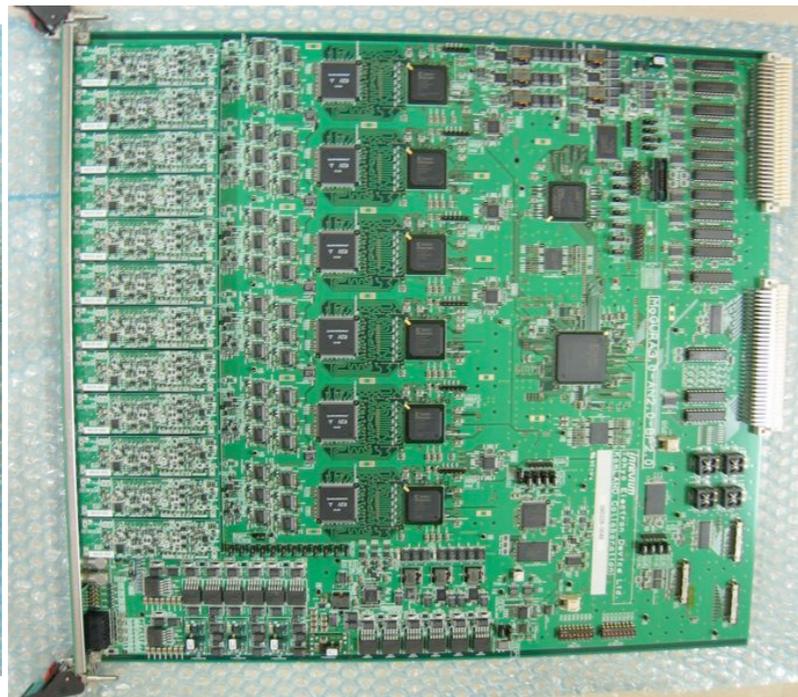


June, 2005



# 新開発デッドタイムフリー電子回路

宇宙線起源バックグラウンドを1/20に低減する。



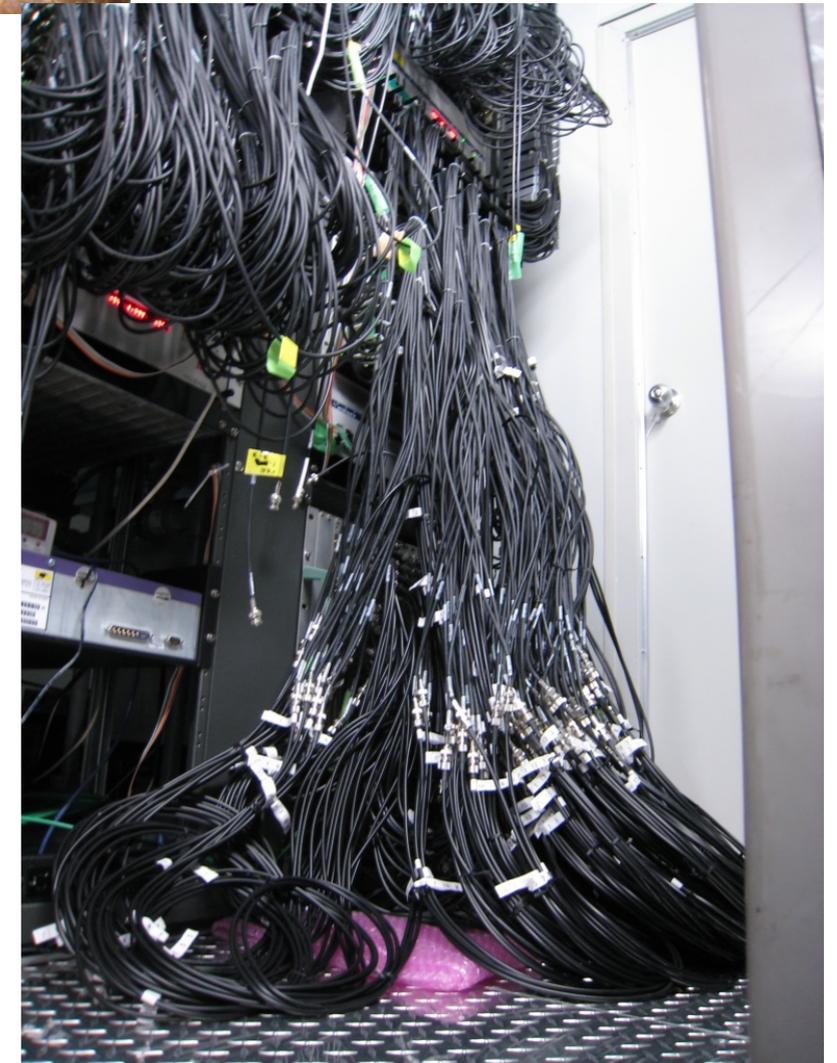
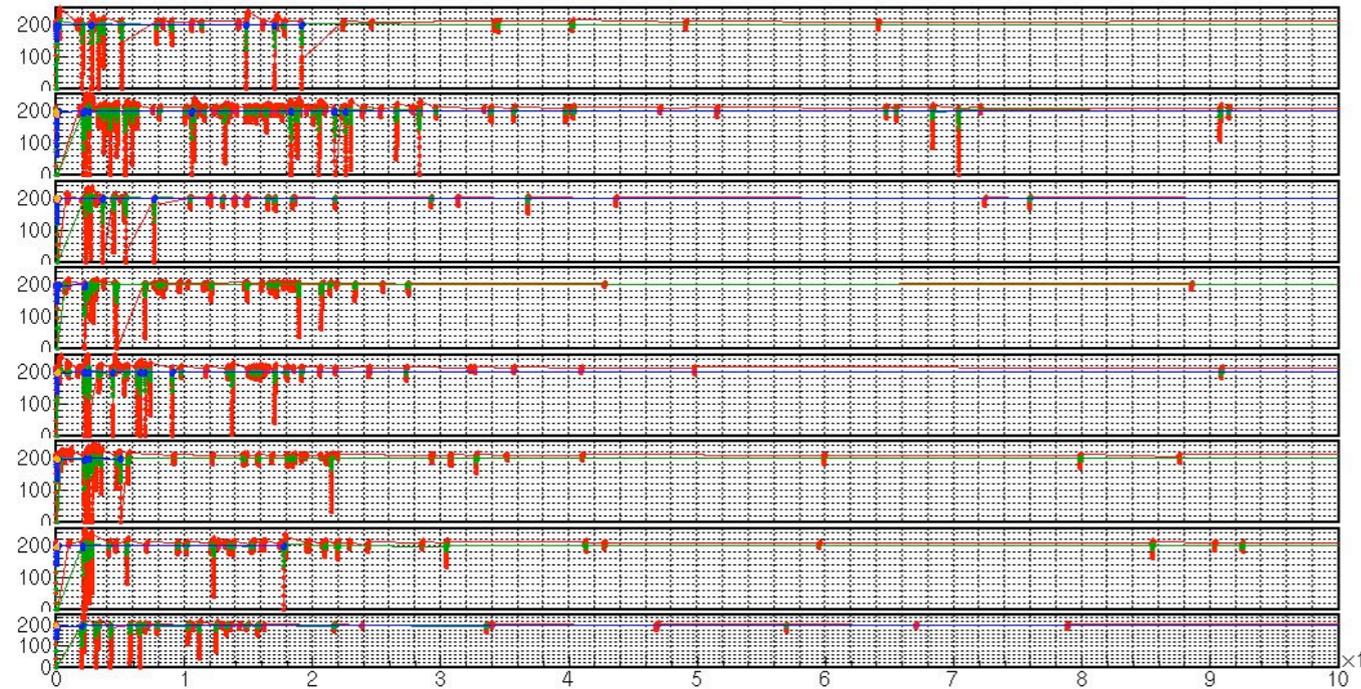
ベースライン安定化回路

波形デジタイザ

トリガー回路

## Muon events with BLR 0-100usec

Event: 0003 || X: Time[nsec], Y: Amplitude[ADC]

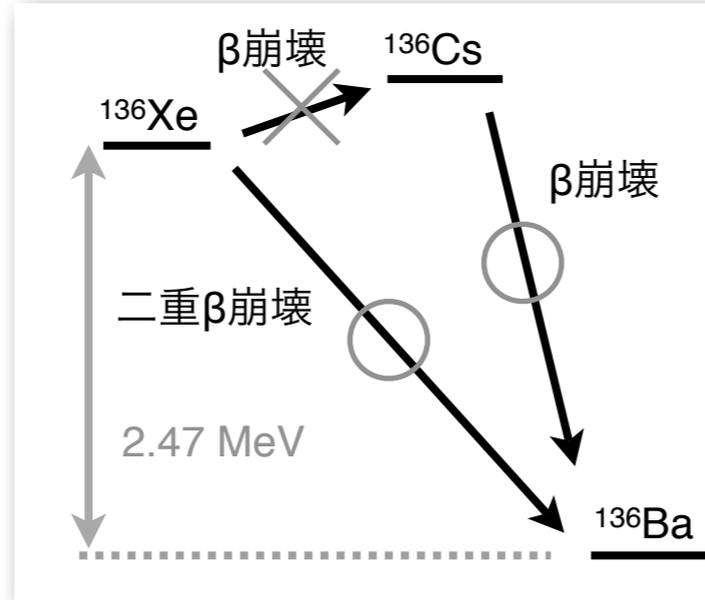


# 4. ニュートリノレス二重β崩壊の研究

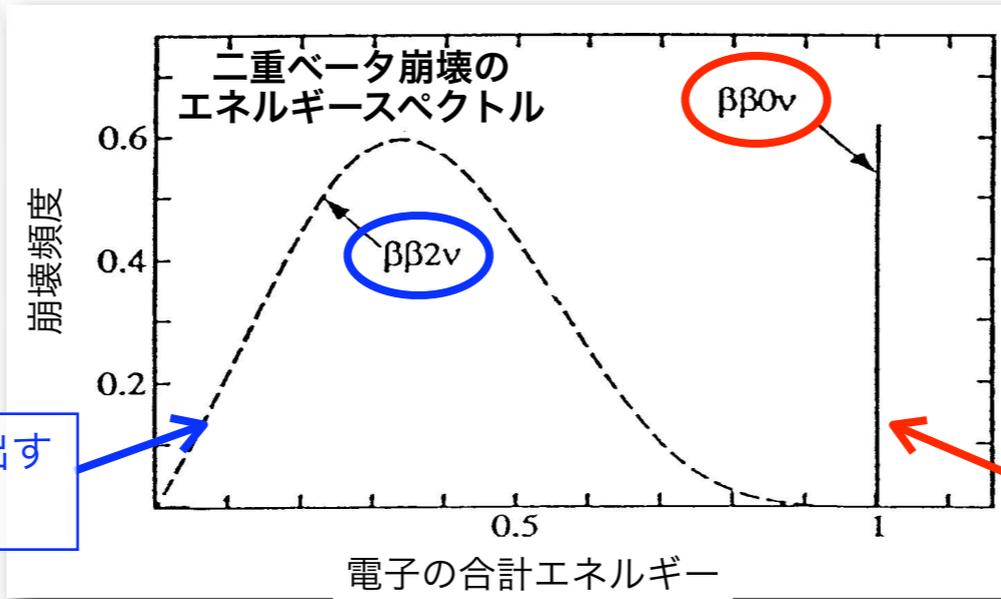
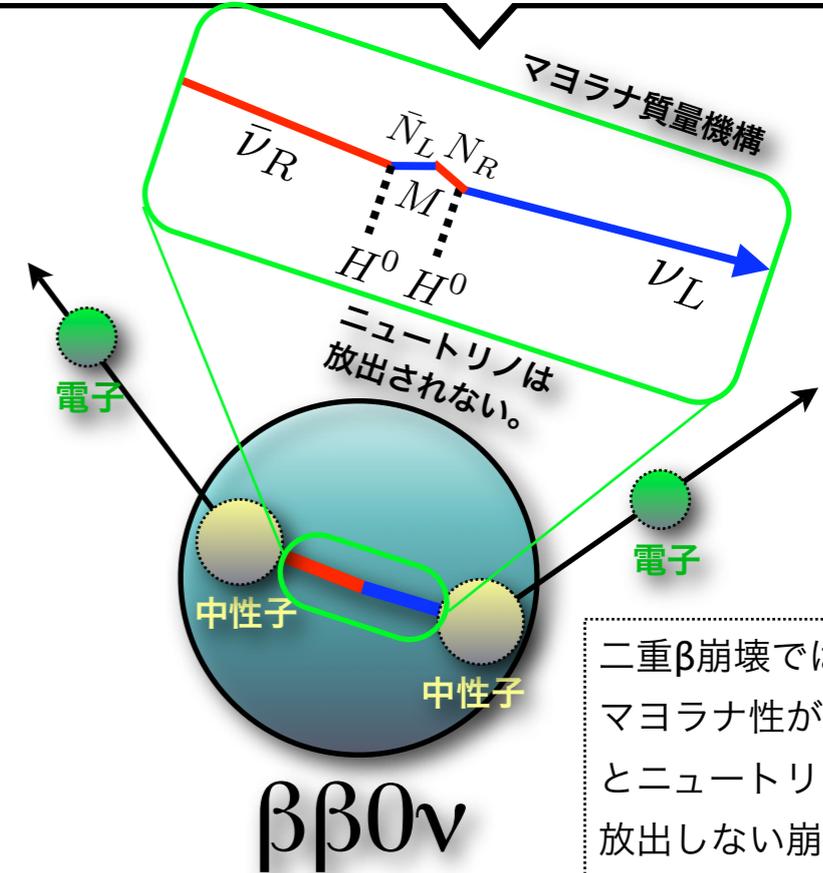
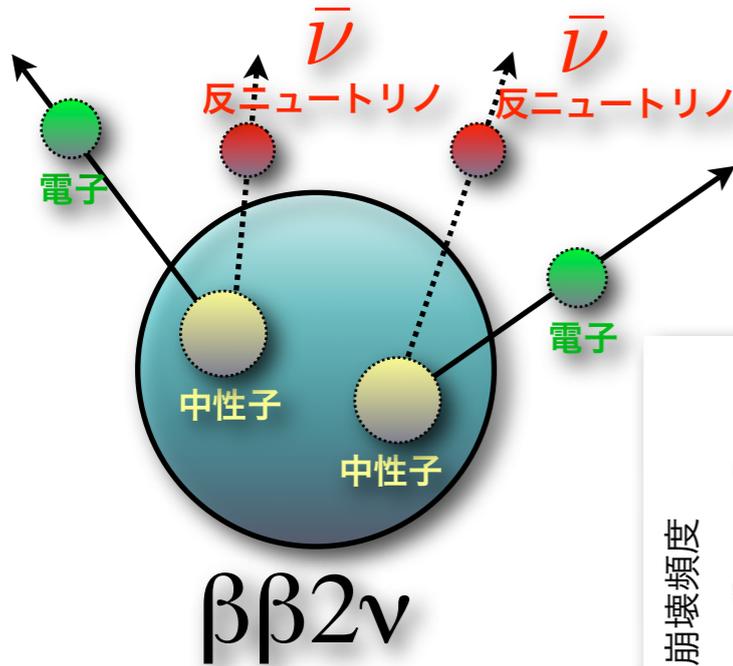
ニュートリノの質量起源を説明し大統一理論と密接に関係するシーソー模型や宇宙の物質優勢を説明するレプトジェネシス理論の基礎となるニュートリノのマヨラナ性を実証する唯一の手法である。  
 ニュートリノ質量構造の決定にも最も感度が高い。

## 二重ベータ崩壊

特別な準位の原子核は2つのβ崩壊が同時に起き、2つの反ニュートリノを同時に放出する。



マヨラナ性は、質量がある反ニュートリノをニュートリノに変身させる。重いほど変身しやすいので、質量を測定できる。



ニュートリノがエネルギーを持ち出すため連続スペクトルとなる。

ニュートリノを放出しないため電子の合計エネルギーが大きい。

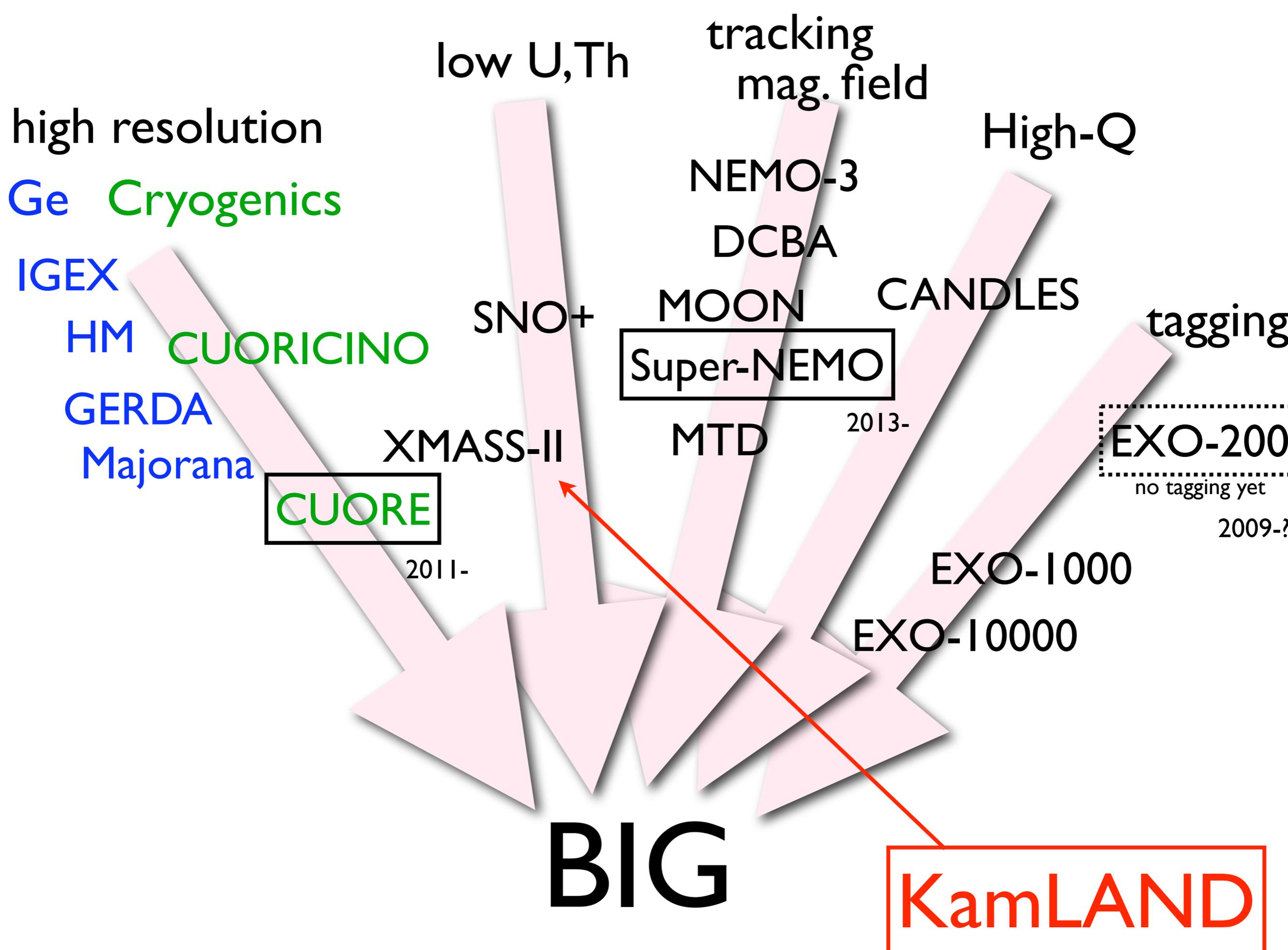
これを探索する。

発見されなくても、大統一理論のもとニュートリノ質量構造を究明できる。

ニュートリノレス二重β崩壊の発見

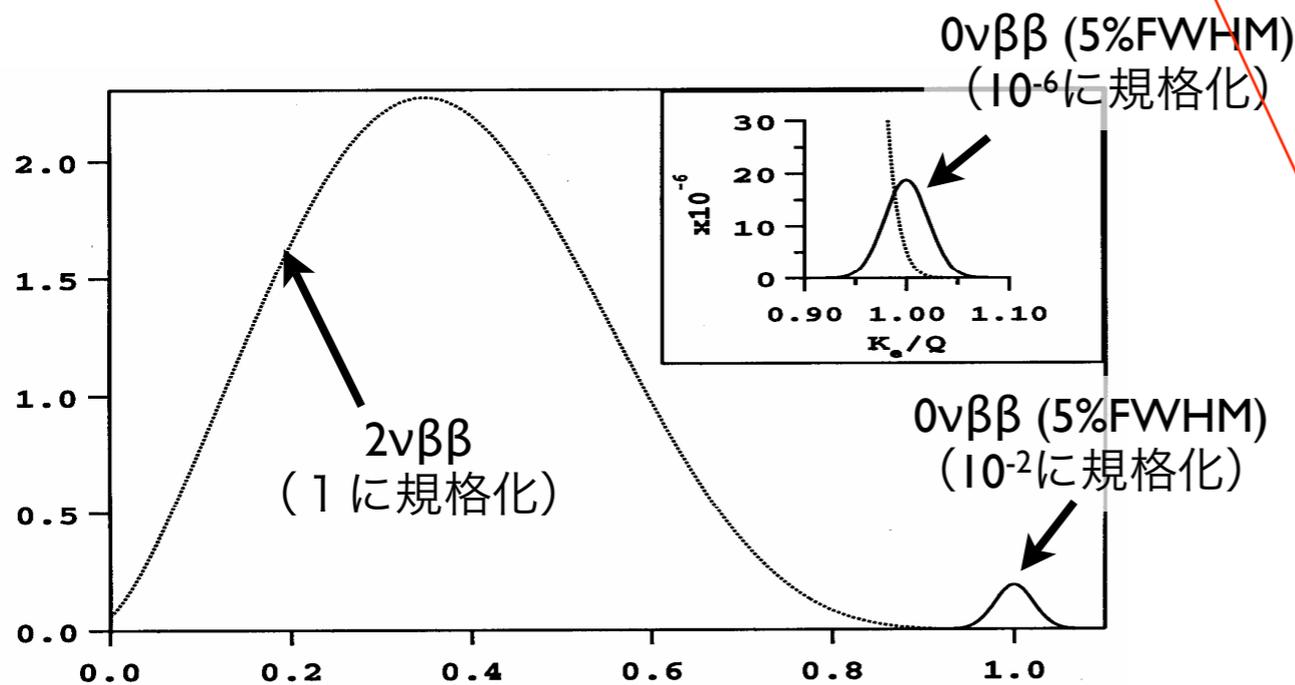
マヨラナニュートリノの証拠  
 ニュートリノ質量の絶対値決定

ニュートリノ質量機構の解明  
 大統一理論の選別  
 宇宙物質優勢の解明への指針



# 二重β崩壊核の比較

原子核	$T_{1/2}^{0\nu}$ (50 meV)	$T_{1/2}^{2\nu}$ 実験値 (year)	自然存在比 (%)	Q値 (keV)	
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$		$(4.2^{+2.1}_{-1.0}) \times 10^{19}$	0.19	4271	最大のQ、 $2\nu$ 早い 半導体
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	$0.86 \times 10^{27}$	$(1.5 \pm 0.1) \times 10^{21}$	7.8	2039	
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	$2.44 \times 10^{26}$	$(0.92 \pm 0.07) \times 10^{20}$	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	$2\nu$ 早い
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	$2.86 \times 10^{26}$	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^{19}$	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	存在比大
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	$4.55 \times 10^{26}$	$> 10^{22}$	8.9	2476	$2\nu$ 遅い、希ガス
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	$2.23 \times 10^{25}$	$(7.8 \pm 0.6) \times 10^{18}$	5.6	3367	$0\nu$ 、 $2\nu$ 早い



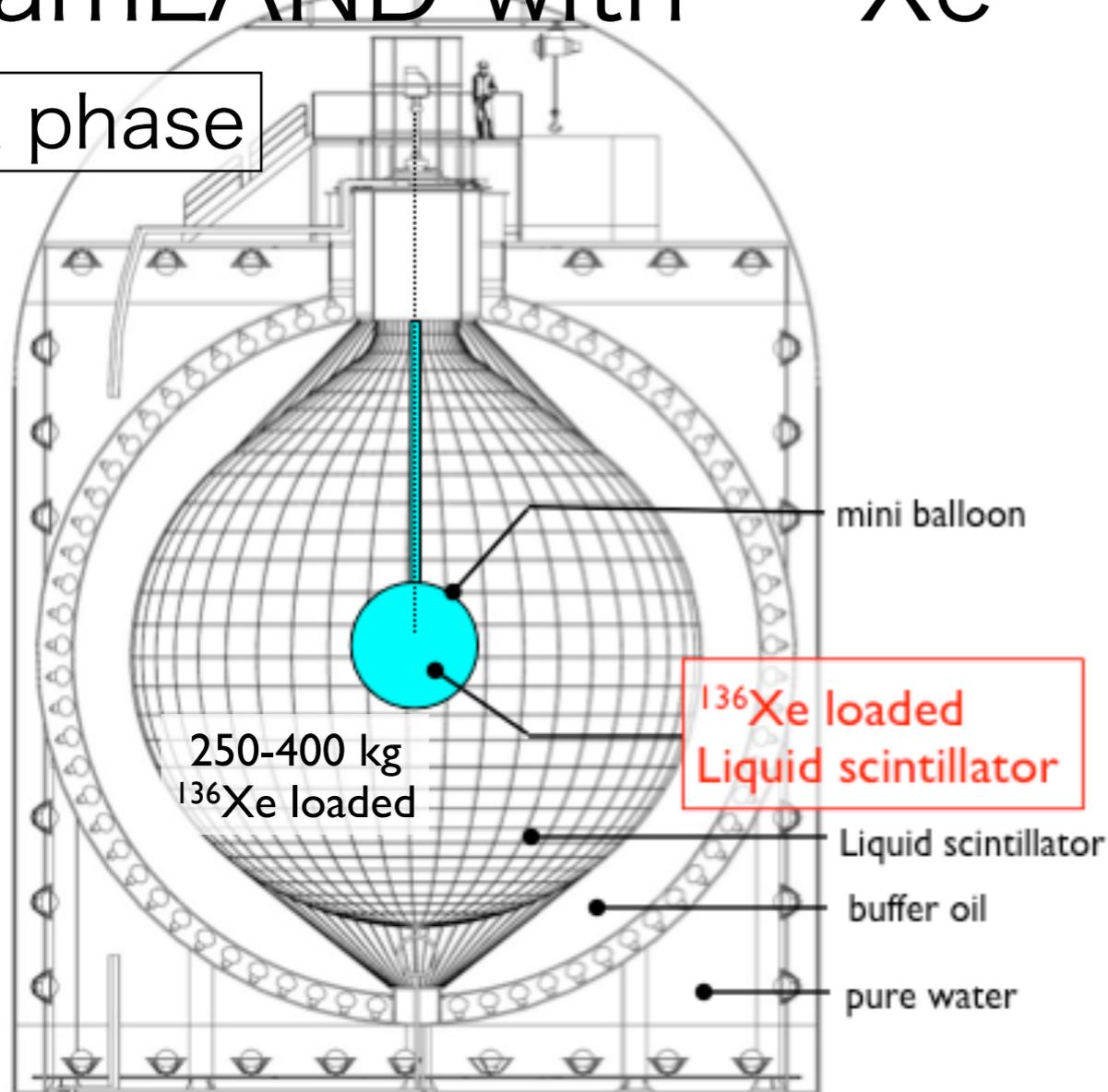
$2\nu$ が早いと高分解能が必要

分解能の5.8乗で混入

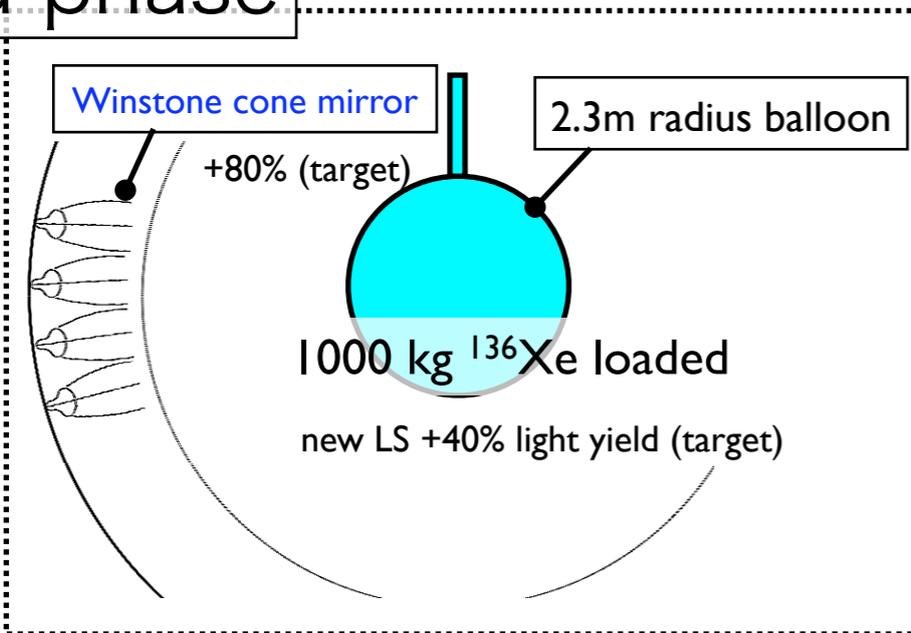
$T^{0\nu} / T^{2\nu}$  が小さいと高分解能  
でなくても良い。

# KamLAND with $^{136}\text{Xe}$

## 1st phase



## 2nd phase



## Merit of using KamLAND

- ultra low radioactivity environment based on ultra pure LS and 9m radius active shield
  - U:  $<3.5 \times 10^{-18}$  g/g
  - Th:  $<5.2 \times 10^{-17}$  g/g
- no modification to the detector is necessary to accommodate DBD nuclei
- high sensitivity with low cost (~6M\$, budget secured)
  - ~60 meV with 1.5 year
- reactor and geo- antineutrino observations continue
- high scalability (2nd phase)
  - 1000 kg  $^{136}\text{Xe}$ , improvement of energy resolution with light concentrators and brighter LS (~30M\$)
  - ~25 meV with 5 years

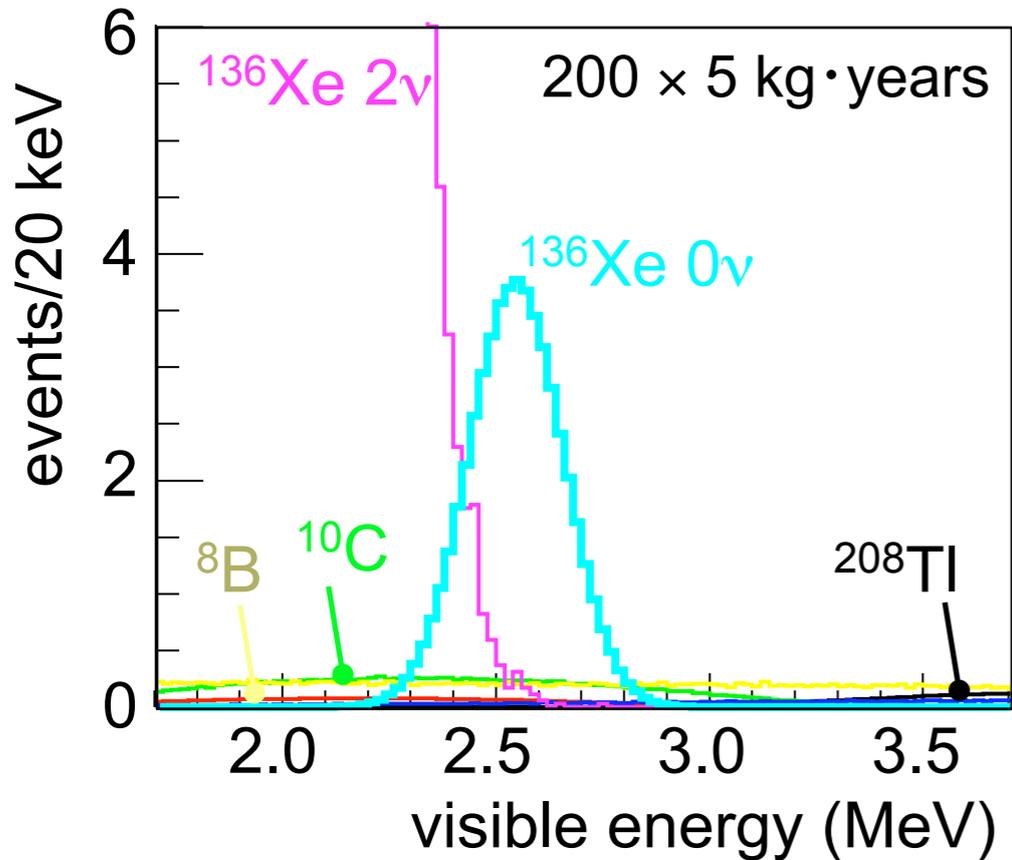
## Merit of using Xe

- isotopic enrichment, purification established
- soluble to LS more than 3 wt%, easily extracted
- slow  $2\nu 2\beta$  ( $T_{1/2} > 10^{22}$  years) requires modest energy resolution

1st phase



KKDC claim, degenerated hierarchy



$\langle m_\nu \rangle = 0.15 \text{ eV}$  (min KKDC)

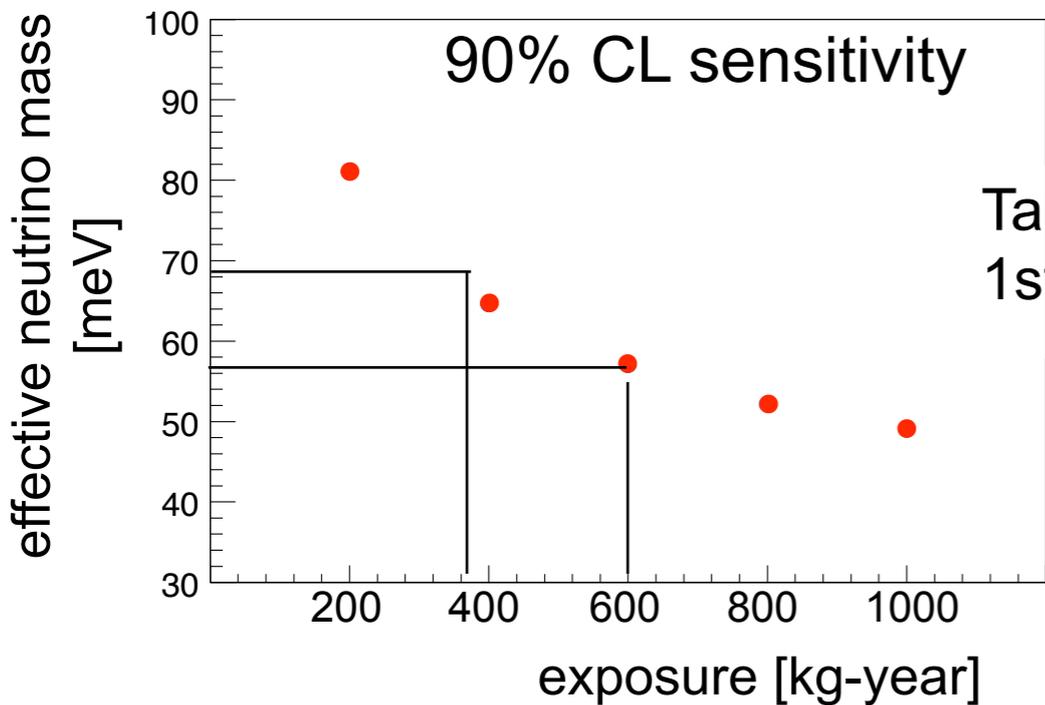
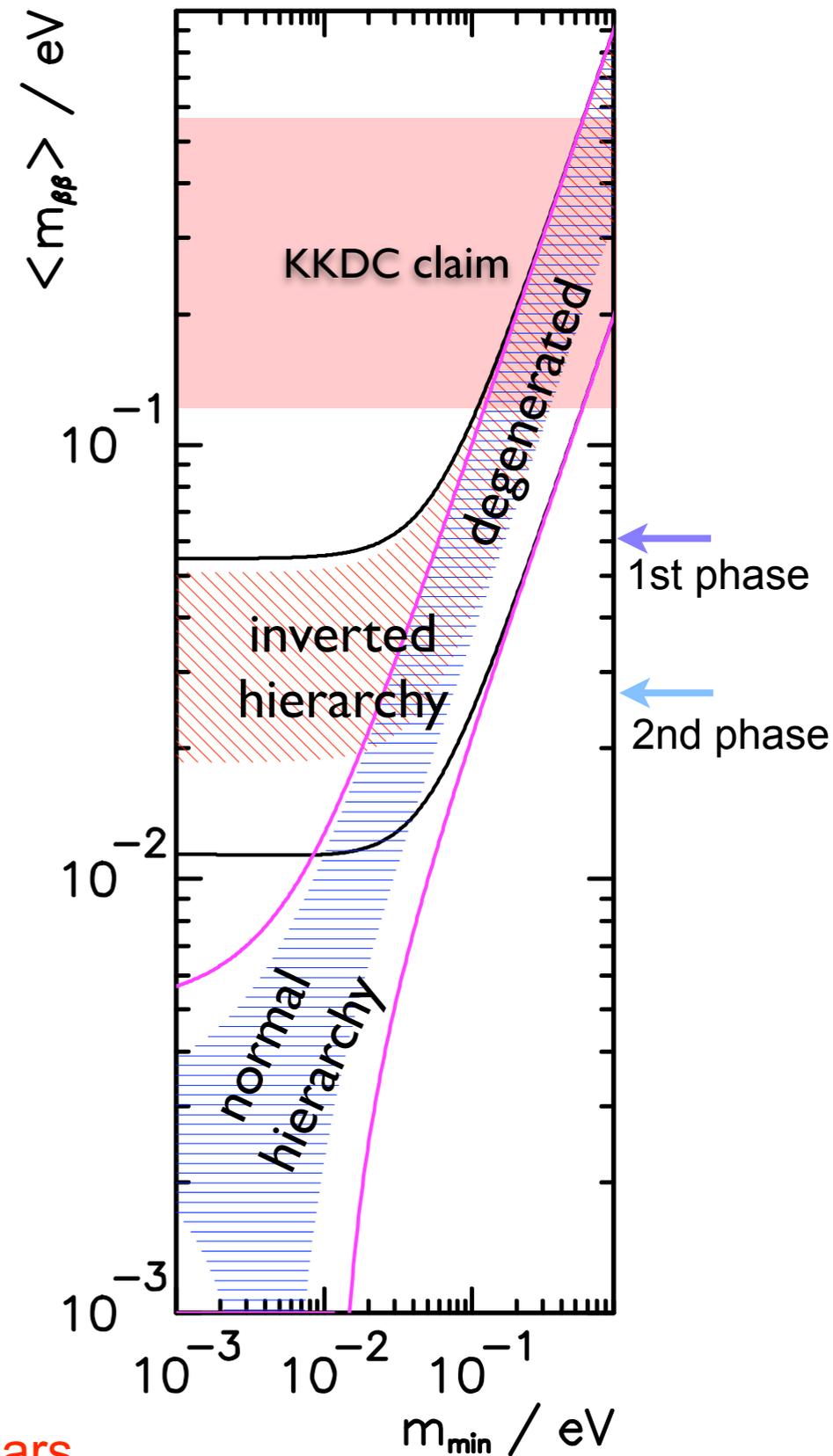
$T_{1/2}(0\nu) = 9.8 \times 10^{25} \text{ y}$

$T_{1/2}(2\nu) = 1.0 \times 10^{22} \text{ y}$

$t_{\text{balloon}} = 25 \mu\text{m}$ ,  $R_{\text{balloon}} = 1.35 \text{ m}$

$^{232}\text{Th}, ^{238}\text{U} = 10^{-13} \text{ g/g}$

$^{10}\text{C}$  95% tag



Target sensitivity of the 1st phase is **~60 meV**.

2nd phase



inverted hierarchy

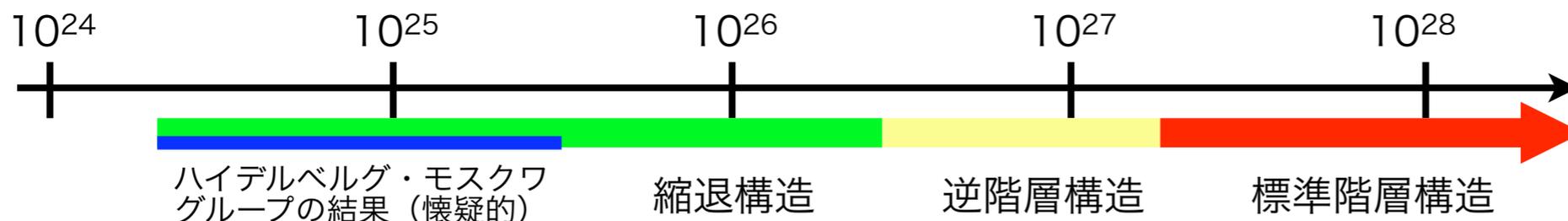
Target sensitivity of the 2nd phase is **~25 meV with 5 years**.

# 他の競合する研究計画との感度比較

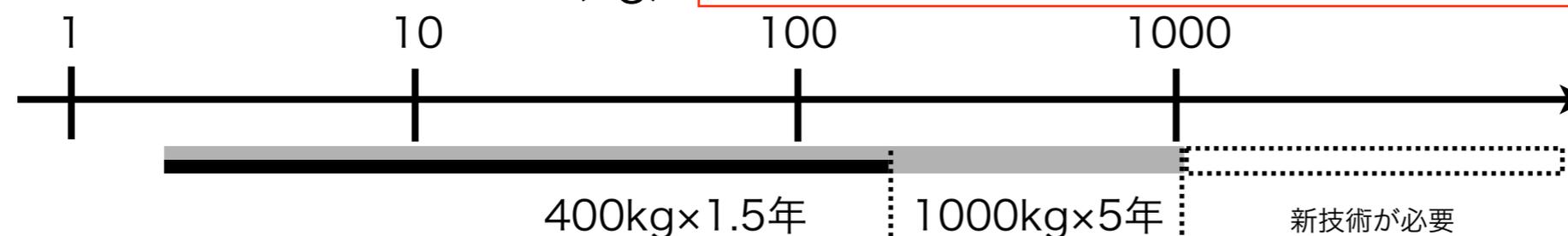
ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊は1939年(W.H.Furry)以来の研究課題で、当初は暗中模索だったが、現在は、ニュートリノ振動研究によるニュートリノ質量の発見で具体的な目標が設定できるようになった。

宇宙物質優勢の自然な帰結としてマヨラナニュートリノを仮定すると、逆階層構造をカバーできる本プロジェクトなら $\beta\beta 0\nu$ が未発見でも標準階層構造と結論できる。

$^{136}\text{Xe}$ のニュートリノレス崩壊半減期 (年)

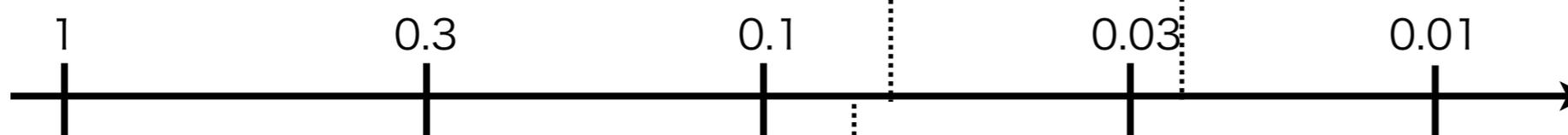


探索に必要な $^{136}\text{Xe}$ の重量(kg)

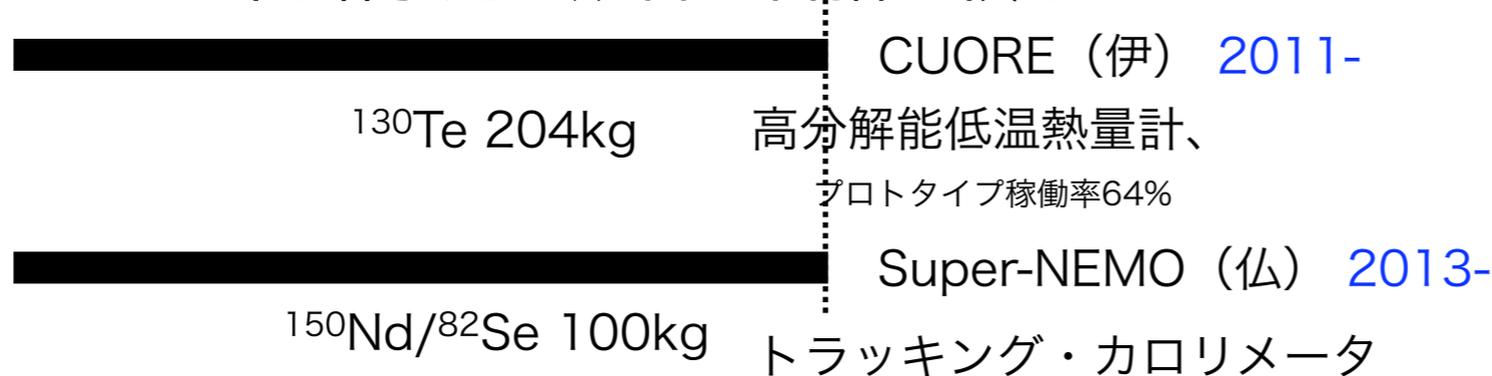


1トン以上までのスケールビリティを持つのは、巨大な極低放射能環境を有するニュートリノ観測装置だけである。

対応する有効ニュートリノ質量 (電子ボルト)

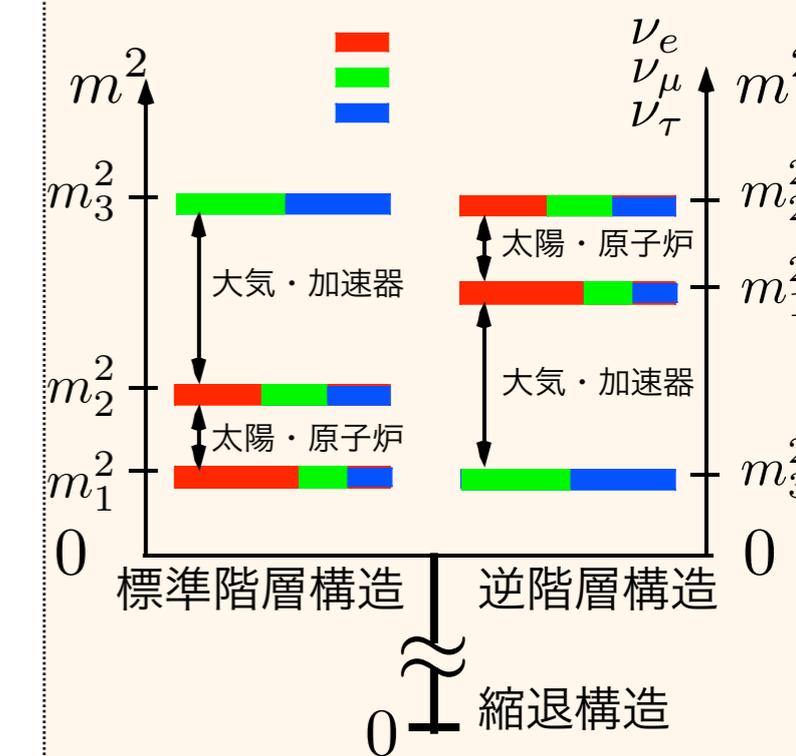


2011~2013に開始予定の競合が目指す領域



ニュートリノ振動研究の結果  
想定される3種類の質量構造

- 3世代の内 3つが重い  
縮退構造
- 2つが重い  
逆階層構造
- 1つが重い  
標準階層構造



# Major R&D items

- Xenon loaded LS with the same density, luminosity, transparency

done

KamLAND LS	
dodecane	80%
pseudo-cumene	20%
PPO	1.36 g/liter

Xenon loaded LS	
decane	81.8%
pseudo-cumene	18.2%
PPO	2.7 g/liter
Xenon	2.5 wt%

soluble up to 3wt% at 10 °C

- 2.7~3.4 m  $\phi$  Mini-balloon (target: thin, 25 $\mu$ m, and low radioactivity,  $10^{-13}$  g/g U/Th)

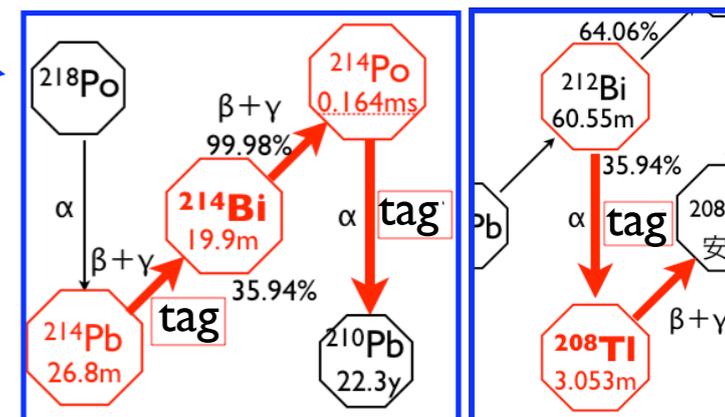
experience of 13 m  $\phi$  balloon



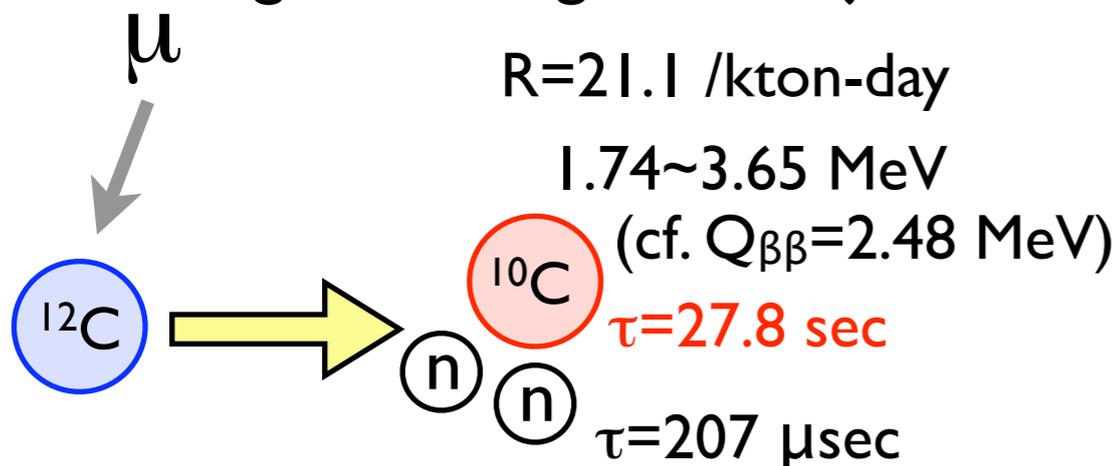
target balloon image



make these possible



- Xenon purification, storage, extraction etc  
experiences of big distillation system, high pressure nitrogen production
- Cosmogenic background rejection with dead-time free electronics



factor 20 reduction with neutron tagging

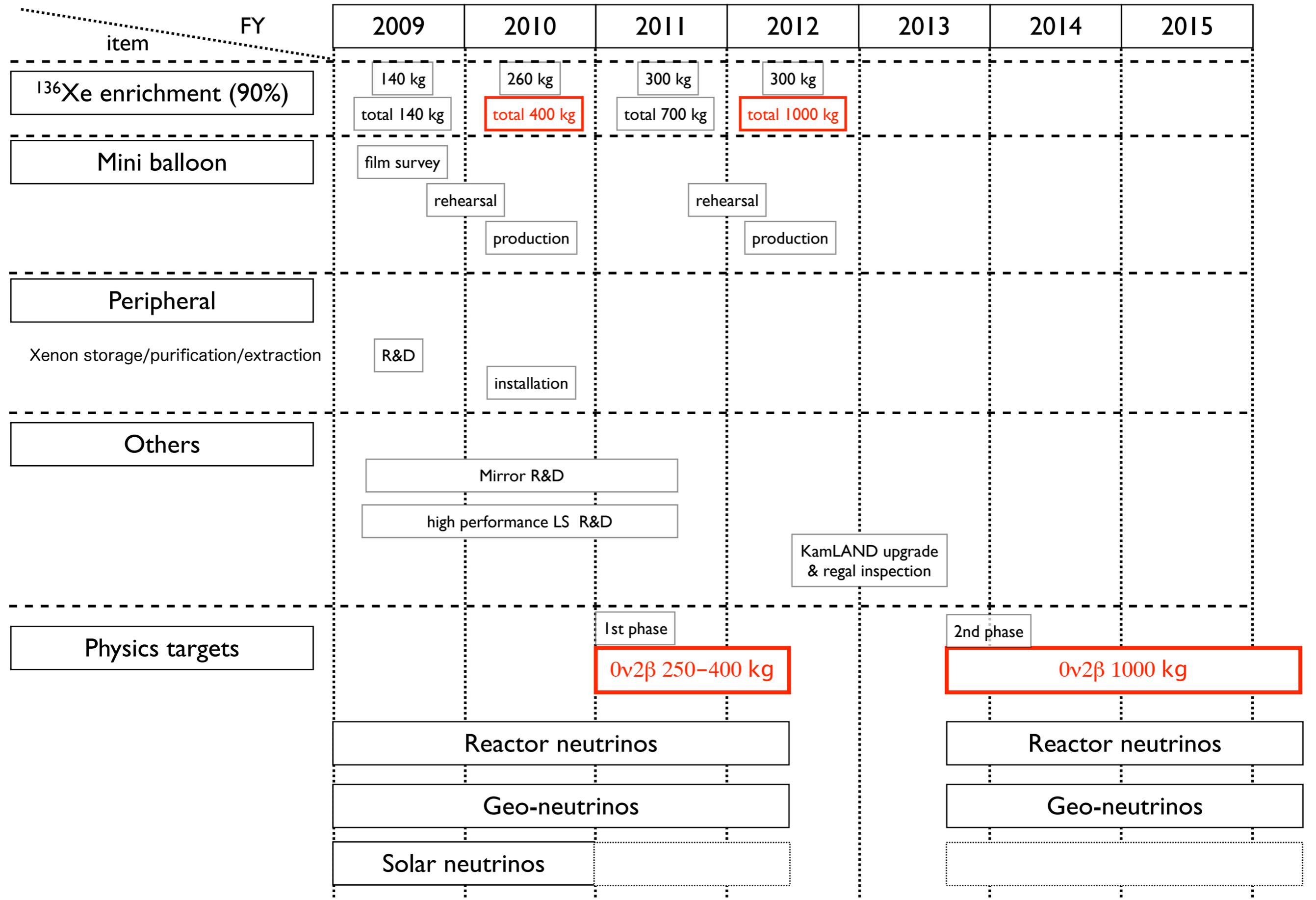


Baseline restorer and signal splitter

1GHz FADC + 3 range 200 MHz FADC for each channel

Trigger module

# project time line



# カムランドで可能性のある (国際) 共同研究例

◎異なる原子核での二重β崩壊詳細研究

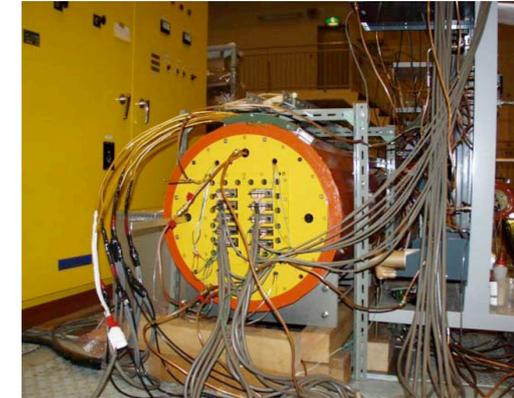
ITEP (Moscow) A.Barabash ら



◎革新技術での二重β崩壊の高感度化

KEK N.Ishihara ら

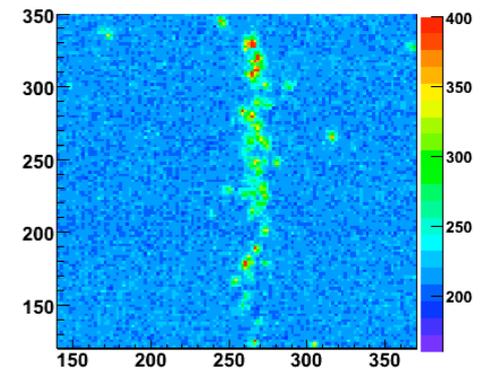
ドリフトチェンバーでの磁場中の飛跡測定に1トンの $^{136}\text{Xe}$ を組み合わせる?



Osaka T.Kishimoto ら



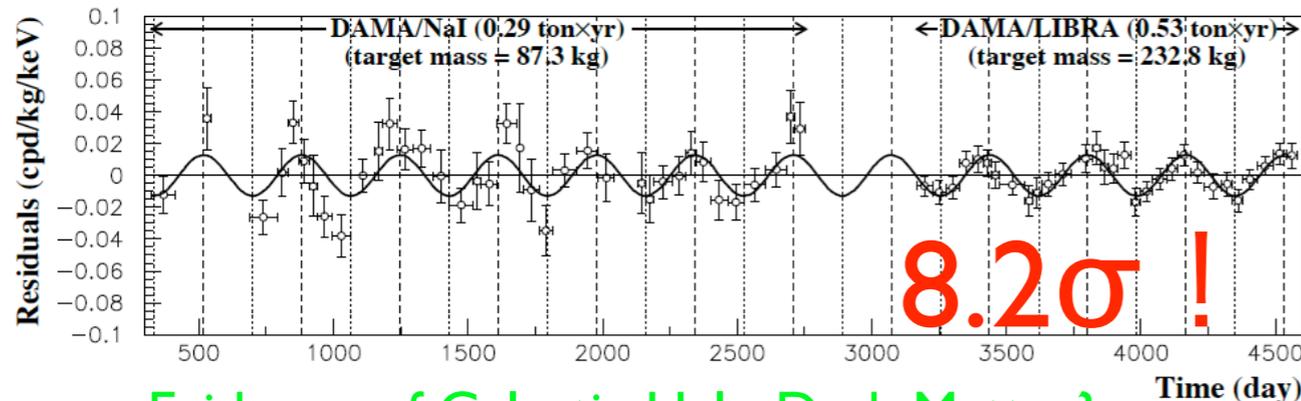
液体シンチレータ中の飛跡撮像技術と1トンの $^{136}\text{Xe}$ を組み合わせる。



◎暗黒物質の探索など

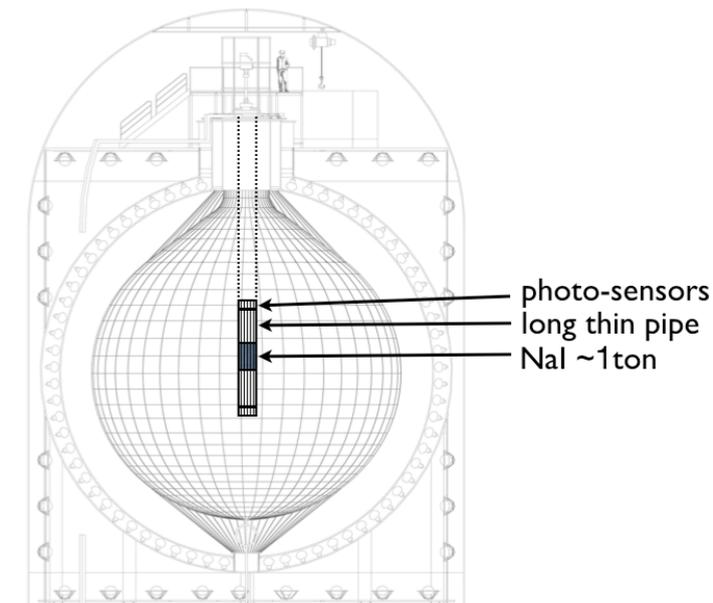
DAMA/NaI+LIBRA

2-6 keV



Evidence of Galactic Halo Dark Matter?

NaIで検証すべきでは?



# まとめ

- 原子炉ニュートリノ振動の精密測定を達成  
もう一段の改善を目指す。
- 地球ニュートリノの観測を達成  
S/Nは向上しており、地球モデルの実質的な検証を目指す。
- 高度再純化を実行、なんとか我慢できるレベルか？  
 ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ の低しきい値データを蓄積中。
- ニュートリノレス二重 $\beta$ 崩壊探索の準備中  
第一段階 ~60meV (縮退構造)  
第二段階 ~25meV (逆階層構造)
- 極低放射能環境での物理研究の可能性を検討中