

# CeLAND: KamLANDを用いた ステライルニュートリノ探索実験

「ニュートリノフロンティア」研究会

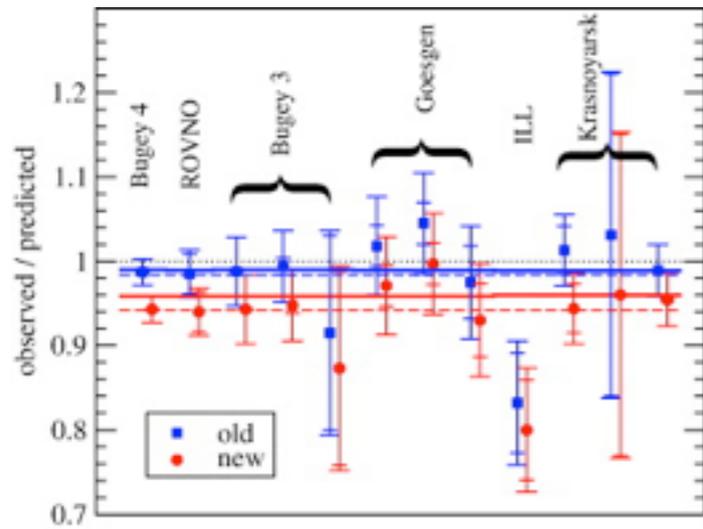
2013年12月8日

東北大学ニュートリノ科学研究センター

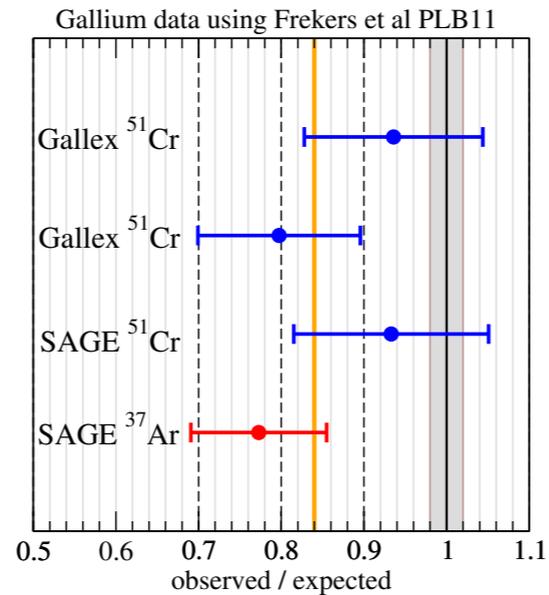
清水 格

# ニュートリノ実験におけるアノーマリー

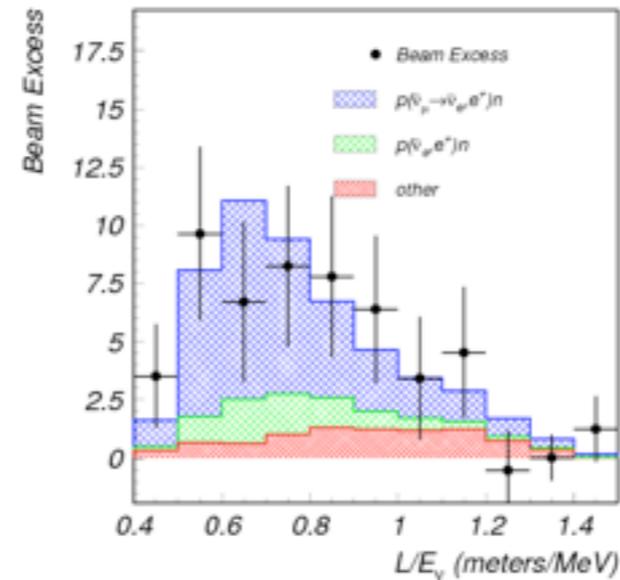
原子炉



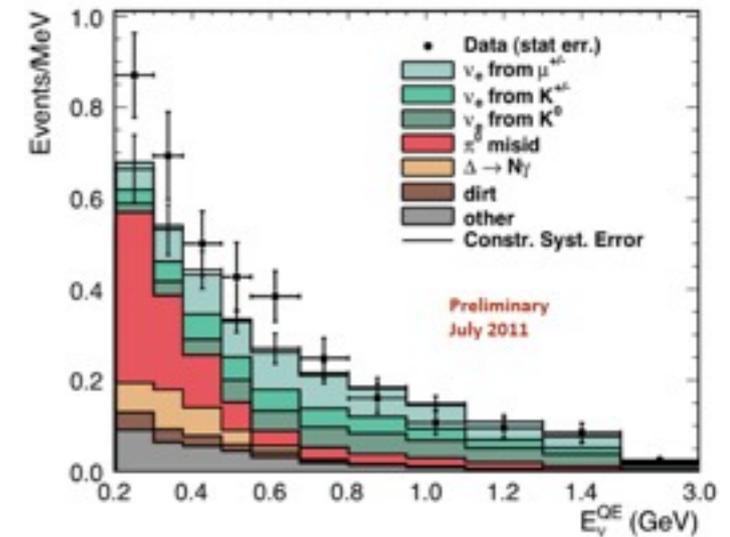
ガリウム



LSND

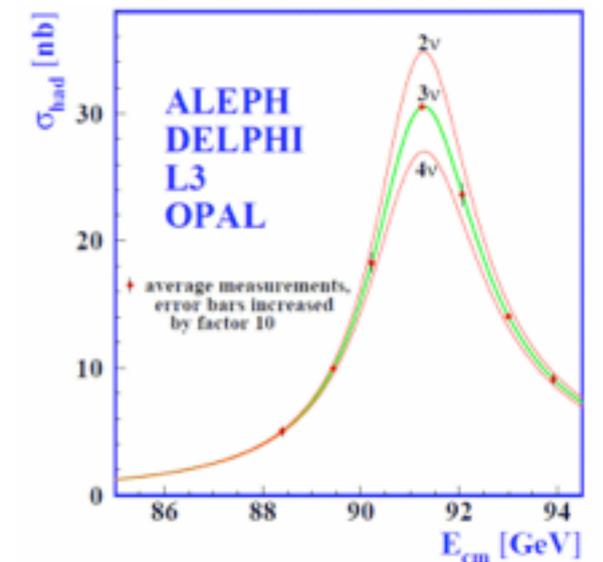
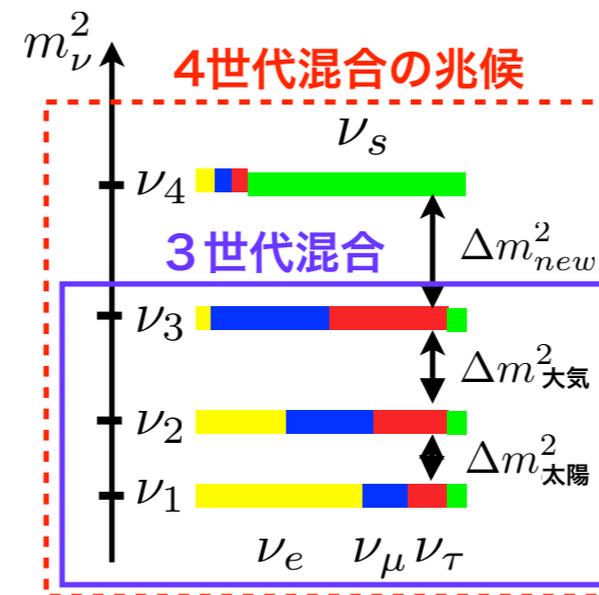


MiniBooNE



いずれのアノーマリーも1 eV程度のステライルニュートリノによって説明できる

	ニュートリノ源	対象	有意さ
原子炉	β崩壊	$\bar{\nu}_e$ 欠損	<b>3.0σ</b>
ガリウム	電子捕獲	$\nu_e$ 欠損	<b>2.7σ</b>
LSND	静止状態での崩壊	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	<b>3.8σ</b>
MiniBooNE	短基線加速器	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	<b>3σ</b>
宇宙論	ビッグバン	有効世代数	<b>~2σ</b>



弱い相互作用をしない  
ステライルニュートリノの証拠???

# ステライルニュートリノ振動

## MNS行列

$$U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} & U_{\mu 4} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} & U_{\tau 4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{pmatrix}$$

ニュートリノ世代数 3+1

+1  $\Delta m^2$

$$\Delta m_{14}^2 \gg \Delta m_{12}^2, \Delta m_{13}^2$$

+3混合角

$$|U_{e4}|^2, |U_{\mu 4}|^2, |U_{\tau 4}|^2$$

**$\nu_e$  消失**

$\nu_e \rightarrow \nu_x$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2 \frac{\Delta m_{41}^2}{4E}$$

$$\sin^2 2\theta_{ee} = 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2)$$

**$\nu_\mu$  消失**

$\nu_\mu \rightarrow \nu_x$

$$P_{\mu\mu} = 1 - \sin^2 2\theta_{\mu\mu} \sin^2 \frac{\Delta m_{41}^2}{4E}$$

$$\sin^2 2\theta_{\mu\mu} = 4|U_{\mu 4}|^2(1 - |U_{\mu 4}|^2)$$

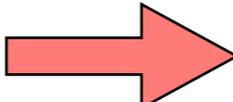
**$\nu_e$  出現**

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$P_{\mu e} = \sin^2 2\theta_{\mu e} \sin^2 \frac{\Delta m_{41}^2}{4E}$$

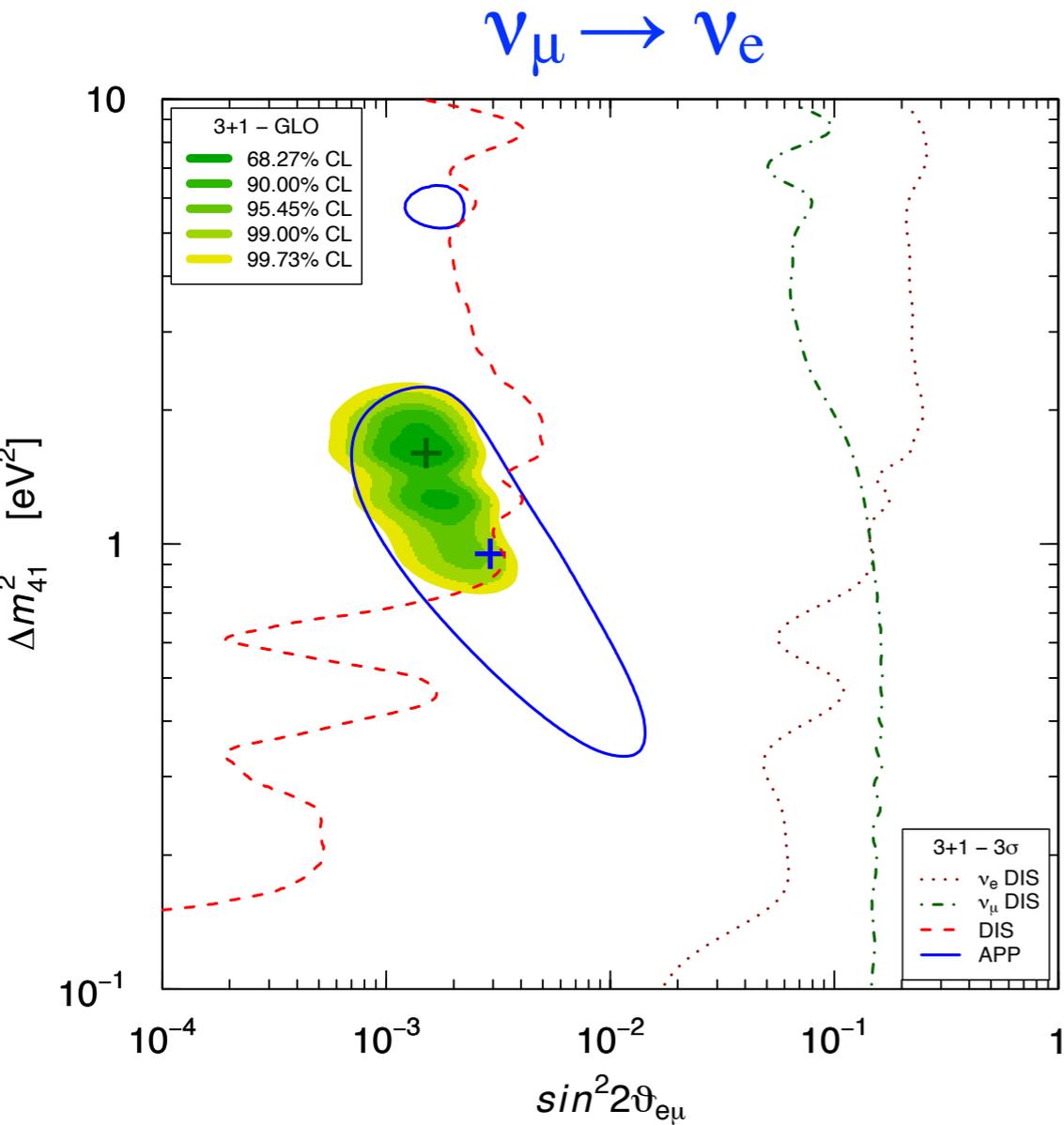
$$\sin^2 2\theta_{\mu e} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu 4}|^2$$

$$\sim \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2 2\theta_{\mu\mu}$$

$\nu_e$ 出現  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$    $\nu_e$ 消失 &  $\nu_\mu$ 消失を要求

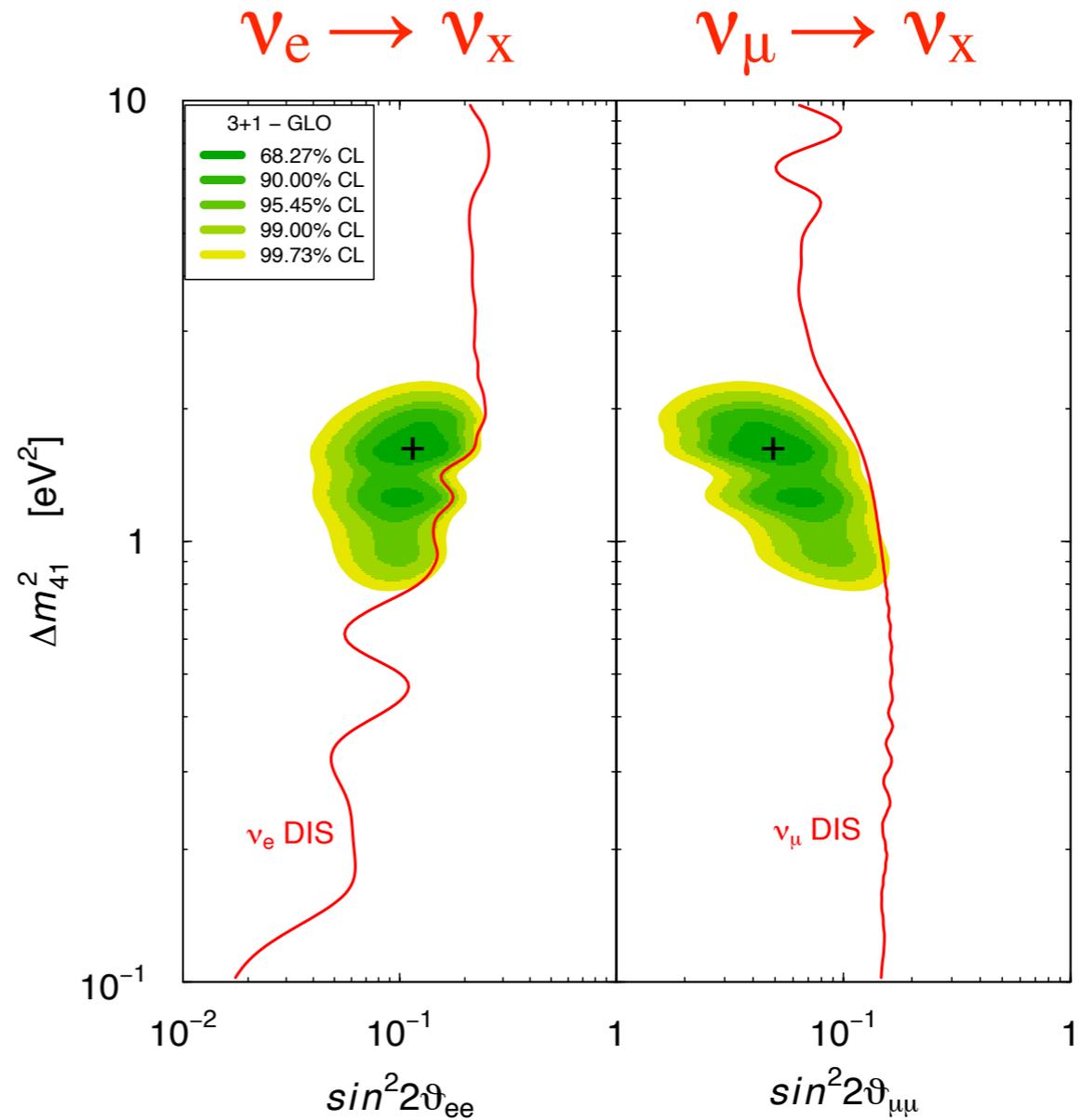
# グローバル振動解析

C. Giunti, arXiv:1311.1335



( $\bar{\nu}_e$ ) 出現を示唆

LSND	NOMAD
MiniBooNE	ICARUS
BNL-E776	OPERA
KARMEN	



( $\bar{\nu}_e$ ) 消失を示唆

Reactor  
Gallium

( $\bar{\nu}_\mu$ ) 消失を示唆せず

CDHSW  
MINOS  
SciBooNE-MiniBOONE

$L/E \sim 1 \text{ m/MeV}$   
短距離振動

# ステライルニュートリノ探索

計画中のステライルニュートリノ探索実験

Experiment Type	Appearance / Disappearance	Oscillation Channel	Projects
Reactor	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	Nucifer, Stéréo, Scraam, Neutrino-4, DANSS, Poséidon, MARS, ...
Radioactive Source	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	CeLAND, SOX (Cr & Ce), Sage2, SNO+, LENS-s
Cyclotron	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	IsoDAR
Pion / Kaon Decay-at-Rest	Apparition & Disappearance	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	OscSNS, CLEAR, DAEδALUS, KDAR
Pion Decay-in-Flight (Beam)	Appearance & Disappearance	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	MINOS+, MicroBooNE, LAr1kton+MicroBooNE, Icarus/Nessie@CERN
Low-E Neutrino Factory	Appearance & Disappearance	$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	vSTORM@Fermilab

arXiv:1204:5379

“Light Sterile Neutrinos: A White Paper”

21の実験が計画中

ステライルニュートリノ振動  
の証明 or 排除

数年以内にいくつかの実験が開始予定

CeLAND実験もその1つ

もしステライルニュートリノが発見されたら...

- 標準理論を超えた素粒子（新フェルミオン）が存在することが示される

→ **新しい素粒子模型の構築**

- 質量次第ではダークマターの候補となり得る (~ keV)

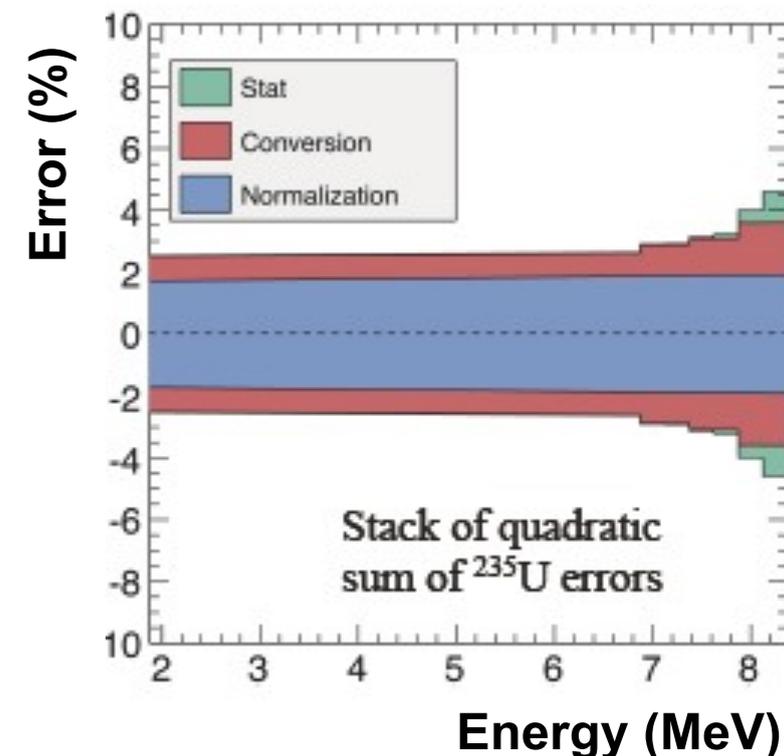
→ **宇宙進化の理論にも大きな影響**

# ソース実験

## これまでの原子炉実験の欠点

- (1) エネルギースペクトルの不定性が大きい (ILL実験)
- (2) 炉心のサイズによって振動が平均化する
- (3) 原子炉付近でのバックグラウンド対策を要する

## 解決策 コンパクトかつ良く理解された単一核種のソース



Type	Detection	Background	Isotope	Production	Activity	Projects
$\nu_e$	$\nu_e e \rightarrow \nu_e e$ 5% $E_{res}$ 15cm $R_{res}$  or Radio-chemical	Detector Radioactivity  Solar $\nu$ (irreducible)  $\nu$ generator impurities	$^{51}\text{Cr}$ 0.75 MeV $t_{1/2}=26\text{d}$	$n_{th}$ irradiation in Reactor	>3 MCi	Sage LENS
			$^{37}\text{Ar}$ 0.8 MeV $t_{1/2}=35\text{d}$	$n_{fast}$ irradiation in Reactor (breeder)	>10 MCi	SOX (SNO+)
					5 MCi	Ricochet
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ $E_{th}=1.8\text{ MeV}$  ( $e^+, n$ )  5% $E_{res}$ 15cm $R_{res}$	reactor $\nu$ , geo $\nu$ ,  $\nu$ generator impurities	$^{144}\text{Ce}$ $E < 3\text{ MeV}$ $t_{1/2}=285\text{d}$	spent nuclear fuel reprocessing + REE extraction	75 kCi	CeLAND
					500 kCi	SOX
			$^{90}\text{Sr}$ $^{106}\text{Rh}$			

ソース +  
液体シンチレータ検出器

→  $^{51}\text{Cr}$  out Borexino

→  $^{144}\text{Ce}$  in/out KamLAND

→  $^{144}\text{Ce}$  in/out Borexino

→  $^{144}\text{Ce}$  out Daya-Bay

# $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ 反ニュートリノソース

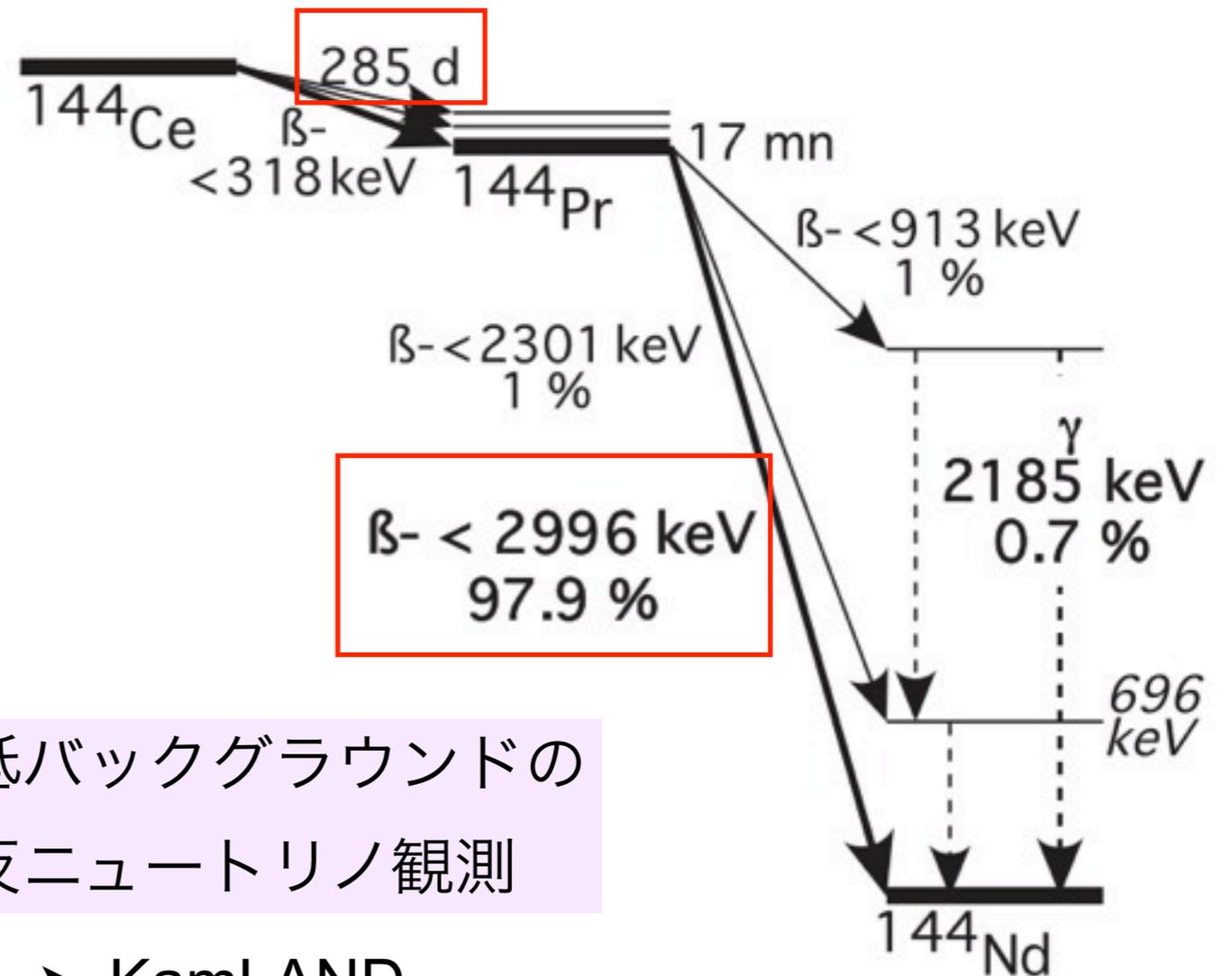
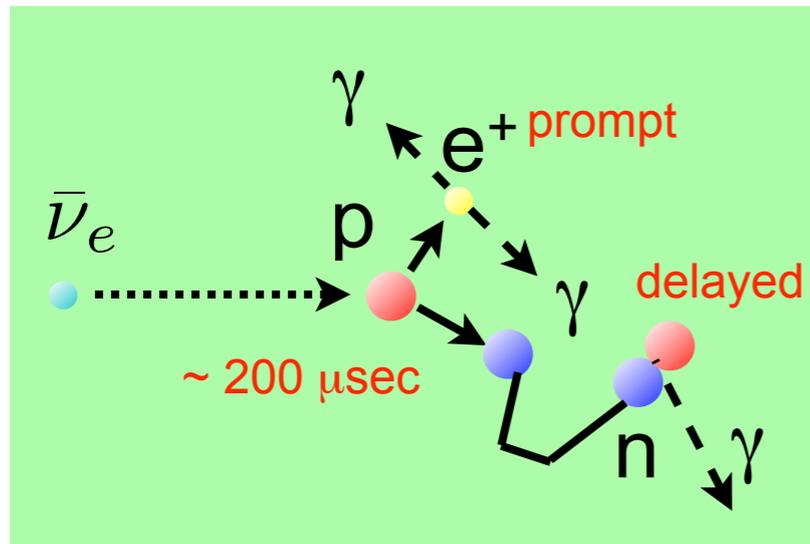
## $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ の利点

(1)  $^{144}\text{Ce}$  半減期: 285日

製作・運搬に十分な時間を確保

(2)  $^{144}\text{Pr}$   $\beta$ 崩壊 Q値: 3.0 MeV

$\bar{\nu}_e$  p エネルギー閾値 1.8 MeV



低バックグラウンドの  
反ニュートリノ観測

→ KamLAND

**1000 ton液体シンチレータ検出器**

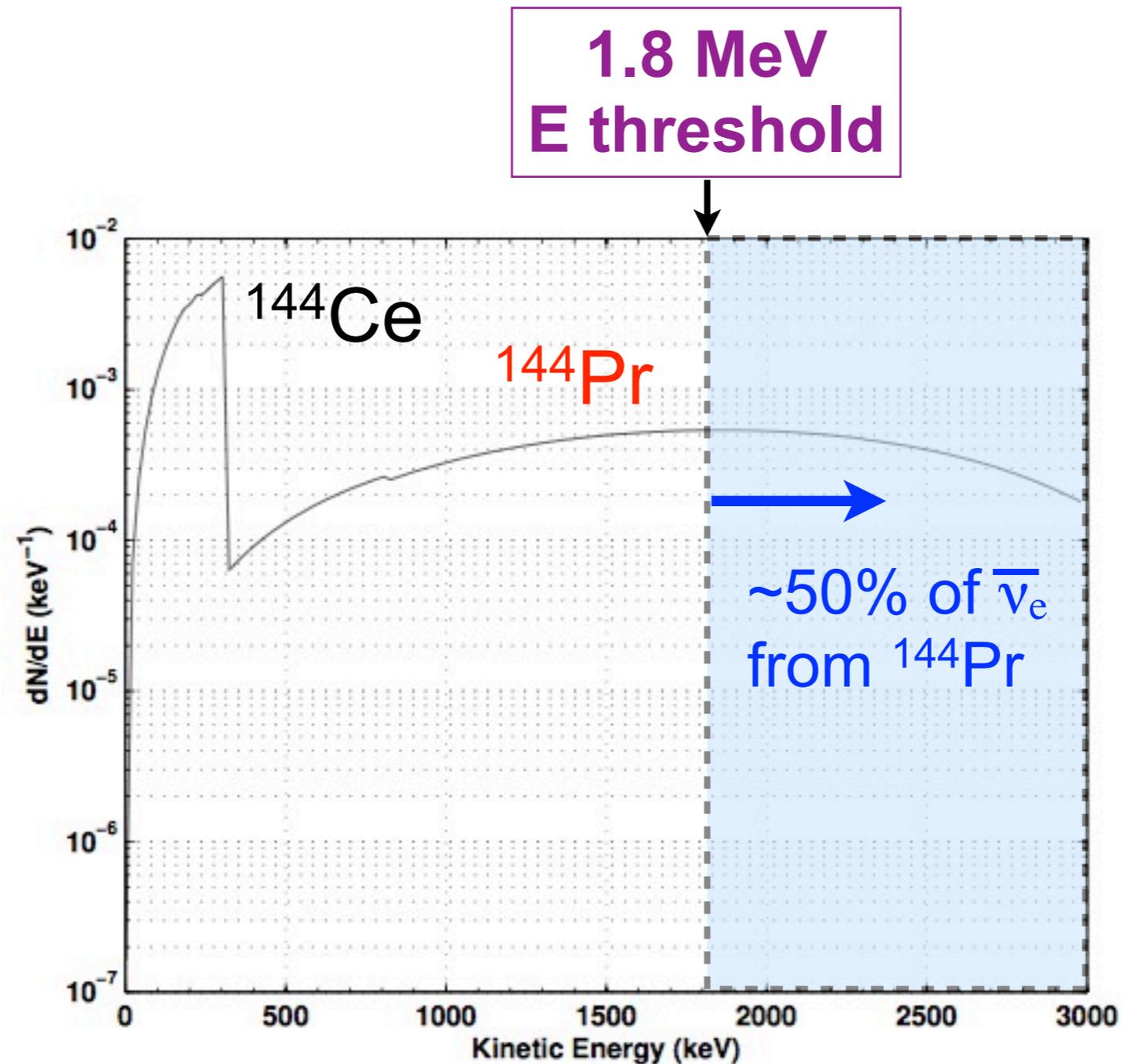
(3) 高強度  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$

$^{235}\text{U}$ 核分裂 →  $^{144}\text{Ce}$ :5%の収率

**$^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ 強度: 50-100 kCi**

高統計かつ低バックグラウンドの反ニュートリノ消失探索実験

# $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ 反ニュートリノスペクトル



スペクトル形状の誤差（主にweak magnetism correction）は、  
 $^{144}\text{Pr}$   $\beta$  スペクトル測定によって縮小する予定

# $^{144}\text{Ce}$ の生成

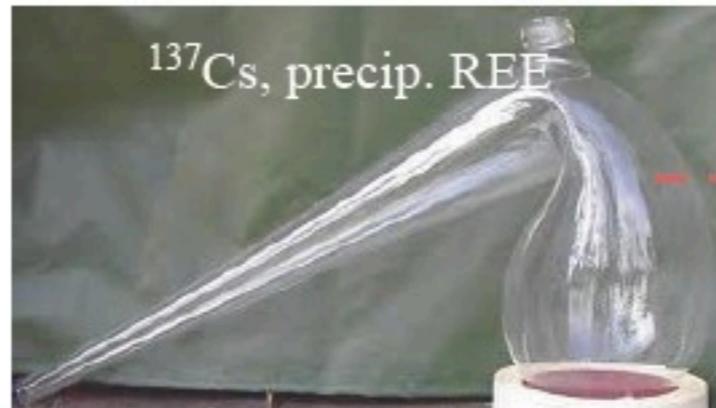


VVR-440, storage



TUK-6

Cutting, digestion  
Purex



$\text{CeO}_2$  calcination



Pressing

タングステンシールド  
(1.5トン)

$\gamma$ 線遮蔽(2 MeV)  $10^{-13}$

Th. Lasserre -  $\nu$ -geoscience 2013

75 kCi (2.77 PBq), 6 kg  $\text{CeO}_2$  (600 W)

# $^{144}\text{Ce}$ の輸送方法



## 1. 輸送容器の選定

B型容器	TN-MTR	23 ton	JMS-87Y	18.5 ton
------	--------	--------	---------	----------

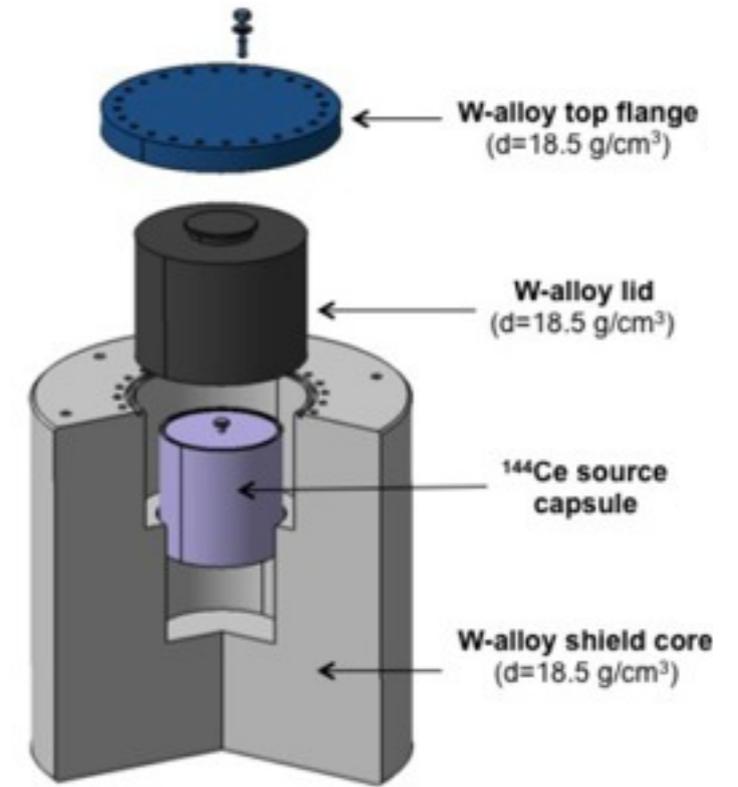
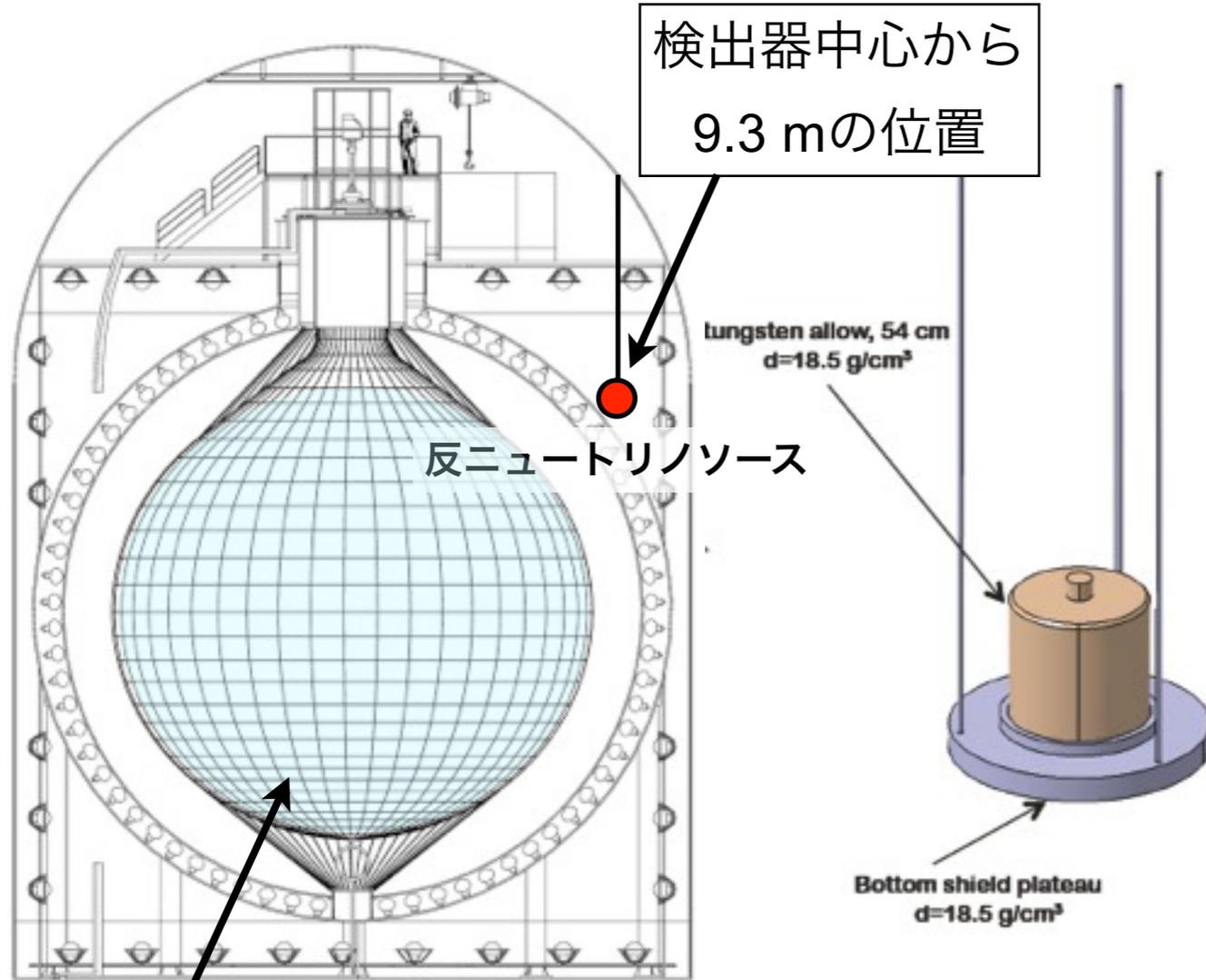
## 2. 輸送ルートへの短縮（高強度を維持）

ボストチヌイ港経由の船舶輸送を検討

# CeLAND

KamLAND

Ce反ニュートリノソース

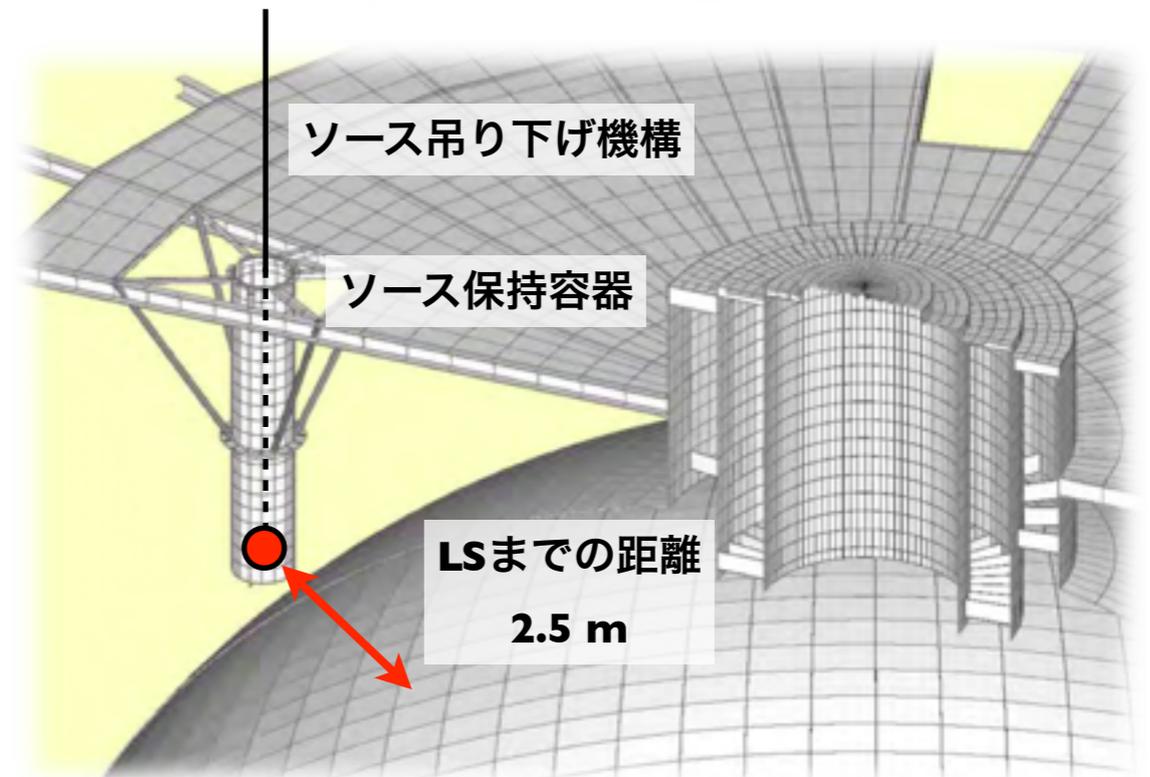


1000トン液体シンチレータ

エネルギー分解能  $6.4\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$

位置分解能  $12 \text{ cm} / \sqrt{E(\text{MeV})}$

~1 eV<sup>2</sup> 振動探索が可能



# $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ 強度測定

熱量計

$^{144}\text{Ce}$ ソース (600 W) 水冷

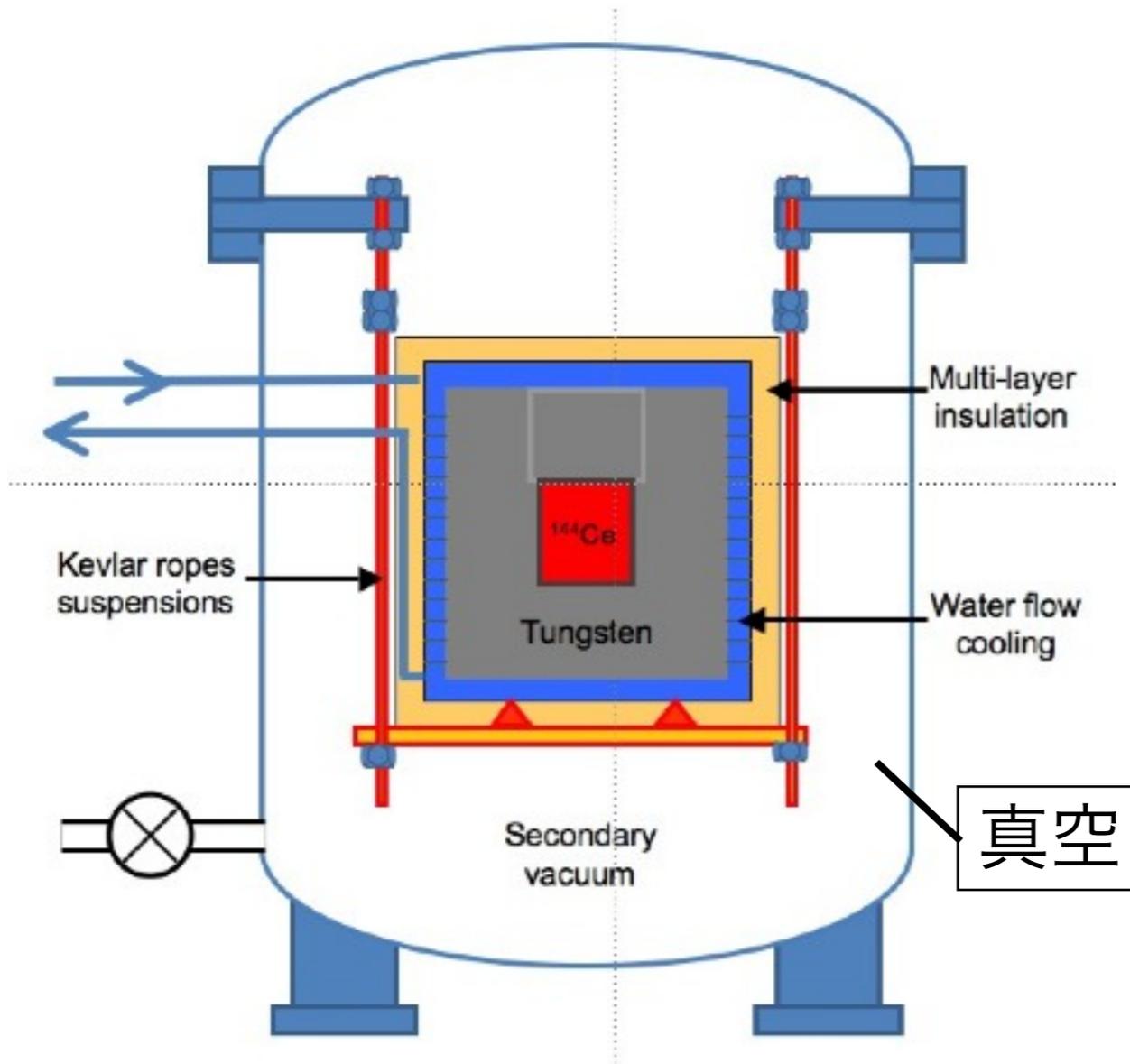
-  $\Delta T = 40 \text{ K}$

- 水流  $\sim 12 \text{ liter/h}$

短時間で熱平衡に到達

断熱  $\sim 1 \text{ W}$ を実現するため、  
真空容器内にソースをケブラー  
ロープで吊り下げる

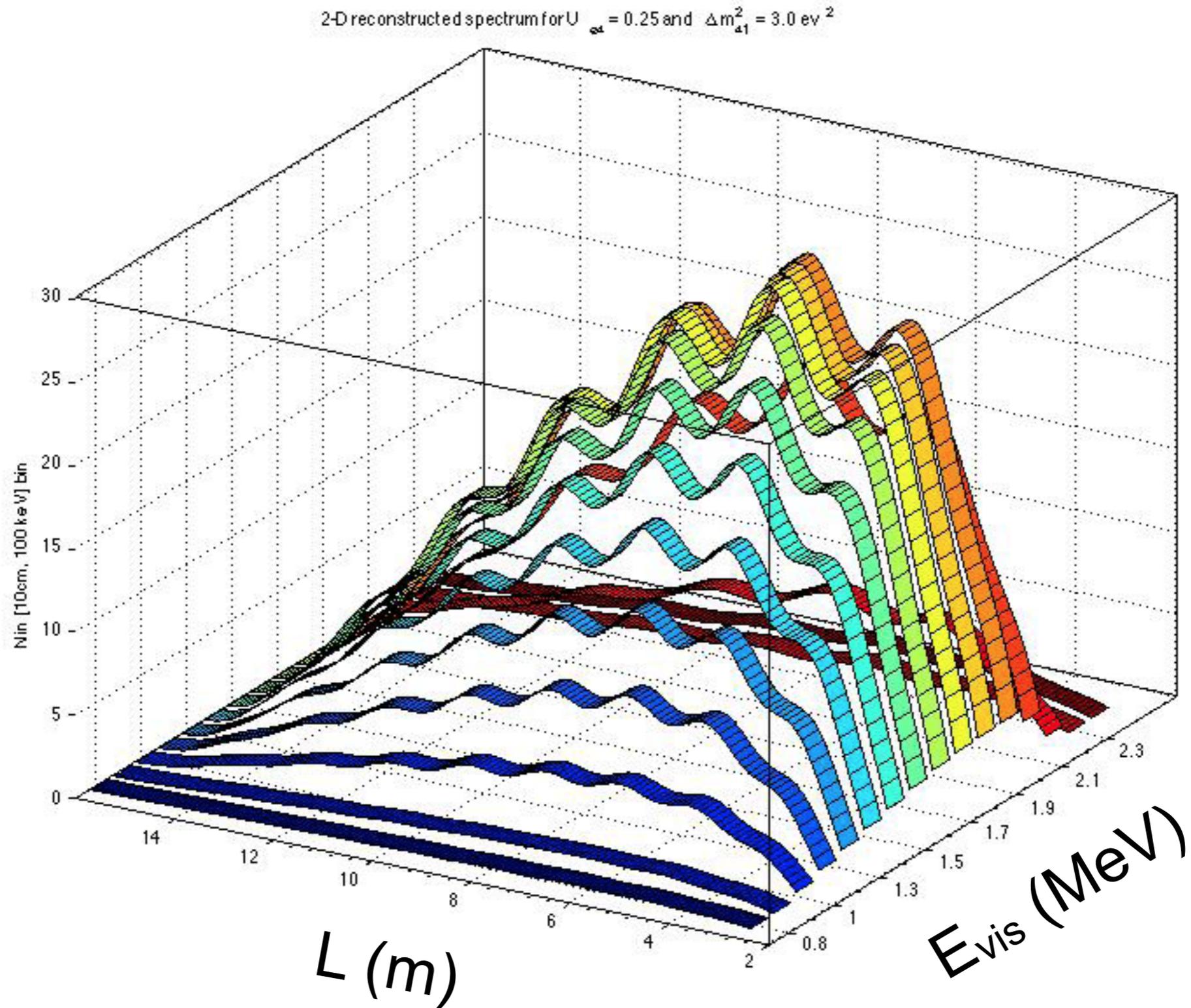
ソース強度の不定性  $\sim 1\%$



レート of 校正は、高い  $\Delta m^2$  の領域 ( $> 3 \text{ eV}^2$ ) で特に重要となる

# $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ 信号

検出器中心から9.3 mの位置 75 kCi  $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ , 1.5 yr



# 観測スペクトル

振動パラメータ  
(global best-fit付近)

$$\sin^2 2\theta_{ee} = 0.1$$

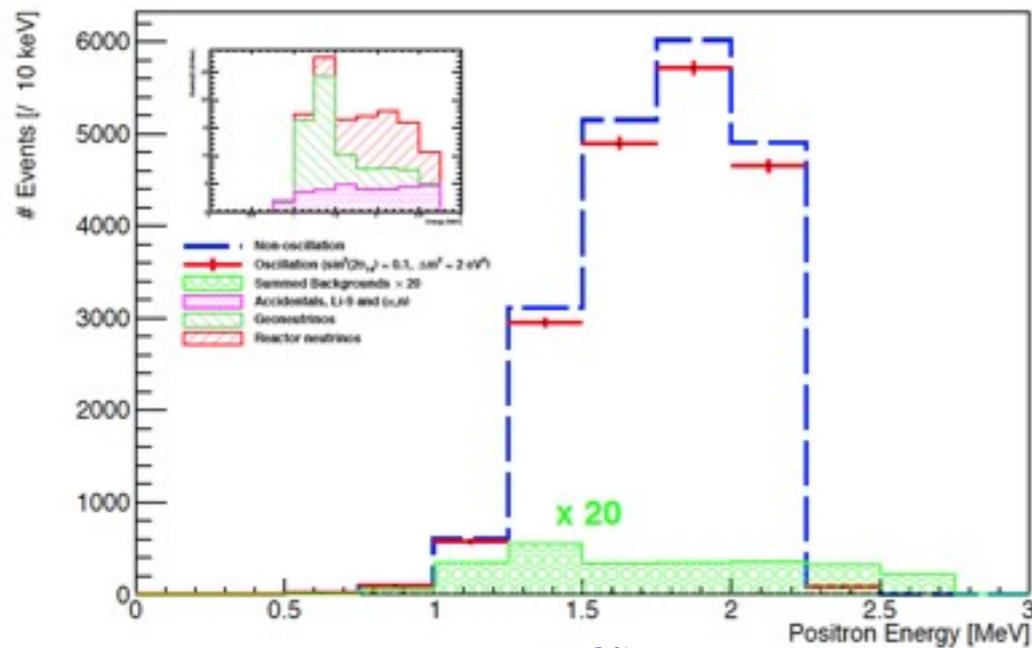
$$\Delta m_{41}^2 = 2 \text{ eV}^2$$

距離 / エネルギー

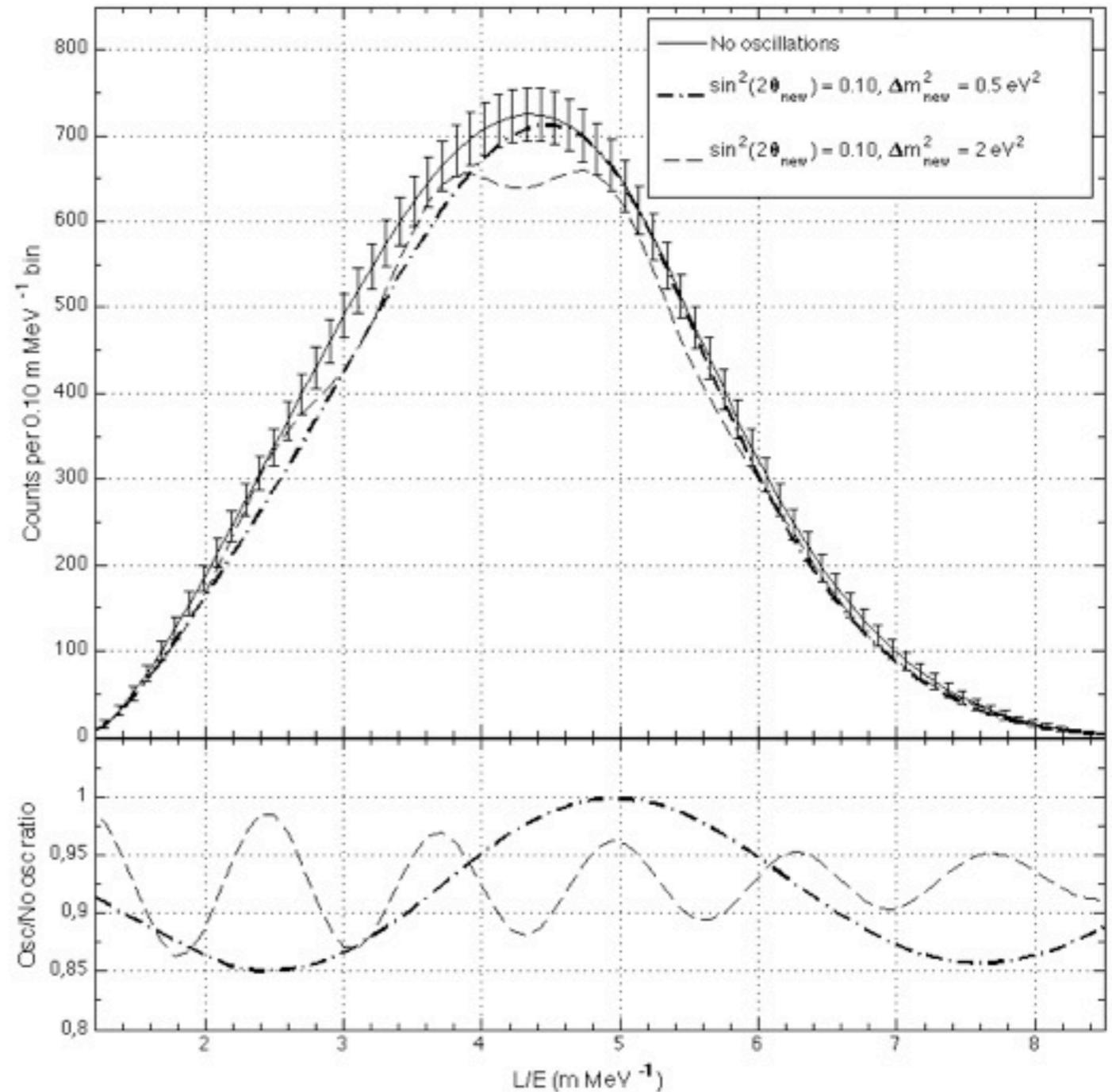
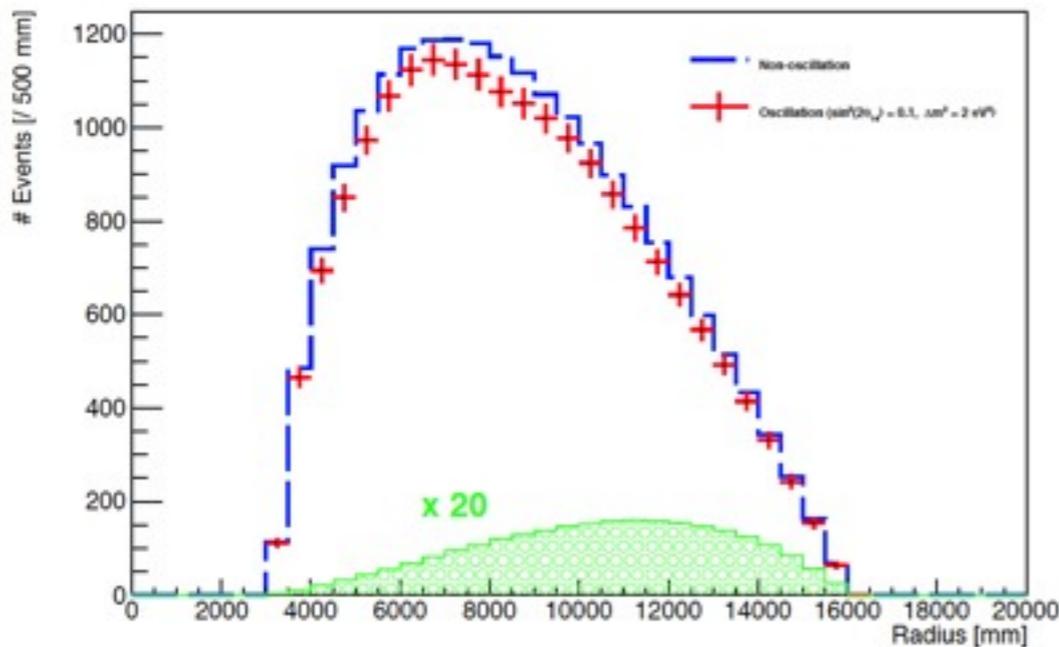
約3周期分の振動に感度



エネルギー

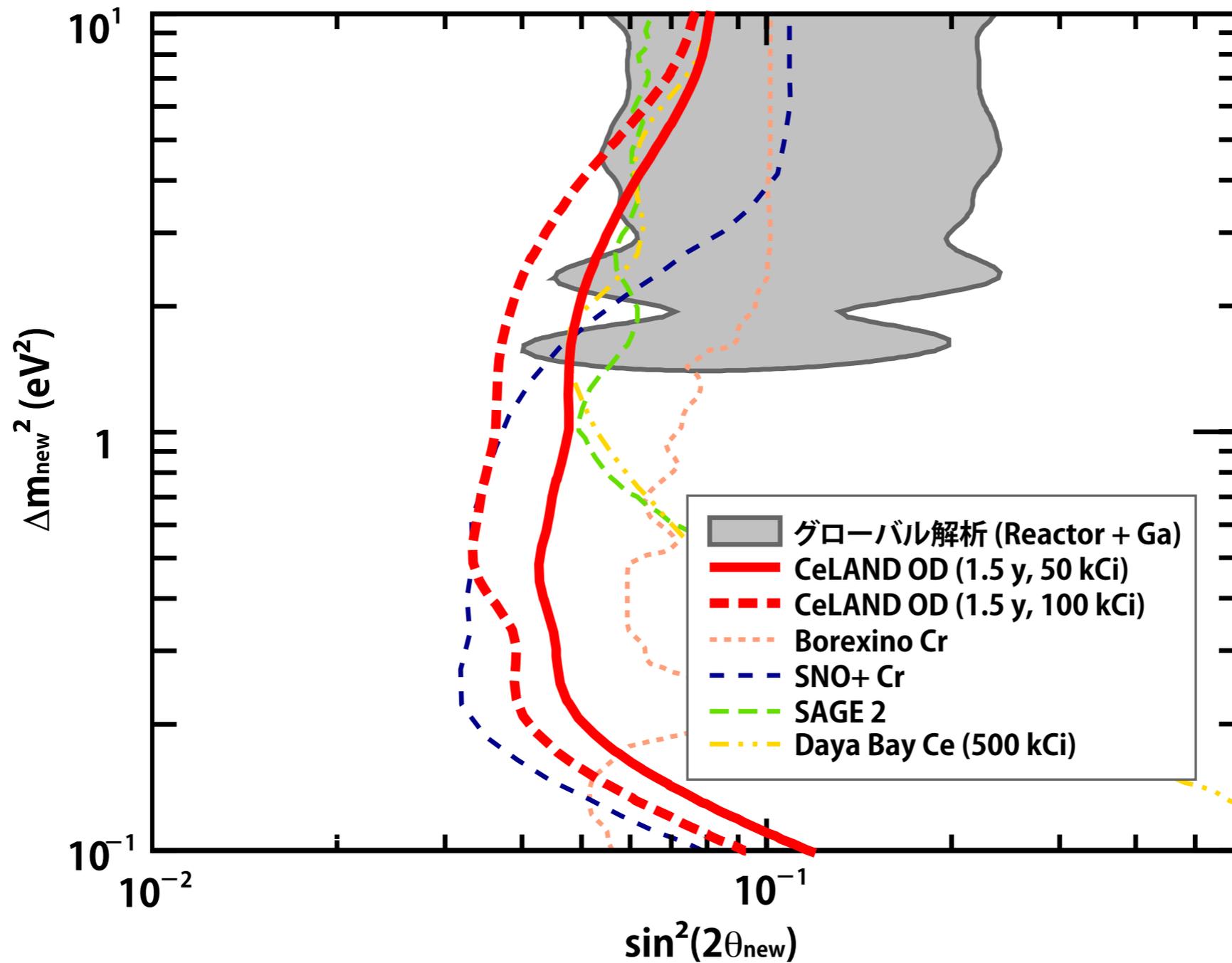


距離



# 感度予測

ニュートリノ振動パラメータに対する感度予測 (95% C.L.)



1.5年の観測によってグロース解析の振動解を検証

# CeLAND Collaboration

## Tohoku University (RCNS)

A. Gando, Y. Gando, S. Hayashida, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, H. Ishikawa, M. Koga, R. Matsuda, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, K. Nakamura, Y. Oki, M. Otani, I. Shimizu, J. Shirai, F. Suekane, A. Suzuki, Y. Takemoto, K. Tamae, K. Ueshima, H. Watanabe, B.D. Xu, S. Yamada, Y. Yamauchi, H. Yoshida

## IPMU

A. Kozlov

## Osaka University

S. Yoshida

## Colorado State University

B. E. Berger

## Saclay, APC

M. Cribier, M. Durero, V. Fischer, J. Gaffiot, T. Lasserre, A. Letourneau, D. Lhuillier, G. Mention, L. Scola, Ch. Veyssire, M. Vivier

## LBNL, University of California (Berkeley)

T. Banks, D. Dwyer, B. K. Fujikawa, Yu. G. Kolomensky, T. O'Donnell

## Nikhef

P. Decowski

## North Carolina Central University

D. M. Markoff

## ITEP

V.N. Kornoukhov, T. V.M. Gelis, G.V. Tikhomirov, I.S. Saldikov

## University of Hawaii

J. G. Learned, J. Maricic, S. Matsuno, R. Milincic

## University of North Carolina

H. J. Karwowski

## University of Tennessee

Y. Efremenko

## University of Washington

J. A. Detwiler, S. Enomoto

60名による国際共同研究（日・米・仏・露）

# まとめ

- 原子炉、ガリウム、加速器、宇宙観測のいずれのアノーマリーも1eV程度のステライルニュートリノによって説明できる
- 多くの短距離ニュートリノ振動実験が計画されている中でCeLAND実験は迅速に実験開始が可能で、示唆されている振動解をカバーする感度を持つ
- CeLAND実験はKamLANDの正式なプロジェクトとして認められ、多くのコラボレータの協力が得られる
  - 2015年 or 2016年初頭に実験開始予定
  - 約1.5年の観測時間 (~20,000 event)
  - 観測エネルギーが異なるため、KamLAND-Zenによる二重ベータ崩壊探索と両立する (地球ニュートリノ観測は休止)