

# 4世代ニュートリノ

極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会

2013年4月24日

東北大学ニュートリノ科学研究センター

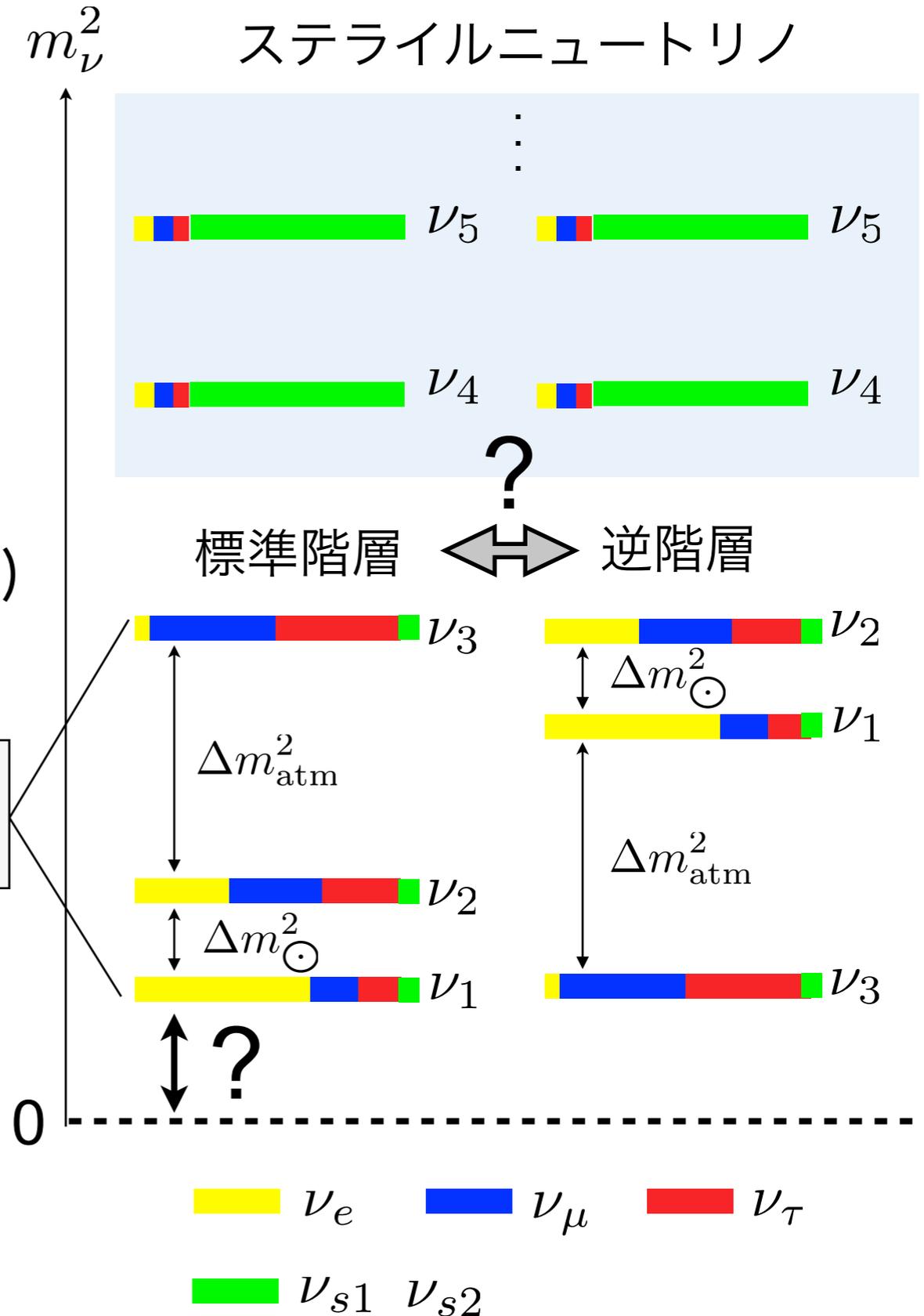
清水 格

# 研究の背景

## ニュートリノ物理の未解決問題

- ニュートリノの絶対質量  
β崩壊,  $0\nu\beta\beta$ 崩壊, 宇宙観測
- 質量階層構造  
ν振動,  $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- レプトン数非保存 (Dirac or Majorana)  
 $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- MNS行列の精密測定  
ν振動
- CP非保存  
ν振動
- 4世代ニュートリノ (ステライル)  
ν振動, 宇宙観測

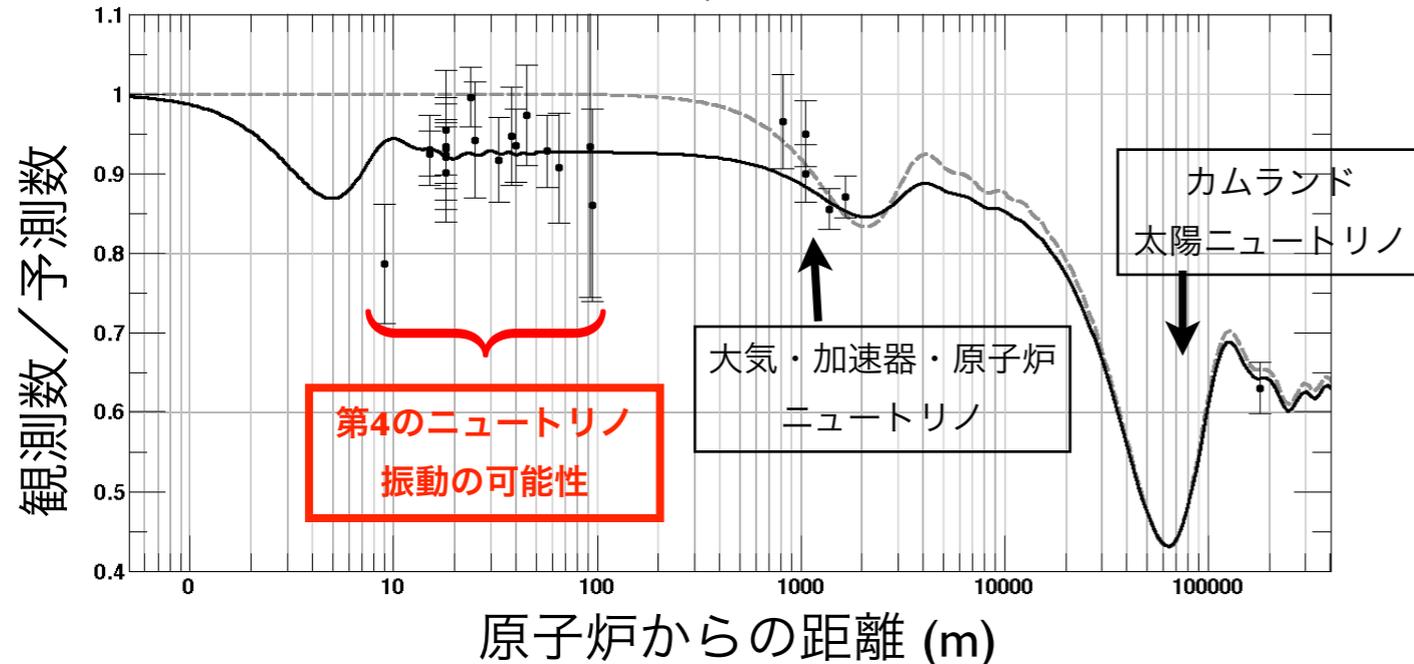
3世代ニュートリノ混合



# 短距離ニュートリノ振動

過去の原子炉反ニュートリノ測定結果

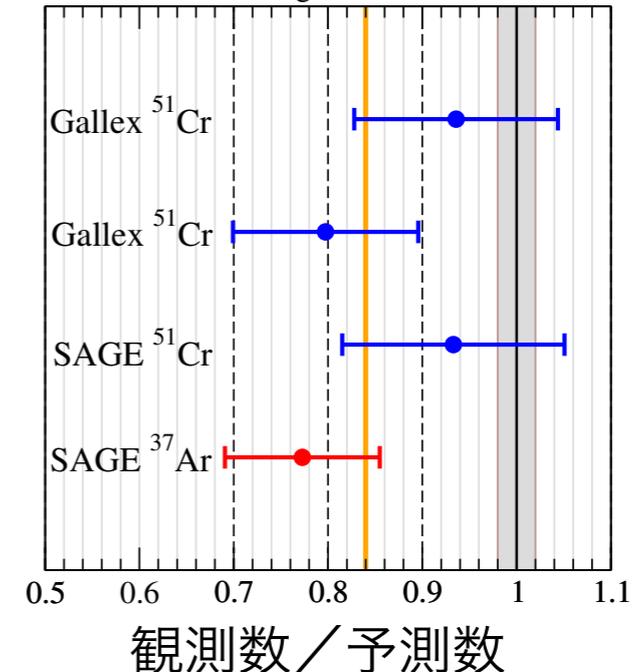
Th. Muller et al., hep-ex/1101.2755



ratio = 0.937 ± 0.027

ガリウムニュートリノソース測定結果

Gallium data using Frekers et al PLB11



ratio = 0.86 ± 0.05

	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	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	$3\sigma$
宇宙論	ビッグバン	有効世代数	$\sim 2\sigma$

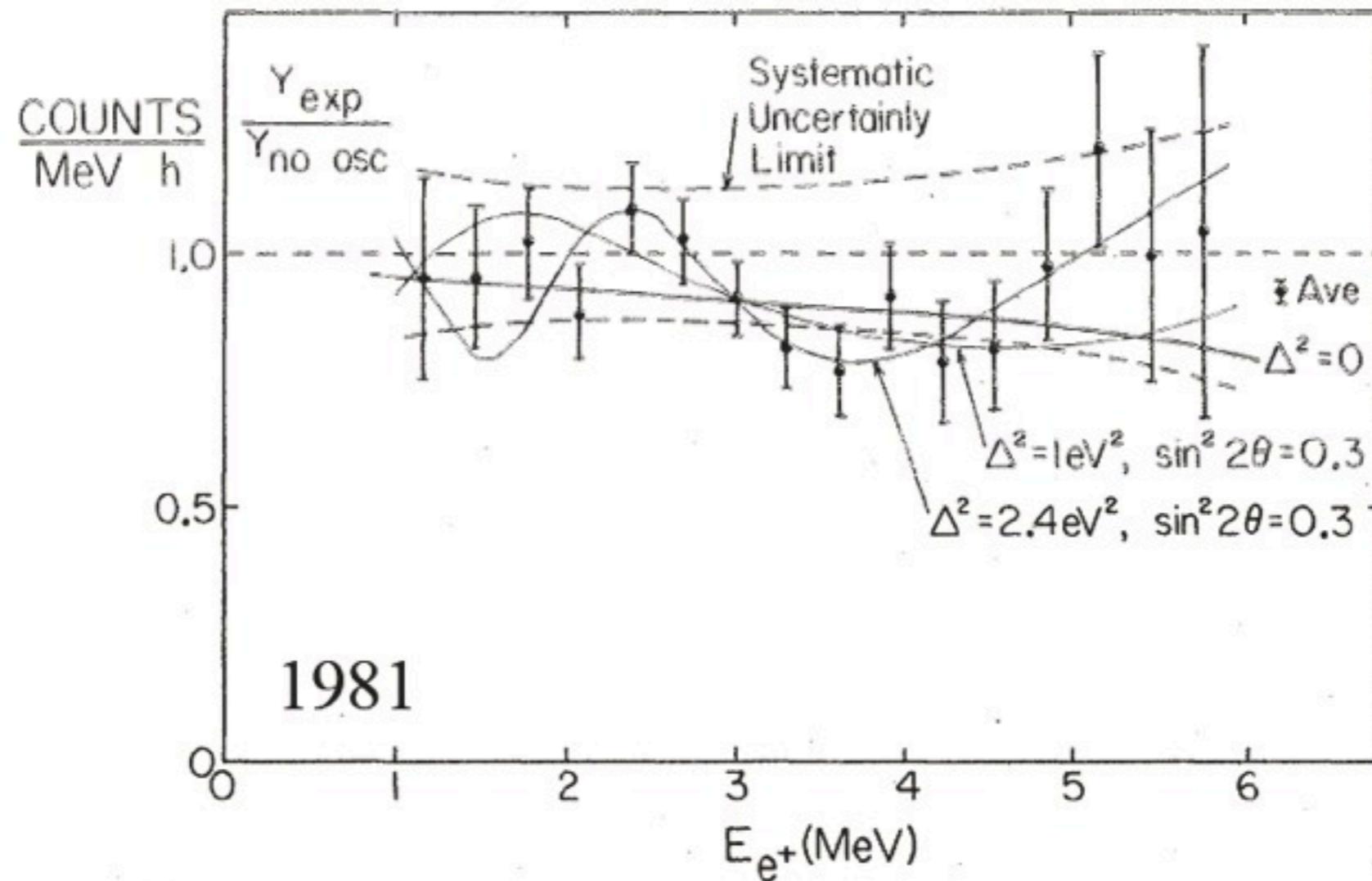
いずれのアノーマリーも1eV程度  
のステライルニュートリノによって  
説明できる



4世代ニュートリノの可能性

# ILLニュートリノ実験 (1981)

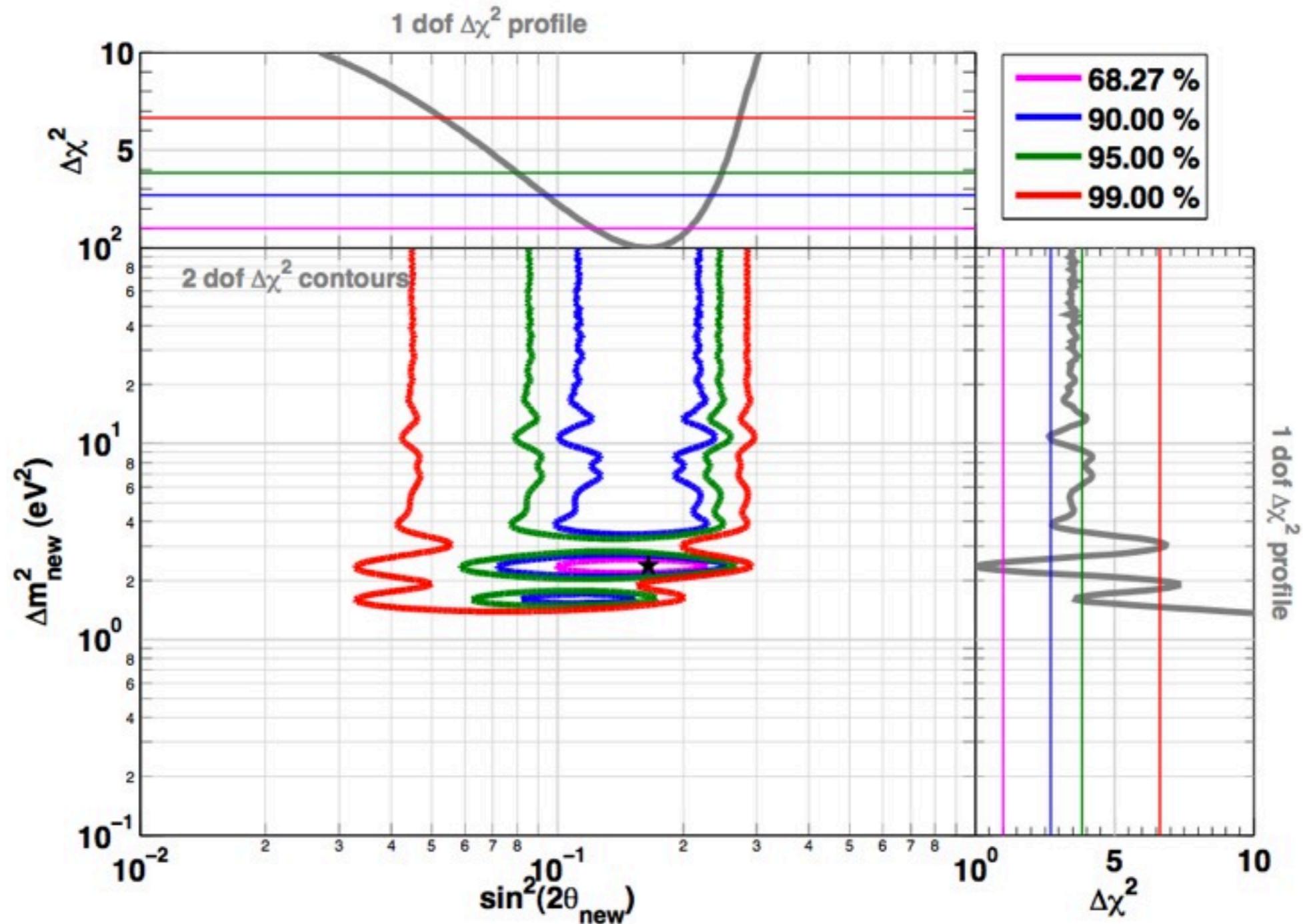
- コンパクトな炉心に $^{235}\text{U}$ 燃料 (大部分) を用いたILL原子炉
- 検出器は炉心から8.8 mの距離



誤差は大きいものの振動のパターンが見えている？

# グローバル振動解析

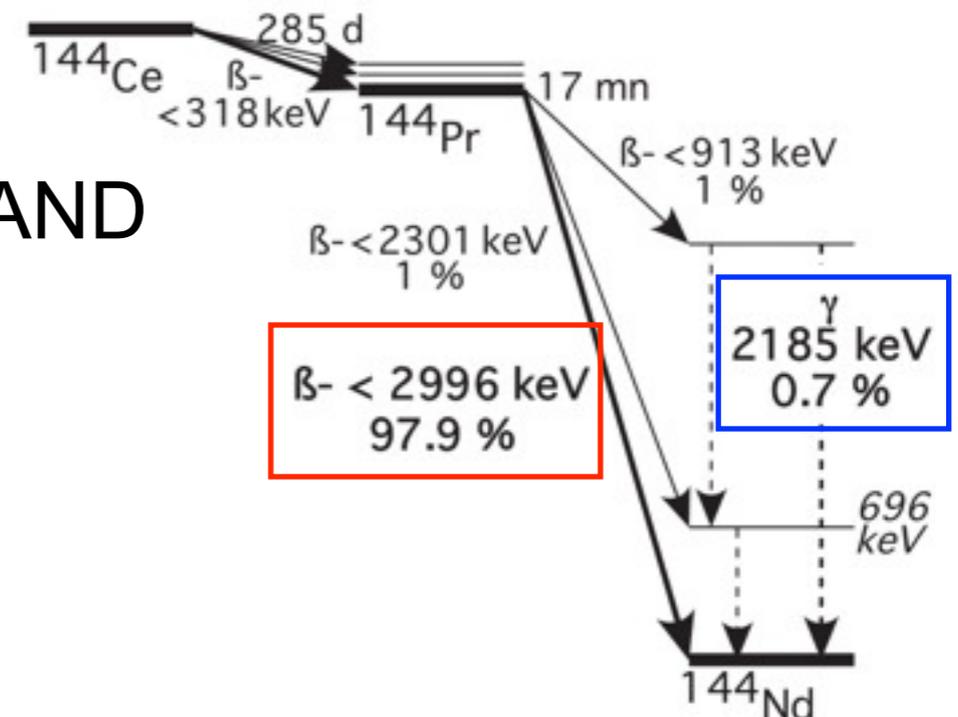
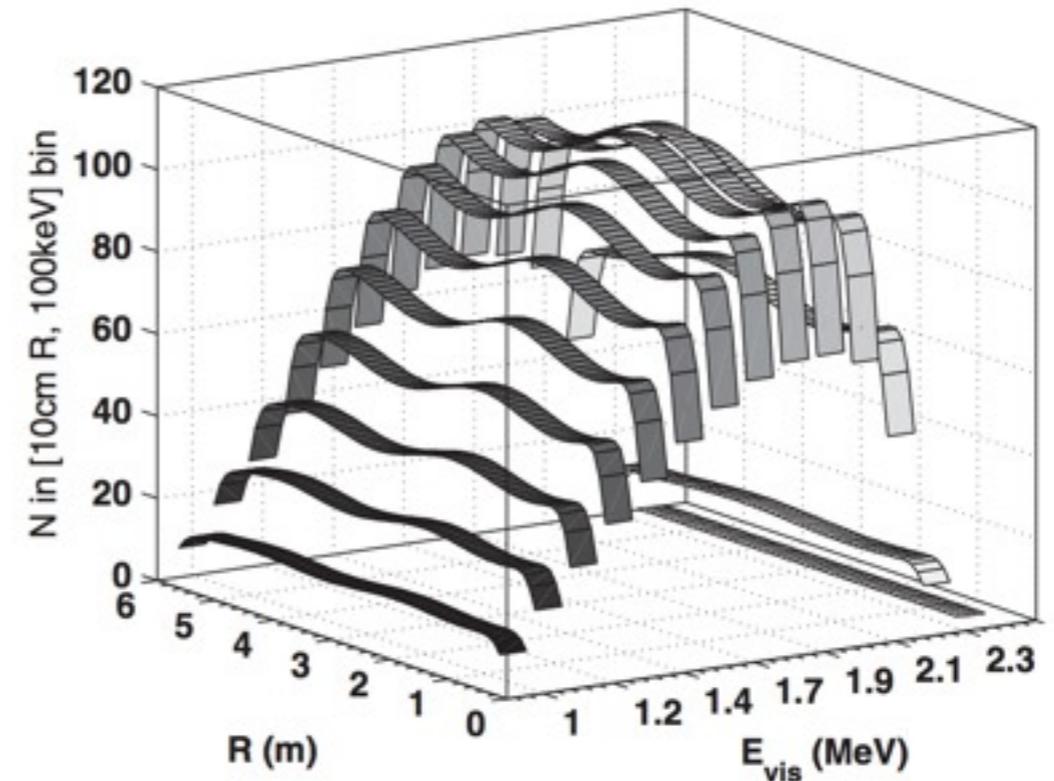
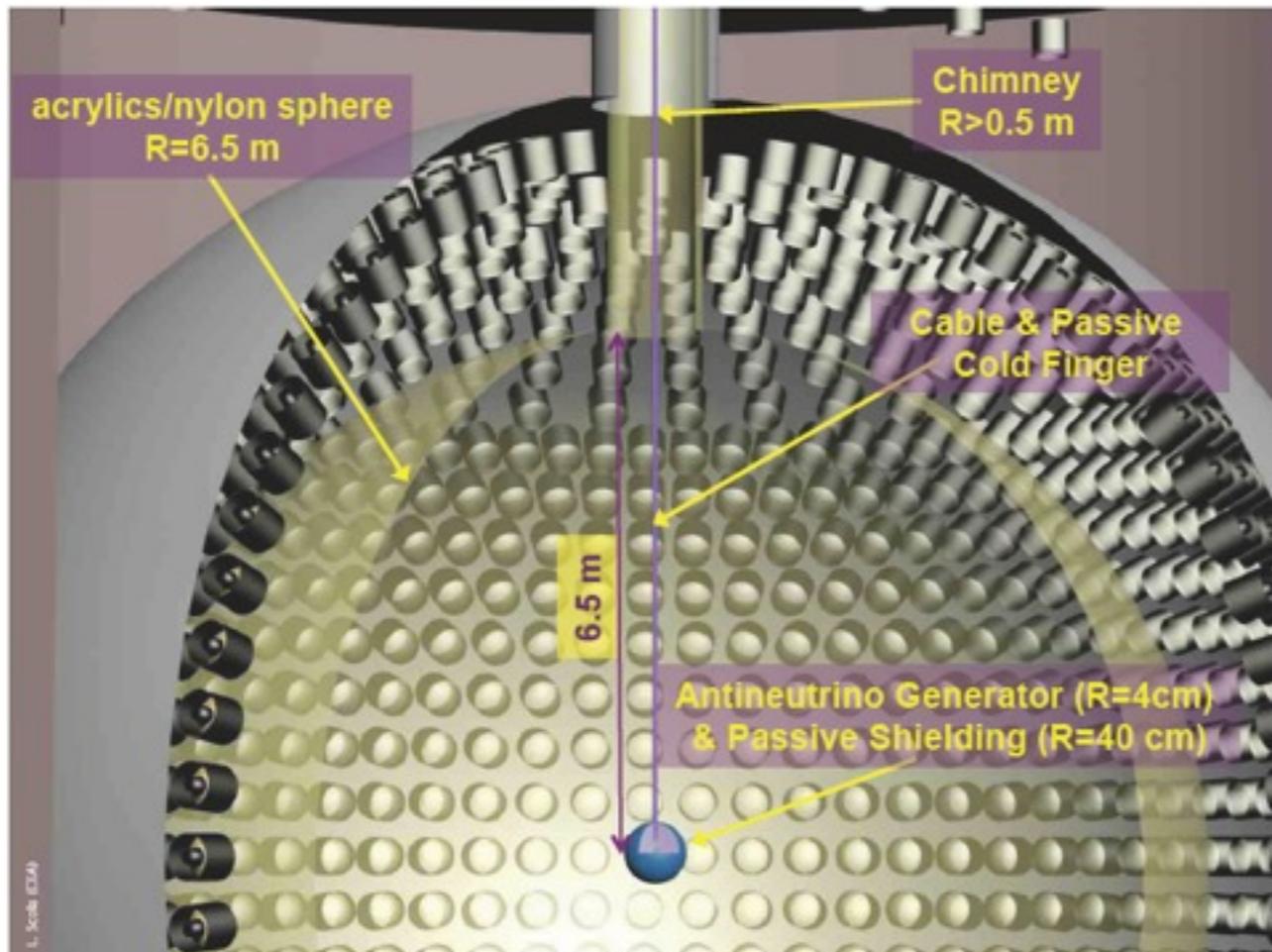
原子炉 + ガリウム + MiniBooNE



~1 eV<sup>2</sup> スケールのニュートリノ振動

# 4世代ニュートリノ探索: CeLAND

Th. Lasserre (CEA-Saclay, Irfu)



- **75 kCi  $^{144}\text{Ce}$**  反ニュートリノ源 + KamLAND
- $^{144}\text{Ce}$  半減期: 285日
- $^{144}\text{Pr}$   $\beta$ 崩壊 Q値: 3.0 MeV
- 高統計量 観測数  $\sim$  **40,000 / 年**
- $\sim 1 \text{ eV}^2$  振動探索  $\rightarrow$   **$L/E > 1$  [m / MeV]**

# $^{144}\text{Ce}$ の生成

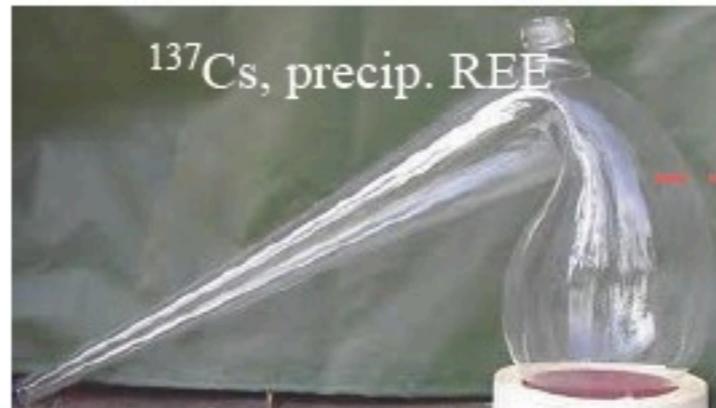


VVR-440, storage



TUK-6

Cutting, digestion  
Purex



Displacement  
Chromatography



$\text{CeO}_2$  calcination



Pressing

タングステンシールド  
(3トン)



Th. Lasserre - v-geoscience 2013

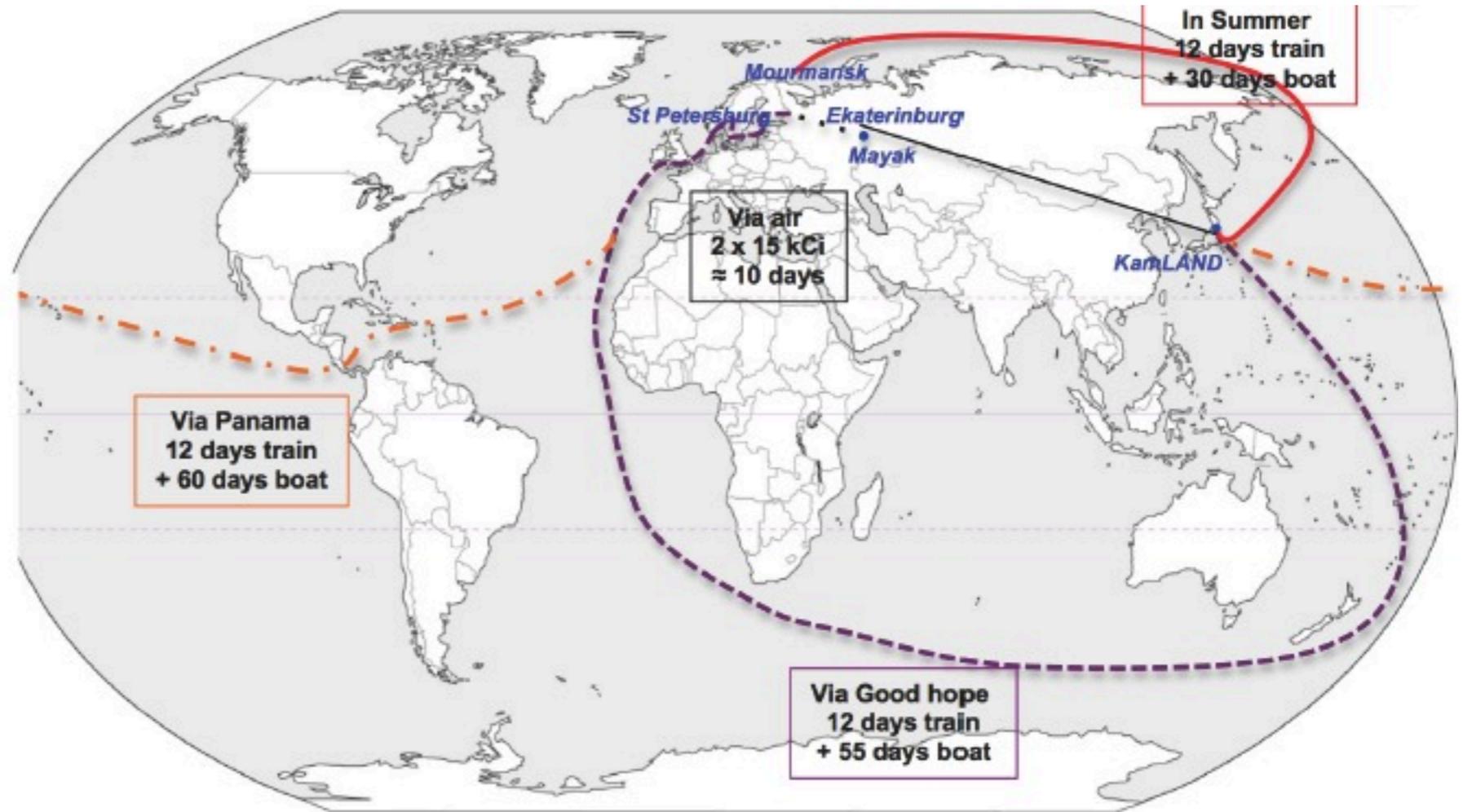
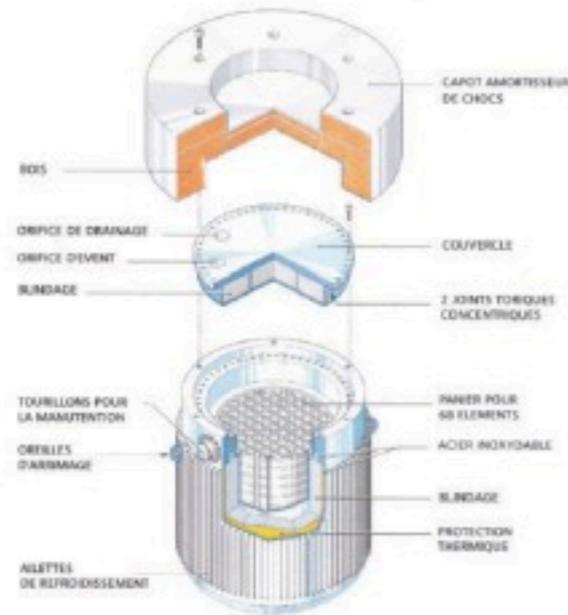
$\gamma$ 線遮蔽(2 MeV)  $10^{-13}$

75 kCi (2.77 PBq), 10 kg  $\text{CeO}_2$  (600 W)を PA Mayak (ロシア) で生成

# $^{144}\text{Ce}$ の輸送方法

輸送用の認証容器

23トン！



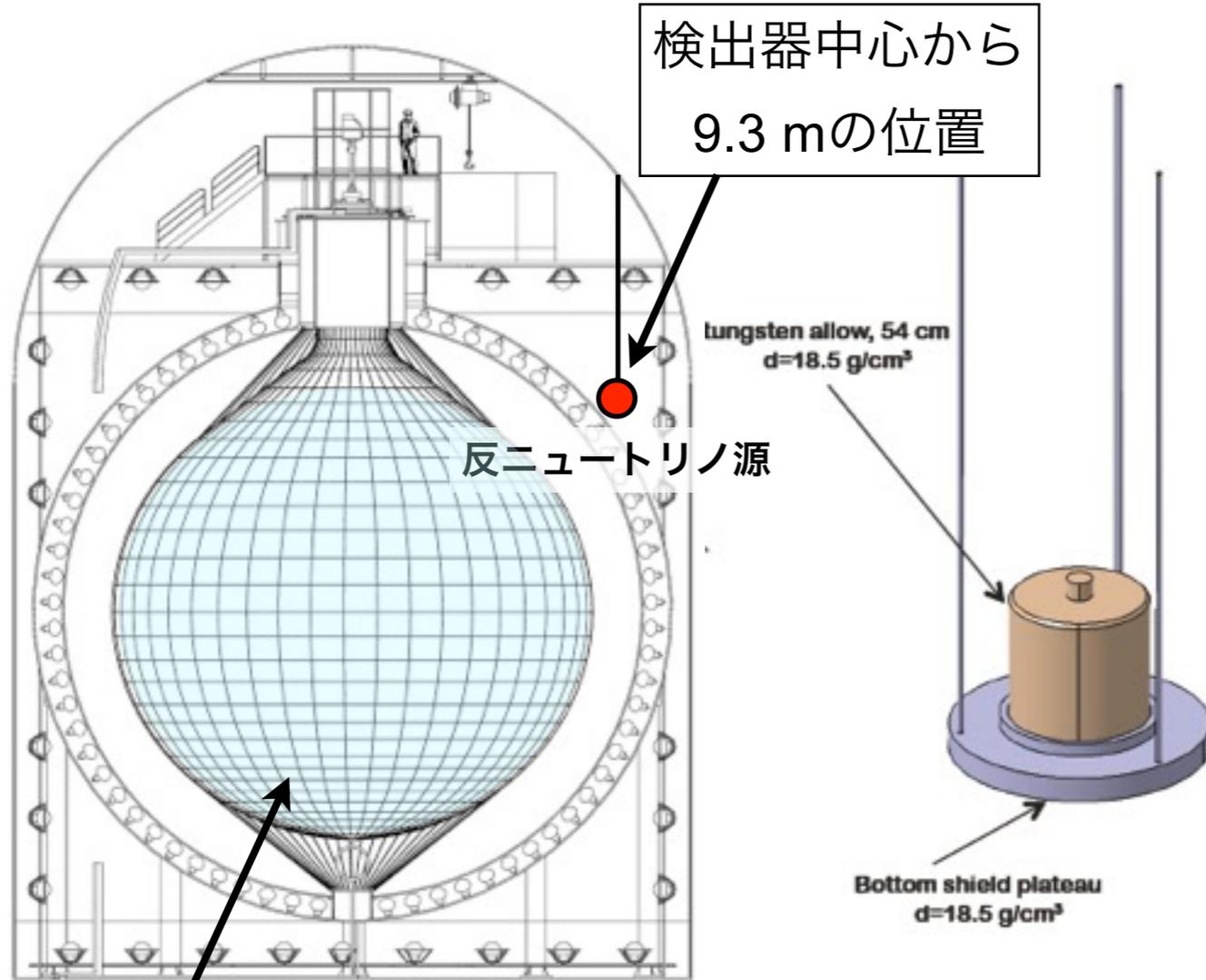
Mayak（ロシア）からKamLANDまでの $^{144}\text{Ce}$ の輸送方法

IAEAによる規制

- 空輸            個々の線源強度の上限: 16.2 kCi  $^{144}\text{Ce}$     分割？
- 海上輸送      線源を受入可能な港の数は限られている

# CeLAND phase 1

KamLAND

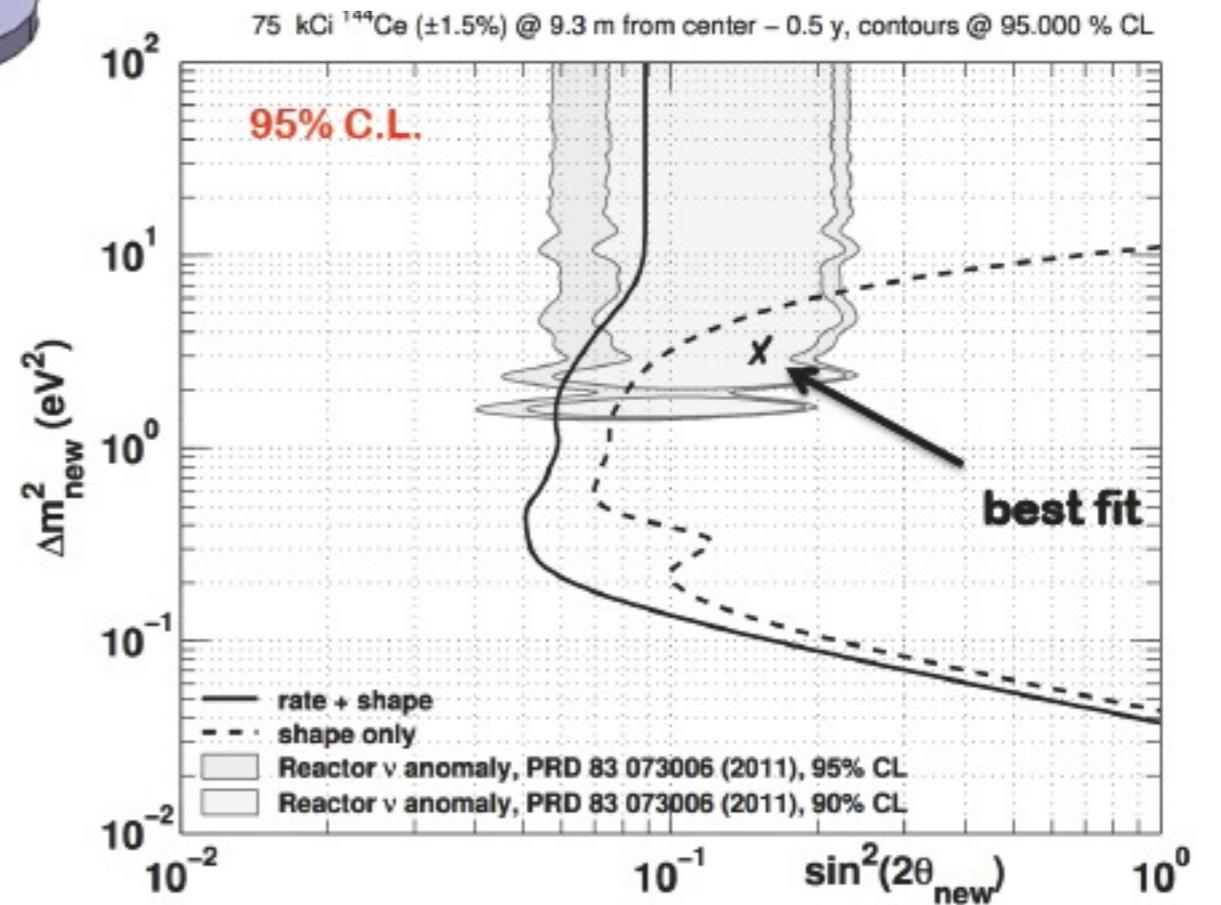
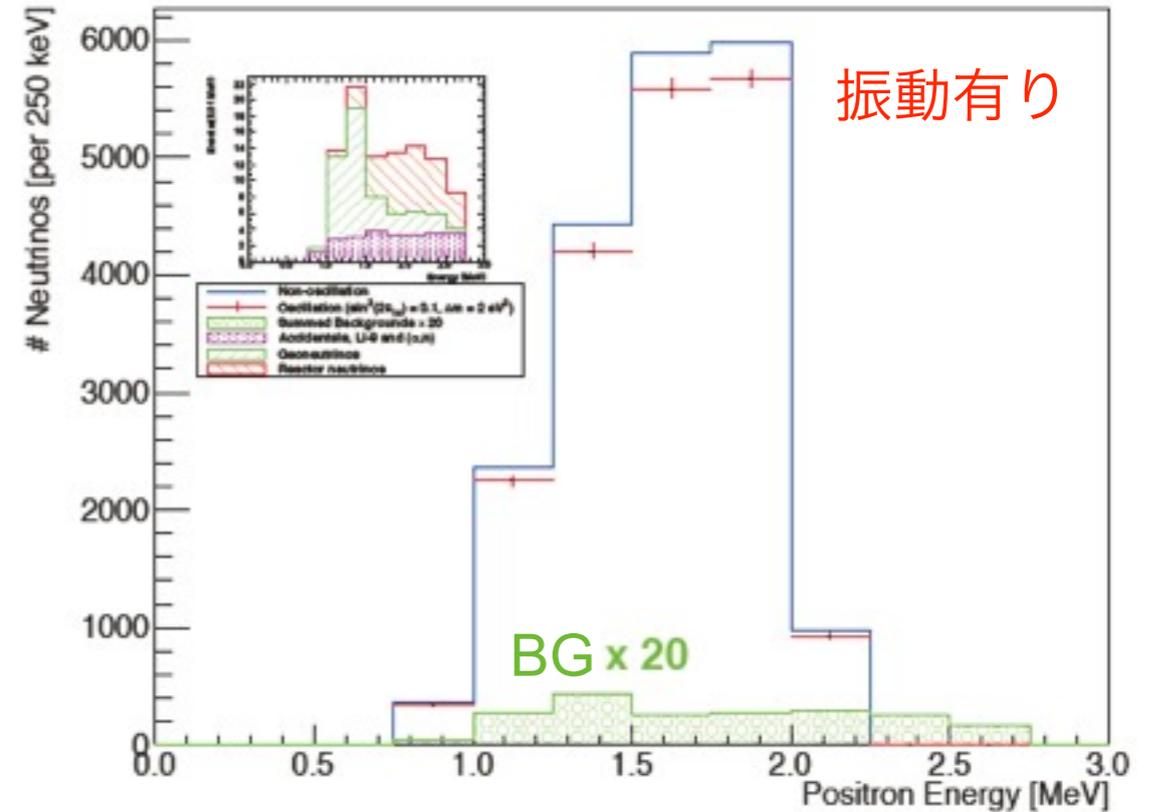


1000トン液体シンチレータ

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

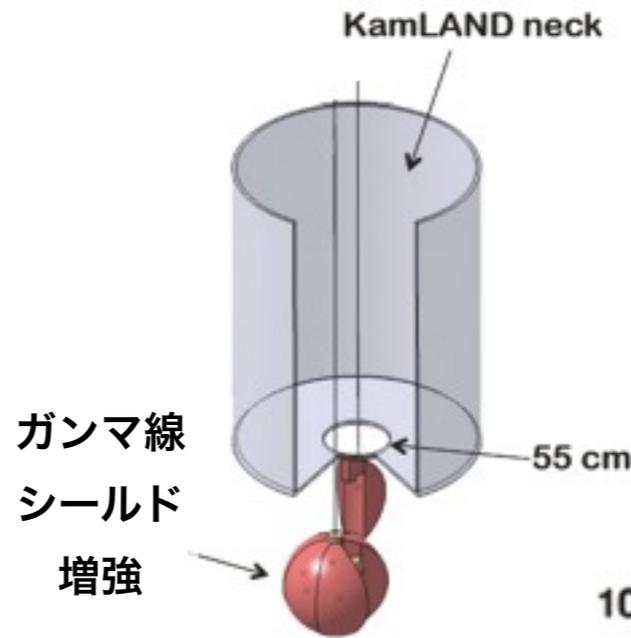
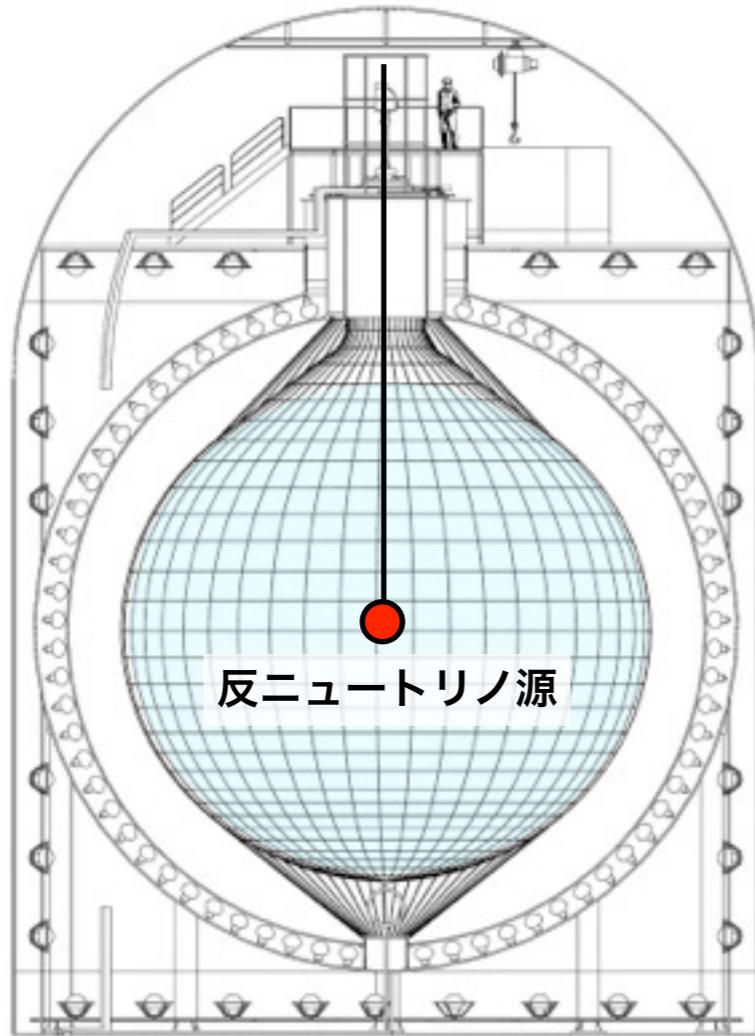
位置分解能  $12 \text{ cm} / \sqrt{E(\text{MeV})}$

~1 eV<sup>2</sup> 振動探索が可能



# CeLAND phase 2

KamLAND



## 改善点

- phase 1 の約 5 倍の統計量での観測
- スペクトルのみでもグローバル解析の95% C.L.領域をカバー

線源強度の減衰

75kCi  $^{144}\text{Ce}$  (phase 1)

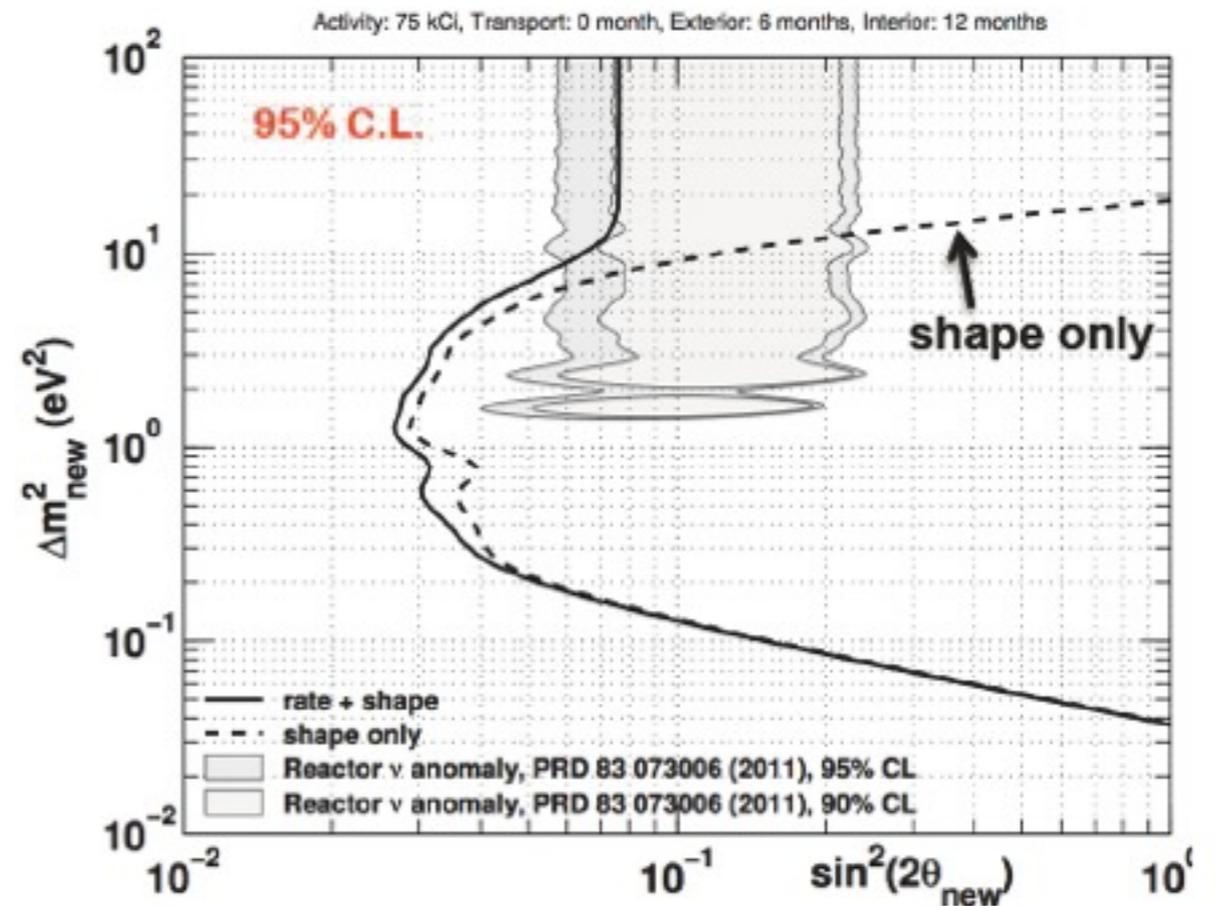
↓ 6ヶ月後

50kCi  $^{144}\text{Ce}$  (phase 2)

観測時間

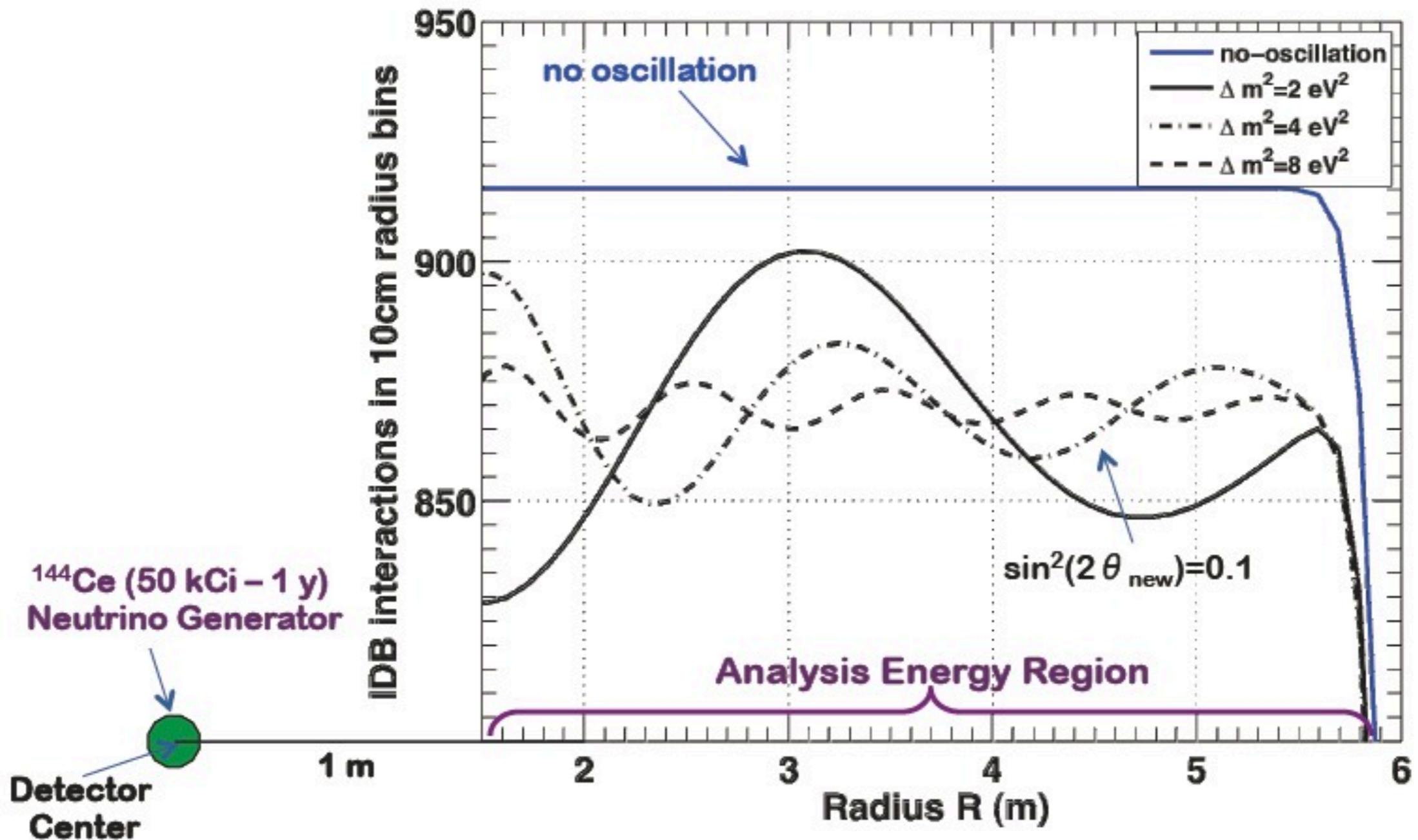
0.5年

1.0年

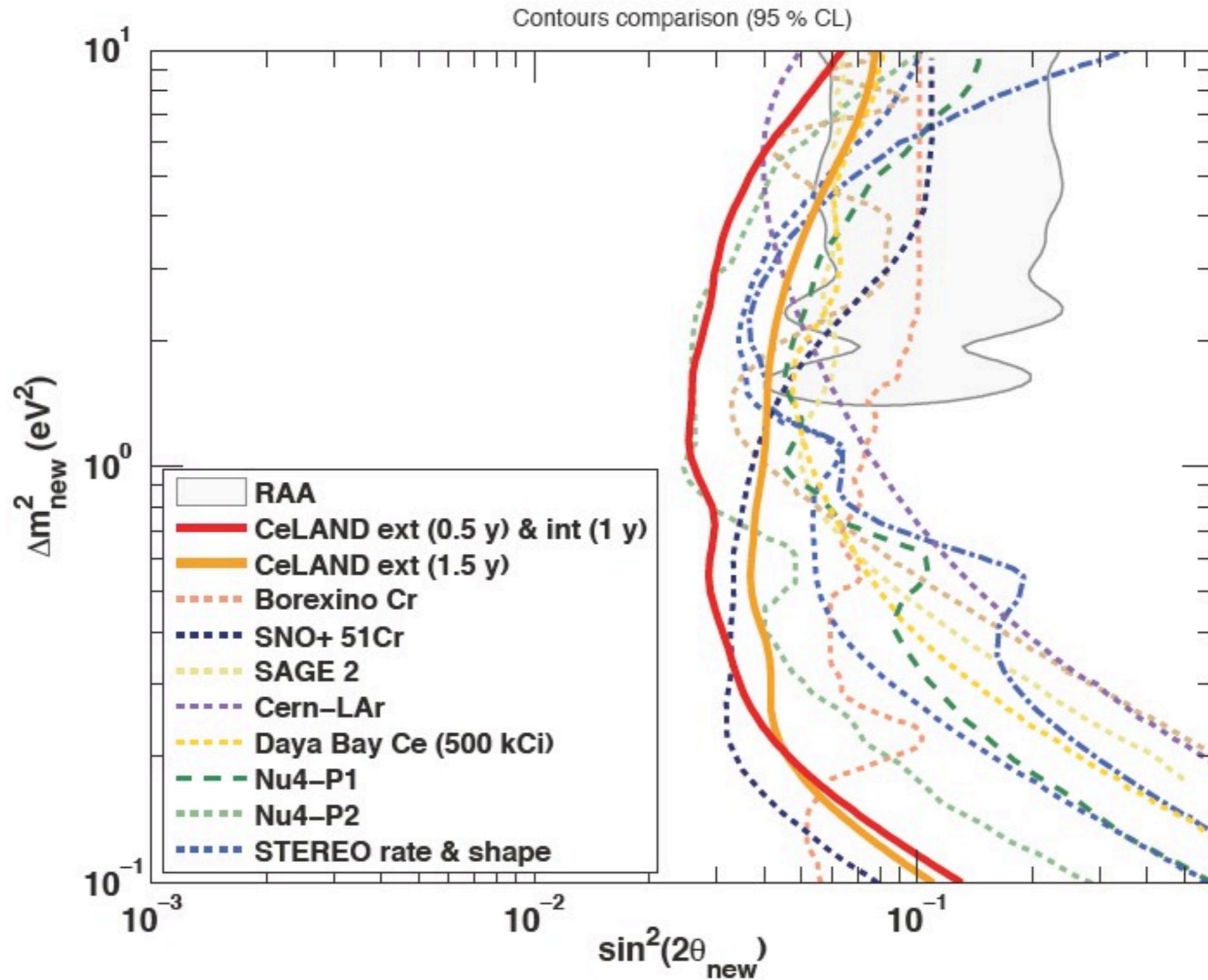


# 4世代振動の確実な証拠

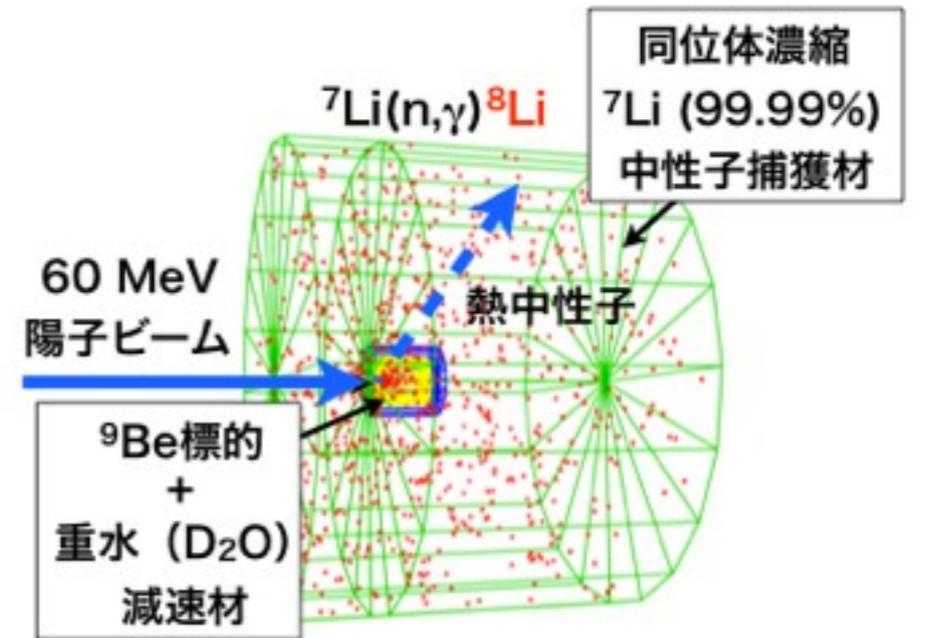
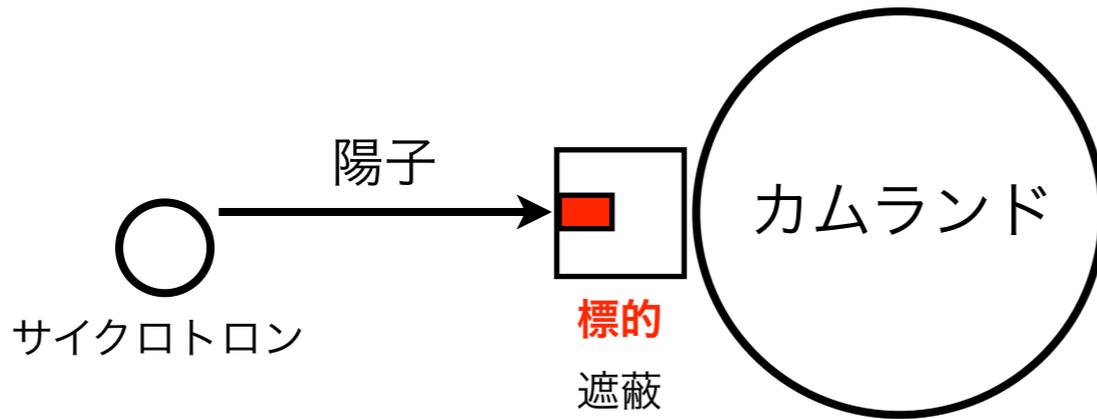
$$\frac{dN}{dR}(R,t) \propto \frac{A(t)}{4\pi R^2} \times \langle \sigma \rangle \times N_p \times 4\pi R^2 \times P_{ee} \left( \frac{\Delta m^2 R}{\langle E \rangle} \right)$$



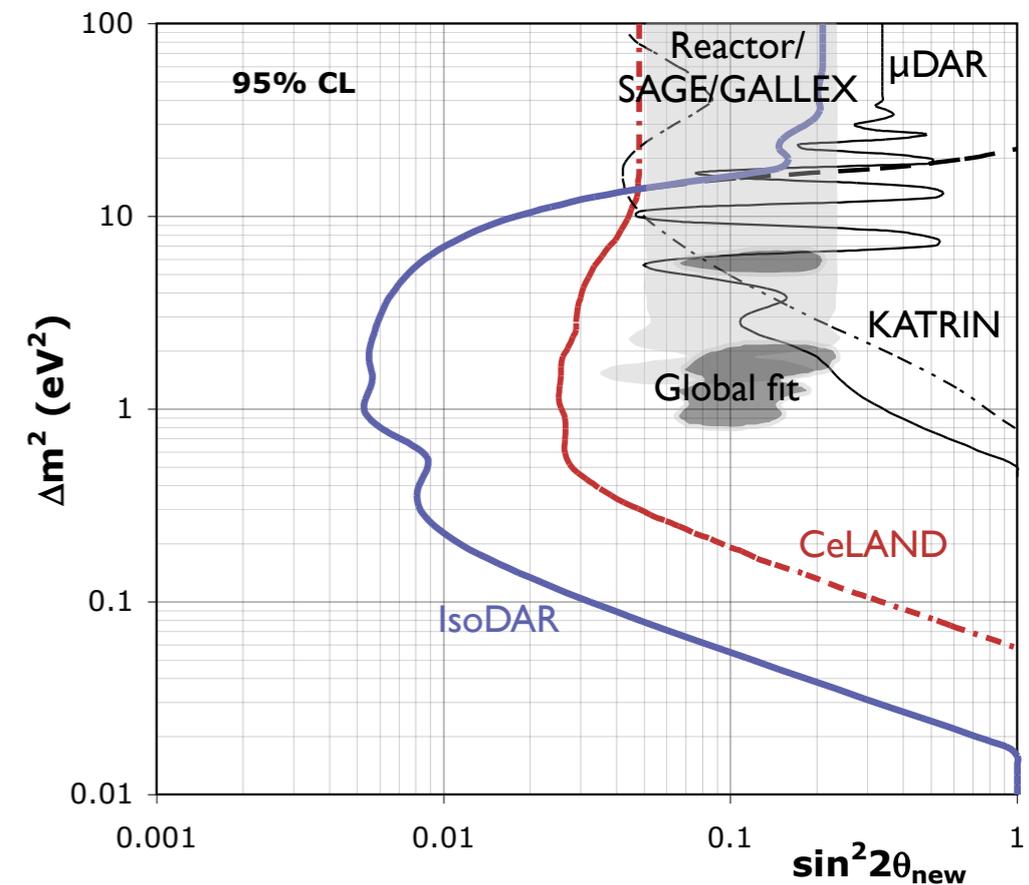
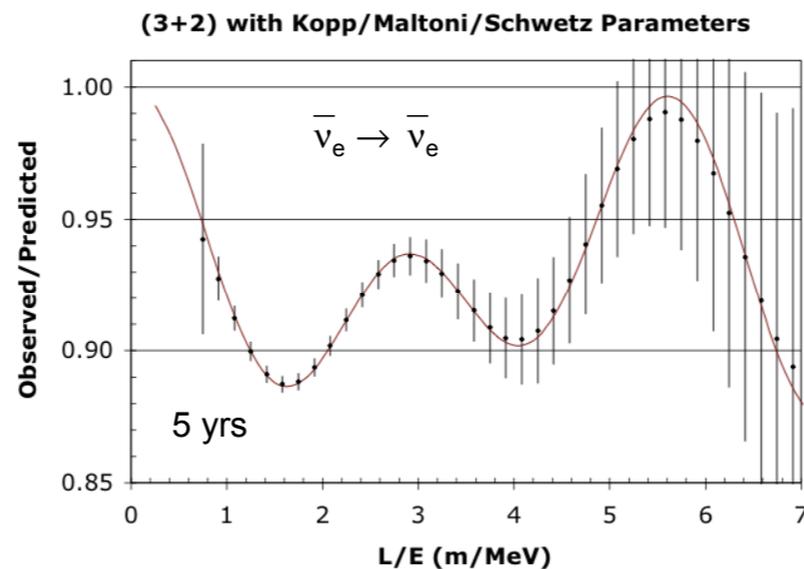
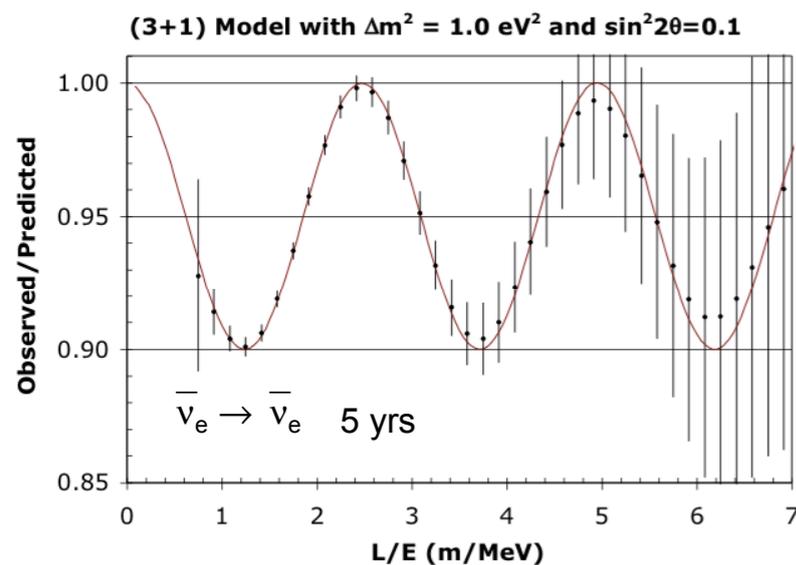
# 期待される感度



# 4世代ニュートリノ探索: IsoDAR



- サイクロトロン + Be標的  $\rightarrow$   ${}^8\text{Li}$ 生成
- 5 mA  $\text{H}_2^+$  加速 60 MeV/amu (600 kW)
- ${}^8\text{Li}$   $\beta$ 崩壊 Q値: 14 MeV
- $\sim 1 \text{ eV}^2$  振動探索  $\rightarrow L/E > 1 \text{ [m / MeV]}$

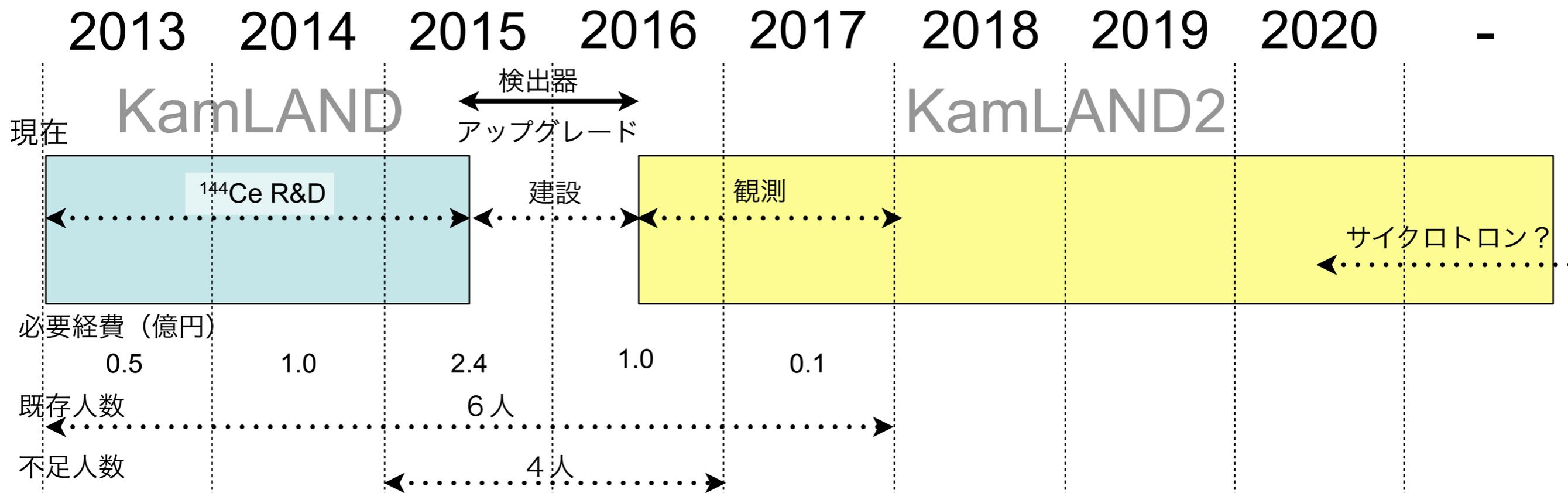


第4世代ニュートリノ振動の精密測定

# 計画中のプロジェクト

Experiment Type	Appearance / Disappearance	Oscillation Channel	Projects
Reactor	Disappearance	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	Nucifer, Stéreo, 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	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\nu_e \rightarrow \nu_e$	MINOS+, MicroBooNE, LAr1kton+MicroBooNE, Icarus/Nessie@CERN
Low-E Neutrino Factory	Appearance & Disappearance	$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$	$\nu$ STORM@Fermilab

# スケジュール



# 経費の内容

$^{144}\text{Ce}$ 線源、B(U)型認証容器、線源運搬、線源強度を測るカロリメータ、線源や容器を持ち上げるクレーンなど

# 人員

建設（線源のインストール作業）期間には10人程度の手が欲しい

# まとめ

- 最近の原子炉ニュートリノのスペクトルの再評価（フラックス増加～3%）によって原子炉アノーマリーが示唆されている
- 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ことから、4世代ニュートリノの可能性があり得る
- 多くの短距離ニュートリノ振動実験（約20プロジェクト）が計画されているが、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