

# 小さな炉心の原子炉によるステライル ニュートリノ探索の現象論

首都大理工・安田修

日本物理学会 第67回年次大会

2012年3月24日 関西学院大学

## 参考文献

arXiv:1107.4766 [hep-ph], 1110.2579 [hep-ph]

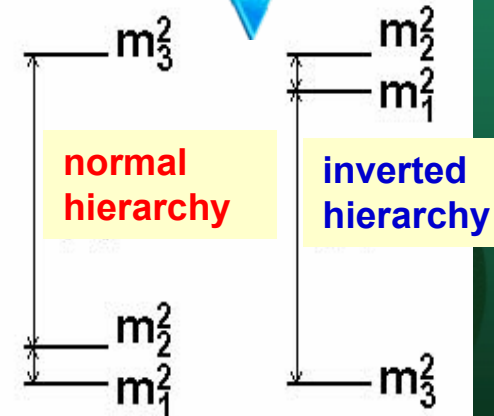
# 1.1 3世代ν 振動の枠組み

## 混合行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

混合角  $\theta_{12}$ ,  
 $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$  と CP  
位相  $\delta$  に依存

両方の質量パターン  
が許容されている



# 1.2 現時点までにわかっていること

$\nu_{\text{solar}}$  + KamLAND (原子炉)

$$\theta_{12} \cong \frac{\pi}{6}, \Delta m_{21}^2 \cong 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$\nu_{\text{atm}}$  + K2K, MINOS (加速器)

$$\theta_{23} \cong \frac{\pi}{4}, |\Delta m_{32}^2| \cong 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Daya Bay + DCHOOZ (原子炉)  
+ T2K + MINOS + others

$$\theta_{13} \cong 0.15 \pm 0.01$$

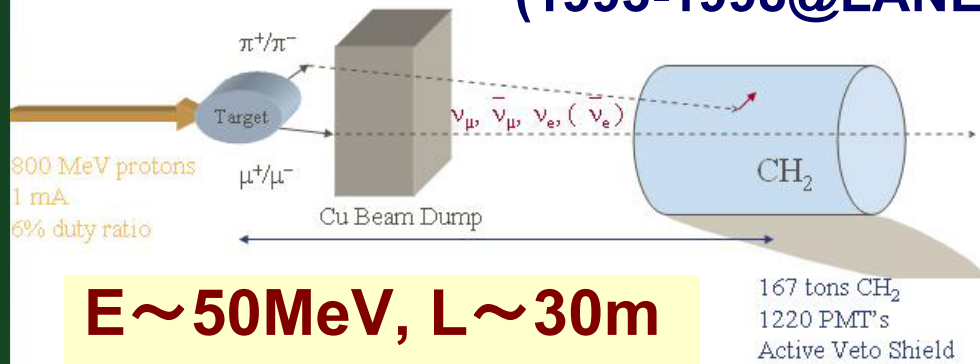
New!!

# 1.3 3世代間のν振動を拡張する可能性

## ● LSND実験の結果

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$

The LSND Experiment  
(1993-1998@LANL)



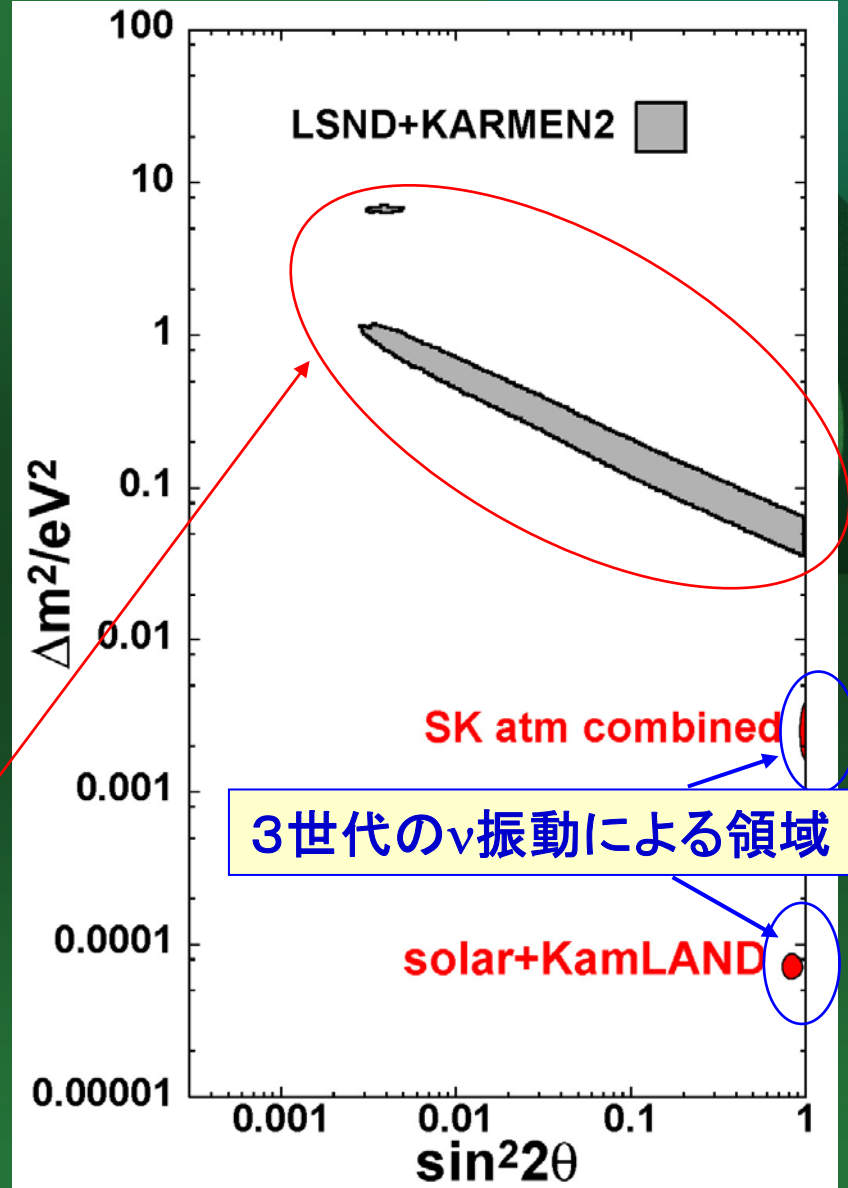
**E ~ 50 MeV, L ~ 30 m**

$$\Delta m^2 \cong O(1) \text{eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta \cong O(10^{-2})$$

??

これは3世代間のν振動  
では説明不可能



# 1.4ステライルニュートリノシナリオに対する評判の時間変化

## ● MiniBooNE実験 (2002-, FNAL)

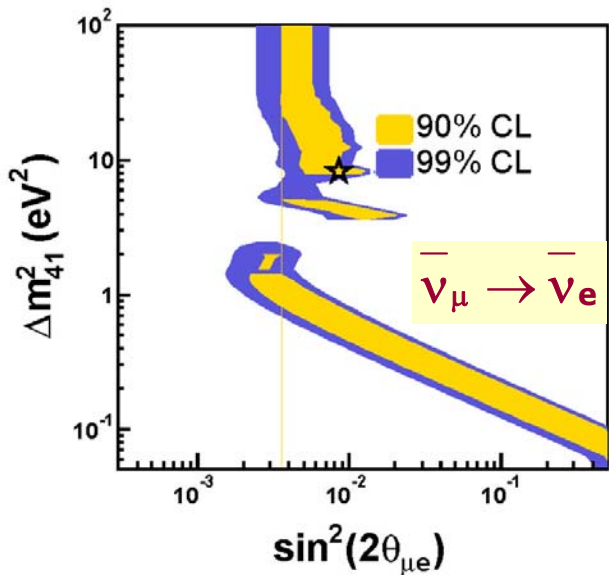
LSNDを追試するための実験は  
が、結論はどっちつかずになっている

$E \sim 1\text{GeV}$ ,  $L \sim 1\text{km}$ ,  $(L/E)_{\text{MB}} = (L/E)_{\text{LSND}}$

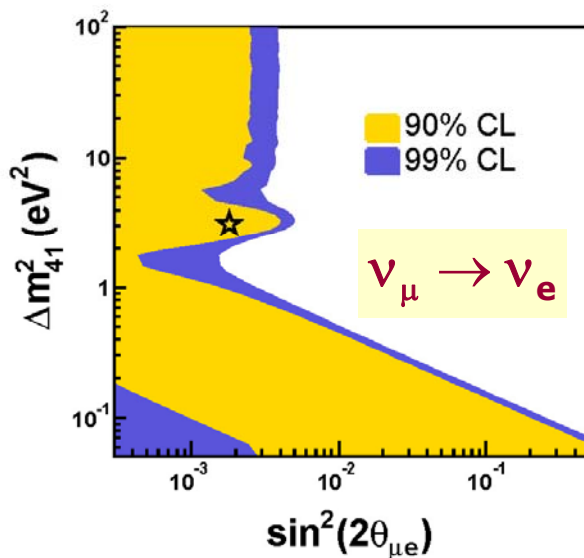
ニュートリノモード (2007)  
(否定的)

反ニュートリノモード (2010)  
(肯定的)

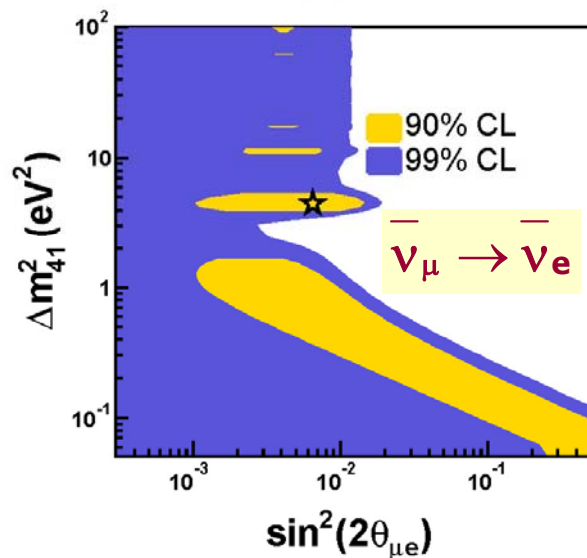
LSND



MB( $\nu$ )



MB( $\bar{\nu}$ )



1995  
LSNDは本当か？

2007  
LSNDは間違っていた！

2010  
LSNDはあっていた？

# ● 原子炉ニュートリノ異常

Mention et al, 2011

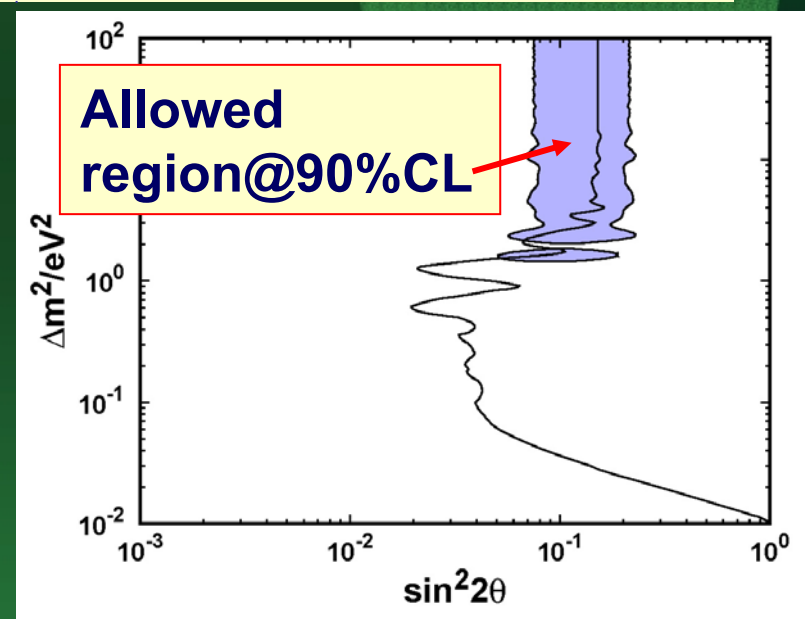
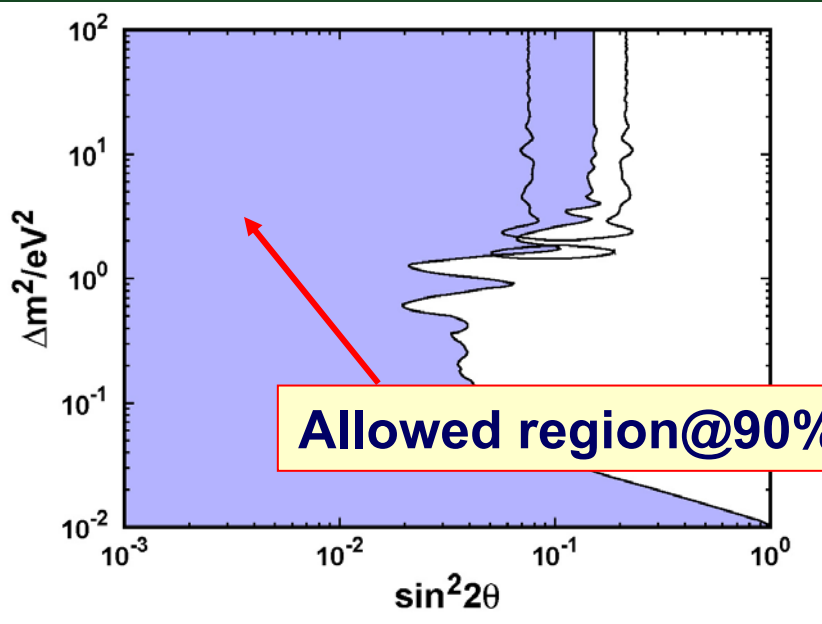
最近原子炉 $\bar{\nu}_e$ のフラックスに対する再評価が出て、これまでのデータがむしろ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ の欠損を示唆していると解釈されるようになった

$$\text{(新フラックス)} = \text{(旧フラックス)} \times 1.03$$

Bugey(原子炉  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ ):  
否定的 with old flux



Bugey(原子炉)+etc :  
肯定的 with new flux ?



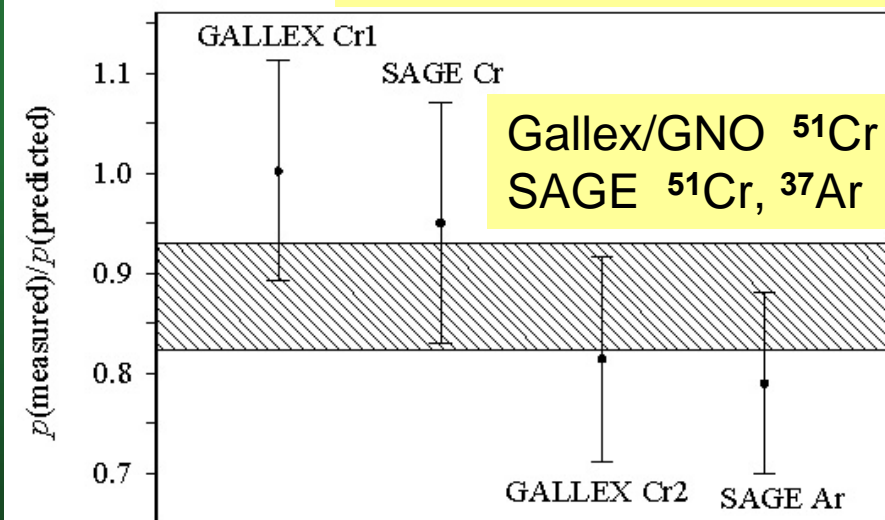
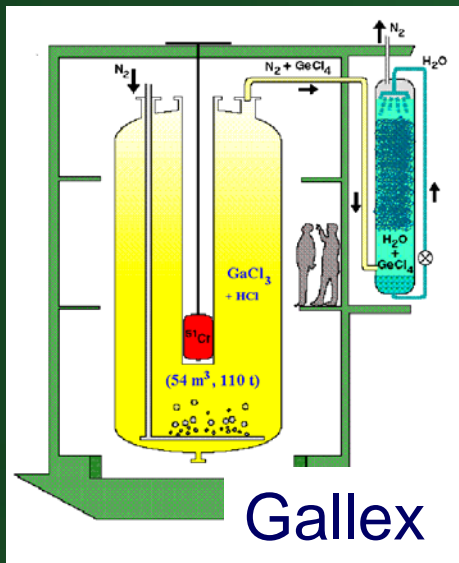
$\Delta m_{41}^2 = 0(1) \text{ eV}^2$   
の領域には $\nu$ 振動はない



$\Delta m_{41}^2 = 0(1) \text{ eV}^2$ の領域  
に $\nu$ 振動があるかもしれない

# ● ガリウム異常

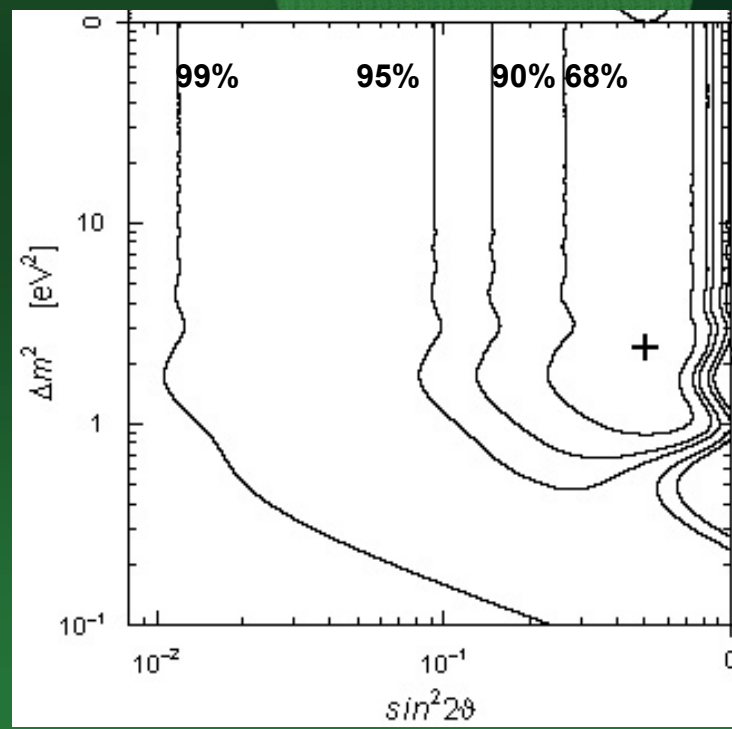
## ガリウム太陽 ν 実験の較正



$$R \equiv \frac{p(\text{measured})}{p(\text{predicted})} = 0.88 \pm 0.05(1\sigma)$$

Giunti-Laveder, 1006.3244v3 [hep-ph]

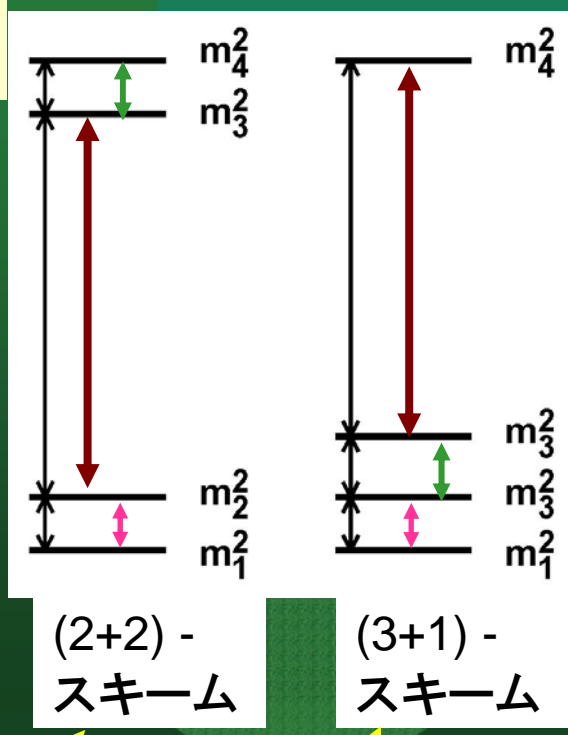
ガリウム太陽 ν 実験の較正の結果  
は active-sterile ν 振動による  $\nu_e$  の  
消失の兆候と解釈することが可能



# 1.5 4世代ニュートリノ混合の現象論

- 太陽  $\nu$  ・ KamLAND (原子炉  $\nu$ )  
 $\Rightarrow \Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- 大気  $\nu$  ・ K2K (加速器  $\nu$ )  
 $\Rightarrow |\Delta m_{32}^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- LSND/MB、原子炉  $\nu$ 異常、Ga異常  
 $\Rightarrow \Delta m_{41}^2 \cong 1 \text{ eV}^2$

$\Delta m^2$ が3つ  
ある4世代  
パターン



CERNのLEP実験('89-'00) から弱い相互作用をする軽いニュートリノは3つしかない→第四のニュートリノはステライルニュートリノ ( $\nu_s$ )とせざるを得ない

$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_s)$$

現在では太陽 $\nu$ +大気 $\nu$ から完全に排除されている

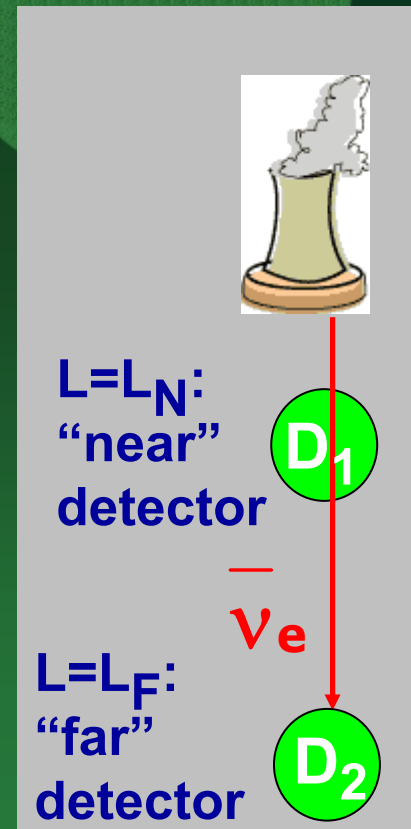
この講演では(3+1)スキームを仮定する

## 2. 実験原子炉ニュートリノの混合角度 $\theta_{14}$ への感度

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right)$$

至近距離の近距離 $L_N$ と遠距離 $L_F$ に測定器を置き、 $L_N$ と $L_F$ について感度を最適化

$\langle E \rangle \sim 4\text{MeV}$ ,  $L=10\text{m} \rightarrow$  ナイーブには  
 $\Delta m^2 \sim 1\text{eV}^2$  程度の感度は期待できる

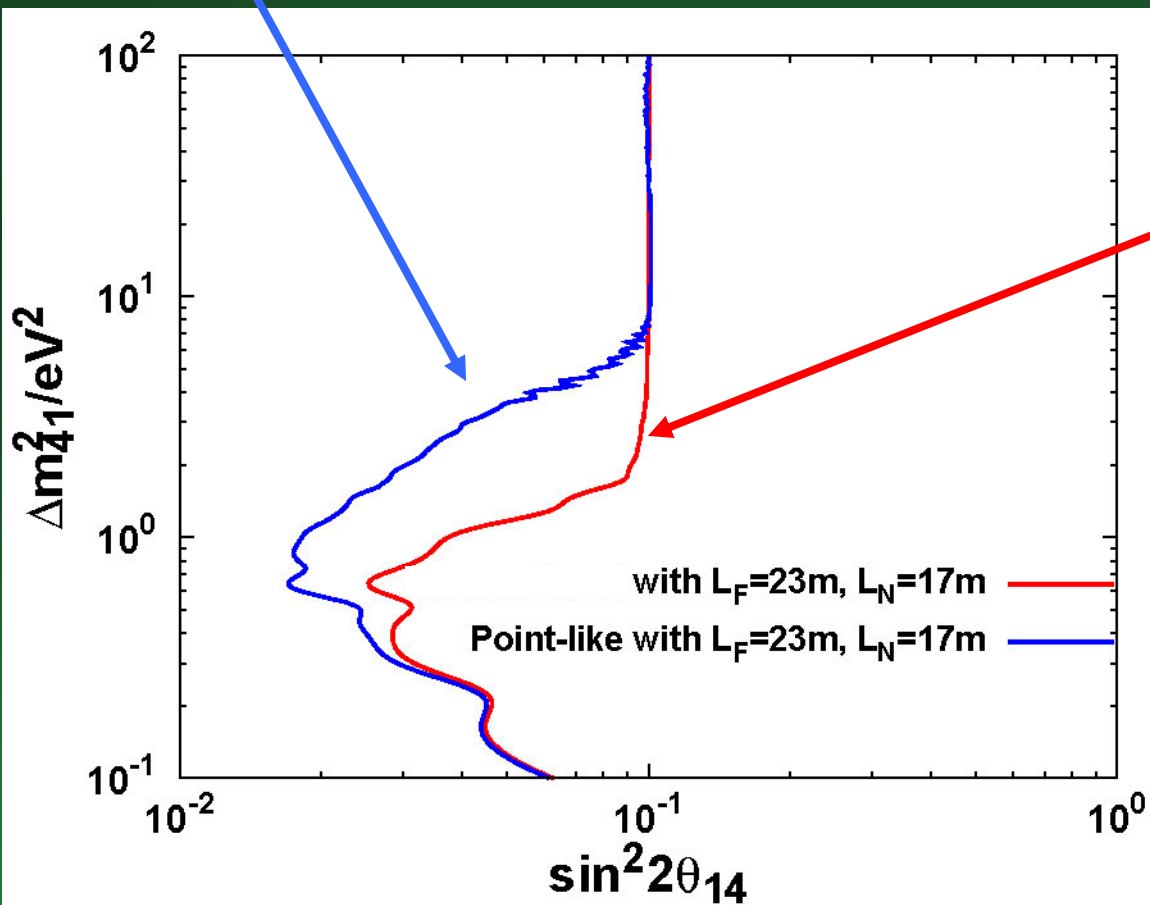




## 2.1 商業炉の場合 (D=4m, h=4mの円筒形を仮定)

最適な距離の組み合わせは  $L_N=17\text{m}$ ,  $L_F=23\text{m}$

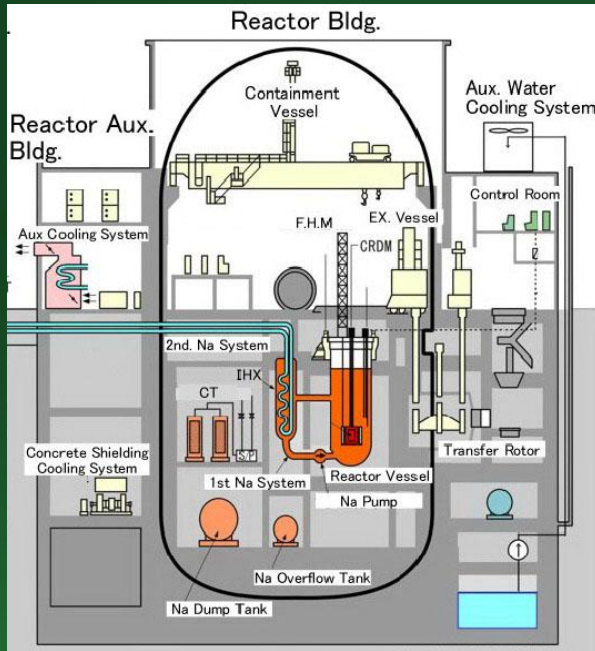
青線: point-likeな炉心を持つと仮定した仮想的な場合  
→ 感度は実際の場合より良い



赤線: 実際の商業炉  
→ 炉心の拡がりが無視できず、  
 $\Delta m^2 \sim 2\text{eV}^2$ の場合、  
感度が劣化

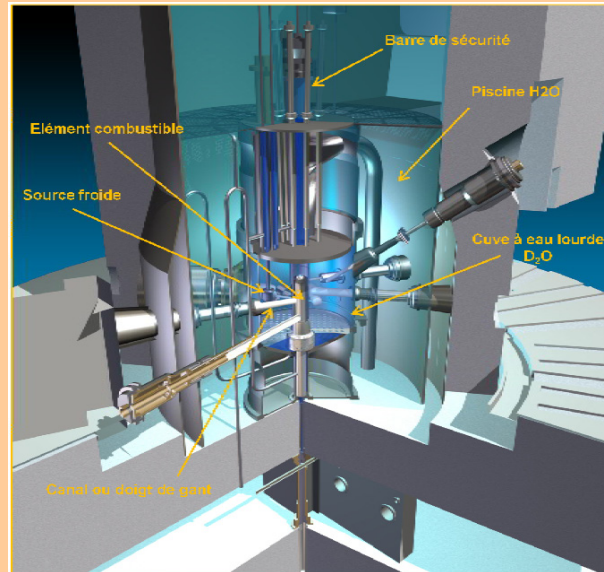
## 2.2 小さな炉心を持つ実験炉

- 常陽(茨城県大洗):  $D=0.8\text{m}$ ,  $h=0.5\text{m}$ ,  $P_{\text{th}}=140\text{MW}$

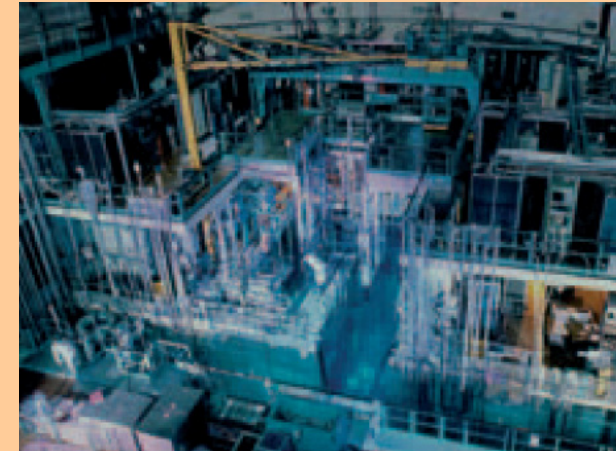


## Nucifer project

- ILL reactor (Grenoble, France):  $D=0.4\text{m}$ ,  $h=0.8\text{m}$ ,  $P_{\text{th}}=58\text{MW}$



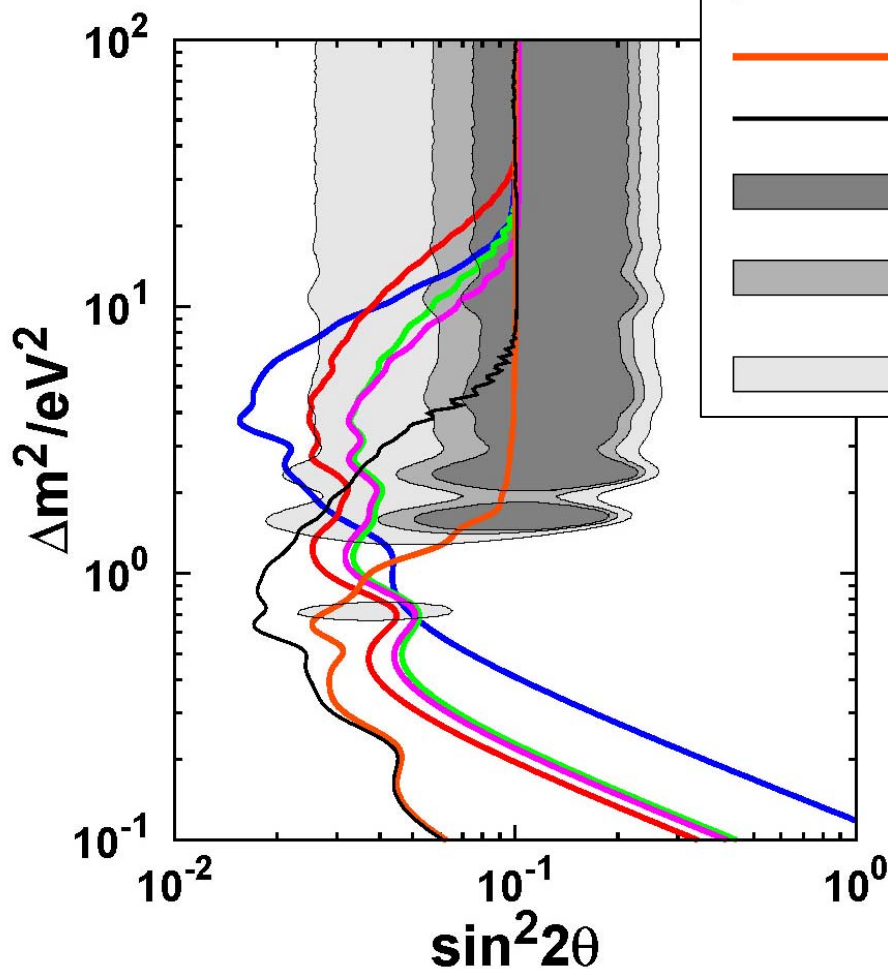
- Osiris reactor (Saclay, France):  $0.57\text{m} \times 0.57\text{m} \times 0.6\text{m}$ ,  $P_{\text{th}}=70\text{MW}$



Power density  $\sim 500\text{MW}/\text{m}^3$

cf.  $\sim 50\text{MW}/\text{m}^3$  for commercial reactors

# 小さな炉心を持つ実験炉における感度



- Joyo with  $L_F=4\text{m}$ ,  $L_N=3\text{m}$
- Joyo with  $L_F=8\text{m}$ ,  $L_N=4\text{m}$
- ILL with  $L_F=8\text{m}$ ,  $L_N=4\text{m}$
- Osiris with  $L_F=8\text{m}$ ,  $L_N=4\text{m}$
- Commercial with  $L_F=23\text{m}$ ,  $L_N=17\text{m}$
- Point-like with  $L_F=23\text{m}$ ,  $L_N=17\text{m}$
- Reactor anomaly 90%CL
- Reactor anomaly 95%CL
- Reactor anomaly 99%CL

炉心の小さい実験炉では、  
 $\Delta m^2 \sim \text{数eV}^2$ の場合に

$\sin^2 2\theta_{14}$ の感度  $\sim 0.03 - 0.04$

程度まで達成できる可能性あり

### 3. まとめ

- 原子炉 $\nu$ フラックスの再評価により、質量二乗差  $\Delta m^2 \sim O(1\text{eV}^2)$  のステライル $\nu$ 振動のシナリオが再度注目されている。
- $\Delta m^2 > 1\text{eV}^2$  に対して原子炉 $\nu$ 実験から質量二乗差の情報を得るには、炉心の拡がりの効果を避けるため、小さな炉心の原子炉を使う必要がある。
- 研究炉は一般的に炉心が小さく、それらの施設における $\nu$ の測定により、LSND/MiniBooNE、原子炉 $\nu$ 異常、ガリウム異常のテストができる可能性がある。

**Backup slides**

## 2. Analysis of a reactor neutrino oscillation experiment with one reactor & two detectors

$$\chi^2 = \min_{\alpha's} \left\{ \sum_{A=N,F} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(t_i^A \sigma_i^A)^2} \left[ m_i^A - t_i^A (1 + \alpha + \alpha^A + \alpha_i) - \alpha_{\text{cal}}^A t_i^A v_i^A \right]^2 + \sum_{A=N,F} \left[ \left( \frac{\alpha^A}{\sigma_{\text{dB}}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_{\text{cal}}^A}{\sigma_{\text{cal}}} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\alpha_i}{\sigma_{\text{Db}}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha}{\sigma_{\text{DB}}} \right)^2 \right\}.$$

n=#(bin)=32

OY, arXiv:  
1107.4766  
[hep-ph]

$m_i^A$ : Measured numbers of events

$t_i^A$ : Theoretical prediction

$v_i^A$ : Variation due to energy calibration error

$$(t_i^A \sigma_i^A)^2 = \boxed{t_i^A} + \boxed{(t_i^A \sigma_{\text{db}}^A)^2}$$

statistical errors

systematic errors

In the present case  $\sigma_{\text{stat}} > \sigma_{\text{sys}}$ :  
statistical errors are more important



A=N:  
“near”  
detector



$\nu_e$

A=F: “far”  
detector



## Assumed systematic errors: those of Bugey experiment

$\sigma_{\text{DB}}$ : correlated wrt detectors, correlated wrt bins = 3%

$\sigma_{\text{Db}}$ : correlated wrt detectors, uncorrelated wrt bins = 2%

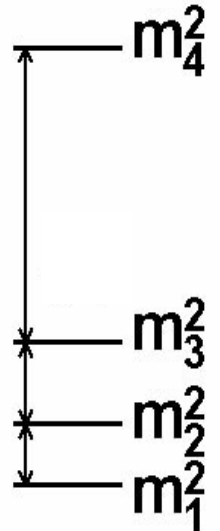
$\sigma_{\text{dB}}$ : uncorrelated wrt detectors, correlated wrt bins = 0.5%

$\sigma_{\text{db}}$ : uncorrelated wrt detectors, uncorrelated wrt bins = 0.5%

$\sigma_{\text{cal}}$ : energy calibration error for each bin = 0.6%

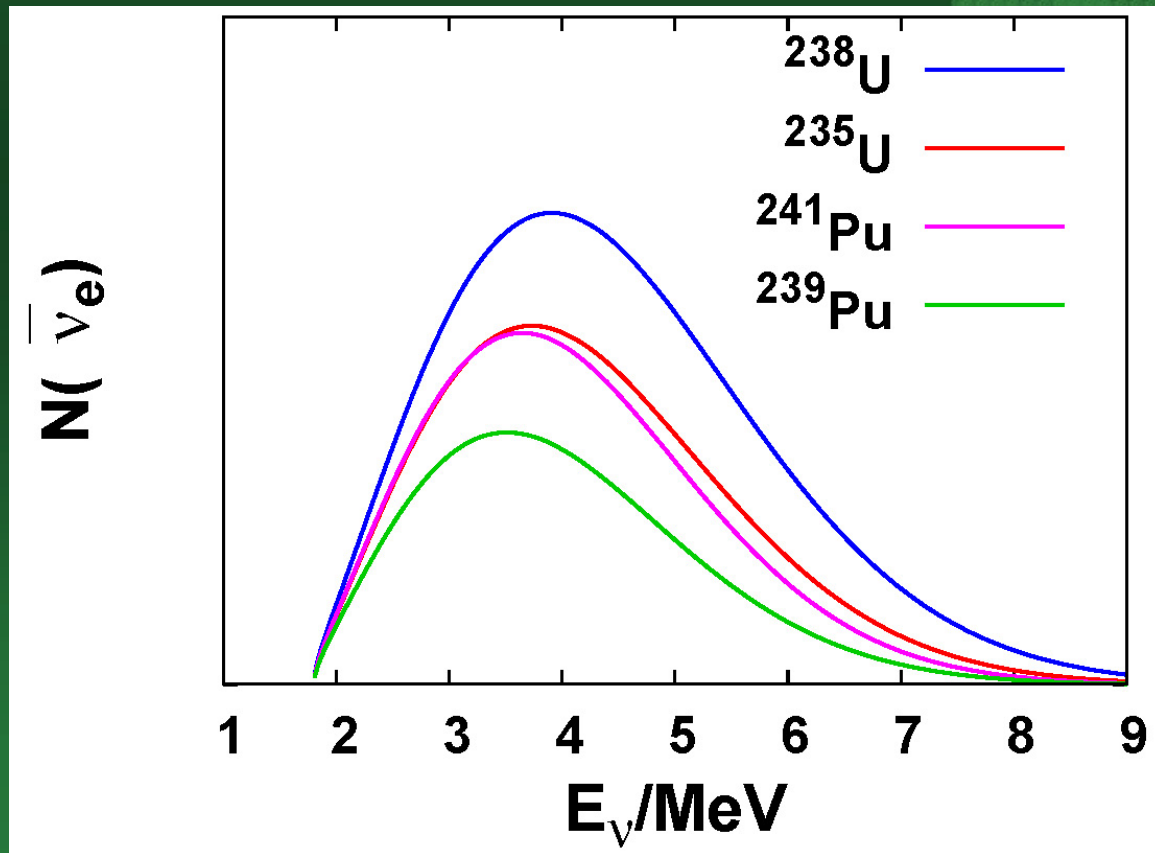
## Formula for oscillation probability

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E} \right)$$



# Composition of Thermal Neutron Reactor & Fast Neutron Reactor

	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{238}\text{U}$	$^{241}\text{Pu}$
Thermal Neutron Reactor (w/ $\text{H}_2\text{O}$ )	53.8%	32.8%	7.8%	5.6%
Fast Neutron Reactor	37.1%	51.3%	7.3%	4.3%





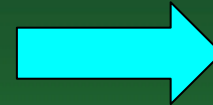
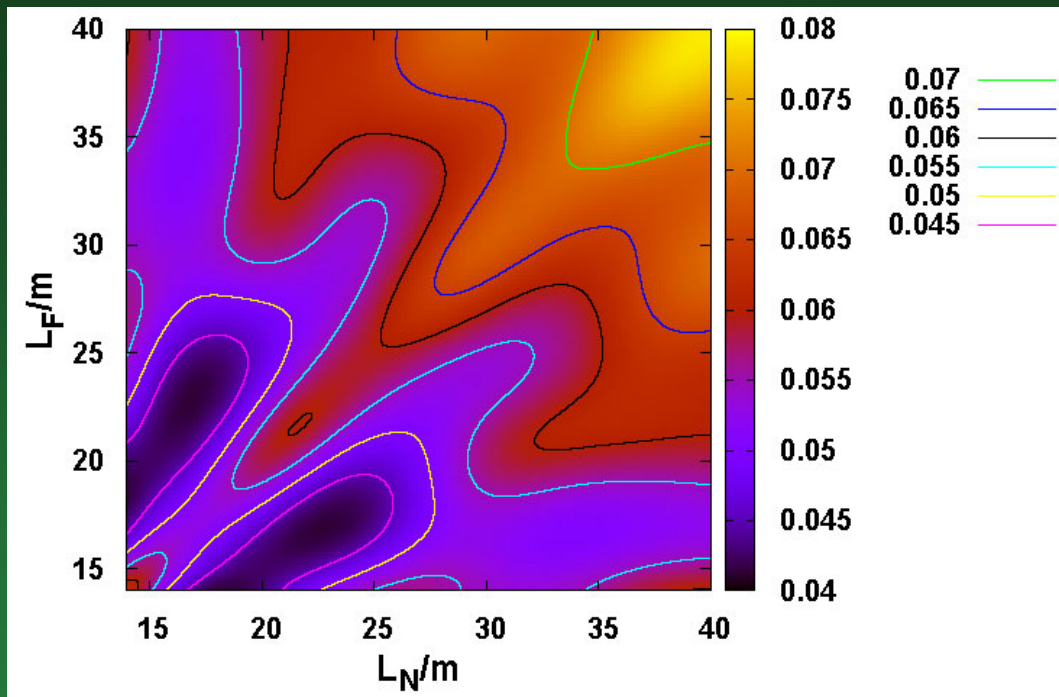
# (1) Commercial reactors

## Assumed parameters (a la Bugey)

- Power: 2.8 GW
- Size of the core: Diameter=4m, Height=4m

Power density  $\sim 50 \text{ MW/m}^3$

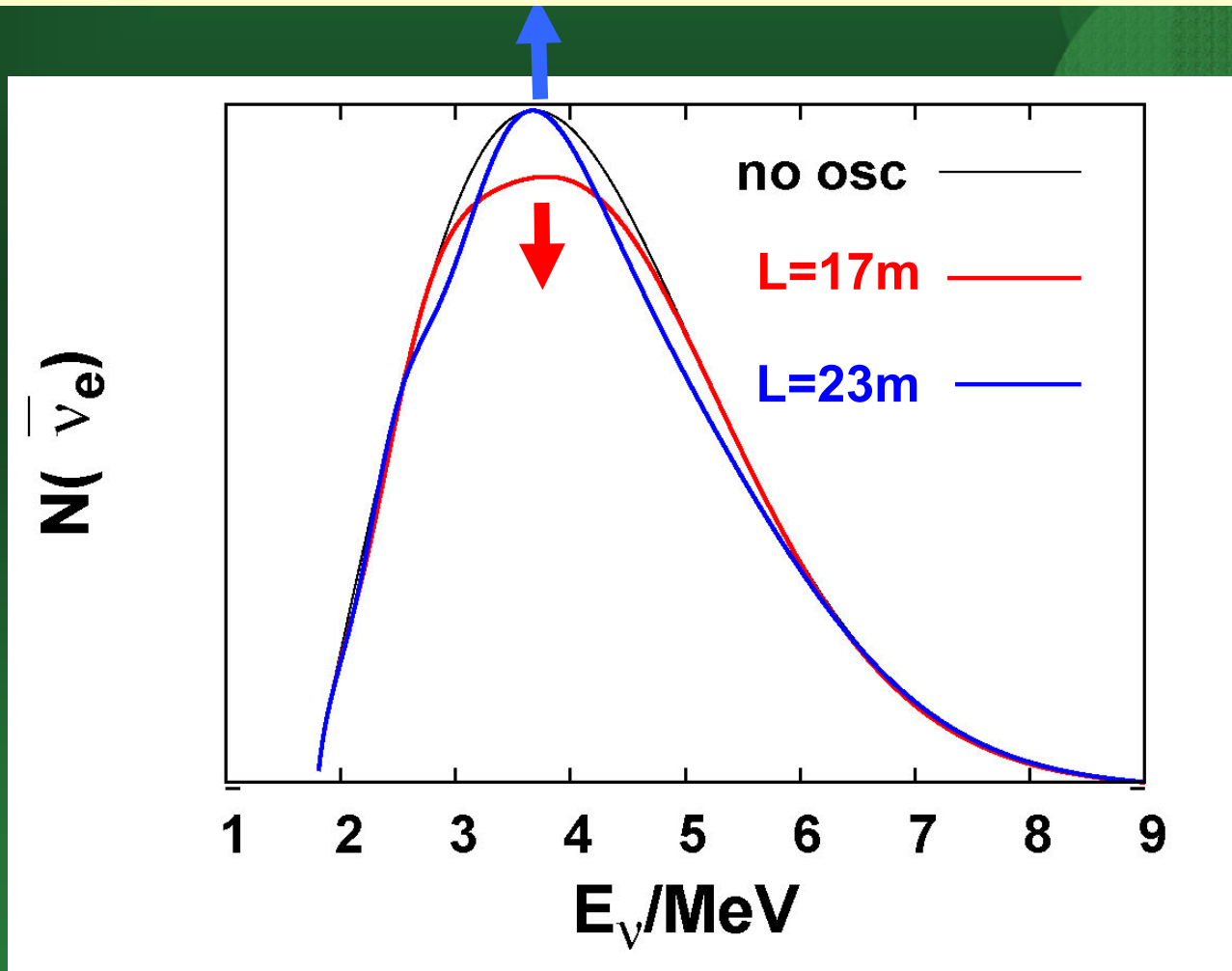
Optimization w.r.t. baseline lengths  $L_N$ ,  $L_F$  for  $\Delta m^2 = 1 \text{ eV}^2$



**Optimized  
baseline  
lengths:  
 $L_N = 17 \text{ m}$ ,  
 $L_F = 23 \text{ m}$**

# The role of a “near” detector in the energy spectrum analysis for $\Delta m^2=1\text{eV}^2$

The difference at  $\langle E \rangle \sim 4\text{MeV}$  is most significant for  $L_N=17\text{m}$   $L_F=23\text{m}$

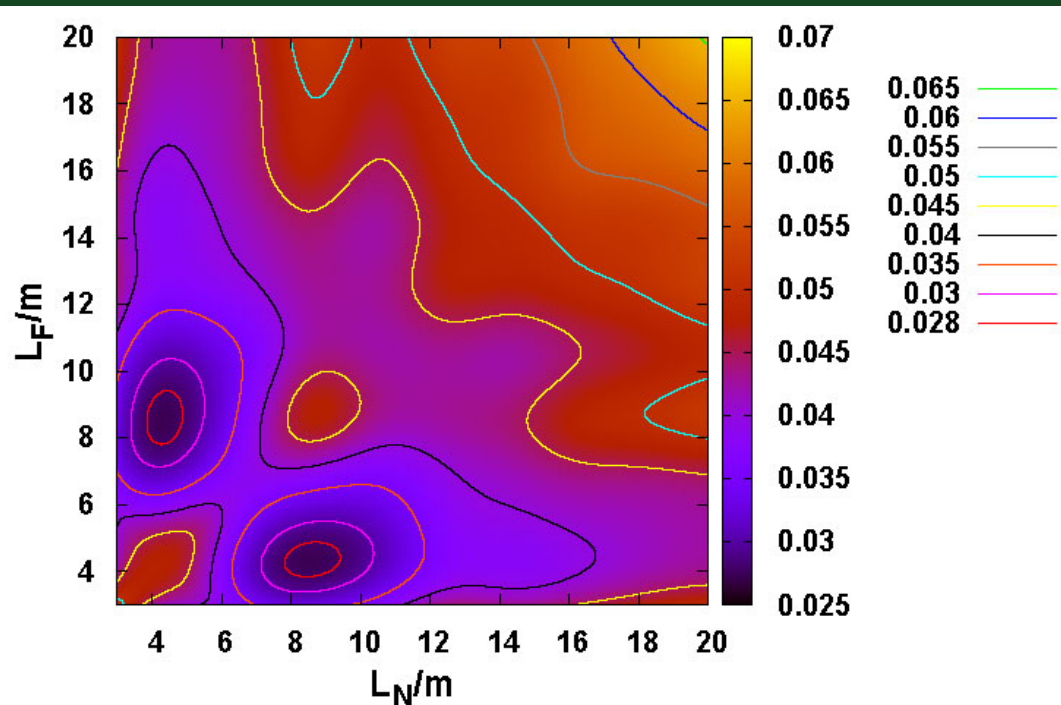


## ● Joyo (A fast neutron reactor)

### Assumed parameters

- Power: 0.14 GW
- Size of the core: Diameter=0.8m, Height=0.5m

### Optimization w.r.t. baseline lengths $L_N$ , $L_F$ for $\Delta m^2=1\text{eV}^2$



**Optimized  
baseline  
lengths:  
 $L_N=4\text{m}$   
 $L_F=8\text{m}$**

# A Study of Reactor $\nu$ Monitoring at Experimental Fast Reactor JOYO

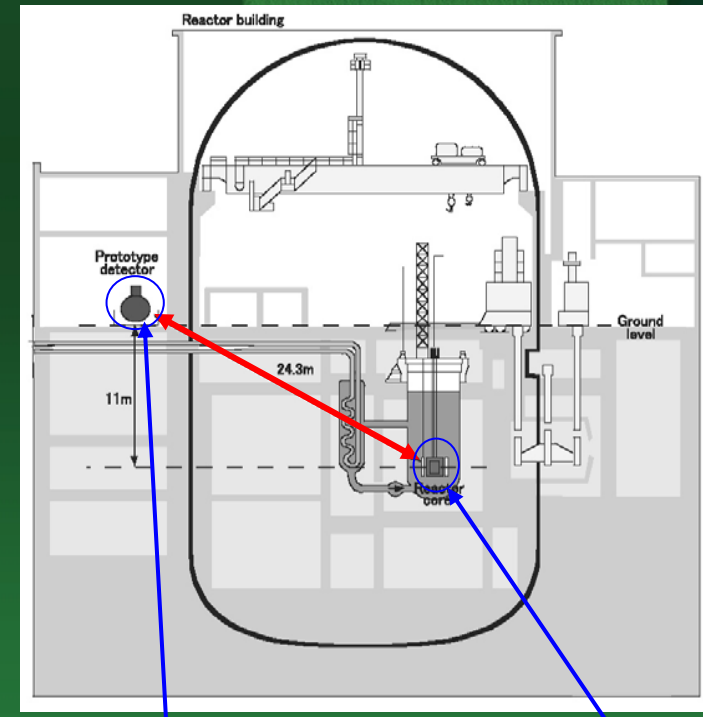
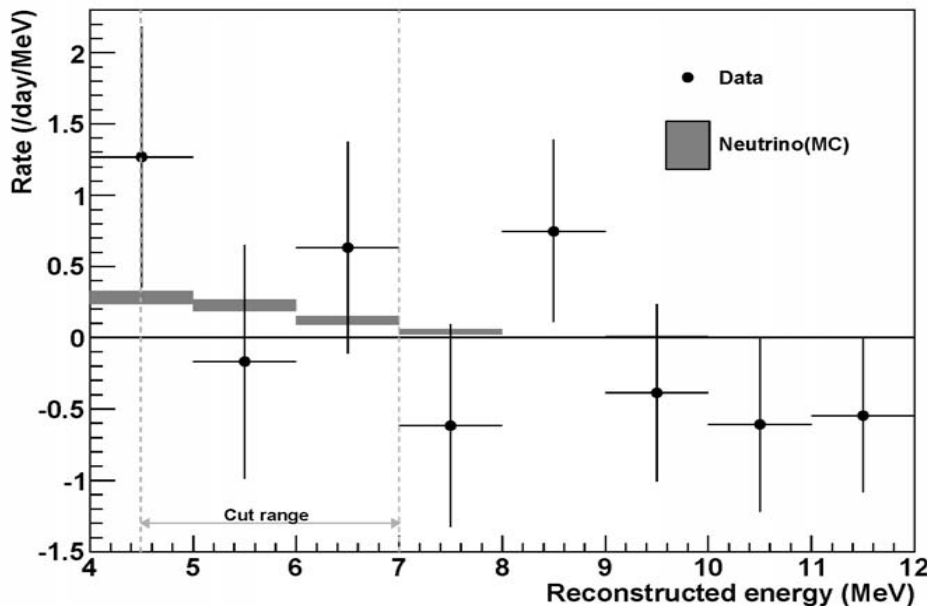
H.Furuta et al., arXiv:1108.2910v1 [hep-ex]

$L=24.3\text{m}$ ; about 150  $\nu p \rightarrow e^+n$  reactions/day

The measured  $\nu$  event rate from reactor on-off comparison was  $1.11 \pm 1.24(\text{stat.}) \pm 0.46(\text{syst.})$  events/day.

The statistical significance of the measurement was not enough.

Their motivation: to detect  $\nu$  from a fast reactor (not motivated by  $\nu_s$ )



Prototype detector

Reactor core