

Double Chooz実験による ニュートリノ振動解析の初期結果

今野 智之
東京工業大学

18th ICEPP symposium @白馬, 2012/02/22



Contents

- ニュートリノ振動
- Double Chooz実験
 - 概要
 - Detector
 - Calibration
 - 原子炉ニュートリノスペクトル
 - ニュートリノ事象選別
 - バックグラウンド
 - ニュートリノ振動解析
- 今後の展望
- まとめ

ニュートリノ振動

ニュートリノ振動 → {

- ニュートリノの質量が有現値
- フレーバー固有状態が質量固有状態の混合

MNS行列:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$c_{ij} = \cos\theta_{ij}$
 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$

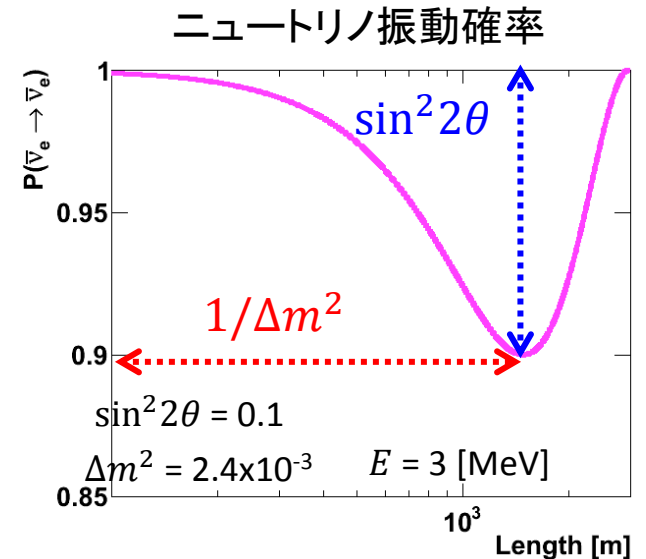
θ_{23} : P($\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$) by Atm. ν & Acc. ν
 θ_{13} : P($\nu_e \rightarrow \nu_e$) by Reactor ν & θ_{13} & δ : P($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) by Acc. ν
 θ_{12} : P($\nu_e \rightarrow \nu_x$) by Reactor ν & solar ν

ニュートリノ振動のパラメータ:

質量差: $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2, \Delta m_{31}^2$
 混合角: $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
 CP violation: δ

ニュートリノ振動確率 (2フレーバー場合):

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin\left(\frac{1.27 \times \Delta m^2 [\text{eV}^2] \times L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]}\right)$$



ニュートリノ振動パラメータ測定の実況

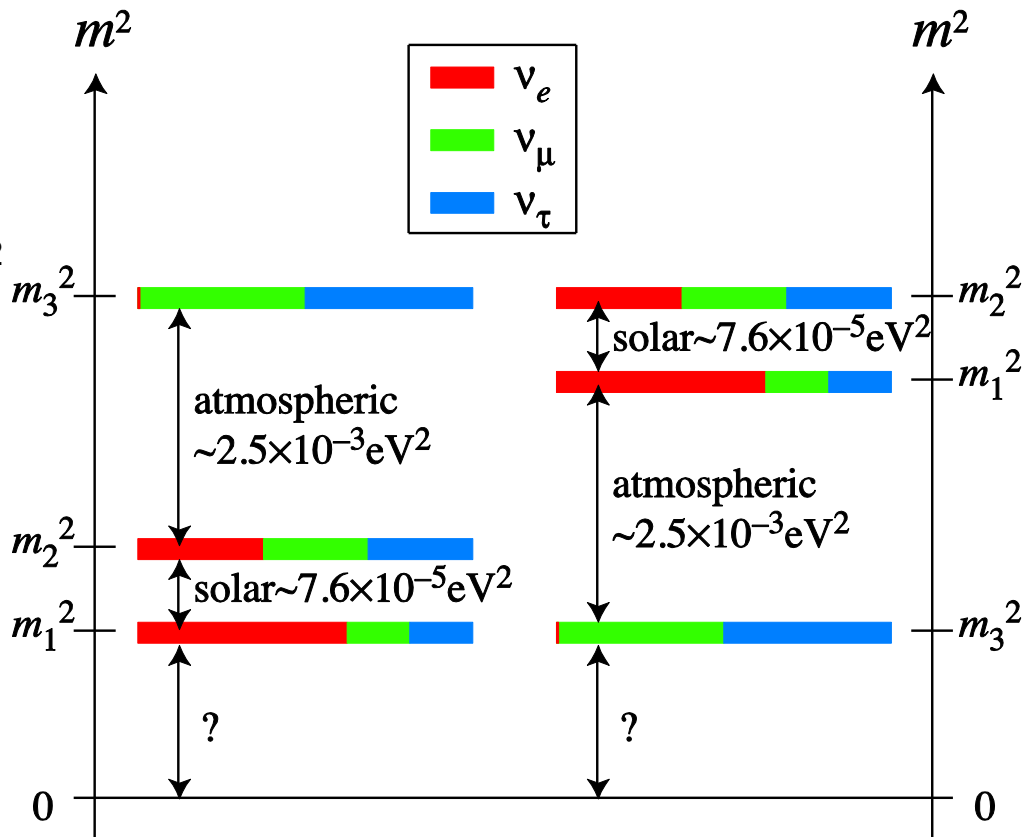
• 質量差

- $\Delta m_{21}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- $|\Delta m_{32}^2| \sim |\Delta m_{31}^2| \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

• 混合角

- $\theta_{12} \sim 34^\circ$
- $\theta_{23} \sim 45^\circ$
- $\theta_{13} < 12^\circ$ ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$)

- CP対称性の破れ → 未測定
- 質量の階層問題 → 未測定
- 質量絶対値 → 未測定



ニュートリノ振動実験では混合角との組み合わせが測定量となる
 → 測定の実現のためには θ_{13} の値を知ることが必要不可欠

θ_{13} へのアプローチ

- 原子炉ニュートリノ実験: Double Chooz, Daya Bay, RENO...

$$P[\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e] \cong 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + O(10^{-3})$$

- θ_{13} に対してのみ感度を持つ

- 長基線ニュートリノ実験: T2K, NOvA, ...

$$P[\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e(\bar{\nu}_e)] = \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \boxed{s_{23}^2} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) - \frac{1}{2} s_{12}^2 \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \boxed{s_{23}^2} \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin\left(\frac{\boxed{\Delta m_{31}^2 L}}{2E}\right) \\ + 2 \boxed{J_r} \boxed{\cos \delta} \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin\left(\frac{\boxed{\Delta m_{31}^2 L}}{2E}\right) \mp 4 \boxed{J_r} \boxed{\sin \delta} \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E}\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) \\ \pm \boxed{\cos 2\theta_{13}} \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \boxed{s_{23}^2} \left(\frac{4Ea(x)}{\boxed{\Delta m_{31}^2}}\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right)$$

$$a(x) = \sqrt{2} G_F N_e(x)$$

$$J_r \equiv c_{12} s_{12} c_{13}^2 s_{13} c_{23} s_{23}$$

$$\mp \frac{a(x)L}{2} \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \boxed{\cos 2\theta_{13}} \boxed{s_{23}^2} \sin\left(\frac{\boxed{\Delta m_{31}^2 L}}{2E}\right) + c_{23}^2 \sin^2 2\theta_{12} \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)^2$$

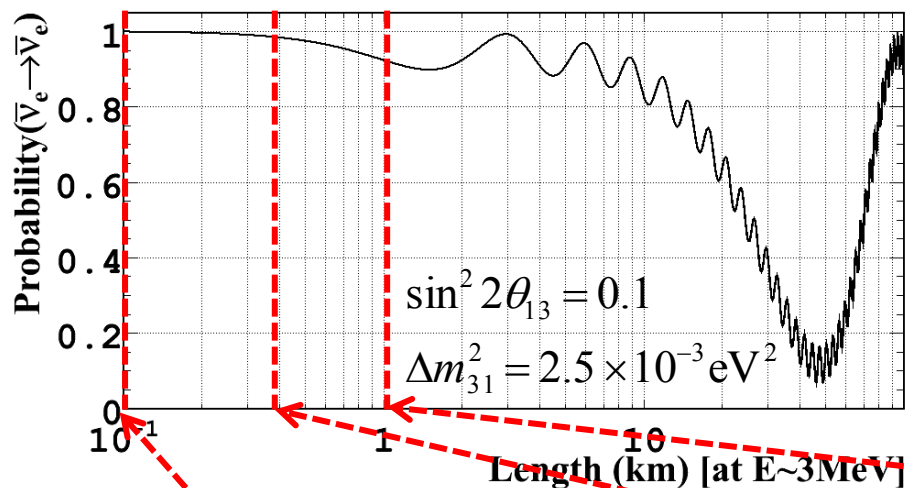
- θ_{13} , δ_{CP} , mass hierarchy, θ_{23} に対して感度を持つ
→ パラメータ縮退による θ_{13} に対する不定性は避けられない
- 将来的にはニュートリノビーム、反ニュートリノビームを用いた測定の組み合わせにより δ_{CP} , mass hierarchy の測定の可能性

Double Chooz実験

原子炉ニュートリノ振動実験

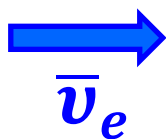
反電子ニュートリノの生存確率:

$$P[\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e] \cong 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + O(10^{-3})$$

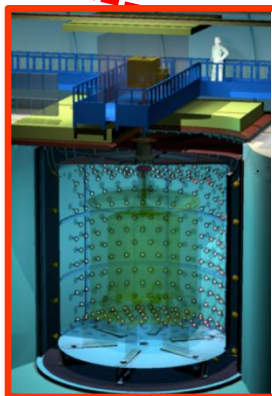


2基の同型検出器を使用することで種々の統計誤差を相殺

- ニュートリノフラックス
- 反応断面積
- 検出器中の陽子数
- 検出効率

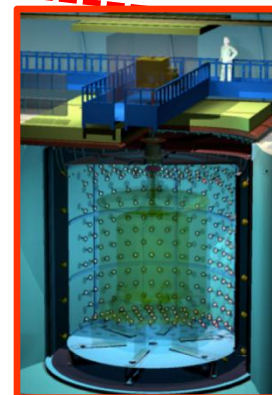


Chooz原子炉
4.27GW_{th} x 2 cores



前置検出器

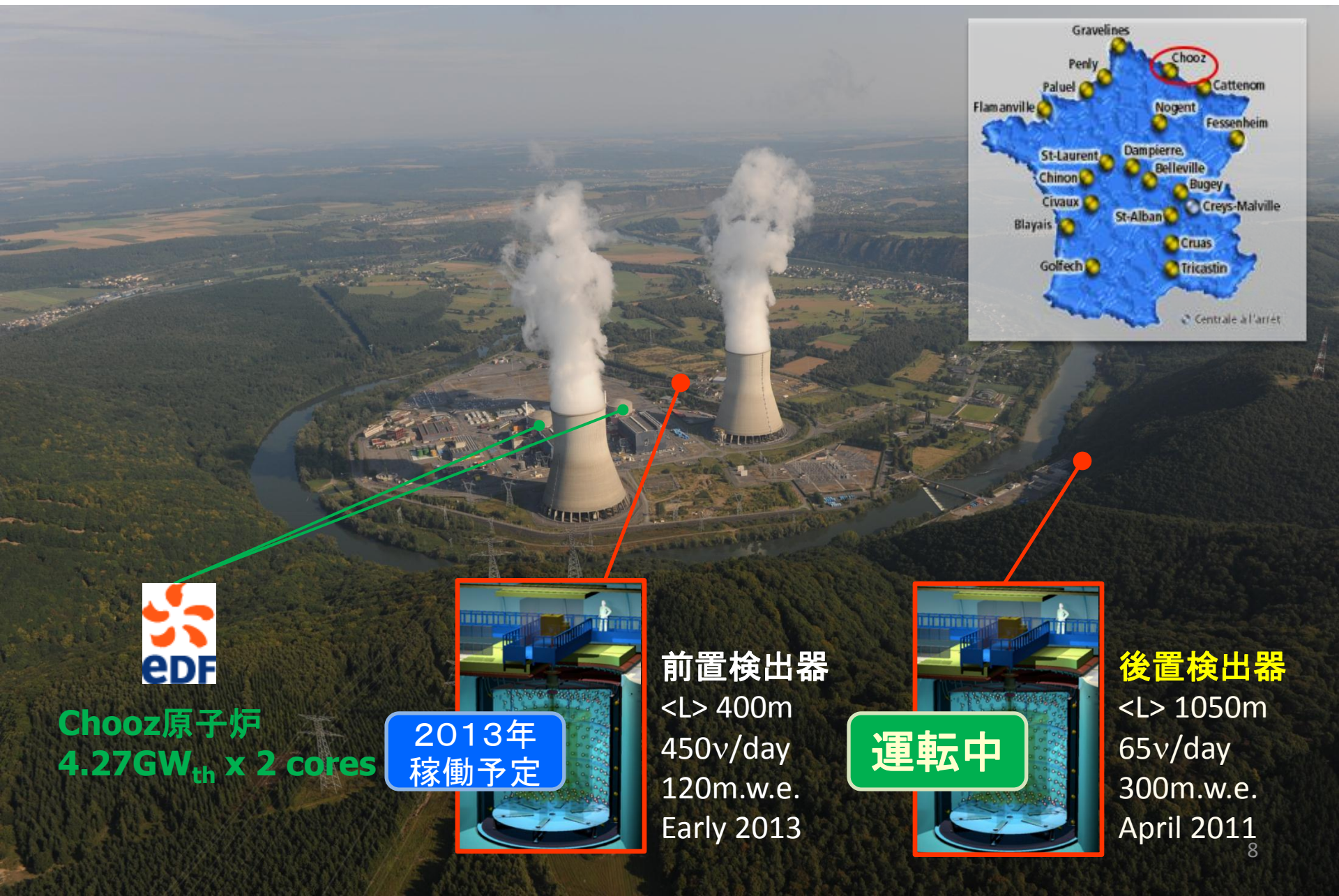
<L> 400m
450v/day
120m.w.e.
Early 2013



後置検出器

<L> 1050m
65v/day
300m.w.e.
April 2011

Double Chooz実験



Chooz原子炉
4.27GW_{th} x 2 cores

2013年
稼働予定



前置検出器
<L> 400m
450v/day
120m.w.e.
Early 2013

運転中



後置検出器
<L> 1050m
65v/day
300m.w.e.
April 2011

Double Chooz collaboration



Brazil

CBPF
UNICAMP
UFABC



France

APC
CEA/DSM/IRFU:
SPP
SPhN
SEDI
SIS
SENAC
CNRS/IN2P3:
Subatech
IPHC
ULB/VUB



Germany

EKU Tübingen
MPIK Heidelberg
RWTH Aachen
TU München
U. Hamburg



Japan

Tohoku U.
Tokyo Inst. Tech.
Tokyo Metro. U.
Niigata U.
Kobe U.
Tohoku Gakuin U.
Hiroshima Inst
Tech.



Russia

INR RAS
IPC RAS
RRC Kurchatov



Spain

CIEMAT-Madrid



UK

Sussex

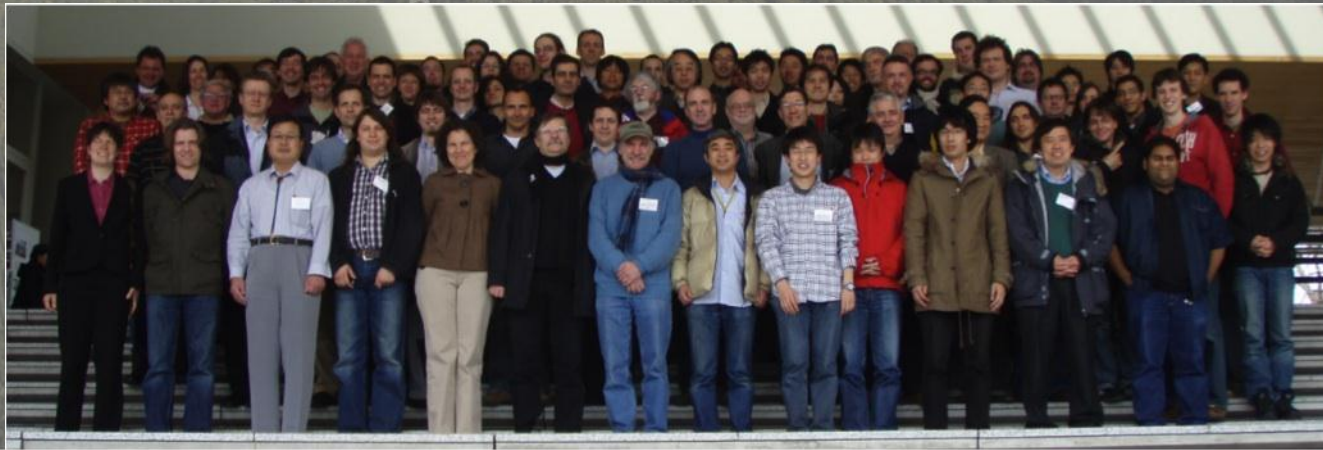


USA

U. Alabama
ANL
U. Chicago
Columbia U.
UCDavis
Drexel U.
IIT
KSU
LLNL
MIT
U. Notre Dame
Sandia National
Laboratories
U. Tennessee

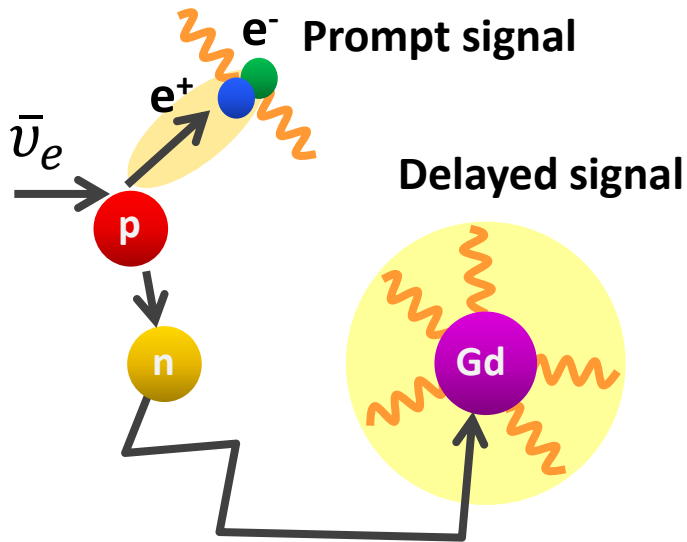
Spokesperson: H. de Kerret (IN2P3)
Project Manager: Ch. Veyssière (CEA-Saclay)

Web Site: www.doublechooz.org/



ニュートリノ検出原理

逆ベータ崩壊反応: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



Delayed coincidence

- Reaction threshold: 1.8 MeV
- Neutrino signal
~ 65 events/day (後置検出器)

Prompt signal :

- 陽電子 + e^+e^- 対消滅
- $E_\nu = E_{\text{VIS}} + 0.8 \text{ MeV}$

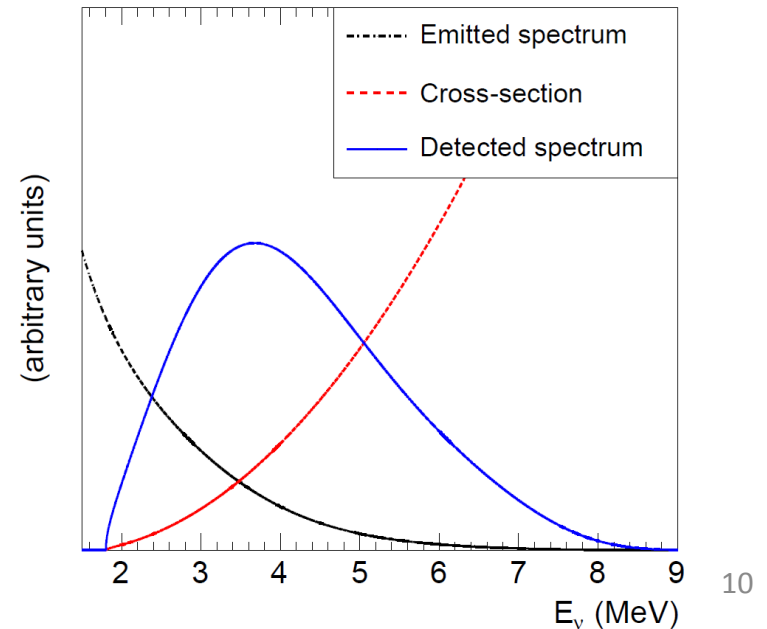
Delayed signal:

- Gd 中性子捕獲 (8 MeV)

Timing correlation:

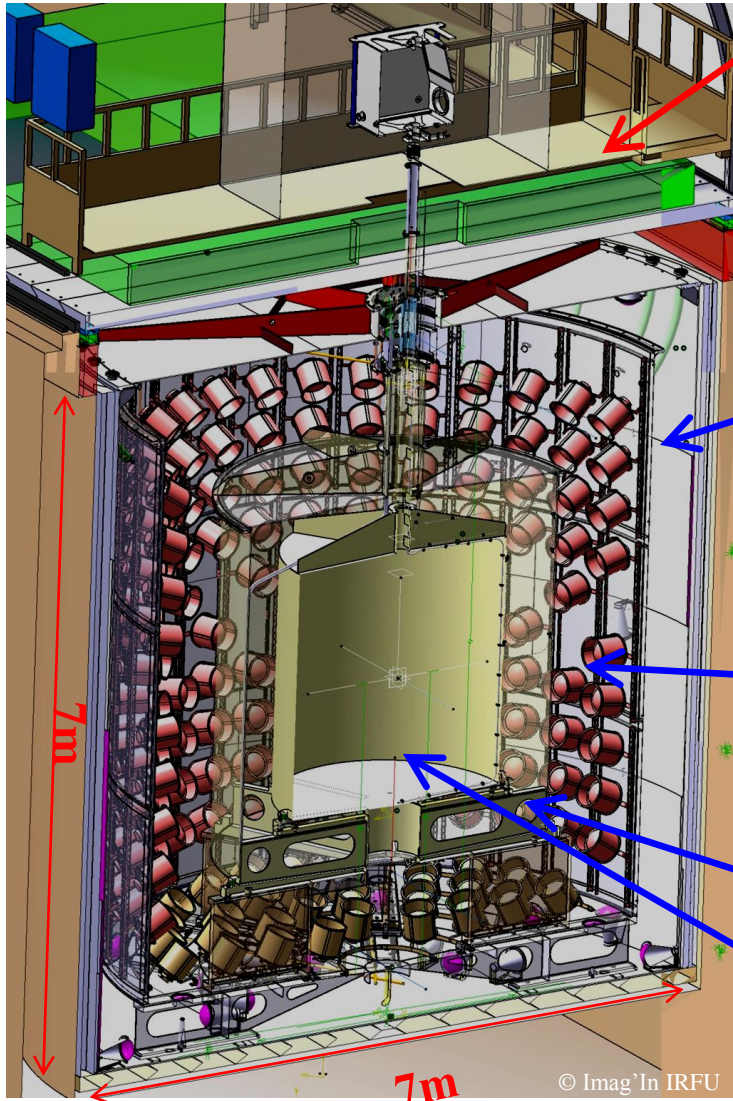
- $\tau = 30 \mu\text{s}$

➡ Backgroundを大幅に抑制



Detector

Double Chooz detector



Outer Veto detector

- plastic scintillator strip
- Far 44 /Near 68 モジュール ×
64ch MAPMTs = 2816 (4352) チャンネル
- 宇宙線ミュオンの同定

Neutrino detector

Inner Veto (90m³液体シンチレータ)

- 78 PMTs (8 inch, 浜松ホトニクス R1408)
- バックグラウンドの検出および遮蔽

Inner detector

Buffer (110m³ ミネラルオイル)

- 390 PMTs (10 inch, 浜松ホトニクス R7081MOD)
- バックグラウンドの低減

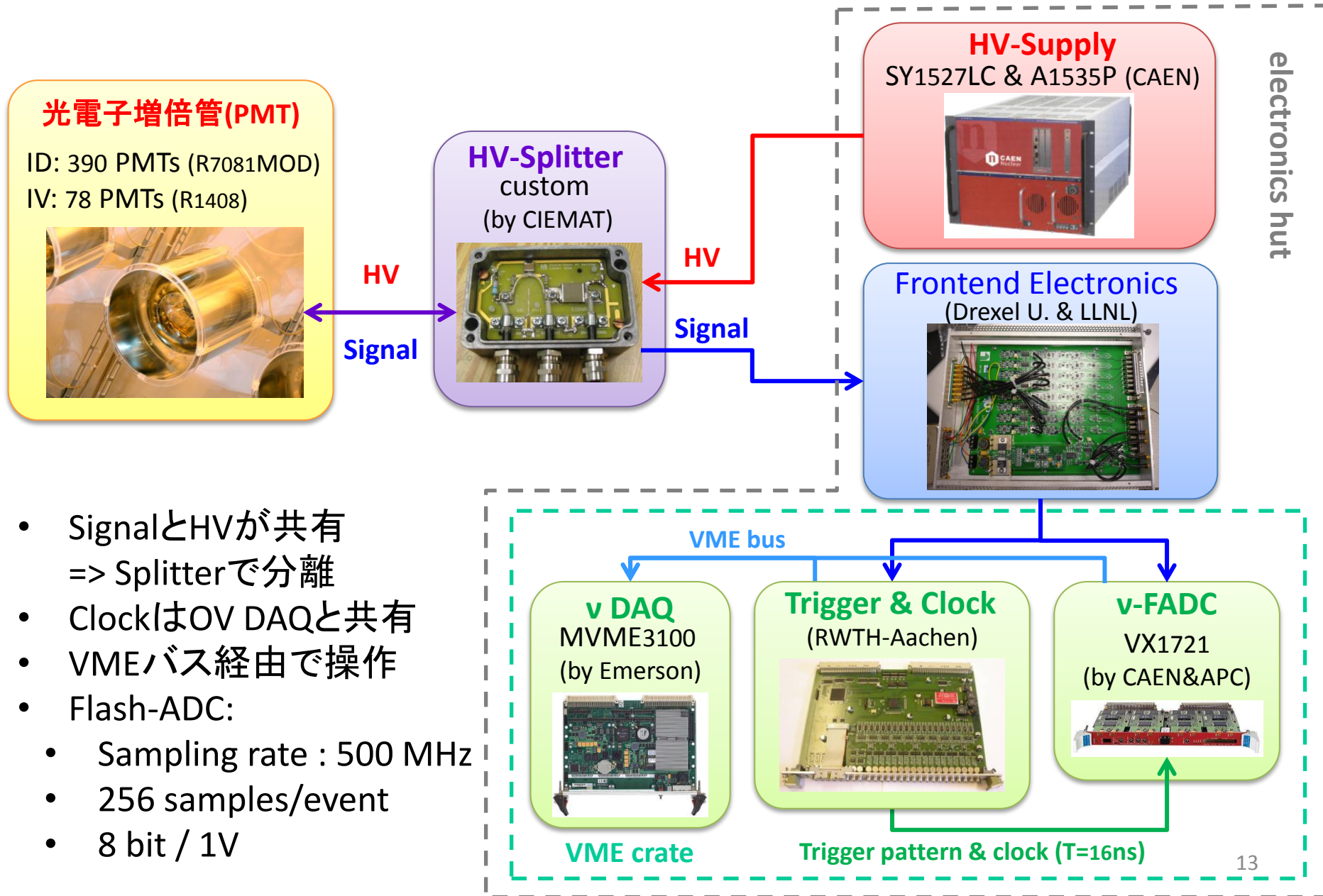
γ-catcher (22.3m³液体シンチレータ)

- target層から漏れるγ線の測定

ν-target (10.3m³ Gd入液体シンチレータ)

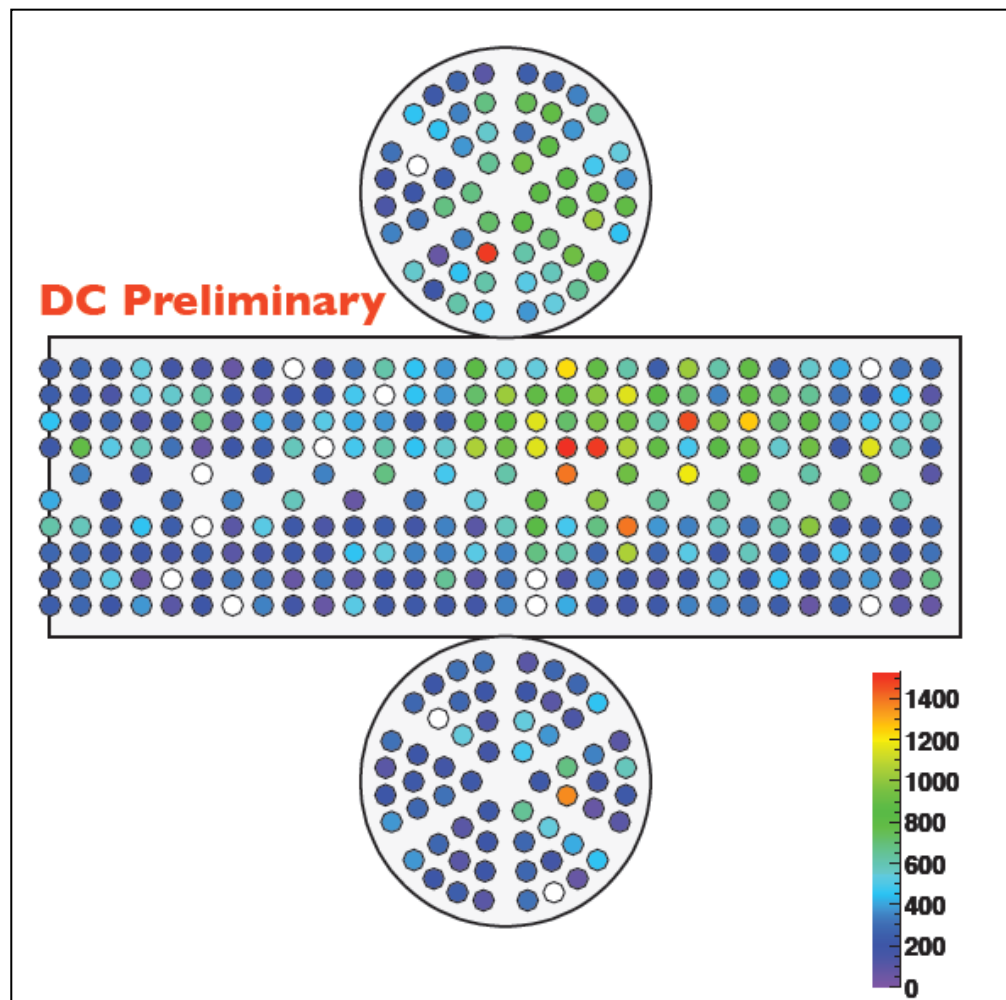
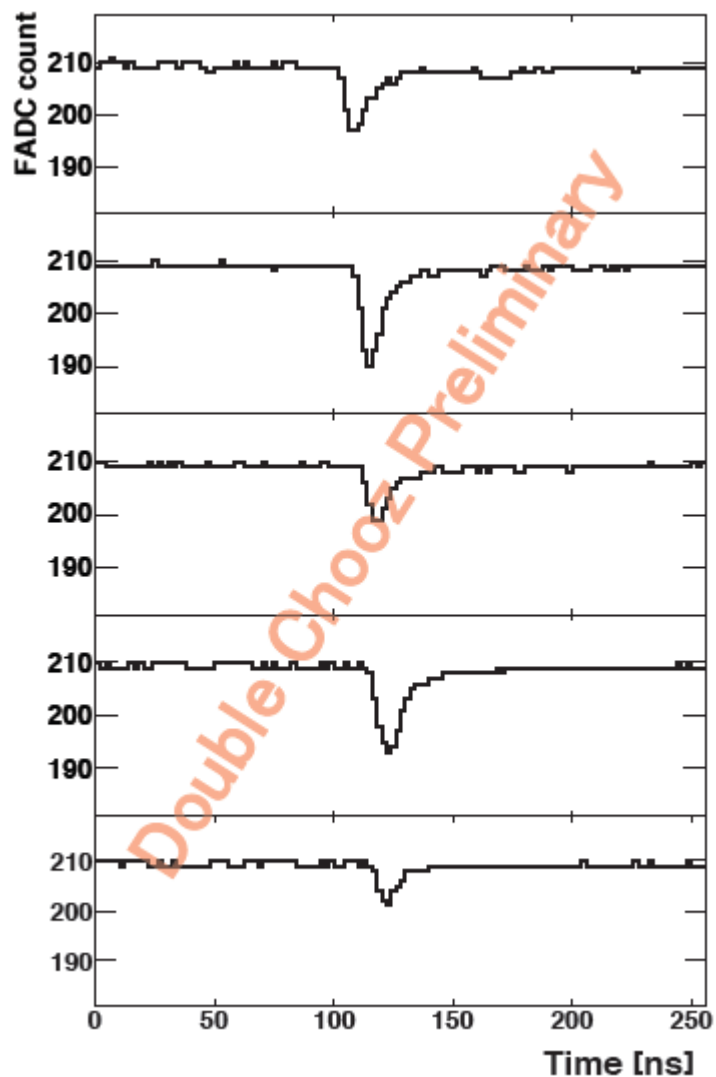
- ニュートリノ信号を観測

Readout system for Neutrino detector



- SignalとHVが共有
=> Splitterで分離
- ClockはOV DAQと共有
- VMEバス経由で操作
- Flash-ADC:
 - Sampling rate : 500 MHz
 - 256 samples/event
 - 8 bit / 1V

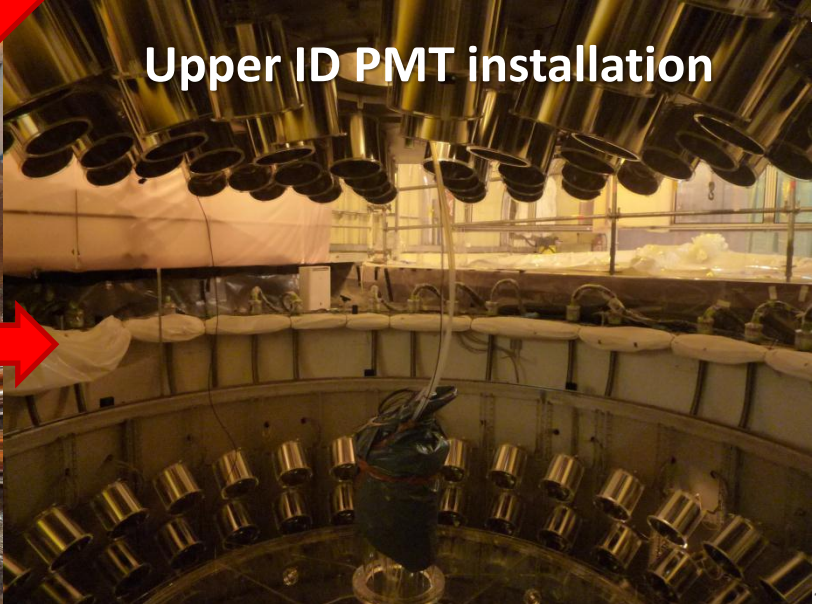
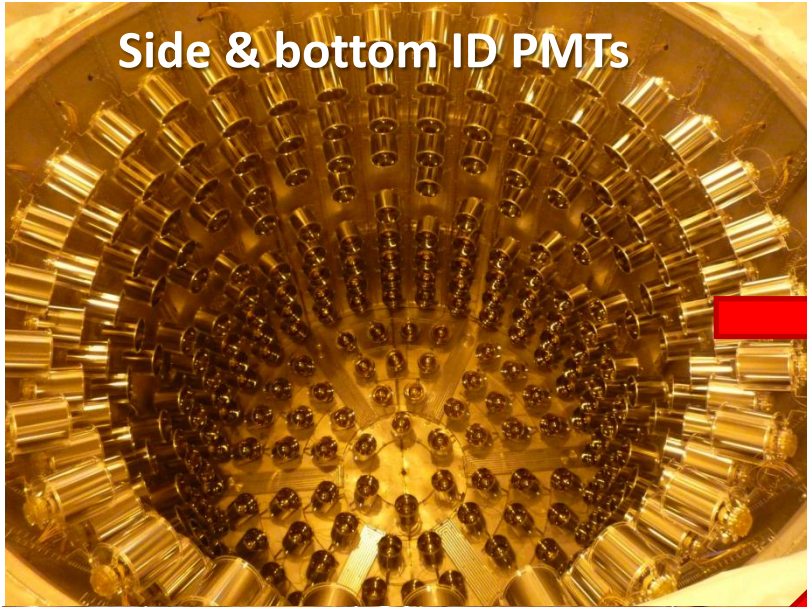
Flash-ADCの取得波形とイベントディスプレイ



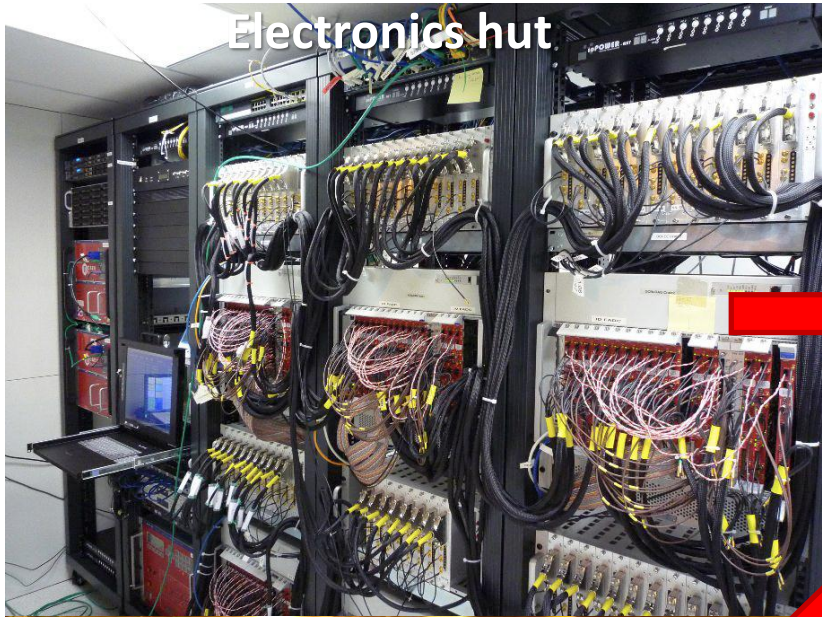
Detector construction



Detector construction



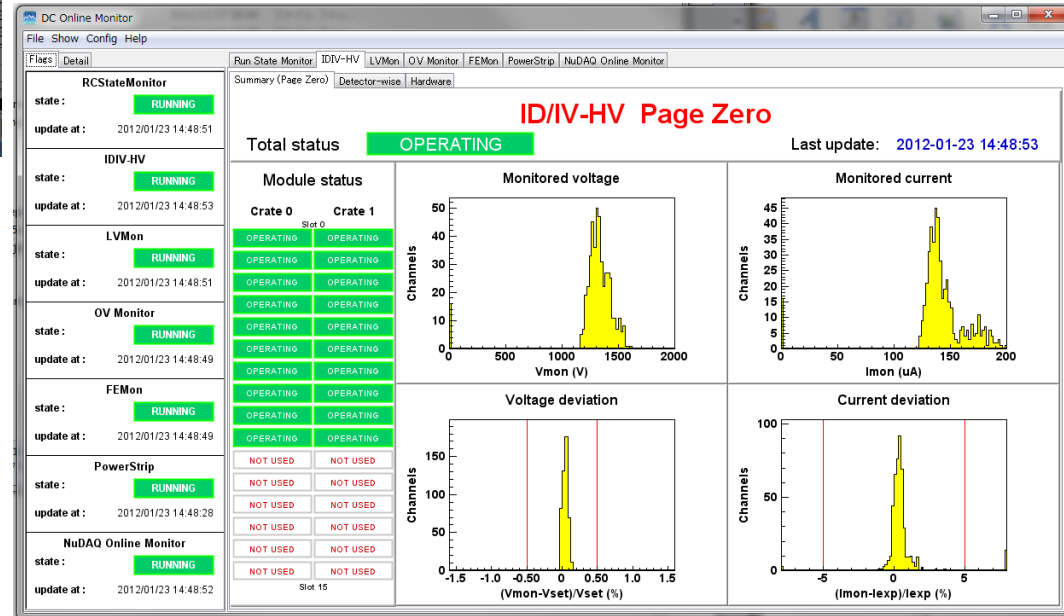
Detector construction



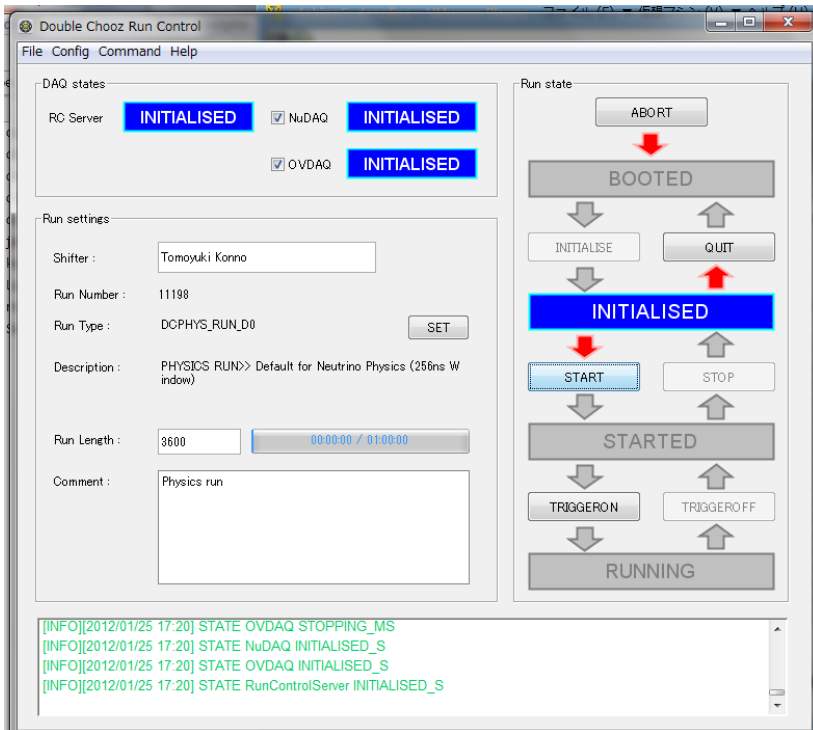
DAQ/Online system

- online systemは大部分が日本製
- JavaベースのGUIによる遠隔操作
— 海外(日本など)からもシフト可能

Online monitor (HV)



Run control

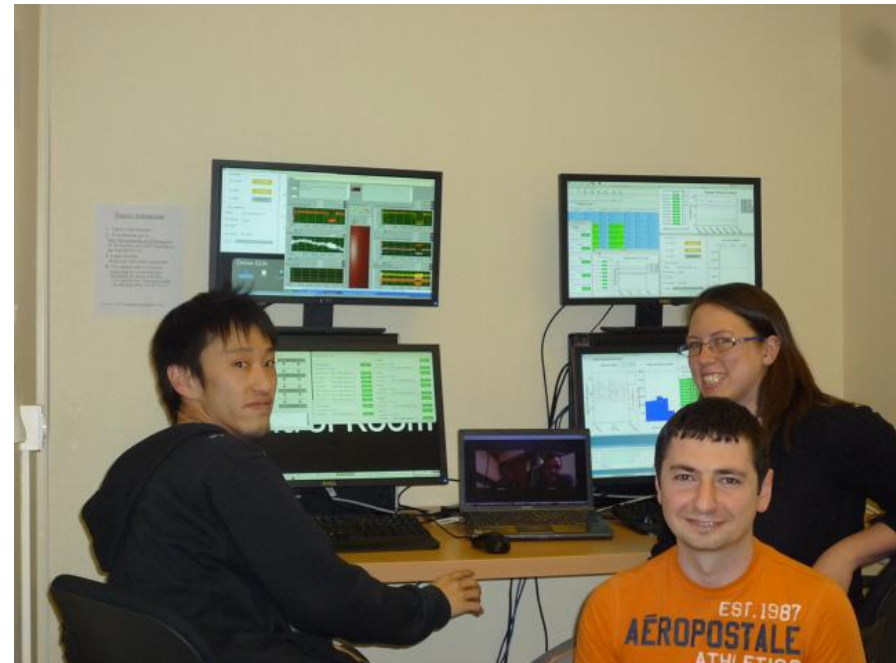


Commissioning & data taking



← 2011年2月
Detector & DAQ
commissioning

2011年4月
data taking 開始！ →



建設/運転スケジュール

2007 2008 2009 2010 2011 **We are here now!** 2012 2013 **Timeline**

Design

Construction Far

Data Taking (Phase 1)

Cstr.
Near

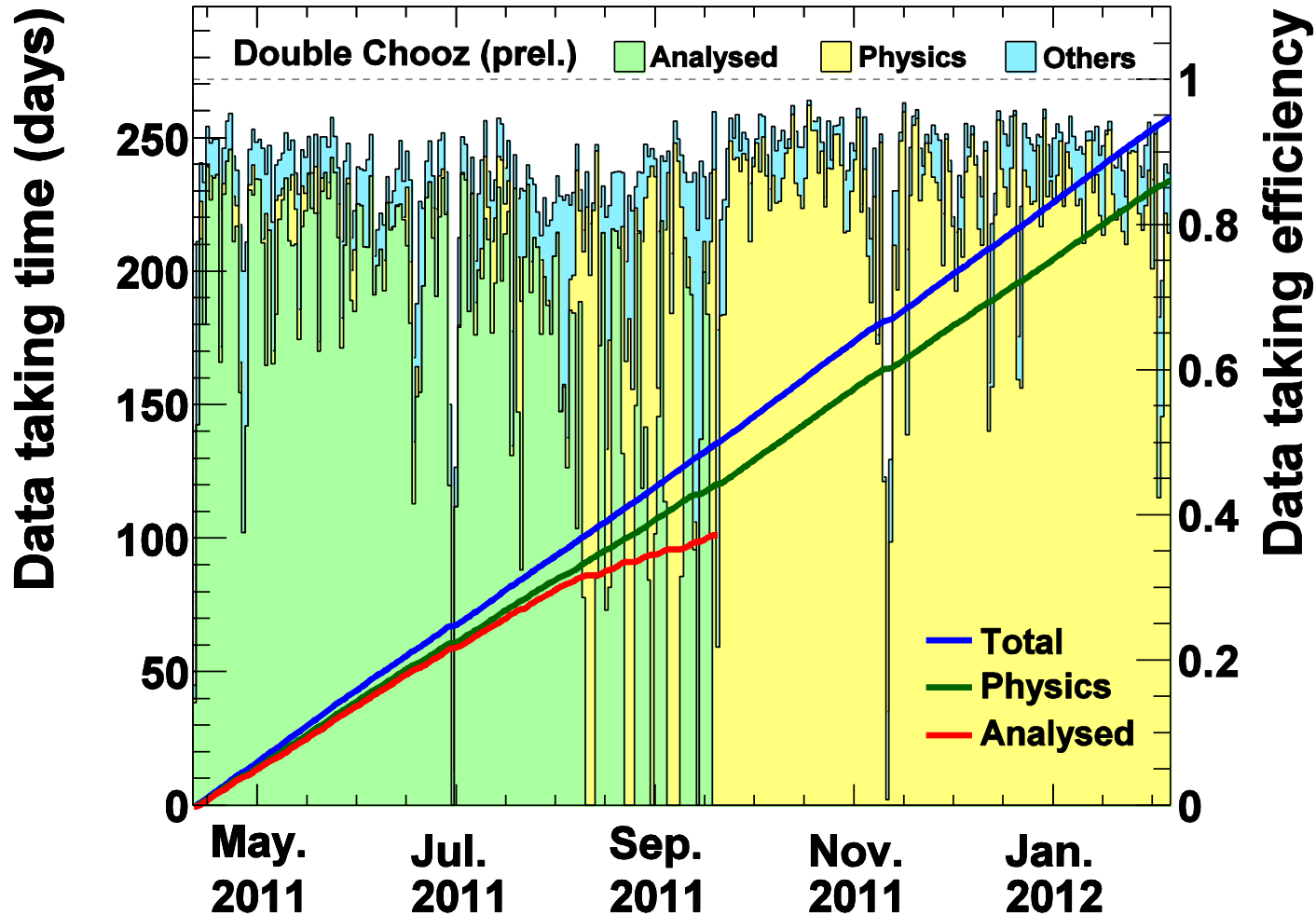
Data Taking (Phase 2)

Far detector only

Far + Near Detector

(2008年5月~) 2010年10月	後置検出器建設完了
2010年12月	液体シンチレータ注入完了
2011年4月	後置検出器試運転完了 物理データ取得開始
	前置検出器建設に向け掘削開始
2011年7月	Outer Veto運転開始
2011年11月	最初のニュートリノ振動解析結果
2012年6月(予定)	前置検出器ラボ完成
2013年初頭(予定)	前置検出器完成 2基の検出器による測定開始

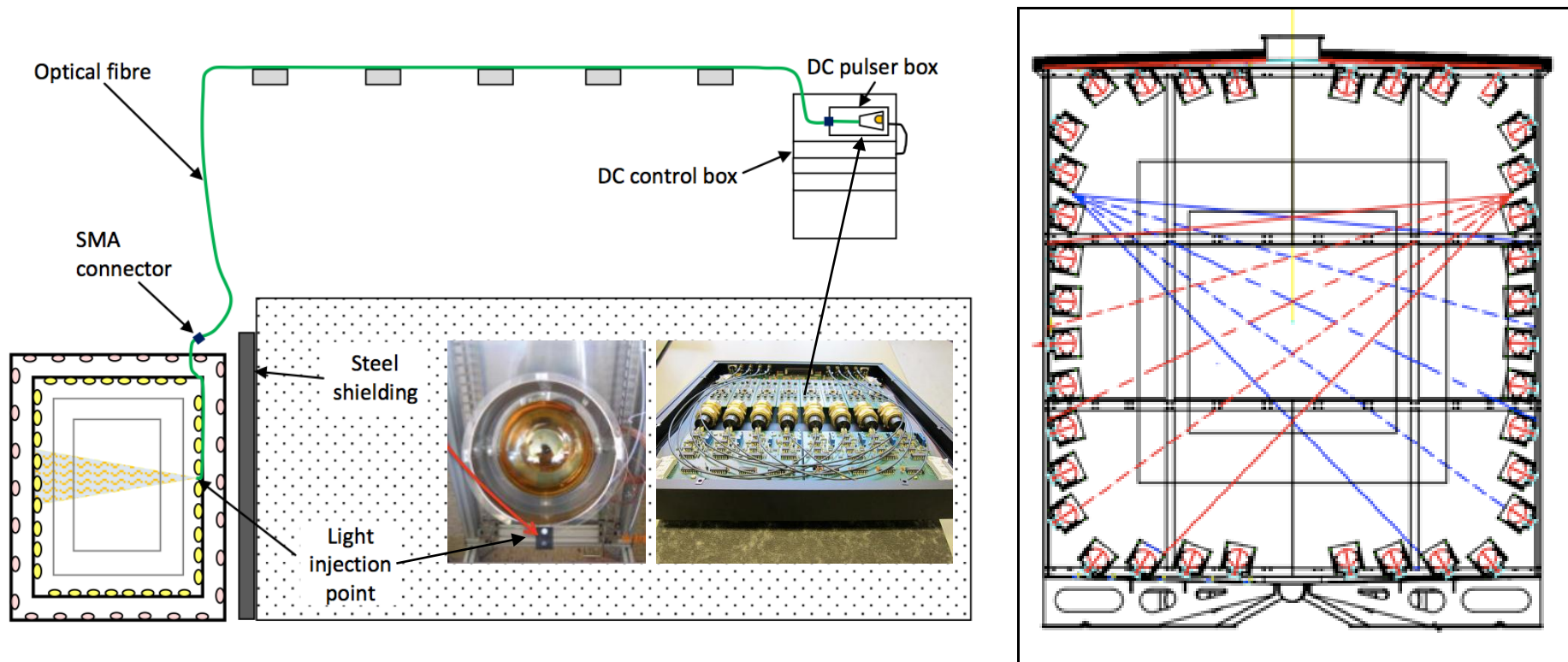
Data taking efficiency



- Run time : 101.523 [day] (4月13日から11月13日まで)
- Live time : **96.823 [day]** (1ms μ vetoのため)

Calibration

LED calibration system



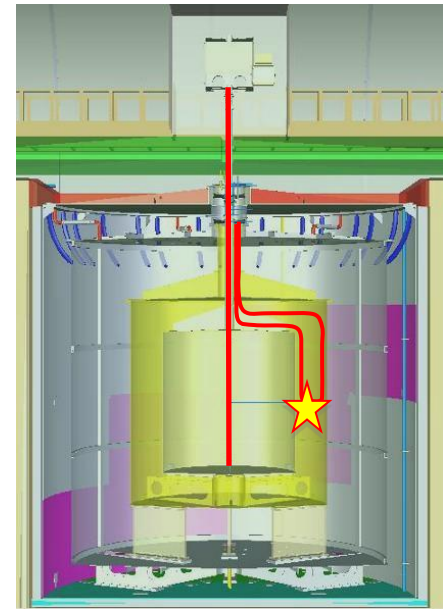
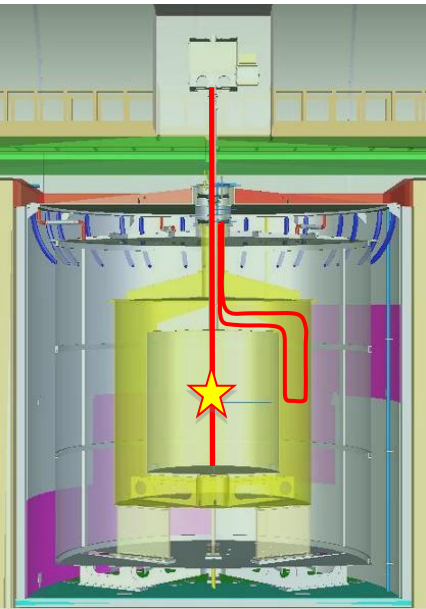
- LED光源からの光をファイバーを通して検出器内に照射
- 検出器内に恒久的に設置されているため、検出器特性の時間変動のキャリブレーションにも用いられる。

Energy calibration

e.g.) ^{68}Ge 陽電子線源
(対消滅による計1.02 MeVのガンマ線)

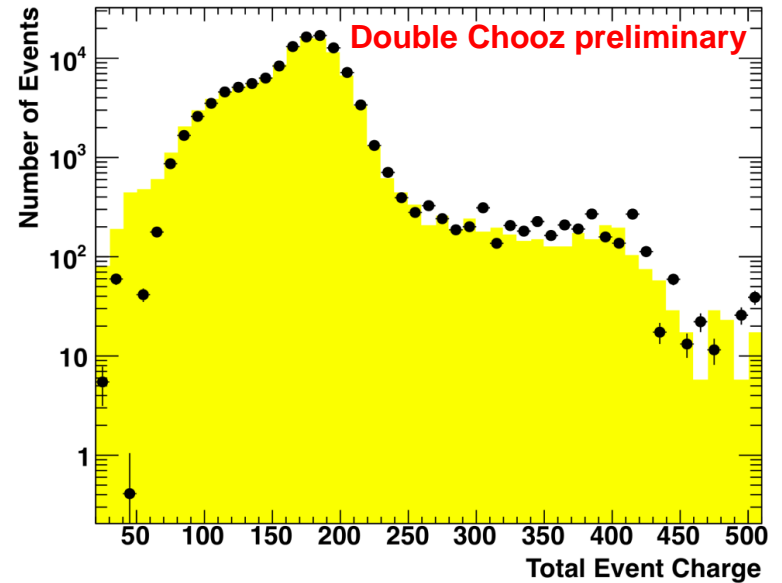
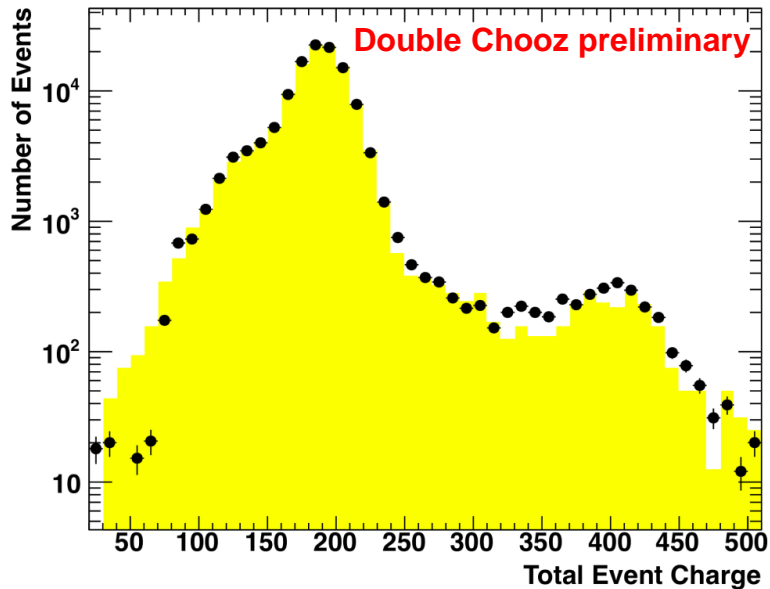
検出器中心に配置

Guide-tube systemで
 γ -catcherに配置
(Targetと γ -catcherの発光量の比較)



^{68}Ge Detector Center X=0mm, Y=0mm, Z=0mm

^{68}Ge Guide Tube X=0mm, Y=1433.9mm, Z=0mm



原子炉ニュートリノスペクトル

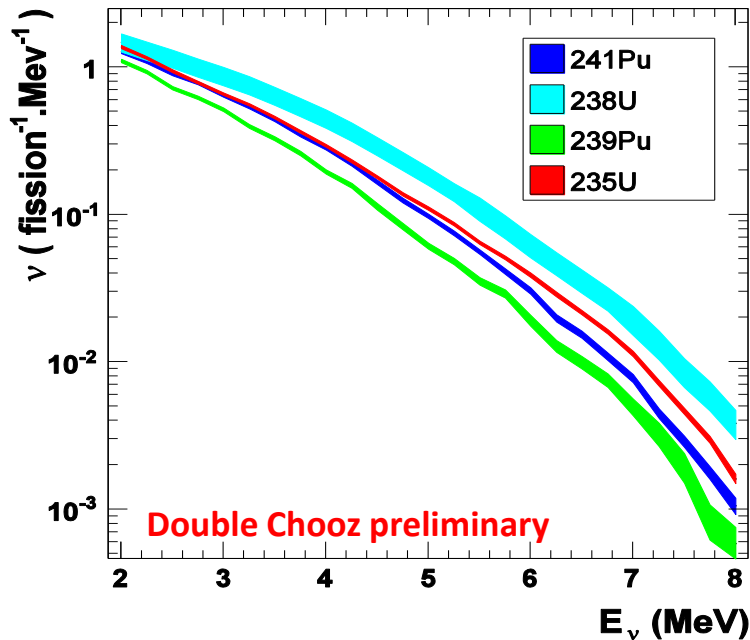
ニュートリノフラックスの計算

期待されるニュートリノ事象数

$$N^{\text{exp}}(E, t) = \frac{N_p \varepsilon}{4\pi L^2} \times \frac{P_{th}(t)}{\langle E_f \rangle} \times \langle \sigma_f \rangle$$

核分裂あたりの平均エネルギー

$$\langle E_f \rangle = \sum_k \alpha_k(t) \cdot \langle E_k \rangle$$

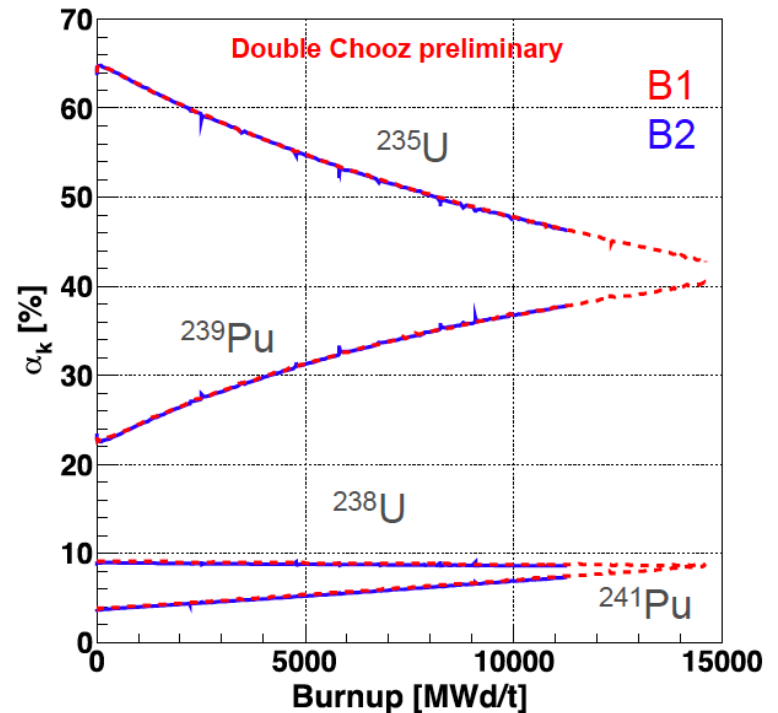


核分裂あたりの平均生成断面積

$$\langle \sigma_f \rangle = \langle \sigma_f \rangle^{\text{Bugey}} + \sum_k (\alpha_k^{\text{DC}}(t) - \alpha_k^{\text{Bugey}}(t)) \langle \sigma_f \rangle_k$$

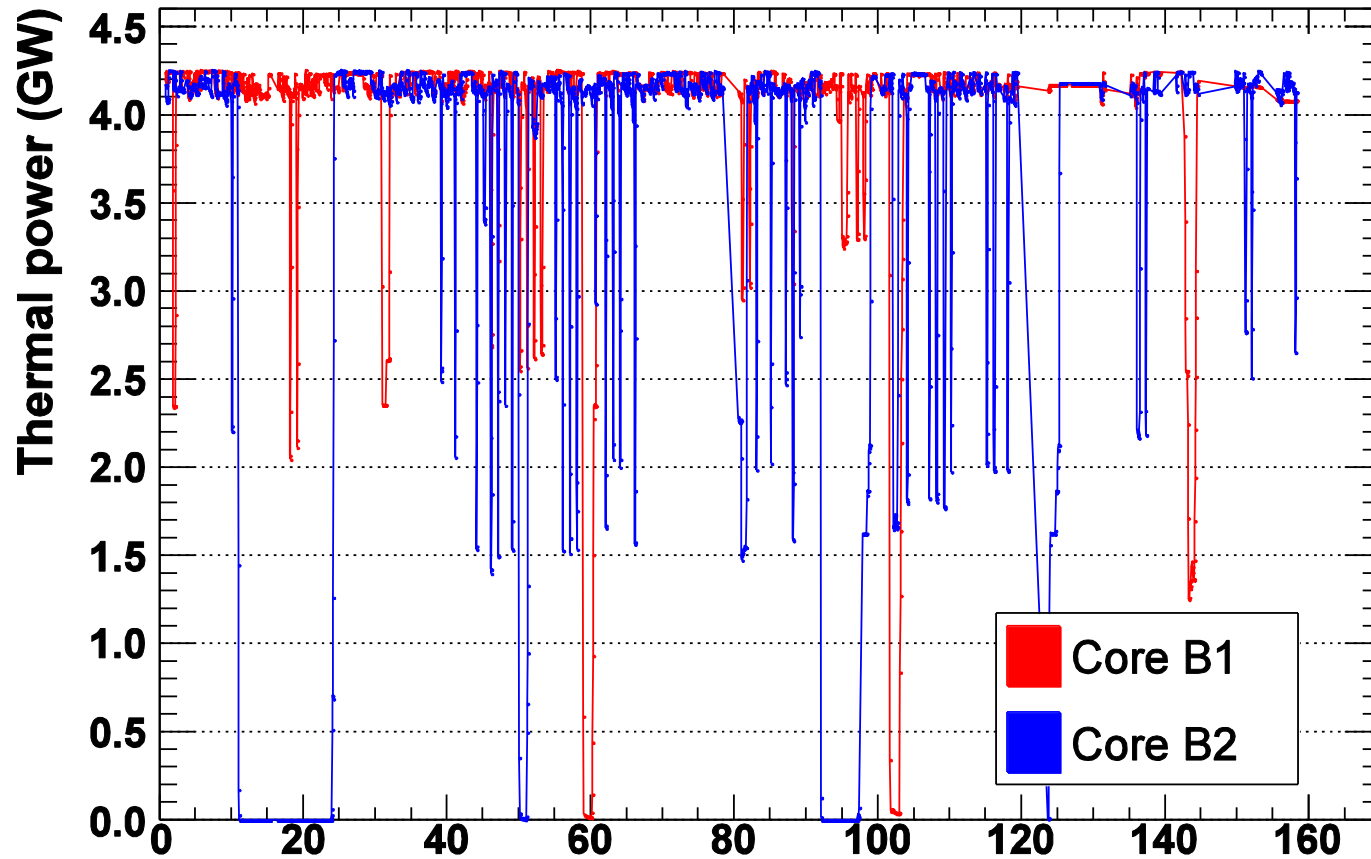
$$\langle \sigma_f \rangle_k = \int_0^\infty dE \cdot S_k(E) \cdot \sigma_{\text{IBD}}(E)$$

※Bugey4実験の測定値を元に
Chooz原子炉の燃料比を補正



Thermal power

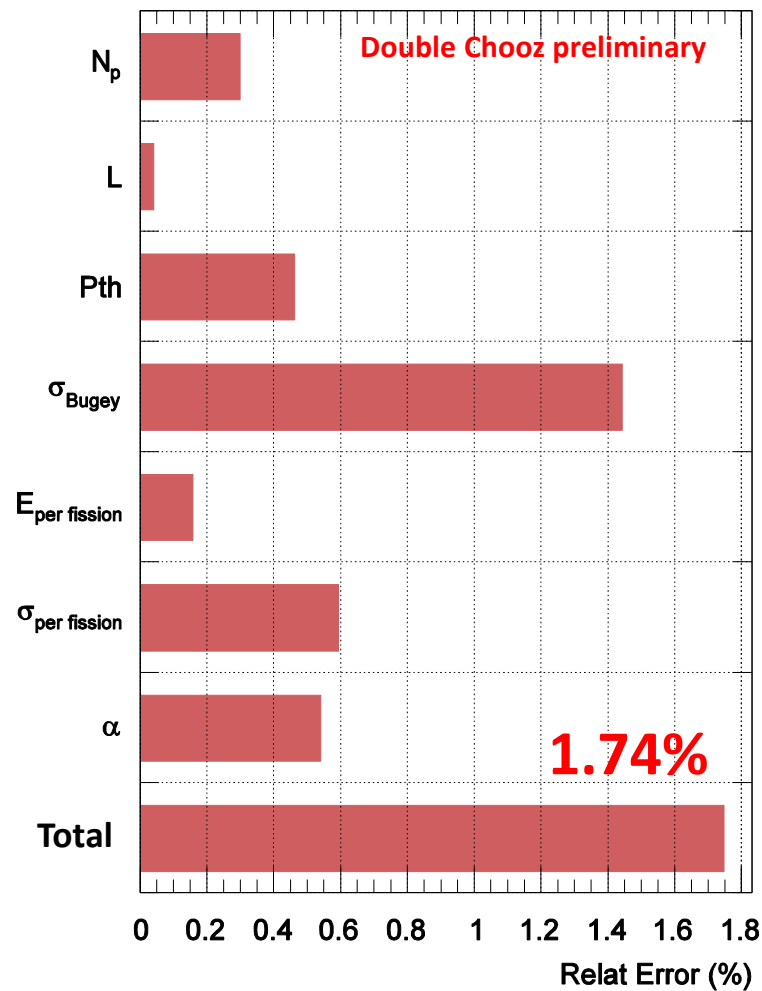
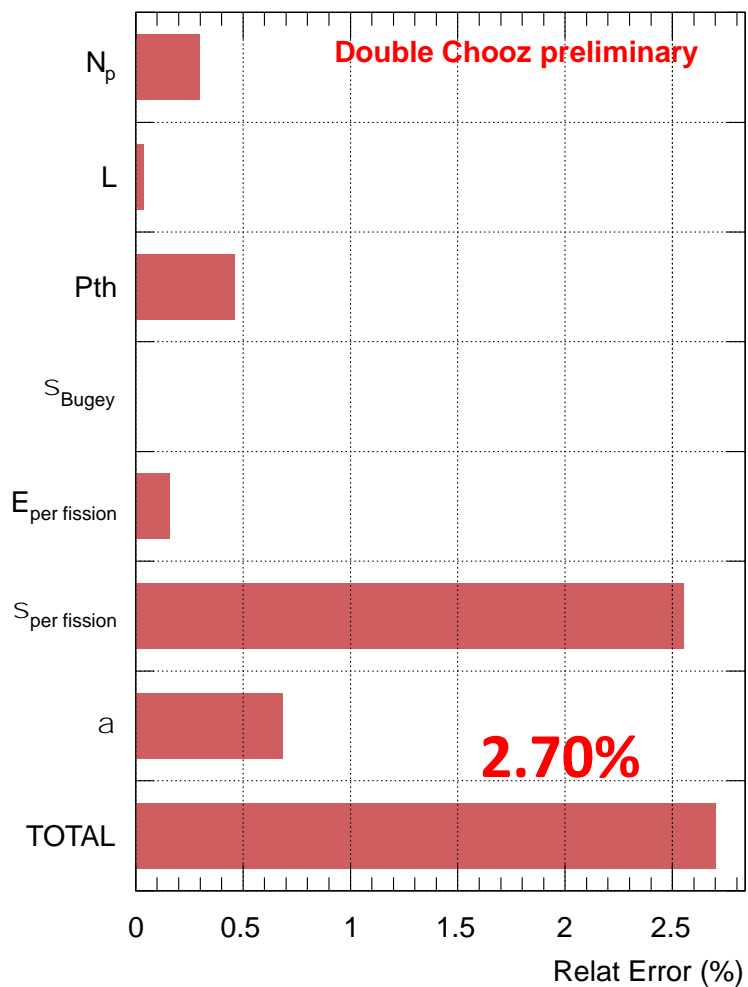
Double Chooz preliminary



- 系統誤差: $\delta P_{th} / P_{th} = 0.46\%$
- Monitoringは1分毎

ニュートリノフラックスの系統誤差

- Bugey4の測定結果を使用 \rightarrow σ_{fission} の誤差を抑制

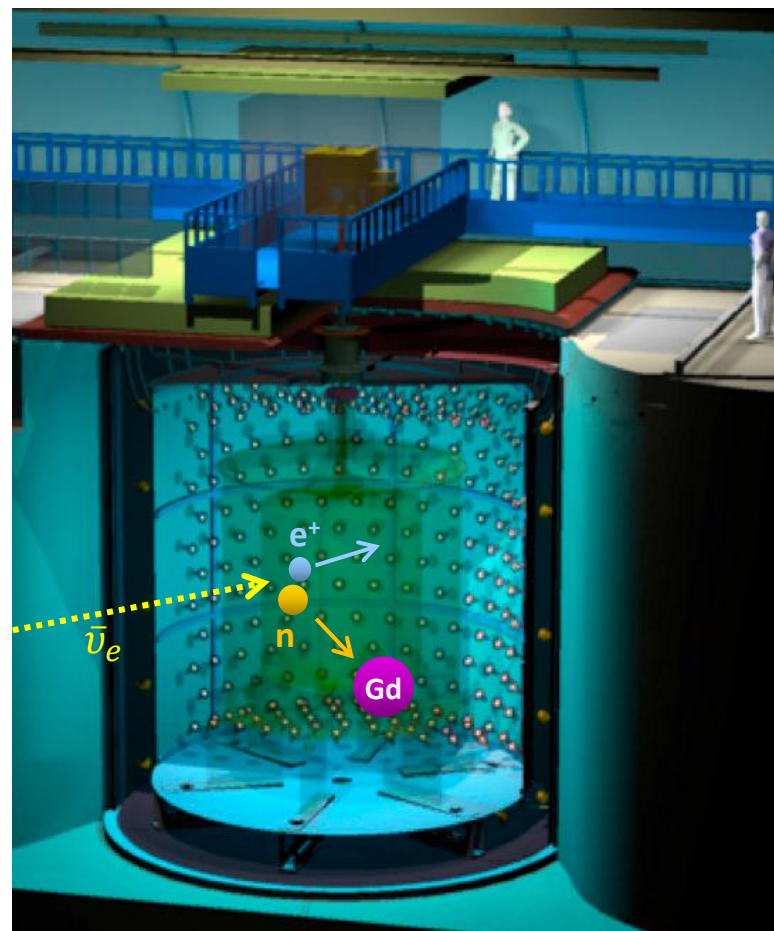


ニュートリノ事象選別

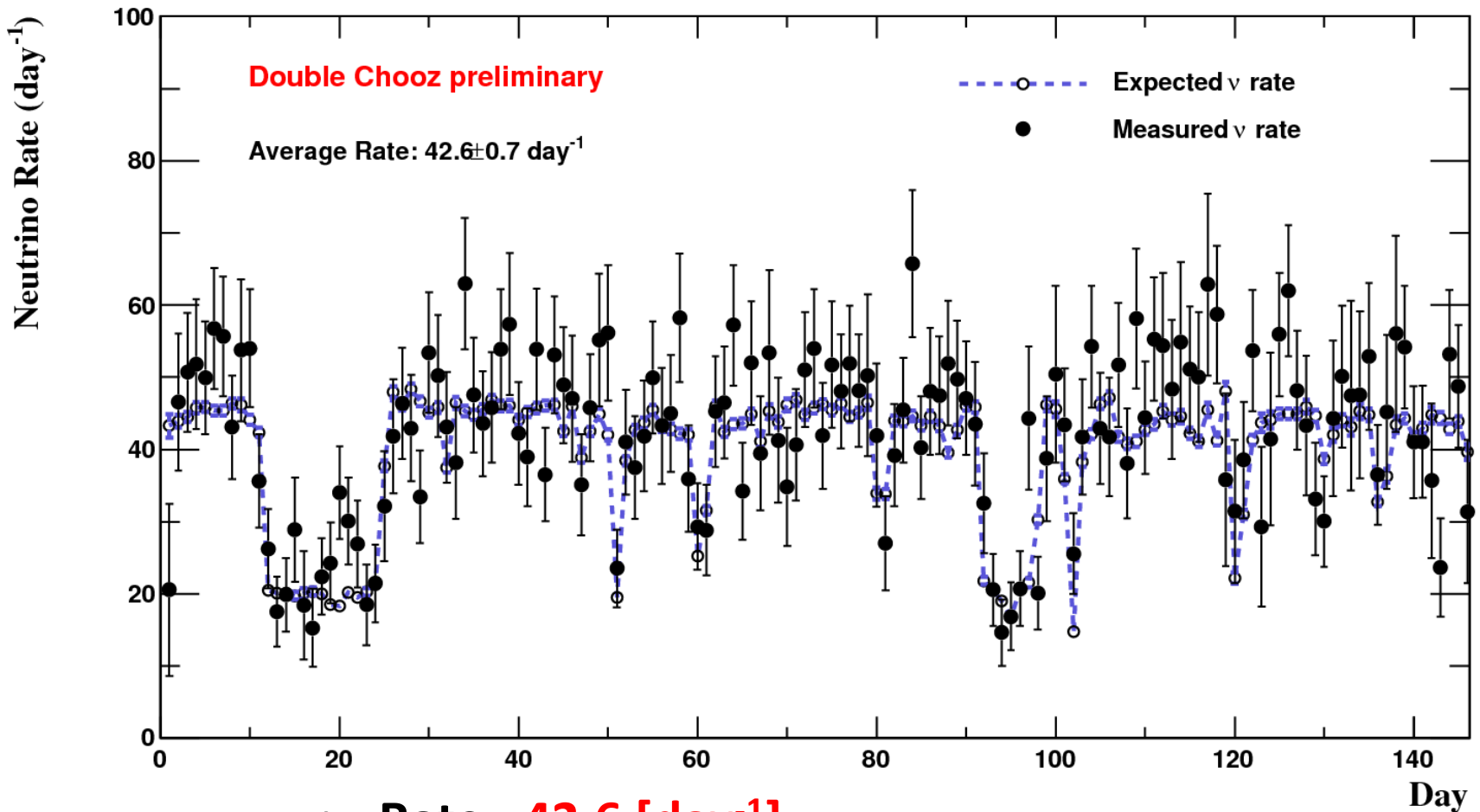
ニュートリノ事象選別条件

- **Prompt event:**
 - No Inner Veto Energy deposition
 - $Q_{\text{Max}}/Q_{\text{tot}} < 0.09$
 - $\text{RMS}_{\text{Tstart}} < 40 \text{ ns}$
 - $0.7 < E_{\text{prompt}} < 12.2 \text{ MeV}$
- **Delayed event:**
 - No Inner Veto Energy deposition
 - $Q_{\text{Max}}/Q_{\text{tot}} < 0.06$
 - $\text{RMS}_{\text{Tstart}} < 40 \text{ ns}$
 - $6 < E_{\text{delayed}} < 12 \text{ MeV}$
- **Time correlation:**
 - $2 \mu\text{s} < \Delta T(\text{prompt} - \text{delayed}) < 100 \mu\text{s}$
 - (no space correlation)

※ $Q_{\text{Max}}/Q_{\text{tot}}$ と $\text{RMS}_{\text{Tstart}}$ はノイズの除去に使用

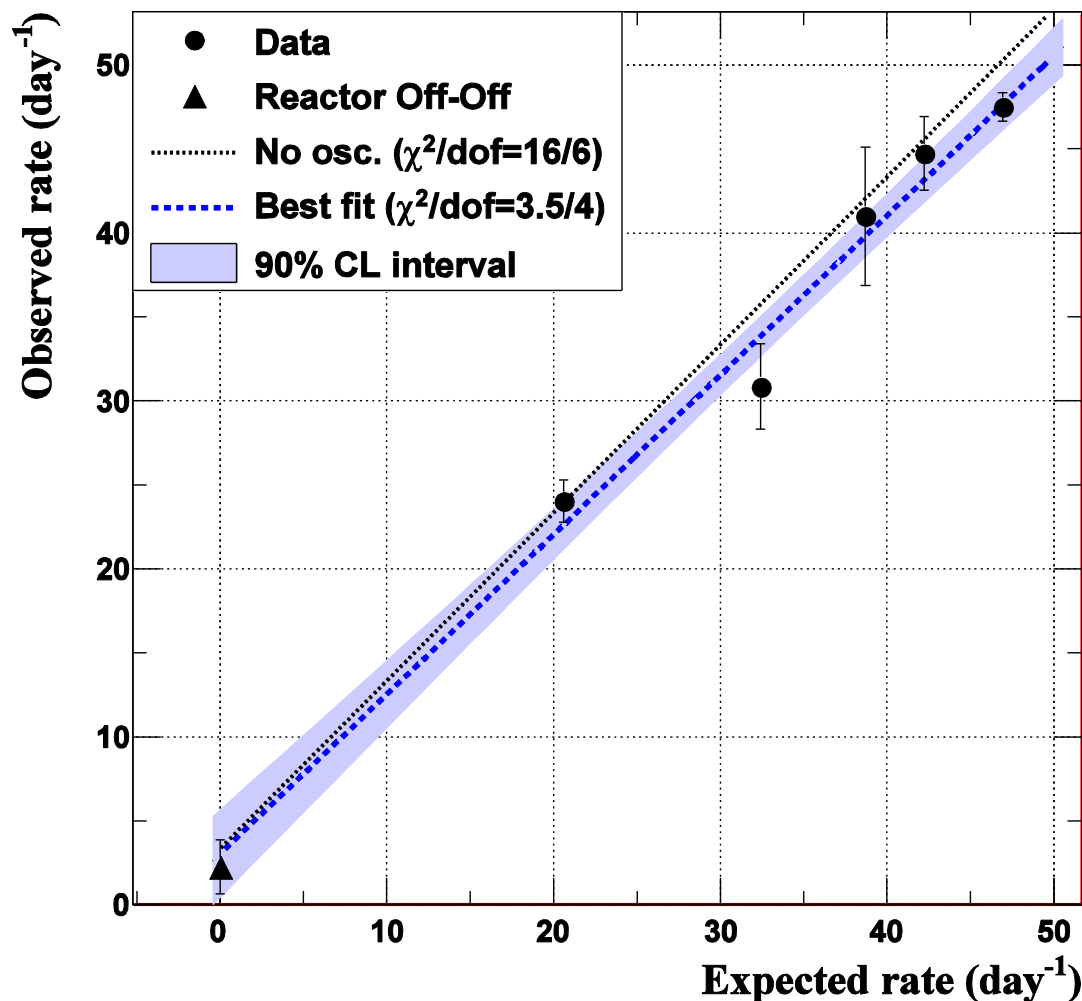


Neutrino candidate rate



- Rate : **42.6 [day^{-1}]**
- バックグラウンドは差し引いていない
- expected neutrino rateと矛盾しない

Observed v.s. Predicted rate



- 観測されたNeutrino rateは期待されるneutrino rateと良い線形性
- Backgroundの見積もりはreactor off dataの測定とも一致。

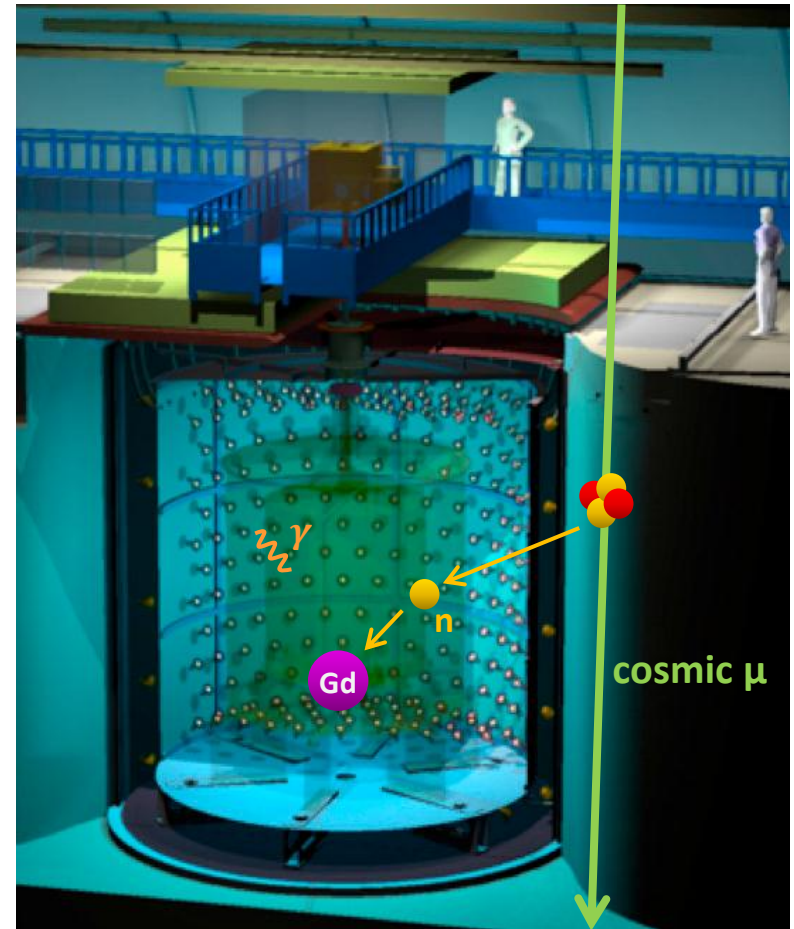
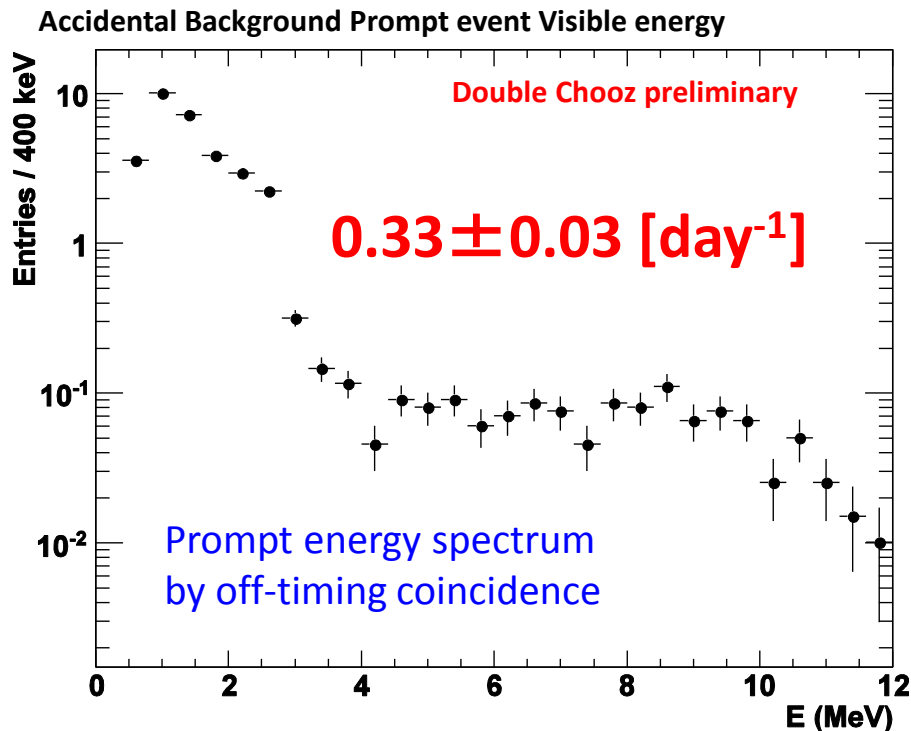
バックグラウンド

3種類のバックグラウンド

- Accidental BG
- Fast neutron BG
- Cosmogenic BG

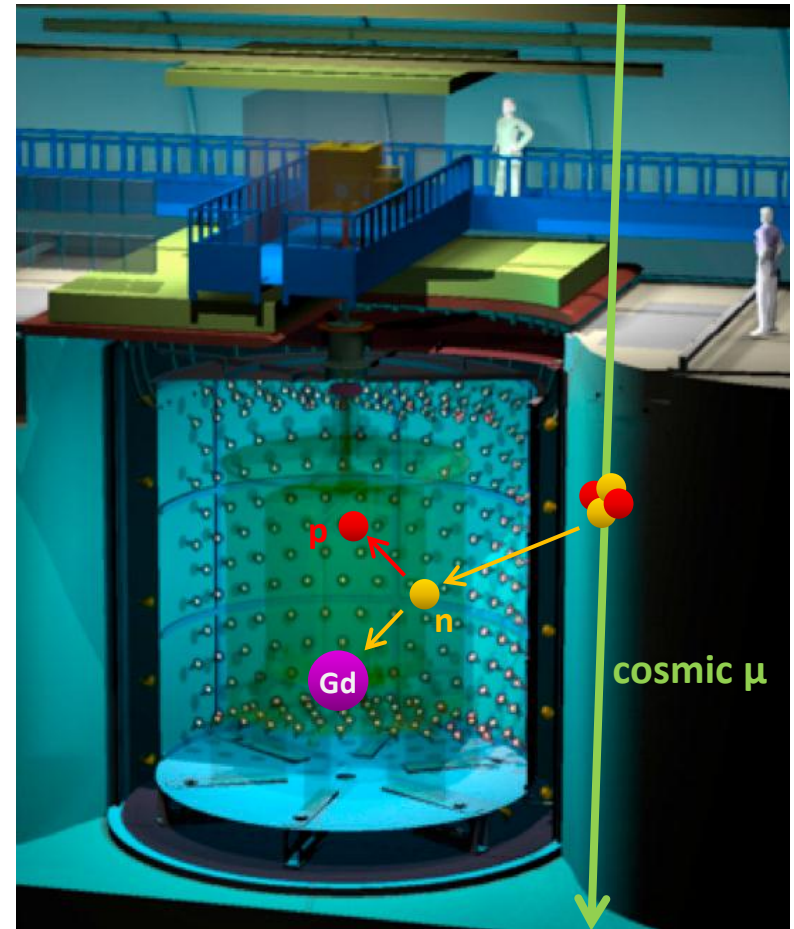
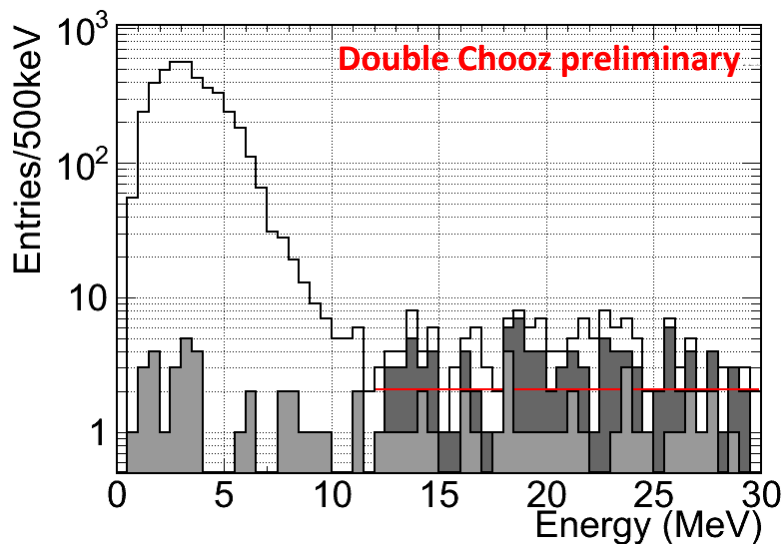
Accidental background

- 二つの無関係の事象がDelayed coincidence windowに偶然入る事象
- ニュートリノに関連しないtime windowでcoincidenceを取って数を見積もる (Off-timing method)



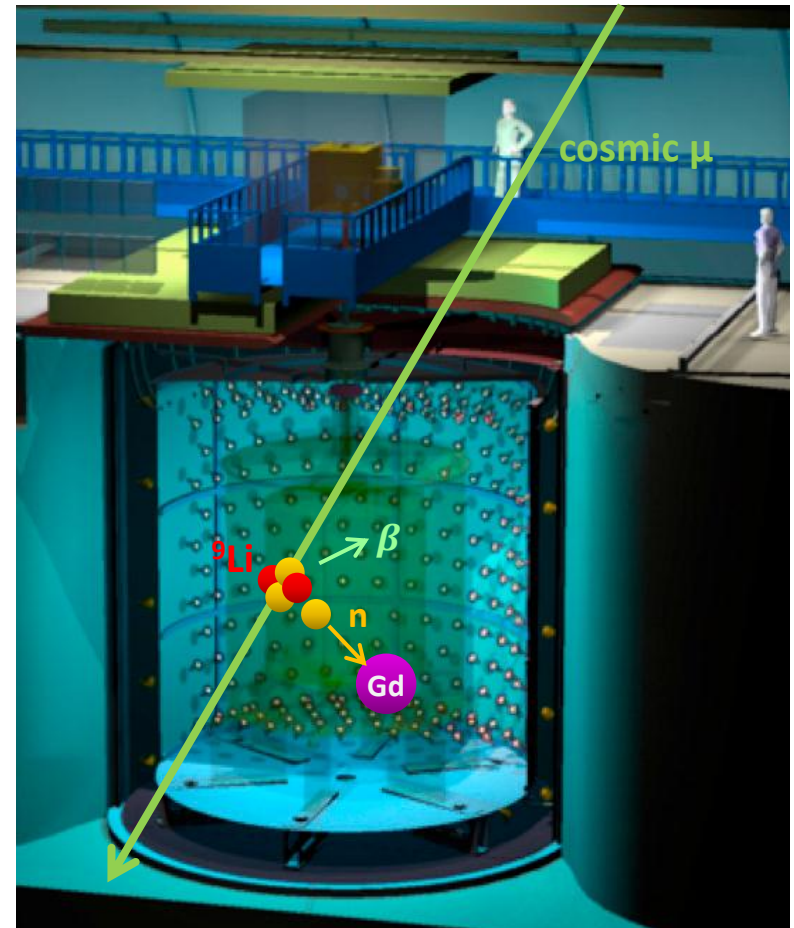
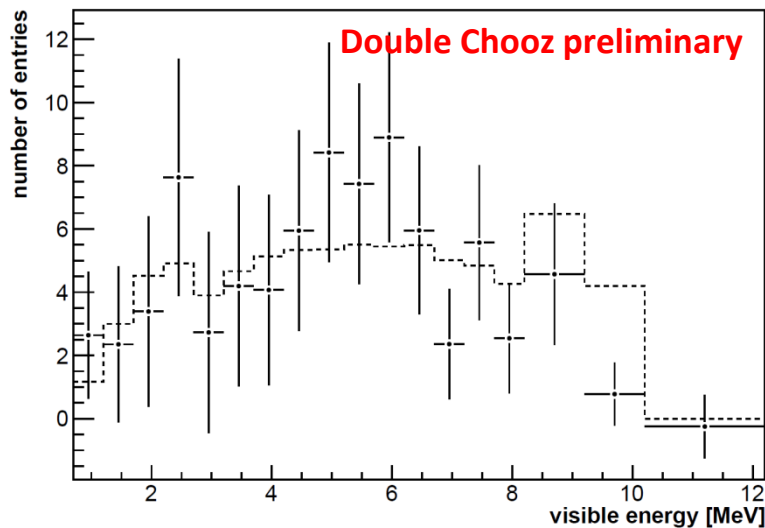
Fast neutron background

- Correlated background
 - Prompt : 高速中性子による反跳陽子
 - Delayed : Gdによる中性子捕獲に伴う γ 線
- Fast-n & Stopping μ
- Rate : 高エネルギー領域から外挿
 - 0.83 ± 0.38 [day⁻¹]
- Shape : フラットなスペクトルを仮定
 - stopping μ によるshape 不定性



Cosmogenic background

- Correlated background
 - 宇宙線ミュオンの核破砕反応により ${}^9\text{Li}$, ${}^8\text{He}$ などが生成
 - 約250 msecのLife timeで $\beta + n$ を出し、ニュートリノ事象と誤識別される
(宇宙線シグナルによってVETOできない)
- Muon-Prompt-Delayed signalのtriple coincidenceで事象数を見積もる
- Rate: 2.3 ± 1.2 [day^{-1}]
- Shape: MC (nuclear database)



ニュートリノ振動解析

解析手法

- χ^2 testからbest fitパラメータを算出
 - Rate analysis : データとMC + backgroundのイベント数を比較
 - Rate + Shape analysis : χ^2 with covariance matrix + pull term

$$\chi^2 = \left(N_i - \left(\sum_R^{\text{Reactors}} N_i^{\nu,R} + \sum_b^{\text{Bkgs}} N_i^b(P_b) \right) \right) \times \left(M_{ij}^{\text{signal}} + M_{ij}^{\text{detector}} + M_{ij}^{\text{stat}} + \sum_b^{\text{Bkgs}} M_{ij}^b \right) \\ \times \left(N_j - \left(\sum_R^{\text{Reactors}} N_j^{\nu,R} + \sum_b^{\text{Bkgs}} N_j^b(P_b) \right) \right)^T \\ + \sum_R^{\text{Reactors}} \frac{(P_R)^2}{\sigma_R^2} + \sum_b^{\text{Bkgs}} \frac{(P_b)^2}{\sigma_b^2}$$

M_{ij}^{signal} : Signal covariance matrix
(reactor ν flux etc.)

M_{ij}^{detector} : Detector covariance matrix
(E scale etc.)

M_{ij}^{stat} : Statistical covariance matrix

M_{ij}^b : Covariance matrix for background b

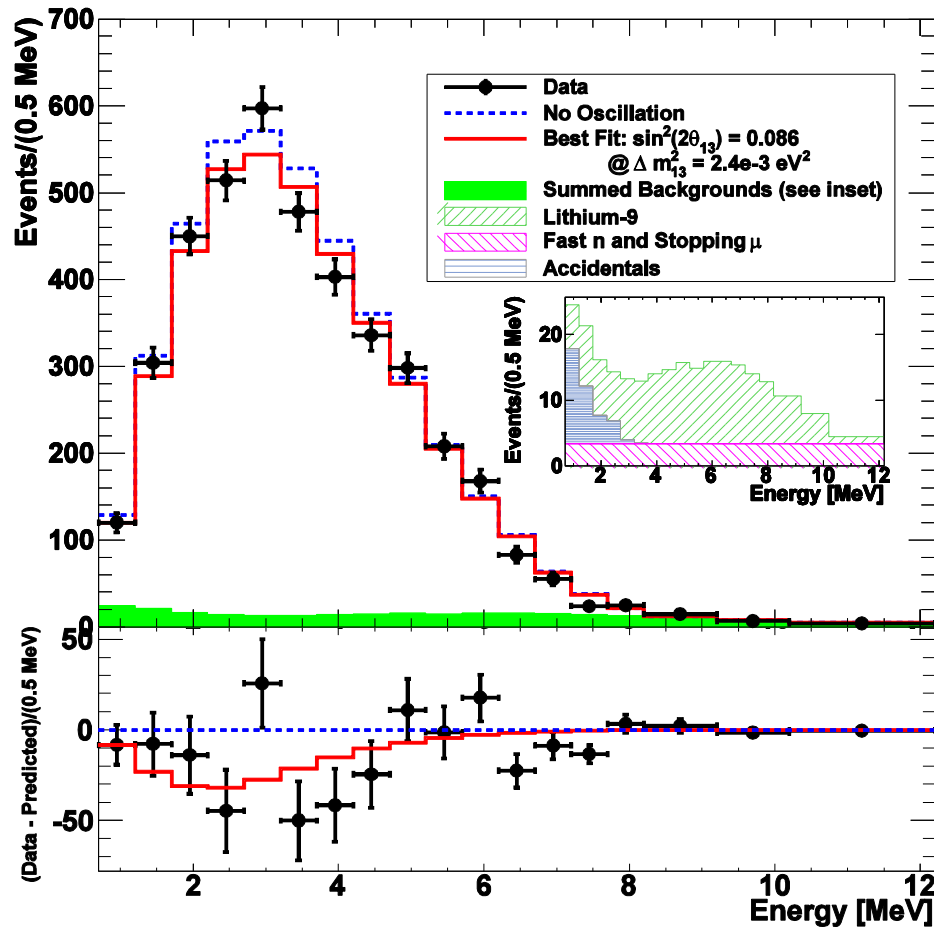
P_R : Pull parameter varying the total rate of neutrinos from reactor R

P_b : Pull parameter varying the total rate of background b

Systematic Uncertainties

Source		Uncertainty w.r.t. signal	
Statistics		1.6%	
Reactor	Bugey4 measurement	1.4%	1.8%
	Fuel Composition	0.9%	
	Thermal Power	0.5%	
	Reference Spectra	0.5%	
	Energy per Fission	0.2%	
	IBD x-sec	0.2%	
	Baseline	0.2%	
Detector	Energy response	1.7%	2.1%
	E_{Delayed} containment	0.6%	
	Gd fraction	0.6%	
	Δt_{e+n}	0.5%	
	Spill in/out	0.4%	
	Trigger efficiency	0.4%	
	Target H	0.3%	
Backgrounds	Accidental	<0.1%	3.0%
	Fast neutron	0.9%	
	${}^9\text{Li}$	2.8%	

解析結果



Rate Only fit:

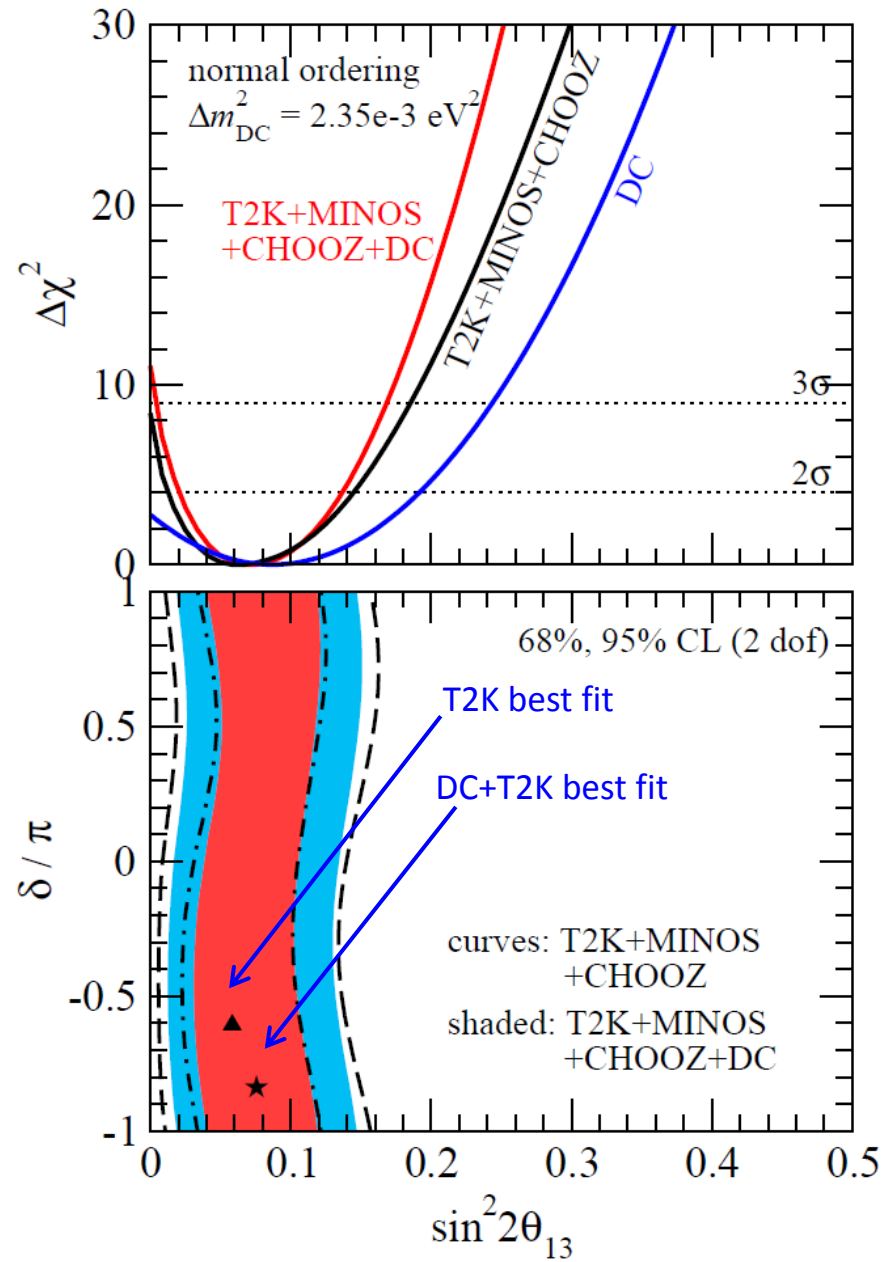
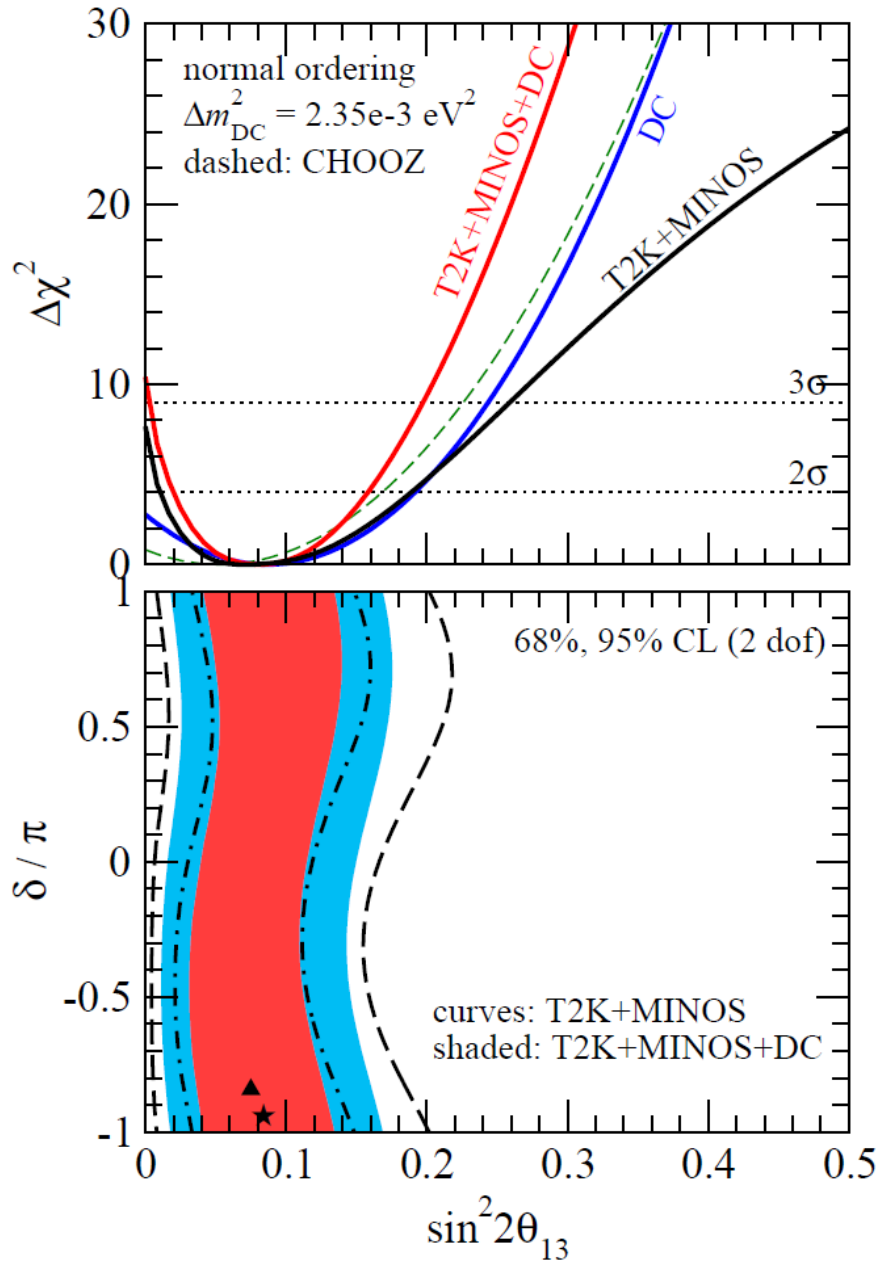
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.104 \pm 0.030(\text{stat.}) \pm 0.076(\text{syst.})$$

Rate & Shape fit:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat.}) \pm 0.030(\text{syst.})$$

➡ No oscillation excluded at 94.6%

他実験と組み合わせ



今後の展望

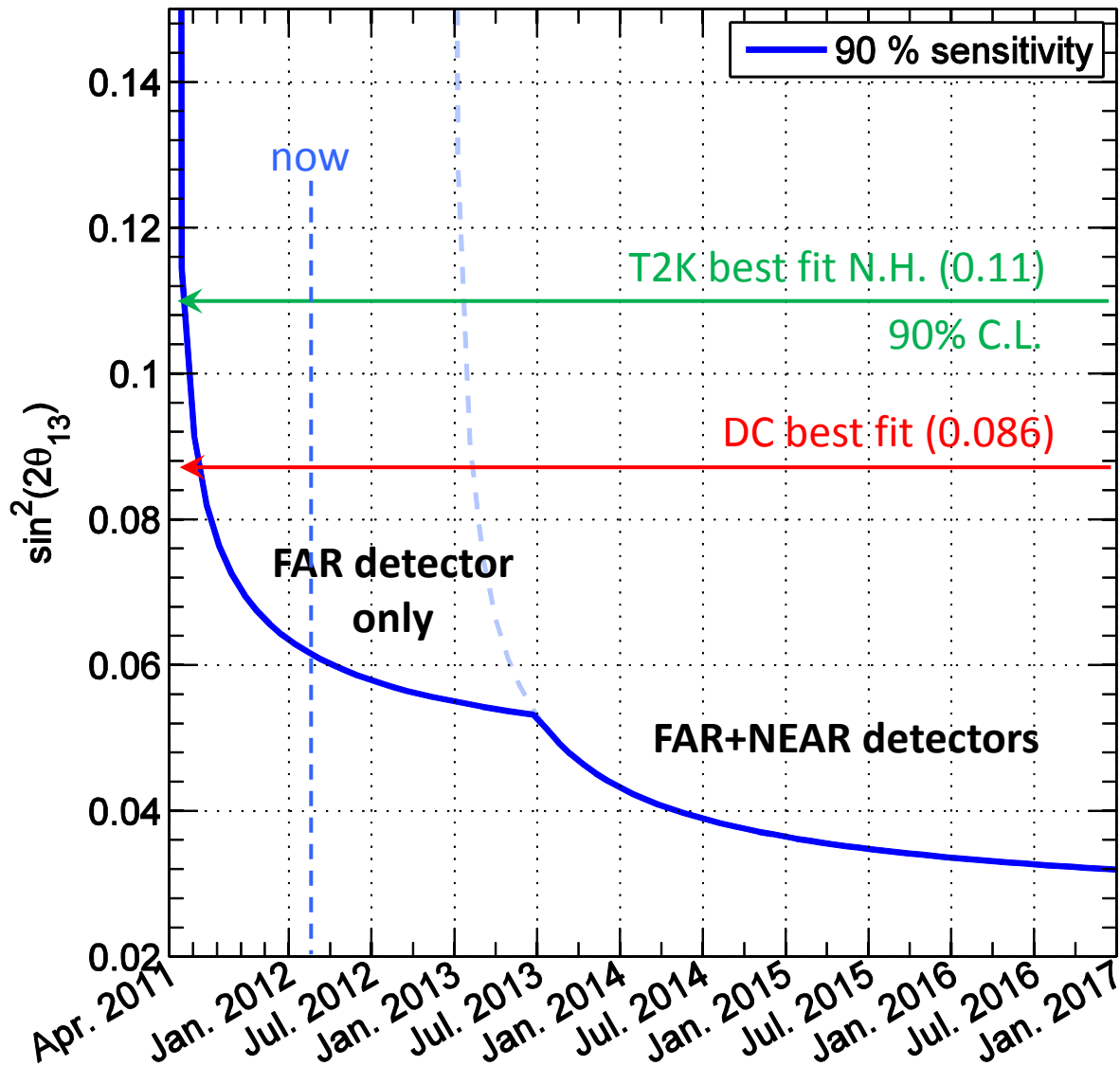
Near detector construction



ラボは2012年6月ごろ完成予定
2013年には前置検出器も測定開始

$\sin^2 2\theta_{13}$ sensitivity

Double Chooz - sensitivity, no oscillations



$\Delta m^2_{\text{atm}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
(20% uncert. by MINOS)

- CHOOZ limit:
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$
- T2K result (N.H.):
 $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$
- DC result:
 $0.001 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.169$

← 現在のData taking efficiency
を考慮している

まとめ

- Double Chooz実験は2011年4月から物理データ取得開始。
 - 検出器は安定しており、順調にデータ取得中
- 約100日のデータを用いて最初のニュートリノ振動解析の結果

Rate + Shape Analysis:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat.}) \pm 0.030(\text{syst.})$$

No oscillation excluded at 94.6% C.L.

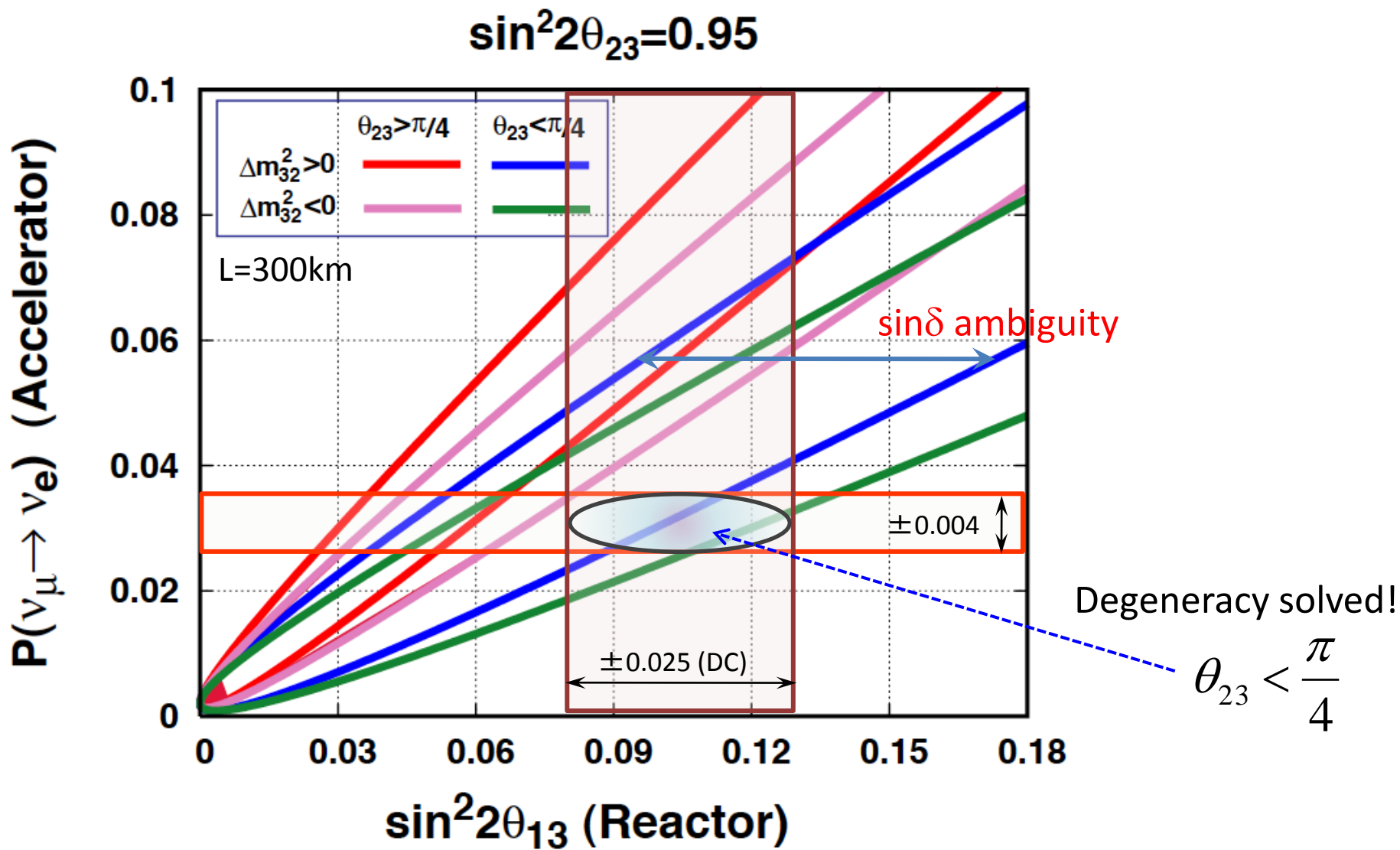
Rate only Analysis:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.104 \pm 0.030(\text{stat.}) \pm 0.076(\text{syst.})$$

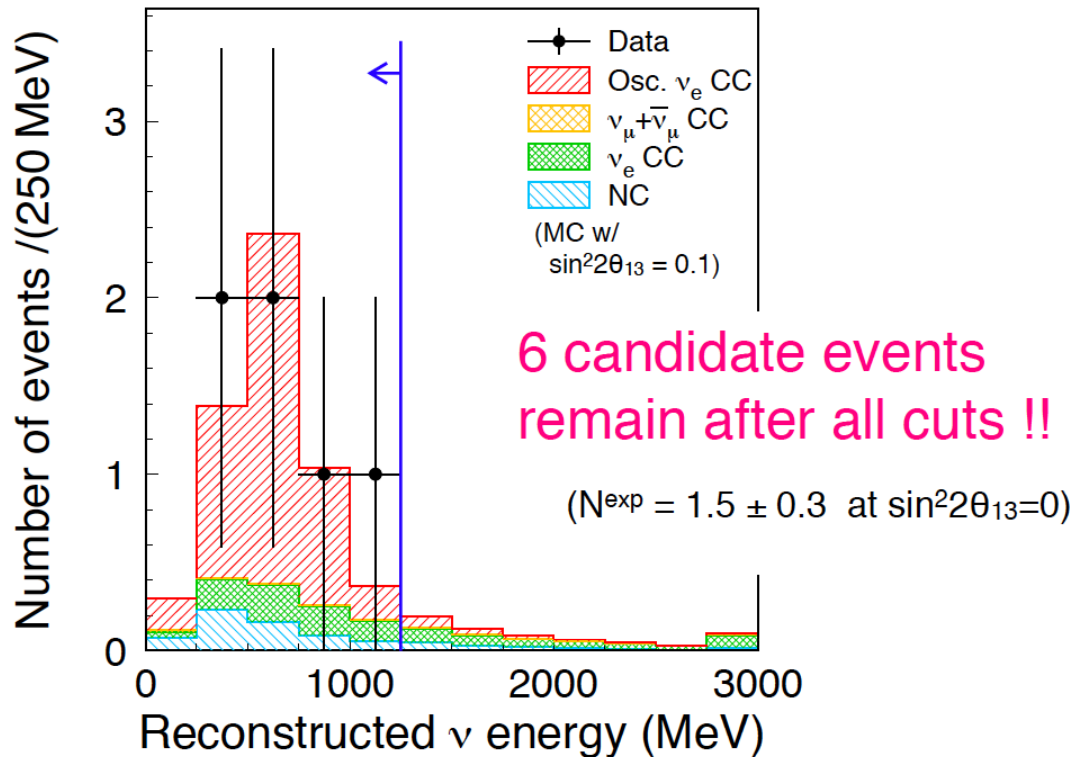
- 今後
 - 後置検出器のみの測定
 - 約1.5年で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.06$ まで探索可能
 - 2013年以降から前置検出器稼働予定。
 - さらに約3年間の測定で、 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ まで探索可能

back up

加速器実験との相補性



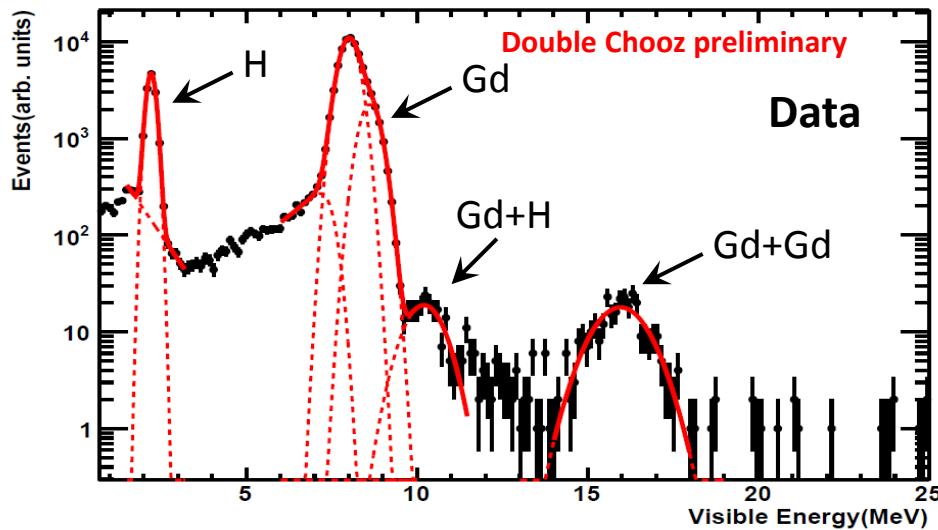
電子ニュートリノ出現現象 (non-zero θ_{13}) の兆候: T2K実験 (2011年6月)



- 2.5σ significance of non-zero θ_{13}
- $0.03 (0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28 (0.34)$ @90% C.L.
for normal (inverted) hierarchy
($\Delta m^2_{23} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\delta_{\text{CP}} = 0$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ を仮定)

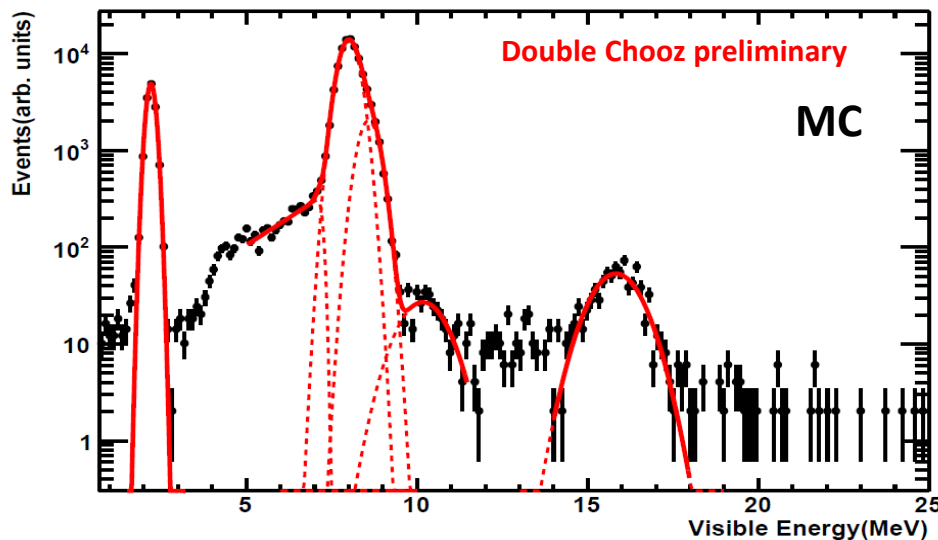
Fraction of Gd capture

^{252}Cf Data Delayed Signal



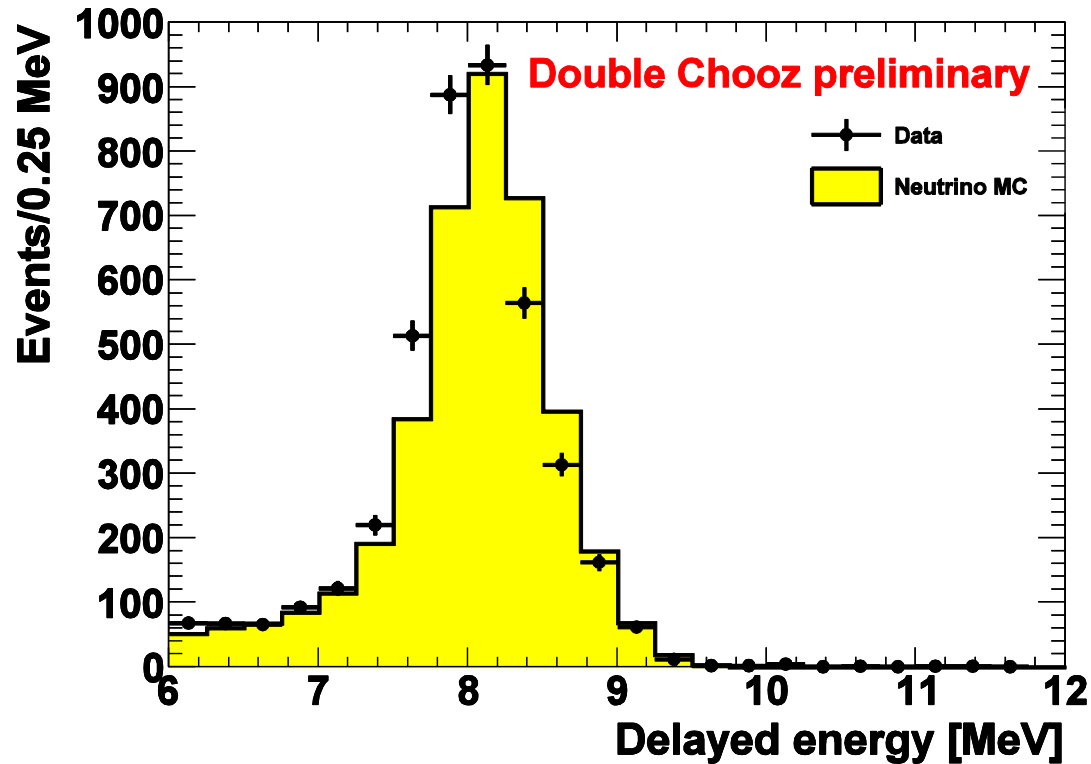
- ^{252}Cf 中性子線源を用いて、Gdによる中性子捕獲の比をデータとMCで比較
→ MCを2%補正

^{252}Cf MC Delayed Signal



Delayed energy spectrum

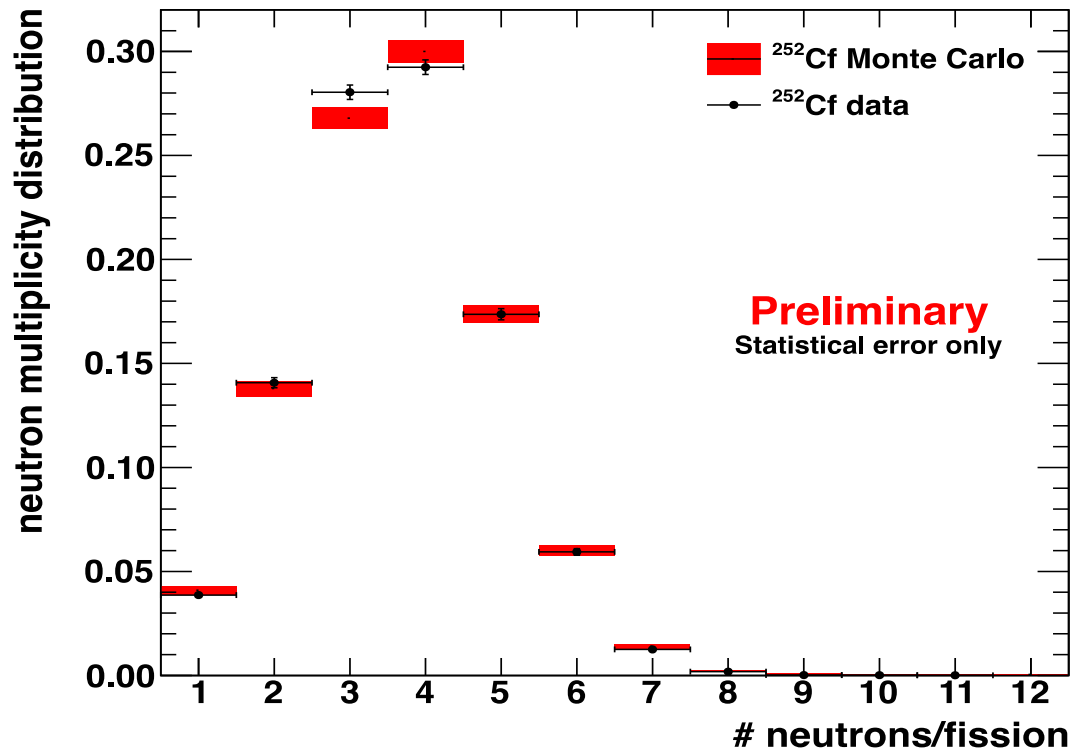
- Selection of neutron capture on Gd only



- Delayed energy cut efficiency : 86.0 ± 0.6 %

252Cf neutron multiplicity

Multiplicity of total neutron capture (H+Gd)

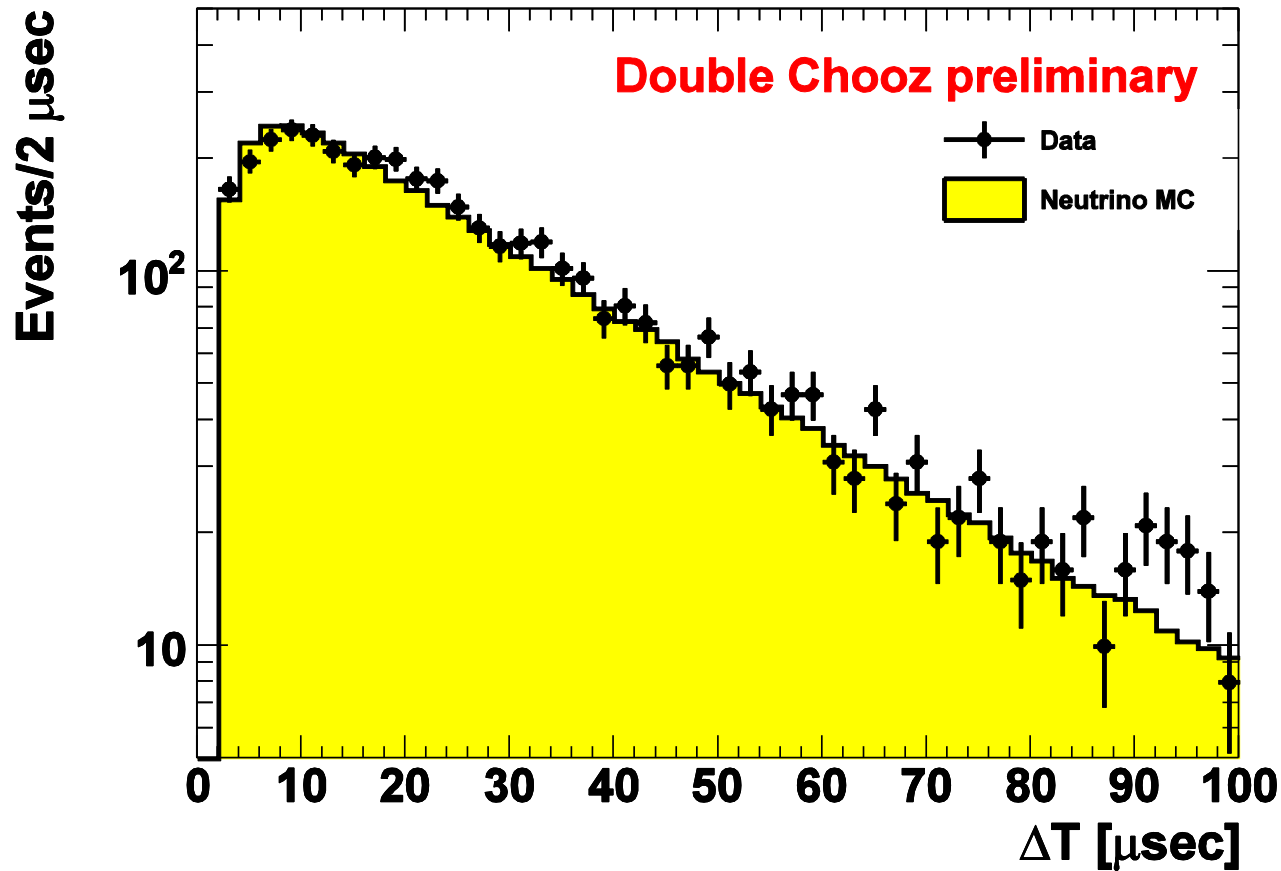


- Important verification of the neutron detection efficiency
- Average neutron multiplicity

Data : 3.659 ± 0.008 (stat.)

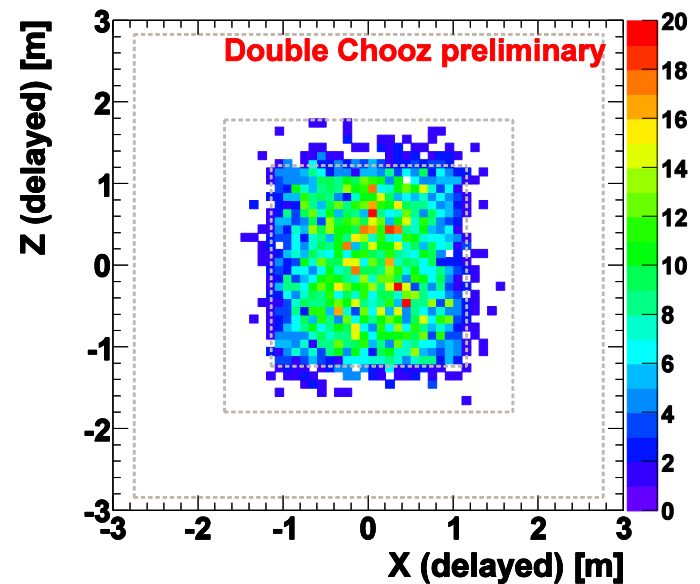
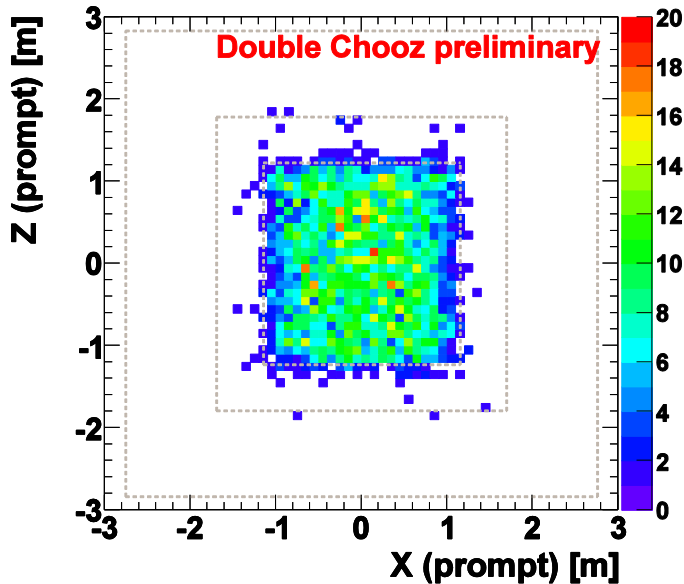
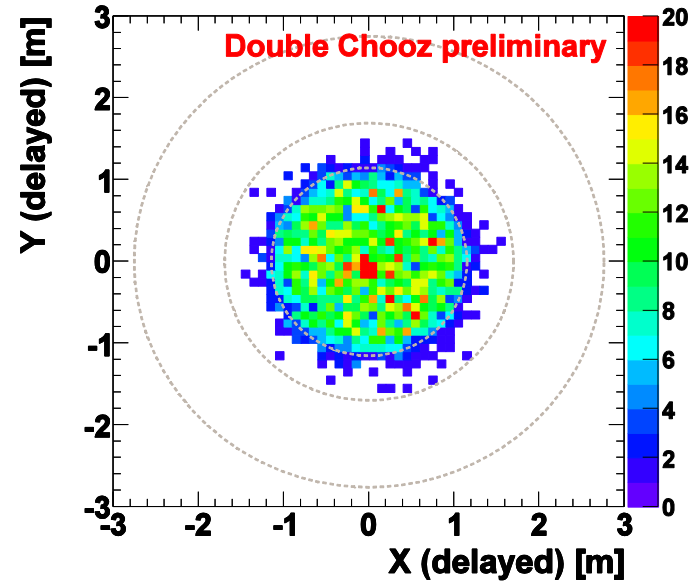
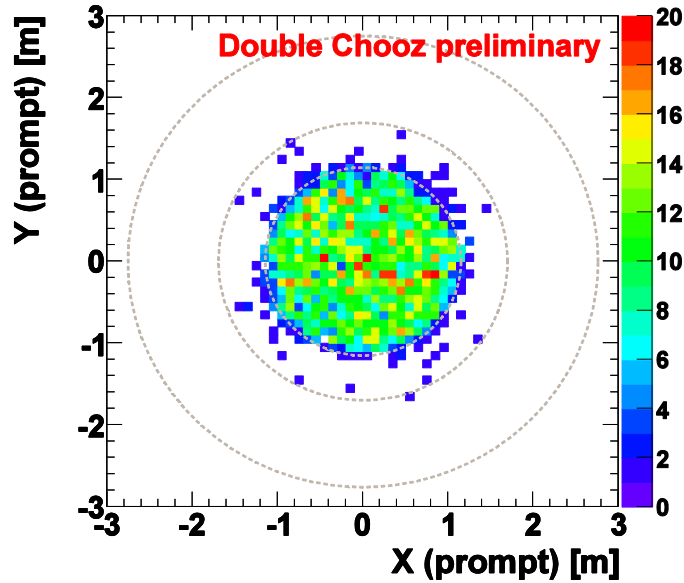
MC : 3.677 ± 0.013 (stat.)

Time coincidence



- keV neutrons thermalized within a few μs
→ then, captured on Gd with $\tau = 27 \mu\text{s}$
- Efficiency within $[2, 100] \mu\text{s}$: $96.5 \pm 0.5 \%$

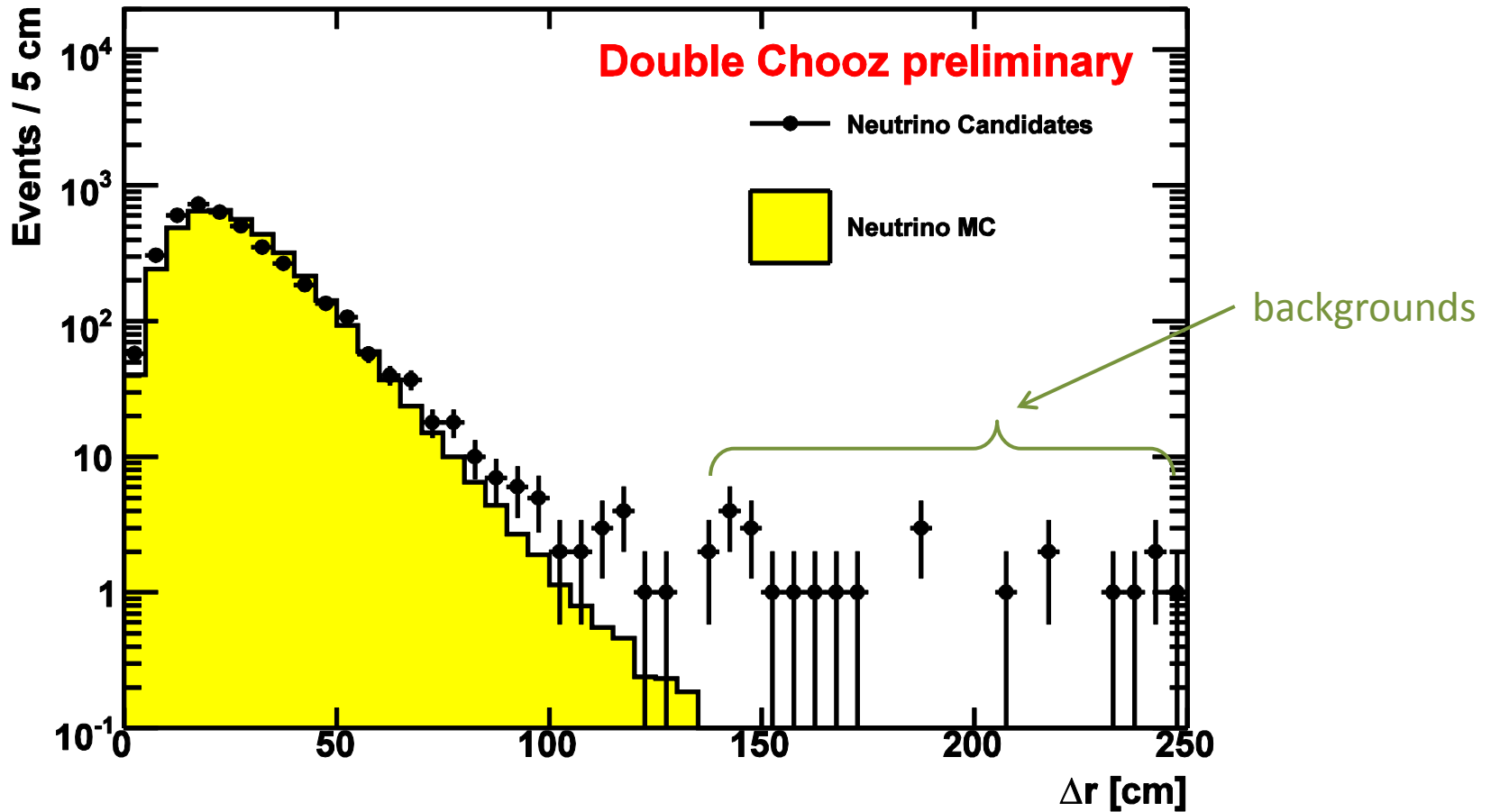
Vertex distributions



注) Vertexは実際にはSelectionとして要求していない

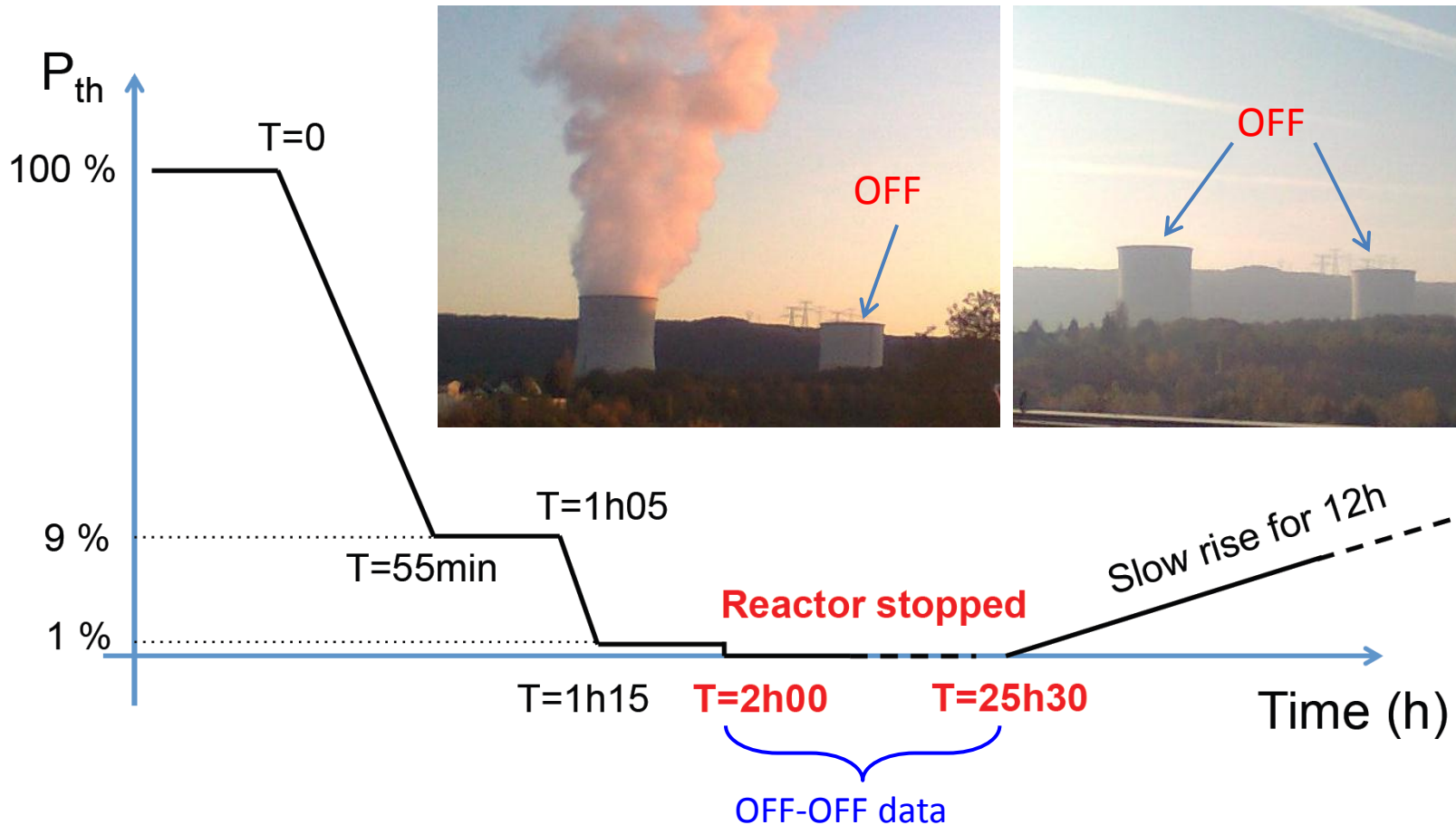
Prompt – Delayed : Δr

Prompt - Delayed Reconstructed Distance



注) Vertexは実際にはSelectionとして要求していない

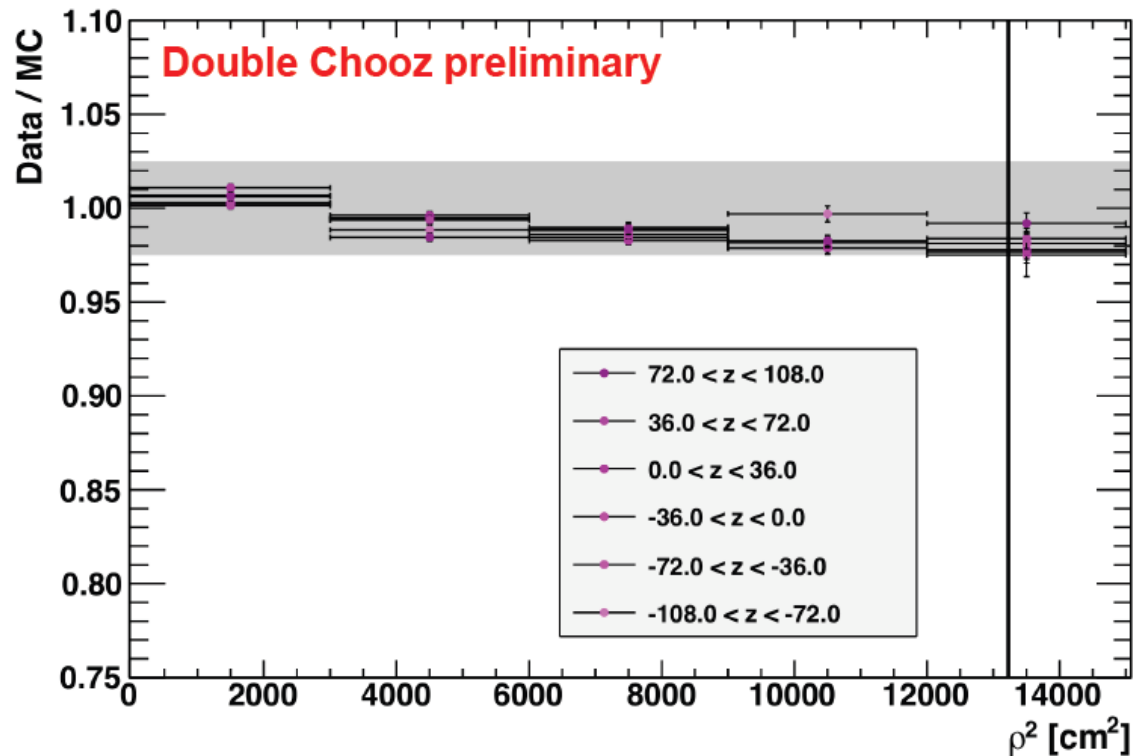
Reactor Off-Off



- Reactor 1 stopped for 2 months (refueling)
- Reactor 2 stopped for 1 day (maintenance)

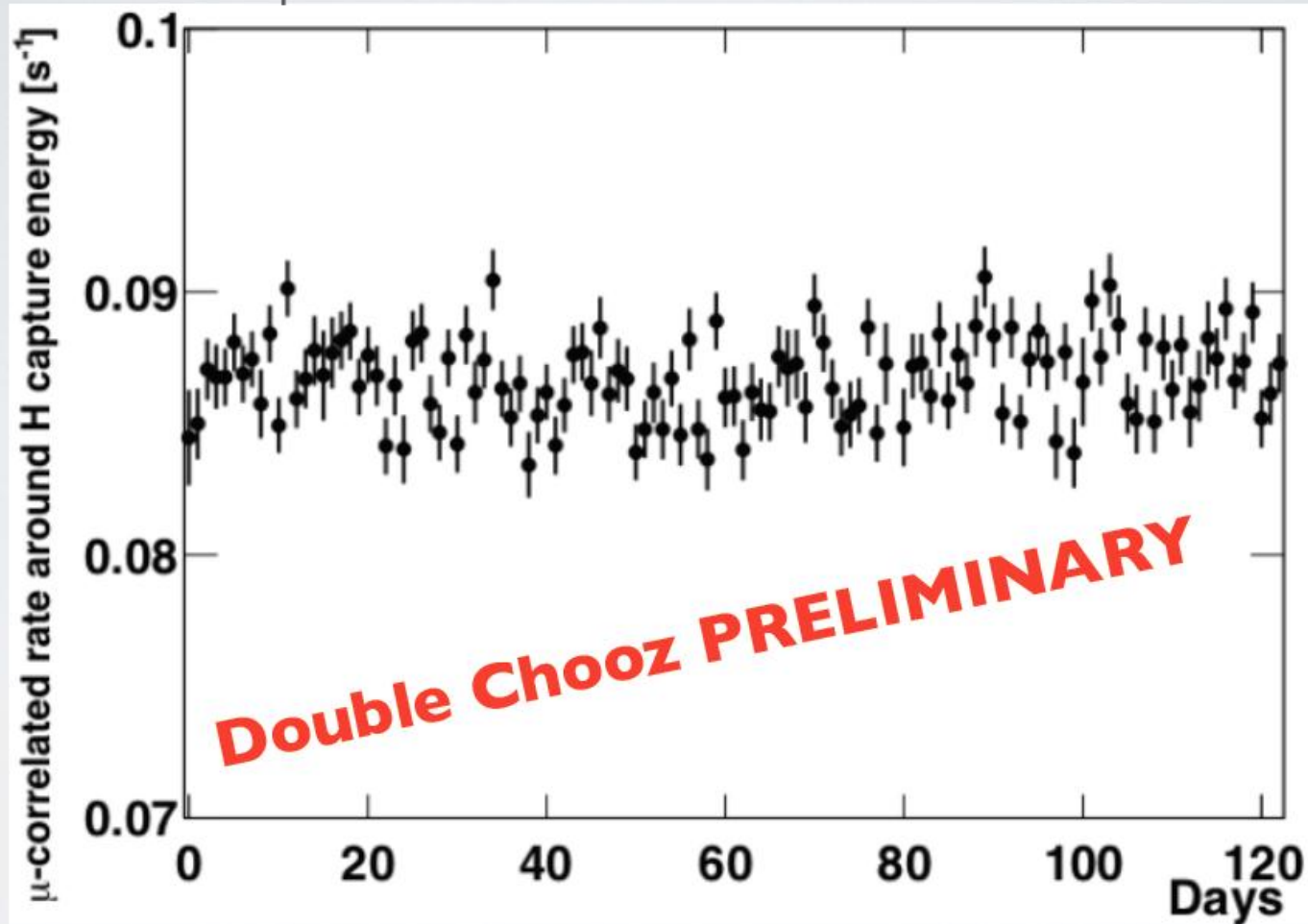
→ **In-situ background measurement** (Unique capability of Double Chooz)
3 events within 0.7~30 MeV...

- Evaluation of the (Q,Z) correction in all volumes
- Study of spallation neutrons in $\rho^2 = x^2 + y^2$ in slices of z
- Capture on Gd peak
- Except for the extremes of the GC all is within +/-2.5%.



Detector Stability

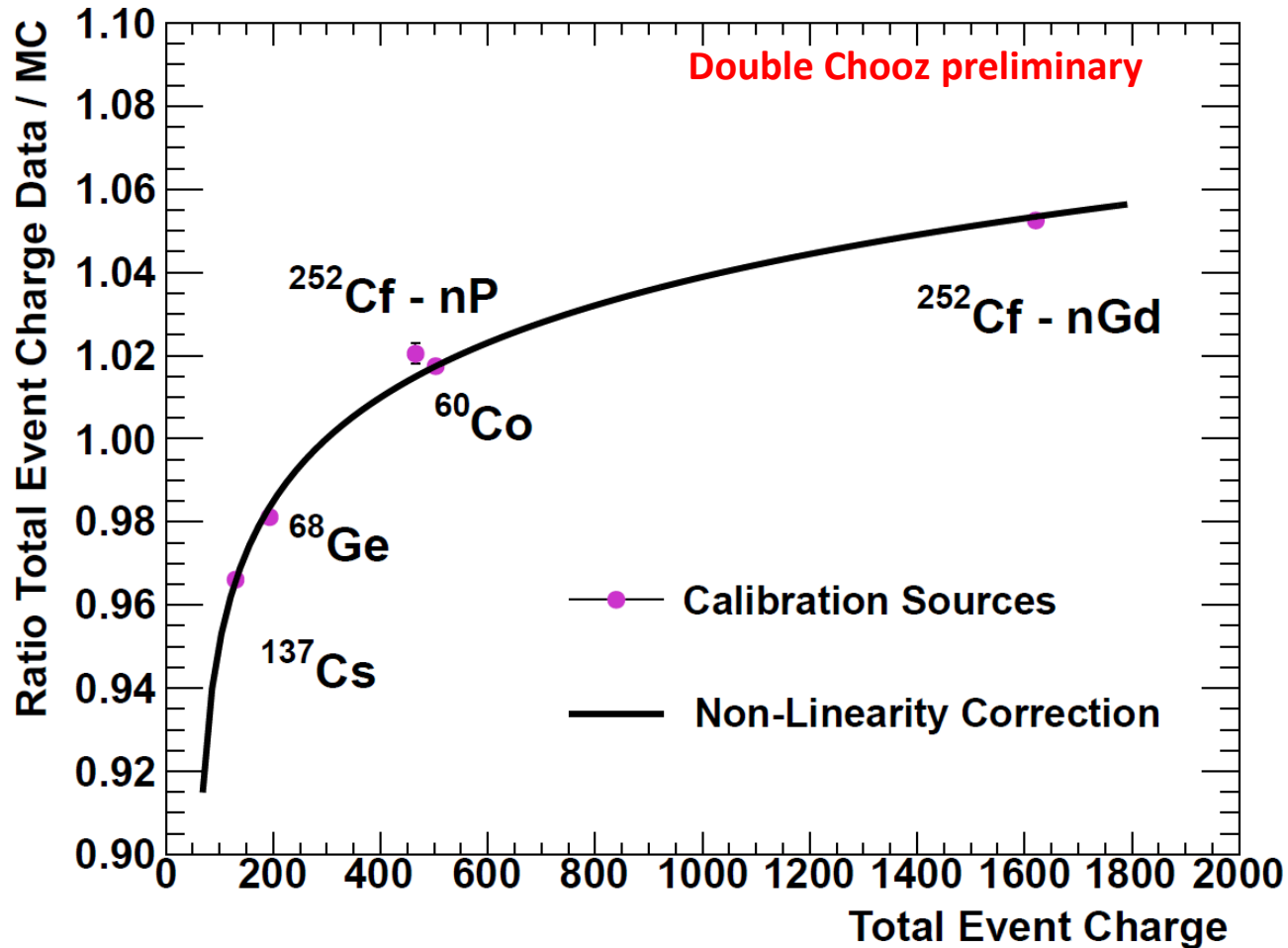
Neutron capture on H_2 after a muon $\sim 10000/\text{day}$



昔のCHOOZ実験では液体シンチレーターの劣化のため、数ヶ月しかもたなかったが、Double Choozではすでに半年以上安定。

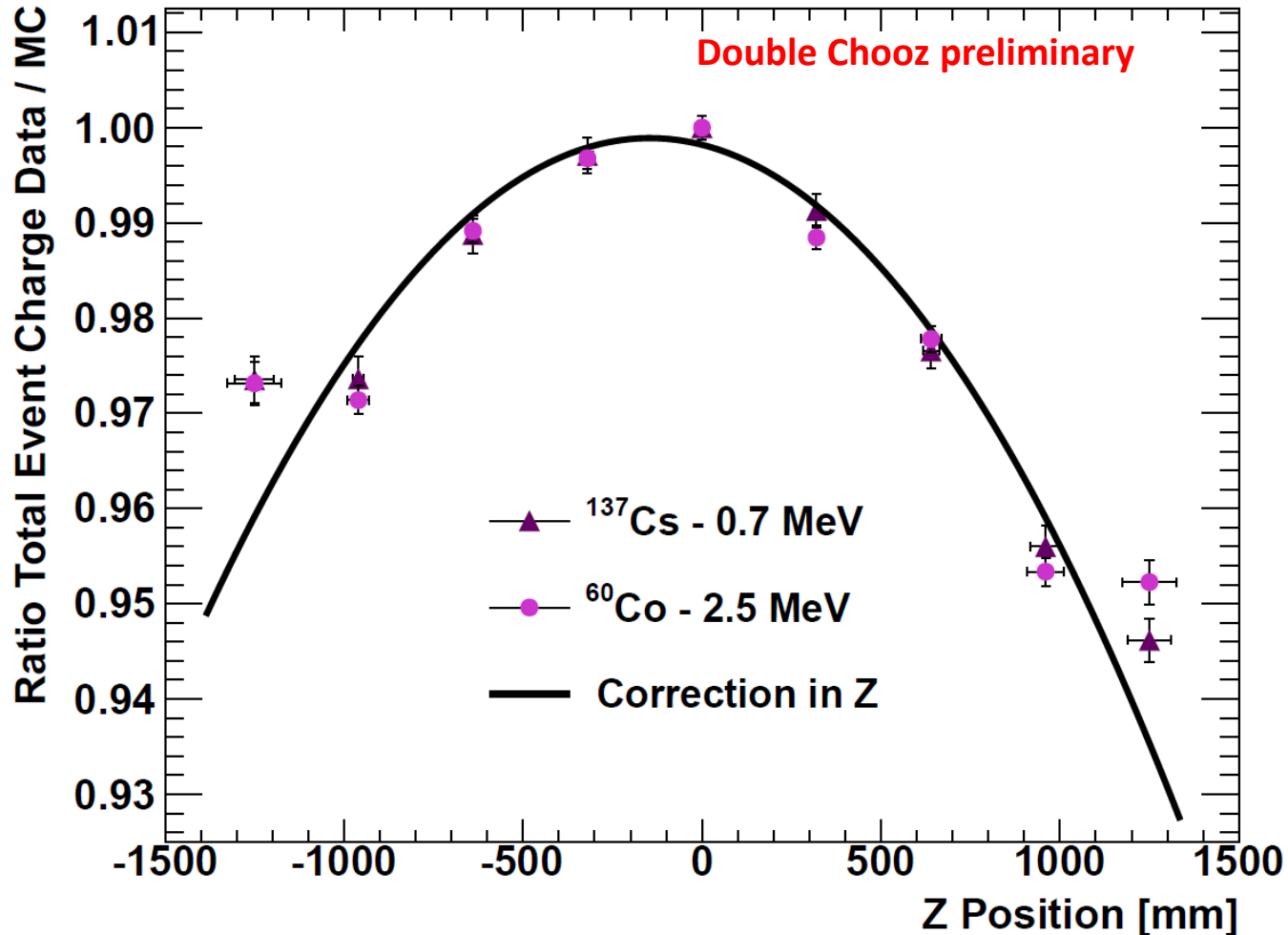
Non-linearity correction

- Calibrated the non-linearity effect due to single photoelectron efficiency, electronics and Q-reconstruction method.

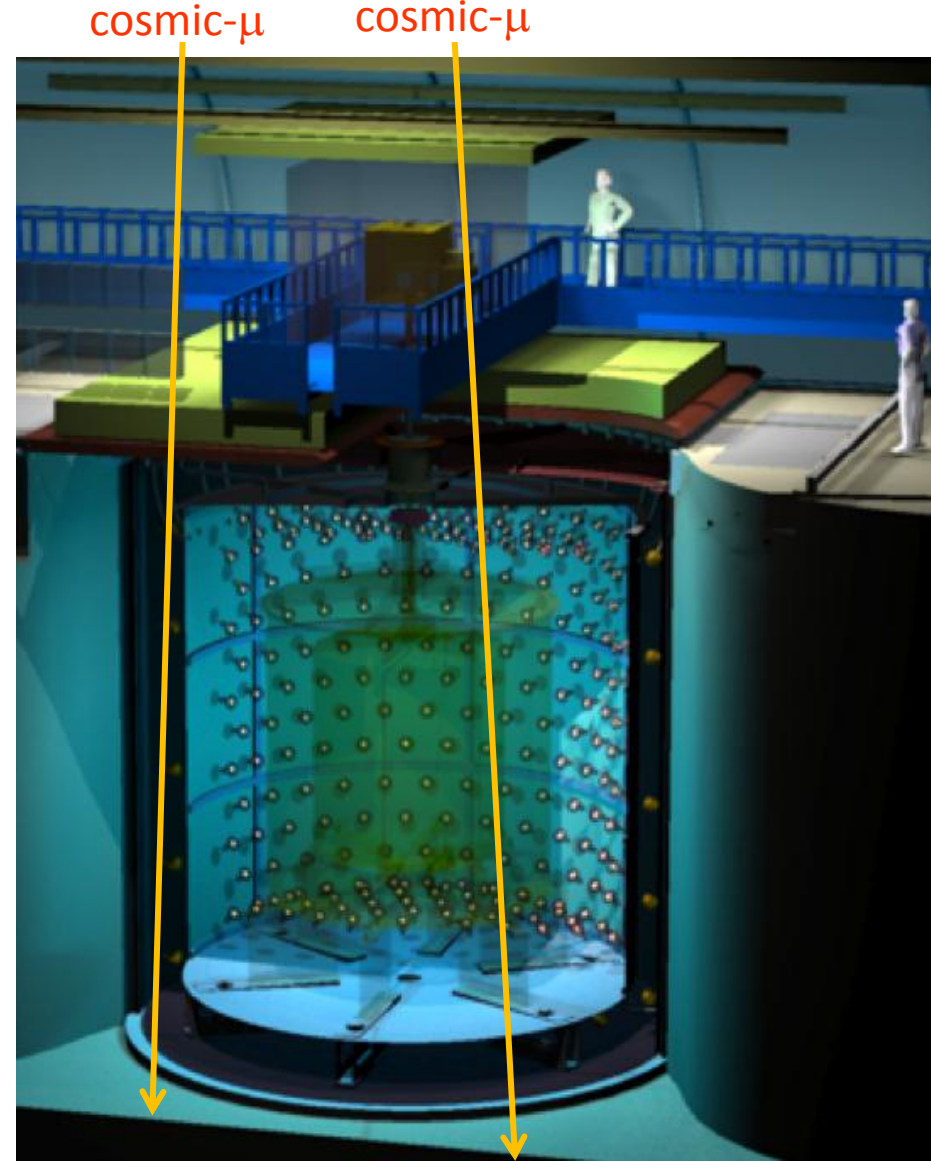
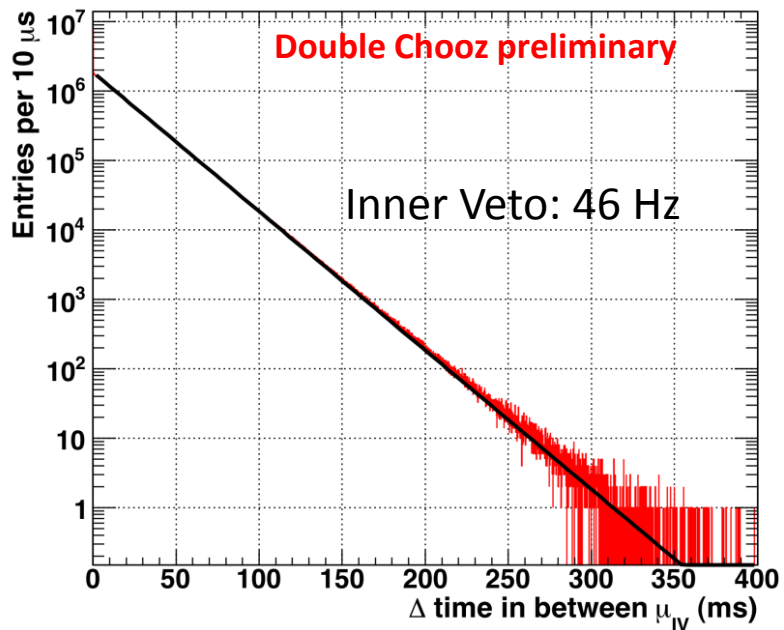
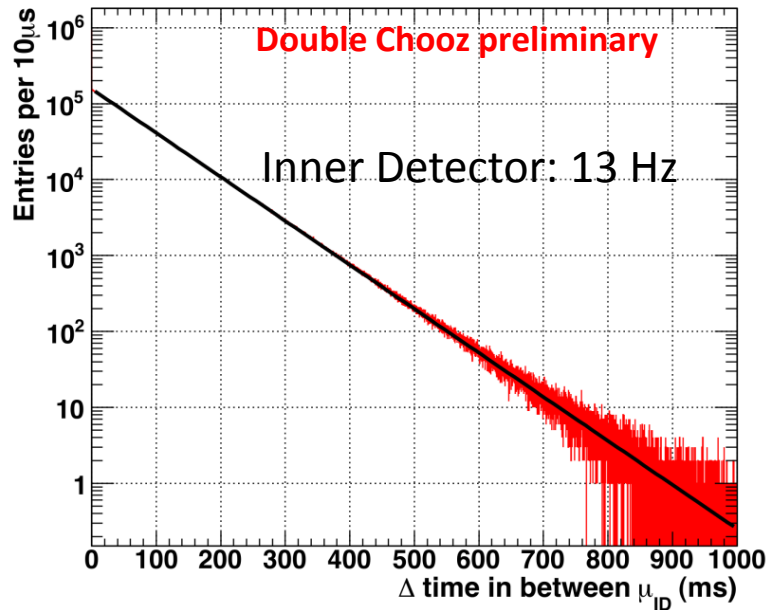


Z-dependence correction

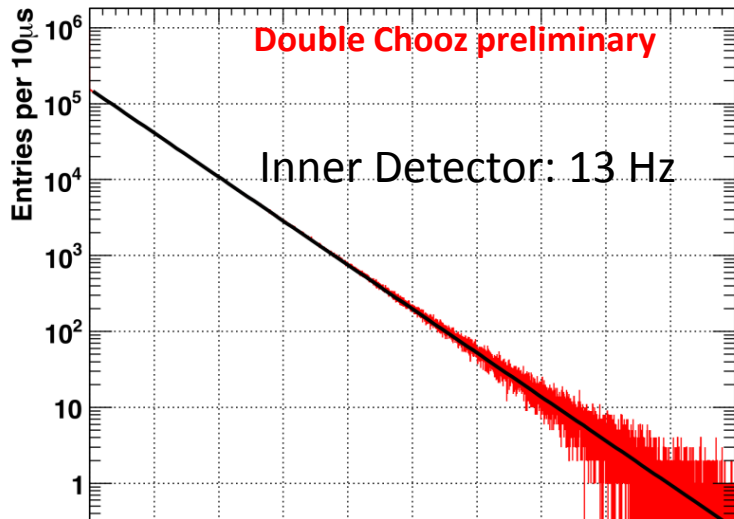
- Calibrated z-dependent bias. Residuals in the correction will be included in the detector covariance matrix.



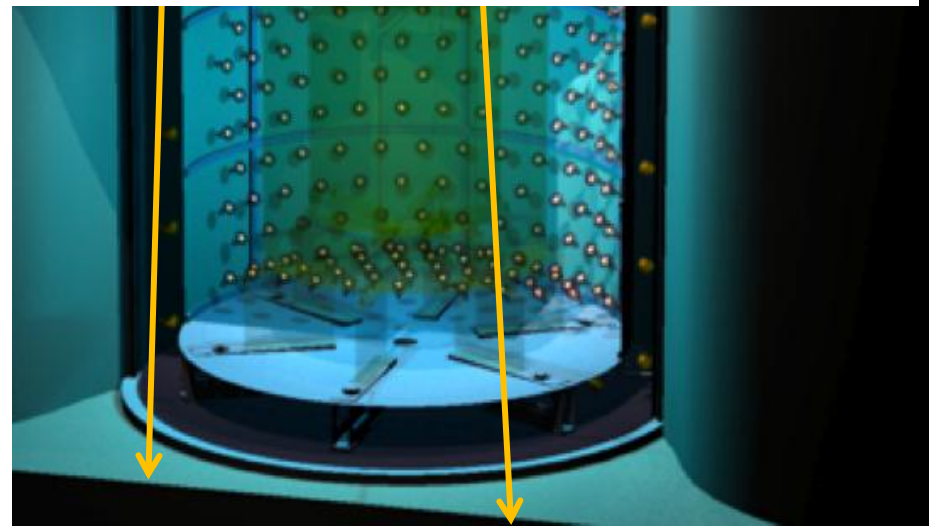
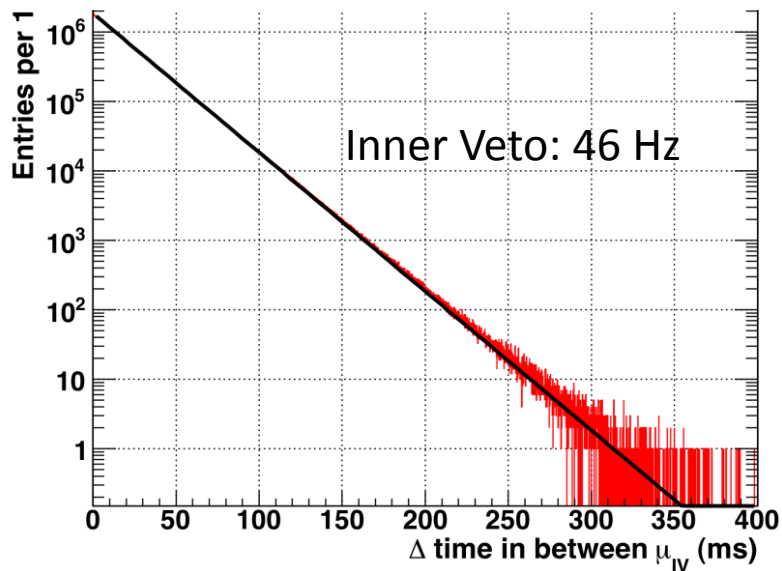
Cosmic muon rate



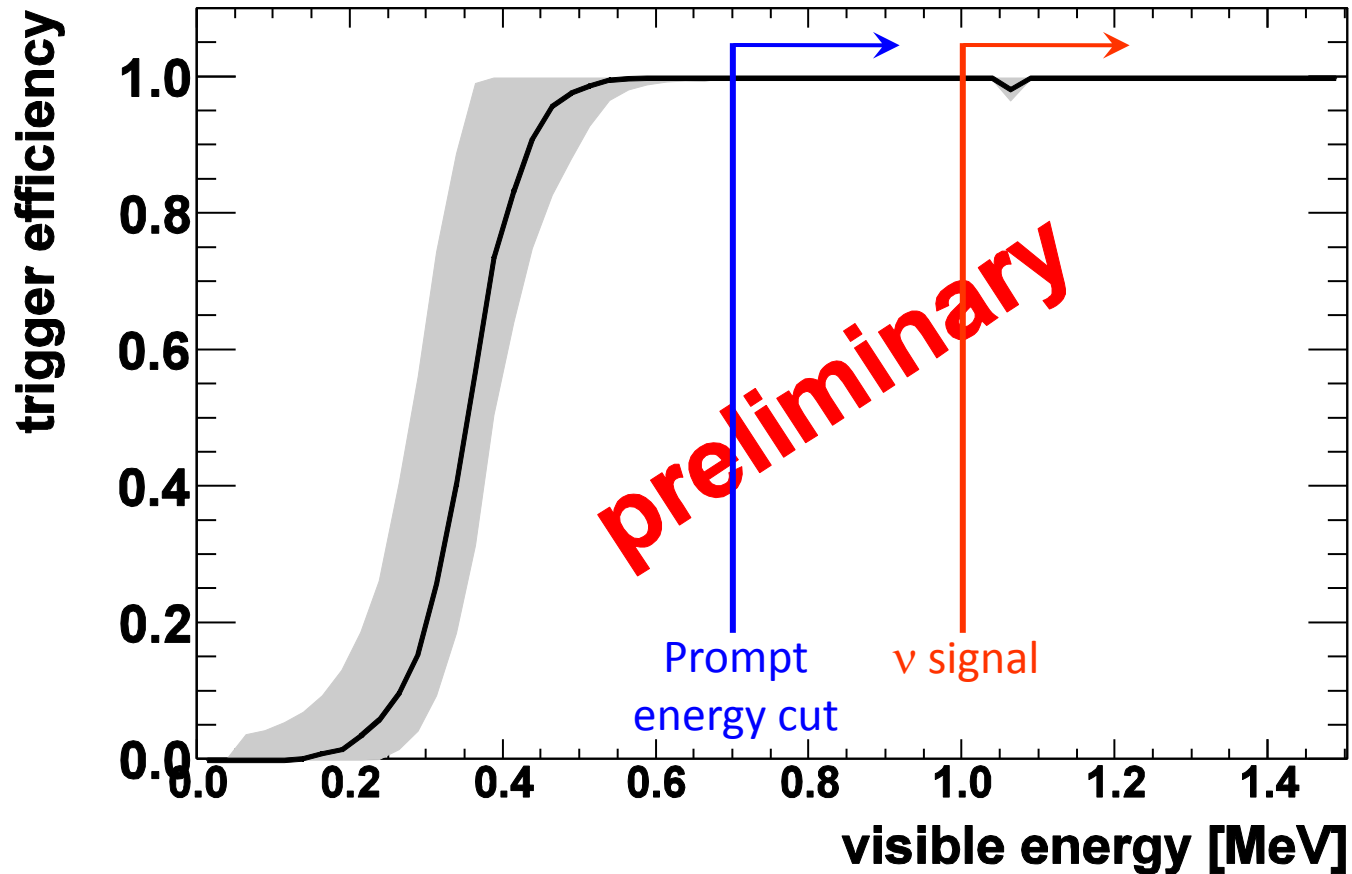
Cosmic muon rate



Electronicsのベースラインシフト、大量のバックグラウンド等を抑えるため、宇宙線の後には1 msのVETOをoffline levelで入れる



Trigger efficiency



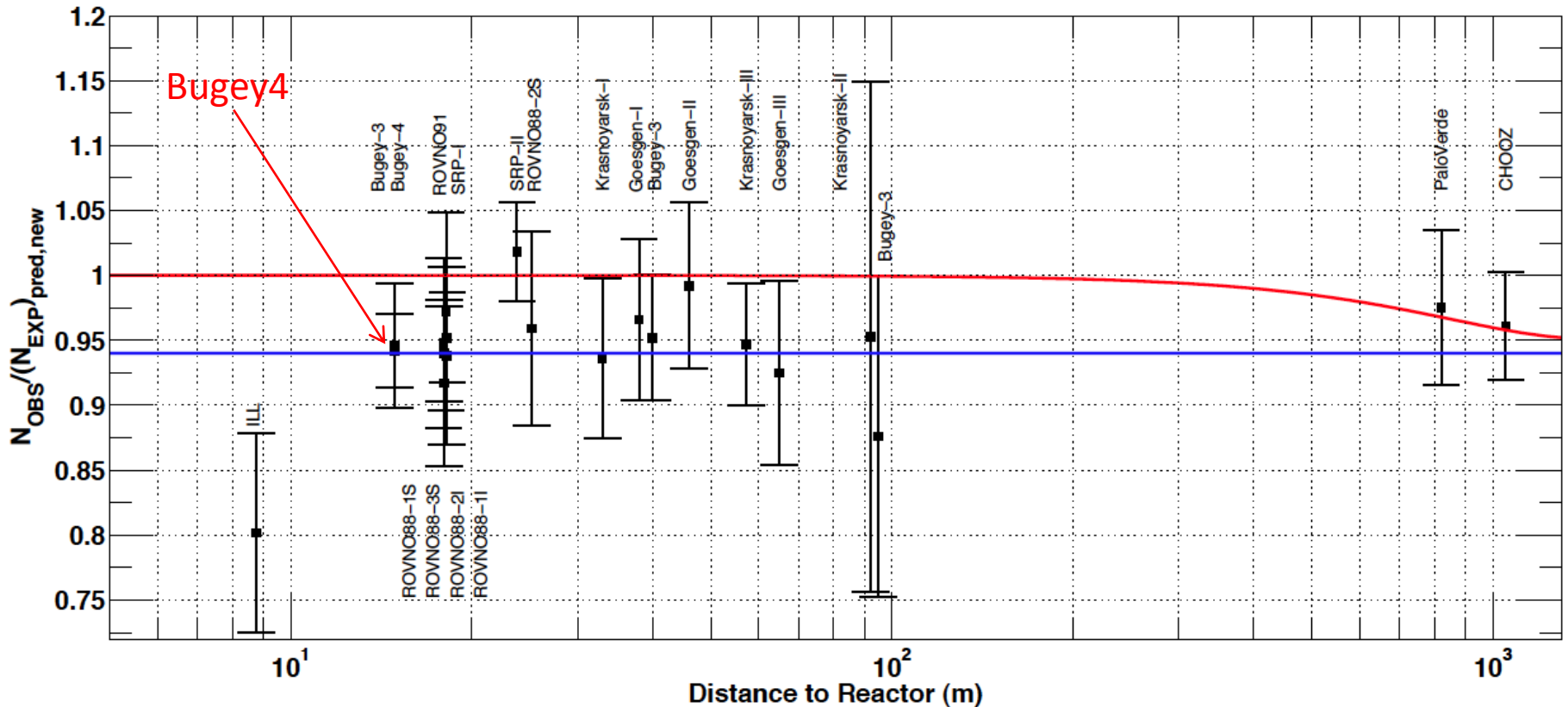
Trigger efficiency :

- 50% @ 350 keV
- $100^{+0}_{-0.4}$ % above 700 keV

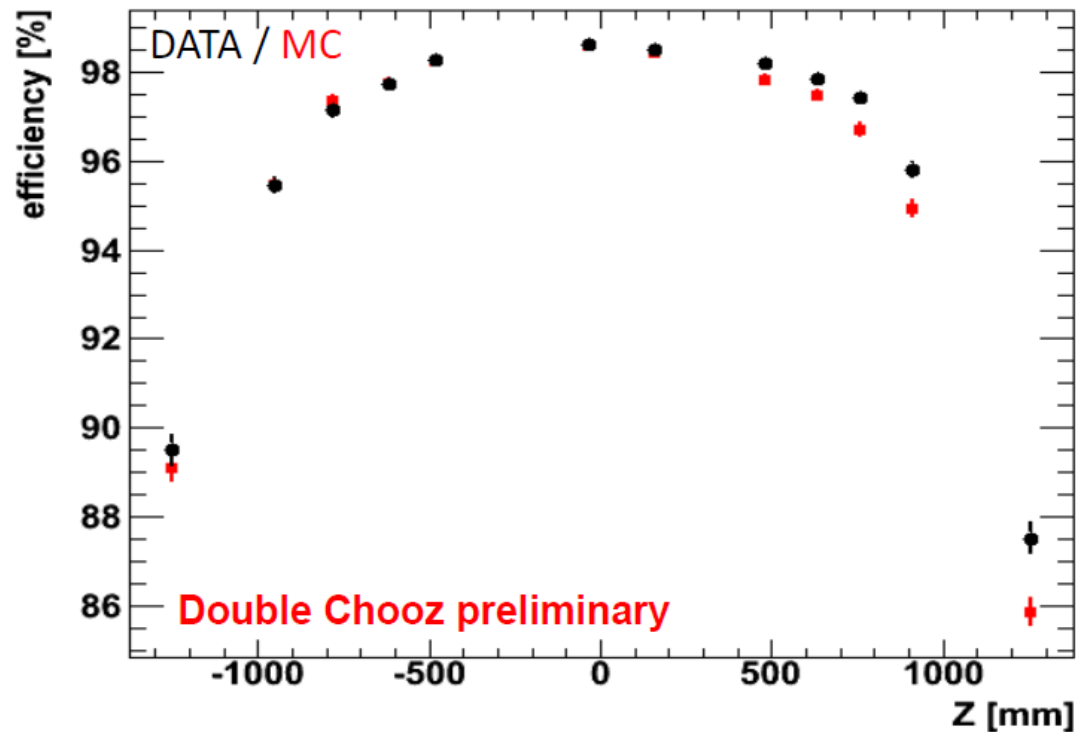
Prompt energy cut efficiency : > 99.9%

ニュートリノスペクトルの予想値

- 原子炉ニュートリノフラックスは計算値を使うのではなく、Bugey4の高精度実験値を使う。
 - Bugey4とDC条件の違い(原子炉燃料の構成など)は補正值として計算



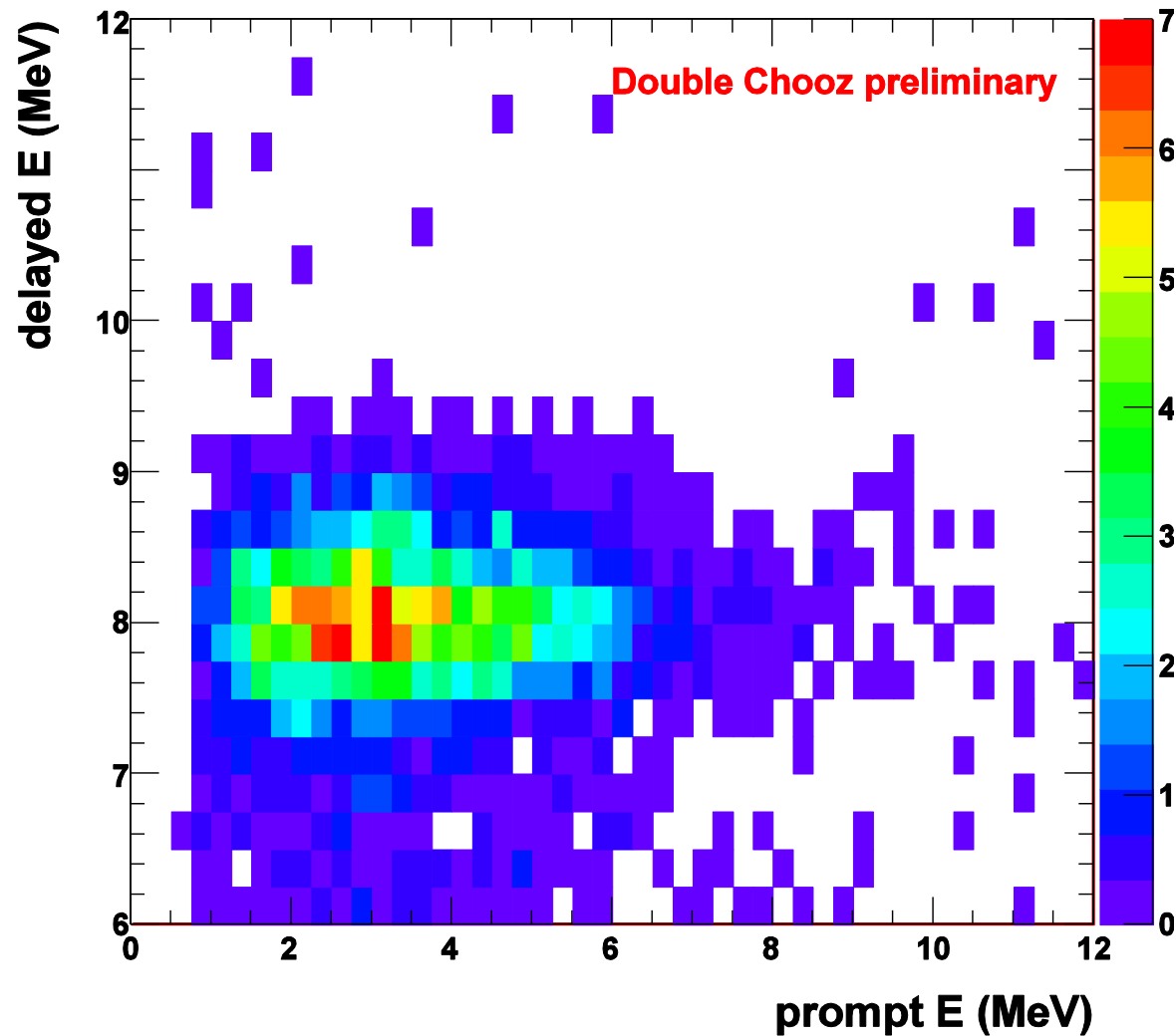
- Part of the Gd-capture gamma's escape the Target + G-Catcher
- Deployment of ^{252}Cf along the Target z-axis
- Eff. (CHOOZ) = # capture [6,12] MeV / # capture [4,12] MeV



Averaged (Data-MC)/Data relative difference: $\leq 0.6\%$

E_{prompt} VS E_{delayed}

Reasonable distribution of reactor neutrinos





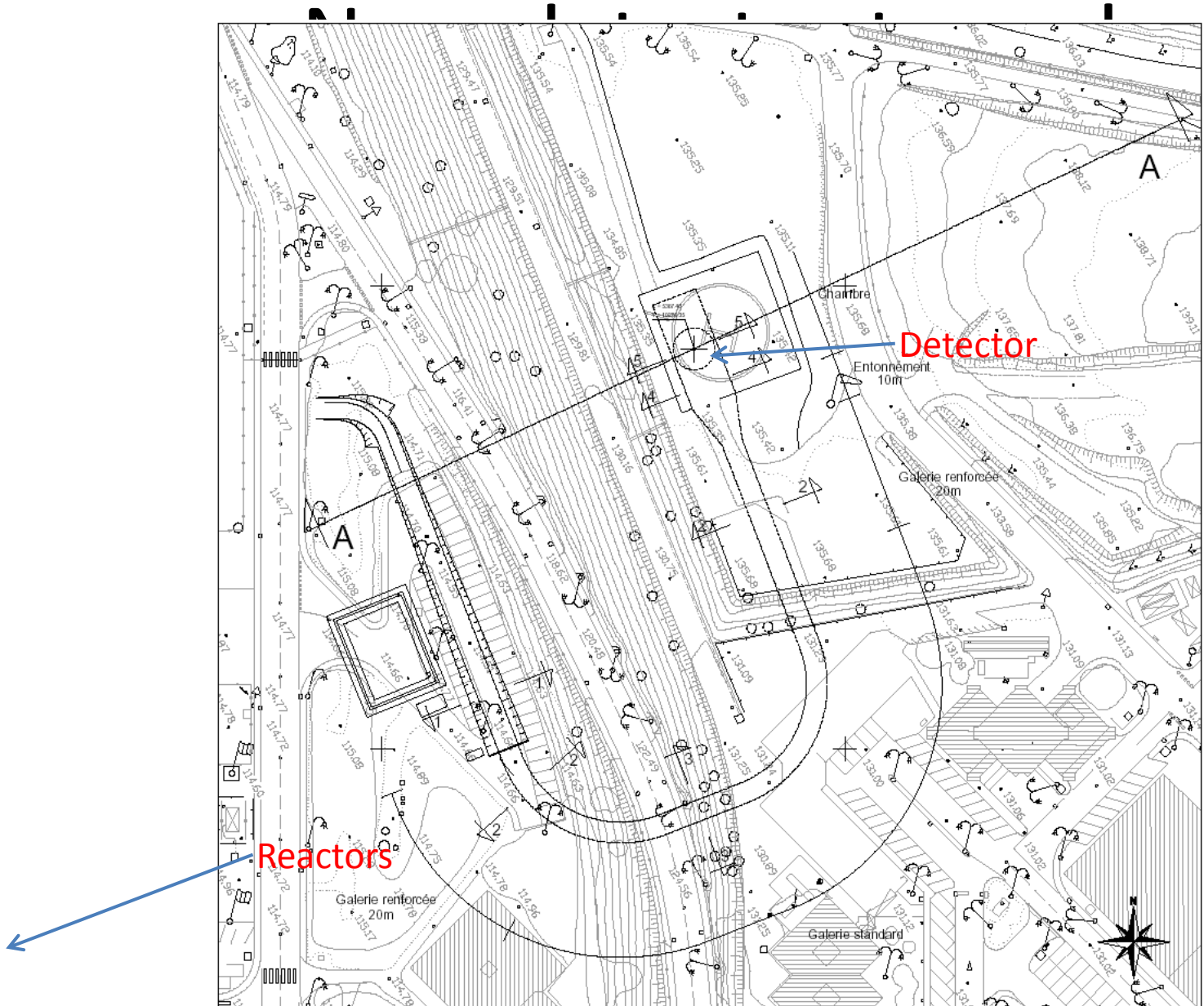
Back Of The Envelop Estimation



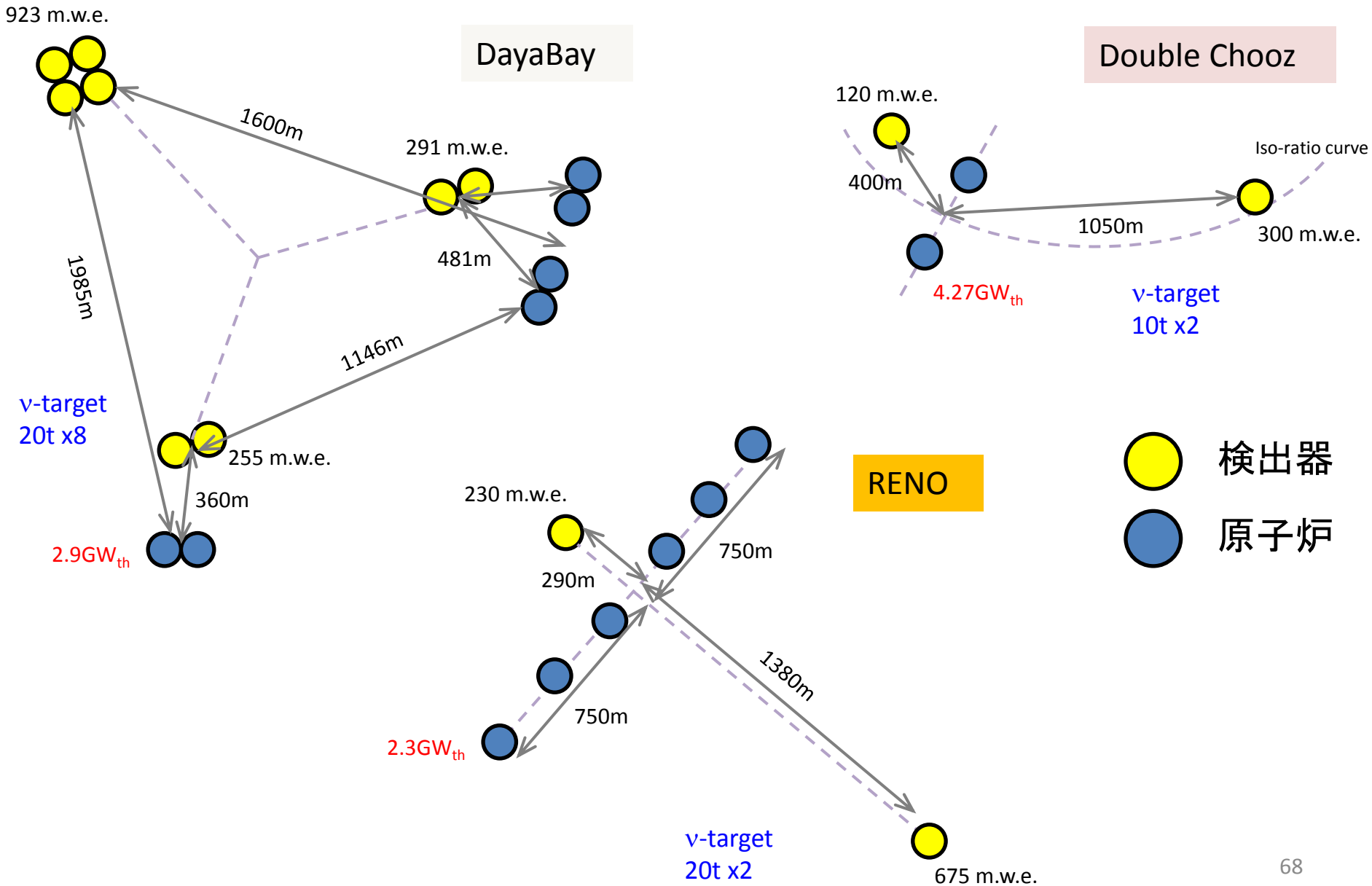
- Data (Neutrino Candidates) : 4121 (+ bkg = 328)
- MC (Expected Signal) : 5339 (+ $\epsilon = 76\%$ + spill in/out)

- Neutrinos_{obs} = (4121 – 328) = 3793
- Neutrinos_{pred} = 5339 . 0.76 . 0.995 = 4037

$$\sin^2(2\theta_{13}) = \frac{\left(1 - \frac{N_{\text{obs}}}{N_{\text{pred}}}\right)}{1 - 0.54} \approx 0.11$$

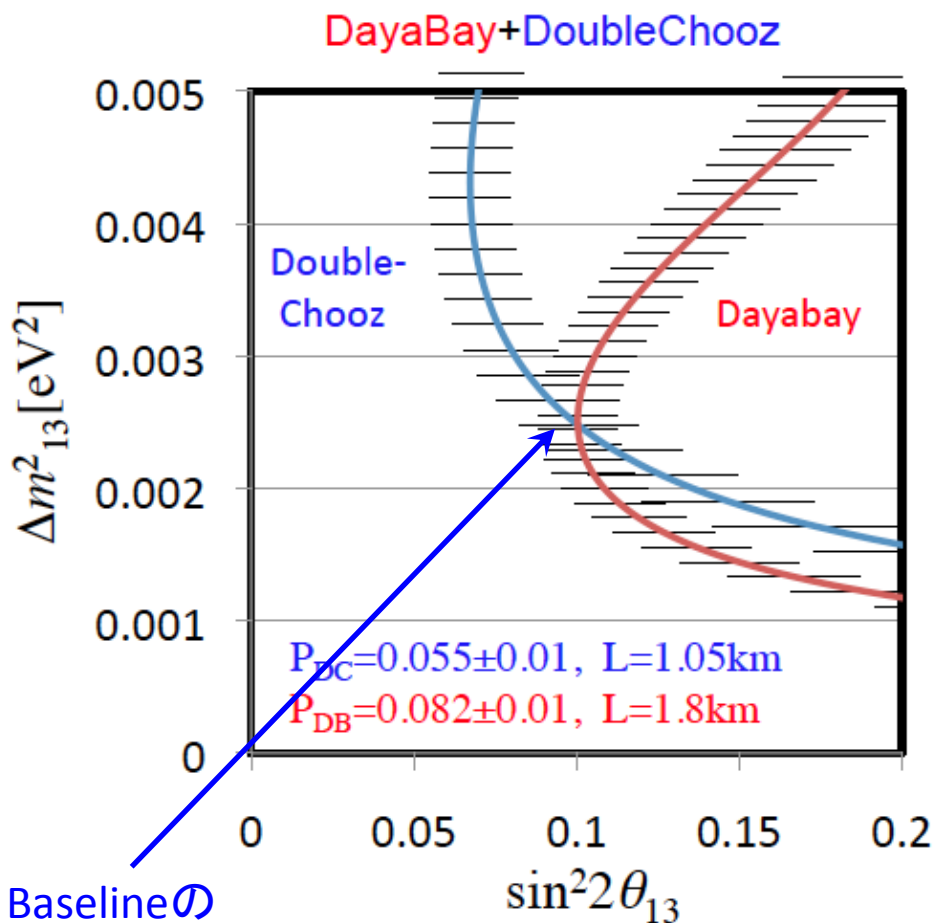


原子炉ニュートリノ振動実験

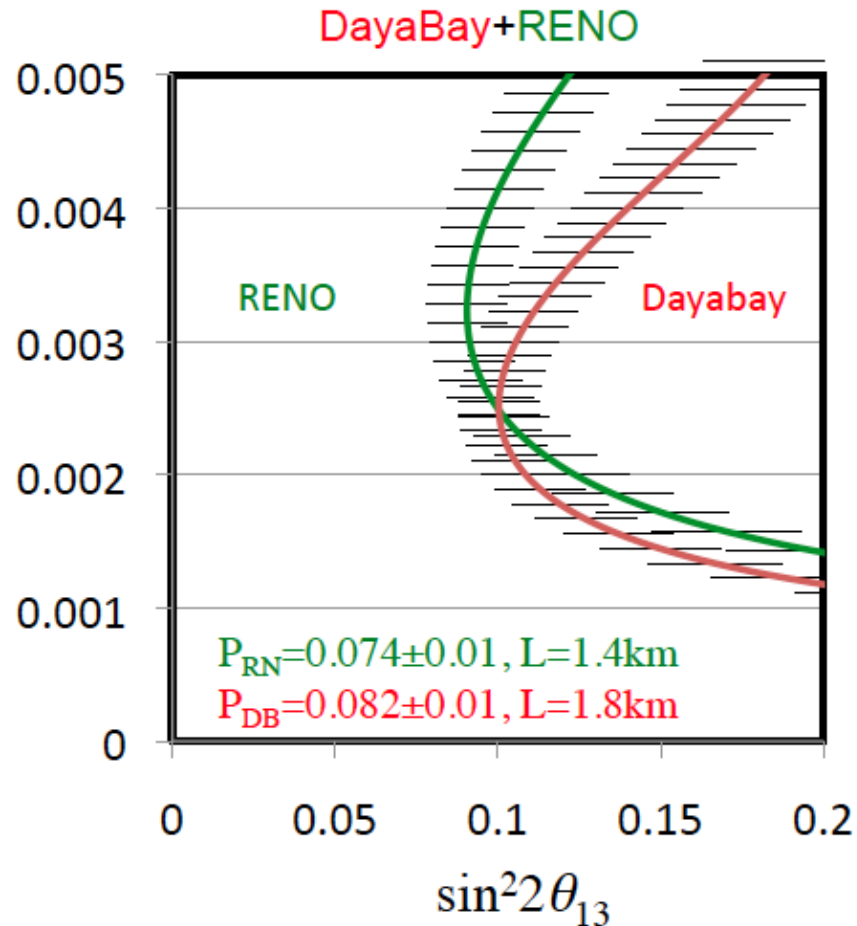


Idea: Combining reactor results

- 原子炉ニュートリノ実験の測定結果は Δm^2_{13} と $\sin^2 2\theta_{13}$ のcontourになる
- Baselineの距離の異なる実験の結果を比較することにより加速器実験とは独立に Δm^2_{13} が測定できる



Baselineの
差が大きい方が良い



Neutrino fluxの測定誤差を1%とした場合