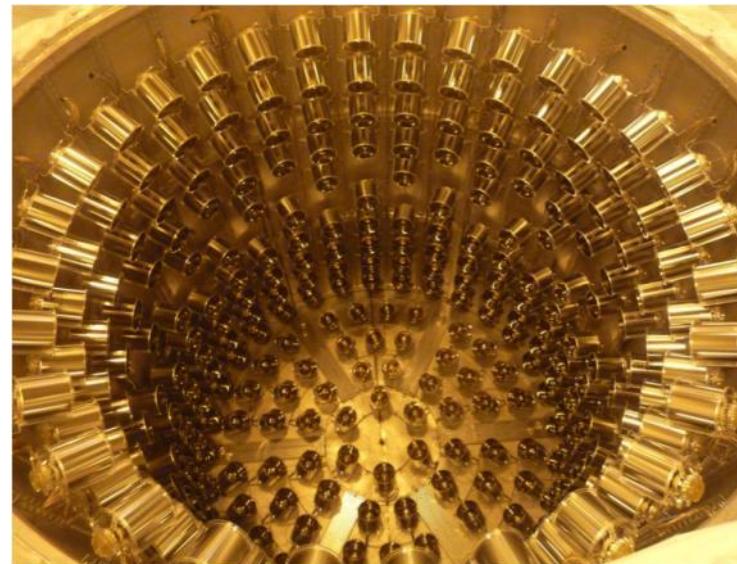


Double Chooz実験による ニュートリノ振動解析の最新結果

川崎健夫(新潟大学)

for the Double Chooz collaboration



内容

- ニュートリノ振動
 - 原子炉ニュートリノ
 - CHOOZ実験
- DoubleChooz実験
 - 概要
 - 現在の状況
- Preliminary Results
 - Data taking
 - Preliminary results
- 今後の予定

Neutrino oscillations

$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T = U (v_1, v_2, v_3)^T \quad : U = \text{MNS Matrix}$$

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

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

Super-K+K2K+MINOS $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.50^{+0.08}_{-0.07}$$

$$\Delta m_{23}^2 = (2.5^{+0.20}_{-0.25}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

CHOOZ
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.2$

Solar+KAMLAND $P(\nu_e \rightarrow \nu_x)$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.30^{+0.02}_{-0.03}$$

$$\Delta m_{12}^2 = (7.9 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

@1 σ
hep-ph/
0606060

6 parameters can be accessible from neutrino oscillation.

$$\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2, \theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta$$

(2 mass differences, 3 angles, 1 complex phase)



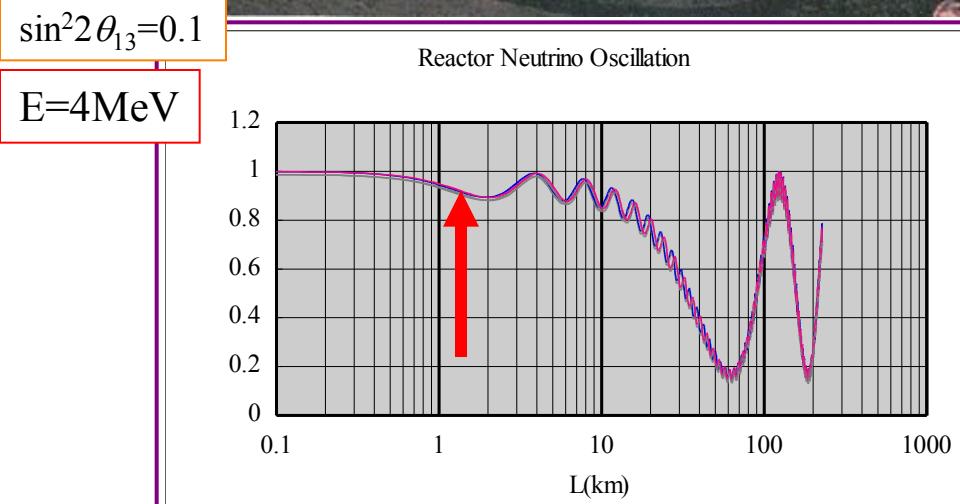
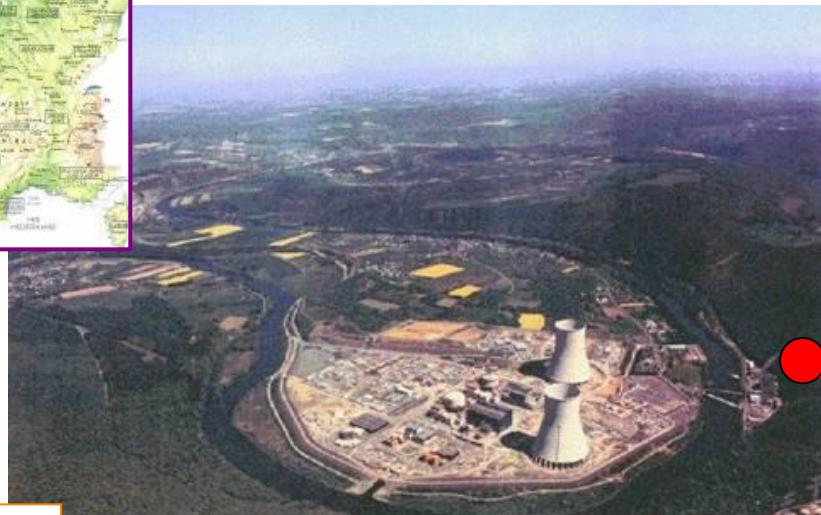
Remains

Small θ_{13}
leptonic CP phase δ
Mass hierarchy

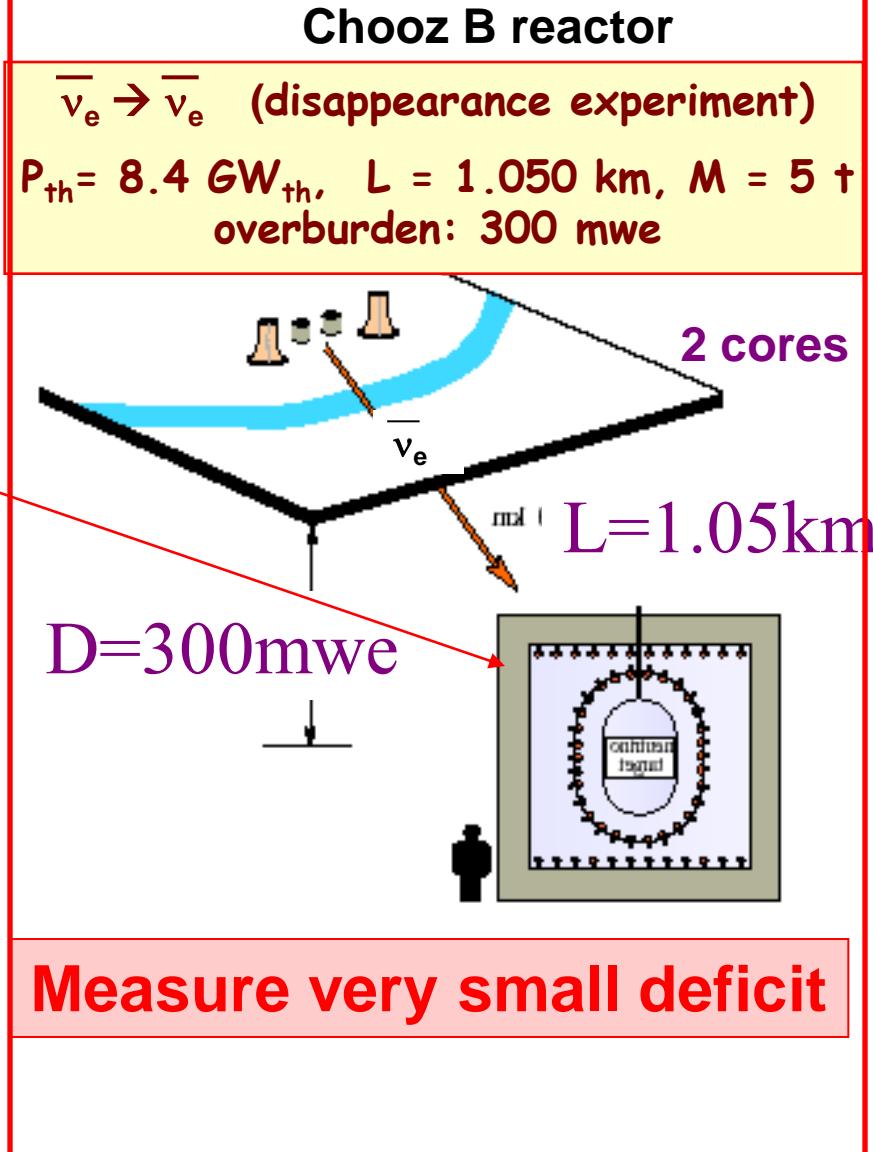
Reactor neutrino experiment



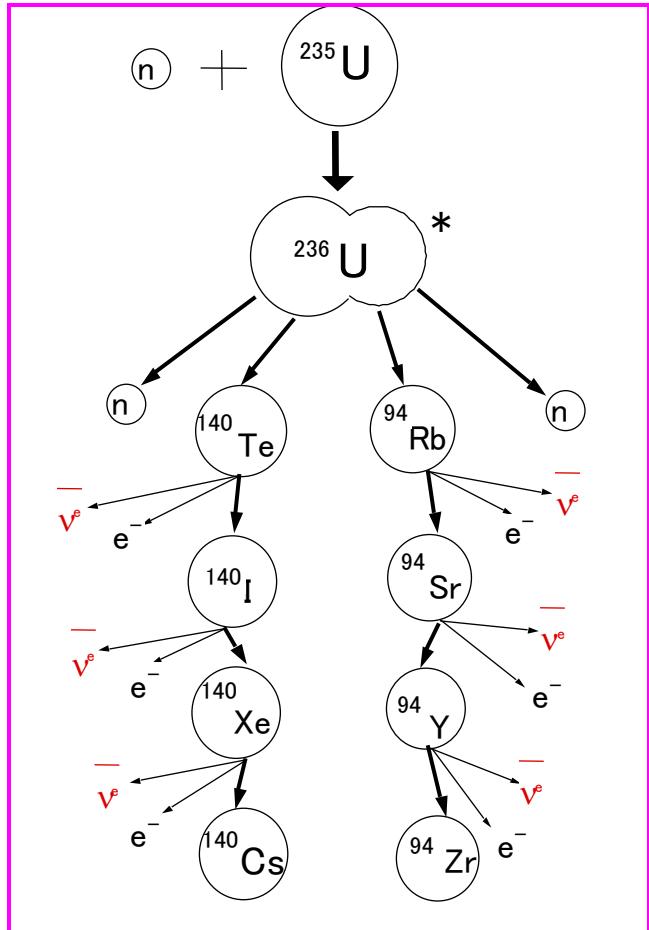
CHOOZ reactor experiment



$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}$$



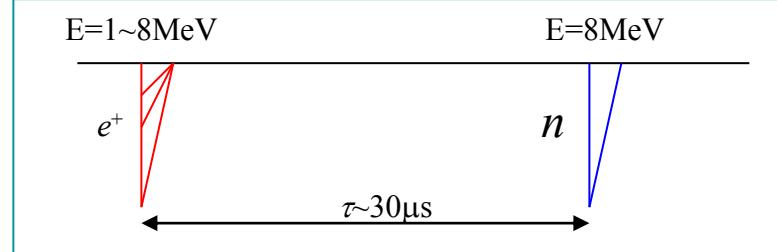
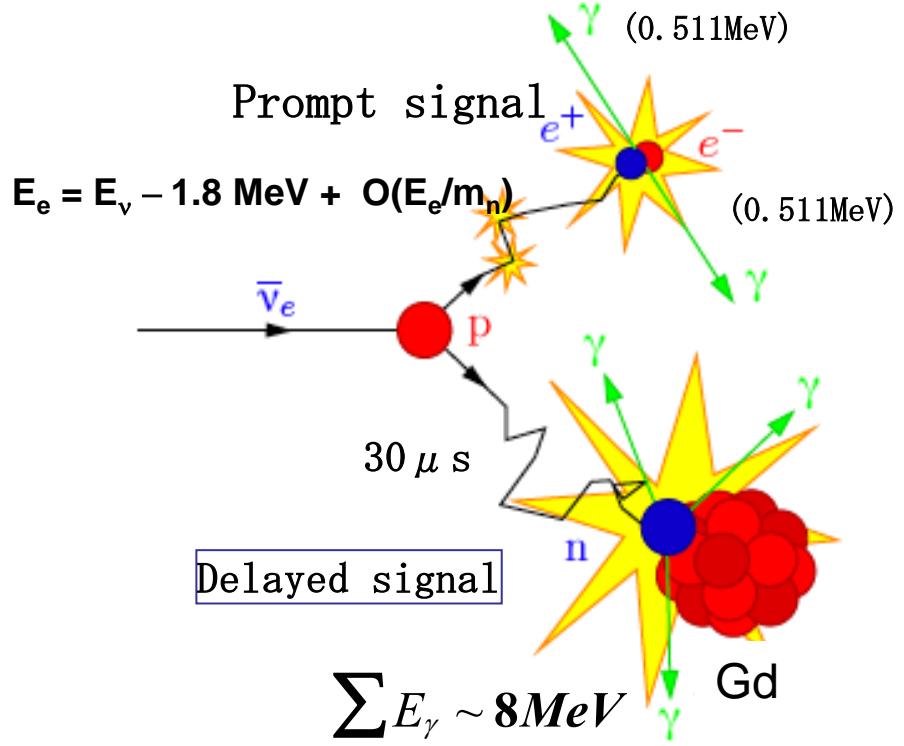
Reactor neutrino & Its detection



$\bar{\nu}$ are produced in β -decays of fission products.

$$\sim 6 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / s / reactor$$

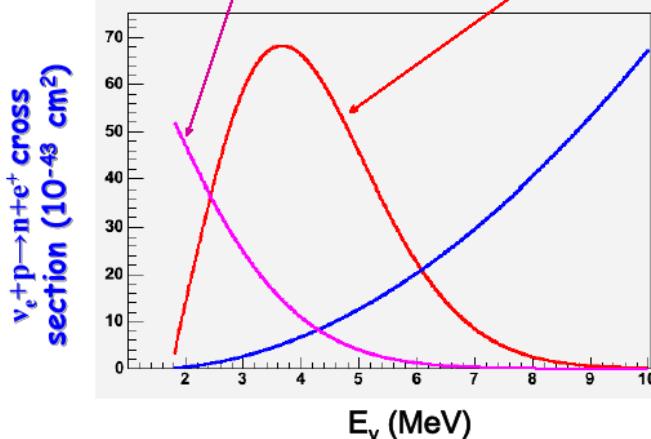
Gd doped liquid scintillator



$\bar{\nu}_e$ spectrum

The $\bar{\nu}_e$ energy spectrum

Reactor ν_e spectrum (a.u.)



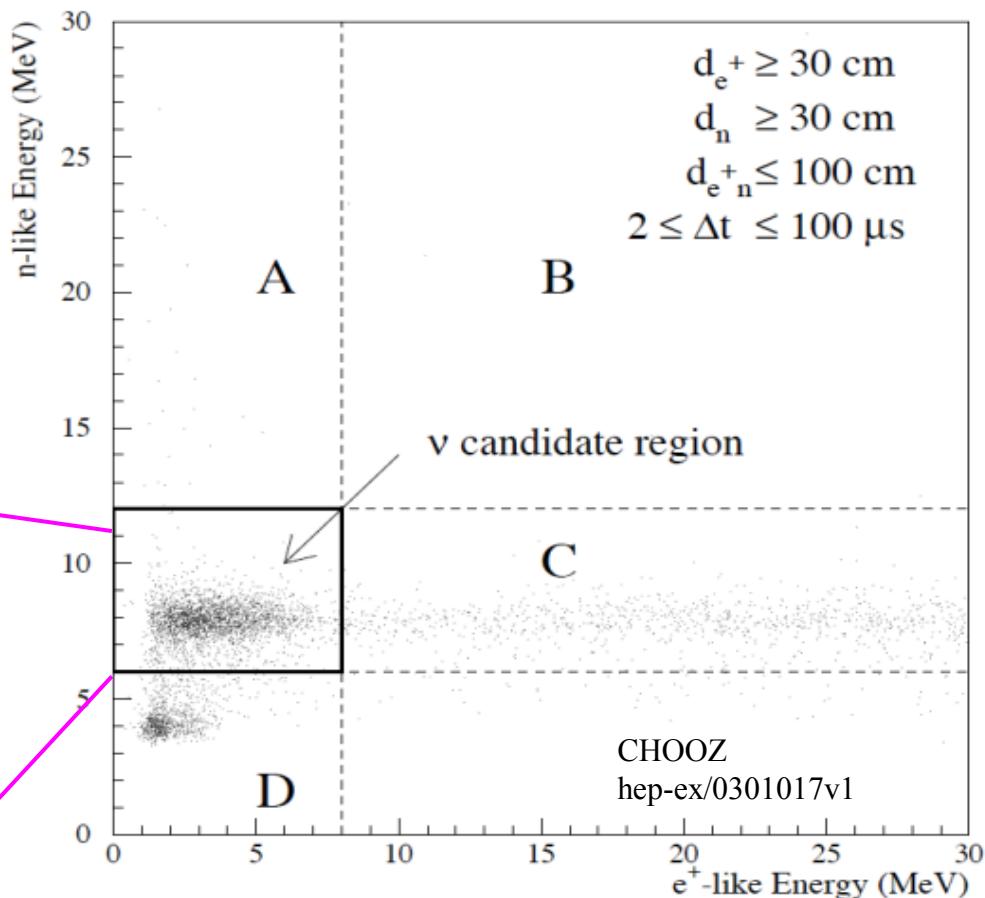
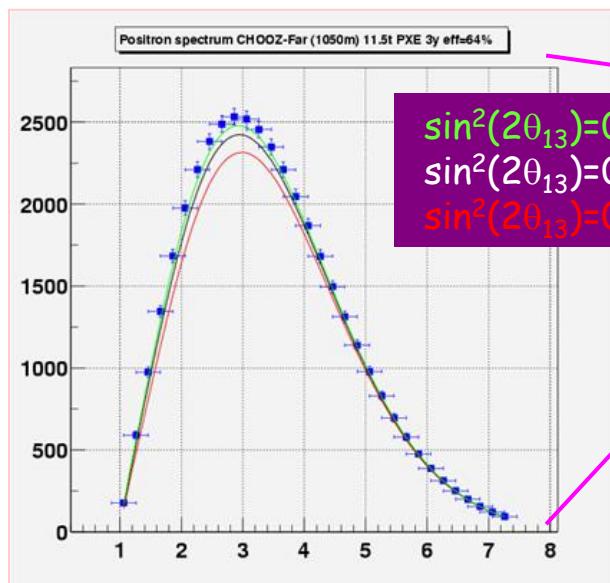
Observed spectrum (a.u.)

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n)$$

CHOOZ data

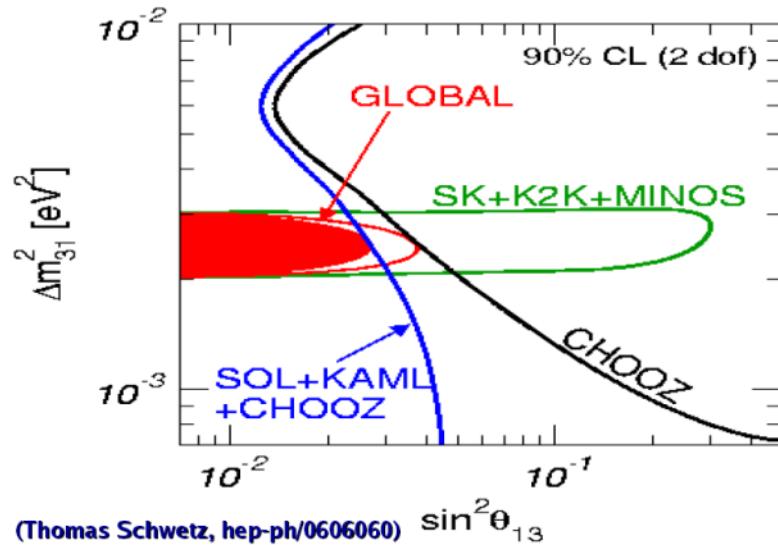
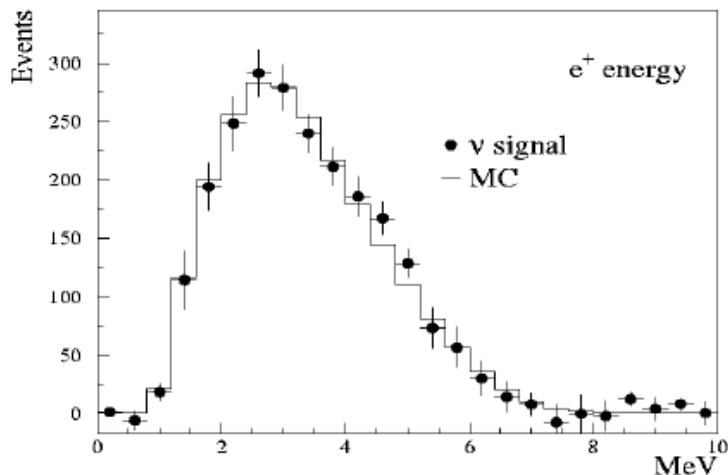
Reactor ON

$$\begin{aligned} d_{e^+} &\geq 30 \text{ cm} \\ d_n &\geq 30 \text{ cm} \\ d_{e^+ n} &\leq 100 \text{ cm} \\ 2 \leq \Delta t &\leq 100 \mu\text{s} \end{aligned}$$



Chooz Result

CHOOZ : $R_{\text{osc}} = 1.01 \pm 2.8\% \text{ (stat)} \pm 2.7\% \text{ (syst)}$



$$\sin^2 2\theta < 0.15 \text{ @ } \Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

World best constraint

The next quest for θ_{13}

Accelerator

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$

$$\approx \left(\sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} + 0.05 \cdot \sin 2\theta_{13} \sin \delta \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E} \right)$$

Reactor

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

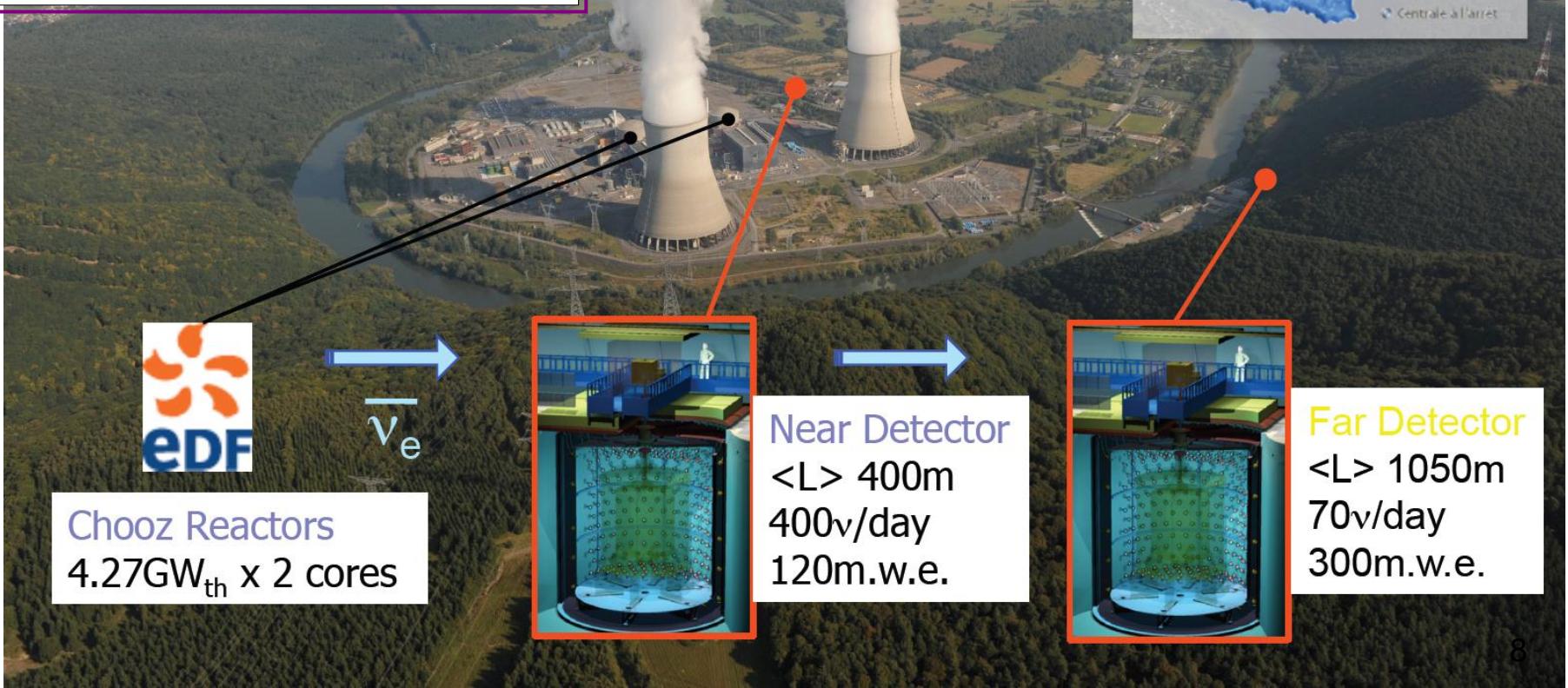
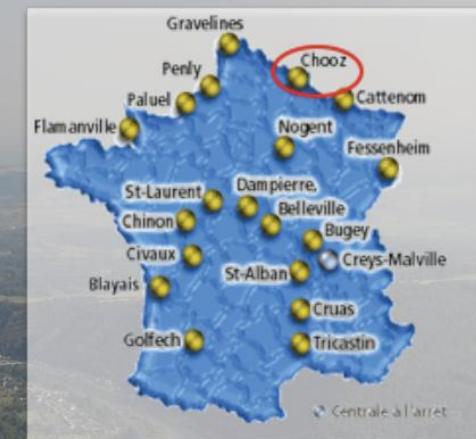
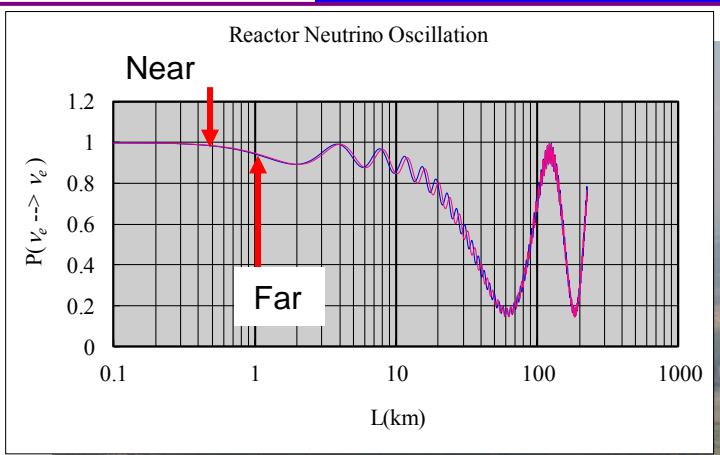
$$\approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E} \right)$$

No effect from δ
Small Matter effect

Complementary



Double Chooz Experiment





Double Chooz Collaboration

France

Saclay
APC (collège de France)
Subatech Nantes
IPHC Strasbourg



Germany

Max planck Heidelberg
Munich TU
Hamburg U
Tubingen U
Aachen U



Spain

CIEMAT Madrid



England

Sussex Univ



Russia

Kurchatov inst
Sc. Acad.



Brasil

CBPF
UNICAMP



USA



Livermore nat lab
Argonne
Columbia Univ
Chicago Univ
Kansas U
Notre Dame U
Tennessee U
Alabama U
Drexel U
Illinois Inst tech
MIT

Japan



Tohoku U
Tokyo Metropolitan U
Niigata U
Tokyo Institute of Tech.
Kobe U
Tohoku Gakuin U
Hiroshima Inst. of Tech.

Very Experienced members: Chooz, Bugey, KamLAND, Super-Kamiokande, SNO, Borexino

~150 people
33 institutes, 8 countries





Detector design/ Physics prospect

How to improve CHOOZ result?

$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0.15$$

$$R_{\text{osc}} = 1.01 \pm 2.8\% \text{ (stat)} \pm 2.7\% \text{ (syst)}$$



Double Chooz: 2 phases

We are here now!



Timeline

2007

2008

2009

2010

2011

2012

2013

Design

Construction Far

Data Taking (Phase 1)

Cstr.
Near

Data Taking (Phase 2)

Phase 1: Far detector Only

Improve statistics

Large target volume
Longer stable operation

Improve systematics

Better detector design
Low BG PMT/material
Buffer oil/ Gamma catcher
Improved Cosmic-Veto detectors

Phase 2: Far + Near Detector

Identical detectors cancel systematics on.

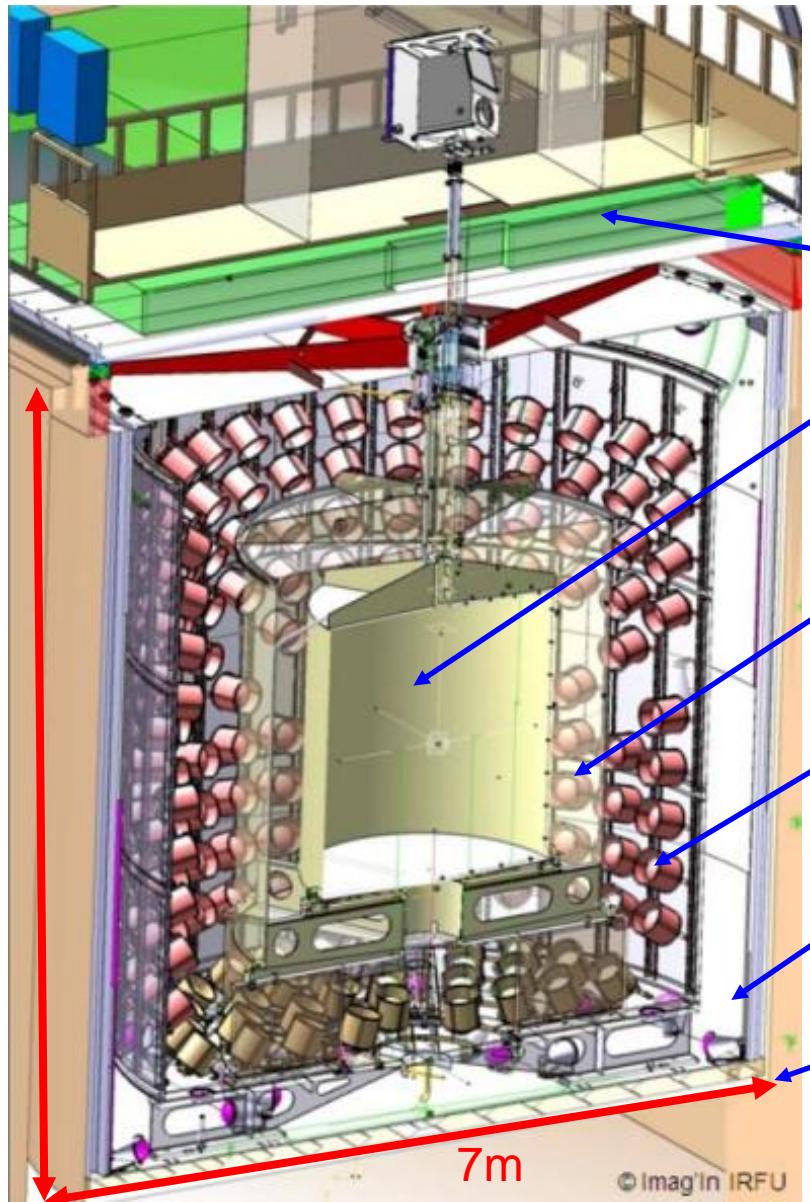
Neutrino flux/Reactor power
Acceptance/Cross section.

Better understand of Background
and Energy scale is necessary
for further reduction of systematic errors

CHOOZ Result : $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.2$

$R_{osc} = 1.01 \pm 2.8\% \text{ (stat)} \pm 2.7\% \text{ (syst)}$

DoubleChooz検出器



New 4-region large detector concept

Outer Veto: plastic scintillator strips (400 mm-t)

v-Target: 10.3 m³ scintillator doped with 0.1g/l of Gd in an acrylic vessel (8 mm-t)

γ-Catcher: 22.3 m³ scintillator in an acrylic vessel (12 mm-t)

Buffer: 110 m³ of mineral oil in a stainless steel vessel (3 mm) viewed by 390 PMTs

Inner Veto: 90m³ of scintillator in a steel vessel equipped with 78 PMTs

Veto Vessel (10mm) & Steel Shielding



How much can we improve?

@CHOOZ: $R = 1.01 \pm 2.8\%(\text{stat}) \pm 2.7\%(\text{syst})$

- Statistical error -

$$\text{Luminosity increase } L = \Delta t \times P(\text{GW}) \times N_p$$

Large detection volume & Long stable operation are necessary

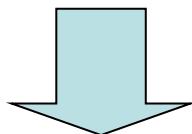
	CHOOZ	Double-Chooz
Target volume	5,55 m ³	10,2 m ³
Target composition	6,77 10 ²⁸ H/m ³	6,82 10 ²⁸ H/m ³
Data taking period	Few months	3-5 years
Event rate	2700	CHOOZ-far : 50,000/3 y CHOOZ-near: ~1x10 ⁶ /3 y
Statistical error	2,8%	0,5%



Systematic on Analysis/Selection

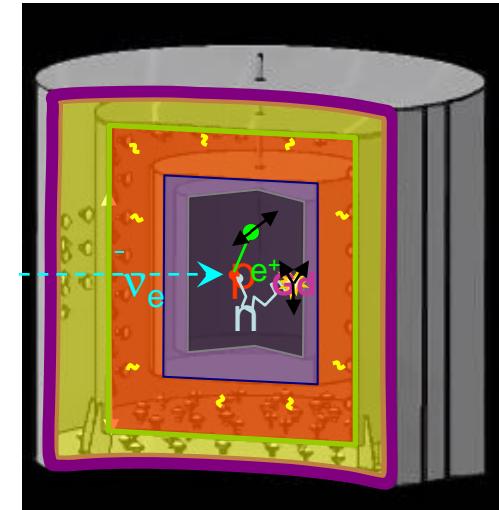
@Chooz:

1.5% syst. err. (Efficiency ~70%)



Goal Double-Chooz:

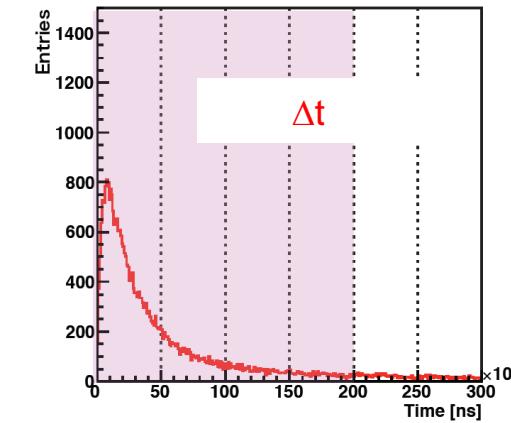
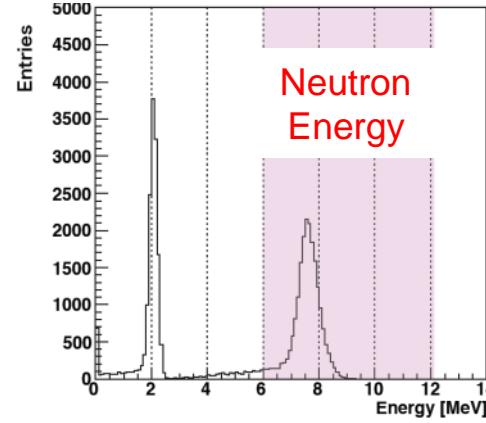
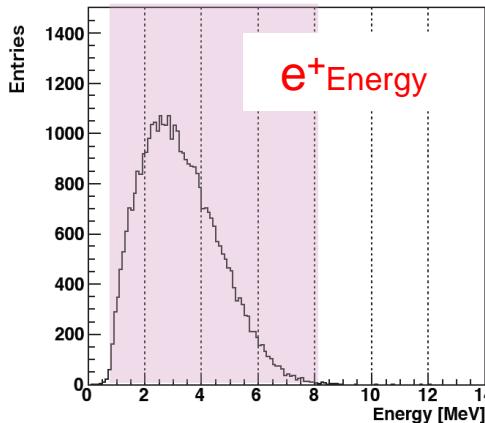
- 2 layer design (no fiducial cut)
- Low BG PMT/material
- Improve Veto detector
⇒ カットをシンプルに。Eff ~100%



Efficiency is **INSENSITIVE** to the energy scale error

In total, **0.2~0.3%** syst. err.:

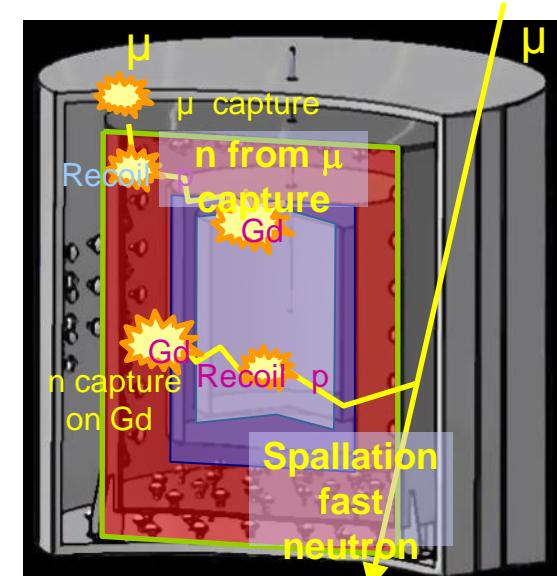
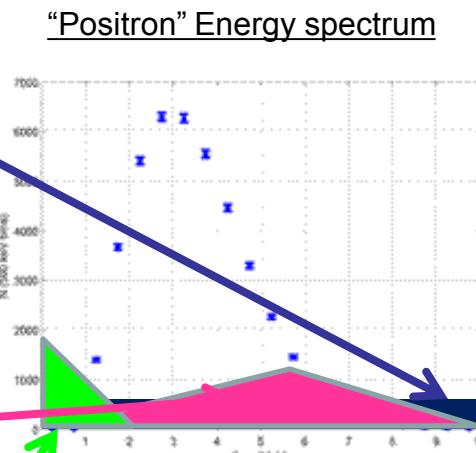
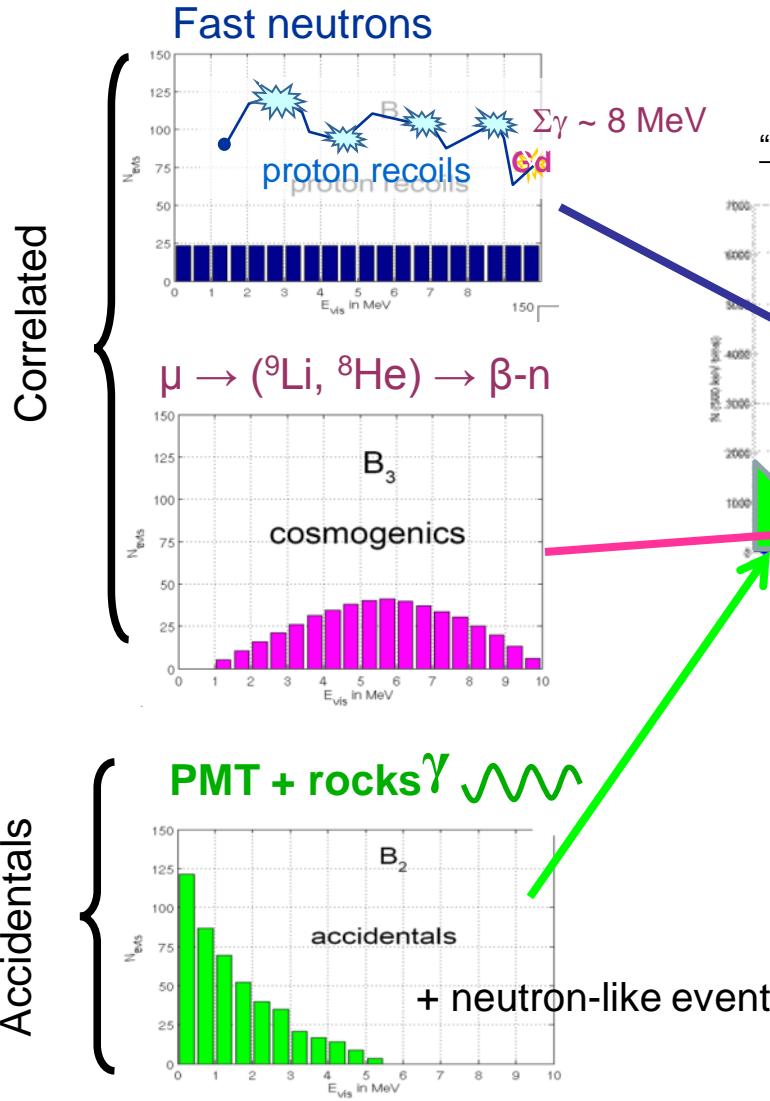
Better calibration (depends on position) realize further reduction





Backgrounds

Estimated with CHOOZ OFF data & Simulation (represent CHOOZ data well)



$N_{\text{bkg}} = \sim 1.6 \text{ evts/day (Far)}$ 2% of ν signal
 $\Rightarrow 0.7\%$ syst err.
 $= 10 \sim 20 \text{ evts/day (Near)}$ 0.5%
 $\Rightarrow 0.2\%$ syst err.

深さによるミューオンレートの違いなど、完全にキャンセルされるわけではない。

詳細なバックグラウンドの理解により、系統誤差を減らす
Reactor Offデータが10日間ほどとれればなおよい



How much can we improve?

@CHOOZ: $R = 1.01 \pm 2.8\%(\text{stat}) \pm 2.7\%(\text{syst})$

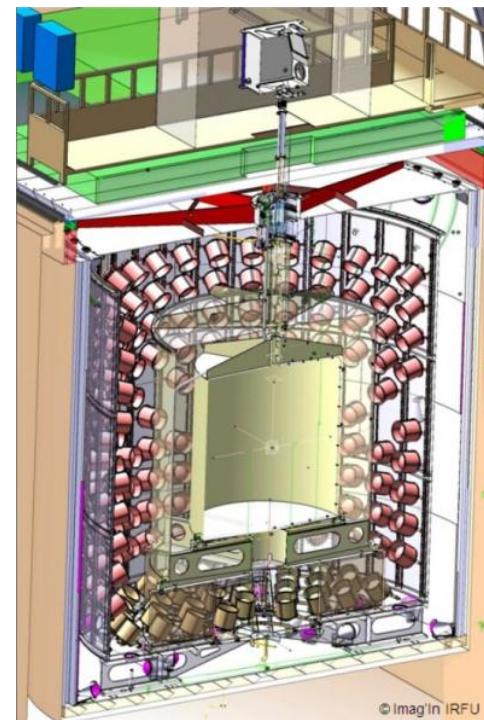
- Systematic errors -

Systematic error	Chooz	Dobule Chooz
Reactor Cross section	1.9%	-
Number of protons	0.8%	0.2%
Detection efficiency	1.5%	0.5%
Reactor power	0.7%	-
Energy per fission	0.6%	-
Total systematic error	2.7%	<0.6%

Double Chooz Goal in Phase 2 (Far+Near)
Thanks to improved detector design and 2 detectors concept

Detector Construction

Material	Status of installation
Steel shield	Complete
Inner veto tank	Complete
Inner veto PMT (8" 78PMTs)	Complete
Buffer tank	Complete
Buffer tank PMT(10" 390PMTs)	Complete
Gamma catcher and Target vessels	Complete
Close Lids	Complete
Electronics/DAQ installation	Complete
Liquid filling	Complete
Commissioning	Complete
Physics Run	Started
Outer Veto	Partially OK



後置検出器・実験室

February 2009



Lab cleaning



Installation Veto and Veto-PMTs



Installation Buffertank



PMT インストール

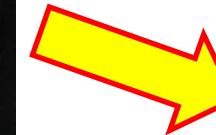
390High performance low background 10" PMTs(Oil proof)
(HAMAMATSU R7081MOD-ASSY)



Test
Assembly



Final test at Exp. site

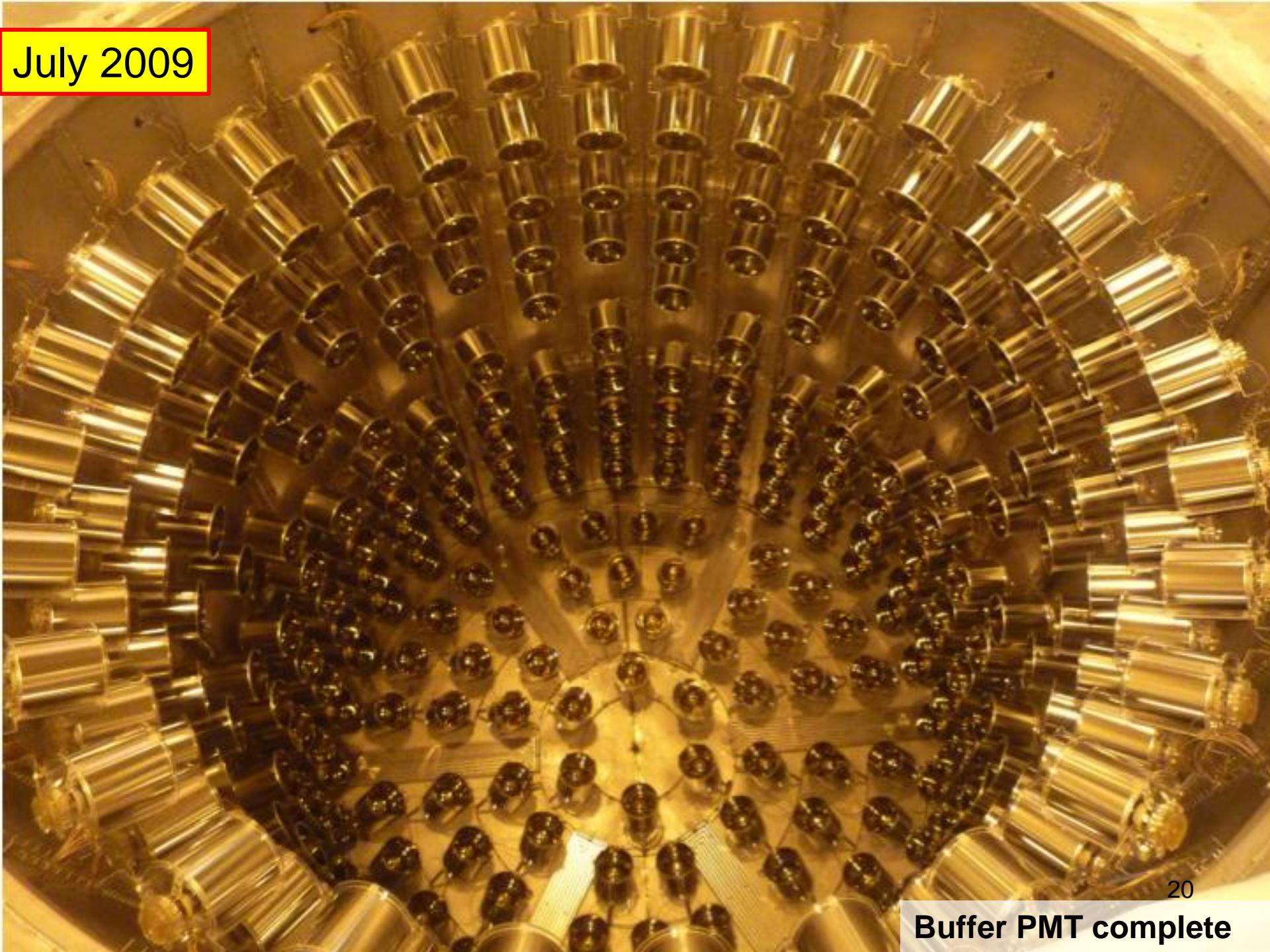


Installation to detector



May 2009

July 2009



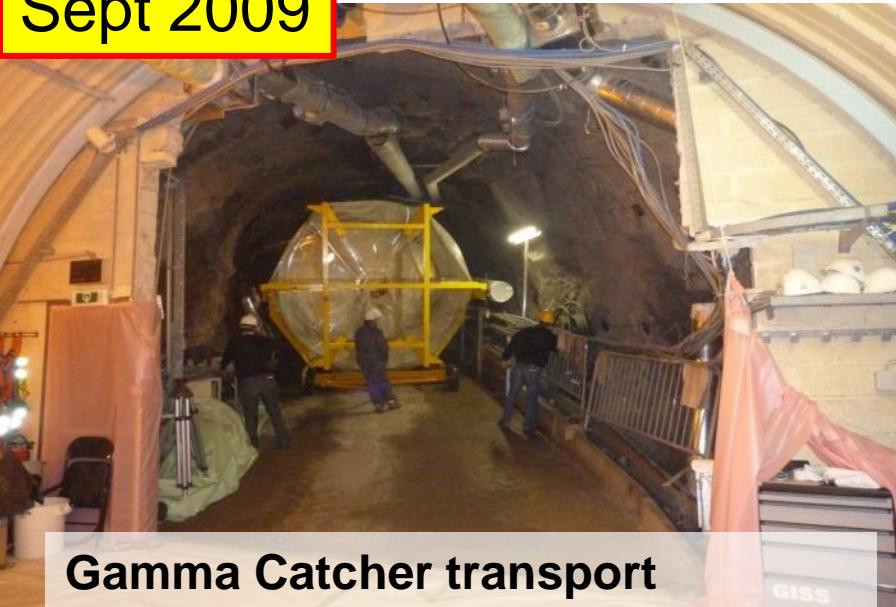
20

Buffer PMT complete



アクリル容器インストール

Sept 2009



Gamma Catcher transport



Acrylic vessels in lab



Gamma Catcher installation



Acrylic vessels in buffer tank

21

Oct 2009

蓋部インストール・蓋閉め



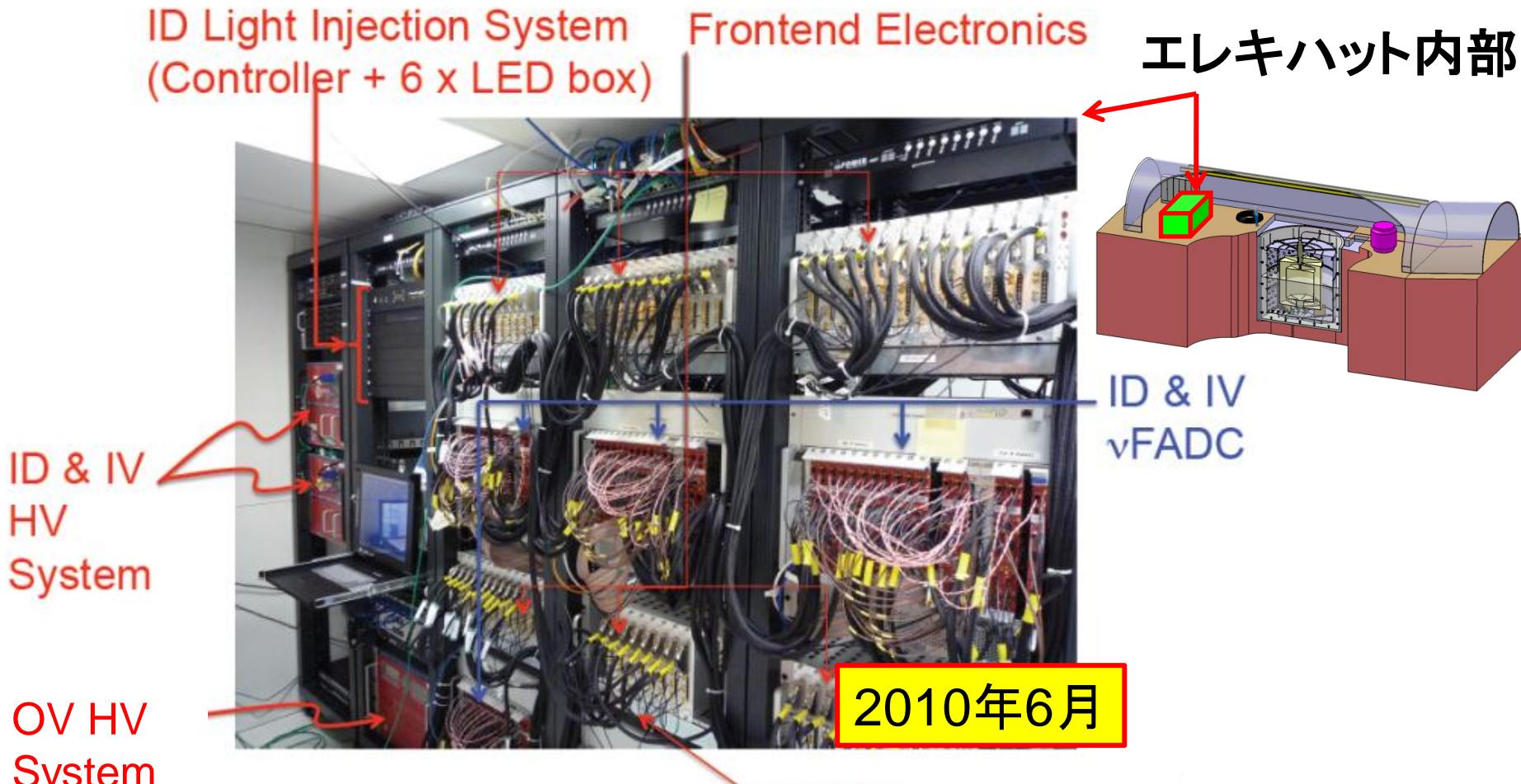
後置検出器本体 建設終了!!



Dec 2009

22

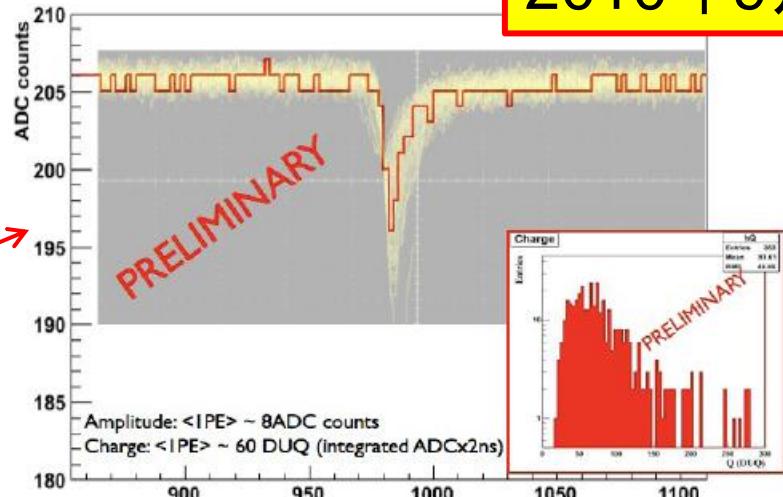
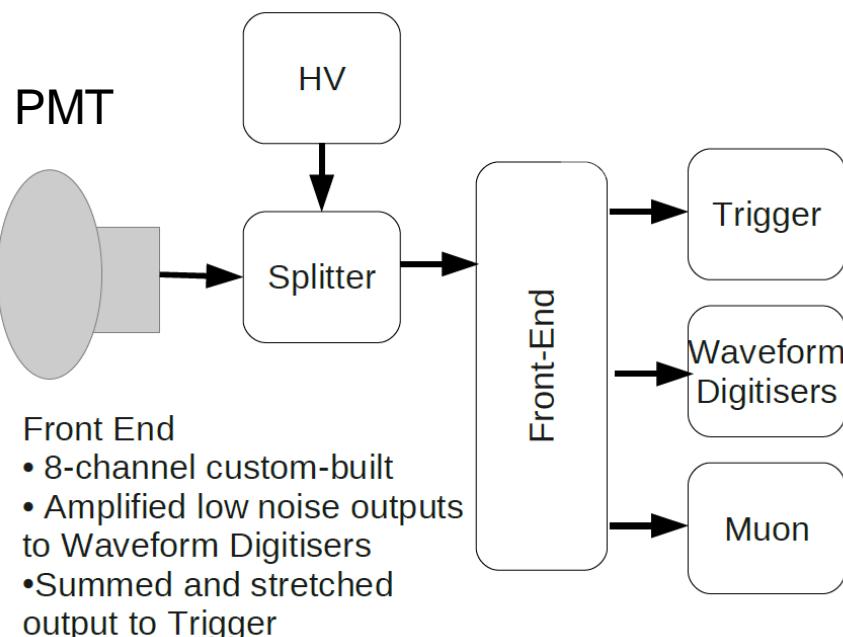
DAQ&エレクトロニクス インストール



- 2010年1～8月
 - エレクトロニクスとDAQシステムインストールおよび動作確認

DAQ&エレクトロニクス インテグレーション

2010年9月



- Dry run (液入れ前の検出器)で
 - HV system
 - DAQ, ランコントロール
 - オンラインソフトウェア
 - 環境モニター 等インテグレーションを行った。

DAQ&エレクトロニクスチーム

24

関連トーク 塚越: 18pSH9

液入れ作業(前回の学会以降)

外部ストレージ室 タンク設置



2009年8月～

オイル到着



2010年4月



2010年4月～

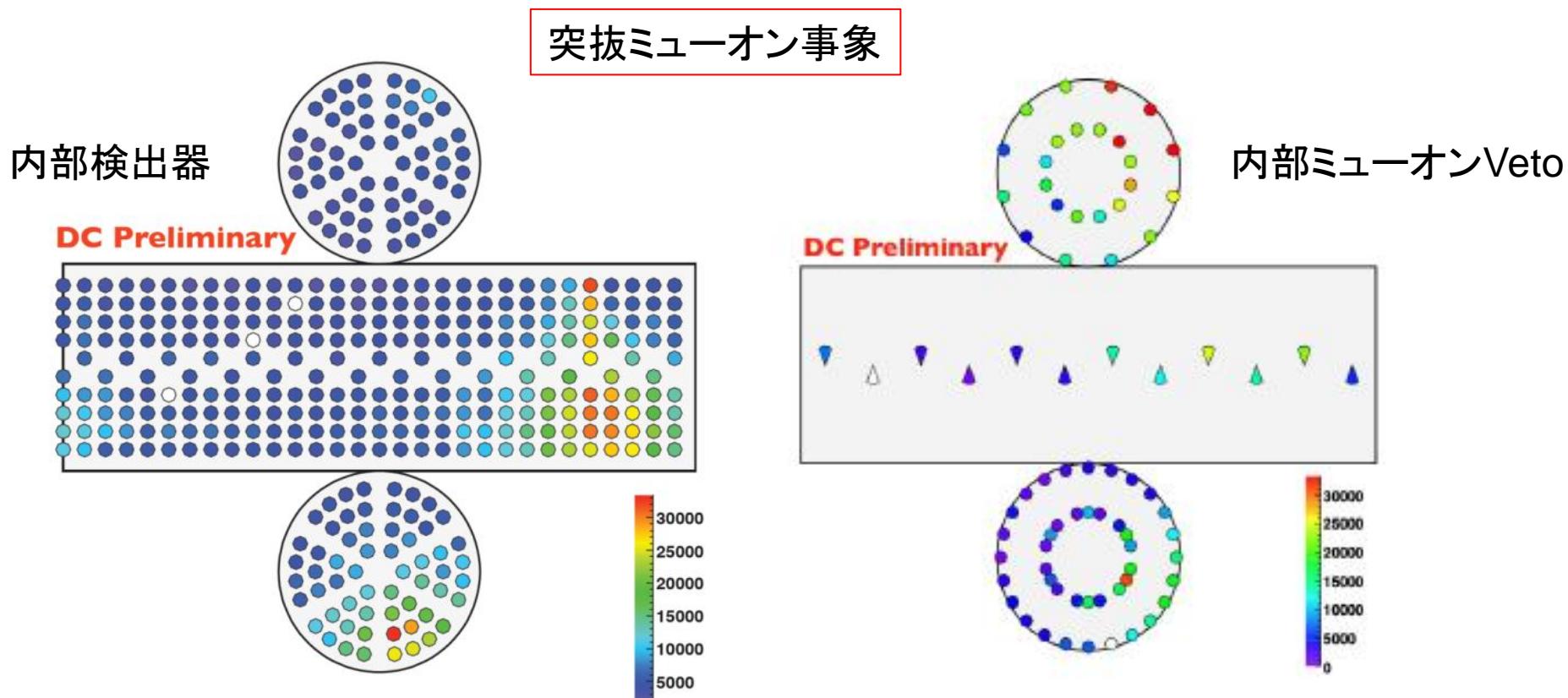
実験室内 液入れシステム設置

- 2010年7月
 - 液入れ準備完了
 - 窒素ページ開始
 - 液入れ開始は安全審査委員会の
 - 承認待ち…
- 2010年10～12月
 - 液入れ作業: 4層の液面を揃えながらゆっくりと液を注入
 - **12月13日 1時59分 完了!**

液面・圧力・温度を24時間モニター
～ 現在も継続して行われている。

最終コミッショニング

- 2010年1月～
 - 検出器・DAQの最終動作確認・調整



このあたりまでの詳細については、高エネルギーニュース(Vol.30 2011年4-6月号)を御参考下さい。²⁶

物理ラン開始！

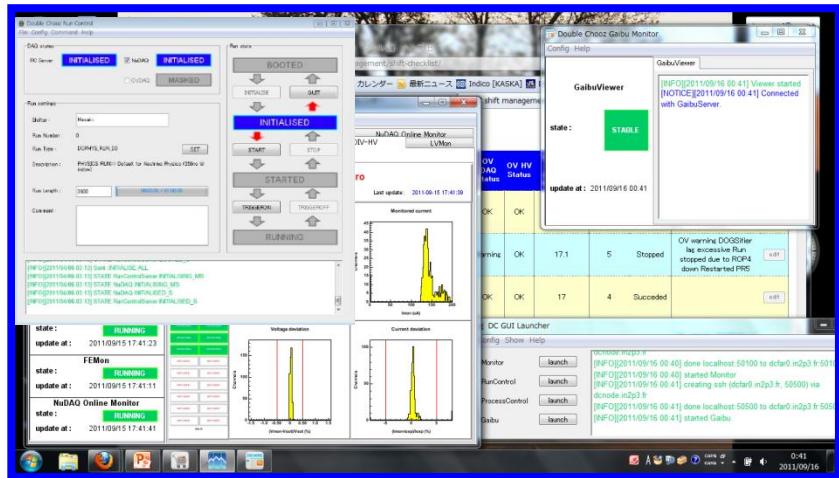


2011年4月13日
現地時間～18時
物理ラン開始!!

最初の物理ランと、オンラインシフター

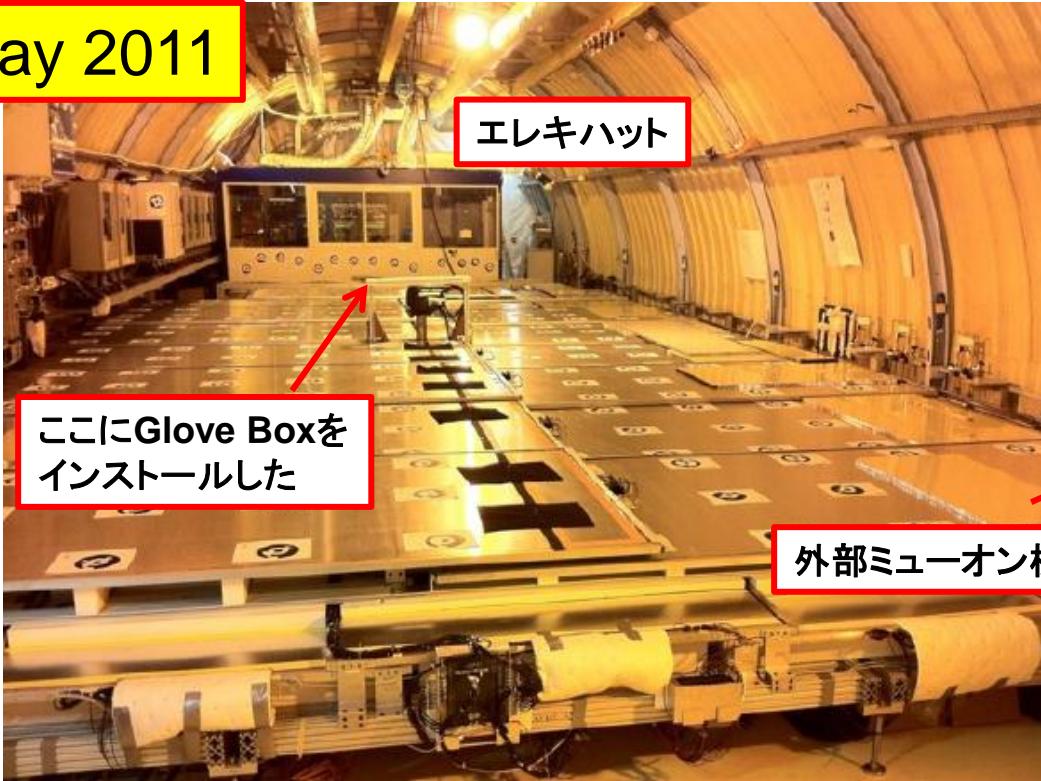
- 測定は24時間継続される
 - オンラインシフト
 - + 3リモートシフト
 - 世界中からインターネット接続でランコントロール・モニター

実はかなりの部分がMade in Japan

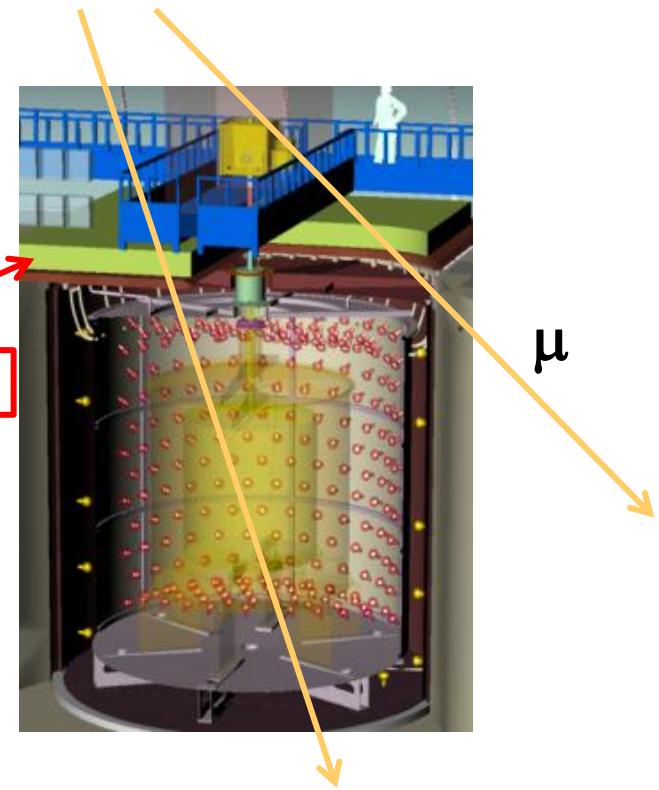


外部ミューオンVeto検出器(継続中)

May 2011



プラスチックシンチレータストリップ
ミューオンを高い位置精度で再構成する



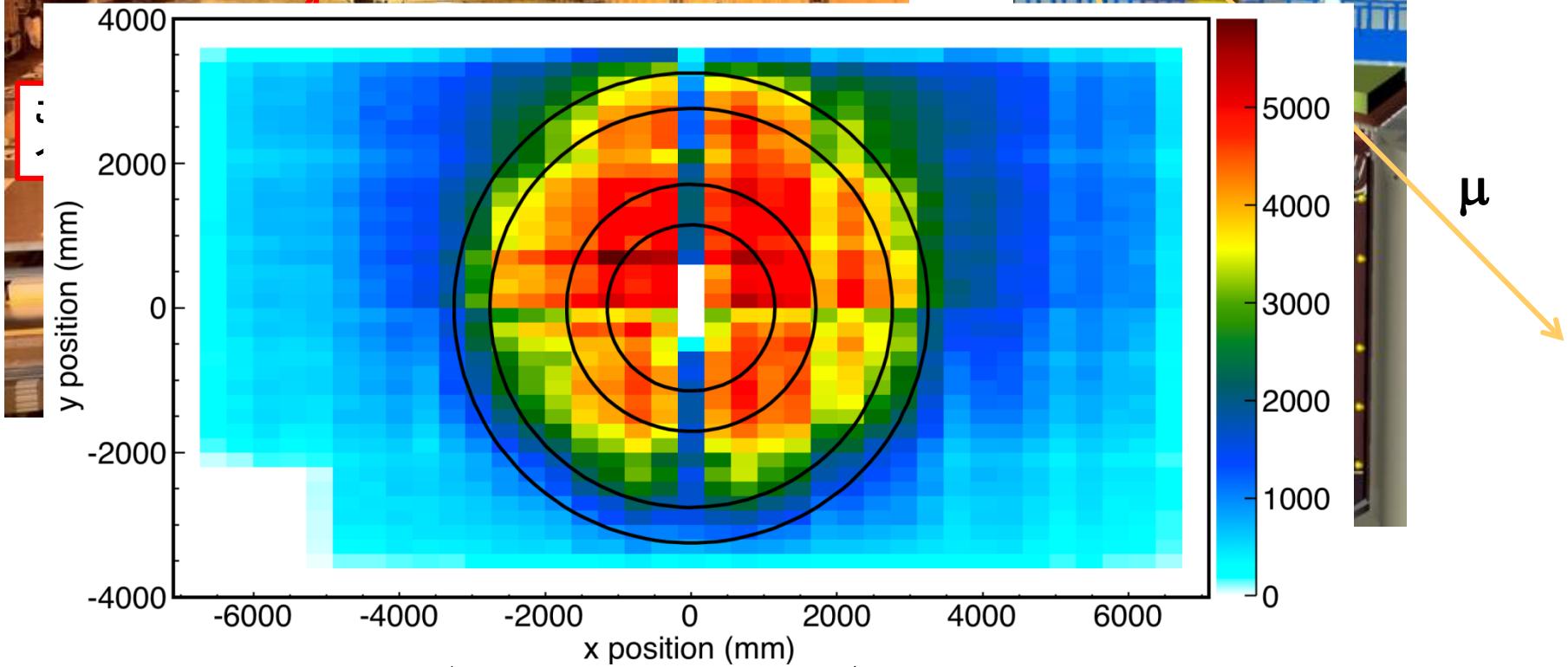
- インストール作業中も、物理ランは継続
 - 上図: 検出器下層部のインストール完了
 - 7月中旬: キャリブレーション用 Glove box をインストール
 - 7月末: OV-DAQ スタート
- 8月より、チェックソースによるキャリブレーションランも行われている。²⁸

外部ミューオンVeto検出器(継続中)

May 2011

エレキハット

プラスチックシンチレータストリップ
ミューオンを高い位置精度で再構成する

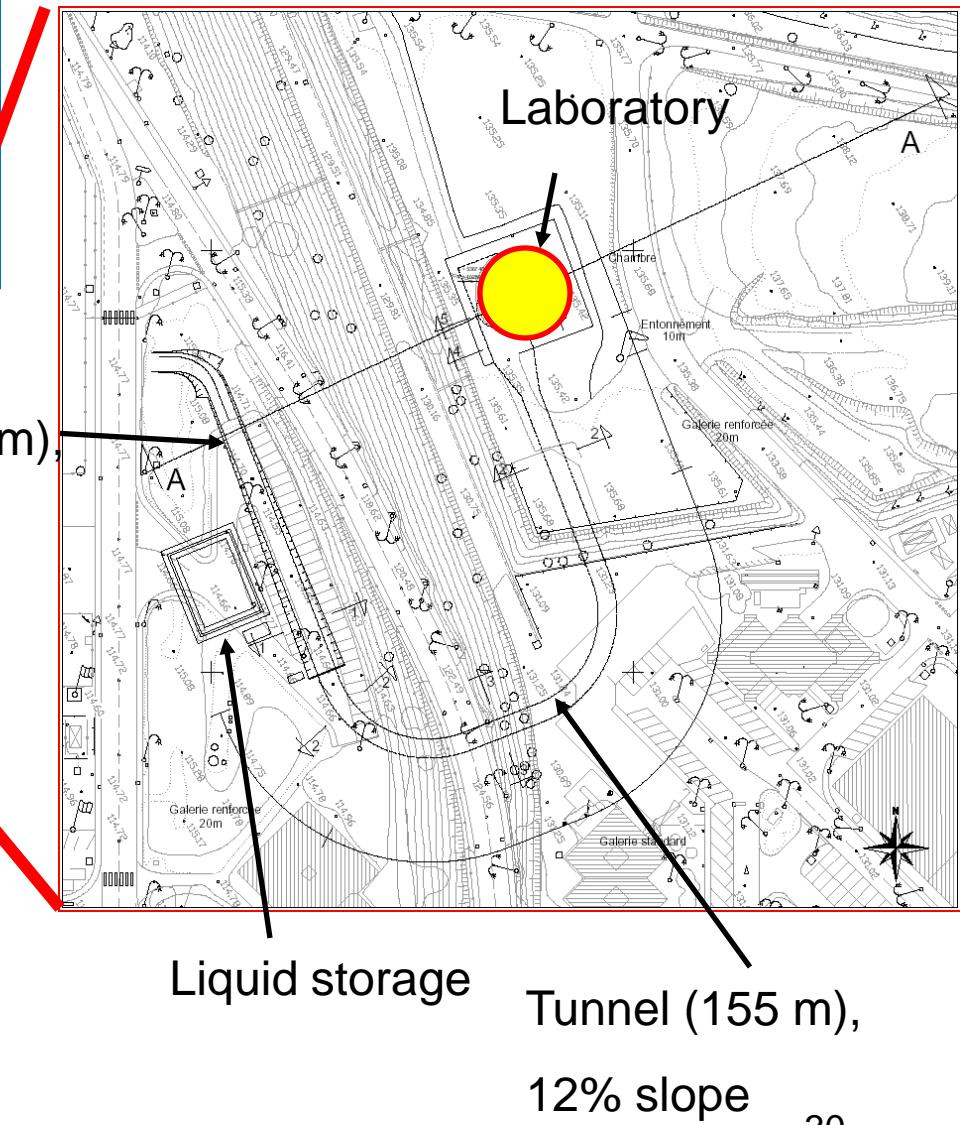
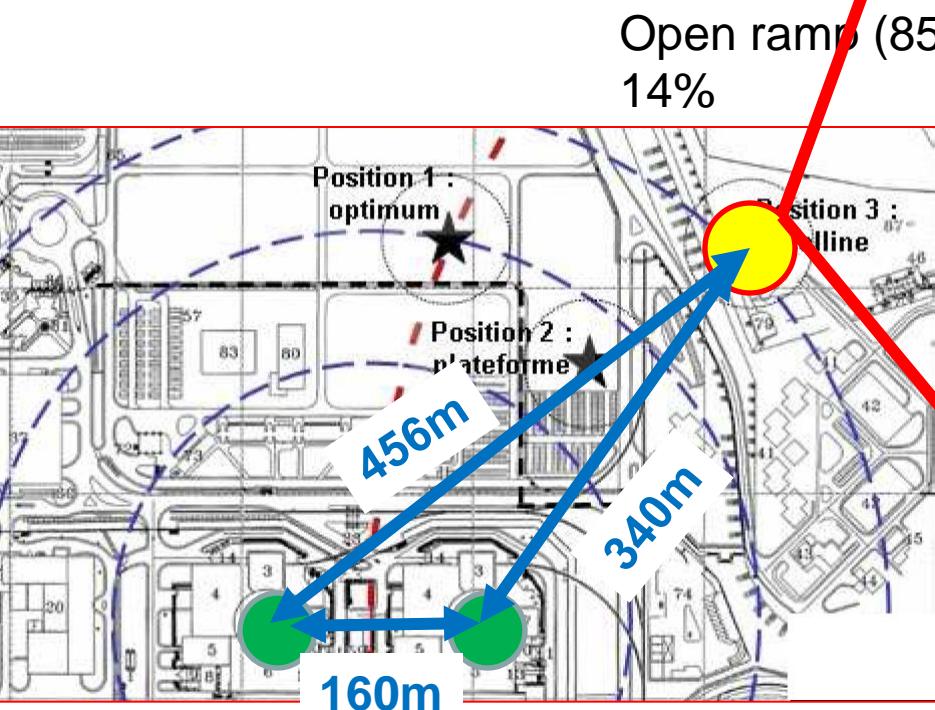


- 8月より、チェックソースによるキャリブレーションランも行われている。²⁹



前置検出器(Near site)の状況

- 炉心から~400m
 - Iso-ratio curveからは少しずれている。
- Depth: 120 m.w.e. (μ flux: $\sim 3\text{-}4 \mu/\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Neutrino fluxes: 2.5×10^5 events in 3 years



前置検出器(Near site)の状況

June 2011



- ・ トンネル/実験サイトの建設中

予定

- ・ 2012年4月ごろ
 - Nearサイト 完成
 - Near検出器 建設開始
- ・ 2012年末
 - Near検出器 完成
- ・ 2013年初頭
 - Near + Far
 - Phase II 測定開始

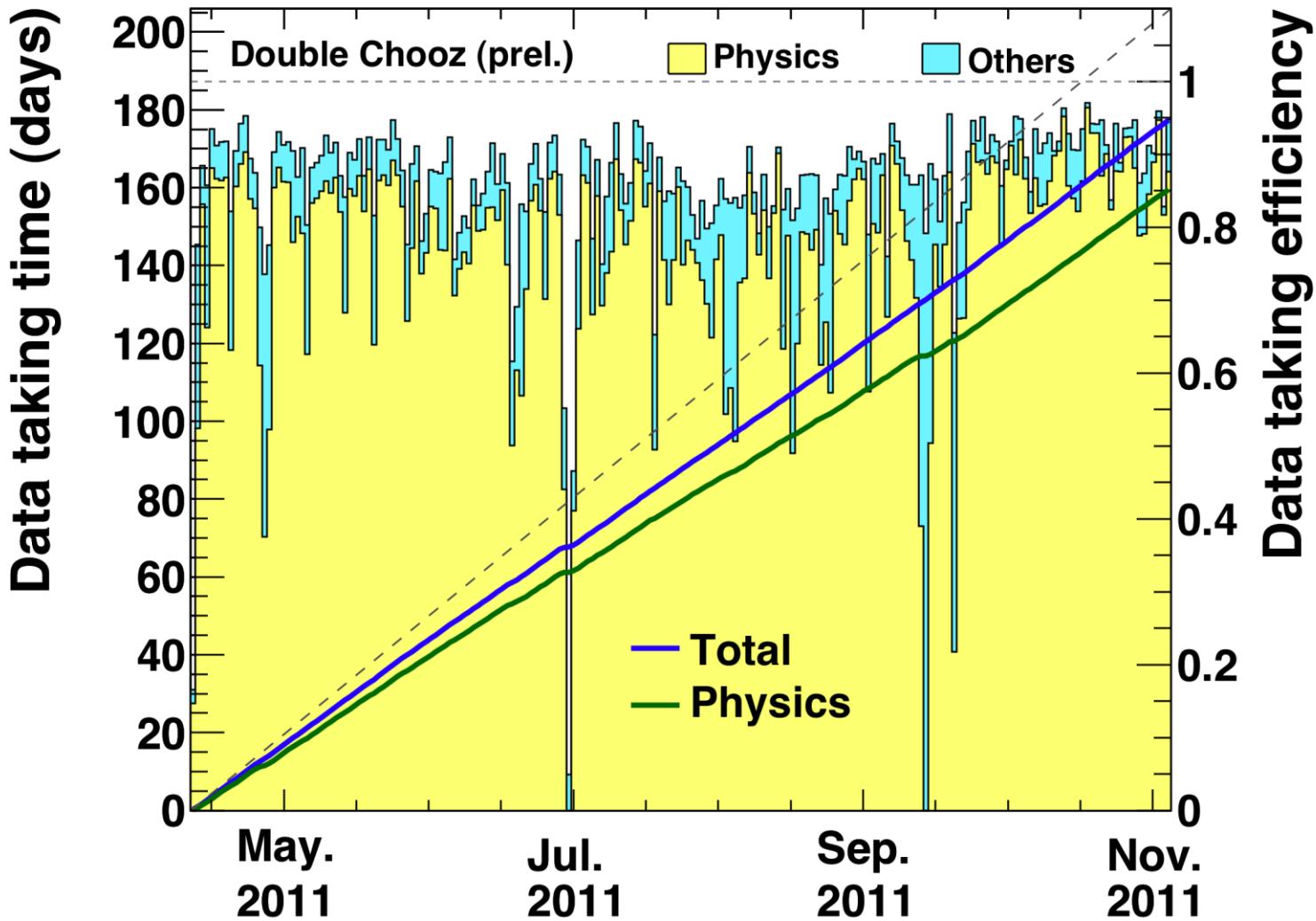


Preliminary Results

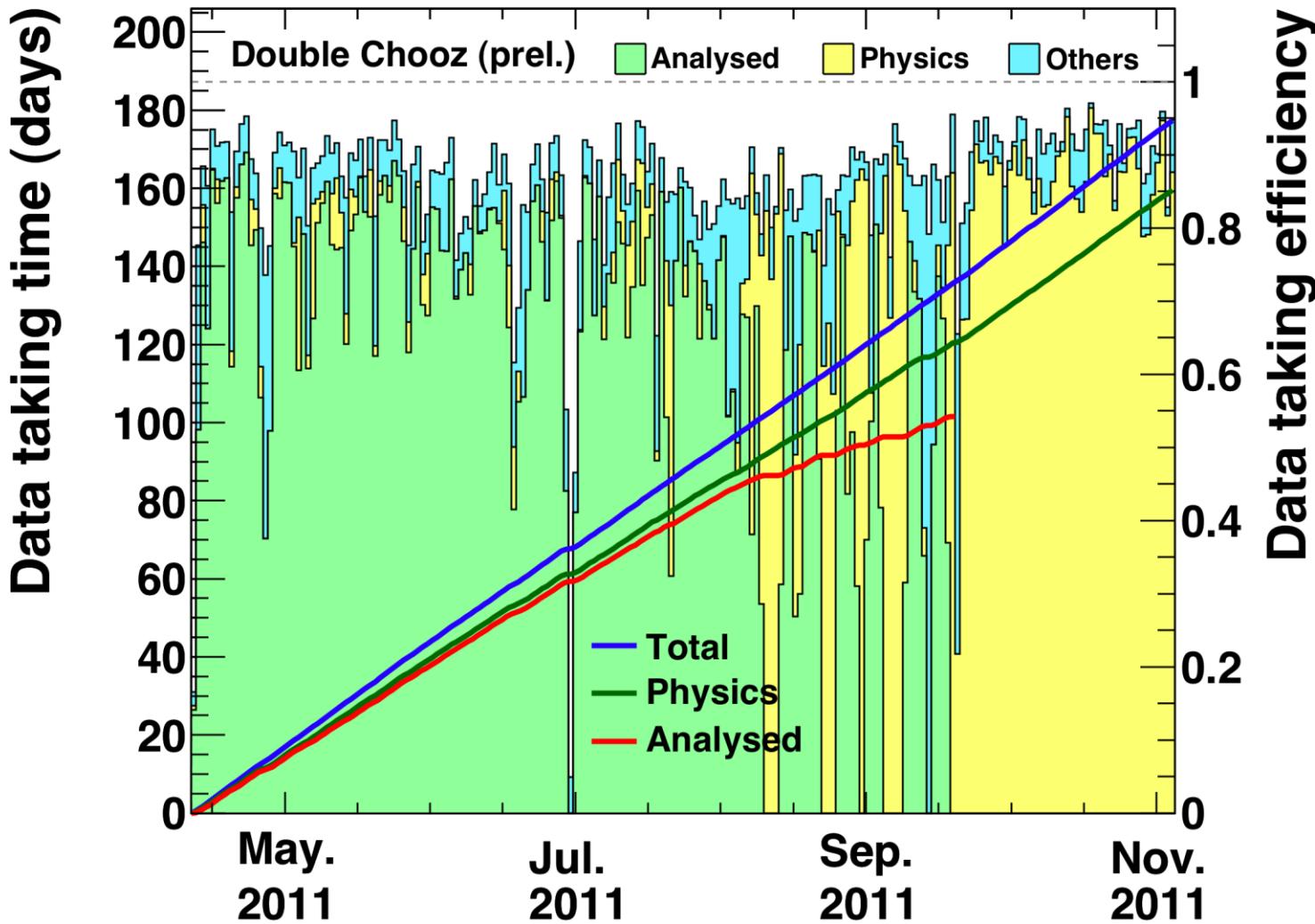
実験開始から約140日間のデータ

当然、現在もデータ収集は継続中

Data taking efficiency



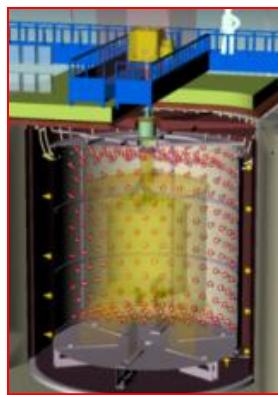
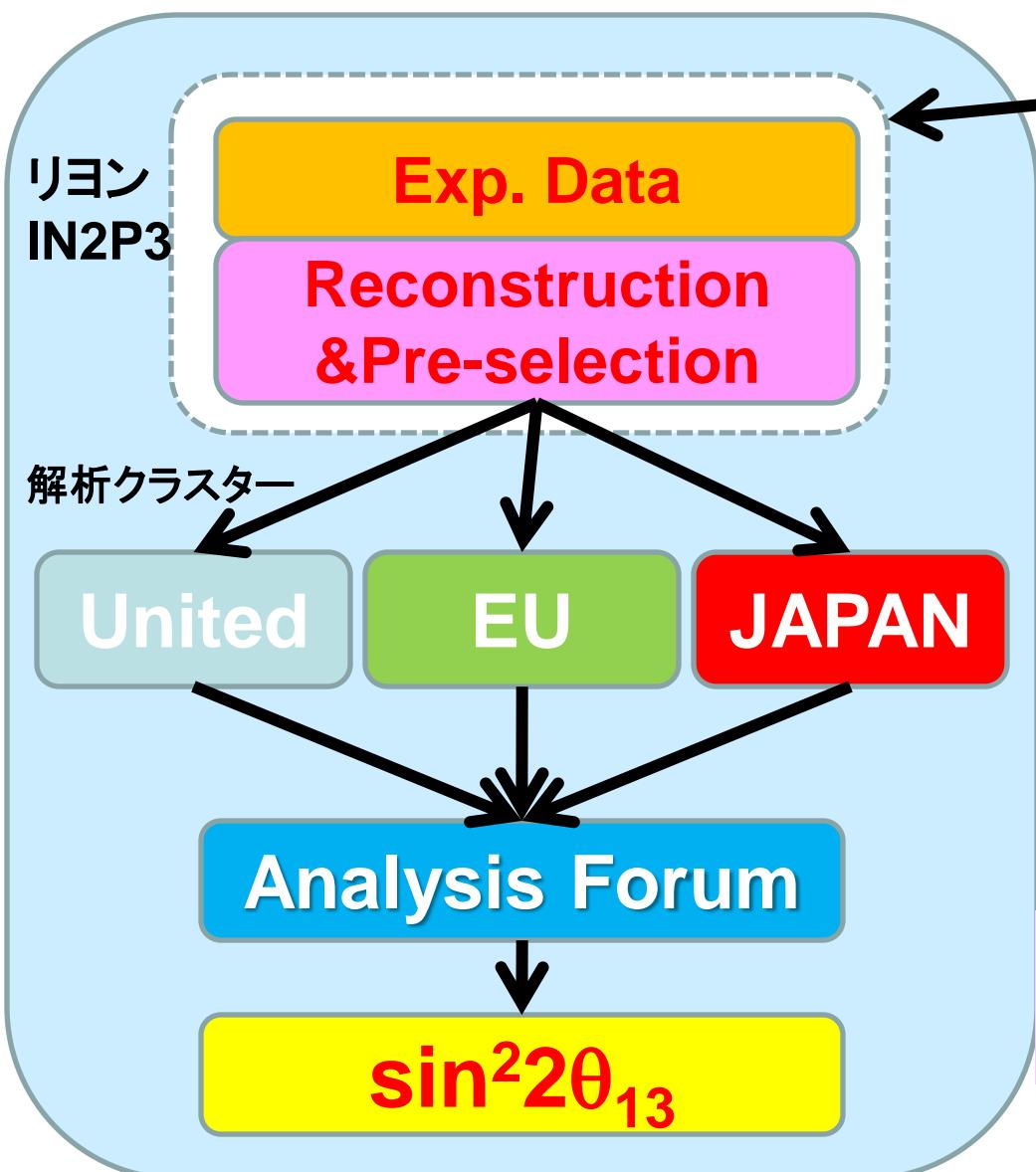
Fraction of analyzed data



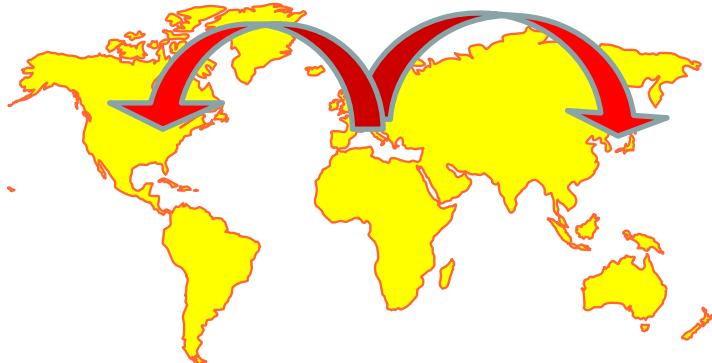
Run Time: 101.5234 days from April 13th to September 18th

Live Time : 96.823 days (1 ms muon veto)

解析体制



実験データは、IN2P3へ送られた後、日(欧)米へネットワーク転送される。



クラスター毎の独立した解析
⇒ Cross check

Neutrino selection

Event Selection

$0.7\text{MeV} < E_p < 12\text{MeV}$ ($99.9 \pm 0\%$)

$6\text{MeV} < E_d < 12\text{MeV}$ ($86.0 \pm 0.6\%$)

$2\mu\text{s} < \Delta T_{\text{p-d}} < 100\mu\text{s}$ ($96.5 \pm 0.5\%$)

* Main cuts:

* Remove after muon effect:

$1\text{ms} < \Delta T_{\mu-\text{p}} < 100\mu\text{s}$ ($95.5 \pm 0\%$)

* Remove multi neutron events:

No trigger within $100\mu\text{s}$ before prompt signal

1 trigger within $400\mu\text{s}$ after prompt signal ($99.5 \pm 0\%$)

* PMT light noise cut:

MaxQ/TotalQ
signal time structure (100%)

→ 4121 ν candidates

Neutrino Candidates Selection

- Discard all triggers in 1ms after each muon (mainly tagged by inner-veto)
- PMT spontaneous light emission rejection cuts (14PMT switched OFF)
 - ensure light approx. homogeneously spread across (use ratio $Q_{\max}/Q_{\text{total}}$)
 - ensure light arrives at approx. the same time (use RMS of hit-time per PMT)
- Prompt signal within [0.7,12]MeV
- Delayed signal within [6,12]MeV
- Coincidence window between [2, 100] μ s
- Multiplicity condition
 - No trigger ($E > 500\text{keV}$) 100 μ s before prompt
 - Only one trigger ($E > 500\text{keV}$) 400 μ s after the prompt

Neutrino candidates(含BG)

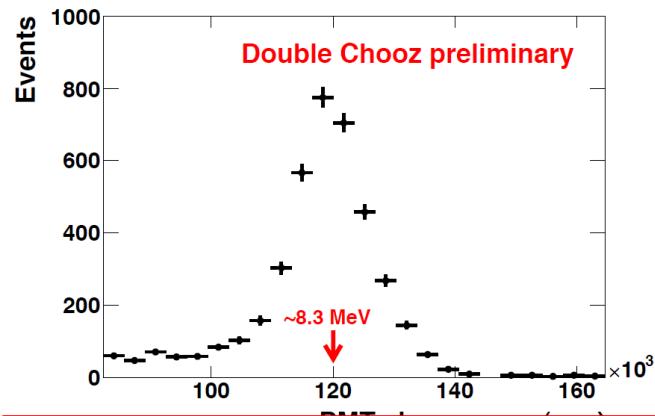
(注意) PMT gain較正前
エネルギー較正・補正前

Data

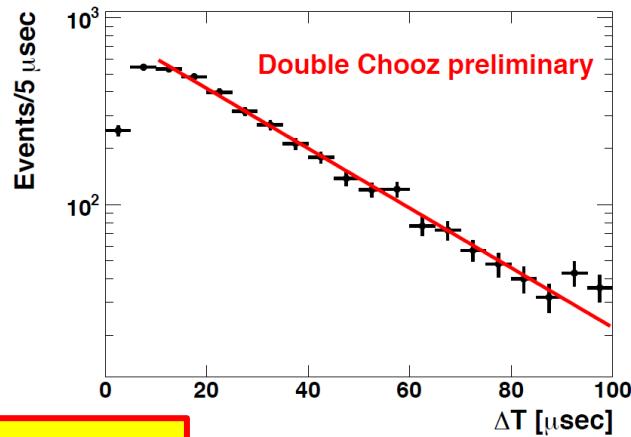
Prompt 信号



Delayed信号

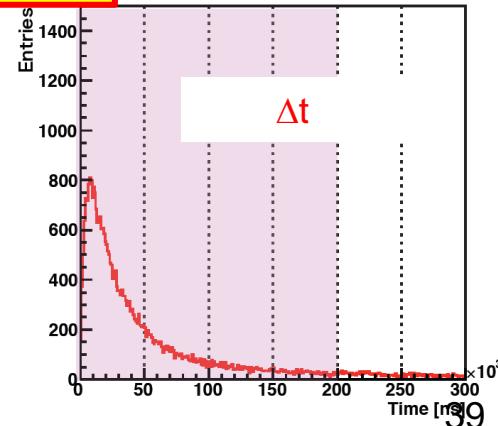
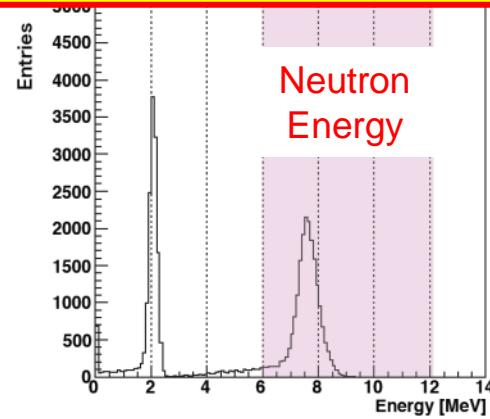
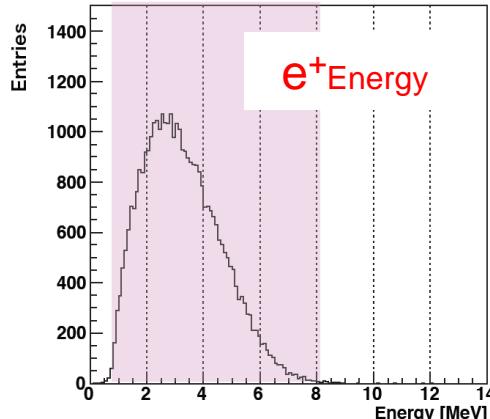


時間差

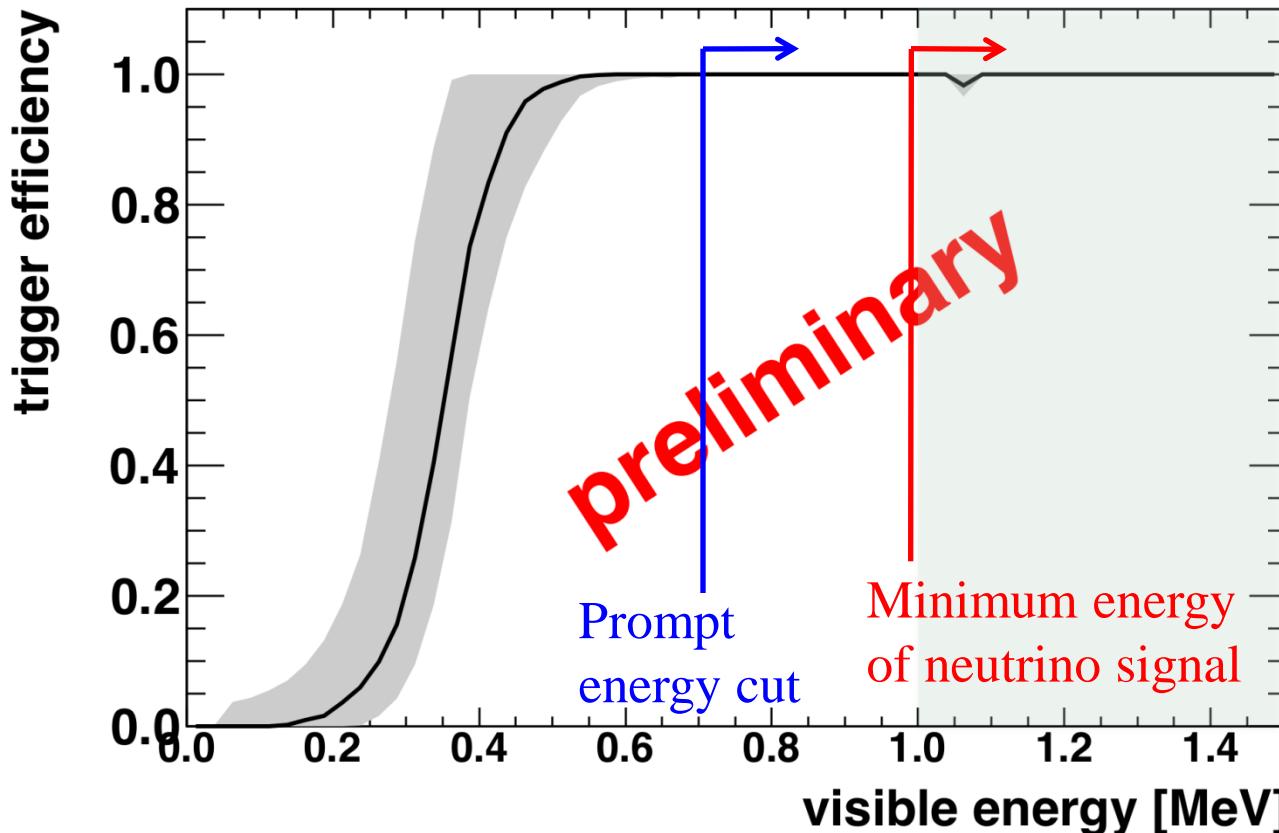


MC (Neutrino signal. タ

JPS@弘前大学



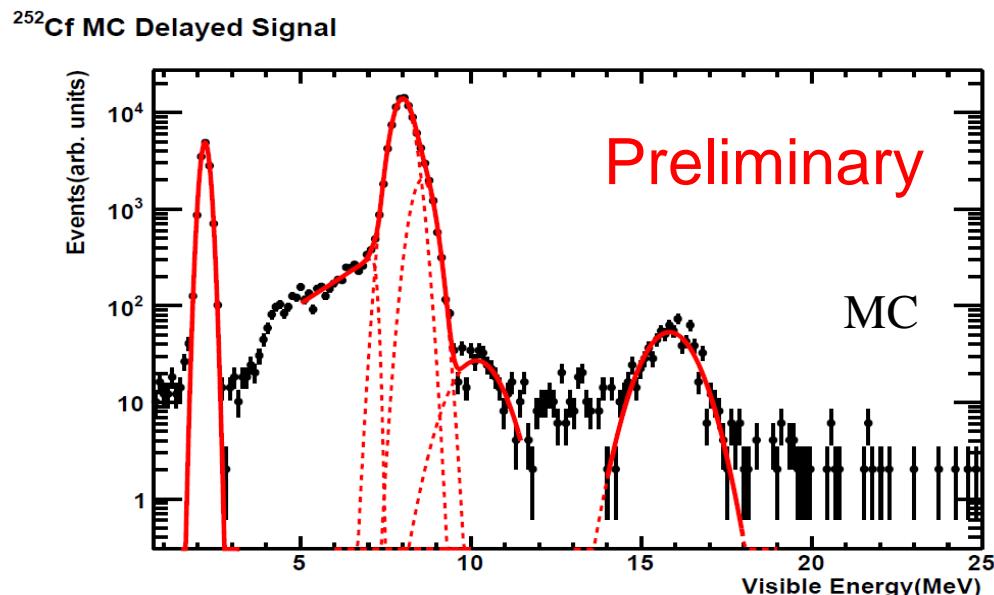
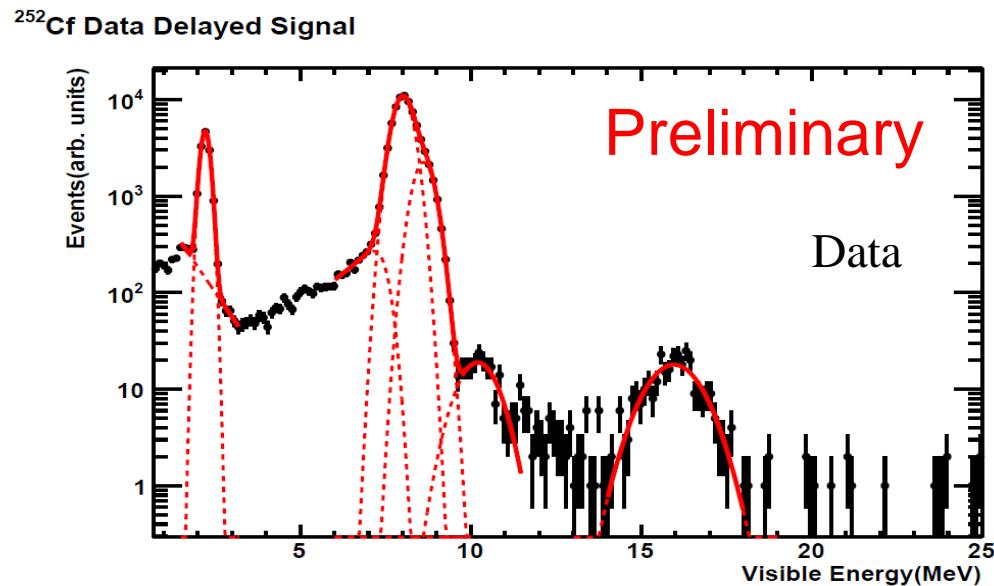
Trigger threshold



- Trigger efficiency
 - 50% @ 350keV
 - $100^{+0}_{-0.4}\%$ above 700keV
- Prompt energy cut efficiency > 99.9%

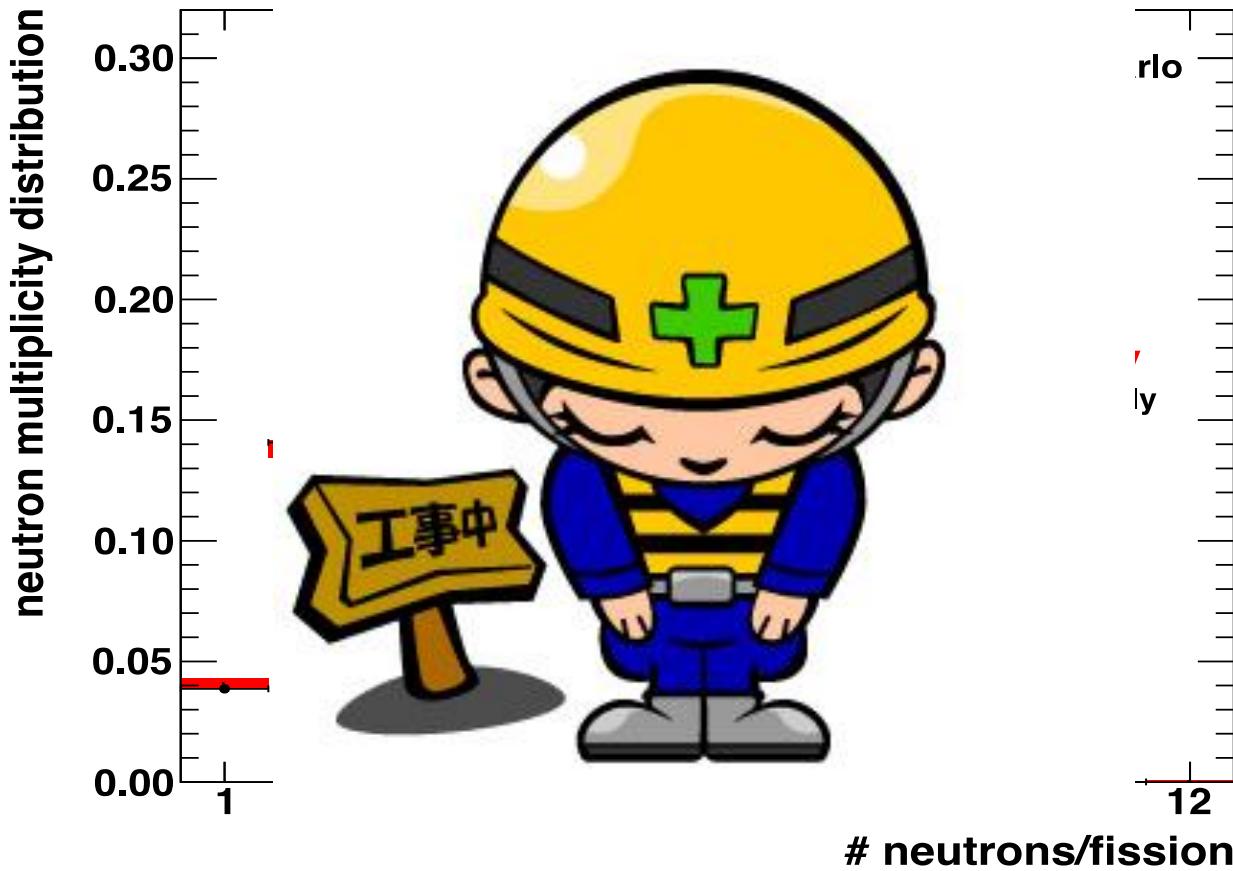
Gd / (Gd + H) ratio

- ^{252}Cf 中性子線源を用いて、Gd/(H+Gd)比をデータとMCシミュレーションで比較
→ MCを2%補正



Neutron multiplicity

Multiplicity of total neutron capture (H+Gd)

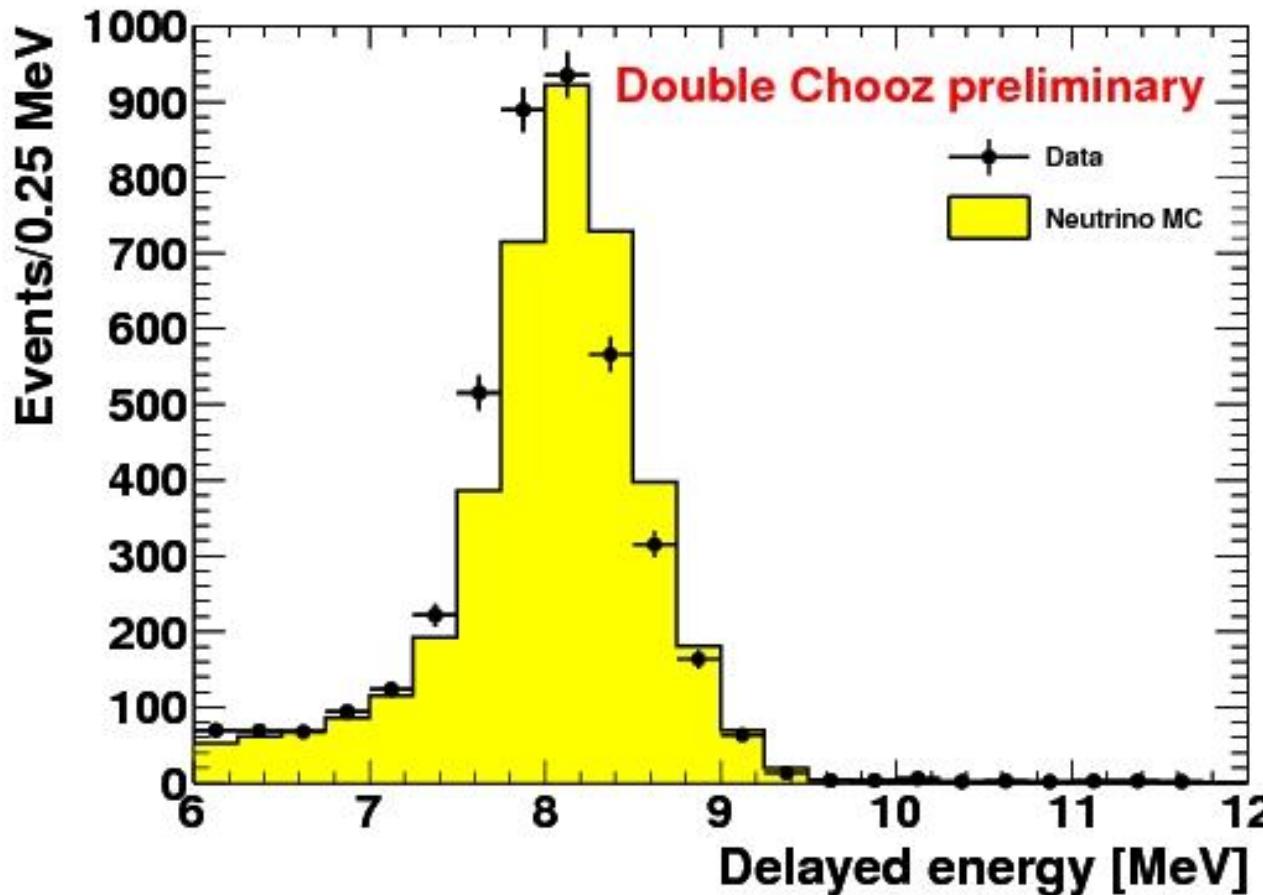


Average neutron multiplicity

Data: 3.659 ± 0.008 (stat)

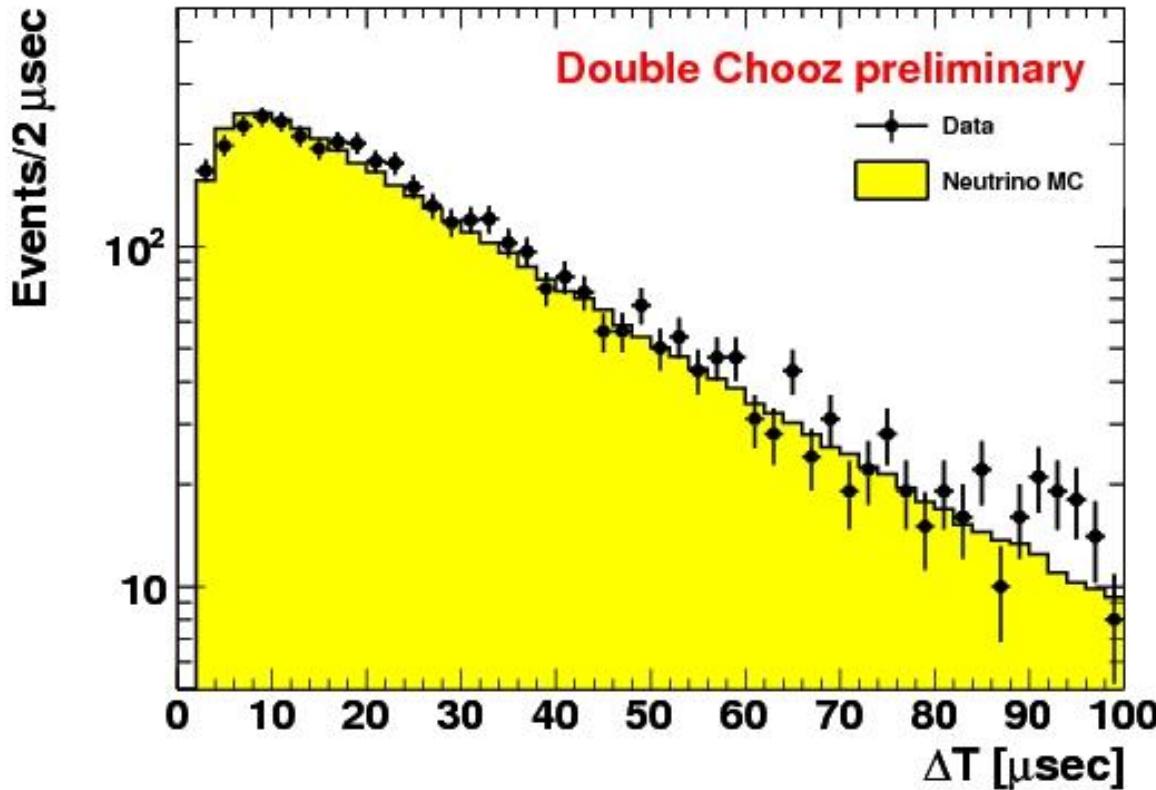
MC : 3.677 ± 0.013 (stat)

Delayed energy cut



Efficiency of delayed signal: 86.0
± 0.6 %

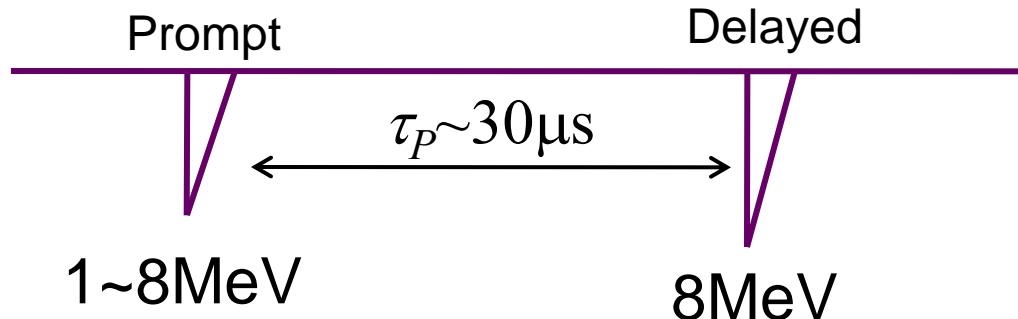
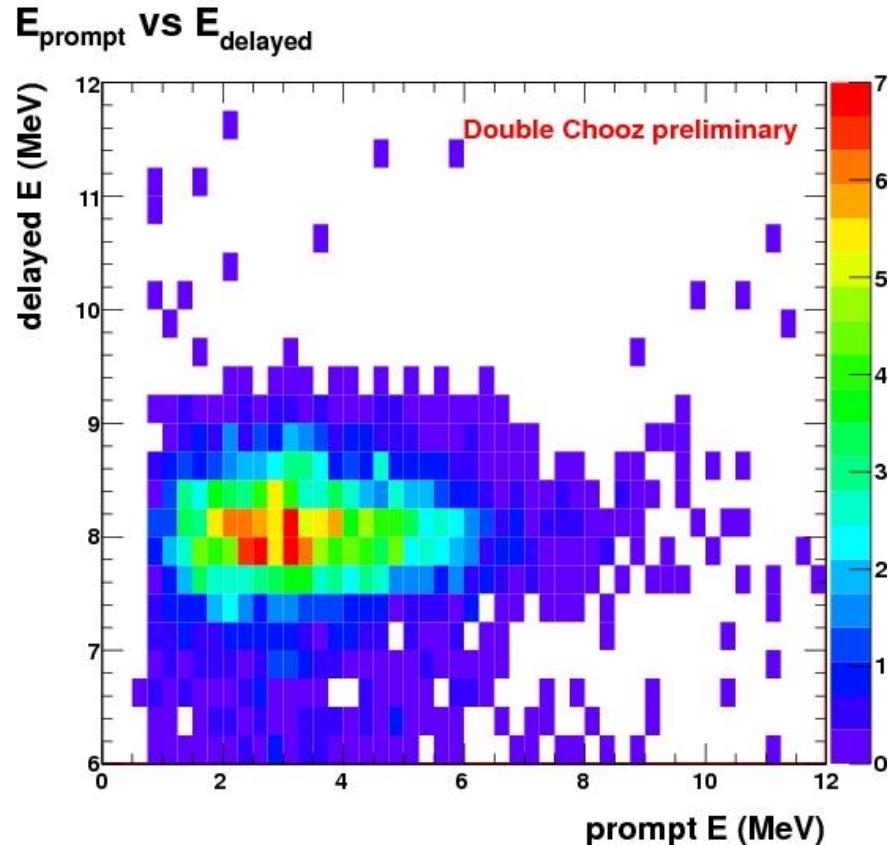
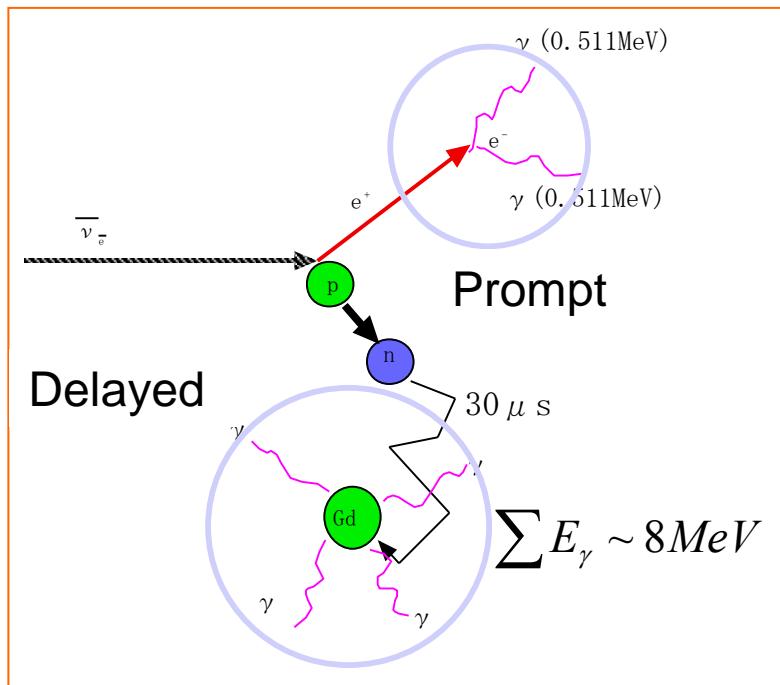
Time coincidence



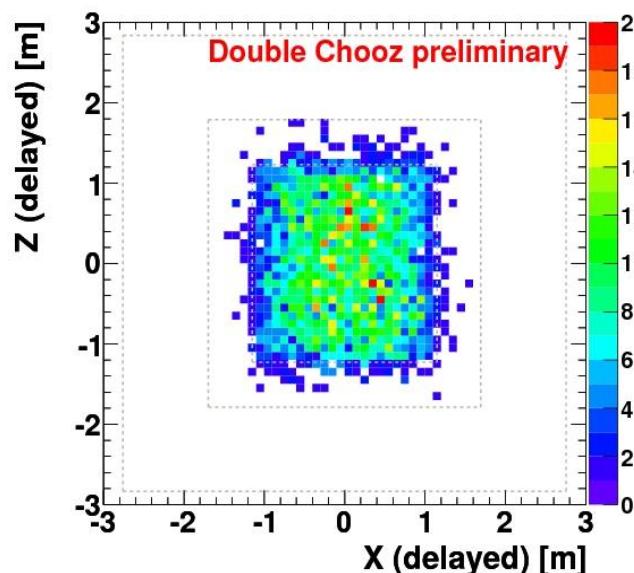
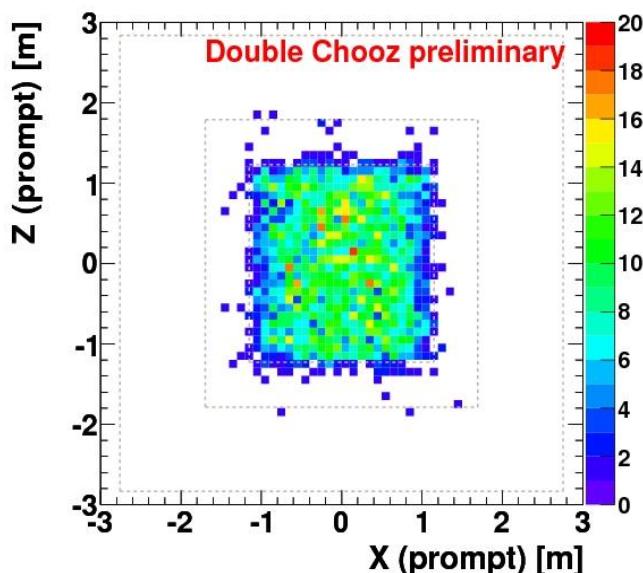
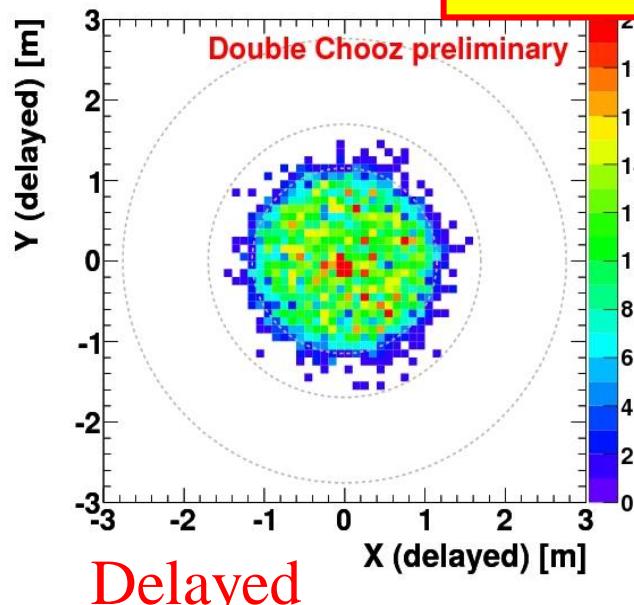
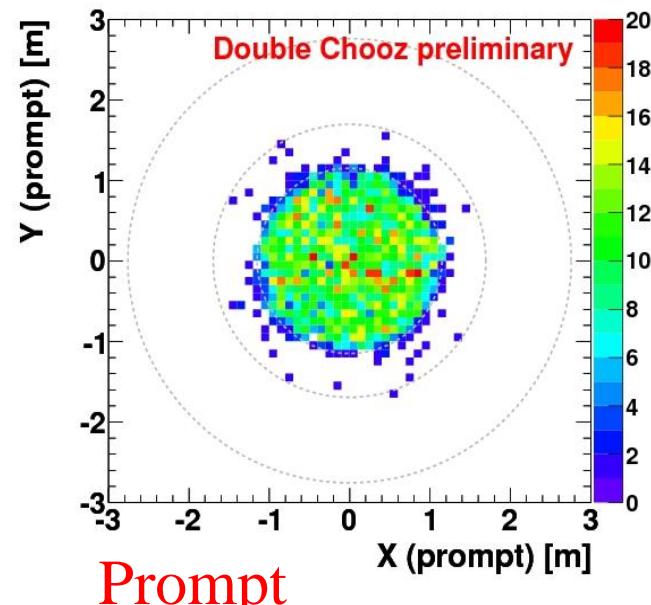
- KeV neutrons thermalized within a few μs
→ captured on Gd with $\tau = 27 \mu\text{s}$
- Efficiency within $[2,100] \mu\text{s}$: $96.5 \pm 0.5 \%$

Quality : Neutrino candidates

Neutrino candidates



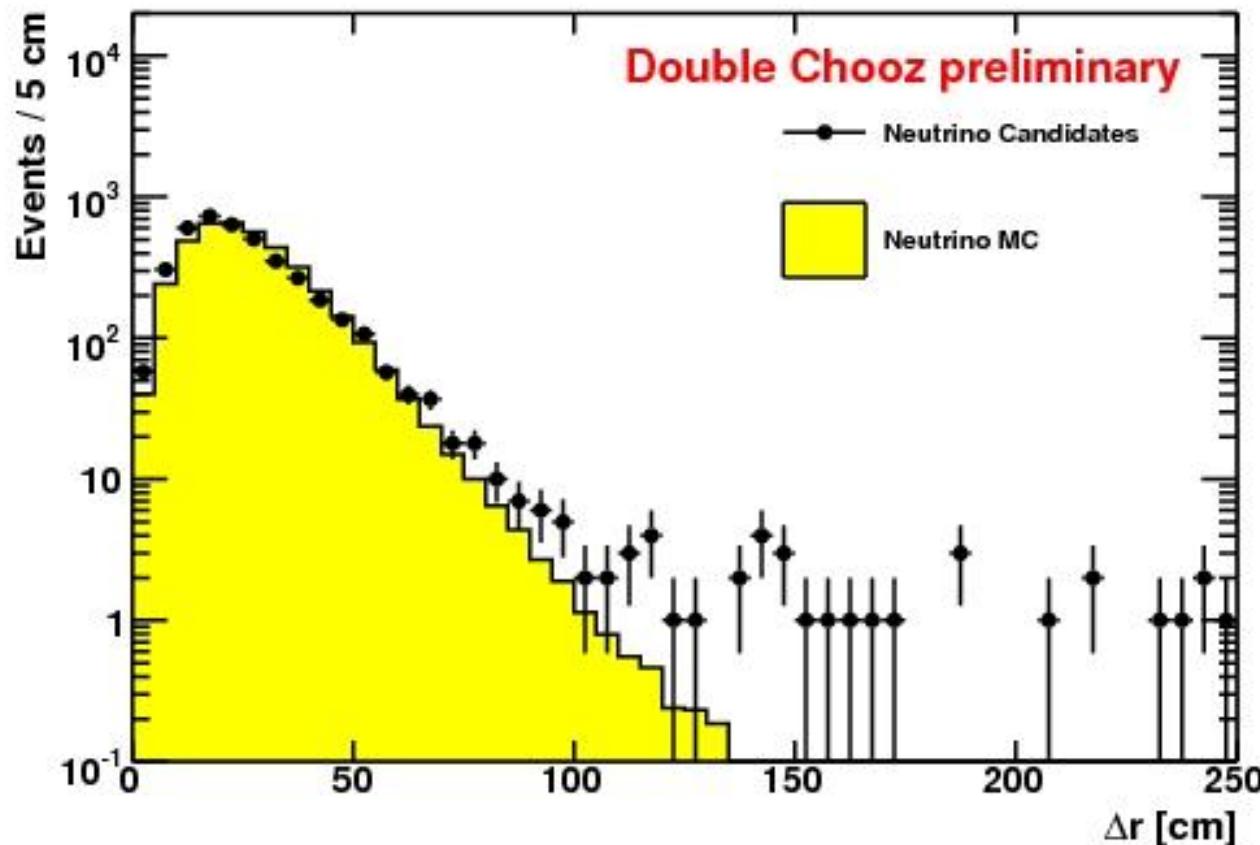
Reconstructed vertex positions



Δr : prompt vs. delayed

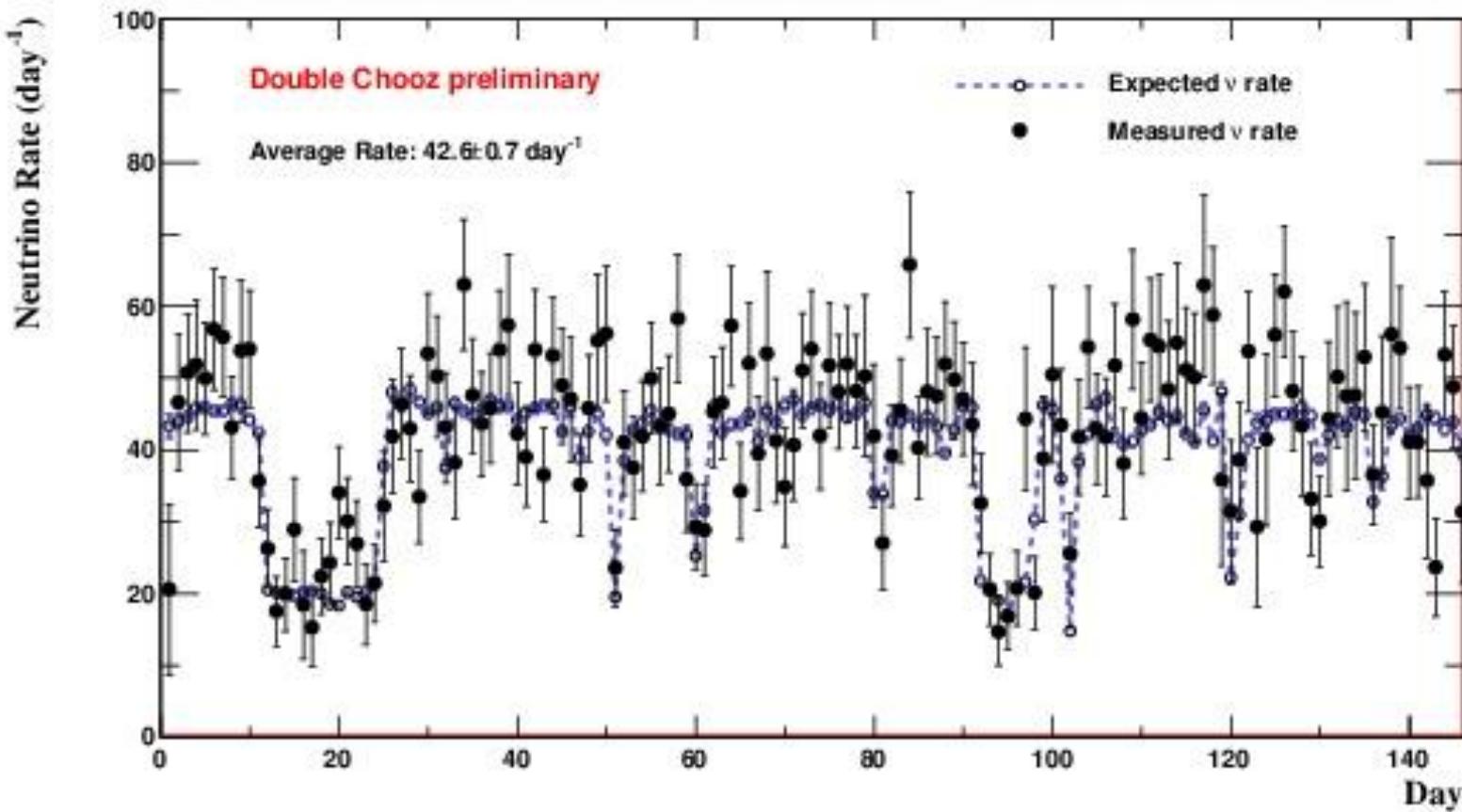
Prompt - Delayed Reconstructed Distance

No Δr cut



Neutrino candidate: event rate

Neutrino candidates rate (background not subtracted)

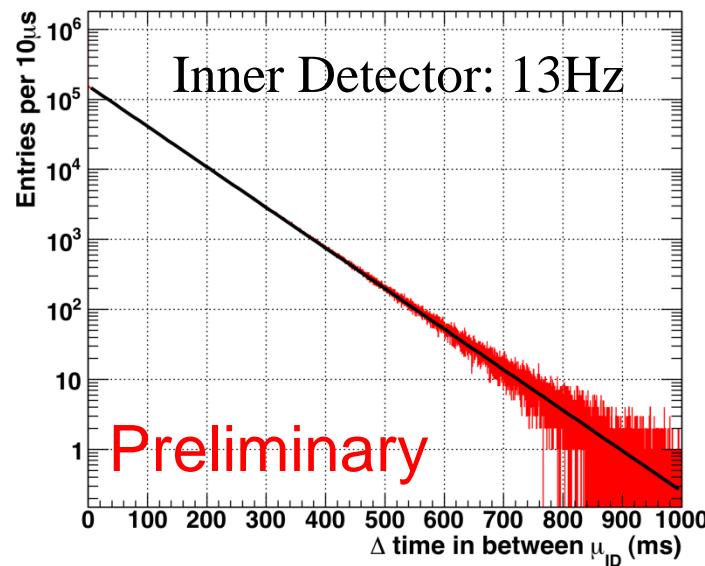


- Background not subtracted
→ good agreement indicates low background level₄₉

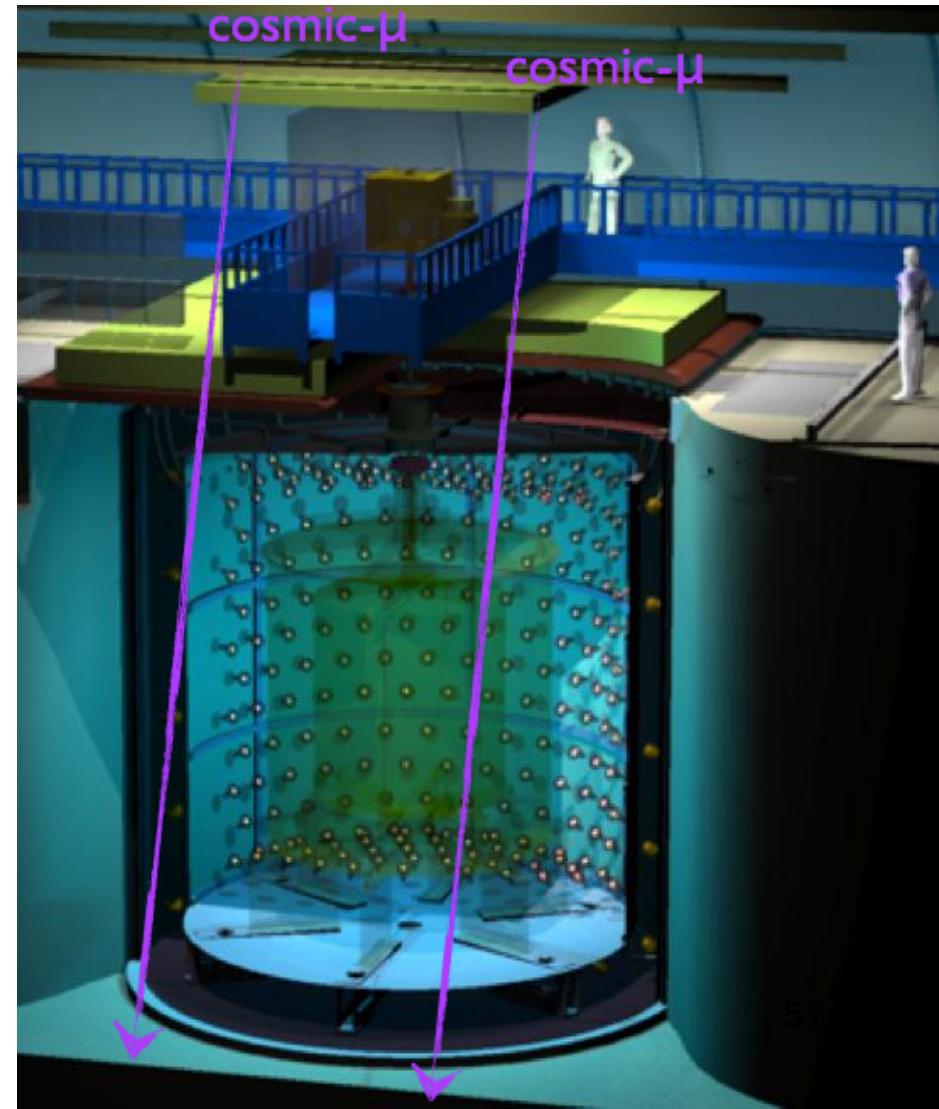
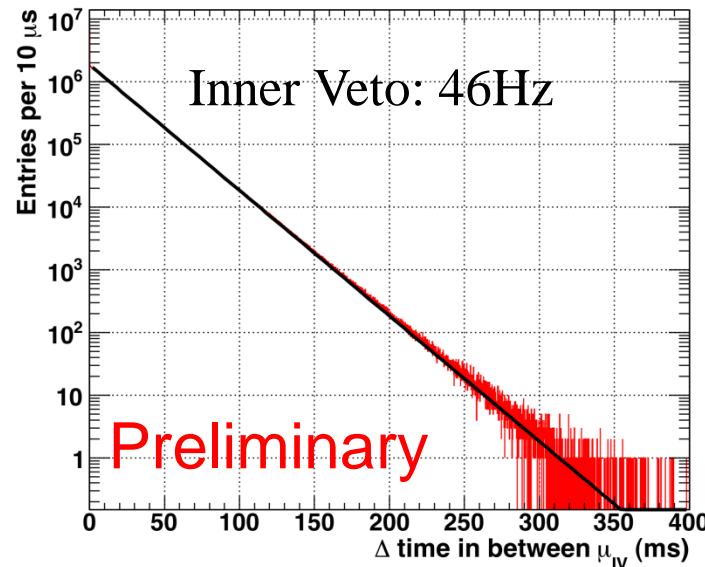
Backgrounds

Cosmic muon rate

Muon rate in Inner Detector: 13 Hz

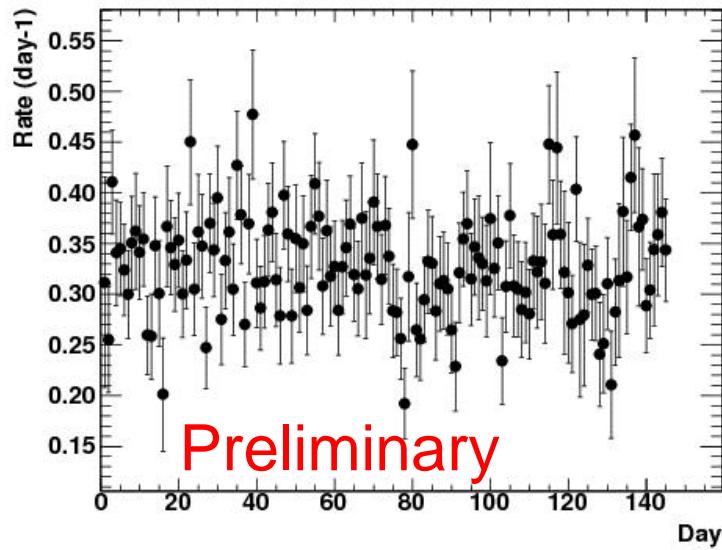
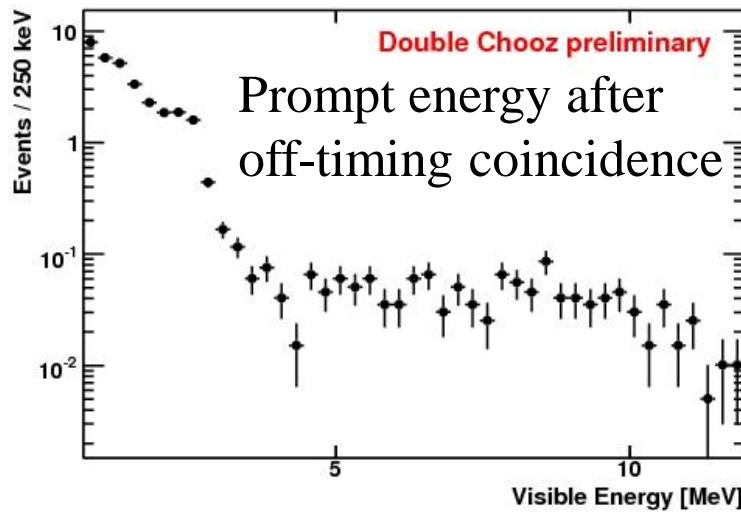


Muon rate in Inner Veto: 46 Hz

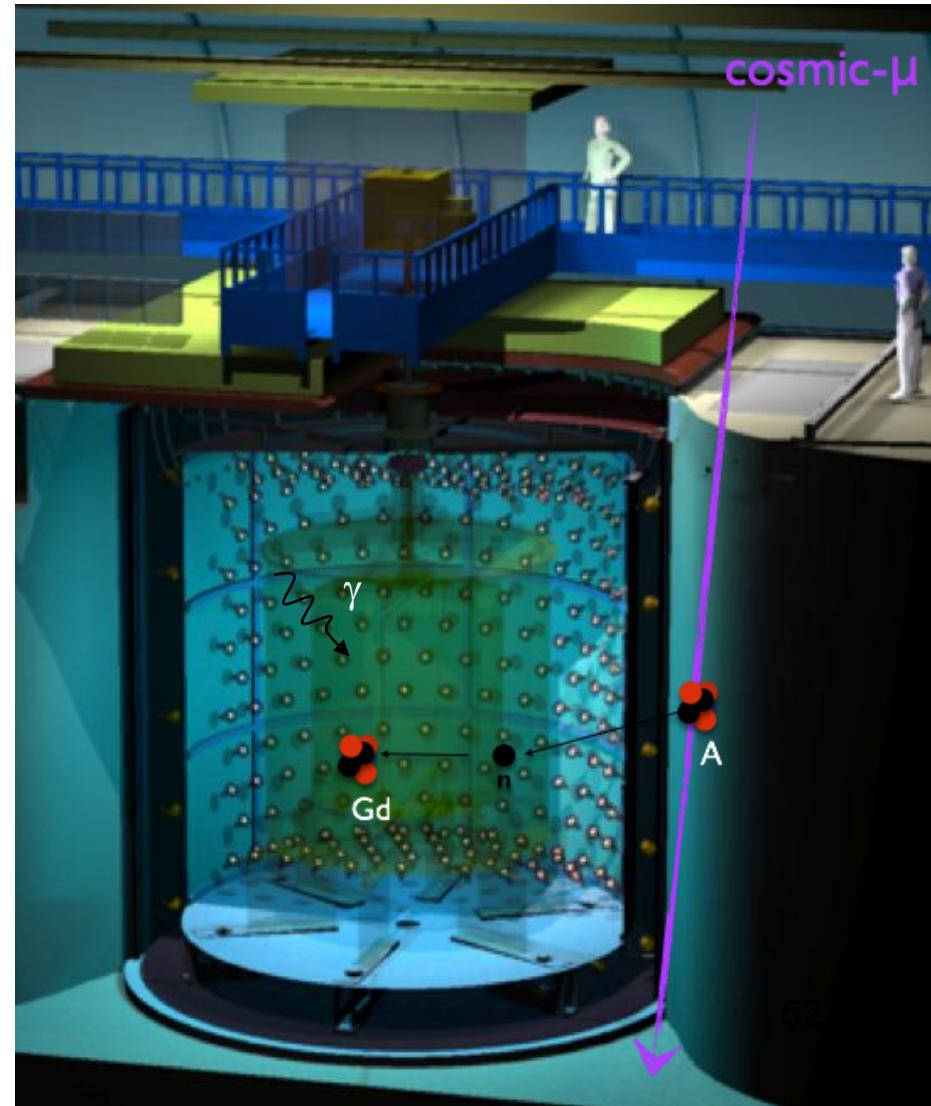


Accidental BG

Accidental Background Prompt Event Visible Energy



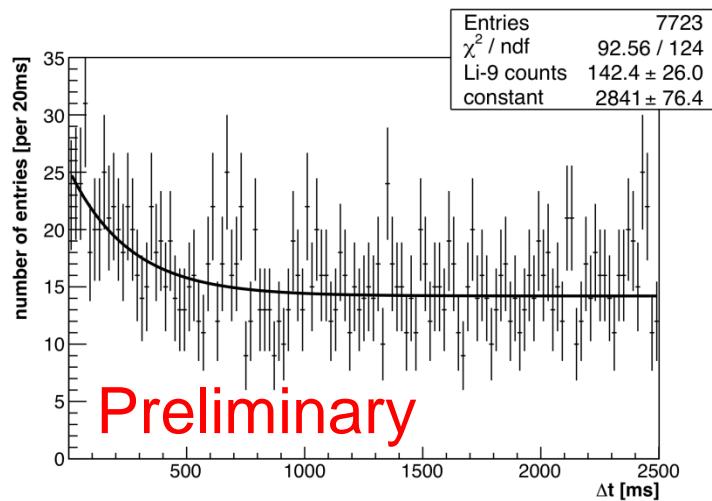
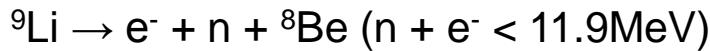
Rate: 0.332 ± 0.004 events/day



Correlated BG: 宇宙線ミューオンによる核破碎事象

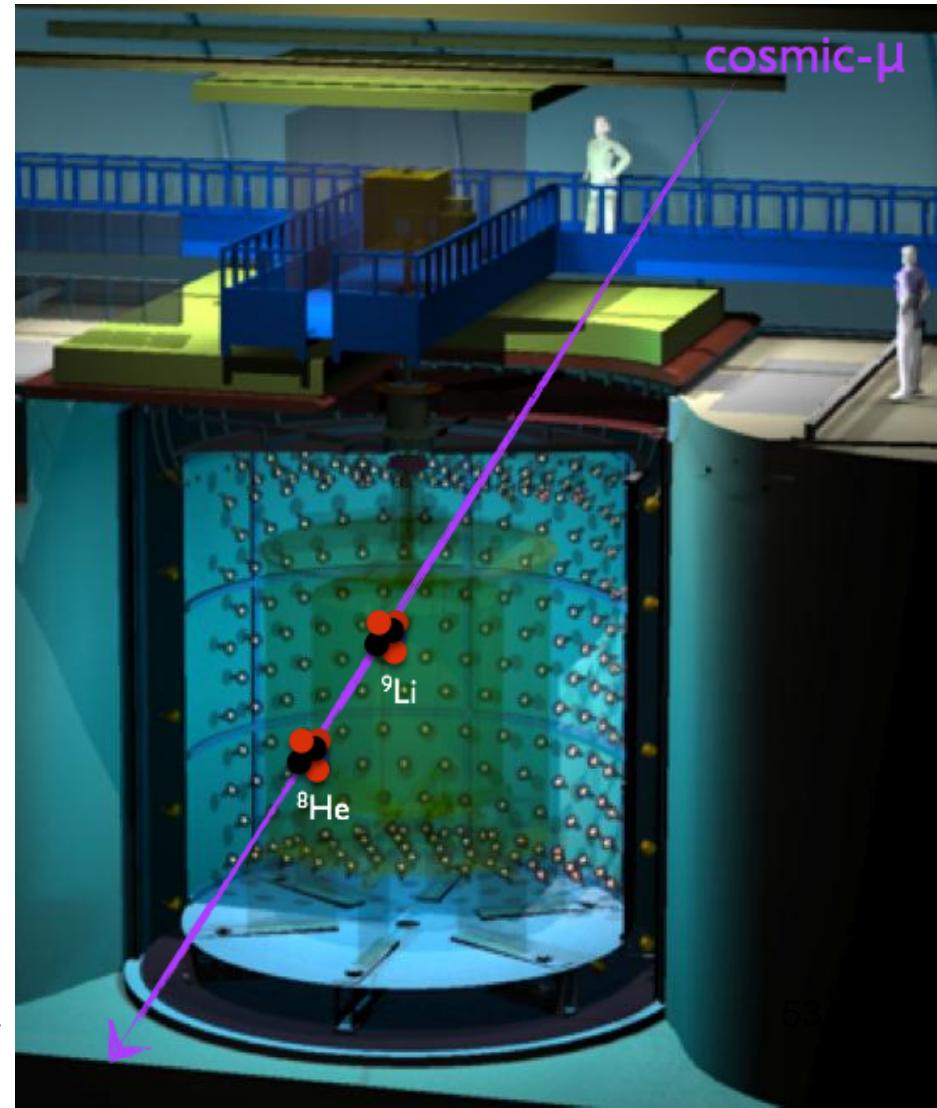
宇宙線ミューオンによる核破碎反応により ${}^9\text{Li}$, ${}^8\text{He}$ などが生成

→ 約200msecの崩壊時間で中性子放出を伴うベータ崩壊



600MeV以上の高エネルギーミューオンとの時間相関からBG事象数を見積もる
→ Reactor OFF の測定結果と一致

Rate: 2.3 ± 1.2 events/day



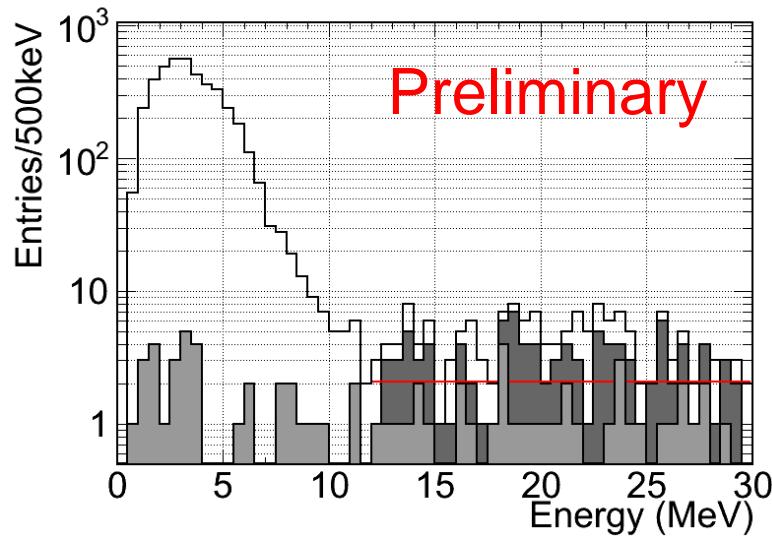
Correlated: 高速中性子

初期信号:

高速中性子による反跳陽子

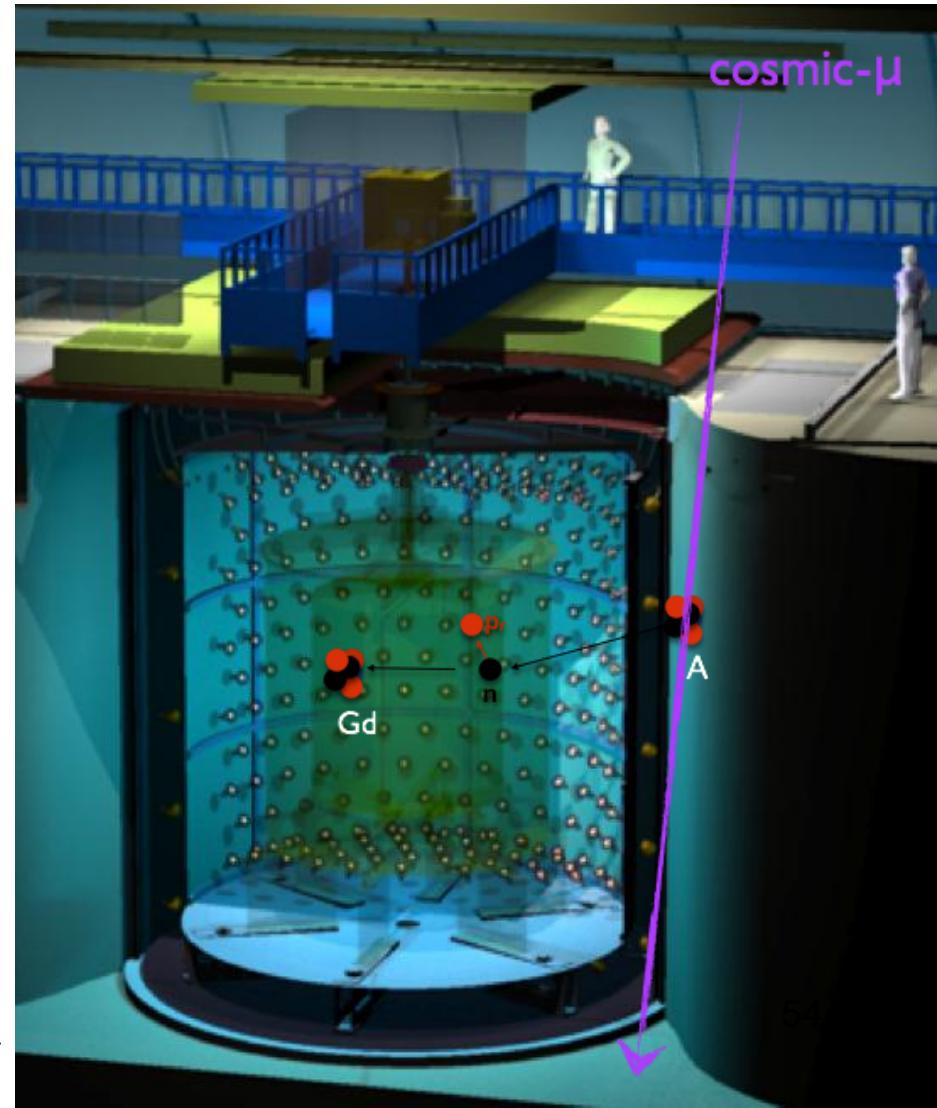
後発信号:

Gdの中性子吸収に伴うガンマ線

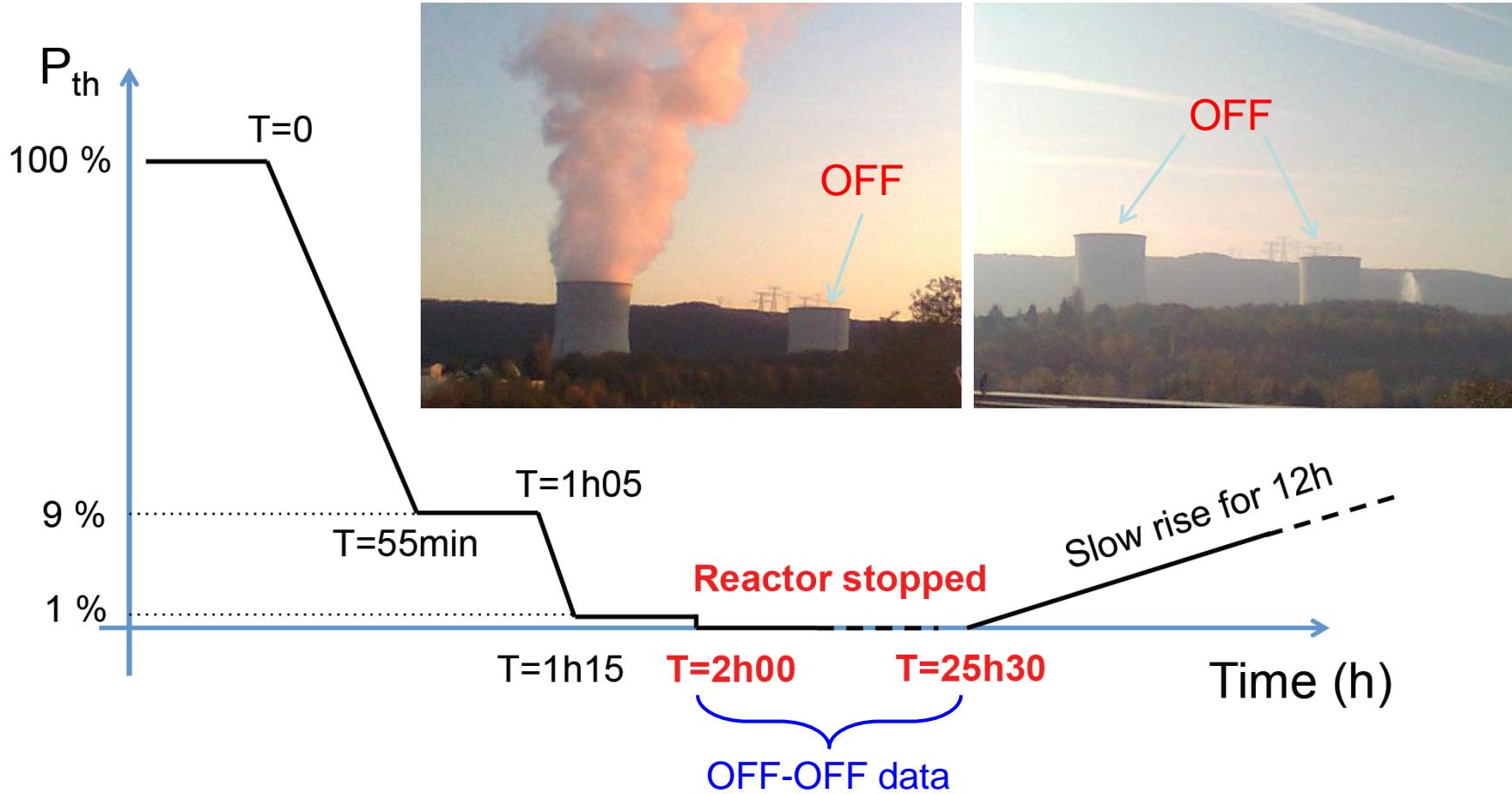


高エネルギー領域のバックグラウンドスペクトルから見積もる

Rate: 0.7 ± 0.5 events/day



Reactor Off-Off



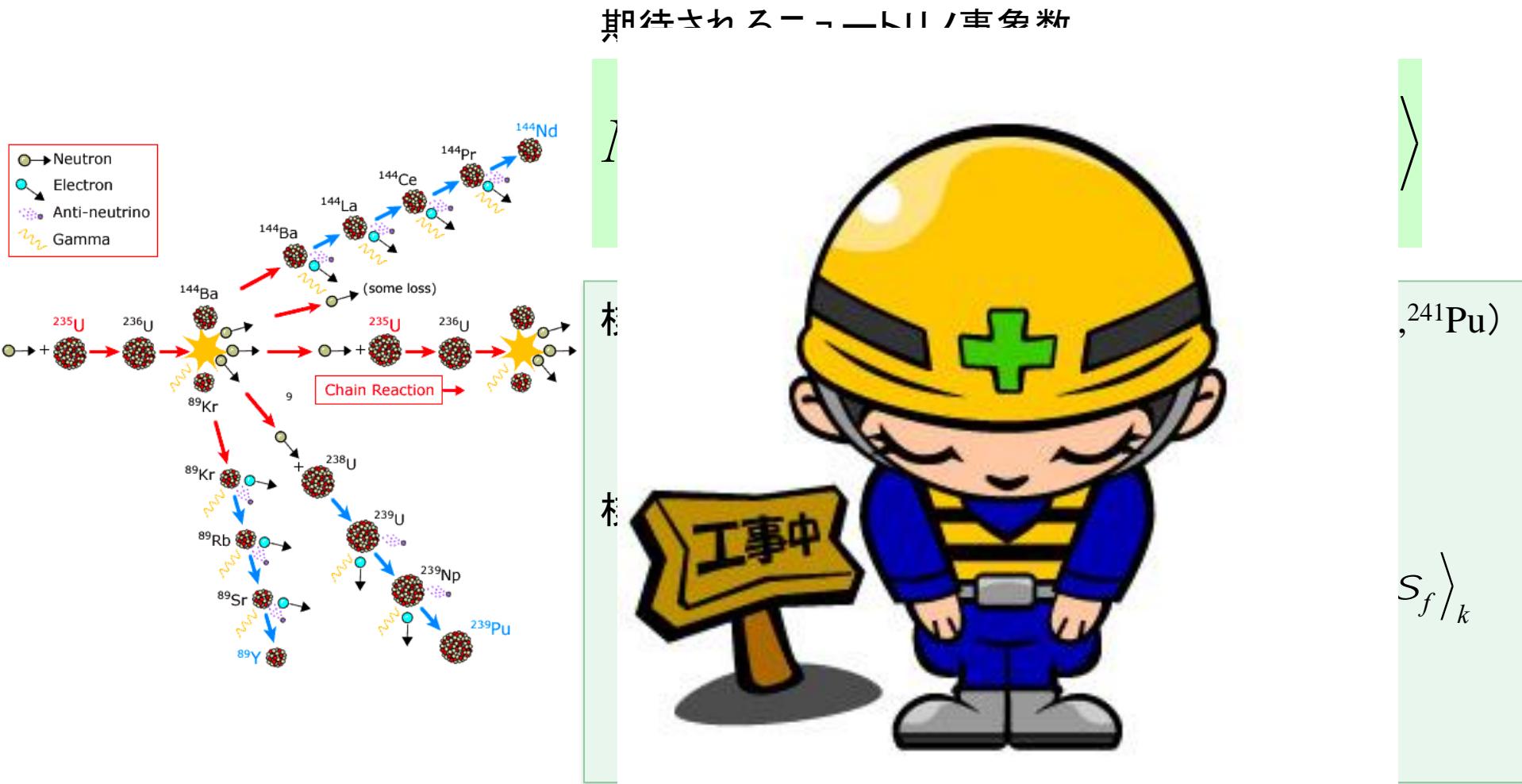
- Reactor 1 stopped for 2 months (refueling)
- Reactor 2 stopped for 1 day (maintenance)

→ In-situ background measurement (Unique capability of Double Chooz)

3 events within 0.7~30 MeV... (see next pages)

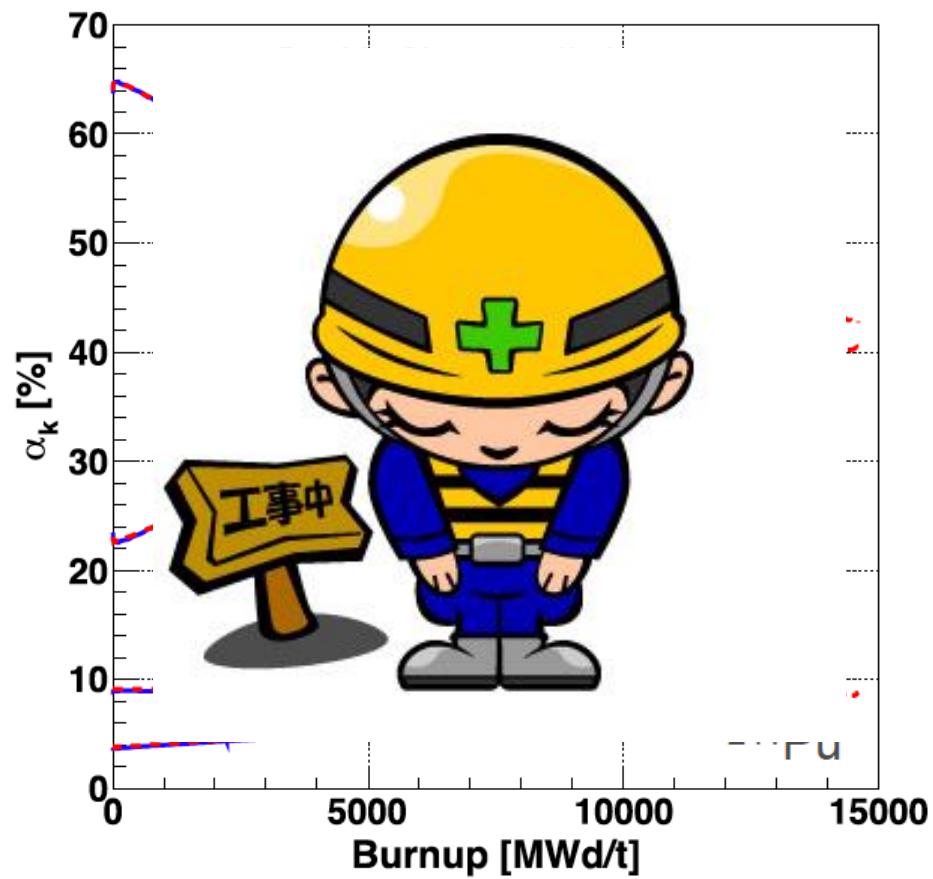
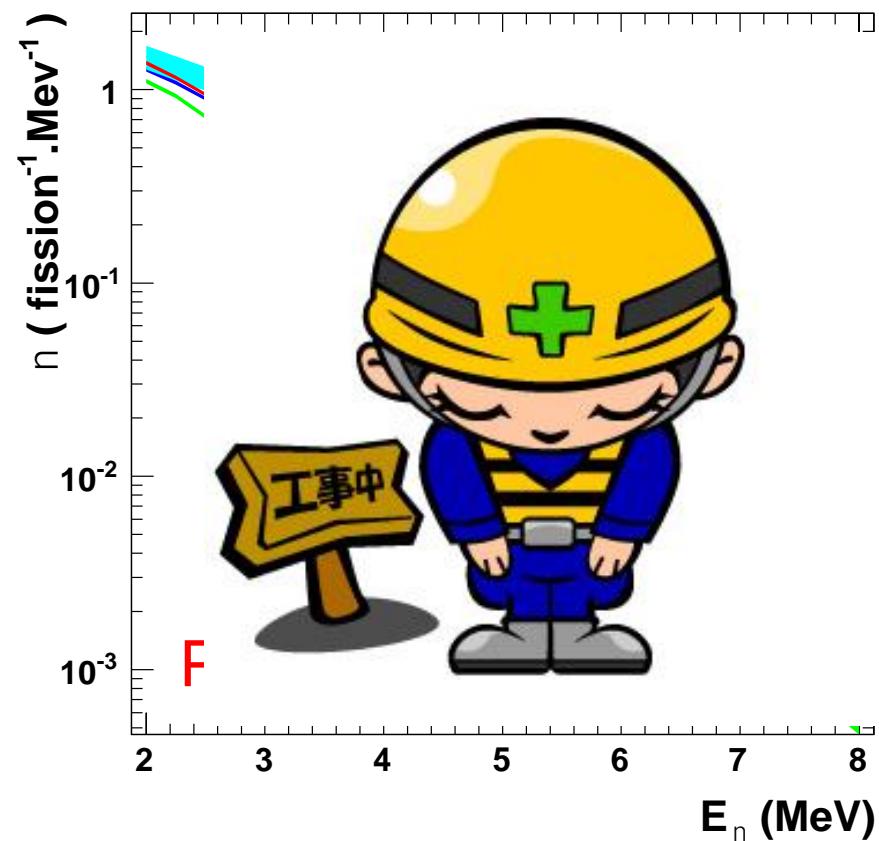
Neutrino oscillation analysis

ニュートリノフラックス計算



Bugey4実験のニュートリノフラックス測定値を元に
Chooz原子炉の燃料比を補正して計算

核分裂あたりのエネルギースペクトルと Chooz原子炉内の燃料比



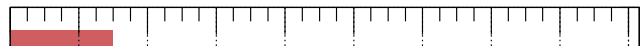
Thermal power

Disaster history



未就誤差0.40%

フラックス計算の系統誤差



y

- Bugey4による測定を使っている

- $\sigma_{\text{per fission}}$ に効いている

•



0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2 1.4 1.6 1.8
Relat Error (%)



Systematic Uncertainties - efficiency

Double Chooz Preliminary

S		
Target fiducial	3 %	
Trigger efficiency	5 %	
Neutrino energy		
Prompt signal	gible	
Delayed signal	6 %	
Time coincidence	5 %	
Energy resolution	6 %	
Live-time		
Muon detection	gible	
Multiplication	gible	
Gd fraction	6 %	
Spill induced	4 %	
Total	0 %	



Oscillation fit strategy

- MC events and Data flow handled in parallel.
- Several statistical tests are done.

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

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

P_b : Pull parameter varying the total rate of background b

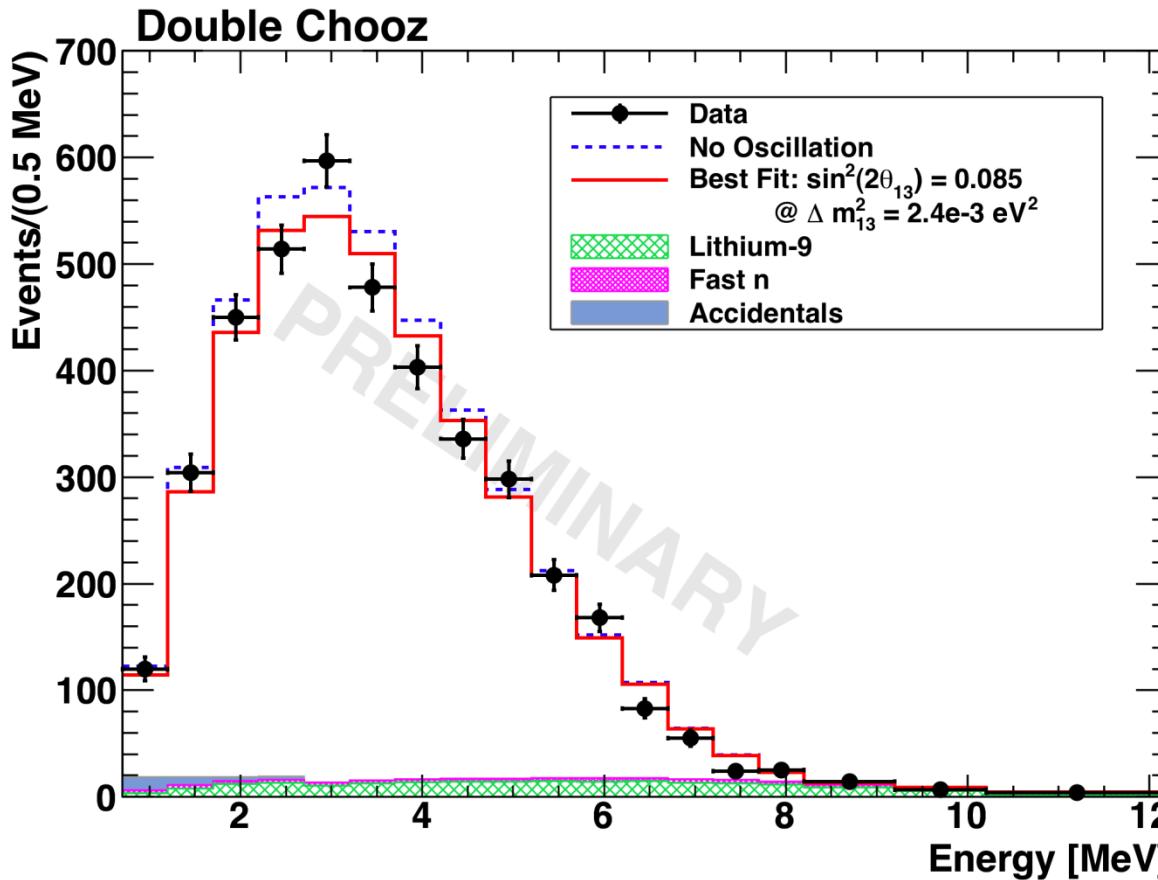
M_{ij}^{signal} : Signal covariance matrix
(reactor v flux etc.)

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

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

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

Results



Rate Only:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.096 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.073(\text{syst})$$

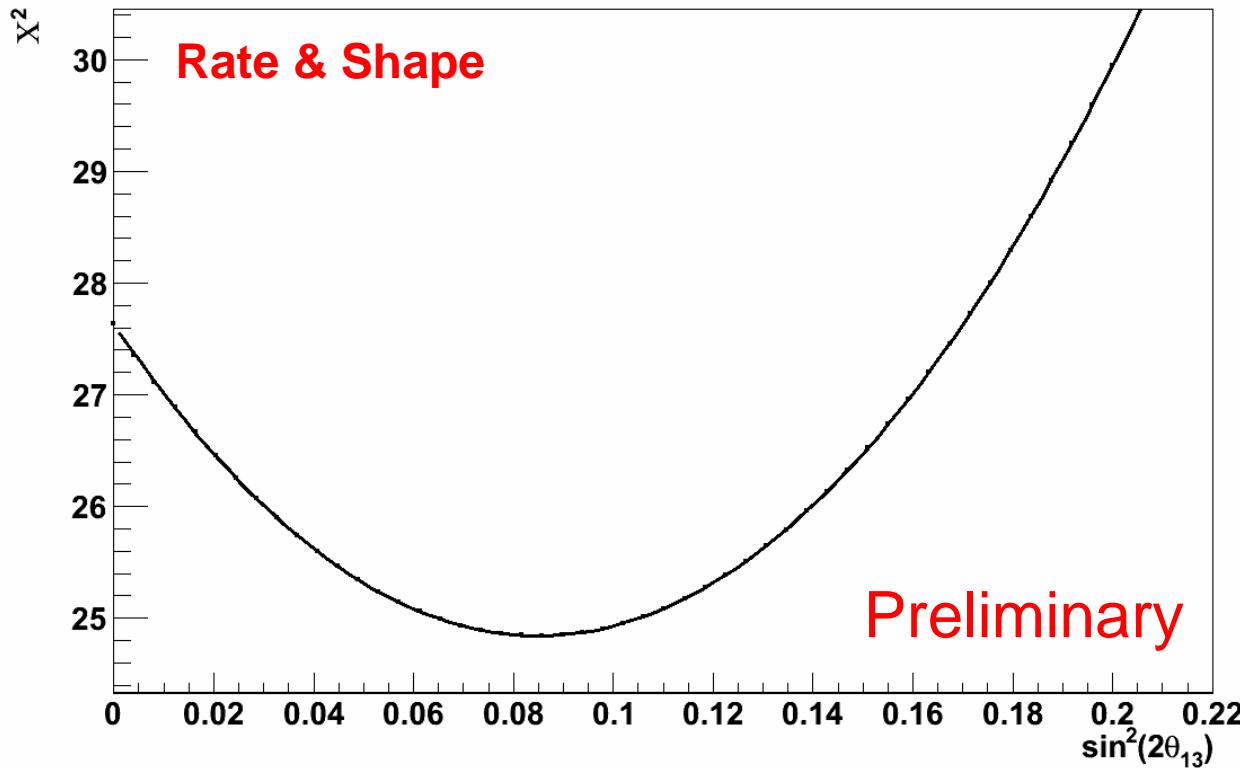
Rate & Shape:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.085 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$$

→ No-Oscillation Excluded at 92.9 %

Results

χ^2 vs. $\sin^2(2\theta_{13})$



Rate Only:

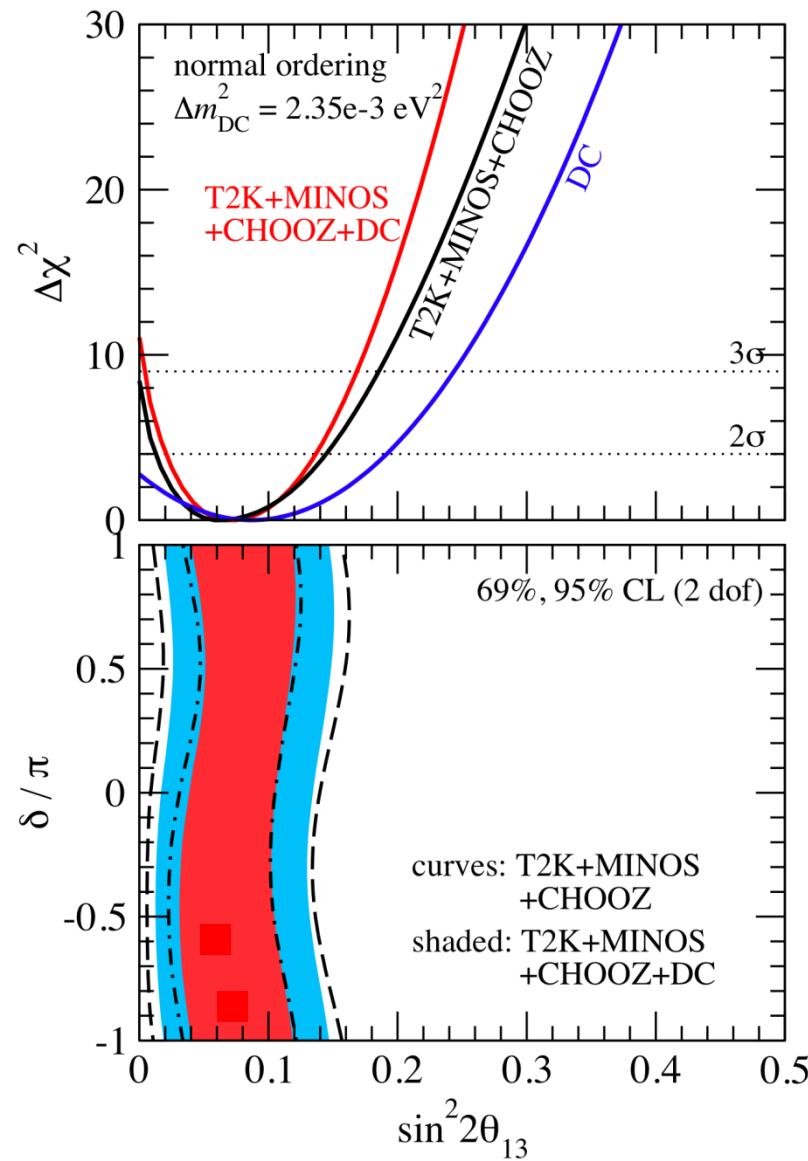
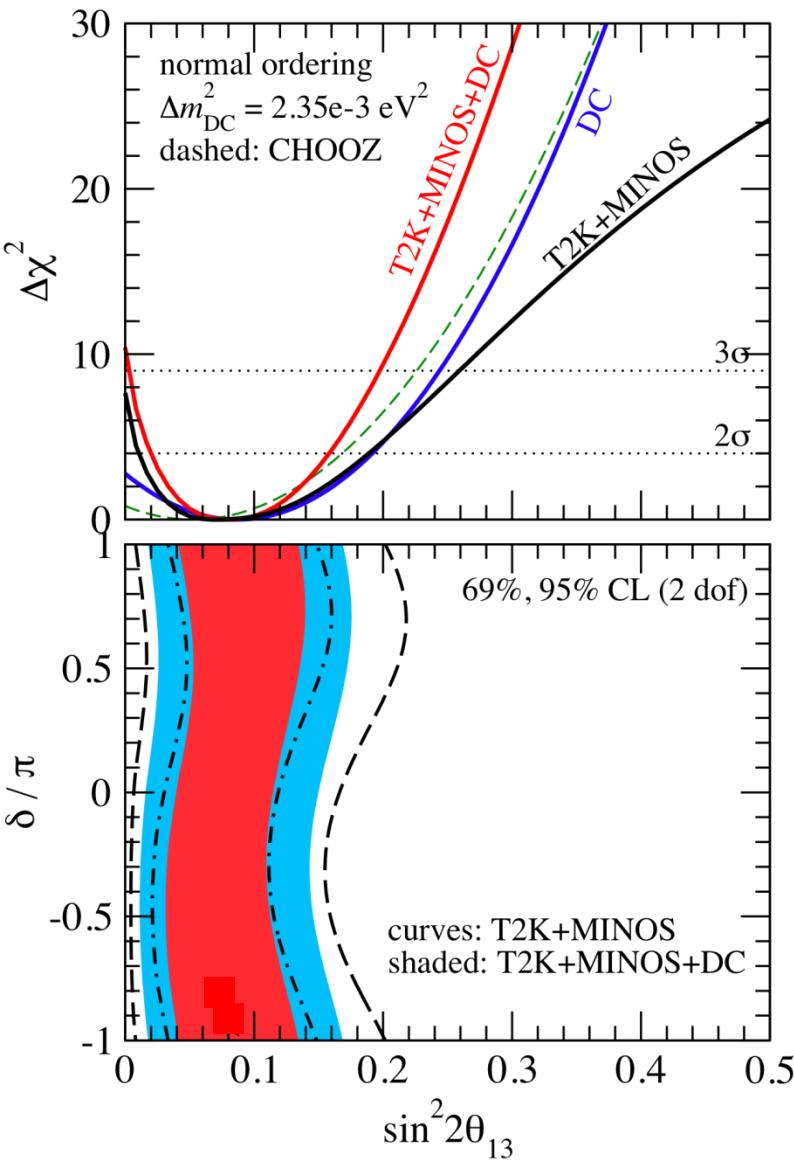
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.096 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.073(\text{syst})$$

Rate & Shape:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.085 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$$

→ No-Oscillation Excluded at 92.9 %

Combined analysis



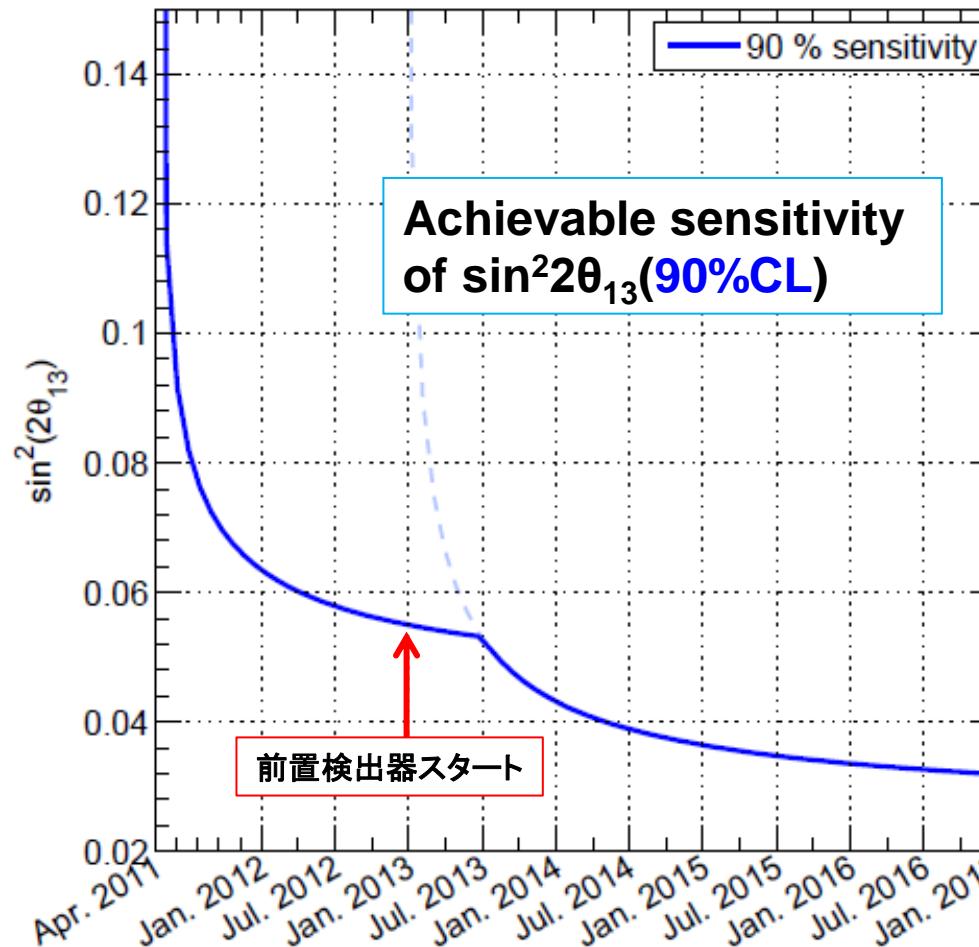


今後のスケジュール

$\sin^2 2\theta_{13}$ 測定到達感度

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

Double Chooz – sensitivity, no oscillations



←現在の物理ランEfficiencyを考慮している。

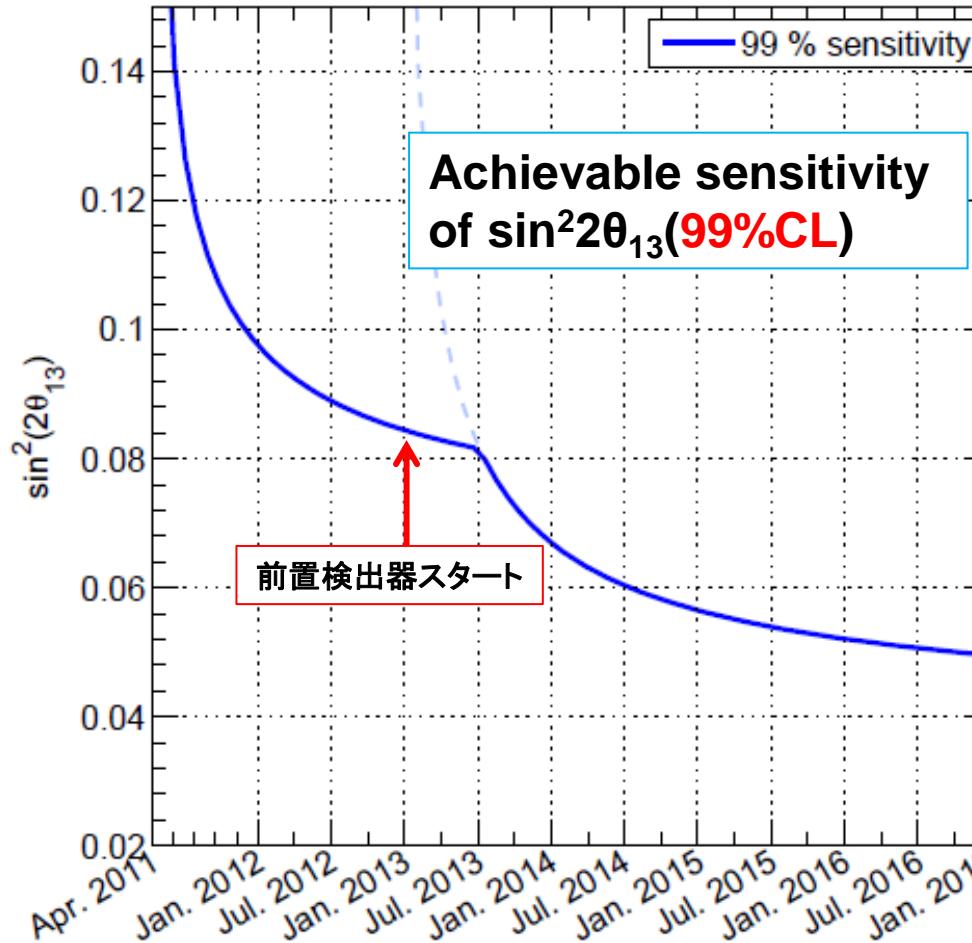
CHOOZ: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ (0.12@global)

5 times better than current limit (5 year measurement)

$\sin^2 2\theta_{13}$ 測定到達感度

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

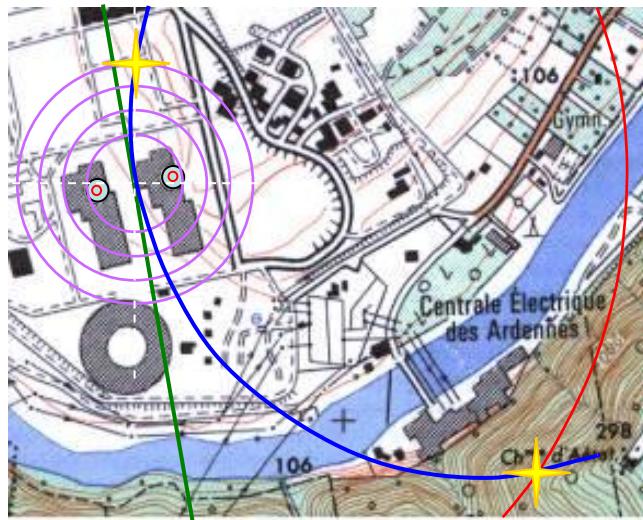
Double Chooz – sensitivity, no oscillations



←現在の物理ランEfficiencyを考慮している。

ライバル

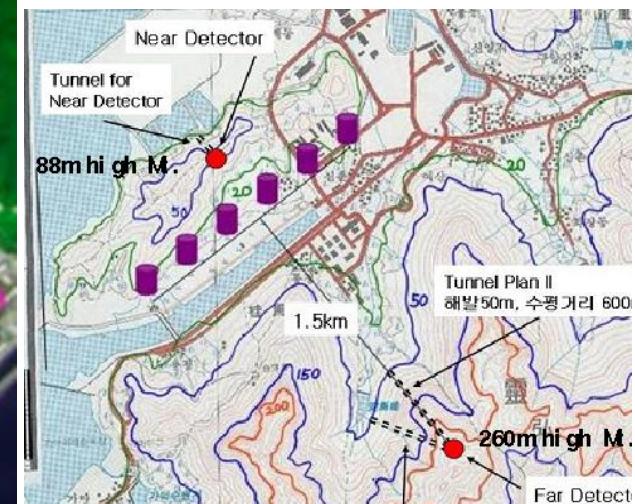
Double Chooz



Daya Bay



RENO

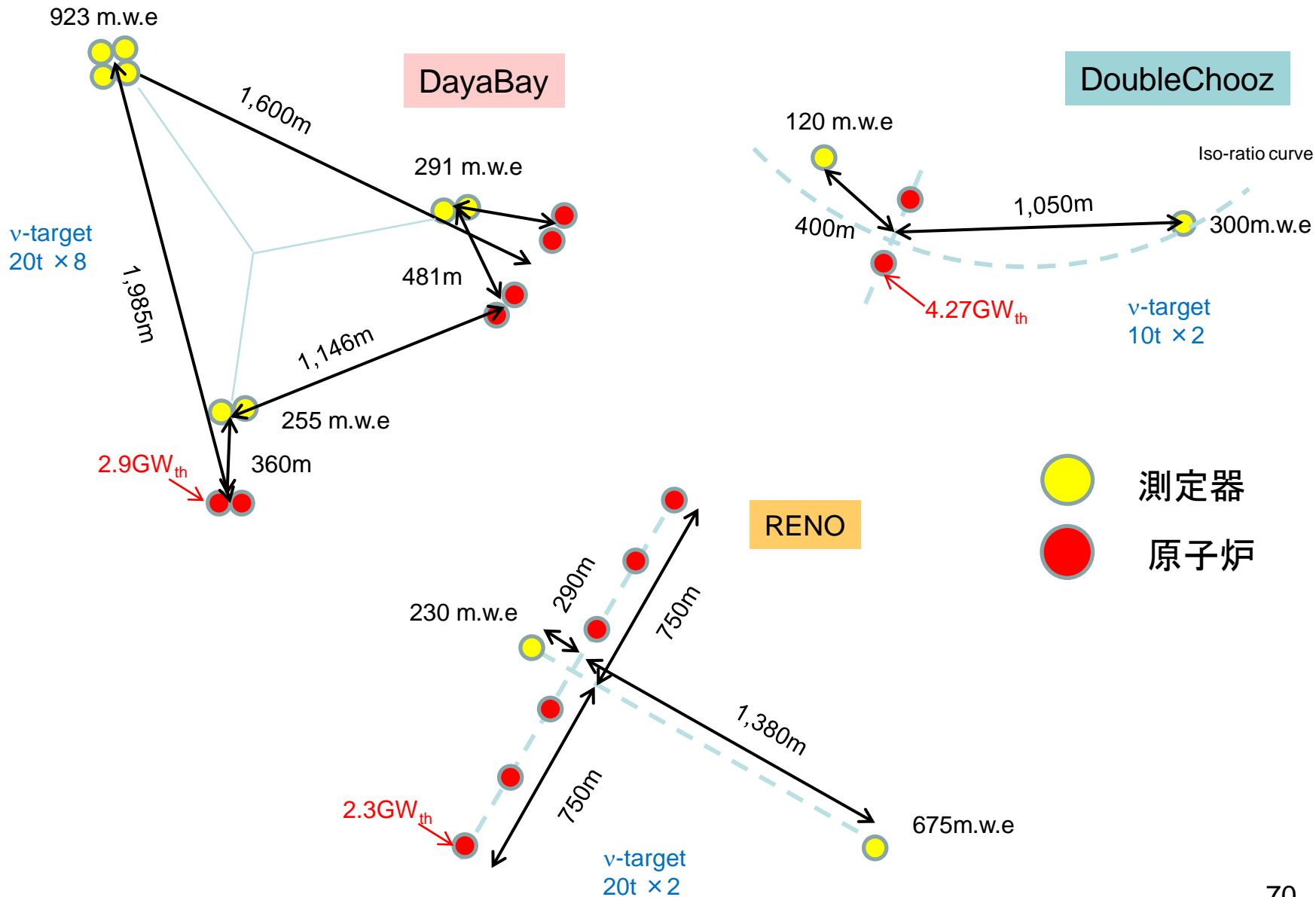


$P=8.2\text{GWth}/2$
 $L=1.05\text{km}$
(2011)

$P=11.6\text{GWth}/4$
 $17.4\text{GWth}/6$ (2011~)
 $L\sim1.8\text{km}$
(2012?)

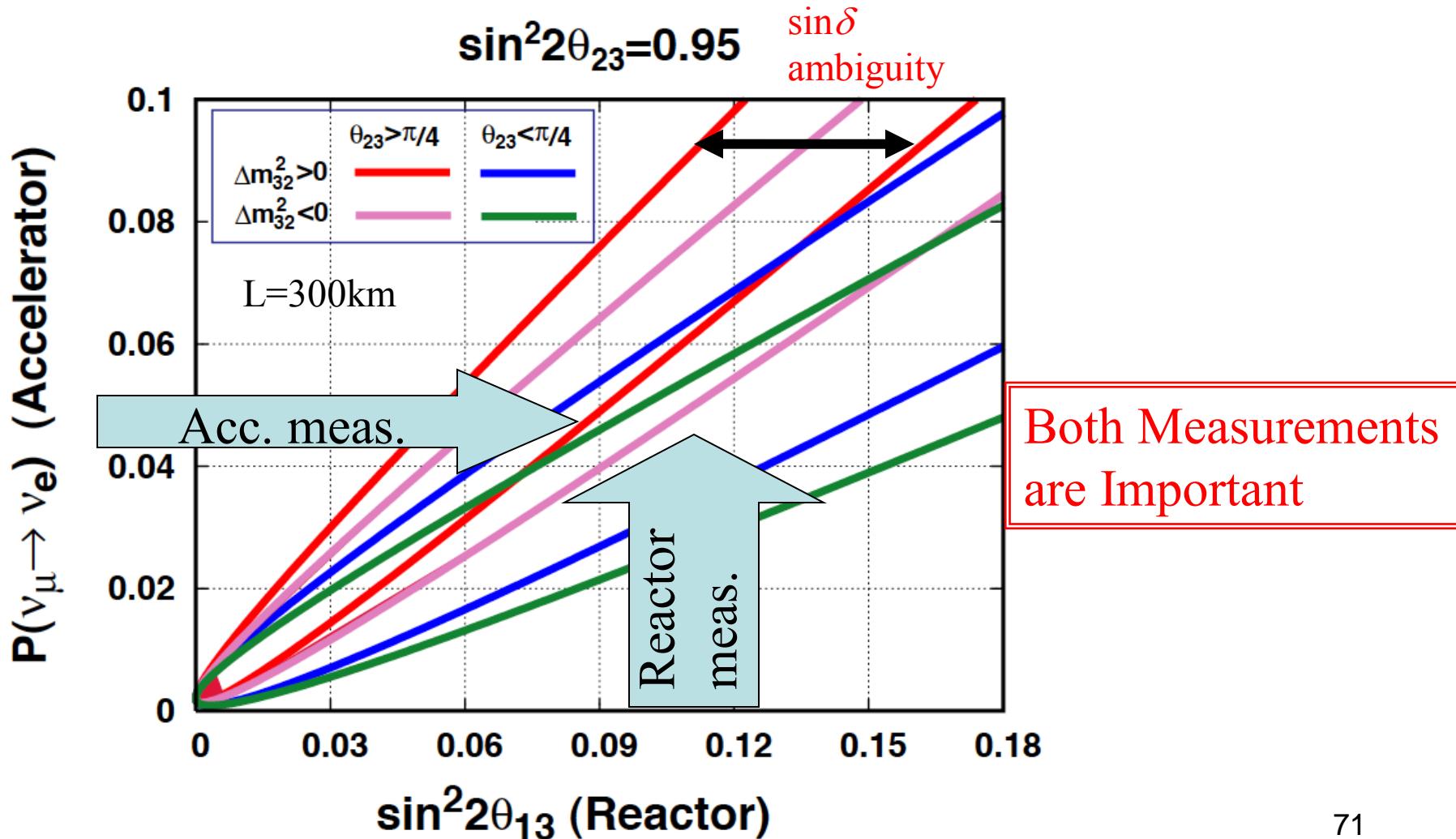
$P=16.1\text{GWth}/6$
 $L\sim1.4\text{km}$
(2011)

原子炉ニュートリノ実験

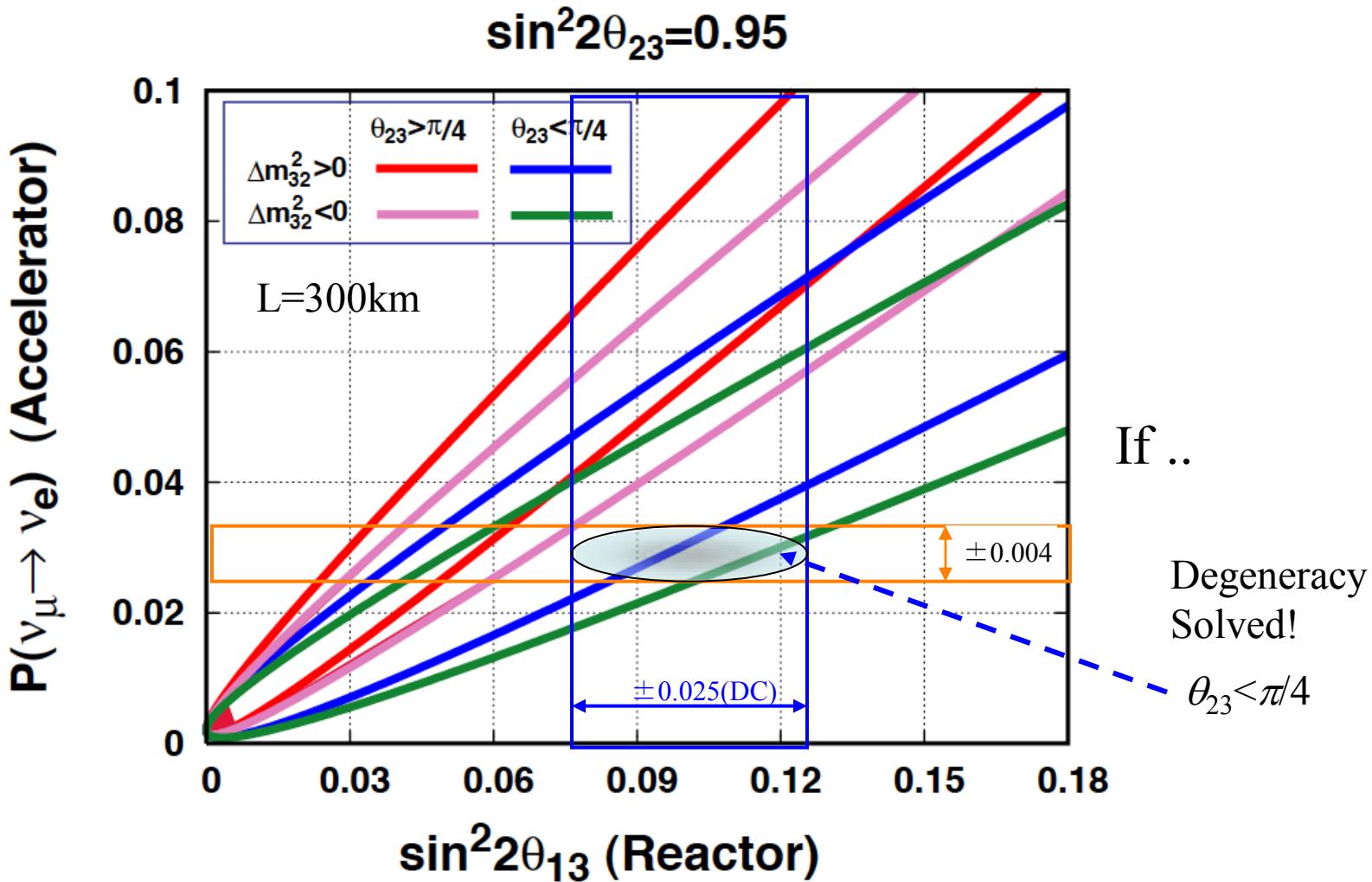


Complementarity to Accelerator- θ_{13}

$$\begin{aligned}
 P_{\text{app}} \simeq & \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})^2} \\
 \pm & \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \sin \delta_{\text{CP}} \sin(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta) \sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{\hat{A}} \\
 + & \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \cos \delta_{\text{CP}} \cos(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta) \sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{\hat{A}} \\
 + & \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}^2},
 \end{aligned}$$

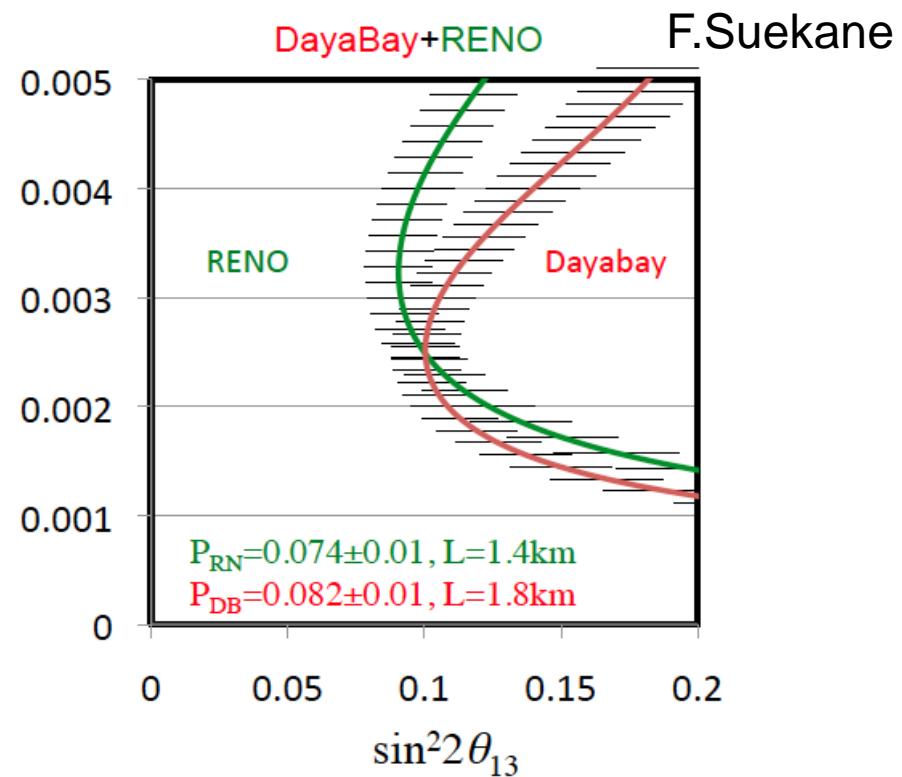
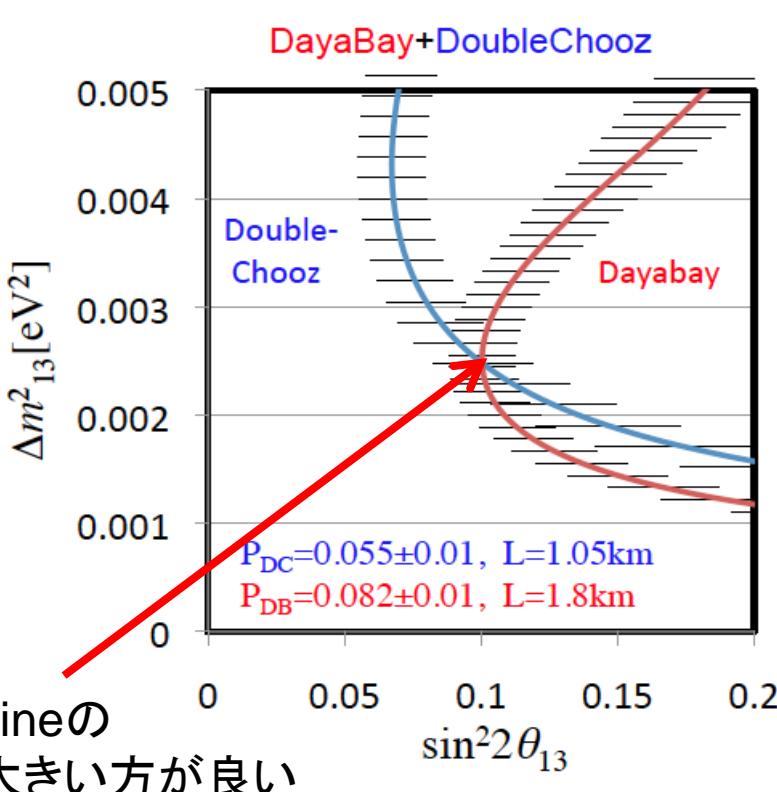


One possible case of Complementarity to Accelerator- θ_{13}



Idea: Combining reactor results

- 原子炉ニュートリノ実験の測定結果は、 $\Delta m_{13}^2 - \sin^2(2\theta_{13})$ のcontour となる
- Baselineの距離の異なる実験の、測定結果を比較することにより、加速器実験とは独立に Δm_{13}^2 を測定できる。





まとめ

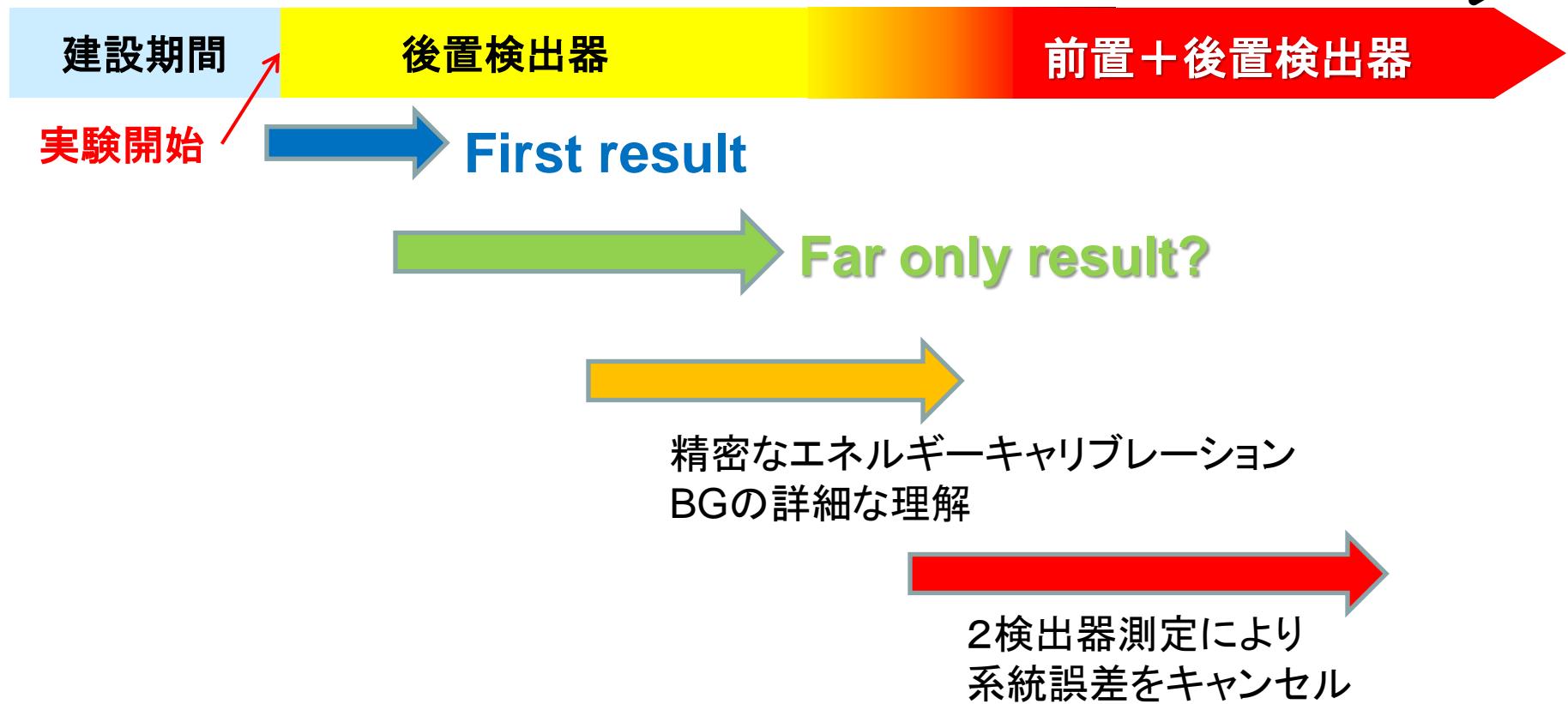
- DoubleChooz実験
 - 4月13日より物理ラン開始。順調にデータを蓄積中
 - 検出器は安定して動作している。
- ニュートリノ振動 最初の結果:~100日分のデータ
 - Rate + Shape Analysis:
 - $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.085 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$
 - Rate Only:
 - $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.093 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.073(\text{syst})$
 - 今後の課題: Systematic errorの見積もりが重要。
- 今後の予定
 - 後置検出器のみの測定
⇒ およそ1.5年のランで、 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.06$ まで探索可能
 - 2013年以降(予定)、前置検出器稼働。“Double” Choozへ。
⇒ さらに、およそ3年間の測定で、 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.03$ まで探索可能

解析スケジュール(私見)

2011

2013

2015



Systematic dominantな実験である。

速やかな θ_{13} 測定のためには、バックグラウンド・検出器性能の
正確な理解が重要