



原子炉実験Double Choozの最新結果と 原子炉実験の現状

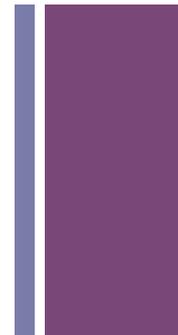
石塚正基（東京工業大学）

on behalf of [the Double Chooz collaboration](#)

2013年8月31日

新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会

+ 内容



- θ_{13} 測定の意義
- なぜ原子炉ニュートリノ実験が重要か
- Double Chooz実験
- 原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} 測定の現状
- 原子炉ニュートリノ実験の今後
- まとめ

+ ニュートリノ振動パラメータ測定現状

- ゼロでない有限の質量
- 弱い相互作用の固有状態と質量の固有状態の混合

⇒ ニュートリノ振動

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

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

- 大気ニュートリノ (SK)
- ニュートリノビーム (K2K, MINOS, T2K)

- 原子炉ニュートリノ (Double Chooz, Daya Bay, RENO)
- ニュートリノビーム (MINOS, T2K)

- 太陽ニュートリノ (SK, SNO etc.)
- 原子炉ニュートリノ (KamLAND)

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

$$\theta_{23} \sim 45^\circ$$

$$\theta_{13} \sim 9^\circ$$

$$\Delta m_{21}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ$$

+ ニュートリノ振動パラメータ測定現状

- ゼロでない有限の質量
- 弱い相互作用の固有状態と質量の固有状態の混合

⇒ ニュートリノ振動

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

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

- 大気ニュートリノ (SK)
- ニュートリノビーム (K2K, MINOS, T2K)

- 原子炉ニュートリノ (Double Chooz, Daya Bay, RENO)
- ニュートリノビーム (MINOS, T2K)

- 太陽ニュートリノ (SK, SNO etc.)
- 原子炉ニュートリノ (KamLAND)

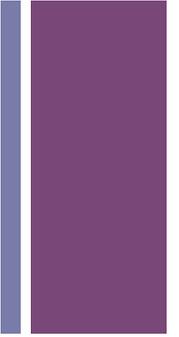
$$|\Delta m_{32}^2| \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\theta_{23} \sim 45^\circ$$

$$\theta_{13} \sim 9^\circ$$

$$\Delta m_{21}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ$$



θ_{13} 測定の意味

+ ニュートリノ物理の中長期的な課題

- CP対称性の破れ
- 質量の階層性
- $\theta_{23}=45^\circ$ からのずれ
- ニュートリノ質量の絶対値
- マヨラナ粒子 or ディラック粒子？

+ ニュートリノ物理の中長期的な課題

- CP対称性の破れ
 - 質量の階層性
 - $\theta_{23}=45^\circ$ からのずれ
 - ニュートリノ質量の絶対値
 - マヨラナ粒子 or ディラック粒子？
- 長基線ニュートリノ振動実験
 - 大気ニュートリノ観測による測定を目指す

+ ニュートリノ物理の中長期的な課題

- CP対称性の破れ
 - 質量の階層性
 - $\theta_{23}=45^\circ$ からのずれ
- 長基線ニュートリノ振動実験
 - 大気ニュートリノ観測
- による測定を目指す

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

$$\begin{aligned}
 a(x) &= \sqrt{2} G_F N_e(x) \\
 J_r &\equiv c_{12} s_{12} c_{13}^2 s_{13} c_{23} s_{23}
 \end{aligned}$$

+ ニュートリノ物理の中長期的な課題

- CP対称性の破れ
 - 質量の階層性
 - $\theta_{23}=45^\circ$ からのずれ
- 長基線ニュートリノ振動実験
 - 大気ニュートリノ観測
- による測定を目指す

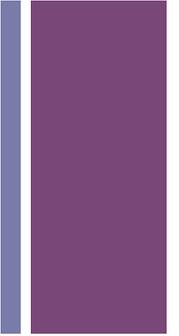
P 測定の実現のためには θ_{13} を精度よく測定することが重要
 \Rightarrow 原子炉ニュートリノ実験による測定

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

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

$$\pm \cos 2\theta_{13} \sin^2 2\theta_{13} s_{23}^2 \left(\frac{4Ea(x)}{\Delta m_{31}^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$

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



なぜ原子炉ニュートリノ実験が重要か

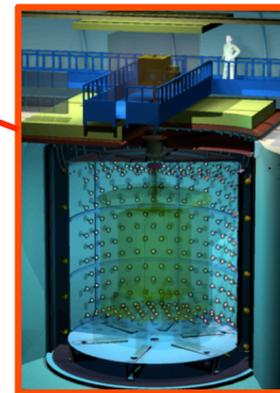
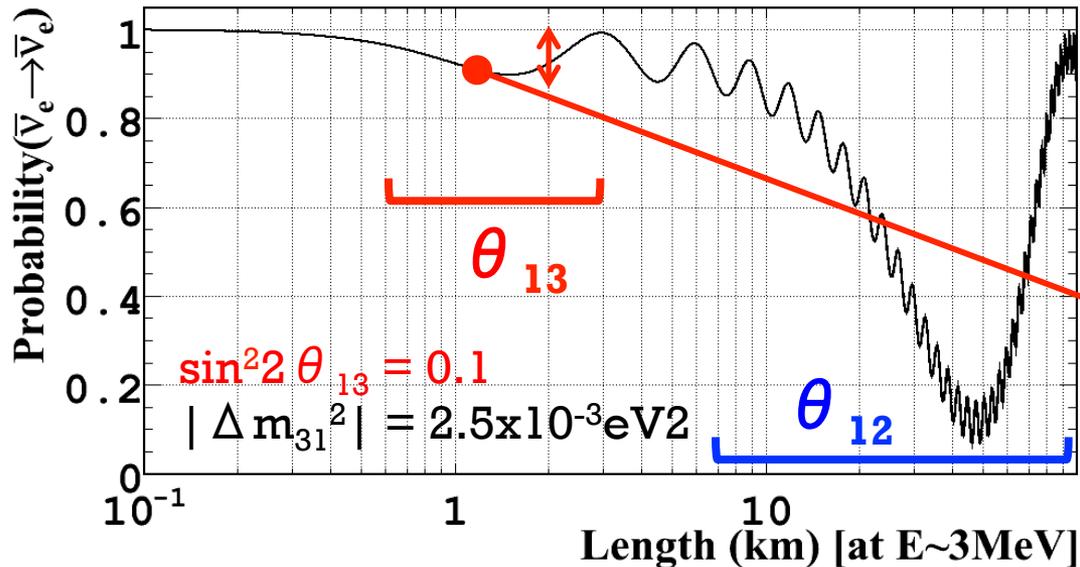
+ 原子炉ニュートリノを用いた θ_{13} の測定

- 原子炉は強力なニュートリノ発生源
- パラメータの縮退なしに θ_{13} の直接測定が可能

原子炉ニュートリノの生存確立

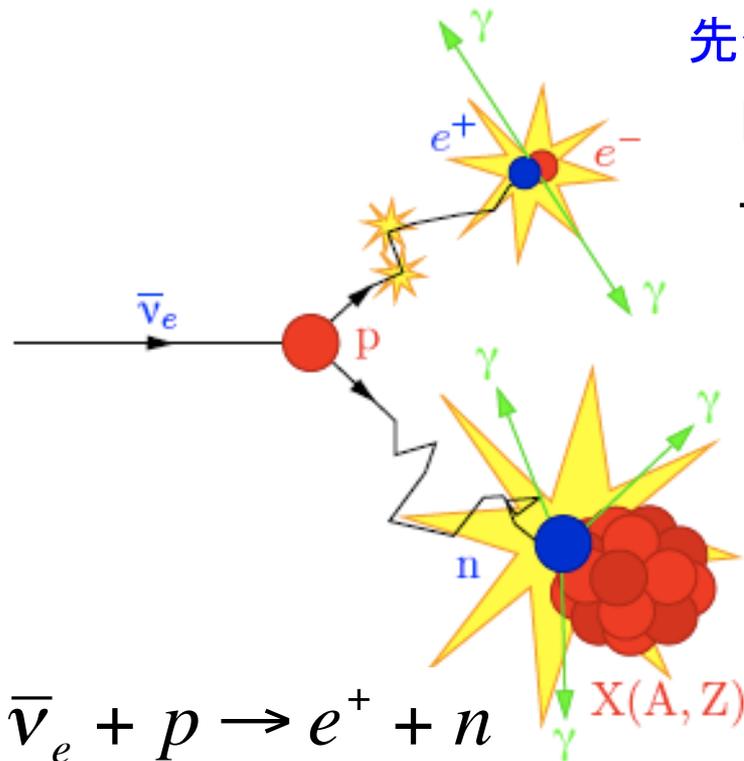
$$P[\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e] \cong 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right)$$

$L \sim 1\text{km}$ では単純な2世代振動の式が成り立つ



+ 原子炉ニュートリノを用いた θ_{13} の測定

- 原子炉は強力なニュートリノ発生源
- パラメータの縮退なしに θ_{13} の直接測定が可能
- 遅延同時計測法によりバックグラウンドが抑えられる



先発信号:

陽電子 + 対消滅によるガンマ線: **1 ~ 8 MeV**

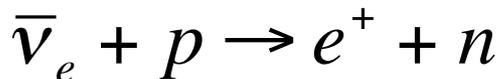
ニュートリノエネルギー: $E_\nu = E_{vis} + 0.8 \text{ MeV}$

時間差:

$\Delta t \sim$ **30 μ sec for n-Gd**
(200 μ sec for n-H)

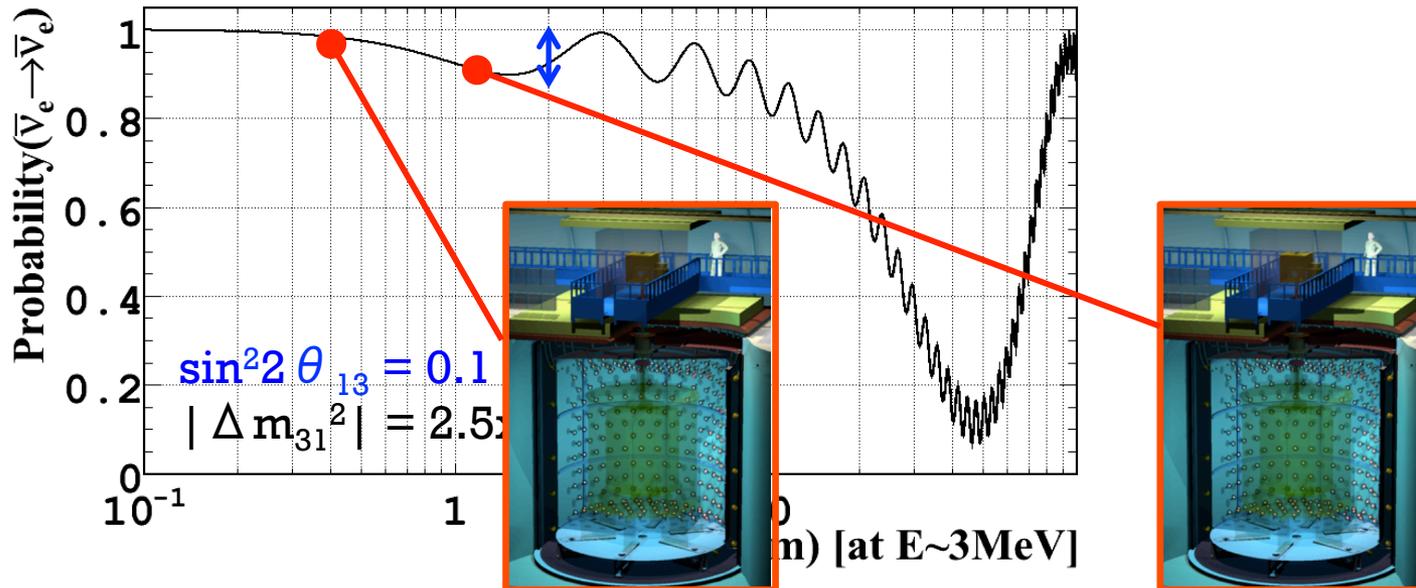
後発信号:

- Gdの中性子捕獲に伴うガンマ線: **8 MeV**
- (水素の中性子捕獲に伴うガンマ線: **2.2 MeV**)

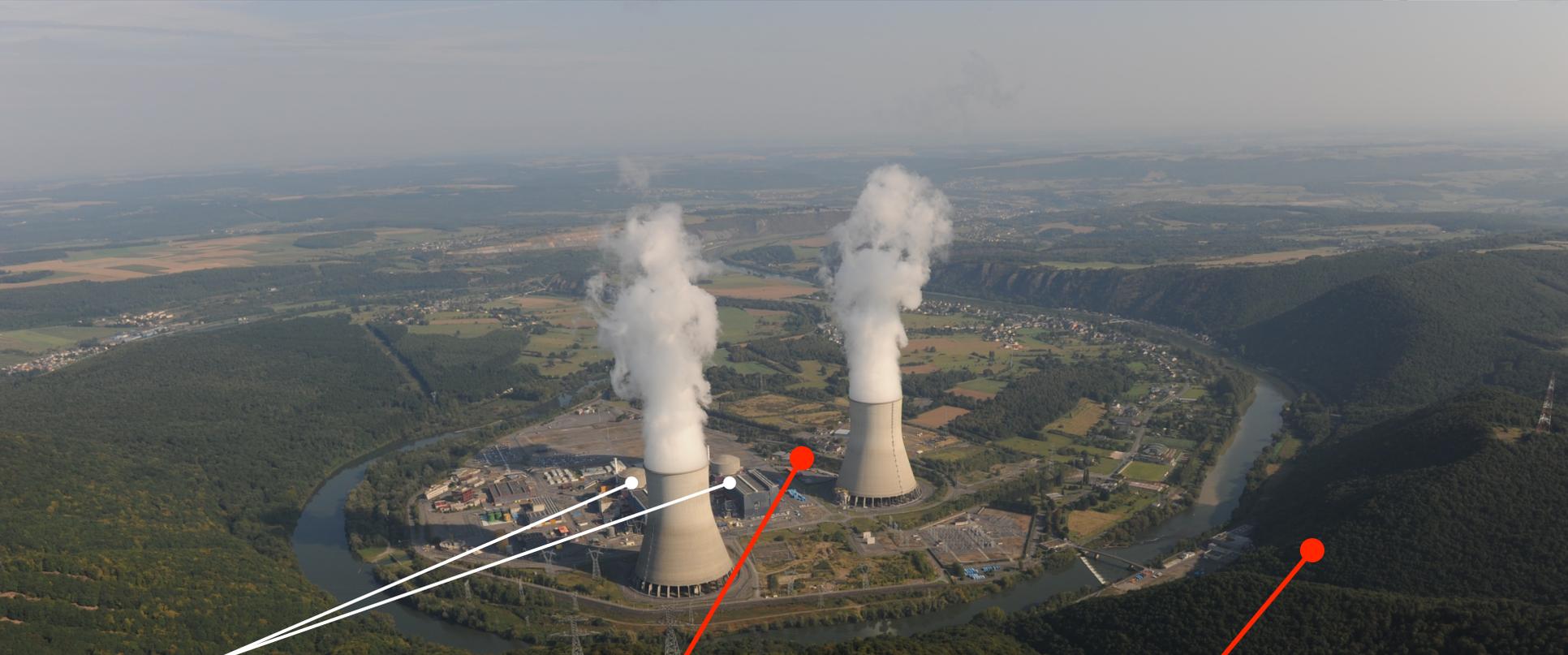


+ 原子炉ニュートリノを用いた θ_{13} の測定

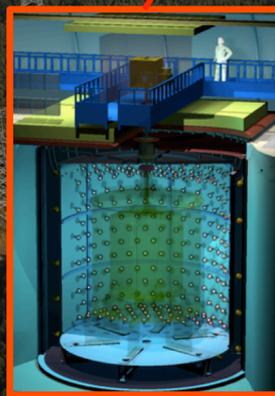
- 原子炉は強力なニュートリノ発生源
- パラメータの縮退なしに θ_{13} の直接測定が可能
- 遅延同時計測法によりバックグラウンドが抑えられる
- ニュートリノフラックスは 2% 以上の精度で決定される
- 原子炉から異なる距離での測定の比較により系統誤差が抑えられる



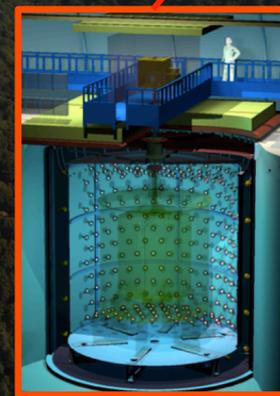
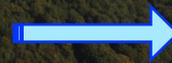
+ Double Chooz実験



Chooz原子炉
4.27GW_{th} x 2 cores



前置検出器
L = 400m
10m³ target
120m.w.e.
建設中



後置検出器
L = 1050m
10m³ target
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**



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**



USA

**U. Alabama
ANL
U. Chicago
Columbia U.
UCDavis
Drexel U.
IIT
KSU
LLNL
MIT
U. Notre Dame
U. Tennessee**

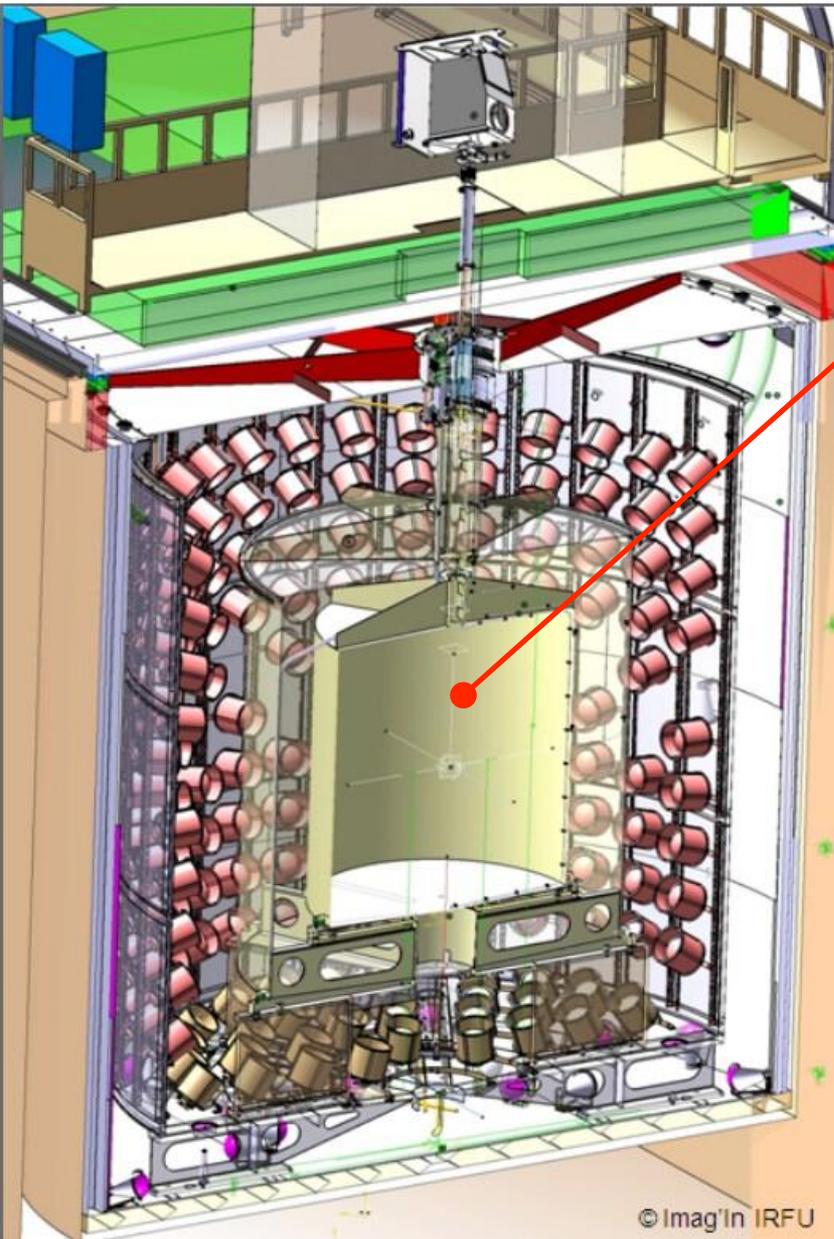


Spokesperson:
H. de Kerret (IN2P3)

Project Manager:
Ch. Veysi ere (CEA-Saclay)

Web Site:
www.doublechooz.org/

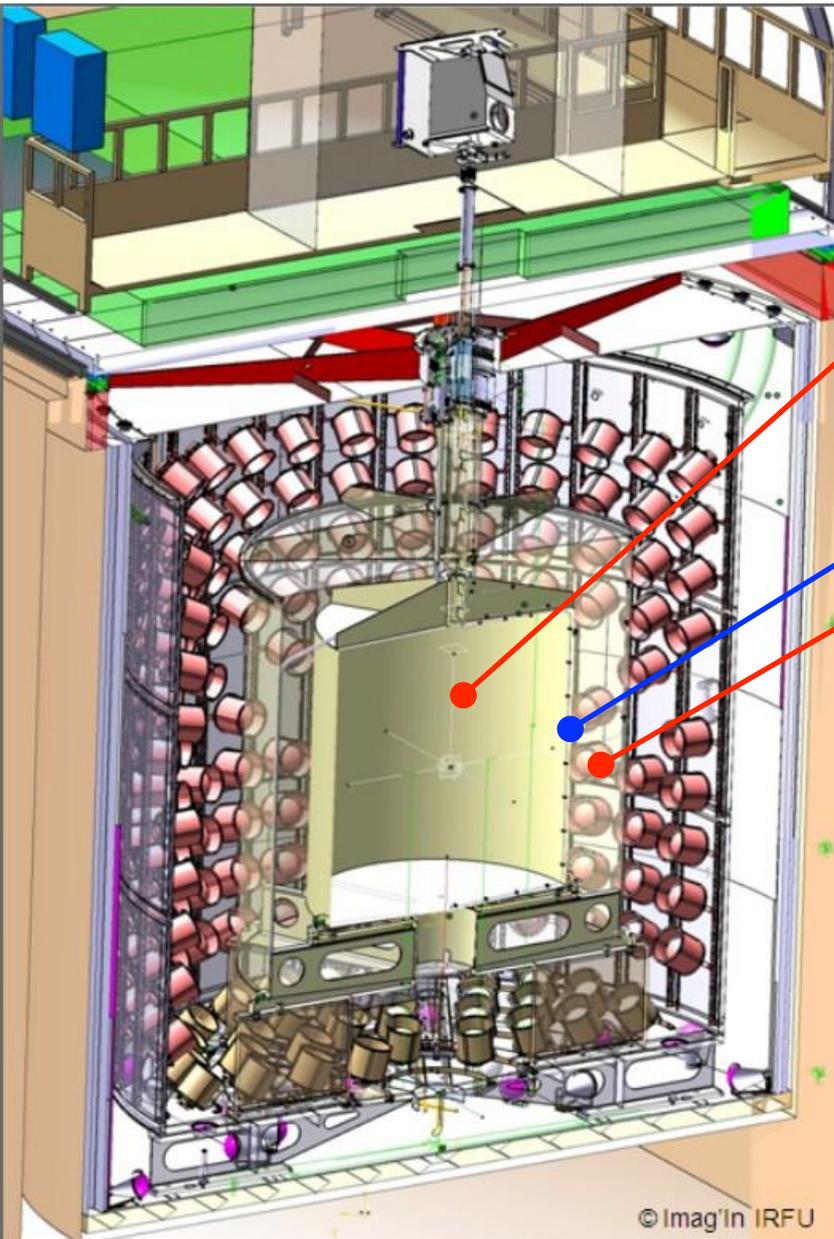
+ Double Chooz検出器



ニュートリノ標的
(Gdを含む液体シンチレータ)

- ニュートリノ事象に対する有効体積
- Gdによる中性子捕獲

+ Double Chooz検出器



ニュートリノ標的
(Gdを含む液体シンチレータ)

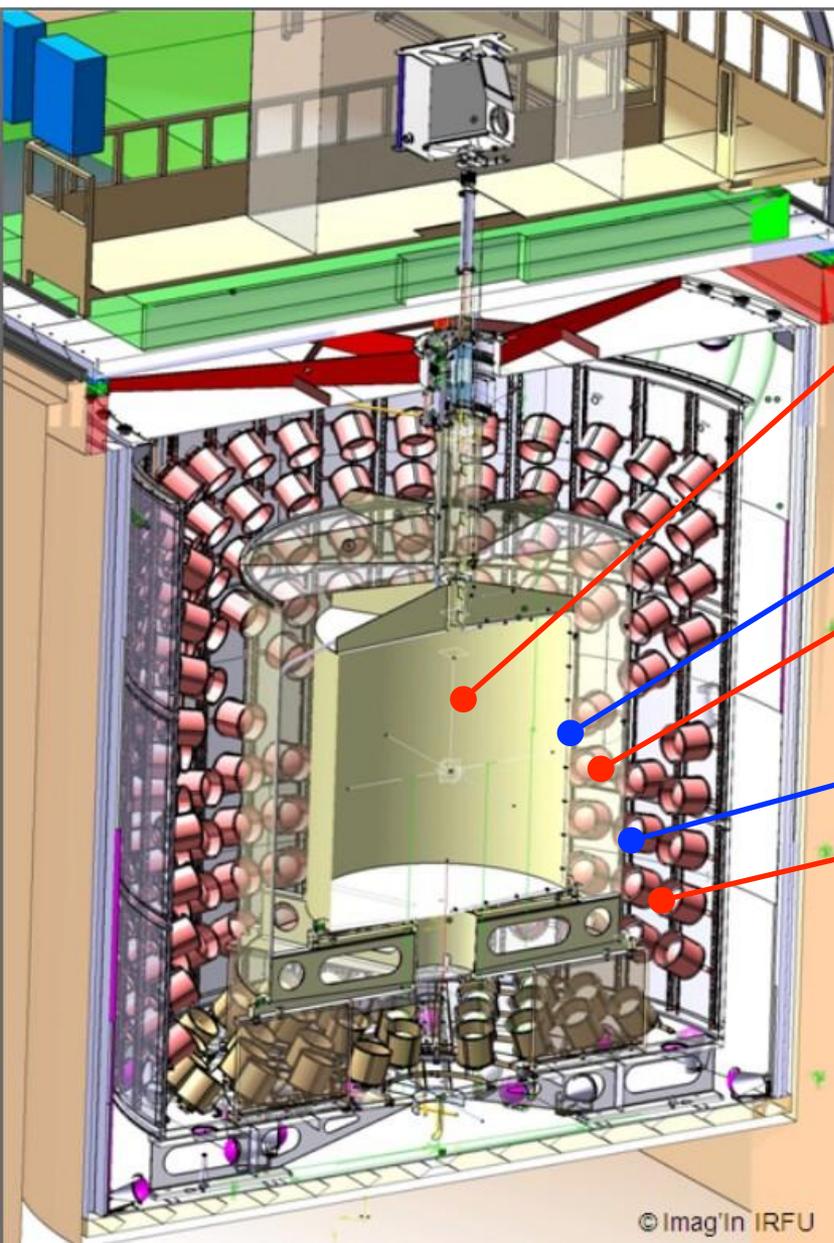
- ニュートリノ事象に対する有効体積
- Gdによる中性子捕獲

アクリルタンク -----

ガンマキャッチャー (液体シンチレータ)

- 中性子捕獲によるガンマ線のエネルギー測定

+ Double Chooz検出器



ニュートリノ標的
(Gdを含む液体シンチレータ)

- ニュートリノ事象に対する有効体積
- Gdによる中性子捕獲

アクリルタンク -----

ガンマキャッチャー (液体シンチレータ)

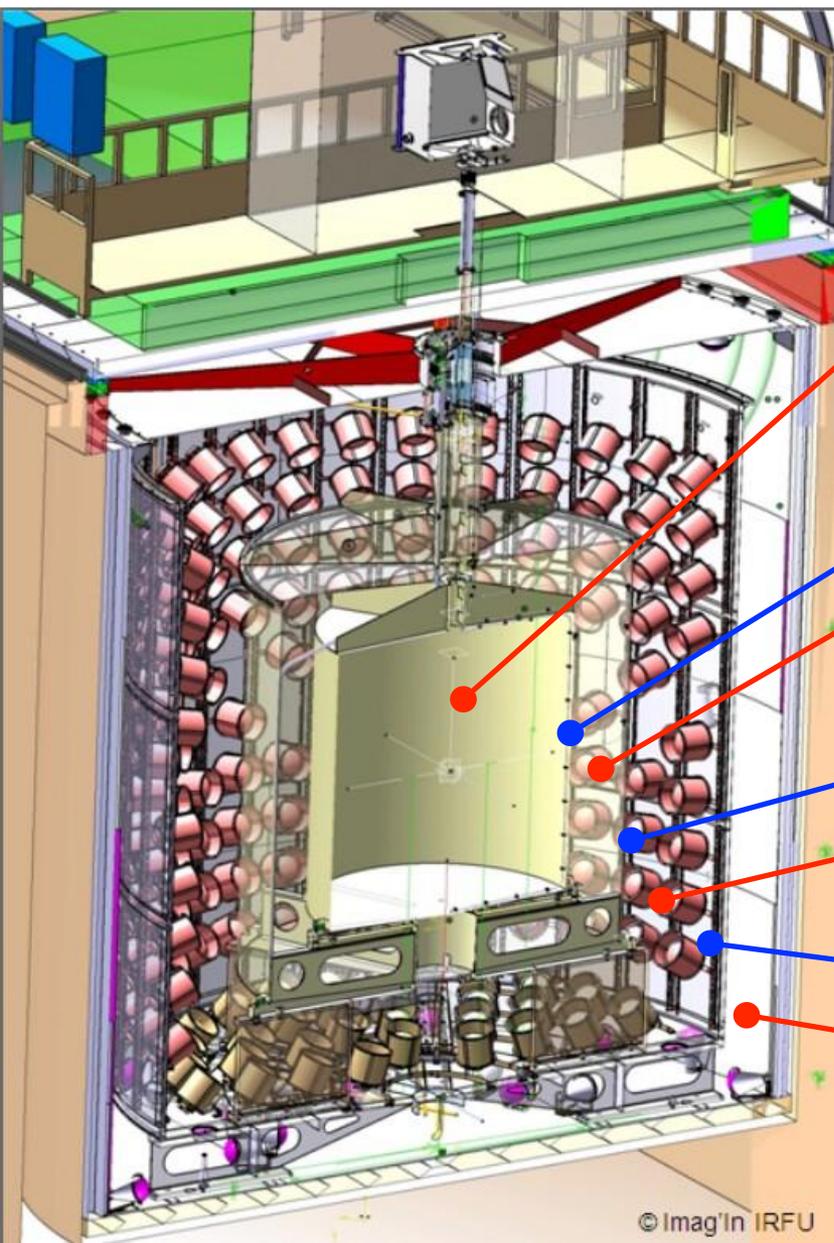
- 中性子捕獲によるガンマ線のエネルギー測定

アクリルタンク -----

バッファ層 (ミネラルオイル)

- PMTなどからの環境ガンマ線の遮蔽

+ Double Chooz検出器



ニュートリノ標的
(Gdを含む液体シンチレータ)

- ニュートリノ事象に対する有効体積
- Gdによる中性子捕獲

アクリルタンク -----

ガンマキャッチャー (液体シンチレータ)

- 中性子捕獲によるガンマ線のエネルギー測定

アクリルタンク -----

バッファ層 (ミネラルオイル)

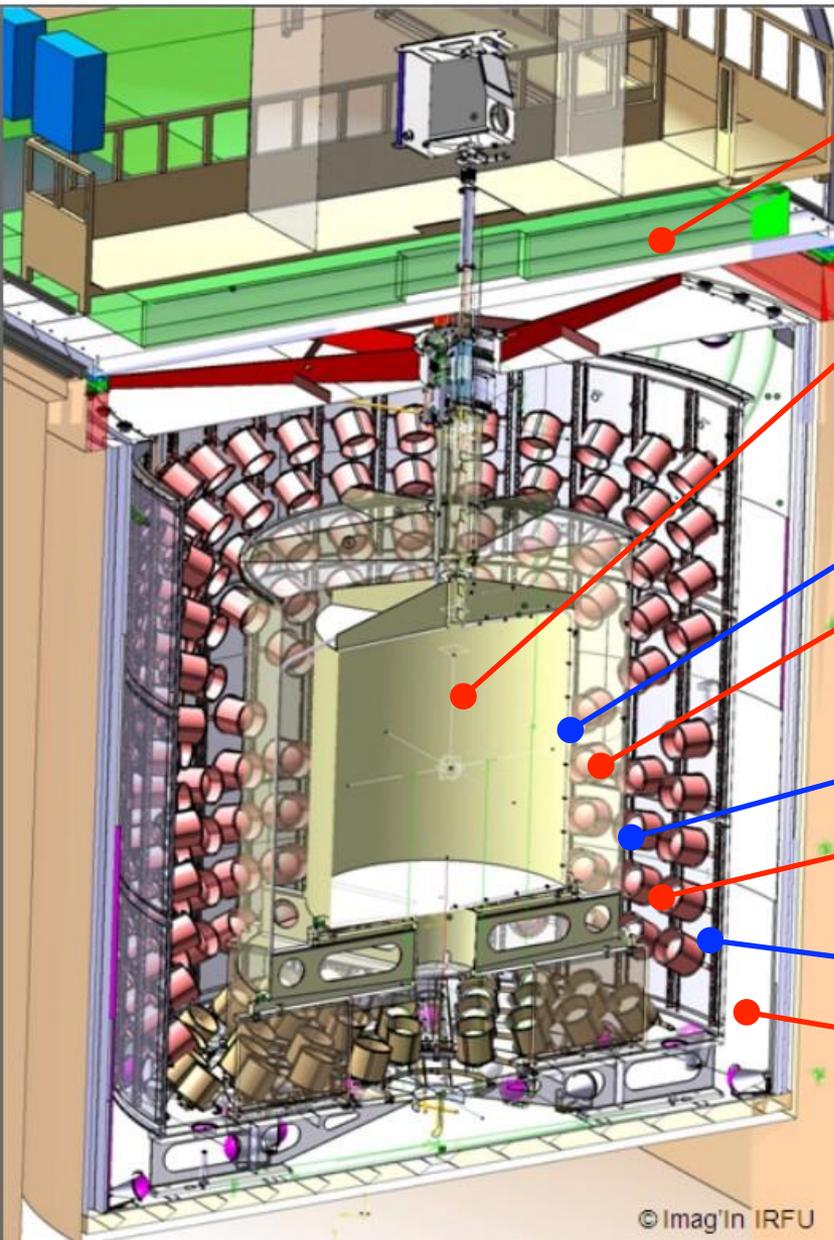
- PMTなどからの環境ガンマ線の遮蔽

ステンレススチールタンク -----

Inner Veto (液体シンチレータ)

- 宇宙線ミュオンの同定
- 高速中性子の遮蔽

+ Double Chooz検出器



Outer Veto
(プラスチックシンチレータ)

- 宇宙線ミュオンの同定

ニュートリノ標的
(Gdを含む液体シンチレータ)

- ニュートリノ事象に対する有効体積
- Gdによる中性子捕獲

アクリルタンク

ガンマキャッチャー (液体シンチレータ)

- 中性子捕獲によるガンマ線のエネルギー測定

アクリルタンク

バッファ層 (ミネラルオイル)

- PMTなどからの環境ガンマ線の遮蔽

ステンレススチールタンク

Inner Veto (液体シンチレータ)

- 宇宙線ミュオンの同定
- 高速中性子の遮蔽

Double Chooz検出器

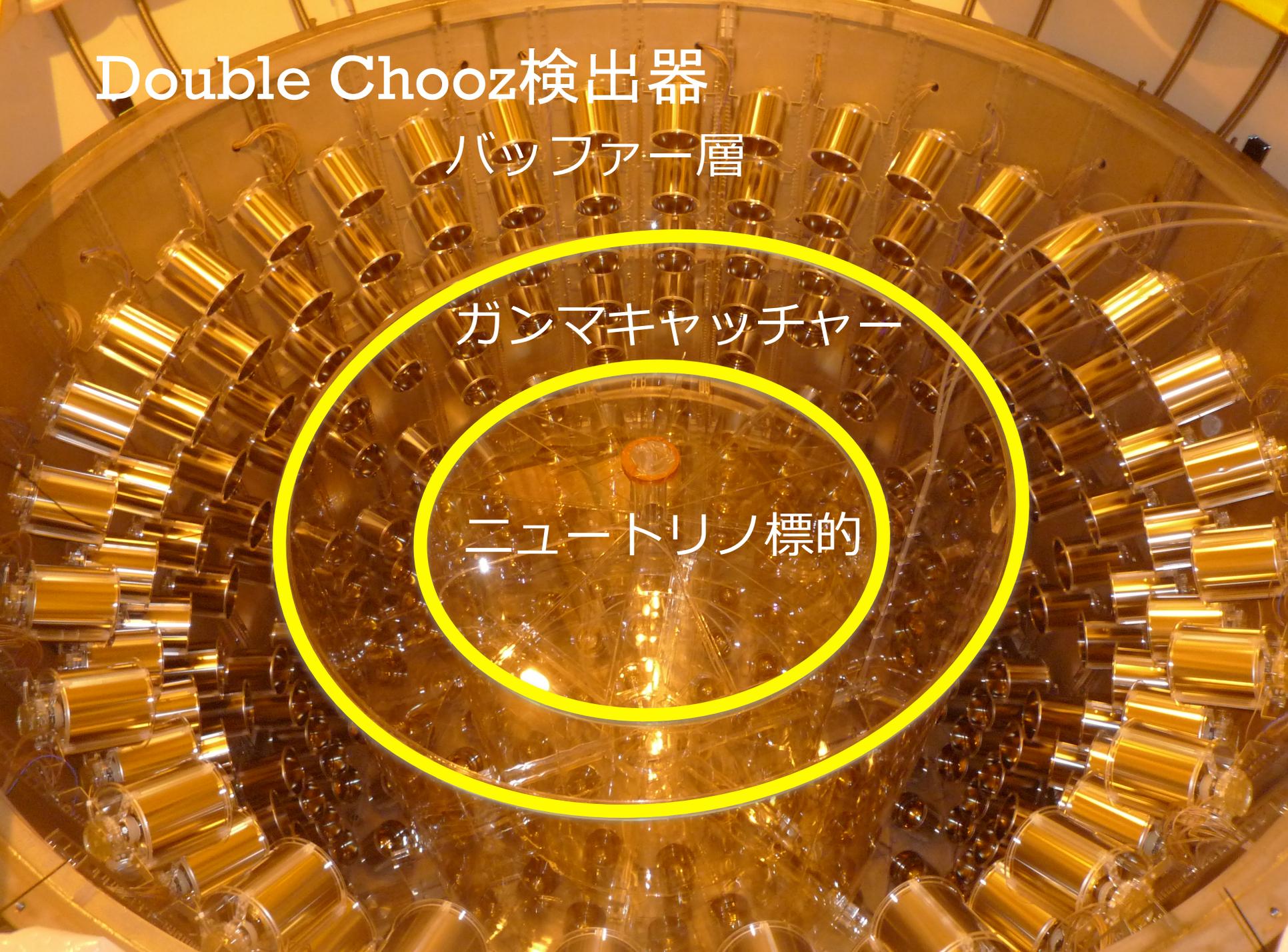


Double Chooz検出器

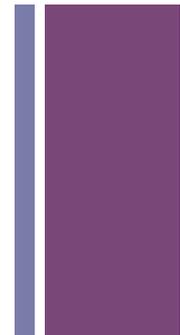
バッファ層

ガンマキャッチャー

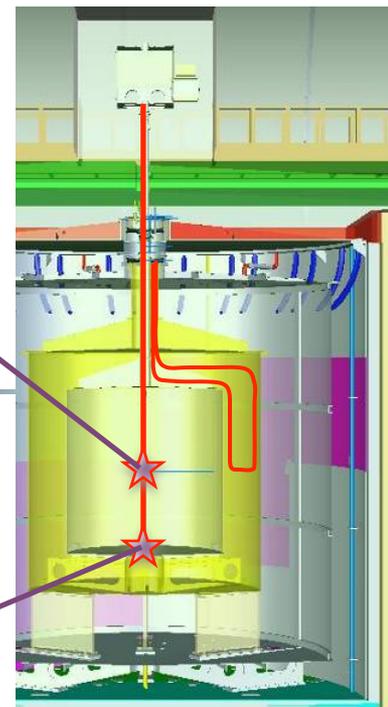
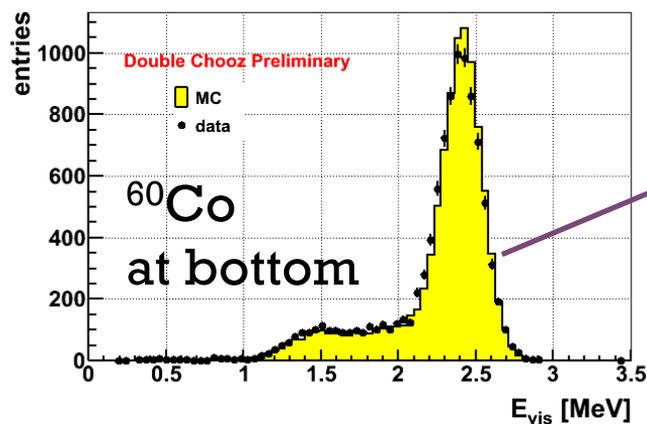
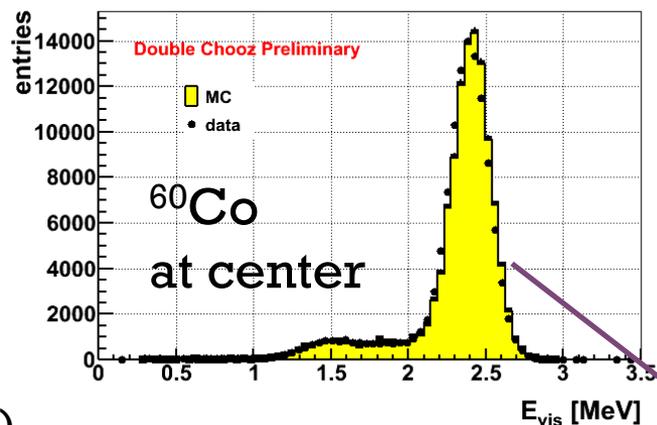
ニュートリノ標的



+ キャリブレーション



- PMTおよびエレクトロニクス (ゲイン、タイミング)
- LEDシステム
 - 検出器内に常設
 - Laserシステム
 - チムニーを通して検出器内に配置
- エネルギースケール
 - ^{68}Ge , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{252}Cf (中性子線源) をニュートリノ標的およびガンマキャッチャーに配置
- 位置依存性、時間変動
 - 宇宙線ミュオン起源の中性子 (Gdおよび水素による中性子捕獲)
- 検出効率
 - ^{252}Cf をニュートリノ標的およびガンマキャッチャーに配置

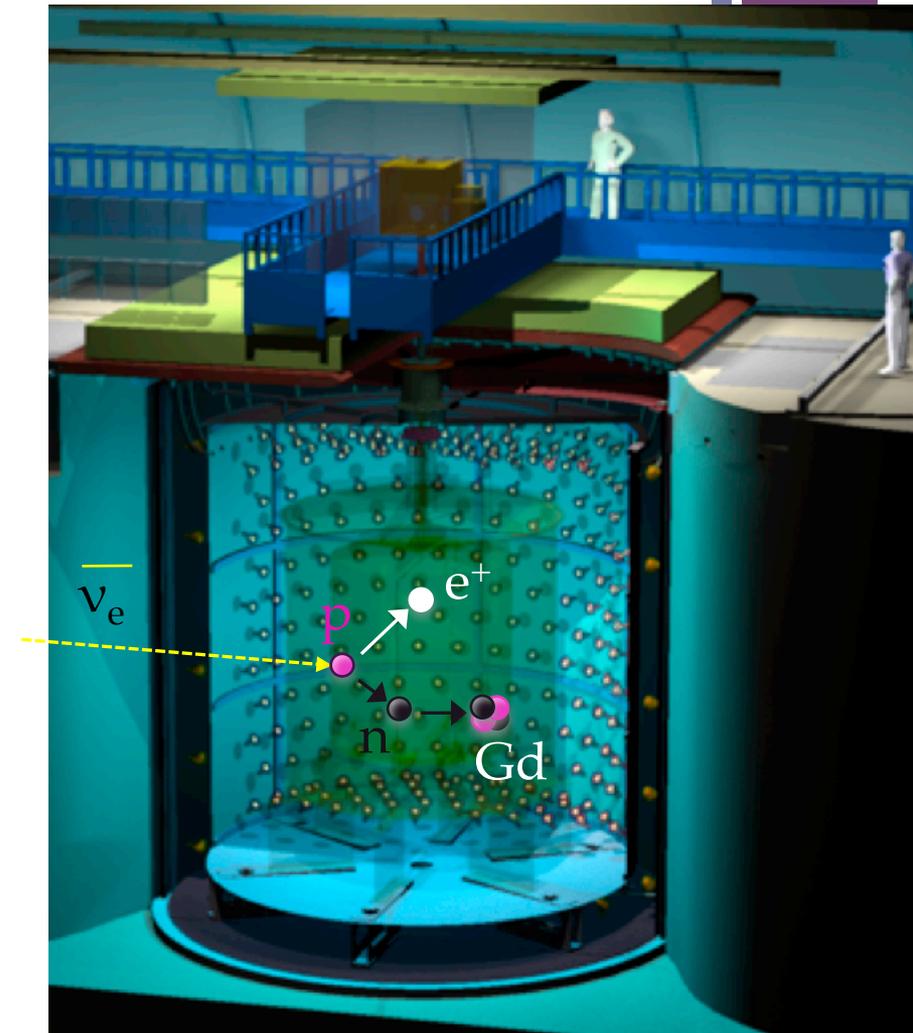


+ ニュートリノ事象選別

Gd selection + (nH selection)

- **Muon veto**
 - $\Delta t_{\mu} > 1 \text{ msec}$
- **Prompt event**
 - $0.7 < E_{\text{vis}} < 12.2 \text{ MeV}$
- **Delayed event**
 - $6 < E_{\text{vis}} < 12 \text{ MeV}$
(nH: $1.5 < E_{\text{vis}} < 3 \text{ MeV}$)
- **Delayed coincidence**
 - $2 < \Delta t < 100 \mu \text{ sec}$
(nH: $10 < \Delta t < 600 \mu \text{ sec}$)
 - nH: $\Delta R < 90 \text{ cm}$
- **PMT light noise rejection**
- **Multiplicity**
 - No extra events around signal

- **Further BG reduction**
 - No coincidence signal in OV
 - $\Delta t_{\mu} > 500 \text{ msec}$ ($E_{\mu} > 600 \text{ MeV}$) only for Gd

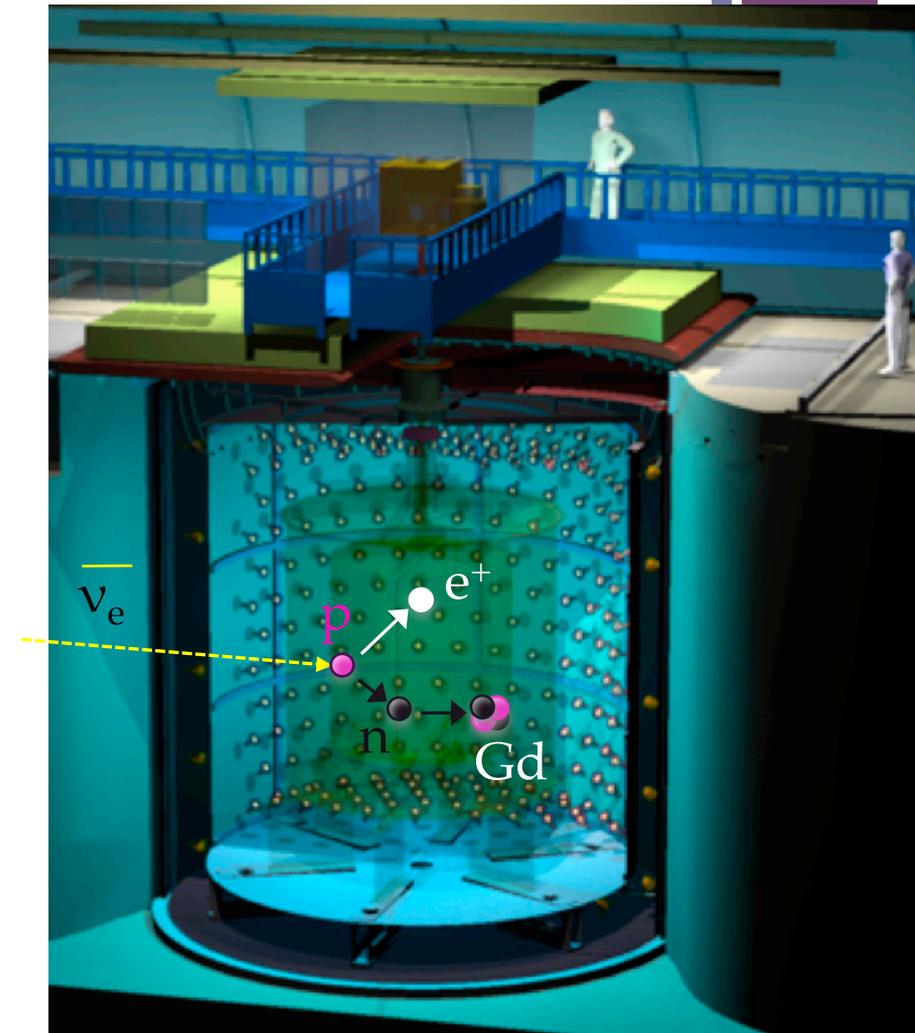


+ ニュートリノ事象選別

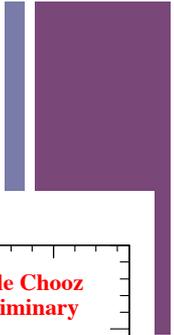
Gd selection + (nH selection)

- **Muon veto**
 - $\Delta t_{\mu} > 1 \text{ msec}$
- **Prompt event**
 - $0.7 < E_{\text{vis}} < 12.2 \text{ MeV}$
- **Delayed event**
 - $6 < E_{\text{vis}} < 12 \text{ MeV}$
(nH: $1.5 < E_{\text{vis}} < 3 \text{ MeV}$)
- **Delayed coincidence**
 - $2 < \Delta t < 100 \mu \text{ sec}$
(nH: $10 < \Delta t < 600 \mu \text{ sec}$)
 - nH: $\Delta R < 90 \text{ cm}$
- **PMT light noise rejection**
- **Multiplicity**
 - No extra events around signal

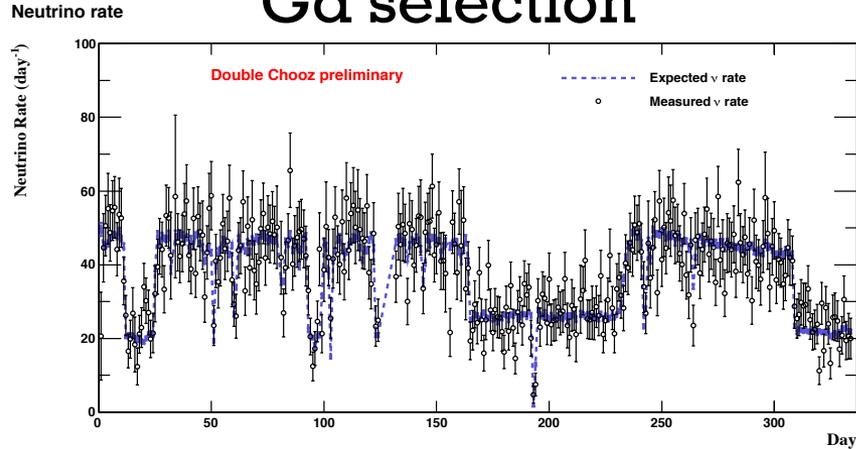
- **Further BG reduction**
 - No coincidence signal in OV
 - $\Delta t_{\mu} > 500 \text{ msec}$ ($E_{\mu} > 600 \text{ MeV}$) only for Gd



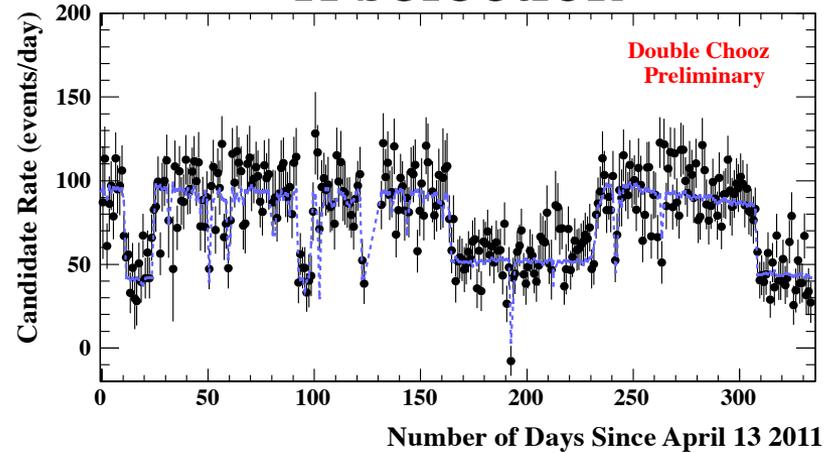
+ ニュートリノ候補事象



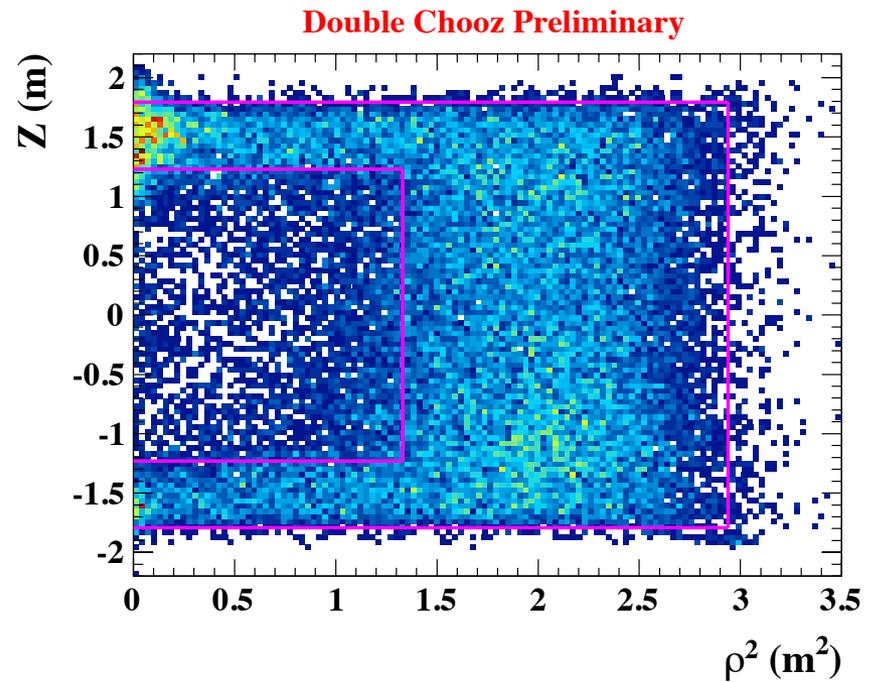
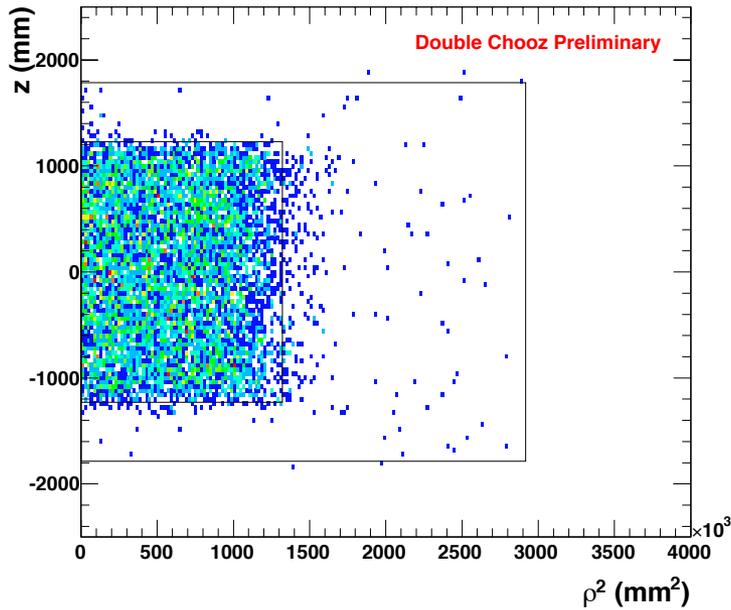
Gd selection



H selection



Prompt vertex $Z\rho^2$ position



+ 期待される原子炉ニュートリノ事象数

原子炉ニュートリノ
フラックス
(reactor core simulation)



逆ベータ崩壊反応



検出器シミュレーション
(Geant4 base)



読み出し&トリガーシ
ミュレーション



1回の核分裂で生成される
ニュートリノ事象数

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

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

Bugey4 測定値

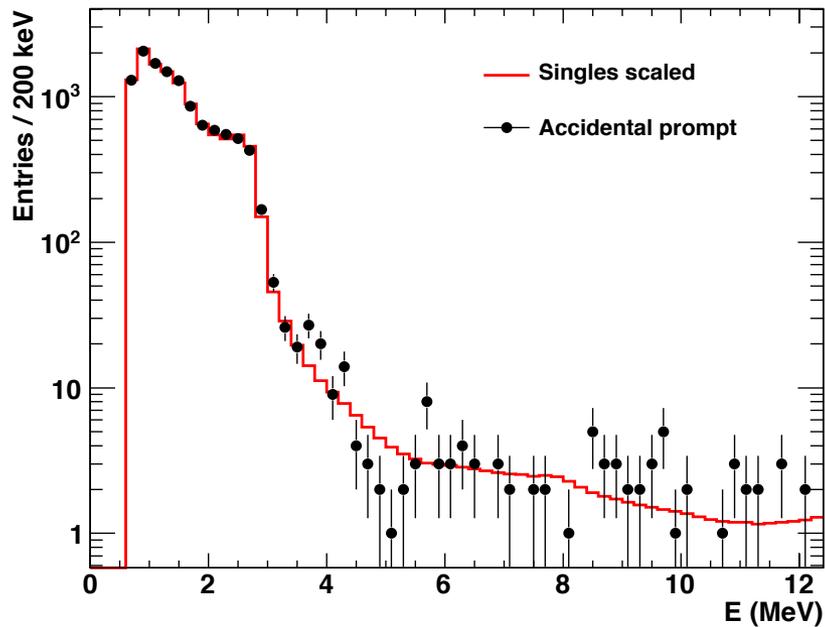
CHOOZ原子炉とBugey
原子炉の燃料比の違い
による補正

- Bugey4の測定値を参照することにより、
ニュートリノフラックスの不定性を抑える：
2.7% → 1.8%

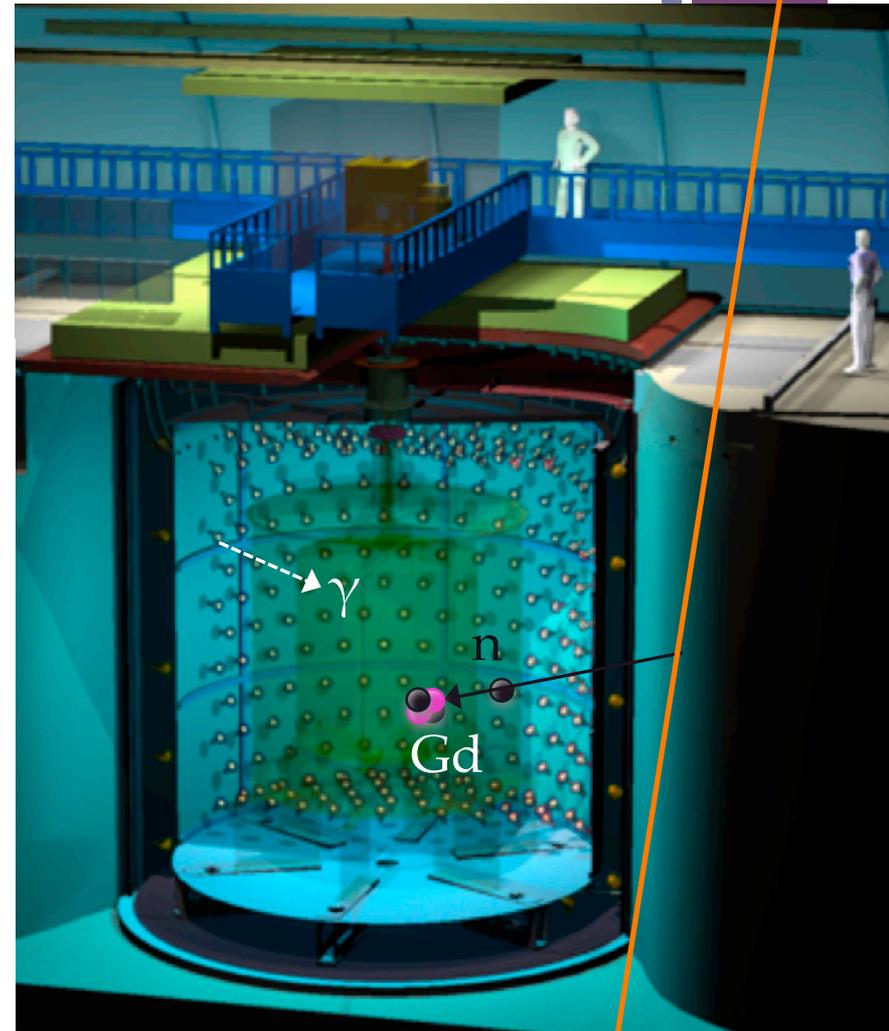
+ バックグラウンド

■ 偶発同期信号

- 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)



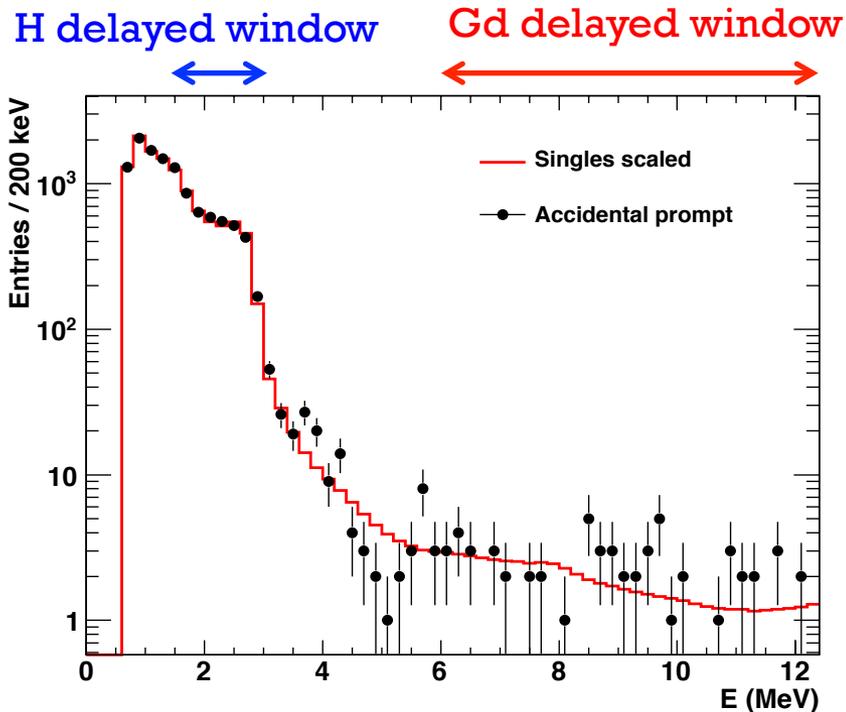
Off-time windowにより精密に測定される



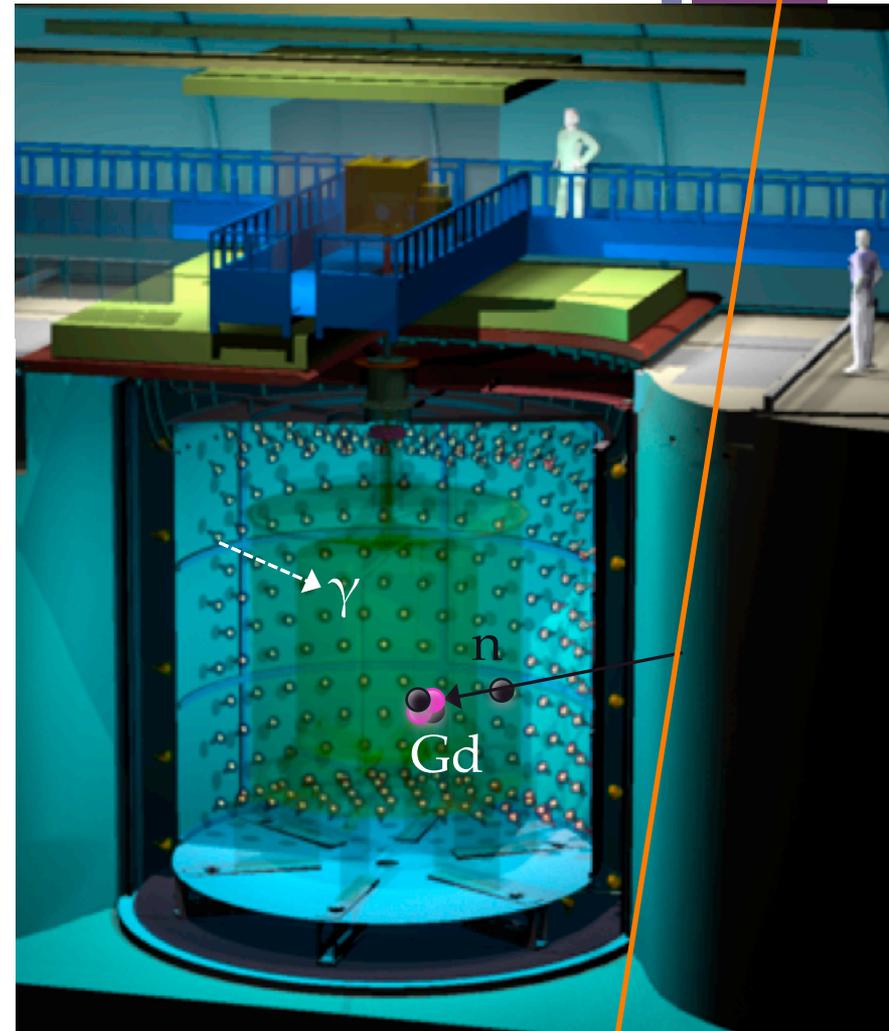
+ バックグラウンド

■ 偶発同期信号

- 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)



Off-time windowにより精密に測定される



μ

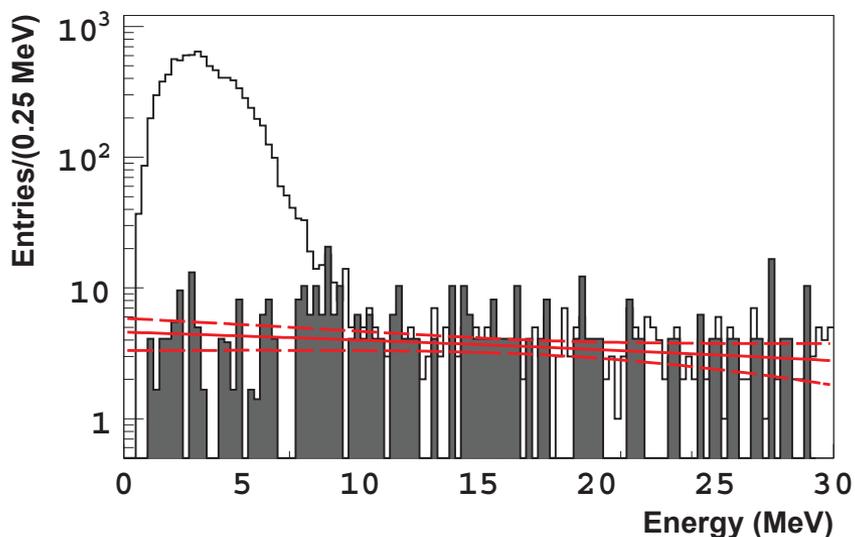
+ バックグラウンド

■ 偶発同期信号

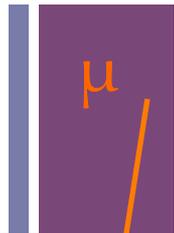
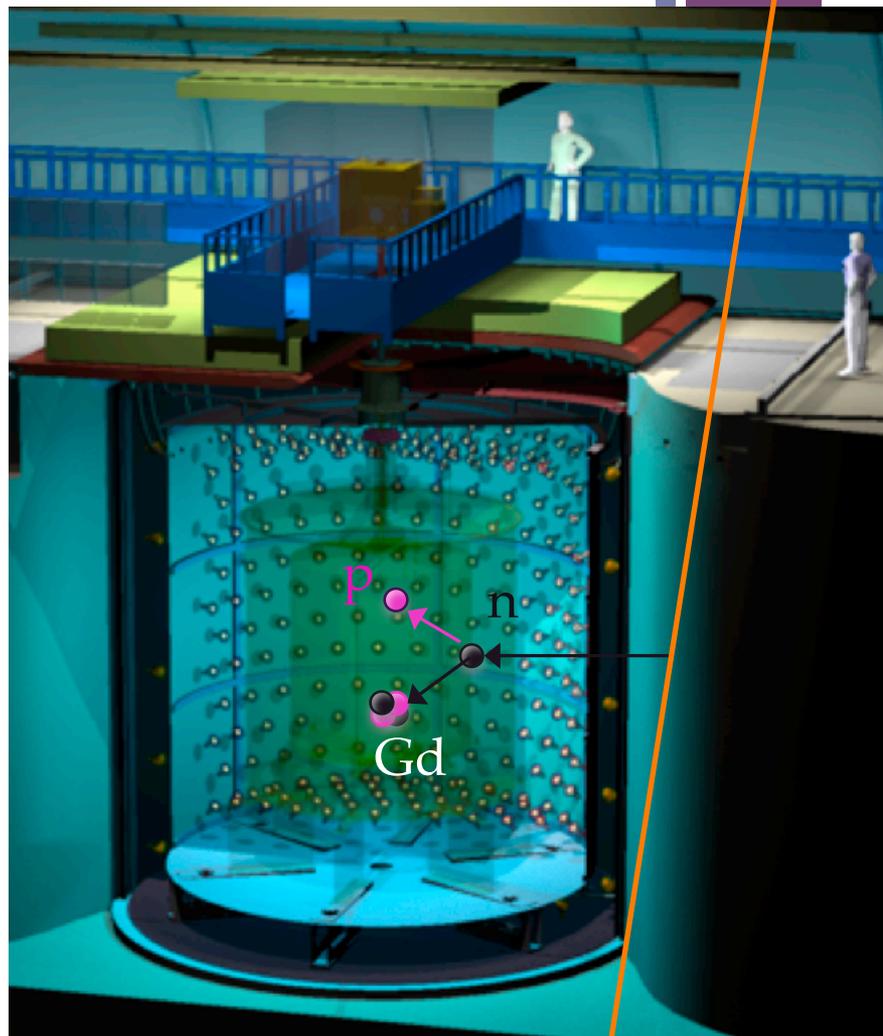
■ 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)

■ 高速中性子 / stop muon

■ 0.67 ± 0.20 events/day
(nH: 2.50 ± 0.47 events/day)

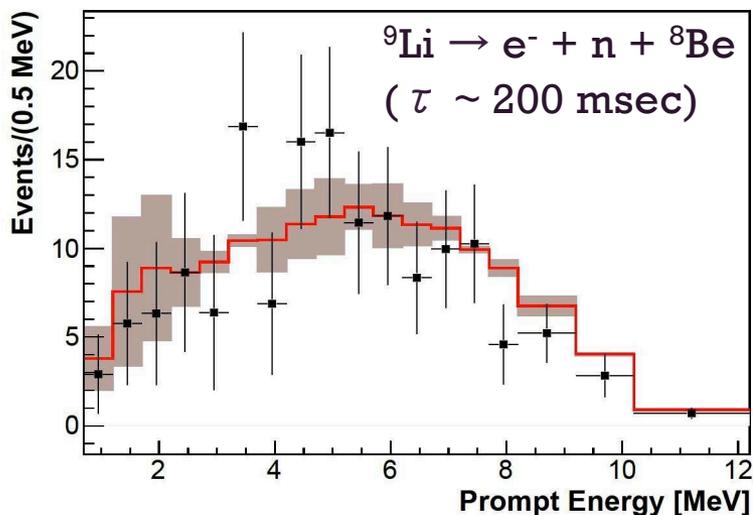


IV および OV の同期信号から見積もる

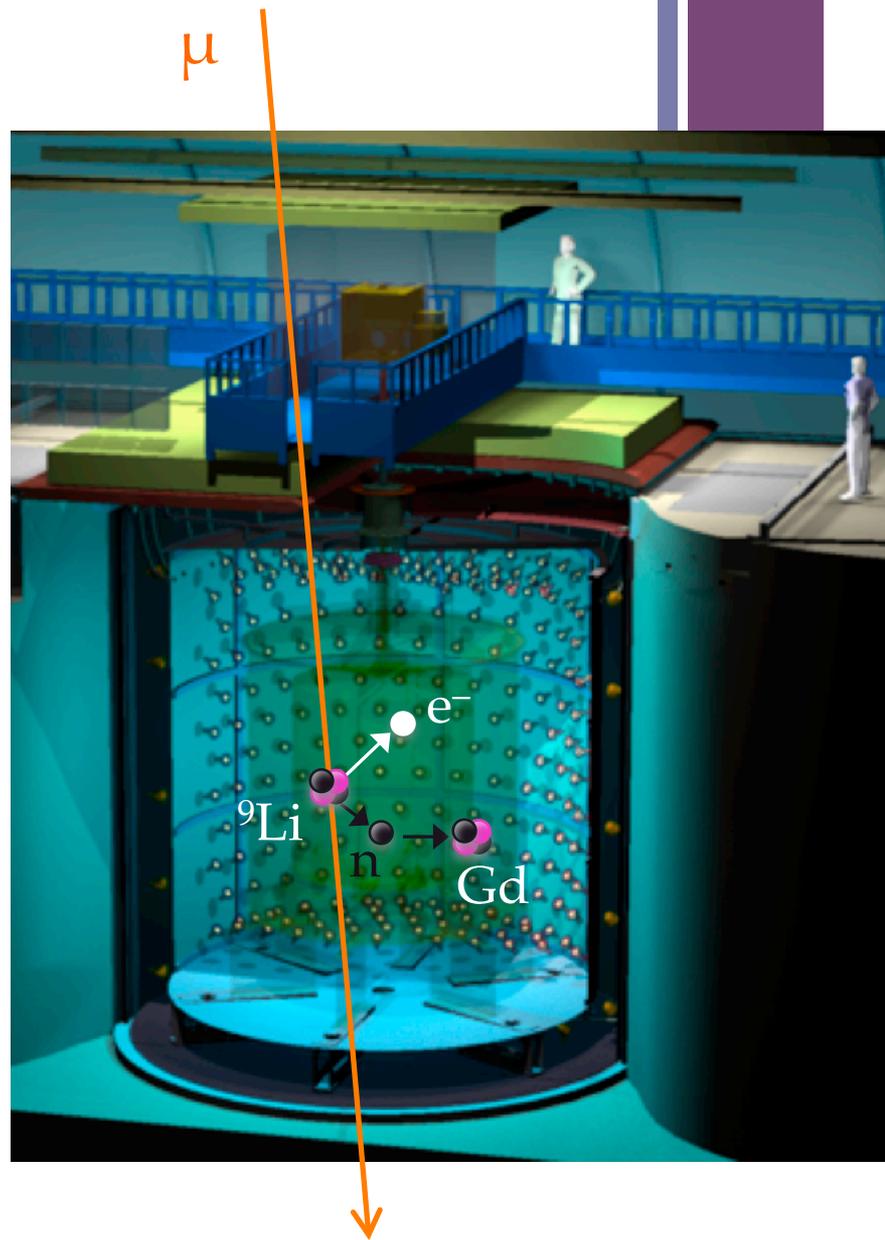


+ バックグラウンド

- 偶発同期信号
 - 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)
- 高速中性子 / stop muon
 - 0.67 ± 0.20 events/day
(nH: 2.50 ± 0.47 events/day)
- 核破砕反応による不安定同位 (${}^9\text{Li}$)
 - 1.25 ± 0.54 events/day
(nH: 2.8 ± 1.2 events/day)

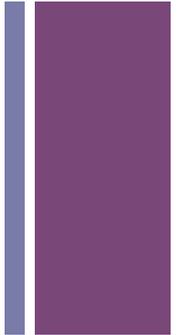


≡ ユーオンと時間・位置相関から見積もる



+ バックグラウンド

- 偶発同期信号
 - 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)
 - 高速中性子 / stop muon
 - 0.67 ± 0.20 events/day
(nH: 2.50 ± 0.47 events/day)
 - 核破砕反応による不安定同位 (^9Li)
 - 1.25 ± 0.54 events/day
(nH: 2.8 ± 1.2 events/day)
 - ニュートリノ信号
 - **~ 40 event/day**
(nH: ~ 80 events/day)
- \Rightarrow S/N ~ 20 in Gd analysis**



+ バックグラウンド

■ 偶発同期信号

- 0.261 ± 0.002 events/day
(nH: 73.45 ± 0.16 events/day)

■ 高速中性子 / stop muon

- 0.67 ± 0.20 events/day \Rightarrow
- (nH: 2.50 ± 0.47 events/day) \Rightarrow

■ 核破砕反応による不安定同位 (9Li)

- 1.25 ± 0.54 events/day \Rightarrow
- (nH: 2.8 ± 1.2 events/day) \Rightarrow

■ ニュートリノ信号

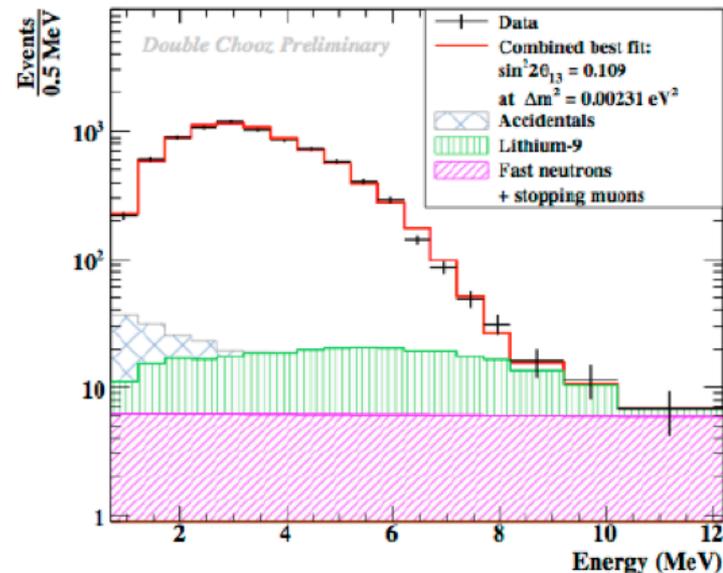
- ~ 40 event/day
(nH: ~ 80 events/day)

\Rightarrow **S/N ~ 20 in Gd analysis**

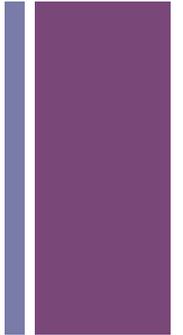
エネルギースペクトルの
フィットからさらに制限がかかる

0.64 ± 0.13 events/day
(nH: 2.6 ± 0.4 events/day)

1.00 ± 0.29 events/day
(nH: 3.9 ± 0.6 events/day)



+ 統計誤差 & 系統誤差



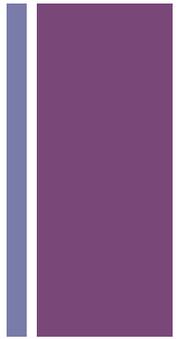
Source		Gd capture	H capture
Statistics		1.1%	1.1%
Reactor flux		1.8%	1.8%
Efficiency		1.0%	1.6%
BG	Cosmogenic	1.5%	1.6%
	Fast-n + stop μ	0.5%	0.6%
	Accidental	<0.1%	0.2%

w.r.t. signal

- + shape error in fit
- Reactor flux
- Energy scale
- ^9Li spectrum
- Fast n + stop μ



統計誤差 & 系統誤差 前置検出器 + 後置検出器の展望



Source		Gd capture
Statistics		1.1%
Reactor flux		1.8%
Efficiency		1.0%
BG	Cosmogenic	1.5%
	Fast-n + stop μ	0.5%
	Accidental	<0.1%

3年間の測定で~0.5%

(H吸収データでさらに低減?)

前置検出器と後置検出器の比較により大幅に低減 (<0.1%)

特にDouble Choozでは原子炉が2基でほぼ同じ距離にあるため、FD/ND cancellationが理想に近い

前置検出器と後置検出器の比較により大幅に低減 (~0.2%?)

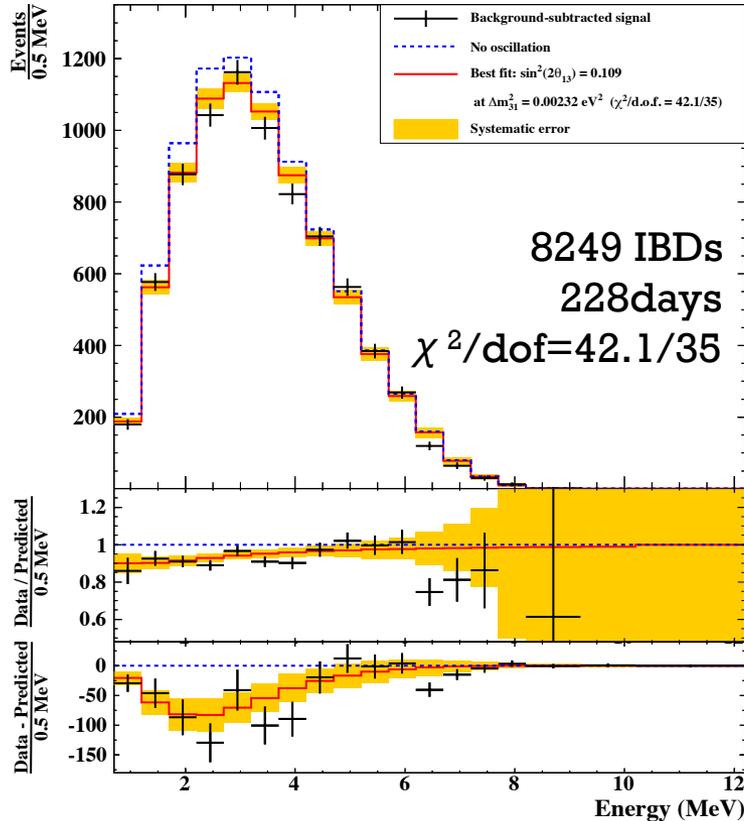
前置検出器と後置検出器でSignal/Backgroundが異なるため
単純なFD/ND cancellationがきかない

⇒ カットによる低減、高統計での正確な見積もり、原子炉OFFでの測定など

+ θ_{13} 測定結果

Gd analysis

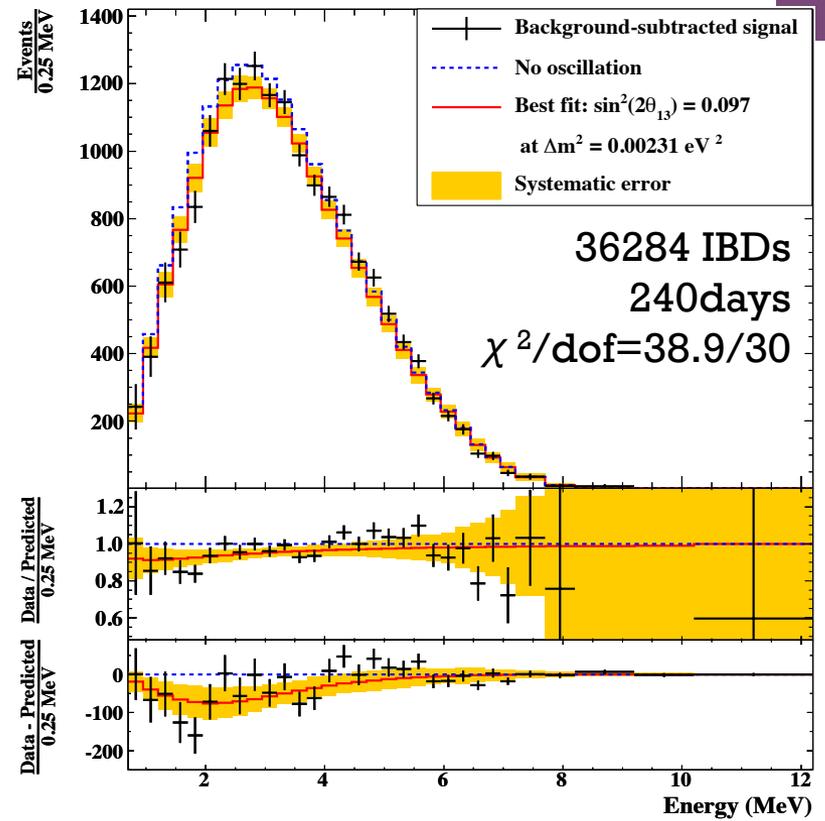
Phys. Rev. D86 (2012) 052008



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.039$$

H analysis

Phys. Lett. B723 (2013) 66-70

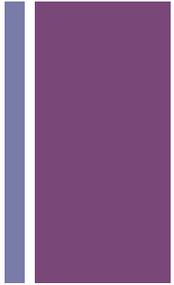


$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.097 \pm 0.048$$

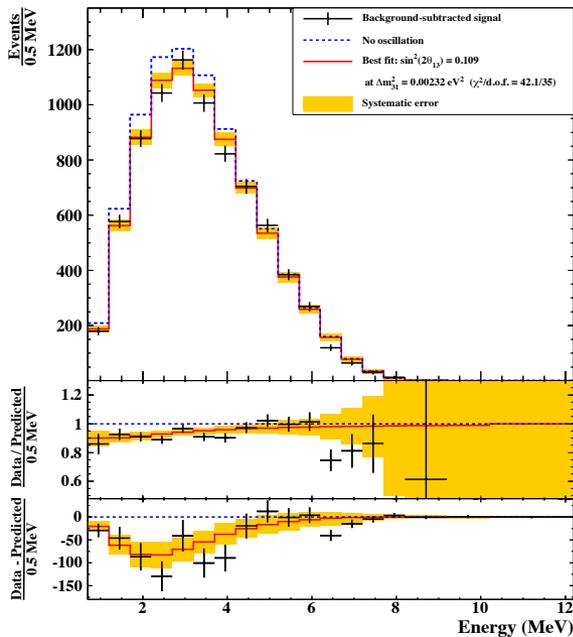
new

Gd+H combined + Reactor off data: $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$

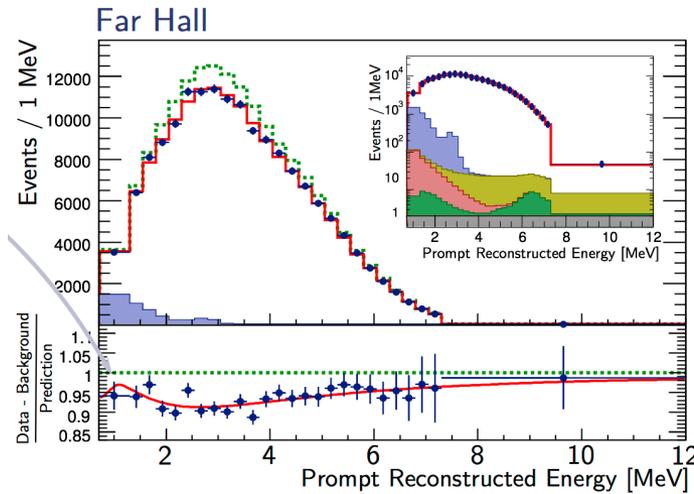
+ 原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} 測定の現状



Double Chooz
(Gd+H combined, EPS 2013, July)

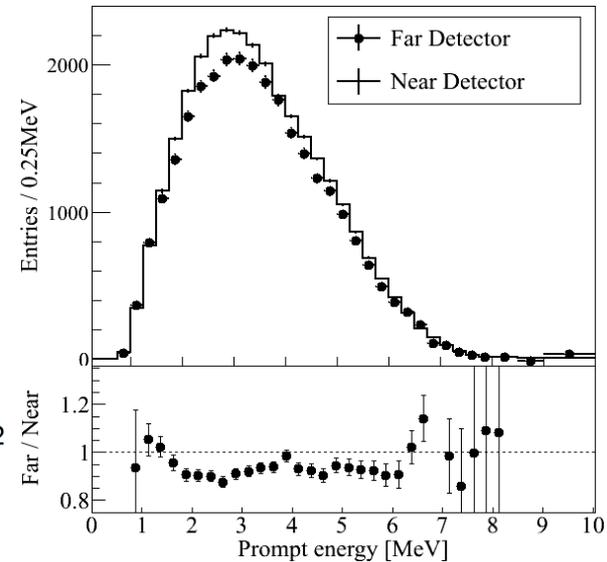


Daya Bay
(NuFact 2013, August)

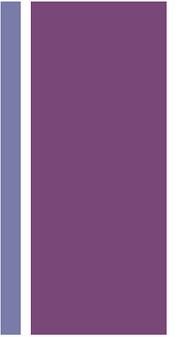


New results from Daya Bay
Rate+Shape fit just delivered

RENO
(NuTel 2013, March)

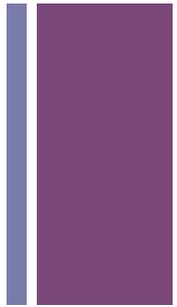


- | | | |
|------------|--|---------------------------|
| ■ DC | $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$ | FD-only, Rate+Shape, Gd+H |
| ■ Daya Bay | $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}$ | FD+ND, Rate+Shape, Gd |
| ■ RENO | $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.100 \pm 0.018$ | FD+ND, Rete-only, Gd |

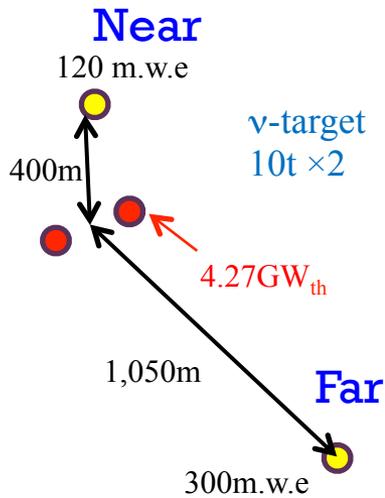


Double Chooz: cross-checks

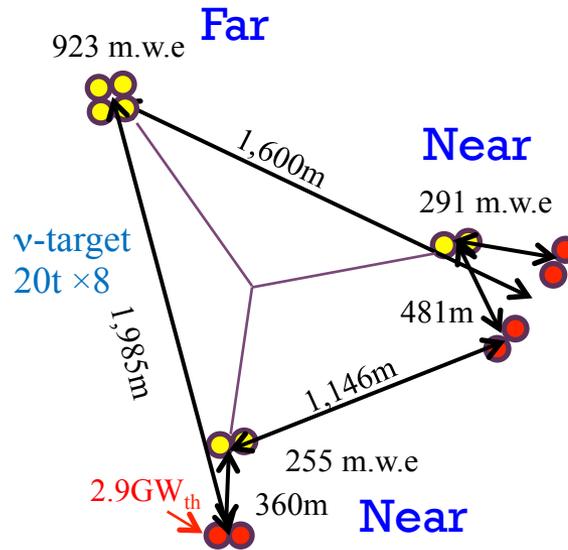
+ 3つの原子炉ニュートリノ実験の セットアップ



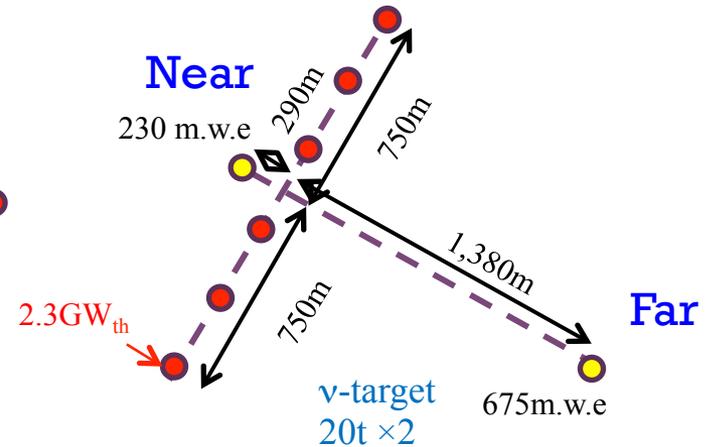
Double Chooz



Daya Bay



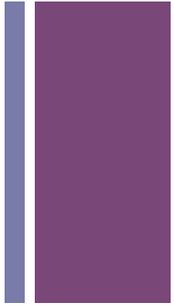
RENO



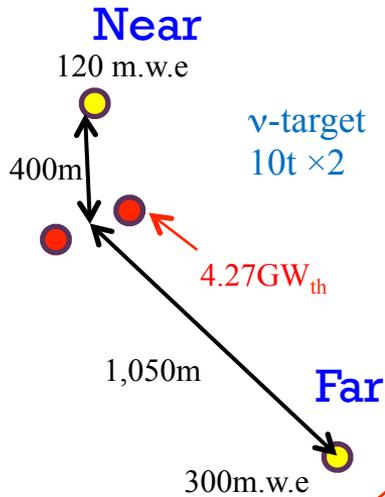
- DC $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$
- Daya Bay $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}$
- RENO $\sin^2 2 \theta_{13} = 0.100 \pm 0.018$

- FD-only, Rate+Shape, Gd+H
- FD+ND, Rate+Shape, Gd
- FD+ND, Rete-only, Gd

+ 3つの原子炉ニュートリノ実験の セットアップ



Double Chooz



- Reactor
- Detector

Daya Bay

923 m.w.e

Reactorが2基であることを生かした解析

- Reactor off dataを用いたバックグラウンドの測定
- バックグラウンドの見積もりに依存しない解析手法
(原子炉パワーの変動を利用した解析)
- 将来的にはFD-ND relative flux errorを特に小さく
($<0.1\%$) 抑えることが可能

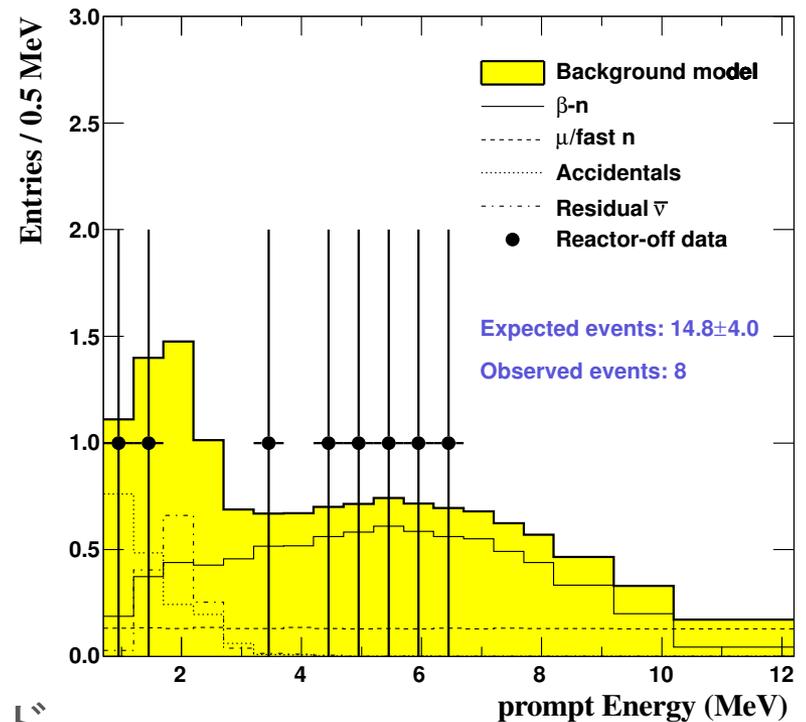
RENO

■ DC	$\sin^2 2 \theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$	FD-only, Rate+Shape, Gd+H
■ Daya Bay	$\sin^2 2 \theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}$	FD+ND, Rate+Shape, Gd
■ RENO	$\sin^2 2 \theta_{13} = 0.100 \pm 0.018$	FD+ND, Rete-only, Gd

+ 原子炉 OFFデータによる バックグラウンドの直接測定

Phys. Rev. D87 (2013) 011102

- 原子炉が2基ともOFFの状態を取得された
7.5日分のデータを解析
- 原子炉OFFデータによる測定
 - 1.0 ± 0.4 events/day
- 原子炉ONデータ解析による見積もり
 - 2.0 ± 0.6 events/day
- 解析による見積もりと一致するバックグラウンドが実際に測定された
- さらに統計を増やせばバックグラウンドの系統誤差を抑えられる可能性も



+ 原子炉パワーの変動を用いた解析

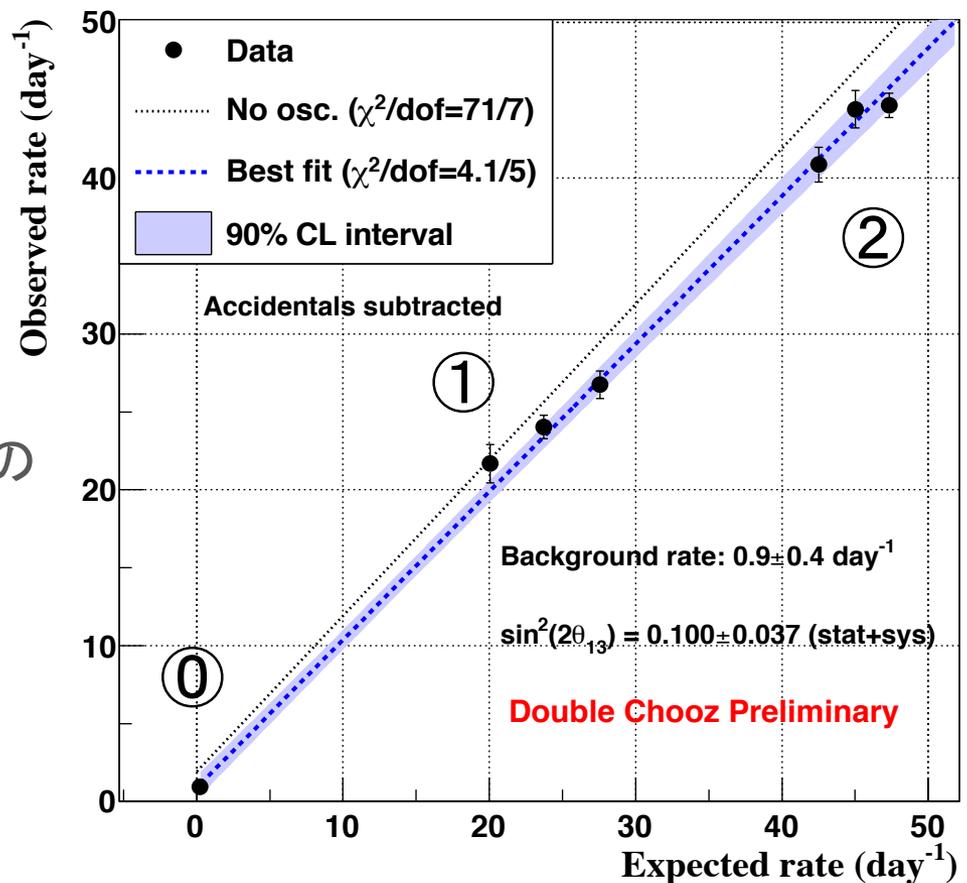
① 原子炉が2基ともOFF (BG)

② 片方の原子炉のみON

③ 原子炉が2基ともON

の場合の測定を比較

偶発事象以外のバックグラウンドの見積もりを使わずに θ_{13} を測定



+ 原子炉パワーの変動を用いた解析



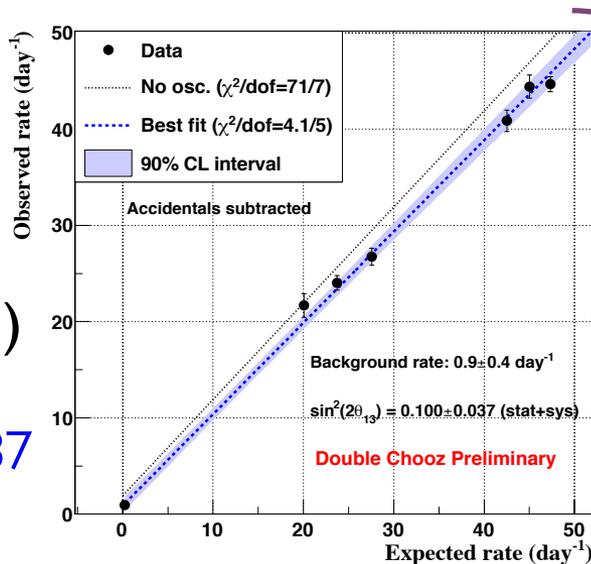
Gd-IBD

Signal: $\sim 40 \text{ day}^{-1}$

BG: 1.1 day^{-1}

(Acc. BG: 0.3 day^{-1})

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.100 \pm 0.037$$



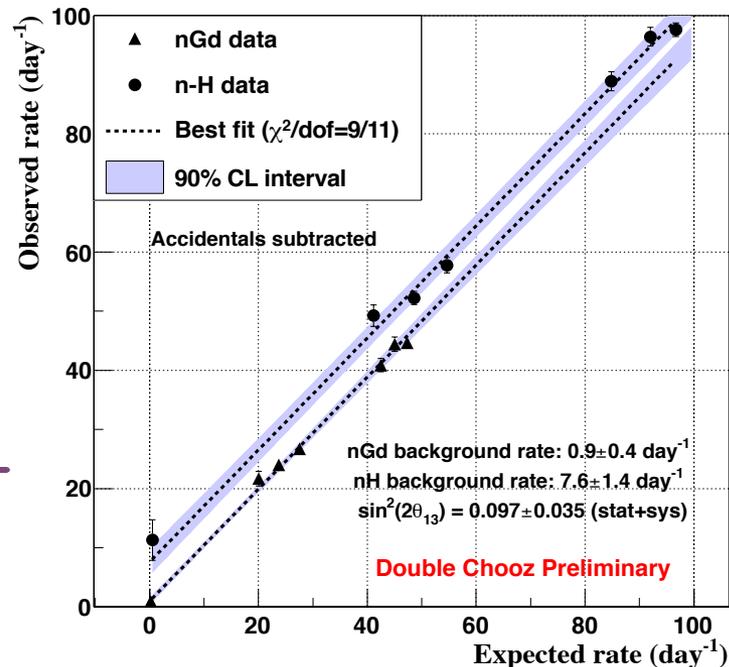
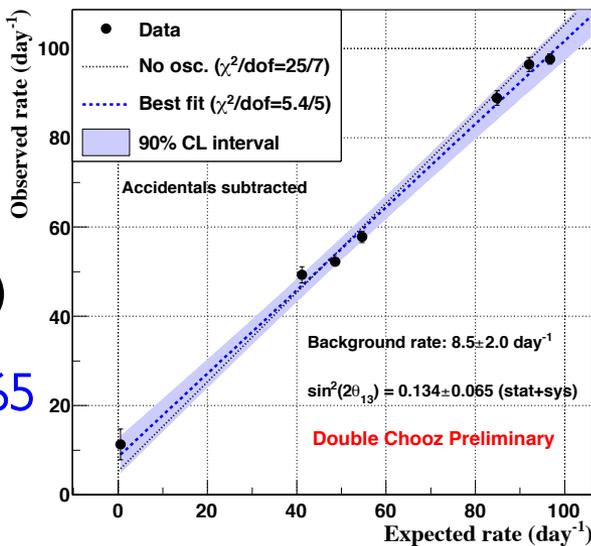
H-IBD

Signal: $\sim 80 \text{ day}^{-1}$

BG: 82 day^{-1}

(Acc. BG: 73 day^{-1})

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.134 \pm 0.065$$



Gd+H combined

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.097 \pm 0.035$$

(Rate+Shape: $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$)

+ Double Chooz実験の今後

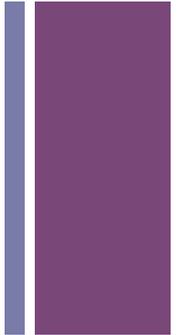
- 2013年中に後置検出器のみで $\delta(\sin^2 2\theta_{13}) \sim 0.03$ まで精度向上
 - 解析の改良：検出効率、エネルギースケール、バックグラウンド
 - 統計の増加：すでに前回の結果の倍以上のデータを取得し、現在解析中
- 前置検出器を2014年に完成させ、3年間の測定で $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定誤差10% ($\delta(\sin^2 2\theta_{13}) \sim 0.01$) まで精度を上げる
 - Daya Bay, RENOによる測定結果の検証
 - 原子炉ニュートリノ実験の θ_{13} 測定精度は系統誤差に依存
 - 複数の実験で測定することが重要
 - 異なるReactorの配置、バックグラウンドの内訳、etc.
 - 3つの実験による測定を組み合わせることにより θ_{13} の測定精度向上の可能性

+ 前置検出器建設の様子



- 2013年中にPMT取り付けを終了
- 2014年春に測定開始予定

+ Double Chooz 日本グループ



- PMT
 - Low BGの10 inch PMTを浜松ホトニクスと共同開発
 - 東工大での個別検査
 - *T. Matsubara et al., Nucl. Instrum. Meth., A661, 16, 2011.*
 - Choozでのインストレーション
- オンライン・DAQシステム
 - HV control/monitor
 - オンラインシステム（ランコントロール、モニター、その他）
- Detector commissioning
- LED光源による検出器キャリブレーション
- データ解析
- HP: <http://dchooz.titech.jp.hep.net/>

+ Double Chooz 日本グループ



+ Double Chooz 日本グループ



+ まとめ

- Double Chooz後置検出器による測定
 - 2つの異なるデータサンプル: GdおよびHによる中性子捕獲
 - 2つの異なる解析手法: エネルギースペクルおよび原子炉パワー
- すべての解析で測定結果が一致
 - エネルギースペクトル (combined): $\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.035$
 - 原子炉パワー (combined): $\sin^2 2\theta_{13} = 0.097 \pm 0.035$
- バックグラウンドの見積もりの検証
 - 原子炉OFFデータの測定と解析による見積もりが一致
 - ニュートリノとバックグラウンドのエネルギー分布の違いによる制限
 - 原子炉パワーの変動による解析によりバックグラウンドに依存しない θ_{13} 測定
- 前置検出器による測定を2014年に開始
 - 3年以内に10%の精度で $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定を目指す