



Double Chooz実験による ニュートリノ振動解析の最新結果

石塚正基(東京工業大学)

2011年11月24日

京都大学セミナー



ニュートリノ振動

- 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

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

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

θ_{23} :
 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ by
 Atm. ν & ν beam

θ_{13} :
 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ by Reactor ν
 θ_{13} & δ :
 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ by ν beam

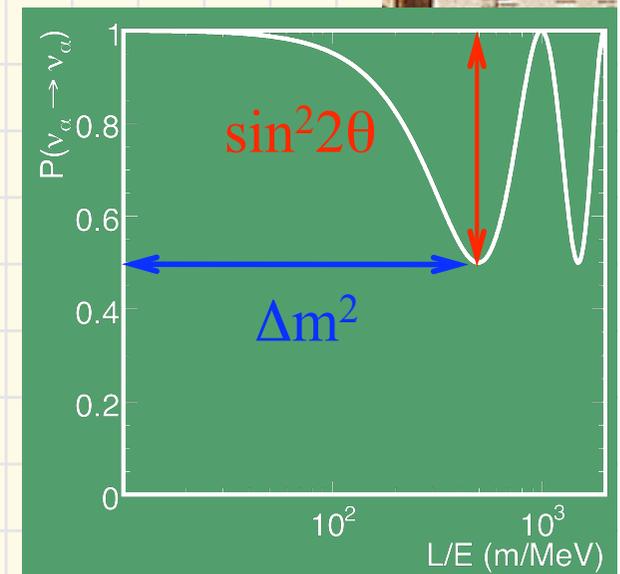
θ_{12} :
 $P(\nu_e \rightarrow \nu_x)$ by
 Reactor ν & solar ν

ニュートリノ振動パラメータ:

混合角: $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
 位相: δ (CP対称性の破れ)
 質量差: $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$

2世代振動の場合:

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



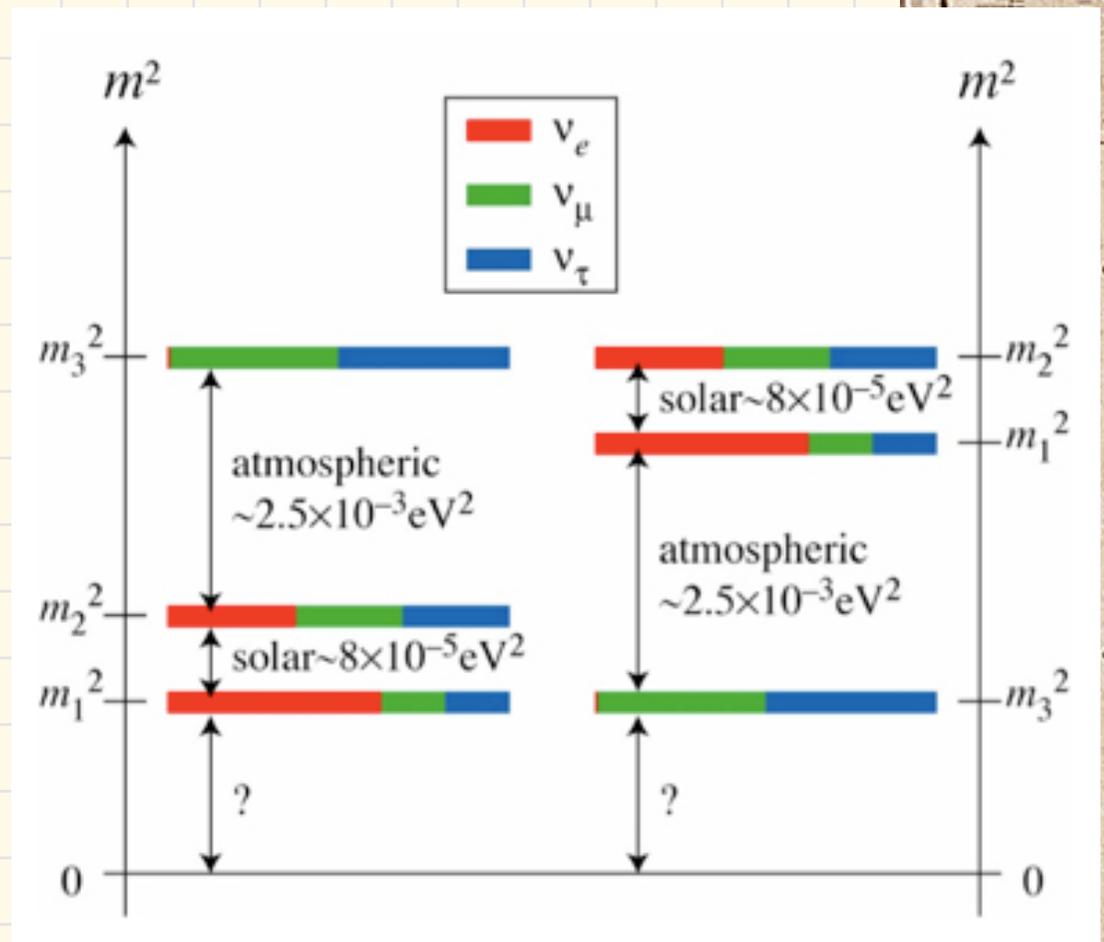
ニュートリノ振動パラメータ測定の実況

- 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

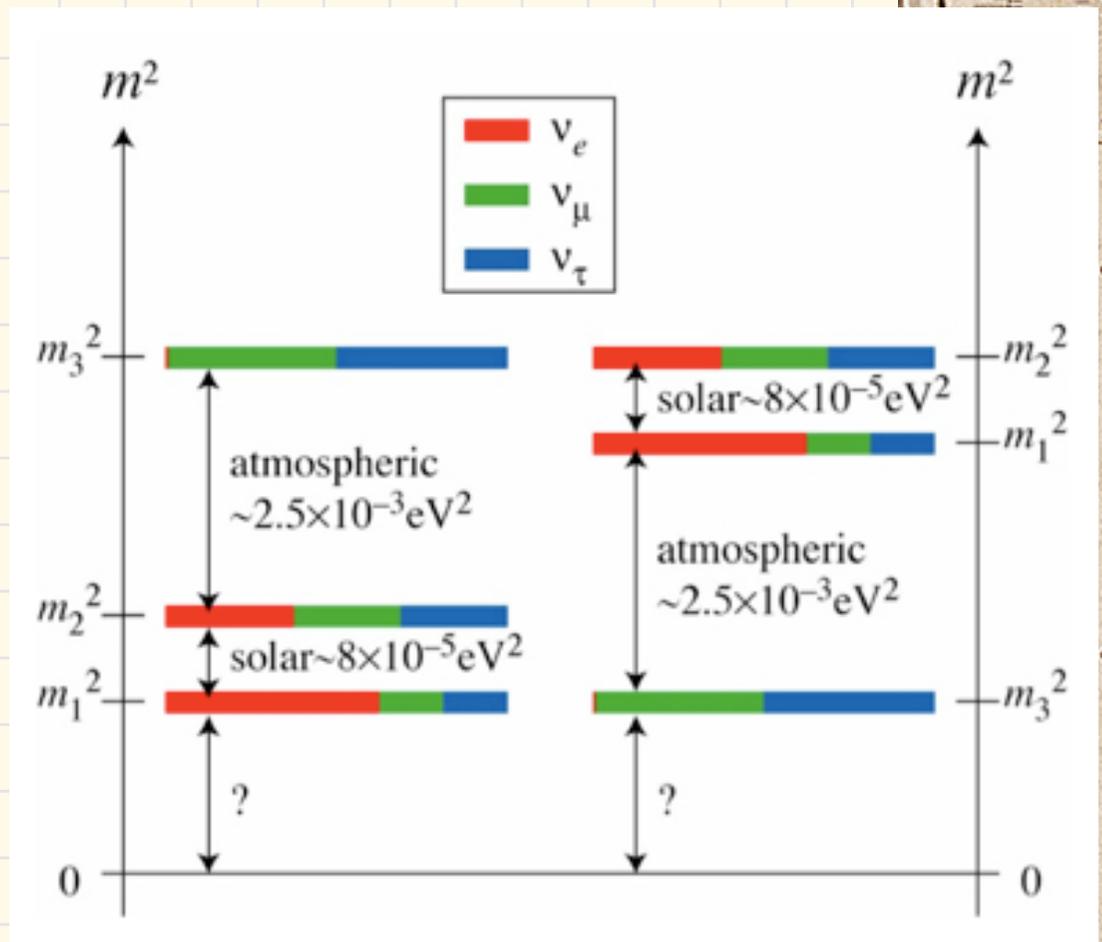
ニュートリノ振動パラメータ測定の実況

- 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} 測定実験: 2つのアプローチ

- 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

- ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ実験: T2K, NOvA ...

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

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

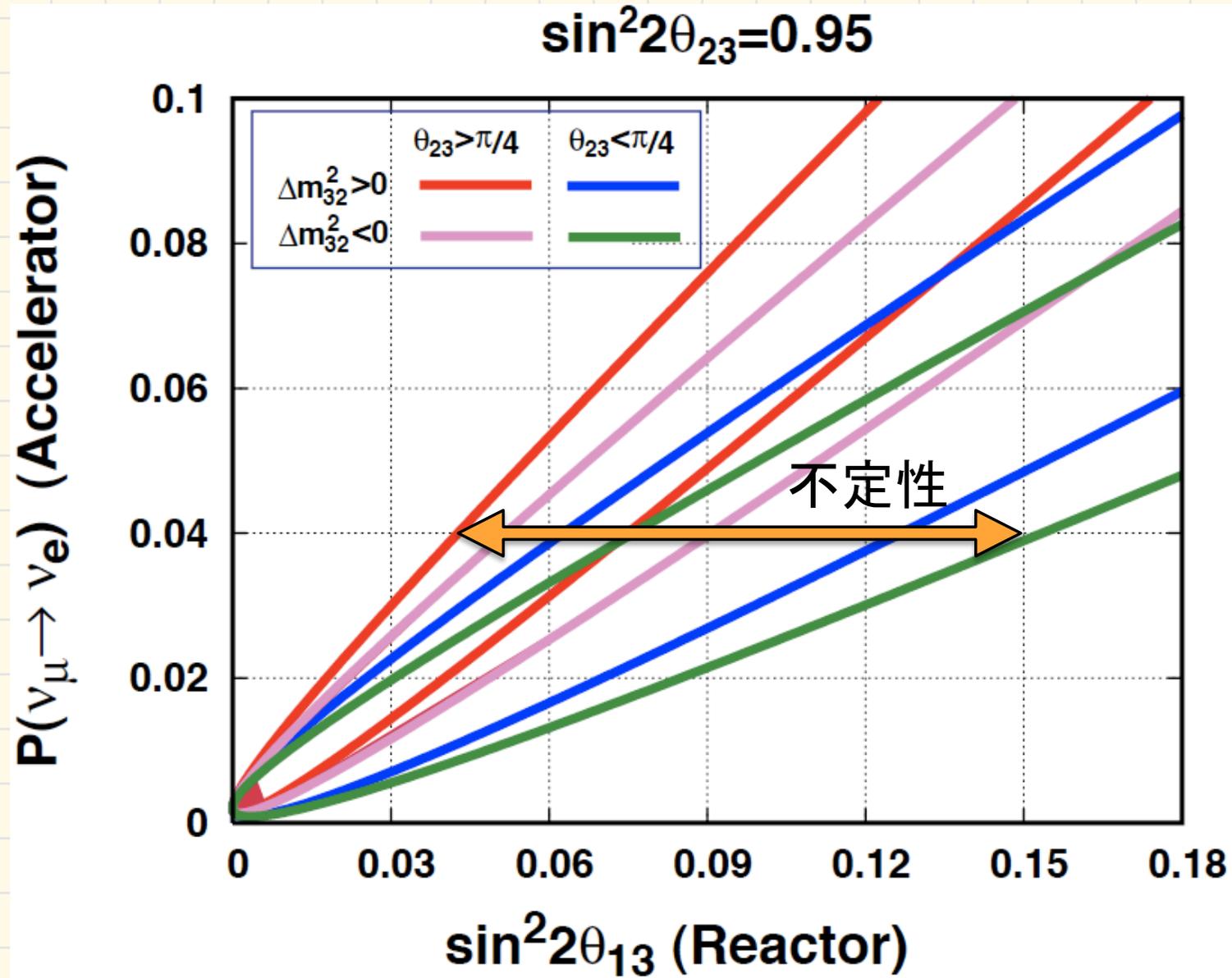
$$J_r \equiv c_{12} s_{12} c_{13}^2 s_{13} c_{23} s_{23}$$

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

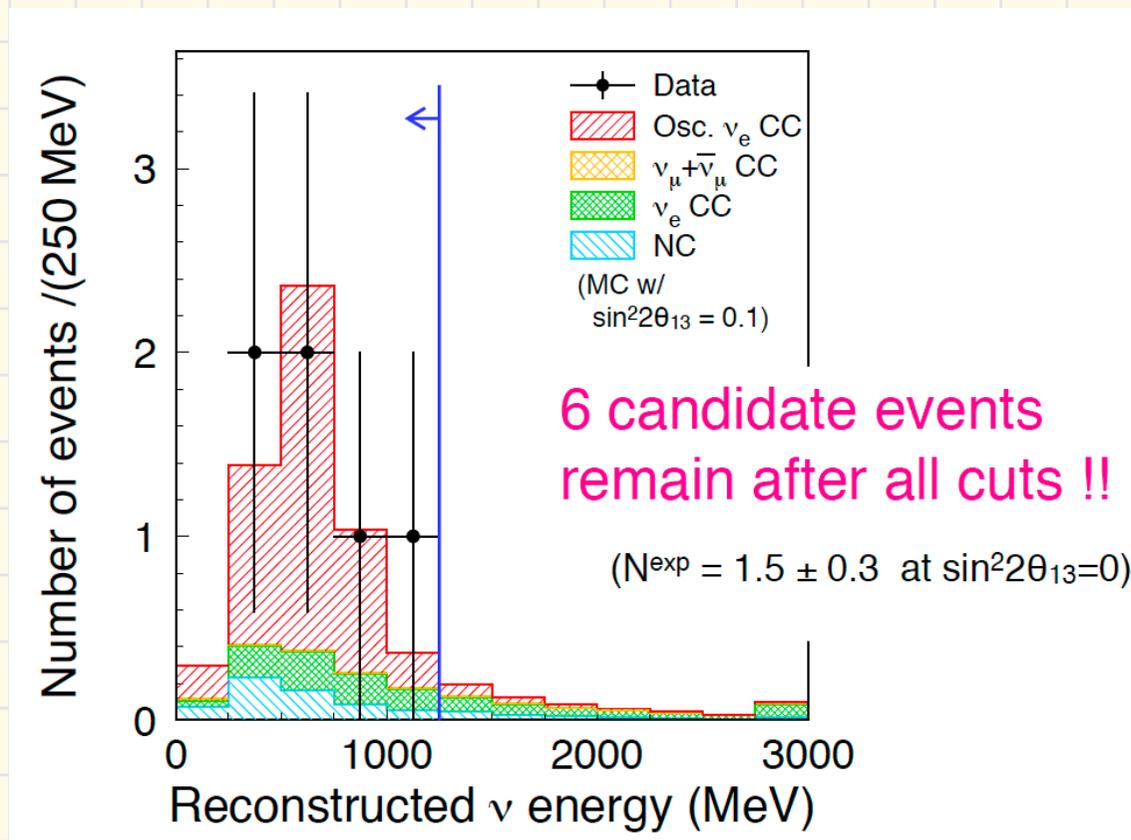
- θ_{13} , δ_{CP} , mass hierarchy, θ_{23} に対して感度を持つ
 - パラメータ縮退による θ_{13} に対する不定性は避けられない
- 将来的にはニュートリノビーム、反ニュートリノビームを用いた測定の組み合わせにより δ_{CP} , mass hierarchy の測定の可能性



パラメータ縮退効果



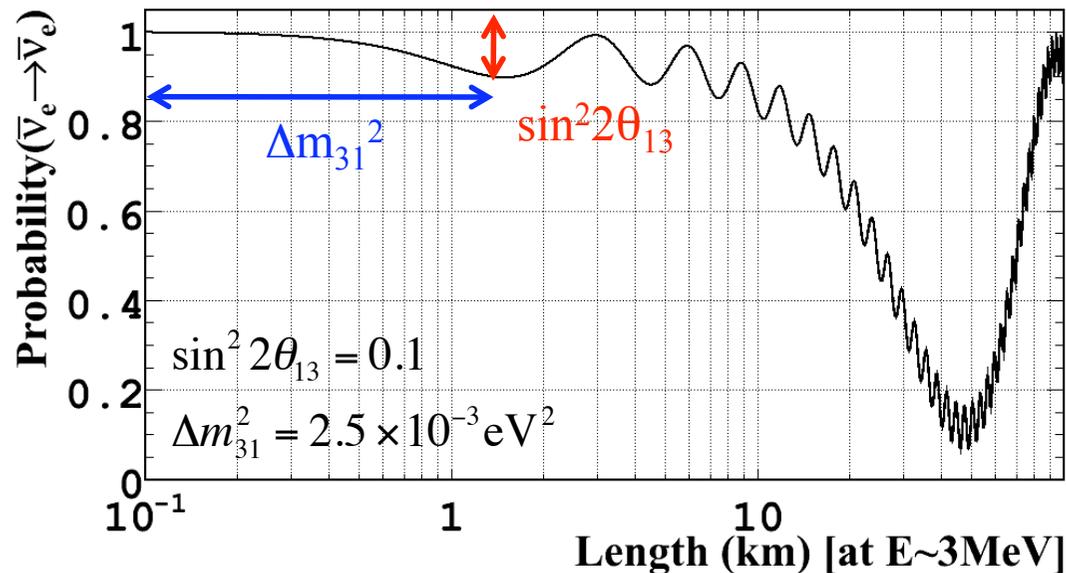
電子ニュートリノ出現現象 (non-zero θ_{13}) の兆候: T2K実験 (2011年6月)



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

原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} の測定

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

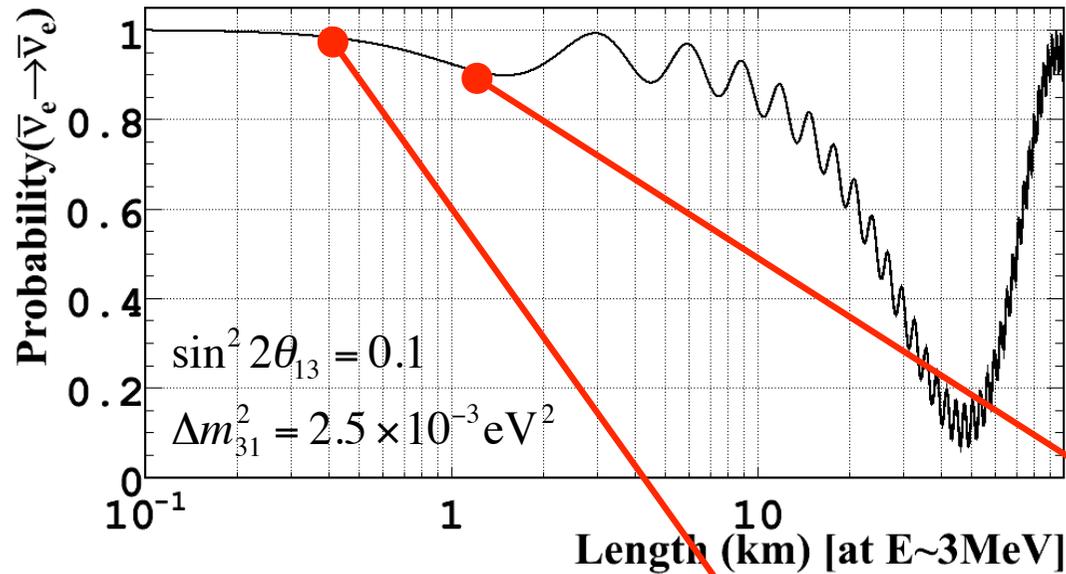


- 1km程度の距離においては2世代振動で仮定できる
 - 振動確率 $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ は Δm_{31}^2 と θ_{13} の関数となる
 - 距離が短いため物質効果は無視できる
 - 振動確率はCP対称性の破れ(δ_{CP})に依存しない
- ➔ 振動確率から直接 θ_{13} が決定される



次世代原子炉ニュートリノ実験

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



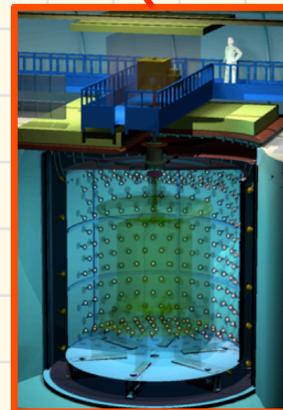
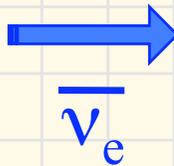
2基の検出器を原子炉から異なる距離に設置

- ニュートリノフラックス
- 標的陽子数
- 検出器特性
- 検出効率

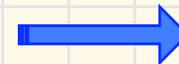
に起因する系統誤差を相殺 → 精密測定



Chooz原子炉
4.27GW_{th} x 2 cores



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

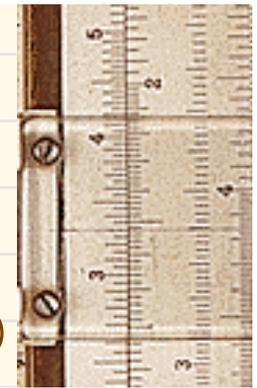


後置検出器
<L> 1050m
65v/day
300m.w.e.
April 2011

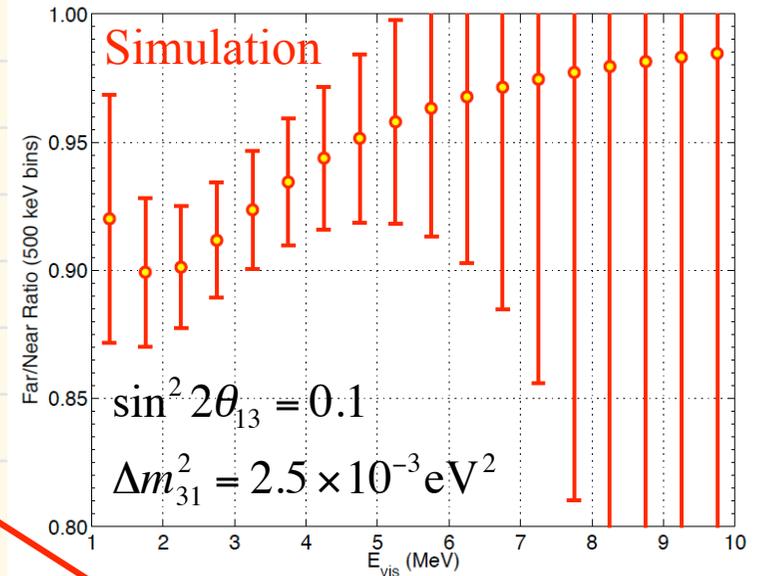
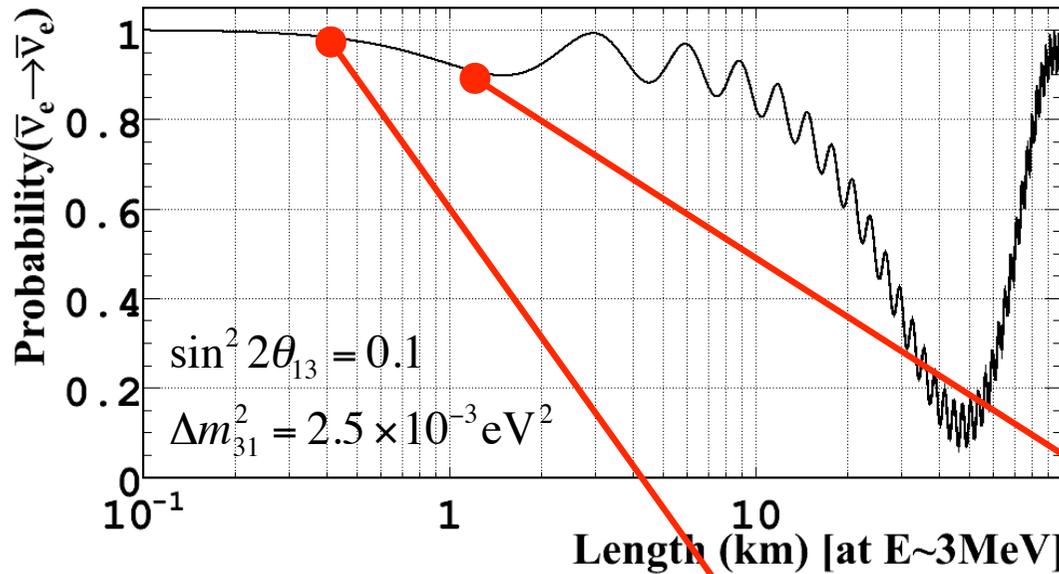


次世代原子炉ニュートリノ実験

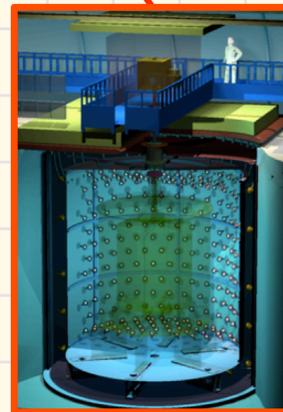
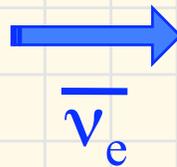
$$P[\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e] \cong 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + O(10^{-3})$$



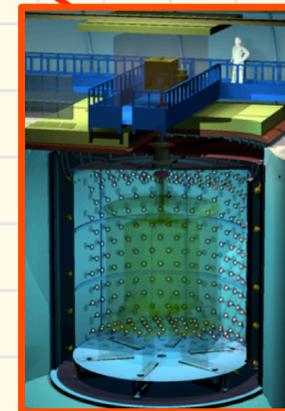
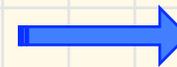
Far/Near比(3年間)



Chooz原子炉
 4.27GW_{th} x 2 cores



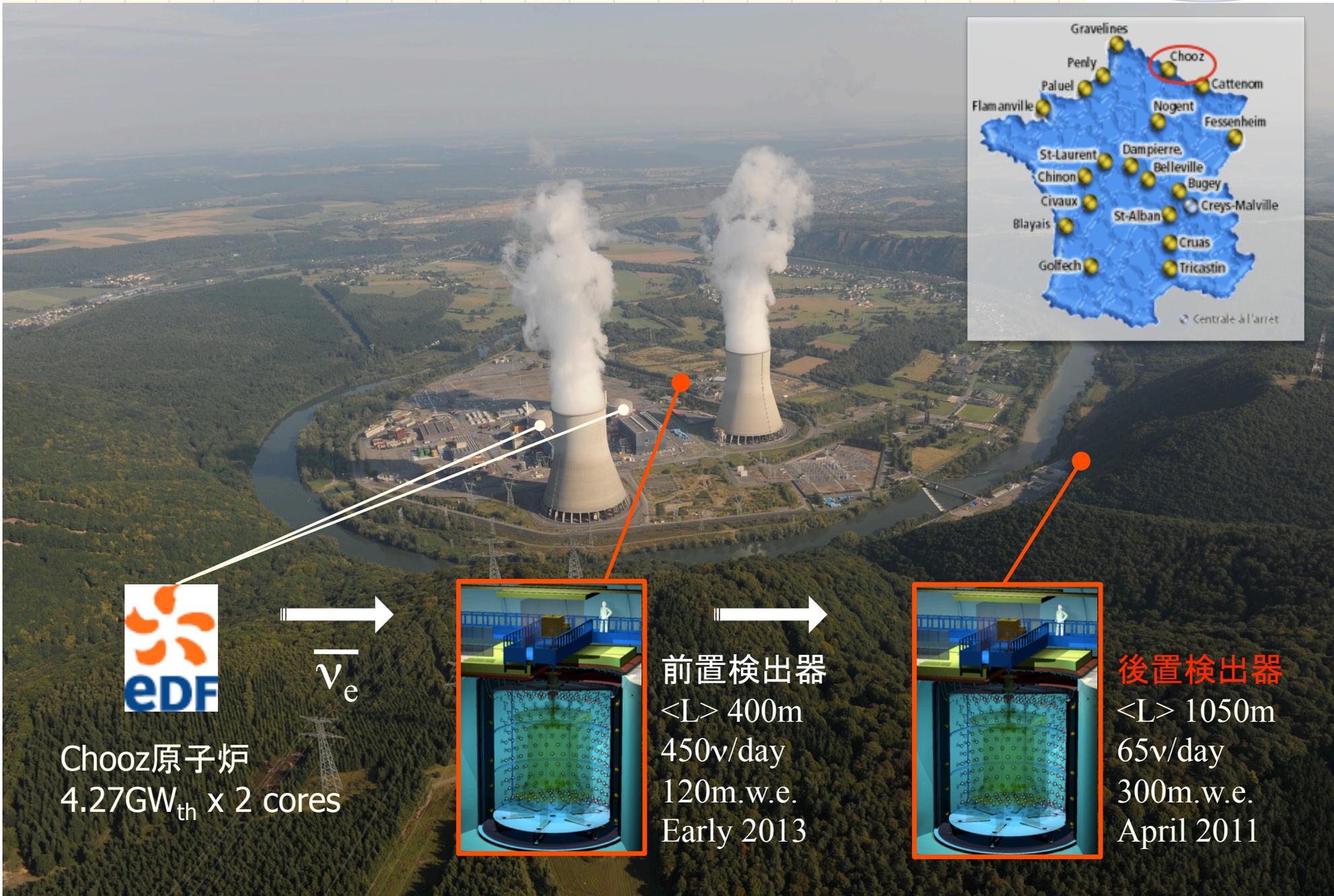
前置検出器
 <L> 400m
 450v/day
 120m.w.e.
 Early 2013



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



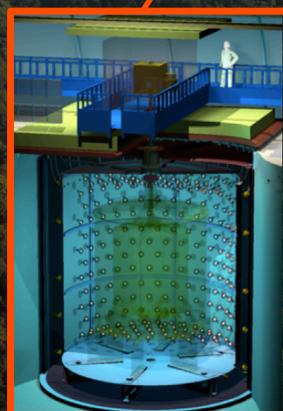
Double Chooz 原子炉ニュートリノ実験



Chooz原子炉
4.27GW_{th} x 2 cores



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



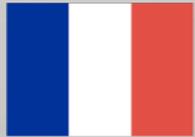
後置検出器
<L> 1050m
65v/day
300m.w.e.
April 2011

Double Chooz 共同研究者



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)

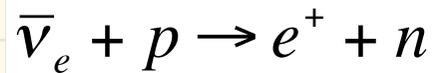
Web Site: www.doublechooz.org/



Double Chooz共同研究者会議@神戸大学

原子炉ニュートリノ測定原理

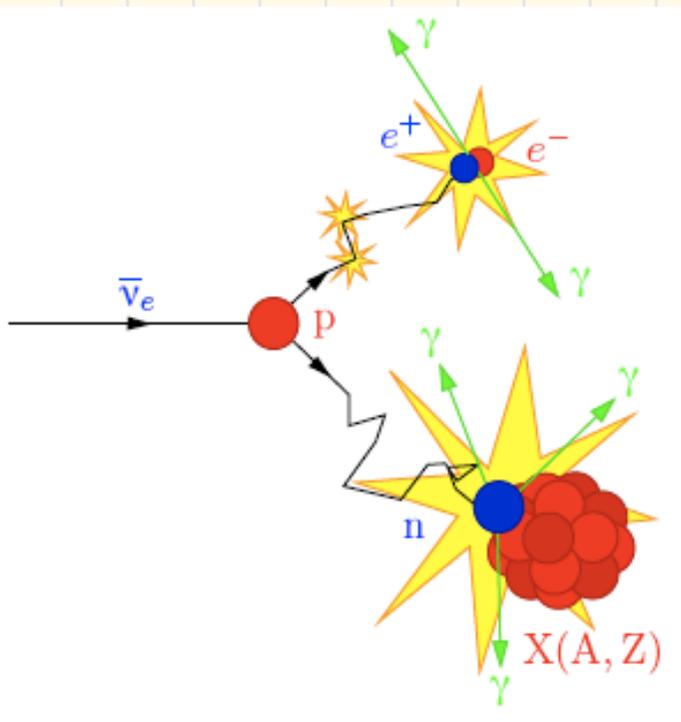
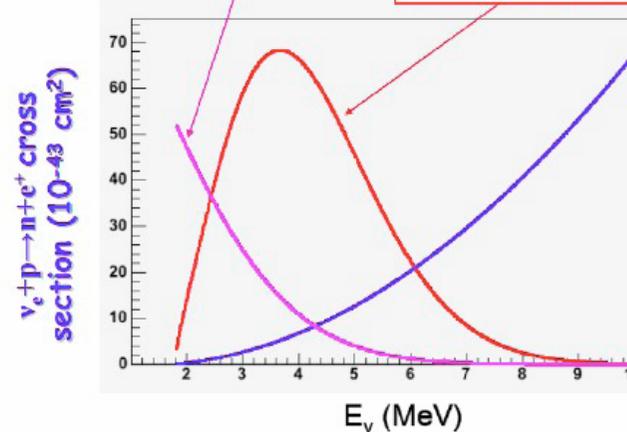
- 反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊反応を検出



- 反応のしきい値: 1.8MeV
- 事象数: 65 events/day (後置検出器)

Reactor ν_e spectrum (a.u.)

Observed spectrum (a.u.)



2つの同期信号を要求することによりバックグラウンドを大幅に低減

初期信号:

陽電子およびその対消滅 (1-8MeV)

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

後発信号:

ガドリニウム原子核の中性子捕獲に伴う
ガンマ線 (8MeV)

2つの信号の時間差:

$\tau = 30 \mu\text{sec}$



Double Chooz検出器

Outer Veto (プラスチックシンチレータ)

宇宙線ミュオンによるバックグラウンドの同定

Steel shield (15cm thick)

Inner Veto

(90m³ 液体シンチレータ & 78 PMTs)

宇宙線ミュオンによるバックグラウンドおよび
高速中性子バックグラウンドの同定

Steel Vessel & PMT support structure

Buffer (110m³ ミネラルオイル & 390 PMTs)

高速中性子バックグラウンドおよびPMTから
発生する環境ガンマ線の遮蔽

Acrylic Vessel

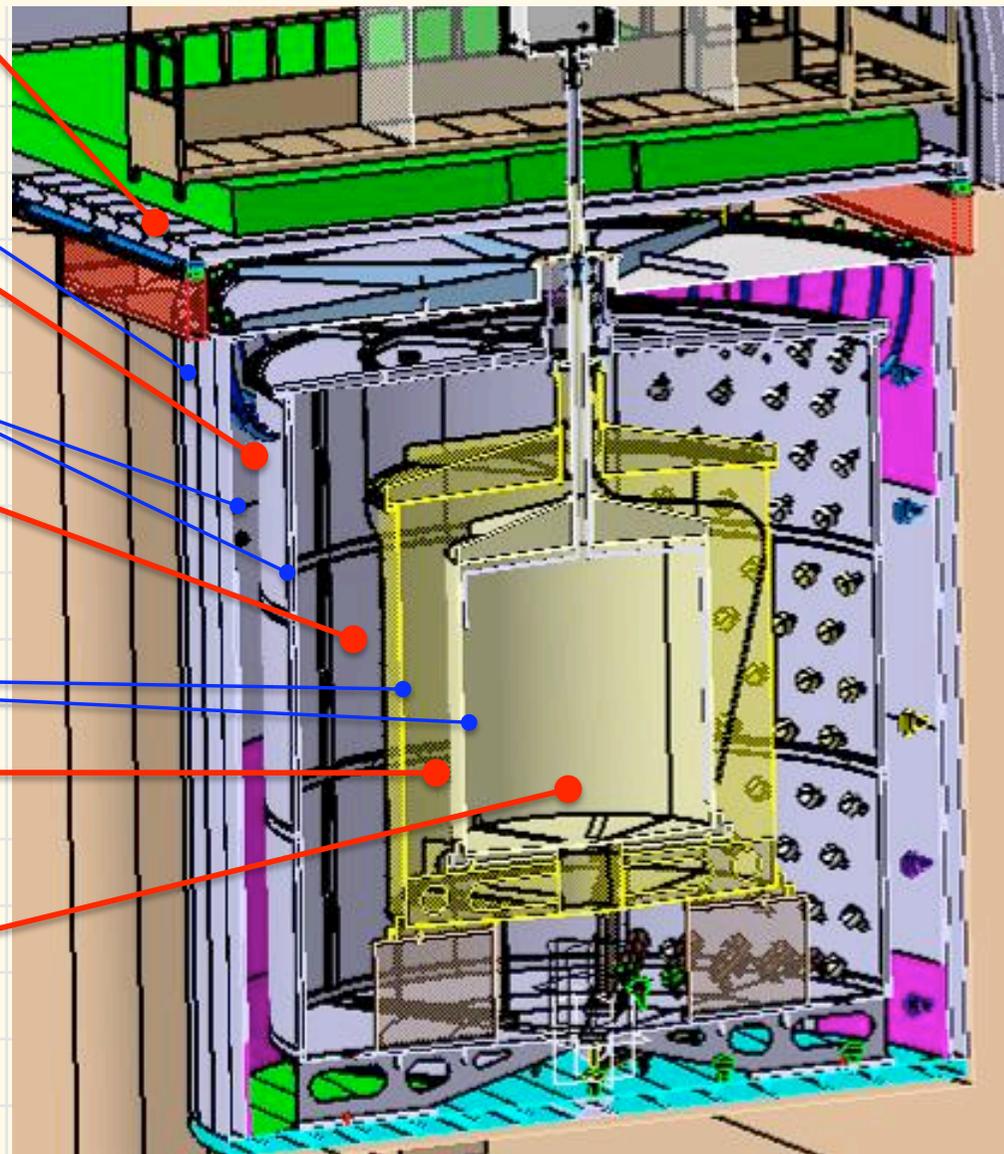
γ -Catcher (22.3m³ 液体シンチレータ)

n-Gd captureによる計8MeVのガンマ線のエ
ネルギーの測定

ν -Target

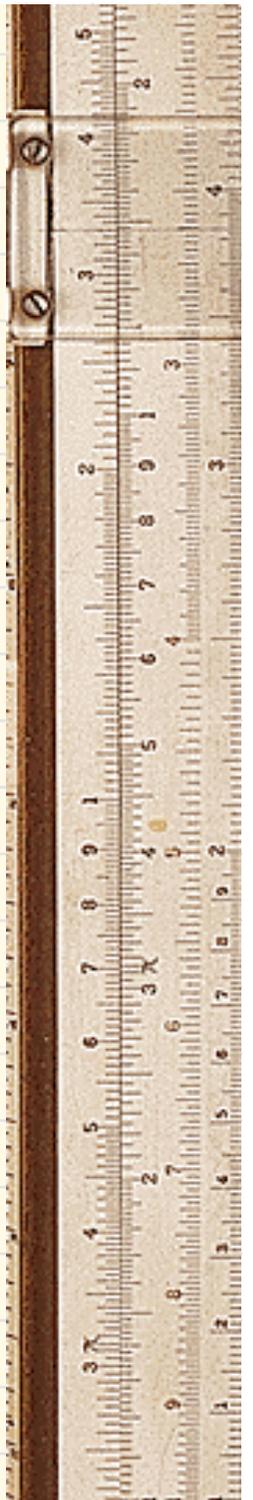
(10.3m³ Gdを含む(1g/l)液体シンチレータ)

ニュートリノ事象に対する有効体積
n-Gd captureにより計8MeVガンマ線を発生



スケジュール

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	前置検出器ラボ完成
2013年初頭	前置検出器完成 2基の検出器による測定開始



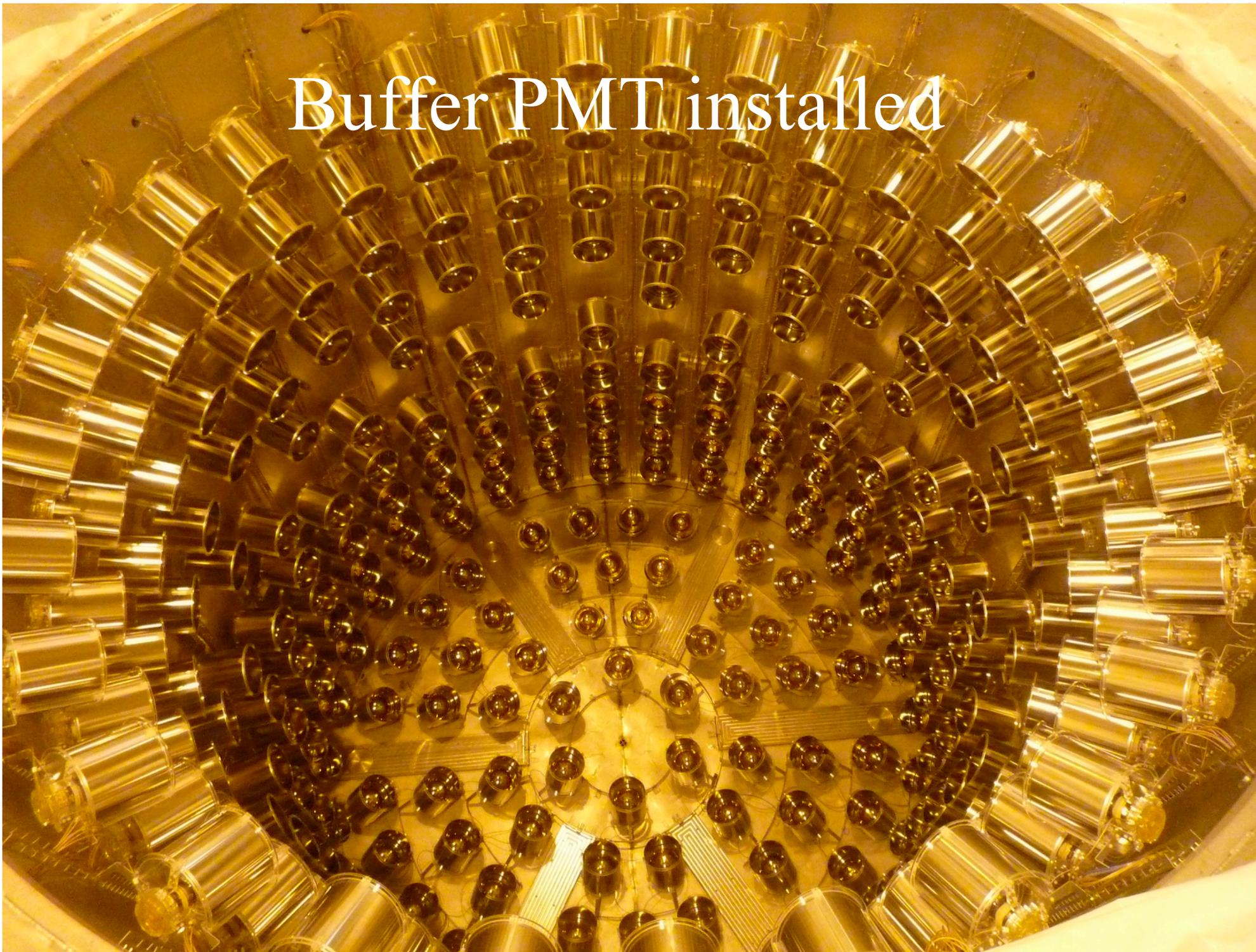
Construction @ DC far lab.



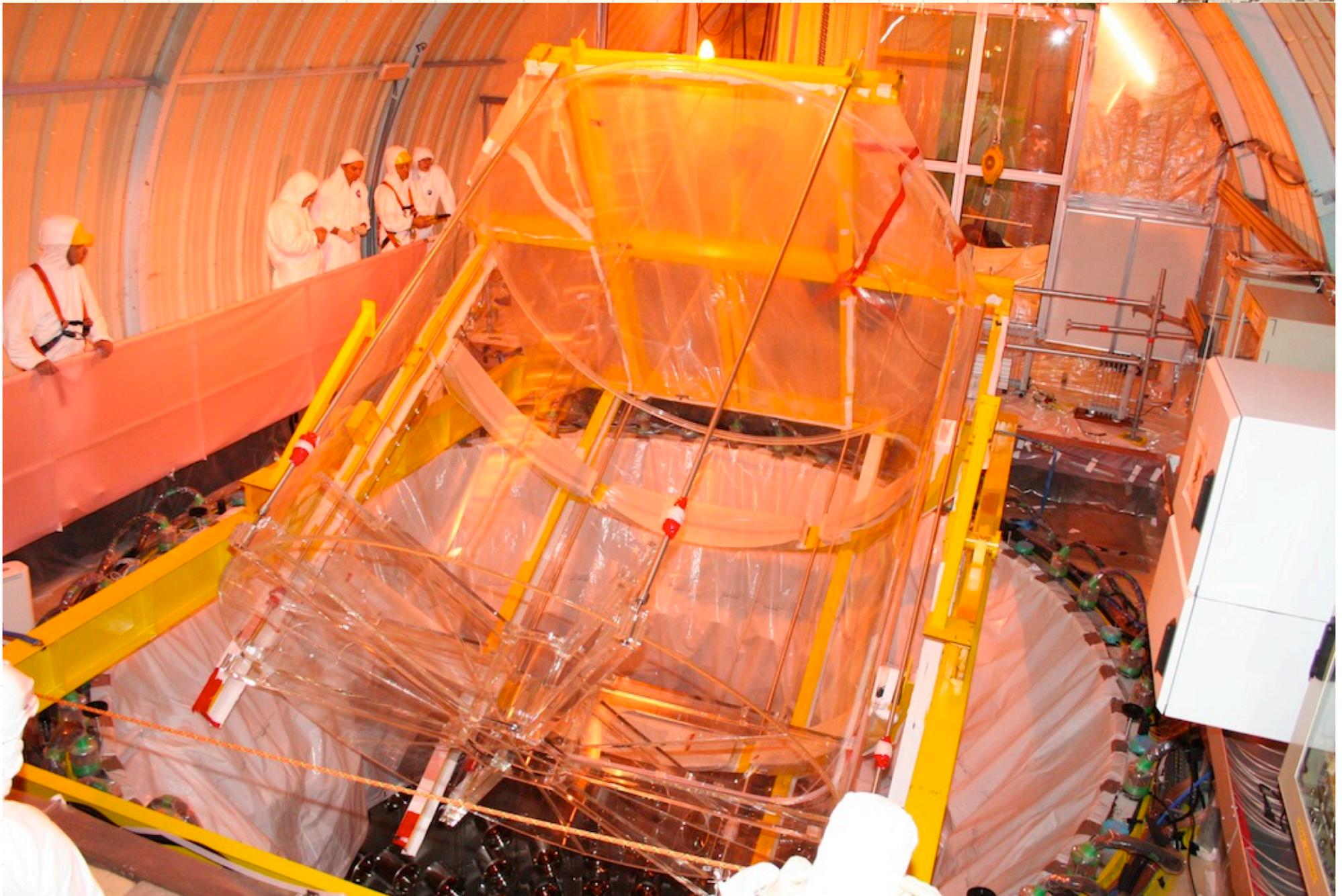
Inner veto PMT installed



Buffer PMT installed

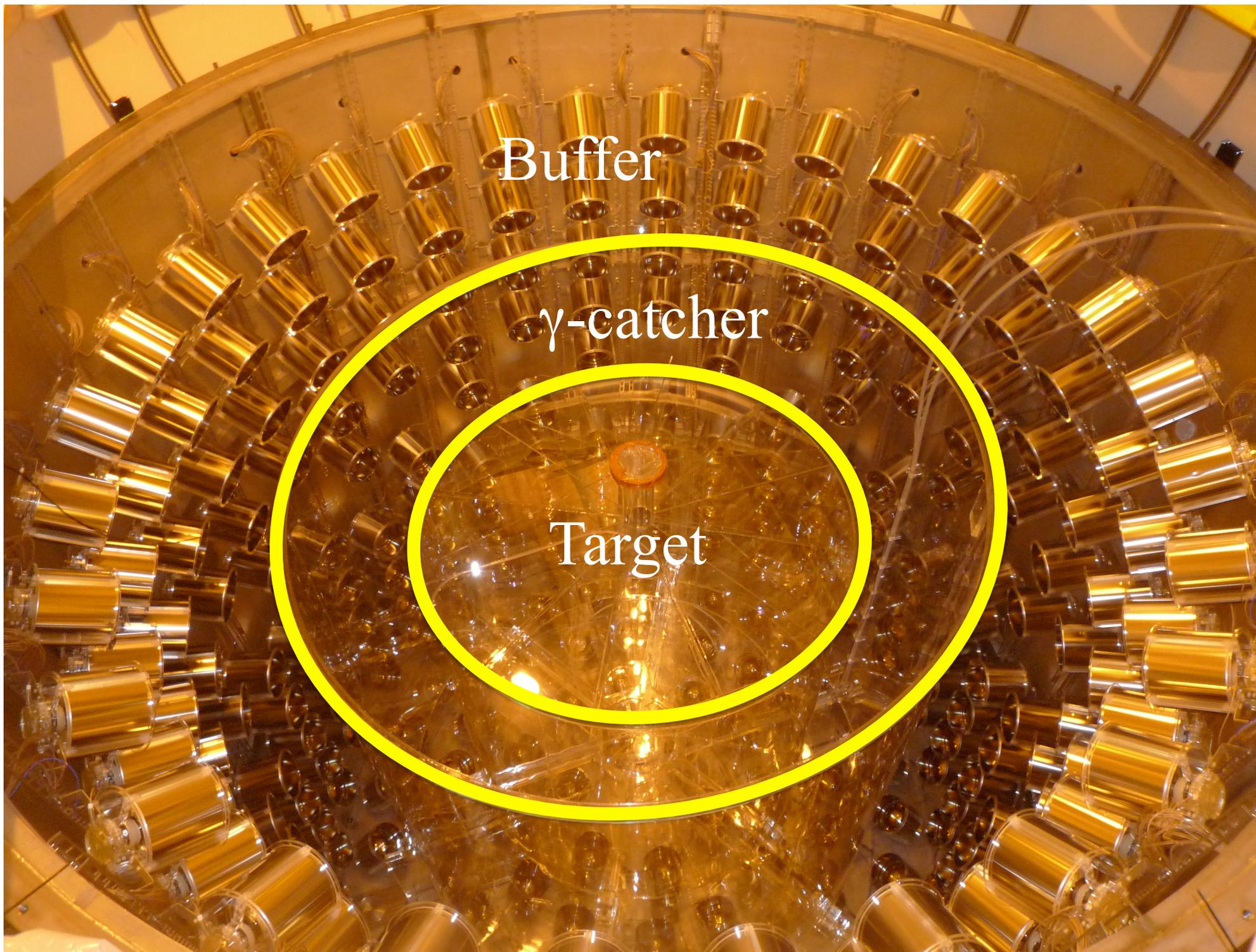


Installation of acrylic vessel



Target and γ -catcher
acrylic vessels installed





Buffer

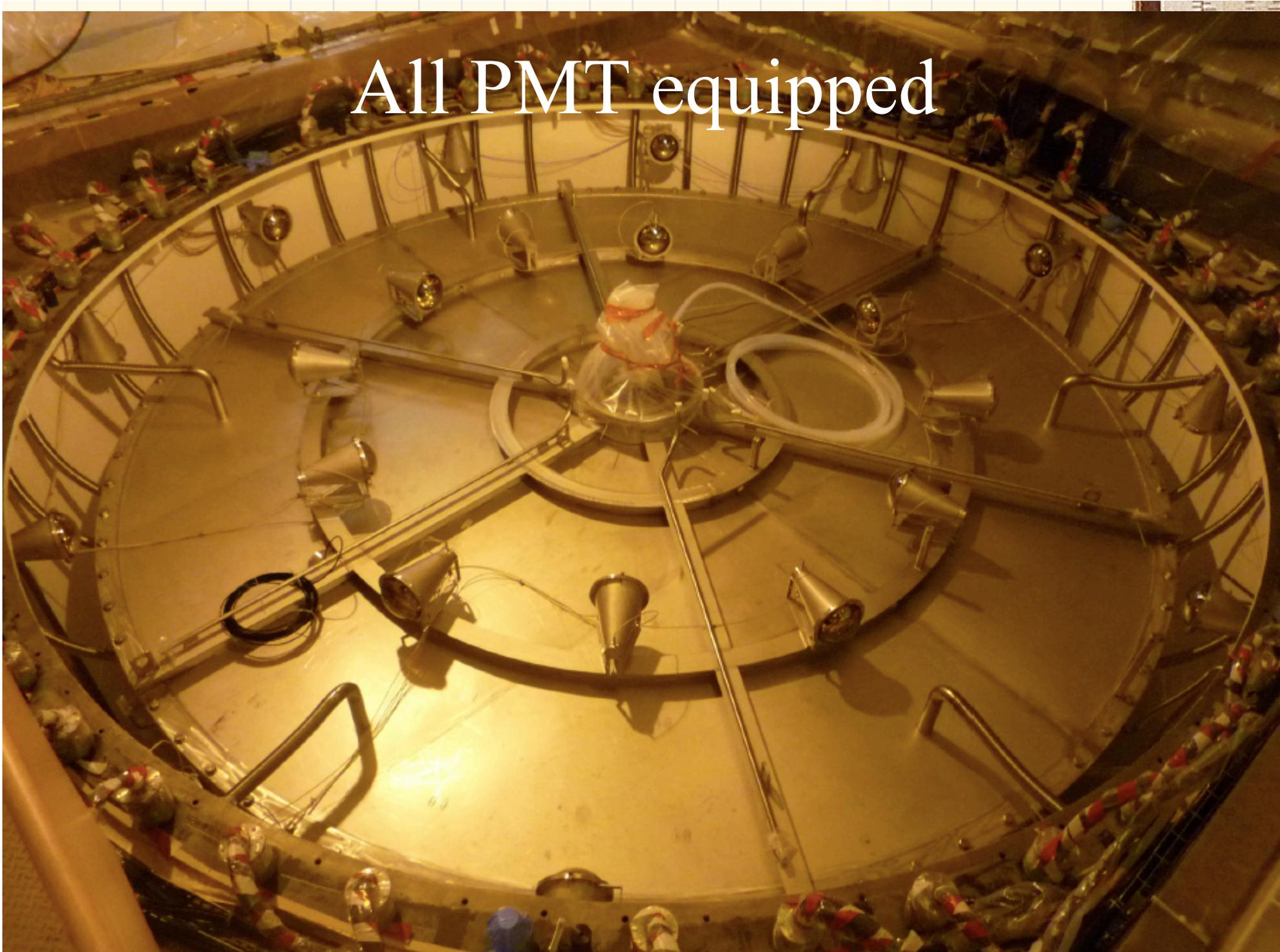
γ -catcher

Target

Lid closure



All PMT equipped



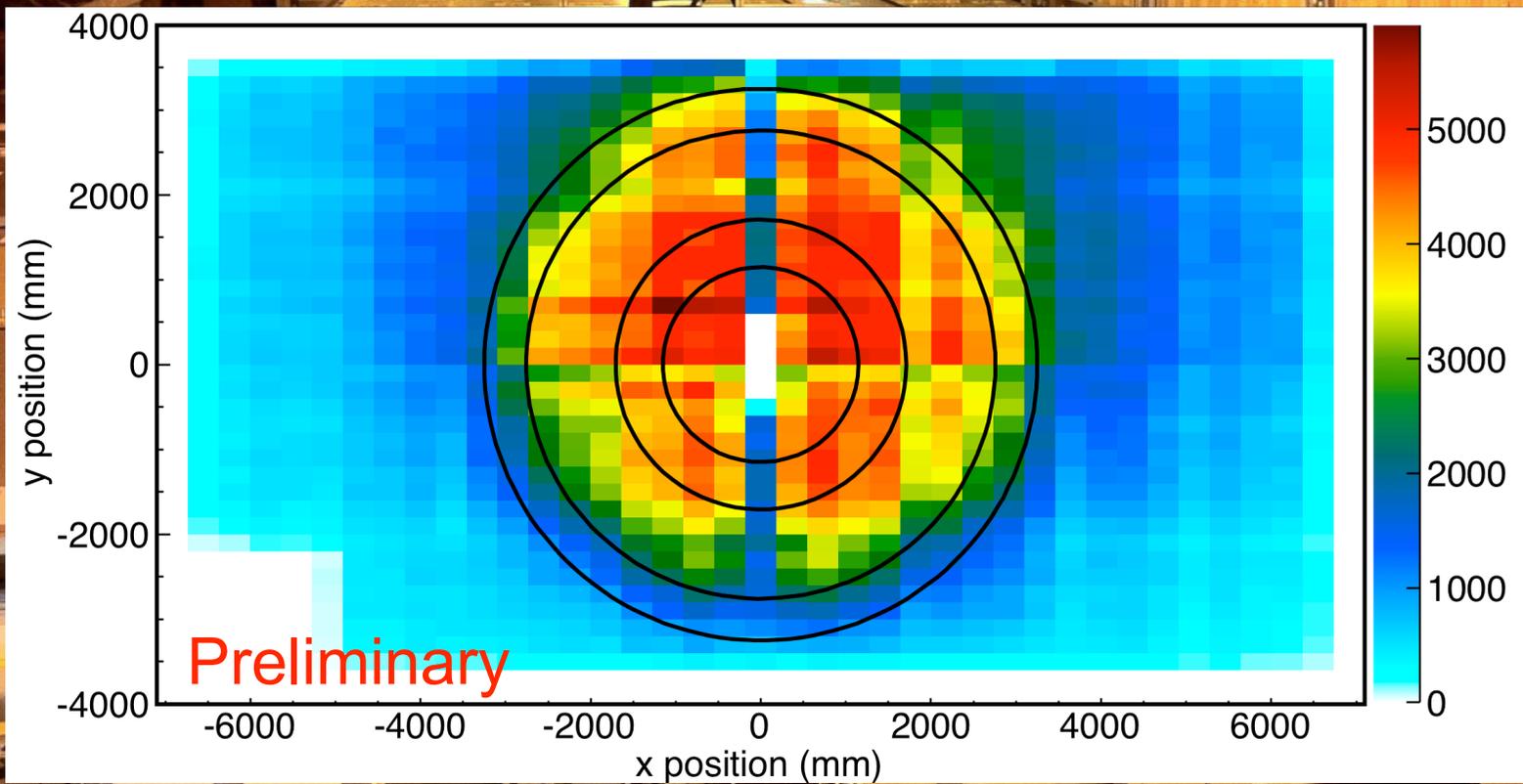
Steel shield installed



Outer Veto partially installed



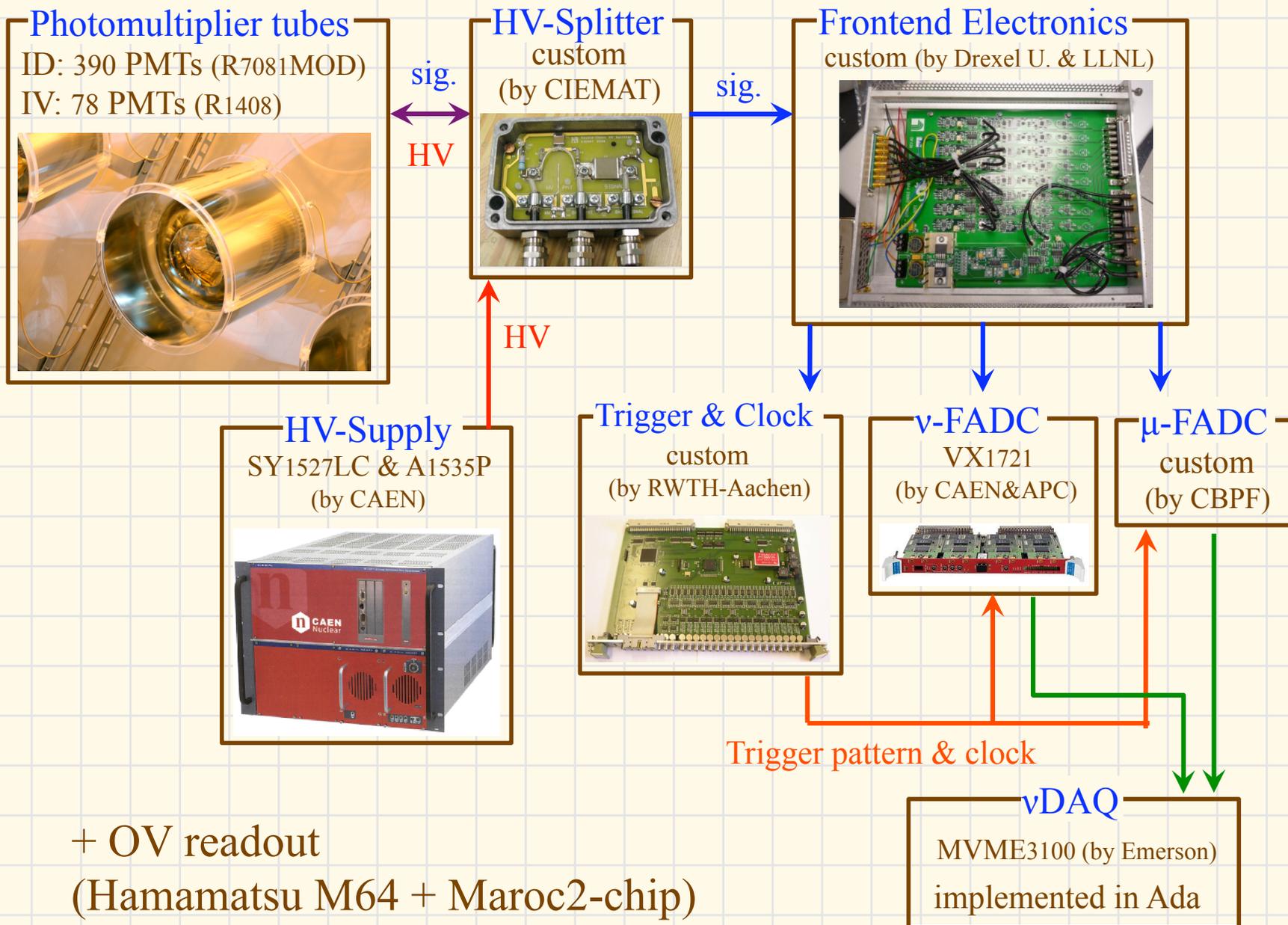
Outer Veto commissioned



Data taking

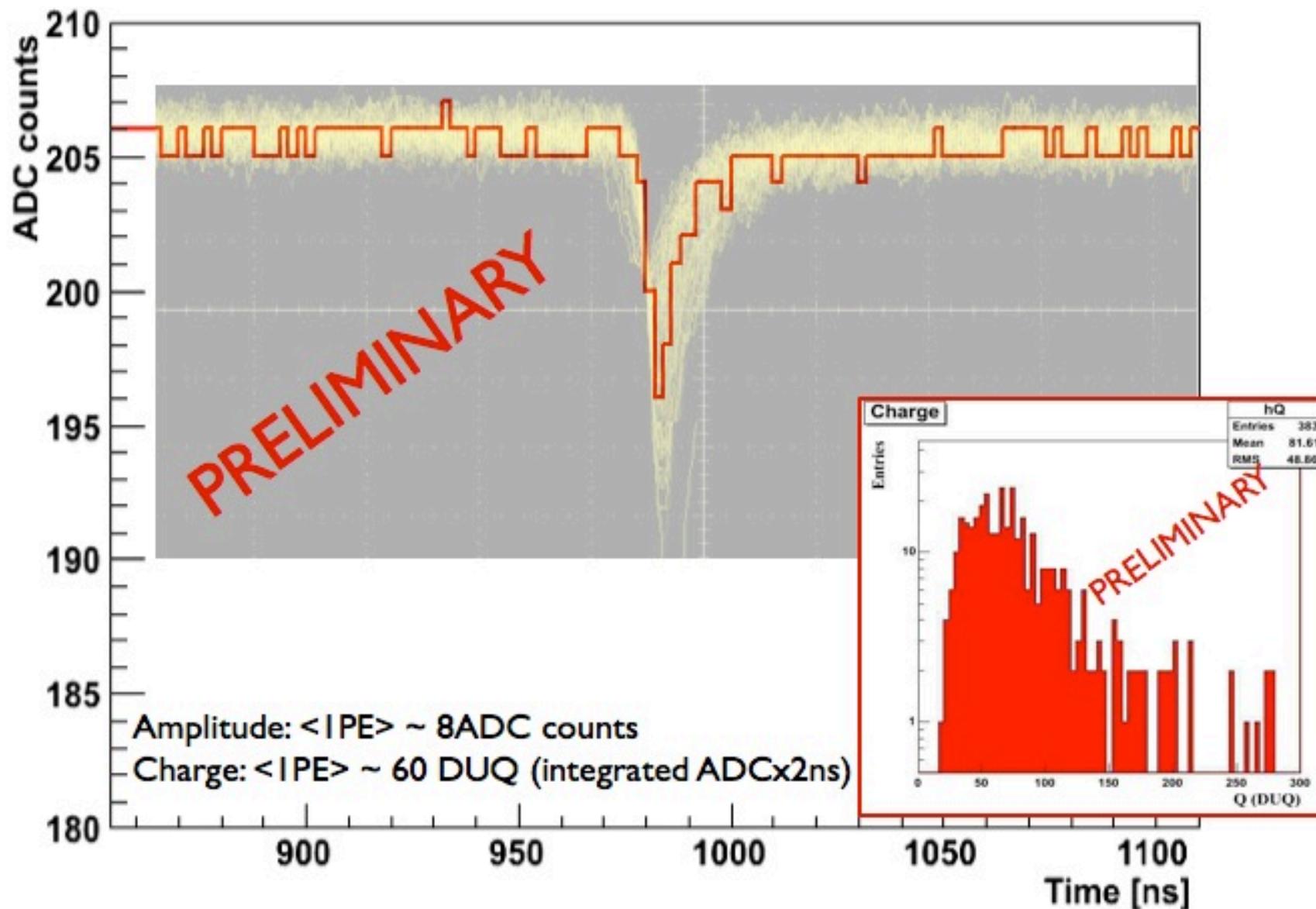


Electronics

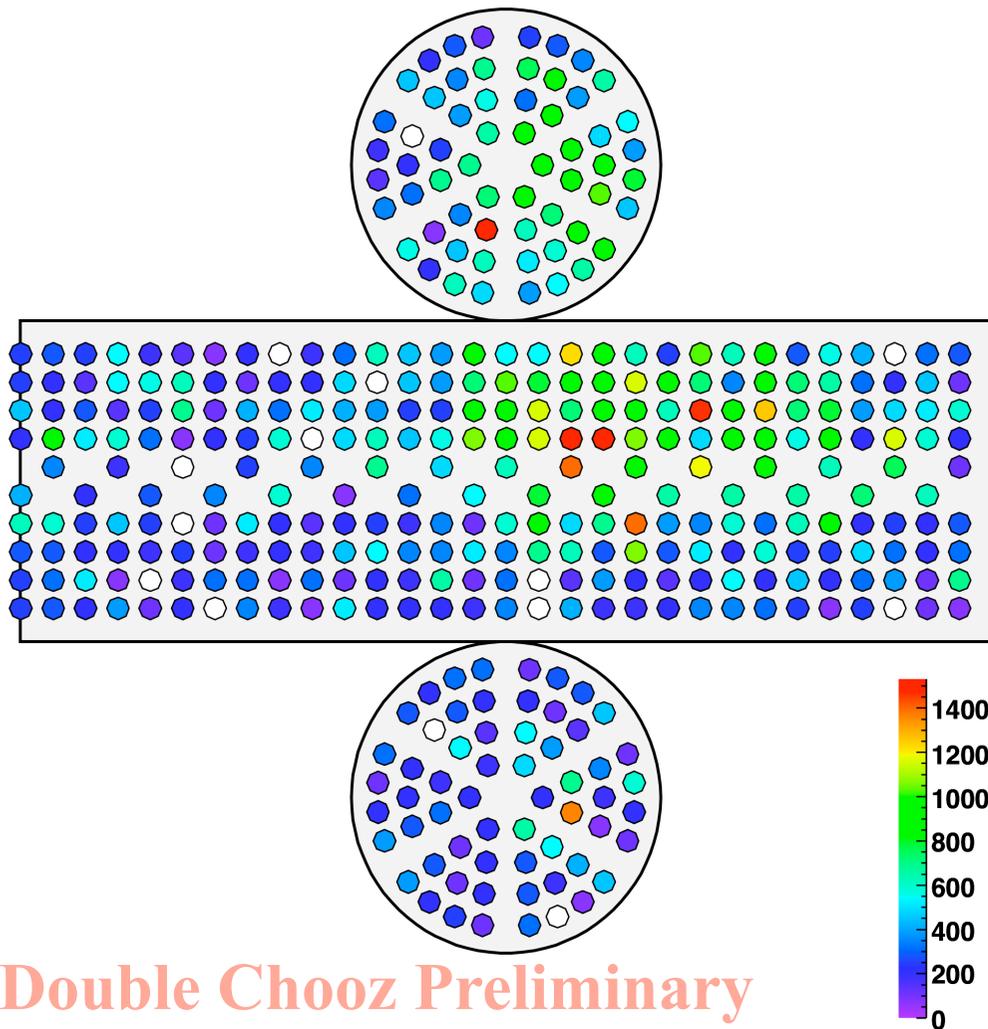


Flash-ADCによる信号波形

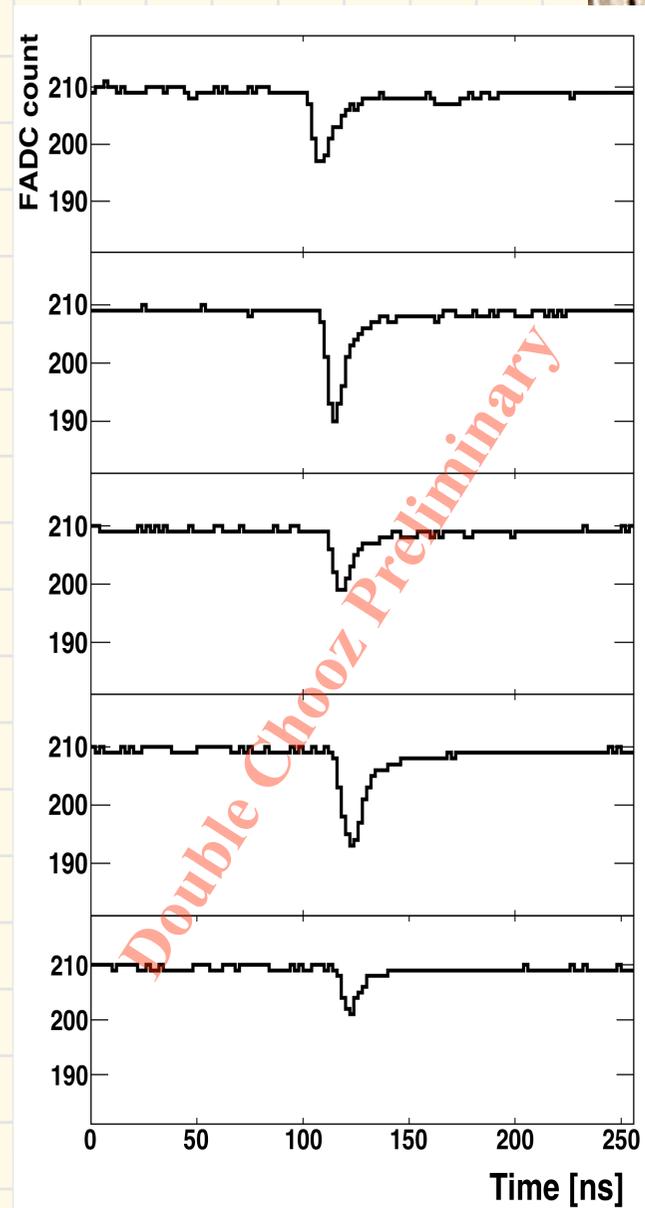
channel = 53, trigger_id = 46



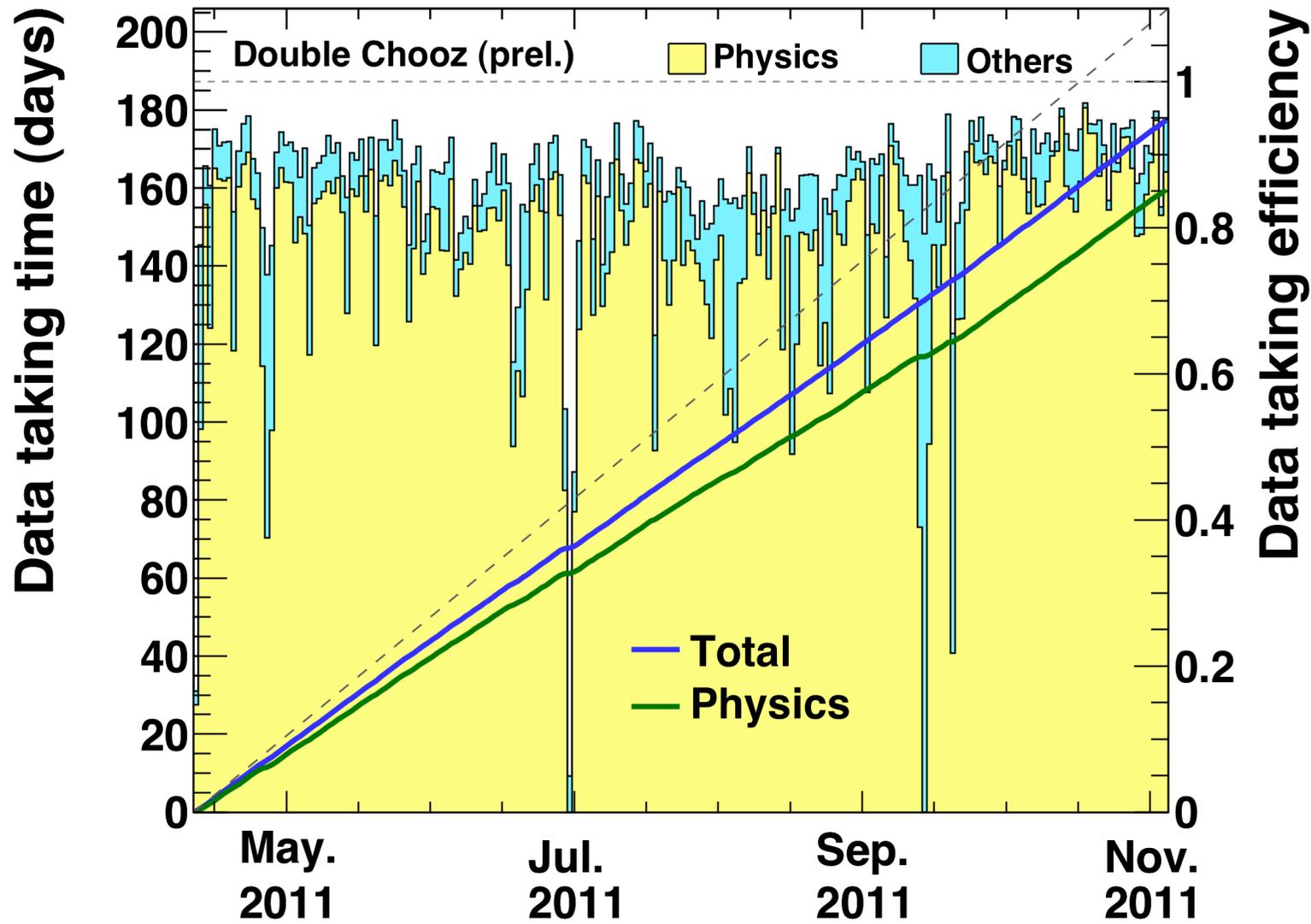
イベントディスプレイ (~8MeV)



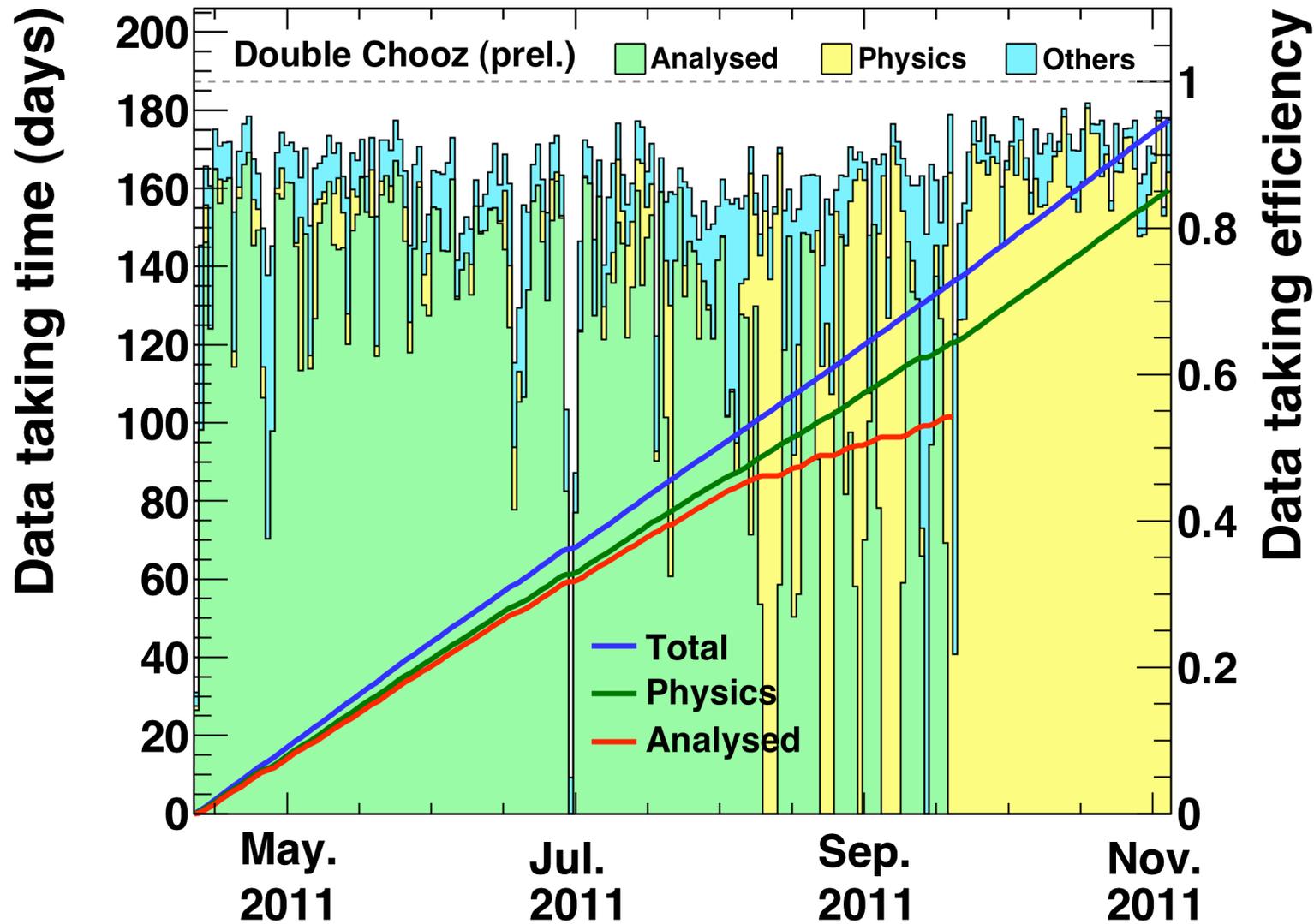
Double Chooz Preliminary



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)



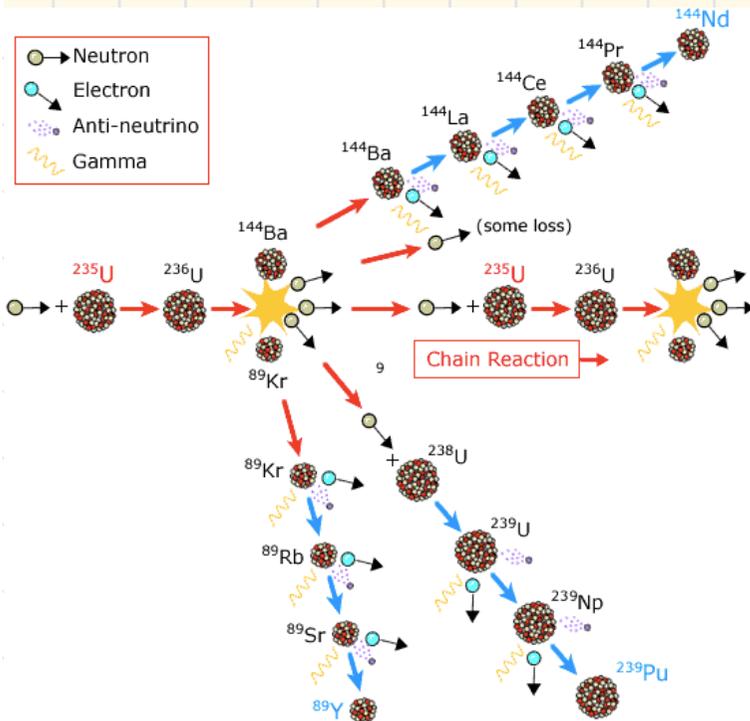
Neutrino flux



ニュートリノフラックス計算

期待されるニュートリノ事象数

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



核分裂あたりの平均エネルギー ($k=^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}$)

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

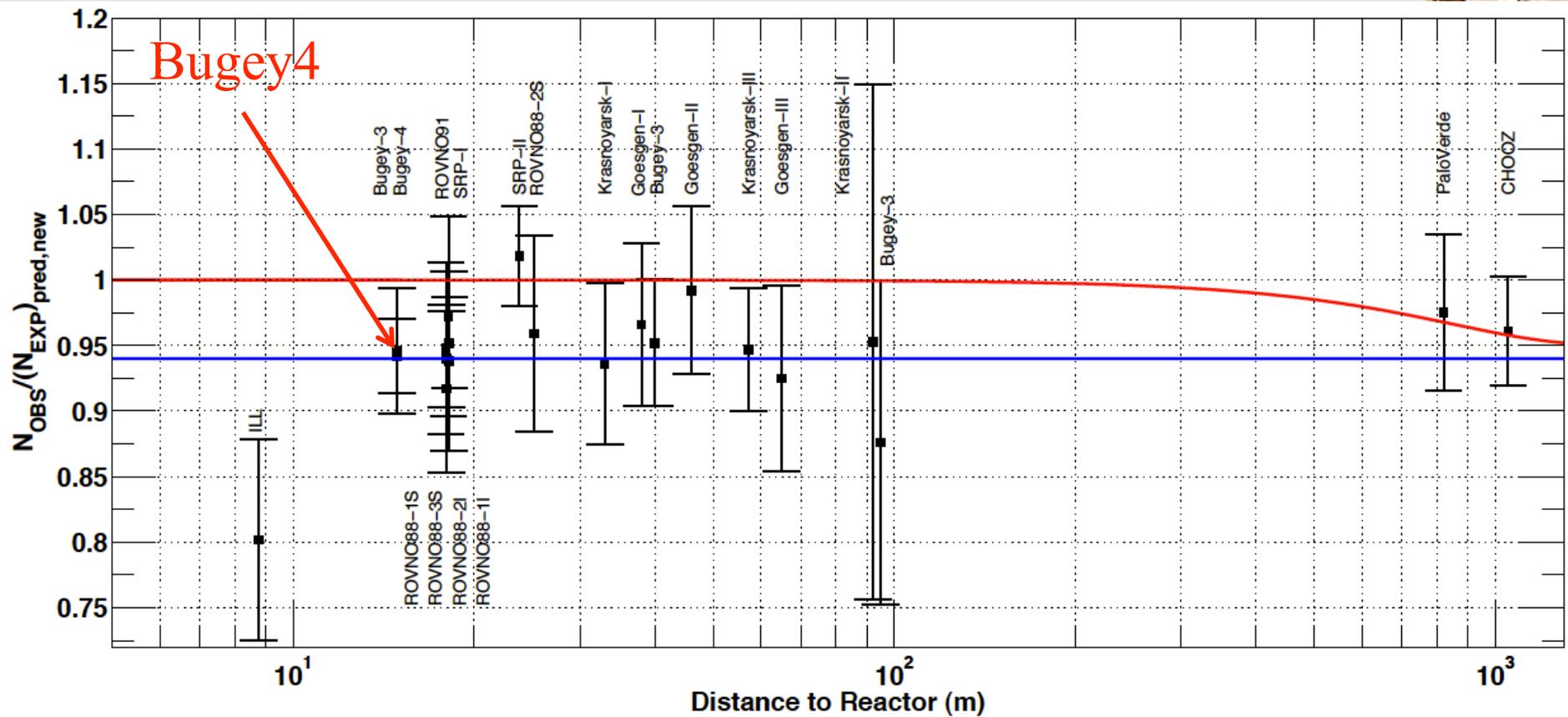
核分裂あたりの平均生成断面積

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

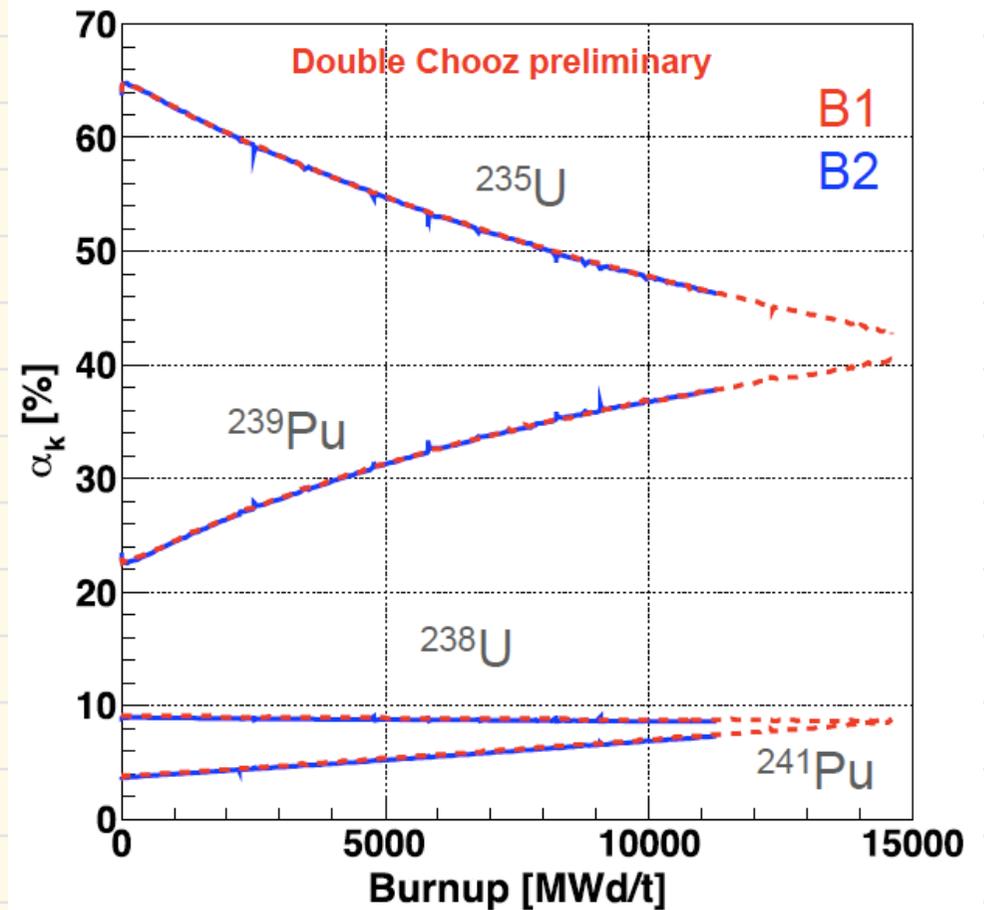
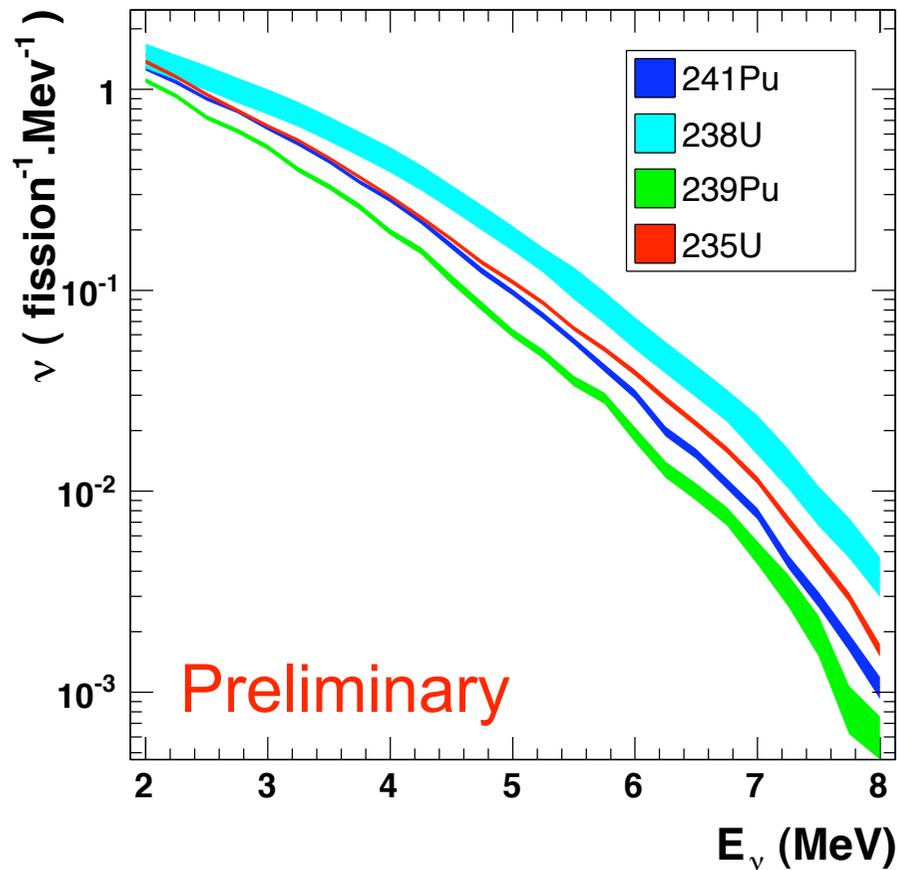
$$\langle \sigma_f \rangle_k = \int_0^\infty dE S_k(E) \sigma_{\text{IBD}}(E)$$

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

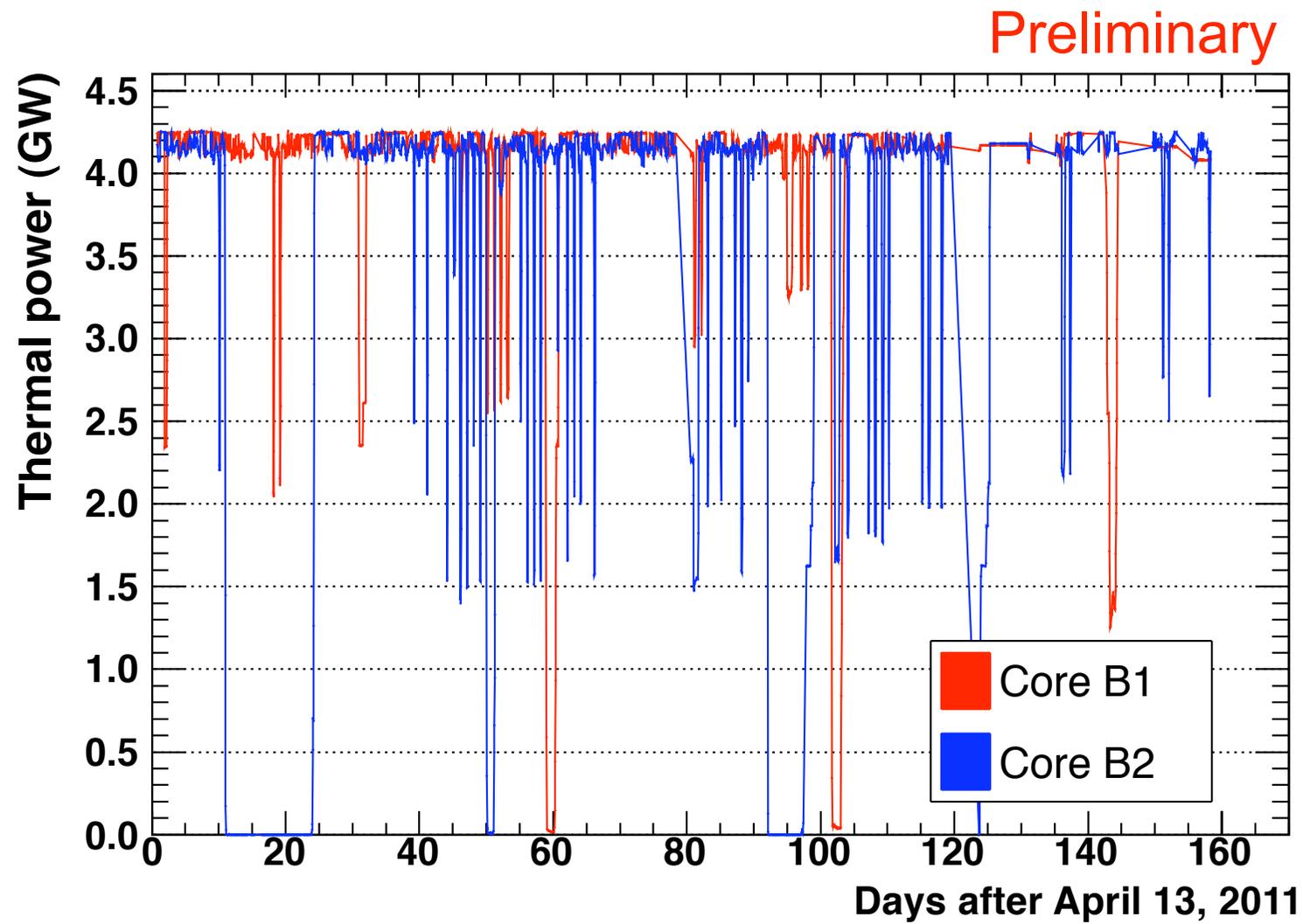
ニュートリノフラックス計算



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

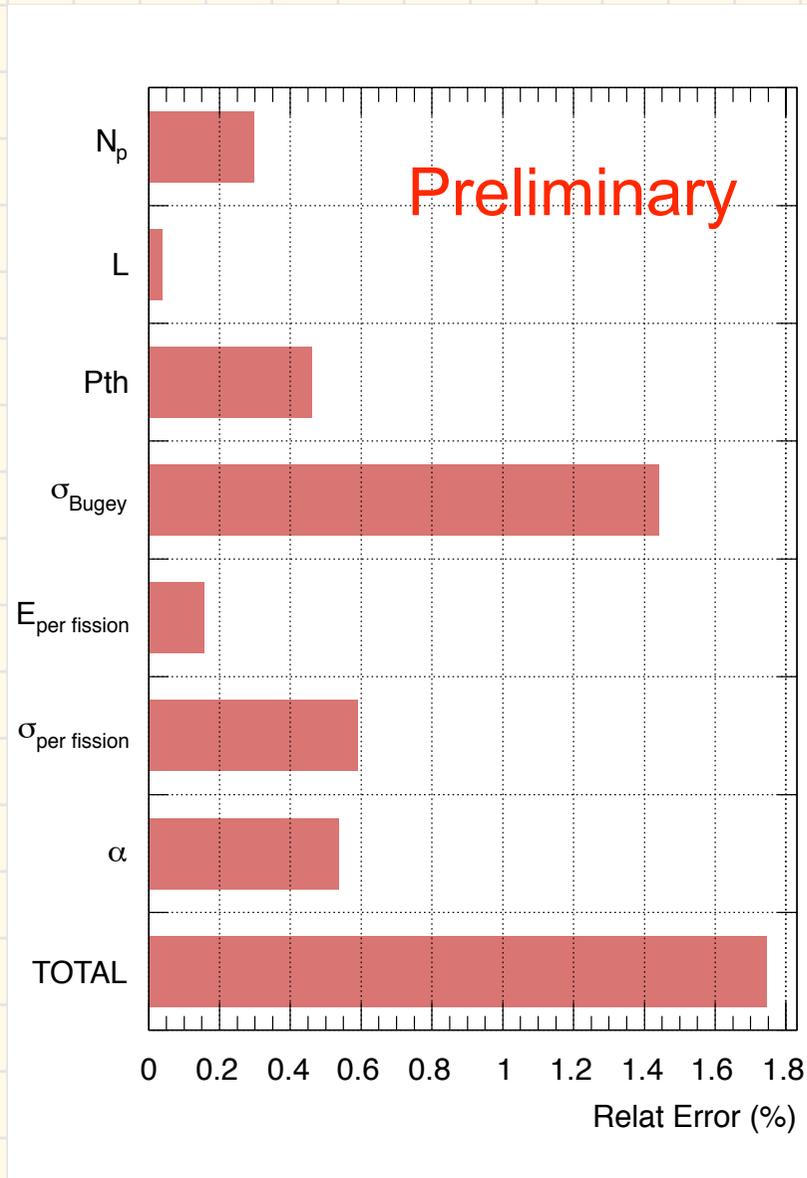


Thermal power



系統誤差0.46%

フラックス計算の系統誤差

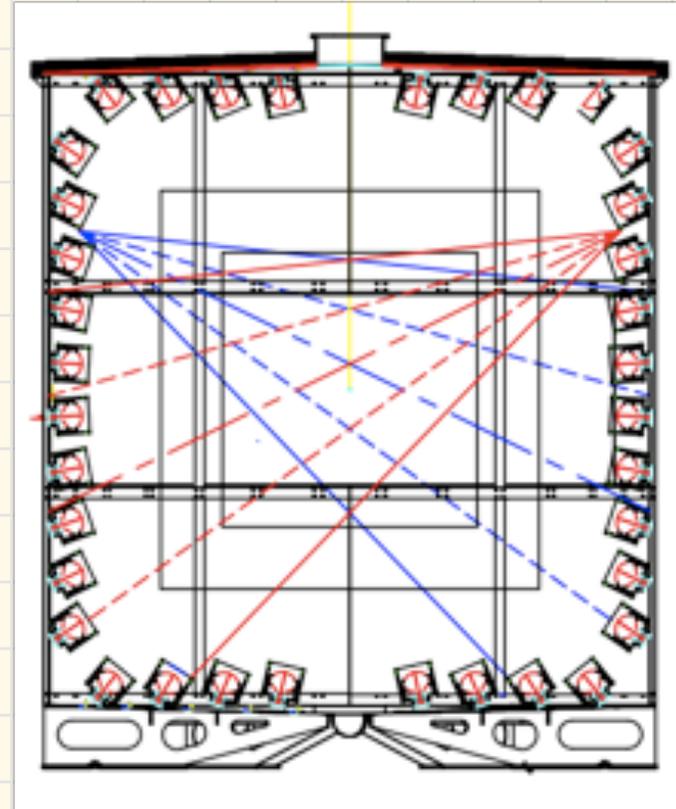


1.7% total error
(Bugey 4の測定を使わない
場合: 2.7%)

Calibration



LED calibration system



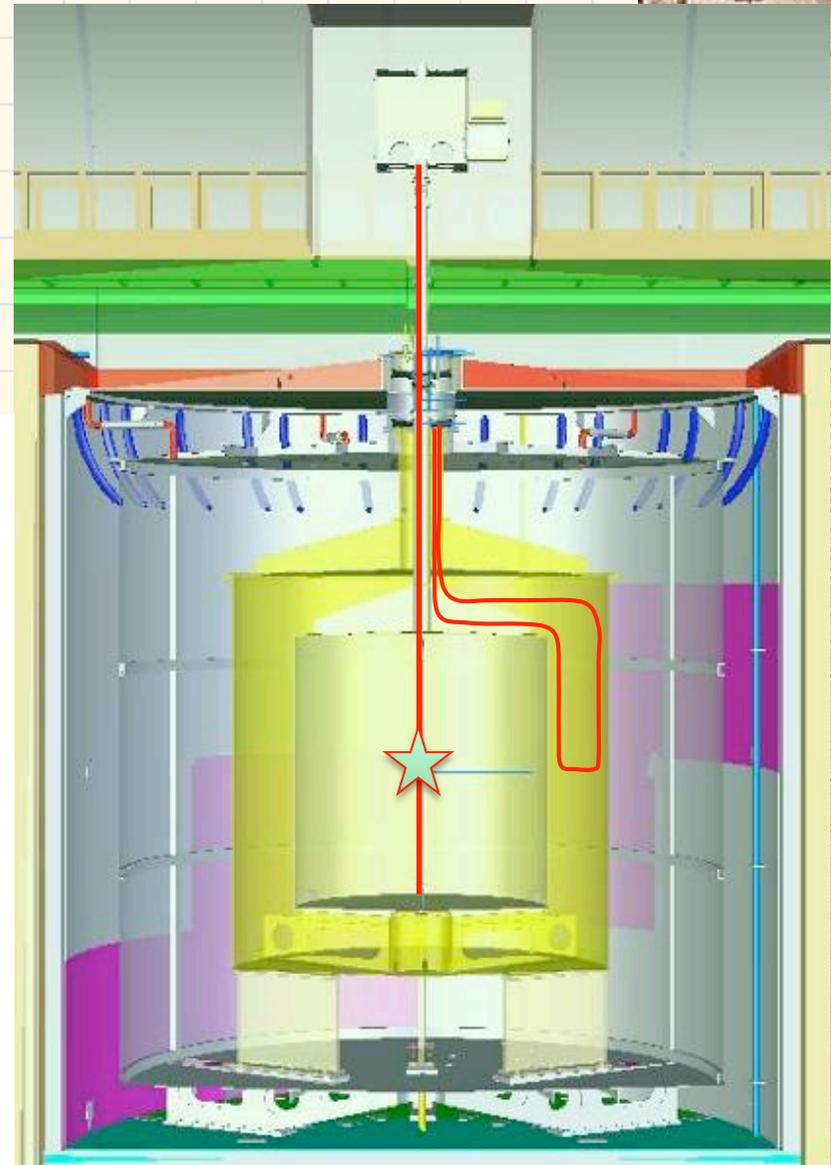
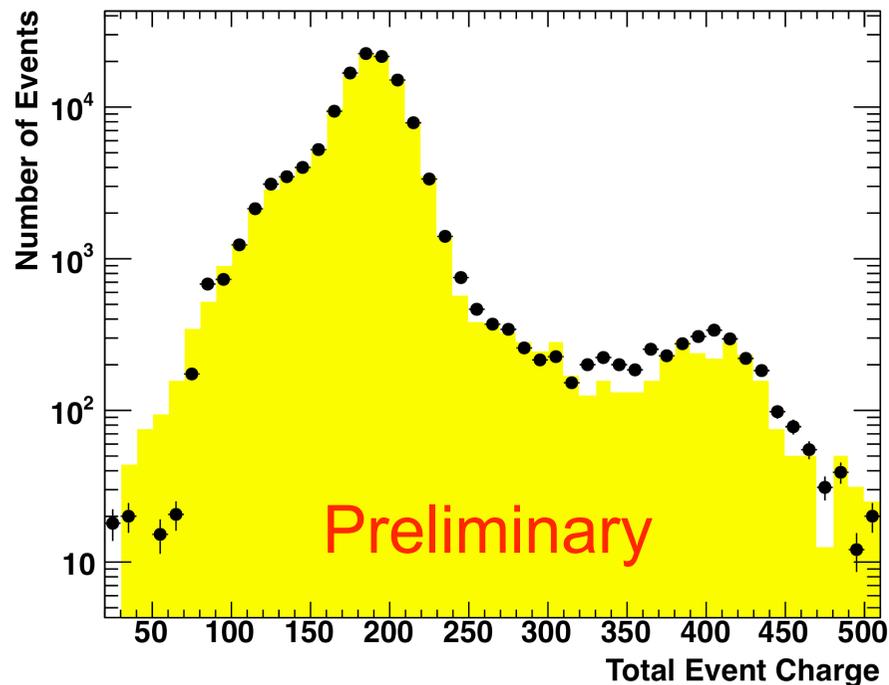
- LED光源からの光をファイバーを通して検出器内に照射
- 検出器内に恒久的に設置されているため、検出基特性の時間変動のキャリブレーションに用いられる



エネルギーキャリブレーション

- Z-Axis systemにより ^{68}Ge 陽電子線源を検出器中心に配置
- 対消滅による計 1.02MeV のガンマ線（逆ベータ崩壊の信号の最小エネルギーに相当）

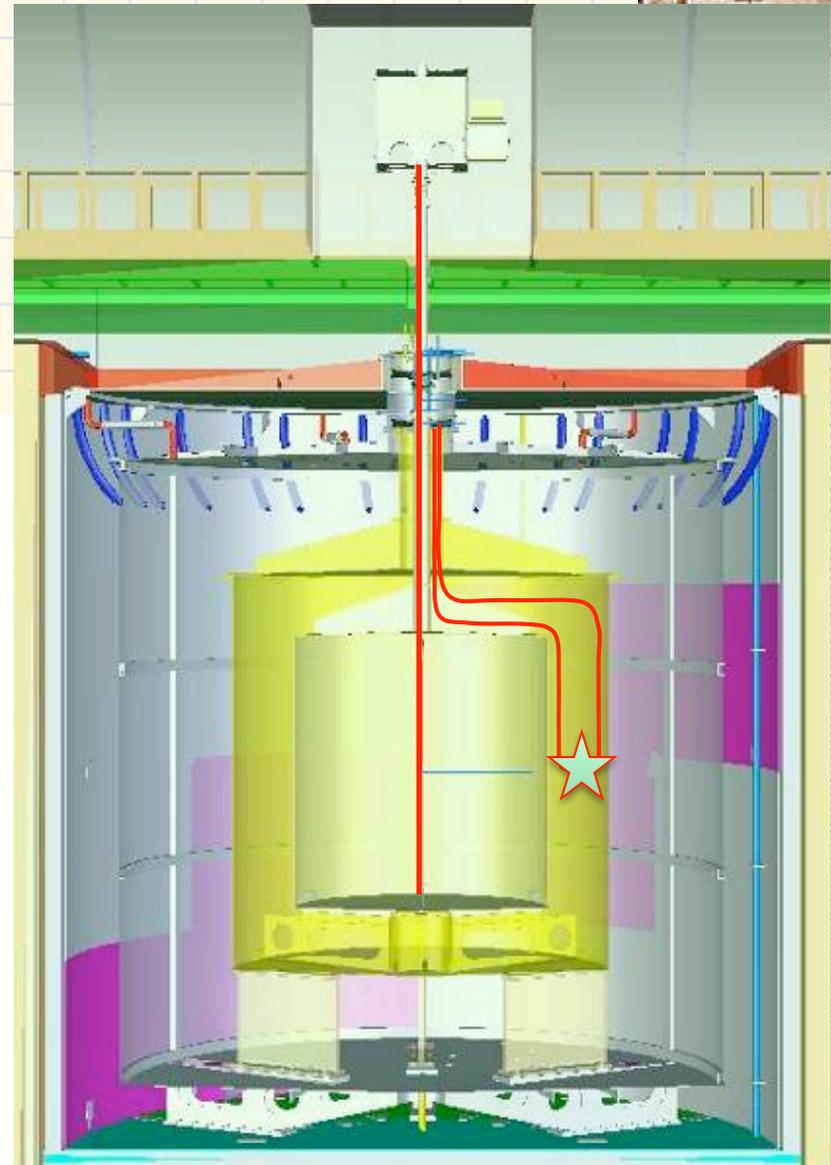
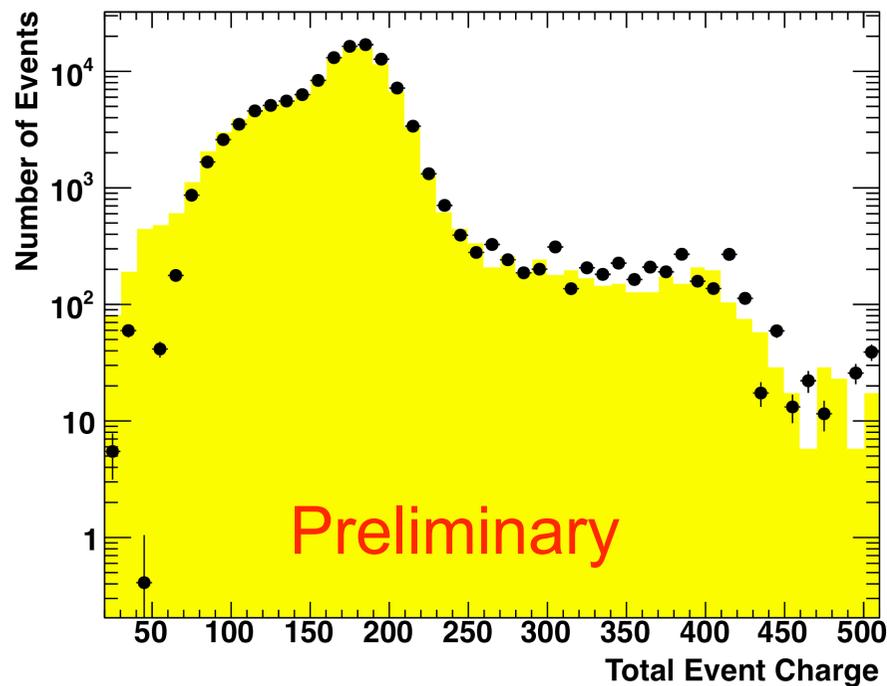
^{68}Ge Detector Center X=0mm, Y=0mm, Z=0mm



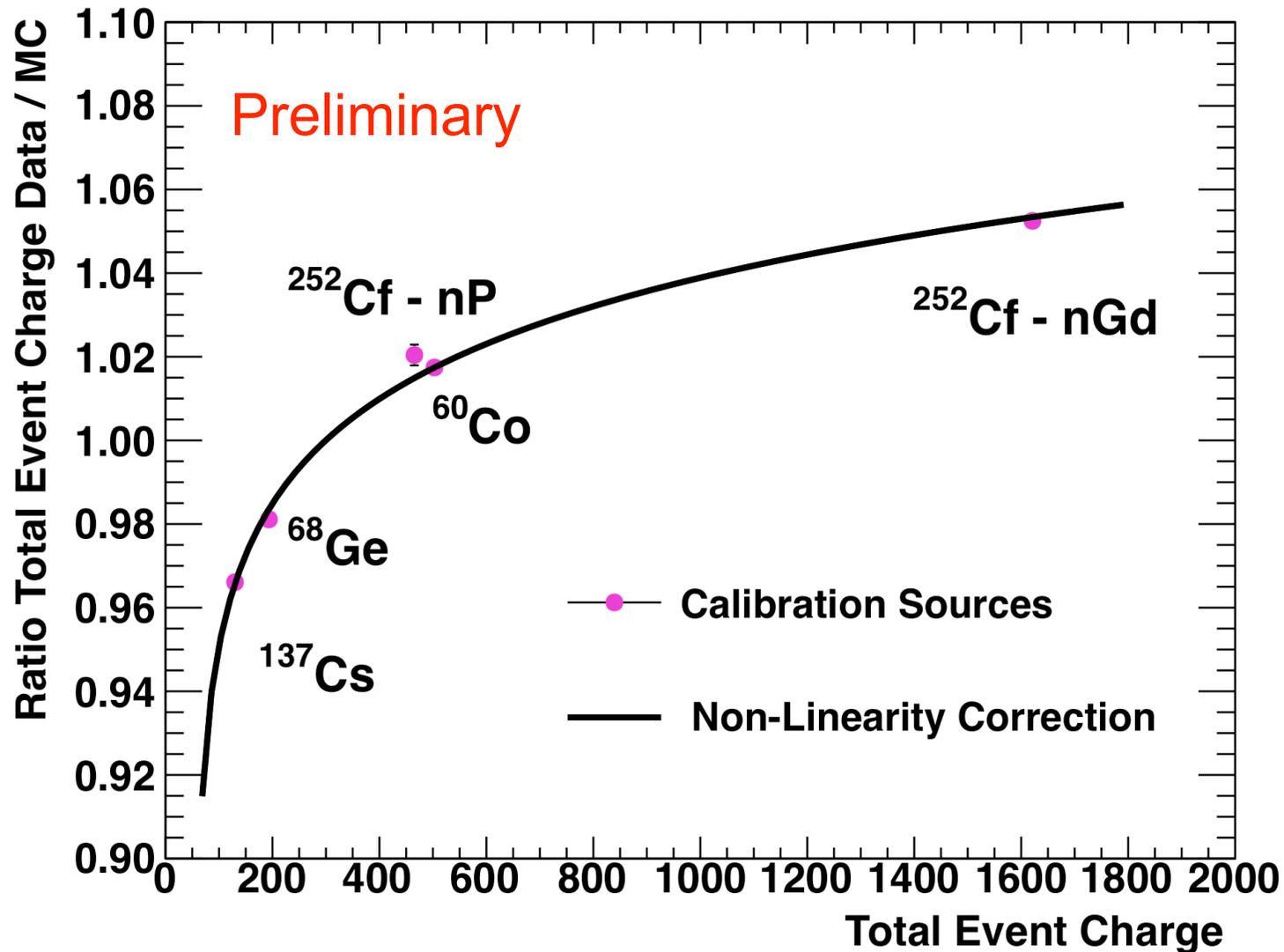
エネルギーキャリブレーション

- Guide-tube systemにより ^{68}Ge 陽電子線源を γ -catcherに配置
- Targetと γ -catcherの発光量の比較
(γ -catcherに用いる液体シンチレータはTargetとほぼ同じ発光量になるように調整してある)

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

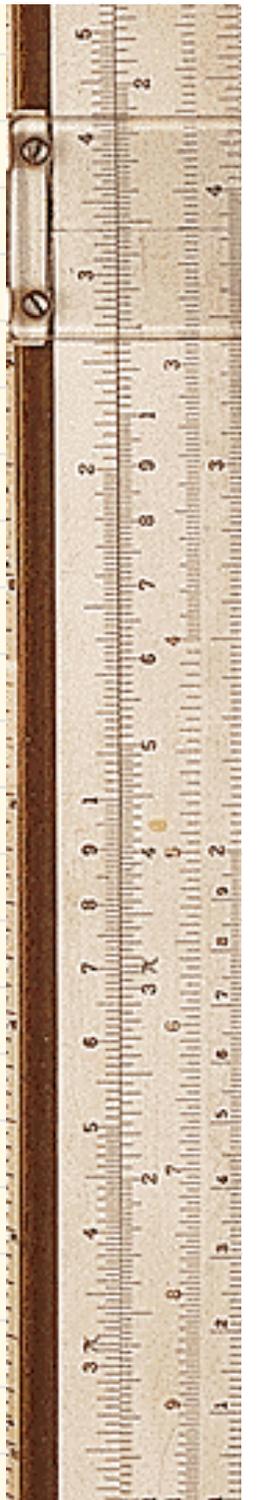


Non-linearity correction



Neutrino selection

- Prompt signal
- Delayed signal
- Coincidence



Selection criteria (1)

Muon veto:

- $\Delta t_{\mu} > 1\text{msec}$

Prompt Event:

- $Q_{\text{max}}/Q_{\text{tot}} < 0.09$ & $\text{RMS}(T_{\text{start}}) < 40\text{ ns}$
- $0.7 < E < 12\text{ MeV}$

Delayed Event:

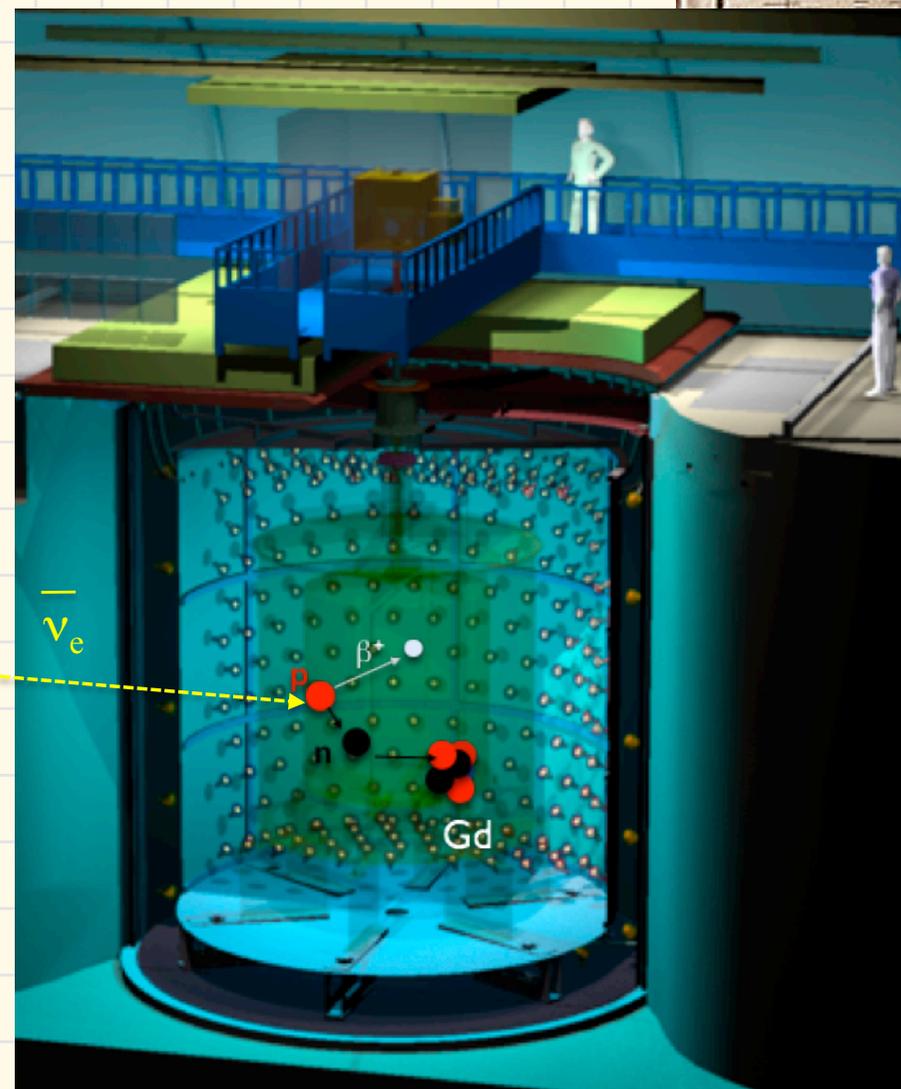
- $Q_{\text{max}}/Q_{\text{tot}} < 0.06$ & $\text{RMS}(T_{\text{start}}) < 40\text{ ns}$
- $6 < E < 12\text{ MeV}$

Coincidence:

- Time coincidence: $2 < \Delta t < 100\mu\text{s}$
- No space coincidence cut

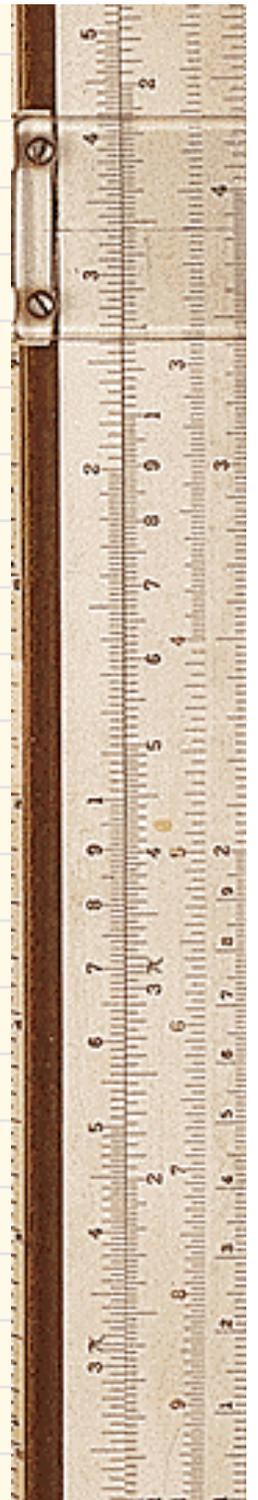
Multiplicity:

- No trigger ($>500\text{keV}$) within $100\mu\text{sec}$ before prompt
- Only one trigger ($>500\text{keV}$) within $400\mu\text{sec}$ after prompt

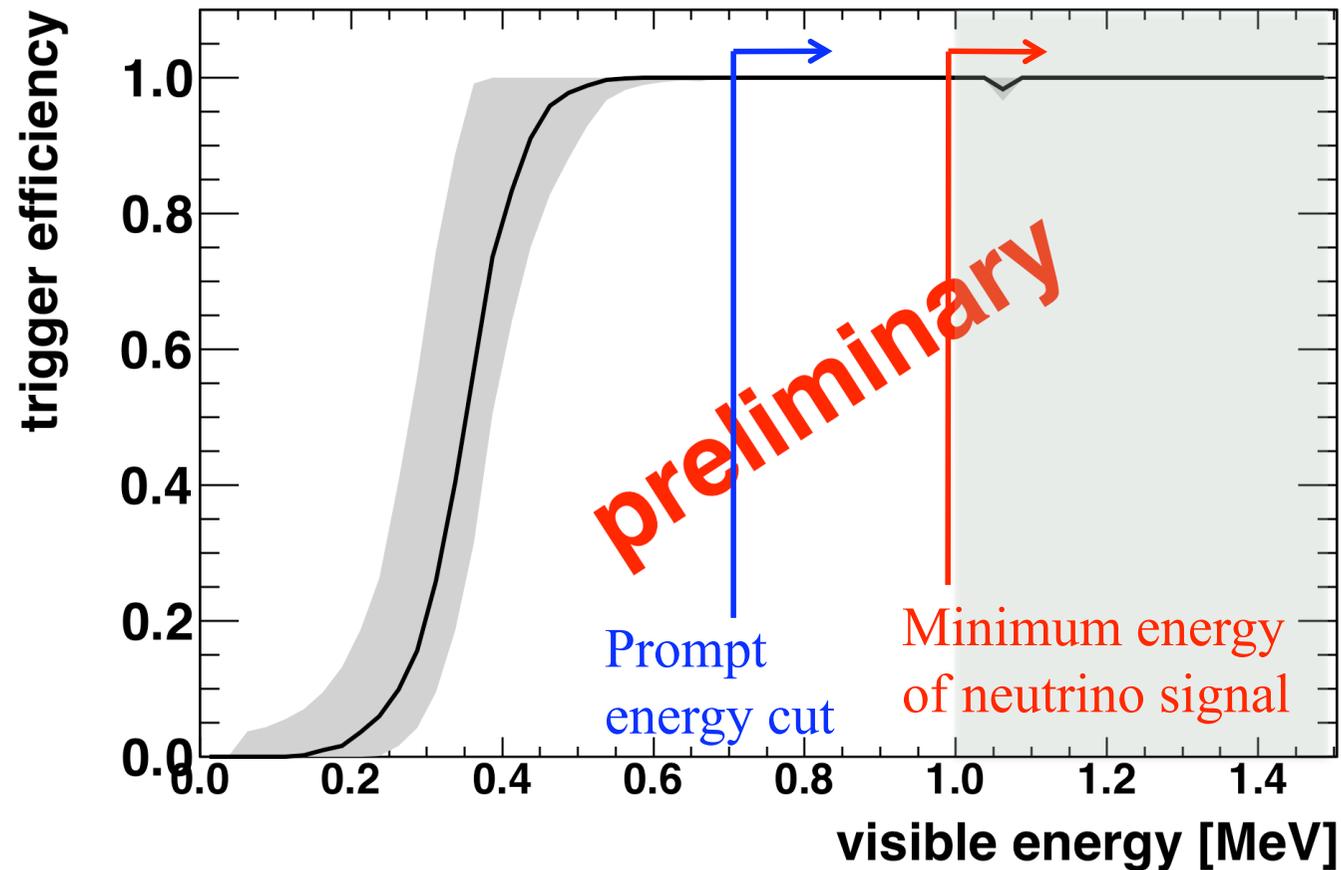


Neutrino selection

- Prompt signal
- Delayed signal
- Coincidence



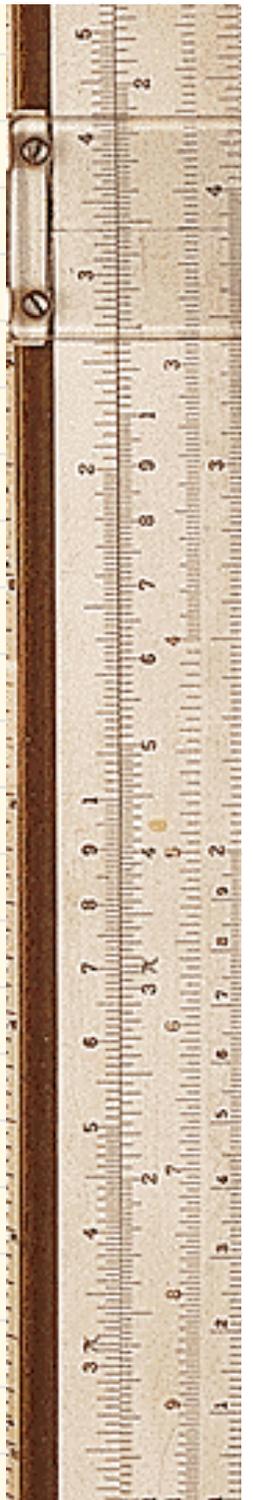
Trigger threshold



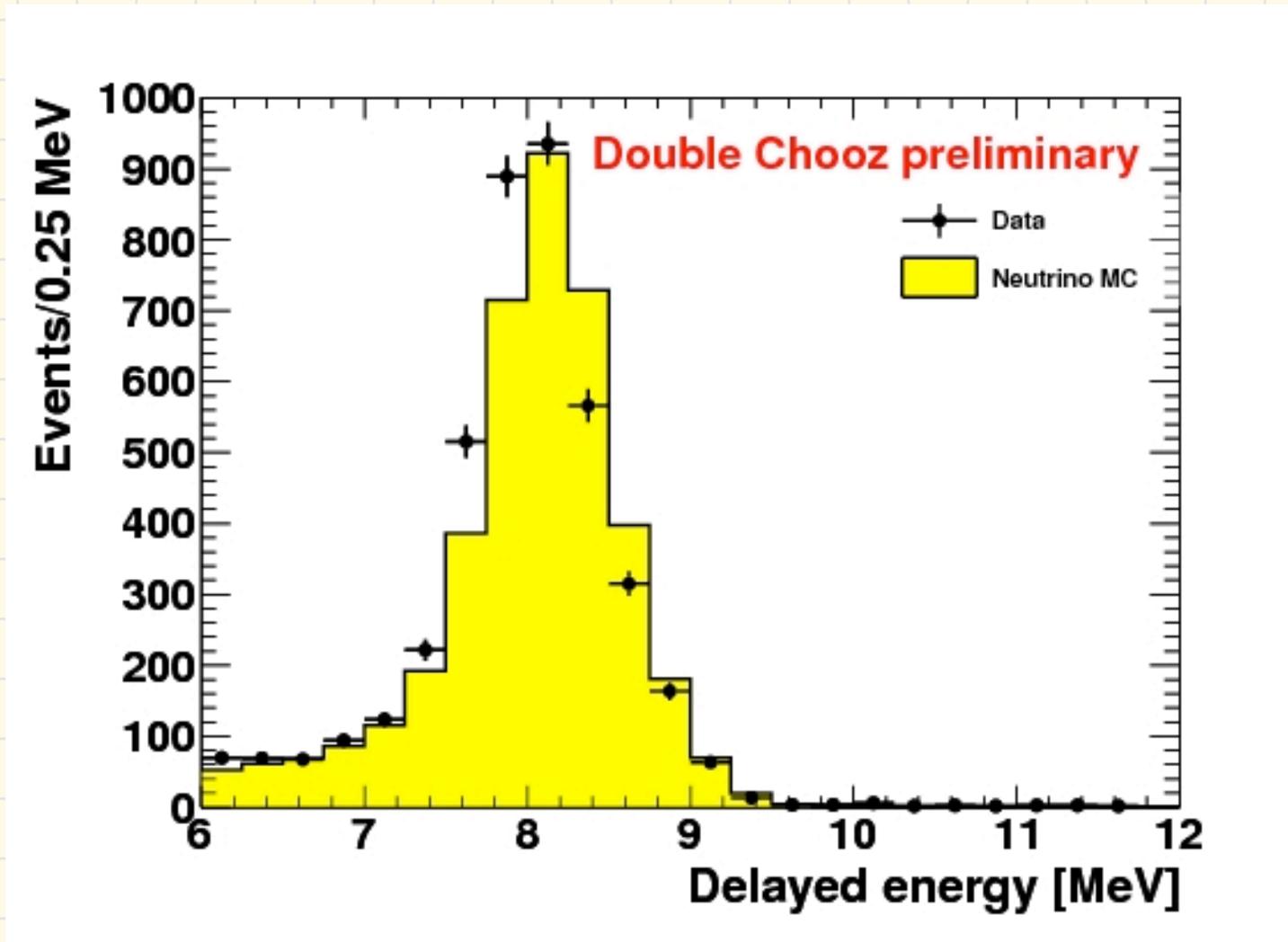
- Trigger efficiency
 - 50% @ 350keV
 - $100^{+0}_{-0.4}\%$ above 700keV
- Prompt energy cut efficiency $> 99.9\%$

Neutrino selection

- Prompt signal
- **Delayed signal**
- Coincidence



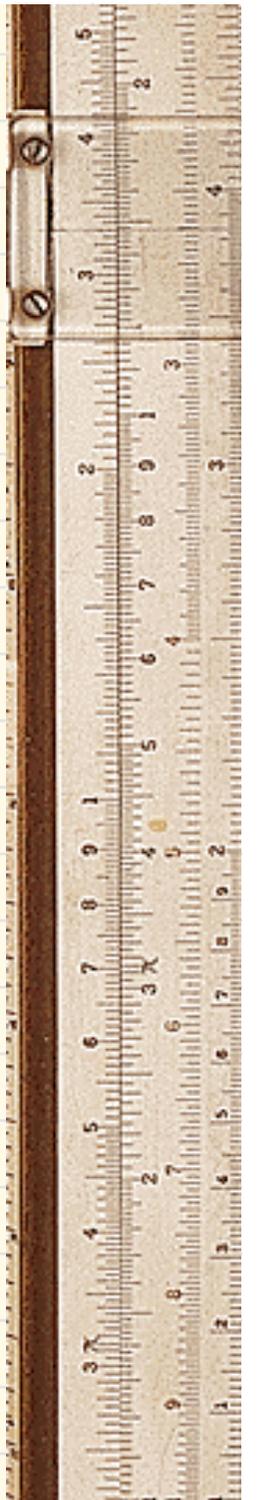
Delayed energy cut



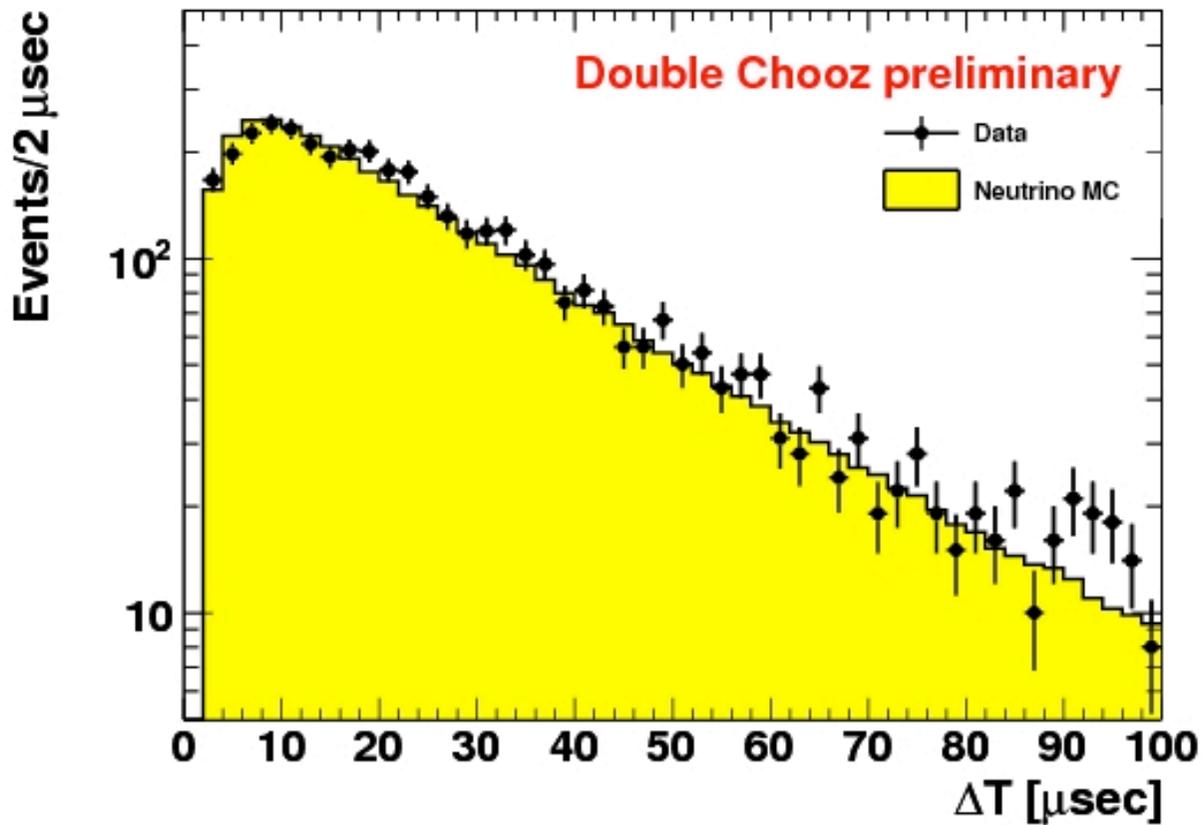
Efficiency of delayed signal: $86.0 \pm 0.6 \%$

Neutrino selection

- Prompt signal
- Delayed signal
- Coincidence

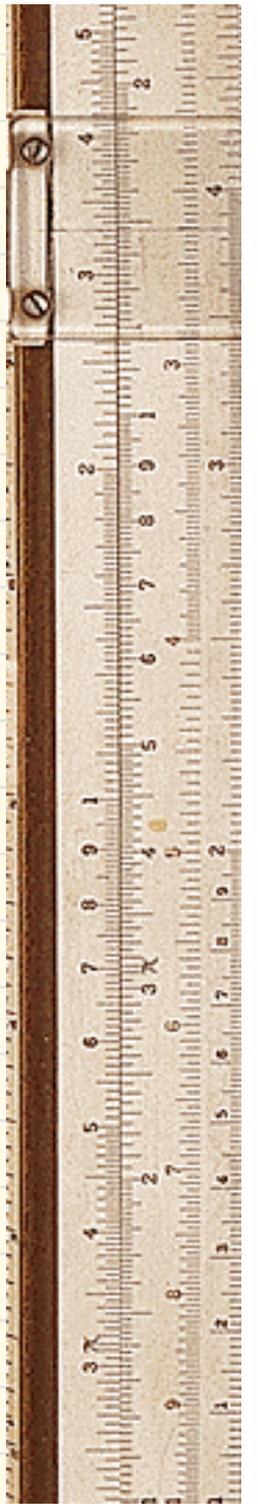


Time coincidence

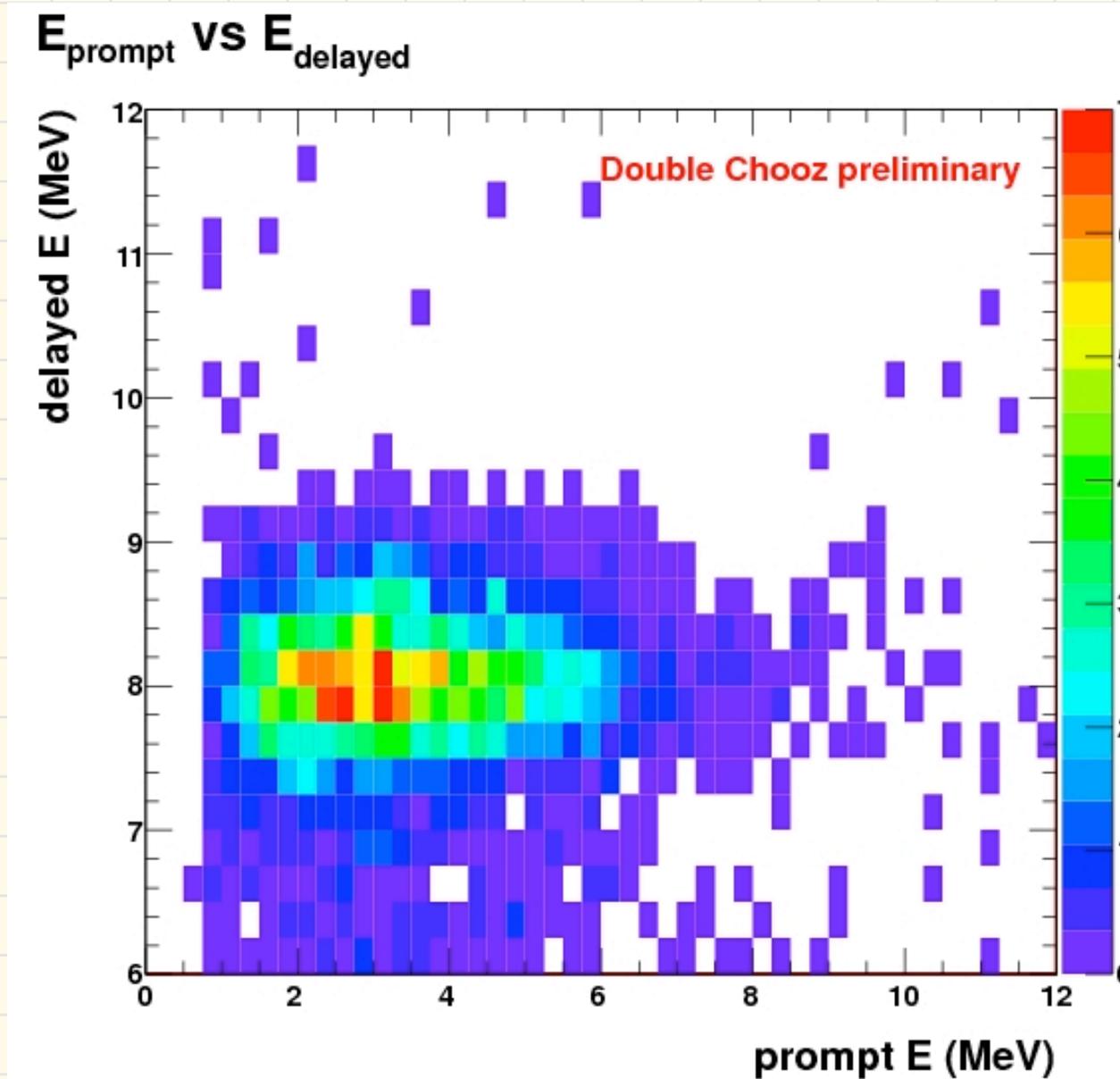


- KeV neutrons thermalized within a few μs
 - captured on Gd with $\tau = 27\mu\text{s}$
- Efficiency within $[2, 100] \mu\text{s}$: $96.5 \pm 0.5 \%$

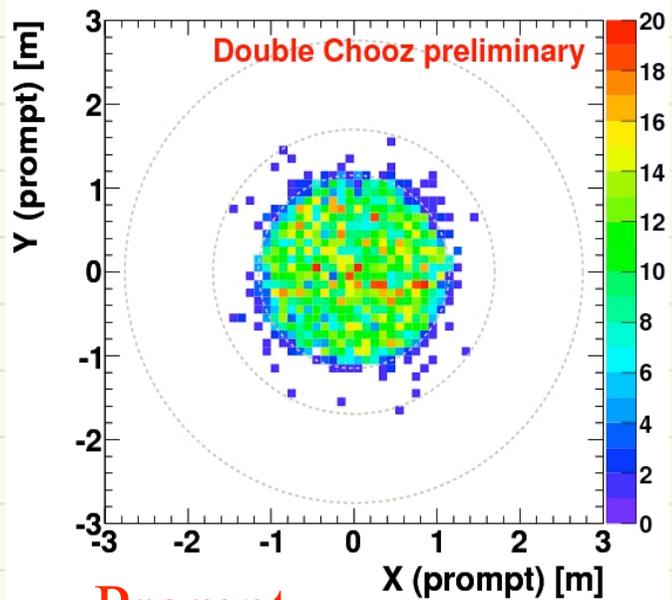
Data quality



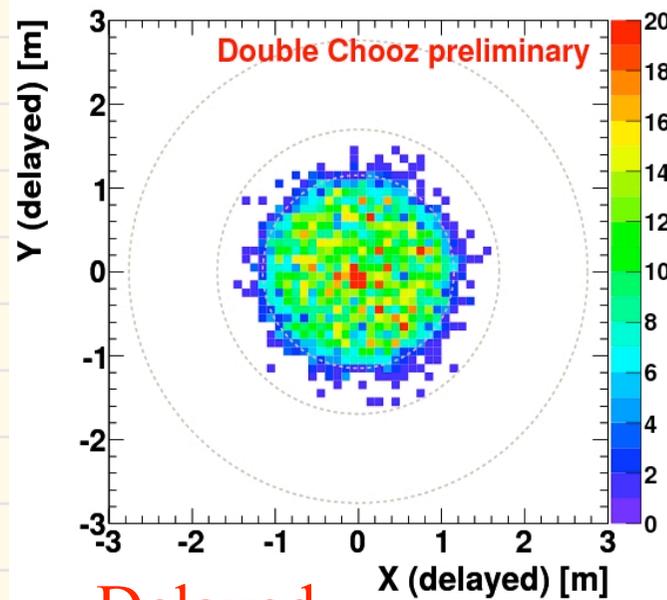
Prompt energy vs. delayed energy



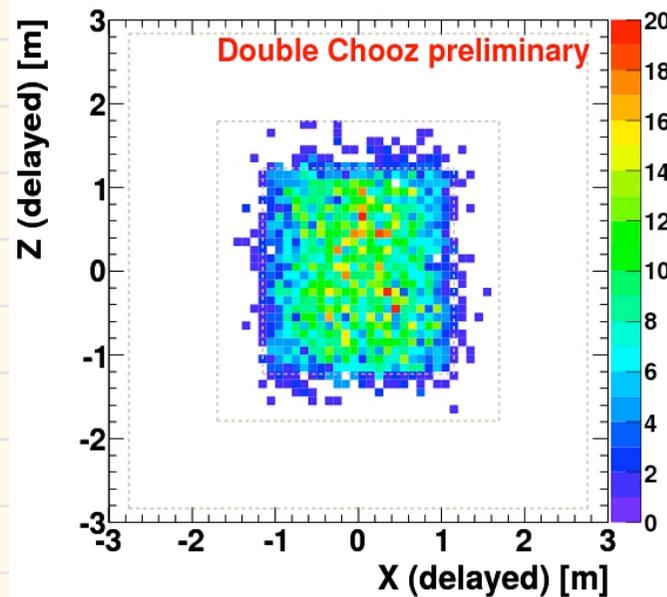
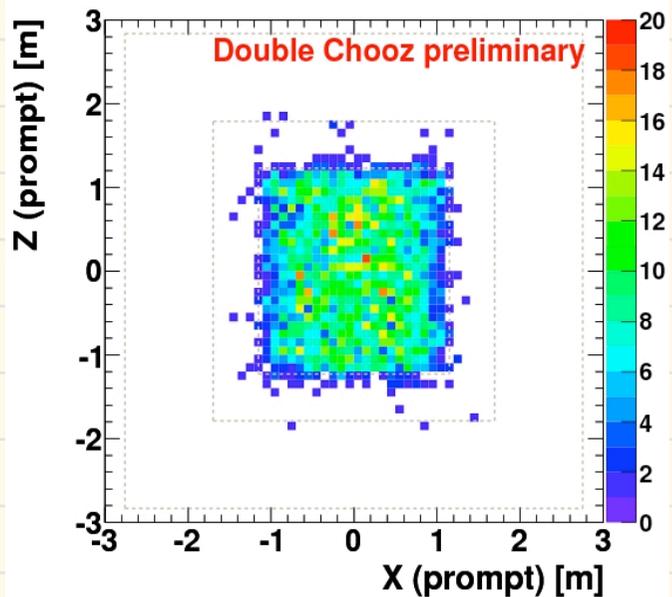
Reconstructed vertex positions



Prompt

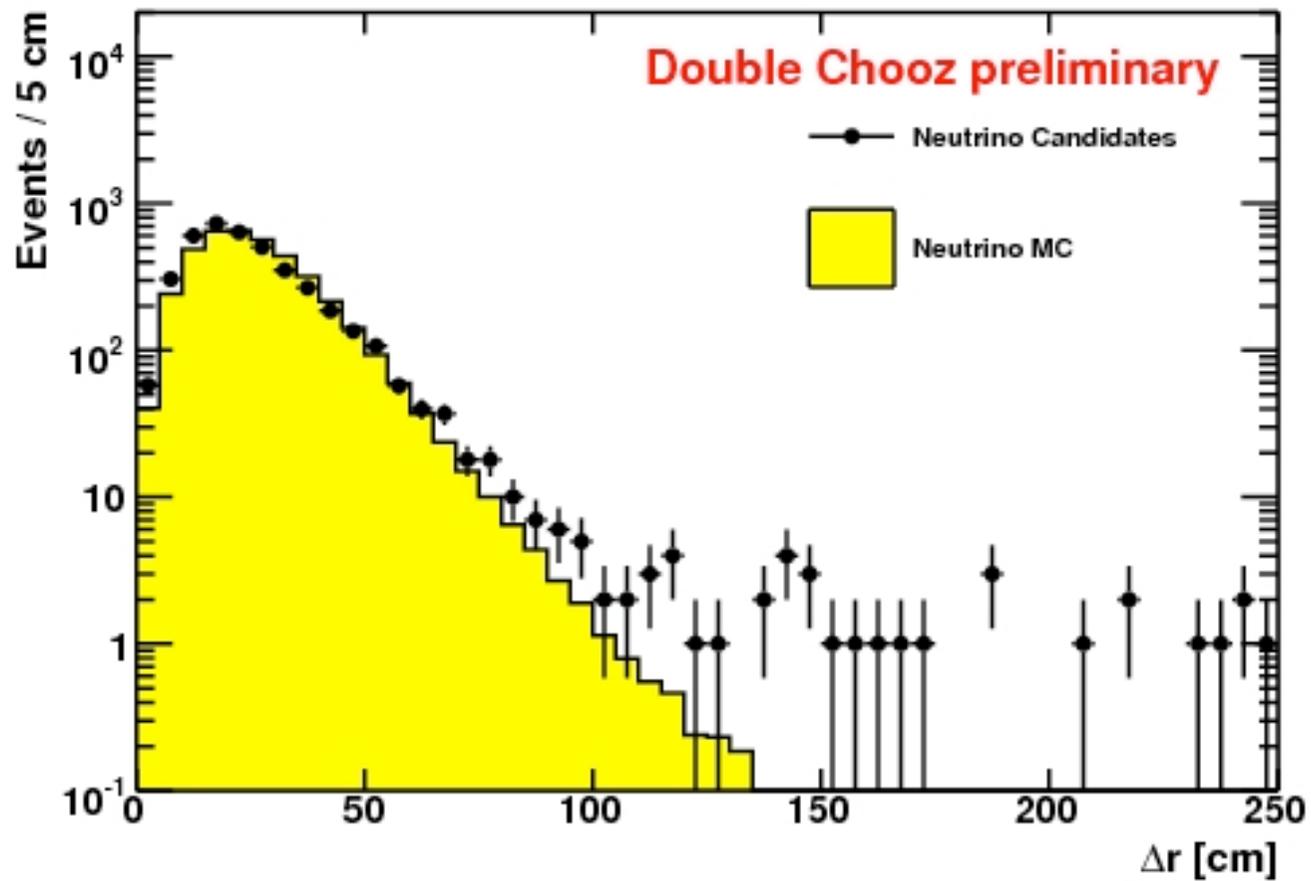


Delayed



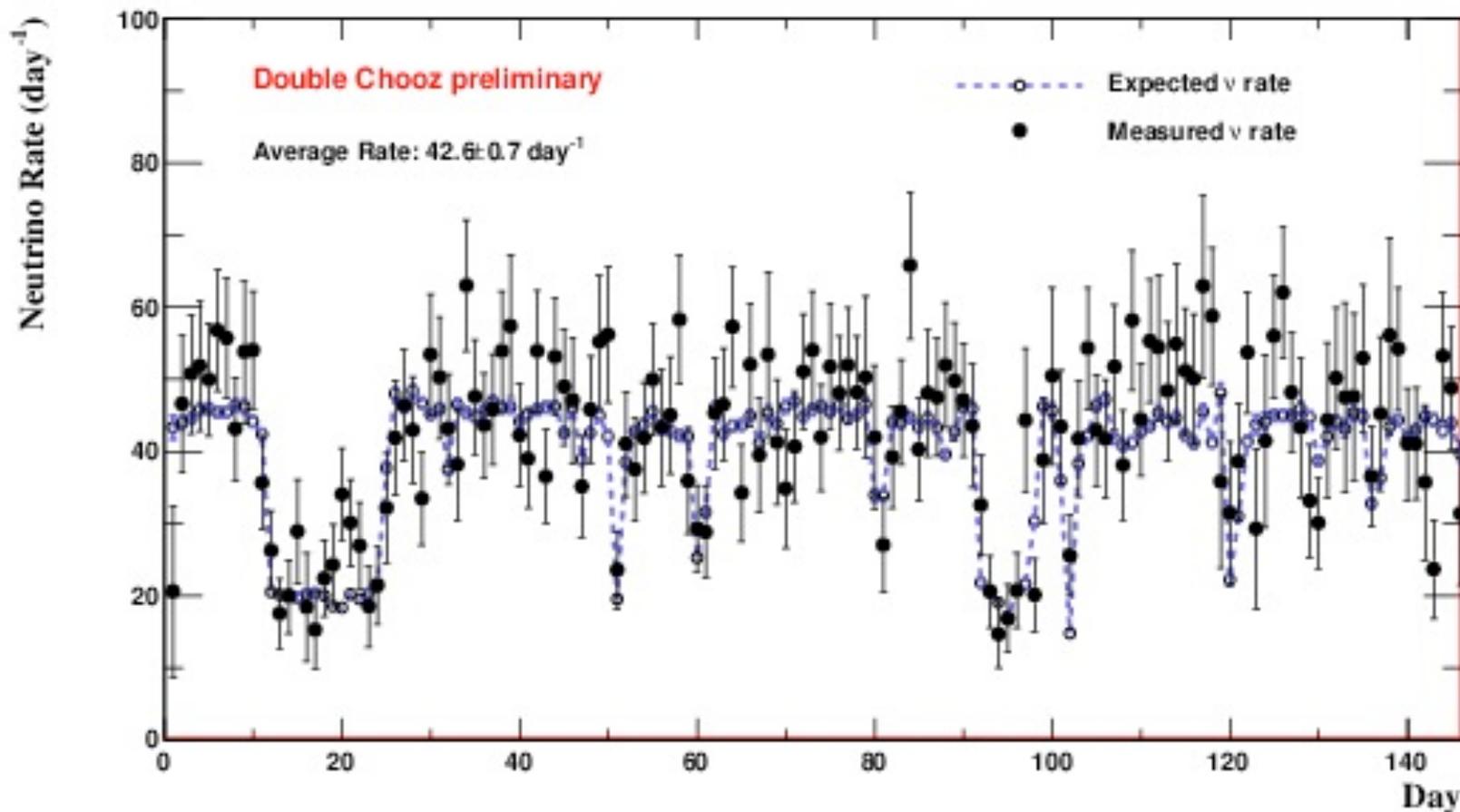
dR: prompt vs. delayed

Prompt - Delayed Reconstructed Distance



Neutrino candidate: event rate

Neutrino candidates rate (background not subtracted)



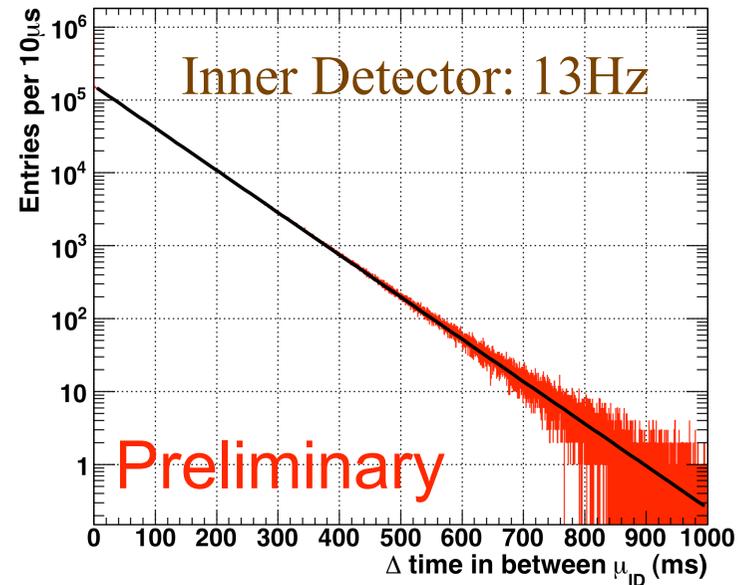
- Background not subtracted
 - good agreement indicates low background level

Background

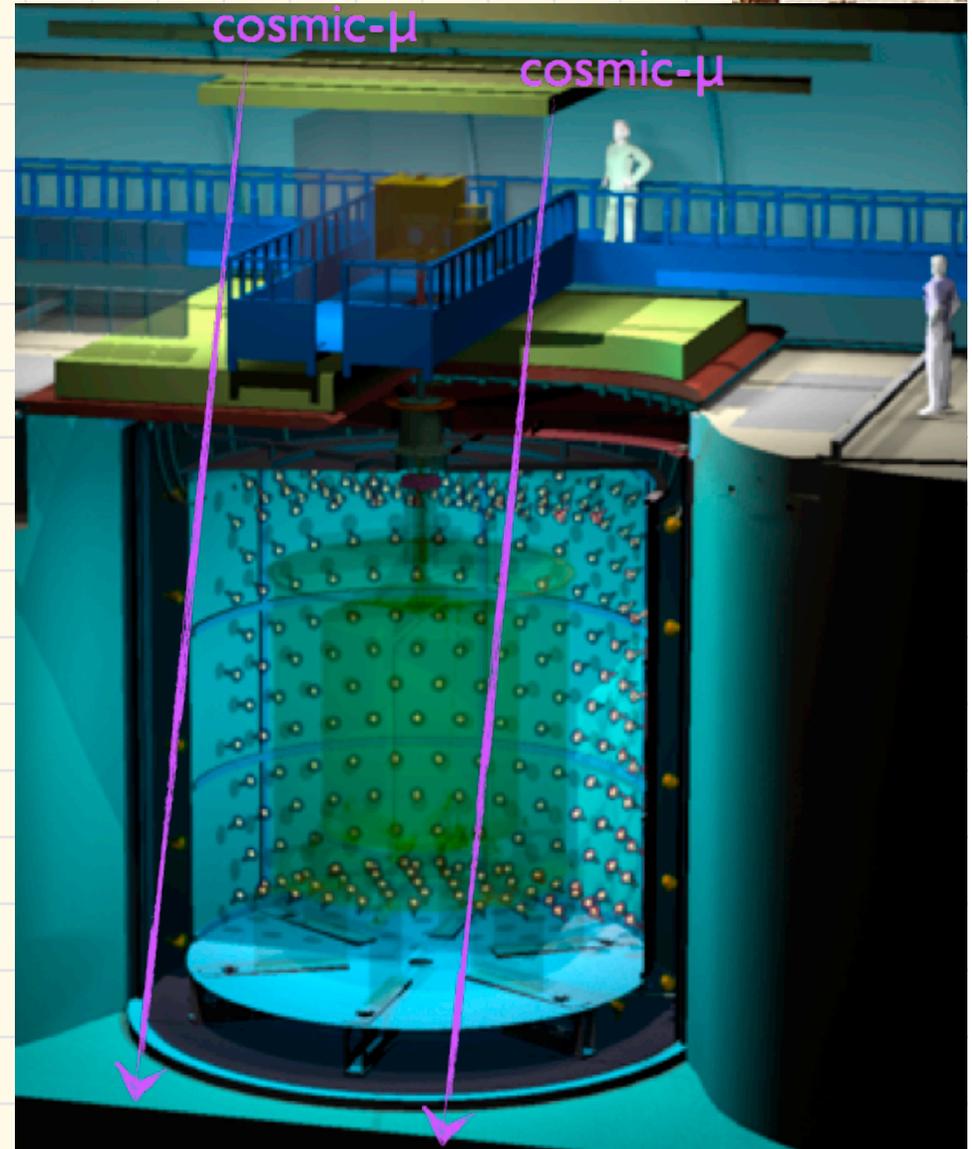
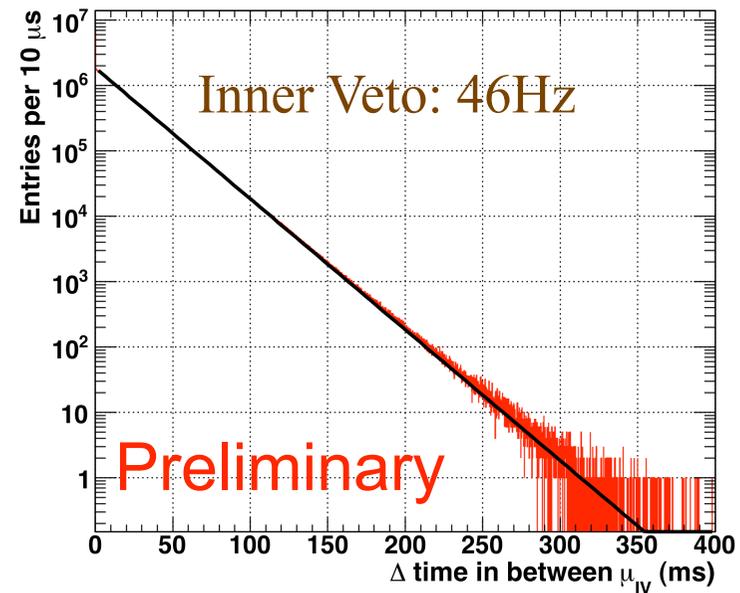


Cosmic muon rate

Muon rate in Inner Detector: 13 Hz

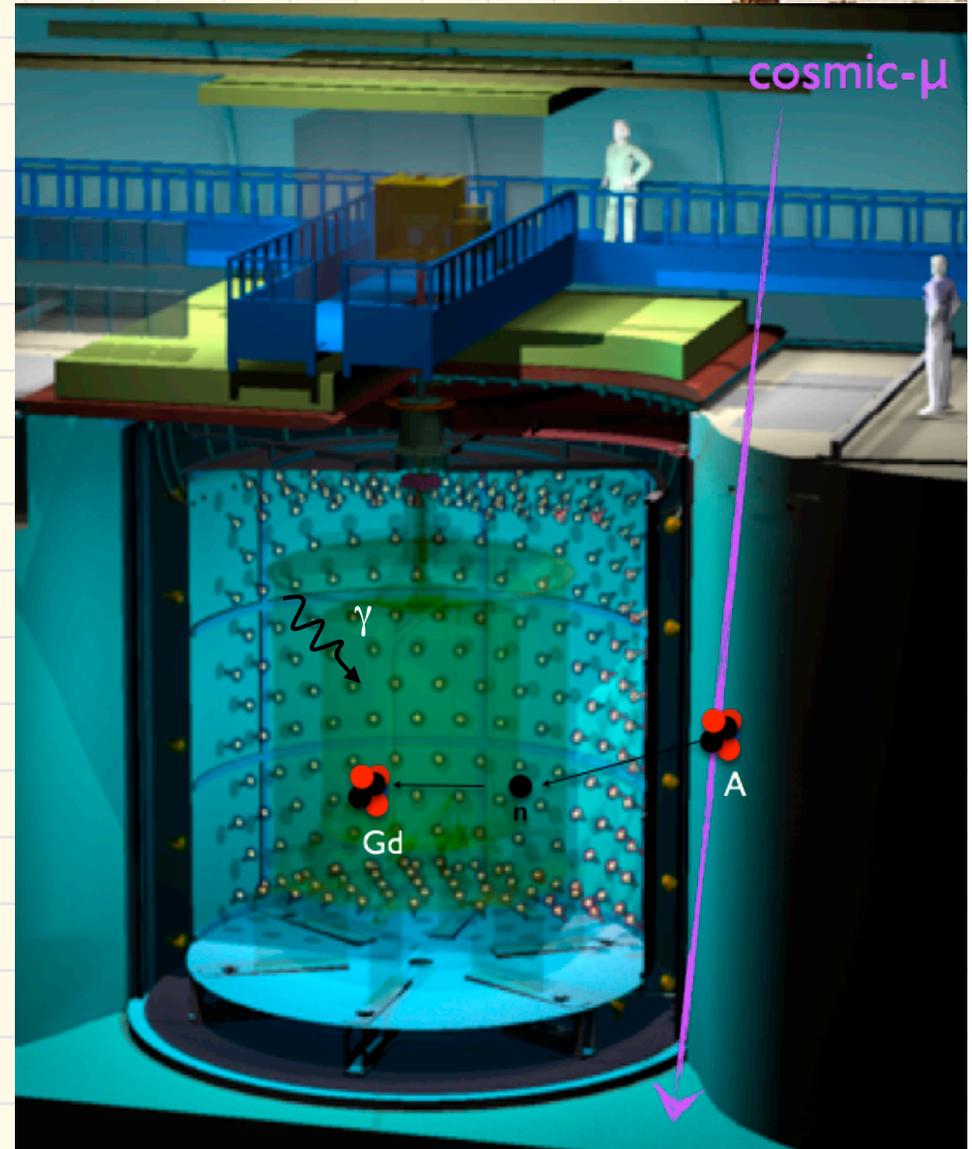
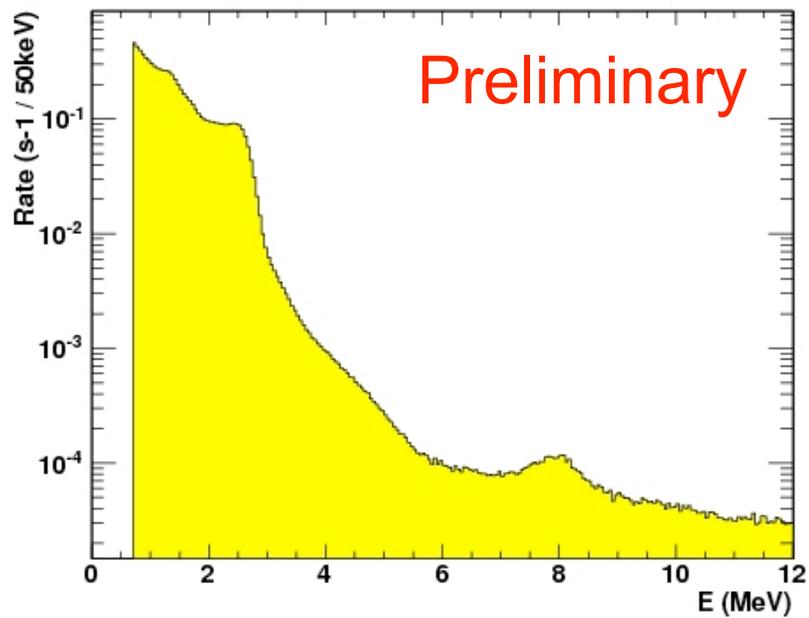


Muon rate in Inner Veto: 46 Hz

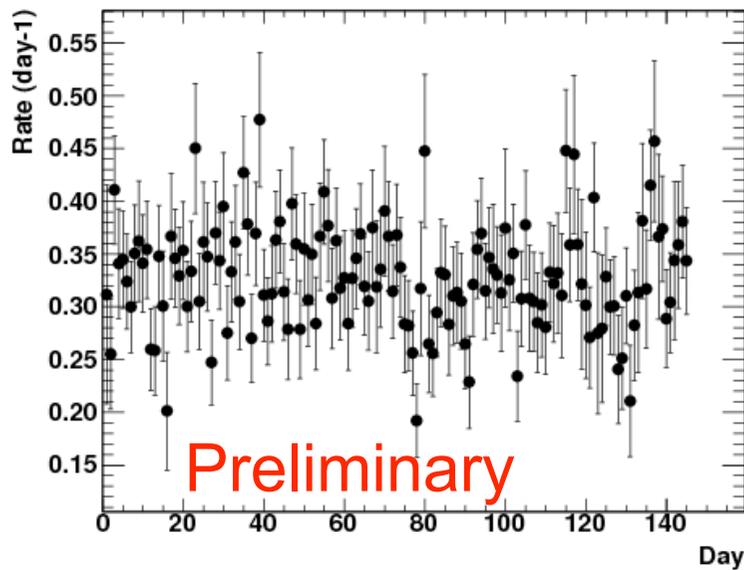
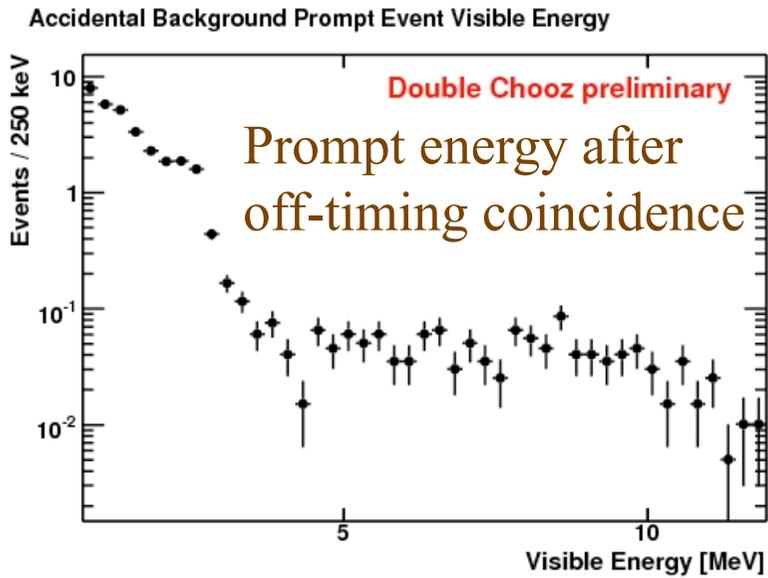
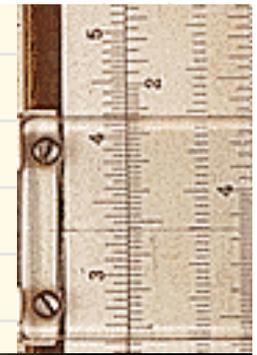


Accidental BG

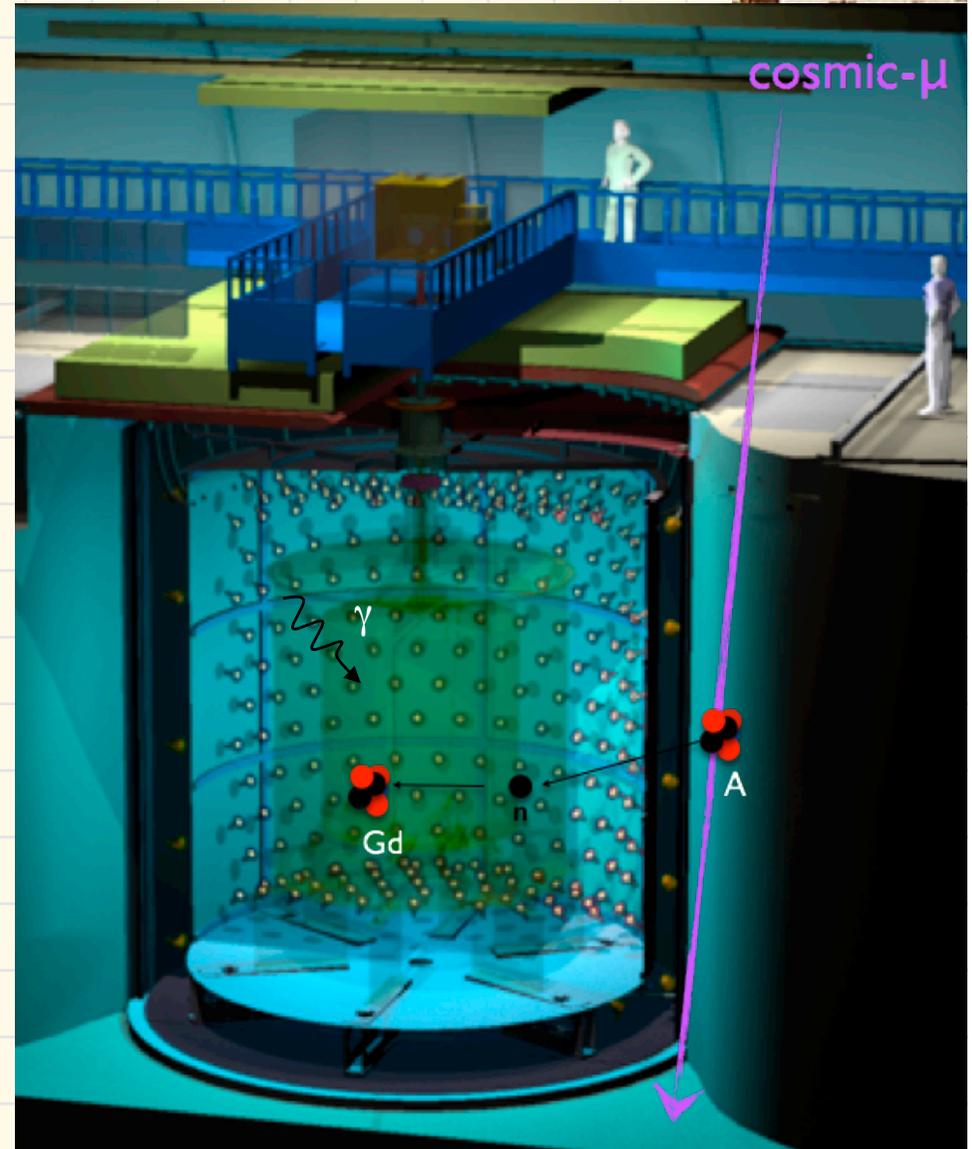
Single spectrum



Accidental BG



Rate: 0.332 ± 0.004 events/day

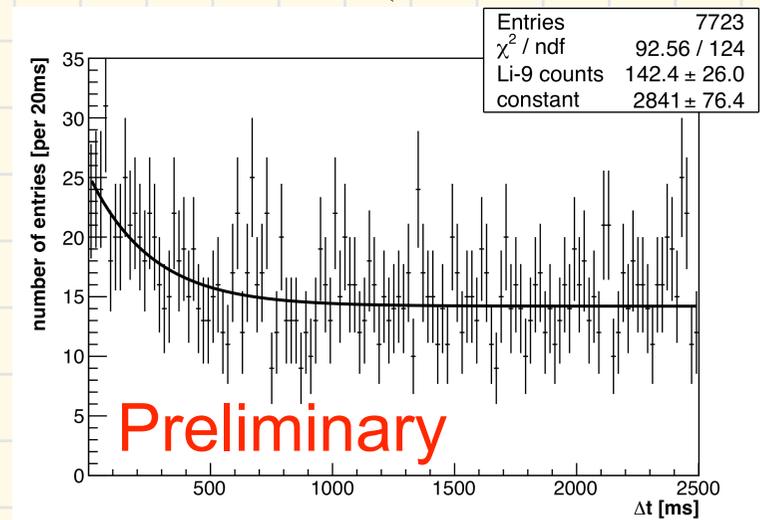
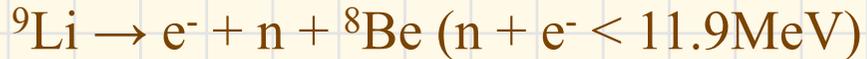


Correlated BG:

宇宙線ミュオンによる核破砕事象

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

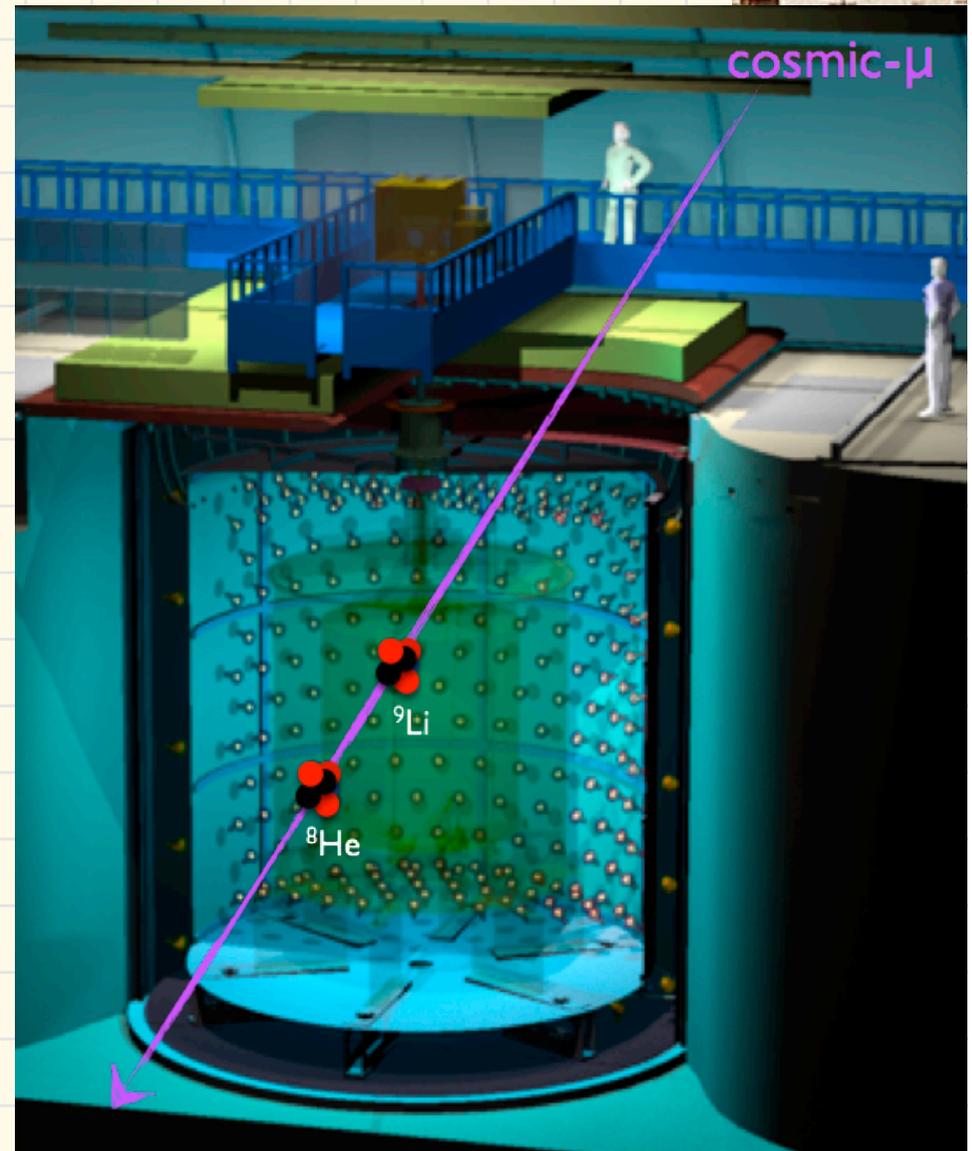
→ 約200msecの崩壊時間で中性子放出を伴うベータ崩壊



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



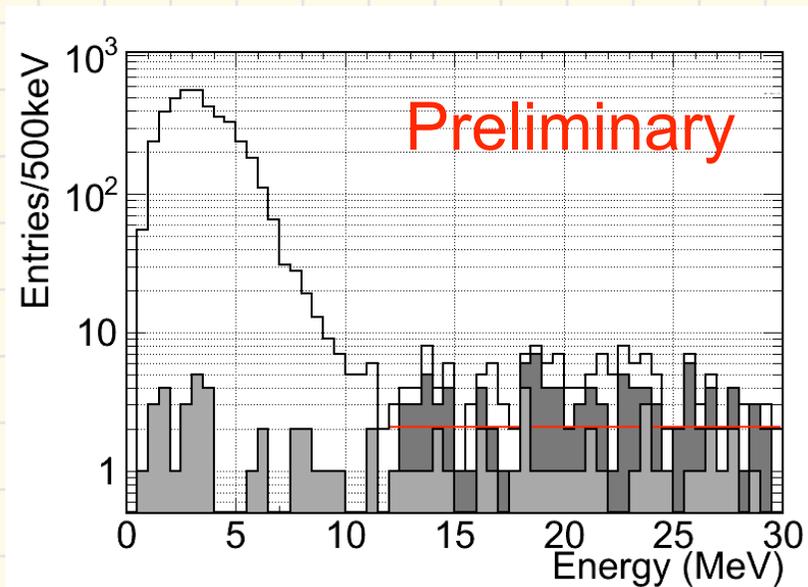
Correlated BG: 高速中性子

初期信号:

高速中性子による反跳陽子

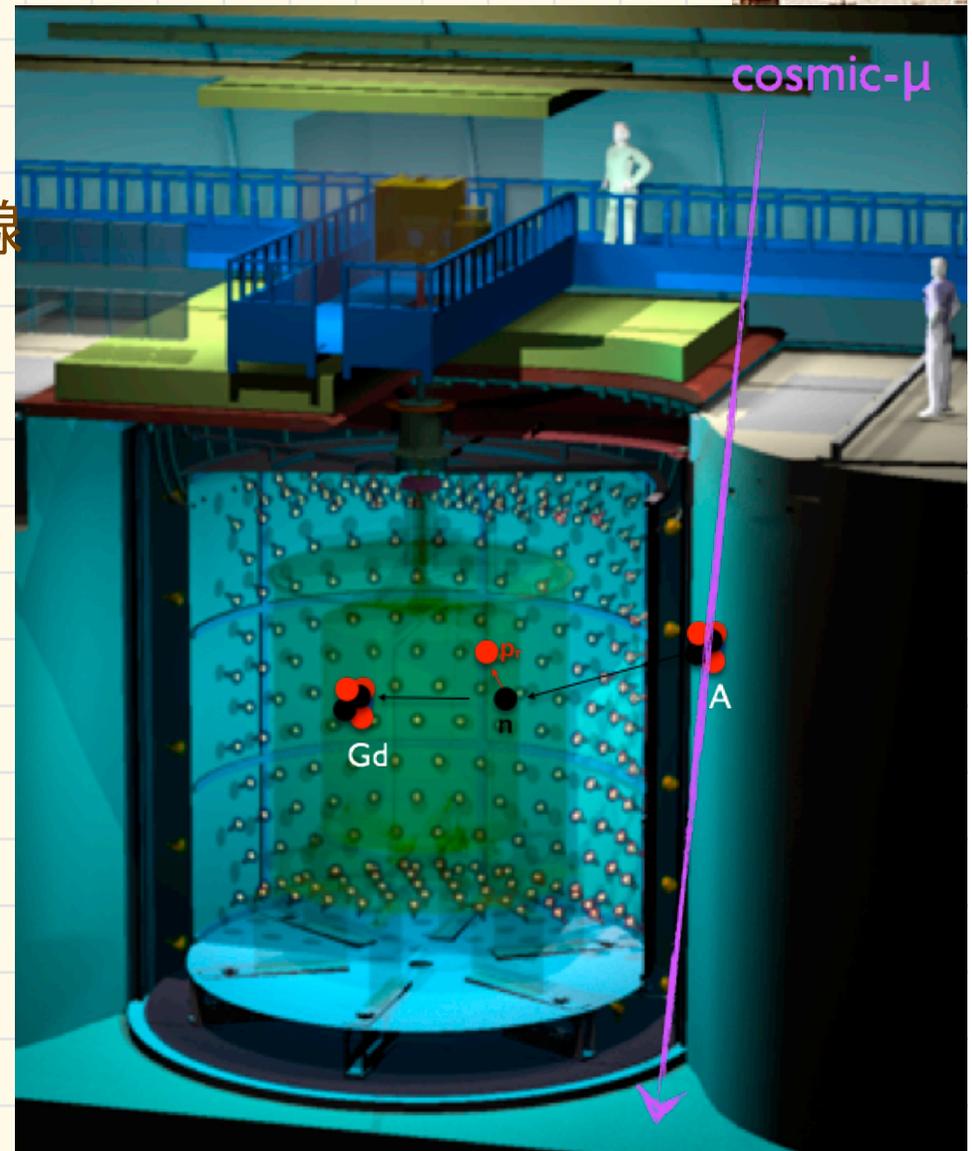
後発信号:

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

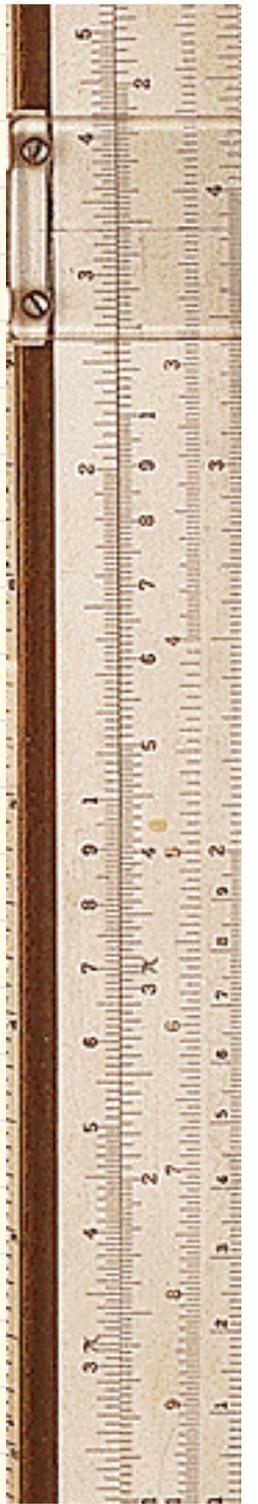


Reactor OFF data

- 原子炉が2基ともOFFの状態です約1日分のデータを取得
- 3事象がニュートリノ選定条件を通過
 1. $E_{\text{prompt}}=9.8 \text{ MeV}$, $\Delta t=201 \text{ msec}$ from showering muon ($>600 \text{ MeV}$), vertex close to muon track (15.4cm)
 2. $E_{\text{prompt}}=4.8 \text{ MeV}$, $\Delta t=241 \text{ msec}$ from showering muon, vertex close to muon track (27.9cm)
 3. $E_{\text{prompt}}=26.5 \text{ MeV}$, no showering muon within 5sec

バックグラウンドの見積もりとReactor OFFの測定が一致

Neutrino oscillation analysis



Systematic errors

Preliminary

Source		Uncertainty
Target free H		0.3%
Trigger efficiency		0.5%
Neutrino Selection	Efficiency	
Prompt event	99.9%	0
Delayed event	86.0%	0.6%
Time coincidence	96.5%	0.5%
Energy cut	94.5%	0.6%
Live-time	MC correction	
Muon deadtime	0.955	0
Multiplicity	0.995	0
Gd fraction	0.98	0.6%
Spill in/out	0.993	0.4%



Definition of χ^2

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \left(N_i - \left(\sum_R^{\text{Reactors}} N_i^{\nu,R} + \sum_b N_i^b(P_b) \right) \right) \times \left(M_{ij}^{\text{signal}} + M_{ij}^{\text{detector}} + M_{ij}^{\text{stat}} + \sum_b^{\text{bkgnds.}} M_{ij}^b \right)^{-1} \\ &\times \left(N_j - \left(\sum_R^{\text{Reactors}} N_j^{\nu,R} + \sum_b N_j^b(P_b) \right) \right)^T \\ &+ \sum_R^{\text{Reactors}} \frac{(P_R)^2}{\sigma_R^2} \\ &+ \sum_b^{\text{bkgnds.}} \frac{(P_b)^2}{\sigma_b^2}\end{aligned}$$

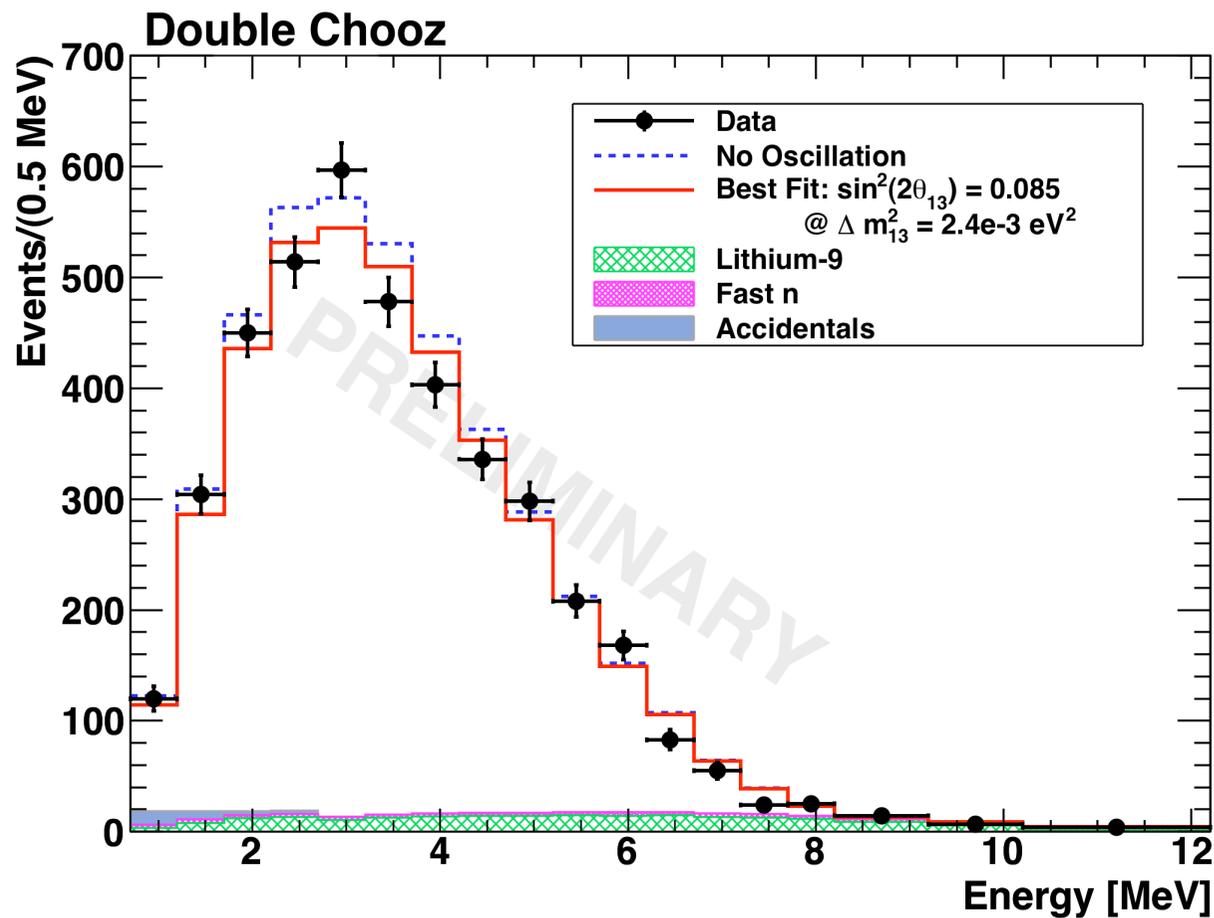
M_{ij}^{signal} : Signal covariance matrix.

M_{ij}^{detector} : Detector covariance matrix.

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

M_{ij}^b : Covariance matrix for background

Results



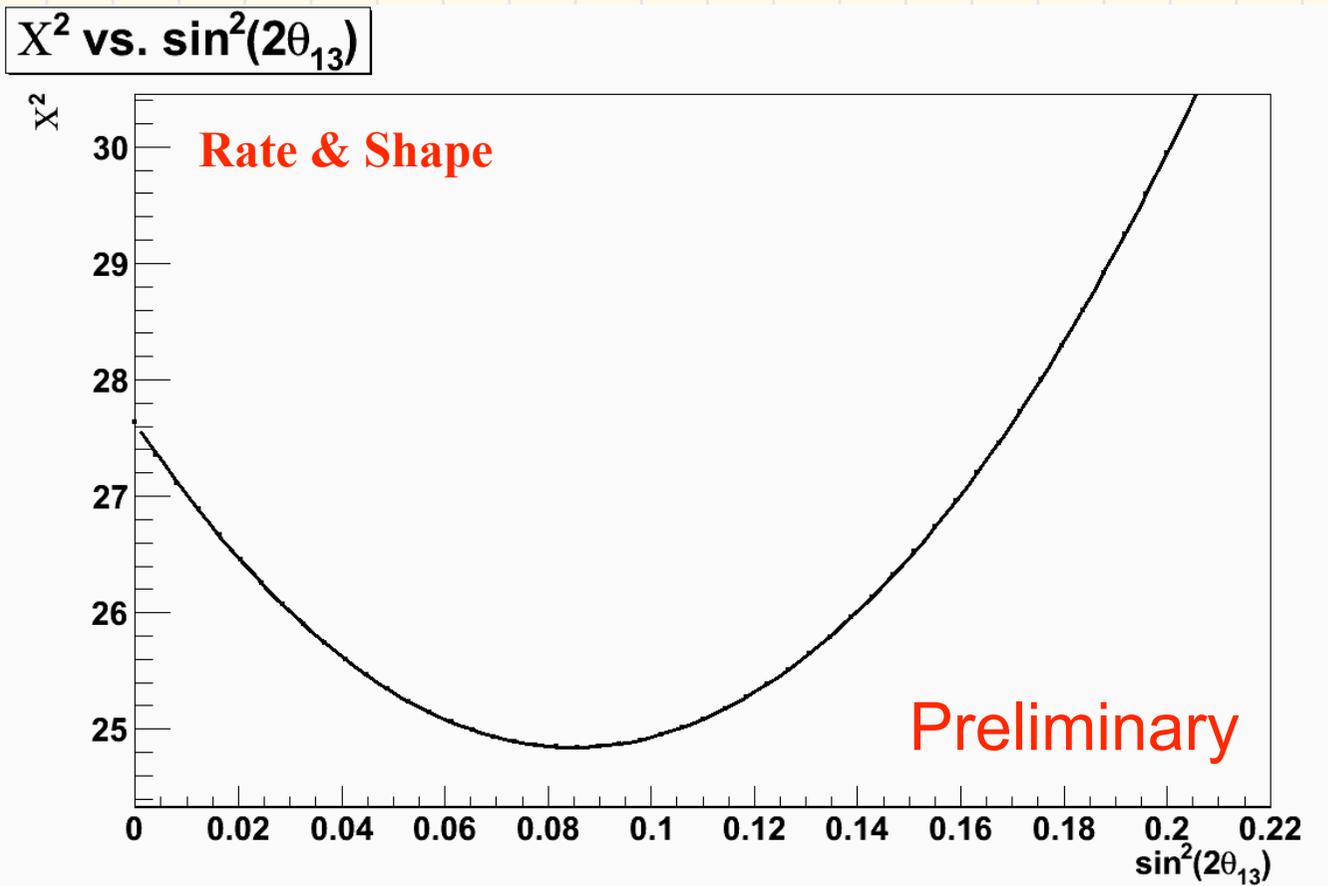
Rate Only:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.093 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.073(\text{syst})$$

Rate & Shape:

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

Results



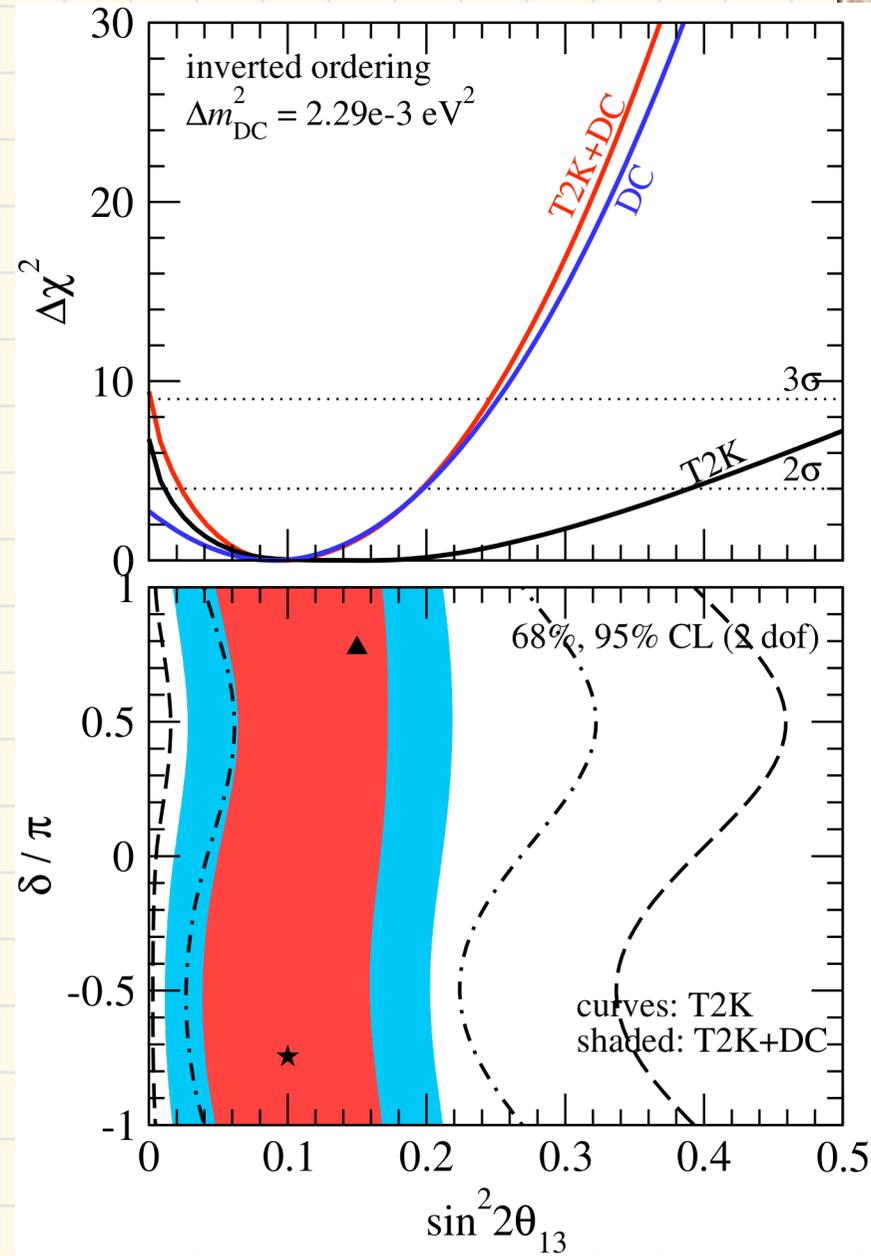
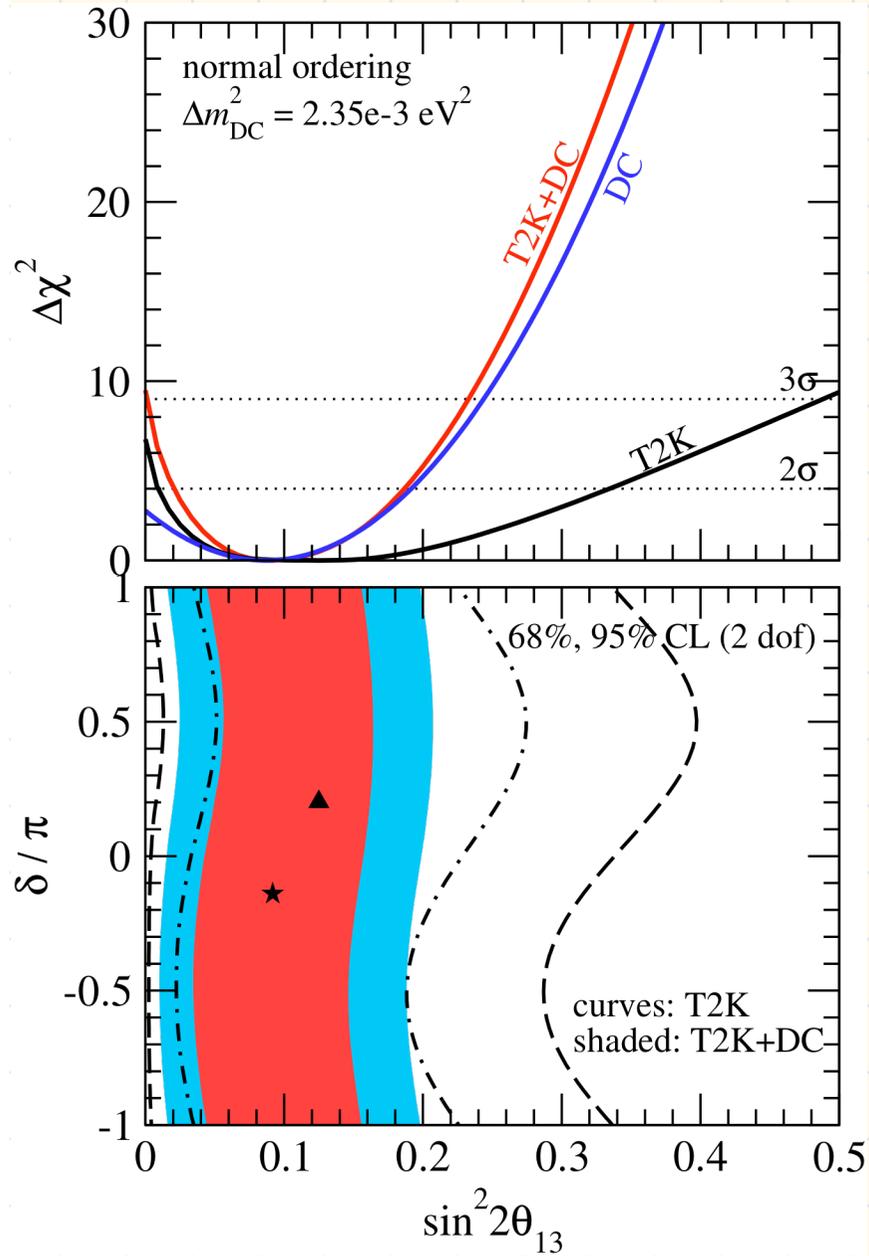
Rate Only:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.093 \pm 0.029(\text{stat}) \pm 0.073(\text{syst})$$

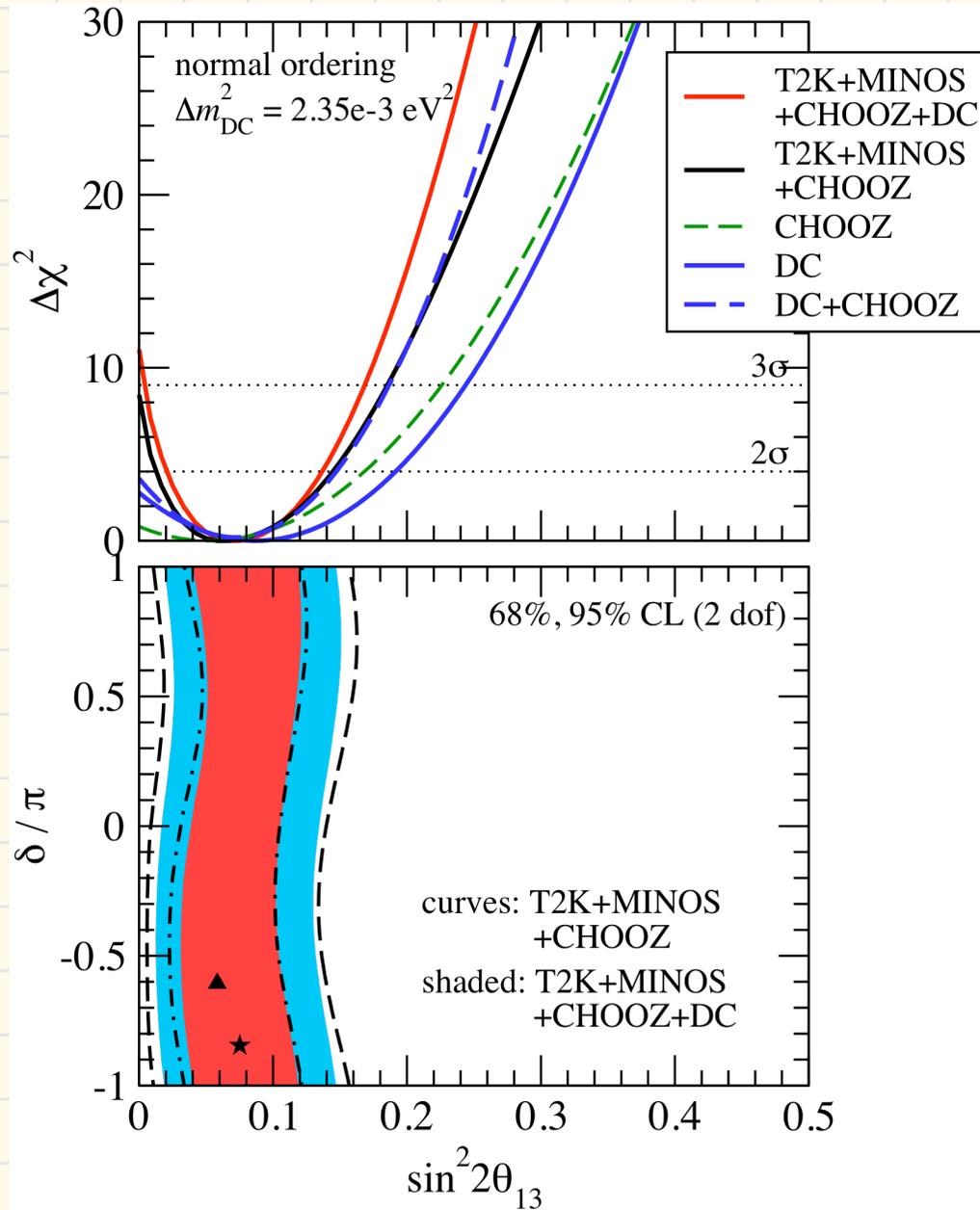
Rate & Shape:

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

Combined analysis: T2K+Double Chooz



Combined analysis: T2K+MINOS+CHOOZ+Double Chooz



ニュートリノ変化の兆候

短い距離でも確認

東北大など

東北大は10日、物質を構成する最小単位である素粒子のニュートリノが、約1キロという短い距離を飛ぶ間に他の種類のニュートリノに変化した兆候を初めてとらえることに、同校などが参加する国際研究グループが成功したと発表した。宇宙誕生の謎を解明する手掛かりになるという。

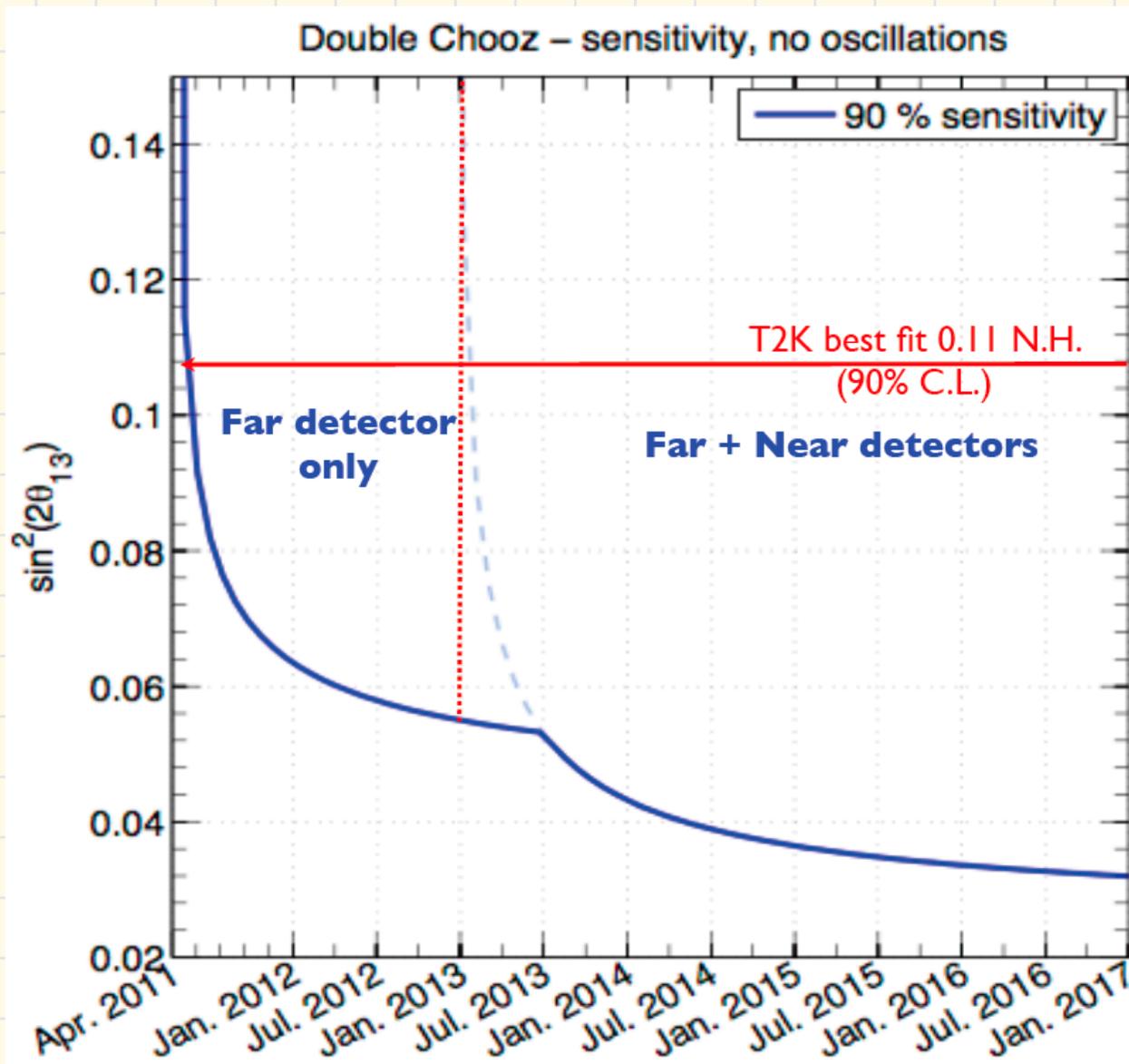
フランス北部のシヨー

原子力発電所で発生するニュートリノを、原子炉から約1キロ離れたトンネル内に検出器を置いて観測。ニュートリノの数が発生時より4〜5%減っていることを確認した。ニュートリノには電子型、ミュー型、タウ型の3種類があり、検出器では電子型をとらえる。「原子炉で発生した電子型ニュートリノがミュー型と

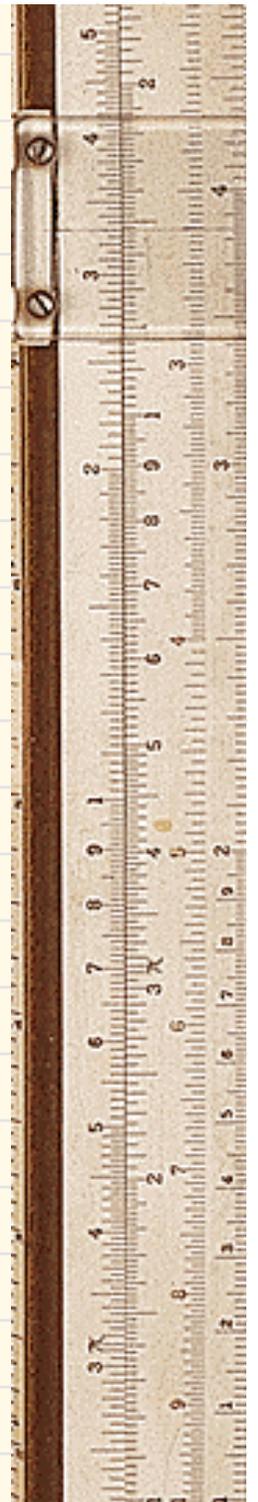
タウ型に変化したと考えられる」(末包文彦東北大准教授)という。3種のニュートリノが相互に移り変わる現象はニュートリノ振動と呼ばれる、これまでは数百キロ以上を飛行する間の変化を観測した。短距離の変化を調べると各ニュートリノの「混ざり具合」が詳しく分かる。宇宙誕生の際にあった

反物質がなくなり、現在の宇宙は物質だけが残ったという考えがある。ニュートリノ振動の様子を調べることで、その仕組みの解明に道筋が付けられると期待されている。

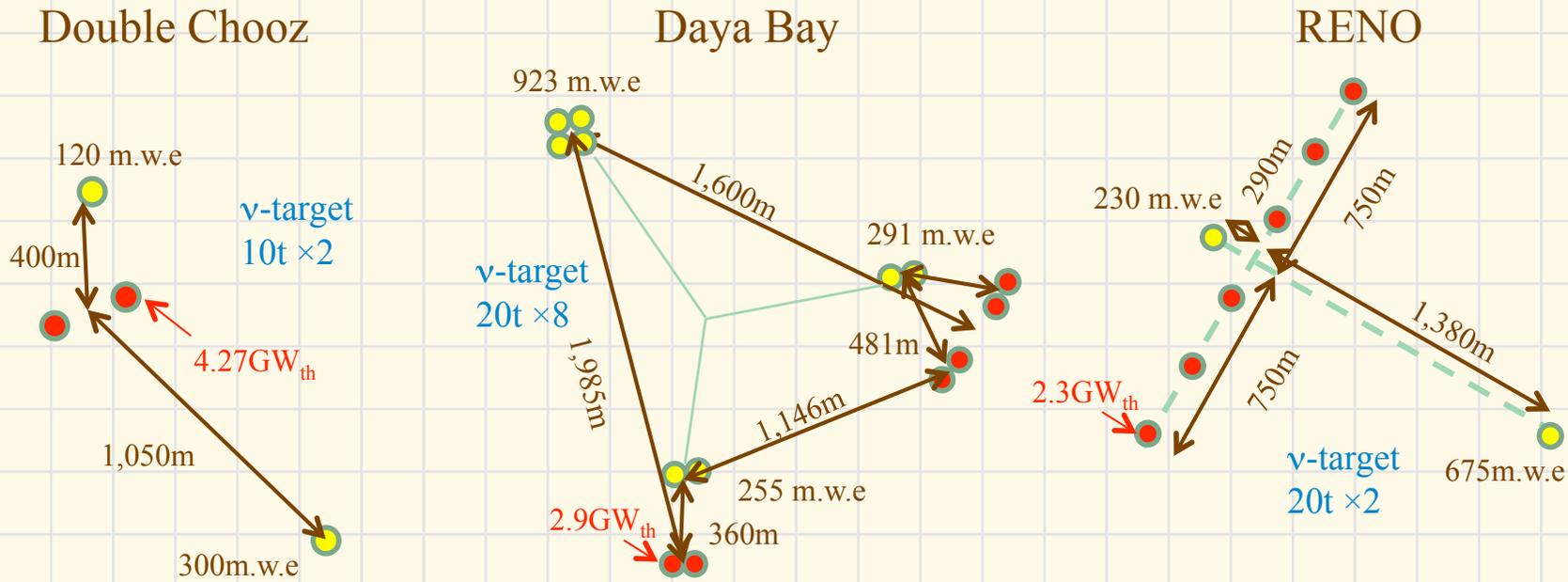
Sensitivity



Near detector construction in progress!!



他の原子炉ニュートリノ実験と比較



$P=8.2\text{GWth}/2$
 $L=1.05\text{km}$
 $\delta\sin^2 2\theta_{13}=0.03$

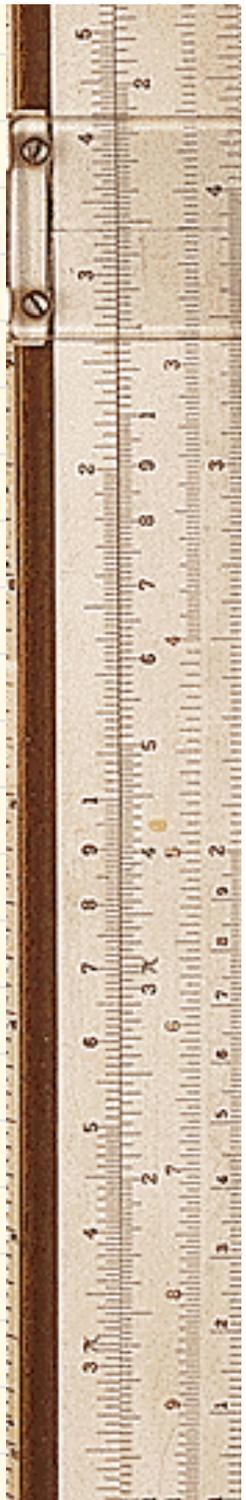
Far データ収集中
 2011年11月 first result

$P=11.6\text{GWth}/4$
 $17.4\text{GWth}/6(2011\sim)$
 $L\sim 1.8\text{km}$
 $\delta\sin^2 2\theta_{13}=0.01$

Near
 データ収集中

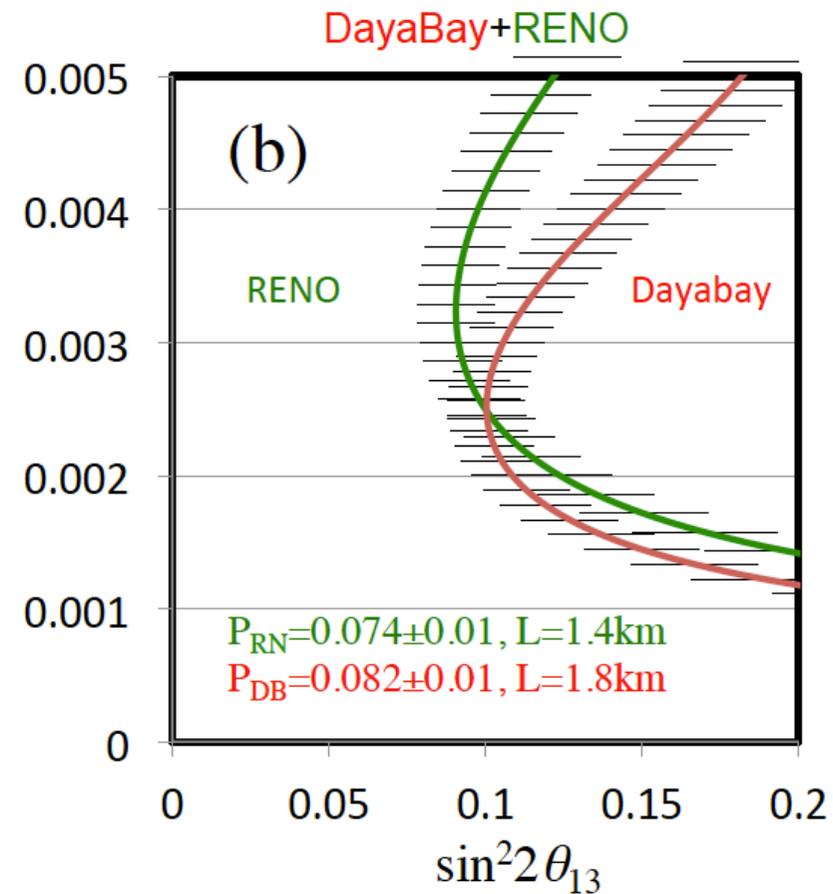
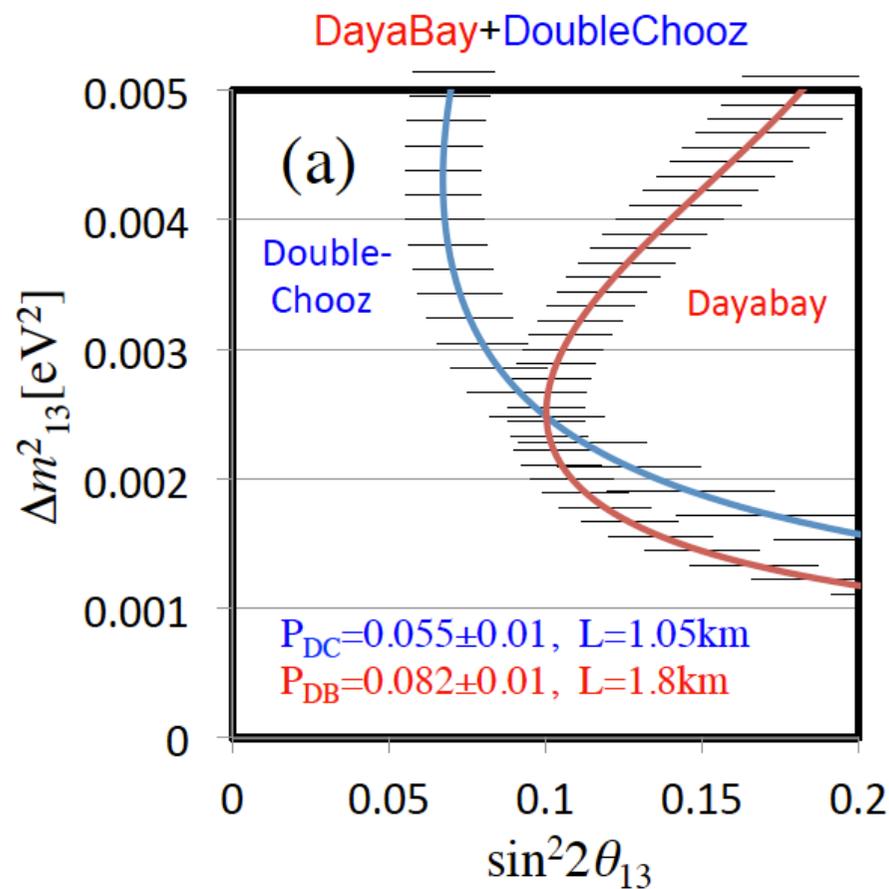
$P=16.1\text{GWth}/6$
 $L\sim 1.4\text{km}$
 $\delta\sin^2 2\theta_{13}=0.02$

Near+Far
 データ収集中



原子炉ニュートリノ実験の相補性

Δm^2_{13} の独立測定

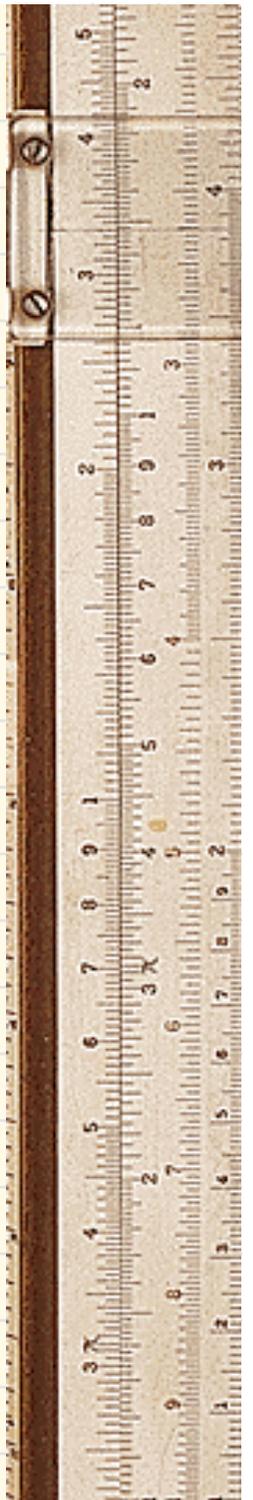


結論

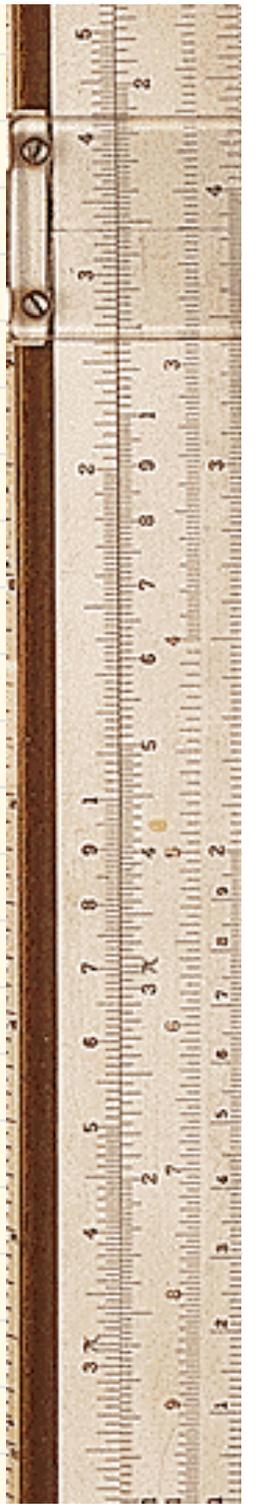
- Double Chooz実験は2011年4月から物理データの取得を開始した。
- 今回は約100日分のデータを用いた最初のニュートリノ振動解析の結果を報告した。

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

- 2013年には前置検出器を完成させ、2基の検出器での測定を開始
 - $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ の感度で精密測定を目指す。

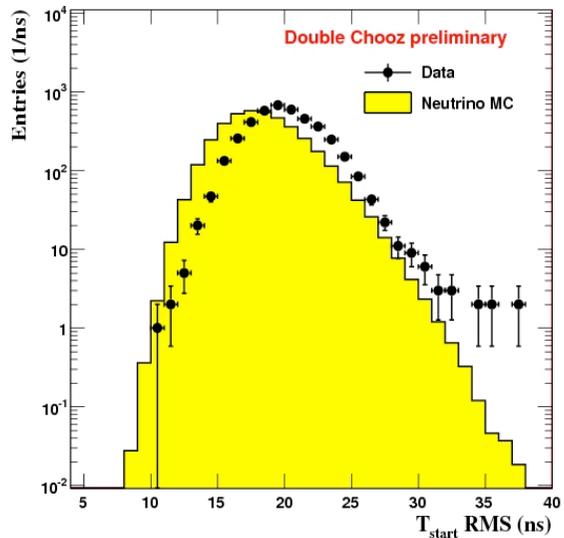


Backup

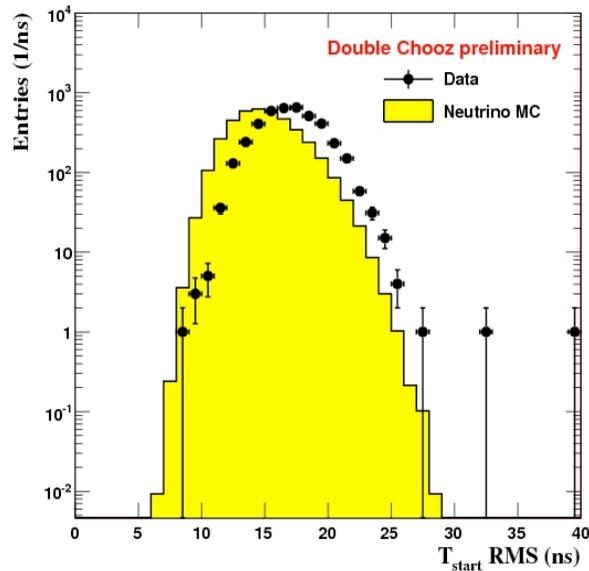


Light noise

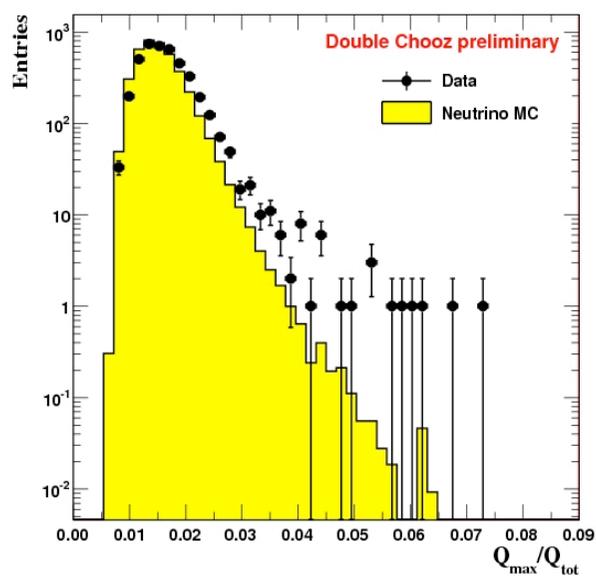
prompt T_{start} RMS



delayed T_{start} RMS



prompt $Q_{\text{max}}/Q_{\text{tot}}$ ratio



delayed $Q_{\text{max}}/Q_{\text{tot}}$ ratio

