

Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

~ θ_{13} ~

arXiv:1203.1669v2

2012/04/25

佐藤 優太郎

Neutrino Physics

フレーバー(弱い相互作用)の固有状態 ($\alpha=e,\mu,\tau$)

\neq

質量の固有状態 ($j=1,2,3$)

ニュートリノの混合行列
MNS(牧・中川・坂田) 行列

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j\rangle$$

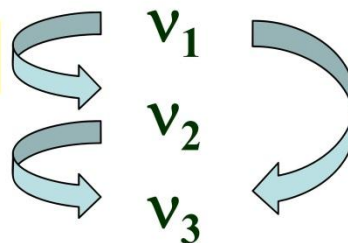
ニュートリノ振動のパラメータ

- 質量の2乗差 $|\Delta m_{12}|, |\Delta m_{23}|, |\Delta m_{13}|$: 波長
- 混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$: 振幅
- 位相 δ : CP の破れ

$\rightarrow \theta_{13}$ と δ が未測定

θ_{12} solar neutrino oscillation

θ_{23} atmospheric neutrino oscillation



ニュートリノ振動(2世代の場合)

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu; L) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]$$

振幅

波長

$$\lambda_{osc} [\text{km}] = 2.47 \frac{E [\text{GeV}]}{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}$$

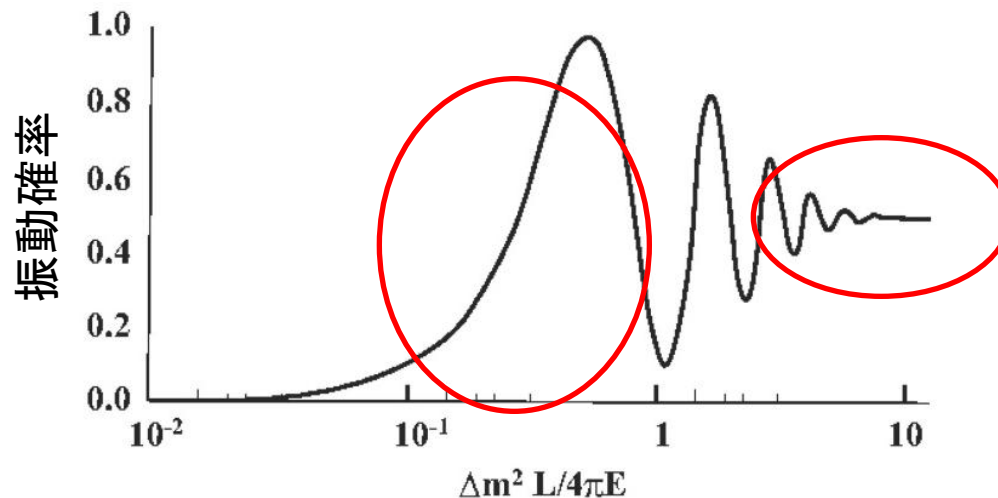
→ ニュートリノ振動は混合があり($\theta \neq 0$)、かつ質量差があるとき($\Delta m \neq 0$)のみ、生じる。

振動周期に対して飛行距離が短い場合

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \sim \sin^2 2\theta \cdot \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)^2$$

振動周期に対して飛行距離が長い場合、
ニュートリノエネルギーに幅があることから、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \sim \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$



θ_{13} 測定

加速器を用いた方法(T2K, MINOS)

- ニュートリノ源：陽子ビームを標的に当てて生成された K, π が生成。
その崩壊から生じる(ミュオン)ニュートリノ。
- Appearance experiment ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$

$$+ 4J_r \sin \delta \sin \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{2E} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) + \dots$$

- for ν
+ for $\bar{\nu}$

(Approximation @ $\Delta m_{31}^2 L/4E \sim \pi/2, \Delta m_{32}^2 \sim \Delta m_{31}^2$)

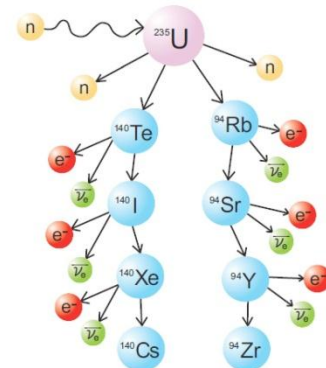
$$J_r \equiv \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \theta_{23} \cos^2 \theta_{13} \sin \theta_{13}$$

原子炉を用いた方法(Double Chooz, Daya Bay, Reno)

- ニュートリノ源：ウラン原子核が中性子を吸収して、核分裂を起こす。
核分裂で生じた原子核が β 崩壊を起こす。→ 反電子ニュートリノ
- Disappearance experiment ($\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$)

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_{\mu,\tau}) \approx \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) + \sin^2(2\theta_{12}) \cos^4(\theta_{13}) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right)$$

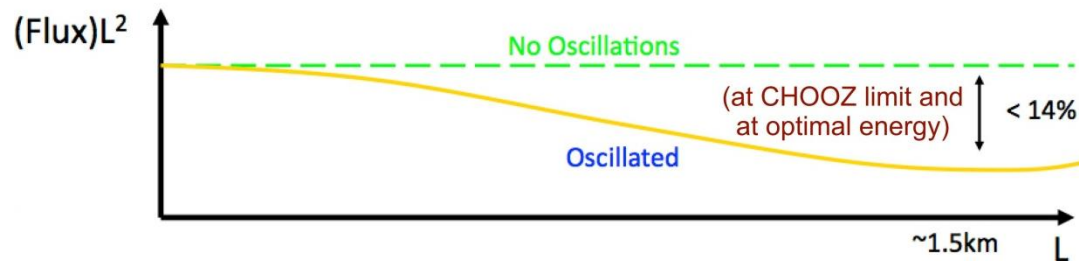
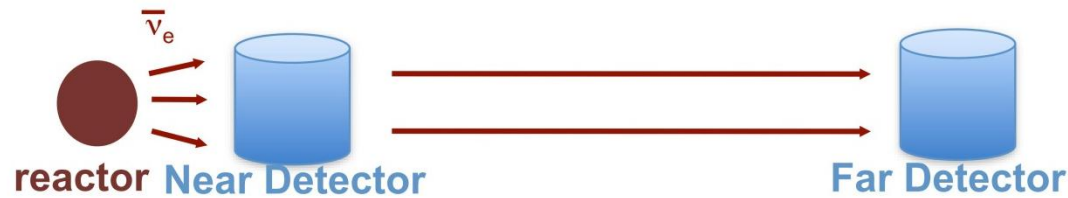
- 2つの測定は相補的。
- 原子炉を用いた方法は、 CP の破れ(δ)、物質効果の影響を受けない。



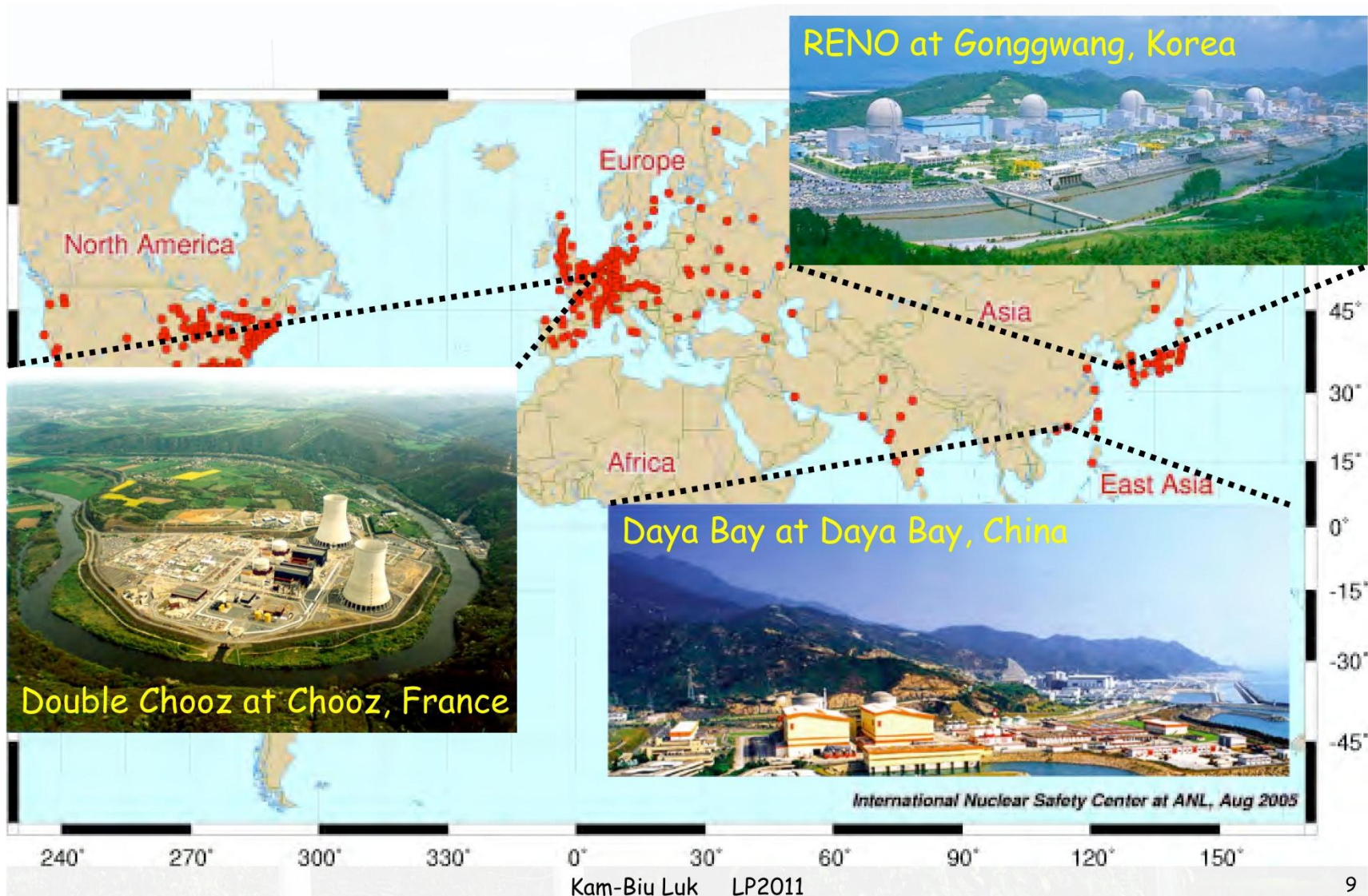
θ_{13} 測定

- Near Detector とFar Detector で比較して、
反電子ニュートリノがわずかに減少していることを観測する。
- Near Detector とFar Detector で系統誤差を相殺。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \cong 1 - \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$



Reactor-based theta_13 Experiments



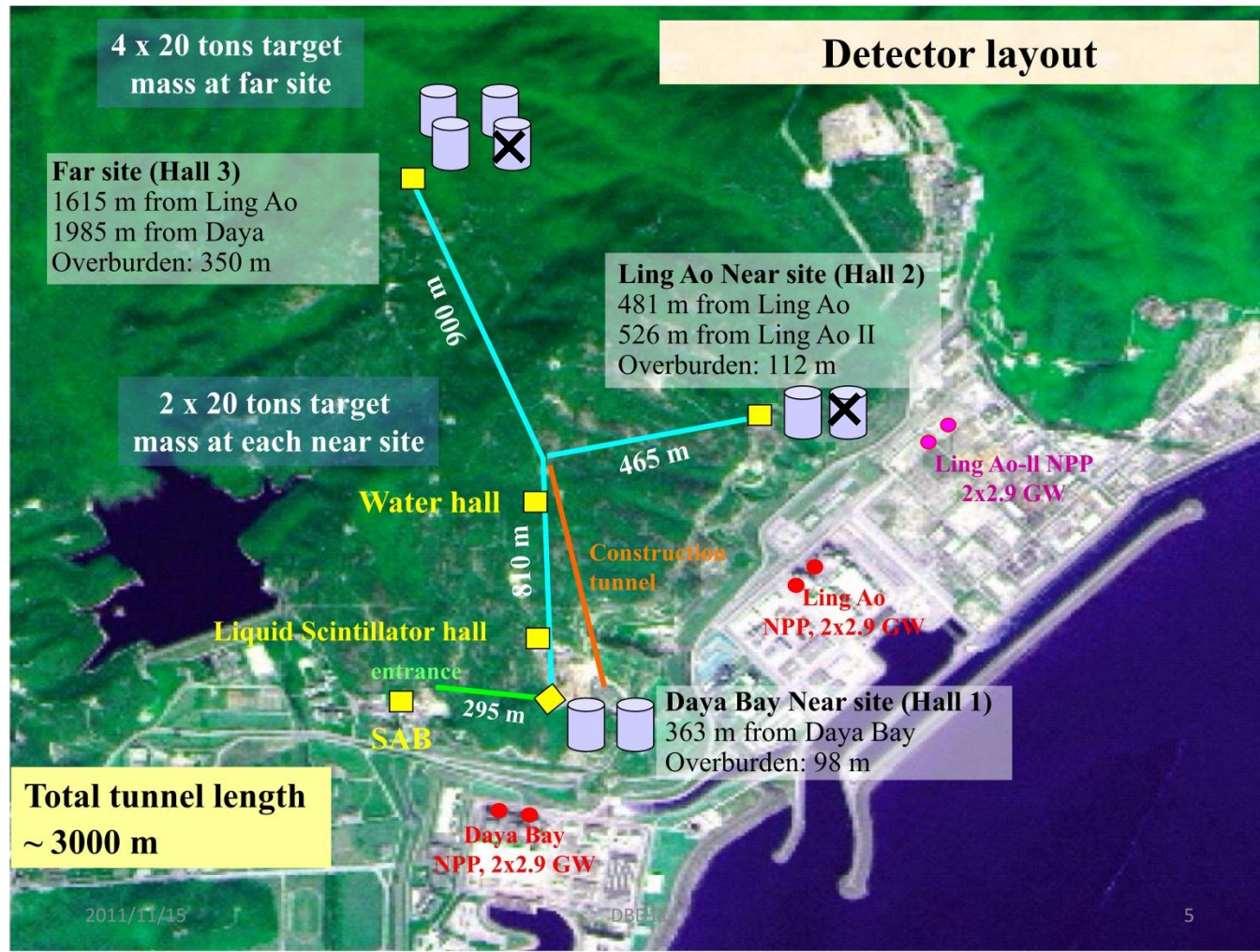
原子炉

- 6つの2.9 GW_{th} の原子炉を使用。
 - 合計17.4GW_{th} = 3.6×10^{21} v/s
 - GW_{th} (熱出力:単位時間当たりの原子炉の発熱量) はThermal power[GW] のこと。

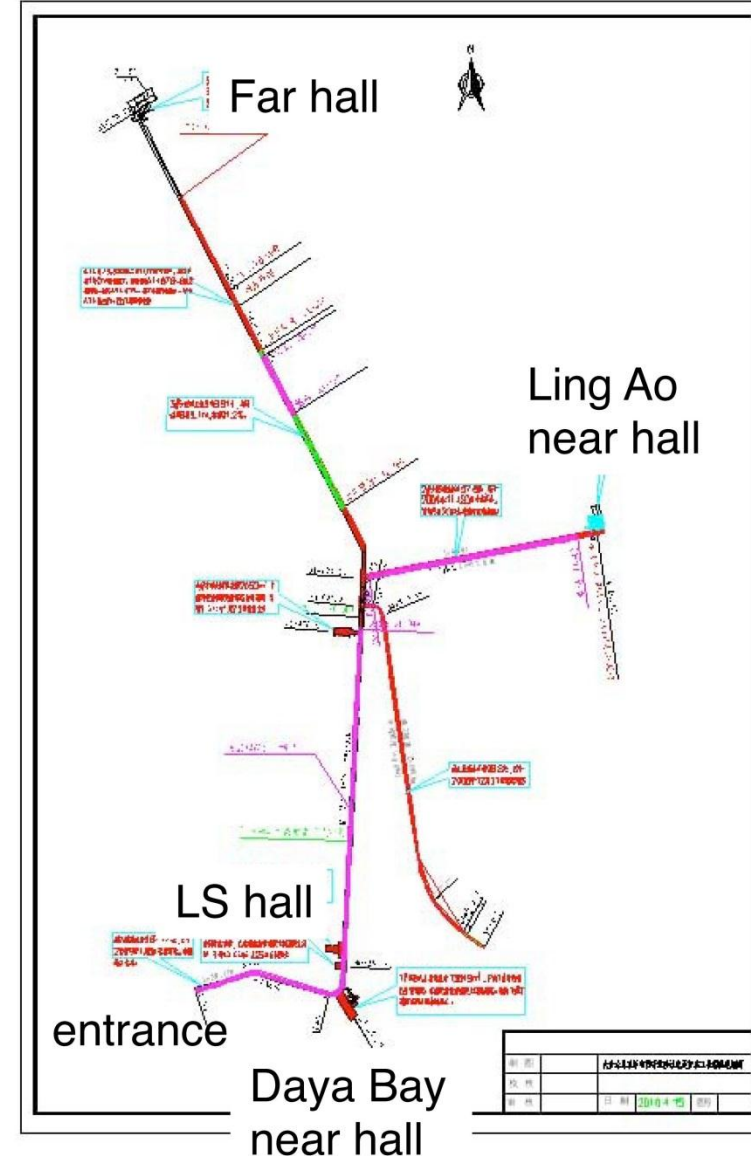


検出器の配置図

- 今回の解析では、6つの検出器を使用。
- 3つの実験ホール。
 - 3つの実験ホールは水平トンネルでつながっている。
- Far detector は振動確率が最大になると予想されている点。



Daya Bay Underground Laboratory

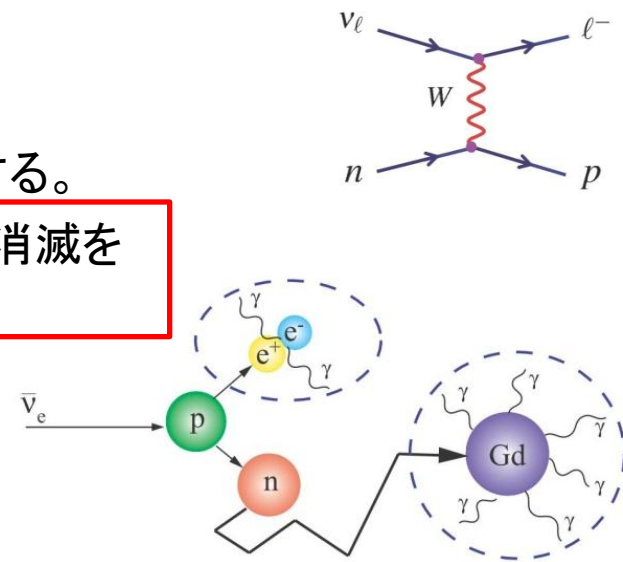
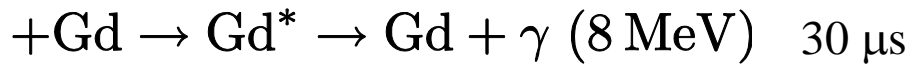
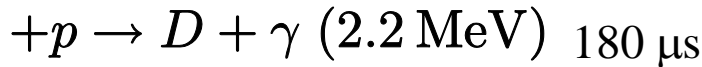
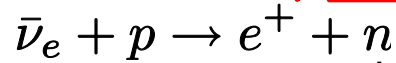


反電子ニュートリノの検出方法

遅延同時計測法

- 液体シンチレータ(0.1% Gadolinium doped LS) を用いて、逆β崩壊を観測することにより、反電子ニュートリノを検出する。

先発信号：液体シンチレータ中の電子と対消滅を起こして、2本の γ 線を出す



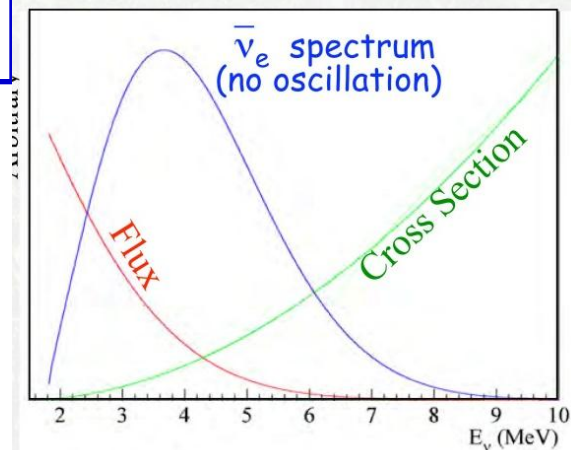
後発信号：中性子が液体シンチレータ中において、弾性散乱を繰り返す中で減速し、熱中性子となる。その後、液体シンチレータ中の水素原子もしくはガドリニウム原子に捕獲され、先発信号から遅れて、 γ 線を出す。

- 先発信号と後発信号の時間差とエネルギーでB.G.を抑制。
- 先発信号の大きさ

$$E_{prompt} = E_{\bar{\nu}_e} - 1.8\text{MeV}(\text{threshold}) + 1.02\text{MeV}(\text{annihilation})$$

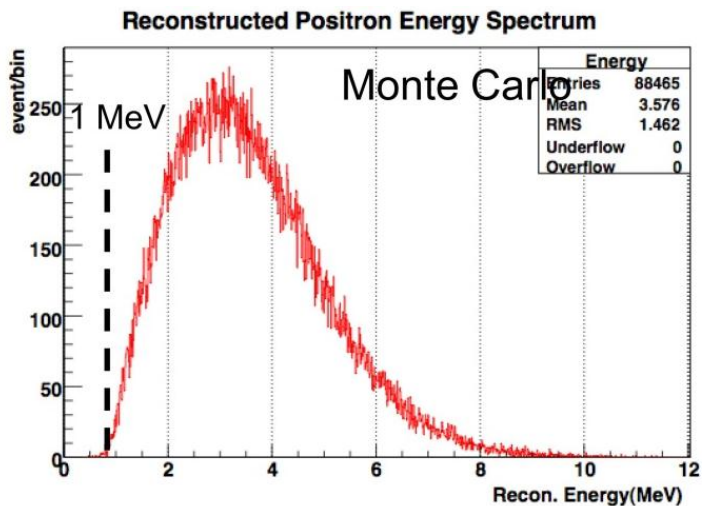
$$\sim E_{\bar{\nu}_e} - 0.78\text{MeV}$$

$$E_{th} = (m_n + m_e) - m_p = 1.805 \text{ [MeV]}$$

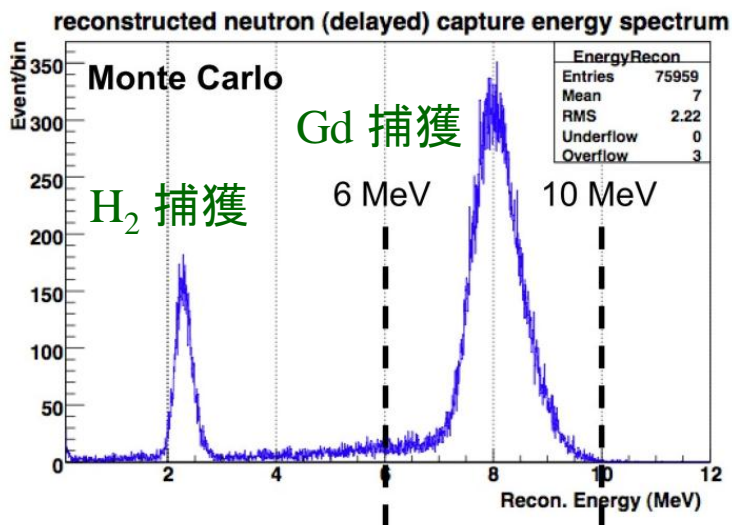


Expected Neutrino Signals

先発信号のエネルギー分布



後発信号のエネルギー分布

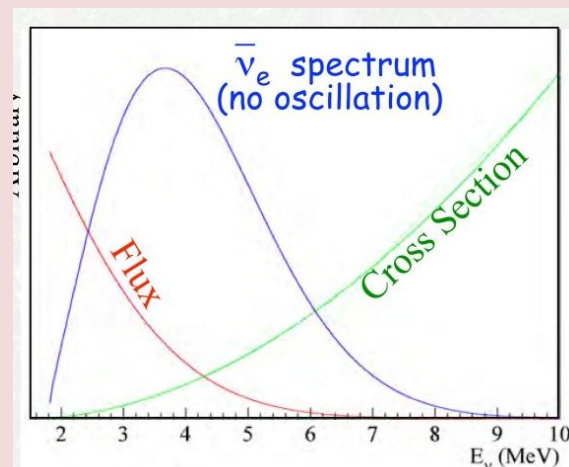


Near sites

~700/day/detector

Far site

~90/day/detector



$$E_{prompt} \sim E_{\bar{\nu}_e} - 0.78 \text{ MeV}$$

検出器

- 検出器は3層に分かれている。
- 上下にリフレクター(反射鏡)を設置。
 - Photocathode coverage 5.6% \rightarrow 12%
- Detector mass : 110 t

ターゲット層(液体シンチレータ+Gd)

ここでニュートリノが反応。20t

Gamma-Catcher 層(液体シンチレータ)

ターゲット層から漏れ出た γ を逃さず
反応させる。(No-fiducial volume cut), 20t

Buffer 層(ミネラルオイル)

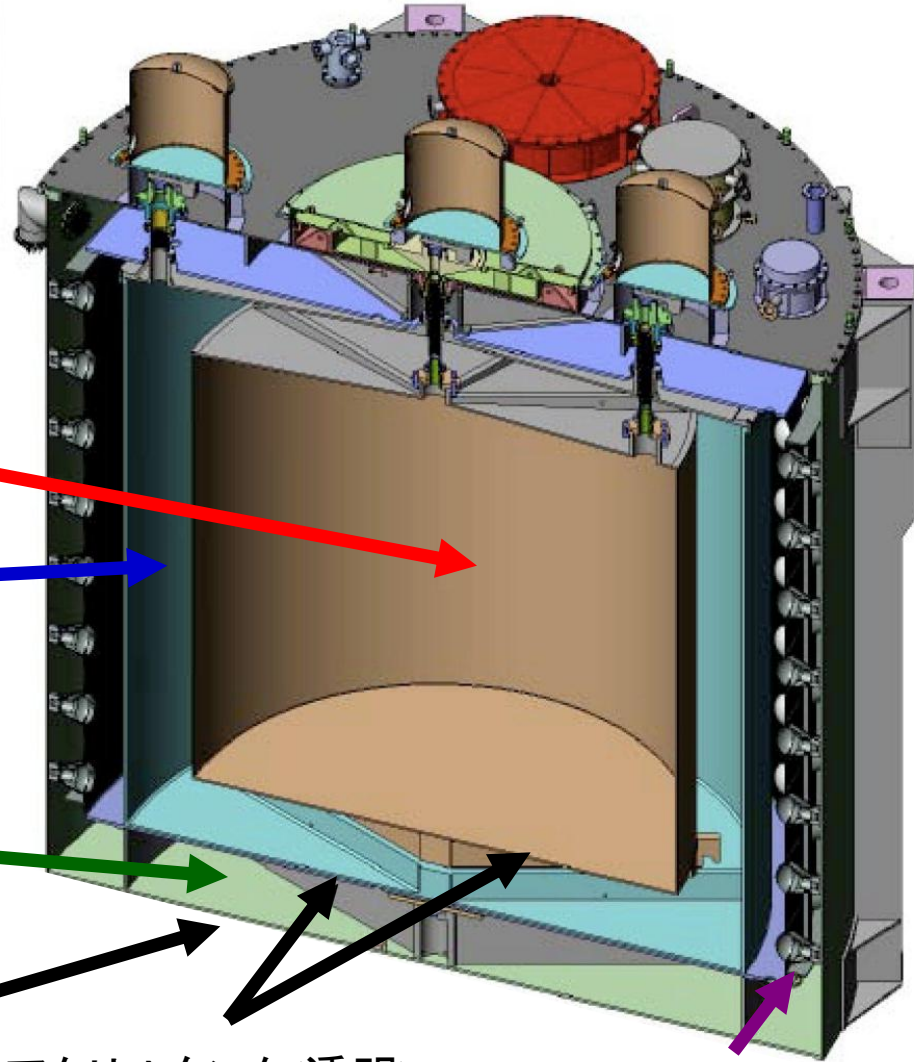
ここではシンチレーション光は発生しない。
外部からの放射線を遮断。37t

スチールタンク
(直径5m)

アクリルタンク(透明)

PMT (光検出器)

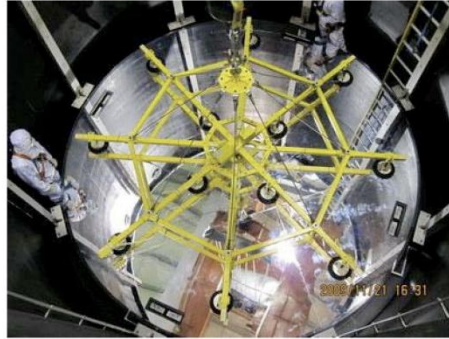
192 個, 12%/ \sqrt{E} @ 1 MeV



検出器の組み立て



Stainless Steel Vessel (SSV) in assembly pit



Install Lower reflector



4m Acrylic Vessel (AV)



Lower 3m AV

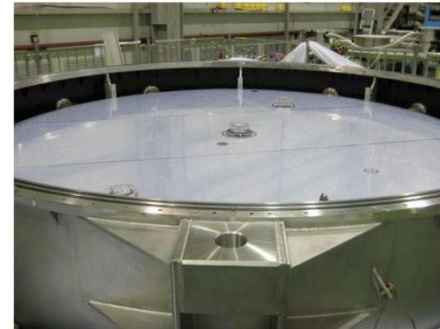
Install Calibration Units



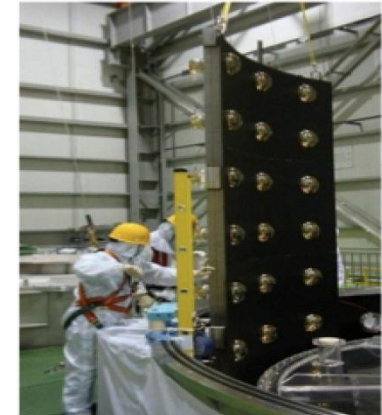
Close SSV Lid



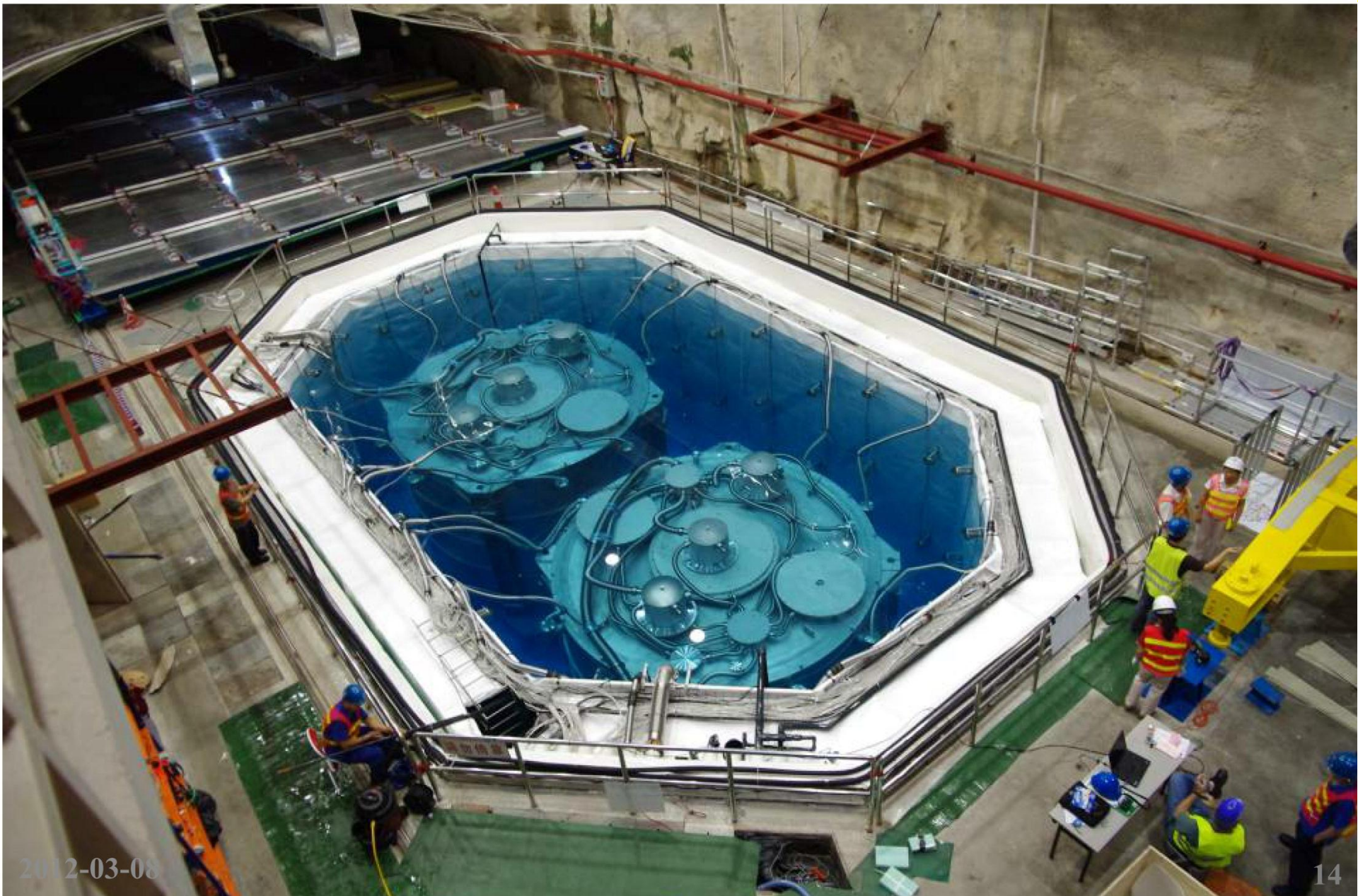
Install Top reflector



Install PMT Ladders



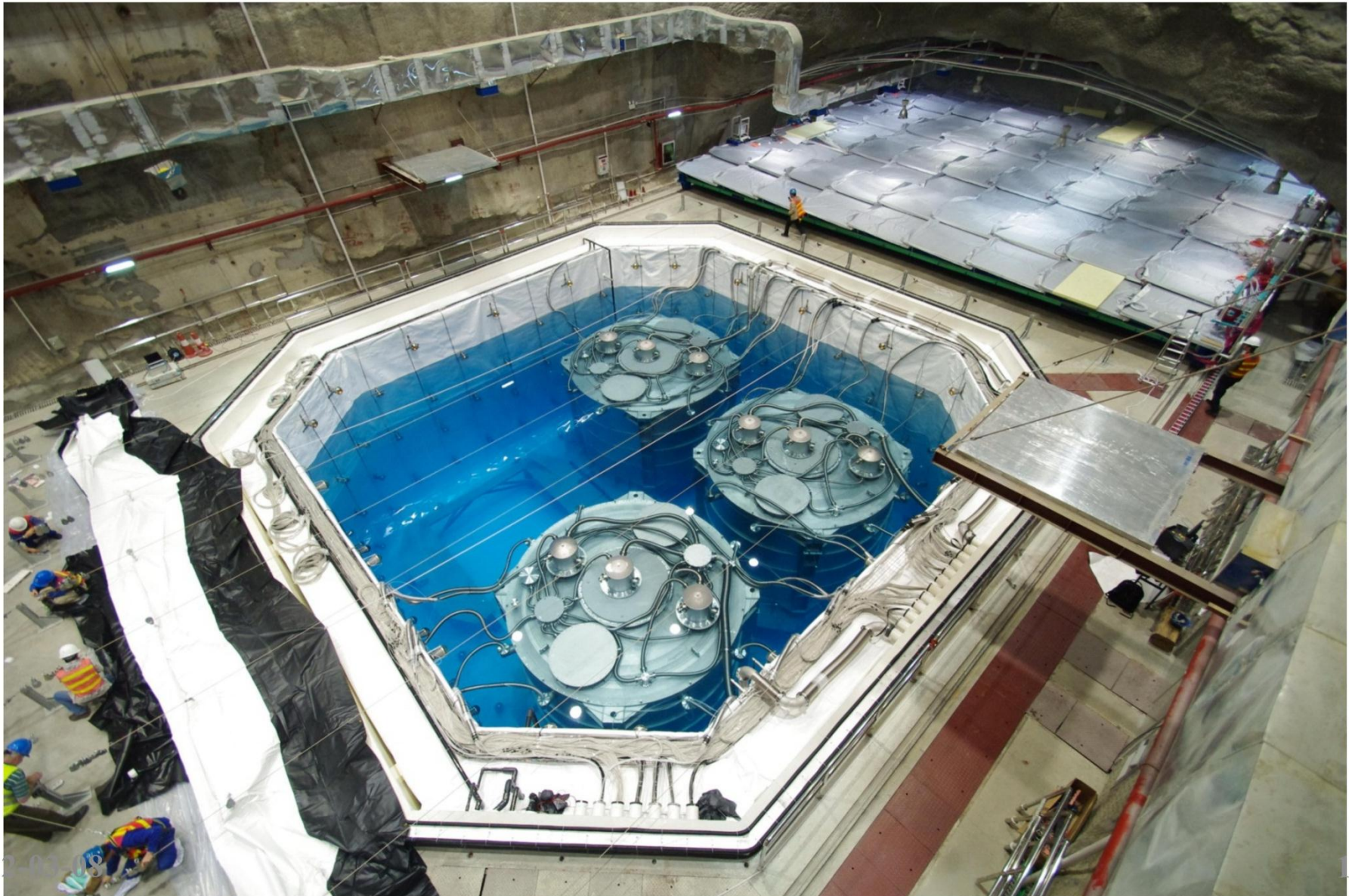
Two ADs Installed in Hall 1



2012-03-08

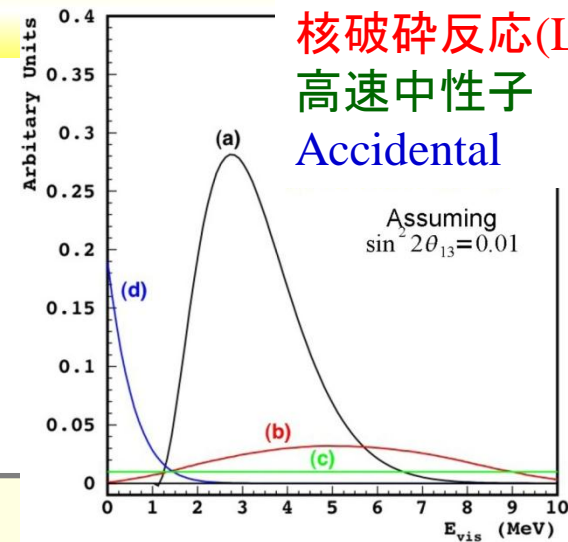
Three ADs insalled in Hall 3

Physics Data Taking Started on Dec.24, 2011



Backgrounds

シグナル
核破砕反応(Li)
高速中性子
Accidental



Accidental background

- 疑似先発信号：自然放射線
- 疑似後発信号：中性子がGdに捕獲される。

Correlated background

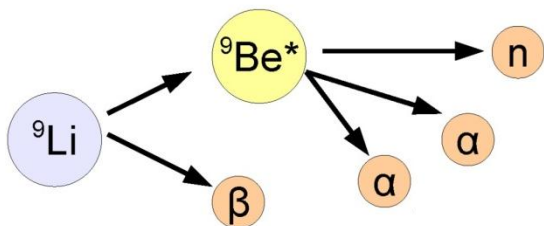
高速中性子

- (高速)中性子がターゲット層の液体シンチレータで陽子と衝突し、最終的に捕獲される。

- 疑似先発信号：散乱した複数の陽子

核破砕反応

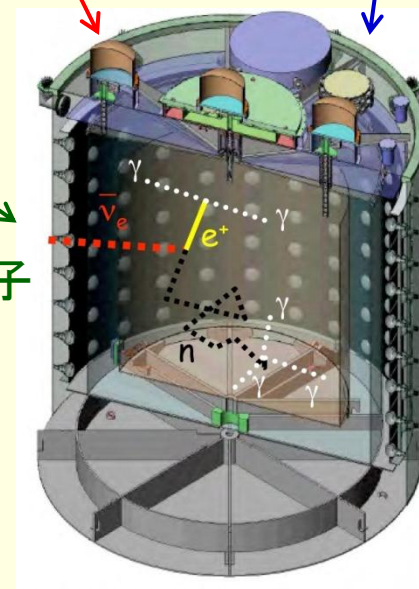
- 不安定性原子核が崩壊する際にβ線やγ線とともに中性子を放出。



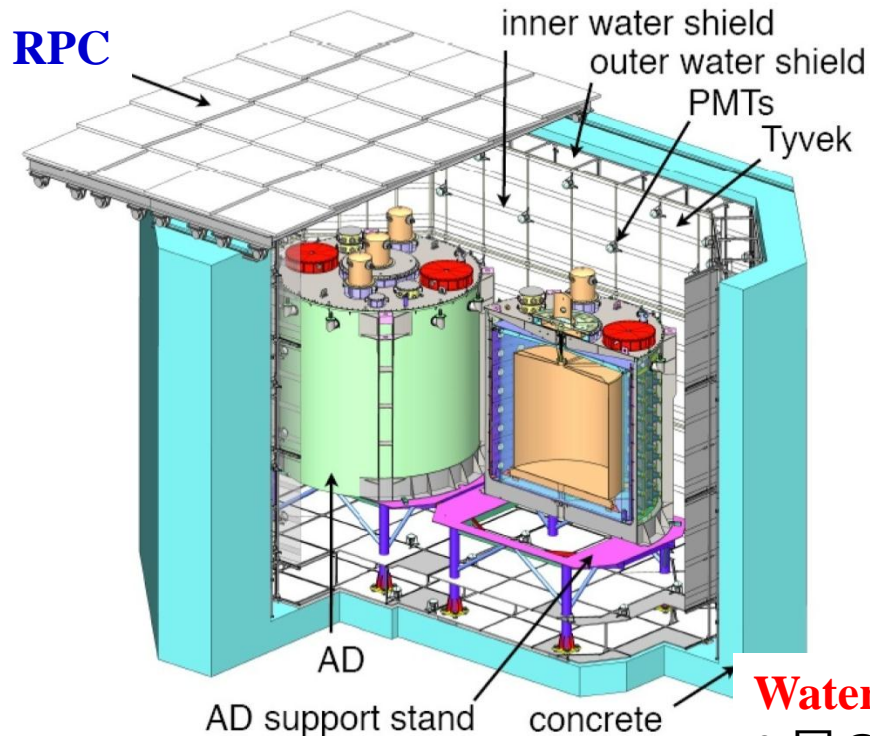
β線、γ線 (自然放射線)

宇宙線ミュオン

不安定性原子核, 中性子



Muon Veto System



	Overburden	R_μ	E_μ	D1,2	L1,2	L3,4
EH1	250	1.27	57	364	857	1307
EH2	265	0.95	58	1348	480	528
EH3	860	0.056	137	1912	1540	1548

TABLE I. Vertical overburden (m.w.e.), muon rate R_μ (Hz/m²), and average muon energy E_μ (GeV) of the three EHs, and the distances (m) to the reactor pairs.

Water Cerenkov detector

2層のプール、それぞれにPMTが設置されている。

Two active cosmic-muon veto's

- Water Cerenkov: Eff.>97%
- RPC Muon tracker: Eff. > 88%

解析

期間

- 2011年12月24日~2012年2月17日 (55 日間)
- 43,000 ton-GWth-day livetime exposure

検出した反電子ニュートリノイベント

- 80,376 イベント (near hall)
- 10,416 イベント (far hall)

Blind analysis

- 原子炉の発熱量
- ターゲット層の液体シンチレータの量

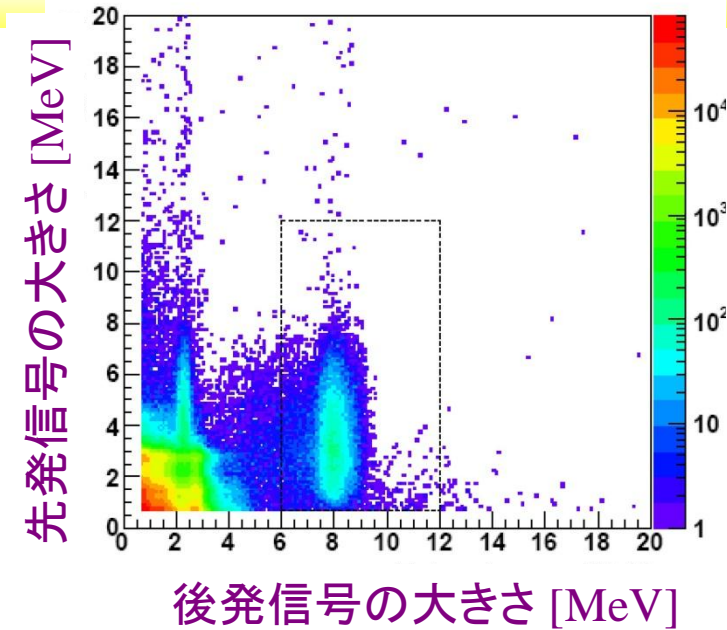
トリガー

- 2つの条件のどちらかを満たした場合、トリガーをかける。(rate < 280 Hz/AD)
 - 閾値 0.25 photoelectron を越えたPMT の数 (NHIT>45)
 - 閾値を越えたPMT の総電荷 (ESUM~>65)
- データとしては各PMT のcharge とtiming をそれぞれの検出器で独立に保存。
- Reactor flux fluctuations による系統誤差を抑えるため、すべての検出器が動いていた時のみの取得データを使用。

イベント選択

イベント選択条件

- 先発信号のエネルギー : 0.7 ~ 12.0 MeV
- 後発信号のエネルギー : $6.0 < 12.0$ MeV,
- 先発信号と後発信号の時間差 1 ~ 200 μ s



Muon-veto

- 検出器の外のプールのPMTのNHIT > 12 → **WS muon candidate “ μ_{WS} ”**
 - 後発信号が 600 μ s 以内にあるときは除外。
- μ_{WS} から 2 μ s 以内に検出器のPMTのエネルギーが 20 MeV 以上 → **muon “ μ_{AD} ”**
 - 後発信号が 1000 μ s 以内にあるときは除外。
- μ_{WS} から 2 μ s 以内に検出器のPMTのエネルギーが 2.5 GeV 以上 → **showering muon “ μ_{sh} ”**
 - 後発信号が 1 s 以内にあるときは除外。
- Multiplicit ycut
 - No additional > 0.7 MeV trigger in the time range $[t_p - 200 \mu\text{s}, t_d + 200 \mu\text{s}]$

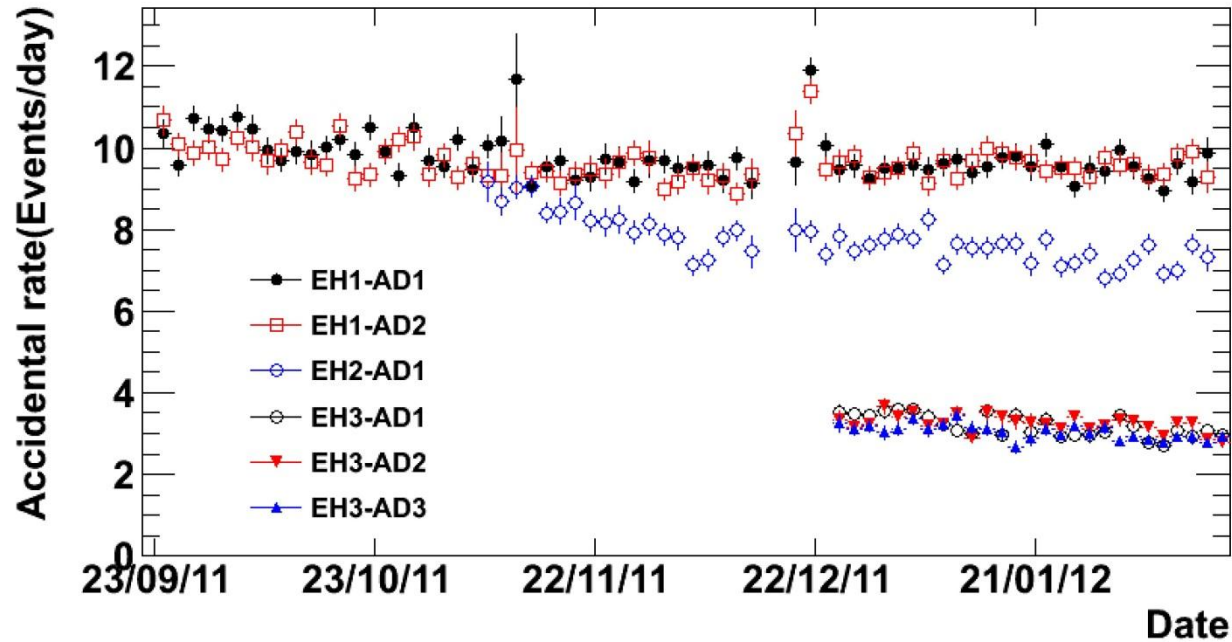
バックグラウンドの見積もり

	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6
IBD candidates	28935	28975	22466	3528	3436	3452
No-oscillation prediction for IBD	28647	29096	22335	3566.5	3573.0	3535.9
DAQ live time (days)	49.5530		49.4971	48.9473		
Muon veto time (days)	8.7418	8.9109	7.0389	0.8785	0.8800	0.8952
$\epsilon_{\mu} \cdot \epsilon_m$	0.8019	0.7989	0.8363	0.9547	0.9543	0.9538
Accidentals (per day)	9.82 ± 0.06	9.88 ± 0.06	7.67 ± 0.05	3.29 ± 0.03	3.33 ± 0.03	3.12 ± 0.03
Fast-neutron (per day)	0.84 ± 0.28	0.84 ± 0.28	0.74 ± 0.44	0.04 ± 0.04	0.04 ± 0.04	0.04 ± 0.04
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$ (per AD per day)	3.1 ± 1.6		1.8 ± 1.1	0.16 ± 0.11		
Am-C correlated (per AD per day)	0.2 ± 0.2					
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ background (per day)	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.035 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02
IBD rate (per day)	714.17 ± 4.58	717.86 ± 4.60	532.29 ± 3.82	71.78 ± 1.29	69.80 ± 1.28	70.39 ± 1.28

TABLE II. Signal and background summary. The background and IBD rates were corrected for the $\epsilon_{\mu} \cdot \epsilon_m$ efficiency. The no-oscillation predictions based on reactor flux analyses and detector simulation have been corrected with the best-fit normalization parameter in determining $\sin^2 2\theta_{13}$.

バックグラウンドの見積もり

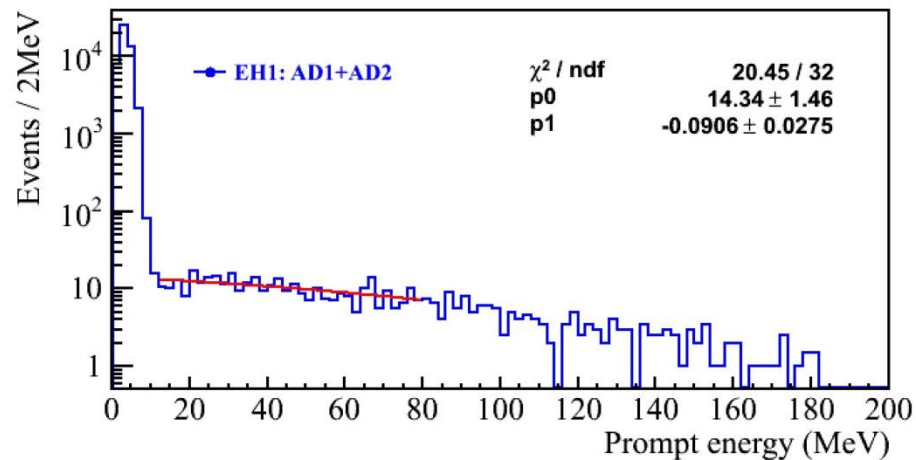
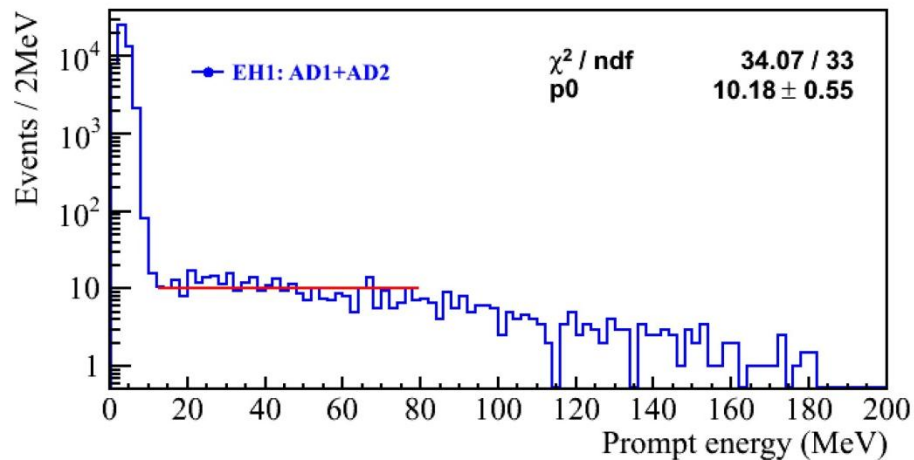
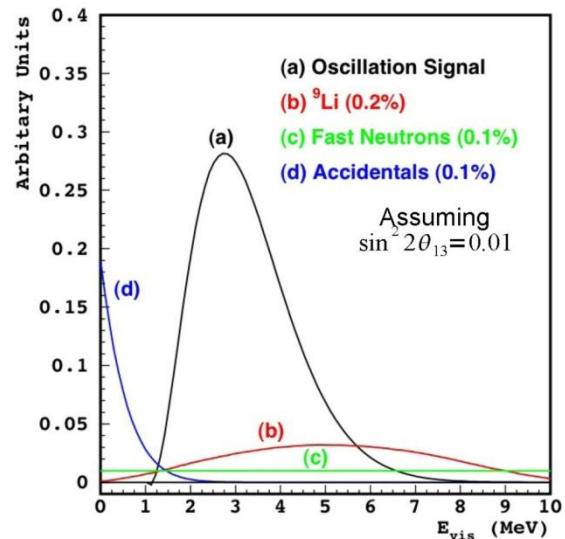
- Accidental background



$$N_{\text{accBkg}} = \sum_i N_{\text{n-like singles}}^i \cdot \left(1 - e^{-R_{e^+\text{-like triggers}}^i \cdot 200 \mu\text{s}} \right) \pm \frac{N_{\text{accBkg}}}{\sqrt{\sum_i N_{\text{n-like singles}}^i}}$$

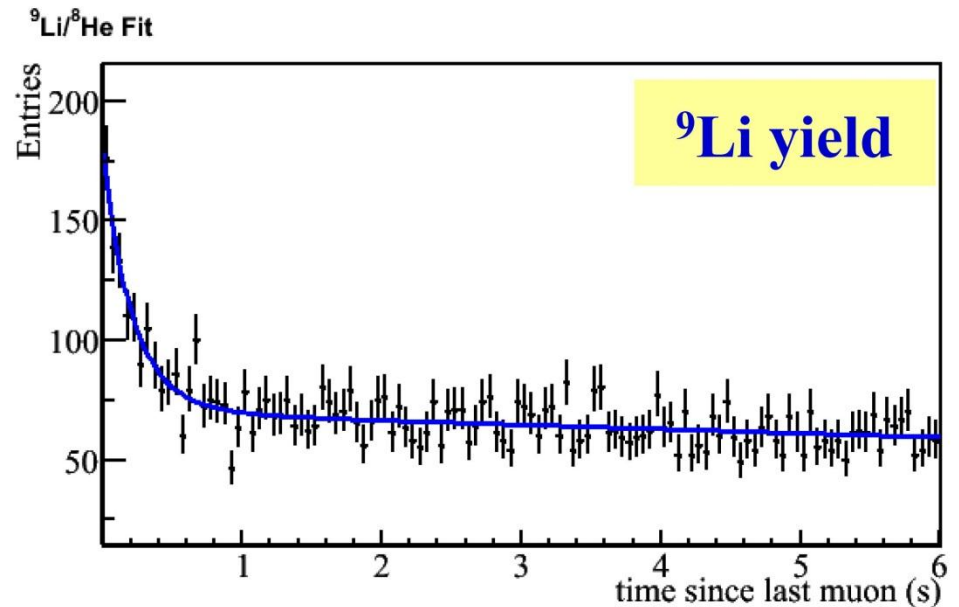
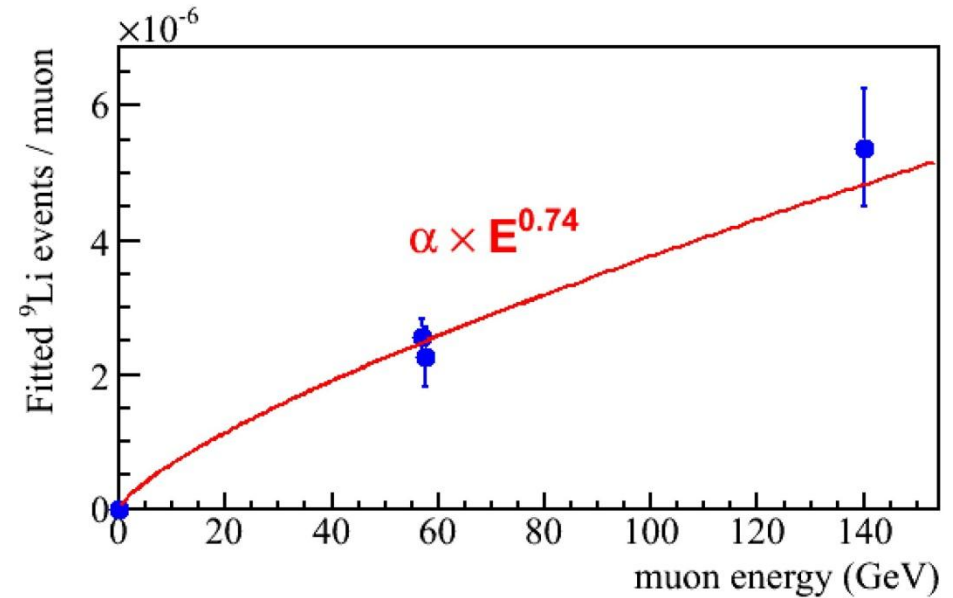
バックグラウンドの見積もり

- 高速中性子

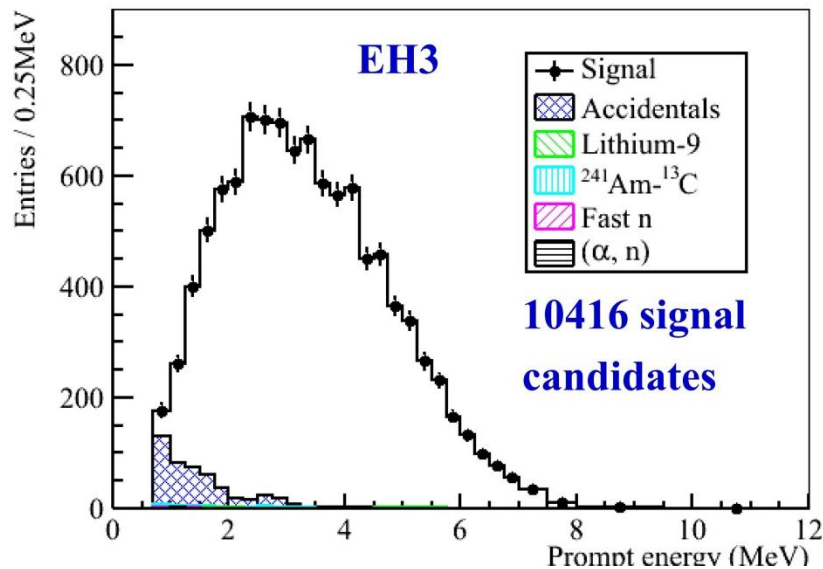
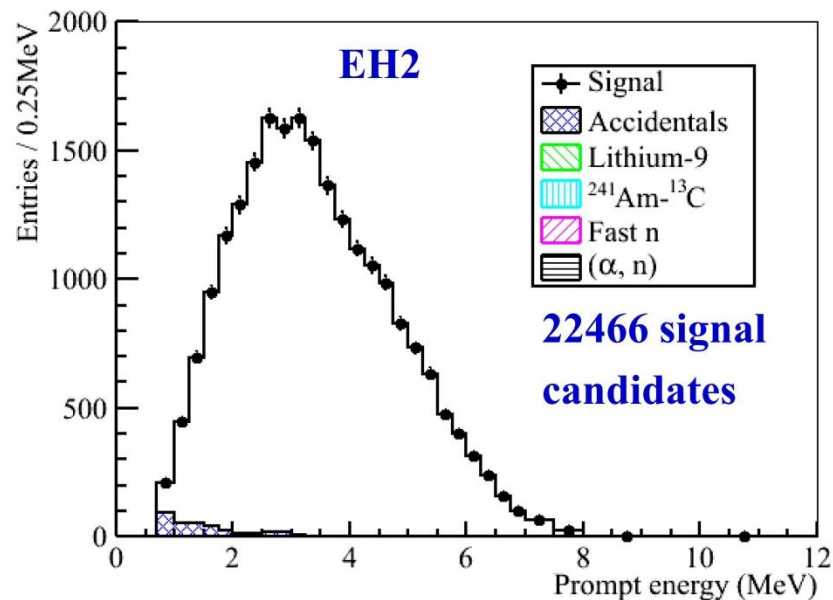
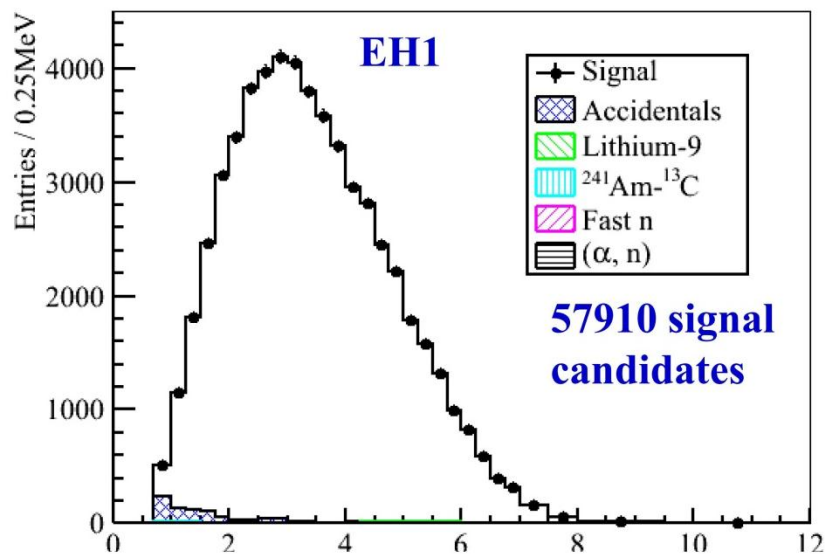


バックグラウンドの見積もり

- 核破碎反応 (${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$)



Signal+Background Spectrum



	B/S @EH1/2	B/S @EH3
Accidentals	~1.4%	~4.5%
Fast neutrons	~0.1%	~0.06%
$^8\text{He}/^9\text{Li}$	~0.4%	~0.2%
Am-C	~0.03%	~0.3%
α-n	~0.01%	~0.04%
Sum	1.5%	4.7%

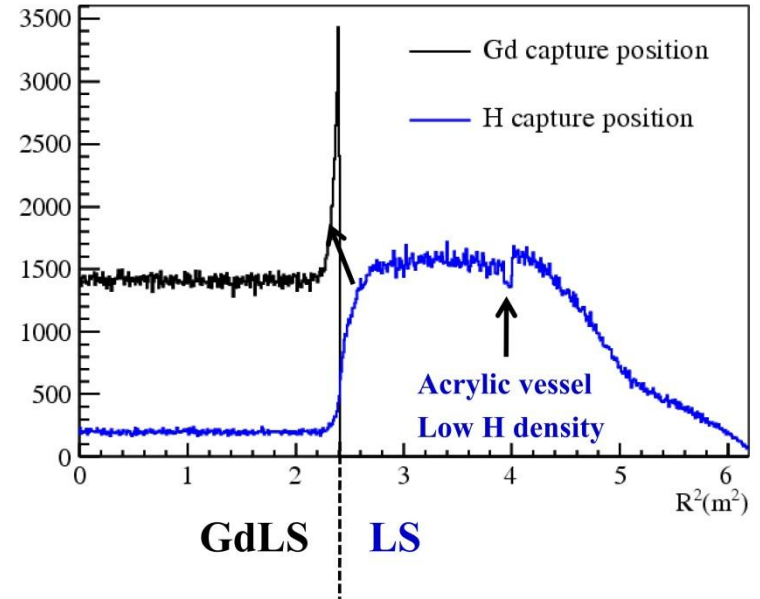
系統誤差

検出器

Detector			
	Efficiency	Correlated	Uncorrelated
Target Protons		0.47%	0.03%
Flasher cut	99.98%	0.01%	0.01%
Delayed energy cut	90.9%	0.6%	0.12%
Prompt energy cut	99.88%	0.10%	0.01%
Multiplicity cut		0.02%	<0.01%
Capture time cut	98.6%	0.12%	0.01%
Gd capture ratio	83.8%	0.8%	<0.1%
Spill-in	105.0%	1.5%	0.02%
Livetime	100.0%	0.002%	<0.01%
Combined	78.8%	1.9%	0.2%

Reactor			
Correlated		Uncorrelated	
Energy/fission	0.2%	Power	0.5%
IBD reaction/fission	3%	Fission fraction	0.6%
		Spent fuel	0.3%
Combined	3%	Combined	0.8%

原子炉



結果

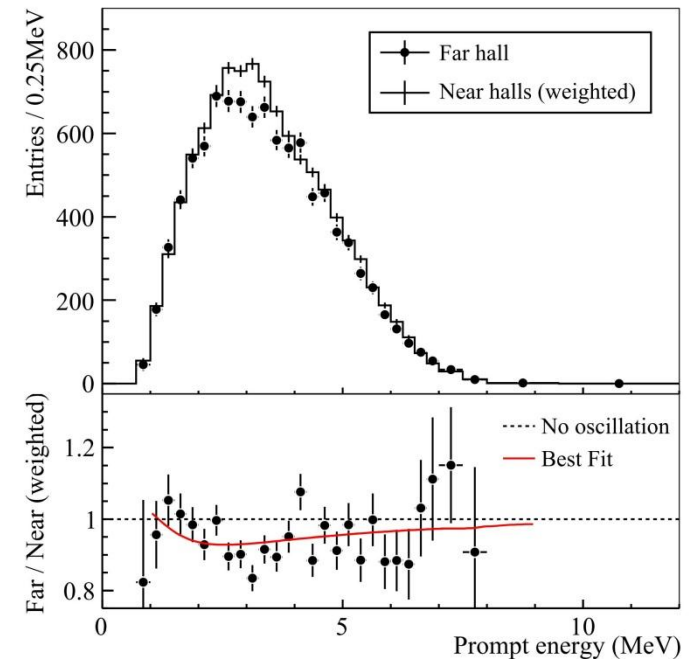
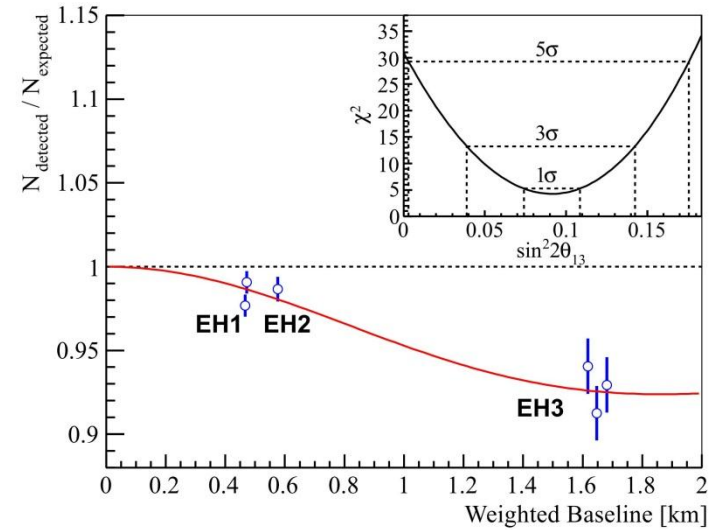
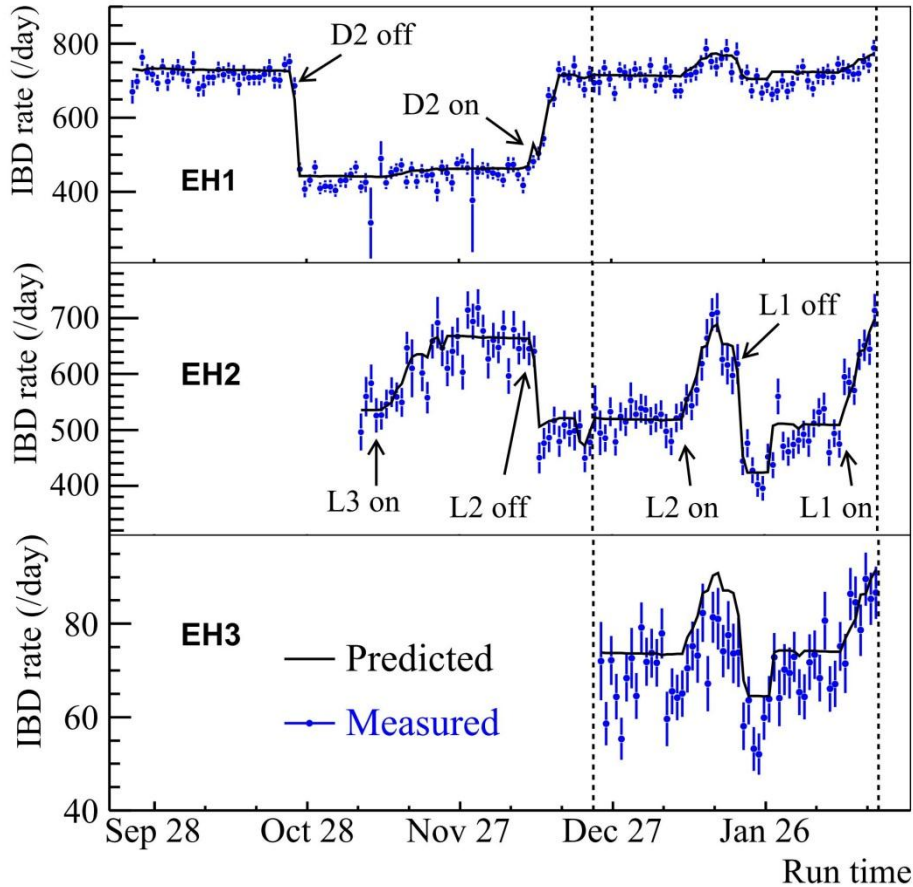
- 2つのNear hall の測定結果から、ニュートリノ振動がないことを仮定して、Far hall での測定値を予言。

→ Ratio(測定値/予言値) = 0.940 ± 0.011 (統計誤差) ± 0.004 (系統誤差)

$$\chi^2 = \sum_{d=1}^6 \frac{[M_d - T_d (1 + \varepsilon + \sum_r \omega_r^d \alpha_r + \varepsilon_d) + \eta_d]^2}{M_d + B_d} + \sum_r \frac{\alpha_r^2}{\sigma_r^2} + \sum_{d=1}^6 \left(\frac{\varepsilon_d^2}{\sigma_d^2} + \frac{\eta_d^2}{\sigma_B^2} \right),$$

結果

- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016$ (統計誤差) ± 0.005 (系統誤差)



Summary

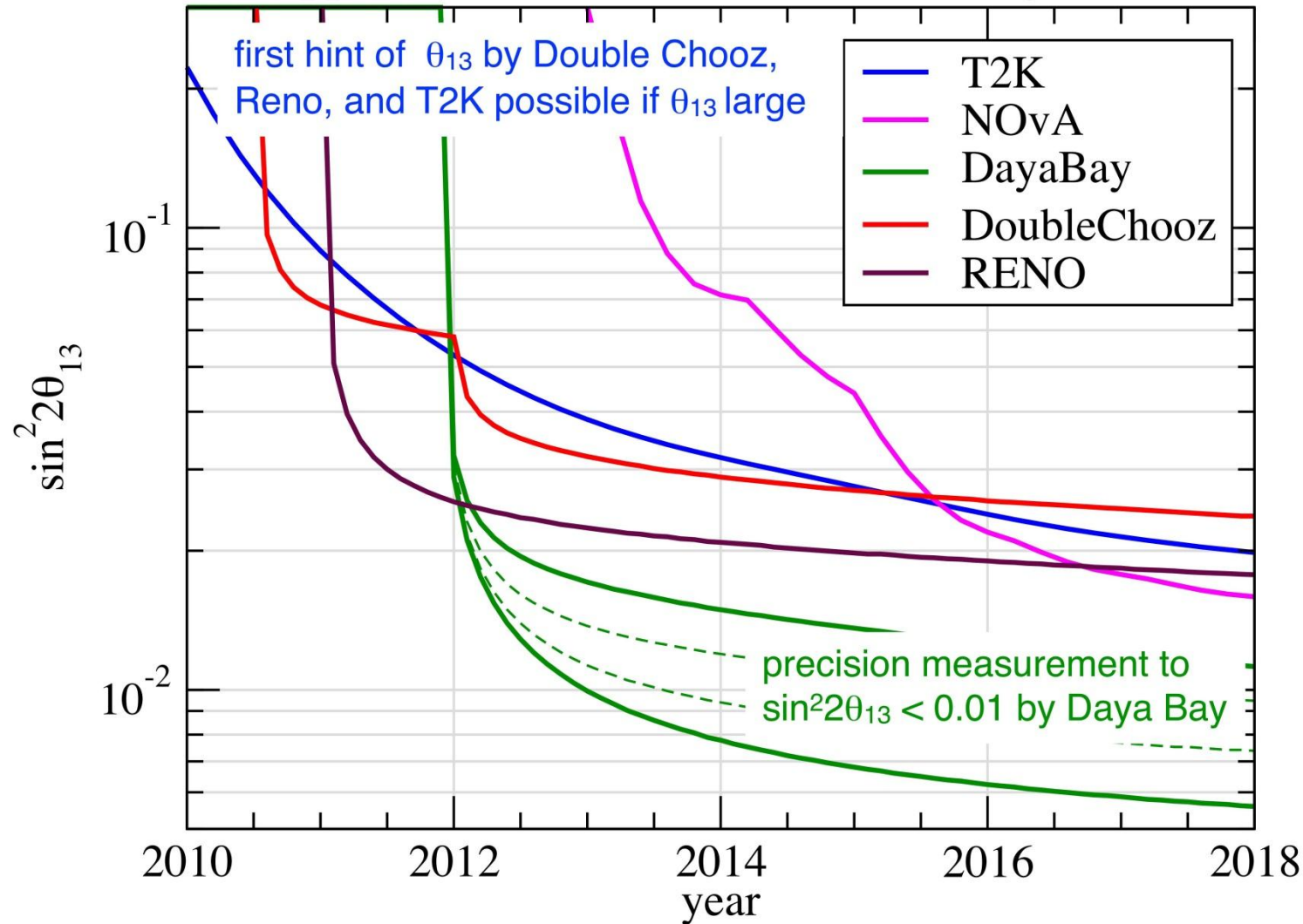
- 唯一測定されていなかった θ_{13} が発見された。
- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016$ (統計誤差) ± 0.005 (系統誤差) @ Daya Bay
- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.013$ (統計誤差) ± 0.019 (系統誤差) @ RENO

Backup Slides

Measuring θ_{13} : A Possible Scenario

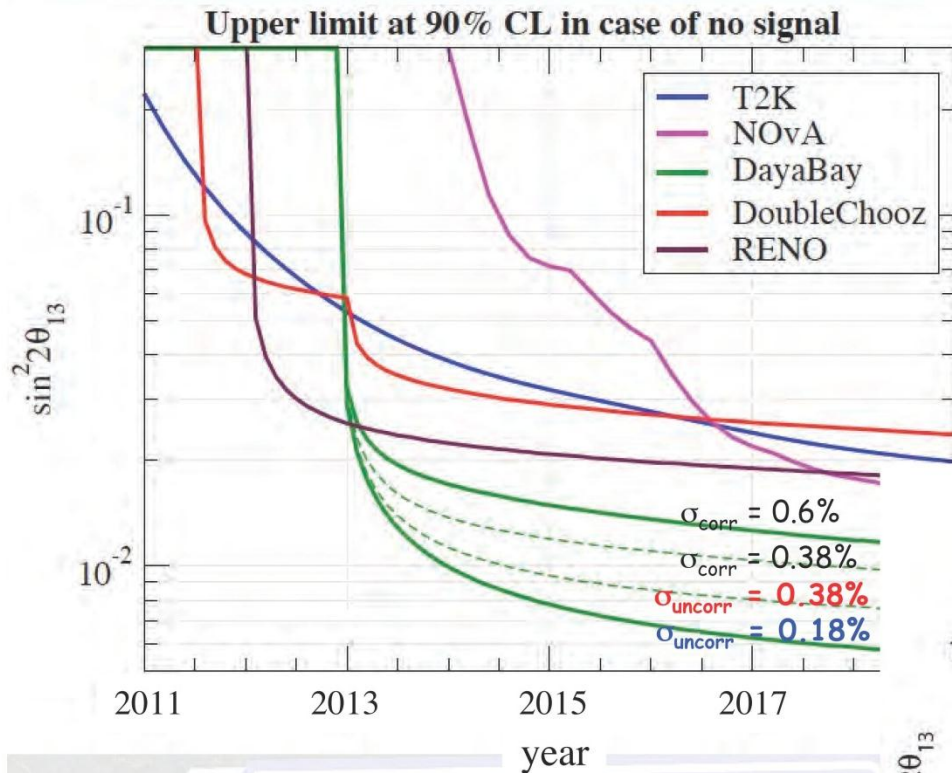


Upper limit at 90% CL in case of no signal

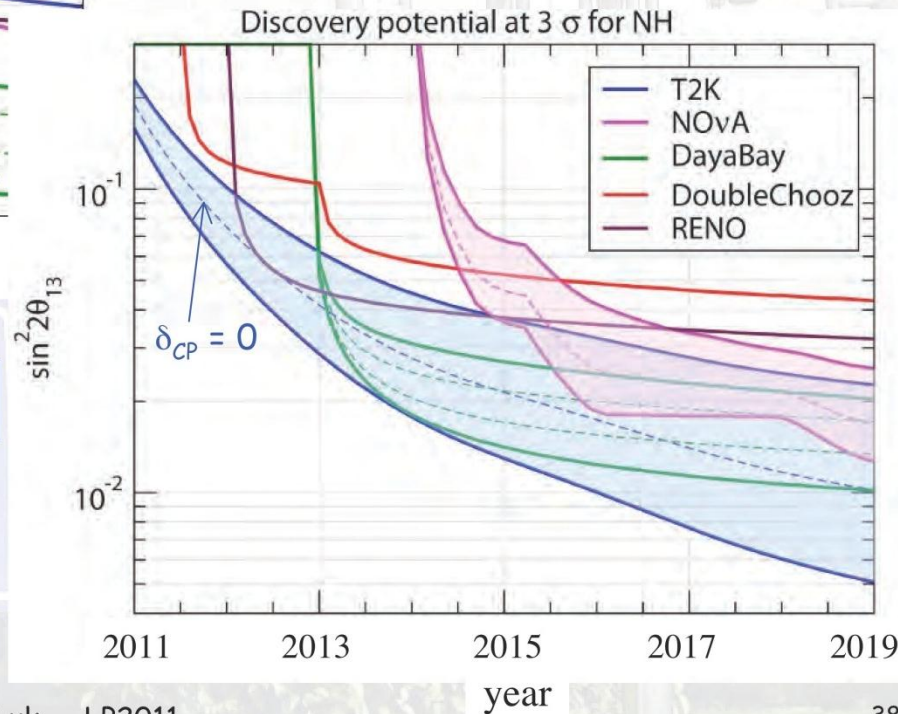


Mezzetto et al
arXive/1003.5800v1

Prospects For Pinning Down θ_{13}



Mezzetto & Schwetz, J.Phys.G37(2010)103001



Start dates subject to change.

Daya Bay Reactor Neutrino Experiment Station

Reactor θ_{13} Experiments

Experiment	Thermal Power (GW)	Distances Near/Far (m)	Depth Near/Far (mwe)	Target Mass (tons)	Start Date Near/Far	Sensitivity @ $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 90% CL, 3 years
Double-CHOOZ (France)	8.6	410/1050	115/300	8.8/8.8	2012/2011	0.03
RENO (So. Korea)	17.3	290/1380	120/450	20/20	2011/2011	0.02
Daya Bay (China)	17.4	363(481) / 1985(1613)	260/910	40($\times 2$) / 80	2011/2012	0.008

Automated calibration units(ACUs)

- LED
- ^{68}Ge source
- Combined source of ^{241}Am - ^{13}C
- ^{60}Co
- をGd-LS とLS の層に入れられるようになっている。

◆ Three Z axis:

- ⇒ One at the center
 - ✓ For time evolution, energy scale, non-linearity...
- ⇒ One at the edge
 - ✓ For efficiency, space response
- ⇒ One in the γ -catcher
 - ✓ For efficiency, space response

◆ 3 sources for each z axis:

- ⇒ LED
 - ✓ for T_0 , gain and relative QE
- ⇒ ^{68}Ge (2×0.511 MeV γ 's)
 - ✓ for positron threshold & non-linearity...
- ⇒ ^{241}Am - ^{13}C + ^{60}Co (1.17+1.33 MeV γ 's)
 - ✓ For neutron capture time, ...
 - ✓ For energy scale, response function, ...

◆ Once every week:

- ⇒ 3 axis, 5 points in Z, 3 sources

