

原子炉ニュートリノ振動実験 Double Choozの現状報告

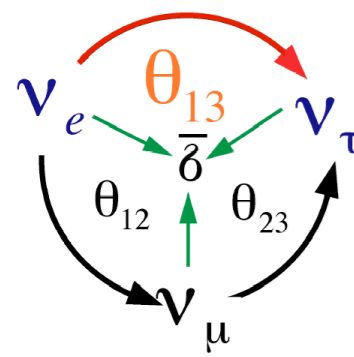
首都大学東京 理工学研究科
修士2年 香山 翔



ニュートリノ振動

ニュートリノが飛行中、その飛行距離に依存する確率で別の型に変化する現象。

ニュートリノ振動は牧・中川・坂田のMNS行列を使って記述出来る。



$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$c_{ik}, s_{ik} : \cos \theta_{ik}, \sin \theta_{ik}$

SK+K2K+MINOS

$\sin^2 2\theta_{23} = 0.52$

$\Delta m^2_{23} = 2.4 \times 10^{-3}$

CHOOZ

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

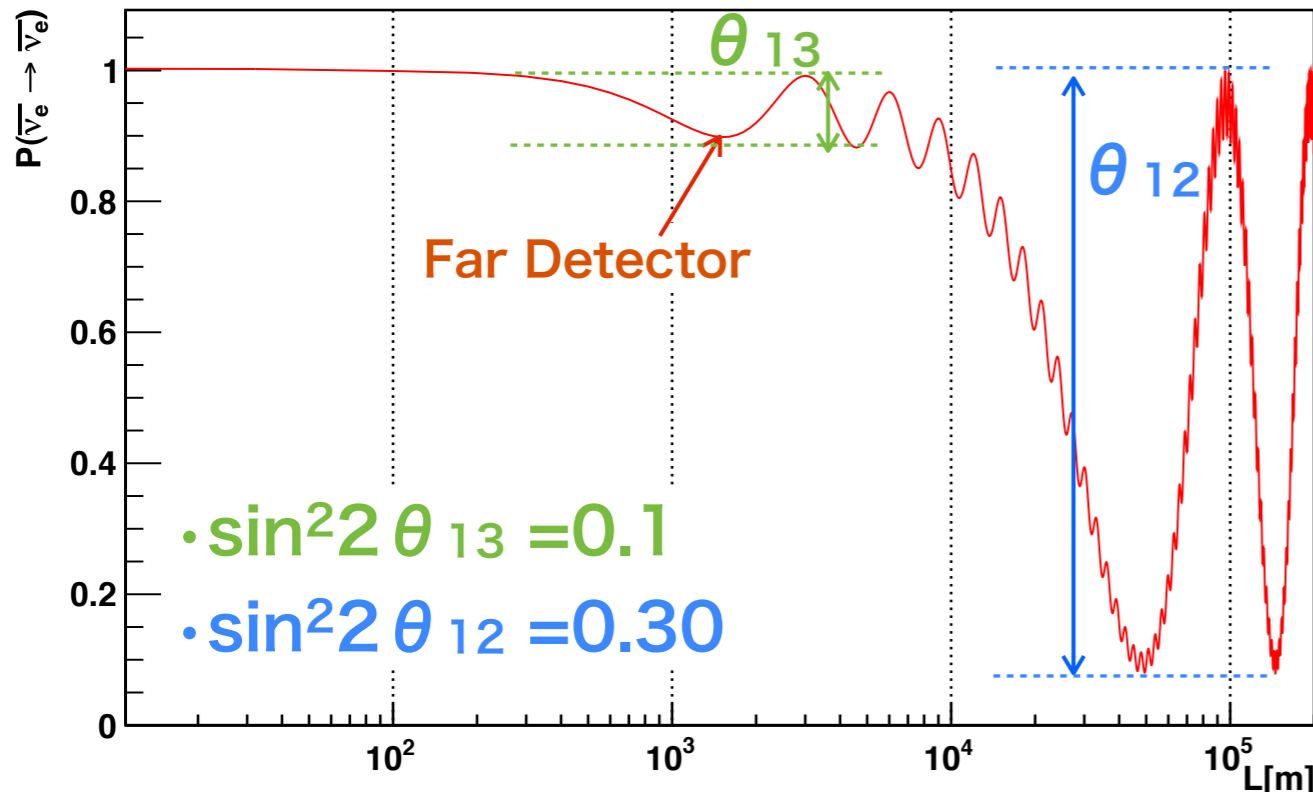
KamLand

$\sin^2 2\theta_{12} = 0.30$

$\Delta m^2_{12} = 7.9 \times 10^{-5}$

→ 原子炉から発生する $\bar{\nu}_e$ の変化量を精密測定する事により
残されたパラメータ θ_{13} の計測を目指す

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{21}^2 L}{E}\right) - \sin^2(2\theta_{13}) \left\{ \cos^2 \theta_{12} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{31}^2 L}{E}\right) + (1 - \cos^2 \theta_{12}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right) \right\}$$



※ θ は変化する確率の振幅を表す

θ_{13} は飛行距離 ~ 10 [km] までの影響が強い。

→ Double Chooz実験では最も振幅が大きくなる
1km付近にFar Detector(後置検出器)を設置する。

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 U

Russia



Kurchatov inst
Sc. Acad.

Brazil



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

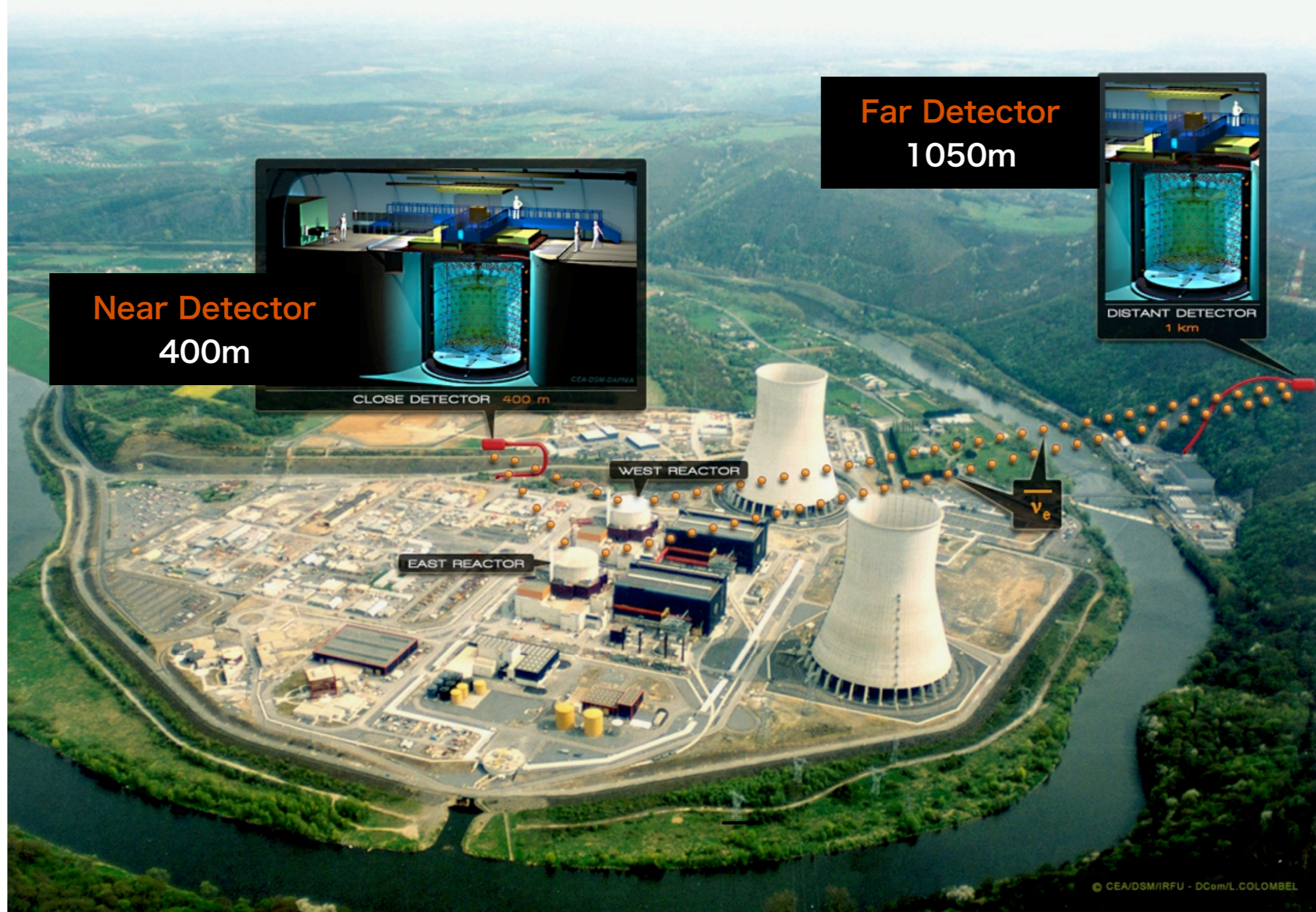
Japan



東北大学
東京工業大学
新潟大学
首都大学東京
神戸大学
東北学院大学
広島工科大学

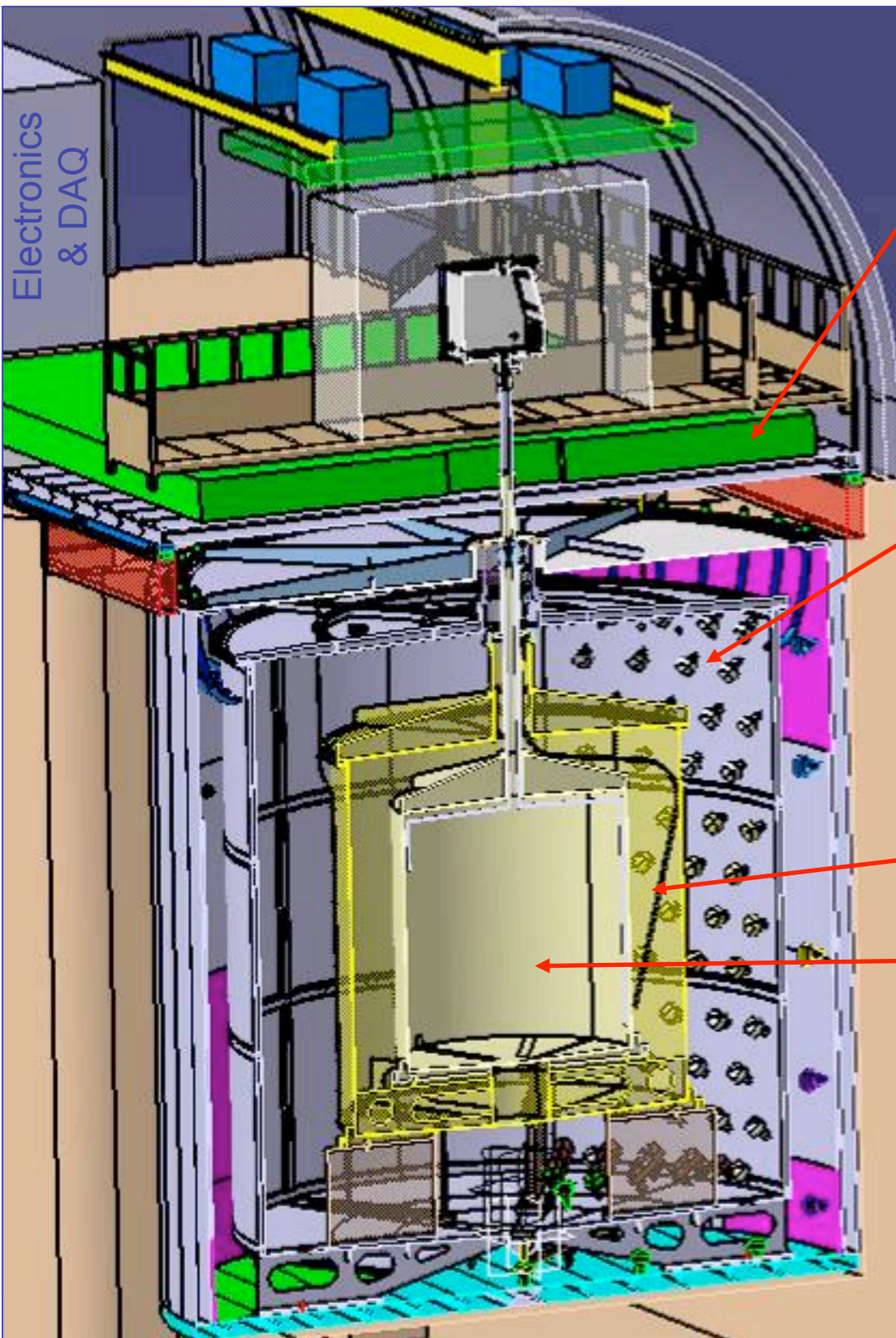


~150 people
35 institutes, 8 countries

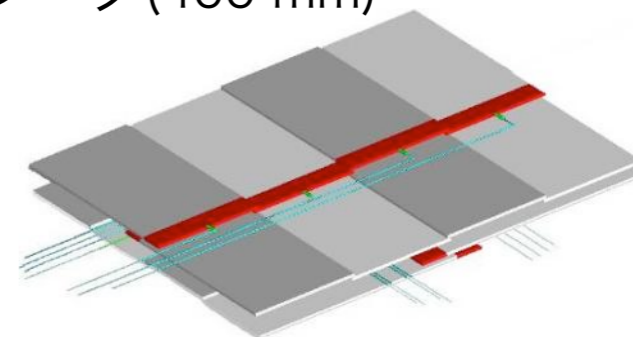


- ・フランスArdennes地方 Chooz村の二基の原子炉($\bar{\nu}_e$ 源)を持った原子力発電所で行われる。
- ・原子炉から400mの地点にNear Detector(前置検出器)、1kmの地点にFar Detectorを設置。
→同じSystematic Errorを持った2つの検出器の結果を比較する事により、誤差を軽減する。
- ※2010年4月からFar Detectorのみで実験開始予定

検出器デザイン



Outer Veto: 格子状に組まれたプラスチックシンチレータ (400 mm)



Buffer: ミネラルオイルで満たされた領域
このTankの内側に390本のPMTが設置される

PMT

- ・ 浜松ホトニクス製Low Background型 10インチPMT(R7081)
- ・ QExCE : ~25%

γ -Catcher: Gd無し液体シンチレータ (22.6m³)

ν -Target: Gd入り液体シンチレータ (10.3m³)

液体シンチレータ

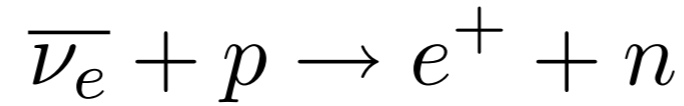
構成: 20% PXE – 80% Dodecane

性能

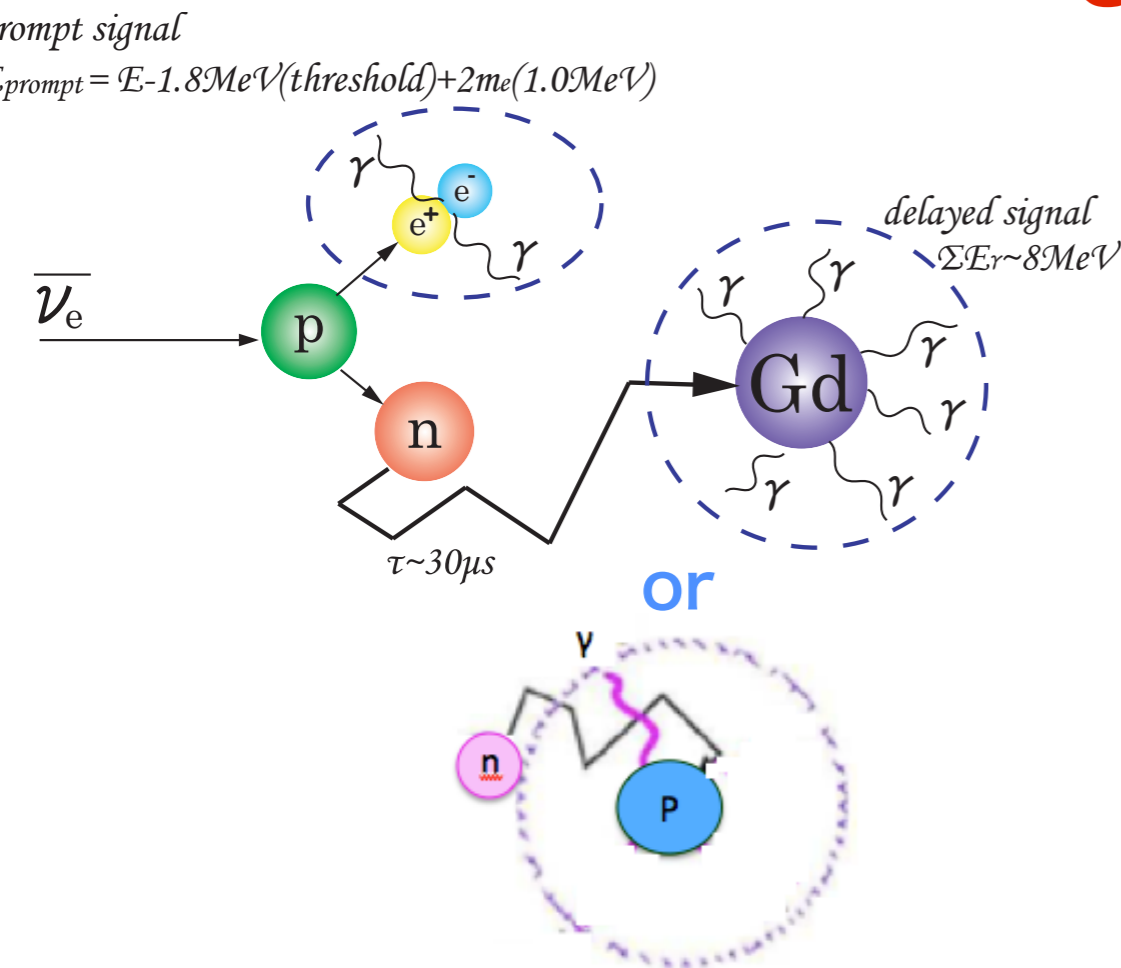
- ・ ~8000 photon/MeV Energy Deposit
- ・ Attenuation length : 5~10m @420nm
- ・ Radiopurity : U: 10⁻¹² g/g , Th: 10⁻¹² g/g , K: 10⁻⁹ g/g

ニュートリノ検出方法

検出器内に入射した $\bar{\nu}_e$ は陽子と逆 β 崩壊反応を起こし、陽電子と中性子が発生する



逆 β 崩壊反応がTarget内(Gd入り液シン)で起きた場合



- ・陽電子はすぐに液体シンチレータ中の電子と対消滅をし、 $511\text{keV} \times 2$ の γ 線を発生させる
→**Prompt**信号
 - ・中性子は数十～数百 μ 秒後にGdか水素に捕獲される
→**Delayed**信号
- Gd :合計**8MeV**の複数本の γ 線を発生
水素 :**2.2MeV**の1本の γ 線を発生

2つの信号をそれぞれのEnergyの大きさ、時間差を要求してニュートリノイベントを選別する事で、Backgroundと区別する。

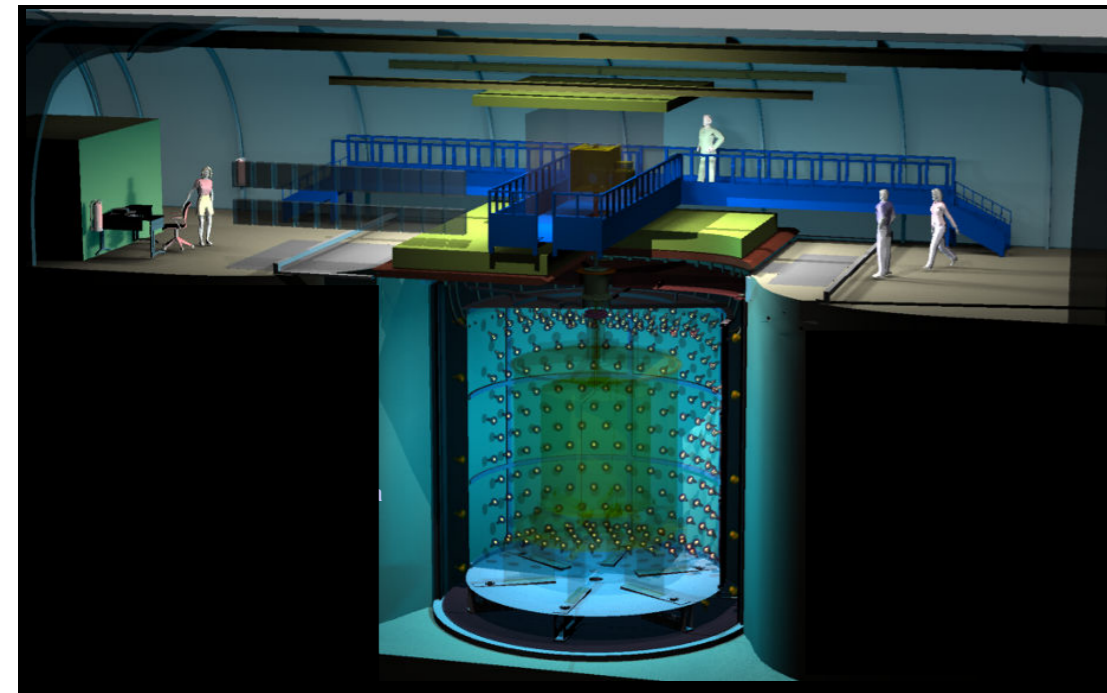
→**Delayed Coincidence(同時遅延計測)**

Far Detector建設作業

2009年夏頃から、Far検出器の建設作業が始まる。

日本グループを含む、各国のCollaboratorによって建設が行われた

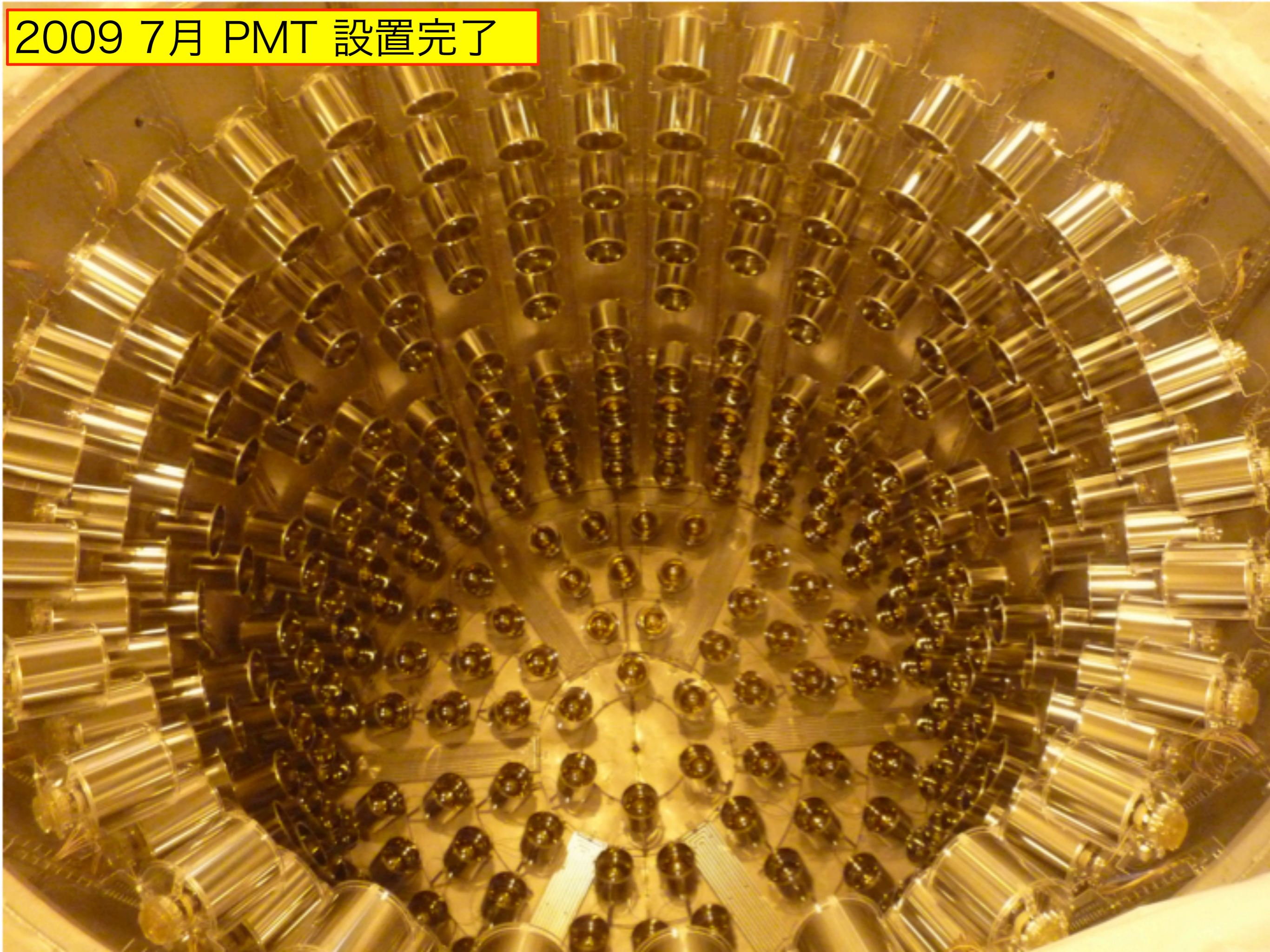
建設前の実験サイト内



PMT設置作業



2009 7月 PMT 設置完了

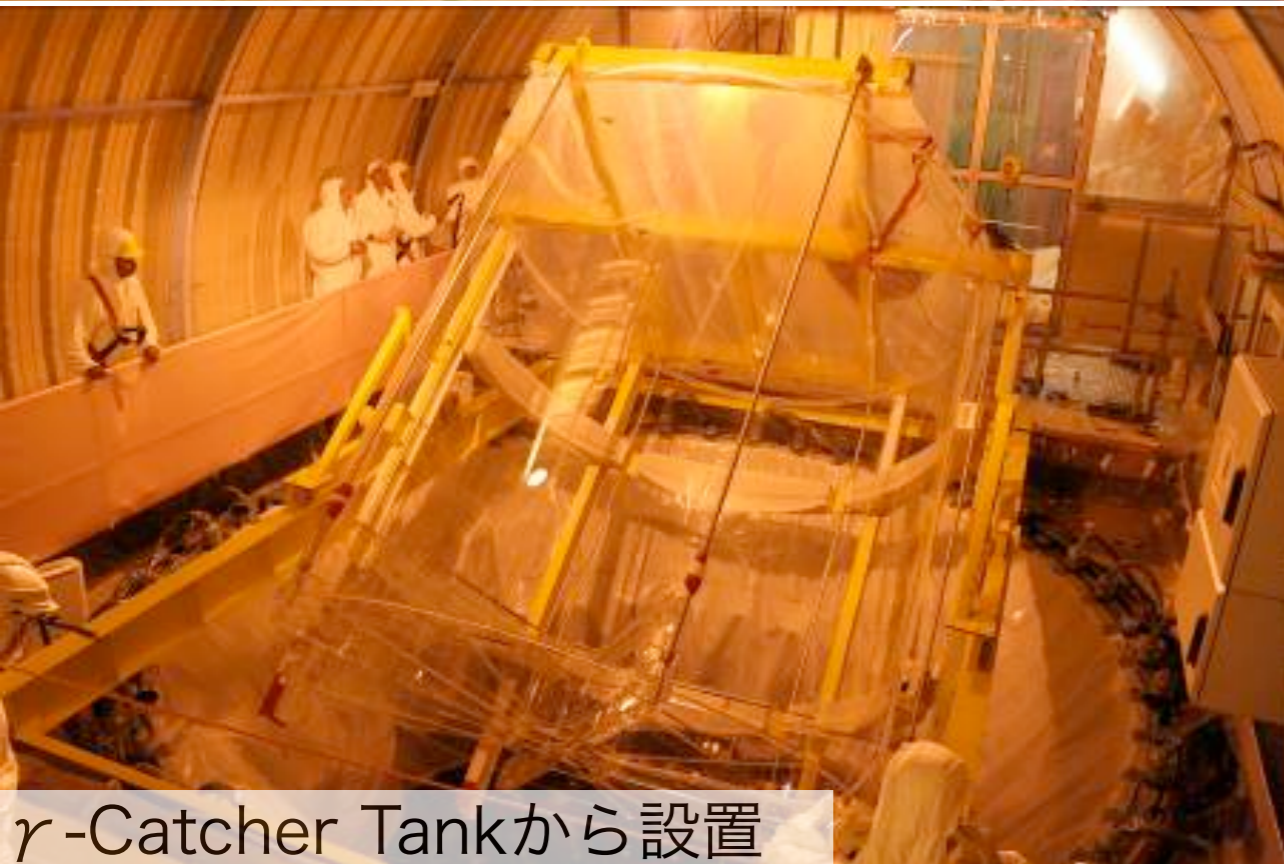


Acrylic Tank 設置作業

2009 9月



Acrylic Tankの輸送



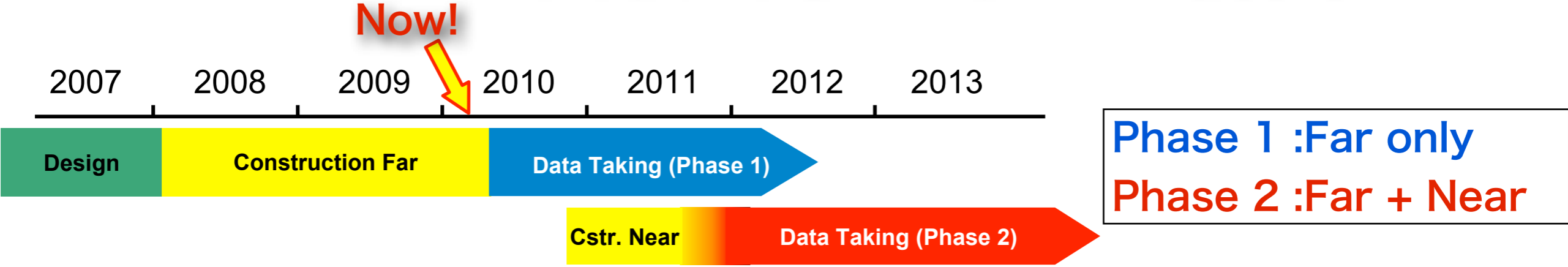
γ -Catcher Tankから設置



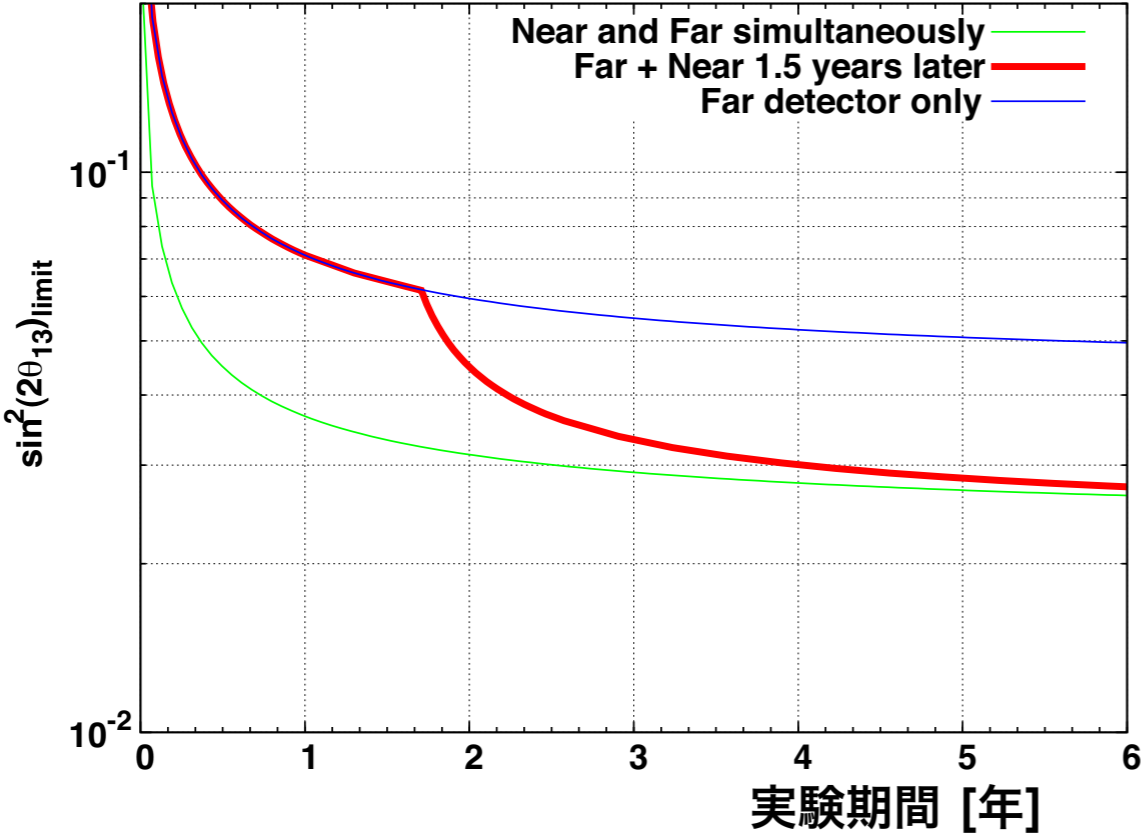
2009 10月

Target、 γ -Catcher共に設置完了

Double Chooz実験 今後の予定、計画



- 現在、Far 検出器の建設が最終段階に入っている
→ **2010年4月からデータ取得開始予定**
- 約2年後から, Nearも同時稼動する予定



$\sin^2 2\theta_{13}$ 目標値
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.02 \sim 0.03$
 ~3年間(Far+Near)

実験の初期段階(~1年)における、新しいデータ解析方法の提案

Double Chooz実験では、様々なBackgroundと区別する為に Delayed信号の内、Gdに捕獲されて発生するEnergyが大きい信号だけを解析に使用すると考えられている。

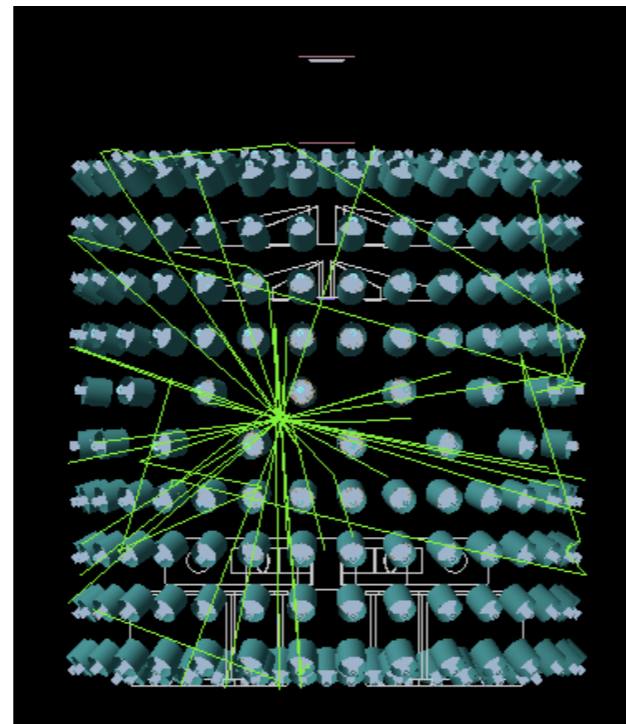
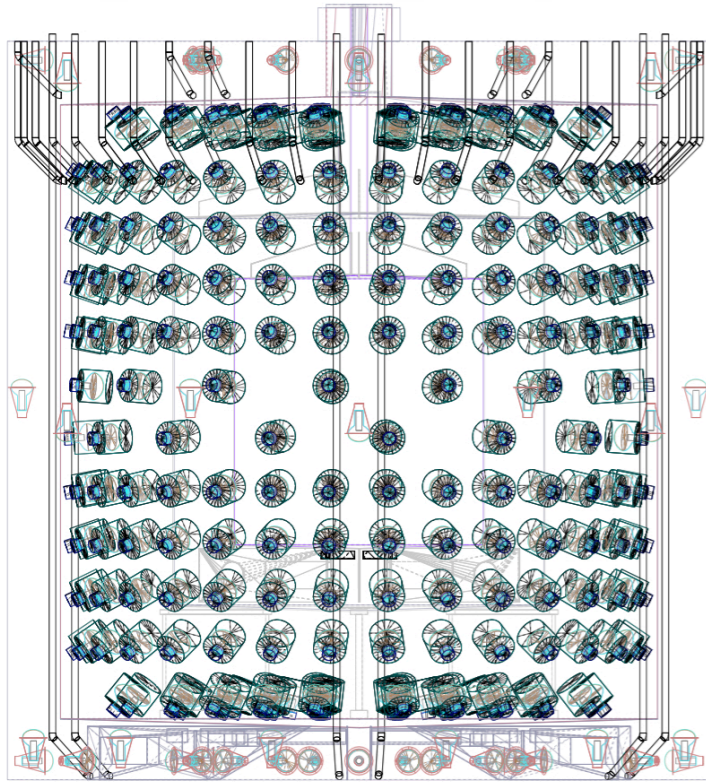
→水素原子に捕獲されるイベントも解析に使用すれば、統計数を多く出来るので解析の感度を上げられないか？

実験が始まる前に、シミュレーションで同じ形式のデータを作成しそのデータを用いて、設定した $\sin^2 2\theta_{13}$ を再構成する解析を行う。

実際の実験でも観測可能なデータのみを用いる

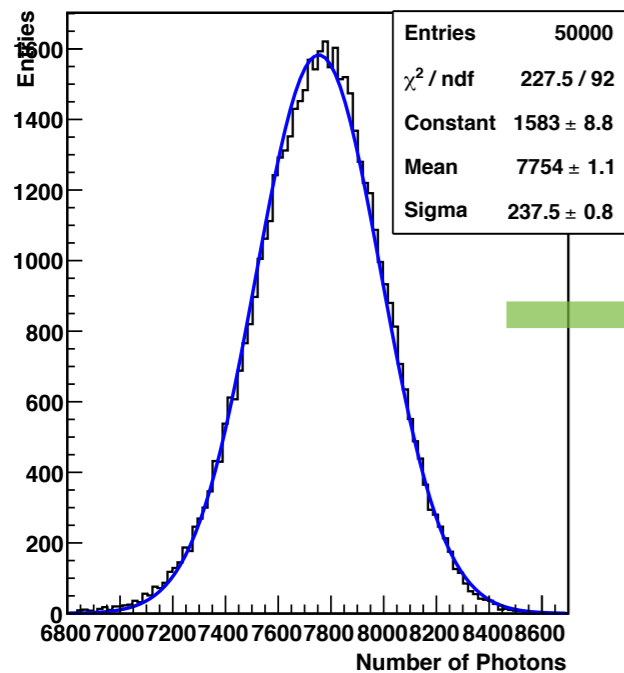
→PMTで観測される電荷量、時間情報 etc..

Double Chooz実験検出器シミュレーション

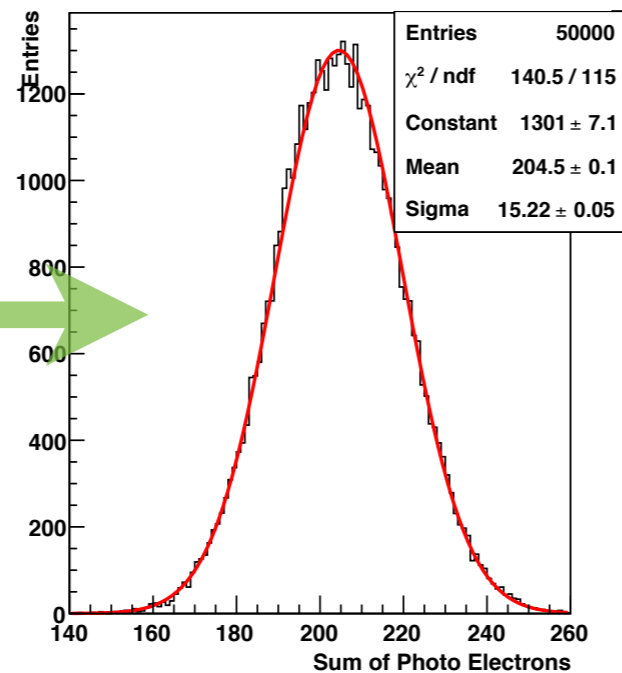


- Geant4をベースにDouble Chooz実験検出器を再現。
- シンチレータ内に発生(入射)した粒子のEnergy Depositによりシンチレーション光が発生する。
- PMTの光電面に光が当たると光電子が発生し、それを観測する。

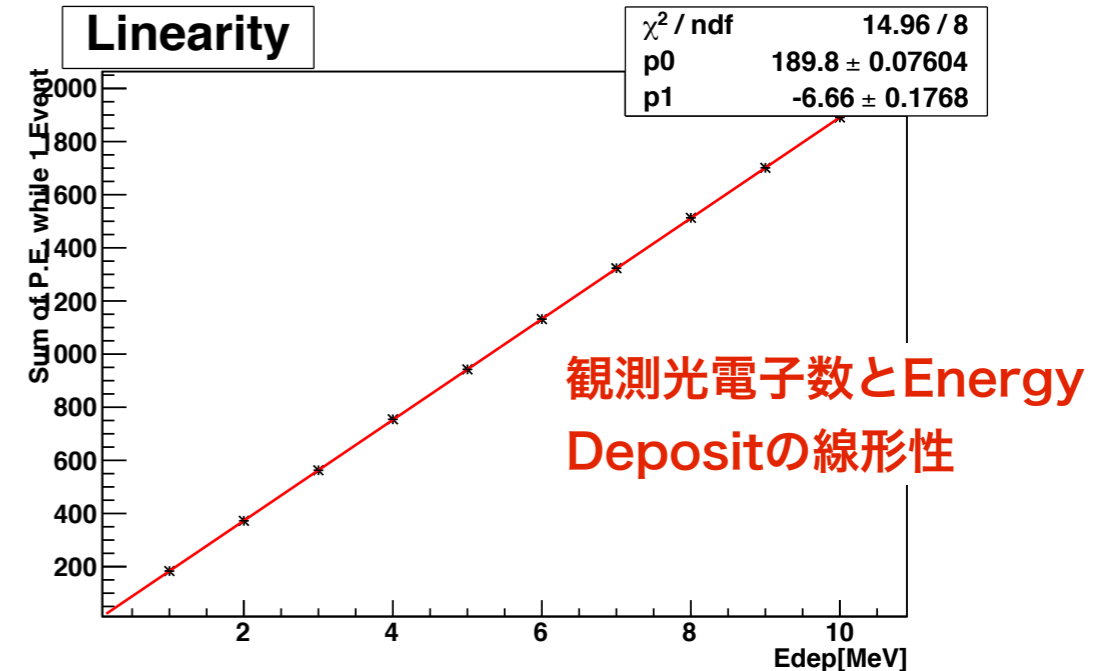
発生光子数



観測光電子数



Linearity



発生光子：約8000 / 1 MeV Energy Deposit



観測光電子：約200個

PMTで観測された光電子数を、信号を出した粒子のEnergy Depositに変換

Neutrino Eventのシミュレーション

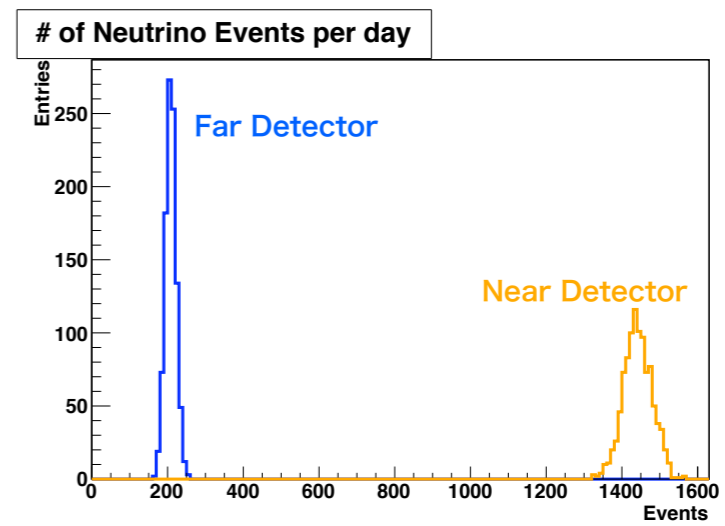
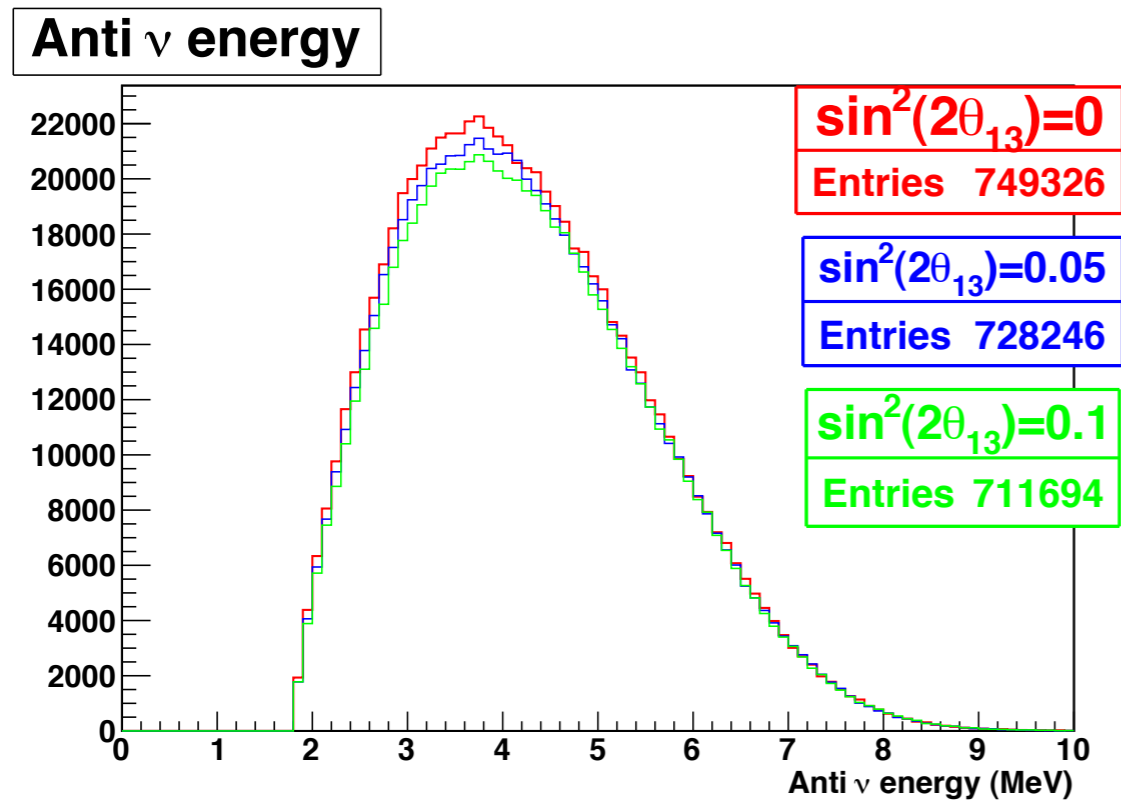
- $\Delta m^2_{32} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ [eV}^2\text{]}$
- $\Delta m^2_{21} = 7.7 \times 10^{-5} \text{ [eV}^2\text{]}$
- $\sin^2 2\theta_{12} = 0.52$
- ※ $\sin^2 2\theta_{13} = 0$

Reactor設定

原子炉の出力	4.25 [GW]
²³⁵ U	52%
²³⁹ Pu	34%
²³⁸ U	8%
²⁴¹ Pu	6%

- Farのみ & 原子炉は常に2つ稼働
- Target, γ -Catcherまで考慮する

データ取得期間：1年間(360日) → 実験の初期段階を再現

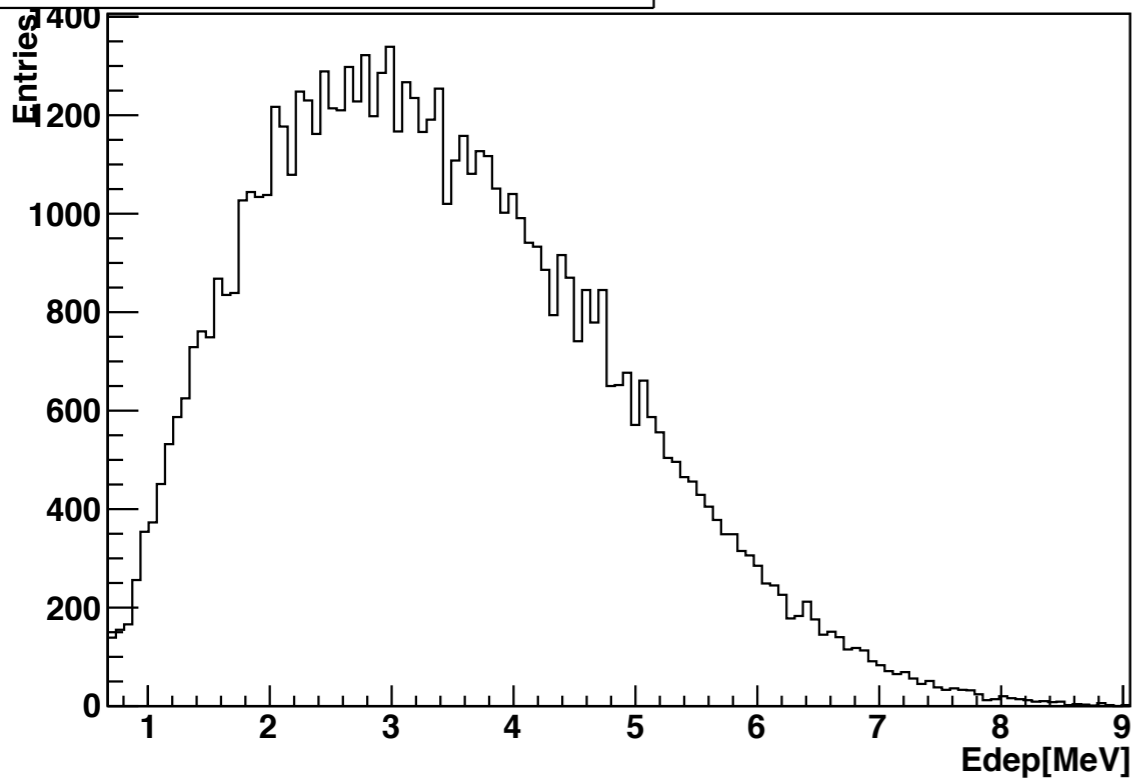


期待されるNeutrinoの逆 β 崩壊反応数

Far Detector	200 Event/day
Near Detector	1450 Event/day

→ 逆 β 崩壊反応で発生する陽電子、中性子のペアを検出器内に発生させる

Prompt Event Energy Deposit

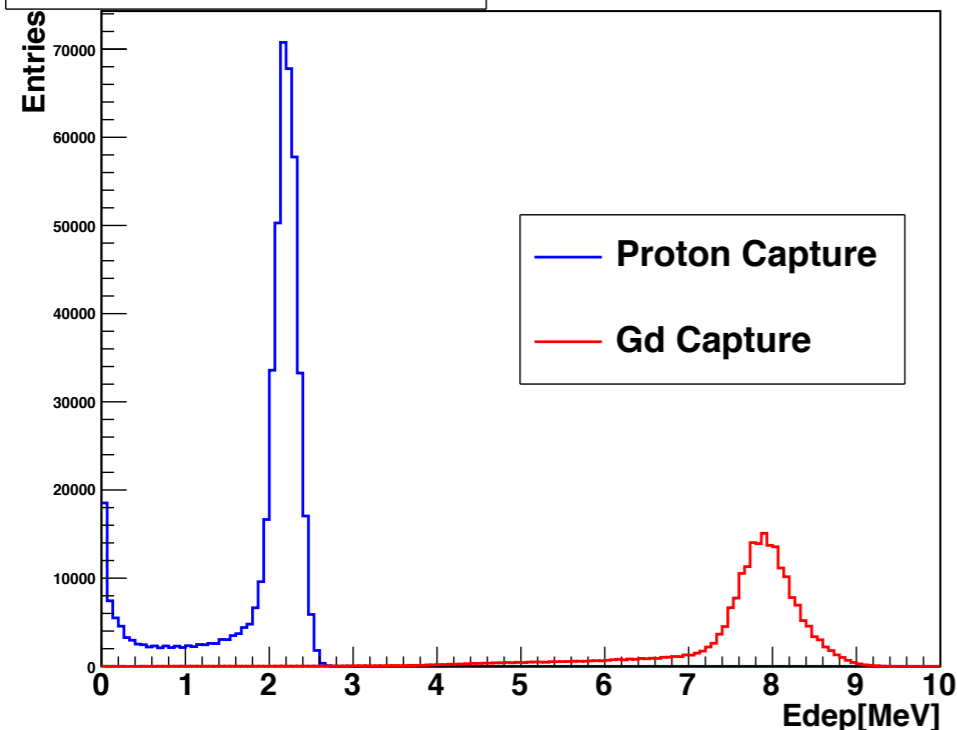


Prompt信号のEnergy Deposit

- ・ 2γ のEnergy (511keV $\times 2$)
- +
- ・陽電子の運動エネルギー ($\equiv \bar{\nu}_e$ のEnergy)

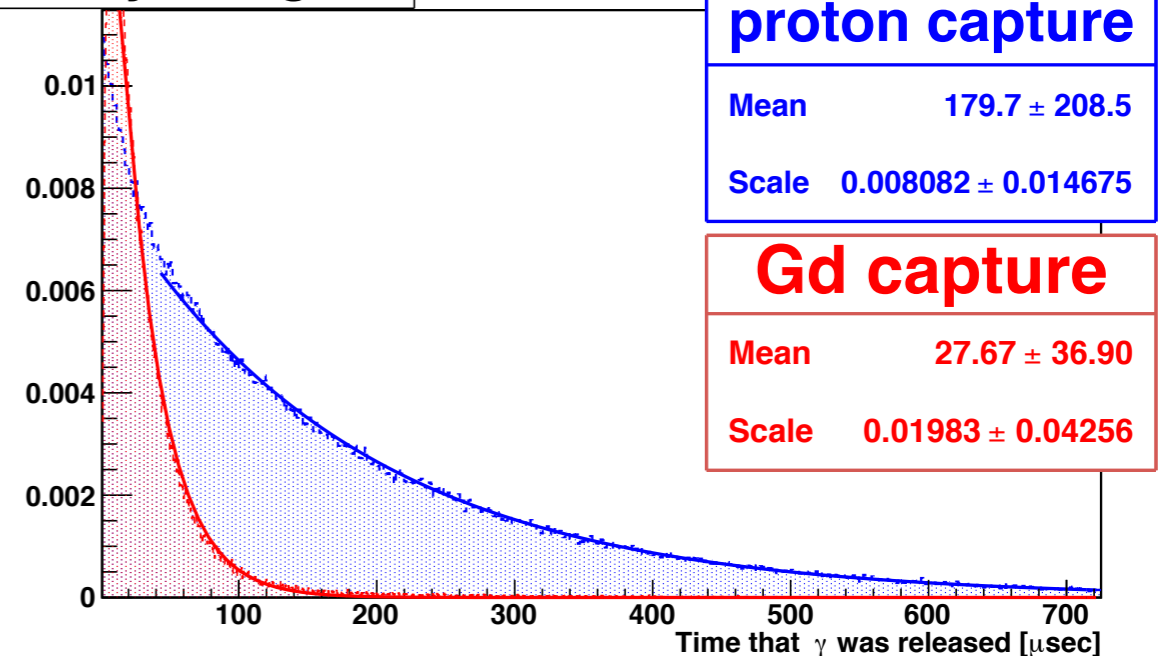
→ Prompt信号 $\equiv \bar{\nu}_e$ のEnergy分布

Delayed Signal Events



青線 : 水素原子捕獲 赤線 : Gd捕獲
 → Gdが含まれない、 γ -Catcher層の方が体積が大きい為

delayed signal

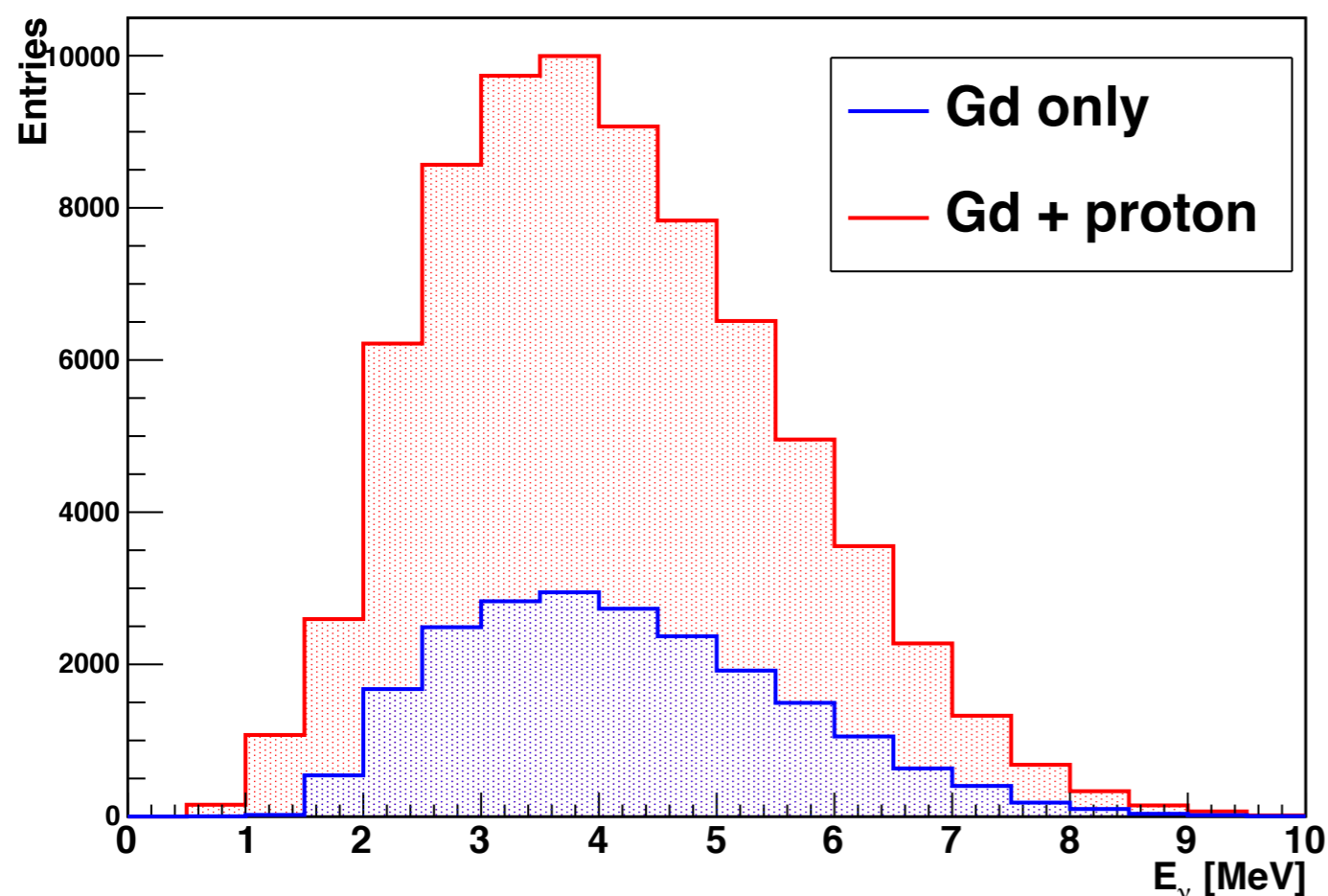


Delayed信号は~数百[μs]で観測される
 水素原子捕獲 : 平均180 μsec
 Gd捕獲 : 平均30 μsec

Delayed信号の大きさによってイベントを選別をする

- 1、 Delayed信号のEnergy Deposit > 5 [MeV]
- 2、 $T_{\text{delayed}} - T_{\text{prompt}} > 1 \mu \text{ sec}$

→ Gd捕獲イベントが選別される



1年間分の観測データ

20263 (Gd only)



70904 (Gd + proton)

→ 統計数は約4倍になる

→ これらを設定した $\sin^2 2\theta_{13}$ の値が解らない、観測データとみなす

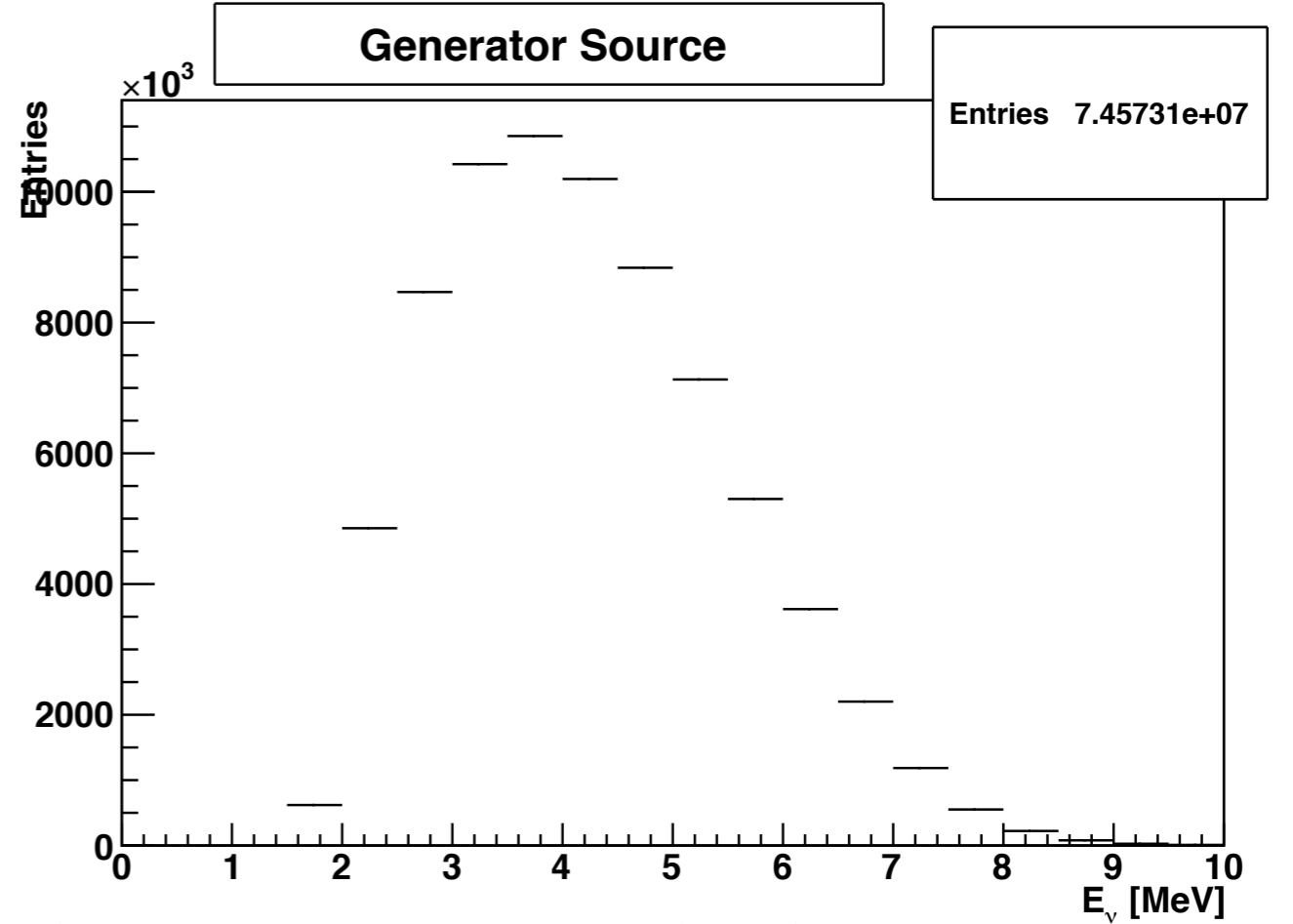
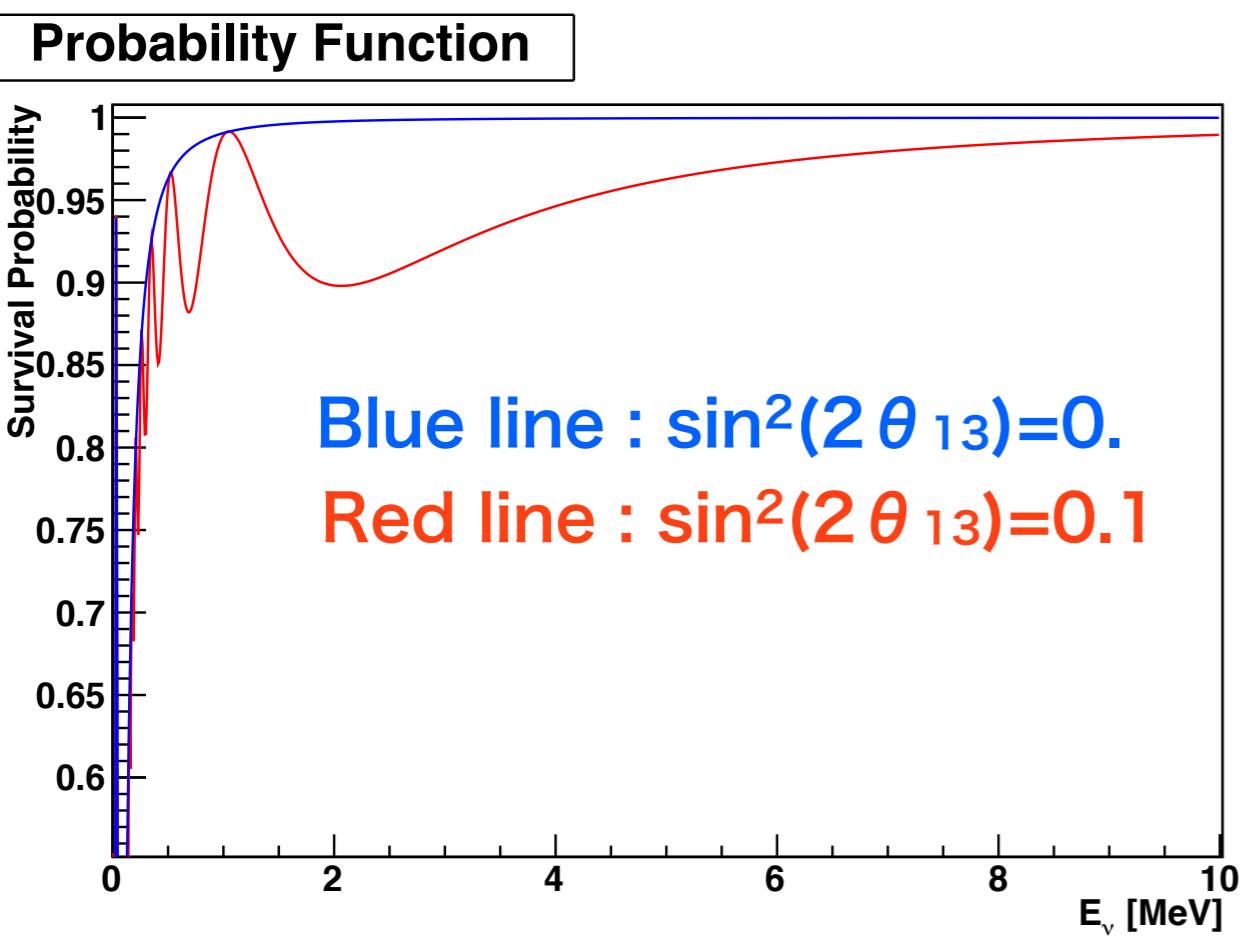
観測データと比較する模擬データの作成

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{21}^2 L}{E}\right) - \sin^2(2\theta_{13}) \left\{ \cos^2 \theta_{12} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{31}^2 L}{E}\right) + (1 - \cos^2 \theta_{12}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right) \right\}$$

L : 1.05 [km]
 $\Delta m_{21}^2 : 7.66 \times 10^{-5} [\text{eV}^2]$, $\Delta m_{32}^2 : 2.4 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$, $\Delta m_{31}^2 : \Delta m_{21}^2 + \Delta m_{32}^2$

※設定した値でFix

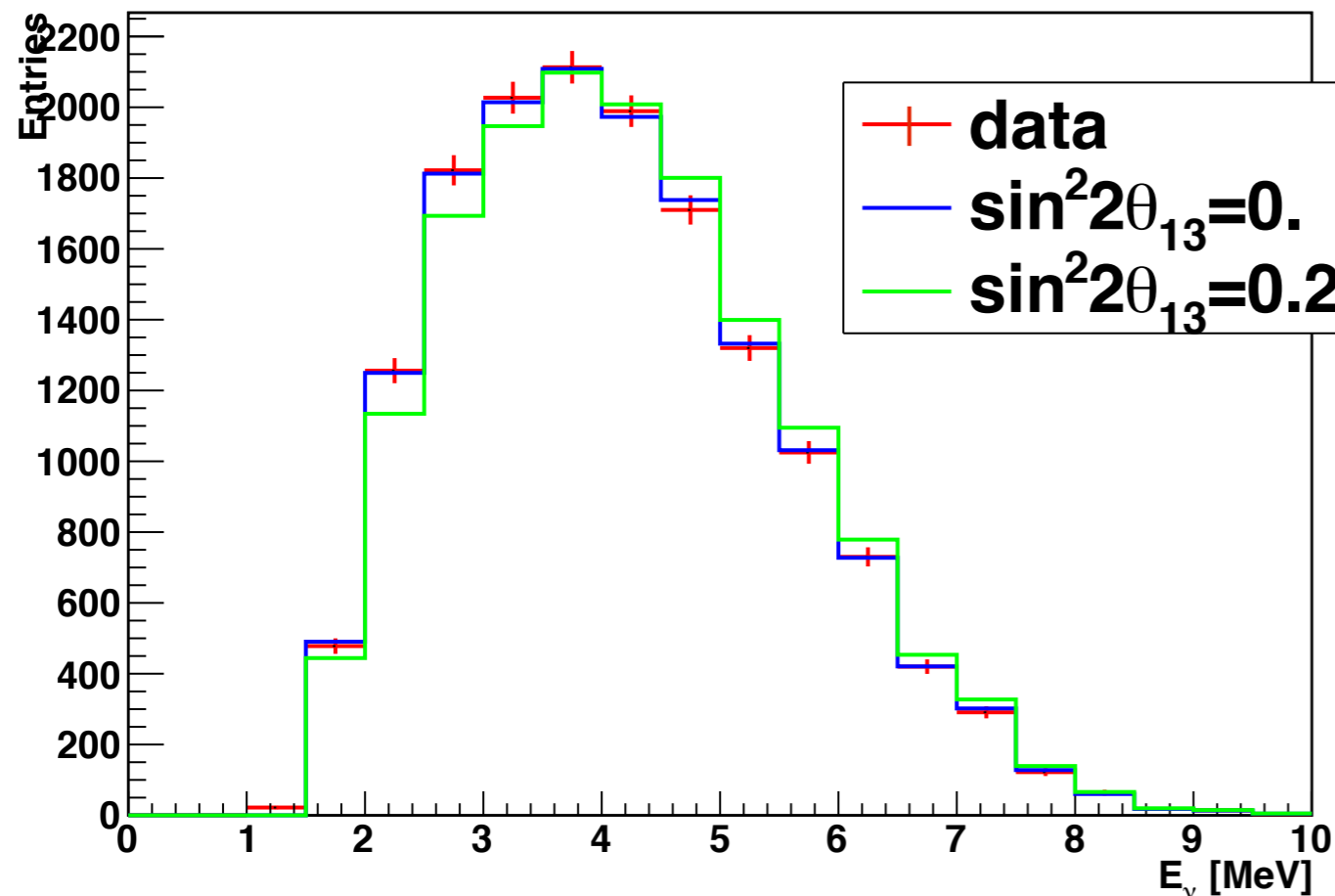
振動が無い場合の $\bar{\nu}_e$ Energy分布



→統計Errorを0と出来る位に統計数を大量にする

→Energy bin毎に掛け合わせる事で、任意の $\sin^2 2\theta_{13}$ における $\bar{\nu}_e$ のEnergy分布となる。

観測データと模擬データの比較



※ Backgroundが多くなる可能性がある為
使用するBinを2~6[MeV]とする

模擬データの統計数は観測データの大きさに合わせ、形のみで比較する
→ $\bar{\nu}_e$ の検出数による誤差を考慮しなくても良い

観測データと最も形が合う時の $\sin^2 2\theta_{13}$ を見つける

→ **スペクトル解析**

最小二乗法によるFitting

データは100%ニュートリノイベントで、Background等が含まれていない
→2.5%のSystematic Errorを付加する。

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{data}_i - \text{theory}_i)^2}{(\sigma_{\text{stat}})^2 + (\text{data}_i \times \sigma_{\text{syst}})^2}$$

data_i : Gd only と proton+Gdの2種類の観測データ

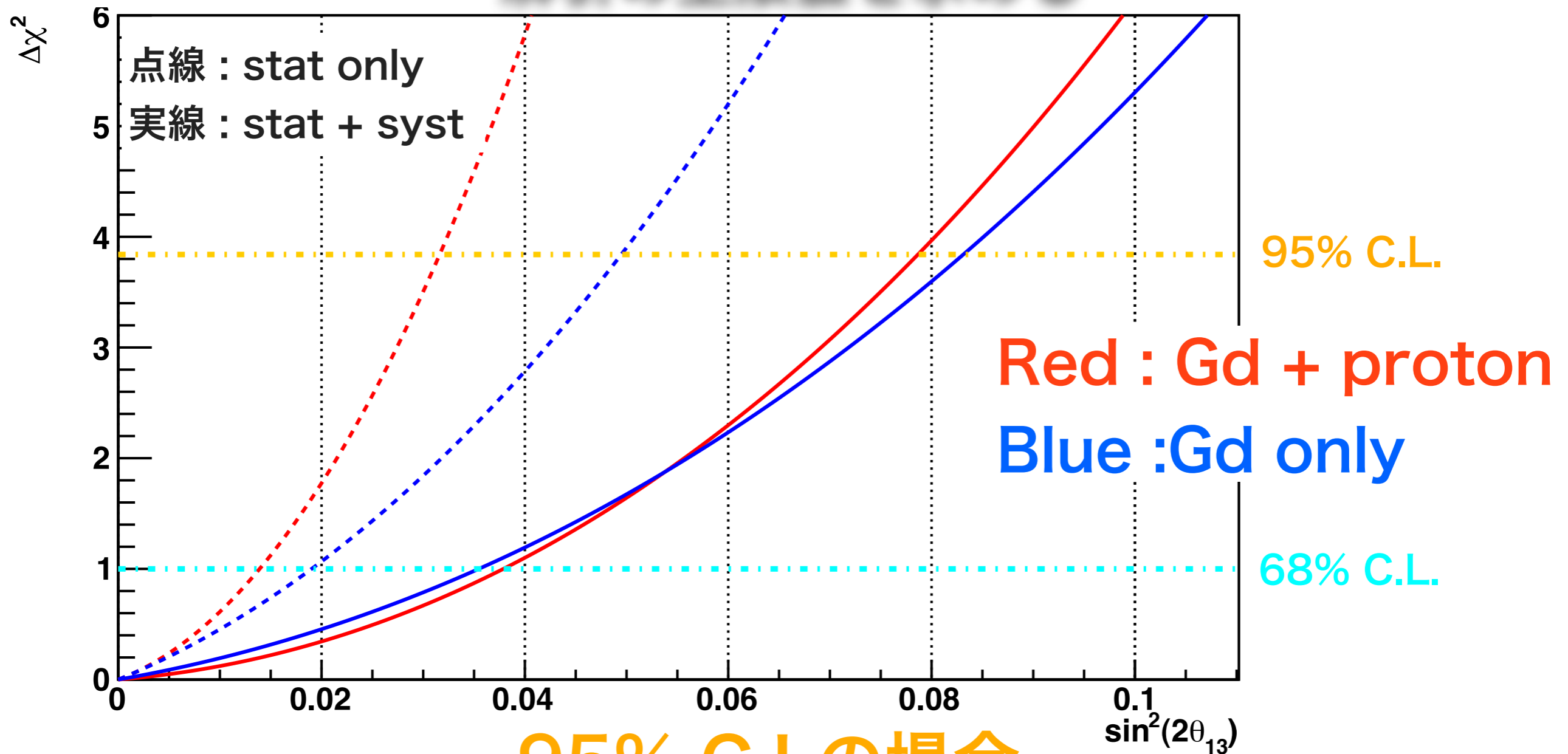
theory_i : ある $\sin^2 2\theta_{13}$ の時の模擬データ

σ_{stat} : data_i の統計Error

σ_{syst} : Systematic Error(2.5%)

→様々な $\sin^2 2\theta_{13}$ を持った模擬データと観測データを比較し(χ^2 を求め)
 χ^2 が最小になる物を見つける

設定した値($\sin^2 2\theta_{13} = 0$)に対する 解析の上限値を求める



95% C.L.の場合

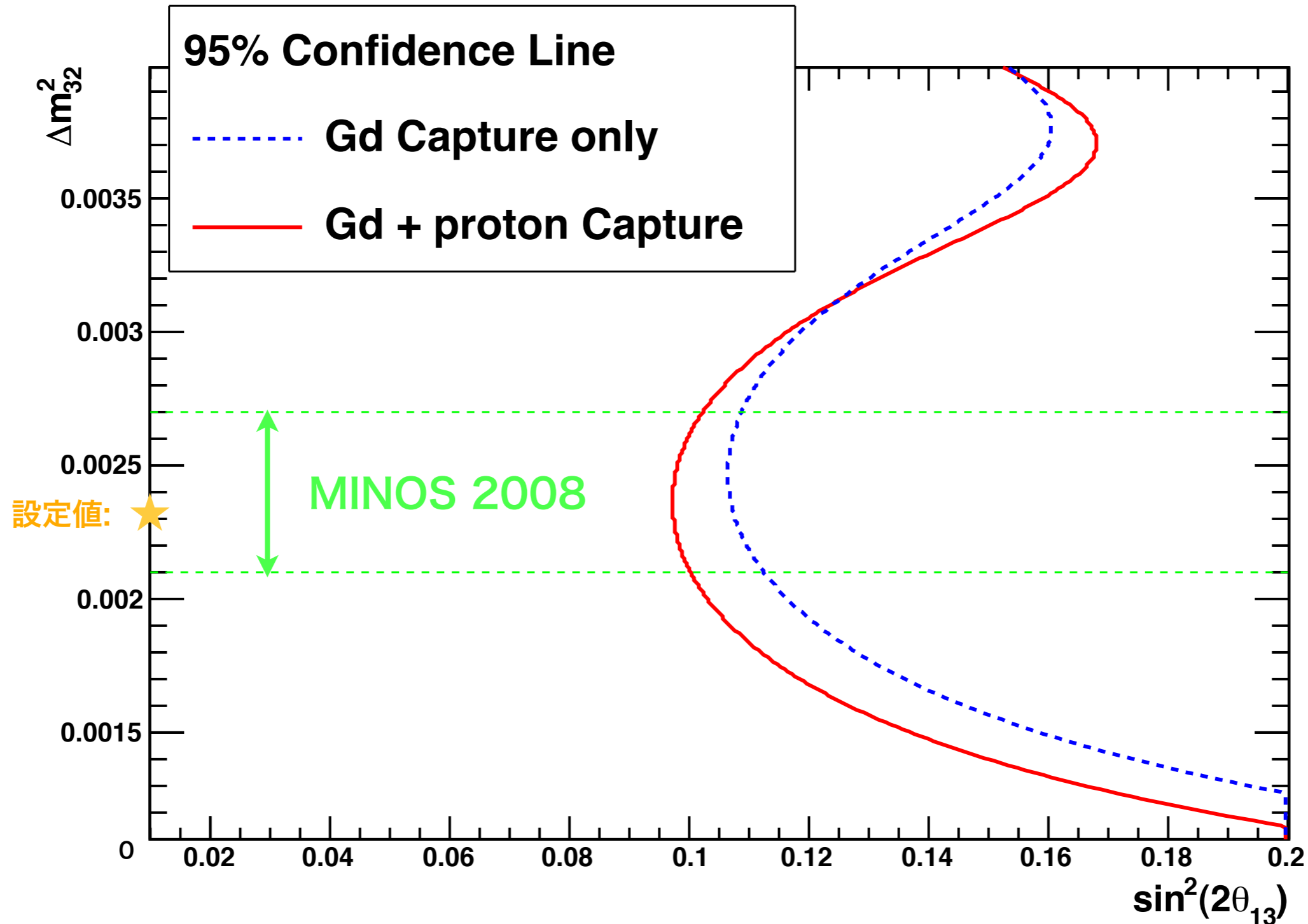
Gd only

$\sin^2 2\theta_{13} < 0.050$ (stat only) , $\sin^2 2\theta_{13} < 0.083$ (stat+syst)

Gd + proton

$\sin^2 2\theta_{13} < 0.032$ (stat only) , $\sin^2 2\theta_{13} < 0.079$ (stat+syst)

Δm^2_{32} と $\sin^2 2\theta_{13}$ を同時に Fitting

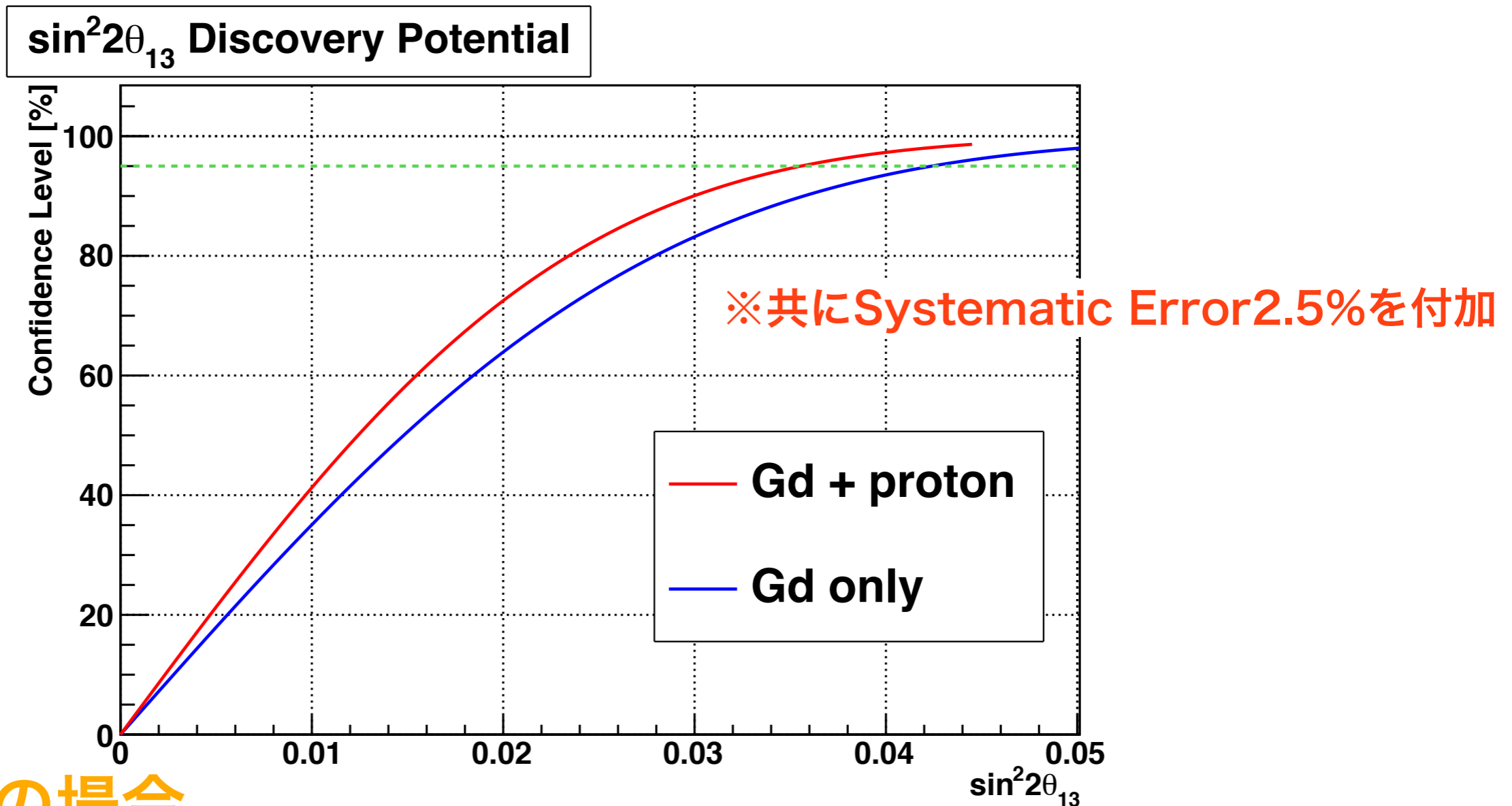


水素捕獲イベントまで含めた方が、予想される Δm^2_{32} の領域で $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度が良くなると期待される。

1年分のデータを使用した時のDiscovery Potential

※有限値を決定する事が出来る $\sin^2 2\theta_{13}$ の下限值

→ $\sin^2 2\theta_{13}$ がこの値以上であれば、有限値を決める事が出来る。



95% C.L.の場合

0.042 (Gd only) → 0.035 (Gd + proton)

→ Gd + protonの方が、より $\sin^2 2\theta_{13}$ が小さい場合まで有限値を求める事が可能

まとめ

- ・Double Chooz実験はフランスで行われる原子炉ニュートリノ振動実験で2010年4月にスタートする予定。
- ・シミュレーションで作成したデータを用いて $\sin^2 2\theta_{13}$ を求める解析を行った。
- ・実験初期段階(約1年)分のデータで解析を行う場合、水素に捕獲されるイベントも使用してスペクトル解析をした方が感度を上げられる

95% C.Lの場合

- ・ $\sin^2(2\theta_{13})$ Upper Limit

0.083(Gd only) → 0.079(Gd + proton)

今後の課題

Systematic Errorの正確な見積り

今回は2.5%と決めてしまったが、Backgroundのシミュレーション等をそれぞれ行ってSystematic Errorの値を見積もる。