

T2K実験前置on-axis検出器INGRID によるニュートリノビーム測定

京都大学: 大谷 将士
for T2K collaboration
2011/3/25

1. ニュートリノ振動とT2K実験
2. ニュートリノビームモニターINGRID
3. RUN1(2010/1 ~ 2010/6)結果
 1. イベントレート
 2. ビーム方向

ニュートリノ振動

- 飛行中にニュートリノのフレーバー(e, μ , τ)が変化

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \longrightarrow |\nu_{\alpha(L)}\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i \frac{L}{2E} m_i^2} |\nu_i\rangle \neq |\nu_\alpha\rangle$$

m_i : i番目のニュートリノ質量

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

- ニュートリノ振動の例

ν_μ 消失確率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

ニュートリノ振動

⇒ 混合角 θ とニュートリノ質量二乗差の決定

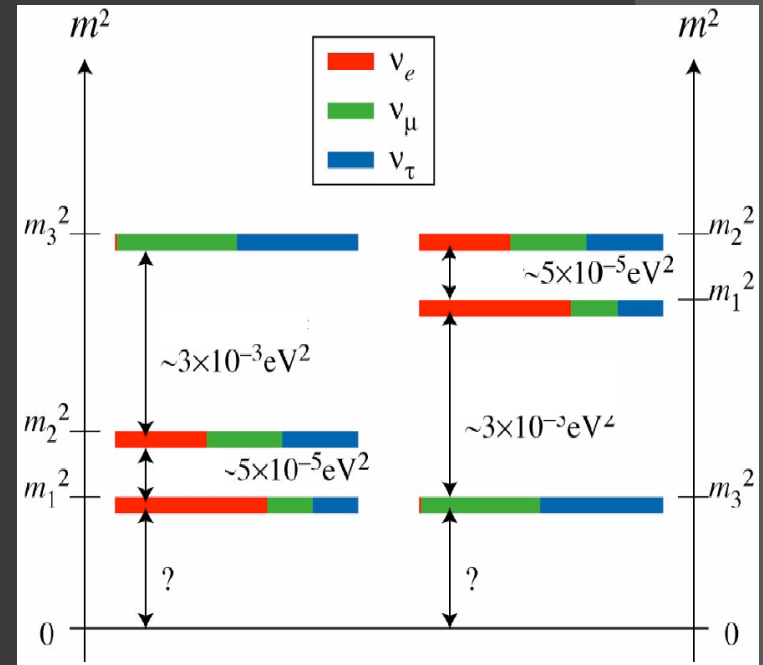
これまでの実験結果

混合角

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= 34 \pm 1^\circ \\ \theta_{23} &< 45 \pm 18^\circ \\ \theta_{13} &< 12^\circ \end{aligned}$$

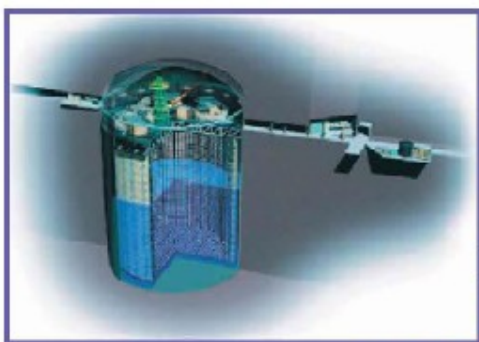
$$U_{MNS} \approx \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & < 0.21 \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

Δm^2



T2K実験

- ◎ 茨城県J-PARCで ν_μ ビーム生成 $\Rightarrow$ Super-Kamiokandeで観測
 - ν_μ 消失モードの精密測定(θ_{23} , Δm^2_{23})
 - $\nu_\mu \Rightarrow \nu_e$ モードの発見(θ_{13} の発見)
- ◎ 2010年1月～6月:RUN1



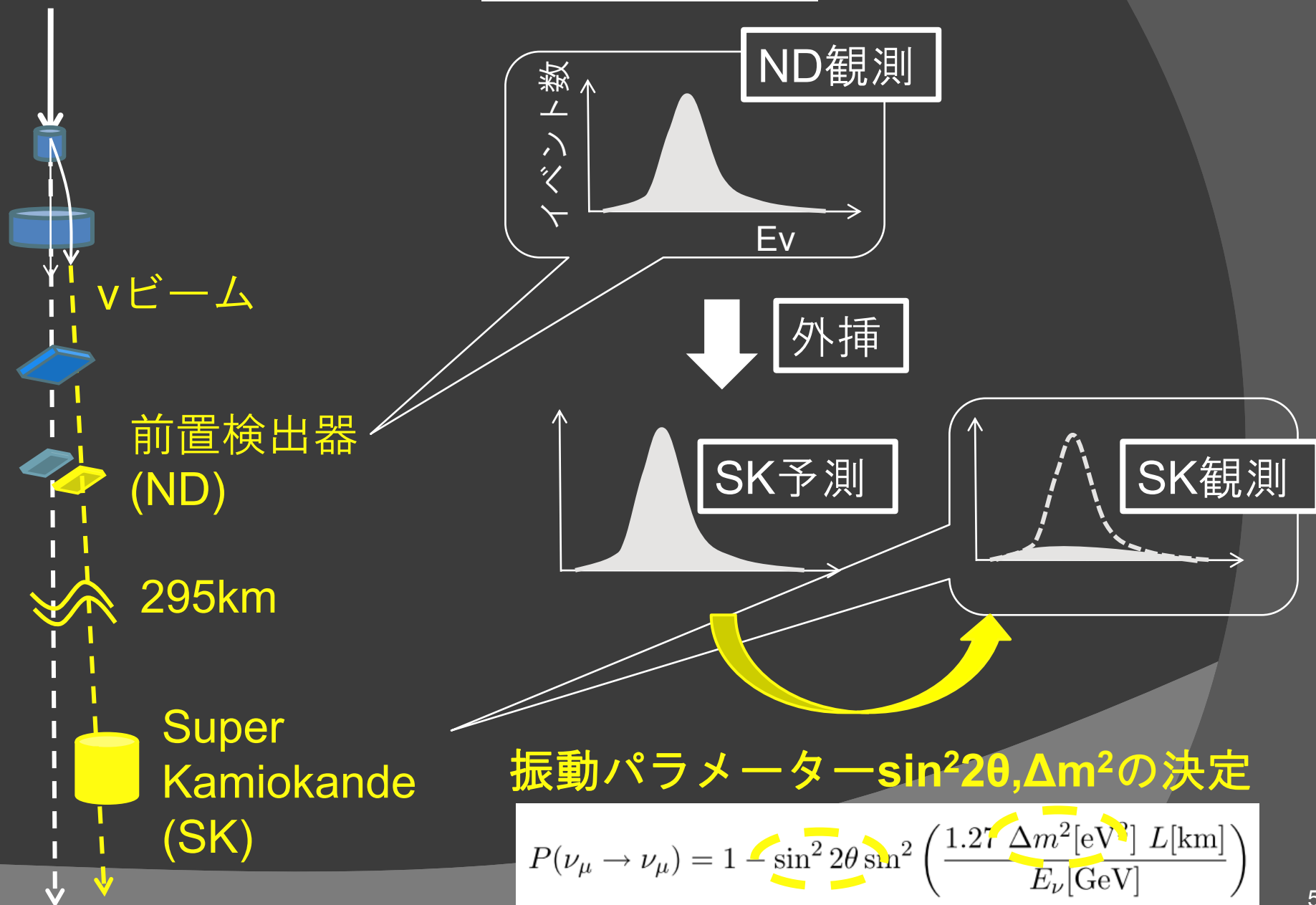
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

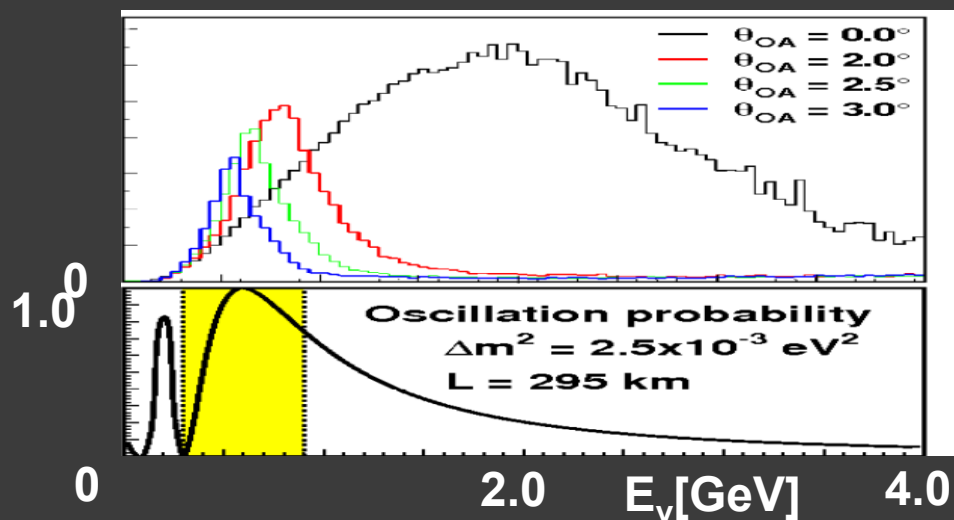
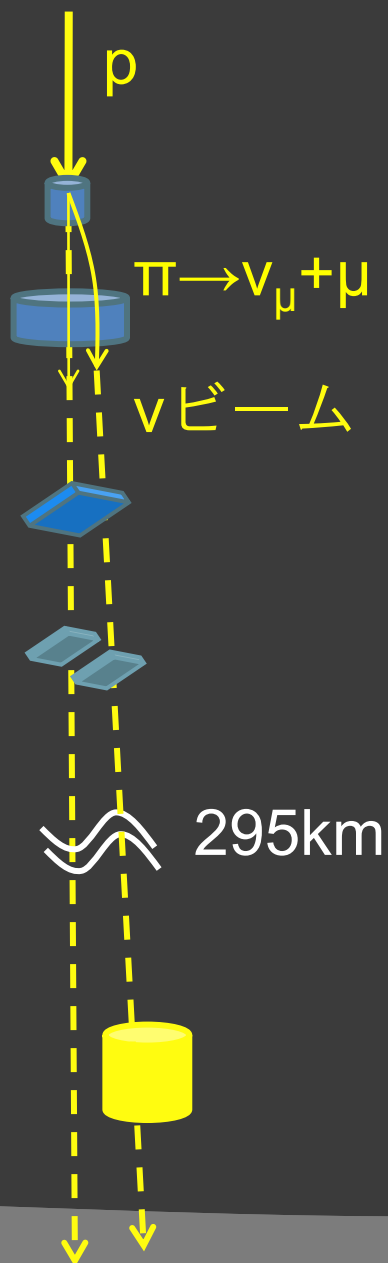


実験原理



T2K実験の特徴

- ・ 大強度ビーム
- ・ オフアクシスビーム
(ビーム中心を故意にずらす)



- ☺シグナル/バックグラウンドの増加
- ☹オフアクシス角度と予測イベント数に強い相関

⇒ ν ビーム方向の測定・モニターが必須

ビームモニター's

陽子ビームモニター's

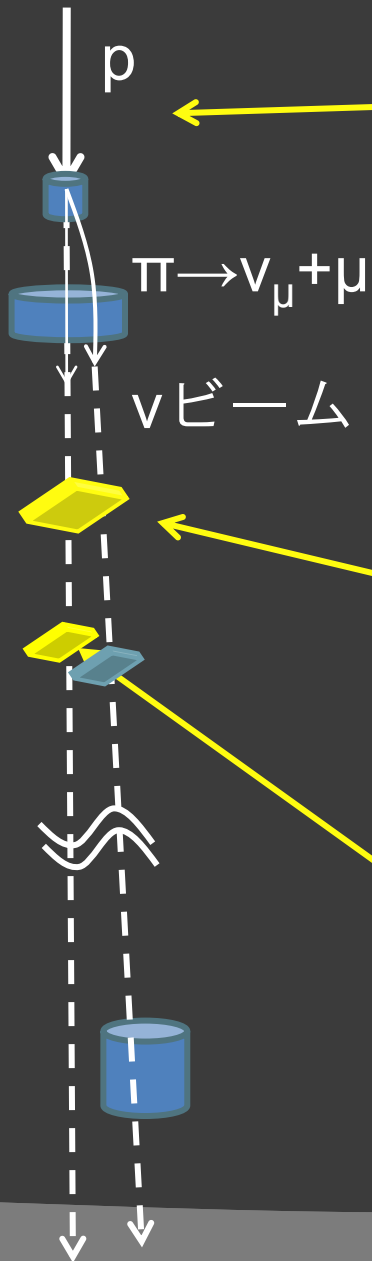
- 強度モニター(CT)・位置モニター(ESM)・
プロフィールモニター(SSEM, OTR)
→陽子標的に照射した陽子数を勘定
→陽子標的にロスなく陽子を照射

MUMON

- μ 強度・プロフィールモニター
→間接的に ν ビーム強度・方向をモニター

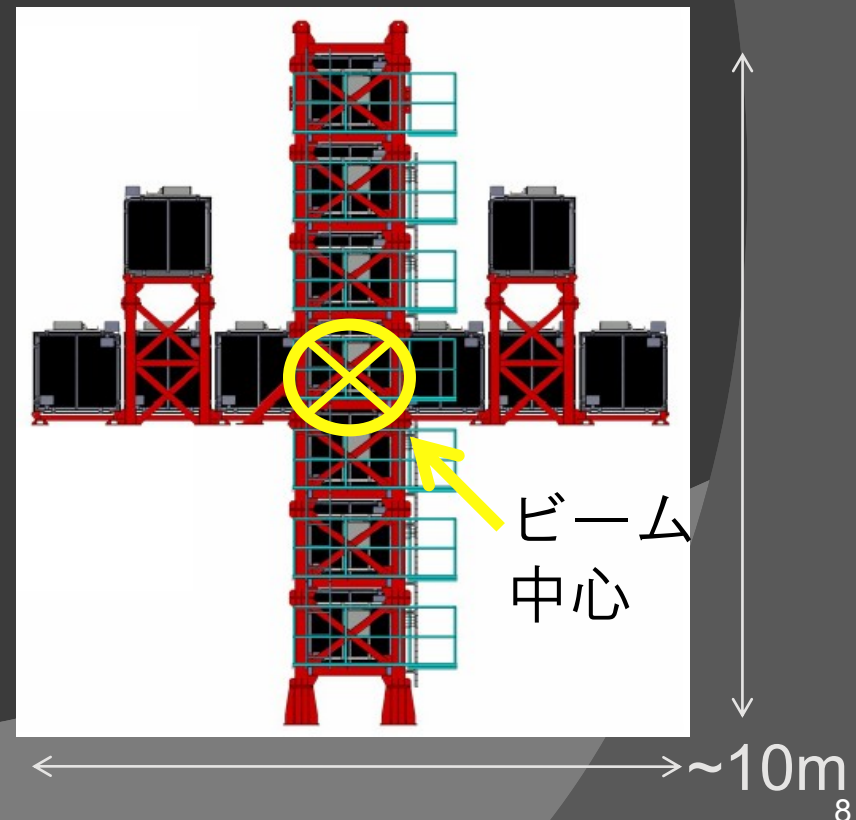
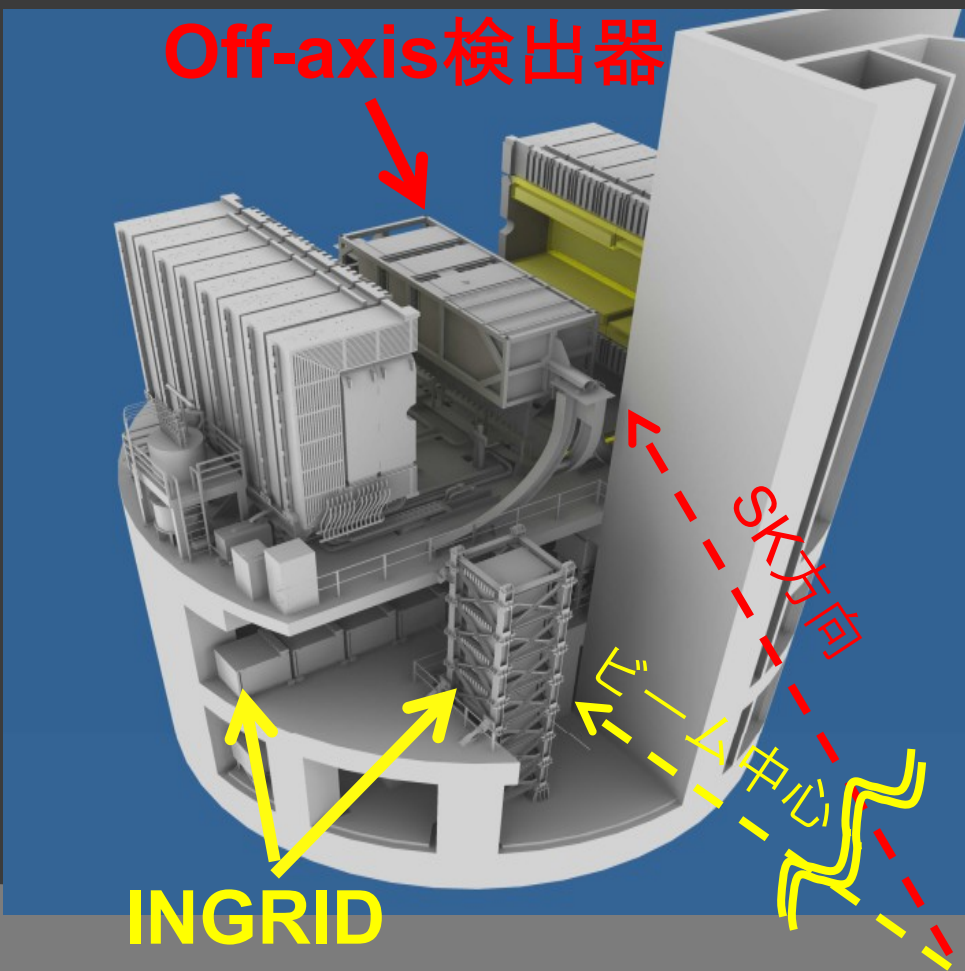
INGRID

- ν を観測し、 ν ビーム方向を直接モニター,
要求精度 $\ll 1\text{mrad}$
- ニュートリノイベントレートの測定



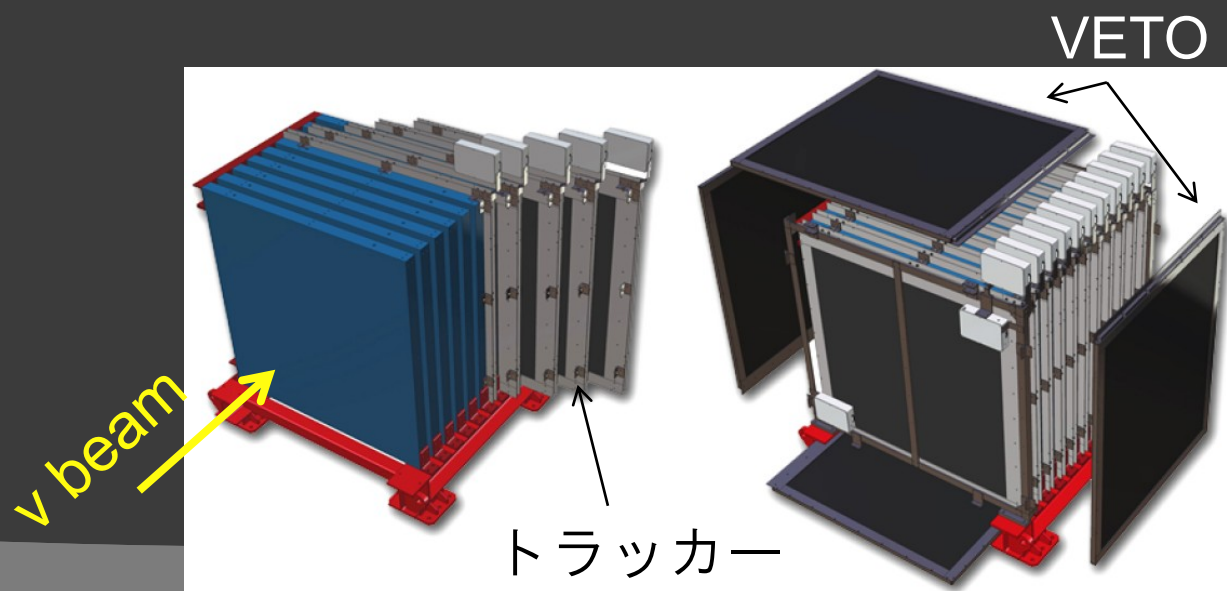
ニュートリノビームモニター「INGRID」

- 前置検出器ホール(陽子標的から下流280m)に設置
- ビーム中心±10mに同一構造の16台のモジュール



INGRIDモジュール

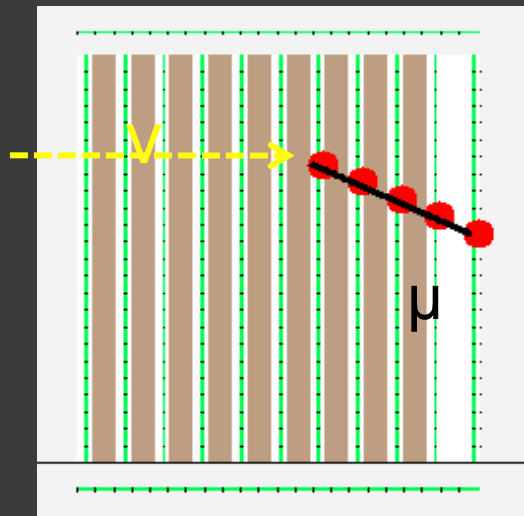
- ◎ $\sim 1\text{m}^3$, 総重量 $\sim 10\text{ton}$
- ◎ 鉄9枚とシンチレータートラッカー11枚のサンドイッチ。
 - トラッカー：縦横24枚のシンチレーター(長さ120cm, 幅5cm, 厚み1cm)
 - シンチレーター + ファイバー + MPPC読み出し
 - 総チャンネル数 $\sim 10'000$
- ◎ 周りをシンチレーターVETOトラッカーで覆う



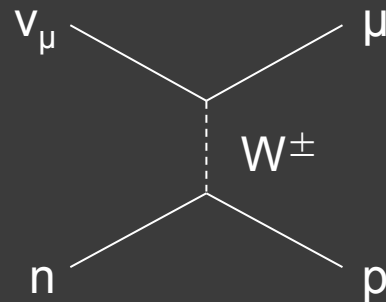
ビーム方向の測定原理

- 鉄で ν 反応 $\Rightarrow \mu$ 飛跡を検出 $\Rightarrow \nu$ イベントを同定
- 一定期間での各モジュールでのイベント数からプロファイル
を再構成 $\Rightarrow$ ビーム中心を測定
 $\Rightarrow$ 陽子標的とを結んでビーム方向を同定
- ビーム中心測定の要求精度 $\ll 28\text{cm}$ ($=280\text{m} \times 1\text{mrad}$)

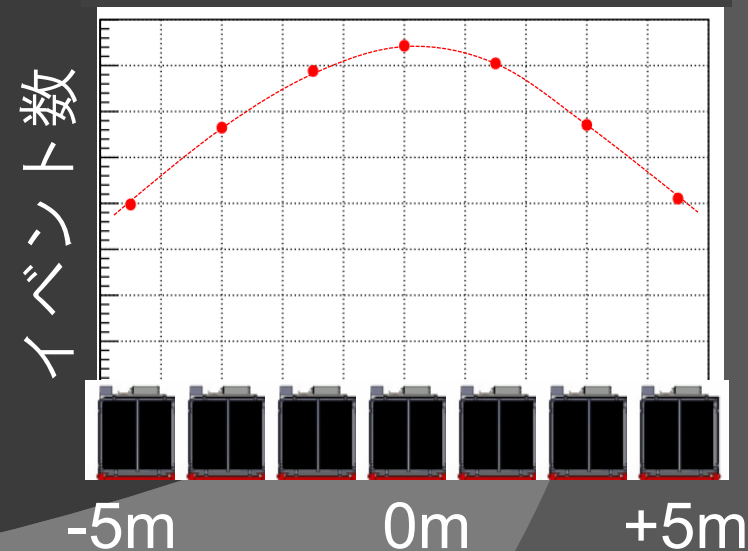
ν 反応例



- シンチレーター
- エネルギー損失



プロファイル再構成

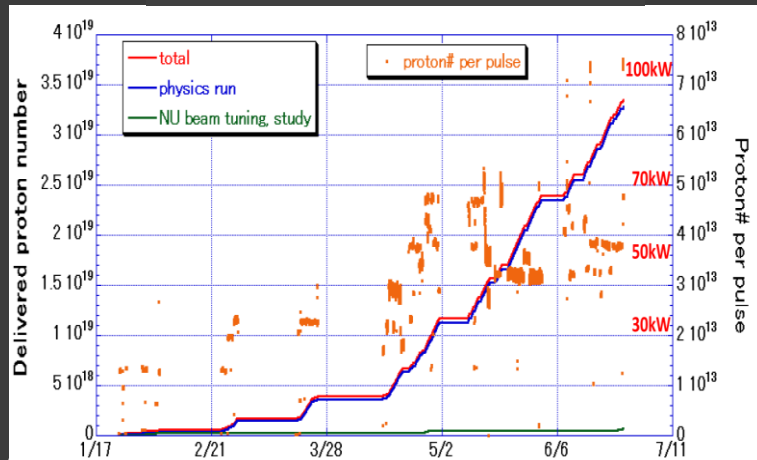


T2K & INGRID history

2004			Proto-type test @ K2K
...			
2008	Aug. ~ Dec		Assembly of scintillator plane
2009	Apr.~ May	First beam commissioning	With 1 module
2009	Jun.~ Oct,		Assembly and installation of all* modules
2009	Nov. ~	Resume beam commissioning	T2K first neutrino at INGRID(Nov. 22nd)
2010	Jan.	Start physics run	

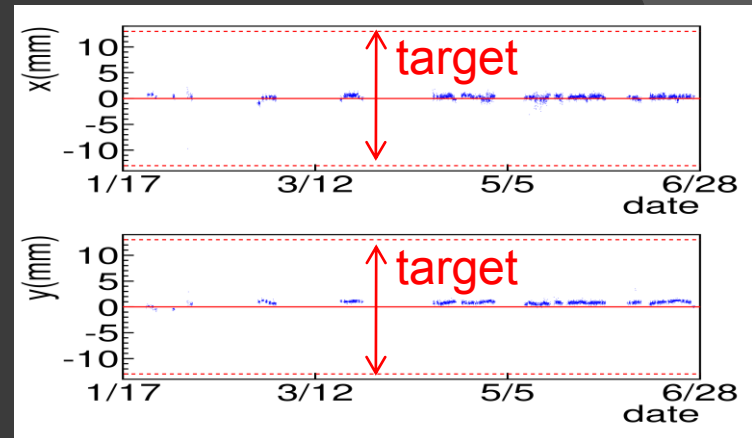
Run 1(2010/1 ~ 2010/6) summary

Delivered POT



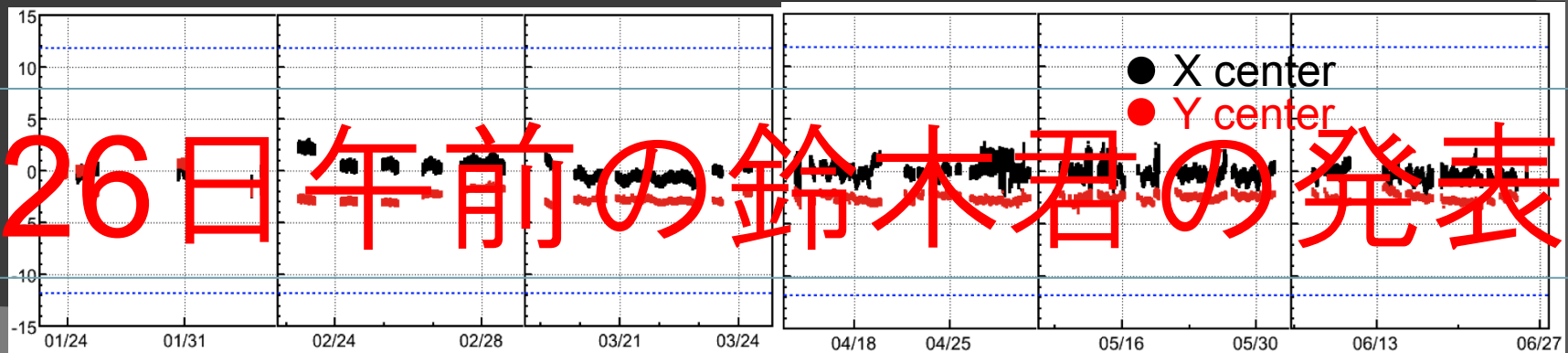
Total POT = 3.28×10^{19}
(Max. intensity = 100kW)

p beam position @ Target



Well controlled p beam

MUMON center

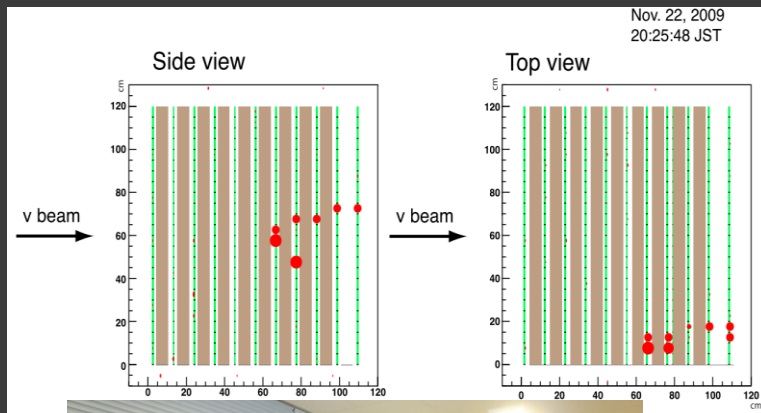


26日前の鈴木君の発表

INGRID data taking summary

- 2009年9月に全モジュールのインストール完了
⇒11月22日にT2K初ニュートリノ観測
⇒99%以上の物理データを取得

T2K first neutrino

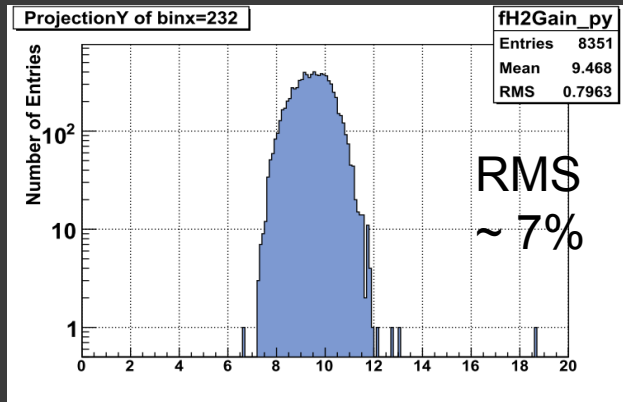


Data taking efficiency

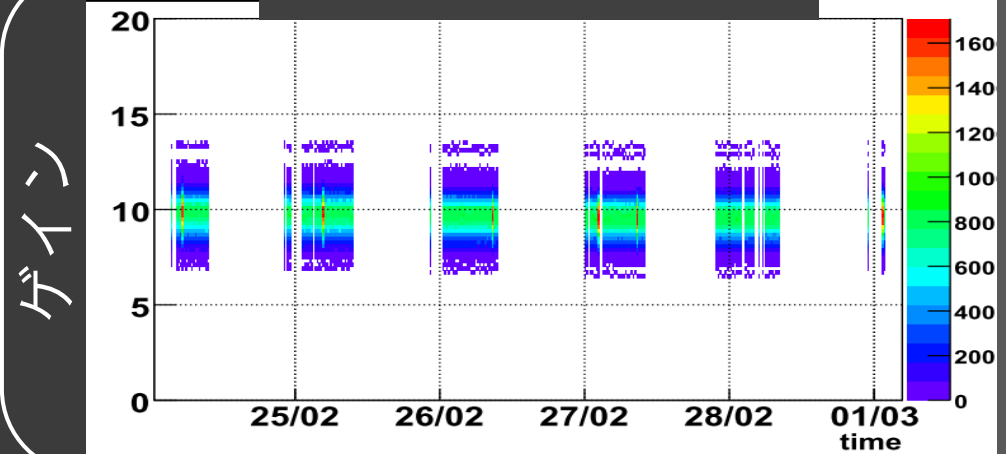
期間	Good spill	INGRID	efficiency
1/23 ~ 2/5	26813	26813	100%
2/24 ~ 2/28	59256	59070	99.7%
3/19 ~ 3/25	86980	86935	99.9%
4/14 ~ 5/1	237350	236647	99.7%
5/9 ~ 6/1	350079	350012	99.9%
6/7 ~ 6/26	246504	246410	99.9%

INGRID detector performance

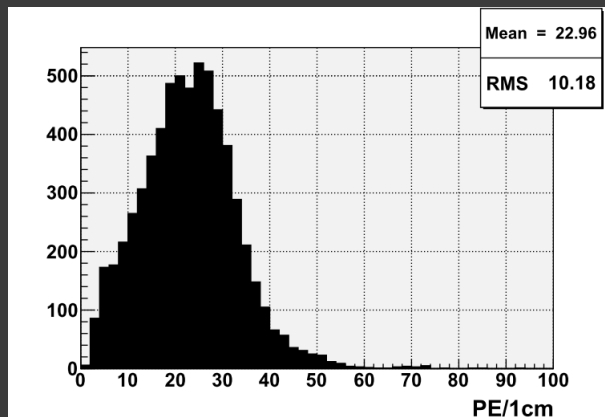
MPPCゲイン分布



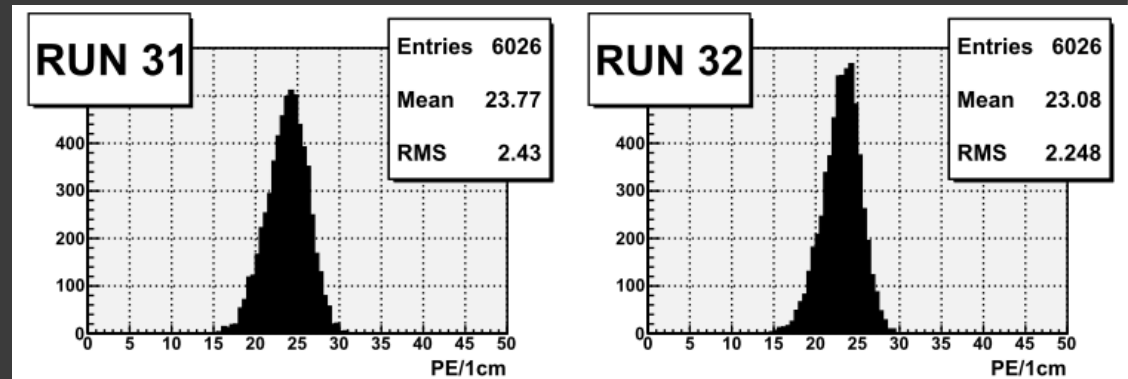
ゲインヒストリー



宇宙線光量



全チャンネルの平均光量分布



全チャンネル(~10'000)が安定して動作

イベントセレクション

Hit timing clustering

Activity & PE cut

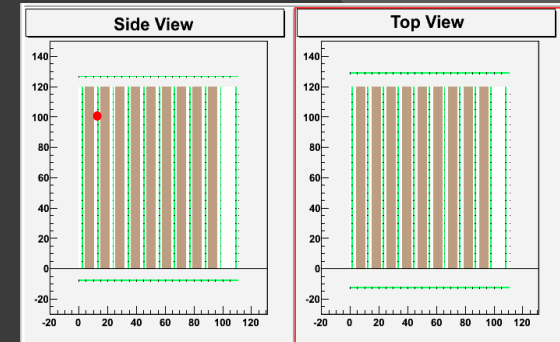
XZ and YZ Tracking &
track matching

Beam timing cut

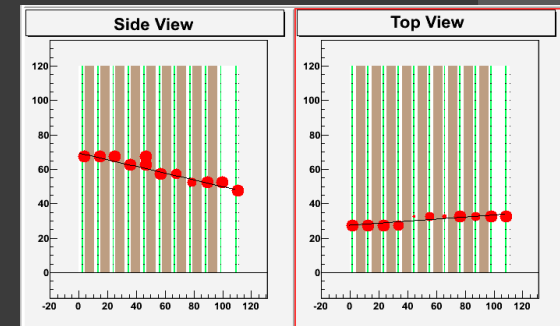
Upstream VETO

Fiducial cut

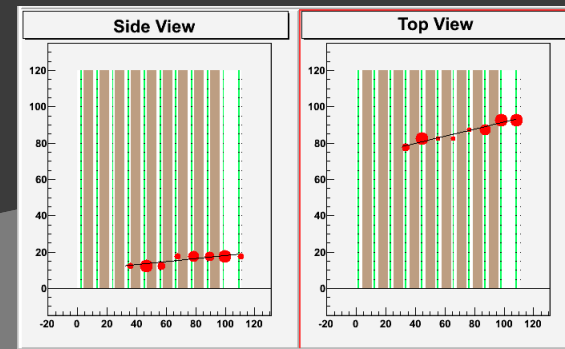
Reject
accidental
noise event



Reject
background

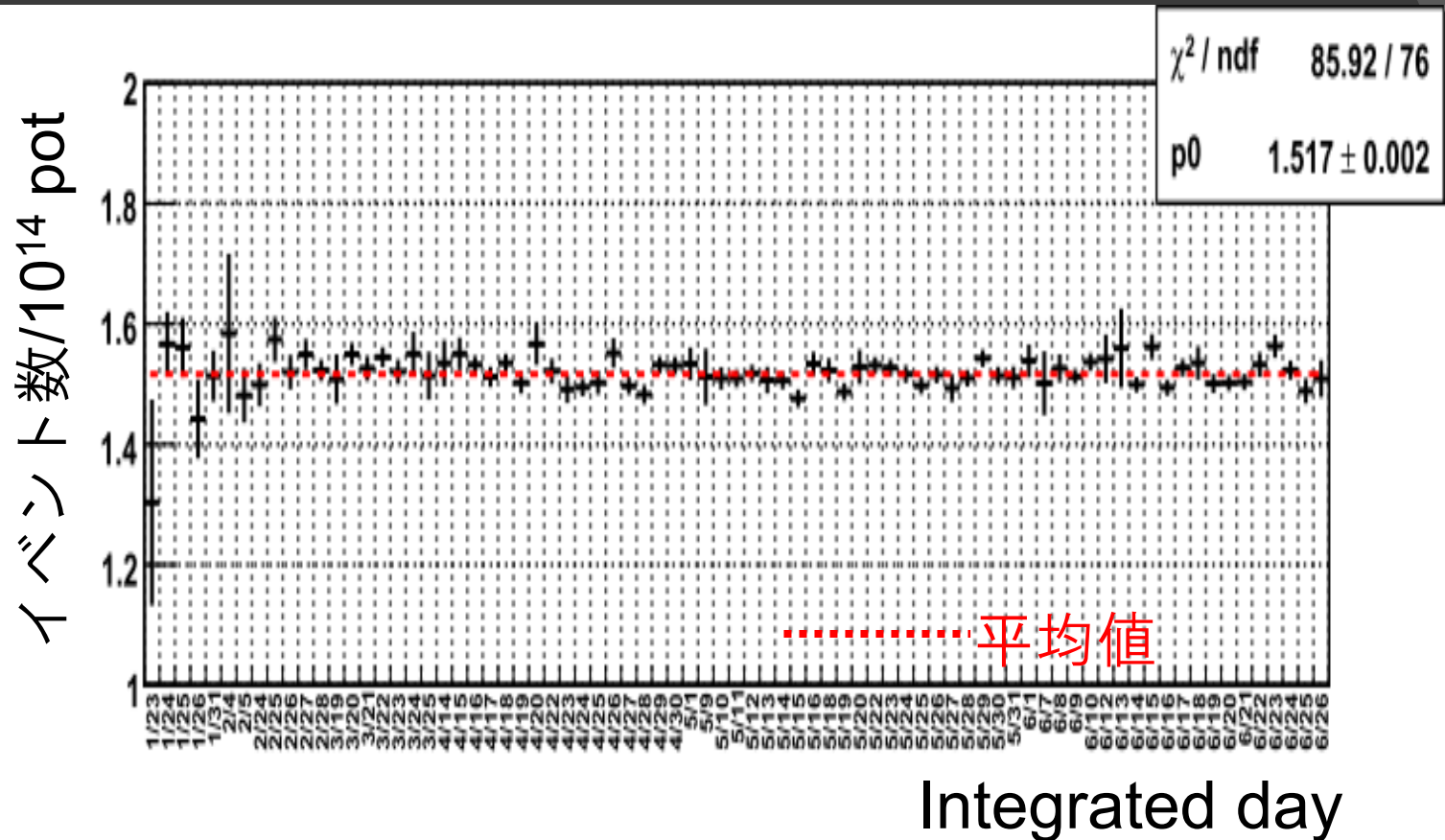


Signal
(ν interaction
within module)



イベントレートの測定

1日毎にイベントレートを測定(統計誤差~1.7%/day)

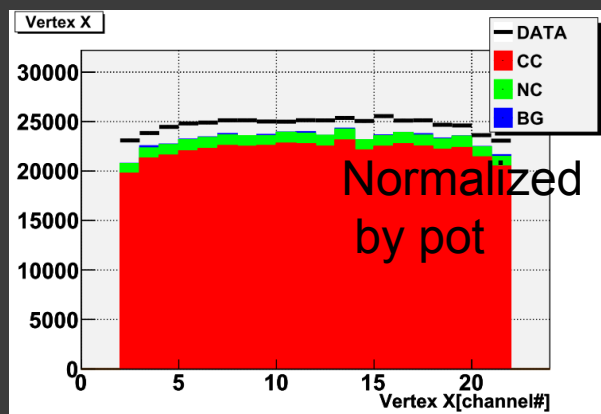


・ イベントレートは安定

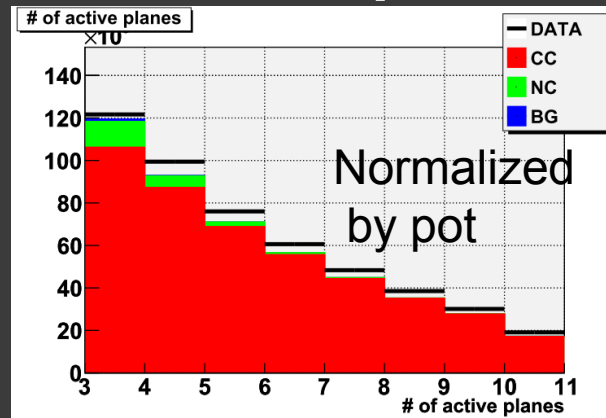
MCとの比較

(イベント数 = ν ビームフラックス $\times$ 反応断面積 $\times$ 検出効率)
 ν ビームフラックスの不定性 $\sim 20\%$,
反応断面積の不定性 $\sim 20\%$

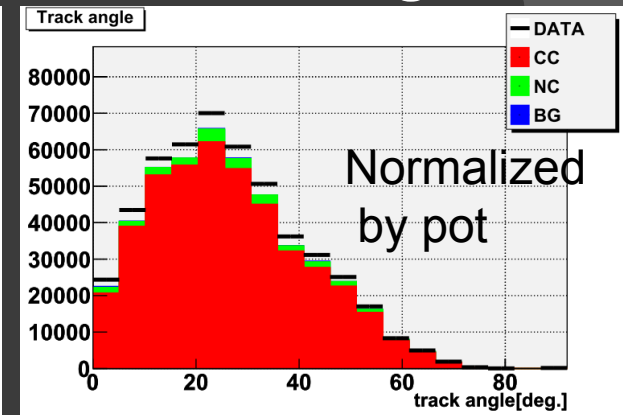
Vertex X



of active planes



Track angle



- ・ MCでdataを非常に良く再現
- ・ イベントレートのdataとの比較
 $\text{data/MC} = 1.073 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.040(\text{syst.*})$

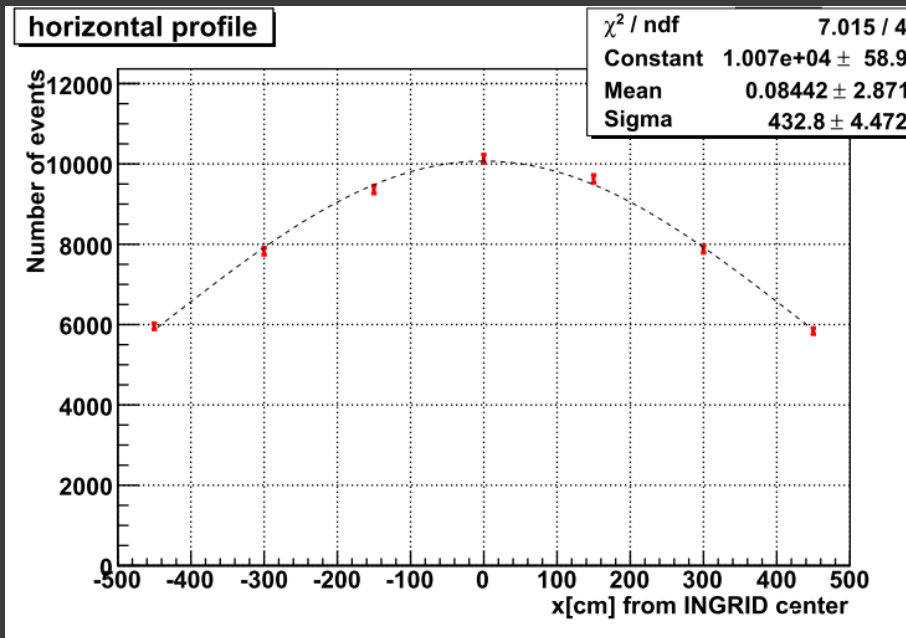
*only detector error

vビームプロフィール

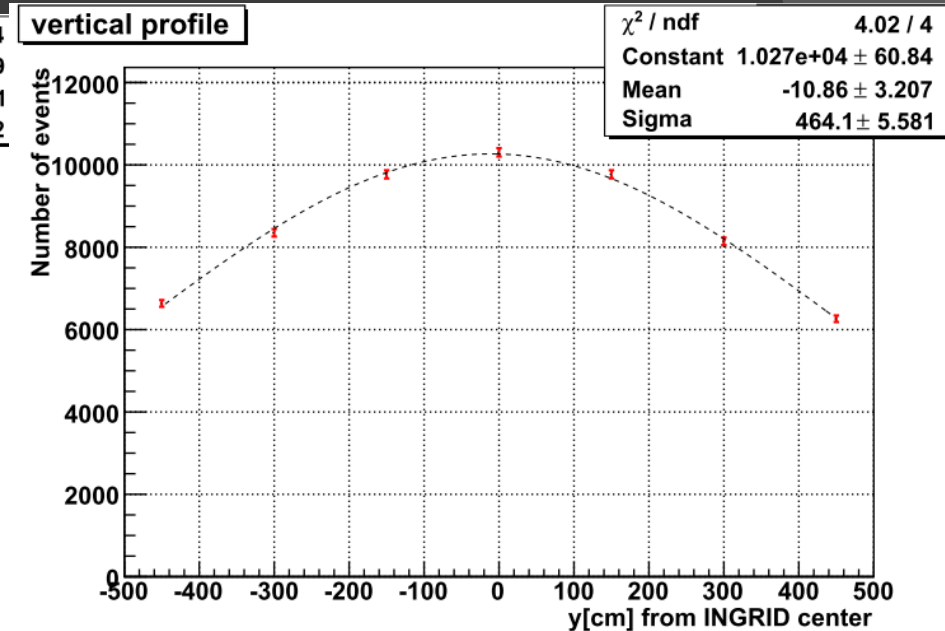
2009年4月のデータ

水平方向

垂直方向



中心: 0.1 ± 2.9 cm



中心: -10.9 ± 3.2 cm

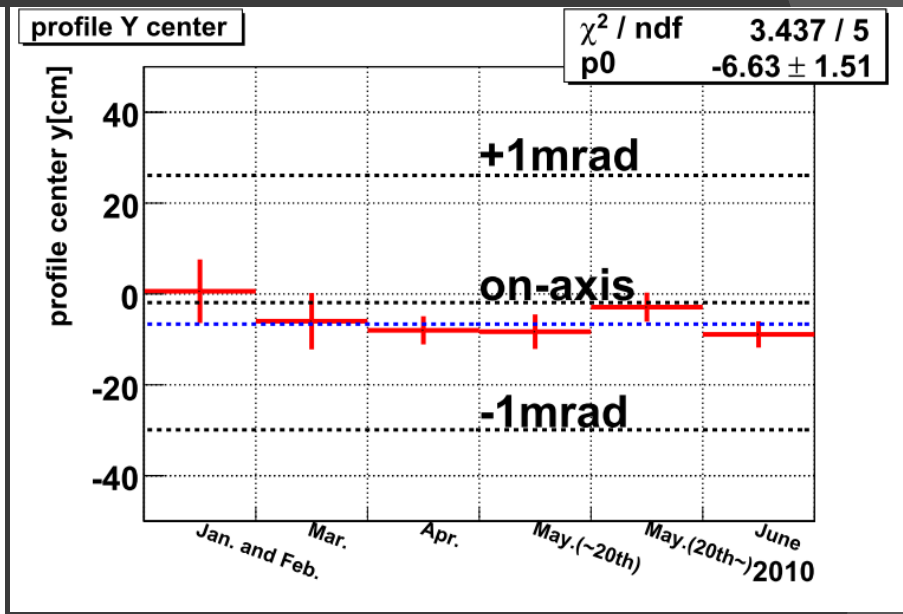
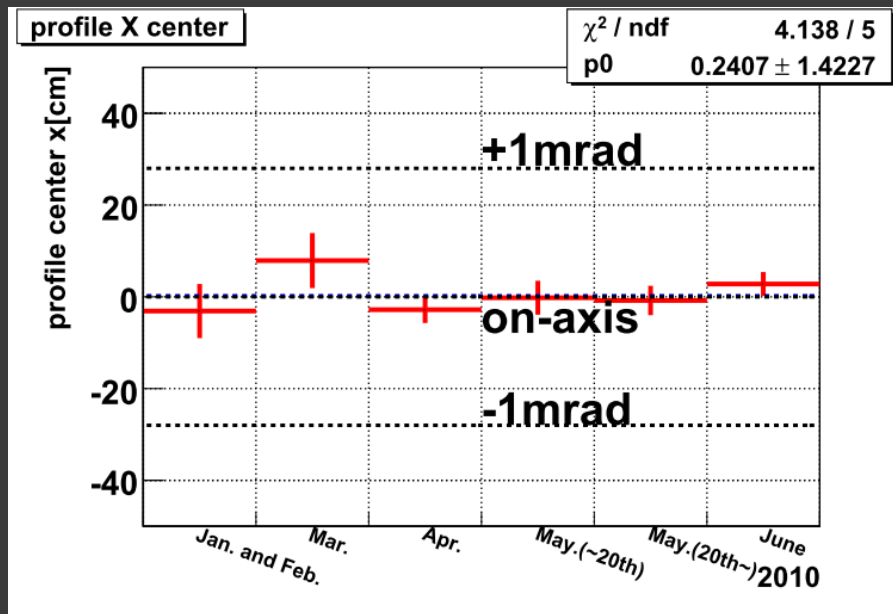
ビームプロフィールを観測

ビーム中心の測定

約1月毎にビーム中心を測定(統計誤差~4.2cm)

水平方向

垂直方向



- ・ ビーム中心は安定
- ・ X center = $0.2 \pm 1.4(\text{stat.}) \pm 9.2(\text{syst.}) \text{ cm}$
Y center = $-6.6 \pm 1.5(\text{stat.}) \pm 10.4(\text{syst.}) \text{ cm}$
⇒ 要求精度(<<28cm)で測定

まとめ

- ◎ T2Kは2010/1に物理データ取得開始。RUN1(2010/1 ~ 2010/6)が終了。
- ◎ INGRIDで99%以上のデータを安定して取得。ニュートリノイベントレート、ビーム中心(方向)を測定した。
 - イベントレート $\text{data/MC} = 1.073 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.040(\text{syst.})$
 - ビーム中心
 $X \text{ center} = 0.2 \pm 1.4(\text{stat.}) \pm 9.2 (\text{syst.}) \text{ cm}$
 $Y \text{ center} = -6.6 \pm 1.5(\text{stat.}) \pm 10.4 (\text{syst.}) \text{ cm}$
→要求精度(<<28cm)で測定

バックアップ