

T2K実験ニュートリノビームモニター INGRIDにおけるビーム測定結果I

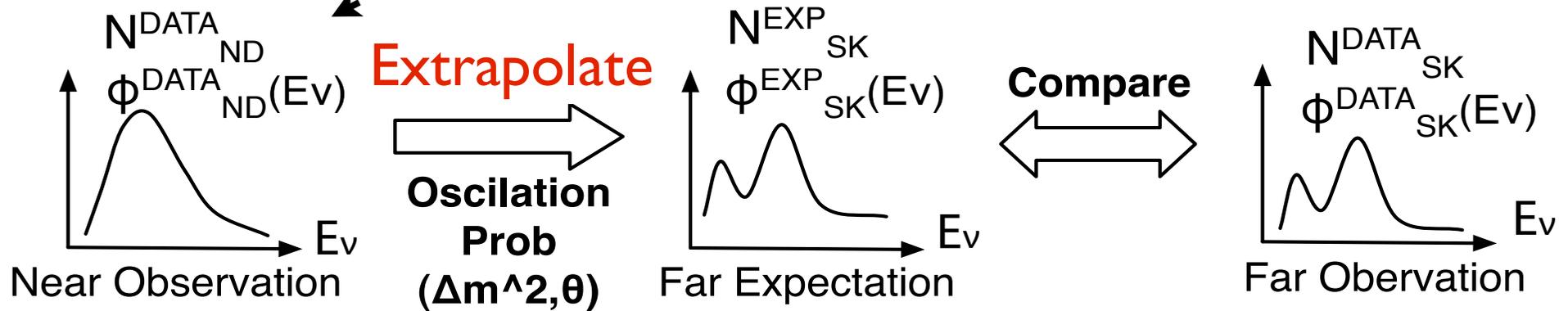
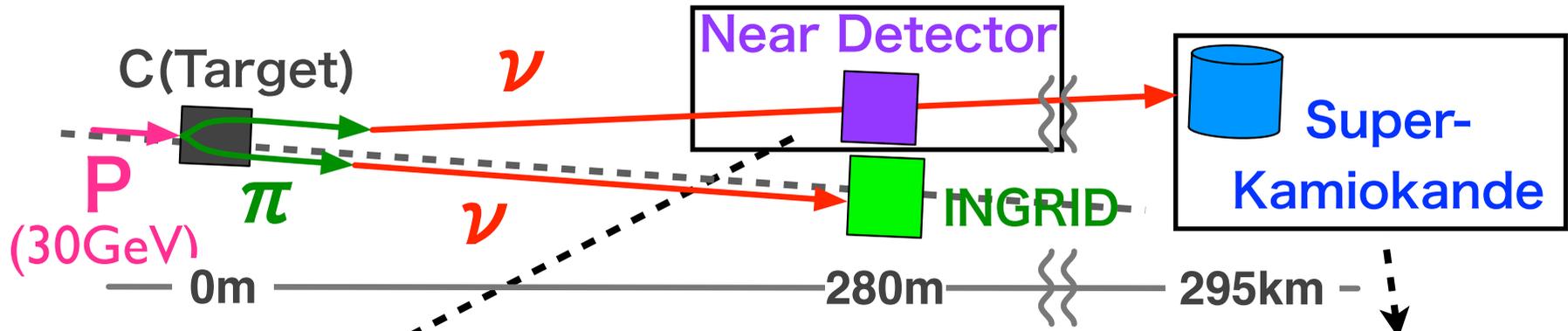
京大理, 東大理^A, 阪市大理^B

村上明, 大谷将士, 松村知恵^B, 木河達也, 鈴木研人, 高橋将太,

南野彰宏, 横山将志^A, 山本和弘^B, 市川温子, 中家剛

他T2Kコラボレーター

ニュートリノ振動解析の一例



$$N_{SK}^{EXP} = \frac{\int \Phi_{SK}^{MC} \times Prob(\Delta m^2, \theta) \times \sigma_{Water}^{MC} \times \epsilon_{SK}^{MC} dE}{\int \Phi_{ND}^{MC} \times \sigma_{CH}^{MC} \times \epsilon_{ND}^{MC} dE} \times N_{ND}^{DATA}$$

(Φ: Flux, σ: neutrino cross-section, ε: detector efficiency)

後置検出器(SK)での観測数の見積もりには

シミュレーション(MC)が重要.

INGRIDでのニュートリノ観測

INGRID : 14(16)モジュールでニュートリノ反応をカウント

$$N_{mod}^{DATA}, N_{mod}^{EXP} = \int \Phi_{mod}^{MC} \times \sigma^{MC} \times \epsilon^{MC} dE$$

→ 高統計の観測を利用できないか。

現時点でのMCの主な不定性

項目	不定性
ニュートリノフラックス $\Delta\Phi$	~25%
反応断面積 $\Delta\sigma$	~30%

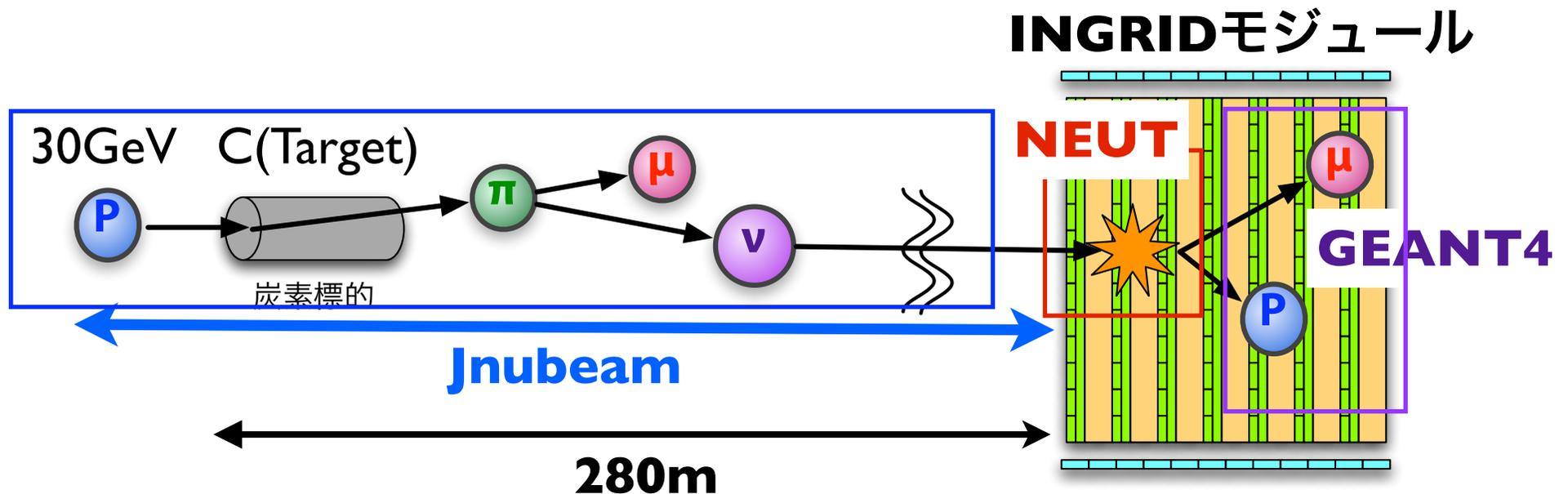
$$\Delta\epsilon_{INGRID}^{MC} \ll \Delta\Phi, \Delta\sigma \Rightarrow \text{Reduce } \Delta\Phi, \Delta\sigma \text{ from } N_{mod}^{DATA} / N_{mod}^{EXP}$$

$$N_{SK}^{EXP} = \sum_{mod} \frac{\int \Phi_{SK}^{MC} \times Prob(\Delta m^2, \theta) \times \sigma_{Water}^{MC} \times \epsilon_{SK}^{MC} dE}{\int \Phi_{mod}^{MC} \times \sigma_{FE}^{MC} \times \epsilon_{INGRID}^{MC} dE} \times N_{mod}^{DATA}$$

まずは、現時点でのデータとMCの比較を行う。

検出器シミュレーション

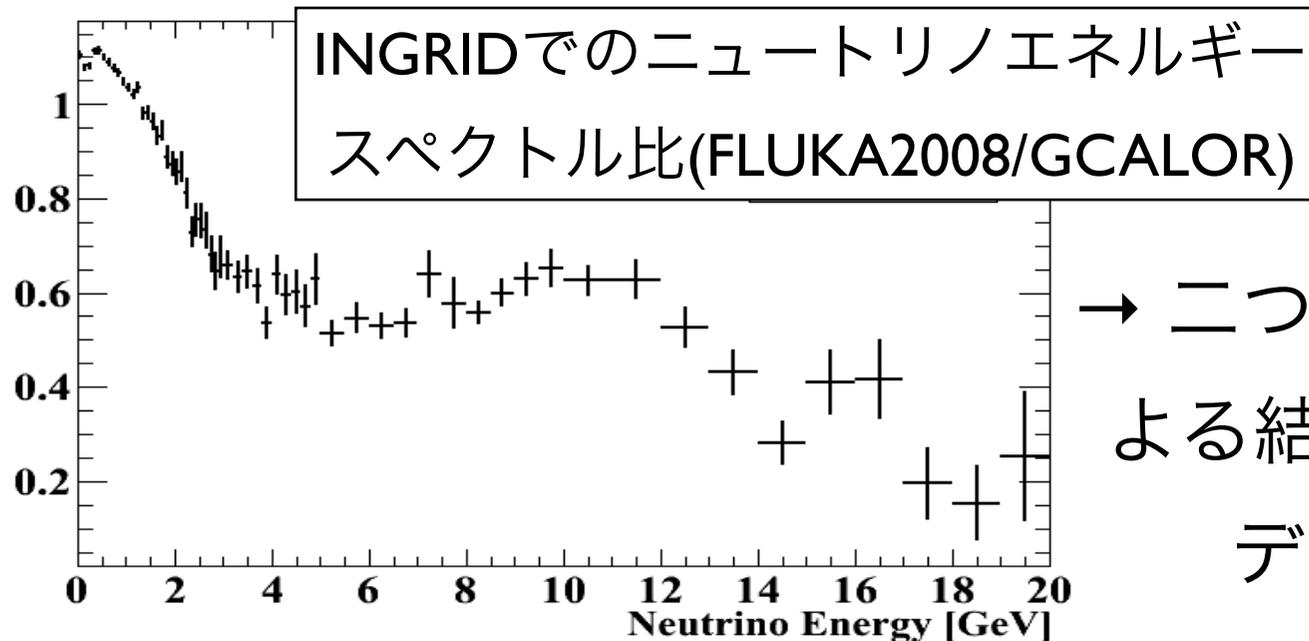
- T2K実験：P(30GeV) + C(Target) → Hadron(π ,K,...) → ν
- INGRIDでのニュートリノ観測のシミュレーションの構成
 - ニュートリノ生成→INGRID：Jnubeam (GEANT3)
 - INGRIDとニュートリノの反応：NEUT
 - ニュートリノ反応での生成粒子に対する応答：GEANT4
- モジュール内で起きたニュートリノ反応のみを扱う。



ニュートリノフラックス

- 30GeV付近のP+C衝突の実験データがない。
- ハドロン生成モデルの不定性が大きい → ニュートリノフラックスの不定性。
- 現在NA6I@CERNで測定中 → フラックスをチューニング
- 二つのハドロン生成モデル(GCALOR, FLUKA2008)を使用
- FLUKA2008 : 現状では実験データ(NA6I preliminary)を良く再現。

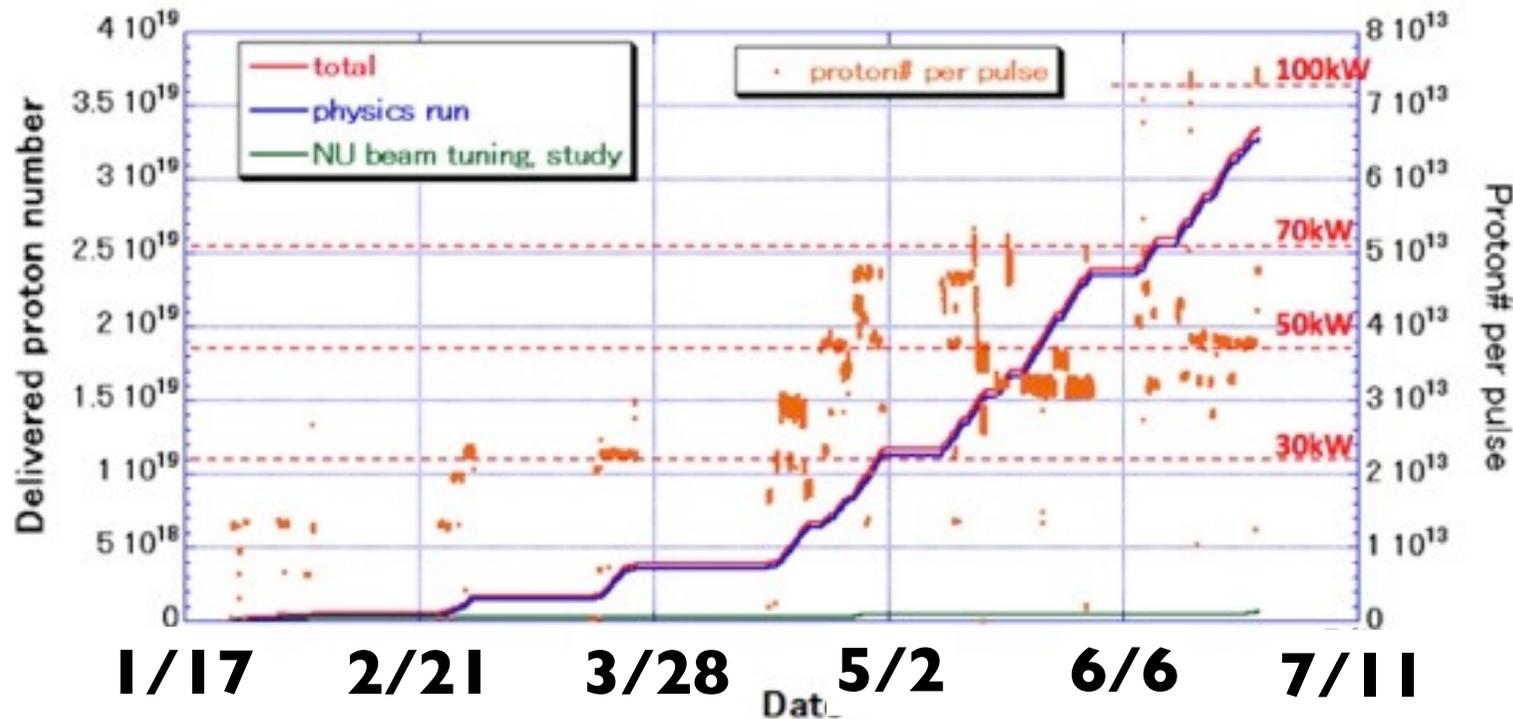
FLUKA2008/GCALOR



→ 二つのフラックスによる結果をINGRIDのデータと比較

データ取得

T2K実験：2010年1月から物理ラン開始



Horn:
250kA&250kA

Max.intensity:
100kW
Stable operation:
< 50kW

INGRID : 2010年1月より測定開始

- **99.9% data taking efficiency**
- Total delivered protons for analysis: $\sim 3.3 \times 10^{19}$

次にデータの解析方法(イベントセレクション)について説明 →

イベントセレクション

Make timing cluster
(more than 4 hits within
100nsec)

of active planes > 2 &&
p.e. / active layer > 6.5

Tracking

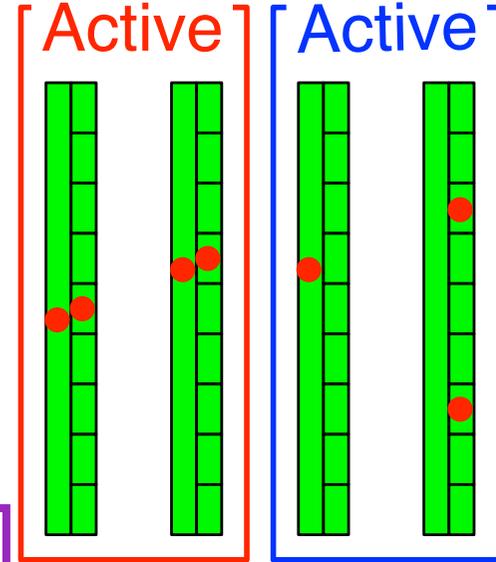
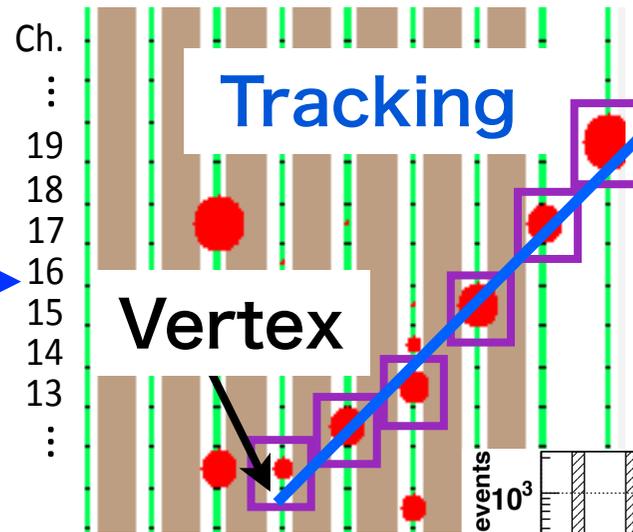
Track matching

On time cut

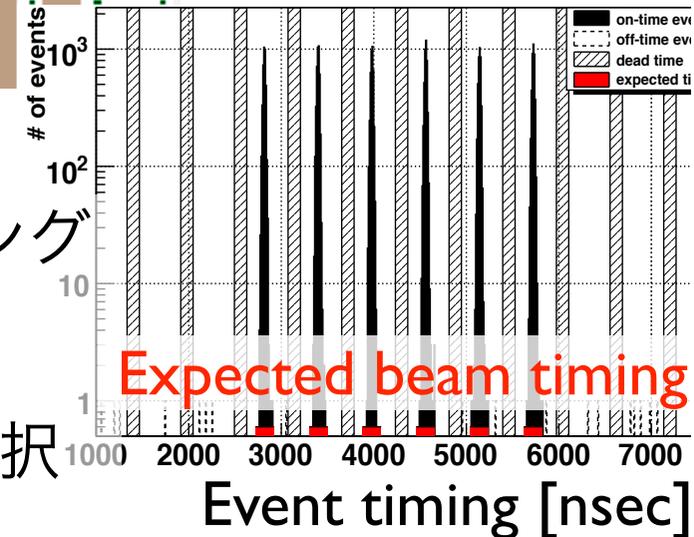
Upstream VETO cut

Fiducial volume cut

- MPPCノイズを除去
 - 連続3PlaneにHIT
- ➡ Tracking



ビームタイミング
と同期した
イベントを選択



イベントセレクション

- 宇宙線・壁からのミュオンを除去

Make timing cluster
(more than 4 hits within
100nsec)

of active planes > 2 &&
p.e. / active layer > 6.5

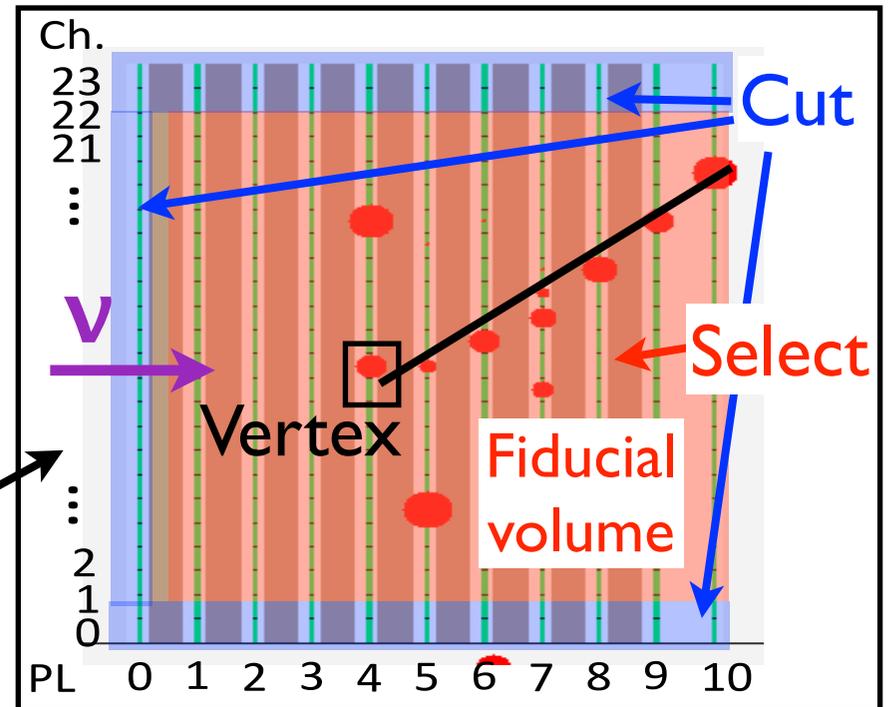
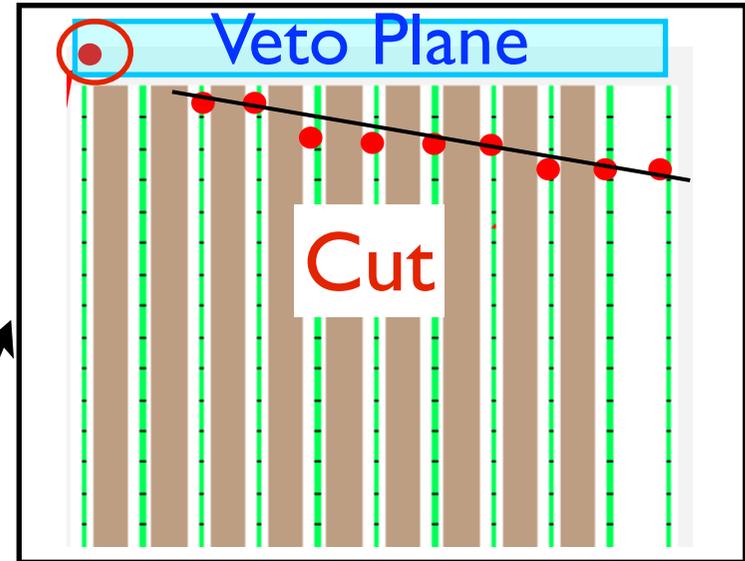
Tracking

Track matching

On time cut

Upstream VETO cut

Fiducial volume cut

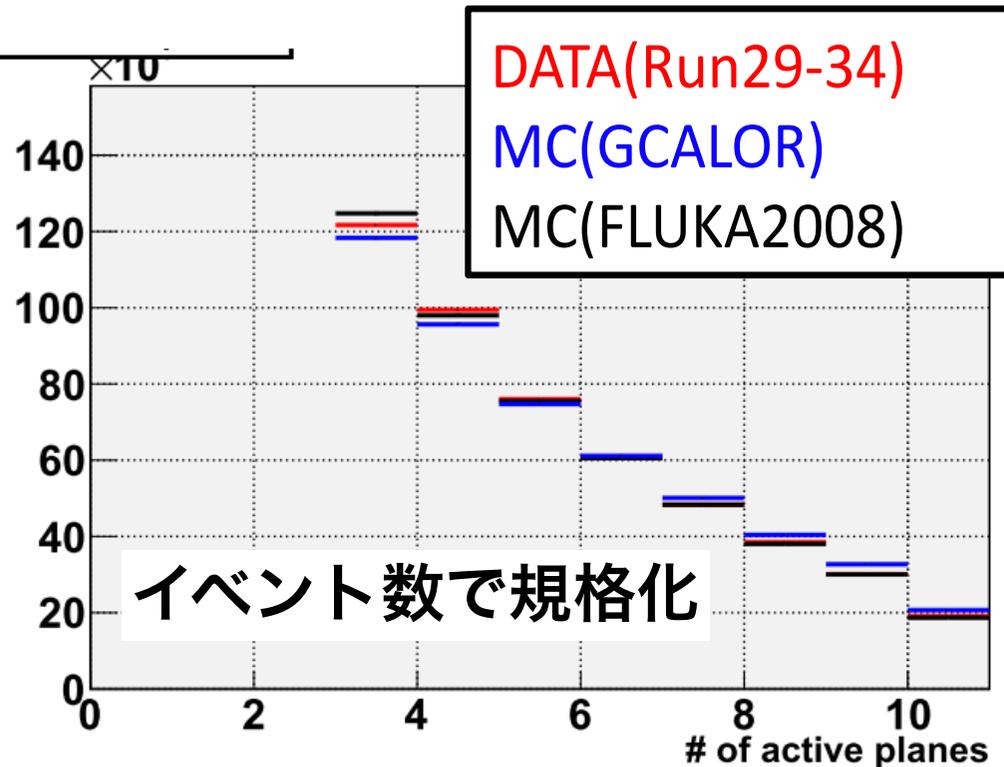


データ vs MC

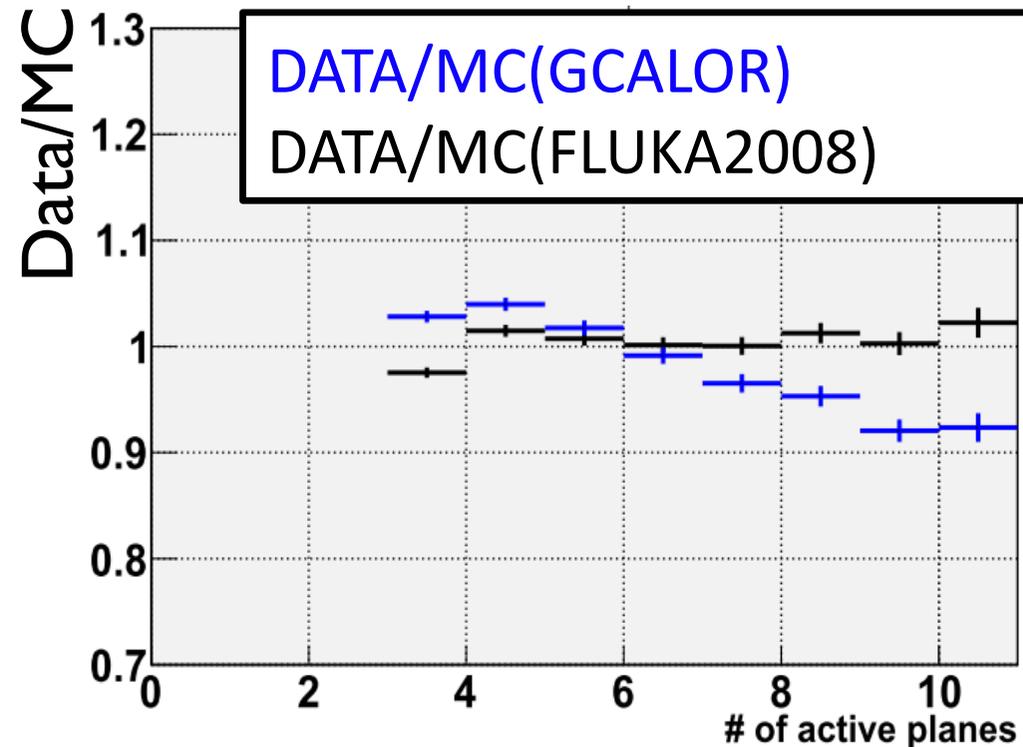
- イベントセレクションで残ったニュートリノイベントに対する応答(# of active plane, tracking angle,...)の比較
- データ : 2010年1月~6月の物理データ
- MC : ν_μ のみ
 - anti- ν_μ : 5%. ν_e : 1%. anti- ν_e : 1%以下 (at Flux to INGRID)
 - 2つのハドロン生成モデル(GCALOR, FLUKA2008)によるニュートリノフラックスを使用.
- イベント数で応答の分布を規格化
 - 分布の形が両者でどの程度合っているかを検証.

of active plane

分布(at all modules)



データとMCの比



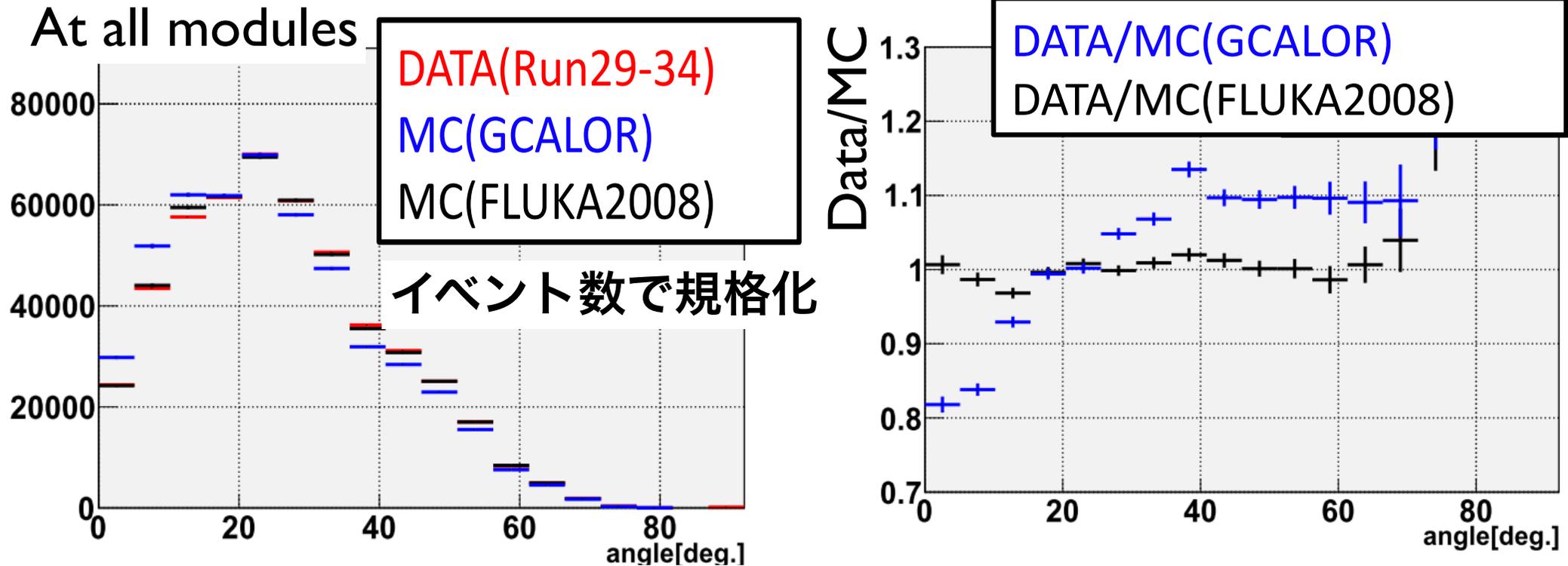
GCALORでは最大~8%の差(at high # of active plane)

FLUKA2008では良く (**3%以内**)再現

▶ 高エネルギーのニュートリノの割合の違い

(High energy ν \rightarrow High energy μ \rightarrow Long Track)

Tracking angle

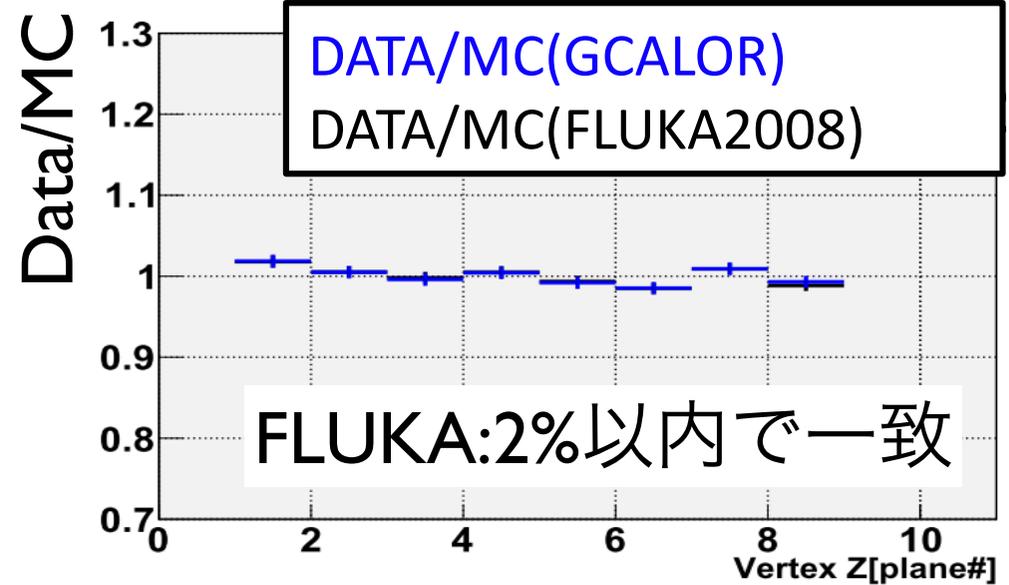
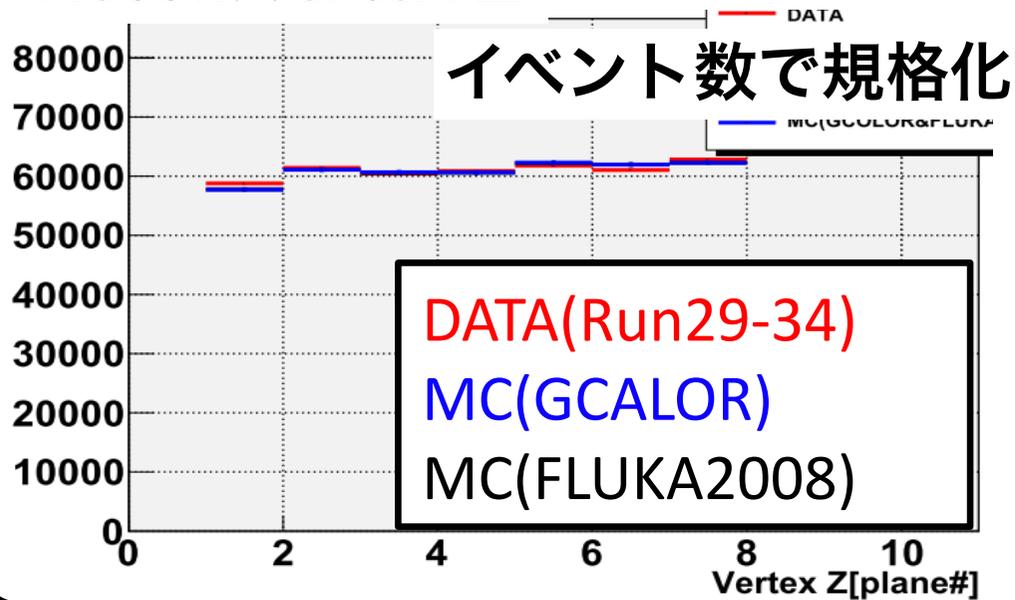


GCALORでは最大~18%(at Low tracking angle)の差
FLUKA2008では良く (**3%以内**)再現

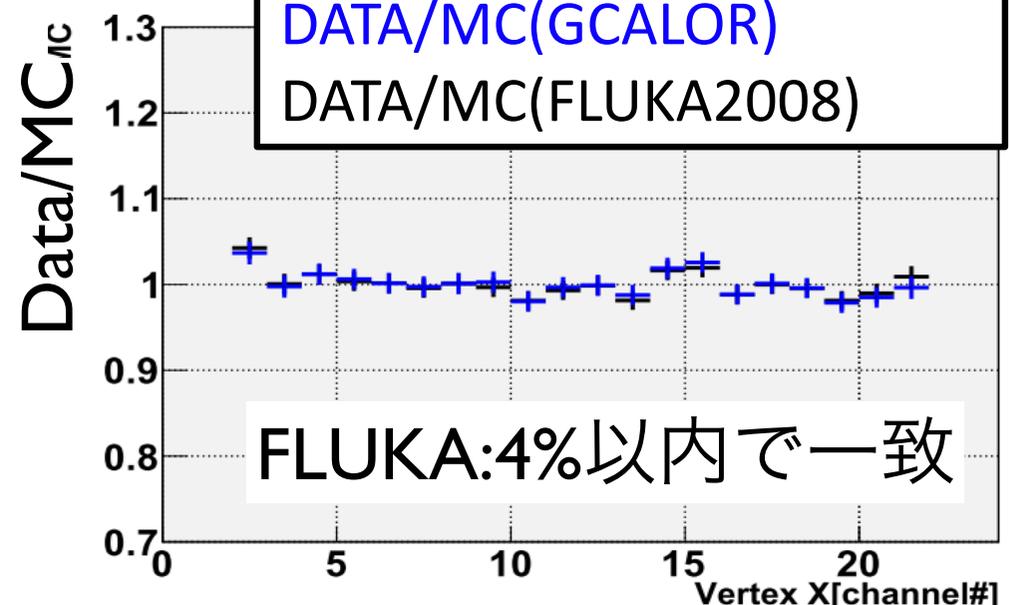
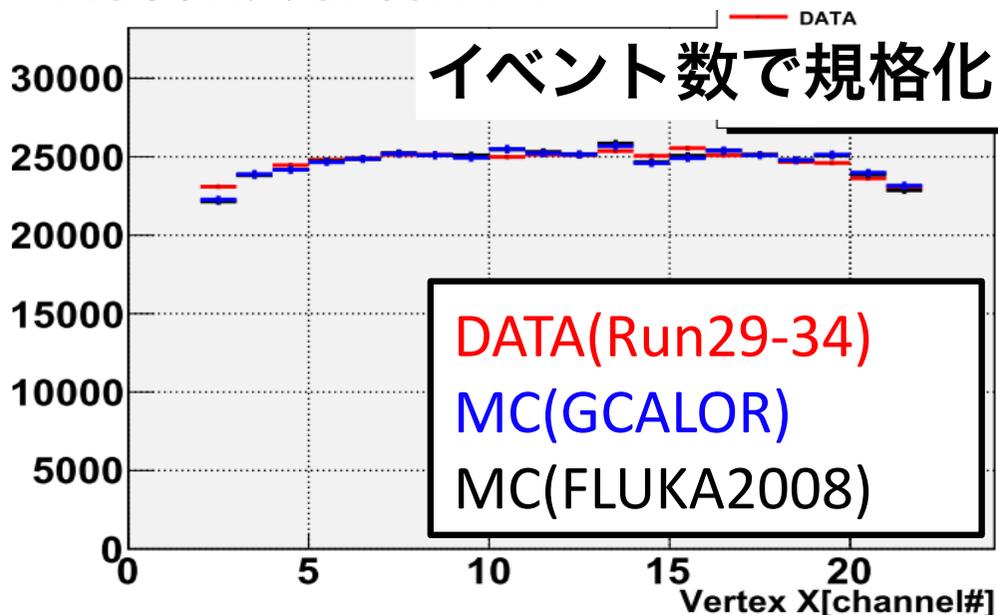
- ▶ 高エネルギーのニュートリノの割合の違い
(High energy $\mu \rightarrow$ ビーム前方に飛ぶ \rightarrow Low angle)

Reconstructed vertex

Recon. vertex Z



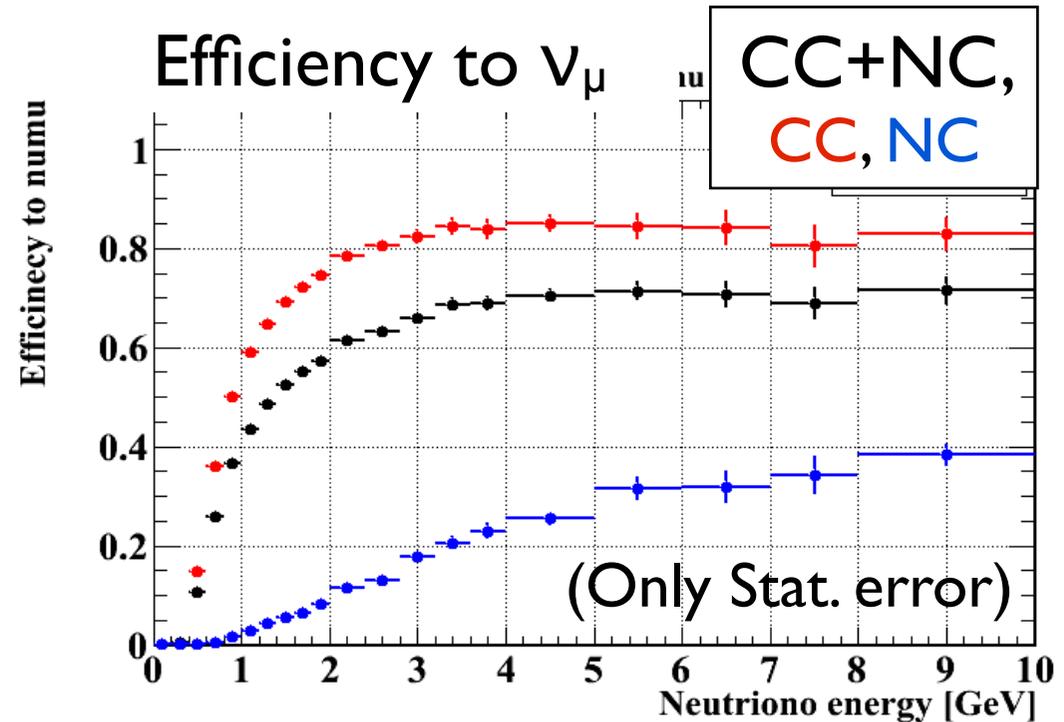
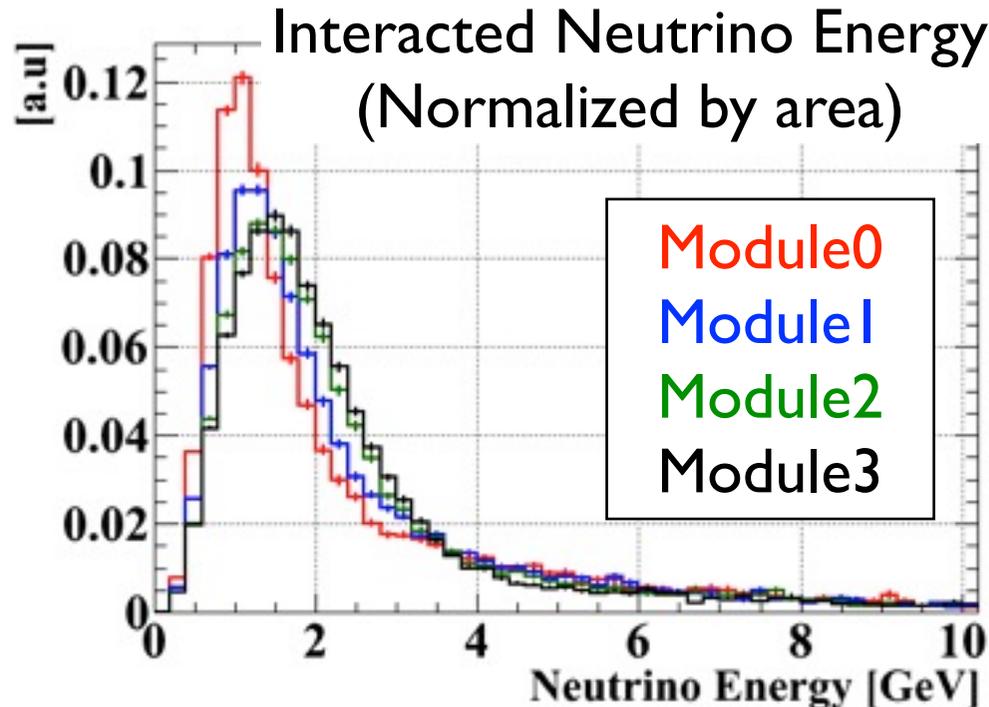
Recon. vertex X



検出効率 ϵ_{INGRID}

MC(FLUKA2008)を用いて検出効率を求めた。

(# of events after event selection) / (# of interaction in Fiducial volume)



各水平モジュールでの検出効率(スペクトル平均)

Module#	0	1	2	3	4	5	6
Efficiency [%]	48.3	50.7	52.3	52.2	52.1	50.8	48.0

→ 各モジュールで48~52%の検出効率が見込まれる。

観測数の見積もり・比較

ニュートリノ観測数のMC($\nu_\mu + \text{anti-}\nu_\mu$)とデータの比較

	MC(GCALOR)	MC(FLUKA2008)	Data
観測数[/ 10^{14} POT]	1.78	1.41	1.52
Diff from Data	+17%	-7%	0

→ ハドロン生成モデルの違いによる観測数の違い:

FLUKA2008/GCALOR ~ 79%

ニュートリノイベントの各分布のShapeだけでなく、

観測数もFLUKA2008の方がデータと合っている。

(ただしニュートリノ反応断面積の不定性は考慮していない。

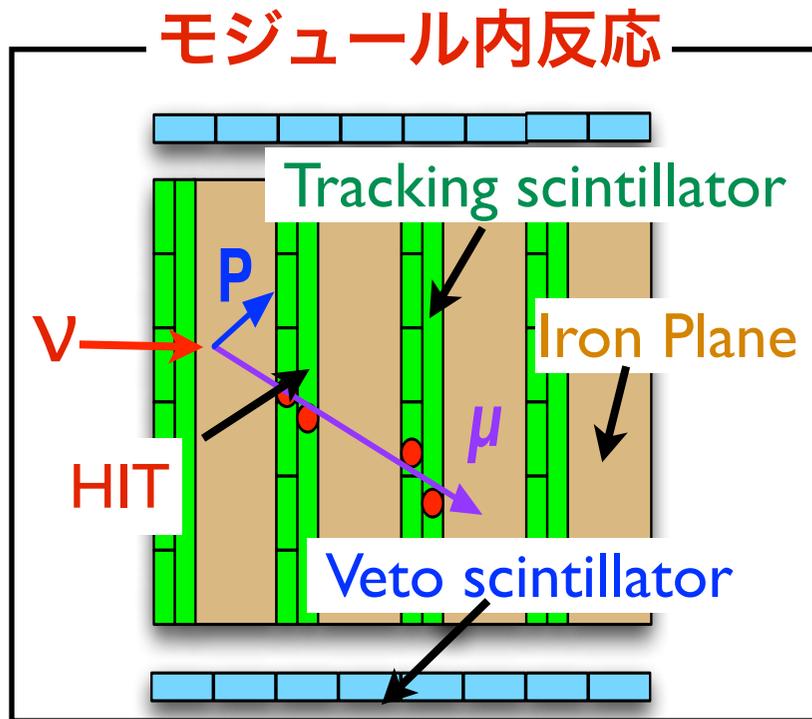
→ 両者の不定性を考慮した比較は今後行っていく。)

まとめ

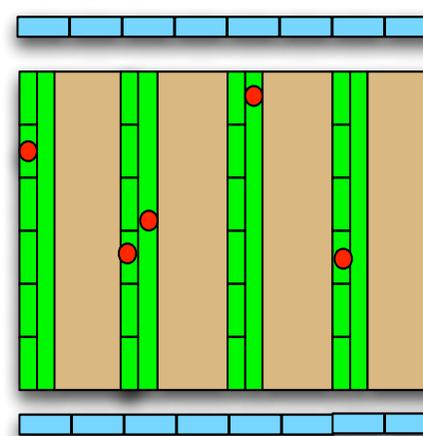
- INGRIDは各モジュールでのニュートリノ観測数から、ビーム方向を測定するビームモニターである。
- 2010年からの物理ランにおいて、安定してデータ取得 (99.9% data tacking efficiency)を行うことが出来た。
- 二つのハドロン生成モデルを用いてシミュレーションとデータの比較を行った。
- ニュートリノイベントの各分布の形、観測数のどちらにおいてもFLUKA2008の方がデータを良く再現していた。
- 次はフラックスの不定性だけでなく、ニュートリノ反応断面積の不定性も考慮した比較を行う。

Back up

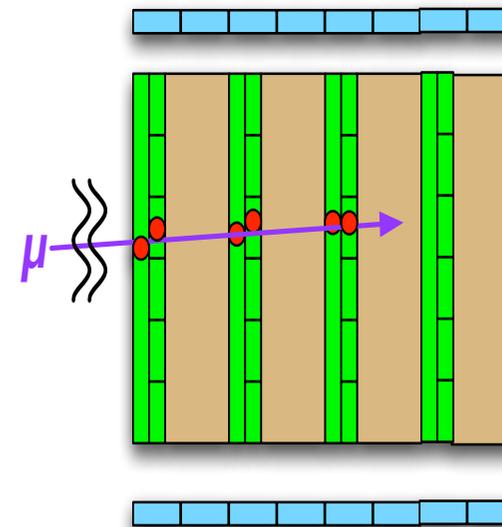
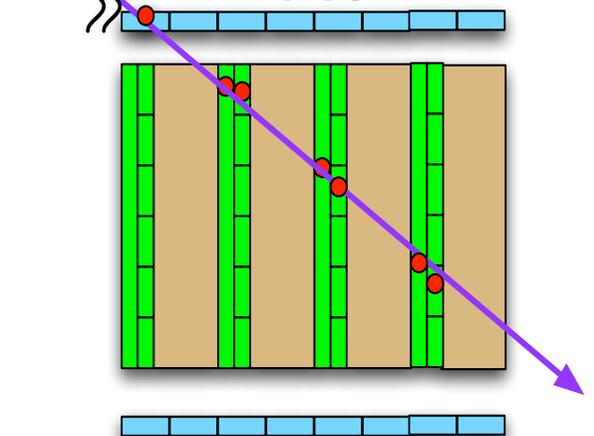
シグナルとバックグラウンド



検出器ノイズ



μ 宇宙線



壁での
ニュートリ
ノ反応

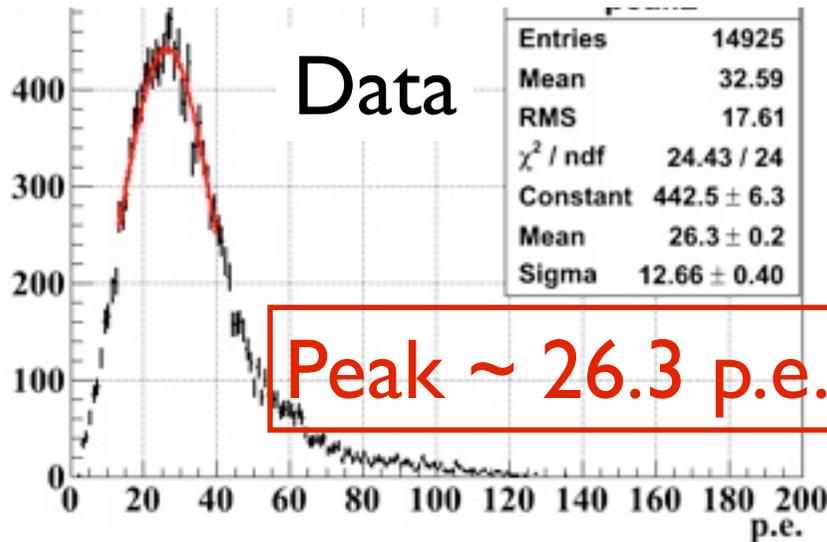
モジュール内反応とそれ以外では
イベントの見え方 (突き抜けたプレーン
数、再構成した反応点...) が違う

→ シグナルシミュレーションとデータを比較することで検証。

Energy → photon

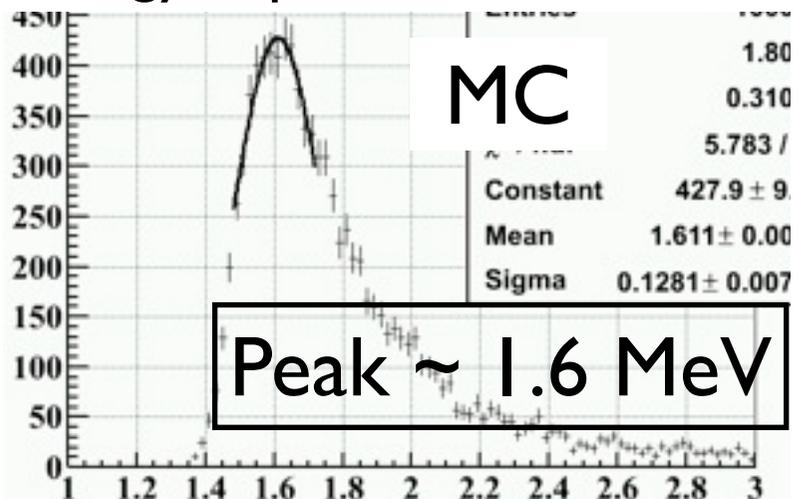
ミュオンによるHITの光量を用いて調整

先頭のTracking Planeでの光量



- 外からのミュオンのHITを選択
- Scintillator内のトラックの長さの違い、ファイバーによる減衰を補正した光量分布
- ピークの光量を使用

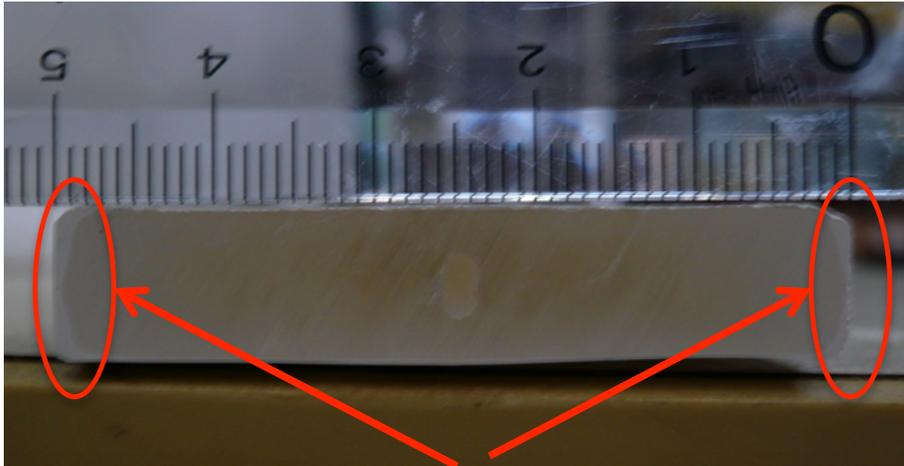
Energy deposit of 1scintillator



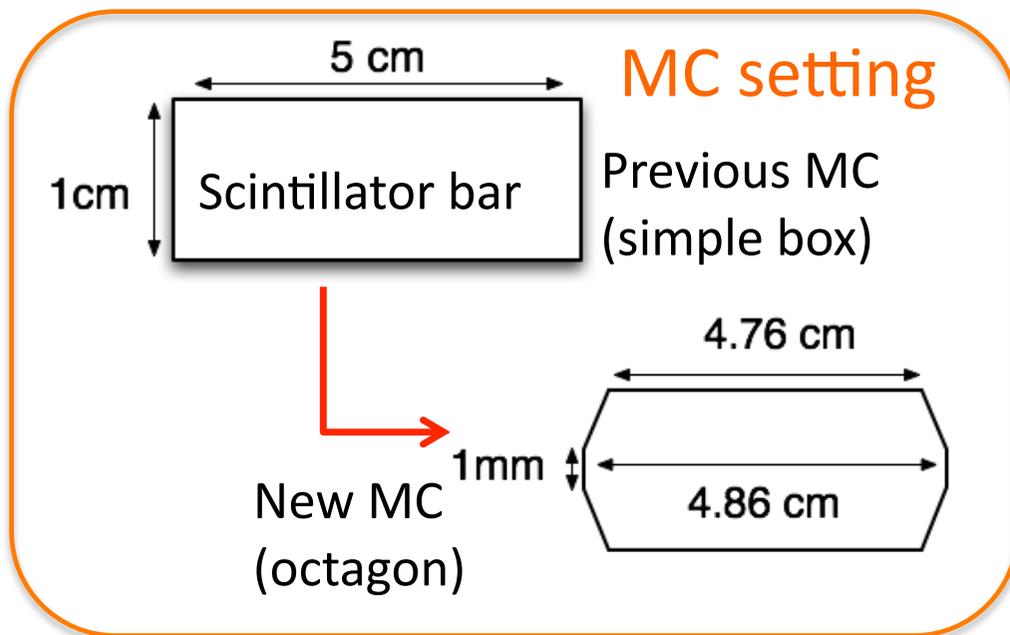
- MCで1シンチレータ内でのミュオンによるエネルギー損失量を求める.
- データの光量に合うようにMCの energy → photonの変換を調整

Real scintillator shape

Photo : surface of scintillator bar

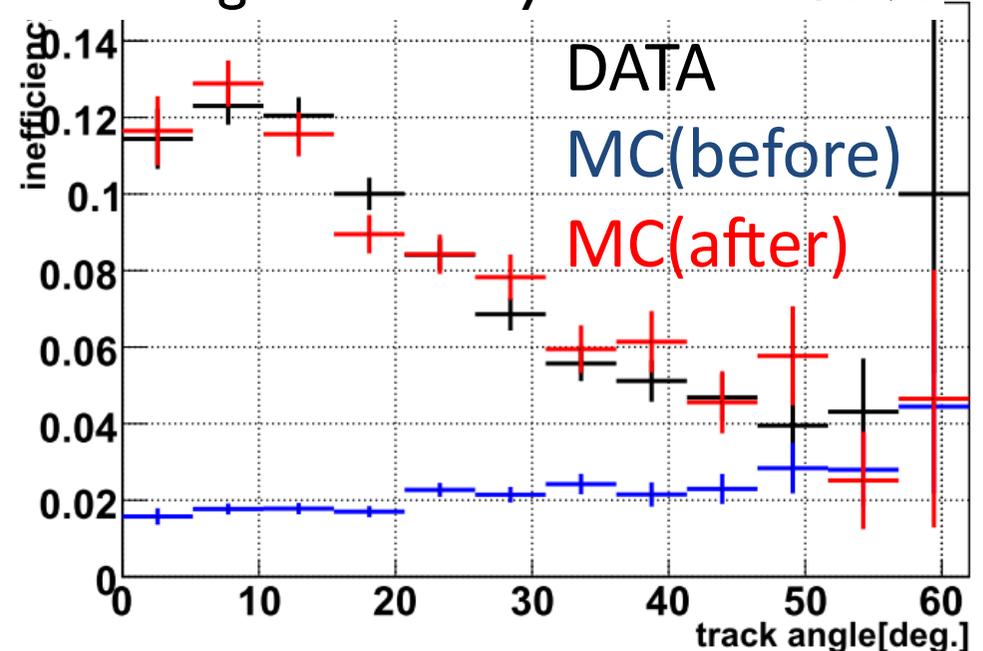


white area : the reflective material.



- 実際のScintillator barの端は反射材の層が厚く、不感領域。
- Tracking inefficiencyに角度依存。
- MCのScintillatorの形を実際に感度のある部分の形に似せた。

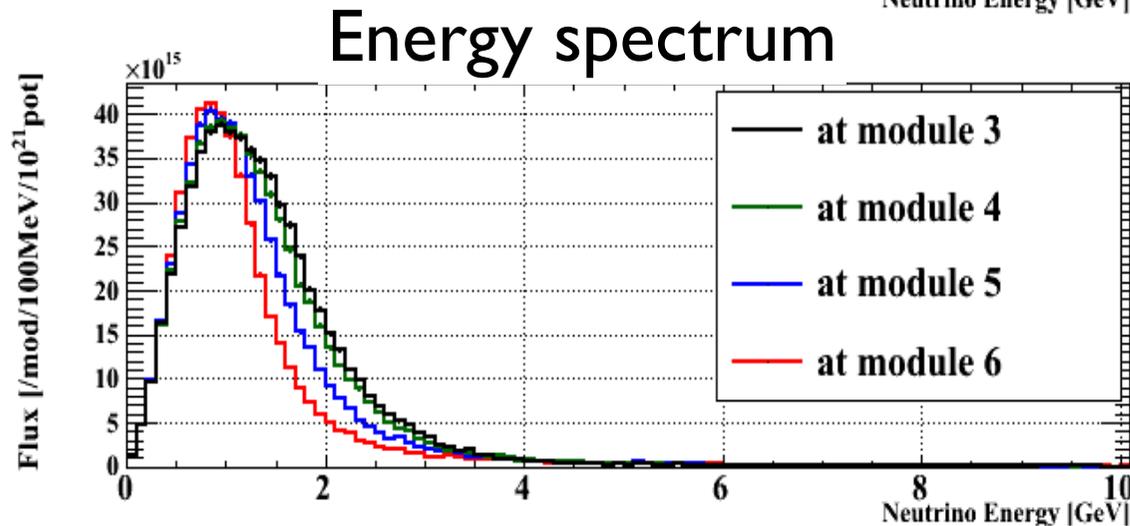
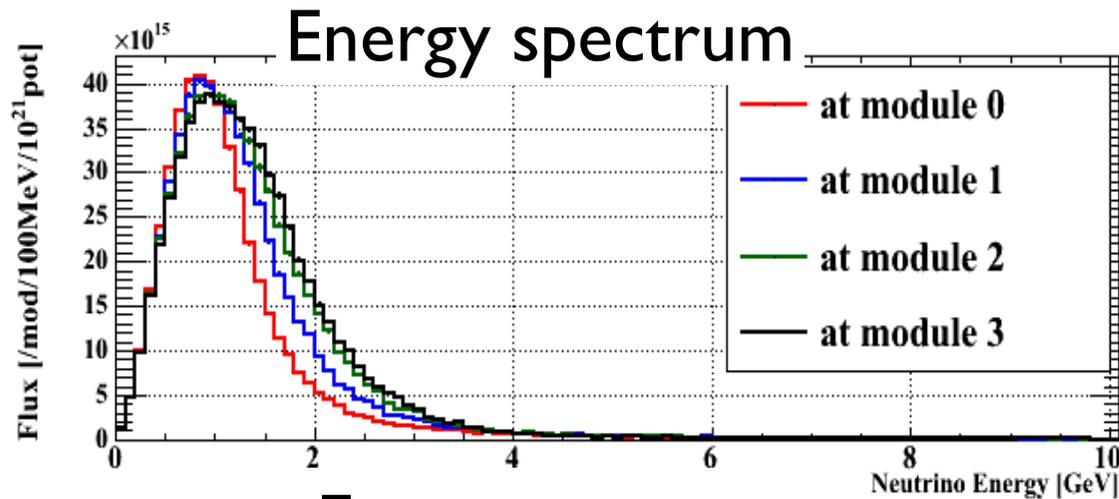
Tracking inefficiency → MCで再現



フラックスで平均した各水平モジュールでの検出効率

Module#	0	1	2	3	4	5	6
Efficiency [%]	48.3	50.7	52.3	52.2	52.1	50.8	48.0

Module#	7	8	9	10	11	12	13
Efficiency [%]	49.4	51.3	52.2	51.4	51.8	50.9	48.4



INGRIDに到達する
ニュートリノのエネルギー
ギースペクトル

