

# T2K実験前置検出器INGRID

を用いた

# 反ニュートリノビームの測定

林野 竜也

21st ICEPPシンポジウム

2014年2月8日

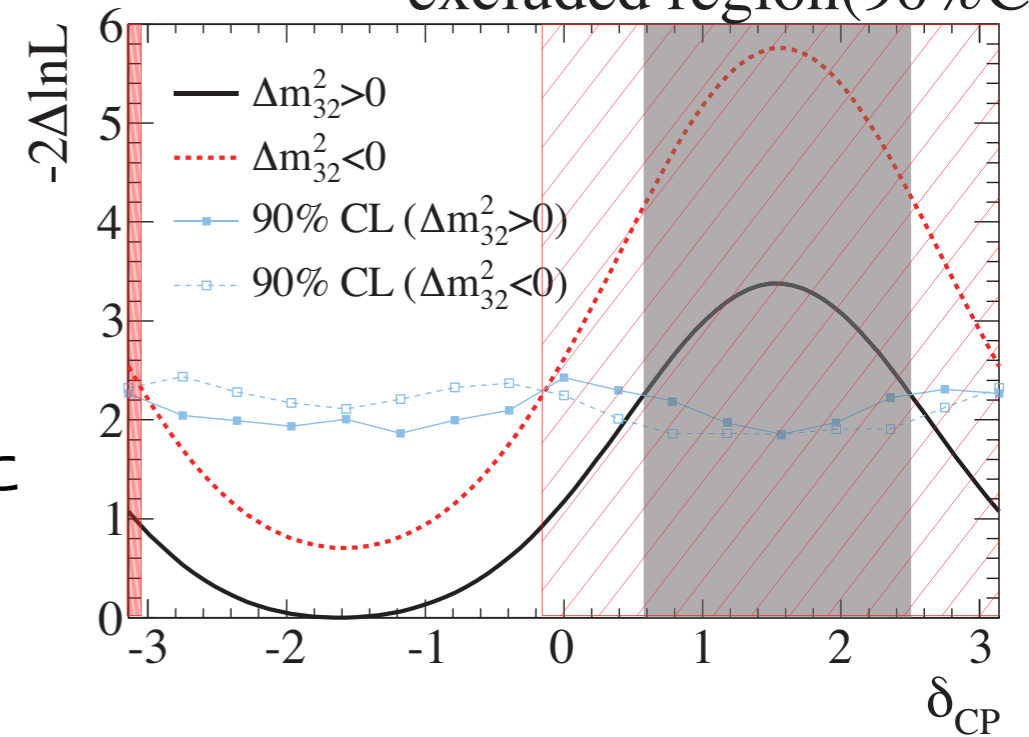
# T2K実験とは

excluded region(90%CL)

- ・長基線ニュートリノ振動実験
- ・J-PARCのミュオンニュートリノビーム
  - ー  $\nu_\mu$  消失事象、 $\nu_e$  出現事象の観測
  - ーレプトンセクターのCP位相角  $\delta_{CP}$  に制限を与えた

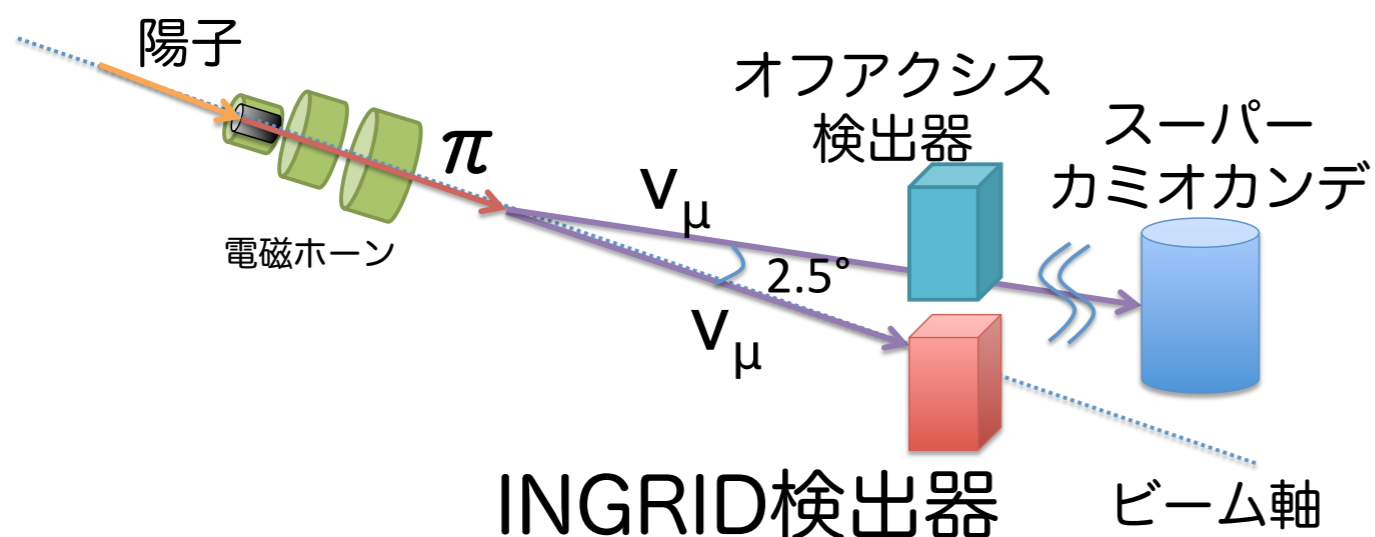
$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \sim \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - \frac{\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{2 \sin \theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \delta_{CP}$$

$\bar{\nu}_\mu$  の場合は符号が反転



レプトンセクターのCP対称性の破れのヒントを求めて、反ニュートリノビームを用いたニュートリノ振動測定を開始した

# オフアクシス(off-axis)法

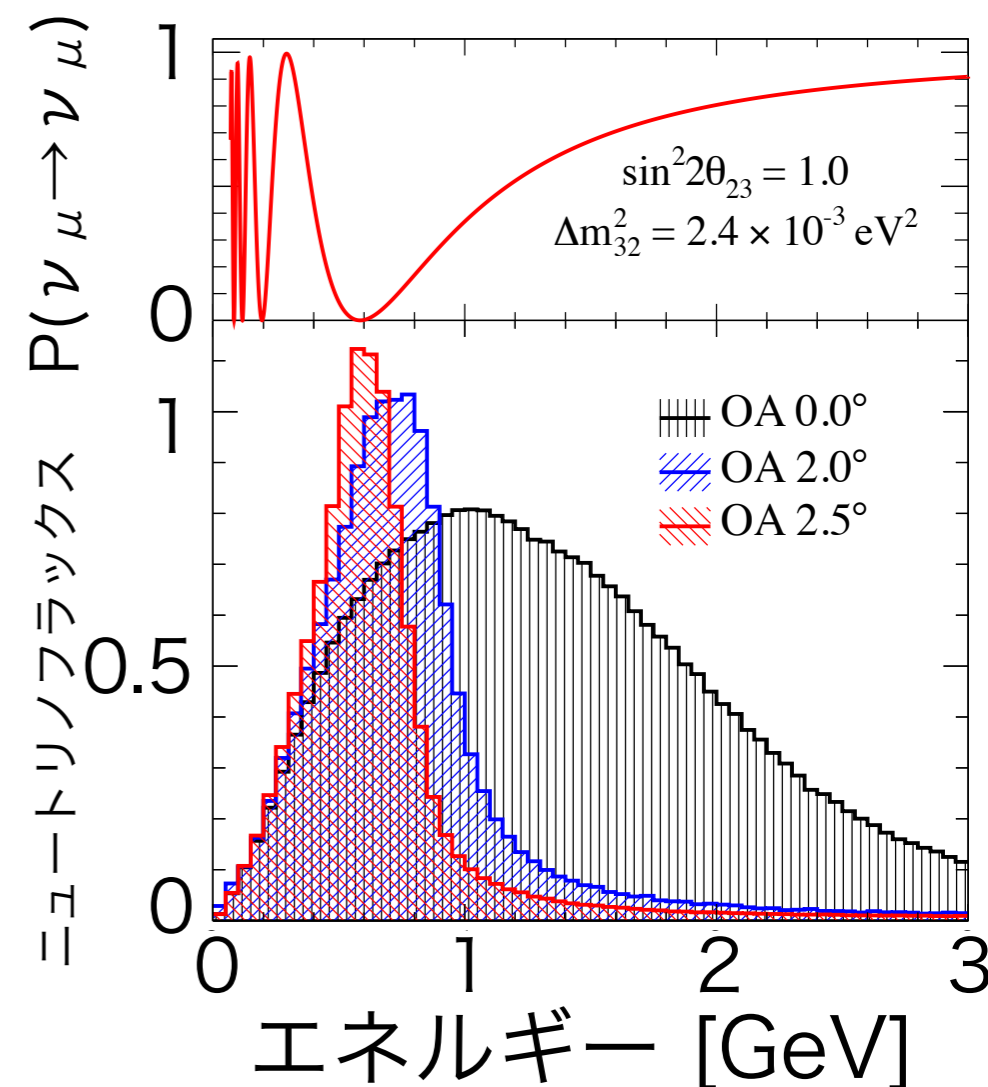


- ニュートリノビーム方向をスーパーカミオカンデの方向から2.5°(オフアクシス角)ずらしたオフアクシス法を採用

- ビーム方向が1mradずれると、SKでのニュートリノエネルギー分布のピークが2%ずれる

→ビーム方向の測定が重要となる

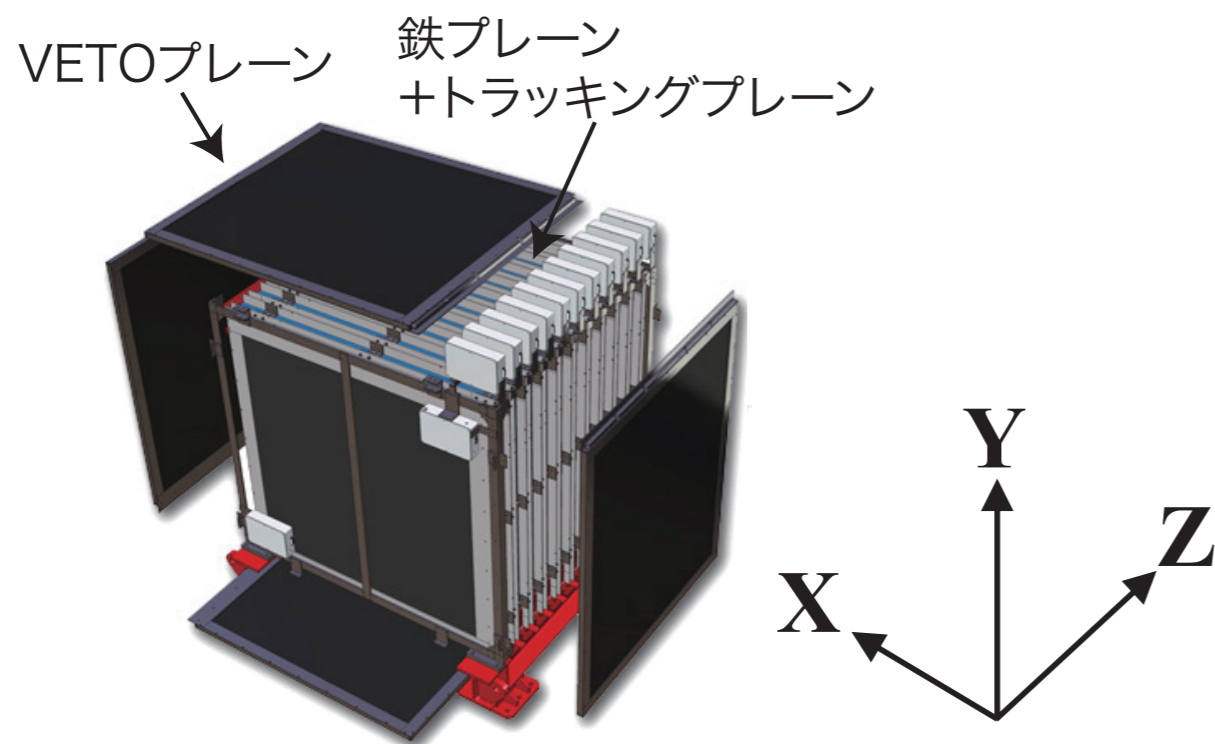
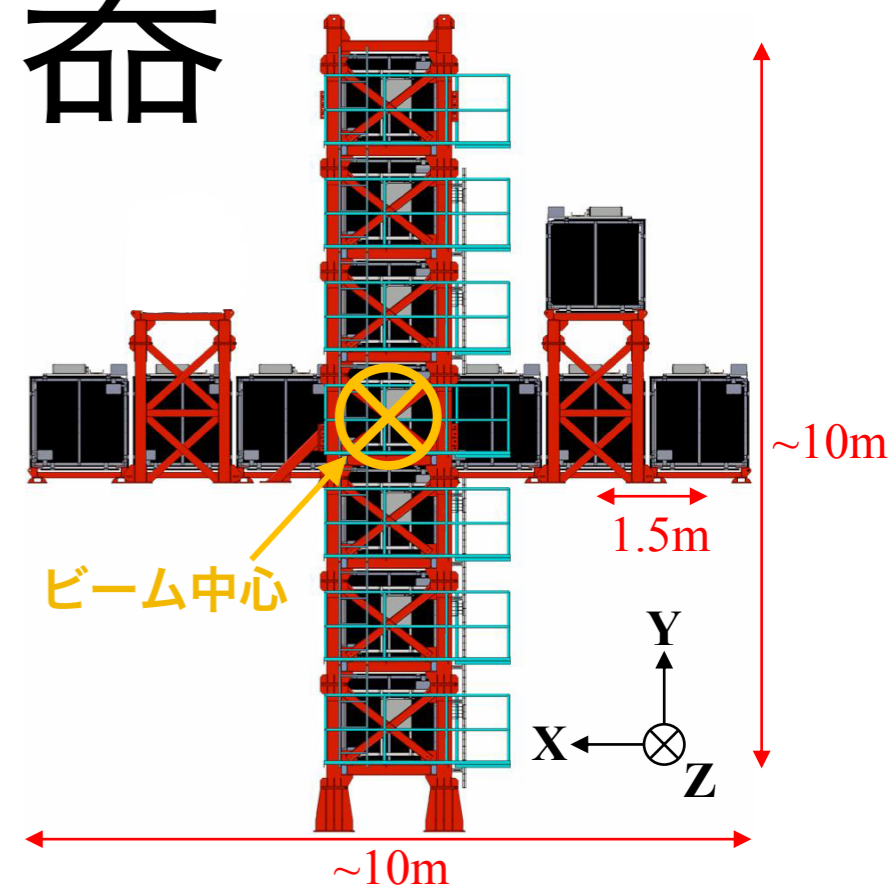
2014年6月に取得したデータで  
反ニュートリノビームの方向測定を行う



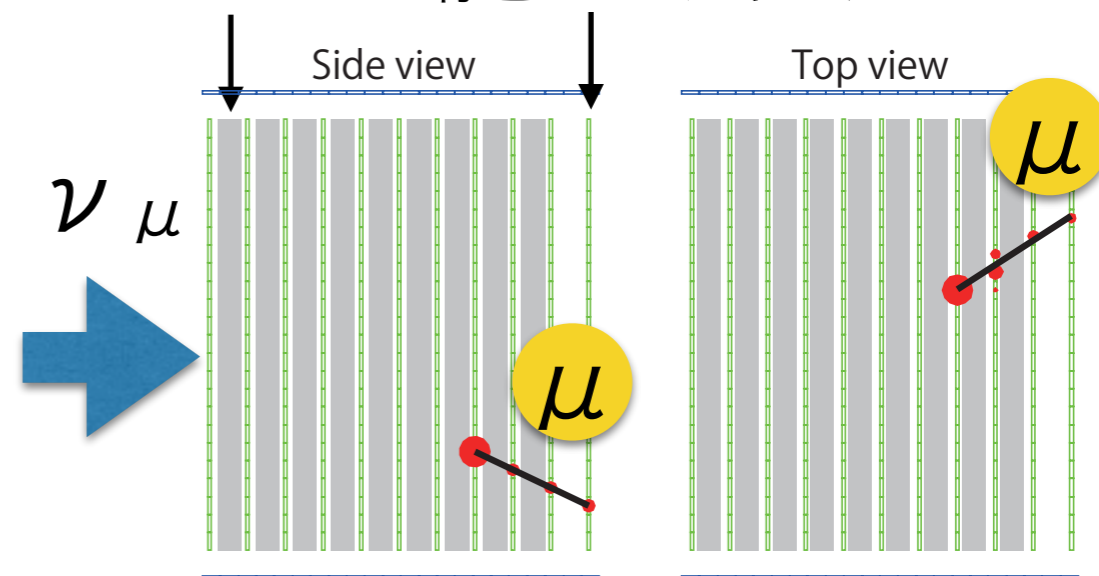
様々なオフアクシス角における295km離れた場所でのニュートリノエネルギー分布とそれに対応する振動確率

# INGRID検出器

- INGRIDはニュートリノビーム軸上に置かれたニュートリノビームの安定性と方向を測定するための検出器
- 鉄とシンチレータのサンドイッチ構造
- 鉄で起こったニュートリノ反応による二次粒子（主に $\mu$ ）の飛跡をシンチレータのヒット情報から再構成する
- 読み出しには光検出器MPPCを使用



灰色:鉄プレーン 緑色:トラッキングプレーン



イベントディスプレイ

# 反ニュートリノビーム測定

## イベントレート

ニュートリノビーム安定性の指標

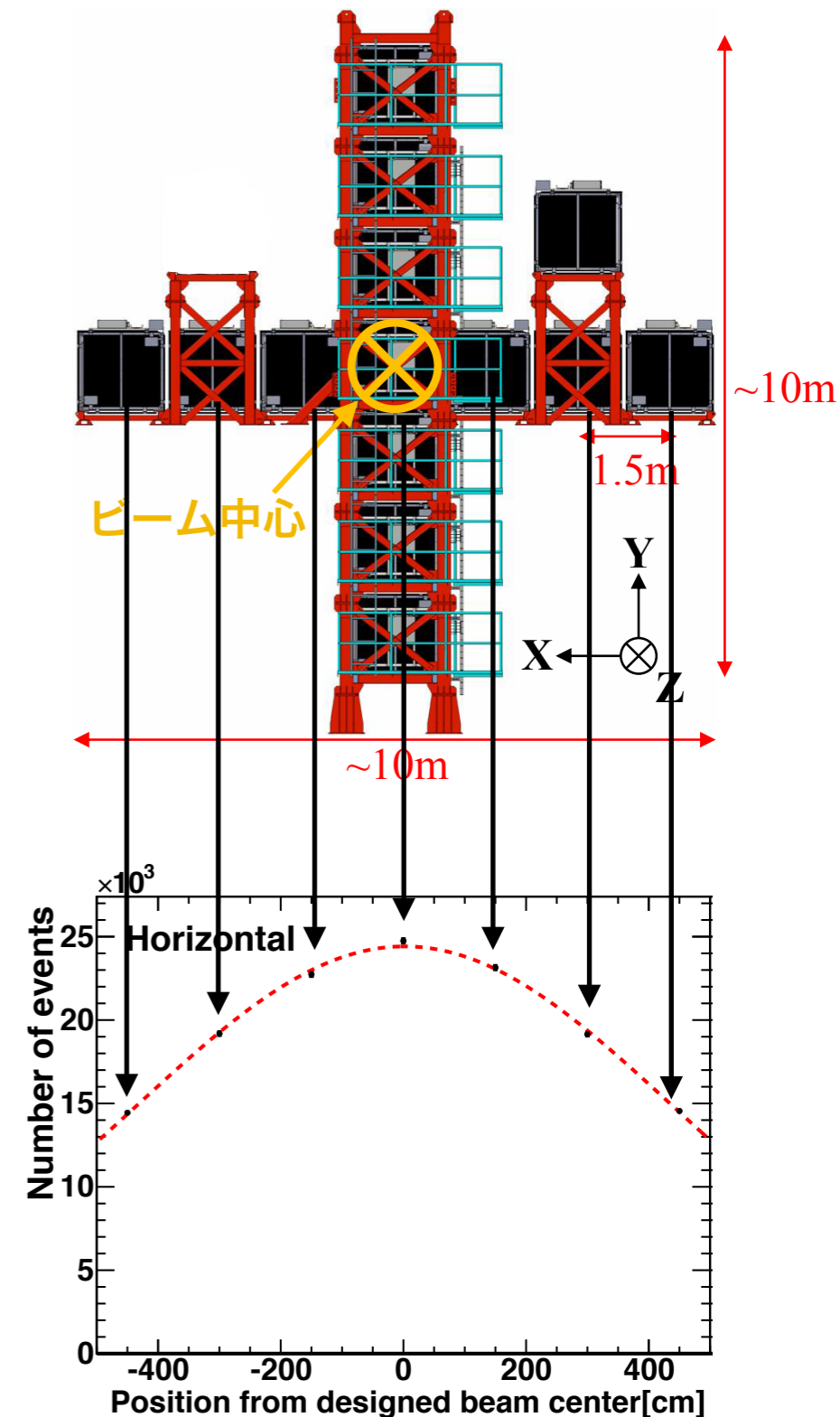
## ビームプロファイル

ビーム方向測定の結果は振動解析のInputとして用いられる

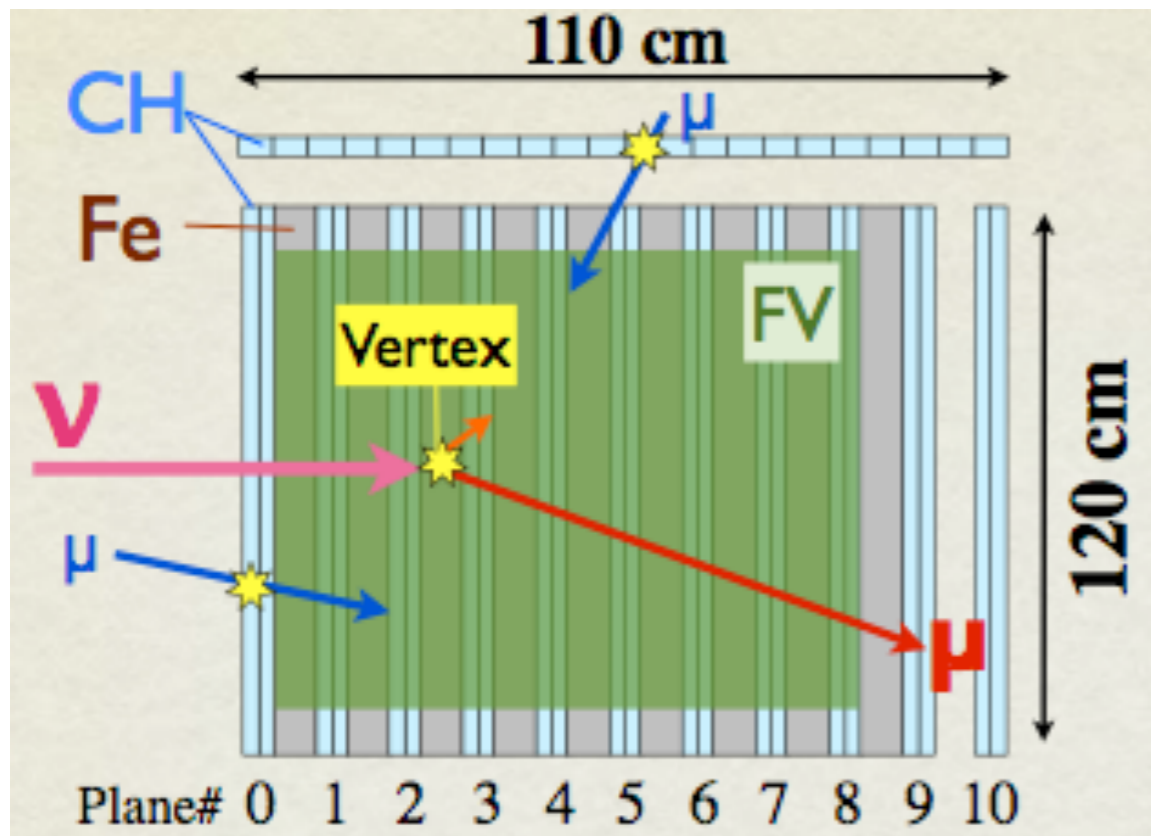
→1mrad(=28cm)より十分よい精度で測定することが必要

## データセット

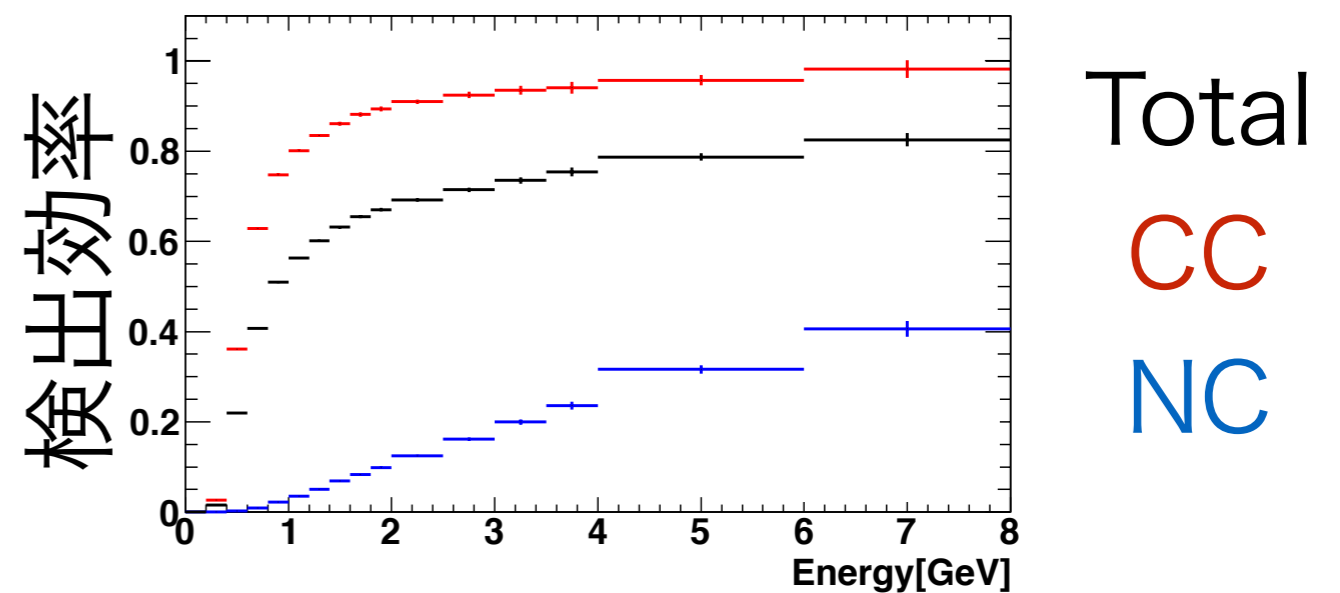
- 取得した統計は $5.09 \times 10^{19}$  POT (Proton On Target)
- データ取得期間中、MPPCのゲインや宇宙線の光量を監視し、INGRIDが安定に動作していることを確認した。



# イベントセレクション



反ミューオンニュートリノの検出効率

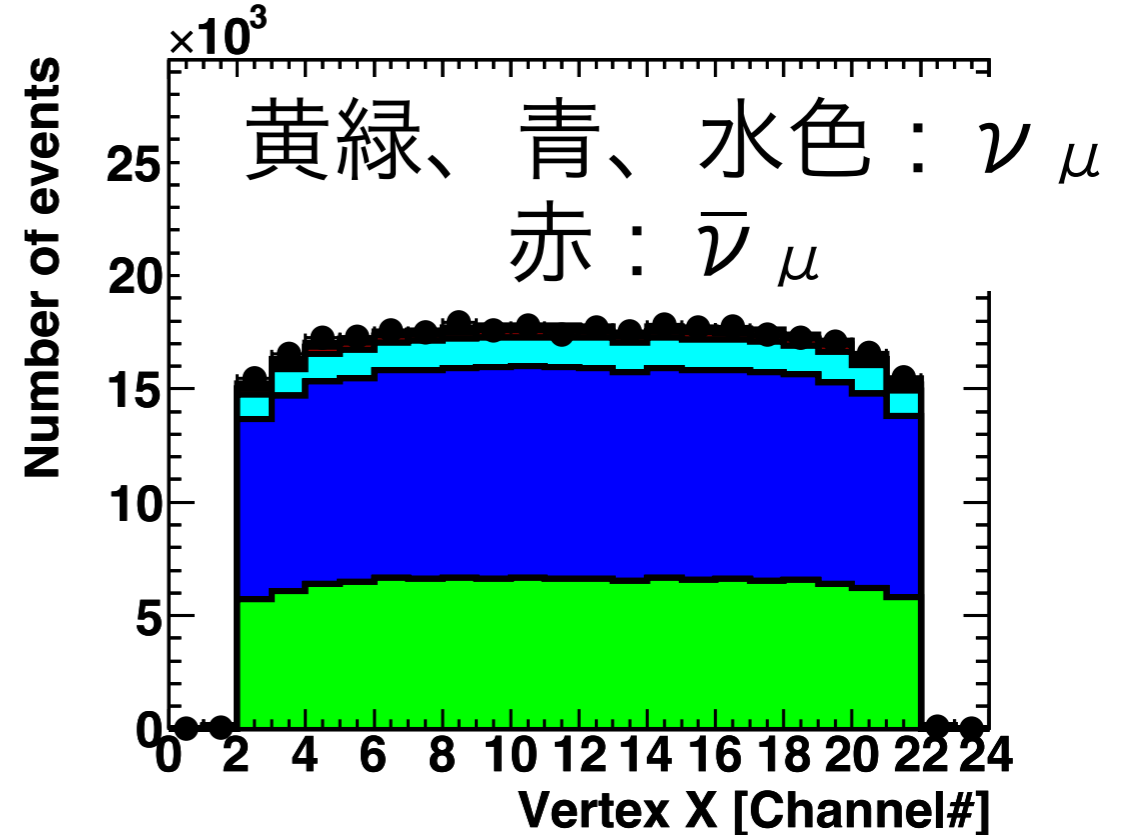
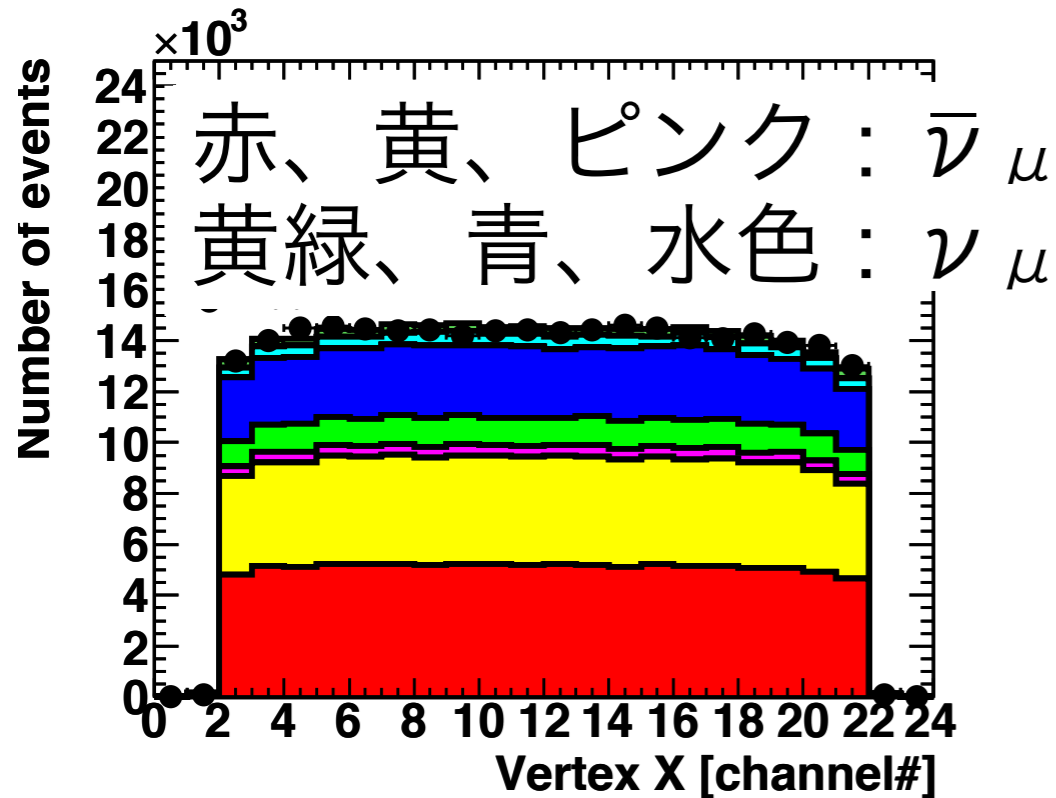


**ニュートリノ検出効率は~65%**

1. 飛跡の再構成と反応点の決定
2. VETO面から入ってきた粒子をカット
3. 反応点が有効体積(Fiducial Volume)にあることを要求

# 反ニュートリノビームとニュートリノビームの違い

- ヘリシティ抑制から  $\bar{\nu}_\mu$  の散乱断面積は  $\nu_\mu$  の 1/3
  - 反ミューニュートリノビームのイベントレートは小さくなる



反ニュートリノビームのときの反応点分布(X)      ニュートリノビームのときの反応点分布(X)

- 反ミューニュートリノビームにおいて  $\bar{\nu}_\mu$  事象数： $\nu_\mu$  事象数 = 2.3 : 1

# 系統誤差



# イベントレートの系統誤差

14モジュールすべての事象数  
に対する系統誤差

既存の方法で見積もった場合

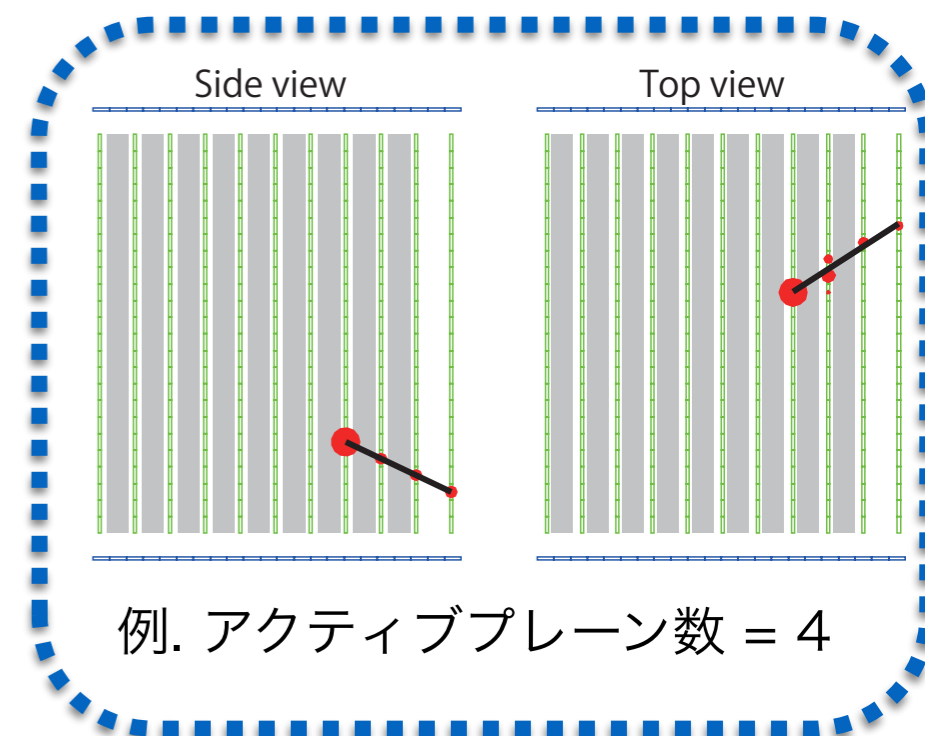
**最も大きい系統誤差  
削減を目指す**

項目	
鉄の質量	0.13
MPPCノイズ	0.58
ヒット効率	0.69
パイルアップ	0.23
ビーム由来のバックグラウンド	1.12
ビーム由来でないバックグラウンド	0.03
2次元飛跡の再構成	3.45
3次元飛跡マッチング	0.68
反応点の決定	0.20
ビームタイミングの選択	0.01
上流VETOカット	1.02
有効体積カット	0.42
総計	3.97

# これまでの二次元飛跡再構成 による系統誤差

$$\text{二次元飛跡再構成率} = \frac{\text{アクティブプレーン} \geq 3 \text{ かつ } x\text{レイヤー、}y\text{レイヤー両方に飛跡が存在}}{\text{アクティブプレーン} \geq 3}$$

	データ	MC	データ-MC
二次元飛跡再構成	97.46%	94.01%	3.45%



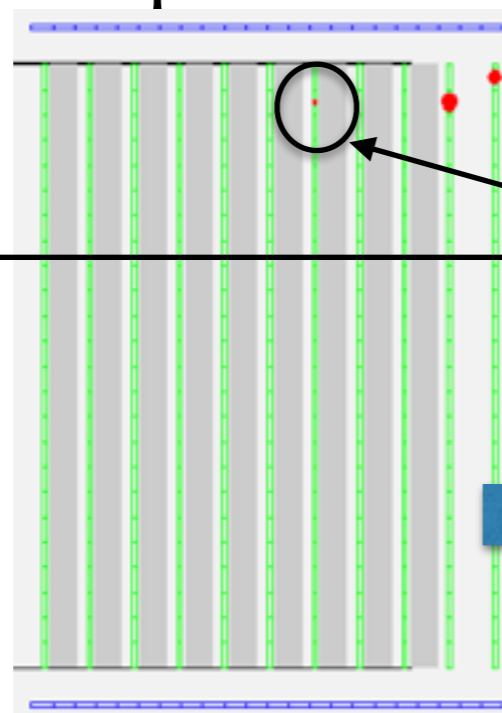
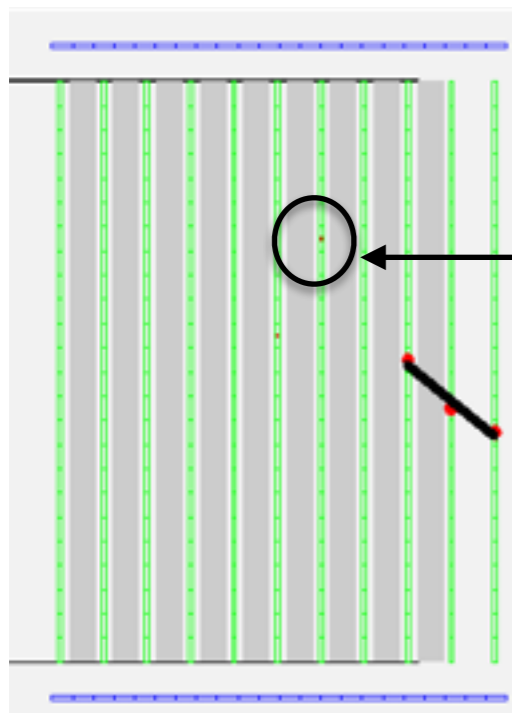
アクティブプレーン数	データ	MC	データ-MC
3	88.30%	75.65%	12.65%
4	98.43%	94.95%	3.45%
5	99.80%	99.16%	0.64%
6	99.98%	99.89%	0.09%
7	99.99%	99.99%	0%
8	100%	100%	0%
9	100%	100%	0%
10	100%	100%	0%

データとMCのずれは  
アクティブプレーン数=3  
のとき(飛跡が短いとき)  
に大きいことがわかった  
→原因を調べる

# 系統誤差を生む原因

1. MPPCノイズの影響
2. バックグラウンドフラックス
3. 検出器内シミュレーションで用いているGeant4の  
Physics List(物理モデル)

例.MPPCノイズの影響  
side view      top view



ノイズが同じプレーンに存在

アクティブプレーン=3

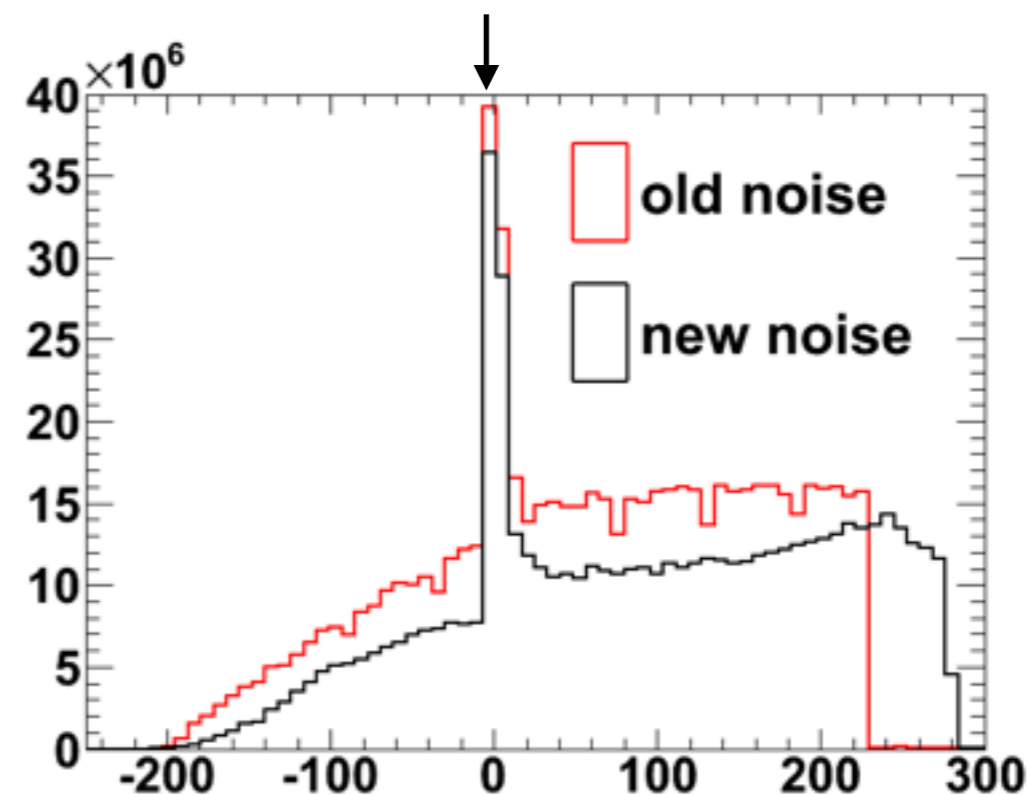
だが、ノイズの影響でtop viewで  
飛跡が再構成できない

# ノイズシミュレーション

## ビームタイミング

- ・ 今までのノイズシミュレーションの問題点
  - ・ 全モジュールに同一のノイズレートでシミュレート
  - ・ ノイズの時間分布を二次関数でFitして、実データのノイズ分布と異なる

- ・ 新しいノイズシミュレーションの特徴
  - ・ モジュールごと、チャンネルごとにデータとMCでノイズレートが合う
  - ・ 光量分布、時間分布がデータと同じ形を再現する



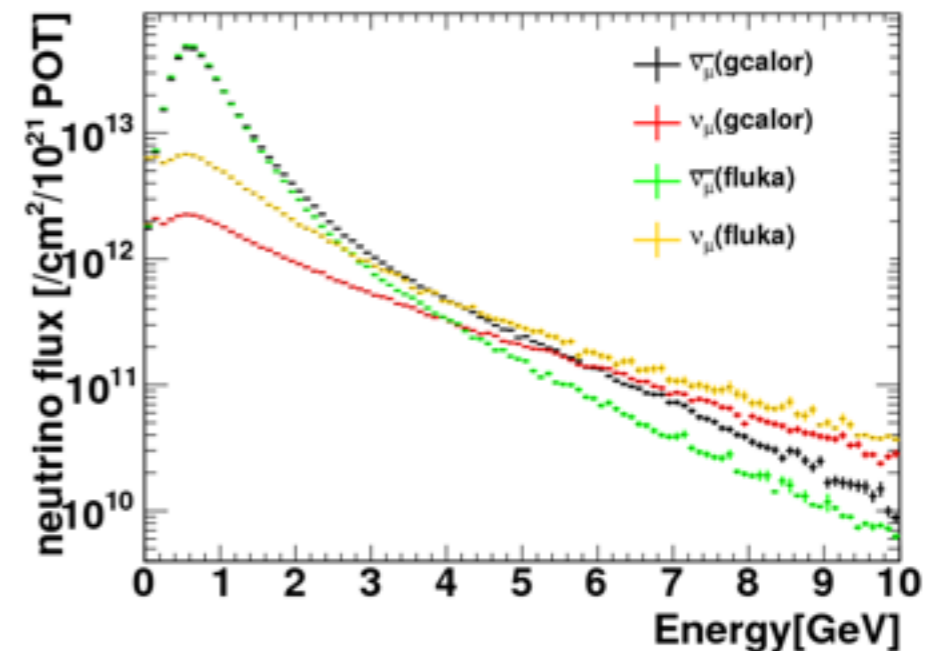
旧ノイズと新しいノイズ  
の時間分布(MC)



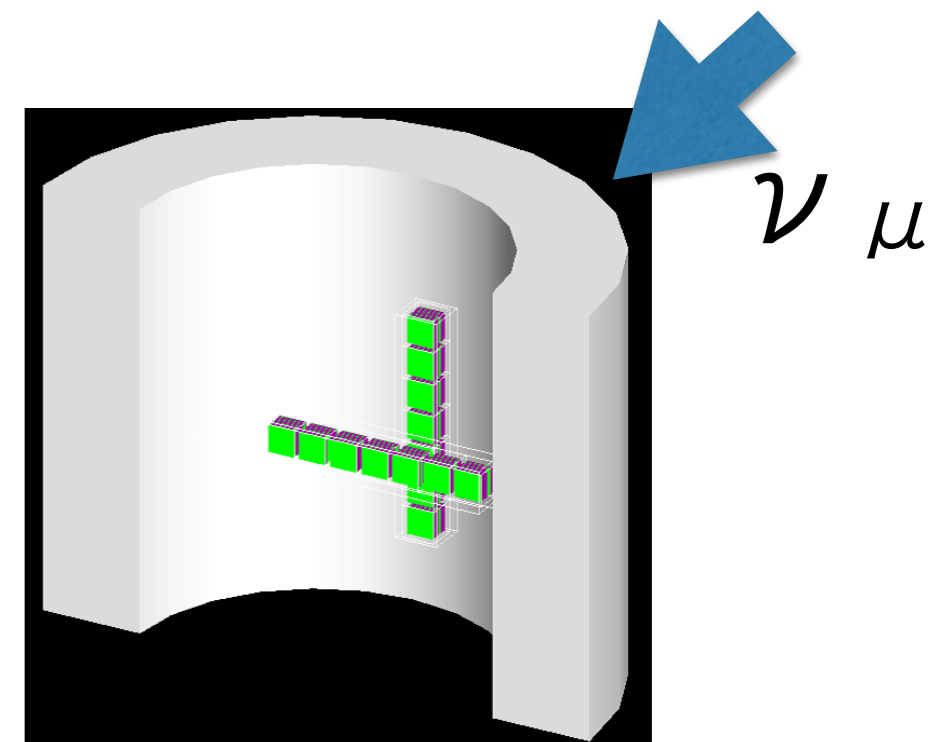
ノイズの影響が減少するのを確認

# バックグラウンドフラックス

- INGRIDのバックグラウンドの主な原因はINGRID上流の壁で生成された中性子、 $\gamma$ 線
  - 中性子や $\gamma$ 線による飛跡はミュオンに比べ飛跡の再構成に失敗しやすい  
→**2次元飛跡再構成率の低下**
- 陽子ビームを炭素ターゲットに入射した際のシミュレーションに用いるモデルを変更した
  - 今まで、簡単のためバックグラウンドフラックスの生成にはGCALORを用いていた
  - 今回、NA61の実測値を再現するFLUKA2011を用いてバックグラウンドの影響を見積もった



GCALORとFLUKAのフラックス分布

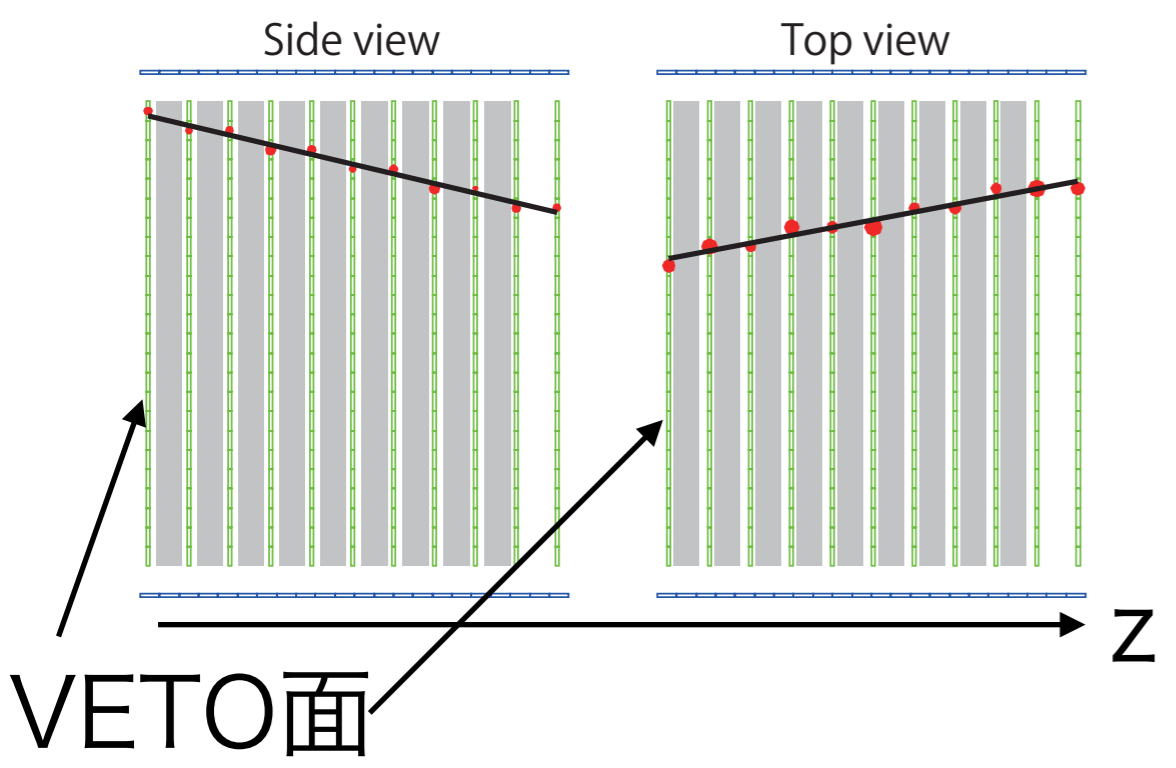


INGRIDと前置検出器ホールの壁

# FLUKAの妥当性

## サンドミュオンを用いたバックグラウンドの規格化

壁におけるニュートリノ反応によって生成されたミュオンがINGRIDに飛跡を残す  
VETO面にヒットがある



バックグラウンド事象数はサンドミュオンの事象数がデータとモンテカルロで合うように規格化している

	規格化定数	バックグラウンドの割合
GCALOR	0.69	2.67
<b>FLUKA</b>	<b>1.16</b>	<b>2.03</b>

- ・ FLUKAのほうが規格化定数が1に近い！
- ・ バックグラウンドの割合も変化した

# 改善の結果

項目	系統誤差	減少度
鉄の質量	0.13	
MPPCノイズ	0.58	
ヒット効率	0.69	
パイルアップ	0.23	
ビーム由来のバックグラウンド	0.66	-0.56
ビーム由来でないバックグラウンド	0.06	
2次元飛跡の再構成	2.23	-1.22
3次元飛跡マッチング	0.68	
反応点の決定	0.20	
ビームタイミングの選択	0.01	
上流VETOカット	0.57	-0.45
有効体積カット	0.32	
総計	2.69	-1.28

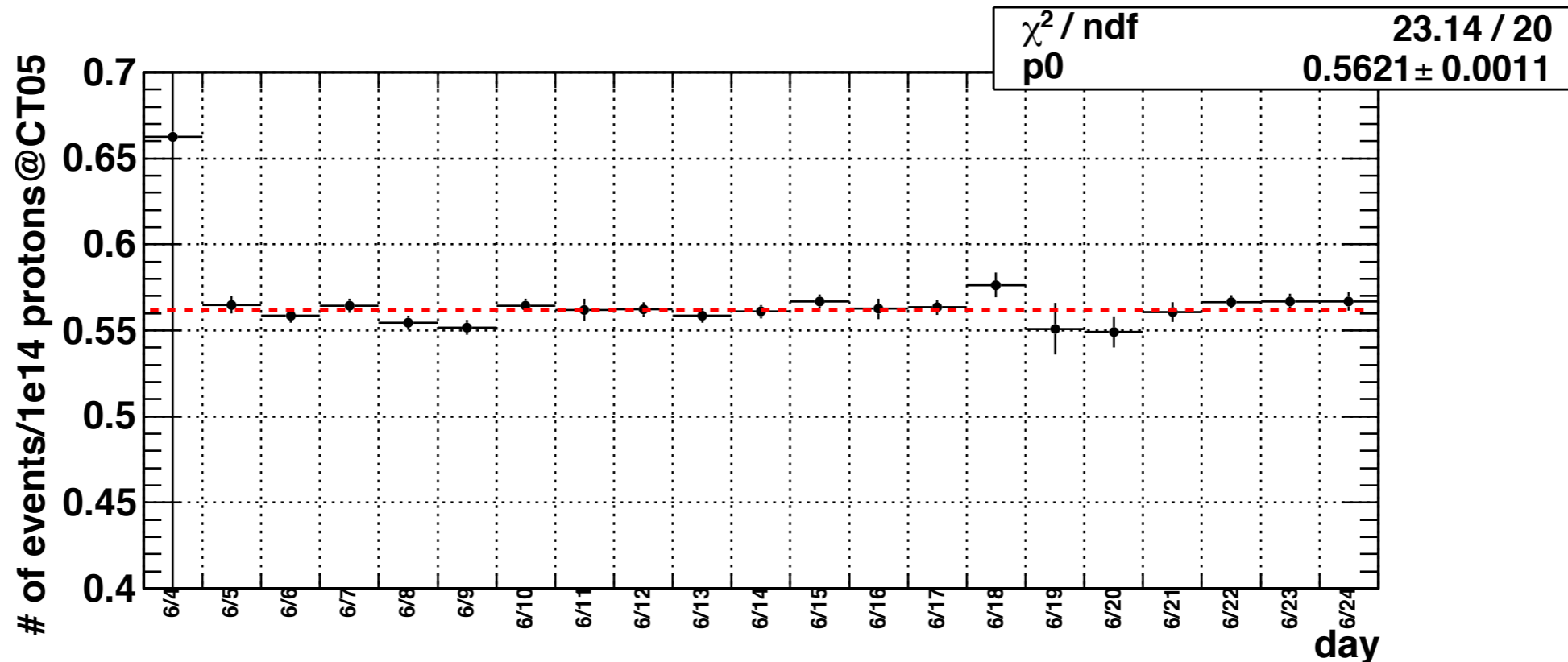
・ 1.28%の系統誤差の削減に成功

・ 改善した値を用いてイベントレートとビーム方向の測定を行った

イベントレートと  
ビームプロファイル

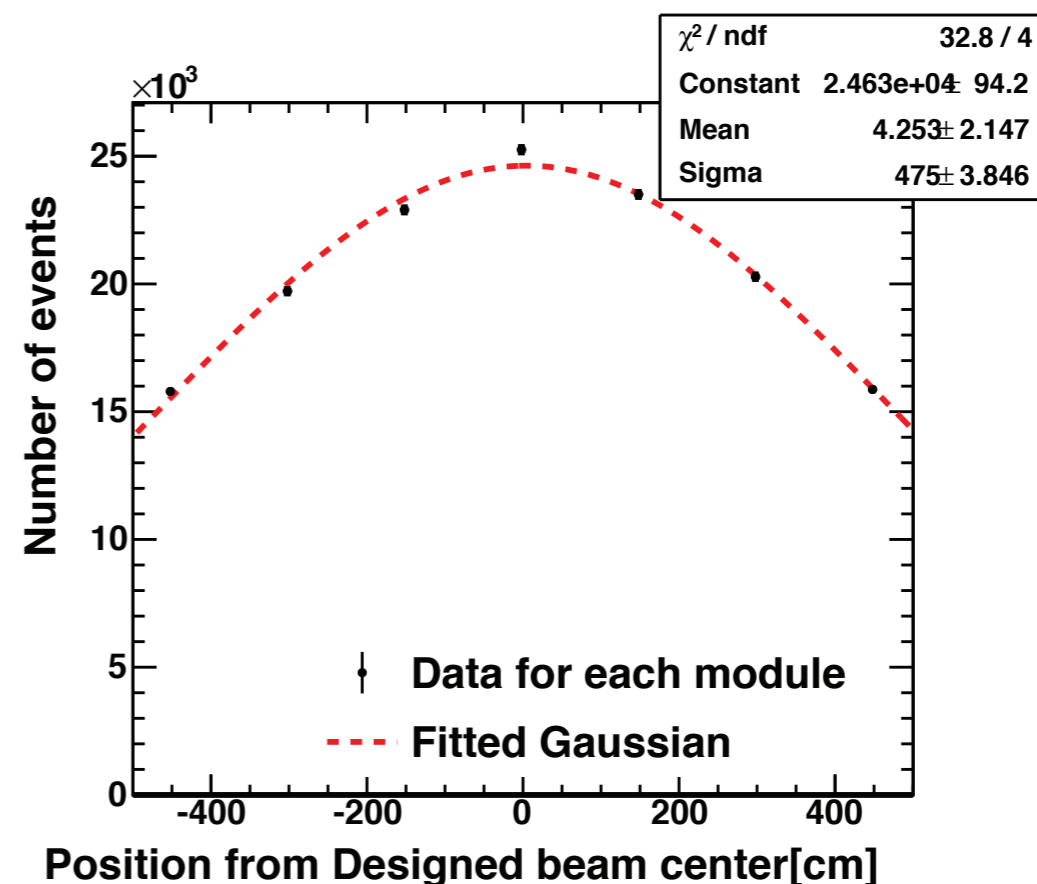
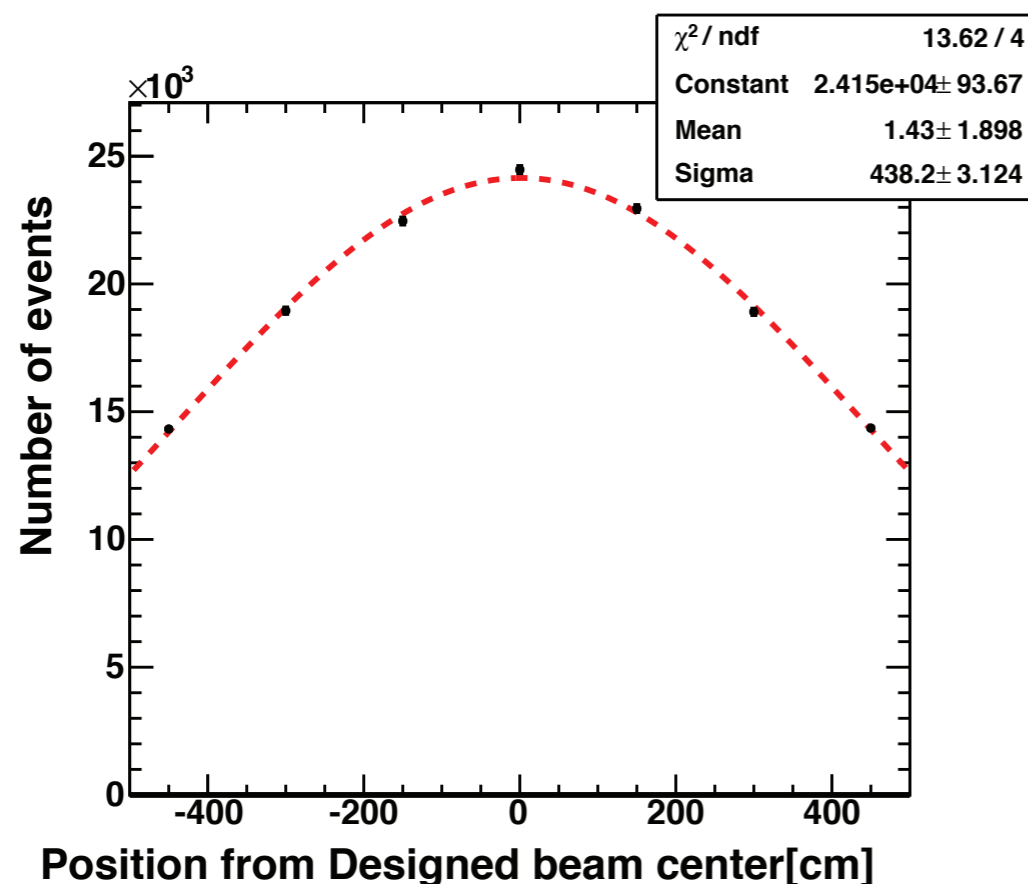


# イベントレート



- ・ イベントレート =  $0.562 \pm 0.001$  (stat.) events/ $10^{14}$  POT
- ・ データ / MC =  $1.003 \pm 0.002$  (stat.)  $\pm 0.040$  (syst.)
- ・ 期間中は0.34%以内で安定
- ・ 反ニュートリノビーム取得前後のニュートリノビームのイベントレートが安定していることも確認した
- ・ (ニュートリノビームのイベントレートは $1.72$  event/ $10^{14}$  POT)

# ビーム方向



	ビーム中心 [cm]	ビーム幅 [cm]
水平方向	$1.4 \pm 1.9(\text{stat.}) \pm 6.9(\text{syst.})$	$438.2 \pm 3.1(\text{stat.})$
鉛直方向	$4.3 \pm 2.1(\text{stat.}) \pm 8.1(\text{syst.})$	$475.0 \pm 3.8(\text{stat.})$

ビームのずれは28 cm (1 mrad) より小さい

→T2Kの解析のための物理的な要請を満たしていることを確認

# まとめ

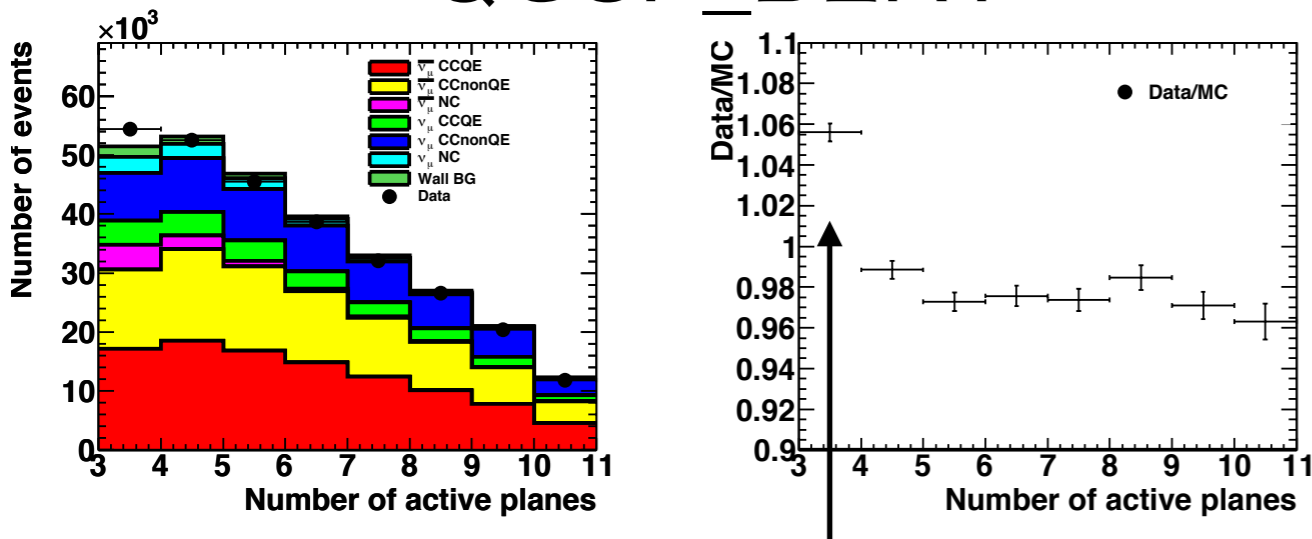
- ・ T2K実験は、ニュートリノのCP対称性の破れの兆候を探すため、2014年6月より反ニュートリノビームを用いた長基線ニュートリノ振動の測定を開始した
- ・ J-PARCで生成される反ニュートリノビームを、INGRID検出器を用いて評価した
- ・ INGRID検出器を用いてニュートリノビームのイベントレート、ビーム方向を測定した
  - ・ 期間中イベントレート、方向が安定していることを確認した
  - ・ ビーム方向のずれはT2Kの解析に用いられる基準( $< 28$  cm)を満たしていることを確認した

Back Up

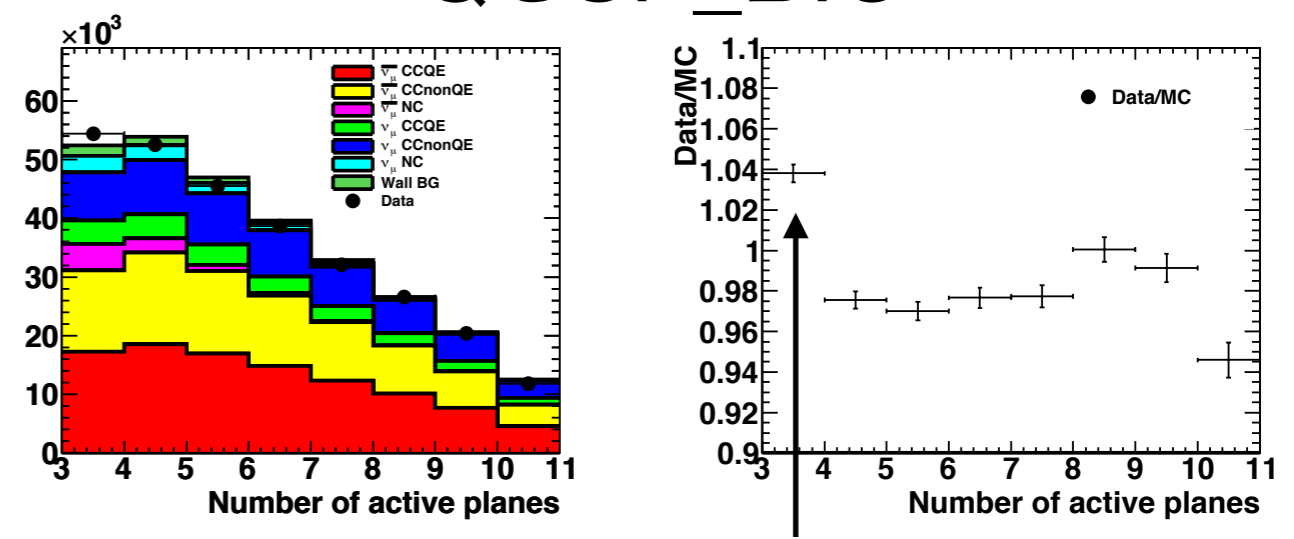
# これから

- ・ 系統誤差の削減に向けて
- ・ 二次元飛跡再構成率がデータとMCで2.24%異なる  
->これが最大の誤差を生んでいる。  
この違いは、アクティブプレーン=3で生じている。
- ・ アクティブプレーン数=3のイベント数はGeant4のPhysics Listの影響を受けやすい
- ・ 今後はGeant4のPhysics Listを検証する。

## QGSP\_BERT

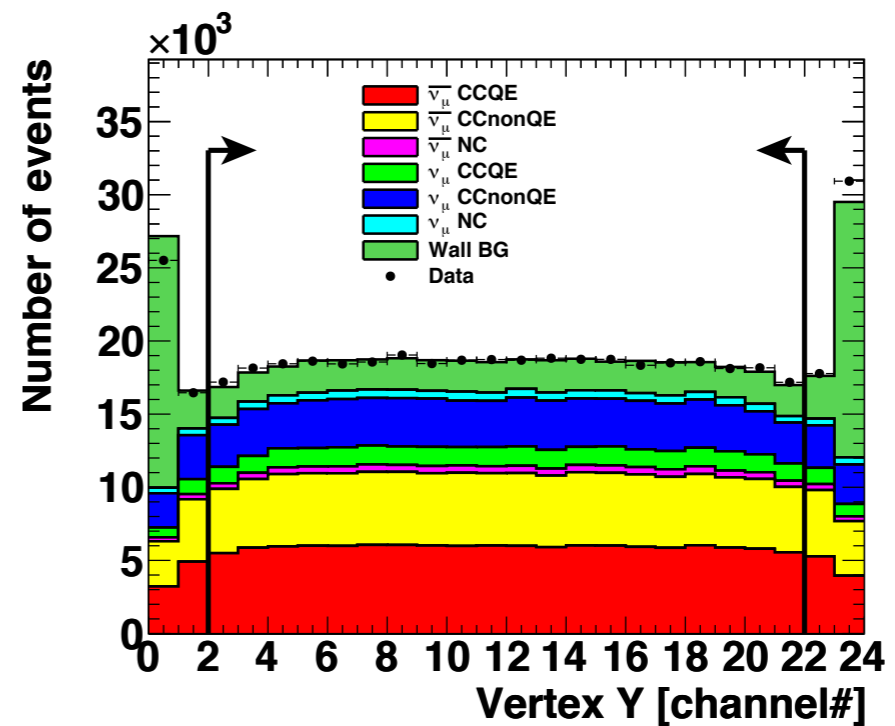
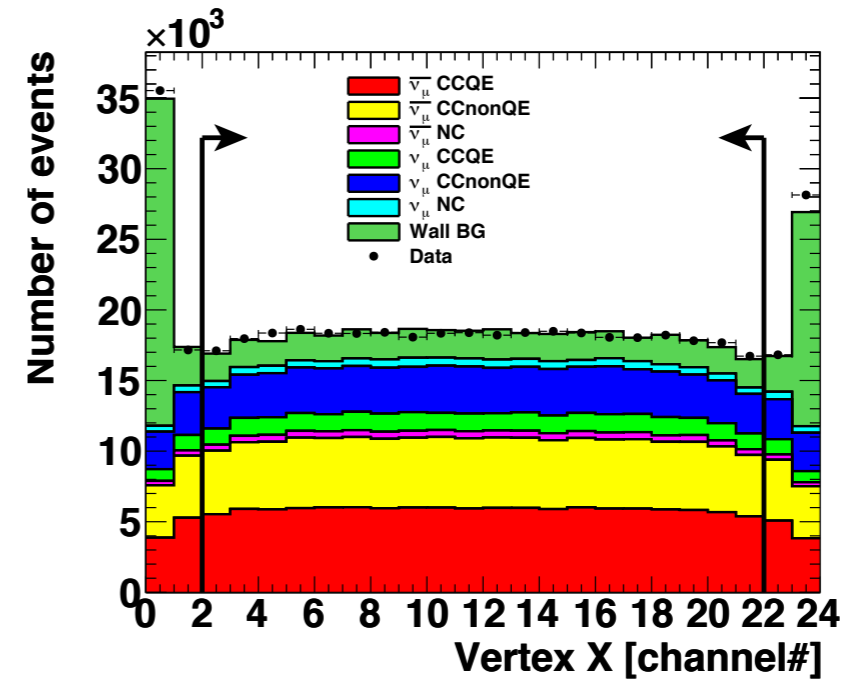
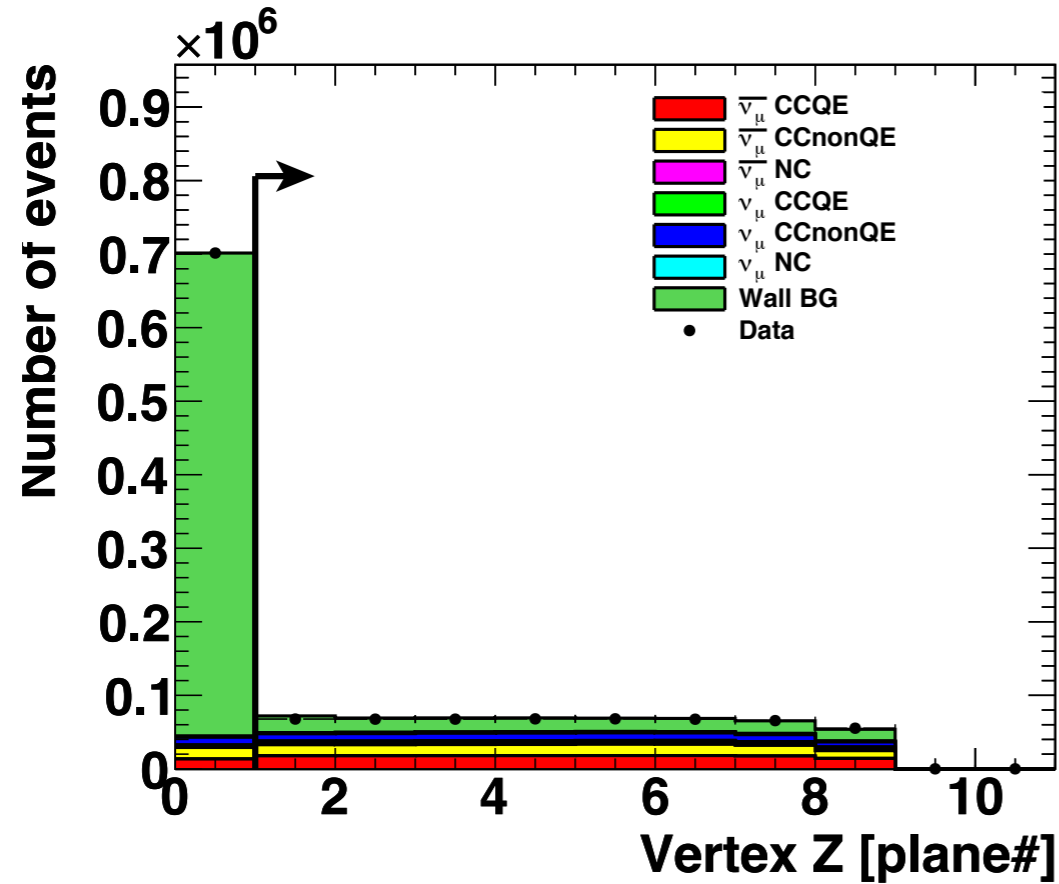


## QGSP\_BIC

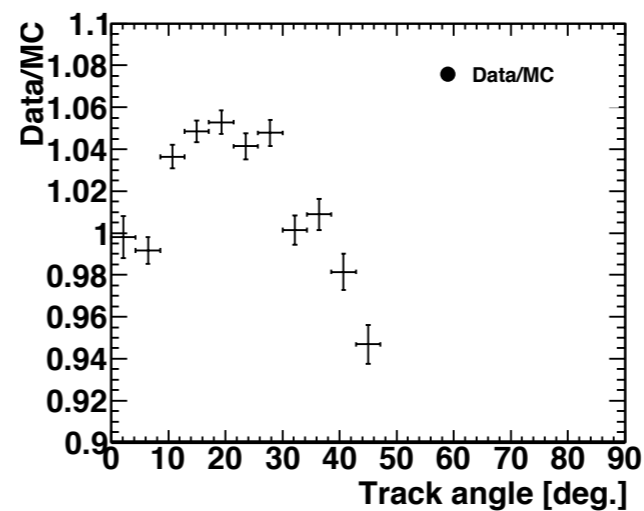
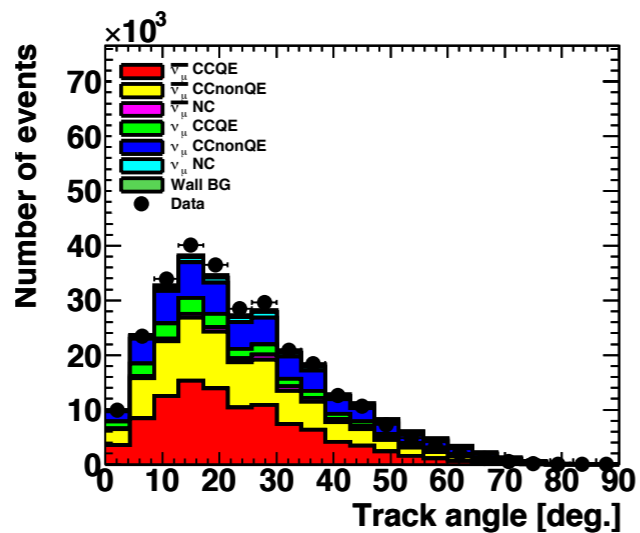
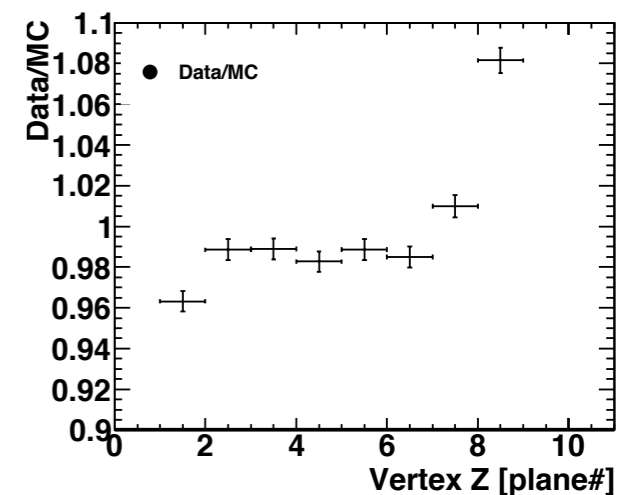
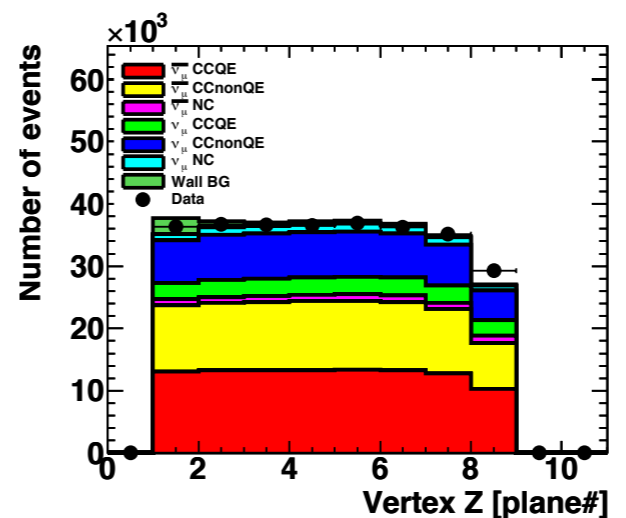
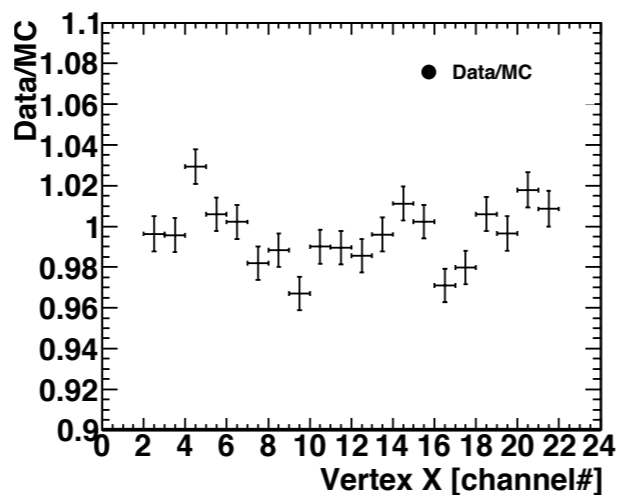
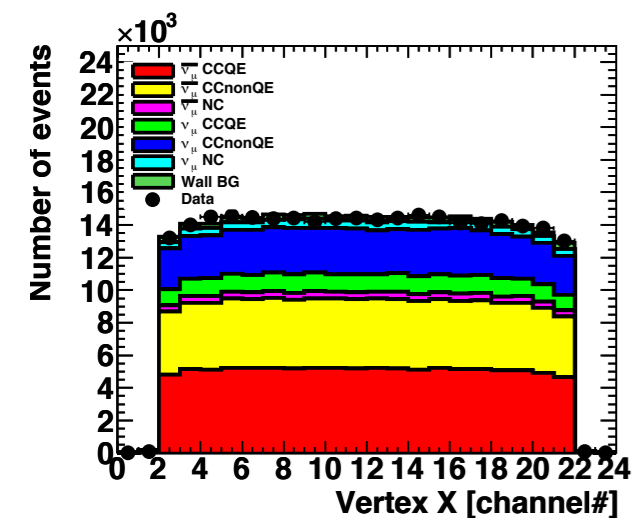
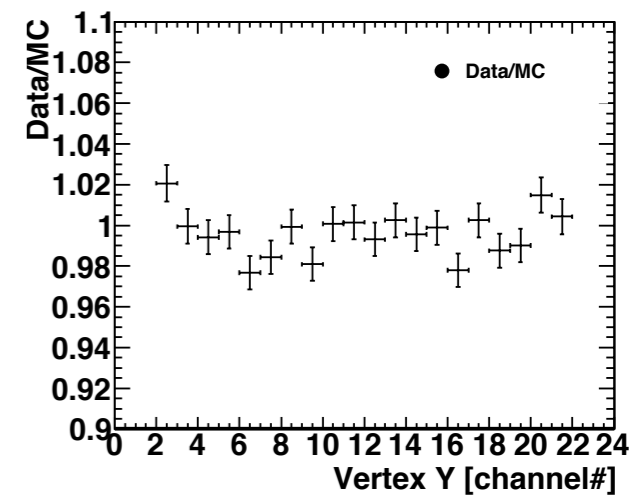
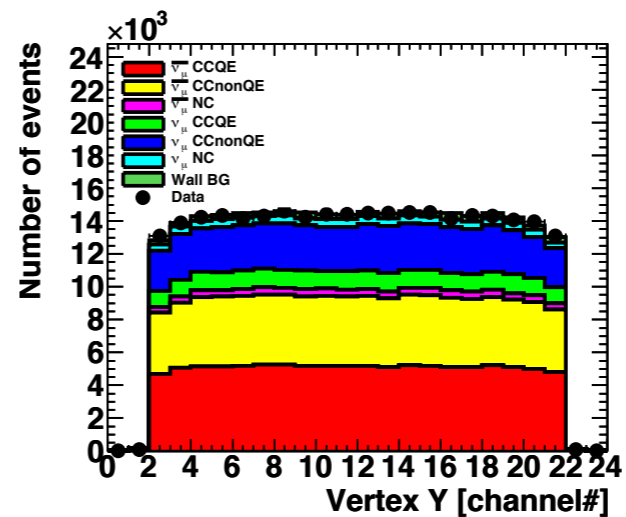
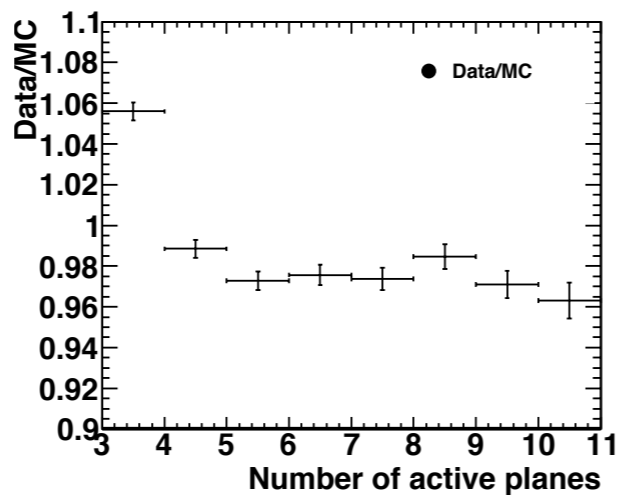
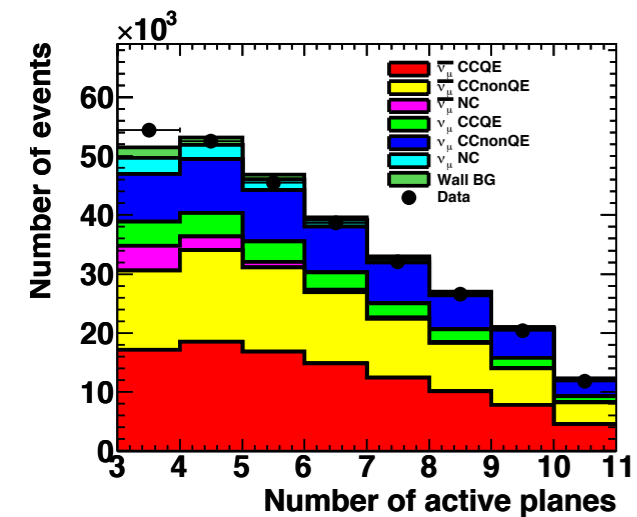


アクティブプレーン数=3のビンが~2%変化した。

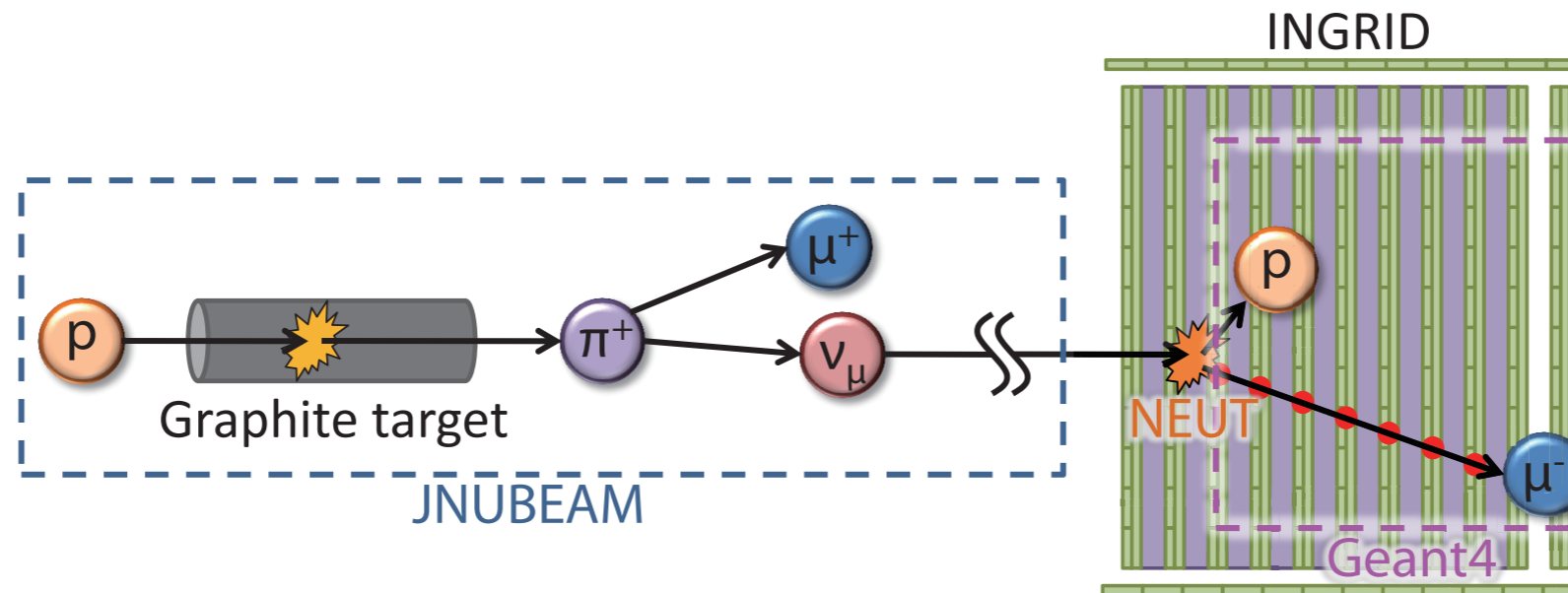
# VETO&有効体積カット



# 基本分布



# モンテカルロ・シミュレーション

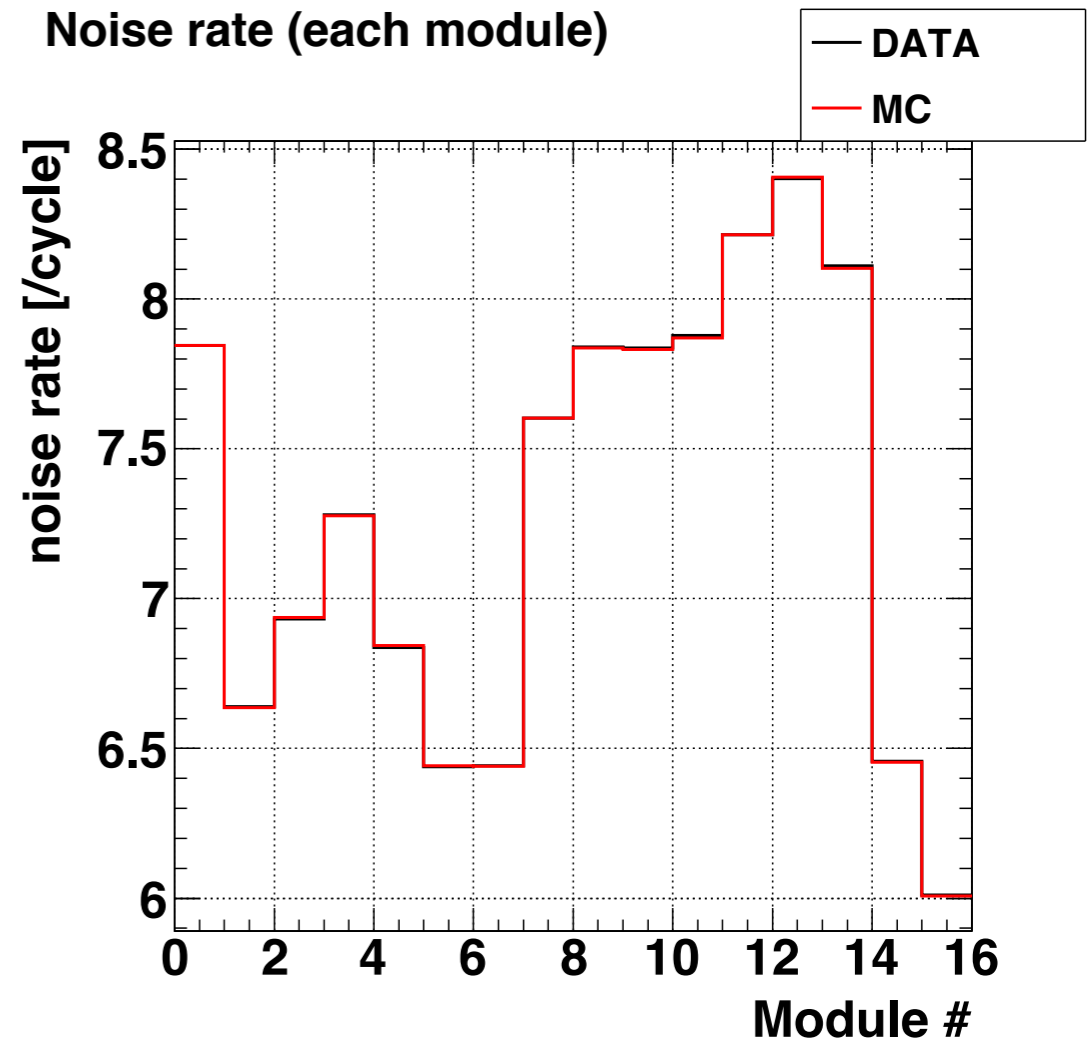


- ・ ニュートリノの生成 (JNUBEAM)  
INGRIDの位置でのニュートリノフラックスを求める
- ・ ニュートリノ反応 (NEUT)  
鉄とニュートリノが反応し、どのような粒子が生成されるかシミュレーション
- ・ 検出器シミュレーション (Geant4)



# ノイズシミュレーション

- ・ 2014年6月のランは以前に比べMPPCノイズレートが高かった
- ・ 以前のノイズシミュレーションは光量をPoisson分布、TDC分布を二次関数でFitして再現。
  - ・ すべてのモジュールで同じレートのノイズを使用
- ・ データにより合ったノイズを作成
- ・ モジュールごと、チャンネルごとのノイズ

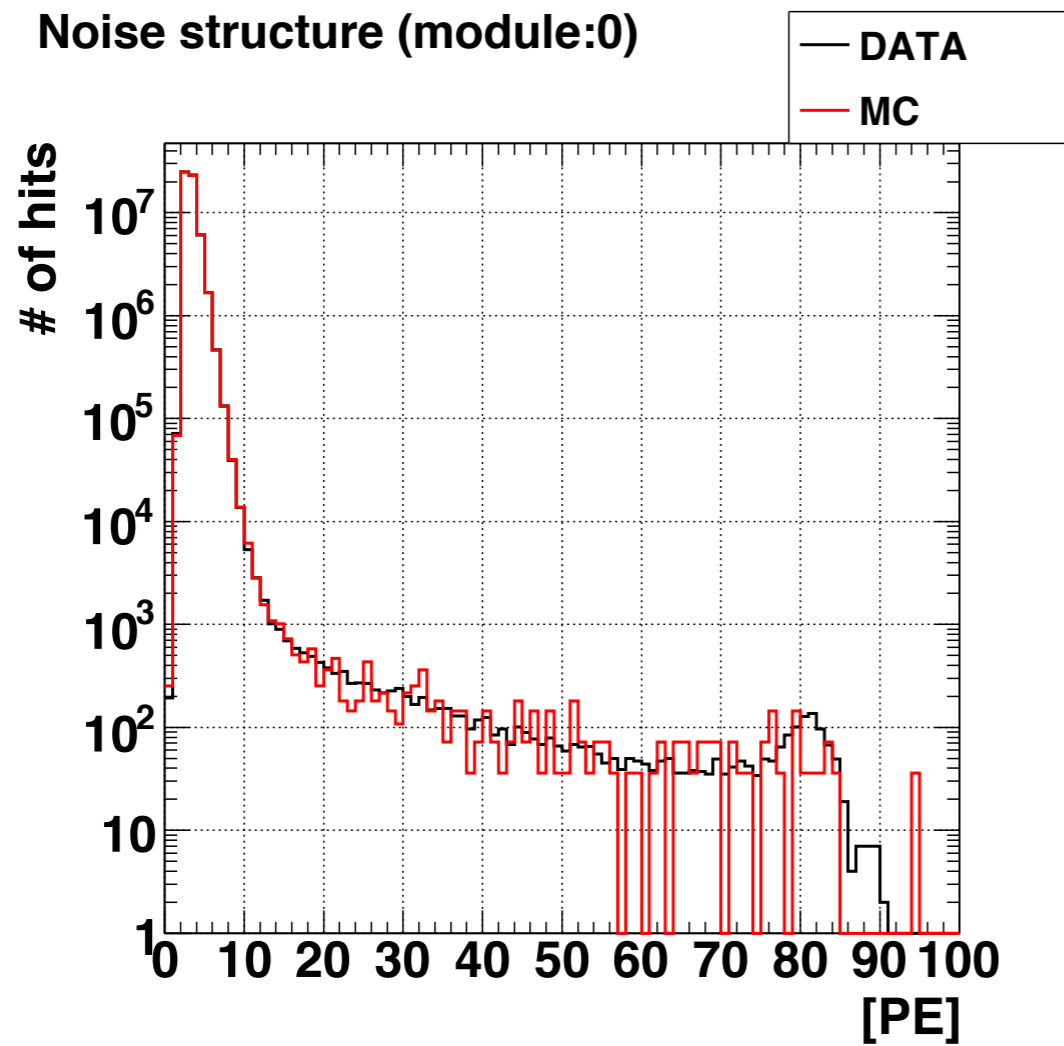


モジュールごとのノイズレート

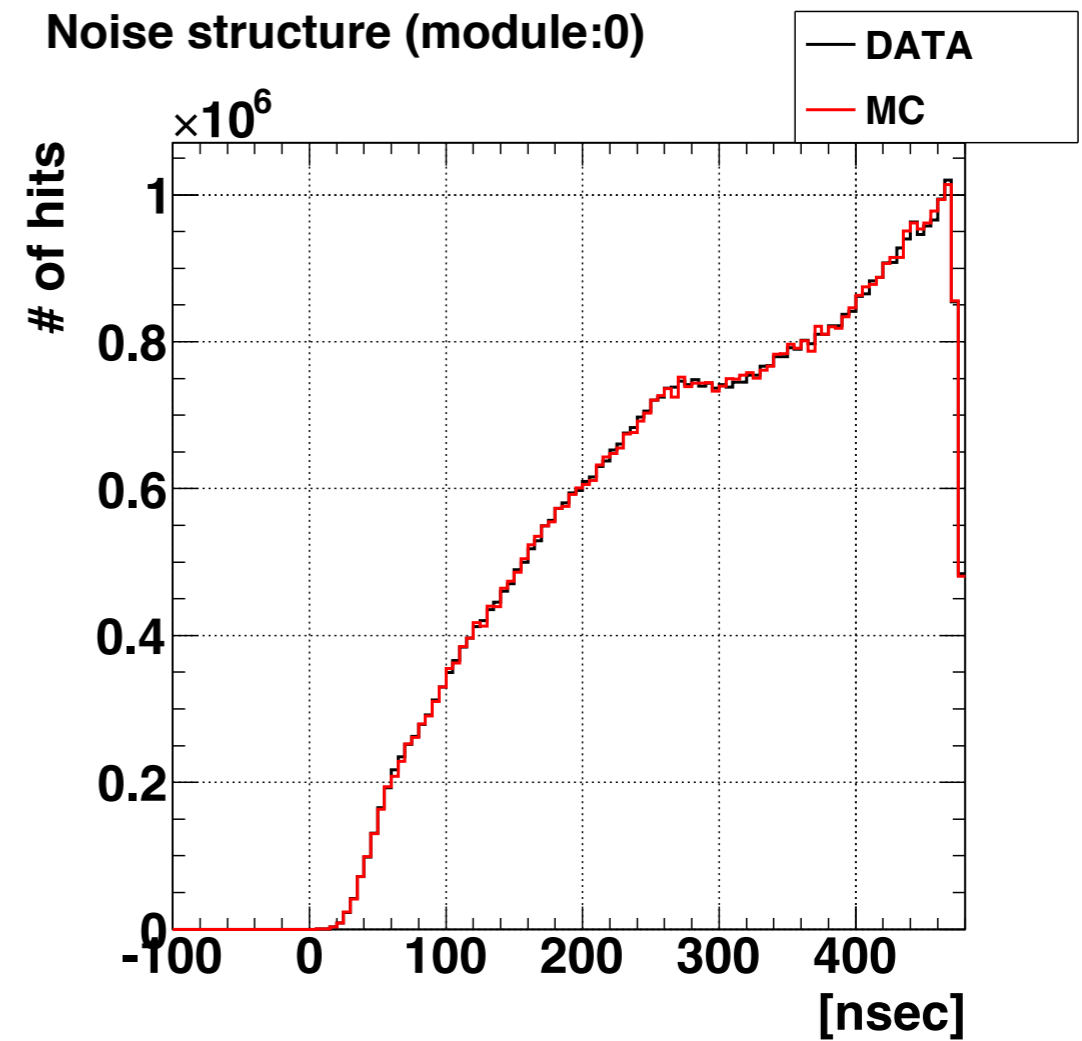
アップデートした

ノイズシミュレーション

# ノイズシミュレーション



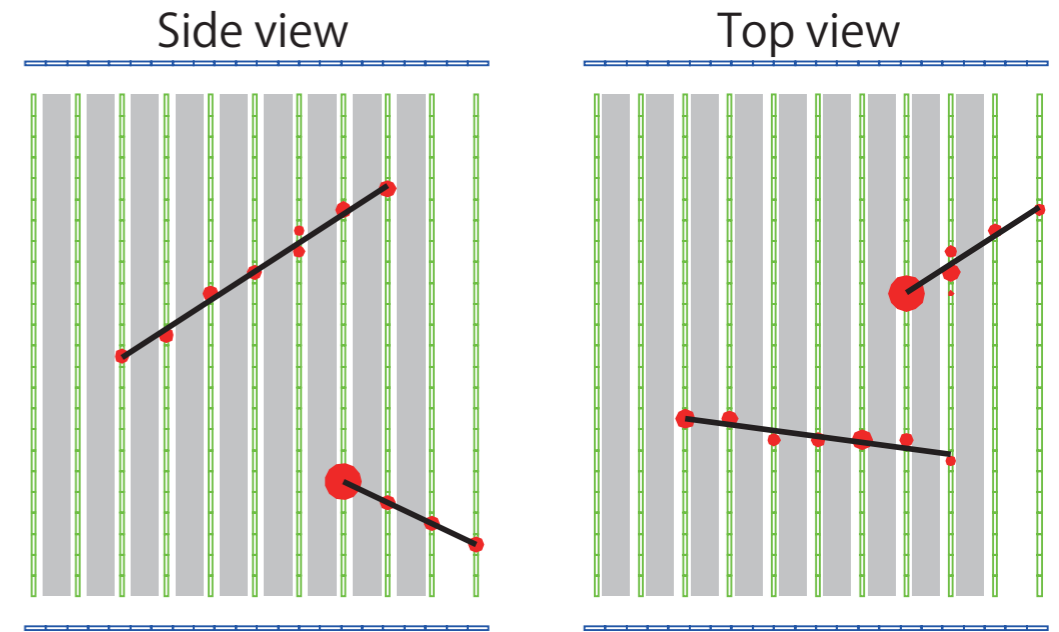
光量分布



ノイズのTDC分布

# イベント・パイルアップに対する事象数の補正

- 右図のように同時に2つのイベントが再構成されることをイベントパイルアップという
- 2つの飛跡がオーバーラップする場合、反応点の決定に失敗することがある  
→ イベント数に与える効果をモジュールごとに補正



イベントパイルアップの起こる確率は  
バンチあたりのPOT数に比例する

$$N_{corr} = \frac{N_{sel}}{1 - C_{loss} n_{ppb}}$$

$N_{corr}$  : 補正後のイベント数

$N_{sel}$  : 補正前のイベント数

$C_{loss}$  : POTあたりのイベントをロスする確率

$n_{ppb}$  : バンチあたりのPOT数

~1%の補正

# その他の補正

- 鉄の質量

各モジュールの鉄の質量(実測値)はデザイン値からずれている

- バックグラウンド

- デッドチャンネル

デッドチャンネルによって、イベントの検出効率が変化する

$$N_{cor} = \frac{N_{sel}}{1 + C}$$

$N_{sel}$  : 選択されたニュートリノ候補事象数  
 $C$  : 補正定数

## 3つの補正の総計

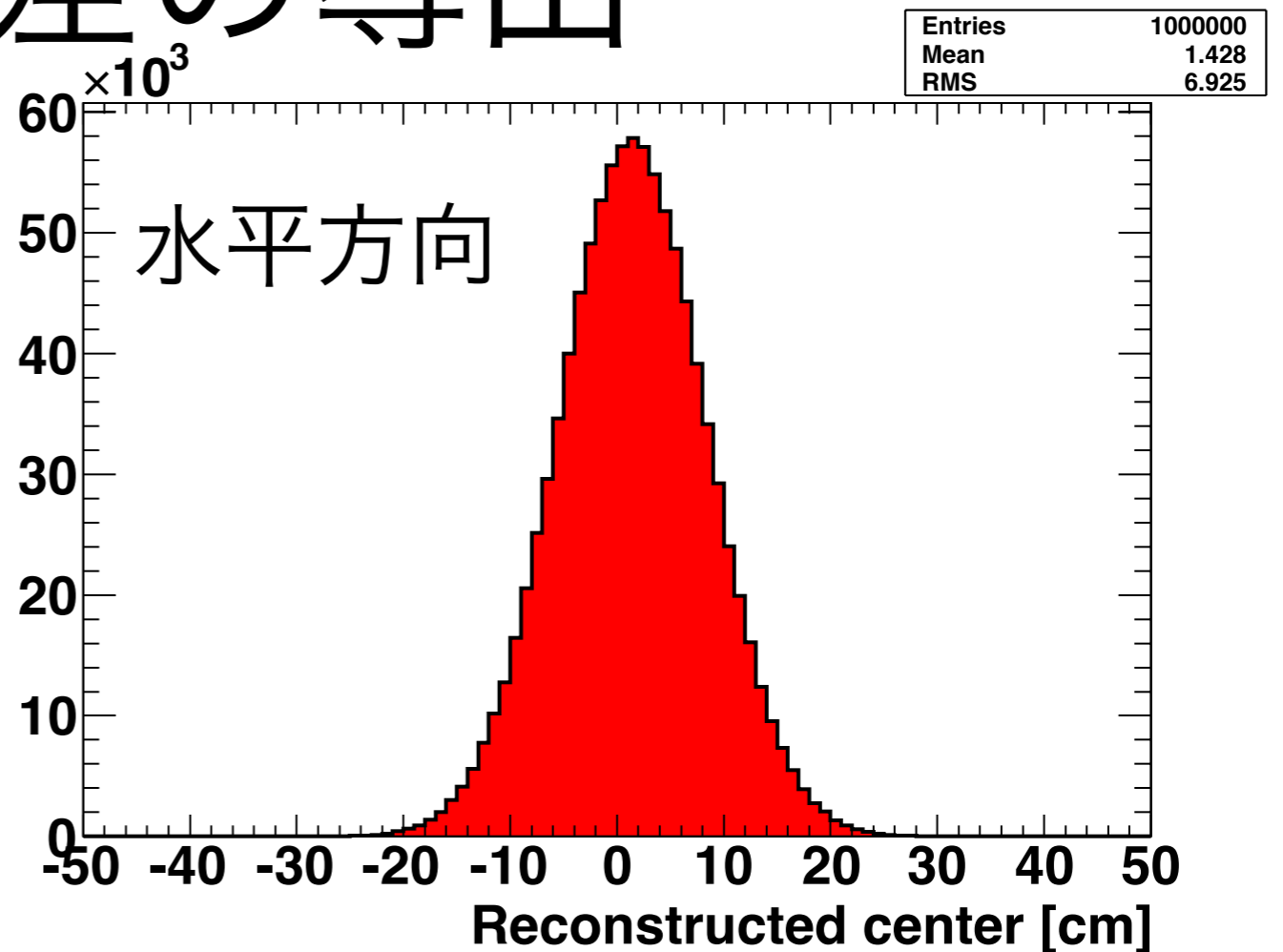
ビームプロファイルに使用  
(イベントレートの測定には使用しない)

モジュール	0	1	2	3	4	5	6
補正定数 [%]	-0.80	1.81	2.03	2.18	1.95	1.09	2.69

モジュール	7	8	9	10	11	12	13
補正定数 [%]	1.54	2.00	2.40	0.85	1.80	0.56	0.99

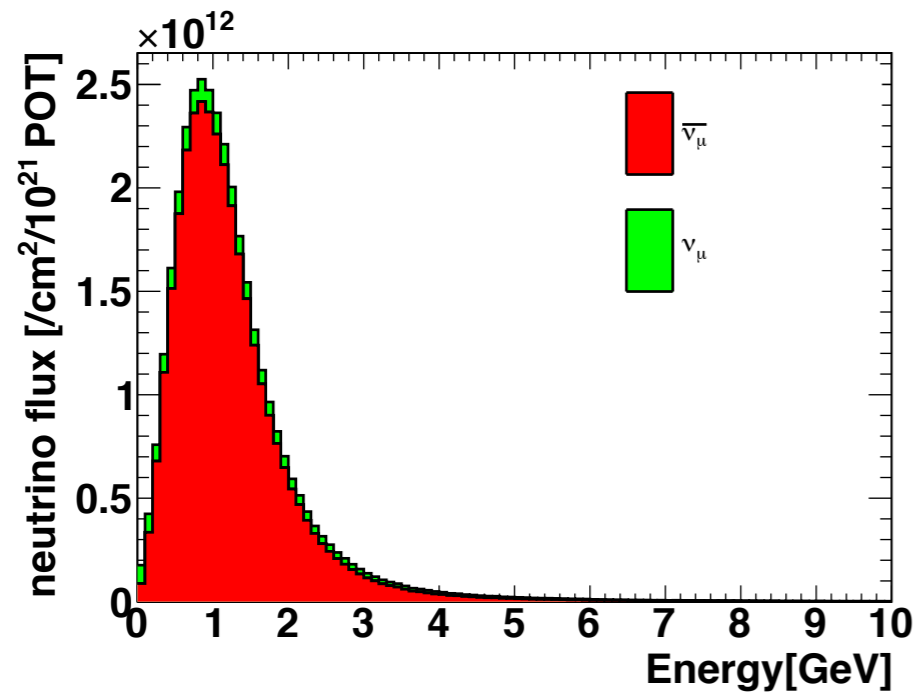
# toyMCを用いたビーム方向の 系統誤差の導出

- 各モジュールでのイベント数と系統誤差2.80%をinputとする
- 各モジュールのイベント数を2.8%の範囲で変化させ、1000000個のプロファイルを作成
- 再構成されたビーム中心分布を作成し、RMSをビーム方向の系統誤差とする

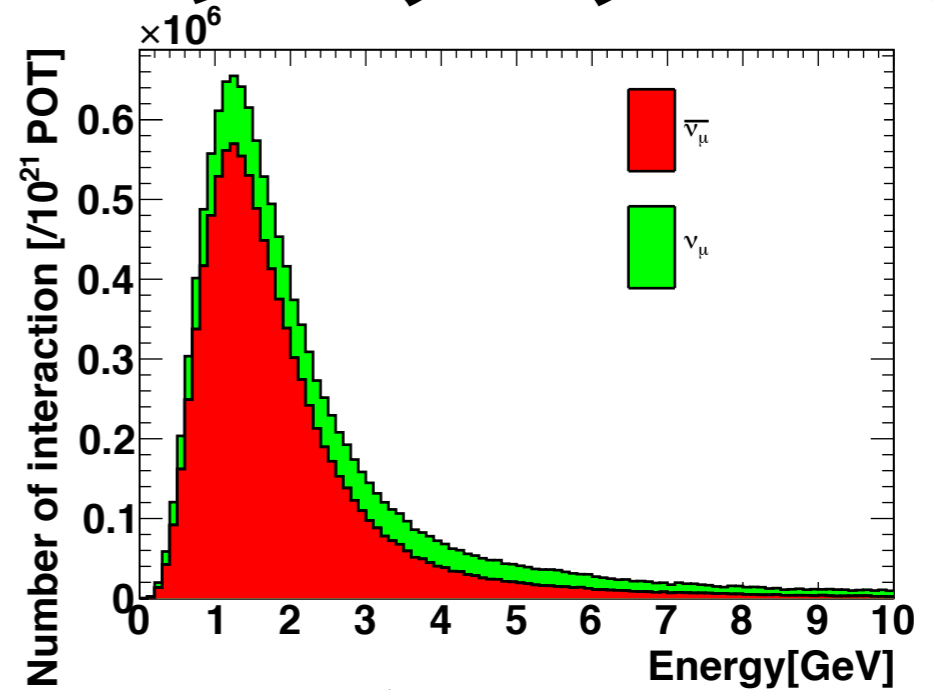


水平方向のビーム中心の  
系統誤差は6.9cm

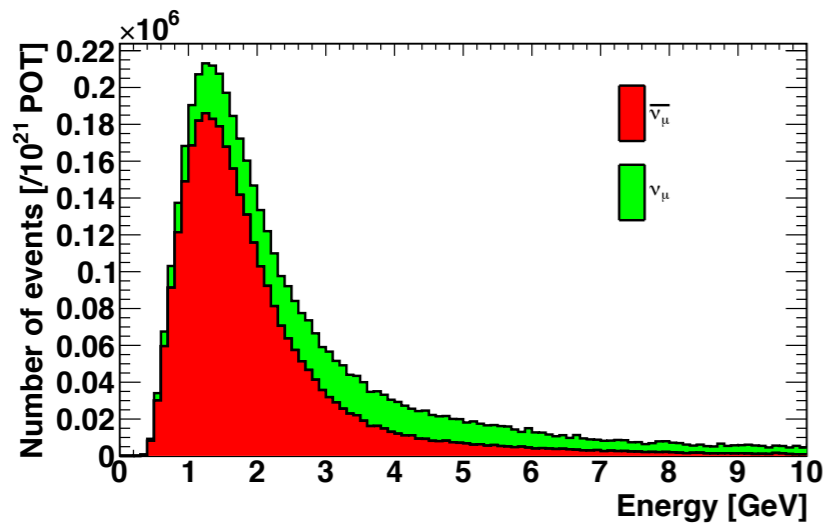
# ニュートリノフラックス



INGRIDでのニュートリノフラックス  
 $\bar{\nu}_\mu / \nu_\mu = 12.6$



INGRIDモジュールで反応した  
 ニュートリノ反応数  
 $\bar{\nu}_\mu / \nu_\mu = 3.0$



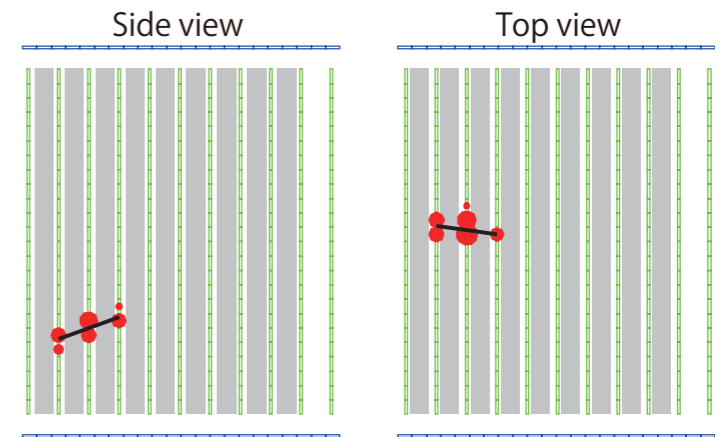
INGRIDモジュールで再構成された  
 ニュートリノ反応数  $\bar{\nu}_\mu / \nu_\mu = 2.2$

反ニュートリノビームでは、 $\bar{\nu}_\mu$ に  
 比べ $\nu_\mu$ の反応断面積が大きいこと  
 から $\nu_\mu$ イベントが多く混入する

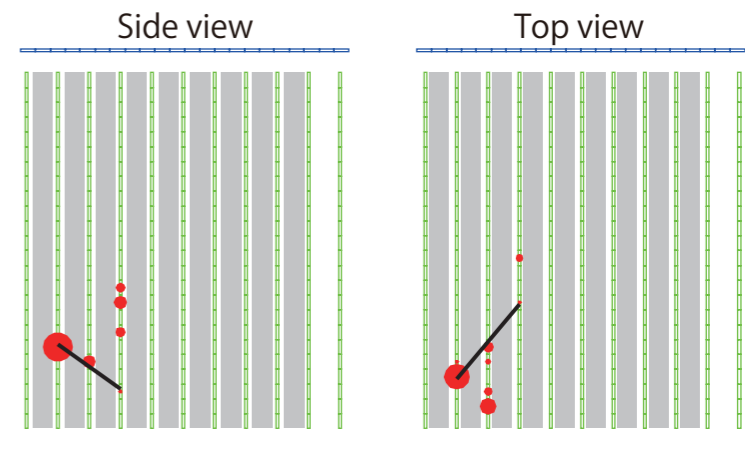
# 背景事象

- 背景事象をモンテカルロシミュレーションを用いて見積もった。
- 主な背景事象は、ニュートリノが反応して壁で生成された中性子、 $\gamma$ 、 $\mu$
- ビーム上流で反応するものの以外はほとんど影響しない
  - INGRID検出器上流側の壁におけるニュートリノ反応で生成された粒子をシミュレーション
- 壁で生じる荷電粒子のほとんどはINGRID上流面にヒットがないことを要求することで除去される

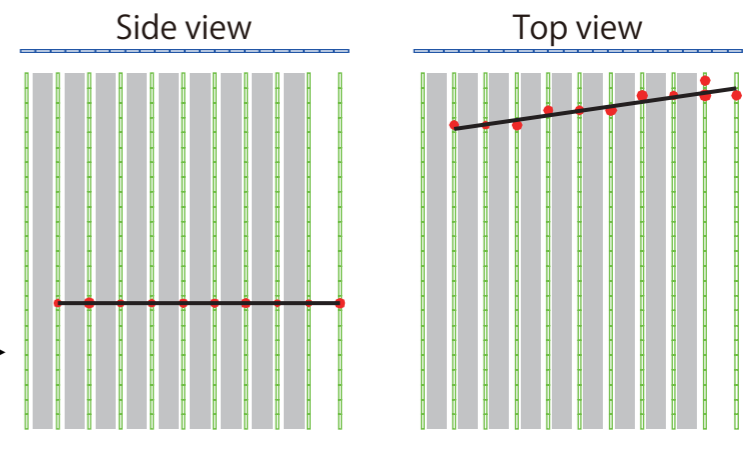
最上流面での検出を  
ミスしている



中性子由来の背景事象



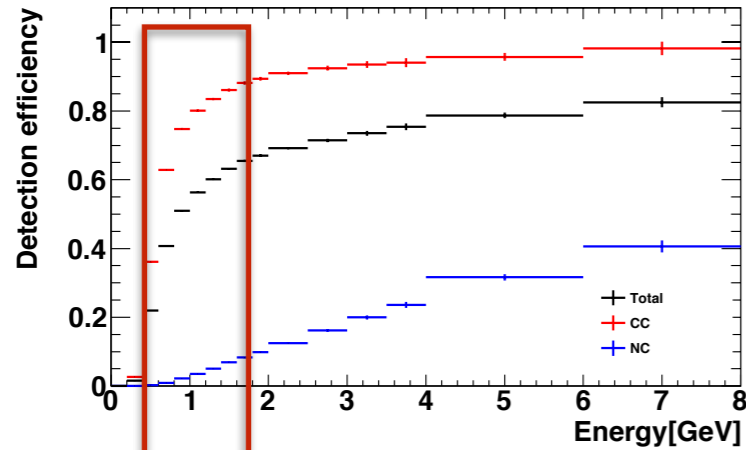
$\gamma$  由来の背景事象



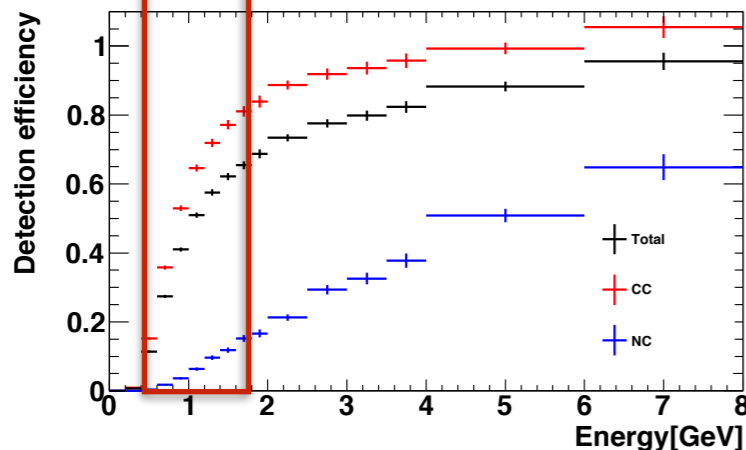
$\mu$  由来の背景事象

# 検出効率

反ミューオンニュートリノの検出効率



低エネルギー側で反ミューオンニュートリノのほうが検出効率が高い  
(反ミューオンニュートリノのほうがミューオンを前方に散乱するため)



ミューオンニュートリノの検出効率

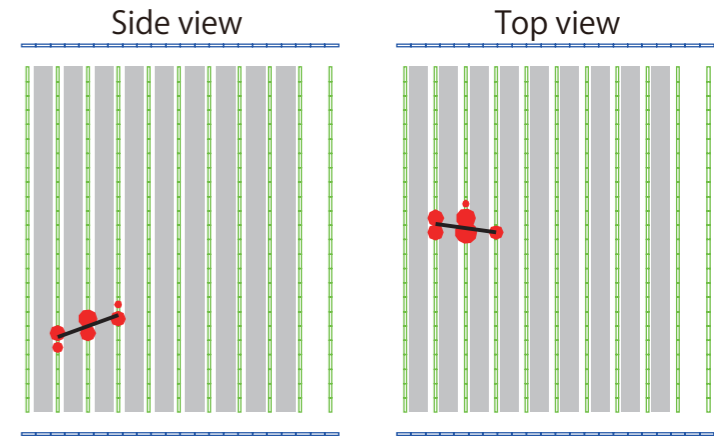
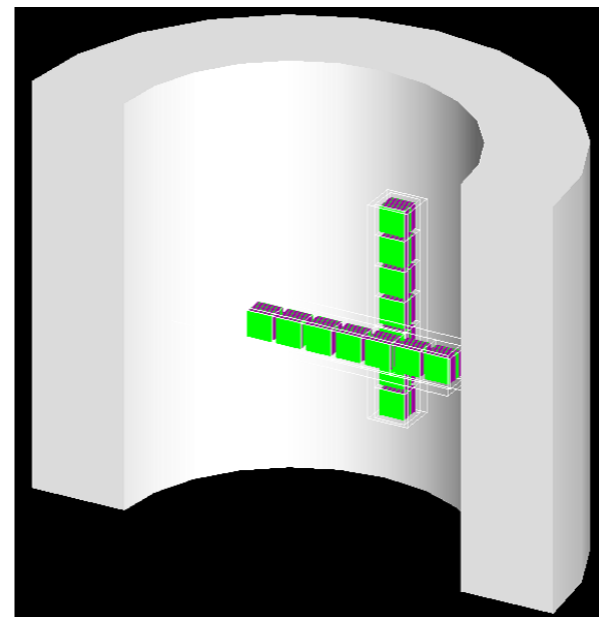
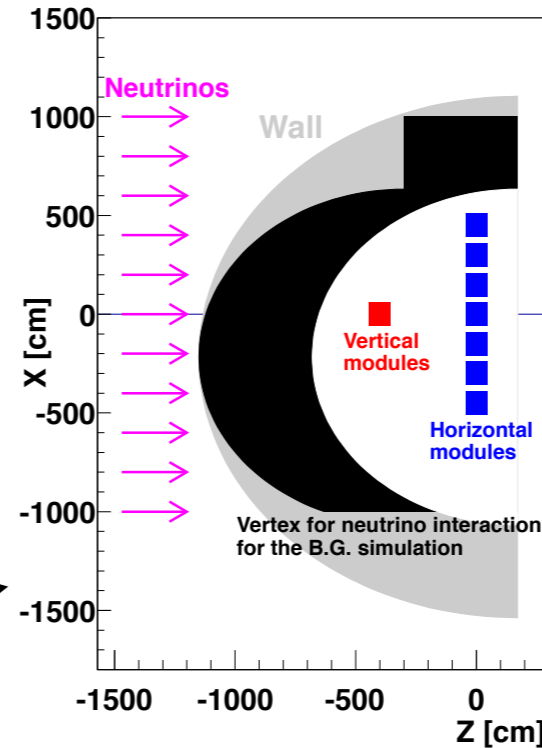
モジュール	0	1	2	3	4	5	6
検出効率 [%]	62.6	65.3	66.4	65.8	66.5	64.9	64.4
モジュール	7	8	9	10	11	12	13
検出効率 [%]	64.1	65.8	66.4	66.9	66.3	65.3	64.8

モジュールごとの検出効率  
(反ミューオンニュートリノ、  
ミューオンニュートリノ  
の両方を含んでいる)

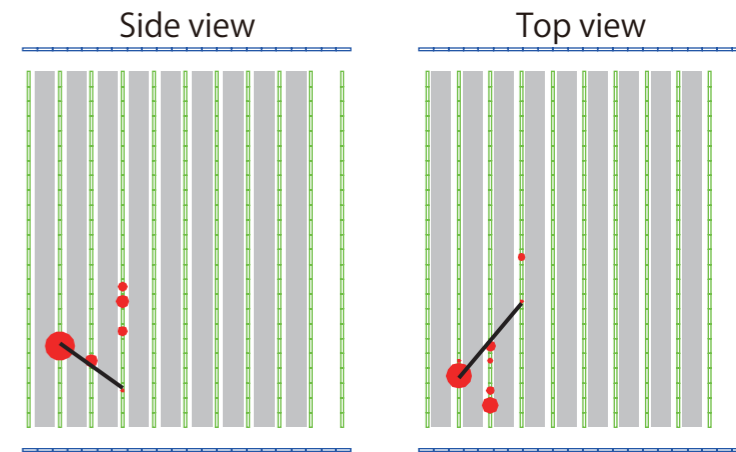


# 背景事象

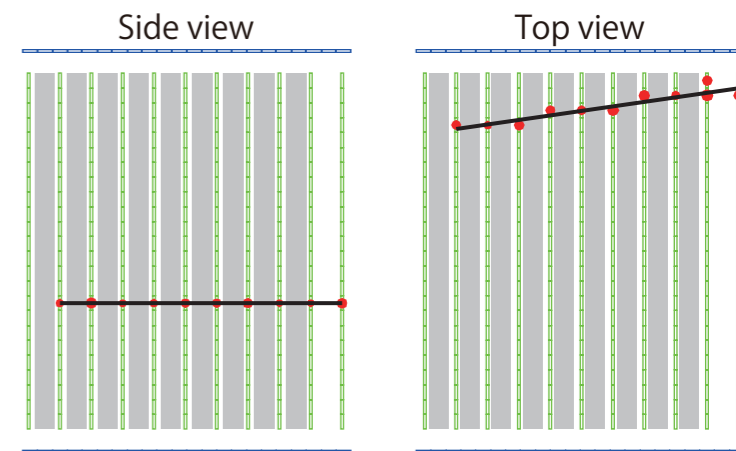
- ・ 主な背景事象は、ニュートリノが反応して壁で生成された中性子、 $\gamma$ 、 $\mu$
- ・ ビーム上流で反応するものの以外はほとんど影響しない  
→ 黒く塗った範囲を考慮
- ・ 壁で生じる荷電粒子のほとんどは INGRID 上流面にヒットがないことを要求することで除去される



中性子由来の背景事象



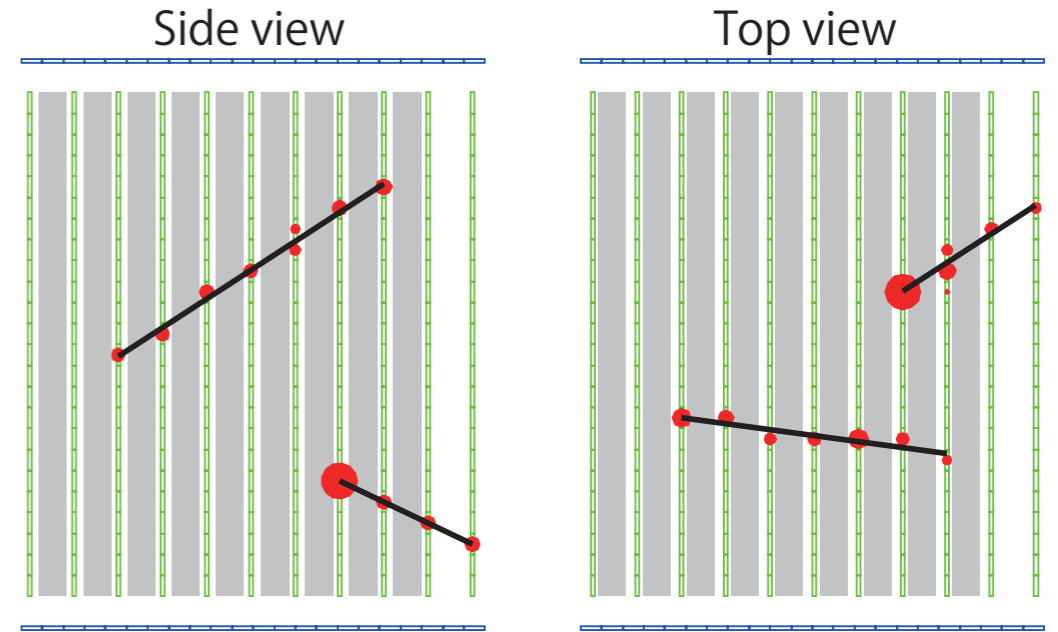
$\gamma$  由来の背景事象



$\mu$  由来の背景事象

# パイルアップの補正

- 右図のように同時に2つのイベントが再構成されることをイベントパイルアップという
- 2つの飛跡がオーバーラップする場合、反応点の決定に失敗することがある  
→これがイベント数に与える効果を補正する



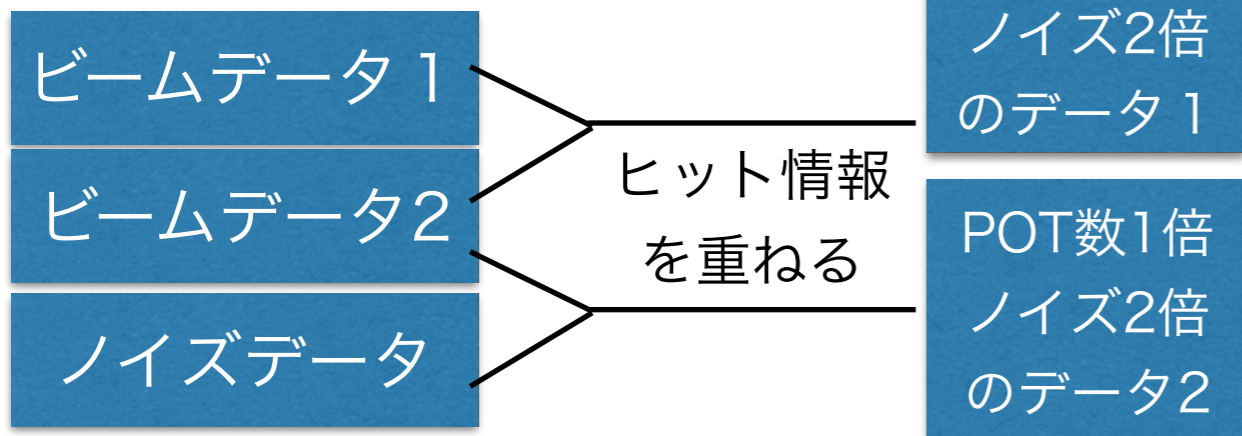
$$N_{corr} = \frac{N_{sel}}{1 - C_{loss} n_{ppb}}$$

$N_{corr}$  : 補正後のイベント数  
 $N_{sel}$  : 補正前のイベント数  
 $C_{loss}$  : イベントロス定数  
 $n_{ppb}$  : バンチあたりのPOT数

イベントパイルアップの起こる確率は  
バンチあたりのPOT数に比例する

**~1%の補正**

## イベントロス定数の求め方

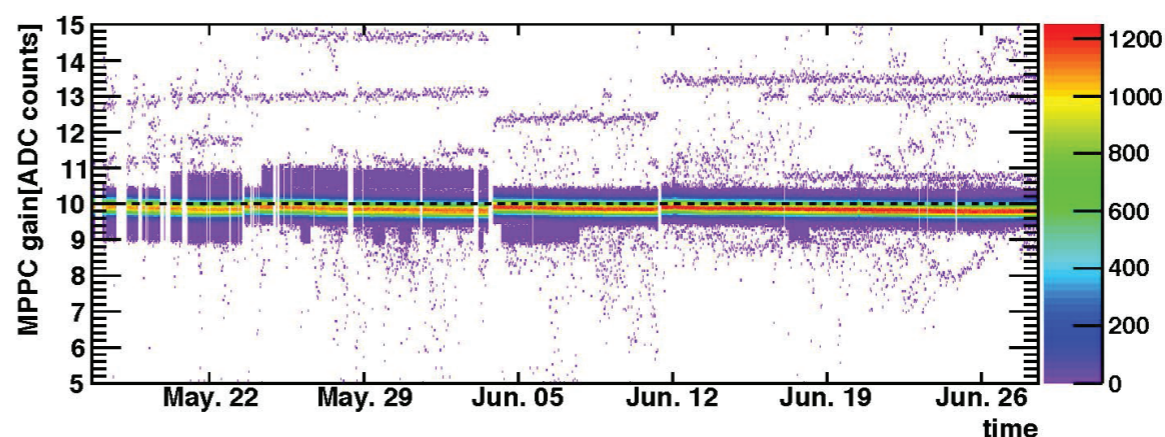


$$N_{corr} = \frac{N_1}{1 - C_{loss} 2n_{ppb}}, \quad N_{corr} = \frac{N_2}{1 - C_{loss} n_{ppb}}$$

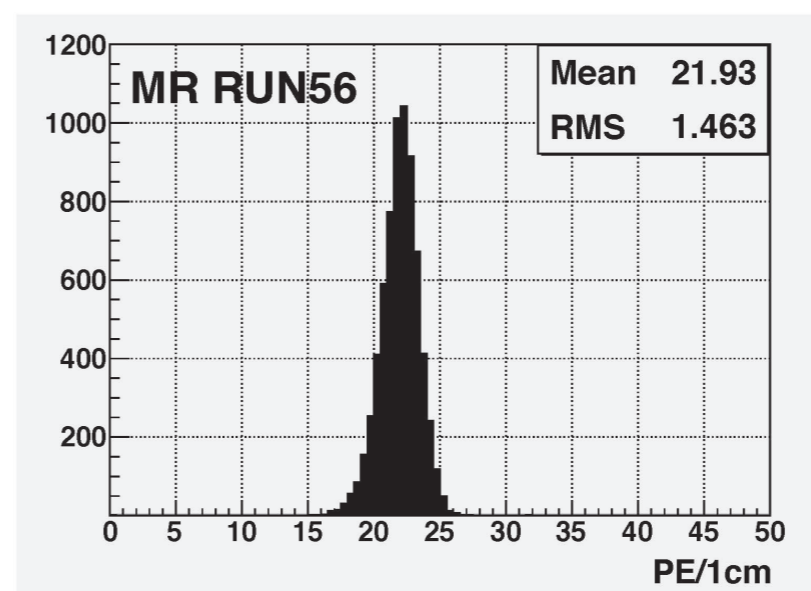
$$C_{loss} = \frac{N_2 - N_1}{n_{ppb}(2N_2 - N_1)}$$

# Data Set

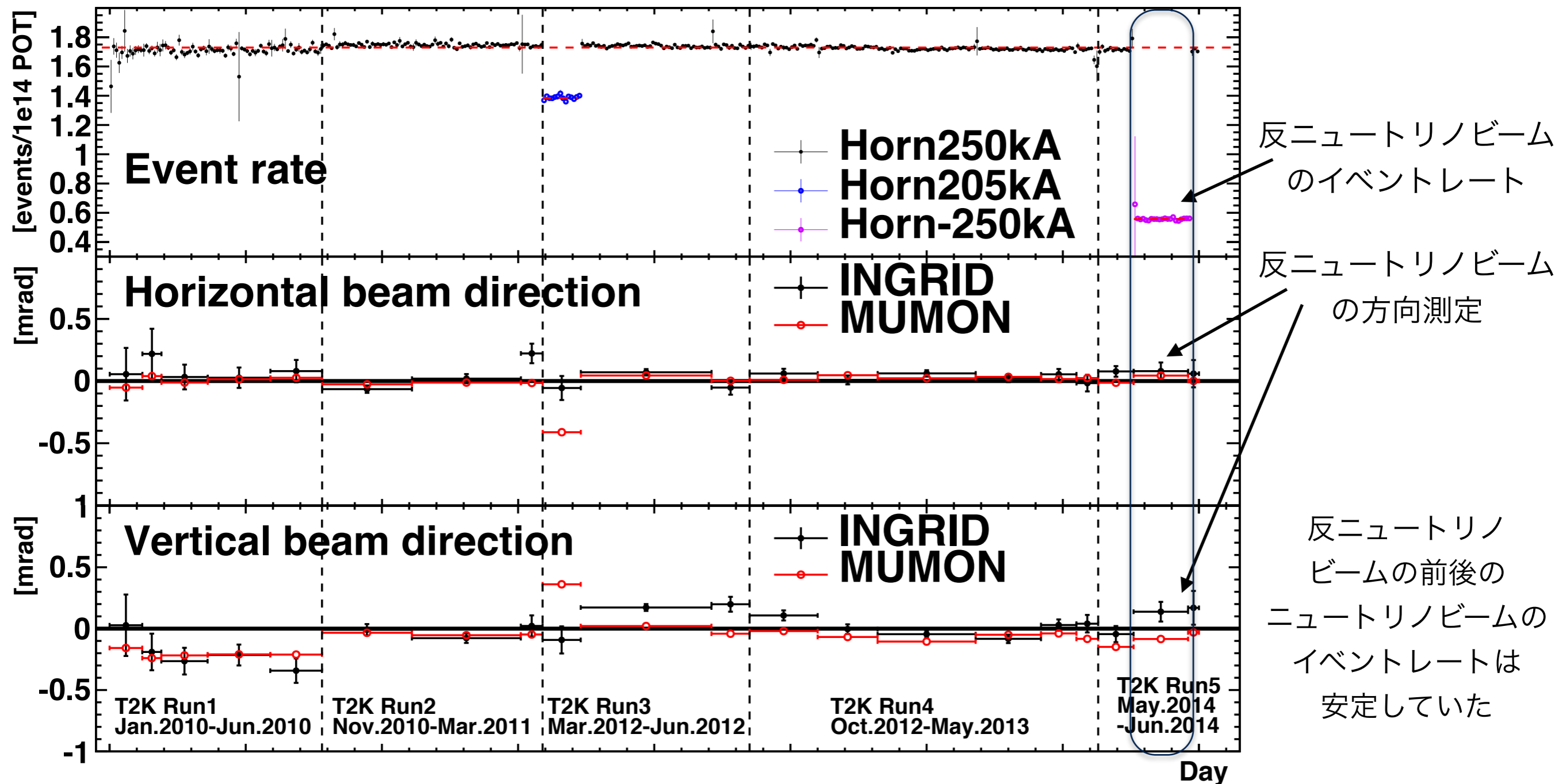
- ・ 6/4 ~ 6/23 に反ニュートリノビームで測定を行った
- ・ 反ニュートリノビームの統計：5.09E+19 POT
- ・ ゲインの安定性



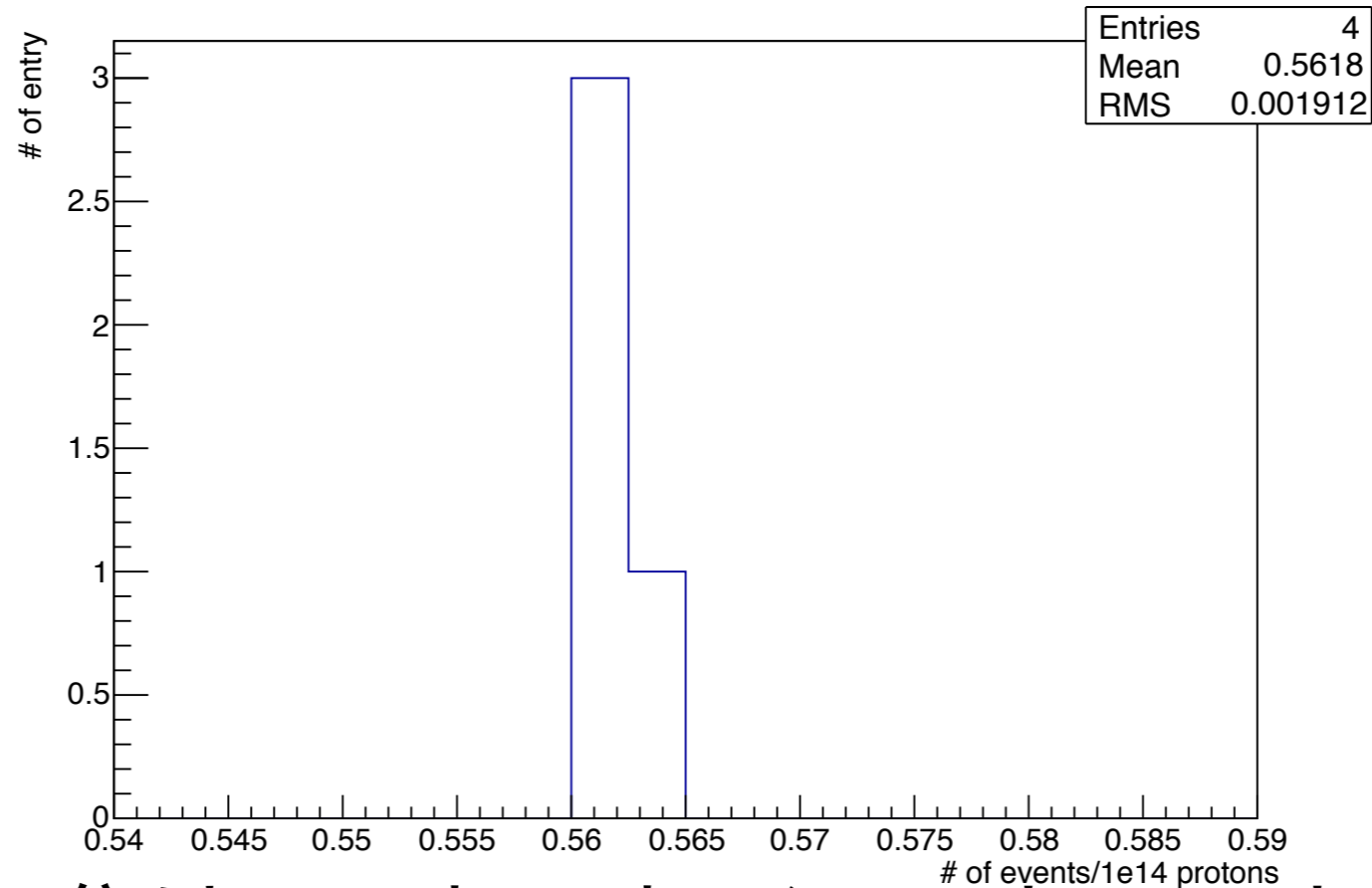
- ・ 宇宙線光量のチェック



# T2K全期間のイベントレート とビーム方向の安定性



# イベントレート

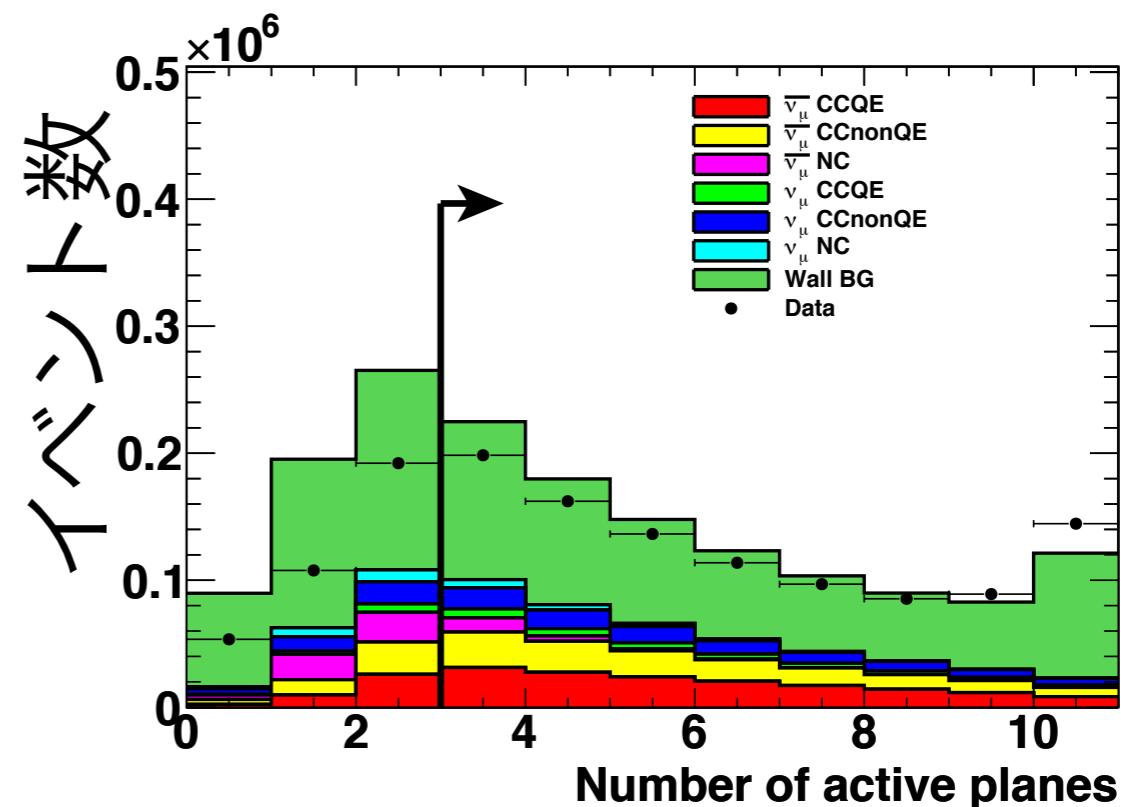
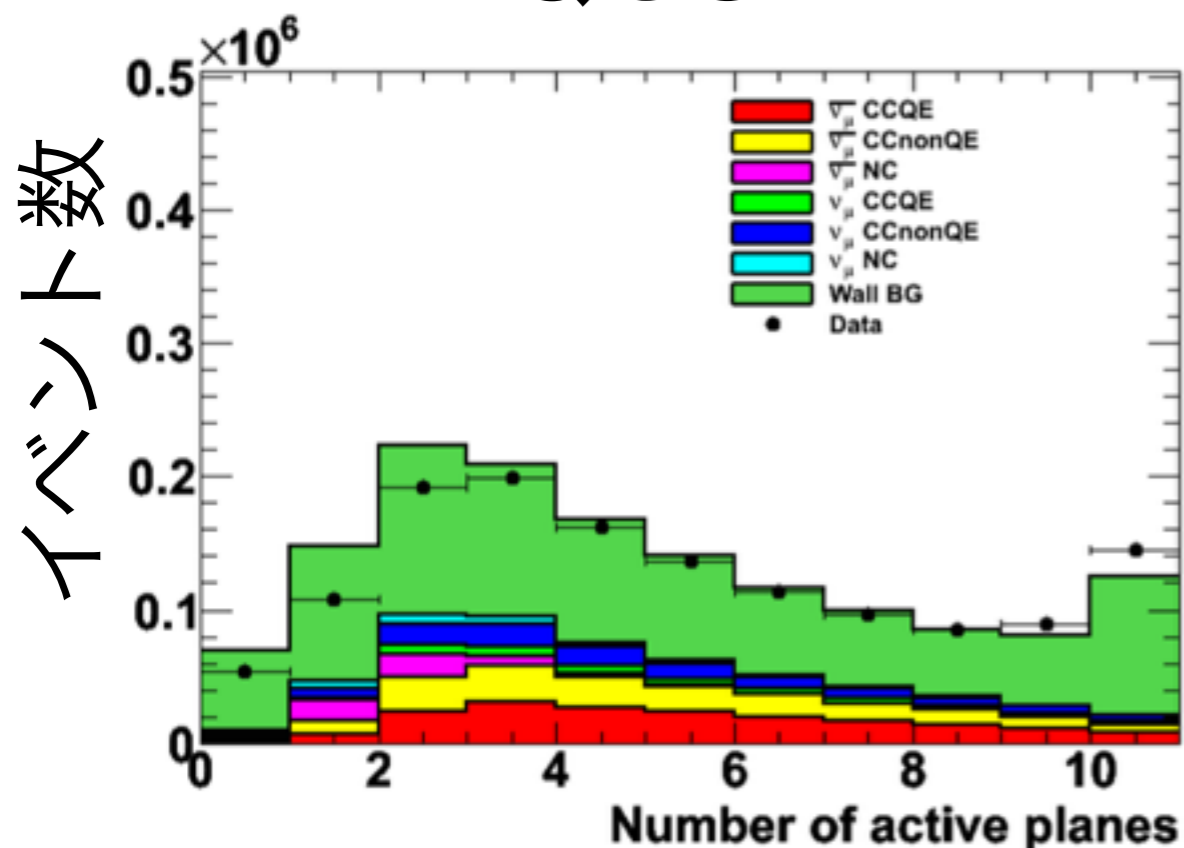


- 4つの期間に分け、それぞれイベントレートを求めたイベントレートの分布をプロット
  - RMS/Mean をイベントレートの安定性の指標とした
  - イベントレートは0.34%で安定

# カット前の アクティブプレーン数

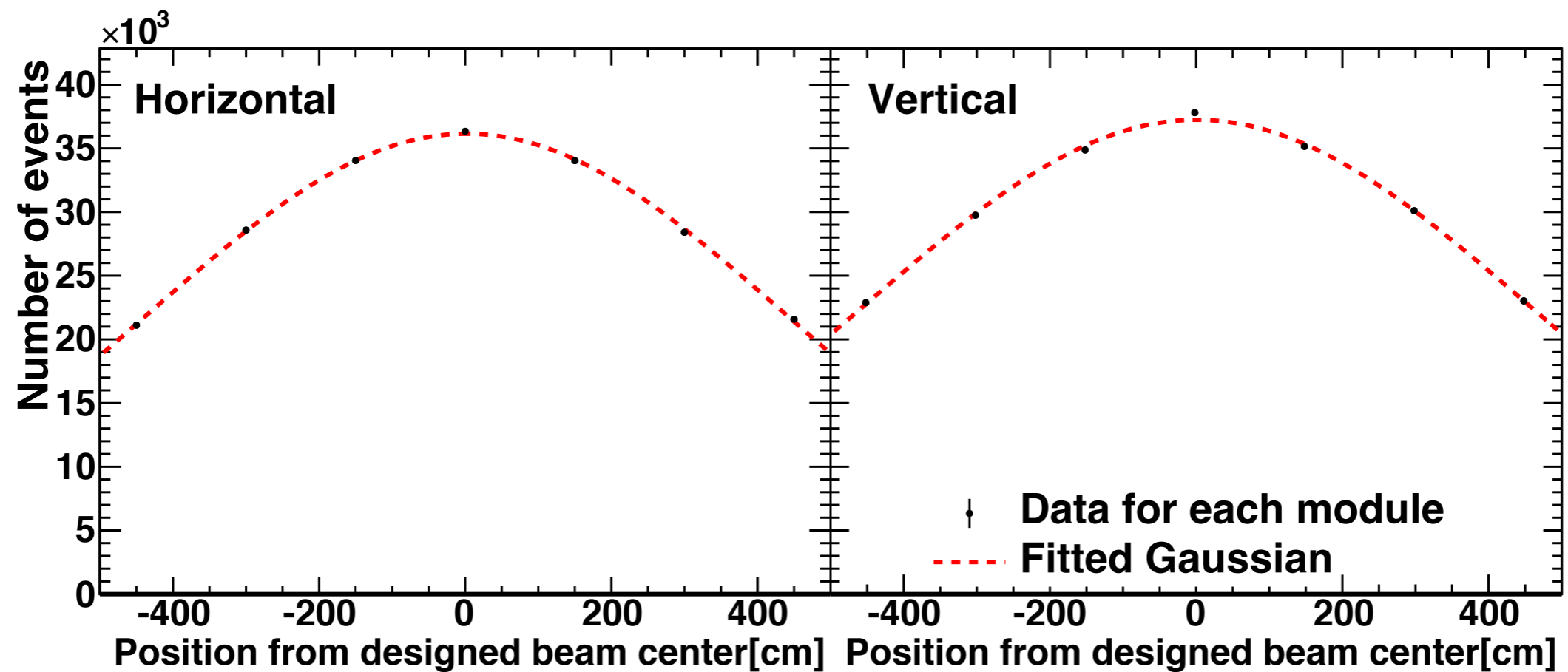
QGSP

QGSP\_BERT



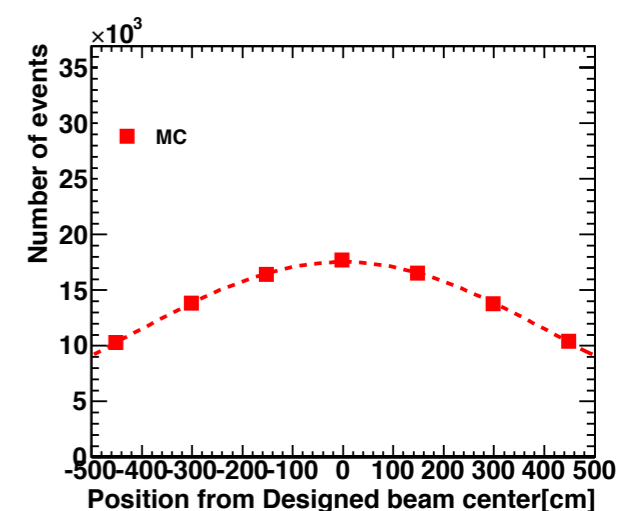
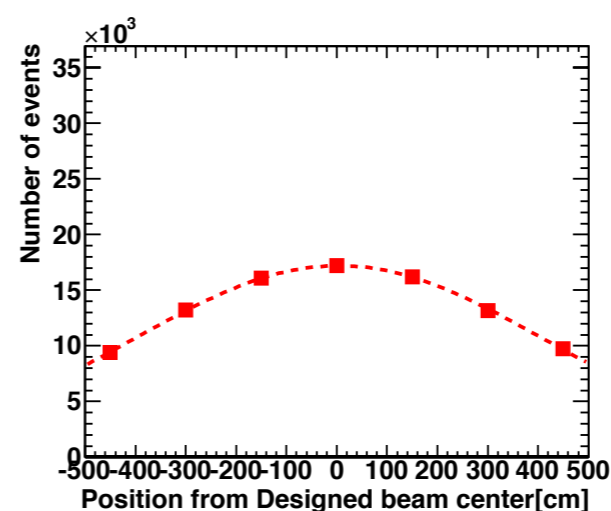
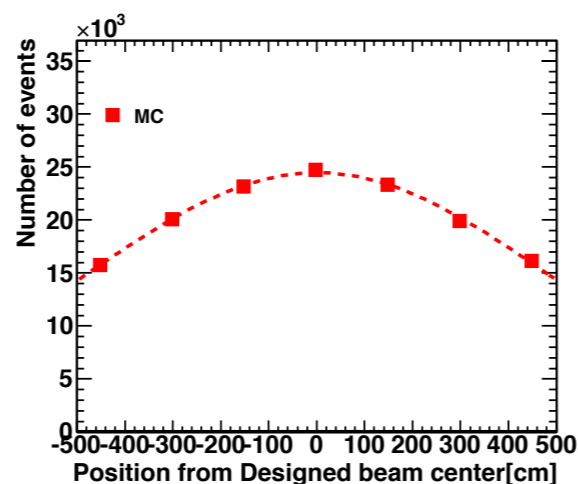
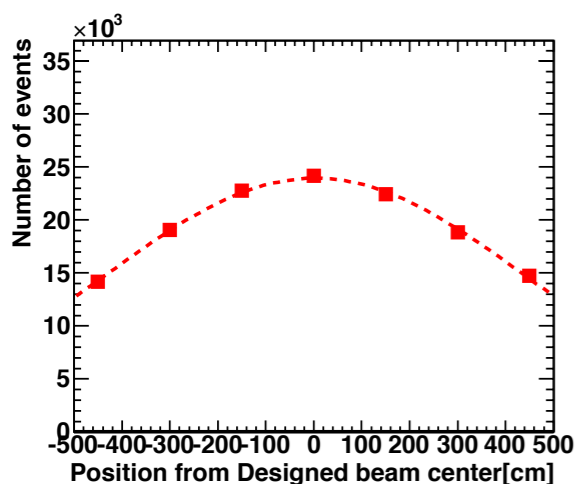
Wall Backgroundをカットする前のアクティブプレーン数  
分布はPhysics Listの変更の影響を受ける

# ニュートリノビームのビーム プロファイル



	center [cm]	width [cm]
Horizontal	$1.91 \pm 1.10$	$437.4 \pm 2.5$
Vertical	$0.81 \pm 1.63$	$456.1 \pm 2.8$

# 反ニュートリノビームの プロファイル



ビーム中心 [cm]      ビーム幅 [cm]

水平方向       $2.6 \pm 2.0(\text{stat.})$        $446 \pm 3(\text{stat.})$

鉛直方向       $1.3 \pm 2.2(\text{stat.})$        $483 \pm 4(\text{stat.})$

ビーム中心 [cm]      ビーム幅 [cm]

水平方向       $4.0 \pm 2.0(\text{stat.})$        $415 \pm 3(\text{stat.})$

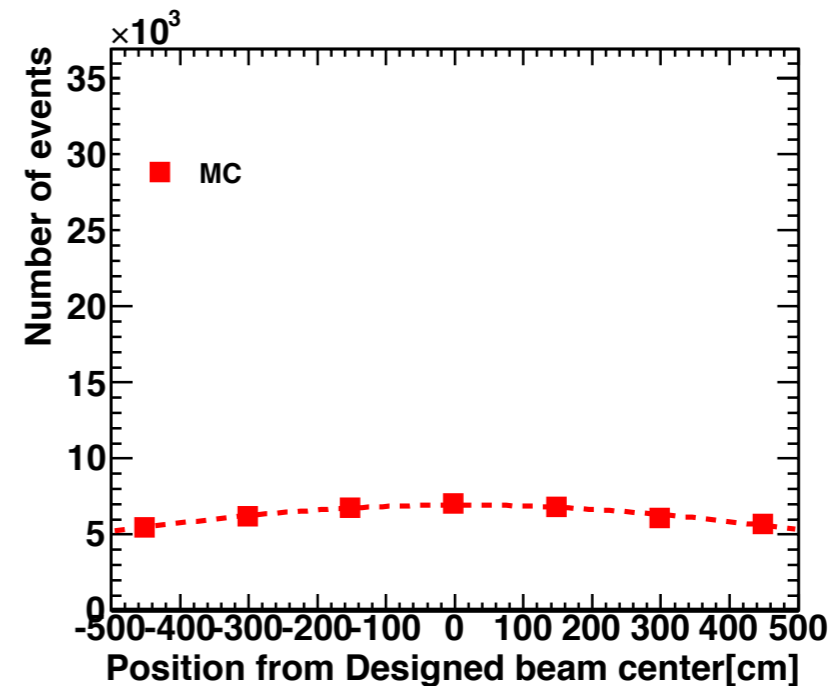
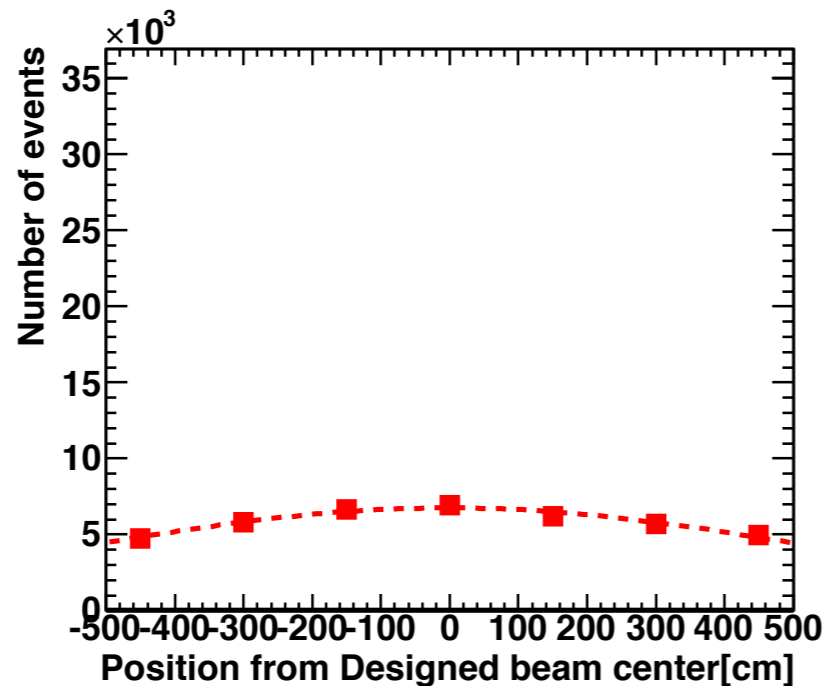
鉛直方向       $0.3 \pm 2.2(\text{stat.})$        $437 \pm 4(\text{stat.})$

反ミューニュートリノ  
& ミューニュートリノ

反ミューニュートリノ



# 反ニュートリノビームの プロファイル



	ビーム中心 [cm]	ビーム幅 [cm]
水平方向	$1.6 \pm 5.3(\text{stat.})$	$549 \pm 11(\text{stat.})$
鉛直方向	$8.9 \pm 7.4(\text{stat.})$	$670 \pm 19(\text{stat.})$

ミューニュートリノ