

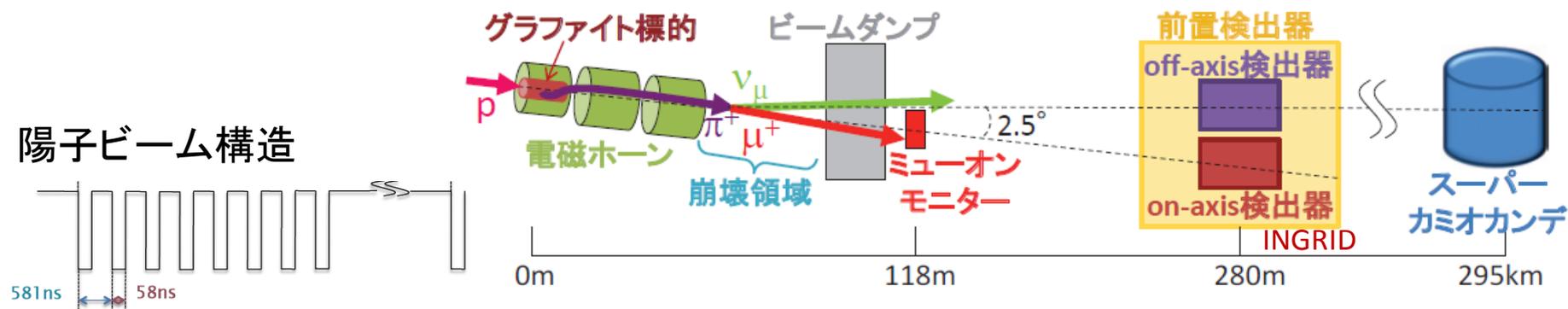
# Recent beam study using T2K muon monitor

Takahiro Hiraki  
for the T2K Collaboration  
(Kyoto University)  
Dec 23, 2014

# もくじ

- ✓ T2K実験 イン트로
- ✓ muon monitor (MUMON)
  - 反ニュートリノモードでの物理データの安定性
  - プロファイルのホーン電流や陽子ビーム中心に対する依存性
  - エマルション検出器を用いたmuon flux の測定
- ✓ まとめ

# T2K実験とミューオンモニター



- J-PARCから陽子の束(バンチ)を炭素標的に照射
- 生成された荷電 $\pi$ を電磁ホーンで収束、 $\nu$ と $\mu$ に崩壊
- ビームの強度、方向モニターは $\nu$ を観測するINGRID(前置検出器の位置にインストール)と $\mu$ を観測するミューオンモニター(MUMON)がある
- ミューオンモニターはビームプロファイルを即時に、またバンチ毎に測定してできる
- ビームライン機器の調整、安全性のため重要

# MUMON

- 高エネルギー(5GeV以上)の $\mu$ を観測
- 上流のビームダンプにより他の粒子は止まる

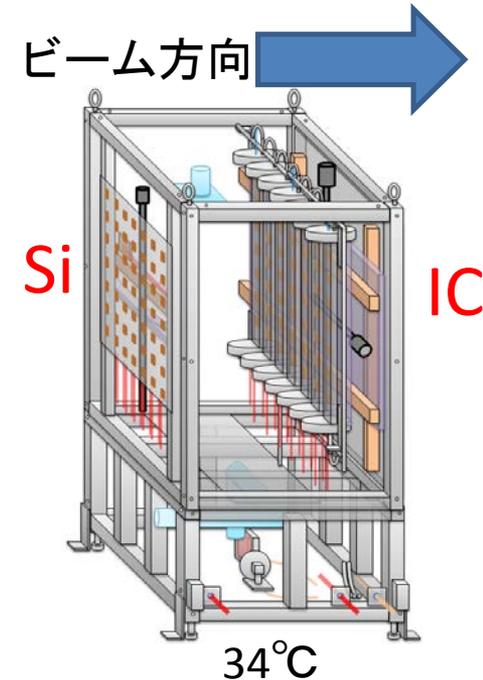
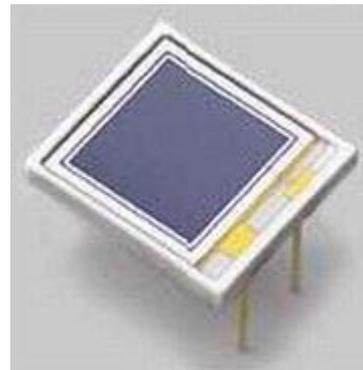
2種類の異なる検出器から構成  
(冗長性を持たせる)

- ✓ Si PIN photodiode  
簡単に交換できる設計
- ✓ Ionization Chamber

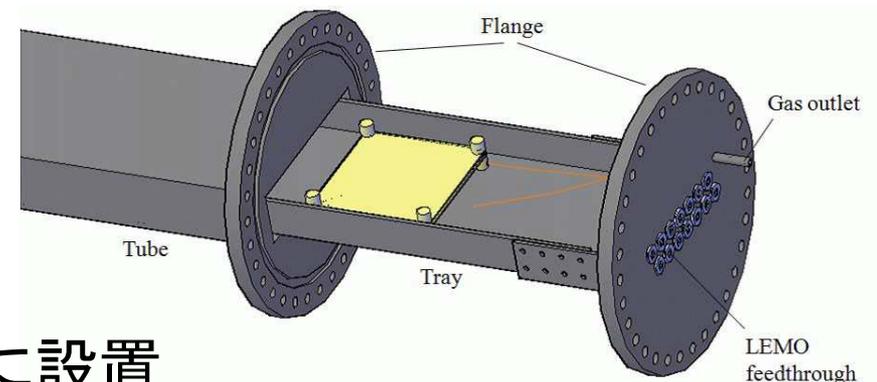
Ar + 2% N<sub>2</sub>(quencher)を使用中、  
ビーム強度が将来高くなると  
He + 1% N<sub>2</sub>を使用予定

それぞれ7×7=49個、25cm間隔に設置  
各検出器の信号の大きさからプロファイルを求める

10mm × 10mm

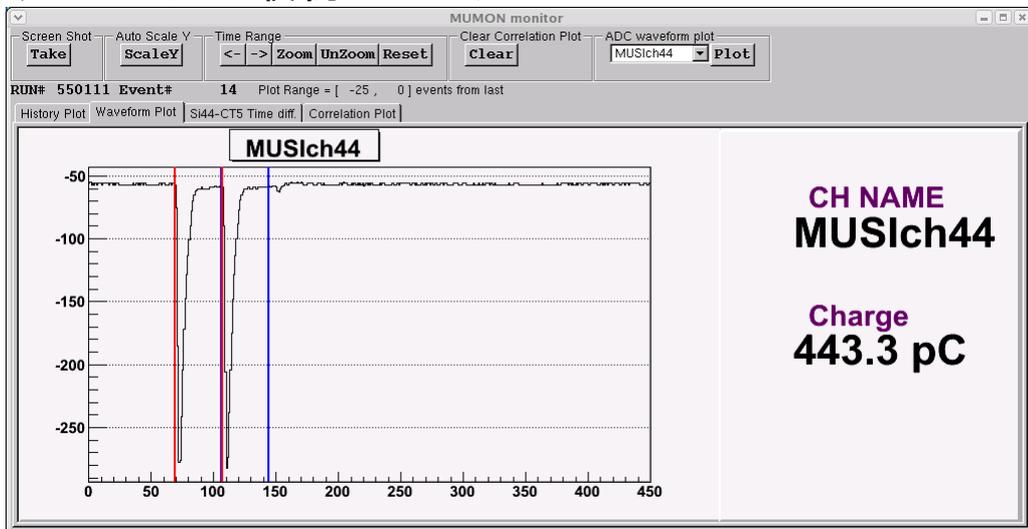


有効面積: 75mm × 75mm

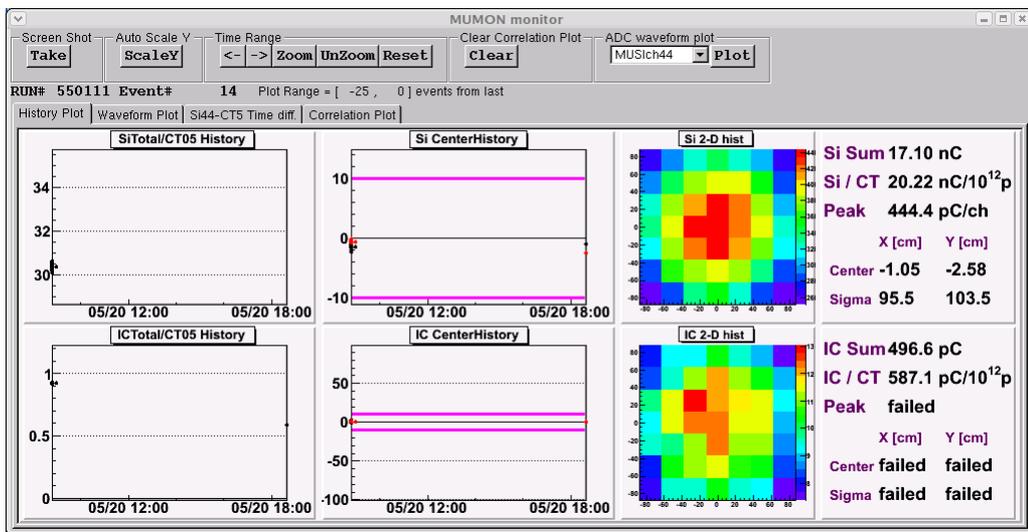
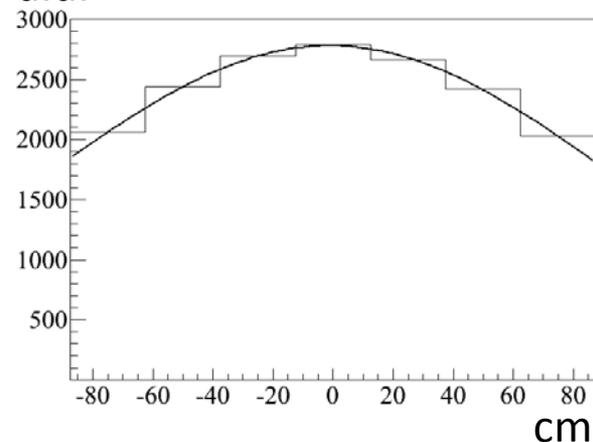


# MUMON のイベントの例

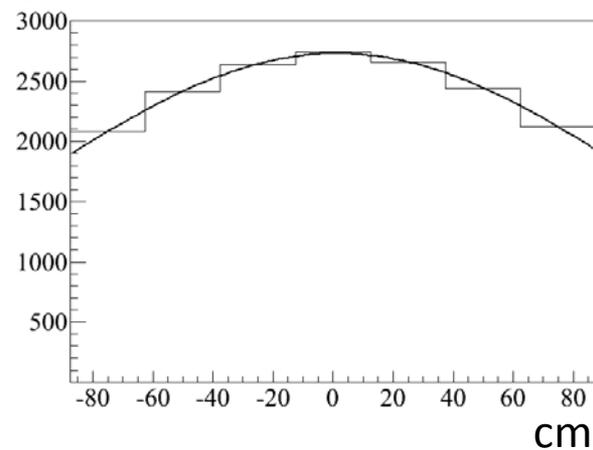
反ニュートリノモードの最初のショット



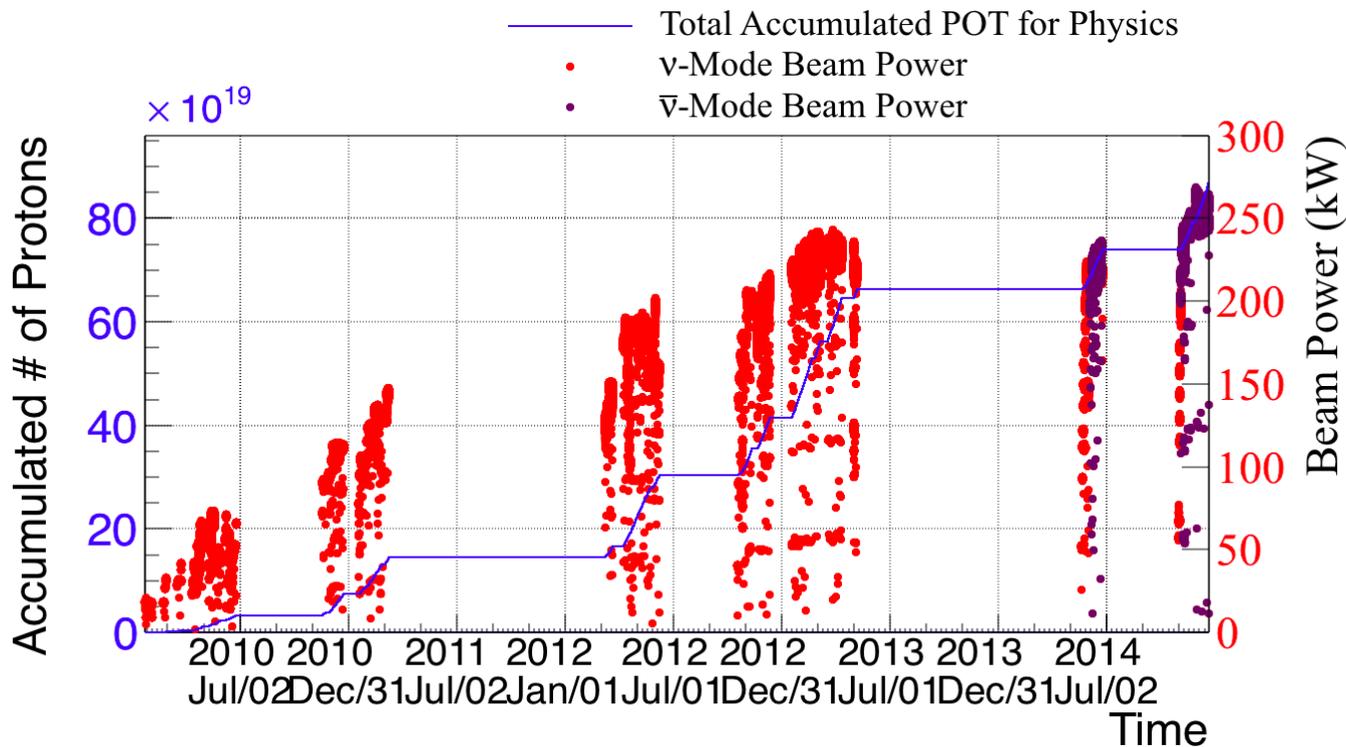
a.u. 水平方向のプロファイル



a.u. 鉛直方向のプロファイル



# Integrated POT (Protons On Target)

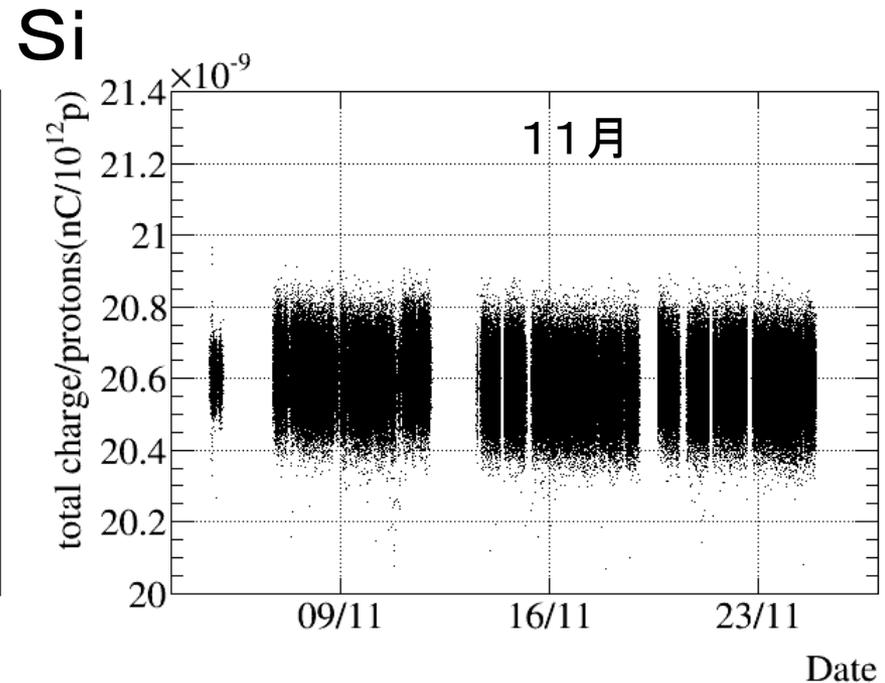
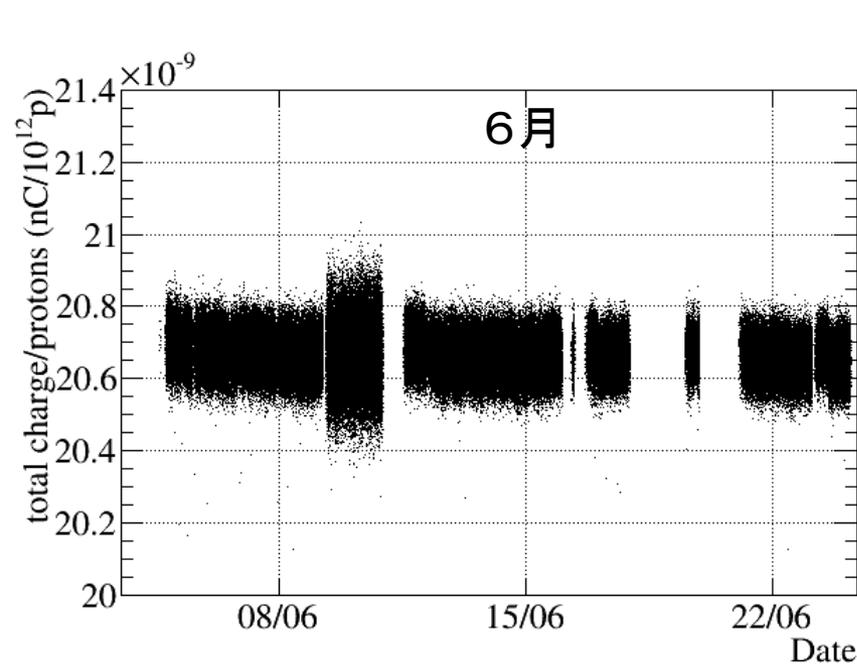


今年の積分POT (反ニュートリノモード, preliminary) :  $\sim 1.8 \times 10^{20}$

今年初めて反ニュートリノモードのデータを取得  
反ニュートリノモードでもプロファイルが安定か、またビームライン  
機器の変化に対して感度があるのか確認する必要がある

# 物理データの安定性 (yield, 収量)

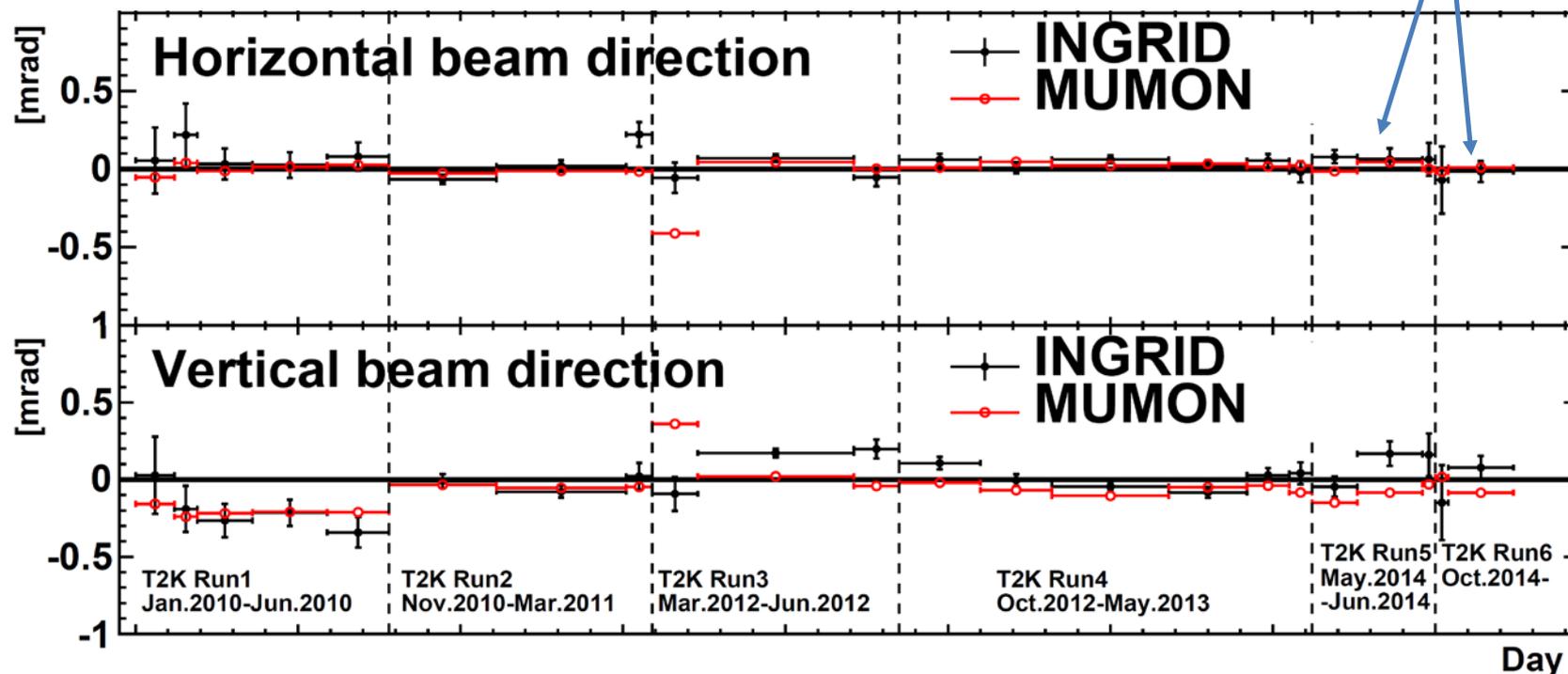
- 物理データの安定性を確認



- 今年のランの全物理データ、各点が1スピルに対応
- 収量は各スピル毎の陽子数で規格化(陽子数はビームライン上にあるCTで計測)
- 収量は解析に用いられている基準の平均±5%以内で安定している
- 時期によって幅(ふらつき)が変わっているがCT(陽子ビーム強度モニター用の変流器)の設定が変わったため

# ビーム方向の安定性

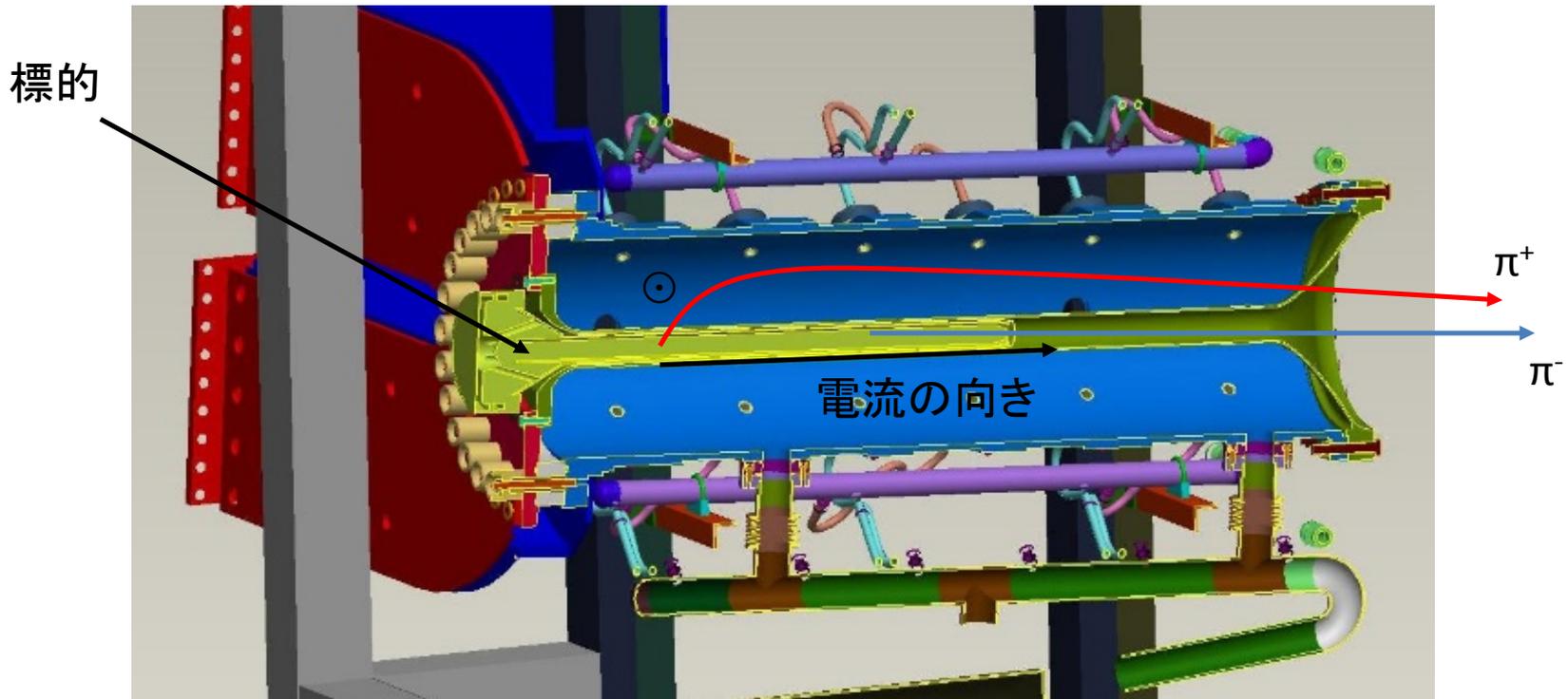
反ニュートリノモードの期間



ビーム中心は物理解析に用いられている基準の $\pm 10\text{cm}$  (大体 $1\text{mrad}$ )  
以内で全期間にわたって安定している  
ビームのqualityを保証

# 電磁ホーンによる収束

ニュートリノモードの時 (+250kA)



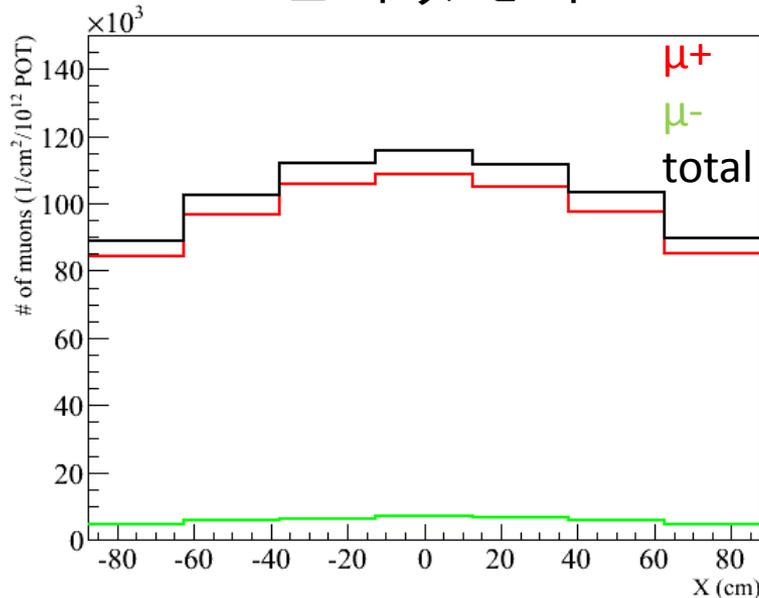
- パルス電流によりトロイダル磁場が生成され、荷電 $\pi$ が曲げられる
- ニュートリノモードの時は $\pi^+$ が前方に曲げられ、崩壊領域へ
- 標的の前方は磁場が無く、標的から真っ直ぐ出てきた $\pi$ も崩壊領域へ向かう
- 反ニュートリノモードの時は電流の向きを反転させる

# ミューオンプロファイルのMC

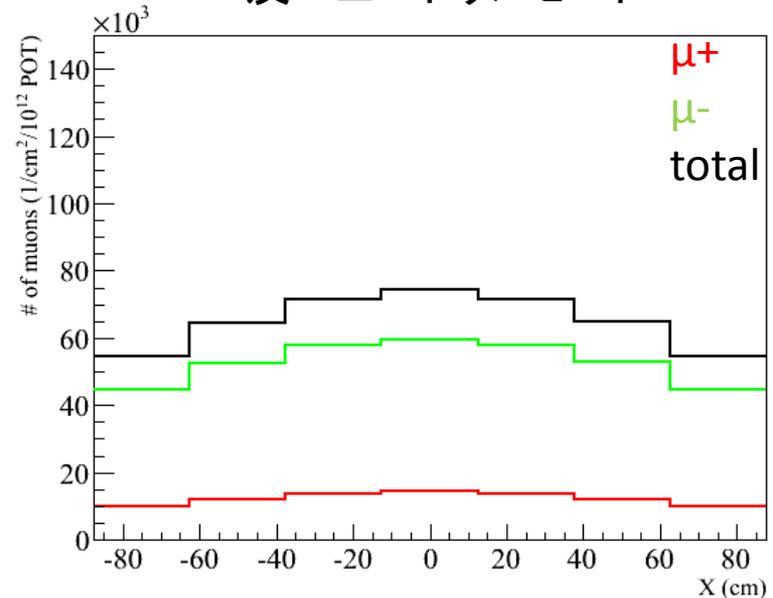
- MCはSK用のフラックスにも用いられているJNUBEAMを使用
- 標的はFLUKA, 他はgeant3のモデルを用い、NA61実験のデータ等でtuningする

Si検出器が存在する面でのx方向のプロファイル

ニュートリノモード



反ニュートリノモード



- MUMONで検出される信号は $\mu^+$ と $\mu^-$ の和
- 標的で生成される $\pi^+$ は $\pi^-$ より多いので、反ニュートリノモードの時はニュートリノモードの時と比べ、全信号の大きさは小さく、wrong signの割合は高い  
(ニュートリノモードでの $\mu^-$ 、反ニュートリノモードでの $\mu^+$ をwrong signと呼んでいる)
- 主に標的からビーム軸に平行に出て来る粒子がwrong signの $\mu$ の親粒子
- 幅はwrong signの粒子の方が狭い

# プロファイルのMCとデータの比較

yield ratio (-250kA / 250kA)	MC	Data total
Si	0.628	0.637
IC	0.630	0.628

- ニュートリノモードと反ニュートリノモードの比は数%の精度で一致

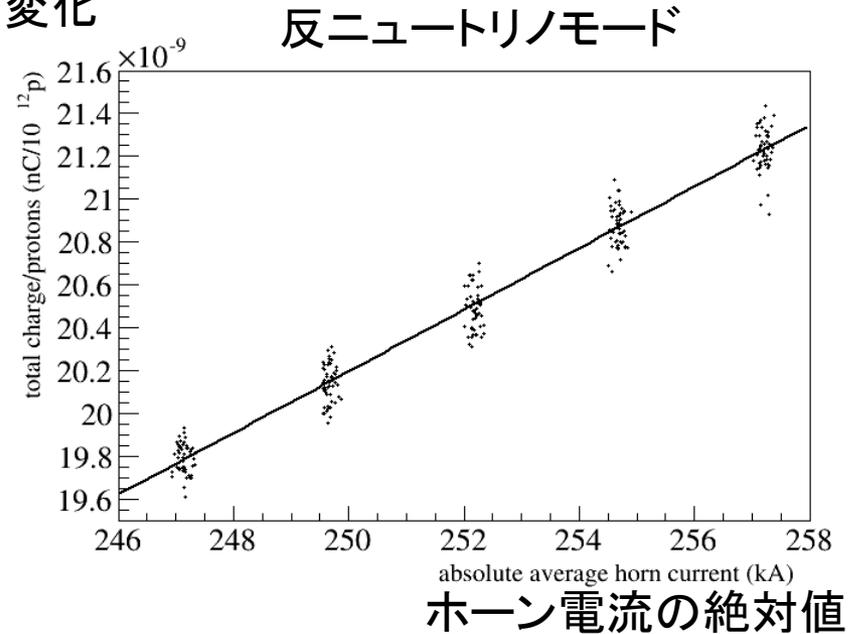
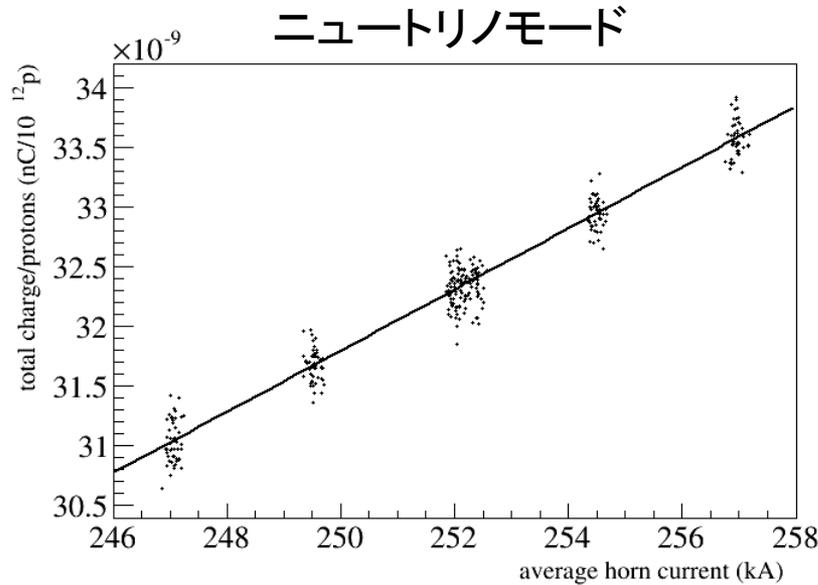
width (cm)	MC X	Data X	MC Y	Data Y
Si 250kA	105.5	101.7	114.0	113.6
IC 250kA	111.7	106.4	127.0	123.8
Si -250kA	96.2	97.7	104.1	103.8
IC -250kA	104.0	103.1	115.0	113.5

- 幅はガウシアンでフィットした時の $1\sigma$
- ビーム幅もニュートリノビームの時と反ニュートリノビームの時共に5%程度の精度で一致
- wrong signの成分が多い反ニュートリノモードの方が幅が狭い 11

# 収量のホーン電流依存性

- MUMONの収量の大きさはホーン電流の大きさの影響を受ける
- ホーン電流の値を1%ずつ変えて、収量の変化を見る

## 収量の変化



変化率 (%/kA)	MC	Data
ニュートリノモード	0.83	0.80
反ニュートリノモード	0.72	0.71

- 反ニュートリノモードで少し変化率が小さいのはwrong signの親粒子はホーンの磁場に対して受ける影響が小さいため

# 陽子ビームへの感度

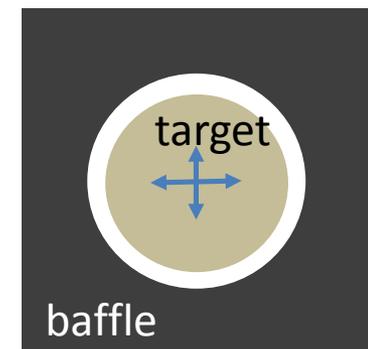
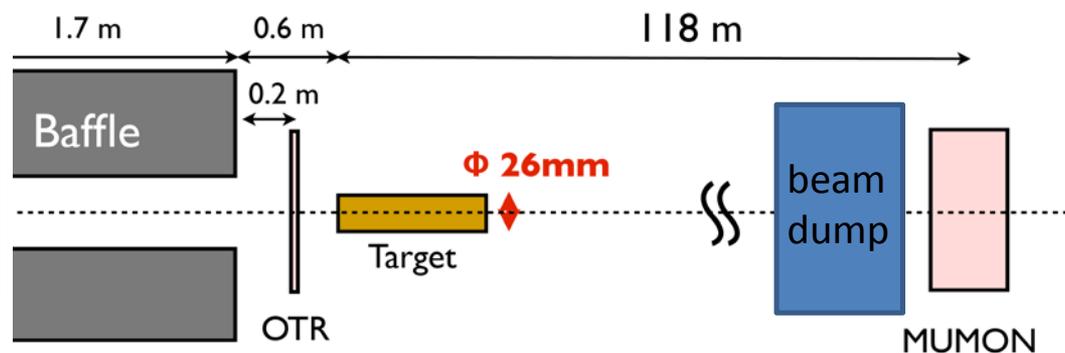
- 陽子ビームの位置や角度に対する応答を調べる
- 物理データ取得時はMUMONの中心位置を用いて、陽子ビームの軌道調整を行う
- 中心から約1mm or 0.1mrad毎にずらして標的にビームを当てた時のプロファイルを調べる

ビームライン側面図

断面図  
(ビーム軸に  
垂直な面)

上流部

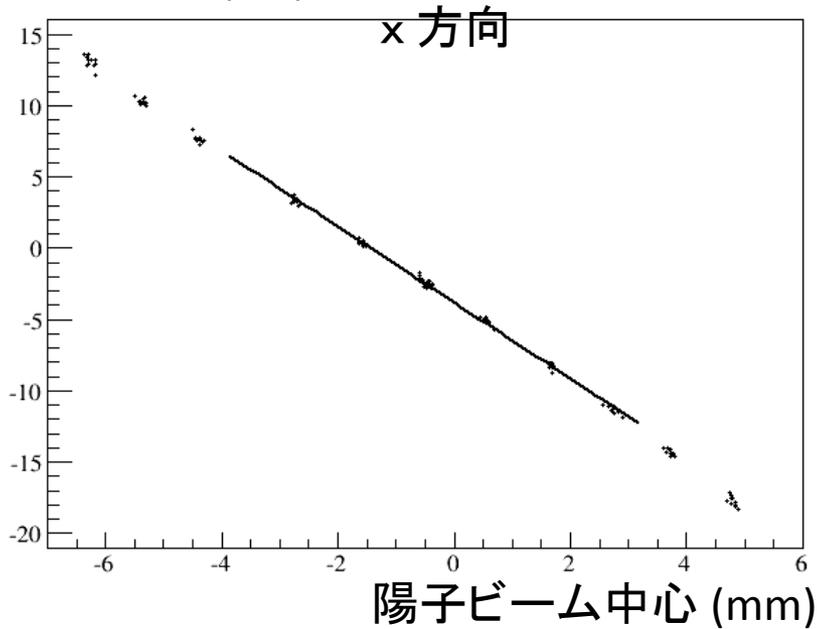
電磁石  
位置モニタ



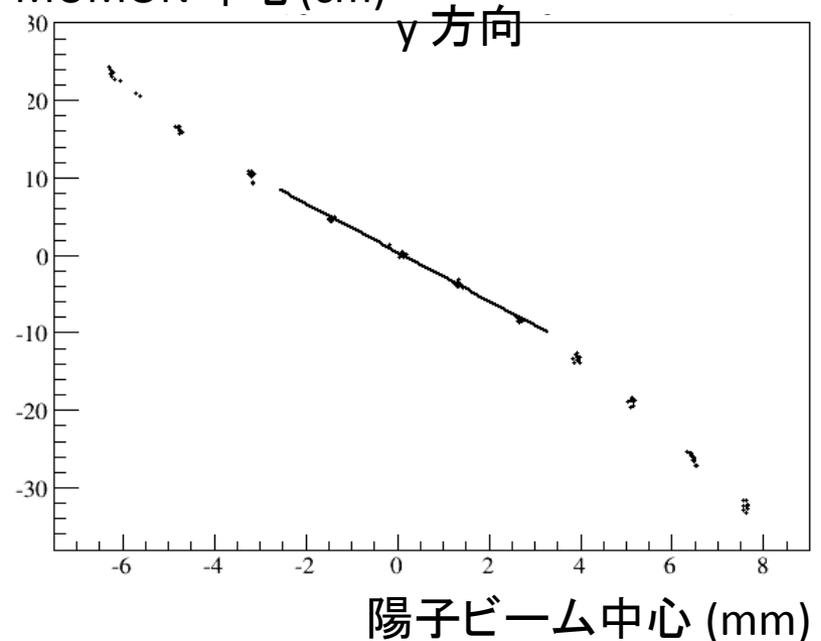
# 陽子ビームへの感度

陽子ビームをビーム軸に平行にした状態で、標的に当たる位置を変えてプロファイルを調べる

MUMON 中心(cm)



MUMON 中心(cm)



- 反ニュートリノビームの時でも陽子ビームの位置に対して感度がある

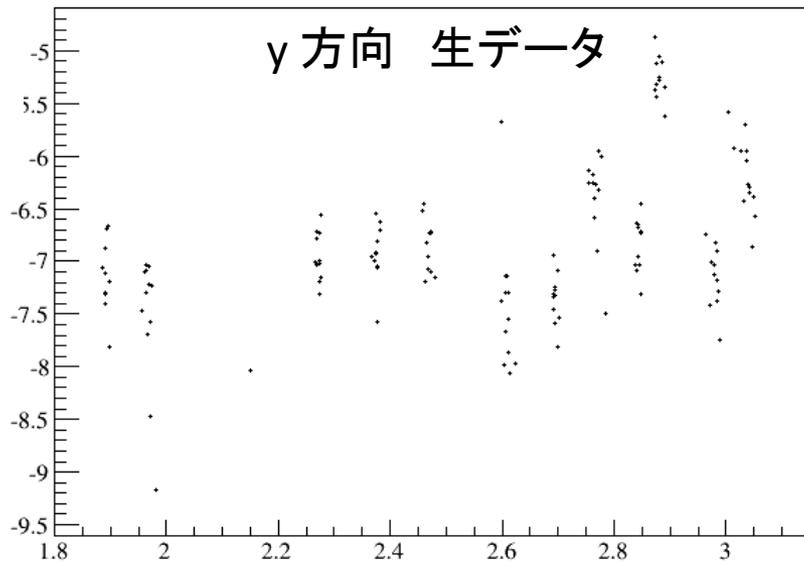
傾き (MUMON cm / beam center mm)	horizontal MC	horizontal data	vertical MC	vertical data
	-2.5	-2.7	-3.1	-3.1

- MCは-2mmから2mmまで動かした時の傾き
- データとMCはよく合っている

# 陽子ビームの角度を変えた時

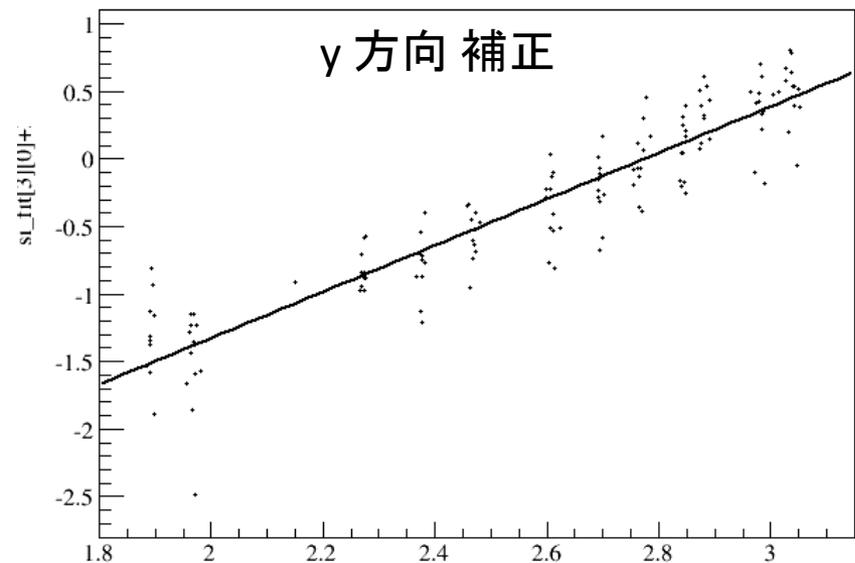
陽子ビームの位置を一定にして、ビーム軸方向の角度を変えた時のプロファイルを調べる

MUMON 中心(cm)



陽子ビーム 角度(mrad)

MUMON 中心(cm)

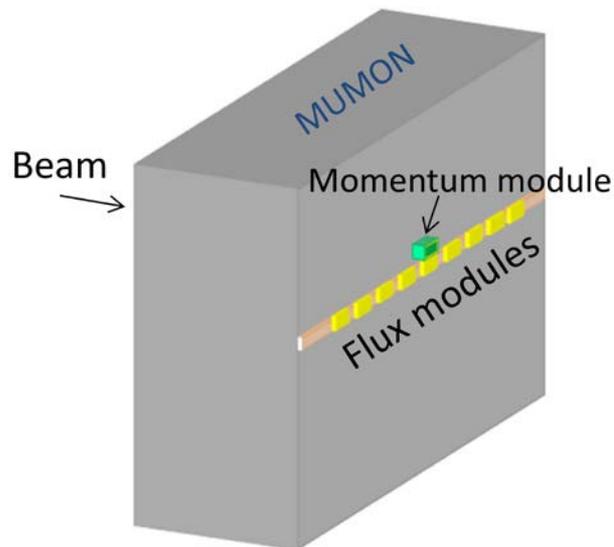


陽子ビーム 角度(mrad)

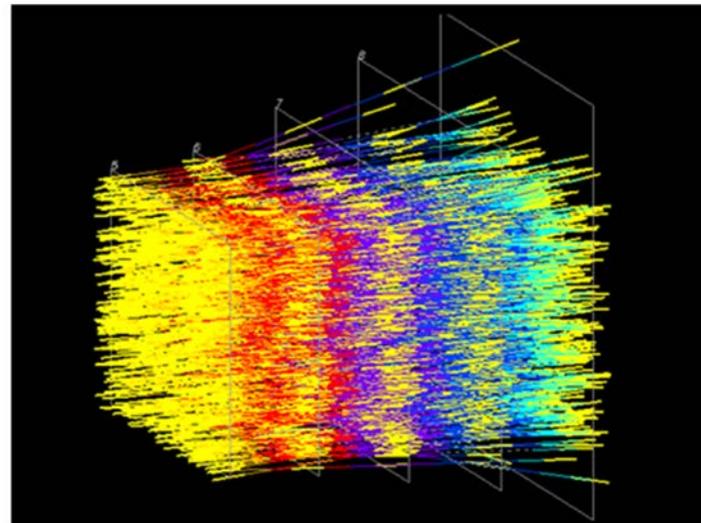
- 陽子ビームの位置を固定するのが難しく、そのままでは応答がよく分からないが、前頁で求めた陽子ビームの位置に対する応答(-3.1 cm@MUMON/mm@p beam)を用いて生データの陽子ビーム位置が合うように補正
- 変化率は1.7cm@MUMON/mrad 程度

# muon flux の詳細測定

- 反ニュートリノモードの時も含んだMUMONのフラックスの絶対量や運動量分布の測定
- ✓ エマルション検出器をMUMONのすぐ下流に設置
- ✓ 飛跡を用いて $\mu$ と $\delta$ -rayを区別できる
- ✓ 11月に弱いビームでデータ取得(解析中)



Reconstructed data



# Summary

- T2K実験は6月から反ニュートリノモードでの物理データを取得中
- 物理データ取得の間、ビーム方向、強度は安定
- ミューオンプロファイルはdataとMCでよく一致している
- ビームコミッショニングスタディを行い、反ニュートリノビームでもビームの変化に対して予測通り応答することを確認
- muon fluxの詳細測定のためのエマルションデータの取得を行った

Back up

# MUMON 写真



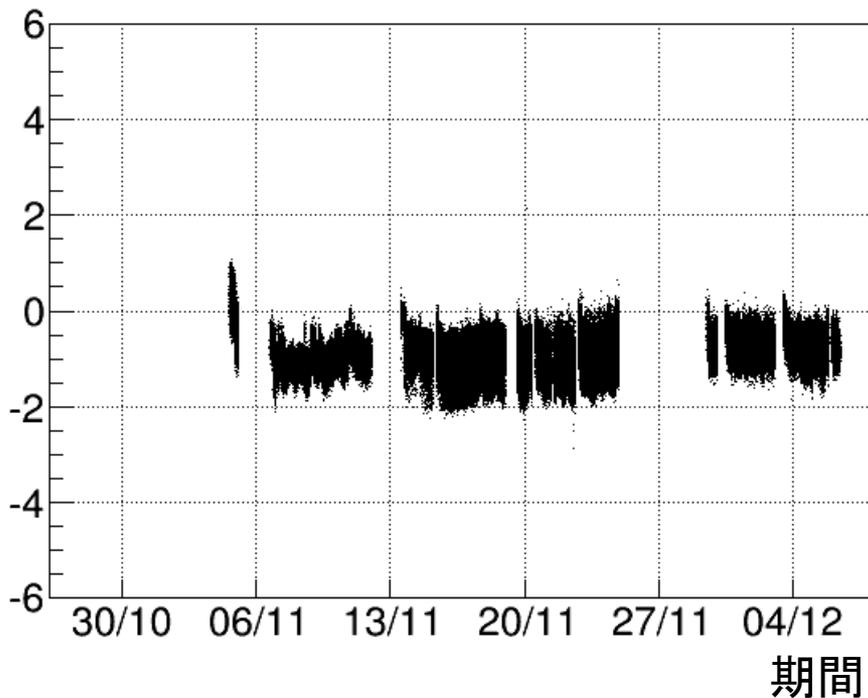
イオン  
チェンバー



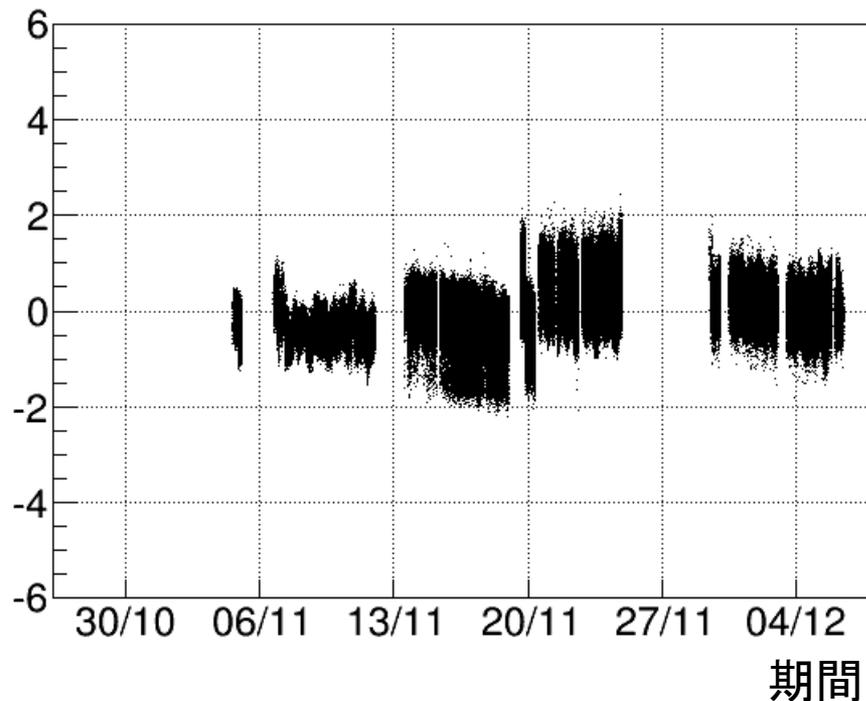
Si検出器

# ビーム方向の安定性

X方向 中心(cm)

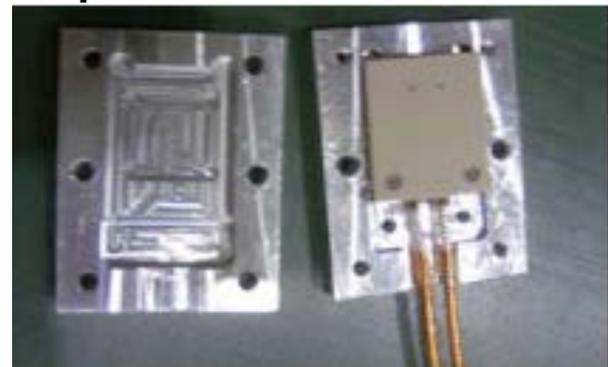


Y方向 中心(cm)



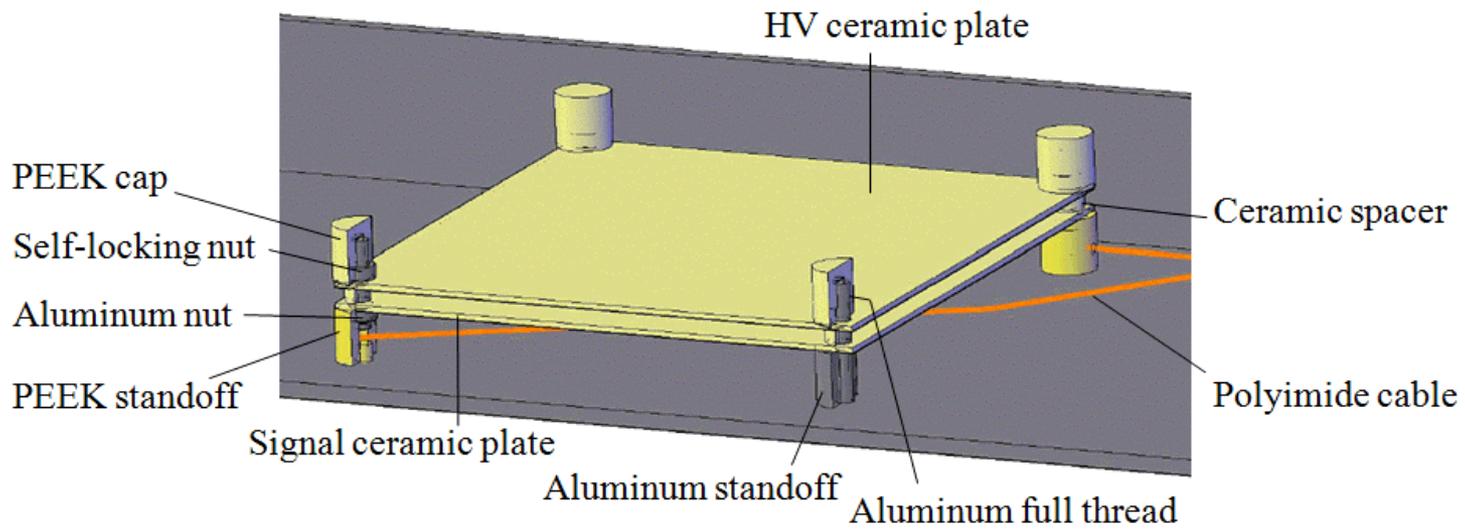
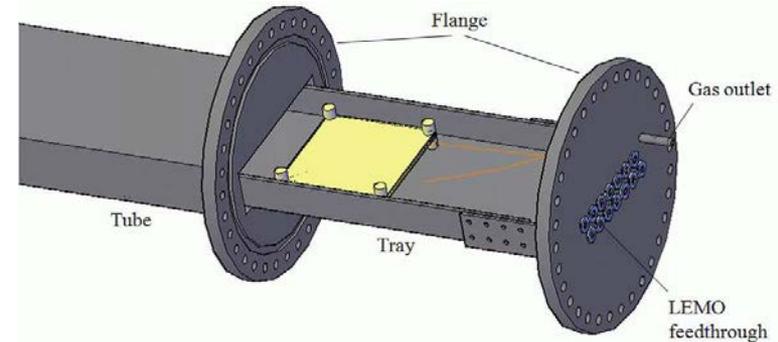
# Silicon PIN photodiode

- HAMAMATSU S3590-08
- Active area: 10mm × 10mm
- thickness: 0.3mm
- HV: 80V
  
- not tolerant of the severe radiation
- lifetime: ~1month with the 0.75MW proton beam
- Packages were designed so that replacement can be quickly done

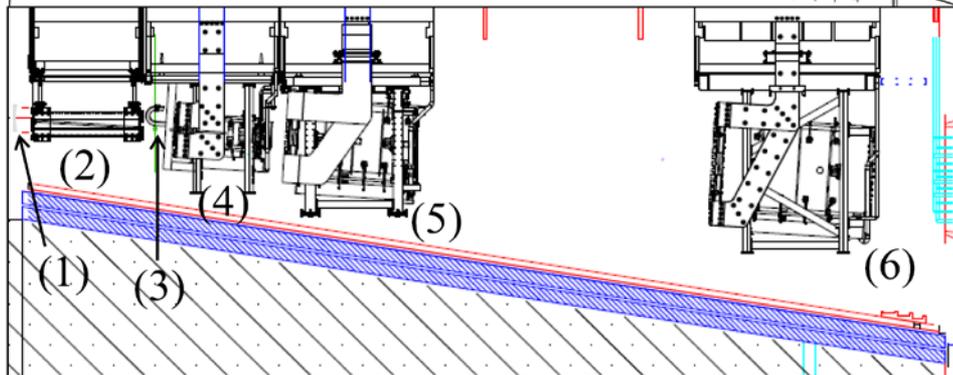
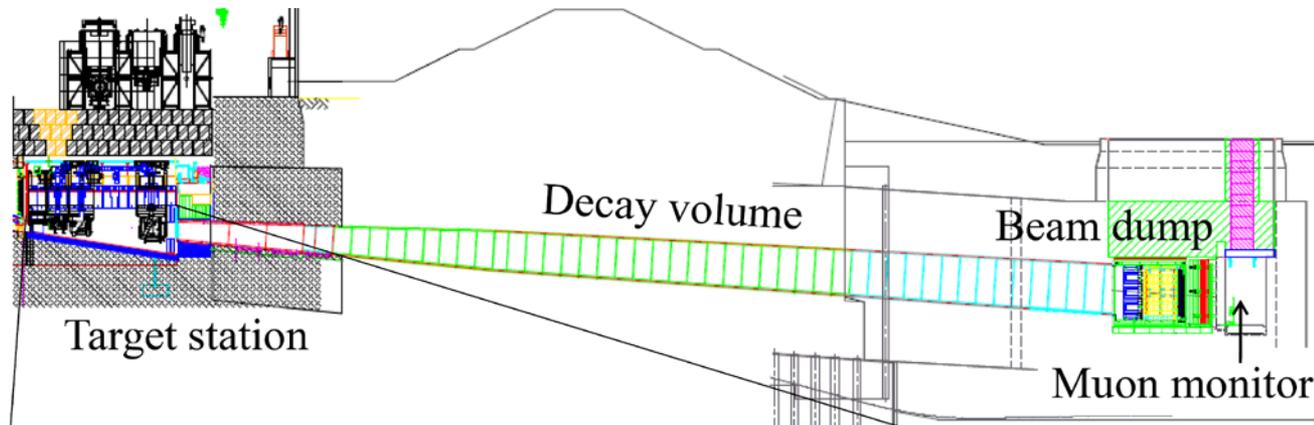
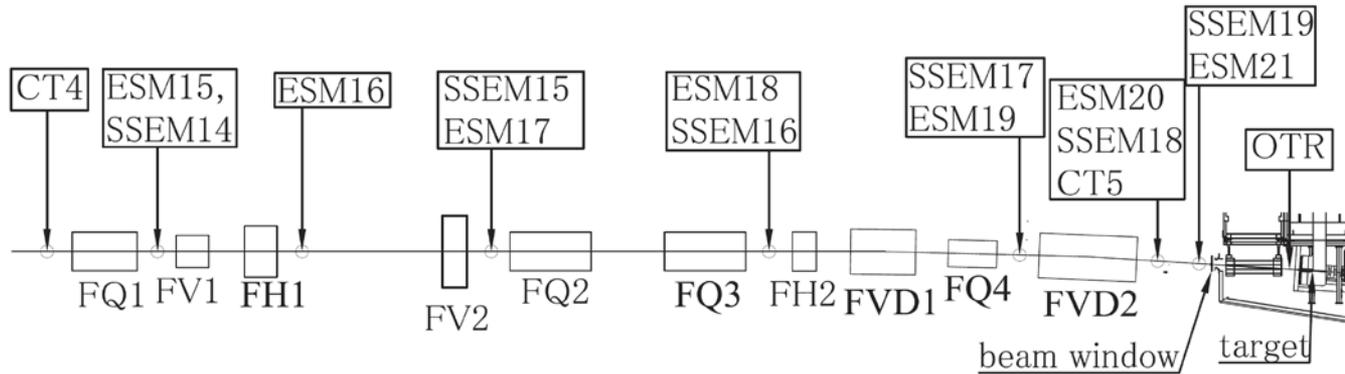


# Ionization chamber

- Active area: 75mm × 75mm
- thickness : 3mm
- Gas : Ar+N<sub>2</sub> (2%)
- : He+N<sub>2</sub> (1%)
- N<sub>2</sub> gas : mixed for faster and stable response
- HV:200V



# ビームライン



- (1) Beam window
- (2) Baffle
- (3) OTR
- (4) Target and first horn
- (5) Second horn
- (6) Third horn

# MC Profile width

MC vs data

width (cm)	MC X	Data X	MC Y	Data Y
Si 250kA	105.5	101.7	114.0	113.6
IC 250kA	111.7	106.4	127.0	123.8
Si -250kA	96.2	97.7	104.1	103.8
IC -250kA	104.0	103.1	115.0	113.5

MC  $\mu^+$  vs  $\mu^-$

width (cm)	X $\mu^+$	X $\mu^-$	Y $\mu^+$	Y $\mu^-$
Si 250kA	107.1	86.0	116.6	86.2
IC 250kA	113.2	93.2	130.0	96.1
Si -250kA	86.2	99.1	87.4	109.6
IC -250kA	93.0	104.7	95.6	121.7

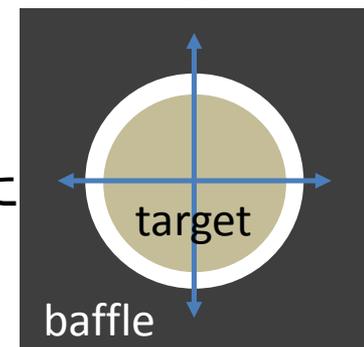
- MUMONで検出する信号は $\mu^+$ と $\mu^-$ の和
- 主に標的からビーム軸に平行に出て来る粒子がwrong signの $\mu$ の親粒子
- 幅はwrong signの粒子の方が狭い

# 標的の相対アライメント

- 今年のランが始まる前に標的を新しいものに交換した
- 標的のバッフル(グラフィットのブロック、コリメータの役割)に対する相対アライメントを確認
- ホーンを通电していない状態で中心から約1mm毎にずらして標的にビームを当てた時のプロファイルを調べる
- 弱い強度(機器を壊さないため)
- 幅は2.2~2.5mmで通常時の4.2mmより狭い

断面図  
(ビーム軸に  
垂直な面)

理想的な  
アライメント  
の場合



# 標的の相対アライメント

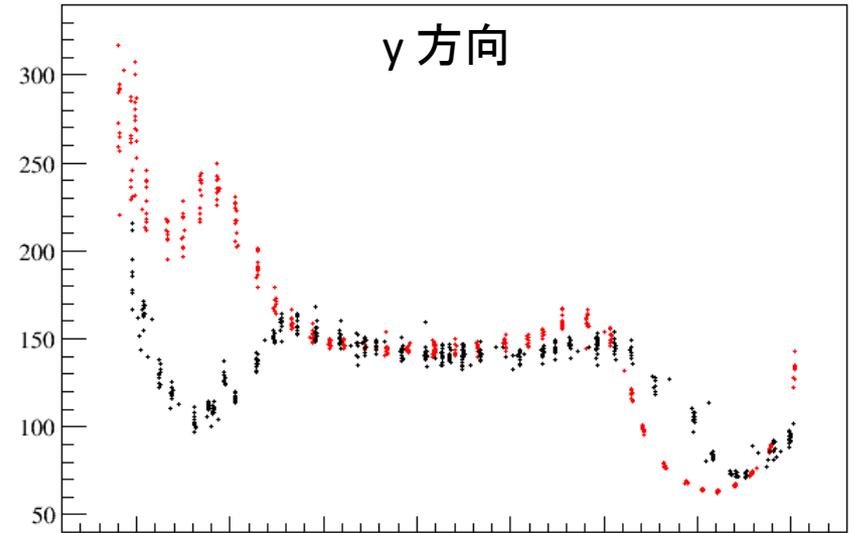
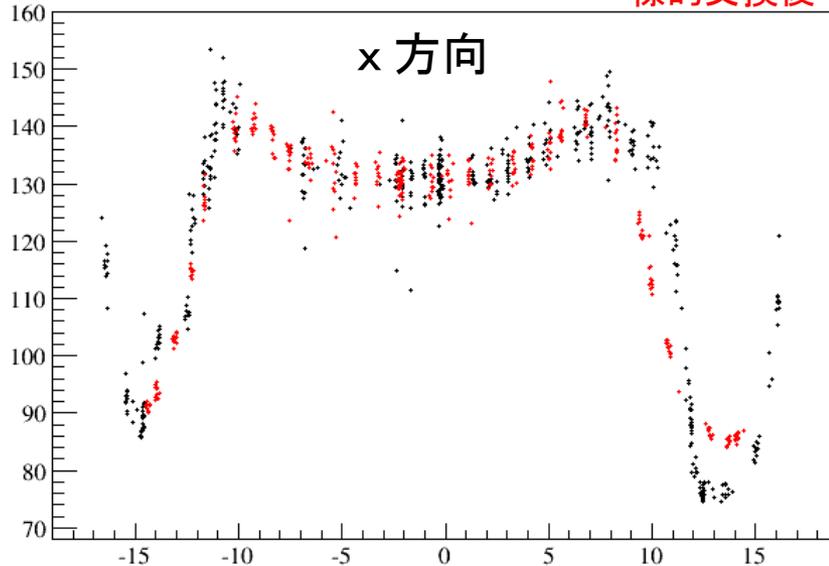
horn 0kA

標的交換前  
標的交換後

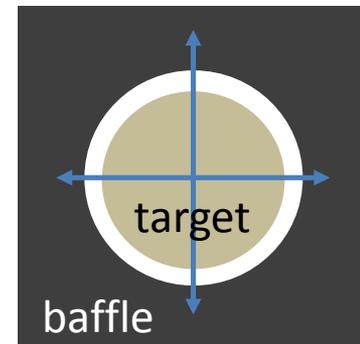
MUMON 幅(cm)

標的交換前  
標的交換後

MUMON 幅(cm)



- 各方向でMUMONの幅を比べる
- 標的中心付近では中心で幅が狭くなる
- ビームの一部が標的とバッフルの間に入るとMUMONに近い領域に当たり、MUMONには狭いビームが到達する
- x方向は過去のデータとまらずまらず一致しているが、y方向は標的の端に近いところで合っていない
- y方向は標的の相対アライメントがずれている



# 標的のアラインメントのずれ

ずれの  
大きさ

1.5mm

1.6mm

1.7mm

1.8mm

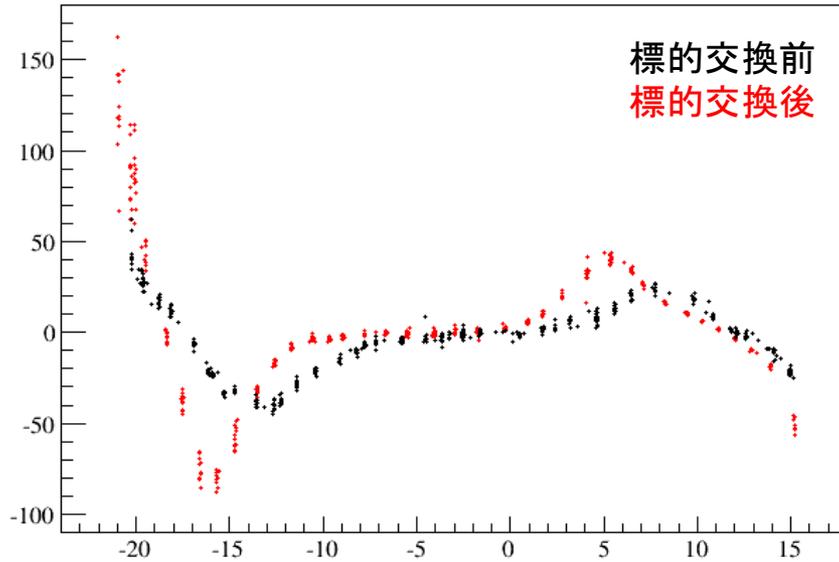
1.9mm

2mm

data

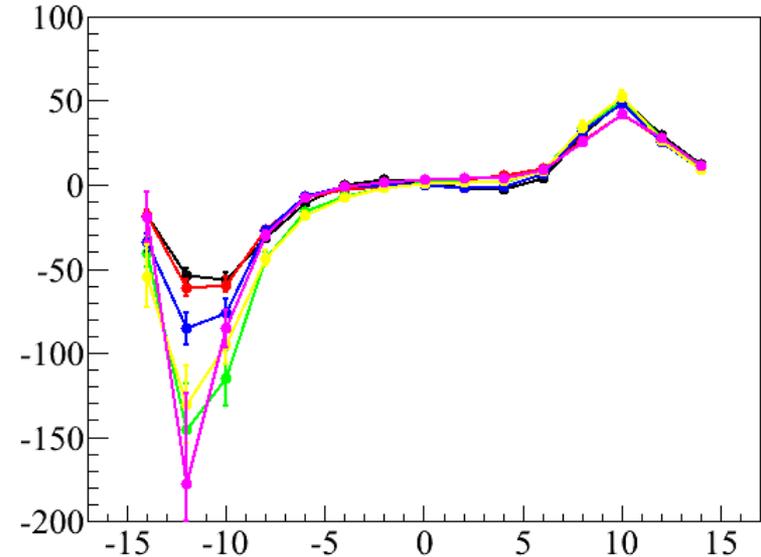
MC

MUMON y 中心 (cm)



陽子ビーム中心位置(mm)

MUMON y 中心 (cm)



陽子ビーム中心位置 (mm)

- MCで陽子ビーム中心を動かした時のMUMONの中心の応答を見る
- データとMCを比較するとずれの大きさは1.6~1.9mm程度と予測される
- 元の標的とバッフルの隙間の幅は2mmなので標的はバッフルに対して隠れてはいない
- 物理データはバッフルに対する陽子ビームの中心をずらして対応