

# T2Kニュートリノ振動実験のための荷電 $\pi$ 中間子反応断面積の精密測定

京大理、東大理<sup>A</sup>、東大ICRR<sup>B</sup>、U of Toronto<sup>C</sup>、  
U of British Columbia<sup>D</sup>、TRIUMF<sup>E</sup>

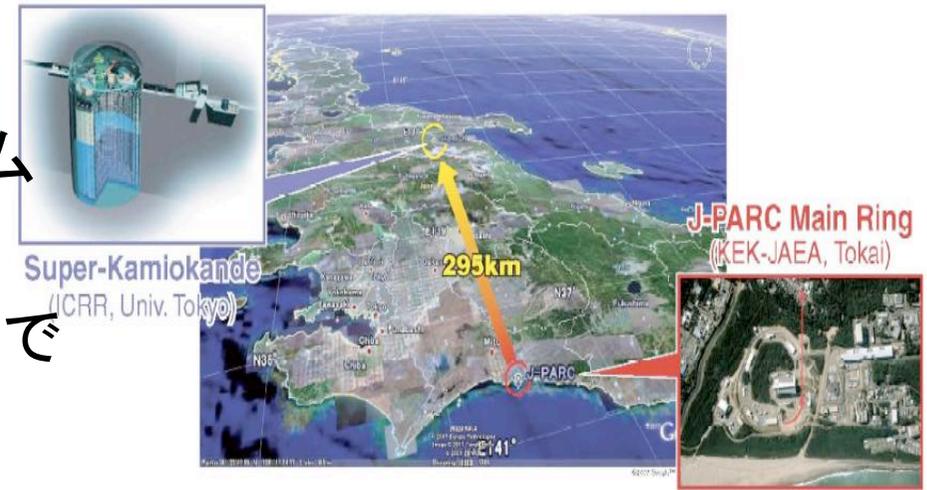
山内隆寛、家城佳、池田一得、中家剛、早戸良成<sup>B</sup>、  
横山将志<sup>A</sup>、Hirohisa Tanaka<sup>D</sup>、Jiae Kim<sup>D</sup>、  
Kendall Mahn<sup>E</sup>、Matthew Gottschalk<sup>D</sup>、Michael Wilking<sup>E</sup>、  
Mike Nicholson<sup>D</sup>、Patrick de Perio<sup>C</sup>



# T2K experiment

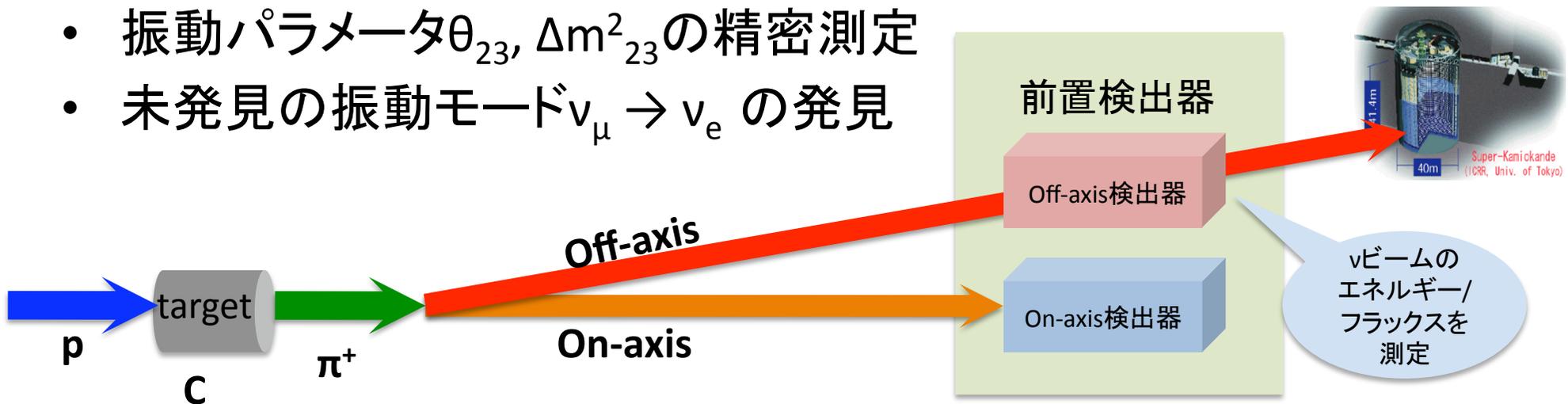
## ★特徴

- 長期線ニュートリノ振動実験
- J-PARC加速器でニュートリノビームを生成
- 295km先のスーパーカミオカンデで検出



## ★目的

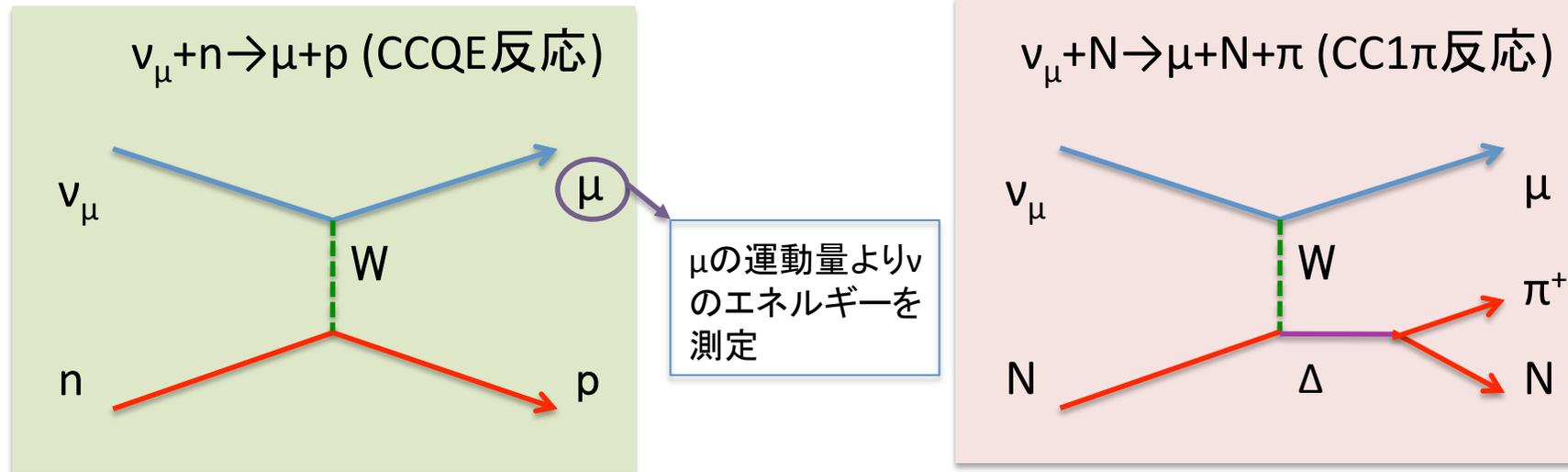
- 振動パラメータ $\theta_{23}$ ,  $\Delta m^2_{23}$ の精密測定
- 未発見の振動モード $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の発見



# PIAnO experiment

## ★目的

- T2K実験におけるニュートリノ反応

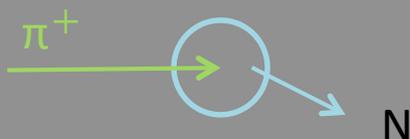


- CC1 $\pi$ 反応において、 $\pi$ が原子核に吸収されるとCCQE反応と同様に見え、 $\nu$ のエネルギーが誤って計算される
  - しかし、過去のデータは不定性が~20%と大きい
  - $\pi$ の原子核中での反応断面積を精密に測定(目標10%)

# PIAnO experiment

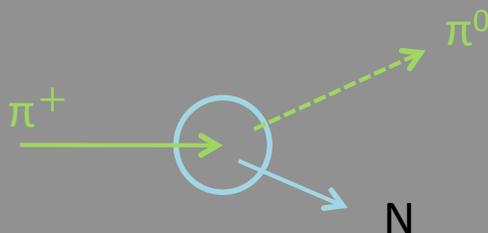
## ★検出したい主な反応

### 1. 吸収反応

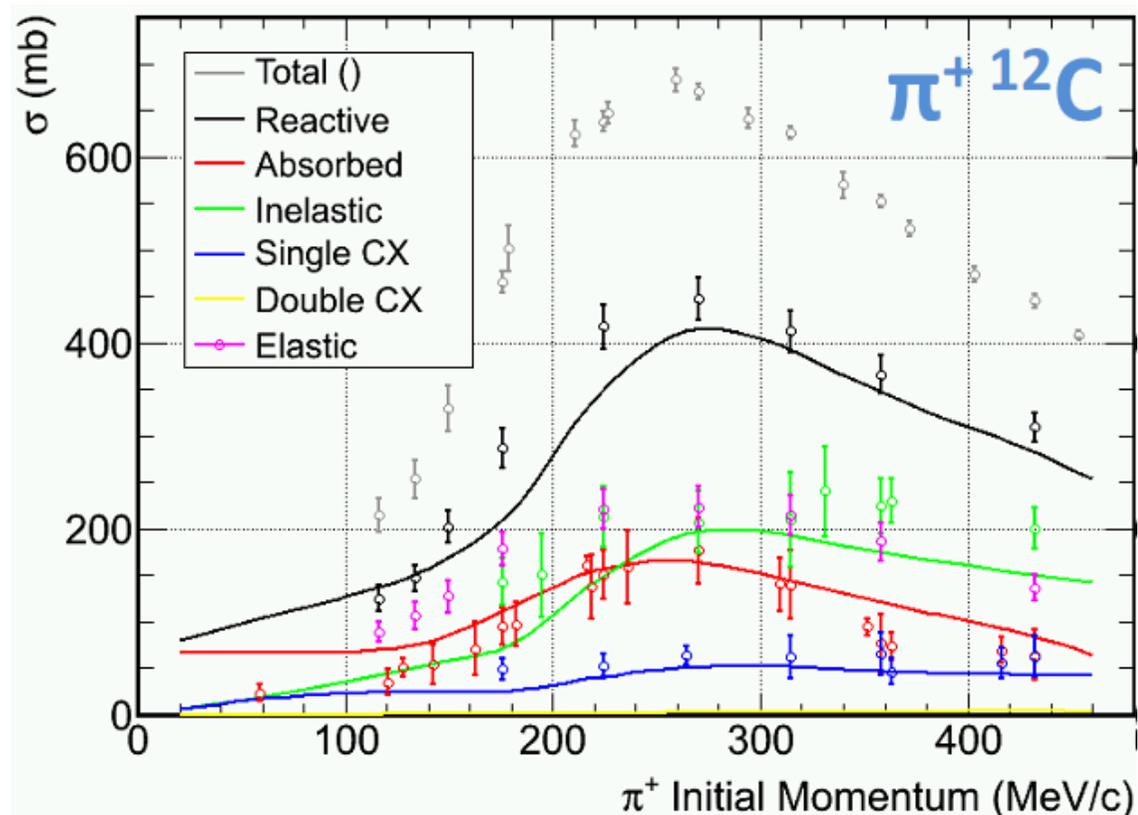


$\pi$ が吸収され、 $p, n$ を放出

### 2. 荷電交換反応



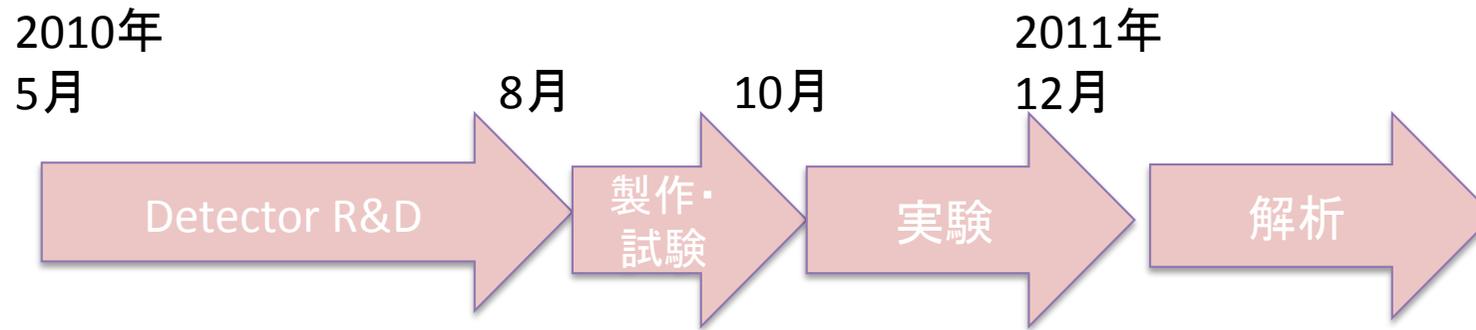
$\pi^+$ が $\pi^0$ に変化し、 $p, n$ を放出



$\pi$ 反応の運動量と断面積の関係

終状態に $\pi^+$ が無く、かつ $\pi^0$ からの $\gamma$ が無ければ吸収反応

# PIAnO これまでの流れ



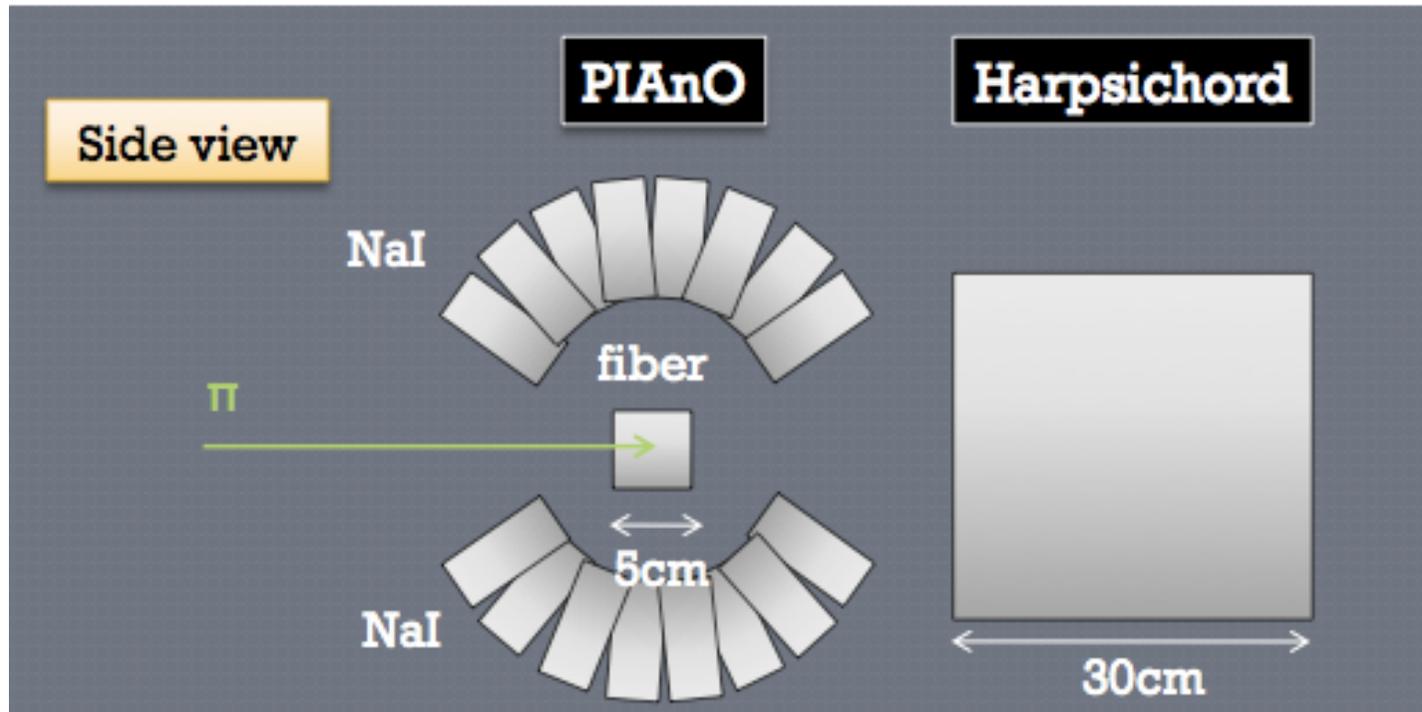
	山内
検出器の製作	ファイバー検出器組み立て
Beam test@TRIUMF	シフト12h/2days
Beam	Particle ID
Calibration	Nal
MCシミュレーション	検出効率を求める
断面積を求める	

完了

予定

# 検出器

# 検出器の概要

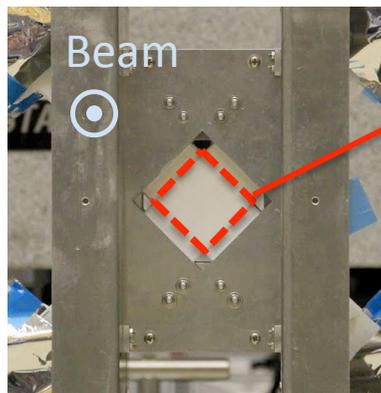
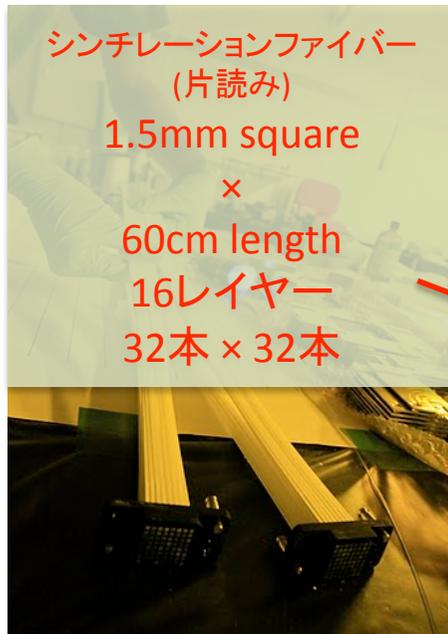


- PIANo: シンチレーションファイバー & NaI
- Harpsichord: シンチレーターバー & 鉛板

ファイバーで $\pi$ 及びNの飛跡を検出

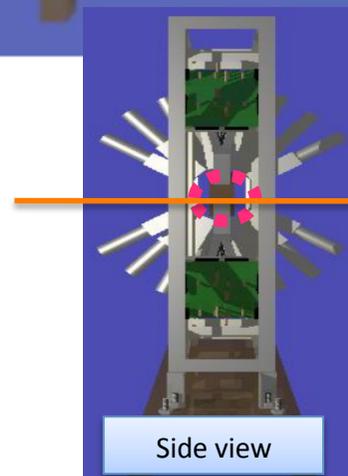
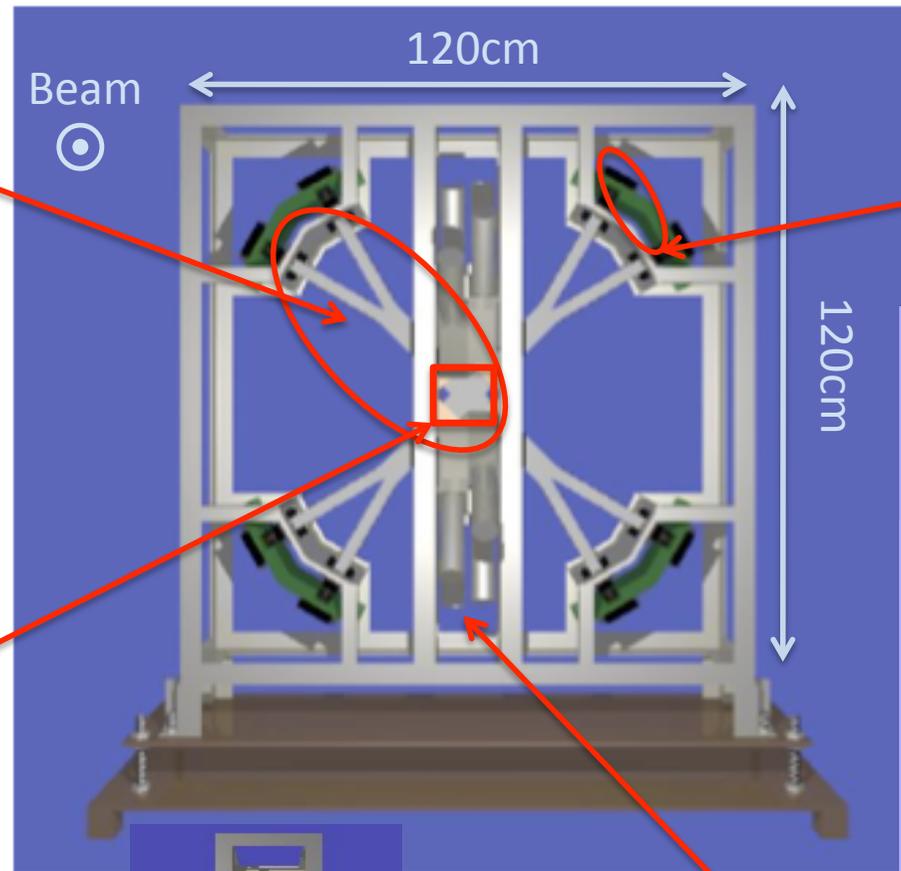
NaI及びHarpsichordでcharge exchangeの $\pi^0$ からの $\gamma$ を検出

# PIAnO detector



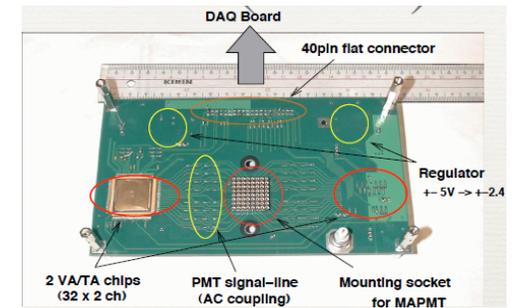
Main volume  
(1.5mm × 32本)<sup>3</sup>  
= (48mm)<sup>3</sup>

ビームは紙面垂直  
方向に入射

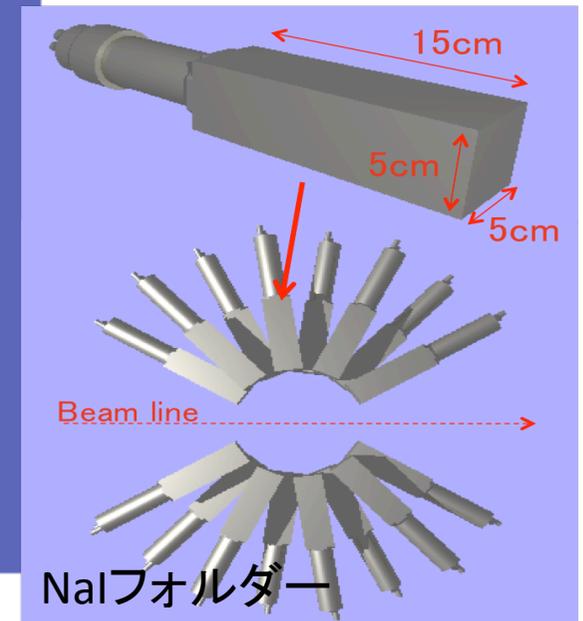


$\pi$  Beam

Fiberで $\pi$ 及びNの軌跡を検出



MAPMT + FEB

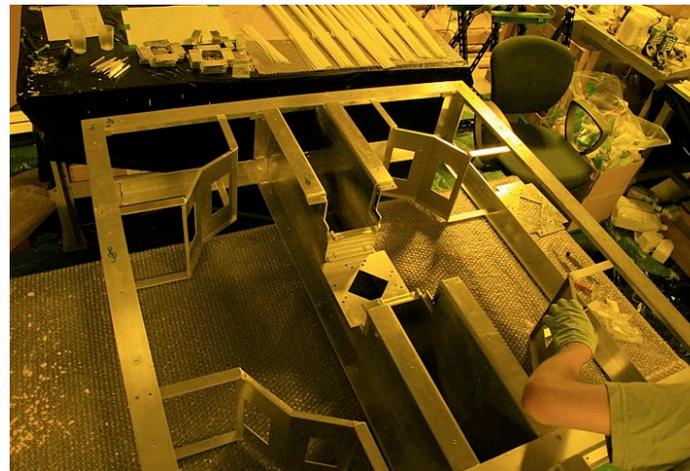


$\pi^0$ からの $\gamma$ を検出するNaI

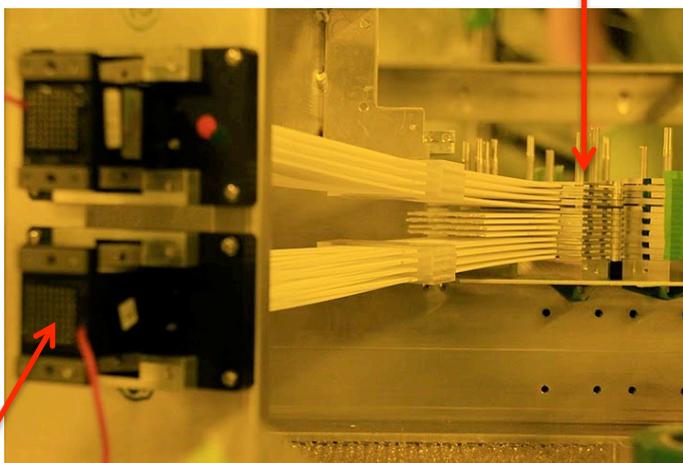
# 検出器の組み立ての様子



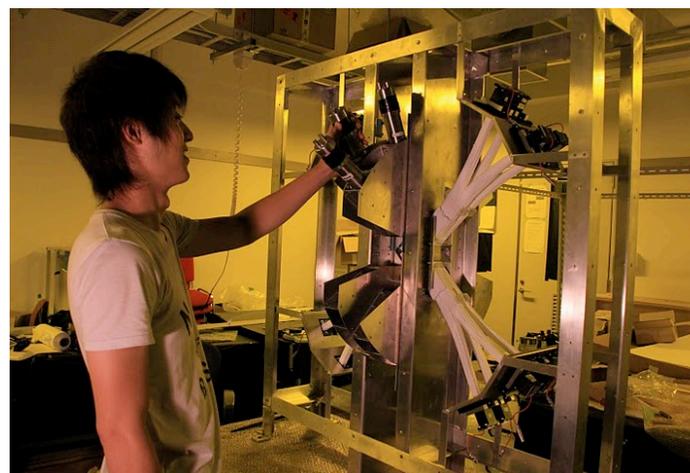
束ねたシンチレーションファイバー



外枠の組み立て

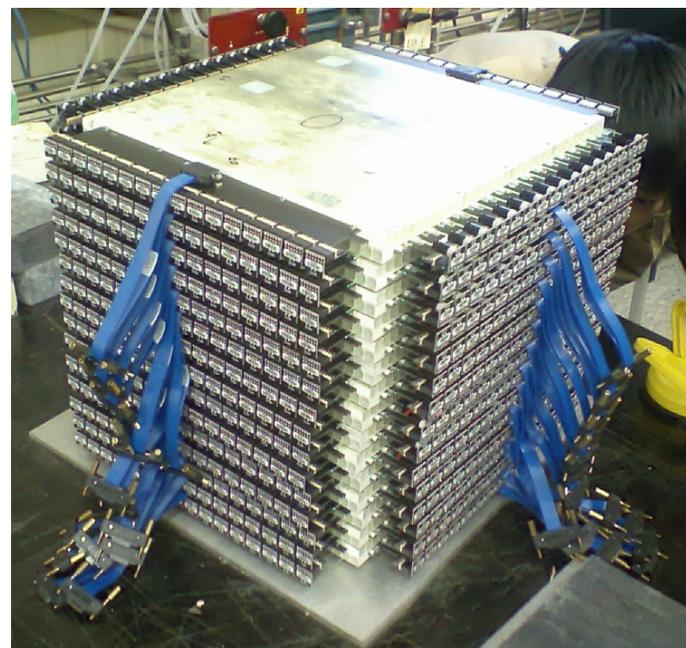


シンチレーションファイバーの重ね合わせ



NaIのインストール

# Harpsichord

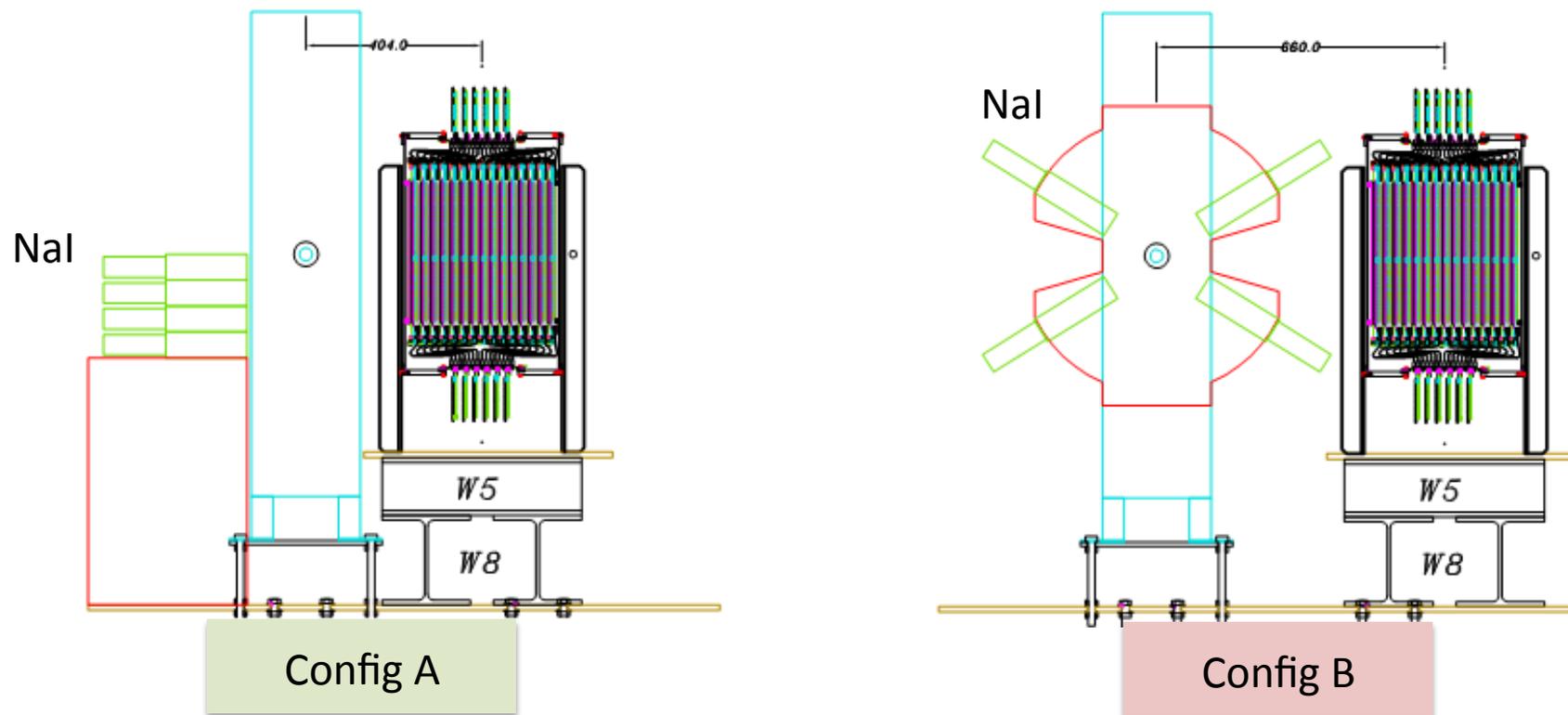


中身

- シンチレータ層と鉛板(1.5mm厚)のサンドイッチ構造
- シンチレータ層は1cm×1cm×30cmのbar32本で構成  
(15layer 32本(x)×32本(y))

# NaI configuration

- 2通りのNaI配置で測定

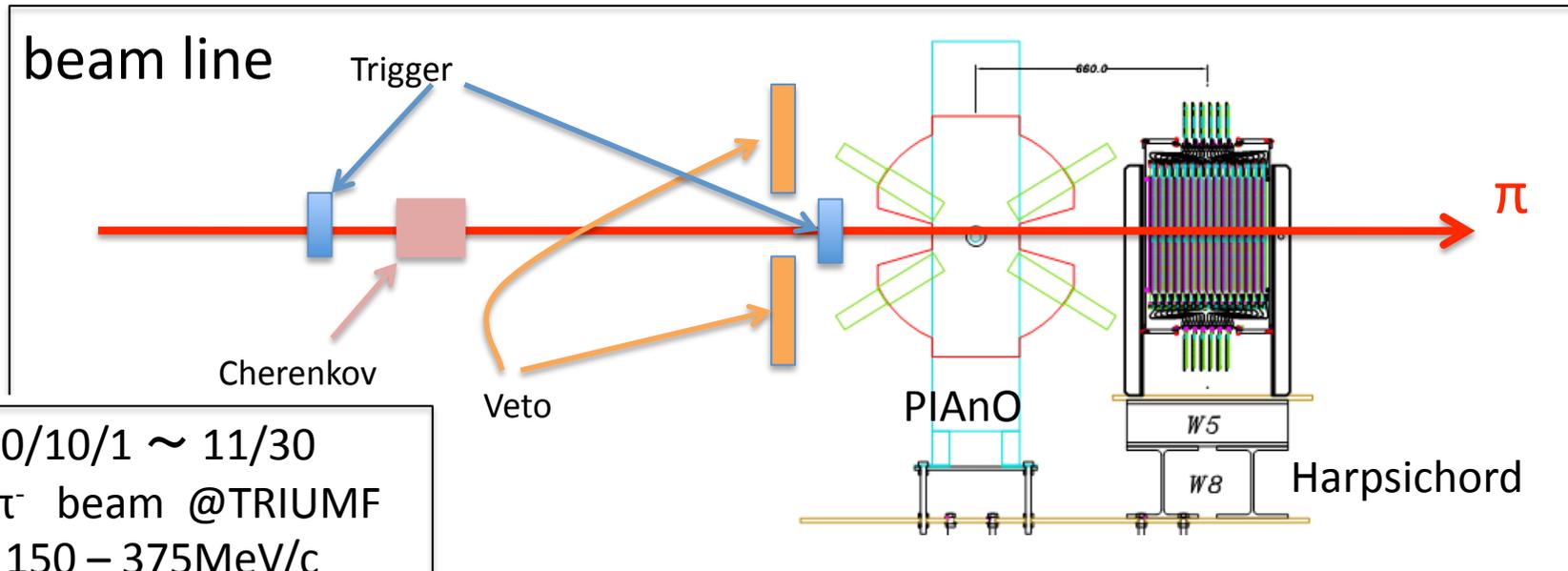


$\pi^0$ からの $\gamma$ の方向分布は、ビーム前方/後方に多いと予想される。  
そのため、

Config A  $\Rightarrow$  NaIをビーム上流に重ねて置き、 $\gamma$ のdetection efficiencyを高める  
Config B  $\Rightarrow$  NaIでファイバー周りに囲み、 $\gamma$ の方向分布を確認

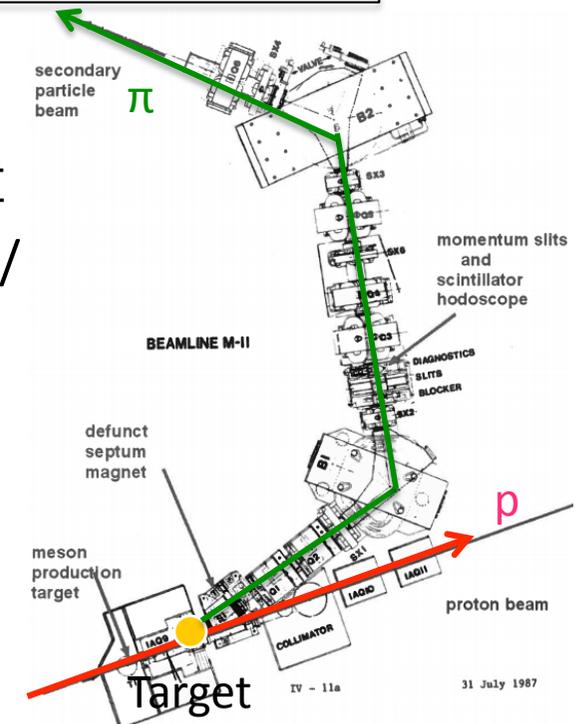
# Beam test @TRIUMF

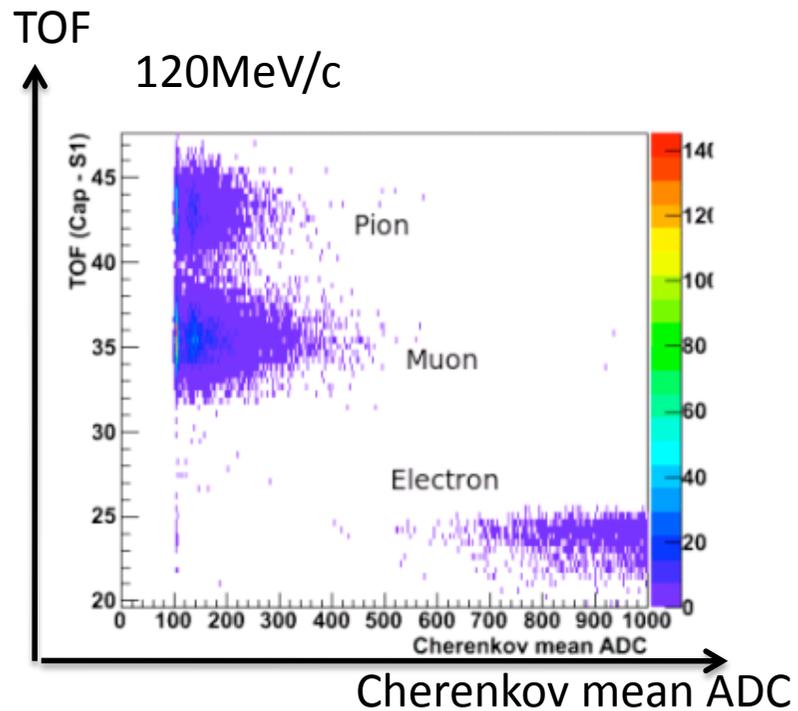
# Experimental setup



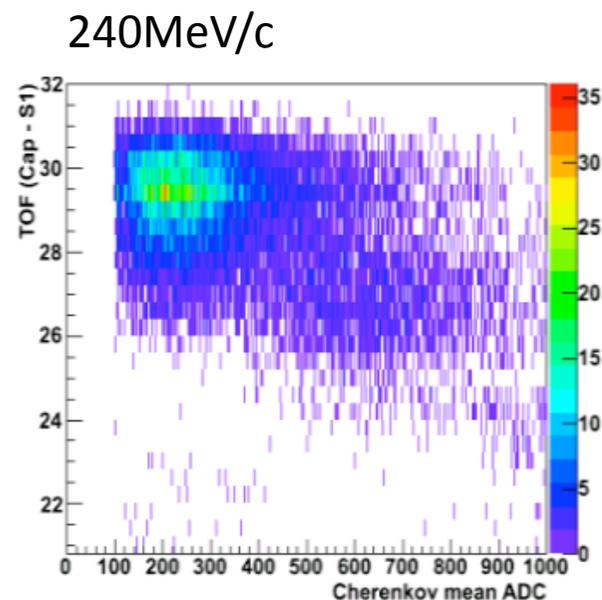
- 2010/10/1 ~ 11/30
- $\pi^+/\pi^-$  beam @TRIUMF
- $P_\pi$  : 150 – 375MeV/c
- Trig rate(S0 & S1): <30Hz

- 2つのシンチレーターでトリガーし、NaI用のVetoを設置
- TOF counterとCherenkov counterを用いてビームの $\pi/\mu/e$ の識別(PID)を行う

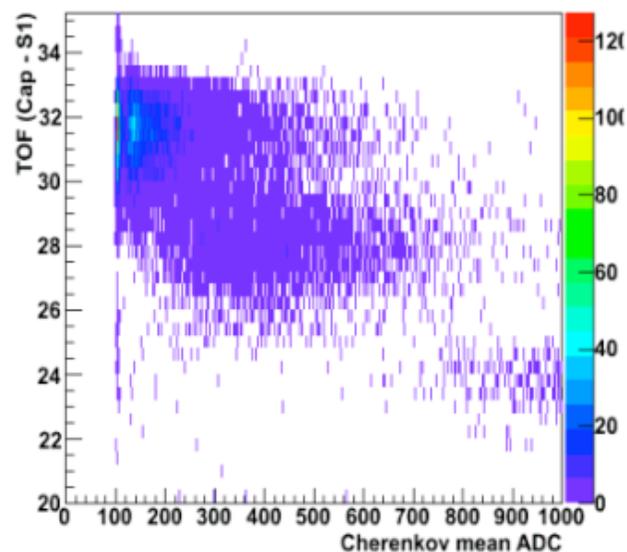




# PID



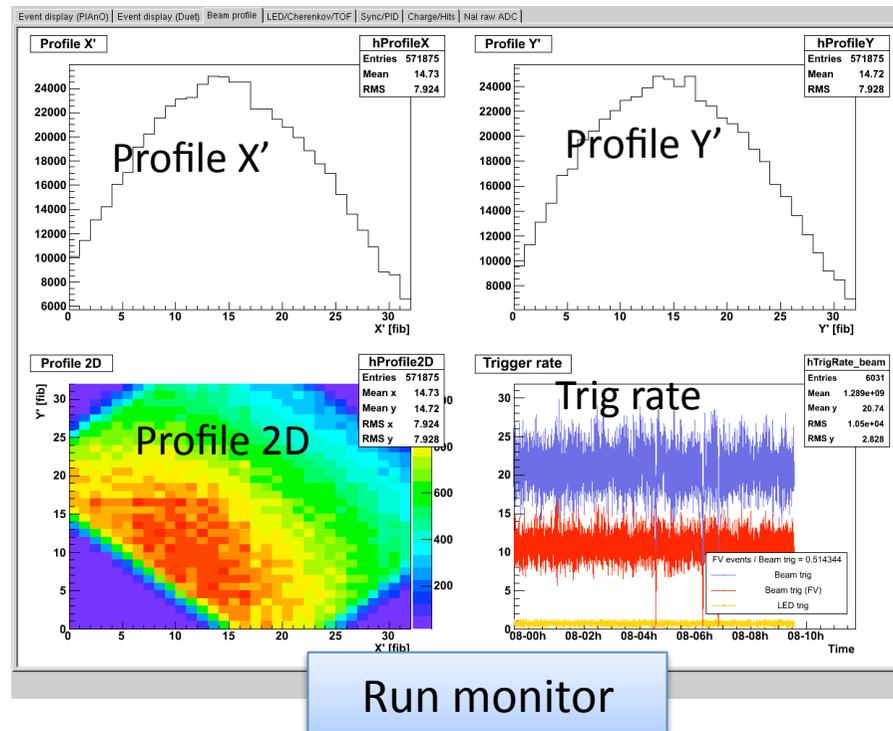
200MeV/c



- オンラインでの信号のチェック
- 1eventごとにPIDを行う予定

# Data taking

- データ取得中はevent display, beam profileやtrigger rateをモニターし、データの質を確認した。
- また、LEDを用いてMAPMTのgain安定性をモニターし、NaIのgainはcalibration runでbeamを直接当ててモニターした。

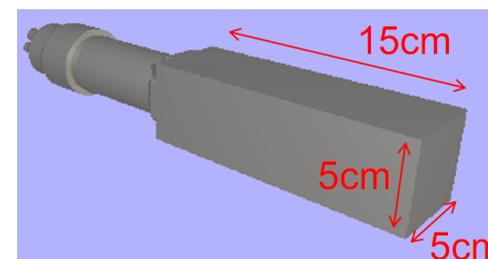


# Nal calibration

# NaI calibration

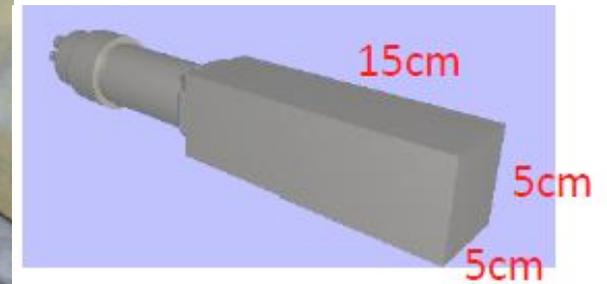
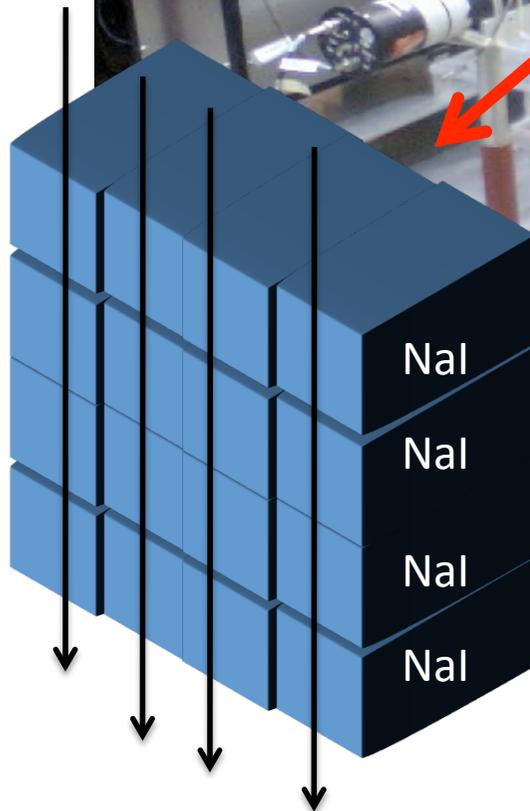
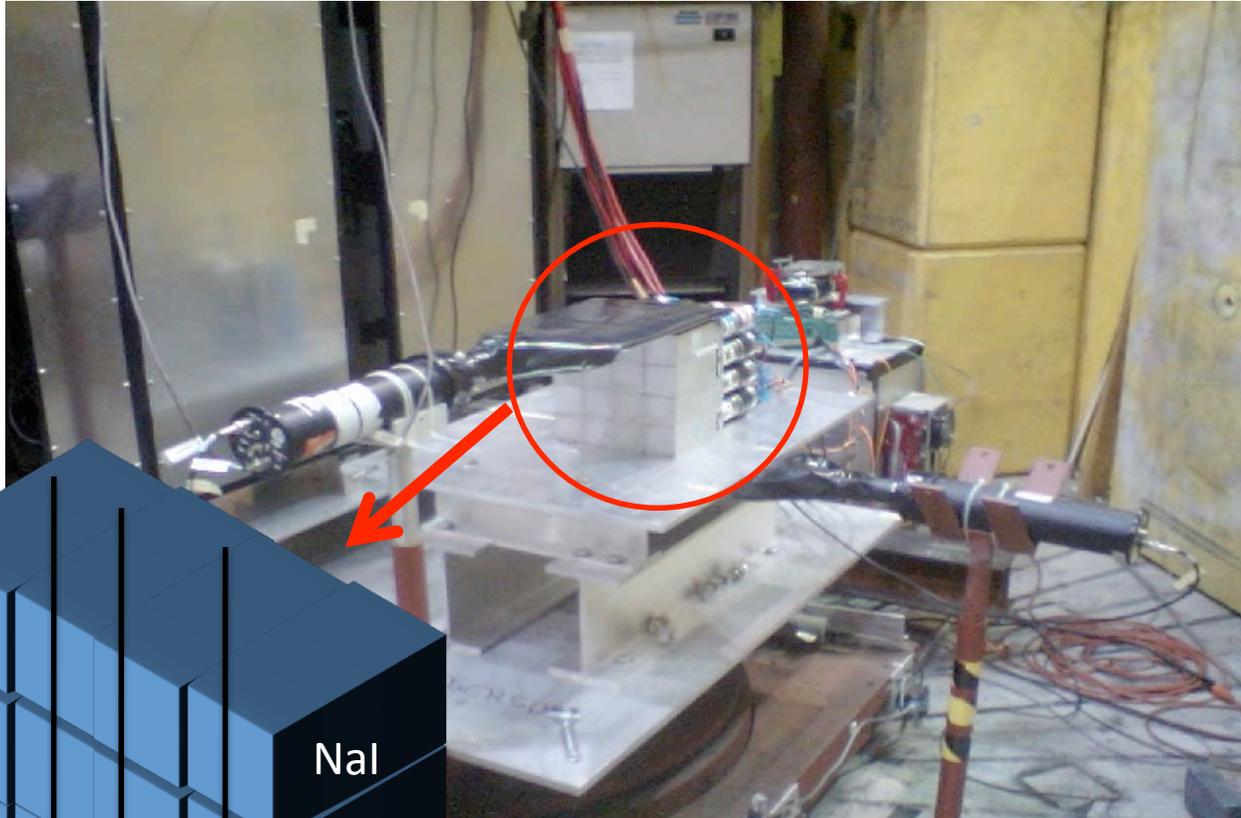
- NaIで吸収反応と荷電交換反応を区別する。
- そのためには、NaIが原子核励起による $\gamma$ (数MeV)と、 $\pi^0$ による $\gamma$ (数十MeV)を識別することが必要。

→ NaIのエネルギースケールの測定を行い、キャリブレーションを行った。



# NaI energy scale

- 宇宙線によるエネルギースケールのチェック

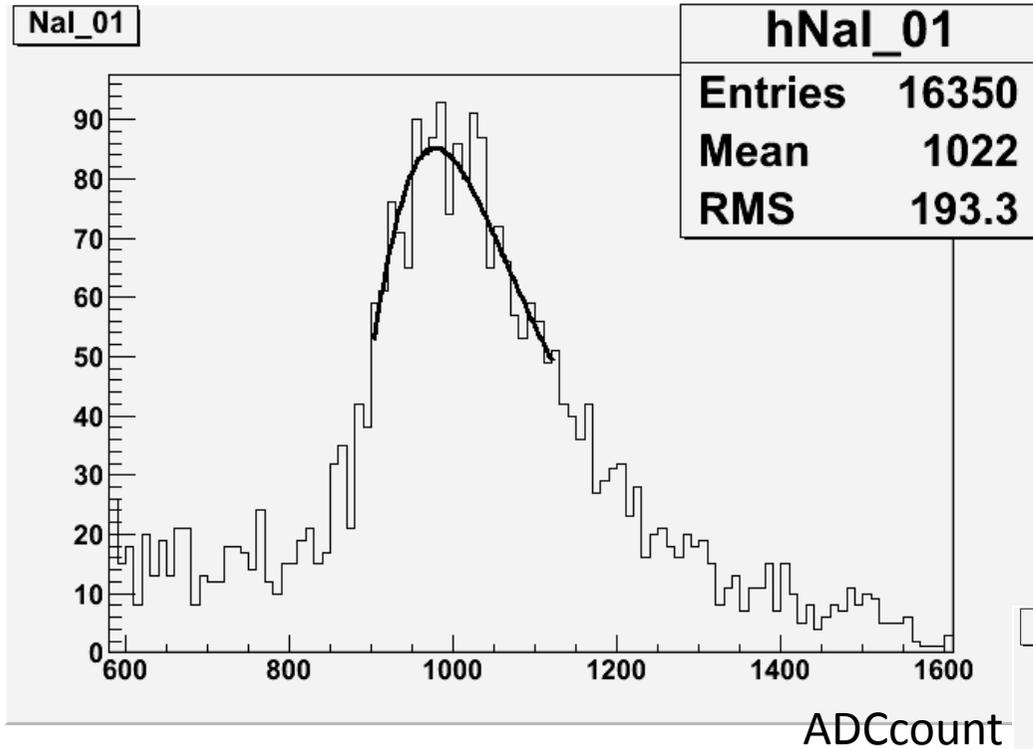


$E_{\text{deposit}} = 24\text{MeV}$   
(for through going MIP)

- 縦に4NaI突き抜けたeventのみ選別

@関西高エネ発表会

# Nal energy scale



Nal #01:  
Peak: 992.198  
Error: 5.193

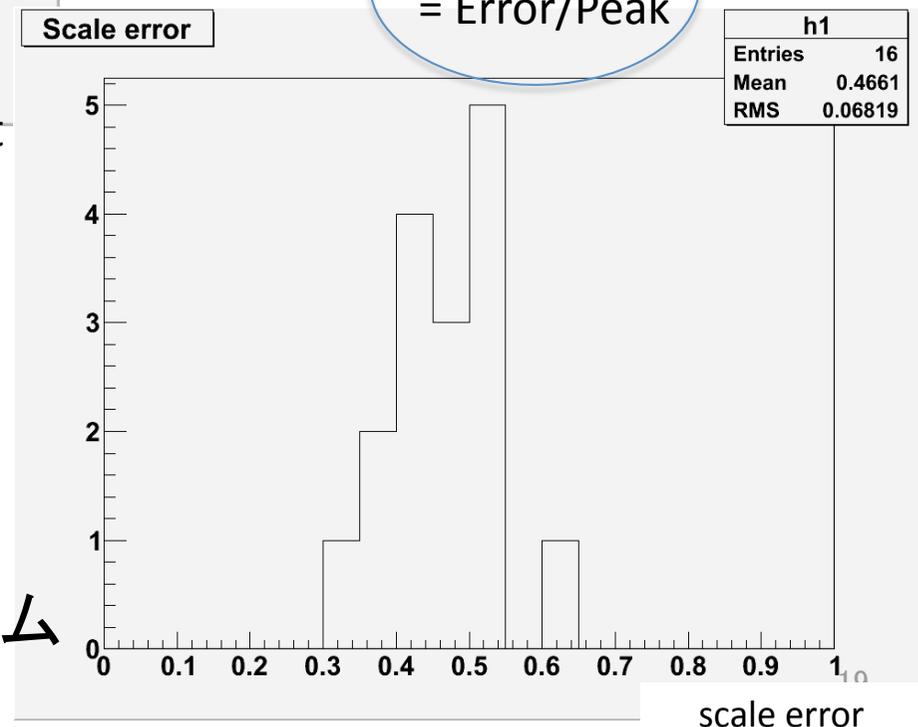


Scale[MeV/count] = 0.0242  
Scale Error[%] = 0.6615

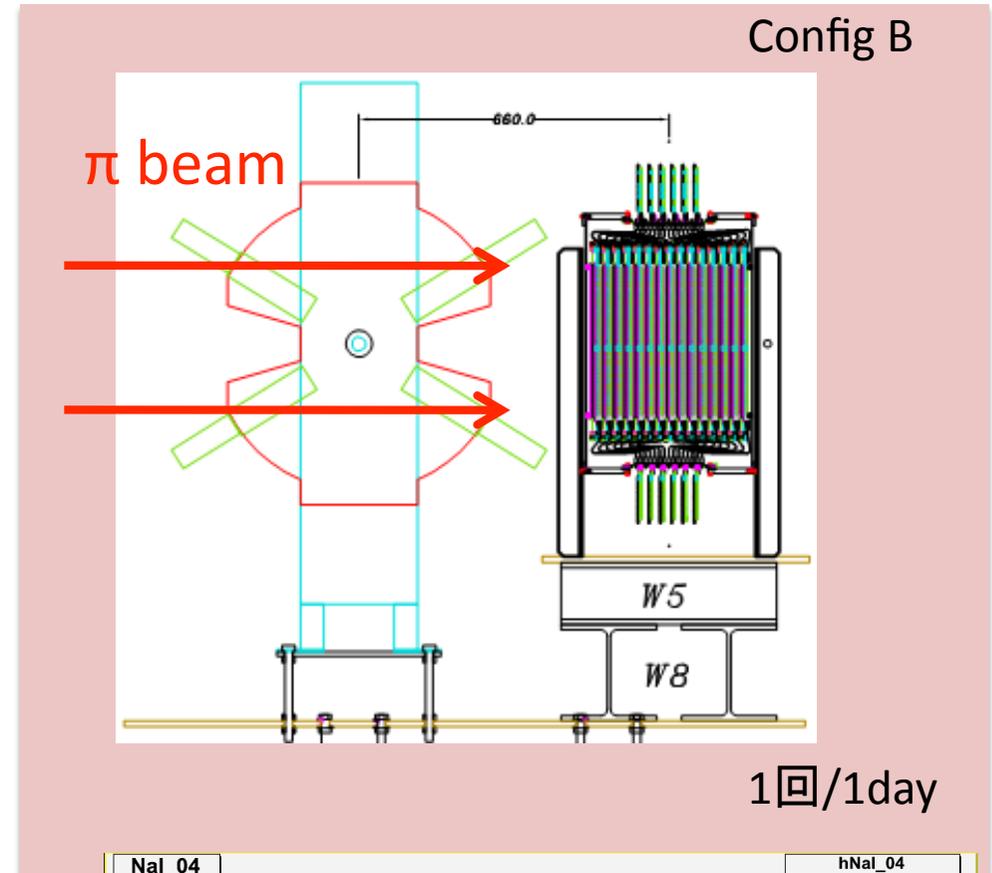
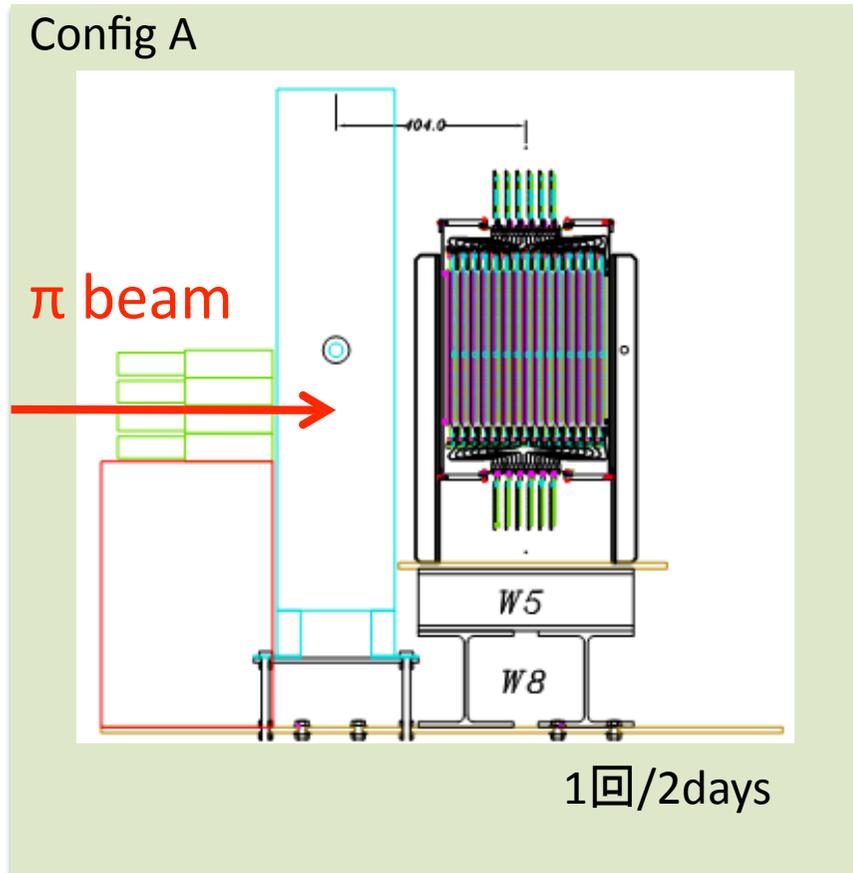
Scale Error  
= Error/Peak

↑Landau Fit よりピーク的位置を求め、ピーク値に対するエラーの割合を計算した。

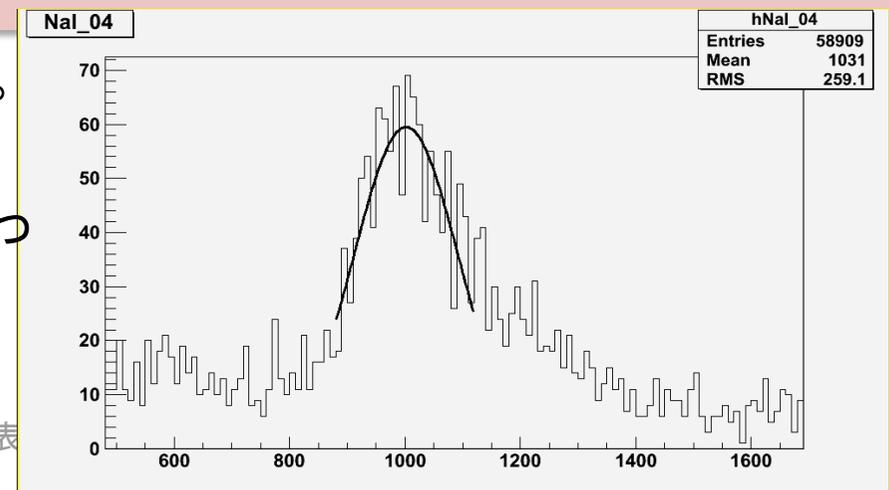
•NaI16本のScale Errorヒストグラム



# Nal Gainの時間変動

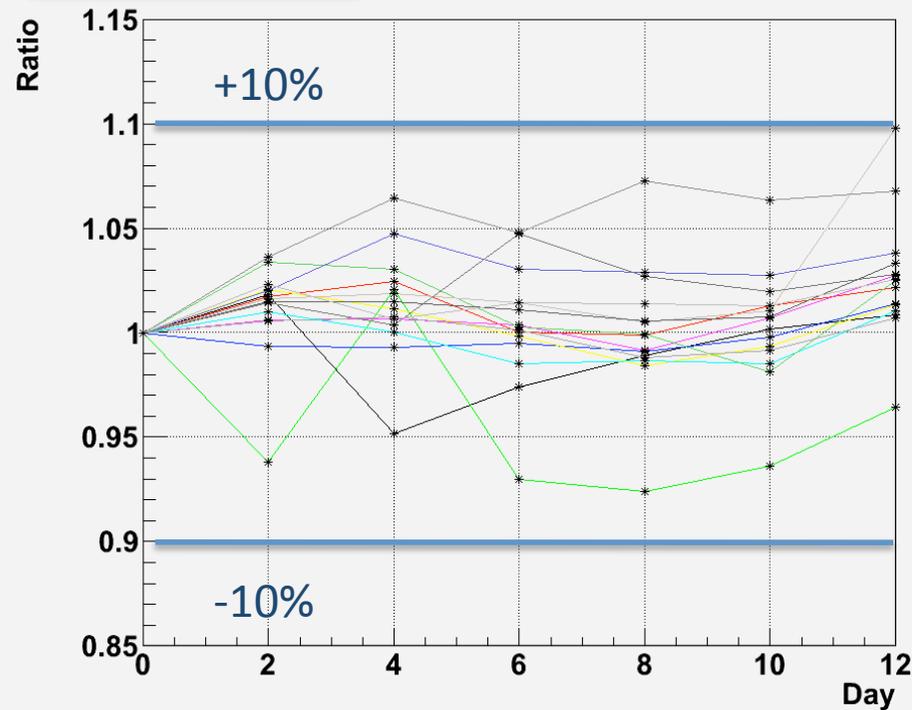


- $\pi$ ビームによるエネルギーピークを確認する。
- Config B では、毎日フォルダーからNalを取り出すことが困難なため、そのまま照射を行った。



# NaI Gainの時間変動

Config A

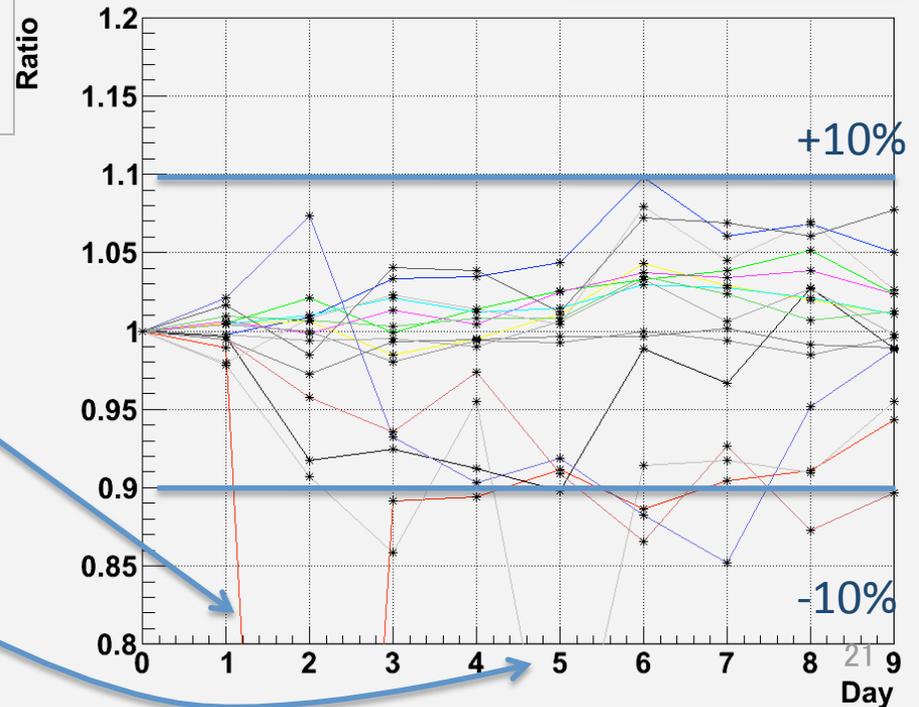


- ◆  $\pi$  beam(300MeV/c)によるキャリブレーション
- ◆ ADCcountの比をプロット

- 1回/2days
- 全NaI15本の変動  $< \pm 10\%$

Config B

Ratio Fluctuation



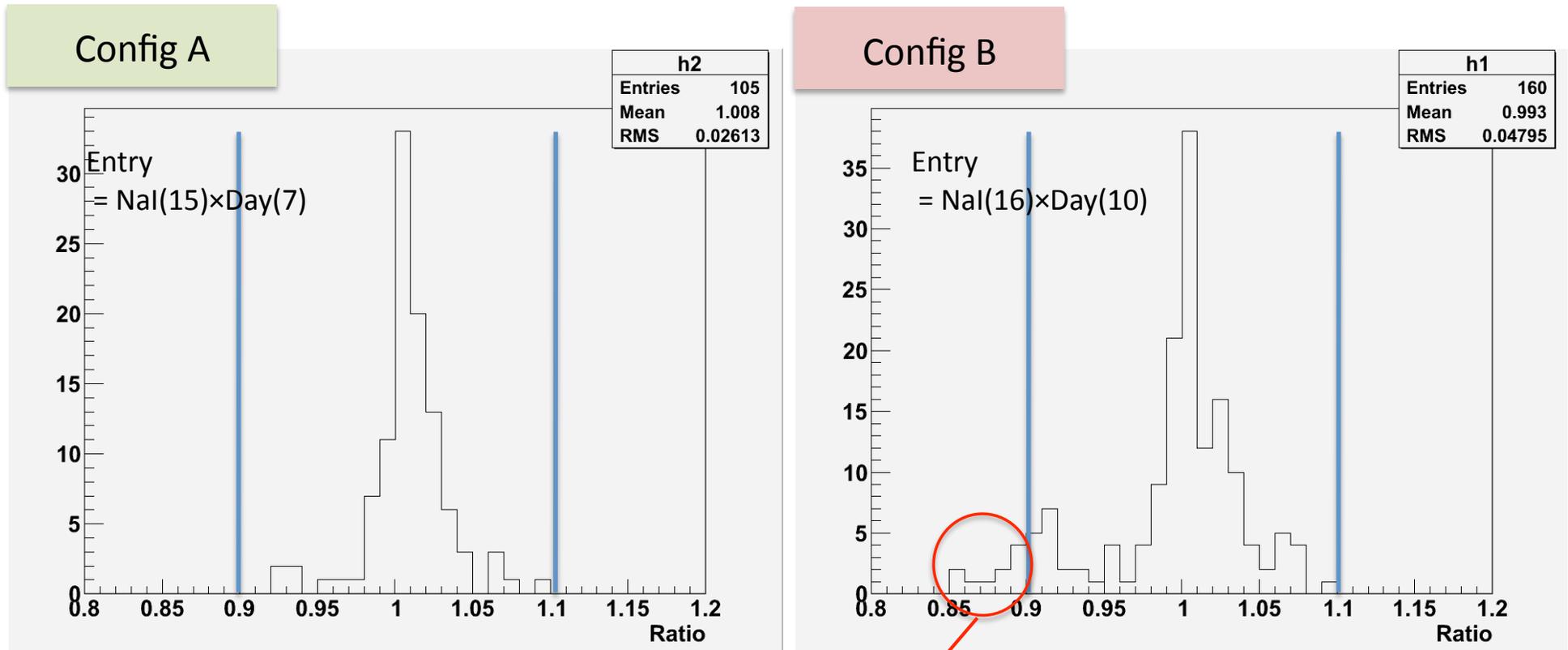
- 1回/1day
- 1/16本 HV故障(Day:2) → 修理
- 3/16本のNaIで変動が $\pm 10\%$ 上回る → 結果にどう影響するかはstudy中

# Summary

- 荷電 $\pi$ 中間子の原子核反応断面積を測定するために、PIAnO検出器を開発し、TRIUMFで運動量150MeV – 375MeV/cの範囲でビームテストを行った。
- 吸収反応と荷電交換反応を区別するため、NaIを2種類の異なる配置にして測定。
- NaIのキャリブレーションを定期的に行い、解析を行った。結果の扱いは今後検討。
- NaIで宇宙線の測定を行い、エネルギースケールを決定した。
- 今後さらに解析を行い、吸収反応と荷電交換反応の断面積を求める。

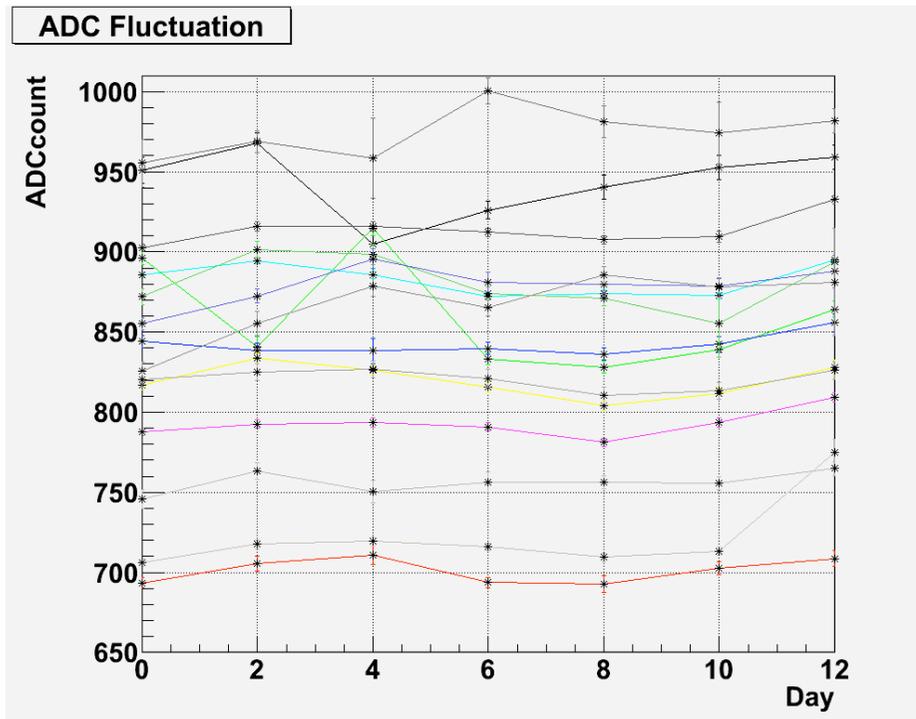
# Backup

# Nal calibration(一次元ヒスト)

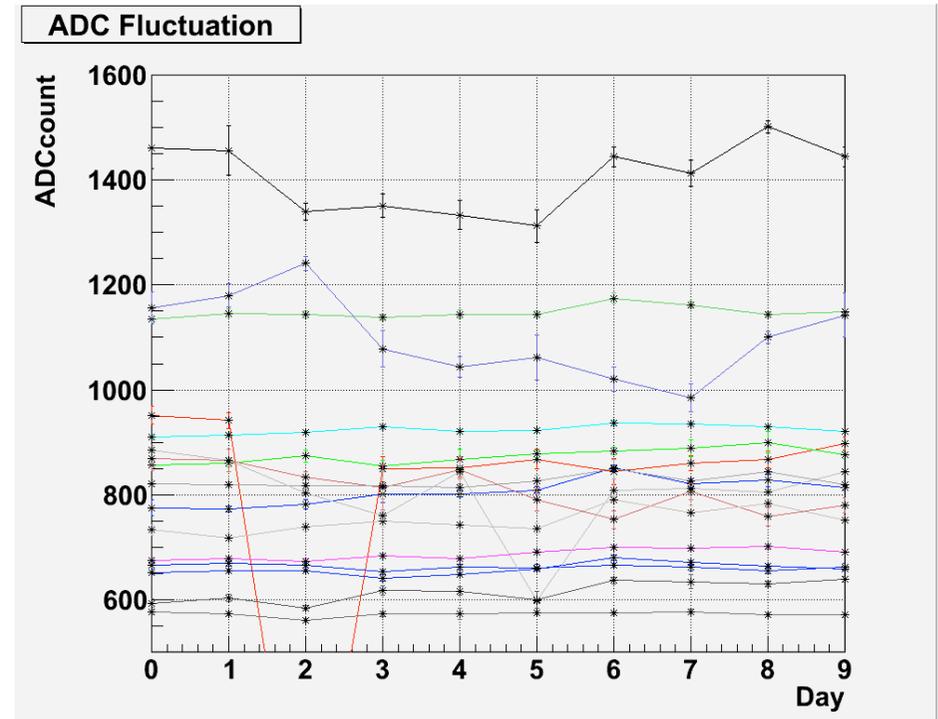


- 全NaI/Day についてのADCcount比のヒストグラム
- ConfigBにおいて、変動率>10% が10event

# Nal calibration(ADCcount)

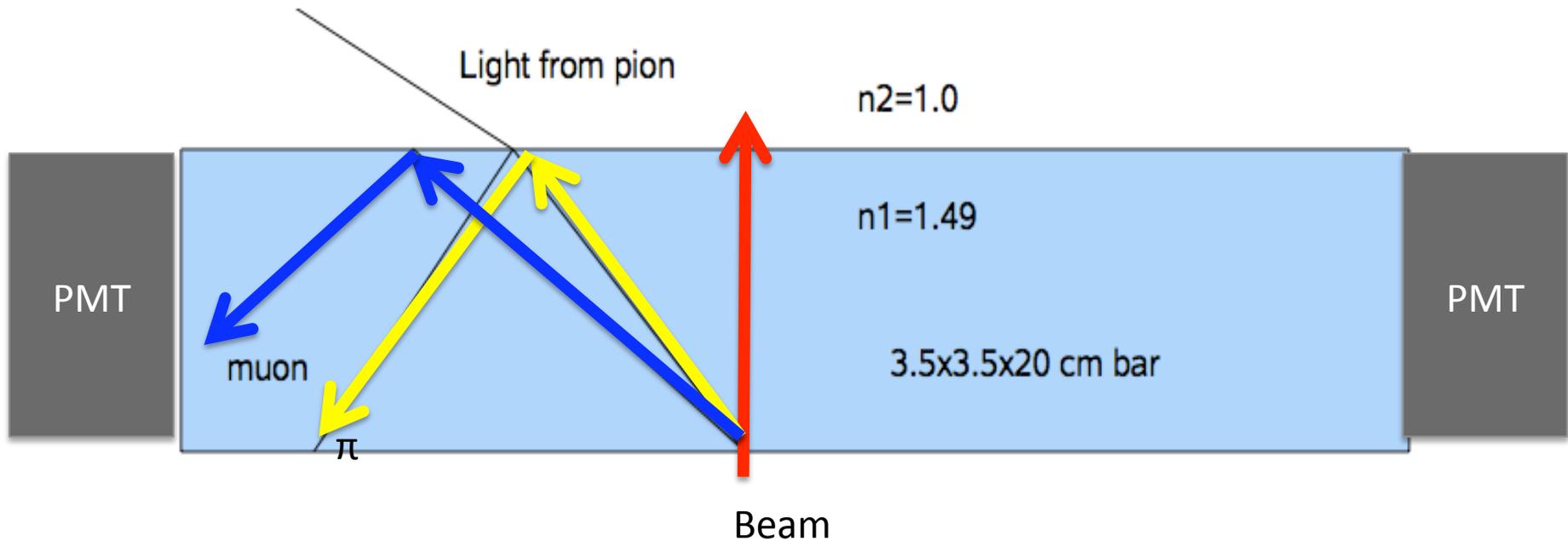


Config A



Config B

# Cherenkov counter



- アクリルの直方体の両端に PMT を装着
- $\mu$  と  $\pi$  では Cherenkov angle が違う  $\Rightarrow \mu$  の光は全反射される  $\pi$  の光は光量が減る

# NaI energy scale

NaI	Peak	Error	Scale[MeV/ count]	Scale Error[%]
1	992.198	5.193	0.0241608	0.6615
2	890.379	3.873	0.0269399	0.5034
3	1118.63	5.893	0.0214667	0.5424
4	1000.31	5.361	0.0238046	0.4081
5	924.333	4.658	0.0258921	0.4468
6	980.359	5.944	0.0245624	0.4763
7	1030.35	4.303	0.0231553	0.3688
8	980.178	4.409	0.0243698	0.3693
9	975.907	4.427	0.0245338	0.3866
10	855.324	2.795	0.027933	0.3700
11	1074.31	4.281	0.0222017	0.3326
12	1034.53	5.065	0.0231747	0.4589
13	976.461	4.554	0.0244328	0.4143
14	942.071	3.674	0.0251895	0.2682
15	880.464	3.576	0.0271898	0.4382
16	689.566	3.639	0.0347927	0.4504

Scale Error  
= Error/Peak

この結果を用いてNaIのADC値⇔エネルギーを計算する

# π吸収反応

Pion absorption

