

T2K実験におけるニュートリノフラックス計算精度向上のためのハドロン生成に関する研究

2022/Sep/06

日本物理学会秋季大会

6aA442-5

白石悠樹、小汐由介、北川芙西音、坂下健^A、中平武^A、
Megan Friend^A、西森早紀子^B、永井義一^C、

他T2K Collaboration

岡山大、KEK^A、総研大^B、エトヴェシュ・ロラード大^C



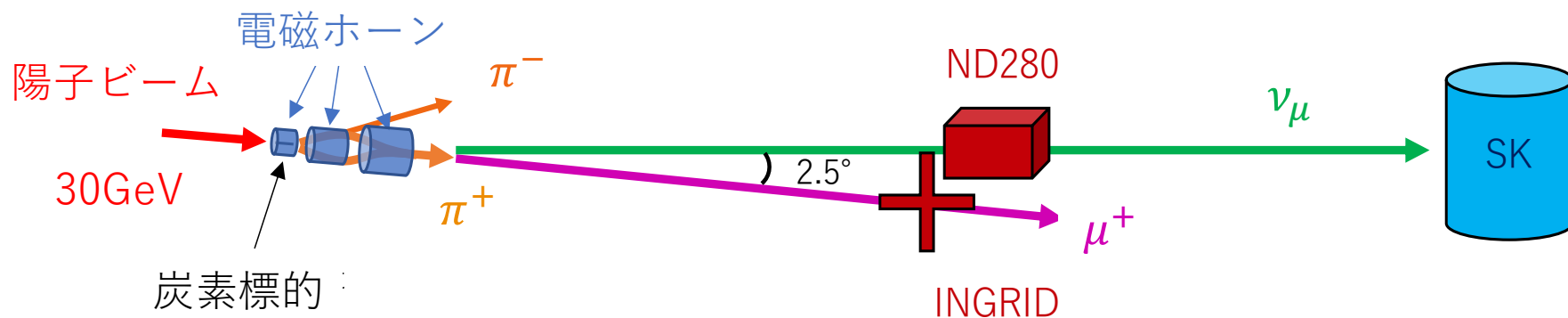
1. T2K実験
2. NA61/SHINE実験について
3. 実験の様子
4. まとめ

T2K実験

T2K実験

- 前置検出器のND280と後置検出器のSuper-Kamiokande(SK)の結果を比較して、ニュートリノ振動の精密測定をする長基線ニュートリノ実験。
- レプトンセクターにおけるCP対称性の破れの実証を目指している。
- J-PARCで30GeVの陽子ビームを炭素標的に照射し、生成されるハドロンが崩壊することでニュートリノビームを得ている。

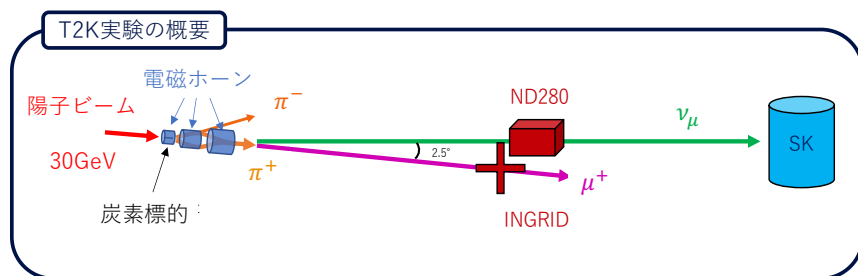
T2K実験の概要



T2K実験

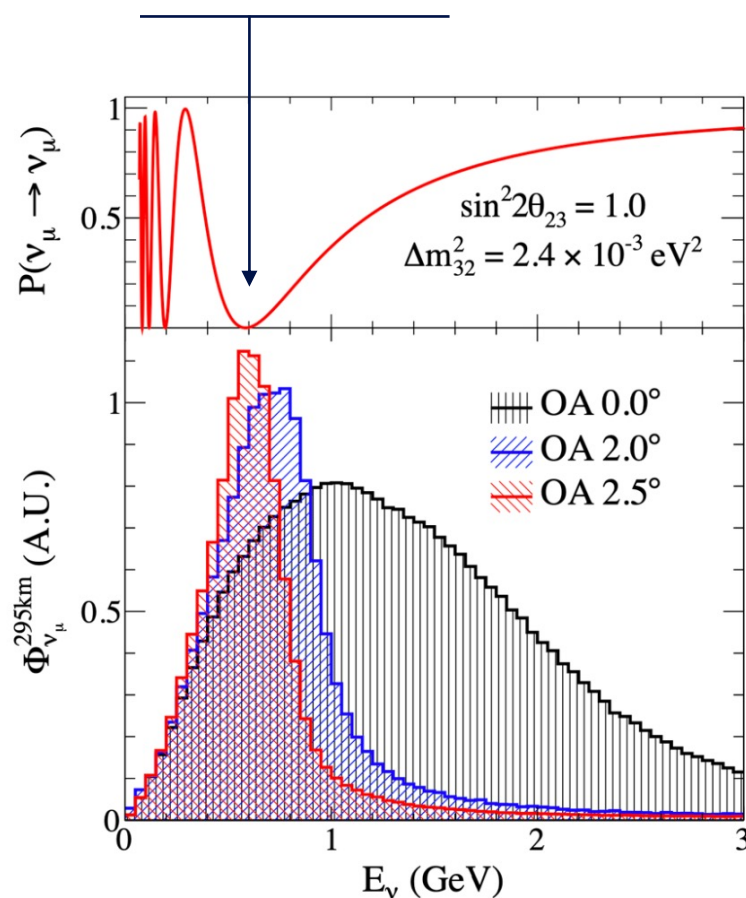
ビームの特徴

- T2K実験では振動事象を効率よく観測するため、**off-axis法(2.5°)**によりSKでのニュートリノビームのエネルギーピークを600MeV付近にしている。



振動確率

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) & \\
 &\simeq 1 - 4\cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23} \\
 &\times (1 - \cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23}) \\
 &\times \sin^2\left(\Delta m_{32}^2 \frac{L}{4E}\right)
 \end{aligned}$$



T2K実験

フラックス計算に対する不定性

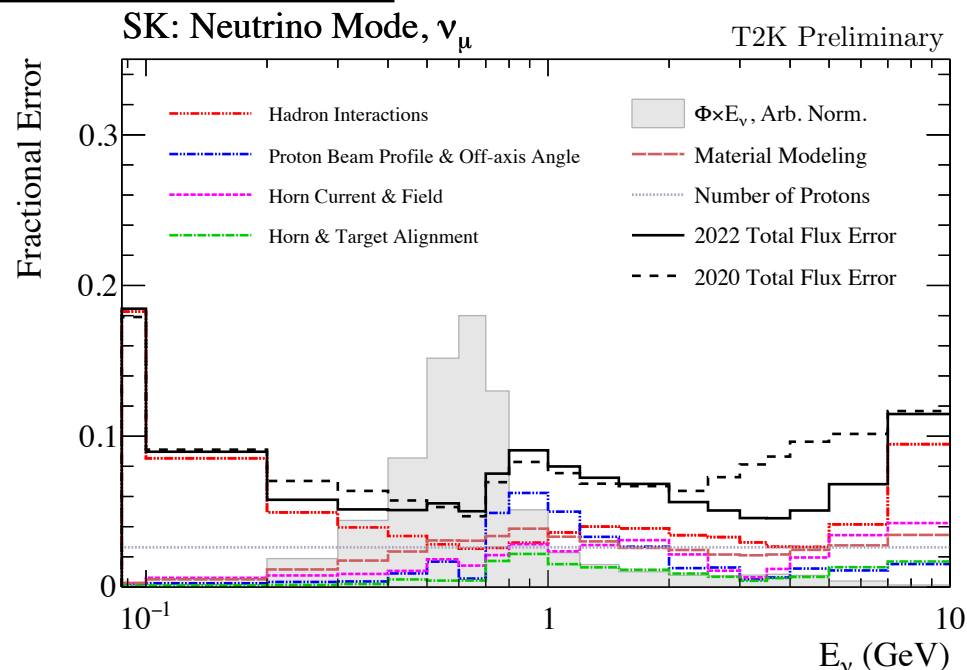
- 振動解析を行う際、ニュートリノの親粒子であるハドロン生成に対する理解は重要である。
- ハドロン生成による不定性を削減するため、2009年から2010年にかけてCERNのNorth Areaにて**NA61/SHINE実験**が行われた。
- その結果、不定性をフラックスピーク付近で5%まで削減。
→95%の信頼度でCP位相角が0であることを棄却。

しかし…

- CP対称性の破れの実証のためには更なる不定性の削減が必要。

そこで…

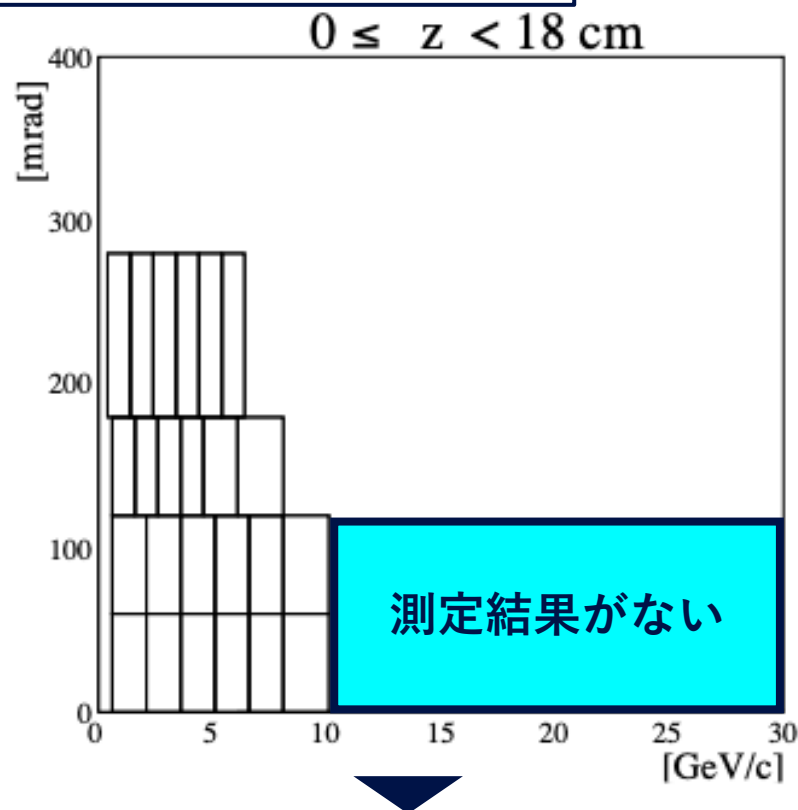
今年の6月から7月にかけて追加のNA61/SHINE実験が行われたので、その様子を報告する。



更なる不定性削減のために

- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)
→高運動量の K^\pm を測定することで、ニュートリノビームが1GeV以上の領域において不定性削減の可能性を示唆している。

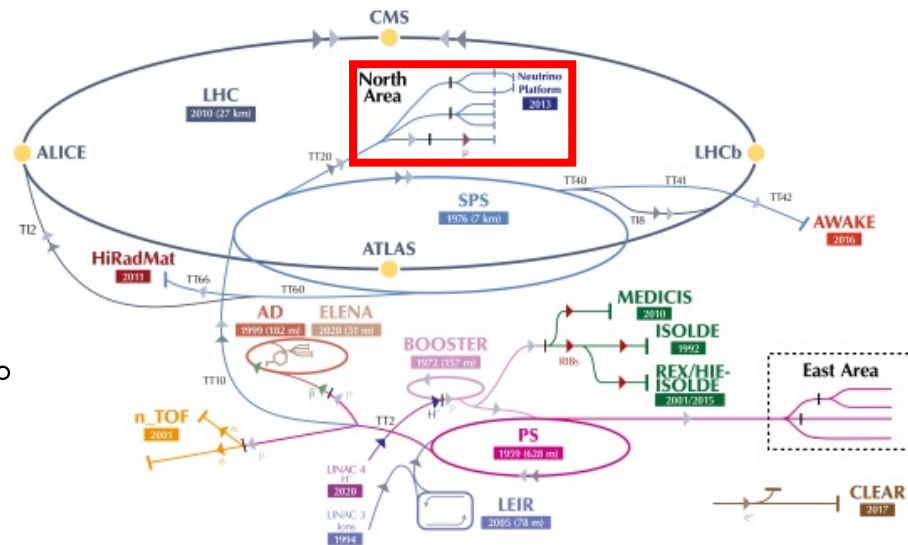
2010年のNA61/SHINEでの K^\pm の測定領域の一例



- 今回のNA61/SHINE実験では高運動量 K^\pm 中間子の測定を目指している。

NA61/SHINE実験について

- NA61/SHINE実験：CERNのNorth Areaで行われる固定標的実験。
- Neutrino physics runとしては炭素標的に対して陽子ビームを打ち込む。

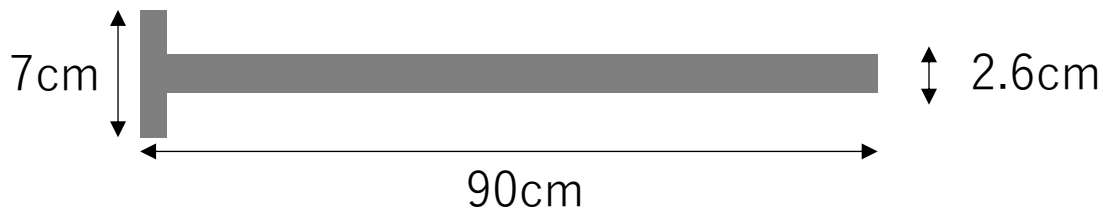


T2K replica target

T2Kでは長さ90cm,半径1.3cmの炭素標的に対して30GeVの陽子ビームを照射している。

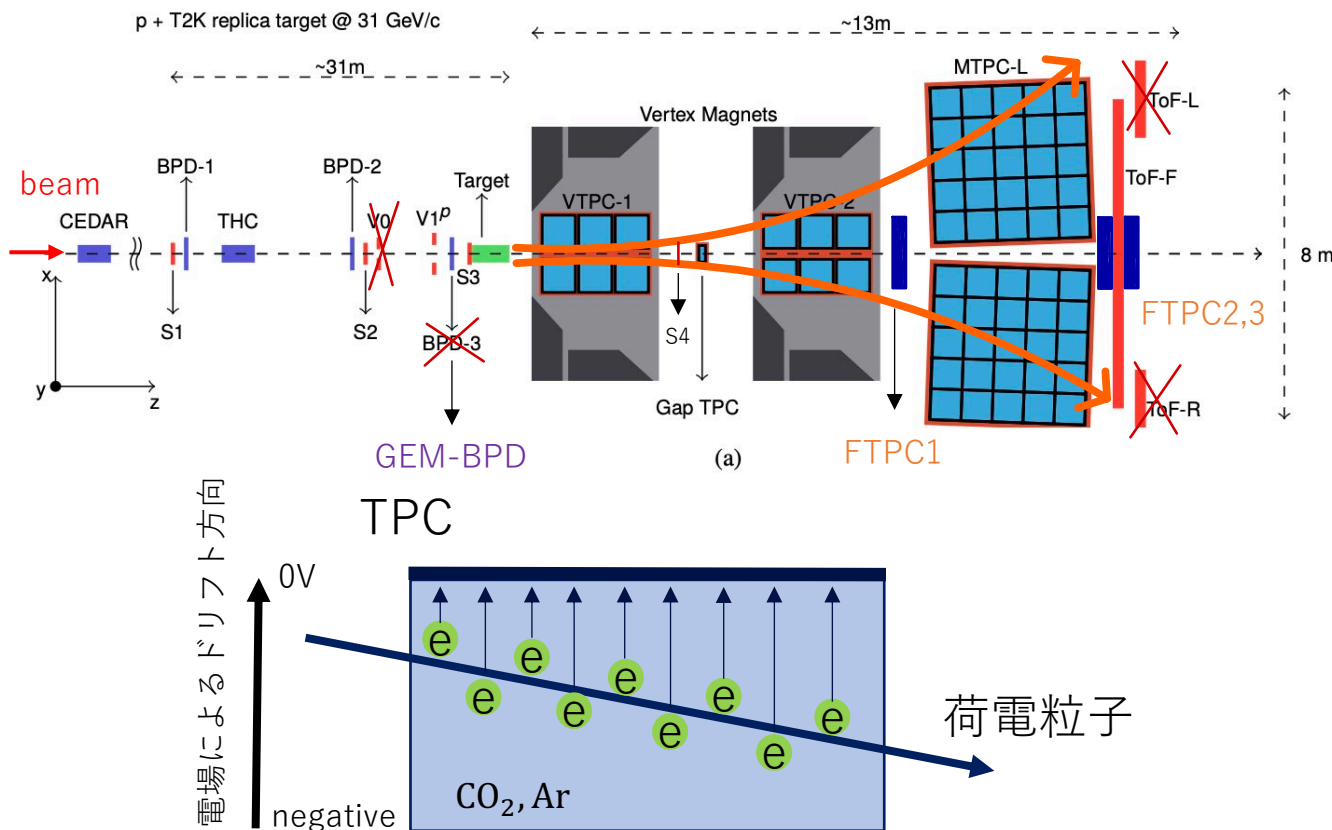
▼
T2K replica targetもそれを模して作られている。

T2K replica targetの模式図



NA61/SHINE実験について

実験の概要



前回との比較

| | 前回 | 今回 |
|--------------|-----------|------------|
| V0 | ○ | × |
| V1' | ○ | ○ |
| BPD3 | ○ | × |
| GEM-BPD | × | ○ |
| S3 | ○ | new |
| S4 | × | ○ |
| FTPC 1,2,3 | × | ○ |
| MF (max1.5T) | 1/8 | 1/2 |
| Data取得レート | ~100 (Hz) | 1000~ (Hz) |

- 今回のNA61/SHINE実験では高運動量 K^\pm 中間子の測定を目指していることから、前回よりもHigh magnetic fieldでデータ取得する。

NA61/SHINE実験について

各production dataのtrigger数

| | 全trigger数 (Million) |
|--|---------------------|
| Full MF, target-OUT | 6.0 |
| 1/2 MF, target-IN | 150 |
| 1/2 MF, target-OUT | 9.1 |
| 1/2 MF, target-holder IN (target-OUT) | 2.9 |
| 1/8 MF, target-IN | 14 |
| 1/8 MF, target-OUT | 1.4 |

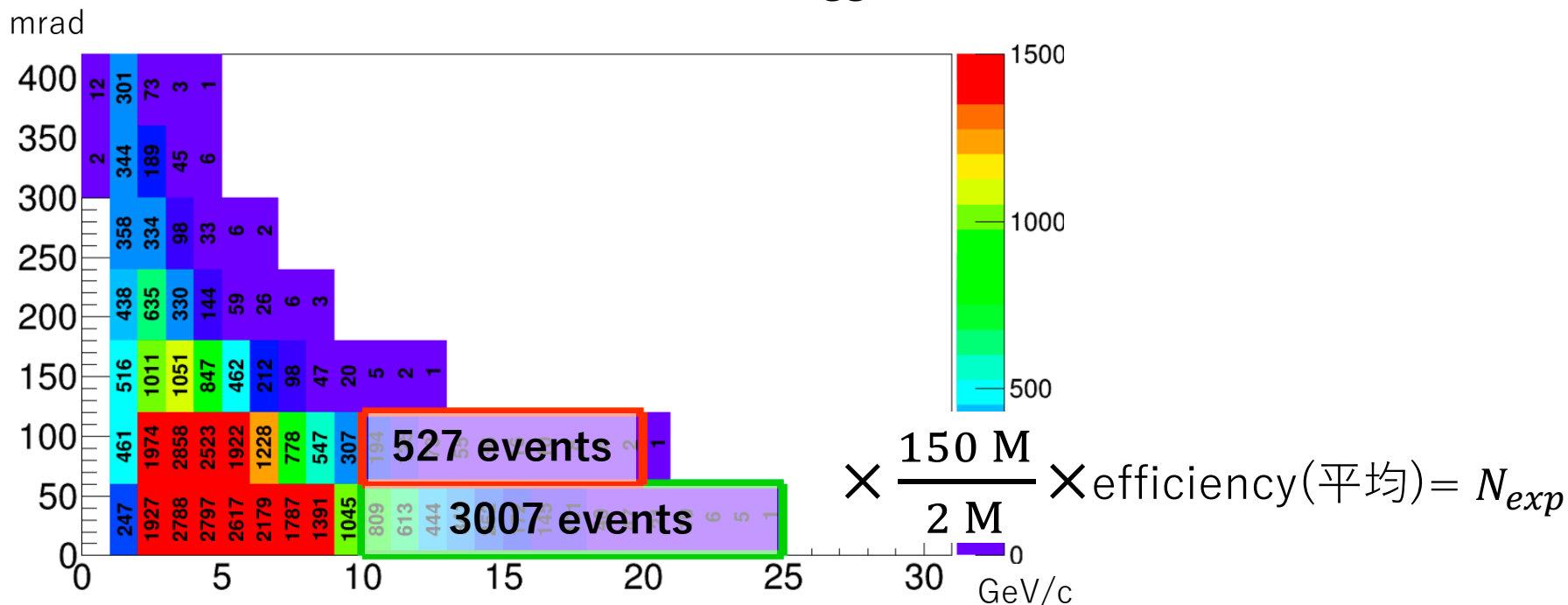
2010年にとられた時の
data数は約10M data

- 一番mainとなる1/2 MF, target-INでは
約**150M data**が取れている。
→前回の10倍以上
- 2010年と同じMFの1/8 MF, target-INでも
約**14M data**が取れている。
→2010年の結果の検証も可能

高運動量 K^\pm の数の見積もり

計算例(K^+)

今回の測定で得られたtrigger数→150 Million
シミュレーションでのtrigger数→2 Million

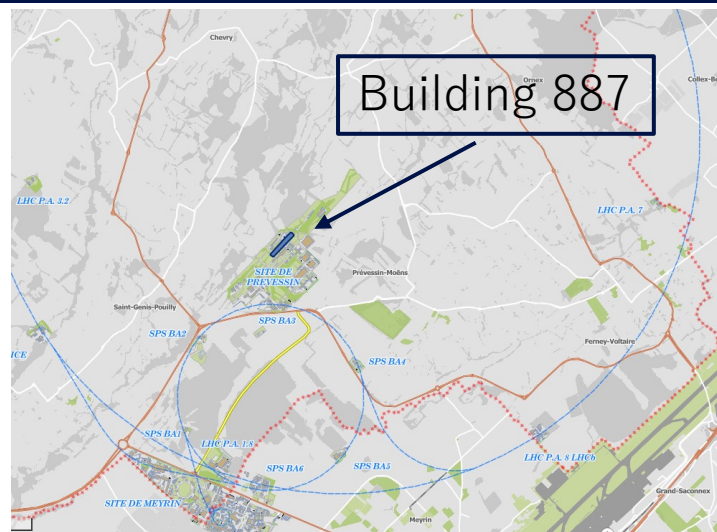
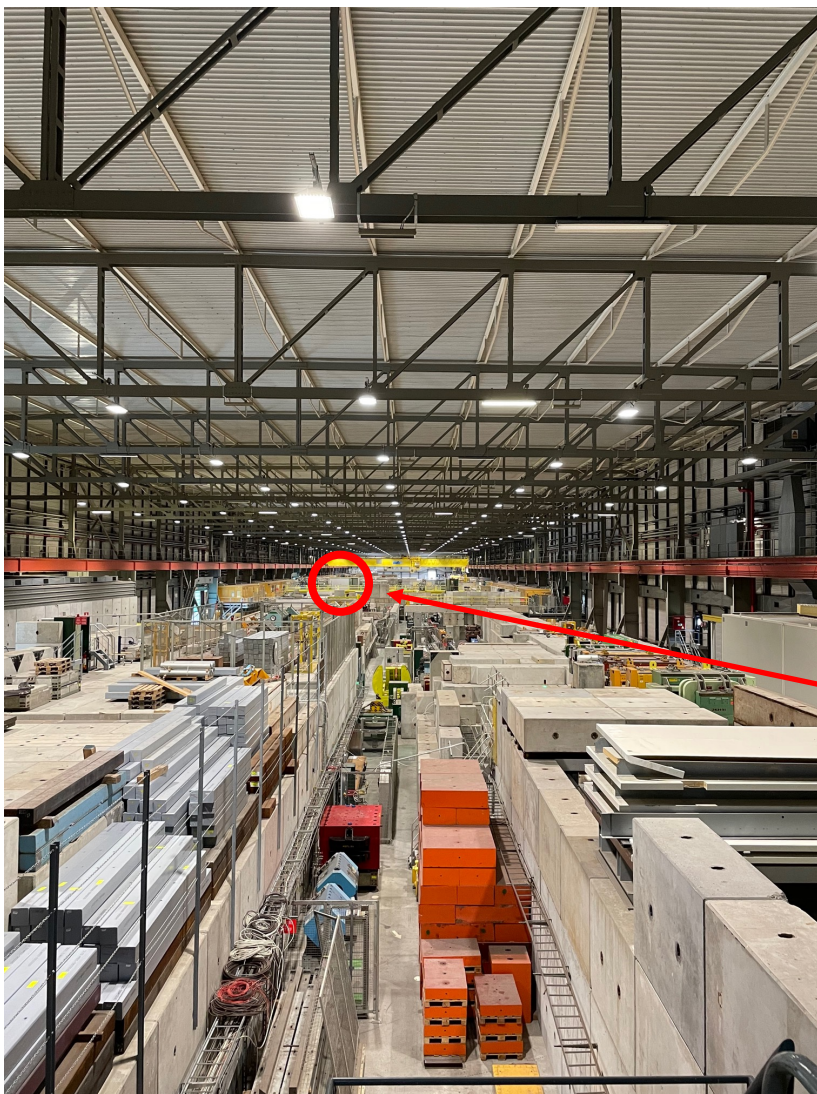


totalすると N_{exp} はそれぞれ

- K^+ : 57000 events 以上
 - K^- : 20000 events 以上
- が期待される

実験の様子

Building 887の様子

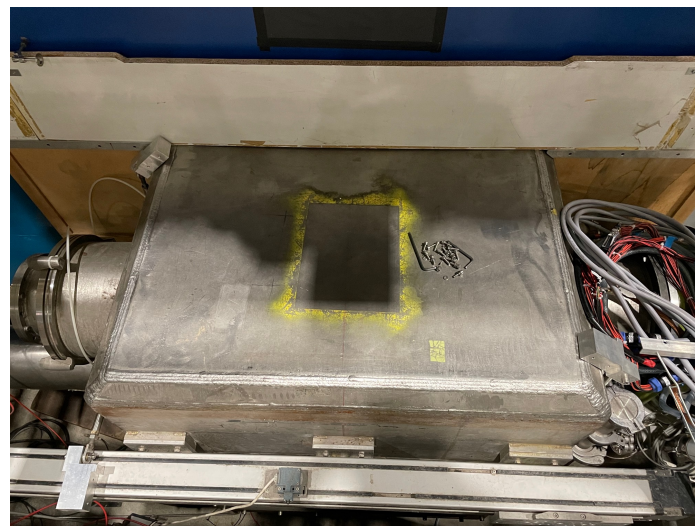


NA61/SHINE



実験の様子

ターゲットを置く場所

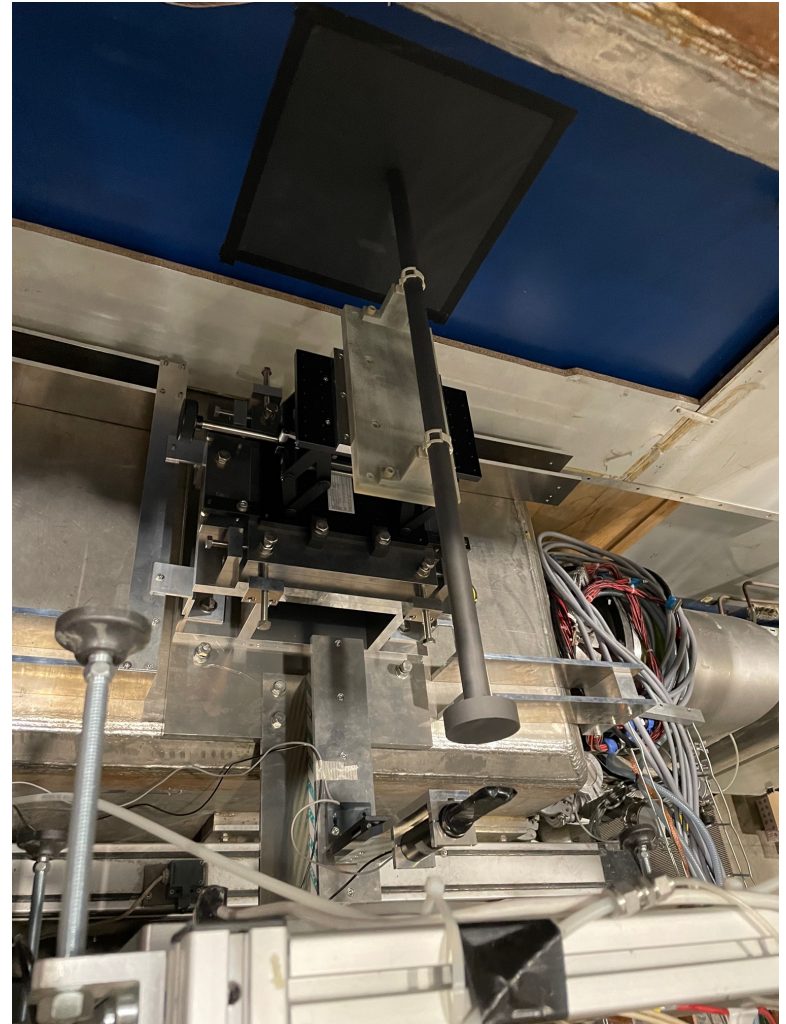


実験の様子

今回の測定で用いたターゲット

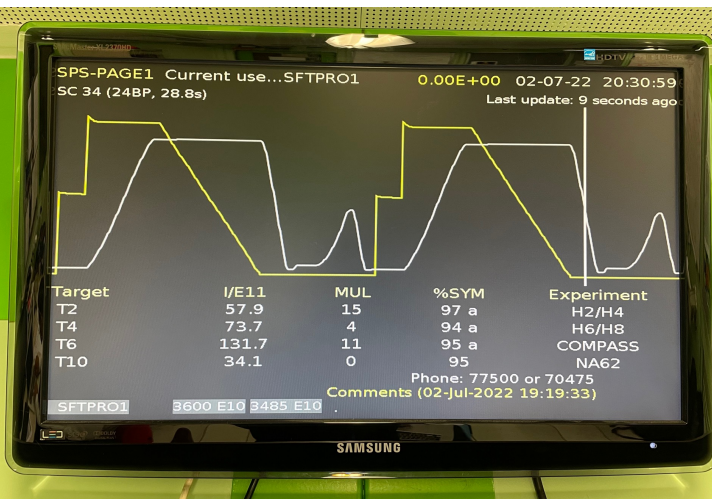


ターゲットを設置

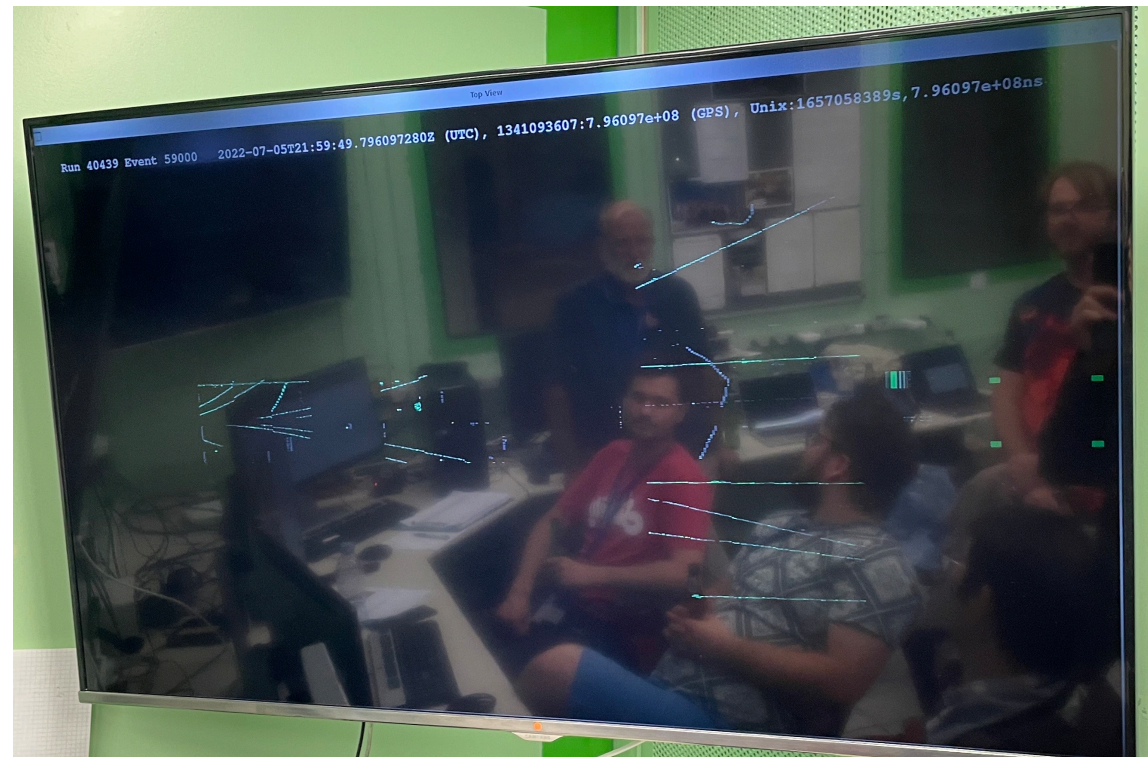


実験の様子

SPSのビームモニター



イベントディスプレイ



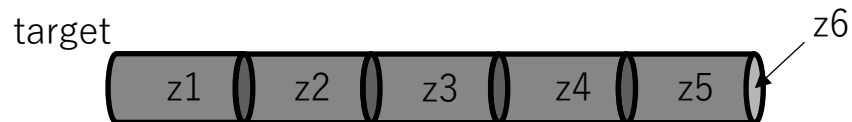
まとめ

- T2K実験におけるニュートリノフラックス計算精度向上のため、今年の6月から7月にかけてNA61/SHINE実験の追加データ取得が行われた。
- 今回の主な目的は、高運動量側の K^\pm 中間子の測定。
→1GeV以上のニュートリノエネルギー領域での系統誤差削減を目指す。
- mainとなる1/2 MF, target-INでは約150M dataが取れていて、これは前回に比べ桁多い統計量である。
→取得したデータについて解析を進めていく。

Back up

高運動量 K^\pm の数の見積もり

- 90cmのtargetを5等分した領域と最下層の計6つの領域で、それぞれ最低値のefficiencyを平均してかける



先行研究の結果

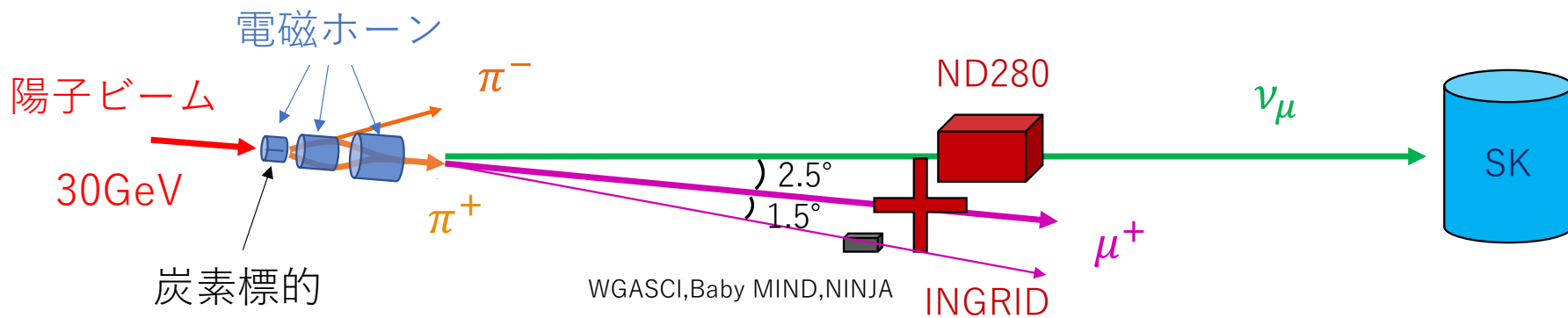
| K^+ | Angle | Full MF | 1/2 MF | 1/4 MF | 1/8 MF |
|---------|-------------|---------|--------|--------|--------|
| TPC cut | 0~60 mrad | 3911 | 3007 | 2340 | 2166 |
| | 60~120 mrad | 617 | 527 | 673 | 680 |

$$\times \frac{150 \text{ M}}{2 \text{ M}} \times \text{efficiency(平均)} = N_{exp}$$

totalするとそれぞれ

- ・ K^+ : 57000 events 以上
 - ・ K^- : 20000 events 以上
- が期待される

T2K実験の概要

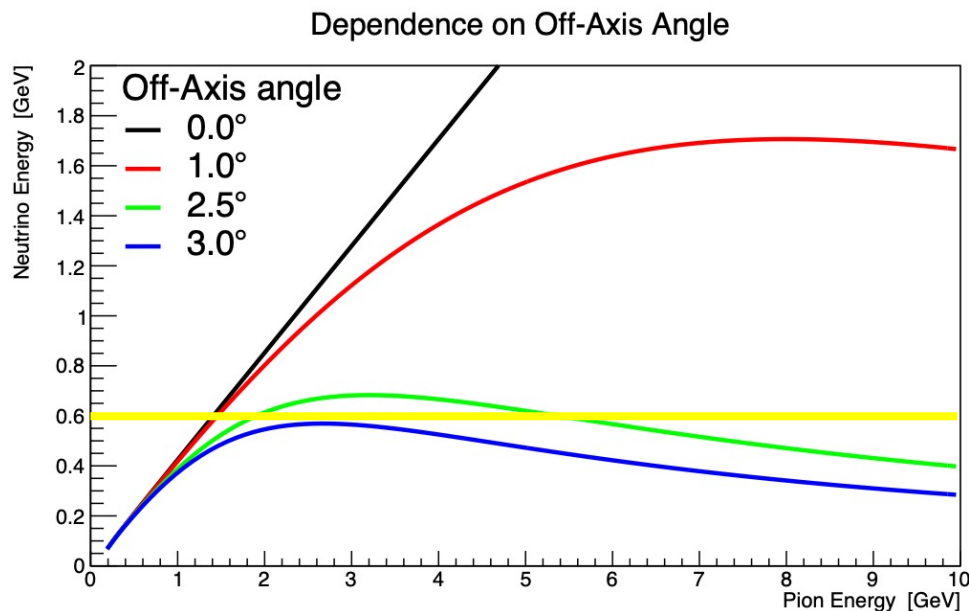




Off-Axis法による角度依存性

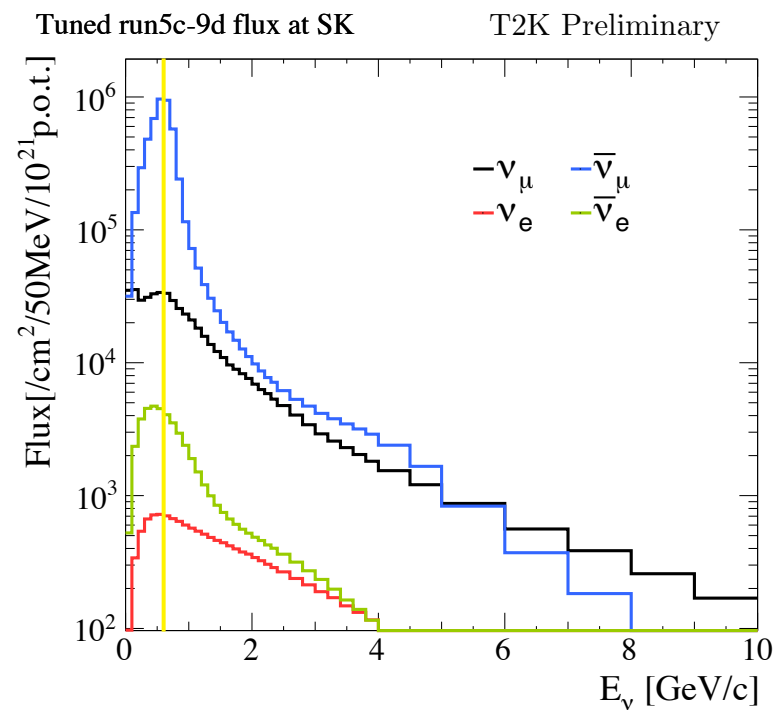
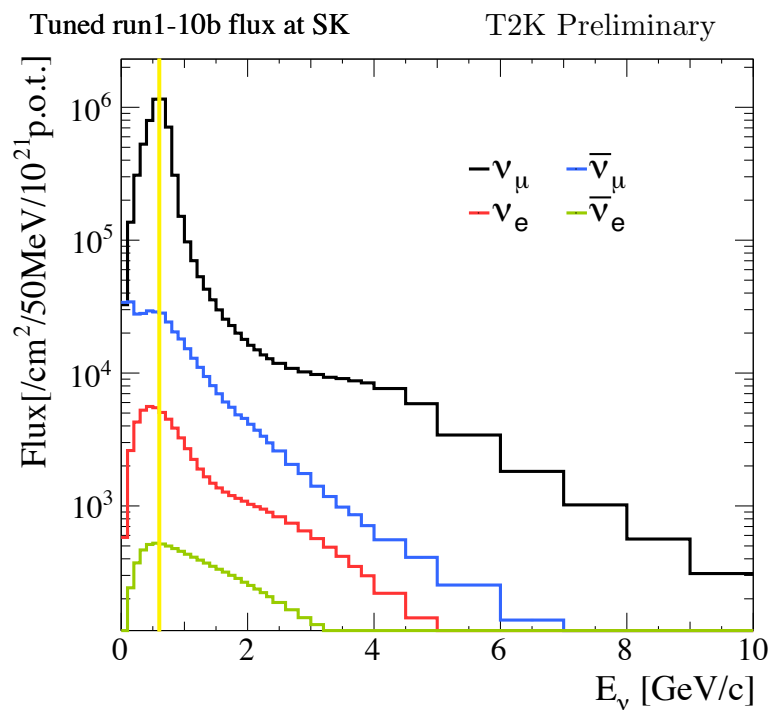
$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2E_\pi} \frac{1}{1 - \cos\theta \sqrt{1 - \frac{m_\pi^2}{E_\pi^2}}}$$

崩壊した後の ν のエネルギー E_ν



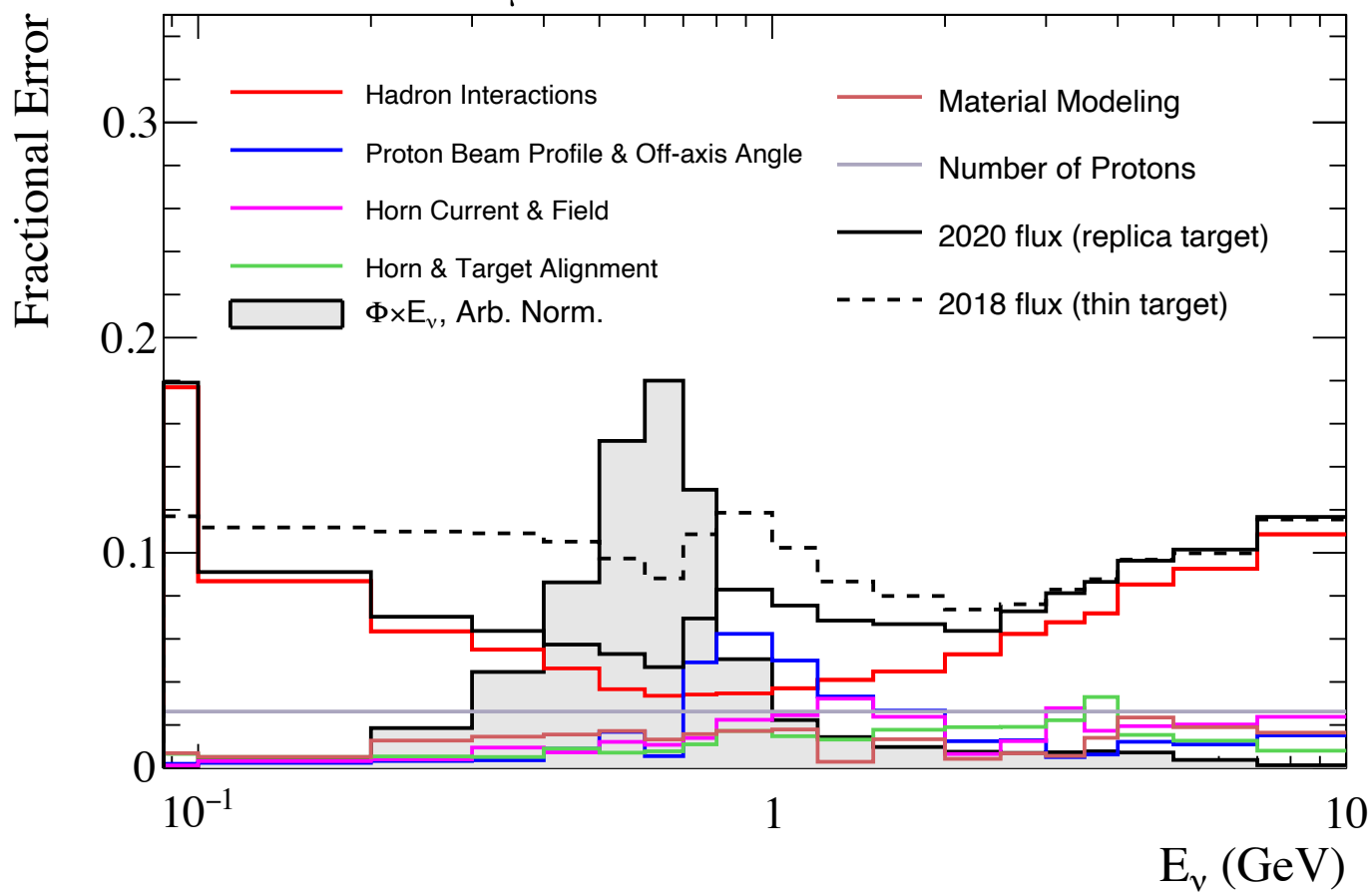
崩壊する前の π のエネルギー E_π

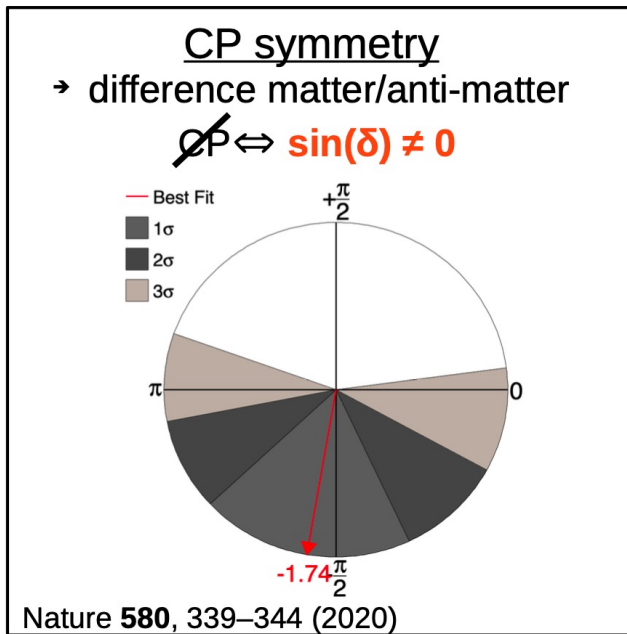
SKでの ν と $\bar{\nu}$ のフラックス



SK: Neutrino Mode, ν_μ

T2K Preliminary





PDGの値

$$\sin^2(\theta_{12}) = 0.307 \pm 0.013$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.539 \pm 0.022 \quad (S = 1.1) \quad (\text{Inverted order})$$

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.546 \pm 0.021 \quad (\text{Normal order})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (-2.536 \pm 0.034) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Inverted order})$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.453 \pm 0.033) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{Normal order})$$

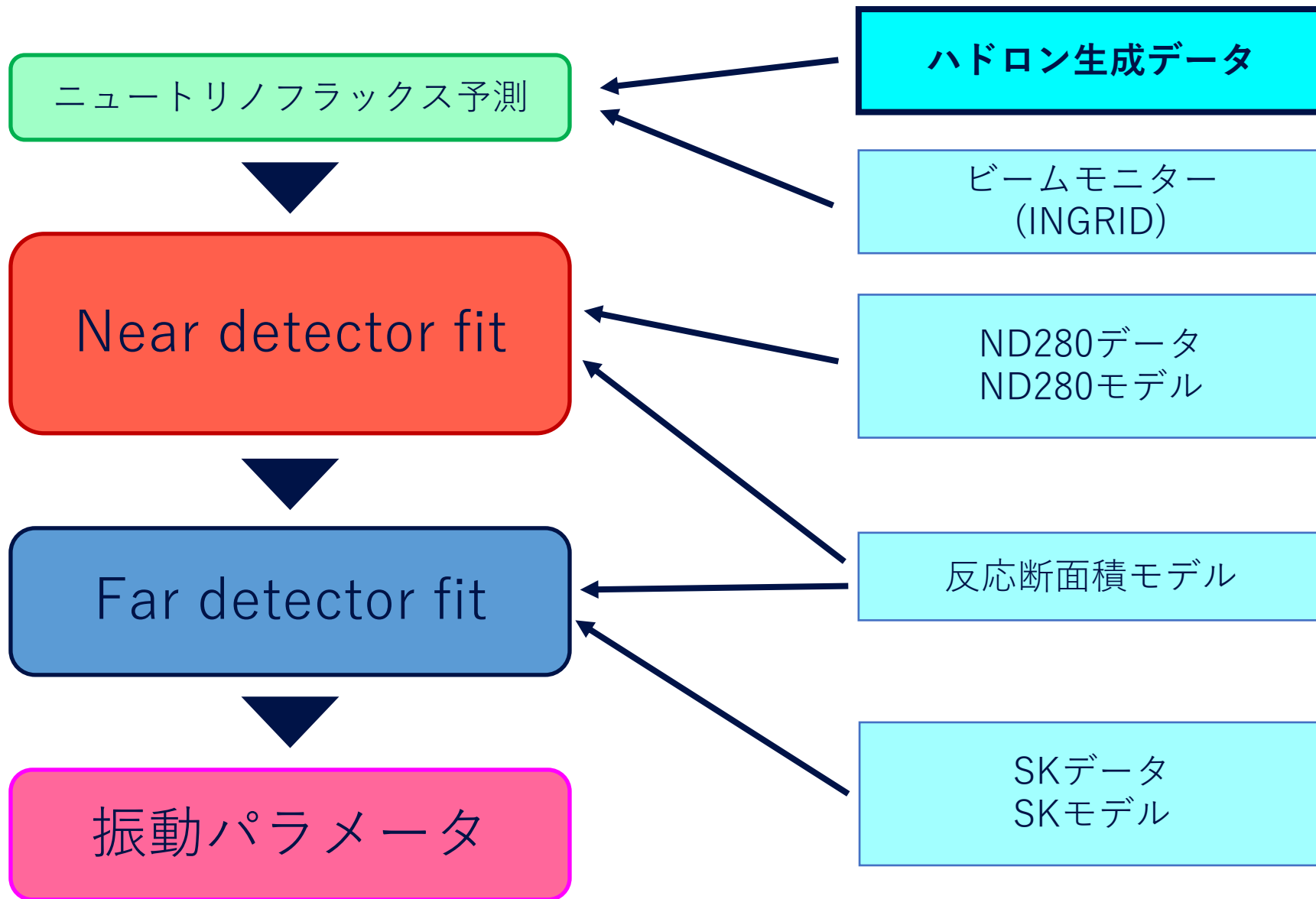
$$\sin^2(\theta_{13}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-2}$$

$$\delta, \text{ CP violating phase} = 1.36_{-0.16}^{+0.20} \pi \text{ rad}$$

$$\langle \Delta m_{21}^2 - \Delta \bar{m}_{21}^2 \rangle < 1.1 \times 10^{-4} \text{ eV}^2, \text{ CL} = 99.7\%$$

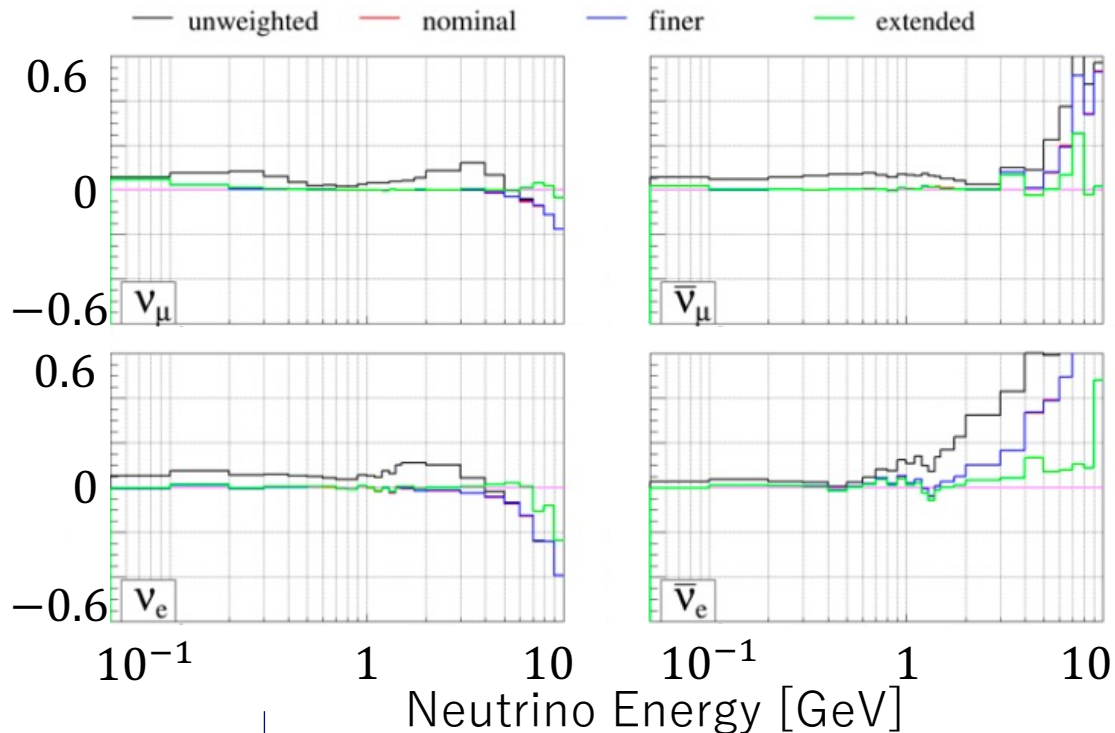
$$\langle \Delta m_{32}^2 - \Delta \bar{m}_{32}^2 \rangle = (-0.12 \pm 0.25) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

振動解析の流れ



更なる不定性削減のために

- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)によって、 K^\pm の解析領域に高運動量領域(extended)を追加することで、不定性が減らせることがわかっている。
→特に、ニュートリノビームが1GeV以上の領域において改善が見られる。



unweighted

: 重み付け係数無し

nominal

: 2010年のNA61/SHINEと同様の解析領域

finer

: 2010年と同様の解析領域をさらに細かく区切ったもの

extended

: K^\pm の解析領域に高運動量領域を追加

この結果から…

- 今回のNA61/SHINE実験では高運動量 K^\pm 中間子の測定を目指している。
→前回の測定の際には無いdata

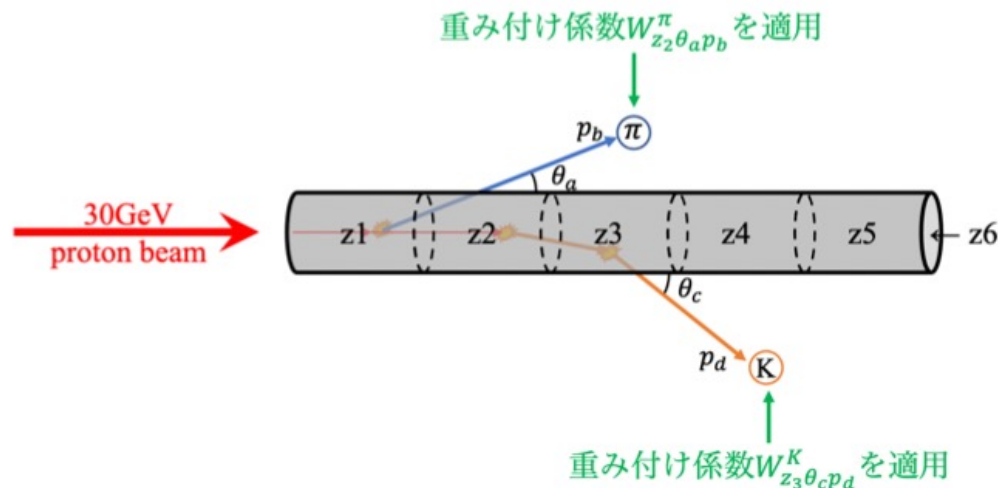
ニュートリノビームフラックス予測の補正

陽子が長さ90cmの炭素標的内でどのような反応を起こし、どのようなハドロンを生成するか、そして生成されたハドロンがどのような反応を起こすかを理解することは困難

したがって以下の式で表される重み付け係数を計算し、各binでのハドロン数に補正を行う。

$$W_{ijk}^{\alpha} = \left(\frac{1}{N_{POT}} \frac{n_{ijk}^{\alpha}}{\Delta p_{ijk} \Delta \theta_{ijk}} \right)_{data} / \left(\frac{1}{N_{POT}} \frac{n_{ijk}^{\alpha}}{\Delta p_{ijk} \Delta \theta_{ijk}} \right)_{MC}$$

α : ハドロンの種類
 i : z-bin領域
 j : 角度 θ
 k : 運動量



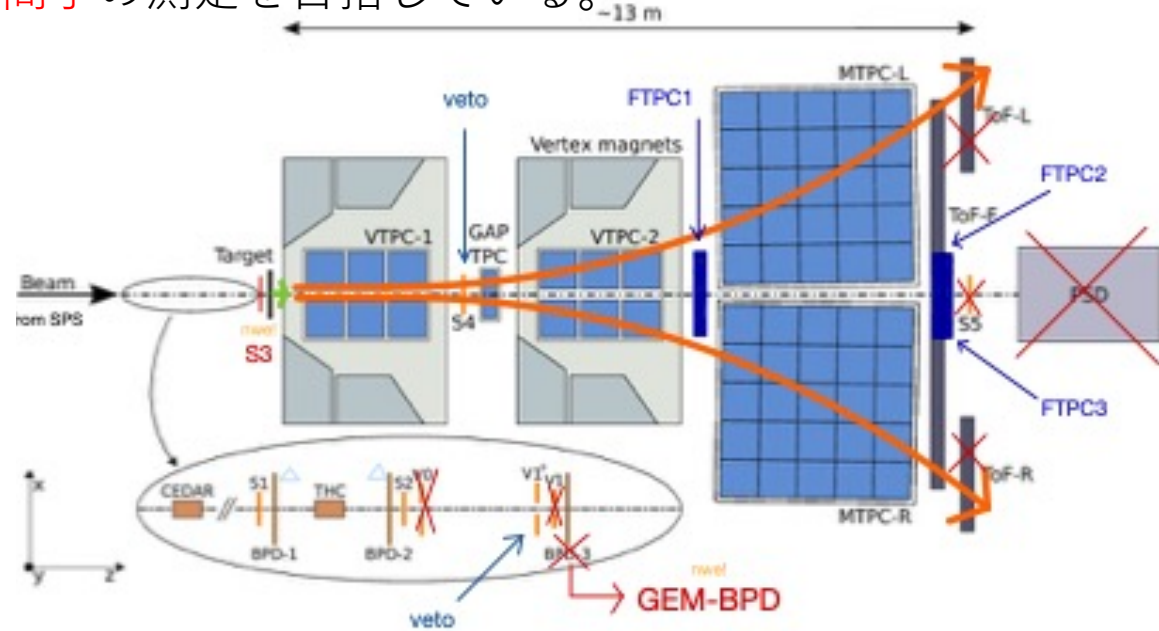
NA61/SHINE実験について

前回との比較

| | 前回 | 今回 |
|-------------|-----|-----|
| V0 | ○ | × |
| V1' | ○ | ○ |
| BPD3 | ○ | × |
| GEM-BPD | × | ○ |
| S3 | ○ | new |
| S4 | × | ○ |
| FTPC 1,2,3 | × | ○ |
| MF (max 9T) | 1/8 | 1/2 |

実験の概要

- 今回のNA61/SHINE実験では前回よりも統計数を増やし、high magnetic filedでデータ取得することで高運動量 K^\pm 中間子の測定を目指している。



- 検出器のデータ取得レートも前回に比べて向上している。

高運動量 K^\pm の数の見積もり

- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)として、シミュレーションによって2Millionの陽子を当てた際、target内で生成された K^\pm が検出器内を通った時の数が見積もられている。(下の表は K^+ のとき)
- これに今回取得できたtrigger数(150 Million)と検出器のefficiencyを考えて、取得できた K^\pm の数を見積もる。
- efficiencyについてはK中間子に対する情報がないため、 π 中間子に対する情報で代用する。
→一番大きな寄与は粒子の種類ではなく、粒子の運動量と角度に対するものであるため、 π 中間子の情報で代用可能。

T2K replica target

T2K target 全長 : 91.4cm
 半径 : 1.3cm
 密度 : 1.8g/cm³

T2K replica target

| | 重さ[g] | 密度[g/cm ³] |
|--------|---------------|------------------------|
| Type C | 988.99 ± 0.01 | 1.81737 |
| Type D | 988.29 ± 0.01 | 1.81609 |

T2K target 密度 : 1.82 [g/cm³]
 前回(2010年) 密度 : 1.83 ± 0.03 [g/cm³]
 今回 密度 : 1.81737 [g/cm³]

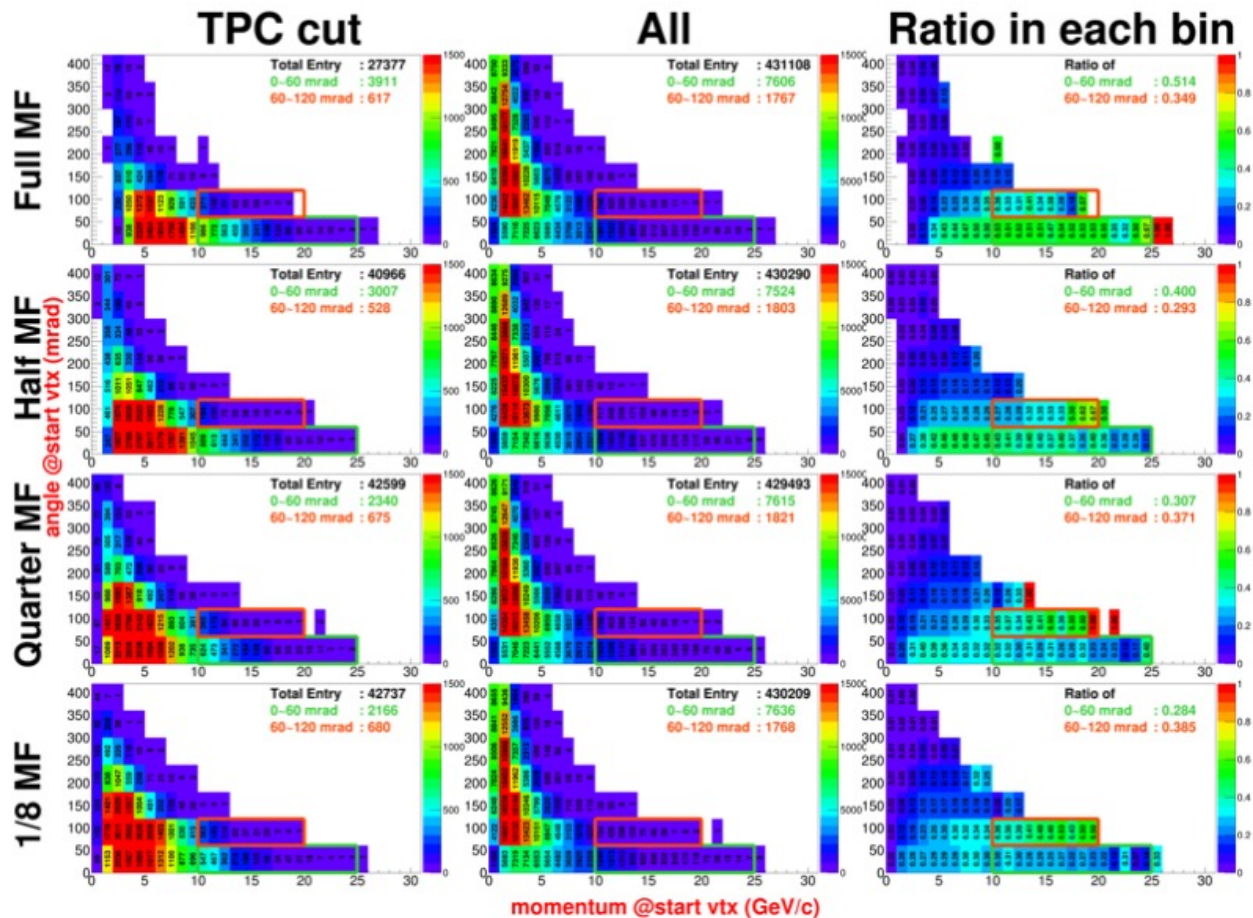
NA61/SHINE実験について

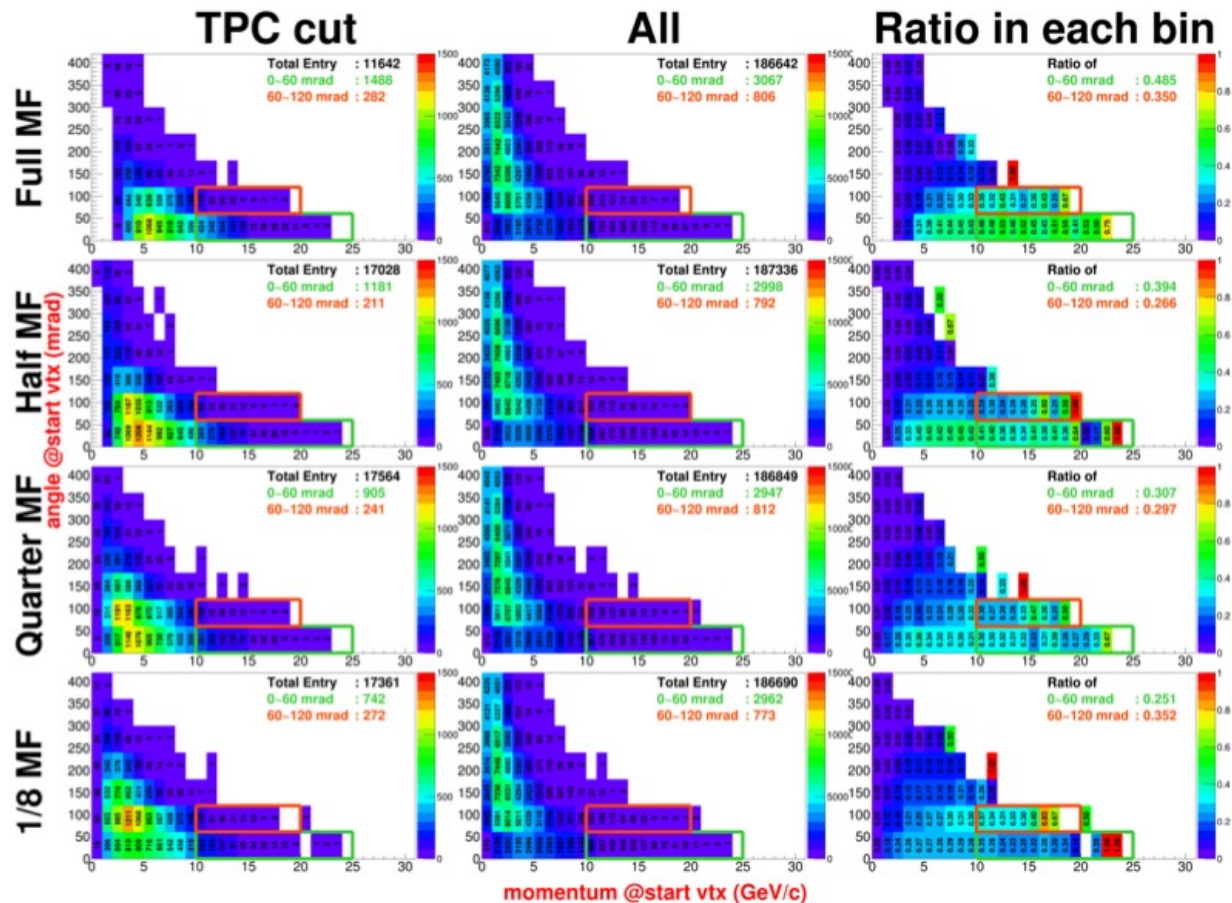
各production dataのtrigger数

| | 全trigger数 (Million) |
|--|---------------------|
| Full MF, target-OUT | 5.969 |
| 1/2 MF, target-IN | 149.7 |
| 1/2 MF, target-OUT | 9.121 |
| 1/2 MF, target-holder IN (target-OUT) | 2.926 |
| 1/8 MF, target-IN | 14.03 |
| 1/8 MF, target-OUT | 1.385 |

- 一番mainとなる1/2 MF, target-INでは約150M dataが取れている。
- 前回の2010年と同じMFの1/8 MF, target-INでも約14M dataが取れている。これは前回の実験と同程度の統計量である。

シミュレーションによるK+のp- θ 分布



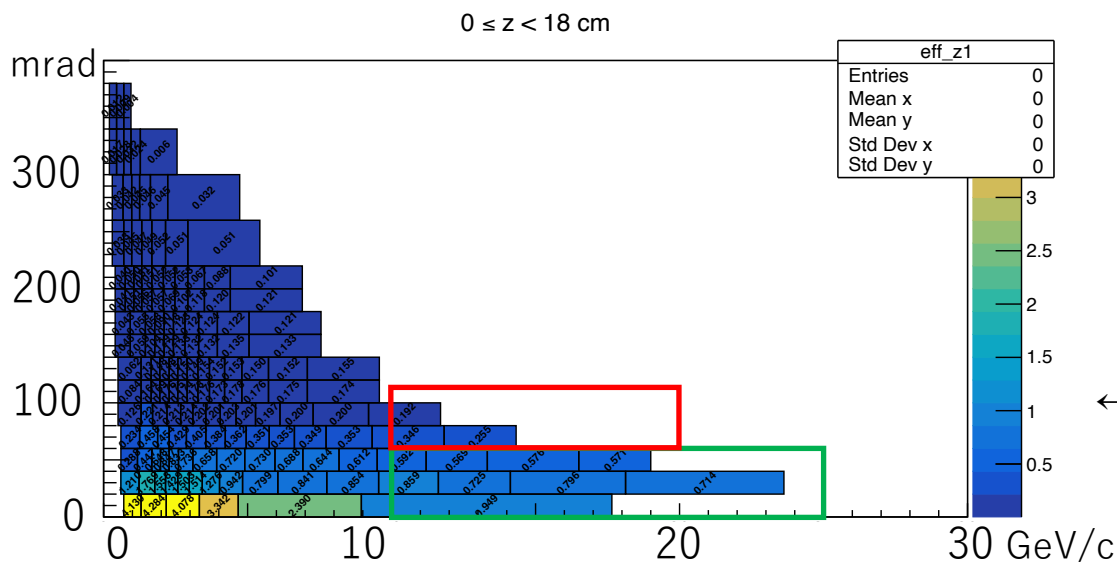
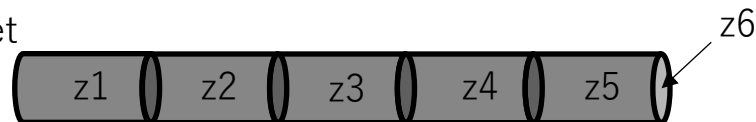
シミュレーションによるK-のp- θ 分布

高運動量 K^\pm の数の見積もり

- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)として、シミュレーションによって2Millionの陽子を当てた際、target内で生成された K^\pm が検出器内を通った時の数が見積もられている。
- K 中間子に対するefficiencyの情報がないため π 中間子に対するefficiencyで代用する。
→ K と π では違いはあるものの、一番大きな影響は粒子の運動量と角度に対するものなので使える。
- これに今回取得できたtrigger数(150 Million)と検出器のefficiencyを考えて、取得できた K^\pm の数を見積もる。

Efficiencyの例(π^+ でtargetのz-1binから)

target



緑枠

θ : 0~60 mrad
 p : 10~25 GeV/c

赤枠

θ : 60~120 mrad
 p : 10~20 GeV/c

枠内が高運動量 K 中間子として
欲しいdata

←この図だと

緑枠内 : 0.596 赤枠内 : 0.192

高運動量 K^\pm の数の見積もり

- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)として、シミュレーションによって2Millionの陽子を当てた際、target内で生成された K^\pm が検出器内を通った時の数が見積もられている。(下の表は K^+ のとき)
- これに今回取得できたtrigger数(150 Million)と検出器のefficiencyを考えて、取得できた K^\pm の数を見積もる。
- efficiencyについてはK中間子に対する情報がないため、 π 中間子に対する情報で代用する。
→一番大きな寄与は粒子の種類ではなく、粒子の運動量と角度に対するものであるため、 π 中間子の情報で代用可能。

Kaonの数を見積もってみる

先行研究から 1/2MF かつ 150M triggerで予想されるK±の統計量を見積もってみた。
先行研究より 2.0×10^6 POTでシミュレーションを行った時のtarget内で生成されたK±がMTPC、VTPC内を通った数(TPC cut)。

| TPC cut | K+ | K- |
|---|------|------|
| $\theta : 0 \sim 60$ mrad $p : 10 \sim 25$ GeV/c | 3007 | 1181 |
| $\theta : 60 \sim 120$ mrad $p : 10 \sim 20$ GeV/c | 527 | 212 |

これらに検出器のefficiency(z1~z6 bin領域での平均)をかけて、trigger数149.7 Millionを考慮して以下の計算式で計算した。

$$K_{expect-number} = \frac{1.497 \times 10^8}{2.0 \times 10^6} \times TPC\ cut \times efficiency \cdots (1)$$

Kaonの数をラフに見積もってみる

今回計算では以下のefficiencyを用いた。

| efficiency | K+ | K- |
|---|-------------|-------------|
| θ : 0~60 mrad p : 10~25 GeV/c | 0.221~0.716 | 0.199~0.456 |
| θ : 60~120 mrad p : 10~20 GeV/c | 0.194~0.320 | 0.203~0.324 |

前ページの(1)式に基づいて計算した結果が以下である。

| $K_{expect-number}$ | K+ | K- |
|---|--------------|-------------|
| θ : 0~60 mrad p : 10~25 GeV/c | 49704~161190 | 17591~40279 |
| θ : 60~120 mrad p : 10~20 GeV/c | 7666~12602 | 3215~5141 |

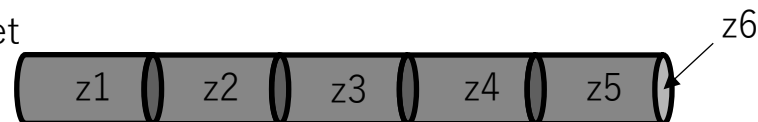
検出器のefficiencyに依存するものの、totalするとK+もK-も最低でも2万event程度は取れていそう。

高運動量 K^\pm の数の見積もり

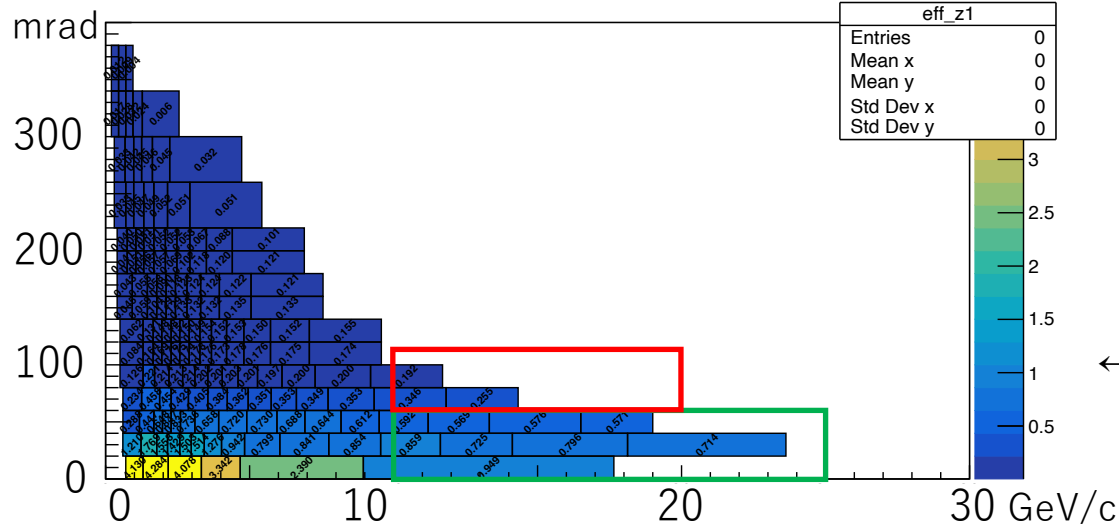
- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)として、シミュレーションによって2Millionの陽子を当てた際、target内で生成された K^\pm が検出器内を通った時の数が見積もられている。
- K 中間子に対するefficiencyの情報がないため π 中間子に対するefficiencyで代用する。
→ K と π では違いはあるものの、一番大きな影響は粒子の運動量と角度に対するものなので使える。
- これに今回取得できたtrigger数(150 Million)と検出器のefficiencyを考えて、取得できた K^\pm の数を見積もる。

Efficiencyの例(π^+ でtargetのz-1binから)

target



$0 \leq z < 18$ cm



緑枠

θ : 0~60 mrad
 p : 10~25 GeV/c

赤枠

θ : 60~120 mrad
 p : 10~20 GeV/c

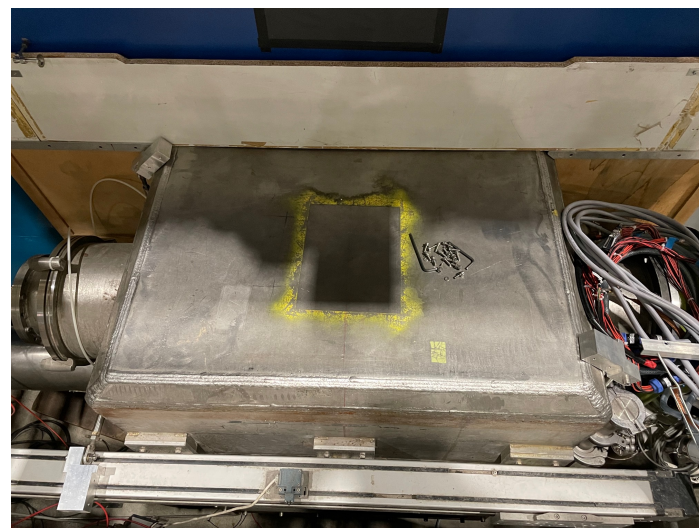
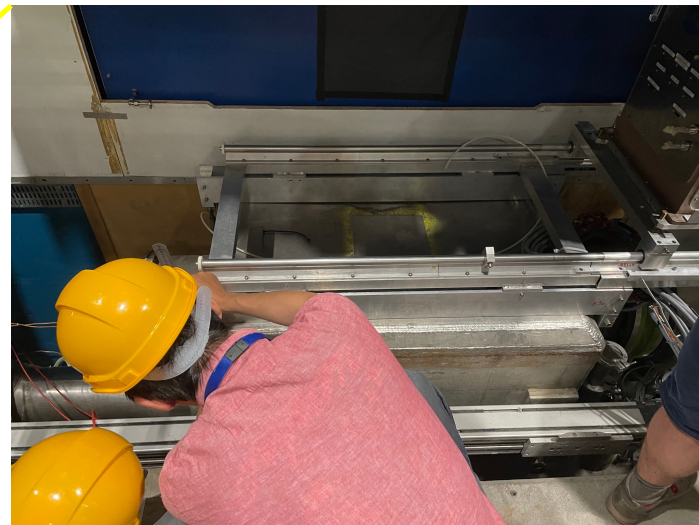
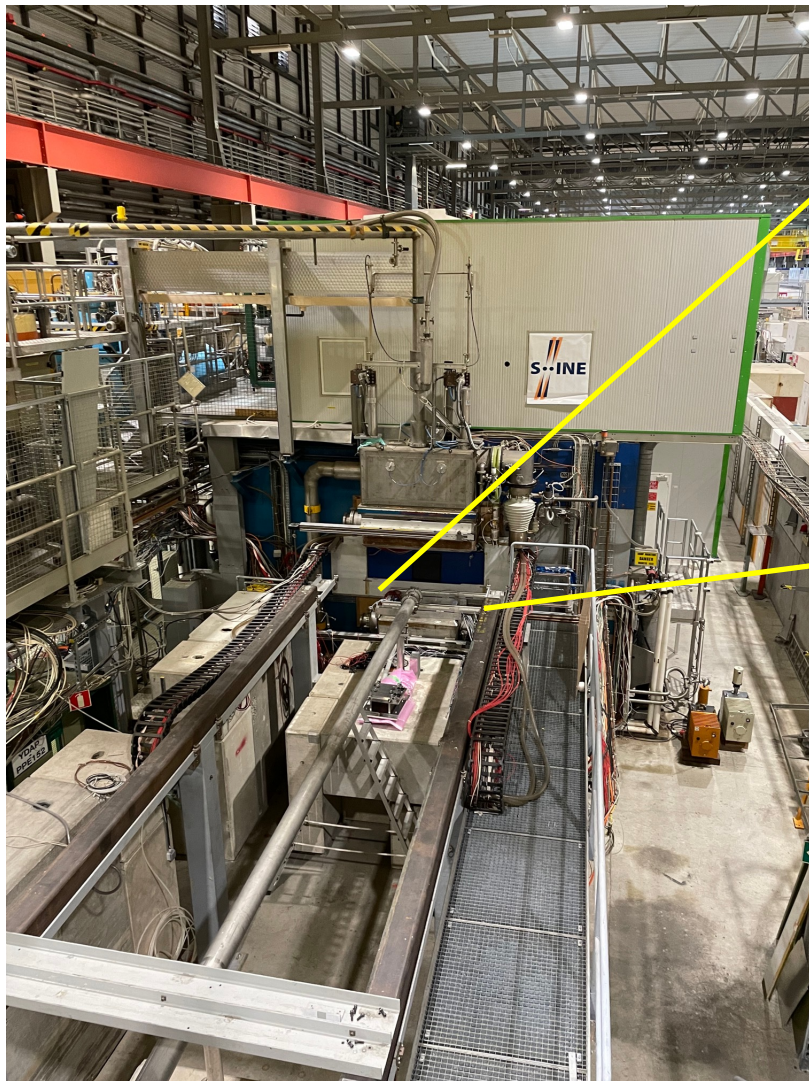
枠内が高運動量 K 中間子として
欲しいdata

←この図だと

緑枠内 : 0.596 赤枠内 : 0.192

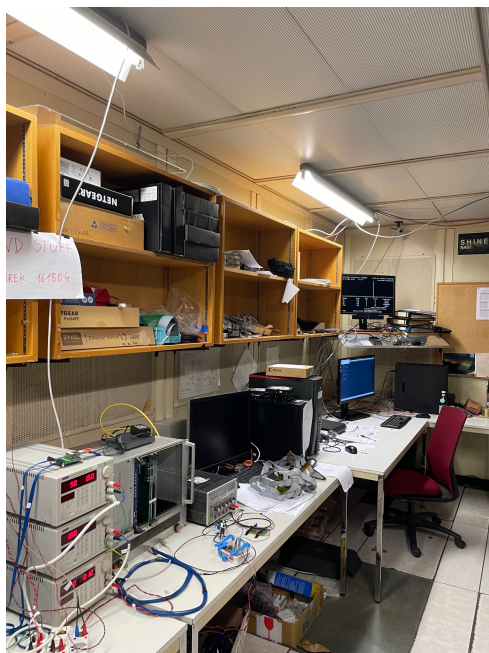
実験の様子

ターゲットを置く場所



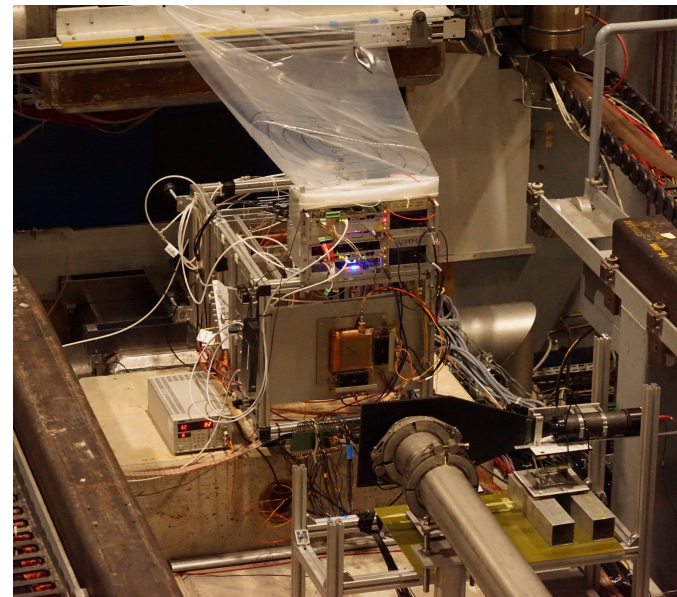
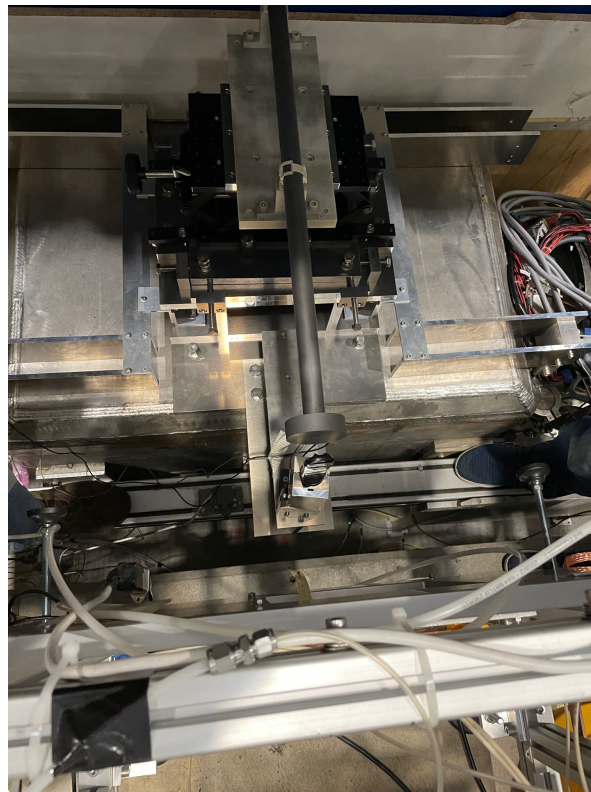
実験の様子

TPCの電流をみるエレキ

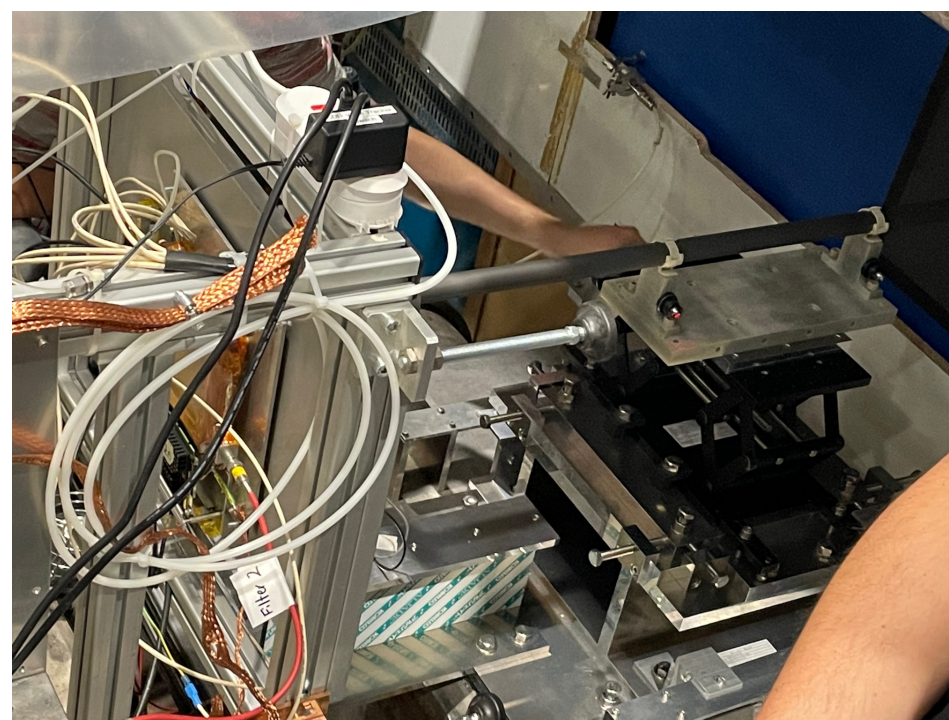


ターゲットサポートの設置

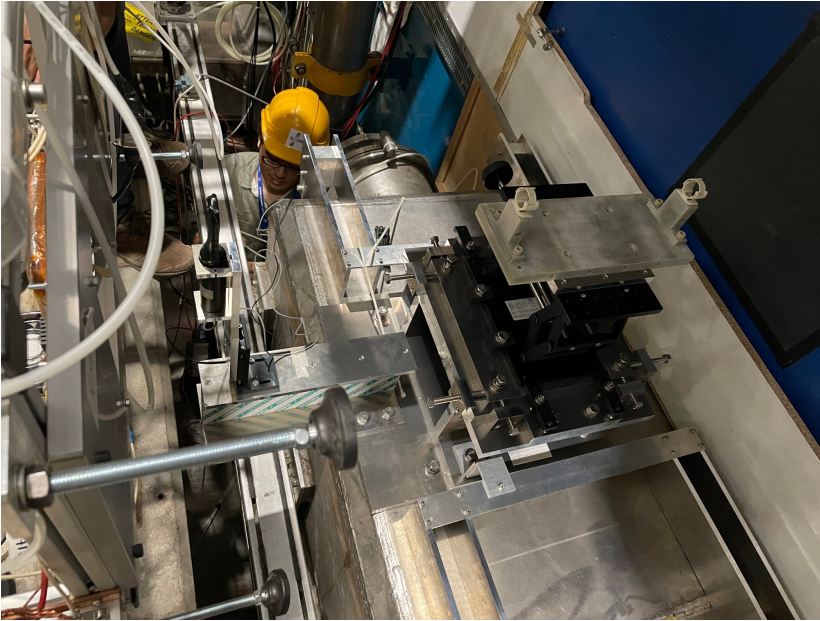




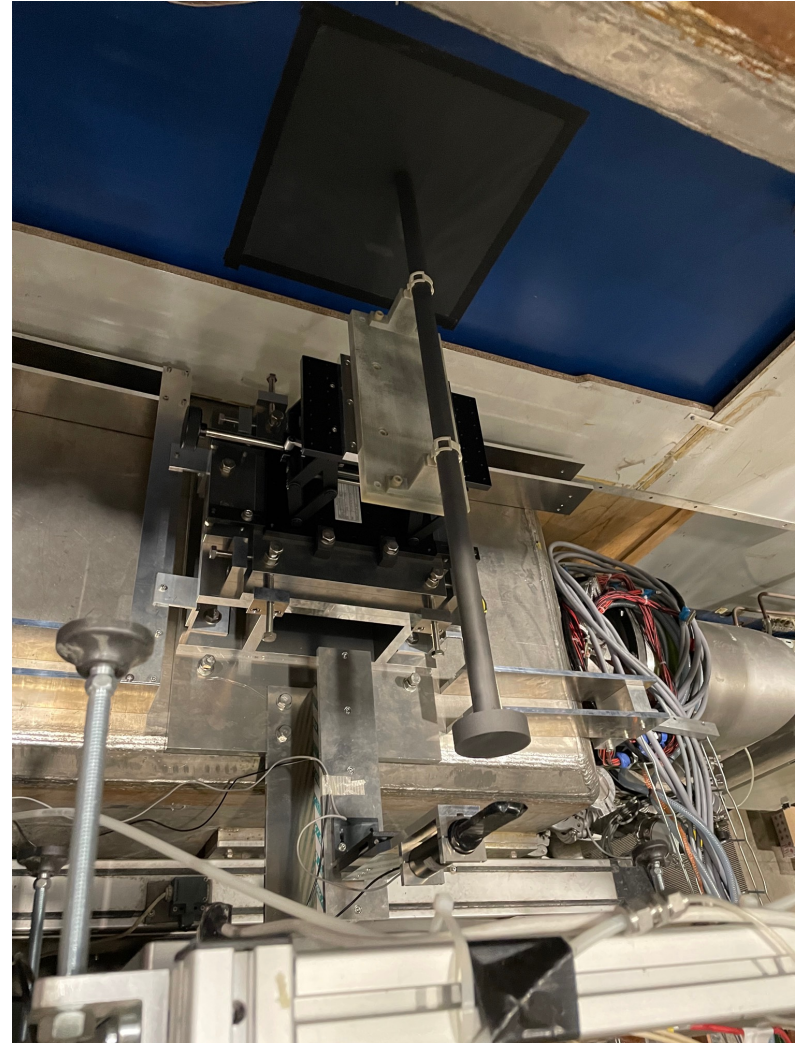
アライメントの様子



実験の様子



ターゲットを設置



今回の測定で用いた
ターゲット



実験の様子

ターゲットを設置



アライメントの様子



beam intensity scan

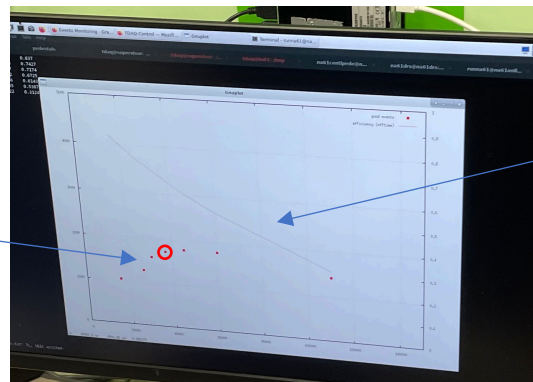
beam intensity ▶ どれくらいの強度(量)でhadronを入射するか。多い方がたくさんprotonを打ち込める

VS

Off time particle ▶ TPCのtime window中に入ったイベント。reconstruction(解析)に使えない

protonはたくさん打ち込めた方が良いが、多すぎるとoff time particleが多くなるためbestなintensityを決める必要がある

取得したイベントに*1をかけた値



off time particleがないときの割合
*1

横軸がS1のイベント数

今回はS1のイベント数が**35k**になるところに決めた
プラトーが見えるがS1のイベントが多いとデータ容量が大きくなってしまいうため立ち上がりの部分で決めた

Physics trigger

2010年

$$T1 : S1 \cdot S2 \cdot \overline{V0} \cdot \overline{V1'} \cdot \text{CEDAR} \cdot \overline{\text{THC}}$$

$$T2 : S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{V1'} \cdot \text{CEDAR} \cdot \overline{\text{THC}}$$

$$T3 : S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{V0} \cdot \overline{V1'} \cdot \text{CEDAR} \cdot \overline{\text{THC}}$$

$$T4 : S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \overline{V1'}$$

今回



$$T1 : S1 \cdot S2 \cdot \overline{V1'} \cdot S3 \cdot \text{CED6} \cdot \overline{\text{THC}}$$

$$T2 : S1 \cdot S2 \cdot \overline{V1'} \cdot S3 \cdot \overline{S4} \cdot \text{CED6} \cdot \overline{\text{THC}}$$

$$T3 : S1 \cdot S2 \cdot \overline{V1'} \cdot S3$$

$$T4 : S1 \cdot S2 \cdot S3 \cdot \text{CED6} \cdot \overline{\text{THC}}$$