

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

2022/11/09

FPWS 2022

岡山大学

白石悠樹



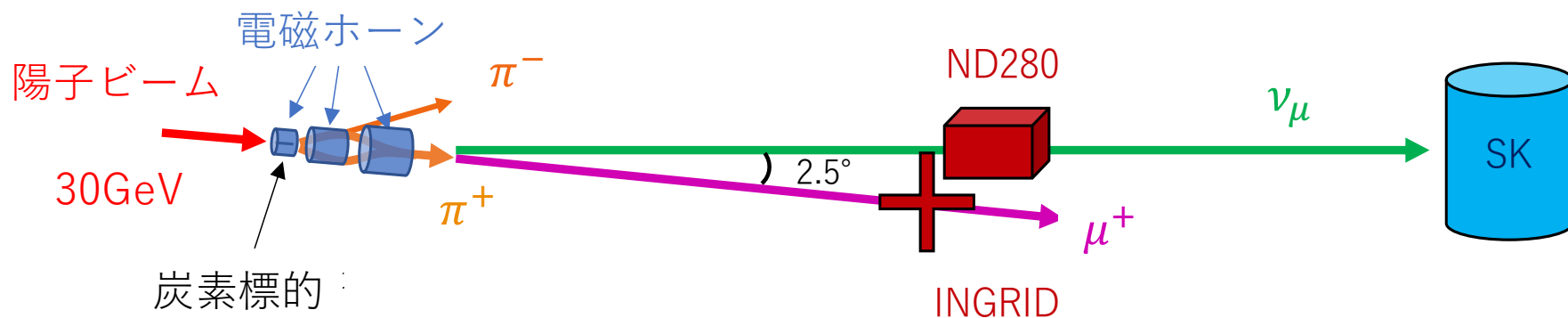
1. T2K実験
2. NA61/SHINE実験について
3. 実験の様子
4. まとめ

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。

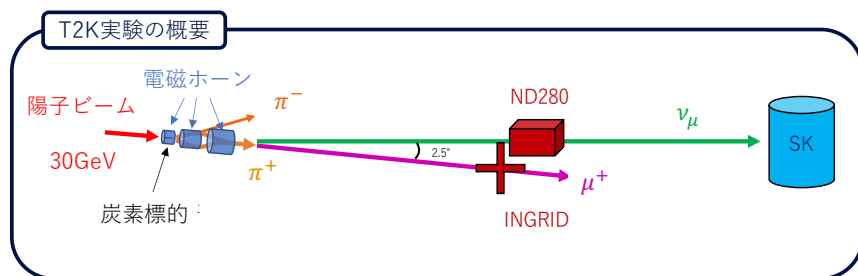
T2K実験の概要



T2K実験

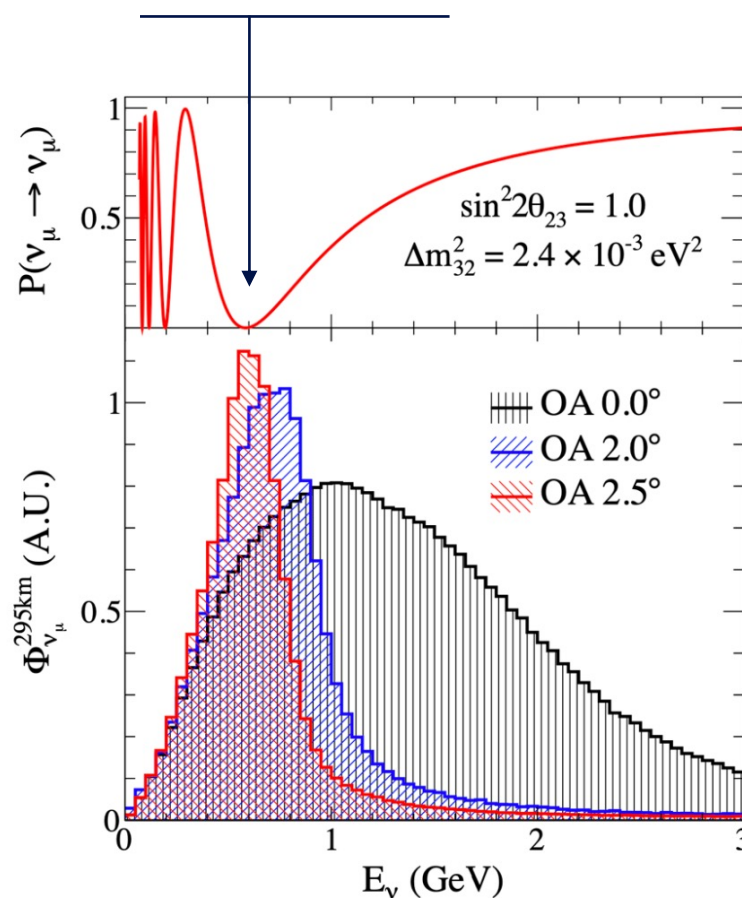
ビームの特徴

- 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。

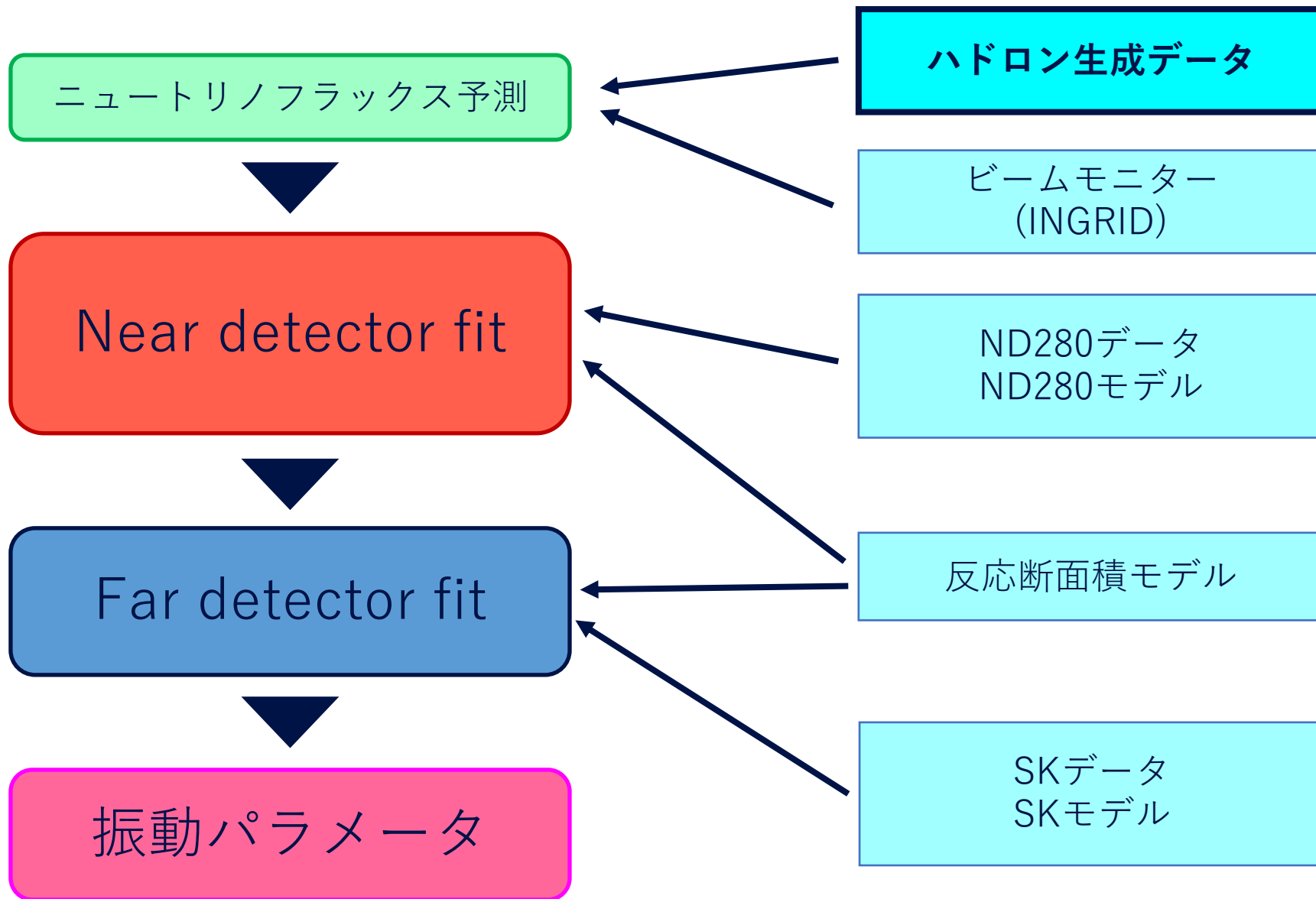


振動確率

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



振動解析の流れ



T2K実験

フラックス計算に対する不定性

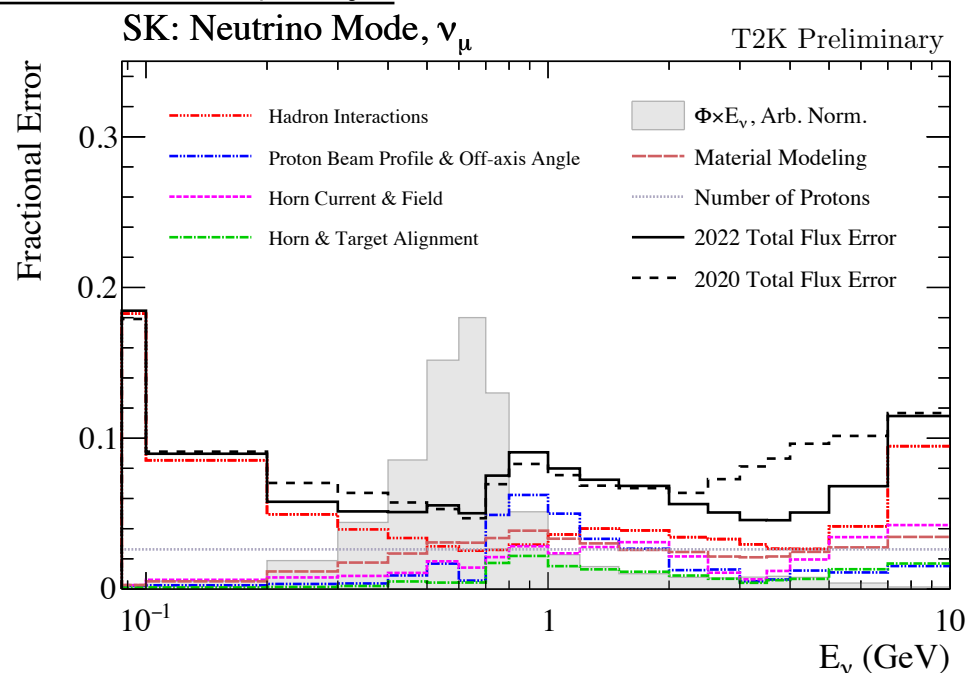
- 振動解析を行う際、ニュートリノの親粒子であるハドロン生成に対する理解は重要である。
- ハドロン生成による不定性を削減するため、2009年から2010年にかけてCERNのNorth Areaにて**NA61/SHINE実験**が行われた。
- その結果、不定性をフラックスピーク付近で5%まで削減。
→95%の信頼度でCP位相角が0であることを棄却。

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…

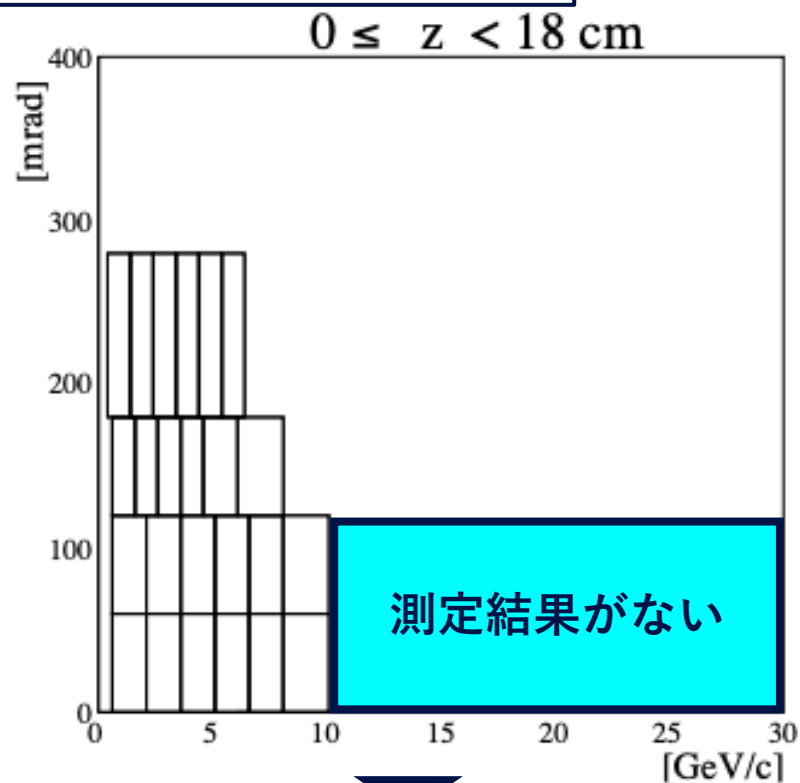
今年の6月から7月にかけて追加のNA61/SHINE実験が行われたので、その様子を報告する。



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

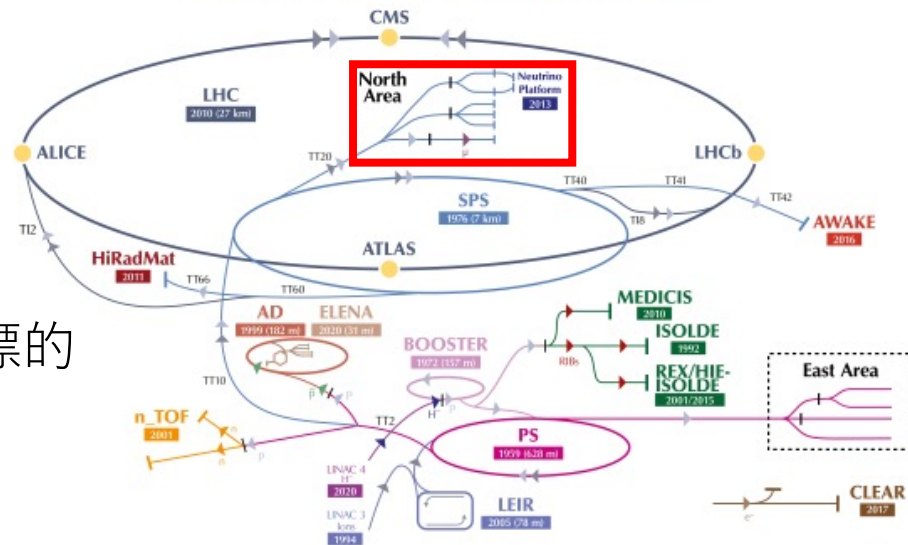


- 今回のNA61/SHINE実験では高運動量 K^\pm 中間子の測定を目指している。

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。
SHINE : SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment

- 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。

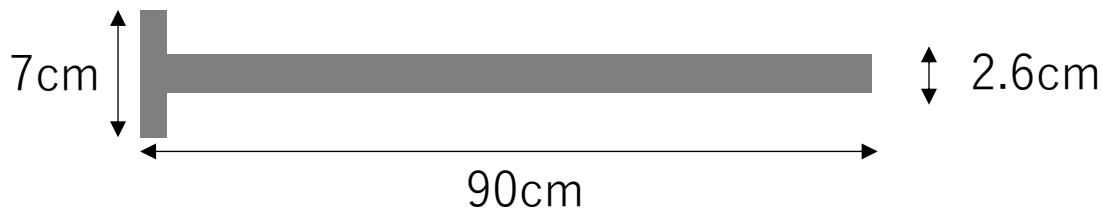


T2K replica target

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。

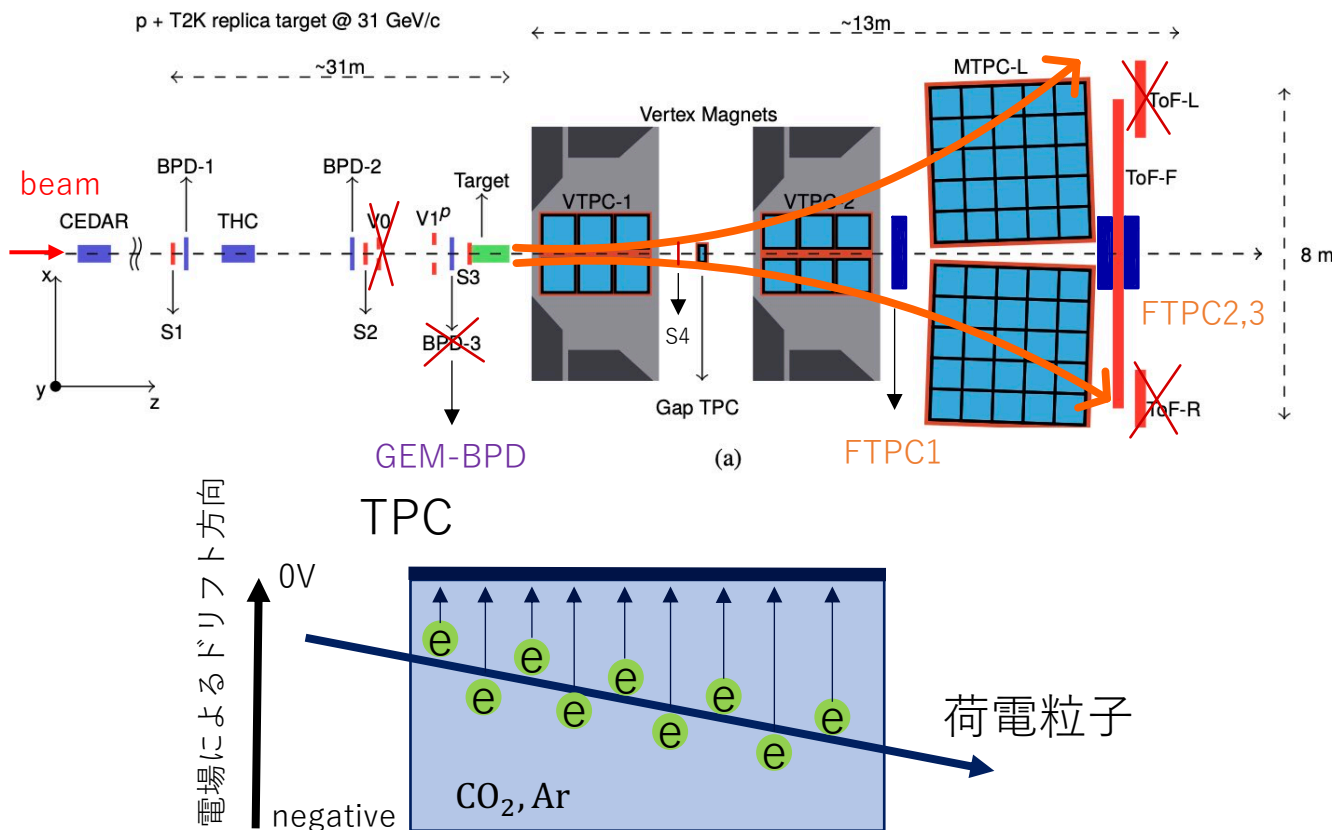
▼
T2K replica targetもそれを模して作られている。

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

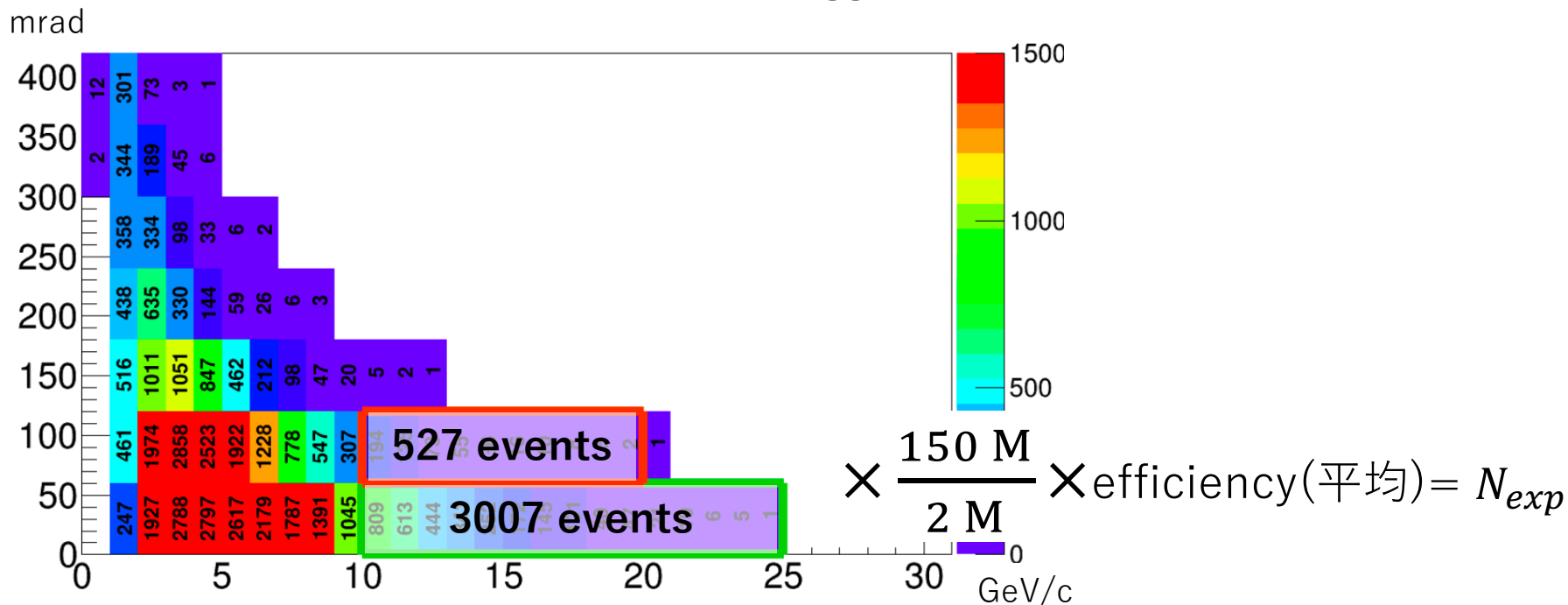
2010年にとられた時の
data数は約10M data

- 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

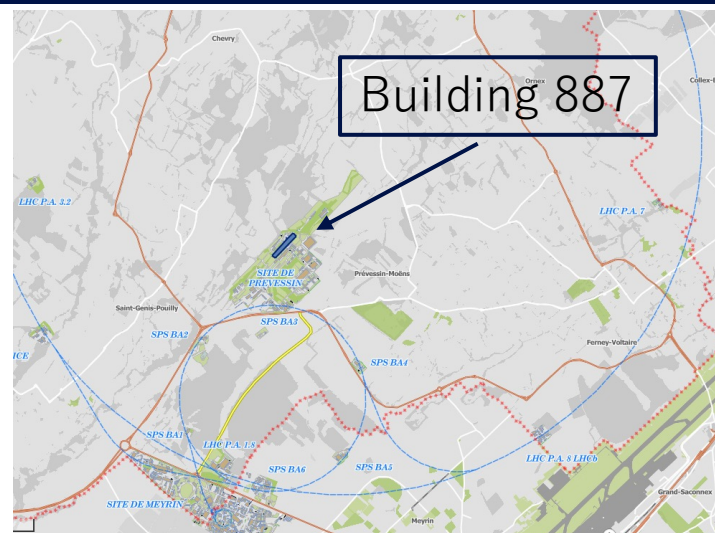
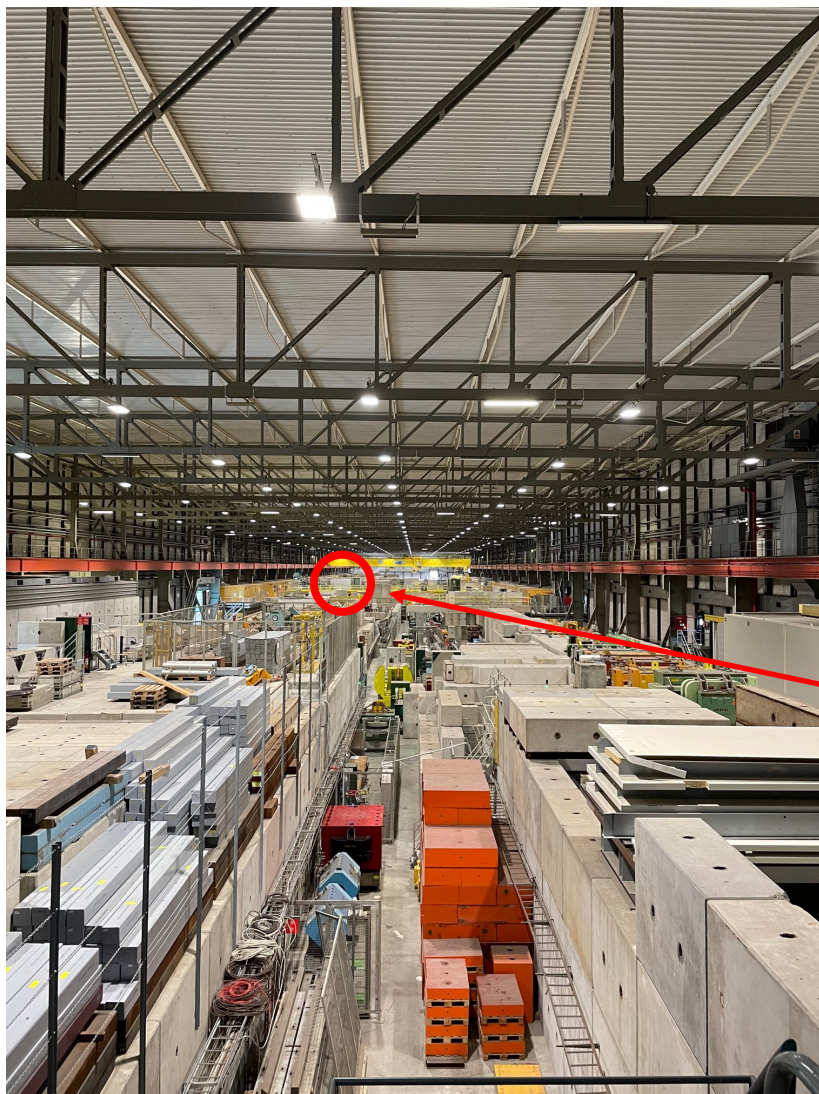


totalすると N_{exp} はそれぞれ

- 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

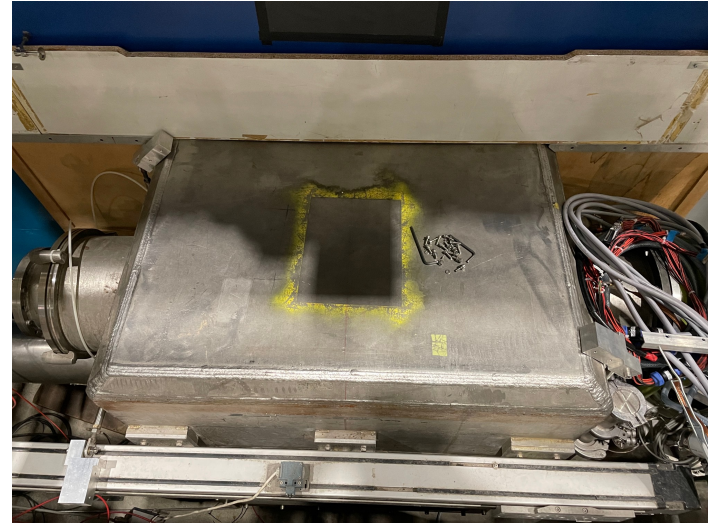
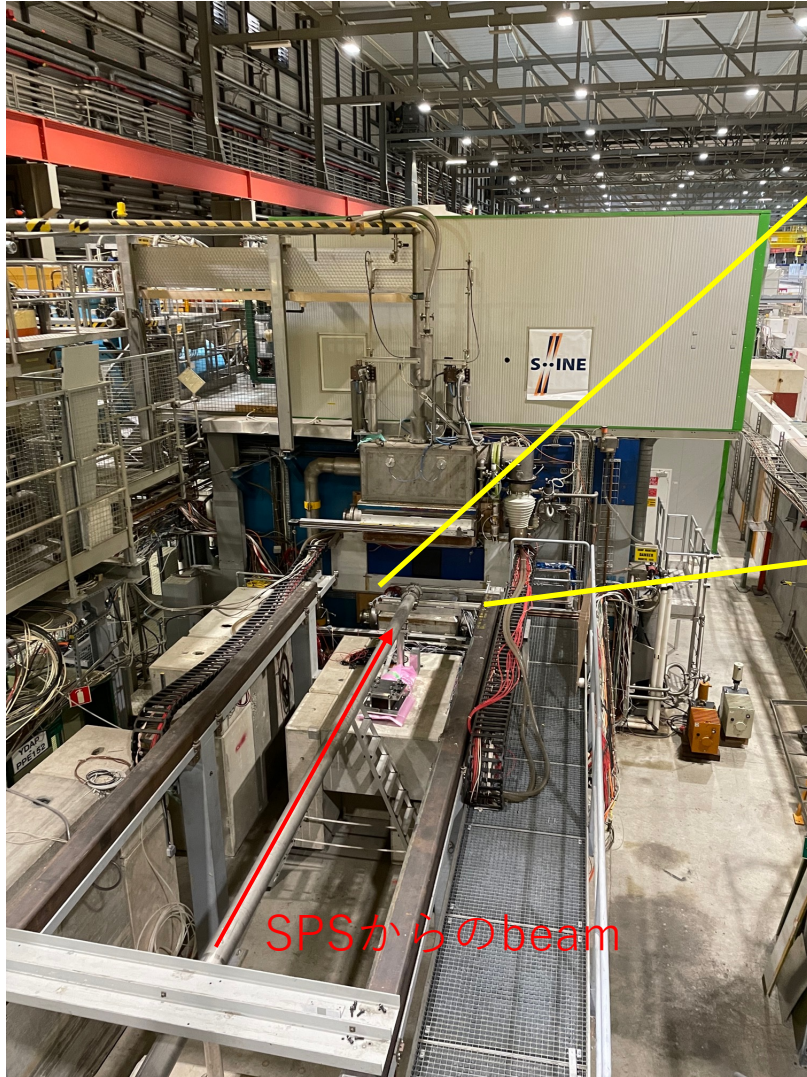


NA61/SHINE



実験の様子

ターゲットを置く場所

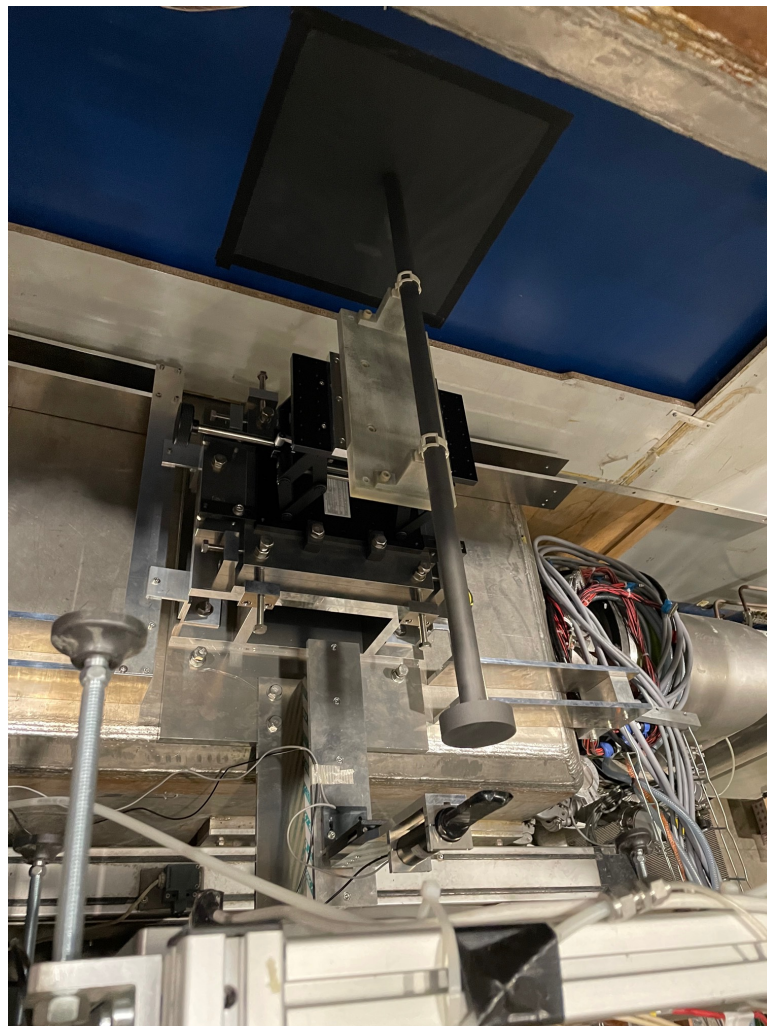


実験の様子

今回の測定で用いたターゲット

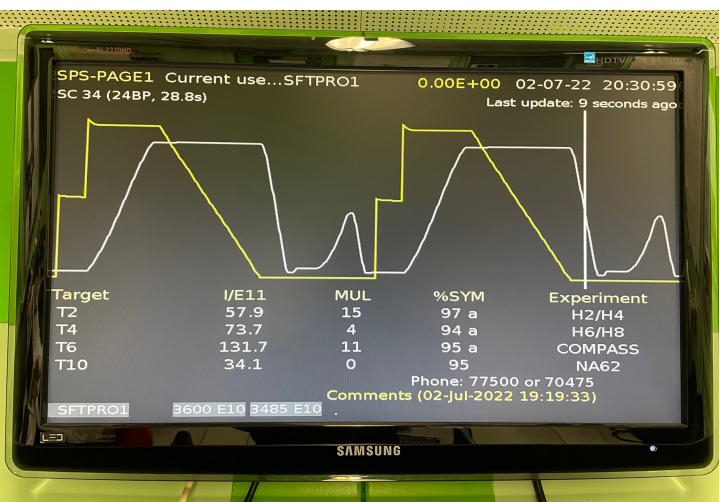


ターゲットを設置

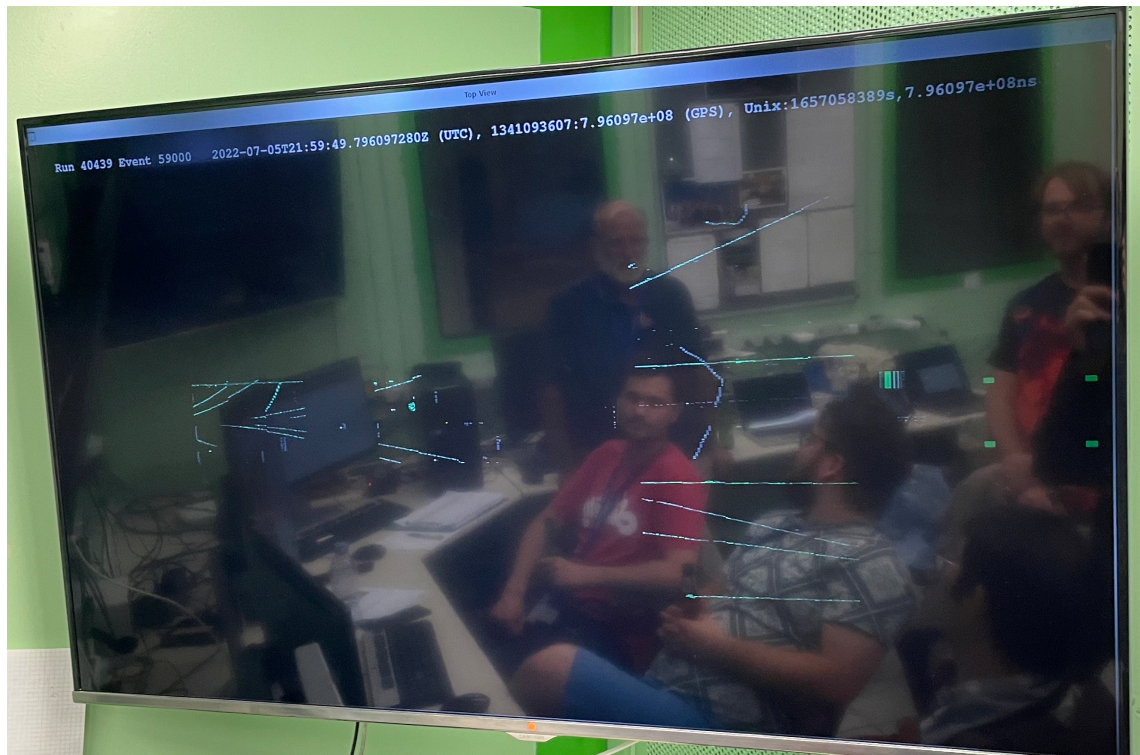


実験の様子

SPSのビームモニター



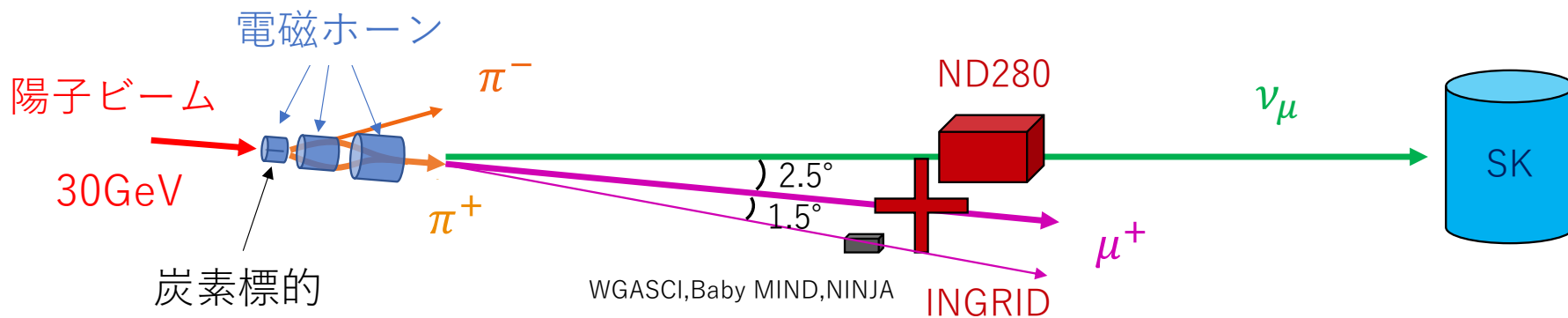
イベントディスプレイ



- 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

T2K実験の概要

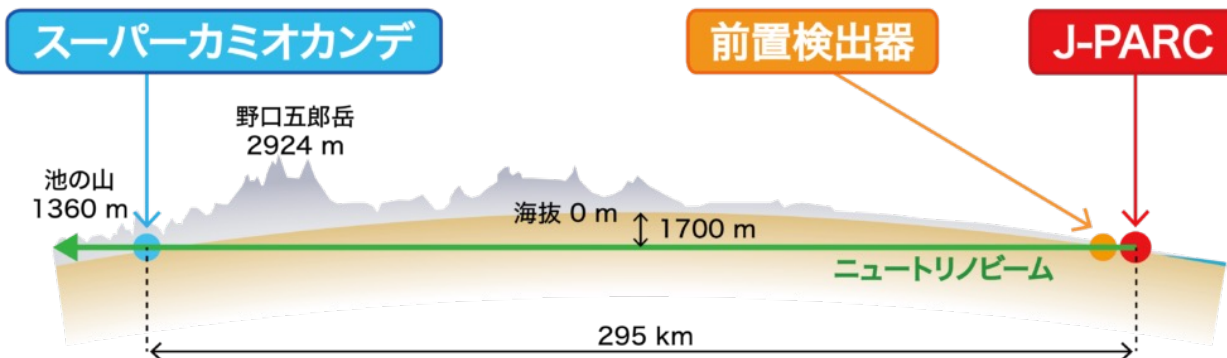




T2K実験

T2K(Tokai to Kamioka)実験

茨城県東海村にあるJ-PARCの大型加速器を用いてニュートリノビームを生成し、そこから295km離れた岐阜県飛騨市神岡町に設置されたSuper-Kamiokande検出器を用いて観測することでニュートリノ振動事象の研究をおこなっている。作られるニュートリノフラックスは主に ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ であるためニュートリノ振動のパラメータのうち θ_{23} , δ_{CP} の測定に高い感度をもつ。

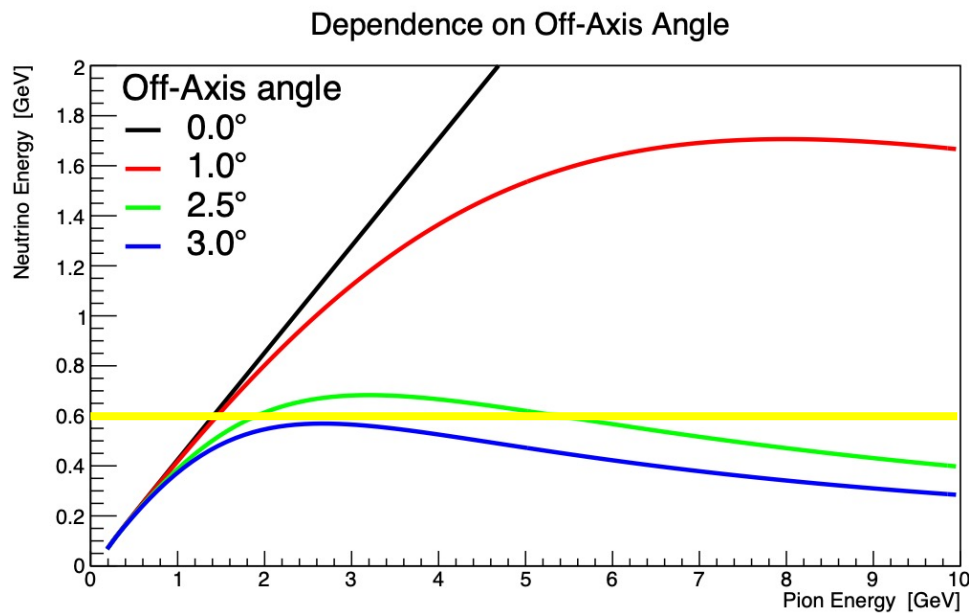


T2KのHPより <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>

Off-Axis法による角度依存性

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

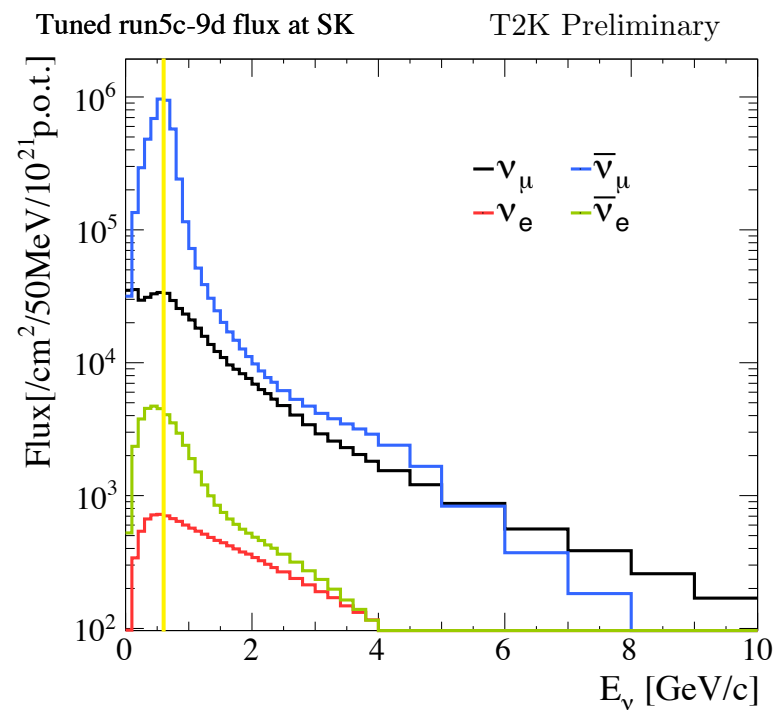
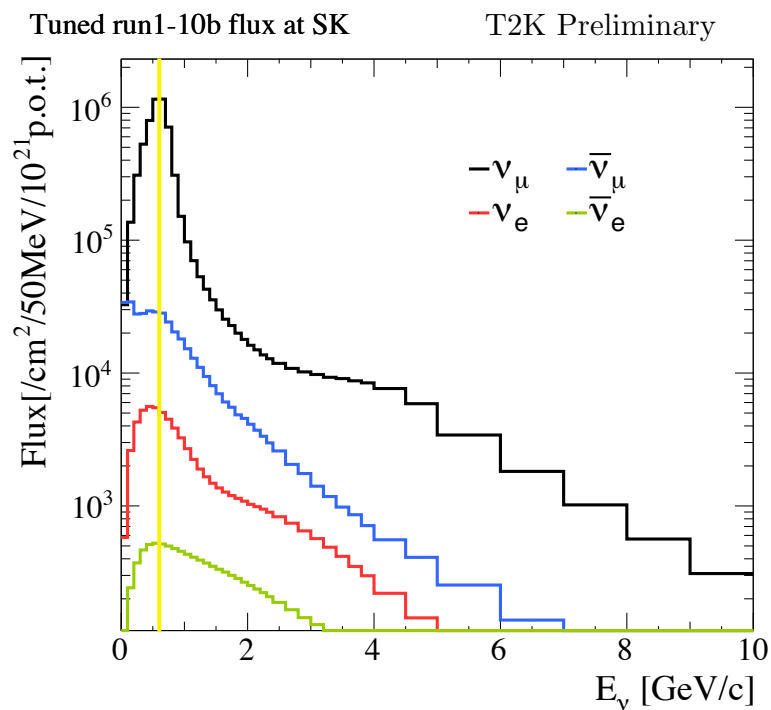
崩壊した後の ν のエネルギー E_ν



崩壊する前の π のエネルギー E_π

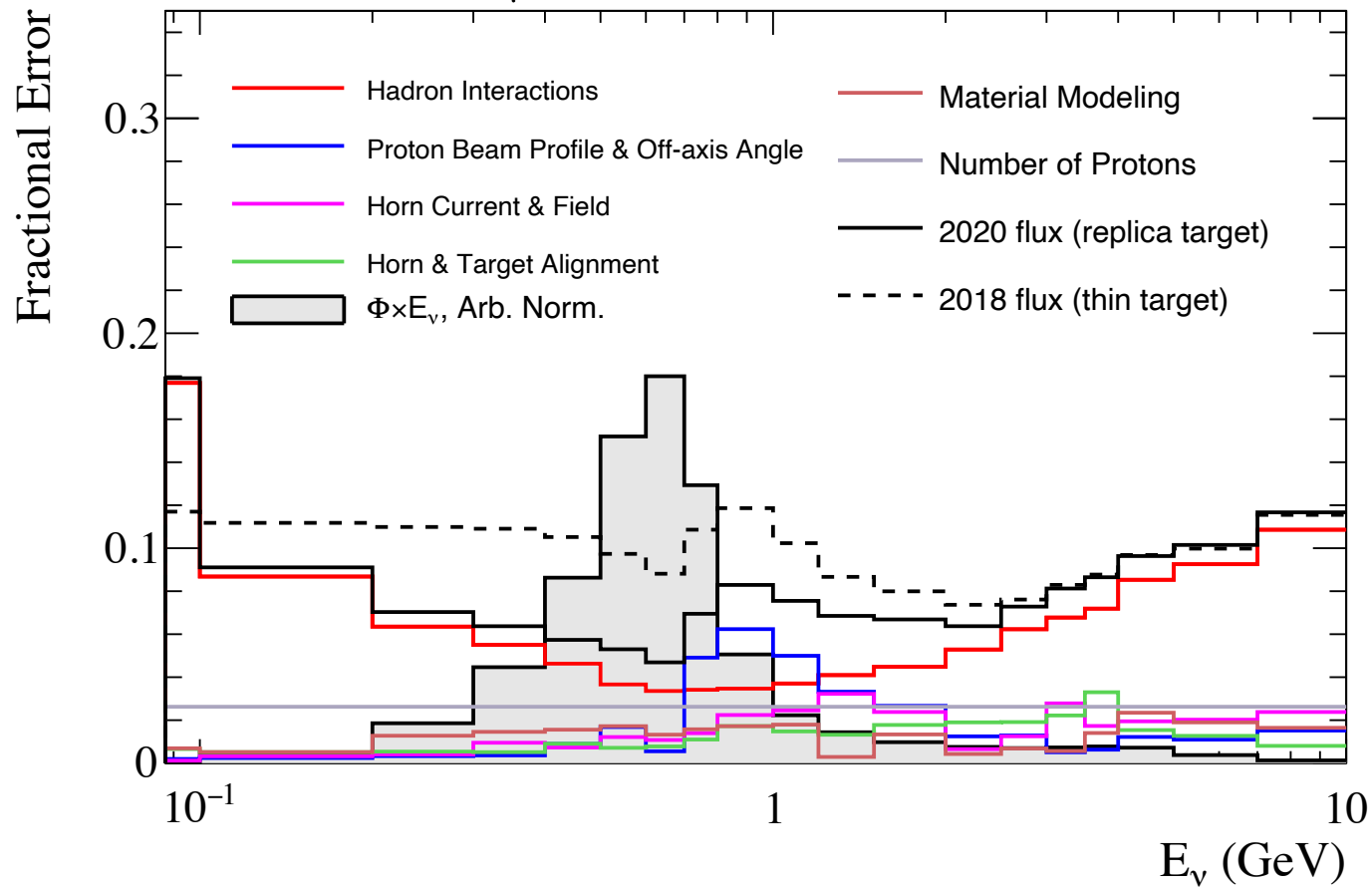
ニュートリノフラックス

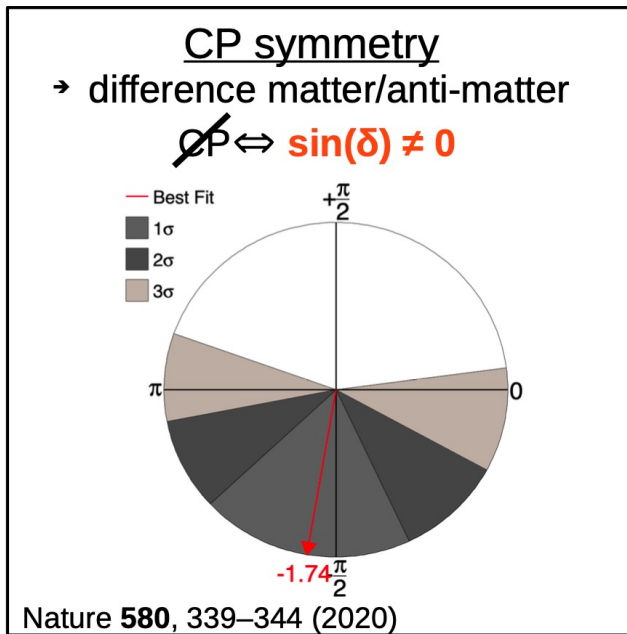
SKでの ν と $\bar{\nu}$ のフラックス



SK: Neutrino Mode, ν_μ

T2K Preliminary





PDGの値

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

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

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

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

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

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

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

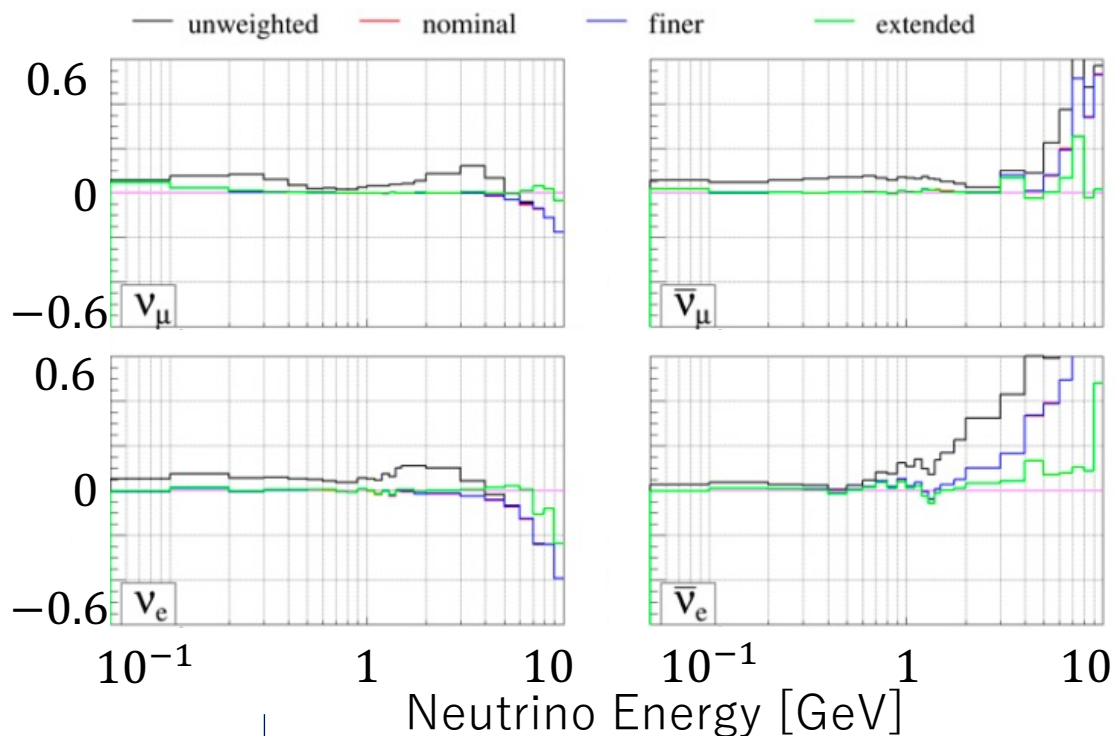
$$\delta, \text{ CP violating phase} = 1.36_{-0.16}^{+0.20} \pi \text{ rad}$$

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

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

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。
→前回の測定するときには無いdata

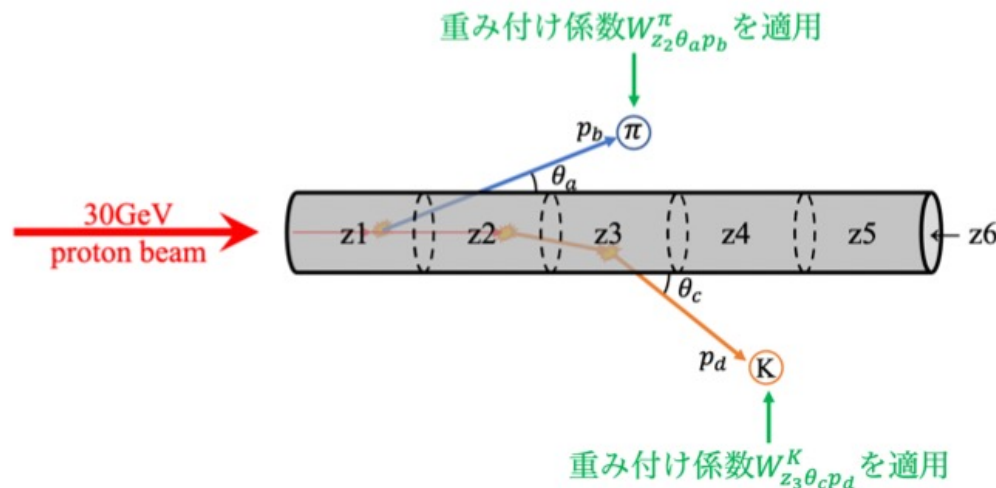
ニュートリノビームフラックス予測の補正

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



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]

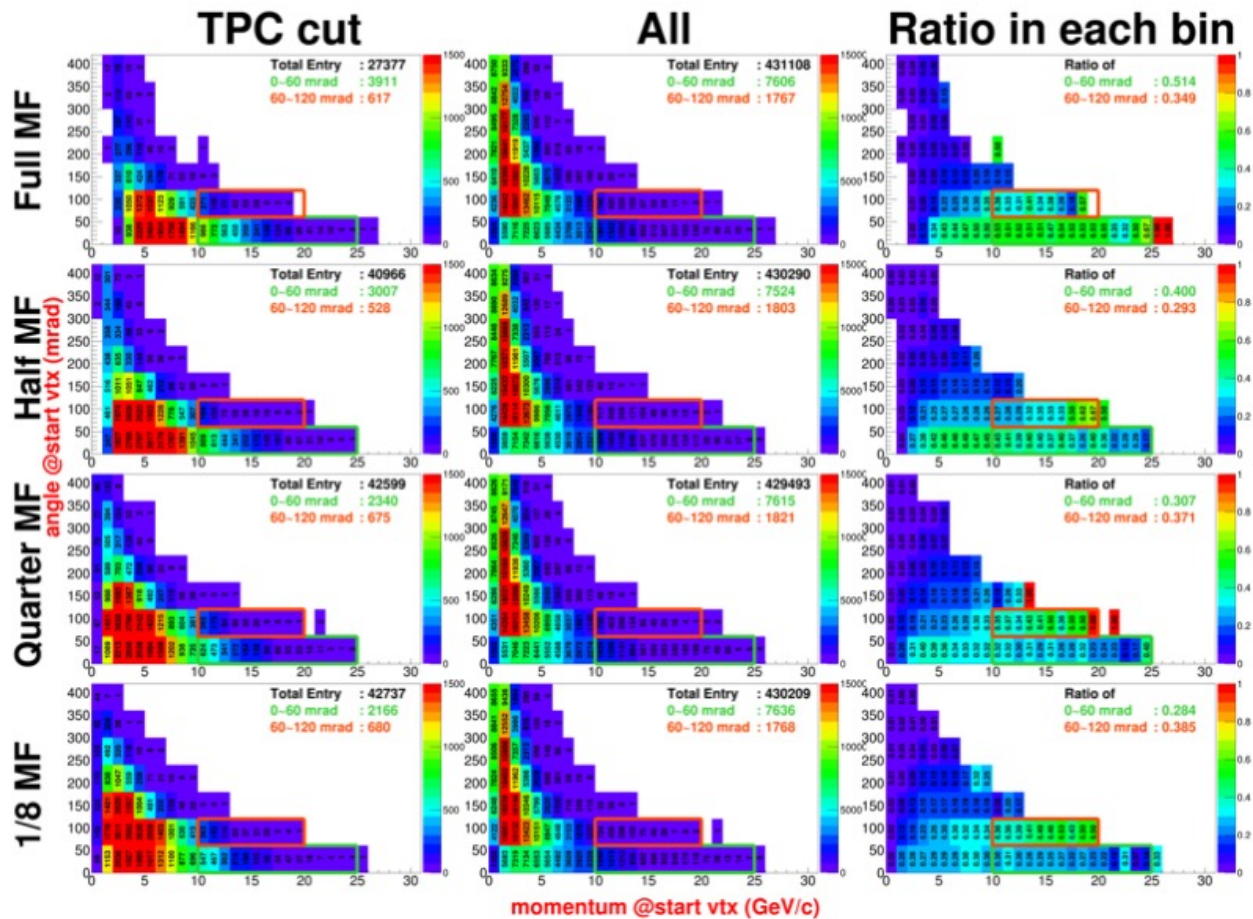
NA61/SHINE実験について

各production dataのtrigger数

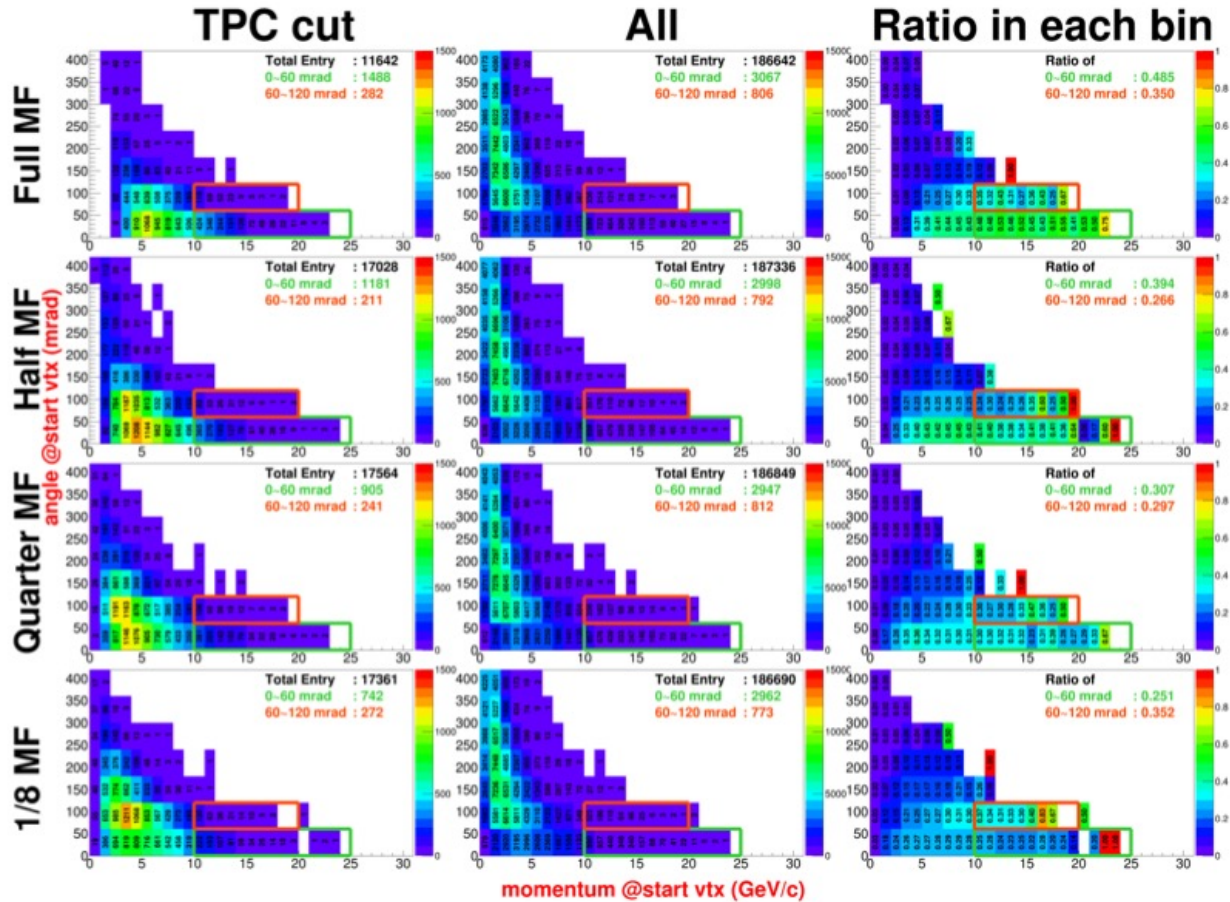
	全trigger数 (Million)
Full MF, target-OUT	5.969
1/2 MF, target-IN	149.7
1/2 MF, target-OUT	9.121
1/2 MF, target-holder IN (target-OUT)	2.926
1/8 MF, target-IN	14.03
1/8 MF, target-OUT	1.385

- 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

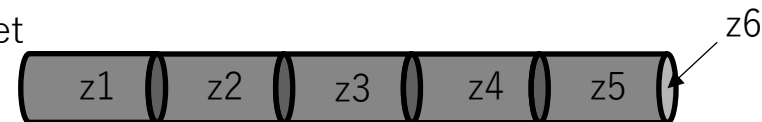


高運動量 K^\pm の数の見積もり

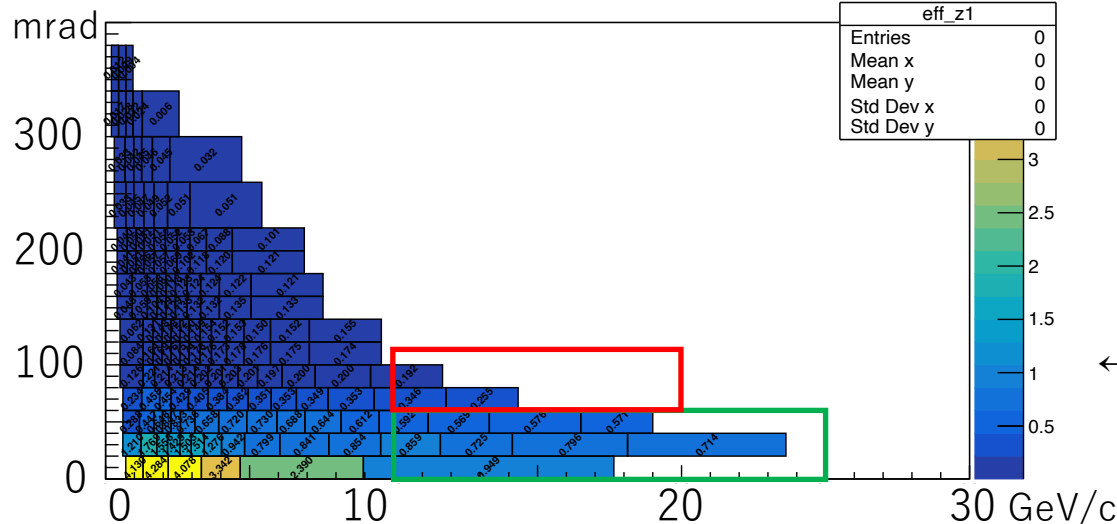
- 先行研究(2020年jps秋季大会：17aSD-6)として、シミュレーションによって2Millionの陽子を当てた際、target内で生成された K^\pm が検出器内を通った時の数が見積もられている。
- K 中間子に対するefficiencyの情報がないため π 中間子に対するefficiencyで代用する。
→ K と π では違いはあるものの、一番大きな影響は粒子の運動量と角度に対するものなので使える。
- これに今回取得できたtrigger数(150 Million)と検出器のefficiencyを考えて、取得できた K^\pm の数を見積もる。

Efficiencyの例(π^+ でtargetのz-1binから)

target



$0 \leq z < 18$ cm



緑枠

θ : 0~60 mrad
 p : 10~25 GeV/c

赤枠

θ : 60~120 mrad
 p : 10~20 GeV/c

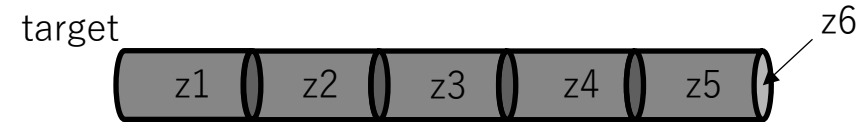
枠内が高運動量 K 中間子として
欲しいdata

←この図だと

緑枠内 : 0.596 赤枠内 : 0.192

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

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。

beam intensity scan

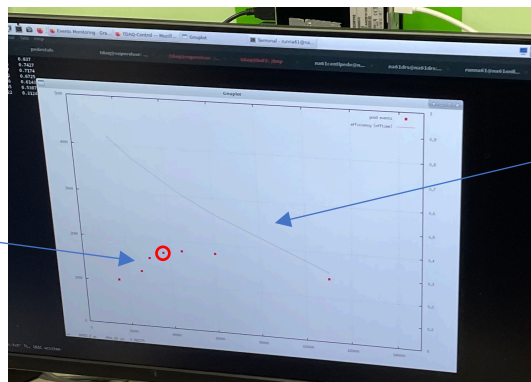
beam intensity ▶ どれくらいの強度(量)でhadronを入射するか。多い方がたくさんprotonを打ち込める

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



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

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

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

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

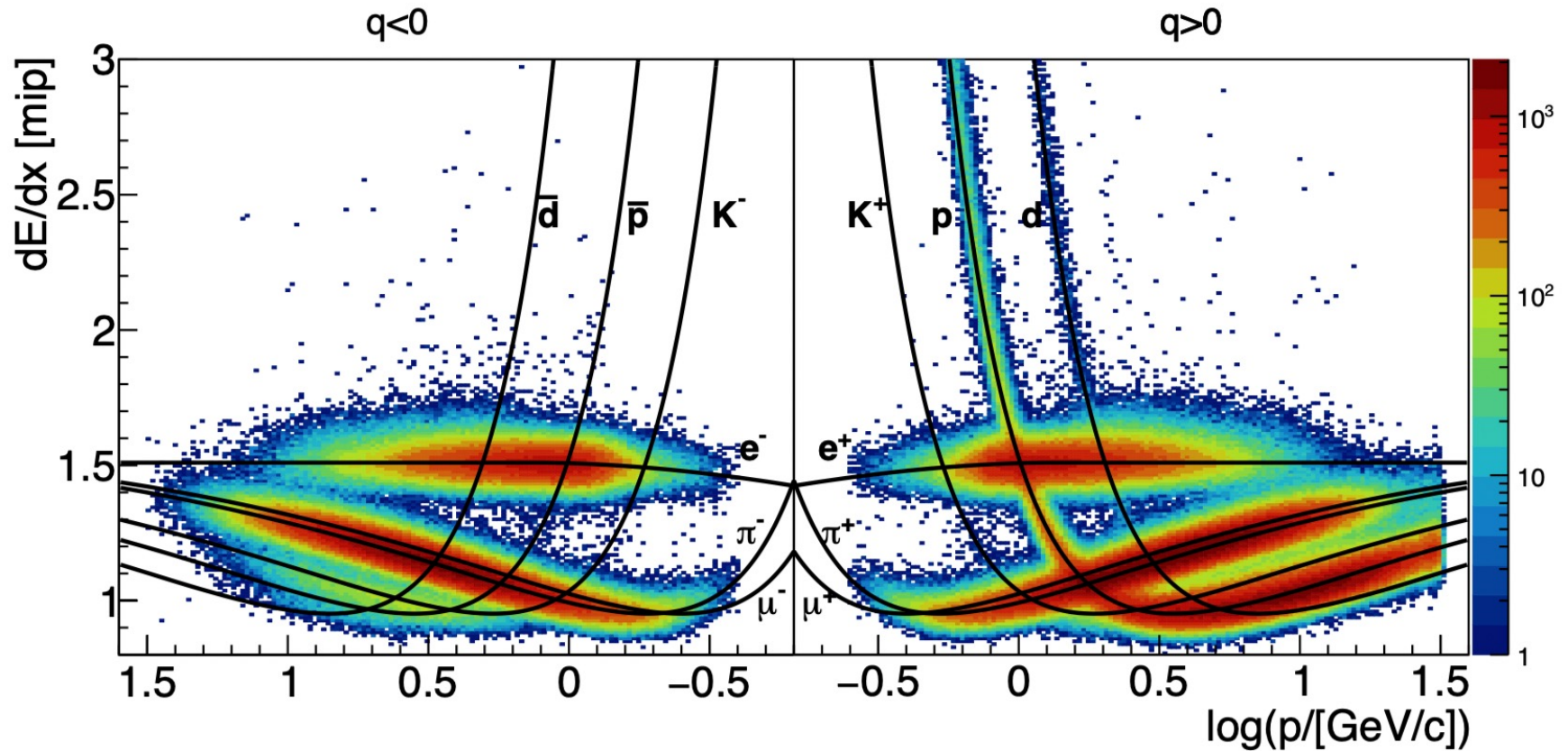


Fig. 12: Distribution of specific energy loss in the TPCs as a function of particle momentum for negatively (left panel) and positively (right panel) charged particles.

