

# CERN NA61/SHINEでの ハドロン生成数測定に向けた研究

---

自然科学研究科 数理物理学専攻  
素粒子物理学研究室  
41501201

岡田 涼

2021年 2月16日

[学会発表]

- 日本物理学会2019年秋季大会 2019年9月19日 19pT11-11
- 日本物理学会第75回年次大会(2020年) 2020年3月16日 16pH31-6 (オンライン)
- 日本物理学会2020年秋季大会 2020年9月17日17aSD-6 (オンライン発表)
- J-PARC Symposium 2019 2019年9月25日 ポスター発表

[出版物]

- Proceedings of the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC Symposium 2019) (出版予定、Accept済み)

# 目次

---

- イントロダクション
  - ニュートリノ
  - T2K実験
  - NA61/SHINE
- 本研究
  - 研究概要
  - 手法
  - Binning
  - フラックスの補正
  - 結果
- まとめ

イントロダクション

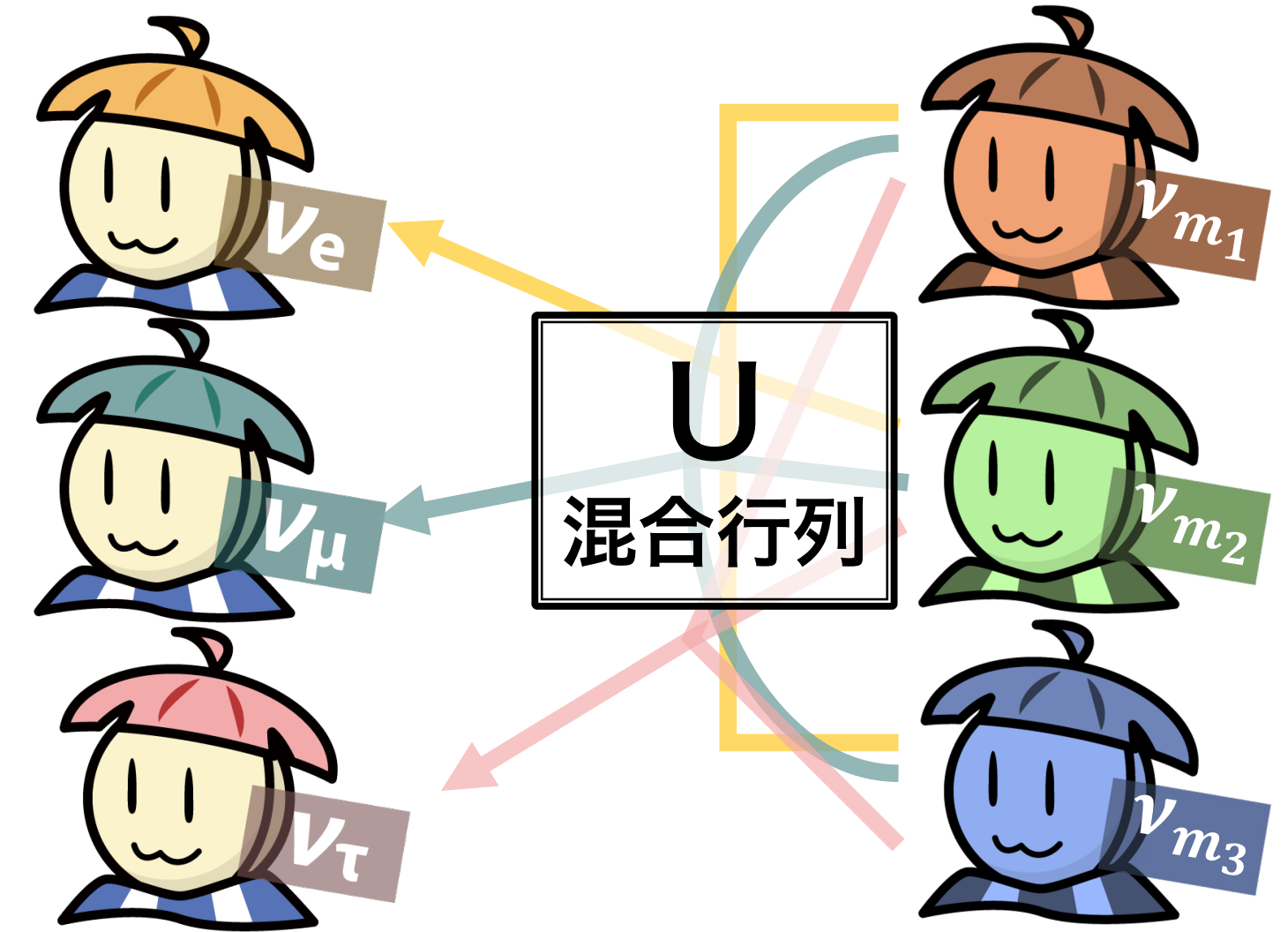
---

# ニュートリノ

- 素粒子の一種、電荷は0、スピンは1/2、3種類のフレーバーが存在する
- フレーバー固有状態は質量固有状態の重ね合わせ(混合)で記述される

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_{m_1} \\ \nu_{m_2} \\ \nu_{m_3} \end{pmatrix}$$

$\nu_x$  : フレーバー固有状態  
 $\nu_{m_i}$  : 質量固有状態

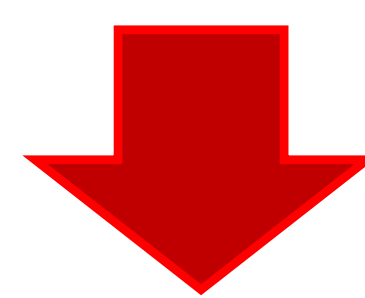


時間変化で混合割合が変わる → ニュートリノ振動

ニュートリノと反ニュートリノで振動確率は？ → CP対称性の破れ\*？

T2K実験

- T2K実験では $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) \rightarrow \nu_e (\bar{\nu}_e)$  振動事象観測を行なっている
  - $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動事象数と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動事象数を比較
  - 同じ : CP対称性の保存      違う : CP対称性の破れ
  - 違った場合、破れの大きさ  $\delta_{CP}$  は？



T2K最新結果 :  $-3.41 \leq \delta_{CP} \leq -0.03$  ( $m_1 > m_2 > m_3$ を仮定)

\*CP対称性の破れ : 粒子と反粒子で違う振る舞いをする事

# T2K実験

## 日本で行われている長基線ニュートリノ振動実験

[目的] ニュートリノ振動事象におけるCP対称性の破れの実証を目指す

### J-PARCでニュートリノビームを生成

陽子ビームと炭素標的の衝突により生成されたハドロンが崩壊する事でニュートリノが生成される

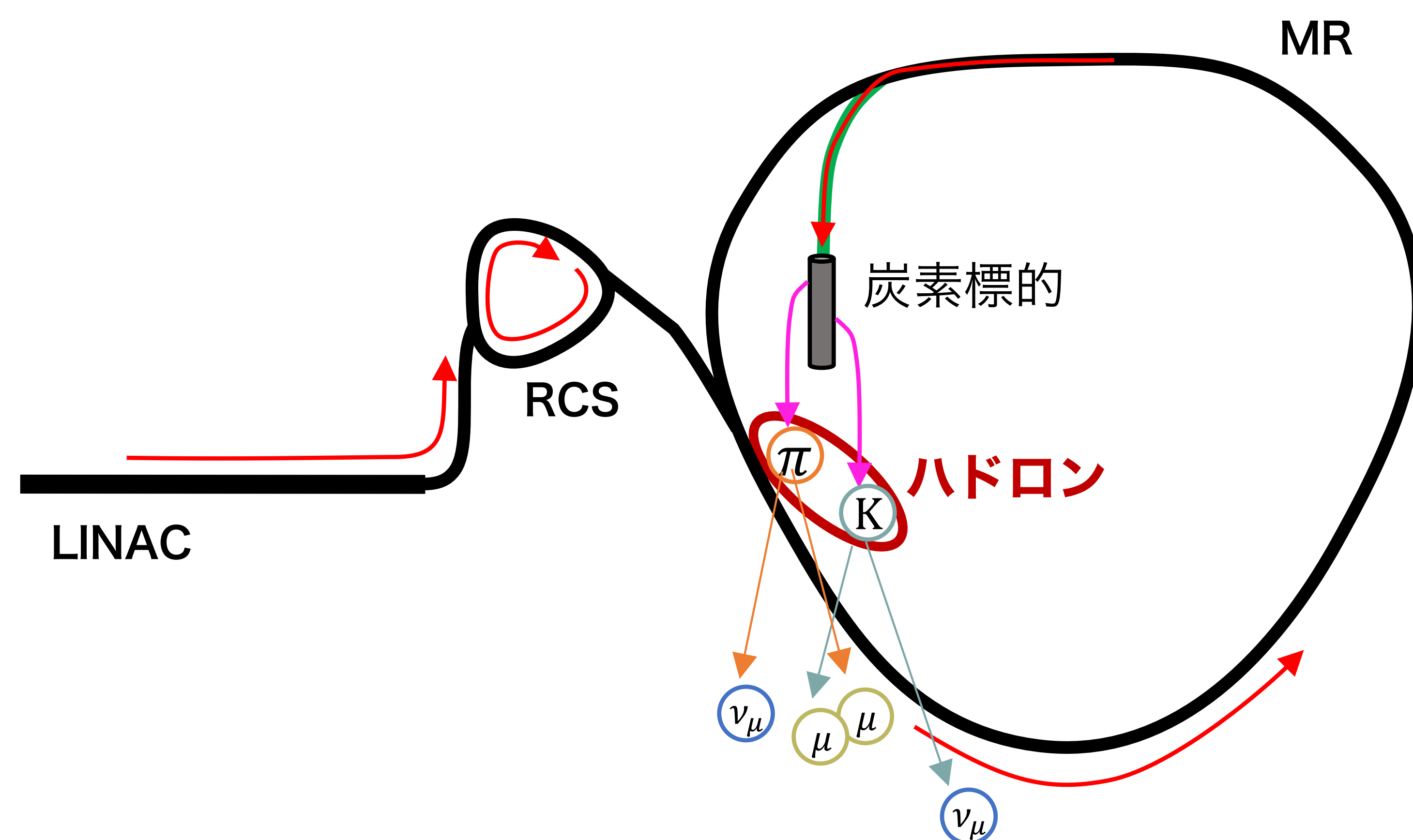
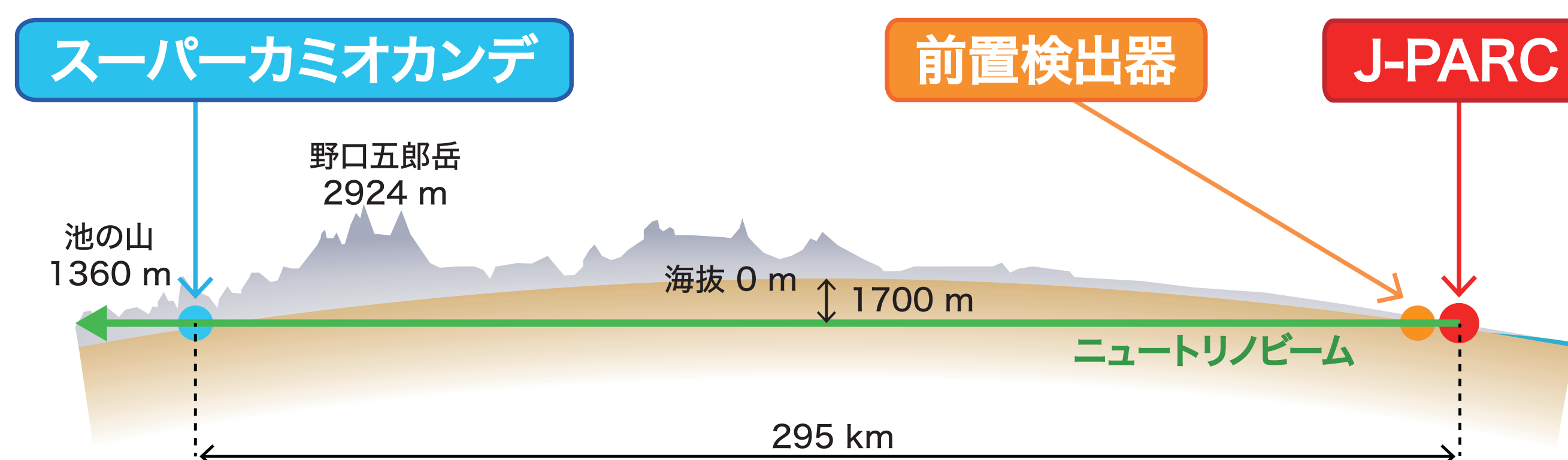
↓ 295 km 飛行する間にいくつか振動

### スーパーカミオカンデで観測

観測データの解析結果とシミュレーションでのニュートリノフラックス予測を比較

ハドロン由来の不定性が大きい

更なる統計と不定性削減で $\delta_{CP}$ の決定を目指す



# NA61 / SHINE

SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment

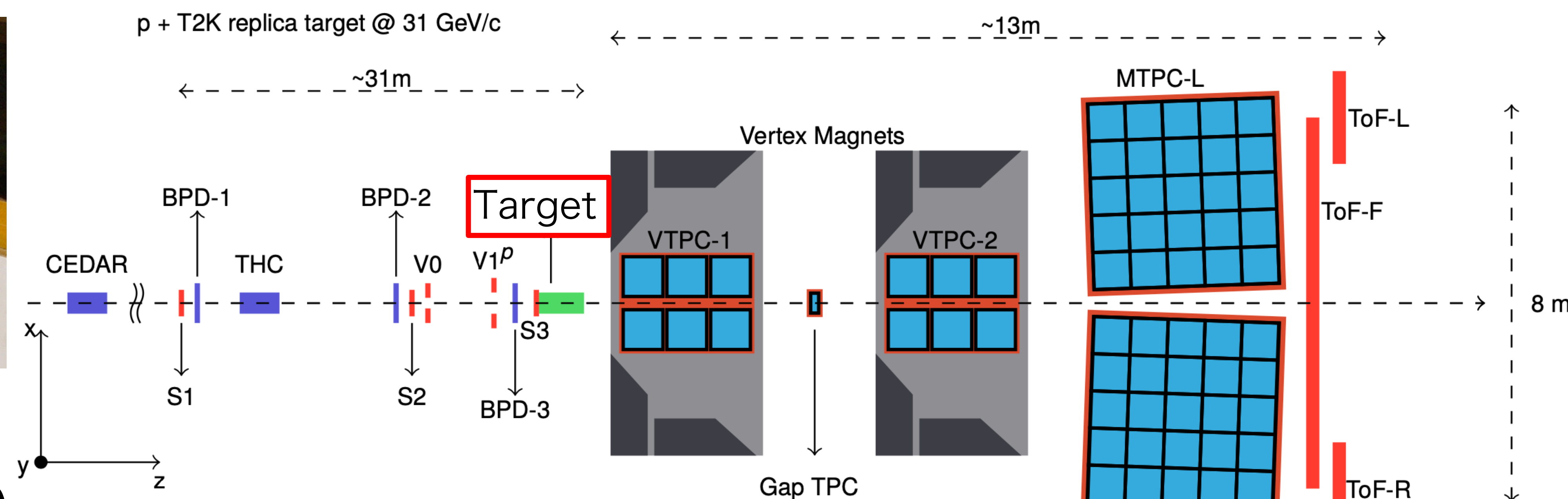
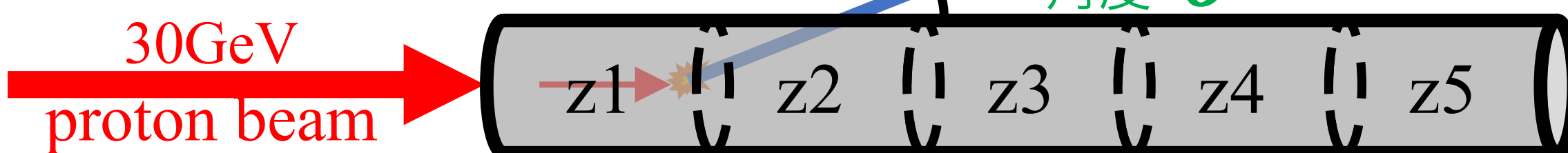
- CERN SPS加速器のNorth Areaで行われている実験
- 複数の検出器を用いて生成粒子の測定を行う

for T2K実験

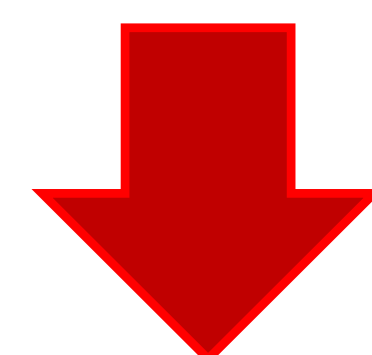
- 陽子ビームを炭素標的に照射、生成されたハドロンを測定



運動量  $p$   
角度  $\theta$



- 炭素標的を6領域に分割→領域ごとに $p$ - $\theta$ 分布を調べる
- NA61/SHINEの測定結果がシミュレーションの補正に使われている  
→ハドロン生成由来のシミュレーションの不定性が~10%残っている



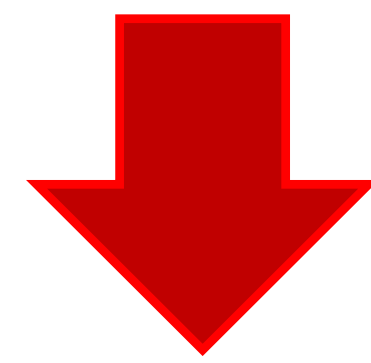
追加測定によりシミュレーションによる予測の不定性を削減したい

# 本研究

---

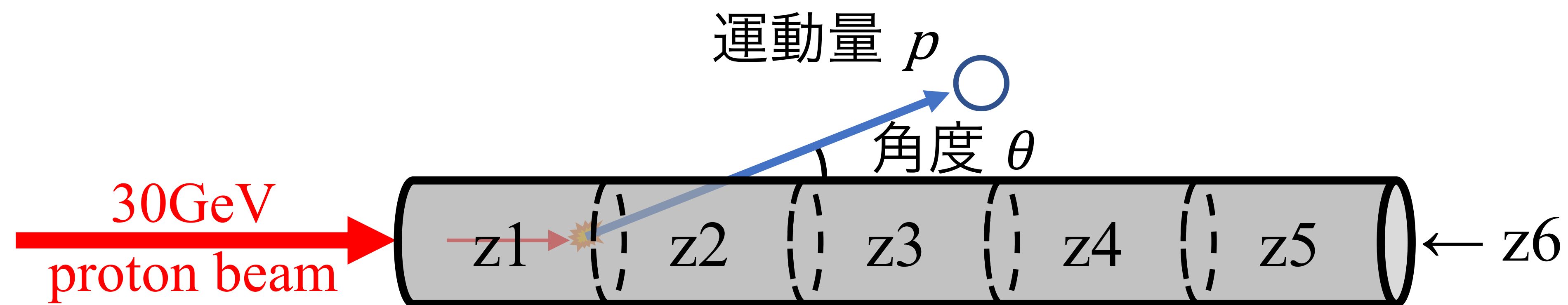
# 研究概要

シミュレーションでの予測の不定性削減に向けた  
NA61/SHINEでの追加測定を行いたい



追加測定においてどのような改善が必要かを調査する必要がある

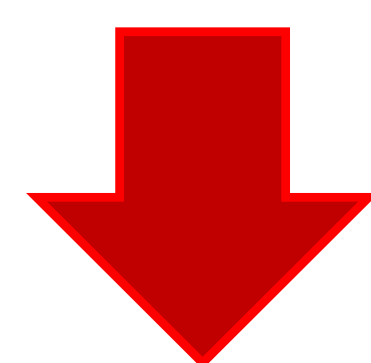
- ターゲット長の分割数の見積もり (B4 ~ M1前期)
  - 測定できる最大の運動量、角度を大きくする?
  - 運動量、角度の測定精度を向上させる?
- } (M1後期 ~ M2)





# 研究概要

シミュレーションでの予測の不定性削減に向けた  
NA61/SHINEでの追加測定を行いたい



追加測定においてどのような改善が必要かを調査する必要がある

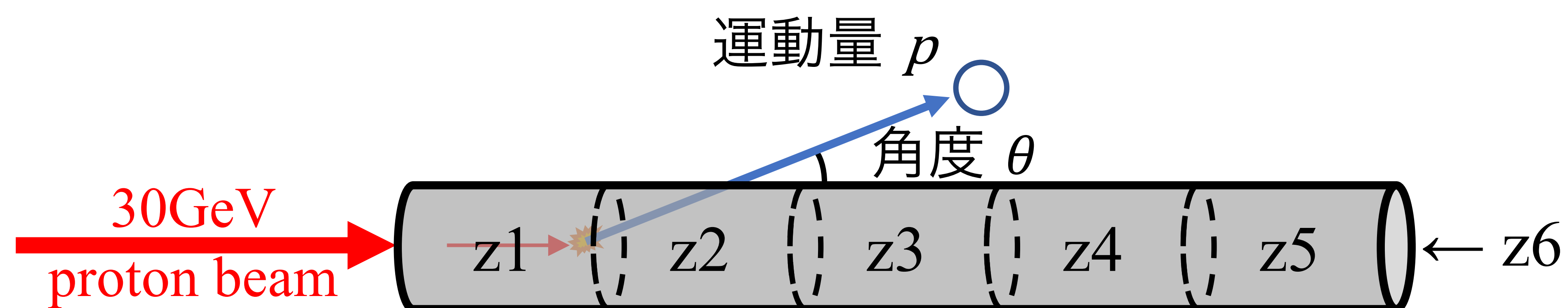
- ターゲット長の分割数の見積もり (B4 ~ M1前期)

- 測定できる最大の運動量、角度を大きくする?

- 運動量、角度の測定精度を向上させる?

(M1後期 ~ M2)

これらの結果を発表する

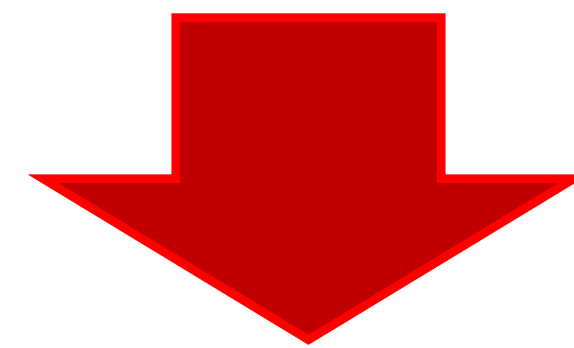


# 研究概要

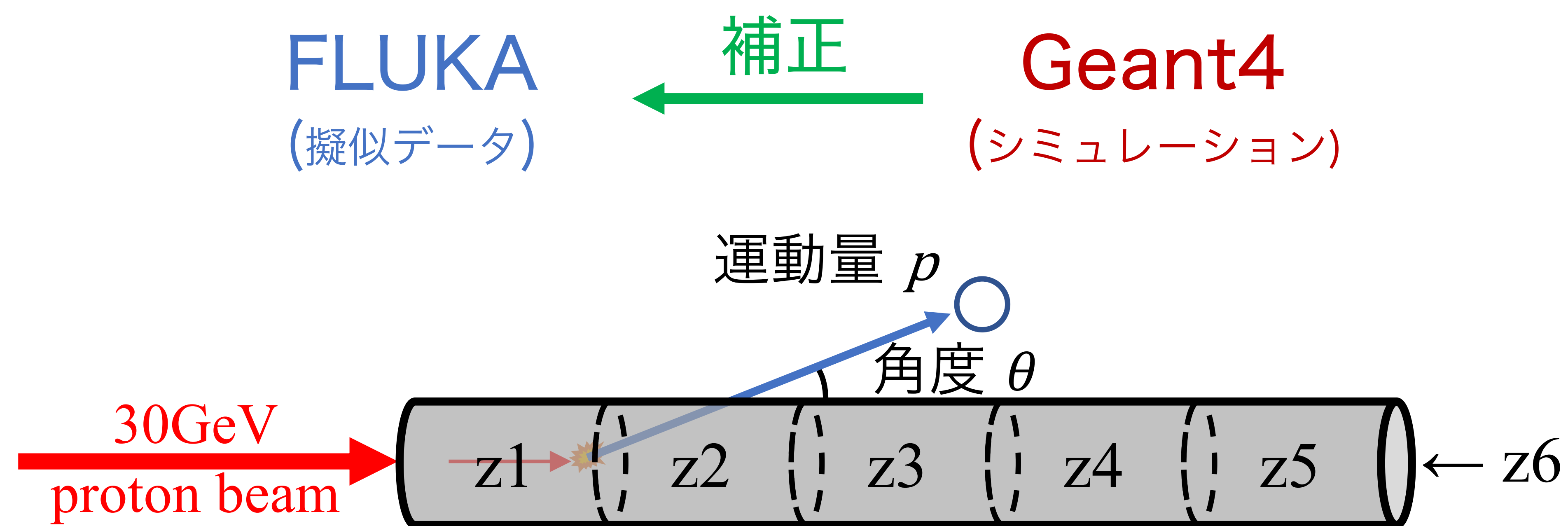
- 測定できる最大の運動量、角度を大きくする？
- 運動量、角度の測定精度を向上させる？

このような測定が行えた場合、フラックス予測はどの程度よくなるかを見積もりたい

測定データがあればベストだけどもちろん存在しない…



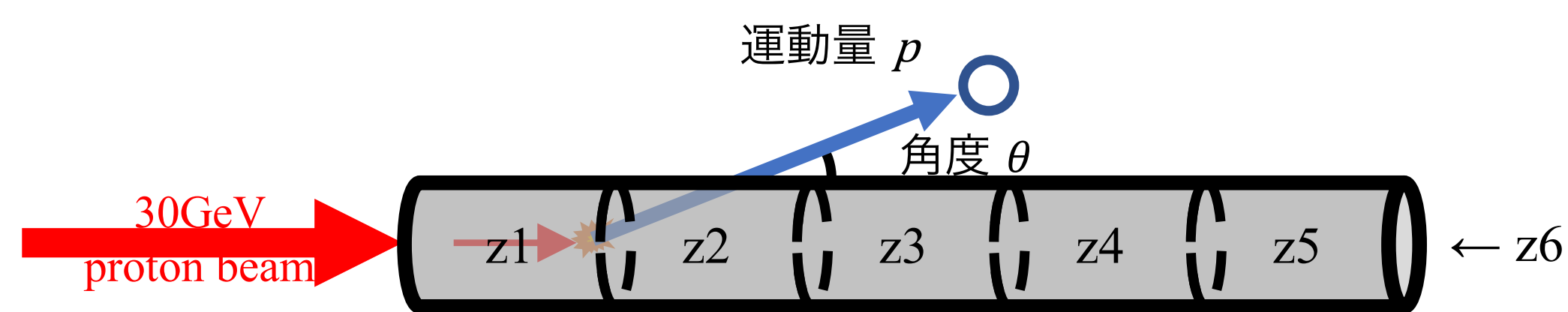
違う物理モデルのシミュレーション、FLUKAとGeant4を使って見積もる



# 手法

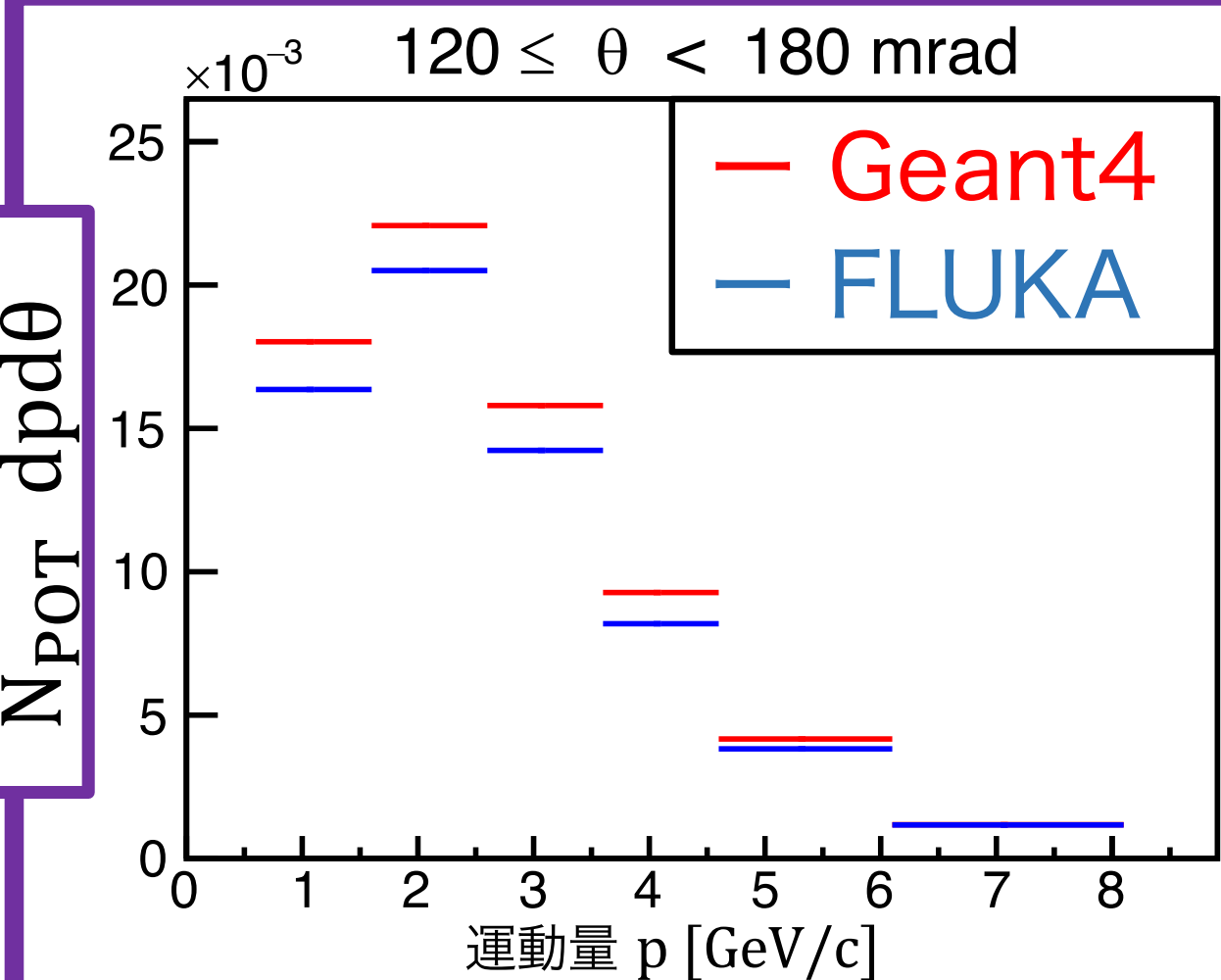
## FLUKA (擬似データ)

ターゲットシミュレーション  
(陽子ビームと炭素標的衝突のシミュレーション)

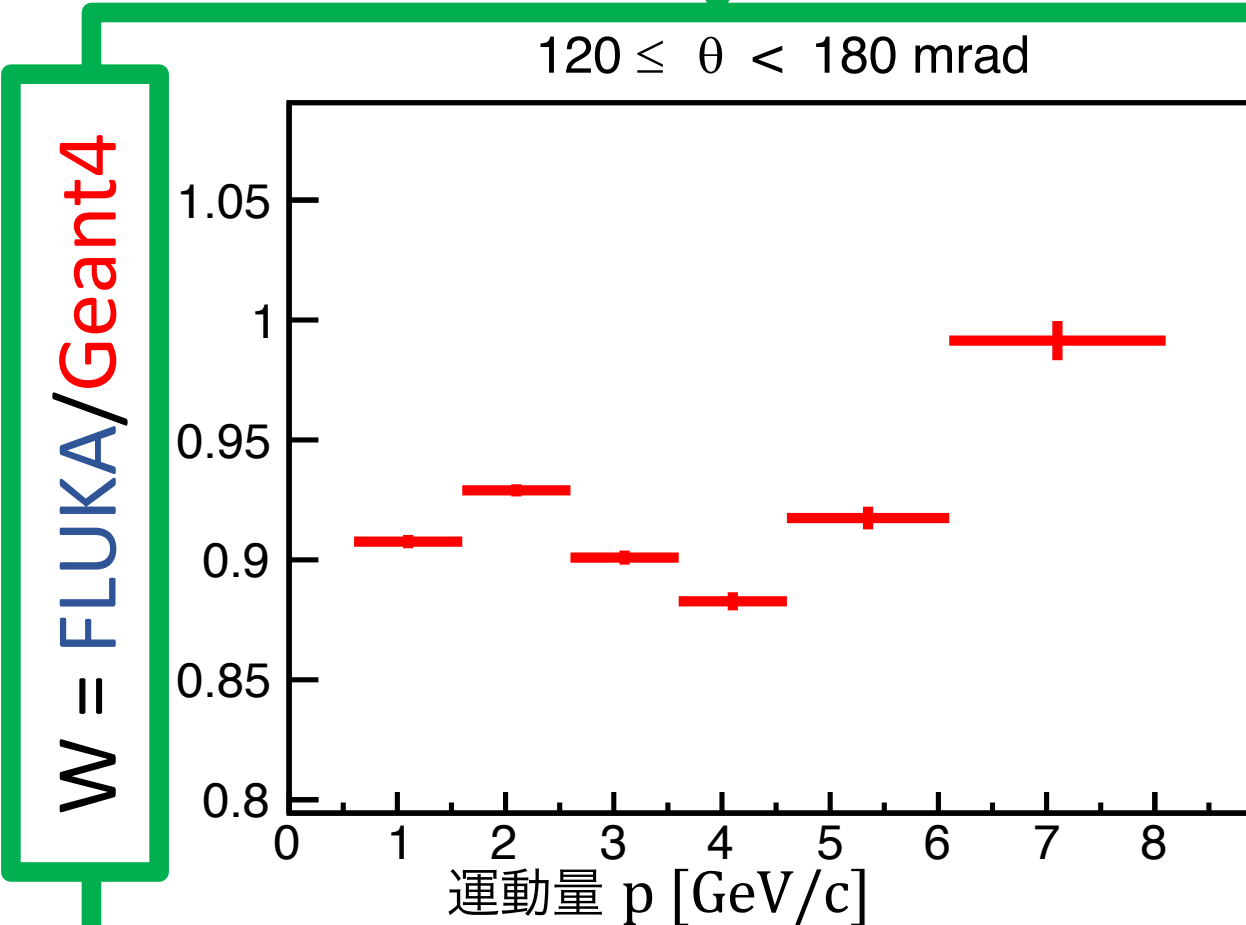


$\pi^\pm, K^\pm$  の位置、運動量、角度  
分布を作る

$$\frac{1}{N_{POT}} \frac{d^2 N_{K^+}}{dp d\theta}$$



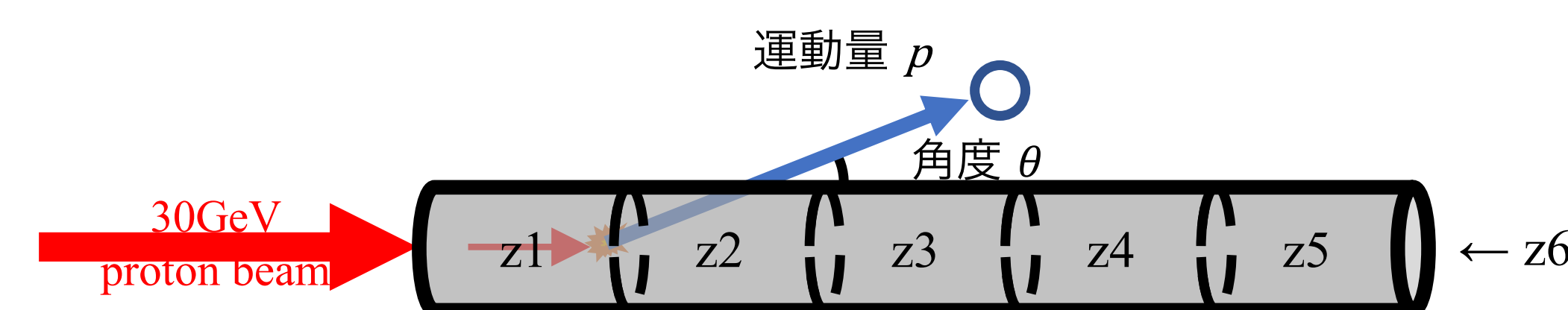
重み付け係数  $W$  を  
分布から求める



比較

## Geant4

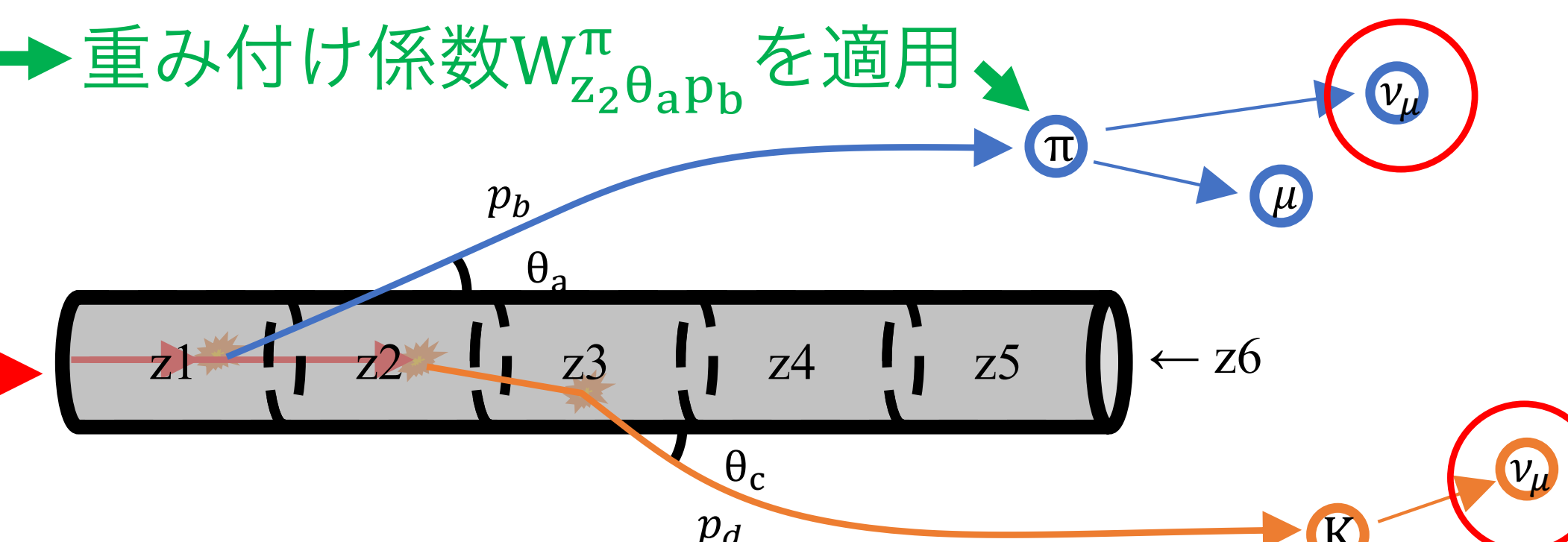
ターゲットシミュレーション  
(陽子ビームと炭素標的衝突のシミュレーション)



$\pi^\pm, K^\pm$  の位置、運動量、角度  
分布を作る

ターゲットシミュレーションデータを用いた  
ニュートリノビームフラックス計算

重み付け係数  $W_{z_2 \theta_a p_b}^\pi$  を適用

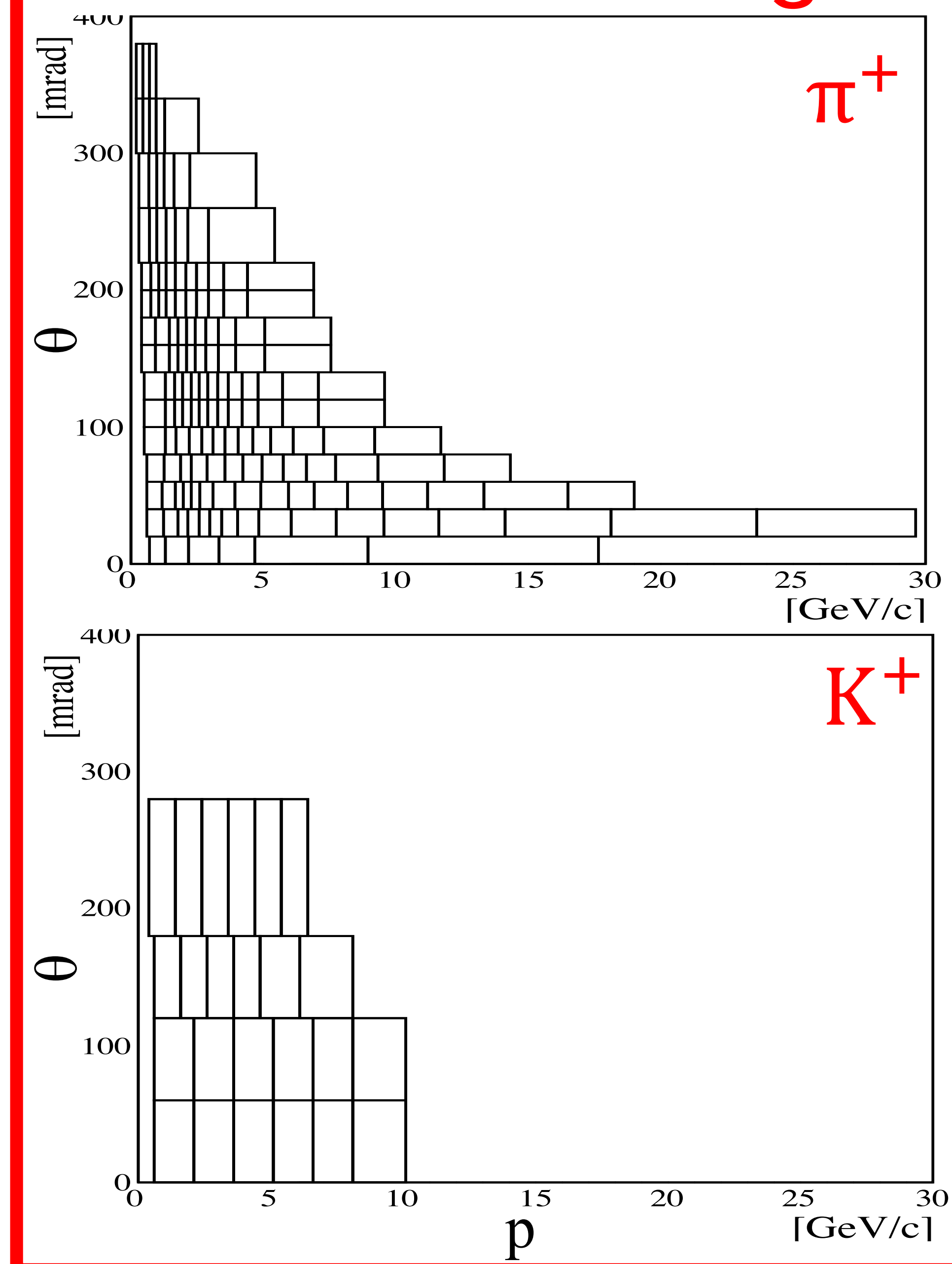


重み付け係数  $W_{z_3 \theta_c p_d}^K$  を適用

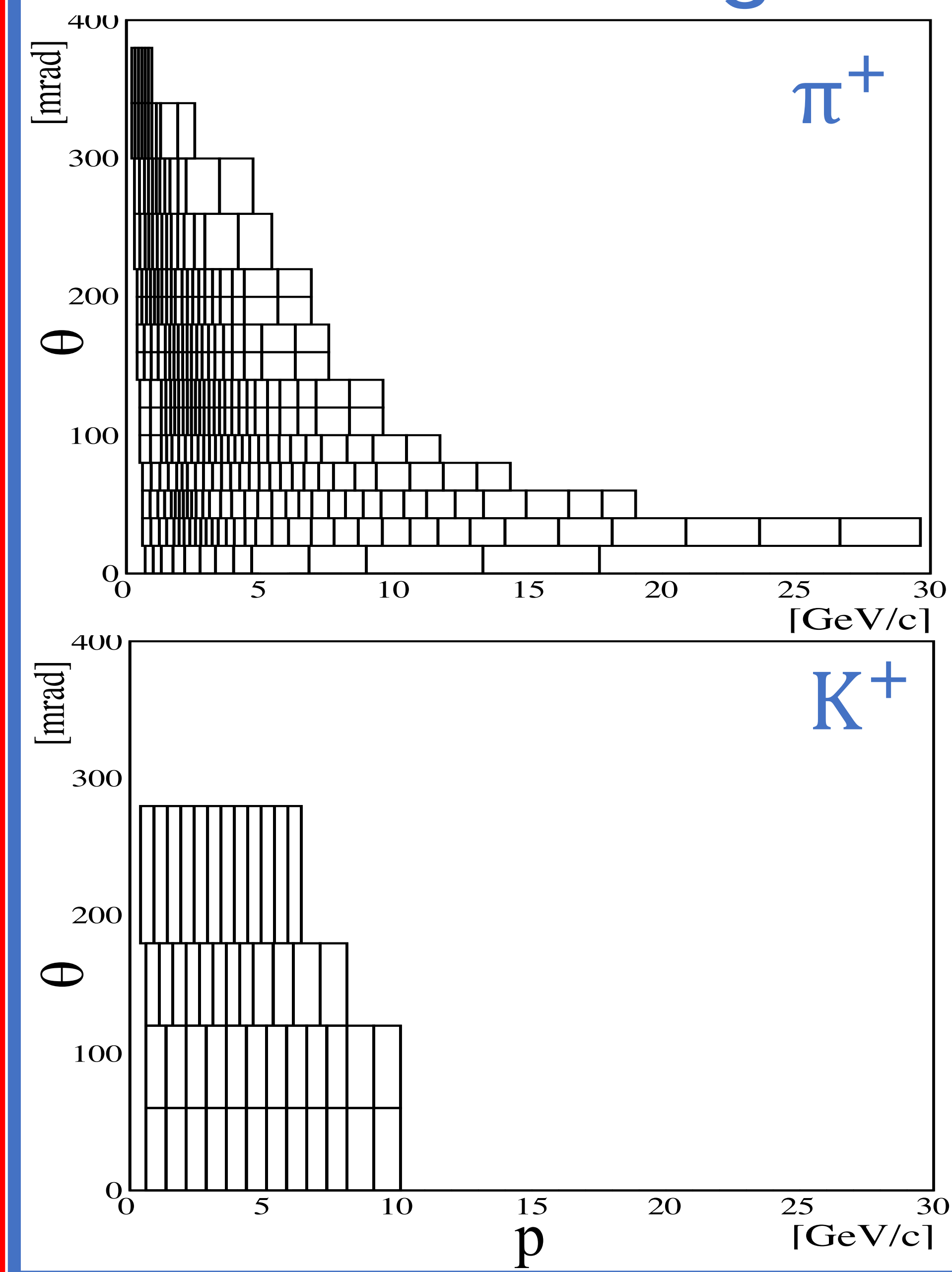
# Binning

以下に示すbinningを行い、データの解析を行った (例として $\pi^+$  と $K^+$ の  $z1$  領域のbinning)

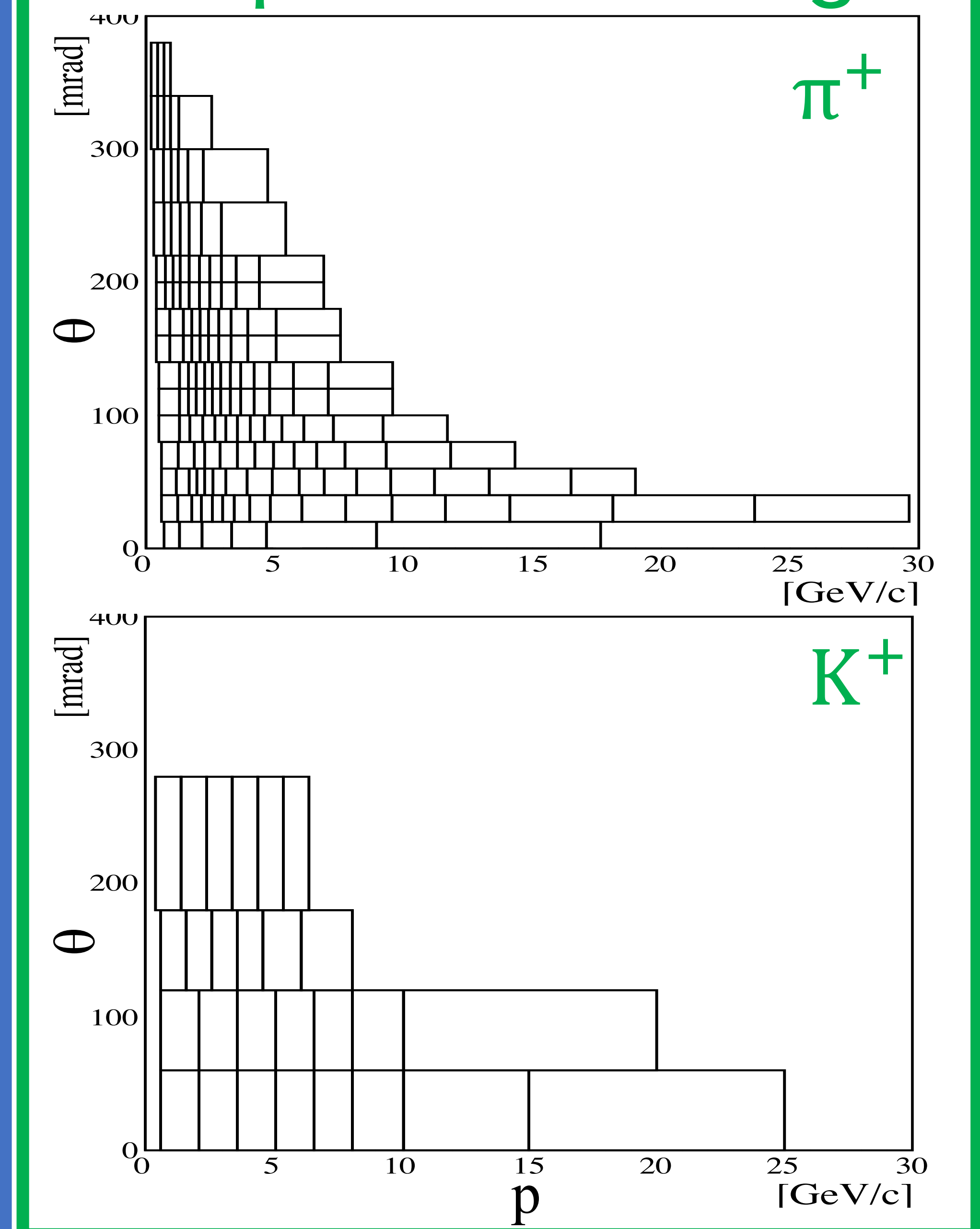
**nominal binning**



**finer binning**



**expanded binning**



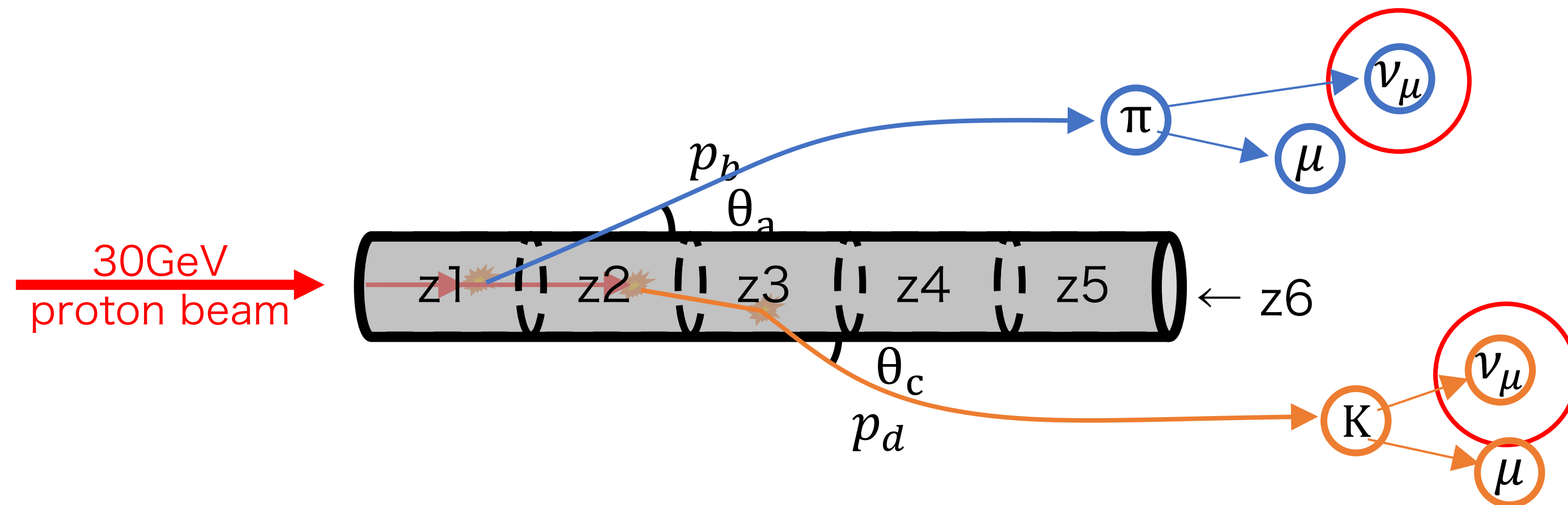
nominal binning : NA61 2010 の解析に使われたbinning

finer binning : **nominal binning** をさらに細かく区切ったbinning

expanded binning :  $\pi^\pm \rightarrow$  nominal binning、 $K^\pm \rightarrow$  高運動領域に拡張

# フラックスの補正

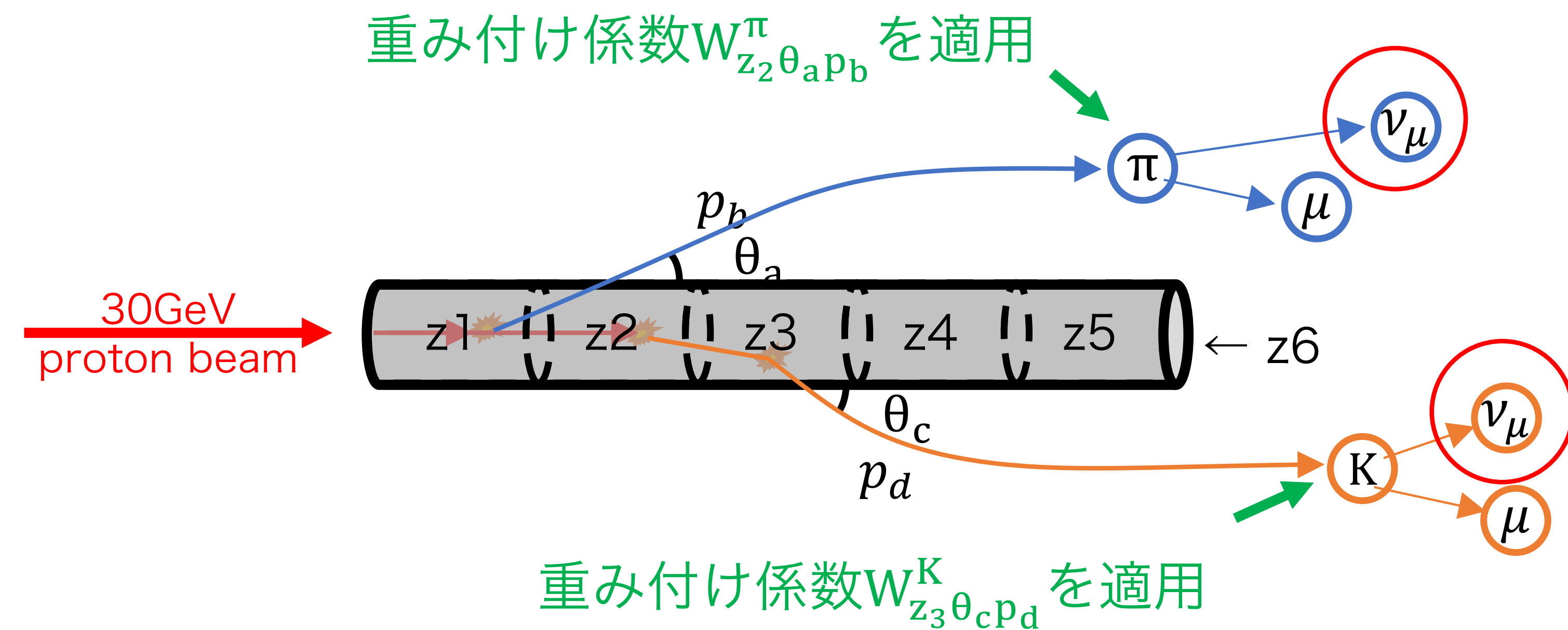
## FLUKA でのフラックス計算



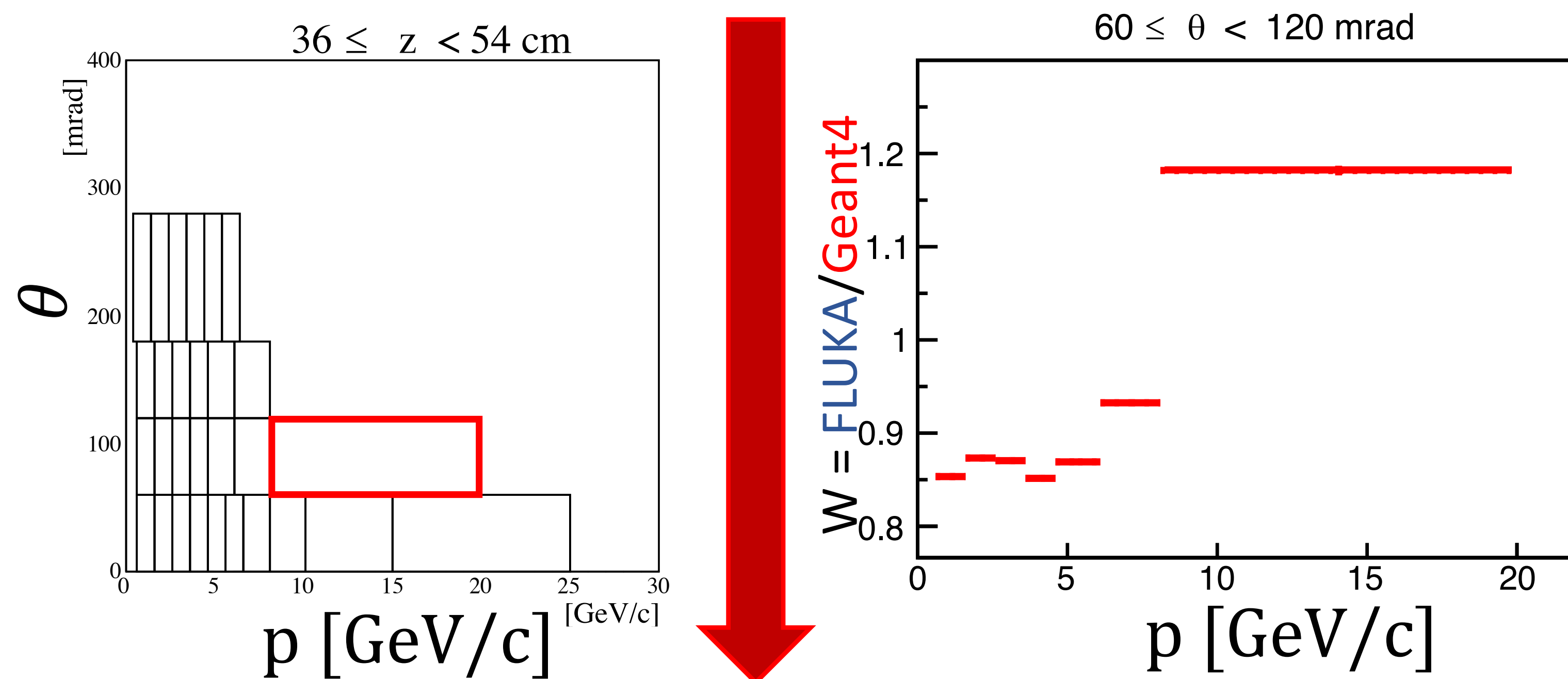
生成されたニュートリノの数を足し上げて  
フラックスを計算する

$\text{Flux}_{\text{FLUKA}}$

## Geant4 でのフラックス計算



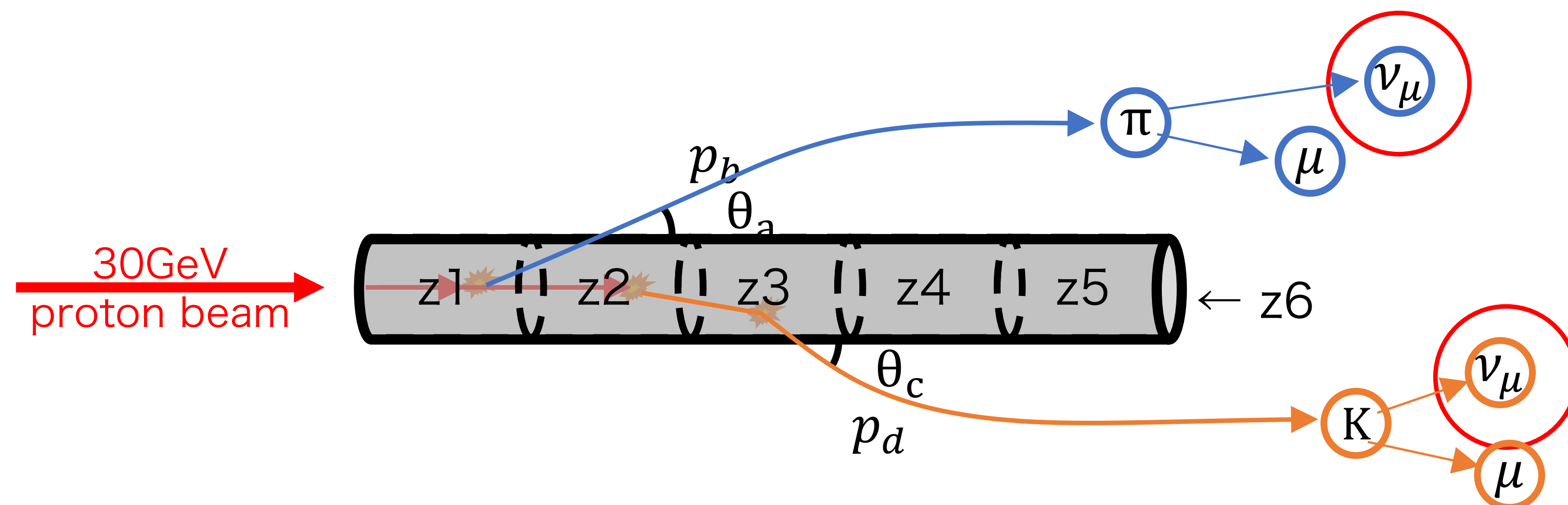
例えば  $K^+$  粒子が赤枠内の  $p$ ,  $\theta$  を持って出てきた場合 (ex,  $\theta = 70$  mrad,  $p = 15$  GeV/c) は、  
フラックスを 1.18 倍する



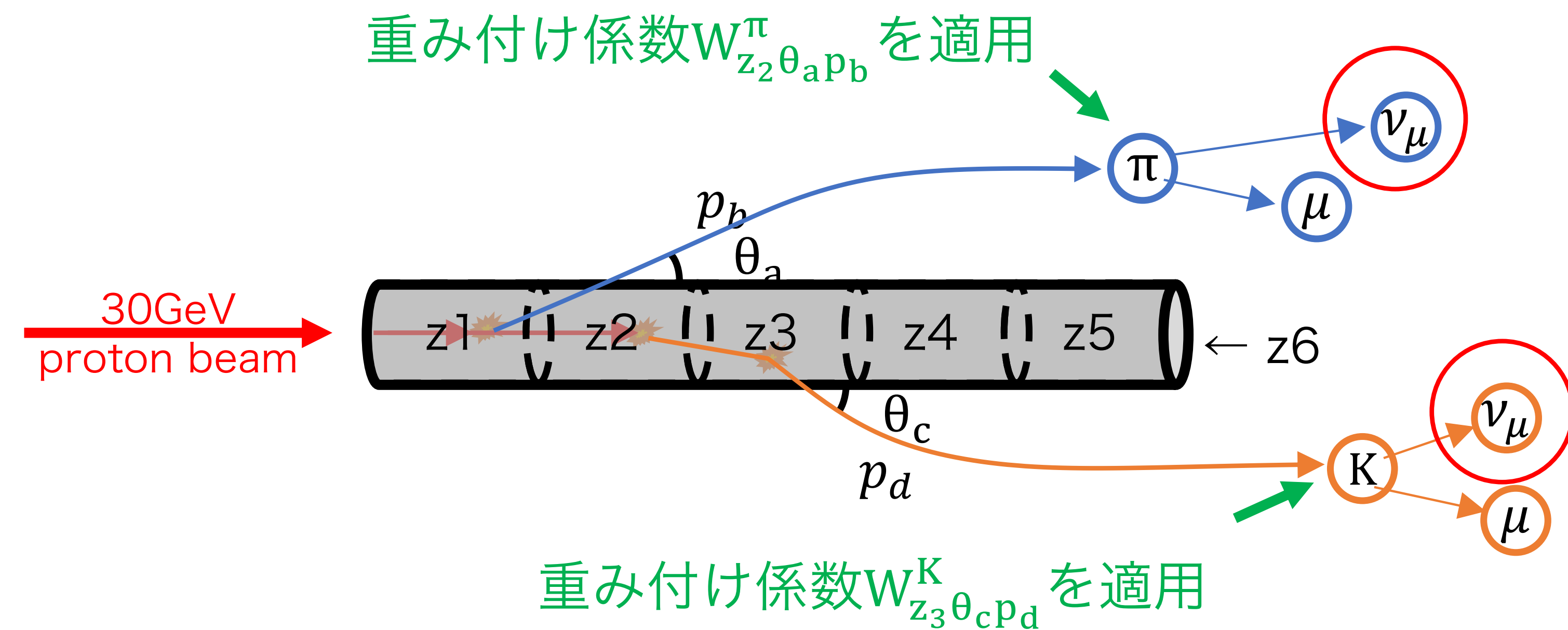
$\text{Flux}_{\text{weighted G4}}$

# フラックスの補正

## FLUKA でのフラックス計算



## Geant4 でのフラックス計算



$Flux_{\text{weighted G4}}$  と  $Flux_{\text{FLUKA}}$  を計算したのち、

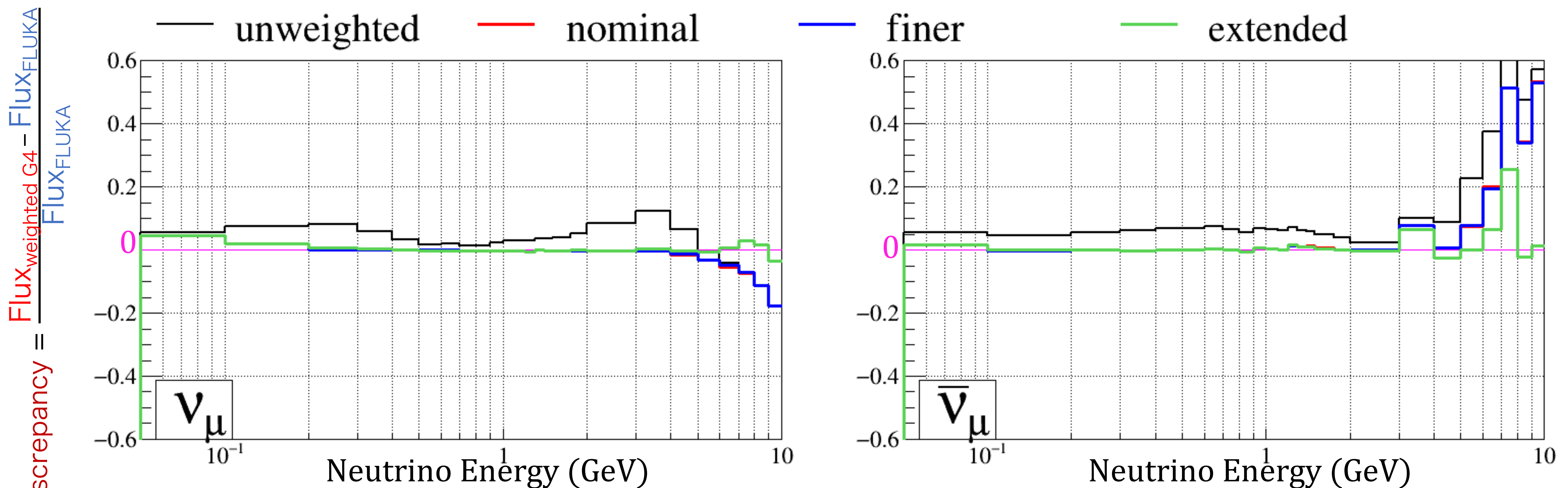
$$\text{Discrepancy} = \frac{Flux_{\text{weighted G4}} - Flux_{\text{FLUKA}}}{Flux_{\text{FLUKA}}} \quad \left( Flux_{\text{weighted G4}} = \text{Geant4 Flux} \times W \right)$$

を計算する

binningを変えることで補正の精度も変化

→ **Discrepancy** が最も 0 に近づく最適な binning を探した

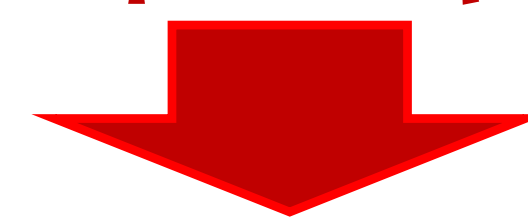
# 結果



Energy < 3 GeV : binningによる違いは見られない

Energy  $\geq$  3 GeV : **extend binning**での補正結果が最もdiscrepancyが小さい

→高運動量 K粒子の測定により高エネルギー領域でフラックス予測改善の見込み



検出器の精度を上げて細かい領域で解析するよりも高運動量の測定を可能にするセットアップをした方がいい

- 必要な測定期間の見積もり : 30日程度の測定が必要 → **現実的な期間**
- 高運動量K粒子測定のための実験セットアップの見積もり : 最大の磁場で**測定可能**

NA61 / SHINE collaboration meetingで本研究結果を発表、ビームタイムを要求

→合計で**5週間の測定期間が承認**されたため、詳細な測定プランを検討中

# まとめ

## T2K実験

- ニュートリノ振動を観測→CP対称性の破れの実証を目指す
- 現状、CP対称性の破れの傾向あり  
→更なる統計+不定性削減で「CP対称性の破れ」の実証へ

## NA61/SHINE

- フラックス予測の為にハドロン生成測定が行われた
- 現状のフラックス予測の不定性は10%程度、更なる改善が必要

## 本研究

- NA61/SHINEで追加測定を行いたい  
Q. 効果的にフラックス予測を改善するにはどの様な測定が必要か？  
A. 高運動量K粒子の測定が必要
  - 必要な測定期間の見積もり  
→ 30日程度必要 → 現実的な測定期間
  - 高運動量K粒子測定が実際に可能かの見積もり  
→ 最大強度の磁場で測定可能
- NA61/SHINE collaboration meetingで発表、5週間の測定が承認された  
→ 高エネルギー領域でフラックス予測改善に期待



# backup

---