

大気ニュートリノフラックス不定性削減 に向けたNA61 / SHINE実験における 液体窒素標的測定の実験報告

日本物理学会 第81回年次大会
東京大学 駒場キャンパス
9月14 – 17日 (2日目)

浅井彩那, 小汐由介, 永井義一^A, 坂下健^A, 中平武^A, Megan Friend^A
岡山大理, 高工研^A

講演番号: 15pG723-2



Motivation: 大気ニュートリノ

2

- ・ 一次宇宙線 ($p, \alpha, \dots$) が、大気中の原子核と衝突して生成されるハドロンの崩壊や、その後のミュオンの崩壊により生じる

- ・ ニュートリノ振動研究の重要な観測対象である一方、超新星背景ニュートリノ探索などでは主要な背景事象となる

- ・ 大気ニュートリノフラックスモデル

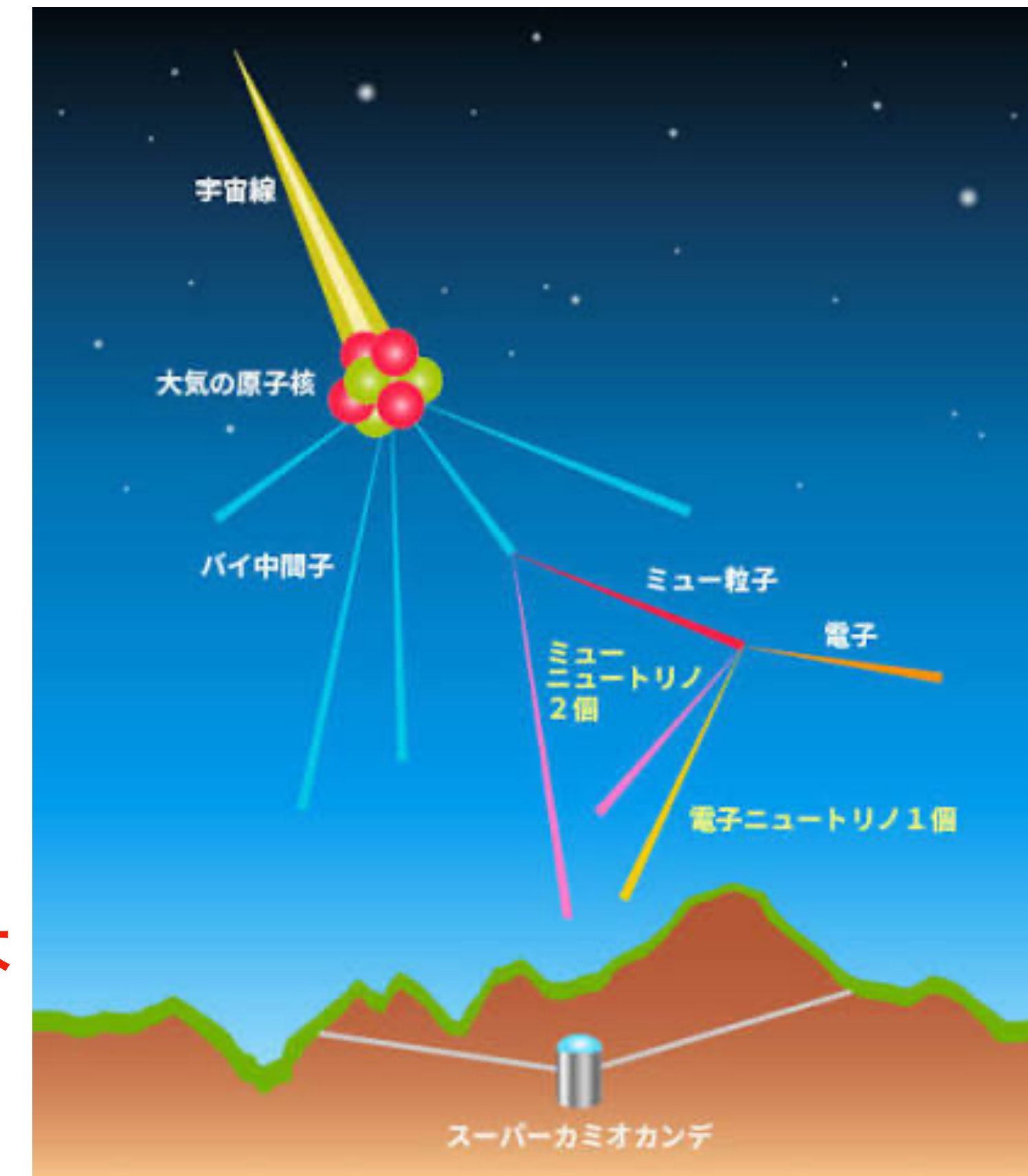
一次宇宙線フラックス + 地磁気の影響 + 空気シャワー

└ ハドロン相互作用 不定性大

大気密度分布

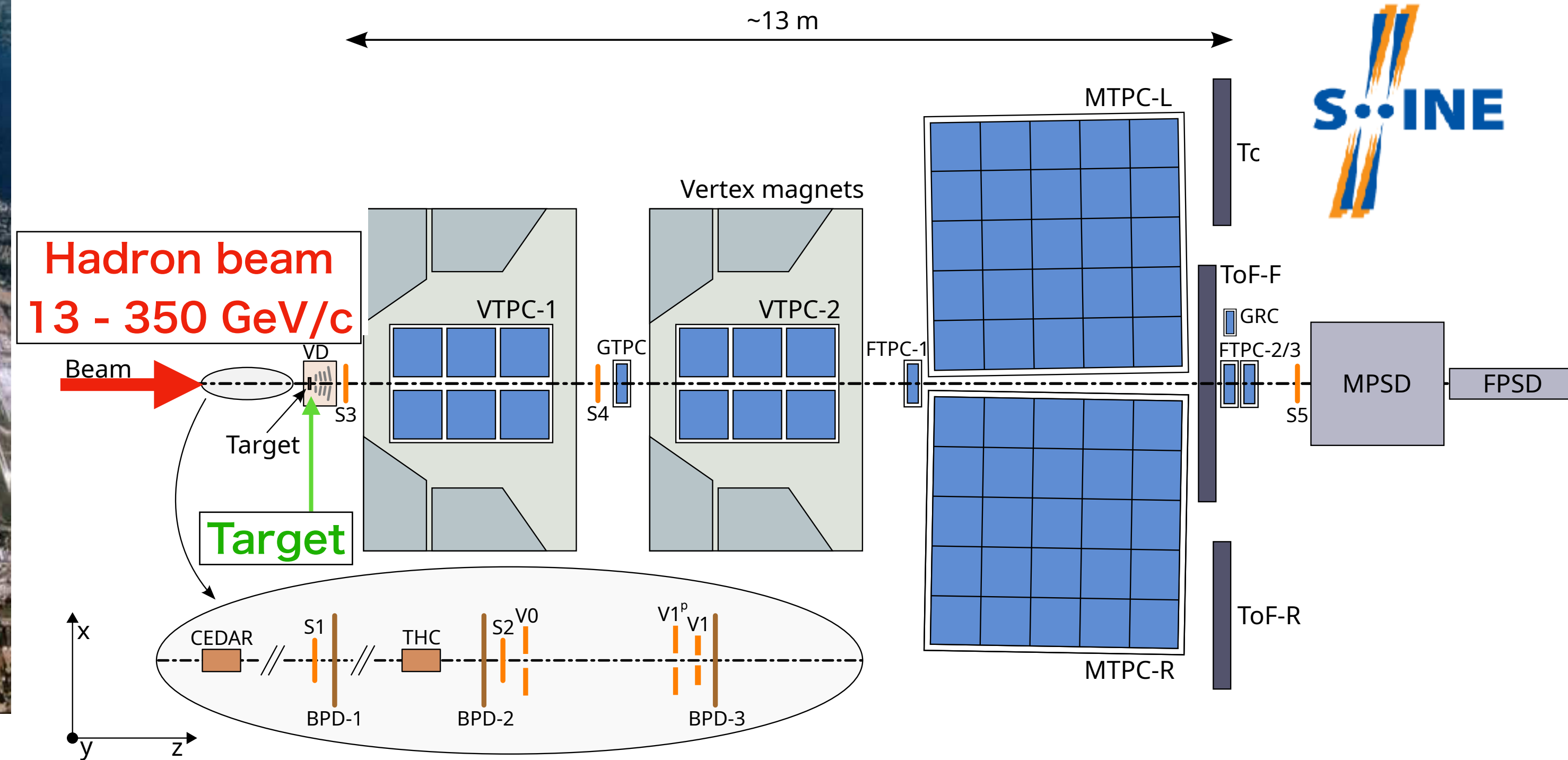
$\pi / K / \mu$ の弱崩壊

- ・ フラックスを高精度に予測するには、ハドロン生成を実測データによって制約することが重要
→ NA61/SHINEで、陽子-窒素標的によるハドロン生成を精密測定する！！





<http://www.lhc-closer.es/>より



- CERN SPSの取り出しビームをBe標的に当て、生成した二次ハドロンビームを用いた固定標的実験
- 複数の**TPC**により、標的で生成された粒子の飛跡を観測し、粒子識別，運動量測定が可能
- 2026年7月、液体**窒素**標的に15 GeV/c の**陽子ビーム**を照射してデータ取得を行なった

This Work and Future

4

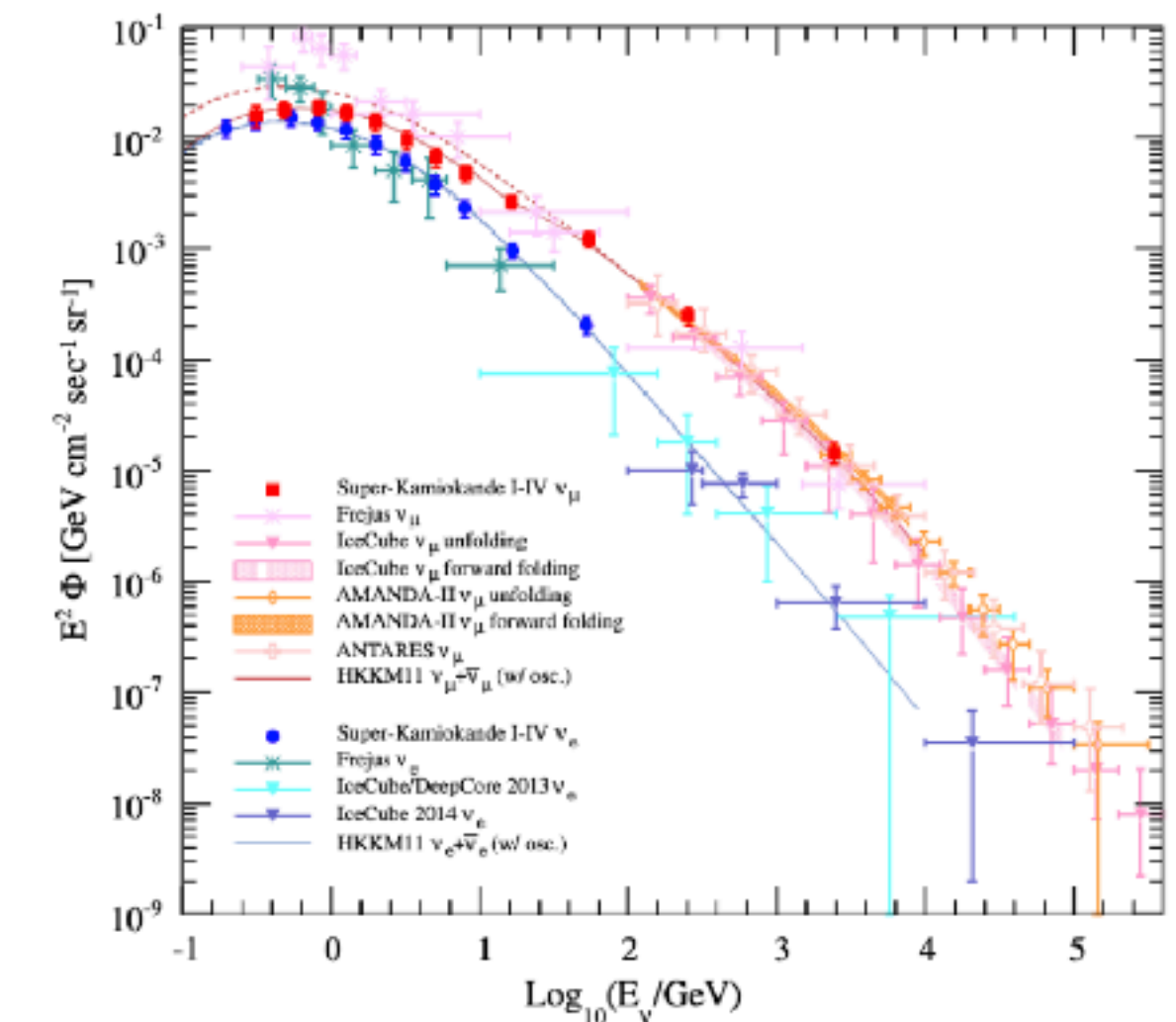
- ・ 今回: w/ 15 GeV/c 陽子ビーム (現在利用可能な最低領域)
- ・ 将来: w/ **3-20 GeV/c** 陽子ビームによる網羅的な測定 (計画中)

- ・ NA61/SHINEで**低運動量ハドロンビームライン**を新たに建設計画中
-> O(0.1-1)GeV領域の大気ニュートリノフラックス不定性の
大幅な改善が期待されている

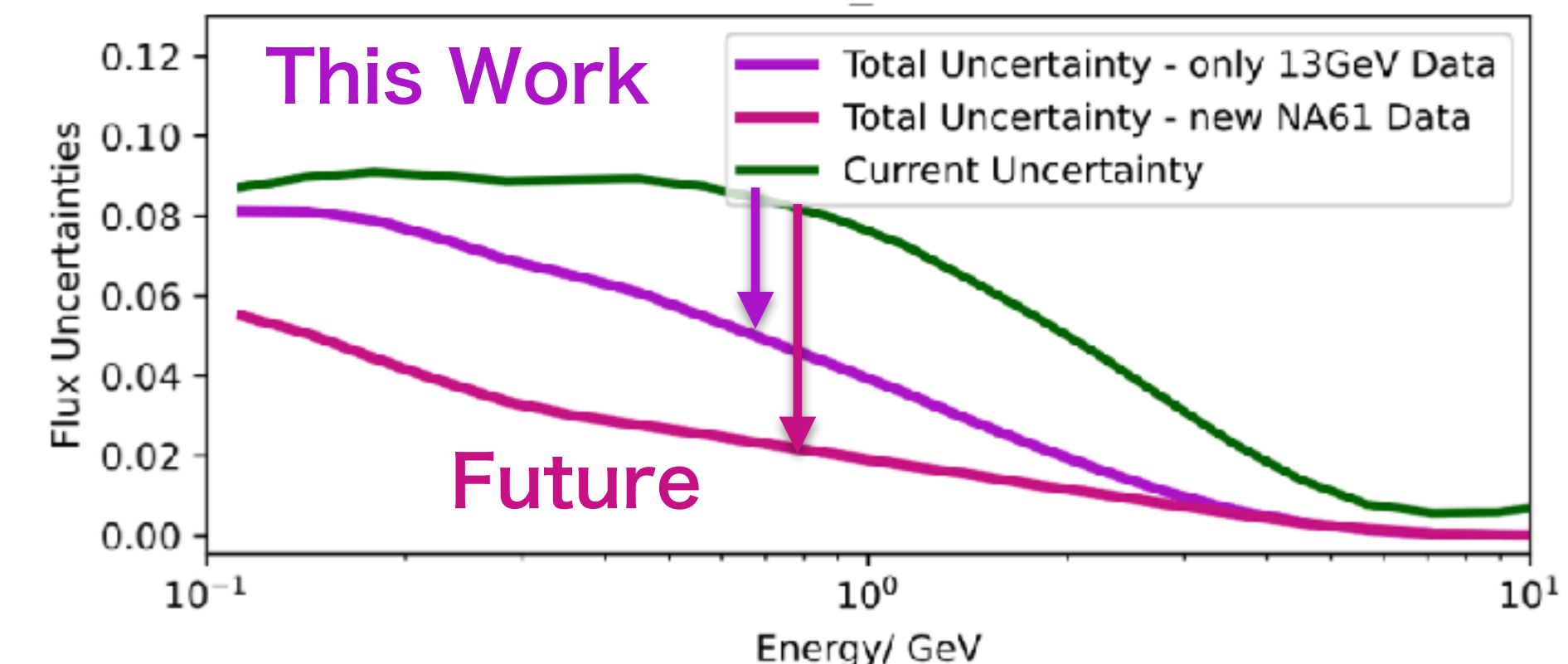
本測定の位置付け

- ・ フラックス不定性を目標領域で ~5%程度まで削減
- ・ 将来計画に向けたフィードバック

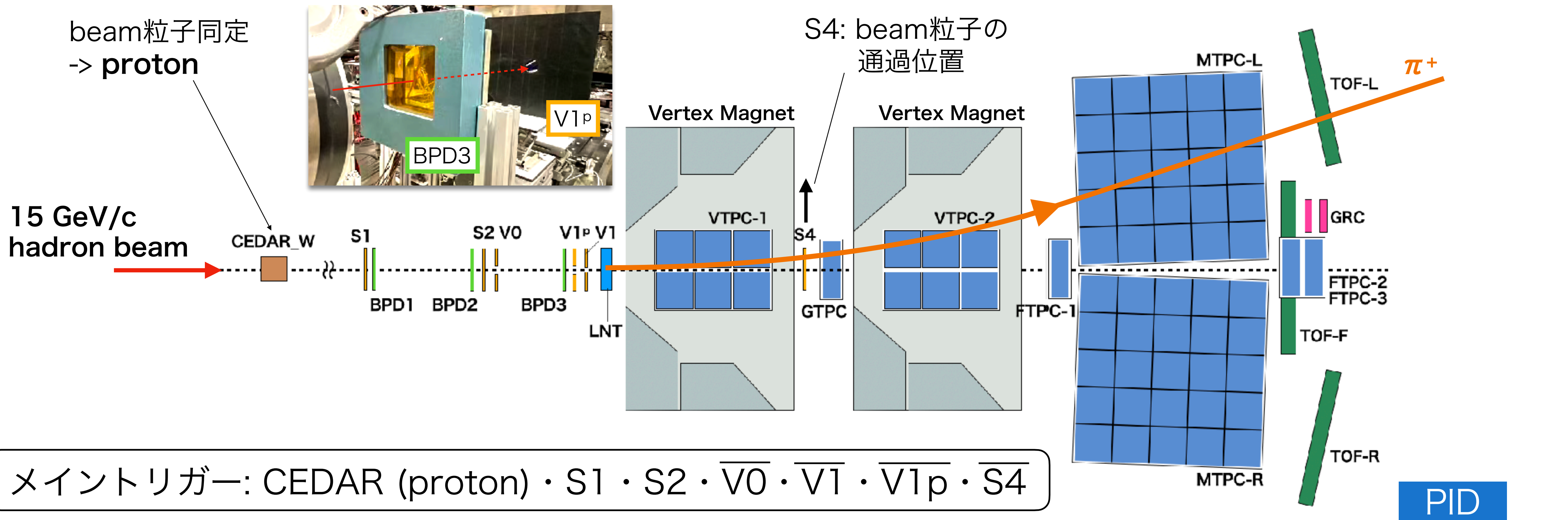
スーパーカミオカンデにおける 大気 ν スペクトル



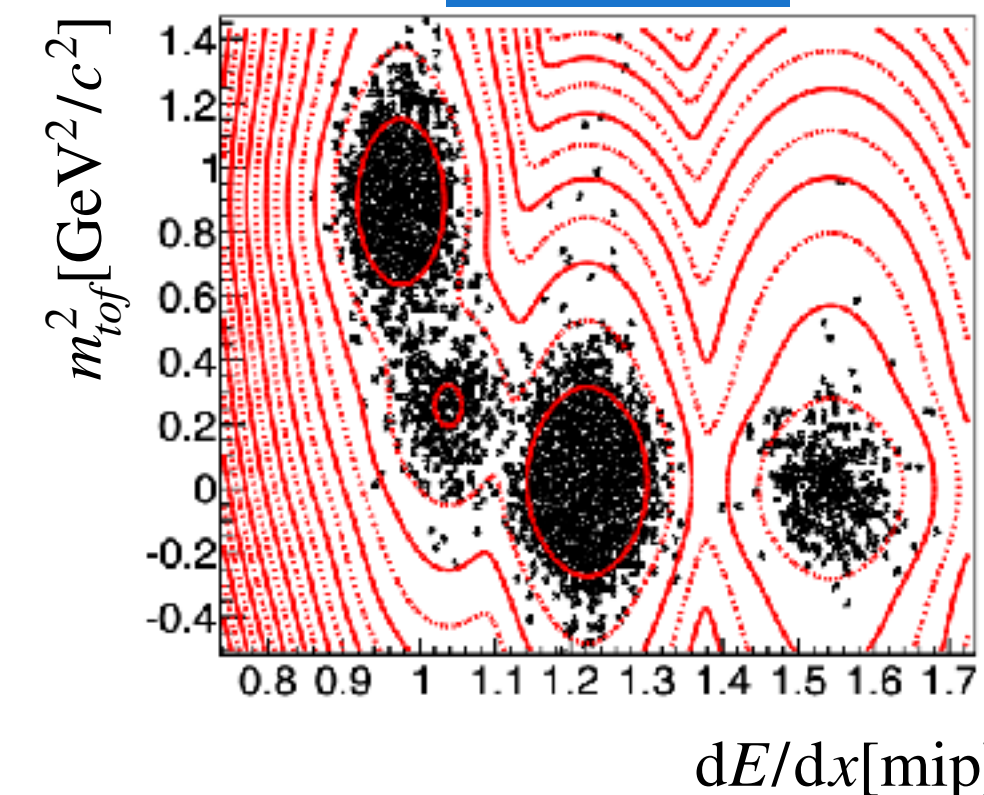
大気 ν_μ のフラックス不定性



実験セットアップ

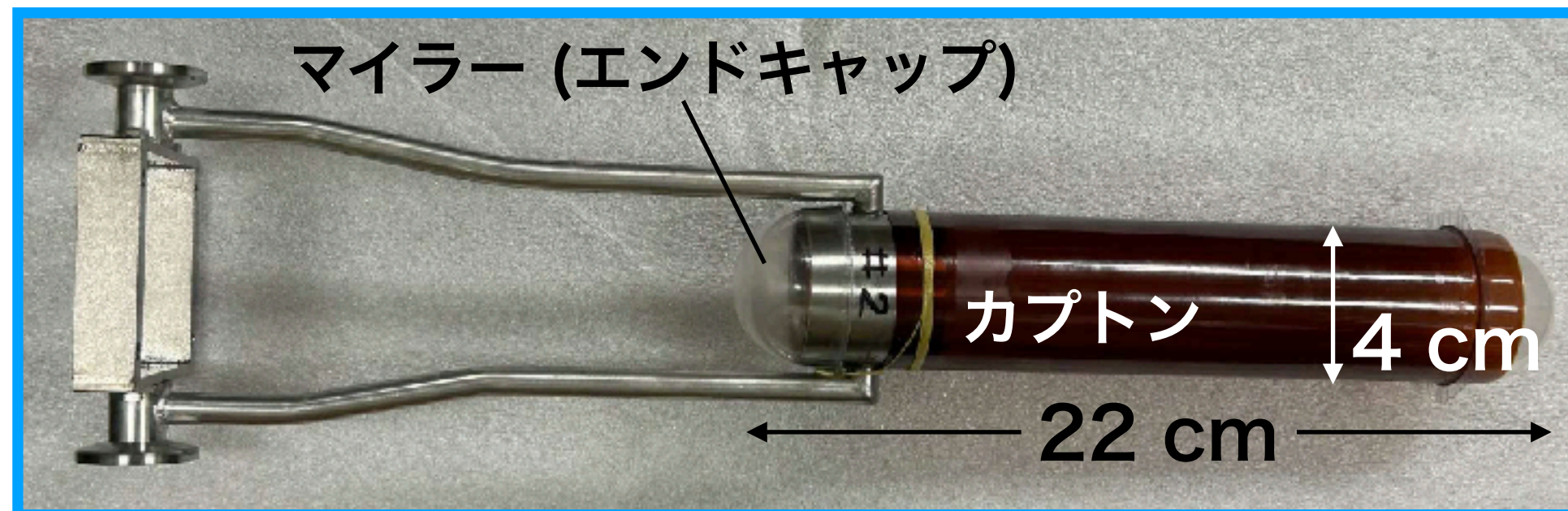


- 15 GeV/c の陽子 p を 液体窒素標的 LNT に照射するハドロン生成測定実験
- TPCでのエネルギー損失 dE/dx と下流のTOF検出器により、粒子を2次元的に**識別**
- 磁場で曲げられた荷電粒子の飛跡を再構成し、**運動量と生成角度**を測定

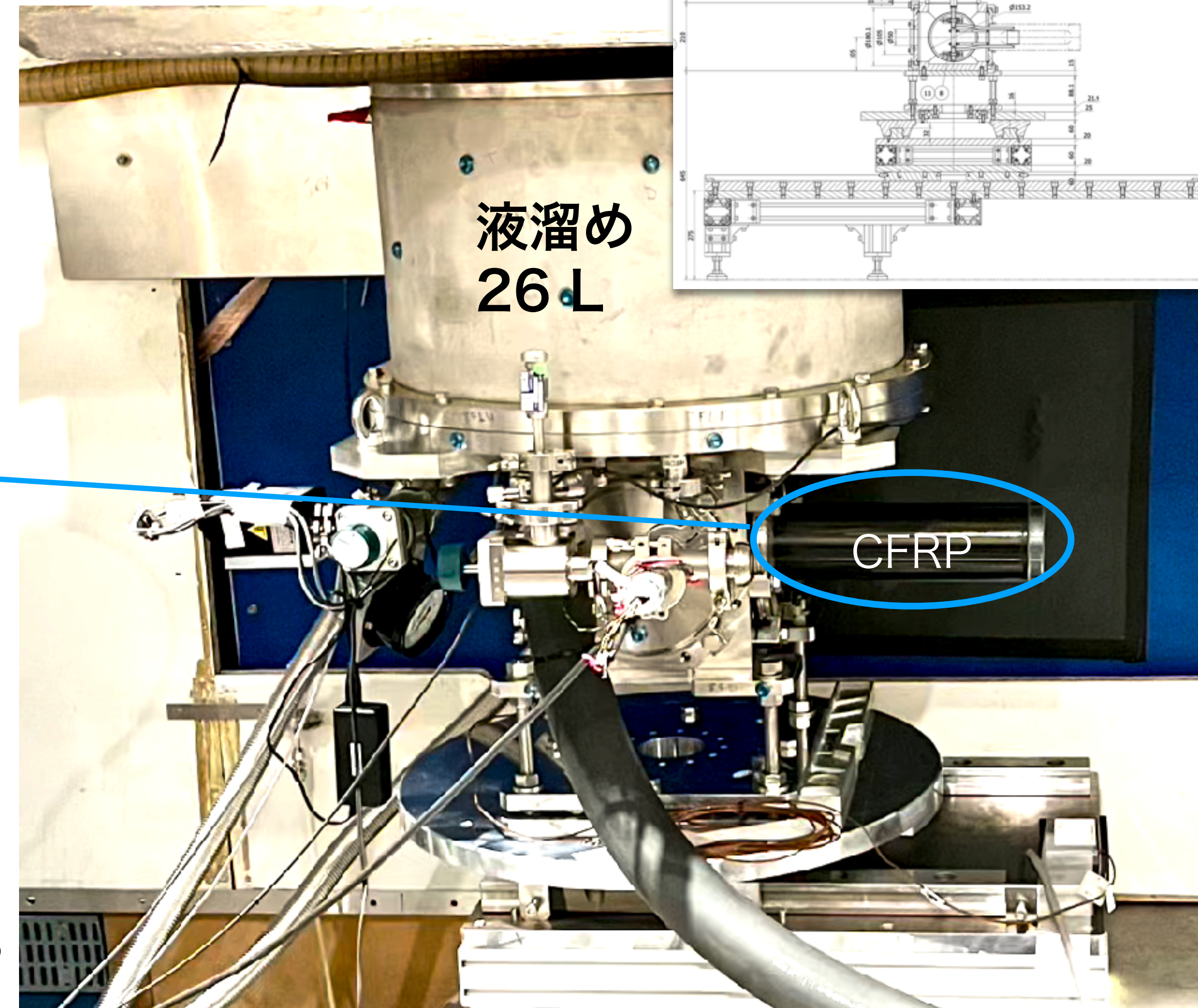


液体窒素標的

- KEKの石元 茂先生らと共同で開発
- 標的セル: 両端が半球状の円柱
-> $L = 22.0 \text{ cm}$, $\phi \sim 4.0 \text{ cm}$ ($V \sim 0.266 \text{ L}$)



- システム全体を移動・回転することにより、
"Thin" (4 cm) <-> "Long" (22 cm) の標的へ切り替え
- 冷却装置等はなく、蒸発により2.5日程度で空になる
-> その都度、外から液体窒素を供給
- 各点に取り付けられた温度計（液面計）で、液面の位置をモニター



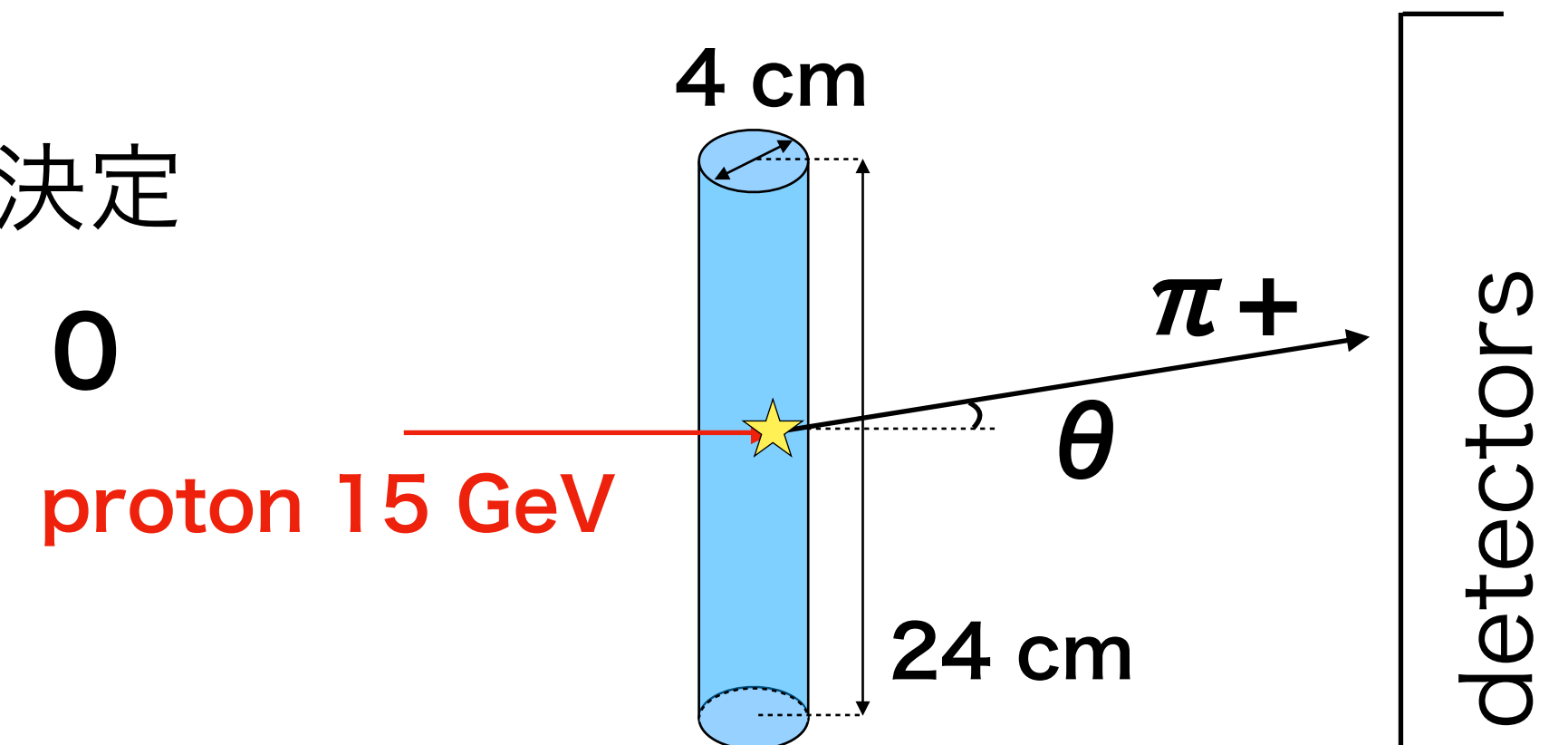
磁場の設定値

7

- 超伝導磁石の Magnetic Field (MF) 値 をシミュレーションから決定

scale: Full (9 Tm) , 1/2, 1/4, 1/8, 1/12, 0

- 磁場で曲がりすぎると、検出器アクセプタンスから外れる
磁場が弱いと、運動量の再構成分解能が悪くなる



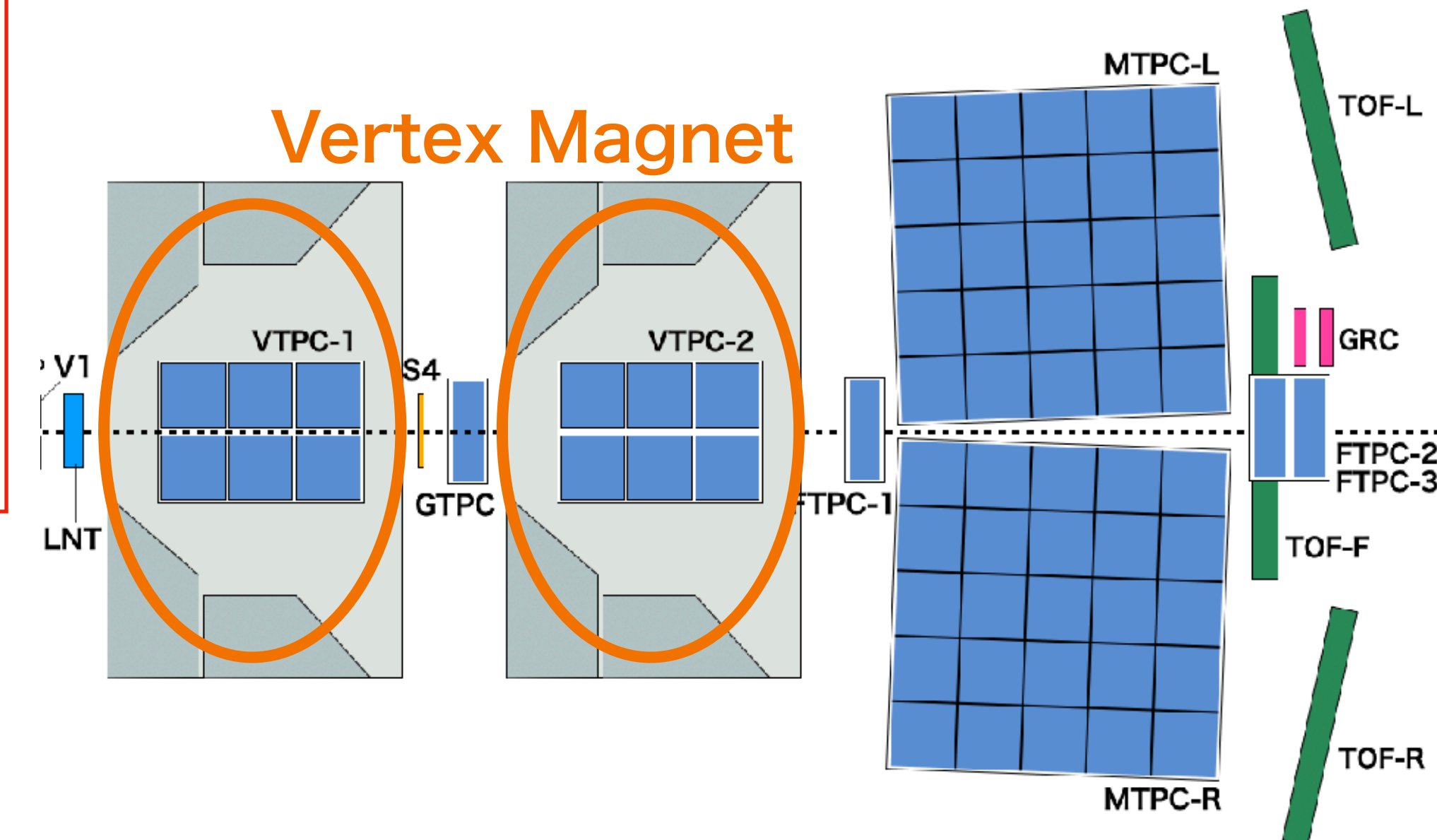
All: 標的で生成された全ての p , $\pi^\pm$, $K^\pm$

TPC cut: - N_{hit} (= Hits w/o FTPCs) > 30

-> 十分なエネルギー再構成の分解能のため

- N_{field} (= Hits in VTPC1 + VTPC2 + GTPC) > 12

-> 十分な運動量再構成の分解能のため



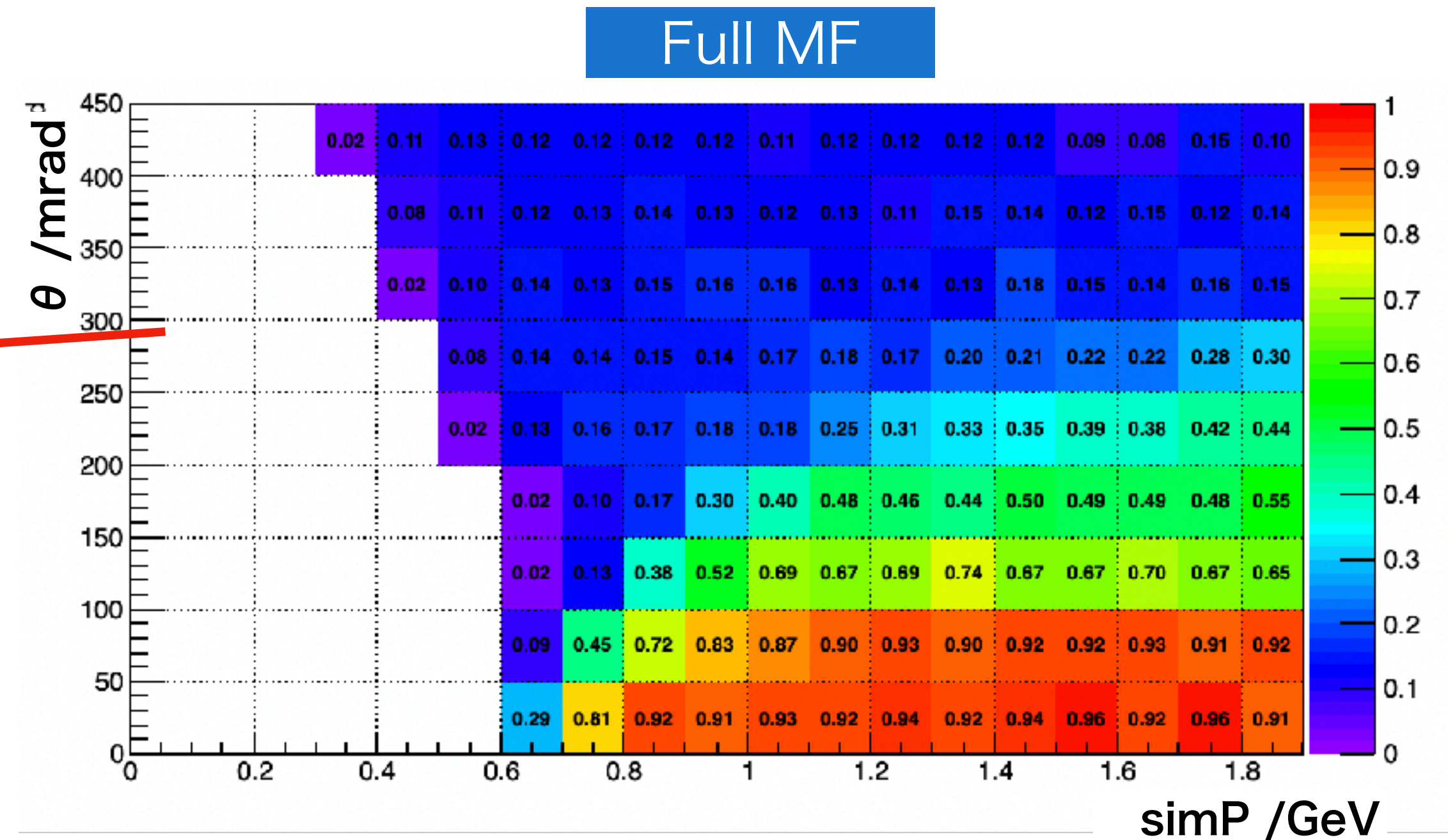
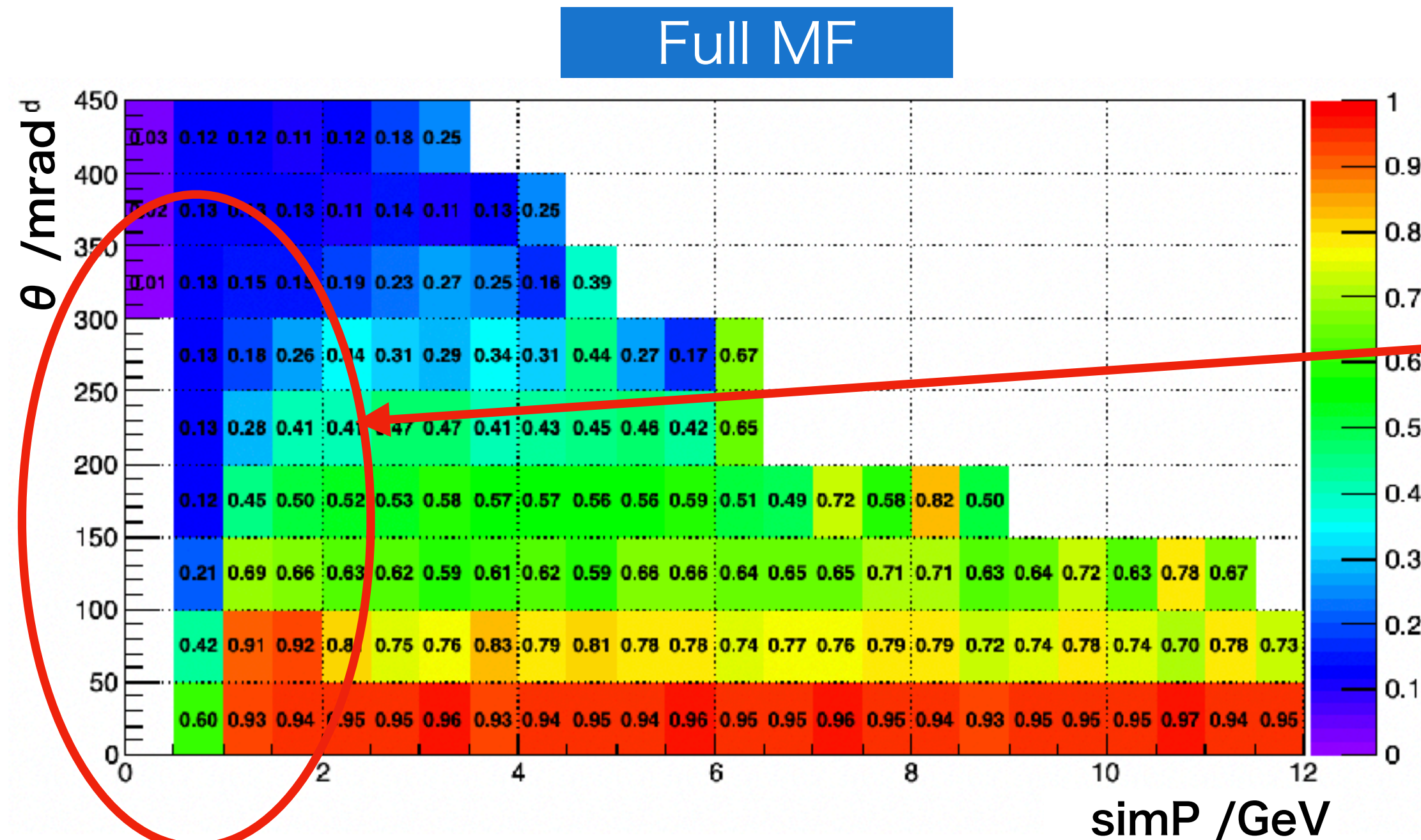
-> TPC cut/All ratio を確認

MF Comparison

8

- ・ シミュレーションにより、TPCに十分 hit を作る生成荷電粒子の数を見積もり
 - ・ **最大磁場** (Full Magnetic Field) の場合を確認
- > 低運動量粒子は磁場で強く曲げられ、検出器のアクセプタンスを外れる

All: 標的で生成された全ての p , $\pi^\pm$, $K^\pm$
TPC cut: - N_{hit} (= Hits w/o FTPCs) > 30
-> 十分なエネルギー再構成の分解能のため
- N_{field} (= Hits in VTPC1 + VTPC2 + GTPC) > 12
-> 十分な運動量再構成の分解能のため

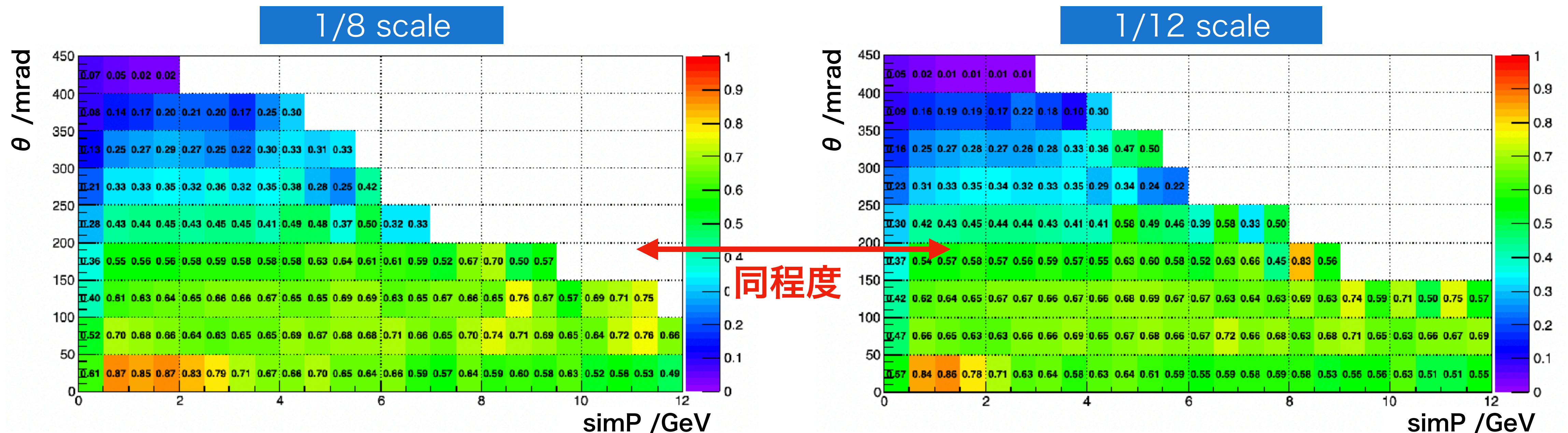


MF Comparison

9

- ・ シミュレーションにより、TPCに十分 hit を作る生成荷電粒子の数を見積もり
 - ・ 磁場の強さ **1/8 scale** と **1/12 scale** の時の検出器アクセプタンスを比較
- > 磁場が強い方が運動量再構成の分解能がよいので、
1/8 scale を採用

All: 標的で生成された全ての p , $\pi^\pm$, $K^\pm$
TPC cut: - N_{hit} (= Hits w/o FTPCs) > 30
-> 十分なエネルギー再構成の分解能のため
- N_{field} (= Hits in VTPC1 + VTPC2 + GTPC) > 12
-> 十分な運動量再構成の分解能のため

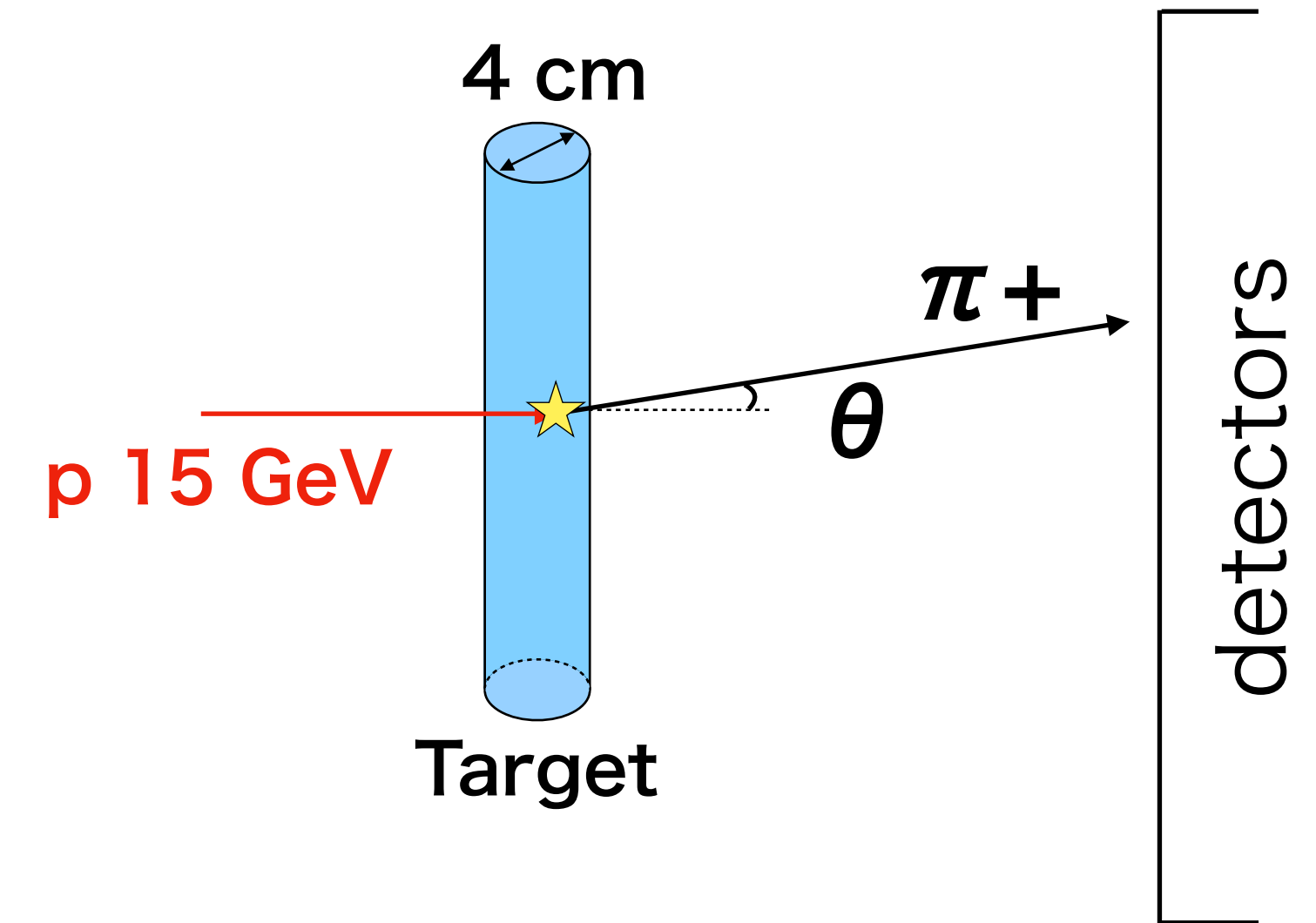


ThinとLong測定

10

- Thin-target測定

- 生成粒子の再構成した運動量 p , 生成角度 θ に対する生成ハドロンごとの二重微分生成数 $d^2n/dpd\theta$ を測定



- Long-target測定

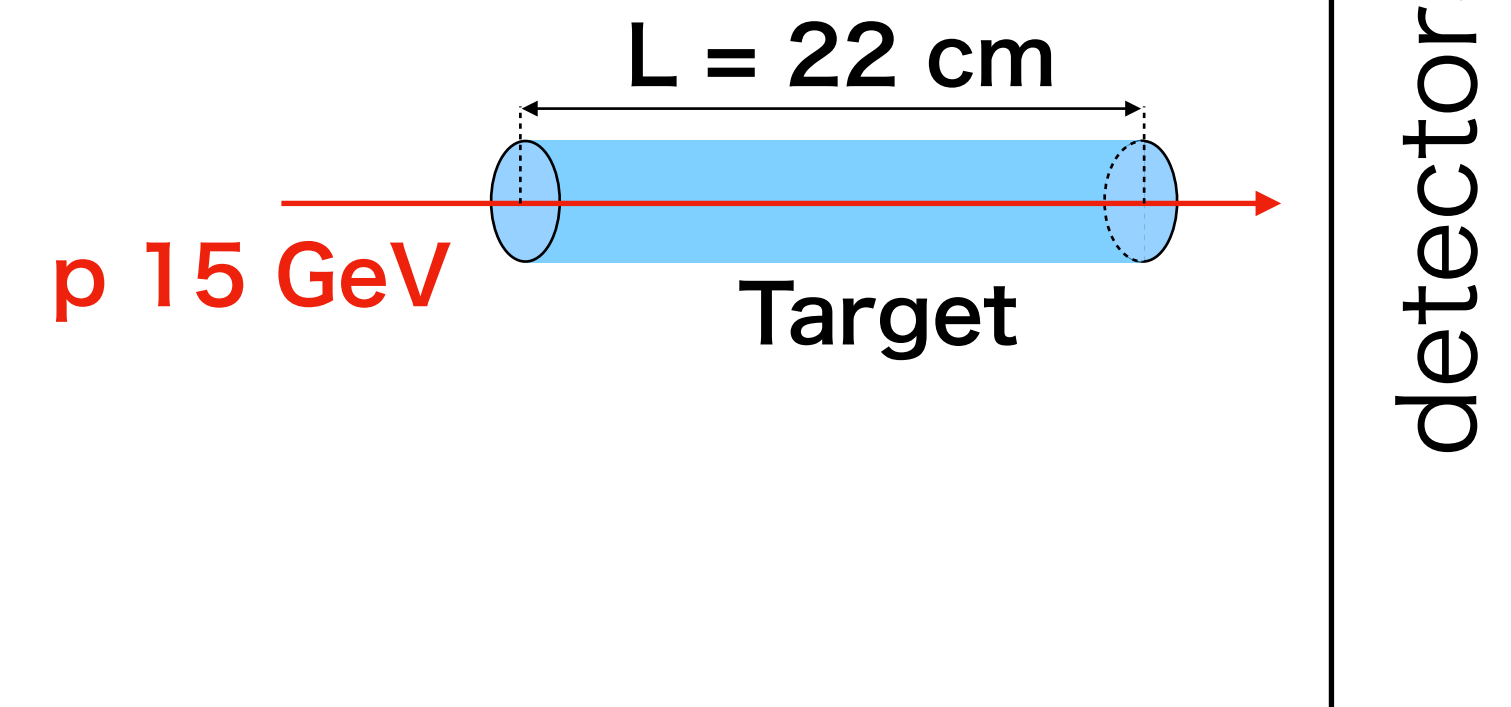
- ビーム減衰から、全生成断面積 σ_{prod} を直接測定

$$dN = -N(x) \cdot n \cdot \sigma_{\text{prod}} \cdot dx \quad N: \text{beam粒子数}, n: \text{標的原子核密度}$$

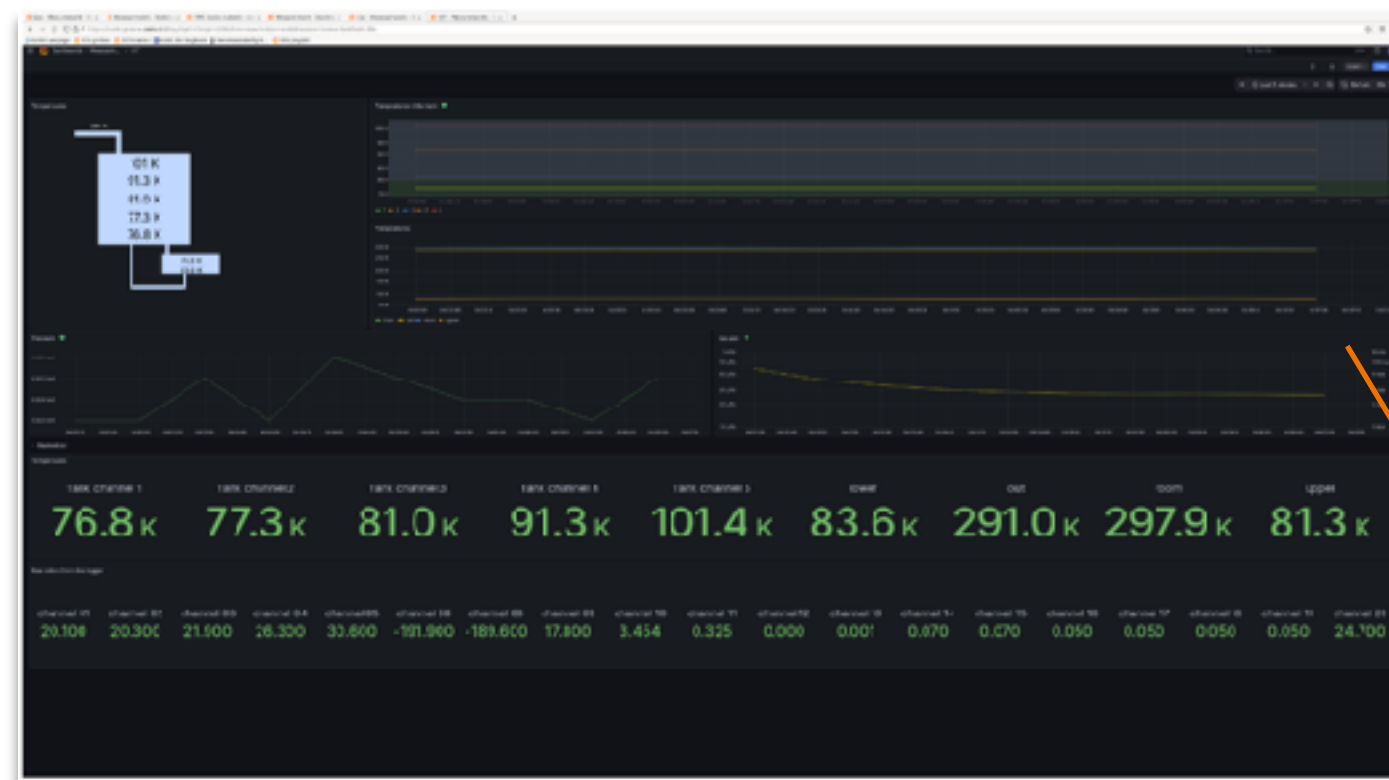
$$P_{\text{surv}} := \frac{\text{num. of selected tracks}}{\text{num. of beam particles}} = e^{-L \cdot n \cdot \sigma_{\text{prod}}}$$

-> これらの測定により、荷電 π 中間子の二重微分生成断面積を測定

$$\frac{d^2n}{dpd\theta} = \frac{1}{\sigma_{\text{prod}}} \frac{d^2\sigma}{dpd\theta}$$



DCS + grafana



Beam 状況



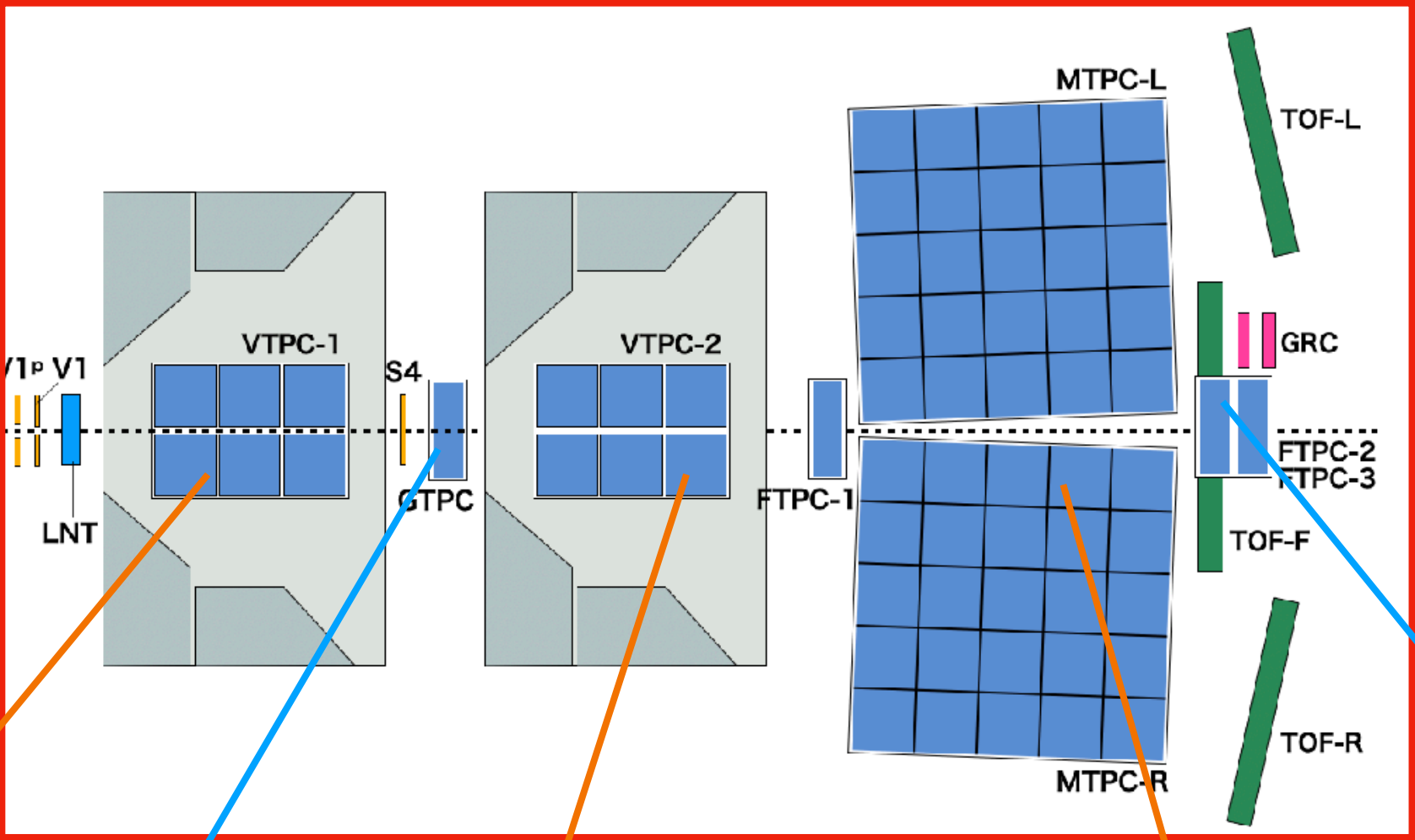
Event Browser

実験の様子: con

DCS
検出器



Run 48561 Event 48940 2026-07-17T16:3



), Unix:1784306165s,1.37971e+07ns

LN₂標的

VTPC-1

GTPC

VTPC-2

MTPC-L/R

FTPC-2/3

15 GeV/c
陽子ビーム

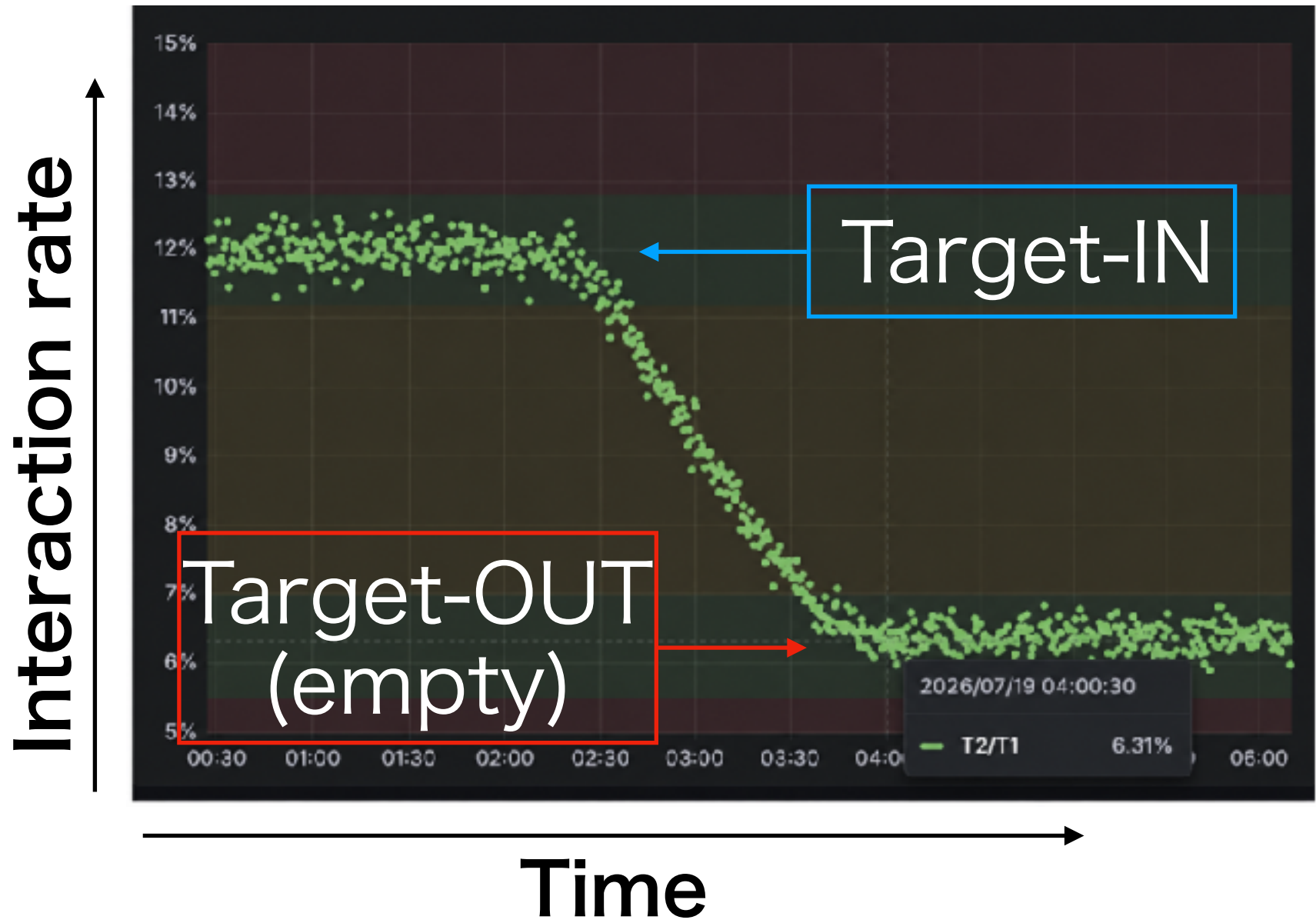
elog
実験口

run中のデータクオリティ評価

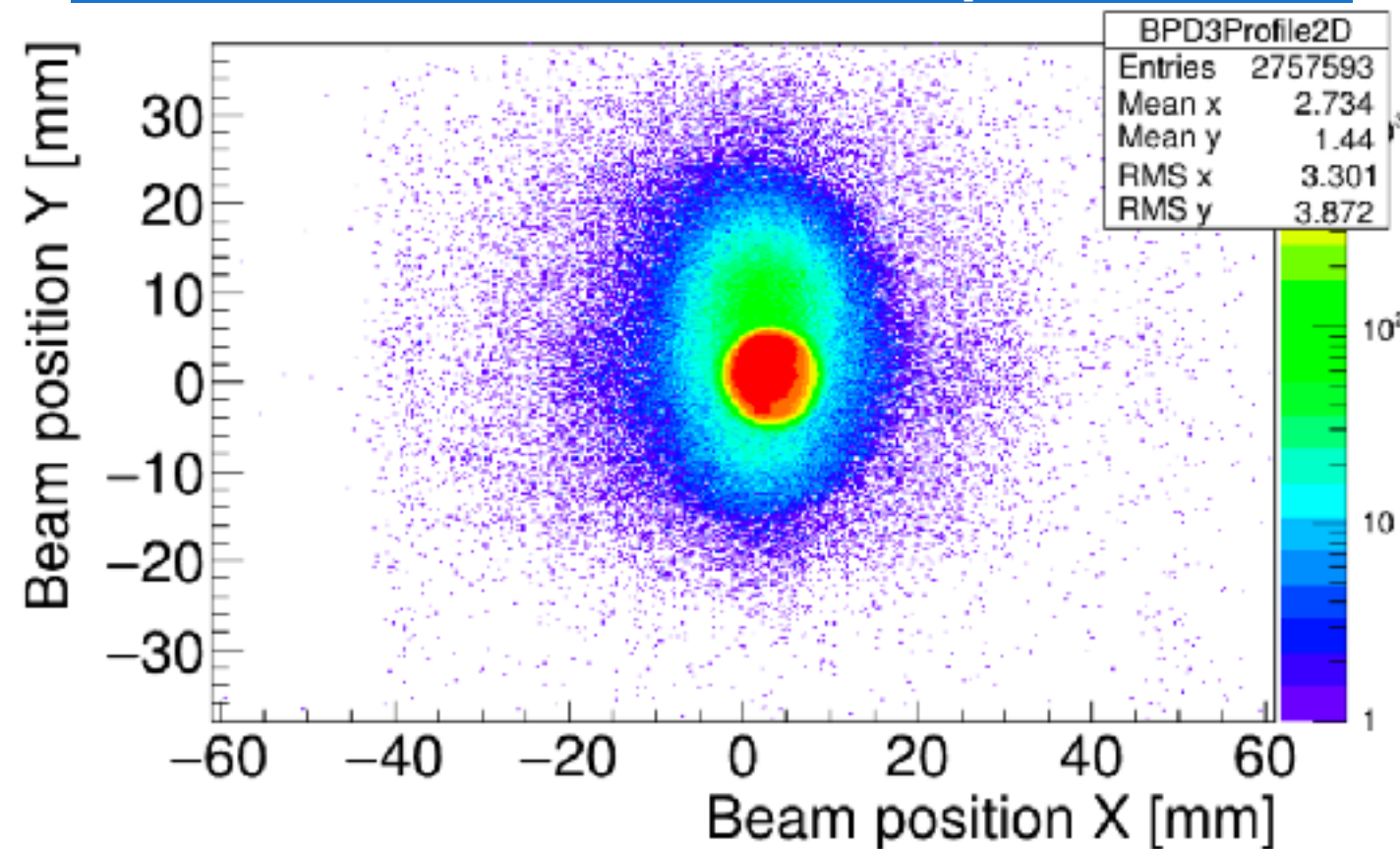
Target status	Statistics
(Thin) Target-IN	13M
(Thin) Target-OUT	2.8M
(Long) Target-IN	85.4M
(Long) Target-OUT	3.6M

Interaction rate (Thin)

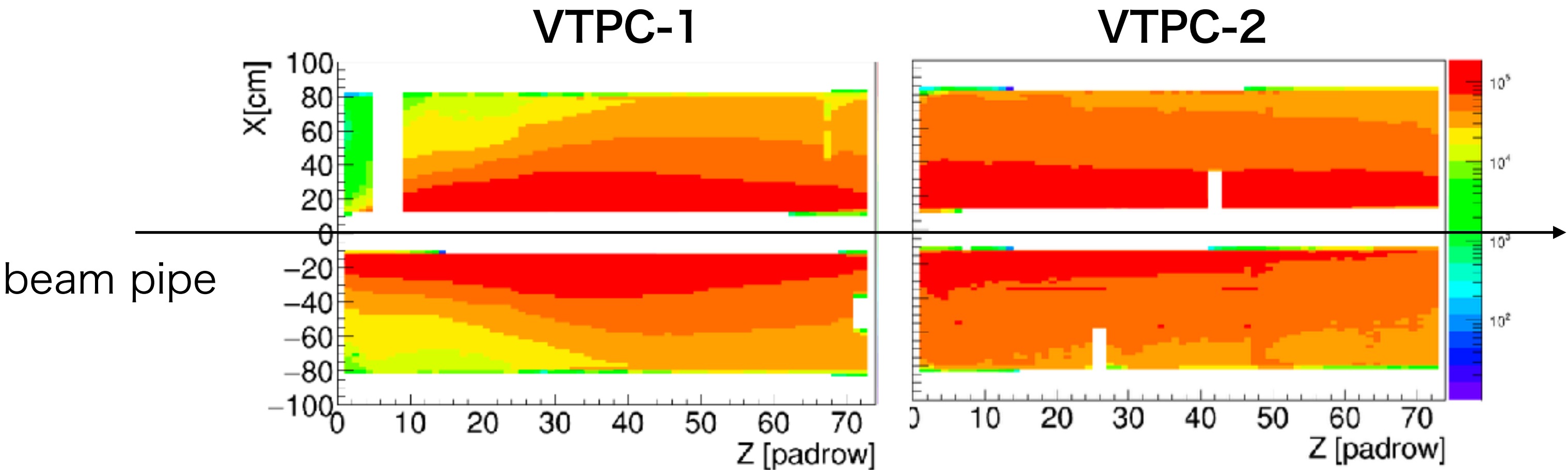
Target-IN: ~12%
Target-OUT: ~6%
-> (IN - OUT) = 6%
beamが標的に当たっている



標的直前の BPD profile



VTPCs hit profile



- ・ 大気ニュートリノフラックスの主要な系統誤差は、ハドロン生成に関する不定性に起因
- ・ 2026年7月、NA61/SHINE実験にて陽子ビーム（15 GeV/c） - 液体窒素標的のハドロン生成反応のデータを取得した
 - 標的厚さ ~4 cm の "Thin-Target" 測定 → 二重微分生成数の測定
 - 標的厚さ ~22 cm の "Long-Target" 測定 → 全生成断面積の測定

今後

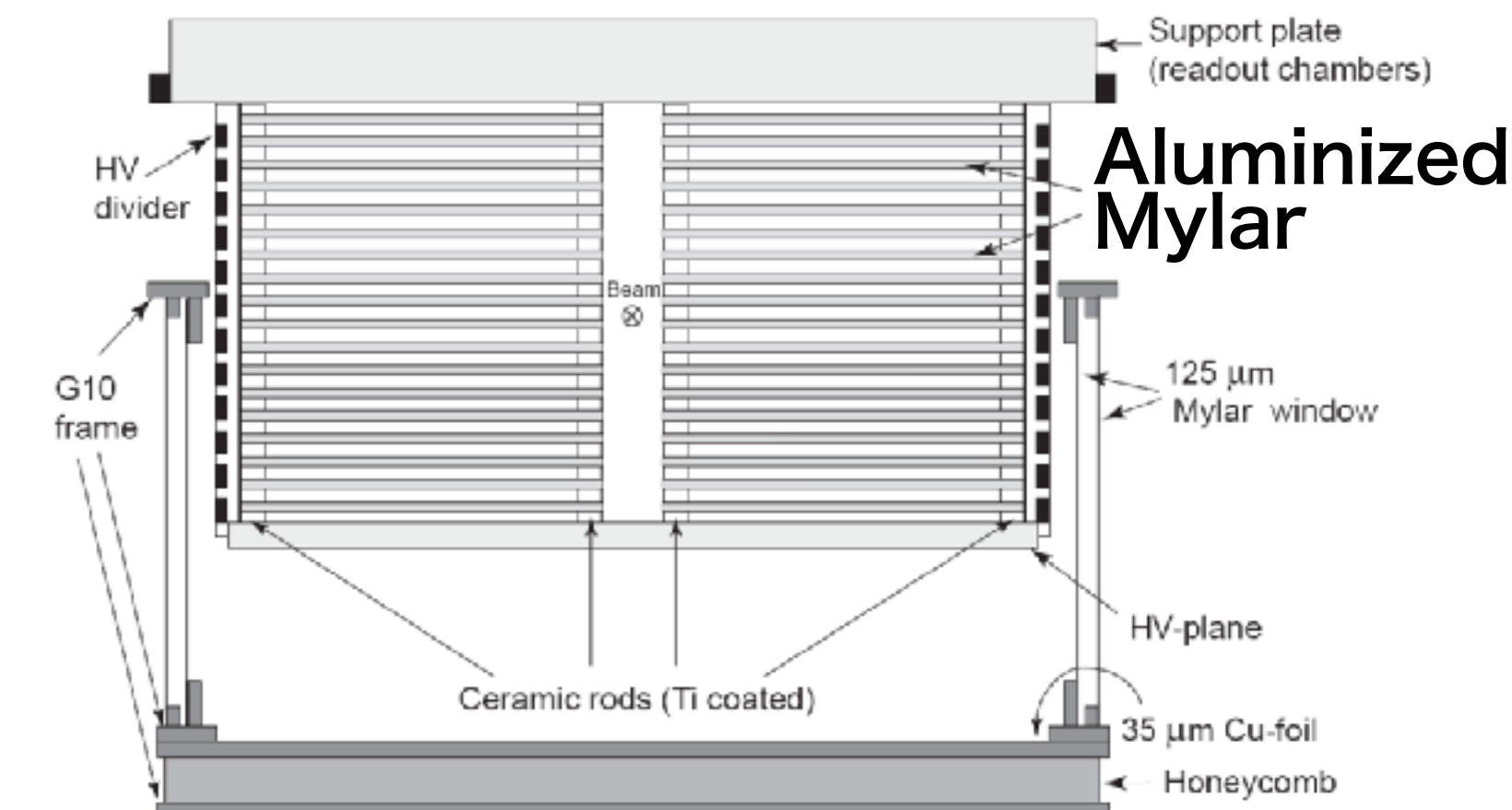
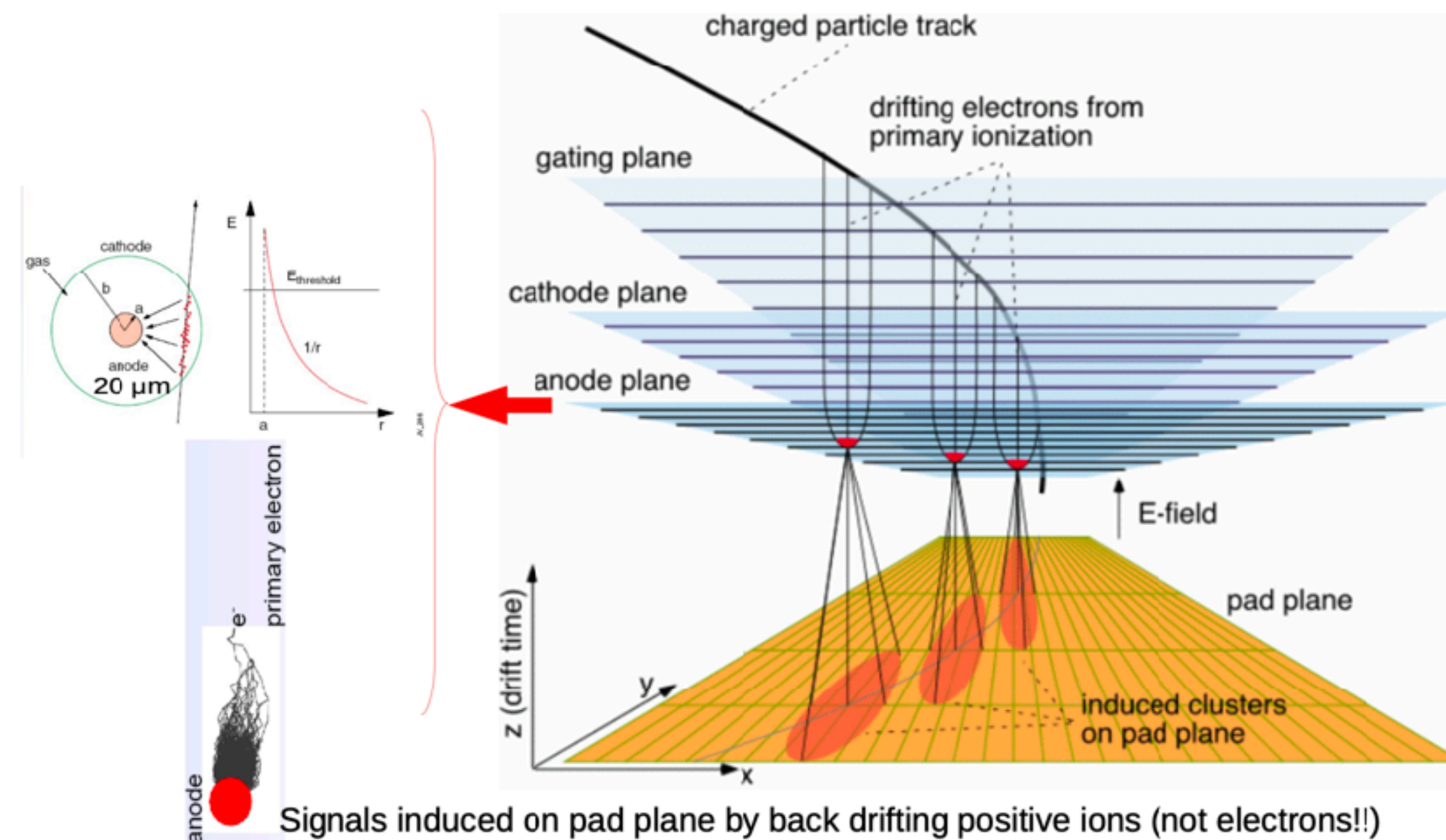
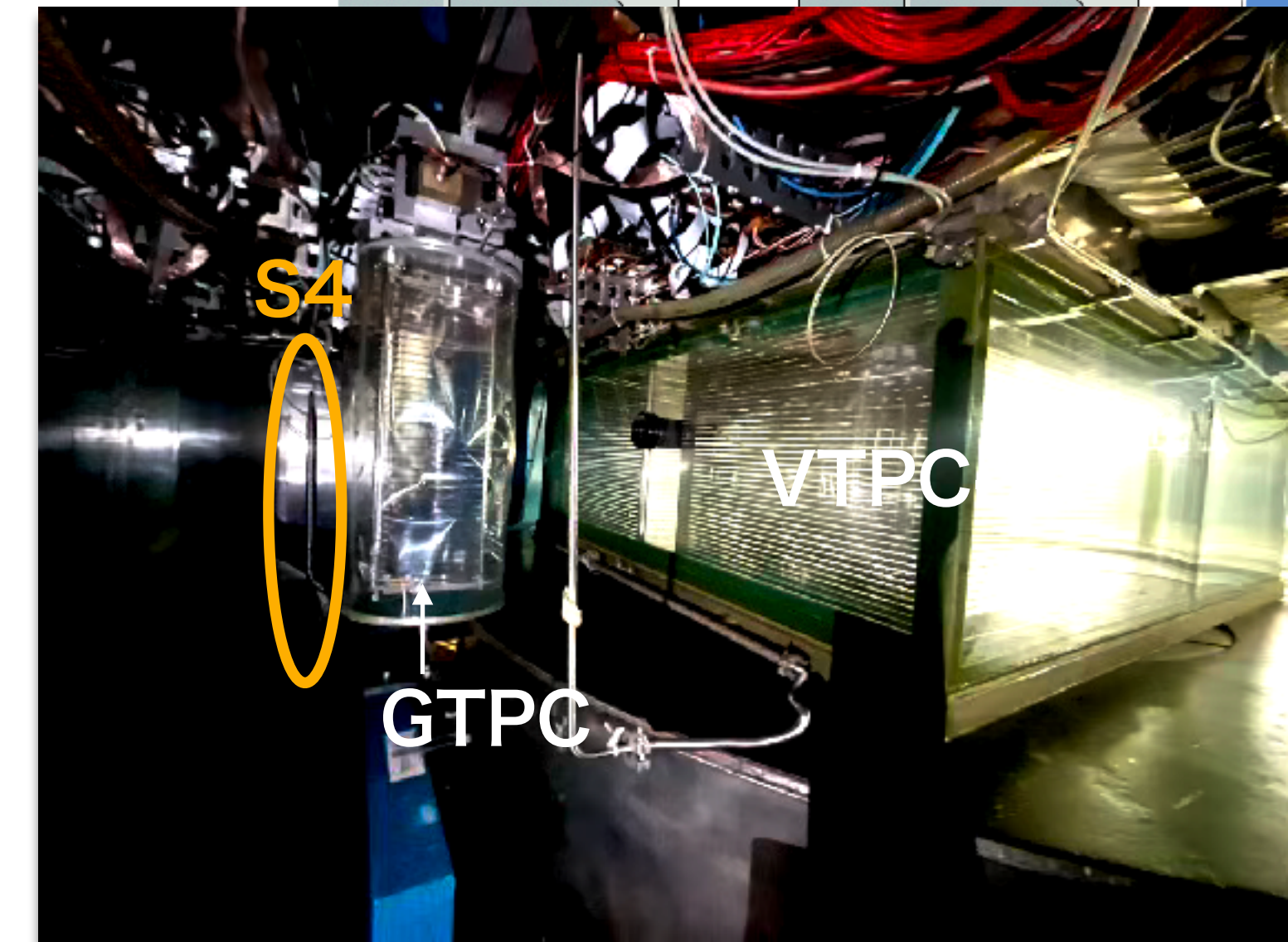
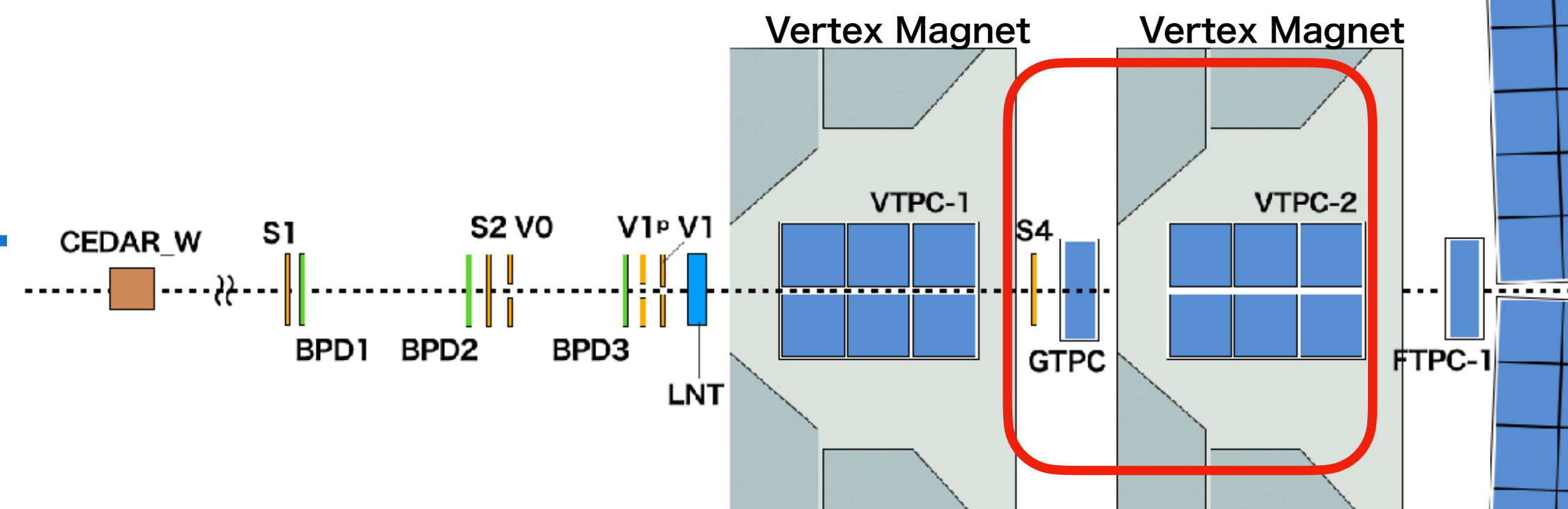
- ・ 主に荷電 π 中間子の運動量と生成角度に対する二重微分生成断面積 $\frac{d^2\sigma}{dpd\theta}$ を測定
- ・ 実測のデータをもとに、Data/MC に基づいてハドロン生成モデルを補正
- ・ 大気ニュートリノフラックス計算において、ハドロン生成反応に由来する系統誤差の低減を目指す

$O(0.1-1)$ GeVの大気ニュートリノフラックス予測精度向上へ

Backups

実験概要: TPC

- 典型的なガスTPC (Ar/CO₂ ~ 90/10)
- 読み出し部:
 - gating plane — trigger がかかると gate が開く
 - cathode plane — 高電圧により電子雪崩
 - anode plane — → 電子はすぐに anode が吸収
 - pad plane — 残った陽イオンに誘起されて電流が流れる



ThinとLong測定

17

生成ハドロン毎の二重微分生成数

$$\frac{d^2 n_i}{dp d\theta} = \frac{y_i}{N_{\text{prod}} \Delta p \Delta \theta}$$

y_i : Num. of observed particles @ ($p - \theta$ 分布の bin i)

N_{prod} : Num. of production interactions

-> 生成反応1回あたりの平均的な粒子の多重度

全生成断面積 σ_{prod}

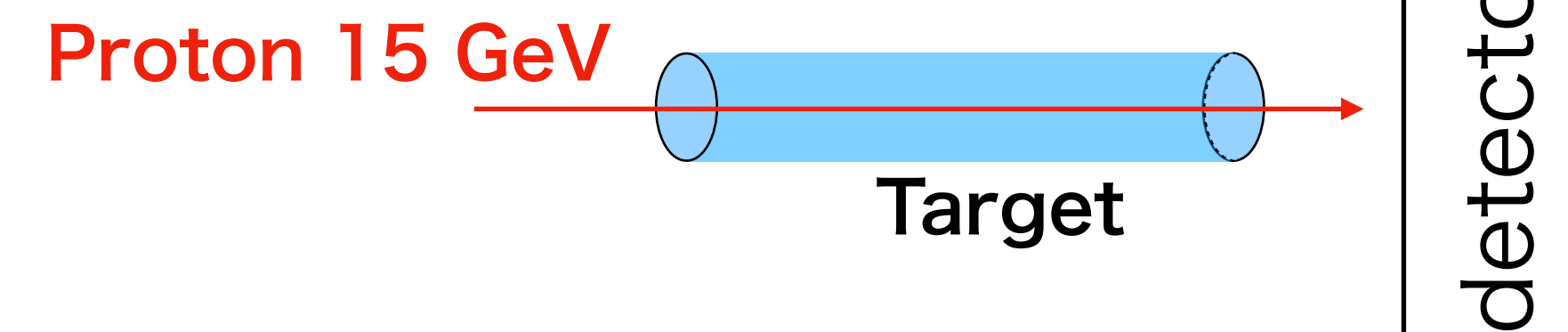
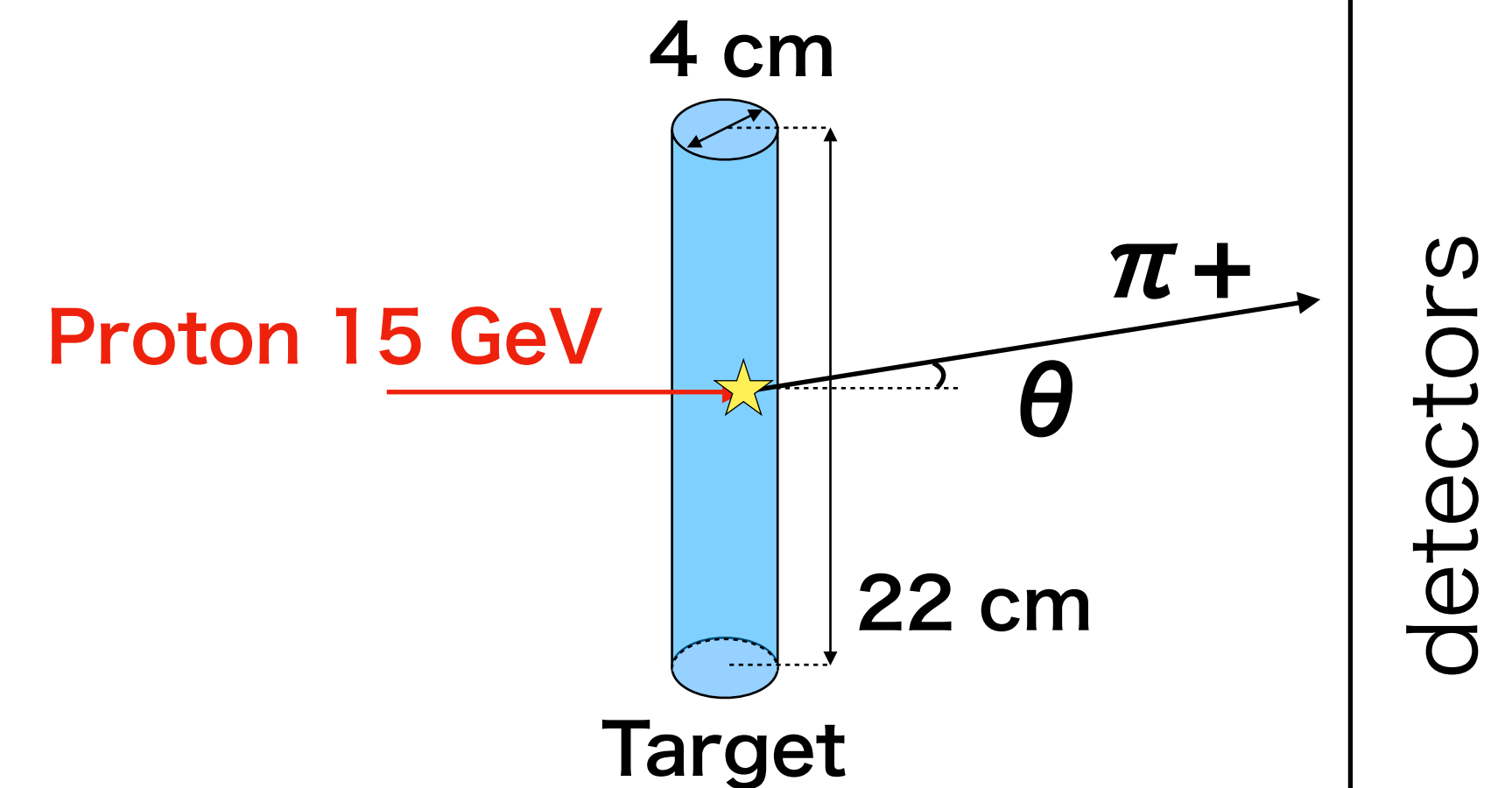
$$dN = -N(x) \cdot n \cdot \sigma_{\text{prod}} \cdot dx$$

N : beam粒子数, n : 標的原子核密度

$$P_{\text{surv}} := \frac{\text{num. of selected tracks}}{\text{num. of beam particles}} = e^{-L \cdot n \cdot \sigma_{\text{prod}}}$$

生成ハドロン毎の二重微分生成断面積

$$\frac{d^2 n}{dp d\theta} = \frac{1}{\sigma_{\text{prod}}} \frac{d^2 \sigma}{dp d\theta}$$



- ・ 前方生成された粒子が S4 を通る可能性がある
 - ・ 弾性/準弾性散乱された beam 粒子が **S4 を miss** する可能性がある
- Trigger を補正する

$$\sigma_{\text{prod}} = \frac{1}{f_{\text{prod}}} \left(\sigma_{\text{trig}} - \sigma_{\text{qe}} f_{\text{qe}} - \sigma_{\text{el}} f_{\text{el}} \right) \quad f: \text{fractions of events miss the S4}$$

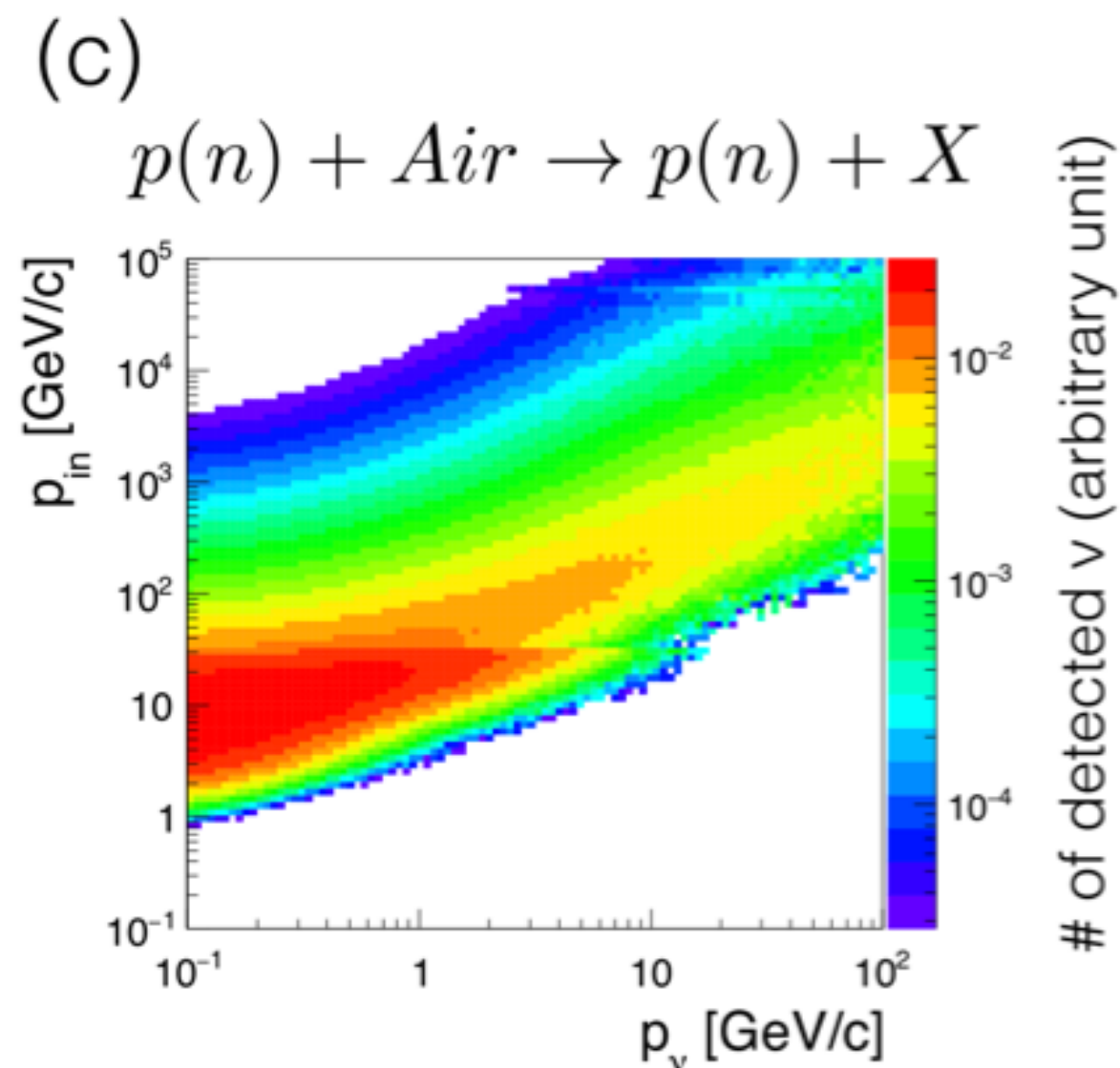
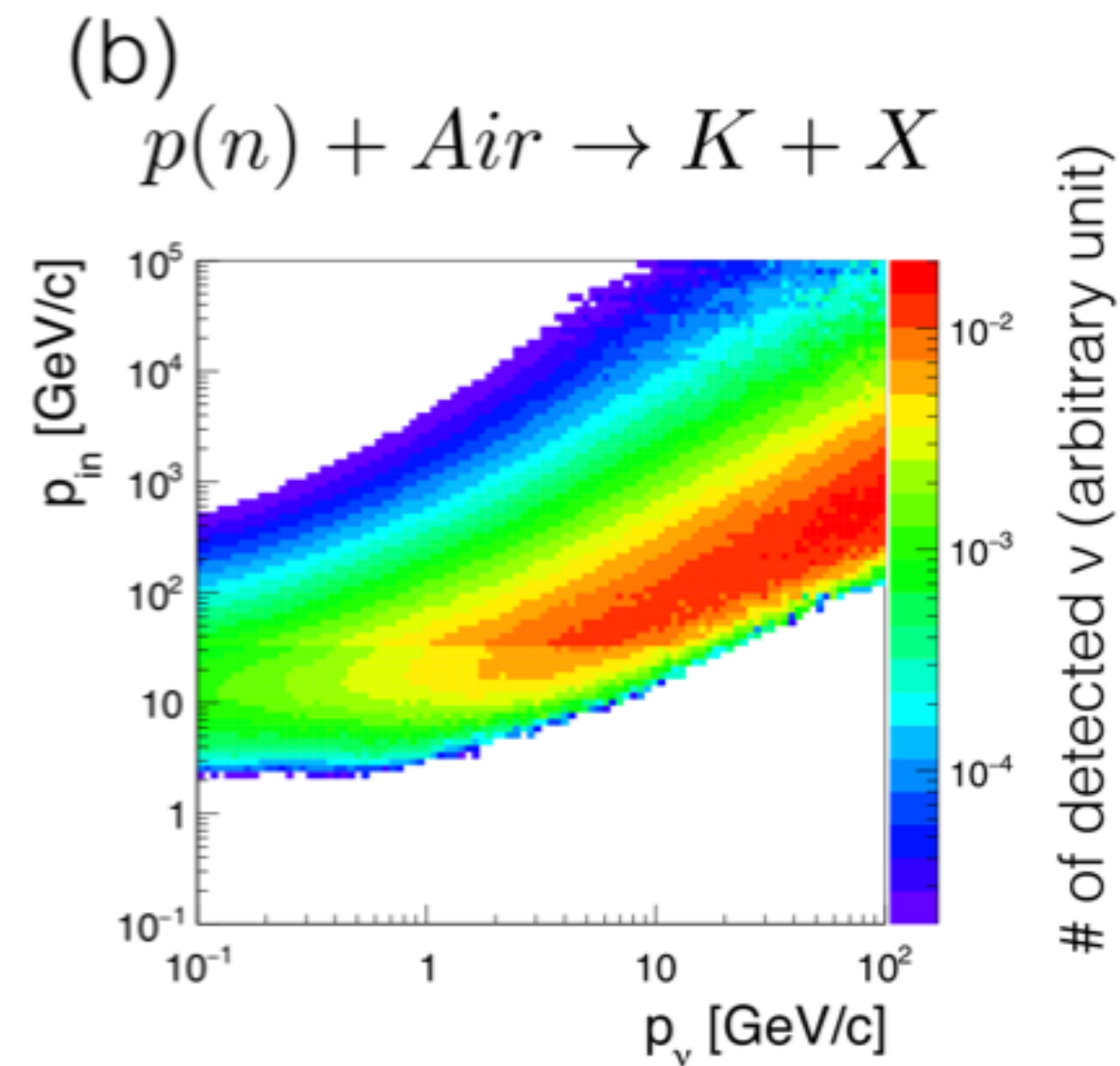
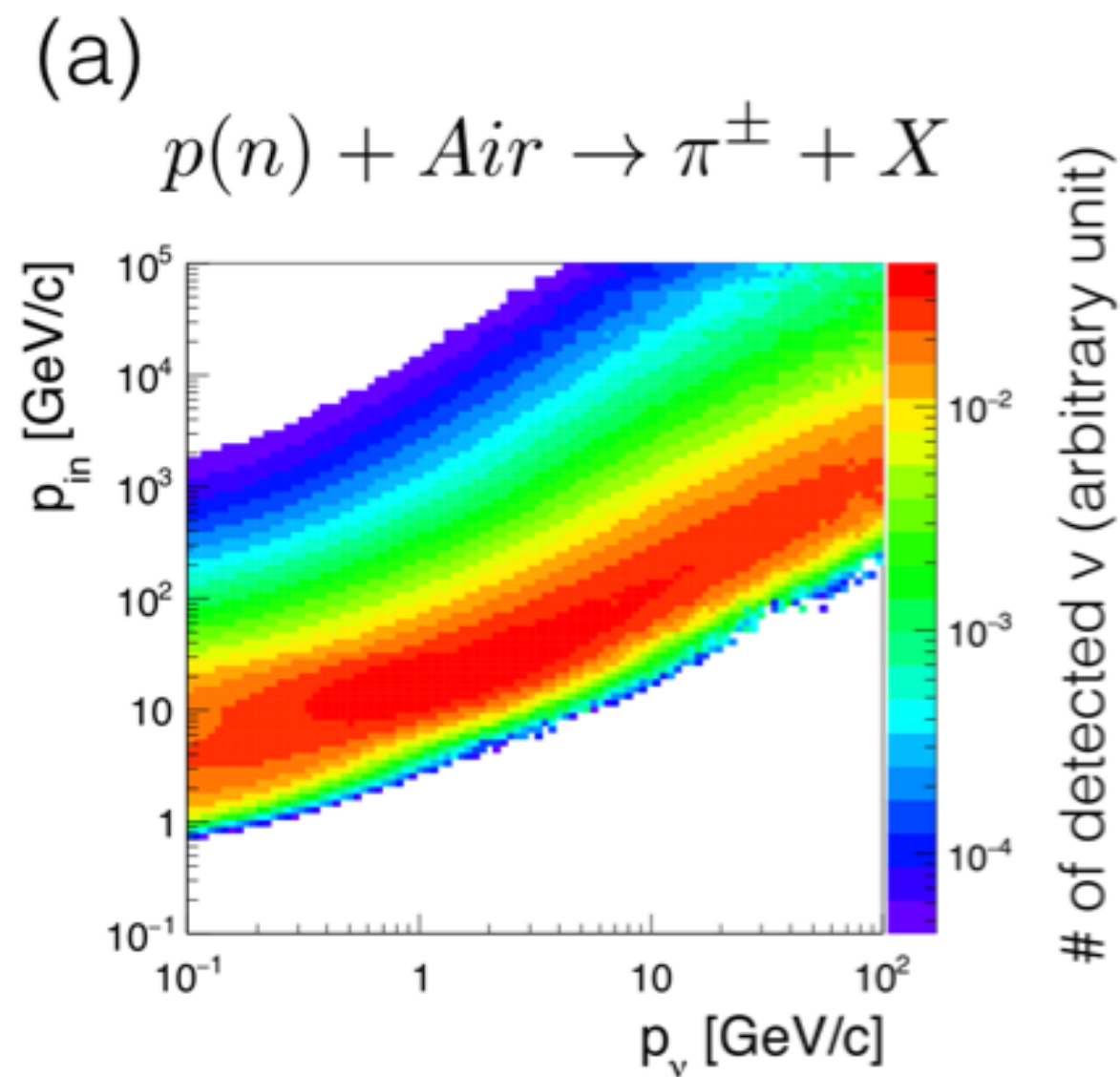
→ MC simulation から見積もられる量

Trigger cross section

モデル不定性が大きい
→ σ_{prod} の支配的な系統誤差源

TABLE VI. Breakdown of systematic uncertainties for production cross section measurements.

Systematic uncertainties for σ_{prod} (mb)							
Interaction	p (GeV/ c)	Density	S4	Total systematic uncertainties	Elastic model	Other model	Total model uncertainties
p + C	60	± 1.9	$\pm_{2.2}^{1.8}$	$\pm_{2.9}^{2.6}$	$\pm_{2.2}^{0.0}$	$\pm_{4.3}^{0.2}$	$\pm_{4.8}^{0.2}$
p + Be	60	± 0.4	$\pm_{1.4}^{1.0}$	$\pm_{1.5}^{1.1}$	$\pm_{2.2}^{0.0}$	$\pm_{4.7}^{0.0}$	$\pm_{5.2}^{0.0}$
p + Al	60	± 1.4	$\pm_{4.9}^{2.6}$	$\pm_{5.1}^{3.0}$	$\pm_{2.6}^{0.0}$	$\pm_{8.0}^{0.2}$	$\pm_{8.4}^{0.2}$
p + C	120	± 1.7	$\pm_{3.1}^{1.9}$	$\pm_{3.5}^{2.5}$	$\pm_{0.4}^{0.0}$	$\pm_{12.2}^{0.0}$	$\pm_{12.2}^{0.0}$
p + Be	120	± 0.4	$\pm_{1.8}^{1.7}$	$\pm_{1.8}^{1.7}$	$\pm_{0.2}^{0.0}$	$\pm_{14.3}^{0.1}$	$\pm_{14.3}^{0.1}$



(横軸) 検出される大気 ν の運動量 p_ν

(縦軸) その ν 生成に関与したハドロン反応における入射核子の運動量 p_{in}

Sub-GeV 大気 ν の生成には、数GeV/c - 数十GeV/c 程度の入射核子によるハドロン反応が重要