

ニュートリノフラックス計算精度向上に向けたNA61/SHINE実験 における荷電粒子弁別のための電荷量補正手法の開発

2026年 9月 15日

日本物理学会 第81回年次大会（東京大学 駒場キャンパス）

講演番号：15pG723-3

白石悠樹、小汐由介、坂下健^A、中平武^A、Megan Friend^A、永井義一^A、
他NA61/SHINE Collaboration

岡大理、高工研^A

T2K実験におけるハドロン生成の不定性

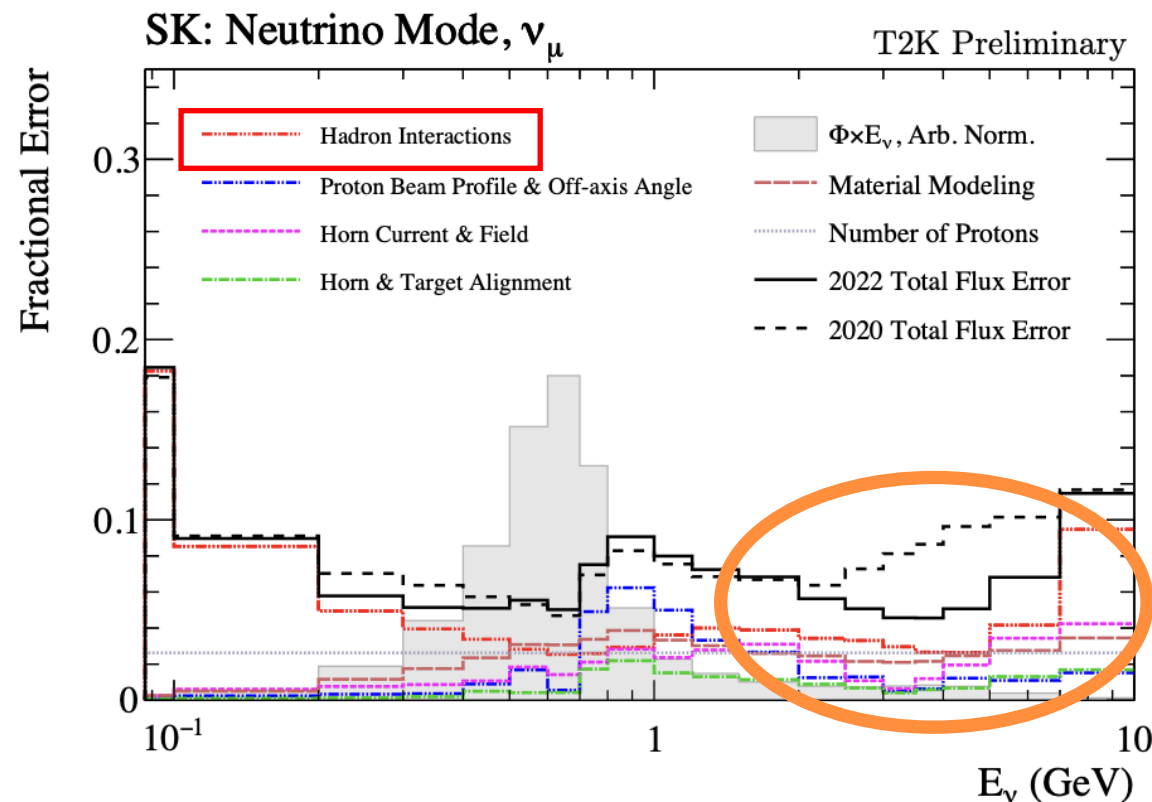
- T2K実験： ν 振動を精密測定しレプトンでのCP対称性の破れを検証している長基線 ν 実験
- 最終目標の99% C.L.での棄却のためには更なる不定性削減が要求
- 主要な不定性の一つ
 - ： **ν フラックス計算に対するハドロン生成の不定性**
 (ニュートリノビームはハドロンの崩壊で作っている)
 → 外部実験である**NA61/SHINE実験のデータを適用**
- 2007年~2010年にNA61/SHINE実験にて最初のT2K実験用の複数のデータを取得
 → フラックスピーク付近で5%程度まで不定性削減
- 先行研究から、過去に測定結果のない**高運動領域の荷電K中間子**を測定することで更なる不定性削減が示唆
 → 2022年の6月から7月にかけて再度T2Kのためのデータ取得を実施

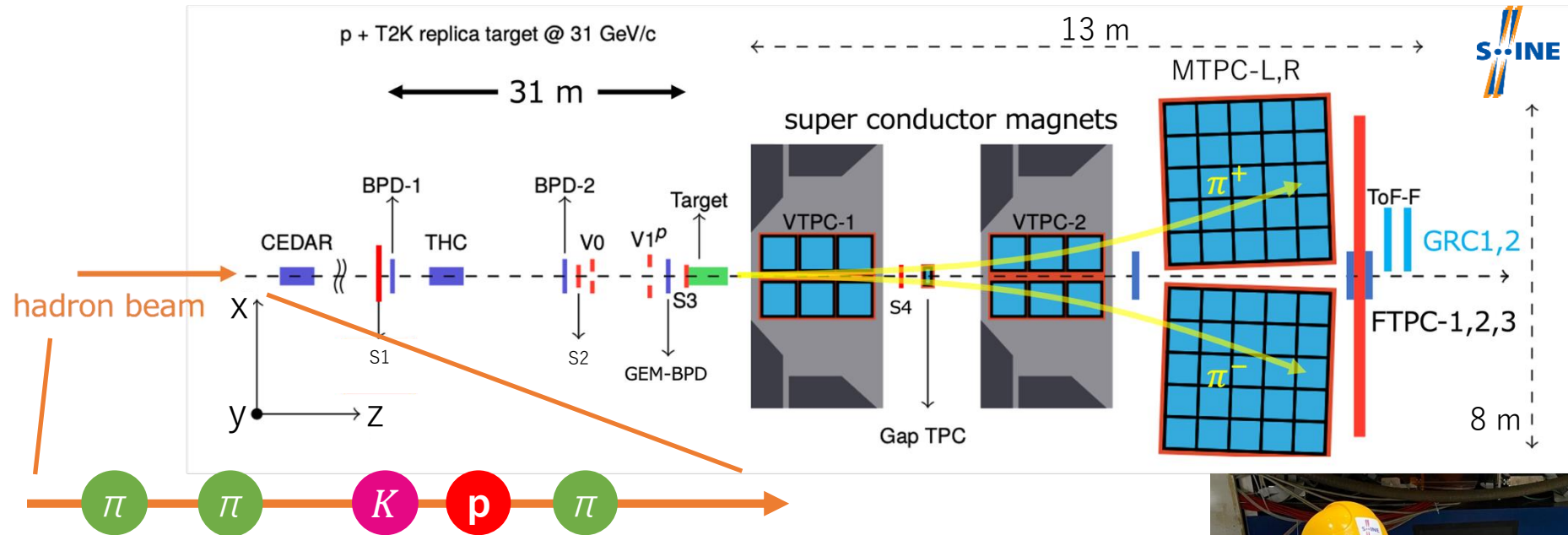
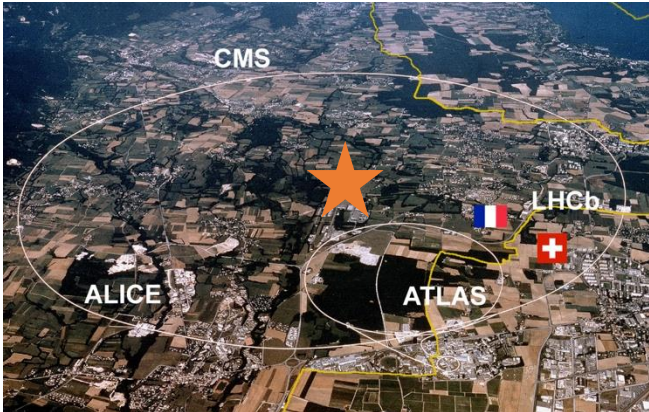
測定目標

✓ **高運動領域における荷電K中間子 → 高エネルギー領域における不定性削減**

✓ T2K replica targetによる $K_S^0 \rightarrow$ T2K replica targetにおける K_L^0 生成の不定性削減

JPS 2026年春季大会 講演番号：23pT1-7





- ・ CERNのNorth Areaで行われている多目的物理・固定標的実験
- ・ SPSから供給されるビームを二次のハドロンビームにして使用する

T2K 2022 run

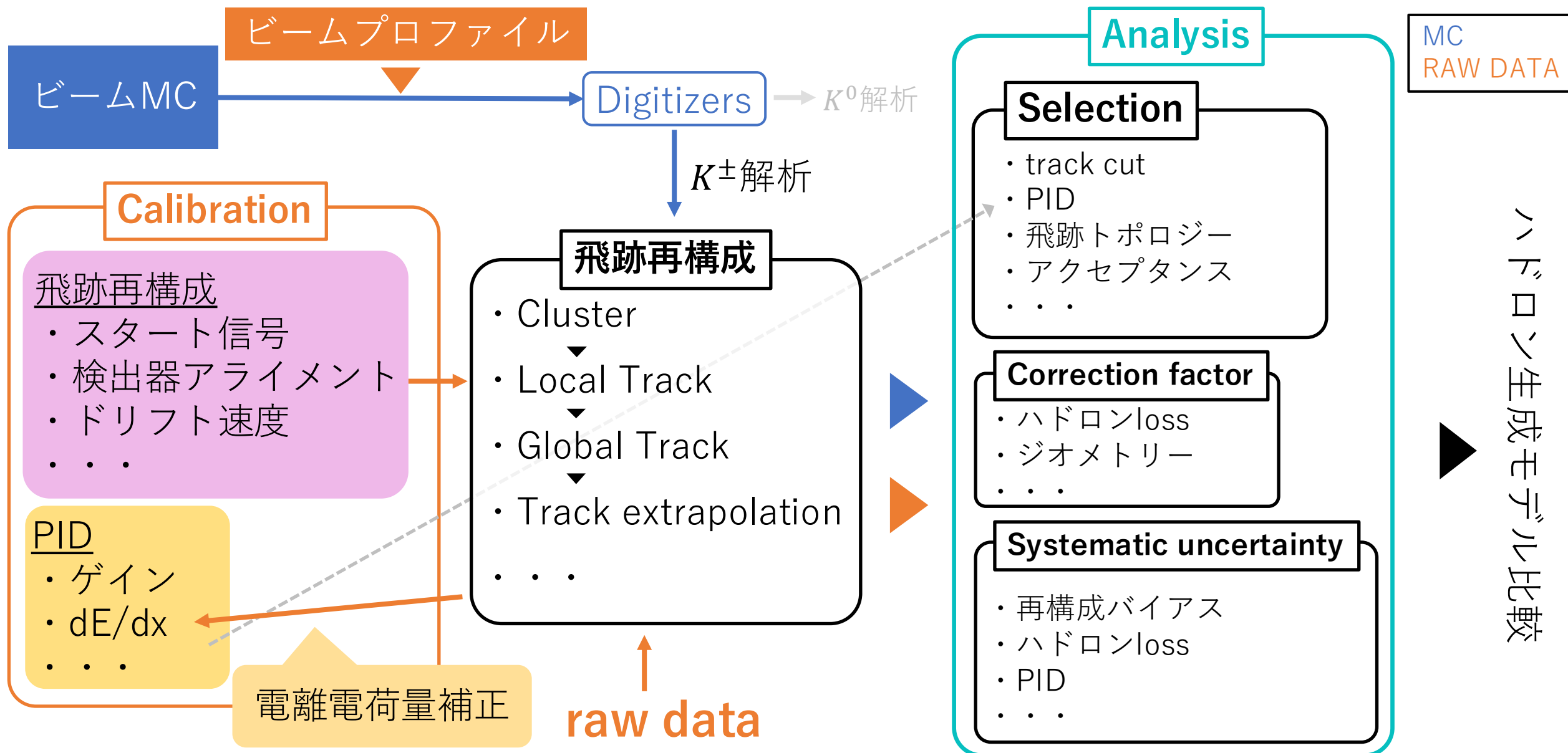
: T2K replica target + 31 GeV/c の陽子ビーム

T2Kと同様の セッティング

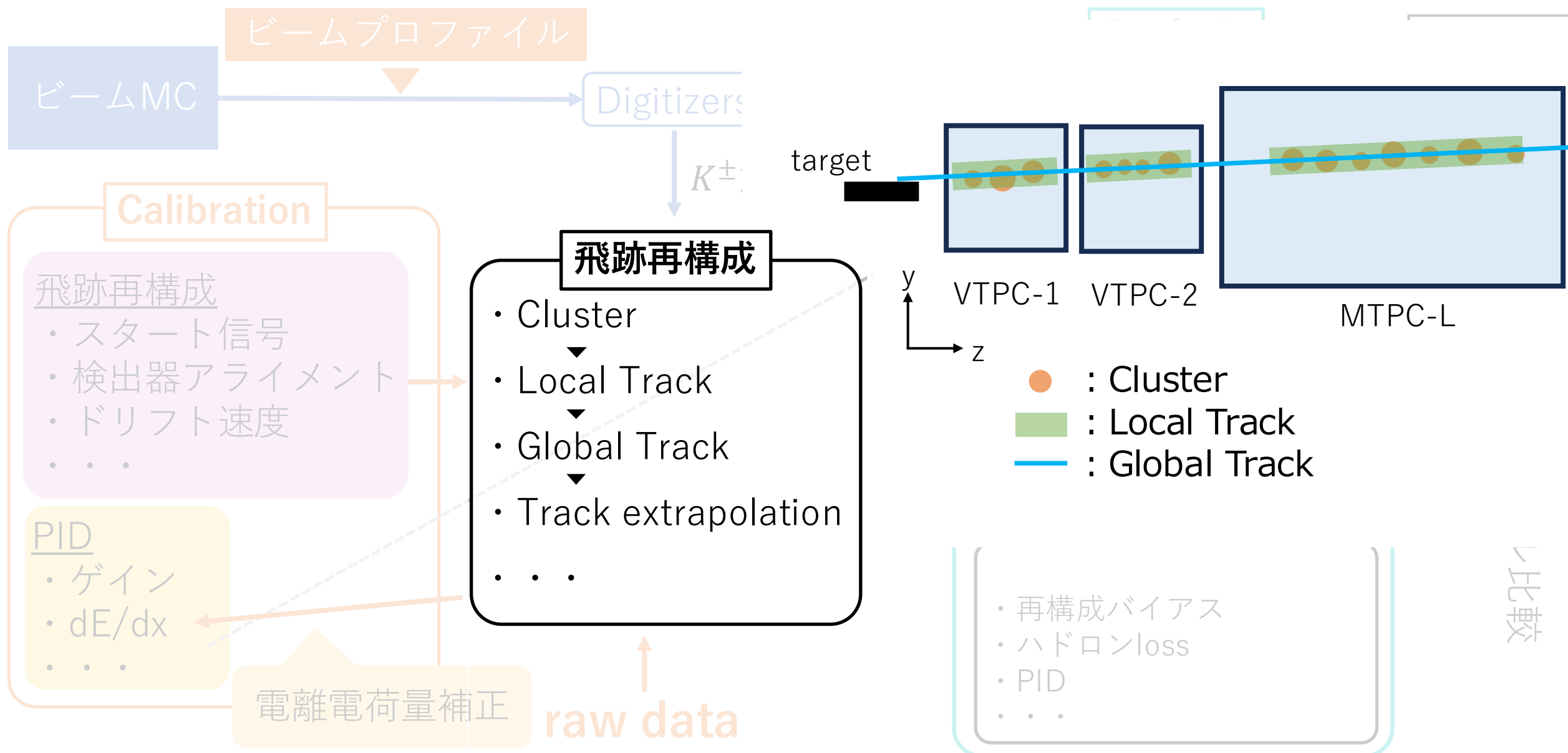
- ・ 主な検出器：4台の巨大TPC + ビーム軸上のTPC
→ 荷電粒子の飛跡を3次元で再構成する



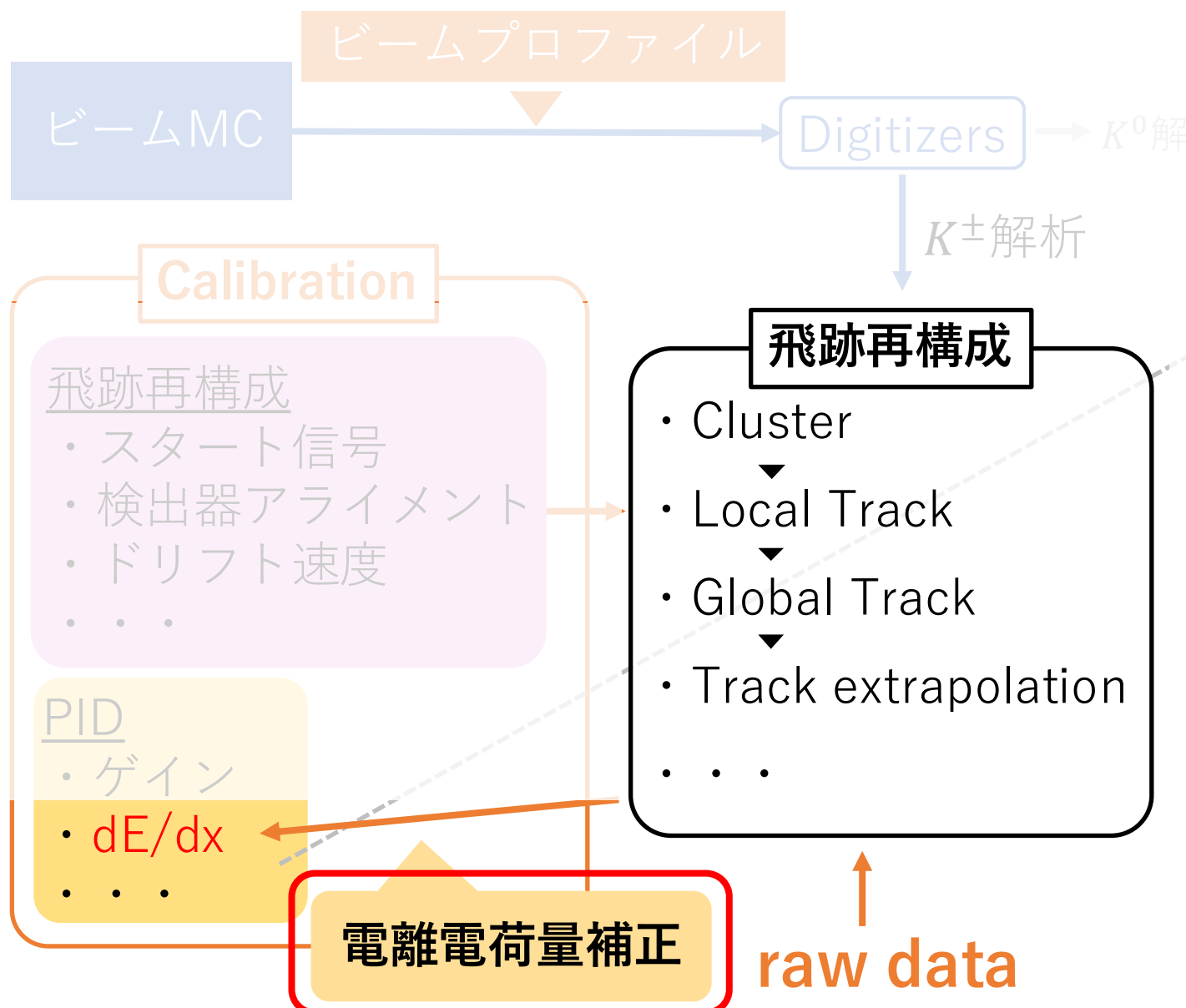
荷電 K 中間子解析の流れ



飛跡再構成

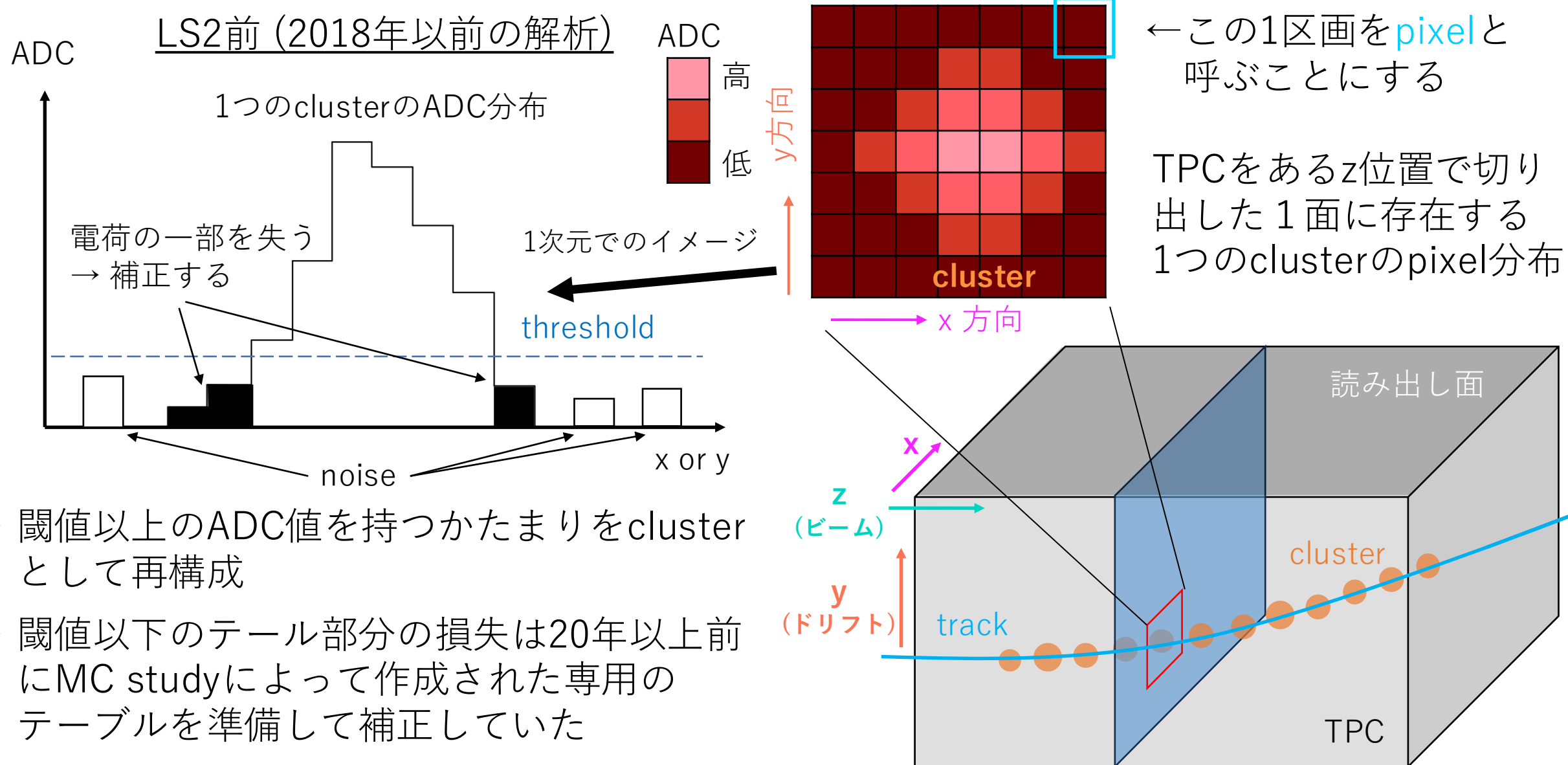


電離電荷量補正

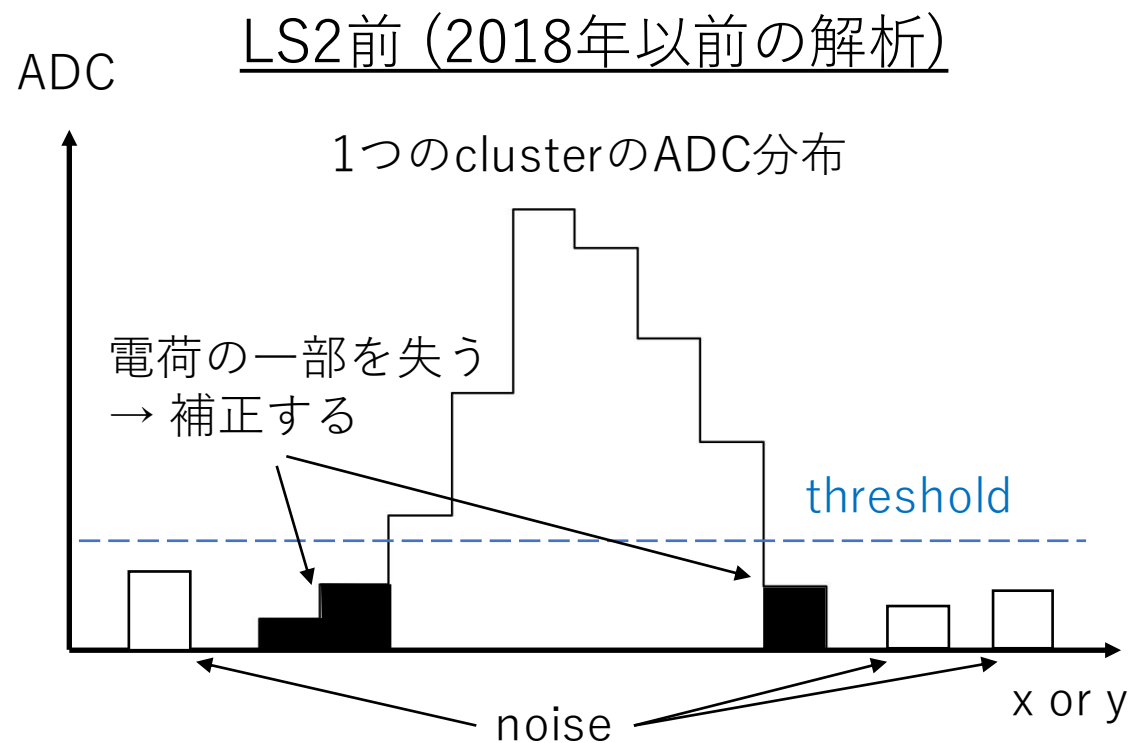


- ・ 再構成された飛跡は、 dE/dx の振る舞いの違いを使ってPIDする
- ・ PIDの精度を上げるためには、各clusterの電荷量の一部が閾値によって失われるため、その補正が必要
- ・ 本実験はCERNのLS2の期間にTPCの読み出しをアップデートした
→ これに伴ってclusterの電荷量補正の手法も更新する

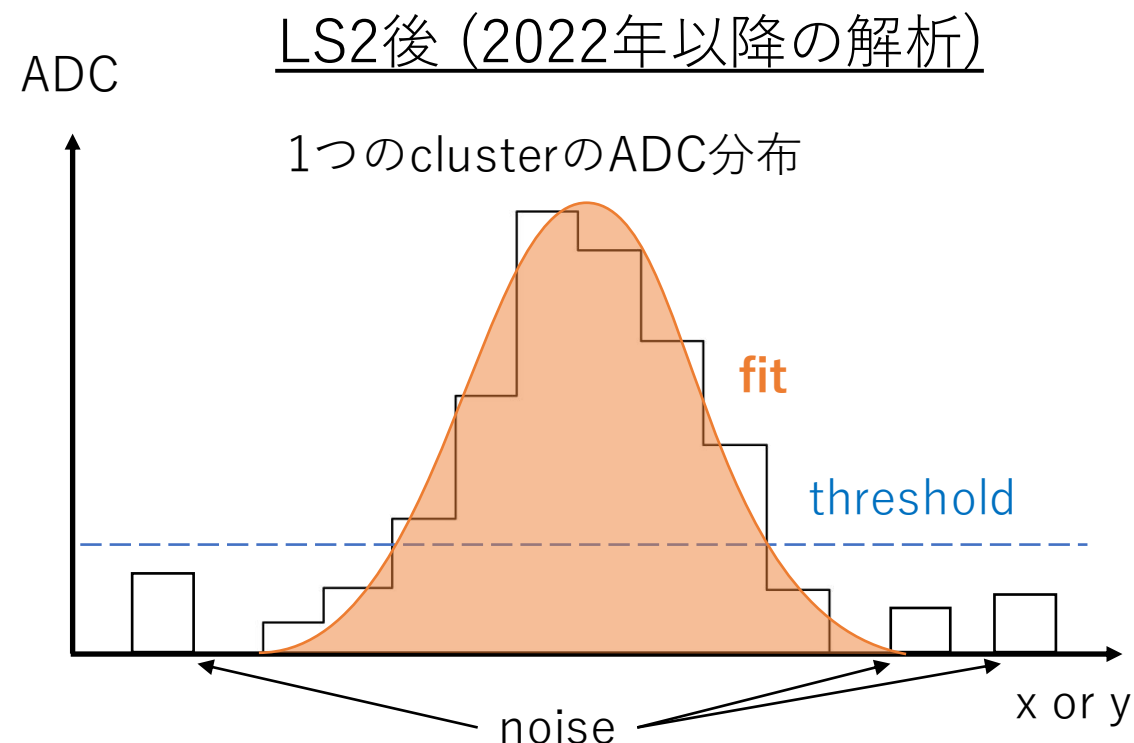
閾値による電荷損失とその補正方法



閾値による電荷損失とその補正方法



- ・ 閾値以上のADC値を持つかたまりをclusterとして再構成
- ・ 閾値以下のテール部分の損失は20年以上前にMC studyによって作成された専用のテーブルを準備して補正していた

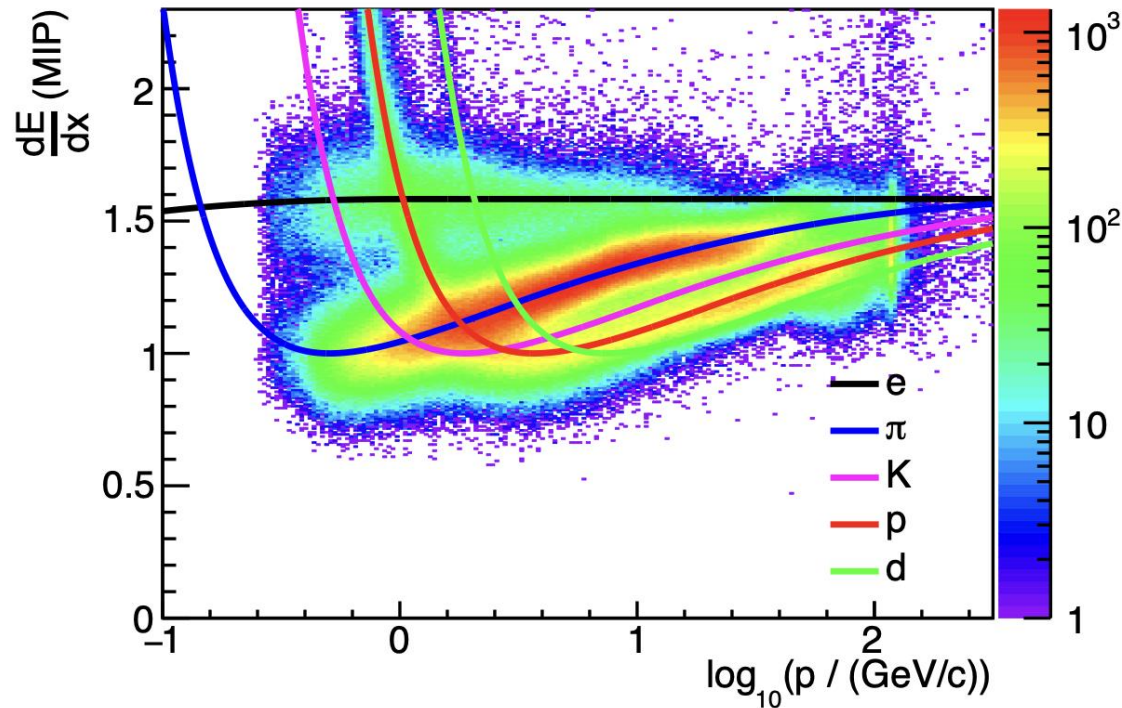


- ・ TPCの読み出し回路が新しくなったため、既存の補正テーブルが適用できるか非自明
- ・ 新しくテーブルを作成するよりも汎用性が高いと考えられるcluster fittingの手法を開発する

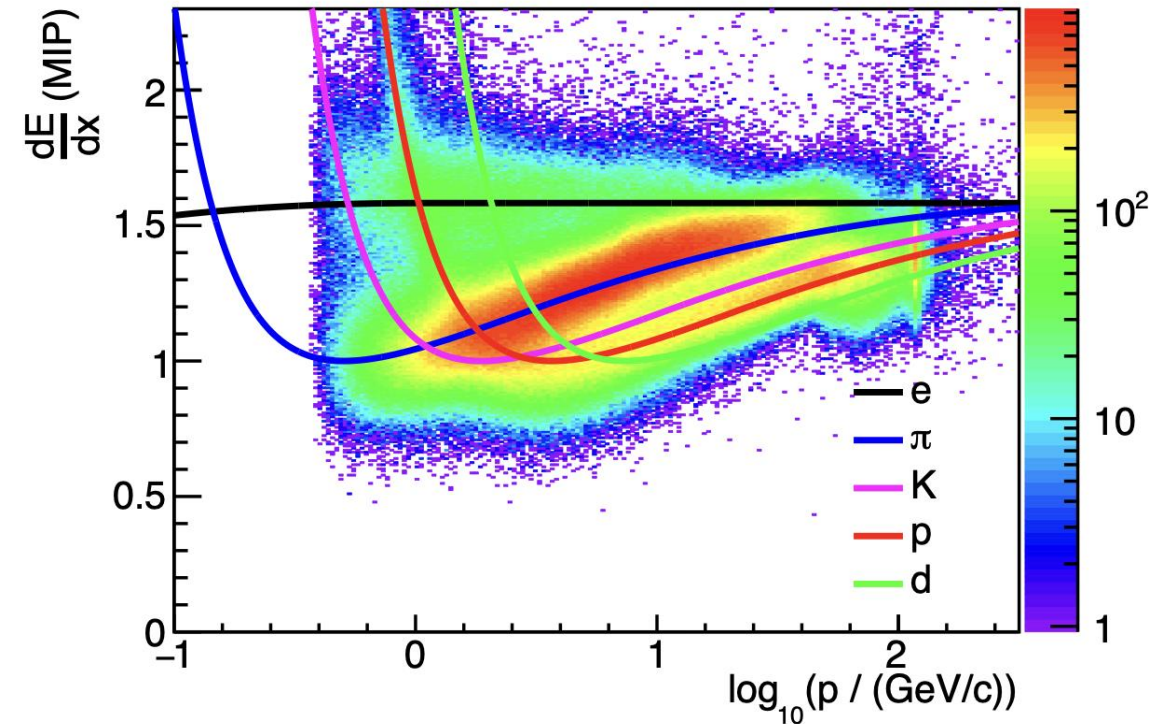
2017年データによるデモンストレーション

8

補正テーブルあり



補正テーブルなし



- 2022 T2K replica target dataはまだ飛跡再構成のためのキャリブレーションが完了していないので2017年に取得した解析済みのデータで電荷補正あり/なしの dE/dx 解析のデモンストレーションを行った
- 補正なしの結果の方がより広がった分布になっている → 精度を悪くする

フィット関数の決定

- cluster fittingの手法を開発する上でも既に解析済みの過去のraw dataを使用
- 各clusterの最大ADC値が1になるように規格化
- 複数の規格化されたclusterを重ね書きして、高さの平均値を計算
- 以下の3タイプ、x-yの相関項の有無で計6つの関数を仮定してROOTでフィット

タイプ①：シンプルな2Dガウス

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right) + \text{x-y相関項の有無}$$

タイプ②：expの肩を q 乗したもの

$$f(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)^q\right] + \text{x-y相関項の有無}$$

タイプ③：ガウシアンよりも裾野の広がり考慮したもの

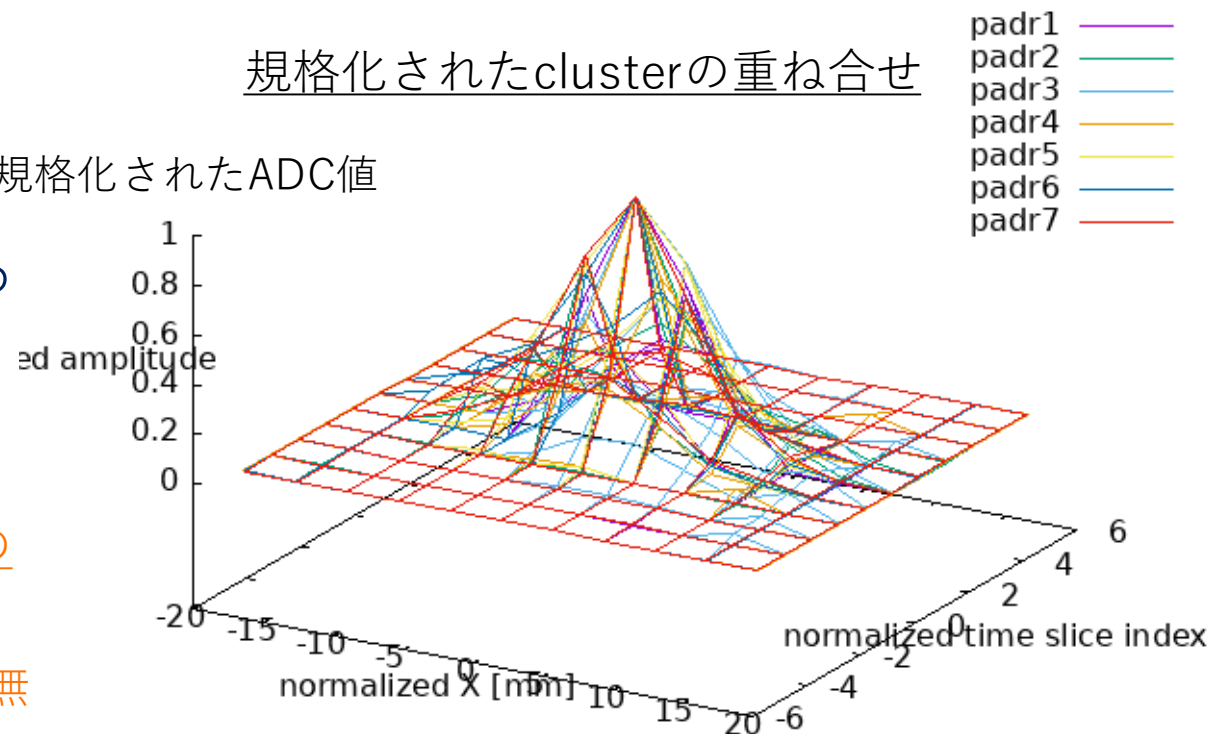
$$f(x, y) = \left[1 + (1 - q) \times -\frac{1}{2}\left\{\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right\}\right]^{\frac{1}{1-q}} + \text{x-y相関項の有無}$$

fitする



規格化されたclusterの重ね合せ

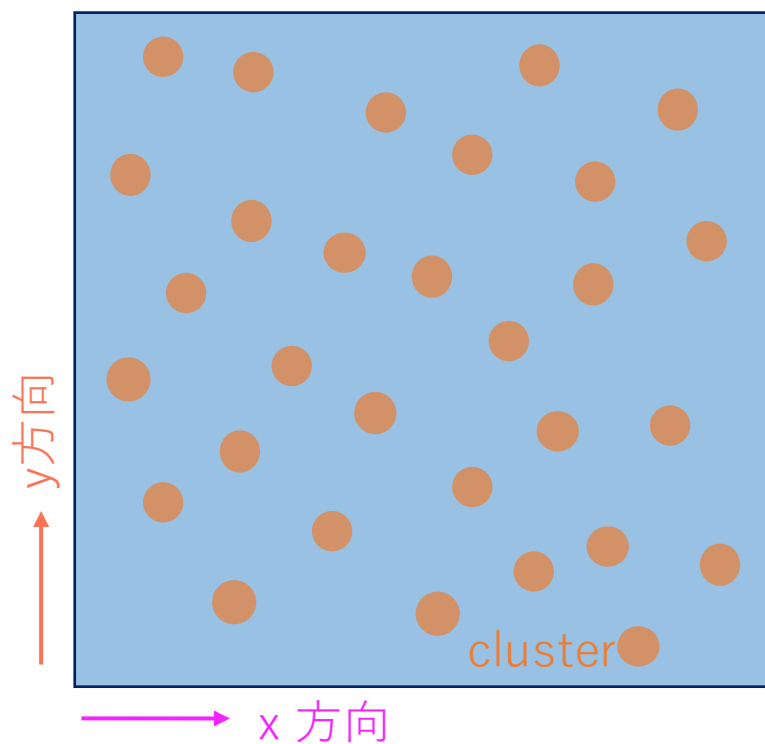
規格化されたADC値



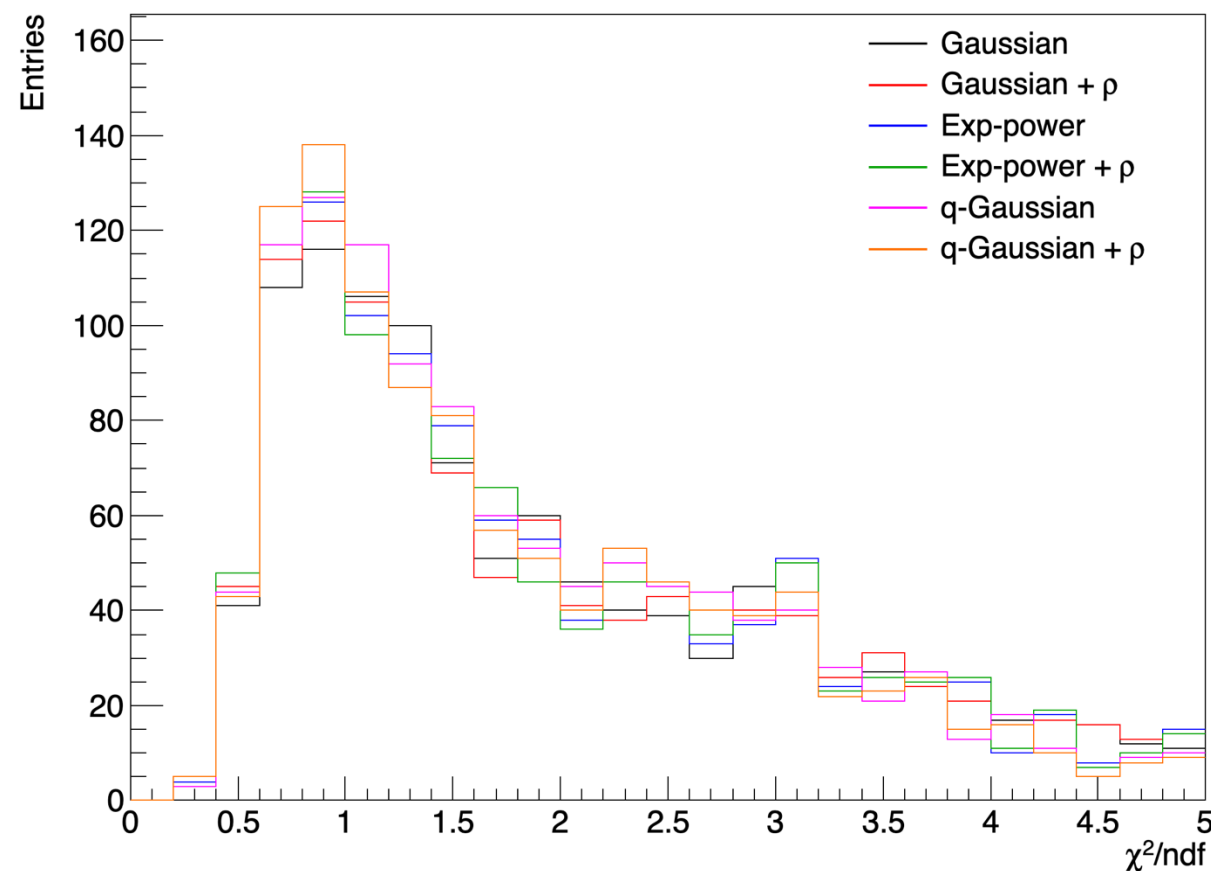
各フィット関数の χ^2/ndf 分布

- TPCのあるz位置のx-y面を切り出した時にclusterが30個以上あるものを選択

TPCのあるz位置のx-y面



- 規格化
 - 平均
 - 6つの関数をフィット
- χ^2/ndf を計算



- 6つのフィット関数で χ^2/ndf 分布に大きな差はみられなかったため、**シンプルな2D ガウス + x-yの相関項有り** をフィット関数として選択

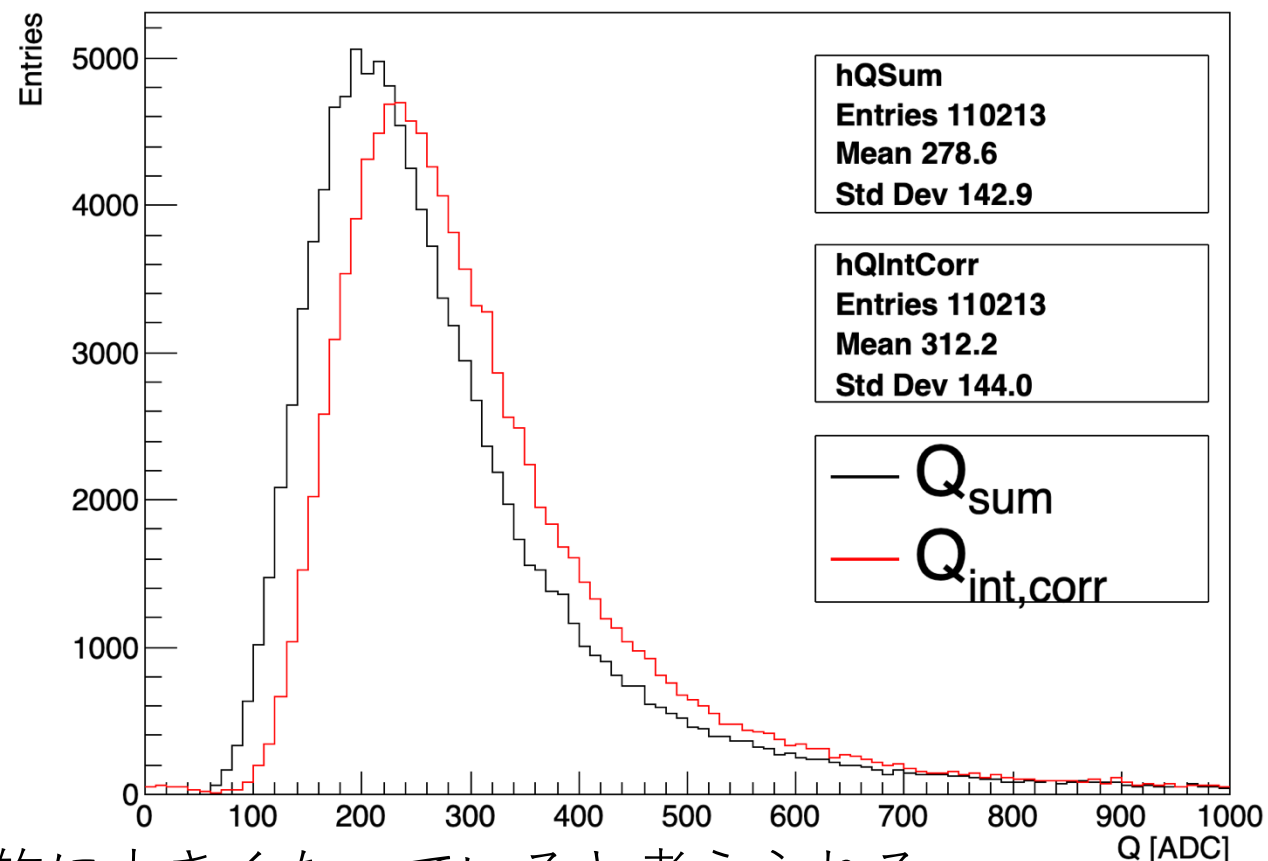
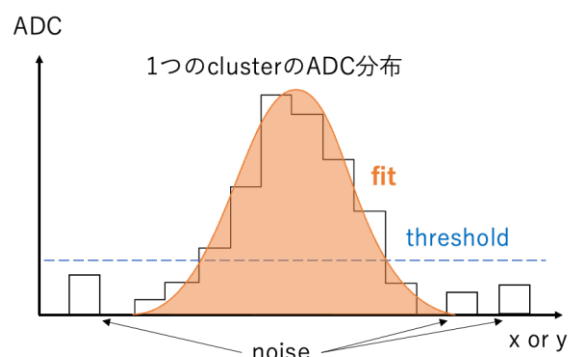
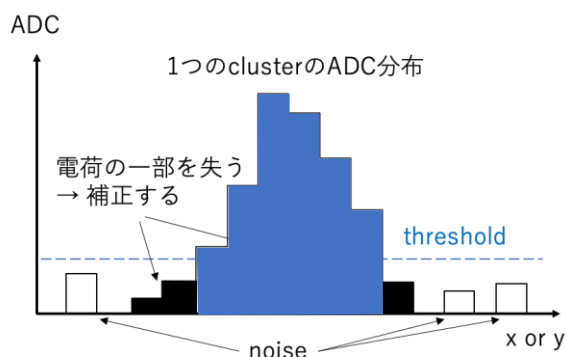
個々のclusterに対するフィットとその評価

- 選択したx-y相関項つき2Dガウシアンを、飛跡再構成に使用された個々のclusterにフィットし
そのフィット結果から全電荷量 $Q_{\text{int,corr}}$ を計算
- 1 clusterの全電荷量を、そのclusterを構成する各pixelのADC値の合計だと思った Q_{sum} を
計算して、2つの分布を比較

$$Q_{\text{sum}} = \sum_{\text{pixel}} \text{ADC}_{\text{pixel}}$$

$$Q_{\text{int,corr}} = \frac{2\pi A \sigma_x \sigma_y \sqrt{1-\rho^2}}{\Delta x \Delta y}$$

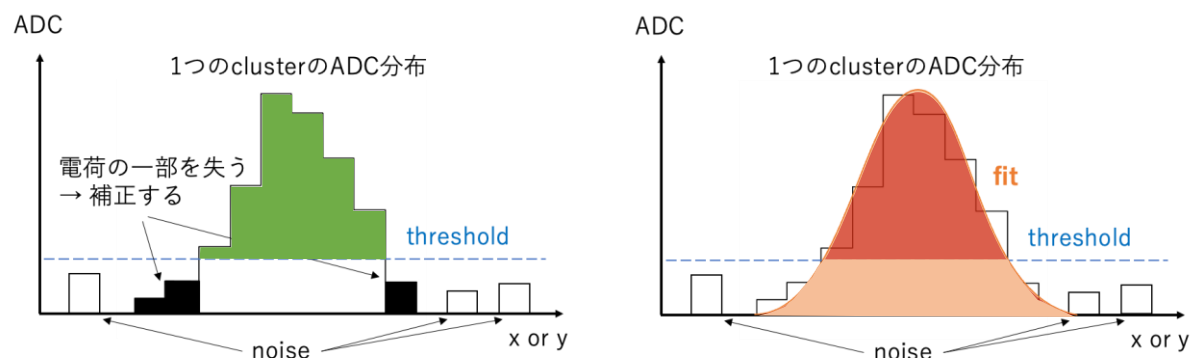
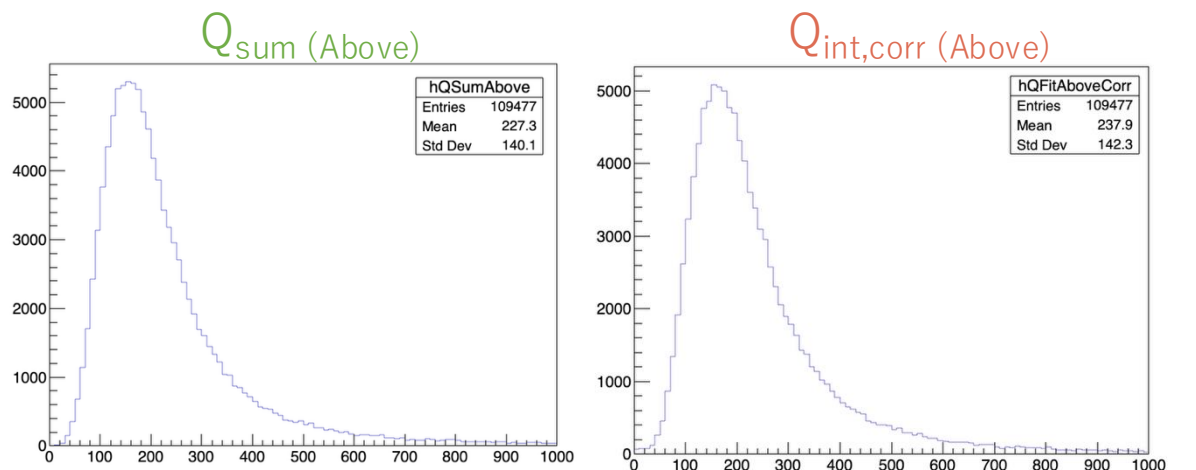
A : ピークの高さ
 σ_x : xの幅
 σ_y : yの幅
 ρ : x-y相関係数
 $\Delta x \Delta y$: 1 pixelの面積



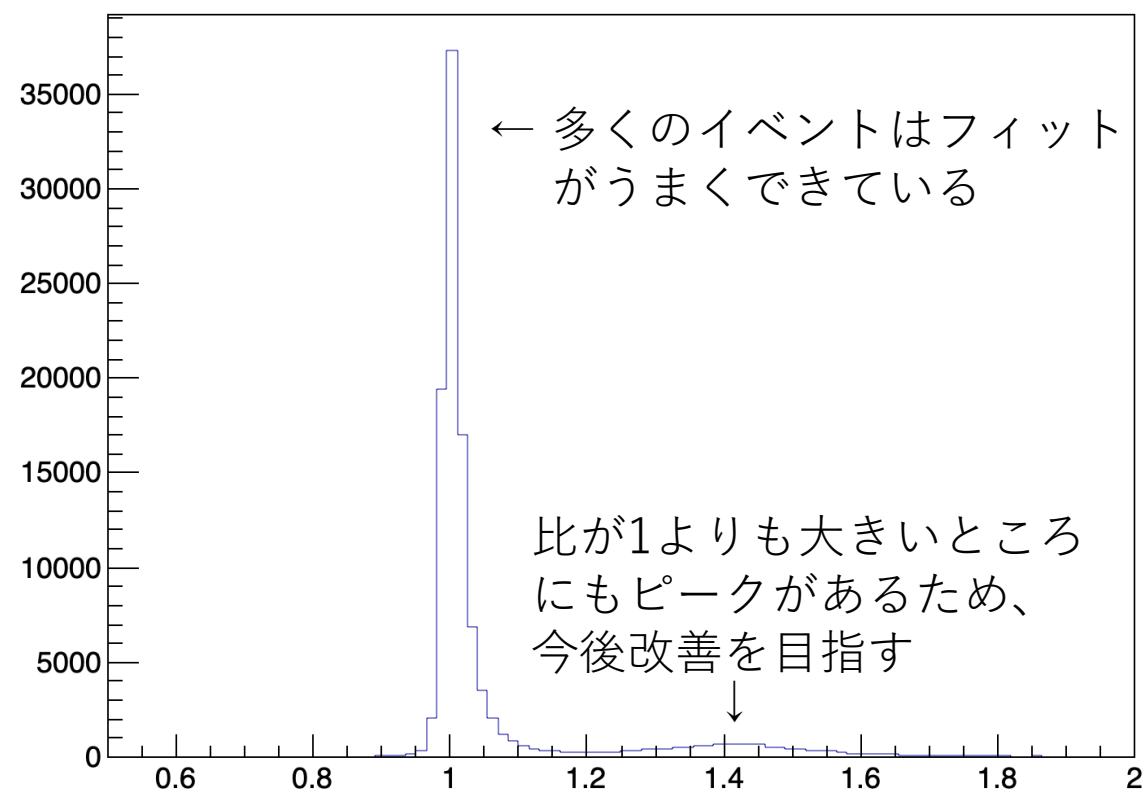
- clusterのテールの分だけ $Q_{\text{int,corr}}$ の方が全体的に大きくなっていると考えられる

個々のclusterに対するフィットとその評価

- フィットそのものがどの程度うまくいっているかを評価するために、閾値以上の $Q_{\text{sum}} (\text{Above})$ と $Q_{\text{int,corr}} (\text{Above})$ の分布を再度計算し比較した



$$Q_{\text{int,corr}} (\text{Above}) / Q_{\text{sum}} (\text{Above})$$



- 比が 0.95 ~ 1.05 の領域に全体の約78%のイベント
- 1よりも大きいところにも山が見えている → うまくフィットできていないので今後対処

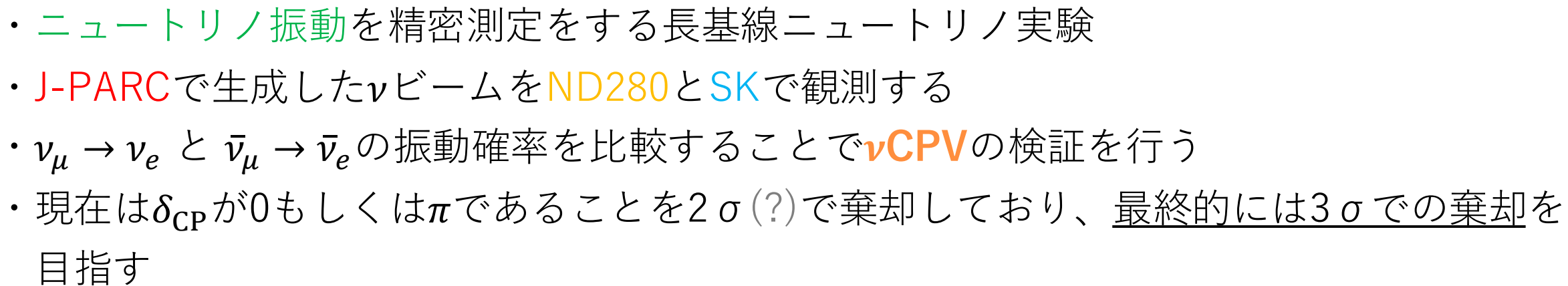
まとめ

- T2K実験における ν フラックス計算精度向上のため、高運動量荷電 K 中間子の測定を主な目的としたNA61/SHINE実験の追加データ取得を行なった
- PIDは dE/dx を用いて行い、その精度を向上するためには電荷量の補正が必要
- LS2期間中にTPCの読み出し回路が新しくなったため、既存の方法が適用できるか非自明 → より汎用性が高いと考えられるcluster fittingの手法を開発中
- 平均cluster shapeから、 x - y 相関項つき2Dガウシアンをフィット関数に選択
- 個々のclusterをフィットし、全電荷量分布を見るとテール部分の影響が見られた
- フィットの評価として閾値以上の電荷量を比較したところ、全体の8割弱は電荷量を再現

今後

- まだうまくフィットできていない部分の対処をし、補正後の全電荷量を用いて dE/dx 解析を行う。

Backup

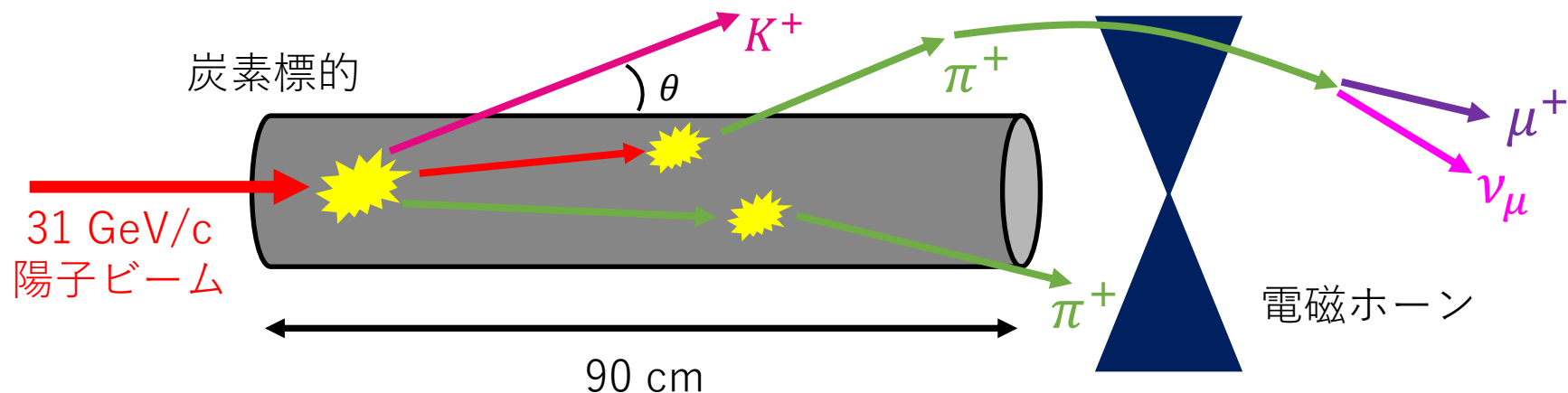


更なる不定性の削減が重要

ハドロン生成に対する不定性

主要な不定性の原因の一つ

→ ニュートリノフラックス計算に対するハドロン生成の不定性



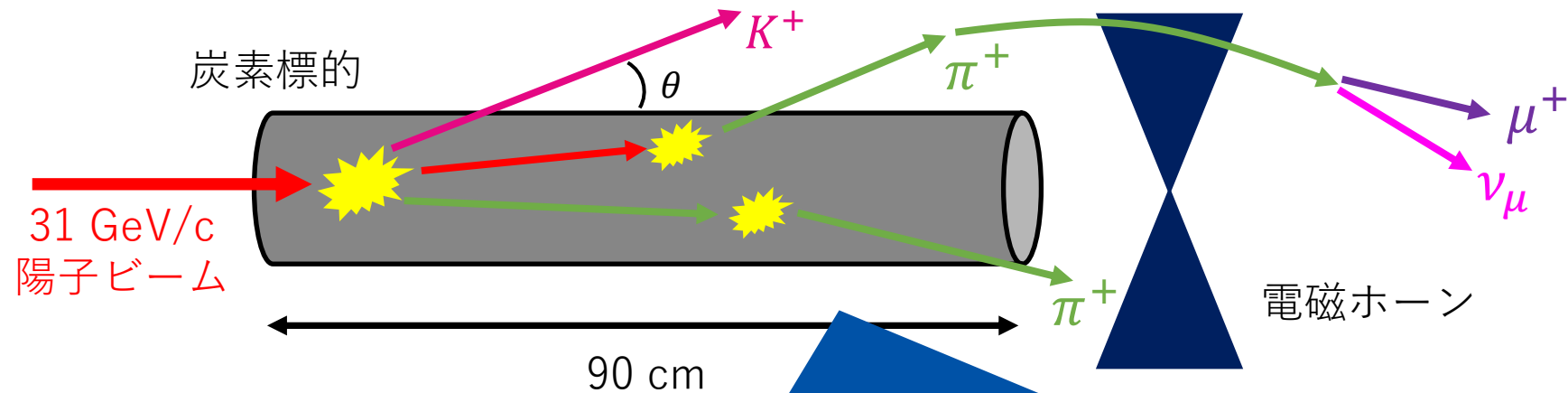
- T2K実験では31 GeV/cの陽子ビームを炭素標的に照射し、生成されるハドロン(主には π と K)の崩壊によって ν フラックスを生成している
- 標的内で陽子が複数回の複雑な散乱をするため、シミュレーションによって完全に再現することは難しく、モデル不定性が存在する

NA61/SHINE実験の測定結果から得られるハドロンの p - θ 分布によって重み付けをし補正する

ハドロン生成に対する不定性

主要な不定性の原因の一つ

→ ニュートリノフラックス計算に対するハドロン生成の不定性

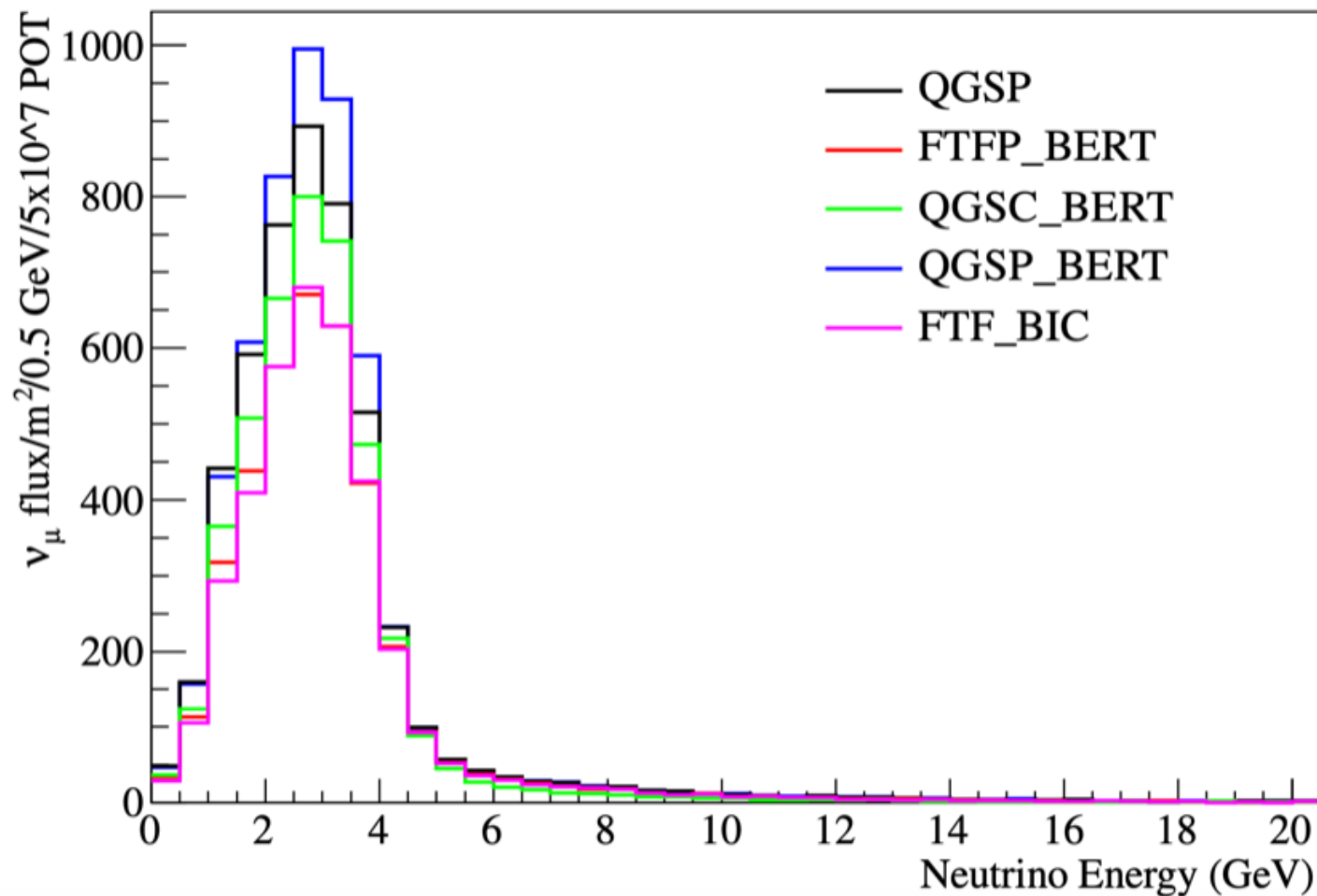


- T2K実験では31 GeV/cの陽子ビームを炭素標的に衝突させて、 ν フラックスを生成して検出する。この過程で、 K などのハドロンが生成される。
 ・どのようなハドロンが? ・どのような運動量で?
 ・どの角度で? ・どの程度の量?
- 標的内で陽子が複数回の複雑な散乱をするため、シミュレーションによって完全に再現することは難しく、モデル不定性が存在する

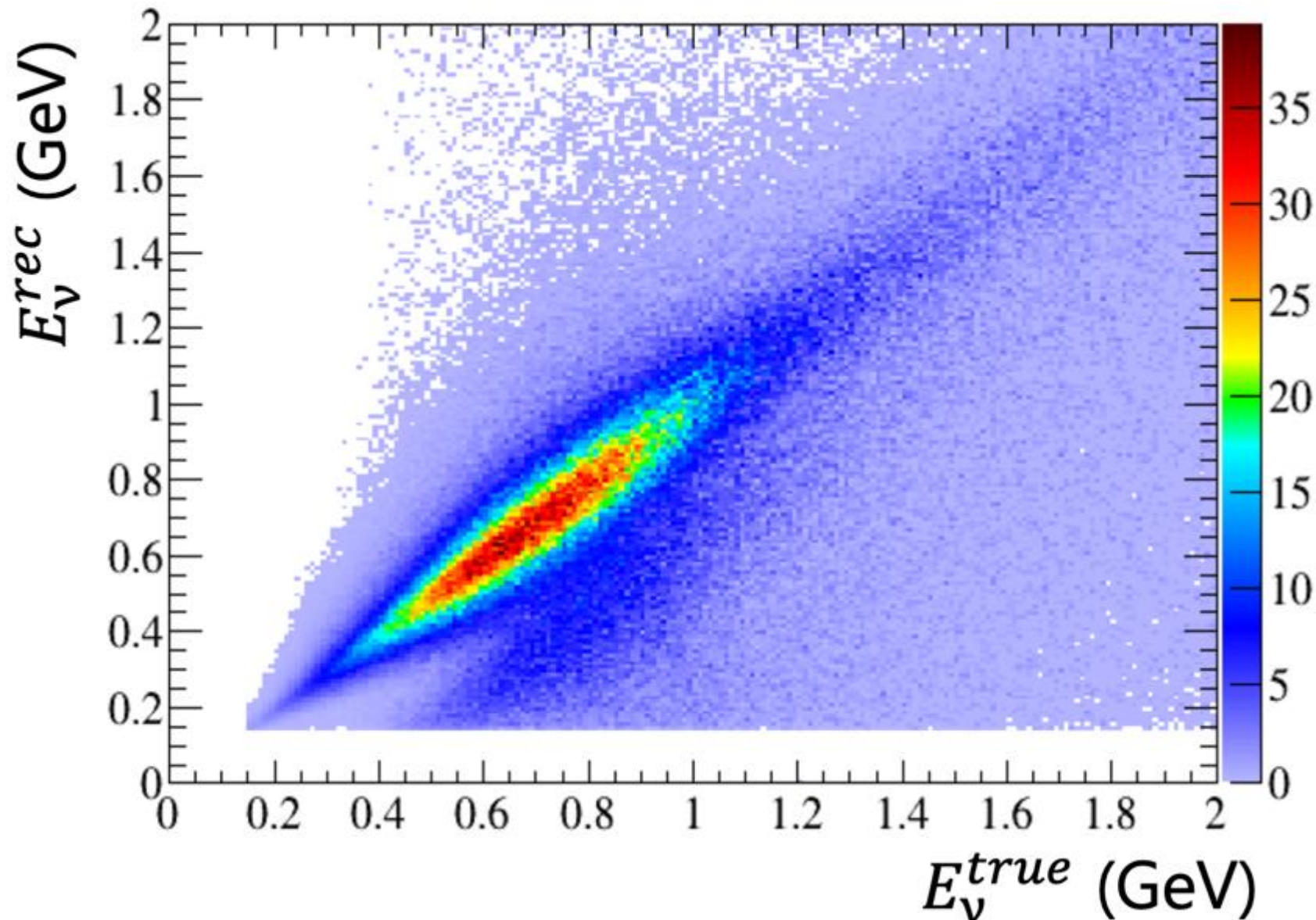
NA61/SHINE実験の測定結果から得られるハドロンのp- θ 分布によって重み付けをし補正する

ハドロン生成に対する不定性

モデル不定性の一例

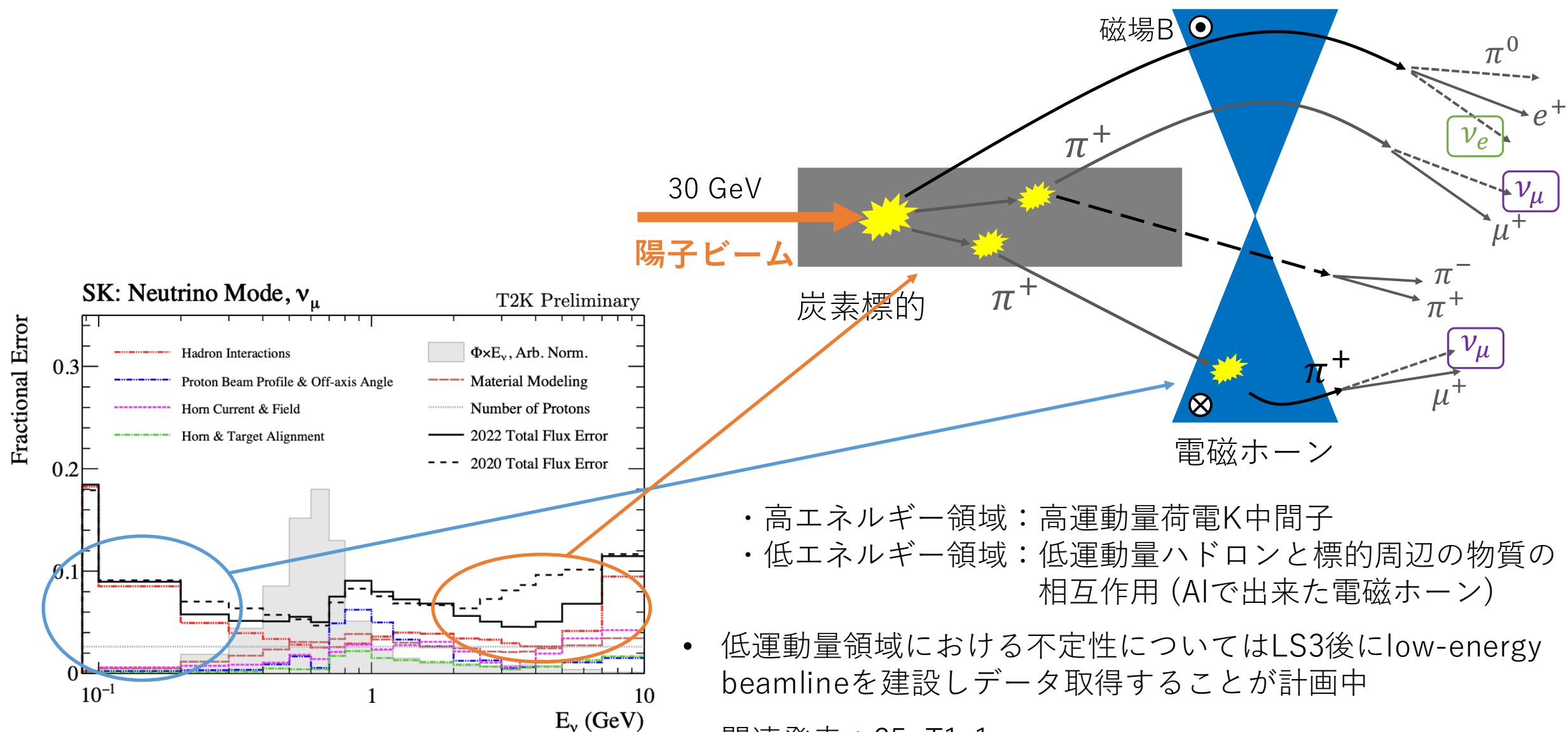


- MINERvA実験におけるNuMI beamlineにおいて π^+ からの崩壊で生成されるニュートリノフラックスのエネルギー分布をGeant4におけるいくつかのハドロン生成モデルで描いたもの
- モデルによって生成されるニュートリノフラックス分布が異なる



- 真のニュートリノのエネルギーと再構成後のニュートリノエネルギーには幅があるためより高エネルギーのイベントからの影響も染み出す

ハドロン生成に対する不定性



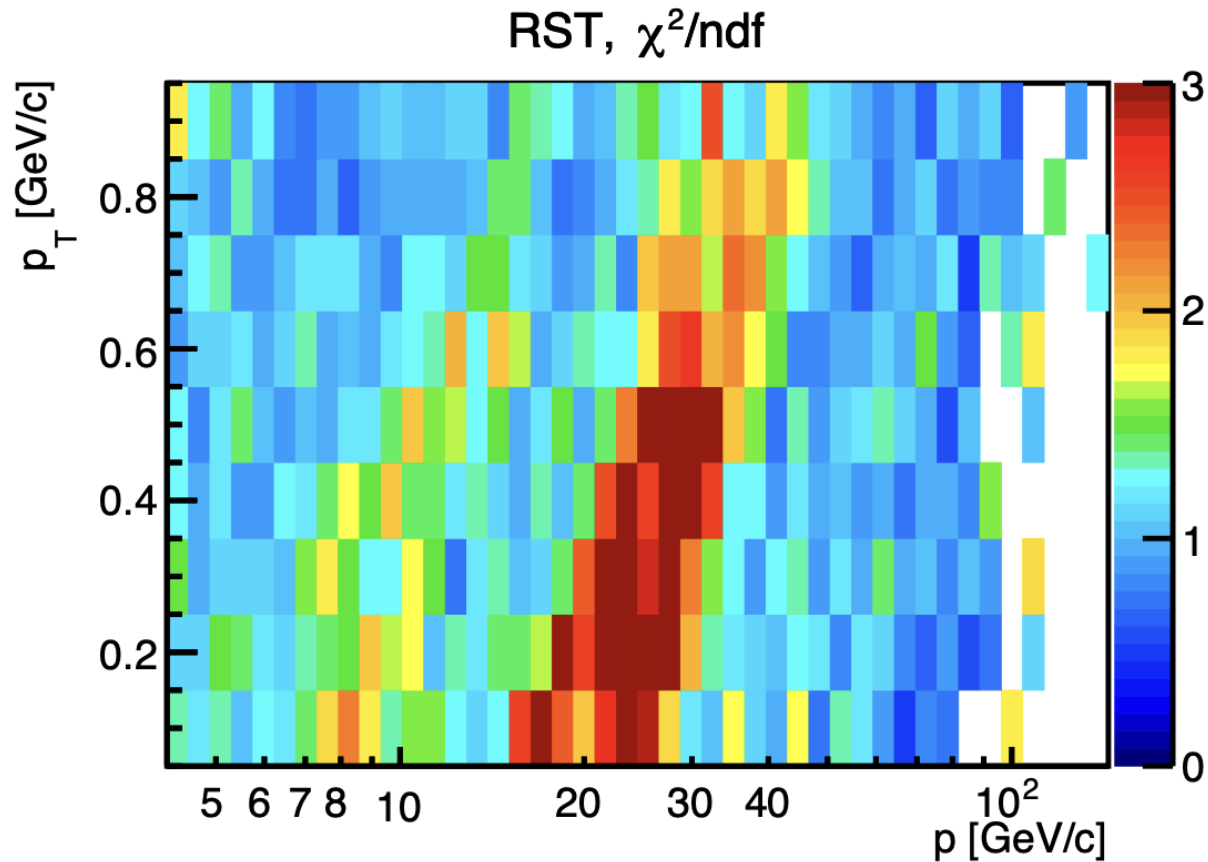
- ・ 高エネルギー領域：高運動量荷電K中間子
- ・ 低エネルギー領域：低運動量ハドロンと標的周辺の物質の相互作用 (AIで出来た電磁ホーン)
- ・ 低運動量領域における不定性についてはLS3後にlow-energy beamlineを建設しデータ取得することが計画中

関連発表：25aT1-1

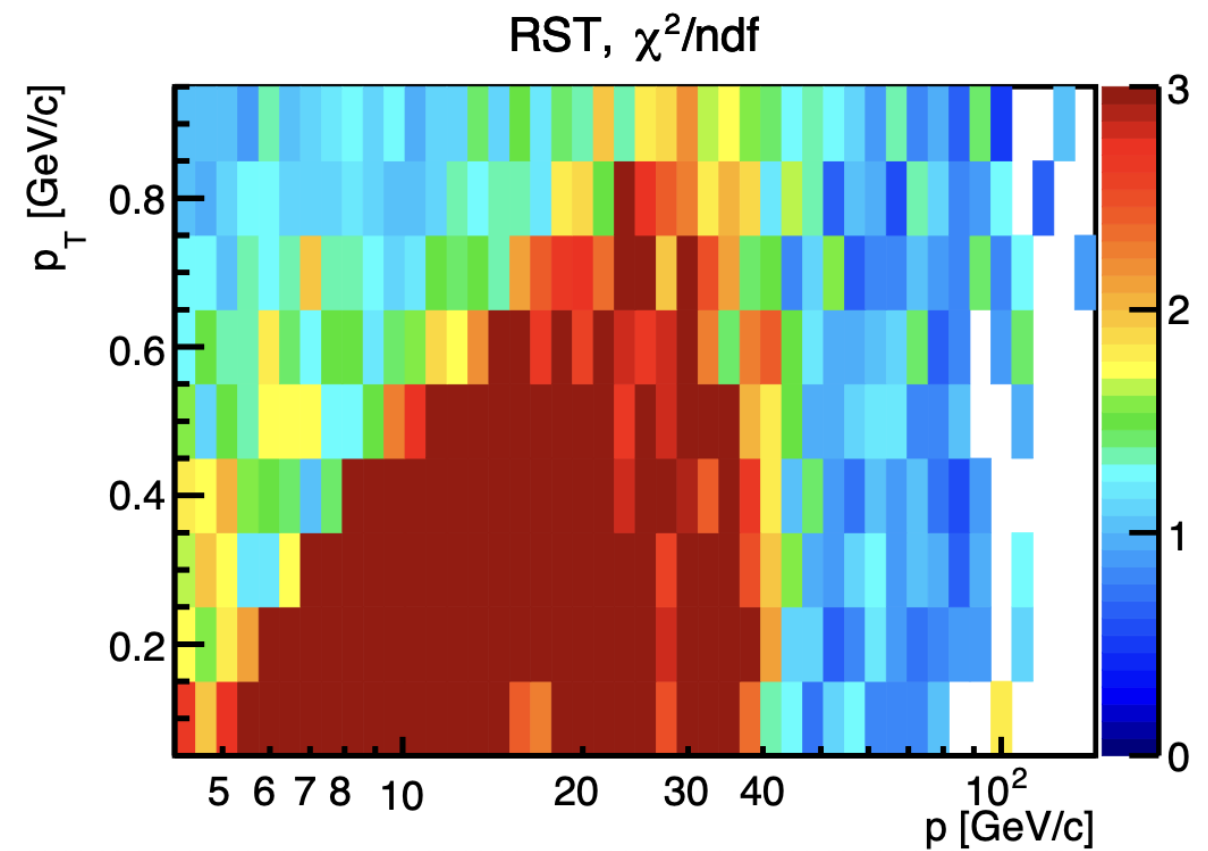
2017年データによるデモンストレーション

21

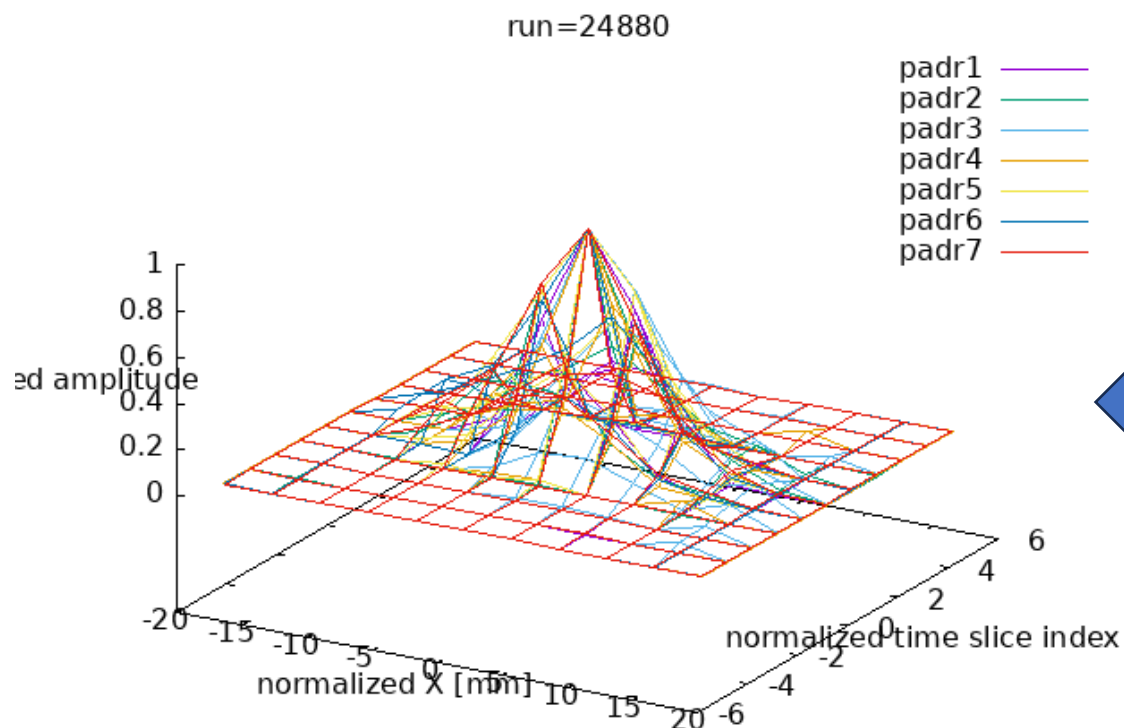
補正テーブルあり



補正テーブルなし



Fitting関数の決定



$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right)$$

$$f(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \times \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} - \frac{2\rho xy}{\sigma_x \sigma_y}\right)\right]$$

$$f(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)^q\right]$$

$$f(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2} \times \left\{\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} - \frac{2\rho xy}{\sigma_x \sigma_y}\right) / (1 - \rho^2)\right\}^q\right]$$

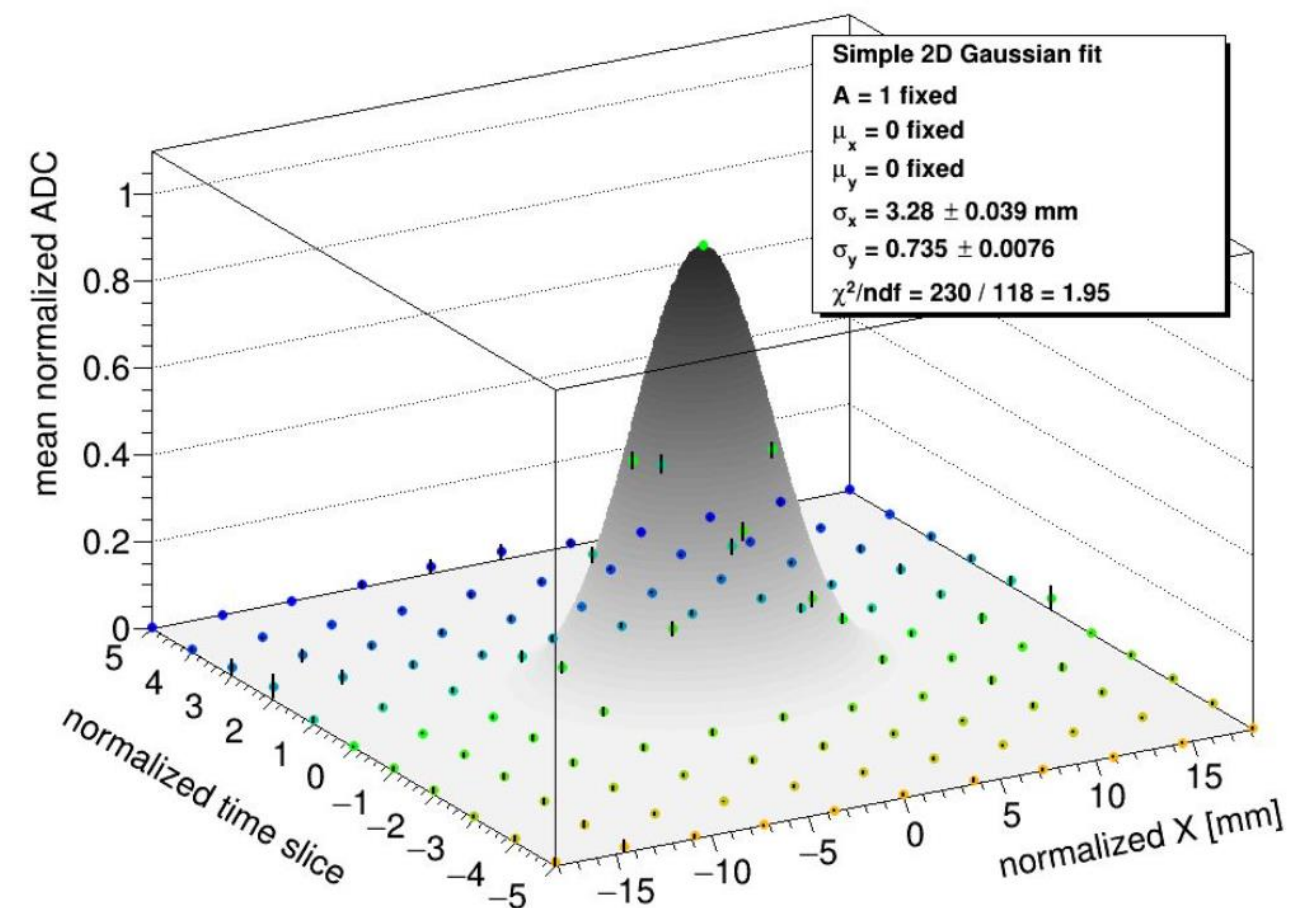
$$f(x, y) = \left[1 + (1 - q) \times -\frac{1}{2} \left\{\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right\}\right]^{\frac{1}{1-q}}$$

$$f(x, y) = \left[1 + (1 - q) \times -\frac{1}{2} \left\{\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} - \frac{2\rho xy}{\sigma_x \sigma_y}\right) / (1 - \rho^2)\right\}\right]^{\frac{1}{1-q}}$$

フィット結果の比較

e.g.) Simple 2D Gauss

Mean cluster profile

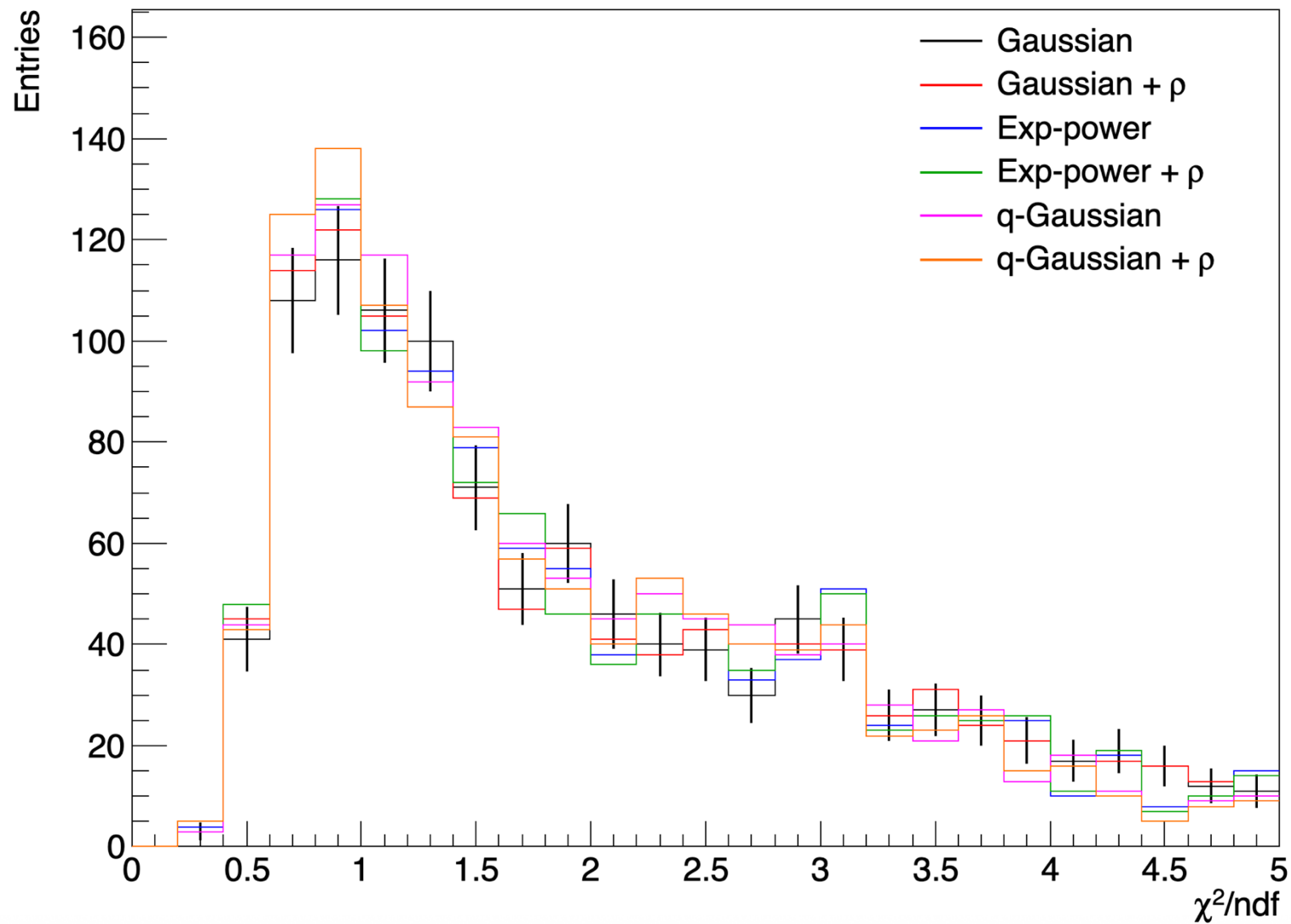


162個のclusterを平均したものにfitした時の様子

Chi²/ndf value

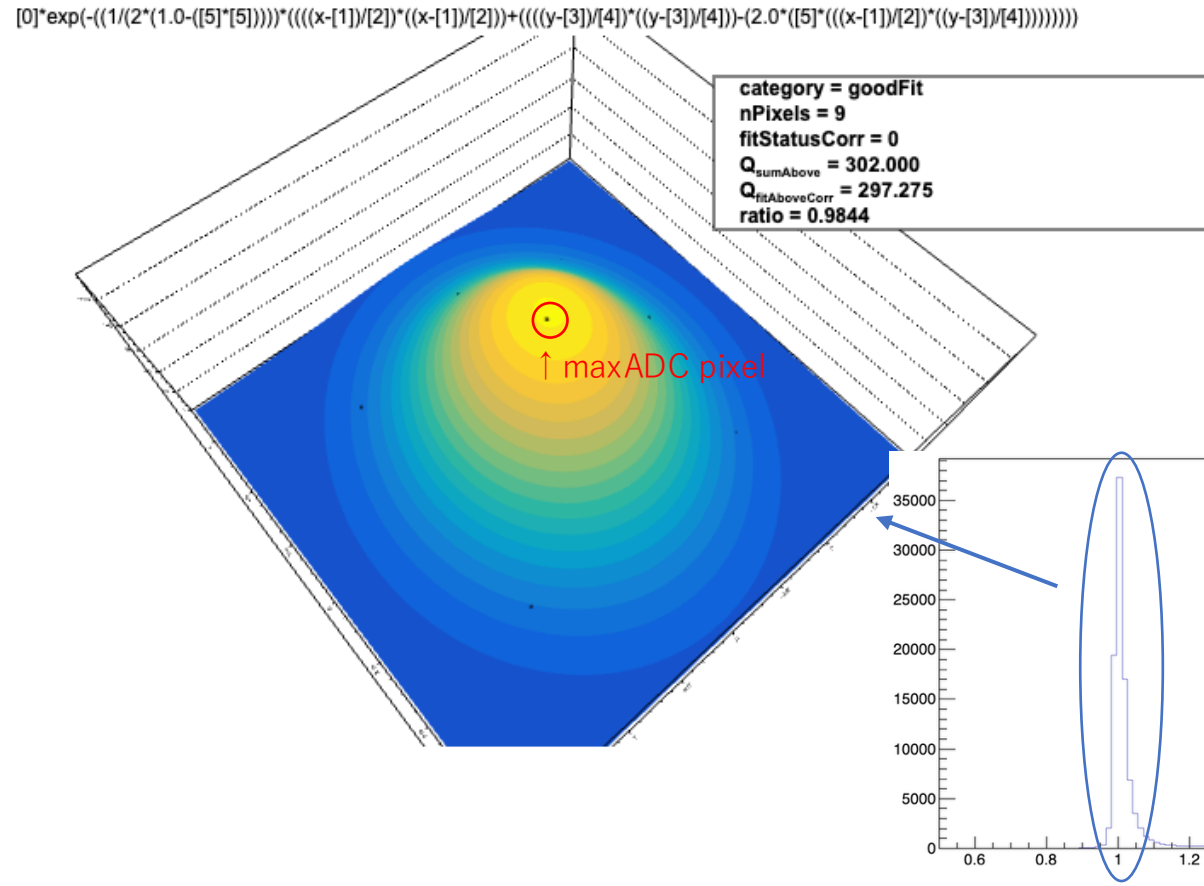
- 2D Gaussian : 230/118 ~ 1.95
- 2D Gaussian w/ corr : 229/117 ~ 1.96
- 2D Exp-power : 228/117 ~ 1.95
- 2D Exp-power w/ corr : 227/116 ~ 1.96
- 2D Q-Gauss : 226/117 ~ 1.93
- 2D Q-Gauss w/corr : 224/116 ~ 1.93

各フィット関数の χ^2/ndf 分布

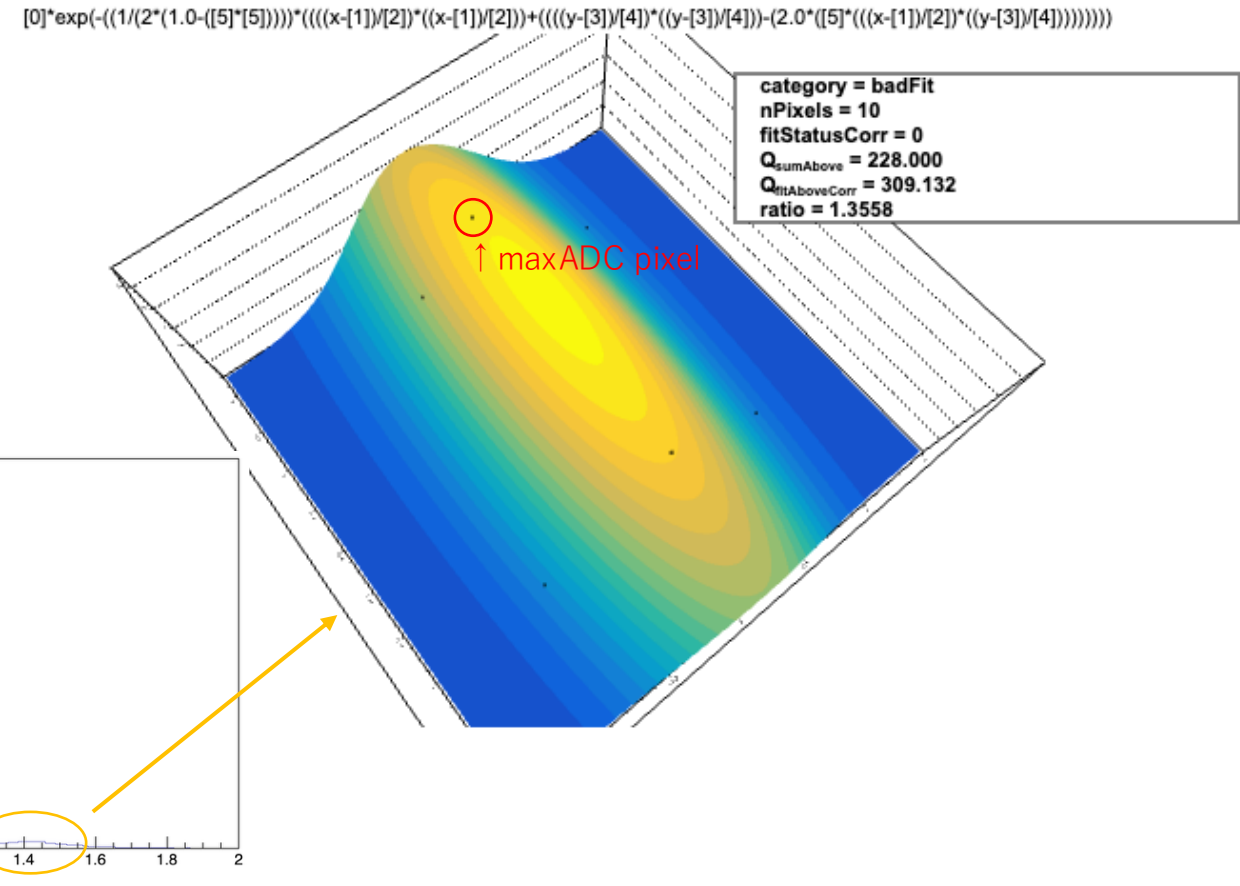


Good fit example & bad fit example

Good fit example



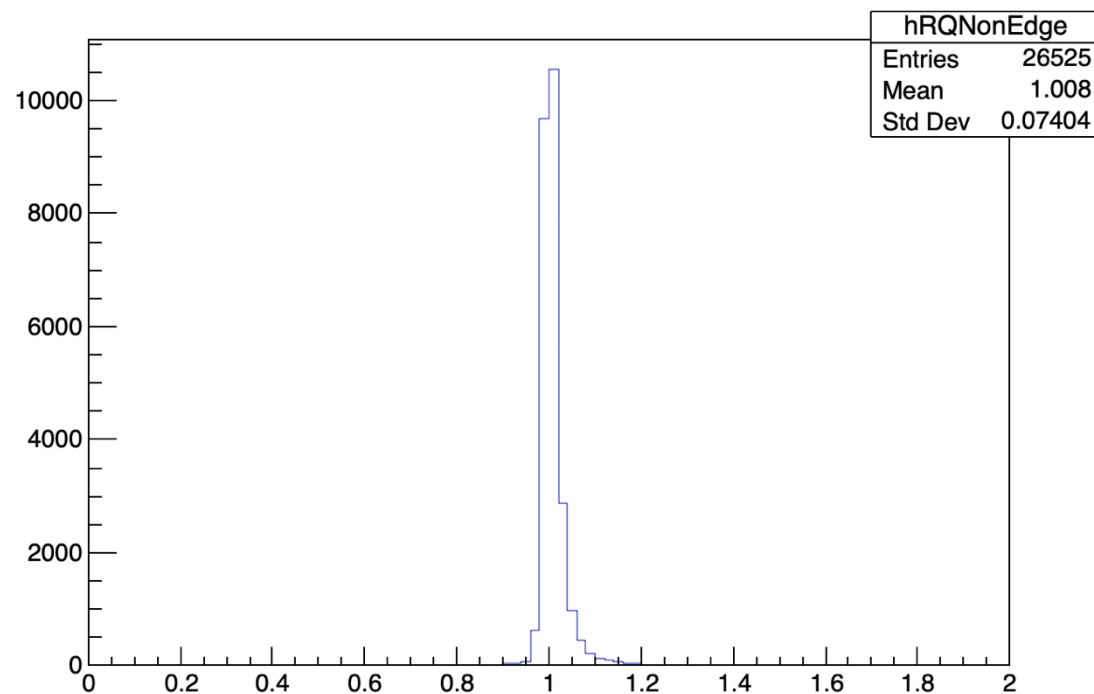
Bad fit example



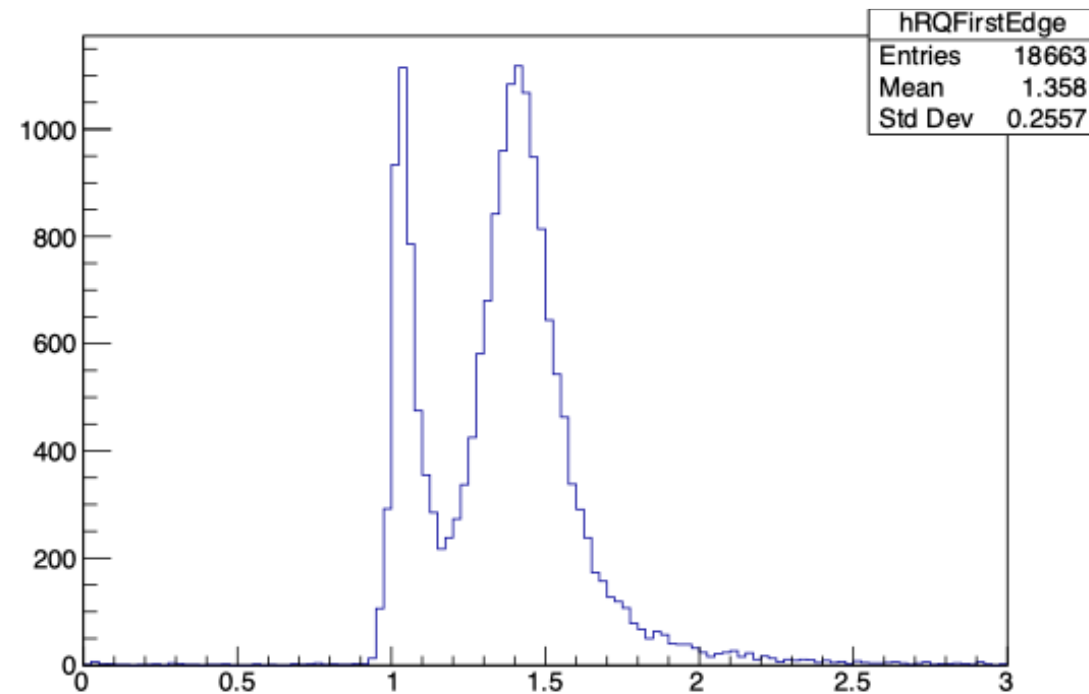
- フィットが上手くいっていない原因としては、最大のADC値を記録したpixelが分布の端にあることで特定の方向にフィット関数が広がってしまったことが考えられる

maxADC pixelがADC分布の端にある場合

maxADC pixelがADC分布の端にない



maxADC pixelがADC分布の端にある



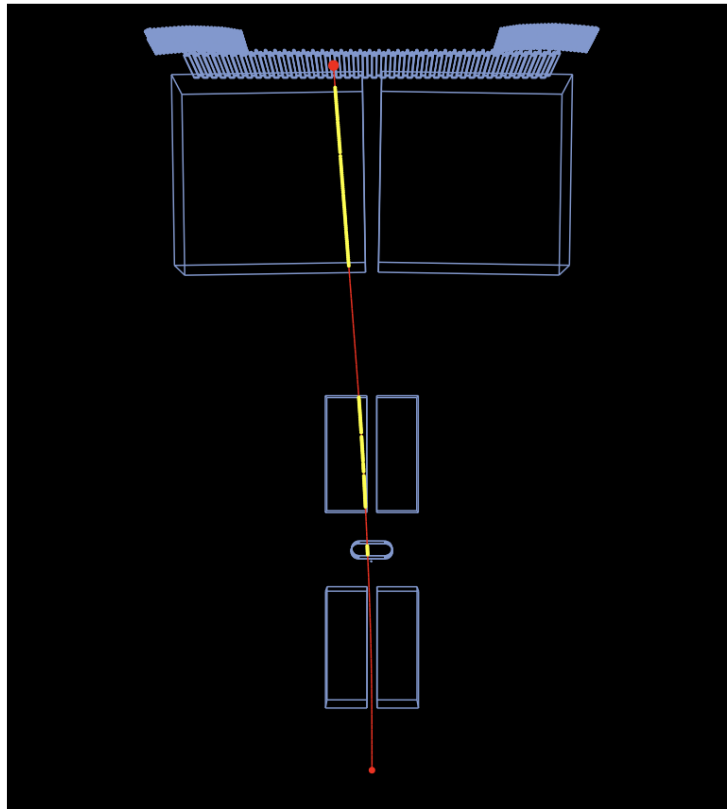
- 対処法としてはフィット関数が必要以上に広がらないように、閾値面での元のpixel分布程度で広がりを抑えてあげていることを考慮している

Right Side Track(RST) と Wrong Side Track(WST)

27

RST

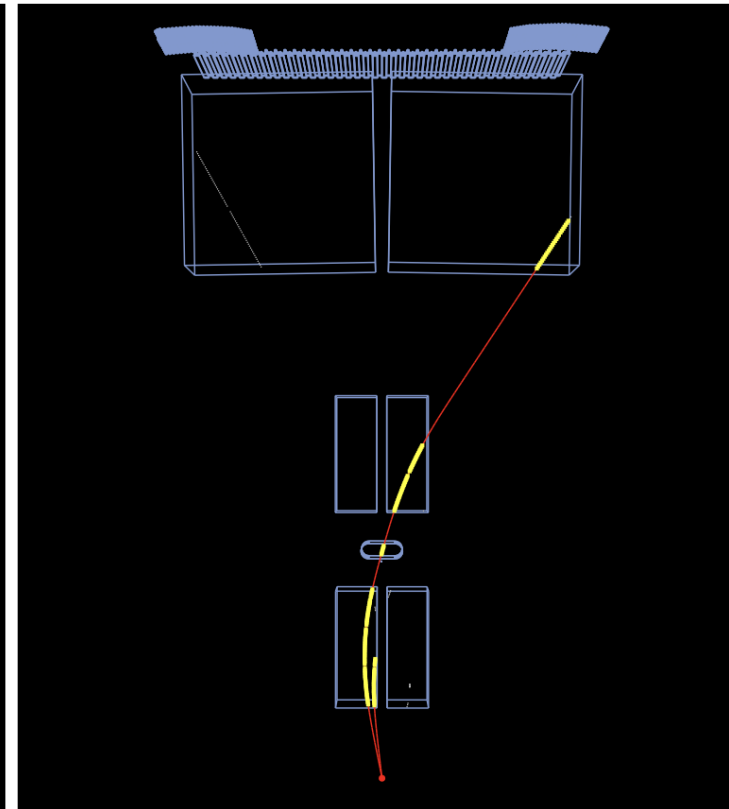
$$q \cdot p_x > 0$$



(a)

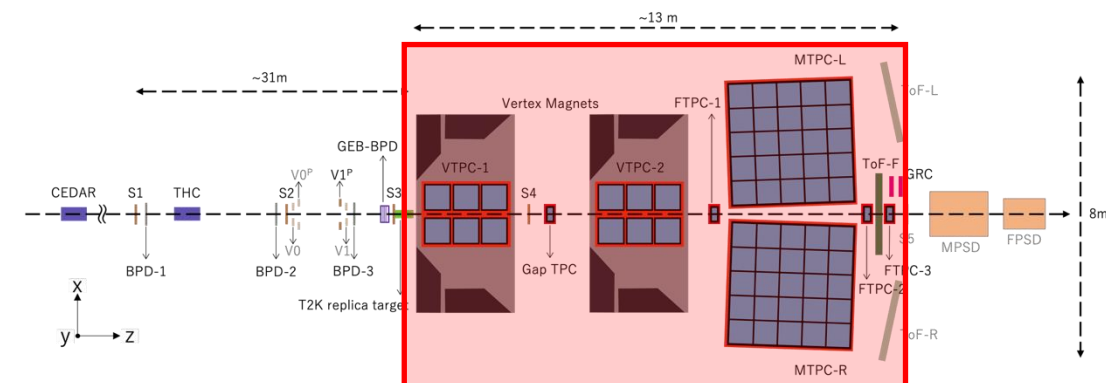
WST

$$q \cdot p_x < 0$$



(b)

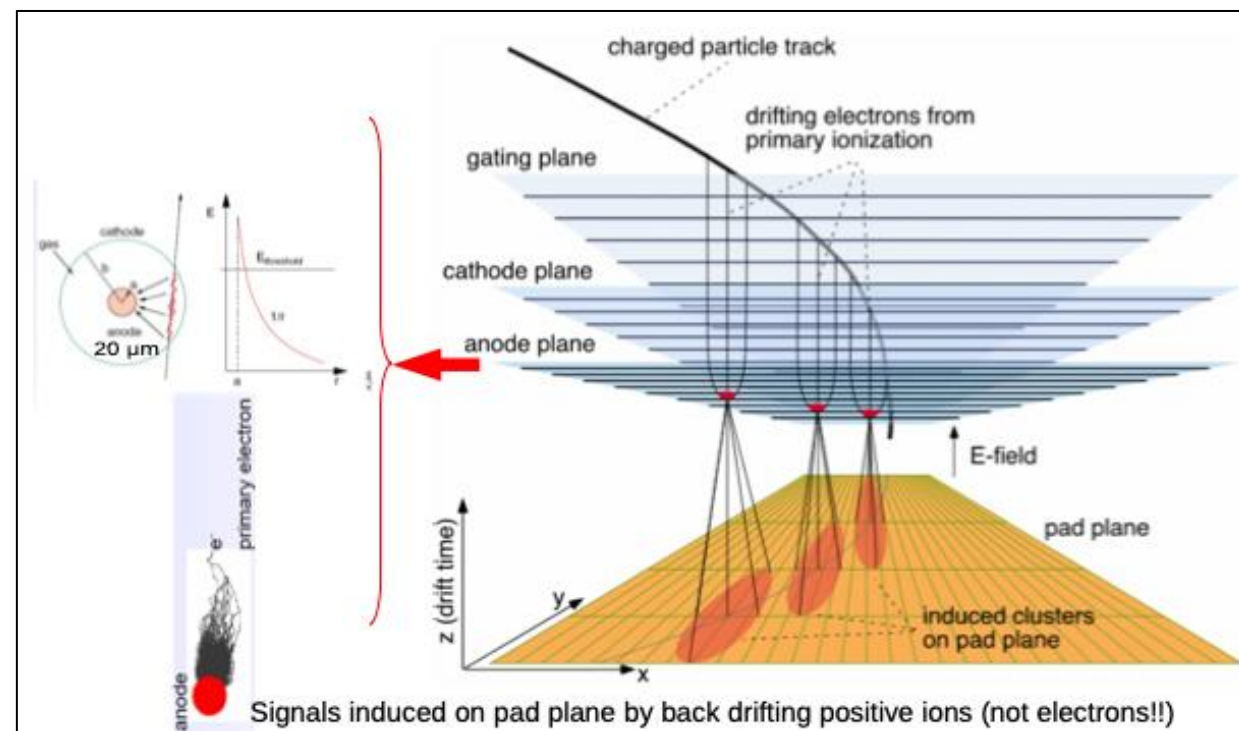
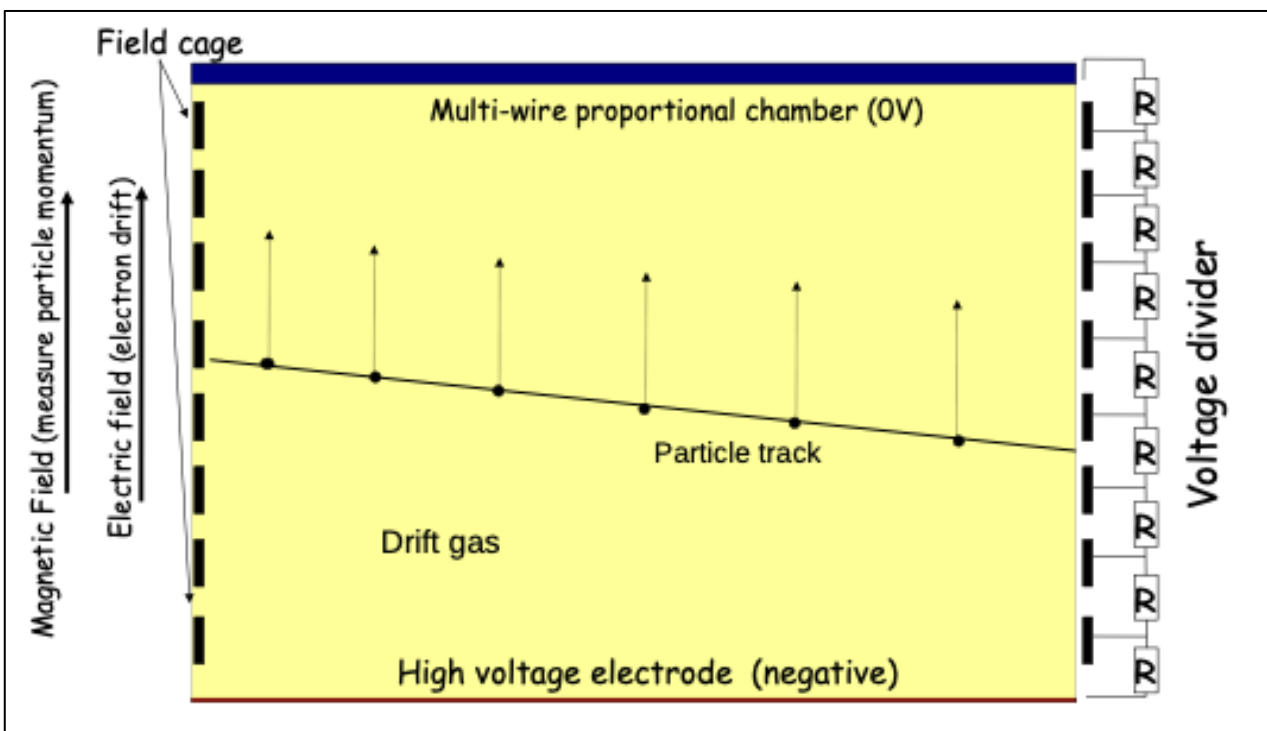
Time Projection Chamber



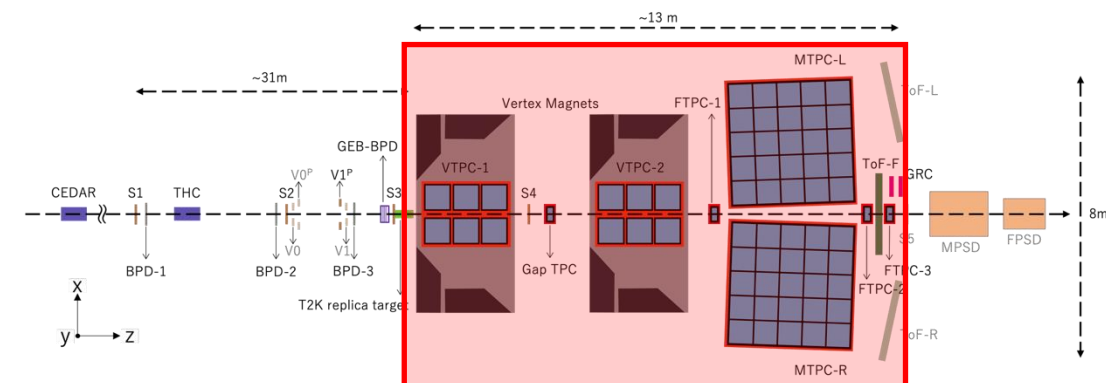
z-y 平面 (ドリフト面)

- 内部にはガスを封入 ($\text{Ar}:\text{CO}_2 = 90:10$ or $95:5$)
- 荷電粒子が通過するとArガスを電離
- y方向はドリフトの時間、z-x方向はpad上に誘起された電流から特定する

Induced current

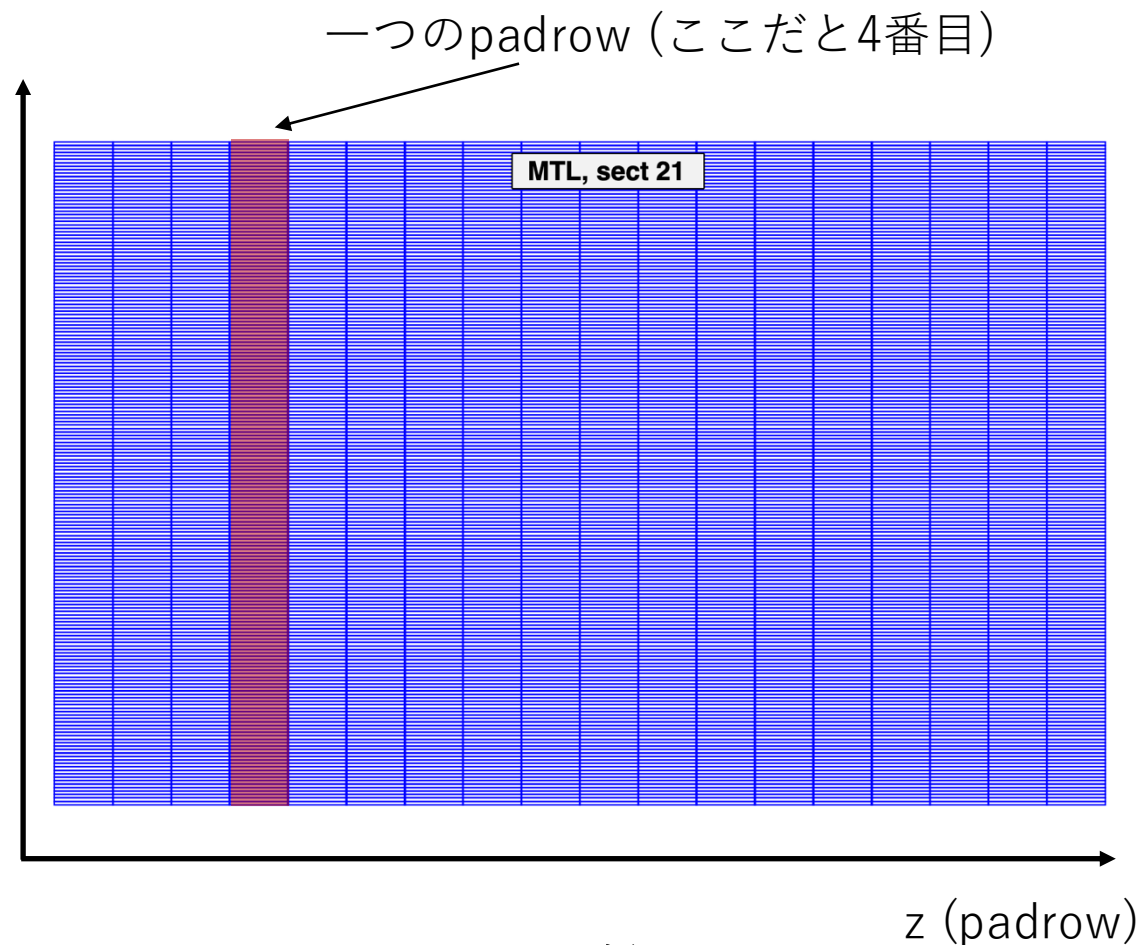


Time Projection Chamber



	VTPC-1	VTPC-2	MTPC-L/R
size (L×W×H) [cm]	250 × 200 × 98	250 × 200 × 98	390 × 390 × 180
No. of pads/TPC	26 886	27 648	63 360
Pad size [mm]	3.5 × 28(16)	3.5 × 28	3.6 × 40, 5.5 × 40
Drift length [cm]	66.60	66.60	111.74
Drift velocity [cm/μs]	1.4	1.4	2.3
Drift field [V/cm]	195	195	170
Drift voltage [kV]	13	13	19
gas mixture	Ar/CO ₂ (90/10)	Ar/CO ₂ (90/10)	Ar/CO ₂ (95/5)
# of sectors	2 × 3	2 × 3	5 × 5
# of padrows	72	72	90
# of pads/padrow	192	192	192, 128

x (pad number)



MTPC-Lのsector-21だと

- padの大きさ : 40 mm × 3.6 mm
- padの数 : 18 rows × 192 pads