

# 3 $^3\text{H}$ 寿命直接測定のための $\text{PbF}_2$ カロリメータの性能評価(2)

阪大理 赤石 貴也

1

for the J-PARC P73 collaboration

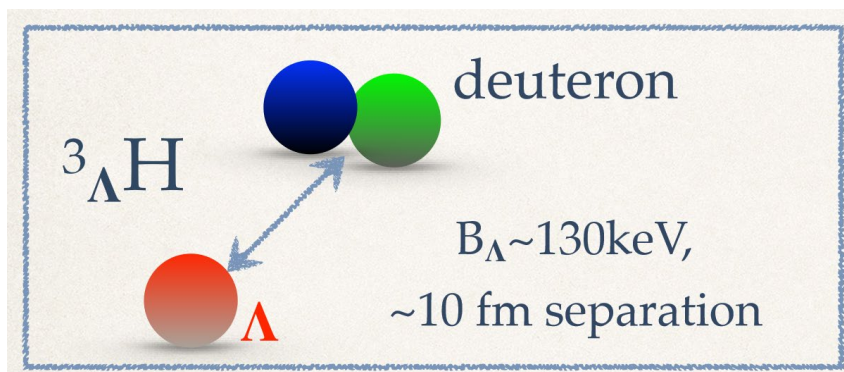
# ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命測定

## ■ 物理背景

➤ ハイパートライトン ( ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ ): p, n,  $\Lambda$  が束縛した最も軽いハイパー核

✓ 束縛エネルギー:  $B_{\Lambda} = 130 \pm 50 \text{ keV}$

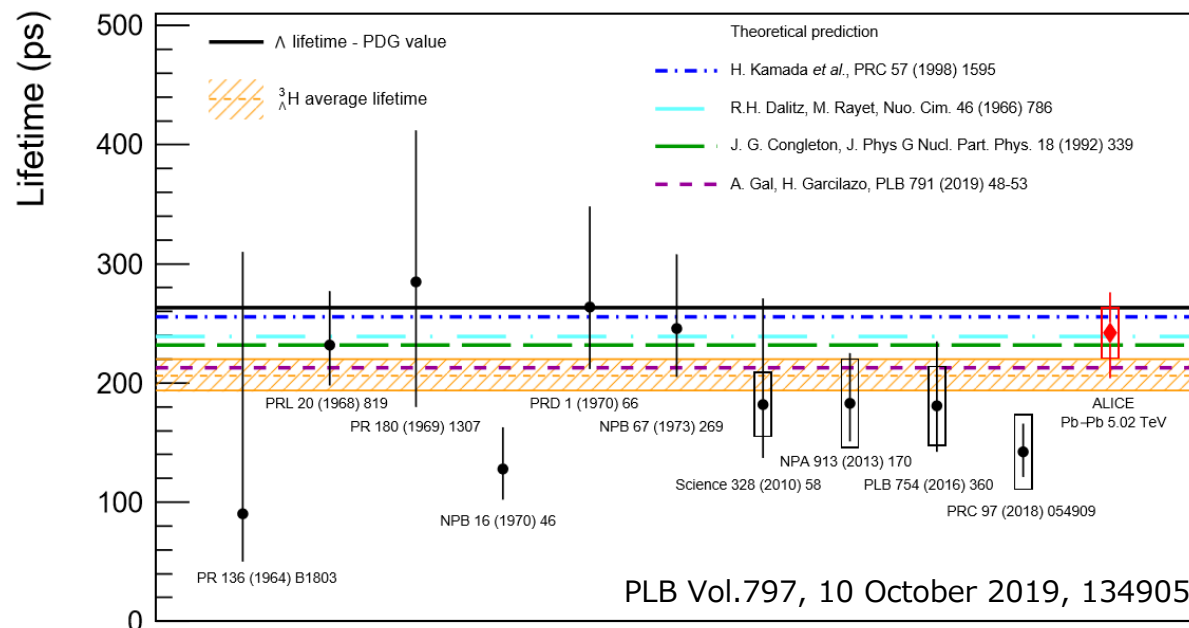
⇒  $\tau \approx 263 \text{ ps}$  (free  $\Lambda$  の寿命に近いと期待)



✓ 近年の重イオン実験結果:  $\tau \approx 180 \text{ ps}$ ...

不変質量にてハイパートライトンを同定  
飛行距離ごとのイベント数にて導出

⇒ 異なる実験手法での測定が必要

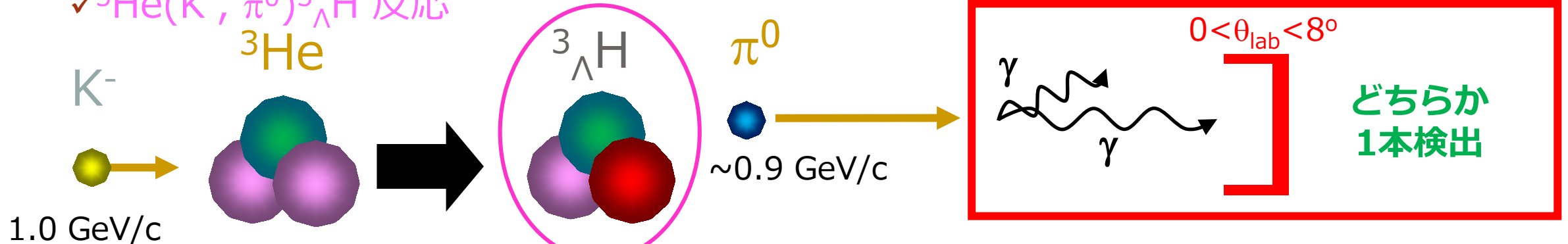


# J-PARC P73実験

## ■ 実験手法

### ➤ J-PARC K1.8BR Beamline

✓  ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$  反応



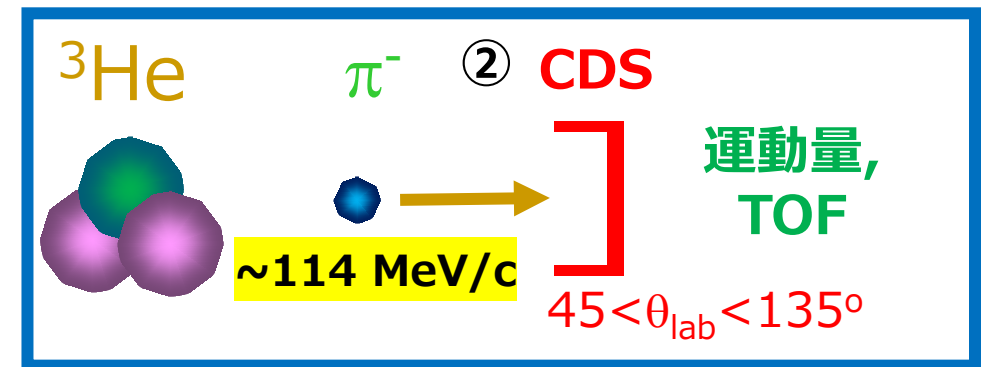
### ① 前方 $\gamma$ 線のタグ

$\Rightarrow {}^3_{\Lambda}\text{H}$ は小さい反跳運動量  
 $\rightarrow$ 物質中で寿命より短い時間で静止

### ② Cylindrical Detector System (CDS)

$\Rightarrow$ 崩壊後の $\pi^-$ の単一運動量を測定

${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を同定して $\pi^-$ のDecay timeから寿命を導出

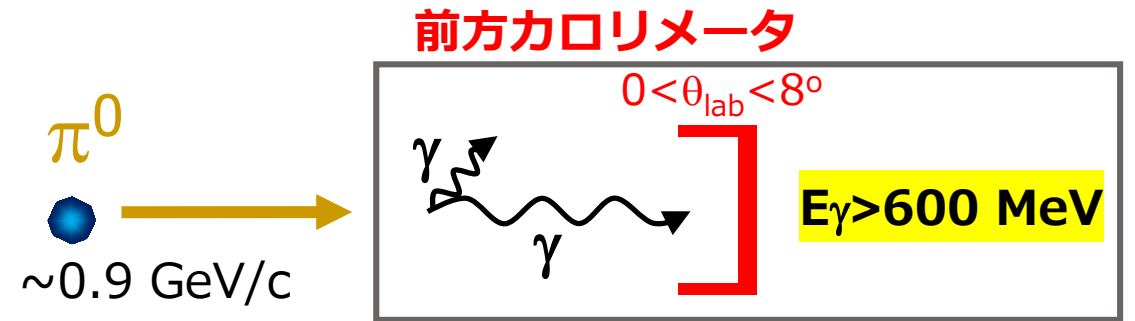


# 前方カロリメータの要求

- **ポイント: ハイパー核生成事象の $\gamma$ 線をタグする**

- **要求**

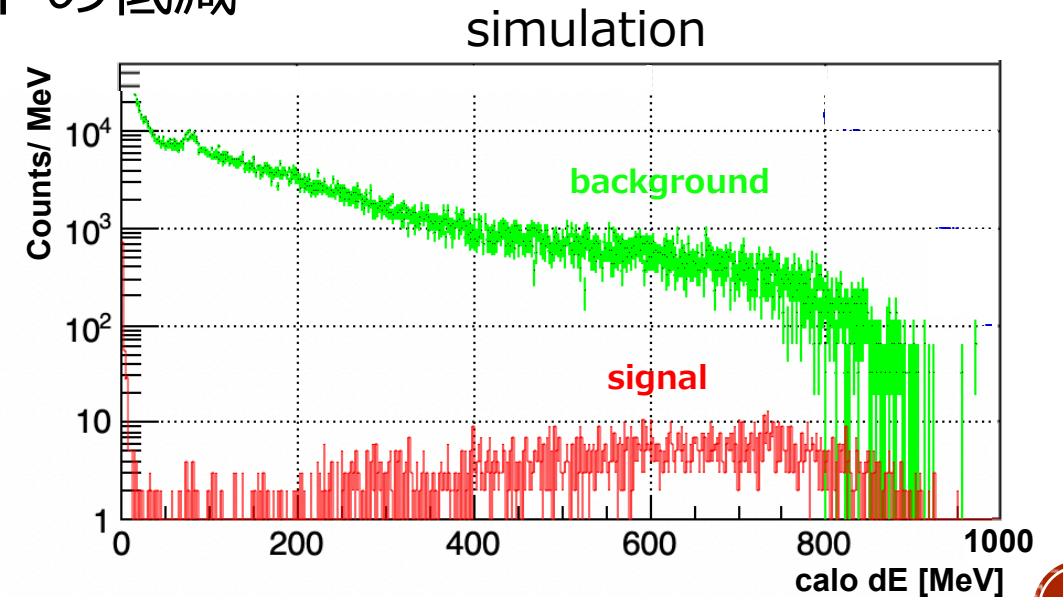
- **ビームライン上に設置**
  - ✓ **早い応答**
  - ✓ **高い放射線耐性**



- **エネルギーカットによるバックグラウンドの低減**

- ✓  $\Lambda, \Sigma$ からの崩壊が主  
カロリメータでエネルギーが広く分布  
 ${}^3_\Lambda\text{H}$ 生成時の $\gamma$ 線のエネルギーでカット  
⇒ エネルギーの低いBGを多く除去

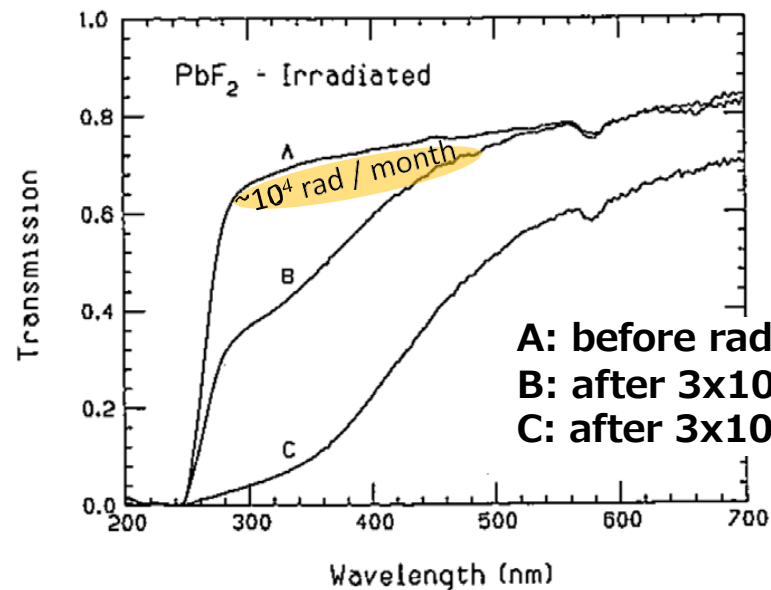
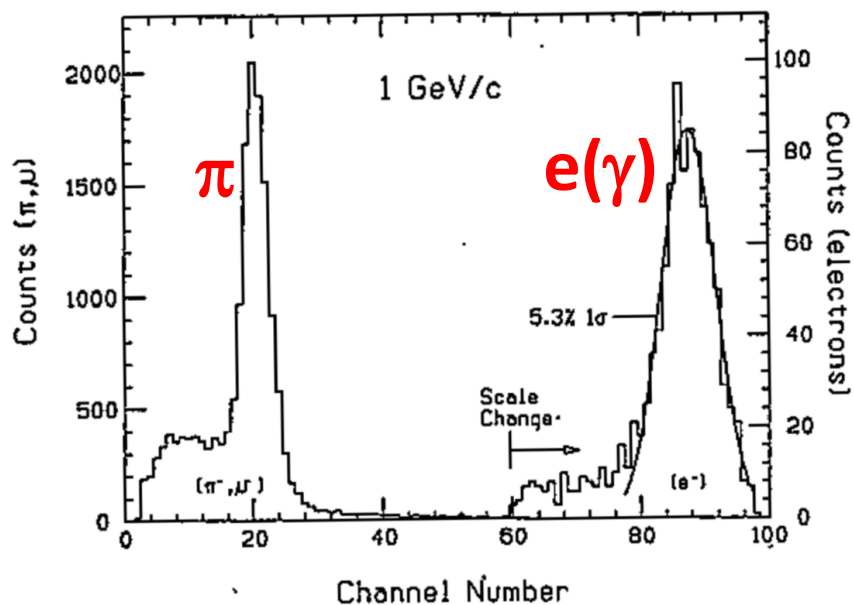
- ✓ **エネルギー分解能:  $< 10 \text{ \%}/\sqrt{E(\text{GeV})}$**   
⇒ エネルギーカットする値に影響



# PbF<sub>2</sub> カロリメータ

## ■ 基本情報

Radiation length	Moliere radius	Density	Refractive index	Resolution	Signal length
0.93 cm	2.22 cm	7.77 g/cm <sup>3</sup>	1.82	5 %/ $\sqrt{E(\text{GeV})}$	2ns



D.F. Anderson et al.,  
NIMA, 290, 385, (1990)

- チェレンコフ光によるカロリメータ
  - ✓ 応答が早い
  - ✓ ハドロンとe, γの識別

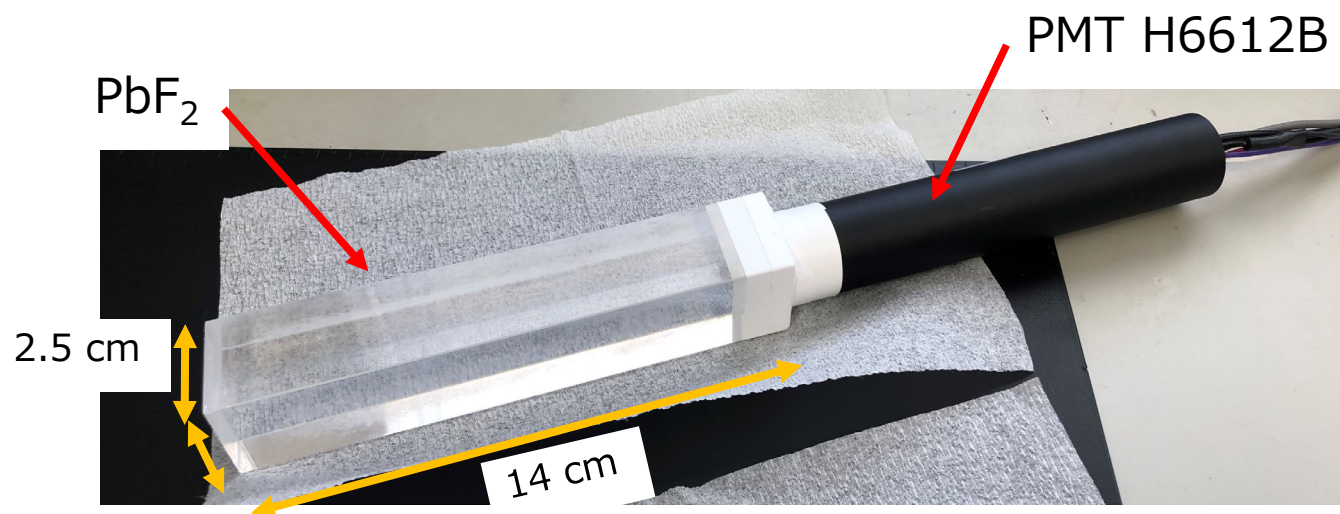
- 高い放射線耐性
  - ✓ J-PARCのbeamtime1ヶ月で影響なし

⇒ビームライン上に設置するのに適切

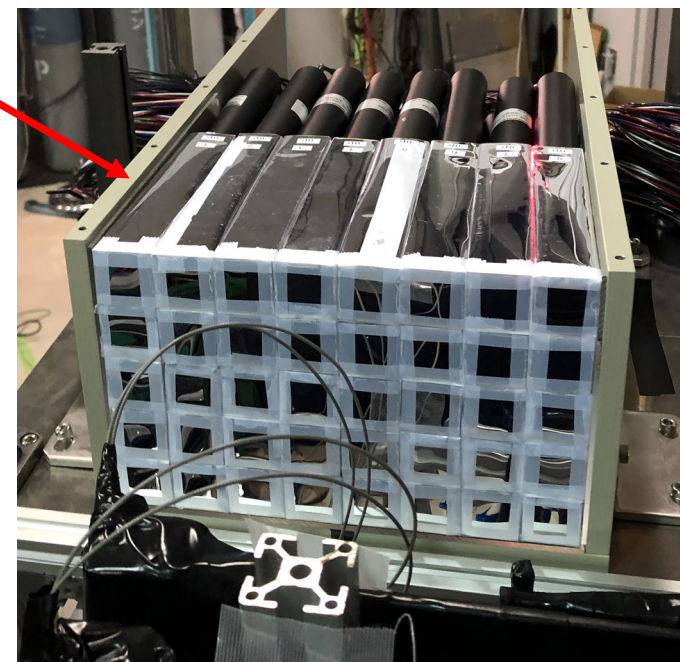


# アセンブリ

- $\text{PbF}_2$  カロリメータ 40 セグメントを使用(縦5×横8)
  - ✓ PMT: H6612B
  - ✓ 結晶とPMTの接着: 紫外線硬化樹脂, オプティカルセメント
  - ✓ 反射材: 鏡面反射
  - ✓ QDC: CAEN v792



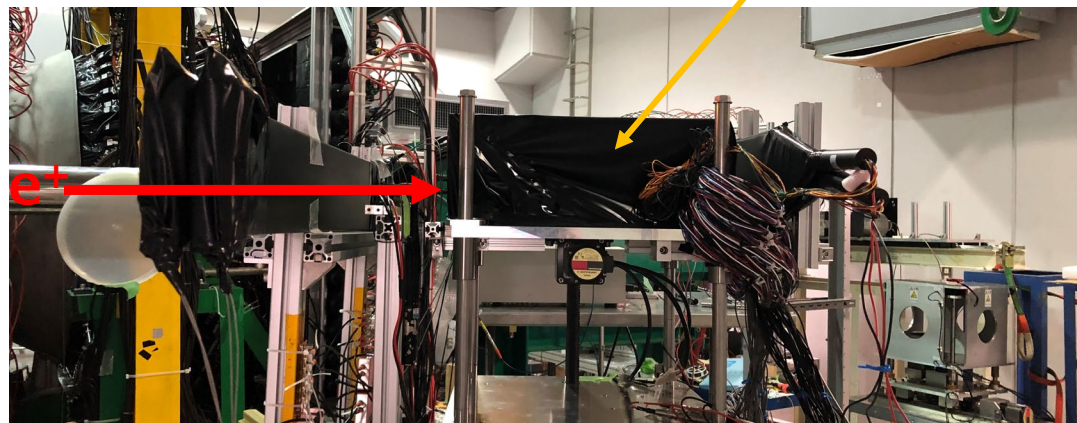
磁気シールド



# PbF<sub>2</sub>カロリメータ動作実験

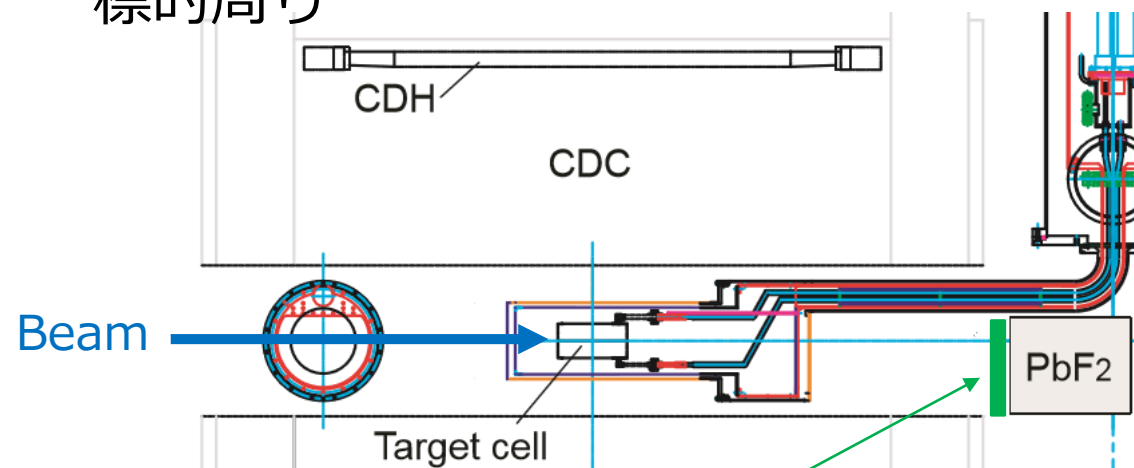
- 2019/12 ELPH
  - 100—800 MeV/c 陽電子ビーム
  - 反射材: ESR
    - ⇒エネルギー応答,  
エネルギー分解能のチェック

実験セットアップ



- 2020/06 J-PARC K1.8BR
  - 1GeV/c ハドロンビーム
    - ⇒Feasibility study(物理ラン)  
4He標的で実験を実施
    - ✓反射材: アルミナイズドマイラー
  - カロリメータ1セグメントの最大レート:  
80 k/1 spill(2 s)

標的周り



# 陽電子での応答@ELPH

- 陽電子ビームを照射: 100–800 MeV/c
  - エネルギーの和を取る
    - ✓ 中心とその周りのある閾値(3.5 MeV)を超えたセグメント

エネルギー分解能  
(セグメントの中心: 5×5 mm<sup>2</sup>)

$$f = \sqrt{\left(\frac{a_0}{\sqrt{E(\text{GeV})}}\right)^2 + \left(\frac{a_1}{E(\text{GeV})}\right)^2 + b^2}$$

山形大学 吉田祐樹氏の修論より

統計項  $a_0: 3.3 \pm 0.2 \%$

ノイズ項  $a_1: 2.2 \pm 0.4 \%$

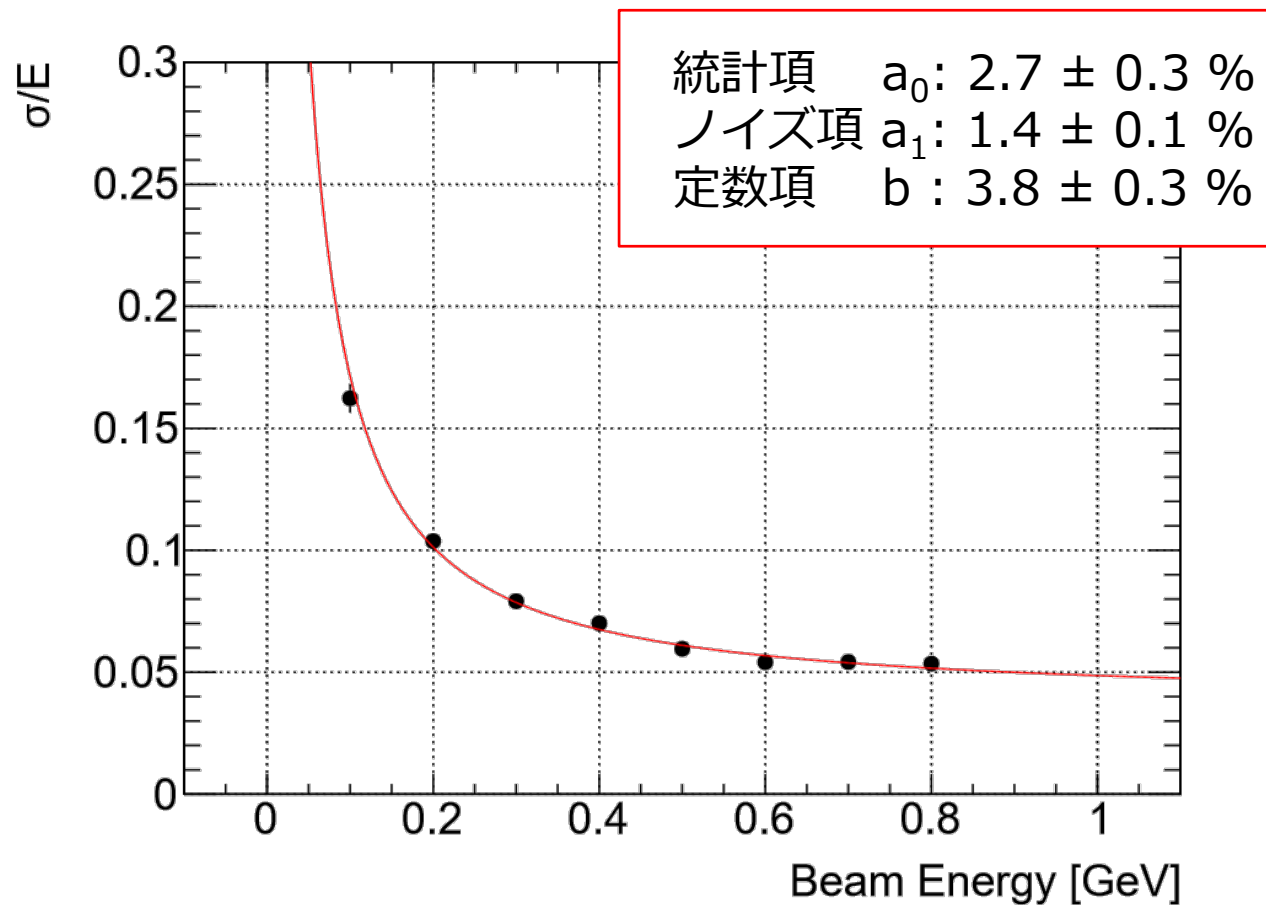
定数項  $b: 3.9 \pm 0.0 \%$

(結晶サイズ: 20×20×100 mm<sup>3</sup>)

PMT: 3/4 インチ R4125UV

テフロンテープ

シリコングリース OKEN – 6262A)





# ハドロン, 電子の応答@J-PARC K1.8BR

- ハドロンビームを照射(電子も混在): 1 GeV/c

- Time-of-Flightで $\pi$ , K, pbarを選択

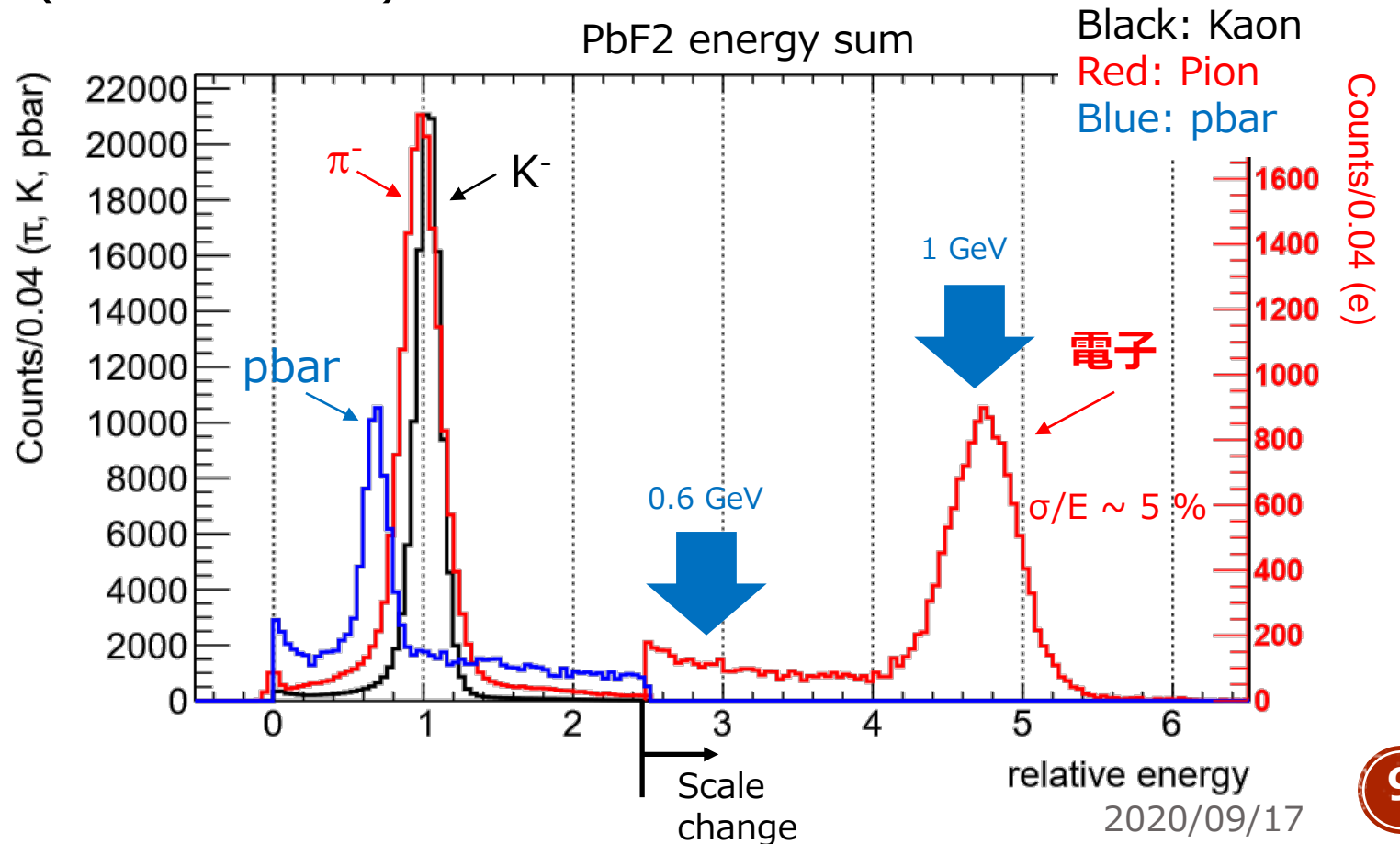
- エネルギーの和を取る

- ✓ 中心とその周りのある閾値(3.5 MeV相当)を超えたセグメント

- K: $\pi$ :pbar=  
1.0:9.9:0.68

- 電子とハドロンを分離

⇒期待通り動作



# ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成のテスト実験

## ■ ${}^4\text{He}(\text{K}^-, \pi^0){}^4_{\Lambda}\text{H}$ 反応

➤ 解析コンディション

✓ トリガー

Kaon(ビームライン) ×  $\gamma$ 線(PbF2)

✓ CDS

$\pi^-$ 中間子を選択, 運動量を導出

✓ Cut条件

TOF, Vertex, CDC-CDH,  
mass2, DCA cuts, dE corrections

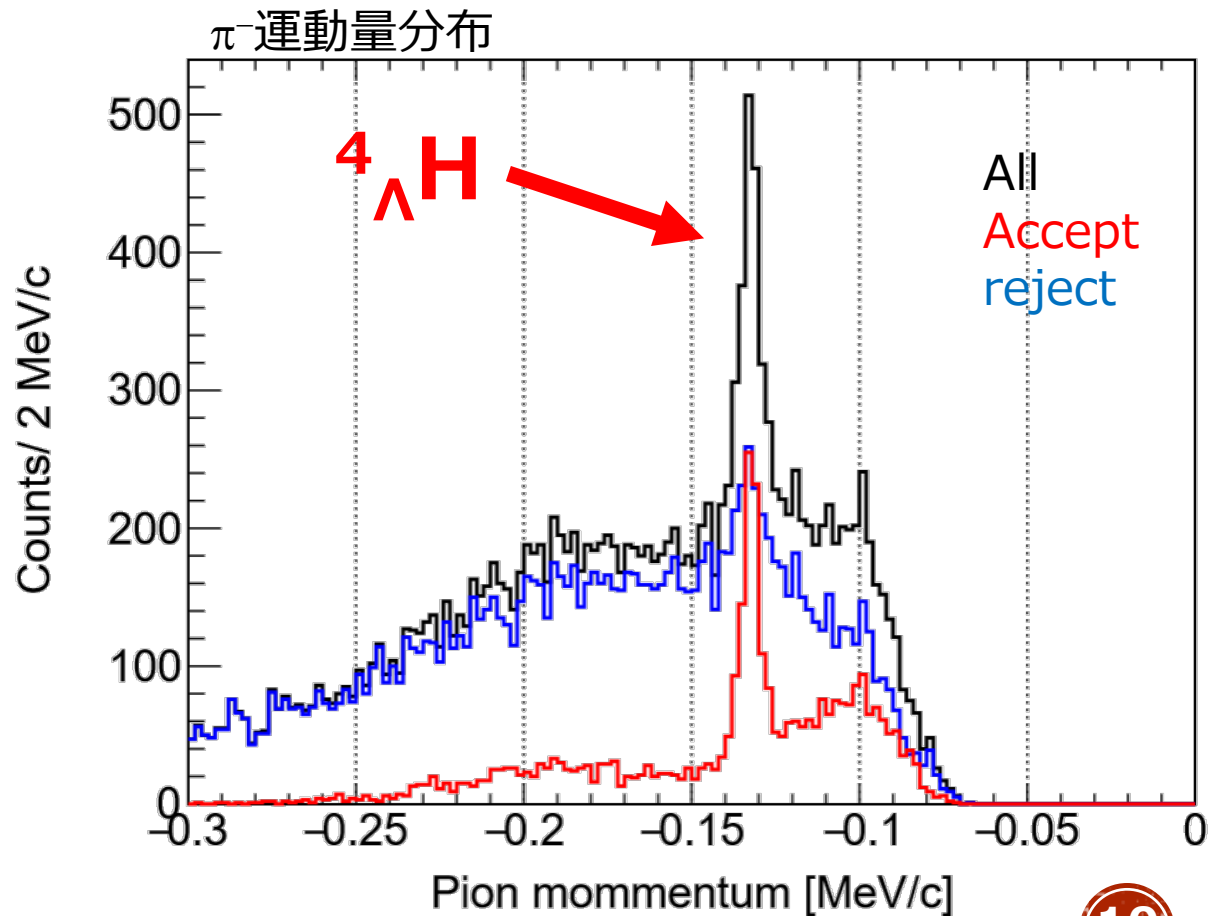
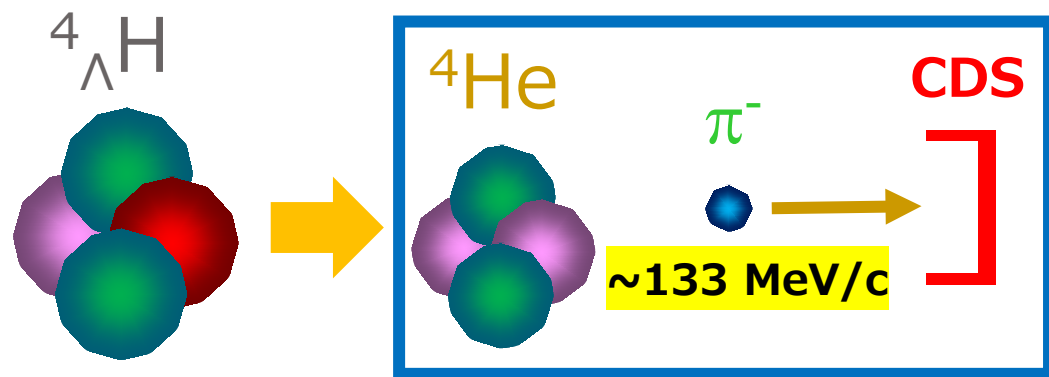
## ■ PbF<sub>2</sub>によるバックグラウンドの低減

➤  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成時の $\gamma$ 線のエネルギーでカット

⇒ S:N比が向上

カット前: 3:2    カット後: 4:1

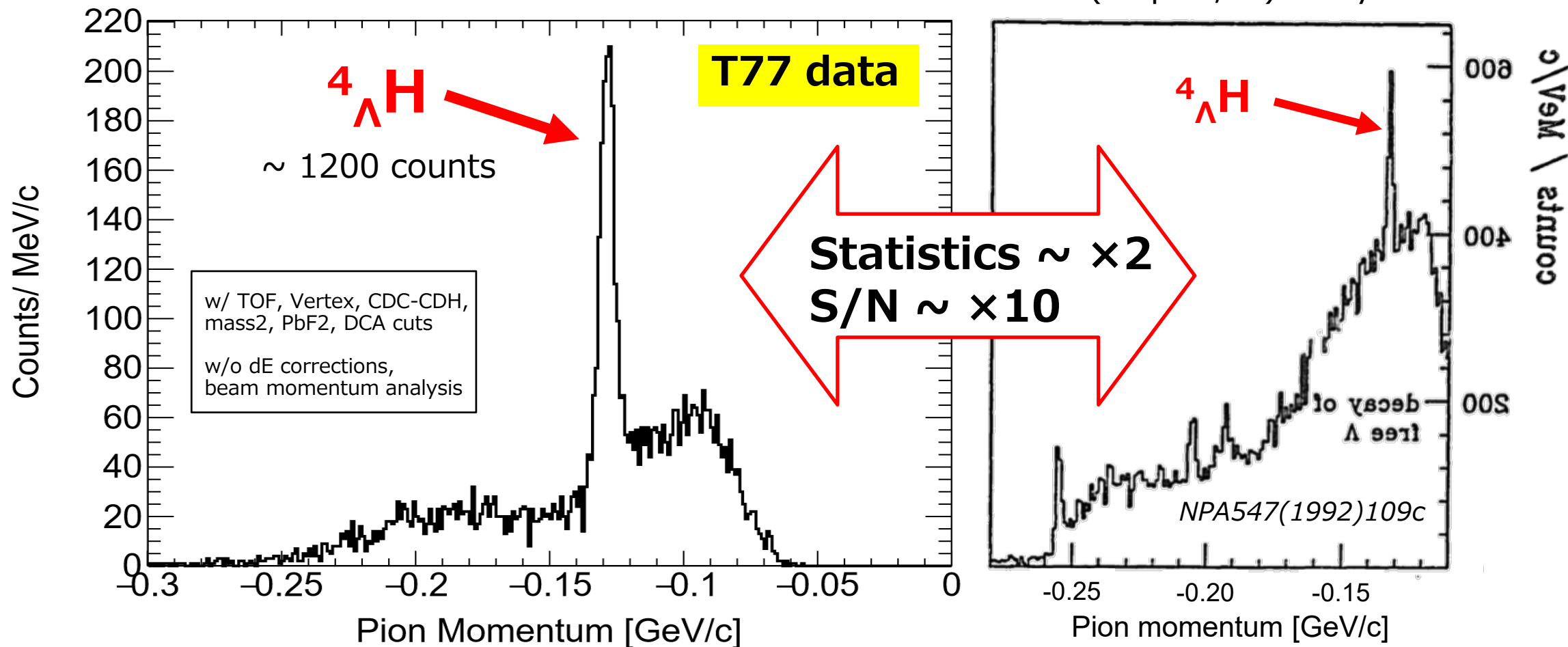
→ 寿命の精度が向上



# $\pi^-$ 運動量分布

KEK, 1992

$^4\text{He}(\text{stop } K^-, \pi^-)$  delayed



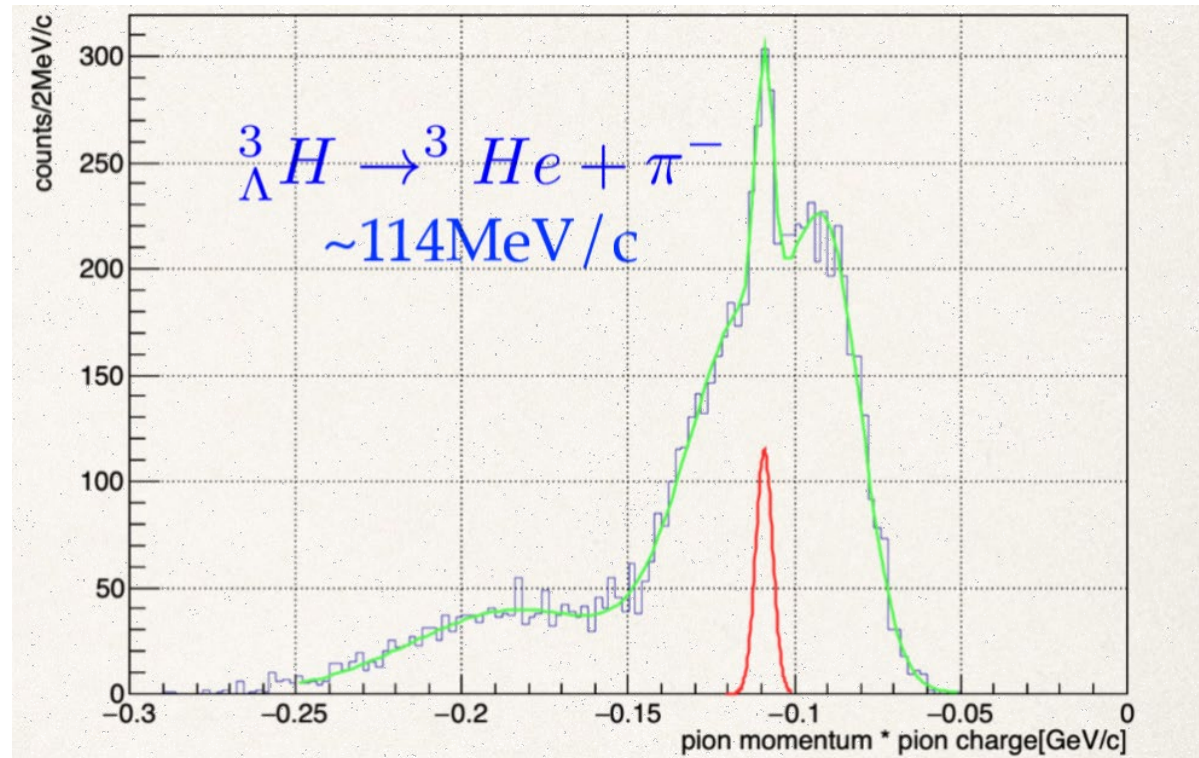
$^4_\Lambda\text{H}$ の寿命でworld recordになりうるデータを取得

$^3_\Lambda\text{H}$ も取得可能 $\Rightarrow$   $^3\text{He}$ 標的でのデータ取得に向けて準備中

# Next step: ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ cross sectionの確認

$$\sigma({}^3_{\Lambda}\text{H}) \cdot \text{BR}({}^3_{\Lambda}\text{H} \rightarrow 2\text{body}) \sim \frac{1}{3} \sigma({}^4_{\Lambda}\text{H}) \cdot \frac{1}{2} \text{BR}({}^4_{\Lambda}\text{H} \rightarrow 2\text{body})$$

期待される $\pi^-$ 運動量分布



➤ まずは1週間程度のビームタイムで測定



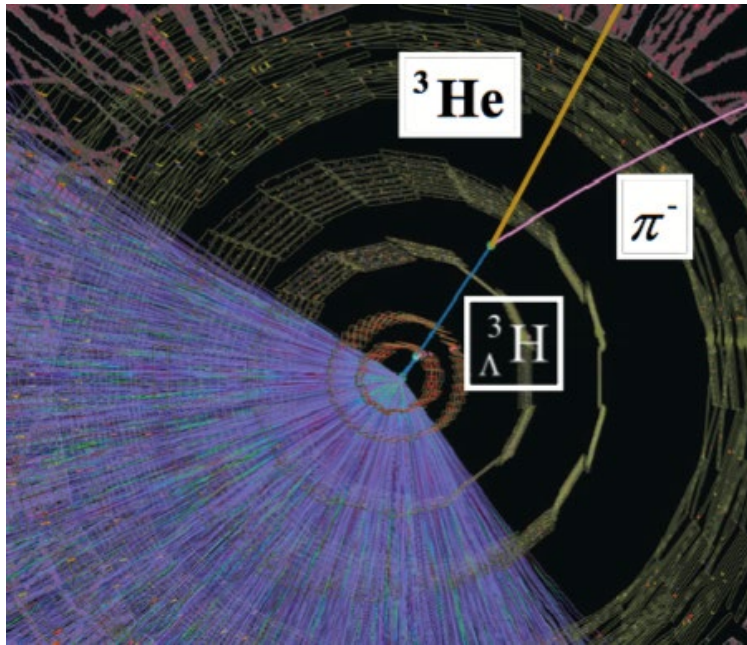
# まとめ

- ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$  反応を用いて ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命直接測定実験を計画
  - 重イオン実験とは異なる実験手法での測定
- $\text{PbF}_2$ カロリメータで動作テスト
  - 2019年12月陽電子ビームを照射
    - ✓  $\text{PbF}_2$ カロリメータの性能評価  
エネルギー分解能:  $2.7 \pm 0.3 \% / \sqrt{E(\text{GeV})}$  (陽電子, 中心位置, ESR)
  - 2020年6月ハドロンビームを照射
    - ✓ ビームライン上で十分動作
- ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成のFeasibility studyを実施
  - $\gamma$ 線のタグでハイパー核生成を識別できた
  - 物理ランにおいて $\text{PbF}_2$ でのエネルギーカットを導入
    - ⇒ S/Nの向上  $\sim \times 2$

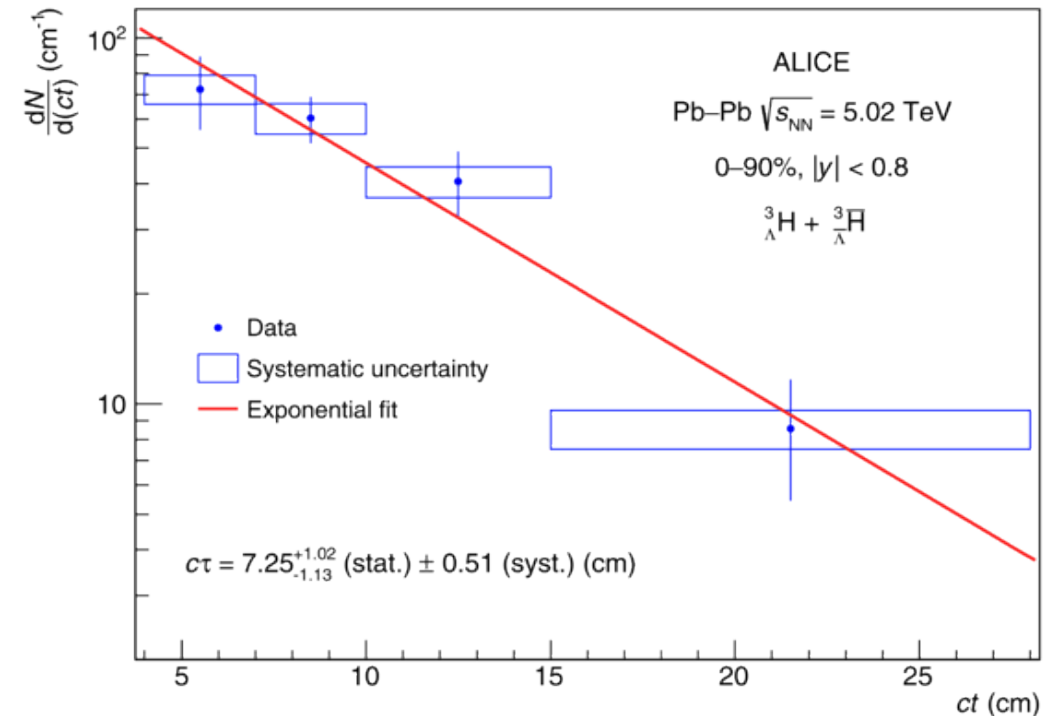
# Backup

# Introduction: heavy ion results

ALICE as an example for the experimental approach.



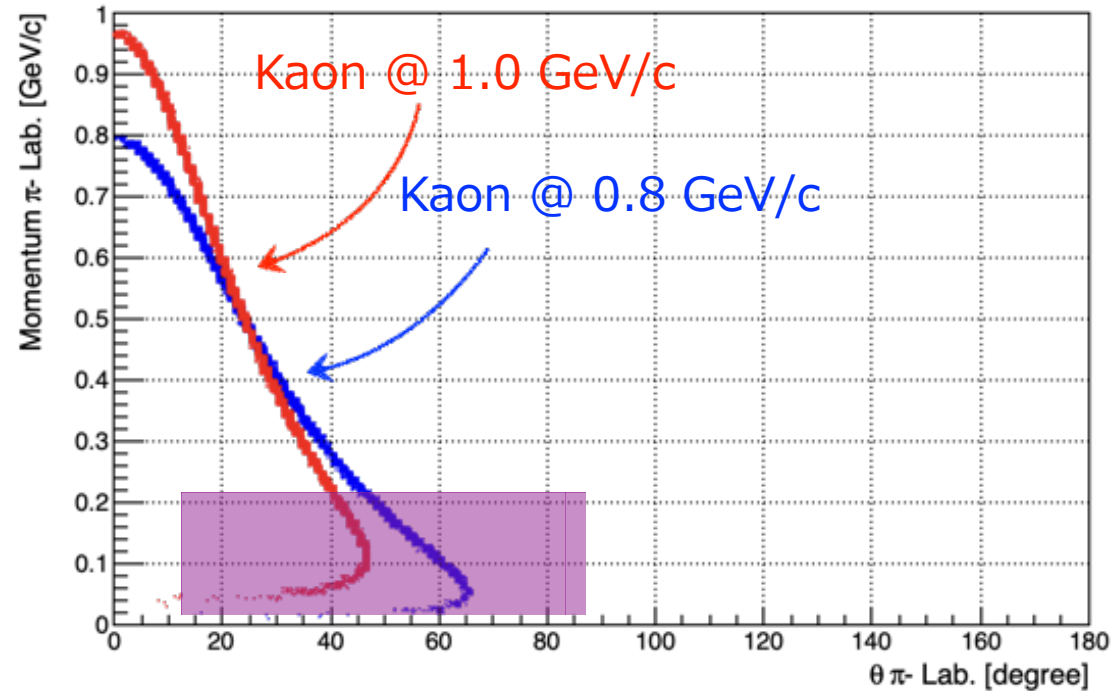
$$\tau = 240_{-31}^{+40}(\text{stat.}) \pm 18(\text{syst.})$$



Depends on tracking results for decay length and momentum as  $t = L/\beta\gamma c$

ALICE collaboration, PLB, 797 (2019) 134905

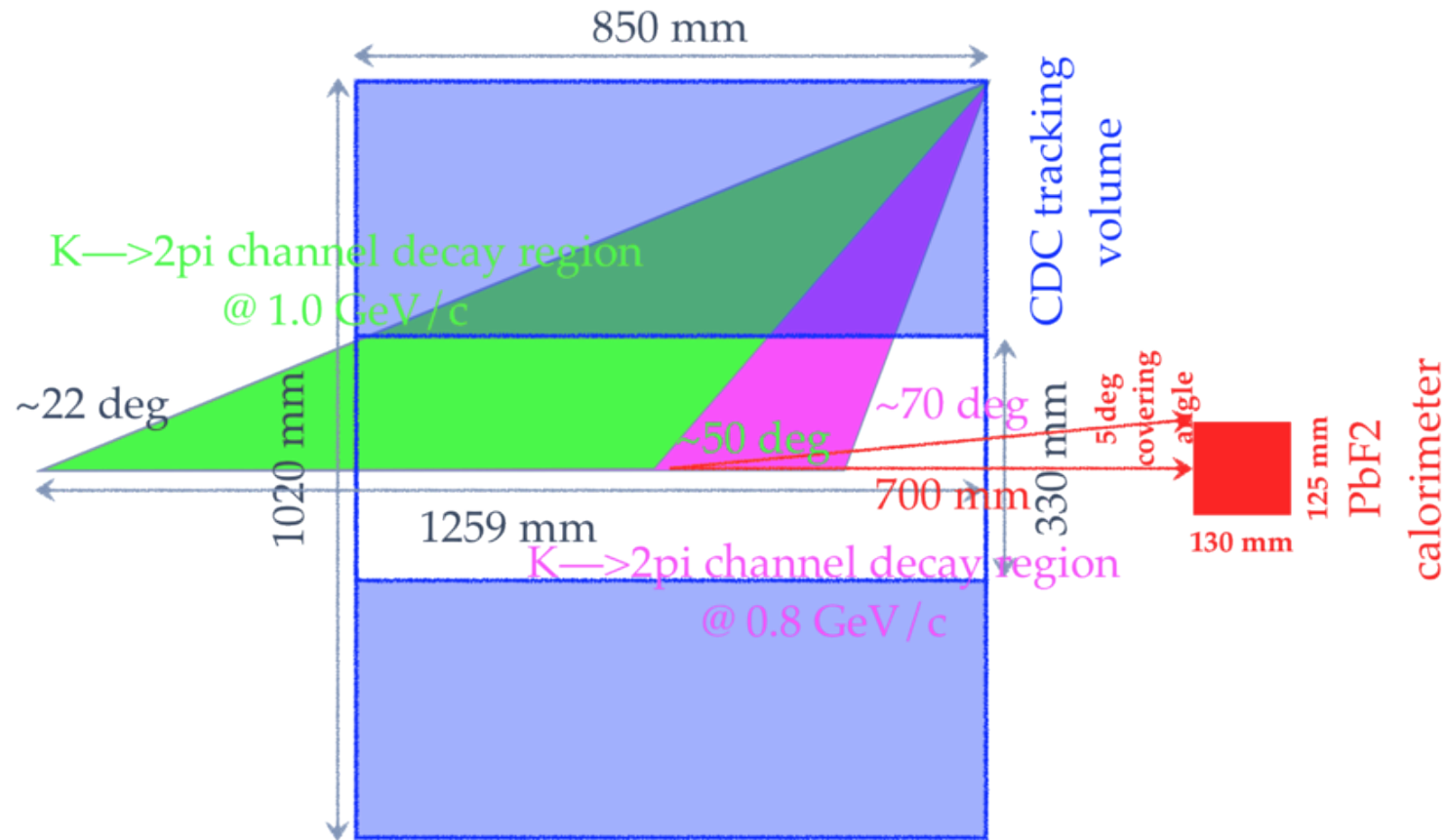
# Background events from Kaon in-flight decay



- For setup like SKS dipole magnet spectrometer, there are severe BG from K- in-flight decay.
- But in our case, a conjunction measurement of both  $\pi^-$  and  $\pi^0$ , the kaon decay backgrounds can be suppressed by using the  $\pi^-$  decay angle and decay vertex.

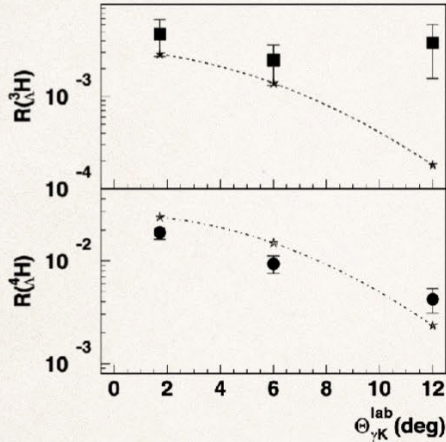


# CDC acceptance vs Kaon decay background



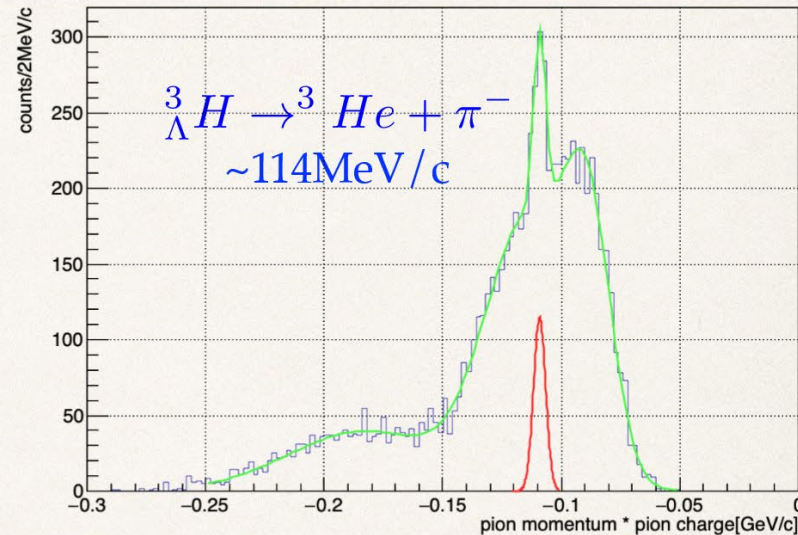
- Most of the 1.0 GeV/c K $\rightarrow$ 2 $\pi$  beam in-flight decay background is out of the acceptance of CDS spectrometer.

# Estimation for ${}^3_{\Lambda}H$ yield based on T77



$${}^3_{\Lambda}H/{}^4_{\Lambda}H \sim 1/4$$

with (e, e'K+) reaction at JLab



Expected pi- spectrum from  ${}^3He$  target

( ${}^3_{\Lambda}H/{}^4_{\Lambda}H \sim 1/3$  assumption)

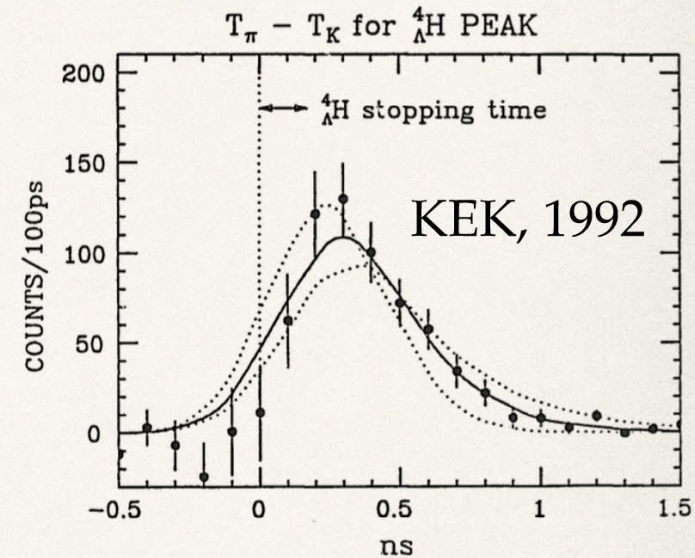
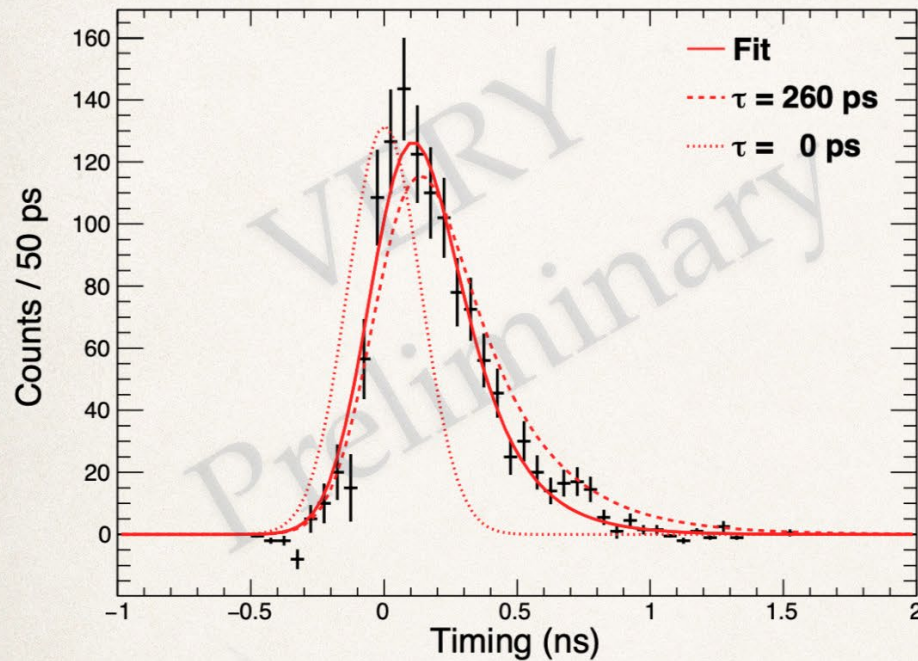
- ❖ JLab data shows  ${}^3_{\Lambda}H/{}^4_{\Lambda}H \sim 1/4$  for (e, e'K+) channel; we estimate  ${}^3_{\Lambda}H/{}^4_{\Lambda}H \sim 1/3$  for (K-, pi0) channel (thanks for Prof. Harada);
- ❖ *With a well known background from T77*, we need **5days × 70kW** beam time to measure the  ${}^3_{\Lambda}H$  production cross section

DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.242501

10



# T77 results: ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ lifetime measurement

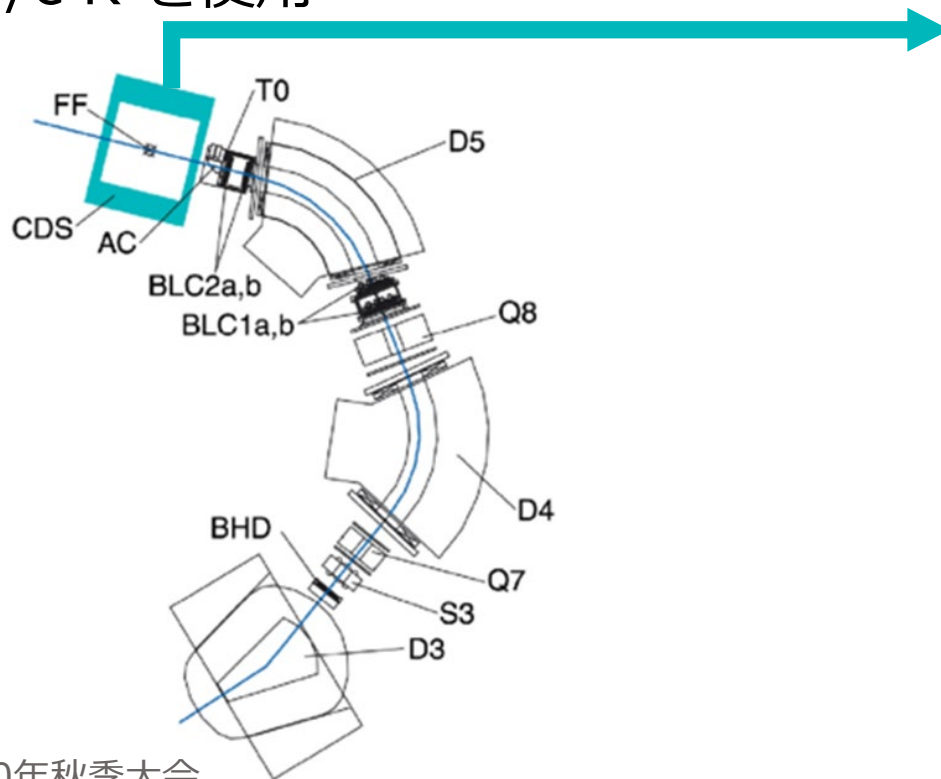


- ❖ T77  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  lifetime fitting:  $\sigma < 10$ ps (statistical only)
  - ❖ *preliminary data analysis (T77 finished on June 26th)*
- ❖ KEK data with stopped K<sup>-</sup>:  $\tau \sim 194^{+24}_{-26}$  ps
- ❖ **Improve the precision by a factor of  $\sim 3$  (3days beam time!)**

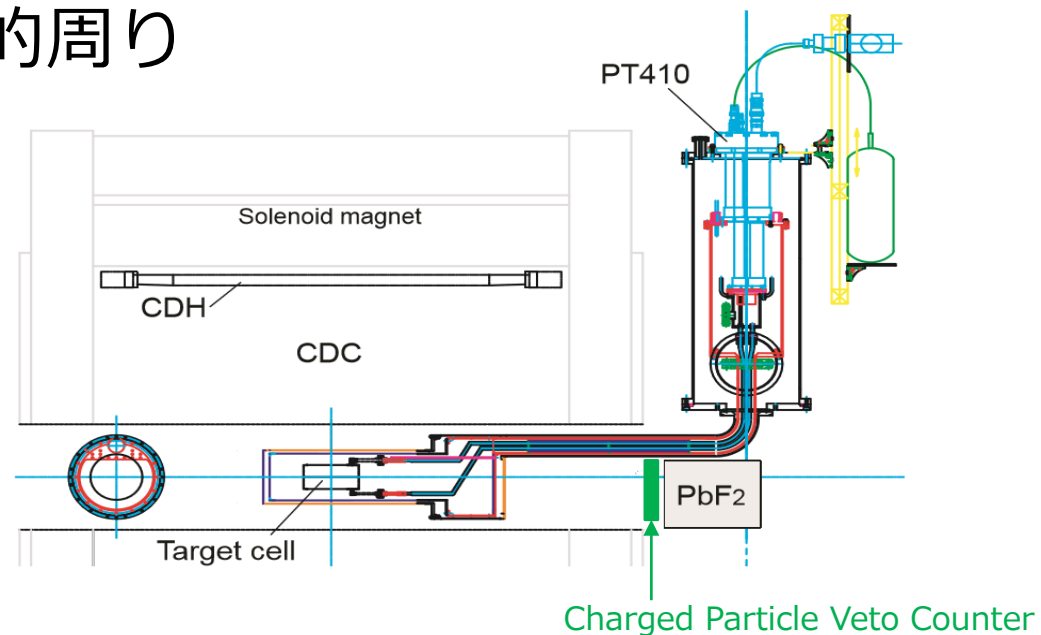
9

# 実験セットアップ

- Feasibility study
  - 2020年6月  $^4\text{He}$ 標的で実験を実施
- ビームライン
  - J-PARC K1.8BR
  - ✓ 1GeV/c  $\text{K}^-$ を使用



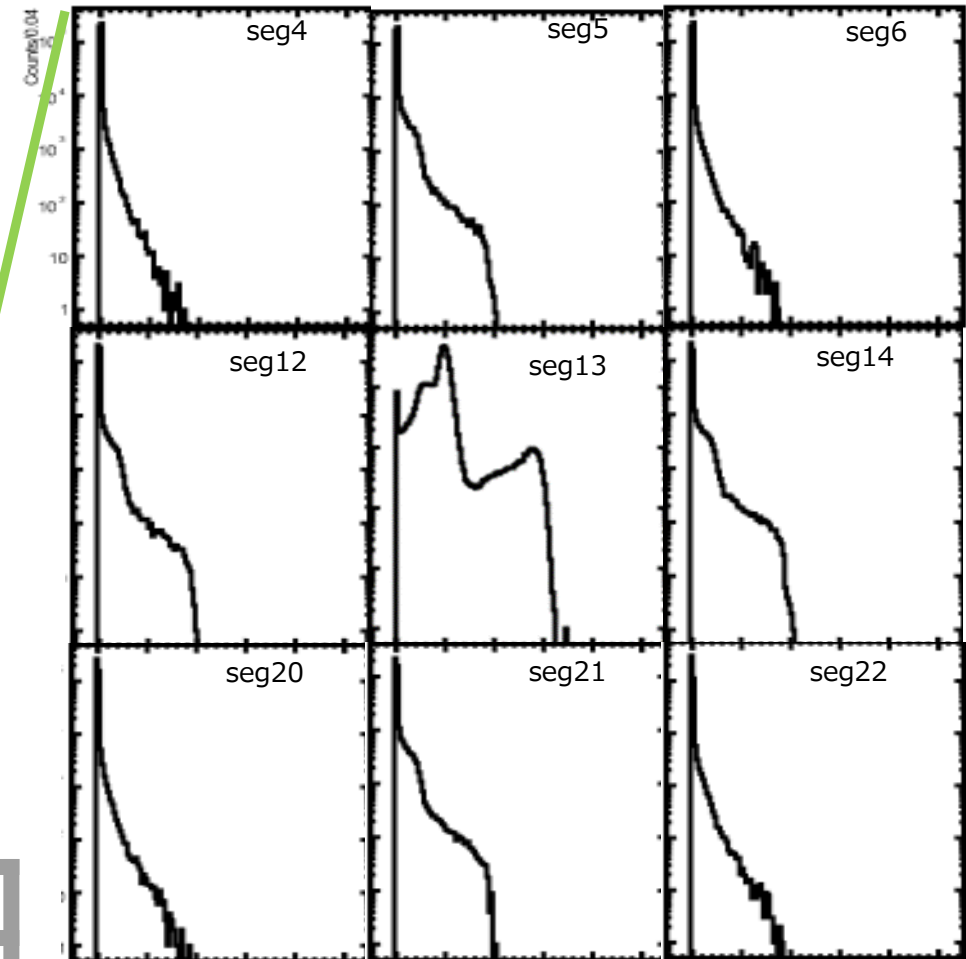
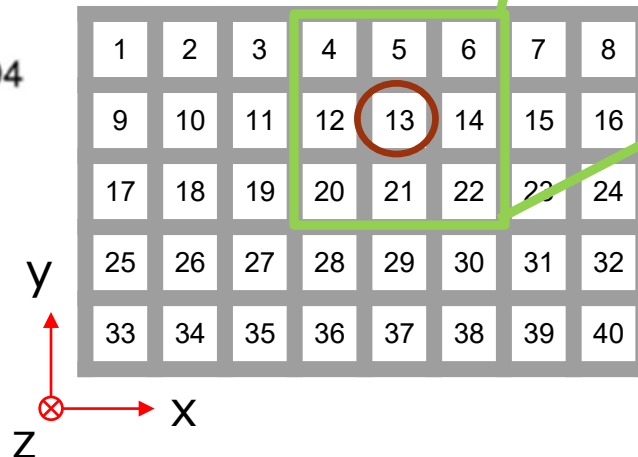
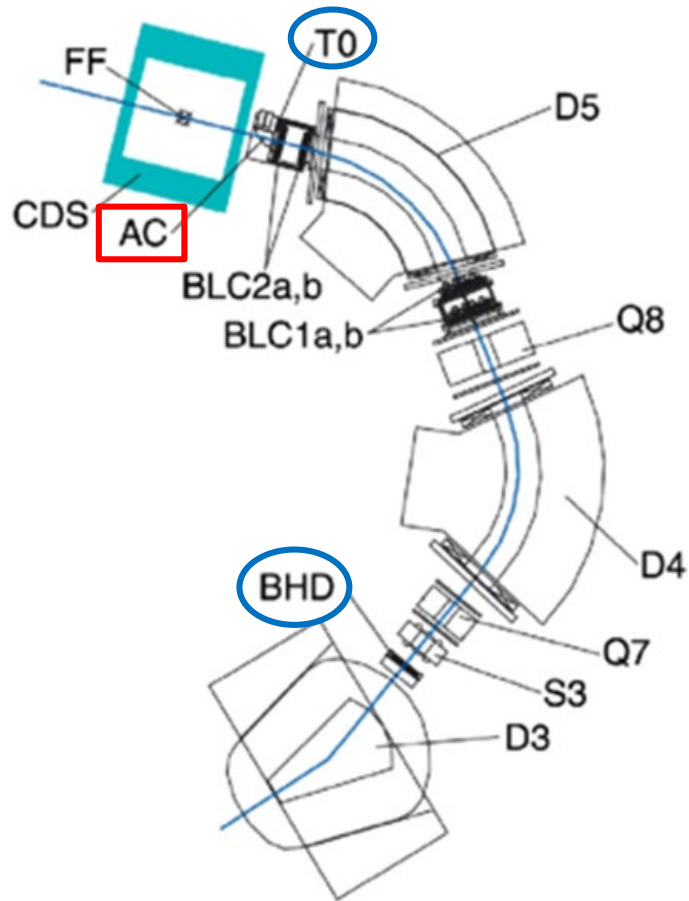
## ■ 標的周り





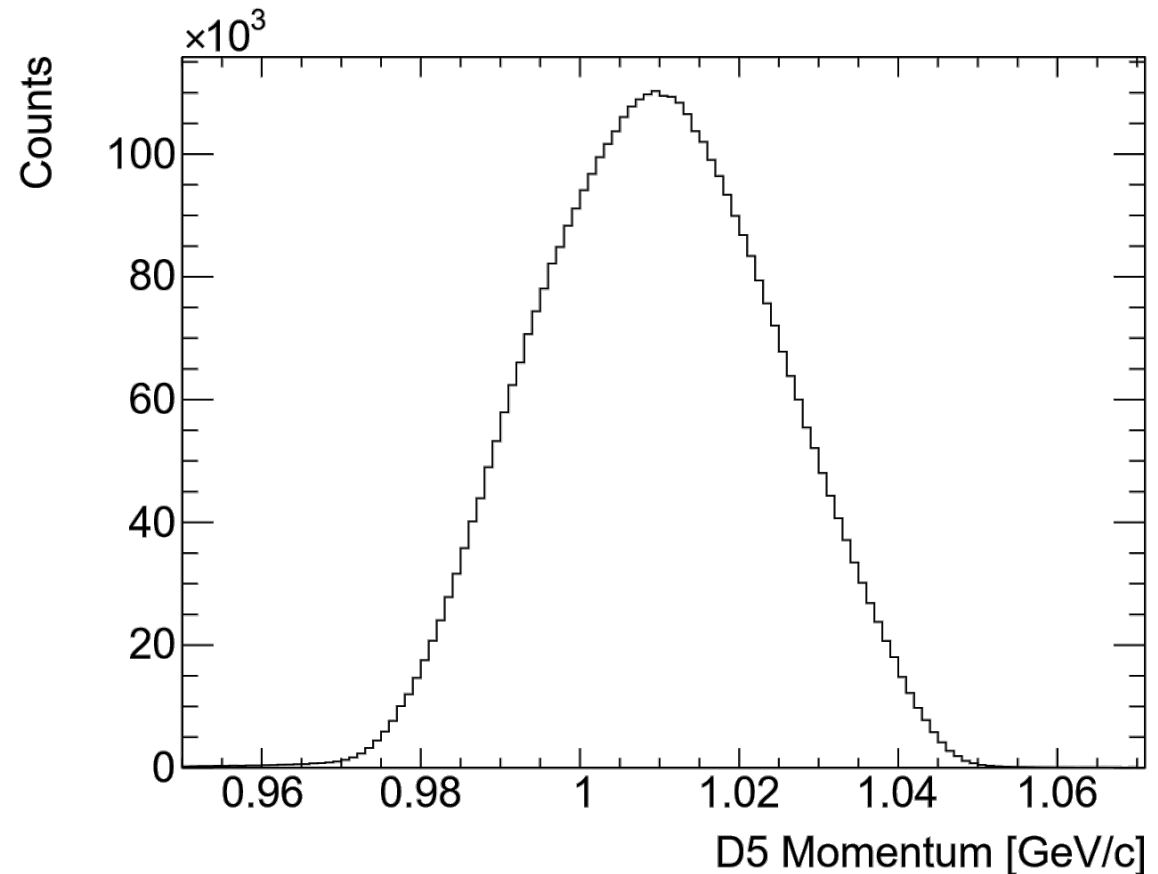
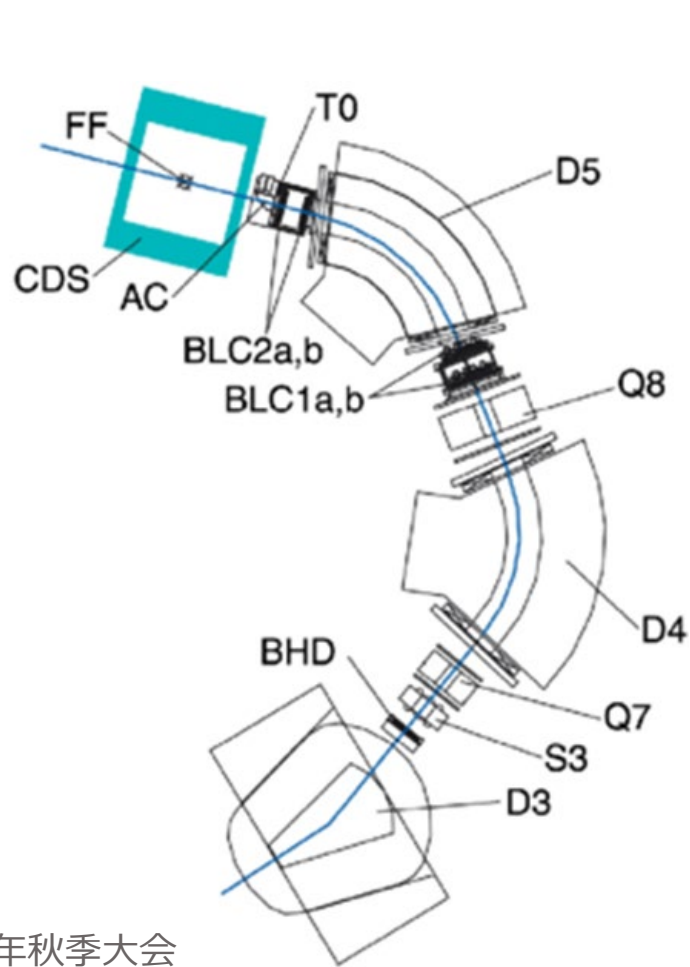
# エネルギー応答

- 1 GeV/c 中間子ビームを照射
  - スペクトロメータで $\pi$ 中間子を選択
    - ✓ BHD-TO TOF & AC → 電子も混在



# 運動量分布の解析

- 分解能を出したいが、運動量にひろがりがある
  - Beamline spectrometerを使って運動量を出す
  - 運動量を区切ってその運動量に対する分解能を出す



# PbF2 energy sum vs D5 momentum

- BLC1-D5-BLC2

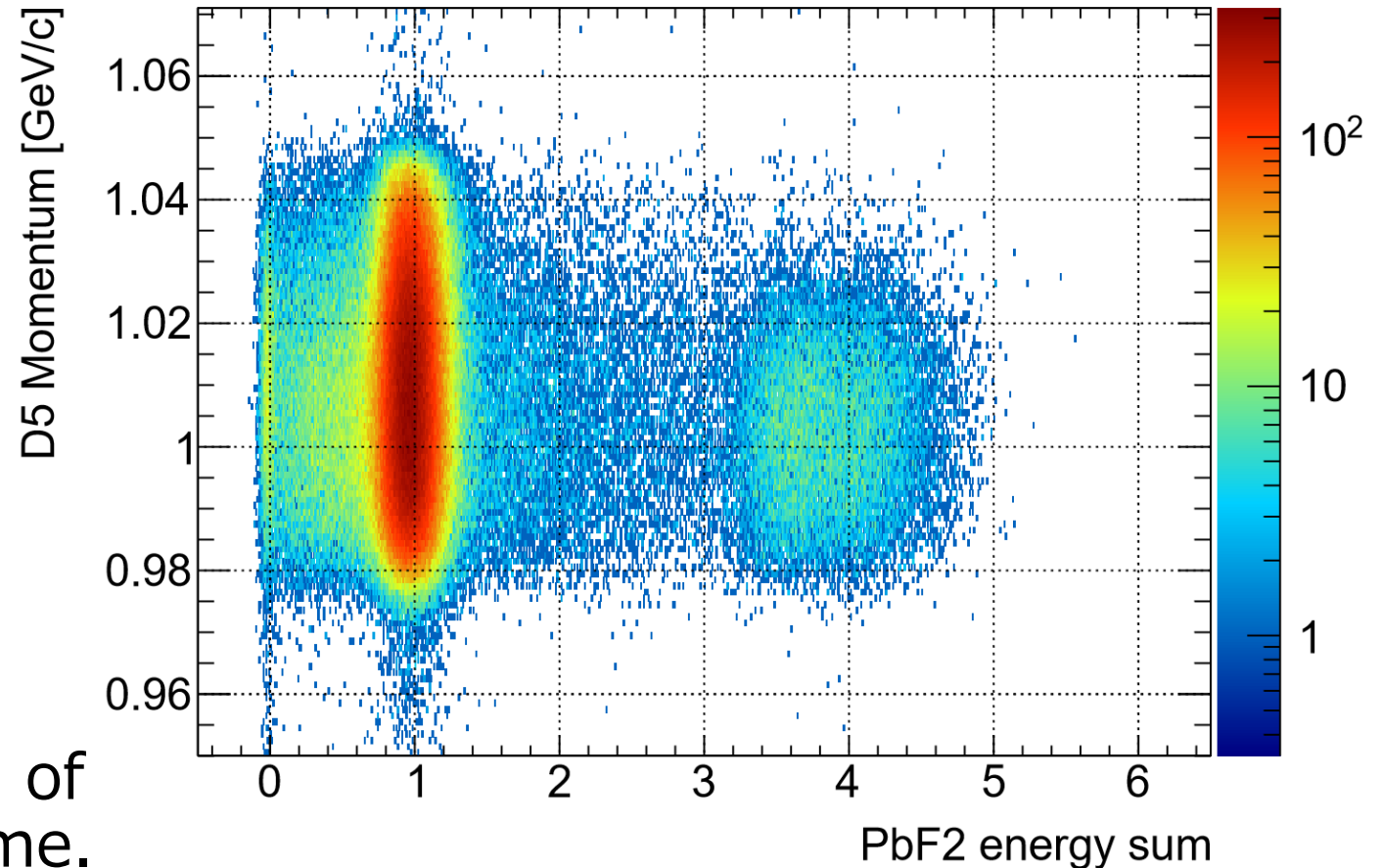
- Beam flag&&ACHIT&&TOFPi
- T0, DEF single hit

- PbF2 energy sum

- Beam flag&&ACHIT&&TOFPi
- T0, DEF single hit
- PbF2 TDC:  $-10 < t < 10$  [ns]
- Clustering

- in this momentum, the width of the electrons remains the same.

PbF2 seg13 cluster

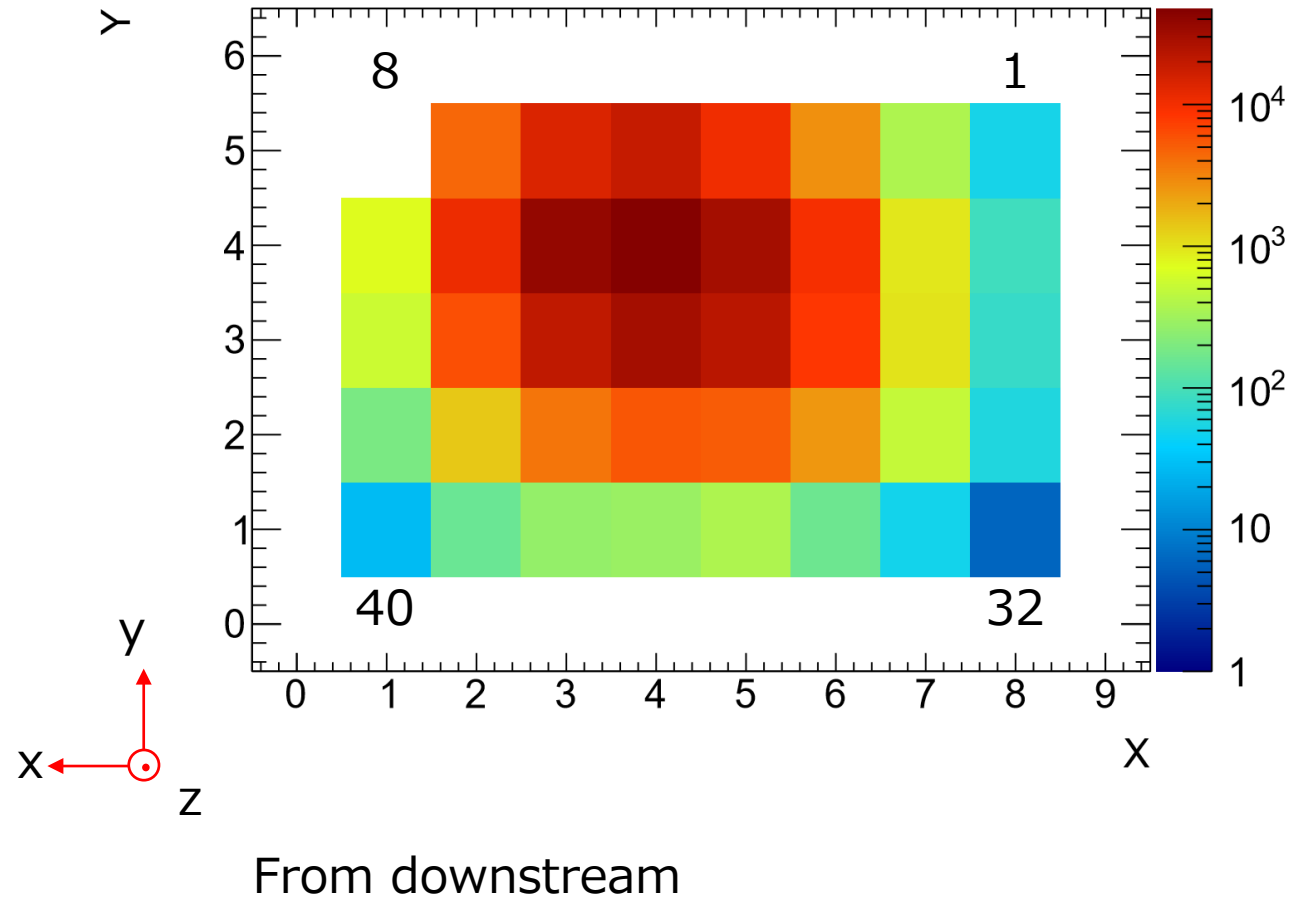


# electron distribution of PbF2

- PbF2 energy sum

- Beam flag&&ACHIT&&TOFPi
- T0, DEF single hit
- PbF2 TDC:  $-10 < t < 10$  [ns]
- Clustering

→select energy sum > 3  
electron distribution of PbF2





# TOF BHD-T0new

- PbF2 energy sum

- Beam flag&&ACHIT&&TOFPi
- T0, DEF single hit
- PbF2 TDC:  $-10 < t < 10$  [ns]
- Clustering

→select energy sum > 3: **electron(sacled)**

→select energy sum < 3: pion

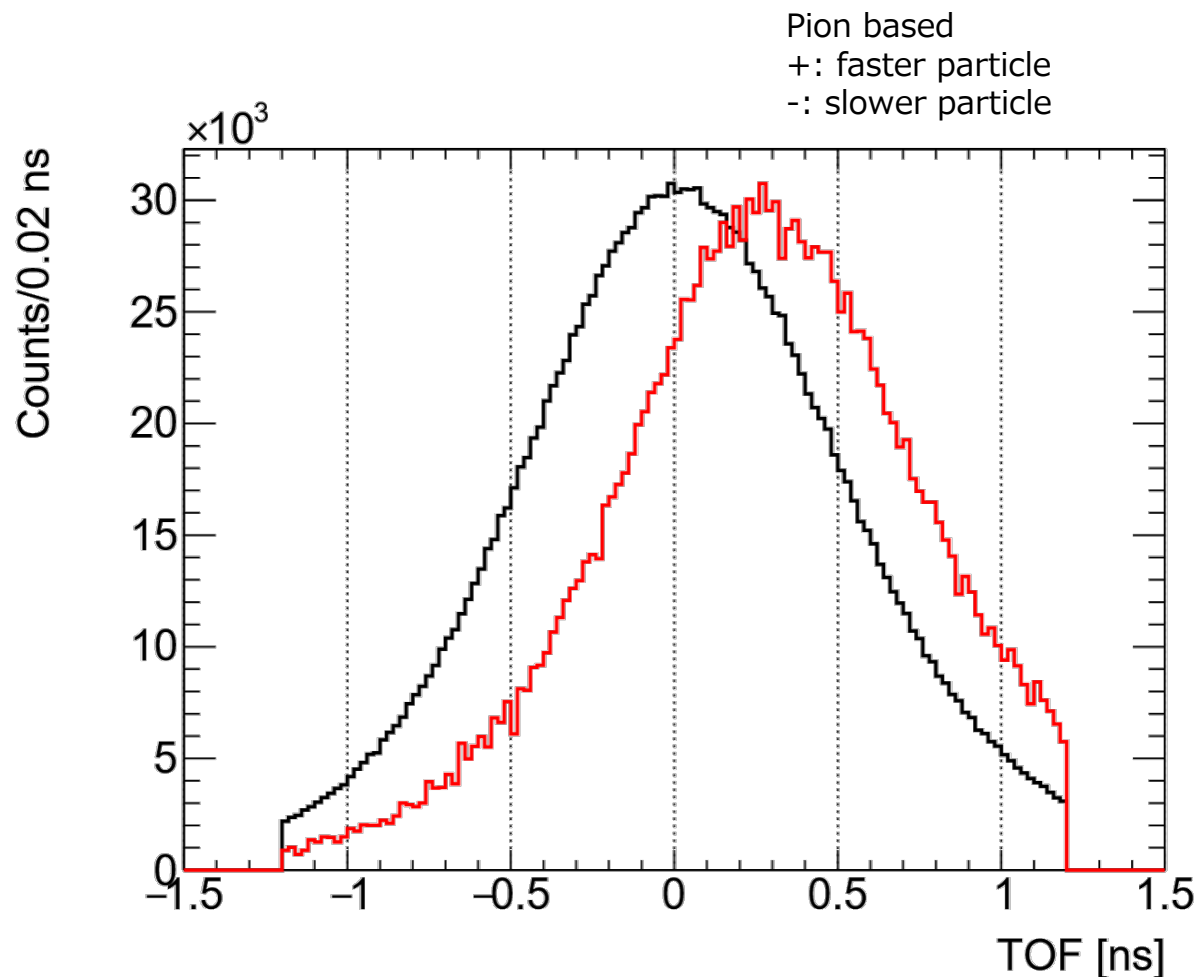
Pion : electron = 1851 k : 72k  
(production run:93—196)

- $\Delta t \sim 0.28$  ns

- ✓ consistent: 7.7 m TOF

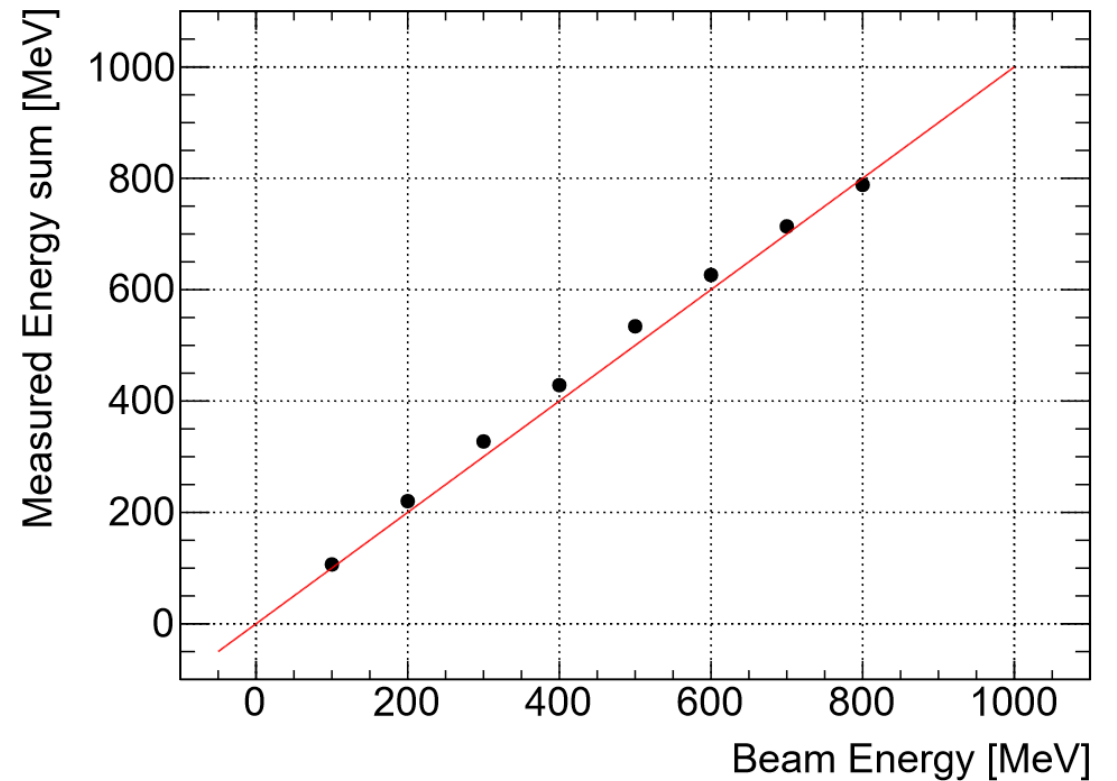
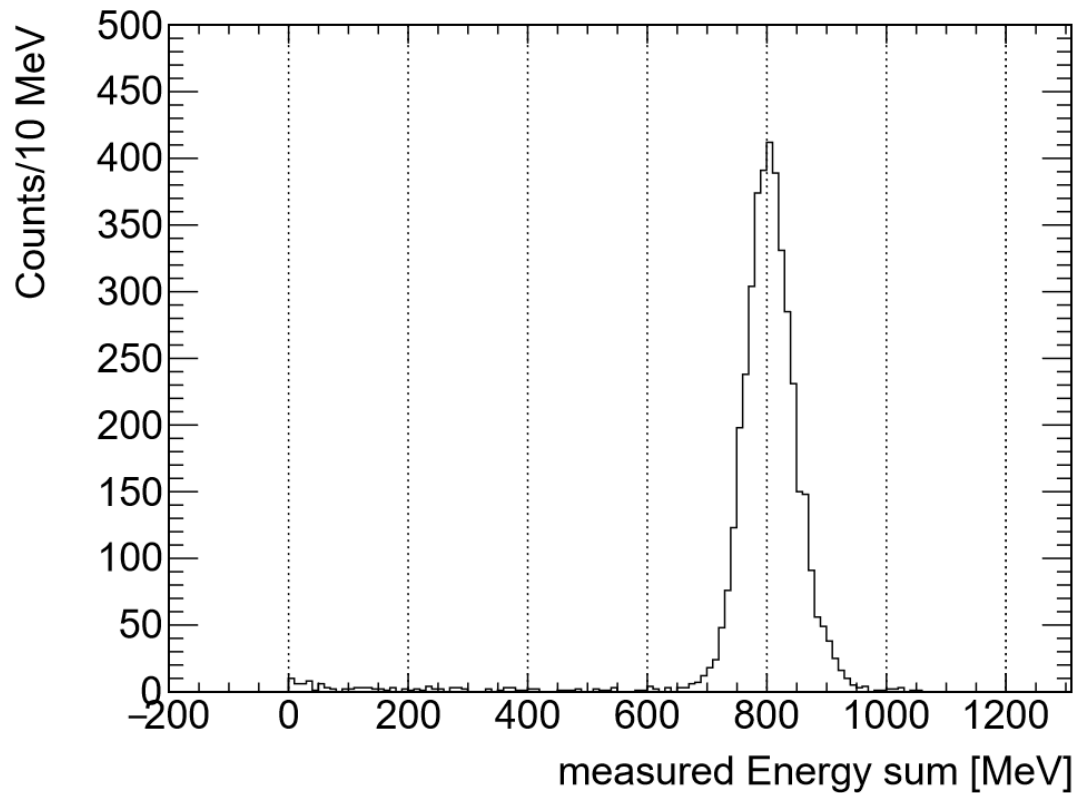
- ✓ No slewing correction

- sigma@pion: 0.48 ns



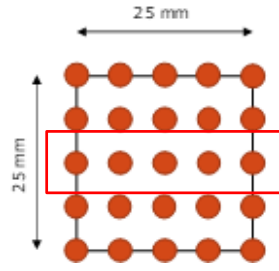
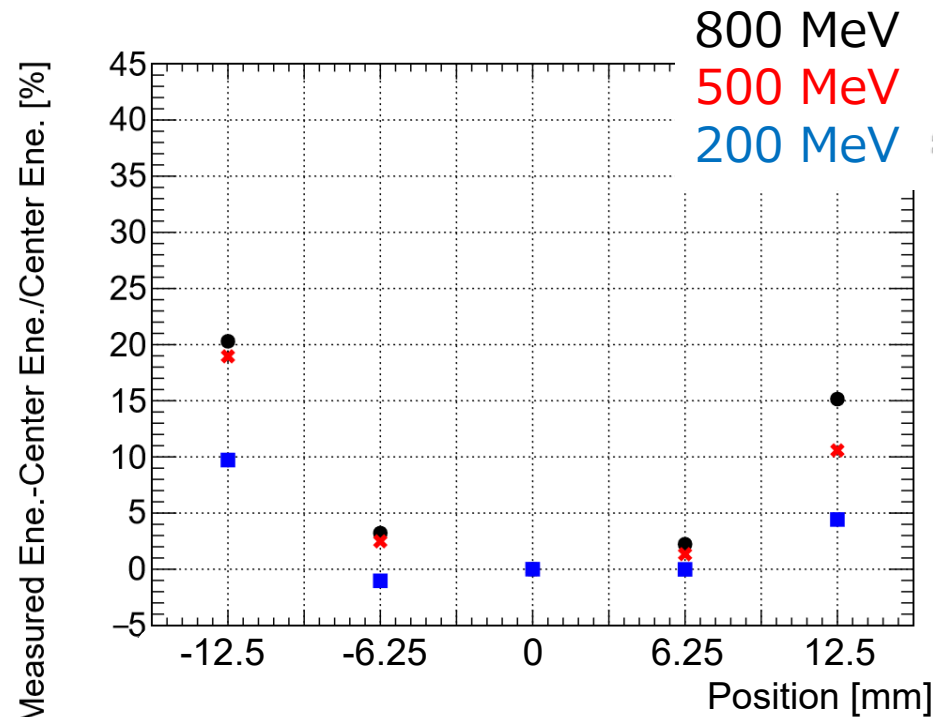
# Energy calibration

- 陽電子ビームを照射: 100–800 MeV/c

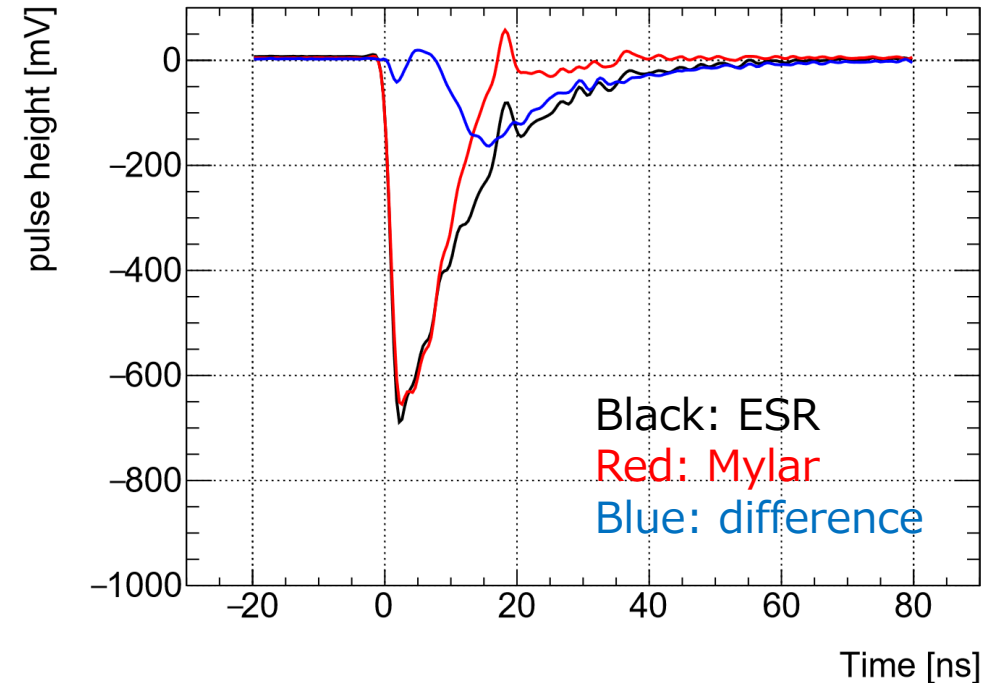


# 陽電子での応答：位置依存性, 波形

## ■ 結晶表面での位置依存性



## ■ 反射材を変えて波形を取得



### ➤ 位置依存あり

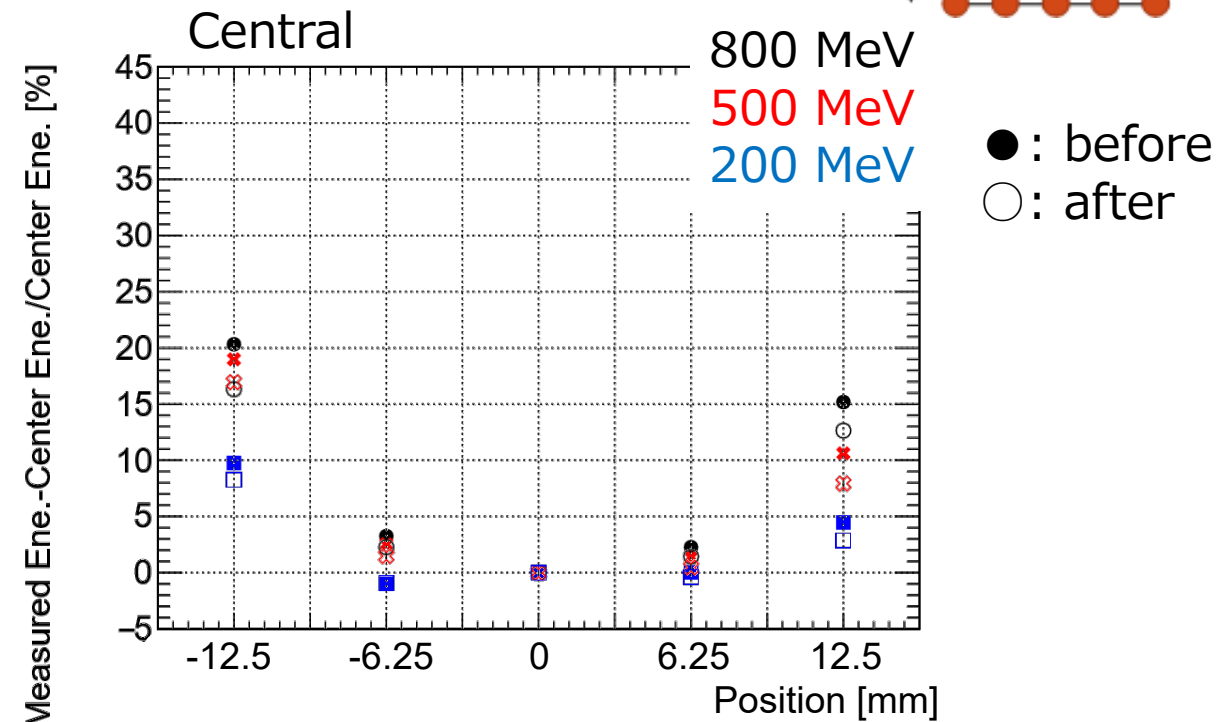
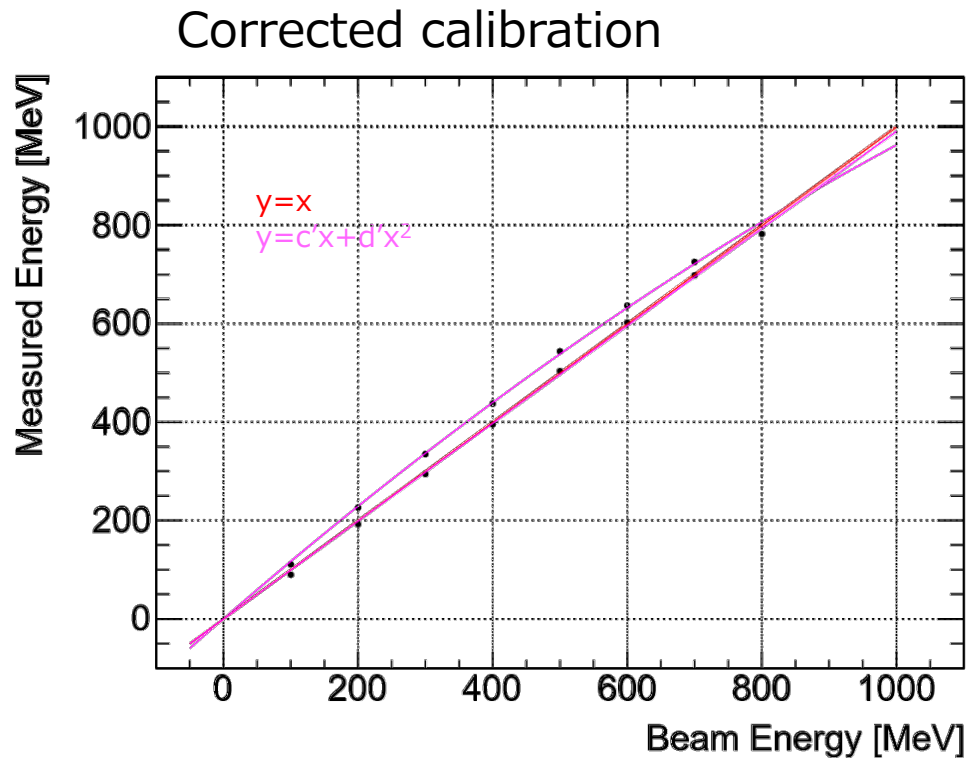
- ✓ ESRはシンチレーション光を発光する  
⇒ ESRの影響?

反射材をマイラーに変更

- ESRとMylarで相違あり
  - ✓ ESRでテールを引く

# Position dependence(after correction)

## ■ ELPH position dep. Data



✓ 3—4 % decreased

→ There is still position dependence

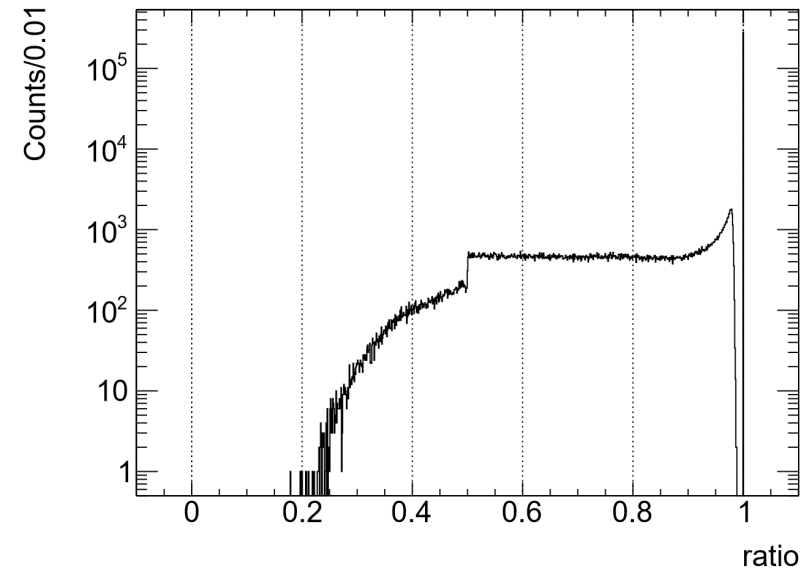
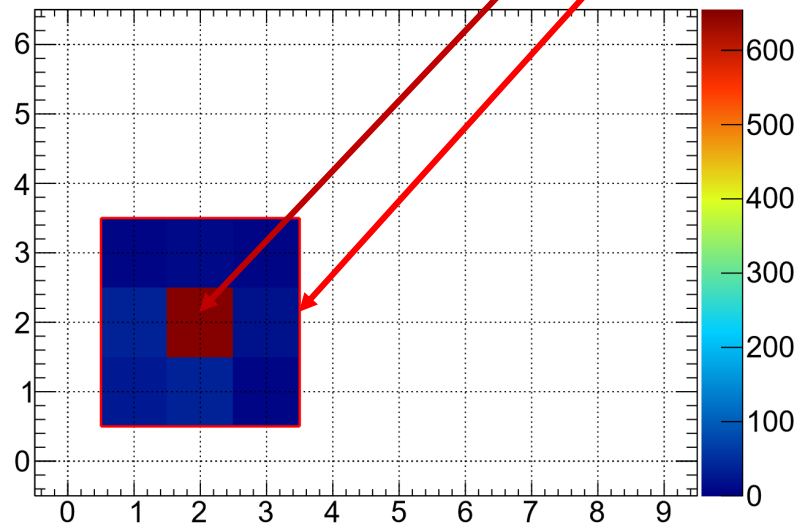


# 結晶前面の入射位置依存性

- エネルギー損失の割合で評価

- $\pi$ 中間子を照射(電子も混在): 1 GeV/c

$$\text{ratio} = \frac{\text{中心のセグメントのエネルギー}}{\text{クラスターのエネルギーの和}}$$



- ✓ Ratioで0.05ずつ区切る

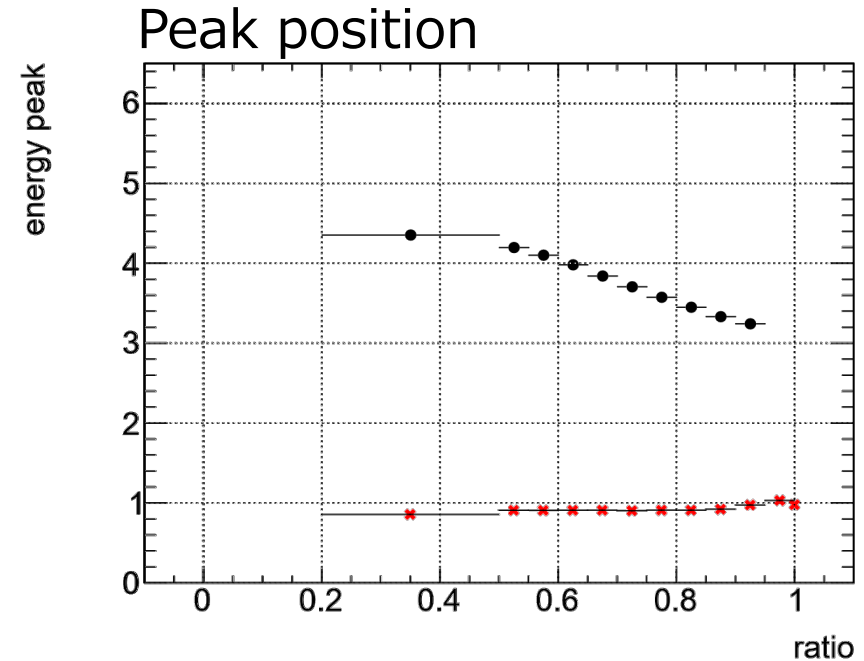
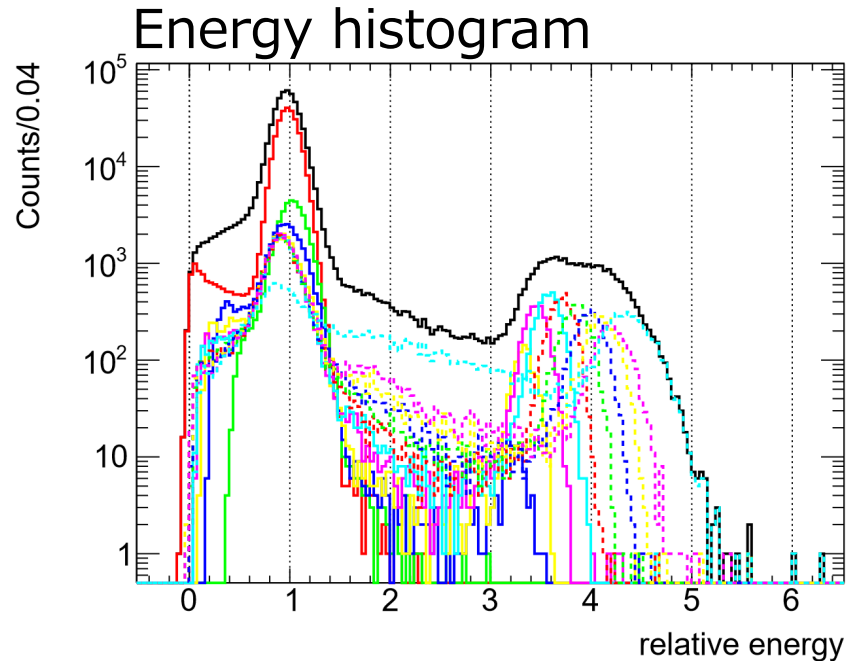
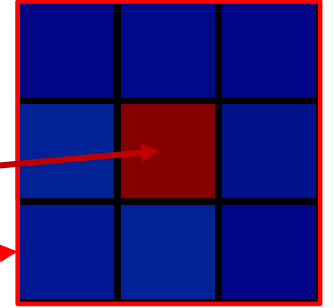
- ⇒各ratioで電子のピーク値をプロット

# 結晶前面の入射位置依存性

- エネルギー損失の割合で評価

- $\pi$ 中間子を選択(電子も混在): 1 GeV/c

$$\text{ratio} = \frac{\text{中心のセグメントのエネルギー}}{\text{エネルギーの和}}$$



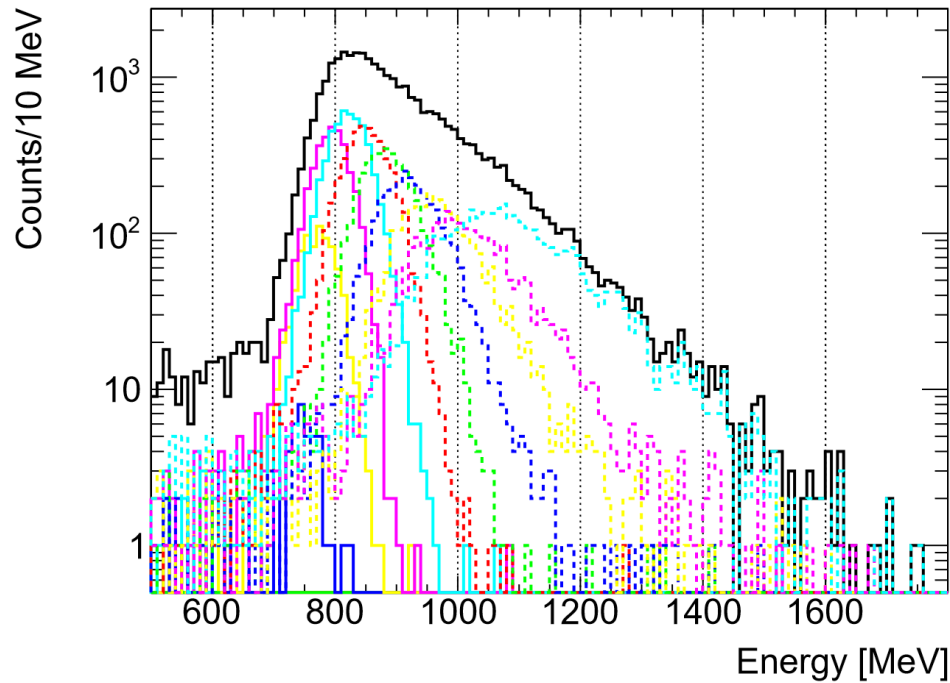
電子: ratio小 $\Rightarrow$ エネルギーの和大

$\pi$ 中間子: ほぼ一定(電子とは違う傾向)

# Energy histogram drawing same @ELPH

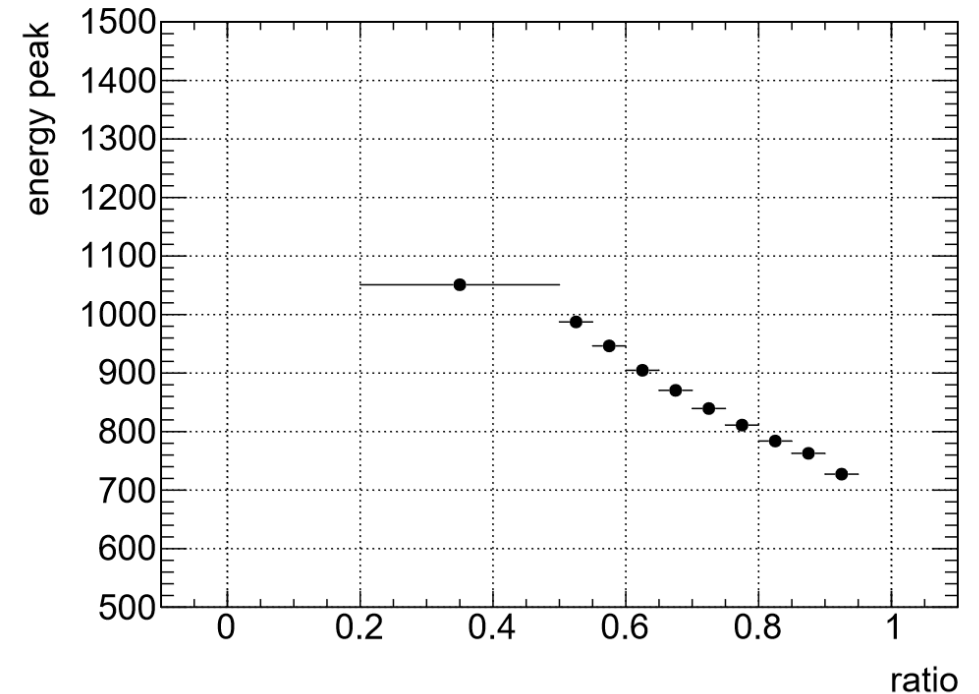
- ELPH position dep. Data
  - positron, 800 MeV/c

The error on the horizontal axis is the range of the ratio used.



## Peak position

Black: positron 800 MeV/c @ELPH data  
Red: electron 1 GeV/c @T77 data



✓ The peak position and width are different depending on the ratio.