

3 ^3H 寿命直接測定のための PbF_2 カロリメータの性能評価

大阪大学 赤石 貴也

for the J-PARC E73 collaboration

1

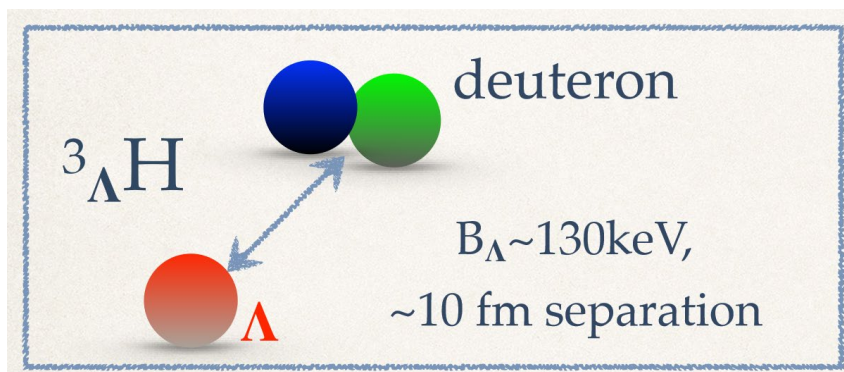
${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命測定

■ 物理背景

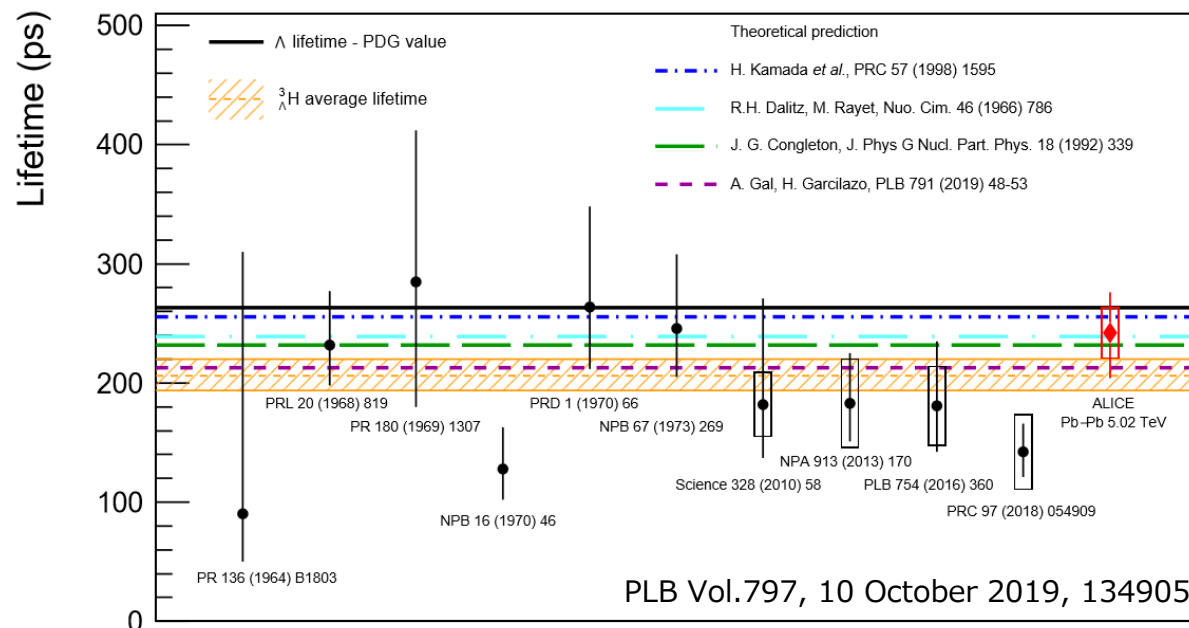
➤ ハイパートライトン (${}^3_{\Lambda}\text{H}$): p, n, Λ が束縛した最も軽いハイパー核

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

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



✓ 近年の重イオン実験結果: より短い寿命
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



重イオン実験 vs 直接寿命測定

PLB Vol.797, 10 October 2019, 134905

■ 重イオン実験: STAR, ALICE, HypHI

- 不変質量を再構成
 - ✓ CTから寿命を導出
 - ✓ Huge combinatorial BG

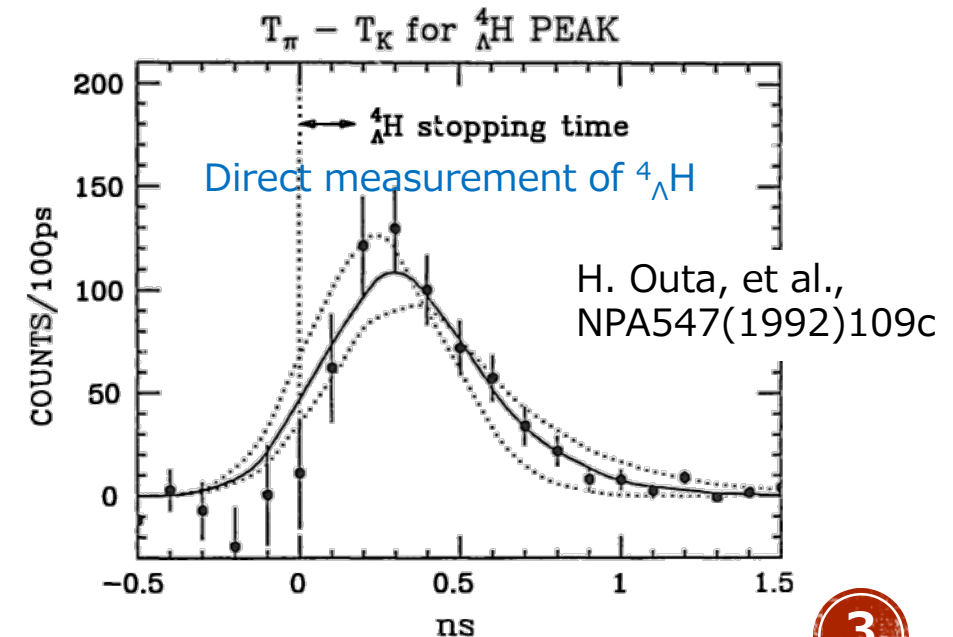
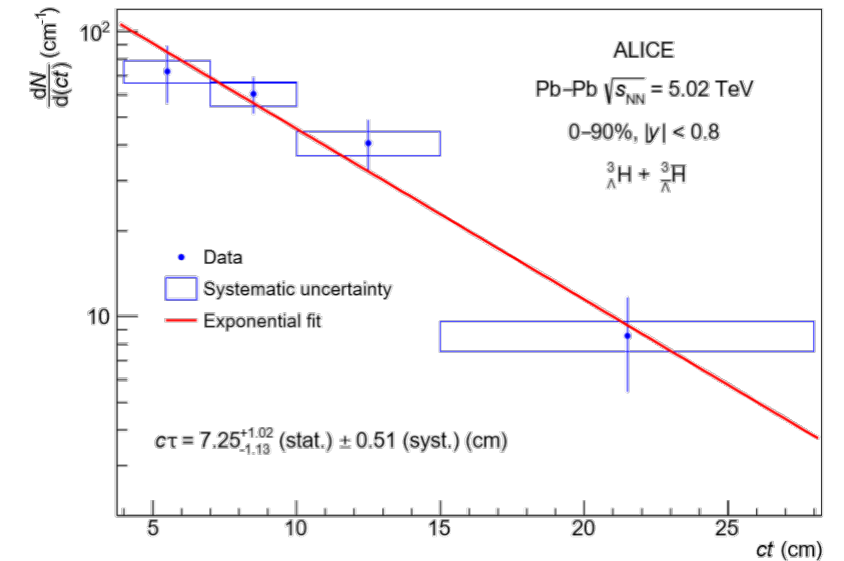


complementary

■ 直接寿命測定: no counter experiment so far

- 中間子崩壊における π^- の崩壊時間(ほぼ静止状態)
 - ✓ 広い範囲でfitが可能
 - ✓ BG: quasi-free $Y \rightarrow \pi^- N$

⇒ J-PARC E73実験で計画、進行中

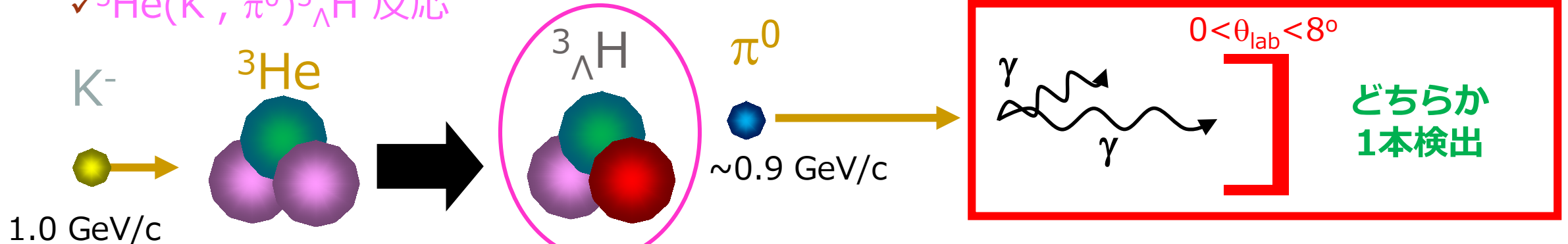


J-PARC E73実験

■ 実験手法

➤ J-PARC K1.8BR Beamline

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



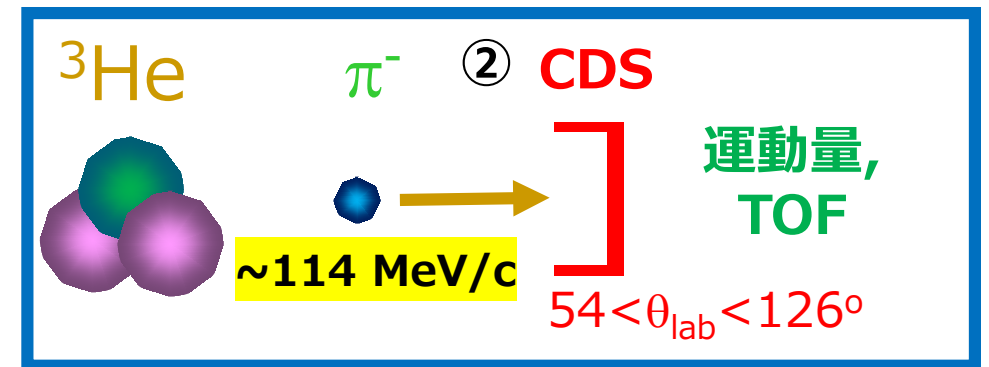
① 前方 γ 線のタグ

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

② Cylindrical Detector System (CDS)

⇒崩壊後の π^- の単一運動量を測定

${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を同定して π^- の崩壊時間から寿命を導出



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 γ 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**

- **バックグラウンドの低減**

- ✓ **前方の高いエネルギーの γ 線**

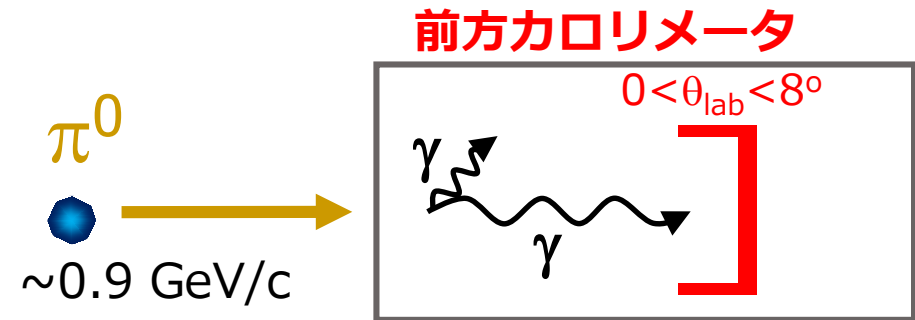
- **シグナルとquasi-free BGのみ**

- ✓ **低エネルギーの γ 線**

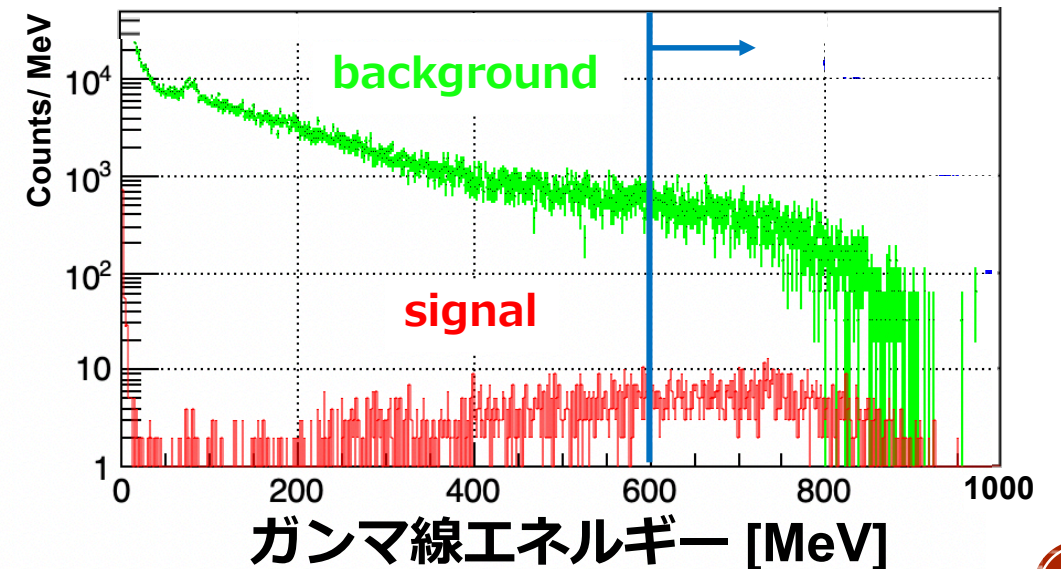
- **Λ , Σ からの崩壊が主**

- ⇒ **エネルギーカットでBG低減が可能**

- **エネルギー分解能: $< 10 \text{ \%} / \sqrt{E(\text{GeV})}$**



Simulation

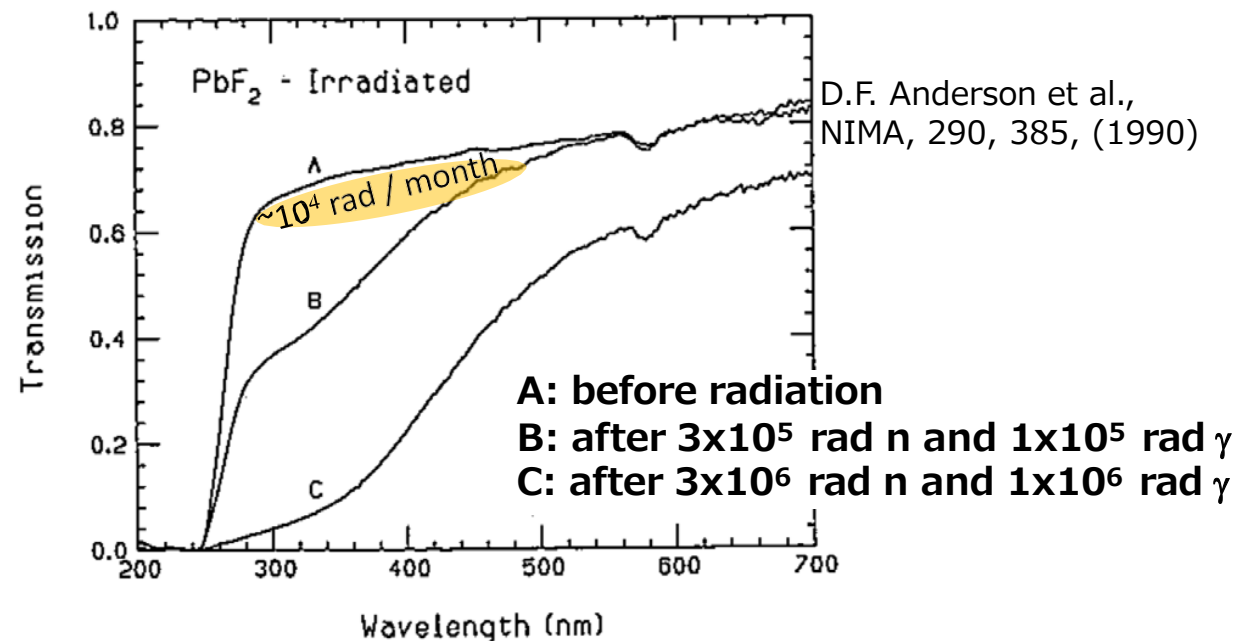
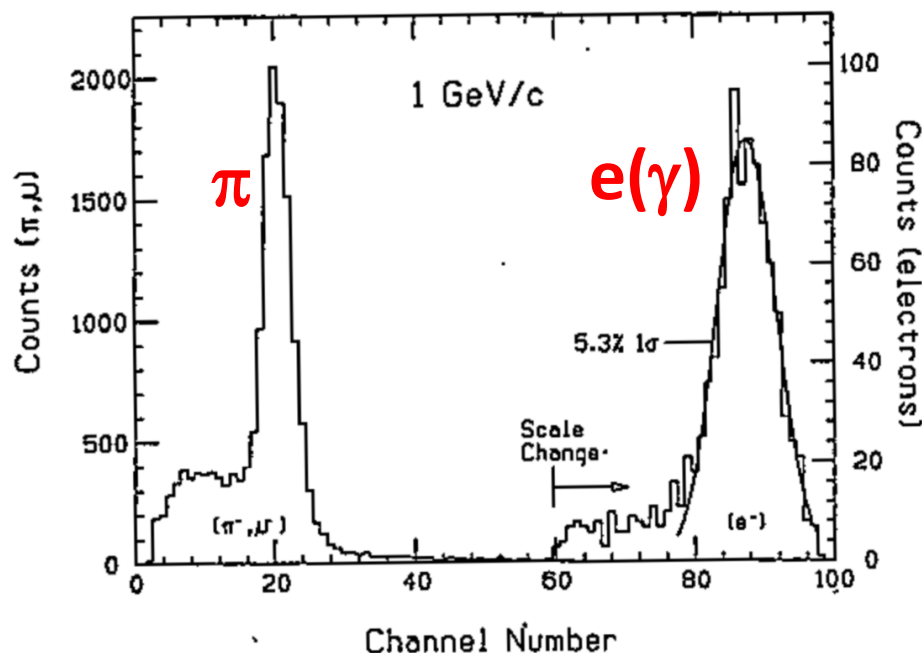


PbF₂ カロリメータ

PbF₂を使用した実験:
New muon (g-2) exp. @Fermilab

■ 基本情報

放射長	モリエール半径	密度	屈折率	エネルギー分解能
0.93 cm	2.22 cm	7.77 g/cm ³	1.82	5 %/ $\sqrt{E(\text{GeV})}$



➤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

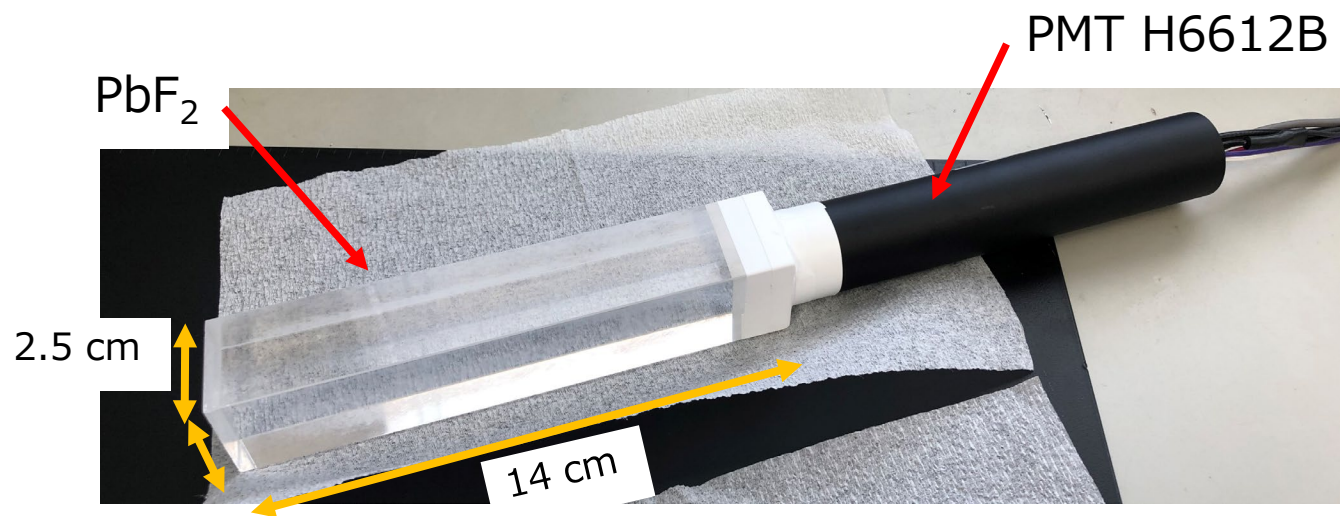
⇒ビームライン上に設置するのに適切

カロリメータの入手, etc.

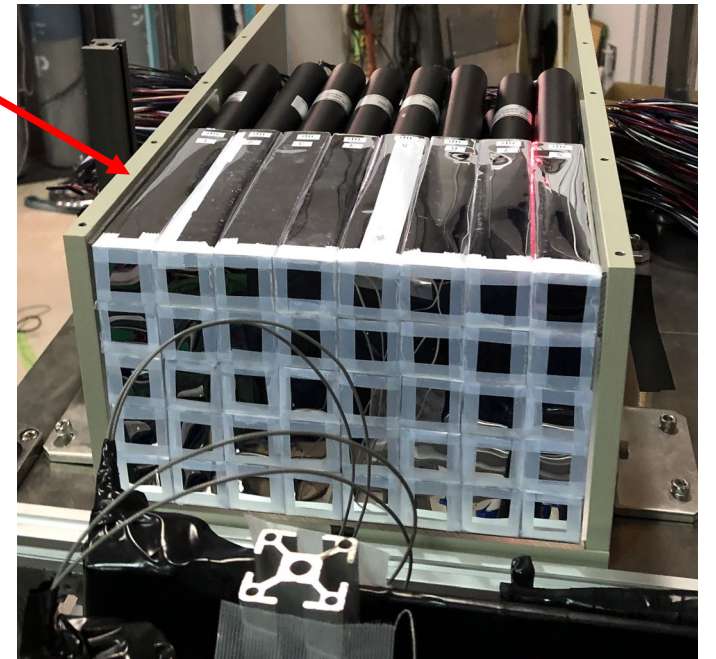
- New muon (g-2) experiment @Fermilab
 - PbF₂カロリメータを使用
 - Mass productionでのあまりを購入
 - 購入先
 - ✓ Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences
 - ✓ <http://english.sic.cas.cn>
 - ✓ 計40本: 1本あたり15万
 - Spec
 - ✓ サイズ: 25×25×140 mm³
 - ✓ Short wavelength edge: 250 nm
 - ✓ Longitudinal transmission at 400 nm: > 75 %

アセンブリ

- PbF_2 カロリメータ 40セグメントを使用(縦5×横8)
 - ✓ PMT: H6612B(3段ブースター付き)
 - ✓ 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



PbF₂カロリメータ動作実験

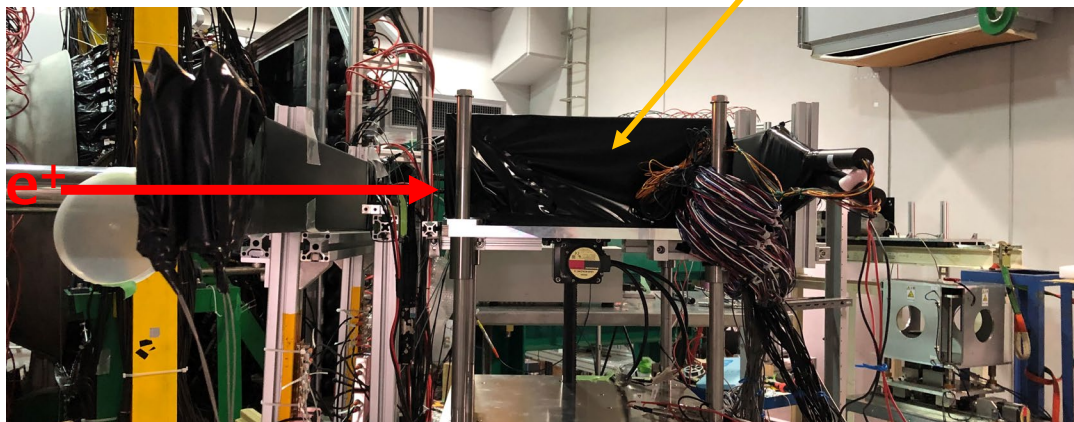
- PbF₂カロリメータを動作させた2つの実験

- 2019/12 ELPH

- 100—800 MeV/c **陽電子ビーム**
- ✓ 基本的なパフォーマンステスト

実験セットアップ

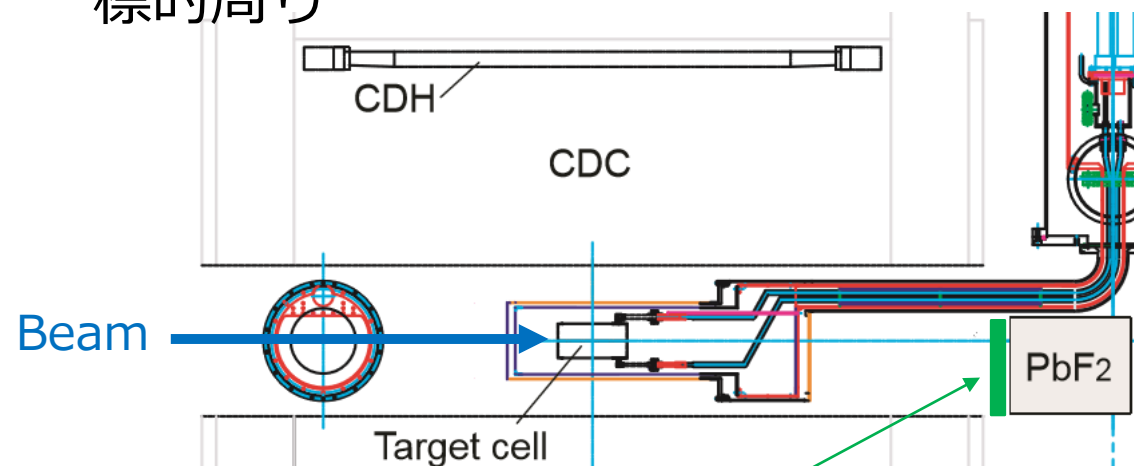
PbF₂



- 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

標的周り

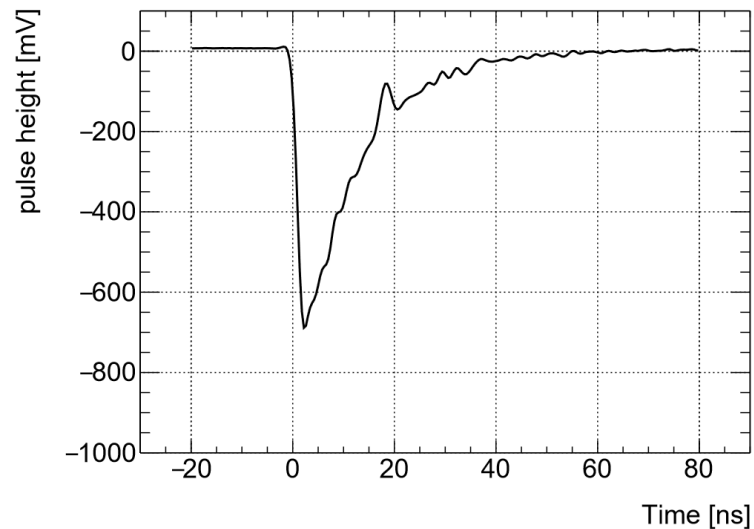


Charged Particle
Veto Counter

PbF₂カロリメータ動作実験@ELPH

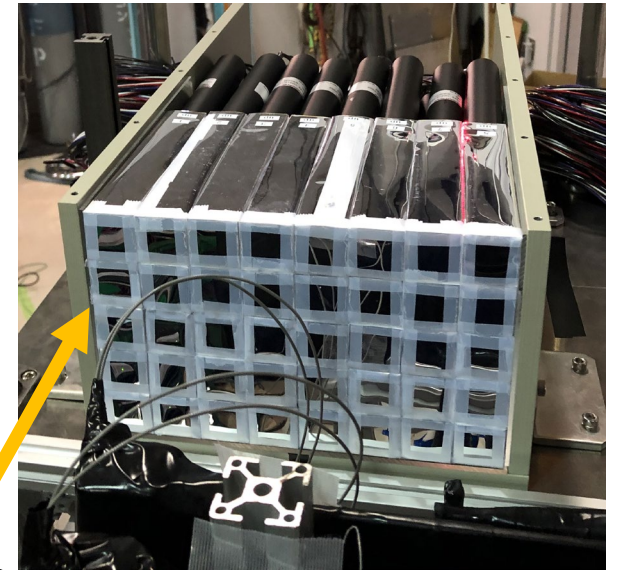
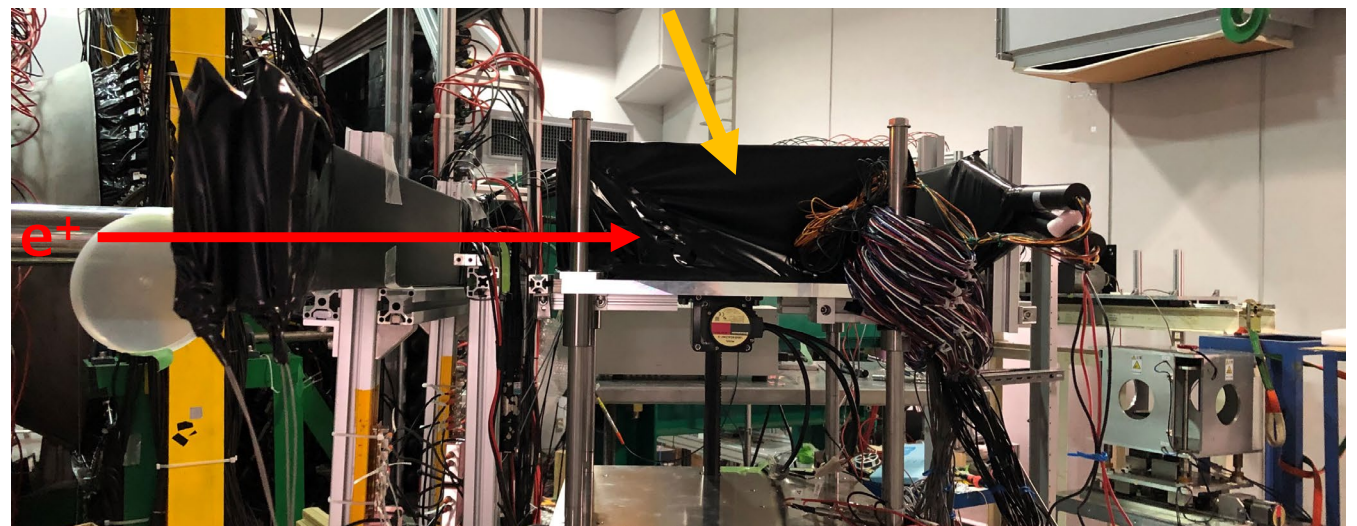
- 2019/12 ELPH
 - 100—800 MeV/c **陽電子ビーム**
⇒ エネルギー応答,
エネルギー分解能のチェック
 - 反射材: ESR

オシロスコープで波形を取得
660 MeV e⁺



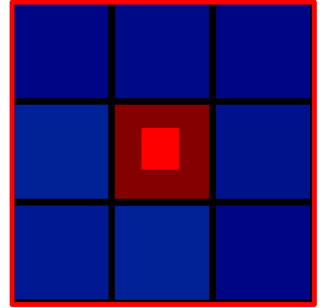
実験セットアップ

PbF₂

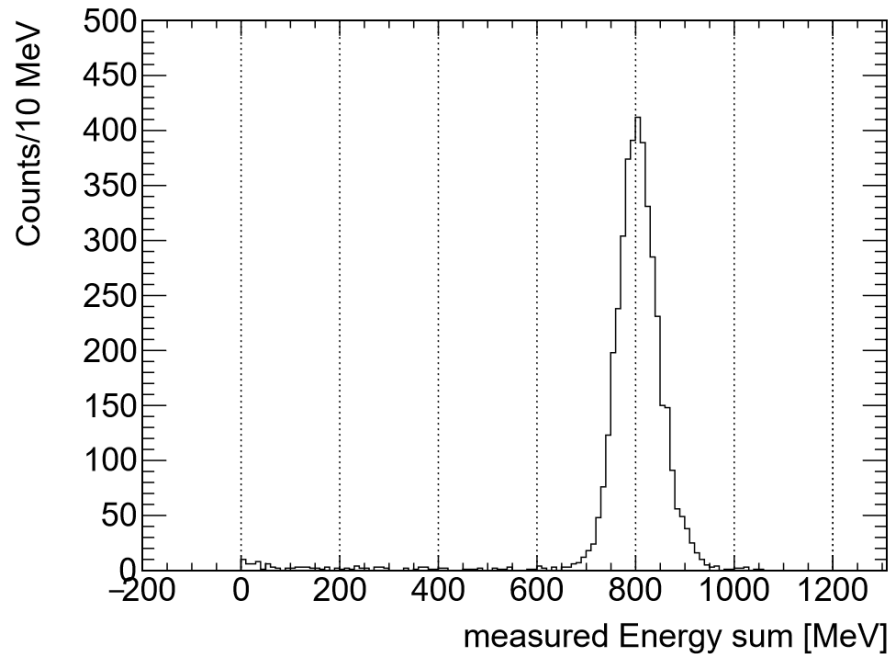


Energy calibration

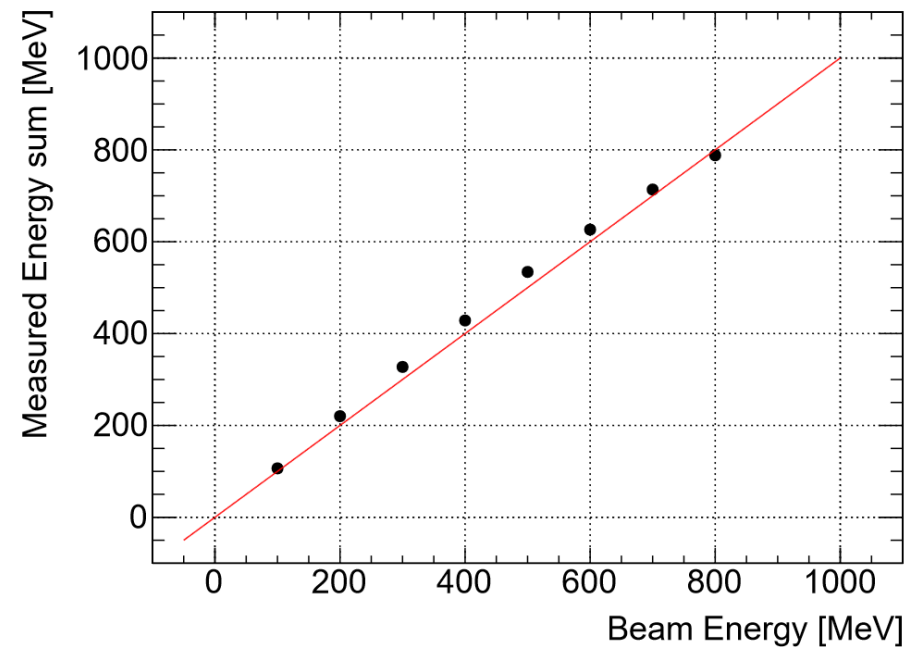
- 陽電子ビームを照射: 100–800 MeV/c
 - Trigger size: 5×5 mm², 中心へ照射
 - キャリブレーションパラメータ: $y=ax+bx^2$ のaを使用
 - 測定したエネルギー = 大きなエネルギーを落としたセグメント + 周りの閾値(3.5 MeV)を超えたセグメント



カロリメータのEnergyの和



ビームエネルギーと測定したエネルギーの相関



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

- 他の測定結果と比較

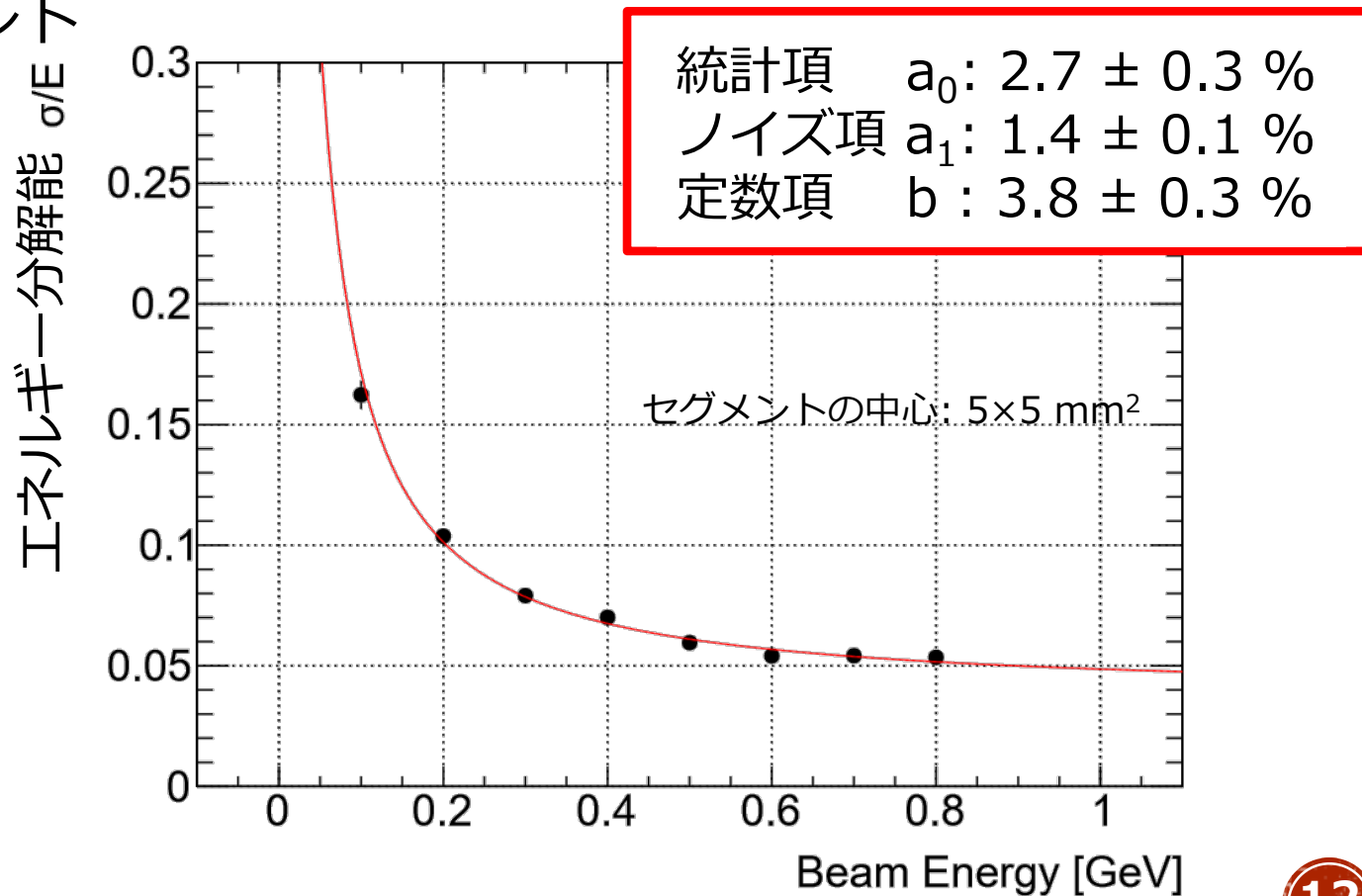
- ✓ エネルギー領域は違うが
近い値

Ref.

NIMA, Volume 783, 21 May 2015

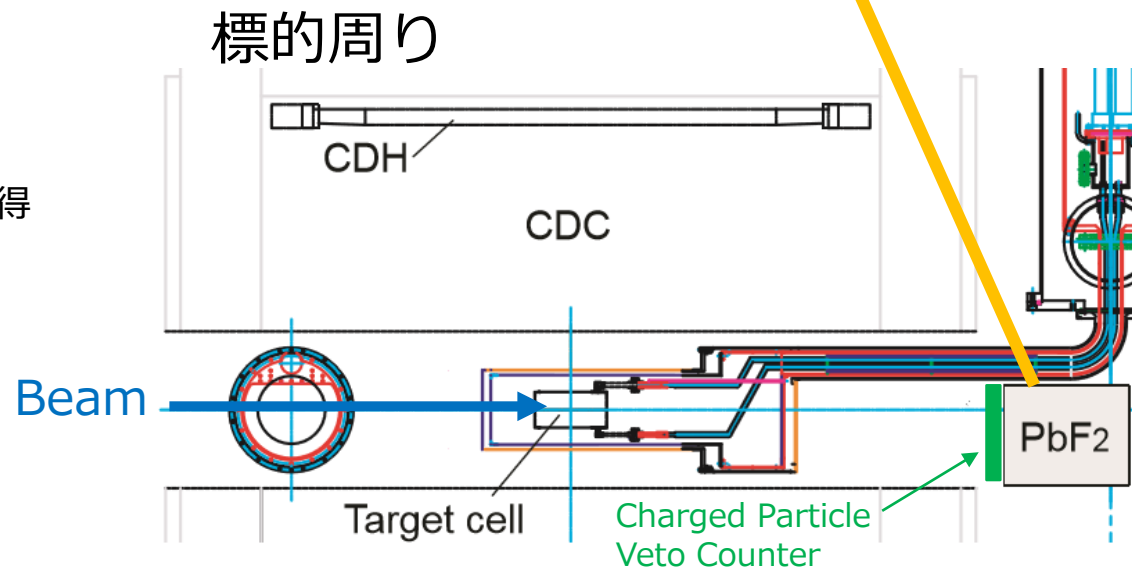
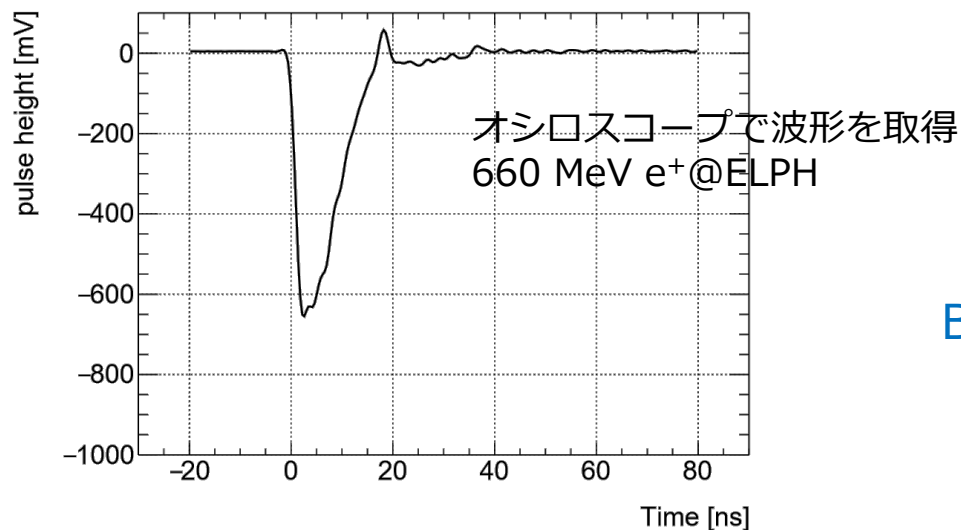
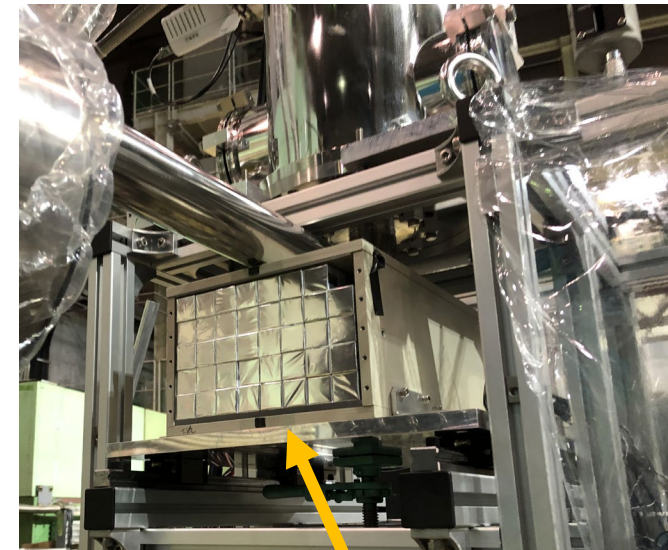
New muon (g-2) experiment @Fermilab

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



PbF₂カロリメータ動作実験@K1.8BR

- 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)



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 π , 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

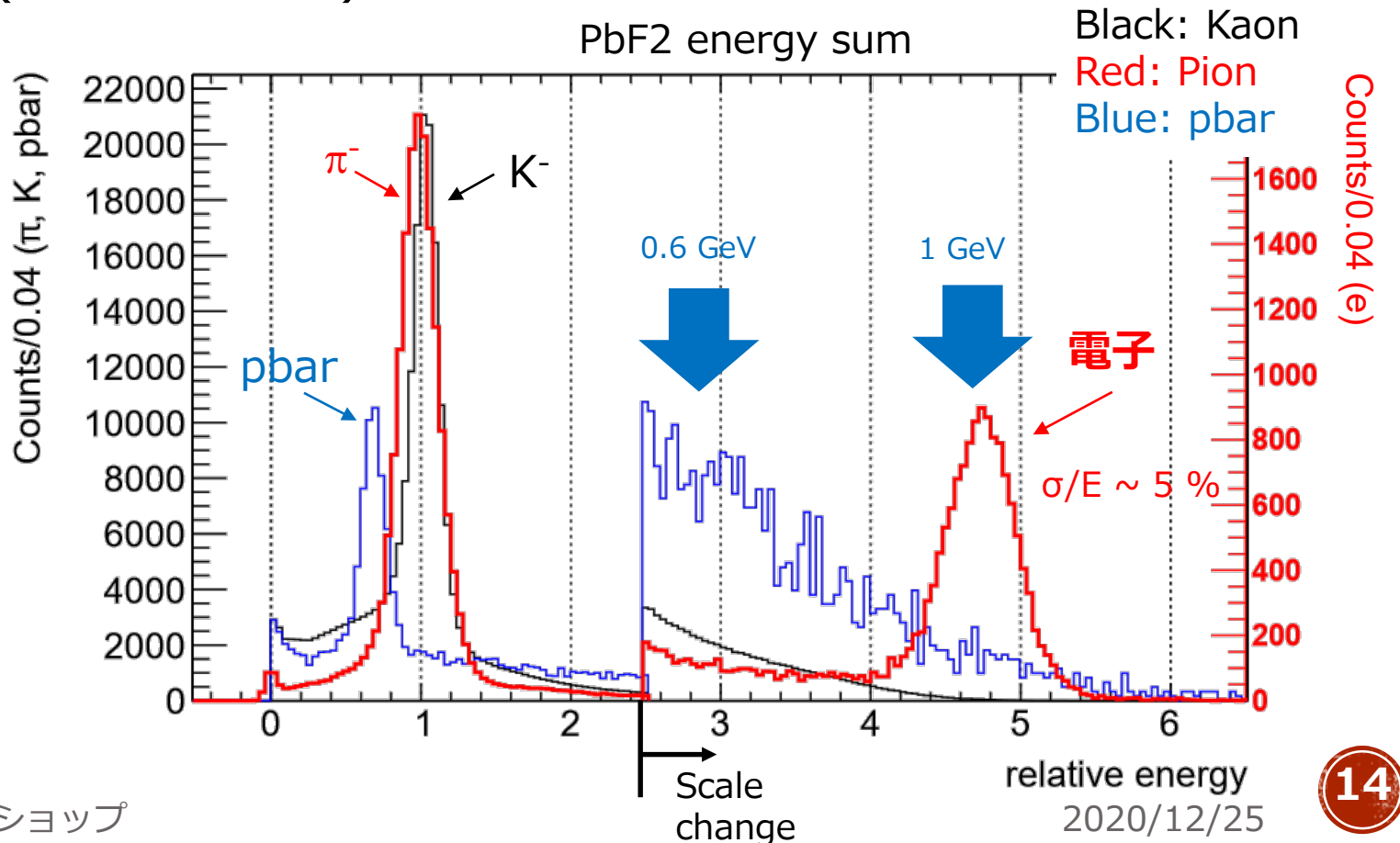
- チェレンコフ光の式

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right)$$

- ✓ 速度で決まる($N_\pi > N_{pbar}$)

- 電子とハドロンを分離

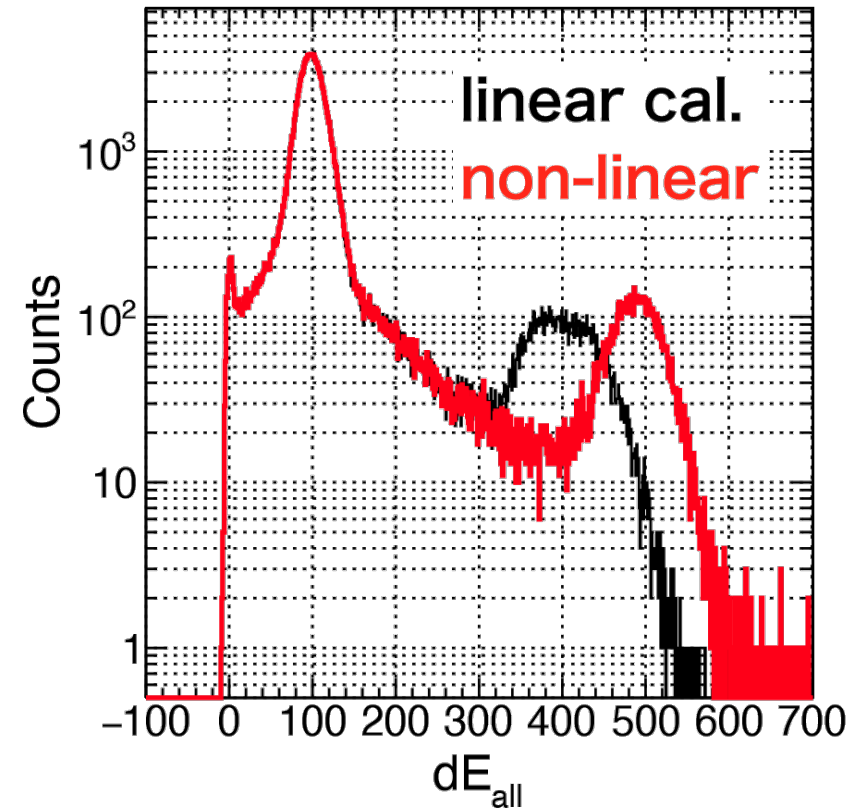
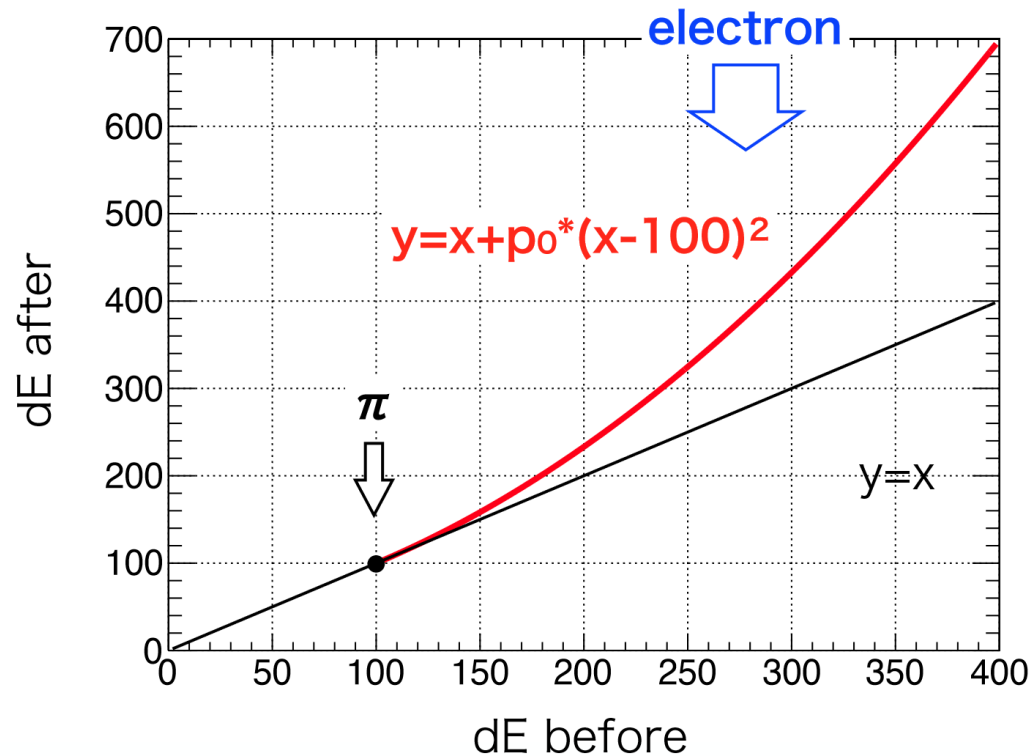
⇒ 期待通り動作



エネルギー補正

- Photon数に対してPMTのHVがたかい
⇒エネルギーのリニアリティが悪かった
以下の関数で補正

$$dE^{after} = dE^{before} + p_0(dE^{before} - 100)^2 \text{ for } dE^{before} > 100$$



${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成のテスト実験

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

➤ 3 days, 6 G K on target

➤ 解析コンディション

✓ CDS

π^- 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_2 によるバックグラウンドの低減

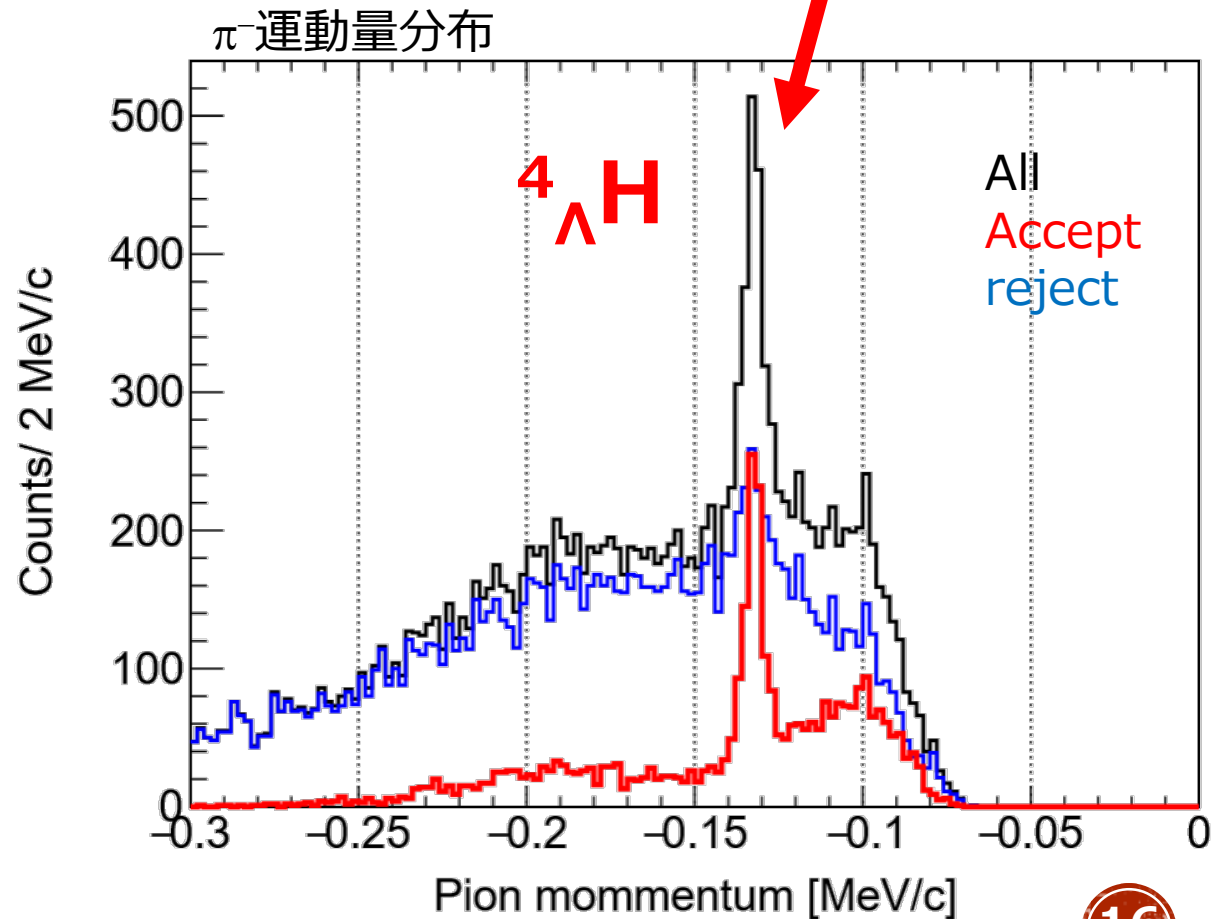
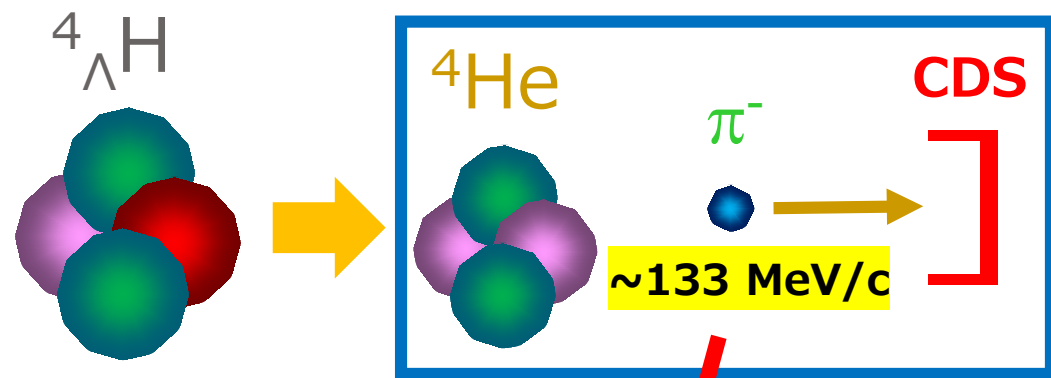
➤ ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成時の高エネルギー γ 線を選択

⇒ signalをほとんど失わず

S:N比が向上

カット前: 3:2 **カット後: 4:1**

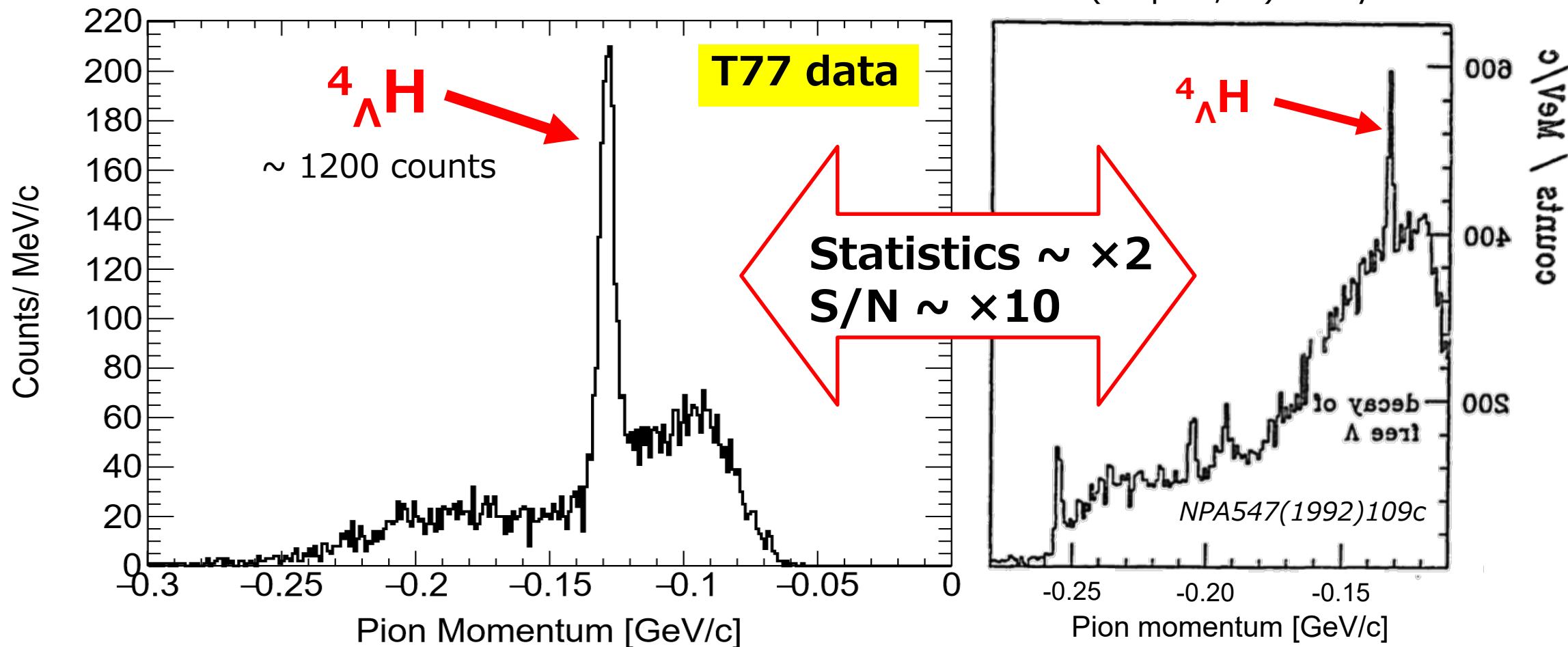
→ **寿命の精度が向上**



π^- 運動量分布

KEK, 1992

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



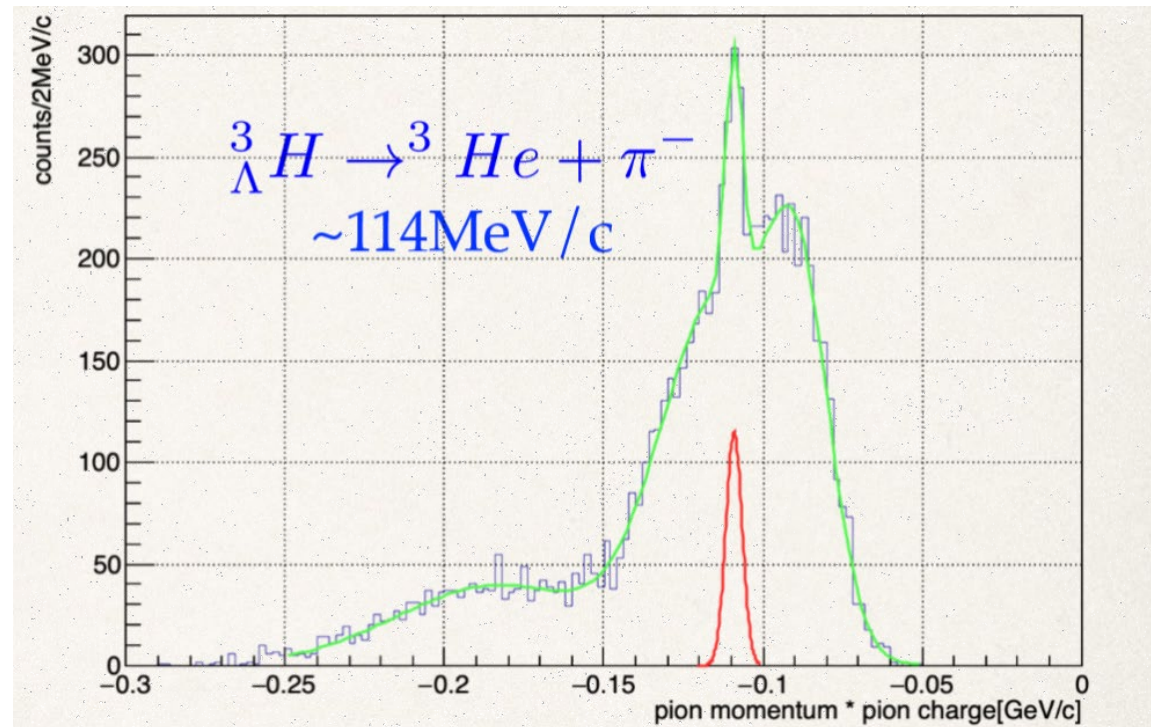
$^4\Lambda\text{H}$ の寿命でworld recordになりうるデータを取得

$^3\Lambda\text{H}$ も取得可能 \Rightarrow ^3He 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 π^- 運動量分布

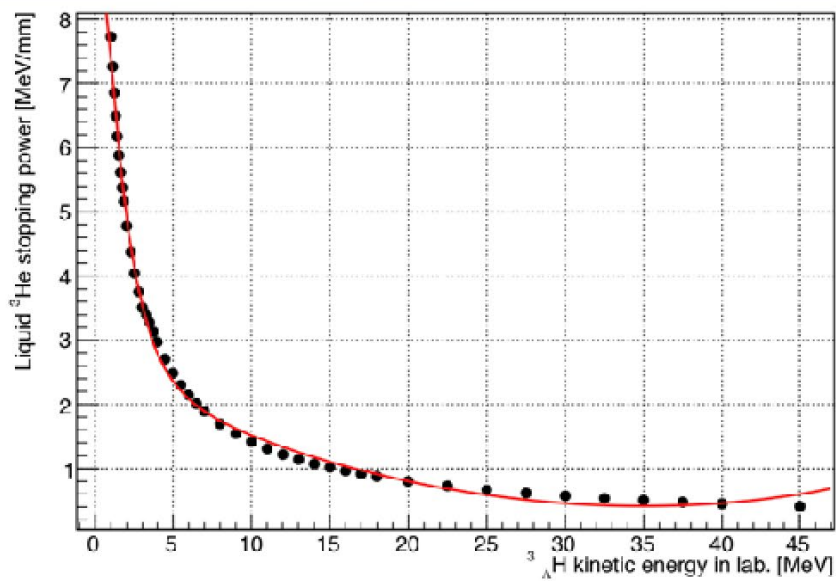


- まずは1週間程度cross sectionの測定(来年度春ごろ)
- そのあと4週間で寿命測定

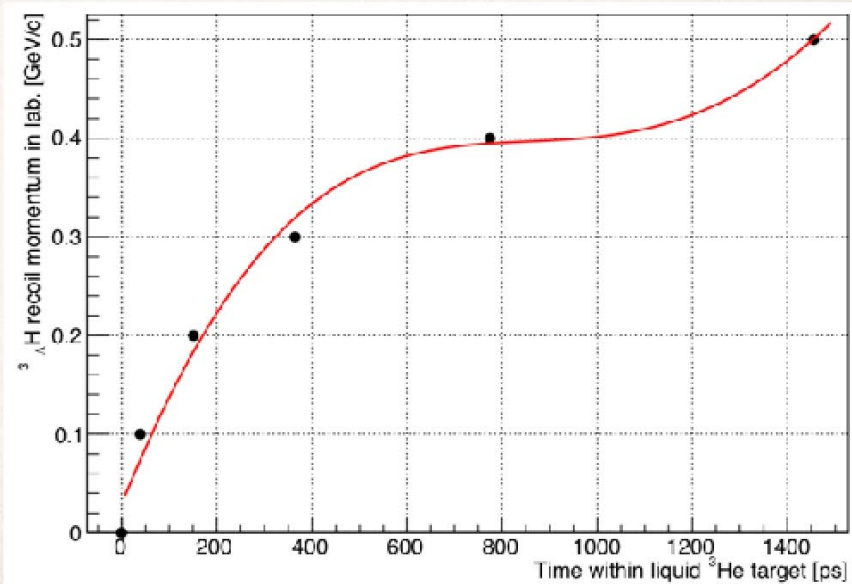
まとめ

- ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$ 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
- 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
 - ✓ 2020年6月ハドロンビームを照射
 - エネルギー分解能: $5\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ @1 GeV
 - ハドロンと電子を分離
 - ビームライン上で十分動作
- ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成のFeasibility studyを実施
 - γ 線のタグでハイパー核生成を識別できた
 - PbF_2 でのエネルギーカットでS/Nの向上 $\sim \times 3$

Backup



*Ln ν stops after 200ps within 1mm;
the recoiling effects on lifetime and
 π - momentum is negligible.*



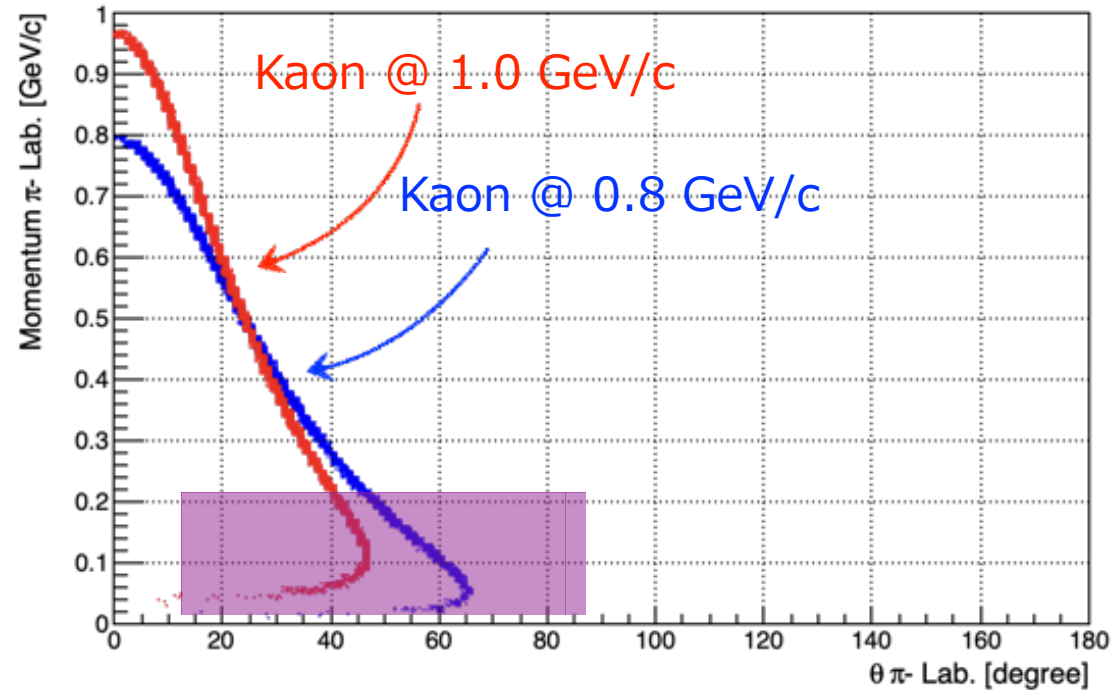
Part I: Performance estimation

out of
pi0+pi-
acceptance

Reaction(decay) and final states	Charged particle timing structure	Branching ratio	σ [mb/Sr] for $p_{K^-}=0.9\text{GeV}/c$ and $\theta_{\pi^0}=0$
$K^- \ ^3\text{He} \rightarrow \pi^0 \ ^3\Lambda \text{H} \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \pi^- \ ^3\text{He} \rightarrow 2\gamma \pi^- \ ^3\text{He} \\ \pi^0 \text{p n n}_s \rightarrow 2\gamma \text{p n n} \end{cases}$	delayed π^- delayed p	?% ?%	?% ?%
$K^- \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow 2\gamma \mu^- \bar{\nu}_\mu \\ \pi^0 \pi^- \rightarrow 2\gamma \pi^- \\ \pi^0 \pi^0 \pi^- \rightarrow 4\gamma \pi^- \end{cases}$	prompt μ^- prompt π^- prompt π^-	3.32% 20.92% 1.76%	Not included
$K^- \text{p} \rightarrow \pi^0 \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \pi^0 \text{n} \rightarrow 4\gamma \text{n} \\ \pi^0 \pi^- \text{p} \rightarrow 2\gamma \pi^- \text{p} \end{cases}$	N. A. delayed π^- , p	35.8% 63.9%	4.5
$K^- \text{p} \rightarrow \pi^0 \Sigma^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \gamma \pi^0 \text{n} \rightarrow 5\gamma \text{n} \\ \pi^0 \gamma \pi^- \text{p} \rightarrow 3\gamma \pi^- \text{p} \end{cases}$	N. A. delayed π^- , p	35.8% 63.9%	0.36 (scaled)
$K^- \text{p} \rightarrow \pi^- \Sigma^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^- \pi^0 \text{p} \rightarrow 2\gamma \pi^- \text{p} \\ \pi^- \pi^+ \text{n} \end{cases}$	prompt π^- , delayed p N. A.	51.57% 48.31%	0.9
$K^- \text{p} \rightarrow \pi^+ \Sigma^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \text{n}$	N. A.	100%	Not included
$K^- \text{n} \rightarrow \pi^- \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^- \pi^0 \text{n} \rightarrow 2\gamma \pi^- \text{n} \\ \pi^- \pi^- \text{p} \rightarrow 2\pi^- \text{p} \end{cases}$	prompt π^- N. A.	35.8% 63.9%	Not included
$K^- \text{n} \rightarrow \pi^- \Sigma^0 \rightarrow \pi^- \gamma \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^- \gamma \pi^0 \text{n} \rightarrow 3\gamma \pi^- \text{n} \\ \pi^- \gamma \pi^- \text{p} \rightarrow \gamma 2\pi^- \text{p} \end{cases}$	prompt π^- N. A.	35.8% 63.9%	Not included
$K^- \text{n} \rightarrow \pi^0 \Sigma^- \rightarrow \pi^0 \pi^- \text{n} \rightarrow 2\gamma \pi^- \text{n}$	delayed π^-	100%	0.9 (scaled)

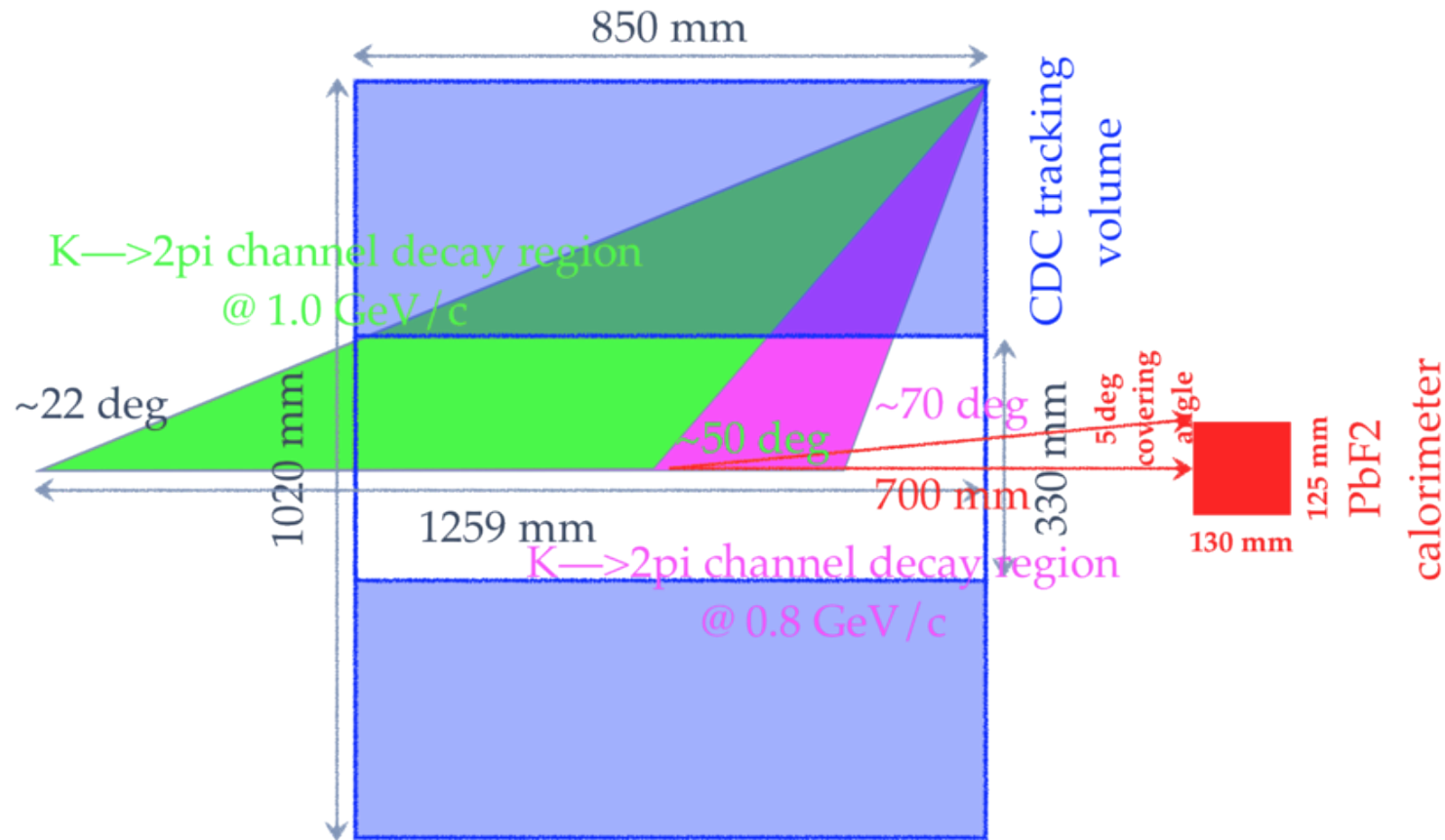
Table 4: Survey for $K^- + \ ^3\text{He} \rightarrow$ forward π^0 + delayed π^- .

Background events from Kaon in-flight decay



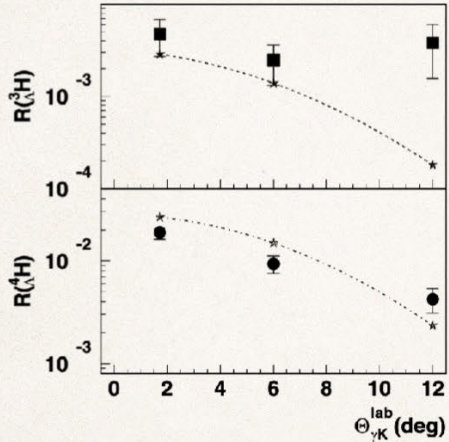
- For setup like SKS dipole magnet spectrometer, there are severe BG from K- in-flight decay.
- But in our case, a conjunction measurement of both π^- and π^0 , the kaon decay backgrounds can be suppressed by using the π^- decay angle and decay vertex.

CDC acceptance vs Kaon decay background



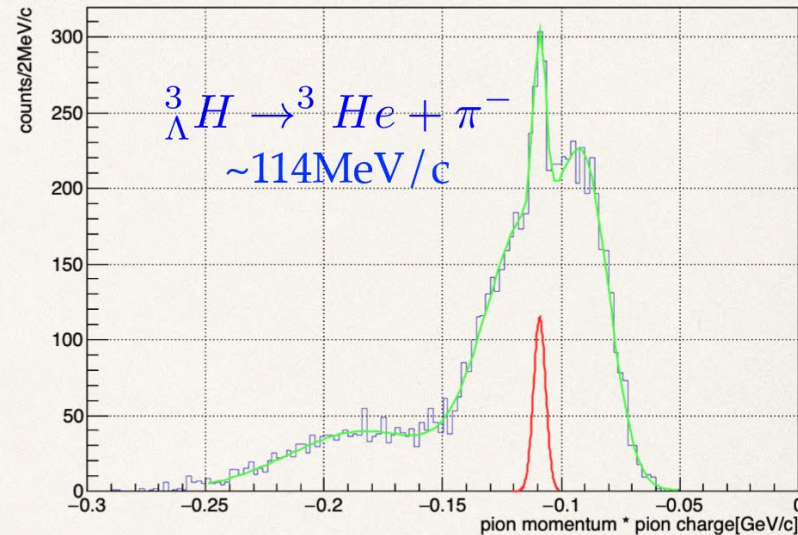
- Most of the 1.0 GeV/c K- beam in-flight decay background is out of the acceptance of CDS spectrometer.

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



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

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



Expected pi- spectrum from ${}^3\text{He}$ target
(${}^3_{\Lambda}\text{H}/{}^4_{\Lambda}\text{H} \sim 1/3$ assumption)

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

DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.242501

10

PbF2カロリメータ reference

- CP 非保存のK 中間子稀崩壊過程測定 KEK – PS E391a
 - 1.5–4.0 GeV/c
 - 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: $20 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$
 - ✓ PMT: 3/4 インチ R4125UV
 - ✓ テフロンテープ
 - ✓ シリコングリース OKEN-6262A
 - New muon(g-2) exp. @Fermilab
 - 2.0–4.5 GeV
 - 統計項 $a_0: 3.4 \pm 0.1 \%$
 - 定数項 $b: 1.5 \pm 0.0 \%$
 - ✓ 結晶サイズ: $25 \times 25 \times 140 \text{ mm}^3$
 - ✓ MPPC: S12642-4040PA-50
 - ✓ Millipore
 - ✓ optical gel (1.62), protective epoxy resin (1.55)
- NIMA, Volume 783, 21 May 2015

山形大学 吉田祐樹氏の修論(2003)

Energy calibration

- Ch to MeV

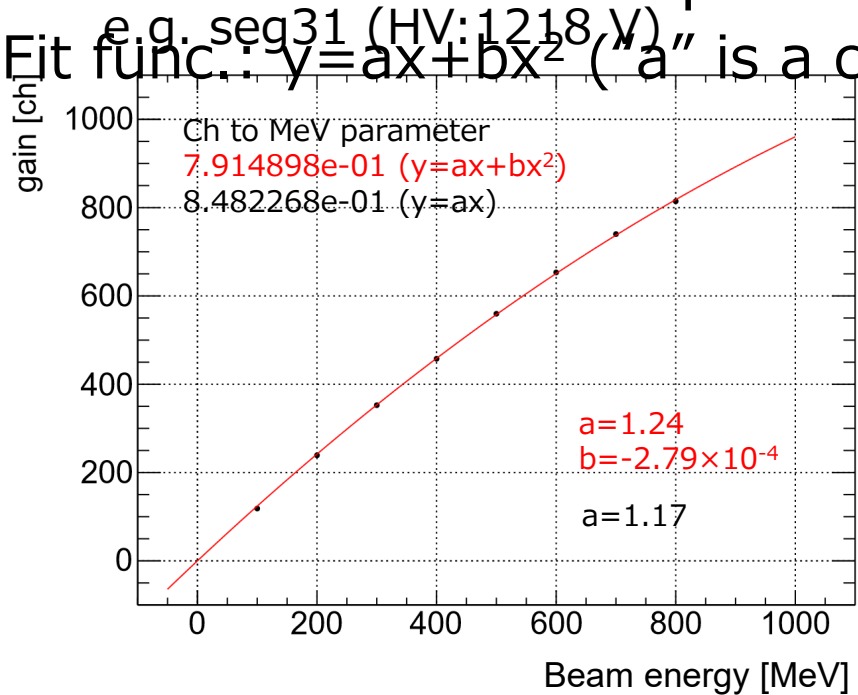
- Fit each energy measured in only one segment at central position with Gaussian

- ✓ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 MeV

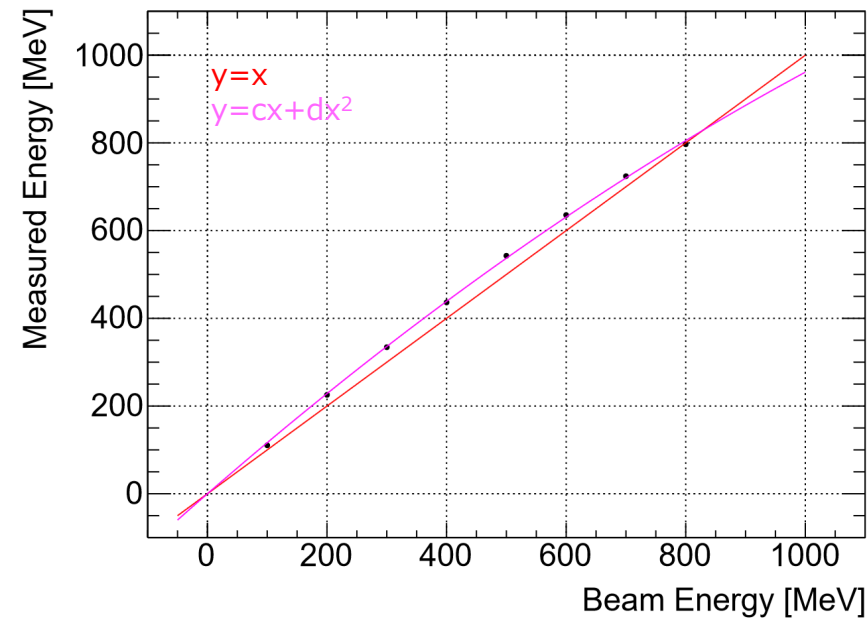
- ✓ Plot the Gaussian mean

- Fit with function below passing through all points.

- ✓ Fit func.: $y = ax + bx^2$ ("a" is a conversion factor)



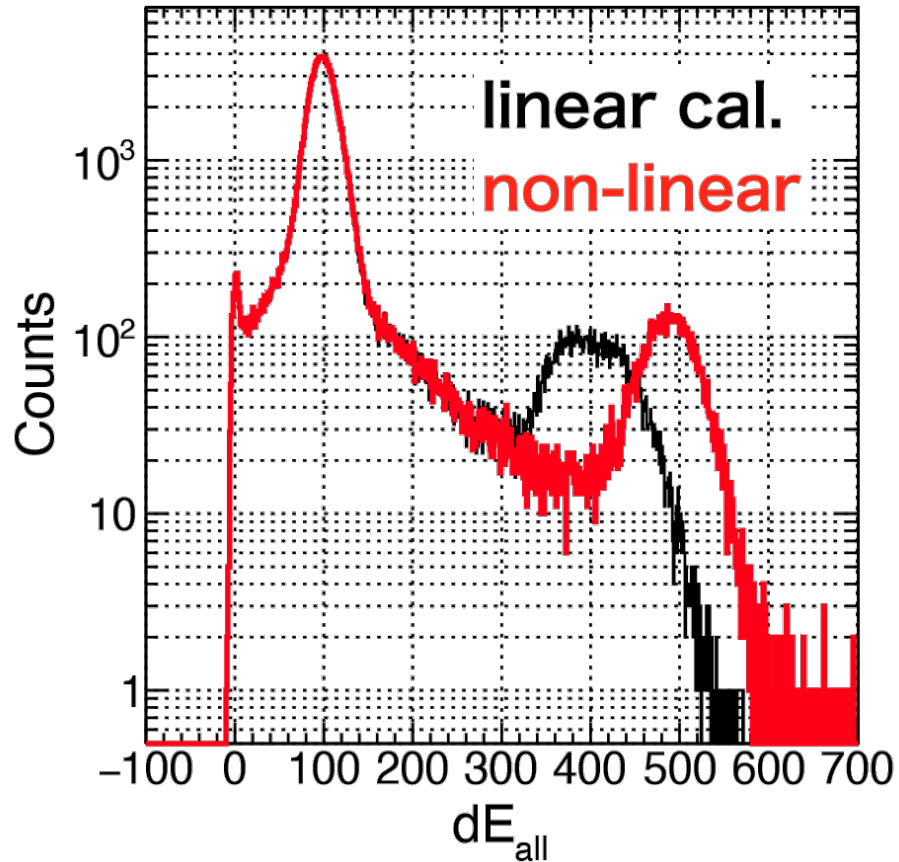
seg31 cluster sum(not required TDC)



no linear

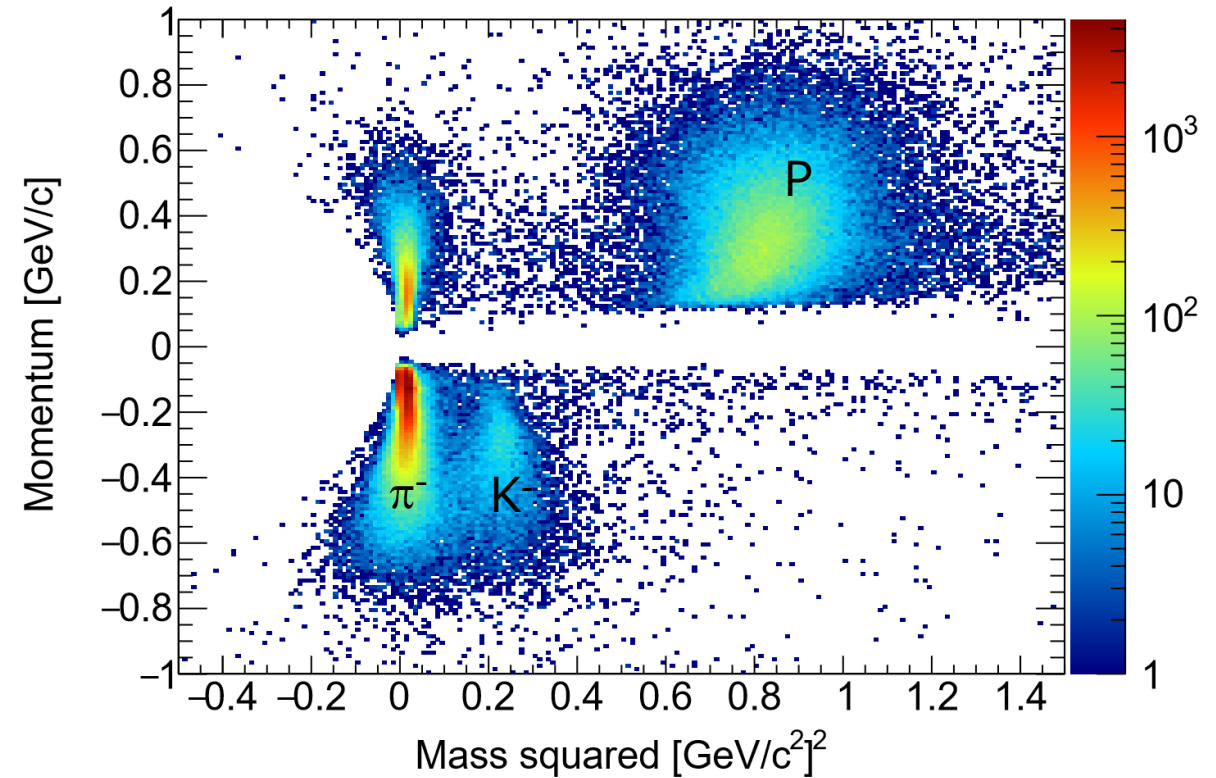
Detector performance

- PbF2 calorimeter



- CDS

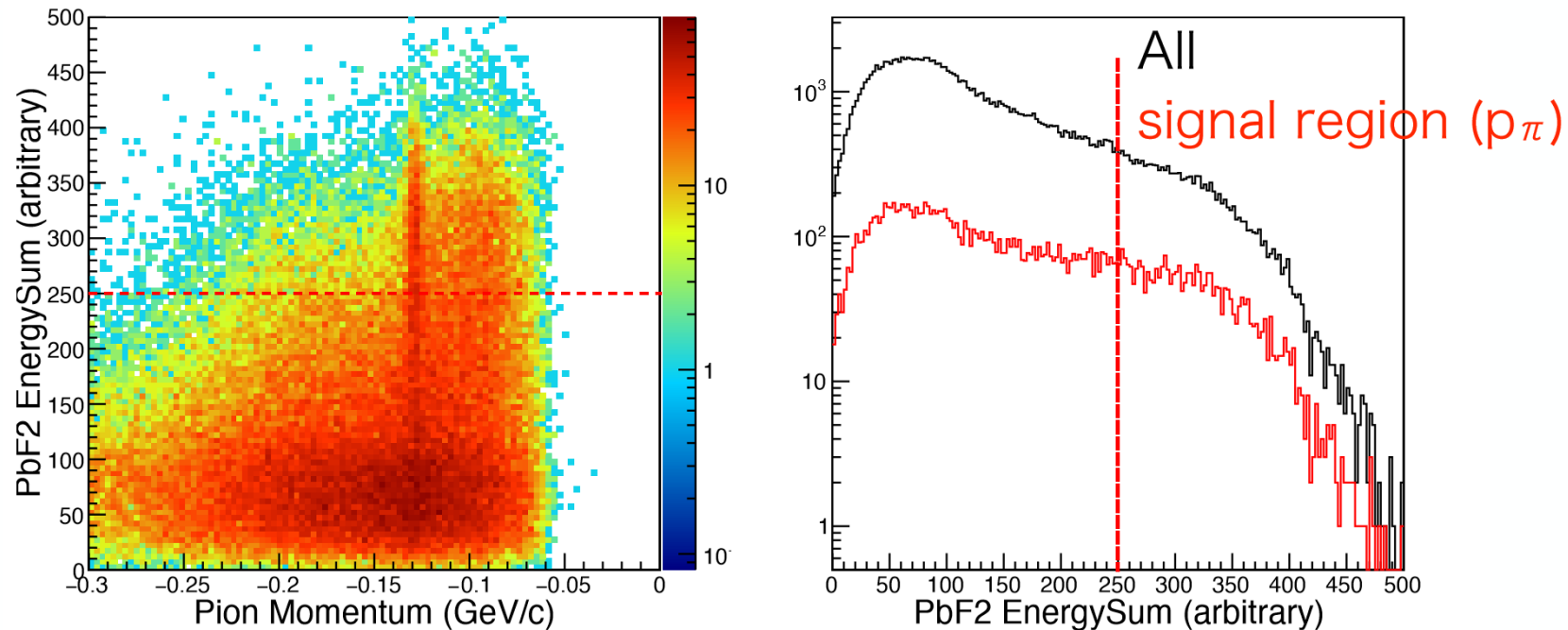
➤ Particle ID



Detectors were working well!

PbF2 EnergySum

with TOF, Vertex, CDC-CDH, mass2 cuts



- Choose high-energy gamma-rays as planned
- 250 corresponds to ~ 600 MeV