

K-ビームを用いた ハイパートライトシンの 寿命直接測定の現状

阪大理 赤石 貴也

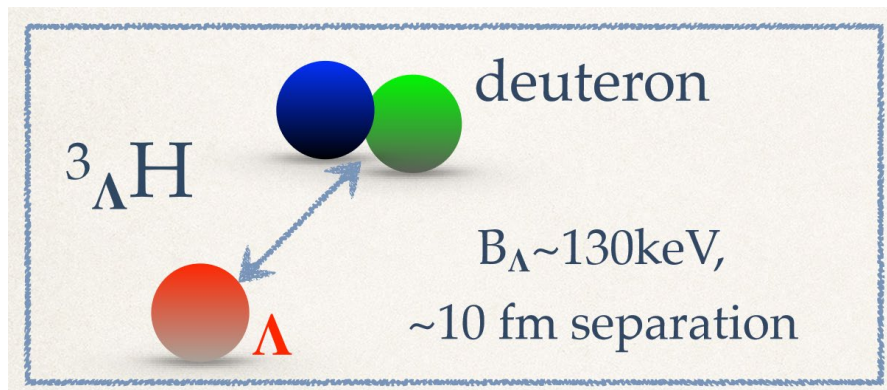
for the J-PARC E73 collaboration

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: 短い寿命**
 - ハイパートライトンパズル
- ⇒ **異なる実験手法: 寿命直接測定**
 - ✓ カウンター実験の結果なし

Exp.	Lifetime
HypHI(2013)	$183^{+42}_{-32} \pm 37 \text{ ps}$
STAR(2018)	$142^{+24}_{-21} \pm 29 \text{ ps}$
ALICE(2019)	$242^{+34}_{-38} \pm 17 \text{ ps}$

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

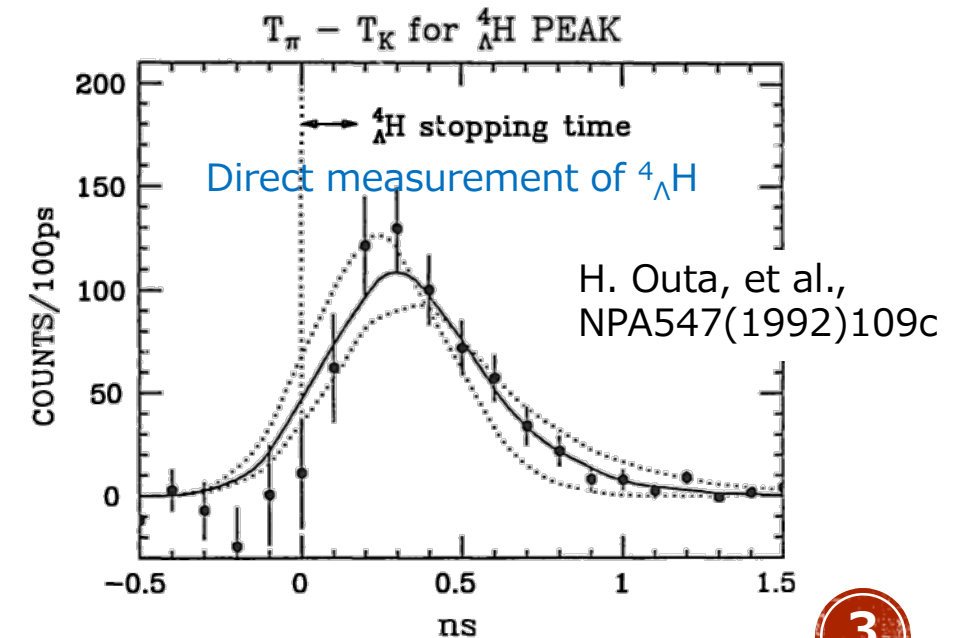
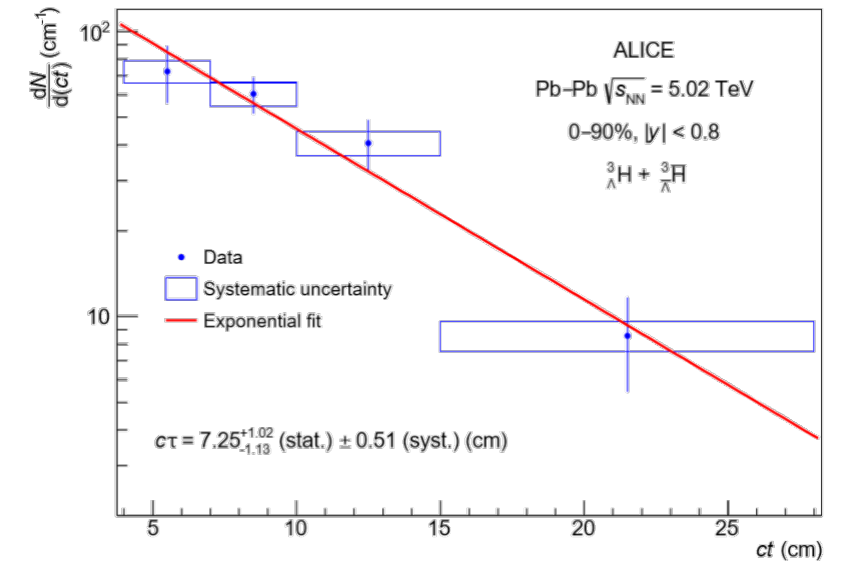


complementary

■ 直接寿命測定: J-PARC, ELPH

- 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

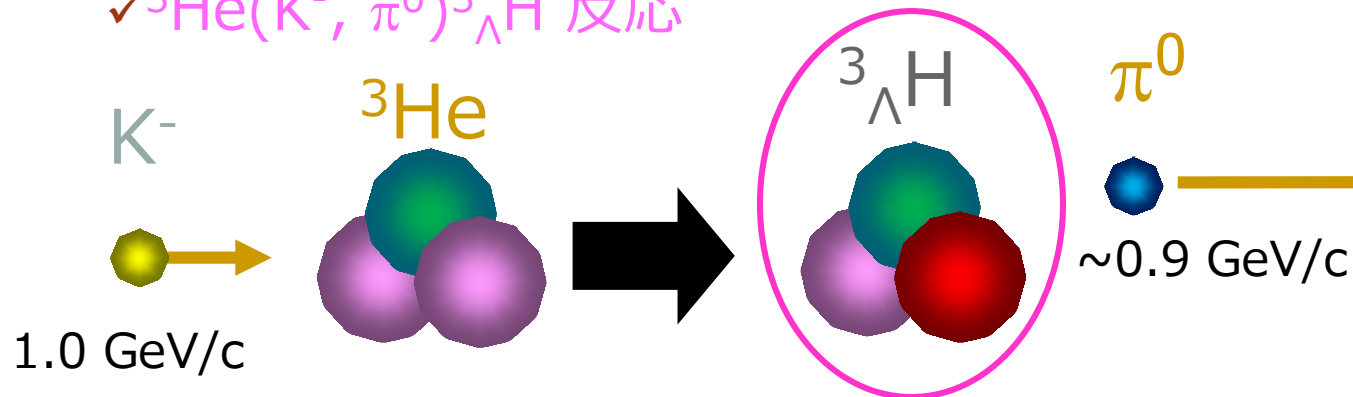


J-PARC E73実験

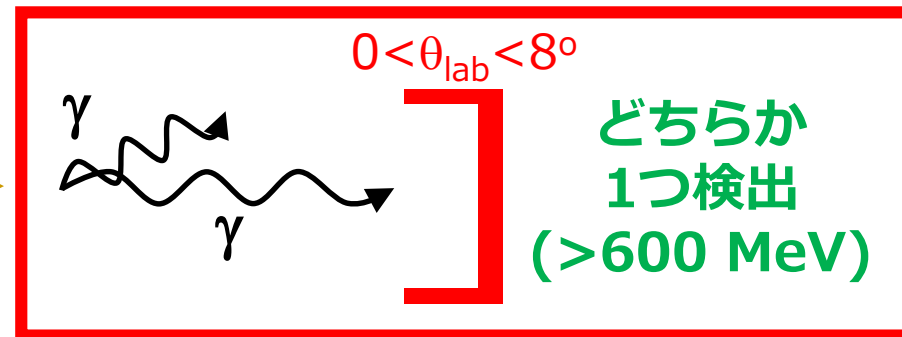
■ 実験手法

➤ J-PARC K1.8BR Beamline

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



① 前方カロリメータ



① 前方 γ 線のタグ

高エネルギーの π^0 を選べる

→ Λ , Σ の崩壊によるBGを除去

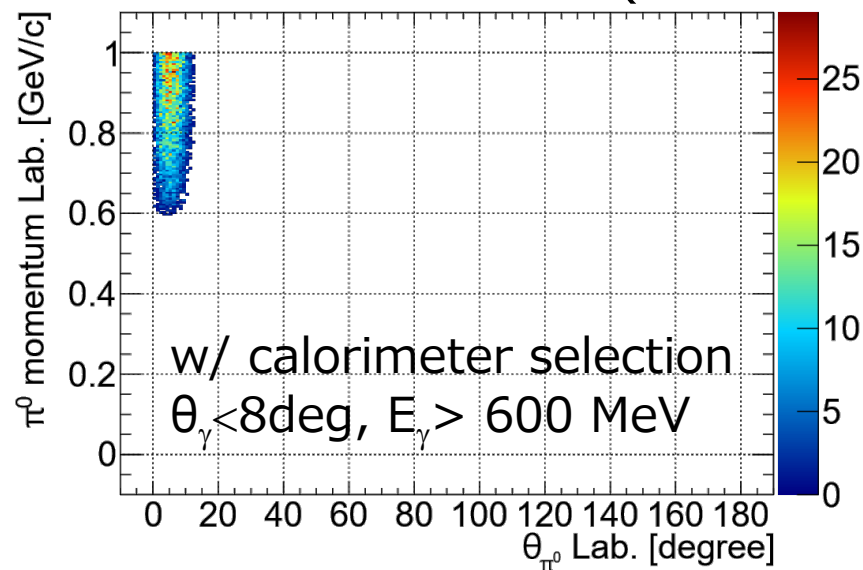
⇒ ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のイベントが主

Λ の反跳運動量: 70–200 MeV(0–10 deg)

→ ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ は小さい反跳運動量

⇒ 物質中で寿命より短い時間で静止

π^0 運動量の角度分布(simulation)

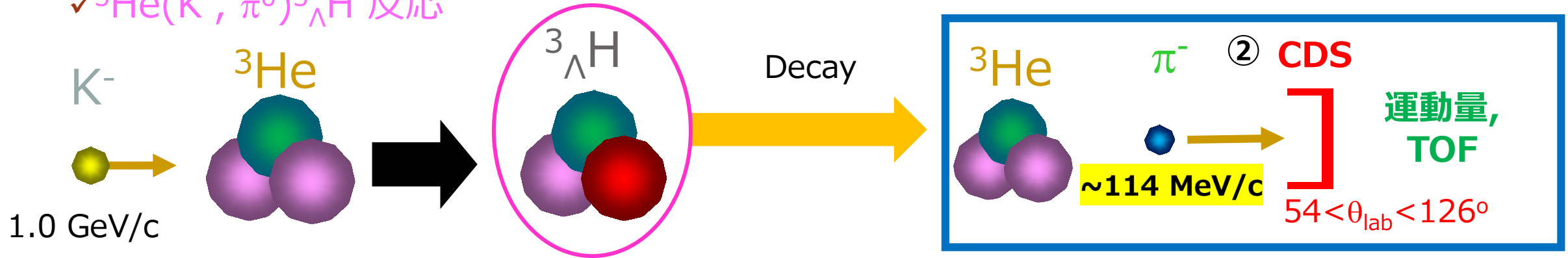


J-PARC E73実験

■ 実験手法

➤ J-PARC K1.8BR Beamline

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

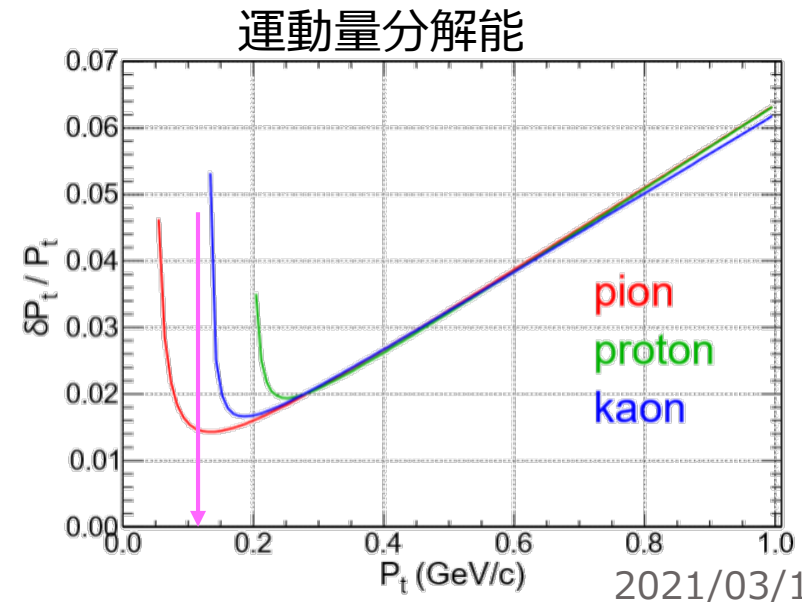


② Cylindrical Detector System (CDS)

particle ID

崩壊後の π^- の単一運動量を測定

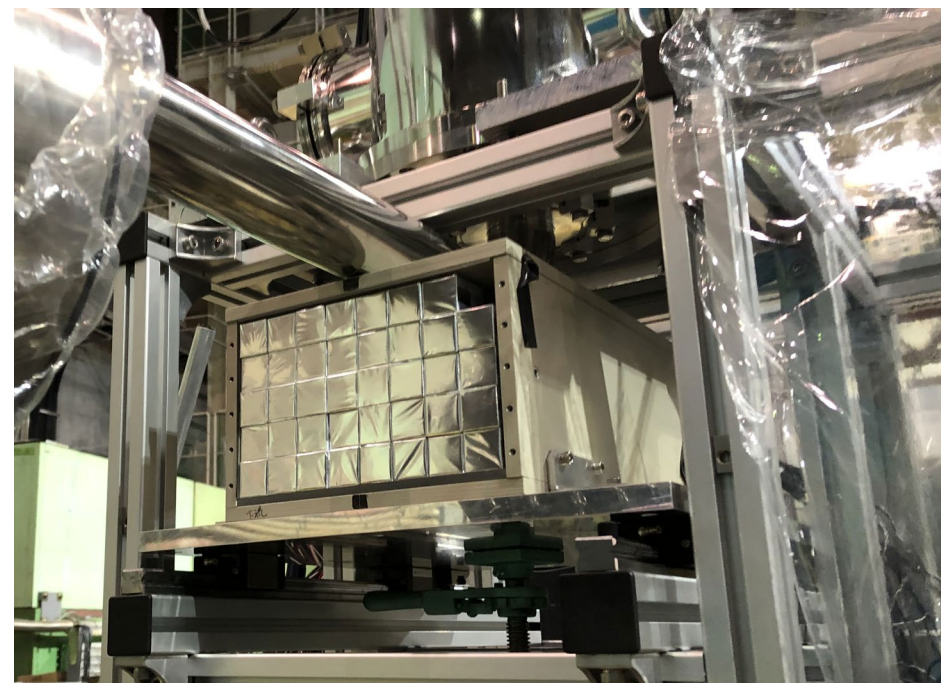
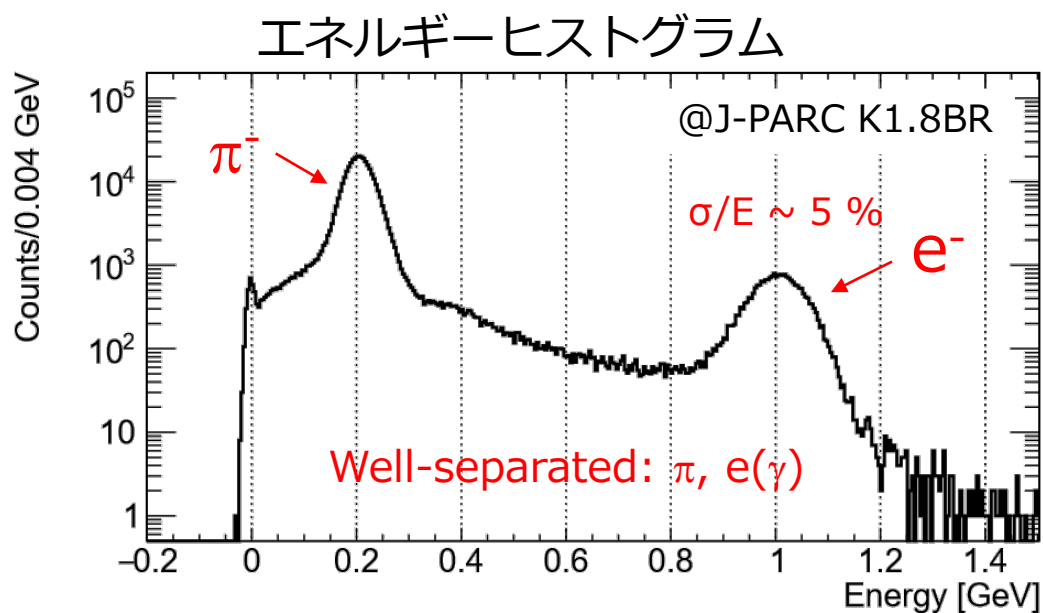
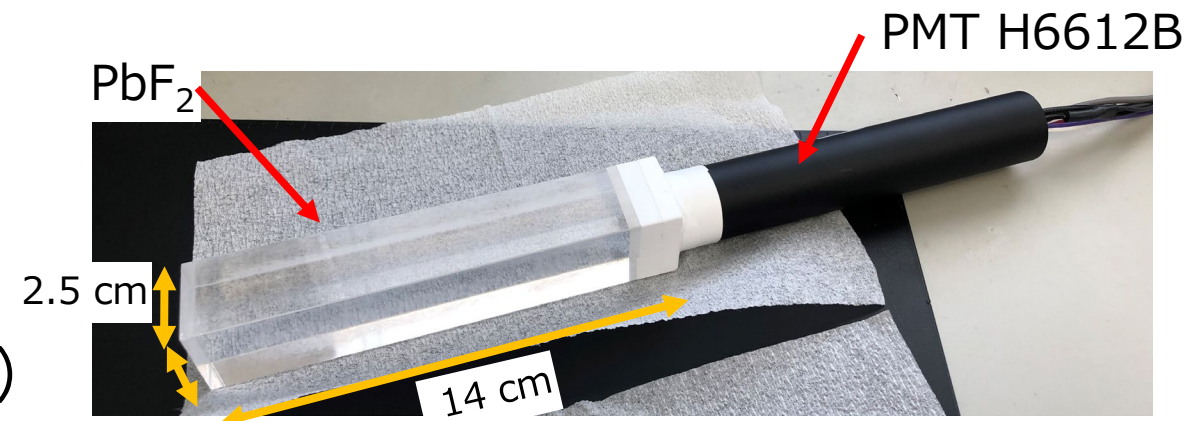
${}^3_{\Lambda}\text{H}$ を同定して π^- の崩壊時間から寿命を導出



実験セットアップ: PbF_2 カロリメータ

➤ PbF_2 結晶

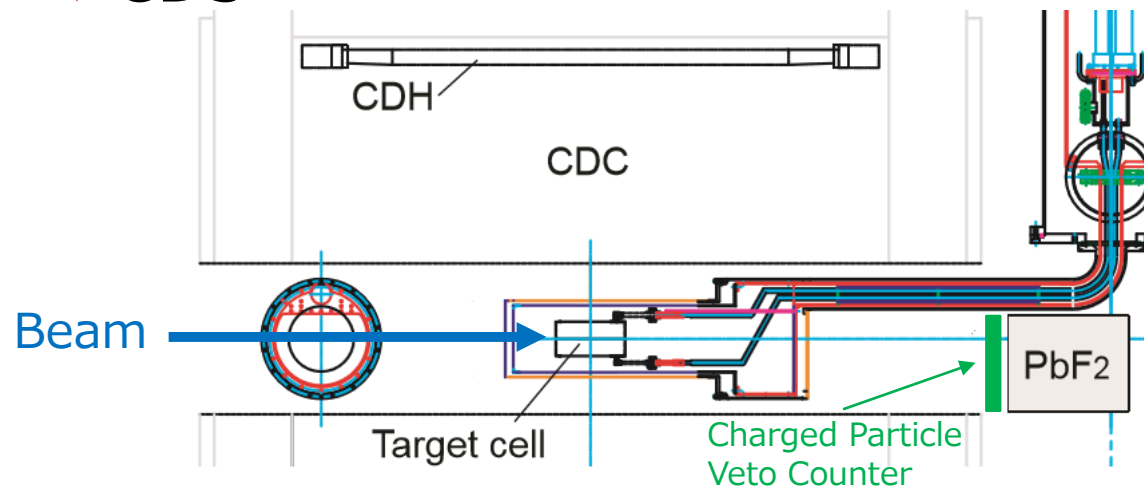
- ✓チェレンコフ光によるカロリメータ
 - 応答が早い, 放射線耐性
 - ハドロンとの分離
- ✓高エネルギーガンマ線をタグ(>600 MeV)
 - γ 崩壊からのBGを除去



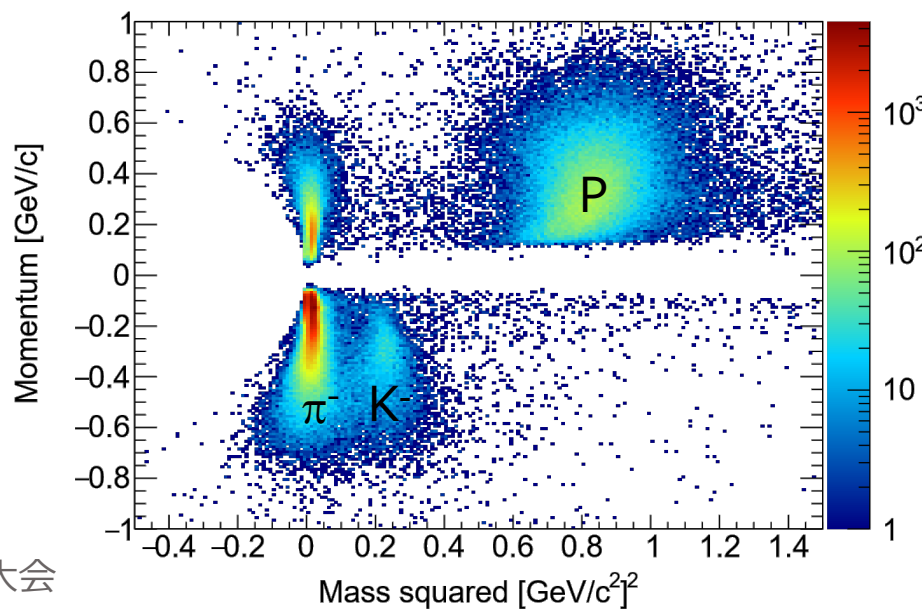
実験セットアップ: CDS

■ J-PARC K1.8BR Beamline

➤ CDS

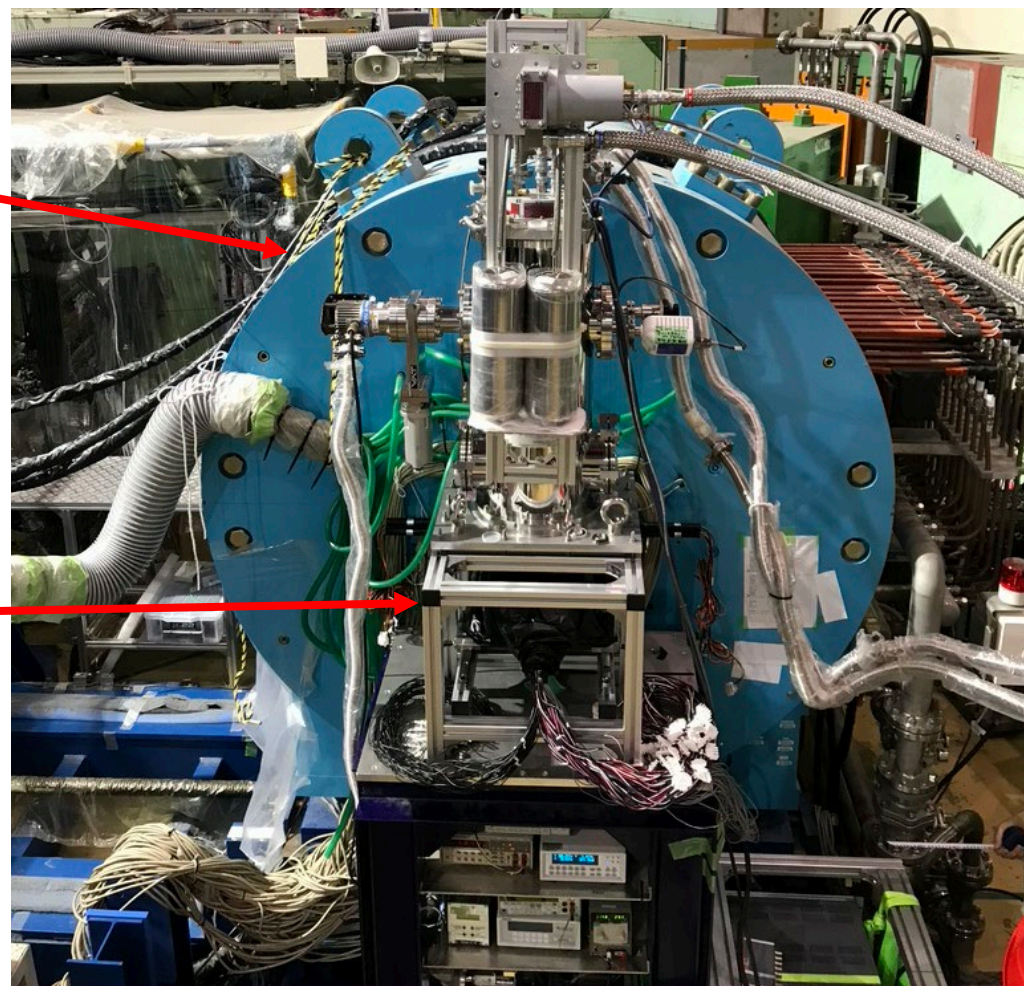


✓PID



CDS

PbF2



Working well

J-PARC E73実験の現状

■ Stage-0

- 4He 標的で (K^-, π^0) 反応のFeasibility study
 - ✓ 2020/06にデータ取得
 - 新しい手法でハイパー核を識別

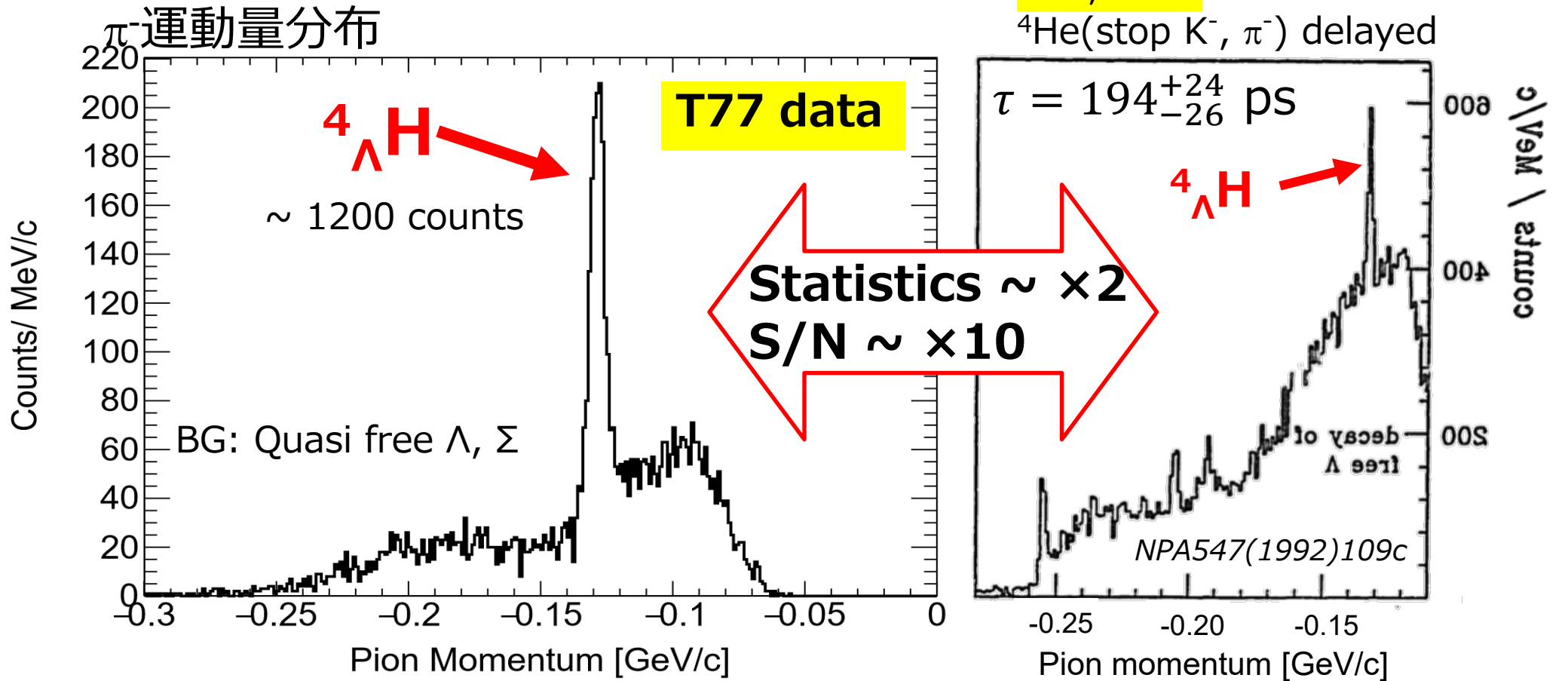
■ Stage-1

- ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のcross section study
 - ✓ (K^-, π^0) 反応における ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 生成: **First measurement**
 - 測定に向けて準備中(今年夏前予定)

■ Stage-2

- ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命測定: 2022年度後半予定

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



新しい手法(K^- , π^0)反応でハイパー核を識別

${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の寿命でworld recordになりうるデータ: statistical error < 10 ps

✓ 3日のビームタイムで取得

Stage-1: cross section of Hypertriton

- ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$: 未測定
→収量が知りたい

- Stage-1: ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のcross section study
✓1週間程度(今年夏前期待)

Prof. T. Harada's calculation:

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

CDCC (continuum discretized coupled-channels) method and DWIA

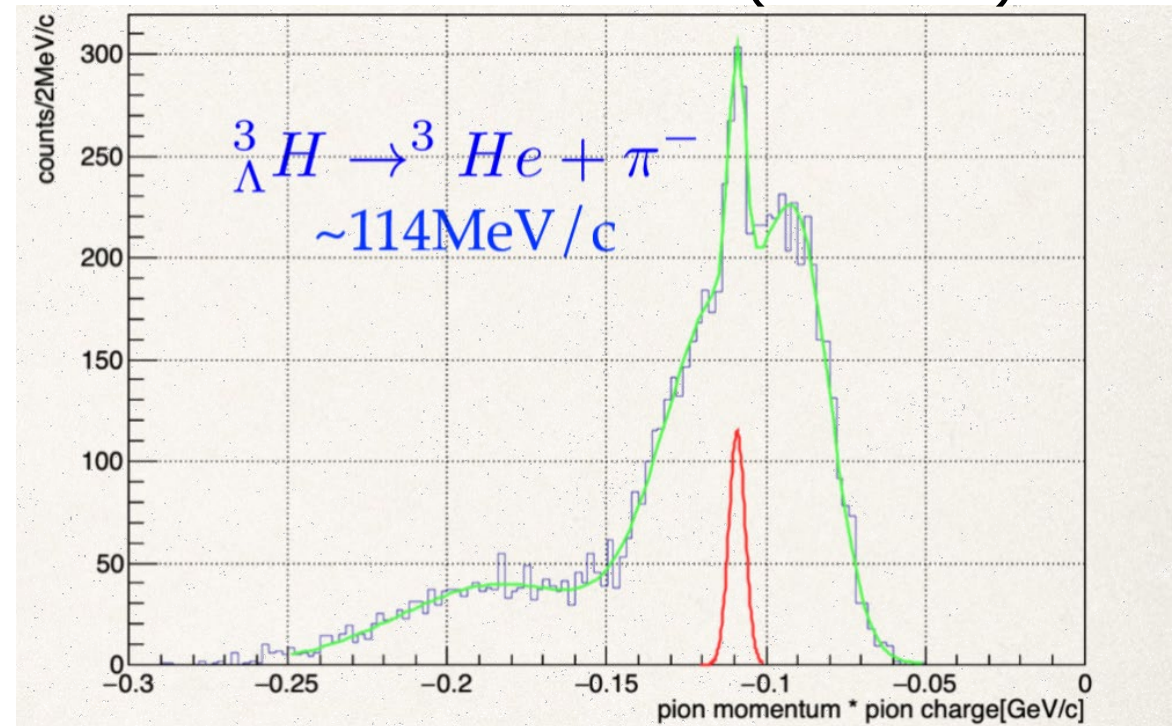
- ✓得られた ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の結果から見積り

- Stage-2: 寿命測定 ~ 4 weeks

- 余談: (K, π)反応 \Rightarrow Spin-nonflip
➤ ${}^3_{\Lambda}\text{H}^{1/2+}_{\text{g.s.}}$ がdominant

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

期待される π 運動量分布(1 week)



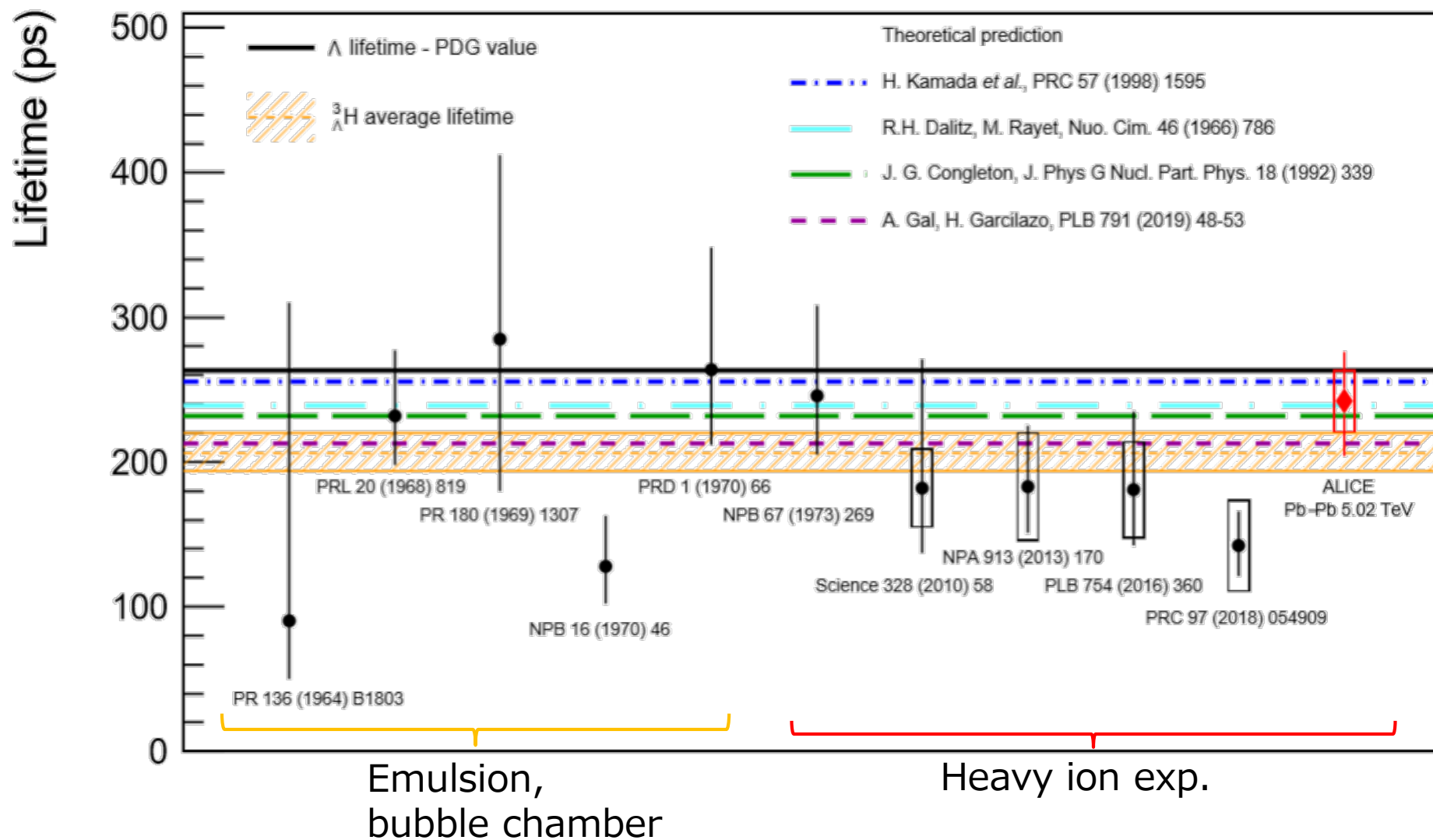
まとめ

- ハイパートライトンパズル
 - $B_{\Lambda} = 130 \text{ KeV}$, free Λ に近い寿命 \Leftrightarrow 重イオンの結果: 短い寿命
- ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$ 反応を用いて ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命直接測定(J-PARC E73)を計画
 - 重イオン実験とは異なる実験手法
- 実験の現状
 - stage-0: ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成のFeasibility studyを実施
 - ✓ 新しい手法でハイパー核生成、識別
 - ✓ Output: ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の寿命, cross section
 - Stage-1: ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ のcross section study
 - ✓ ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$ 反応でfirst measurement
 - ✓ 1週間程度(今年夏前期待)
 - Stage-2: ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ 寿命測定 ~2022年度後半予定

Backup

lifetime

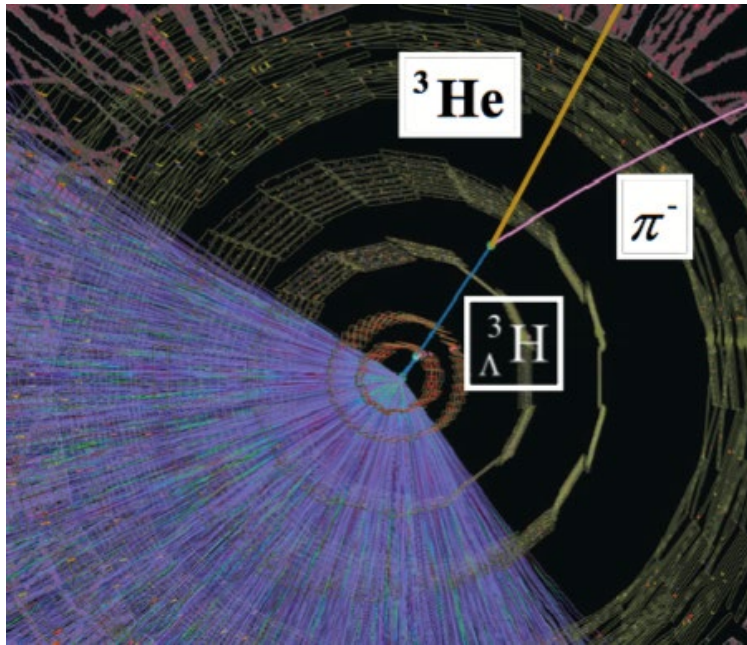
PLB Vol.797, 10 October 2019, 134905



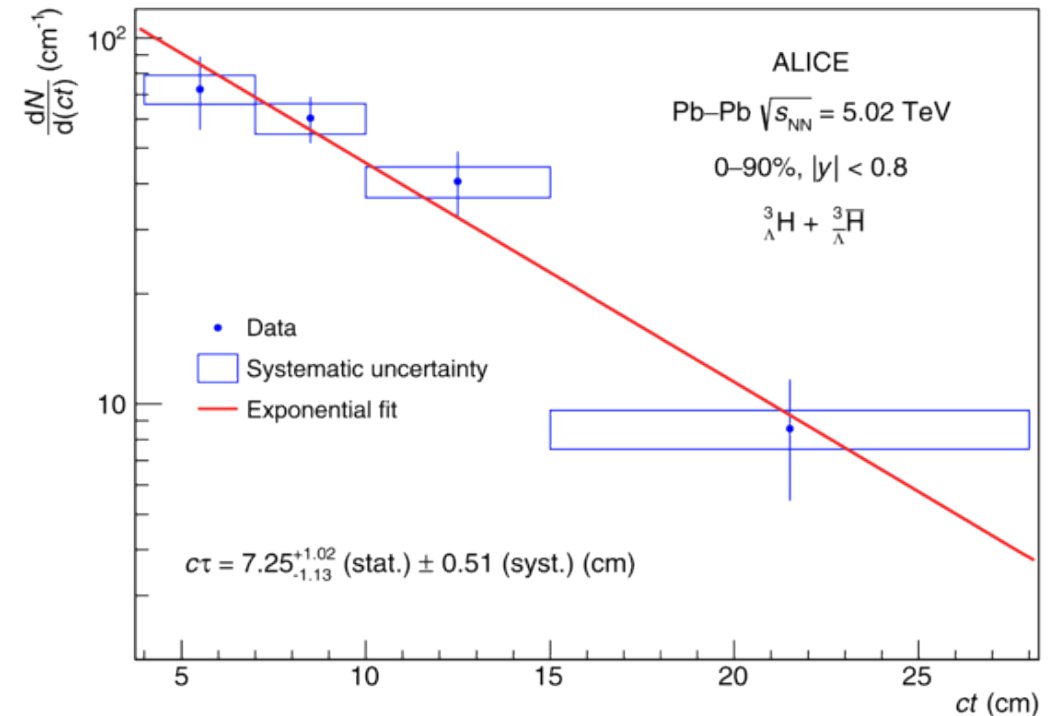
No result of counter exp. of hypertriton

Introduction: heavy ion results

ALICE as an example for the experimental approach.



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



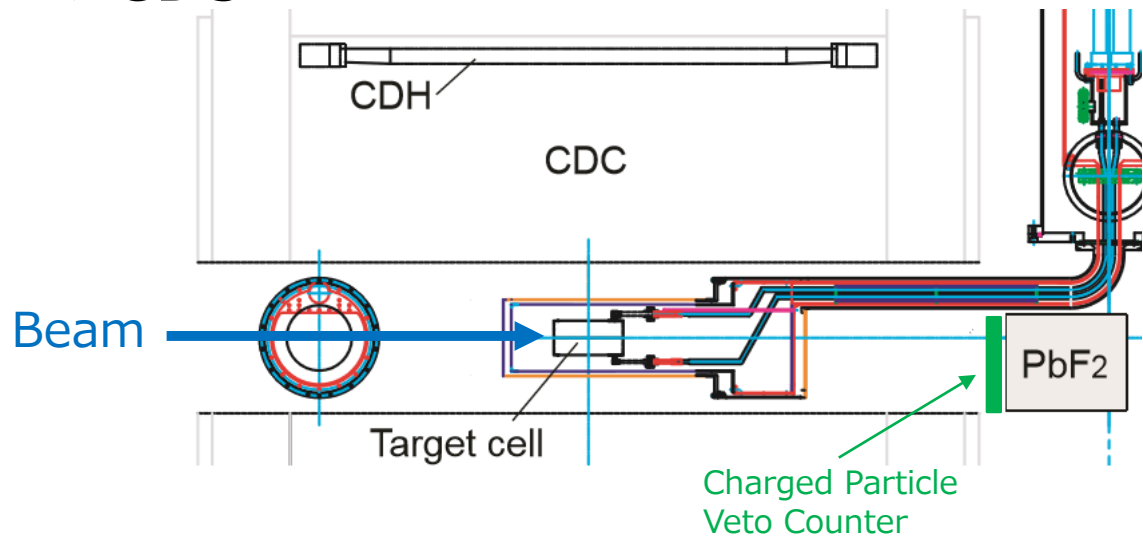
Depends on tracking results for decay length and momentum as $t = L/\beta\gamma c$

ALICE collaboration, PLB, 797 (2019) 134905

実験セットアップ

■ J-PARC K1.8BR Beamline

➤ CDS

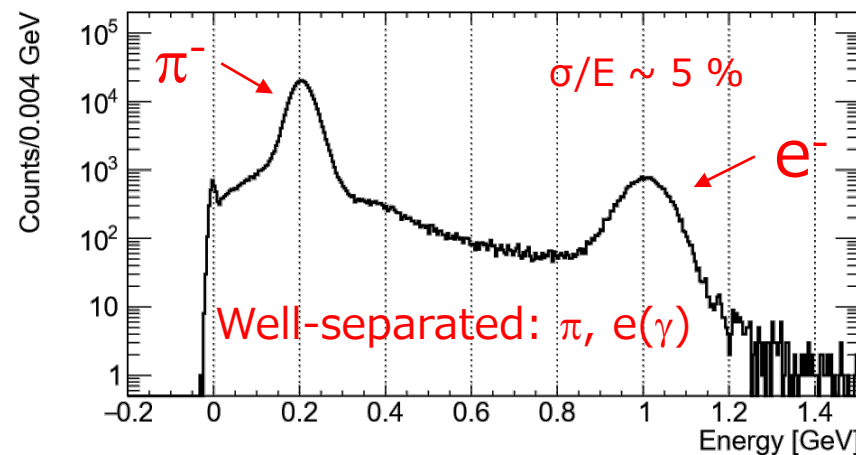
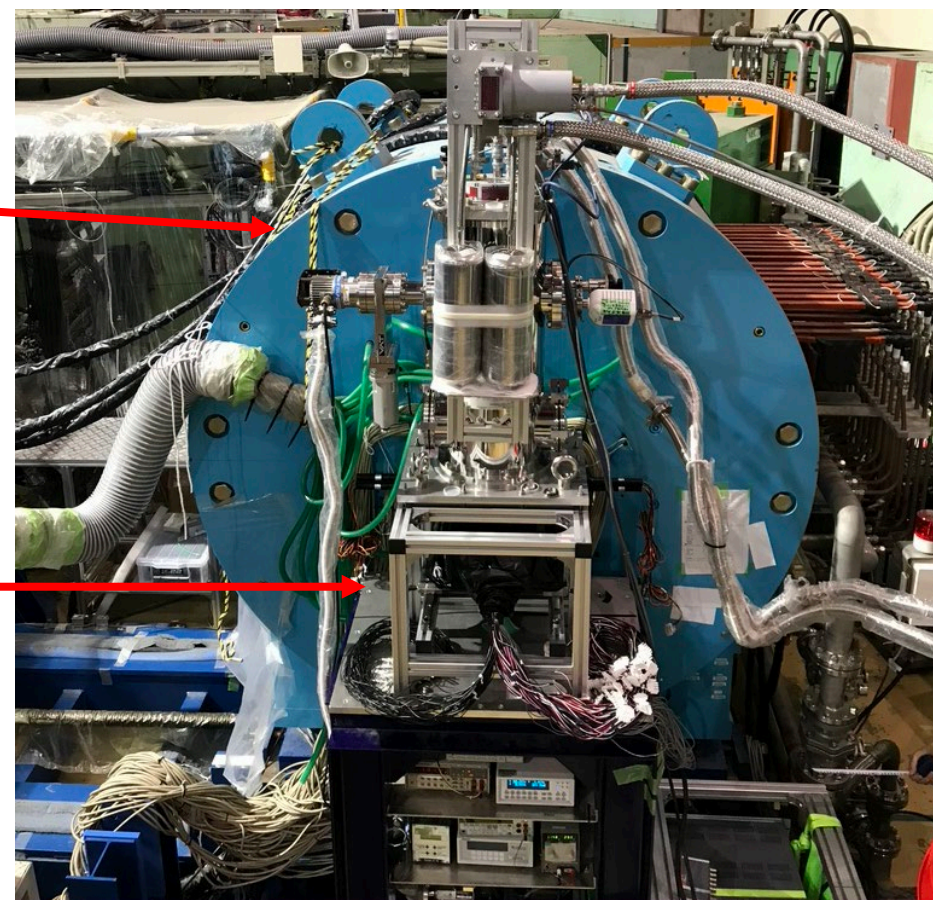


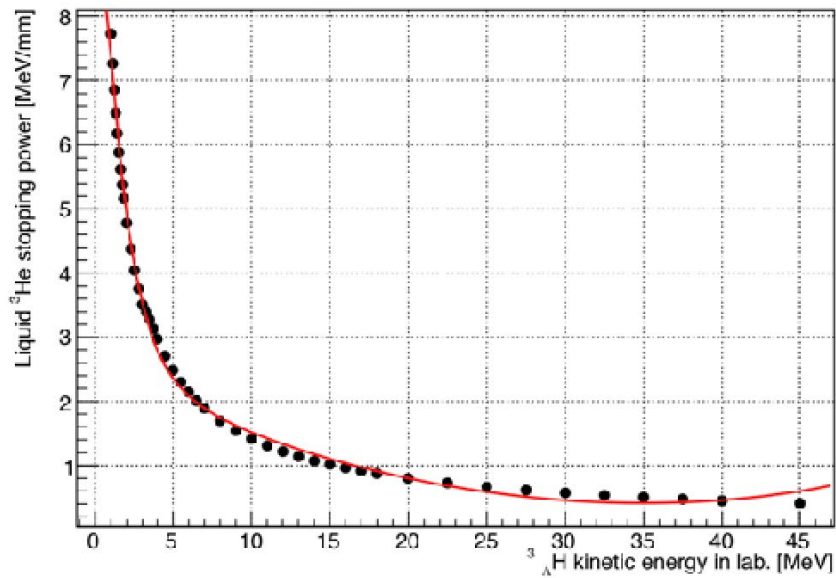
➤ PbF2結晶

- ✓ チェレンコフ光によるカロリメータ
→ 応答が早い, 放射線耐性
→ ハドロンとの分離
- ✓ 高エネルギーガンマ線をタグ(>600 MeV)
→ Υ 崩壊からのBG低減

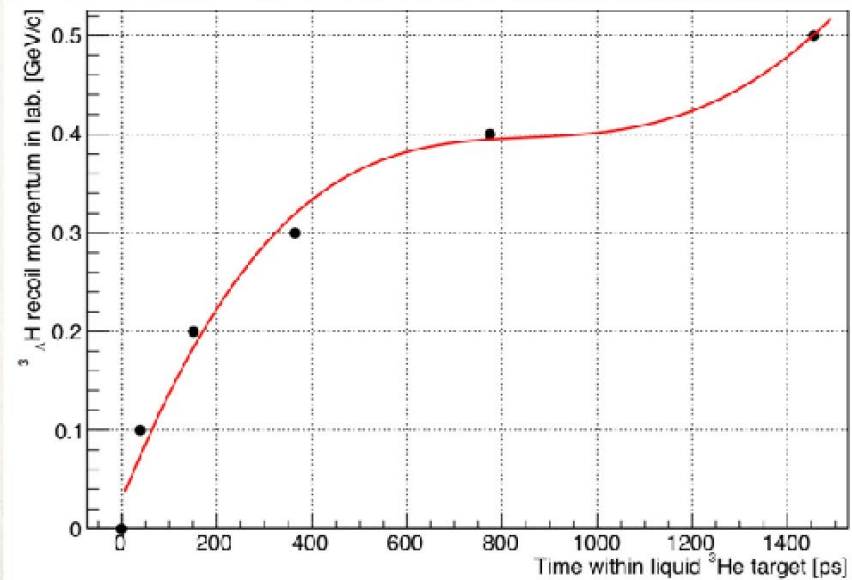
CDS

PbF2

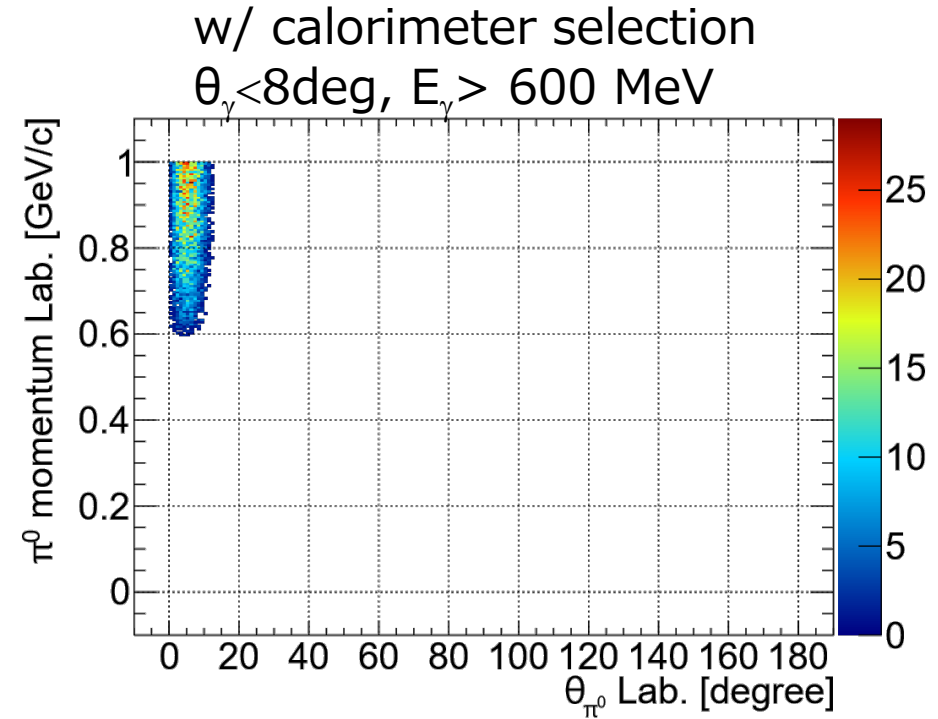
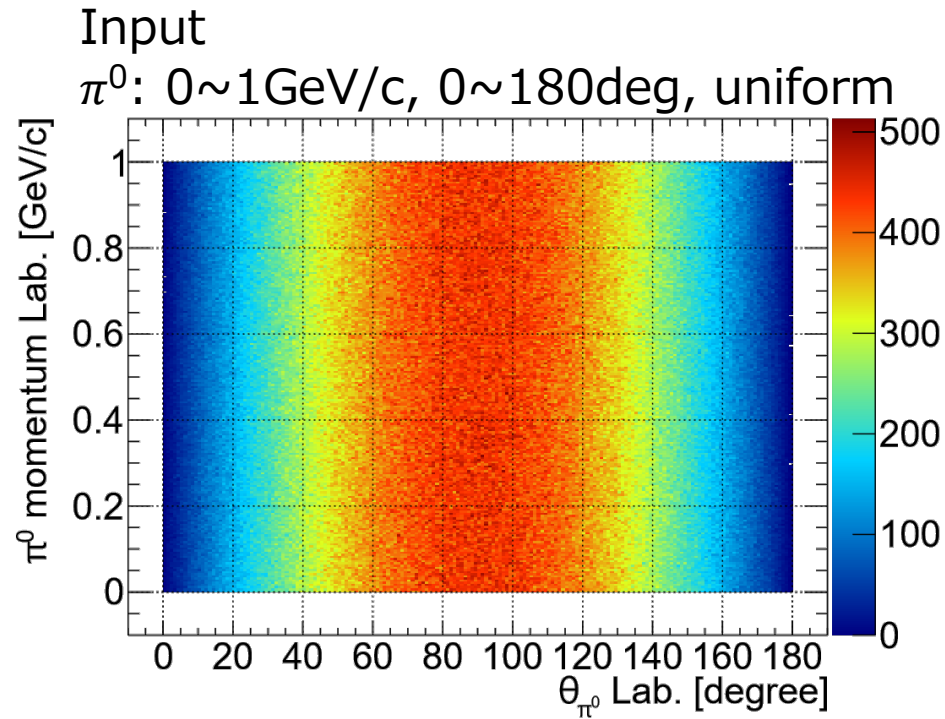




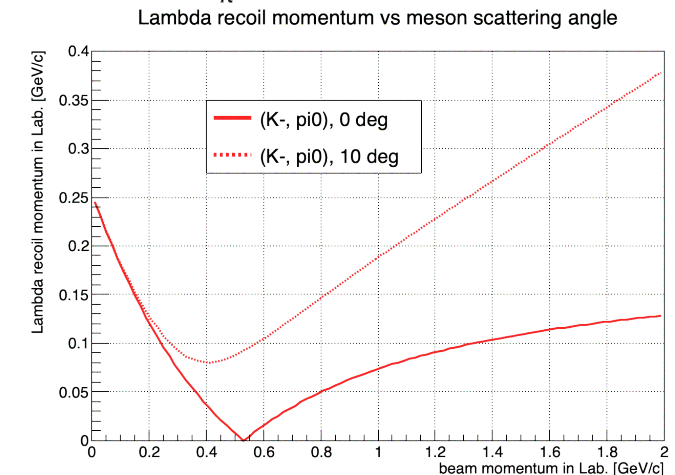
*Ln ν stops after 200ps within 1mm;
the recoiling effects on lifetime and
 π - momentum is negligible.*



前方ガンマ線のタグ



- 前方カロリメータで1つの高エネルギー γ 線を選ぶ
 - ✓ 高エネルギーの π^0 を選べる
 - Λ , Σ の崩壊によるBGを除去
 - ⇒ ${}^3_\Lambda\text{H}$ のイベントが主



前方カロリメータの役割

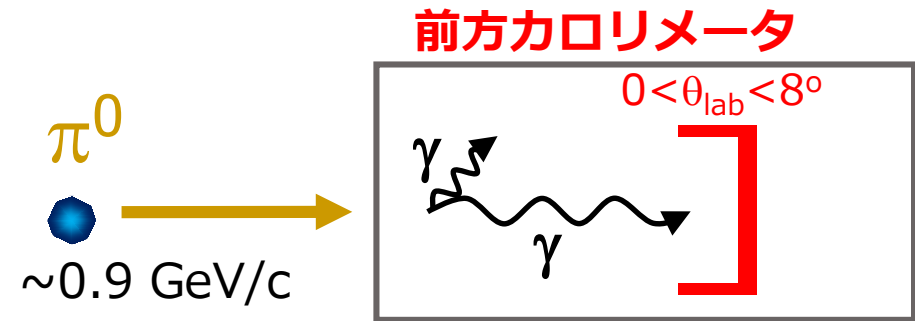
■ポイント: ハイパー核生成事象の γ 線をタグする

➤バックグラウンドの低減

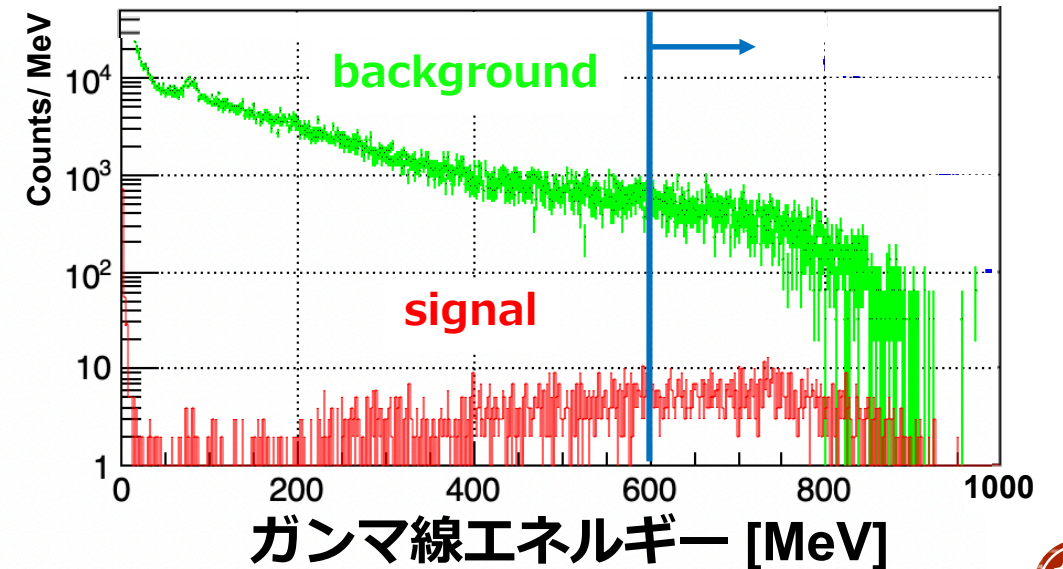
✓前方の高いエネルギーの γ 線
→シグナルとquasi-free BGのみ

✓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

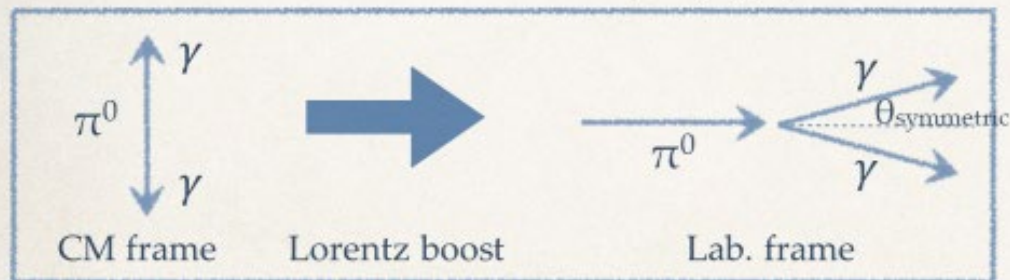
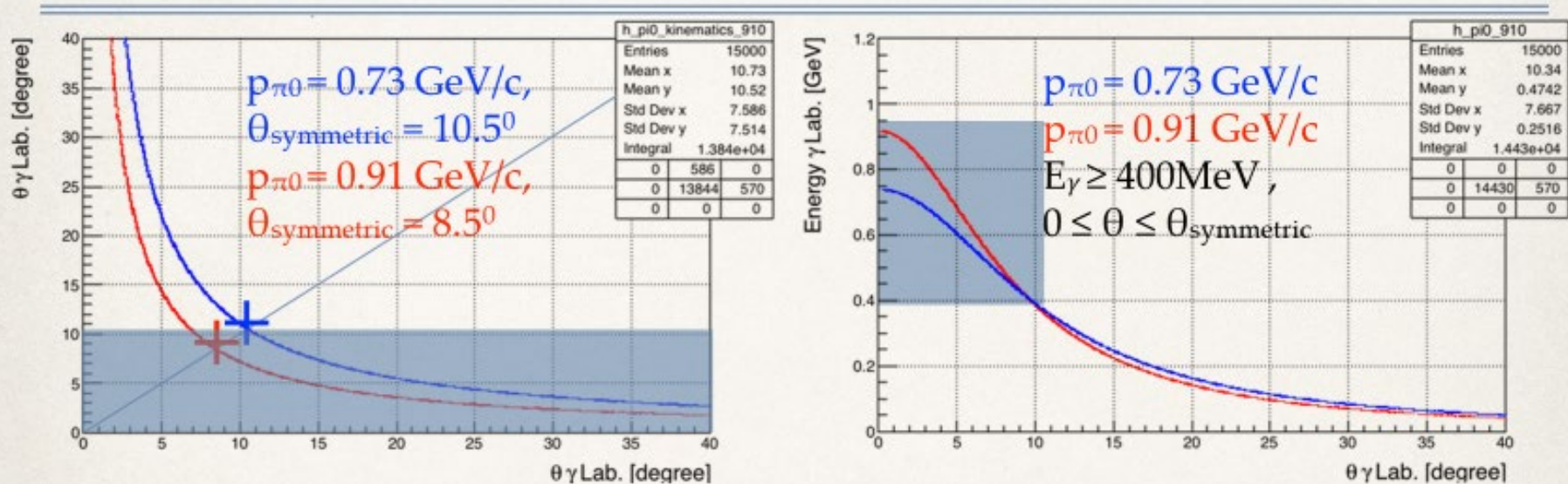
- エネルギー分解能: $< 10 \text{ \%} / \sqrt{E(\text{GeV})}$



Simulation



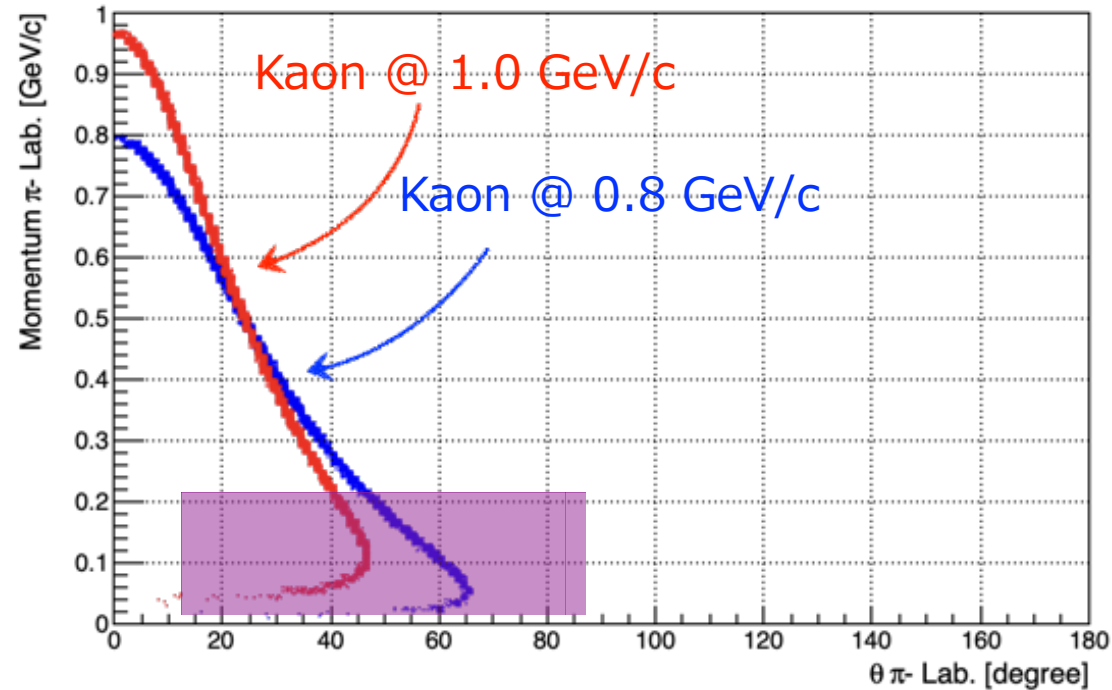
Revisit π^0 decay kinematics



- * 0.73~0.91GeV/c π^0 boosts γ forwardly;
- * By covering $0 \sim \theta_{\text{symmetric}}$, tag the γ with higher energy ($E_\gamma \geq 400\text{MeV}$)

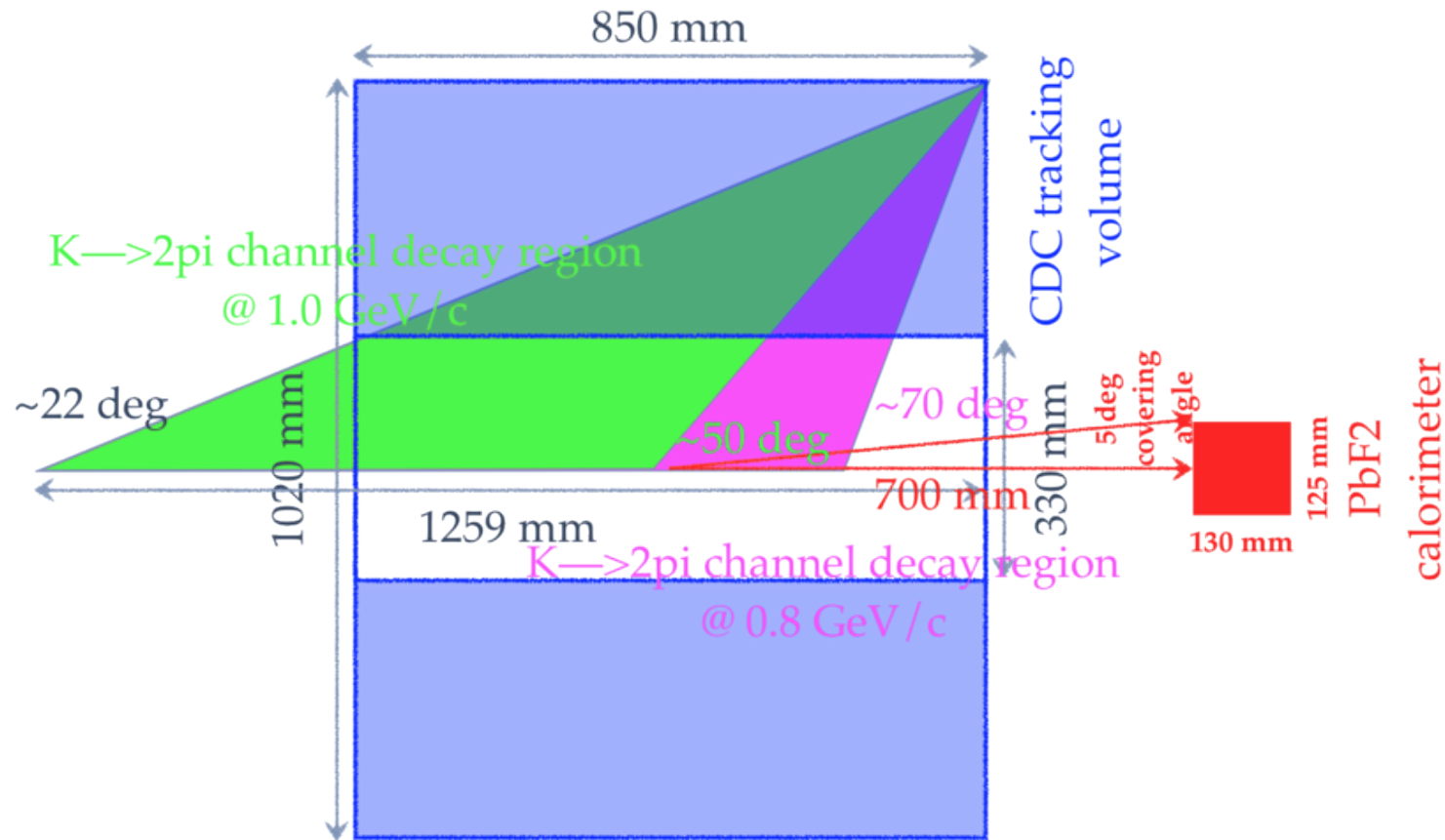
- * π^0 tagger needs to be *located along beam line*
- * *Fast response, radiation hardness*

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.

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 $\theta_{\pi^0}=0$
$K^- \ ^3\text{He} \rightarrow \pi^0 \ ^3\Lambda\text{H} \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \pi^- \ ^3\text{He} \rightarrow 2\gamma \pi^- \ ^3\text{He} \\ \pi^0 p n n_s \rightarrow 2\gamma p n n \end{cases}$	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
$K^- p \rightarrow \pi^0 \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \pi^0 n \rightarrow 4\gamma n \\ \pi^0 \pi^- p \rightarrow 2\gamma \pi^- p \end{cases}$	N. A. delayed π^- , p	35.8% 63.9%	4.5
$K^- p \rightarrow \pi^0 \Sigma^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \gamma \pi^0 n \rightarrow 5\gamma n \\ \pi^0 \gamma \pi^- p \rightarrow 3\gamma \pi^- p \end{cases}$	N. A. delayed π^- , p	35.8% 63.9%	0.36 (scaled)
$K^- p \rightarrow \pi^- \Sigma^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^- \pi^0 p \rightarrow 2\gamma \pi^- p \\ \pi^- \pi^+ n \end{cases}$	prompt π^- , delayed p N. A.	51.57% 48.31%	0.9
$K^- p \rightarrow \pi^+ \Sigma^- \rightarrow \pi^+ \pi^- n$	N. A.	100%	Not included
$K^- n \rightarrow \pi^- \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^- \pi^0 n \rightarrow 2\gamma \pi^- n \\ \pi^- \pi^- p \rightarrow 2\pi^- p \end{cases}$	prompt π^- N. A.	35.8% 63.9%	Not included
$K^- n \rightarrow \pi^- \Sigma^0 \rightarrow \pi^- \gamma \Lambda \rightarrow \begin{cases} \pi^- \gamma \pi^0 n \rightarrow 3\gamma \pi^- n \\ \pi^- \gamma \pi^- p \rightarrow \gamma 2\pi^- p \end{cases}$	prompt π^- N. A.	35.8% 63.9%	Not included
$K^- n \rightarrow \pi^0 \Sigma^- \rightarrow \pi^0 \pi^- n \rightarrow 2\gamma \pi^- n$	delayed π^-	100%	0.9 (scaled)

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

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

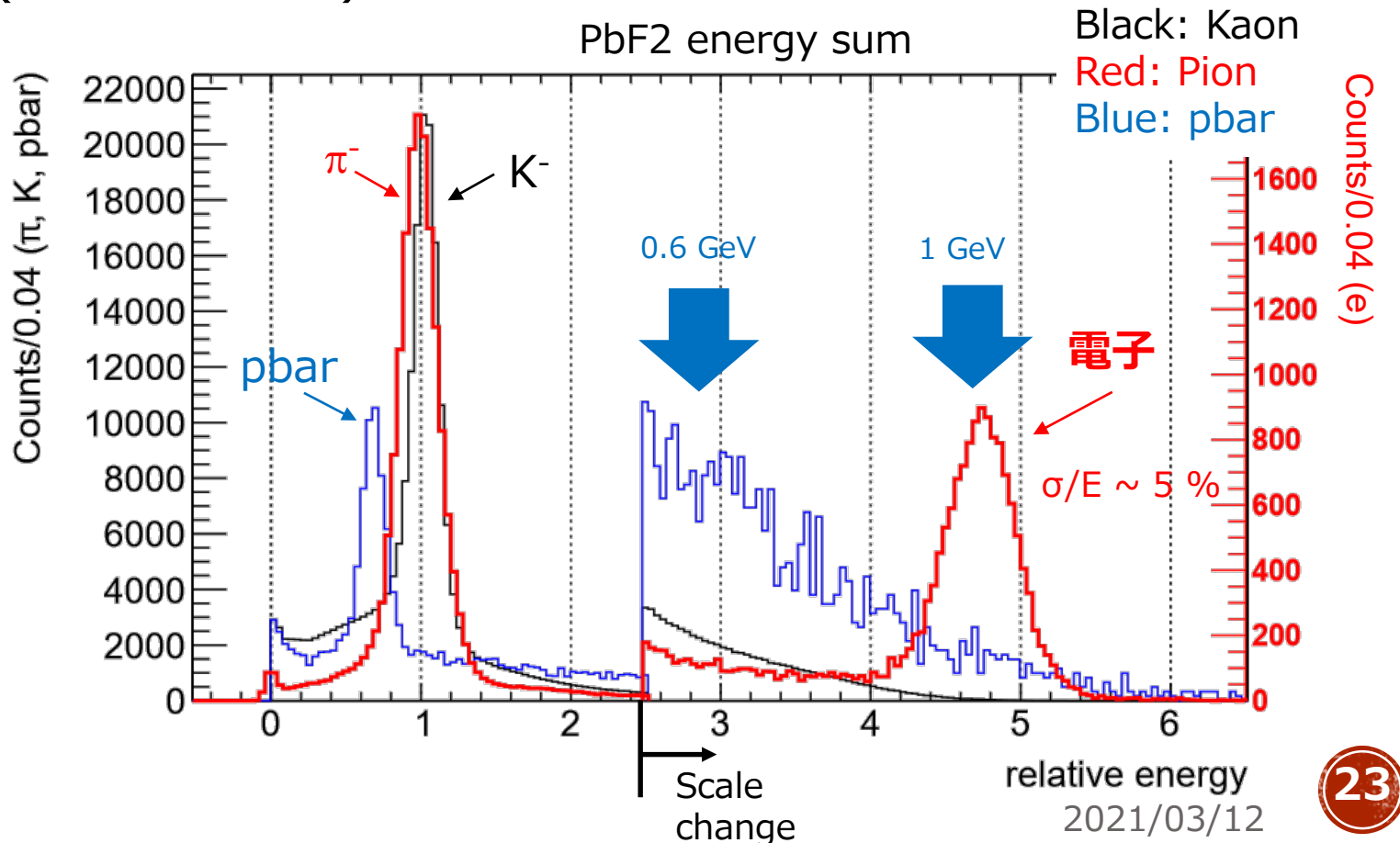
- チェレンコフ光の式

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

- ✓ 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



${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 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

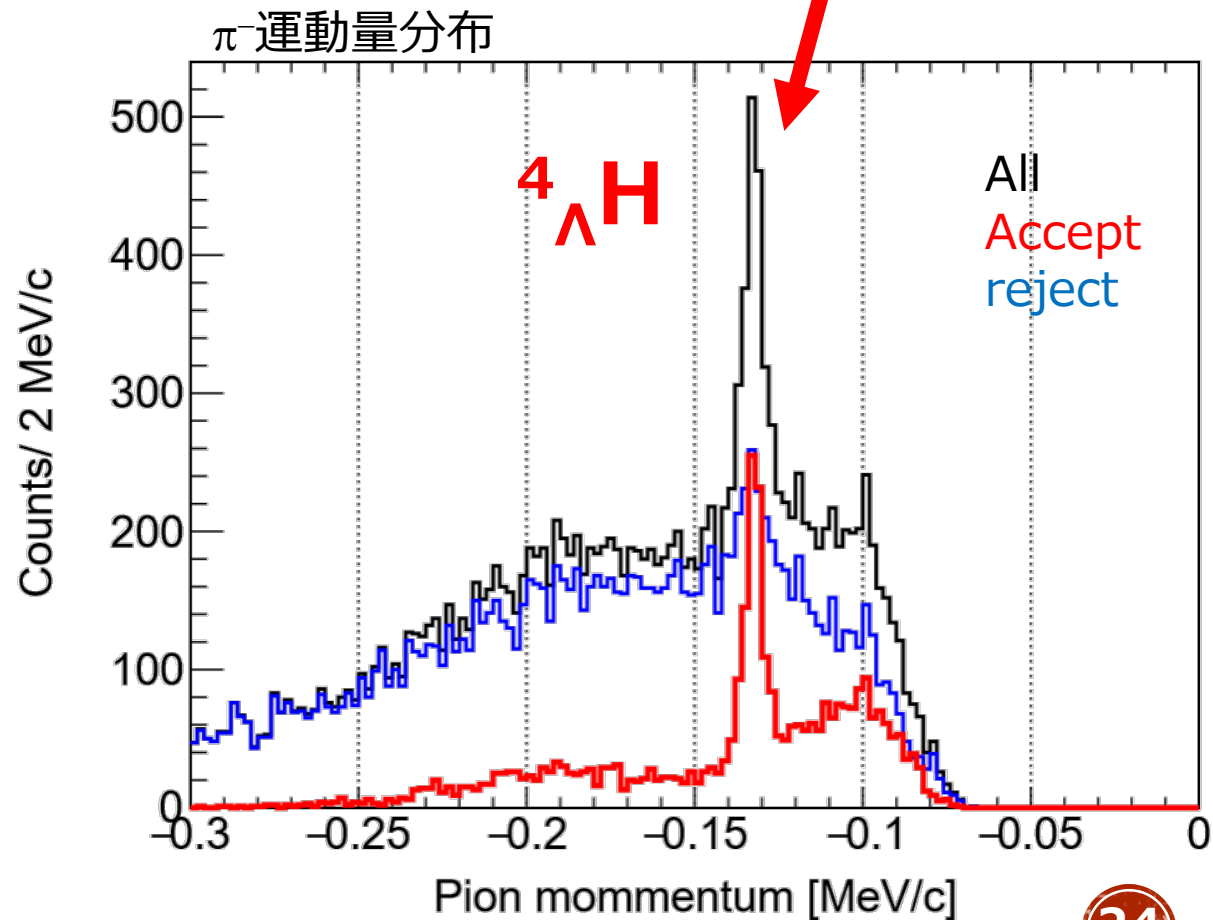
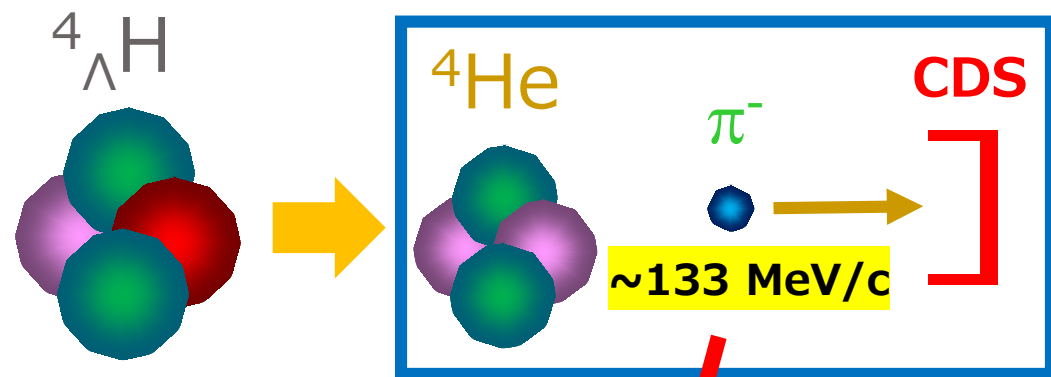
➤ ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成時の高エネルギー γ 線を選択

⇒ 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**

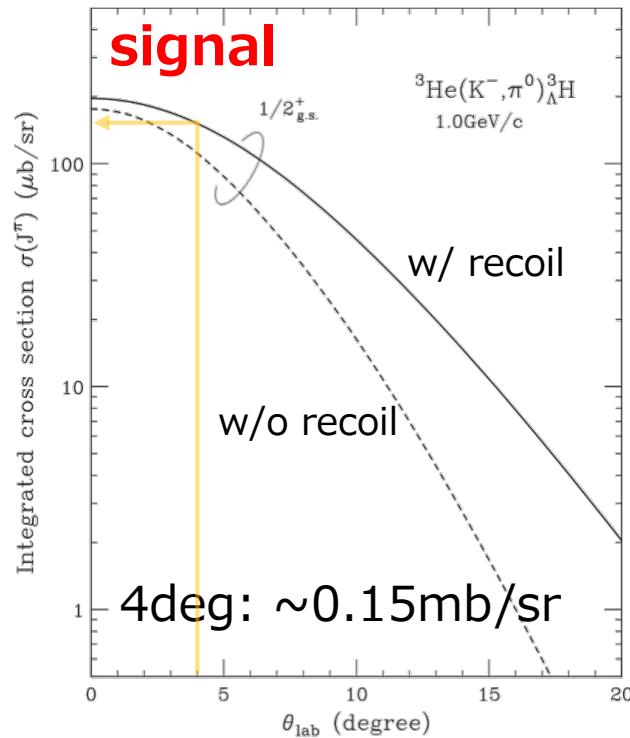
→ **寿命の精度が向上**



Cross sectionの見積もり

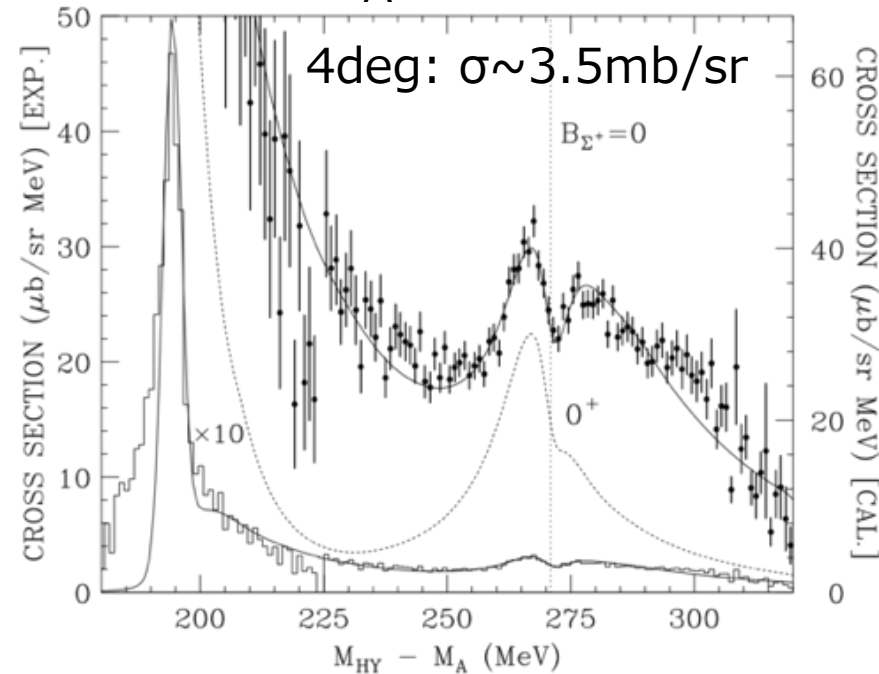
- ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$: 未測定

Prof. T. Harada's calculation:
 $\sigma({}^3_{\Lambda}\text{H})$



- ${}^4\text{He}(K^-, \pi^0){}^4_{\Lambda}\text{H}$: 計算なし

➤ ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-){}^4_{\Lambda}\text{He}$ @ 0.6GeV/cから見積もり



T. Harada,
 Phys. Rev. Lett.,
 81, 5287, (1998)

Isospin coupling factor: 1/2

Recoiling momentum

$n(K^-, \pi^-)\Lambda$ elementary cross section @ 0 degree

$K^-n \rightarrow \Lambda\pi^-$: ~ 2.5 mb @ 0.6 GeV/c ($q \sim 50$ MeV/c)

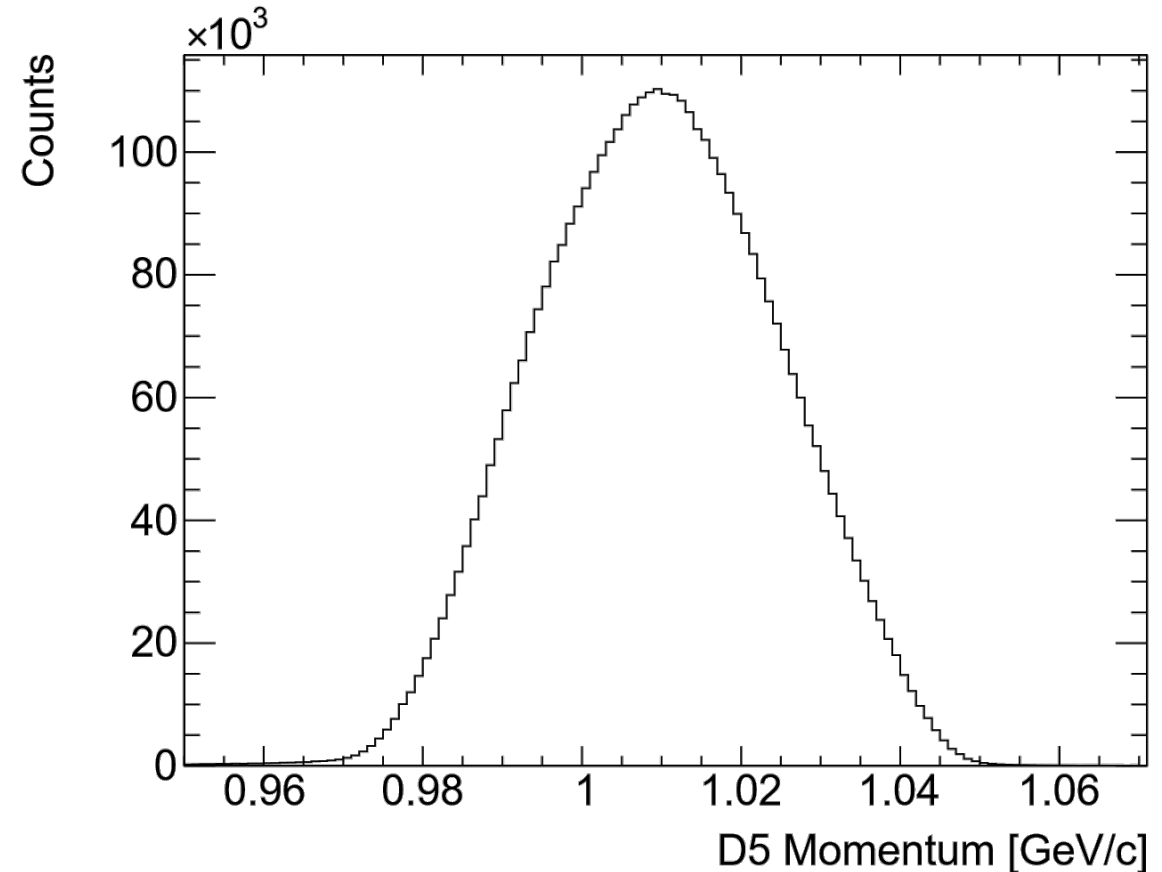
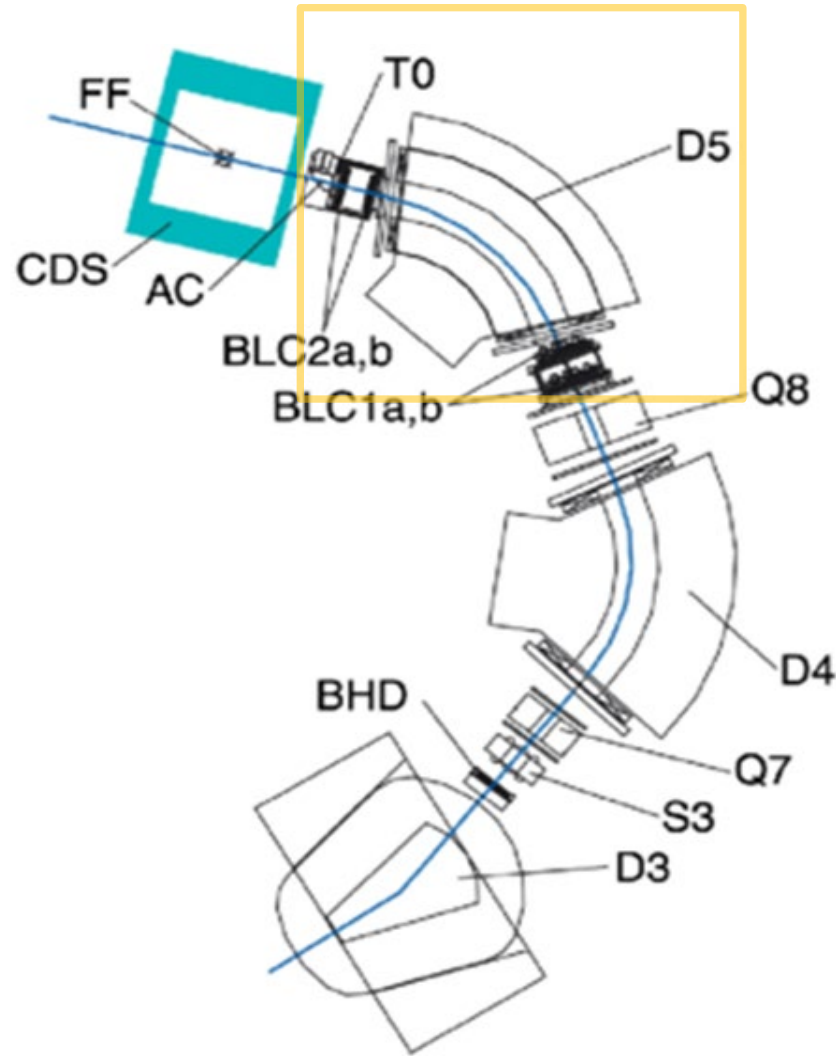
$K^-p \rightarrow \Lambda\pi^0$: ~ 2.5 mb @ 1.0 GeV/c ($q \sim 100$ MeV/c)

${}^4\text{He}(K^-, \pi^0){}^4_{\Lambda}\text{H}$ @ 1.0 GeV, 4 deg: ~ 0.44 mb (scaled)
 ${}^3\text{He}(K^-, \pi^0){}^3_{\Lambda}\text{H}$ @ 1.0 GeV, 4 deg: ~ 0.15 mb (calc.)

$\sigma({}^3_{\Lambda}\text{H})/\sigma({}^4_{\Lambda}\text{H}) \sim 1/3$ for ground state

ビーム運動量分布の解析

- Momentum using BLC1, D5 magnet, BLC2



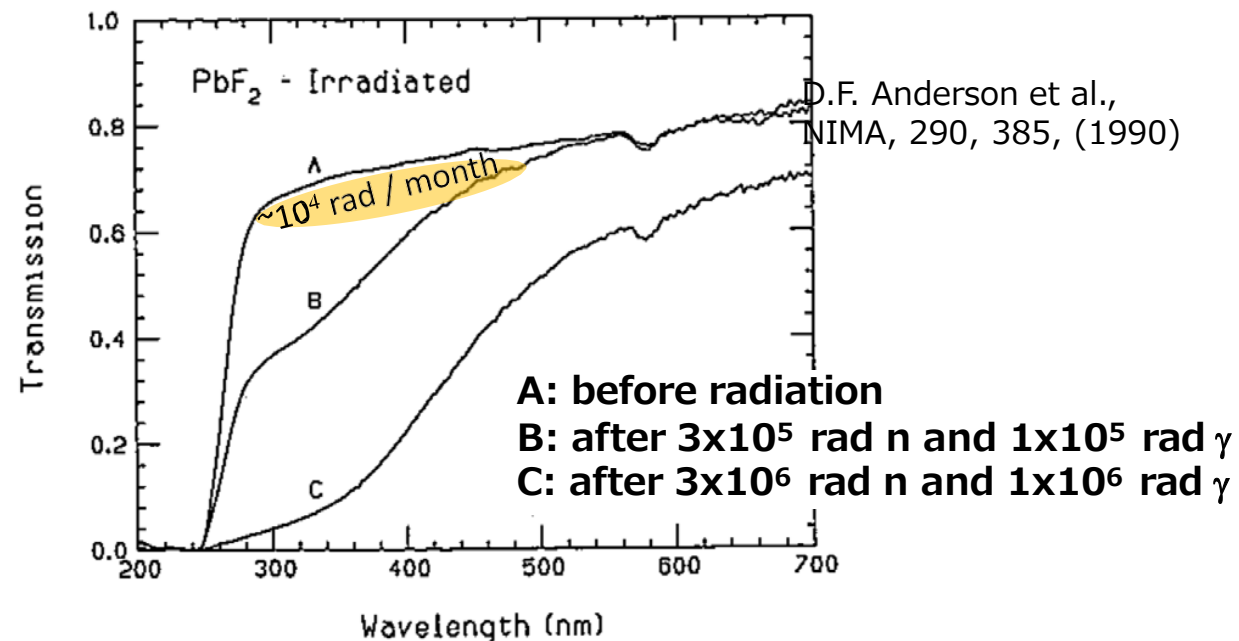
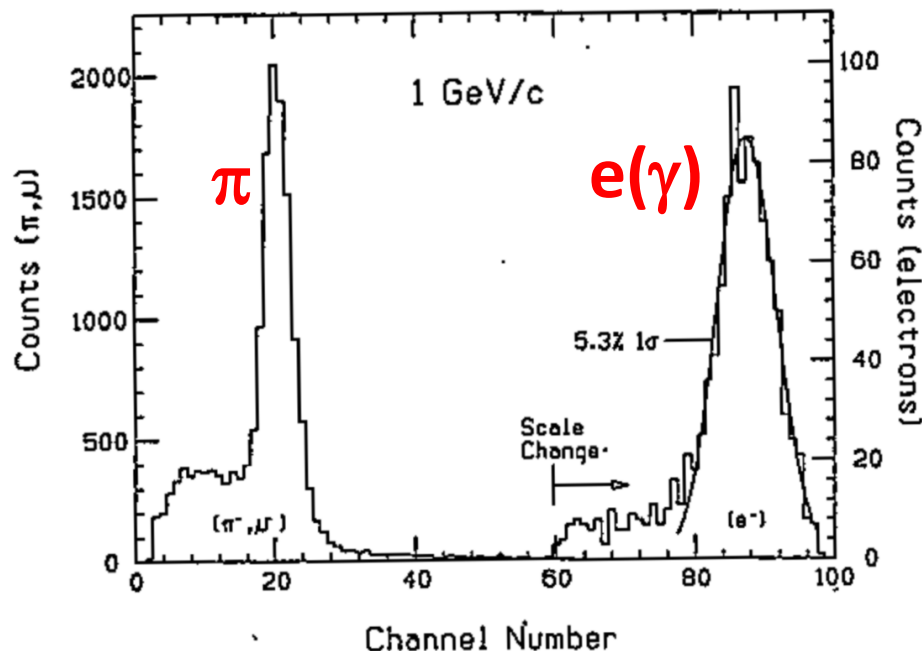
PbF₂ カロリメータ

PbF₂を使用した実験: MAMI A4

EPJA: Hadrons and Nuclei volume 18, p.159–161(2003)

■ 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

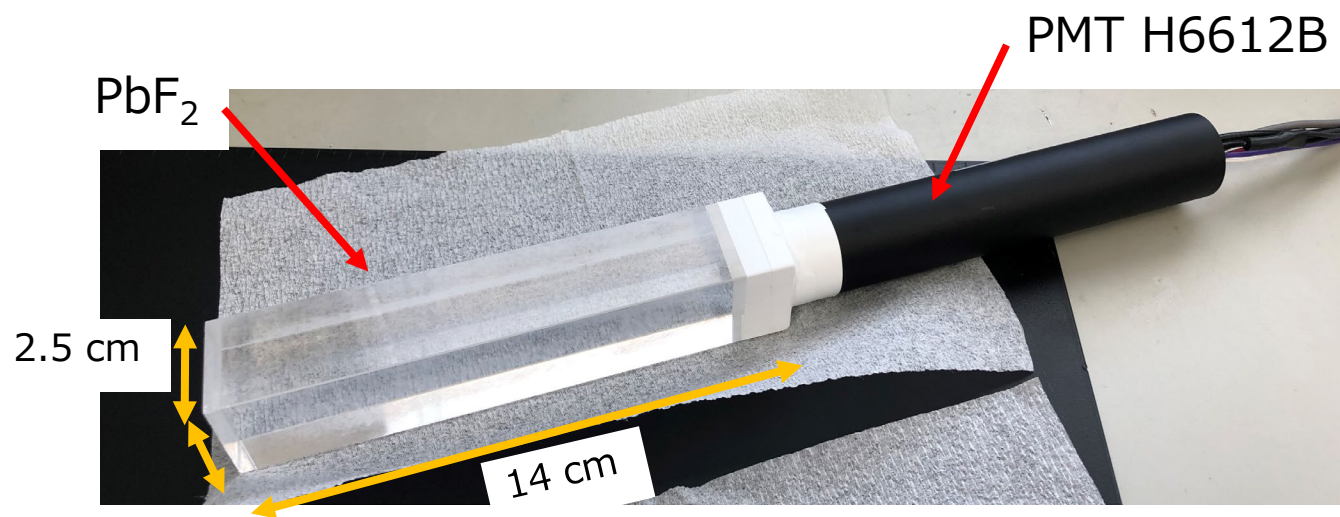
✓ ハドロンとe, γ の識別

➤ 高い放射線耐性

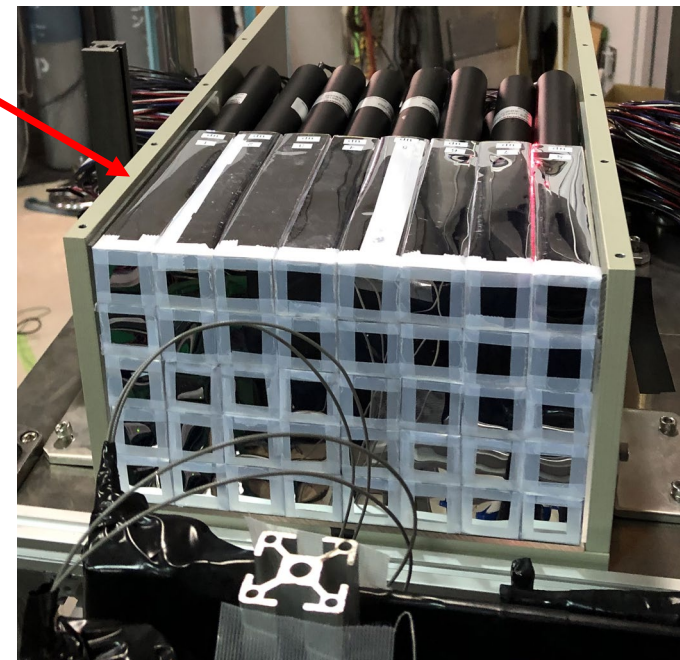
✓ J-PARCのbeamtime1ヶ月で影響なし

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



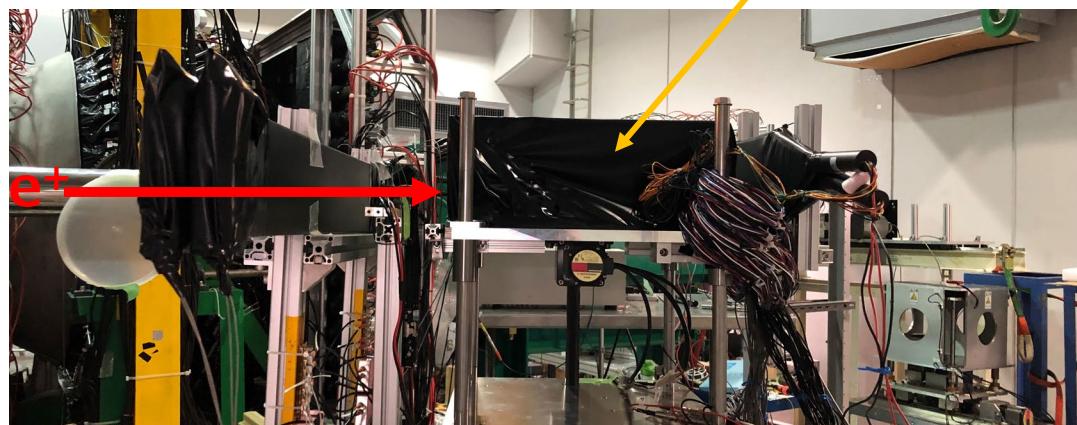
磁気シールド



PbF₂カロリメータ動作実験

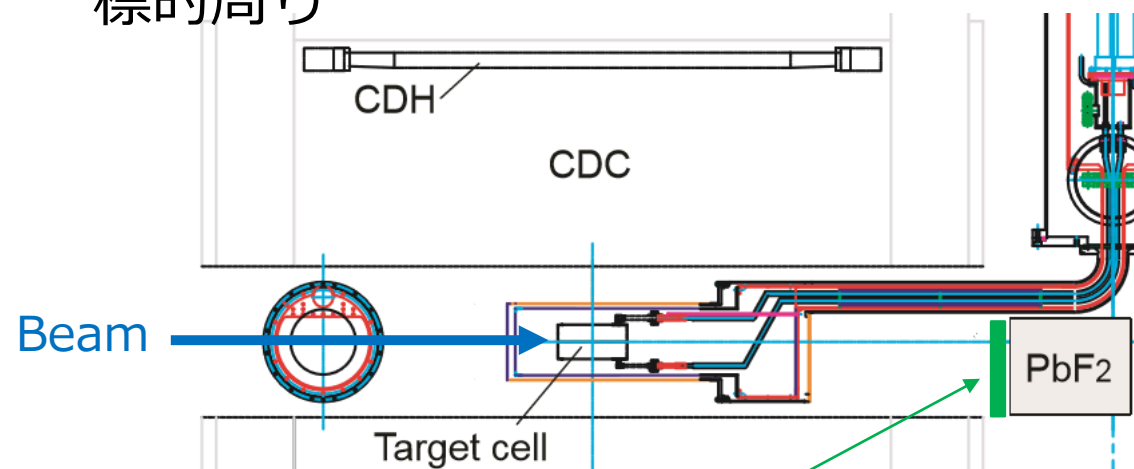
- 2019/12 ELPH
 - 100—800 MeV/c **陽電子ビーム**
⇒エネルギー応答,
エネルギー分解能のチェック
 - 反射材: ESR

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

- 他の測定結果と比較

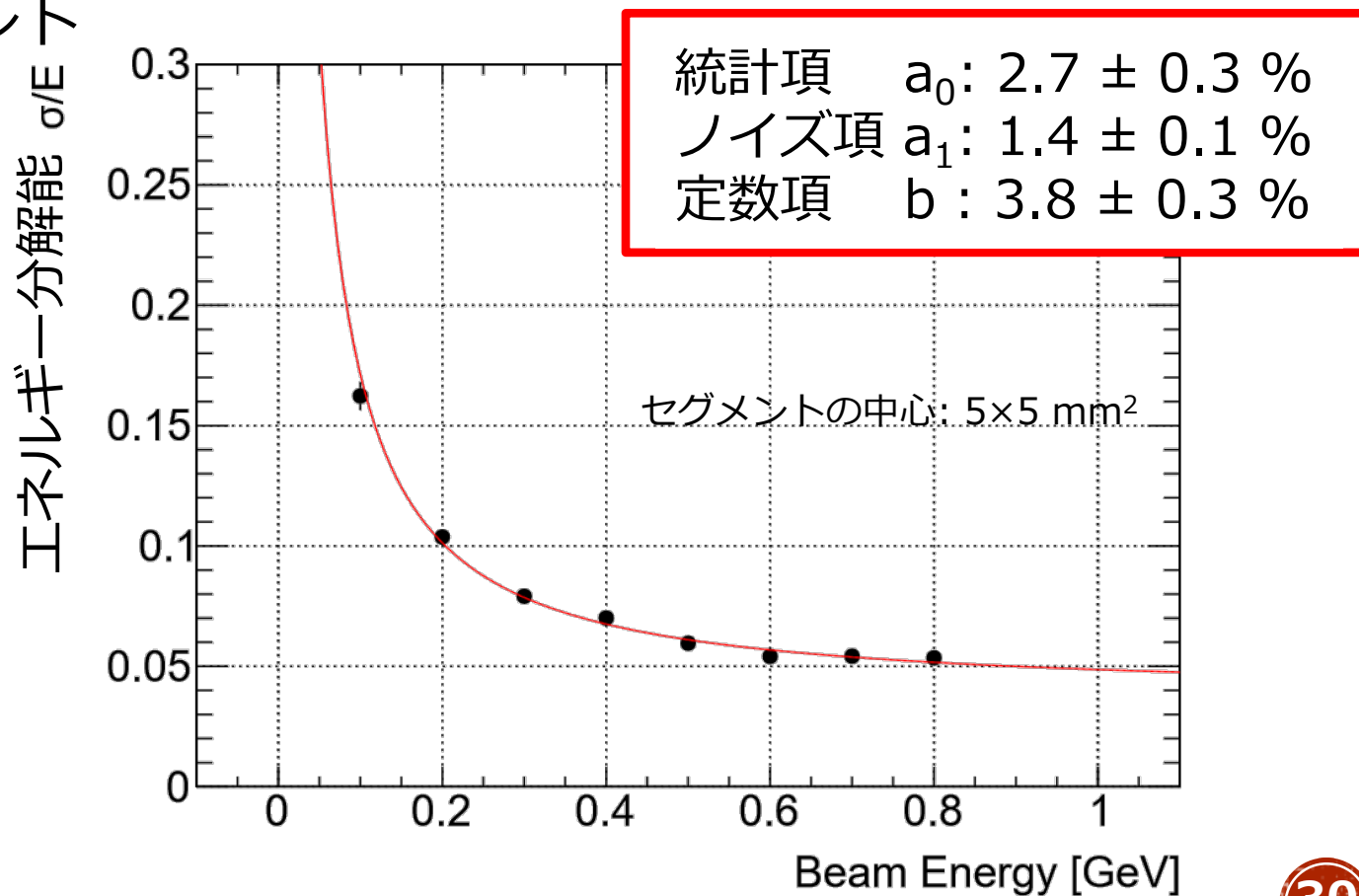
- ✓ エネルギー領域は違うが
近い値

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 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)

3 Λ H測定実験の動向

■ Lifetime

➤ 重イオン実験

✓ ALICE

✓ STAR

➤ 直接測定

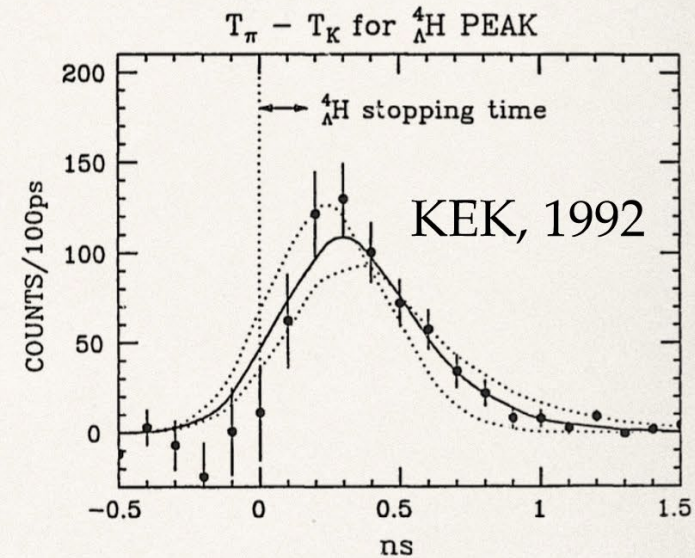
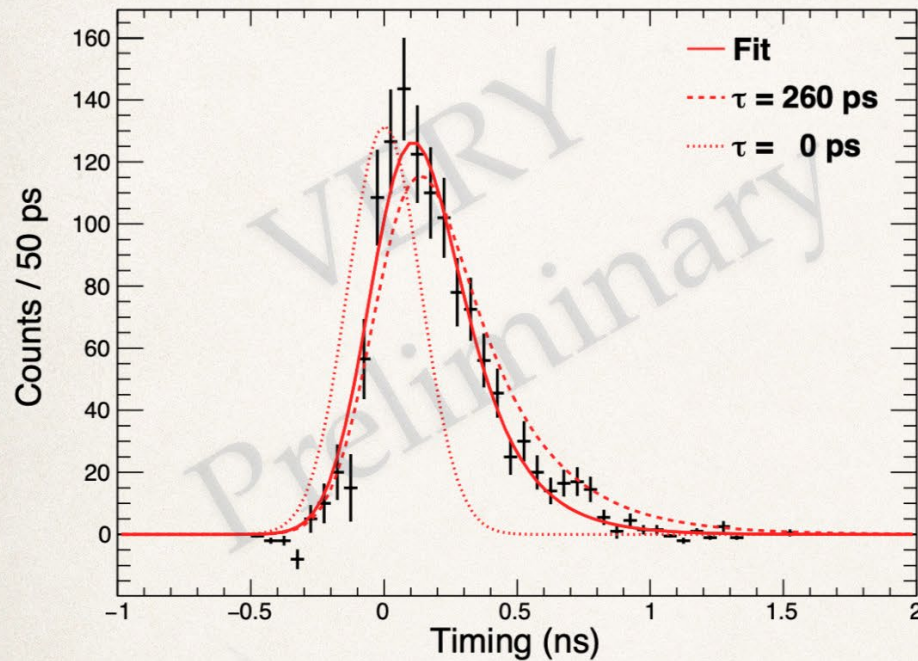
✓ ELPH: (γ , K^+)

✓ J-PARC E73: (K^- , π^0)

■ Binding Energy

➤ Jlab: ($e, e'K^+$)

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



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

9