

Ξハイパー核精密分光実験に向けた アクティブ標的の開発

原子核・ハドロン物理学研究室

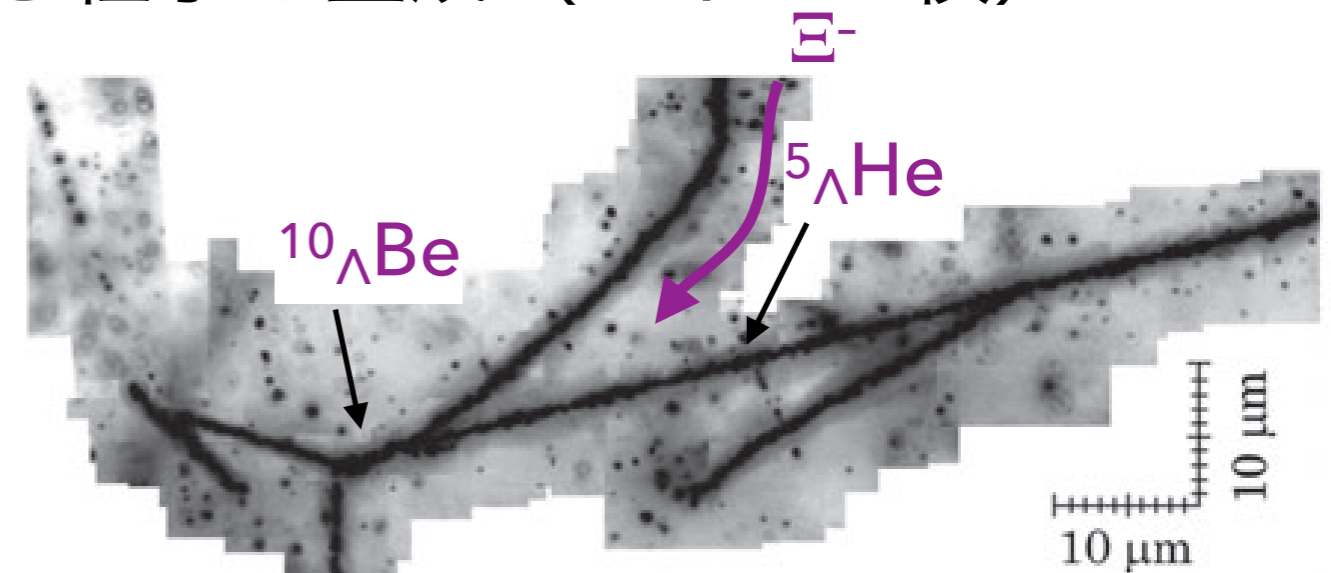
修士2年 越川亜美

ハイパー核研究の目的

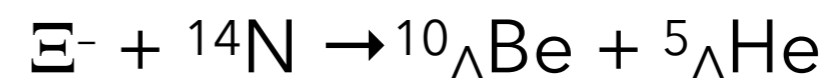
- 核子間相互作用 (u,d) $\xrightarrow{\text{拡張}}$ バリオン間相互作用 (u,d,s)
 - ▶ 核力の短距離部分 (現象論的な扱い)
 - ▶ 高密度核物質中におけるストレンジネス自由度 の理解

- 原子核中にs クォークを含む粒子を生成 (ハイパー核)

- ▶ $S = -1$ Λ, Σ
 - (K⁻, π^-) (π^+ , K⁺) (e, e'K⁺)
 - γ 線分光
 - $\Lambda N, \Sigma N$ 有効相互作用
- ▶ $S = -2$ Ξ (\underline{dss}) (\underline{uss}), $\Lambda\Lambda$
実験データが限られている



KISO イベント



K. Nakazawa *et al.*, PTEP 033D02 (2015).

三ハイパー核精密分光実験 @J-PARC

■ $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ 反応を用いて三ハイパー核を生成

- ▶ 励起スペクトルの精密測定 ($\Delta E < 2 \text{ MeV FWHM}$)

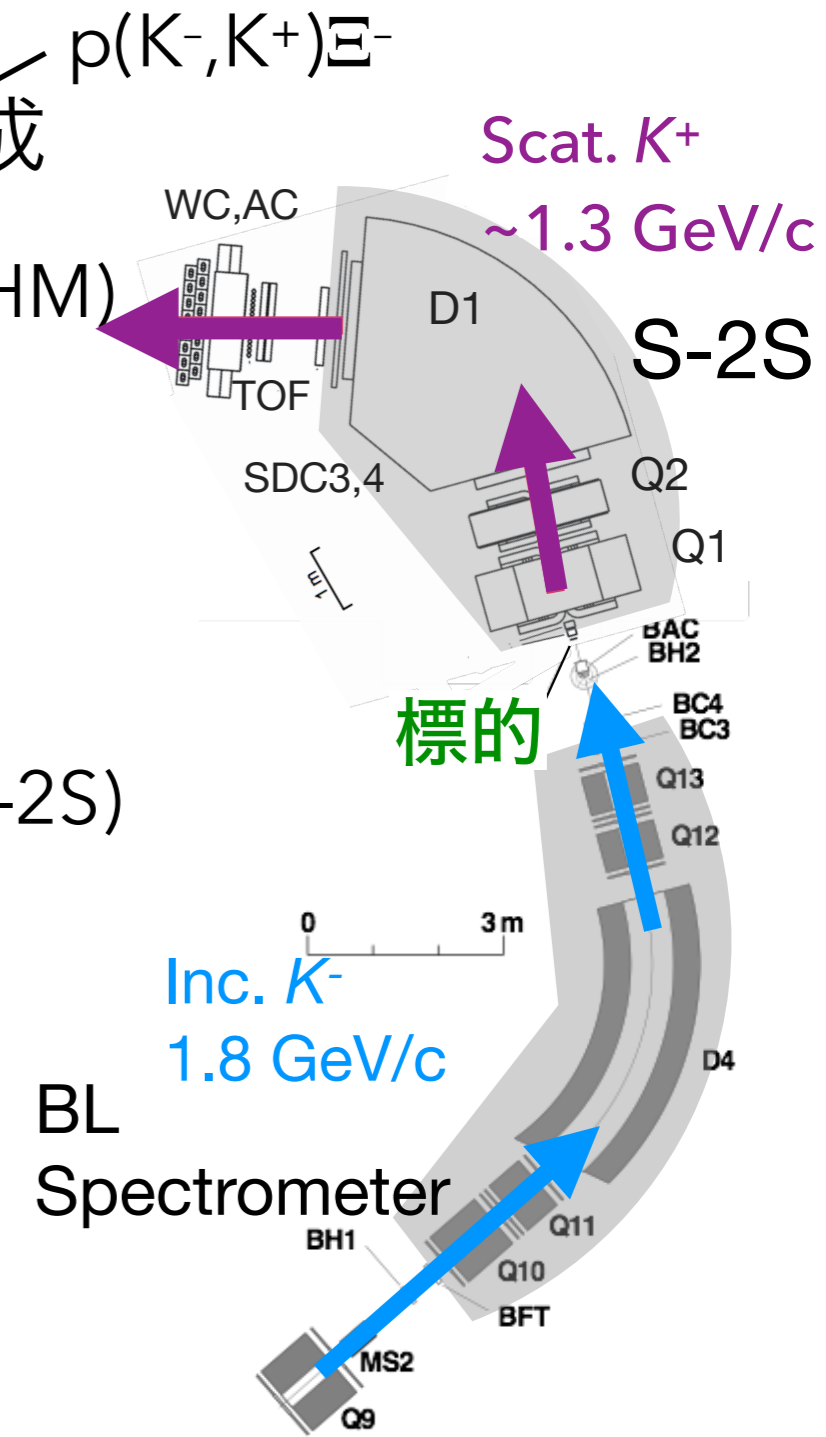
→ 三N相互作用に強い制限

- ▶ エネルギー分解能の決定要因

- ▶ 入射 K^- : $\Delta p/p = 1.0 \times 10^{-3}$ (FWHM)
- ▶ 散乱 K^+ : $\Delta p/p = 6.0 \times 10^{-4}$ (FWHM) (新設 S-2S)
- ▶ 標的中のエネルギー損失のふらつき

CH 標的厚 (g/cm^2)	0	1.15	10.6
標的中のエネルギー損失の ふらつき (MeV, FWHM)	-	0.56	3.2
分解能 (MeV, FWHM)	1.83	1.91	3.7
収量 (/month)	-	13	120

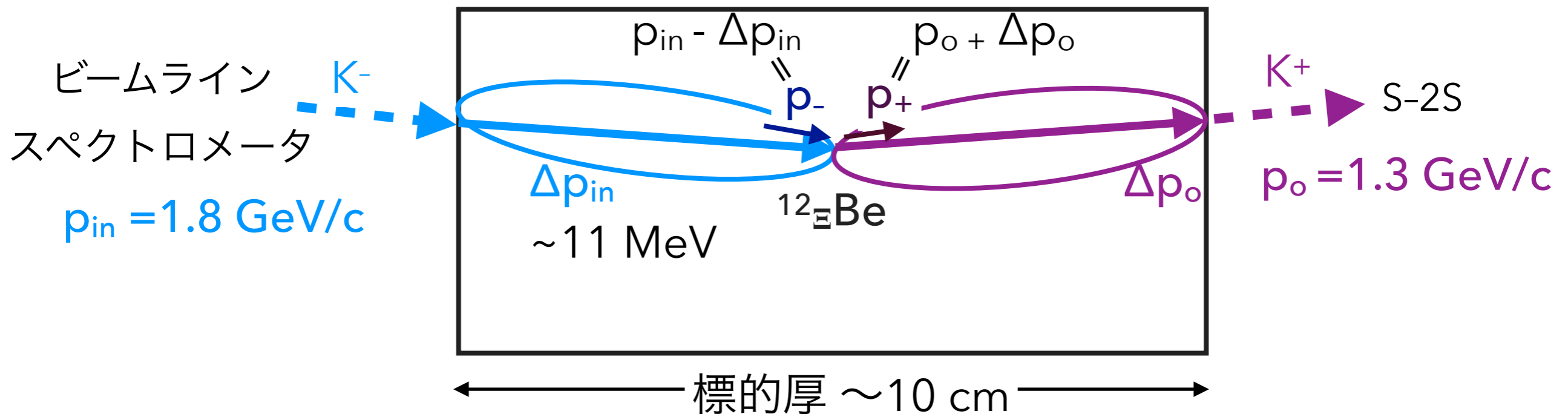
→ アクティブ標的の導入



アクティブ標的の概要

■ シンチレーティングファイバー中の炭素を標的とする

- ▶ 標的中の K^\pm のエネルギー損失に応じてシンチレーション光発生
 - イベントごとに光量を測定
 - 反応点における K^- , K^+ の運動量を補正

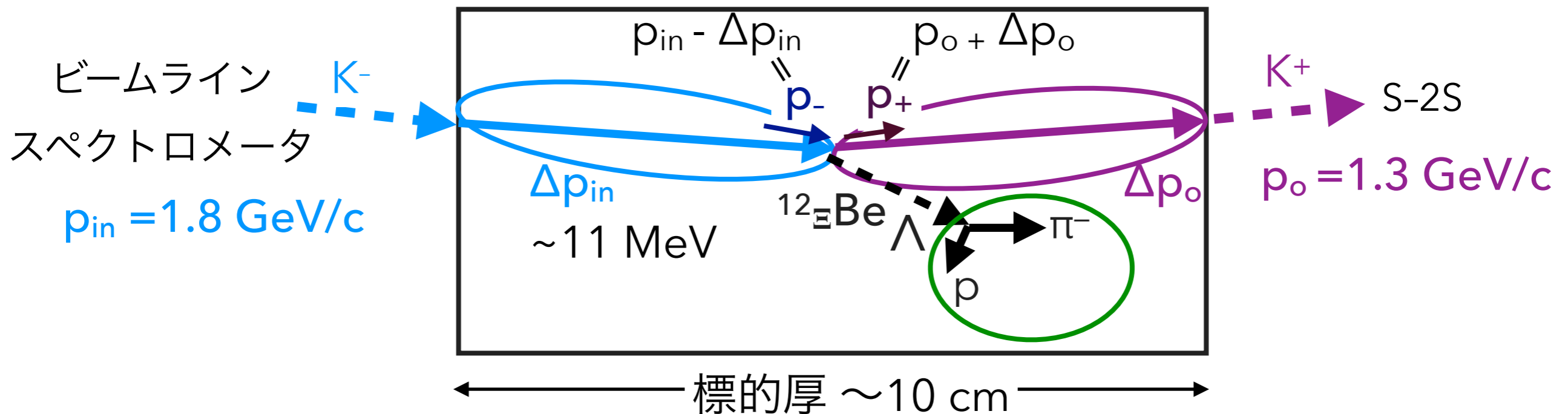


- ▶ K^\pm と二次粒子との区別が必要 → ファイバーを採用 (36層程度)
1本あたりのエネルギー損失 0.6 MeV

アクティブ標的の概要

■ シンチレーティングファイバー中の炭素を標的とする

- ▶ 標的中での K^\pm のエネルギー損失に応じてシンチレーション光発生
 - イベントごとに光量を測定
 - 反応点における K^- , K^+ の運動量を補正



- ▶ K^\pm と二次粒子との区別が必要 → ファイバーを採用 (36層程度)

1本あたりのエネルギー損失 0.6 MeV

シンチレーティングファイバーの性能評価

- 大阪大学核物理研究センター (RCNP) でテスト実験
 - ファイバー1本のエネルギー損失と発光量をそれぞれ測定
 - ▶ エネルギー損失：Grand Raidenスペクトロメータ系で測定
($\Delta E \sim 20$ keV)
 - ▶ 発光量：MPPCで光読み出し
- 相関を調べる
- 測定結果をもとに、数百本のファイバーから成るアクティブ標的全体のエネルギー分解能をシミュレーションで見積もる

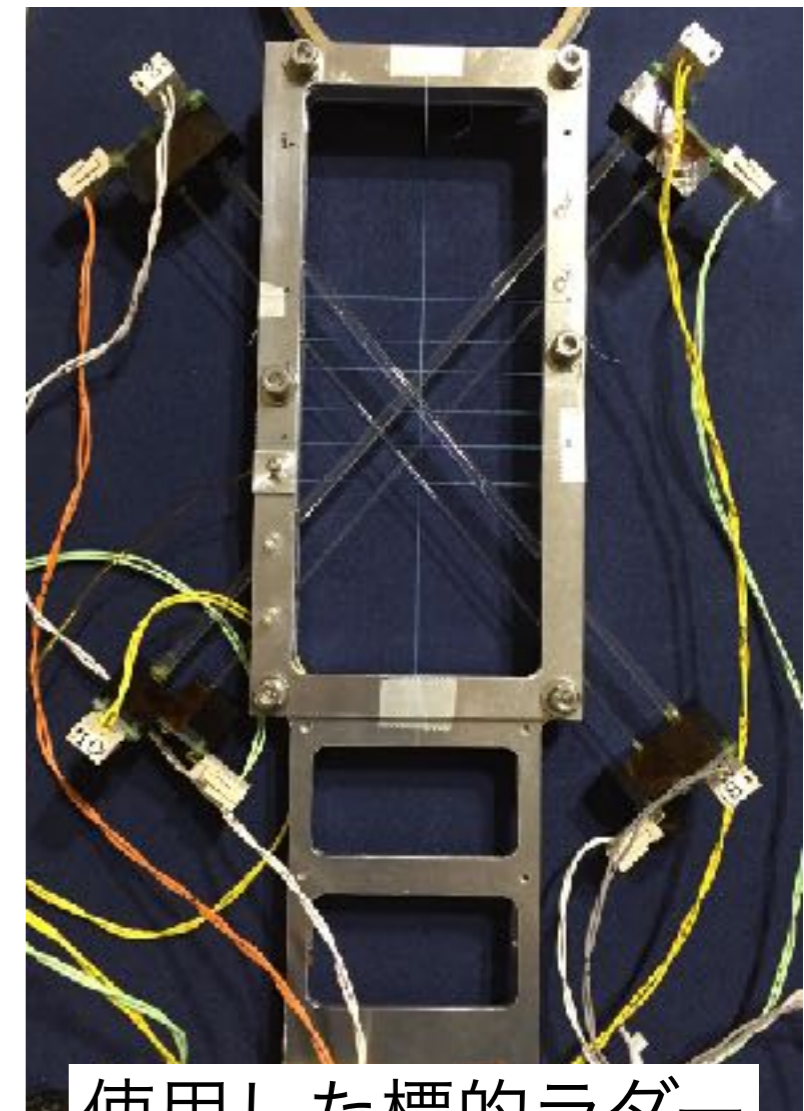
実験セットアップ

■ 陽子ビーム条件

	エネルギー	β	平均エネルギー損失 (3 mmファイバー中)
2017年6月	64.6 MeV	0.353	3.2 MeV
2017年12月	295 MeV	0.649	1.1 MeV
(参考) K ⁺	1.3 GeV/c	0.934	0.59 MeV

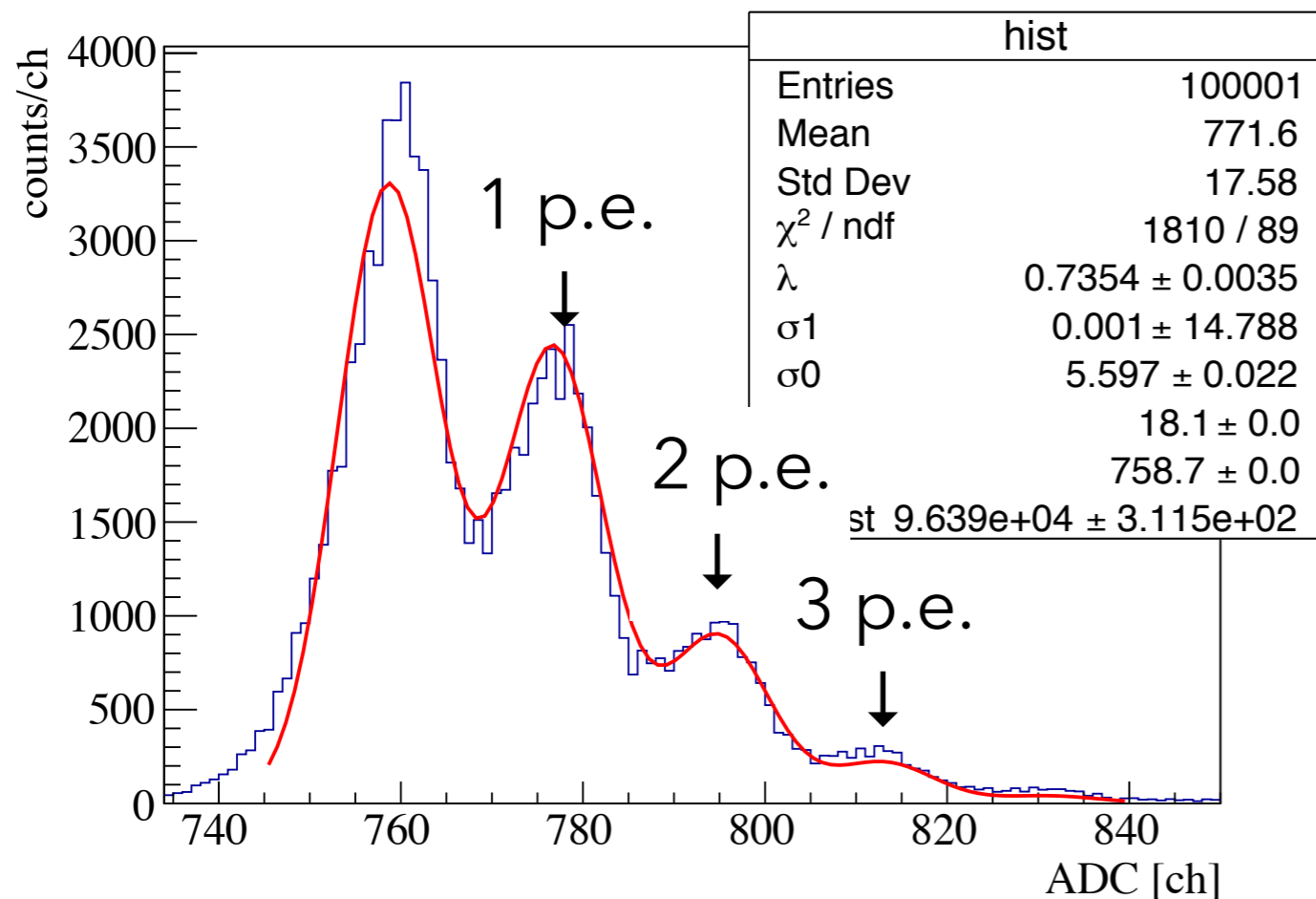
■ ファイバー

- ○ 3 mm, □ 3 mm, ○ 1 mm, □ 1 mm
- 読み出し: MPPC (3 mm, 1600ピクセル)
EASIROC MODULEでMPPCの制御、
信号の波高情報・タイミング情報を取得



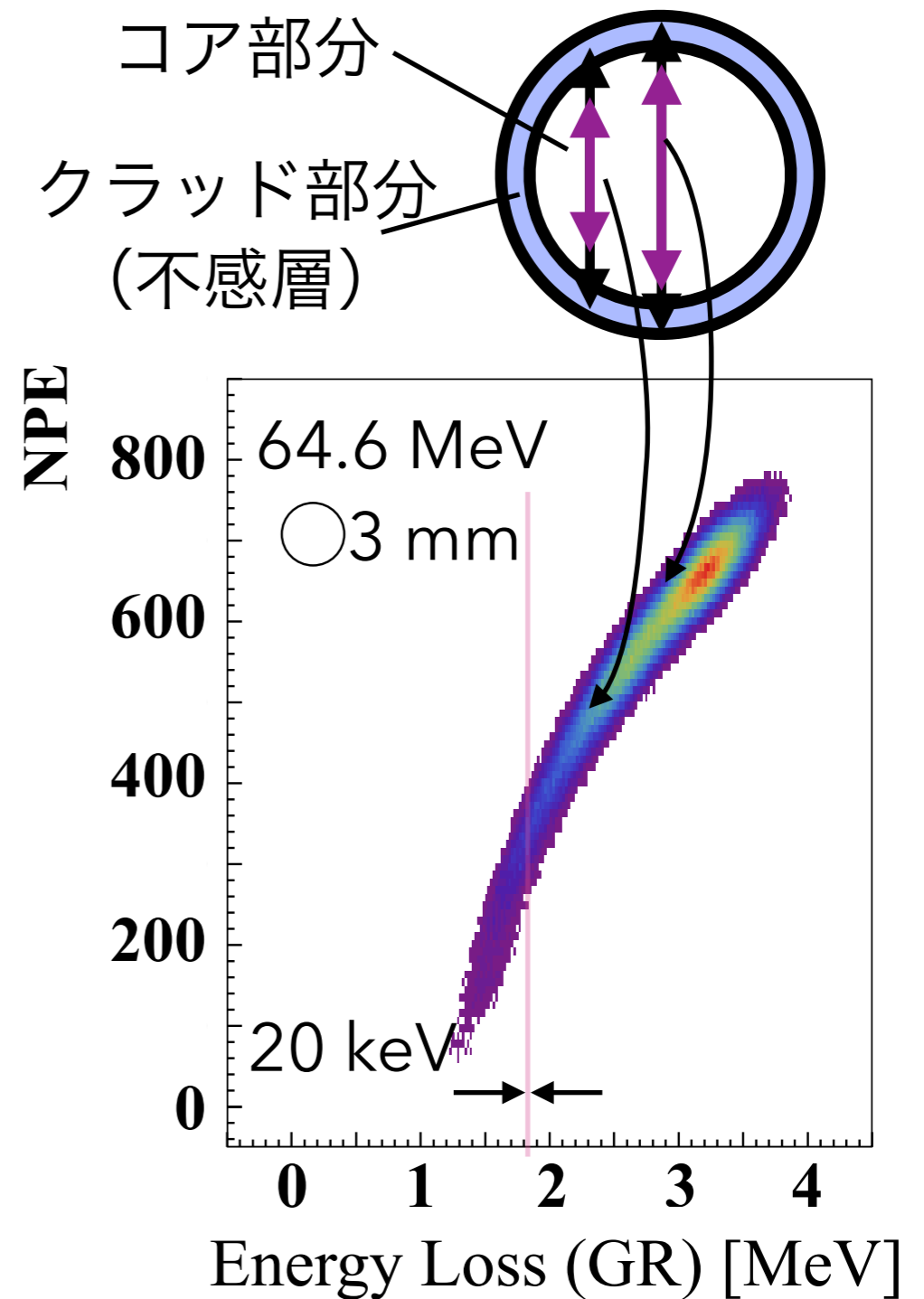
使用した標的ラダー

エネルギー損失と発光量の相関

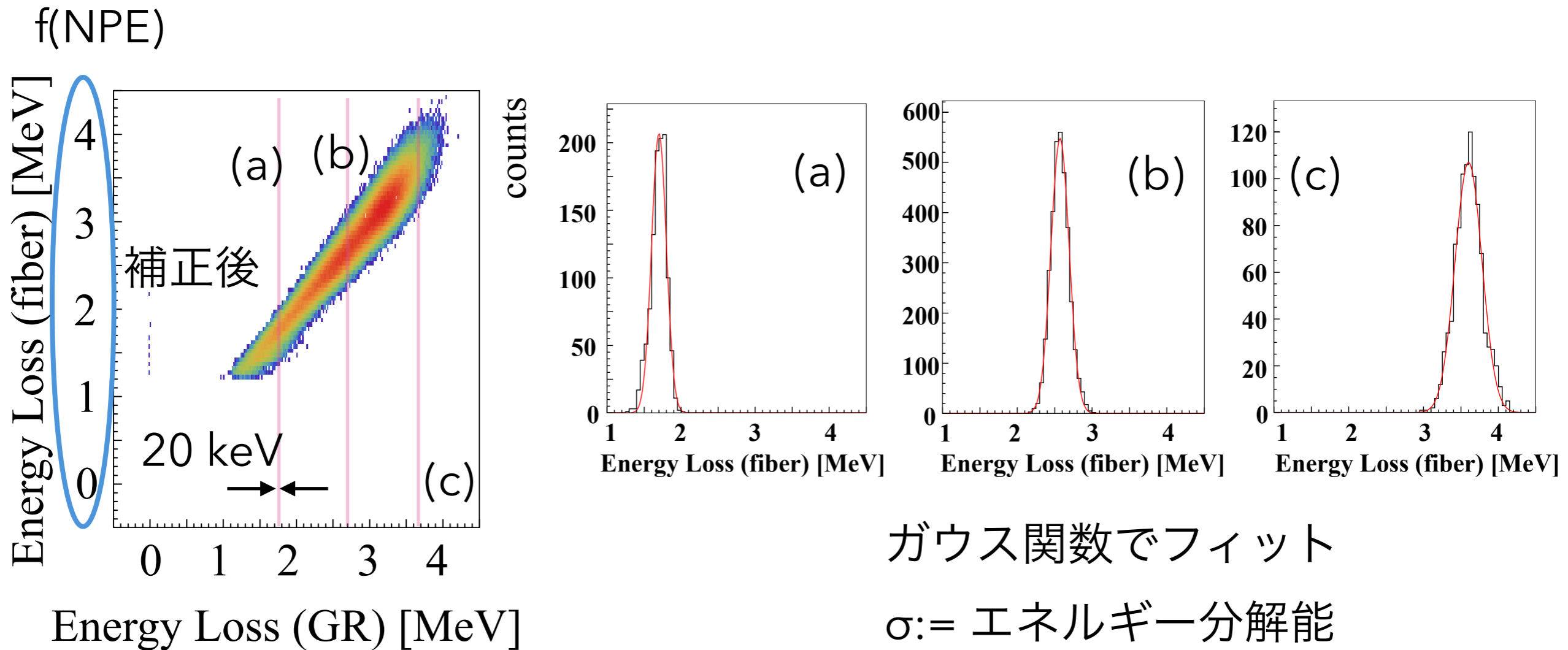


LEDからの光をMPPCで検出

→ADCのチャンネルを光電子数に変換

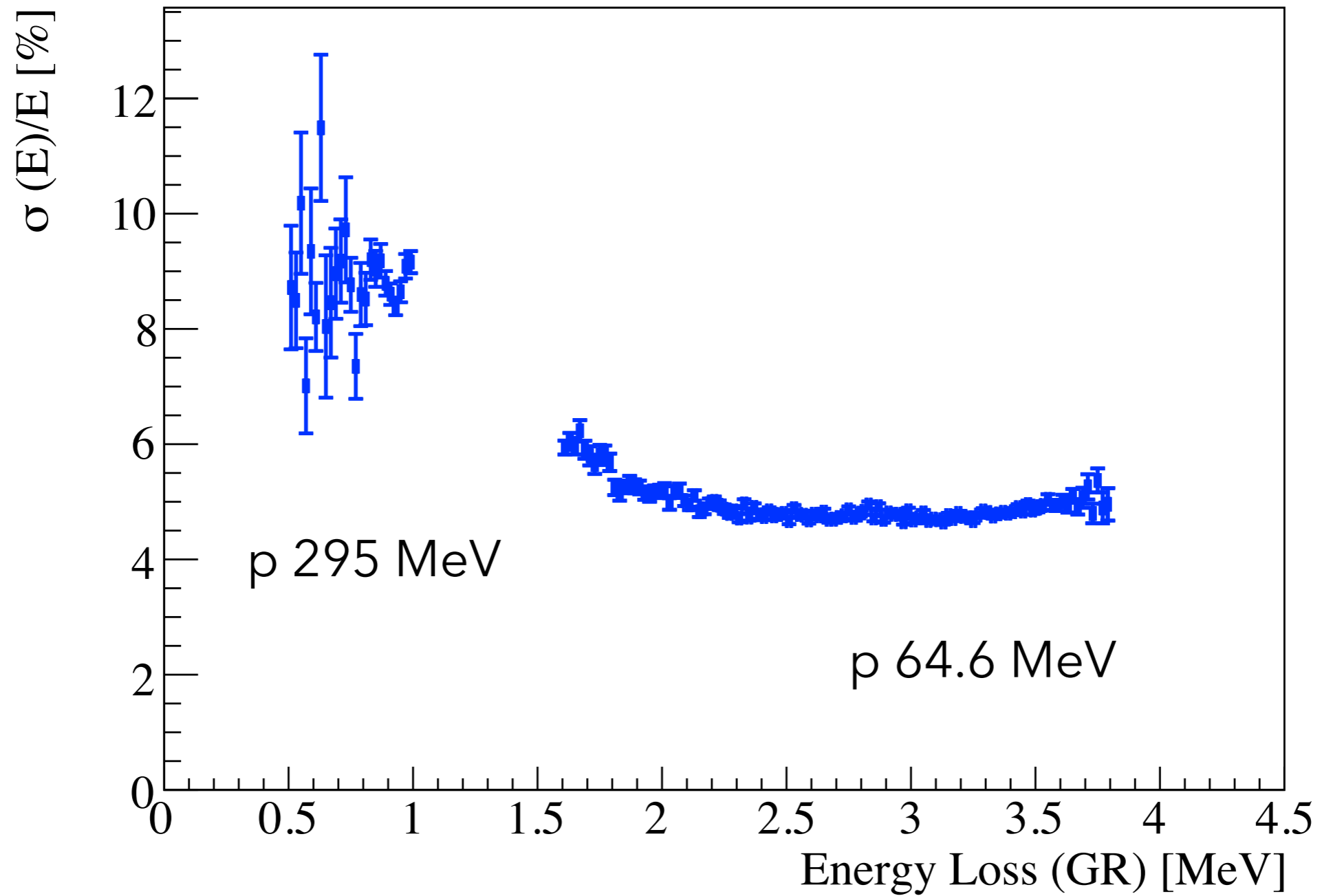


エネルギー分解能の評価

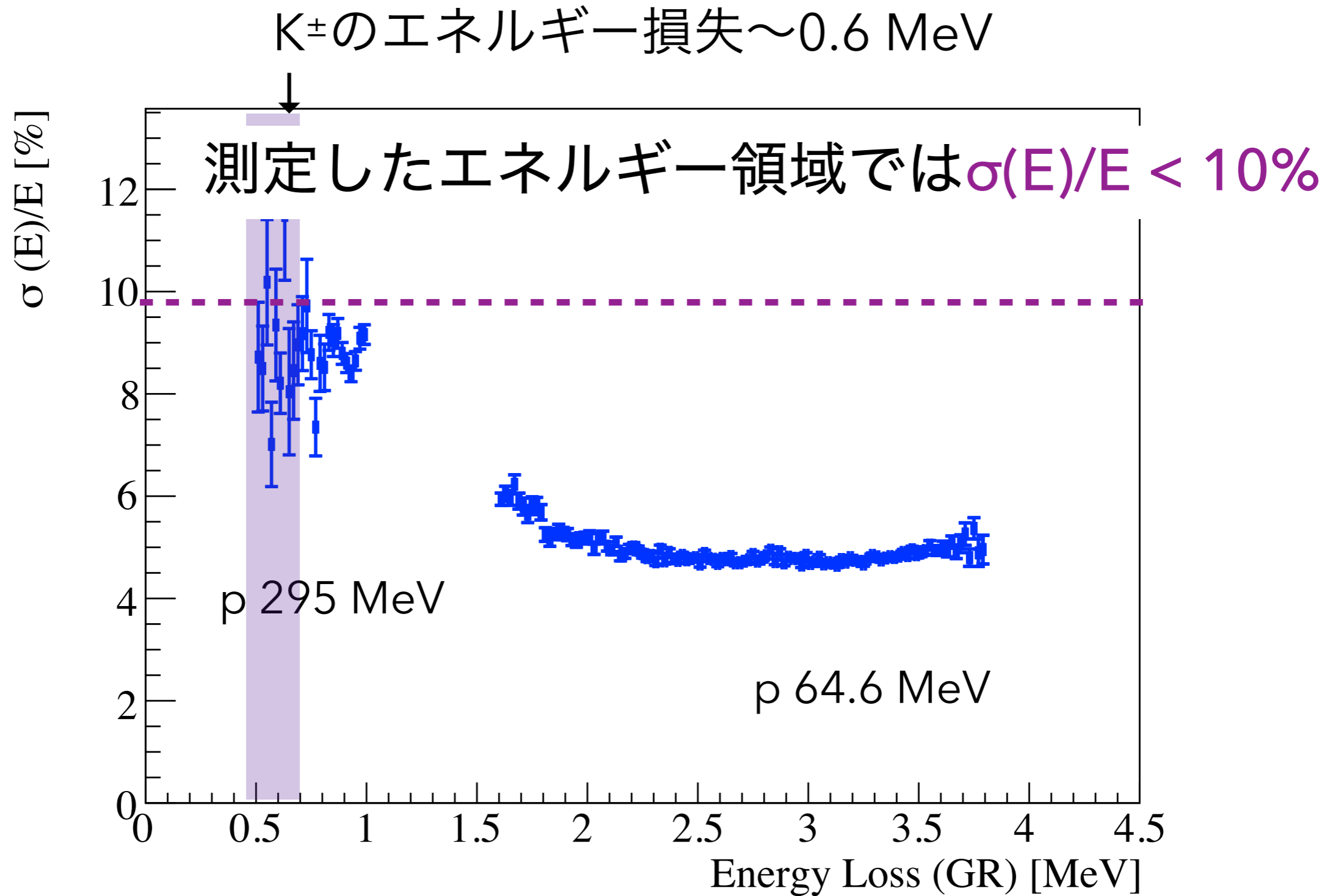


- エネルギー分解能と粒子のエネルギー損失の関係を求めた

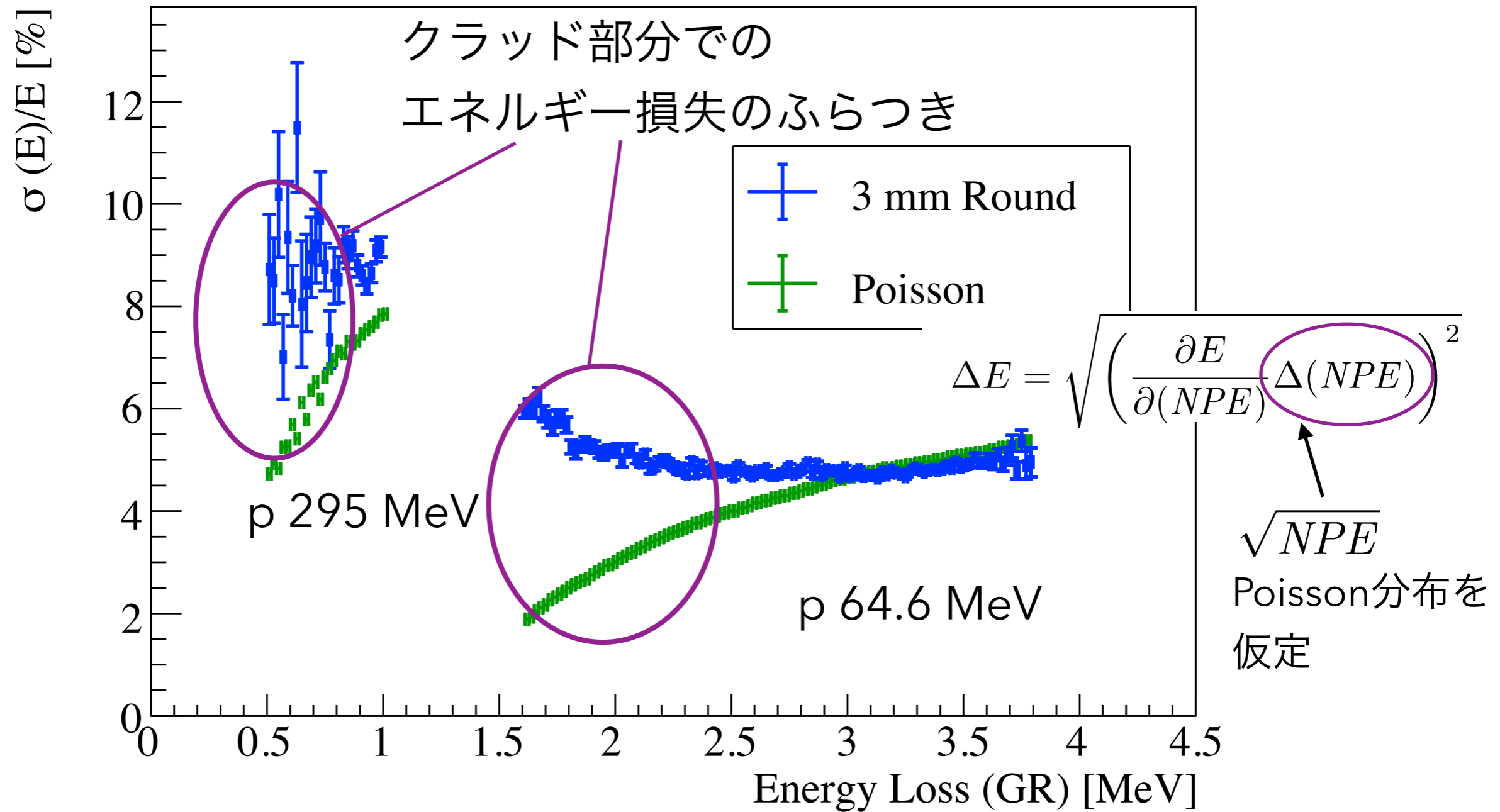
結果



結果

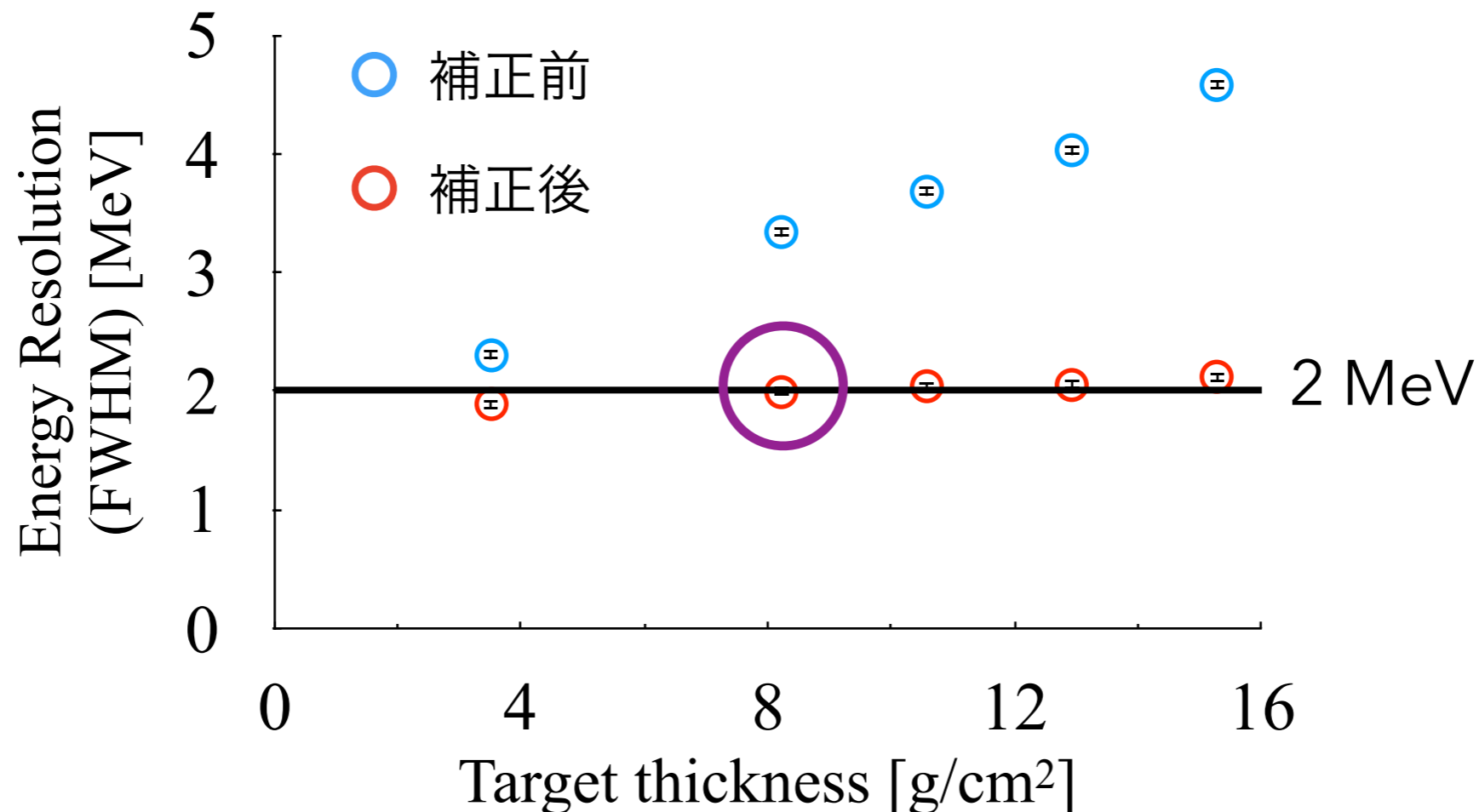


結果



実現可能な標的厚の見積

- ▶ 2 MeV (FWHM) 以下の欠損質量分解能を実現するには？
- ▶ ファイバー1本の分解能10% (σ)を考慮したGeant4シミュレーション
→アクティブ標的中におけるエネルギー損失のふらつきを評価
- ▶ 標的は8.2 g/cm³ まで厚くすることが可能



まとめ

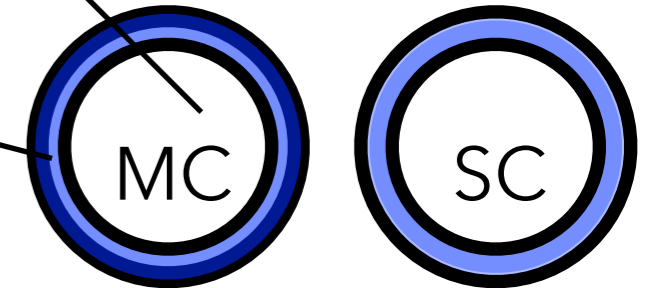
- $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ 反応を用いた Ξ ハイパー核の精密分光 @J-PARC
 - ▶ Ξ ハイパー核の束縛エネルギーと幅を測定
 - ▶ 欠損質量分解能 $< 2 \text{ MeV}$
 - ▶ 標的中でのエネルギー損失のふらつきが分解能に制限
- アクティブ標的の開発
 - ▶ ファイバー1本のエネルギー分解能を評価 @RCNP
 - $\text{K}^+ 1.3 \text{ GeV}/c$ のエネルギー損失 ($\sim 0.6 \text{ MeV}$) では10%
 - ▶ 最大 $8.2 \text{ g}/\text{cm}^2$ 厚の標的を用いても要求される分解能を満たす

Backup

測定データ

コア部分

クラッド部分
(不感層)



■ ファイバーの選定

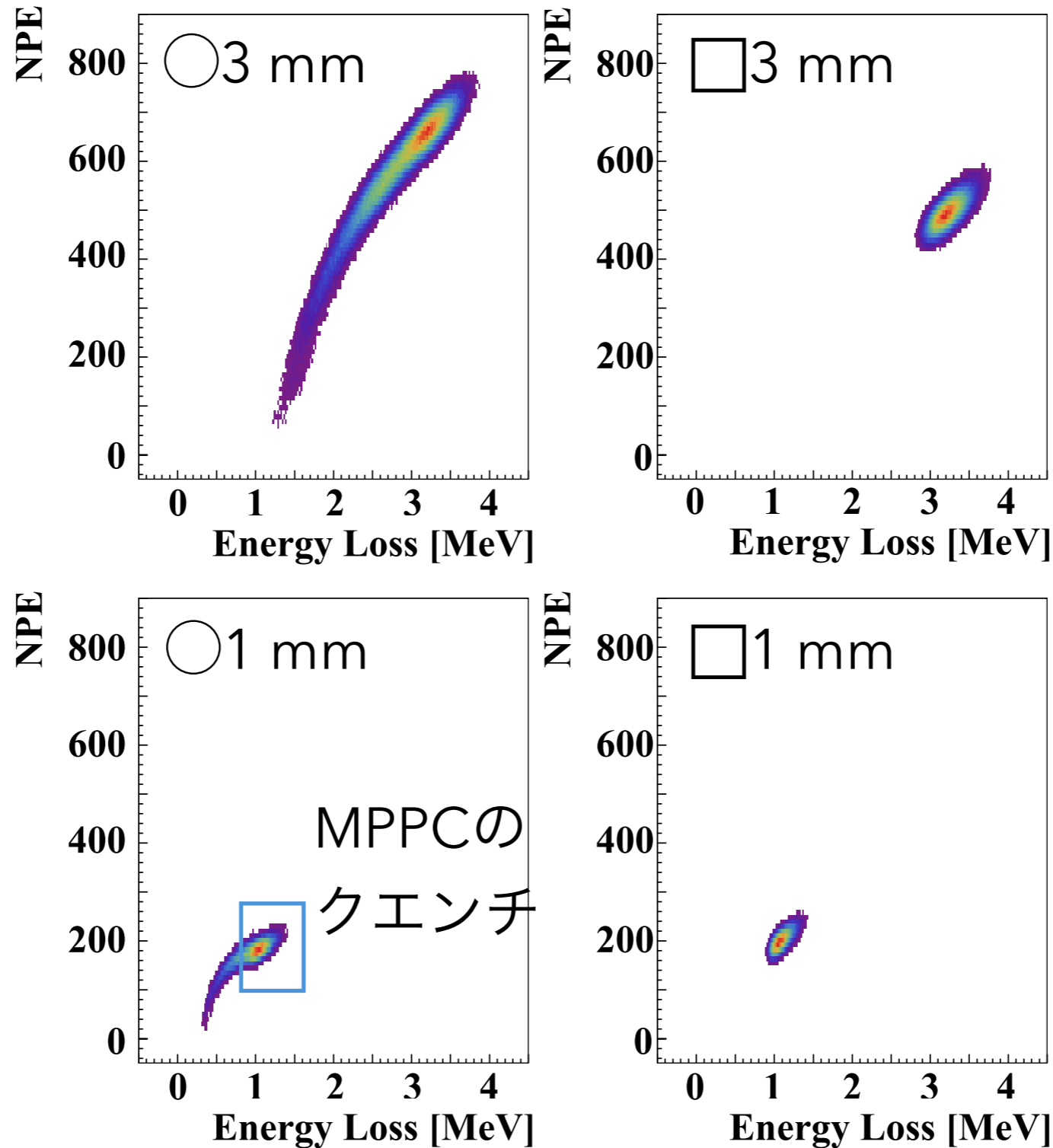
- ▶ Kuraray製 シングルクラッド○1 mm, □1 mm
- ▶ Saint-Gobain製 シングルクラッド○3 mm, □3 mm

■ エネルギー分解能のShaping Time依存性

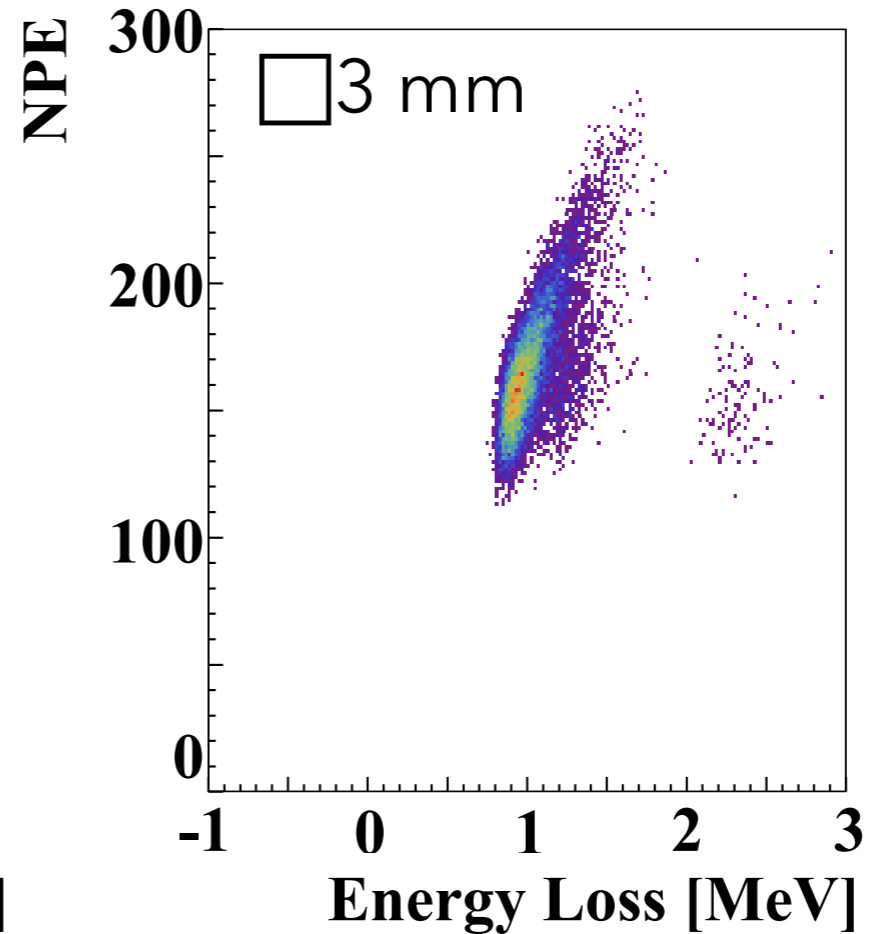
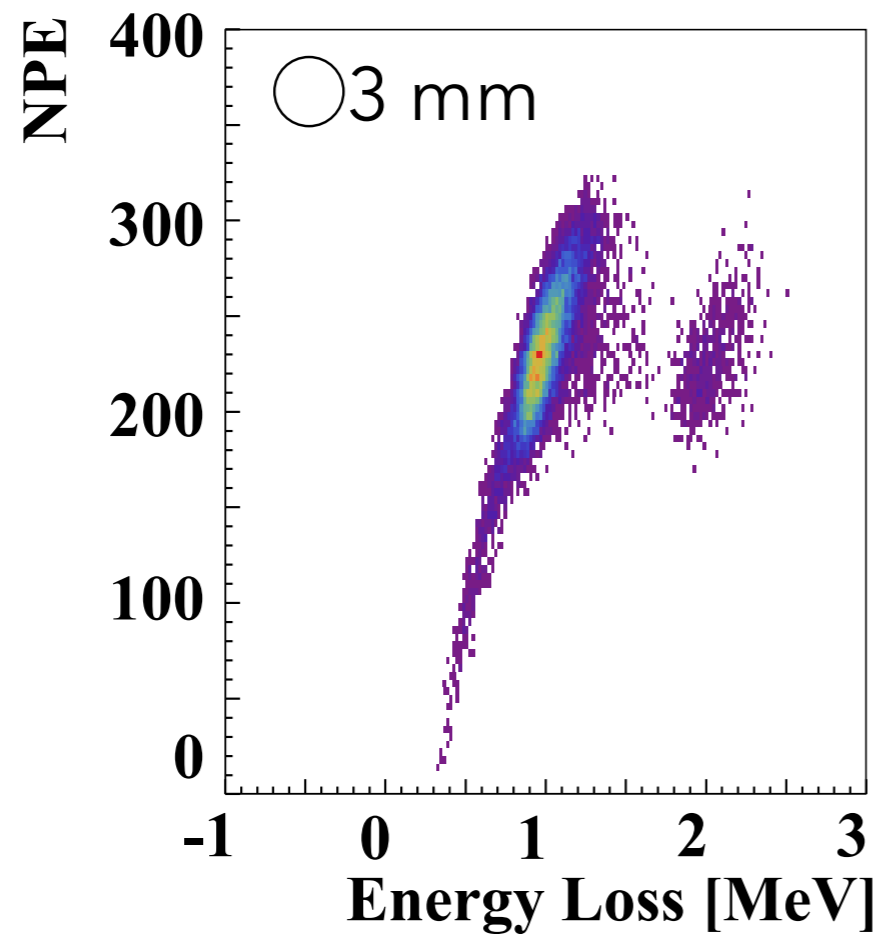
- ▶ Saint-Gobain製 シングルクラッド○3 mm, □3 mm
- ▶ 25 ns, 75 ns, 125 ns, 175 ns

■ 試作機 (4層構造)

発光量とエネルギー損失 (64.6 MeV)

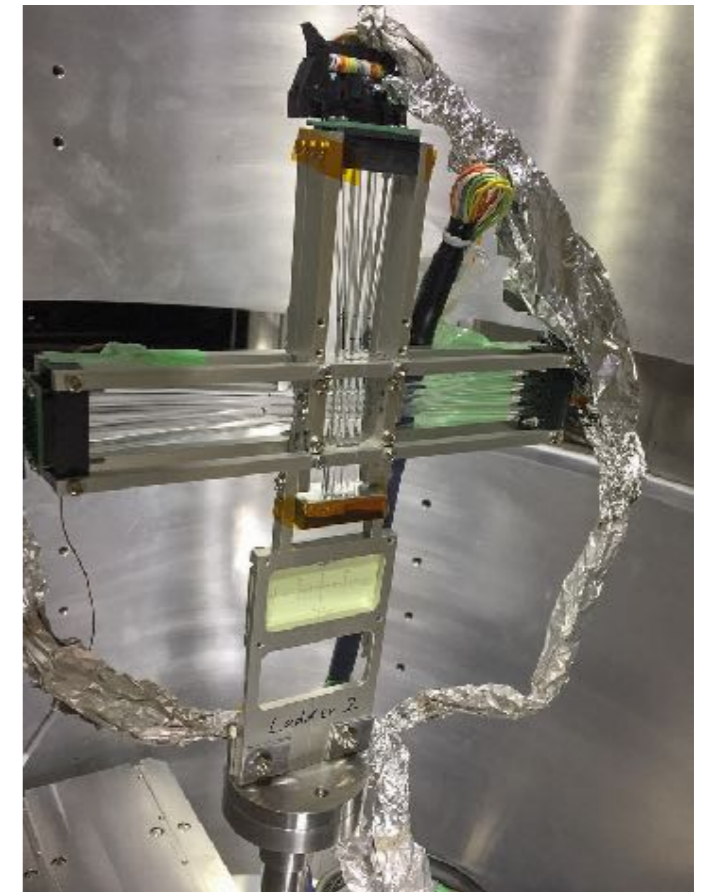
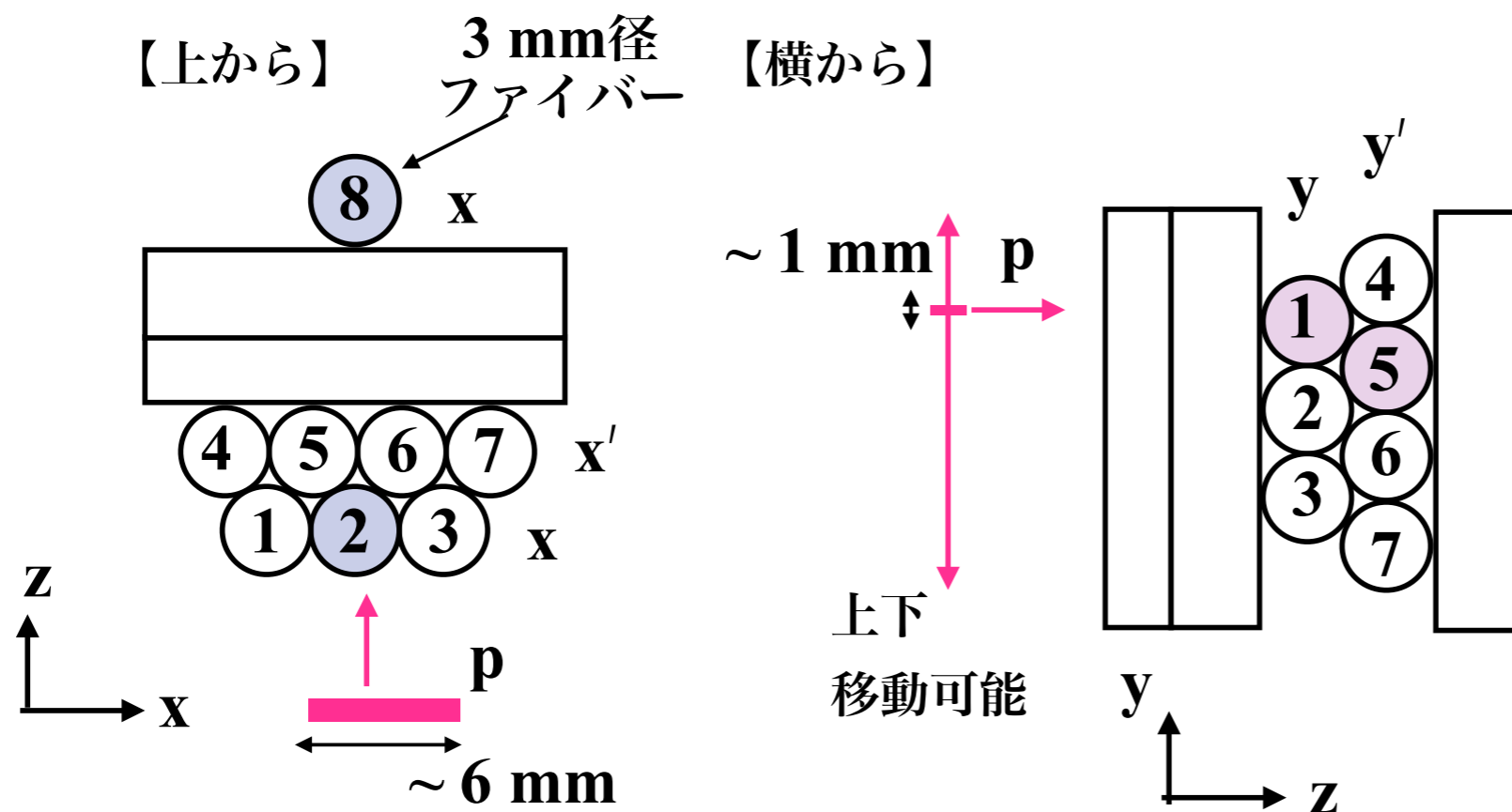


発光量とエネルギー損失 (295 MeV)



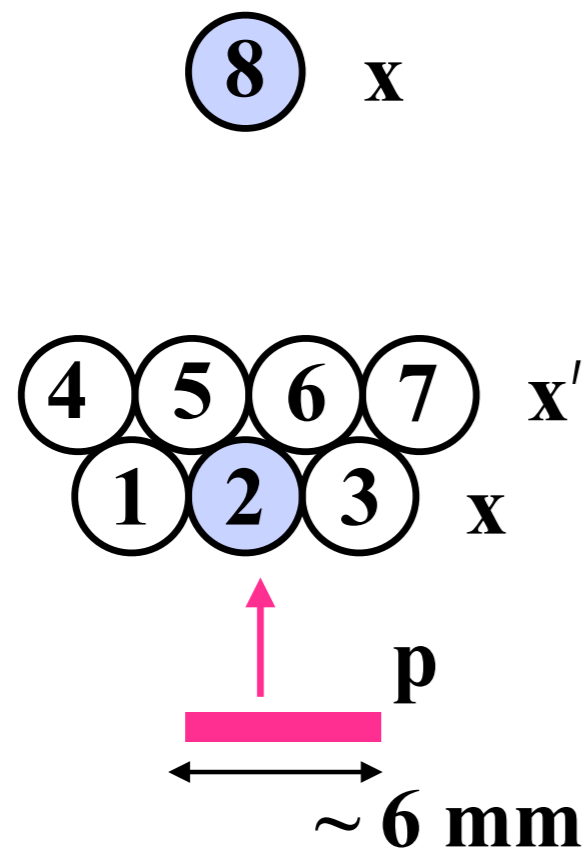
4レイヤー構造の試作機

- p 295 MeVビームを照射



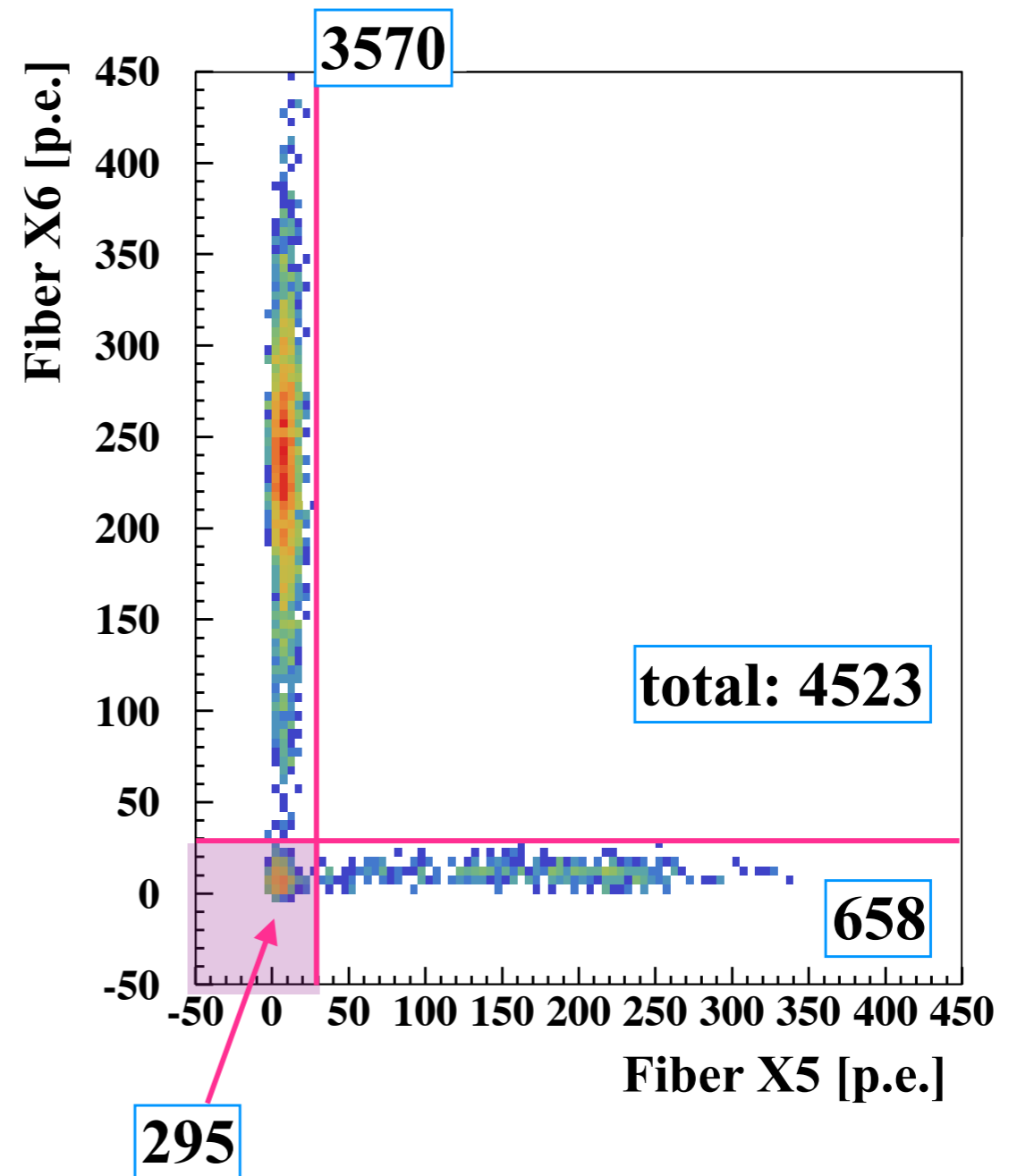
1レイヤーにおける検出効率

■ 「中心を通る」 条件下でのX5, X6の応答

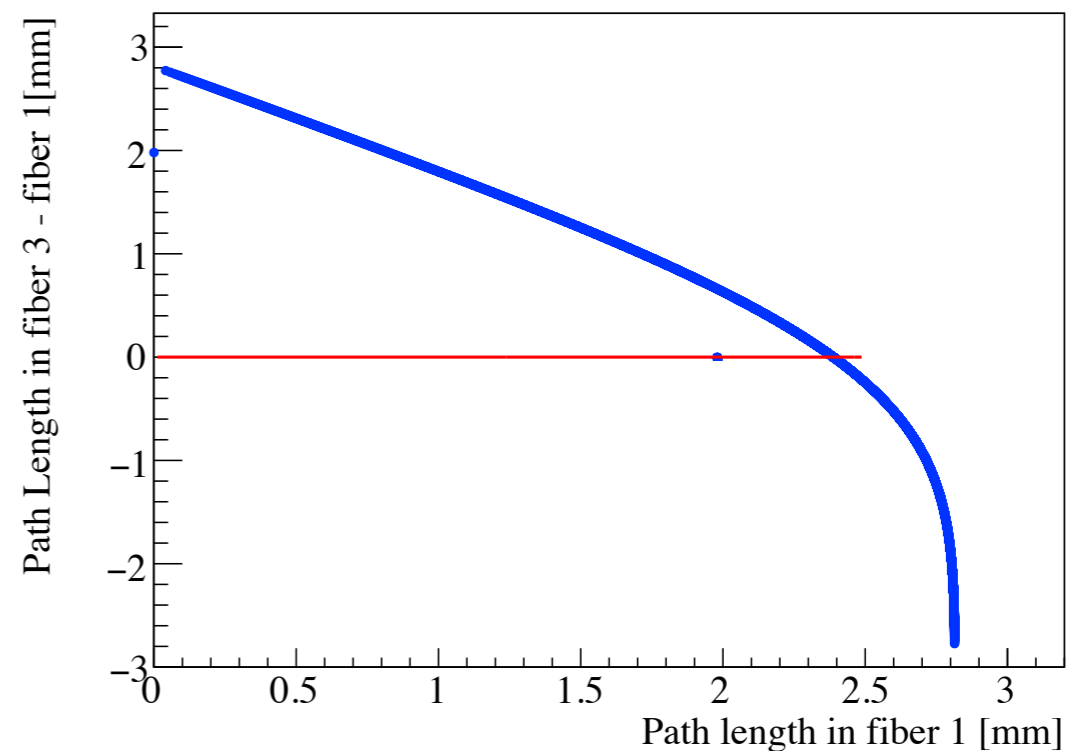
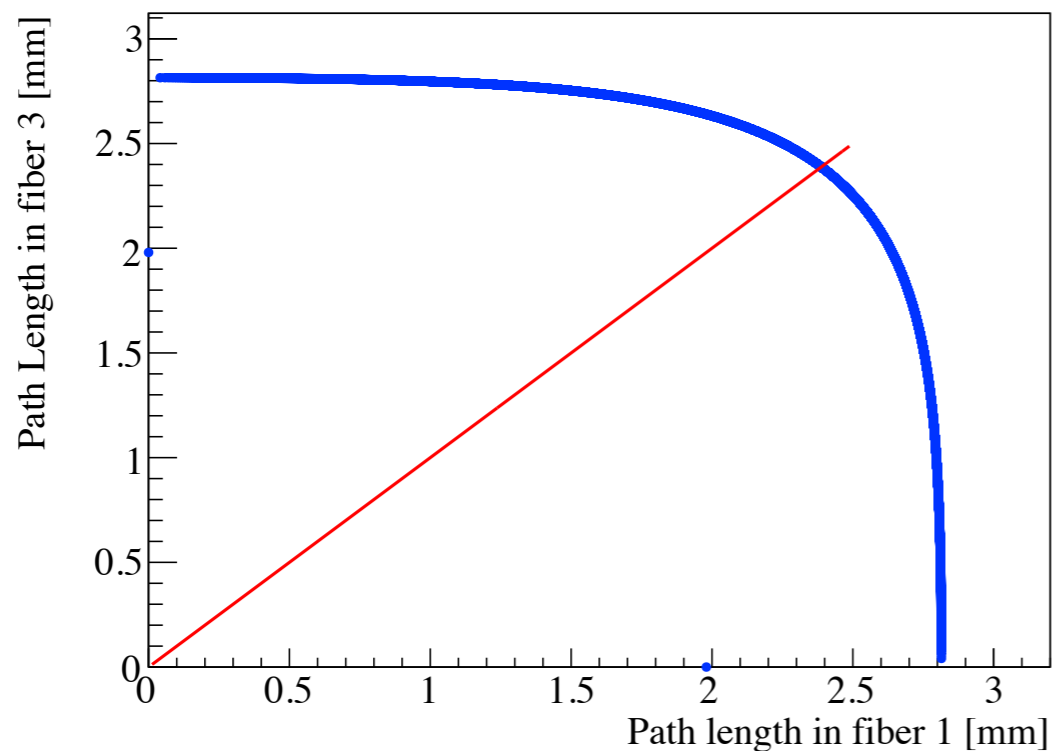
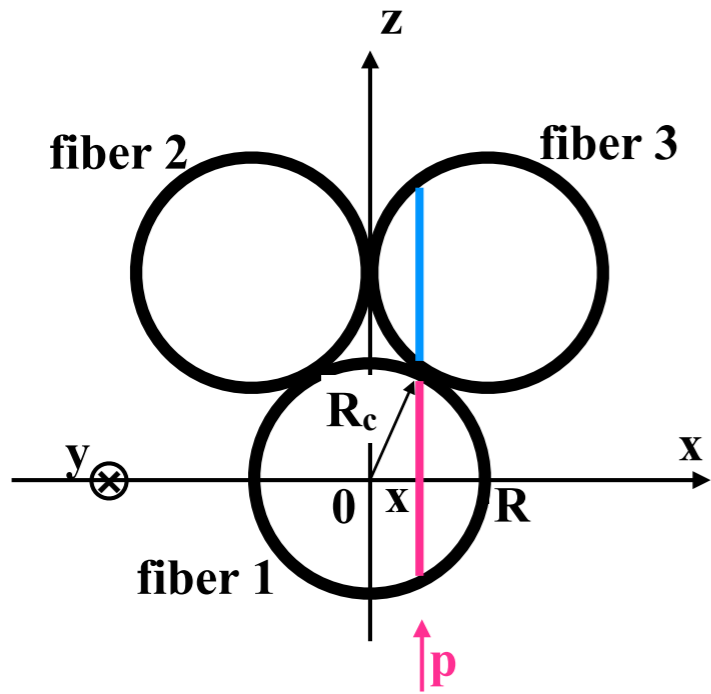


■ 検出効率 93.5%

- ▶ コアの直径 (94%) とほぼ一致



位置検出

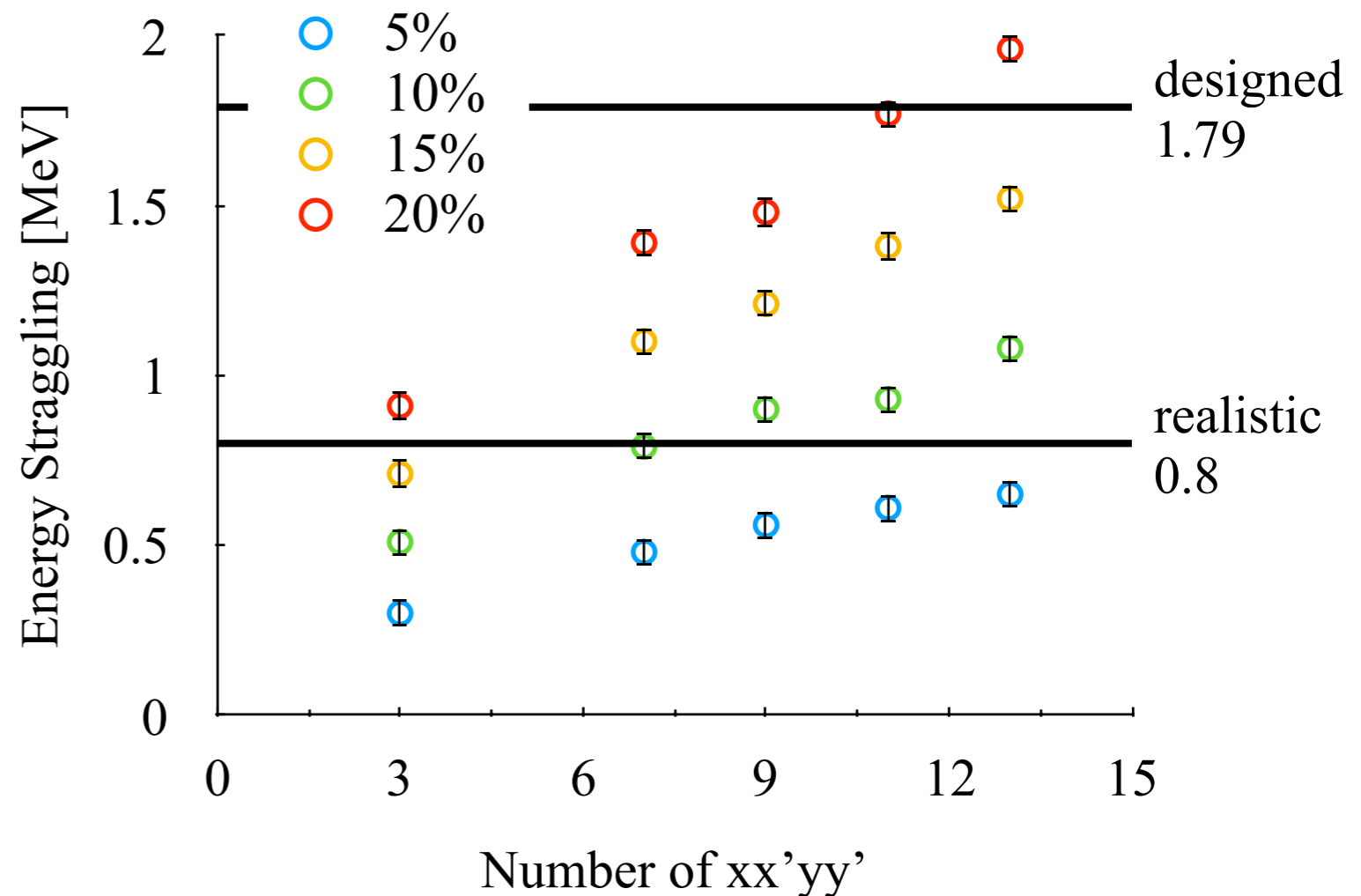
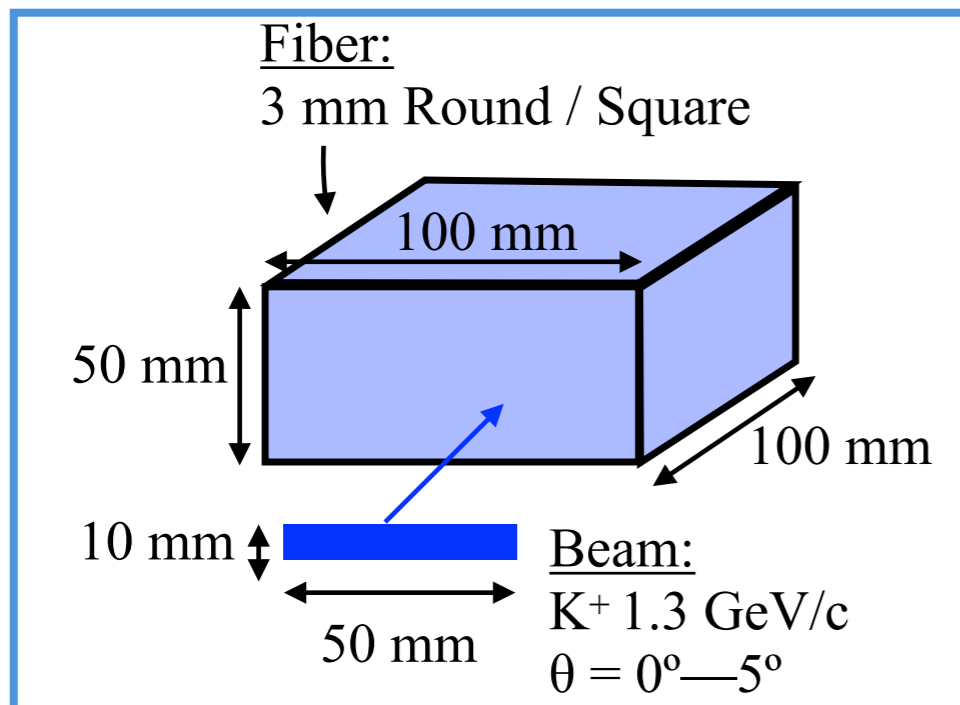


欠損質量分解能

$$\blacksquare \Delta M^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^-}} \Delta p_{K^-} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial p_{K^+}} \Delta p_{K^+} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial \theta} \Delta \theta \right)^2 + \Delta E_{strag}^2$$

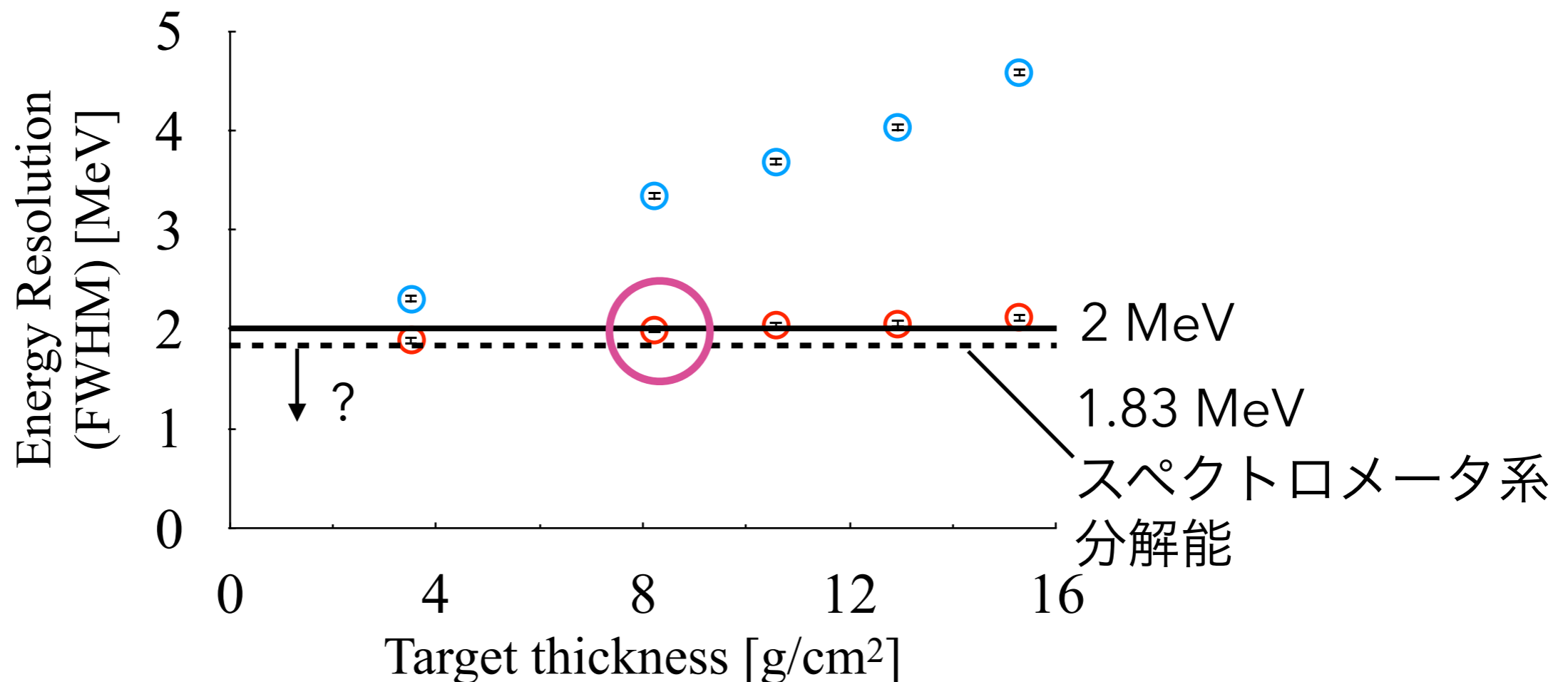
■ アクティブ標的のエネルギー損失のふらつき

- ▶ 標的厚：1本あたりのエネルギー分解能に依存



実現可能な標的厚の見積

- ▶ 2 MeV (FWHM) 以下の欠損質量分解能を実現するには？
- ▶ ファイバー1本の分解能10% (σ)を考慮したGeant4シミュレーション
→ アクティブ標的中におけるエネルギー損失のふらつきを評価
- ▶ 標的は8.2 g/cm³ まで厚くすることが可能



実験セットアップ

■ ファイバーの発光量とエネルギー分解能を実測

▶ ファイバーとGRの同時計測

→ エネルギー損失と発光量の関係

→ ファイバー1本あたりの
エネルギー分解能を測定

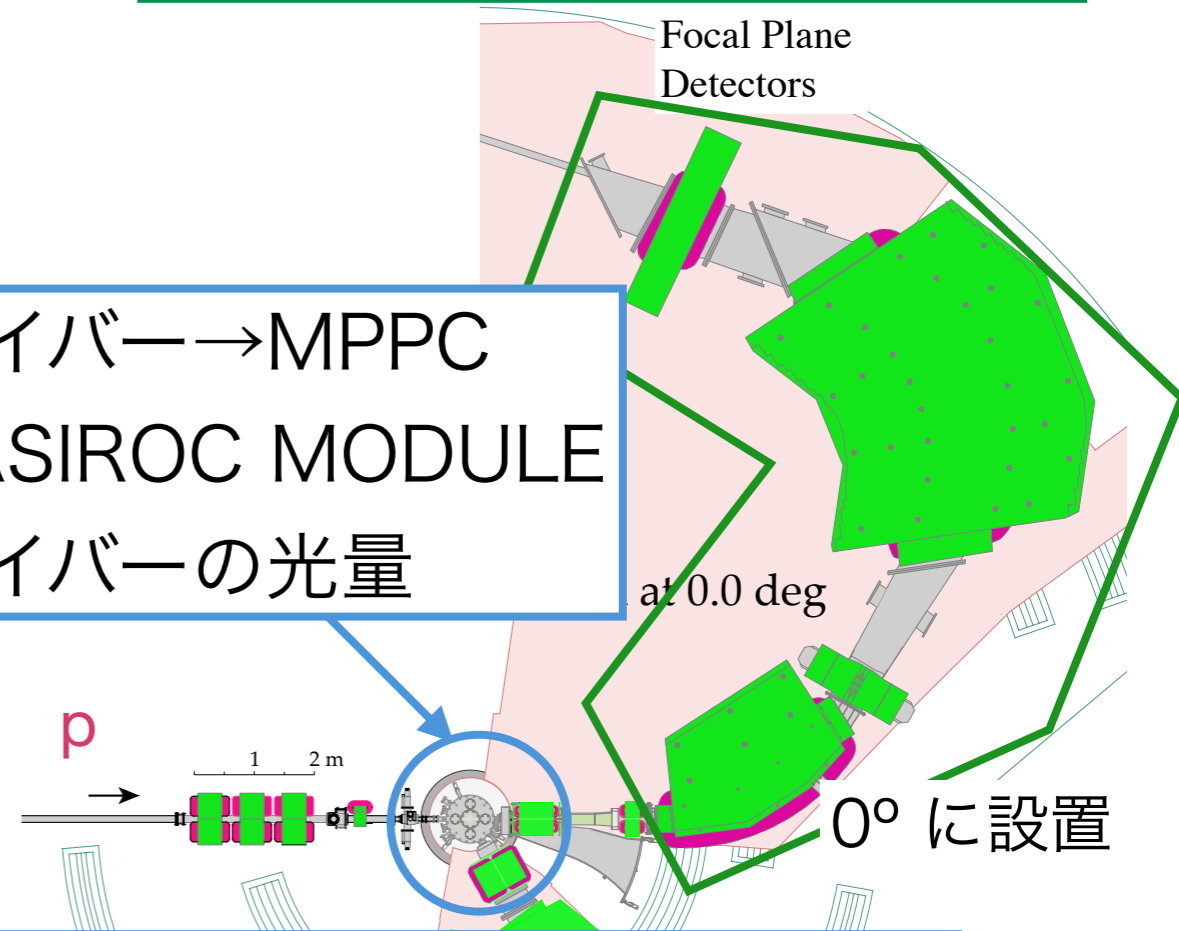
GR: ファイバーにおけるdE

■ 使用したビーム

▶ 6月: p 64.6 MeV, $\beta=0.354$
(~20 keV FWHM)

▶ 12月: p 295 MeV, $\beta=0.649$
(分散整合を用いて
~20 keV FWHM)

ファイバー→MPPC
→EASIROC MODULE
ファイバーの光量



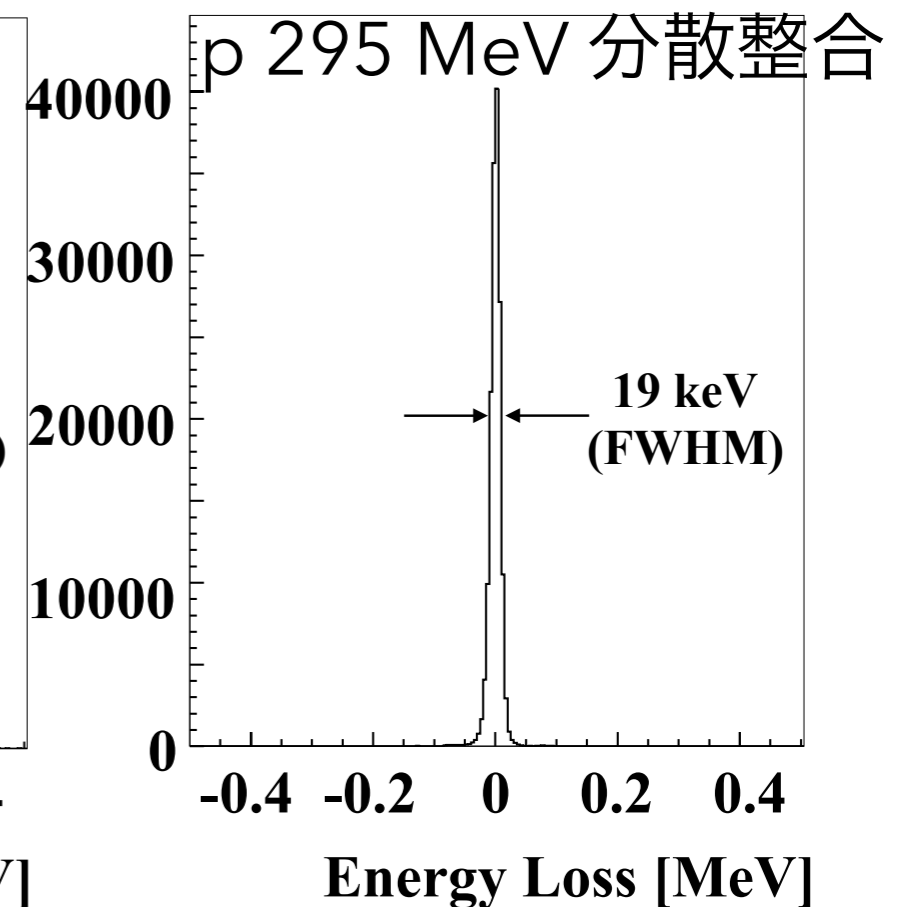
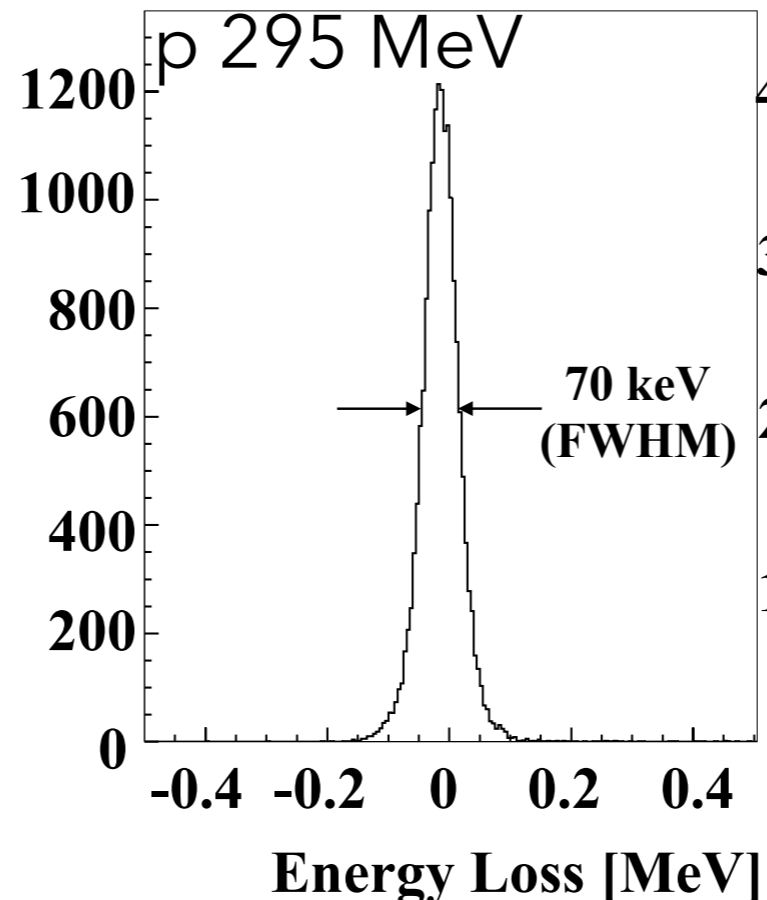
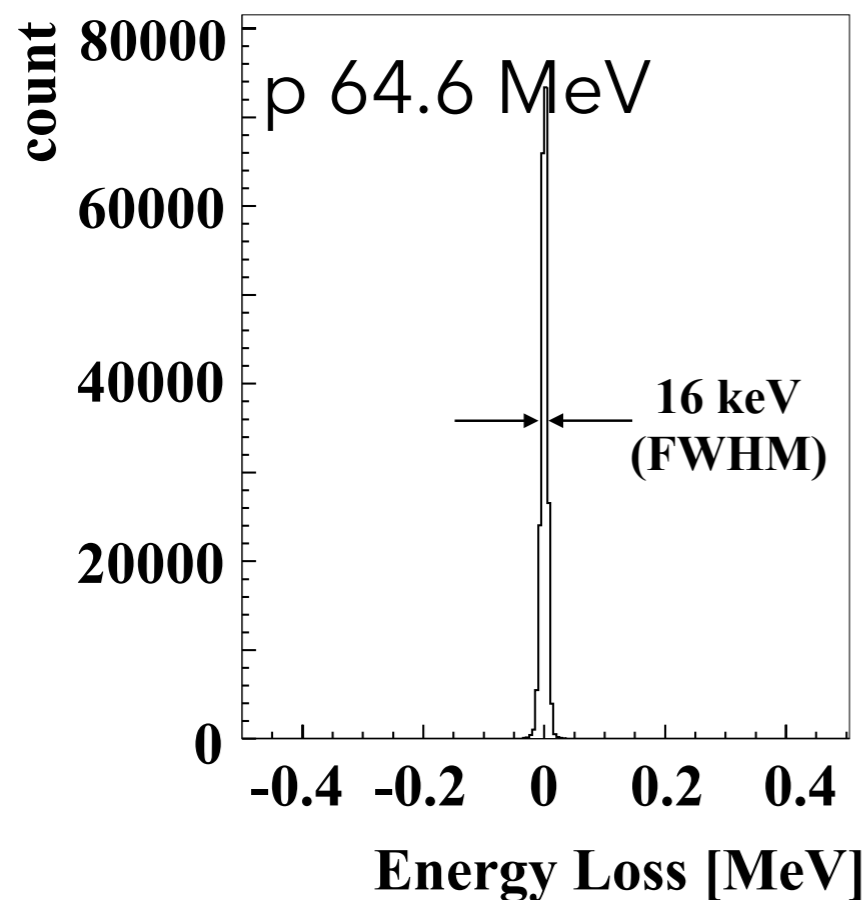
GR と EASIROC MODULEは
独立トリガー
→ スケーラー情報でイベント照合

実験セットアップ



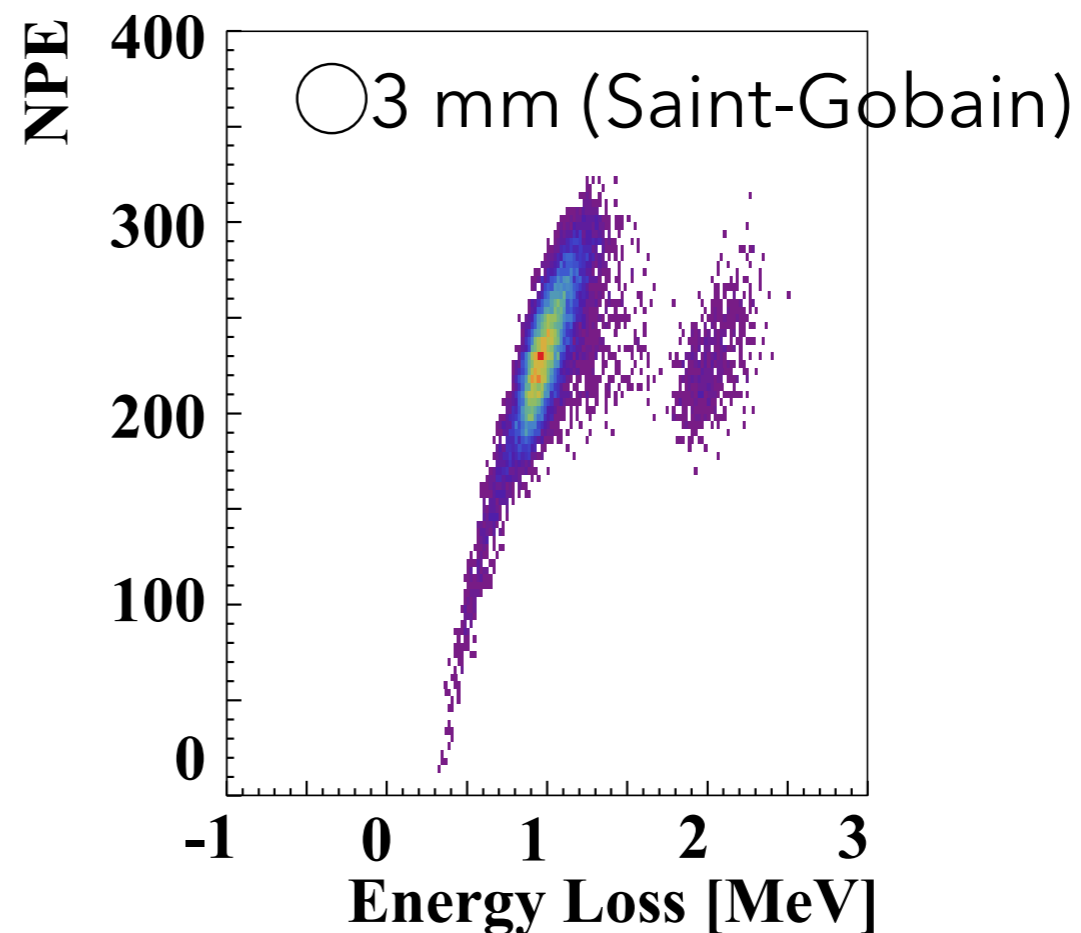
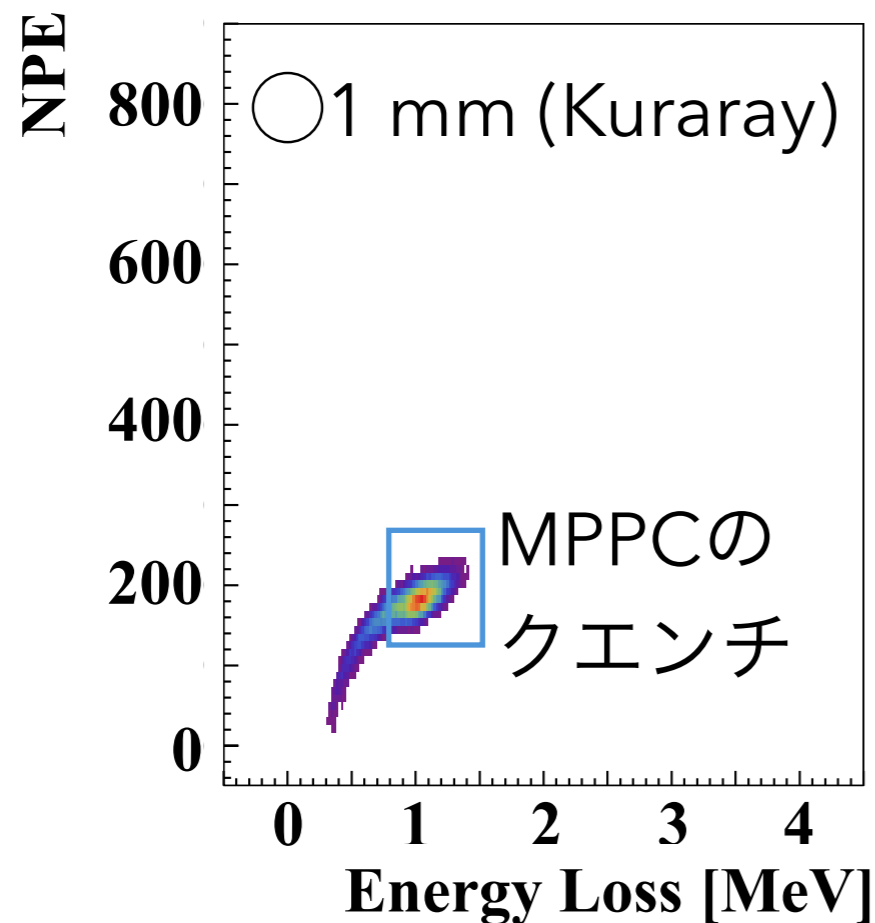
■ 使用したビーム

- ▶ 6月: p 64.6 MeV, $\beta=0.354$ (~20 keV FWHM)
- ▶ 12月: p 295 MeV, $\beta=0.649$
(分散整合を用いて ~20 keV FWHM)



発光量とエネルギー損失の関係

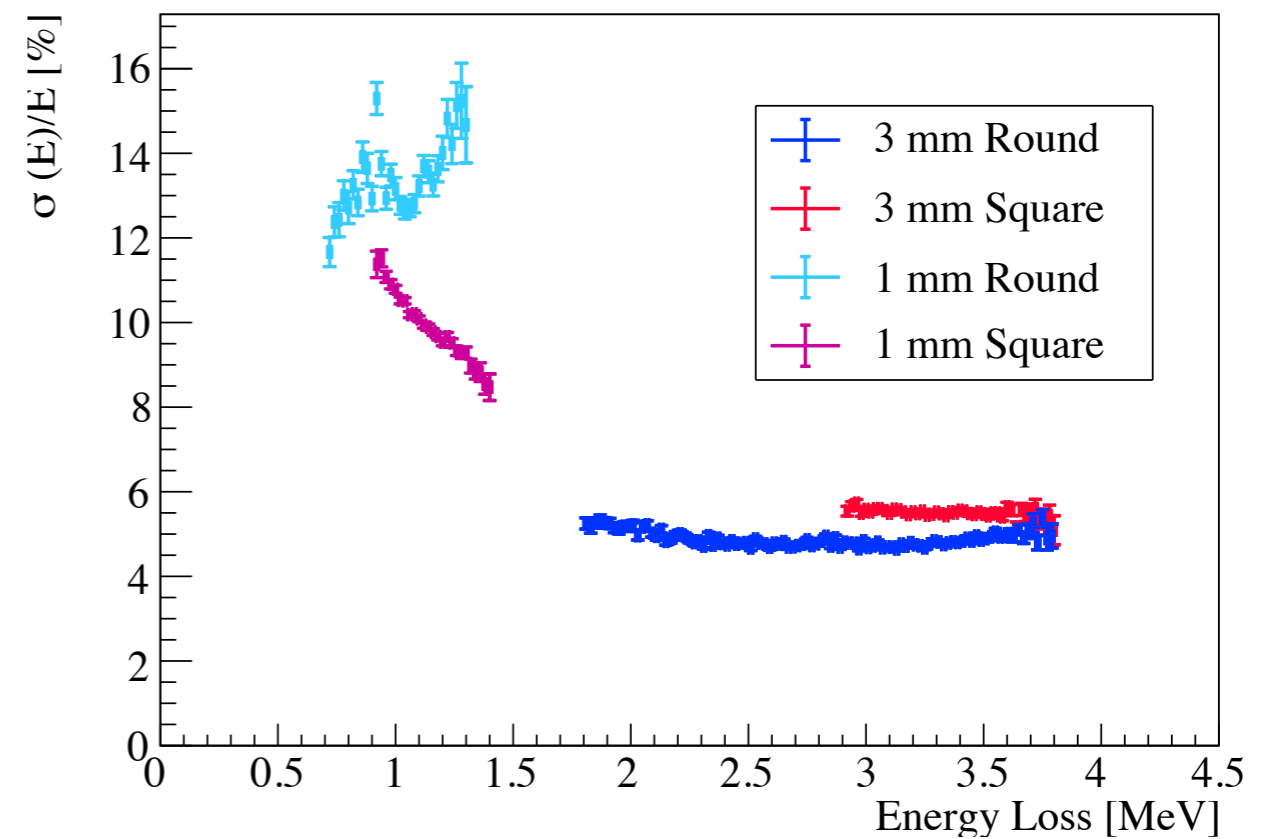
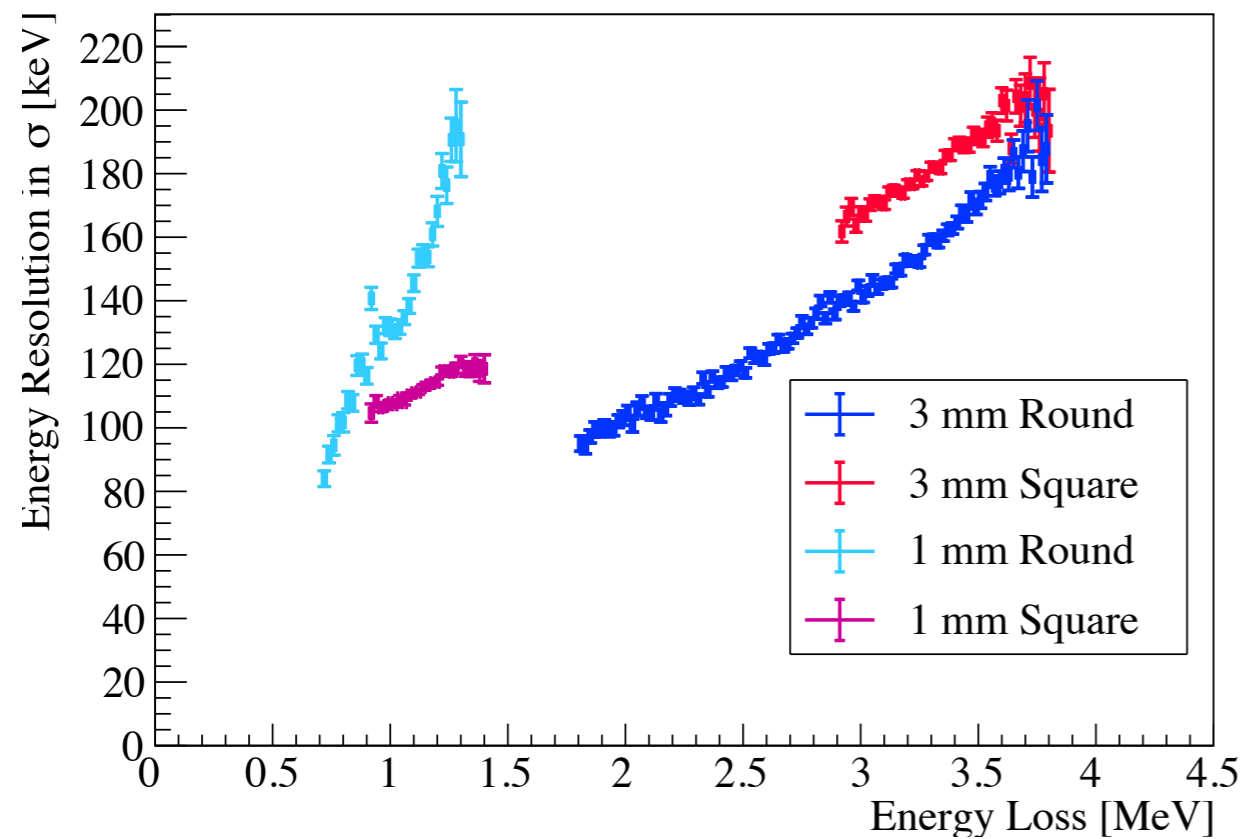
- ○1 mm (64.6 MeV) と○3 mm (295 MeV) の比較
 - ▶ エネルギー損失はどちらも約1 MeV
 - ▶ Kuraray製とSaint-Gobain製で2倍ほどの違いは見られず



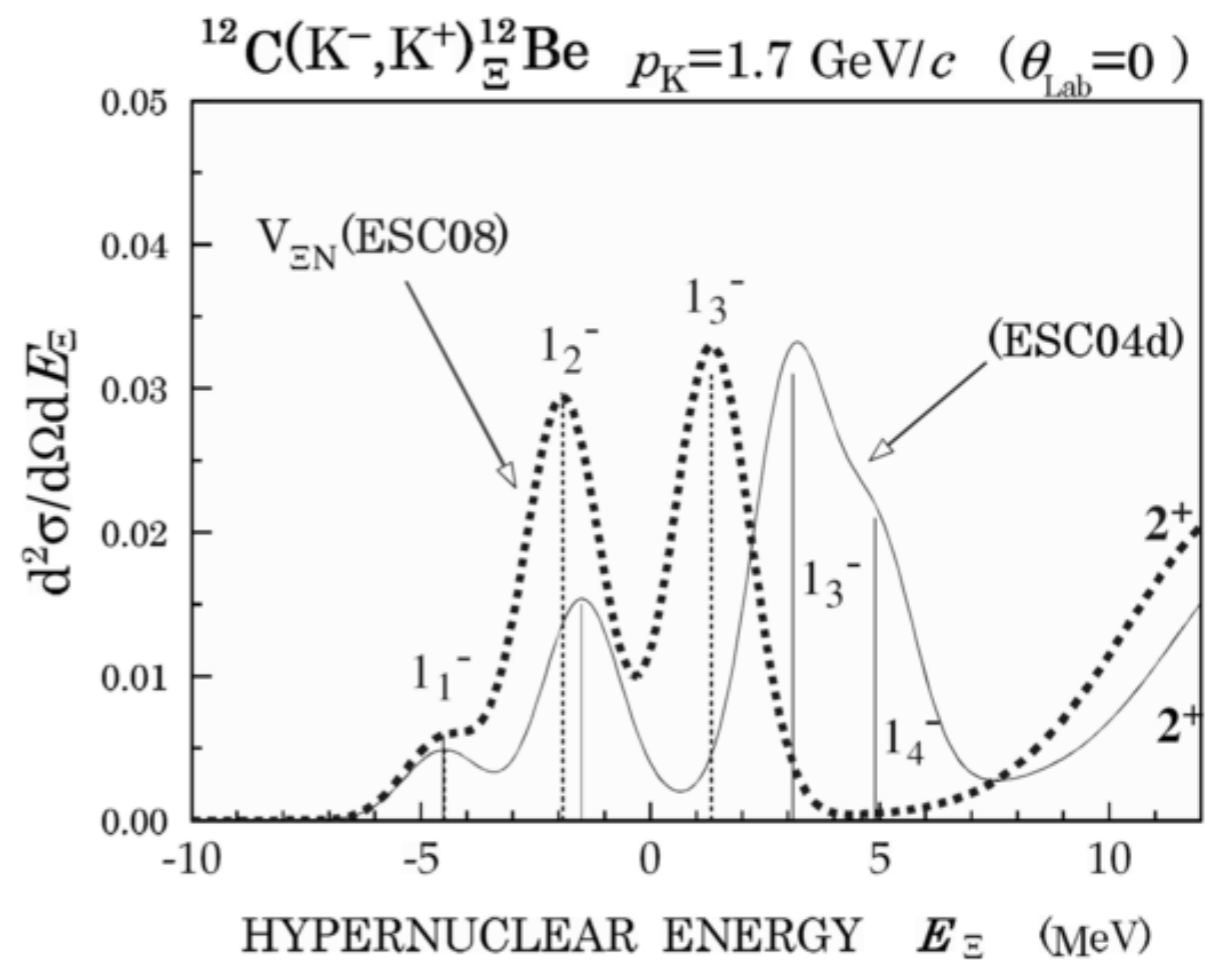
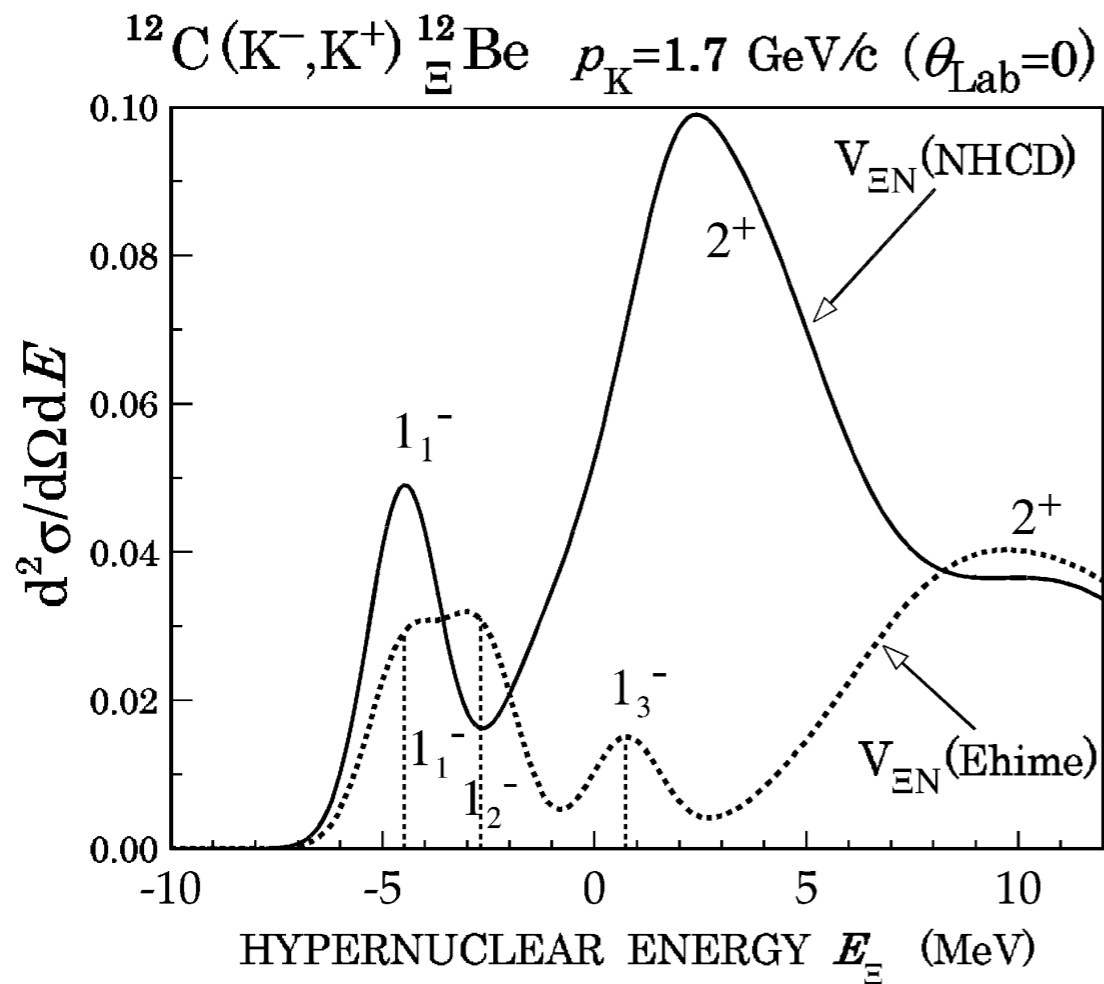
エネルギー分解能

■ p 64.6 MeVの測定結果

- ▶ 分解能が一番良いのは○ 3 mm

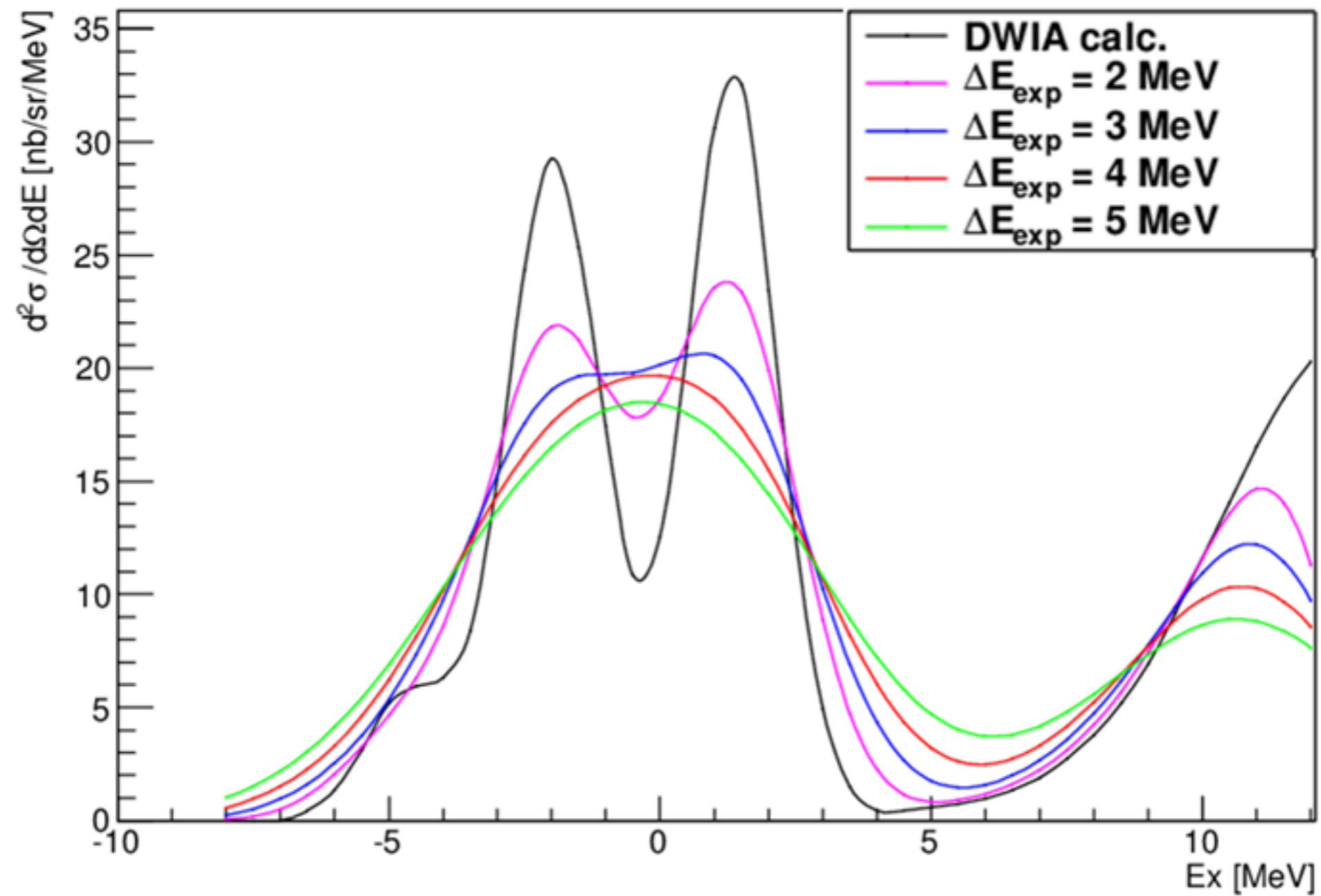


理論スペクトル

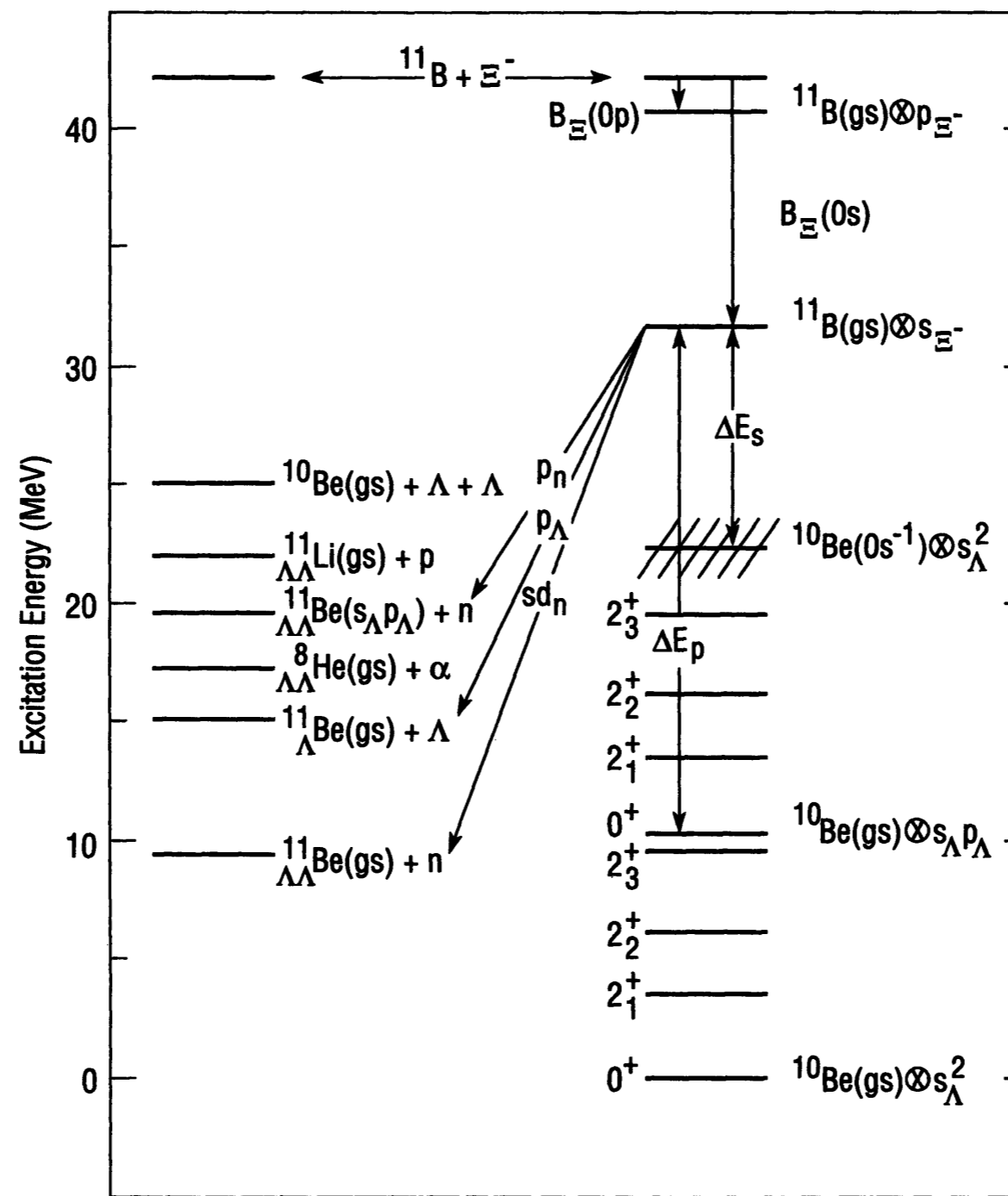


T. Motoba and S. Sugimoto, NPA **835** (2010) 223.

理論スペクトル



理論スペクトル



D. J. Millener, C. B. Dover and A. Gal, PTPS **117** (1994) 307.