

Grand Raidenを用いたX17探索の新アプローチ

2024年度 課題研究P4

安齋想 斎藤誉志大 中村哲 那須峻
西川湧志朗 原田祥仁 齋藤一輝

Tables of Contents



1. Introduction
2. Experiment
3. Analysis
4. Result
5. Summary

1. Introduction

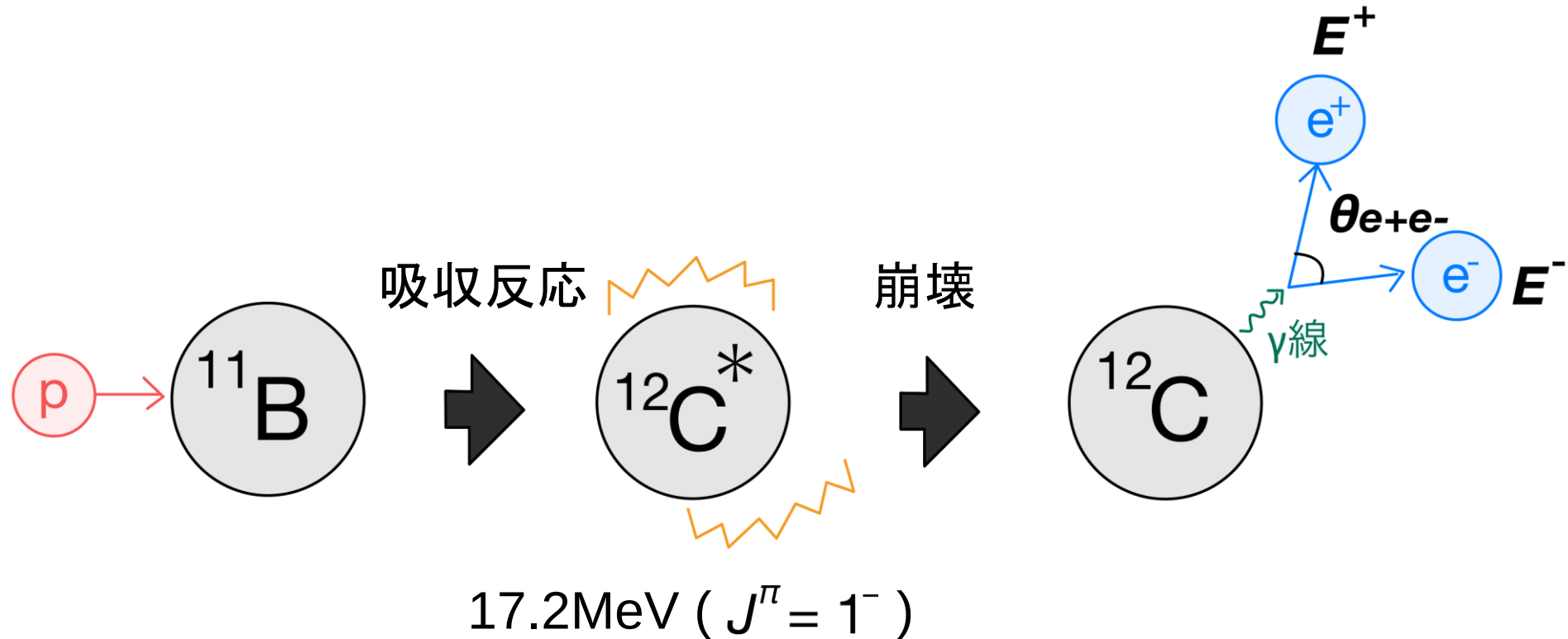


1. Introduction – 先行研究

先行研究 (Atomki Laboratory)

2022 A.J.Krasznahorkay et al.

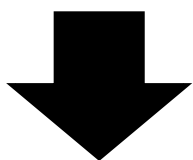
$^{11}\text{B} (p, e^+ e^-) ^{12}\text{C}$ 反応 $\longrightarrow$ 内部対生成の角度 $\theta_{e^+e^-}$ の分布



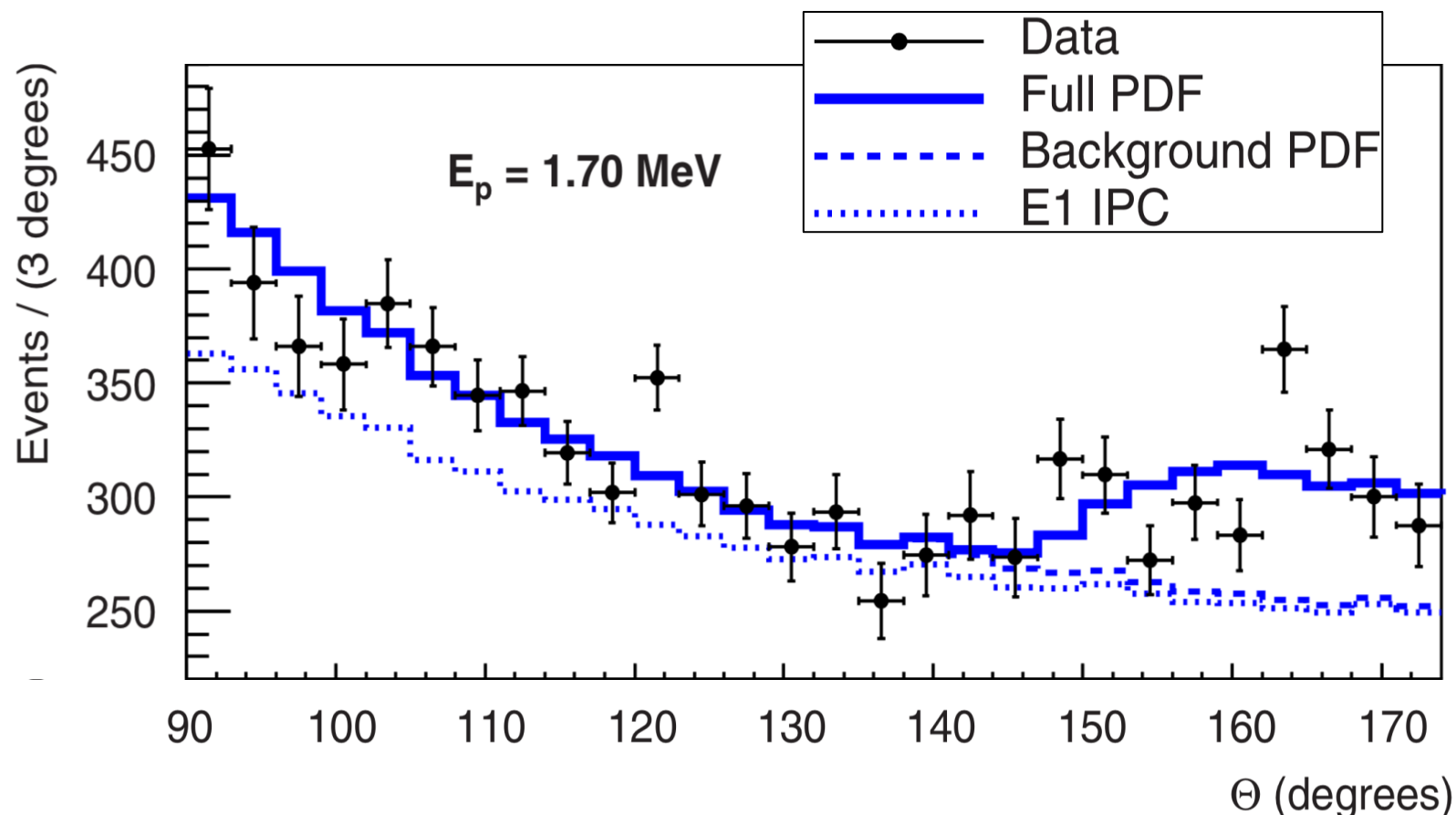
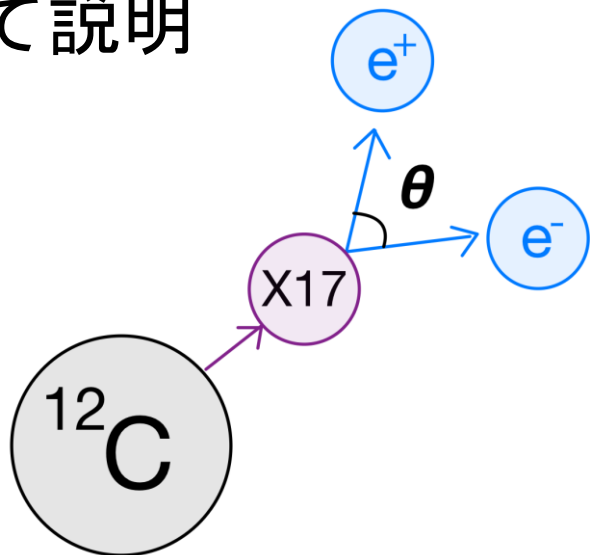
1. Introduction – 先行研究

先行研究 (Atomki Laboratory)

155°～160°に説明困難なピーク



約**17MeV**のボソン**X17**
が中間生成していたと
して説明

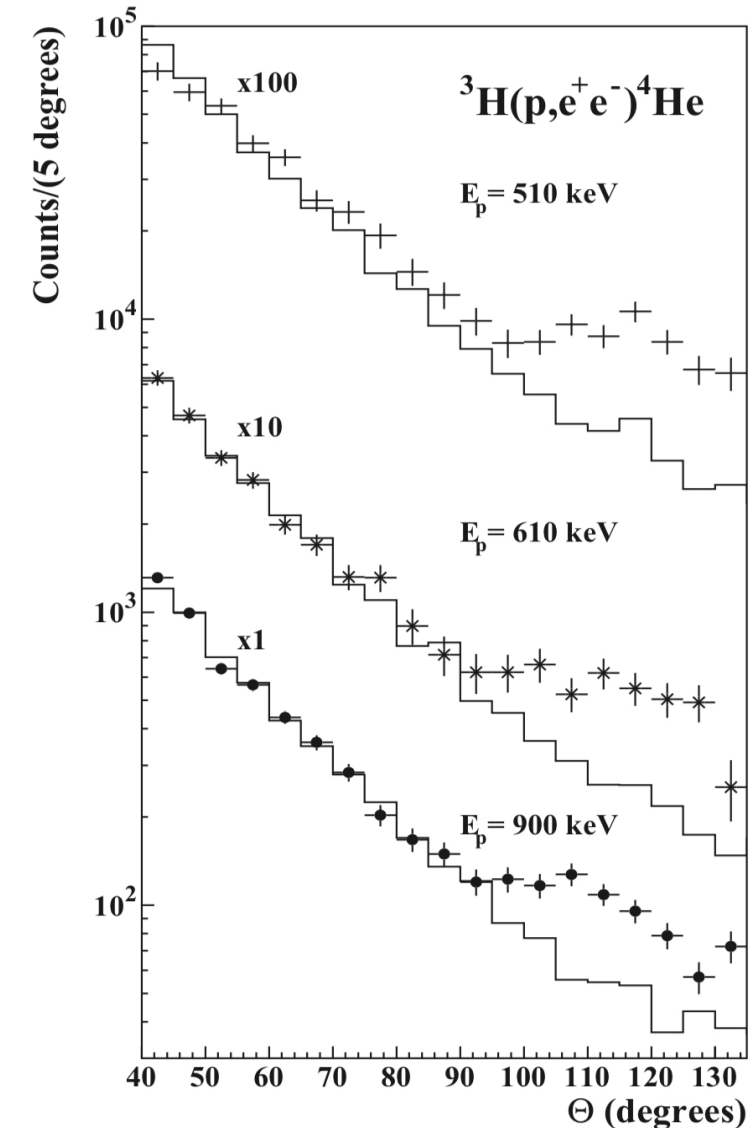
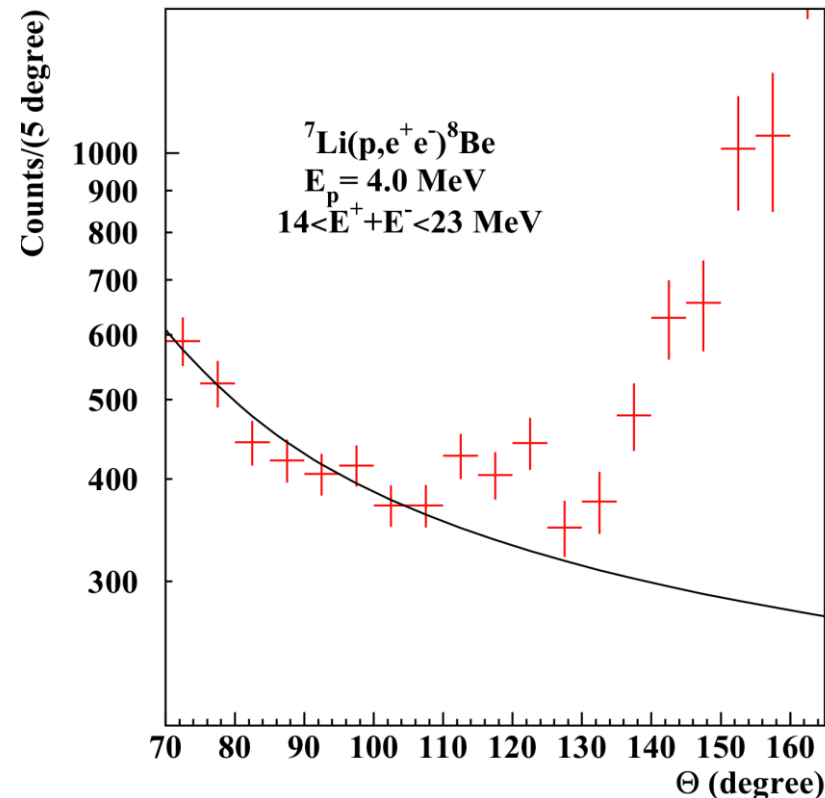


出展 : A. J. Krasznahorkay et.al. “New anomaly observed in 12C supports the existence and the vector character of the hypothetical X17 boson” (2022)

1. Introduction – 先行研究

A. J. Krasznahorkay et.al. “Observation of the X17 anomaly in the decay of the Giant Dipole Resonance of ^8Be ” (2023)
A. J. Krasznahorkay et.al. “New anomaly observed in ^4He supports the existence of the hypothetical X17 particle” (2021)

- ^8Be (2016,2023), ^4He (2021), ^{12}C (2022)への陽子吸収反応 (どれもX17粒子の存在で説明可能)
- e^+e^- のエネルギー測定
→励起状態の特定
- e^+e^- それぞれの位置測定
→開き角 $\theta_{e^+e^-}$ 分布
- 大角度での増強を確認

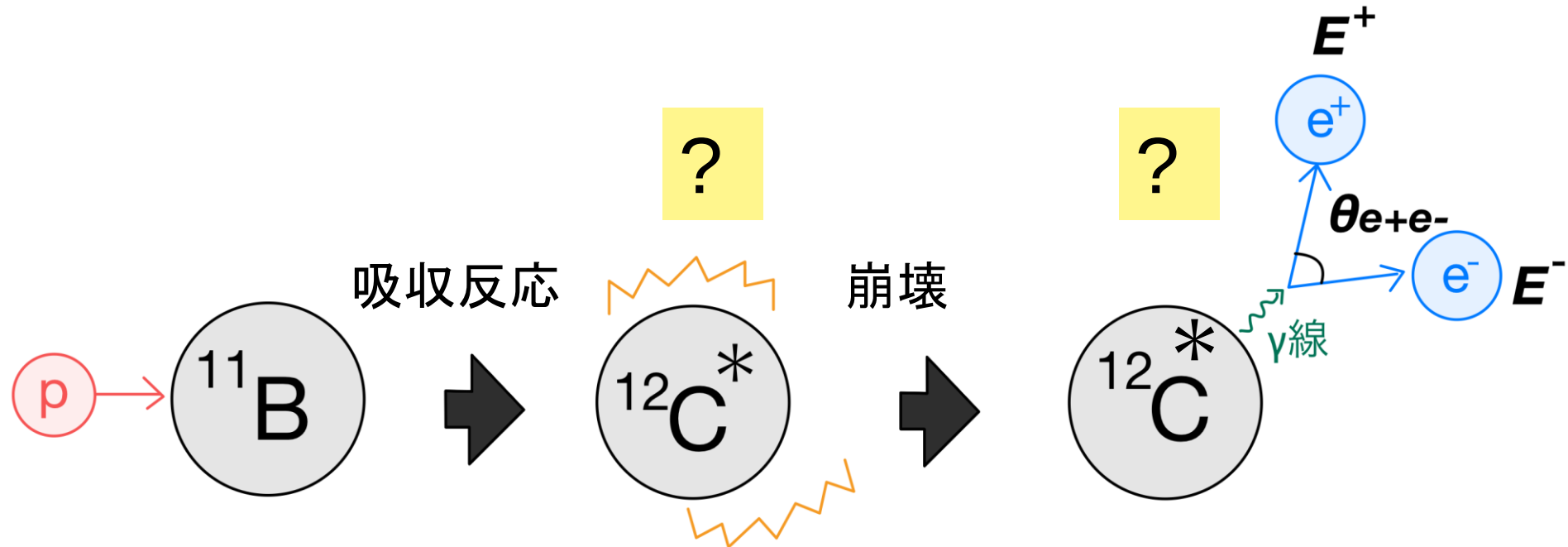


1. Introduction

先行研究 (Atomki Laboratory)

もっと調べる必要がある点

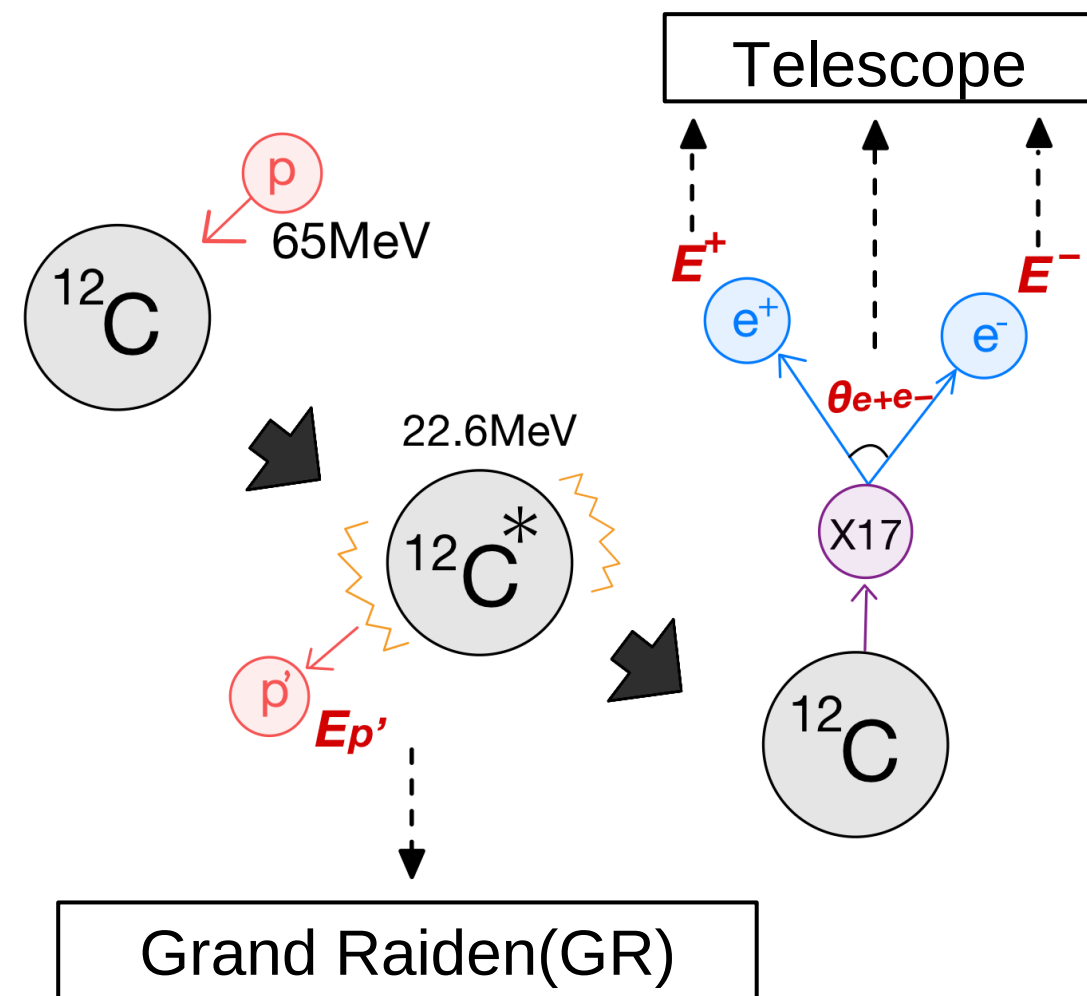
- ・ 網羅性
- ・ 反応の特定(準位間隔が狭い場合)



1. Introduction

今回の実験

- $^{12}\text{C}(p, p')^{12}\text{C}$ 非弾性散乱→色々な反応(網羅)
- 散乱陽子 p' のエネルギー測定 (Grand Raiden)
→ ^{12}C の励起状態ごとにデータ取得(特定)
(今回は22.6MeVに注目)
- e^+e^- のエネルギー測定 (Telescope)
→終状態の特定
- e^+e^- それぞれの位置測定 (Telescope)
→角度相関 $\theta_{e^+e^-}$



1. Introduction

今回の実験

Telescope (GAGG)で γ 線エネルギースペクトルも測定

目的:内部対生成による電子対角度分布をモンテカルロシミュレーションにより再現

→シミュレーションの正当性を γ 線スペクトルで検証

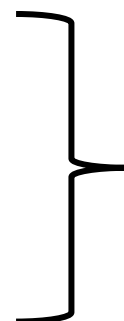
※今回は十分な検証時間が足りず断念

1. Introduction

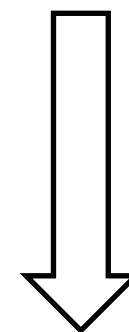
実現可能性 – 角度分解能

角度の不定性を生む要因

- 1) 標的中での反応点の広がり
- 2) DSSDのstrip幅分の不定性
- 3) e^+e^- の標的中での多重クーロン散乱



シミュレーションで評価



- FWHM < 10°
- 収率の最適化

Set upのパラメータ決定

1. Introduction

実現可能性 – 収率予想

- X_{17} 由来イベント検出レート @telescope

$$N/t = (I/e) \times (n\sigma) \times p \times R \\ \cong 2.2 \times 10^{-2} \text{ [cps]}$$

- X_{17} 由来のGR同期が可能なイベント検出レート

$$N_{GR}/t = \frac{I}{e} \times \left(n \frac{d\sigma}{d\Omega} \delta\Omega \right) \times p \times R \\ \cong 1.8 \times 10^{-4} \text{ [cps]}$$

	物理量
I	ビーム電流
n	単位面積当たりの ^{12}C 個数
σ	22.6 MeVに励起する断面積
p	励起状態から X_{17} を生成する確率
R	Telescopeの幾何効率
$d\sigma/d\Omega$	$\theta = 4.5 \text{ deg}$ での微分反応断面積
$\delta\Omega$	標的からGRを見込む立体角

実験時間25時間で集まる数は $N \cong 2000$ 個, $N_{GR} \cong 16$ 個

2. Experiment

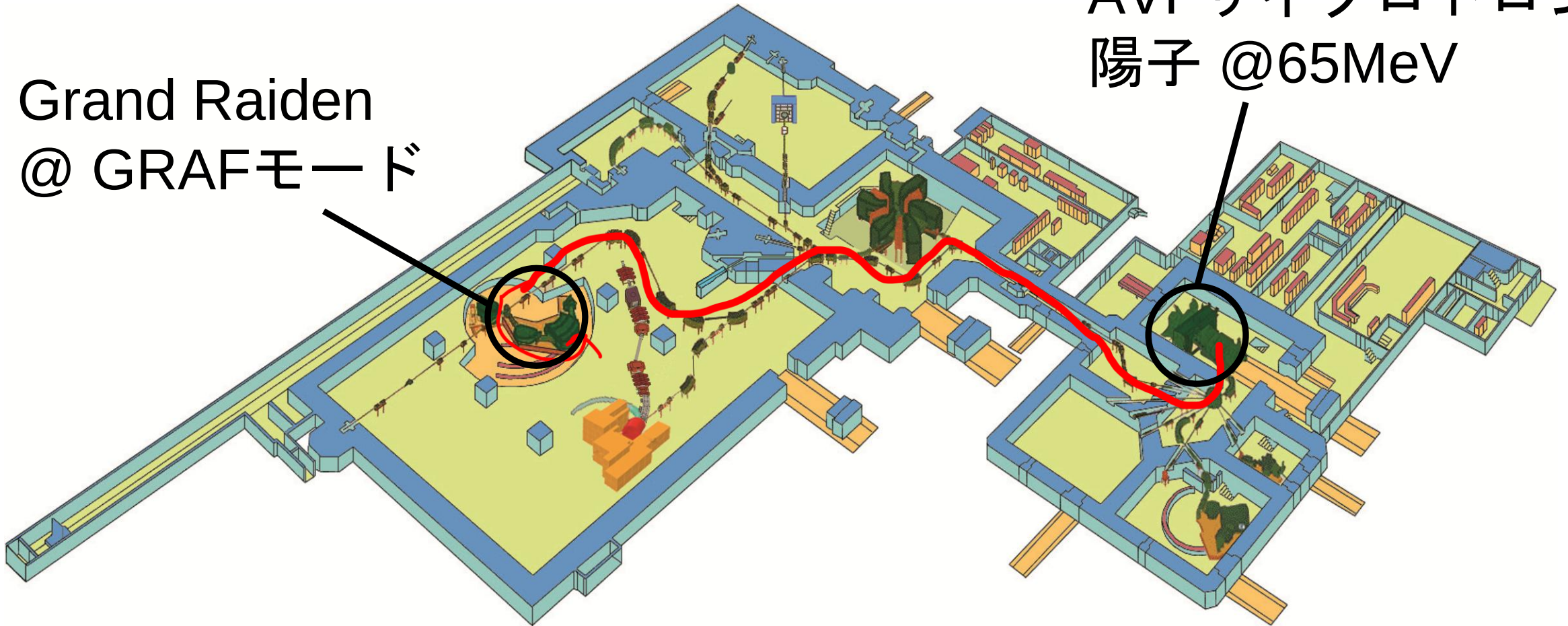


2. Experiment – 実験概要

実験 @ RCNP

Grand Raiden
@ GRAFモード

AVFサイクロトロン
陽子 @65MeV

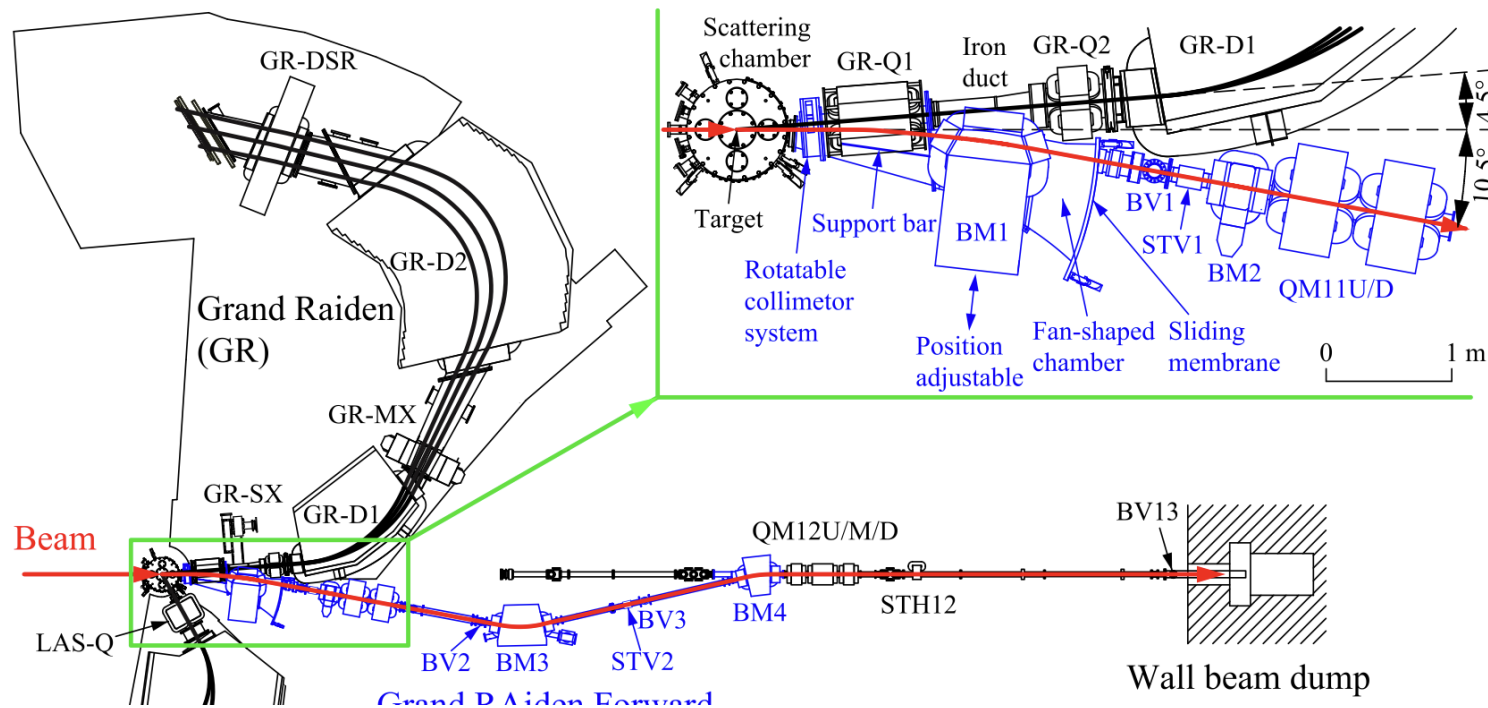


2. Experiment – 実験概要

GRAF mode

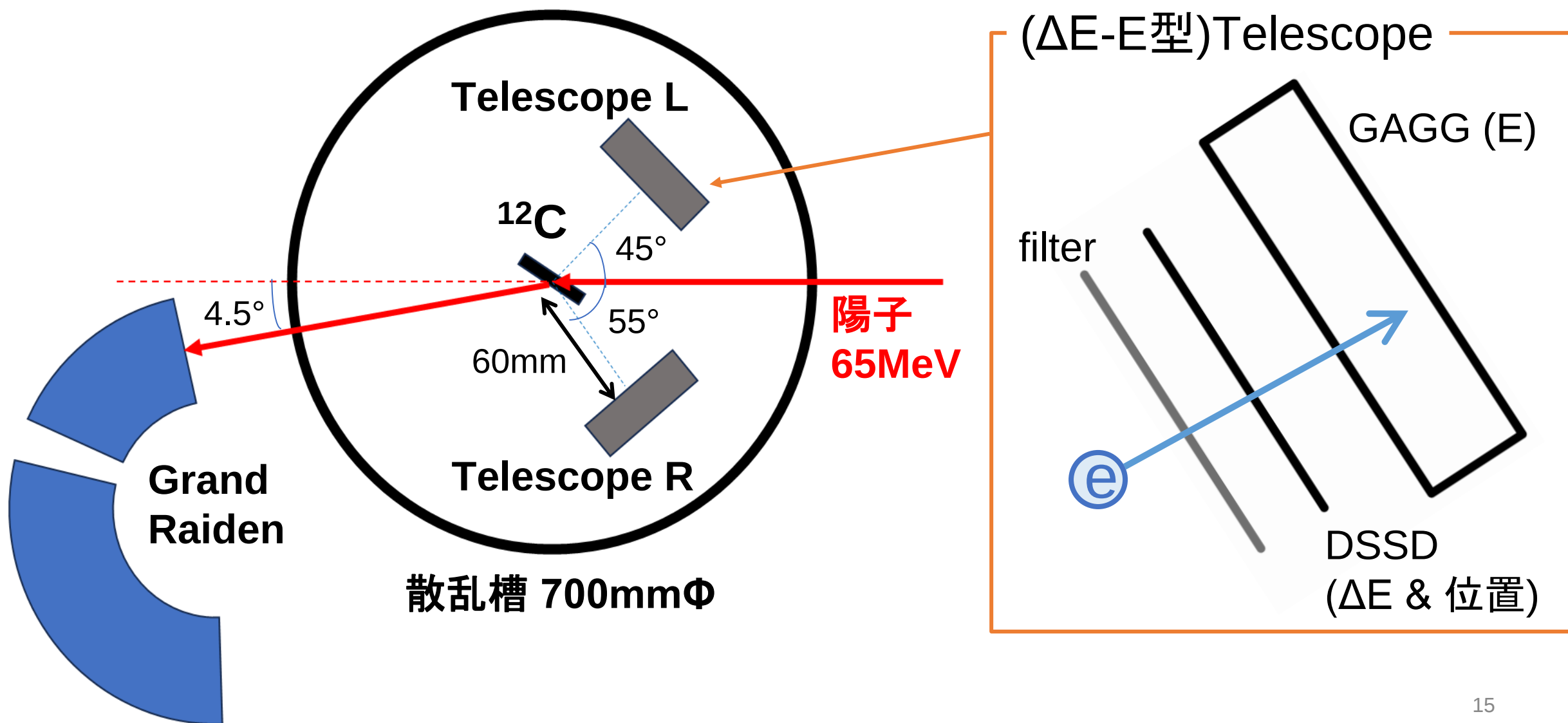
直進するビームを曲げて**前方散乱 4.5°** を見る

→ 22.6 MeVへの微分断面積大きく



2. Experiment – 実験概要

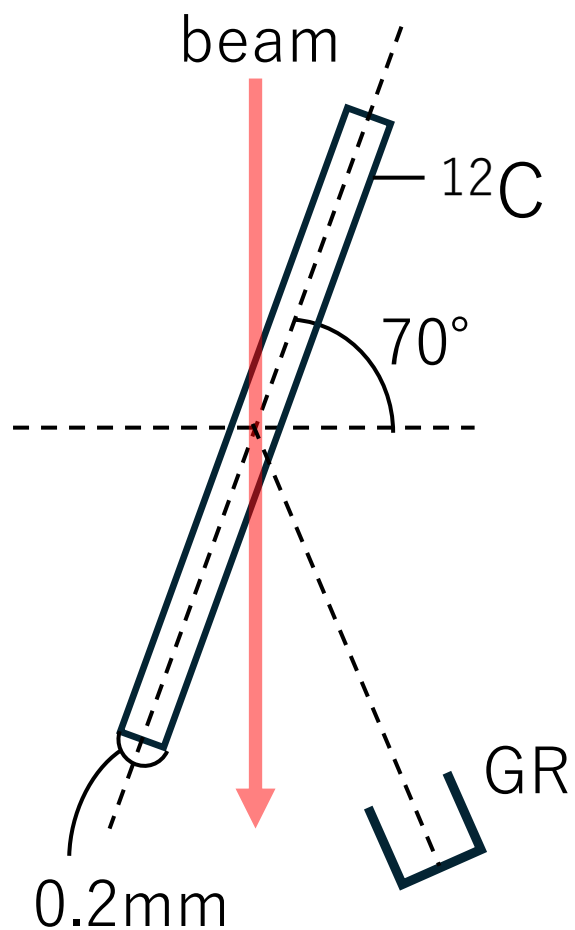
Set up 概略図



2. Experiment – 実験概要

Target

上から見た図



正面から見た図

ターゲットホルダー



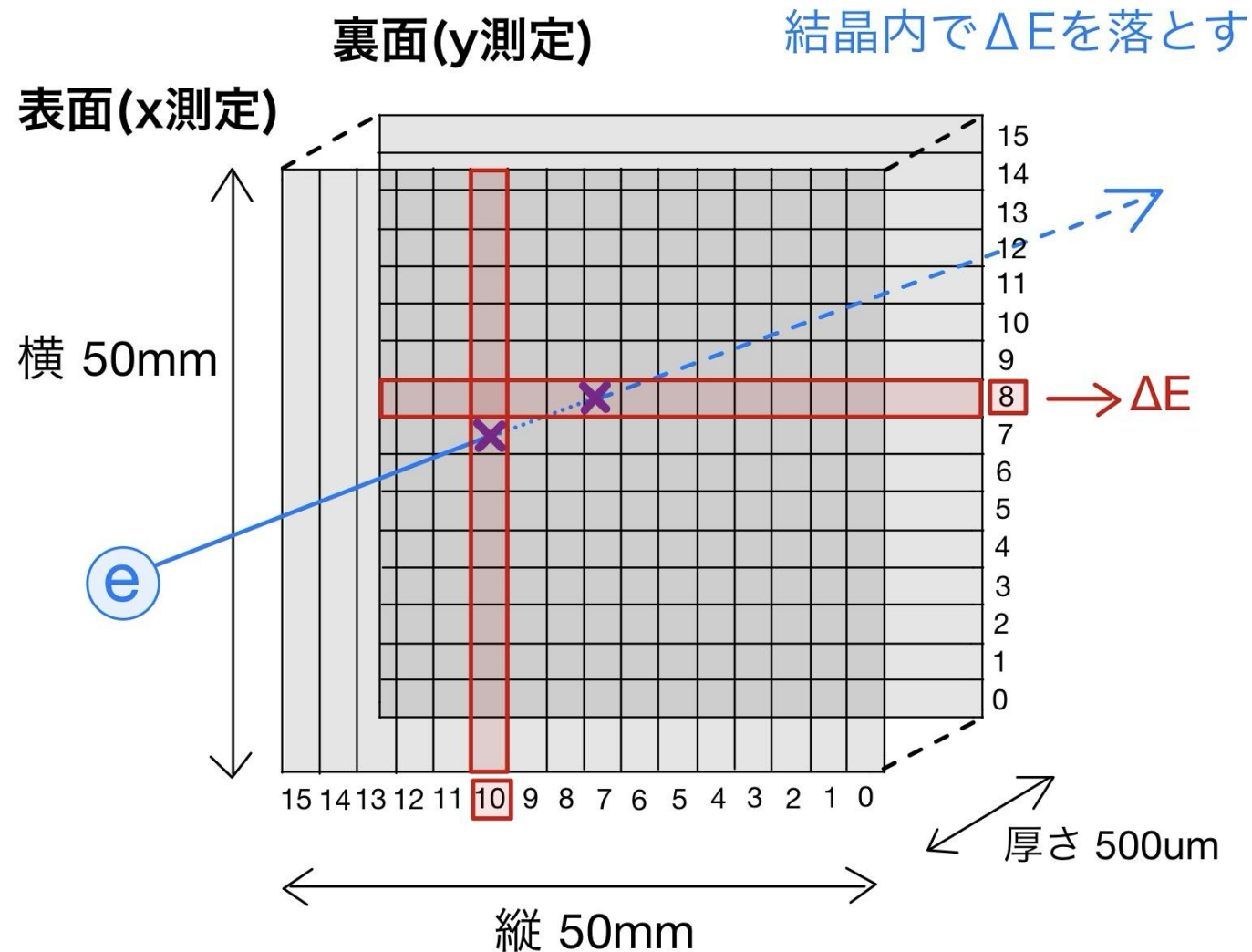
^{12}C (0.2 mmt)

^{12}C (0.3 mmt)

viewer

2. Experiment – telescope

DSSD (Double-sided Silicon Strip Detectors)



得たい情報

- ・ 見る粒子 : e^- , e^+ , p
- ・ 粒子が通過した位置
(x, y どのstripが鳴ったか)
- ・ 落としたエネルギー ΔE

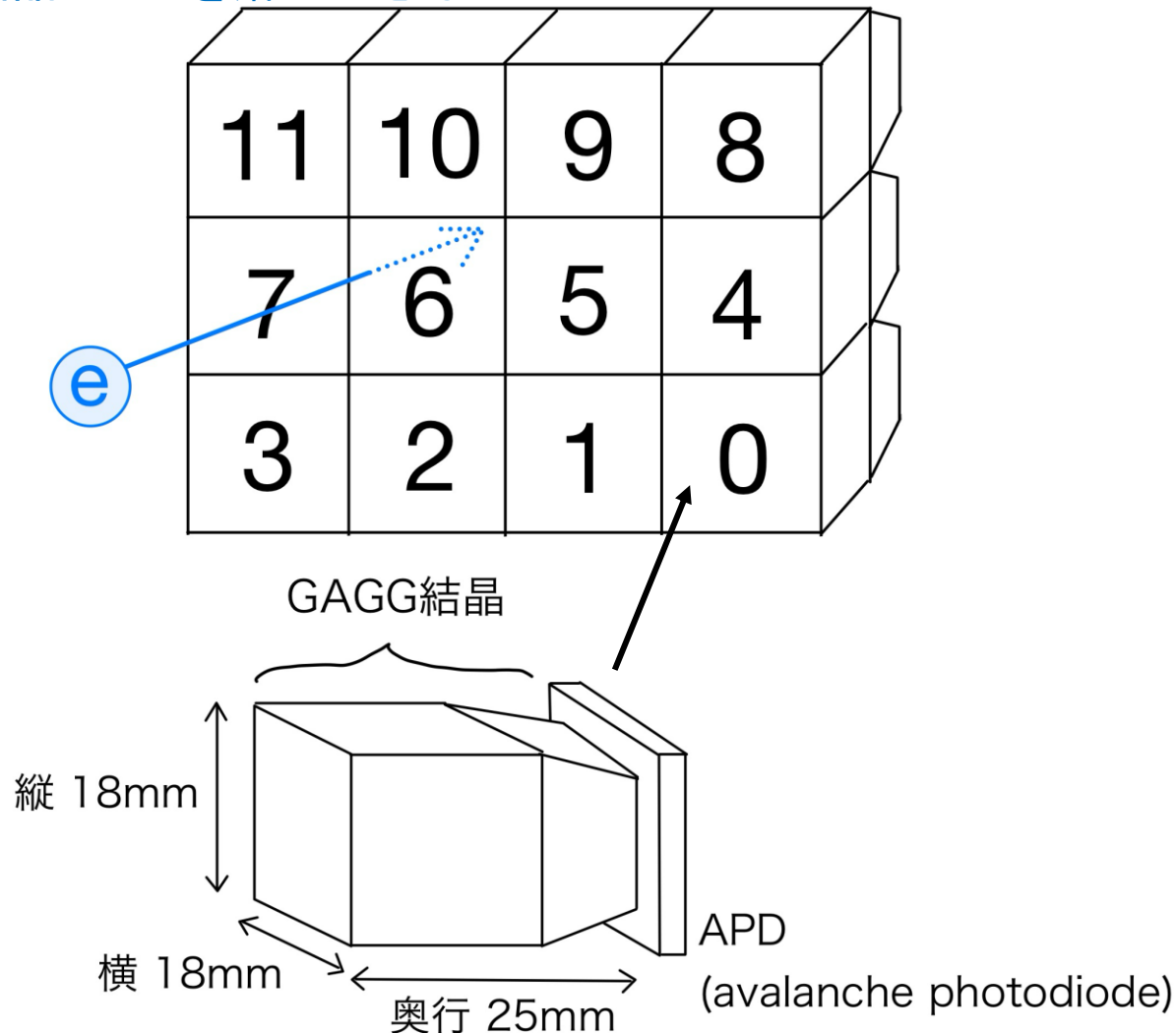
特徴

- ・ Si半導体検出器
- ・ γ 線にほぼ応答しない

2. Experiment – telescope

GAGG ($\text{Gd}_3(\text{Ga,Al})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$) シンチレータ

結晶内で E を落としきる



得たい情報

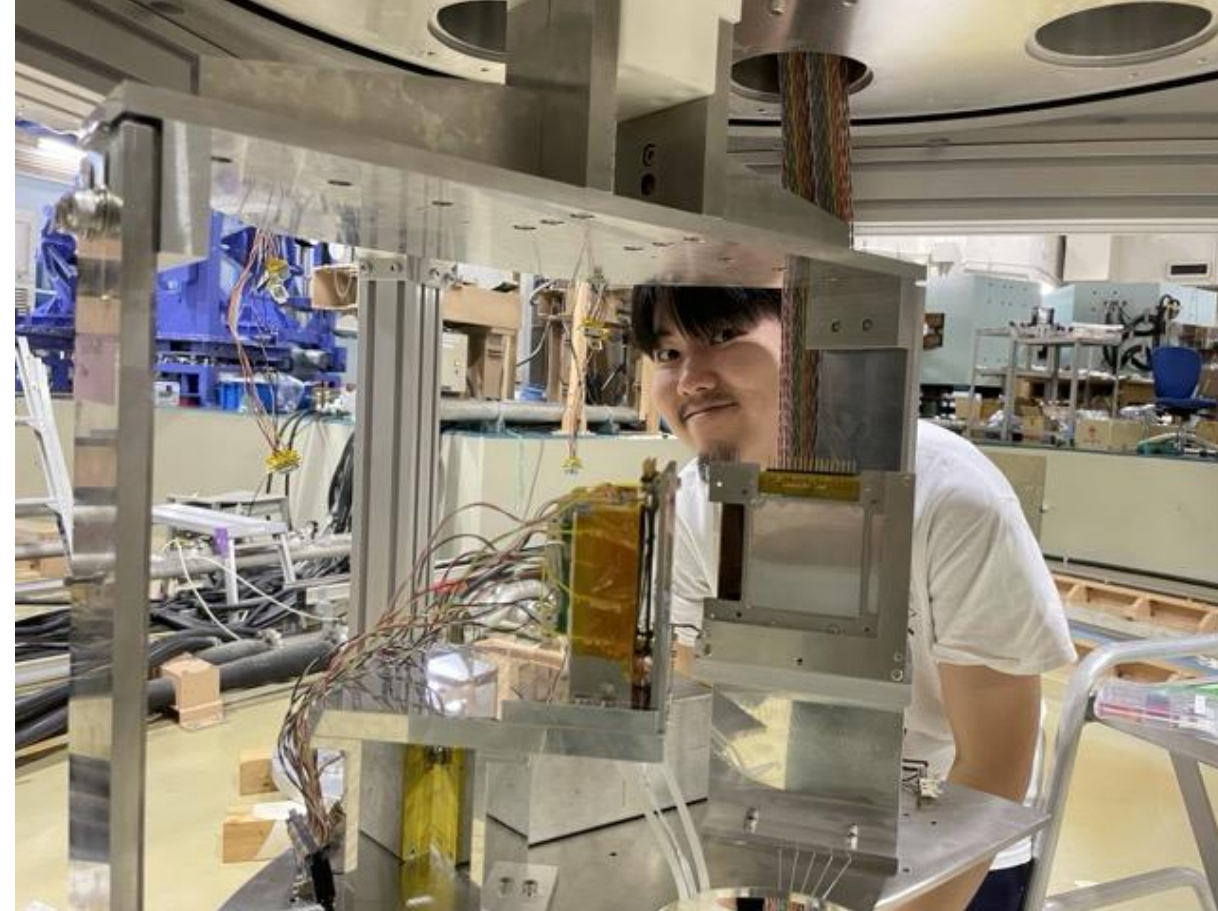
- ・ e^- , e^+ , p , γ の運動エネルギー E

特徴

- ・ エネルギー分解能が高い
(プラスチックに対して)
- ・ サイズがコンパクト

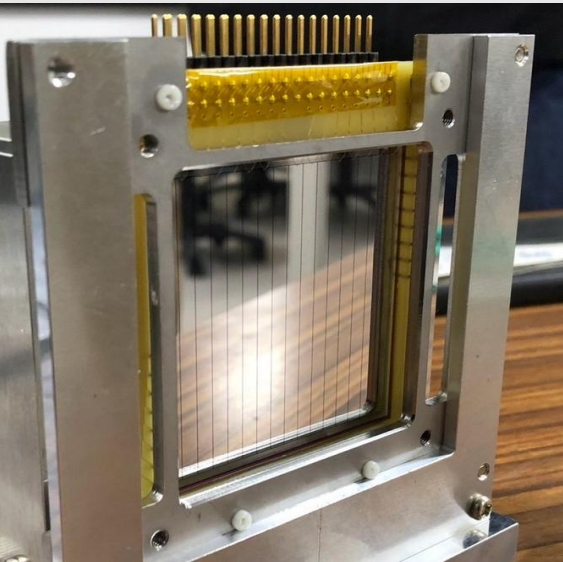
2. Experiment – telescope

実際のTelescopeの写真

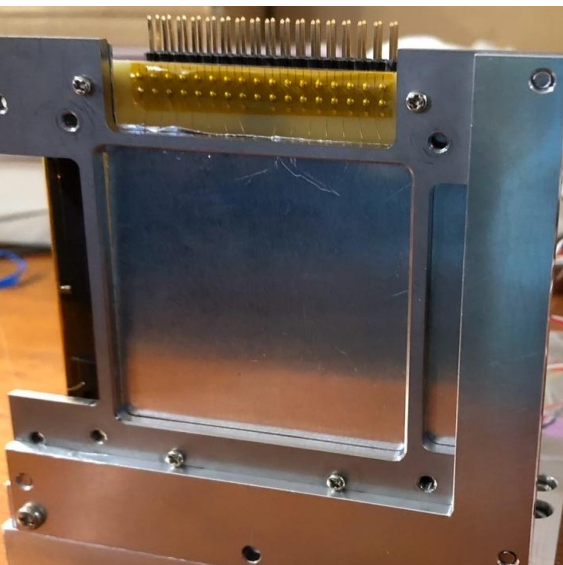


2. Experiment – telescope

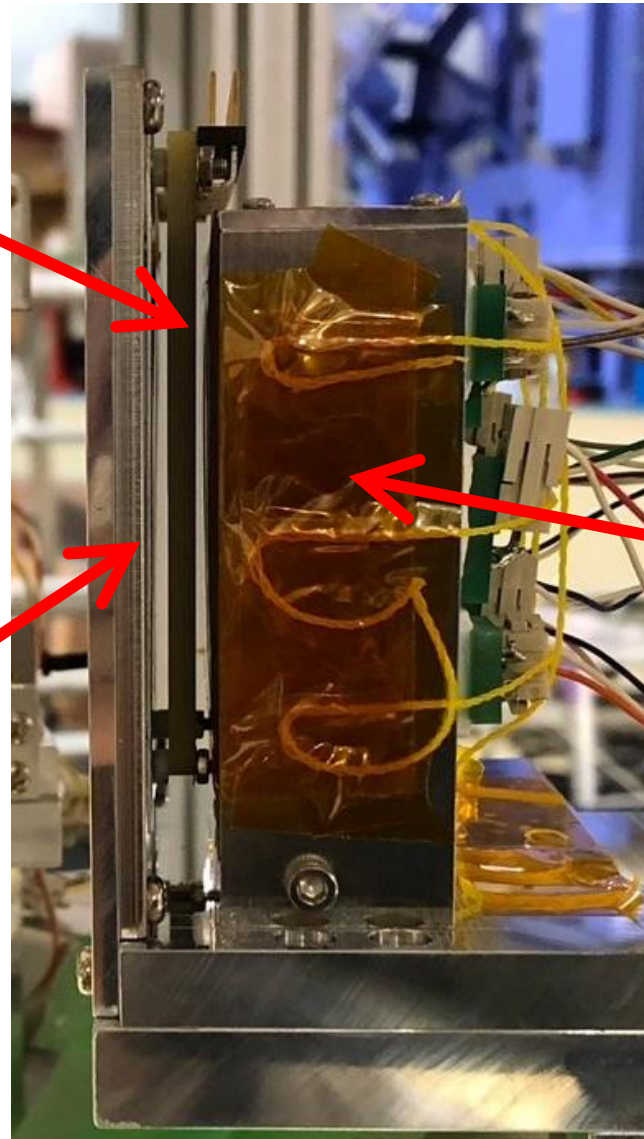
実際のTelescopeの写真



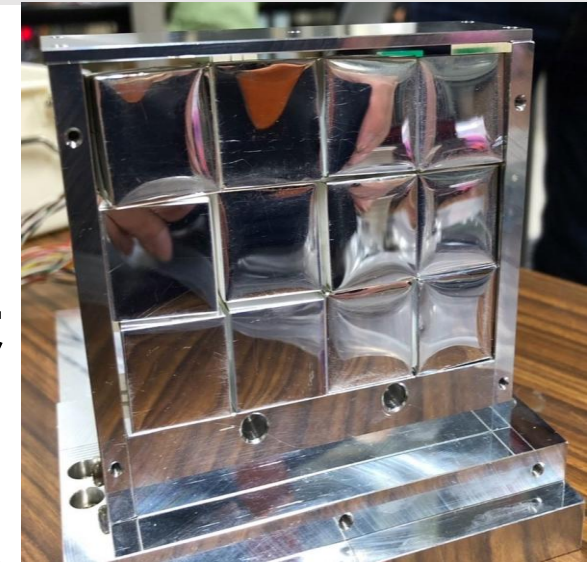
DSSD



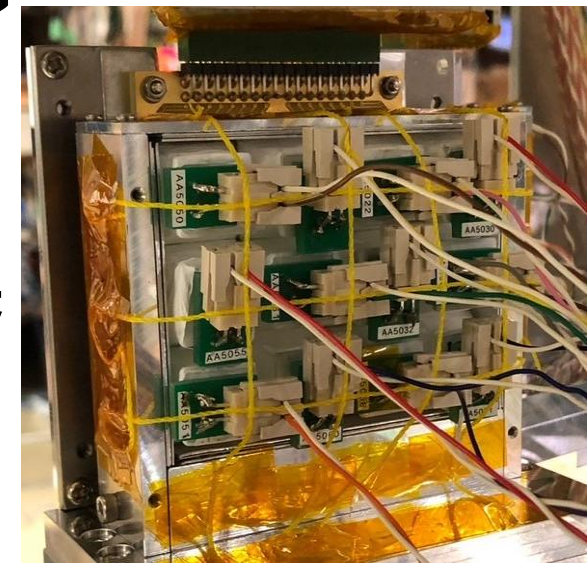
Filter



GAGG



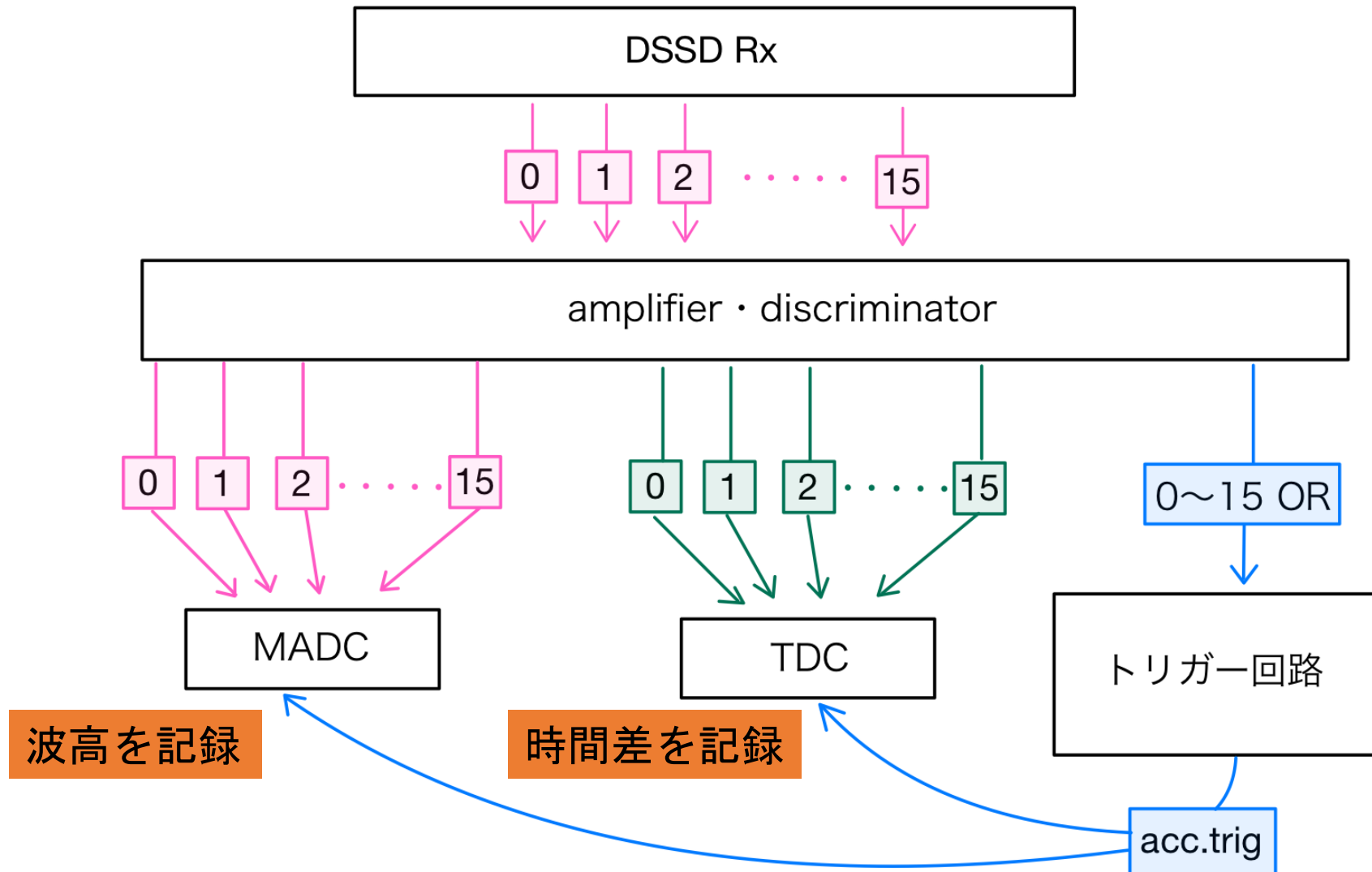
表



裏

2. Experiment – telescopeの回路・DAQ

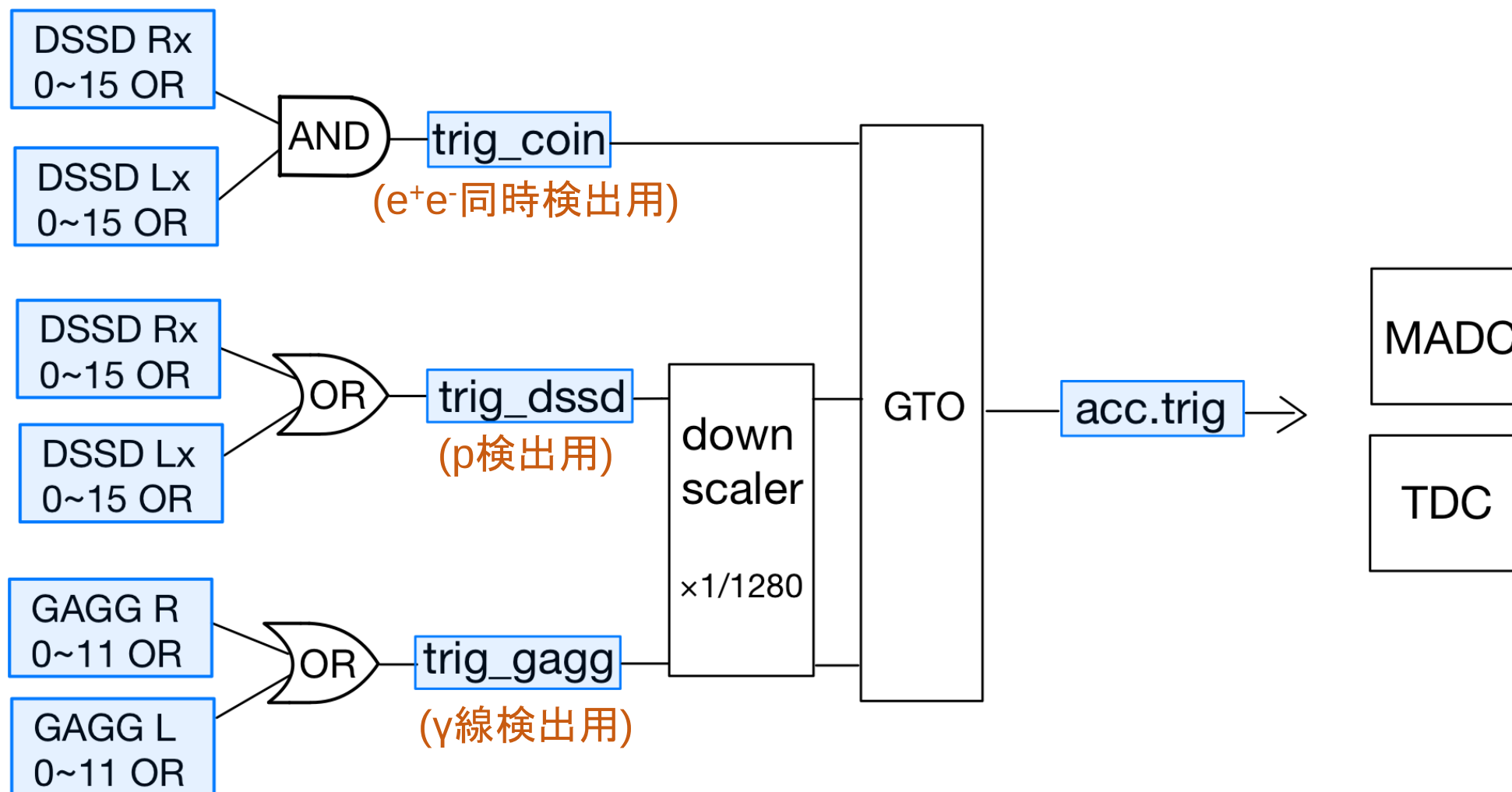
テレスコープ回路の模式図



2. Experiment – telescopeの回路・DAQ

トリガー

3種類のトリガーを併用



2. Experiment – Grand Raiden

Grand Raiden

散乱された陽子のエネルギーを測定
→ ^{12}C の励起状態を同定

$$p = Bq\rho$$

p : 運動量 B : 磁場 q : 電荷 ρ : 曲率半径

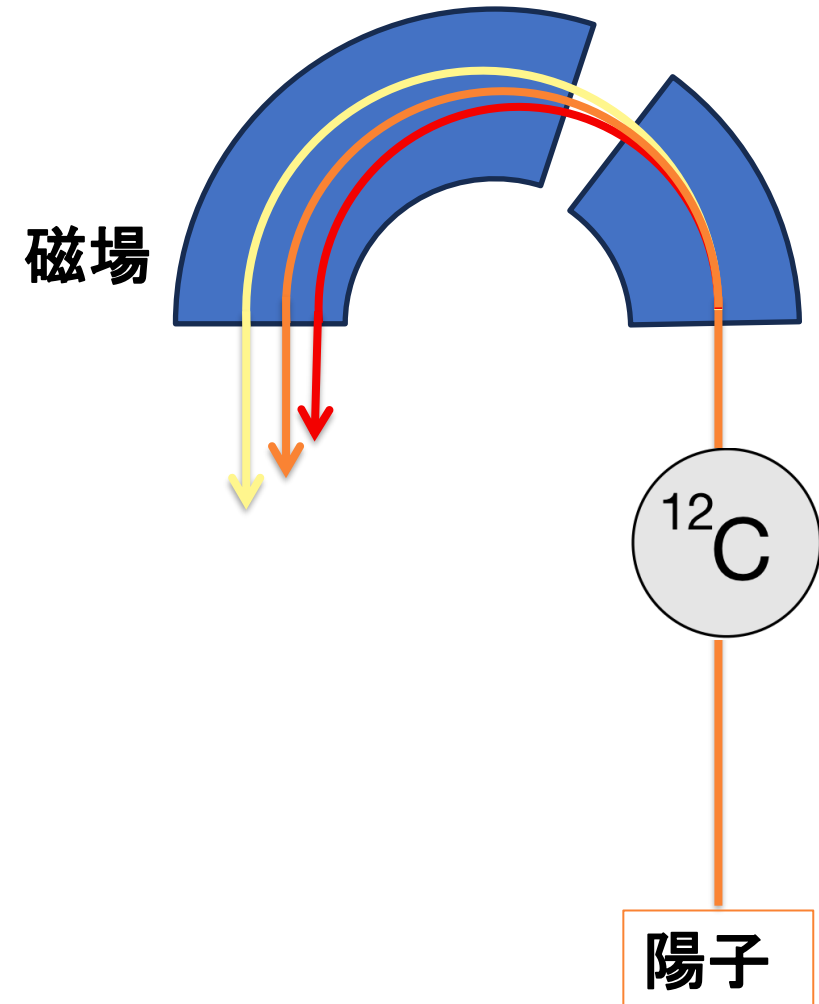
軌道(x) $\rightarrow p \rightarrow E$

仕様:

世界最高の運動量分解能 = 37000

運動量アクセプタンス: 5% ~ 4MeV

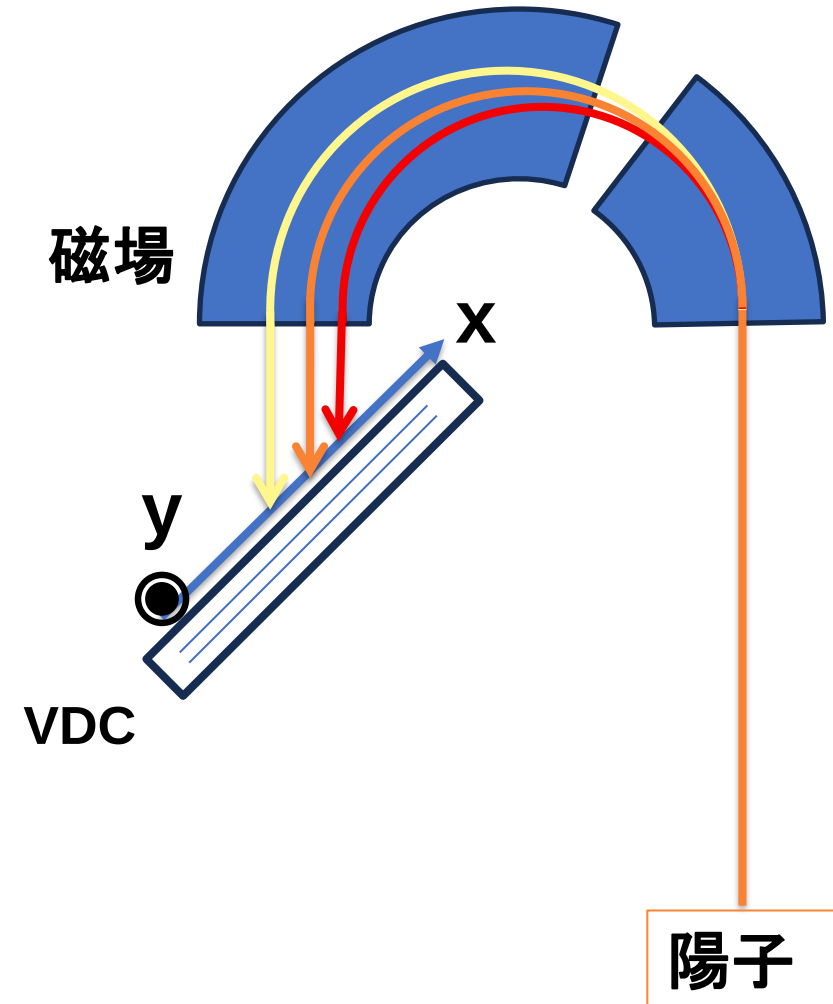
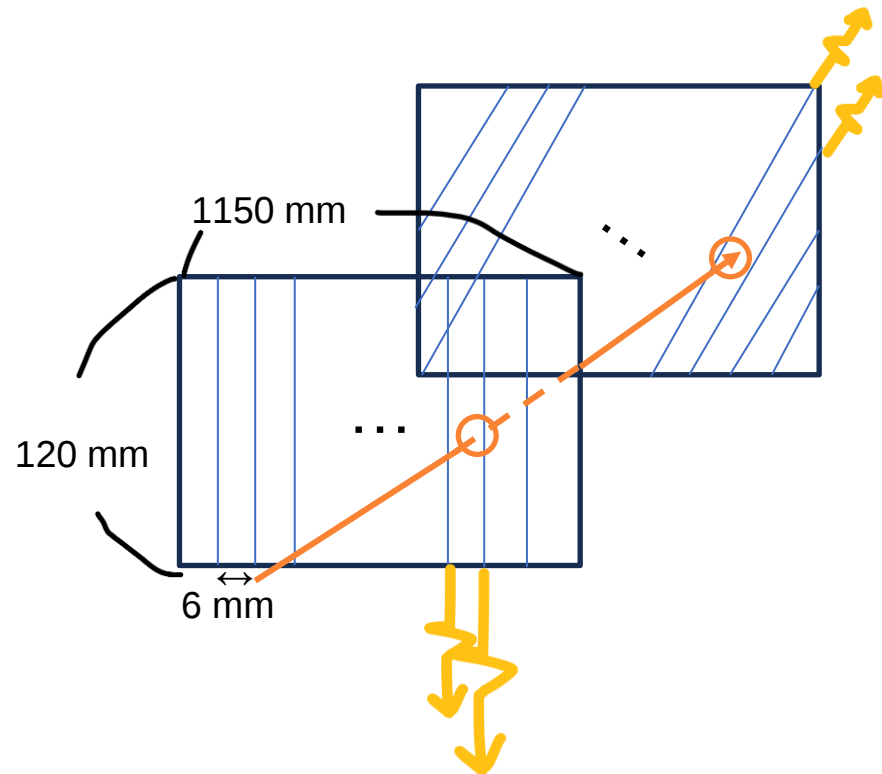
→ 見る準位ごとに磁場変更



2. Experiment – Grand Raiden

(1) VDC: Vertical Drift Chamber

- 位置情報X, Y
運動量の傾きA(X方向) B(Y方向)



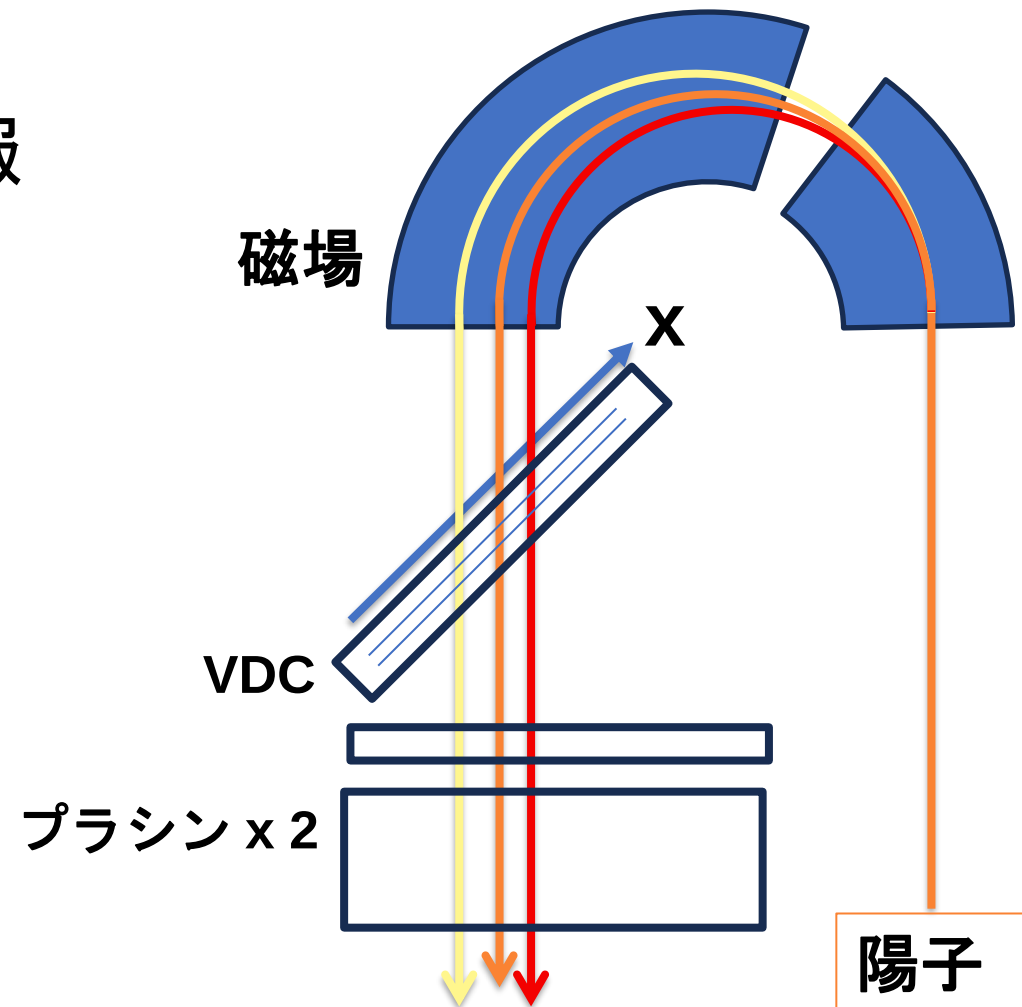
2. Experiment – Grand Raiden

(2) プラスチックシンチレータ

- ・ 落としたエネルギー、時間情報
→ 粒子識別

一枚目: 厚さ 1mm

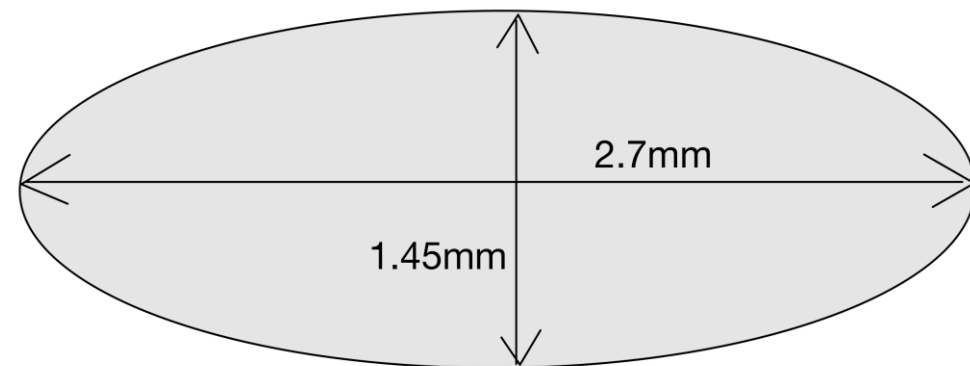
二枚目: 厚さ 10mm



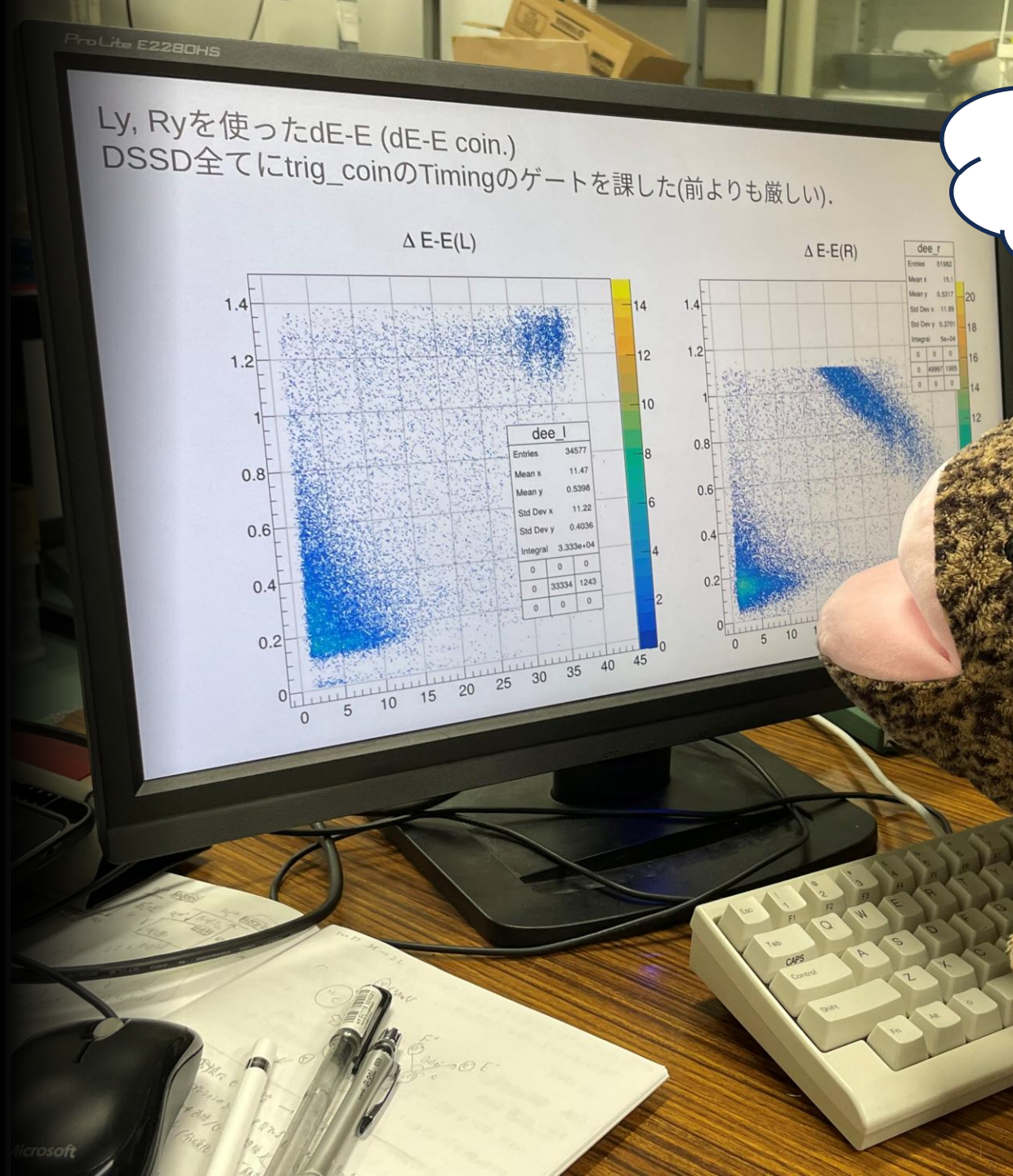
2. Experiment

本番の実験条件

	想定	本番
ビーム電流	$1\mu\text{A}$	1nA
ビームの広がり	直径2mm	下図
ビームタイム	25h	4h



3. Analysis



難しいなあ

3. Analysis - Telescope

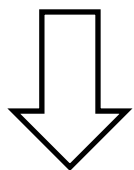
概要

- Energy Calibration
~ 生データ $\rightarrow$ MeV
- 粒子識別
~ ΔE -E plot から e^+e^- を選別
- 角度分布 (最終目的)
~ $\theta_{e^+e^-}$ を plot

3. Analysis – (Telescope) Energy Calibration

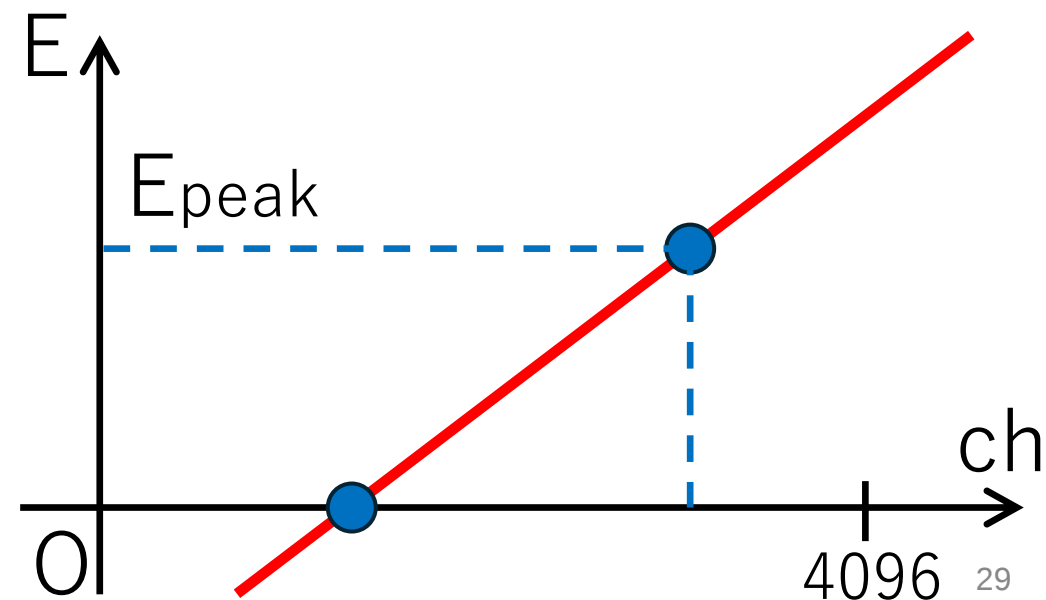
Energy Calibrationの方法

- ・ 特定線源のピークエネルギー
- ・ 0 MeVに対応するbaselineのchannelをfitting



右図のようにMADCの出力を較正
(channel $\rightarrow$ E 変換)

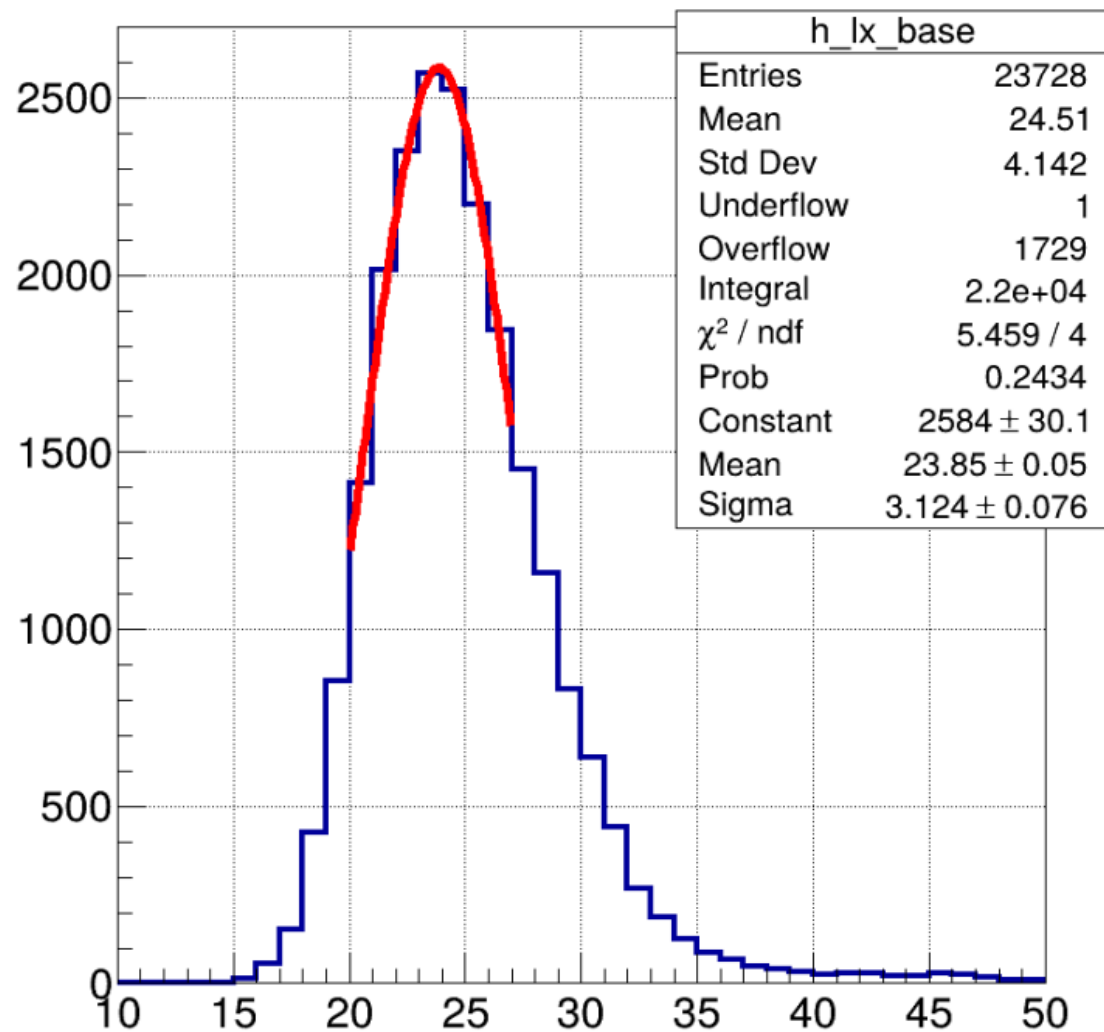
	線源	種類	Peak energy
DSSD	^{241}Am	α	5.485 MeV
GAGG	^{22}Na	γ	511 keV



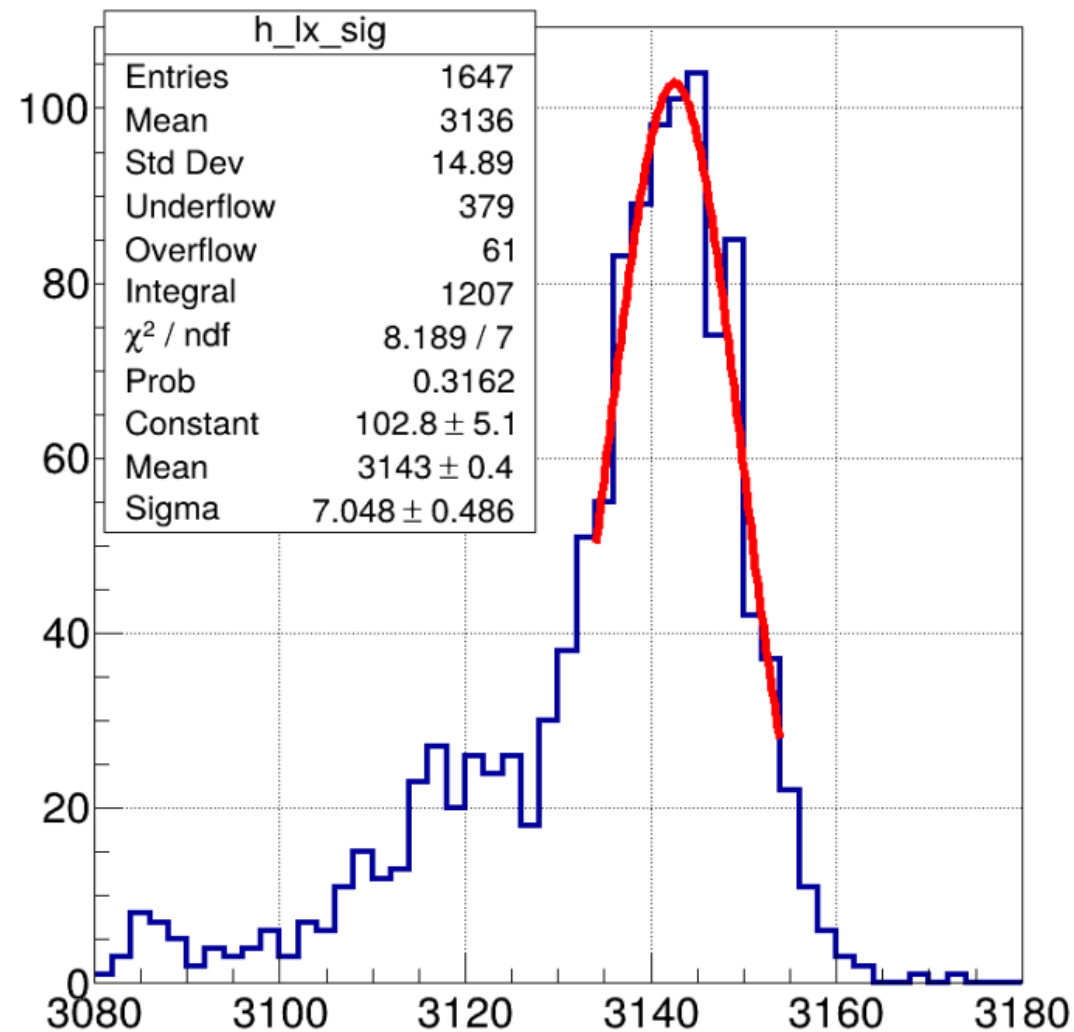
3. Analysis – (Telescope) Energy Calibration

Fittingの例 (DSSD)

DSSD Lx ID=0, baseline

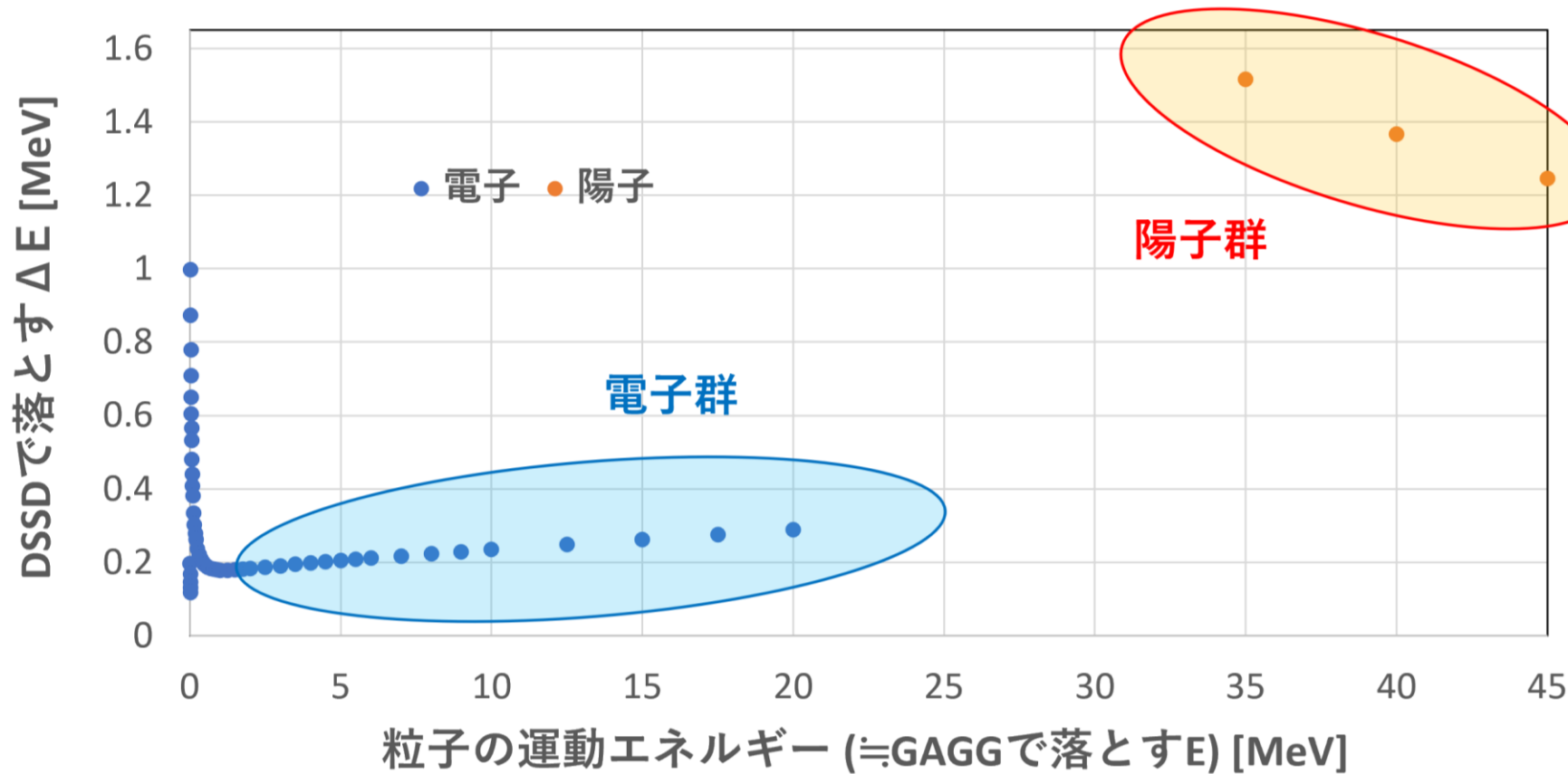


DSSD Lx ID=0, signal from ^{241}Am



3. Analysis – (Telescope) 粒子識別

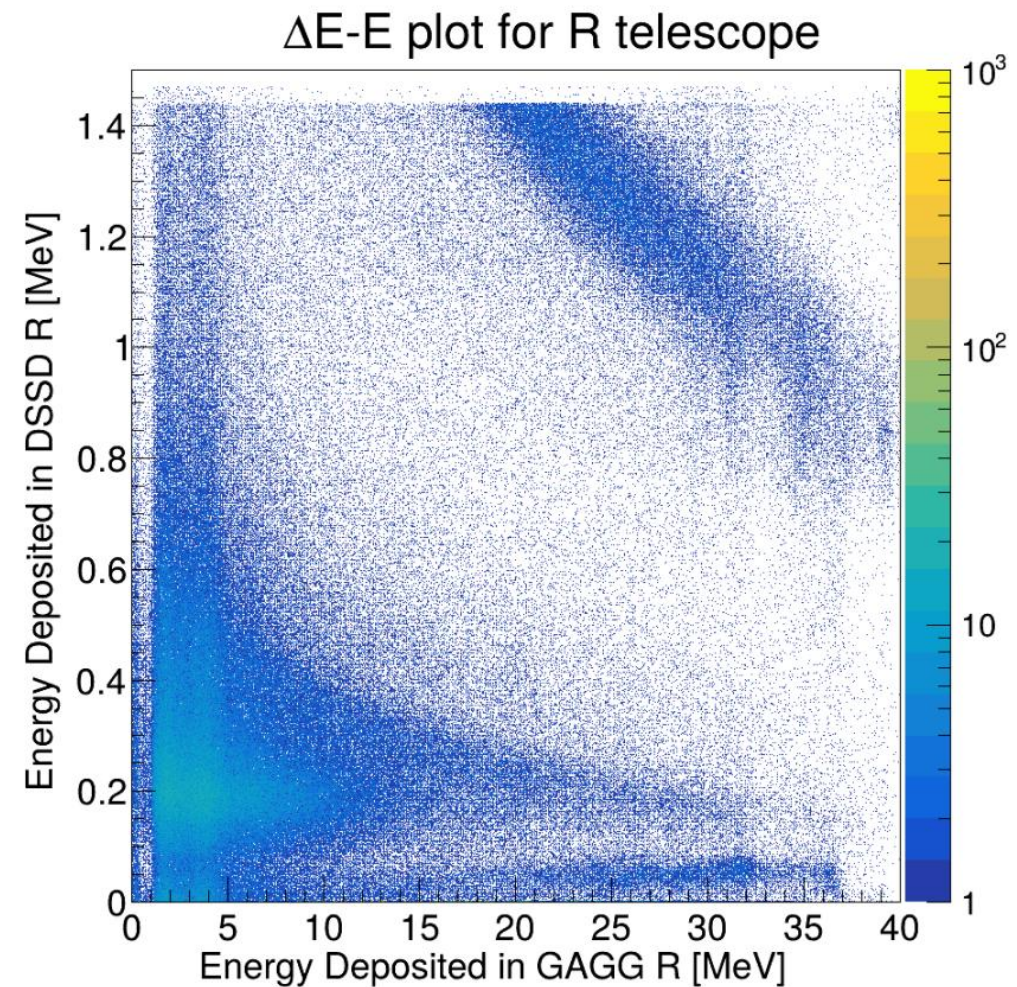
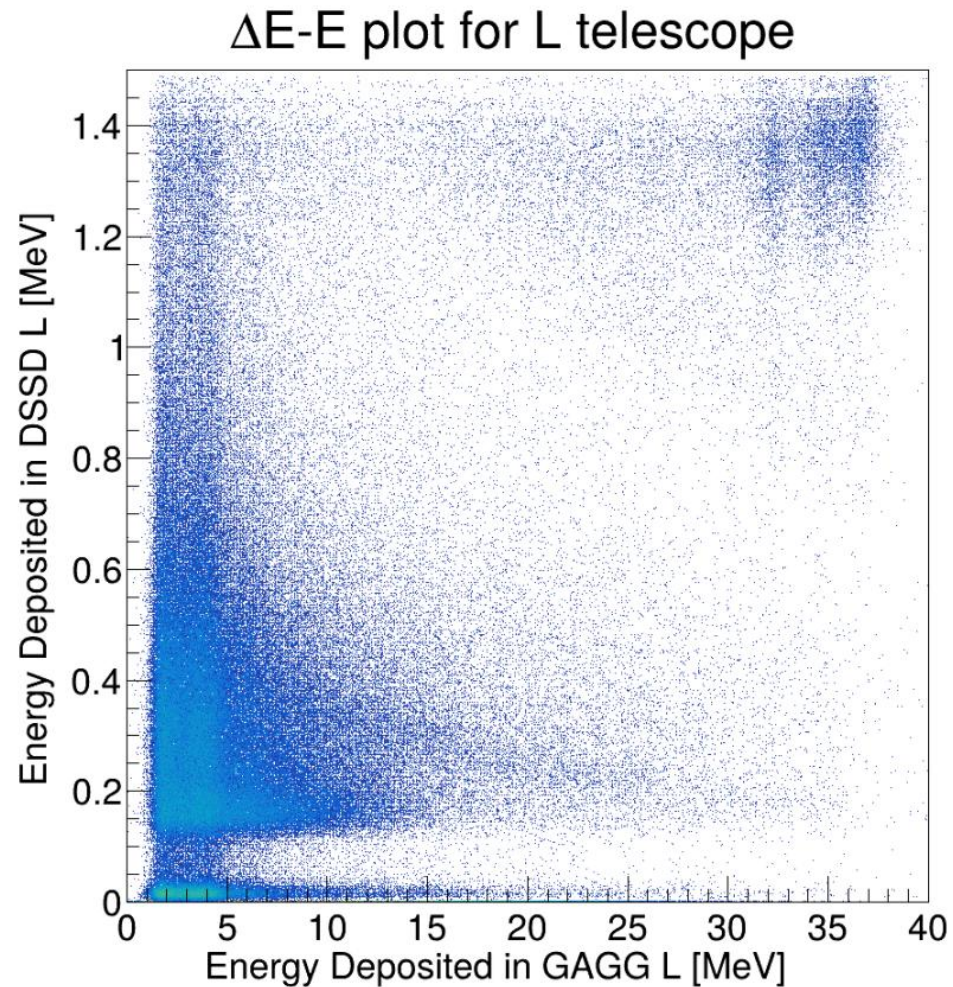
ΔE -E plot の予想図



- ・ DSSDで落とすエネルギーは十分小さいとする.
- ・ 粒子はGAGGでその運動エネルギーを全て落とすきる.

3. Analysis – (Telescope) 粒子識別

ΔE -E plot



電子の島がはっきり見えない → ノイズを落とす

3. Analysis – (Telescope) 粒子識別

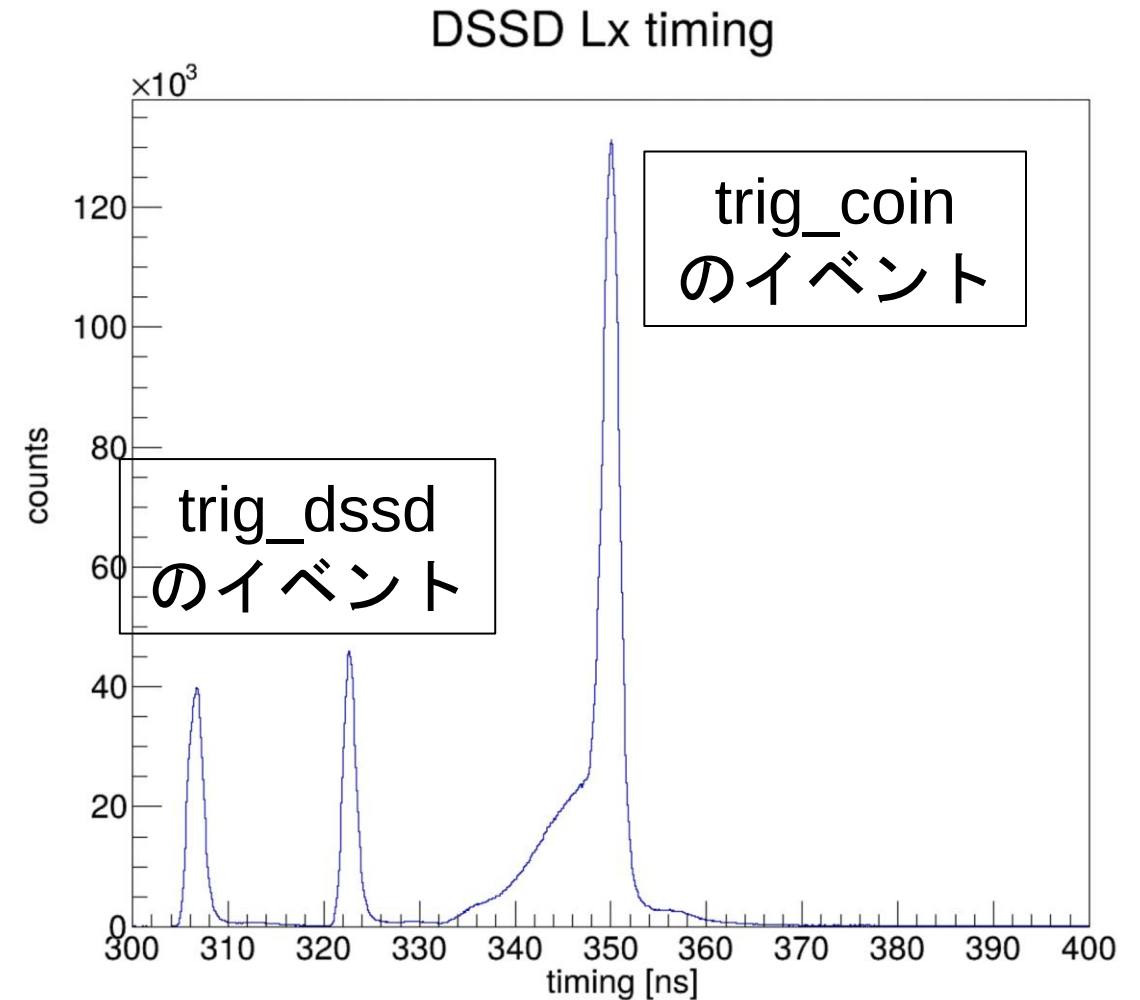
粒子識別のためのノイズ除去①

① TimingによるCUT

- DSSD信号の時間情報に注目
- Triggerを作った信号を選別する



Triggerとは無関係な信号を除去！



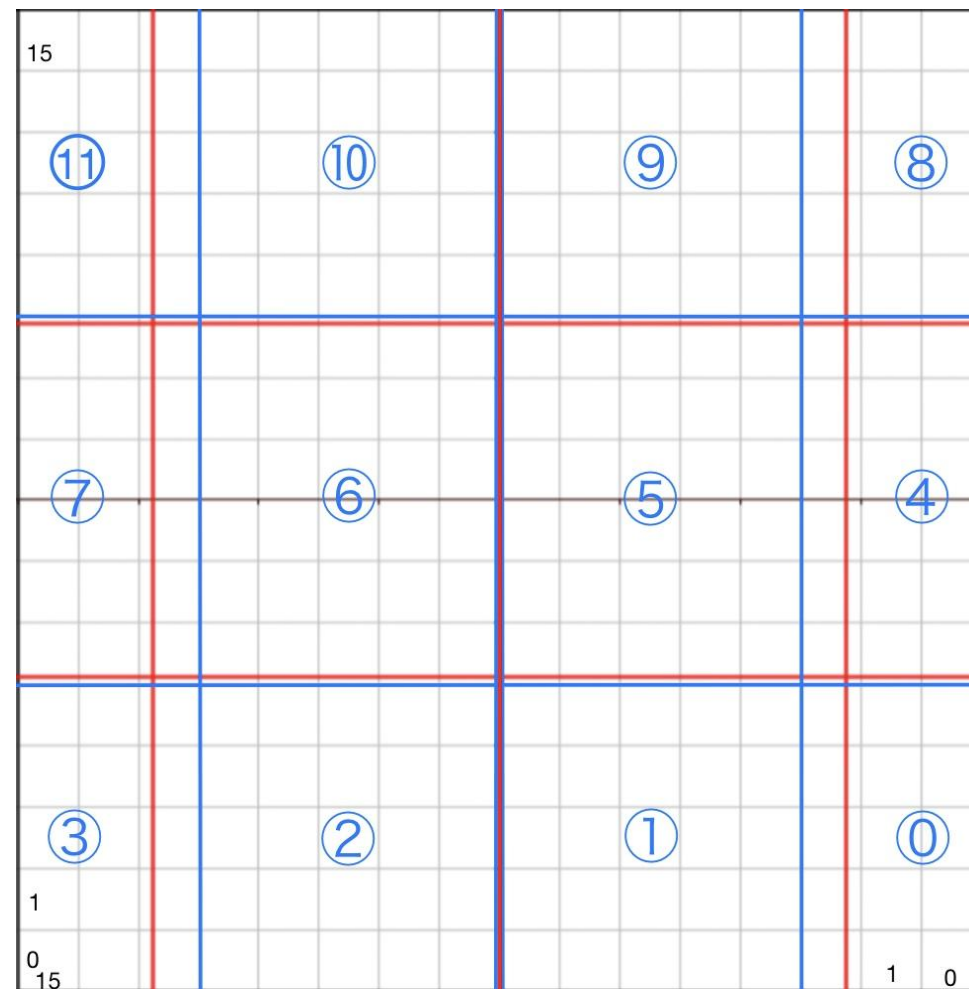
粒子識別のためのノイズ除去②

② DSSD-GAGG対応

- DSSDの各セクションの「後ろ」のGAGGのIDを指定



幾何的に明らかなノイズを除去！

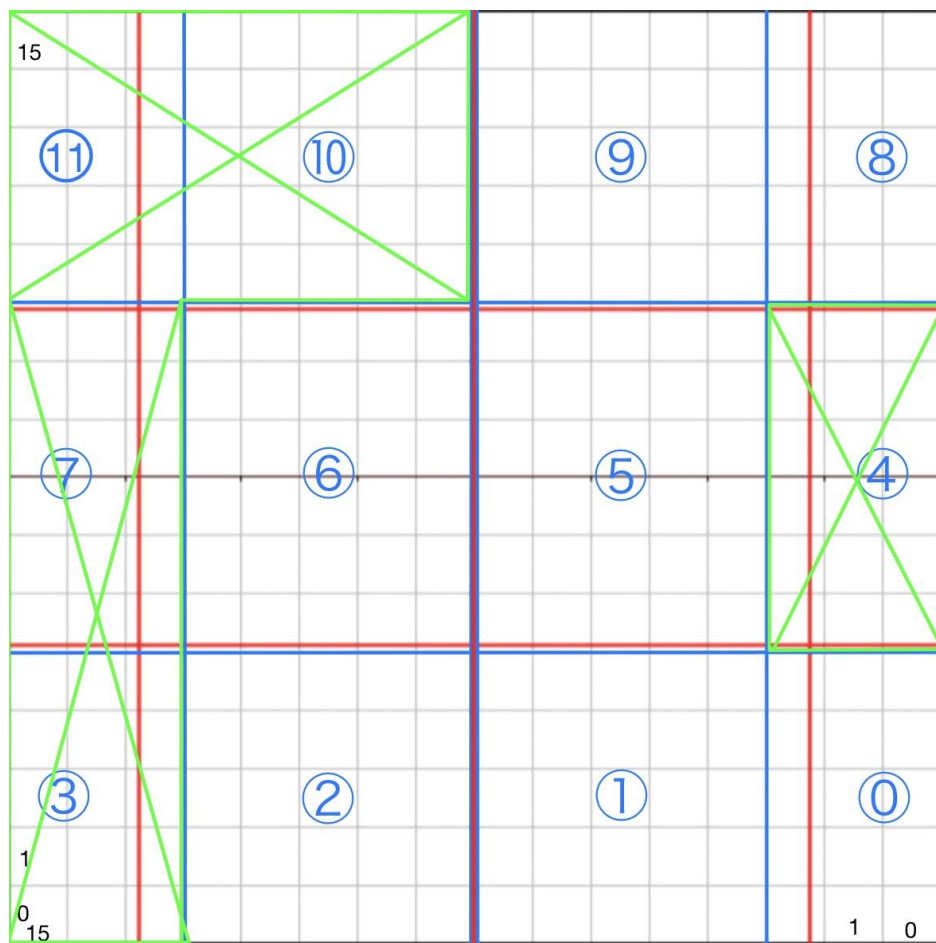


検出器を正面から見た図

3. Analysis – (Telescope) 粒子識別

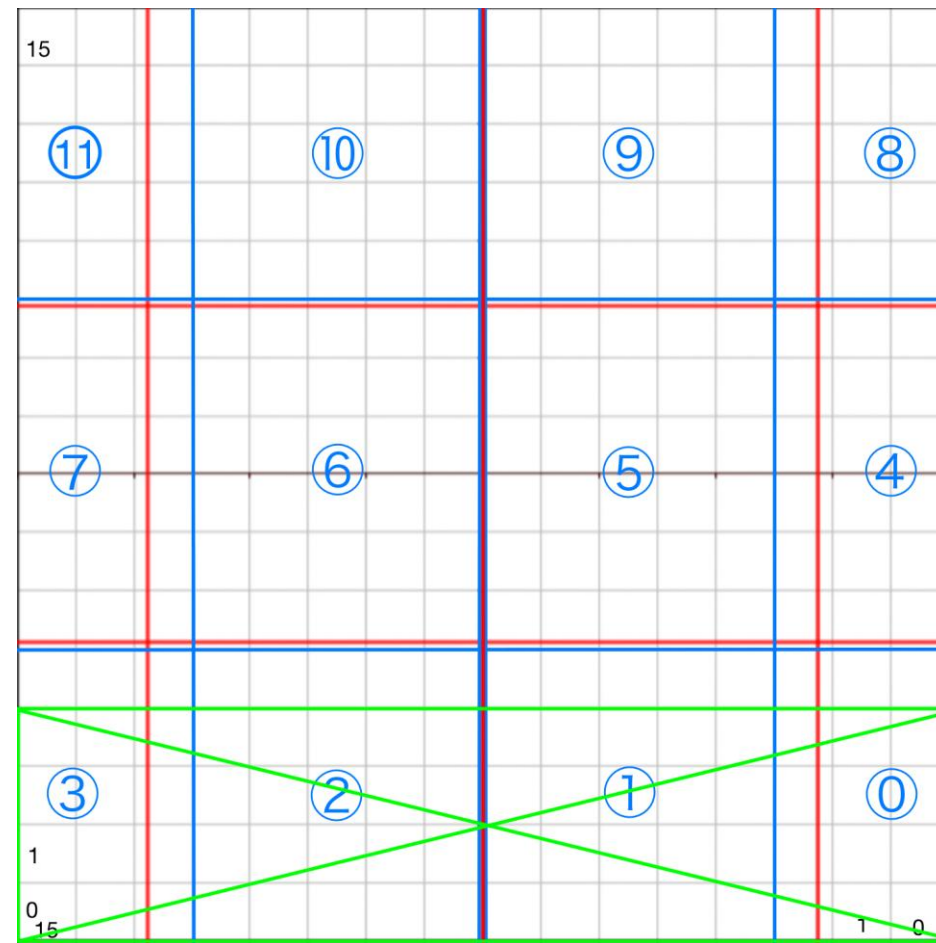
DSSD-GAGG対応の補足情報

L



GAGG側のアンプの不調

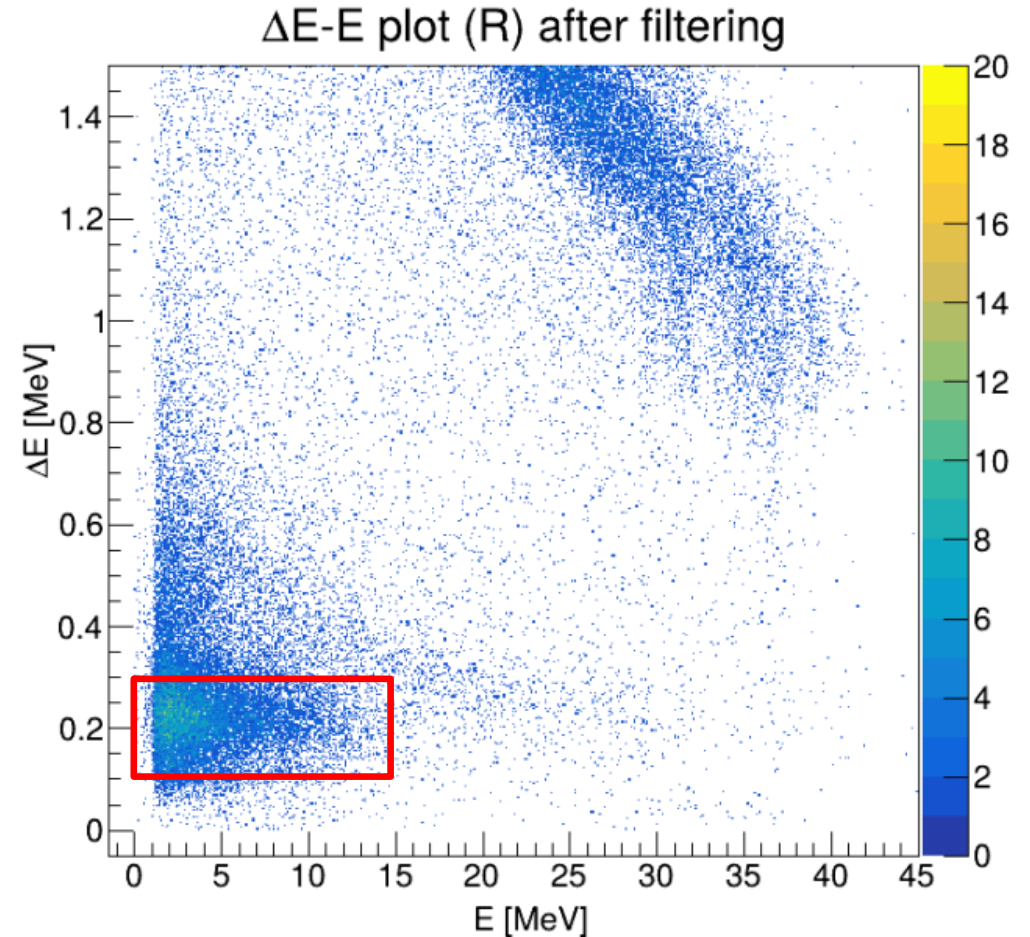
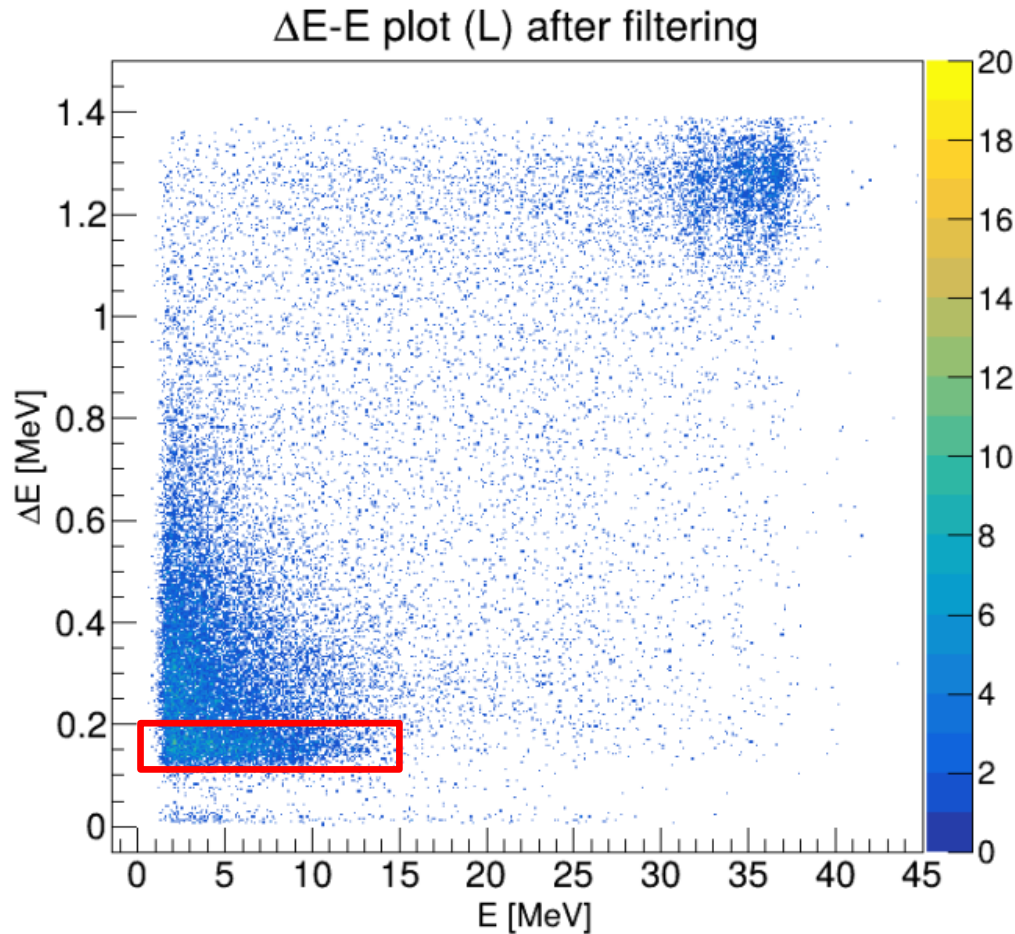
R



DSSD R側のコネクタの接触不良

3. Analysis – (Telescope) 粒子識別

粒子識別の結果



以降はこのCUTの範囲のイベントのみを電子として扱う

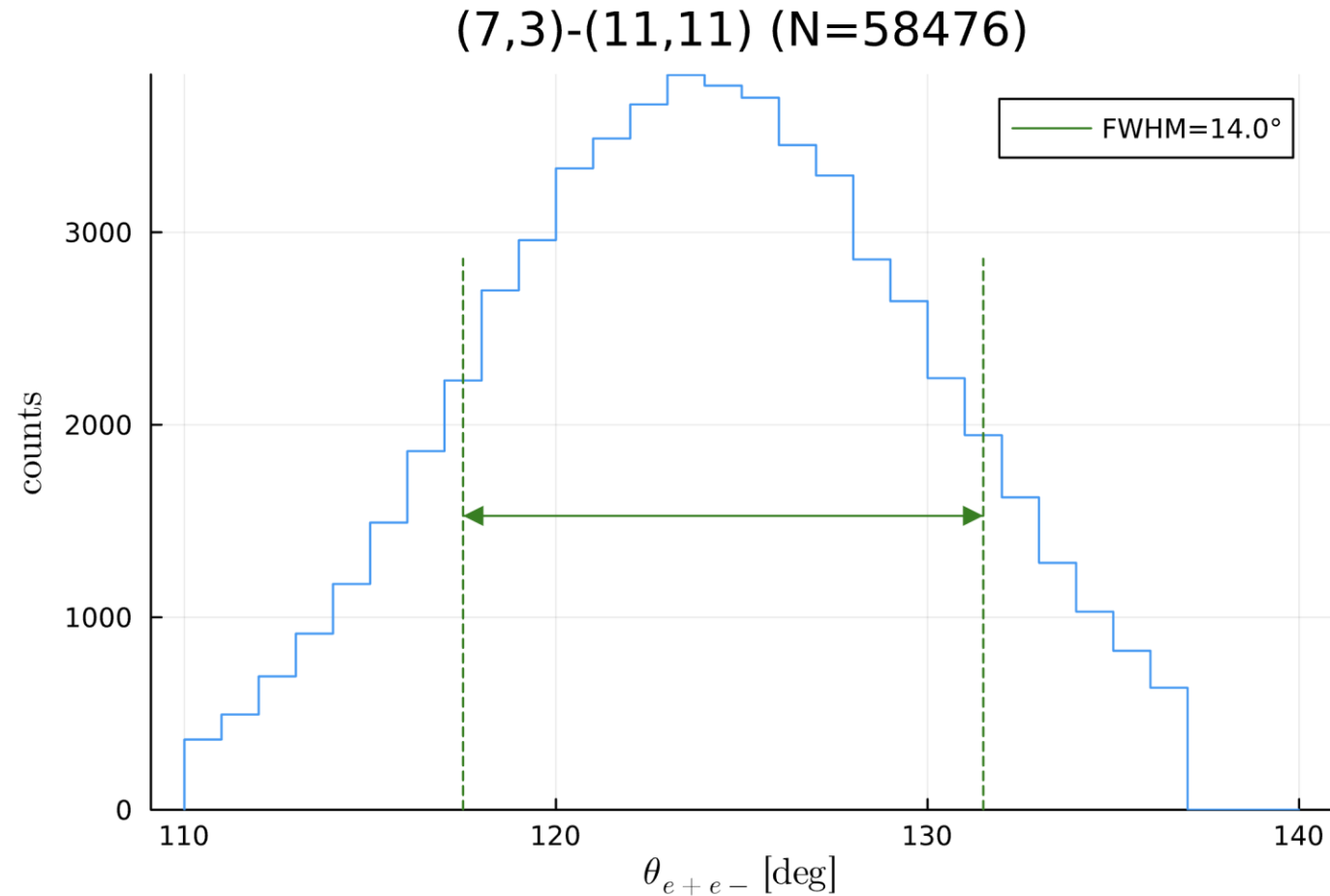
3. Analysis – (Telescope) 角度分布

角度分解能

シミュレーションで計算

→ $\text{FWHM} = \text{約}14^\circ > 10^\circ$

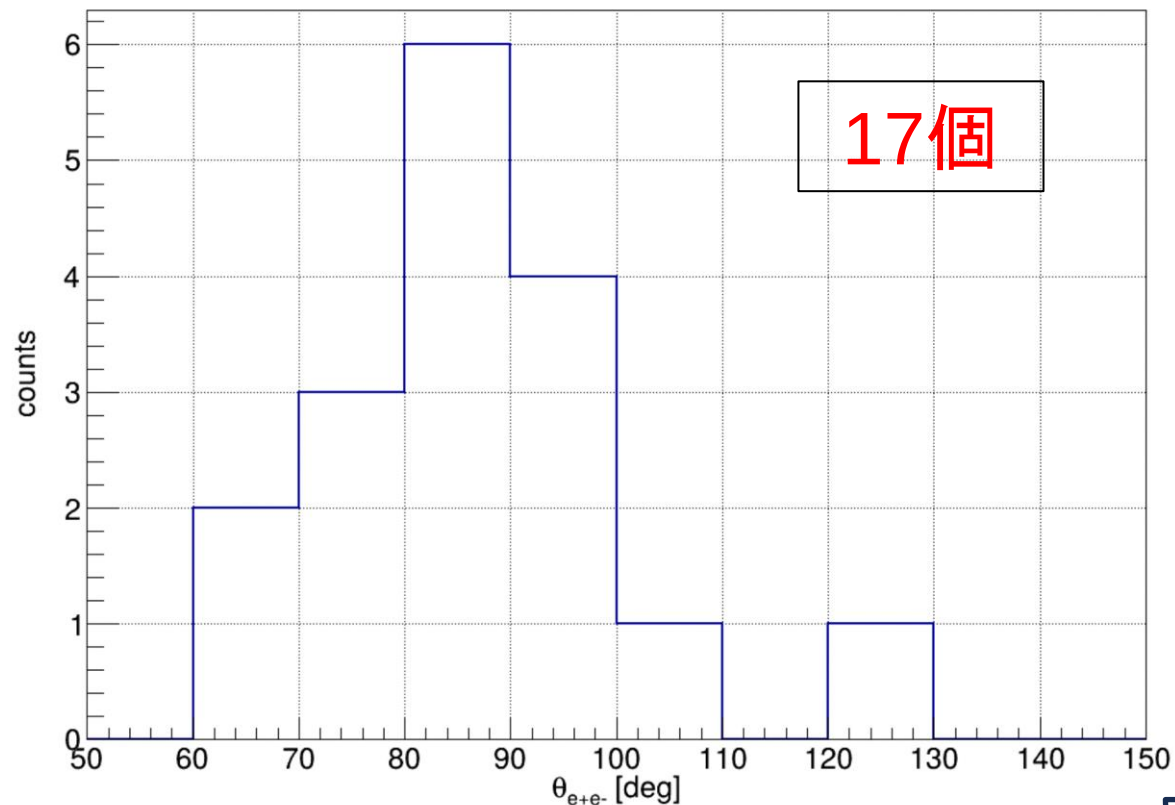
→ 角度分布図のbinの幅は 10°
(先行研究に準拠)



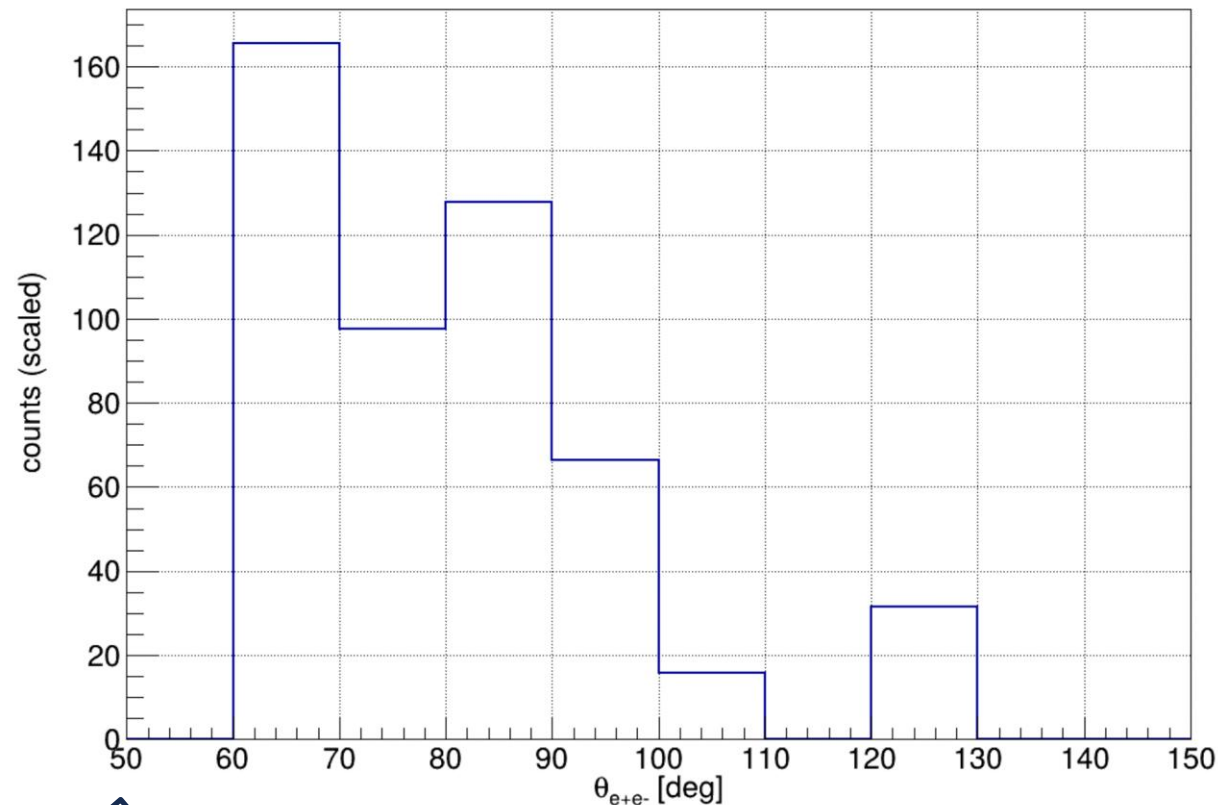
3. Analysis – (Telescope) 角度分布

角度分布①

Angular distribution



Angular distribution (after correction)



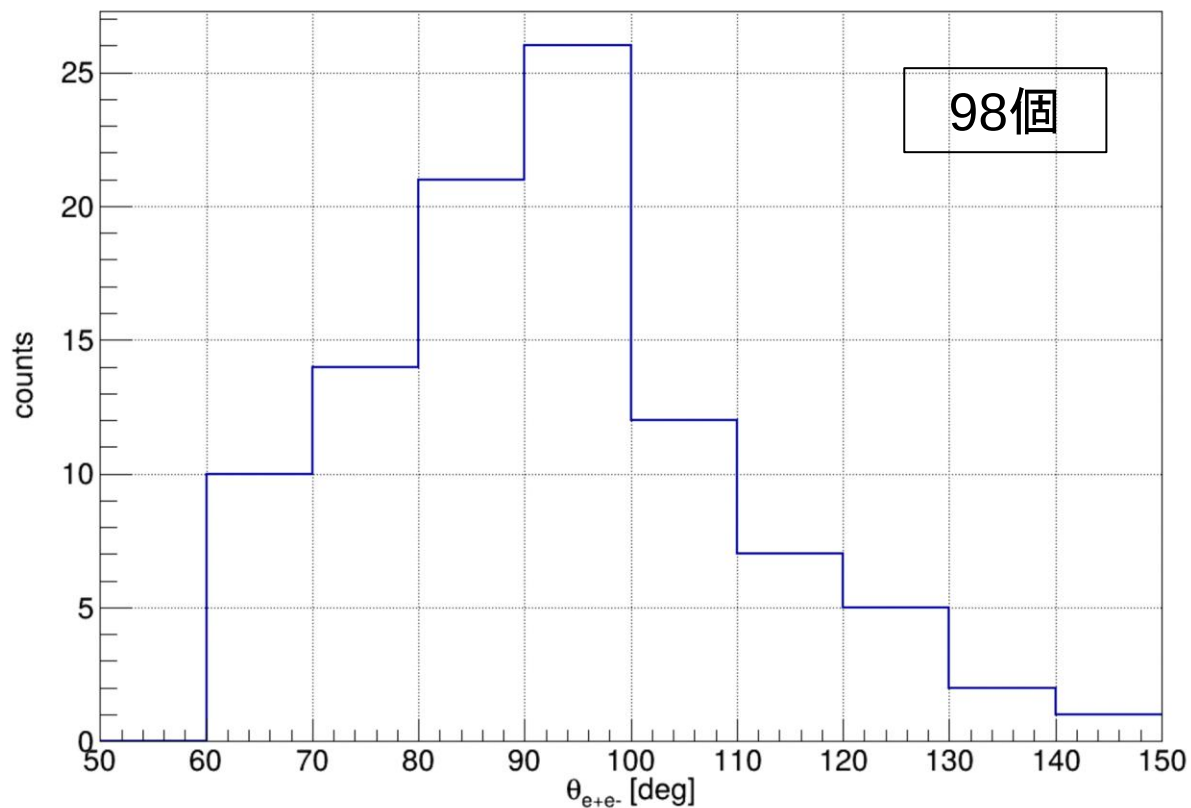
制限 : ① TimingによるCUT
② DSSD-GAGG対応

角度ごとの検出効率の違いをシミュレーションで補正

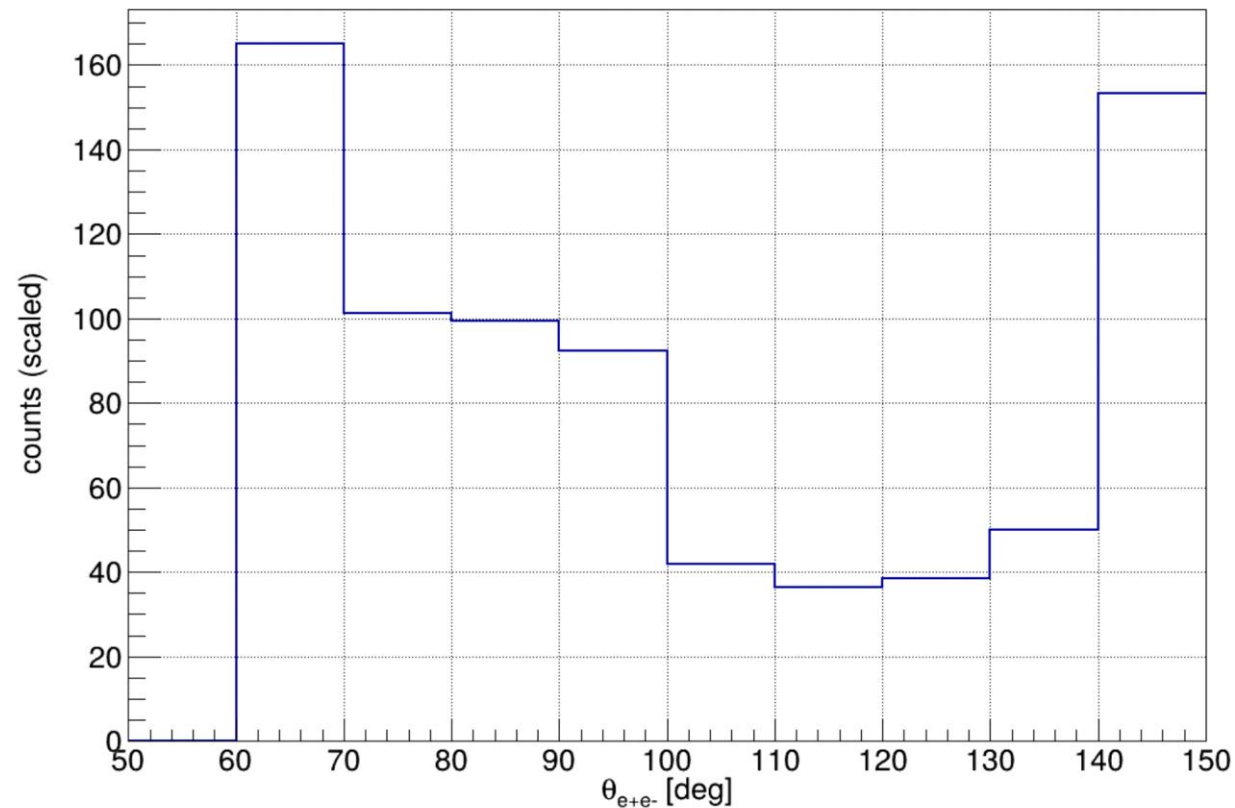
3. Analysis – (Telescope) 角度分布

角度分布②

Angular distribution



Angular distribution



制限 : ① TimingによるCUT

② ~~DSSD-GAGG対応~~ → 「どこかのGAGGが鳴っている」

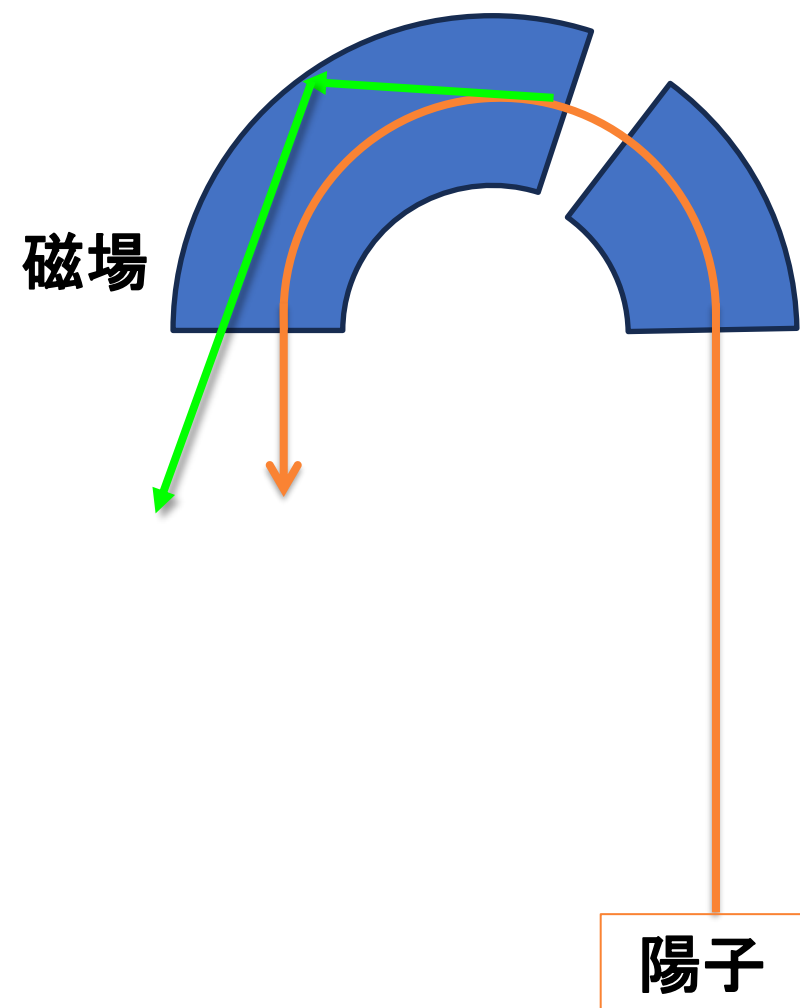
3. Analysis - Grand Raidenでの22.6MeV準位観測

概要

シグナル： 標的で散乱された陽子

ノイズ： (p, d)反応によるd
壁で散乱された陽子

→ ノイズを除いた上で
キャリブレーション
22.6MeV準位観測



3. Analysis - Grand Raidenでの22.6MeV準位観測

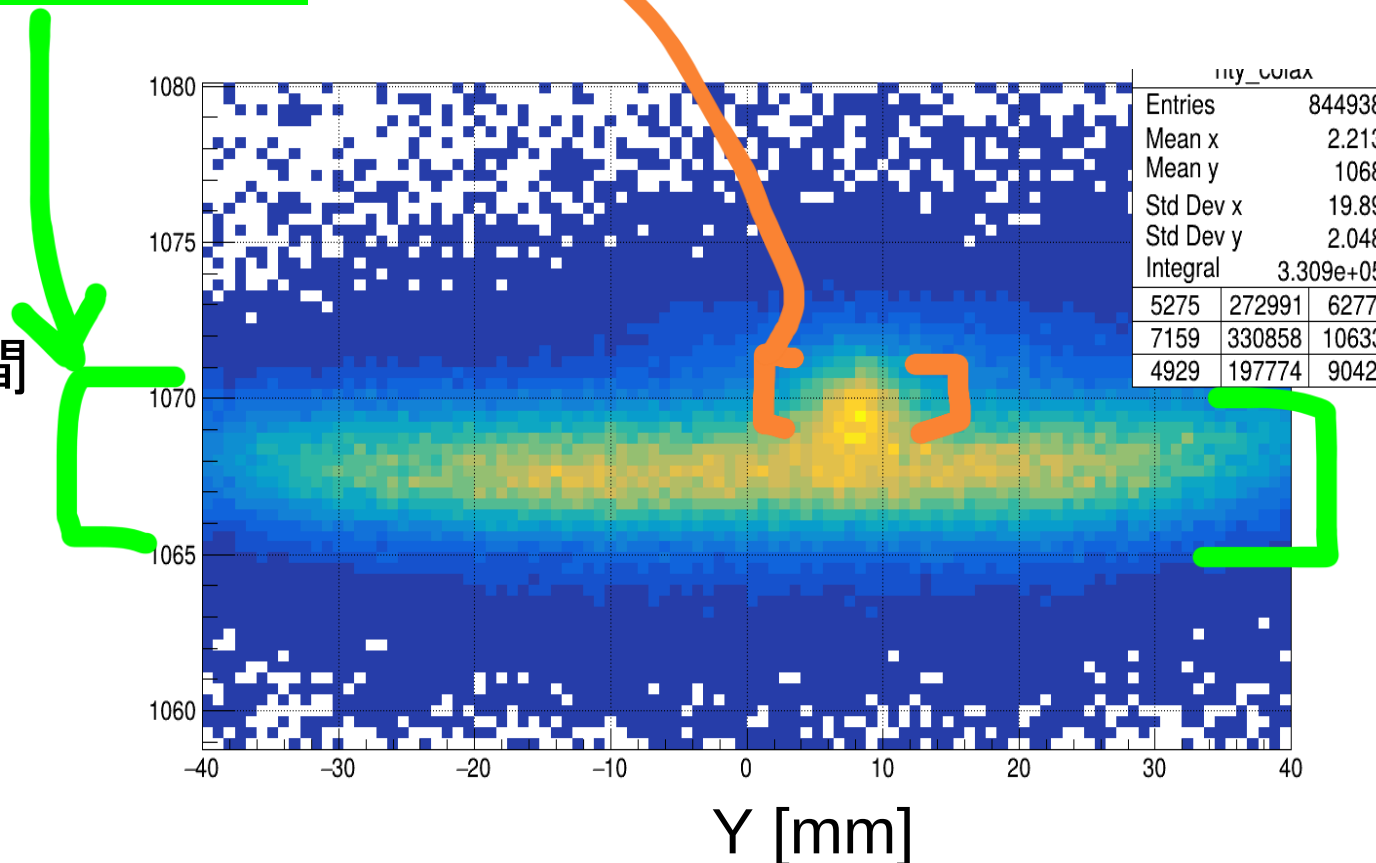
ノイズ落とし

シグナル： 標的で散乱された陽子

ノイズ： 壁で散乱された陽子

経路差を補正した時間
[ns]

Y, 時間, プラシンを
CUT

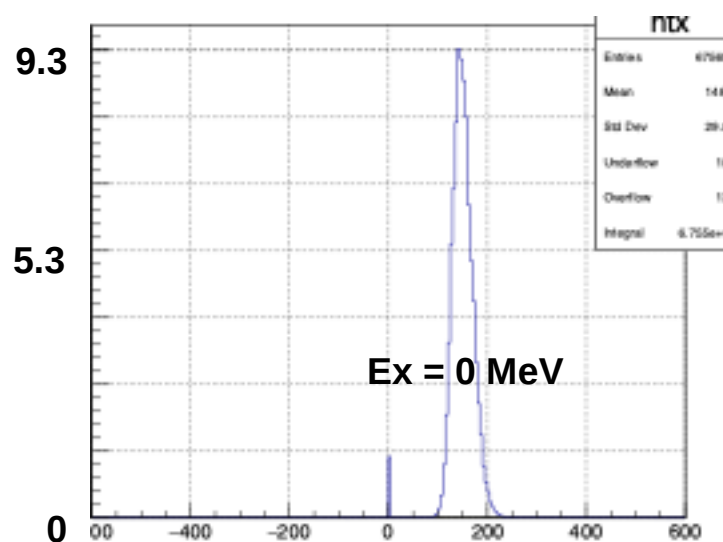


3. Analysis - Grand Raidenでの22.6MeV準位観測

低いエネルギー準位の観測

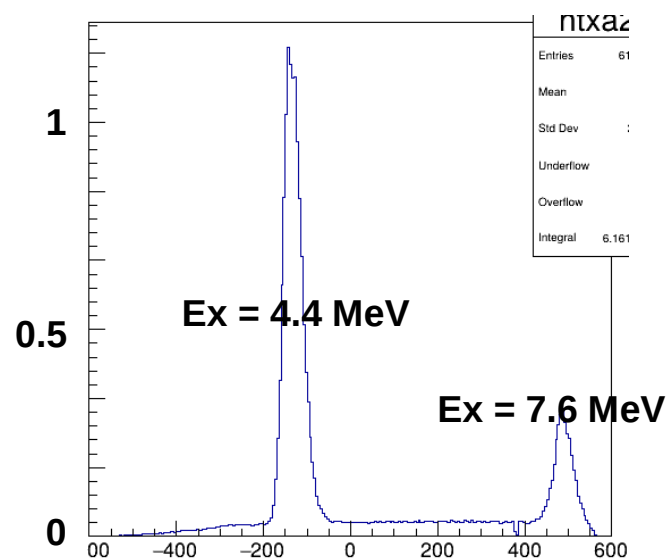
見たいエネルギーに応じて磁場を変える→励起状態のピーク

縦軸: 収量 / (ビーム電流・時間) [arbitrary unit]

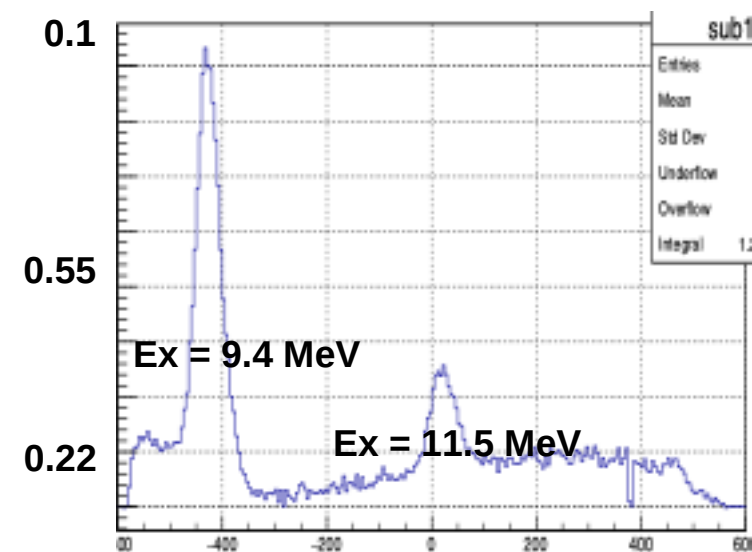


X [mm]

→ キャリブレーション



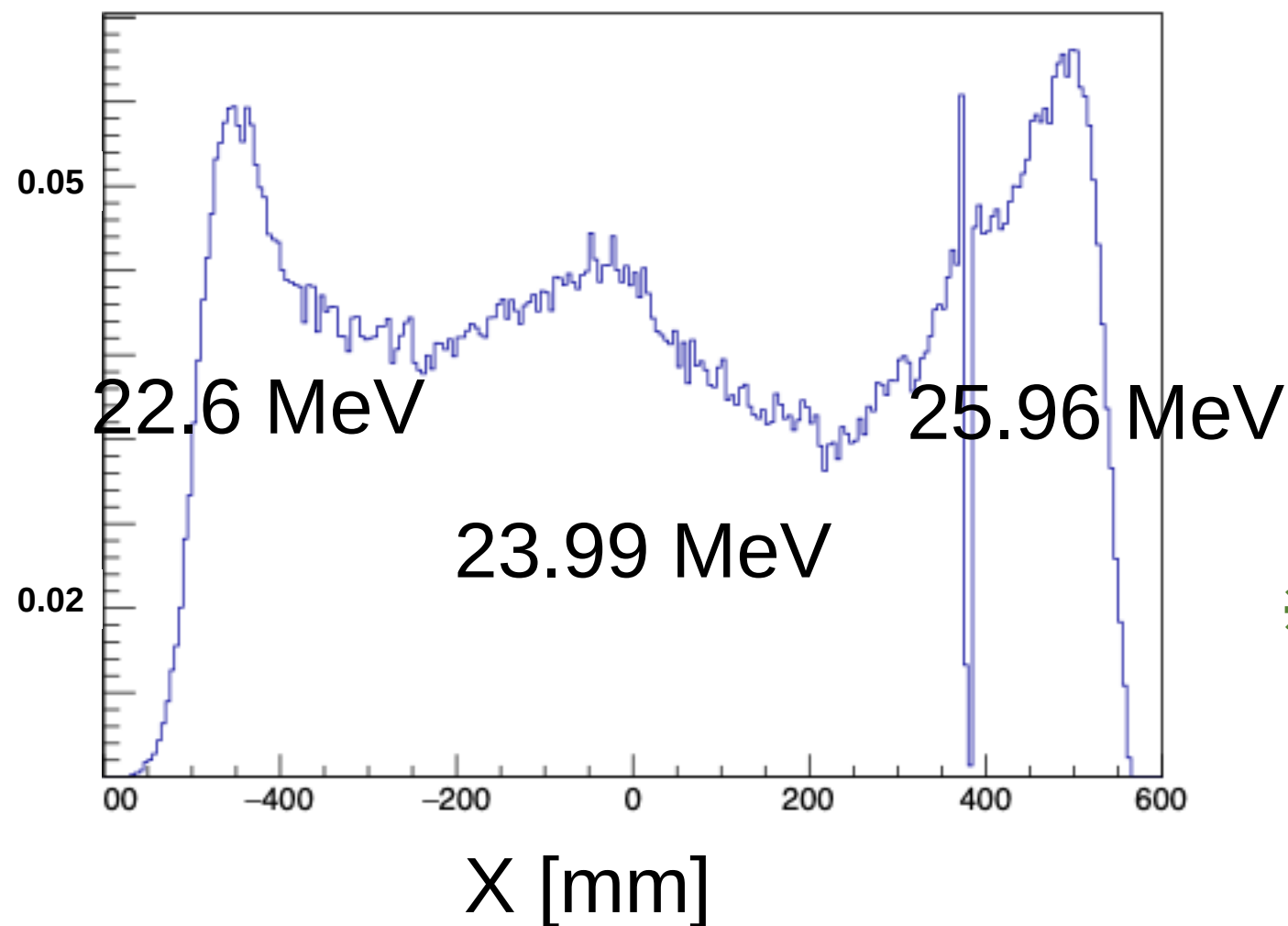
X [mm]



X [mm]

3. Analysis - Grand Raidenでの22.6MeV準位観測

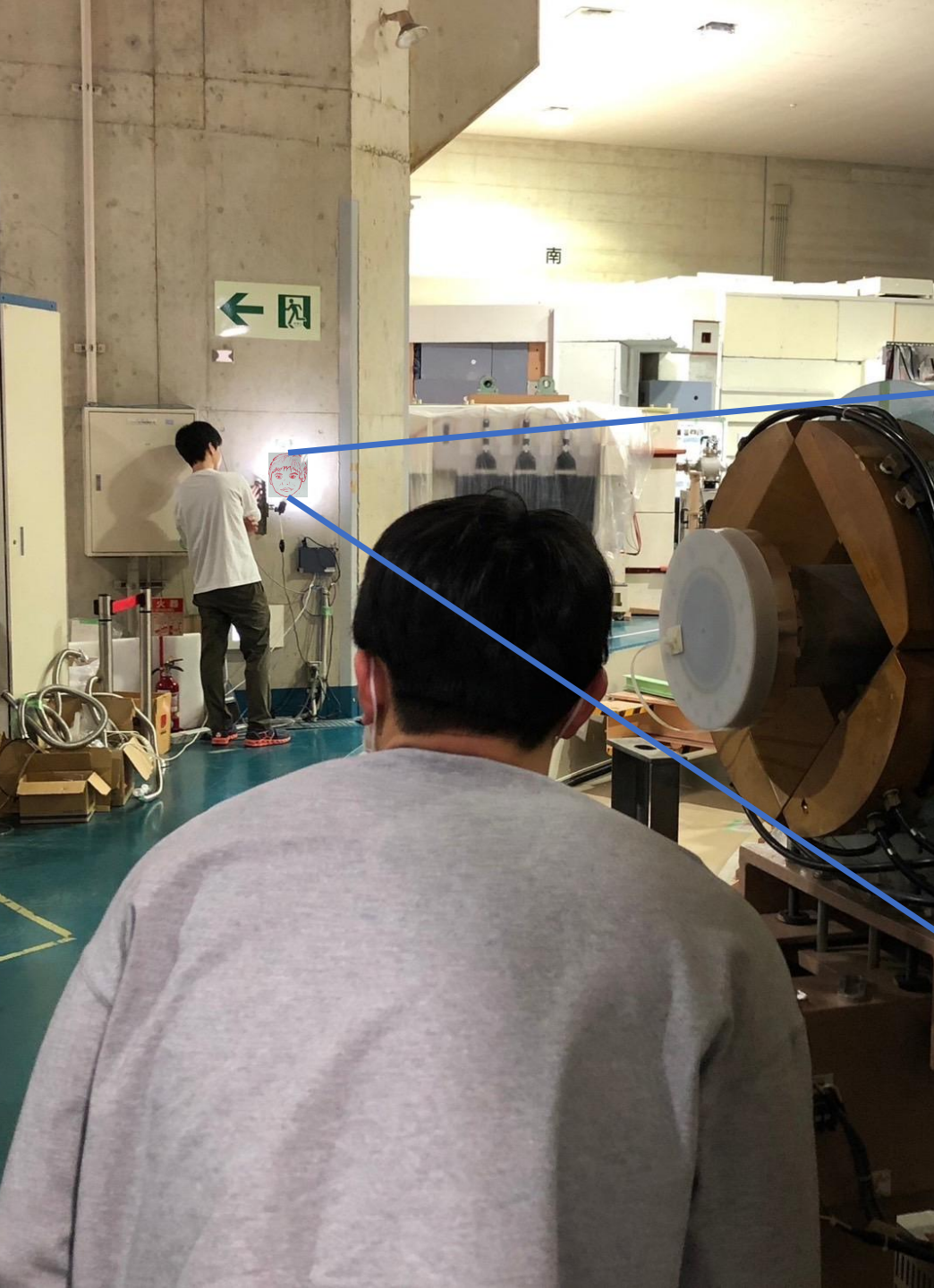
22.6MeV準位



テレスコープと同期
→ 励起状態22.6MeV
由来のみ取り出せる

※今回は時間が足りず、同期には至らず

4. Result



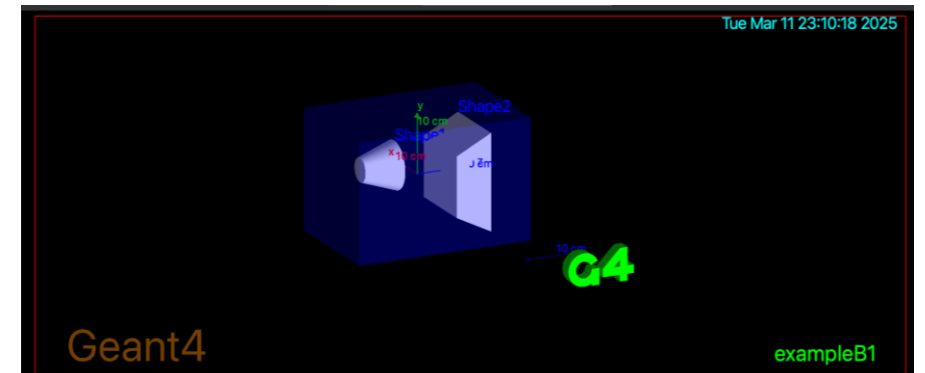
4. Result

モンテカルロシミュレーションの利用

Geant4はモンテカルロシミュレーションのためのツールキット
豊富なデータベースを通じて物質と粒子の諸反応をステップバイ
ステップで再現.

- ・ 検出器の形状/材質
- ・ 相互作用モデル
- ・ 入射粒子とそのエネルギー etc...

今回はデータ内の外部対生成イベントの評価を目標とした.



4. Result

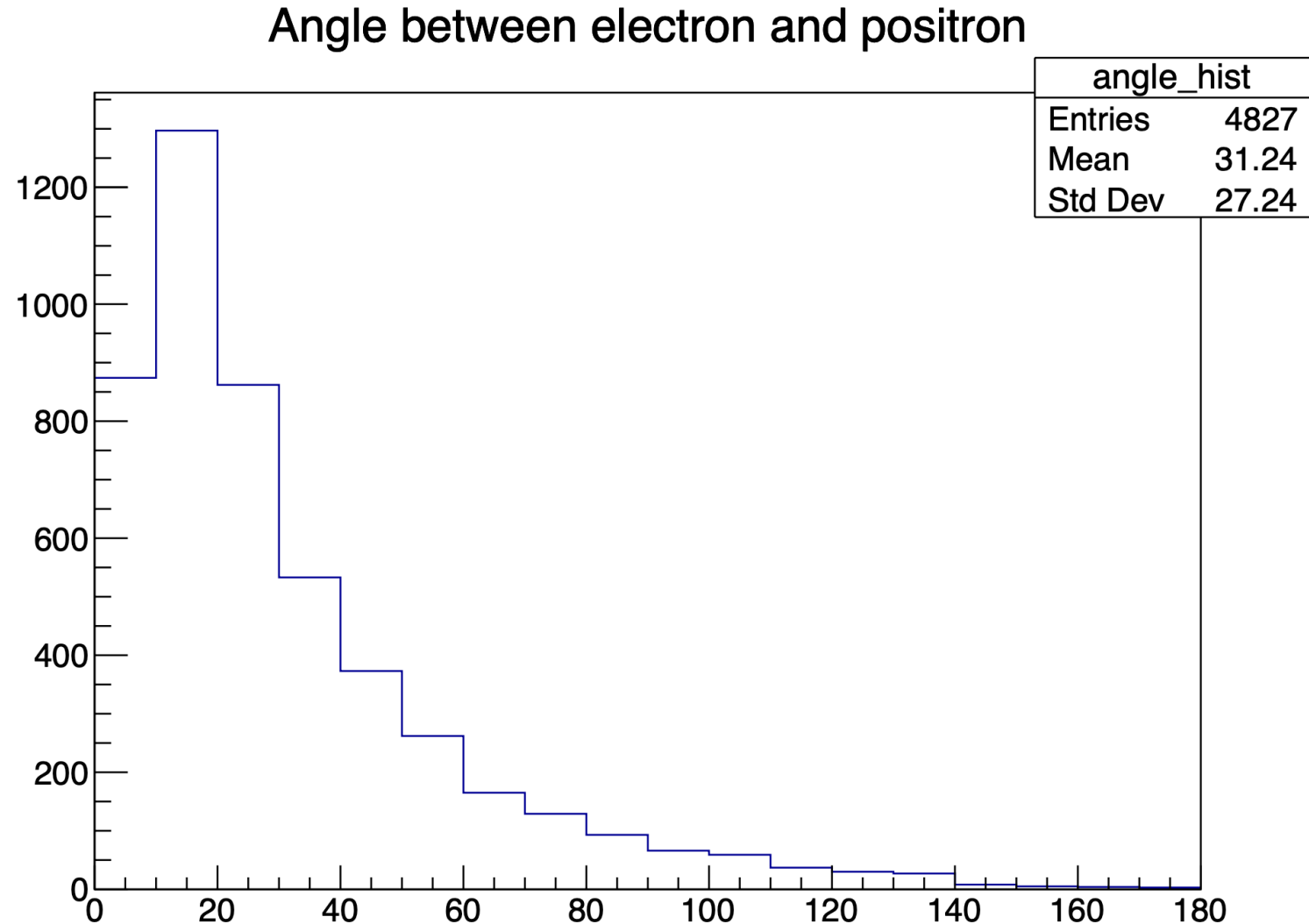
Geant4によるシミュレーション例:内部対生成

入射粒子:65MeV 陽子

炭素標的:ビームに対し傾き 70°

標的内部で対生成した
電子対全てのペア
で角度相関を取得

→これが理論曲線に相当

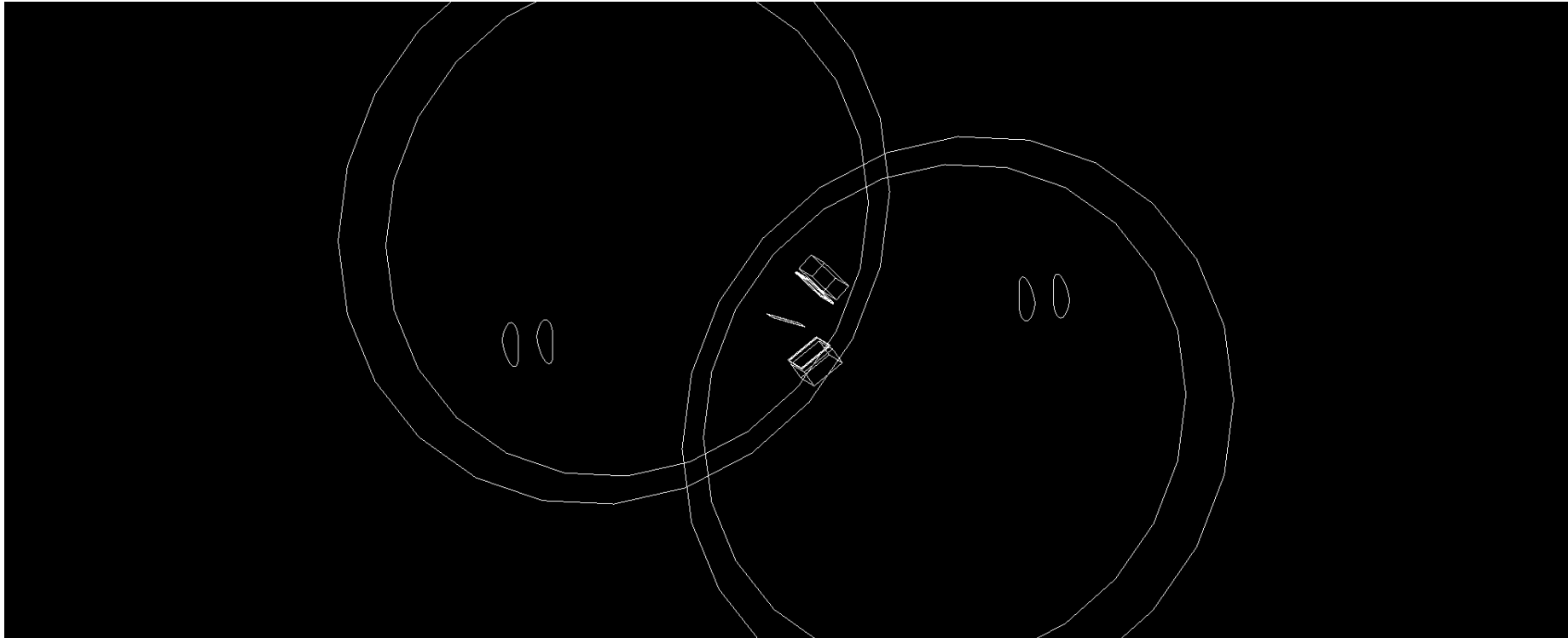


4. Result

Geant4によるシミュレーション:外部対生成

検出器を追加して本実験系のモデルを作成

時間差 1ns でDSSDに侵入する電子対イベントを取得



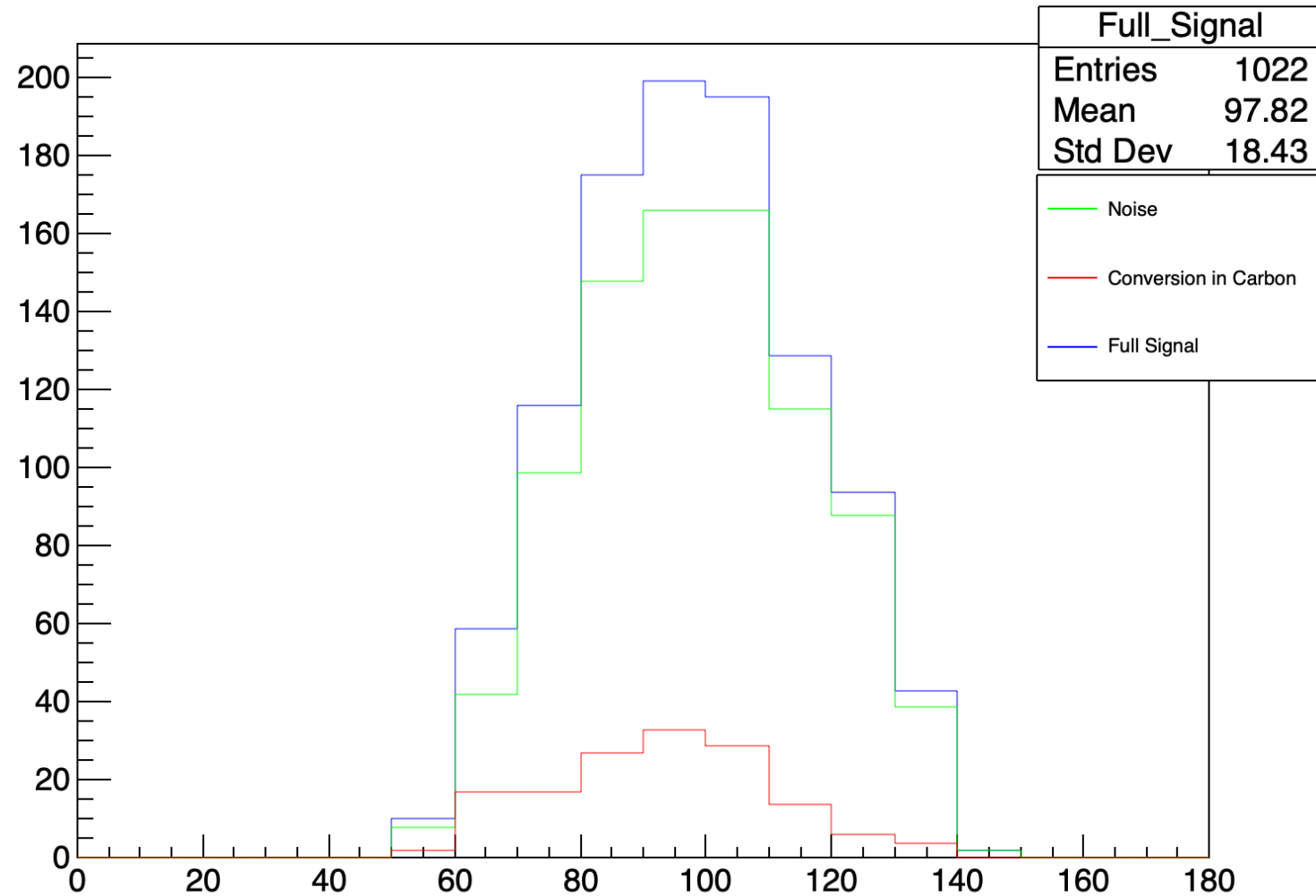
4. Result

Geant4によるシミュレーション:外部対生成

青:全シグナル

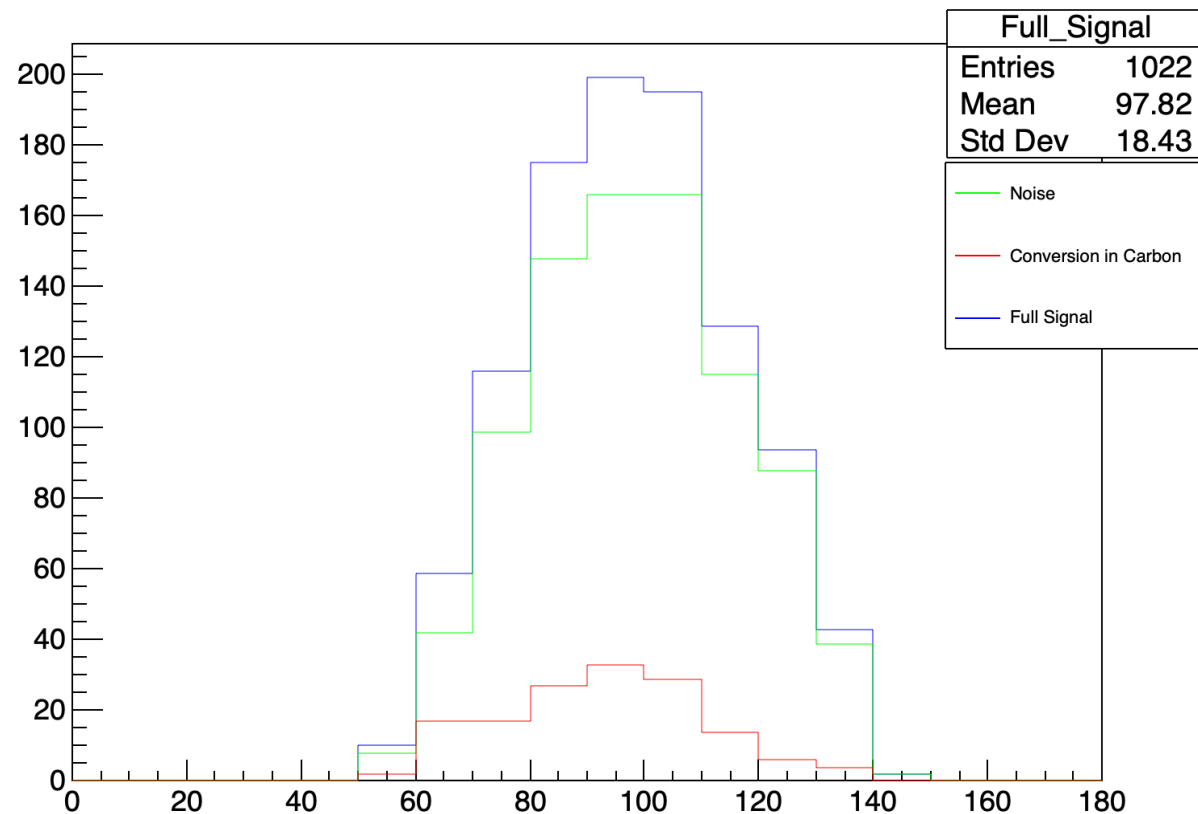
赤:対生成電子対

緑:ノイズ

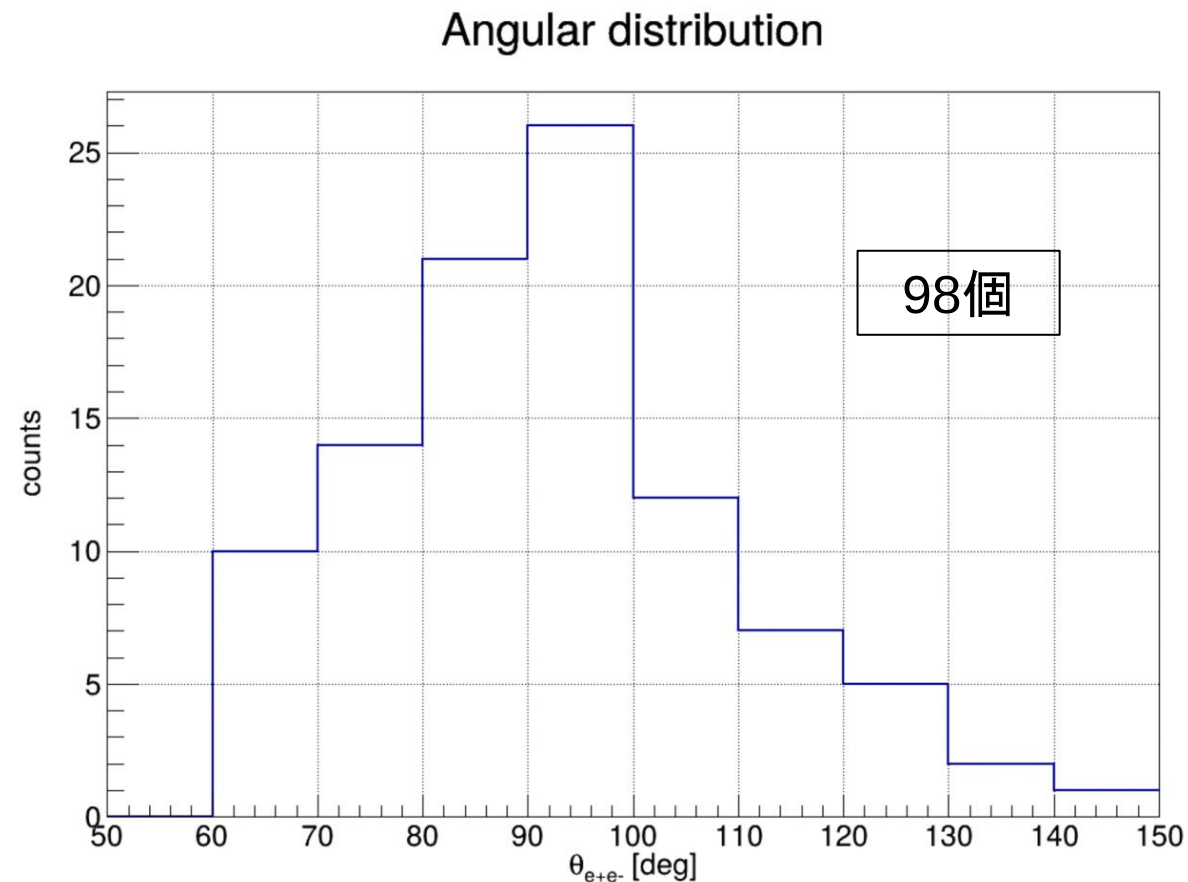


4. Result

実験データとの比較



シミュレーション

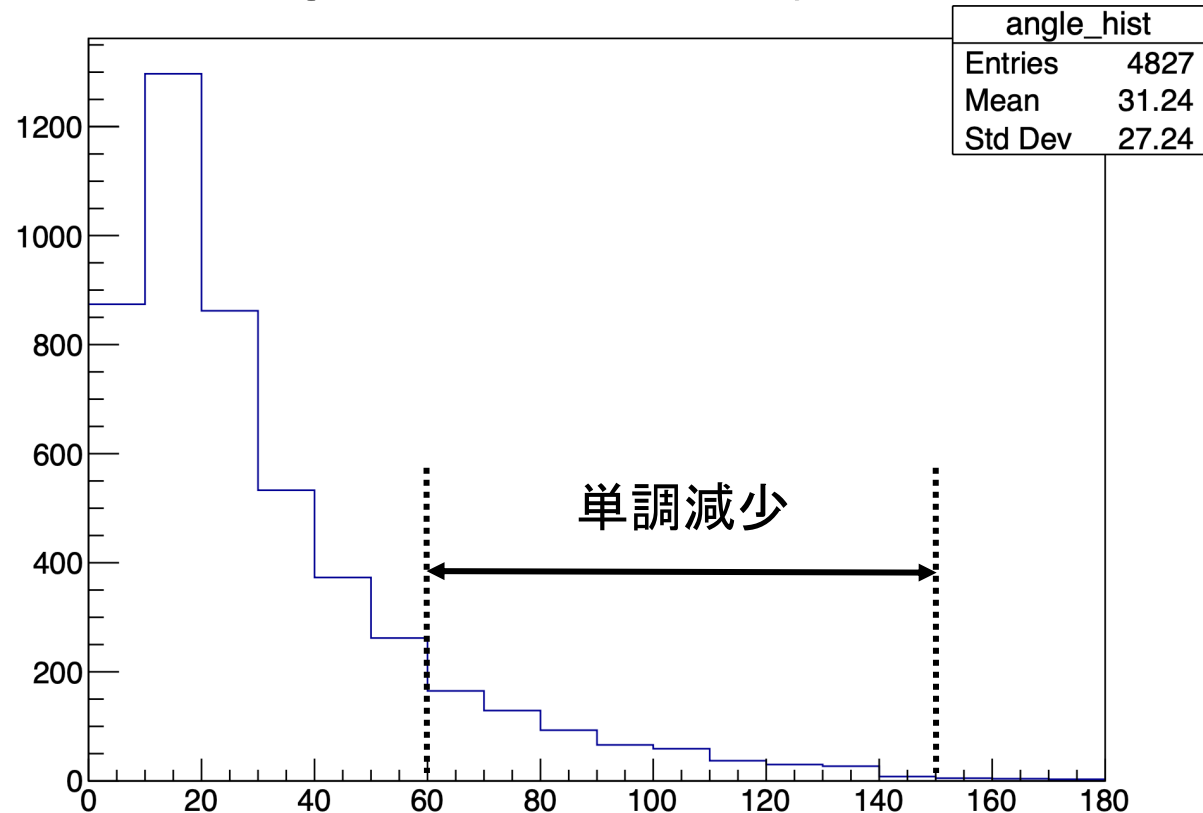


収率補正前実験データ

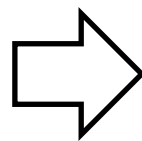
4. Result

実験データとの比較

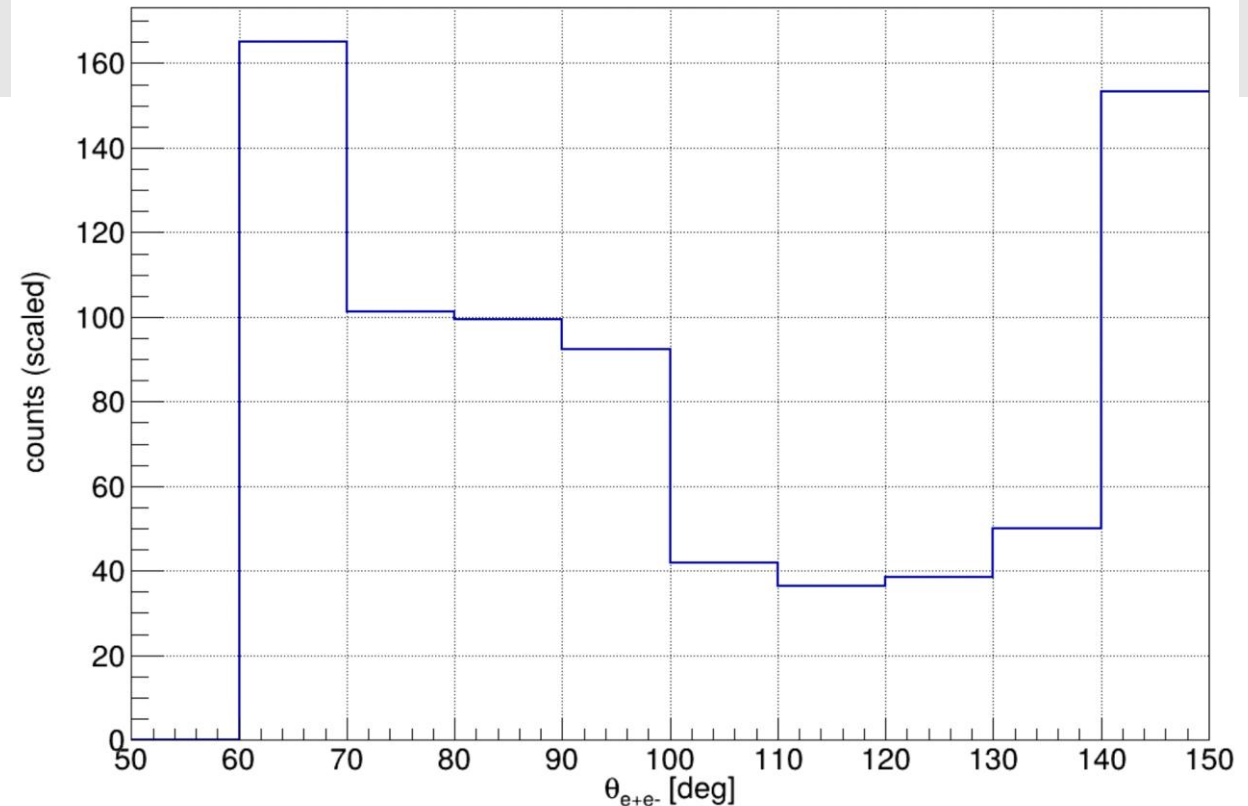
Angle between electron and positron



内部対生成の理論曲線と合わない



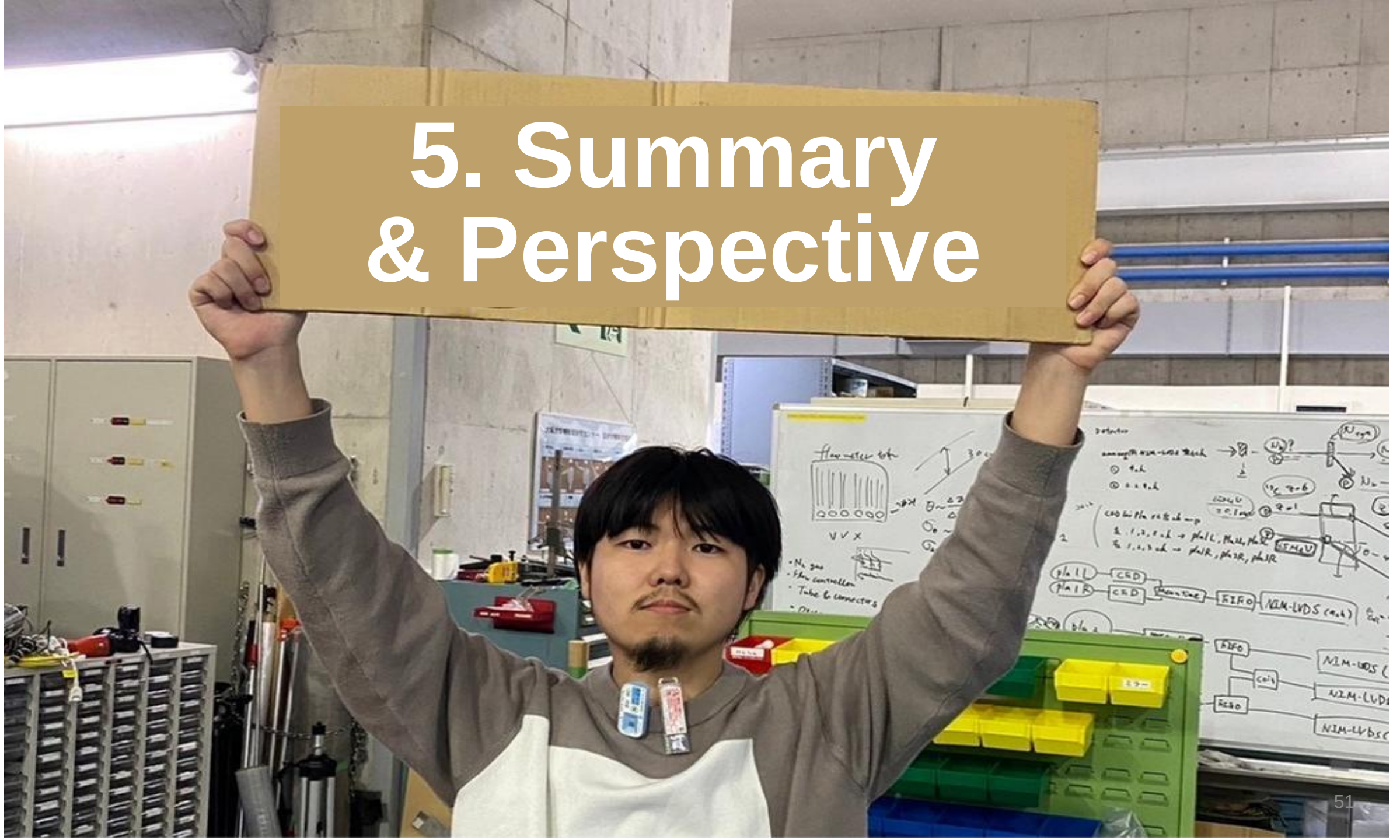
Angular distribution



収率補正後の実験データ (DSSD-GAGG対応なし)

- ・統計量が足りない
- ・ノイズ (外部対生成含む) が多い

5. Summary & Perspective



5. Summary & Perspective

Summary

- ① $^{12}\text{C} (p, p' e^+ e^-) ^{12}\text{C}$ 非弾性散乱について電子陽電子の角度分布を調べたが、十分なイベント数は得られなかった.
- ② 入射ビームの不調でイベント数は想定より下がったが、それでも多くノイズが入ることが分かった.
- ③ 実験結果との比較はできなかったが、Geant4によるシミュレーションにより角度分布の理論的見積もりはできた.
- ④ GRでは、22.6MeV周辺の励起スペクトルを確認できた.

5. Summary & Perspective

Perspective

- E検出器をGAGGからプラスチックシンチレータに変更
 - γ 線応答が減り, アクシデンタルノイズが減る.
 - 検出器の数が減る.
- γ 線検出器を ΔE , E検出器とは別に配置
 - Geant4シミュレーションに用いて, IPC+EPCの評価を行う.
- DSSDを前後に2枚配置
 - 粒子の方向がわかり, ノイズを判別できる.

5. Summary & Perspective

Perspective

- Grand Raidenを幾何的なacceptanceの大きなLASなどに変更
 - 励起エネルギーのタグができるイベント数を稼ぐ.
- Grand Raiden の磁場設定を変えてより高い励起状態を観測
- Grand Raidenで微分断面積の前方角度分布を取りたい

謝辞

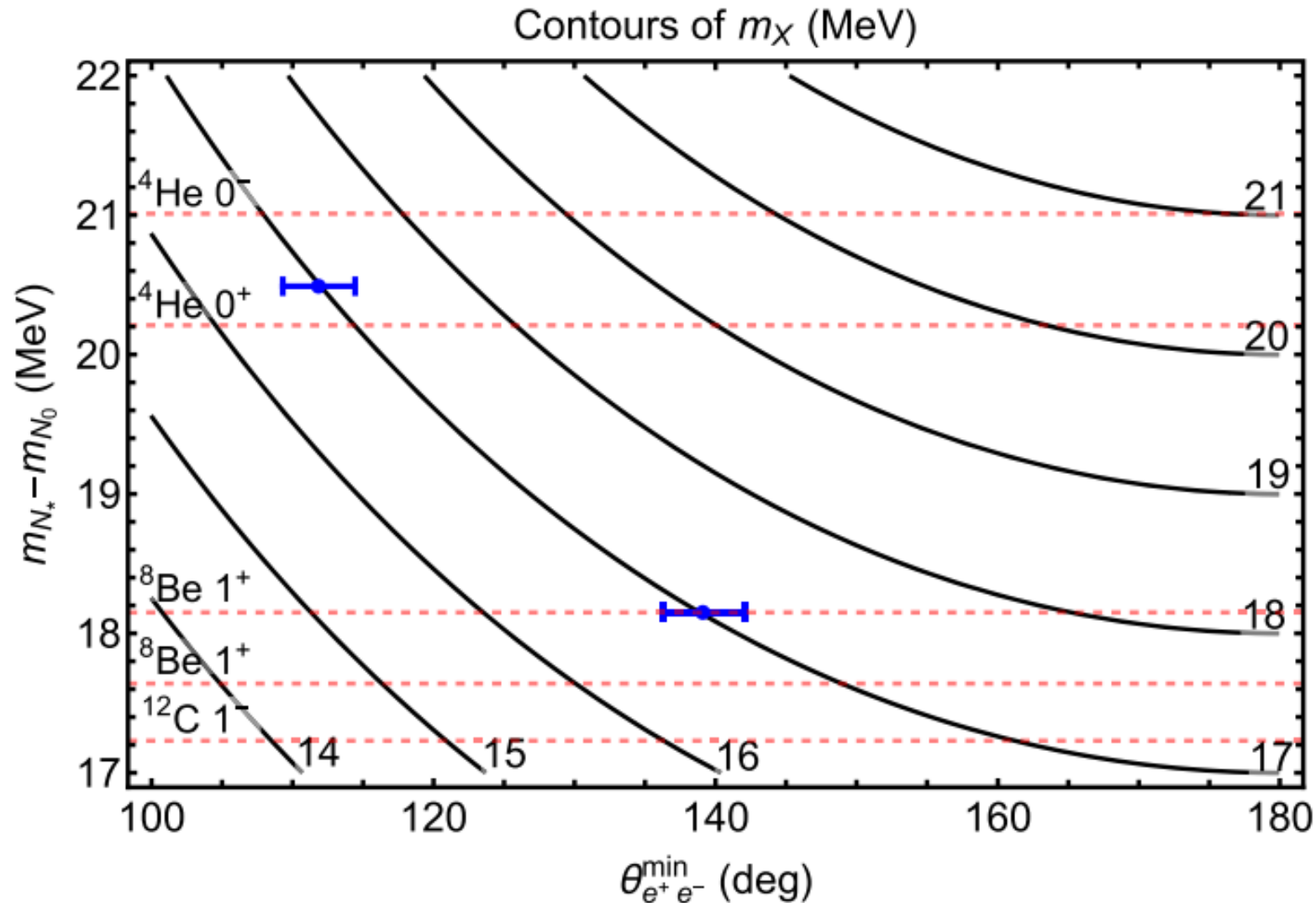
一年間、懇切丁寧に熱心なご指導いただいた銭廣先生
理論ゼミで大変お世話になった萩野先生、金田先生
お忙しい中、ご協力いただいた堂園先生
TAとして多くのアドバイスを下さった矢野さん、石井さん
実験準備のお力添えをいただいた辻さん、小倉さん
学生実験に貴重な設備を貸して下さった古野先生、大田先生、田中先生
をはじめとするRCNPのコラボレーター皆さん

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

補足スライド

3. Analysis – Energy Calibration

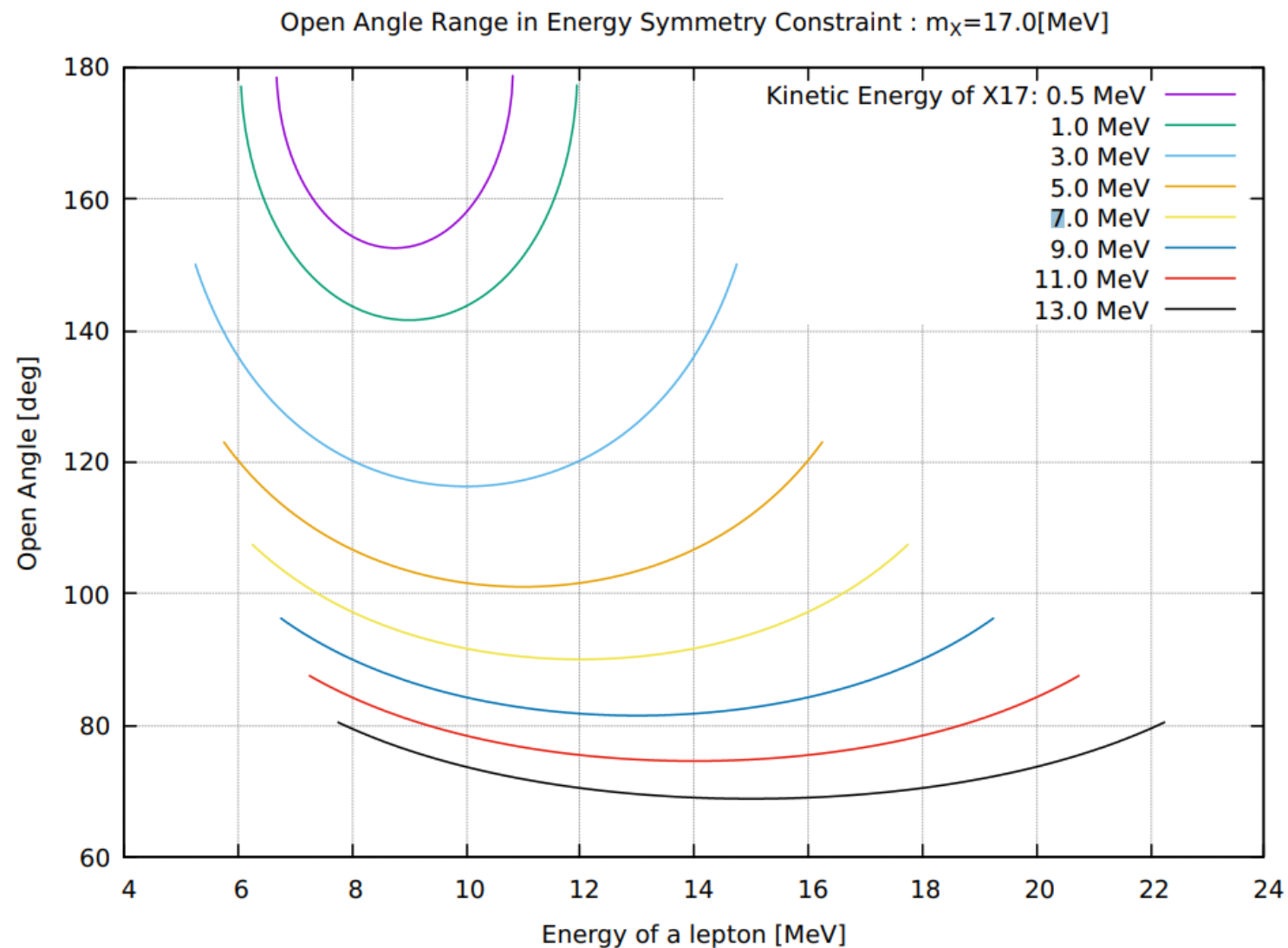
励起状態と角度ピーク的位置(ボソンの質量ごと)



Daniele S. M. Alves et al, Shedding light on X17 community report (2023)

3. Analysis

相対論より

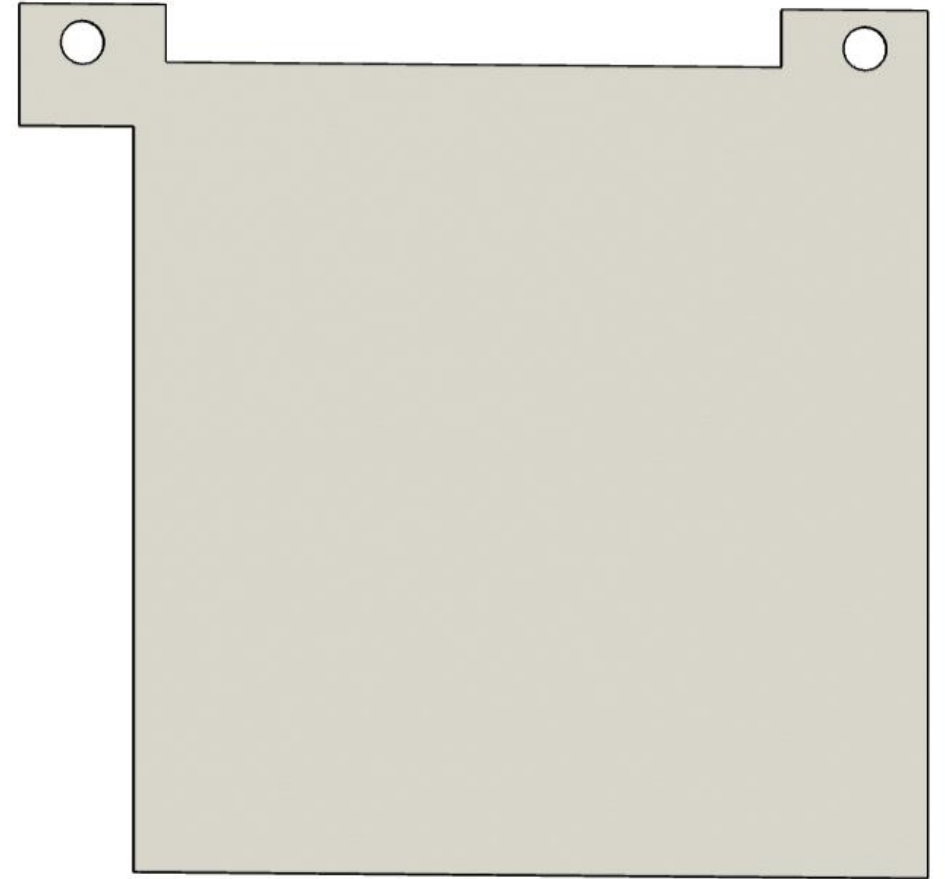


4元運動量の保存則から
許される角度の範囲

2. Experiment – テレスコープ Filter

Al板 (0.50 mmt)

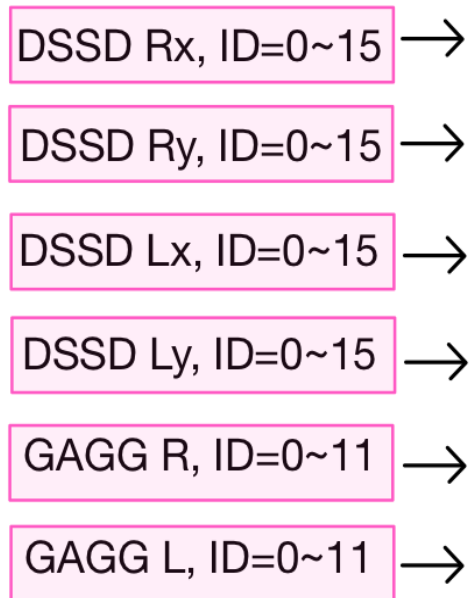
- ・ ΔE -E検出器の直前に配置
- ・ 目的 : **ノイズの除去**
→ 原子核崩壊から飛んでくる陽子や α 線を制止
- ※ e^- , e^+ のエネルギー損失は運動エネルギーに比べて十分小さい



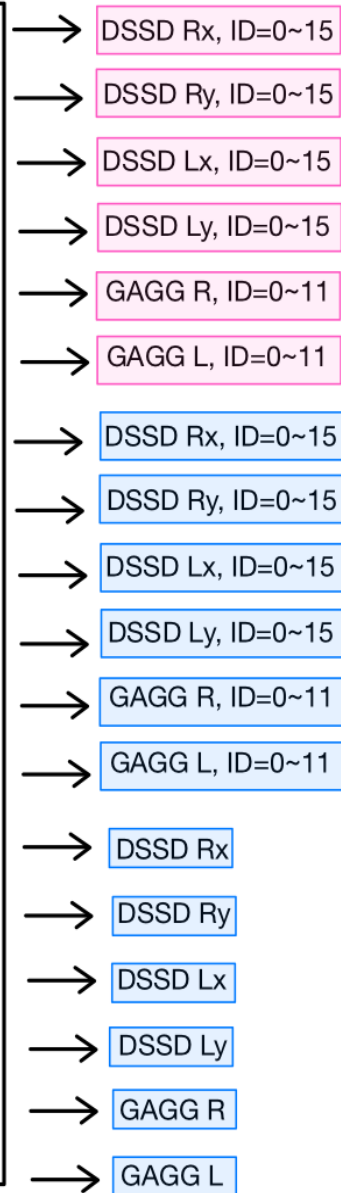
2. Experiment – テレスコープの回路・DAQ

MSCF— 3 種類の役割を持つモジュール

検出器から来た
アナログ信号



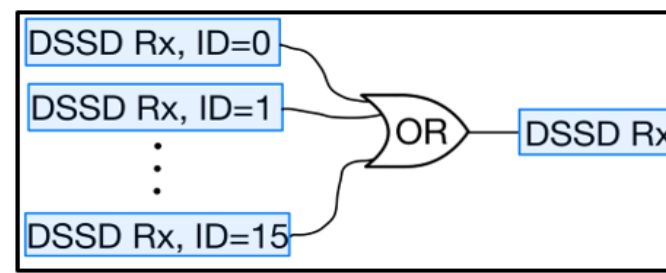
MSCF



(1) 増幅・整形されたアナログ信号
→MADCへ

(2) 閾値を超えたロジック信号
→TDCへ

(3) 各IDのORをとったロジック信号
→トリガーを作る

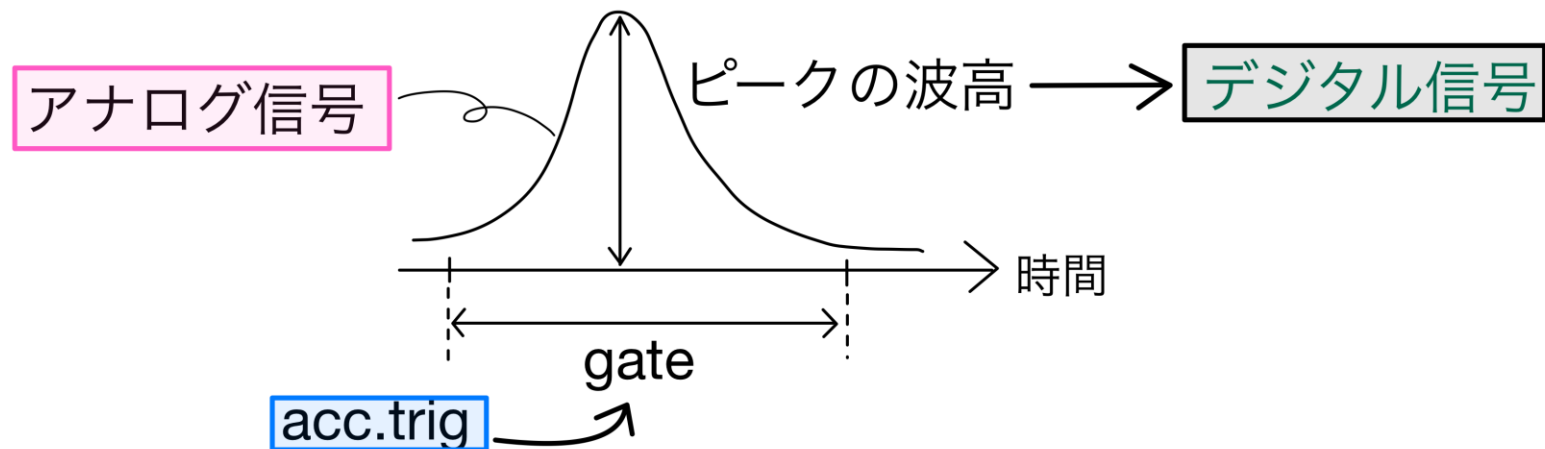


2. Experiment – telescopeの回路・DAQ

MADC, TDC

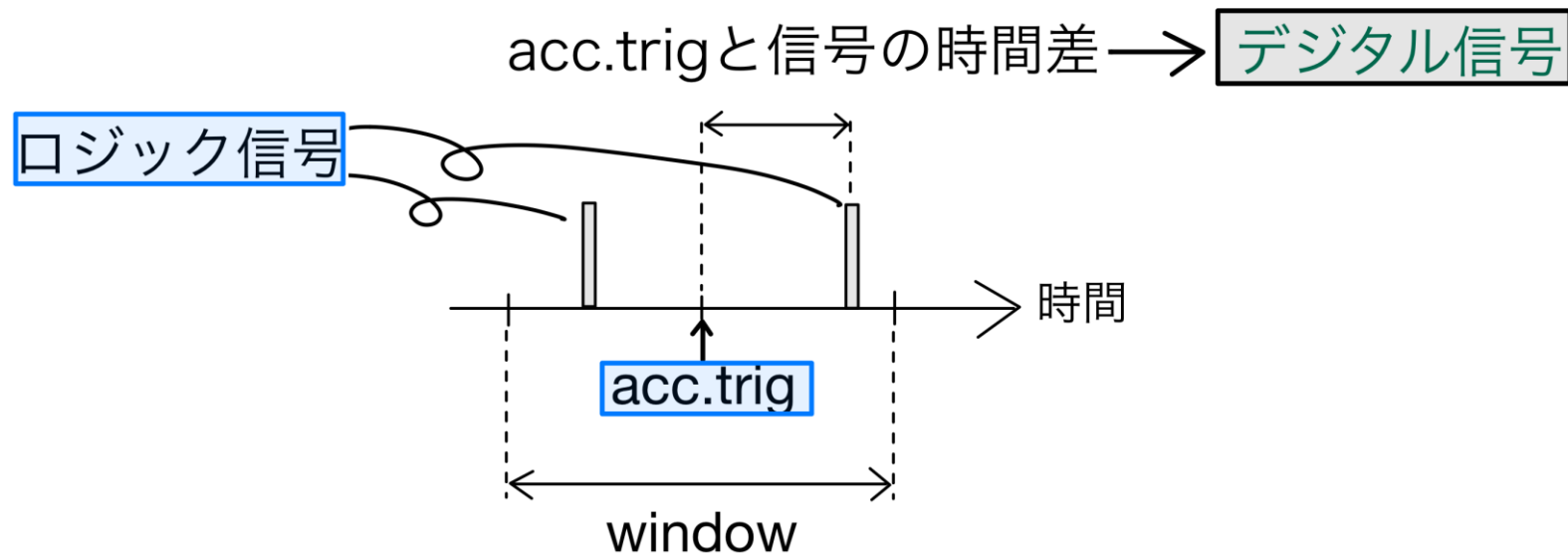
MADC

- ・ 入力信号の**最大波高**を記録
- ・ エネルギーの情報を得る



TDC

- ・ 入力信号と acc.trig の**時間差**を記録
- ・ windowに入った全信号について記録
- ・ トリガーの区別やノイズ除去に使う



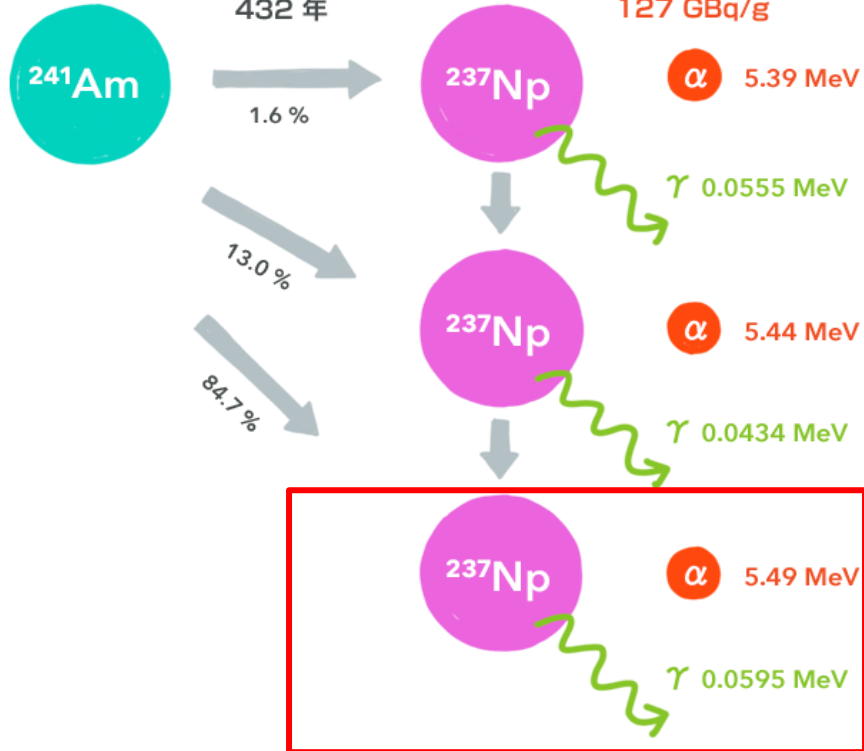
3. Analysis

エネルギーキャリブレーション(DSSD)

アメリシウム 241

半減期
432 年

比放射能
127 GBq/g



DSSDのcalibrationについて

実験前と実験後に、

標的ラダーに α 線源Am241を置き、RxRyLxLyでsignalをとった

gaussian fittingでbaselineと5.49MeVの2点のpeakを求めた(各ID毎)

それらを結ぶ直線を較正直線として採用

3. Analysis

エネルギーキャリブレーション(DSSD)まとめ

実験前と実験後においてキャリブレーション結果に
大きな違いはなかった。 Lxの較正直線の傾き比→

より本番中に近い実験後のデータを採用した。

※RxのID=0,1のみ実験後のデータがうまくとれてい
なかったため、実験前のデータを使った。

傾き比(後/前)

1.041857052

1.04487085

1.039942554

1.039441507

1.044847951

1.043622463

1.043199512

1.038653052

1.047513285

1.040218779

1.043931263

1.045169973

1.050190407

1.050174374

1.046734381

1.049600728

3. Analysis

エネルギーキャリブレーション(DSSD)まとめ

傾き比(後/前)

1.114216633

1.100495881

1.12219618

1.08956078

1.099039229

1.122223406

1.095264387

1.103938992

1.115608807

1.079846016

1.110190136

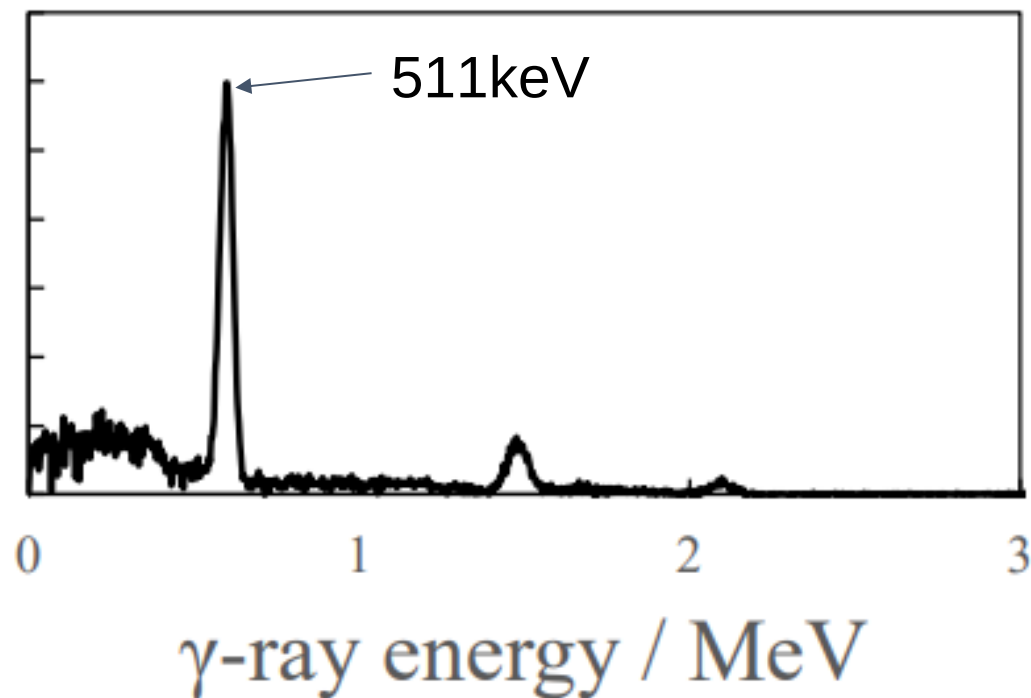
1.082088896

実験前と実験後においてキャリブレーション結果に
有意な差があった。
Rの較正直線の傾き比→

より本番中に近い実験後のデータを採用した。

3. Analysis

エネルギーキャリブレーション(GAGG)



<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2024/02/cf1089786bb3be4b86389428c1bb279d.pdf>

GAGGのcalibrationについて

実験前と実験後

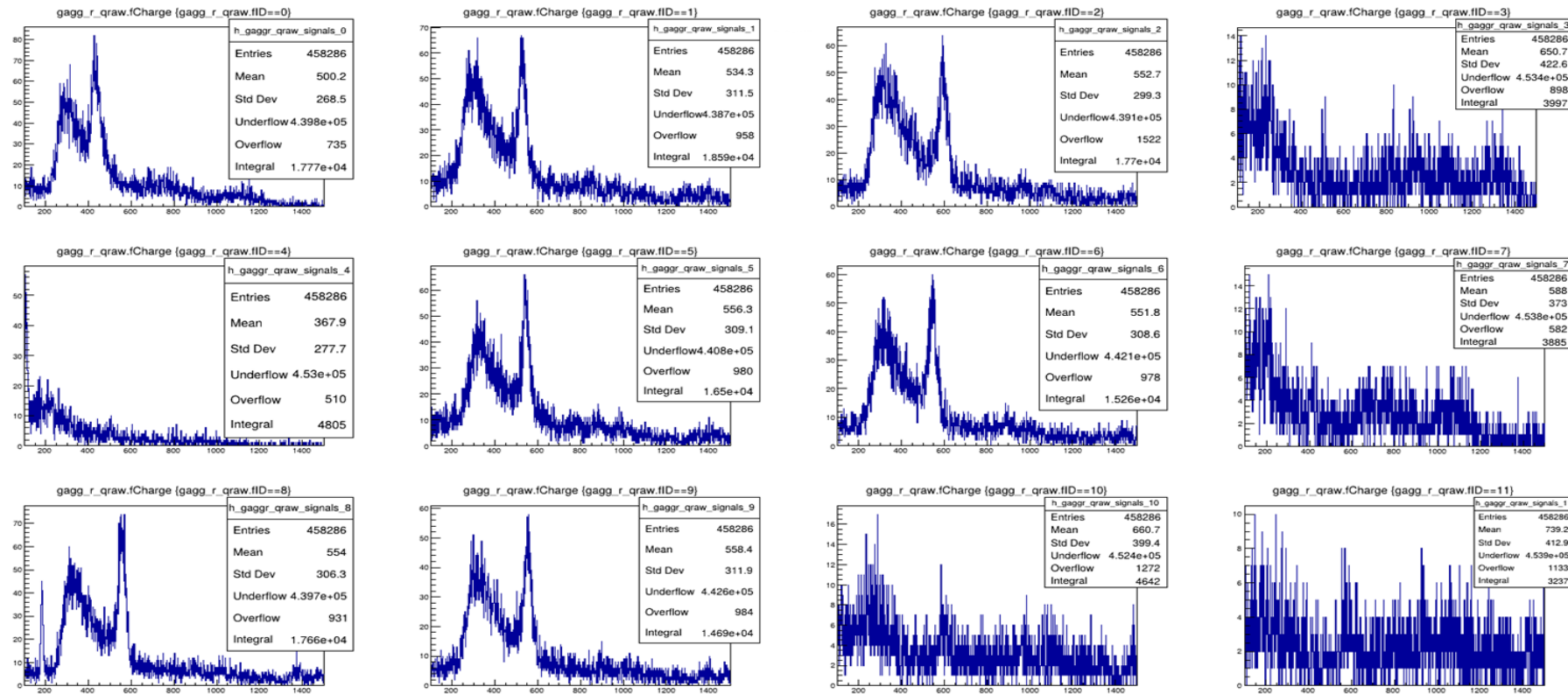
散乱層の外側に ^{22}Na を貼り、
RL同時にsignalをとった。

gaussian fittingでbaselineと511keVの
2点のpeakを求めた。(各ID毎)

それらを結ぶ直線を較正直線として
採用。

3. Analysis

GAGG-Lの死んでいたID

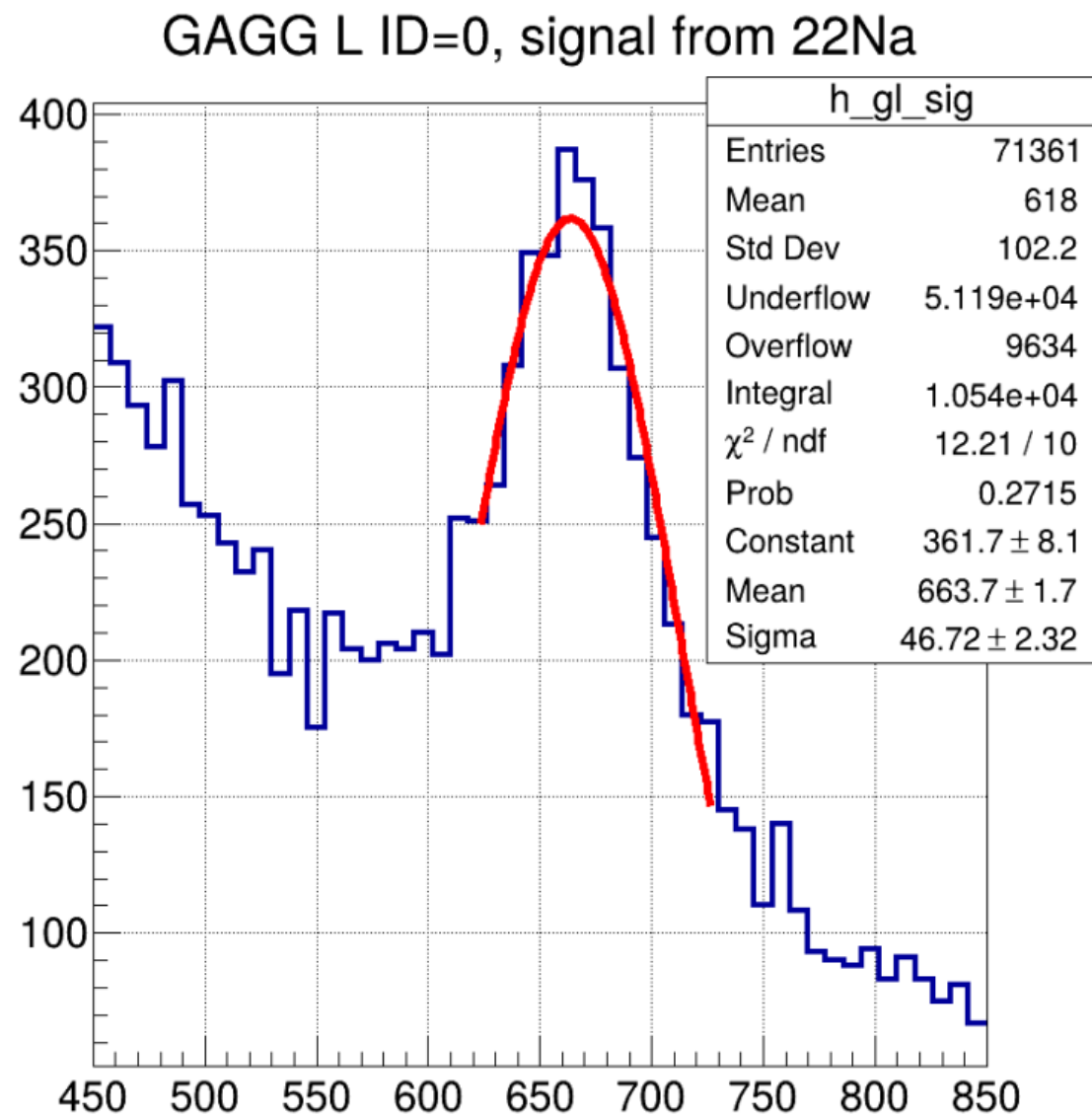
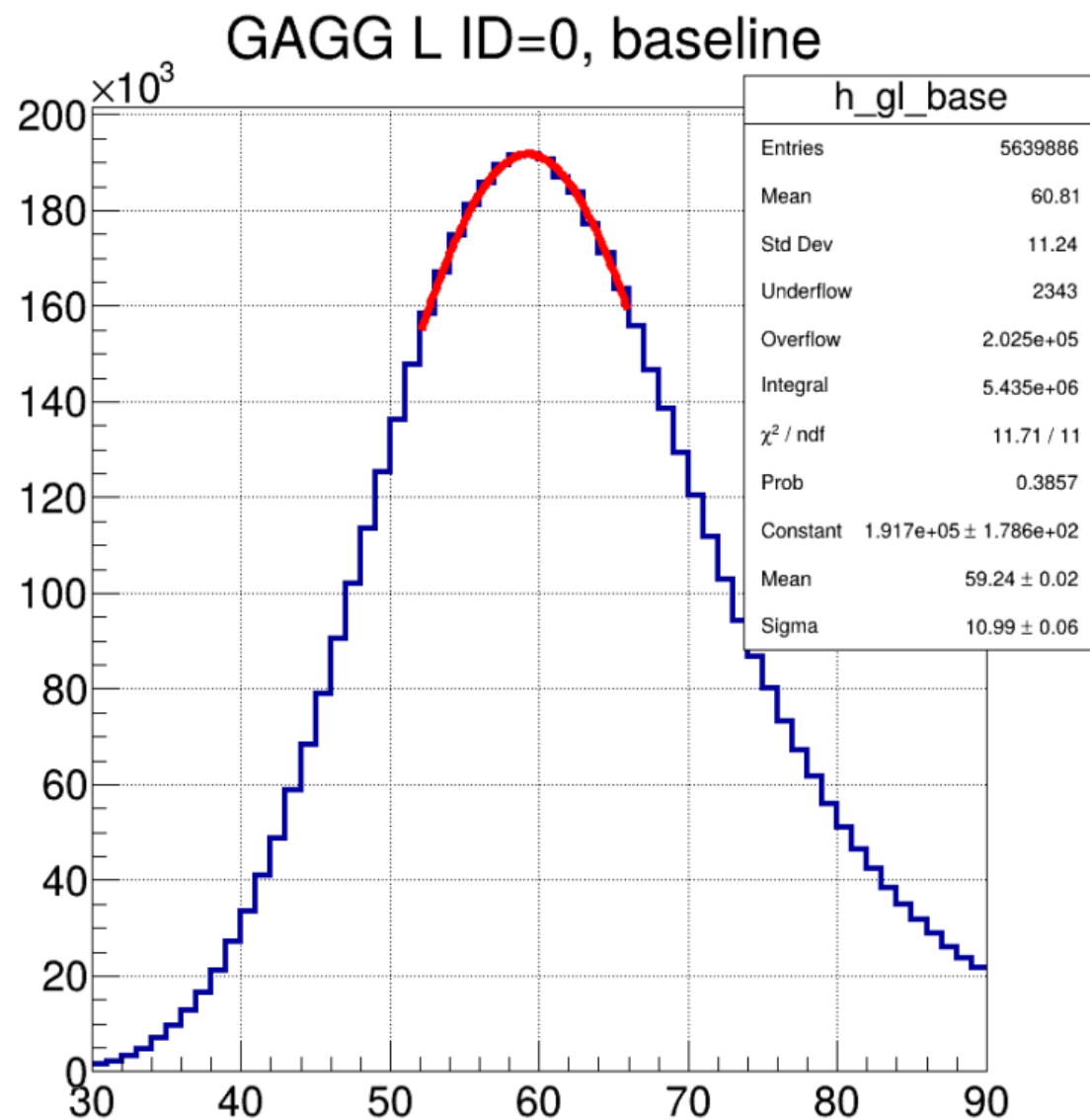


GAGG-LのID=3,4,7,10,11がうまくとれていない

→MSCFの不調による. **本番中もこれらのIDは使えない.**

3. Analysis – Energy Calibration

Fittingの例 (GAGG)



使用した相互作用モデル

Geant4が提供する物理モデルのうち

FTFP_BERT (ハドロン原子核相互作用)

→0~10 GeVの入射陽子に対してBertini INC Modelを適用する

StandardEM_opt4 (電磁相互作用)

→最も精密な電磁相互作用モデル 特に γ 線対生成

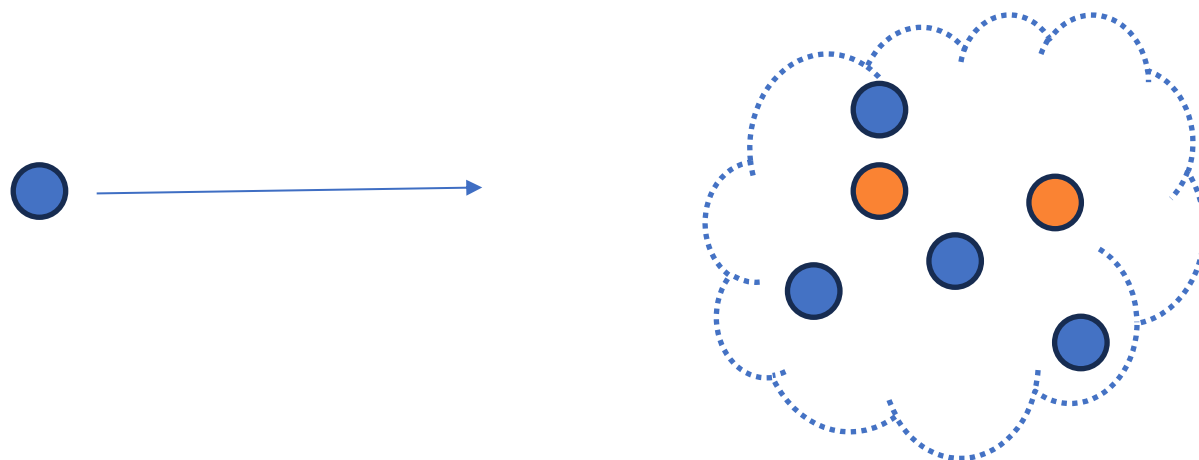
以上二つを導入した.

3. Analysis

Bertini INC modelの概要

INC modelとは?

INC(Internuclear Cascade) modelは原子核を複数の核子の集まりと捉え,入射粒子との相互作用を二体衝突の繰り返しで記述する

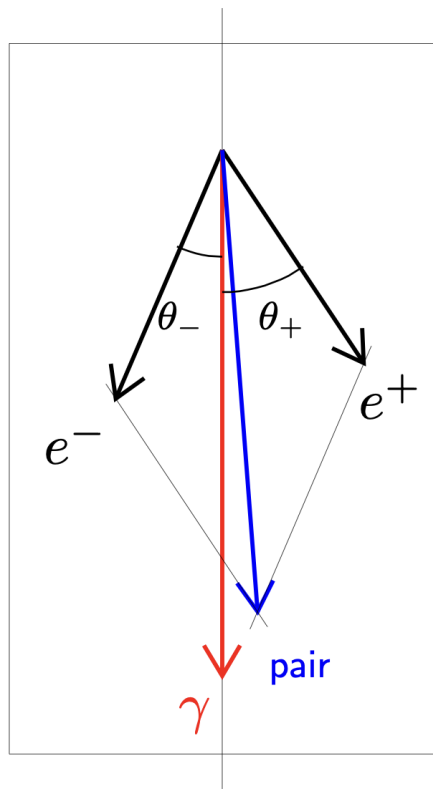


ビリヤードのように核子が反応を繰り返す

3. Analysis

StandardEM_opt4

Context: Pre-existing event generators



“conversion plane”

- pdf = product of 1D pdf's
- No recoil explicitly generated ($\vec{p}_+ + \vec{p}_- = \vec{k}$)
 - $\Rightarrow$ conversion wrongly generated in a plane that contains $\vec{k}_\gamma$
 - $\Rightarrow$ no kick transverse to the plane
- e^+ and e^- polar angles generated independently
 - $\Rightarrow$ energy-momentum not conserved !
 - $\Rightarrow$ artificial kick in the plane (and wrong distribution)
- Attempts to verify polarized models failed
- Single-particle polar angle θ distribution, OK.
- “Energy share”, x_+ distribution, OK. $x_+ \equiv E_+/E_\gamma$
- Geant4 Physics Reference Manual, release 10.4 (Dec. 2017, [pdf](#))
Sects. 6.5 – 6.6. & 13.9

D.Bernard
G4BetheHeitler5DModel, a 5D,
polarized, $\gamma \rightarrow e^+e^-$
Geant4 “Physics Model”
より引用

各自パワポで書いたスライドをここにコピー
してくる形がいいかな
いったんここで書いてみるけど全然消してね
2021年のスライドのフォーマットを大胆に
真似してます。

発表時間 < 60分

https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakusei/p4/p4_2021/p4_2021_koki.pdf