

# ニュートリノ-原子核反応予測の精密化 に向けた逆運動学実験における $^{15}\text{O}$ の励起エネルギー再構成

31st ICEPP Symposium 2025/2/18

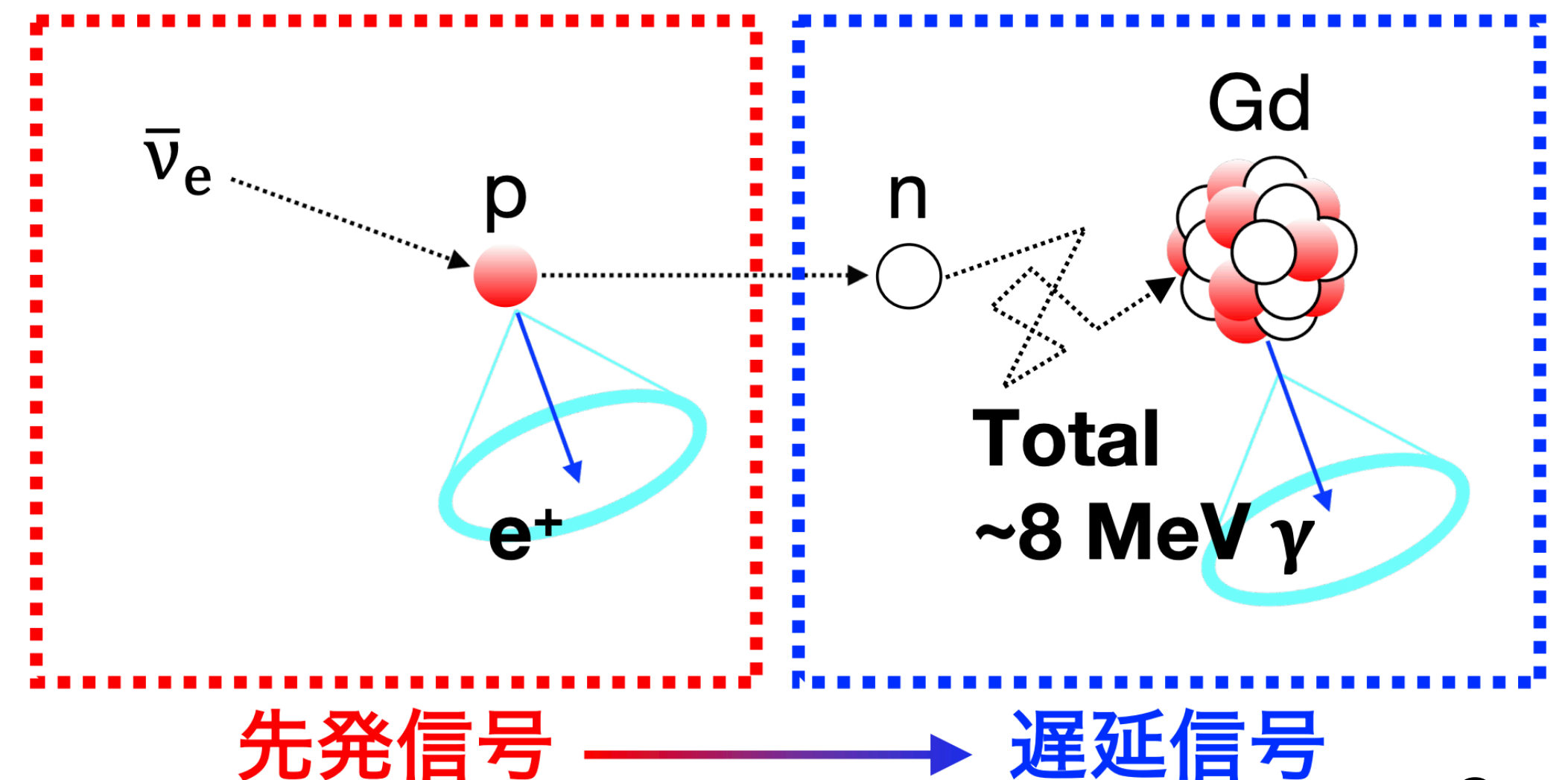
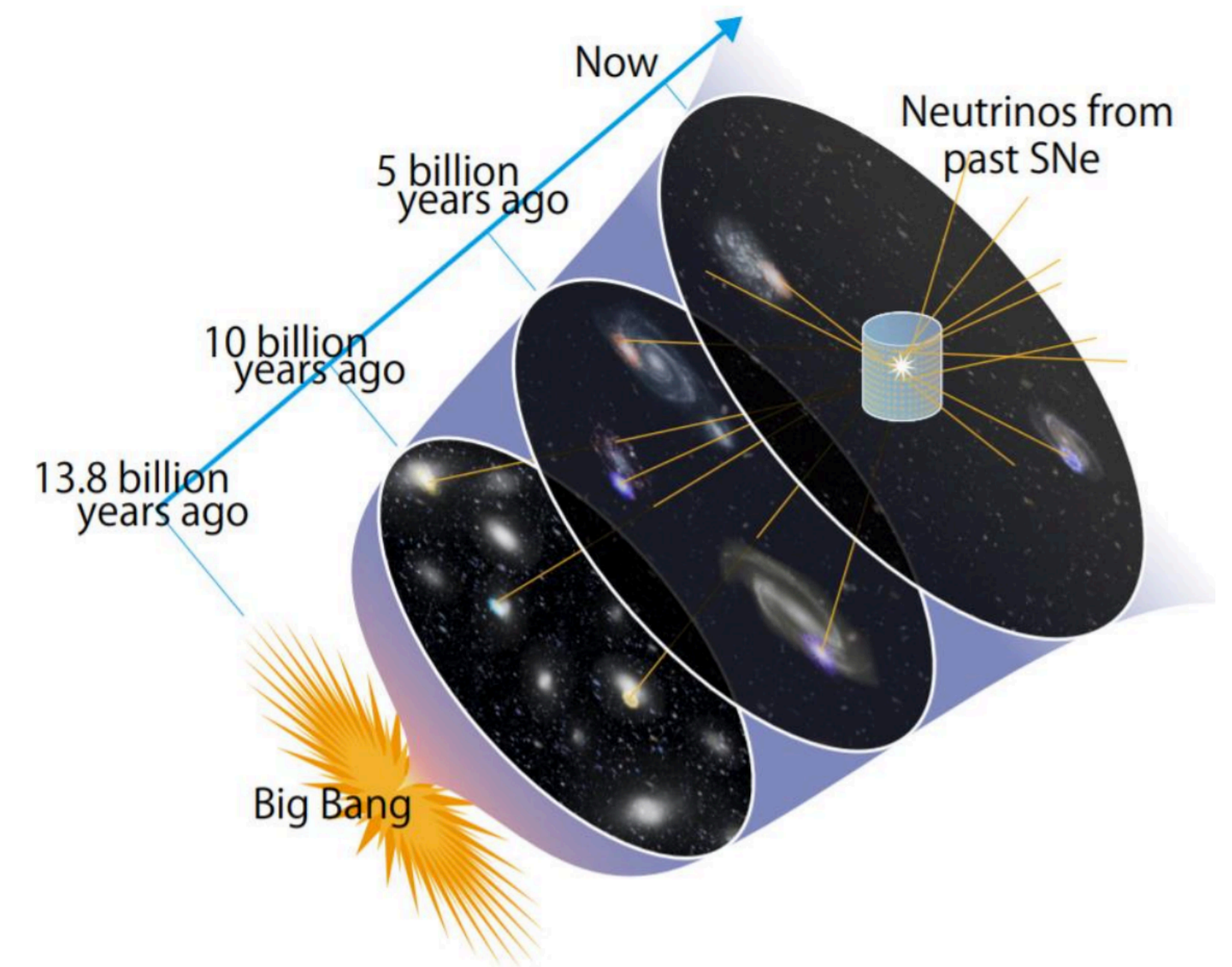
東京大学 理学系研究科・物理学専攻 横山・中島研究室 M1 林崎響

# 目次

- Introduction
  - スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノの測定
  - SAMURAI実験
- 中性子検出器の検出効率とエネルギー分解能
- $^{15}\text{O}$ の励起エネルギー再構成

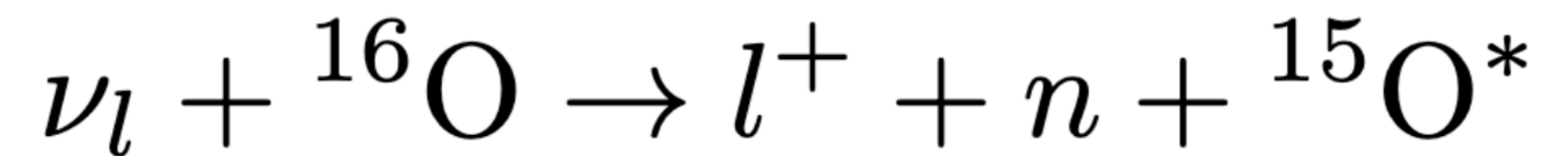
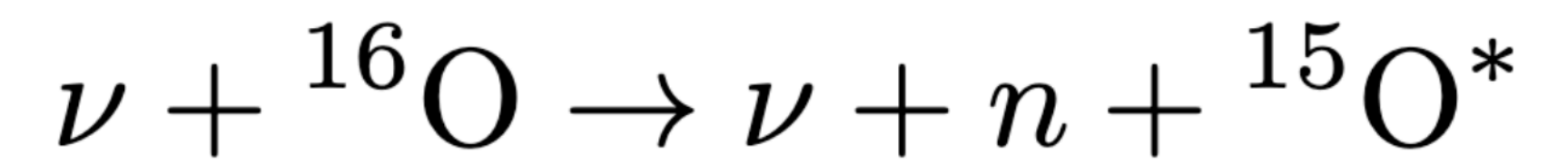
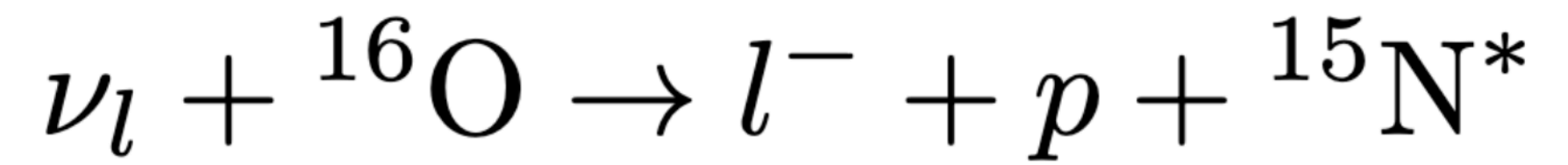
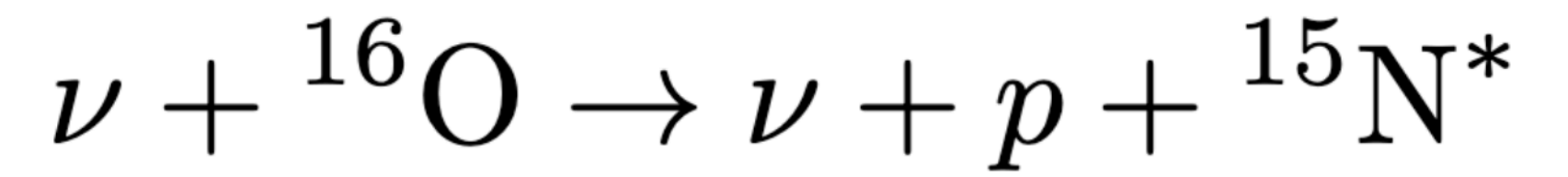
# 超新星背景ニュートリノの観測

- Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)
- 過去の超新星爆発で生成したニュートリノ
- スーパーカミオカンデ(SK)で観測を目指している
- SKではDSNBのなかでも**反電子ニュートリノ**を観測
- 反電子ニュートリノの信号：2つの信号  
陽電子の信号 + 中性子の信号  
(先発信号)      (遅延信号)

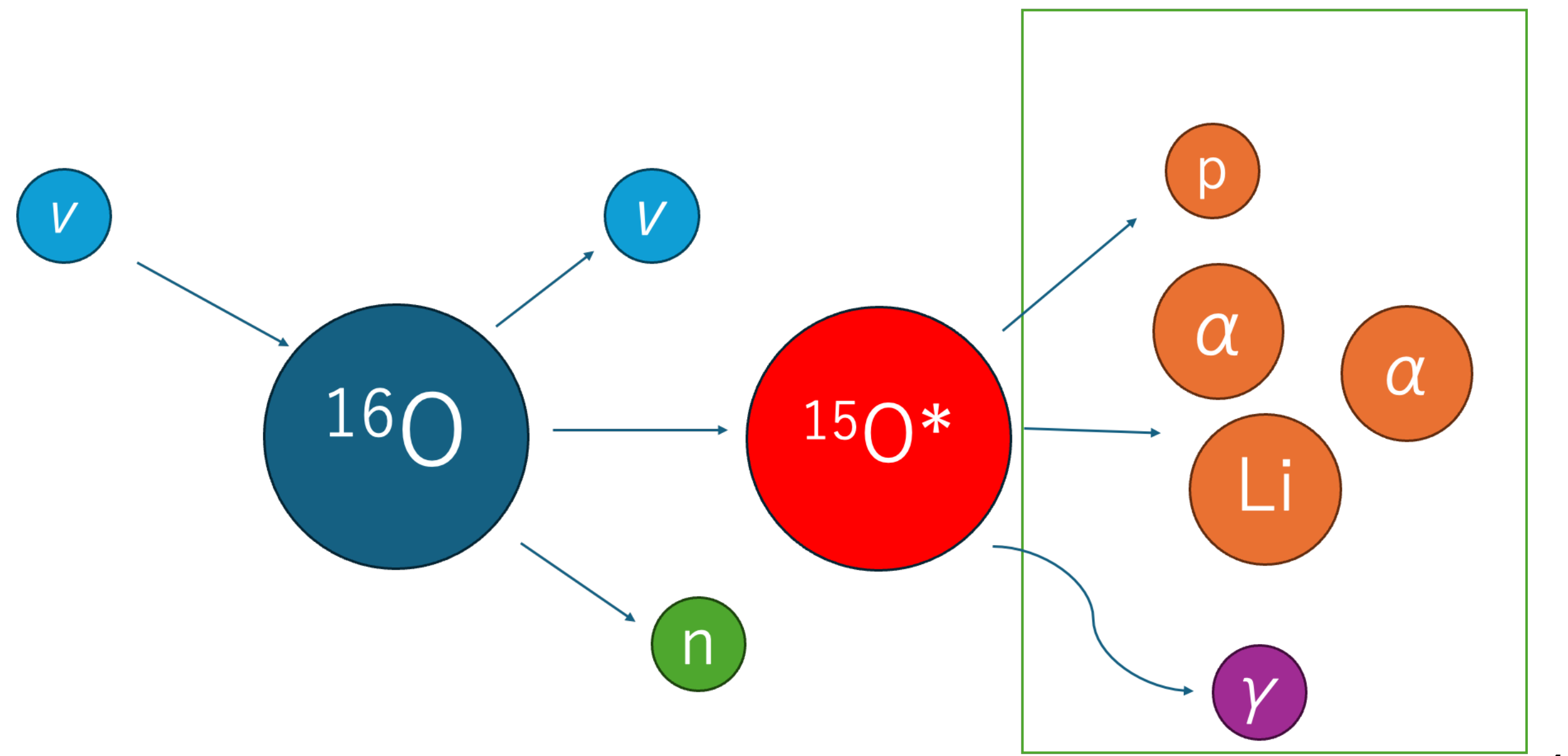


# DSNBの背景事象

- 大気ニュートリノと酸素原子核のNCQE、CCQE反応
- 生成する高い励起状態の原子からの  
**脱励起過程**：不定性が大きい
  - > DSNBの観測における主要な系統誤差
  - > SAMURAI実験で測定



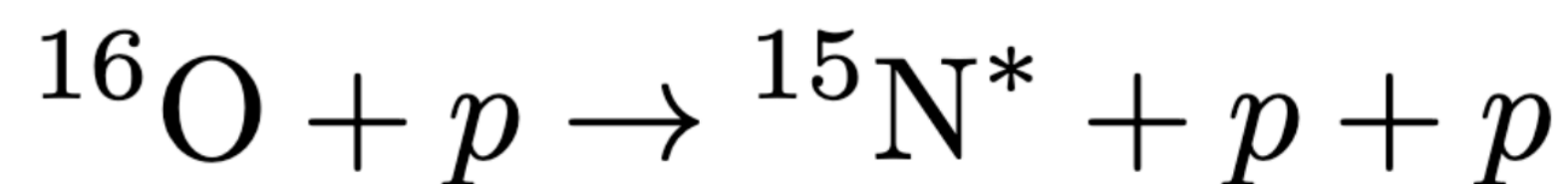
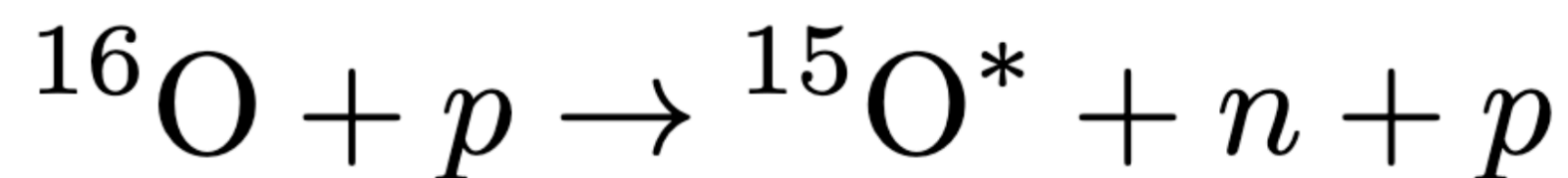
NCQE、CCQE反応の例



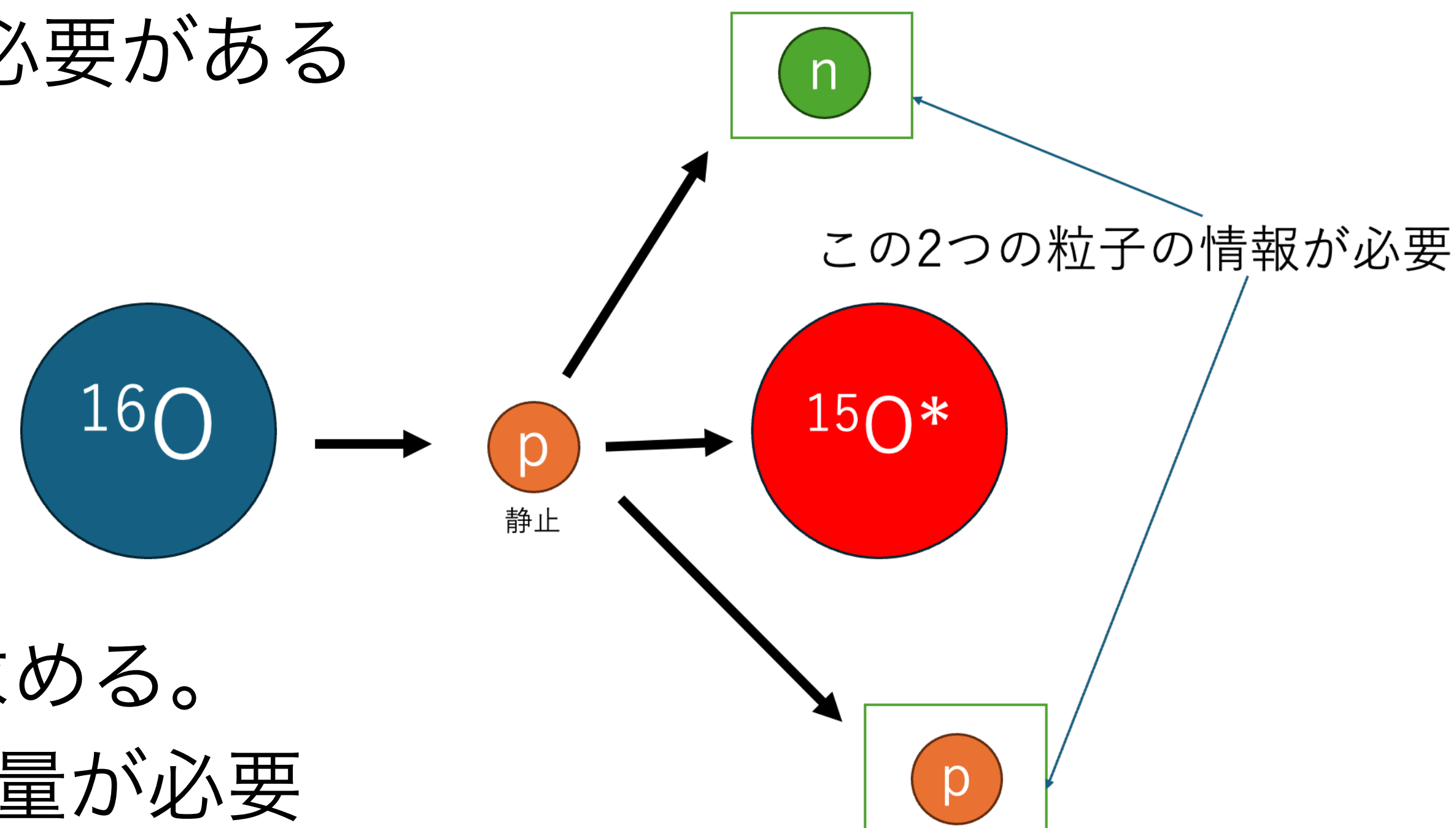
脱励起過程 4

# SAMURAI実験

- SAMURAI実験： $^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ の励起エネルギーごとに**脱励起過程**を測定
- $^{15}\text{O}$ ： $^{16}\text{O}$ の中性をノックアウトして生成  
 $^{15}\text{N}$ の実験との違い：中性子を測定する必要がある



- $^{15}\text{O}$  励起エネルギーの再構成  
生成した $^{15}\text{O}$ の4元運動量を再構成して求める。  
陽子とノックアウトされた中性子の運動量が必要



$$p^{15\text{O}} = p^{16\text{O}} + p_{\text{target}} - p_p - p_n$$

# 15Nと15Oでの検出器の配置の違い

- 中性子の測定のため、CATANAの一部を外し、代わりに中性子検出器を配置。
- Strasse & CATANA：荷電粒子の飛跡 + エネルギーの測定
- MNEUT：中性子のエネルギー、運動量の測定

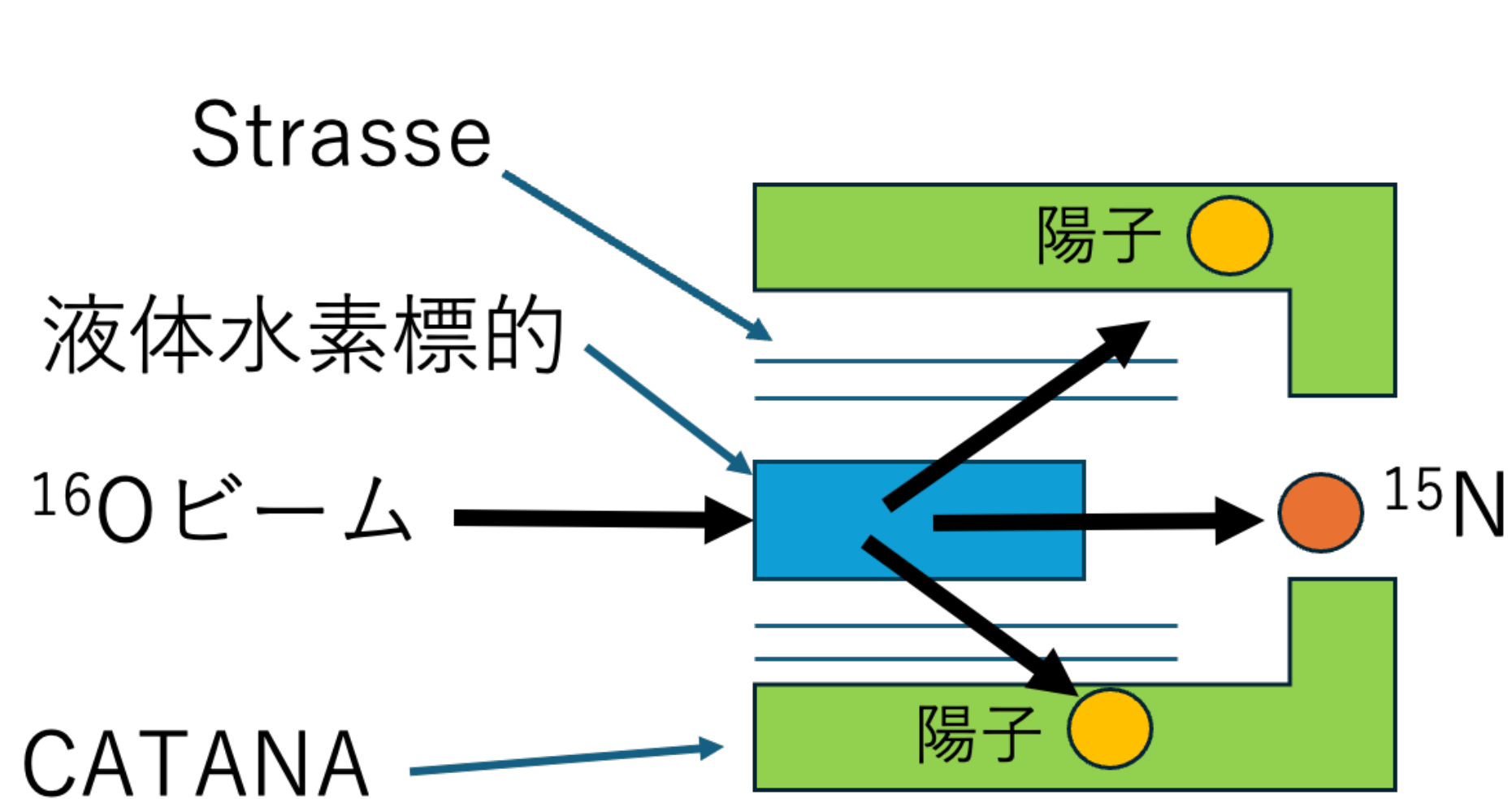


図: 15Nの場合の検出器の配置

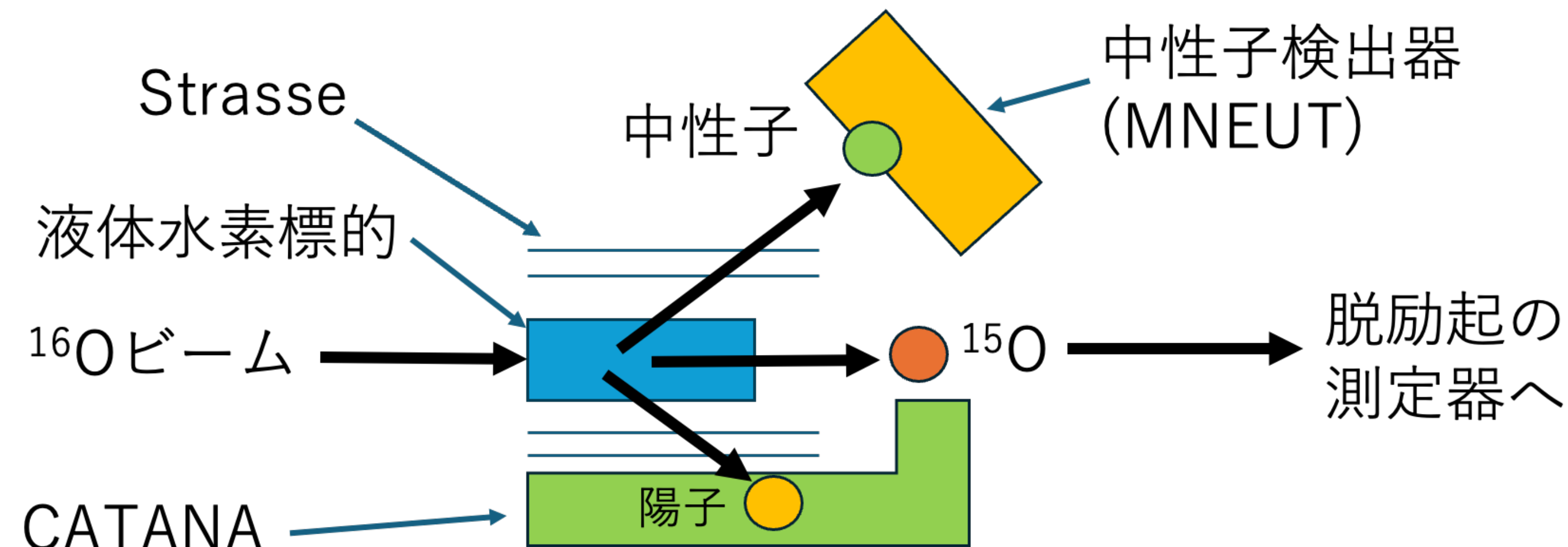
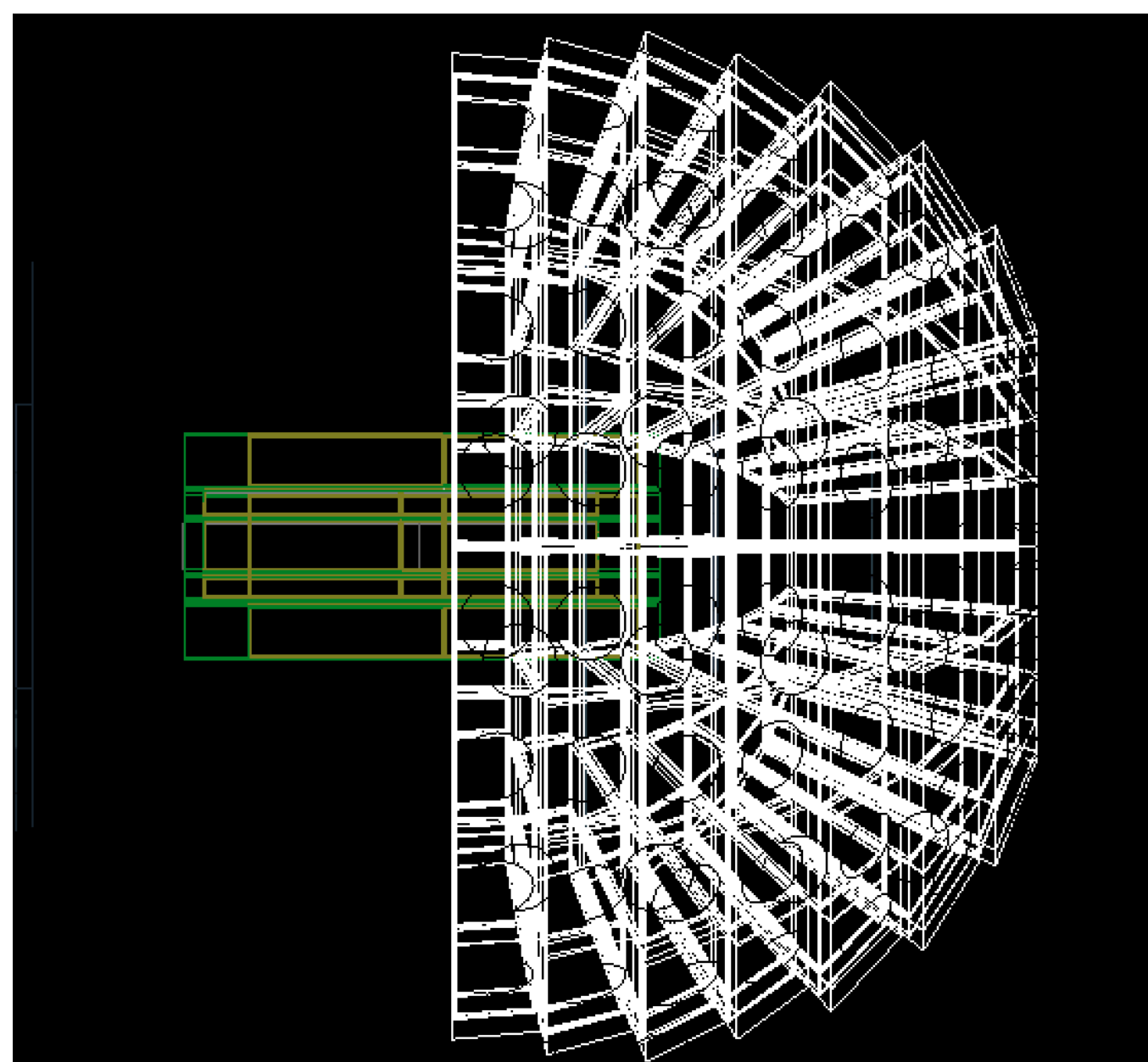


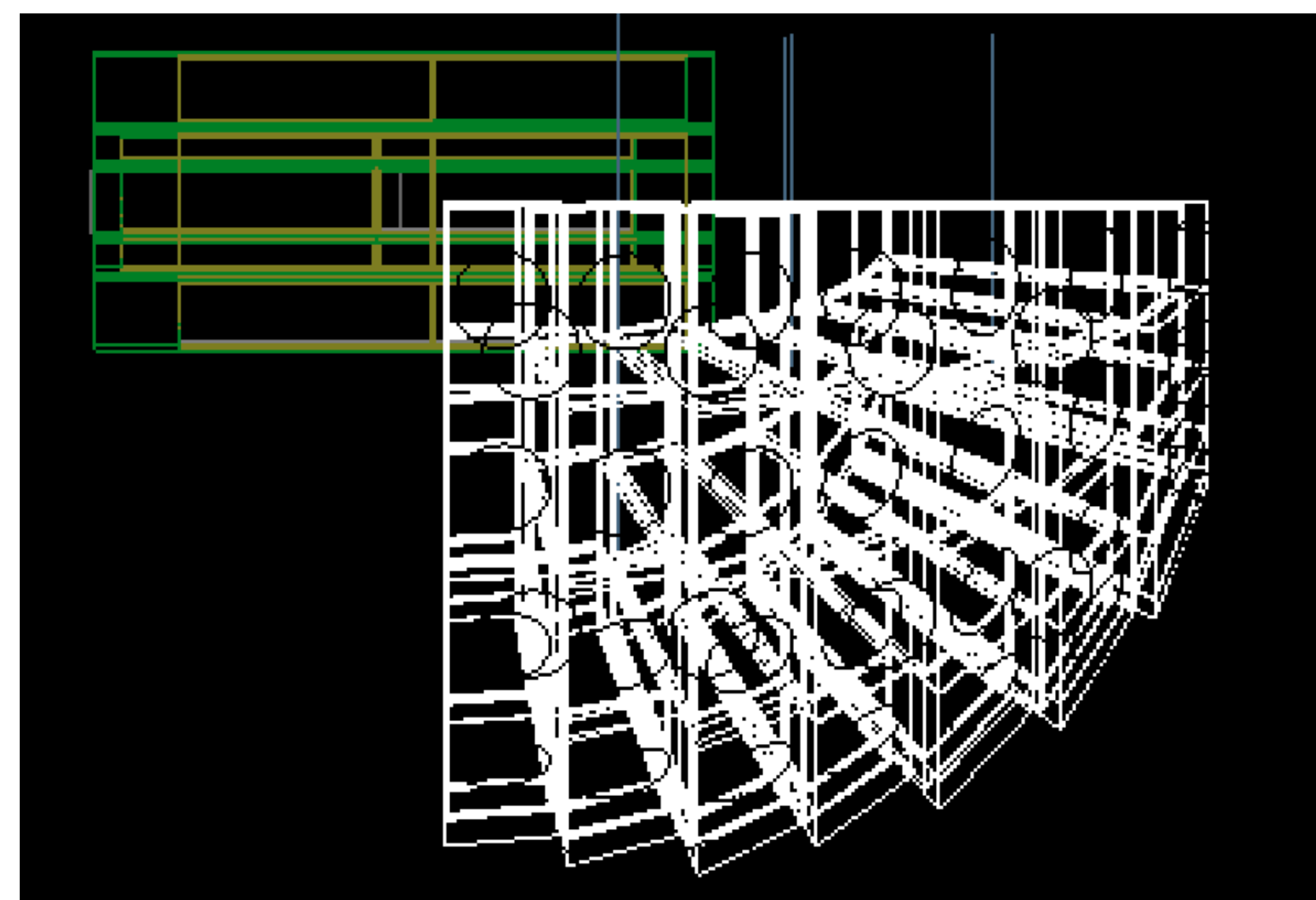
図: 15Oの場合の検出器の配置

# 検出器の配置

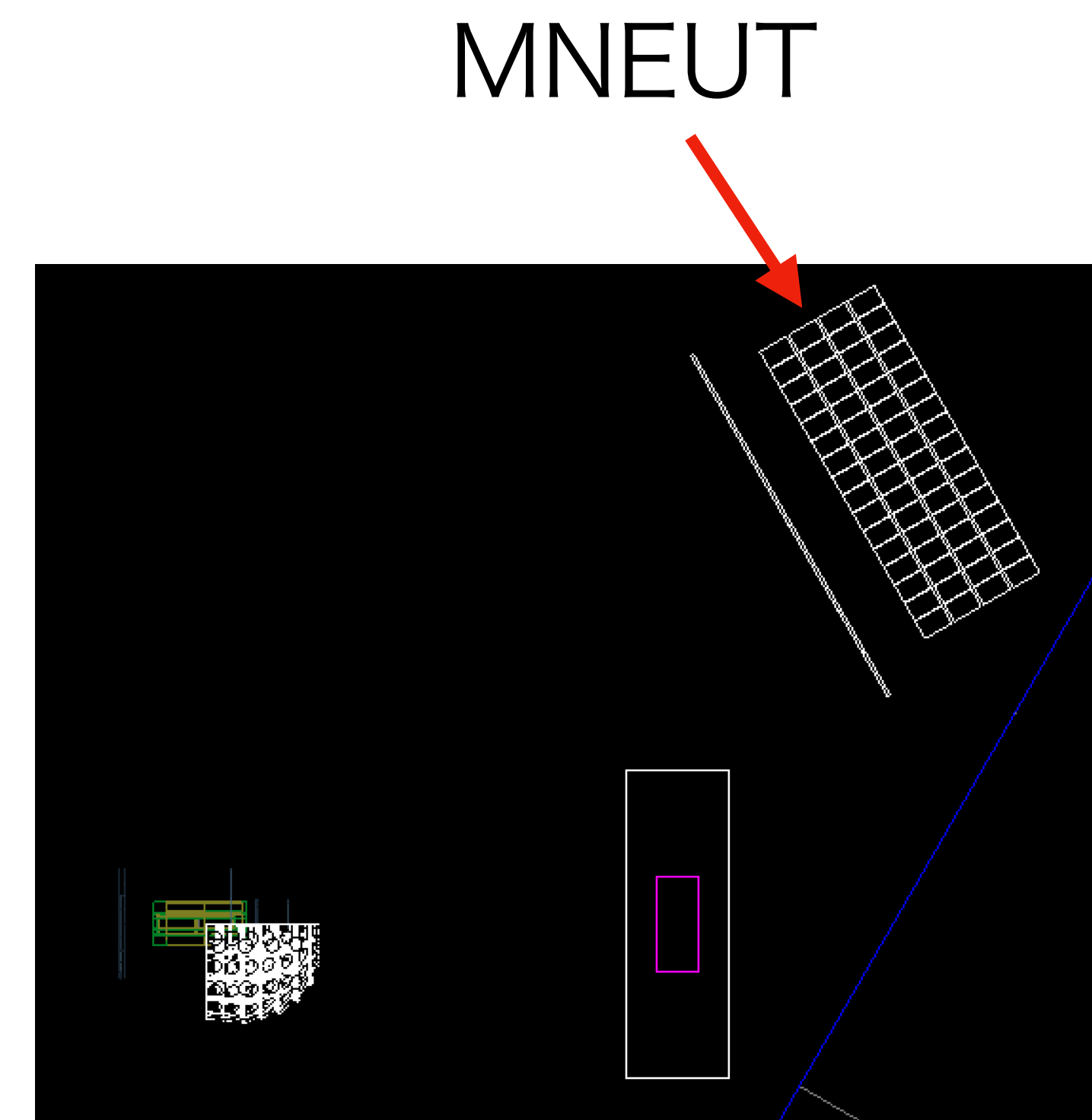
- 中性子を検出するため、CATANA検出器を半分にする。



$^{15}\text{N}$ のときのCATANA



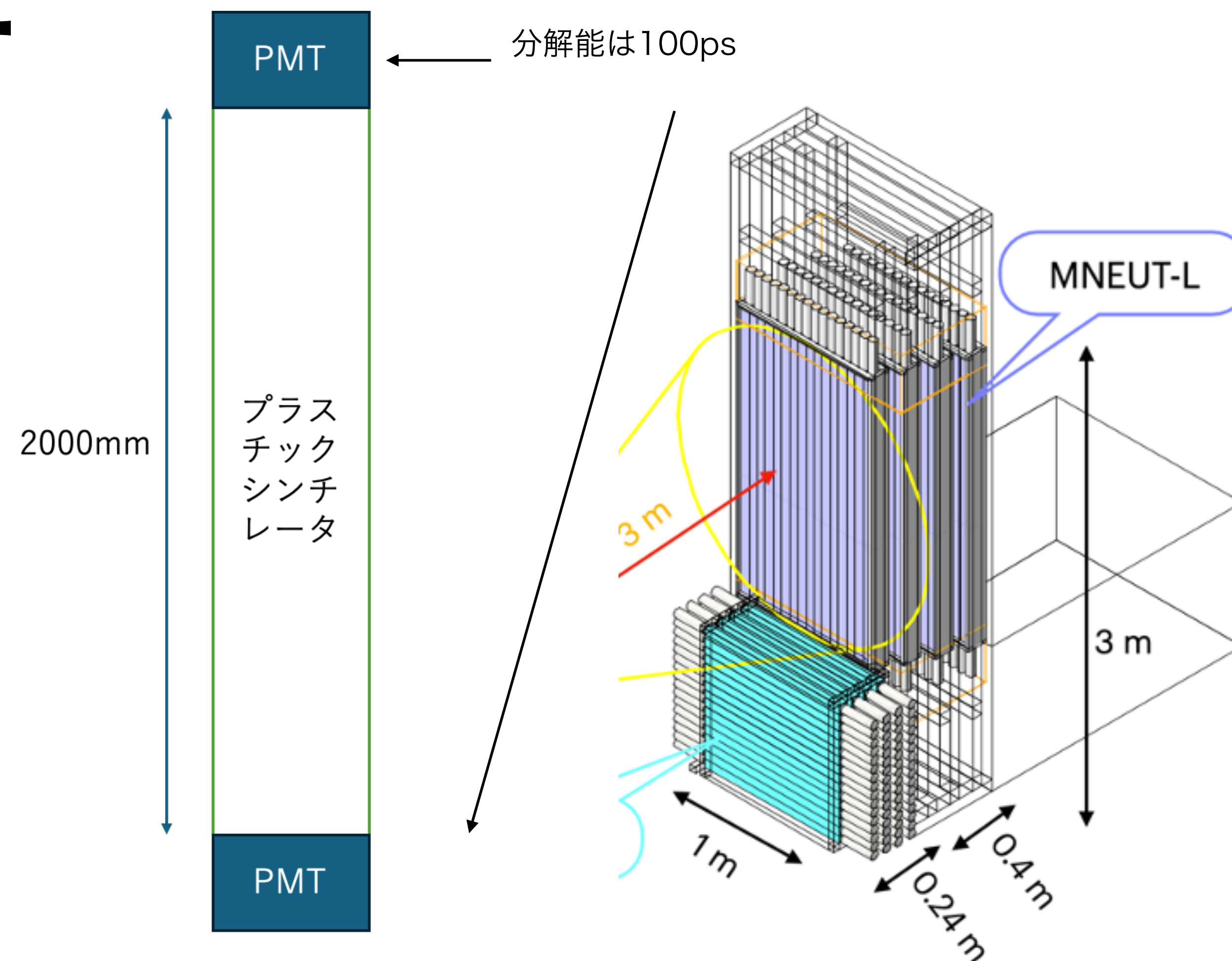
$^{15}\text{O}$ のときのCATANA



$^{15}\text{O}$ のときの全体像

# 中性子検出器 MNEUT

- 新たに導入される中性子検出器
- 64本のシンチレータの集合体
- TOFでエネルギーを求める



1本のシンチレータの大きさ  
65 × 2000 × 100 (mm)



# シミュレーションの目的

- $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーの再構成精度を知る
- 中性子検出器の配置や形状を決定
- $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーの再構成精度の向上

# 中性子検出器の検出効率と エネルギー分解能

# 中性子のエネルギーの求め方

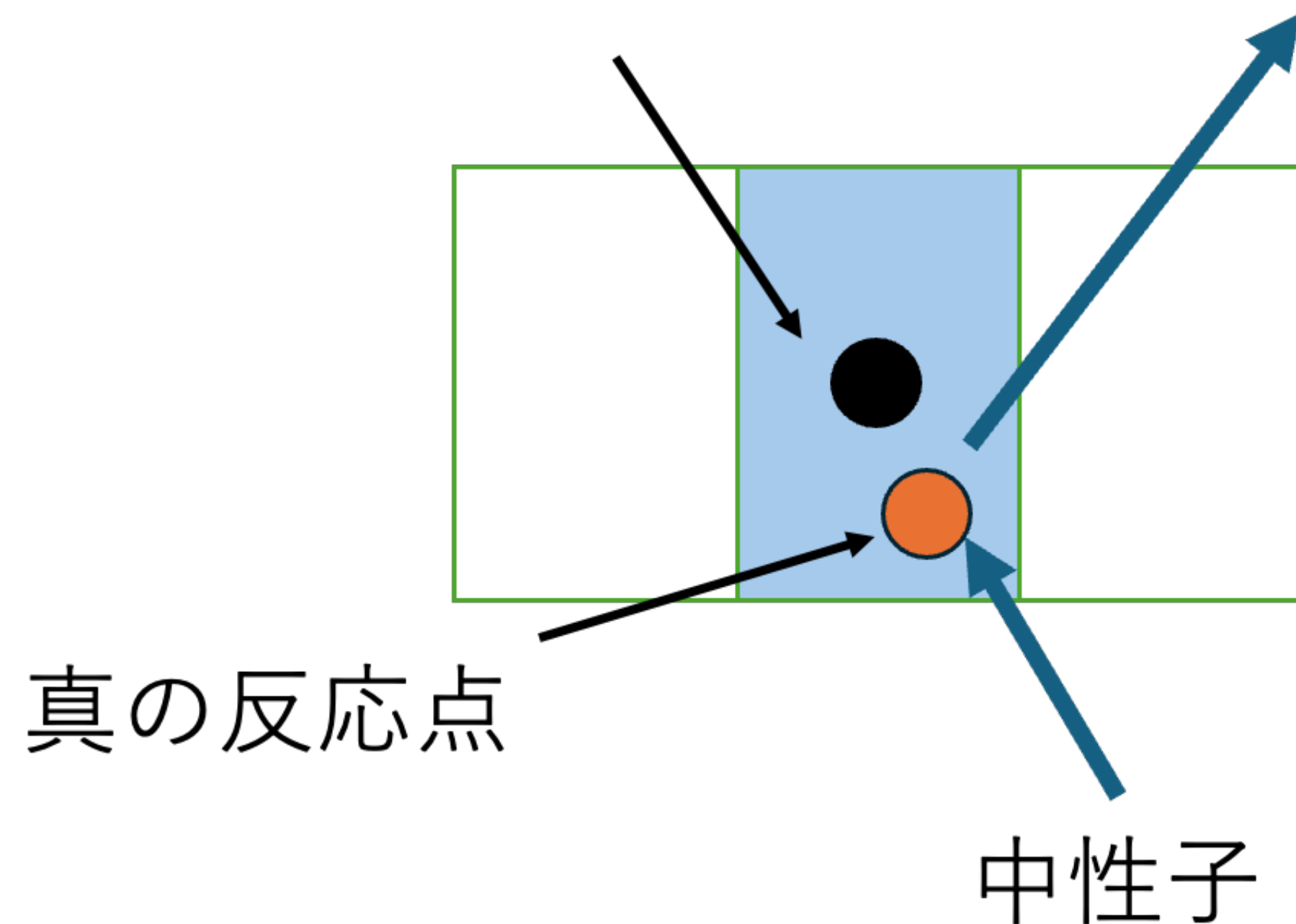
- Time-of-Flight 法：移動時間と移動距離からエネルギーを計算。  
始点と終点の位置と時間の情報が必要。

- ノックアウト中性子の場合  $^{16}\text{O} + p \rightarrow ^{15}\text{O}^* + n + p$   
始点：中性子が生成した点：陽子の情報から再構成 -> p.17  
終点：MNEUT内部で反応した点：シンチレータの情報から再構成
- MNEUT内部で反応した場所、時間の再構成精度 & 中性子のエネルギーの再構成への影響を調べた。

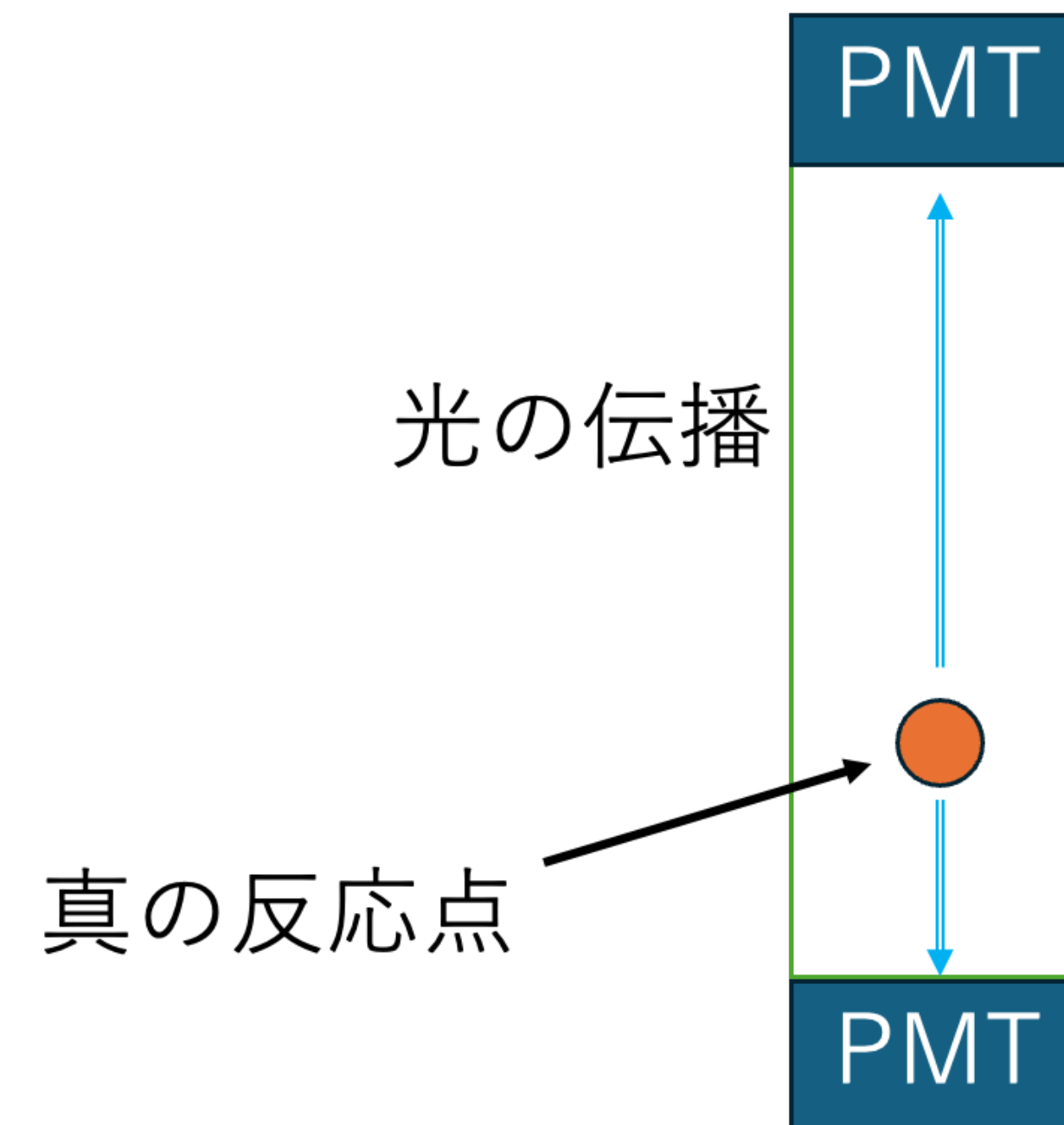
# MNEUTでの反応点再構成における誤差の原因

- シンチレータの大きさによるもの
  - 水平方向の座標：反応したシンチレータの中心を中性子の反応した座標と仮定

反応したシンチレータの中心

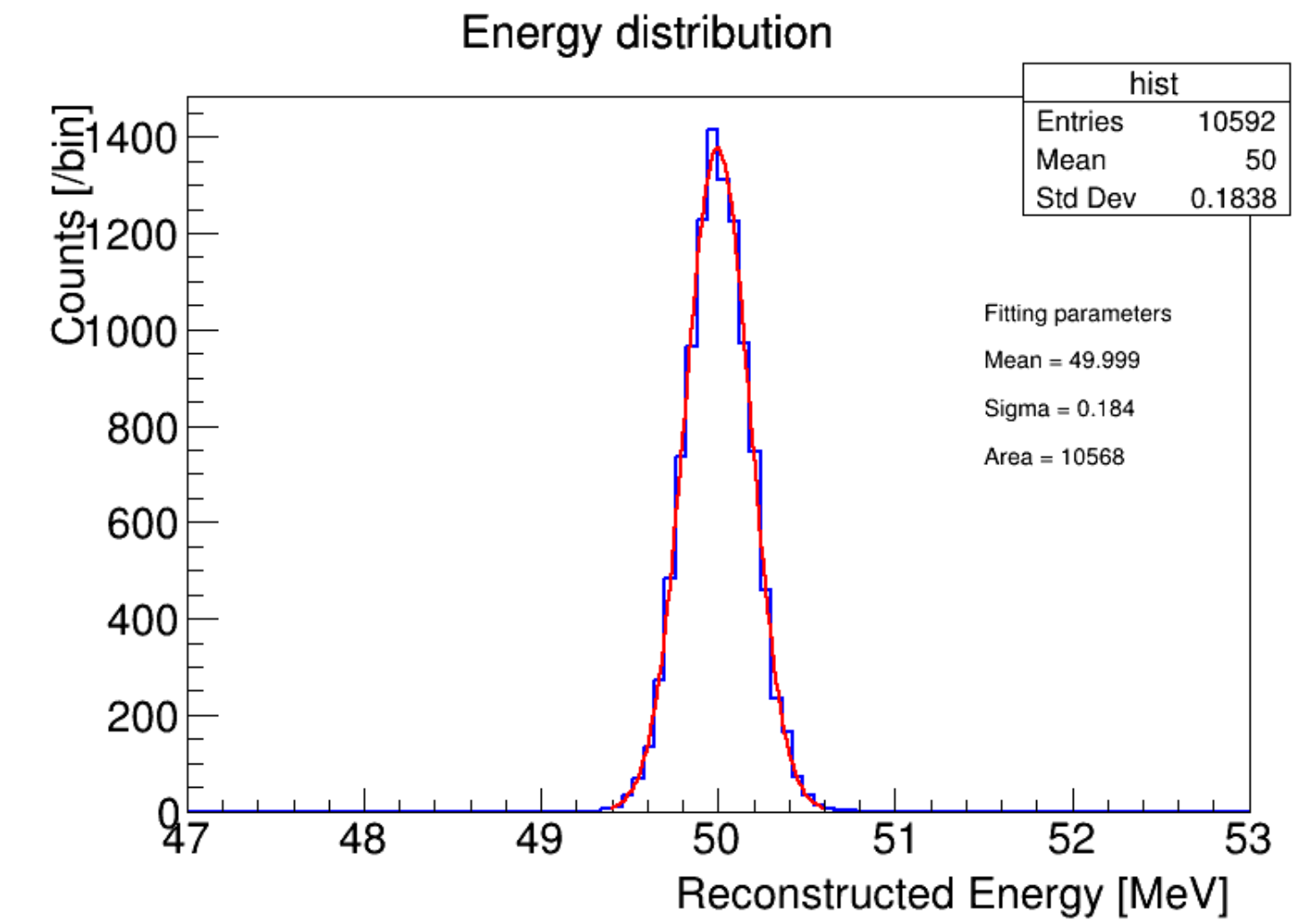


- PMTの時間分解能によるもの
  - 鉛直方向の座標：上下のPMTで信号を捉えた時間差から再構成
  - 時刻：上下PMTで反応した時刻から再構成



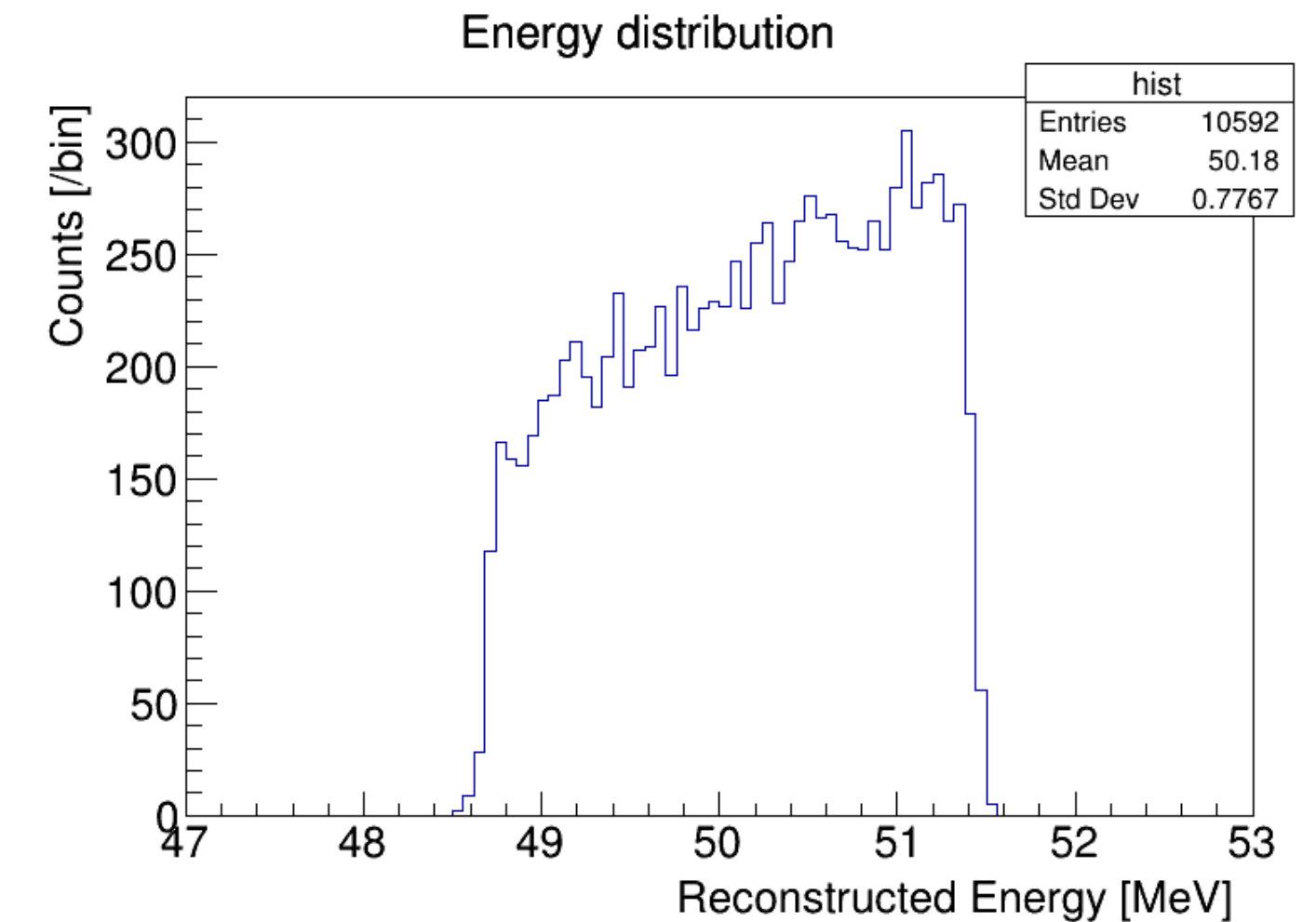
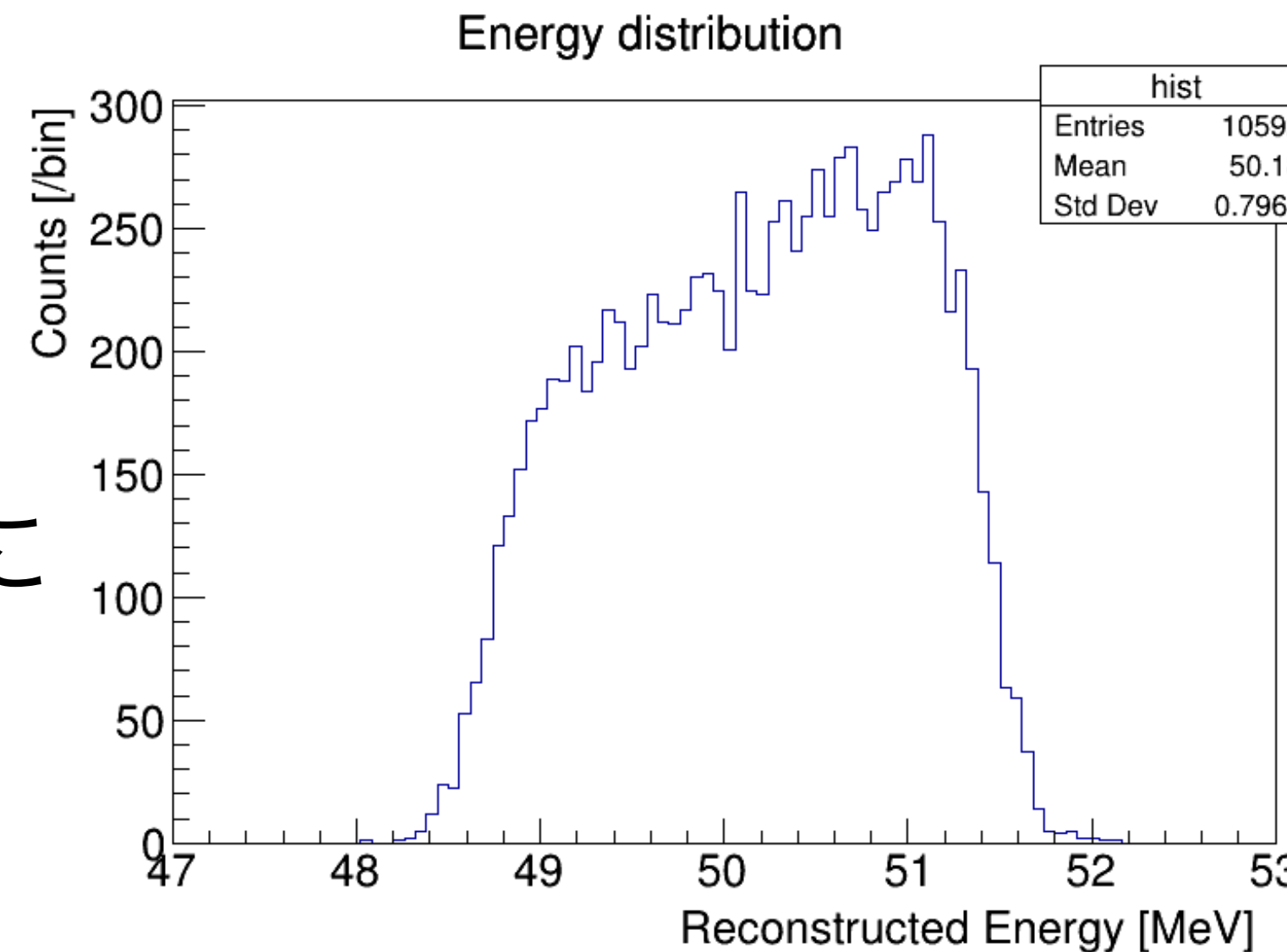
# 中性子のエネルギーの再構成精度

- 中性子の設定  
エネルギー：固定  
発射位置：固定  
発射角度：ランダム  
中性子ができた点は正確に分かるものとした。



PMTの時間分解能による誤差

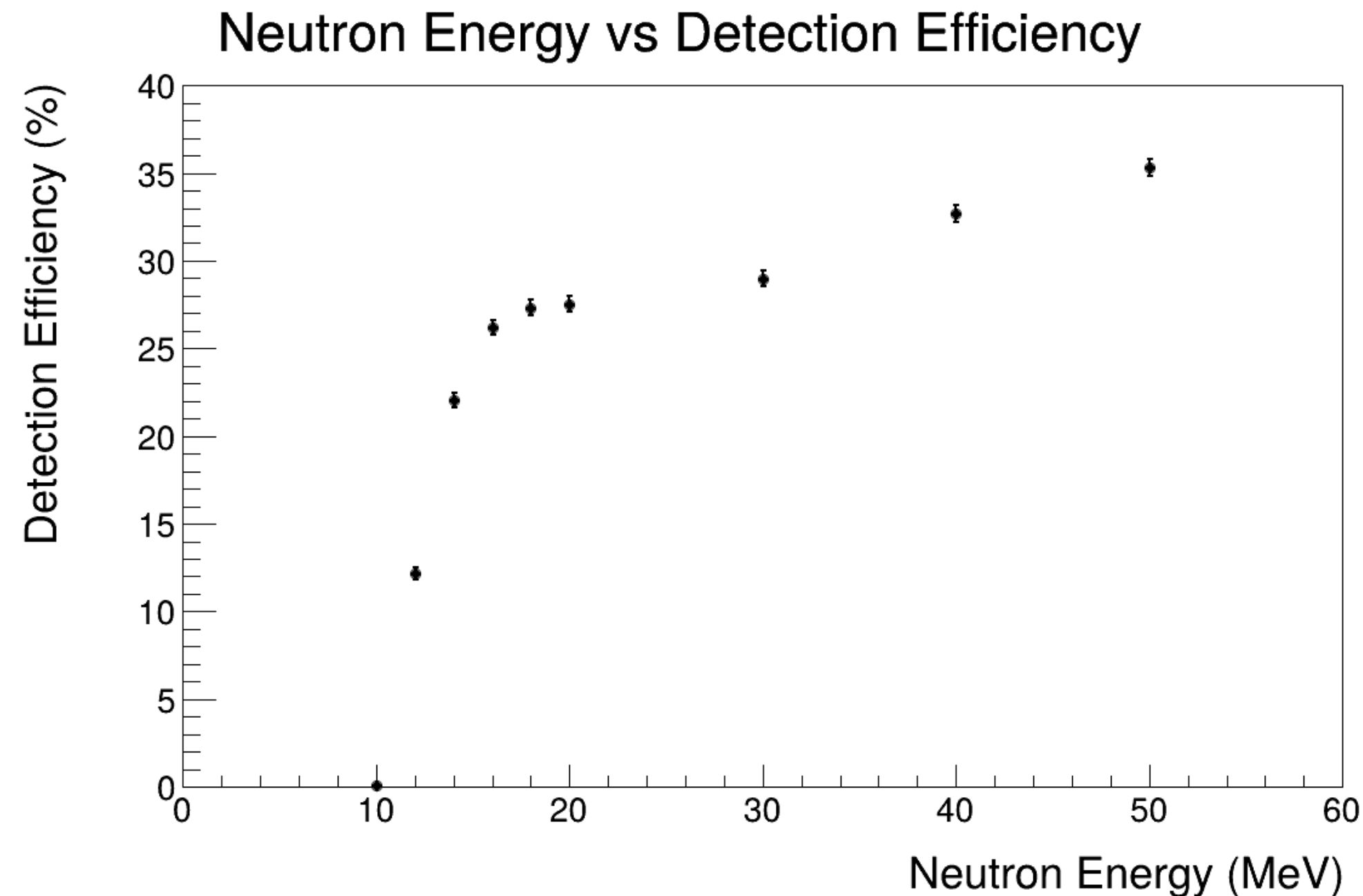
- エネルギー分解能(FWHM)  
~3MeV @50MeV
- シンチレータの大きさが主に影響。



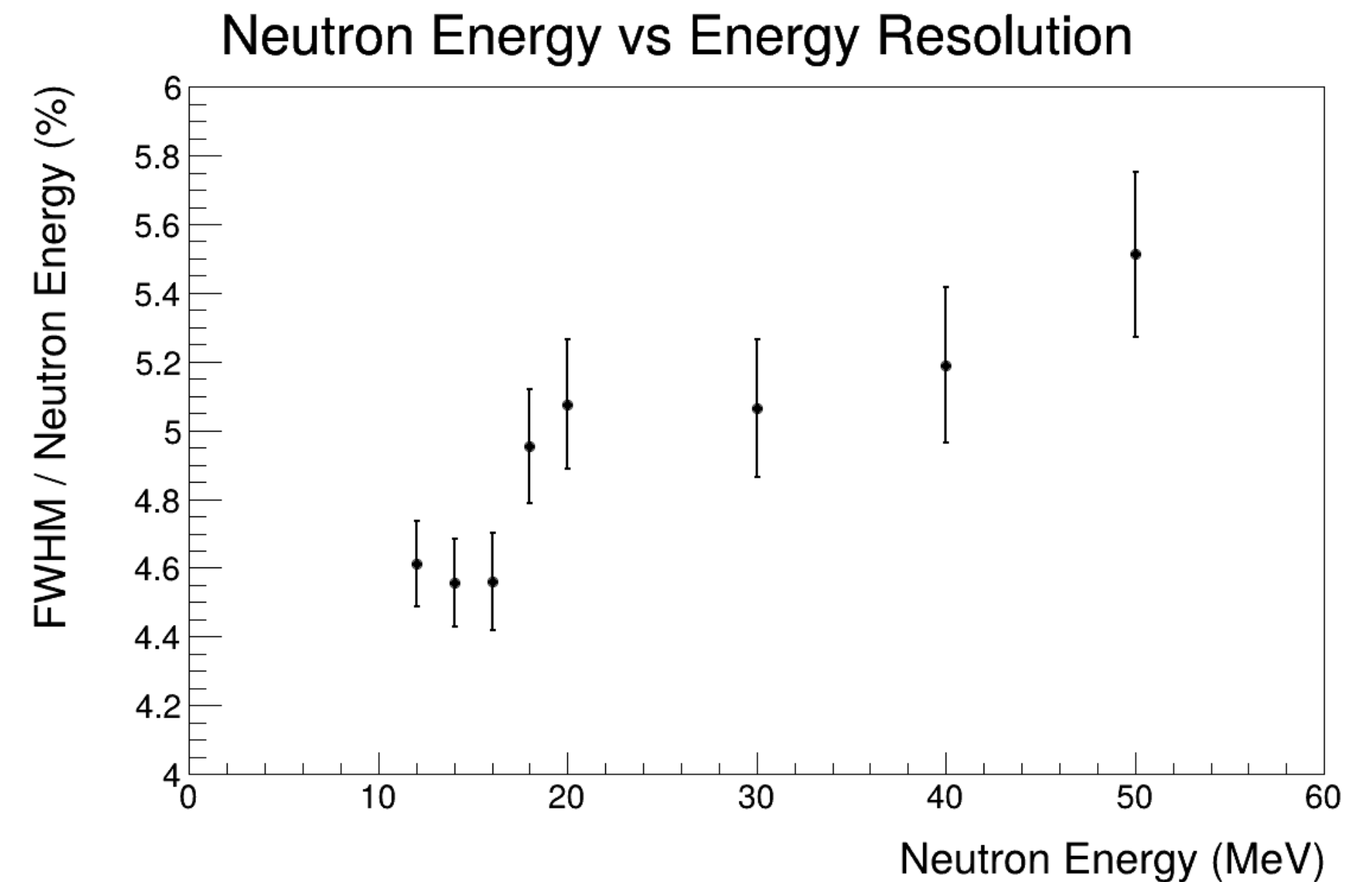
再構成されたエネルギー シンチレータの大きさによる誤差

# 中性子のエネルギーと検出効率、分解能

- 検出効率
  - < 10MeV : ほぼ検出できない
  - > 18MeV : 30 - 40%程度
- エネルギー分解能(FWHM) : エネルギーにあまり依存せずほぼ一定(4 - 6%)



中性子のエネルギーと検出効率

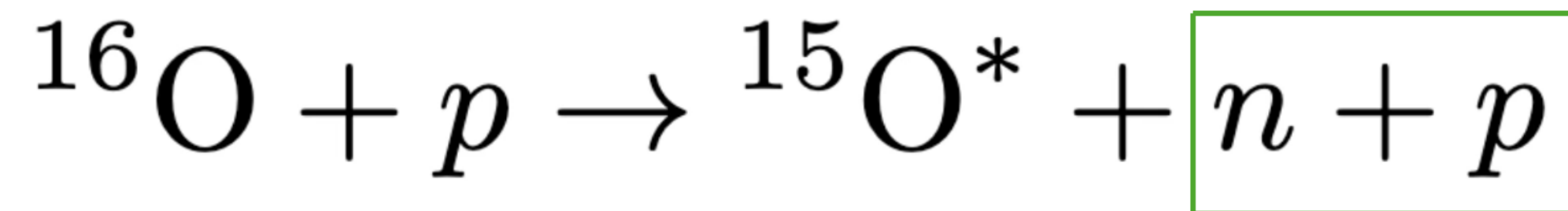


中性子のエネルギーと分解能 14

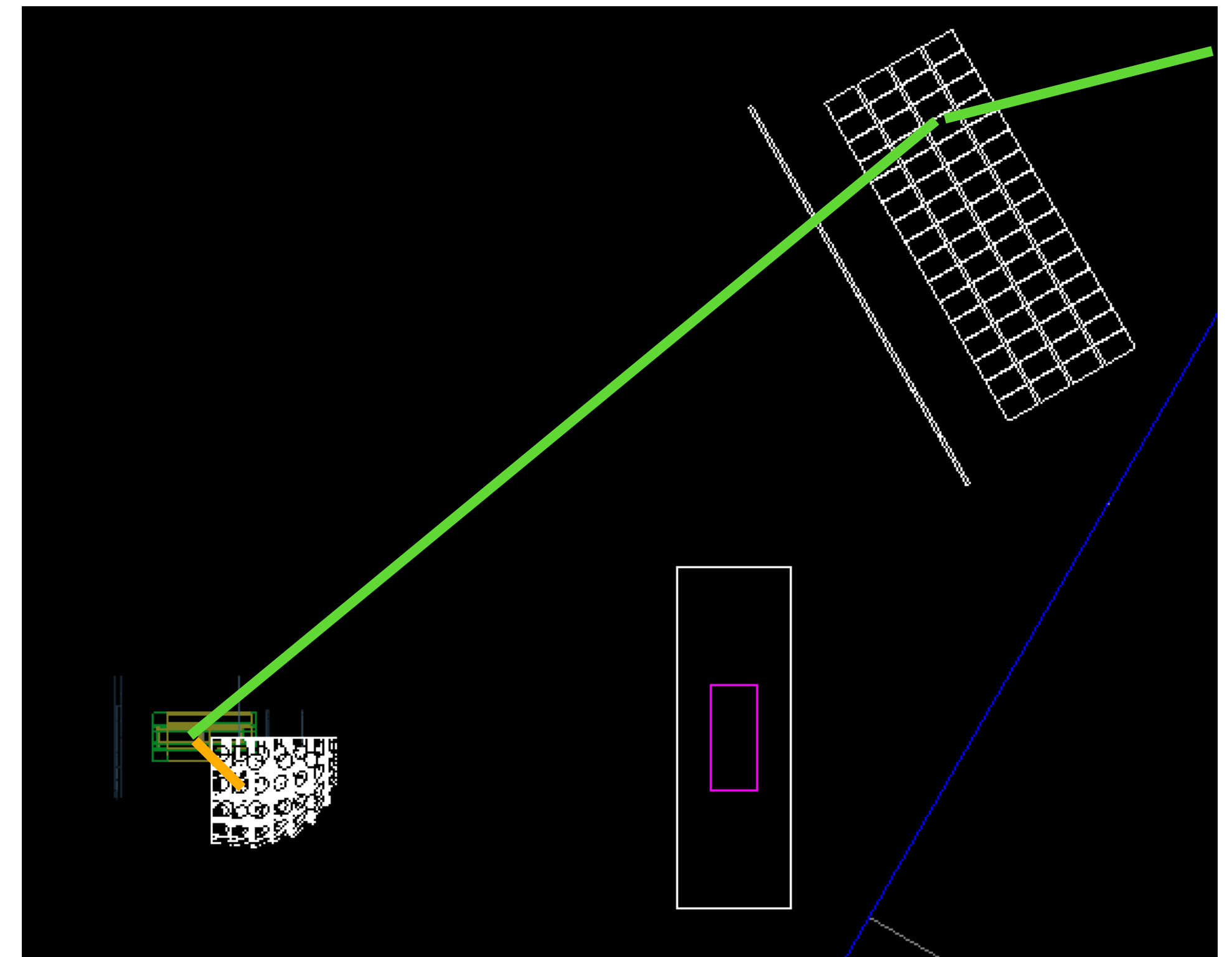
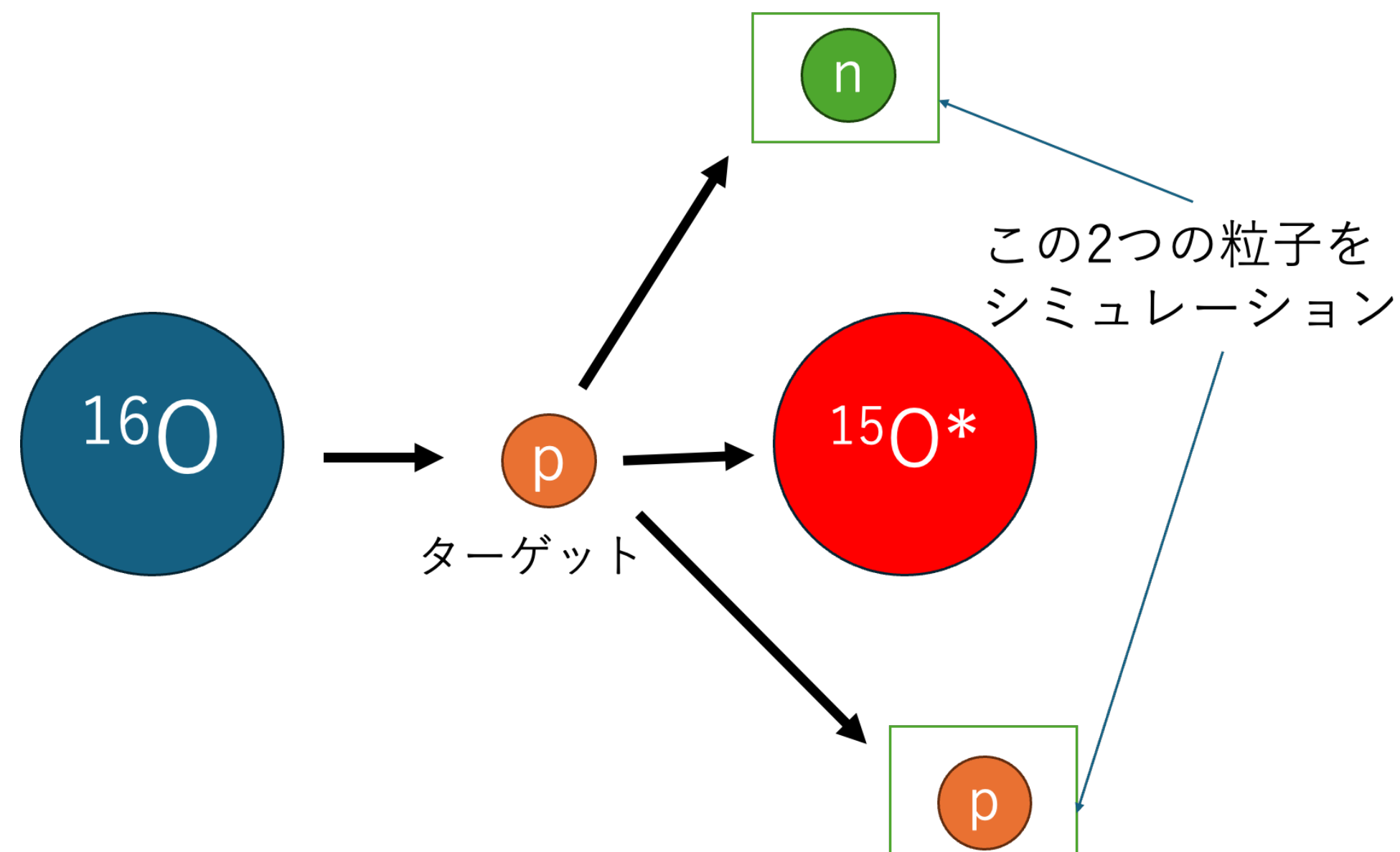
# 150の励起エネルギー再構成

# 15Oの励起エネルギー再構成のシミュレーション

- 反応後の陽子と反跳中性子をシミュレーション。



この2つの粒子



シミュレーションの例



# $^{15}\text{O}$ の励起エネルギー再構成方法

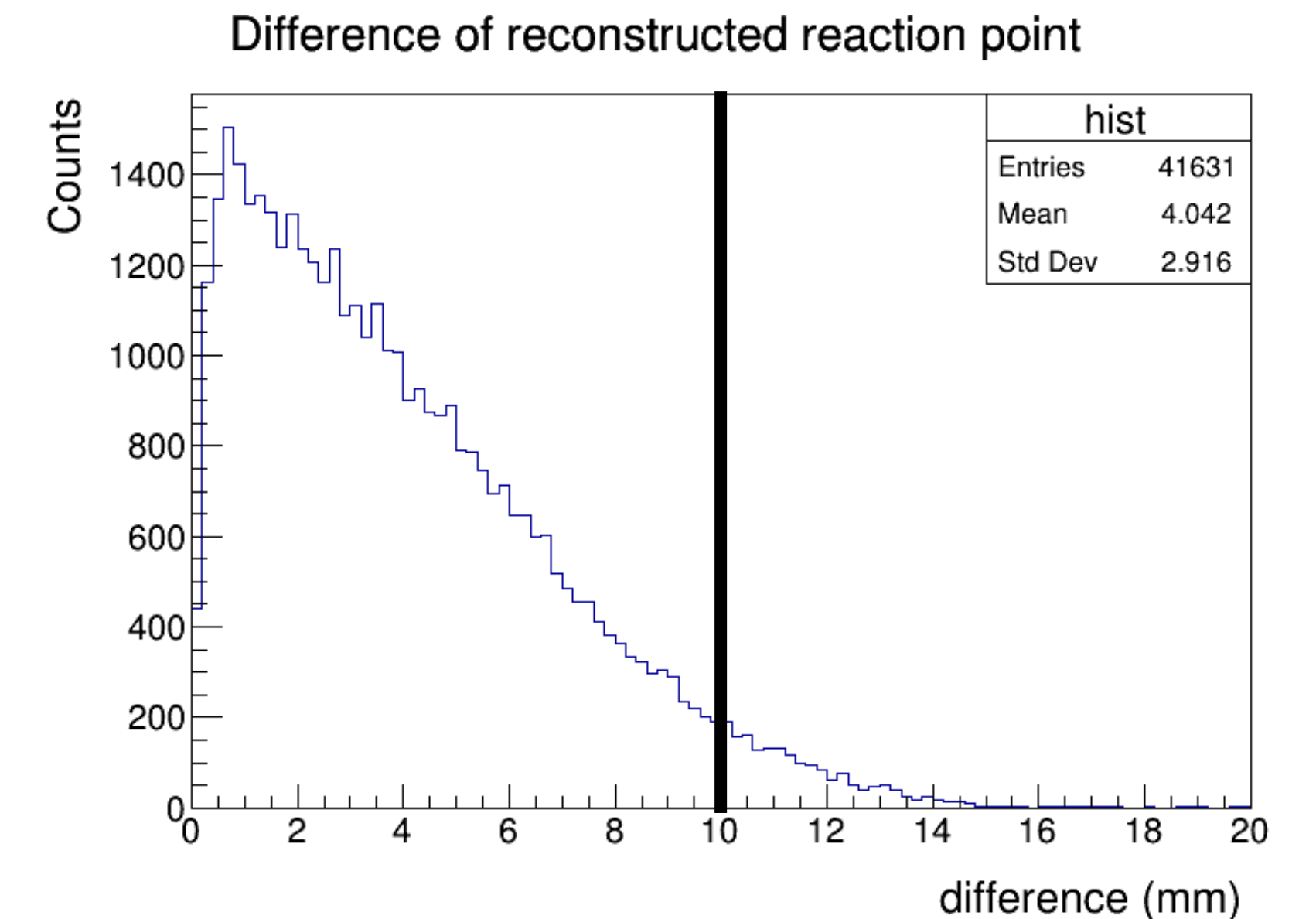
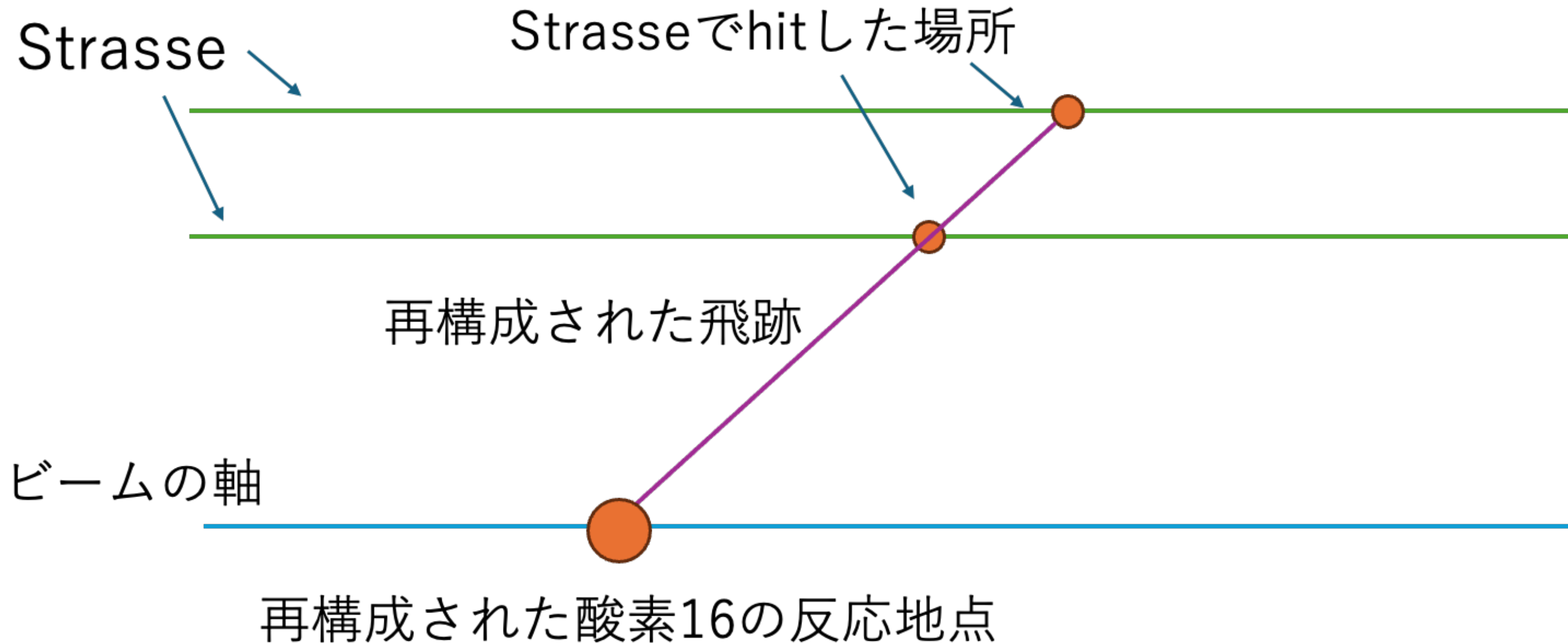
- 計算方法：4元運動量から求めた静止質量から、基底状態の質量を引く。

$$E_{\text{Ex}} = \sqrt{(p^{16\text{O}} + p_{\text{target}} - p_p - p_n)^2 - m_{15\text{O}}^2}$$

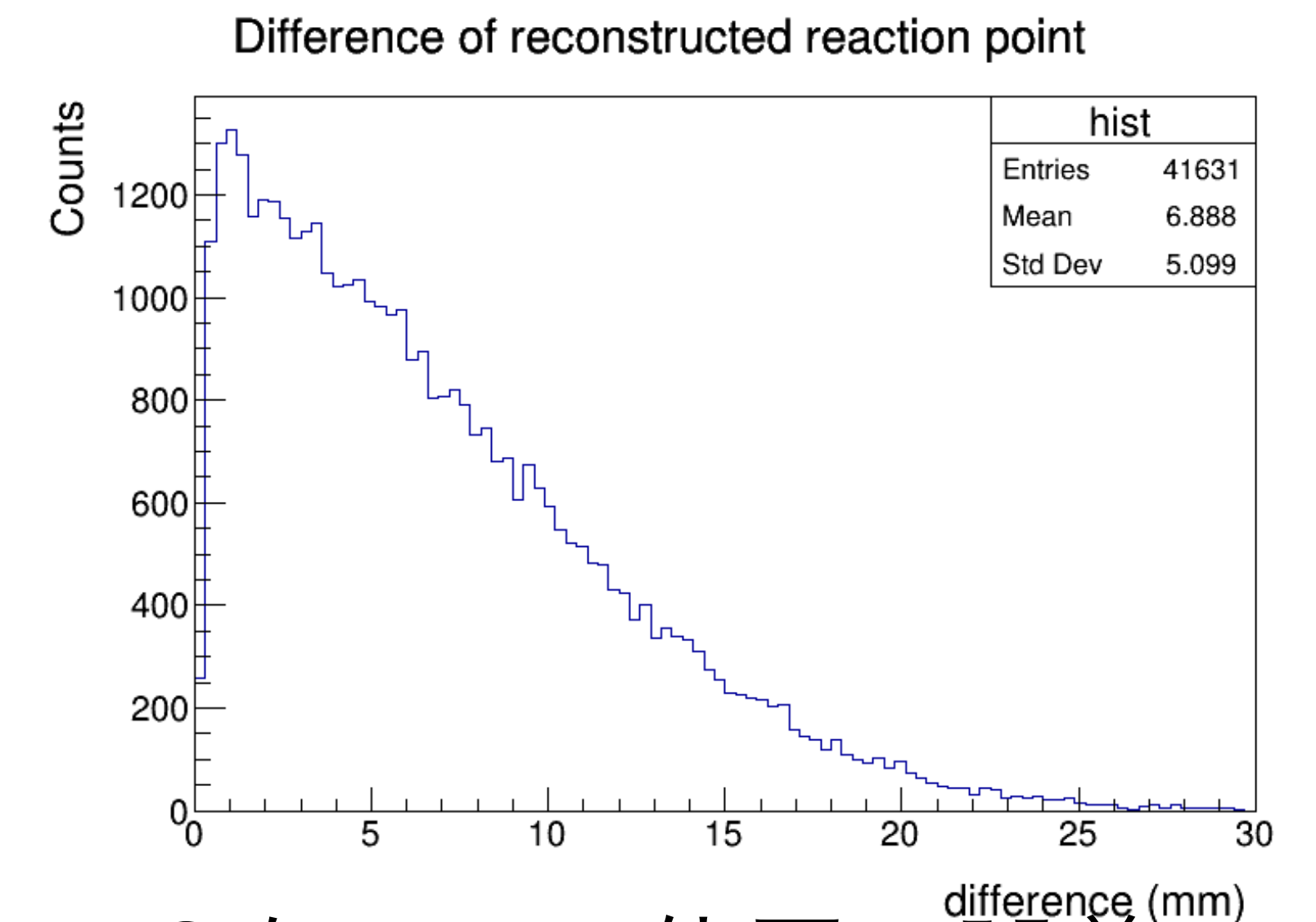
- $^{16}\text{O}$ の運動量：再構成された $^{16}\text{O}$ の反応点
- 陽子の運動量：StrasseとCATANAの情報
- 中性子の運動量：再構成された $^{16}\text{O}$ の反応点と、MNEUTの情報  
始点 終点

# 16Oの反応点の再構成

- 16Oの反応点：ビーム軸と陽子の飛跡から求める。  
飛跡を延長し、最もビーム軸に近くなる点。
- ビームの幅：< 10mm  
誤差は概ねビームの幅に収まっている。



ビーム軸に垂直な面での位置の誤差



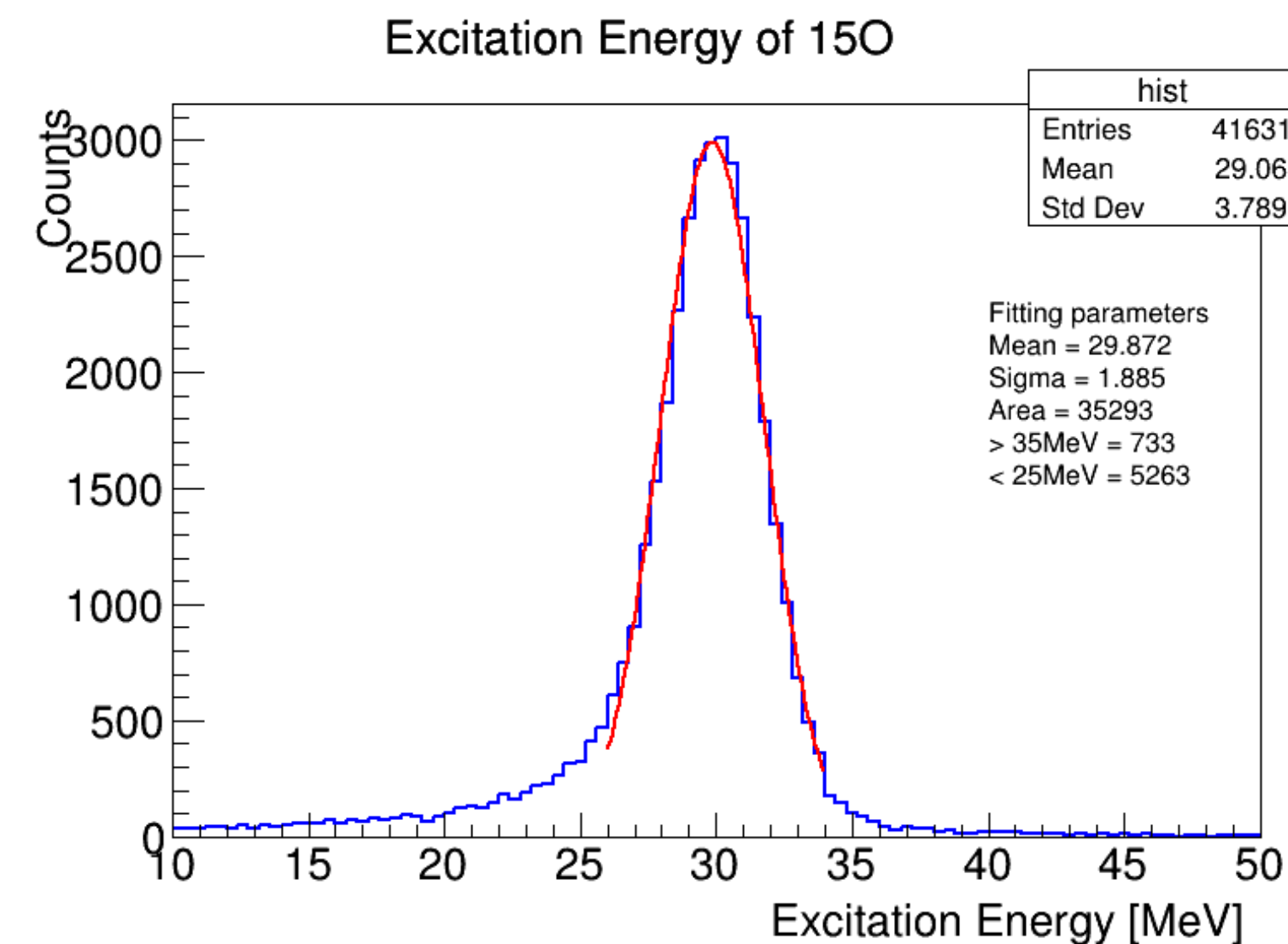
3次元での位置の誤差 18

# $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーの再構成結果

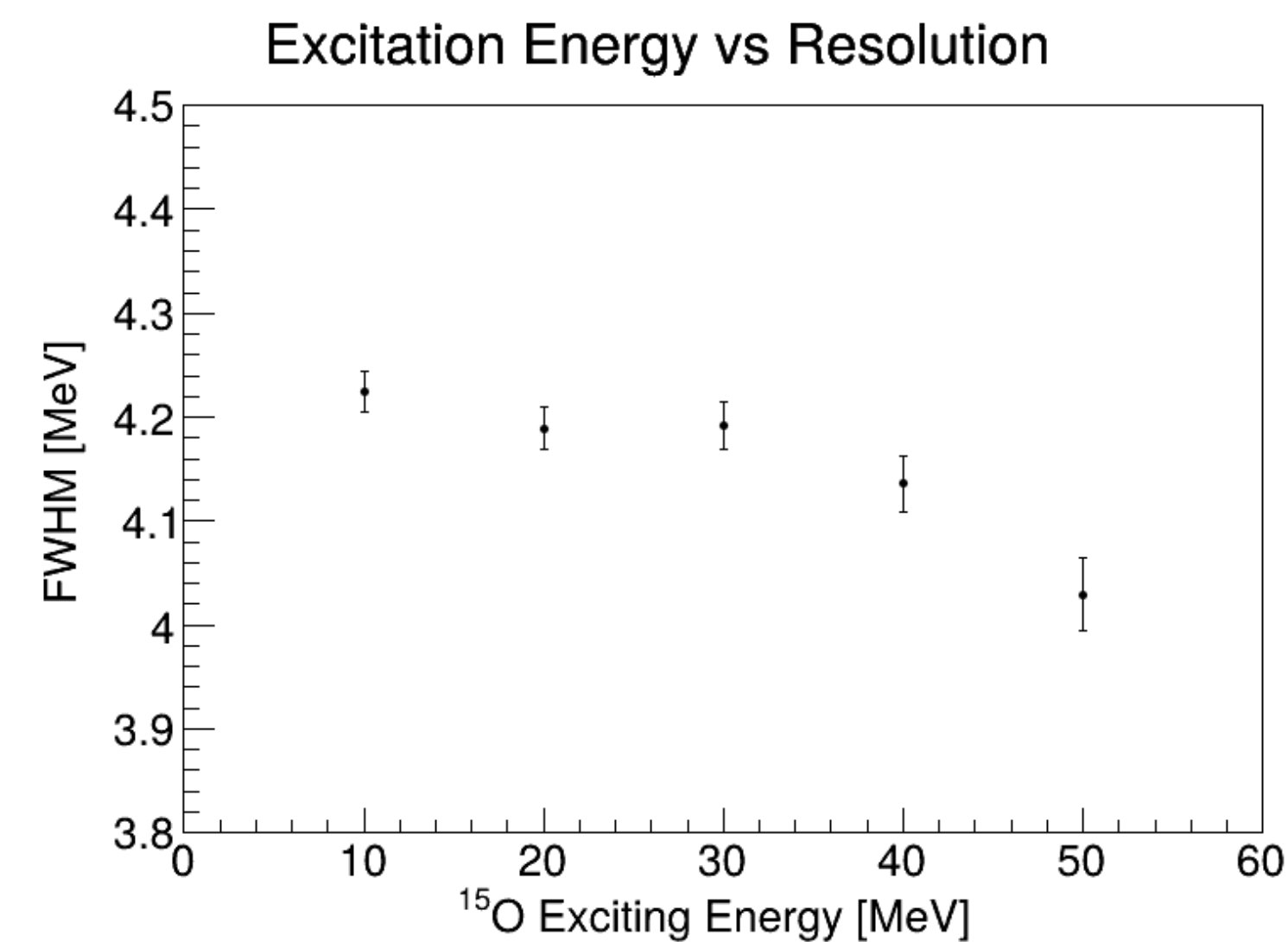
- 計算式：
$$E_{\text{Ex}} = \sqrt{(p_{^{16}\text{O}} + p_{\text{target}} - p_p - p_n)^2 - m_{^{15}\text{O}}}$$
- 励起エネルギー30MeVのとき  
FWHM：4.2MeV (14%)  
平均値：29.8MeV

エネルギーを変えてシミュレーション

- エネルギー分解能：励起エネルギーにかかわらず  
ほぼ一定(FWHM：4.2 MeV程度)



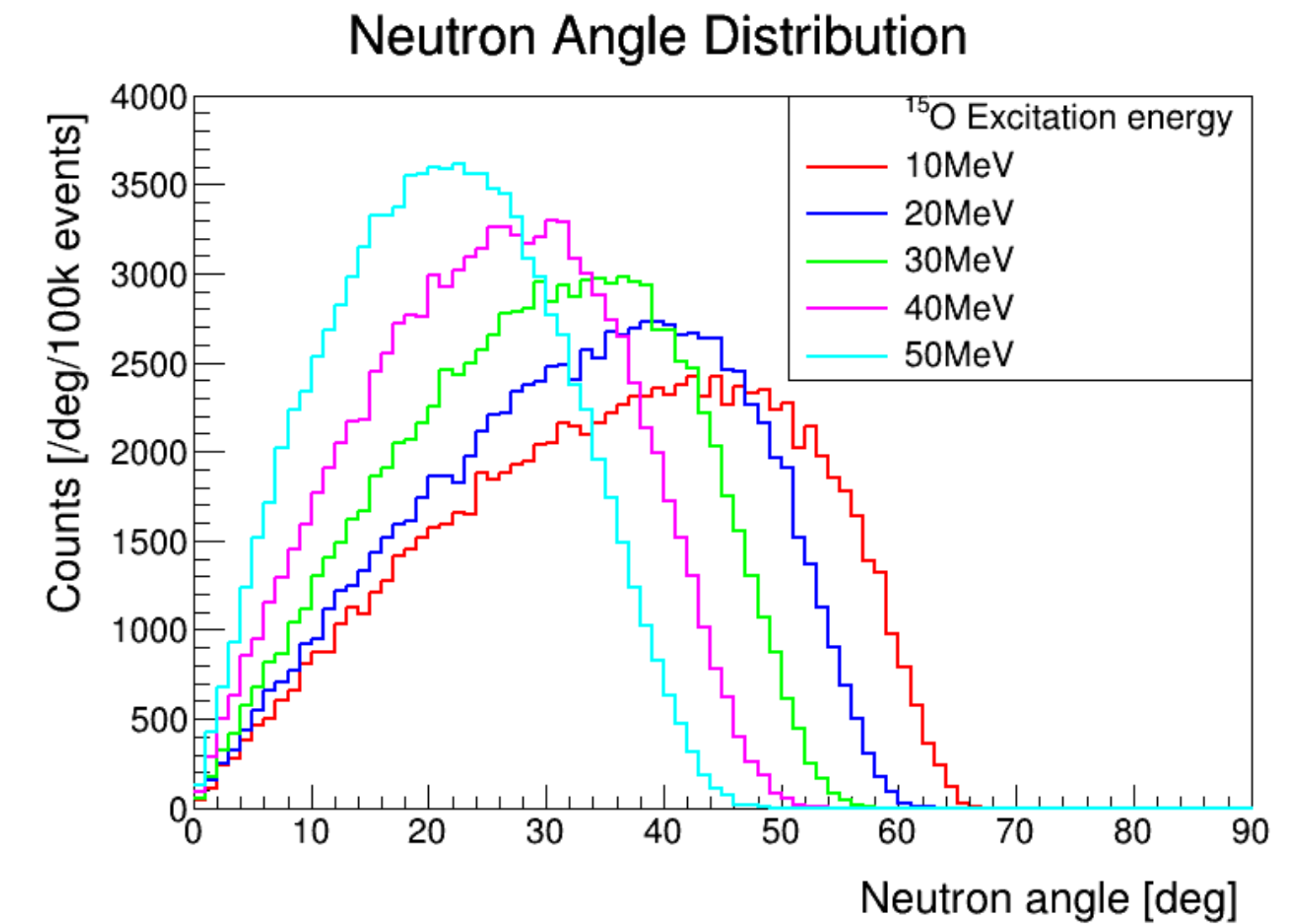
再構成された $^{15}\text{O}$ の励起エネルギー



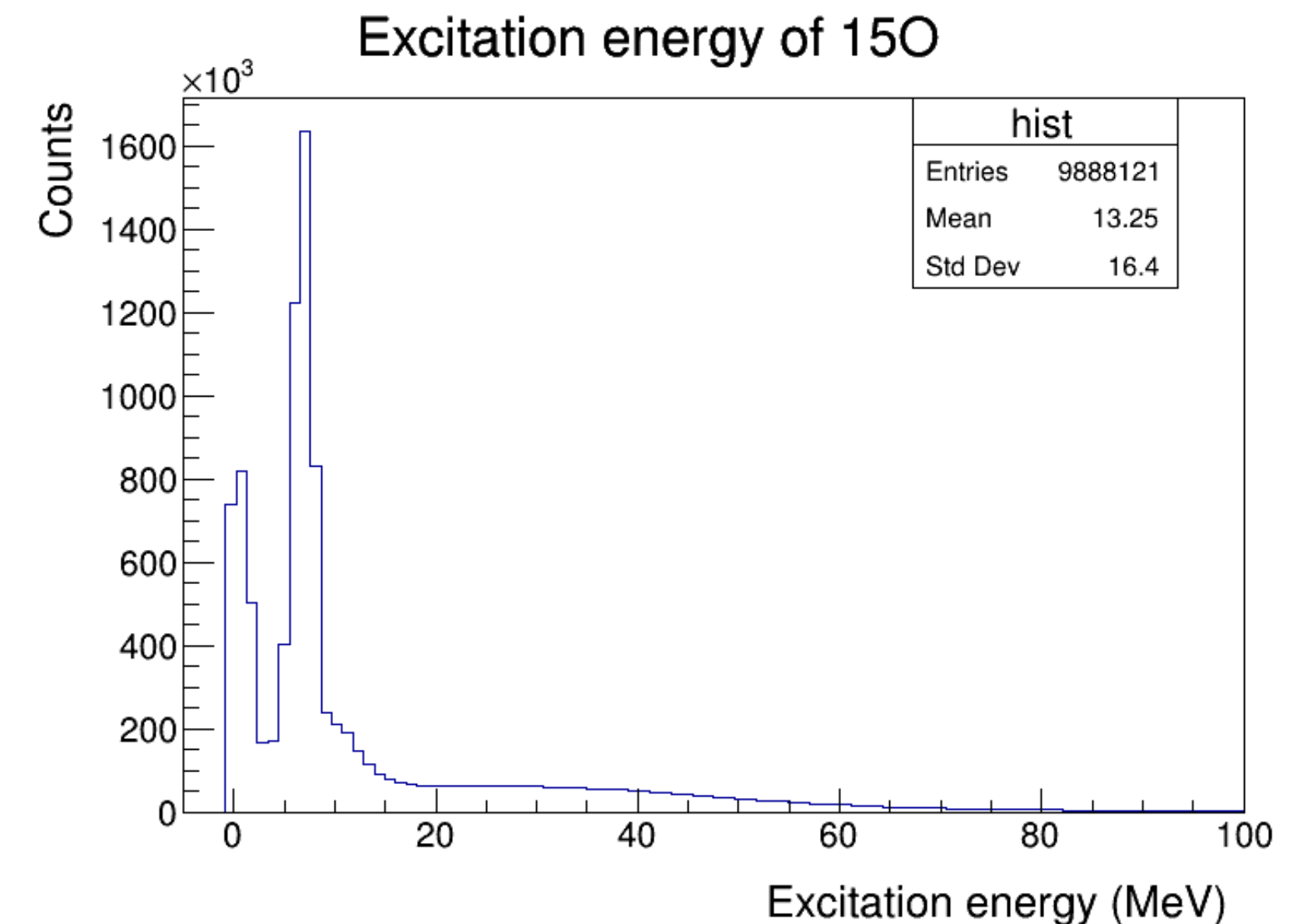
励起エネルギー vs 分解能<sup>19</sup>

# MNEUTの配置と検出効率

- 今後：MNEUTの配置を決定
  - 検出効率
  - エネルギー分解能
  - その他の制限
- 検出効率に関わる要素
  - 中性子のエネルギー、角度分布の励起エネルギー依存性
  - 中性子検出効率のエネルギー依存性
  - 生成する $^{15}\text{O}$ の励起エネルギー分布
- 10-50MeVまで5MeVずつ区切って脱励起を測定
- どの領域も十分なイベント数を確保



中性子の運動方向の励起エネルギー依存性



$^{15}\text{O}$ の励起エネルギー分布

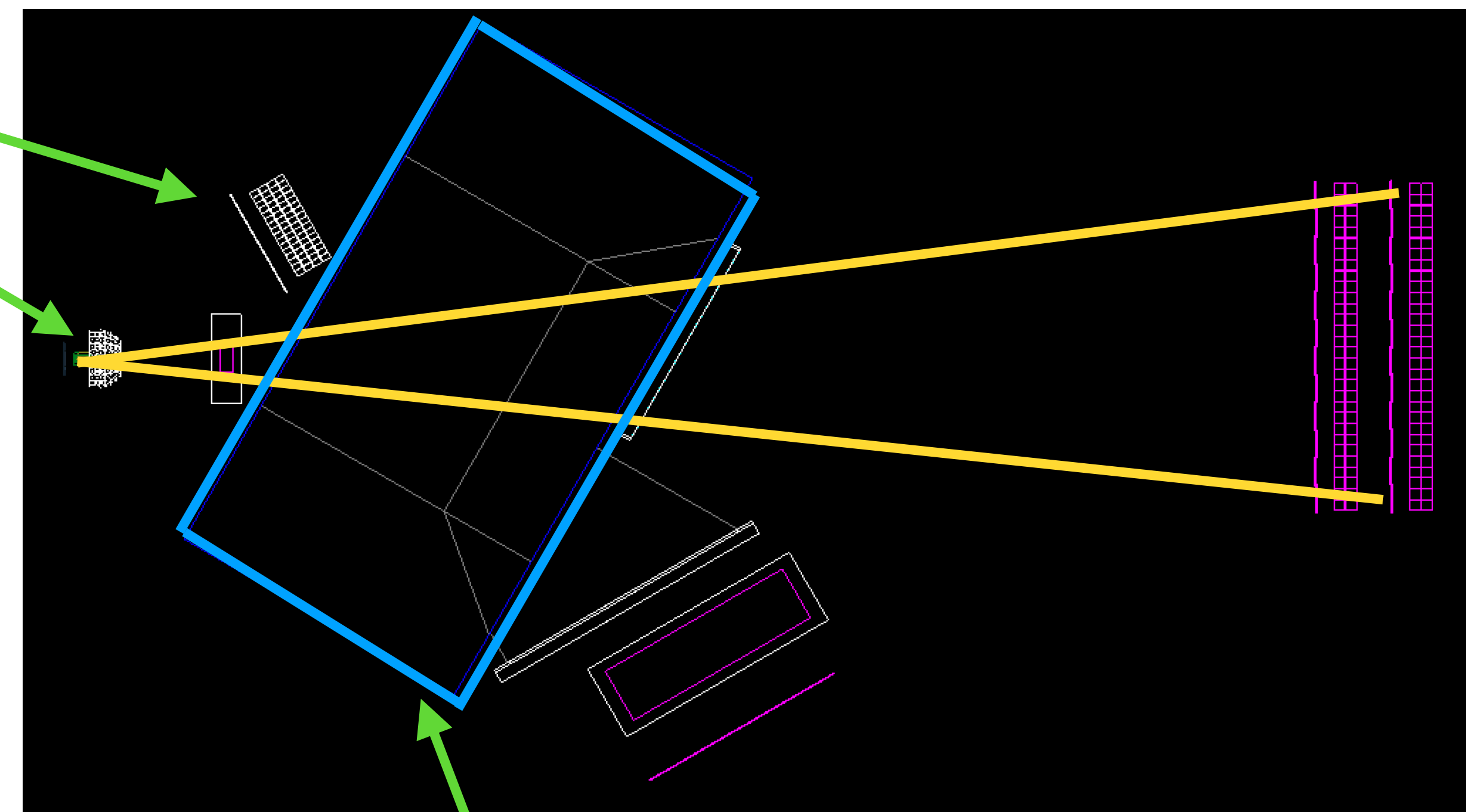
# MNEUTの配置

- 物理的な制限
  - 磁場
  - 他の検出器との干渉
- エネルギー分解能：向きに依存

黄色の線の内側：生成した原子核が通る

MNEUT

CATANA



(青枠) マグネット

- 様々な要素を考慮して最適な場所、向きを決定

# まとめ・展望

- ・ DSNBの検出には、大気ニュートリノと酸素原子核との反応の予測の精密化が必要
- ・  $^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ の脱励起を測定するSAMURAI実験を行う。
- ・  $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーの測定に中性子検出器が必要。

## 実験に向けたシミュレーションスタディ

- ・ 中性子検出器のエネルギー分解能、検出効率のシミュレーション
- ・  $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーの再構成精度、検出効率のシミュレーション

## 今後

- ・ 中性子検出器の配置の最適化
- ・ 脱励起過程の測定のためのシミュレーション

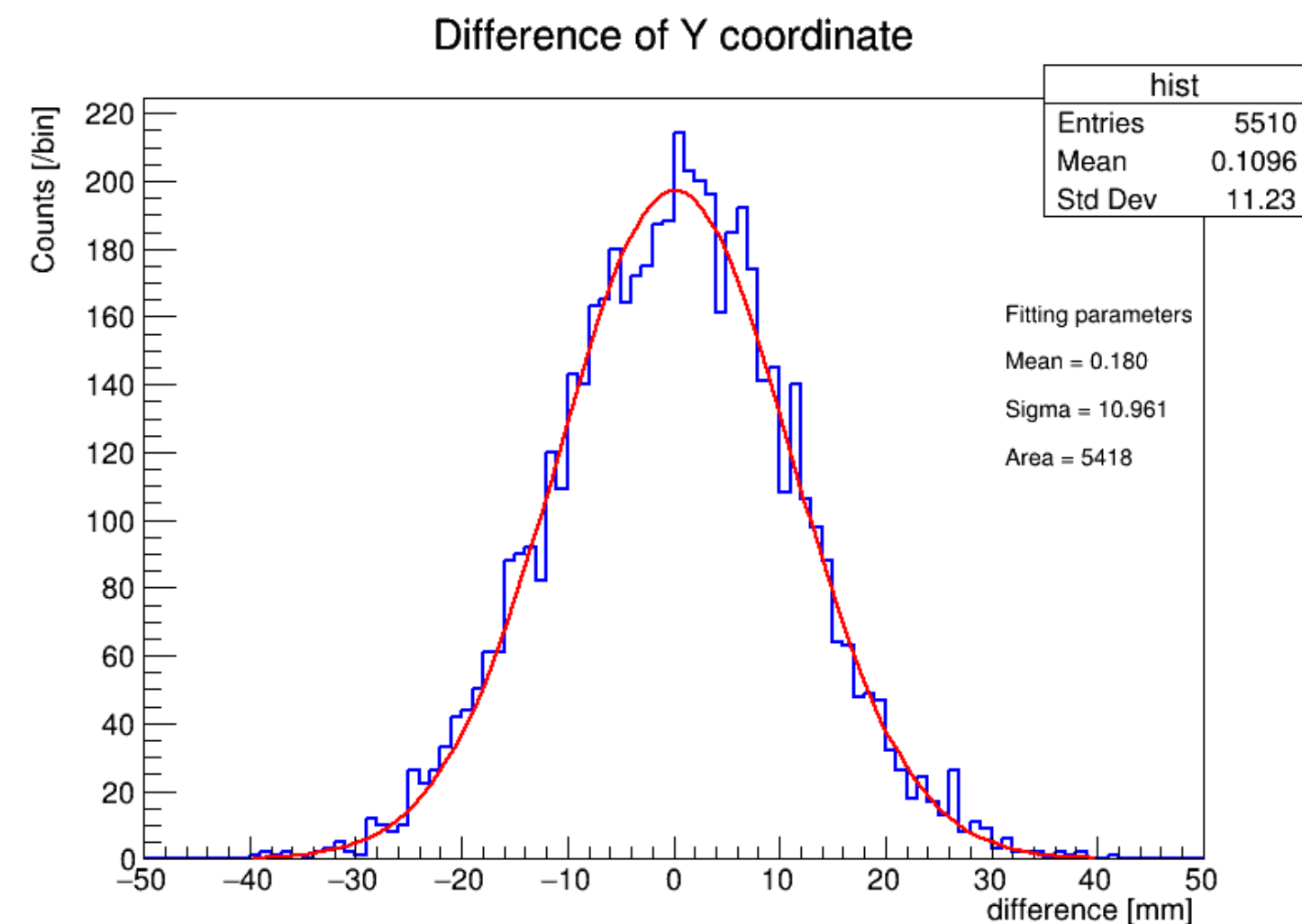
# Back up

# 中性子検出器の検出効率 エネルギー分解能

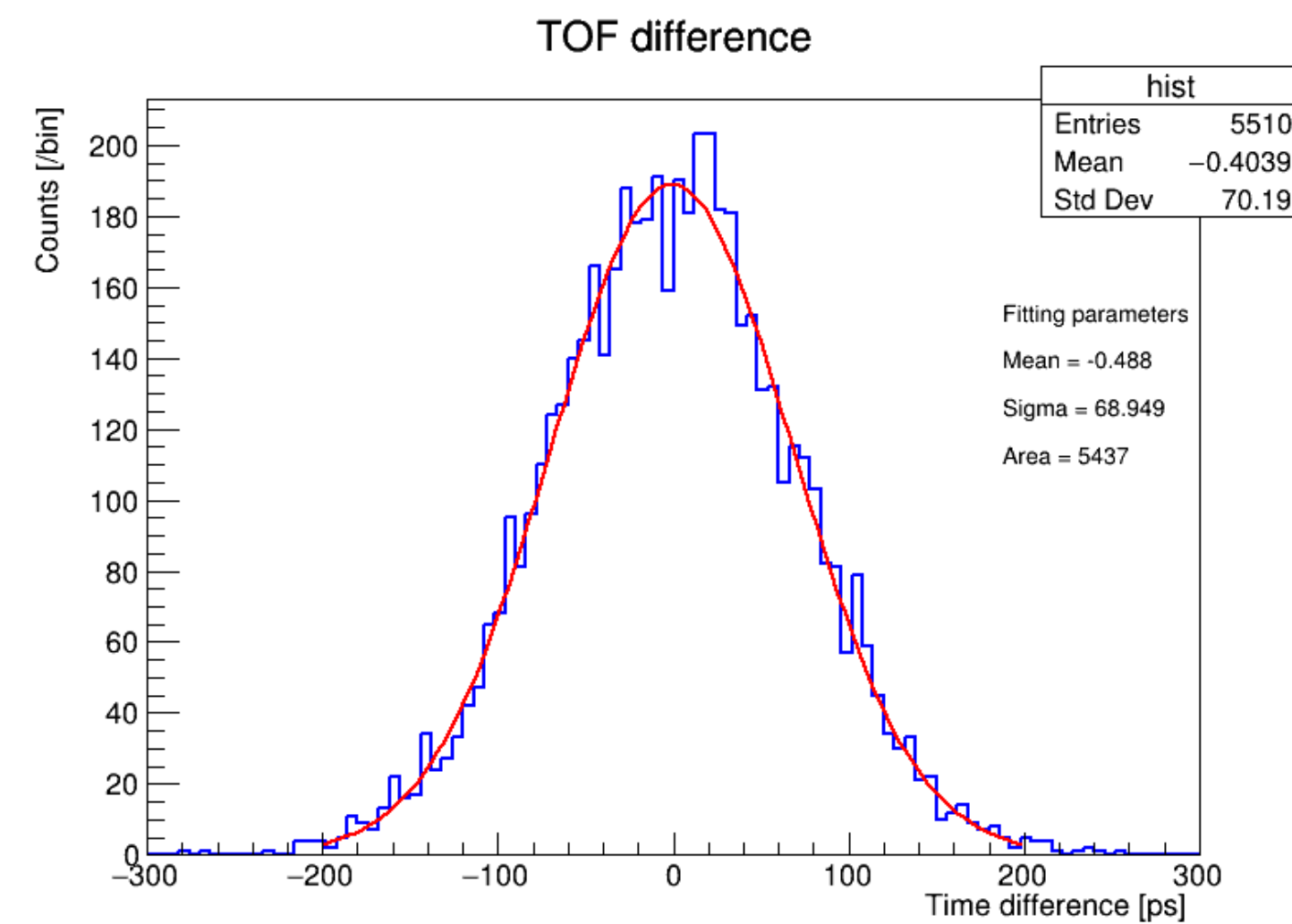


# PMTの時間分解能の位置・時間再構成への影響

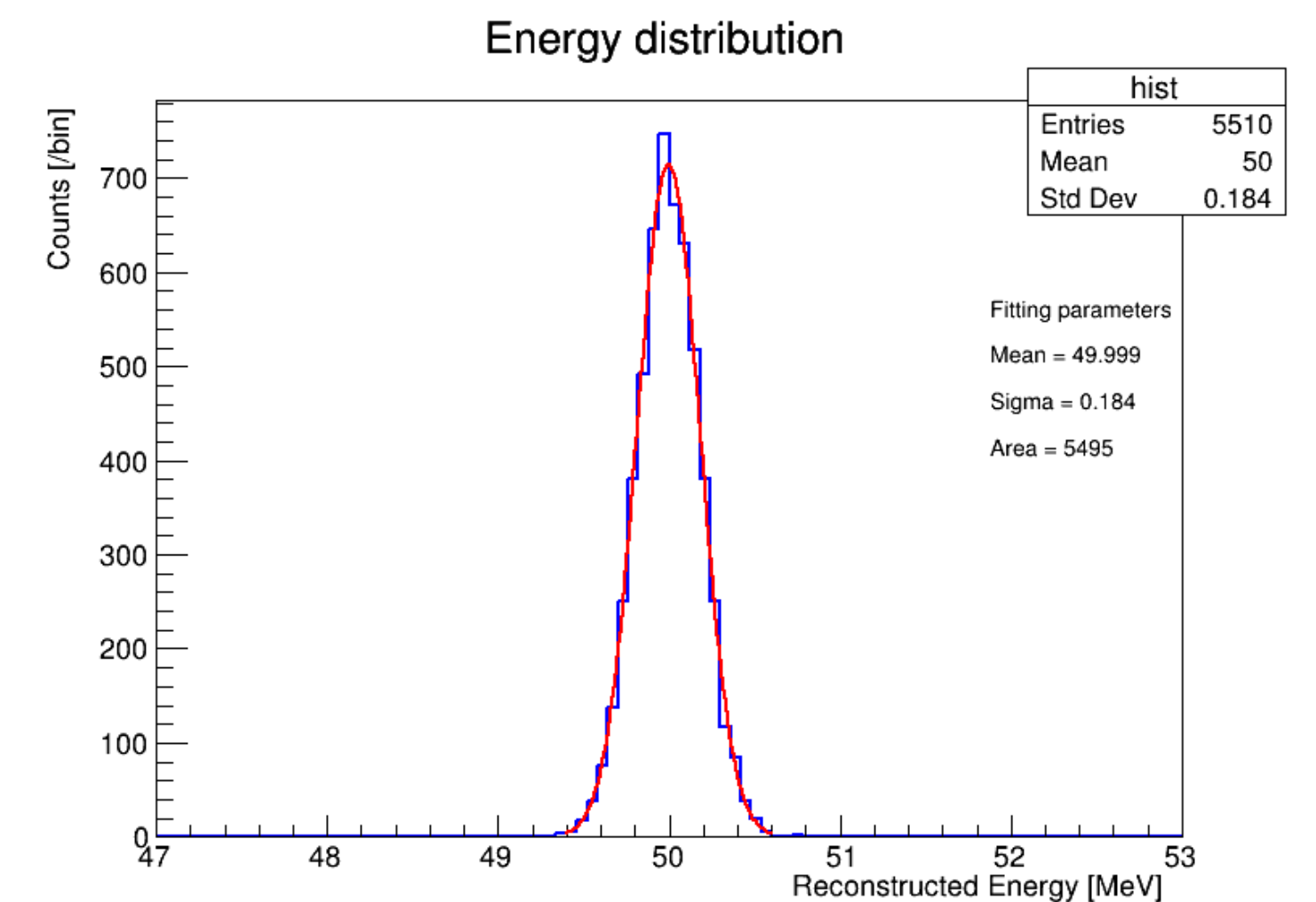
- PMTの時間分解能は100ps。
- Y座標とTOFの再構成精度はPMTの時間分解能から予想される結果に合致。
- 中性子のエネルギーのFWHMには0.4MeV程度影響。



y座標の真の値との差



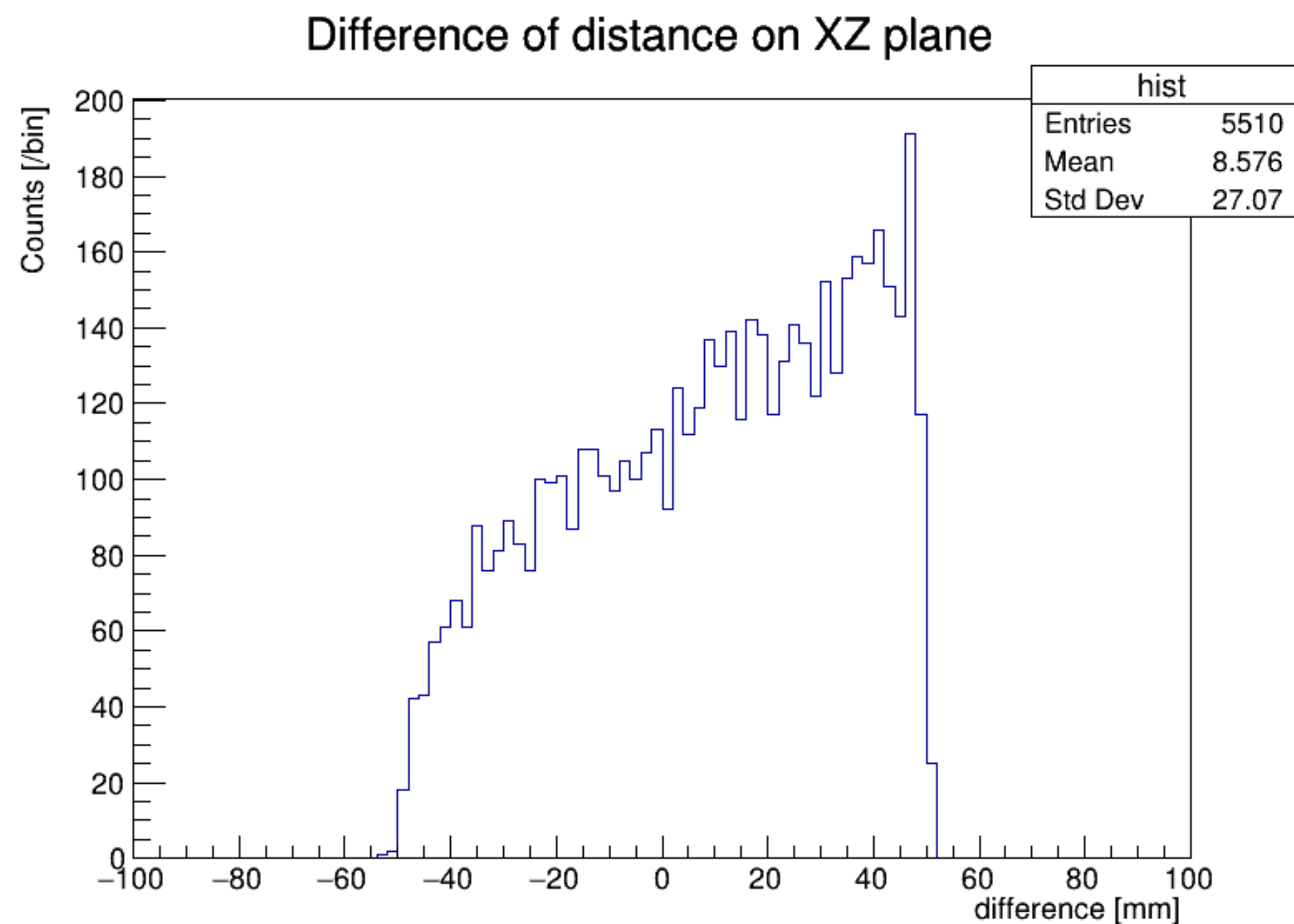
時間の真の値との差



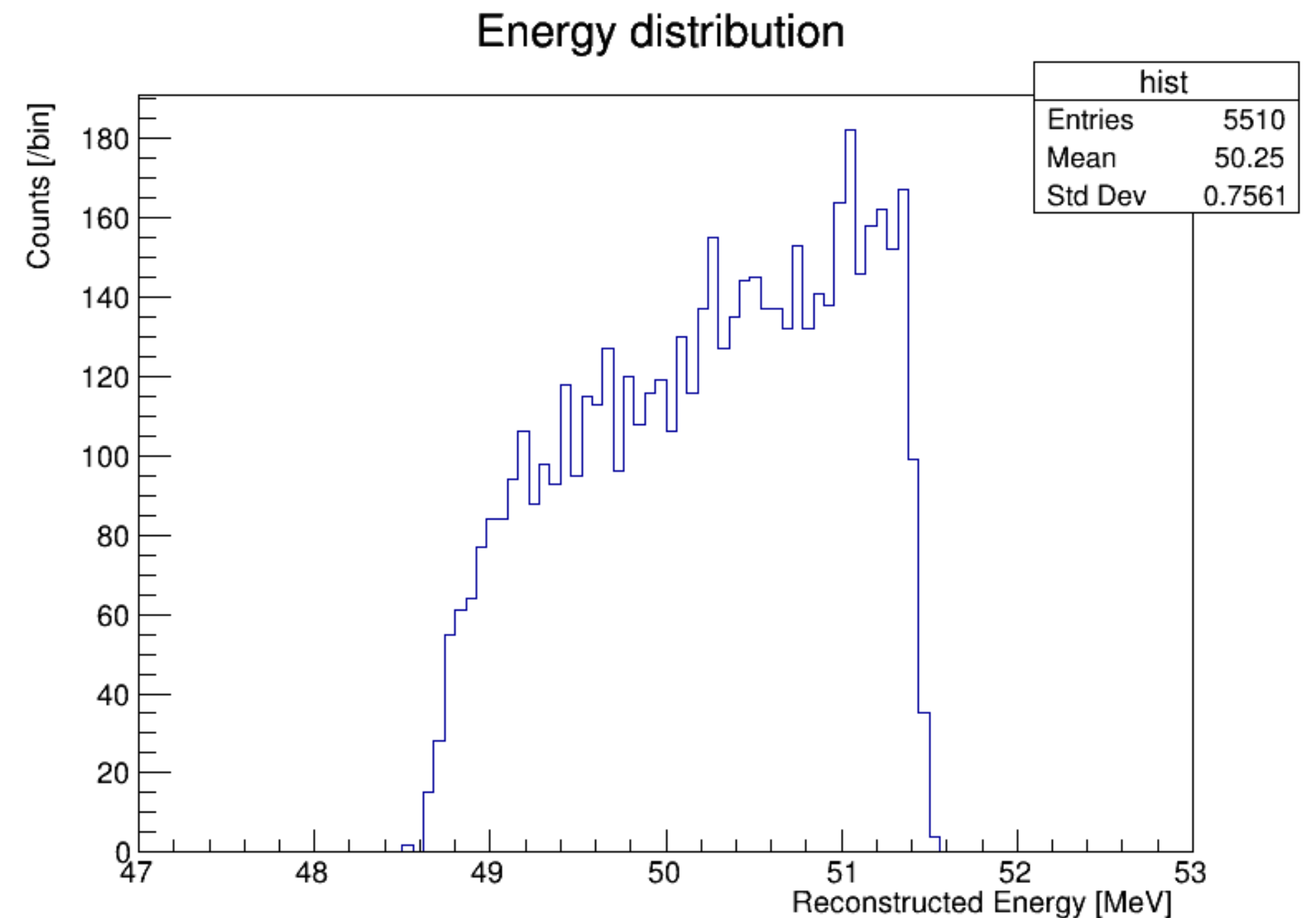
PMTの時間分解能を考慮して求めた中性子のエネルギー

# シンチレータの大きさの影響

- 飛行距離が長く推定される。  
->エネルギーが大きく推定される。
- 分布は矩形でもガウス分布でもない。



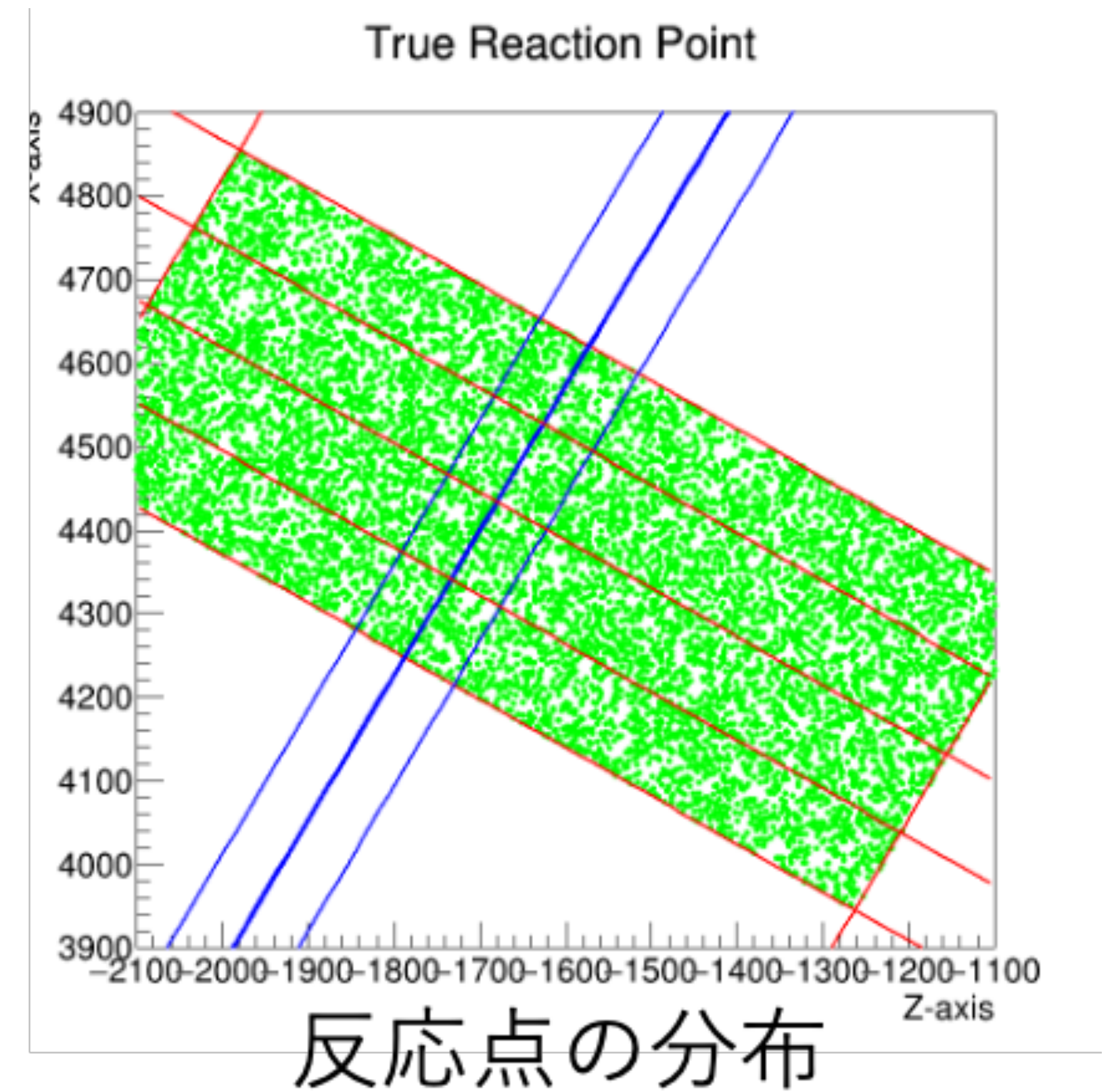
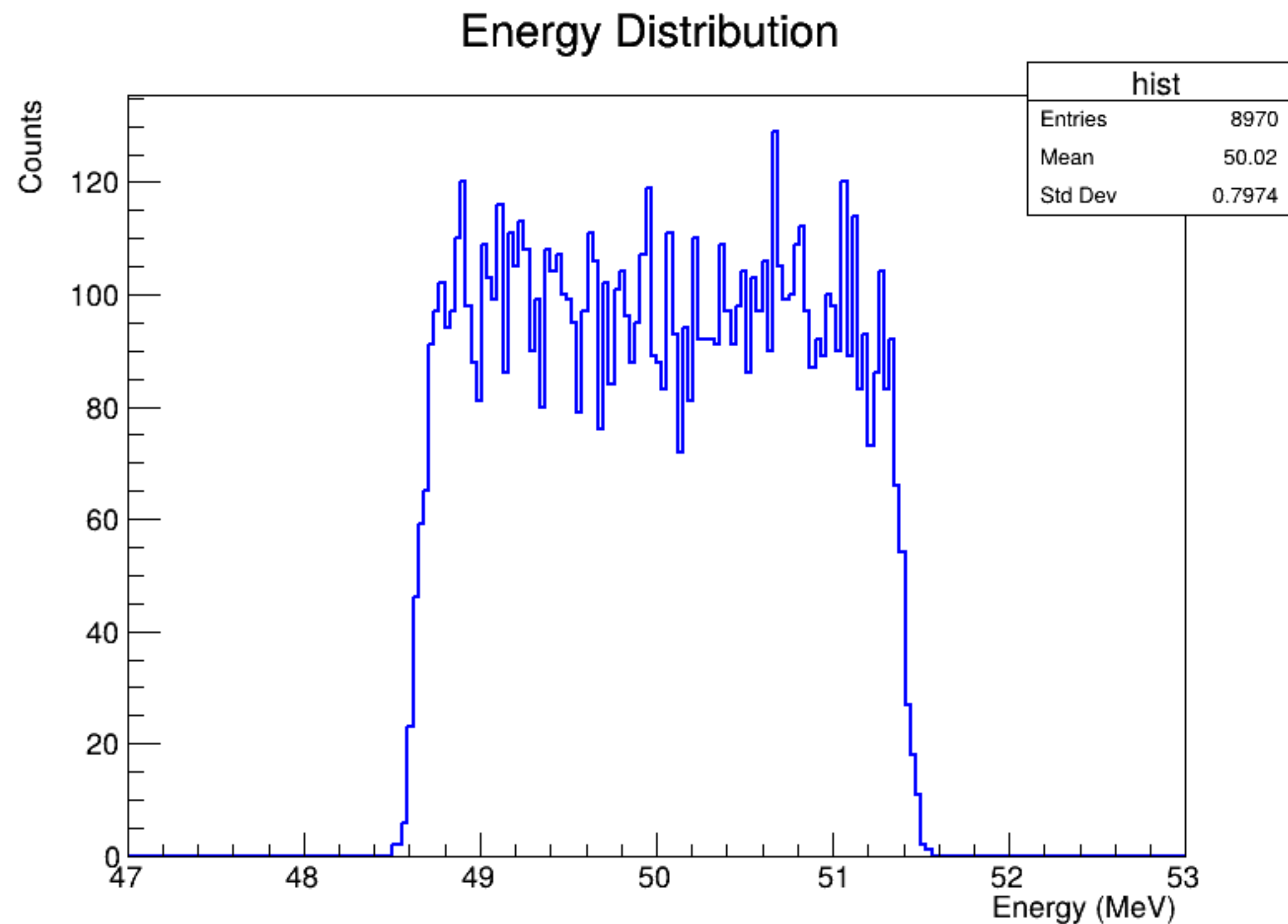
真の飛行距離との差



再構成された中性子のエネルギー分布

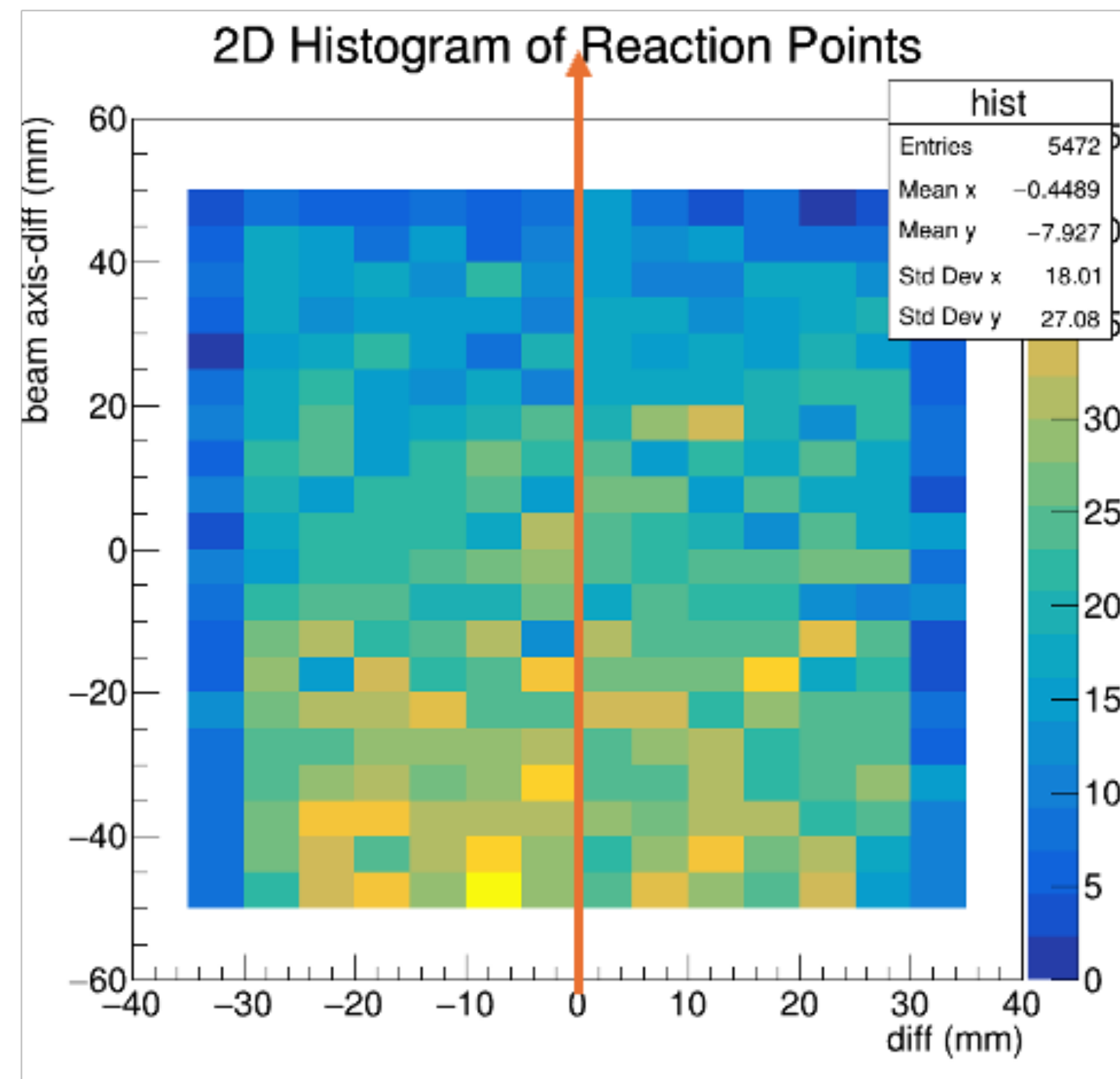
# シンチレータの形の影響

- 中性子の反応点がMNEUT内で一様るとき：  
再構成されたエネルギーは矩形の分布  
-> 中性子が反応する場所が偏っている

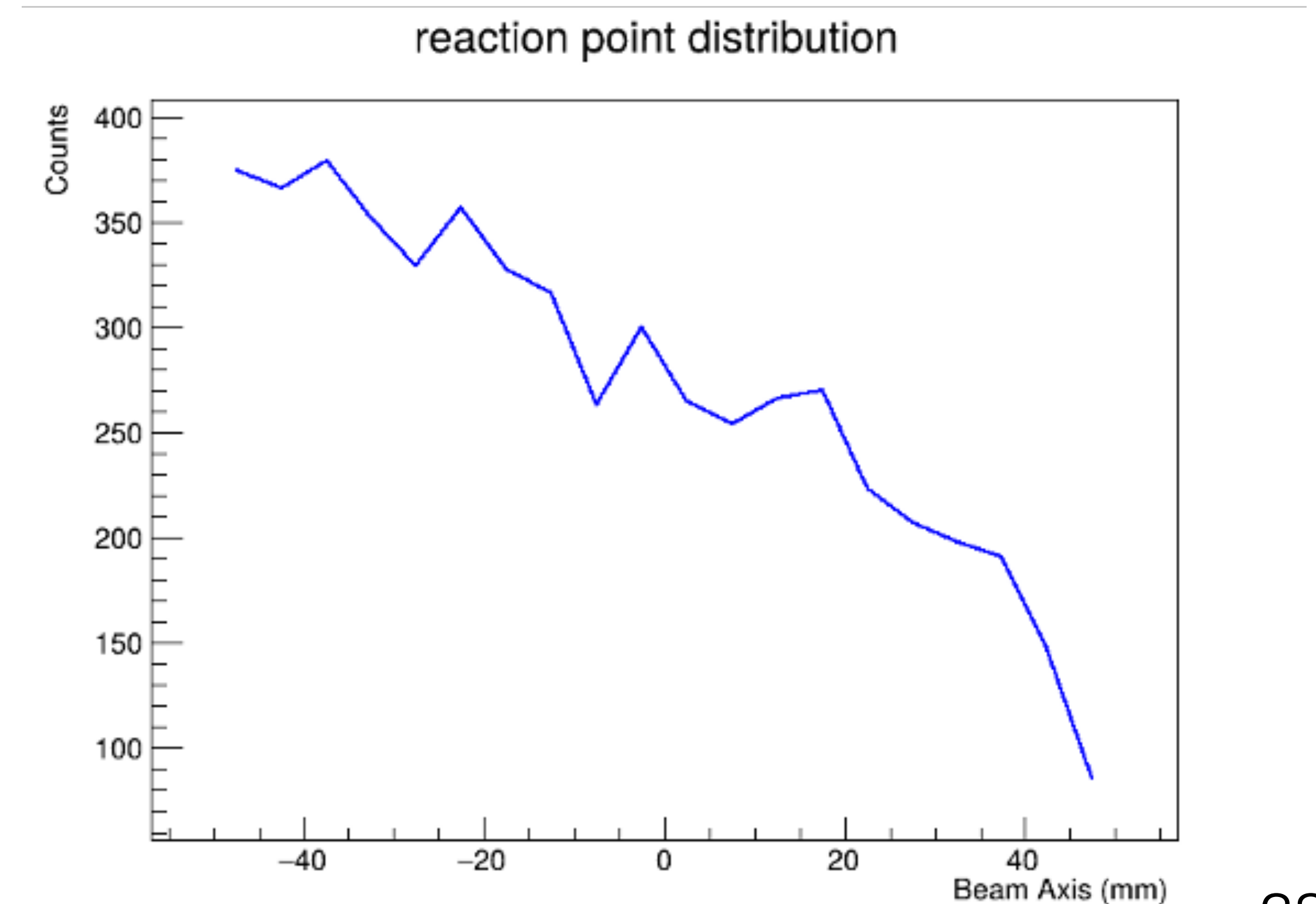


# エネルギー分布の形の原因

- 中性子が反応した点と、シンチレータの中心からの相対座標をプロット。
- 中性子が飛んできた側に反応地点が偏っている。  
これが飛行距離を長く見積もる原因になっている。



中性子の反応点の分布



# 150の励起エネルギー再構成

# イベントセレクション

- 陽子についての条件

CATANAで1hit

+

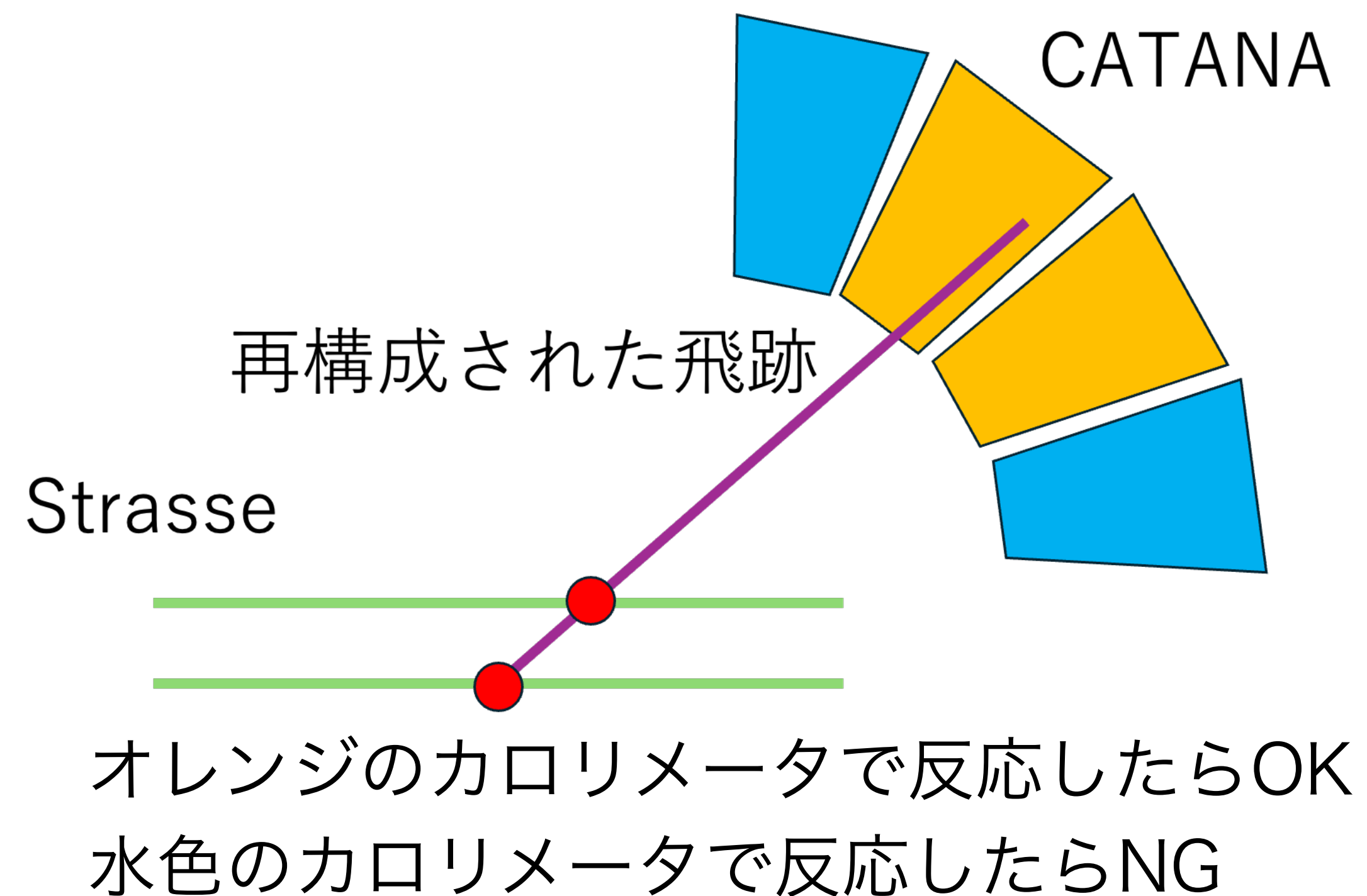
Strasseで求めた飛跡とCATANAの反応点が矛盾しない

- 中性子についての条件

VETO : 0hit

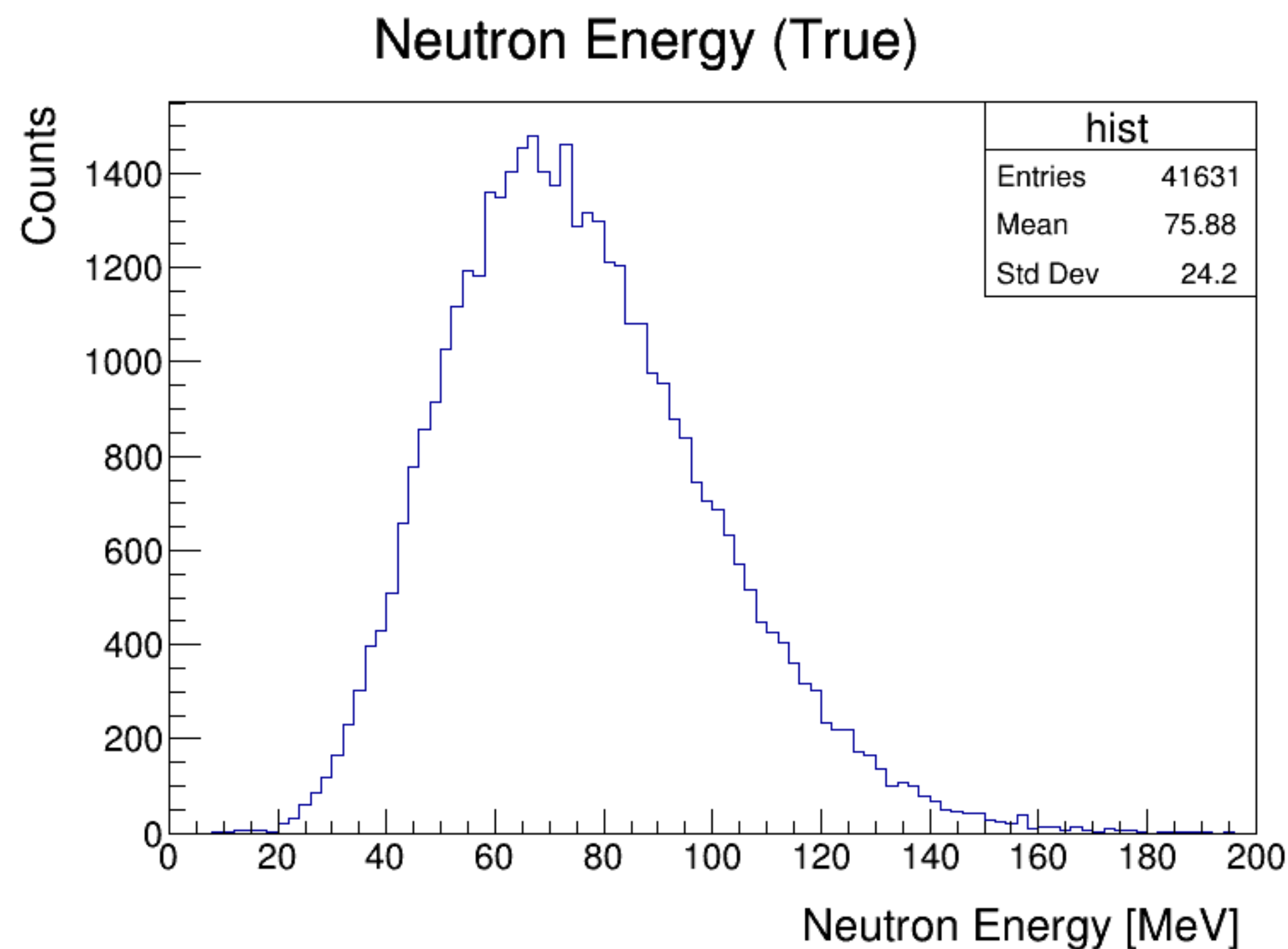
+

プラスチックシンチレータ1hit。

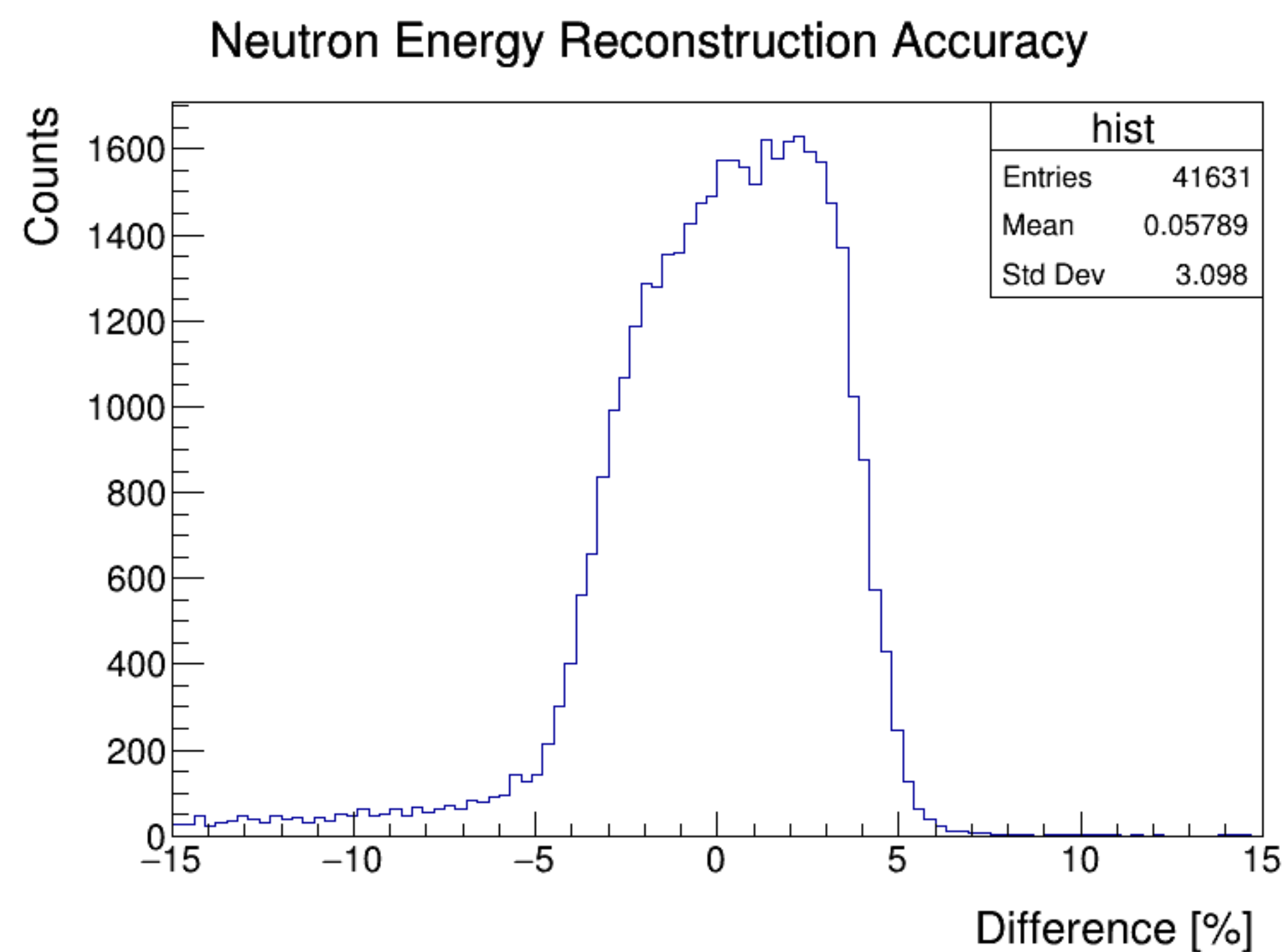


# 中性子のエネルギー分布と再構成精度

- 中性子のエネルギーの再構成精度は $\pm 5\%$ 程度。



中性子のエネルギー分布

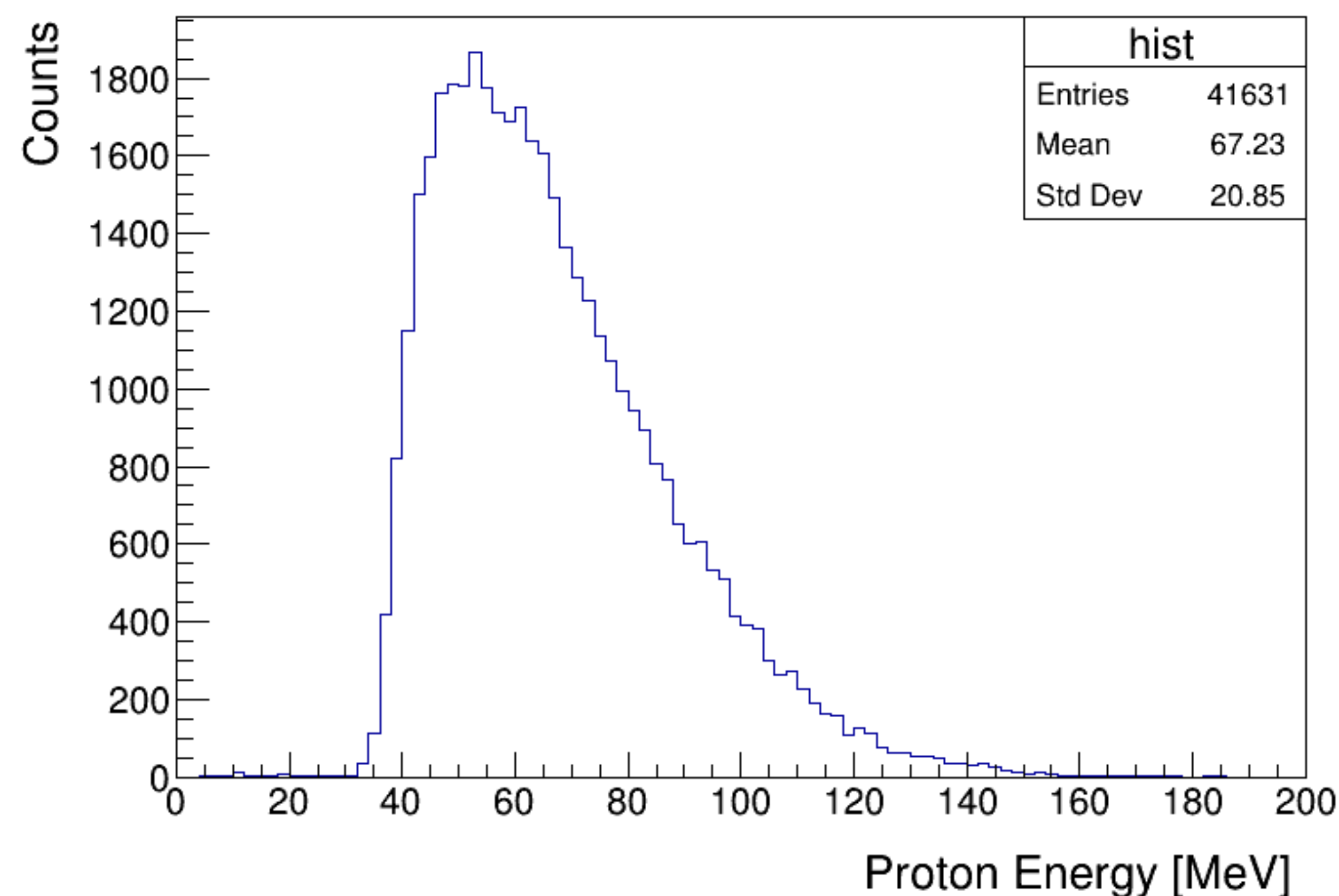


再構成されたエネルギーの誤差

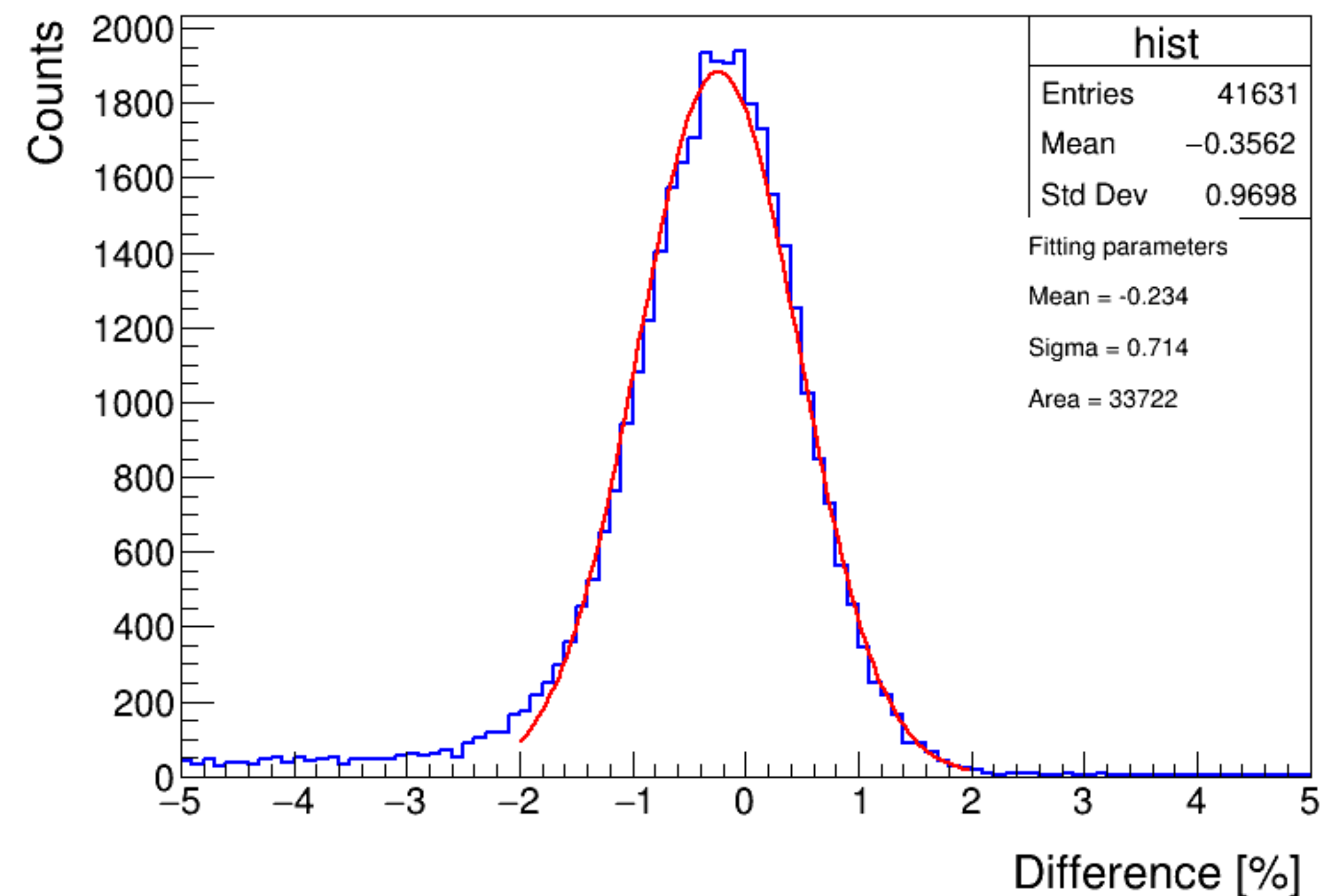
# 陽子のエネルギー分布と再構成精度

- 検出できる陽子のエネルギーは35MeVから分布。
- エネルギー分解能は2%程度。ややエネルギーを過小評価する。

Proton Energy (True)



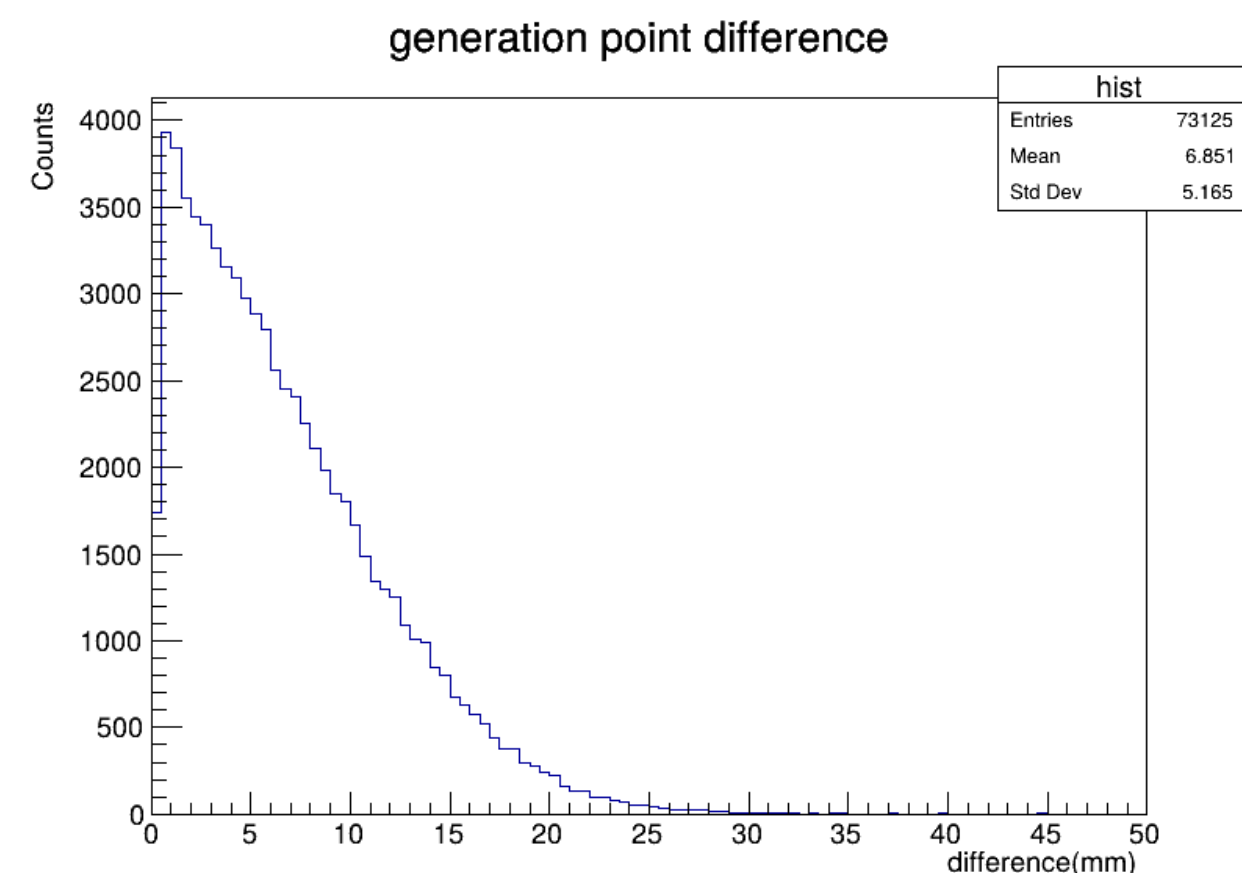
Proton Energy Reconstruction Accuracy



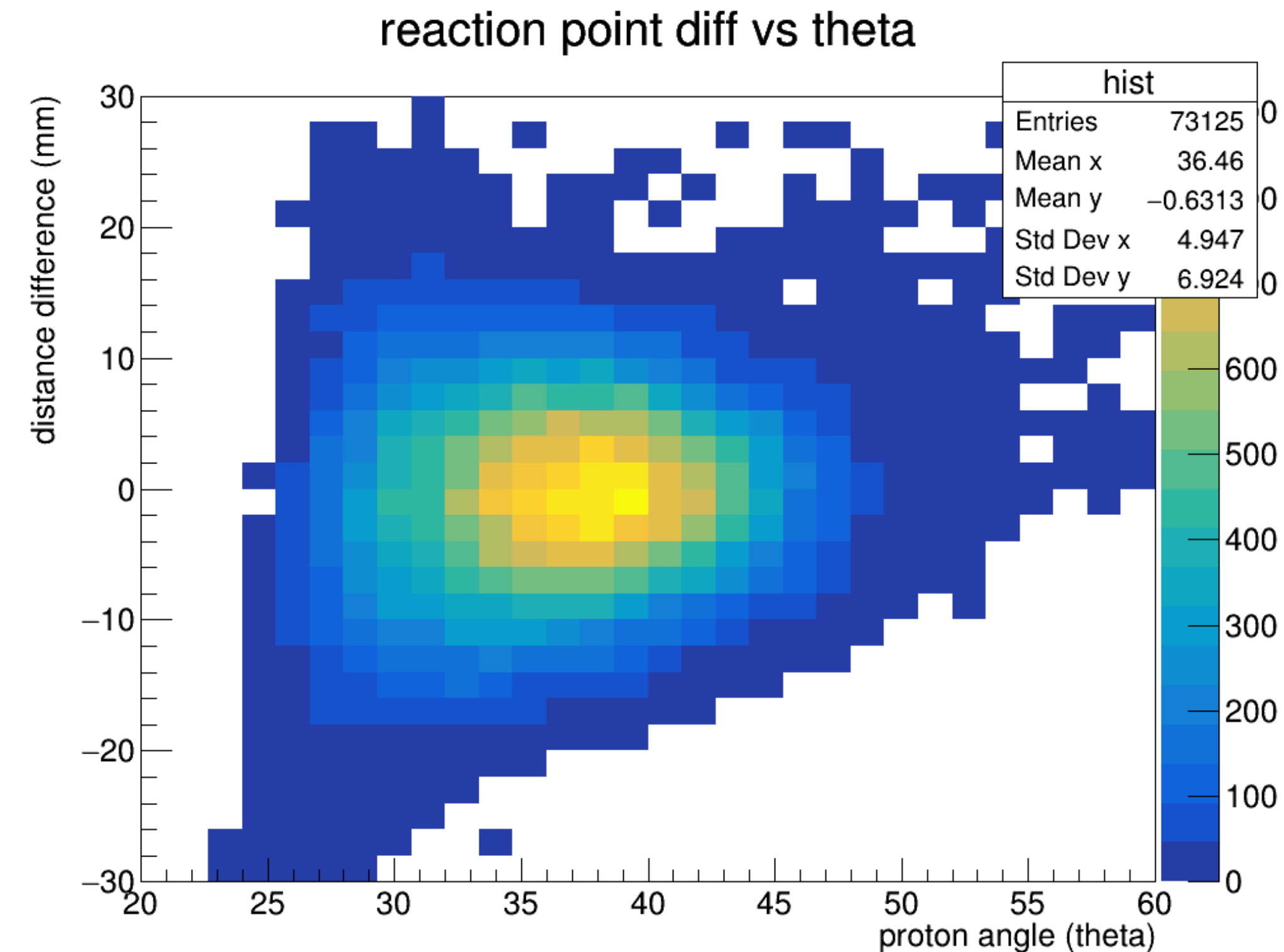


# 酸素16の反応地点の再構成

- 反応地点のズレは $< 25\text{mm}$  (平均は $7\text{mm}$ )
- 誤差は陽子の角度に依存。  
陽子の運動量とビーム軸のなす角が大きいと、  
誤差は小さくなる。



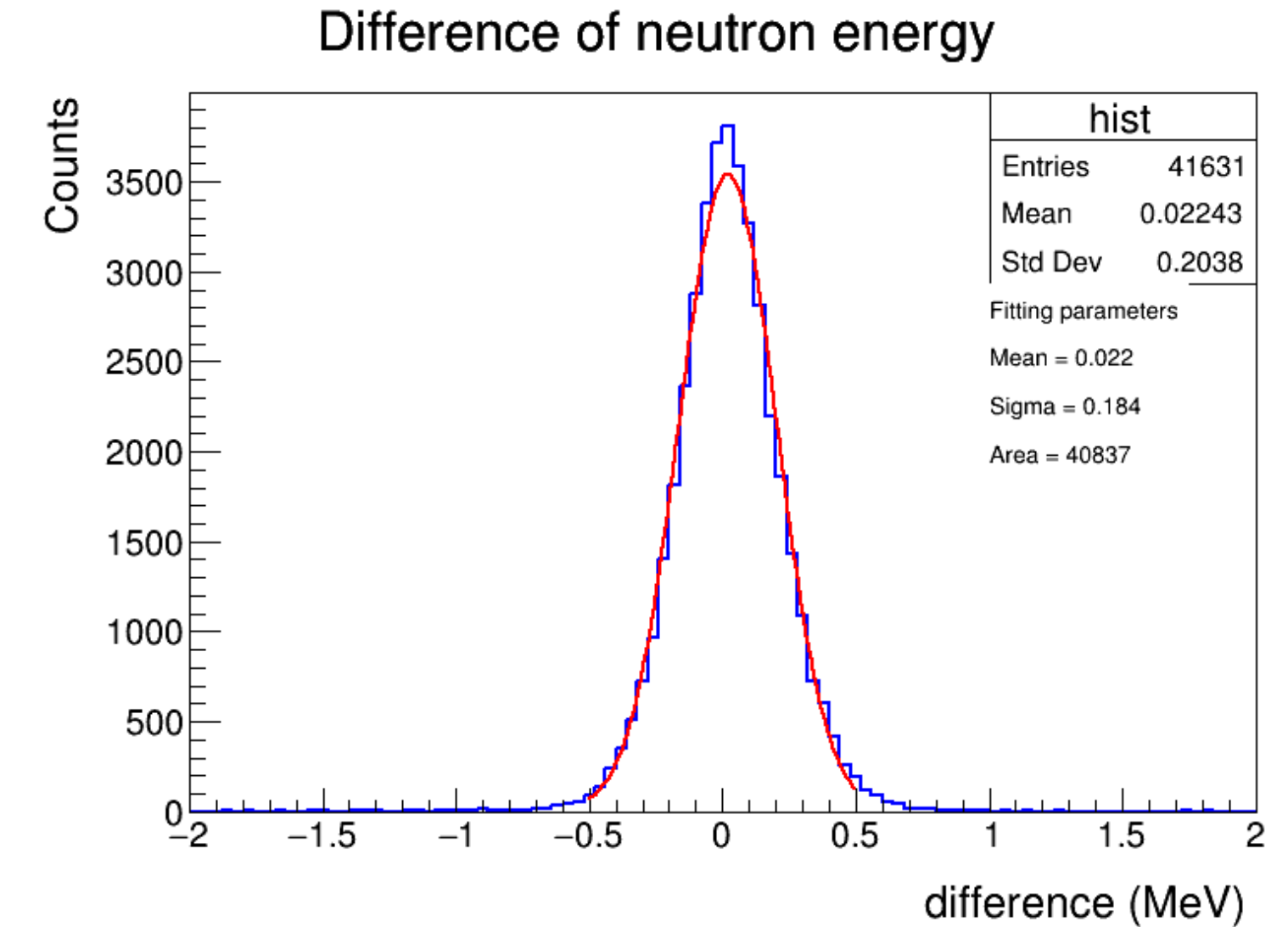
3次元での位置の誤差分布



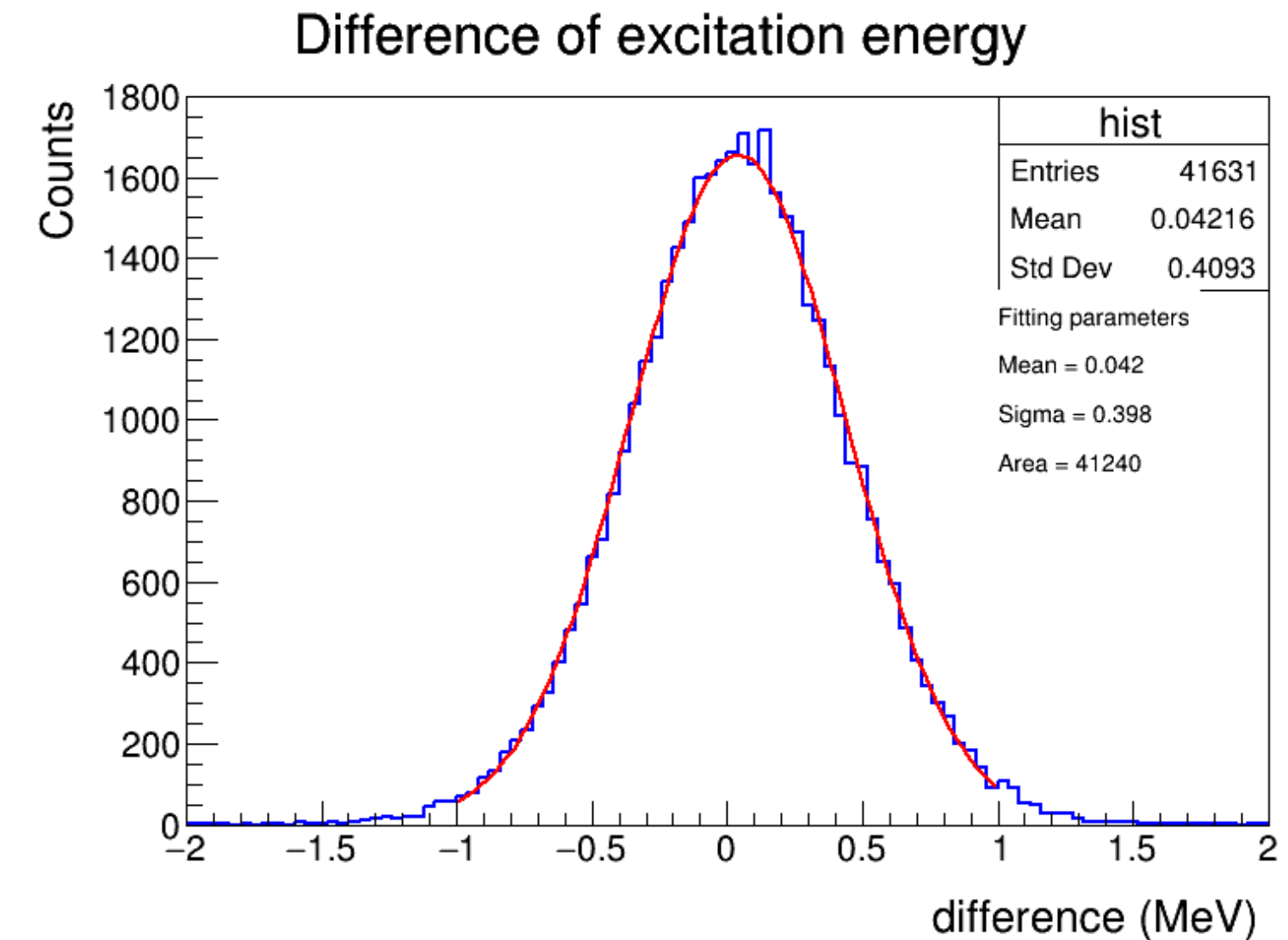
陽子の角度と、再構成された反応点のビーム軸方向の誤差の分布

# $^{16}\text{O}$ の反応点のエネルギー再構成への影響

- 中性子エネルギーへの影響： $\sigma = 0.2\text{MeV}$   
MNEUTの大きさの影響に比べ小さい。
- $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーへの影響： $\sigma = 0.4\text{MeV}$ 
  - 中性子の運動量
  - $^{16}\text{O}$ のエネルギー



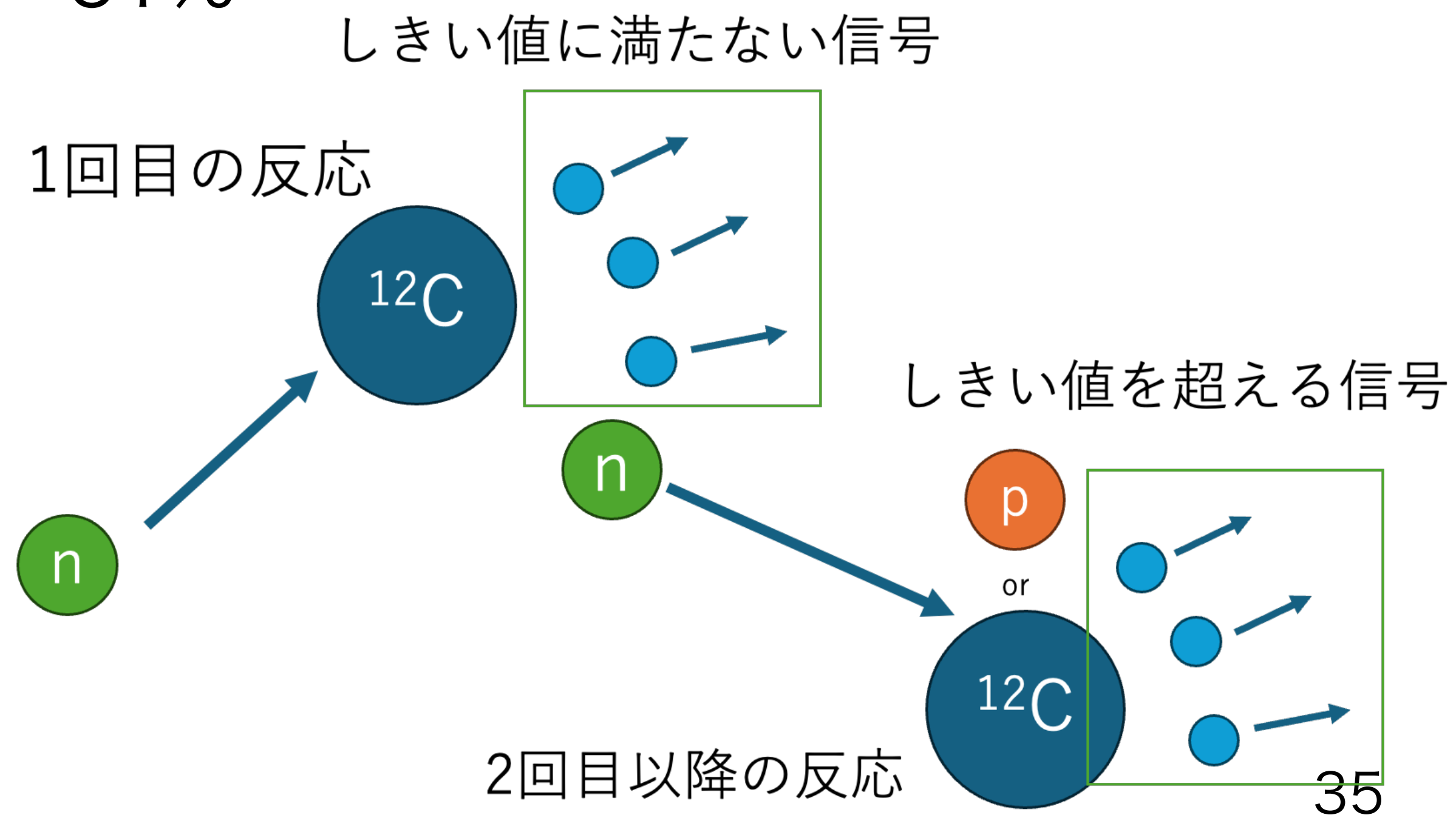
中性子のエネルギーへの影響



$^{15}\text{O}$ の励起エネルギーへの影響 34

# テールの原因

- 中性子が原因の励起エネルギーのテール  
-> 中子のエネルギーを小さく見積もるのが原因
- 中子のエネルギーを小さく見積もる原因  
MNEUT外部での散乱：39%  
MNEUT内部での炭素のノックアウト反応：61%



# 励起エネルギーの再構成精度

- $^{15}\text{O}$ の励起エネルギーごとに脱励起過程を測定  
10 - 50 MeVを5MeVずつに区切る。
- 実際の励起エネルギー分布で、どれだけ正しく再構成できるか？
- Purity = (真の励起エネルギーと再構成された励起エネルギーが共にそのbinであるイベント数)
- Purity :  $^{15}\text{N}$ では60 - 70%。  $^{15}\text{O}$ では < 40%
- FWHM(分解能) :  $^{15}\text{N}$  : 3.8MeV  $^{15}\text{O}$  : 4.2MeV
- 励起エネルギーを小さく見積もるイベントが影響。

