

**スーパーカミオカンデでのニュートリノ-原子核反応予測  
の精密化に向けた逆運動学実験  
— 概要および $^{15}\text{N}$ の励起エネルギー再構成 —**

東京大学 横山-中島研究室

M2 水野 裕介

2025/2/18

第31回ICEPPシンポジウム

# Contents

- イントロダクション
  - ニュートリノ-原子核反応
  - スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノ探索の現状
  - ニュートリノ-原子核反応予測の課題
- 逆運動学実験
  - 逆運動学実験とは
  - SAMURAI-79実験の計画
- $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定の検出器シミュレーション
  - 励起エネルギーの再構成精度
  - 脱励起過程の測定

# Contents

- イントロダクション
  - ニュートリノ-原子核反応
  - スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノ探索の現状
  - ニュートリノ-原子核反応予測の課題
- 逆運動学実験
  - 逆運動学実験とは
  - SAMURAI-79実験の計画
- $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定の検出器シミュレーション
  - 励起エネルギーの再構成精度
  - 脱励起過程の測定

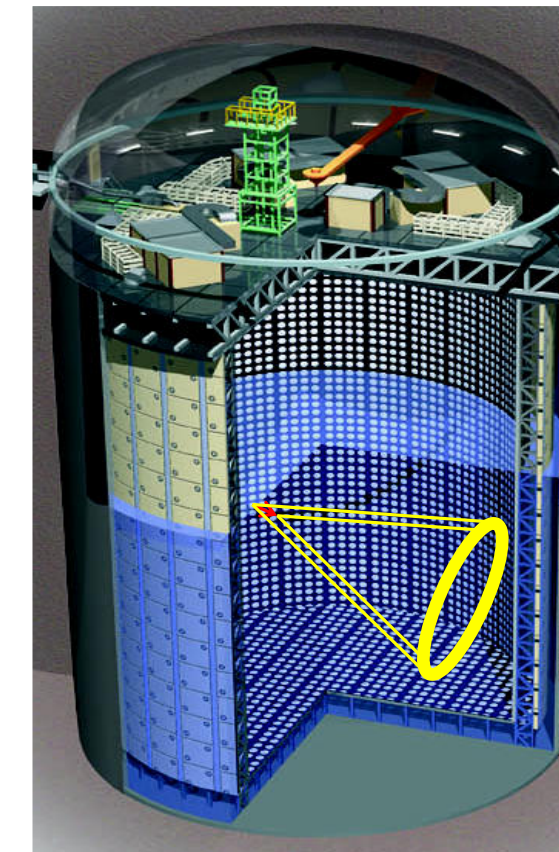
# Introduction

- ニュートリノ実験で使われる標的は原子核 (が必ず含まれる)
  - 水: 酸素 (SK, HK, etc. )
  - 液体シンチレーター: 炭素 (KamLAND, JUNO, etc. )
  - 液体アルゴン (DUNE, etc. )
- ニュートリノの更なる精密観測のためには、ニュートリノと原子核の反応を理解することが重要

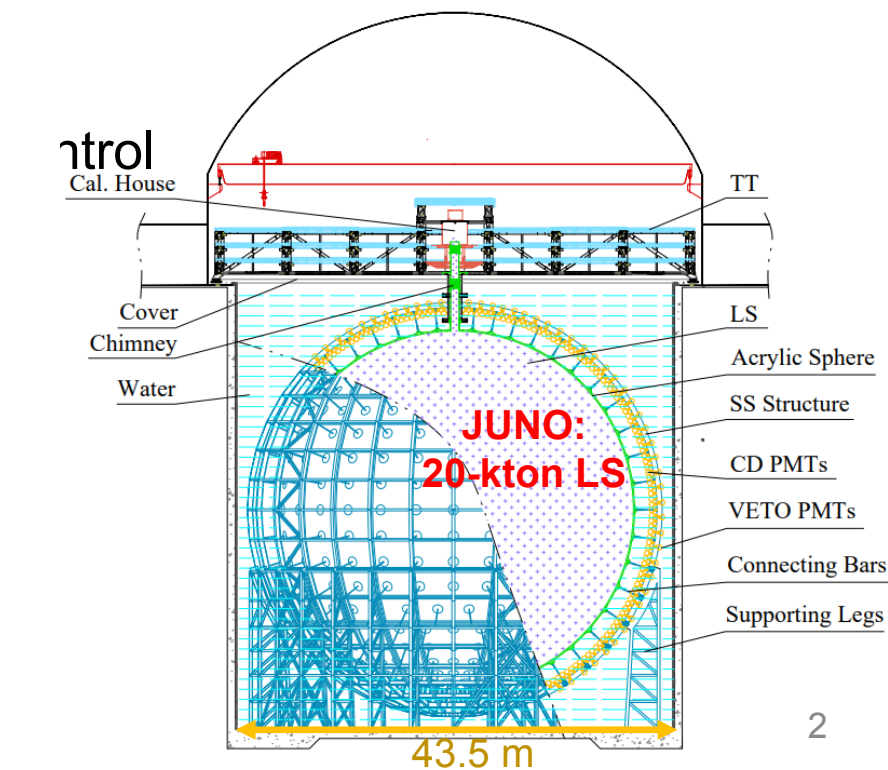
- スーパーカミオカンデでのニュートリノ-原子核反応予測の精密化に向けた逆運動学実験

- 概要 ) 本講演 (水野)
- $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定
- $^{15}\text{O}$ の脱励起過程の測定 次の講演 (林崎)

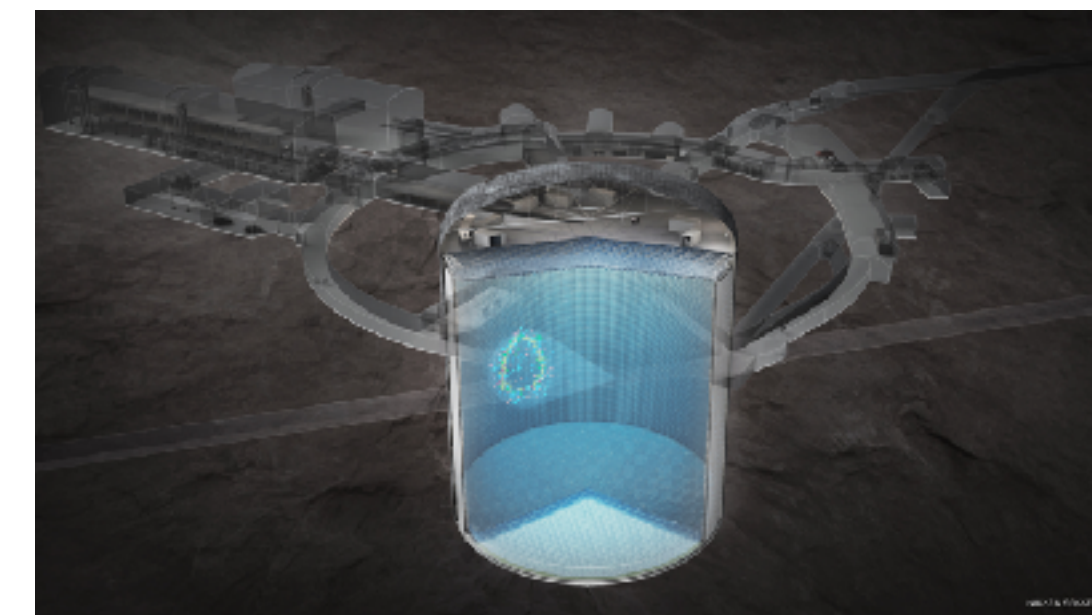
Super-Kamiokande (SK)  
(1996-, water)



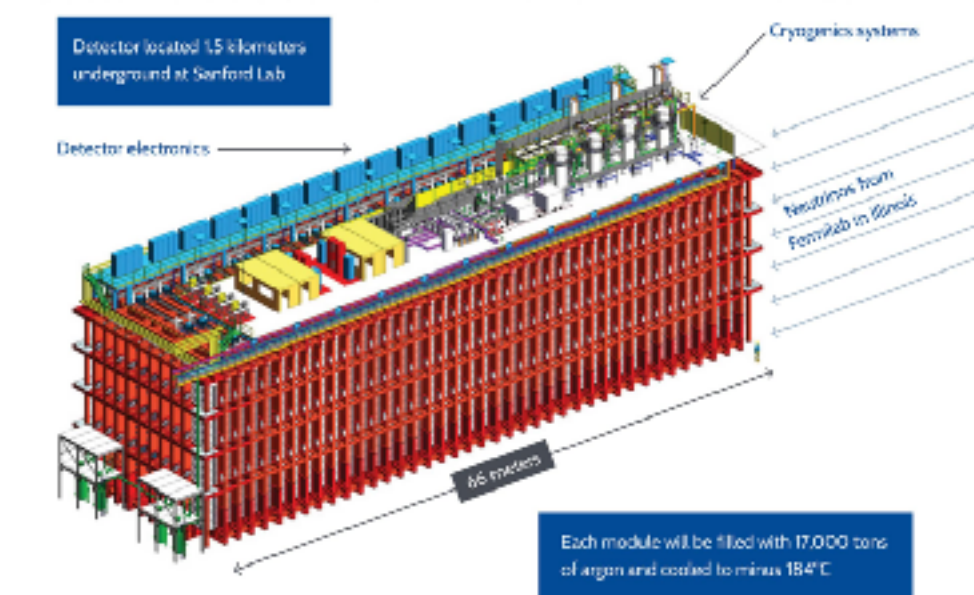
JUNO  
(2025-, LS)



Hyper-Kamiokande (HK)  
(2027-, water)



DUNE  
(2030?-, LAr)

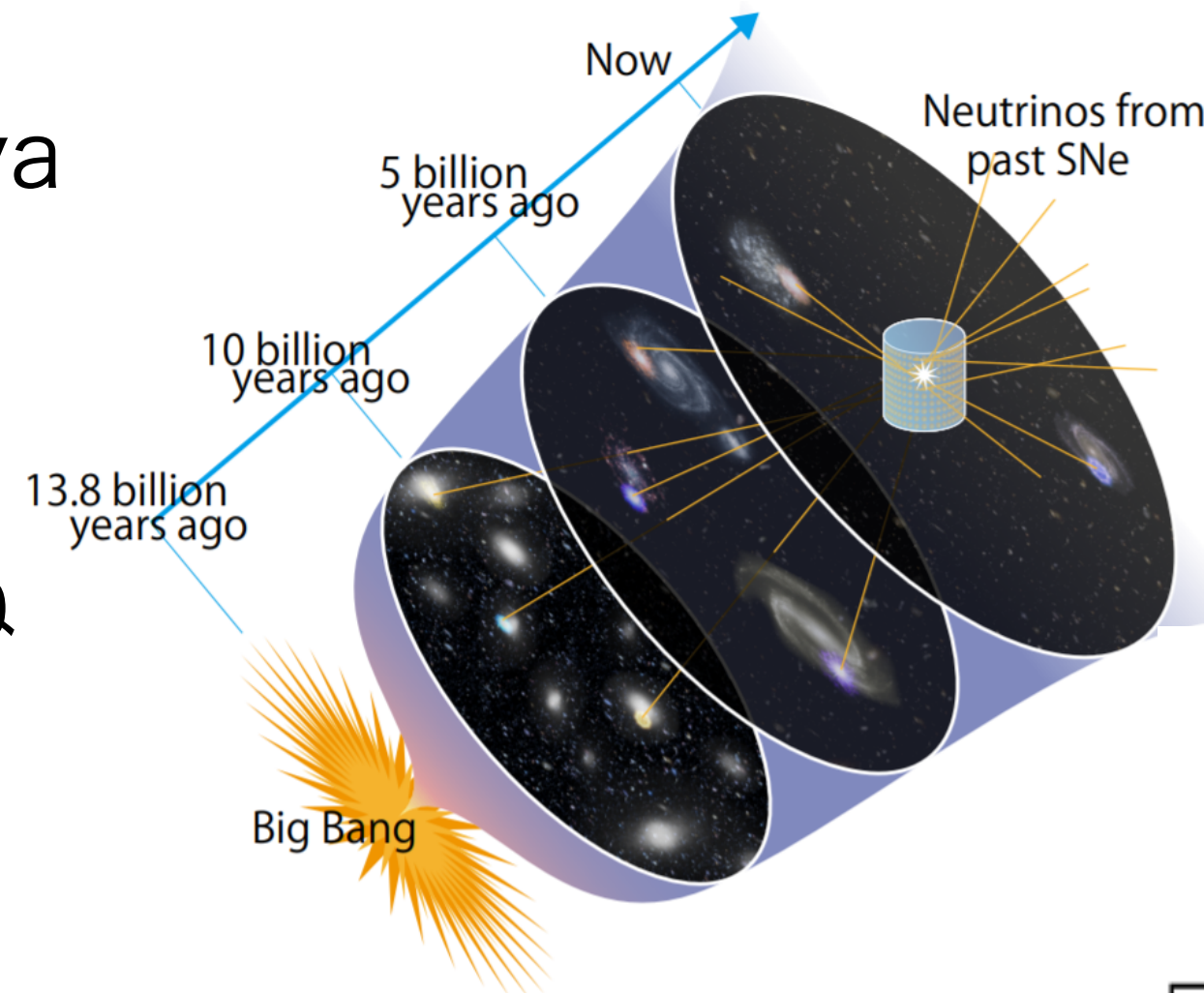




# Diffuse Supernova Neutrino Background

- 超新星背景ニュートリノ (Diffuse Supernova Neutrino Background, DSNB)

- これまでの宇宙で起きた超新星爆発で放出された超新星ニュートリノの積み重ね



- DSNBフラックス

$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^\infty R_{\text{CCSN}}(z) \frac{dt}{dz} \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} dz$$

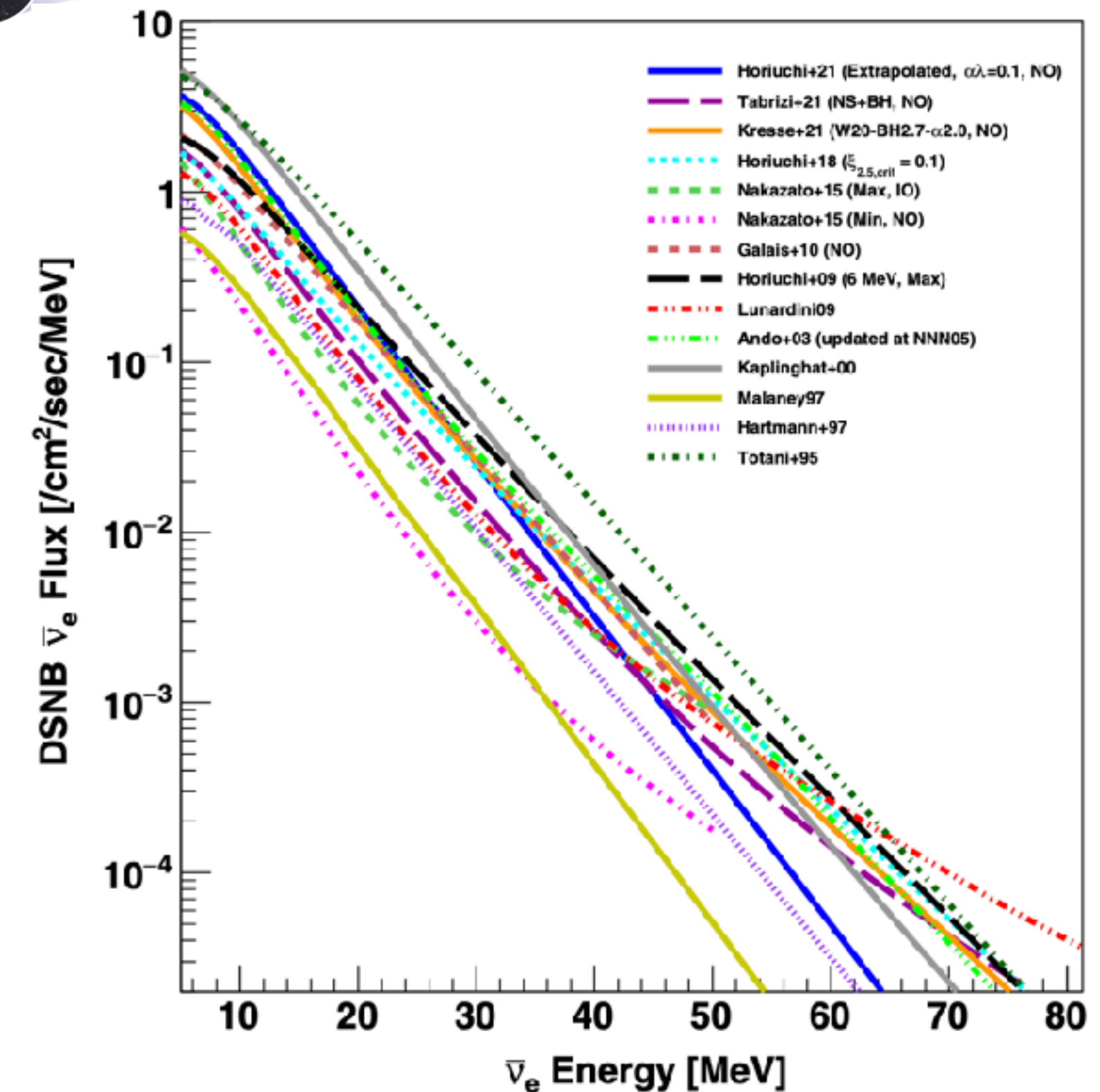
超新星爆発のレート  
星形成の歴史

宇宙膨張の歴史

超新星爆発のメカニズム

ニュートリノそのものの性質 (ニュートリノ振動 etc.)

DSNBフラックスの理論予測

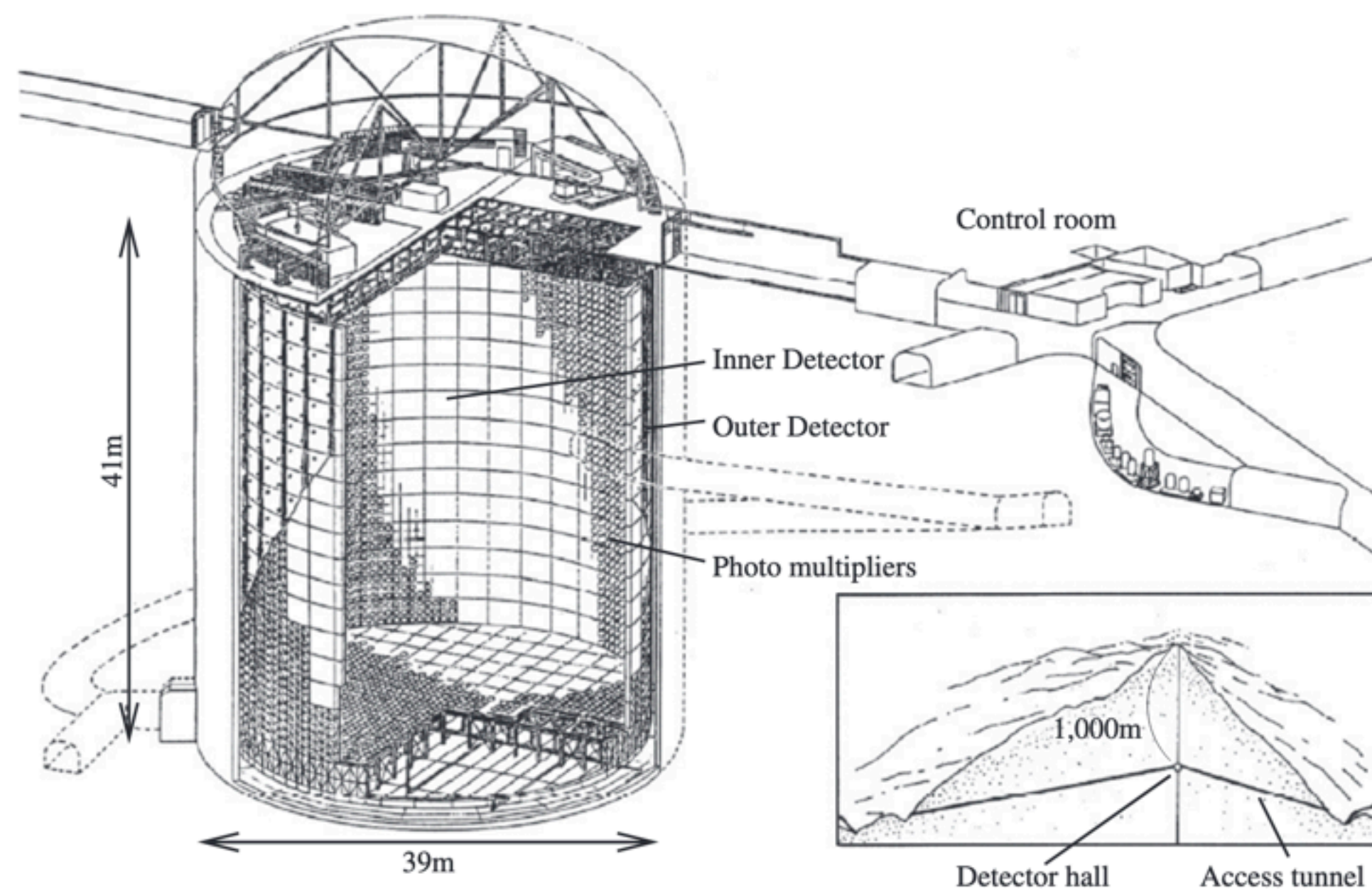
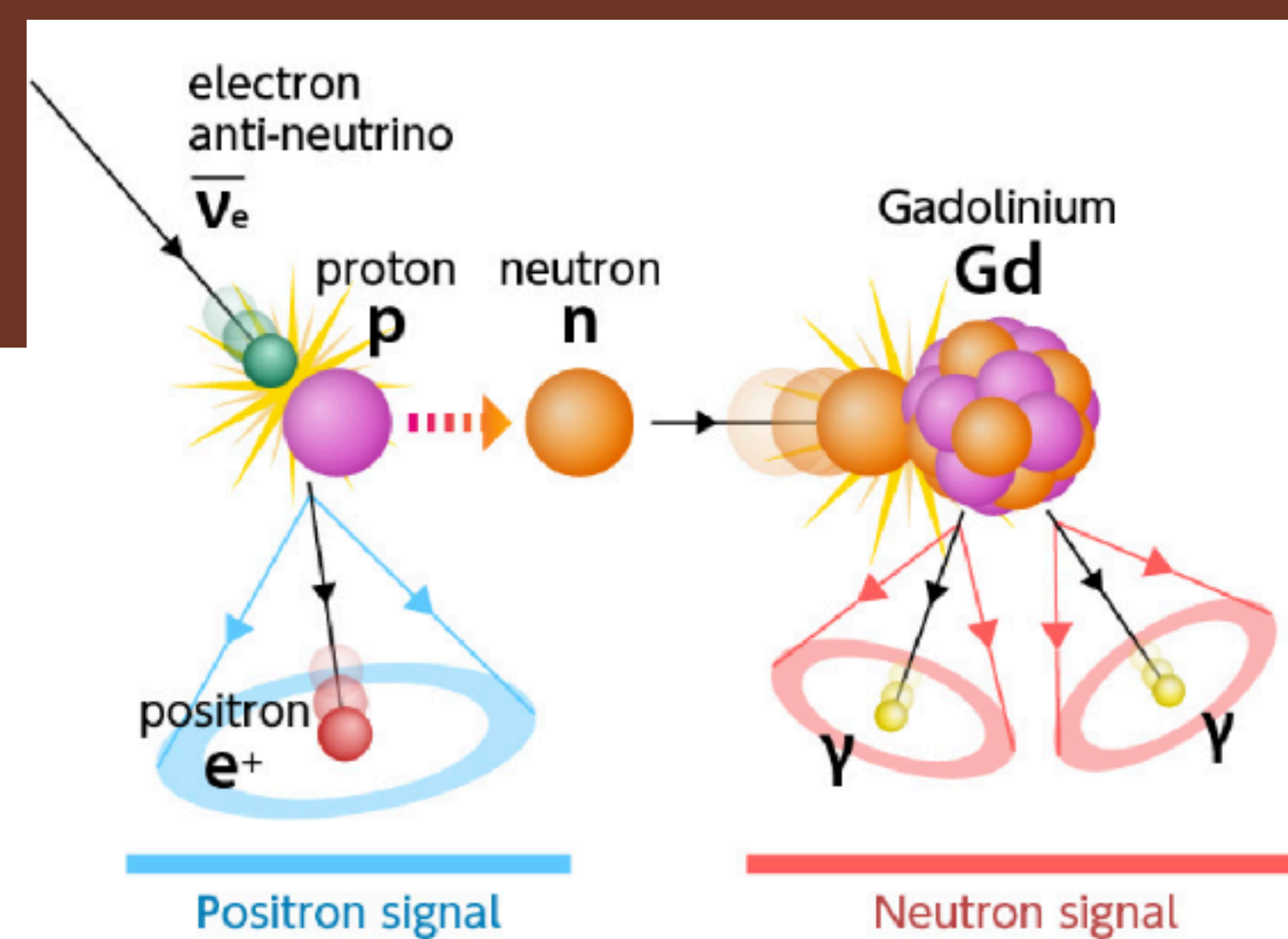


- 物理や宇宙物理にとって重要だが、未発見

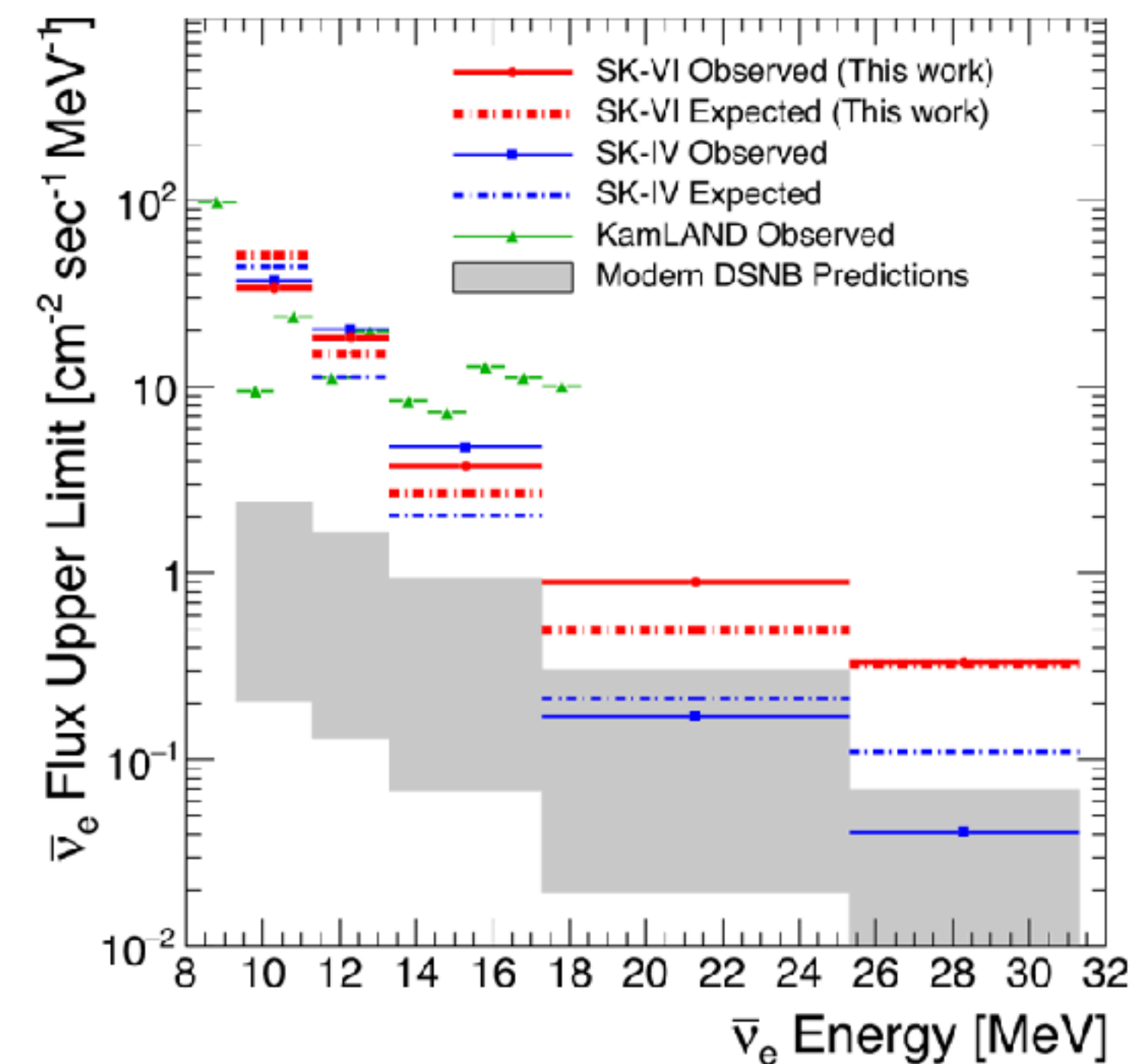


# Super Kamiokande

- スーパーカミオカンデ (SK)
  - 神岡の地下1000 mにある大型水チェレンコフ検出器
  - ガドリニウムによる中性子捕獲信号を利用して背景事象を大幅に削減
  - DSNBフラックスに対して最も厳しい制限
  - 理論予測に近づきつつある
    - さらなる観測精度の向上が必要



DSNB upper limit (90% C. L.)



# Neutrino-nucleus Interaction

- 大気ニュートリノと酸素原子核の反応が主要な背景事象

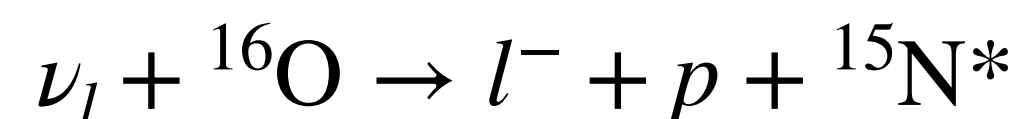
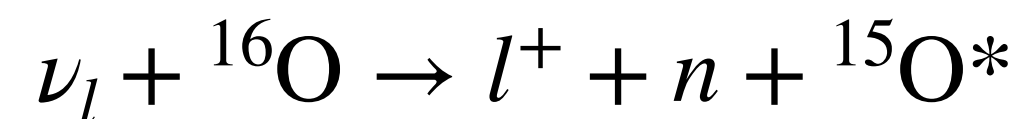
- 予測に大きな系統誤差

- 中性カレント準弾性 (NCQE) 散乱 : 68%

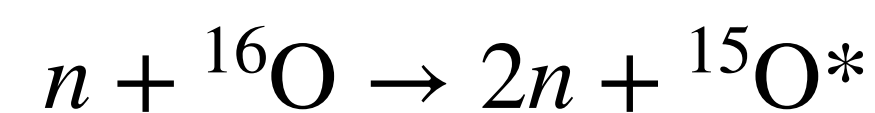
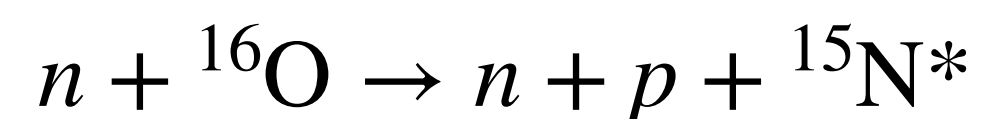
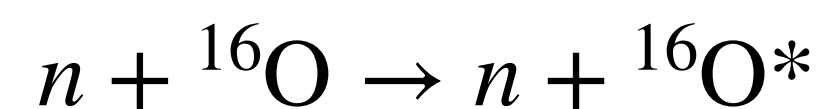


- non-NCQE: 36%

- 主に荷電カレント準弾性 (CCQE) 散乱

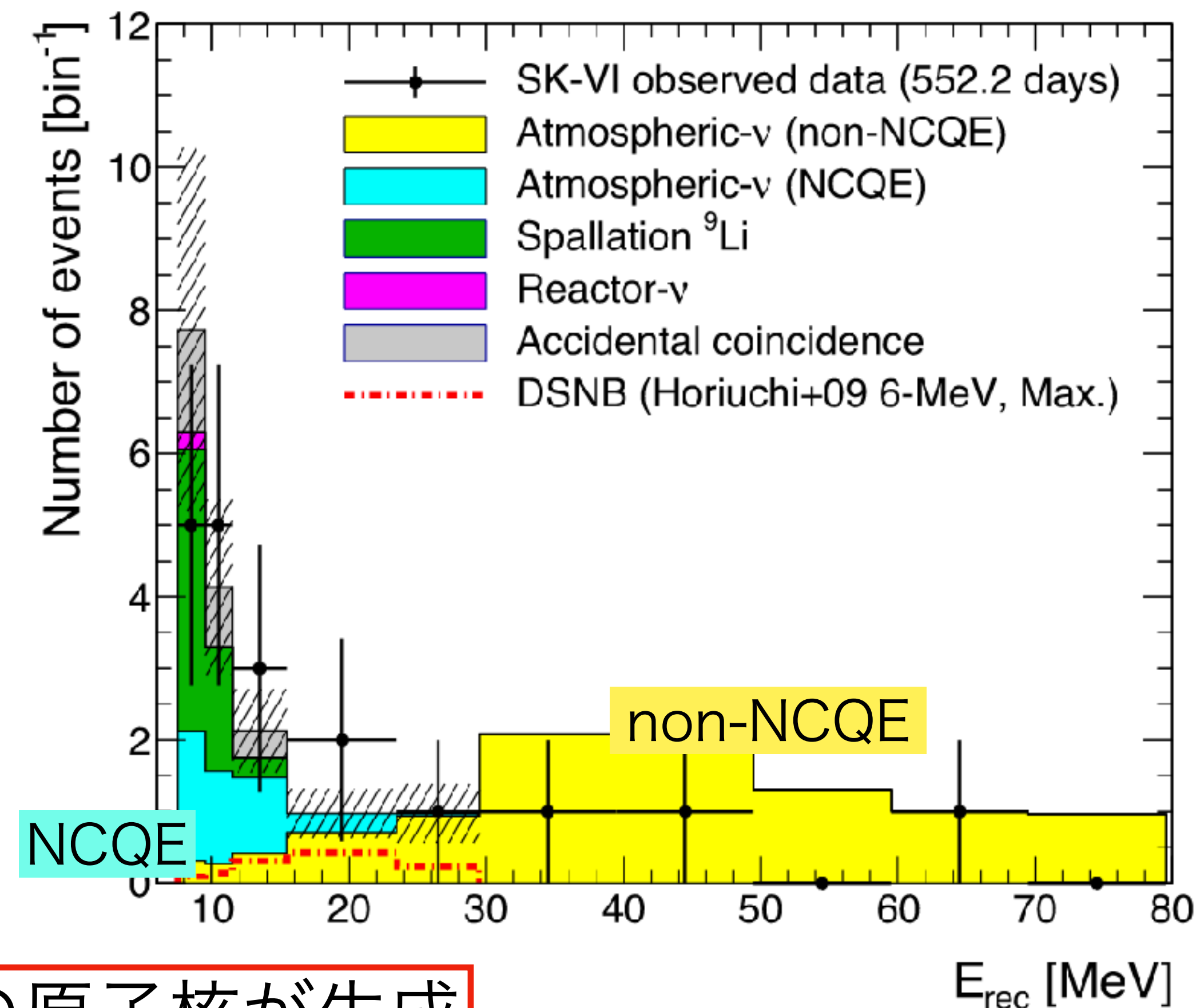


- 反跳核子による二次反応



励起状態の原子核が生成

SKで観測された  
反電子ニュートリノのエネルギー



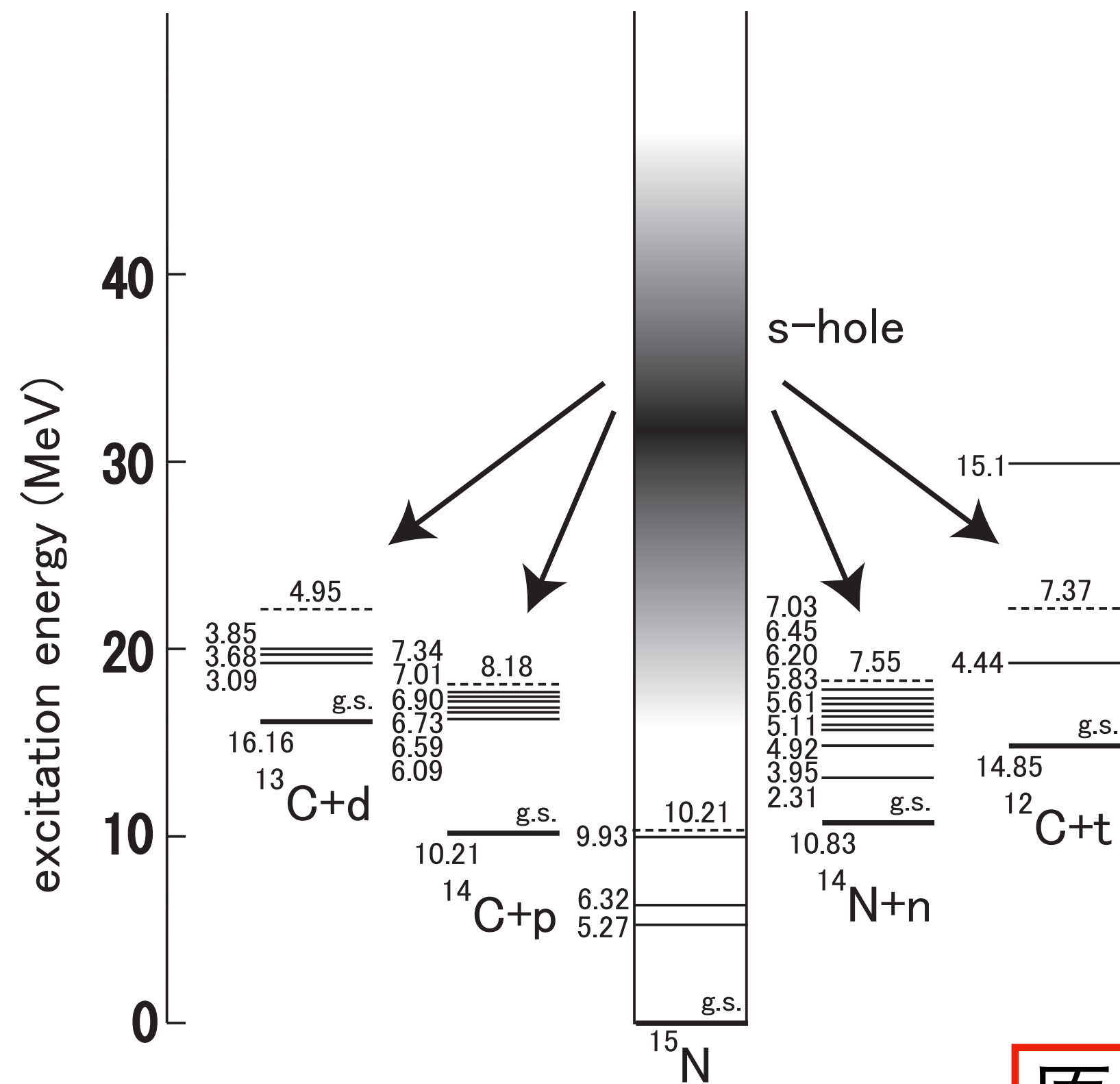
M. Harada et al., *Astrophys. J. Lett.*, 951(2):L27 (2023)



# Neutrino-nucleus Interaction

- 高い励起状態からの脱励起では、脱励起ガンマ線だけでなく、中性子や陽子を放出する (蒸発)
  - 実験データの不足による理論の不定性

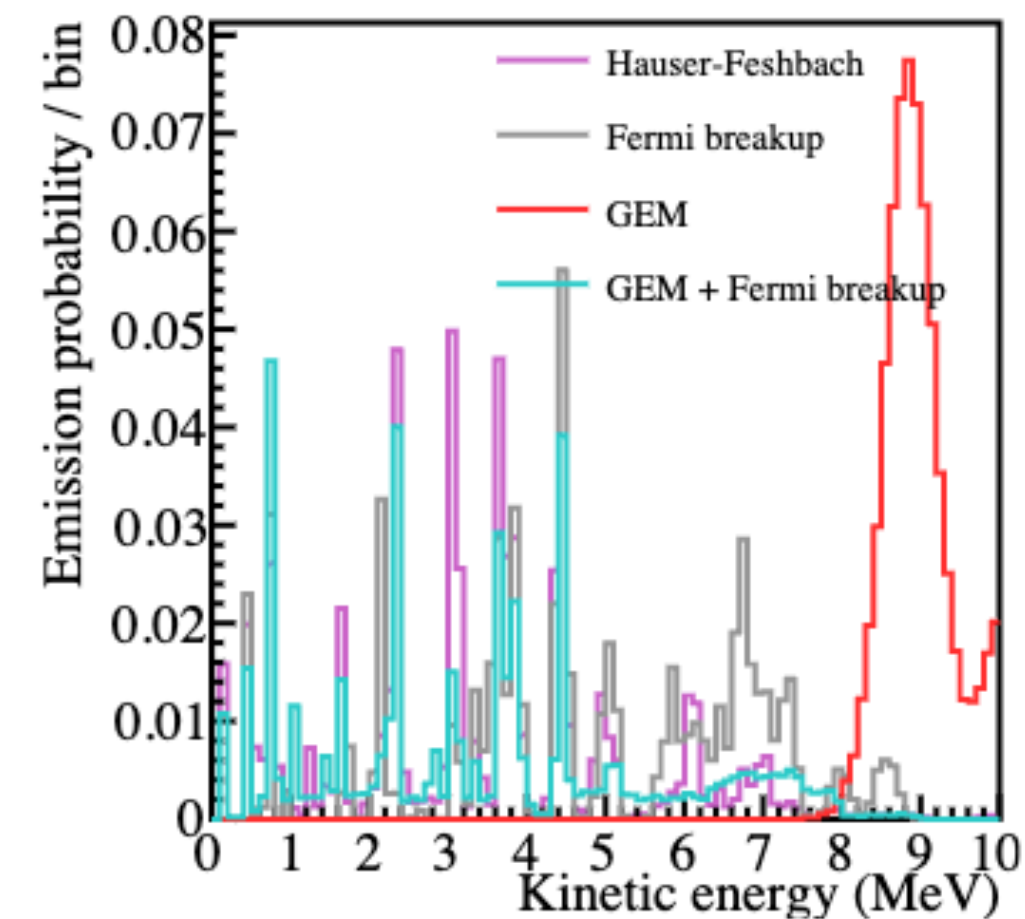
e.g.  $^{15}\text{N}$ の脱励起で放出される粒子のエネルギー  
(理論による違い)



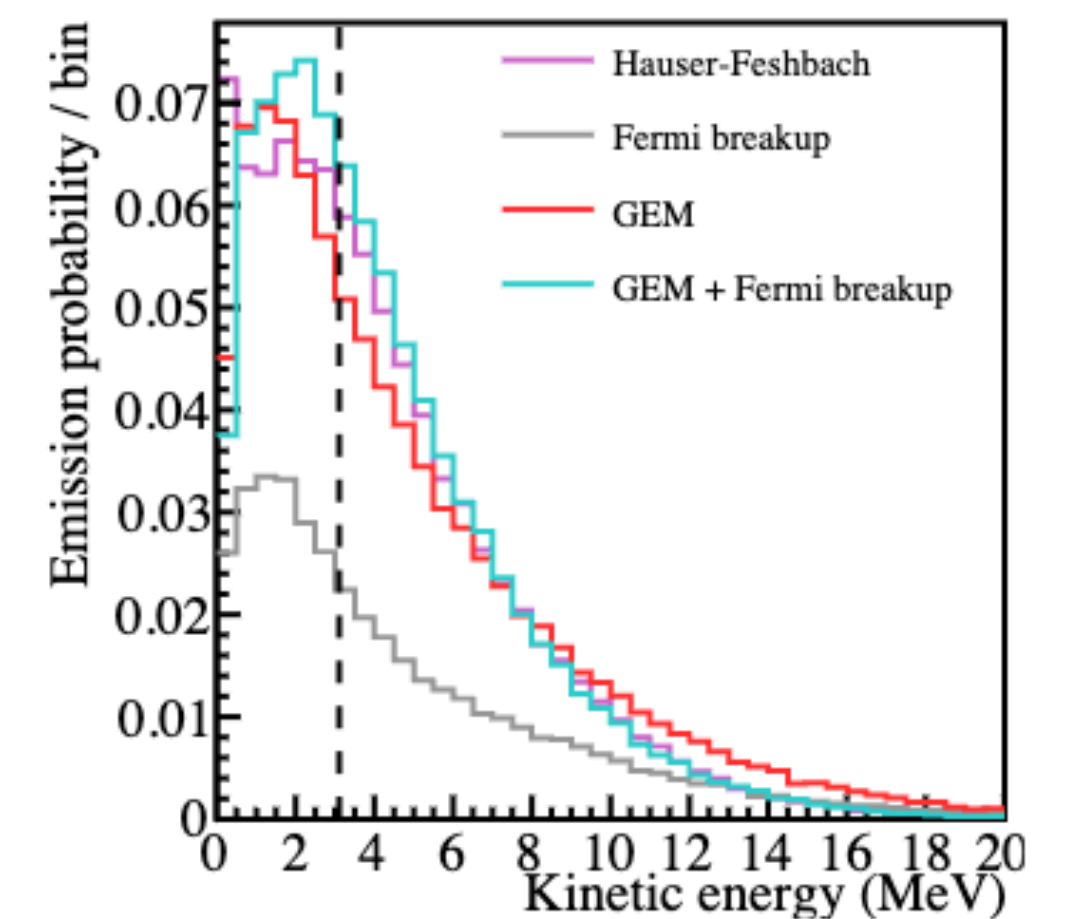
$^{15}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}$ の脱励起過程  
の理解が重要

原子核ビームを使った逆運動学実験

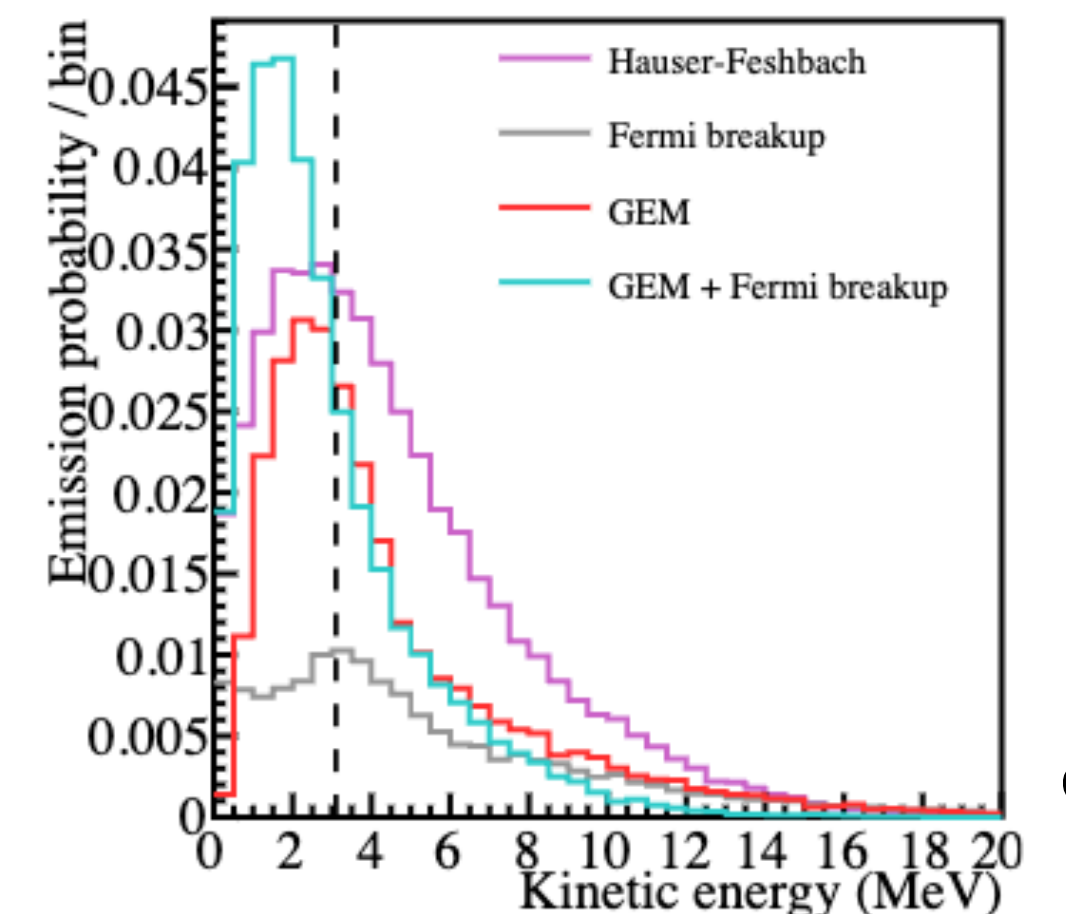
ガンマ線



中性子



陽子





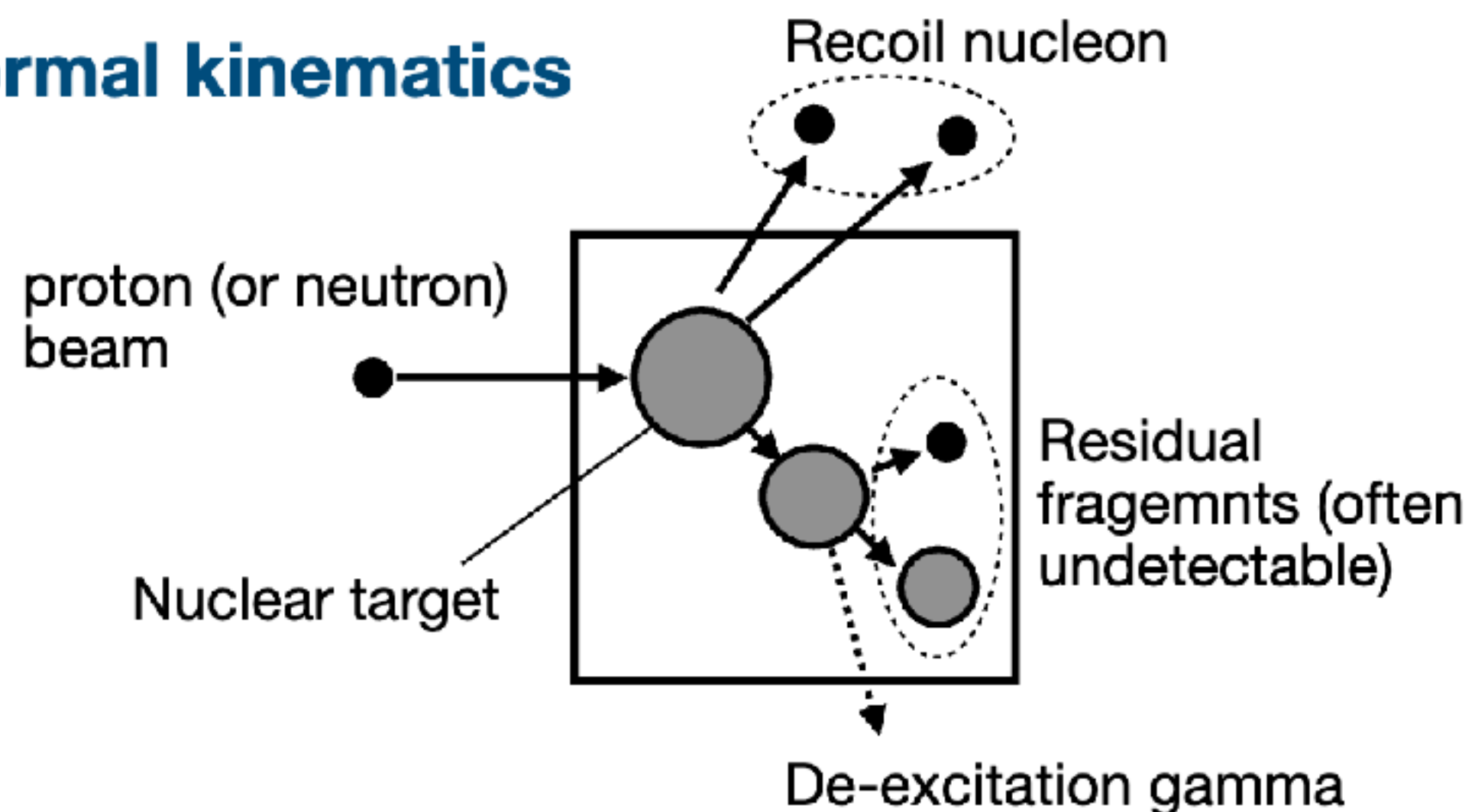
# Contents

- イントロダクション
  - ニュートリノ-原子核反応
  - スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノ探索の現状
  - ニュートリノ-原子核反応予測の課題
- 逆運動学実験
  - 逆運動学実験とは
  - SAMURAI-79実験の計画
- $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定の検出器シミュレーション
  - 励起エネルギーの再構成精度
  - 脱励起過程の測定

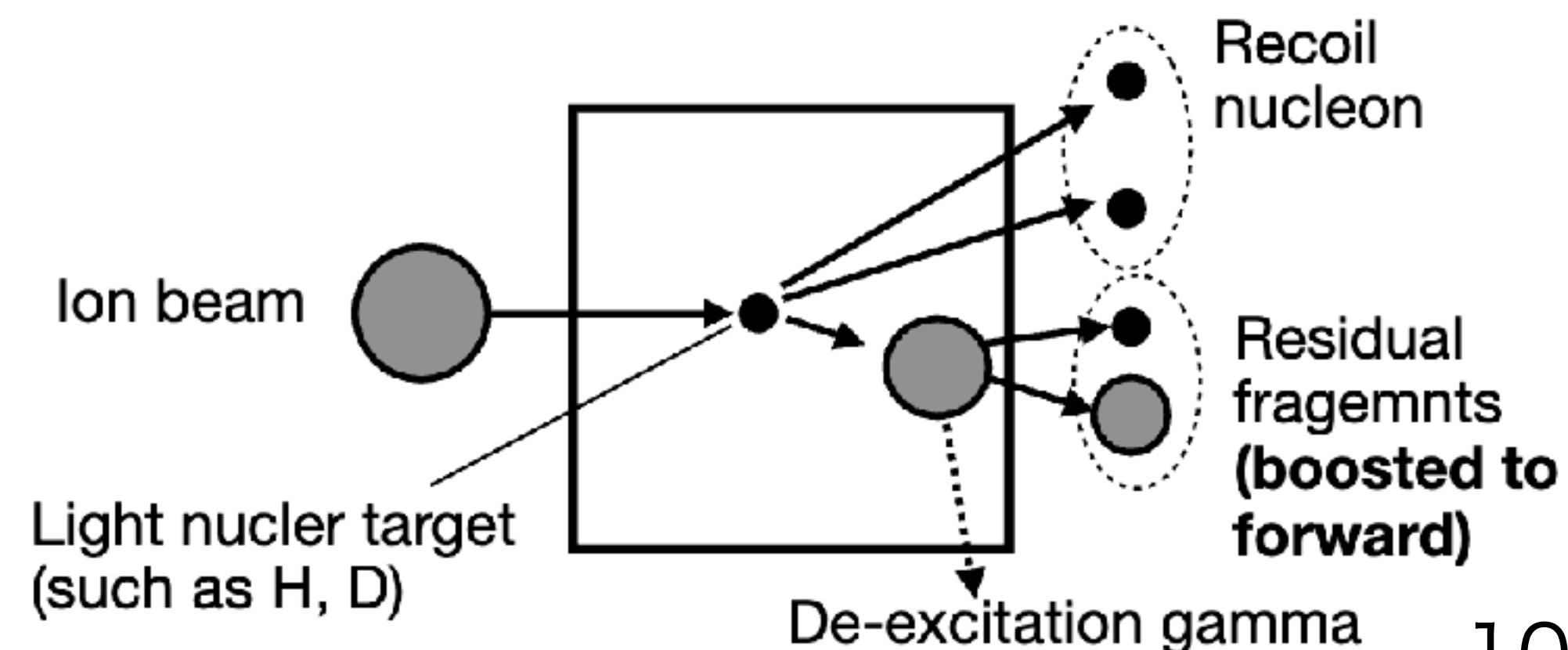
# Inverse Kinematics

- 順運動学実験
  - 核子ビームを原子核標的に当てる
  - 残留核や、脱励起による生成粒子はほとんど検出できない
- 逆運動学実験
  - 原子核ビームを核子標的に当てる
  - 系全体が実験室系に対して動いているため、残留核や、脱励起による生成粒子を検出できる

## Normal kinematics



## Inverse kinematics



# SAMURAI-79 Experiment

- $^{15}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}$ の主要な脱励起チャンネルの分岐比を、励起エネルギーの関数として測定

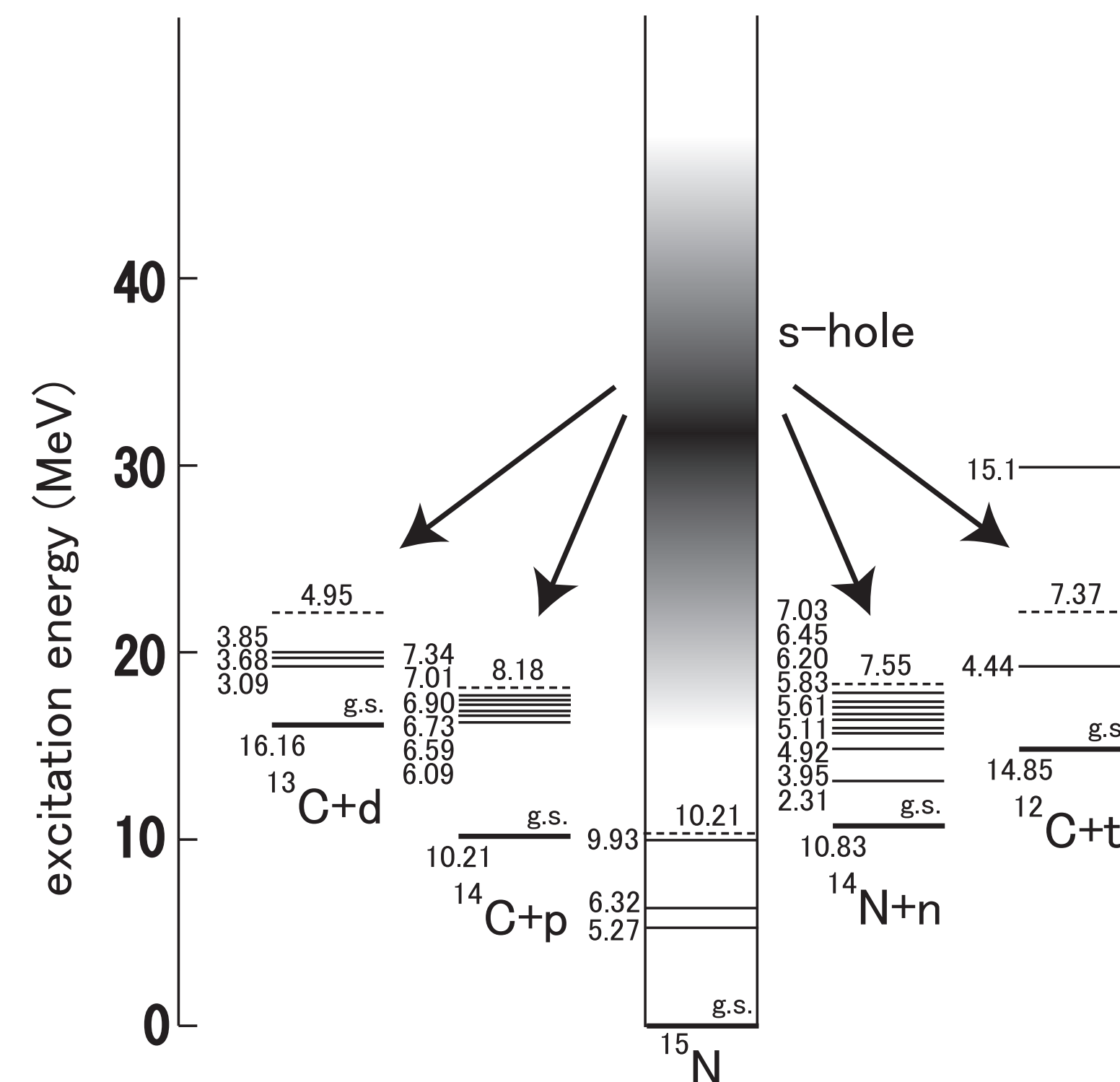
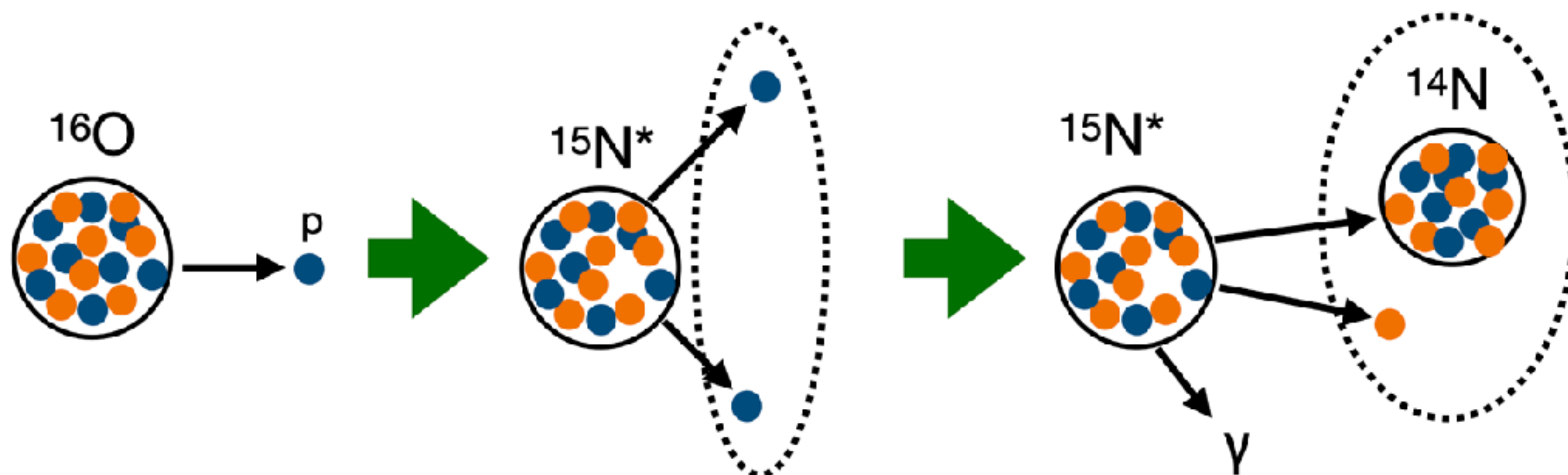
-  $^{16}\text{O}(p, 2p)^{15}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}(p, pn)^{15}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}(p, pn)^{16}\text{O}$

本講演 (水野)

次の講演 (林崎)

- e.g.  $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定

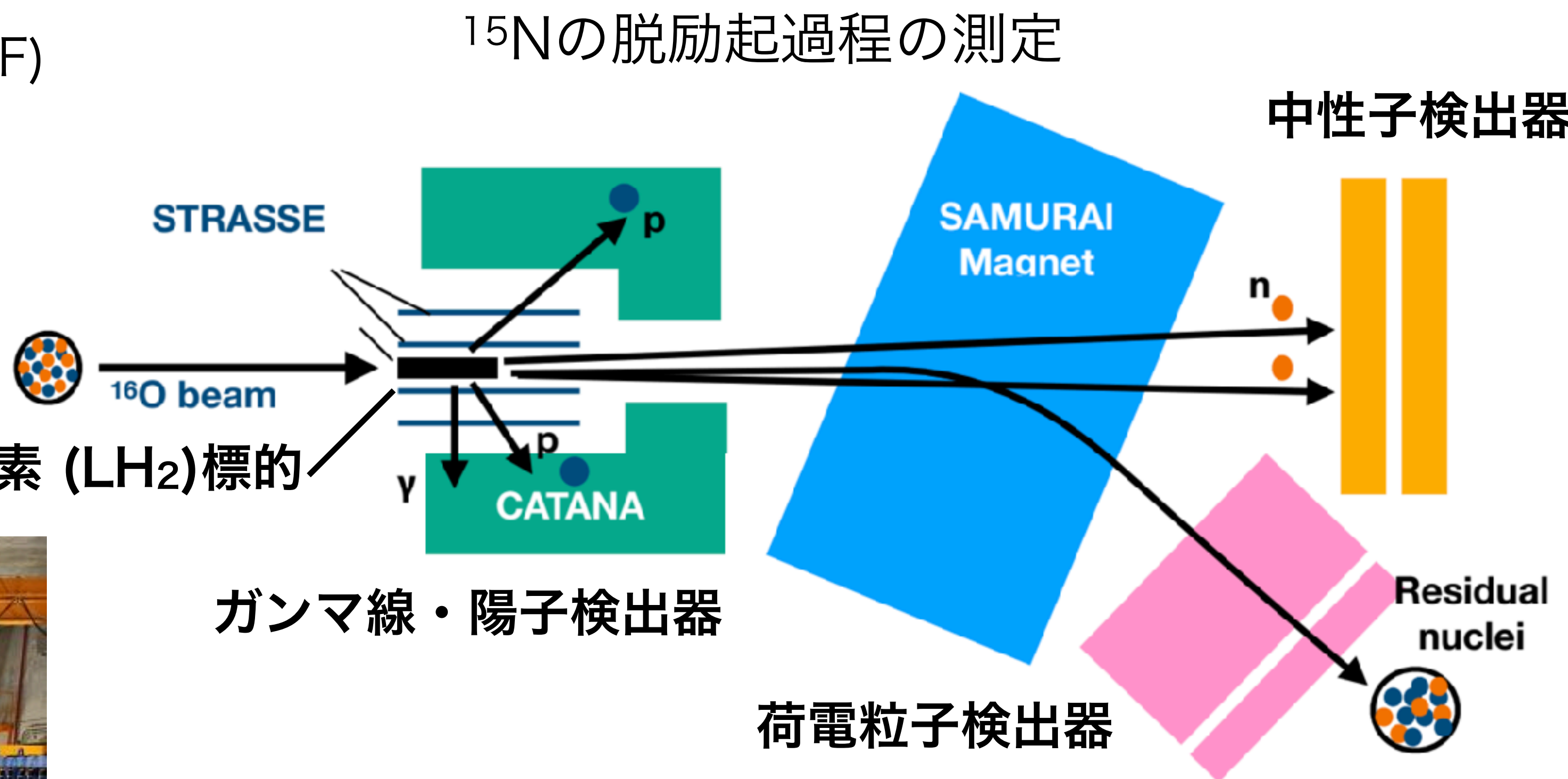
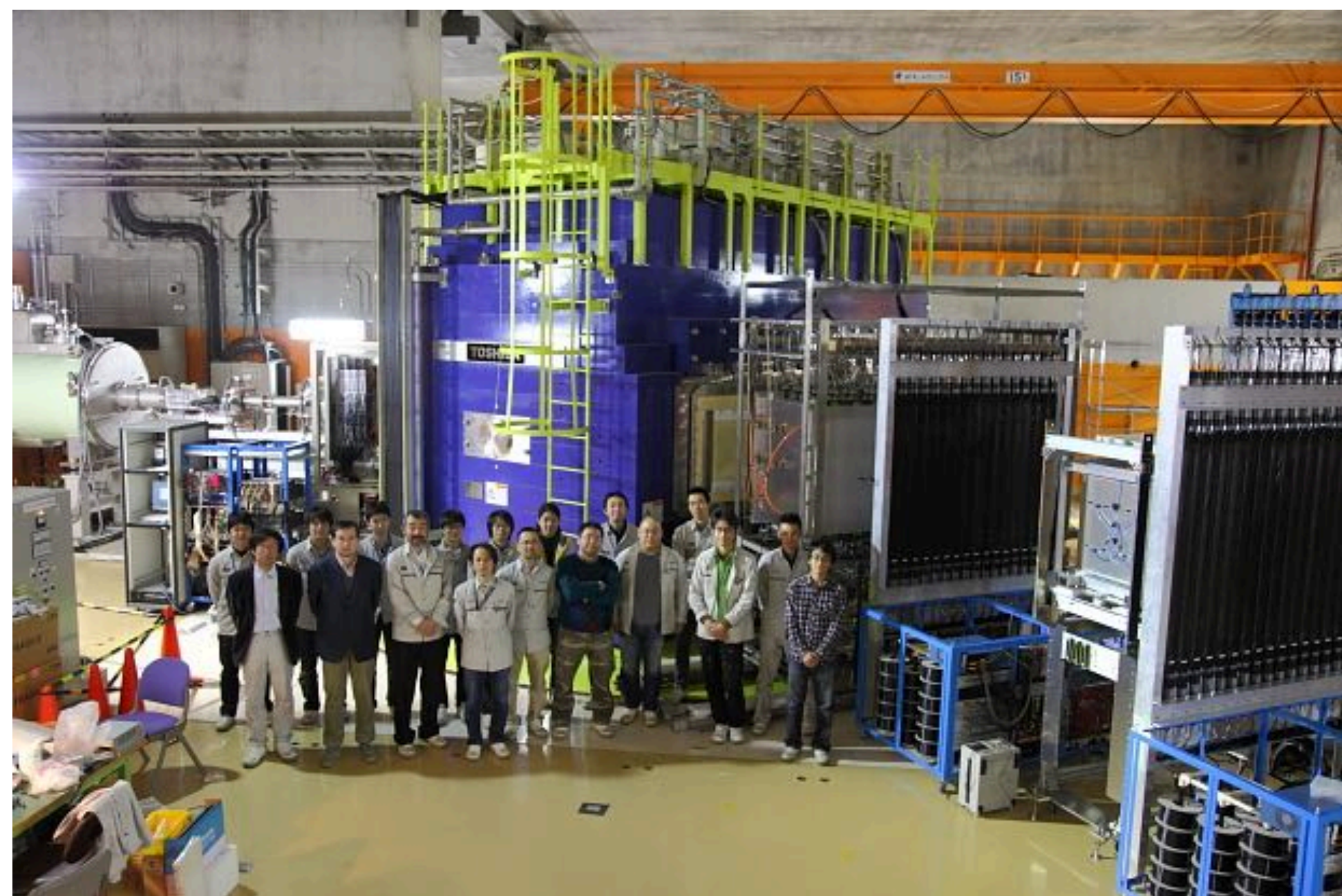
- 200 MeV/uの $^{16}\text{O}$ ビームを陽子標的に衝突させ、(p, 2p)反応により励起状態の $^{15}\text{N}$ を生成
- 2つの陽子の運動量とエネルギーを測定し、 $^{15}\text{N}$ の励起エネルギーを再構成
- 脱励起で生成された残留核、脱励起ガンマ線、蒸発中性子を検出





# SAMURAI-79 Experiment

- ・ 理化学研究所 RIビームファクトリー (RIBF)
- ・ SAMURAIスペクトロメーター
- ・ 2024年12月のPACで採択
  - 早ければ今年秋に最初の測定を行う



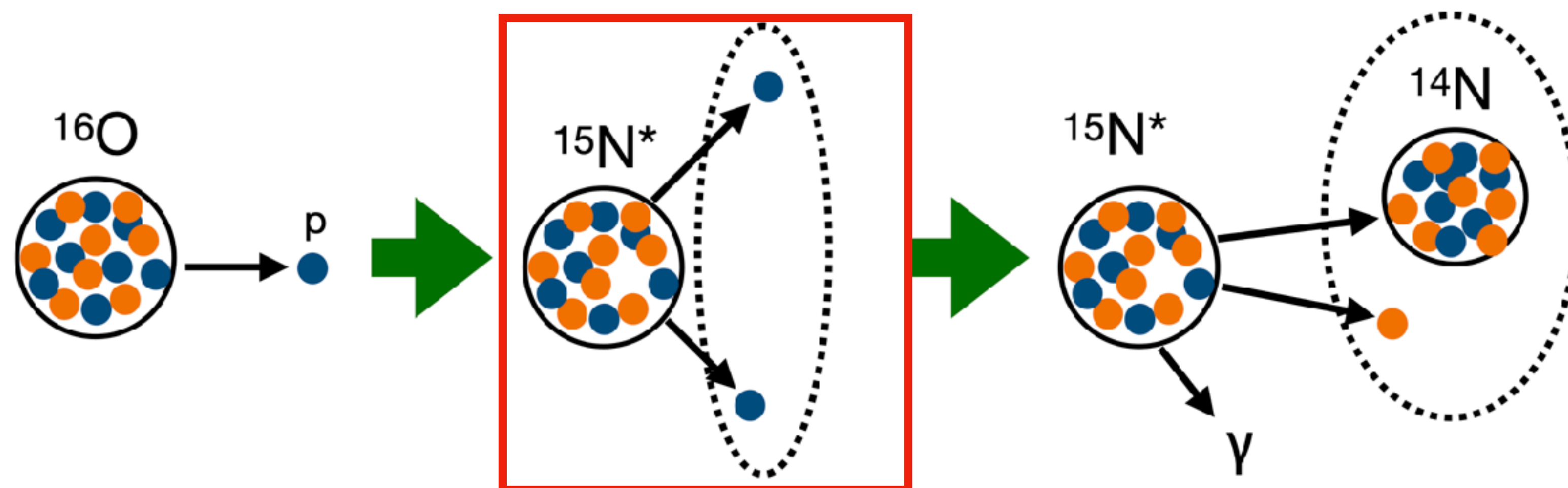
実験ホールの写真  
(講演者は写ってないです)



# Research motivation

- 主要な脱励起チャンネルの分岐比を、励起エネルギーの関数として測定
    - 励起エネルギーをどのように測定するか？どのくらいの精度で測定できるか？
    - 分岐比をどのくらいの精度で測定できるか？
- シミュレーションで評価

ノックアウト陽子の測定による  
 $^{15}\text{N}$ の励起エネルギー再構成 (本講演のテーマ)

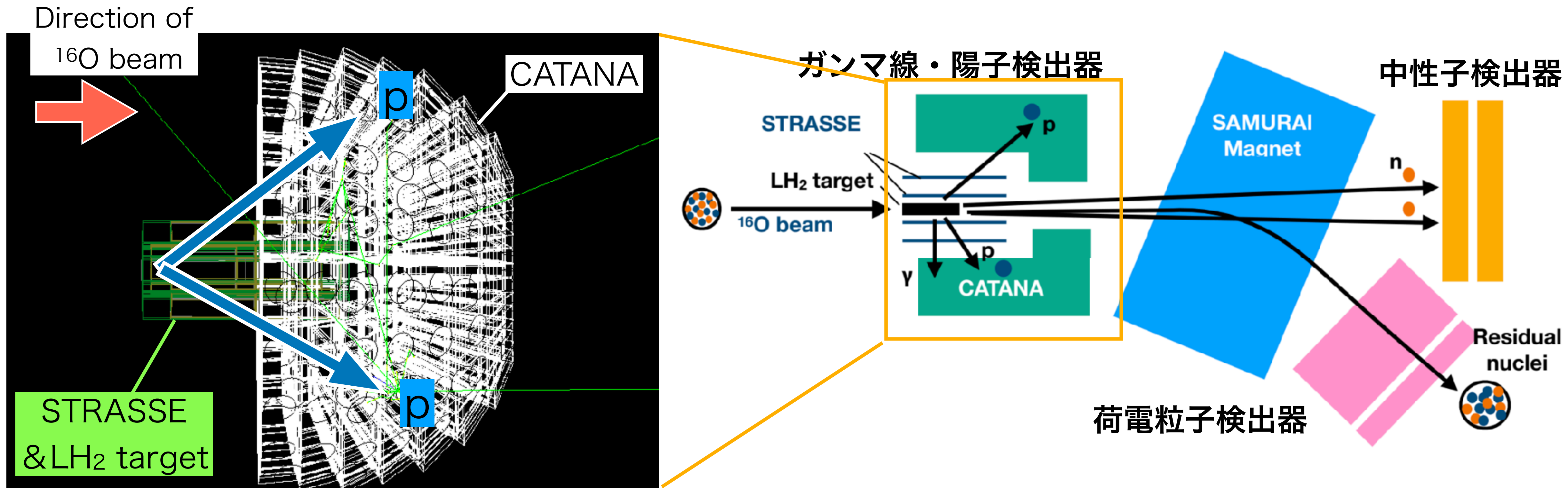


# Contents

- イントロダクション
  - ニュートリノ-原子核反応
  - スーパーカミオカンデでの超新星背景ニュートリノ探索の現状
  - ニュートリノ-原子核反応予測の課題
- 逆運動学実験
  - 逆運動学実験とは
  - SAMURAI-79実験の計画
- $^{15}\text{N}$ の脱励起過程の測定の検出器シミュレーション
  - 励起エネルギーの再構成精度
  - 脱励起過程の測定

# Excitation Energy Reconstruction

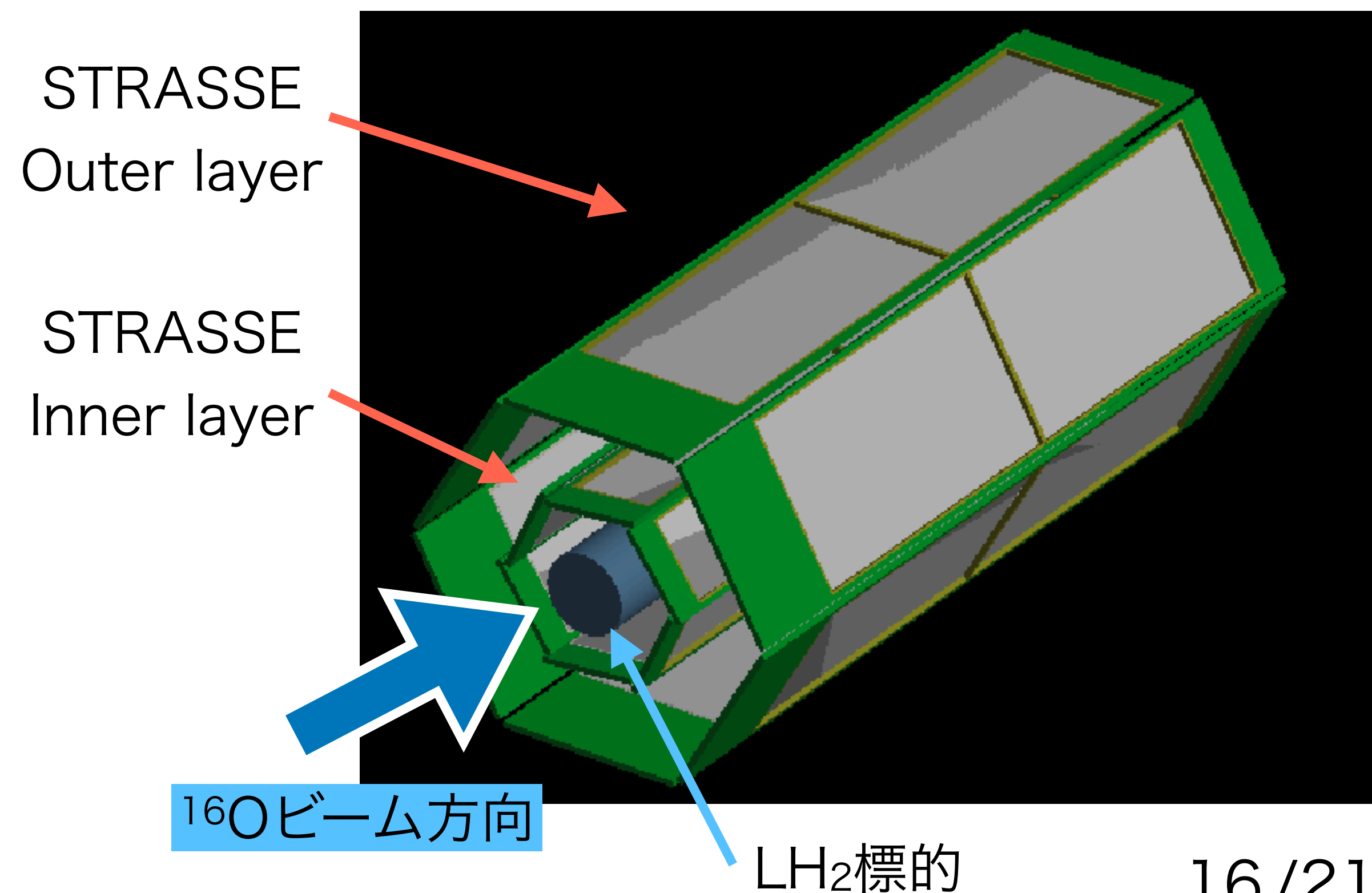
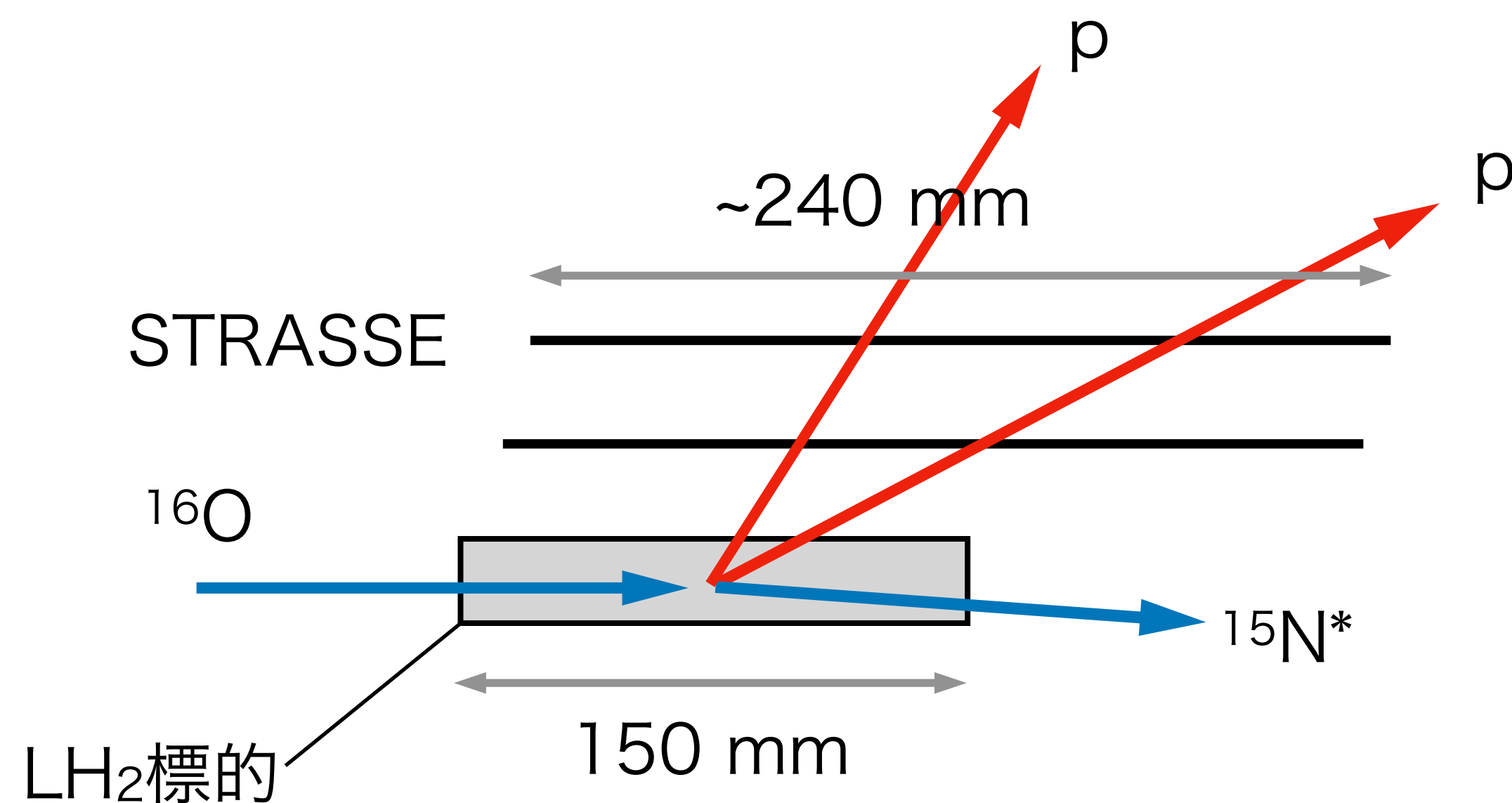
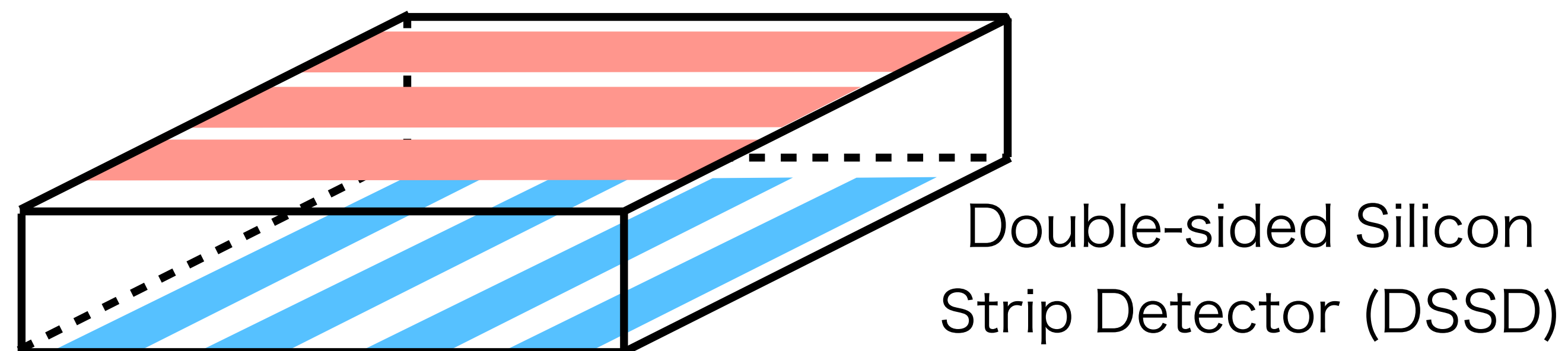
- $^{15}\text{N}$ の励起エネルギー再構成
- 2つのノックアウト陽子のみをシミュレーションに入れ、検出器の応答を見る
  - 使用する検出器: Siトラックャー (STRASSE)、CsIシンチレーター (CATANA)





# Measurement of Recoil Protons

- Si トラッカー (STRASSE)
  - 2層の両面Siストリップ検出器
  - ストリップの間隔は200  $\mu\text{m}$
  - 陽子の飛跡から運動量方向を求める
  - 数 mrad程度の角度分解能
  - 2本の飛跡から反応点の位置を求める
  - 1 mm程度の位置分解能





# Measurement of Recoil Protons

- CsI カロリメーター (CATANA)
  - 140個のCsI (Na)結晶のシンチレーター
  - 662 keVの $\gamma$ 線に対するエネルギー分解能は10% (FWHM)
  - 陽子のエネルギーを測定
  - 1つの結晶内でのenergy depositを合計し、

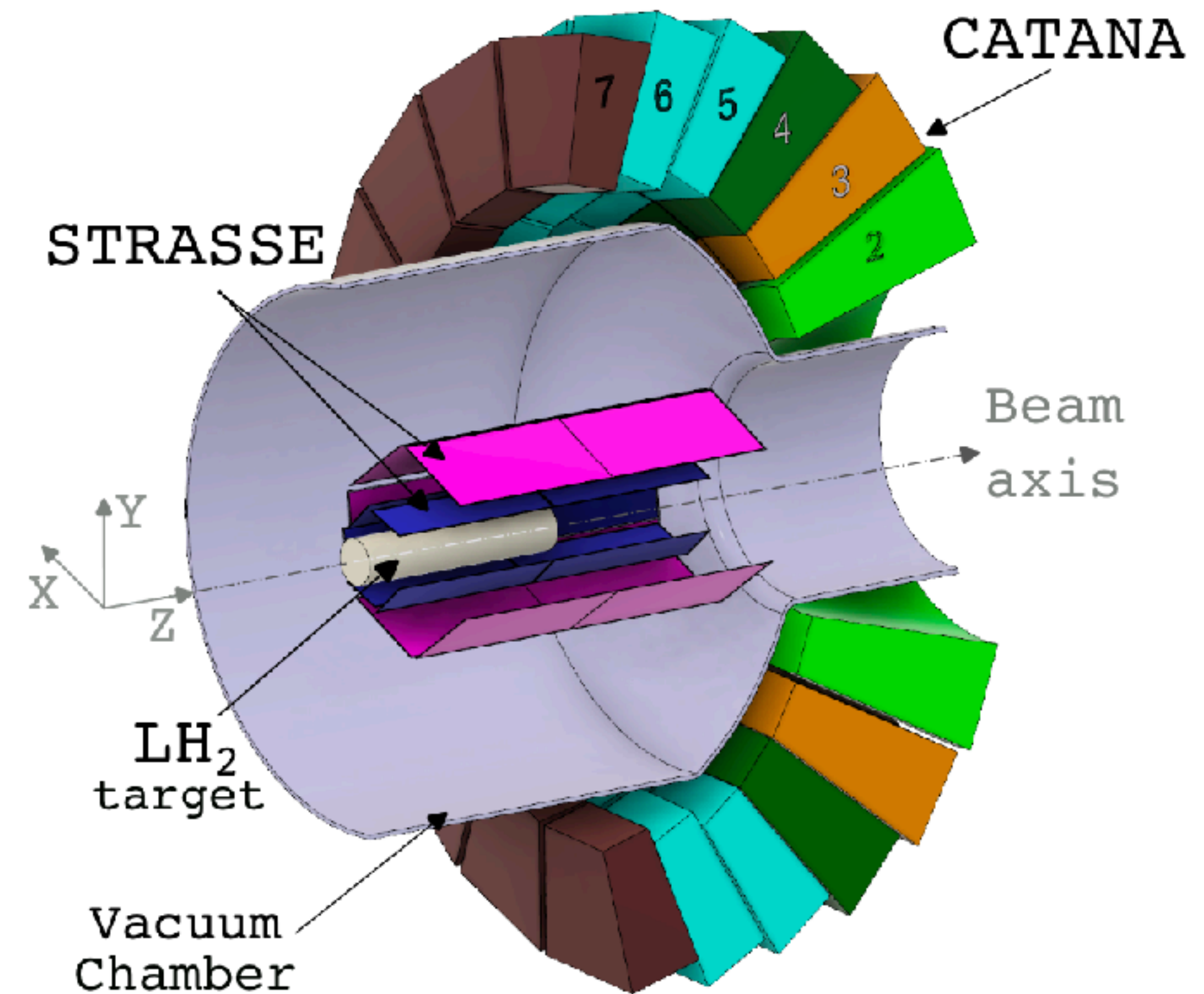
$$\sigma [\text{keV}] = a \times (E [\text{keV}])^b$$

$a = 0.686569$   
 $b = 0.564352$

のガウス分布で決めたものを、観測されるエネルギーとする

- $E = 100 \text{ MeV}$ に対し  $\sigma = 0.5 \text{ MeV}$

a、bの値はソースキャリブレーションから



H. N. Liu et al., Eur. Phys. J. A 59, 6, 121 (2023)

# Excitation Energy Reconstruction

励起エネルギーの求め方

$$E_x = \sqrt{(p_{\text{beam}} + p_{\text{tgt}} - p_1 - p_2)^2 - M_{^{15}\text{N}}^2}$$

STRASSEで運動量方向を測定

CATANAで運動エネルギーを測定

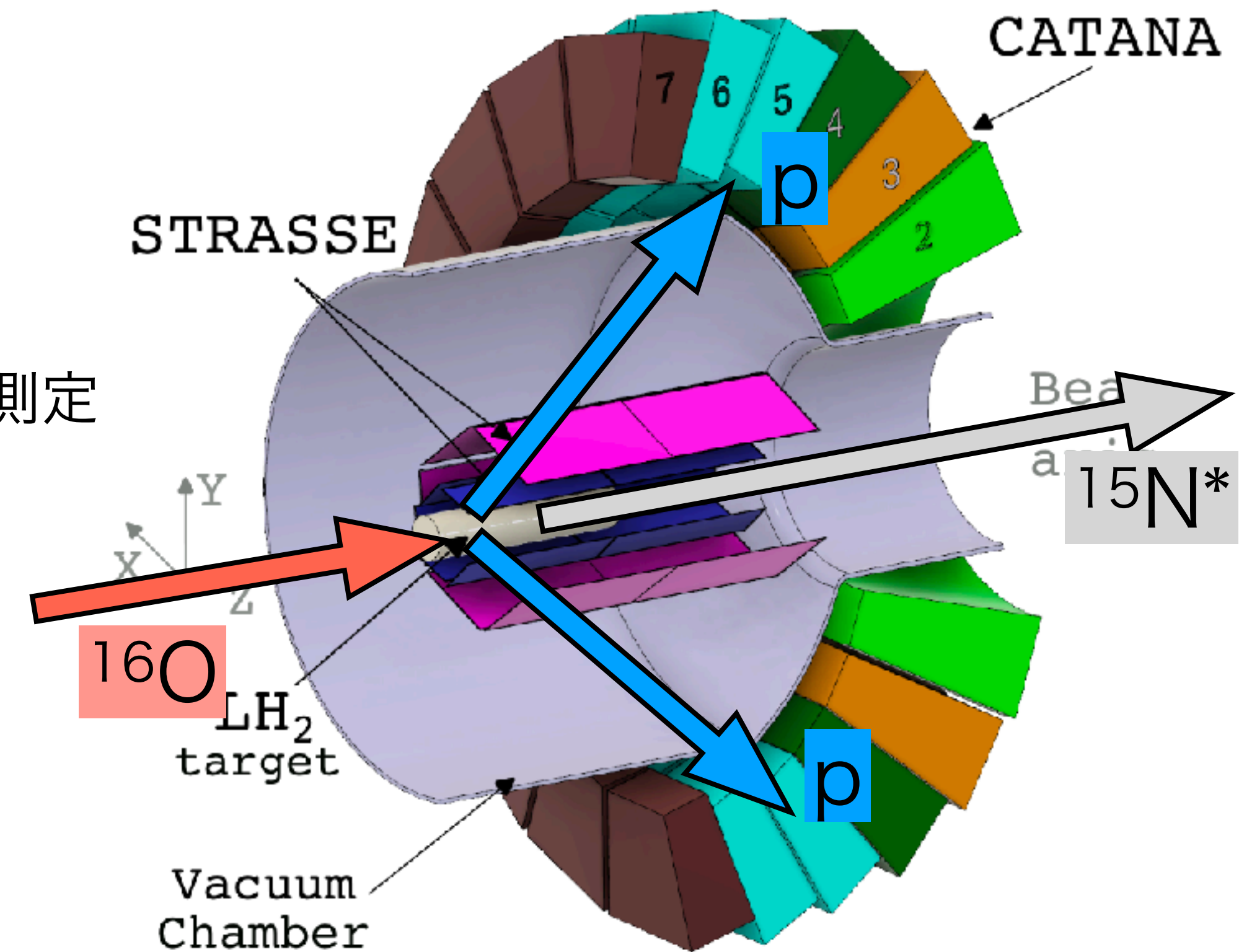
反応点からエネルギー損失を推定

$p_{\text{beam}}$  : ビームの4元運動量

$p_{1,2}$  : 反跳陽子の4元運動量

$p_{\text{tgt}}$  : 標的の4元運動量

$M_{^{15}\text{N}}$  :  $^{15}\text{N}$ の質量



H. N. Liu et al., Eur. Phys. J. A 59, 6, 121 (2023)

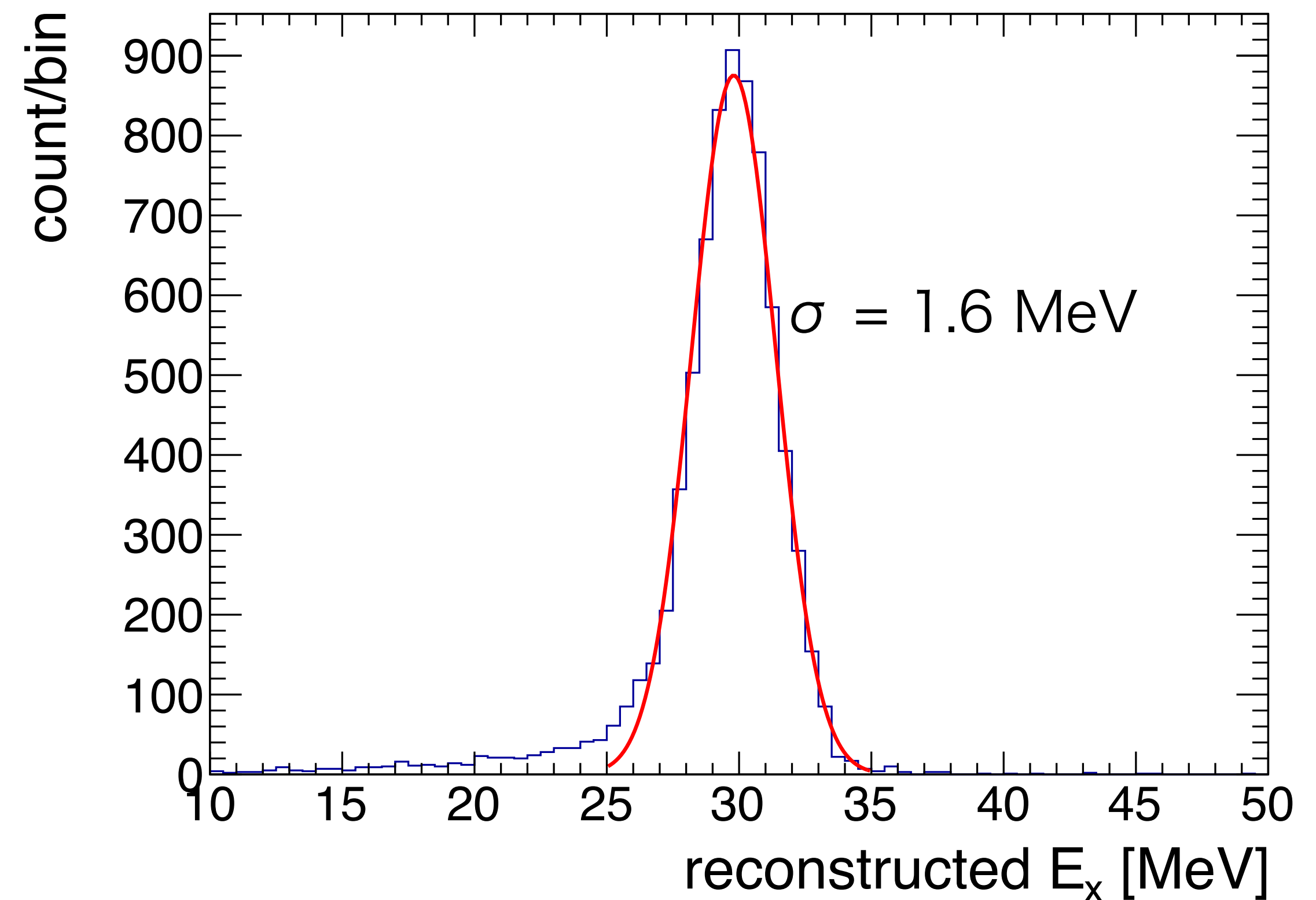
# Excitation Energy Reconstruction

- STRASSEとCATANAで測定された反跳陽子とビームのエネルギーと運動量から、 $^{15}\text{N}$ の励起エネルギーを再構成

$$E_x = \sqrt{(p_{\text{beam}} + p_{\text{tgt}} - p_1 - p_2)^2 - M_{^{15}\text{N}}^2}$$

- 実験では、5 MeVのビンで区切って励起エネルギーを測定する
  - 十分な精度が達成された

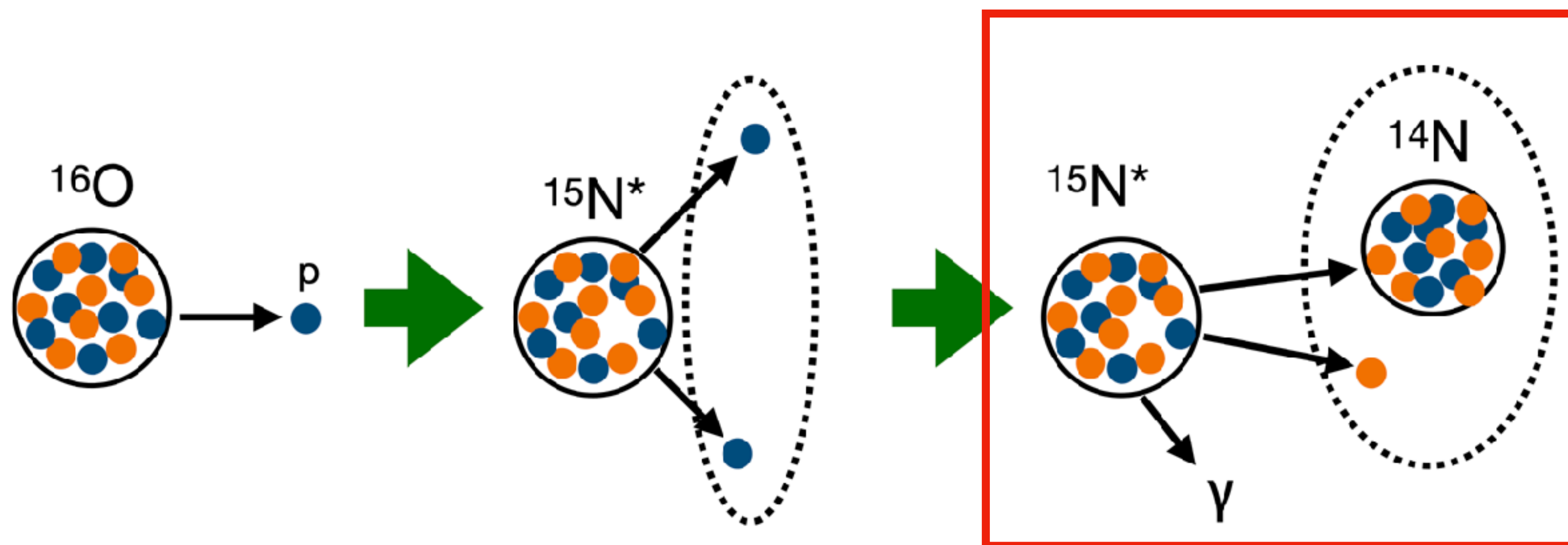
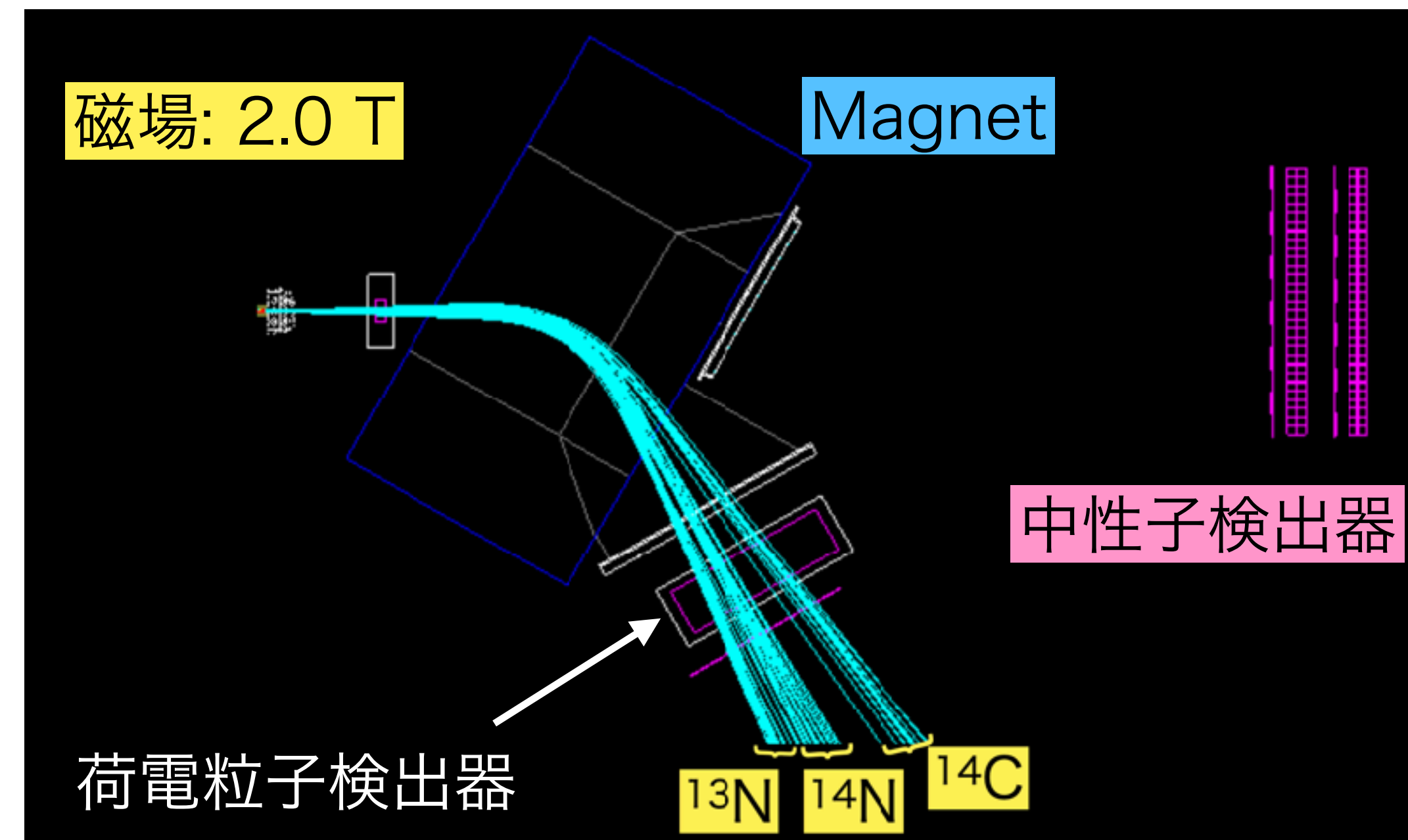
True  $E_x = 30$  MeV



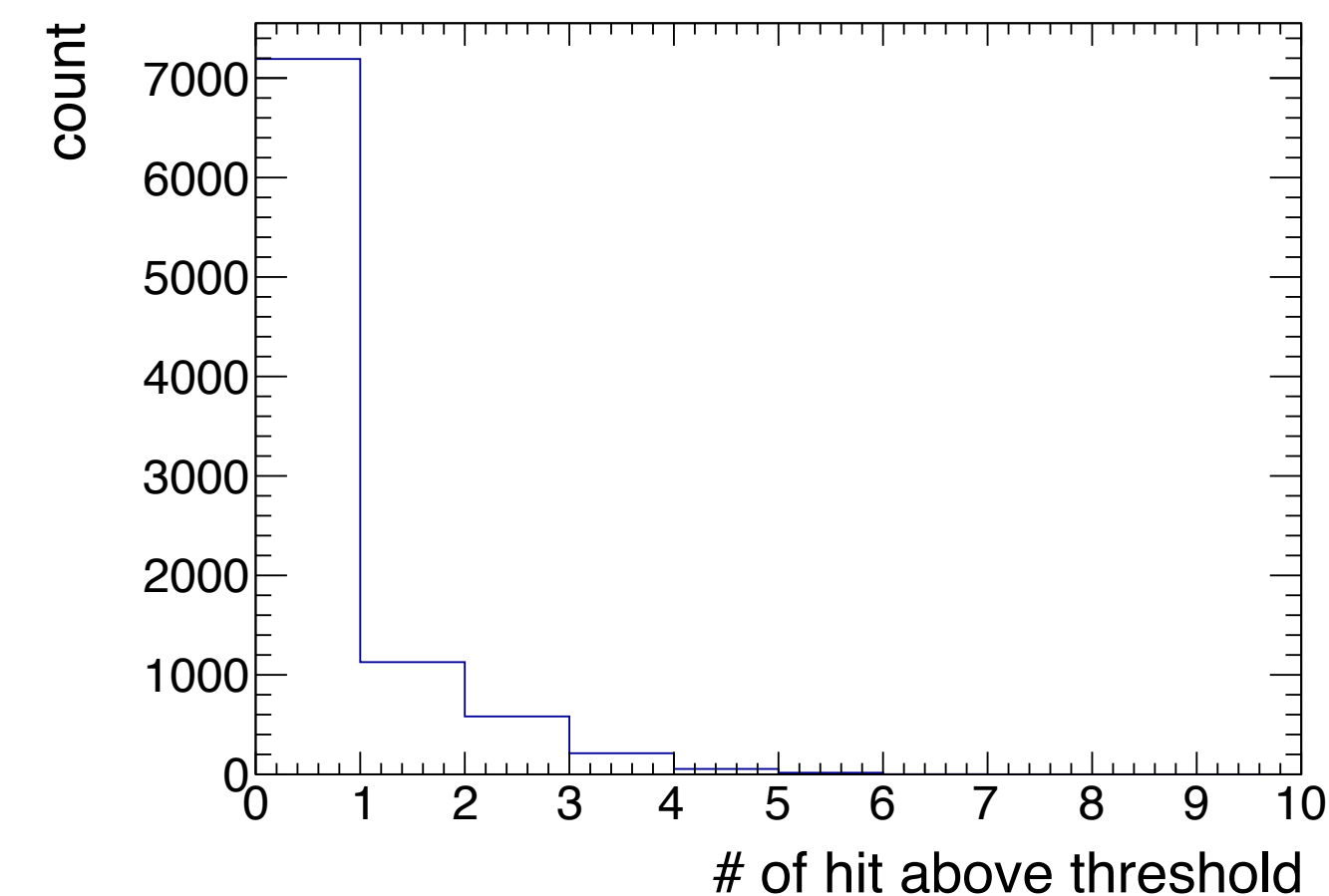


# Measurement of Branching Ratio

- 残留核と中性子を検出することで、各脱励起チャンネルの分岐比を測定する
  - 残留核の飛跡のシミュレーション
  - 中性子の検出効率の評価



中性子検出器へのヒット数分布





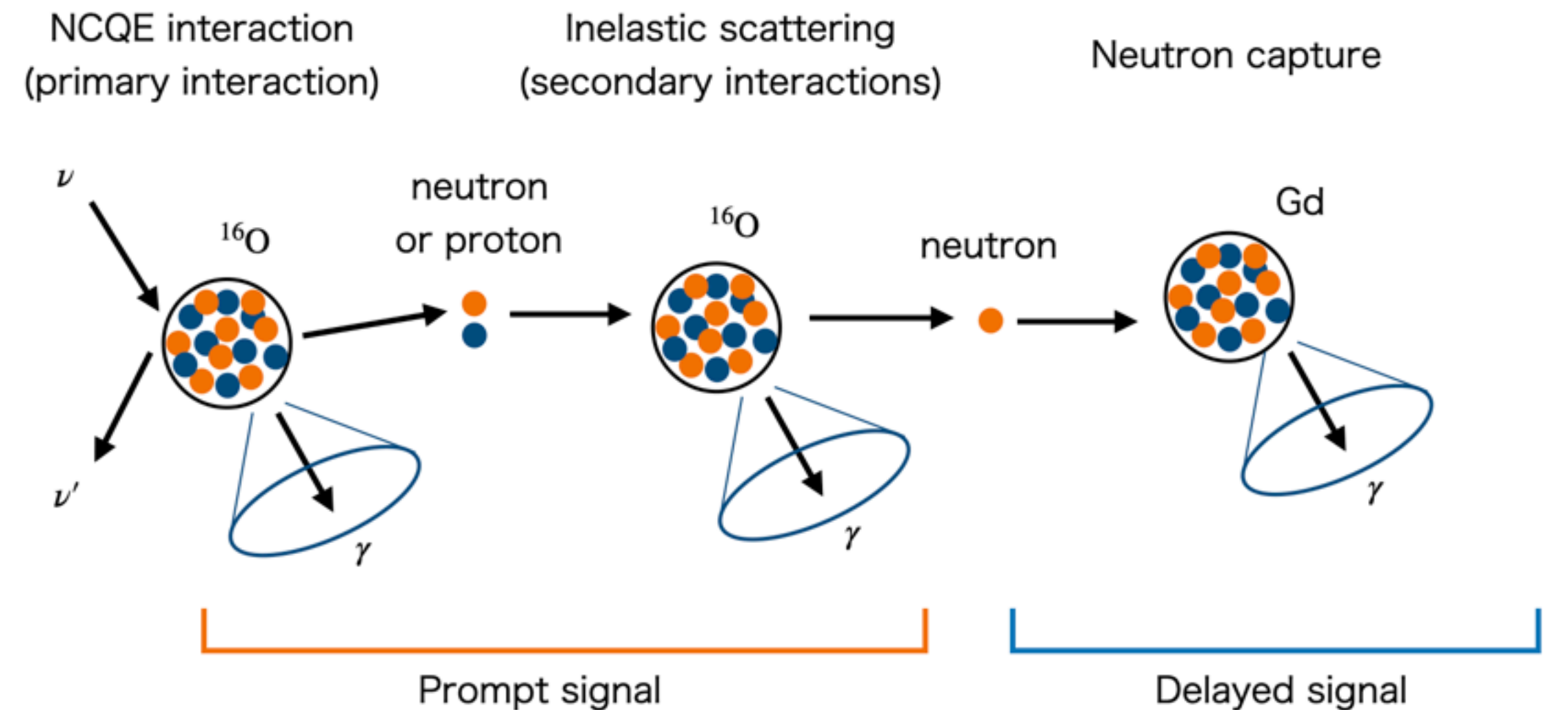
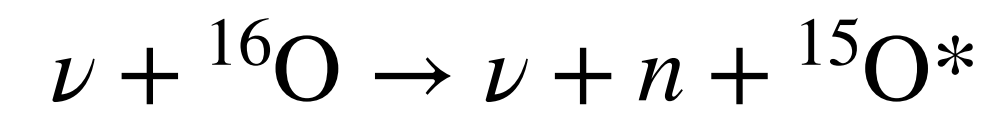
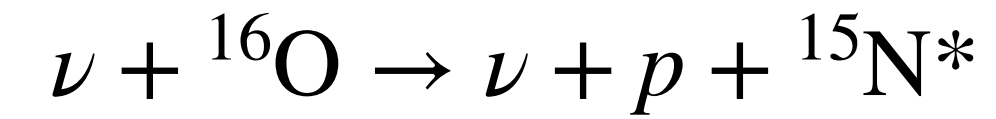
# Summary

- 超新星背景ニュートリノ発見のためには、大気ニュートリノと酸素原子核の反応の精密予測が必要
- 特に重要なのは $^{15}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}$ の脱励起過程の理解
- これらの核種の脱励起過程を測定するSAMURAI-79実験を計画中
  - 逆運動学実験@理研RIBF
- 実験に向けたシミュレーションスタディを行っている
  - 励起エネルギーの測定
  - 脱励起チャンネルの分岐比の測定
  - ノックアウト中性子の測定のため、新しい中性子検出器が必要 (次の林崎の講演)

Back up

# Atmospheric Neutrino

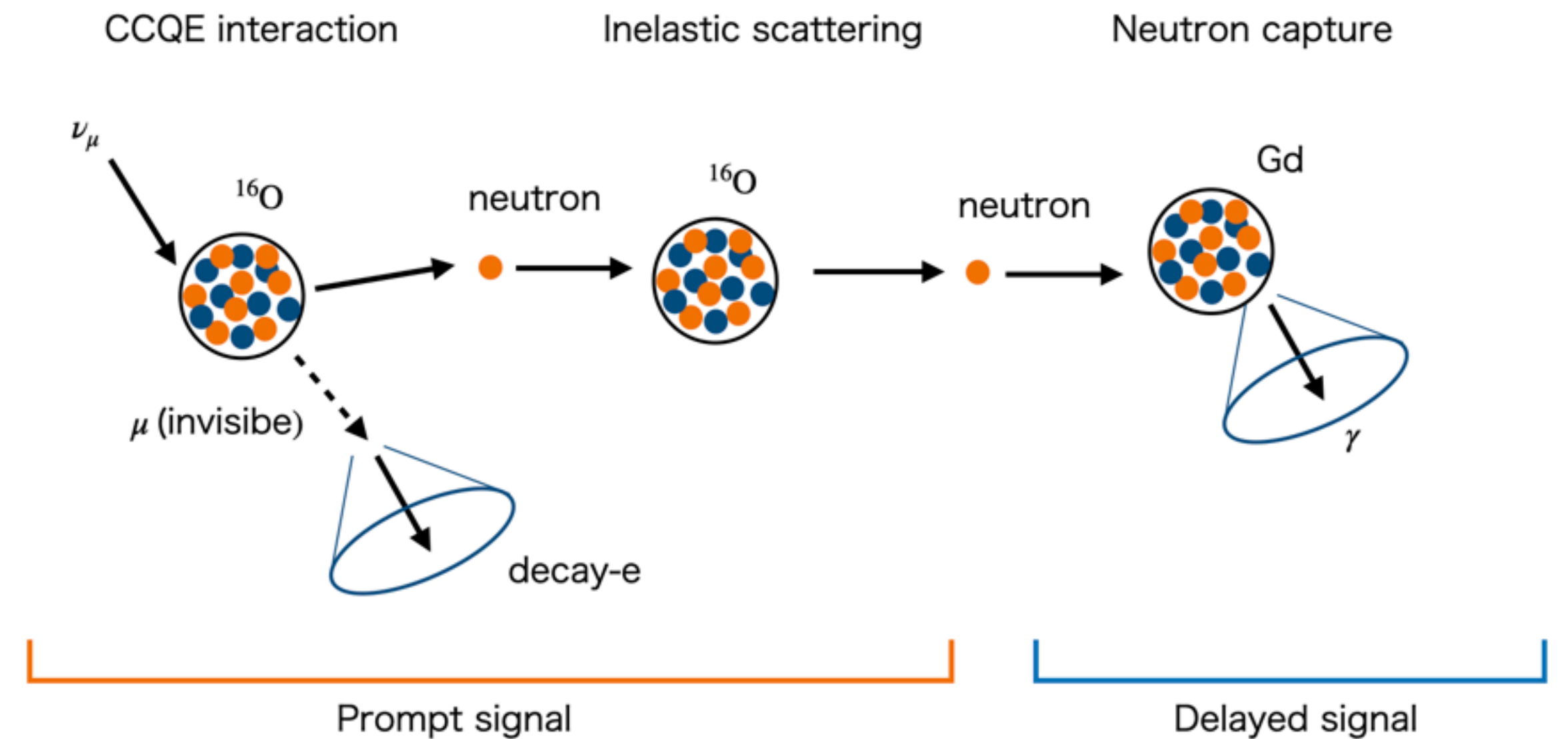
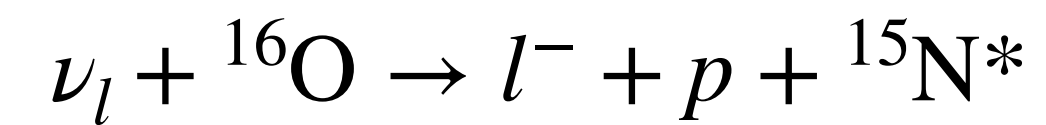
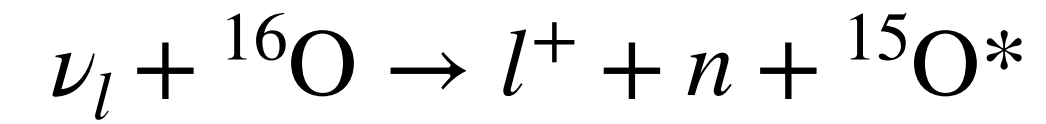
- 主要な背景事象: 大気ニュートリノ
- 1. 大気ニュートリノと酸素原子核のNCQE反応と、それに伴って起こる二次反応
  - 先発信号: NCQE反応と二次反応により生じた原子核からの脱励起ガンマ線
  - 後発信号: NCQE反応と二次反応により生じた反跳中性子および蒸発中性子がGdに捕獲されたときのガンマ線
  - 68%の系統誤差





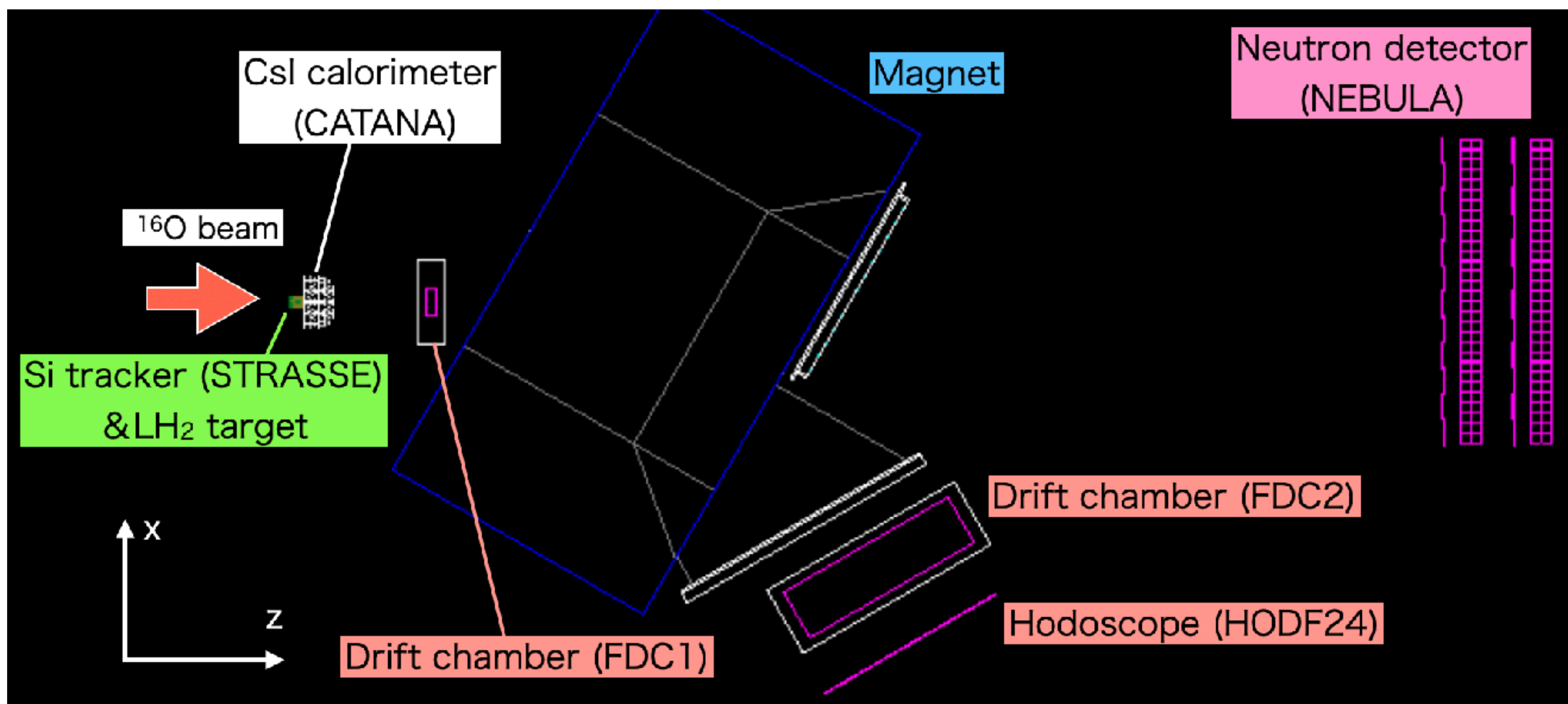
# Atmospheric Neutrino

- 主要な背景事象: 大気ニュートリノ
- 2. 大気ニュートリノ  $\nu_\mu$  と酸素原子核のCCQE反応と、それに伴って起こる二次反応
  - 先発信号: ミューオンの崩壊による電子/陽電子
  - 後発信号: CCQE反応と二次反応により生じた反跳中性子および蒸発中性子がGdに捕獲されたときのガンマ線
- 3. その他 ( $\nu_e$ CC etc.)
- (2)とまとめてnon-NCQEで36%の系統誤差



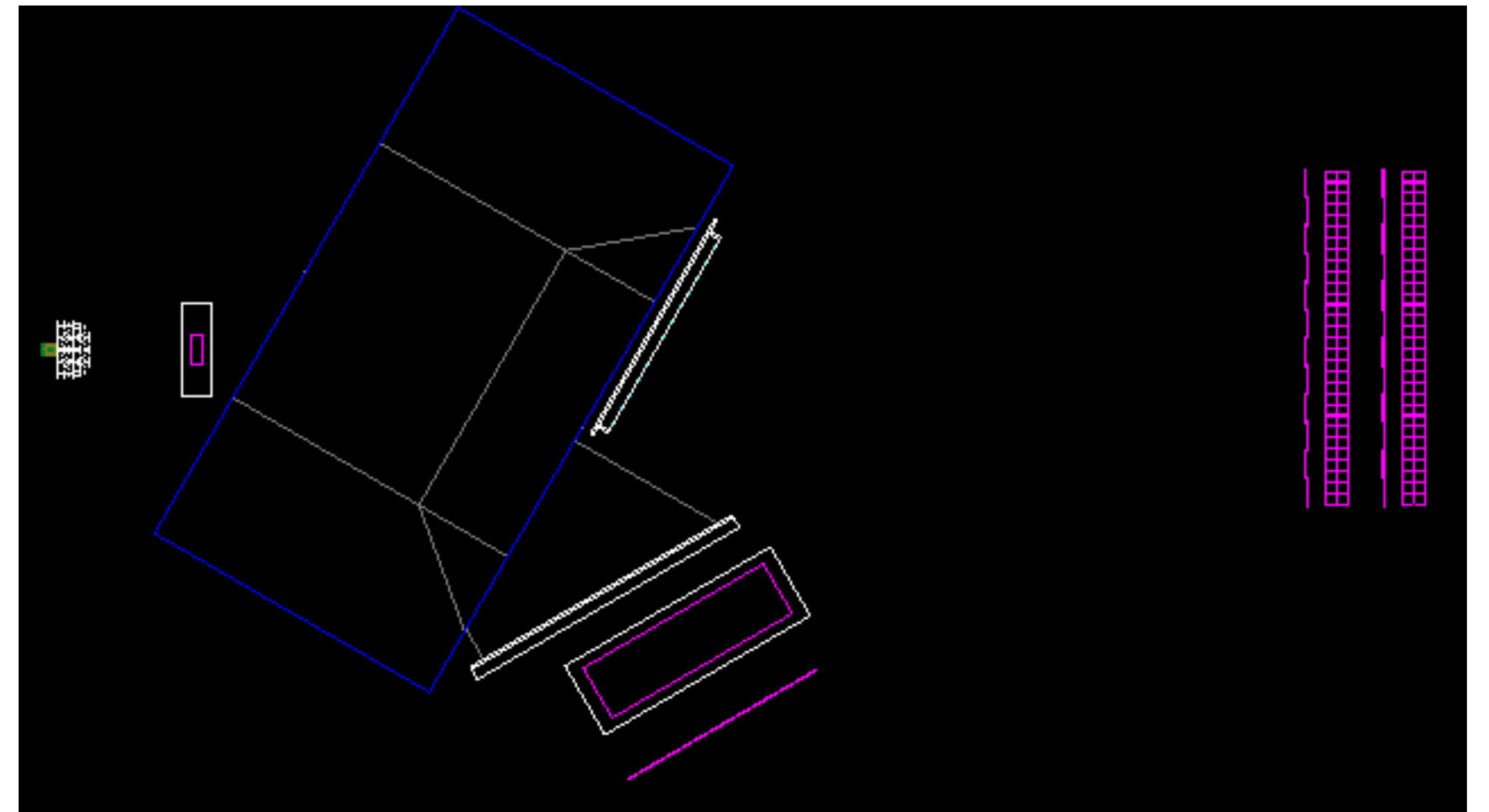
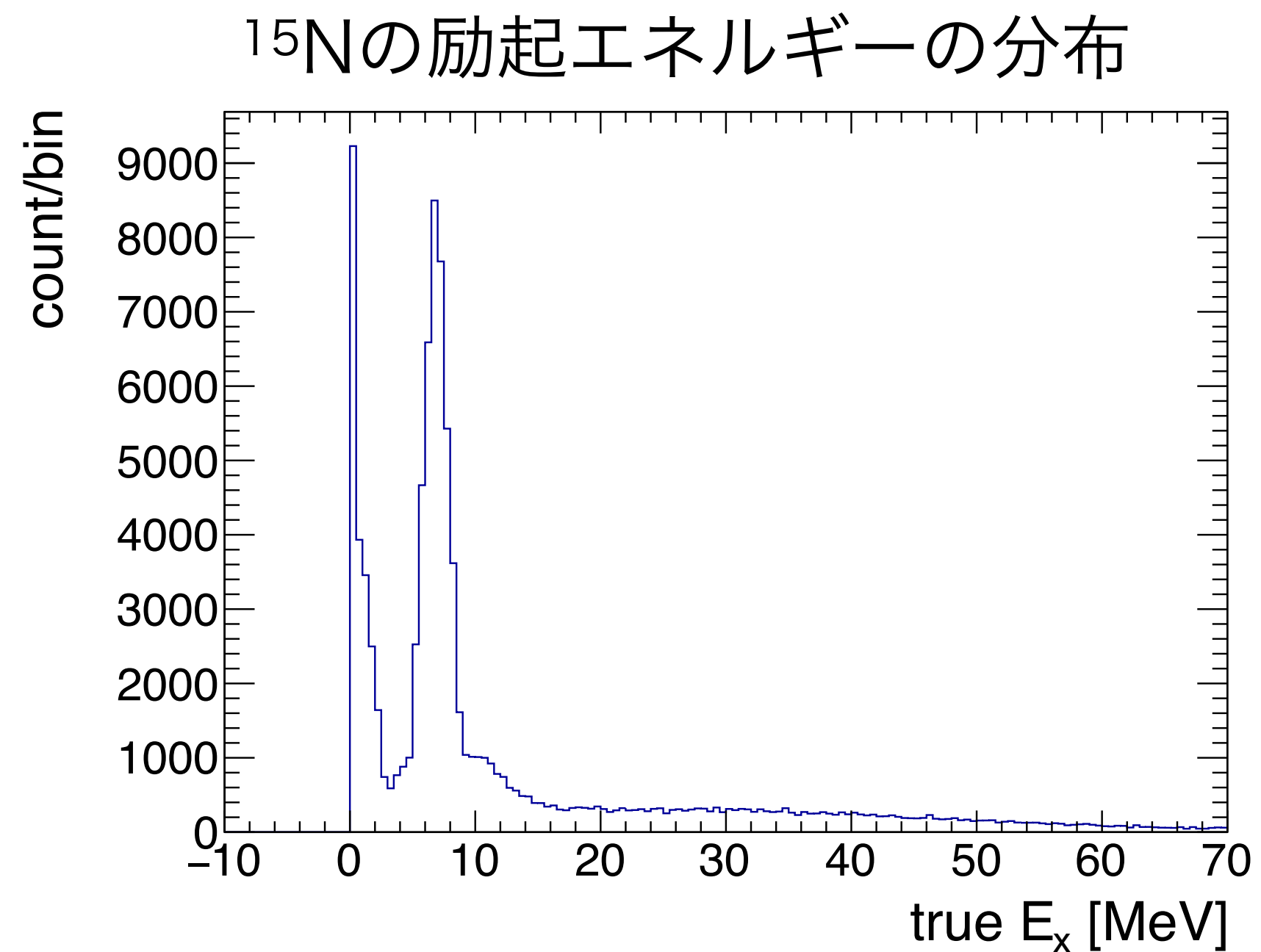
# Simulation Setup

- SAMURAIスペクトロメーターの検出器が再現されたGeant4ベースのシミュレーション
- ビームと標的の反応の部分は別途計算し、 $^{16}\text{O}(p, 2p)^{15}\text{N}$ 反応のみを生成



# Simulation Setup

- SAMURAIスペクトロメーターの検出器が再現されたGeant4ベースのシミュレーション
- $^{16}\text{O}(p, 2p)^{15}\text{N}$ 反応のイベントを生成
  - 励起エネルギー固定 ( $E_x = 10, 30, 50$  MeV)
  - 連続的な励起エネルギー分布
    - $^{16}\text{O}$ のSpectral function [Benhar et al., Phys. Rev. D, 72\(5\):053005 \(2005\)](#)

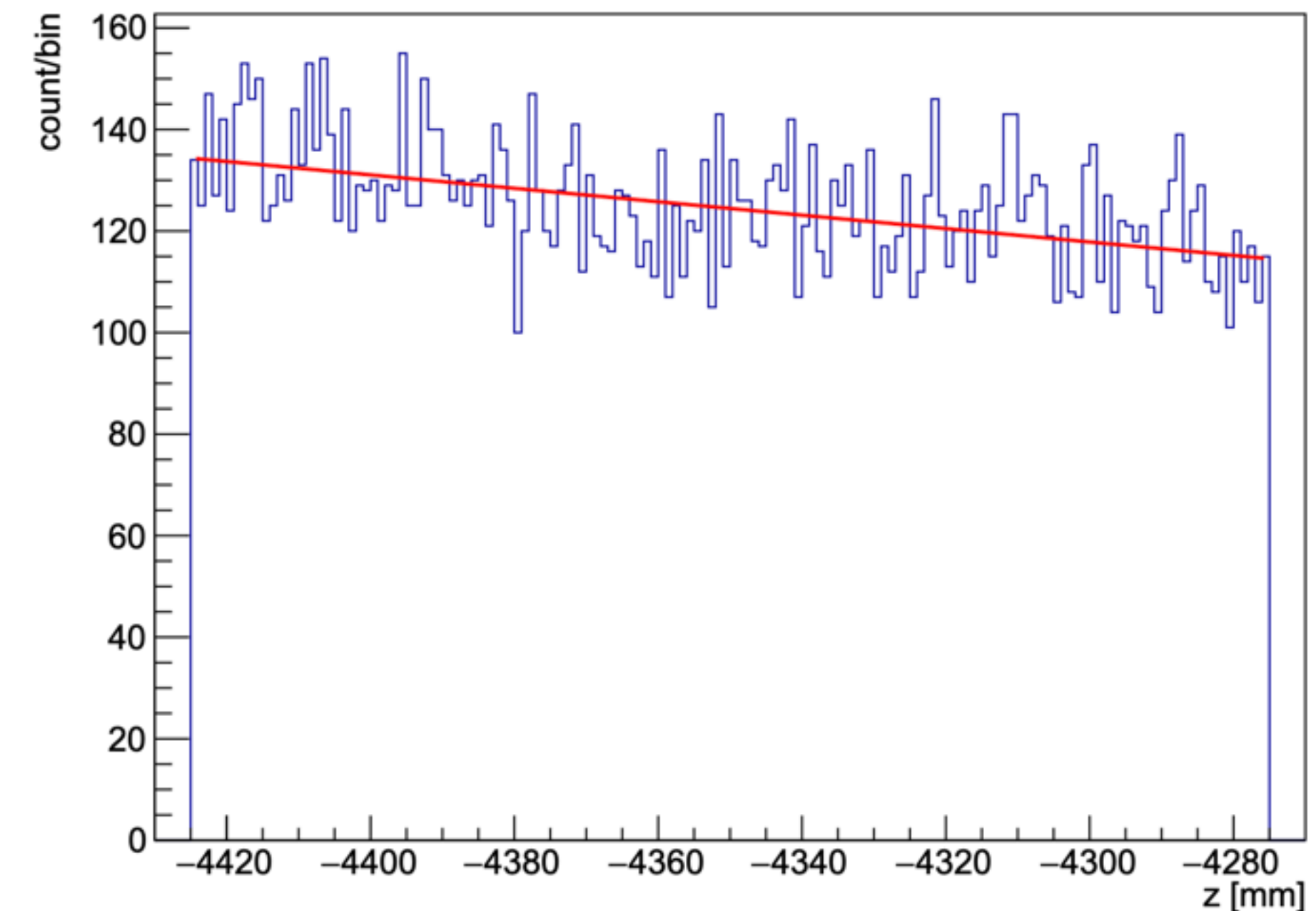




# Event Generation

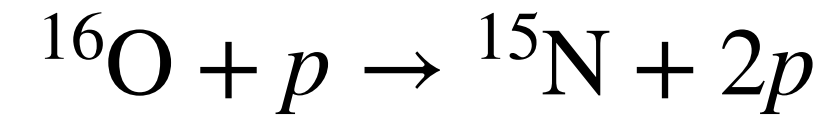
- LH<sub>2</sub>標的内での酸素ビームの輸送をGeant4でシミュレーション
- あらかじめ決められた反応点に到達したとき、酸素のエネルギーと運動量をもとに(p, 2p)反応の運動学を計算する
- 酸素ビームの初期条件
  - 運動エネルギー: 200 MeV/u
  - 方向: z軸 (LH<sub>2</sub>に垂直な向き)
  - ビームの空間的広がり:  $\sigma_{x,y} = 5$  mm
- 反応点は右図の分布を再現するように決定
- (p, 2p)反応の計算
  1. 励起エネルギー固定 ( $E_x = 10, 30, 50$  MeV)
  2. 連続的な励起エネルギー分布 (spectral function)

200 MeV/uの酸素ビームを入射したときの、LH<sub>2</sub>標的における反応点分布



# Event Generation

## 1. 励起エネルギーを固定したイベント生成



### • Virtual dissociation: $^{16}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + p_{\text{virtual}}$

- $^{16}\text{O}$ は $^{15}\text{N}$ と質量 $m_{p,\text{off}}$ の仮想陽子に分けられる

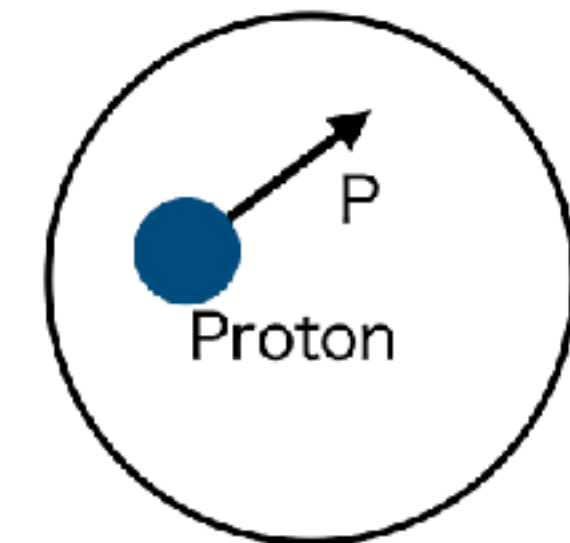
$$m_{^{16}\text{O}} = \sqrt{\vec{P}^2 + (m_{^{15}\text{N}} + E_x)^2} + \sqrt{\vec{P}^2 + m_{p,\text{off}}^2}$$

- $E_x$ :  $^{15}\text{N}$ の励起エネルギー
- 仮想陽子の内部運動量 $P$  ( $^{16}\text{O}$ の静止系)を  $\sigma = 50 \text{ MeV}$ のガウス分布で決定

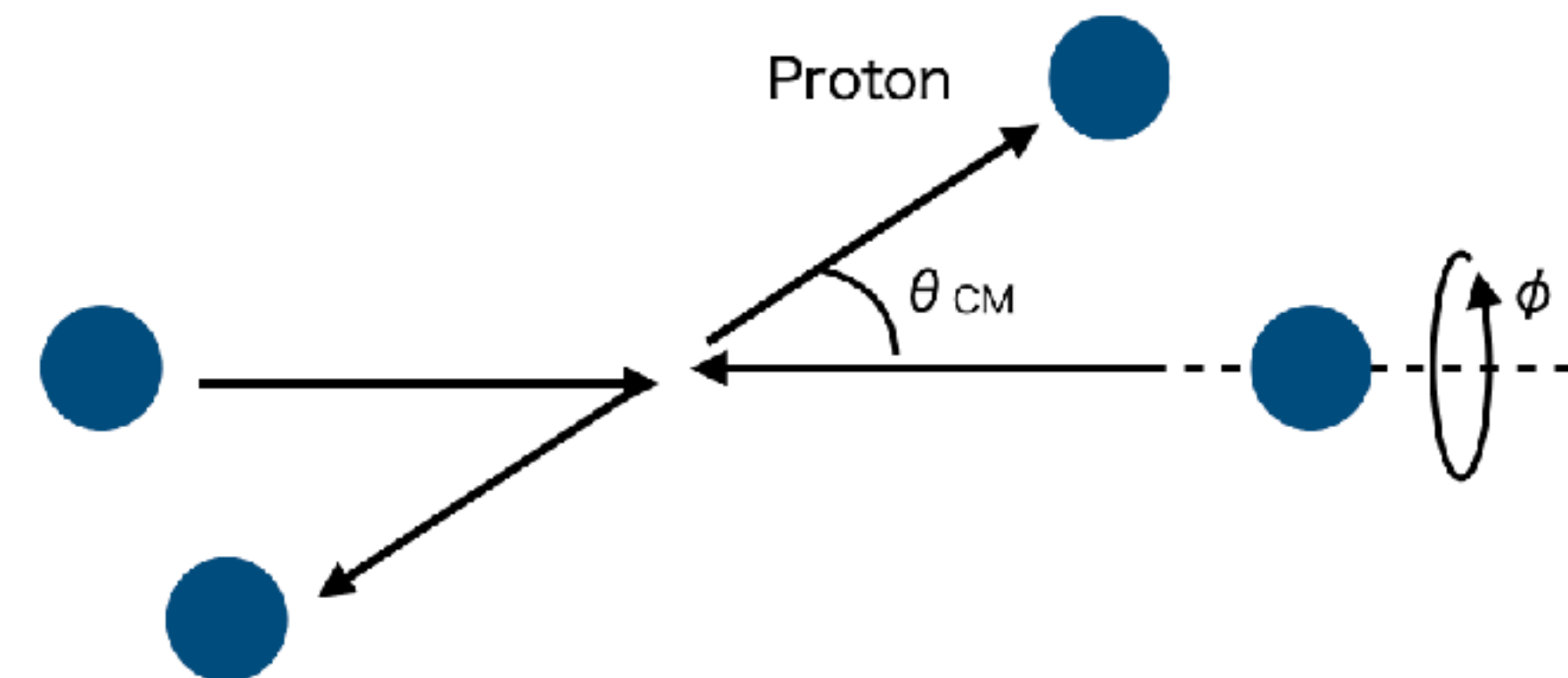
### • Scattering: $p_{\text{virtual}} + p_{\text{target}} \rightarrow p + p$

- 仮想陽子と標的陽子の弾性散乱
- 散乱角  $\theta_{\text{CM}}$ :  $-1 \leq \cos \theta_{\text{CM}} \leq 1$  で一様
- 散乱角  $\phi$ :  $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$  で一様

$^{16}\text{O}$



Rest frame of  $^{16}\text{O}$



CM frame of  $2p$

# Event Generation

## 2. 連続的な励起エネルギー分布のイベント生成

- 励起エネルギーと内部運動量の決め方以外は(1)と共通

- Spectral function

- 原子核中での核子の持つmissing energyと内部運動量の確率密度関数

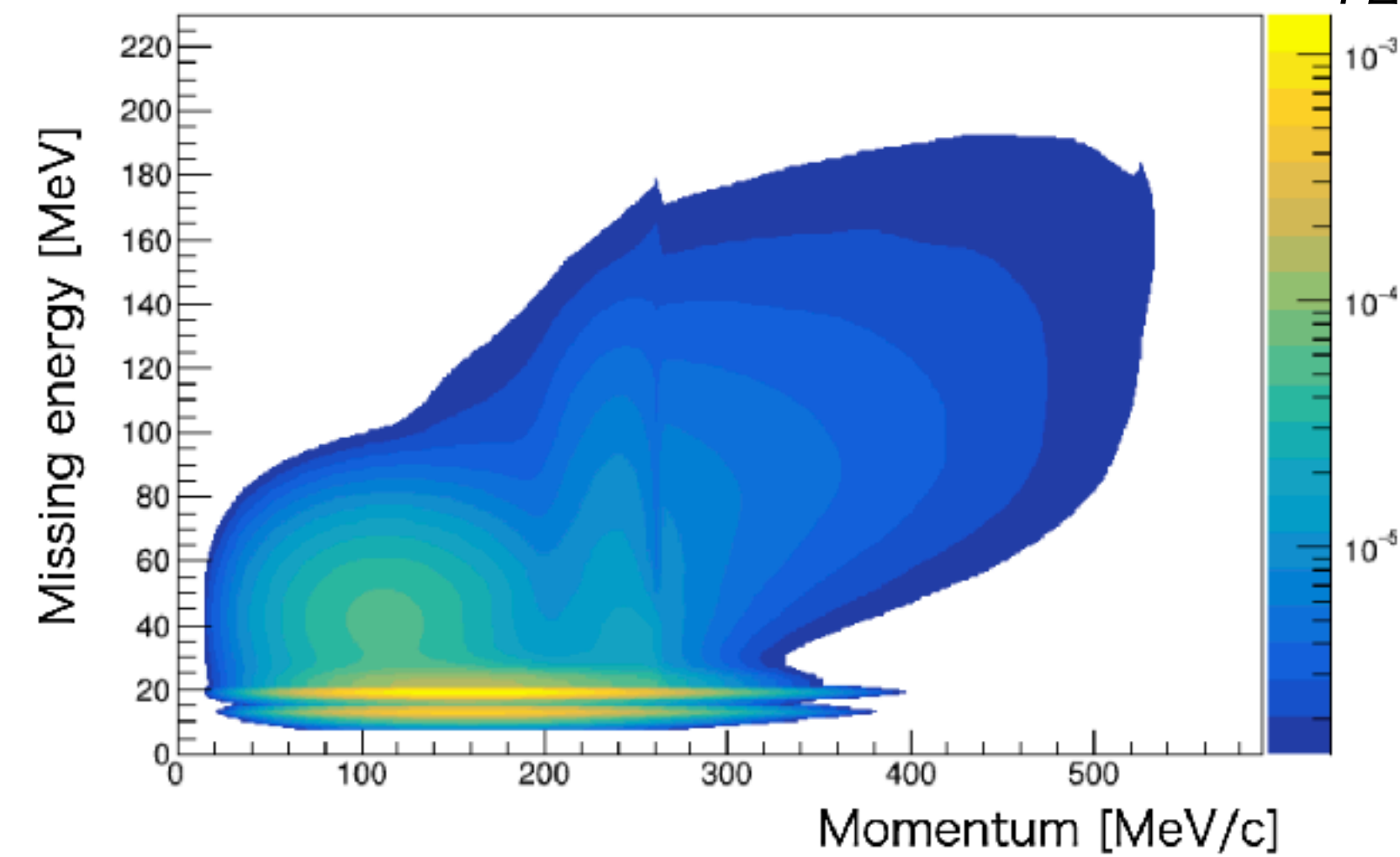
- 励起エネルギー:  $E_x = E_{\text{miss}} - S_p$

$S_p$ : 陽子のseparation energy

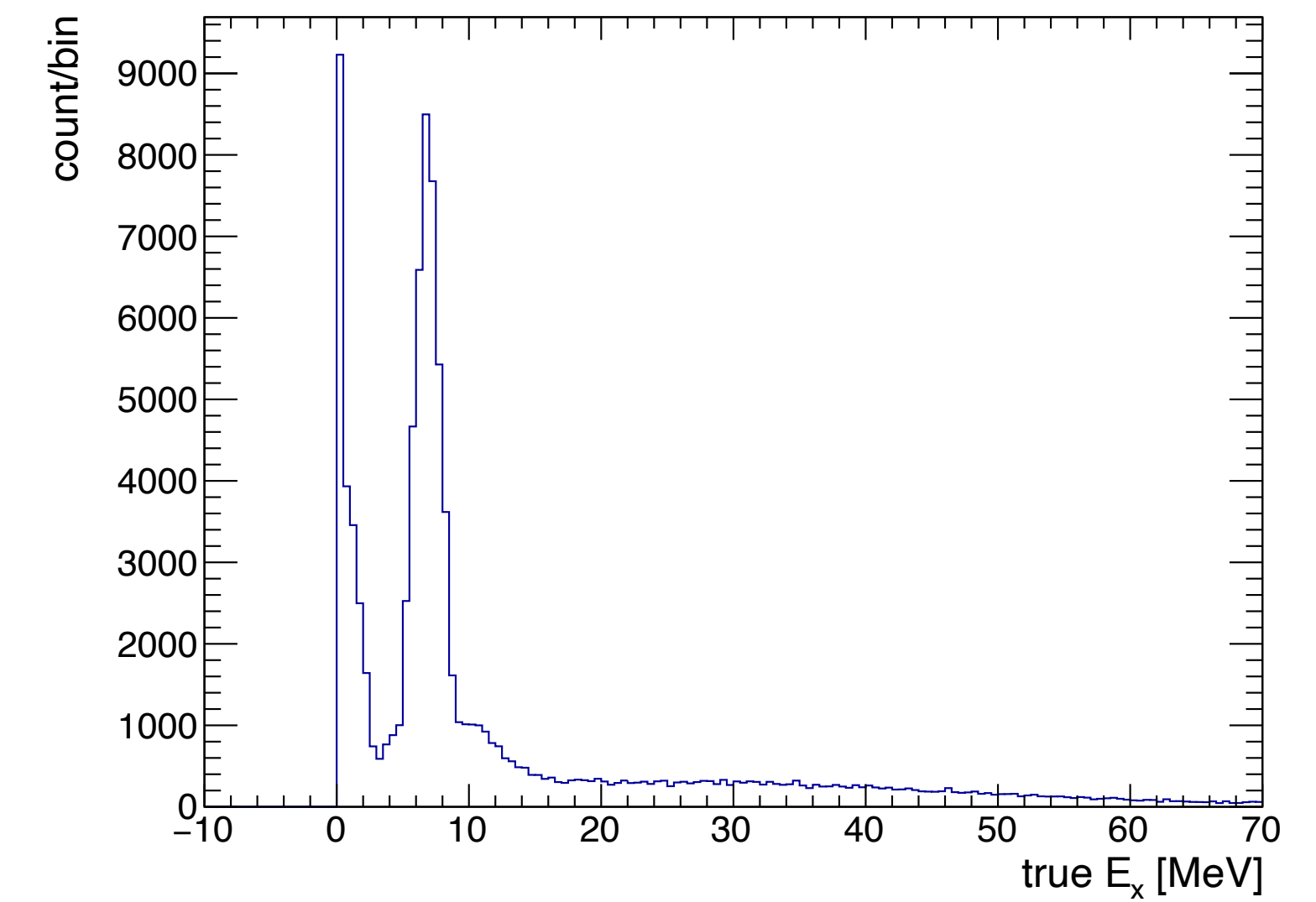
- 内部運動量: 絶対値はspectral functionから、方向は等方的に決定

$^{16}\text{O}$ のspectral function

Benhar et al., Phys. Rev. D,  
72(5):053005, 2005



励起エネルギー分布



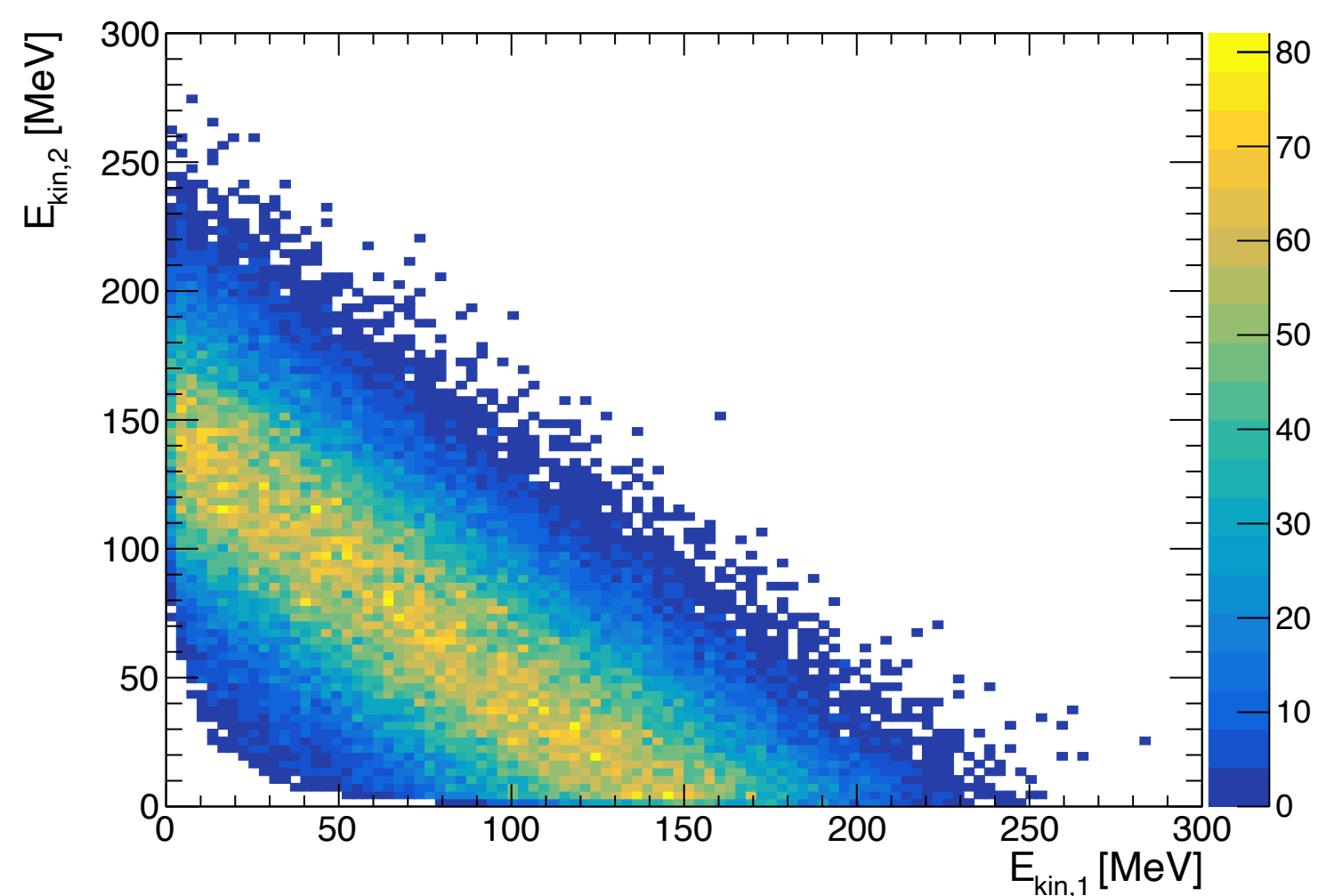


# Event Generation

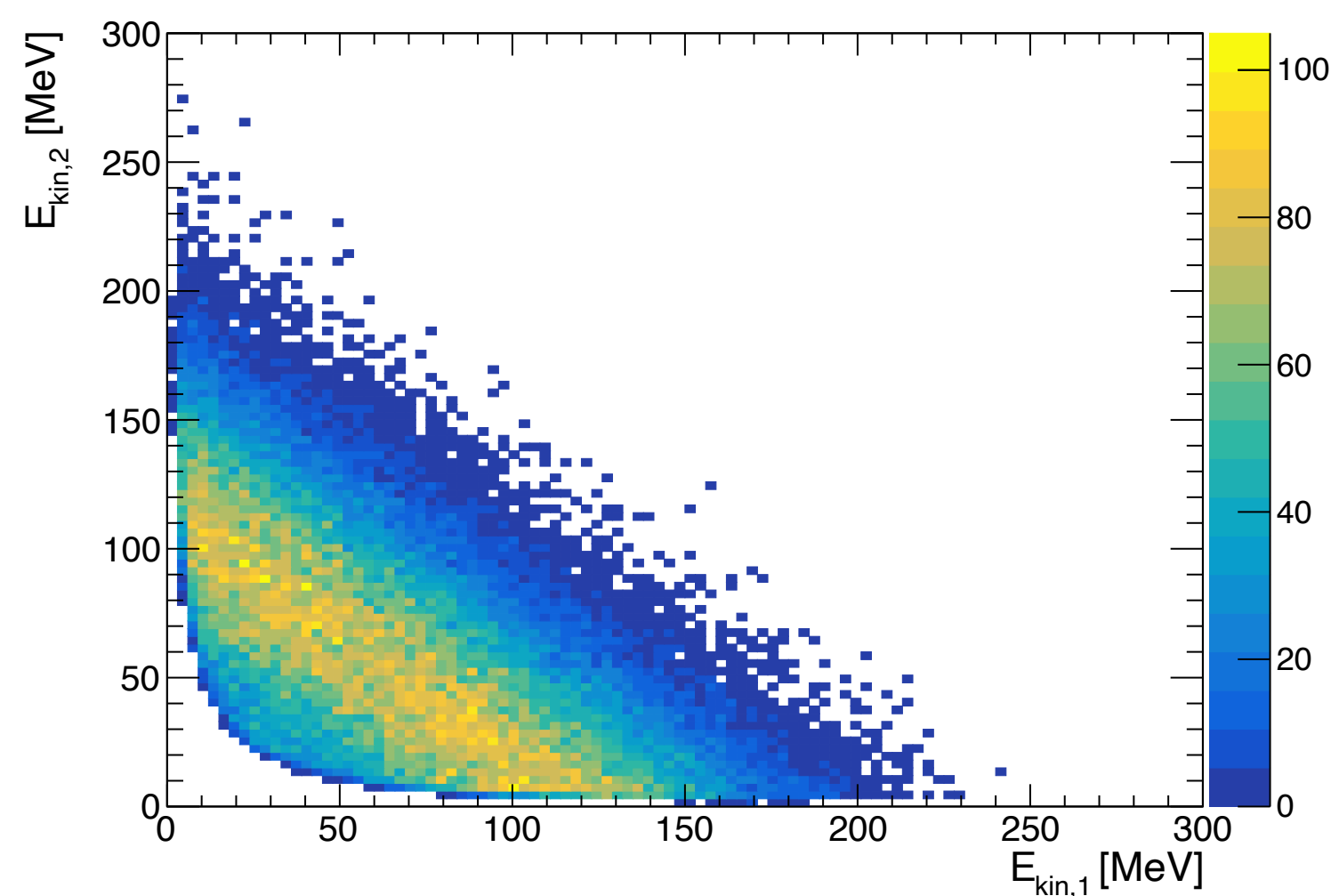
- エネルギー保存から運動エネルギーの和は一定
- 反応の位置によって $^{16}\text{O}$ のエネルギーが異なること、および内部運動量の広がりから分布は広がる
- 励起エネルギーが高いほど、反跳陽子のエネルギーは低くなる

2つの反跳陽子の運動エネルギー (lab系)

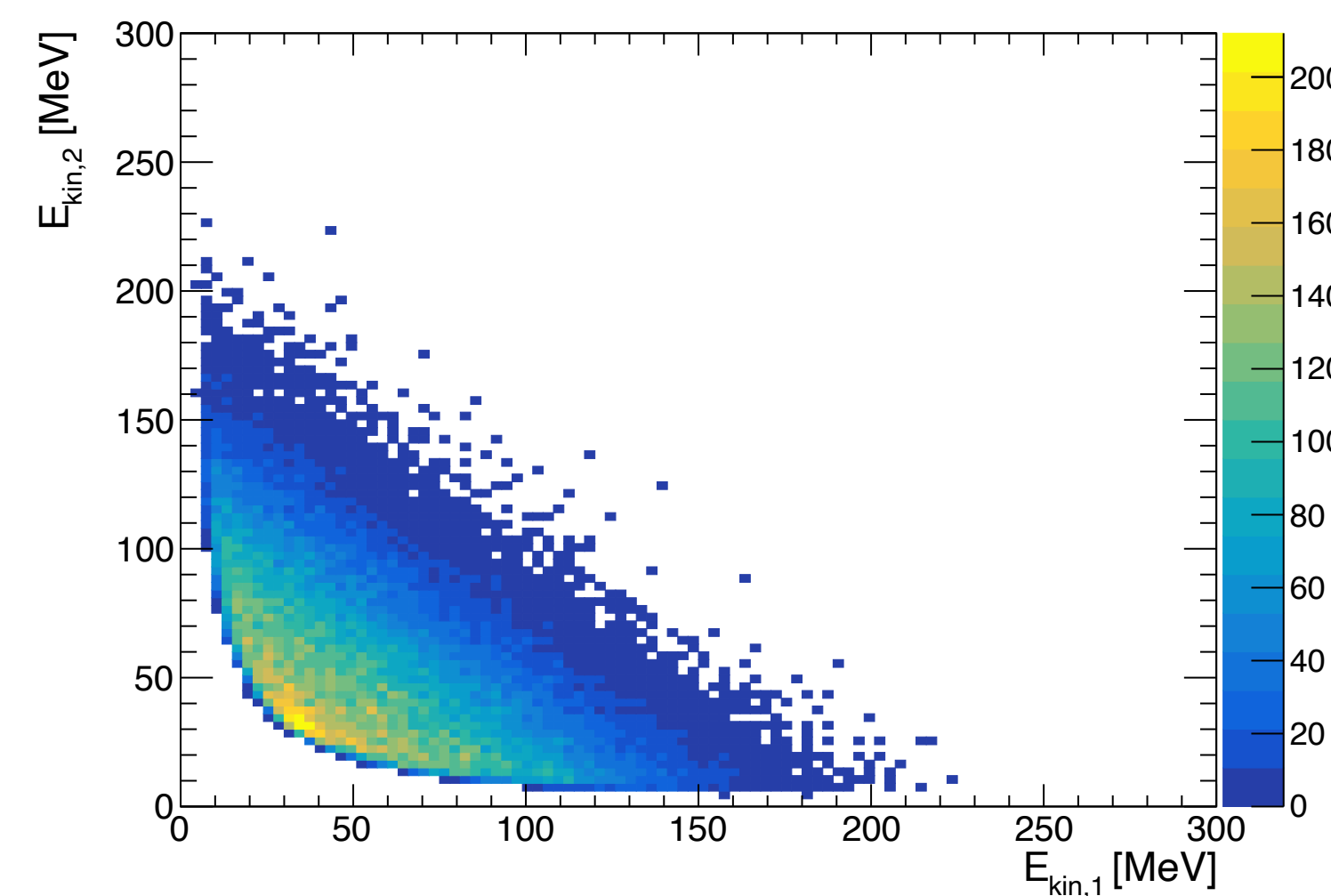
Ex = 10 MeV



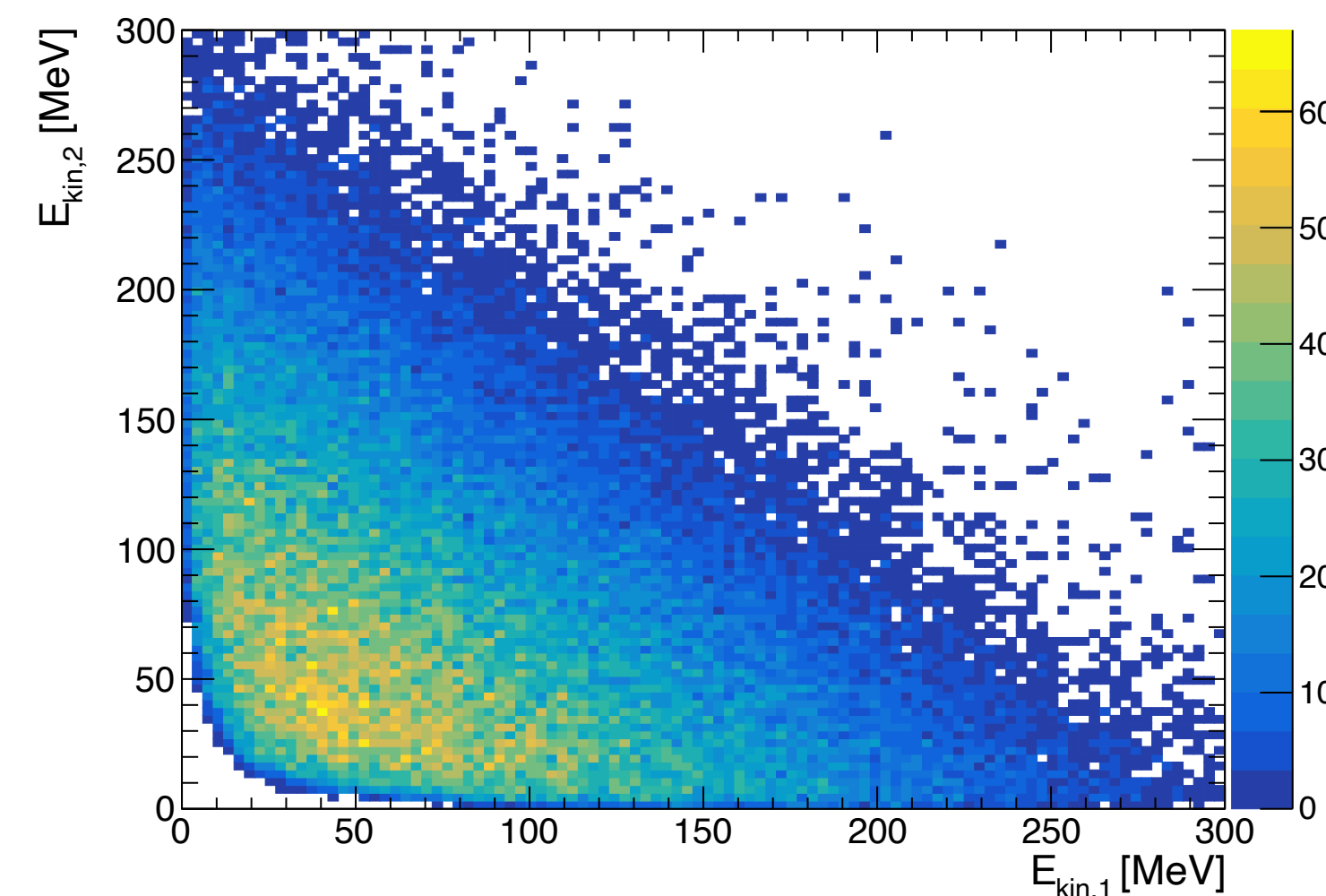
30 MeV



50 MeV



Spectral function

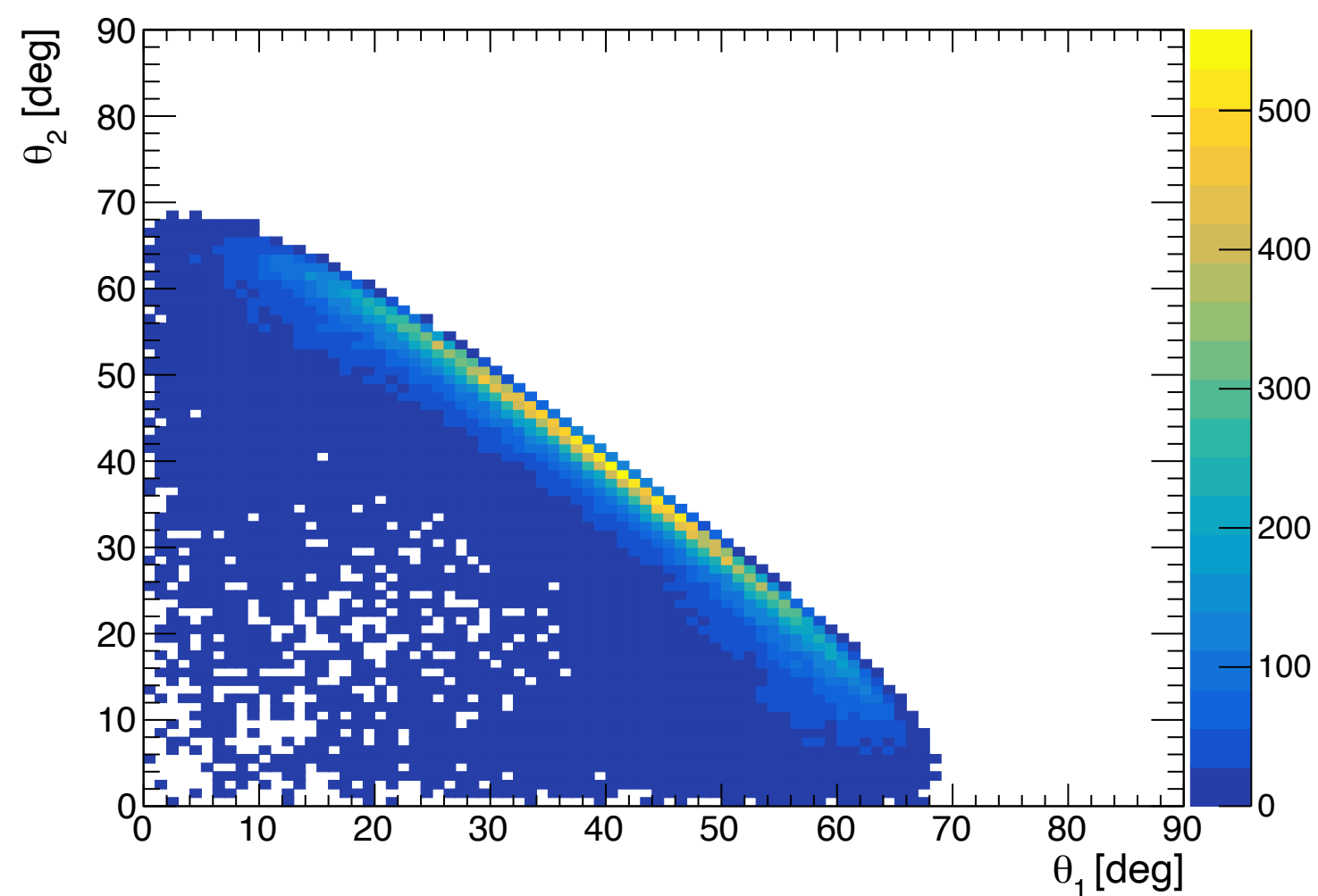


# Event Generation

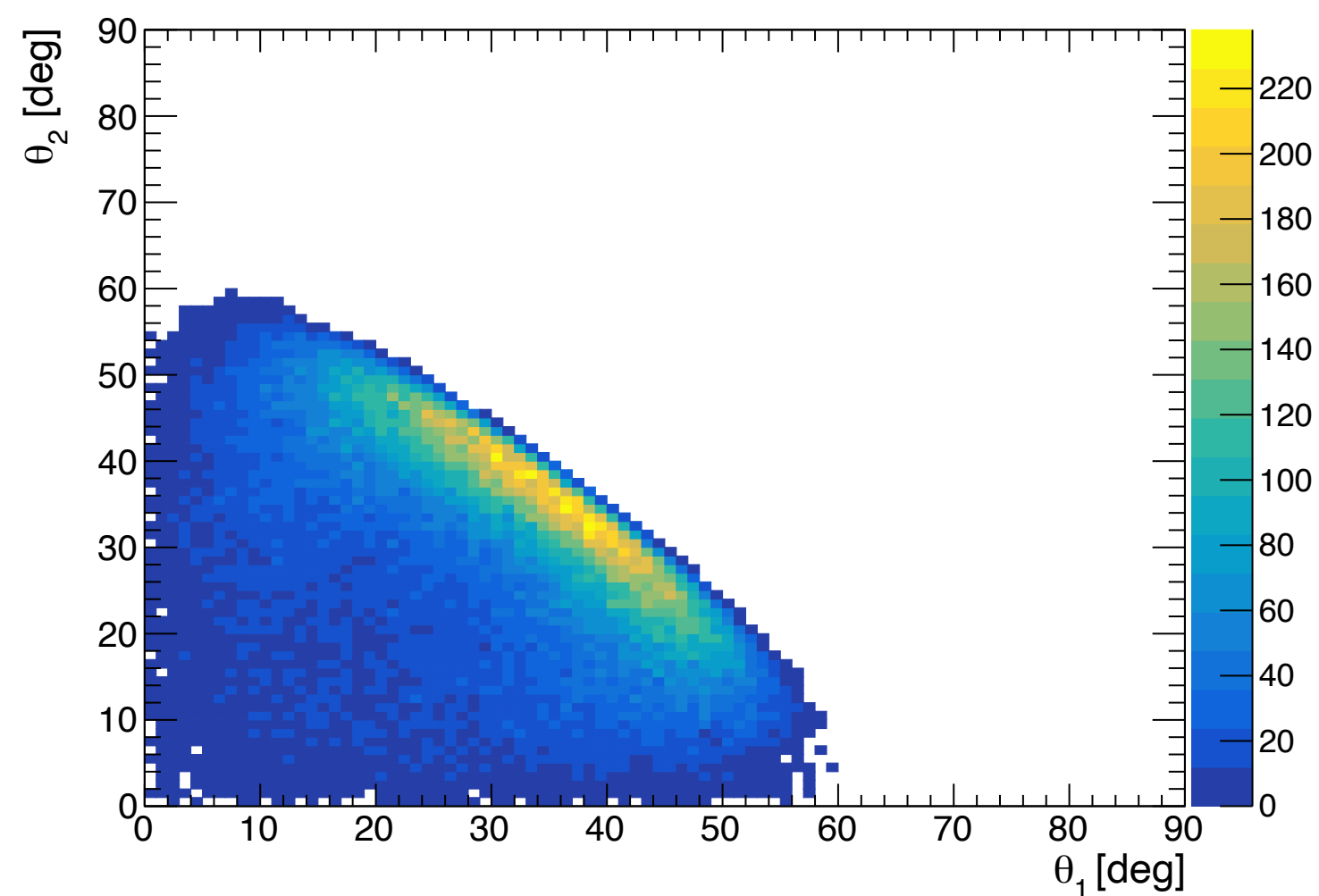
- 励起エネルギーが高いほど、反跳陽子のpolar angle  $\theta$  は小さくなる
- 典型的な角度は  $20^\circ \lesssim \theta \lesssim 60^\circ$

2つの反跳陽子のpolar angle  $\theta$  (lab系)

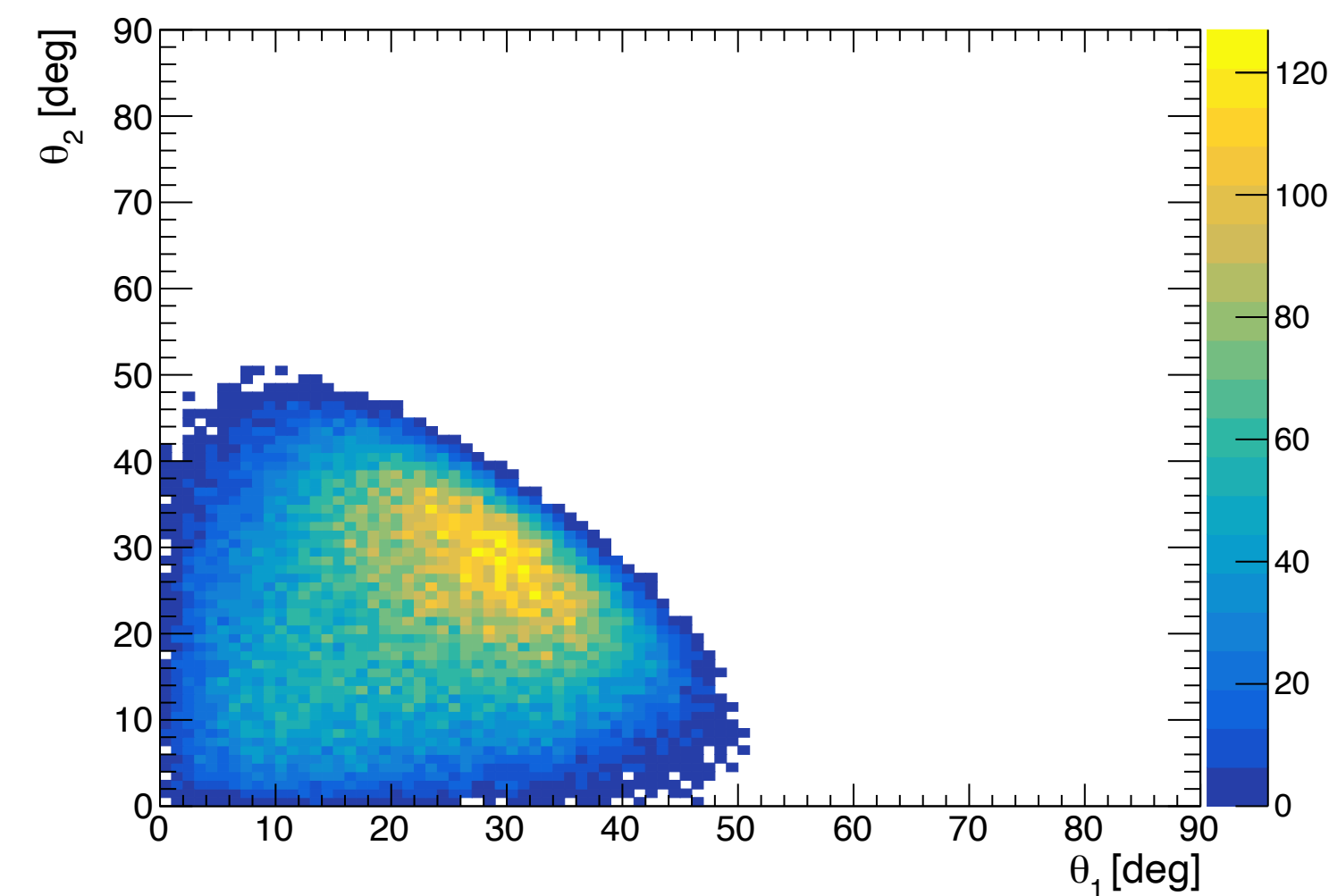
Ex = 10 MeV



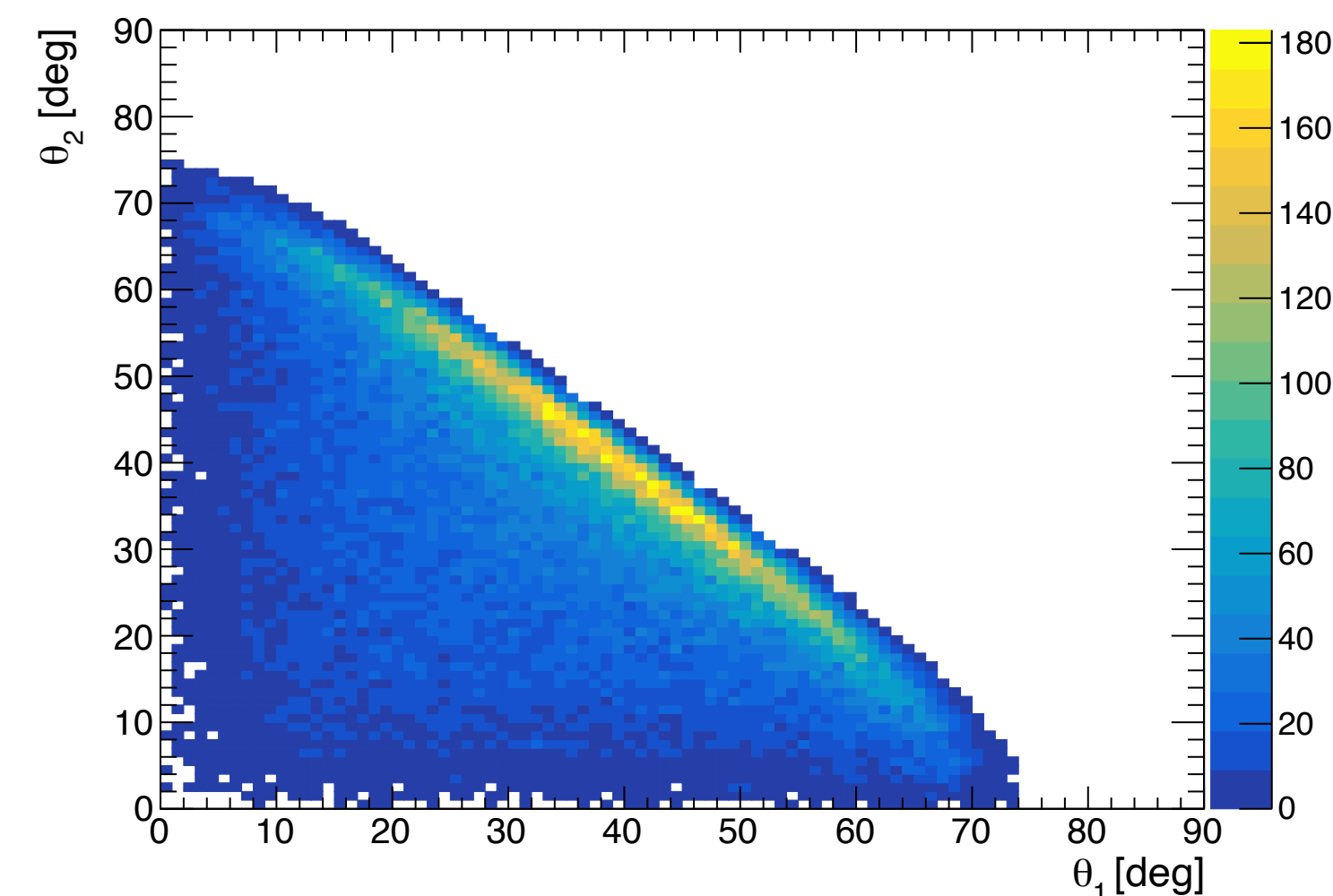
30 MeV



50 MeV



Spectral function



# Event Generation

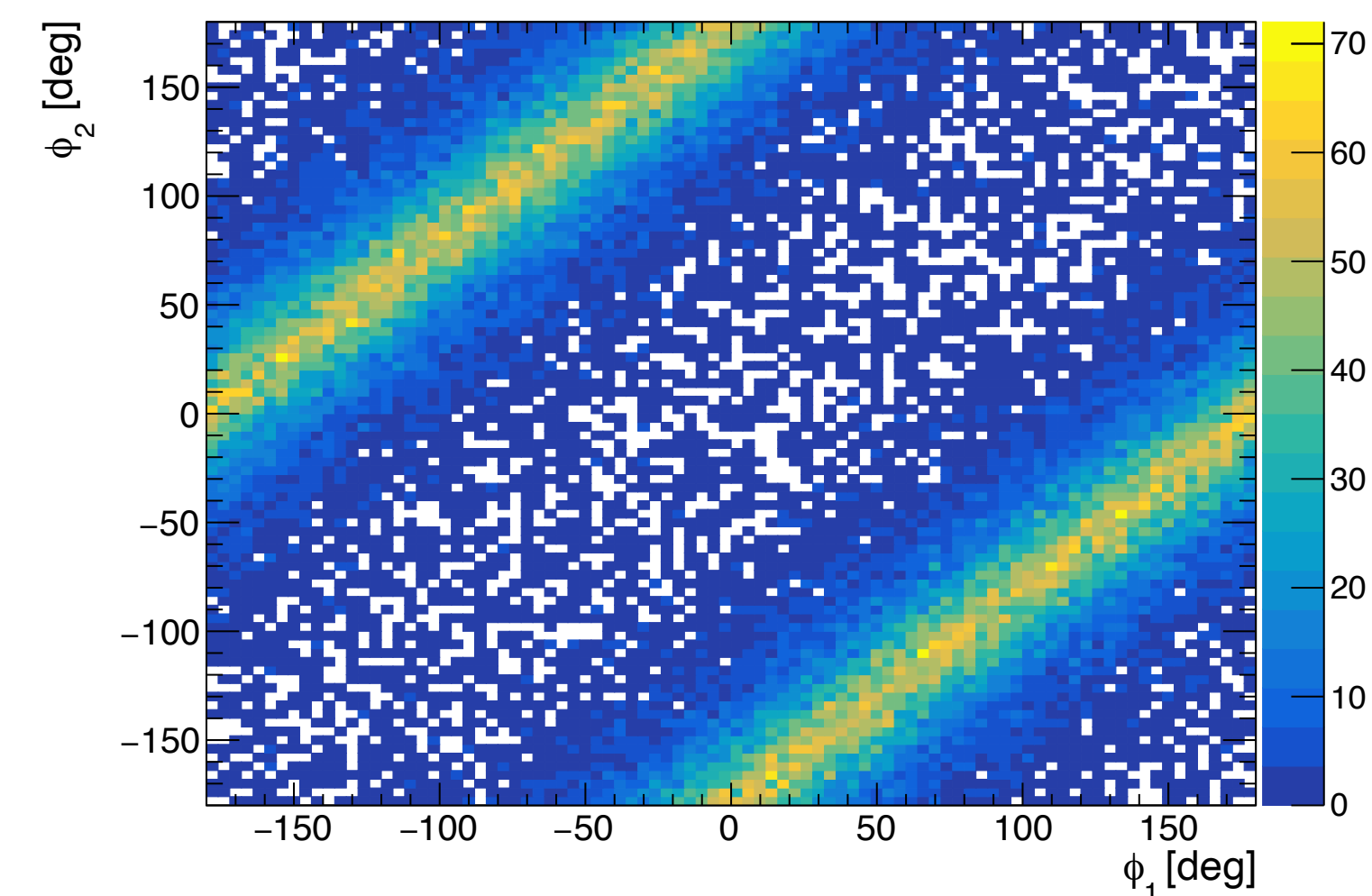
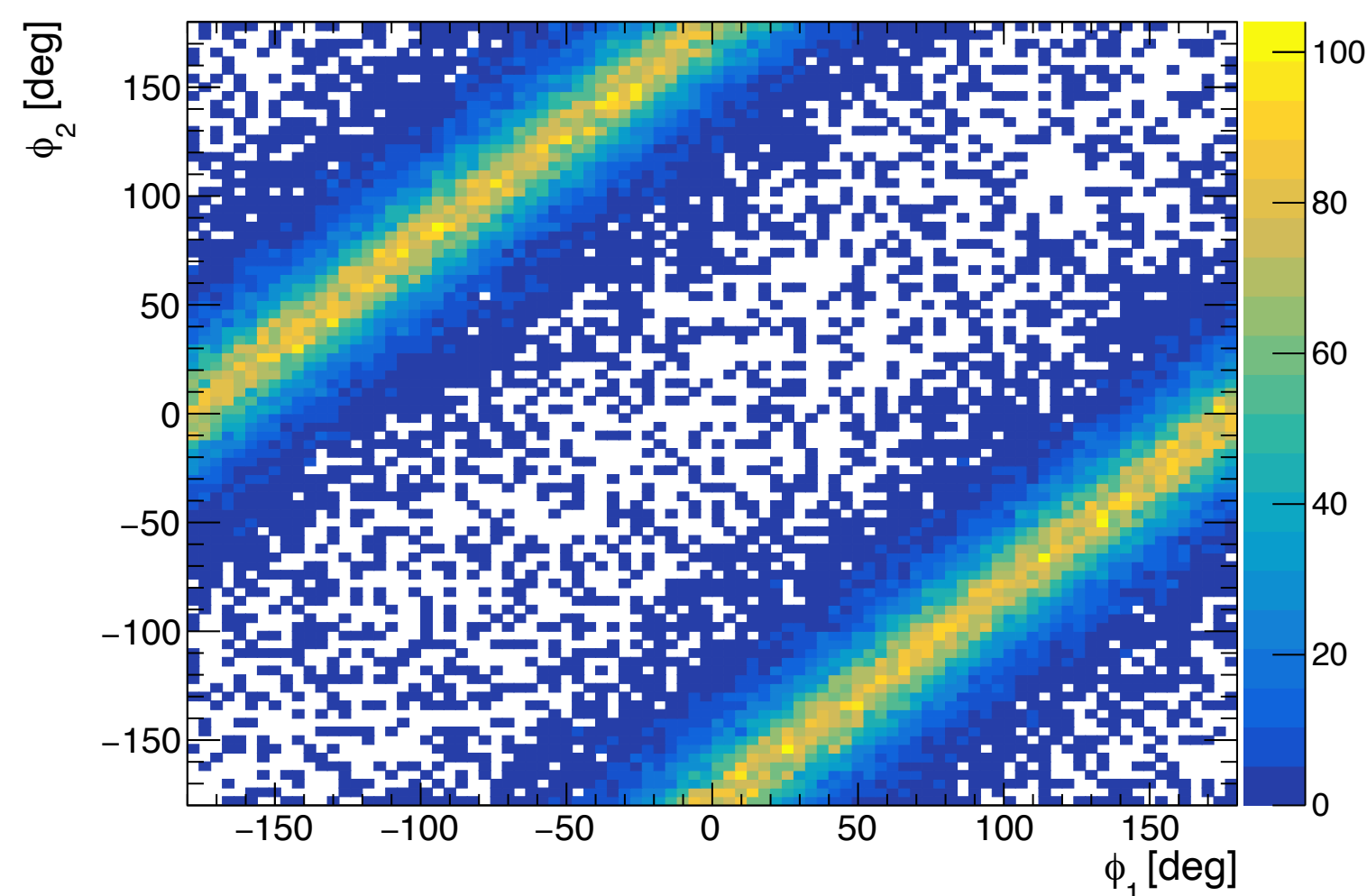
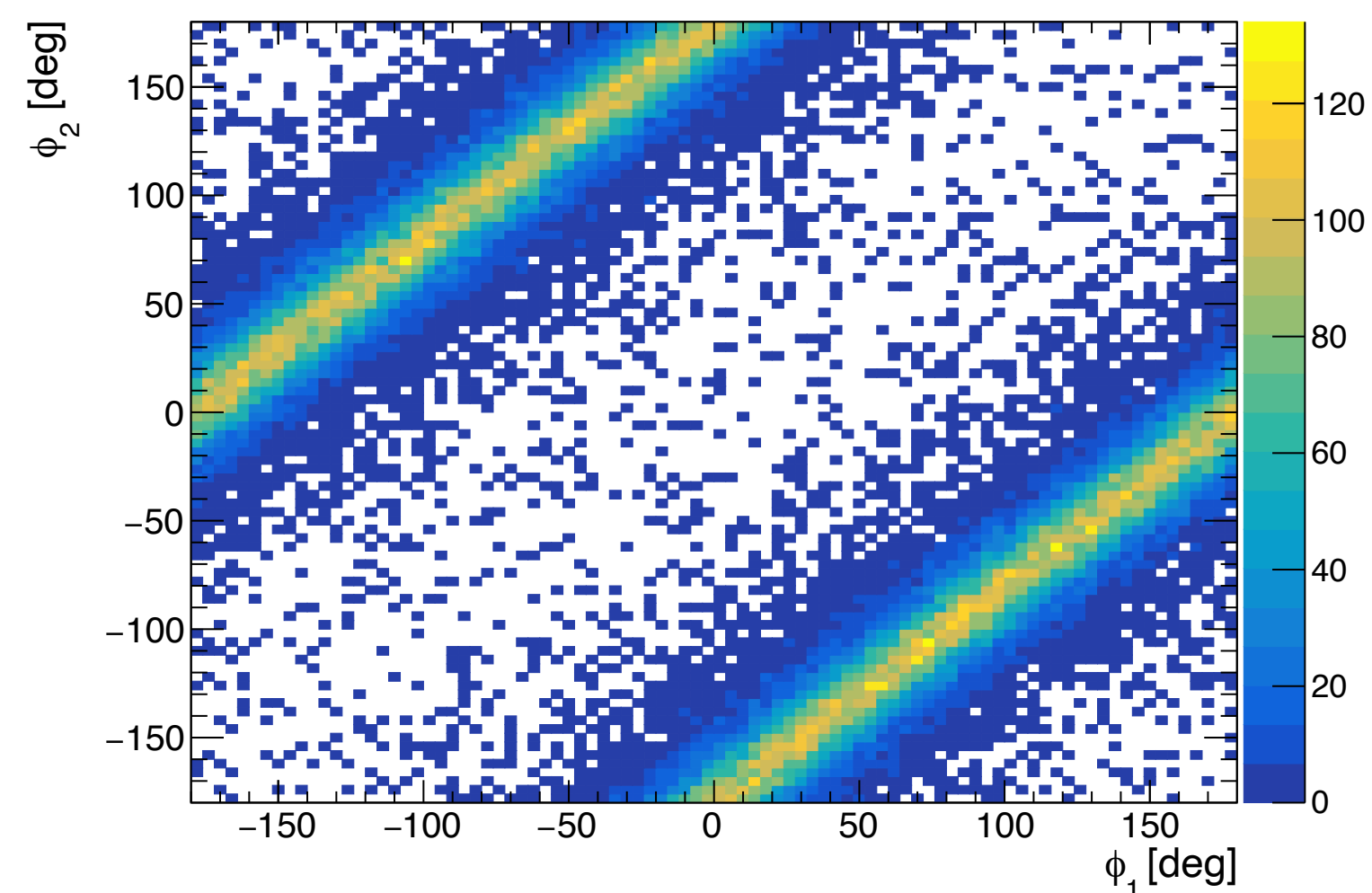
- 反跳陽子は重心系でback-to-backに放出される
- 実験室系ではビーム軸方向にブーストされ、azimuthal angle  $\phi$  にback-to-back correlation

2つの反跳陽子のazimuthal angle (lab系)

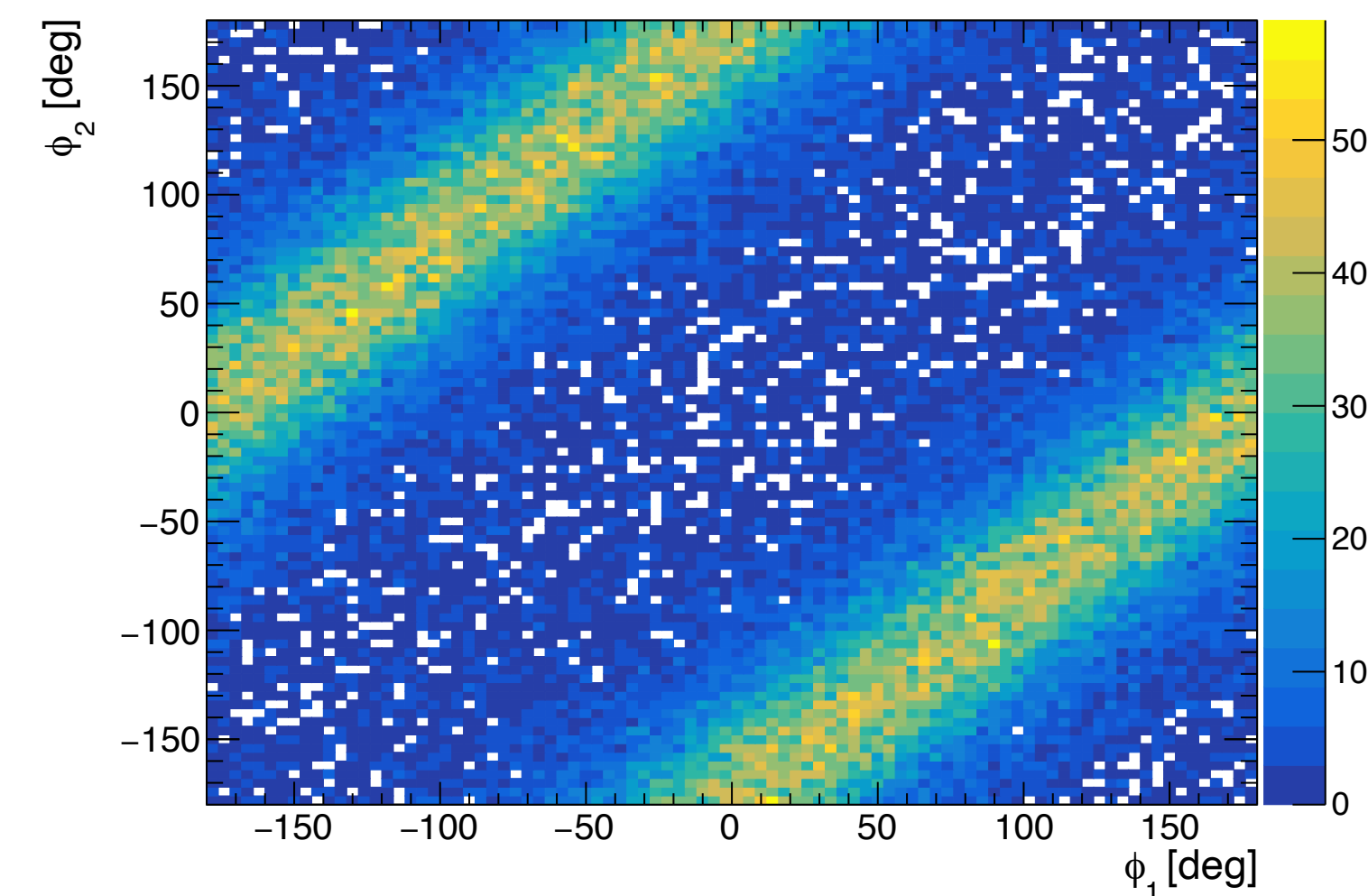
Ex = 10 MeV

30 MeV

50 MeV



Spectral function





# Selection Criteria

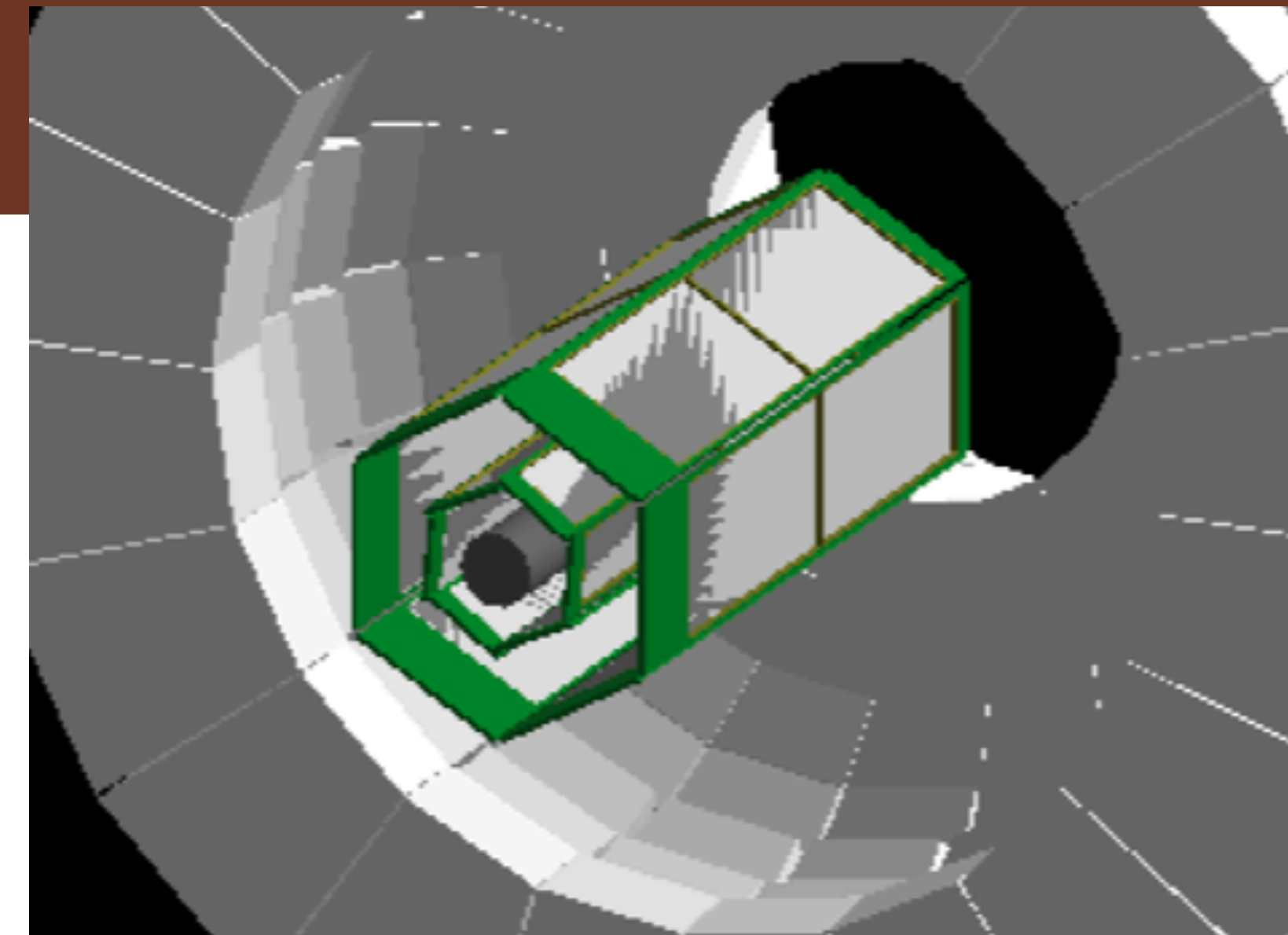
- Edge cut
  - STRASSEのフレームを通過した陽子のエネルギー損失を推定することは困難なため、そのようなイベントを除外する
  - 各waferで、ビームに垂直な両端から1 mm、ビームに平行な下流側の端から2 mmを除外

- Track selection

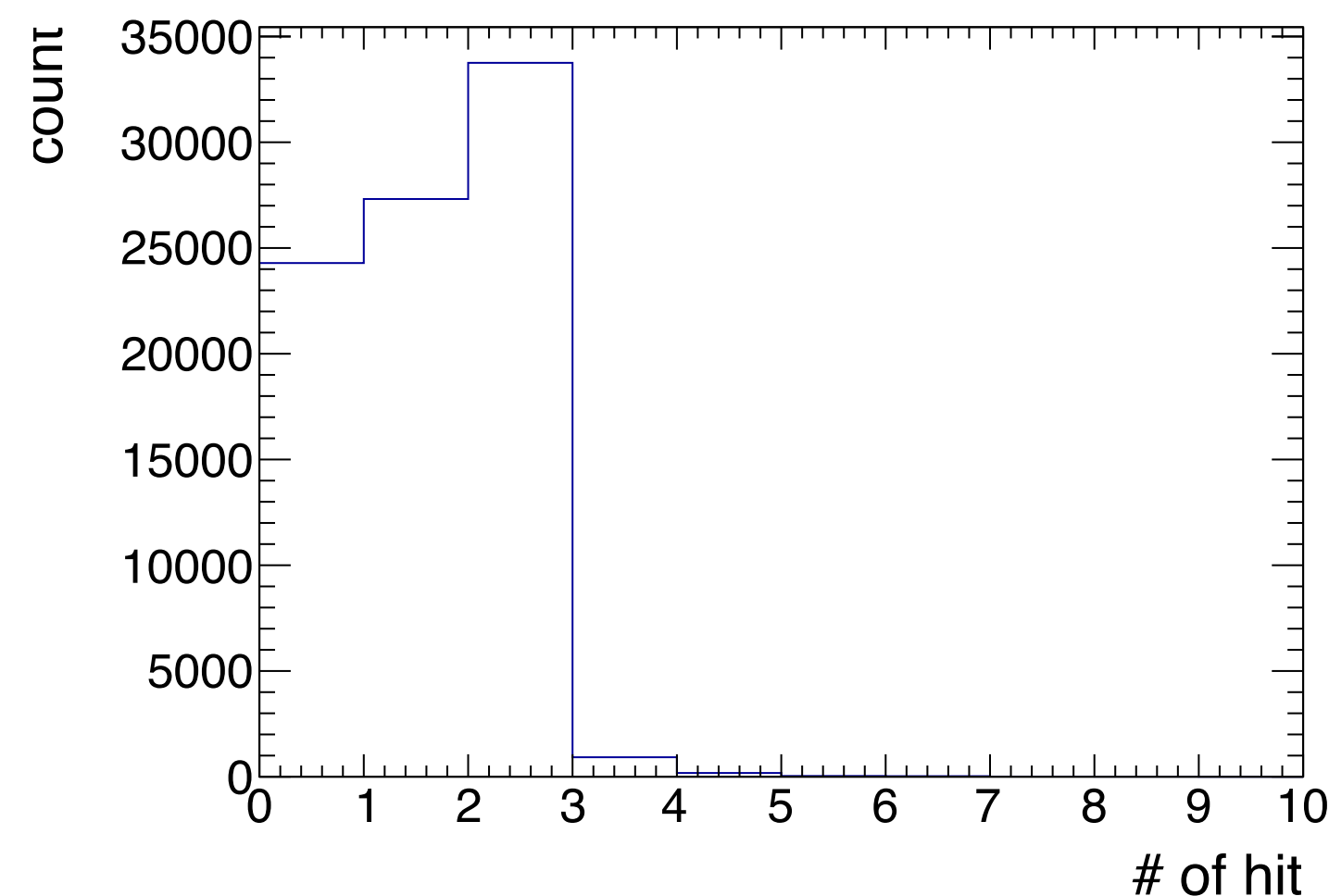
- STRASSEで検出されたトラックの数 = 2 本

- Vertex selection

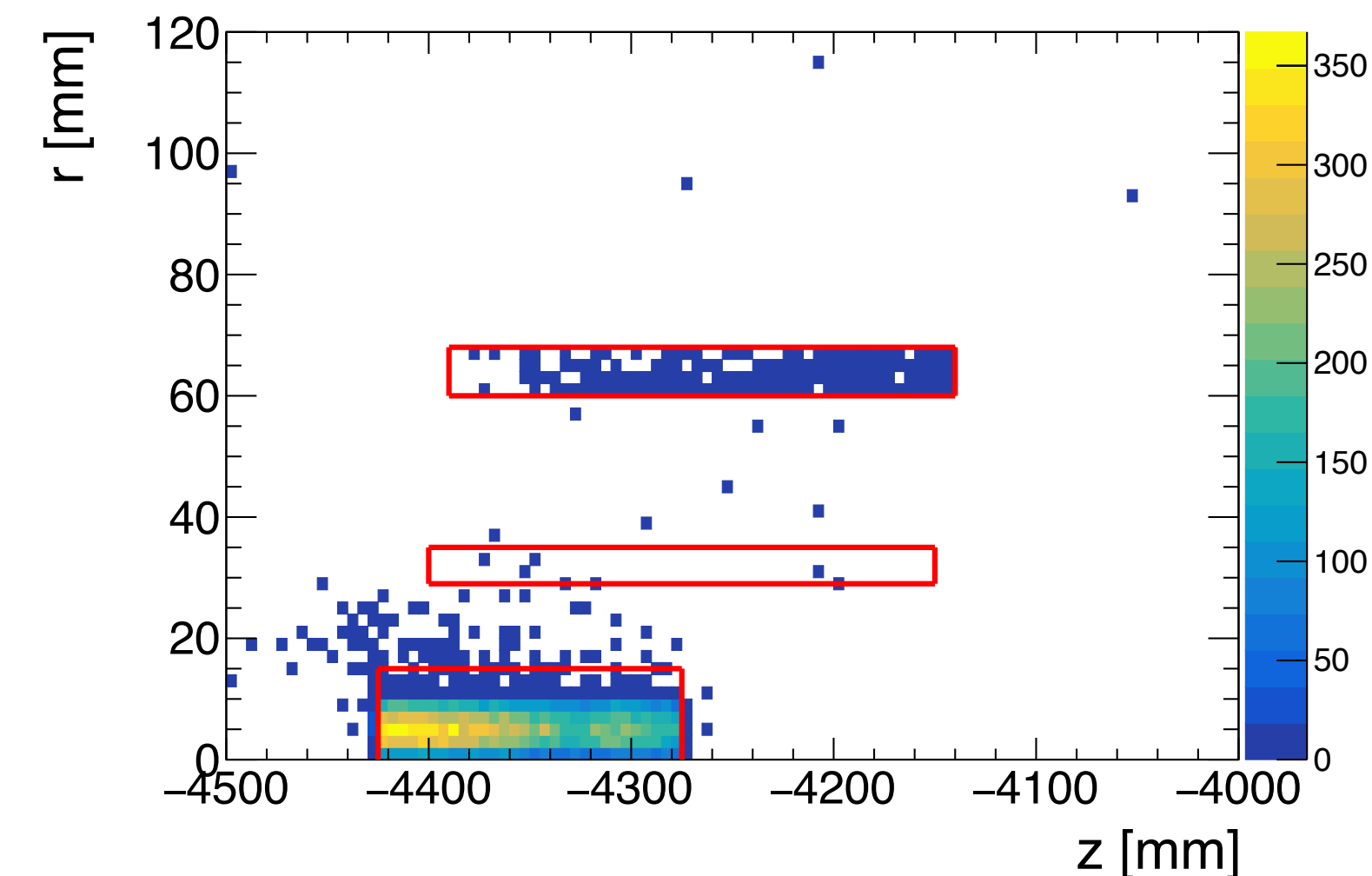
- STRASSEで再構成された反応点が標的の中にある



検出されたトラックの数

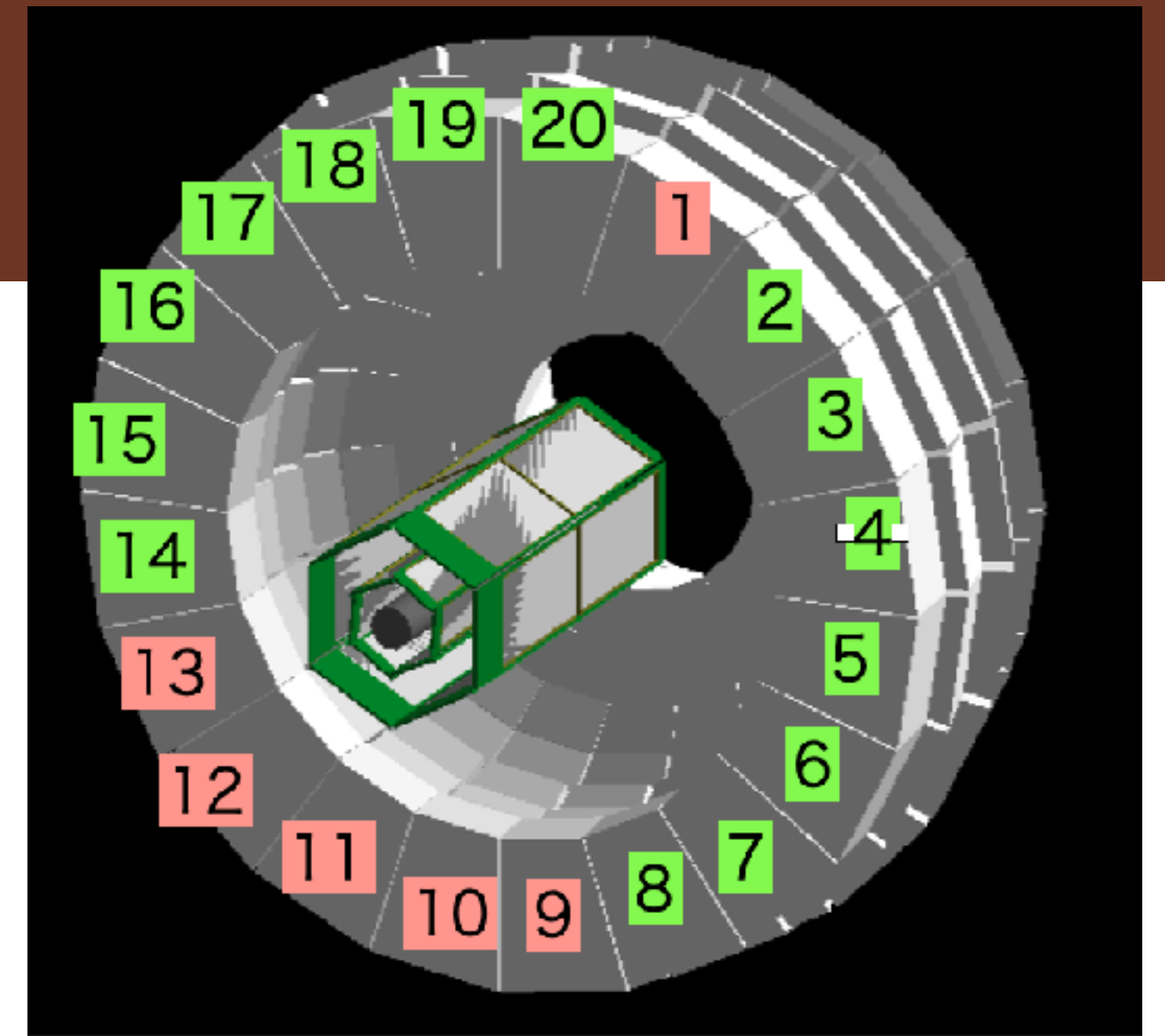


再構成されたVertexの分布

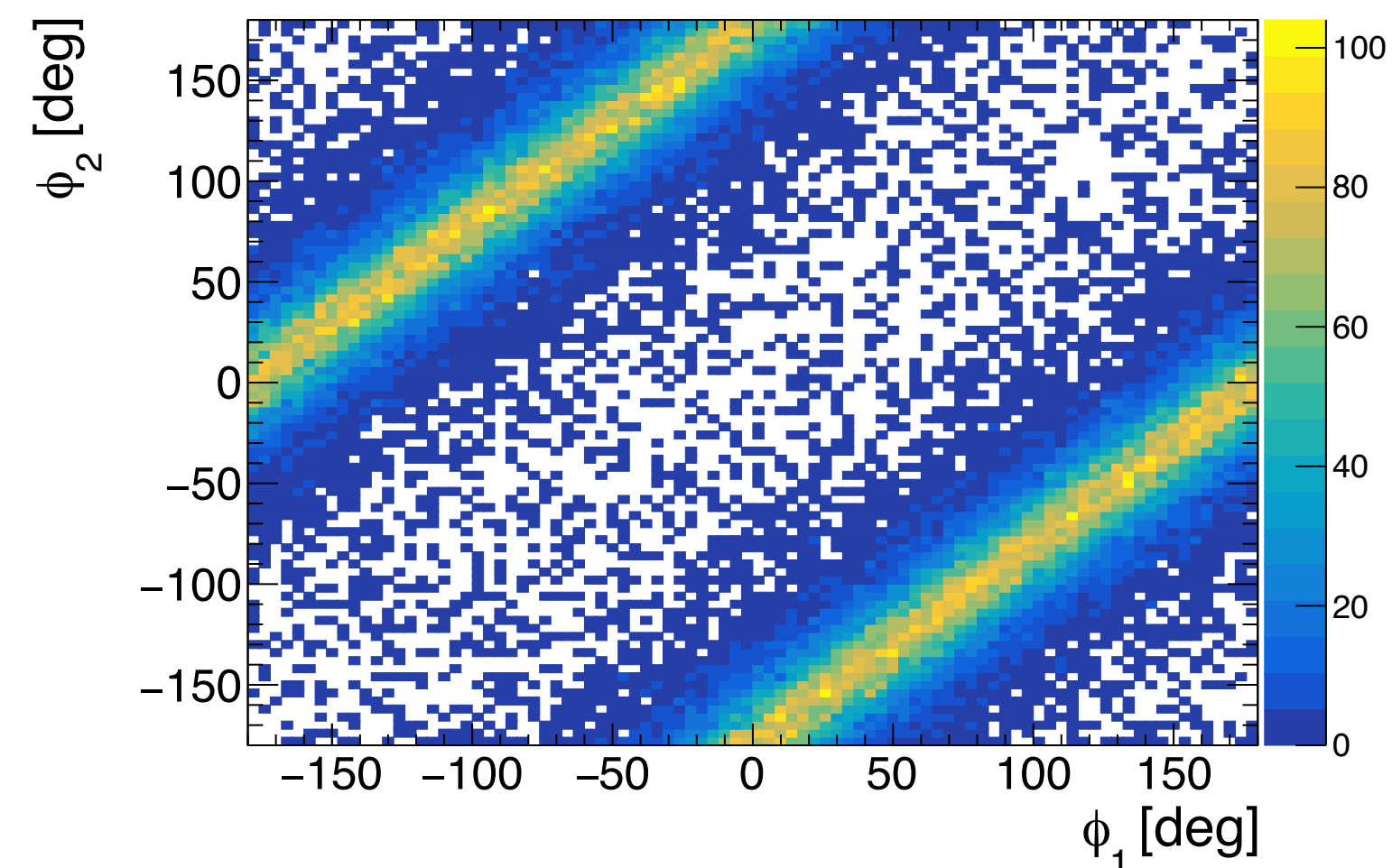


# Selection Criteria

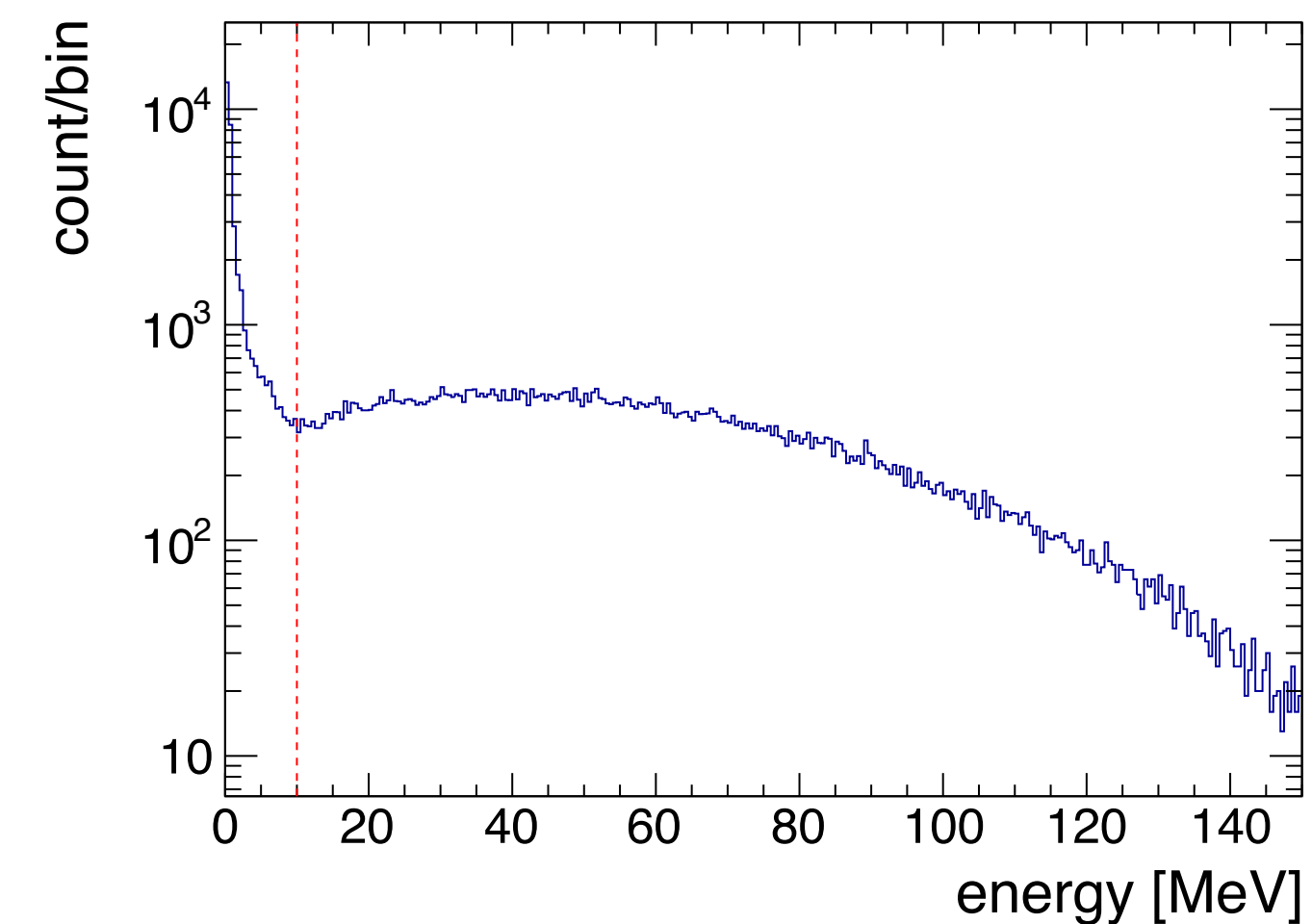
- Angular selection
  - CATANAの2つのヒットのなす角が $\phi = 180^\circ \pm 36^\circ$
- Energy selection
  - CATANAの2つのヒットがともに10 MeV以上 (ガンマ線の除外)



2つの反跳陽子の  
ビーム軸に垂直な平面での角度  $\phi$  (lab系)



CATANAで測定されたエネルギー



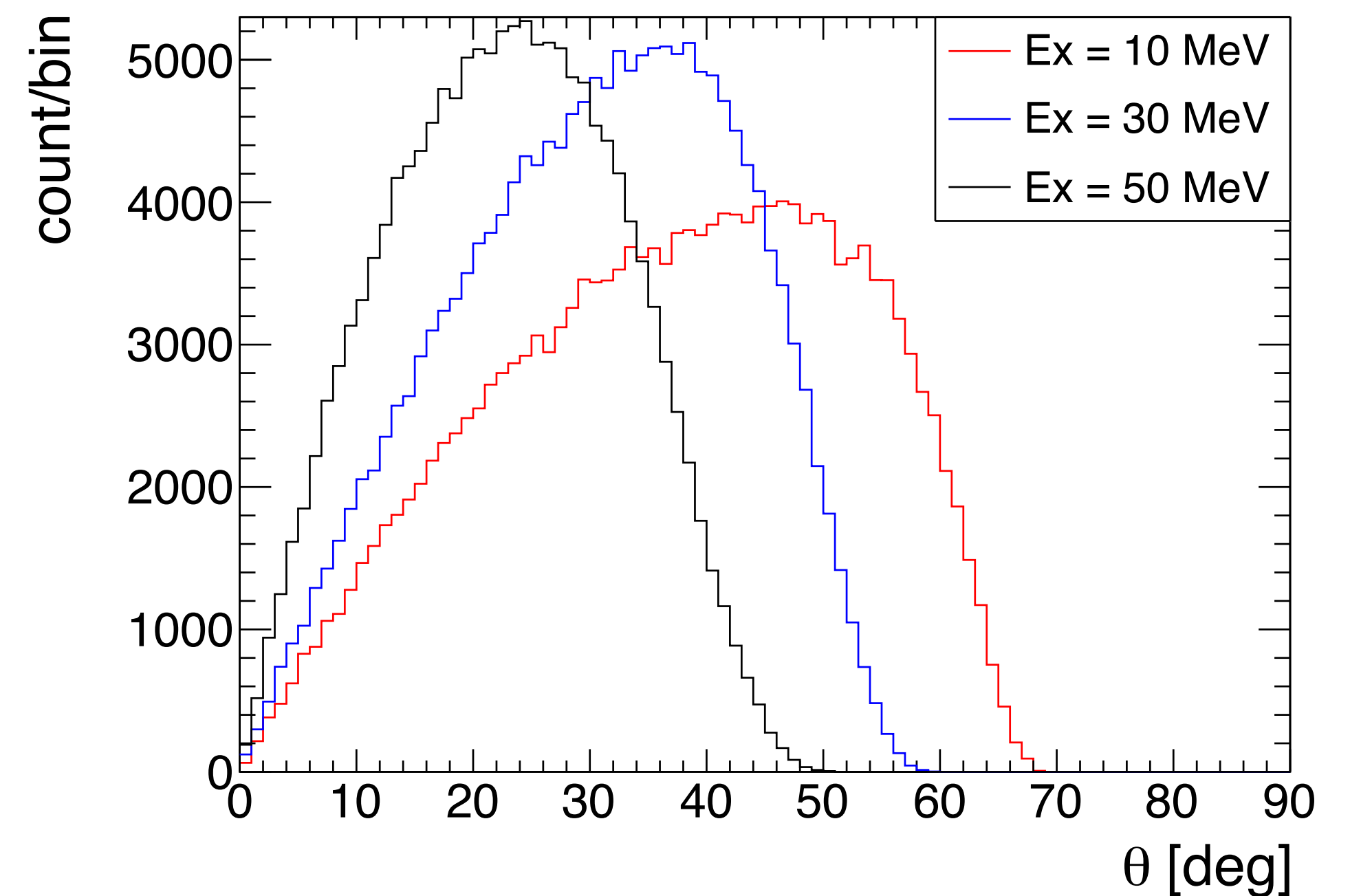
# Selection Criteria

- Matching of STRASSE and CATANA
  - STRASSEで検出された飛跡を外挿し、ヒットのあったCATANAに到達する
- 励起エネルギーが高いほど選択効率は下がる
  - 反跳陽子の角度  $\theta$  が浅くなるため

反跳陽子事象の選択効率

$E_x$ [MeV]	Efficiency [%]
10	9.5
30	7.7
50	5.2

励起エネルギーごとの  
反跳陽子のビーム軸に対する角度  $\theta$  (lab系)





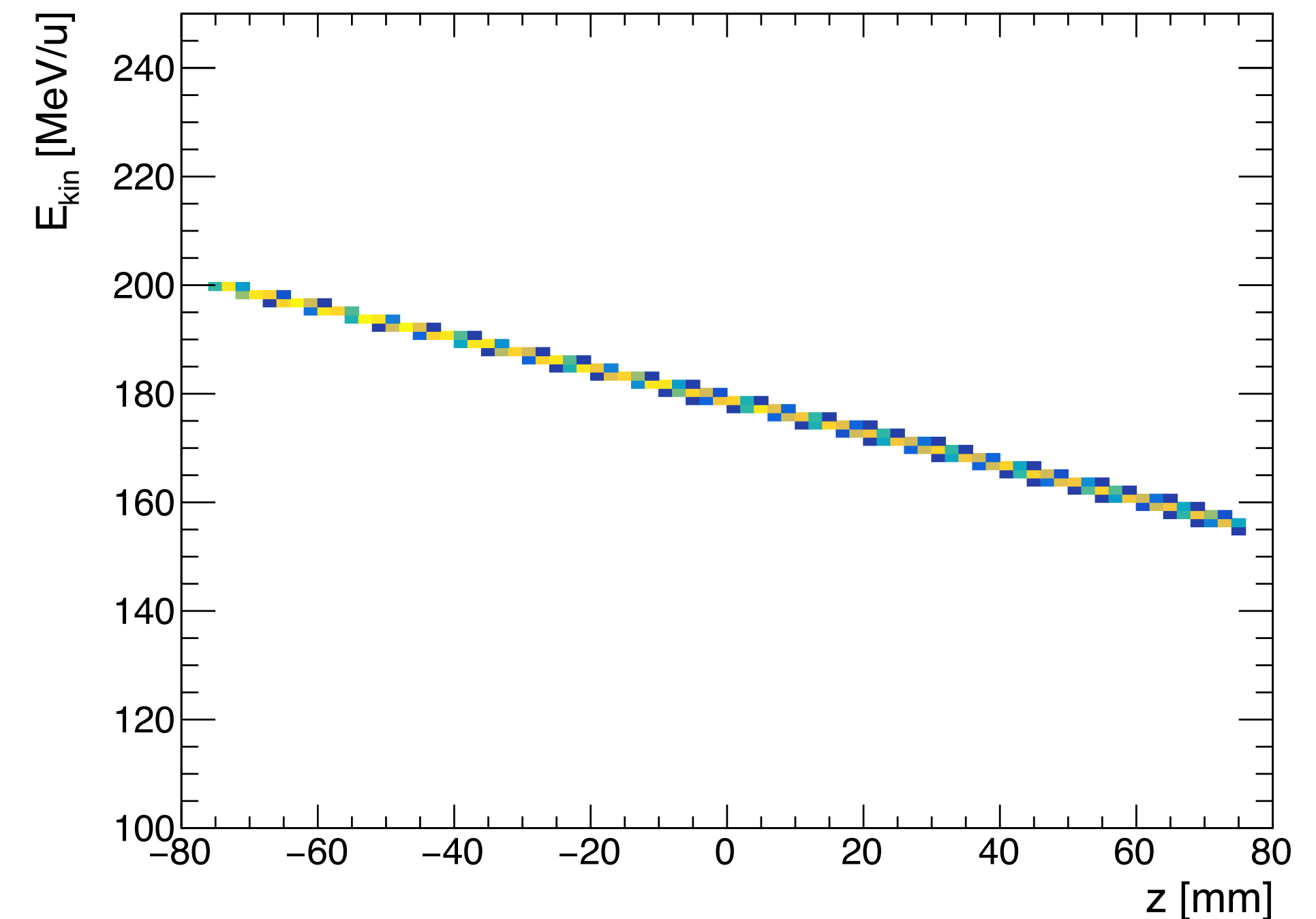
# Energy Loss Correction of Oxygen Beam

- 酸素ビームはLH2標的中で運動エネルギーを失う
- 反応直前のエネルギーを、STRASSEで測定した反応点のz座標から推定

$$E_{\text{kin}} [\text{MeV/u}] = 200 - 0.3 \times (z - z_{\text{upstream}}) [\text{mm}]$$

$z_{\text{upstream}}$  : 標的の上流側の端のz座標

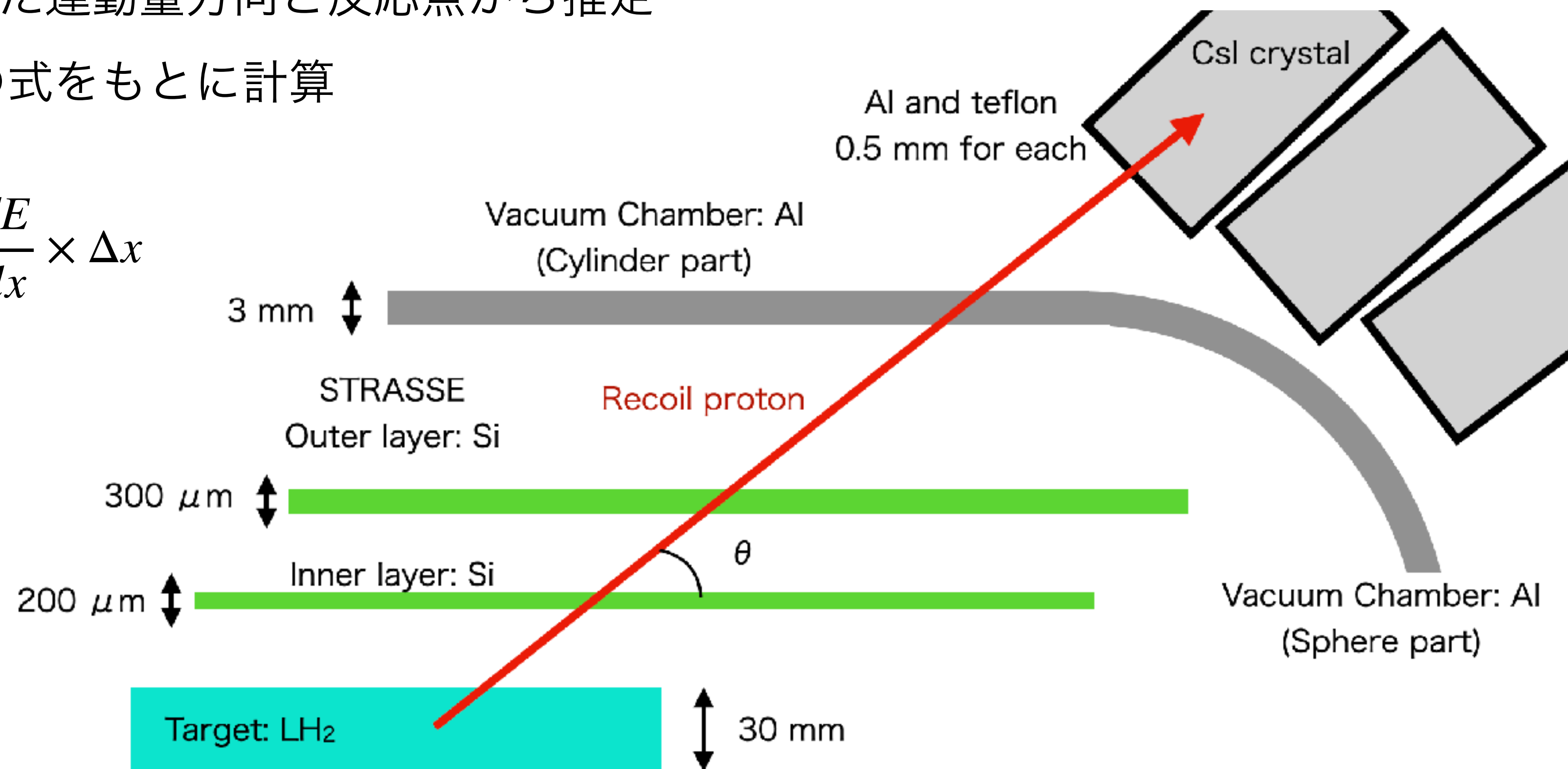
200 MeV/uの酸素ビームを  
LH2標的に入射したとき、  
反応位置と反応直前のエネルギー



# Energy Loss Correction of Recoil Protons

- 反跳陽子はCATANAの結晶に入射する前に、様々な物質でエネルギーを失う
- 物質を通る前のエネルギー $E_{\text{before}}$ を、後のエネルギー $E_{\text{after}}$ と飛行距離 $\Delta x$ から推定
  - 飛行距離はSTRASSEで測定した運動量方向と反応点から推定
  - 阻止能 $dE/dx$ はBethe-Blochの式をもとに計算

$$E_{\text{before}} = E_{\text{after}} + \frac{dE}{dx} \times \Delta x$$



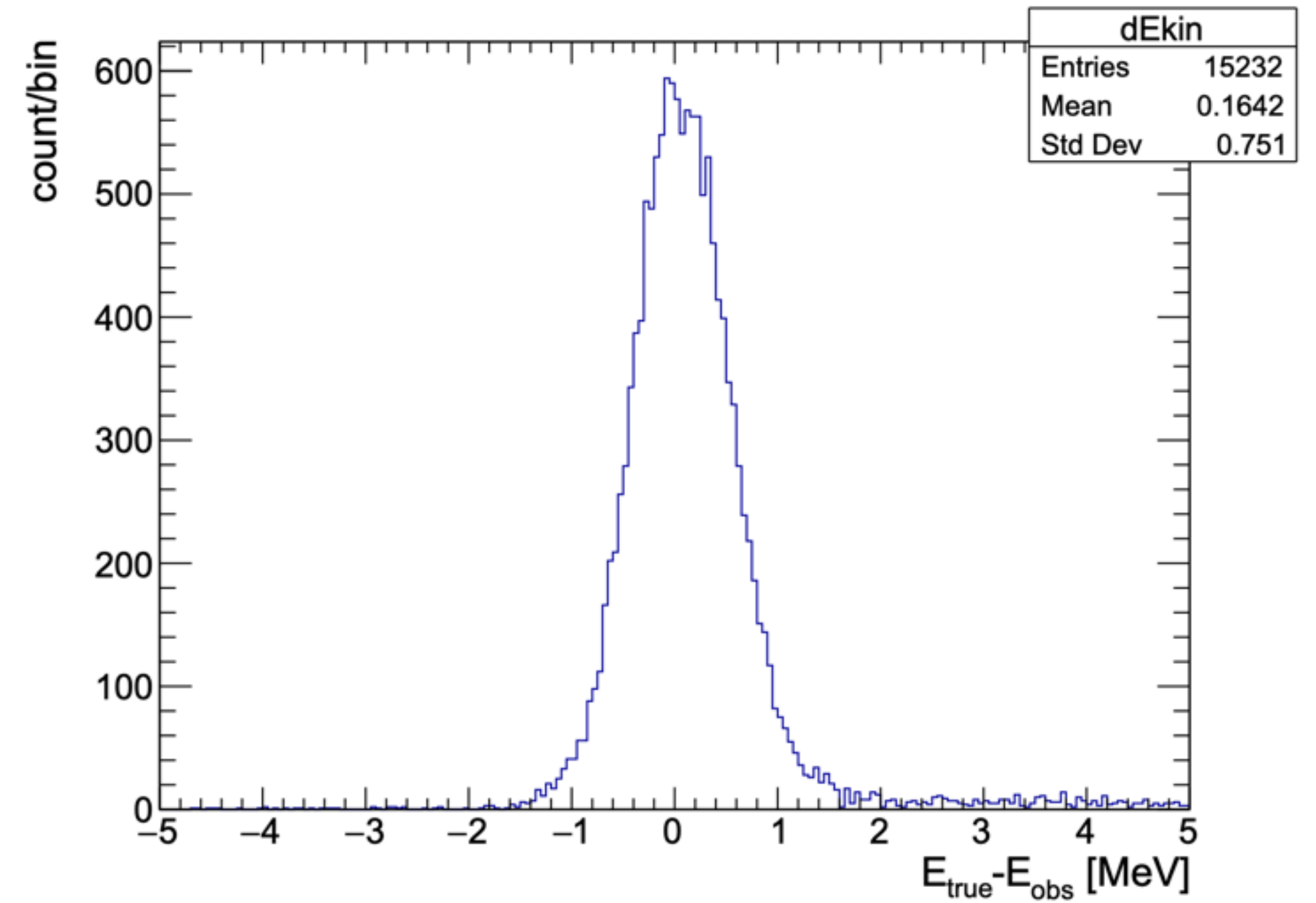
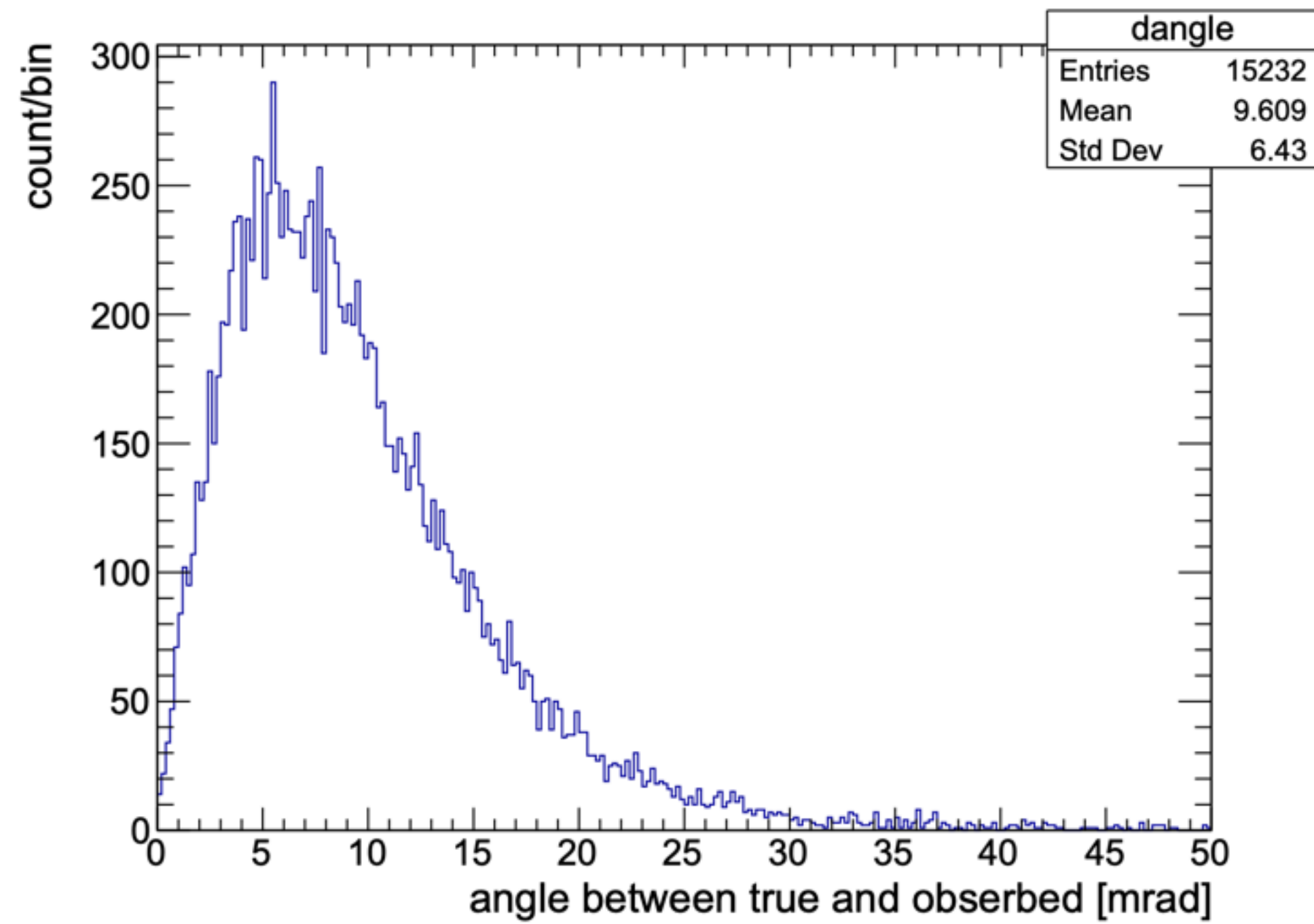
# Selection Efficiency

Selection	Efficiency [%]		
	Ex = 10 MeV	30 MeV	50 MeV
Edge cut & Track selection	33.7	28.6	19.5
Vertex selection	33.1	27.9	18.9
Angular selection	17.1	14.1	9.6
Energy selection	15.8	12.7	8.5
Matching of STRASSE and CATANA	9.5	7.7	5.2



# Excitation Energy Resolution

True Ex = 30 MeV

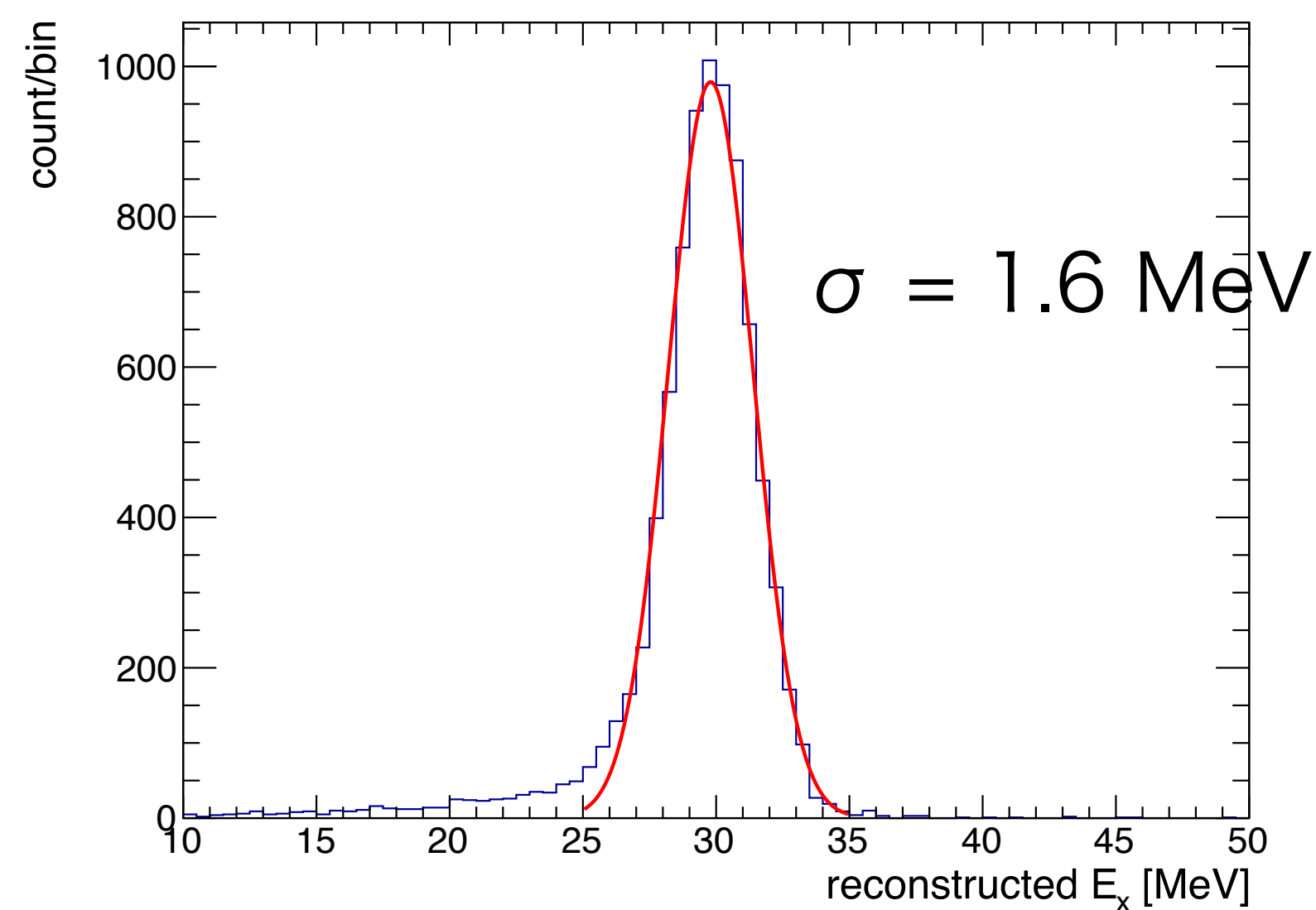


# Excitation Energy Resolution

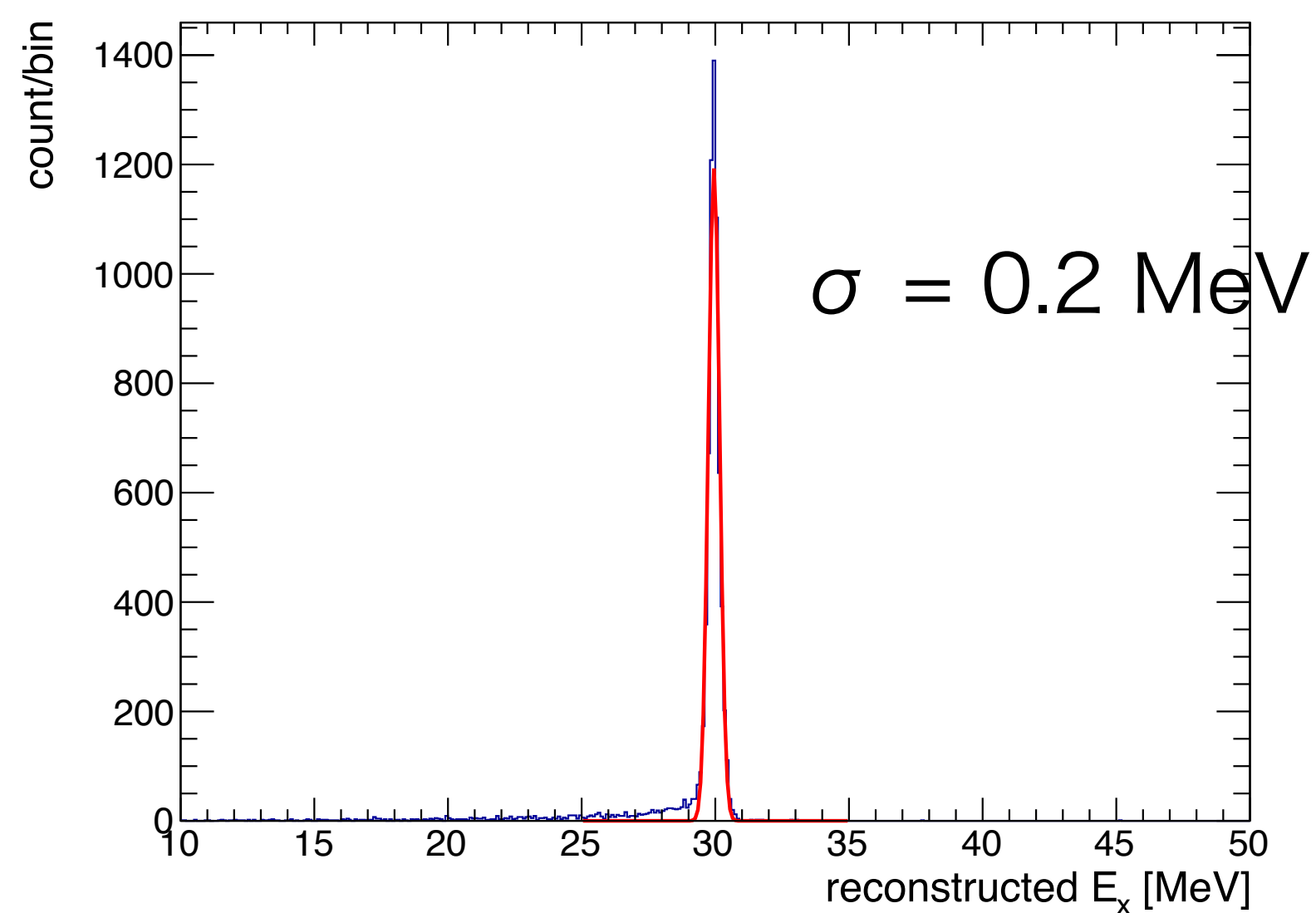
- 運動量方向またはエネルギーを真の値に置き換えて励起エネルギーを再び計算し直す

$$E_x = \sqrt{(E_{\text{beam}} + E_{\text{tgt}} - E_1 - E_2)^2 - (\vec{P}_{\text{beam}} - \vec{P}_1 - \vec{P}_2)^2} - M_{\text{frag}}$$

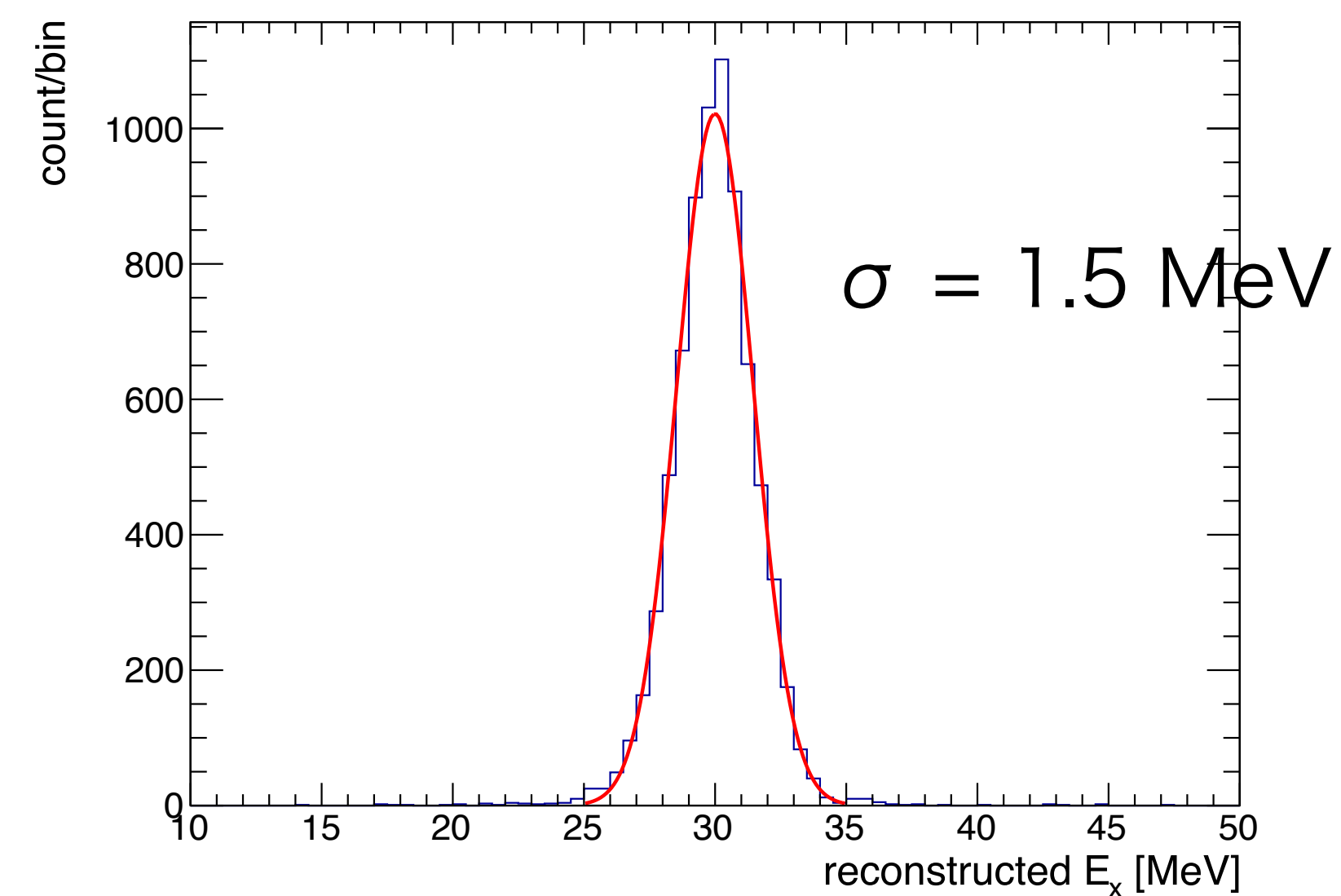
Nominal



(1) Momentum direction



(2) Energy

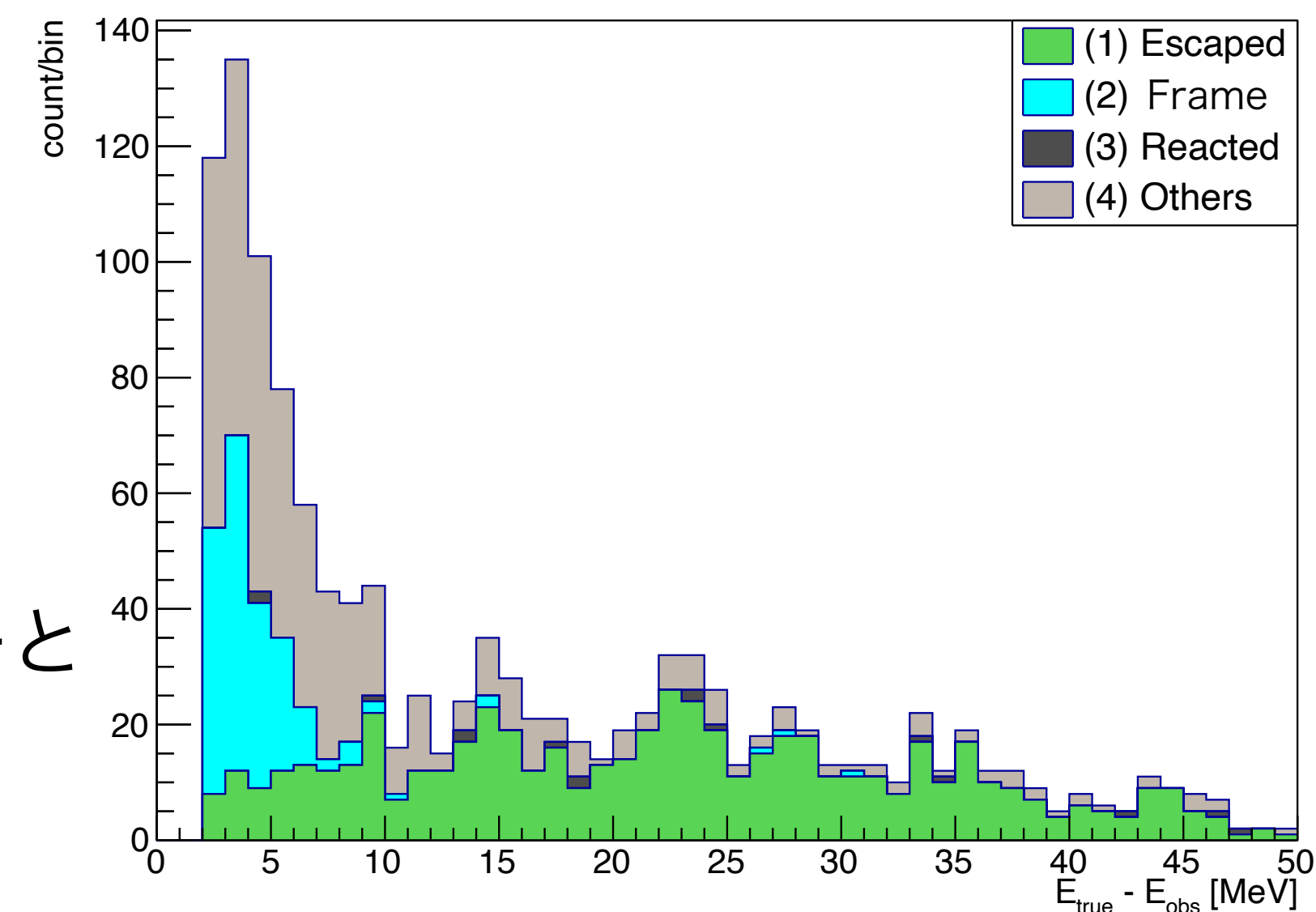
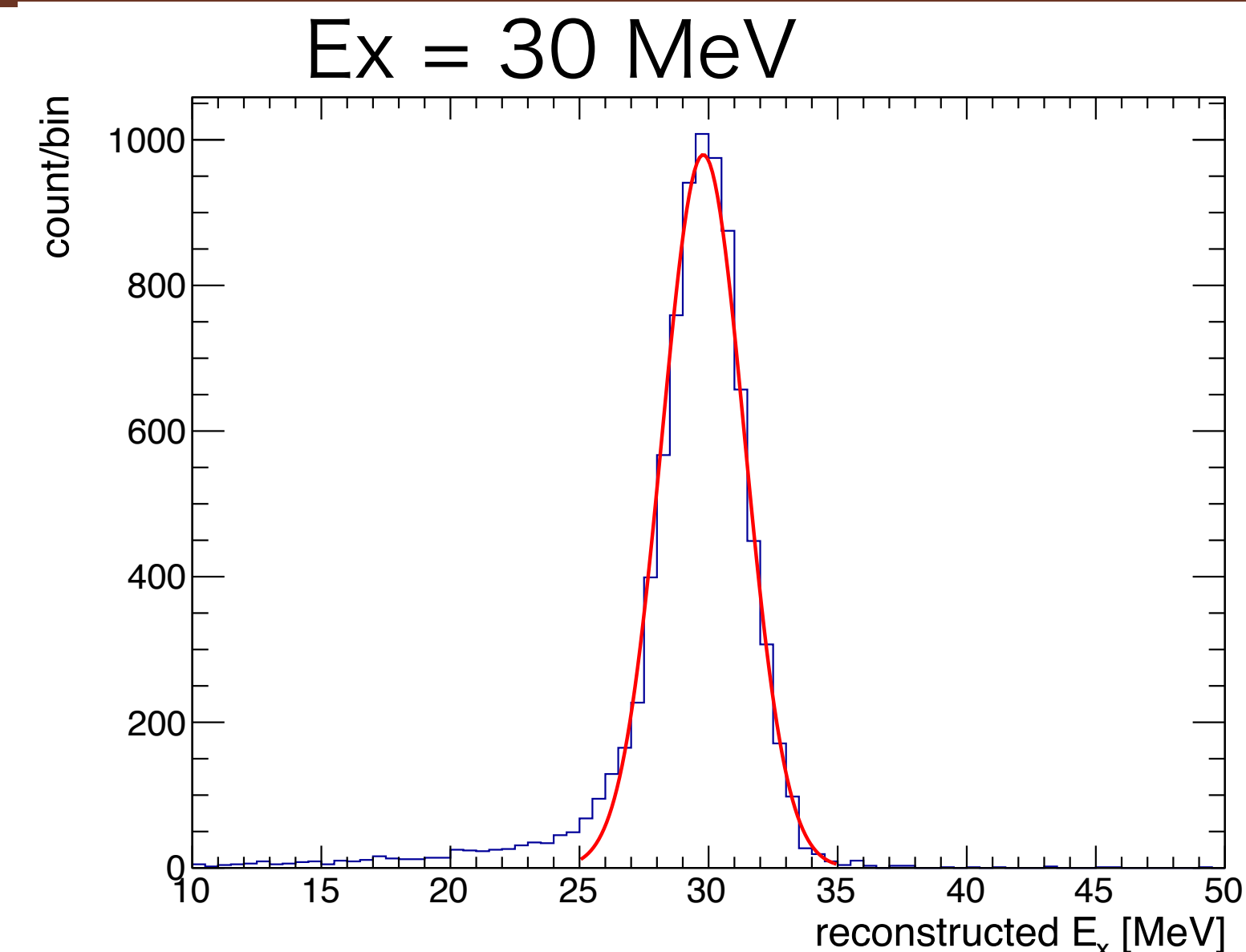


- 励起エネルギーの分解能に最も効いているのは、STRASSEの角度分解能であることがわかった

# Tail Components

- テール成分の原因は陽子のエネルギー損失を低く見積もってしまうため
  - 8.5%の陽子が  $E_{\text{true}} - E_{\text{reco}} > 2 \text{ MeV}$
- 原因は複数ある
  1. Escaped: 陽子がCATANAで全エネルギーを落とさずに逃げる
  2. Frame: STRASSEのフレーム部分を通して余分にエネルギーを落としている
  3. Reacted: 陽子が途中で二次反応を起こし、その生成物がCATANAに入射する
  4. Others: CATANAの結晶同士の間隙に入り、そこでエネルギーを失った後にCATANAに入射する etc.

要因別で色分けした真のエネルギーと再構成されたエネルギーの差

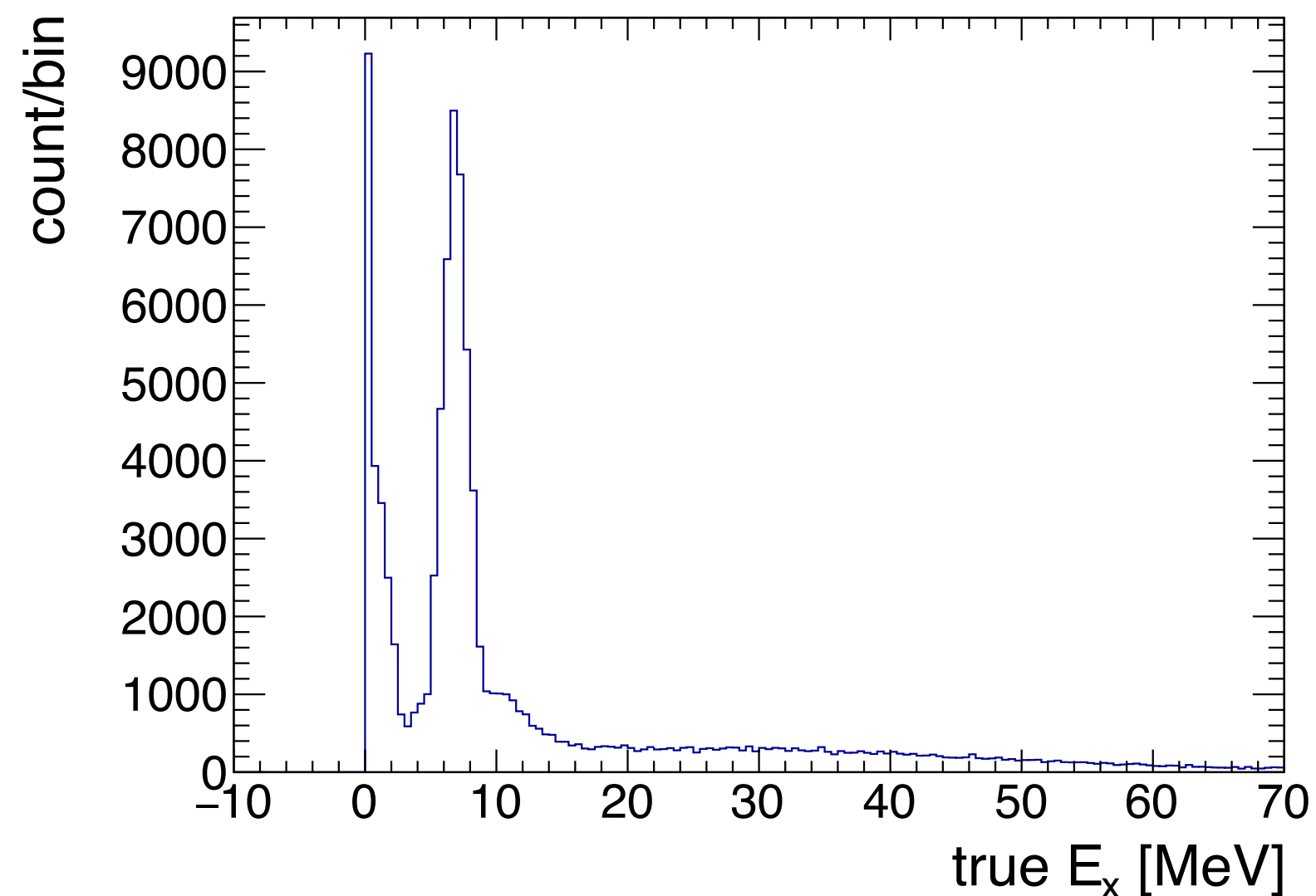




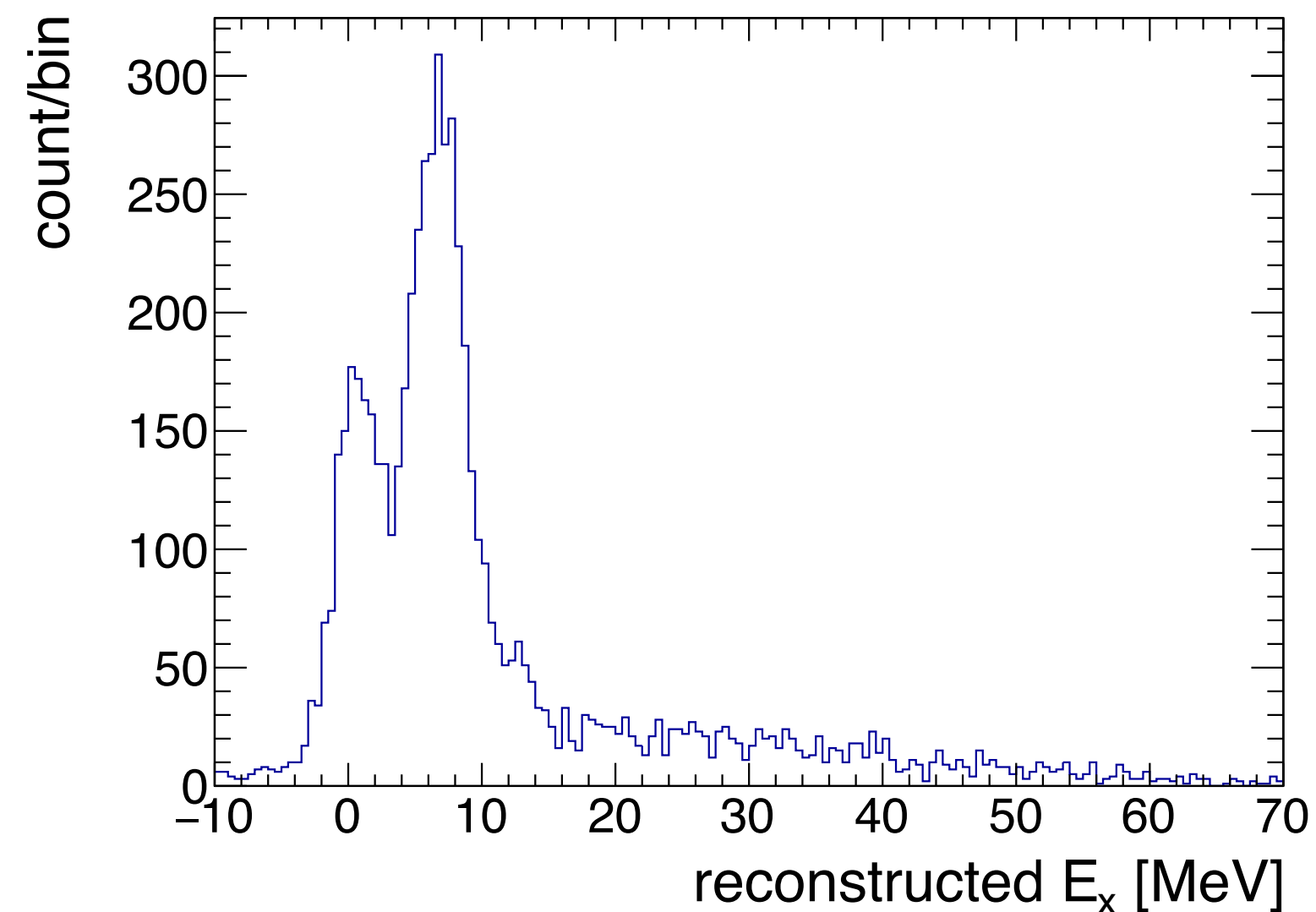
# Continuous Input Distribution

- Spectral functionをもとに生成した、連続的な励起エネルギー分布での再構成

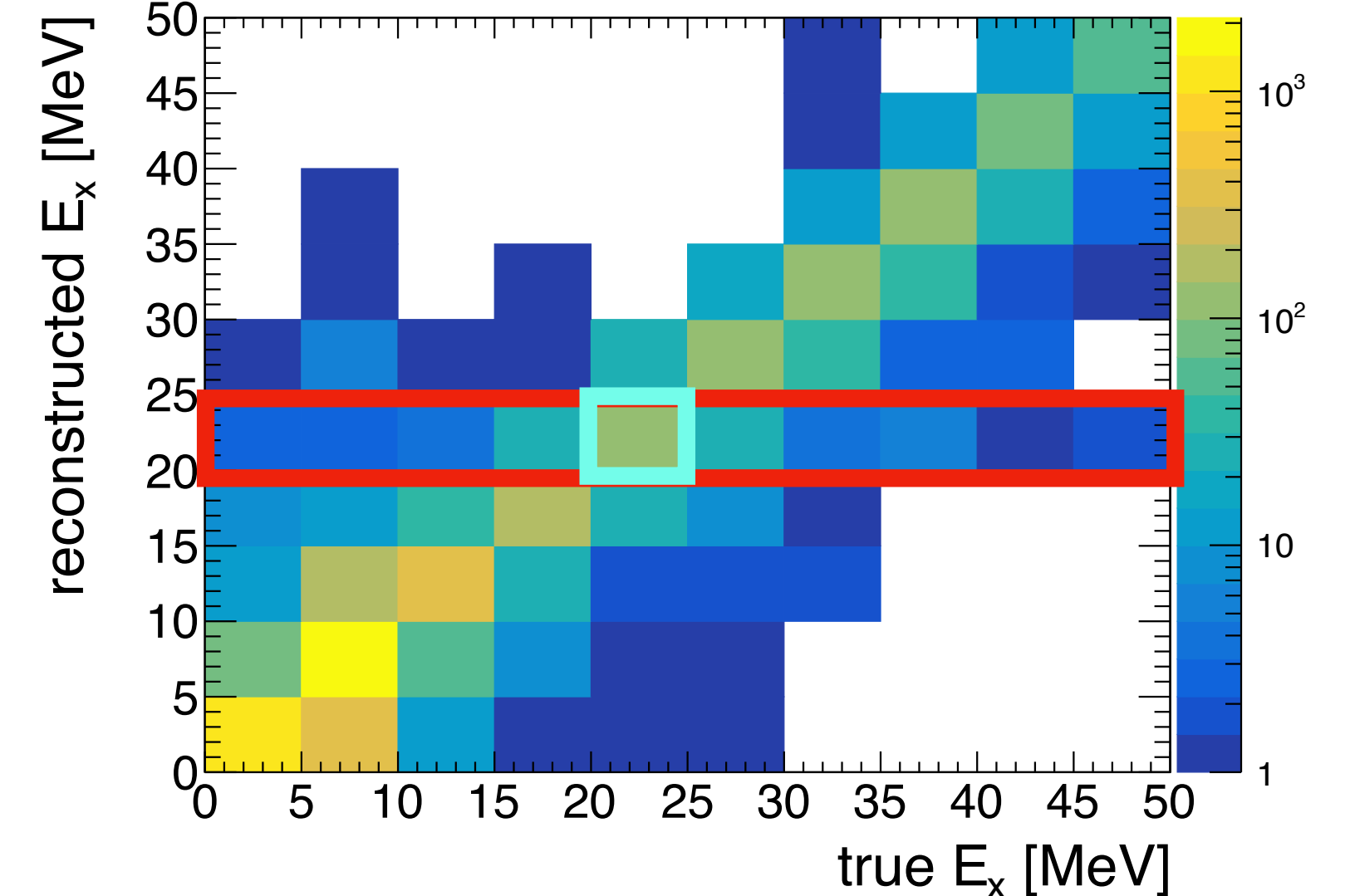
真の励起エネルギー



再構成された励起エネルギー



真の励起エネルギーと  
再構成された励起エネルギー



(Purity) := (水色枠のイベント数) / (赤枠のイベント数)

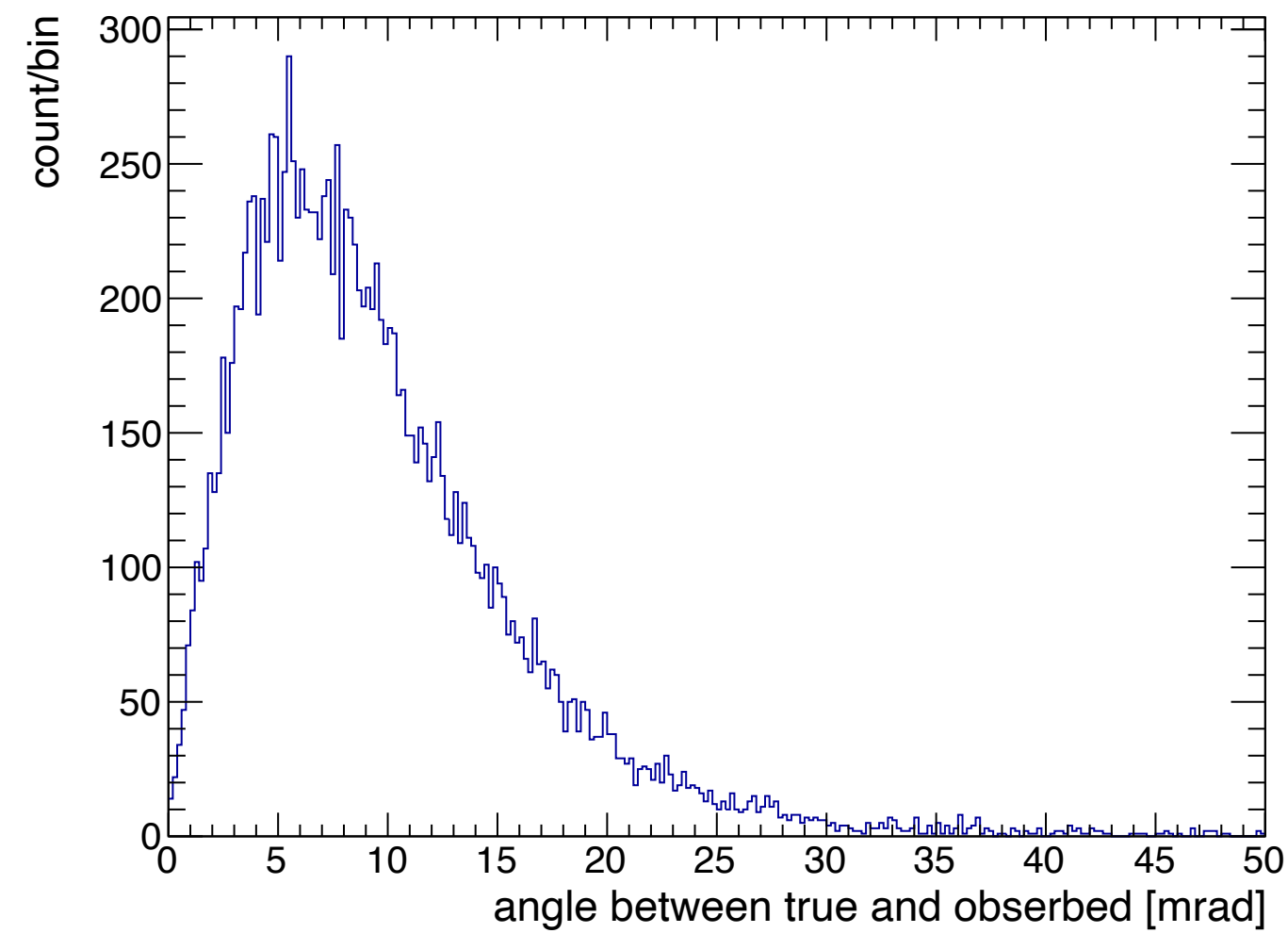
およそ60~70%

これらの混合を評価し補正することが重要

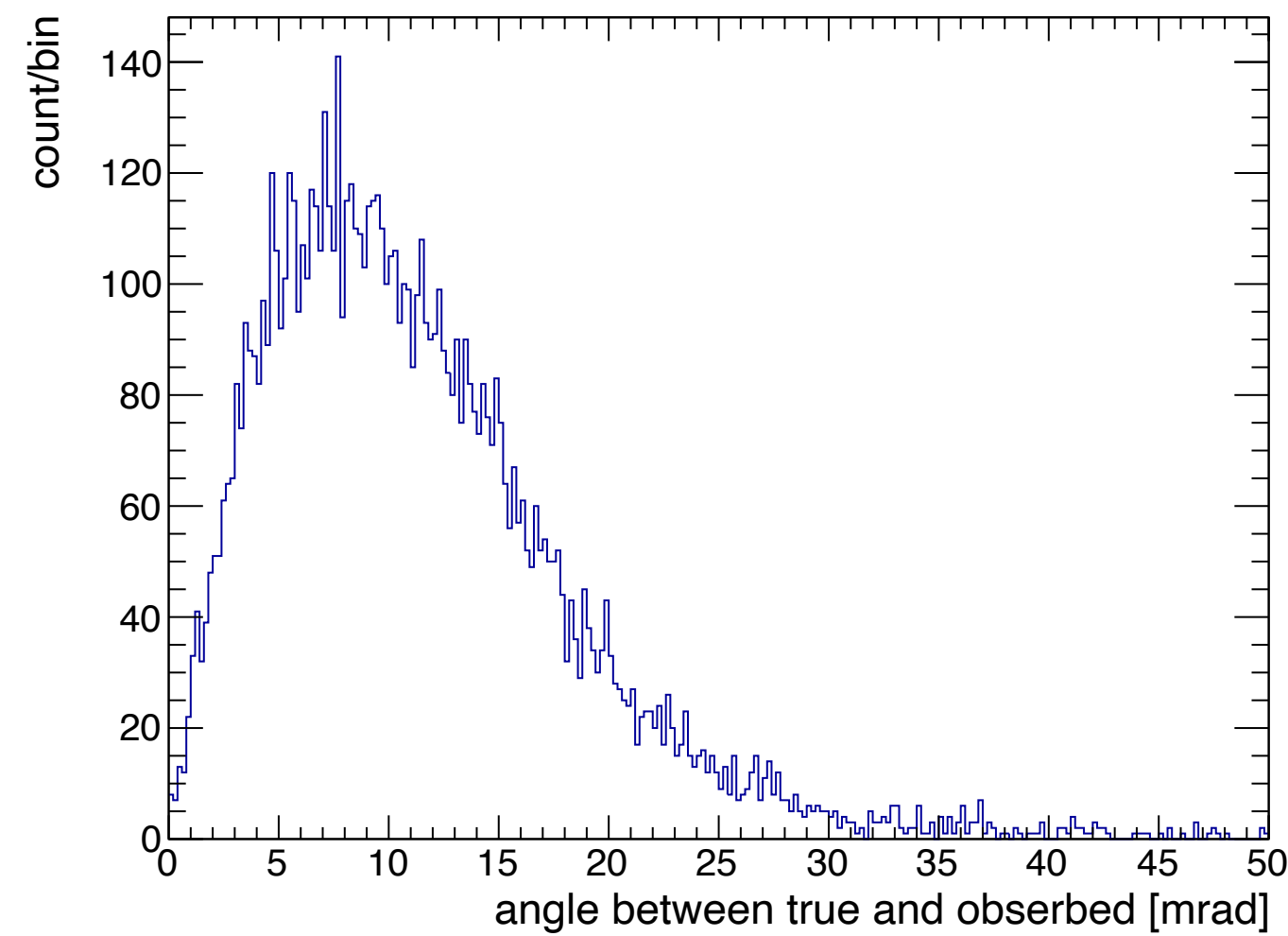
# Excitation Energy Resolution

- 反跳陽子の真の運動量方向と、測定された運動量方向のあいだの角度

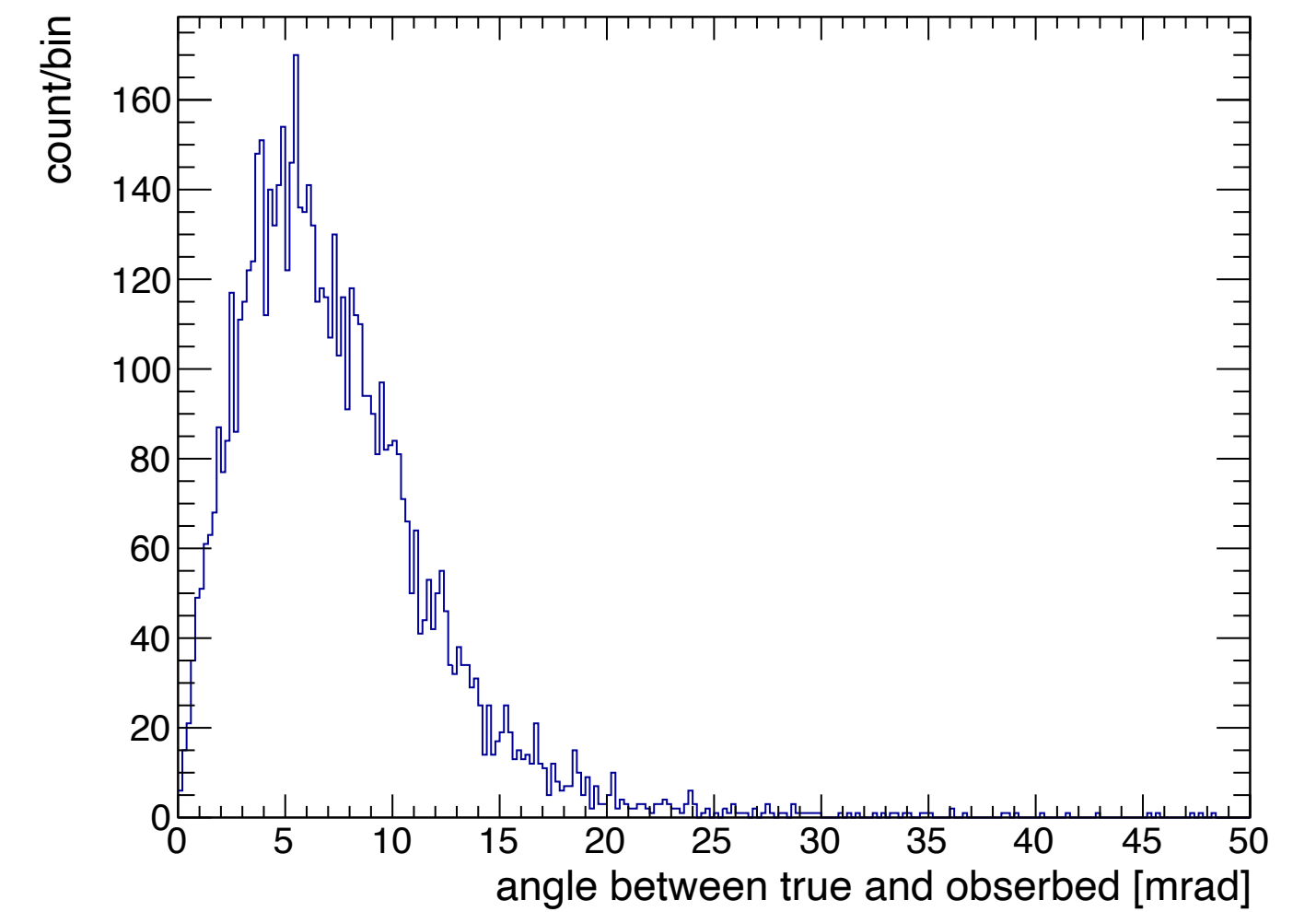
All



$E_{kin} < 70$  MeV



$E_{kin} > 70$  MeV

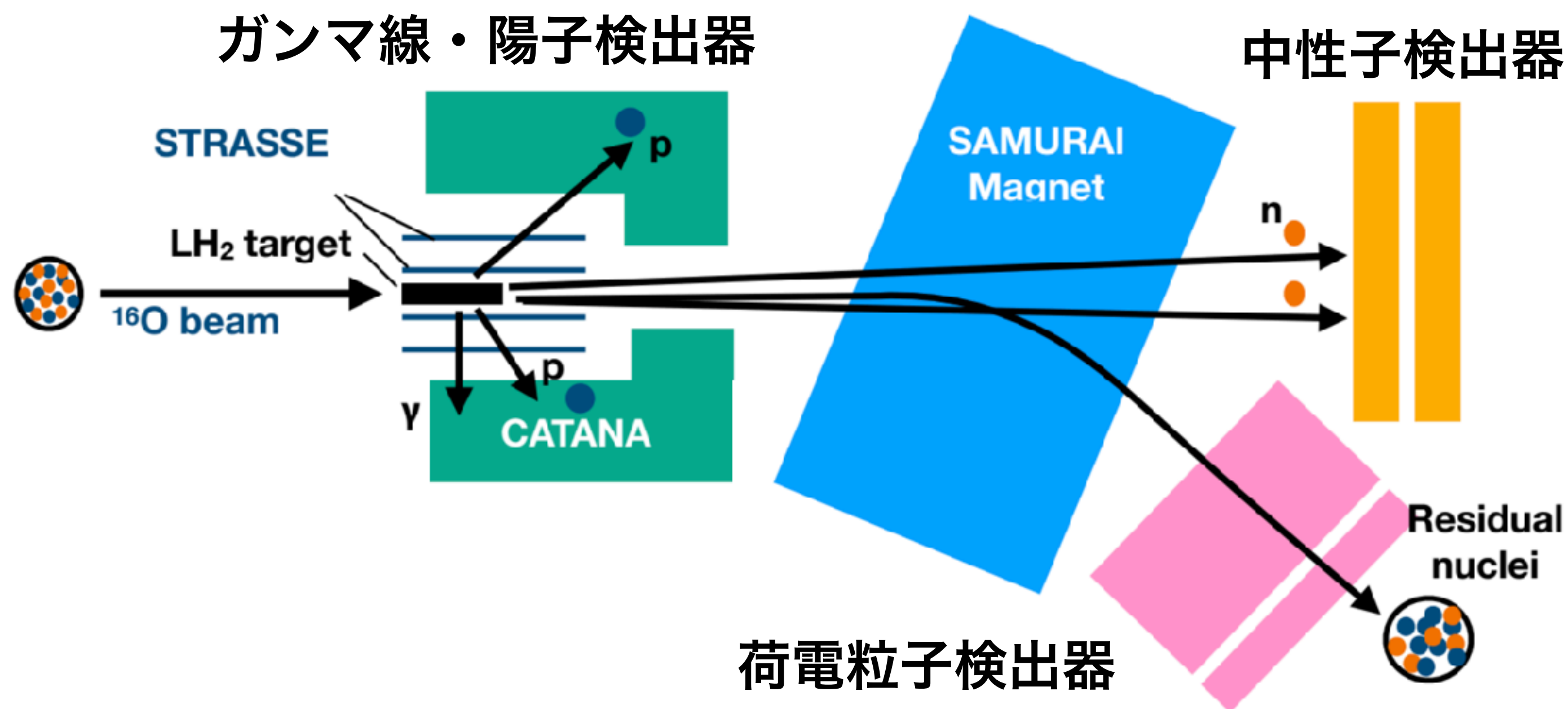


# Branching Ratio

- 残留核と中性子を検出することで、 $^{15}\text{N}$ の脱励起チャンネルを測定
  - e.g.  $^{14}\text{N}$ が検出された  $\rightarrow$  一意に $^{14}\text{N}+n$
  - e.g.  $^{12}\text{C}$ が検出された
    - $^{12}\text{C} + t, ^{12}\text{C} + d + n, ^{12}\text{C} + p + 2n$
    - 中性子検出器で中性子の数を数えることで特定

G4PreCompoundによる  
 $^{15}\text{N}$ の崩壊分岐比  
 ( $10.83 < E_x < 50 \text{ MeV}$ )

Channel	Branching Ratio [%]
$^{14}\text{N} + n$	38.1
$^{13}\text{C} + p + n$	11.2
$^{11}\text{B} + \alpha$	6.7
$^6\text{Li} + 2\alpha + n$	6.4
$^{12}\text{C} + p + 2n$	6.2
$^{12}\text{C} + d + n$	5.6
$^7\text{Li} + 2\alpha$	5.5
$^{14}\text{C} + p$	3.9
$^{13}\text{N} + 2n$	3.8
Others	12.6



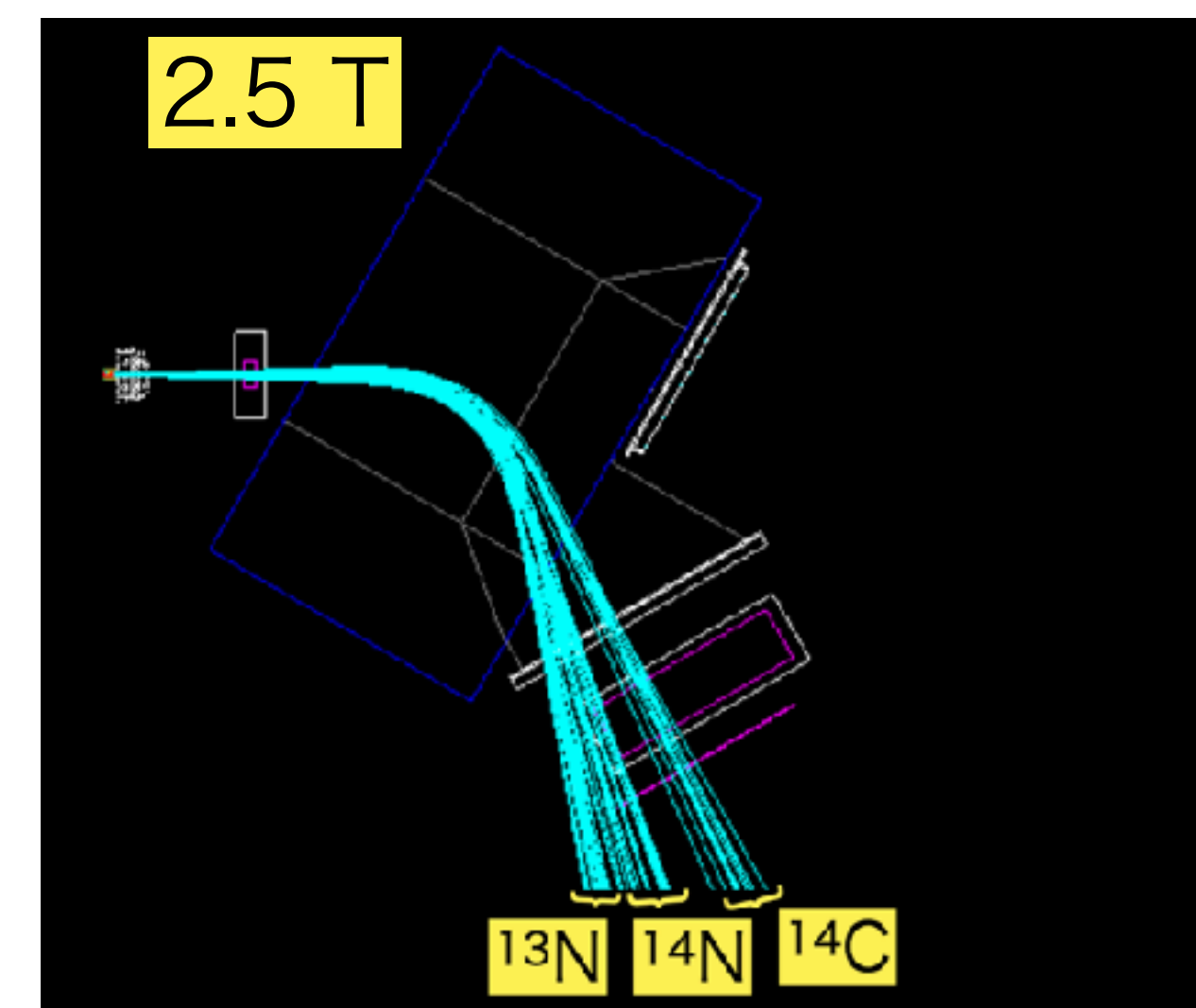
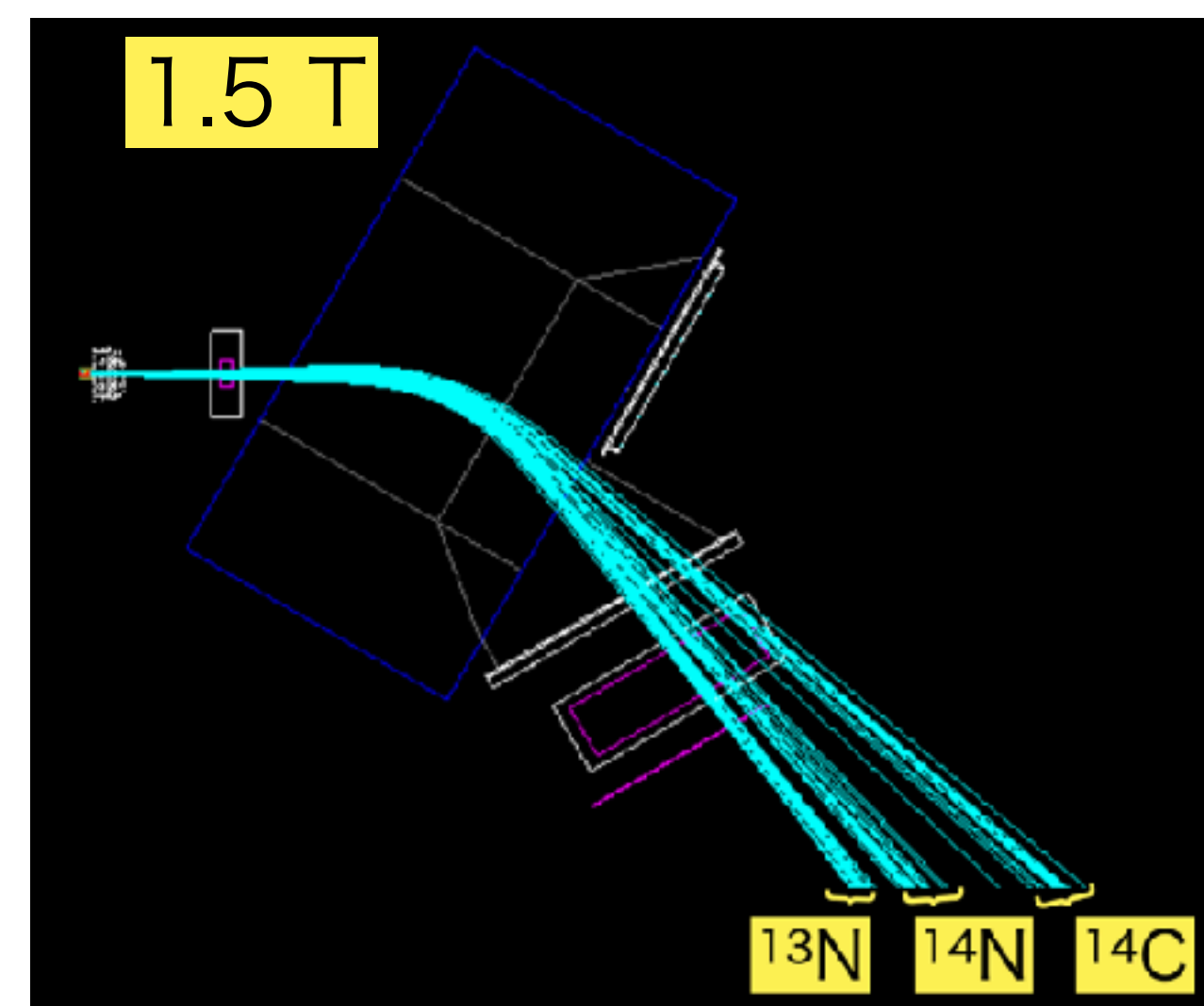
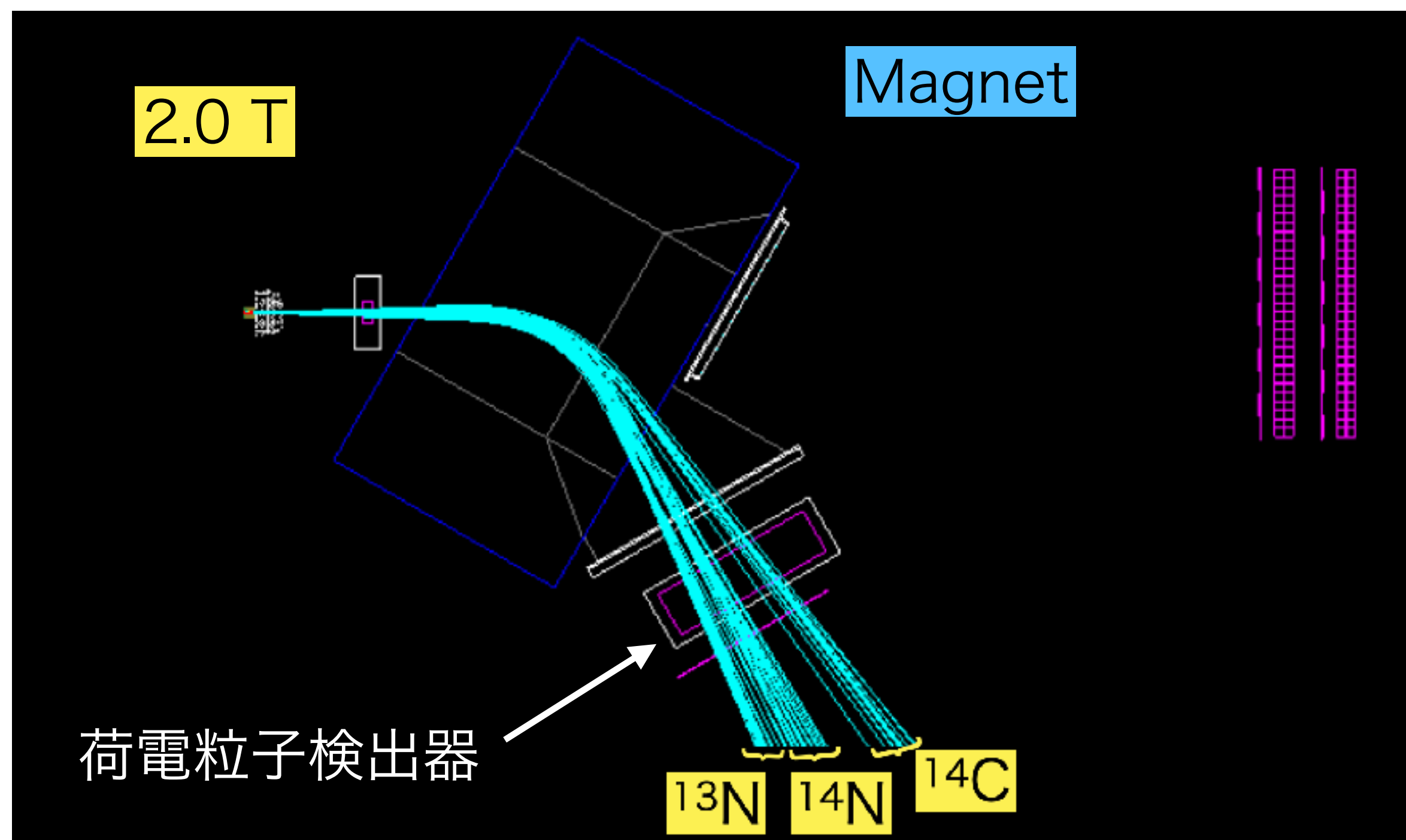


# Measurement of Residual Nuclei

- $A/Z$ の大きい $^{14}\text{C}$ 、典型的な $^{14}\text{N}$ 、小さい $^{13}\text{N}$ の飛跡をシミュレーション
  - 2.0 Tの磁場により全ての残留核を検出できる

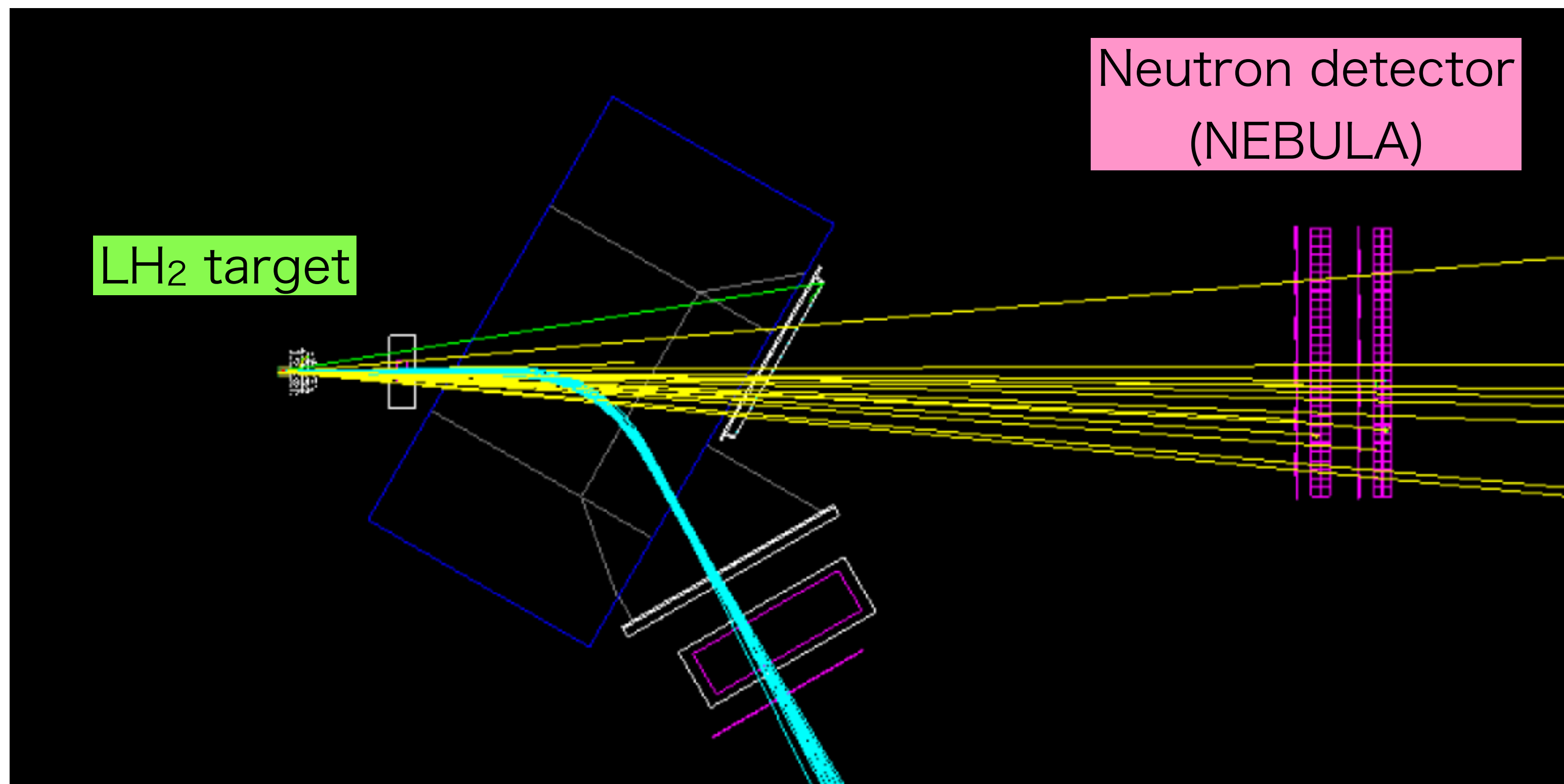
主な残留核と  
 $A/Z$

Particles	$A/Z$
$^{13}\text{N}$	13/7
$^{14}\text{N}$ , $^{12}\text{C}$ , $^6\text{Li}$ , $\alpha$ , d	2
$^{13}\text{C}$	13/6
$^{11}\text{B}$	2.2
$^{14}\text{C}$ , $^7\text{Li}$	7/3



# Measurement of Neutron

- $^{14}\text{N} + n$  の中性子の測定をシミュレーション
- プラスチックシンチレーター (NEBULA)
  - 120本の棒状のプラスチックシンチレーターが4層に並んでいる
  - 荷電粒子が1本のプラスチックシンチレーター内に落としたエネルギーから、粒子の種類に応じて発光量を計算
  - ガンマ線のヒットを落とすため、6 MeVee (electron equivalent) のしきい値

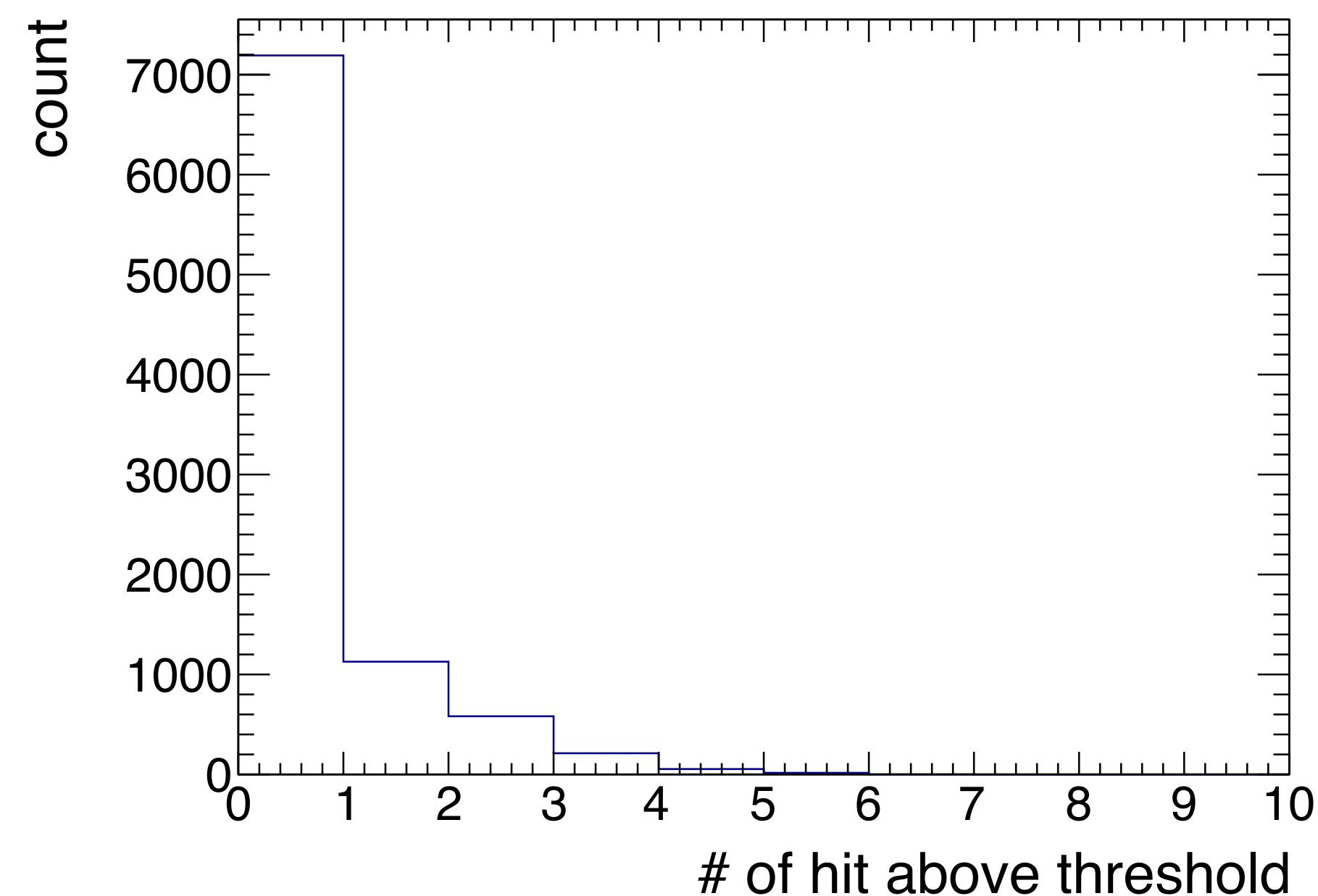


# Measurement of Neutron

- 中性子が1個検出されたイベントは全体の12%となった
- 1個の中性子が複数のヒットを作るイベント (cross-talk) が存在
  - Cross-talk rejectionでこのイベントを区別する必要 (今後の課題)

Conditions	Ratio [%]
幾何学的アクセプタンス	60
6 MeVee以上のヒットが1つ以上	22
6 MeVee以上のヒットが1つ	12

6 MeVee以上のヒットのあったプラスチックシンチレーターの数





# Statistical Performance

- 反跳陽子事象の選択効率 ( $E_x = 30 \text{ MeV}$ ): 7.7%
- ビームタイムや生成断面積を用いると、この実験で生成できる励起状態の $^{15}\text{N}$ は、35万イベント
- $^{14}\text{N}+n$  (分岐比: 38.1%)のイベントの数は13万イベント
  - $^{14}\text{N}$ は100%の効率で検出されるとすると、得られる統計数は13万イベント
  - 分岐比は0.3%の統計誤差で測定できる
- $^{12}\text{C}+d+n$  (分岐比: 5.6%)のイベント数は2万イベント
  - $^{12}\text{C}$ の検出効率100%、中性子1個の検出効率12%を用いると、約2400イベント
  - 分岐比は2.0%の統計誤差で測定できる

# Impact on DSNB

- NCQE背景事象の内訳

NCQE cross section	44%
Atmospheric $\nu$ flux	15%
Flux difference	7%
Reductions	2%
Neutron tagging	9%
Neutron multiplicity	30%
Spectral shape	38%
Total	68%

本研究で削減が期待されるもの

- 大気ニュートリノの系統誤差を20%、10%に削減したときのDSNB将来感度を計算
- 3 $\sigma$ の感度でDSNBを発見できる

DSNBの3 $\sigma$ 発見感度

