

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

An Inverse-Kinematics Experiment for
Improving Neutrino-Nucleus Interaction
Prediction at Super-Kamiokande

Yusuke Mizuno (UTokyo)

水野 裕介 (東京大学)

2025/3/4

The 11th Supernova Neutrino Workshop

Contents

- Introduction
 - Diffuse Supernova Neutrino Background search at Super-Kamiokande
 - Neutrino-nucleus interaction
- Inverse-kinematics experiment
 - SAMURAI-79 experiment
- Simulation study for the measurement of de-excitation of $^{15}\text{N}^*$
 - Excitation energy reconstruction

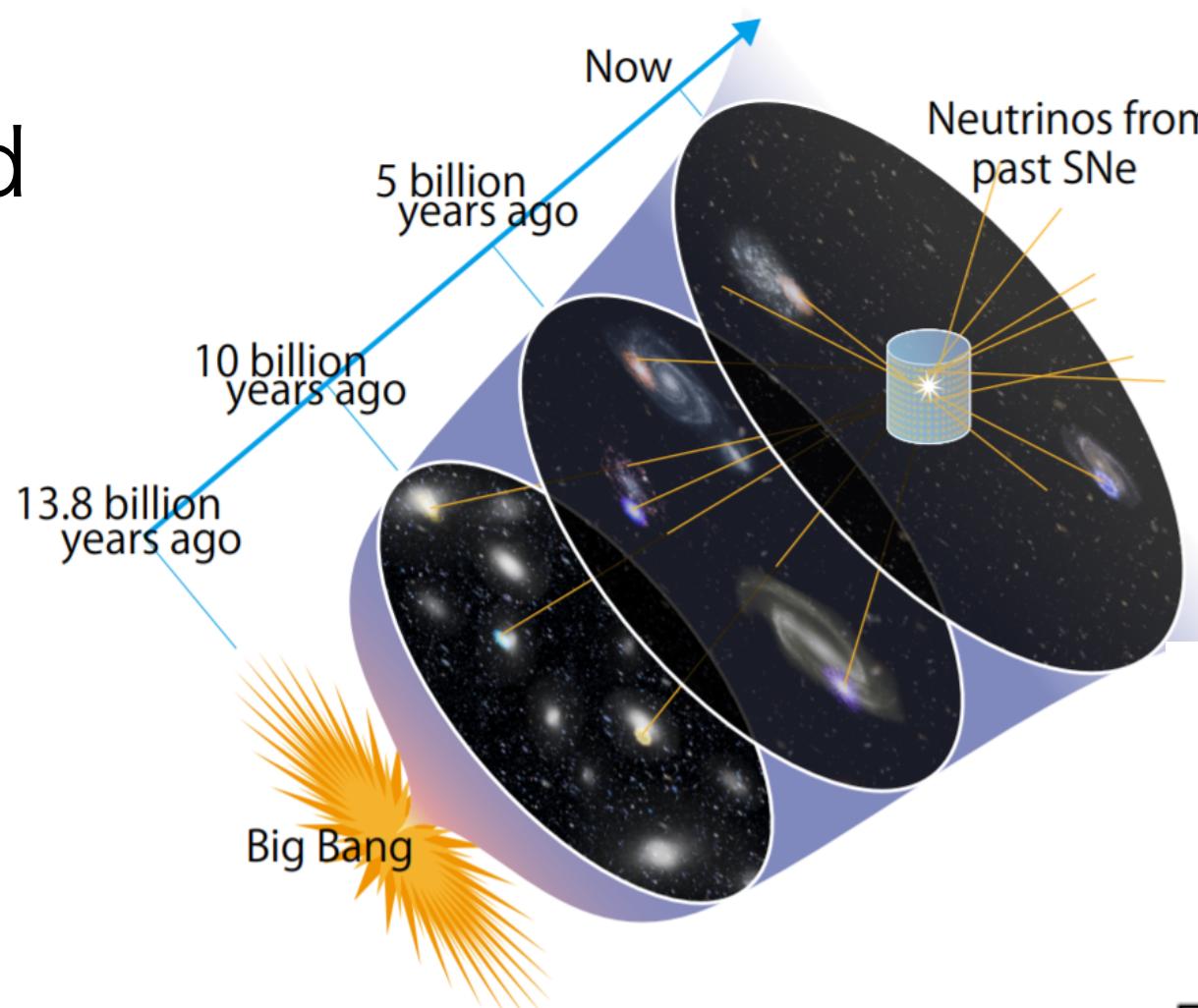
Contents

- Introduction
 - Diffuse Supernova Neutrino Background search at Super-Kamiokande
 - Neutrino-nucleus interaction
- Inverse-kinematics experiment
 - SAMURAI-79 experiment
- Simulation study for the measurement of de-excitation of $^{15}\text{N}^*$
 - Excitation energy reconstruction

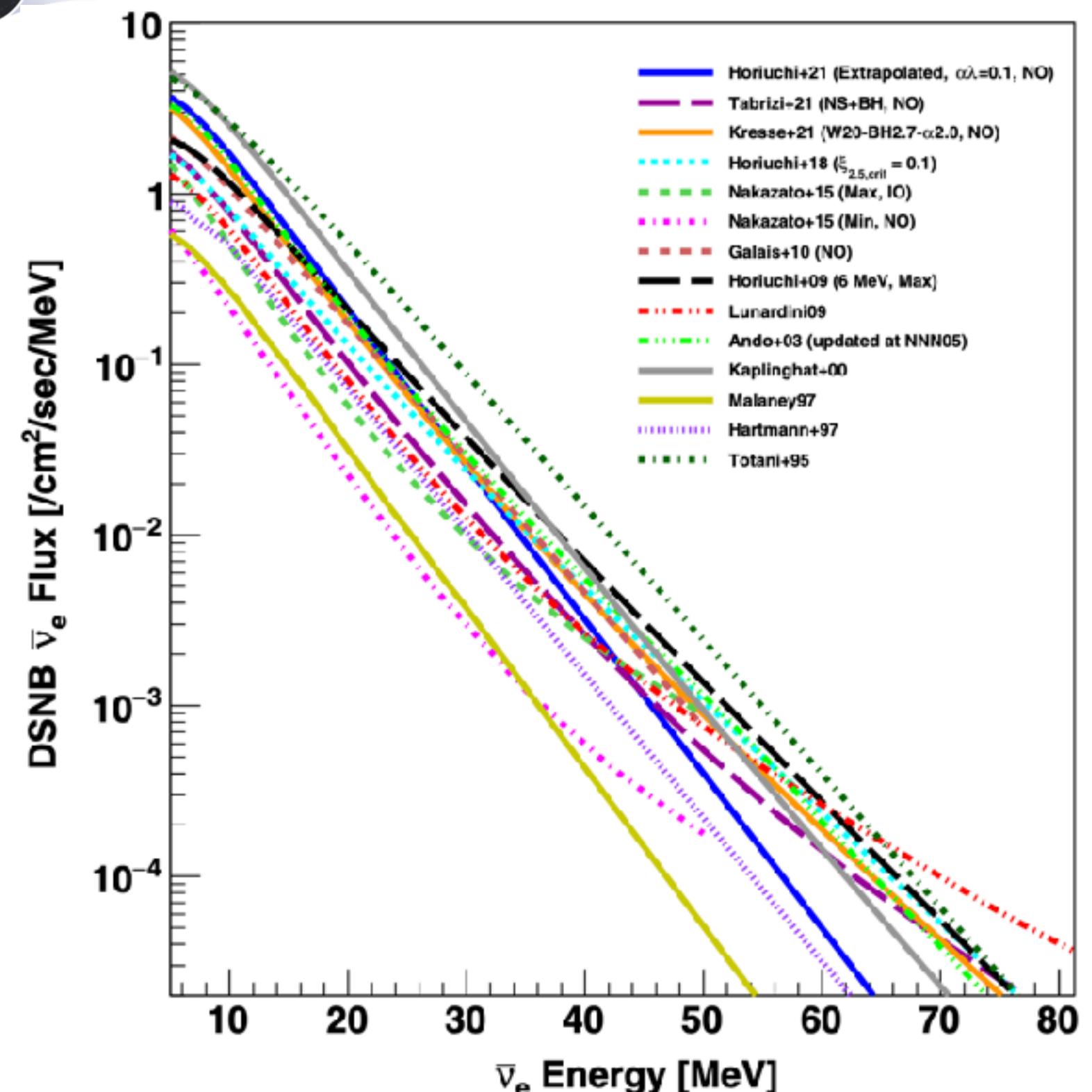
Diffuse Supernova Neutrino Background

- Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)
 - An accumulated flux of the neutrinos from all past CCSNe

$$(\text{DSNB flux}) \propto \int (\text{SN rate}) \otimes (\nu \text{ emission from SN}) \otimes (\text{Red shift})$$

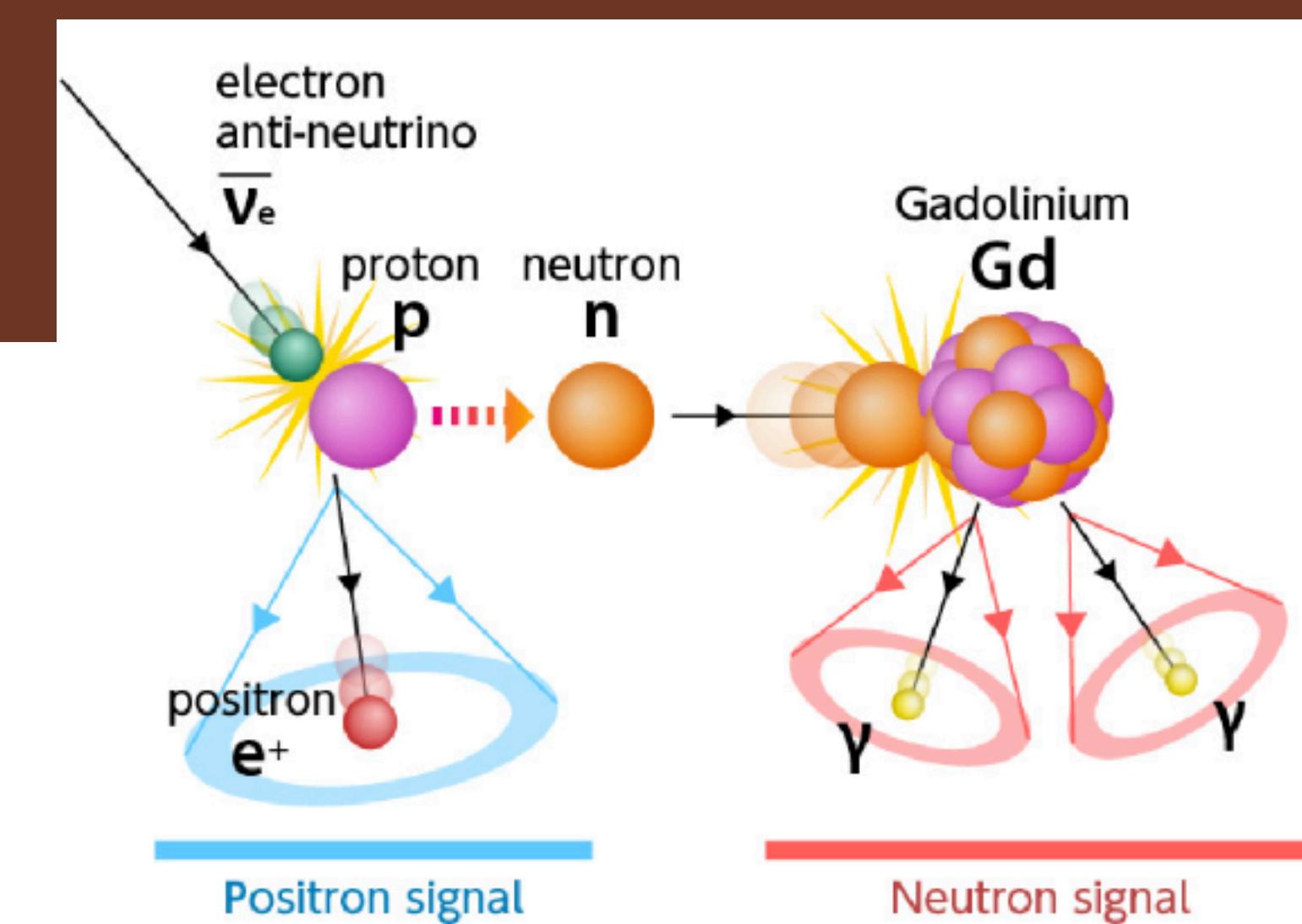
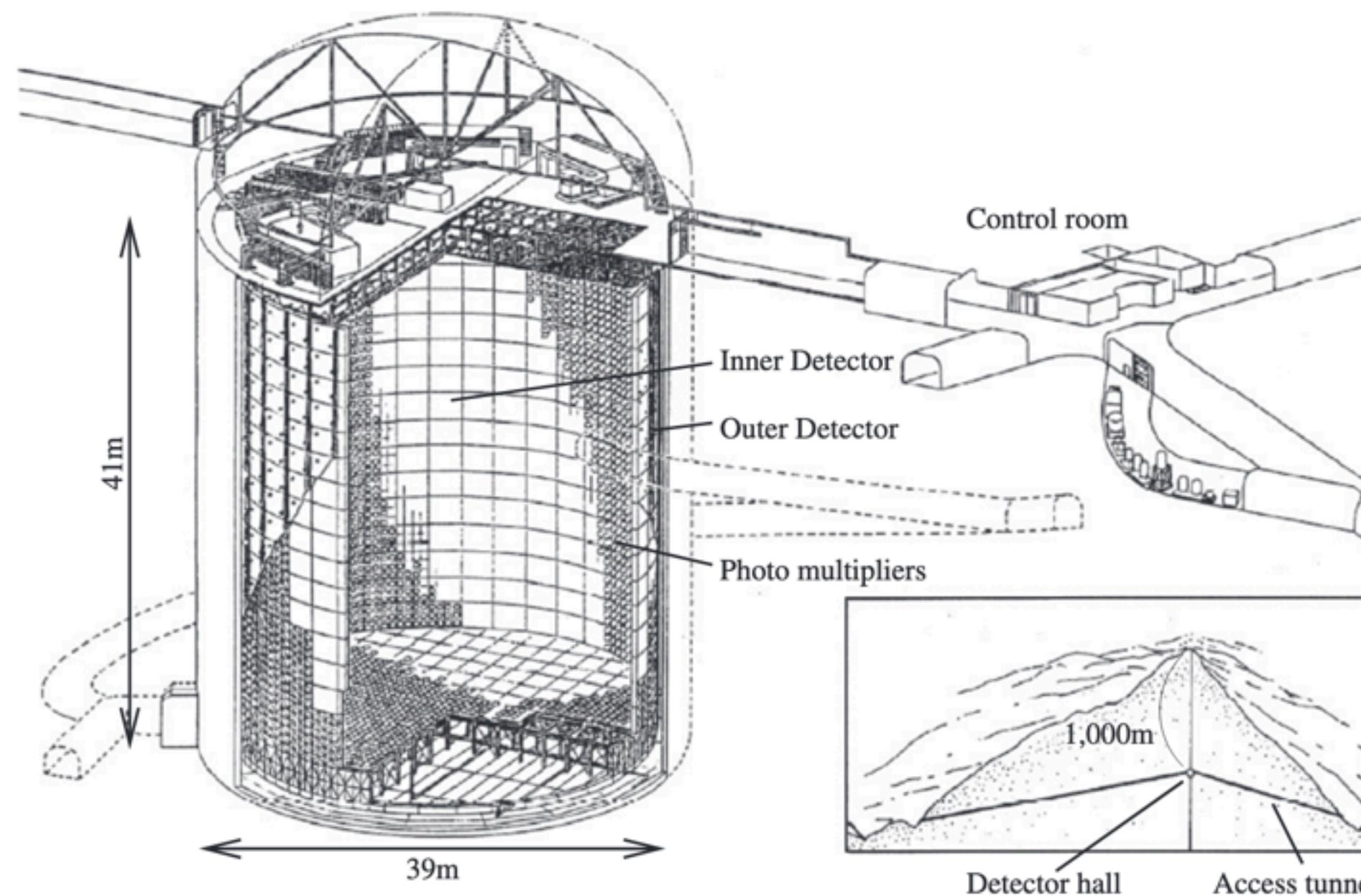


Theoretical predictions of DSNB flux

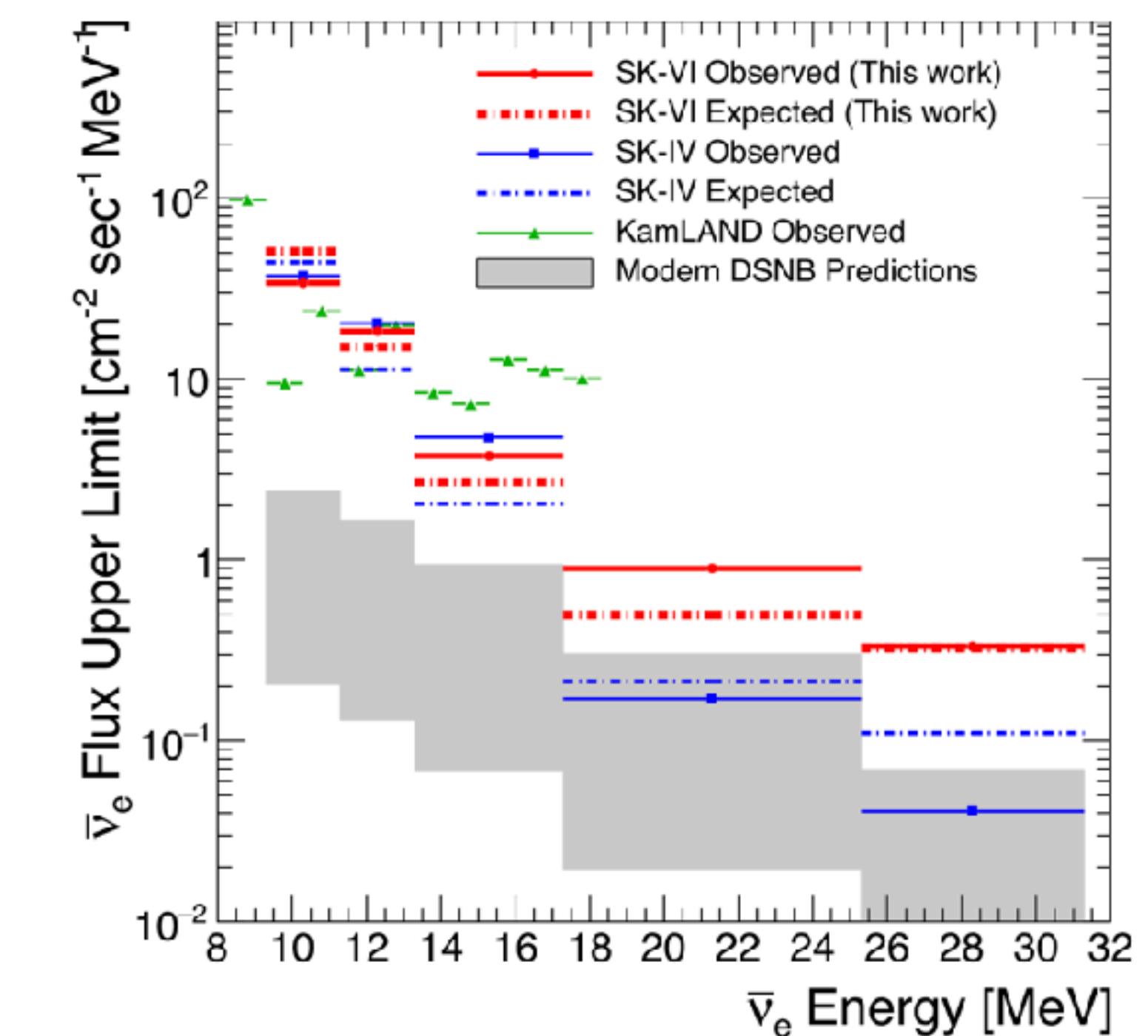


Super Kamiokande

- Super Kamiokande (SK)
 - 50 kton Water Cherenkov detector
 - Reduced background events by using neutron capture signal from Gadolinium
 - Most stringent upper limit on DSNB flux
 - Experimental sensitivity approaching model prediction

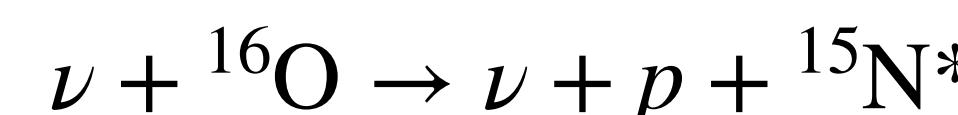


DSNB upper limit (90% C. L.)

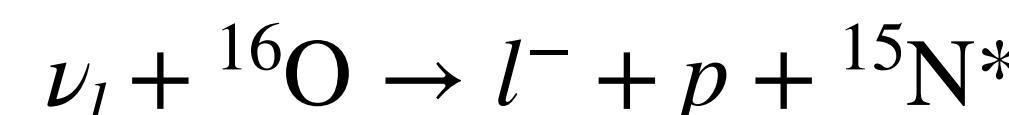
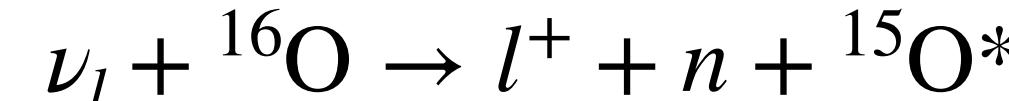


Neutrino-Nucleus Interaction

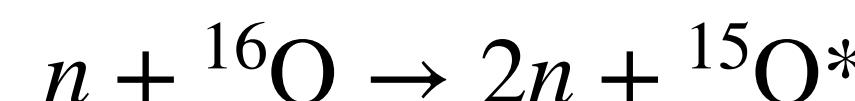
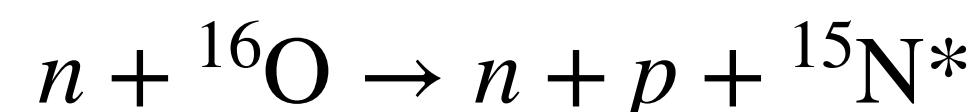
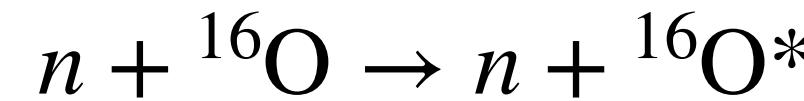
- Background: interactions between atmospheric neutrinos and oxygen nuclei
 - Large uncertainties on prediction
 - Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE) scattering



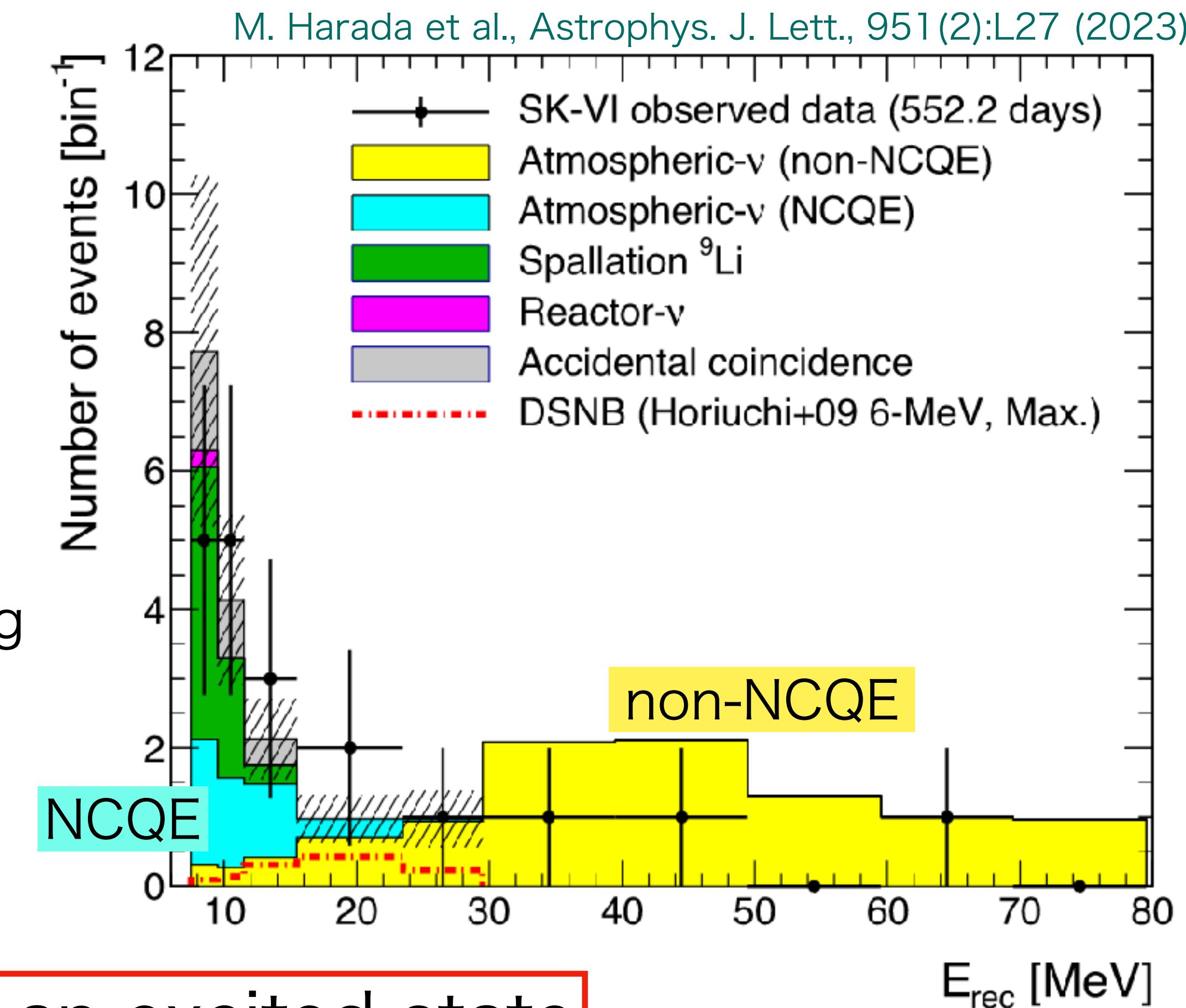
- non-NCQE
 - Charged Current Quasi-Elastic (CCQE) scattering



- Secondary interaction



Reconstructed energy spectrum



Nuclei in an excited state
are produced

Neutrino-Nucleus Interaction

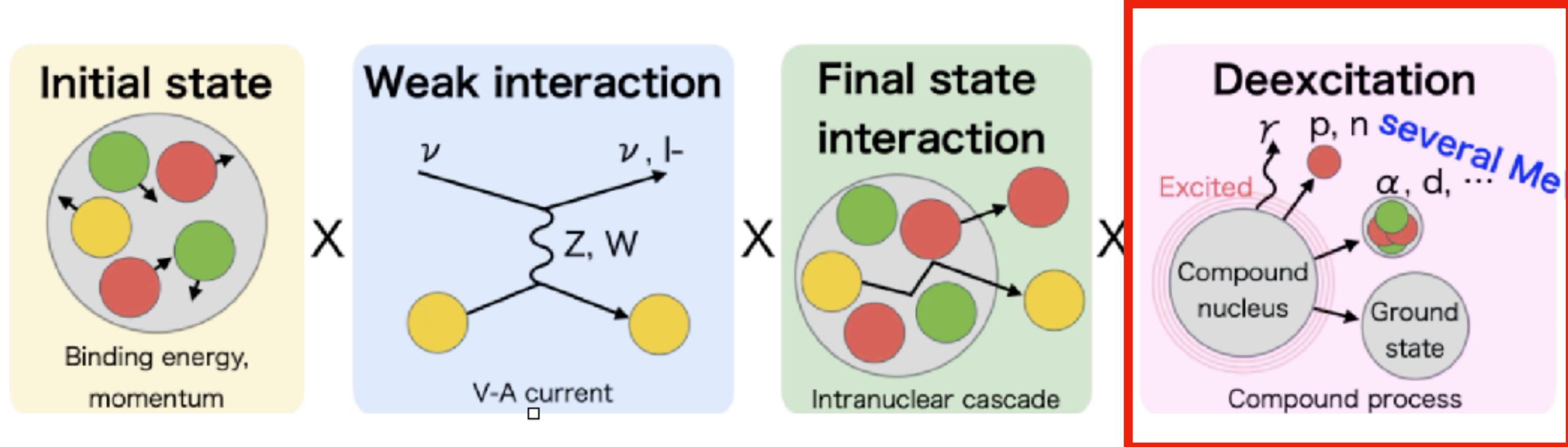
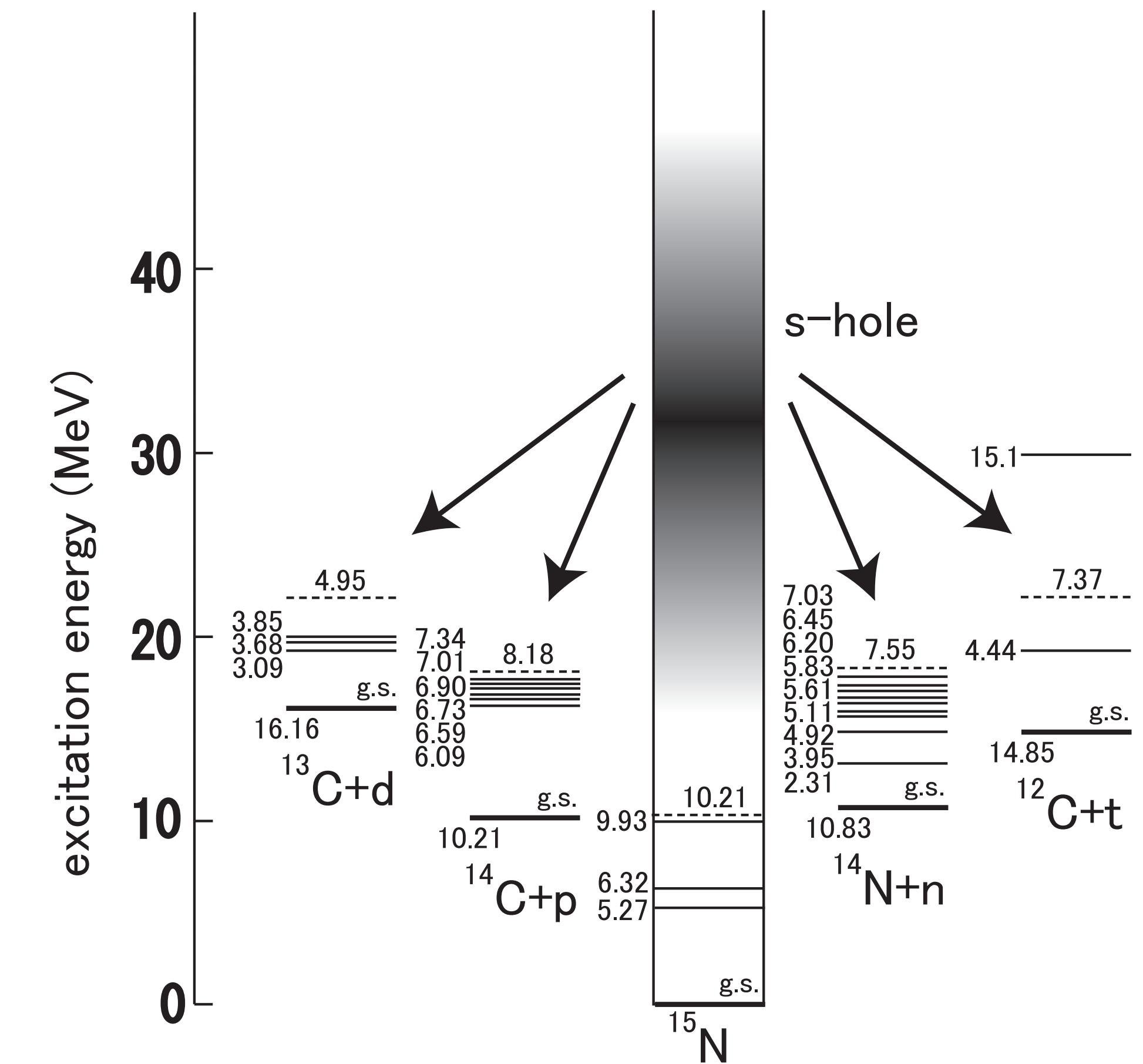


Figure by S. Abe

Key process

- De-excitation from highly excited states emits neutrons or other particles
 - Uncertainty on the theoretical model due to a lack of experimental data



K. Kobayashi, et al. [arXiv:nucl-ex/0604006 [nucl-ex]] (2006)

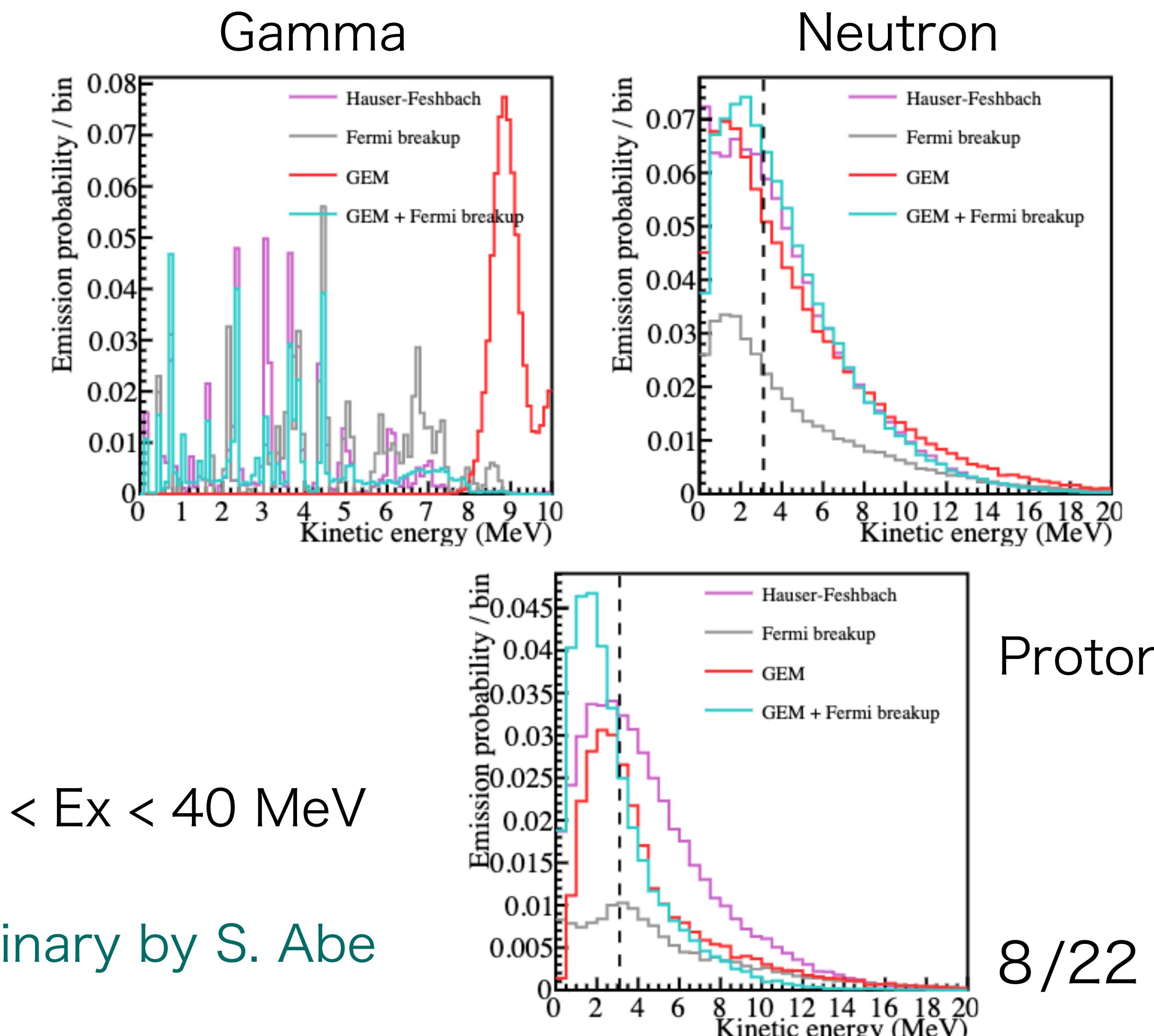
Neutrino-Nucleus Interaction

- De-excitation from highly excited states emits neutrons or other particles
 - Uncertainty on the theoretical model due to a lack of experimental data
- Better understanding of the de-excitation process of $^{15}\text{N}^*$, $^{15}\text{O}^*$, $^{16}\text{O}^*$ is important for reducing the uncertainties

→ Inverse kinematics experiment with nuclear beam

$20 < \text{Ex} < 40 \text{ MeV}$

e.g. Energy distribution of particles from the de-excitation of $^{15}\text{N}^*$ with various models



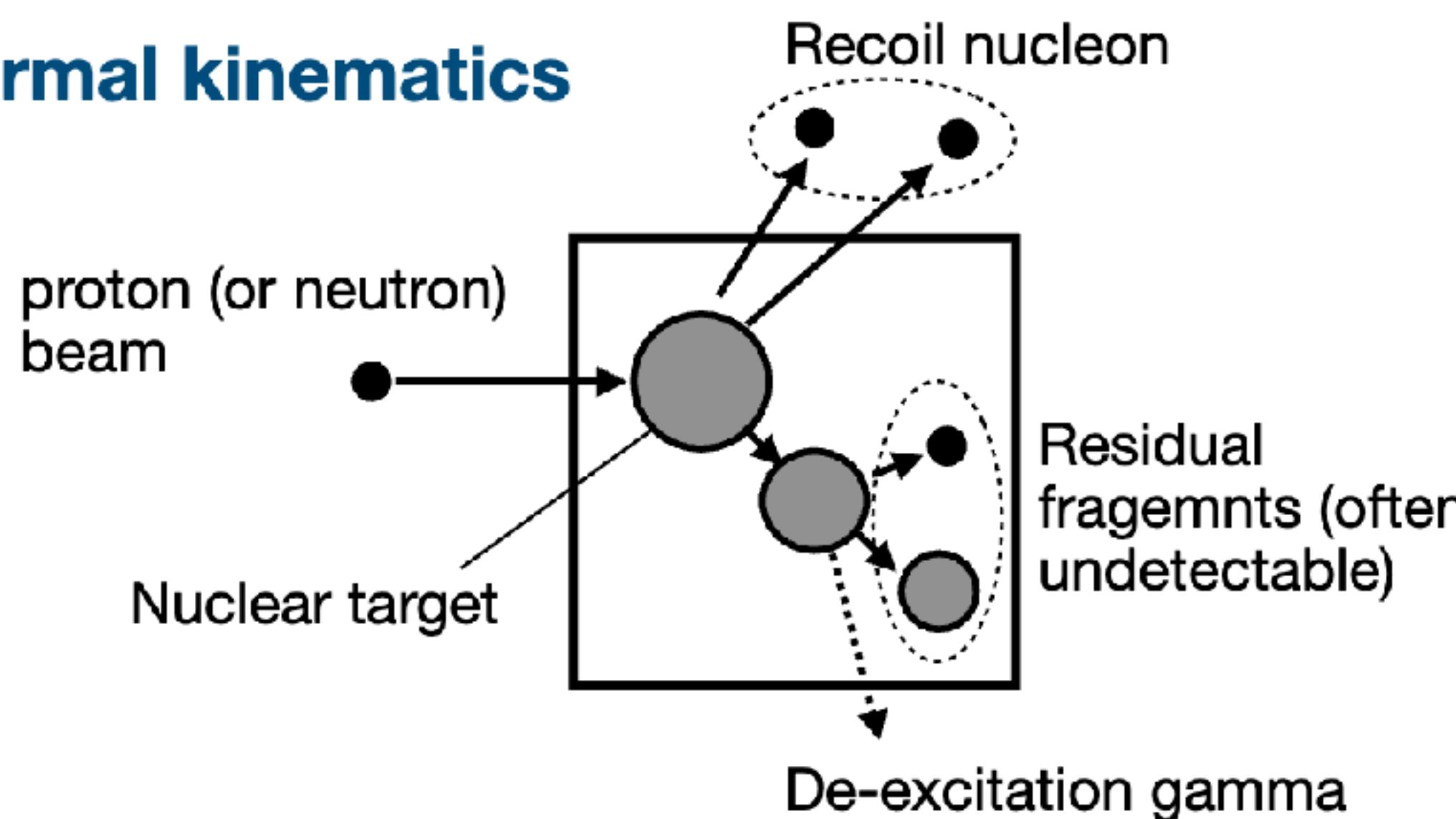
Contents

- Introduction
 - Diffuse Supernova Neutrino Background search at Super-Kamiokande
 - Neutrino-nucleus interaction
- Inverse-kinematics experiment
 - SAMURAI-79 experiment
- Simulation study for the measurement of de-excitation of $^{15}\text{N}^*$
 - Excitation energy reconstruction

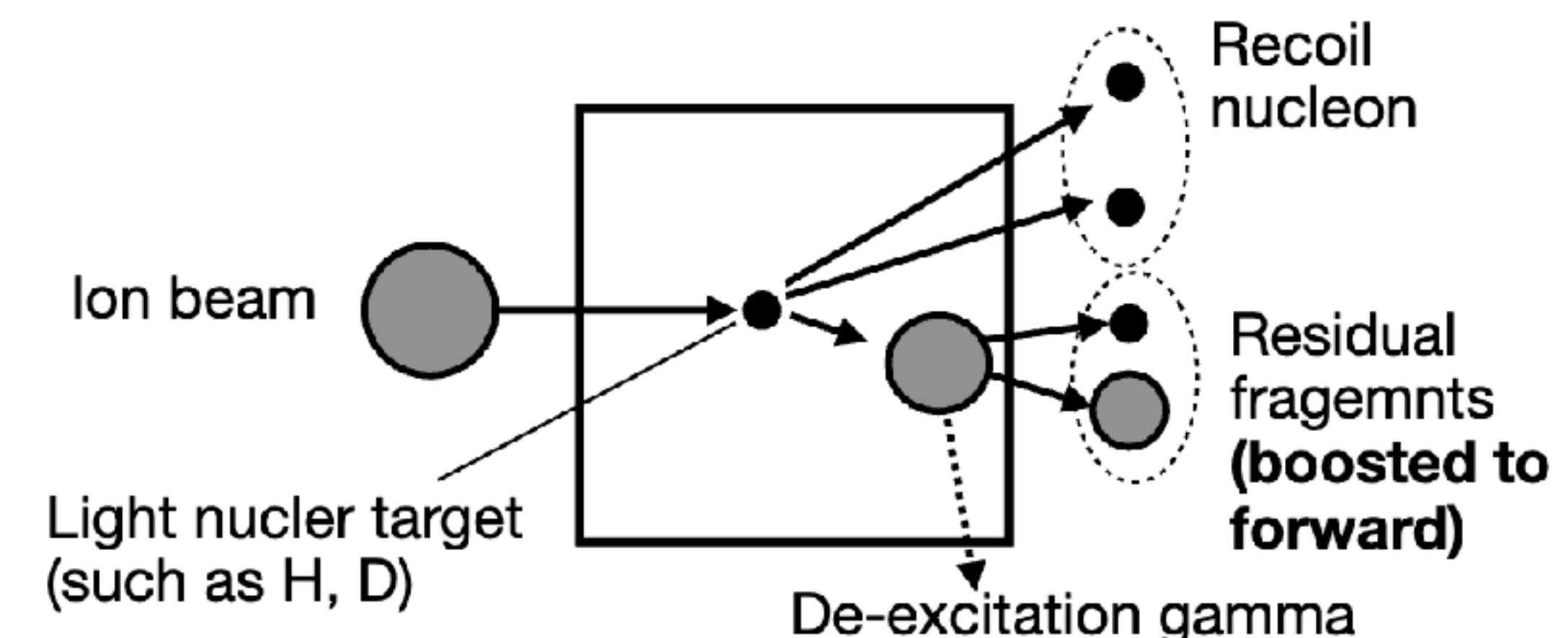
Inverse-Kinematics

- Strike a nuclear beam into a nucleon target
- The entire system is moving relative to laboratory frame
 - Makes detection of low-energy residual nuclei and de-excitation products (typically < 10 MeV in the CM frame)

Normal kinematics

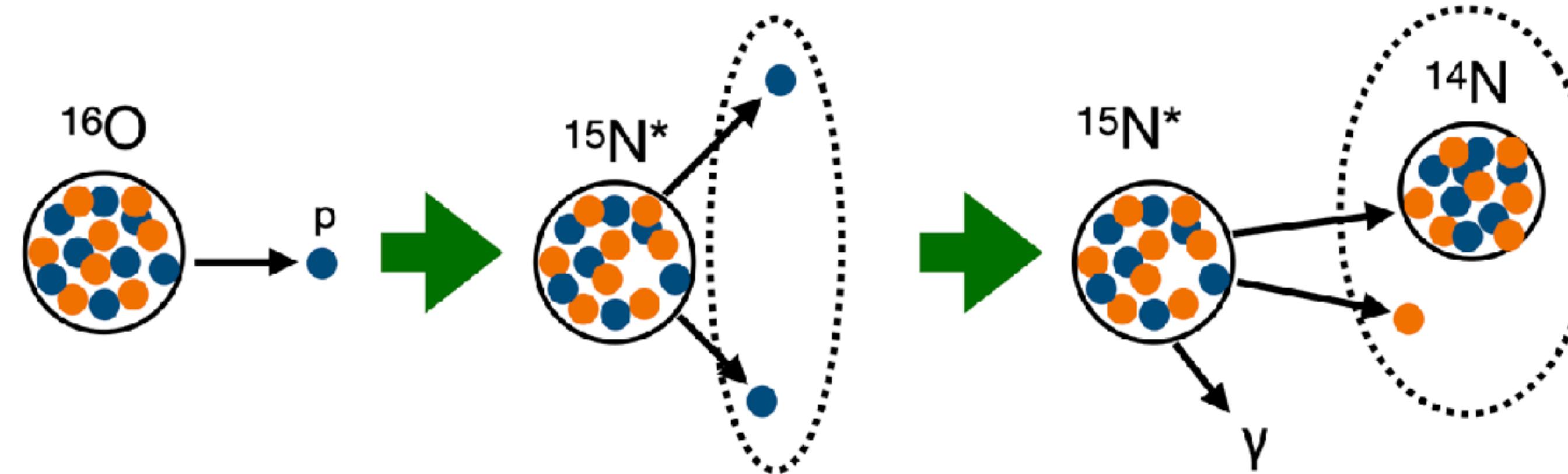


Inverse kinematics

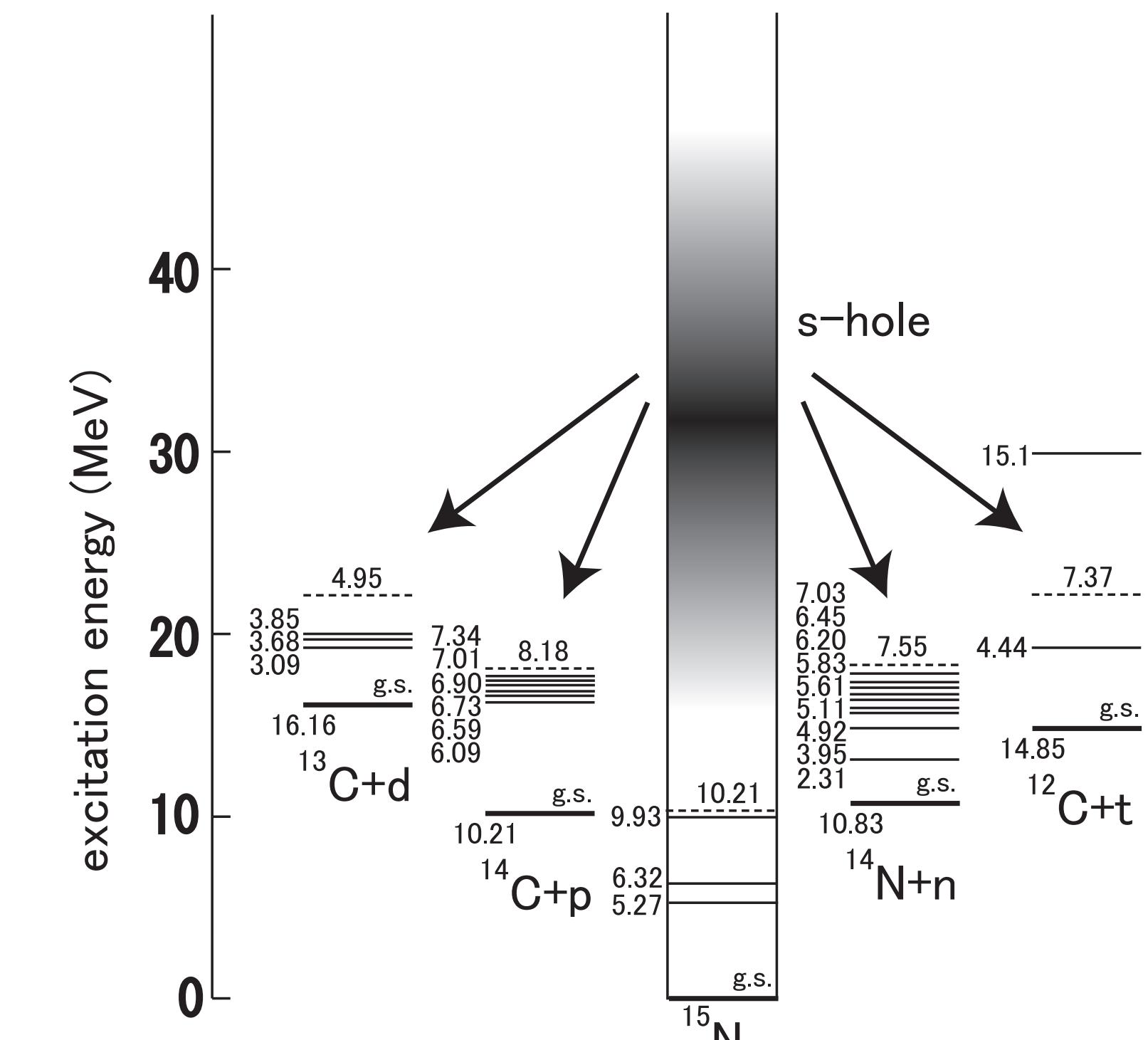


Inverse-Kinematics

- Measuring branchings ratio of major de-excitation channels of $^{15}\text{N}^*$, $^{15}\text{O}^*$, and $^{16}\text{O}^*$ as a function of excitation energy
 - Reaction to produce these nuclei:
 - $^{16}\text{O}(\text{p}, 2\text{p})^{15}\text{N}^*$, $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{pn})^{15}\text{O}^*$, $^{17}\text{O}(\text{p}, \text{pn})^{16}\text{O}^*$
- e.g. Measurement of de-excitation of ^{15}N



^{15}N excitation energy is reconstructed
by measuring recoil protons

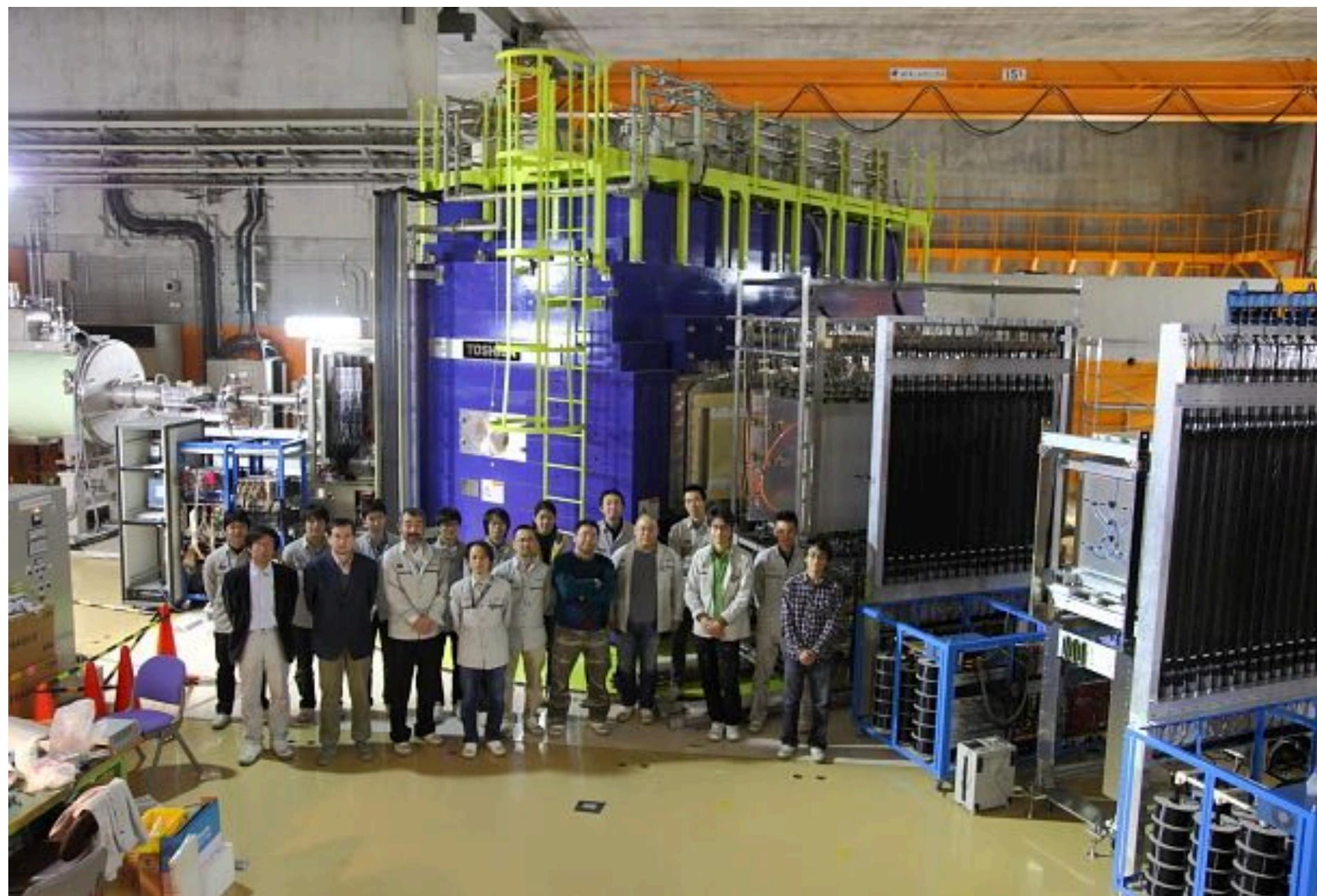


Residual nuclei and de-excitation
products are detected

SAMURAI-79 Experiment

- RI Beam Factory (RIBF) @ RIKEN Nishina Center
- SAMURAI spectrometer

Measurement of $^{16}\text{O}(\text{p}, 2\text{p})^{15}\text{N}^*$



Liquid H₂ target

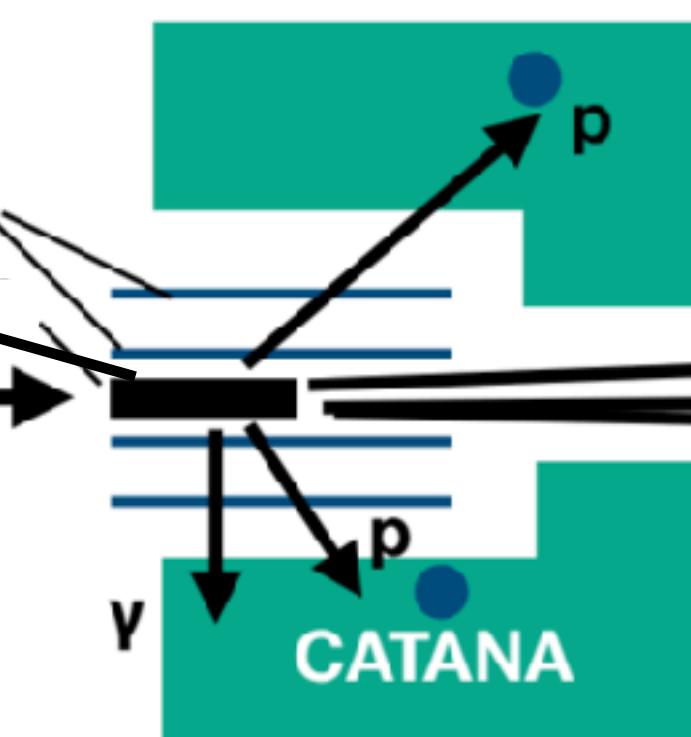
STRASSE



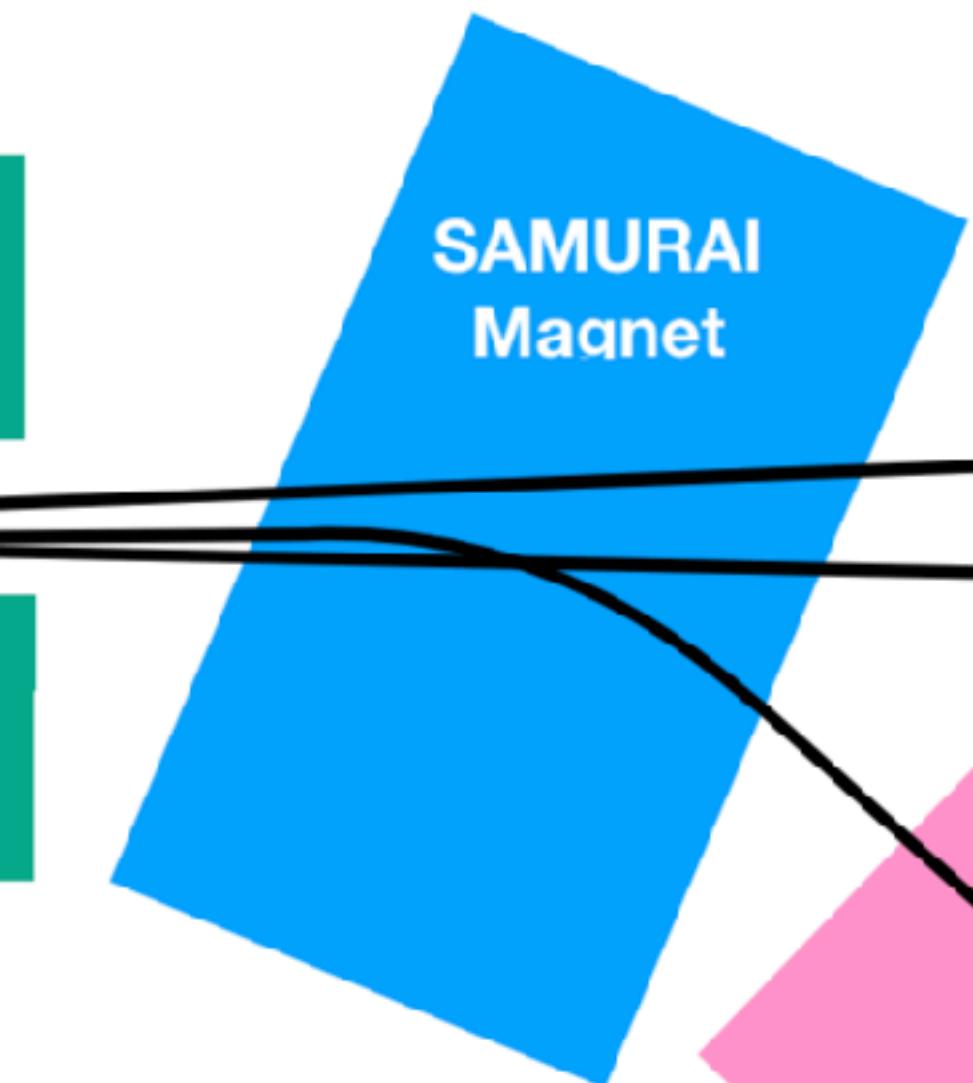
^{16}O beam

Gamma & proton
detectors

CATANA



Charged particle
detectors



Experimental hole

Current Status and Plan

- Proposal was approved at RIBF PAC on Dec. 2024
 - Planing to conduct the first measurements as early as this autumn
- Simulation studies to optimize the detector configuration and running plan
 - Selection method, position of the neutron detector, etc.
- Communicating with nuclear reaction theorists
 - Method to improve the prediction model using the experimental data
 - Difference between neutrino-induced and nucleon-induced reaction

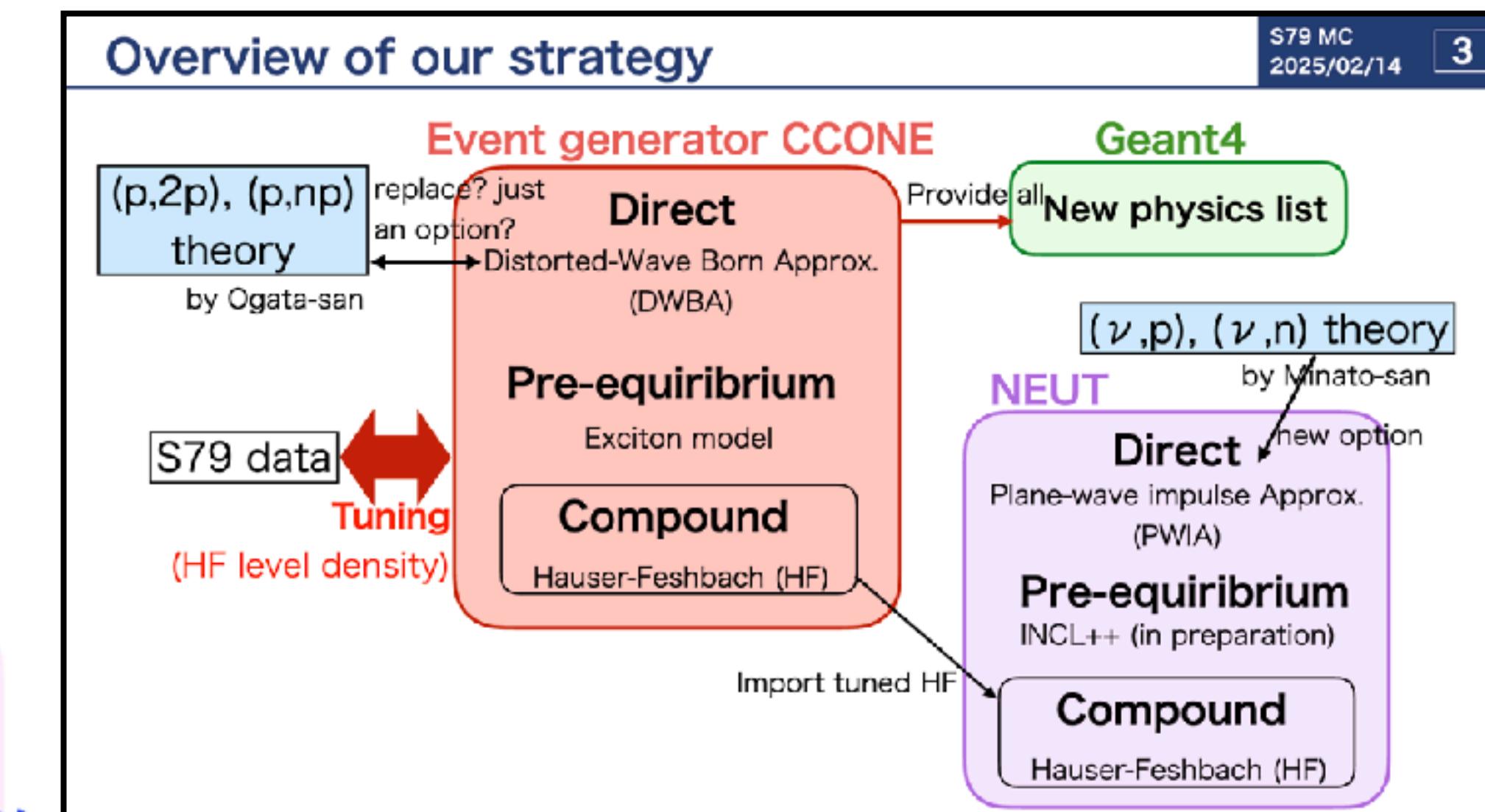
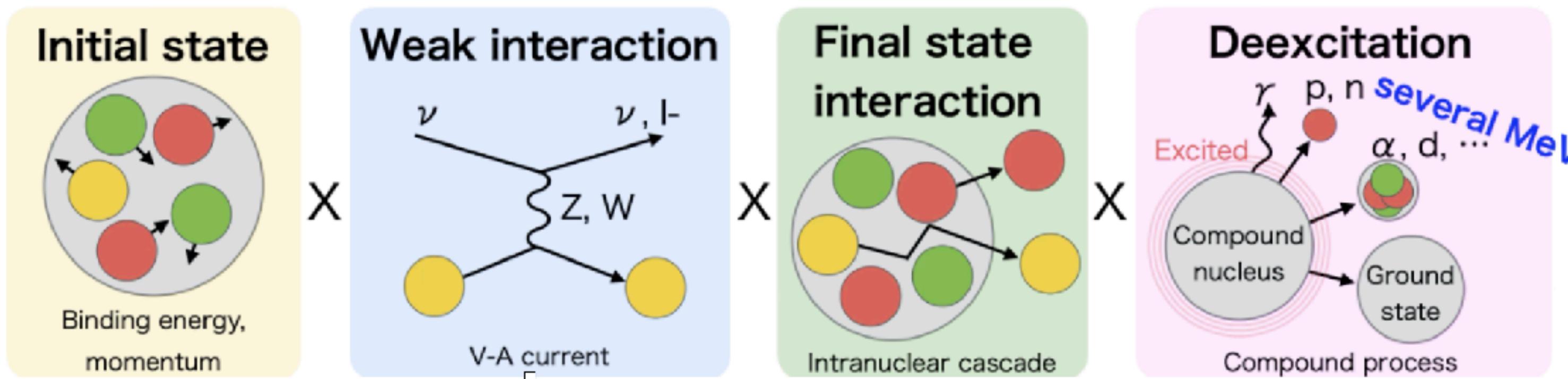


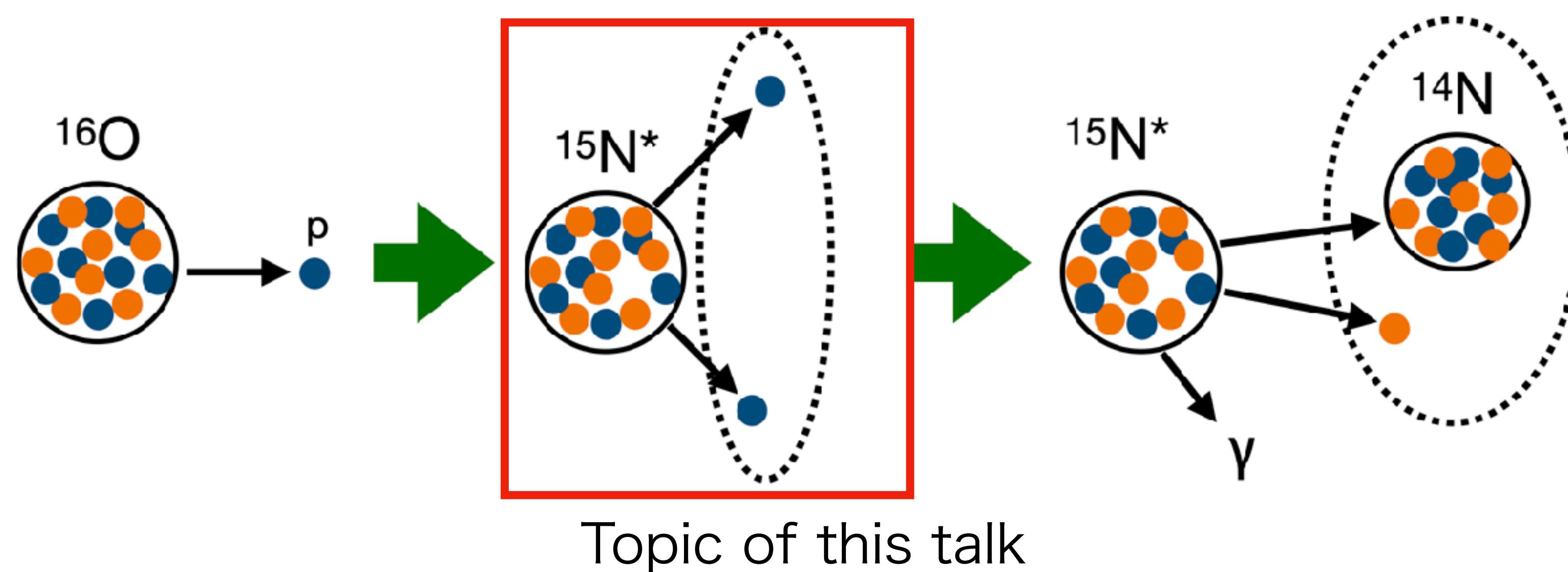
Figure by S. Abe

Contents

- Introduction
 - Diffuse Supernova Neutrino Background search at Super-Kamiokande
 - Neutrino-nucleus interaction
- Inverse-kinematics experiment
 - SAMURAI-79 experiment
- Simulation study for the measurement of de-excitation of $^{15}\text{N}^*$
 - Excitation energy reconstruction

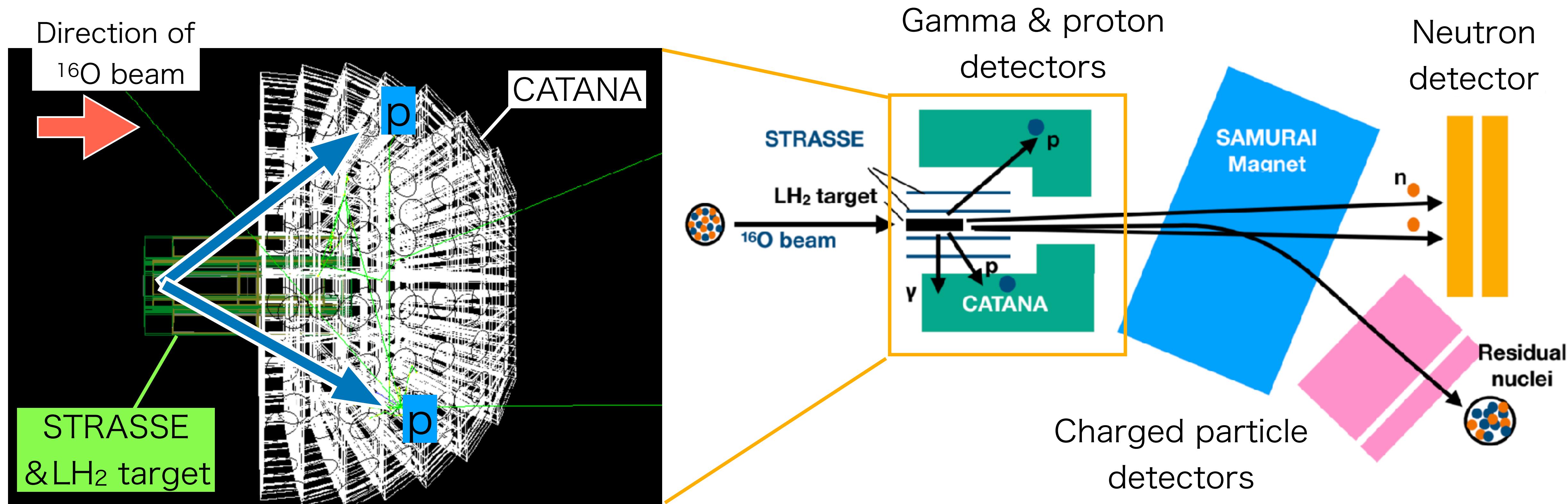
Simulation Study

- Conducting simulation studies for the SAMURAI-79 experiment
 - Event selection and reconstruction method
 - Optimization of magnetic field and detector configuration
 - Parameter tuning with de-excitation calculation
- This talk
 - How accurately can we measure the excitation energy of $^{15}\text{N}^*$?



Excitation Energy Reconstruction

- Simulation of excitation energy reconstruction of ^{15}N
- Two recoil protons are emitted and detector response is simulated
 - Si tracker (STRASSE), CsI calorimeter (CATANA)



Excitation Energy Reconstruction

- Four-momentum of $^{15}\text{N}^*$

$$p_{^{15}\text{N}} = p_{\text{beam}} + p_{\text{tgt}} - p_1 - p_2$$

p_{beam} : four-momentum of ^{16}O beam

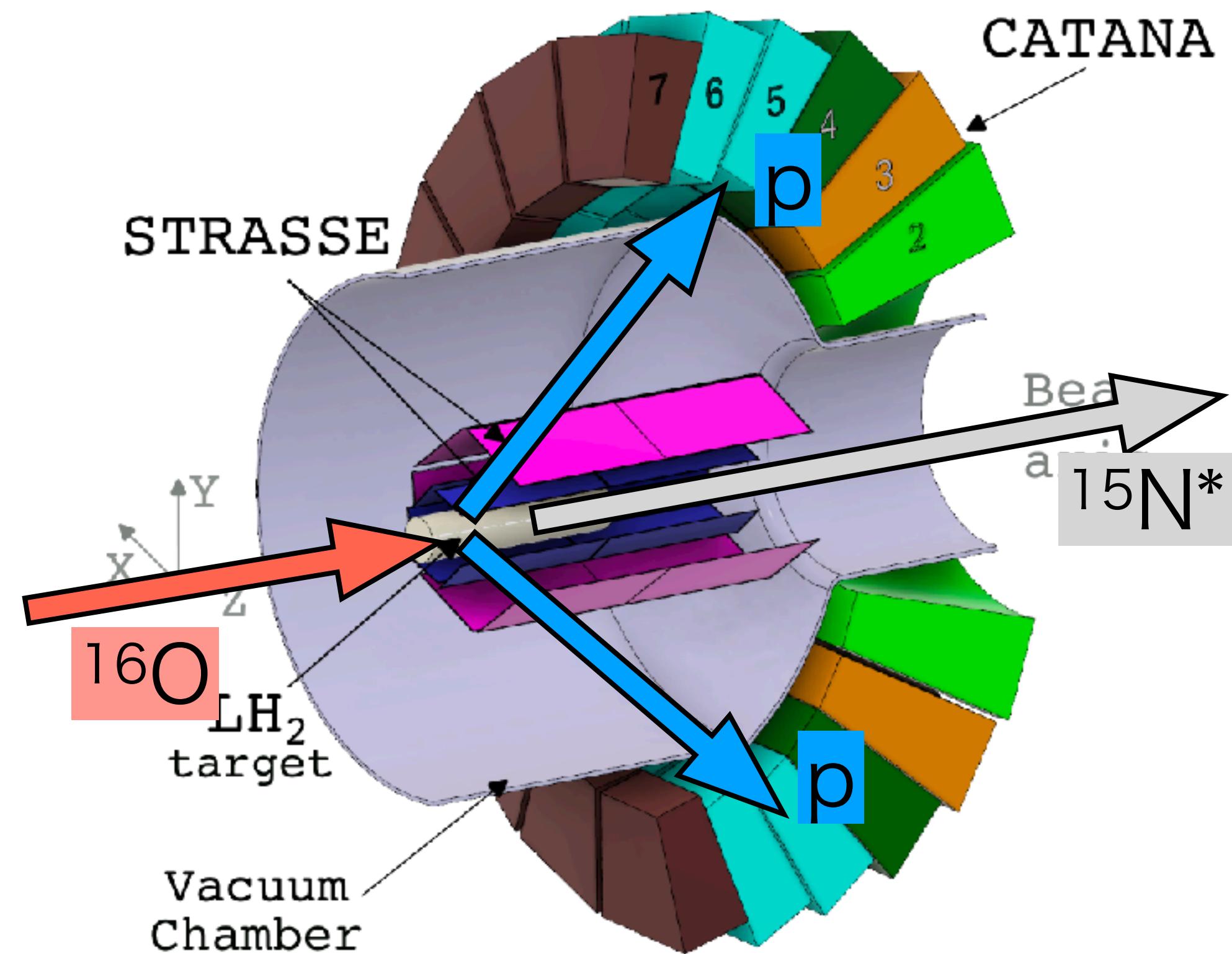
p_{tgt} : four-momentum of target proton

$p_{1,2}$: four-momentum of recoil protons

- Excitation energy reconstruction

$$E_x = \sqrt{(p_{^{15}\text{N}})^2} - M_{^{15}\text{N}}$$

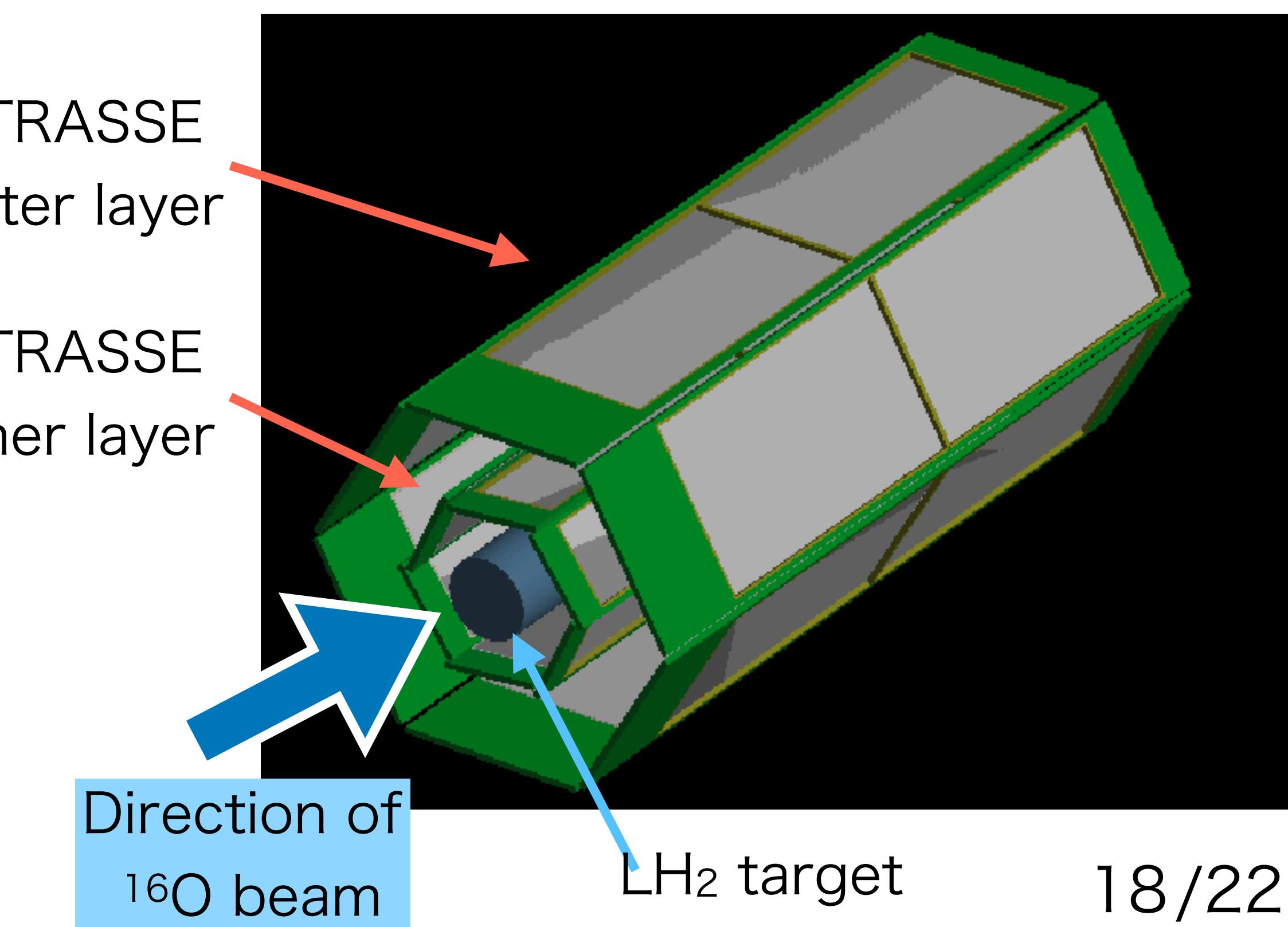
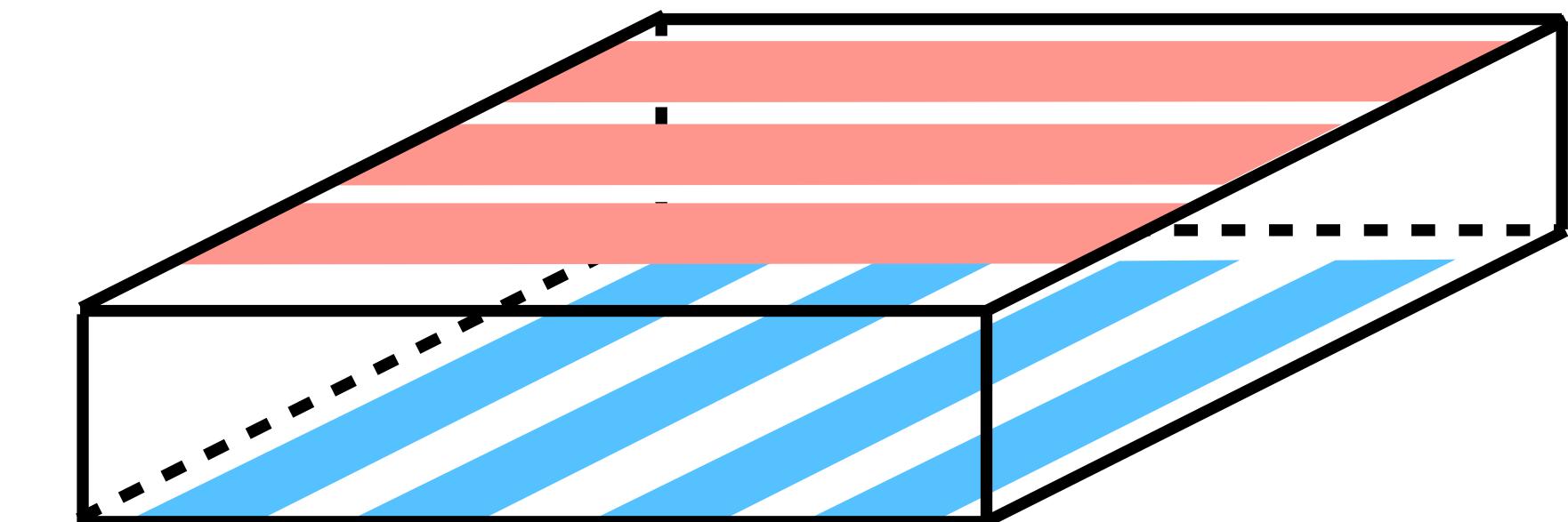
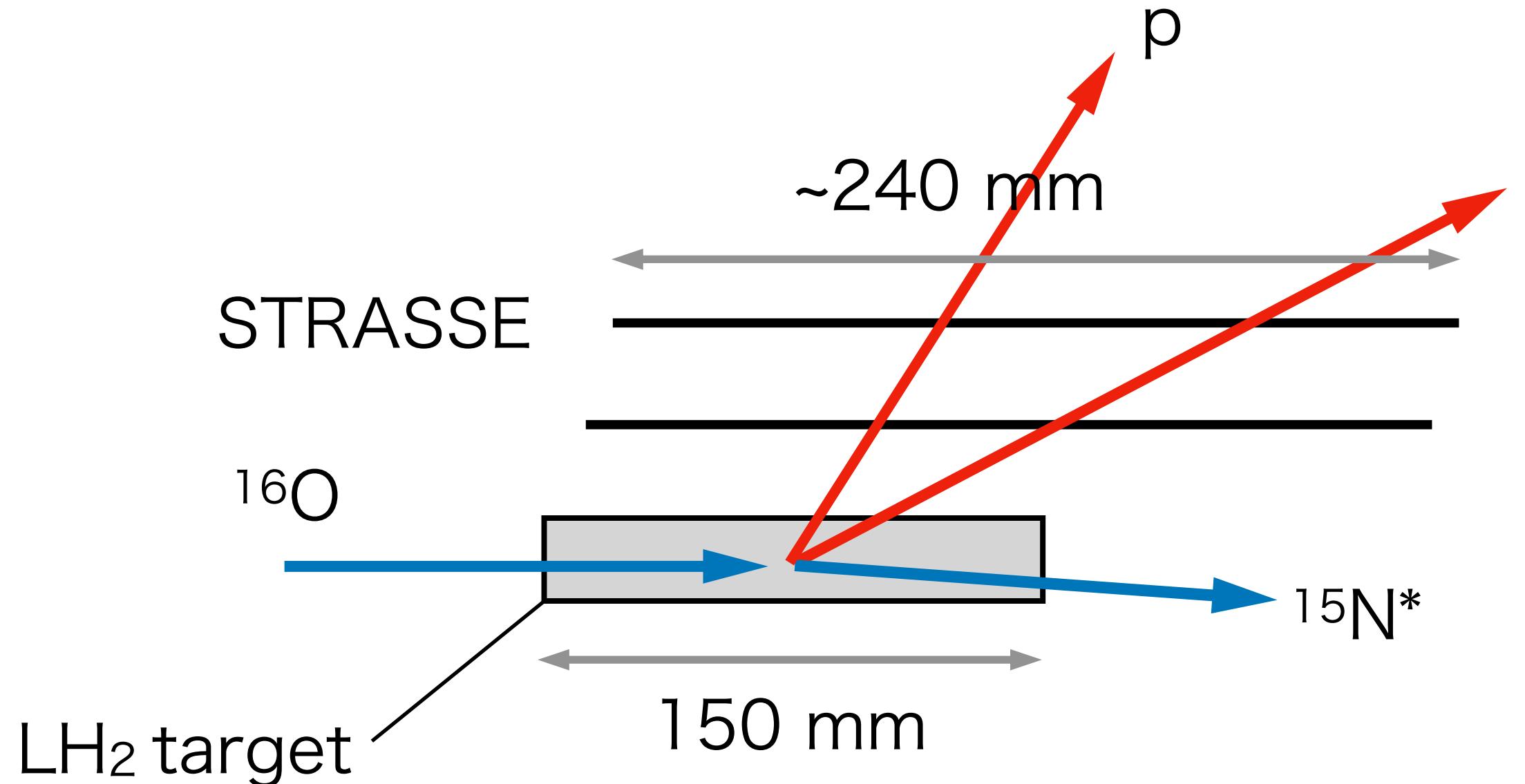
$M_{^{15}\text{N}}$: mass of ^{15}N



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

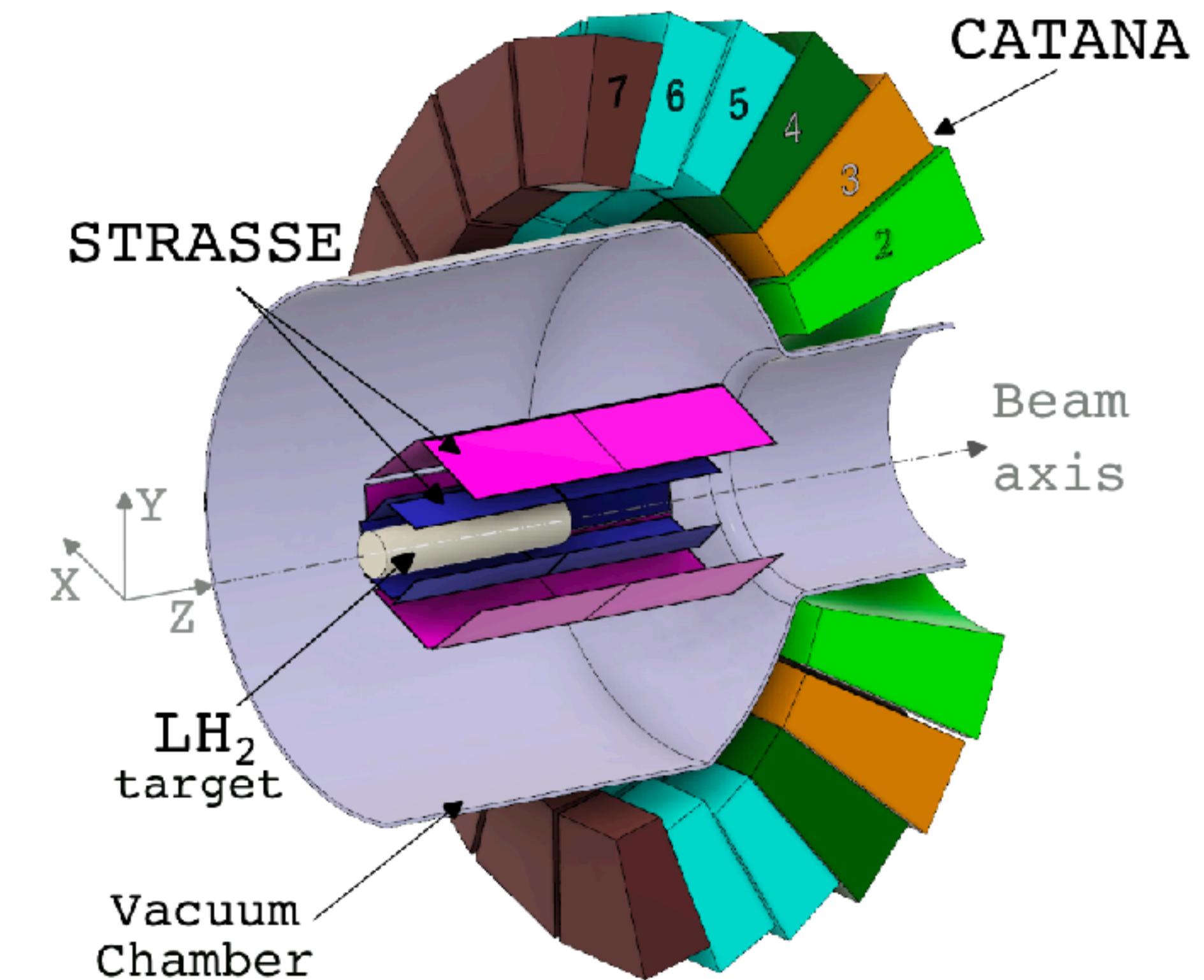
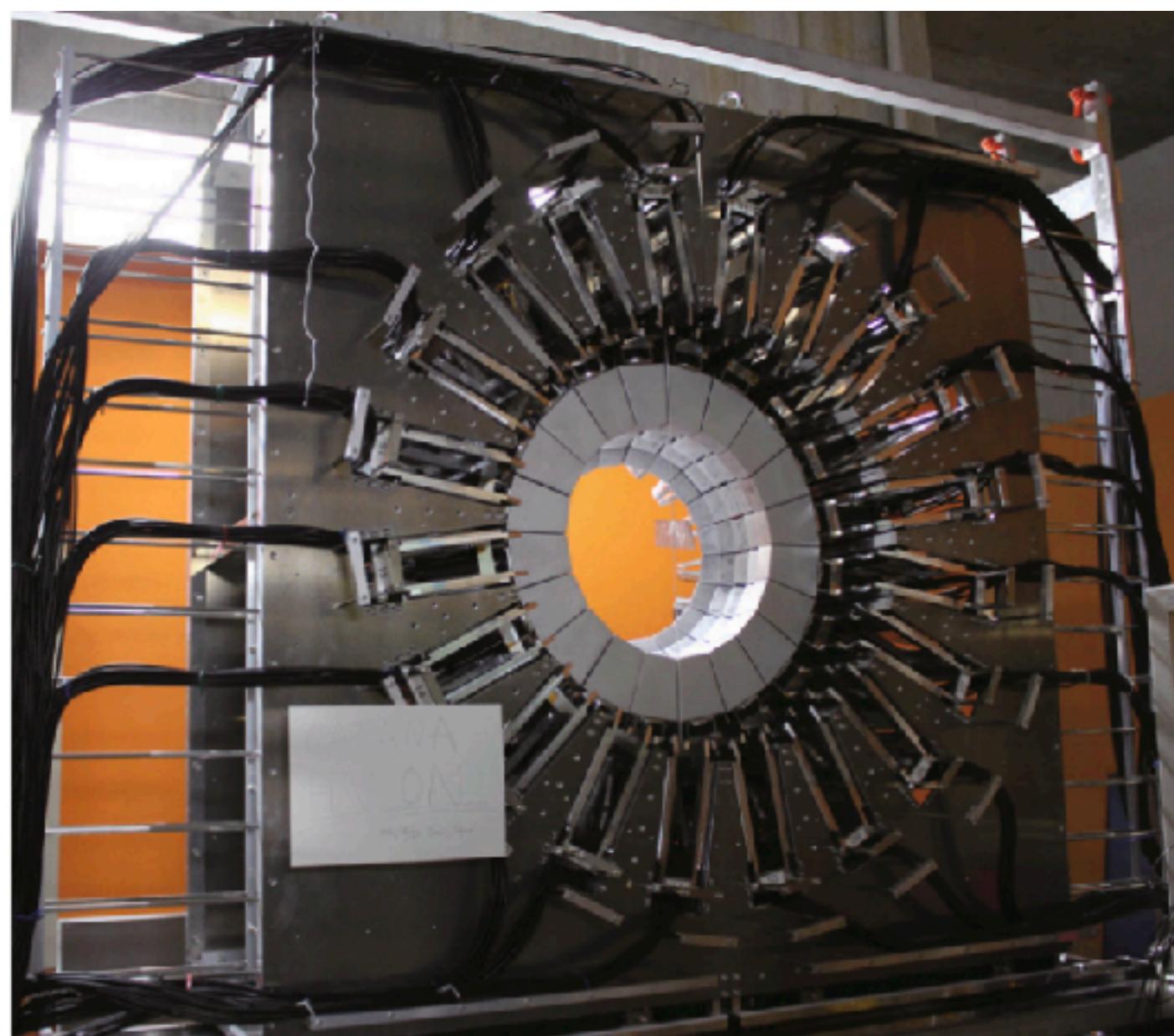
Measurement of Recoil Protons

- Si tracker (STRASSE)
 - Two layers of double-sided Si strip detector (DSSD)
 - Pitch size of 200 μm
 - Can measure momentum direction of recoil protons
 - Angular resolution of $\sim 0(10)$ mrad
 - Can measure vertex position
 - Position resolution of ~ 1 mm



Measurement of Recoil Protons

- CsI calorimeter (CATANA)
 - Array of 140 CsI (Na) scintillation crystal
 - Energy resolution for 662 keV gamma-ray
 - 10% (FWHM)
 - Can measure kinetic energy of recoil protons



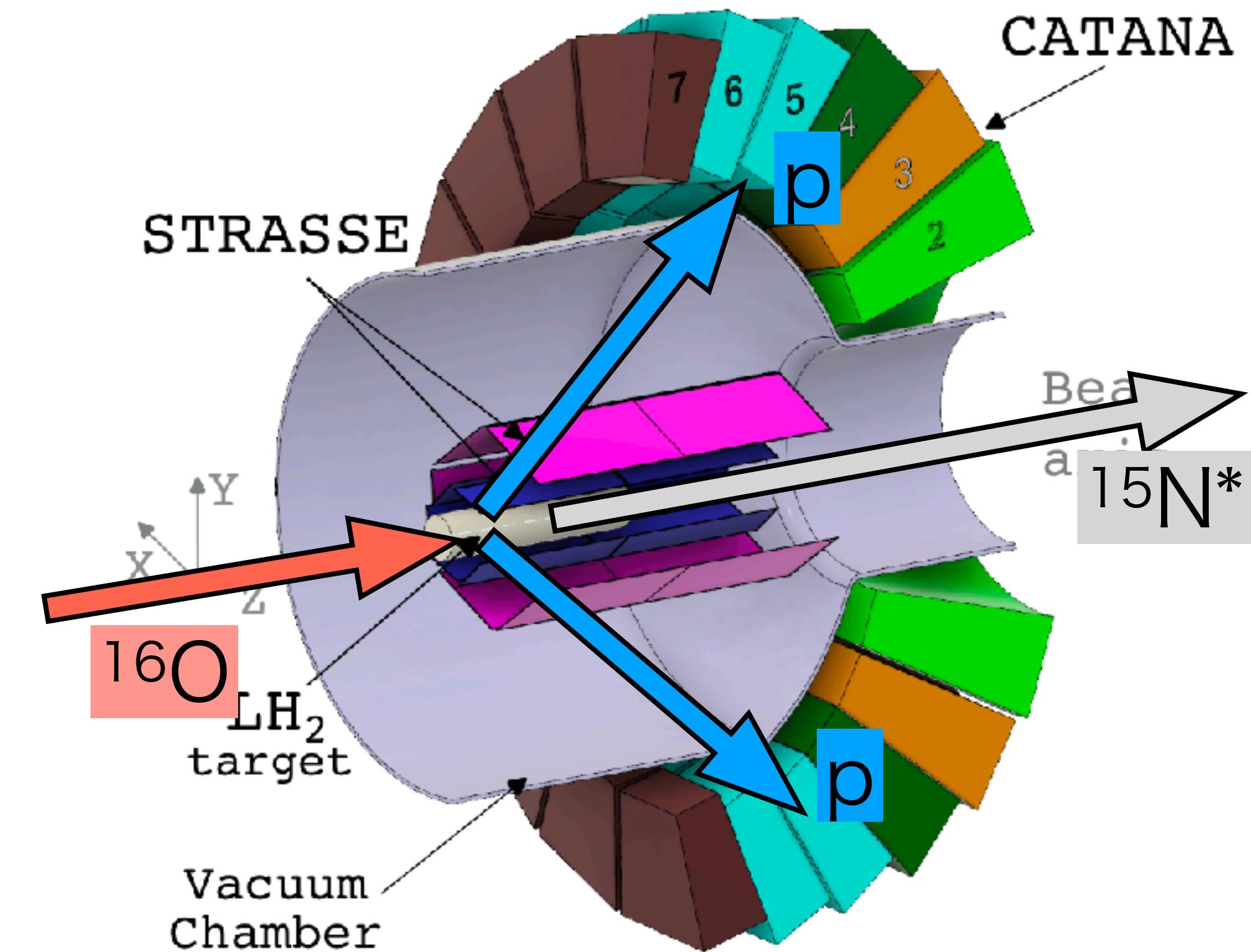
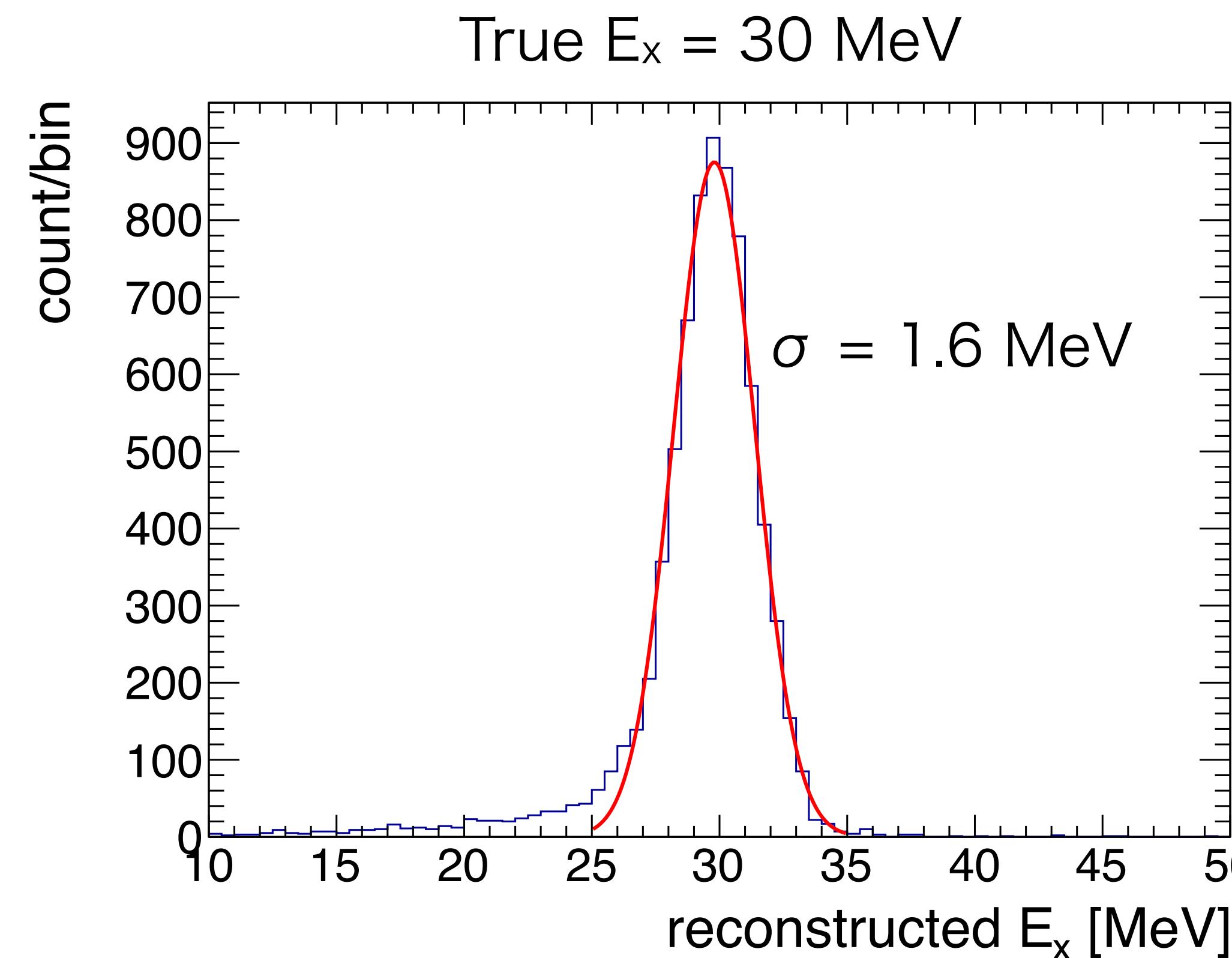
H. N. Liu et al., Eur. Phys. J. A 59, 6, 121 (2023)

Y. Togano, et al., Nuclear Inst. and Methods
in Physics Research B 463 (2020) 195–197

Excitation Energy Reconstruction

- Momentum direction: STRASSE
- Kinetic energy: CATANA

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

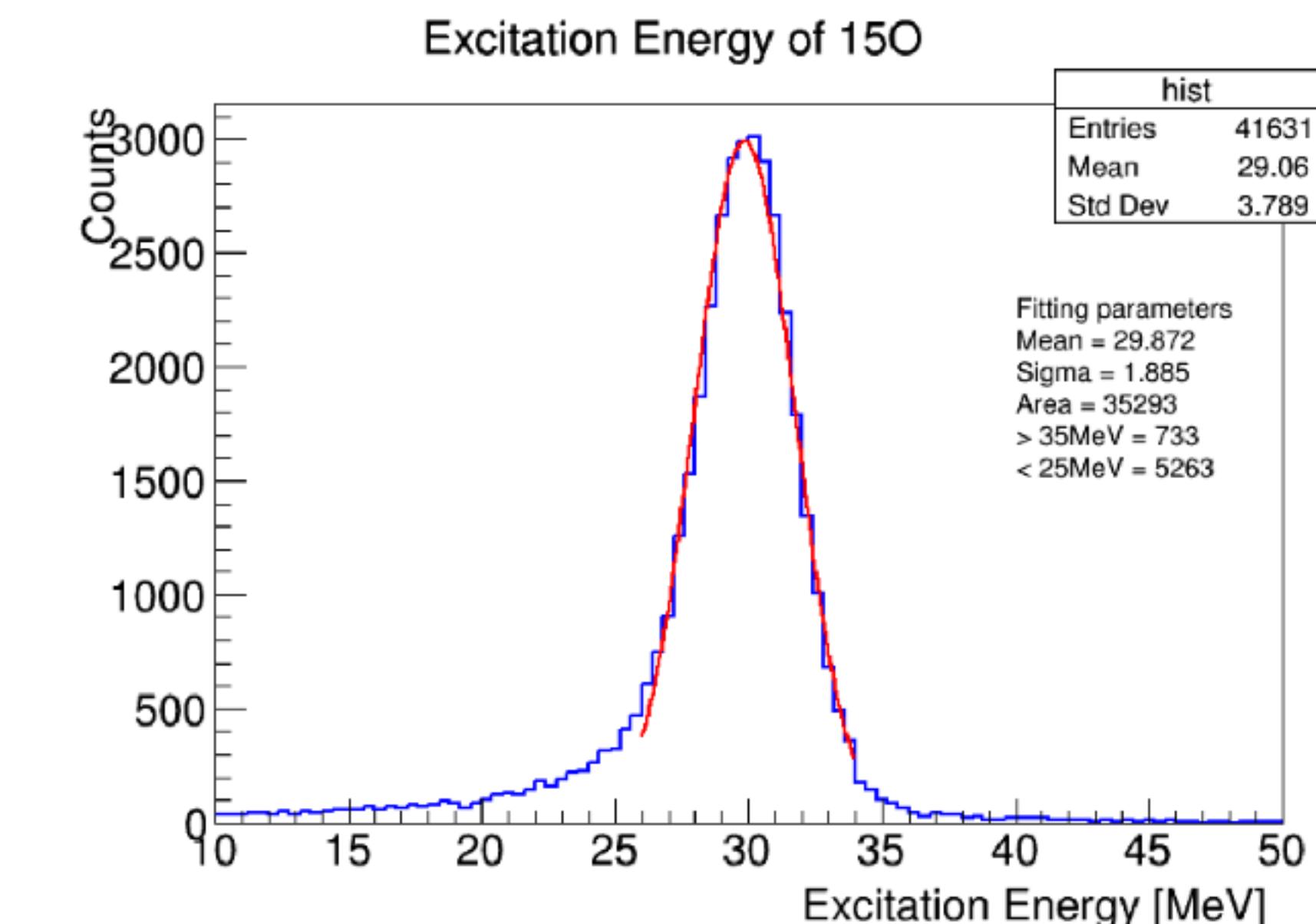
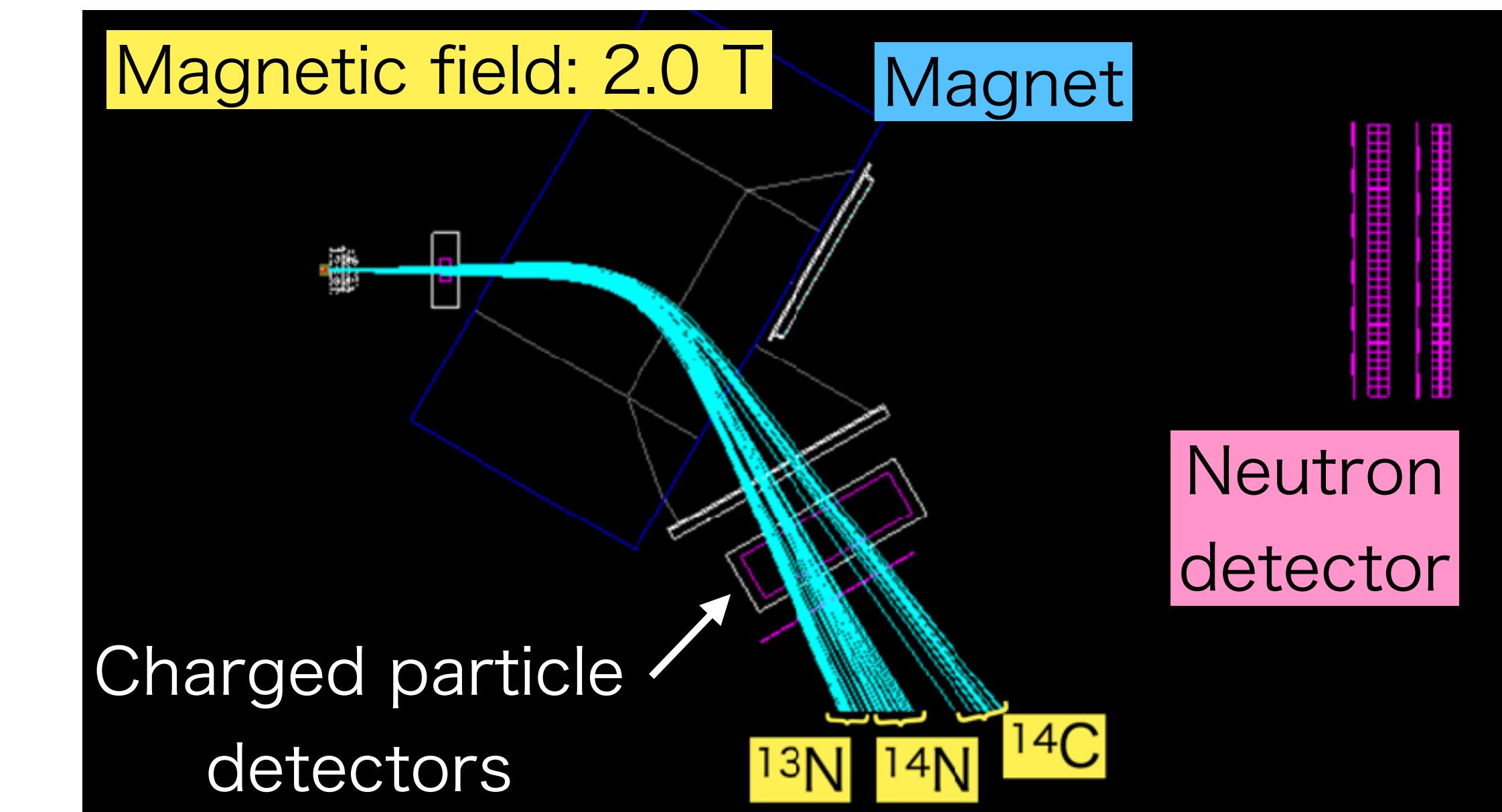
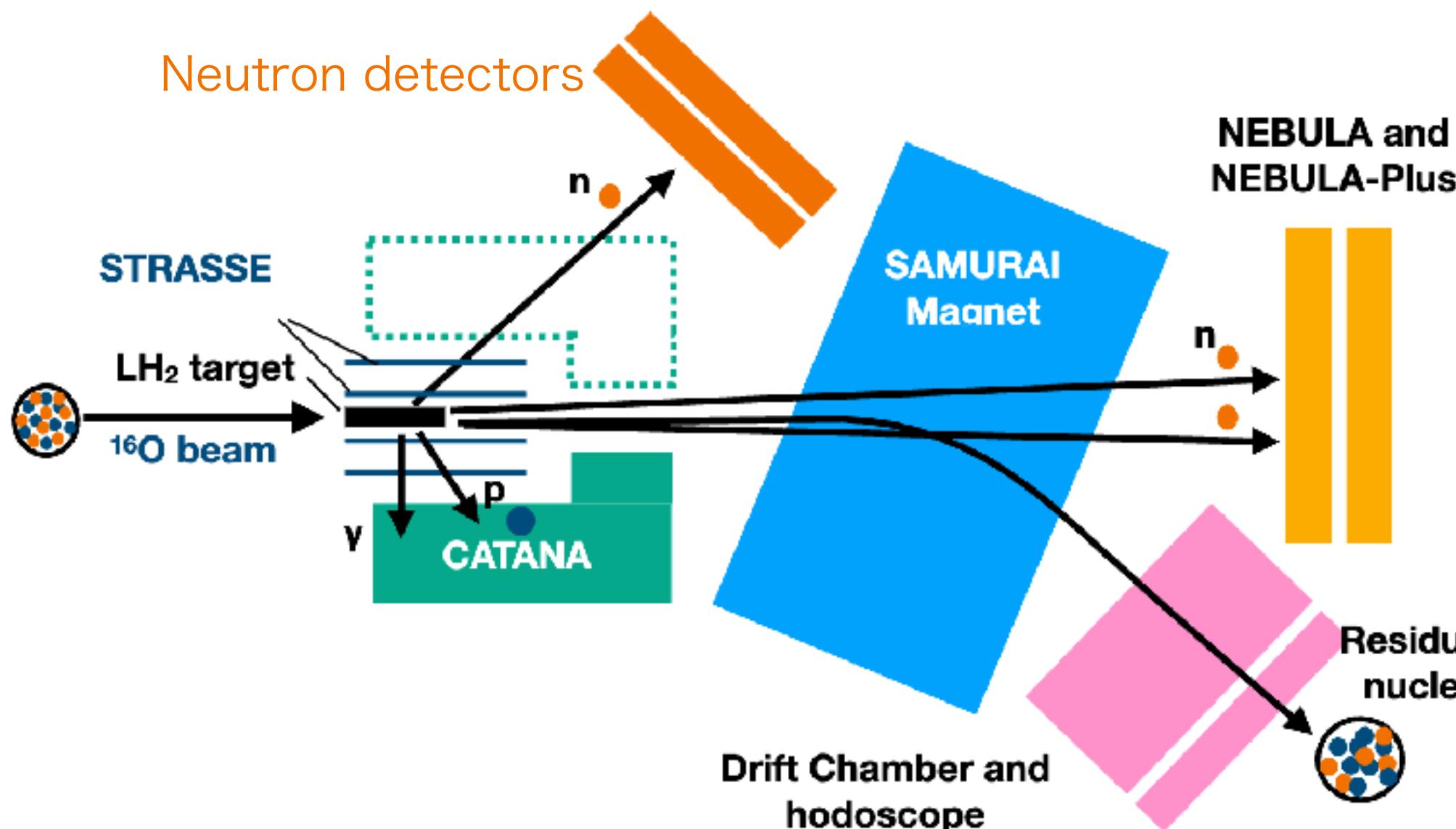


H. N. Liu et al., Eur. Phys. J. A 59, 6, 121 (2023)

Other Simulation Studies

- Event selection and reconstruction method
- Optimization of magnetic field
- Optimization of detector configuration
 - Position of recoil neutron detectors
- Parameter tuning with de-excitation calculation

Measurement of $^{16}\text{O}(\text{p}, \text{pn})^{15}\text{O}^*$



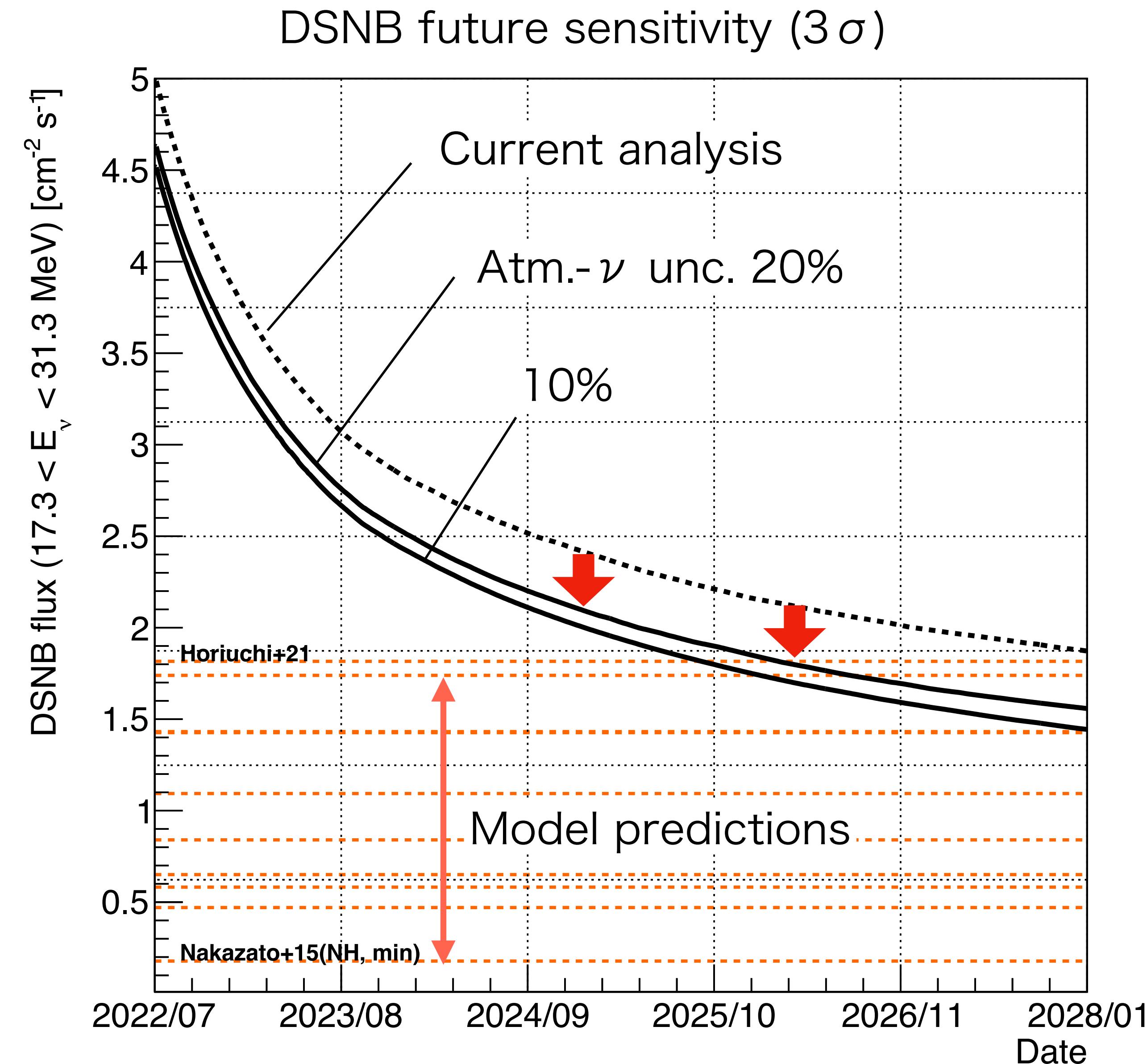
Summary

- Precise prediction of nuclear de-excitation process is critical for diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande
- Key process: de-excitation of ^{15}N , ^{15}O , and ^{16}O
- We plan to conduct SAMURAI-79 experiment
 - Inverse kinematics experiment @RIKEN RIBF
 - This autumn (if possible)
- Simulation studies
 - Excitation energy reconstruction, etc.

Back up

Impact on DSNB

- Assumption
 - Uncertainties
 - NCQE: 68% → 20%
 - non-NCQE: 36% → 20%

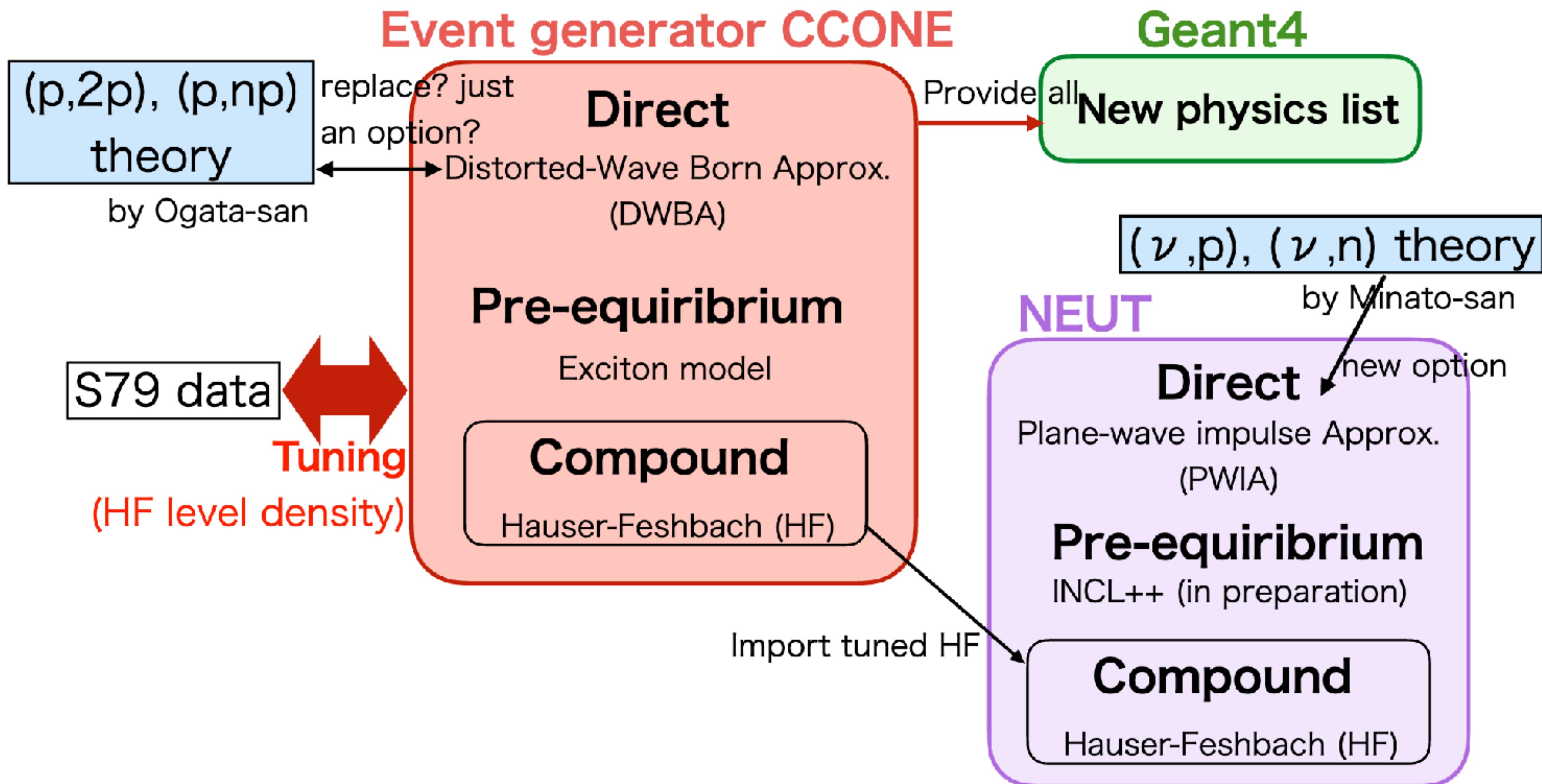


Simulation update plan

Overview of our strategy

S79 MC
2025/02/14

3

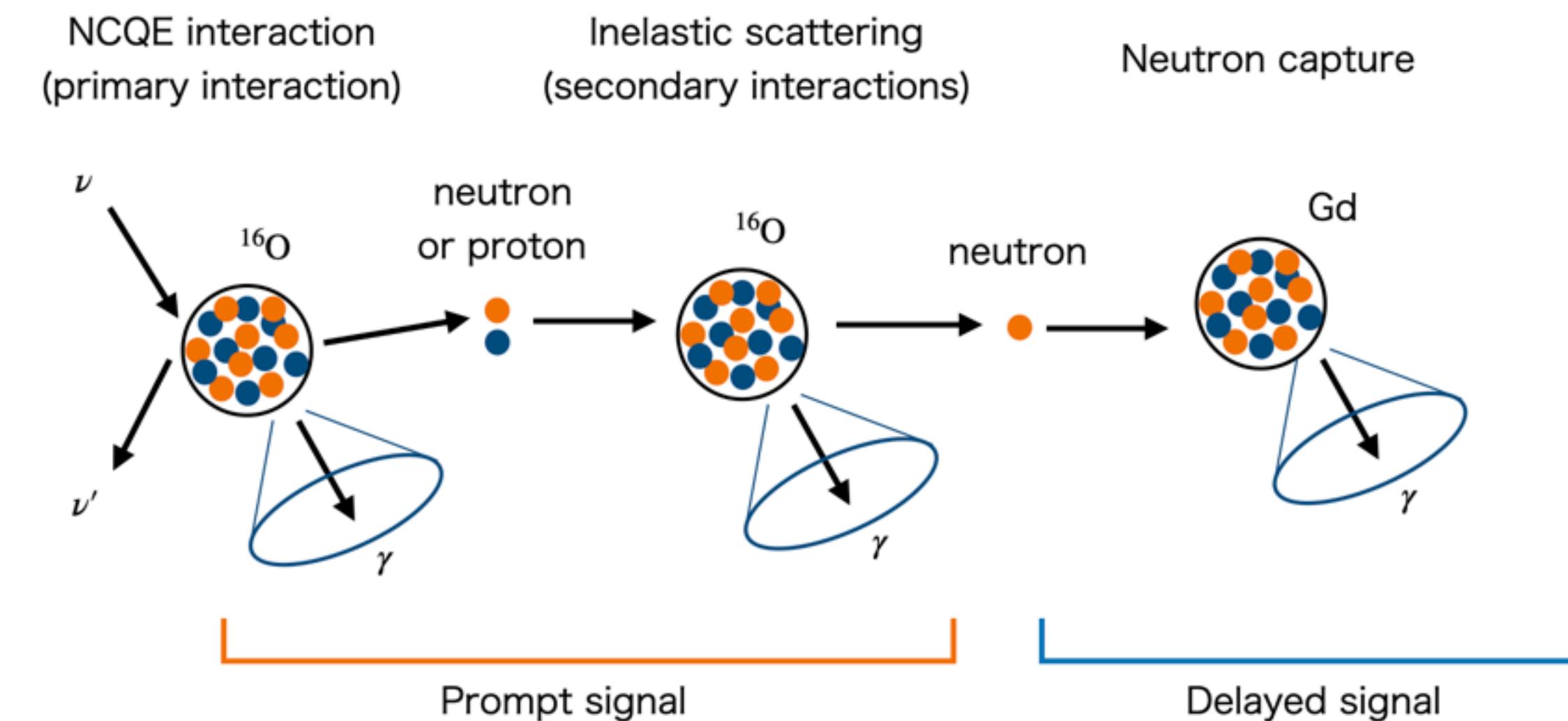
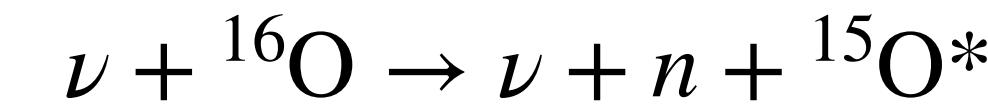
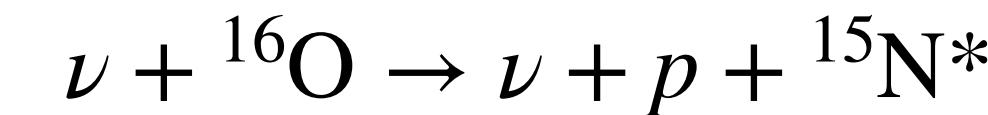


Statistical Performance

- ・ 反跳陽子事象の選択効率 ($E_x = 30$ 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}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}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
- ・ $^{12}\text{C}+\text{d}+n$ (分岐比: 5.6%)のイベント数は2万イベント
 - ^{12}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

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

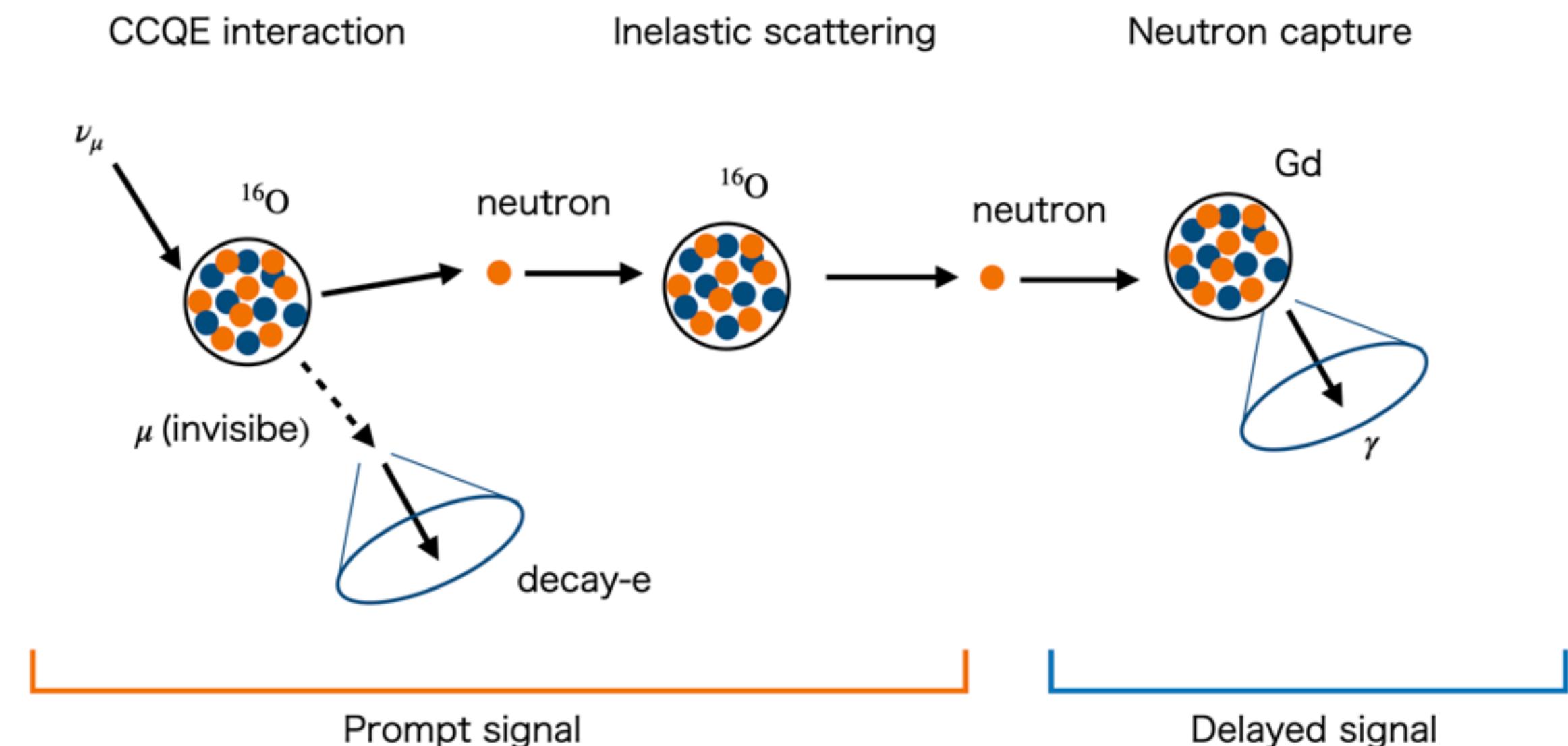
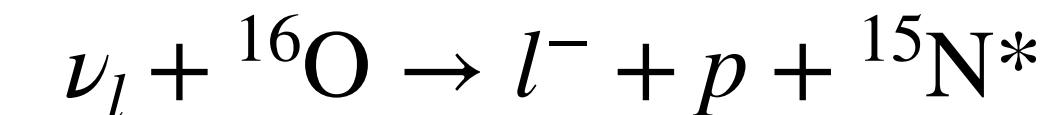
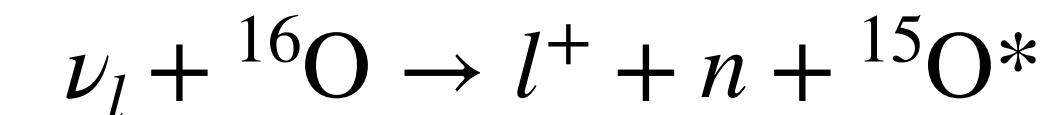


Atmospheric Neutrino

- 主要な背景事象: 大気ニュートリノ
- 2. 大気ニュートリノ ν_μ 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

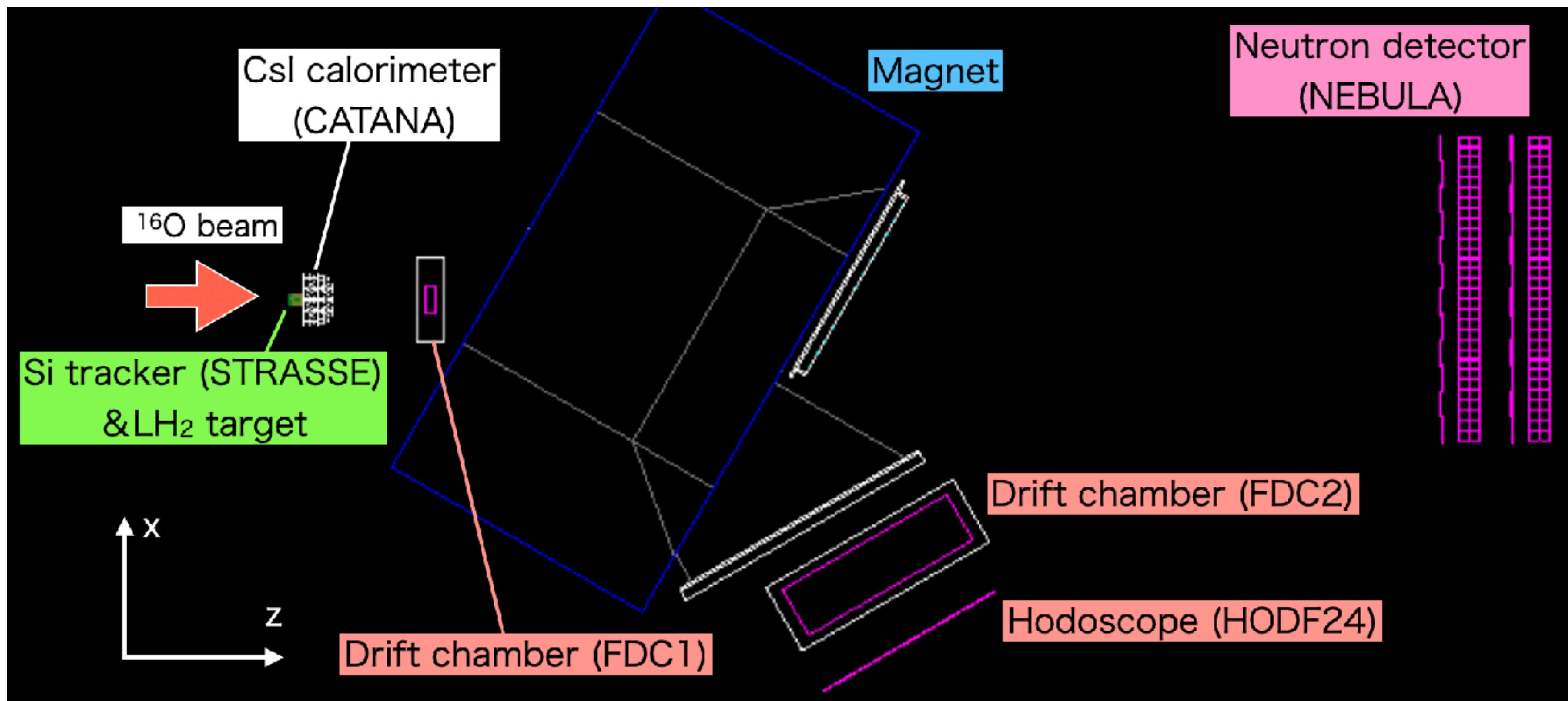
3. その他 (ν_e CC etc.)

- (2)とまとめてnon-NCQEで36%の系統誤差



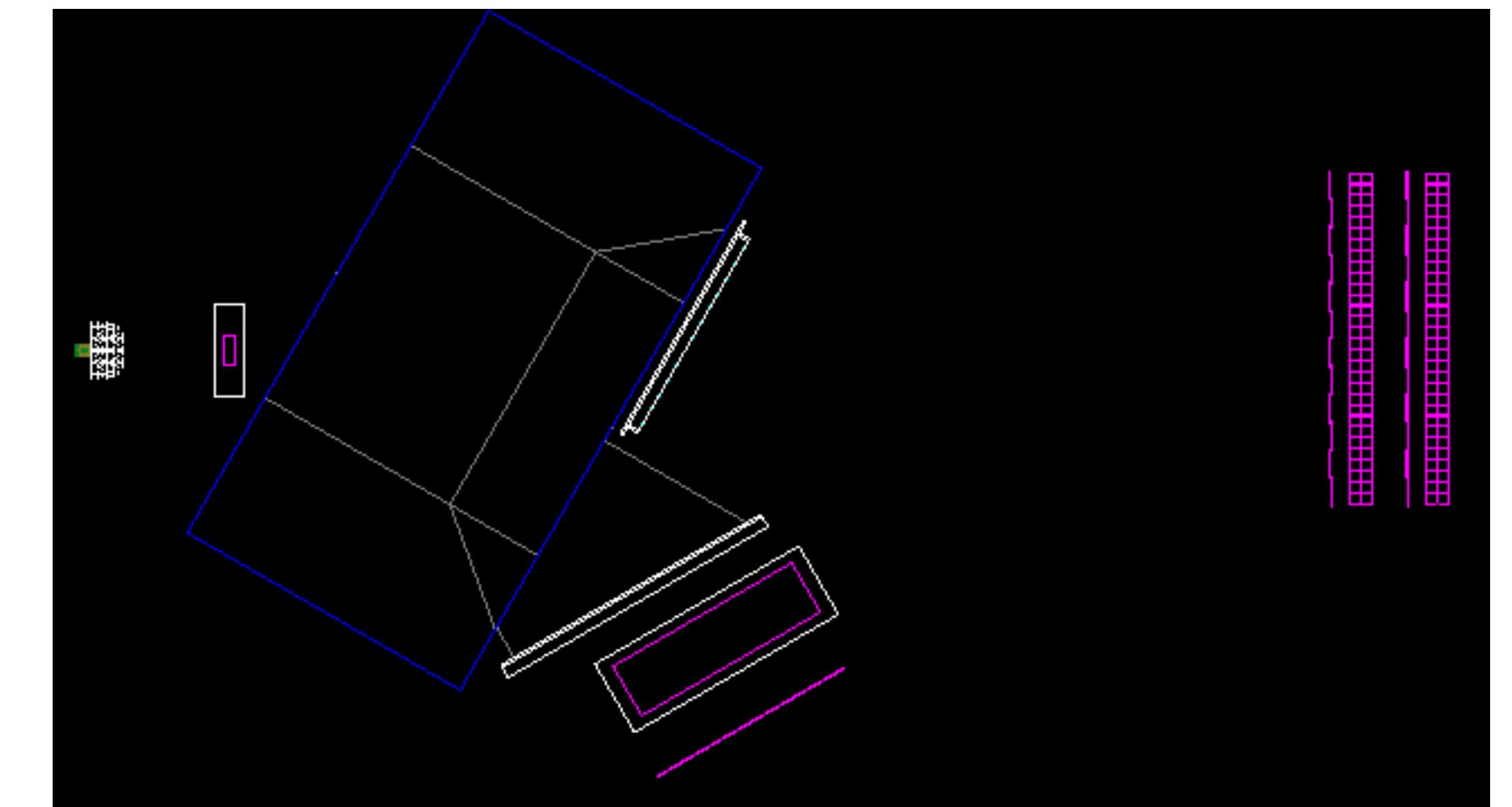
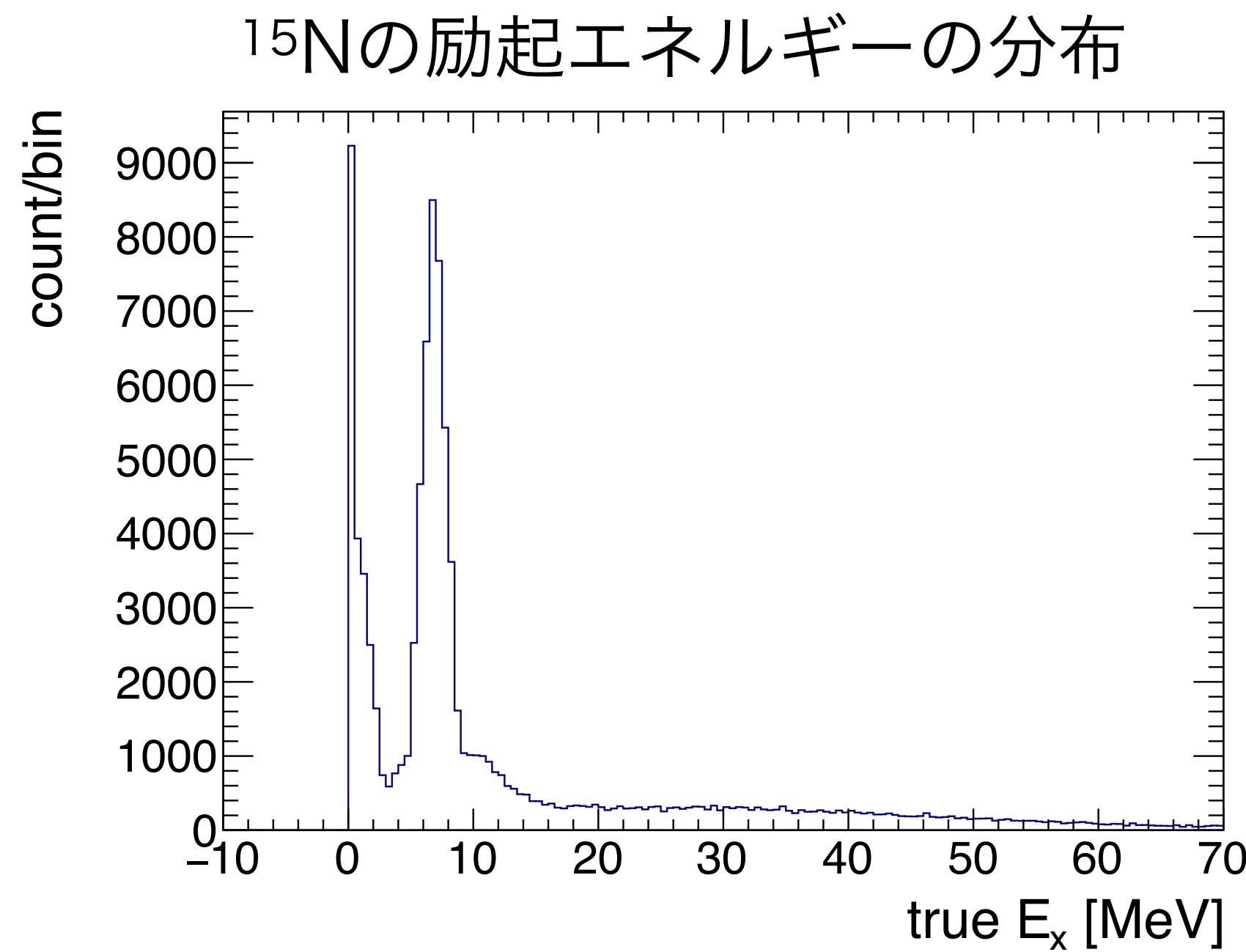
Simulation Setup

- 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、 $^{16}\text{O}(\text{p}, 2\text{p})^{15}\text{N}$ 反応のみを生成



Simulation Setup

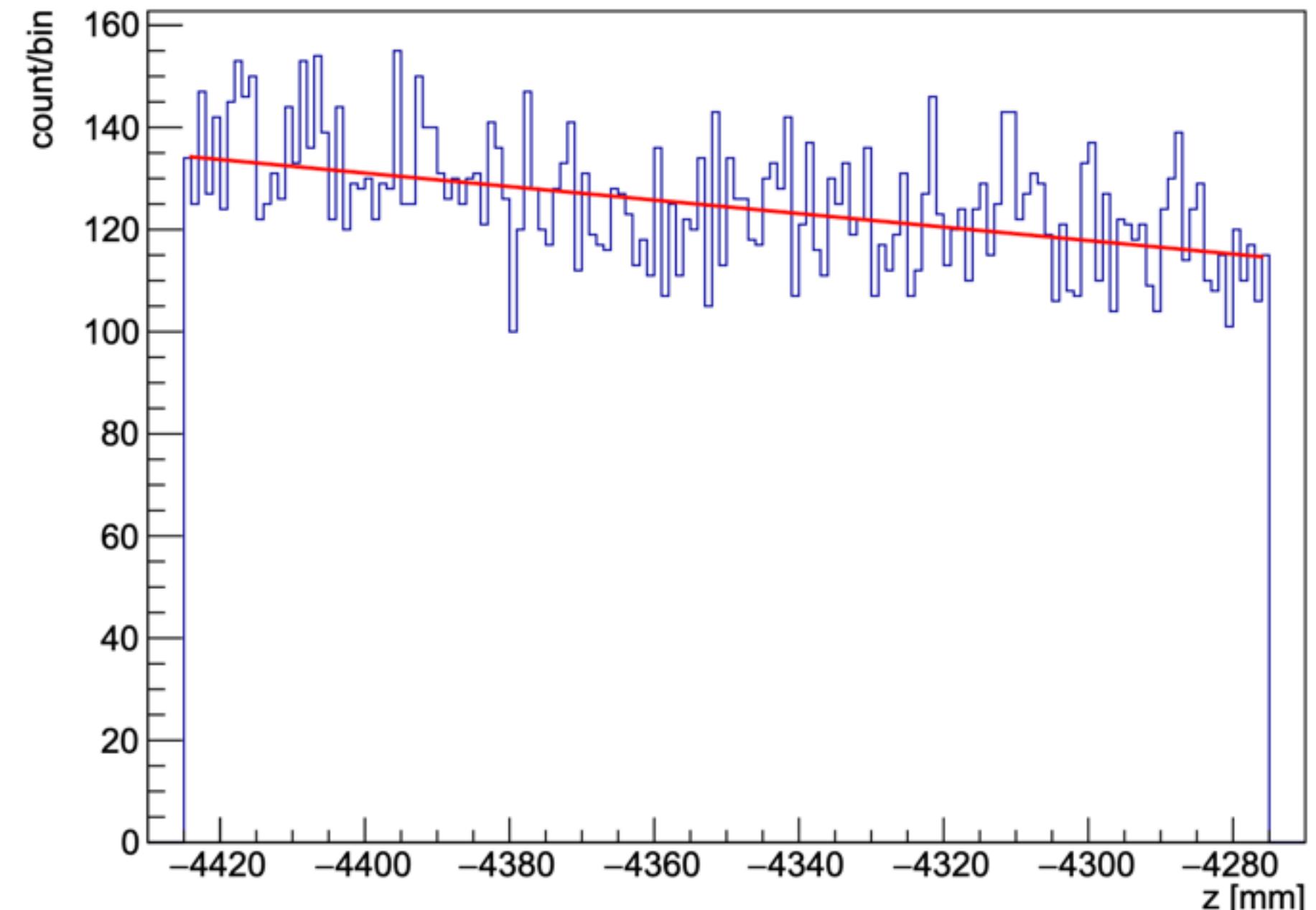
- SAMURAIスペクトロメーターの検出器が再現されたGeant4ベースのシミュレーション
- $^{16}\text{O}(\text{p}, 2\text{p})^{15}\text{N}$ 反応のイベントを生成
 - 励起エネルギー固定 ($E_x = 10, 30, 50 \text{ MeV}$)
 - 連続的な励起エネルギー分布
 - ^{16}O のSpectral function Benhar et al., Phys. Rev. D, 72(5):053005 (2005)



Event Generation

- LH₂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 (LH₂に垂直な向き)
 - ビームの空間的広がり: $\sigma_{x,y} = 5 \text{ mm}$
- 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 ($E_x = 10, 30, 50 \text{ MeV}$)
 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、LH₂標的における反応点分布

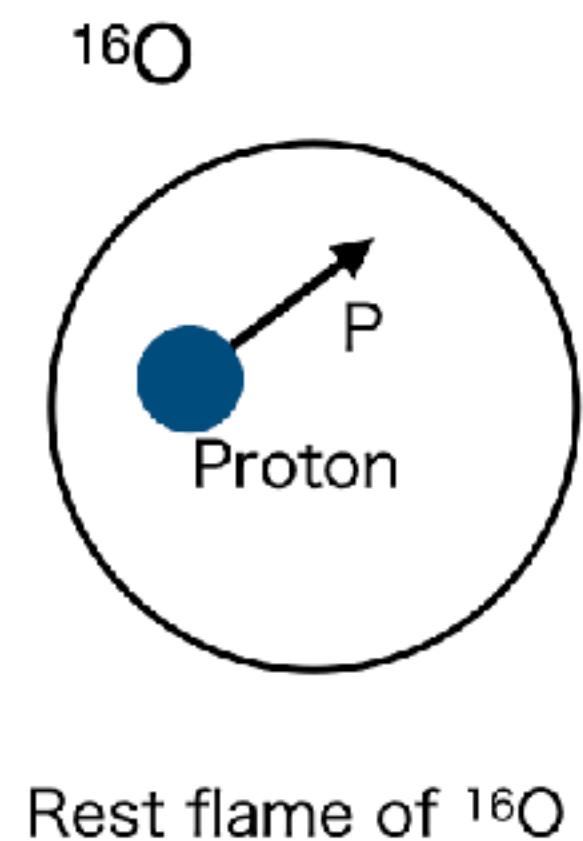
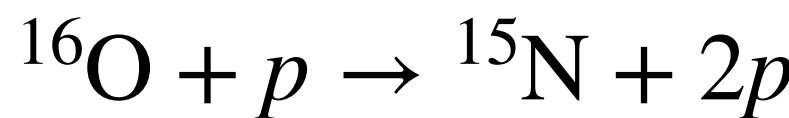


Event Generation

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

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

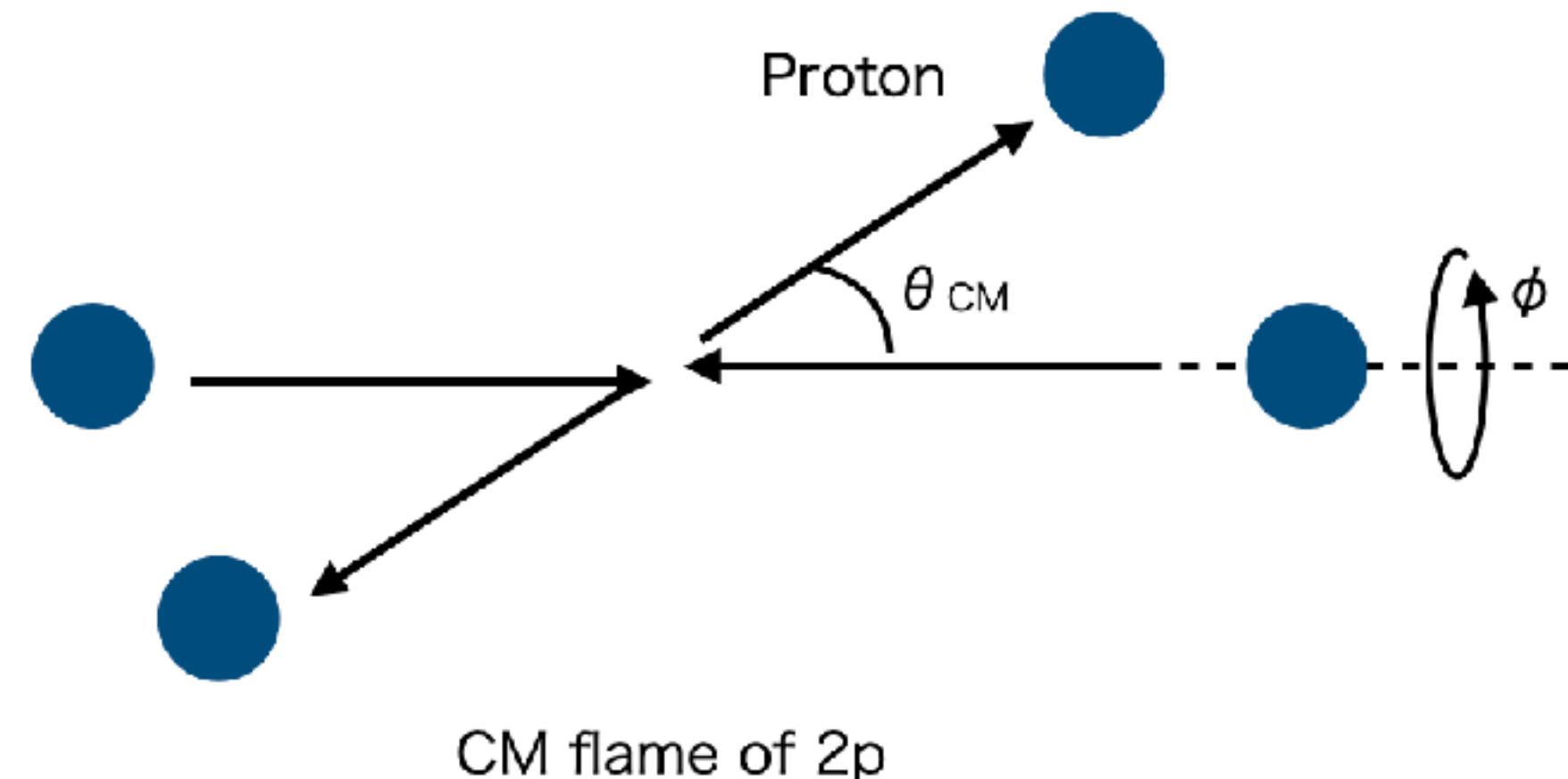


Rest frame of ^{16}O

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

2. 散乱イベント生成

- 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 θ_{CM} : $-1 \leq \cos \theta_{\text{CM}} \leq 1$ で一様
 - 散乱角 ϕ : $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ で一様



CM frame of 2p

Event Generation

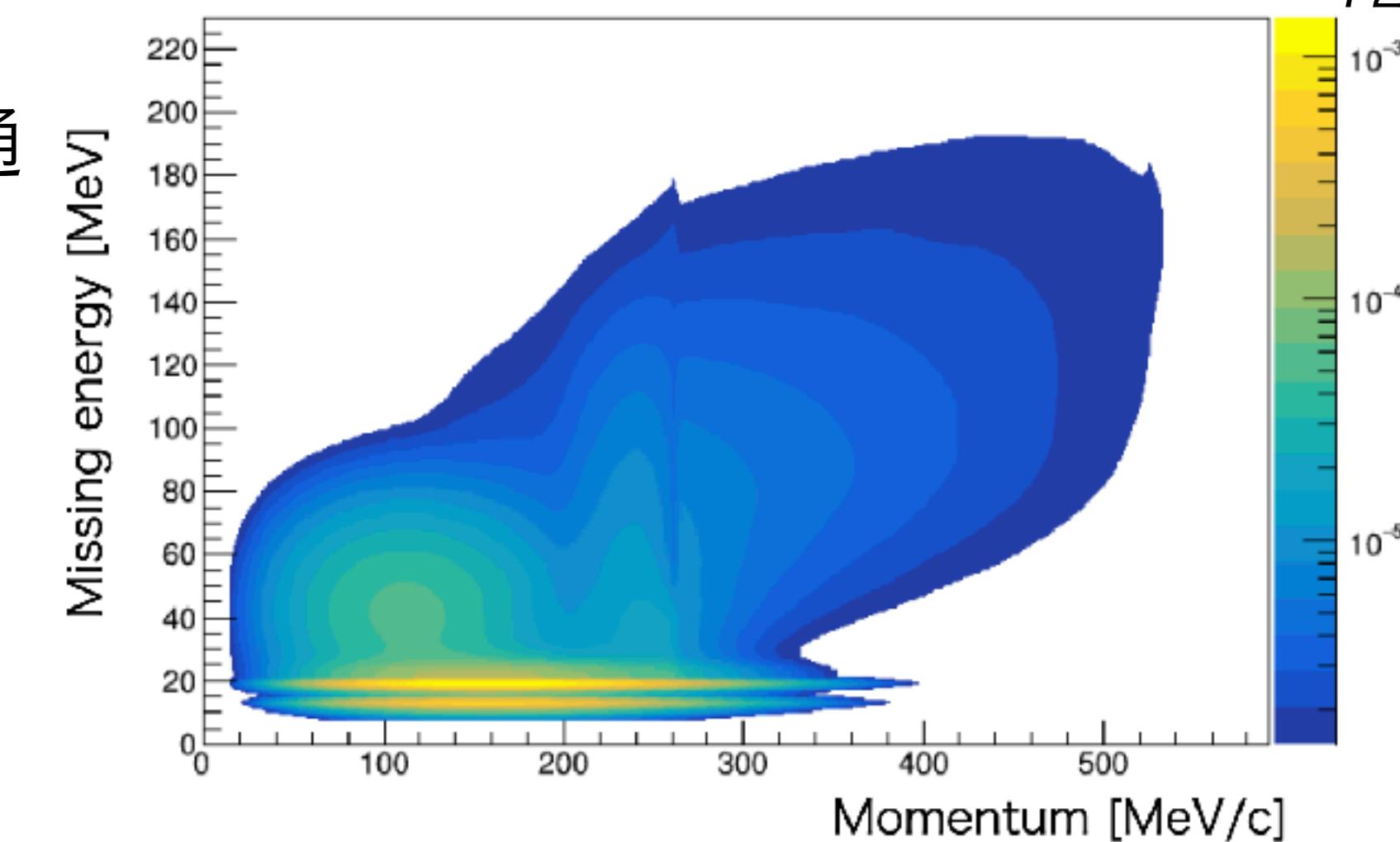
2. 連続的な励起エネルギー分布のイベント生成

- 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: $E_x = E_{\text{miss}} - S_p$

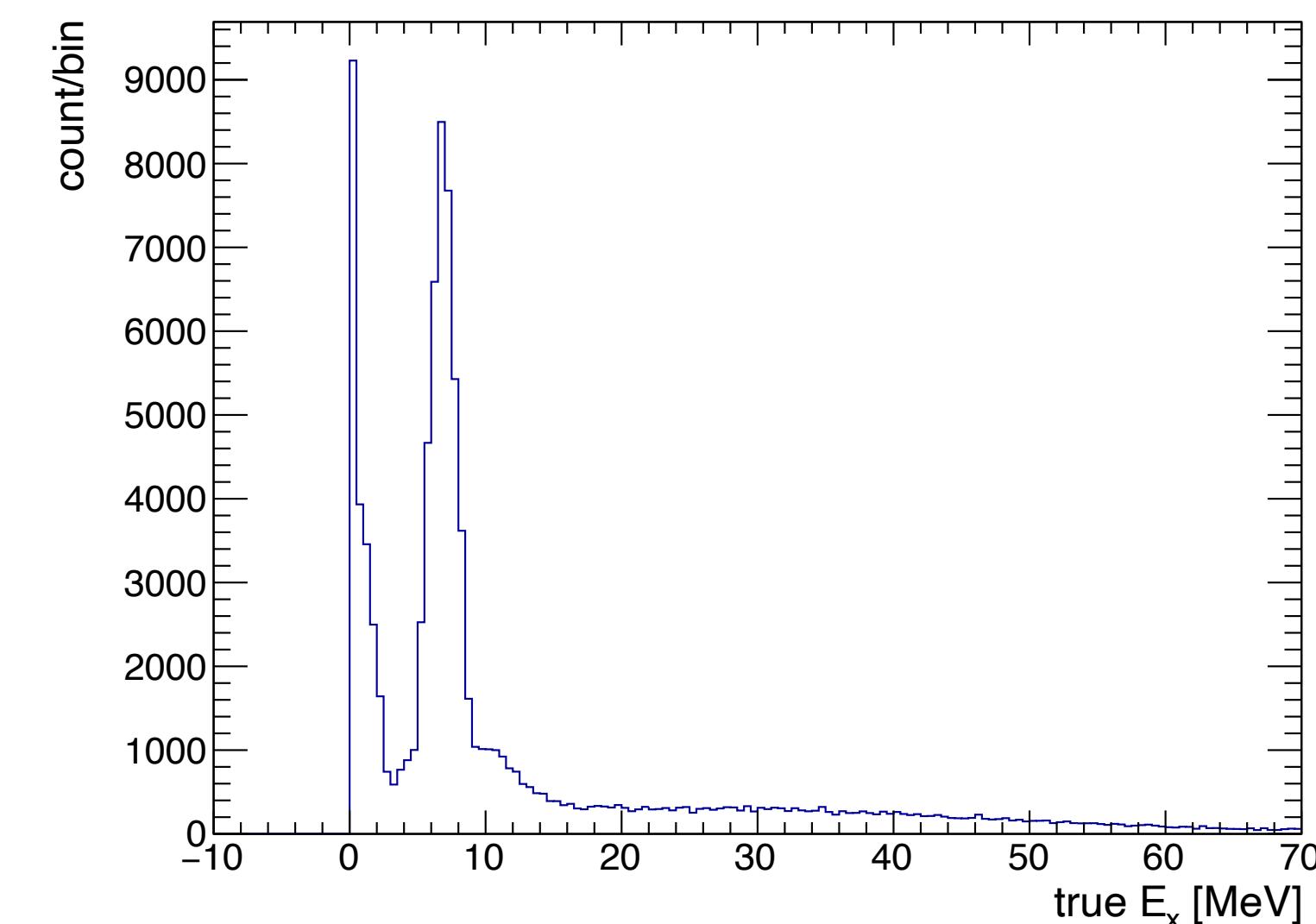
S_p : 陽子のseparation energy

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

16Oのspectral function
Benhar et al., Phys. Rev. D,
72(5):053005, 2005



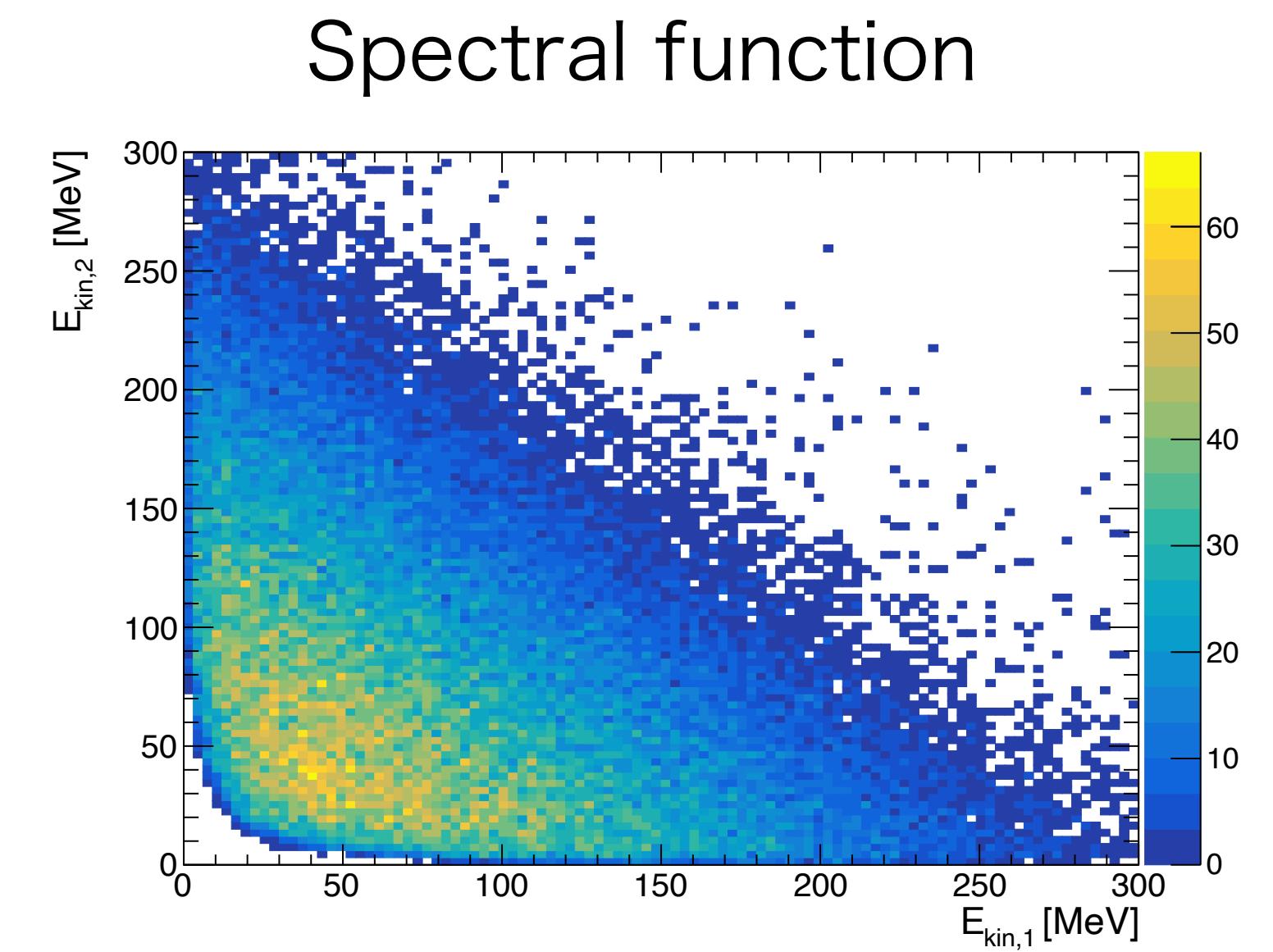
励起エネルギー分布



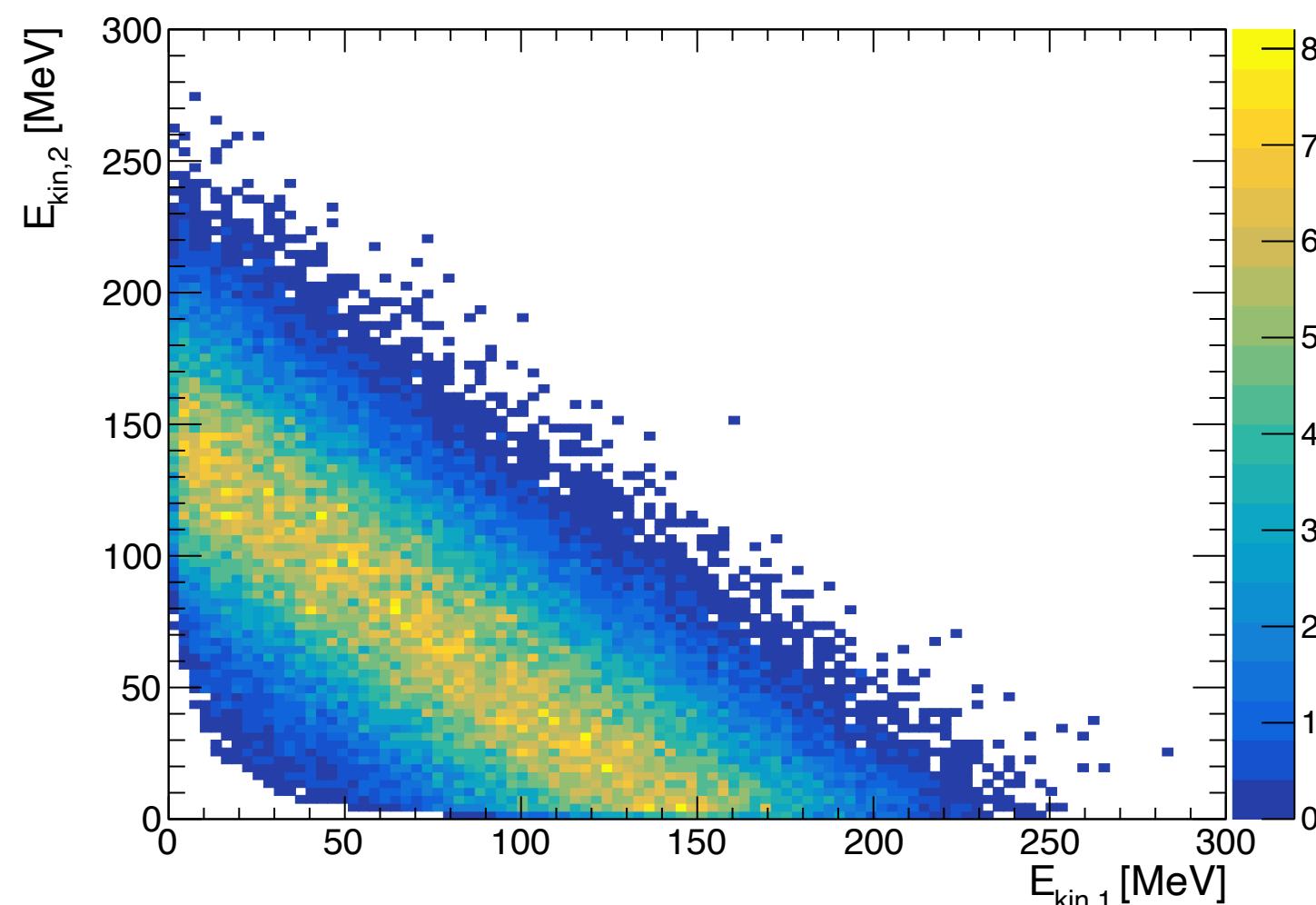
Event Generation

- 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}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

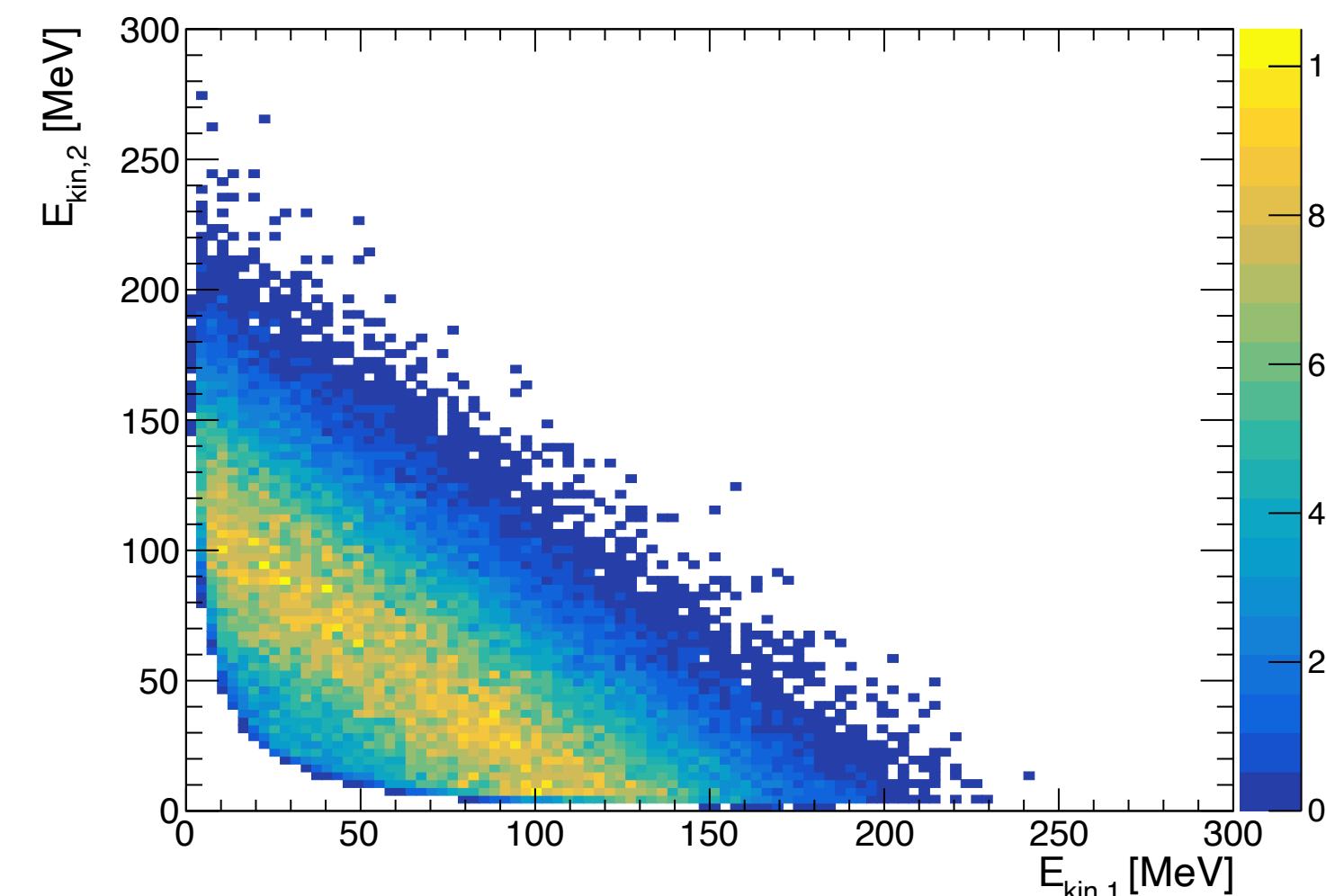
2つの反跳陽子の運動エネルギー (lab系)



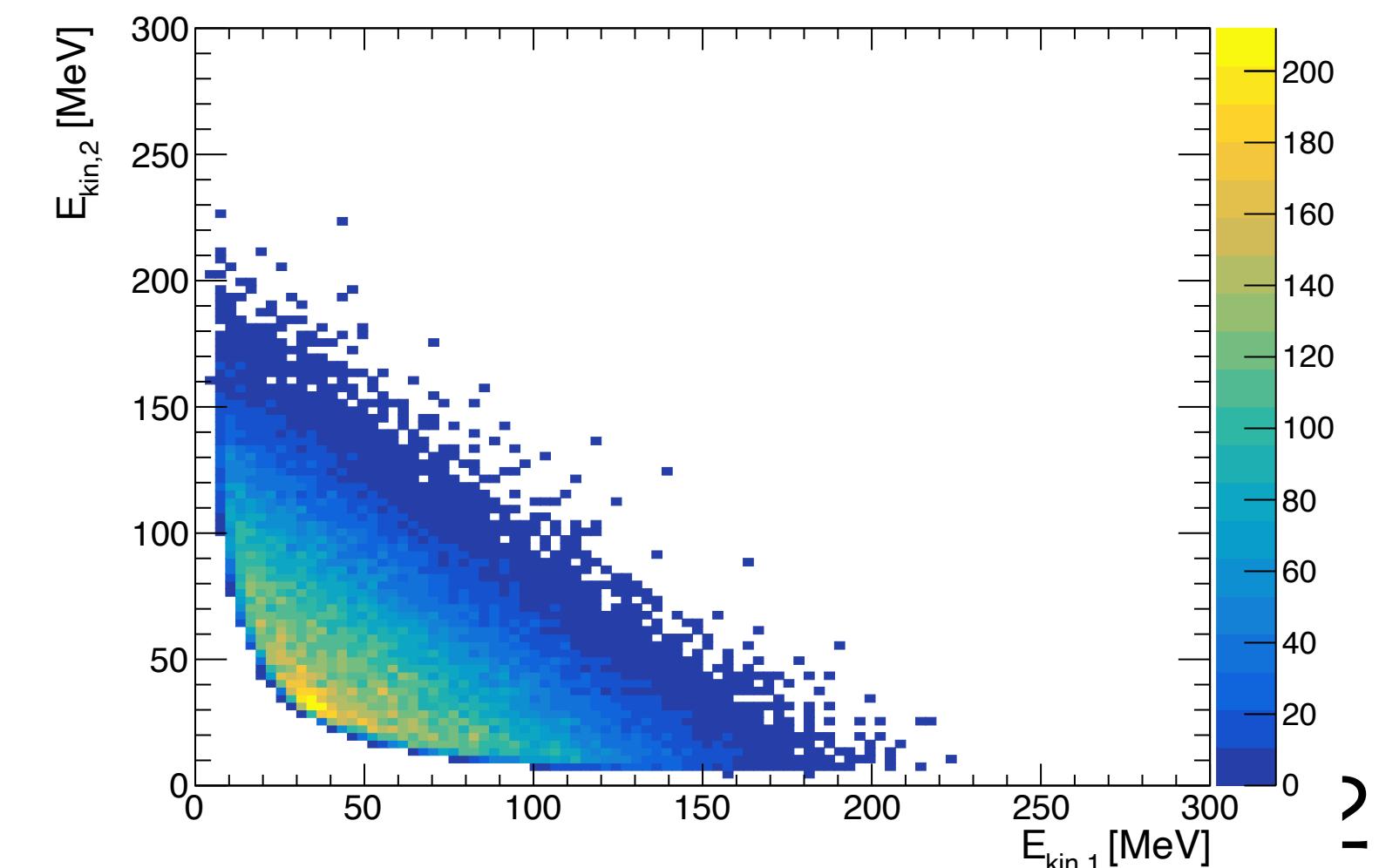
$E_x = 10 \text{ MeV}$



30 MeV



50 MeV

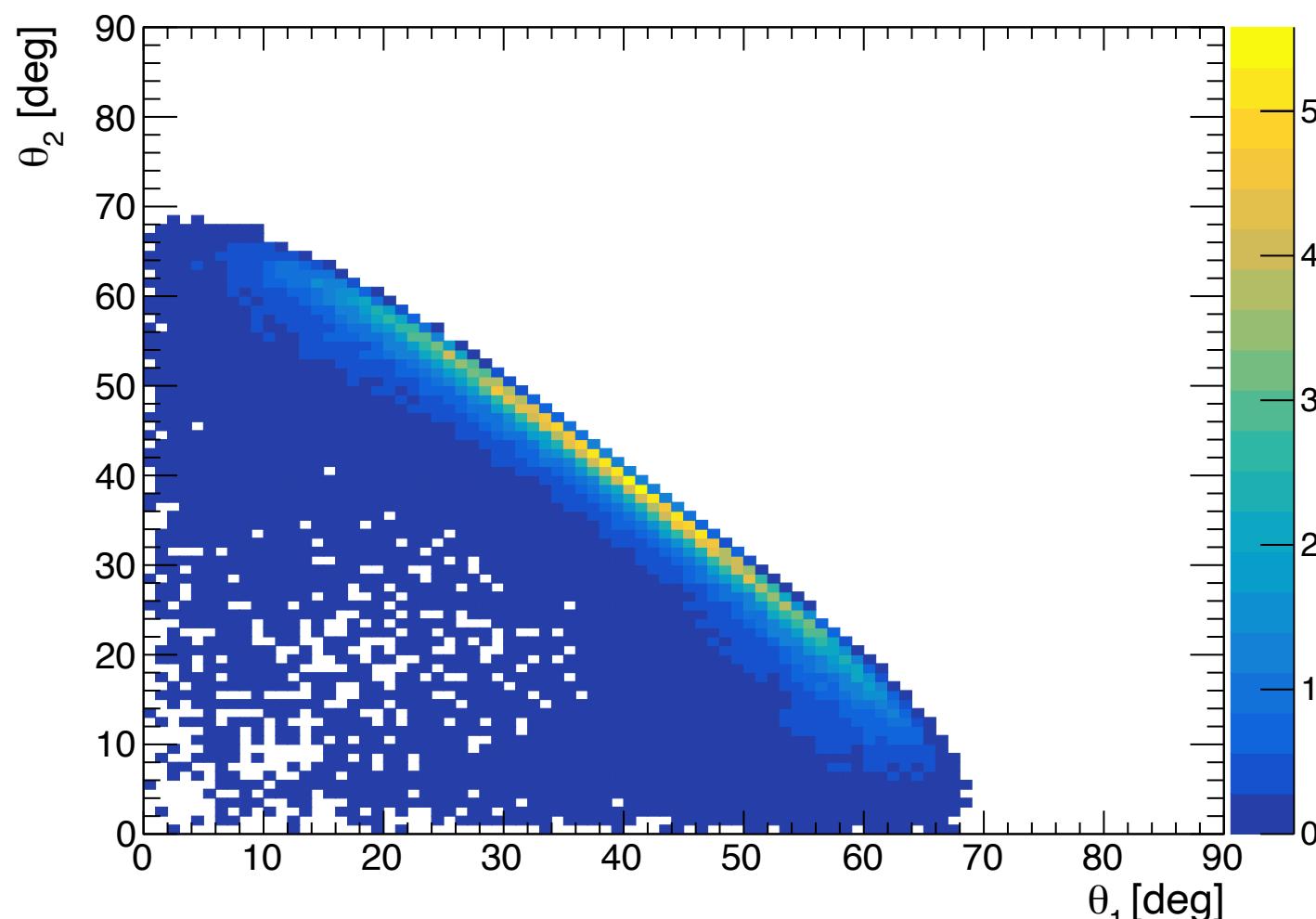


Event Generation

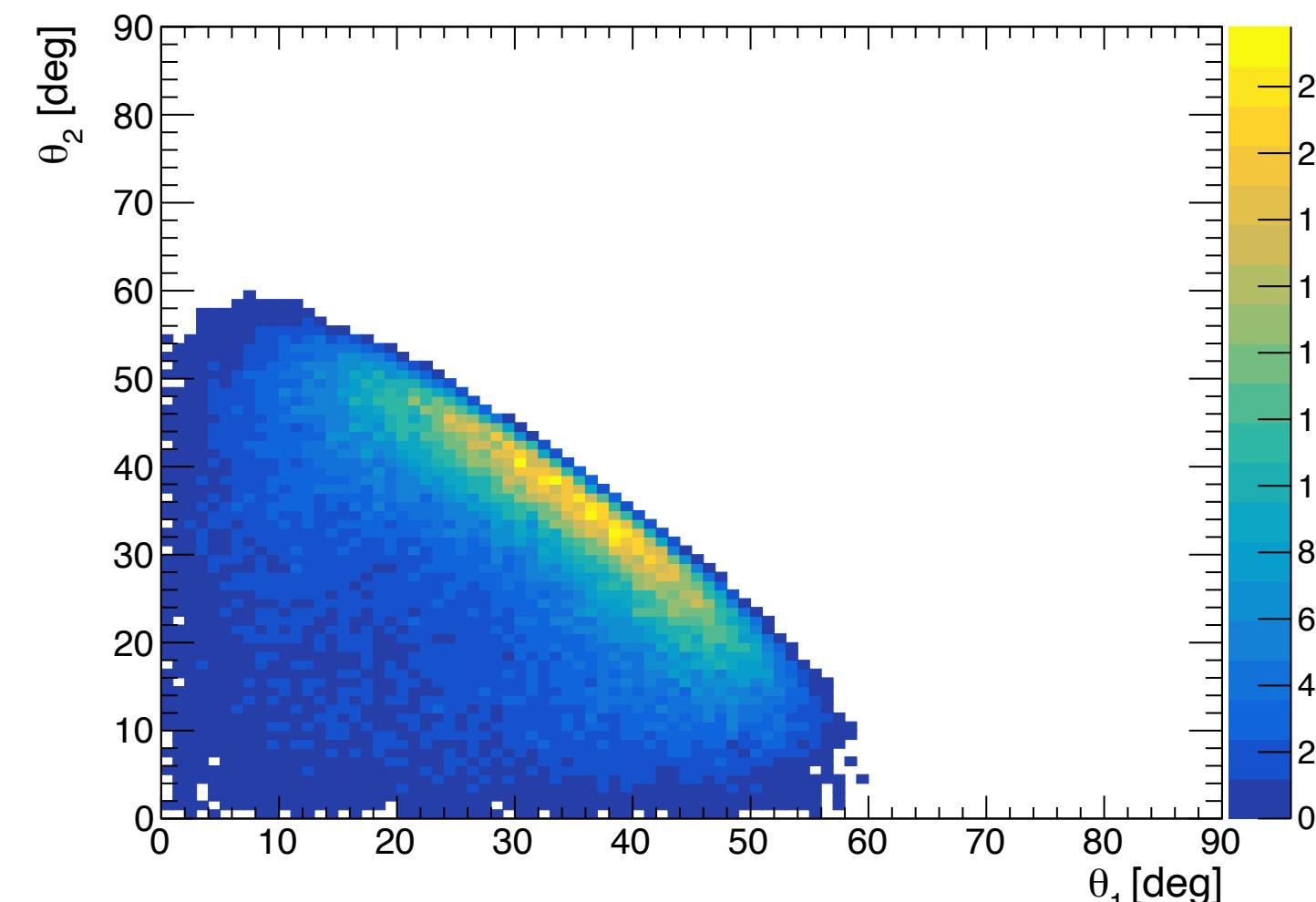
- 励起エネルギーが高いほど、反跳陽子のpolar angle θ は小さくなる
- 典型的な角度は $20^\circ \lesssim \theta \lesssim 60^\circ$

2つの反跳陽子のpolar angle θ (lab系)

$E_x = 10 \text{ MeV}$

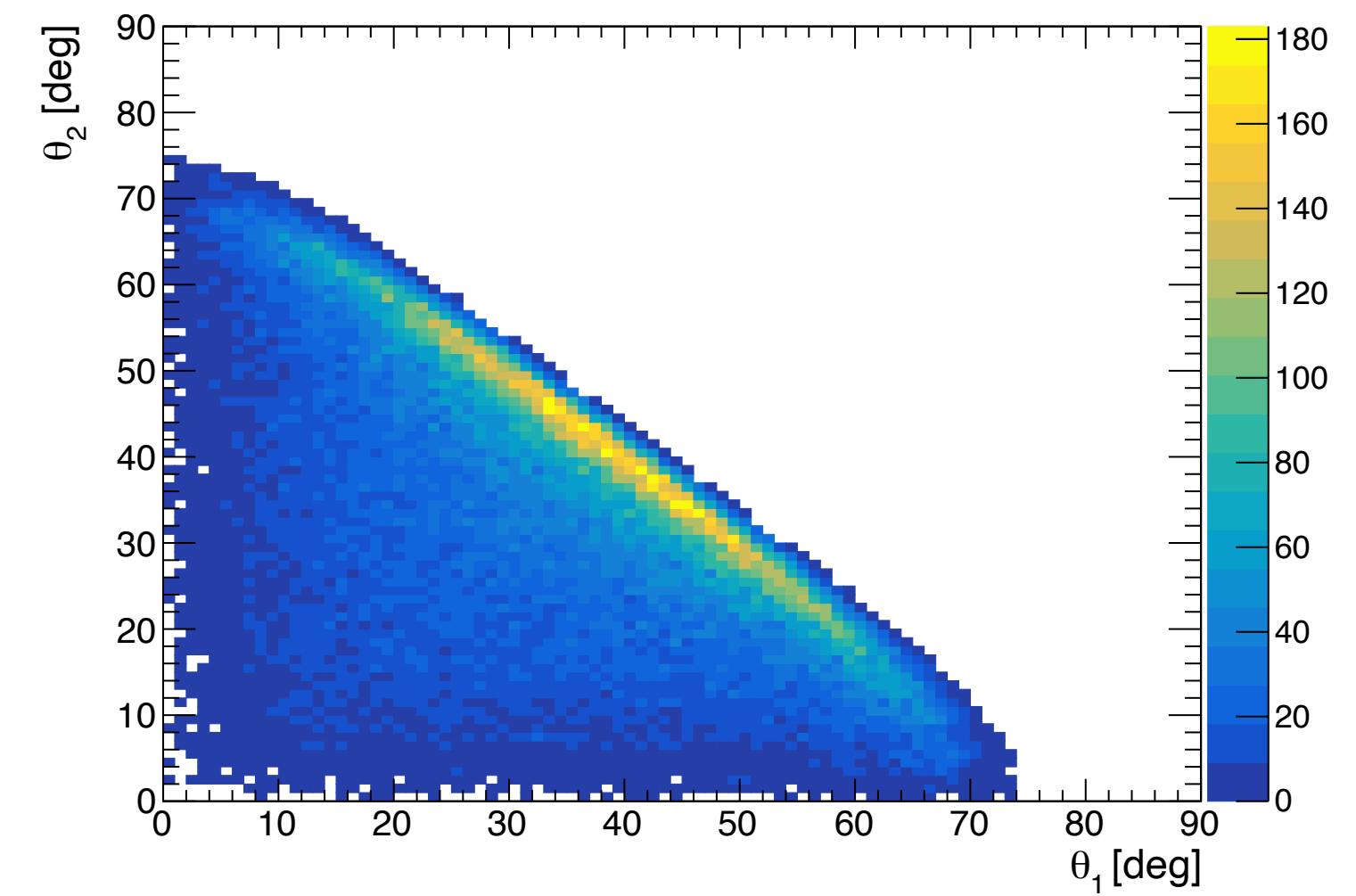


30 MeV

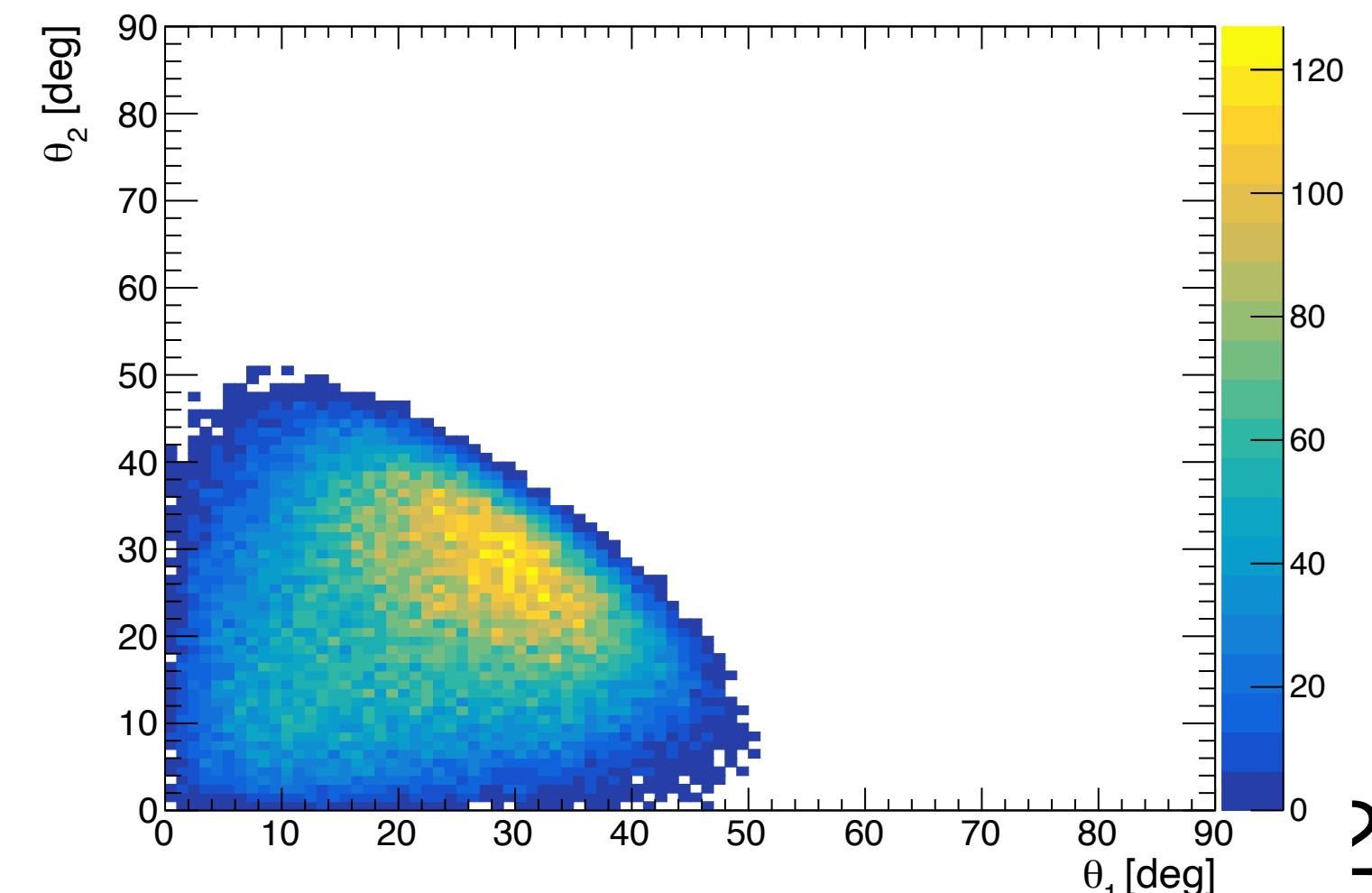


2

Spectral function



50 MeV



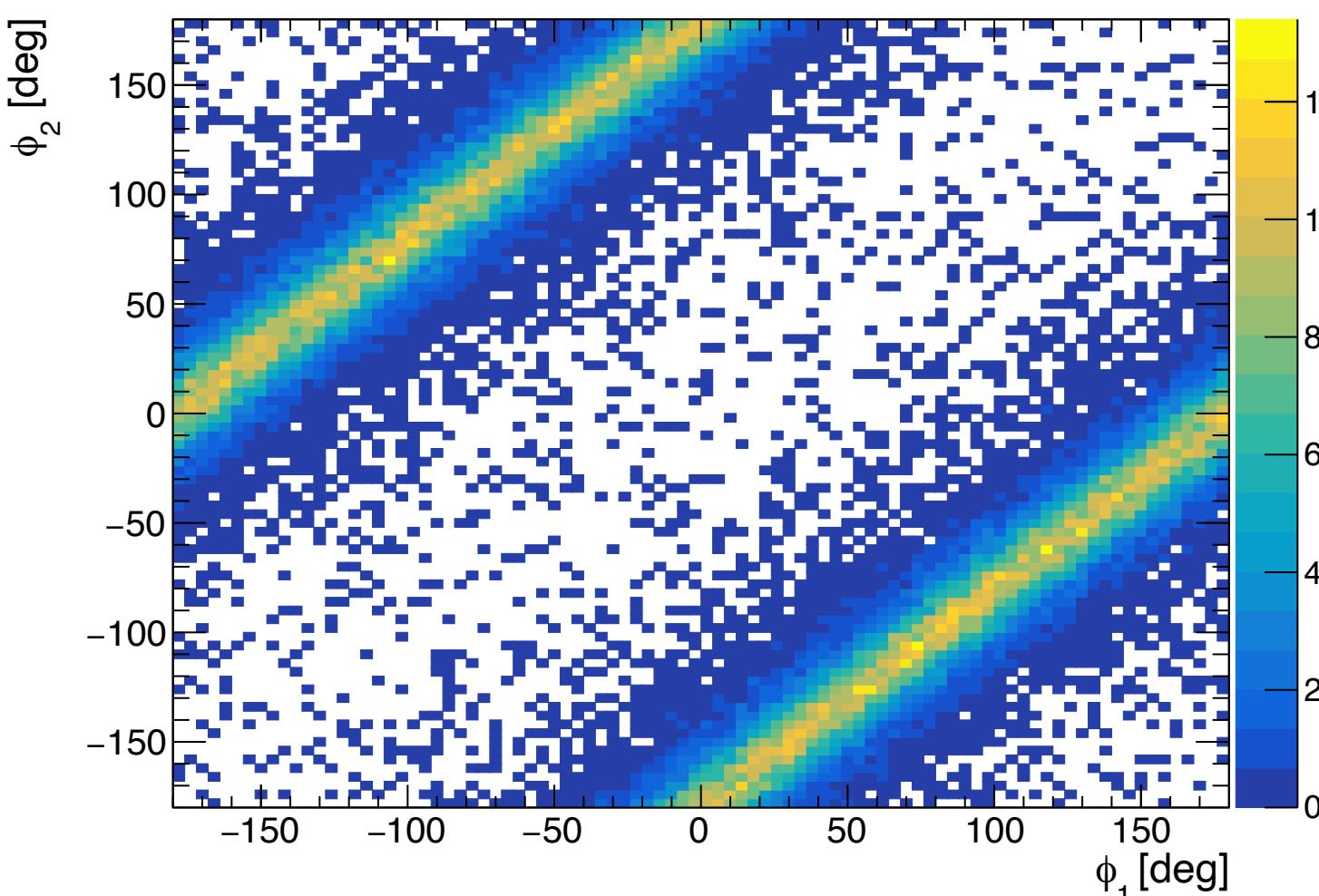
2

Event Generation

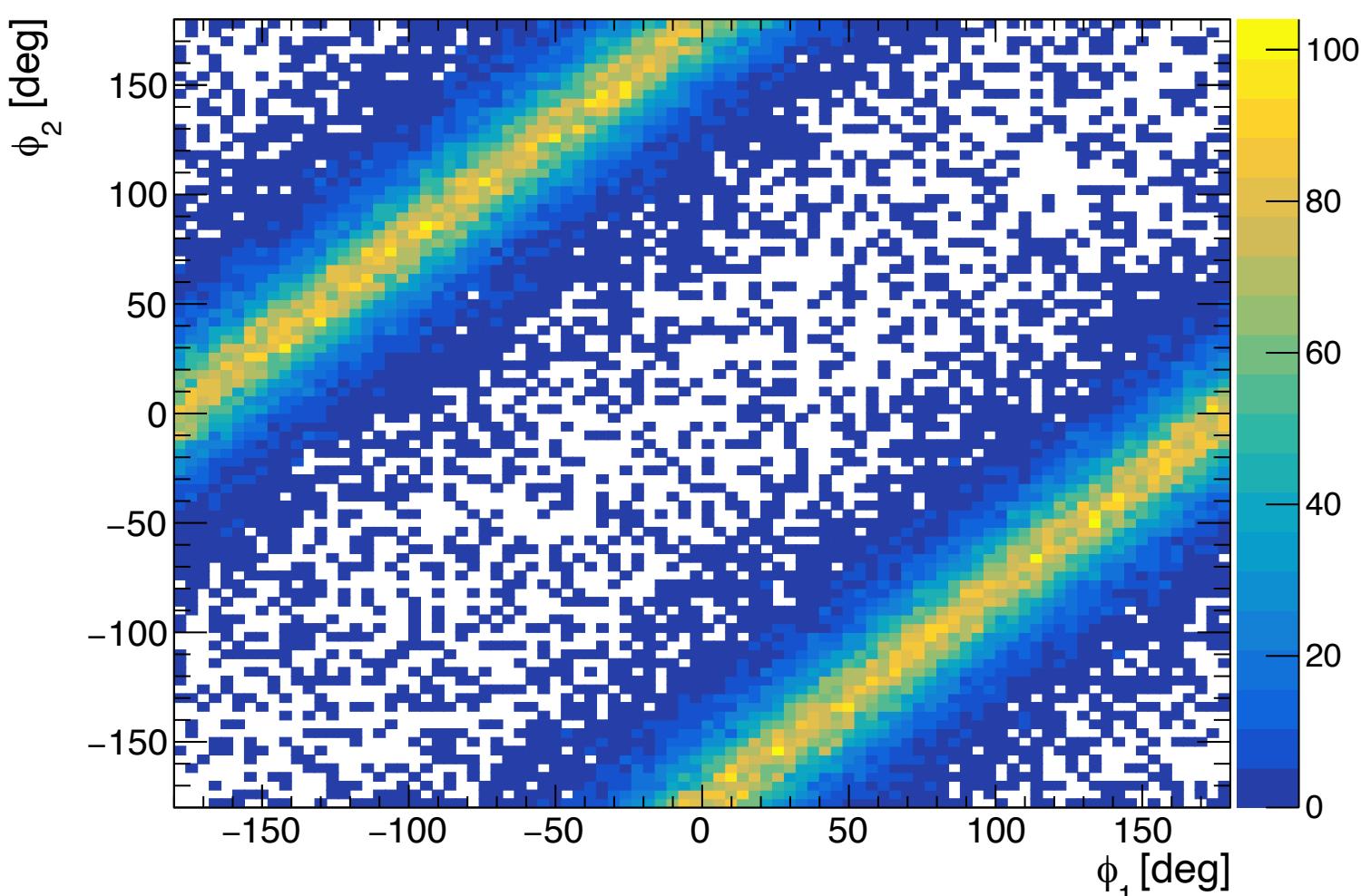
- 反跳陽子は重心系でback-to-backに放出される
- 実験室系ではビーム軸方向にブーストされ、 azimuthal angle ϕ にback-to-back correlation

2つの反跳陽子のazimuthal angle (lab系)

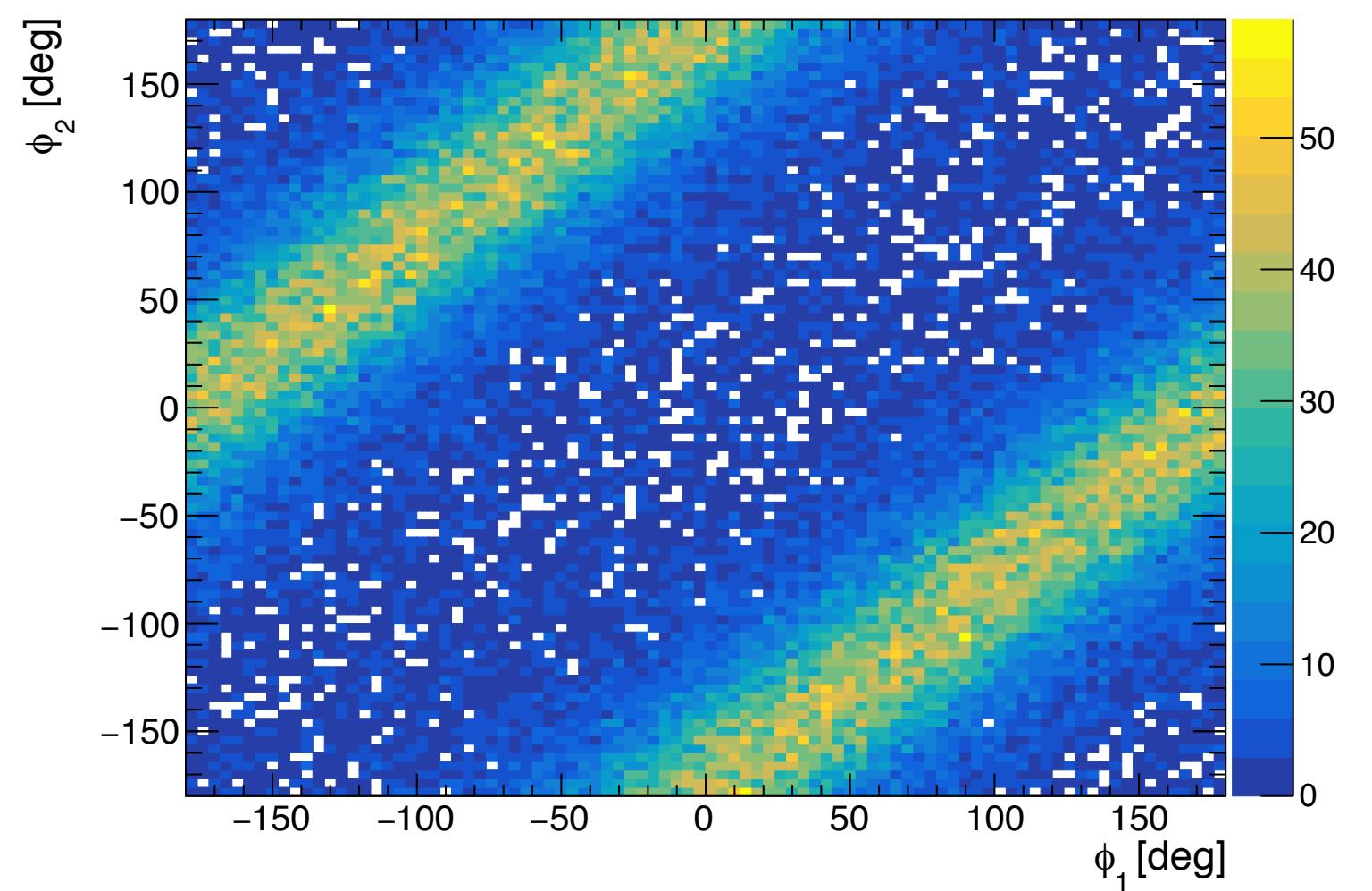
$E_x = 10 \text{ MeV}$



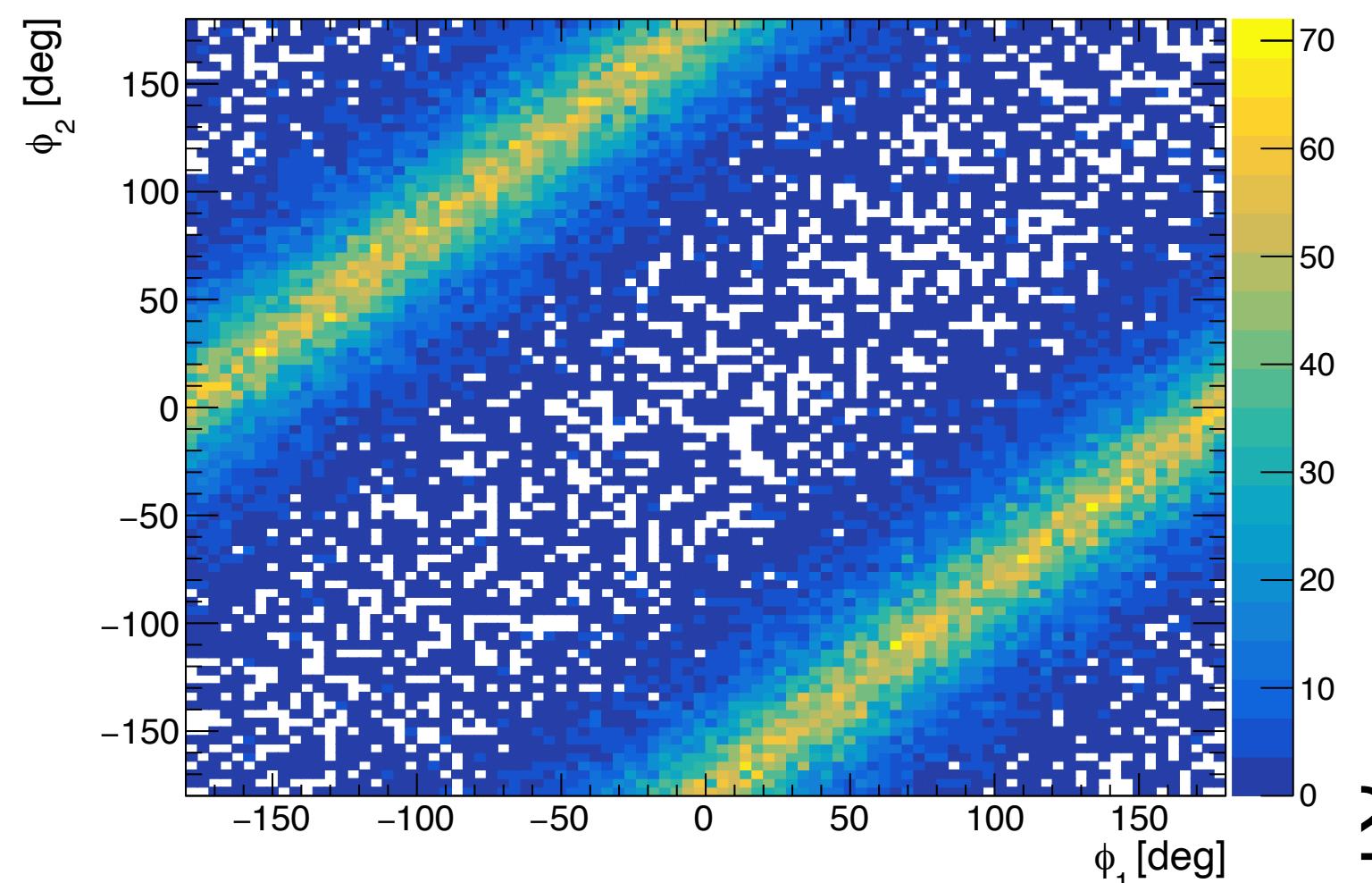
30 MeV



Spectral function

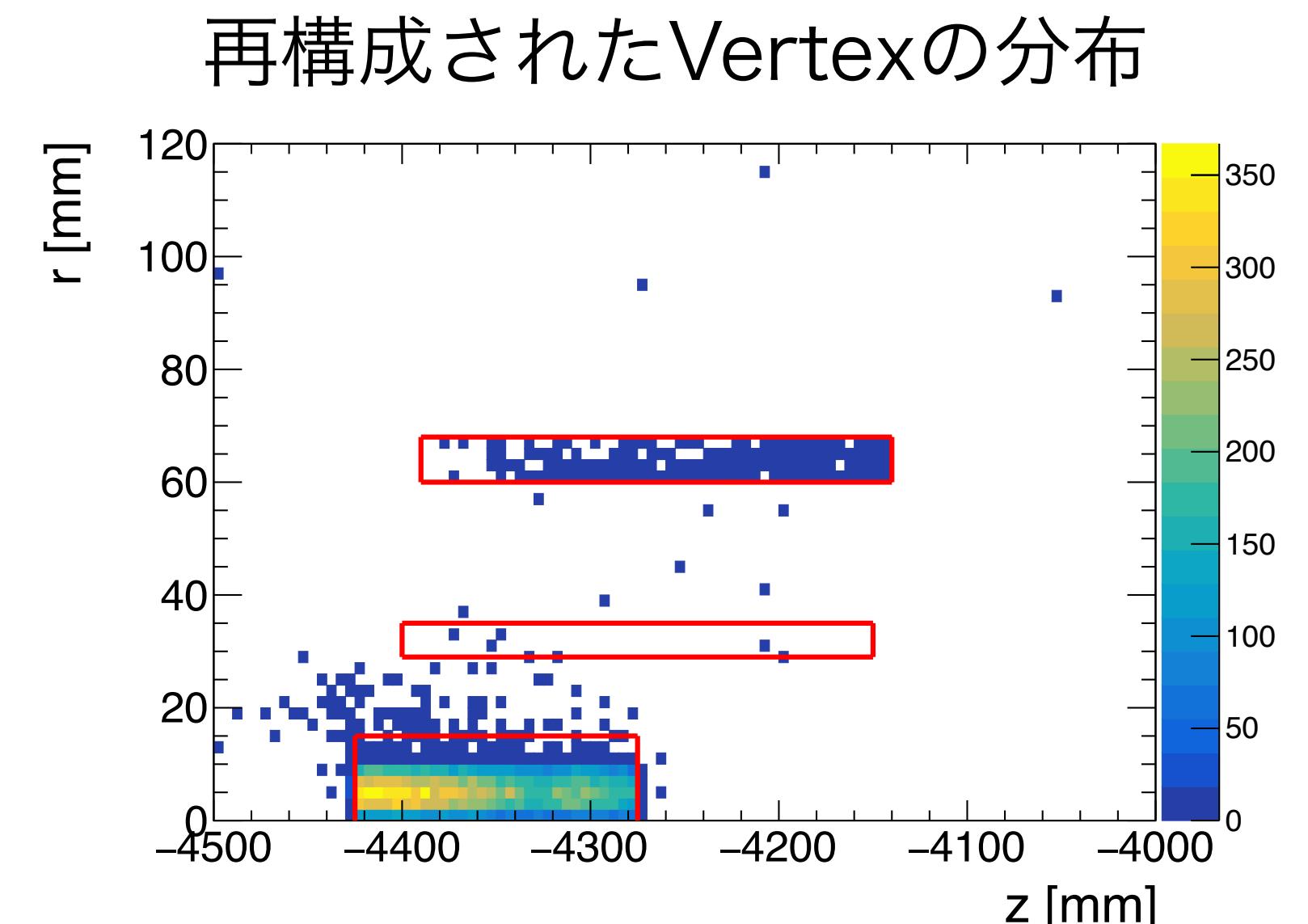
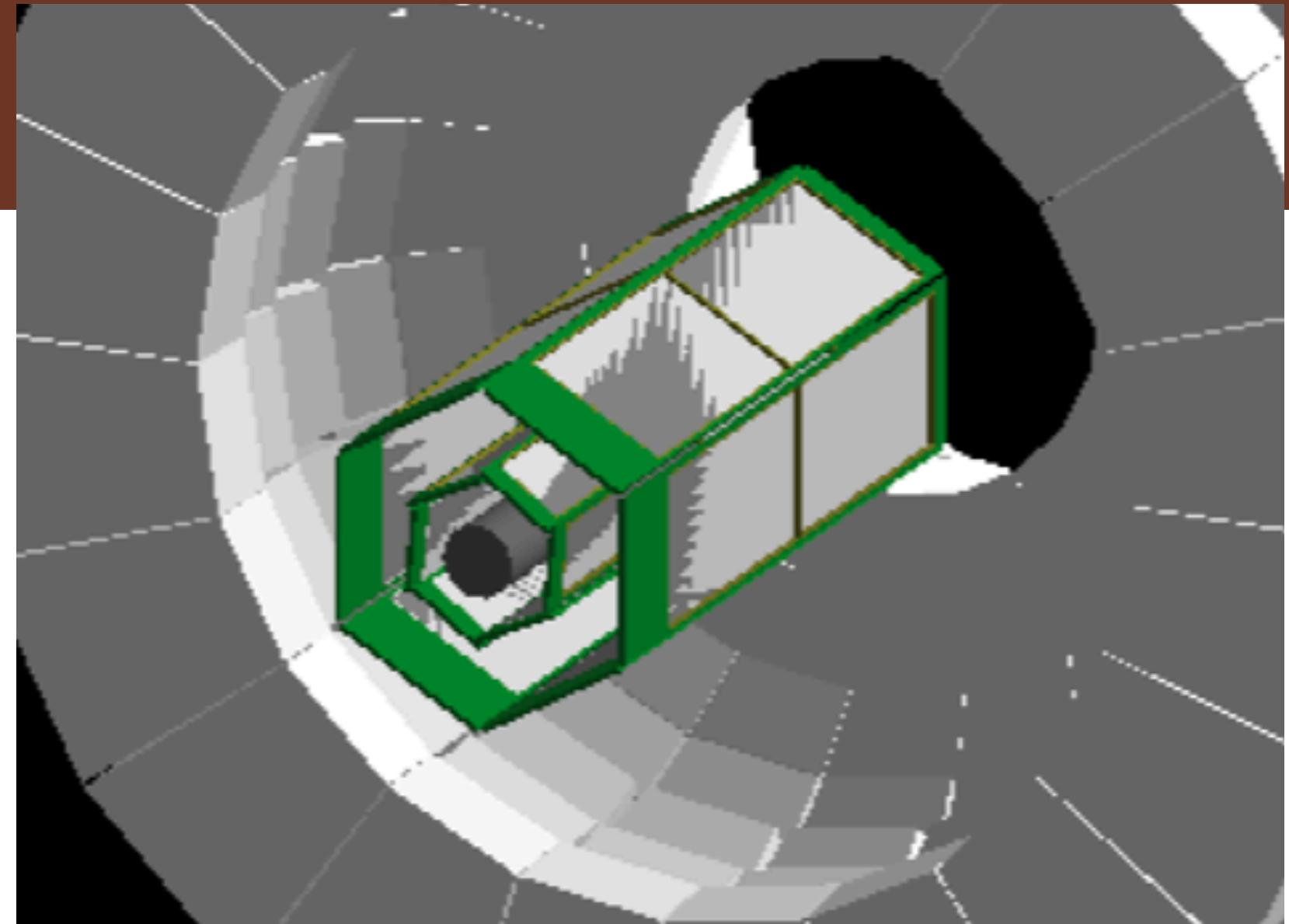
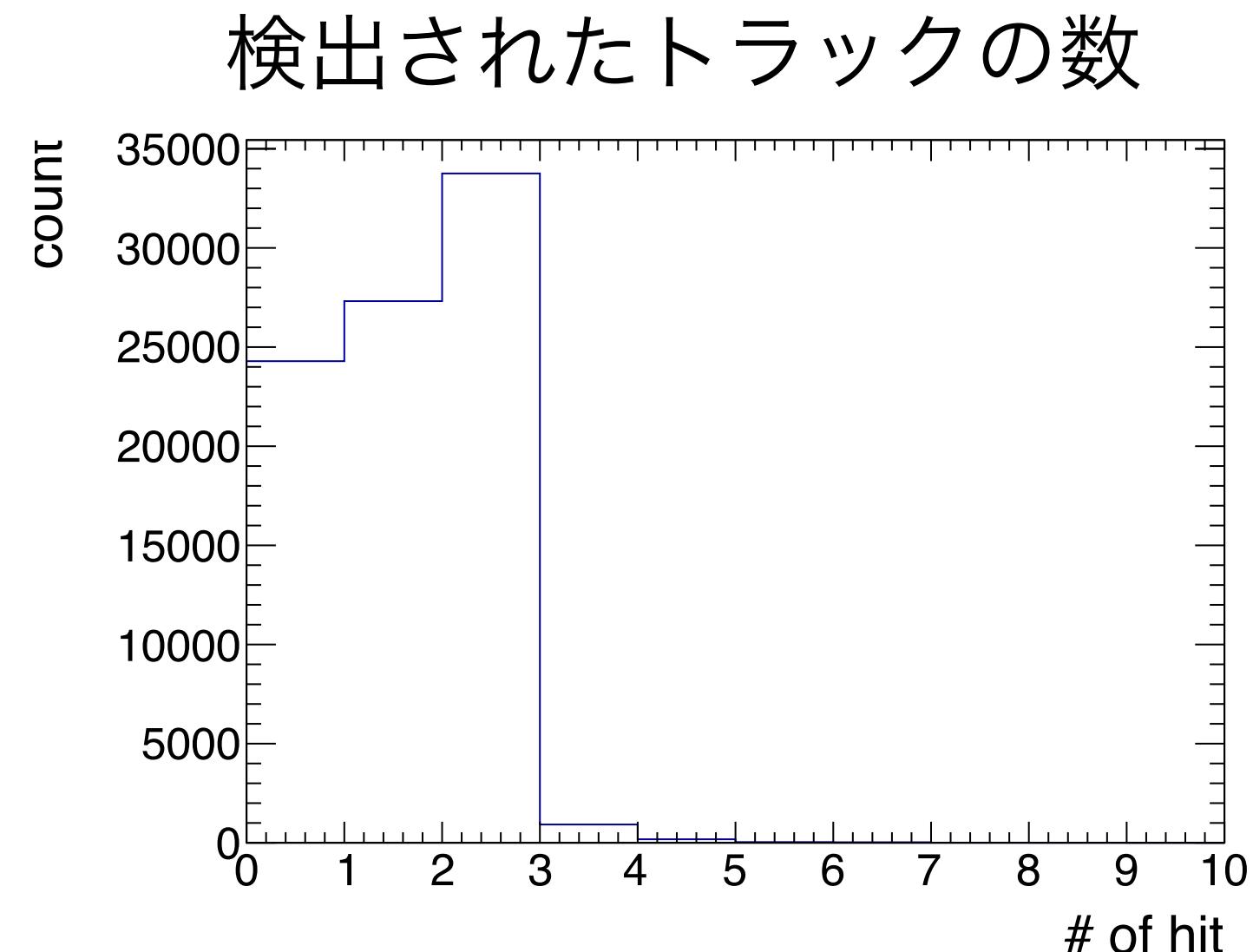


50 MeV



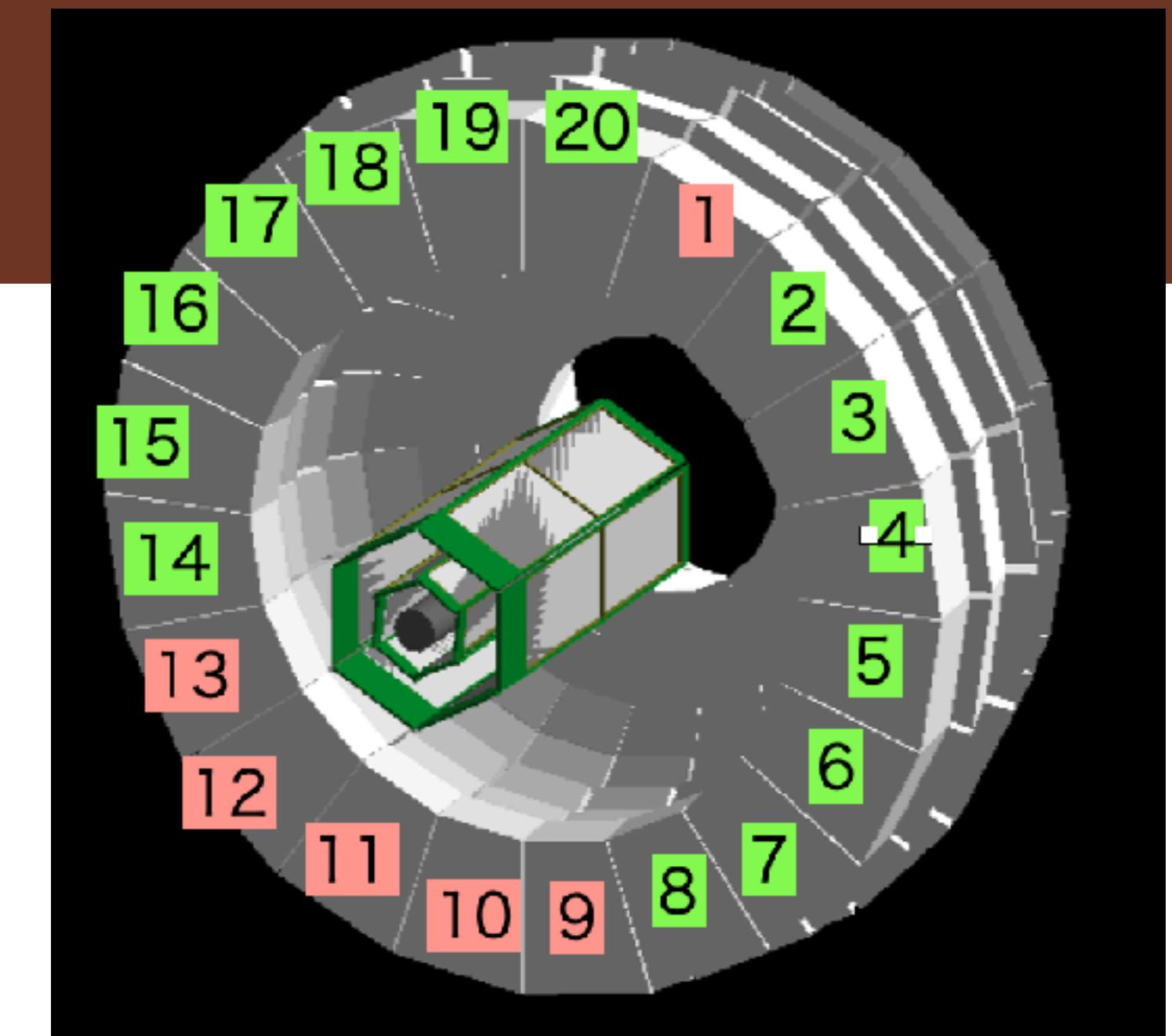
Selection Criteria

- 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

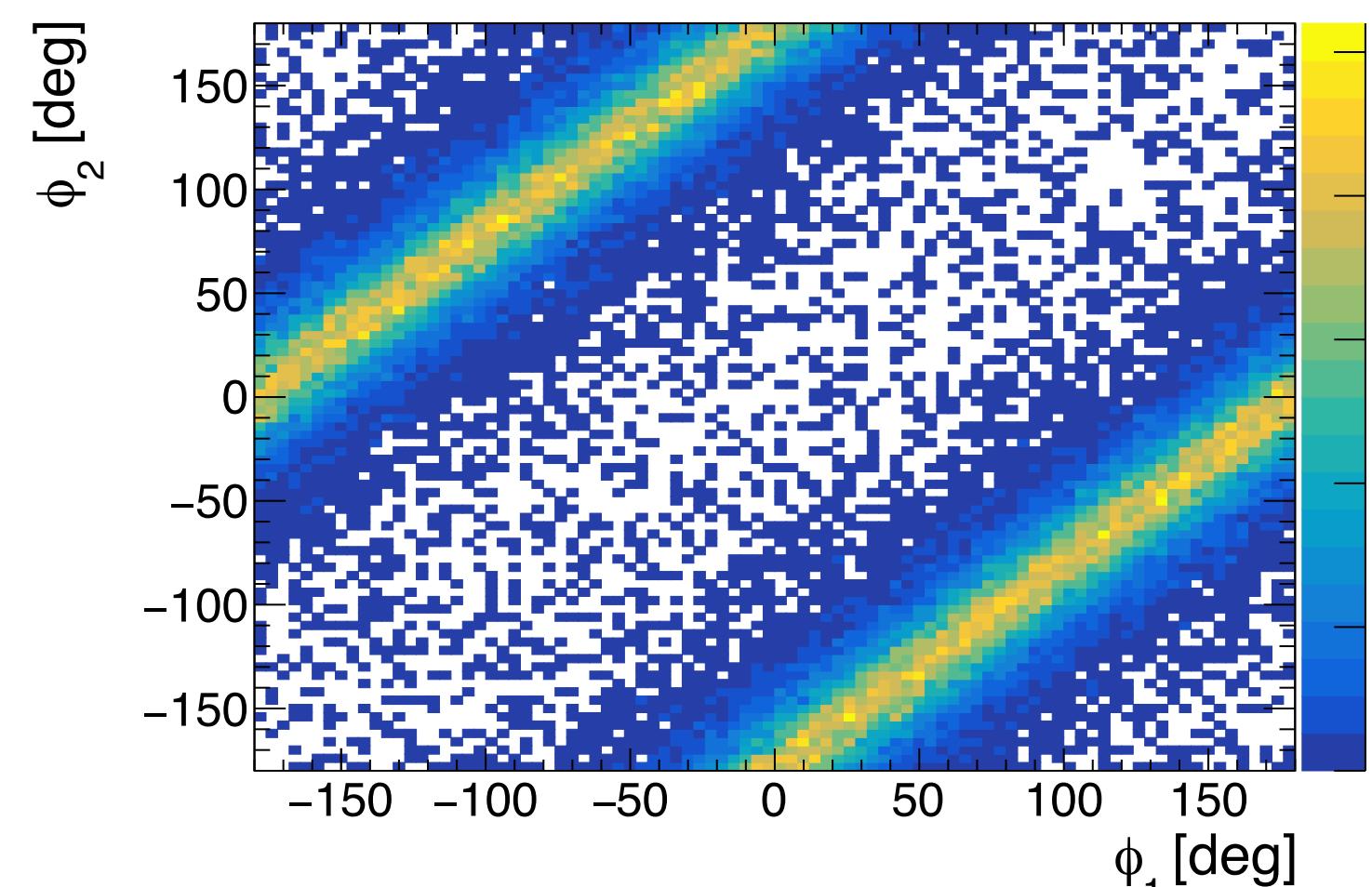


Selection Criteria

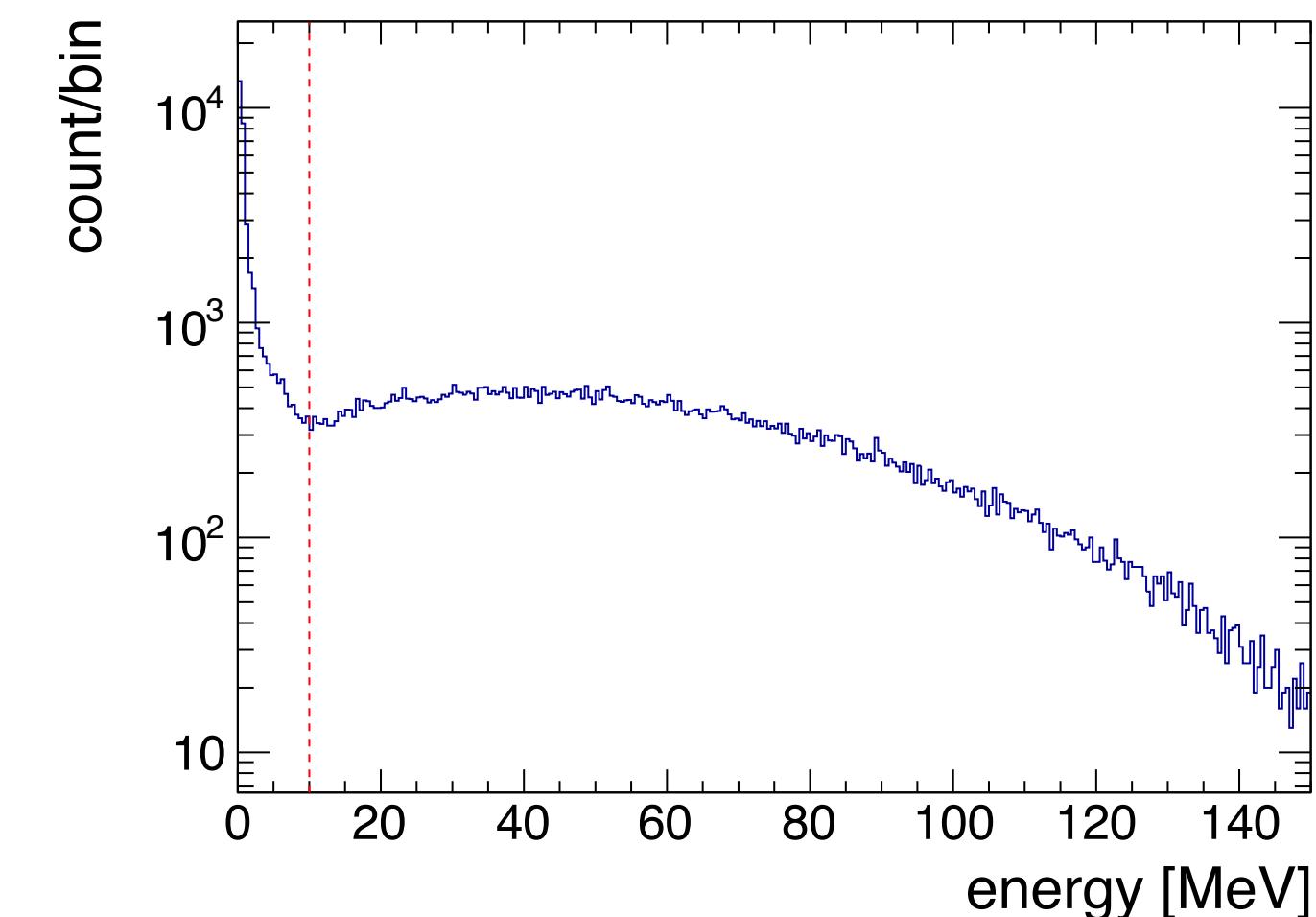
- Angular selection
 - CATANAの2つのヒットのなす角が $\phi = 180^\circ \pm 36^\circ$
- Energy selection
 - CATANAの2つのヒットがともに10 MeV以上 (ガンマ線の除外)



2つの反跳陽子の
ビーム軸に垂直な平面での角度 ϕ (lab系)



CATANAで測定されたエネルギー



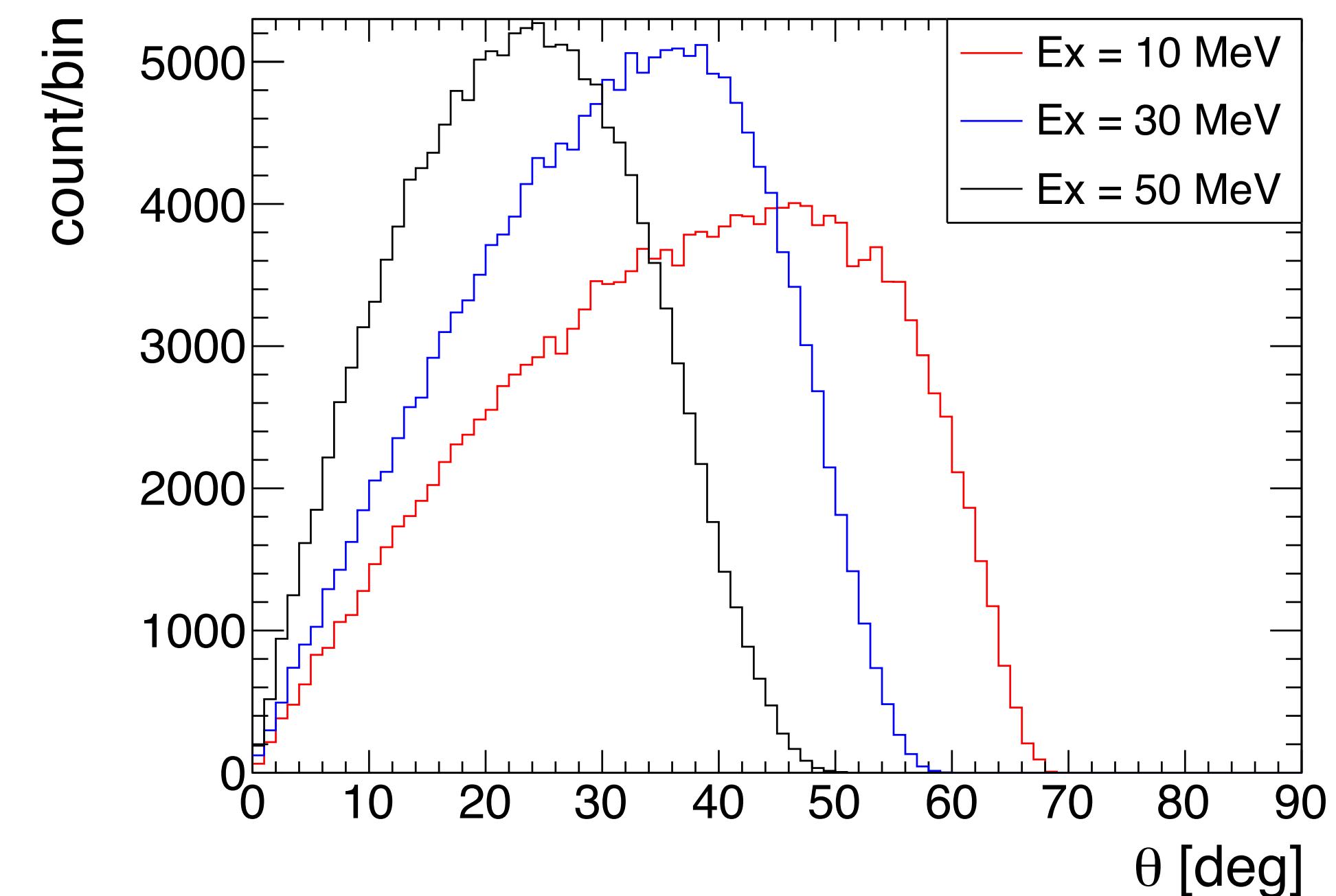
Selection Criteria

- 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 θ 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 θ (lab系)



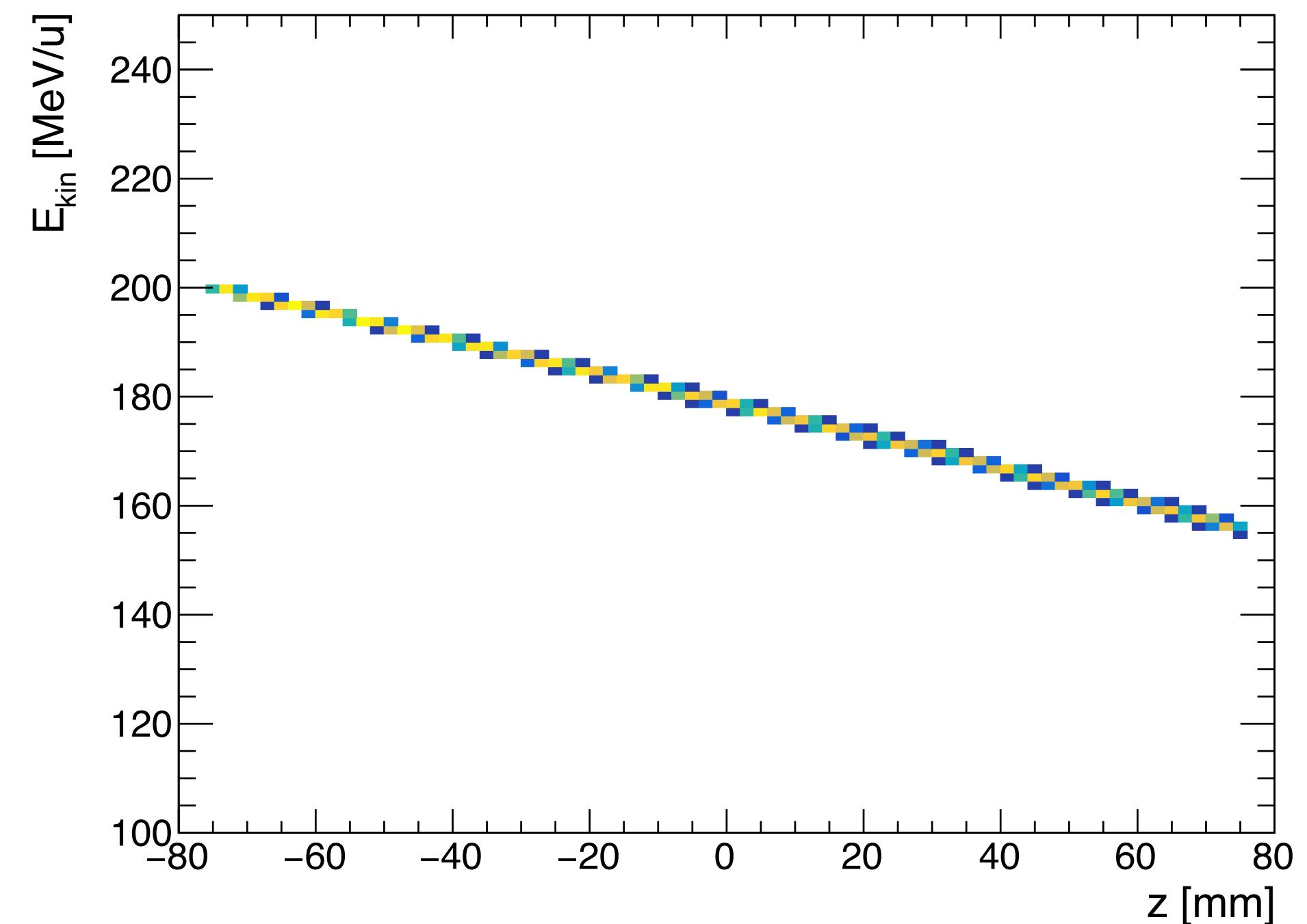
Energy Loss Correction of Oxygen Beam

- 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_{upstream} : 標的の上流側の端のz座標

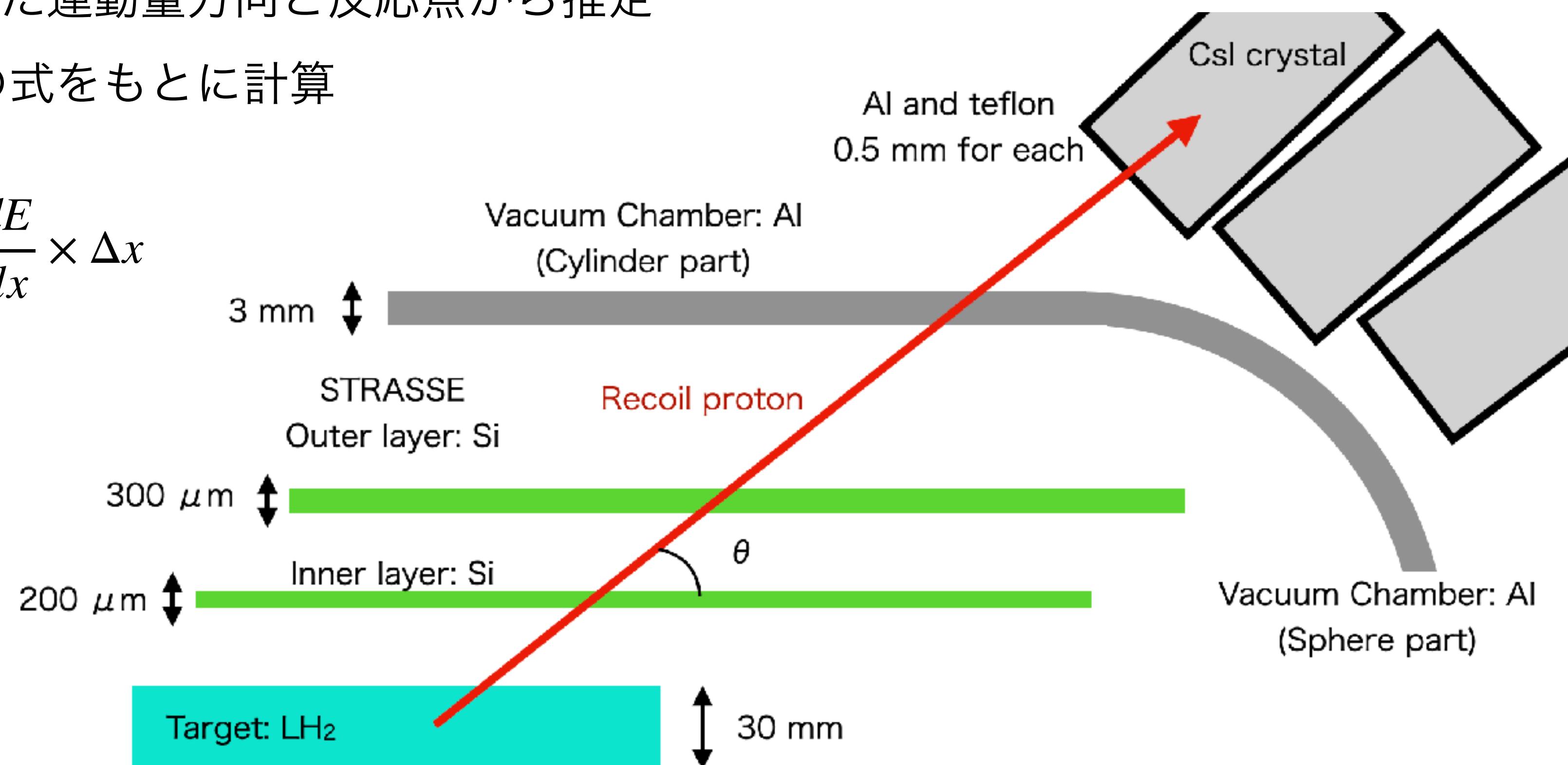
200 MeV/uの酸素ビームを
LH₂標的に入射したとき、
反応位置と反応直前のエネルギー



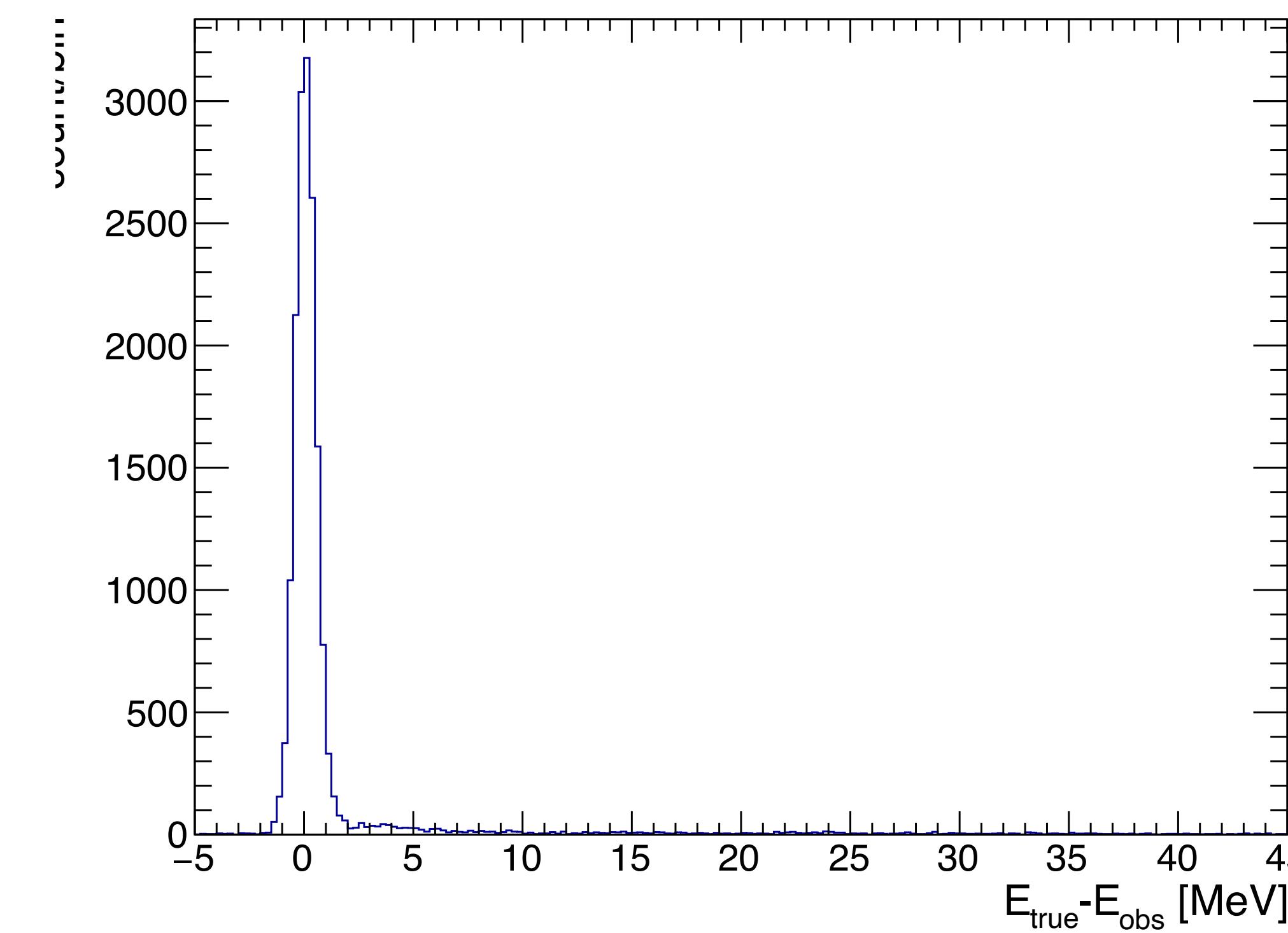
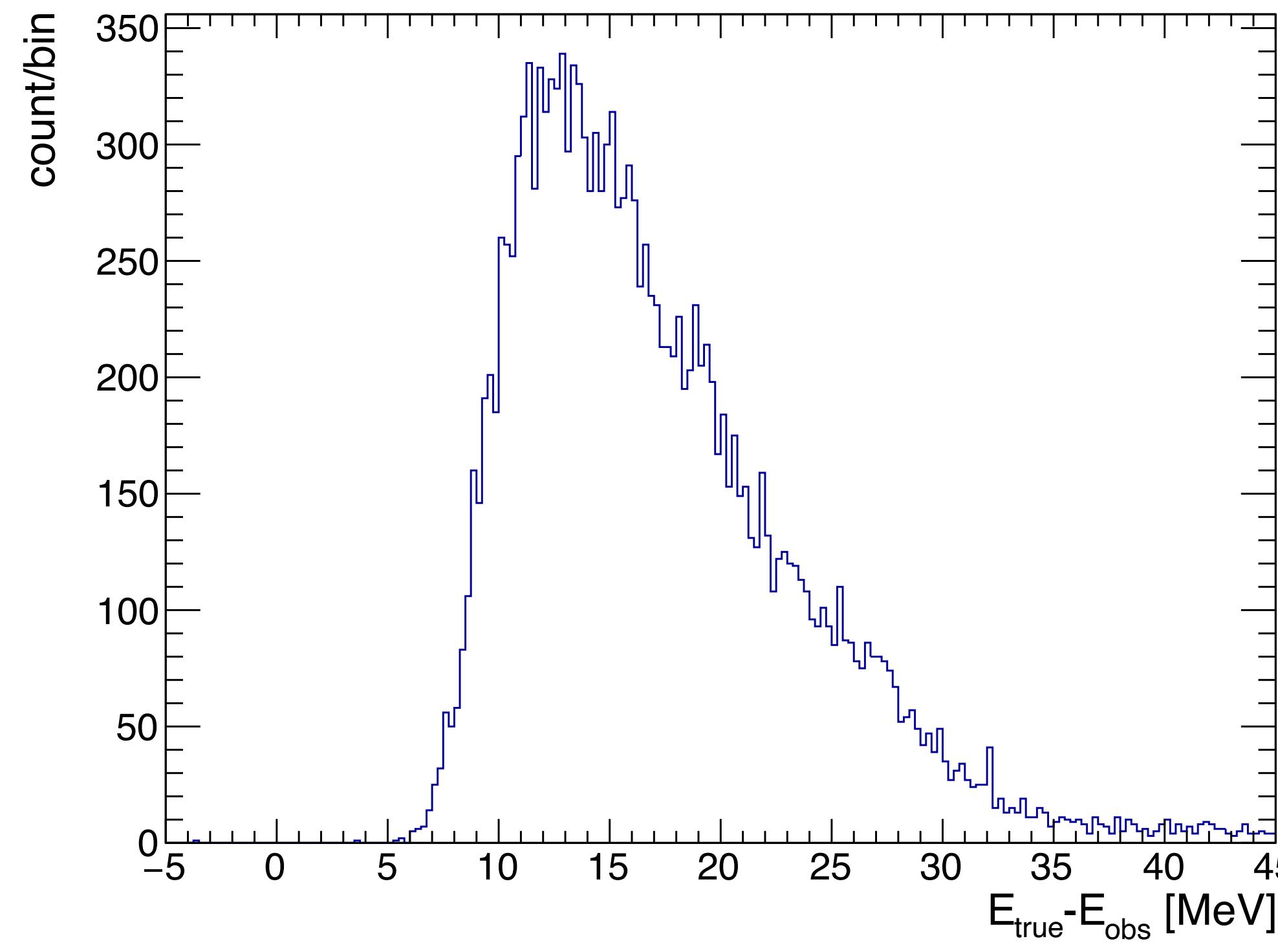
Energy Loss Correction of Recoil Protons

- 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_{before} を、後のエネルギー E_{after} と飛行距離 Δx 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

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



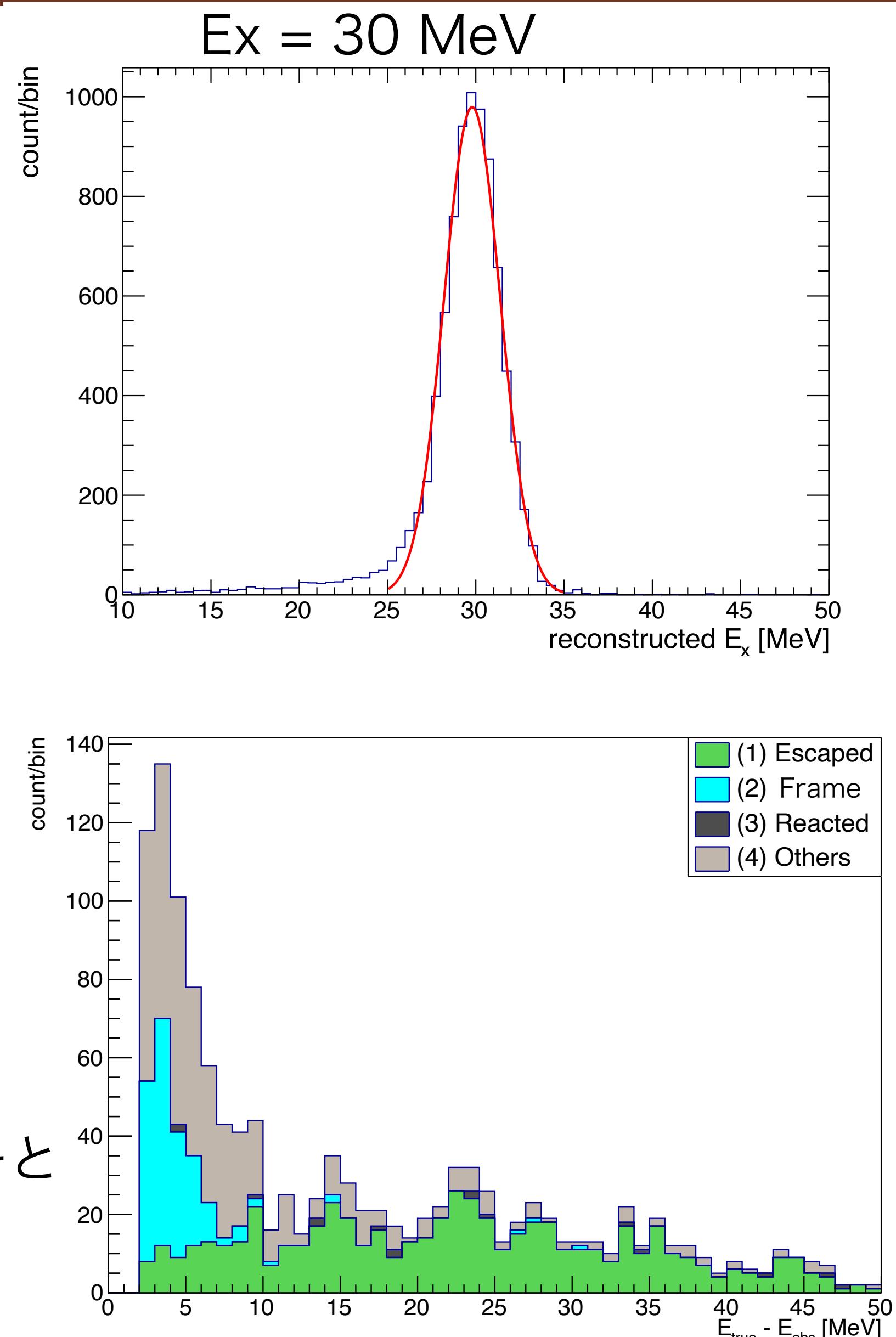
Energy Loss Correction of Recoil Protons



Tail Components

- テール成分の原因是陽子のエネルギー損失を低く見積もってしまふため
 - 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っ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の結晶同士の隙間に入り、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

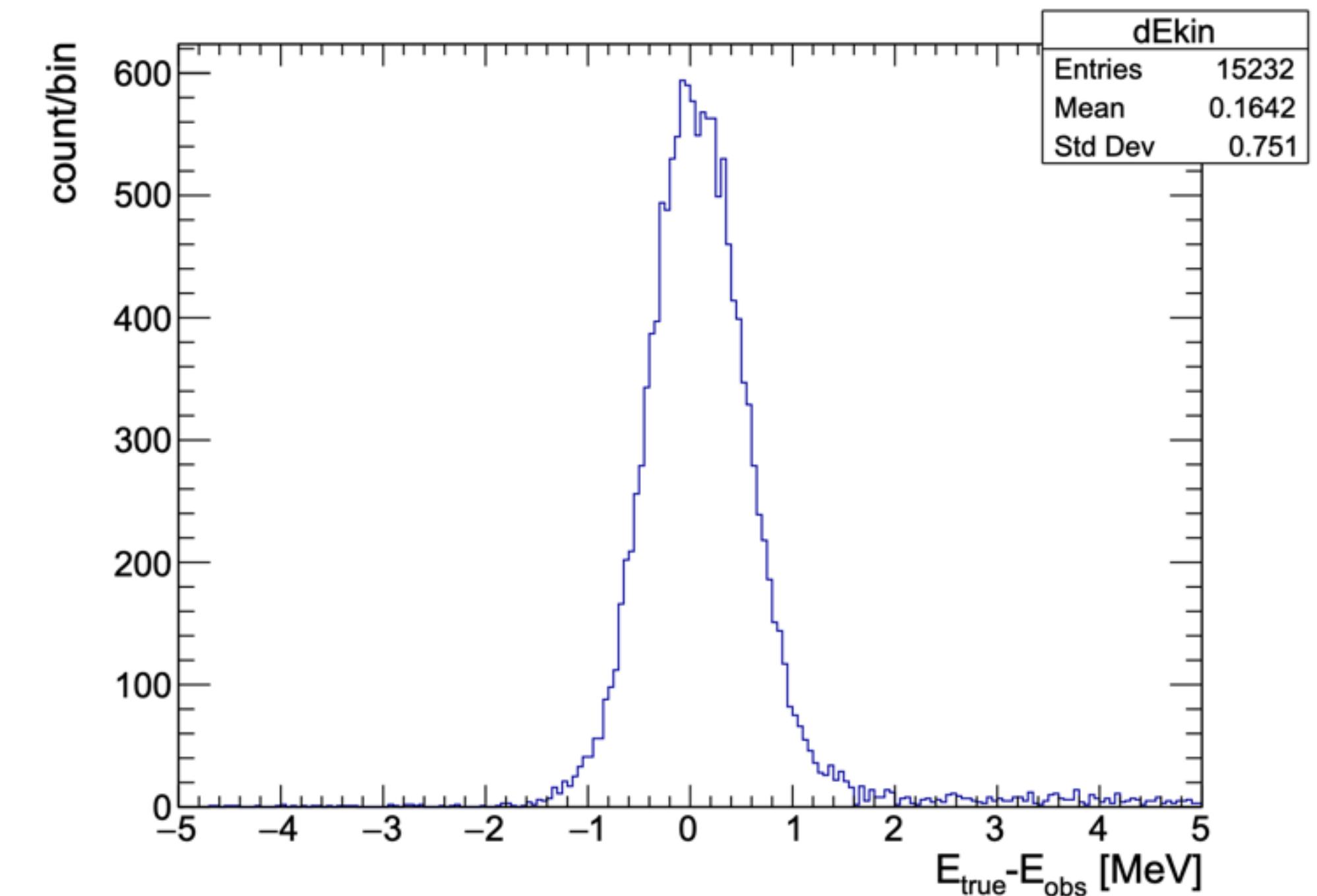
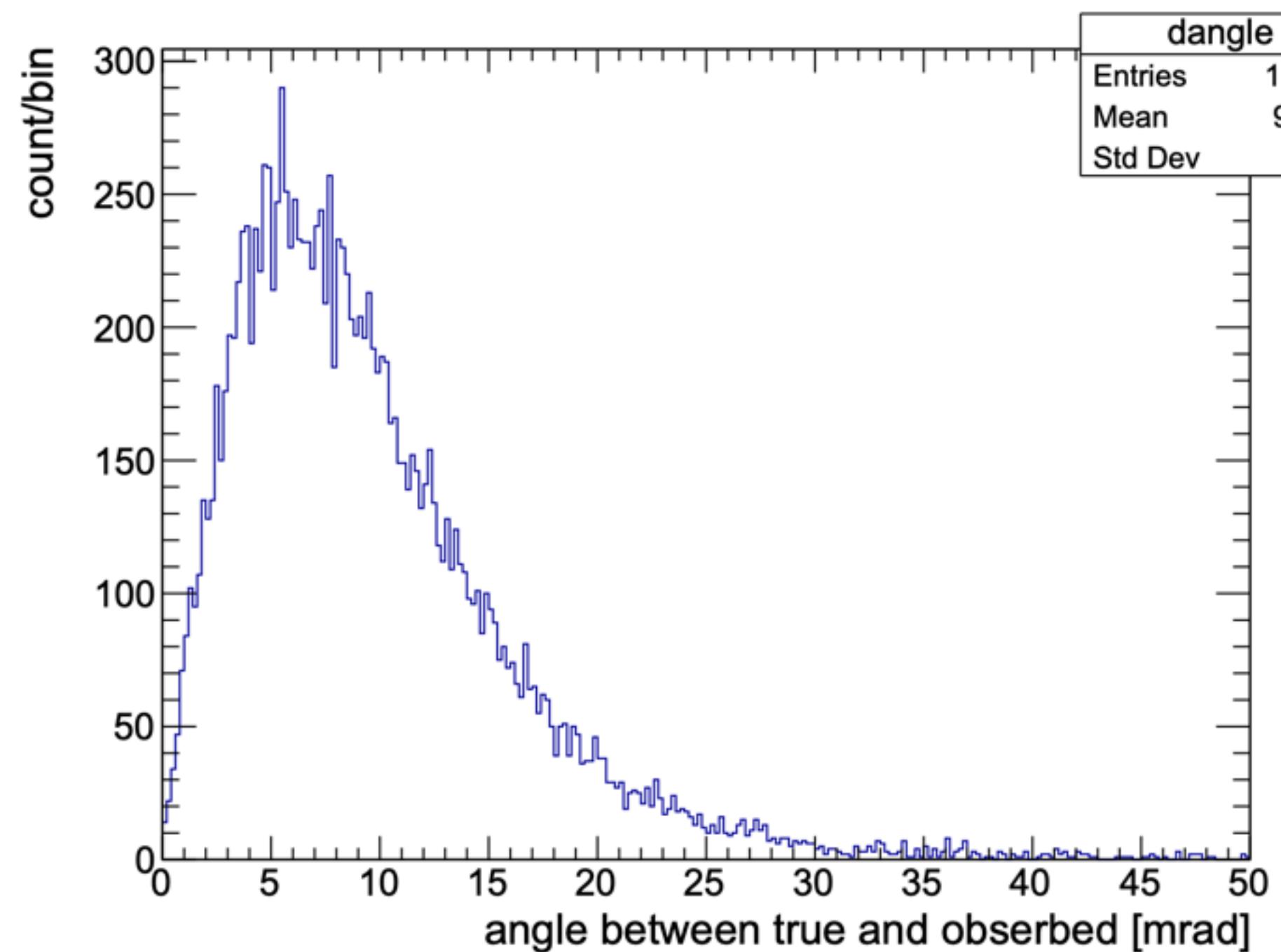


Selection Efficiency

| Selection | Efficiency [%] | | |
|--------------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | $E_x = 10 \text{ MeV}$ | 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

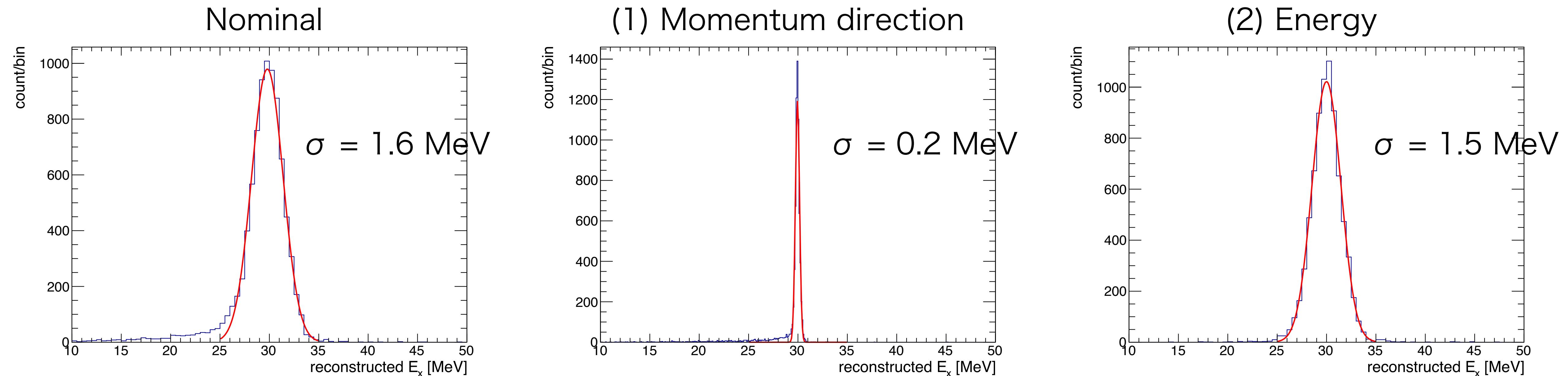
True Ex = 30 MeV



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

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

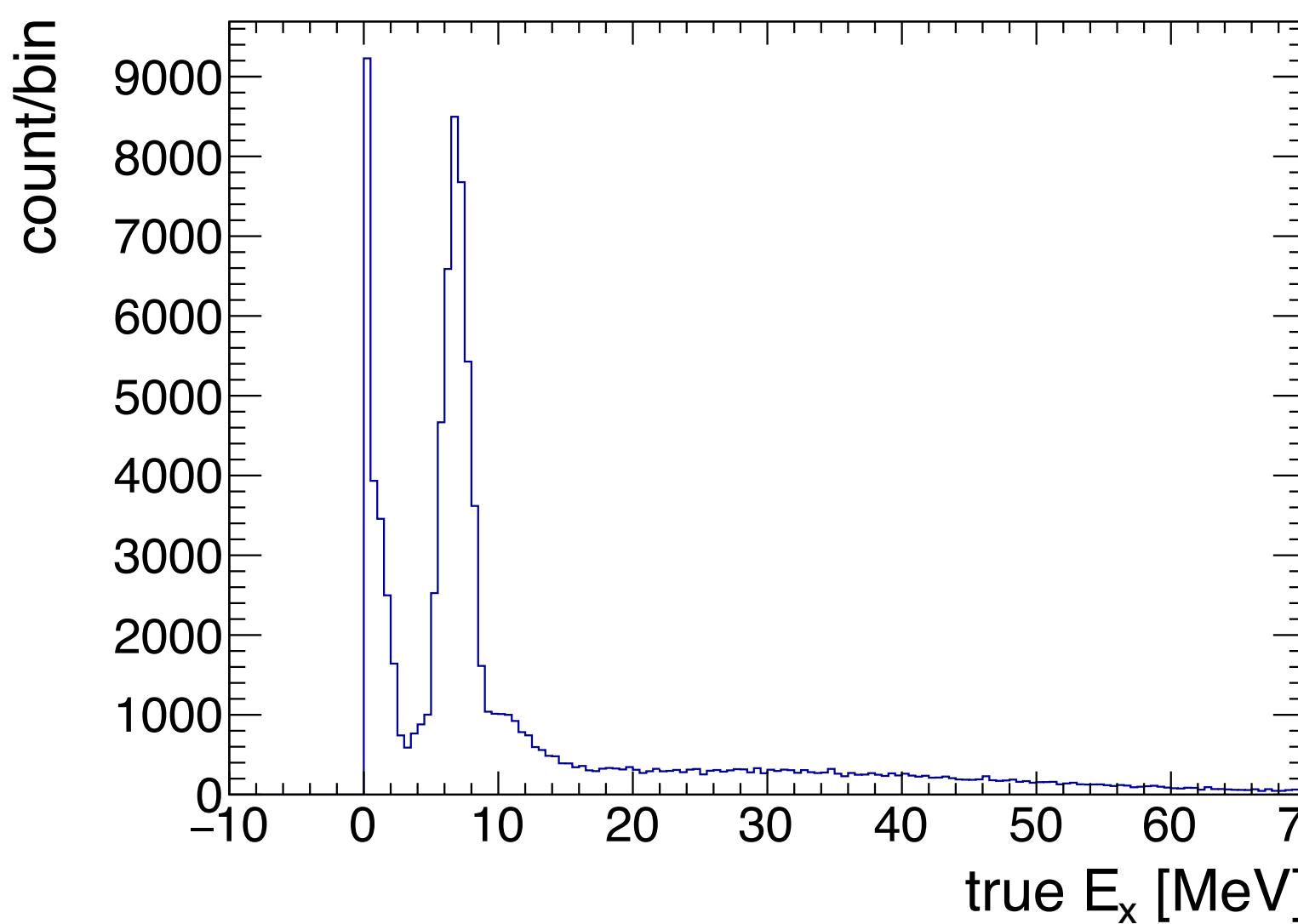


- 励起エネルギーの分解能に最も効いているのは、STRASSEの角度分解能であることがわかった 46/22

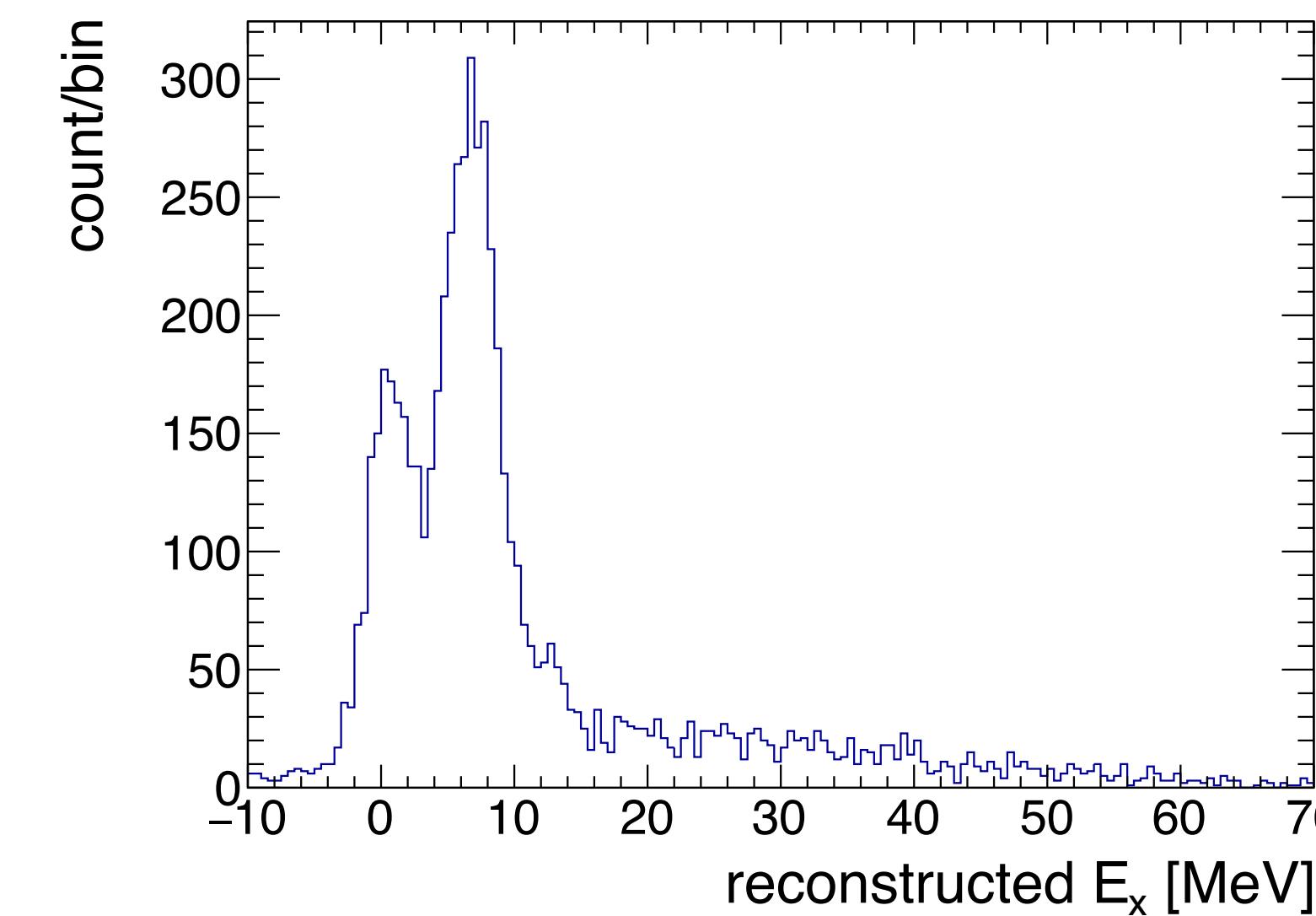
Continuous Input Distribution

- 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

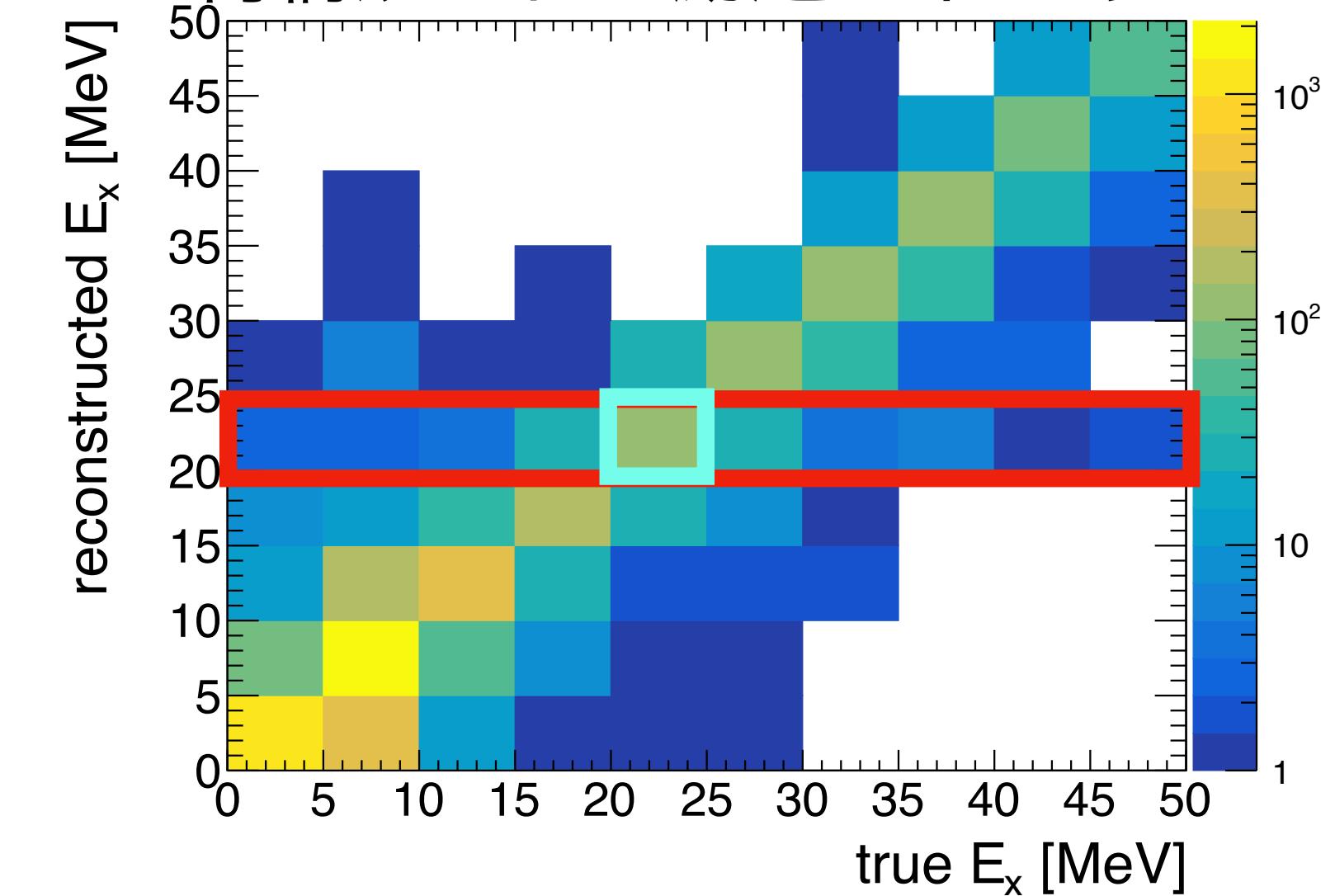


再構成された励起エネルギー



真の励起エネルギーと

再構成された励起エネルギー

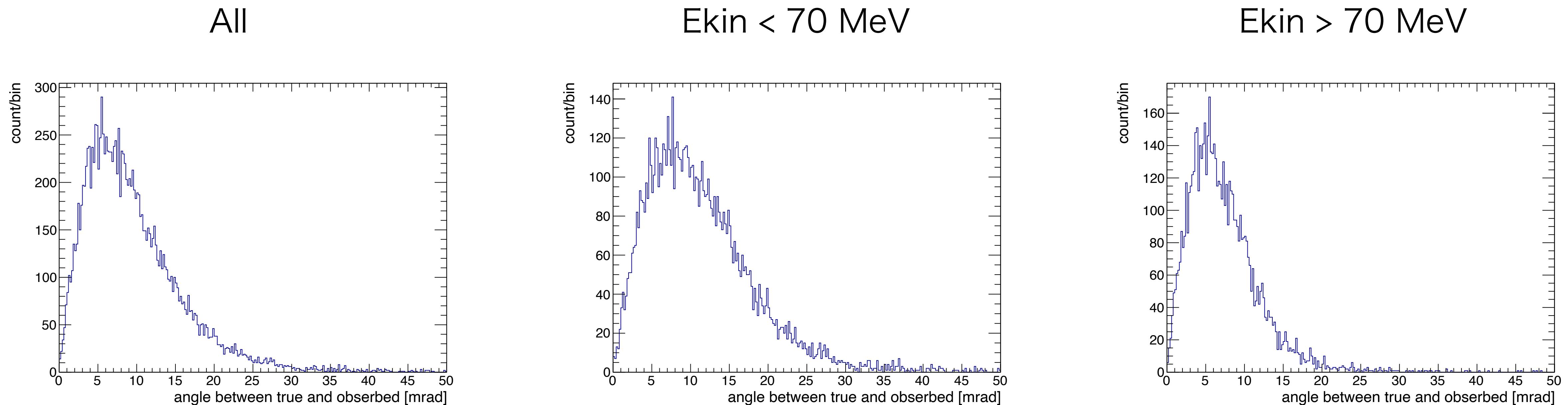


(Purity) := (水色枠のイベント数) / (赤枠のイベント数)
およそ60~70%

これらの混合を評価し補正することが重要

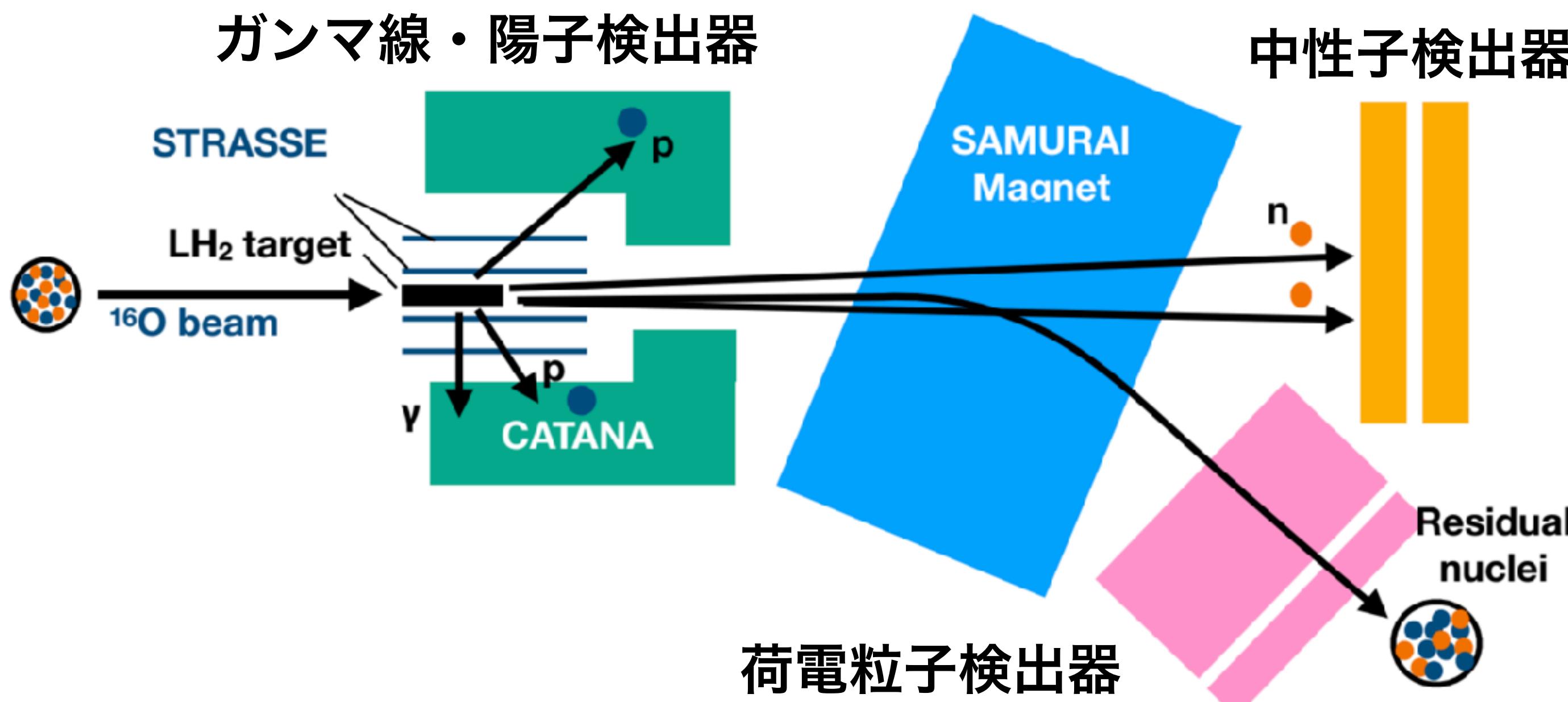
Excitation Energy Resolution

- 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



Branching Ratio

- ・ 残留核と中性子を検出することで、 ^{15}N の脱励起チャンネルを測定
 - e.g. ^{14}N が検出された → 一意に $^{14}\text{N} + \text{n}$
 - e.g. ^{12}C が検出された
 - $^{12}\text{C} + \text{t}$, $^{12}\text{C} + \text{d} + \text{n}$, $^{12}\text{C} + \text{p} + 2\text{n}$
 - 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}N の崩壊分岐比
($10.83 < E_x < 50 \text{ MeV}$)

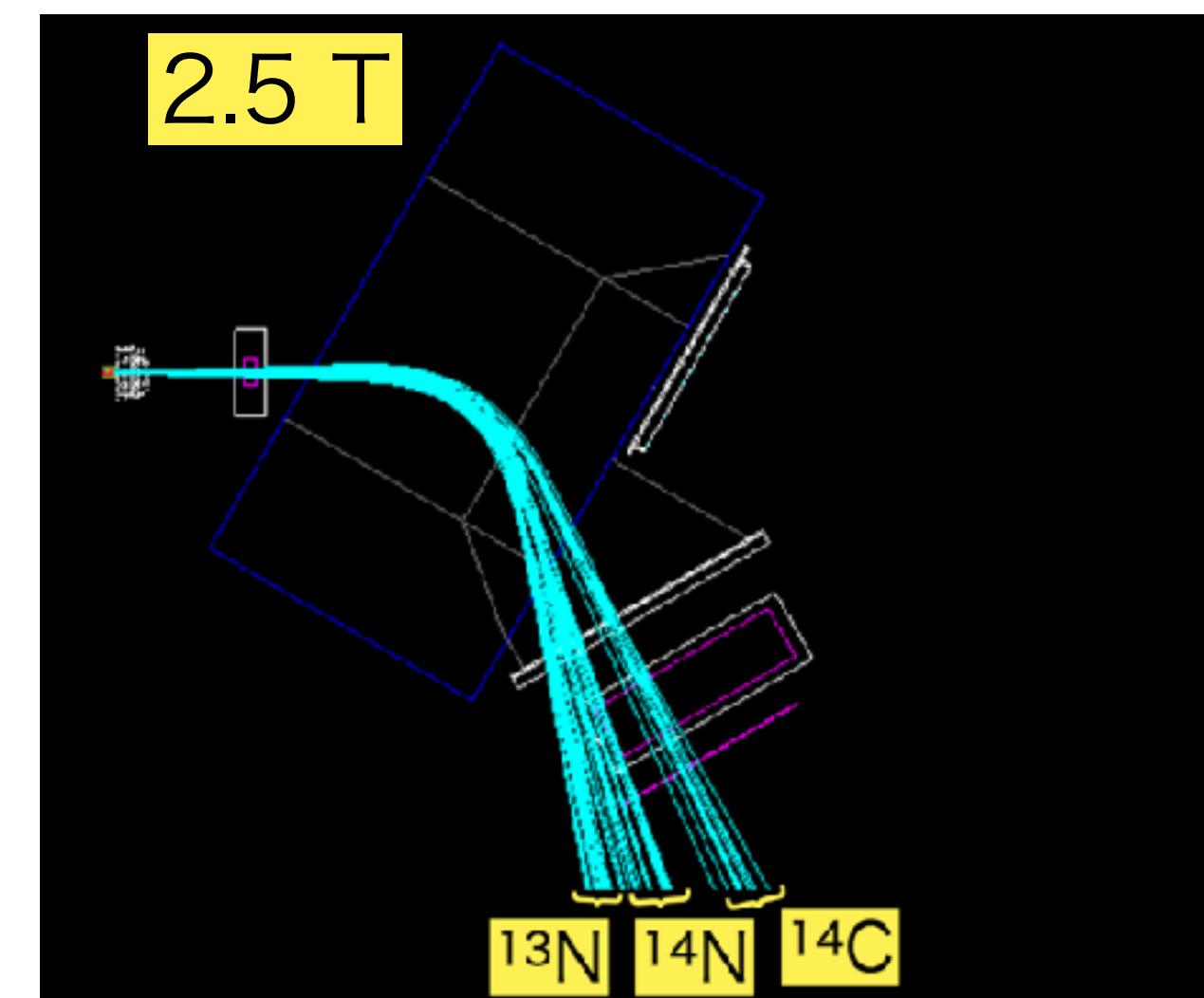
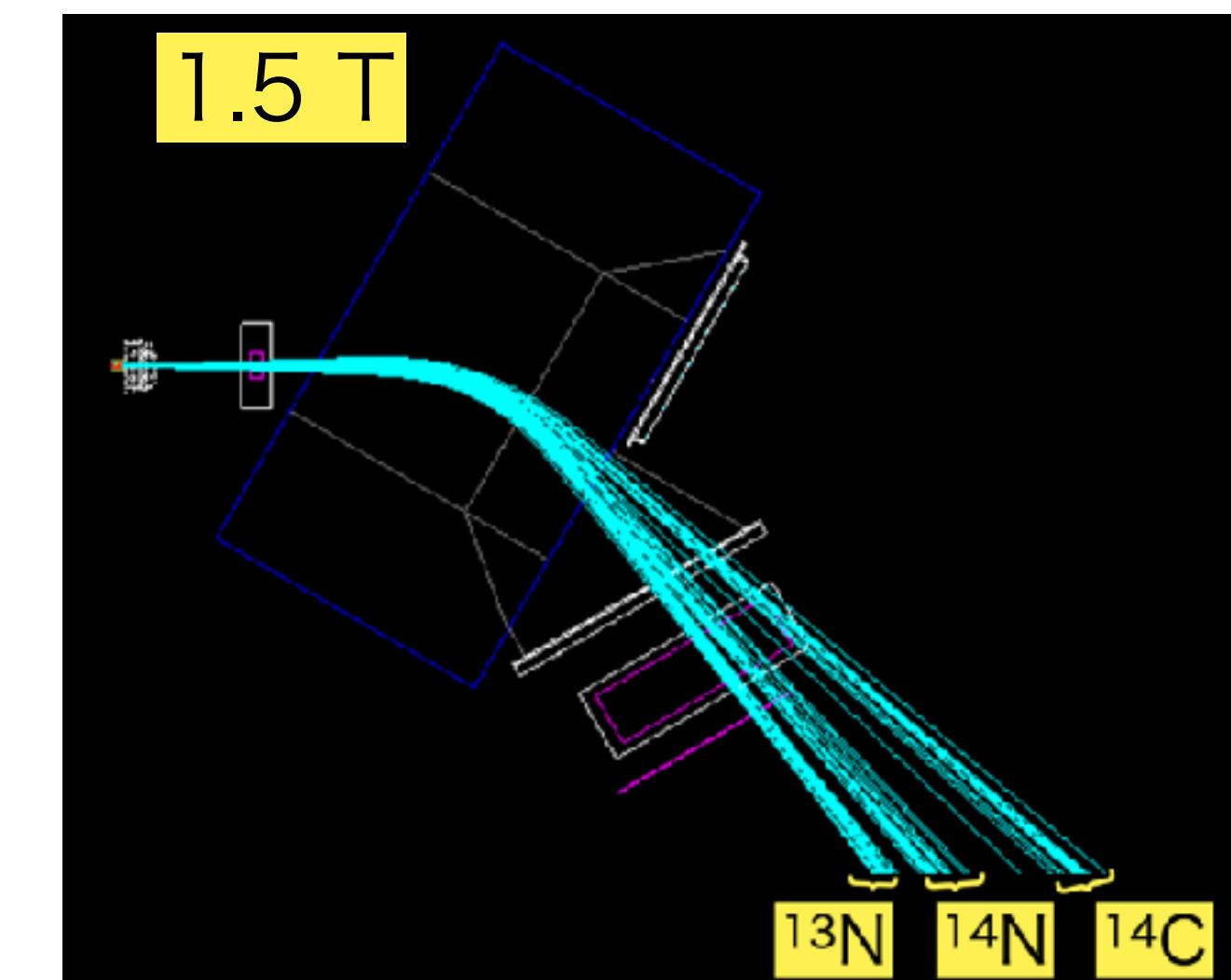
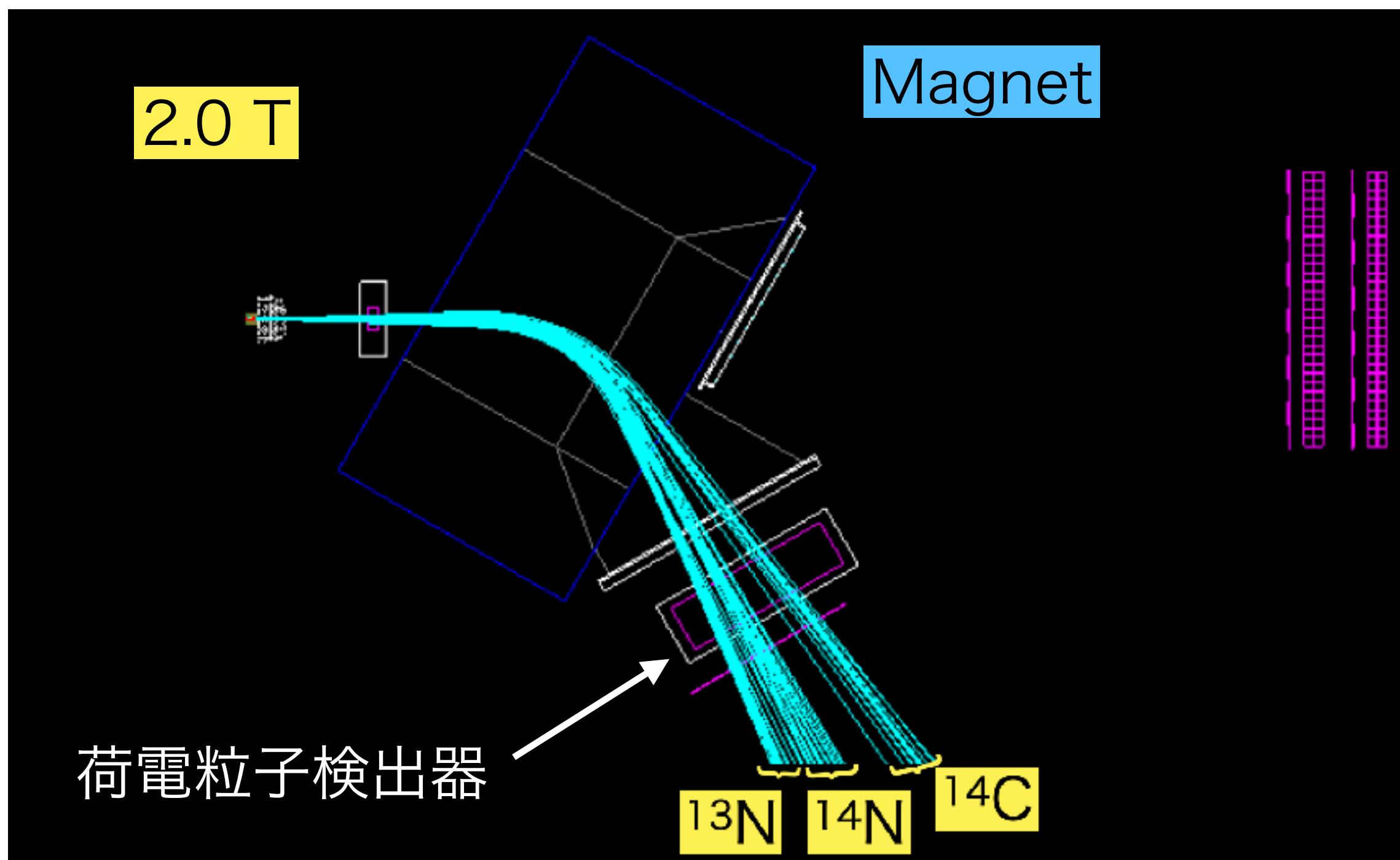
| Channel | Branching Ratio [%] |
|--|---------------------|
| $^{14}\text{N} + \text{n}$ | 38.1 |
| $^{13}\text{C} + \text{p} + \text{n}$ | 11.2 |
| $^{11}\text{B} + \alpha$ | 6.7 |
| $^{6}\text{Li} + 2\alpha + \text{n}$ | 6.4 |
| $^{12}\text{C} + \text{p} + 2\text{n}$ | 6.2 |
| $^{12}\text{C} + \text{d}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

Measurement of Residual Nuclei

- A/Zの大きい¹⁴C、典型的な¹⁴N、小さい¹³N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

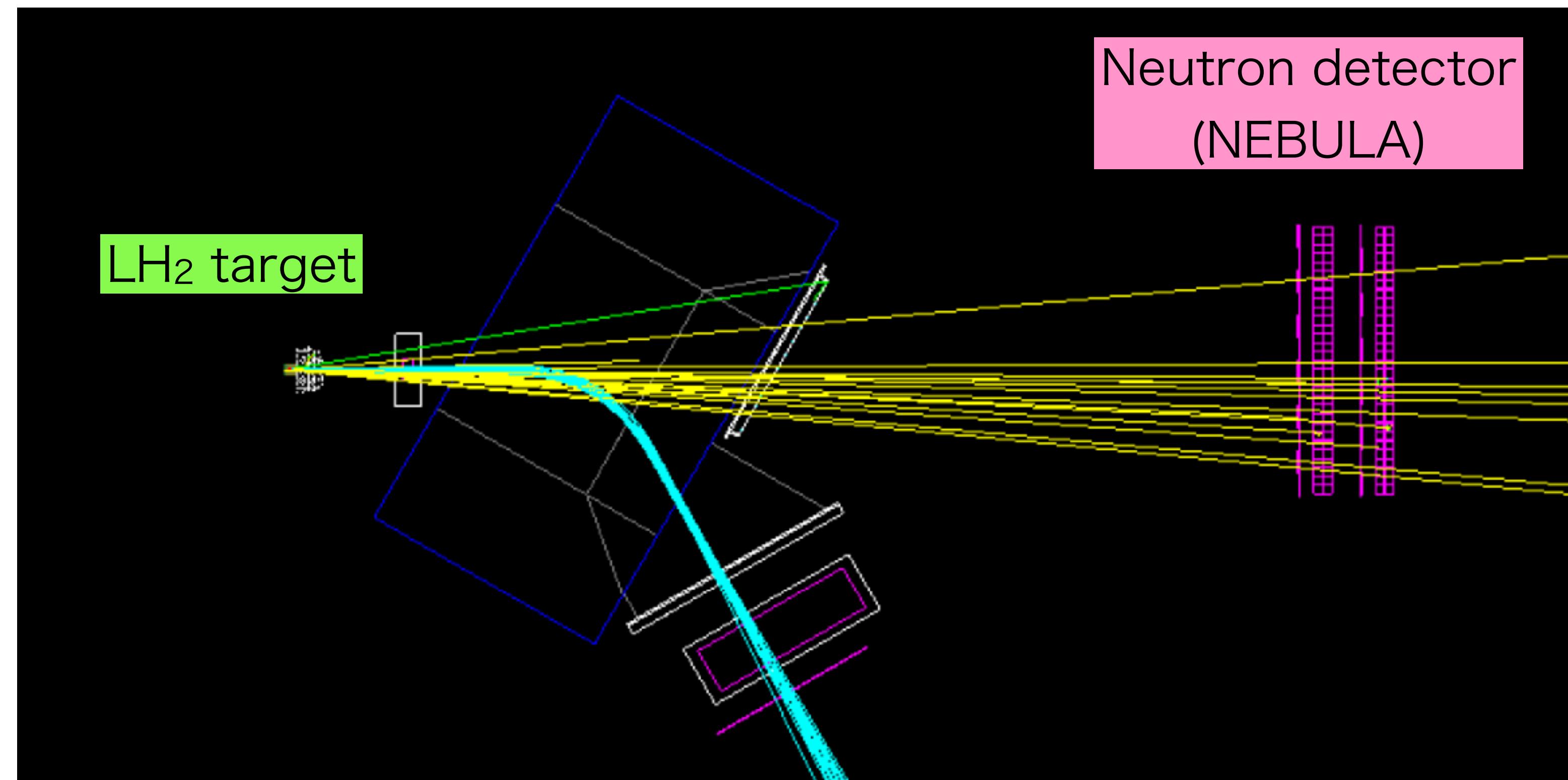
主な残留核と
A/Z

| Particles | A / Z |
|---|-------|
| ¹³ N | 13/7 |
| ¹⁴ N, ¹² C, ⁶ Li, α , d | 2 |
| ¹³ C | 13/6 |
| ¹¹ B | 2.2 |
| ¹⁴ C, ⁷ Li | 7/3 |



Measurement of Neutron

- $^{14}\text{N} + \text{n}$ 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 |

