

機械学習を用いた**NEWAGE**実験における 粒子飛跡再構成

島田 拓弥

身内賢太郎 東野聡 石浦宏尚 窪田諒

神戸大学粒子物理研究室 **NEWAGE**

日本物理学会 第76回年次大会

INDEX

- ◎ 方向に感度を持った暗黒物質直接探索実験 **NEWAGE**
- ◎ **NEWAGE**への機械学習の導入
- ◎ 機械学習による飛跡の方向再構成
- ◎ 機械学習による飛跡の前後判定
- ◎ まとめ

方向に感度を持った暗黒物質探索実験

NEWAGE

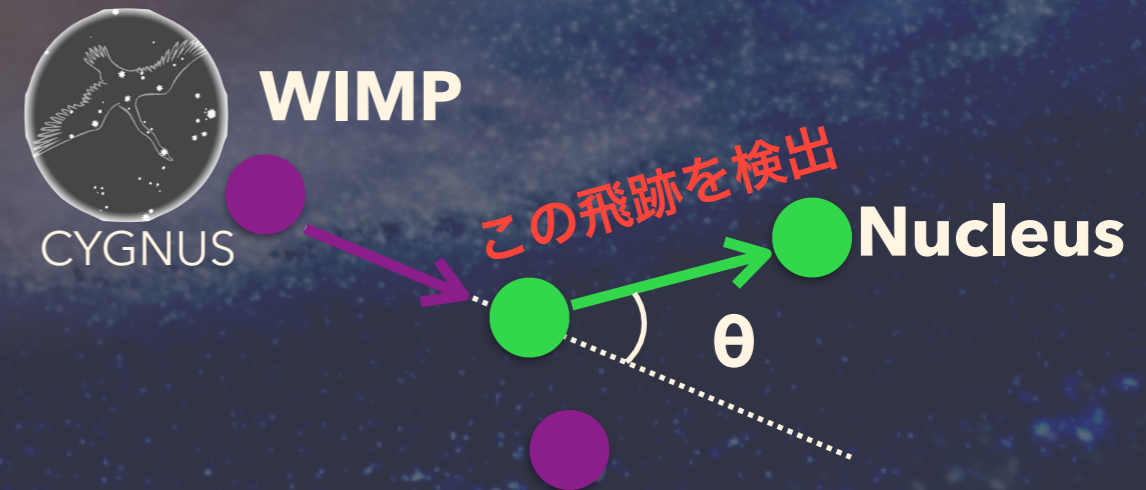
NEWAGE (NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

◎ 暗黒物質

- ▶ 銀河を覆っている質量を持った様々な宇宙観測にて予測されている物質

◎ 暗黒物質候補

- ▶ **WIMP** (Weekly Interaction Massive Particle)
- ▶ etc.

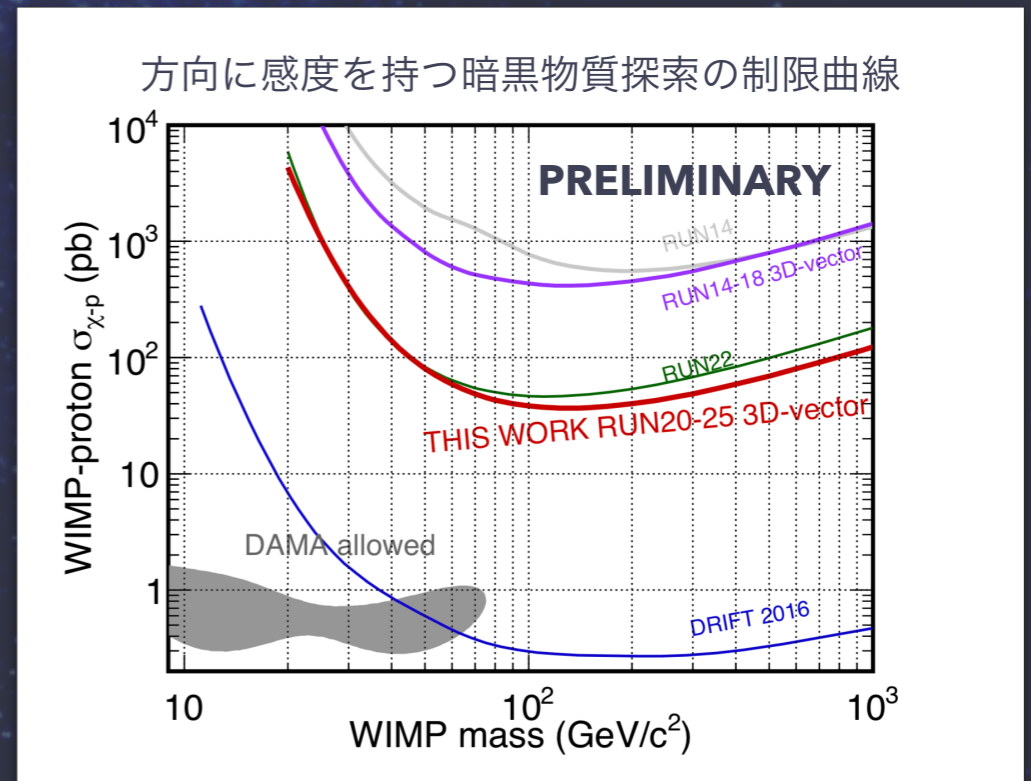


◎ 暗黒物質の特徴的な信号

- ▶ 季節変動 (DAMA/LIBRA, COSINE, etc.)
- ▶ 到来方向 (**NEWAGE**, DRIFT, DM-TPC, etc.)

◎ NEWAGE

- ▶ 方向に感度を持つ**3次元飛跡検出器**
 - ▶ **μ-PIC**を用いたガス検出器
- ▶ 最新結果 (2021年 島田 修士論文 →)
- ▶ DAMA領域の探索に至っていない



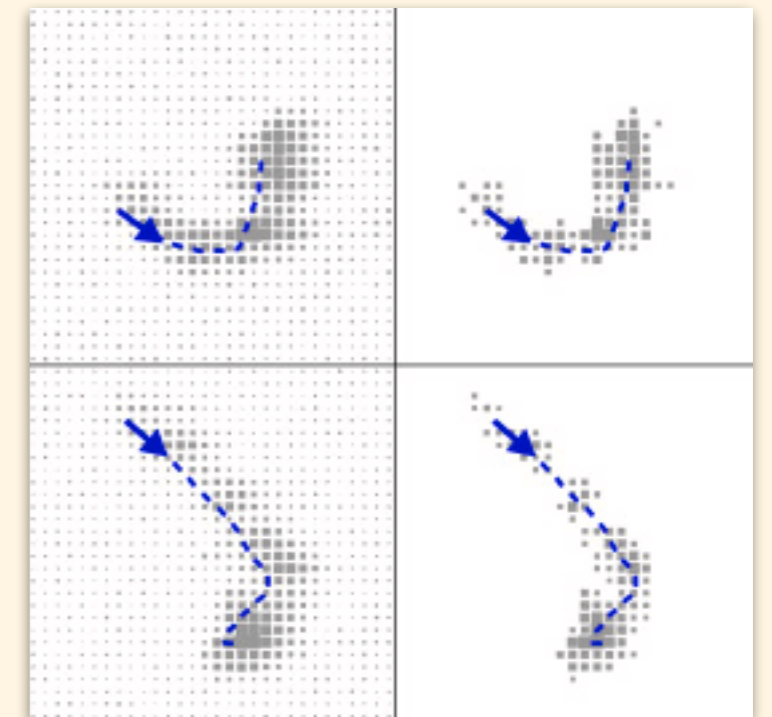
NEWAGEへの機械学習の導入

機械学習の物理学への応用

- 近年、機械学習が発展・流行している
 - ▶ クラウドコンピューティング・ビッグデータ
- 画像認識も可能！
 - ▶ 畳み込みニューラルネットワーク (CNN)
 - ▶ 手書き数字 (MNIST) の識別正答率 **99 %** 以上
- 物理学への応用
 - ▶ CNNを用いたガス検出器における**電子反跳方向再構成**
(下図) NIM A 942(2019) 162389
 - ▶ 2020 秋期 JPS 京都大学 池田智法氏 (電子反跳方向再構成)
「SMILE55 : 機械学習によるETCC検出器の点源分解能の改善」
- **NEWAGE**でもやろう (“**新時代**”の波に乗ろう！)



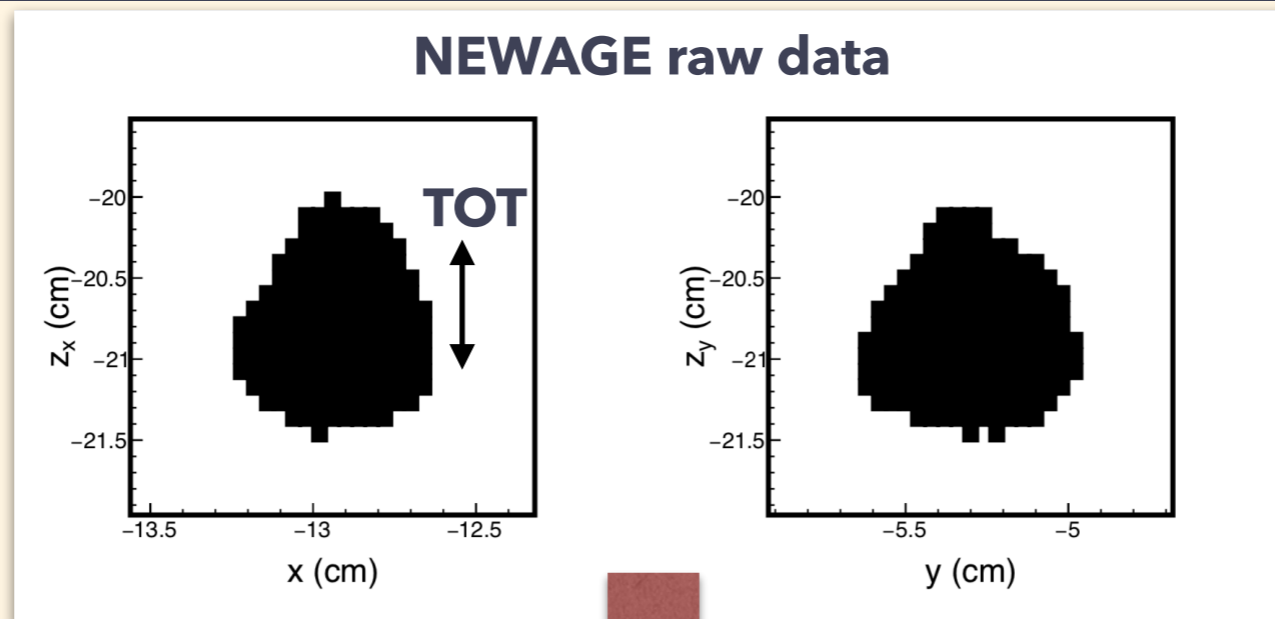
MNISTデータ



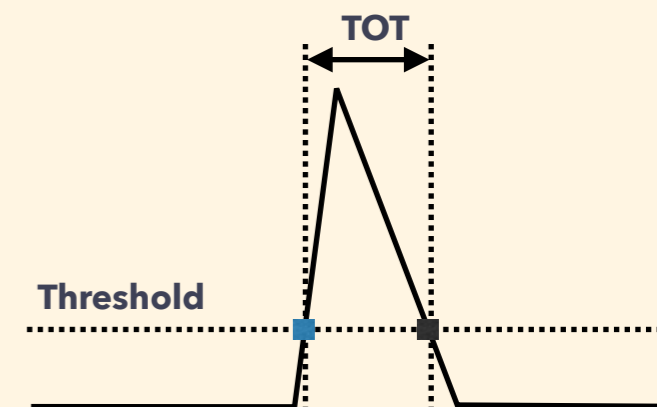
電子反跳方向再構成の様子

NIM A 942(2019) 162389

NEWAGEへの機械学習の導入



ストリップの波形



TOTの定義

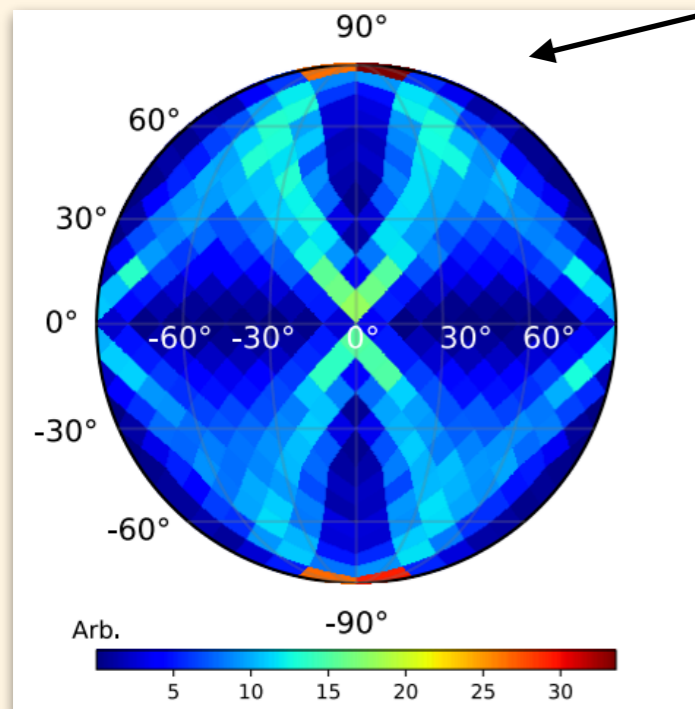
Deep Learning (CNN)

方向再構成

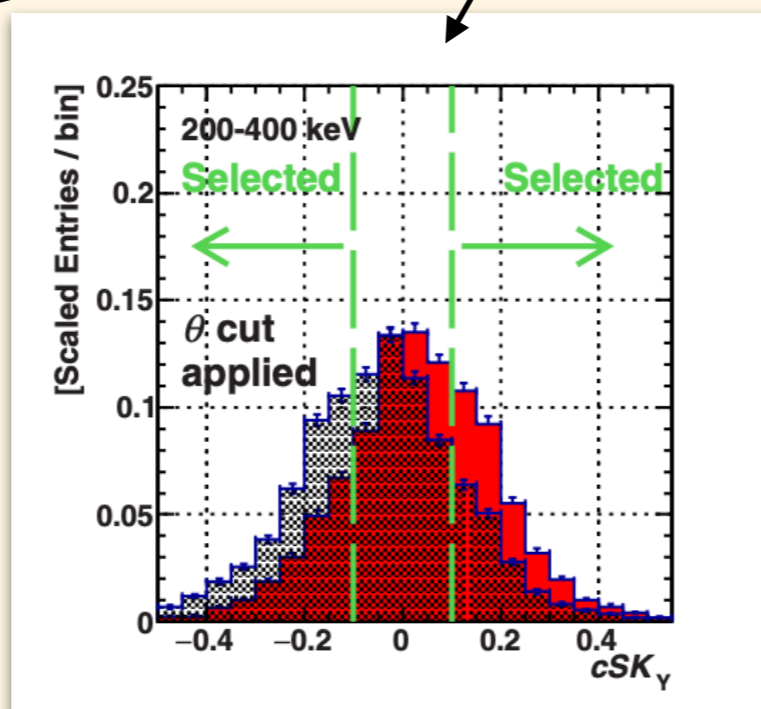
前後判定

粒子識別

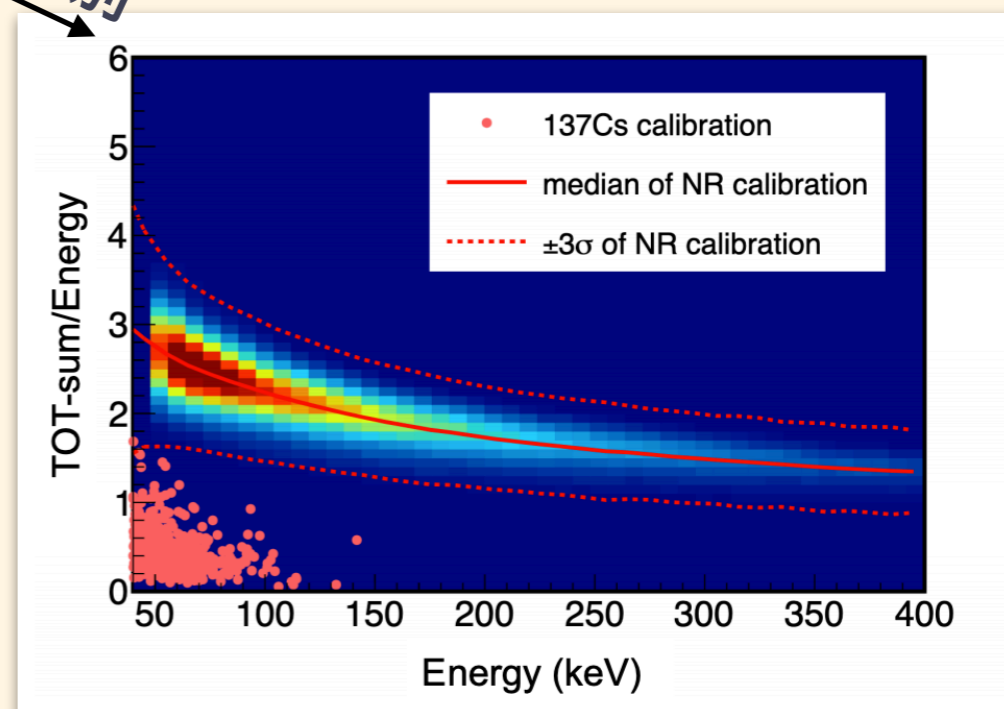
arXiv:2101.09921



arXiv:2101.09921



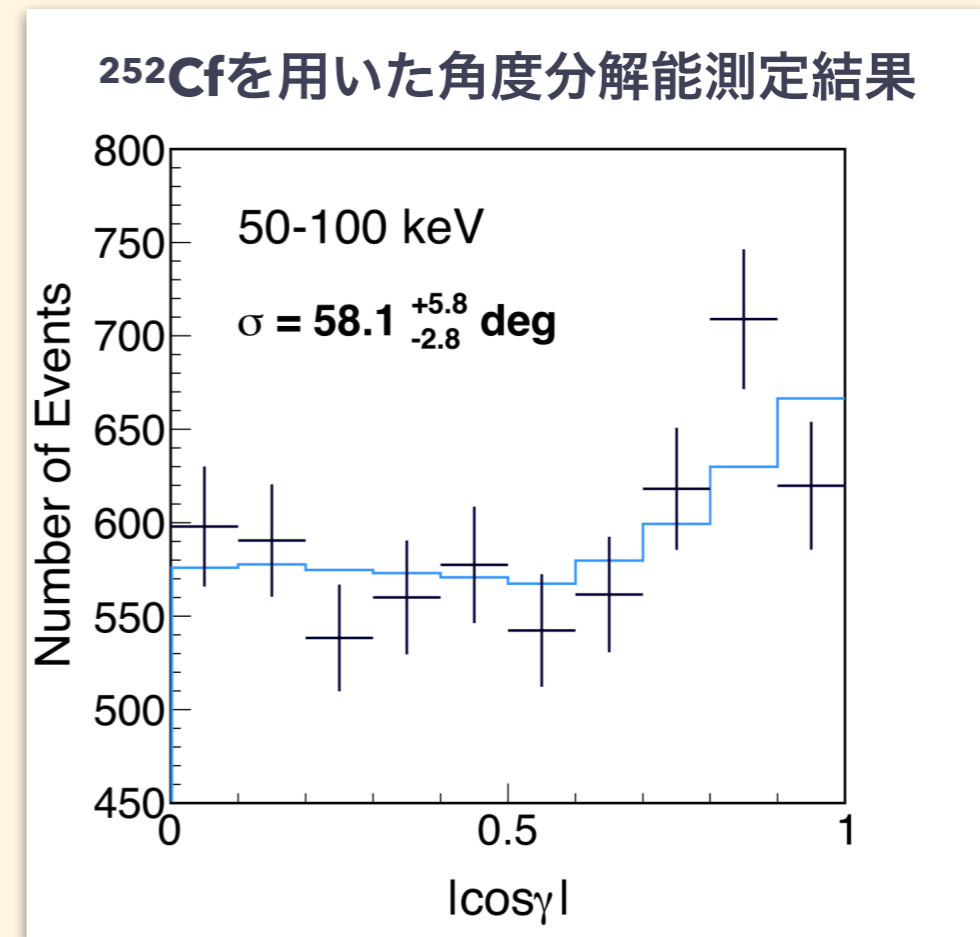
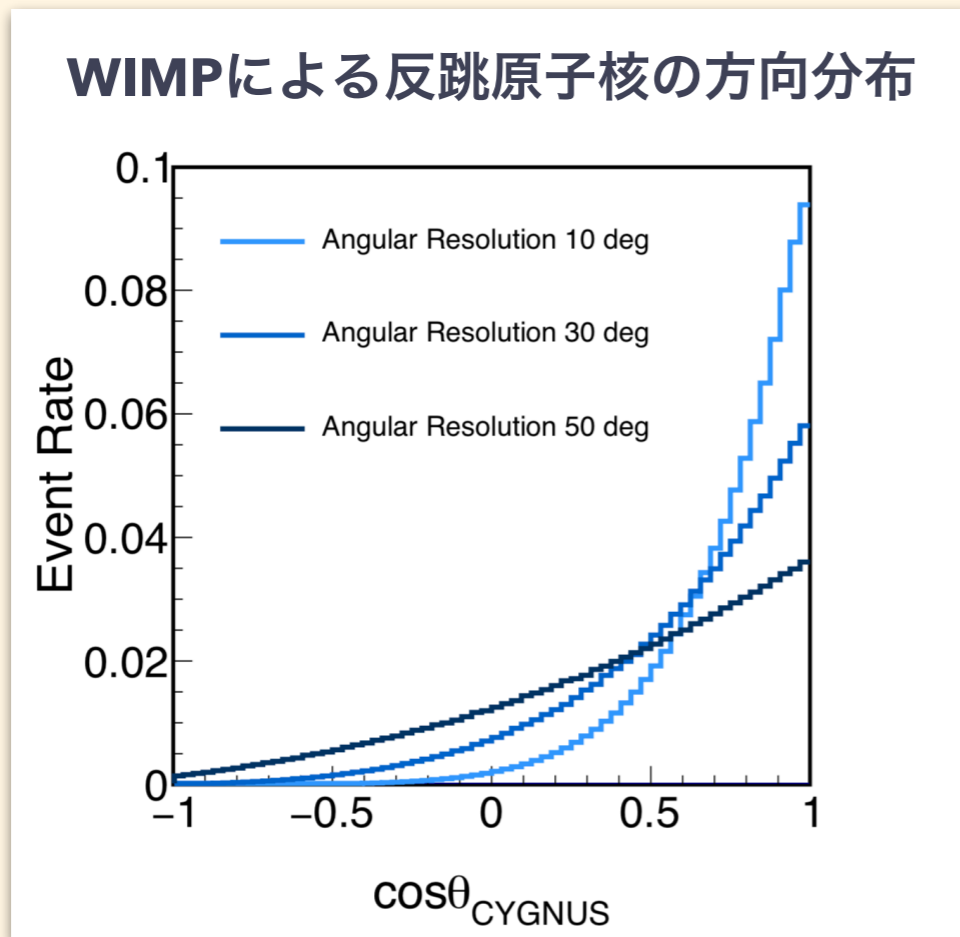
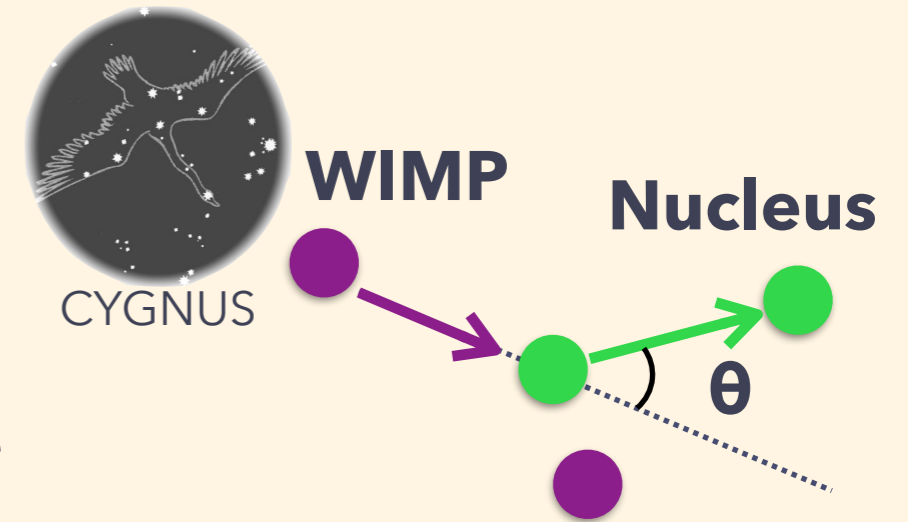
PTEP 2020 113F01



機械学習による 飛跡の方向再構成

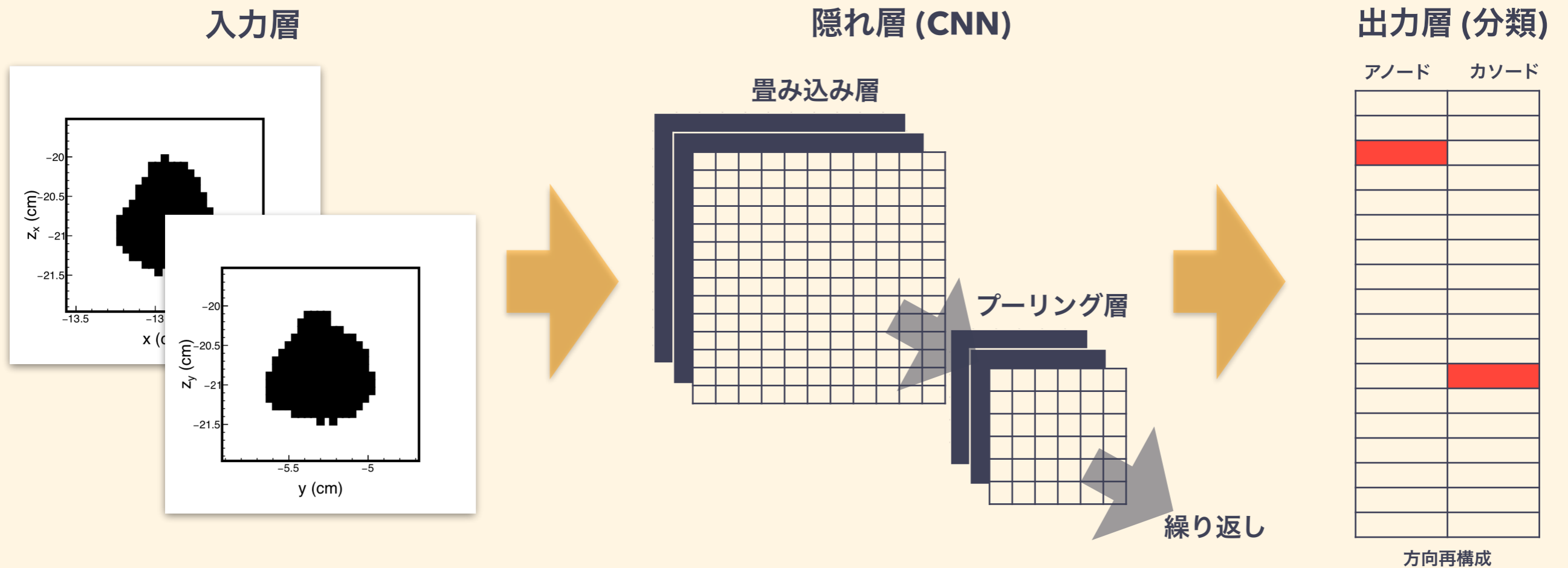
飛跡の方向再構成

- 方向に感度を持つ暗黒物質探索では**角度分解能**が重要なパラメータである
 - 反跳方向分布の**非対称性**が大きくなる (左図)
- 現在の解析手法ではほとんど分解能を持っていない
 - **58.1** ° @50-100keV (右図、2021年島田修士論文)



電子反跳ではできた → 原子核反跳の方向も機械学習で推定可能・改善するはず

学習の流れ



◎ 入力層

- ▶ シミュレーションデータ
 - 検出器応答考慮
- ▶ 入力画像
 - アノード+カソード
 - サイズ64×64×2

◎ 隠れ層 (CNN)

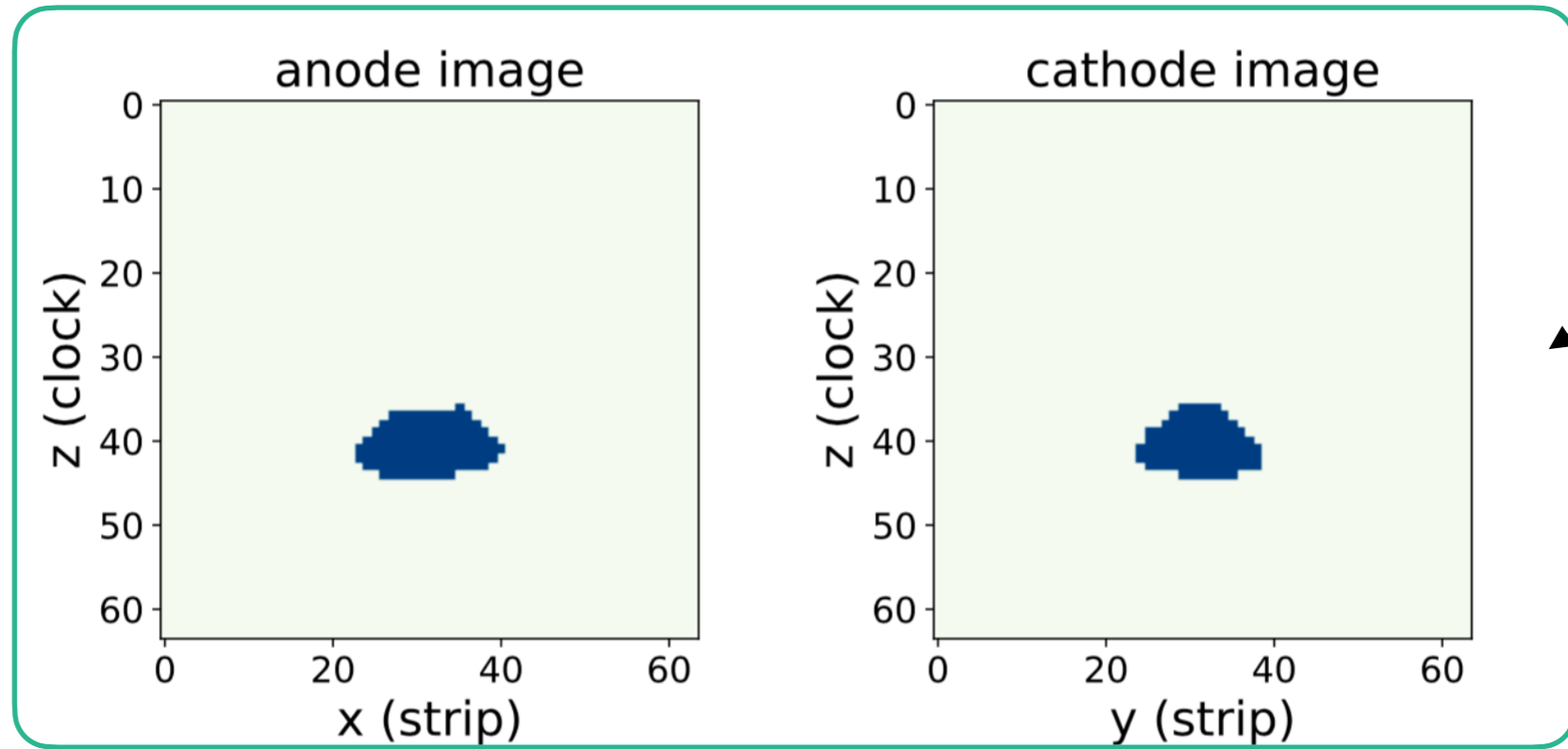
- ▶ 畳み込みニューラルネットワーク実装部
- ▶ (畳み込み層+プーリング層) × 4 + Dropout層

◎ 出力層

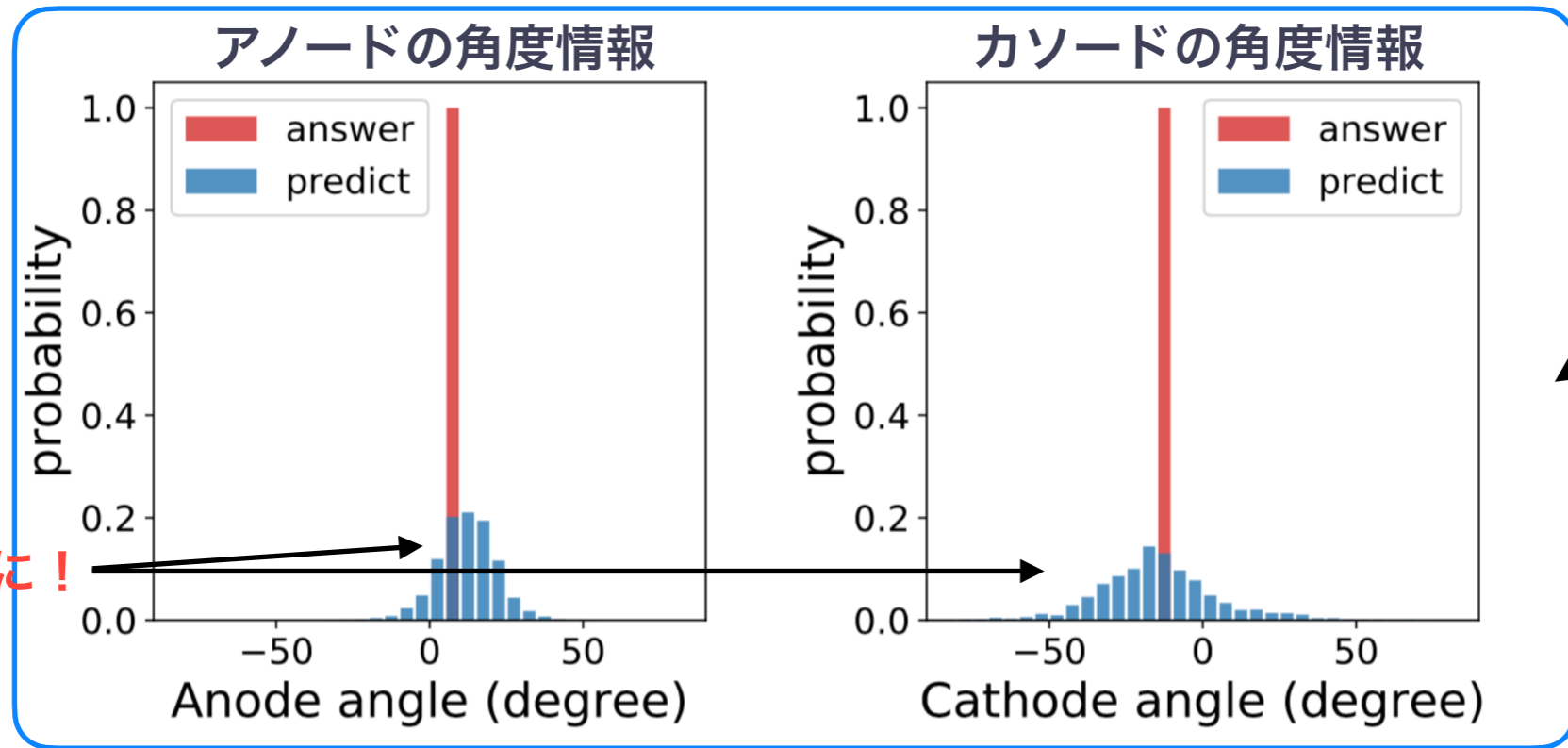
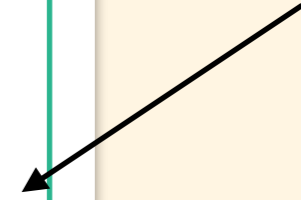
- ▶ 分類問題
- ▶ 出力領域: $-90^\circ \sim 90^\circ$
- ▶ 分割数: 5° ずつ **36分割**
- ▶ アノード+カソード

機械学習による再構成の様子

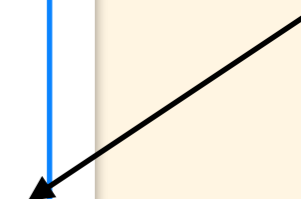
400 keV F原子核反跳



INPUT情報
(シミュレーション)

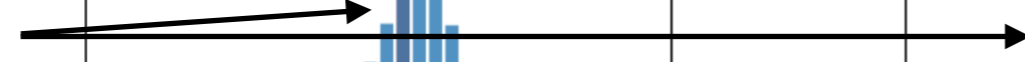


OUTPUT情報



赤 : 真値
青 : 予測値

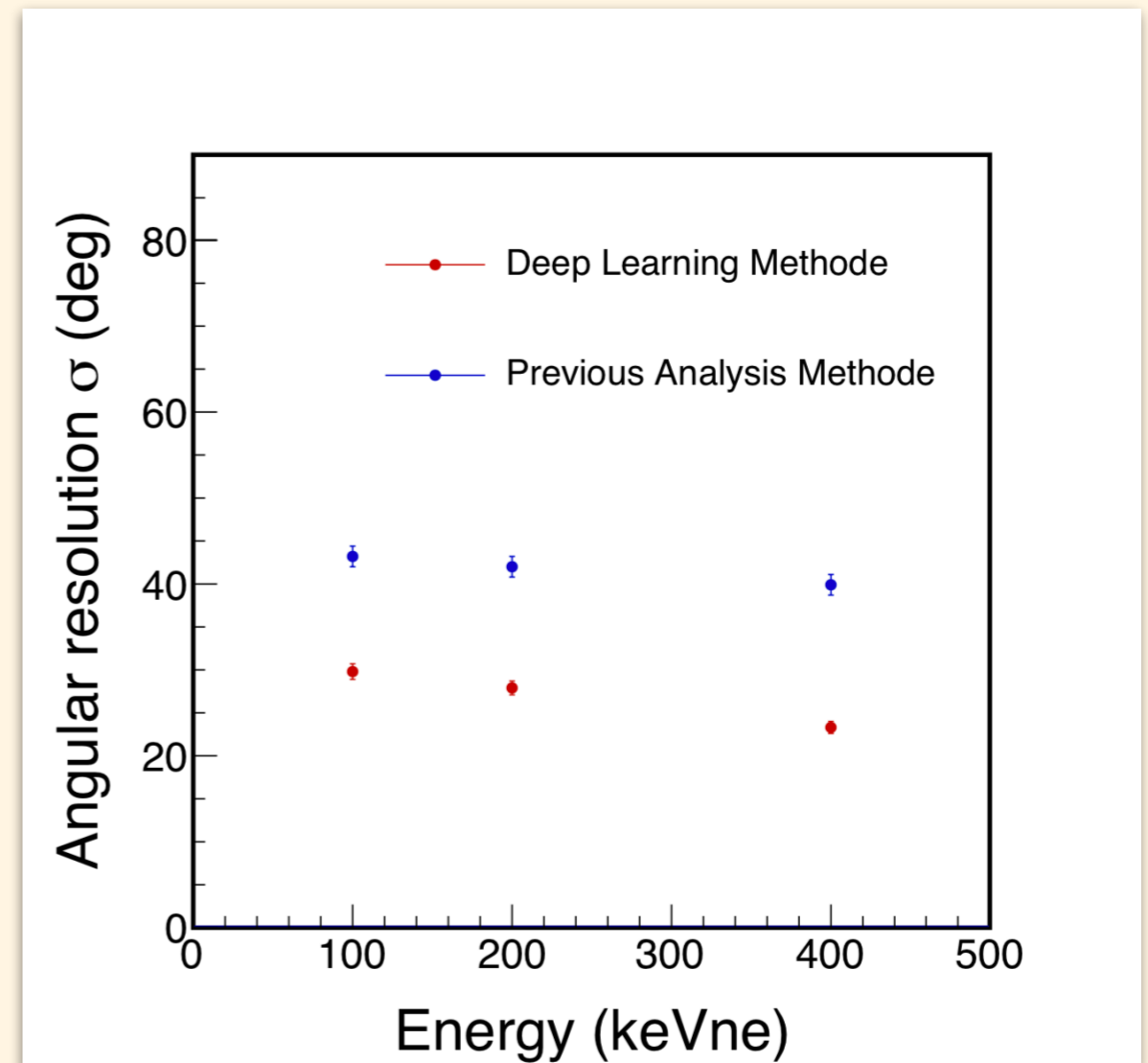
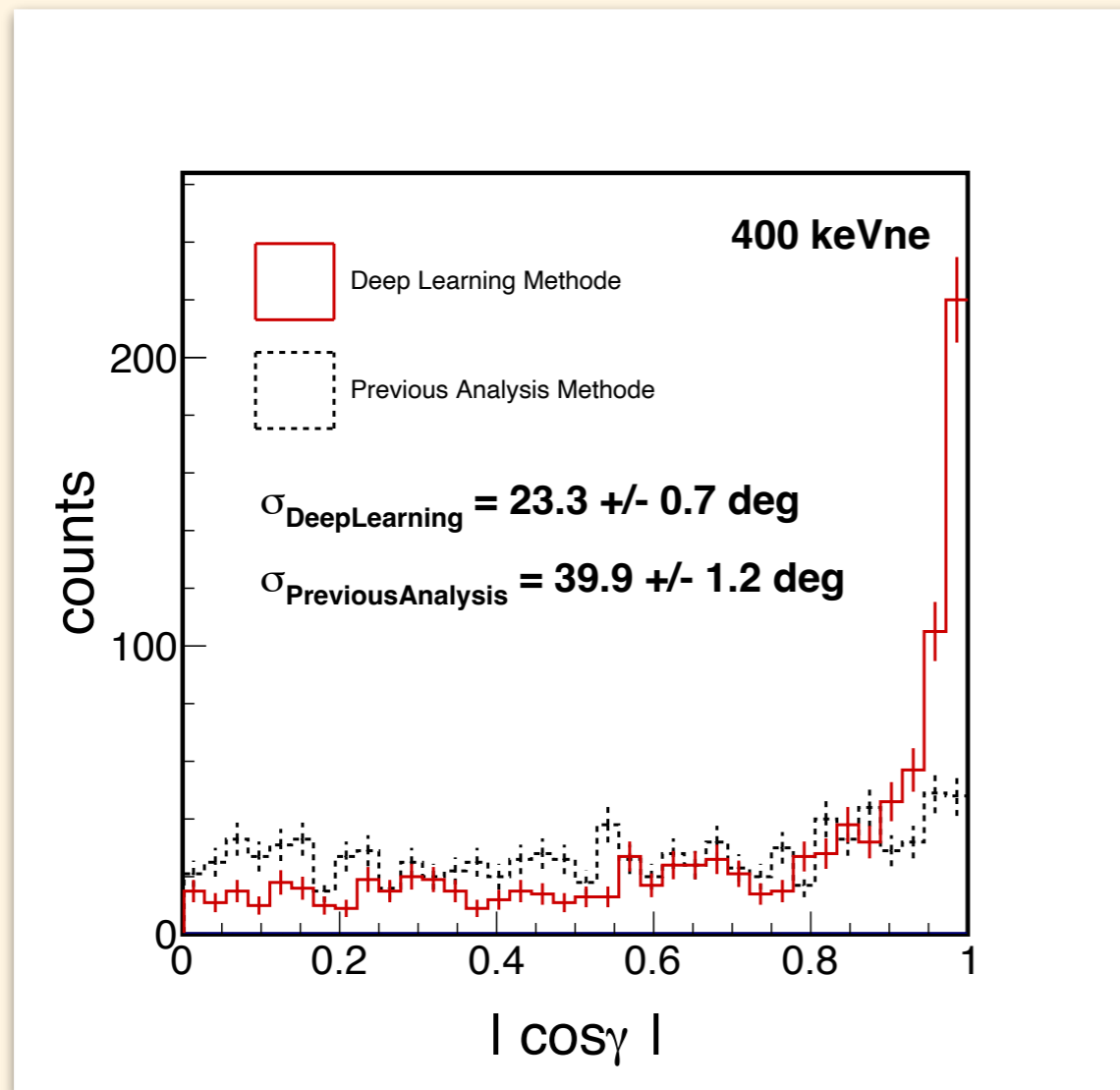
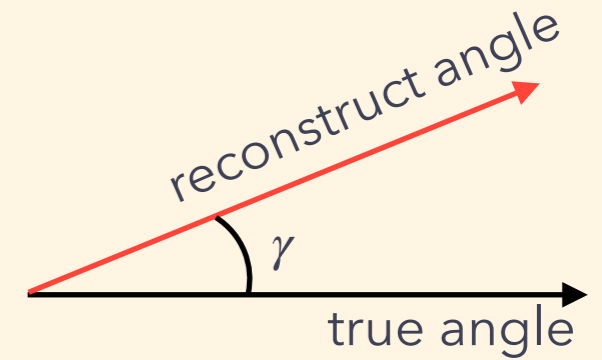
真値付近が高確率に！



角度分解能の評価

● 真値と再構成された方向の角度 γ (右図定義)

- ▶ 下図: $|\cos \gamma|$ 分布
- ▶ 機械学習: 赤線
- ▶ 従来手法: 黒点線



従来手法に比べて、角度分解能を**1.5倍改善**

機械学習による飛跡の前後判定

飛跡の前後判定 -Headtail-

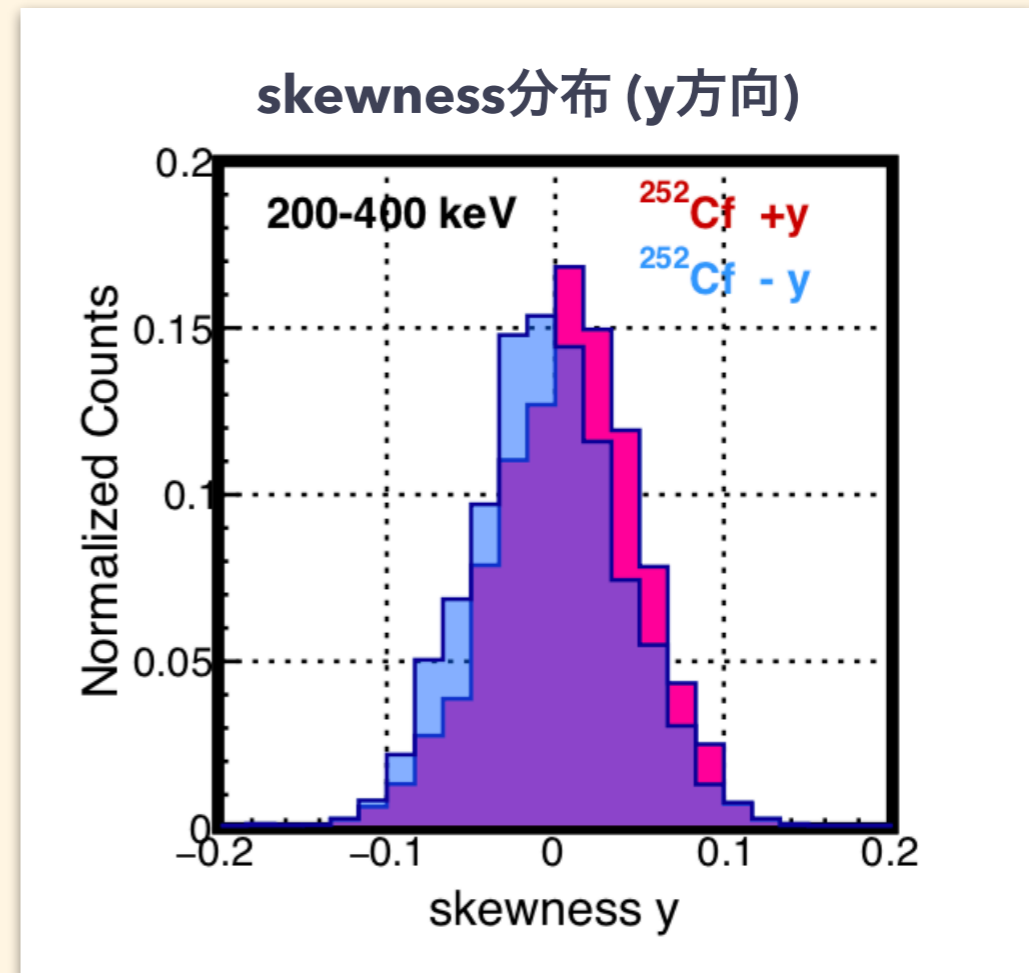
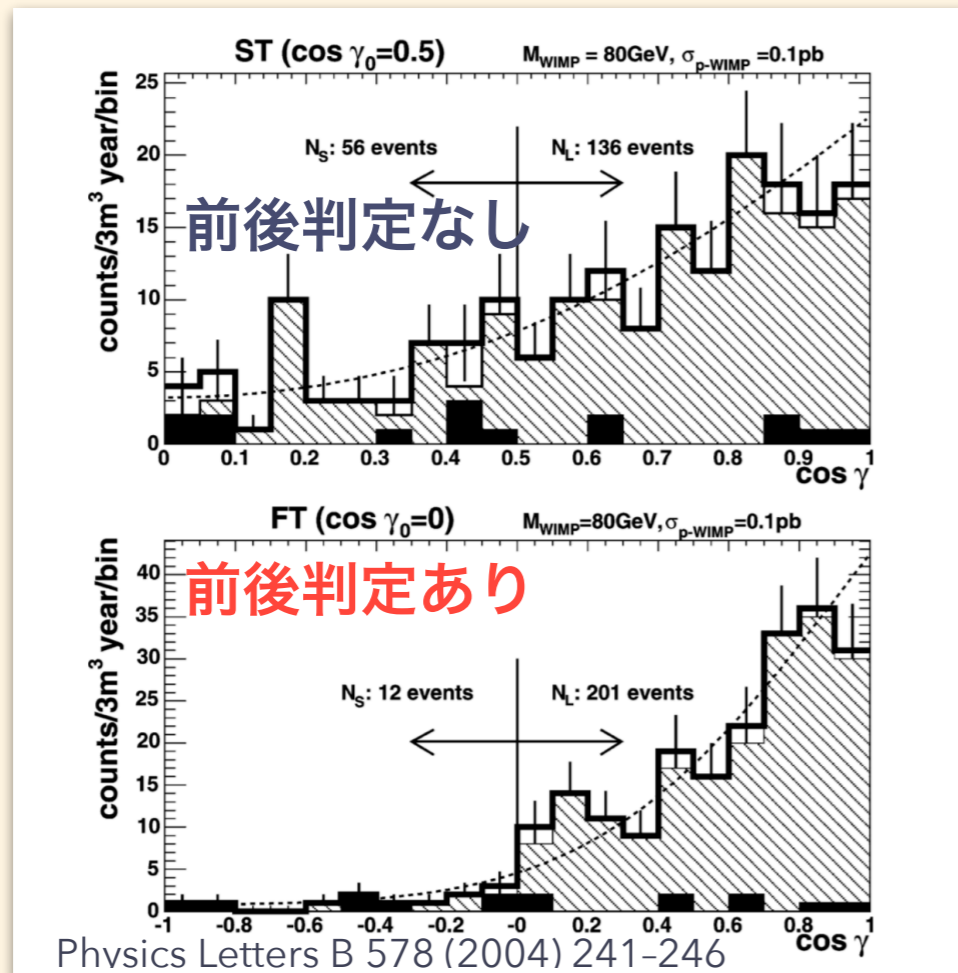
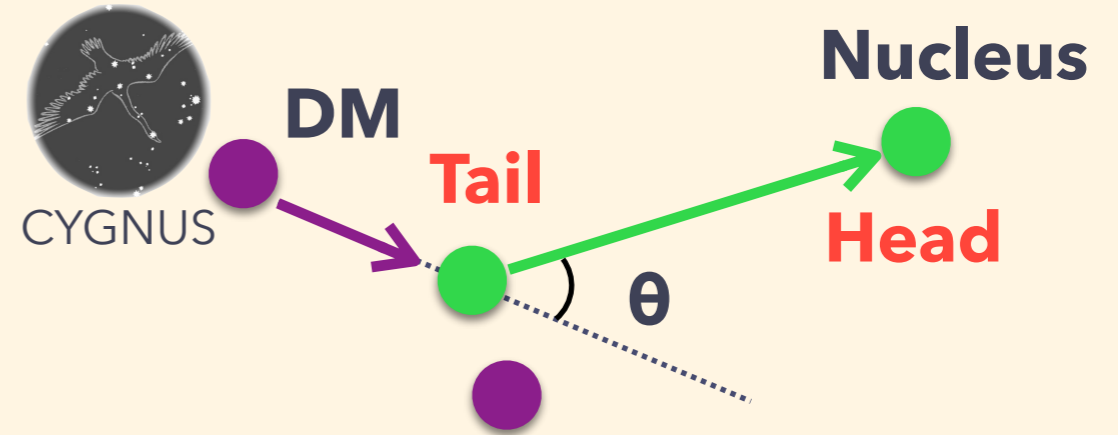
- 飛跡の前後判定 (定義→)

- ▶ 方向分布の**非対称性**が増大 (右下図)

- 従来の手法 : 分離能力が小さい

- ▶ skewness (1次元情報)

- ▶ **53.6 %** @200-400 keV (2021年 島田修士論文)



機械学習を使うと**3次元情報**を用いて判定可能であり、判定能力が**改善**するはず！

機械学習の流れ (前後判定)

◎ 入力 (実験データ)

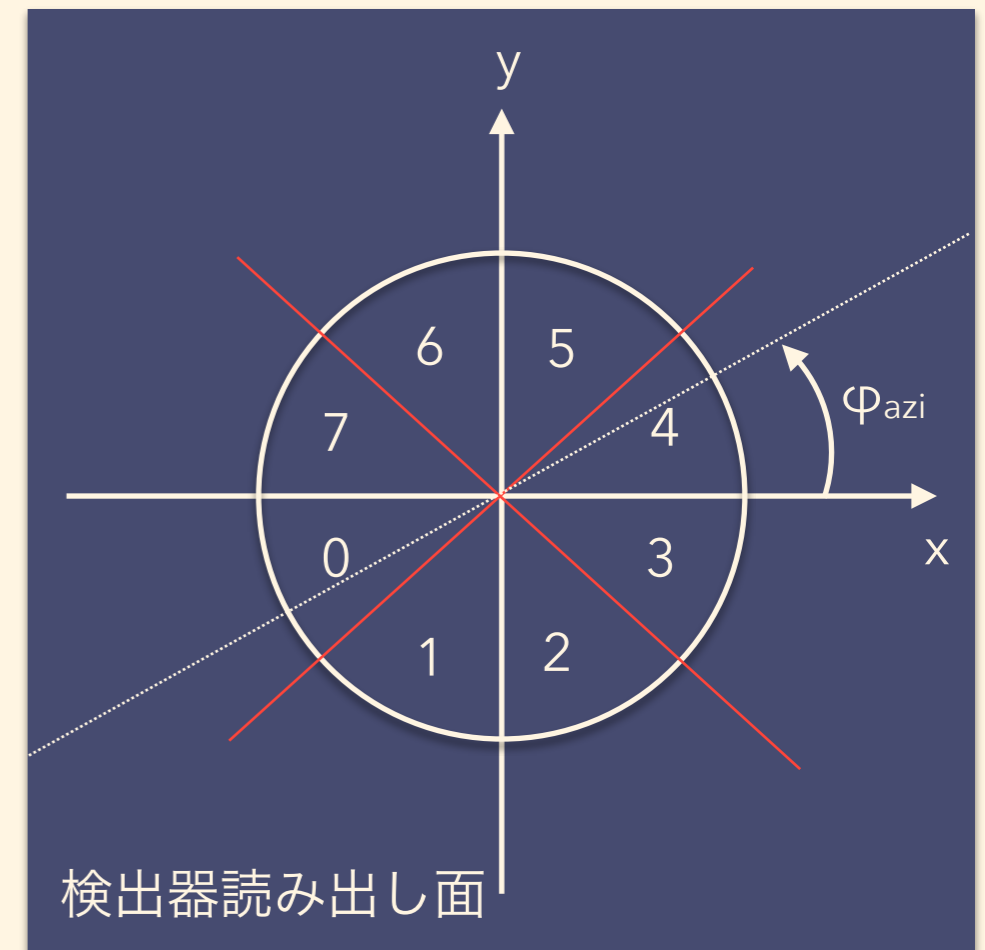
- ▶ ^{252}Cf 線源による原子核反跳事象データ
- ▶ $\pm x$ 、 $\pm y$ の4方向からの照射データ
 - ▶ 学習データ 4000ev \times 4
 - ▶ 検証データ 1000ev \times 4

◎ 隠れ層 (CNN)

- ▶ 方向再構成と同じ層
- ▶ 教育回数 : 1000 epoch

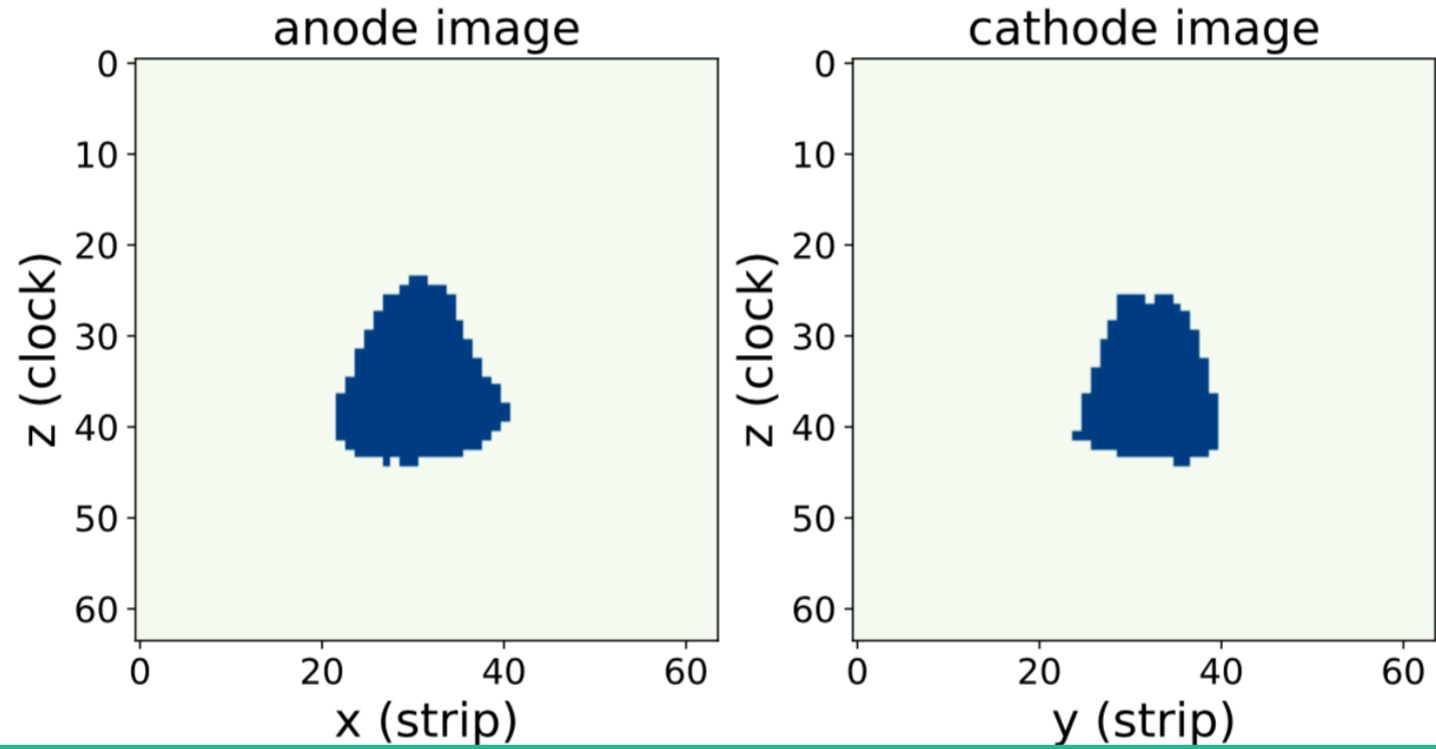
◎ 出力

- ▶ **前後判定込み**の検出器座標系の方位角 φ_{azi} を再構成
- ▶ 360° を 45° ずつ、8分割 \rightarrow

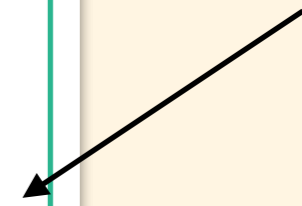


機械学習による再構成の様子

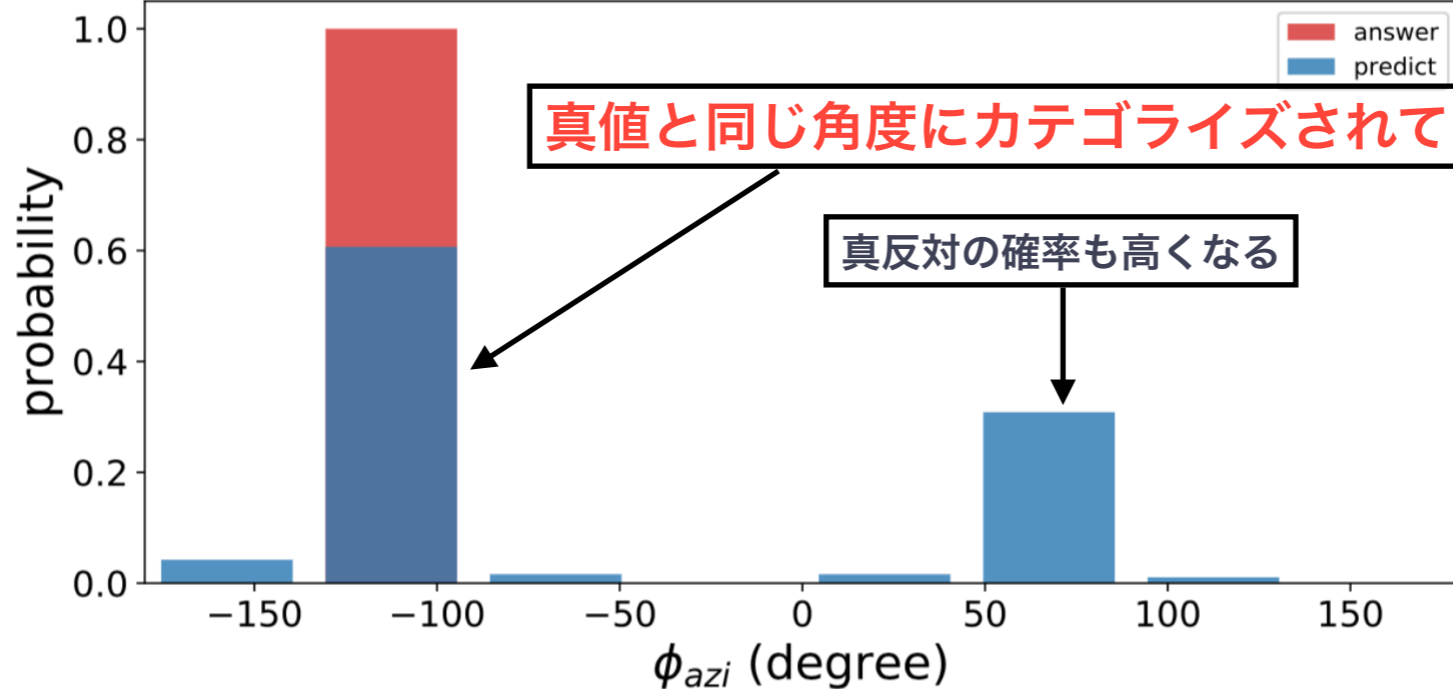
300 keV 原子核反跳事象



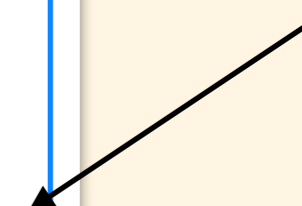
INPUT情報
(実験データ)



赤：真値
青：予測値

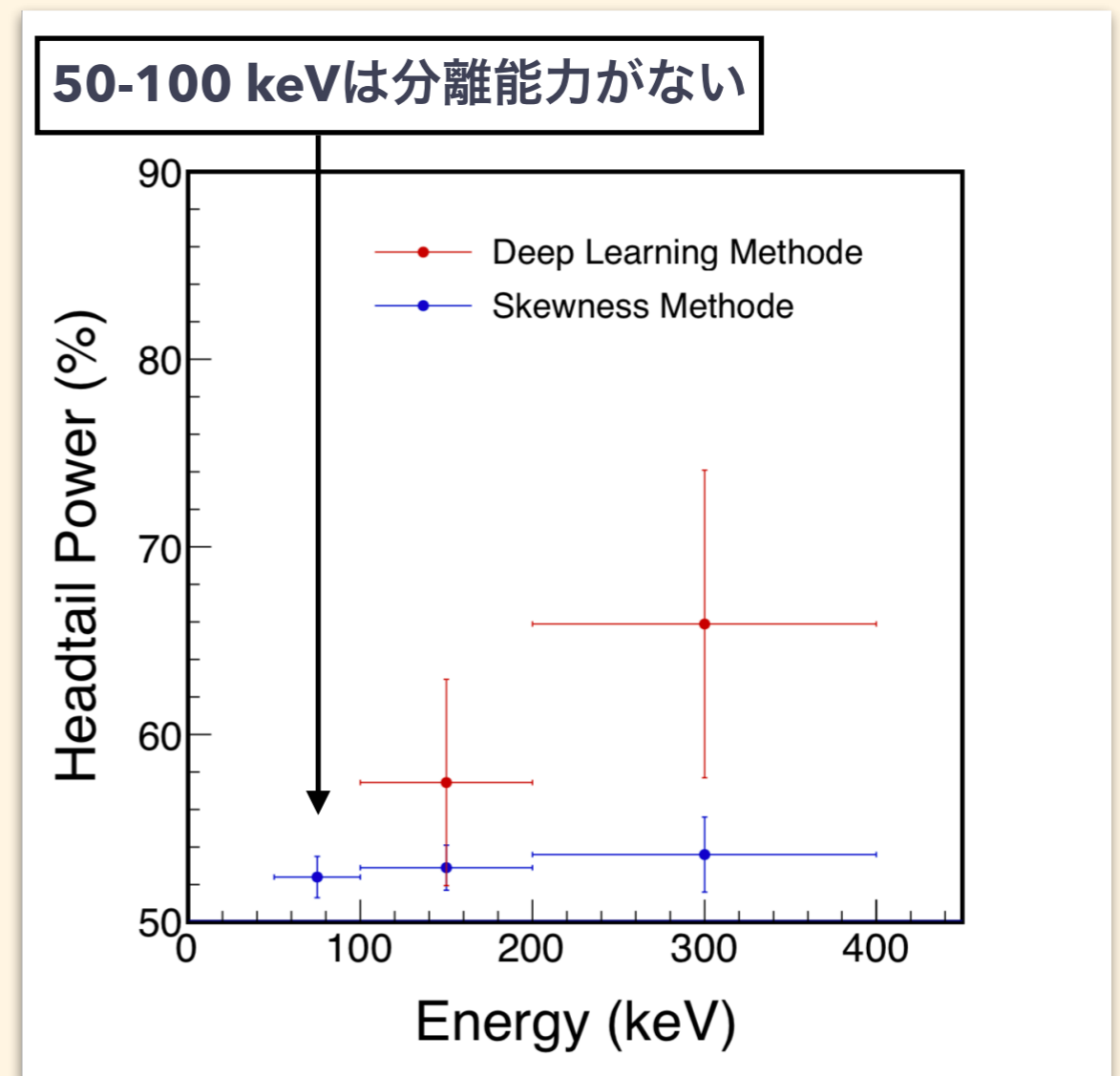
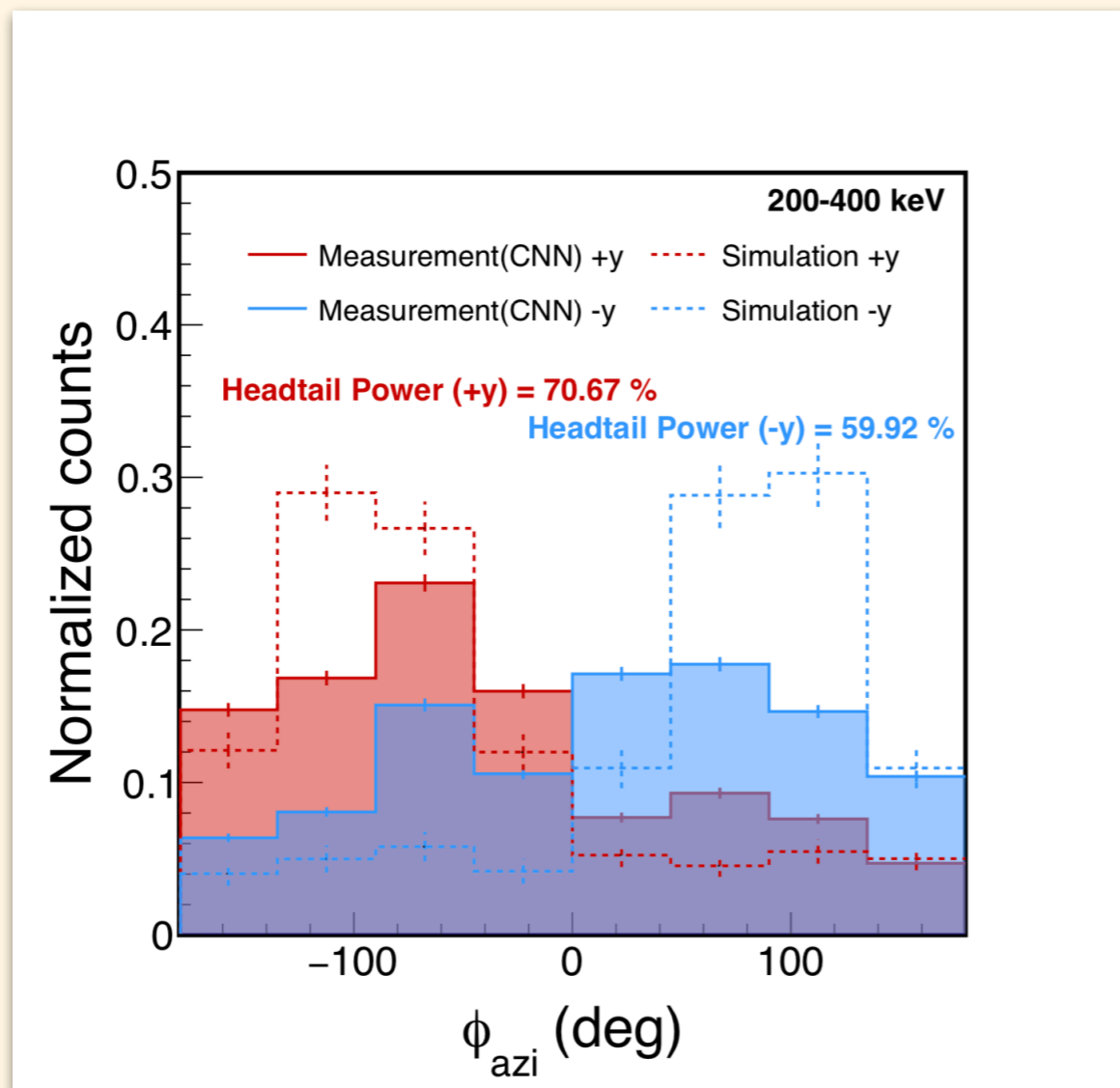


OUTPUT情報



前後判定能力の評価

- 前後判定込みの検出器座標系の方位角 ϕ_{azi} を再構成・分離を確認 (左図)
 - ▶ $-180^\circ \sim 0^\circ$: **+y**方向への再構成、 $0^\circ \sim 180^\circ$: **-y**方向への再構成
 - ▶ **赤** : **+y**方向からの照射、**青** : **-y**方向からの照射
- 100-400keVのエネルギー範囲では、飛跡の前後を判定できた



200~400 keV では **65.9%** (従来法:53.6%) の前後判定能力を得た

まとめ

- ◎ NEWAGEは方向に感度を持つ手法で暗黒物質探索を行っている
 - ▶ **機械学習**の導入をすることで高感度化を目指せるのではないか
- ◎ 機械学習を用いて飛跡の方向を再構成することに成功
 - ▶ シミュレーションデータを用いて学習・検証
 - ▶ 角度分解能を**1.5倍**改善
- ◎ 機械学習を用いて飛跡の前後を判定することに成功
 - ▶ 実験データを用いて学習・検証
 - ▶ 前後判定能力 **65.9 %** @200-400keV (従来法 : 53.6%)
- ◎ 機械学習が感度を向上させることが分かった
 - ▶ DAMA領域の探索を目指したい