



Toho University



B03

高精度飛跡検出技術を用いた方向を 持つ暗黒物質探索と関連研究

代表: 中 竜大(東邦大)

分担: 身内賢太郎(神戸大)

分担: 白石卓也(神奈川大)



神奈川大学
KANAGAWA UNIVERSITY

学術変革「地下稀事象」第2回領域研究会
2025年6月25-26日@東京大学

Signature of Dark Matter Detection



天体の運動に依存した信号情報の取得

Annual Modulation

Diurnal Modulation

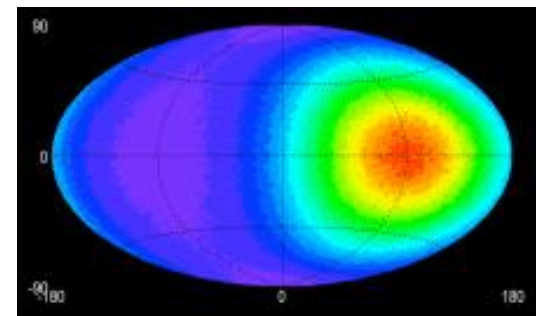
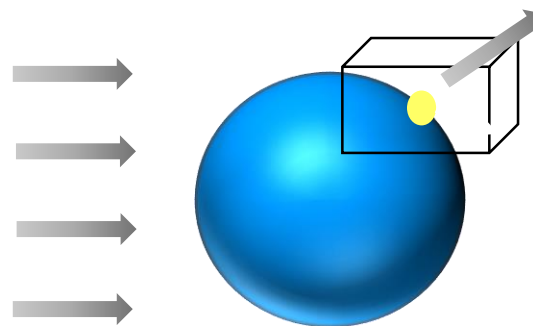
$$S(v_{lab}) \simeq S_k(v_s) + \underbrace{S_{Ann} \cos \omega_{rev} (t - t_0)}_{\text{2-3 \% variation}} + \underbrace{S_d \cos \omega_{rot} (t - t_d)}_{\text{0.01 - 0.1 \% variation}}$$

2-3 % variation

0.01 - 0.1 % variation

- 統計的に > O(100) event 以上が必要
- 季節変動するBGとの切り分け (e.g., cosmic-ray μ , neutrino)

Dark Matter wind

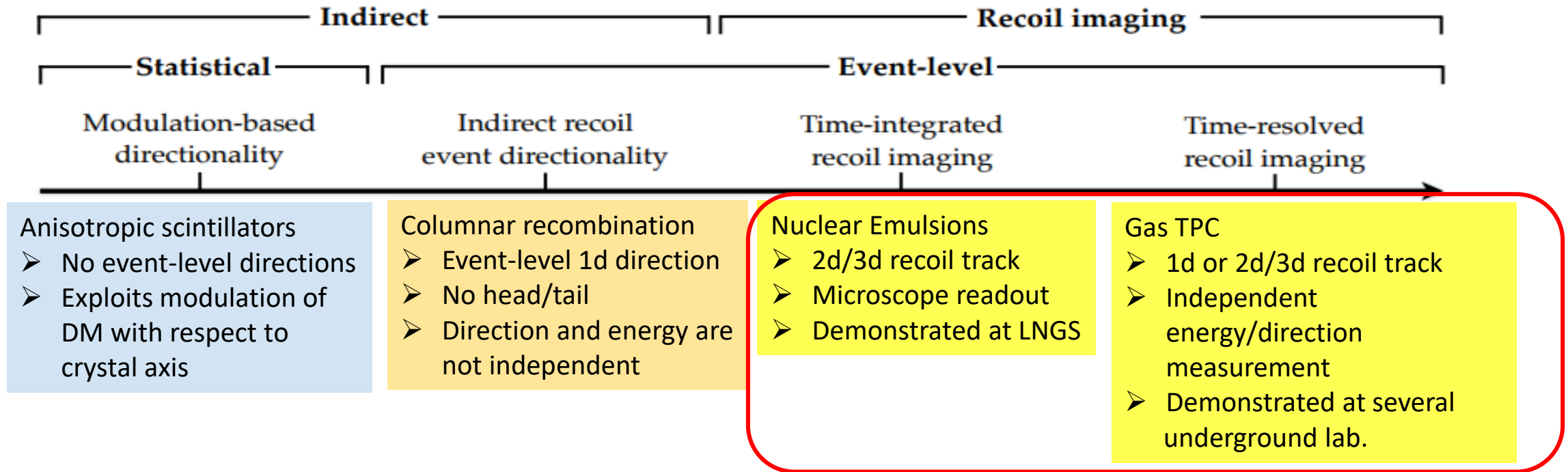


飛跡検出 + 方向感度

- 到来方向異方性に対する信号証拠
- BG混在下における方向分布を用いた背景事象分離
- 幾何学的特徴量と粒子識別 (高いBG除去能)
- Dark matterの性質解明

Detector classes by directional information

Demonstrated 
R&D 
Proposed 



Dark Matter検出における飛跡検出技術

<https://arxiv.org/pdf/2102.04596>

- 低エネルギー信号に対する飛跡検出能(方向感度)
- 検出器および読み出し機構の拡張性
- 特有の背景事象の除去手法開発

すでに暗黒物質の方向感度技術を実用化させた
ガス検出と原子核乾板を相互に発展させる

B03高精度飛跡検出器を用いた方向感度を持った暗黒物質探索

- 低エネルギー反跳原子核飛跡検出による暗黒物質探索の推進
- 低バックグラウンド化技術の開発による継続的感度向上
- 大型化に向けた技術開発

領域内連携(E班、D班)

領域外連携

(方向感度技術、物性、宇宙論、AI技術 等)

ガス検出器 (NEWAGE)

- 低バックグラウンド化
 - 大型化
- これまでの10倍の感度向上+SDでの
DAMA領域探索

- 異なる技術の高度化と経験の蓄積
- 方向感度検出の普遍的な理解
- 新たなパラメータスペースと方向感度の可能性
- 技術連携

原子核乾板 (NEWSdm)

- 地下観測実験の推進
 - 低バックグラウンド化
 - 読み取り体積の拡大
 - 中性子計測
- 1 kg スケールの観測実験の推進と基盤構築

将来の大型実験に向けた経験・技術・知識の蓄積と発展

本研究会での関連ポスター発表

P25 : 東野 聡 “NEWAGE: 暗黒物質探索地下実験の現状”

P28 : 生井 凌太 “方向に感度をもつ暗黒物質探索実験に向けた大型ガスTPC開発の現状”

P31 : 浅田 貴志 “近年のNEWSdm実験の開発・応用研究の進展”

P37 : 遠山 和佳子 “ガス検出器を用いた暗黒物質探索実験における電離によるエネルギー損失測定のためのビーム試験”

P40 : 陳 夏姫 “超微粒子原子核乾板を用いたMulti Component Boosted Dark Matter 探索に向けた計画”

P41 : 染谷 一輝 “暗黒物質直接方向探索実験における超微粒子原子核乾板の現像液での飛跡輝度上昇効果による低エネルギー陽子検出性能の検証”

P44 : 石原 大樹 “酸化分解反応を利用した超微粒子原子核乾板のノイズ低減に関する研究”

原子核乾板による方向感度検出 [NEWSdm experiment]

Super-resolution nuclear emulsion and sub-micron tracking

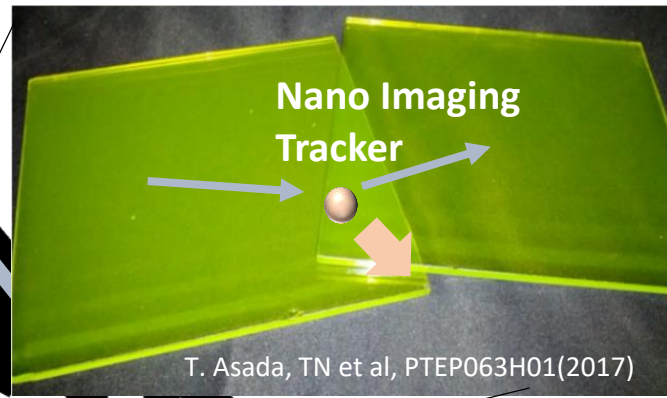
LSPR (plasmonic response)
+ super resolution

$R < 0.3 \mu\text{m}$

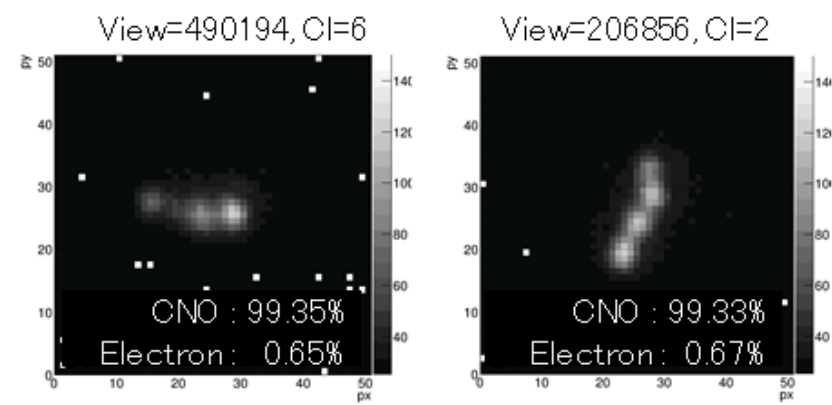


Scientific Reports 13, 22813 (2023)

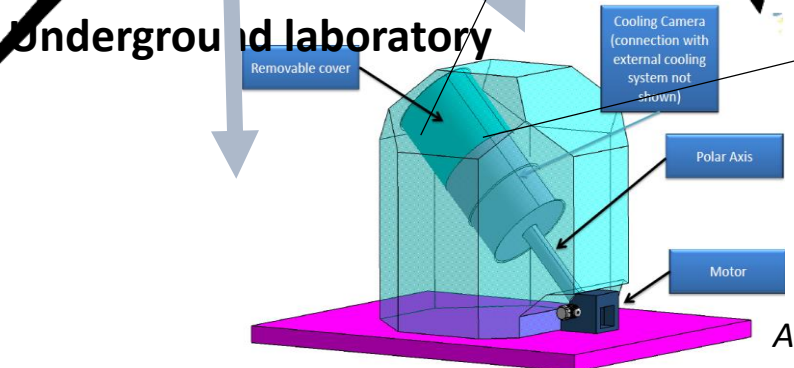
超微粒子原子核乾板
[Nano Imaging Tracker : NIT]



$R > 0.3 - 1.0 \mu\text{m}$



Underground laboratory

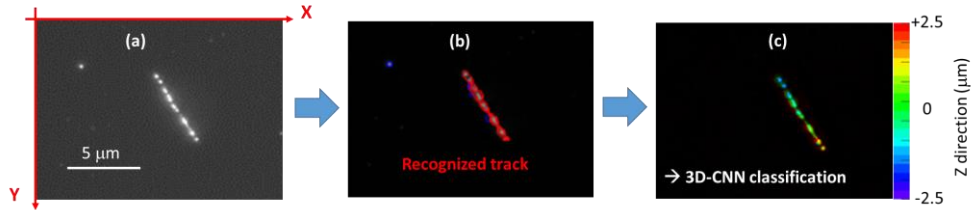
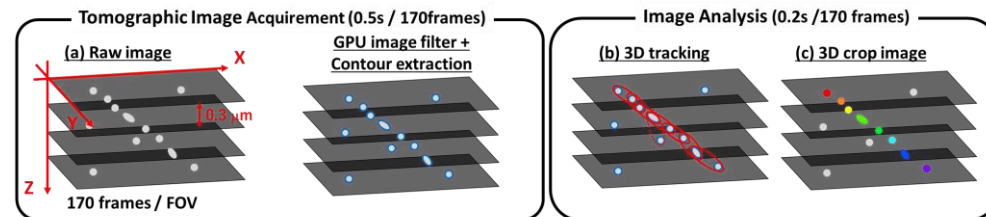


イタリア・グランサッソ研究所 (LNGS)

$R > 1 \mu\text{m}$

3D reconstruction

A. Umemoto et al., JCAP 02 (2025) 012
TN and G. De Lellis, JAIS-500, 2024



T. Shiraishi et al., PTEP 2021 (2021) 4, 043H01

+ CNN selection (on going)

Proton Tracking

Neutron Measurement

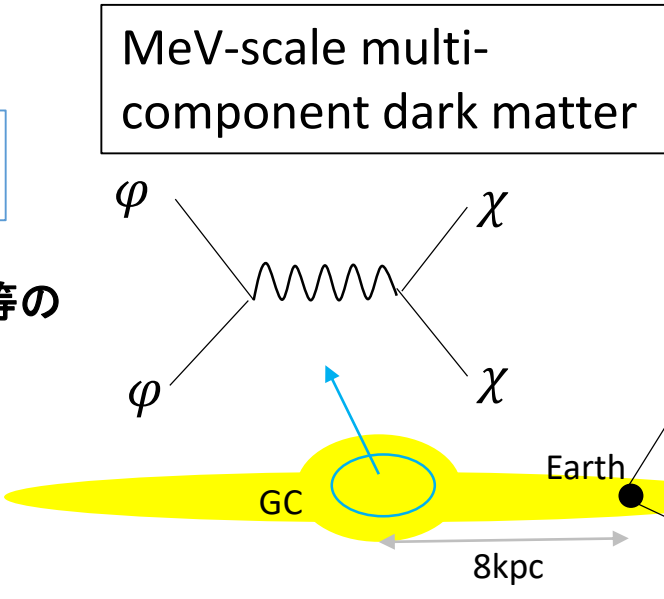
分担: 白石
極低放射能研究会 参照

- 地下環境中性子(特に、sub-MeV領域)のフラック・スペクトル等の精密理解
 - 中性子計測応用 (e.g., 核融合、原子炉、イメージング)
- ※理研RUNS, 北大HUNSとの連携を推進中

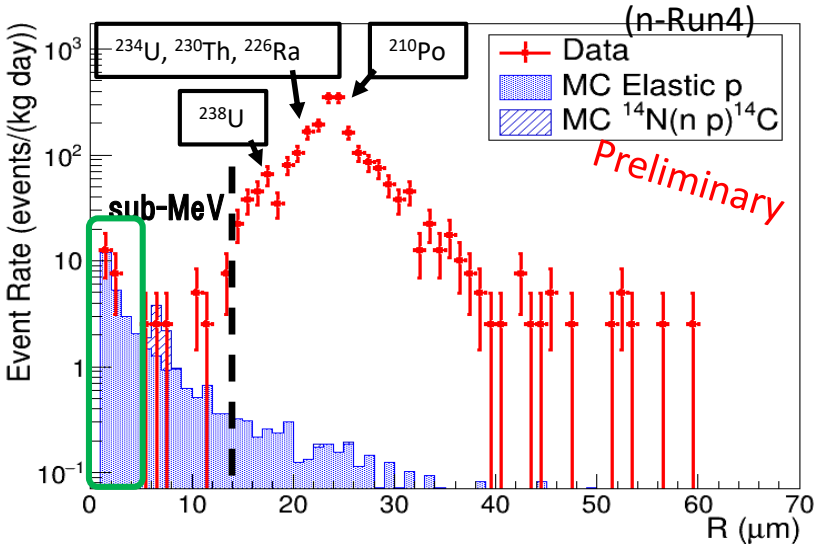
P40陳ポスター

E01連携

K. I. Nagao, TN, T. Nomura JCAP04(2025)030



MeV scaleにおいては軽い標的が有利⇒ proton recoil “track”

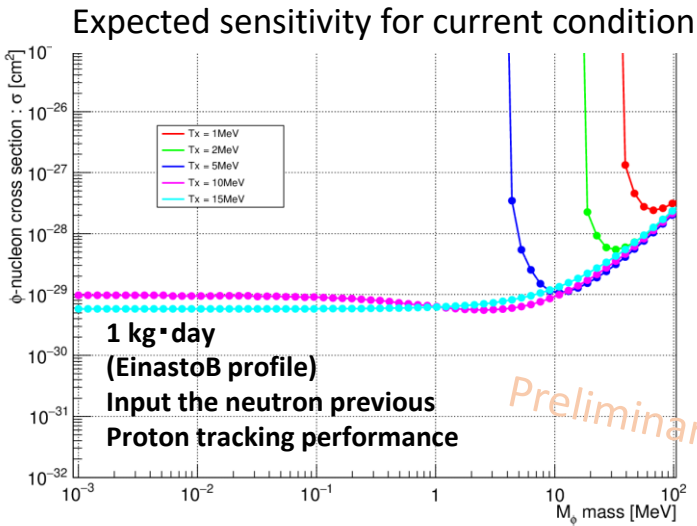
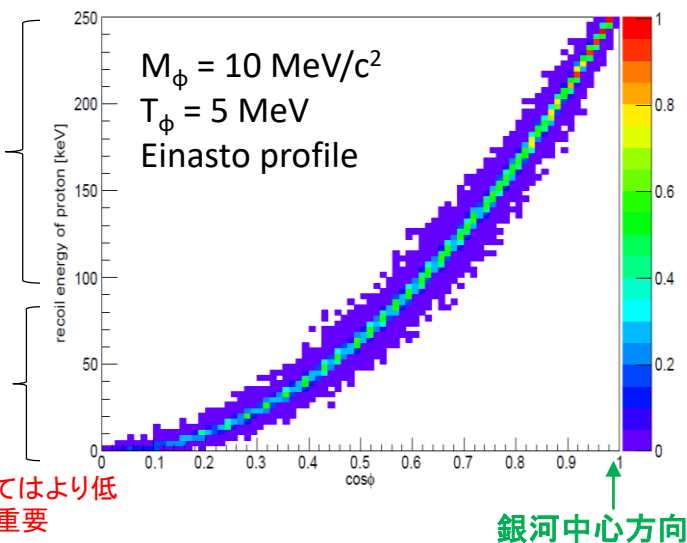


Sub-MeV領域においては中性子による反跳陽子が検出され始めている
(期待通りγ・β線はBGになっていない)

中性子検出実験で実装済み

On-going

質量縮退モデルについてはより低エネルギー反跳飛跡が重要



NITデバイスの高度化

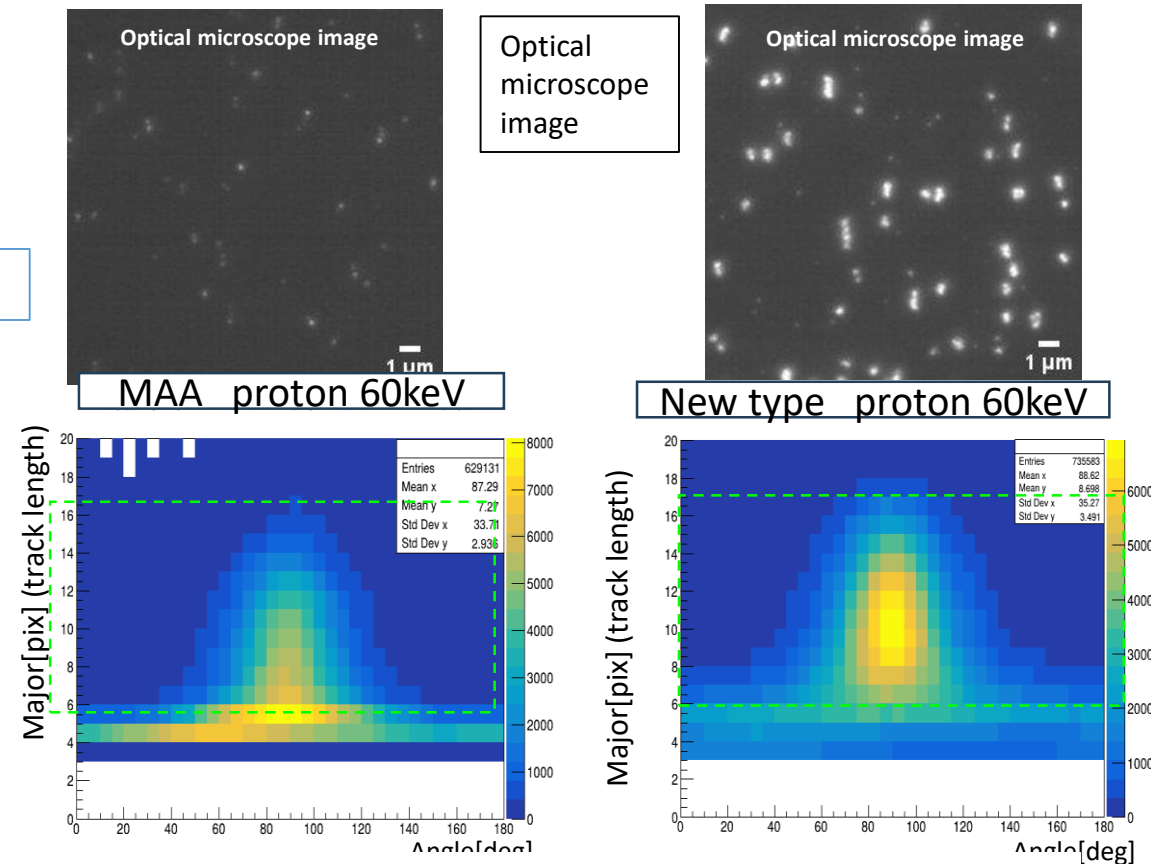
■ 光学輝度向上のための化学現像法の刷新

P41 染谷ポスター

・現在の標準化学現像は、ノイズ生成を最小限にする代わりに顕微鏡下での光学輝度が抑制されている

・安定した光学輝度上昇を可能にすることで、飛跡再構成精度の向上が期待⇒ 低エネルギー事象検出性能の向上

- ✓ 期待通りの検出性能の向上を確認
- ✓ 地下実験での実用化に向け調整中



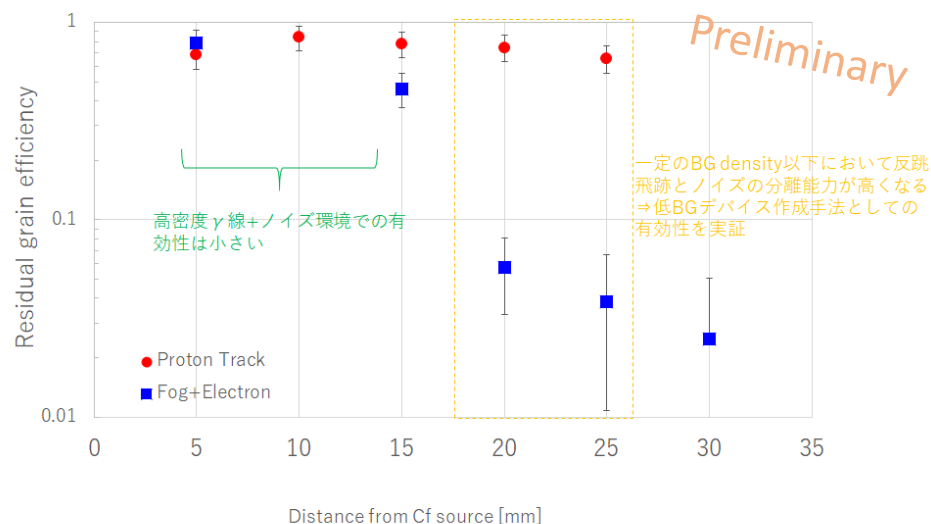
■ 低ノイズデバイス処理の新たな手法開発

P44 石原ポスター

・先の地下実験でのBGラン⇒ 非物理的なノイズの不安定性によって、確率的に飛跡検出されてしまう事象が混入

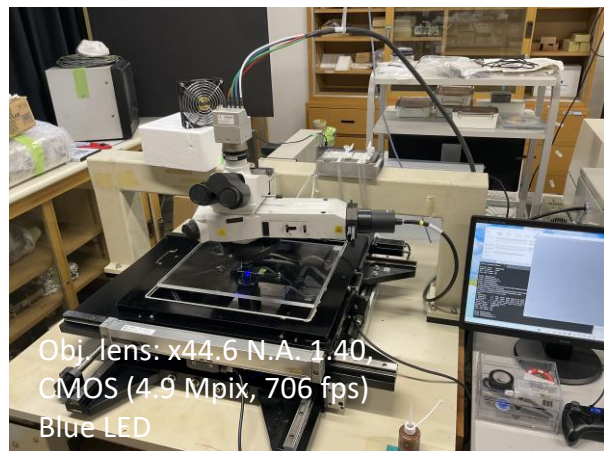
・より安定したノイズ削減方法の開発
⇒ “酸化反応を用いたノイズ除去”

現像処理後にノイズ除去処理
⇒ 初期のデバイス性能の要求レベルを低減

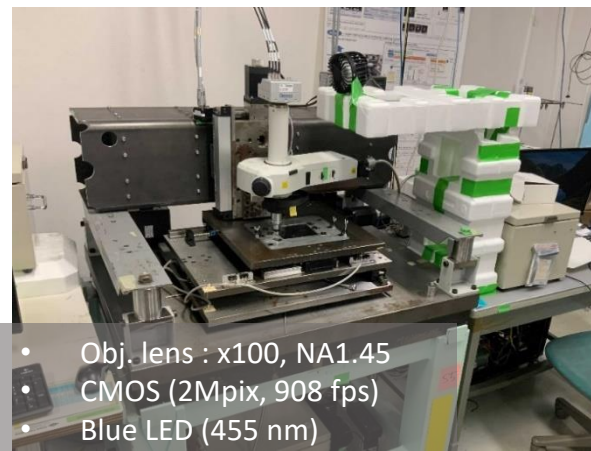


光学読み取りステージ

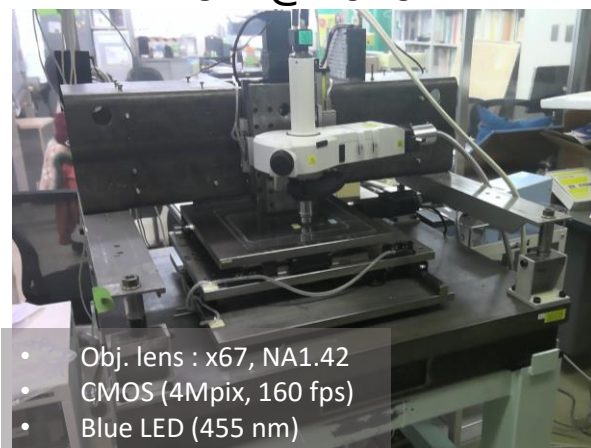
PTS-2' @ Kanagawa U.



PTS-3 @ Nagoya



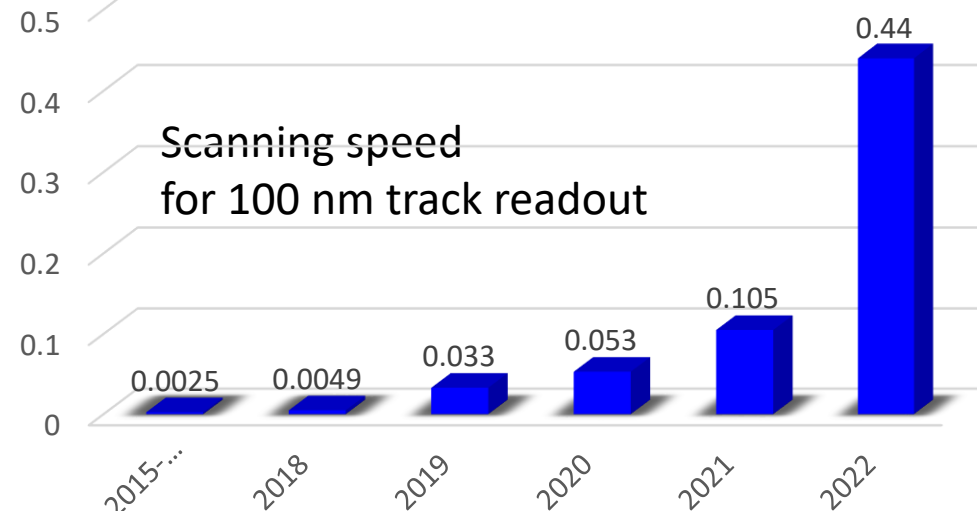
PTS-4 @ Toho



PTS-5 @ Nagoya



Max. scanning power [kg/year/machine]

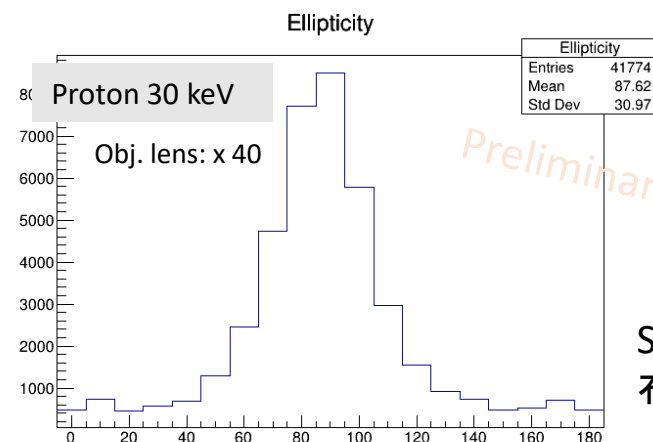


> 1kg scale のスキャン体制の構築と実装

反跳陽子解析 (中性子, MeV-scale DM search)

⇒ 1.4/kg/y/machineを達成

PTS-5を含めて2台運用で> ~2kg/year scaleを達成見込み
(100 kg・day 解析体制構築を目指す)

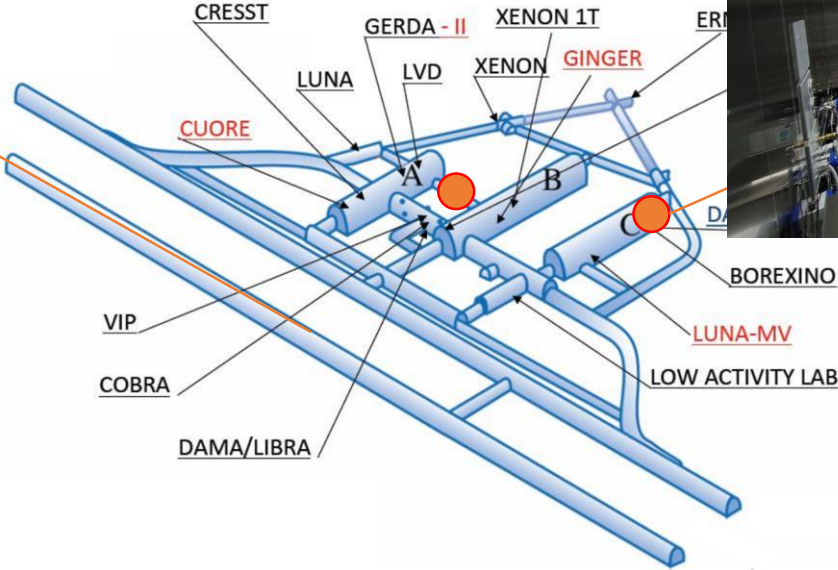


Sub-micron track の角度分布は問題なく取得

NEWSdm underground activity@LNGS

P31浅田ポスター

NEWSdm device production and handling



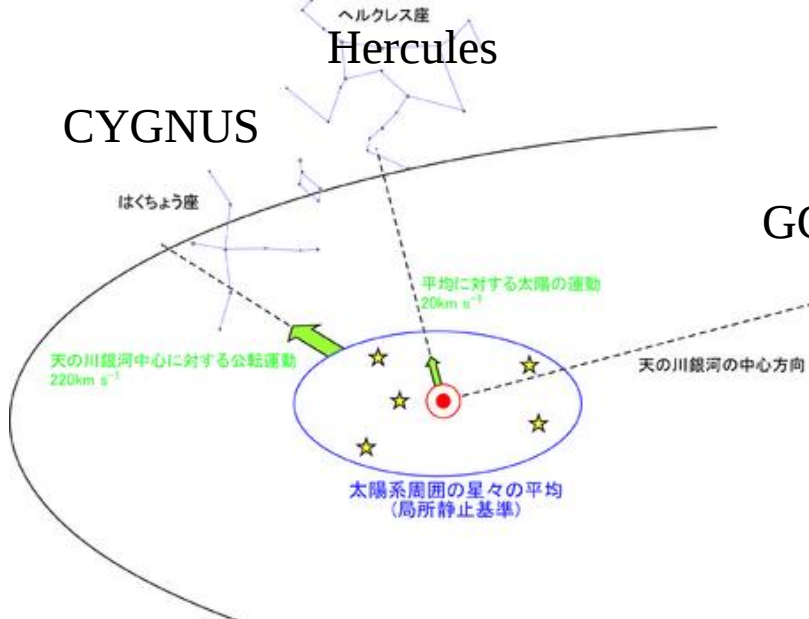
CR1 Radon free clean room



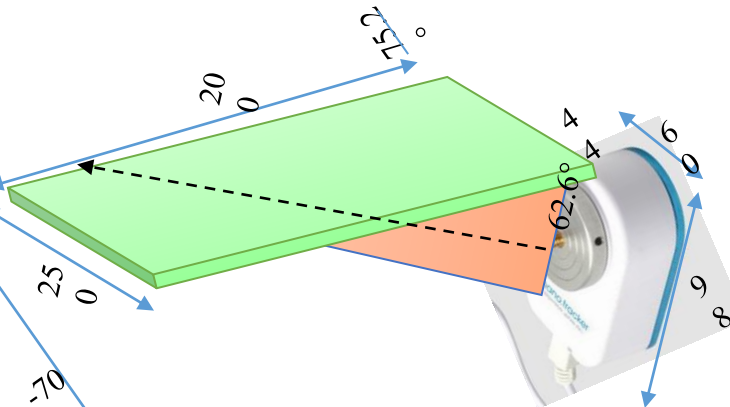
- 原子核乾板作成時に混入するRnバックグラウンドを削減(中性子測定におけるMeV帯の陽子検出にとっては邪魔)
- 乾燥中に生じた α 線は、飛跡再構成がうまくいかずBGになる可能性
- 銀ゼオライト等を用いたRn混入を抑えた原子核乾板作成環境構築についても研究中

ヘルクレス座
Hercules

CYGNUS



GC



銀河中心と白鳥座方向の同時観測



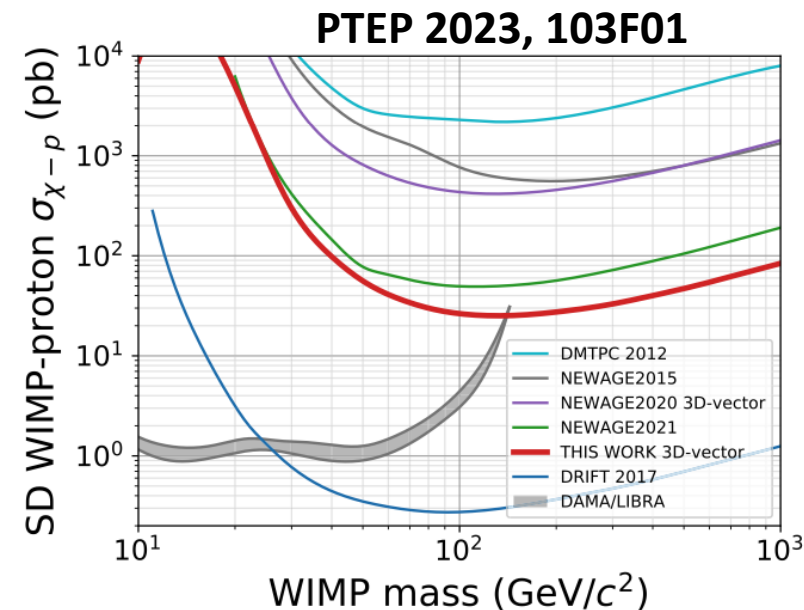
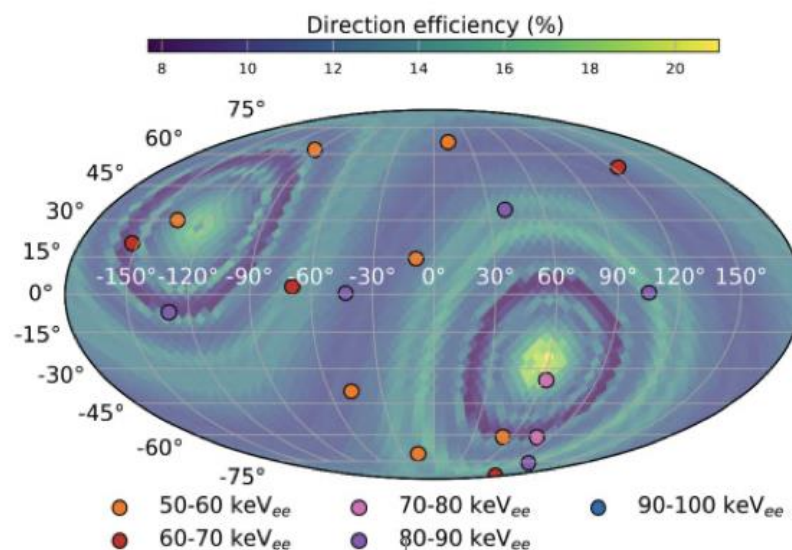
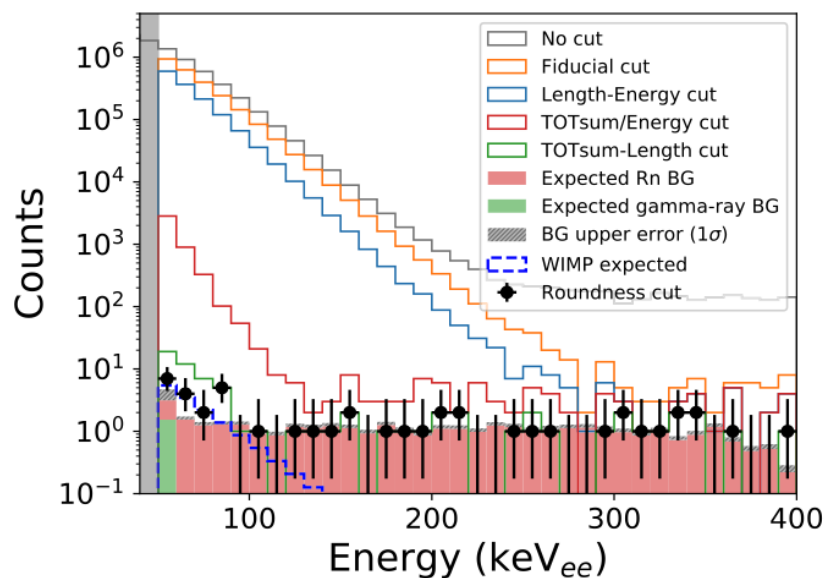
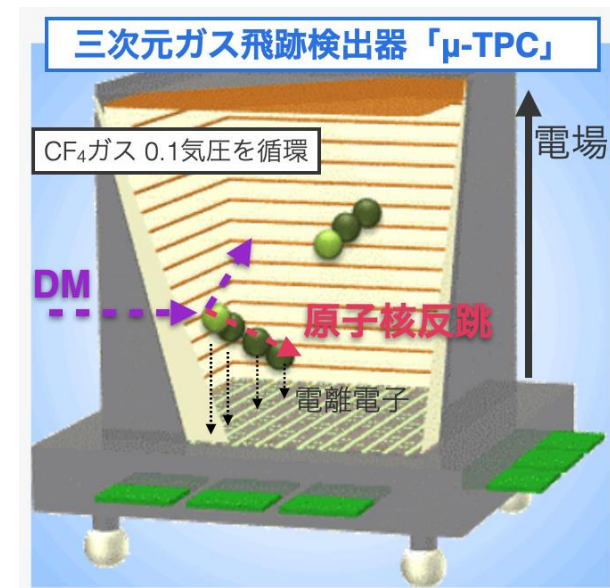
1 kg・day $\rightarrow$ 10 kg・day scaleへの拡張

NEWAGE

ガスTPC検出器を用いた方向感度を持つ暗黒物質探索実験

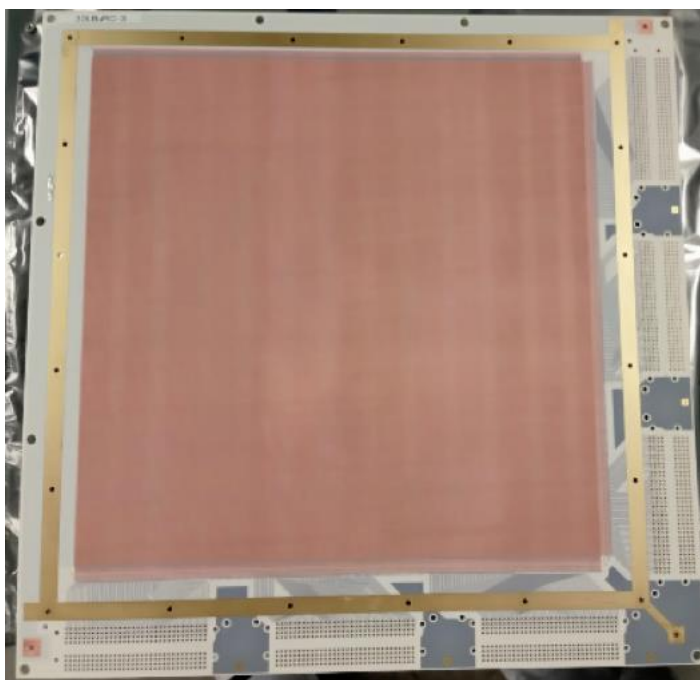
NEWAGEの現状

- $\sim(30\text{ cm})^3$ ガスTPCを用いて地下実験進行中 (神岡坑内)
- 方向感度を持った解析においては世界最高感度をキープ
 - DAMA/LIBRA領域に到達 (2023年)
- 一方、exposureに対してBGが本格的に効いてきた
 - チェンバー外部からの環境ガンマ線によるBGはシールド追加で削減可能
 - チェンバー内のガスに混入したラドン (と娘核) の α 崩壊事象削減が直近の課題



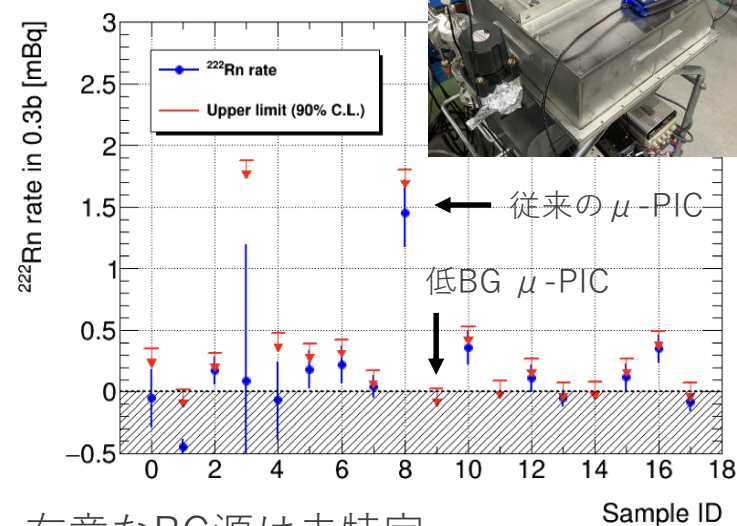
チェンバー内部のラドン削減対策

- U/Th系列混入量の少ない低BG素材の検出器開発、実装 (Quartz + resin)
 - 従来の検出器から2桁BG削減できたが、チェンバー内にはまだBGが存在
- ラドン検出器でチェンバー構成材質のBG測定、様々なサンプルを測定中
- フィールドケージ内壁から表面 α 線BGあり → ラドンが出ている？
 - 内壁にEVOHカバーを取り付けた。ラドンBGが減るかどうか検証中

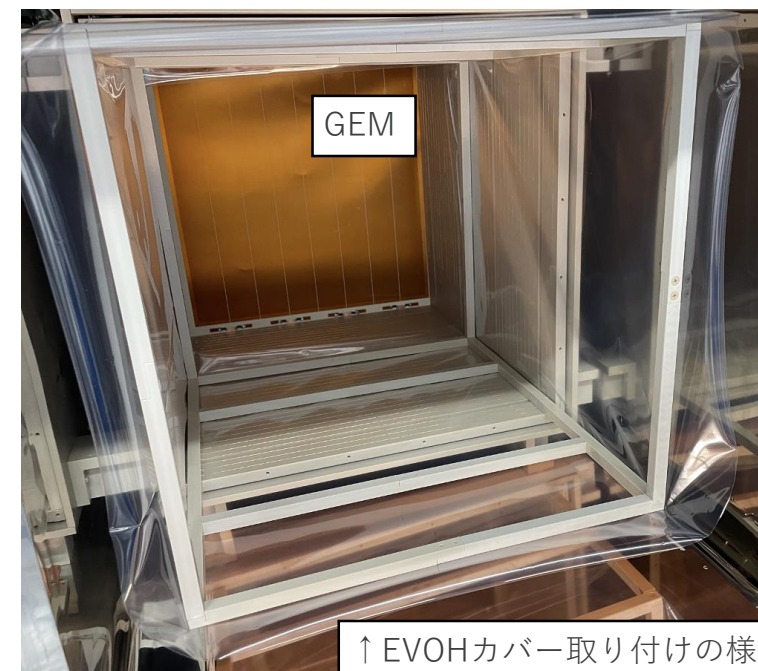


低BG検出器 (μ -PIC): NIMA 1072 (2025) 170145

様々なサンプルを測定



有意なBG源は未特定



↑ EVOHカバー取り付けの様子

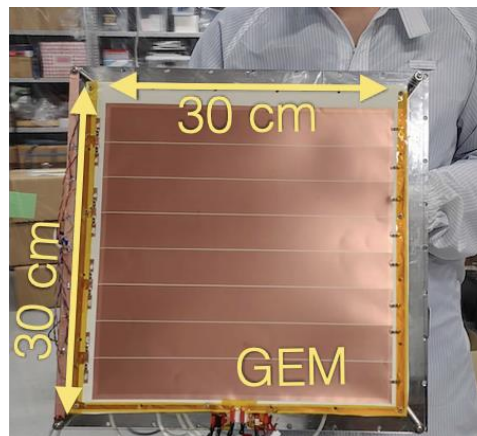
大型ガスTPC開発の現状



@神戸大学

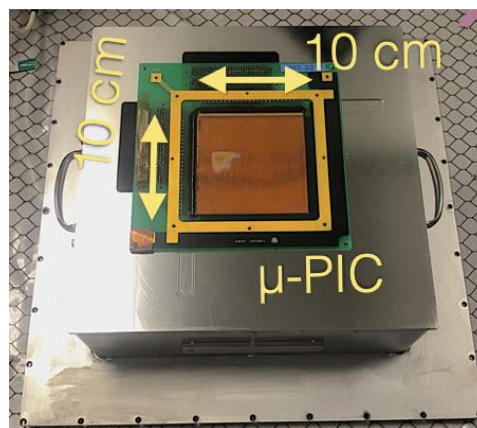
CYGNUS-KM/NEWAGE (C/N-1.0)
~1 m³ fiducial volume

- Moduler design chamber with $\sim \times 20$ fiducial volume
 - モジュール型検出器の調整中
 - 今年度夏より神戸大学にて地上実験開始予定



"Module-0" (3 GEMs + pad readout)

30 × 30 cm² fiducial area
大型だが飛跡再構成能力ナシ
ラドン量モニターとしても有用



"Module-1" (GEM + μ -PIC readout)

10 × 10 cm² fiducial area
小型だが飛跡再構成が可能

詳細はP25ポスター (神戸大 生井)

B03高精度飛跡検出器を用いた方向感度を持った暗黒物質探索

- 低エネルギー反跳原子核飛跡検出による暗黒物質探索の推進
- 低バックグラウンド化技術の開発による継続的感度向上
- 大型化に向けた技術開発

領域内連携(E班、D班)

領域外連携

(方向感度技術、物性、宇宙論、AI技術 等)

ガス検出器 (NEWAGE)

- 低バックグラウンド化
 - 大型化
- これまでの10倍の感度向上+SDでの
DAMA領域探索

- 異なる技術の高度化と経験の蓄積
- 方向感度検出の普遍的な理解
- 新たなパラメータスペースと方向感度の可能性
- 技術連携

原子核乾板 (NEWSdm)

- 地下観測実験の推進
 - 低バックグラウンド化
 - 読み取り体積の拡大
 - 中性子計測
- 1 kg スケールの観測実験の推進と基盤構築

将来の大型実験に向けた経験・技術・知識の蓄積と発展

低速イオン加速器@神奈川大学(星野研究室)

B03分担: 白石卓也

一研究室レベルで所有するイオン加速器のよりフレキシブルな活用

低速イオン注入装置

加速電圧: 5 ~ 200 kV

照射温度: -196 ~ 1000 °C

ビーム電流: 10 pA ~ 100 μ A



1MVタンデム型ペレトロンイオン加速器

加速電圧: 0.5 - 1 MV

検出器: 表面障壁型Si半導体検出器 x 2

元素分析: RBS-channeling, PIXE, 核反応, ERDA, ...



- ユニフォームなイオンビーム(エネルギー、方向) $\Rightarrow$ 方向感度検出性能の最も適した較正
- 低速イオン特有の物性効果(散乱効果、結晶欠陥、クエンチング)

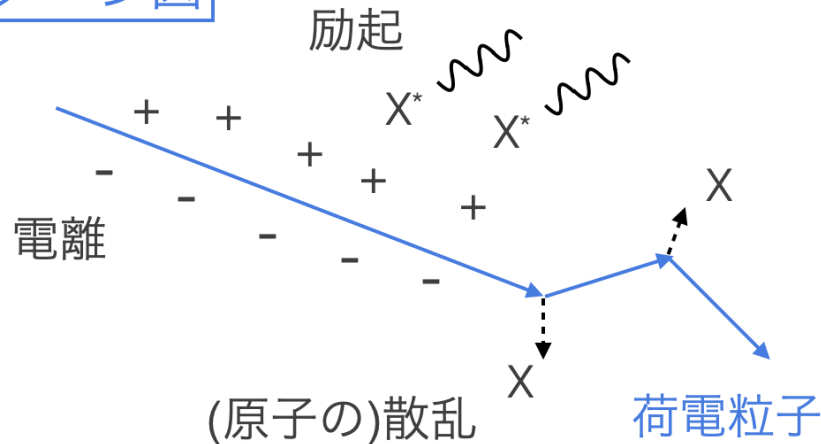
“方向感度”の普遍的な理解に向けてB03全体での統一的な技術と知見の共有

ガス中でのエネルギー損失とその測定

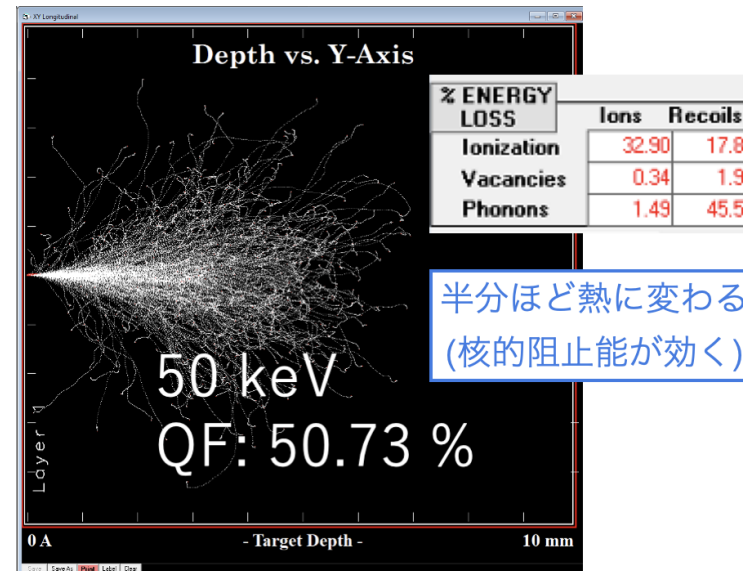
- NEWAGEで検出できるのは電離によるエネルギー損失
 - 物質中の荷電粒子の全エネルギー損失に対して、電離による損失の割合を知ることが重要
 - 物質や荷電粒子の種類によって異なる
- 現状、SRIM (TRIM) による計算値を利用。実際に測定して正しい値を使いたい
 - 知っているエネルギーのイオンビームをガスに注入して測定する

SRIMモデルの妥当性の検証として検出器問わず重要⇒ B03全体の連携が大事

イメージ図

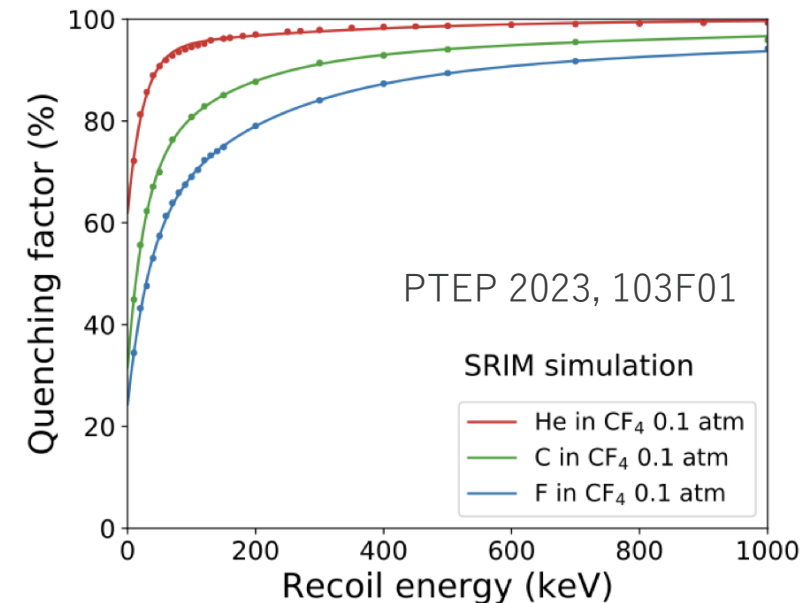


SF₆ガス 20 Torr中にフッ素イオン注入 (TRIM)



半分ほど熱に変わる
(核的阻止能が効く)

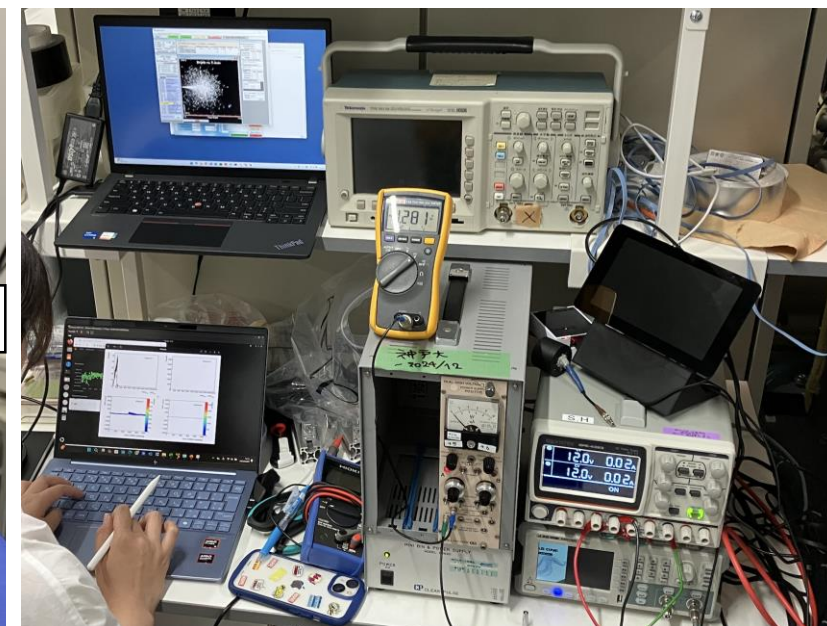
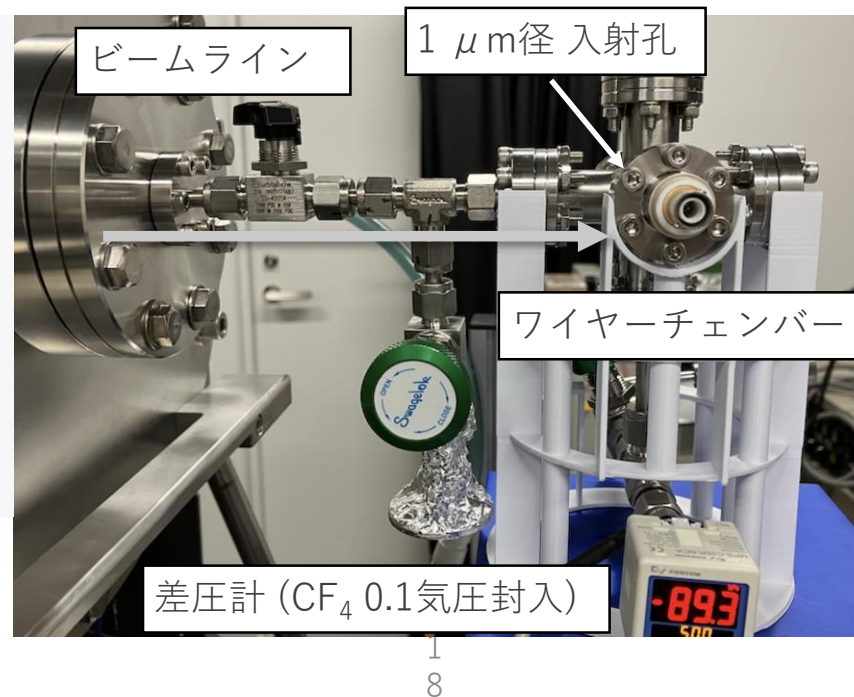
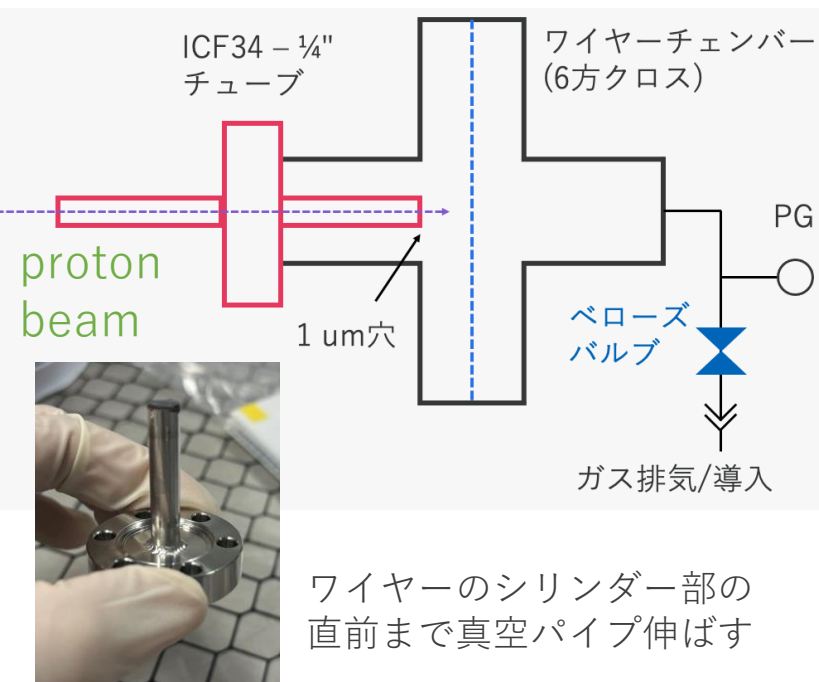
電離による損失の割合 (Quenching factor)



神奈川大イオンビーム照射試験

P37 遠山ポスター

- 真空中でイオンビームを輸送し、ガス領域にイオンを注入する必要あり
 - 10 μm 厚のSUSフィルムで真空とガス領域を隔てつつ、1 μm の穴を開けてビームを通す
 - COMIMAC加速施設 (Grenoble) にて先行研究結果あり。神奈川大ビームラインでも原理実証したい
- 2025年6月5-6日に実施、100 – 200 keV protonを用いたパイロットラン
 - 小型ワイヤーチェンバー開発、ビームラインに接続

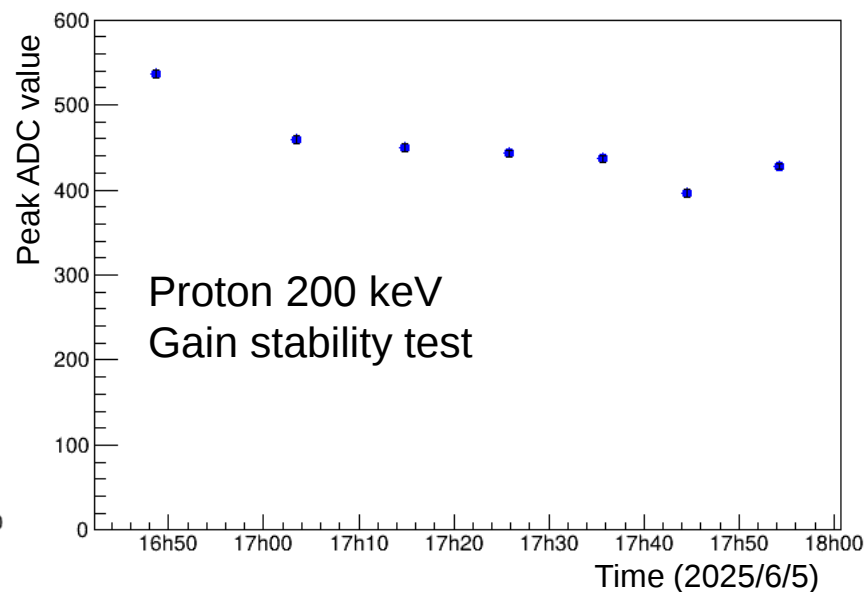
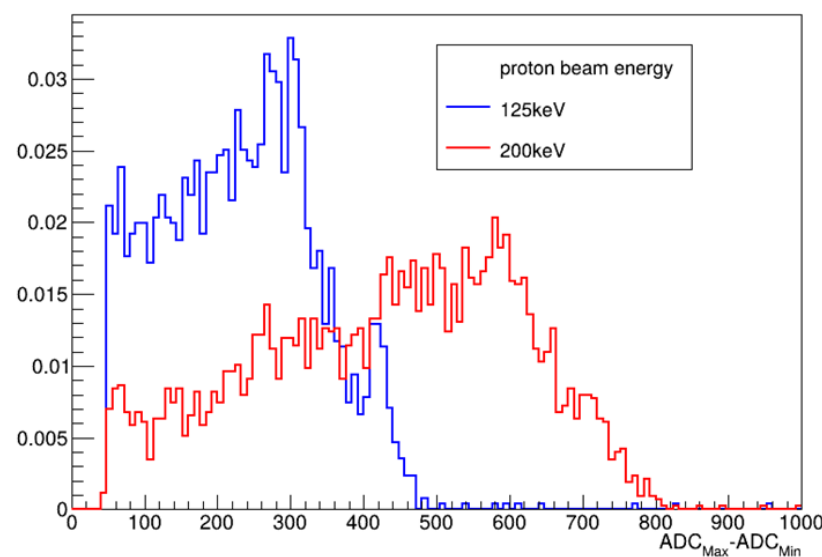
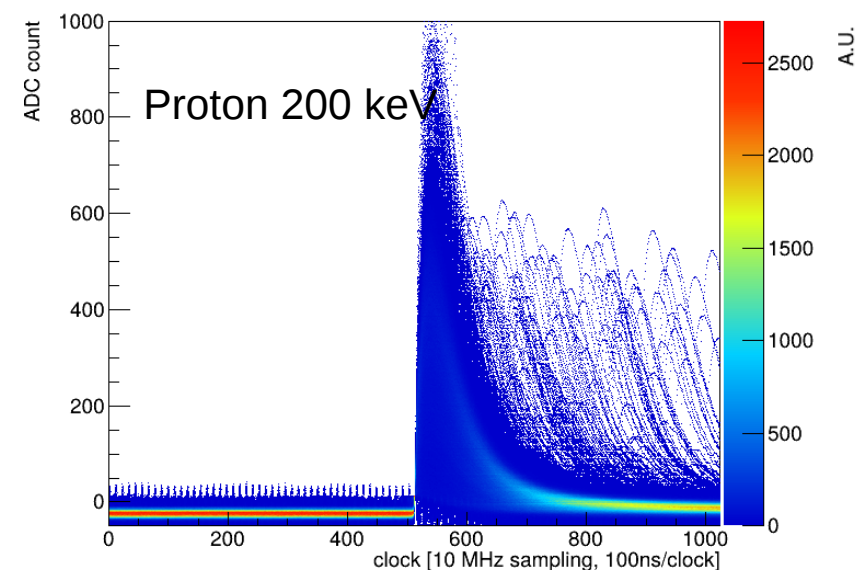


ビームライン横でDAQ & 解析

Proton beam観測

P37 遠山ポスター

- Proton 100 – 200 keV エネルギー領域でビーム由来の事象観測
 - 1 μm 穴で真空 – ガス領域を分離しつつビームの輸送に成功！
 - ガス検出器へのイオン注入の原理実証ができた
- 一方、ワイヤーチェンバーのゲイン安定性などで課題あり
 - データ解析 & 課題デバッグののち、2025年夏に本測定の手配
 - 電離によるQuenching factorを測定、論文執筆へ



B03高精度飛跡検出器を用いた方向感度を持った暗黒物質探索

ガス検出器 (NEWAGE)

- DAMA/LIBRA領域の探索
- さらなる低バックグラウンド化推進
- 大型チェンバーのコミッショニング

- 異なる技術の高度化と経験の蓄積
- 方向感度検出の普遍的な理解
- 新たなパラメータスペースと方向感度の可能性
- 技術連携

原子核乾板 (NEWSdm)

- 地下観測実験のスケールアップ
- 低バックグラウンド技術の新手法導入
- 読み取りシステムのアップグレード
- 地下中性子測定
- MeV scale DM 探索

領域内連携 (B03- E01、D班)

- 共同開催 “Workshop on Inelastic Nuclear Scattering for Dark Matter Detectio”
<https://sites.google.com/view/boosteddm/home>
- K.I Nagao, T. Naka, T. Nomura “Directional direct detection of MeV scale boosted dark matter in two component dark matter scenario via dark photon interaction”, JCAP04(2025)030

領域外連携

- 核融合中性子源における中性子計測 (理研、北大)
- 医学応用のための重粒子線分析
- 反粒子における量子イメージング
etc.

- 低速イオン加速器を用いた低エネルギー原子核の検出器物性効果の直接検証
⇒ ガス検出器のクエンチング効果の直接測定
- 地下中性子バックグラウンドの知見共有
- AgゼオライトによるRn除去システム開発
(NEWAGE, NEWSdm)
- α 線イメージ分析 (AICHAM)

