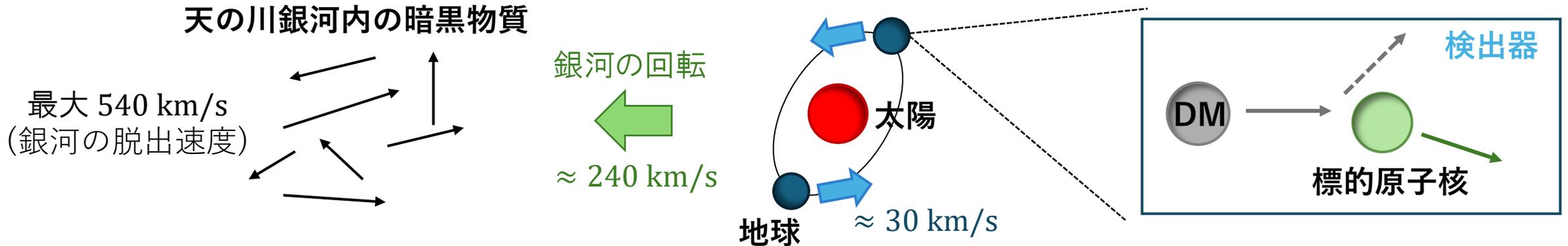


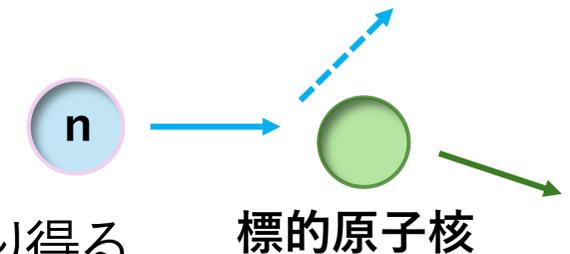
サブマイクロ精度の3次元飛跡検出器を用いた地下環境中性子測定と宇宙線加速されたダークマターの探査

神奈川大 M1 林大晟

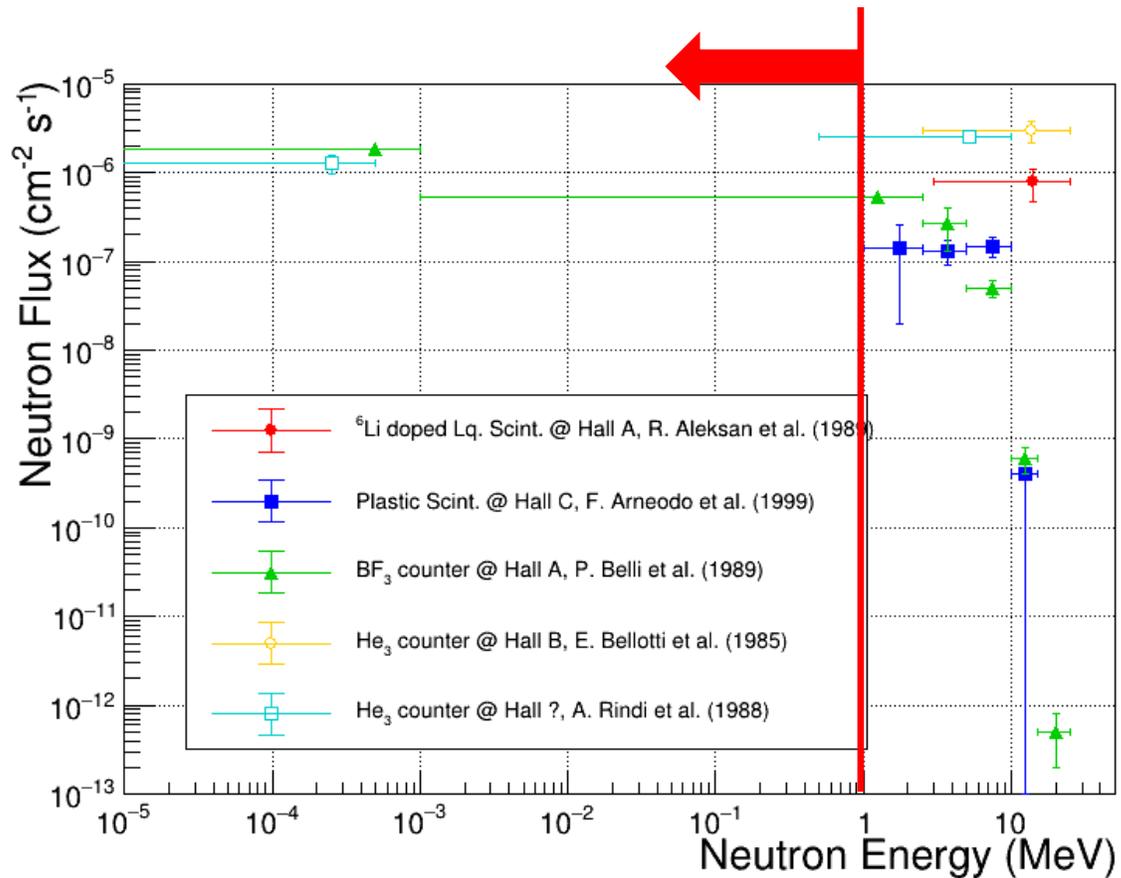
- 極低バックグラウンド実験では、環境中性子がバックグラウンド源となり得る



- ・ ダークマター探査 \Rightarrow 中性子による標的原子核の弾性散乱は特に暗黒物質との信号の区別が困難
- ・ 熱中性子捕獲後に放出される p, α, γ
 \Rightarrow ダークマター探査 + $0\nu\beta\beta$ 崩壊探査におけるバックグラウンドになり得る



広いエネルギー領域における中性子スペクトルの測定が重要



MeV以下の領域における中性子測定の現状

・エネルギースペクトルが取得できていない

⇒減衰材 + 熱中性子捕獲を用いているため
エネルギー分解能がない

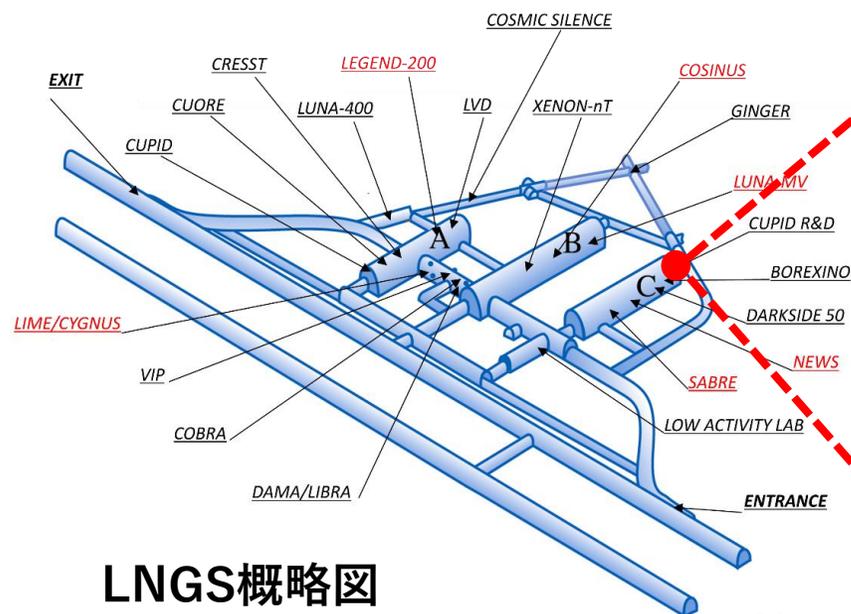


超微粒子原子核乾板(NIT)を用いることで
スペクトル測定が可能になる

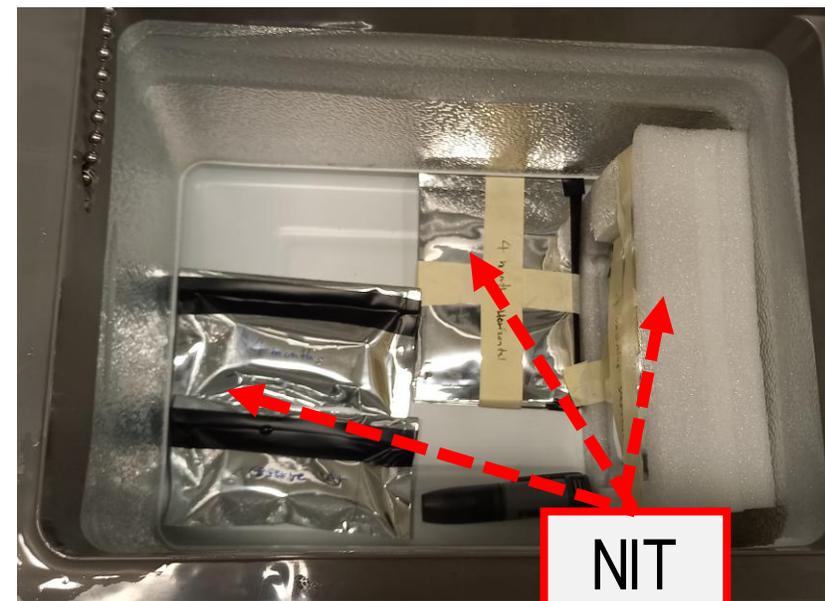
H. Wulandari et al., *Astropart. Phys.* **22** (2004) 313.

n-Run4

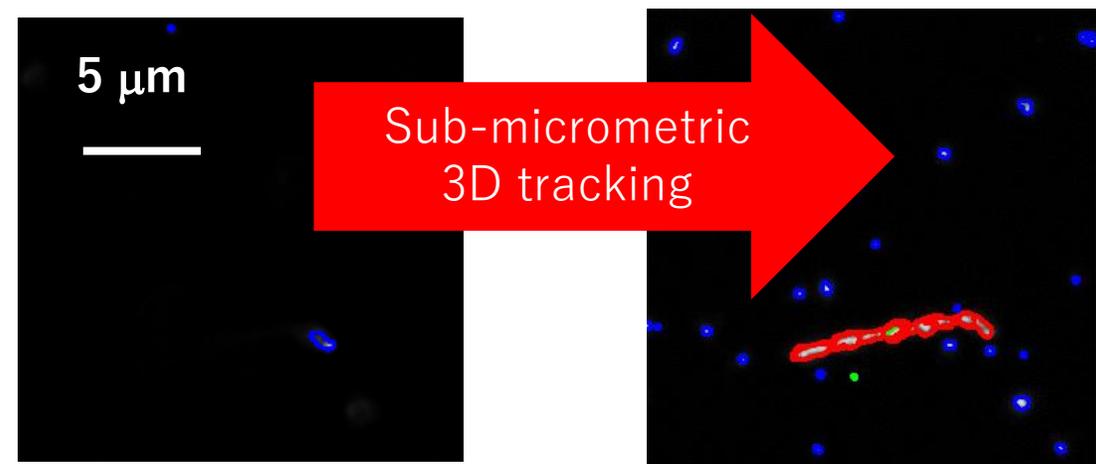
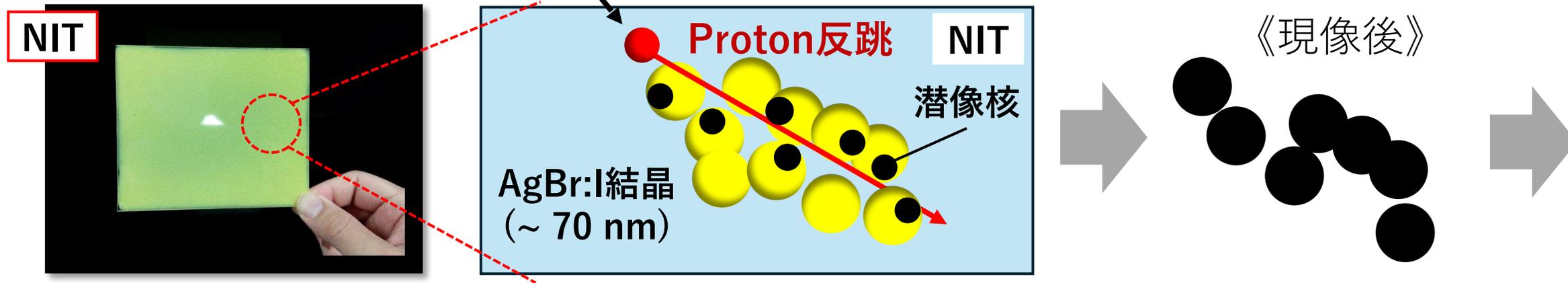
地下環境(ホールC、深さ約1500m)で実施
2023年11月~0day, 4monthsの中性子測定実験
中性子シールドなし



LNGS概略図

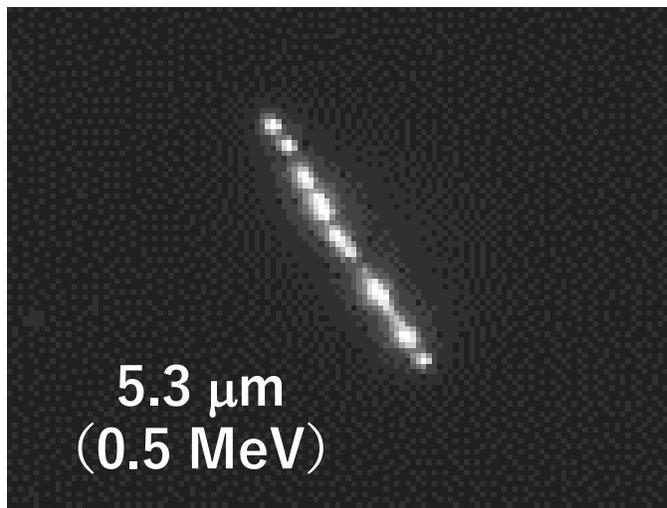


NITの検出原理



T. Shiraishi, et al., PTEP 2021 4, 043H01 (2021).
T. Shiraishi, et al., Phys. Rev. C 107, 014608 (2023).

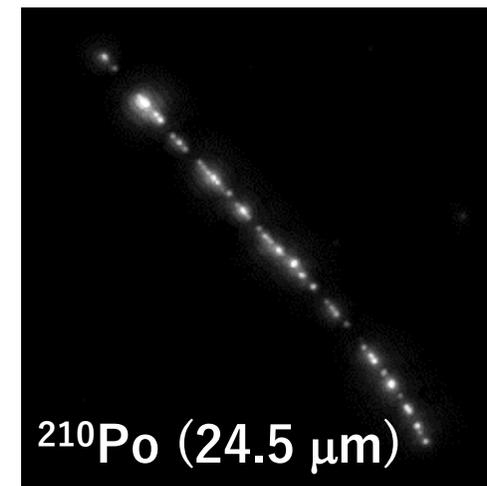
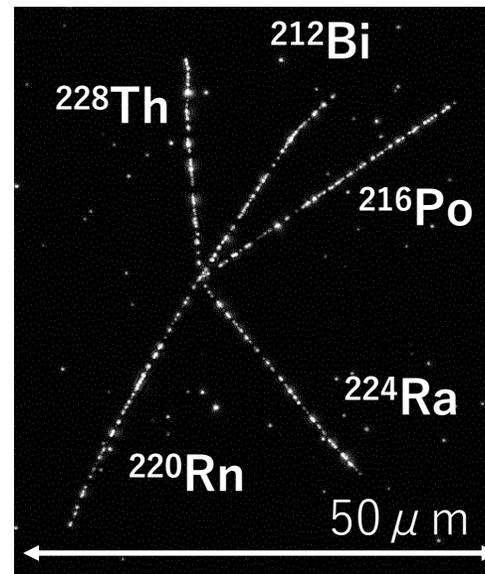
Protonによる飛跡



- 中性子によるNIT中のprotonの弾性散乱
- 熱中性子捕獲後のproton放出
 $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C}(42\text{keV}) + p(584\text{keV})$

バックグラウンド: α 線による飛跡

$^{228}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$

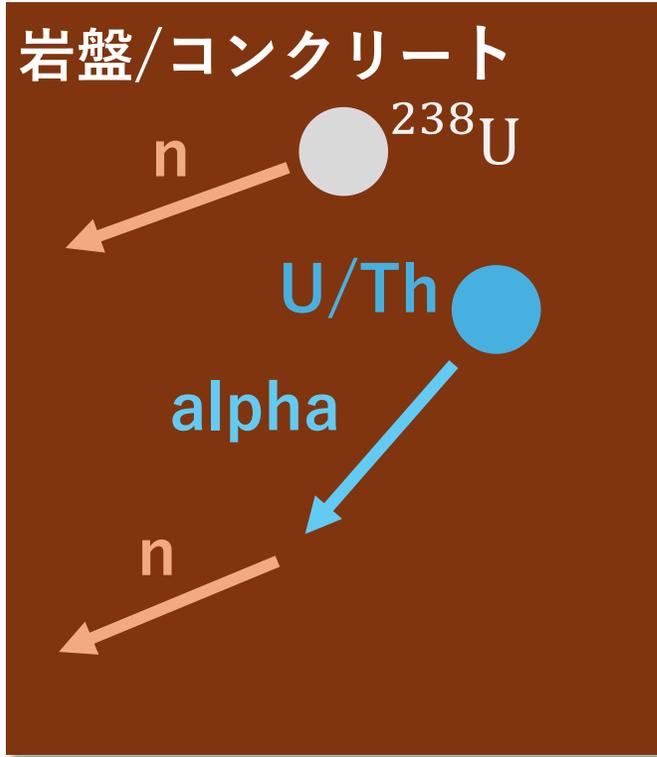


- U/Th系列の α 崩壊

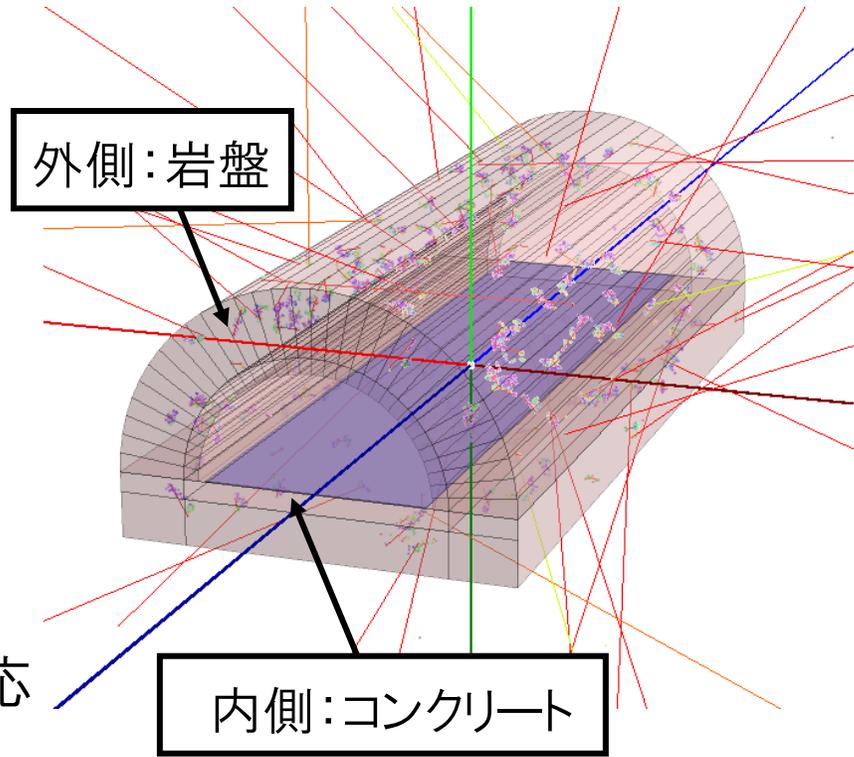
⇒現状、一本に見える飛跡をsignalとして分類している

中性子輸送シミュレーション

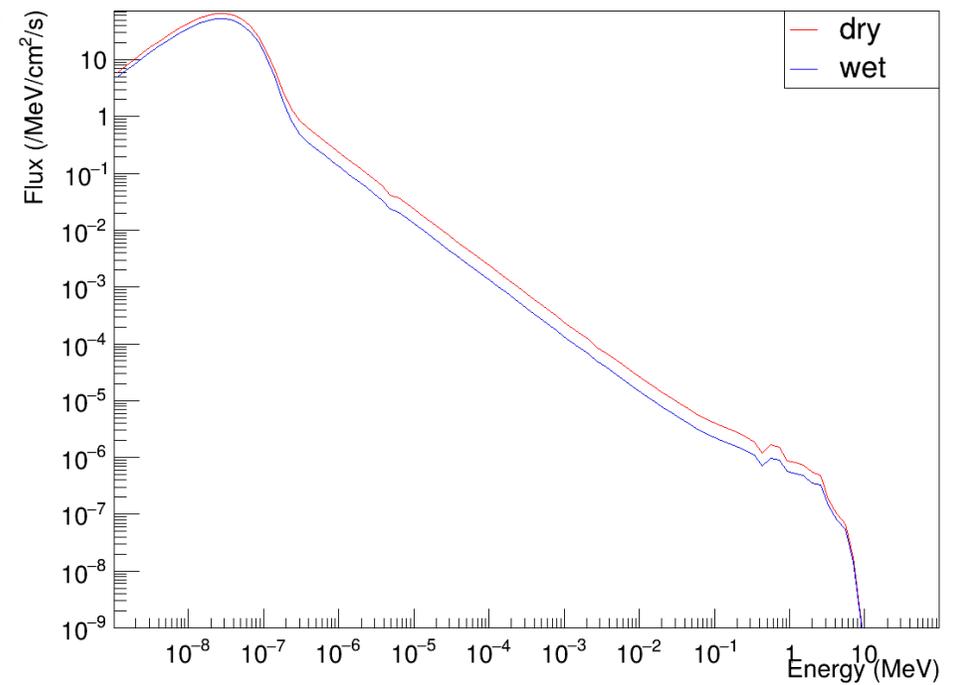
地下環境中性子の起源



岩盤とコンクリート内で生成された中性子の伝播・減衰のシミュレーション (Phits)



予想される検出器での中性子スペクトル



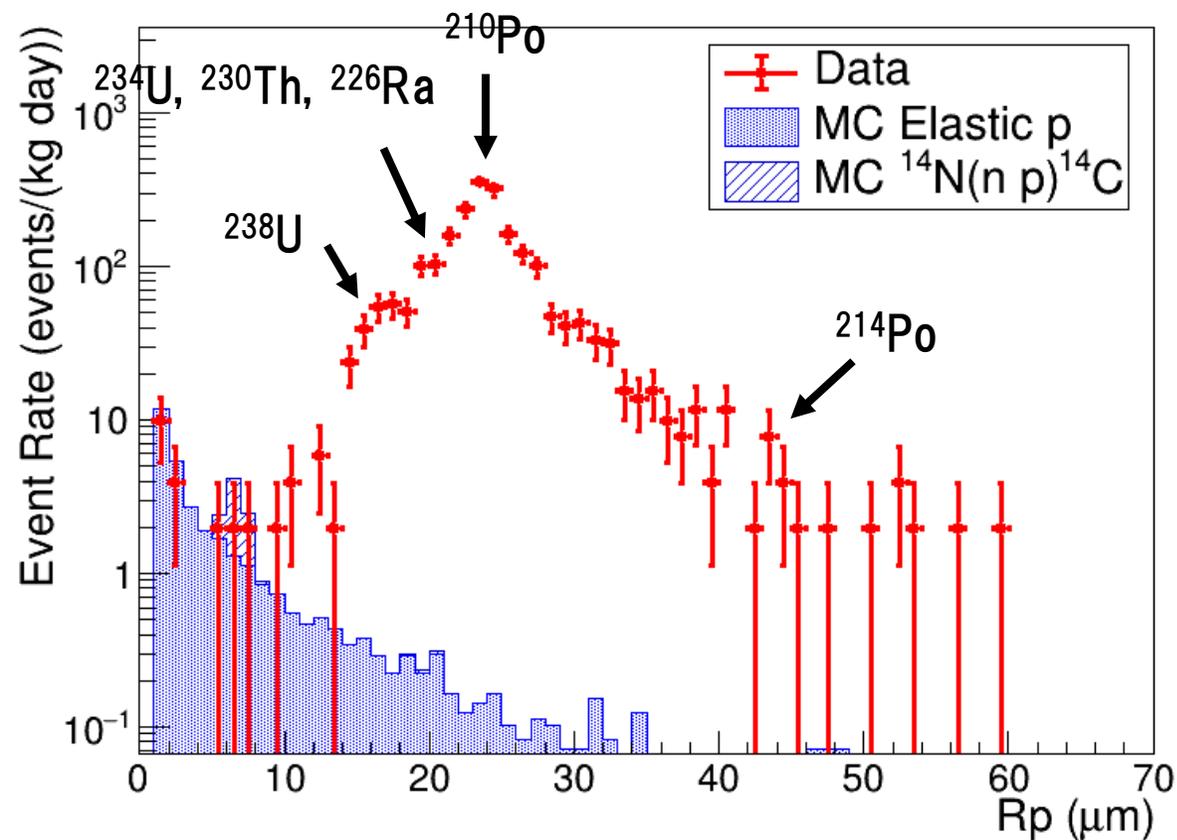
- ・ U/Th系列による(α n)反応 (neucbot)
- ・ ^{238}U による自発核分裂

中性子によるproton反跳へ (geant4)

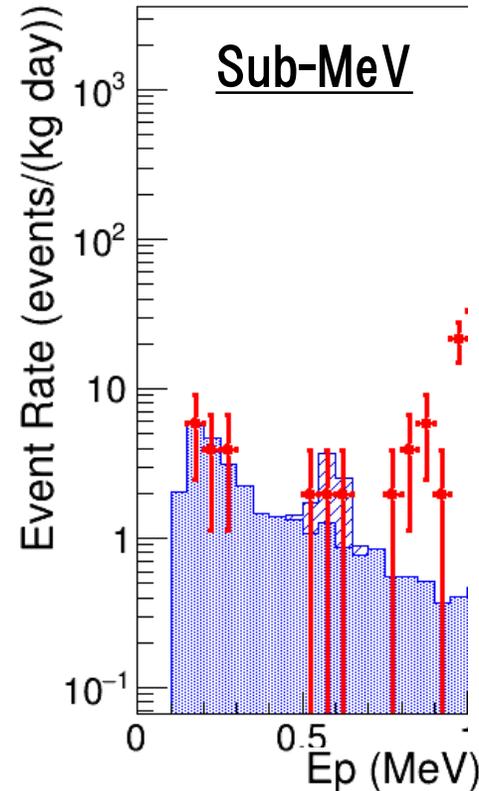
Preliminary

➤ 17.2 g*month分の解析結果(signal)との比較 (simulation : dry 8%)

《飛程分布》



《エネルギー分布》



➤ sub-MeV帯+熱中性子領域は、シミュレーションによる予想と観測が無矛盾

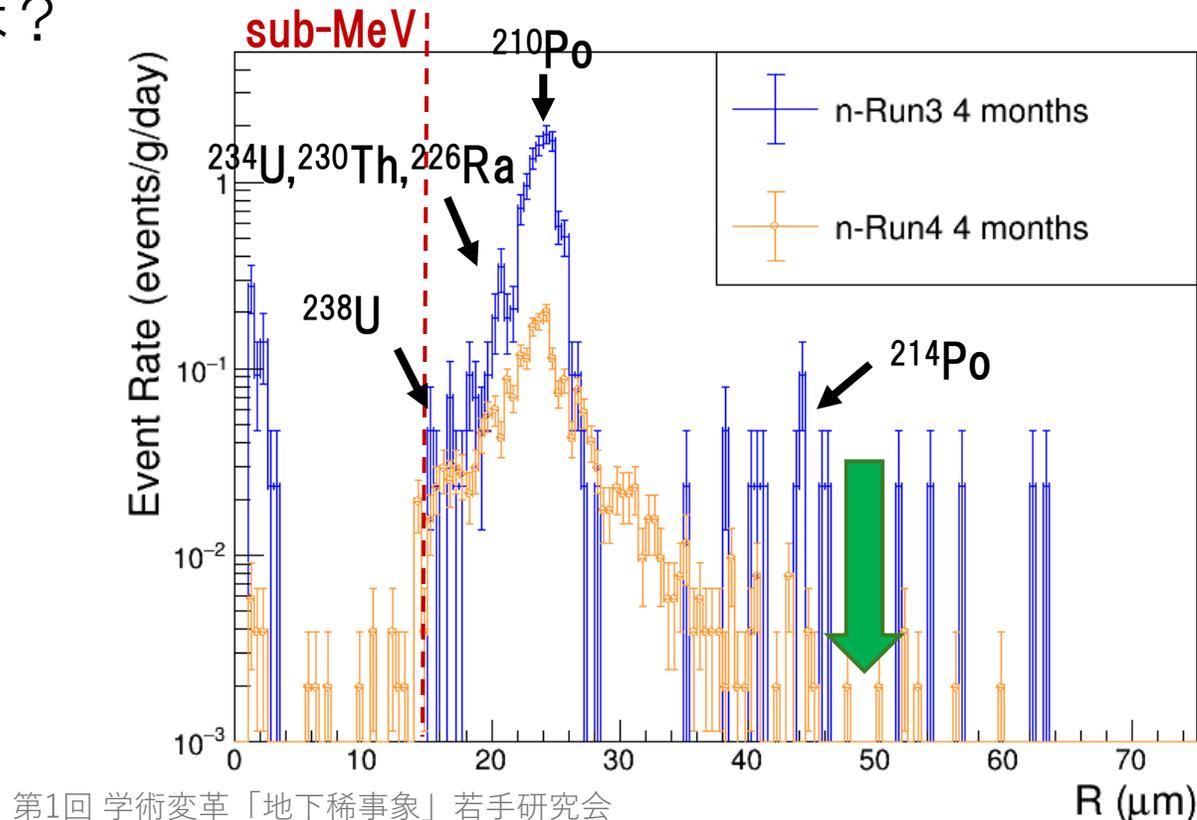
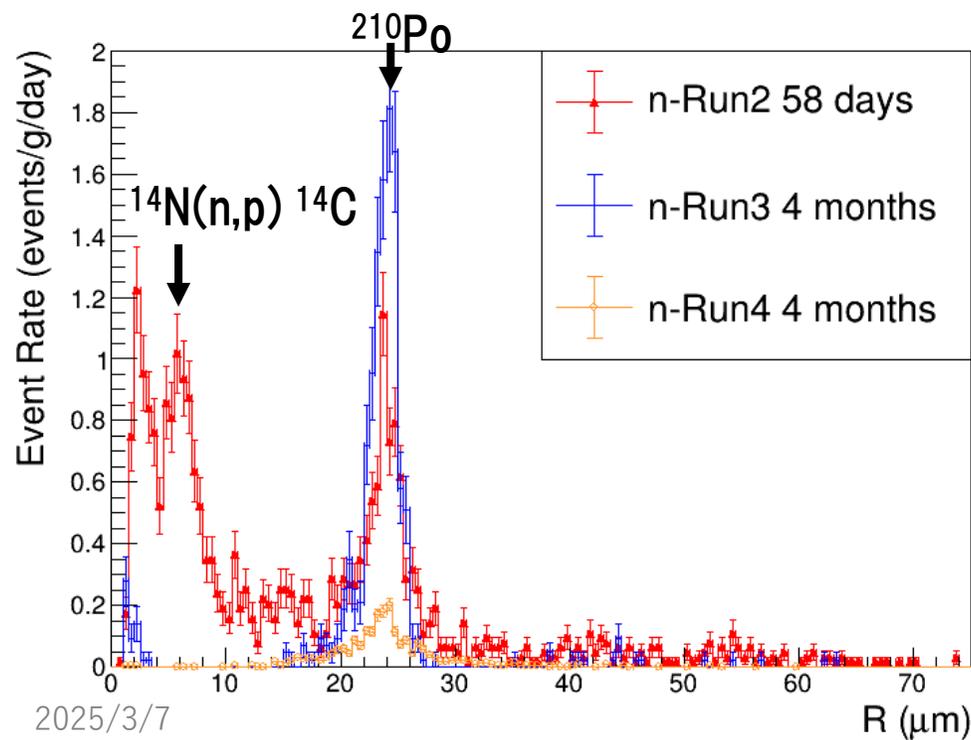


見えているprotonの飛跡は中性子による弾性散乱と熱中性子捕獲によるもの

➤ 最終的に中性子のスペクトルに直す必要がある

課題 α 線バックグラウンド・エネルギー分解能

- n-Run2(地上), n-Run3(地下), n-Run4(地下+Rnフリールーム)
- 地上Runで見えていた15 μm 以下の中性子によるprotonの弾性散乱、熱中性子捕獲後のproton
⇒地下Runで減少
- Rnフリールームにより、 ^{214}Po による α 線をかなり落とすことができる
- n-Run4における ^{210}Po のピーク ⇒ n-Run3に比べて一桁以上低い、かつ、裾がある
⇒ エネルギー分解能が悪くなっているのでは？

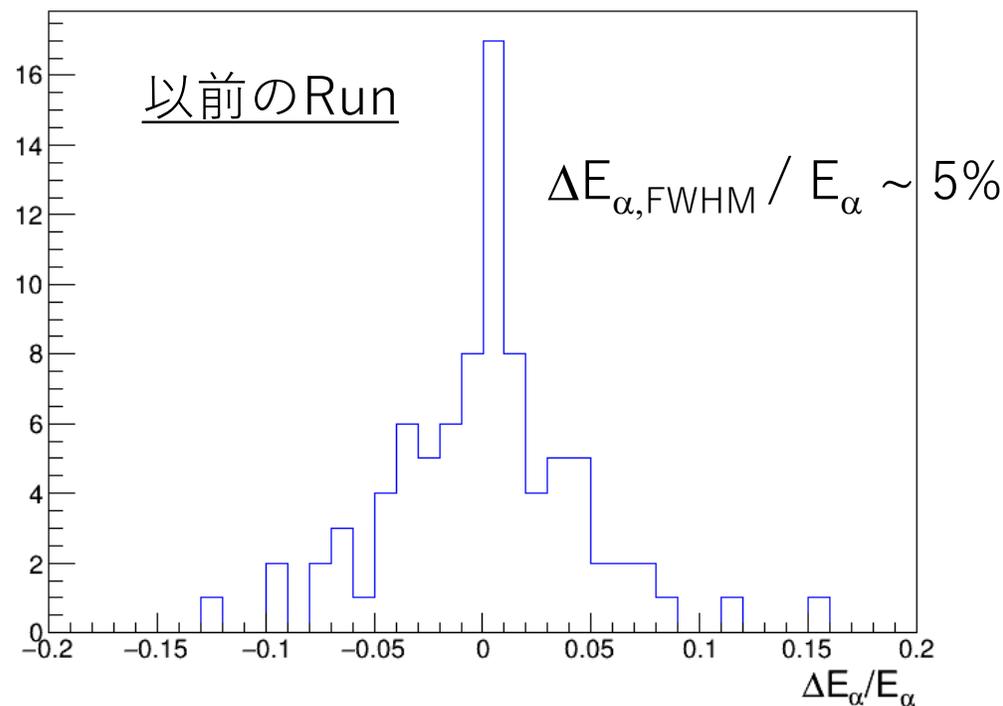
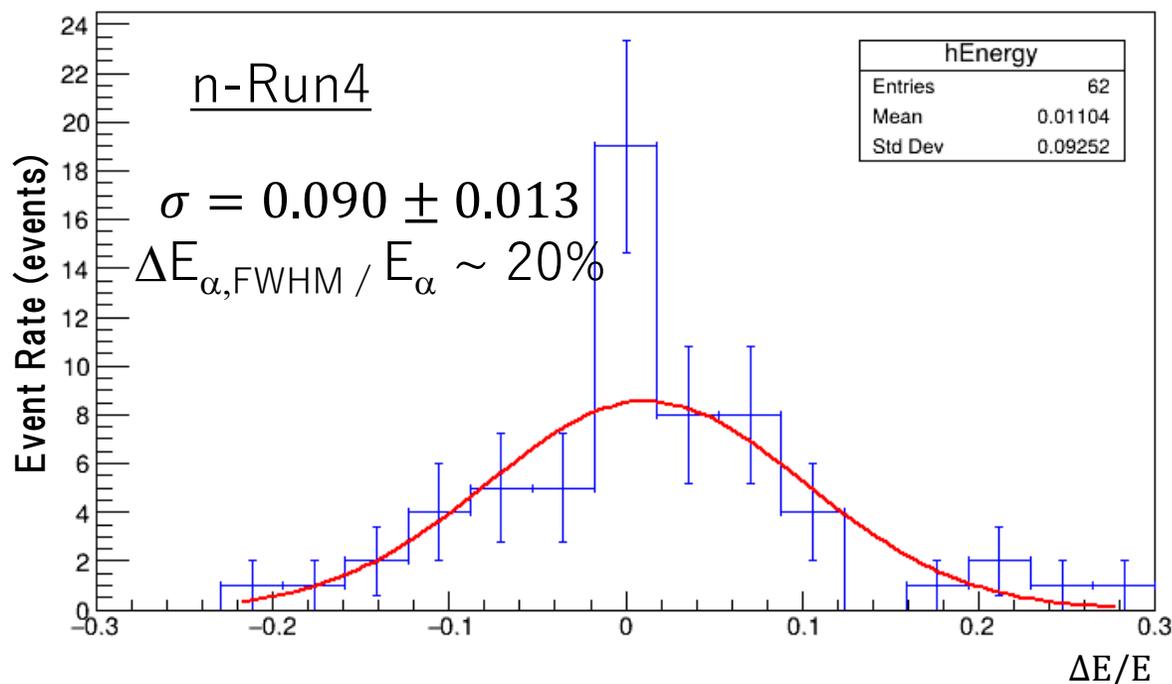
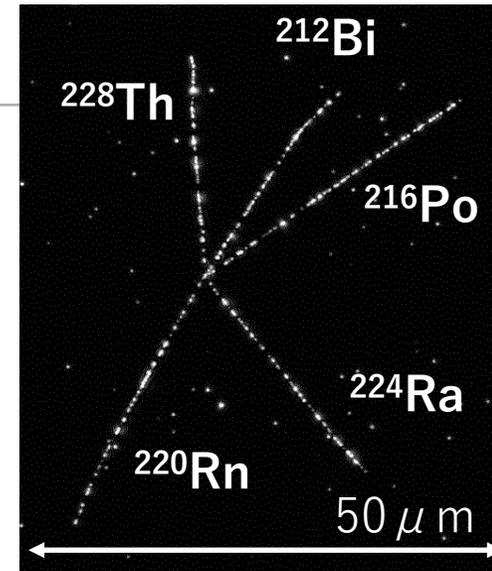


エネルギー分解能の評価

- $^{228}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ までの α 崩壊による飛跡からエネルギーの測定値を見積もる
 $\Rightarrow \Delta E/E$ を計算し、エネルギー分解能を評価

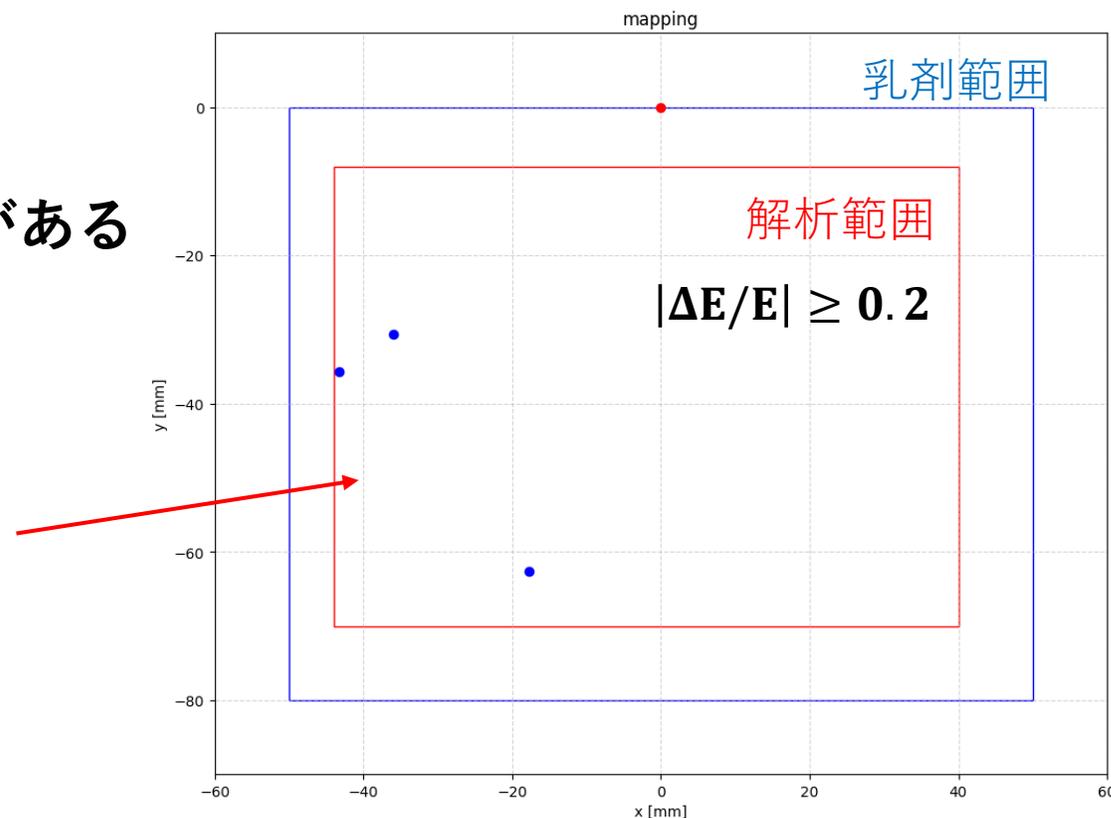
$$\Delta E/E = (\text{測定値} - \text{理論値}) / \text{理論値}$$

- $\sigma \approx 0.09$ 、 $|\Delta E/E| \geq 0.2$ のテールが残る結果
- n-Run1に比べ、n-Run4では分解能が悪くなっている



➤ $\Delta E/E$ がサンプルの端で大きくなる可能性がある

$$\begin{aligned} \Delta E/E &= 0.24(\text{Rn220}) \\ &= 0.28(\text{Po216}) \Rightarrow (-43.3092, -35.7056) \\ &= 0.20(\text{Po212}) \\ &= 0.19(\text{Ra224}) \Rightarrow (-17.7467, -62.6023) \\ &= -0.22(\text{Th228}) \Rightarrow (-35.9981, -30.6777) \end{aligned}$$

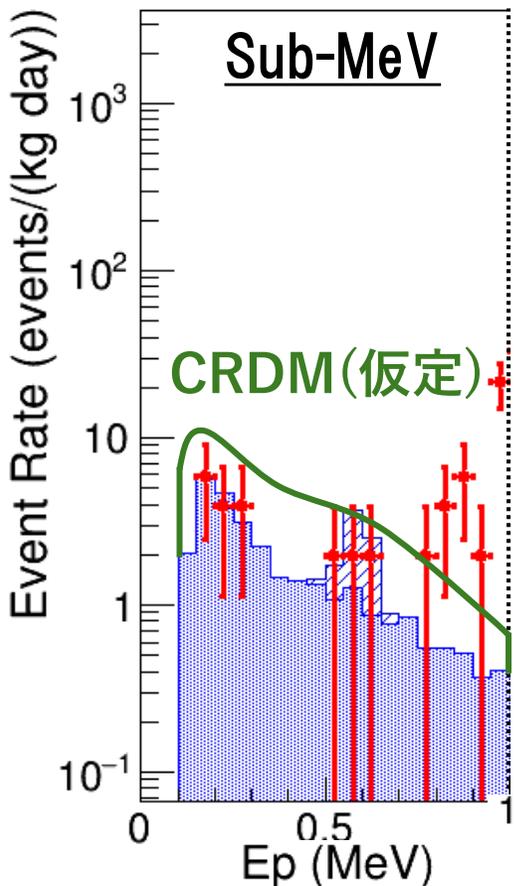
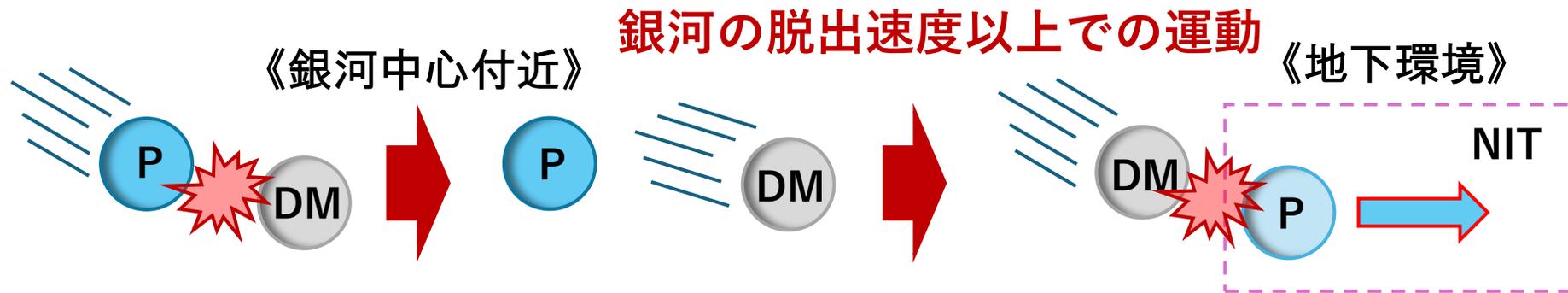


➤ 解析段階で、端の方を除外することでエネルギー分解能の改善を目指す

- ・すでに解析してしまったサンプル
⇒ イベントごと座標を取得しているため、端の方のイベントを容易に除外可能

Cosmic Ray boosted Dark Matter(CRDM)

N.Y. Agafonova et al, JCAP07(2023)067.



- ・ 宇宙線による加速を仮定したダークマター
⇒ ターゲットとなるのは軽い元素 (NIT中のH、C、N、O)
- ・ 今回の中性子測定の結果から、CRDM探査へ応用
⇒ 理論から予測されるCRDM由来のイベントをヒストグラムに積み立て (現状、まだ計算しきれていない)
- ・ Dataと理論値の差を利用した統計的手法により、質量領域 keV~GeVのCRDMに対し、断面積 σ_χ で制限をかける

➤ 地下環境中性子測定

- ・ sub-MeV帯や熱中性子領域におけるprotonの信号が検出できている
- ・ 統計量を増やす
(80 g*month スケールの実験を行い、現在17.2 g*month分の解析が終了)
- ・ エネルギー分解能の評価として、 $|\Delta E/E| \geq 0.2$ のテールが残っている
- ・ ラドンをさらに減らす環境を検討し、ラドン娘核によるバックグラウンドを低減
- ・ 岩盤やコンクリート内部における水分量、測定の方法や季節における不定性の評価

➤ CRDM探査

- ・ 今回の結果から質量keV~GeVのCRDMに対して $\sigma_\chi \approx 10^{-27} \text{ cm}^2$ 程度で制限ができそう
- ・ 今回は中性子測定に特化した実験
⇒ 中性子遮蔽 + スケールアップ + 解析速度をアップグレードによって
 $\sigma_\chi \approx 10^{-30} \text{ cm}^2$ 程度の制限を目指す