

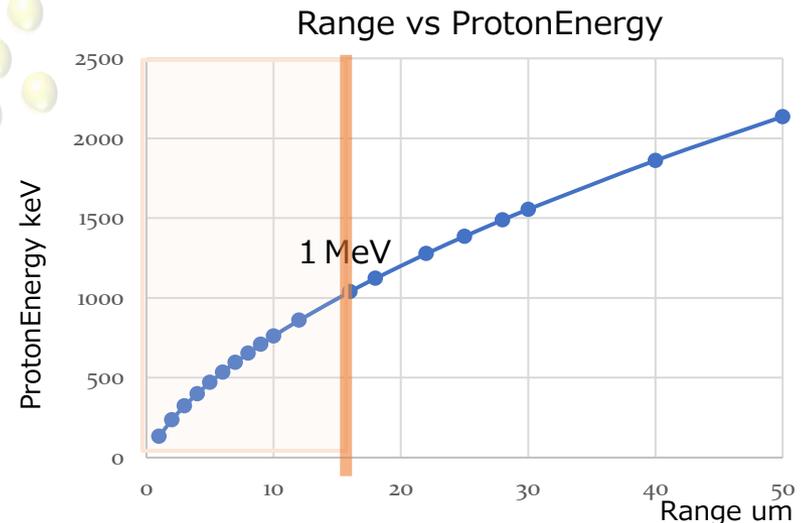
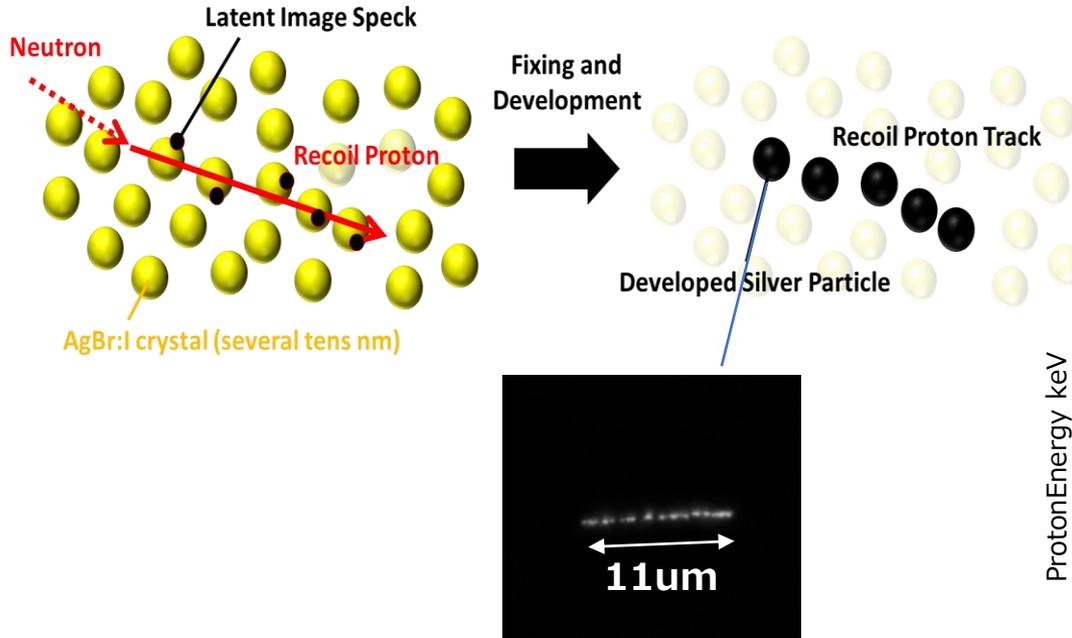
超微粒子原子核乾板を用いた sub-MeV環境中性子測定

2021.11/25~11/26

地下宇宙若手研究会

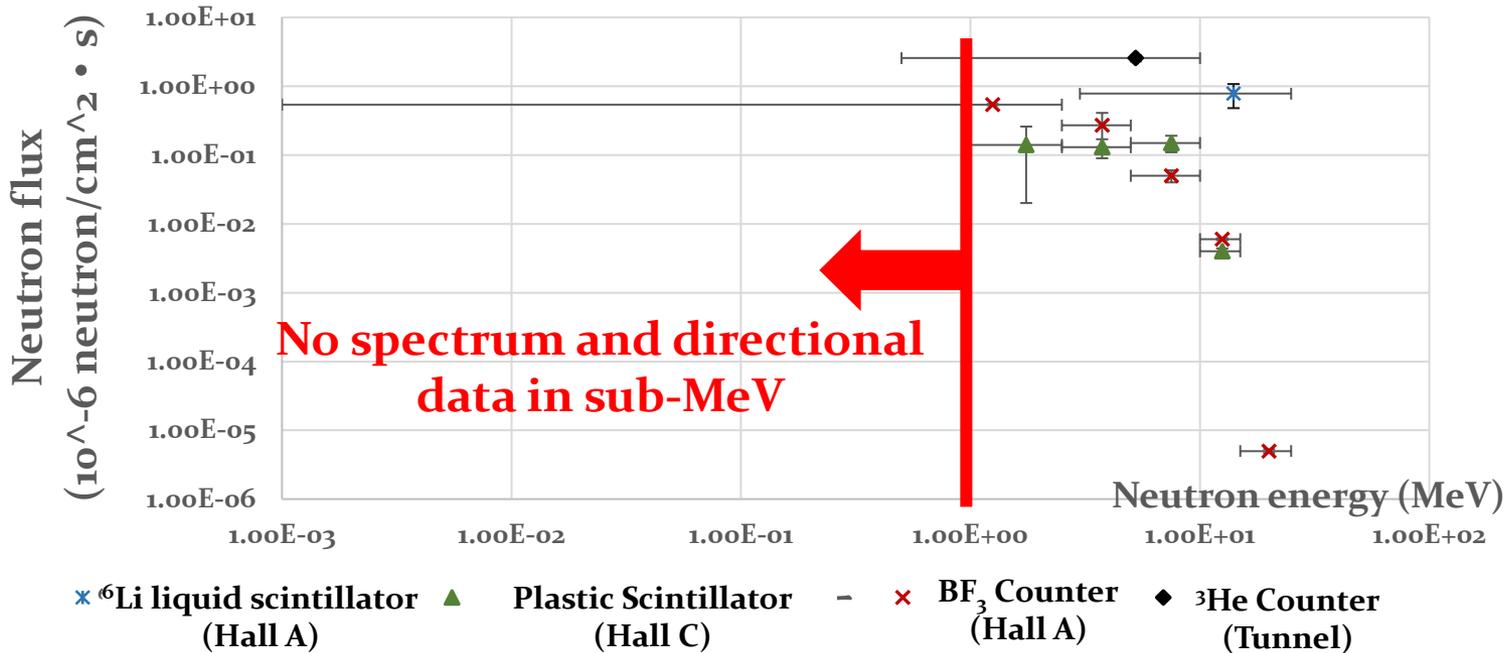
東邦大学 赤松咲耶

- 地下などの低バックグラウンド下で行われる暗黒物質直接探索実験などにおいて、環境中性子は背景事象となりうる。
- 超微粒子原子核乾板(NIT)は、AgBr結晶が高密度に分散された固体飛跡検出器であり、**数umの高い位置分解能**と、飛跡の**方向感度**を合わせもつ。
- NIT中に含まれる水素原子核を標的原子核とし、反跳原子核を飛跡として捕らえる。sub-MeV中性子ではNIT中で陽子は数um~数十umの飛跡を作る。



これまでの地下環境中性子測定@LNGS

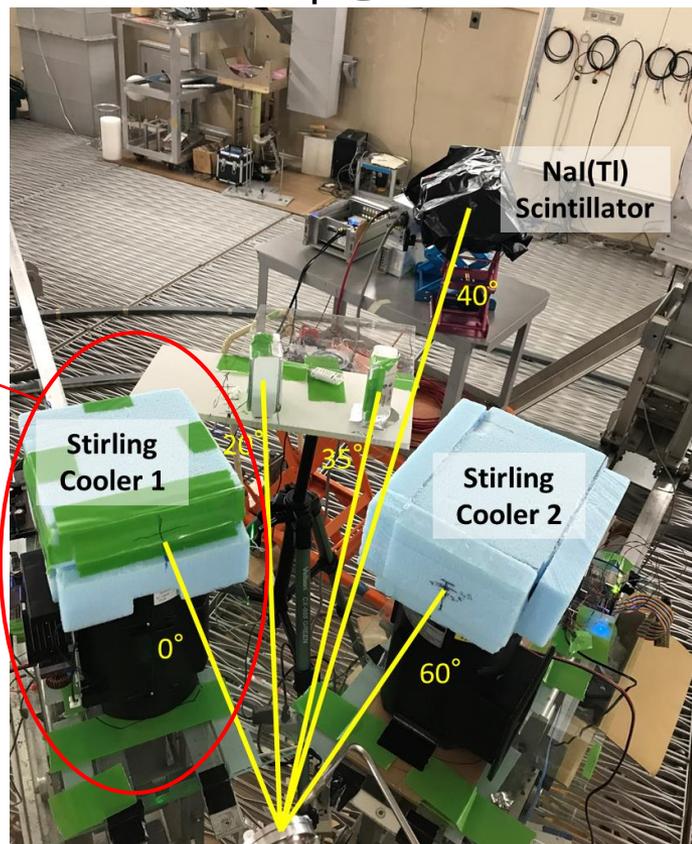
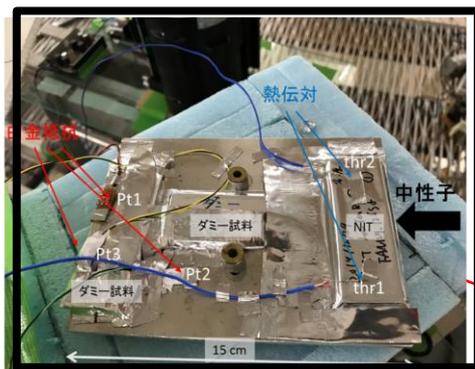
H. Wulandari, et al., *Astropart. Phys.* **22** (2004) 313.
 A. Rindi, et al., *Nucl. Inst. Meth. A*, **272** (1988) 871.



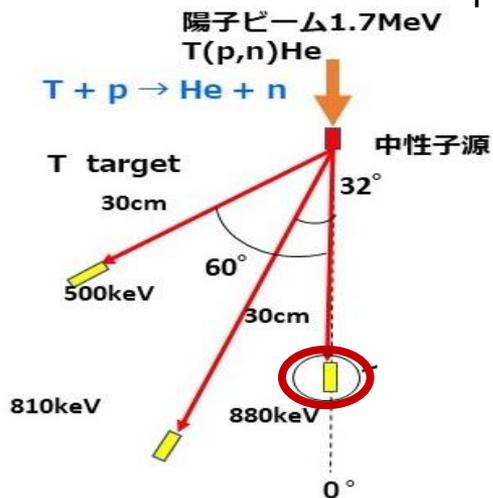
Neutron Detector	Energy Range	γ -ray rejection power	Detection Efficiency	Energy Spectrum	Directionality
有機シンチレータ	1MeV~100MeV	Bad	Good	Good	Bad
BF_3 , ^3He カウンター	thermal~20MeV	Good	Good	Bad	Bad
比例計数管	10keV~2MeV	Bad	Bad	Good	Bad
原子核乾板	Sub-MeV~	Good	Good	Good	Good

Sub-MeV中性子測定の実証

SetUp@AIST 2019

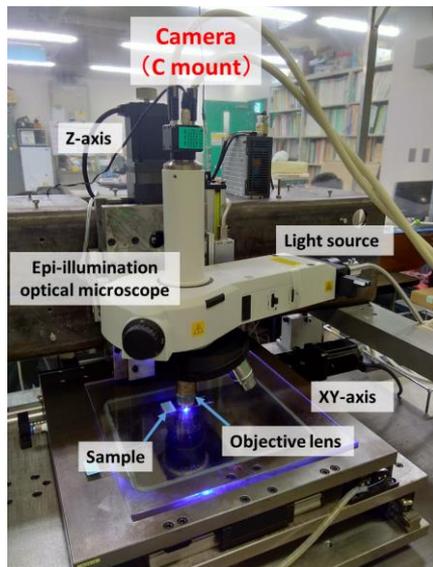


中性子源: 陽子ビーム1.7MeV $T(p,n)He$
 $T + p \rightarrow He + n$



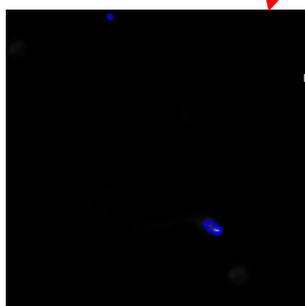
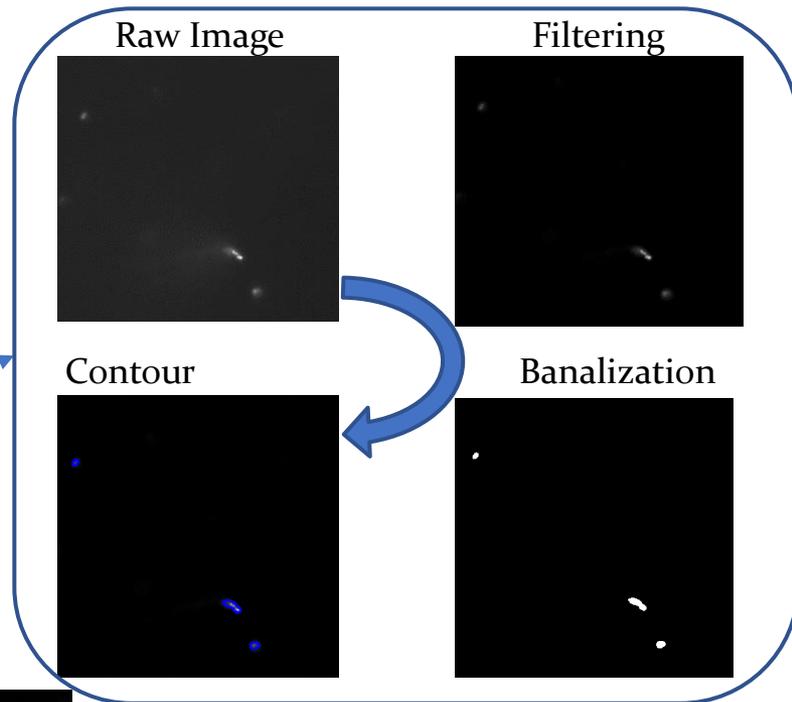
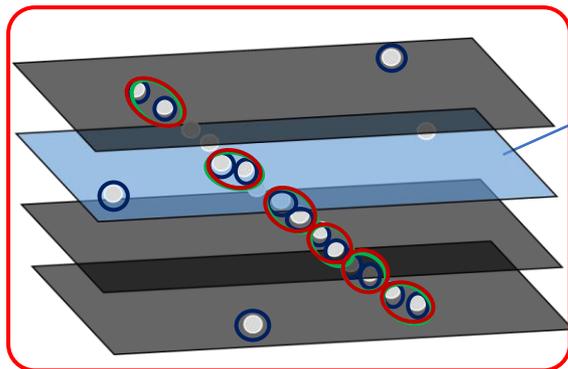
2019年産業技術総合研究所(AIST)にて中性子ビーム(880keV)を照射したサンプルを解析。

乾板中の飛跡の自動読み出しシステム

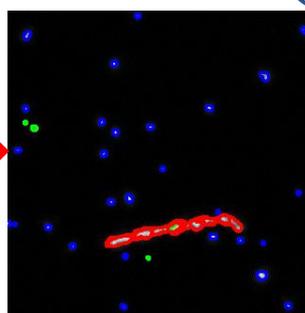
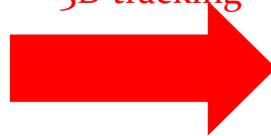


自動撮像装置PTS-4@東邦大学

Tomographic images acquired by
PTS4
2048pix × 2048pix



Micrometric
3D tracking



Tracking System

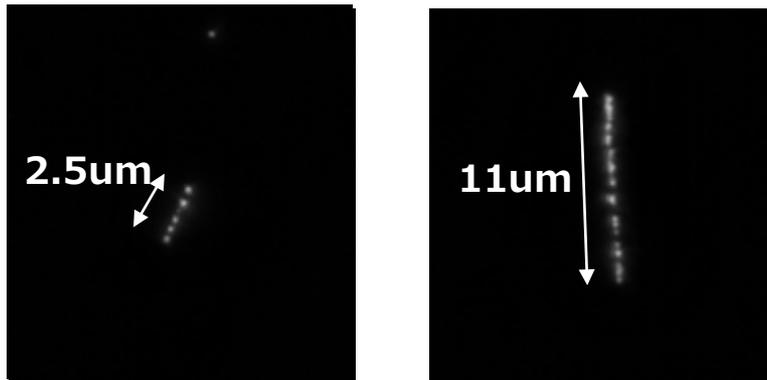
1. 現像銀をクラスターとして認識
2. 近接するクラスター同士でpairを作る
3. pair同士を接続し、飛跡として抽出

Current analysis speed:
150 g/year/machine

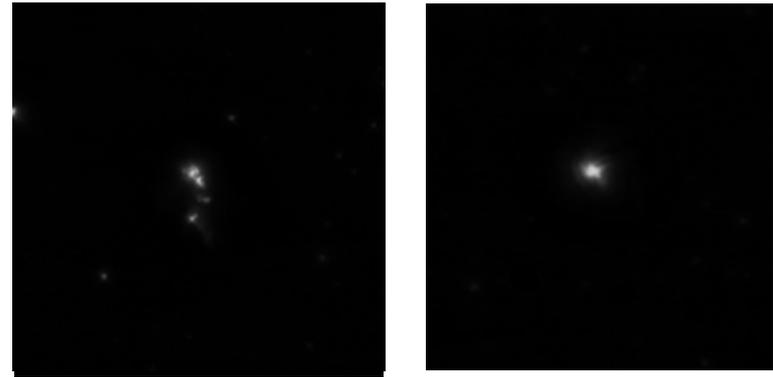
Objective lens	N.A. 1.40 60x
Light source	455 ± 27 nm LED
pixel resolution	0.092 um
F.O.V	180umx180um
Camera	4MP, 16ofps

候補事象の切り取り画像取得

Signal(ProtonRecoil)



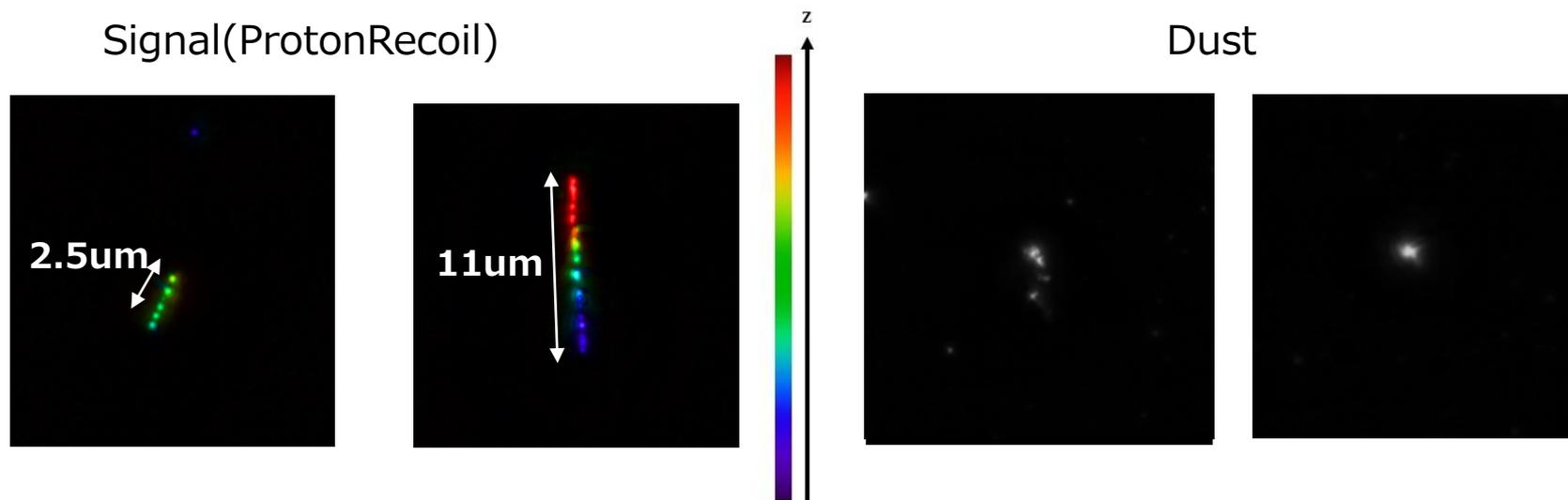
Dust



- 自動解析システムでは、スキャン後に信号の候補事象となったイベントの周囲を切り取った画像が抽出される。

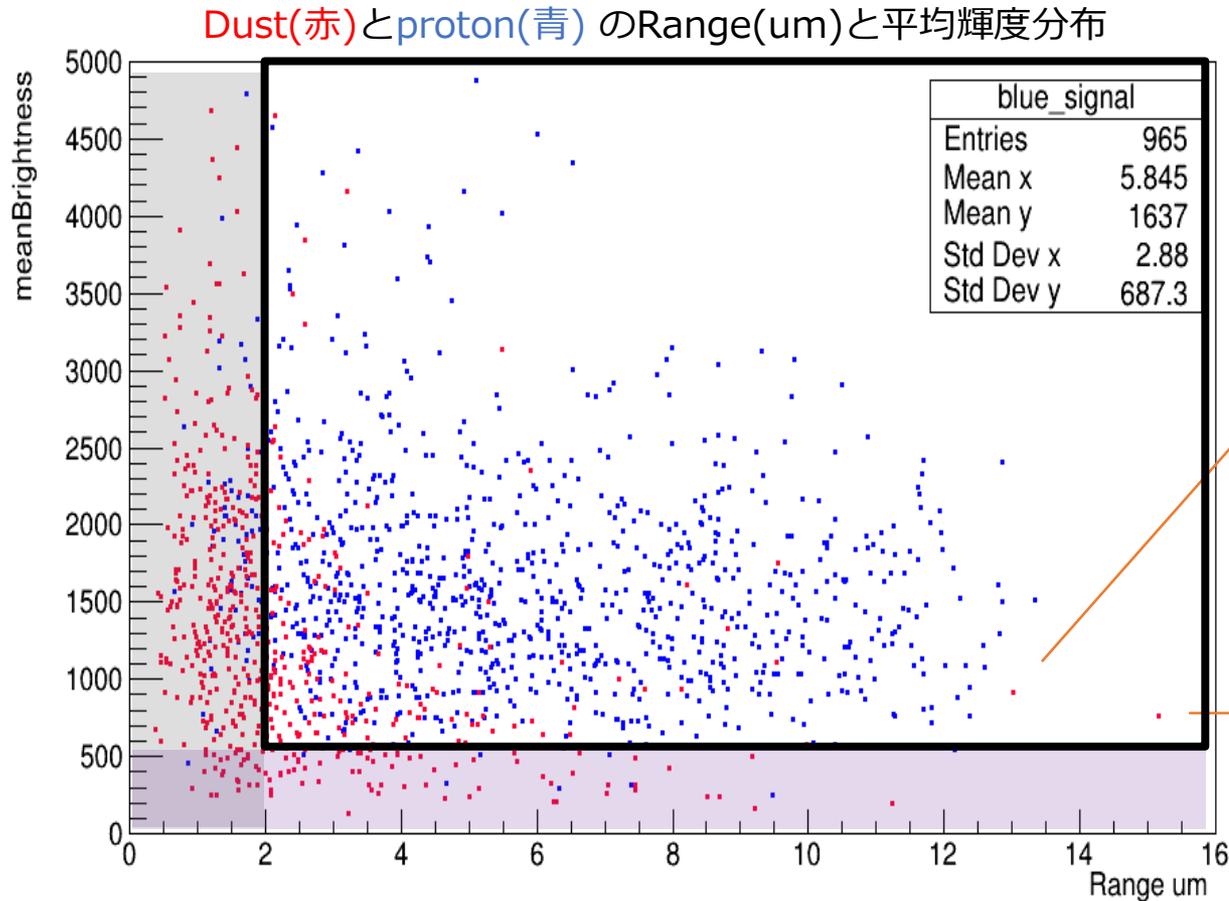
➡飛跡の幾何学的形状や特徴得ることができる。

候補事象の切り取り画像取得

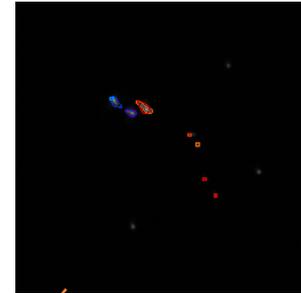


- 自動解析システムでは、スキャン後に信号の候補事象となったイベントの周囲を切り取った画像が抽出される。
➡ 飛跡の幾何学的形状や特徴得ることができる。
- 深さ方向に対する飛跡の相対位置をカラースペクトルに沿って色付け。
➡ 二次元画像に対して三次元情報を持たせている。

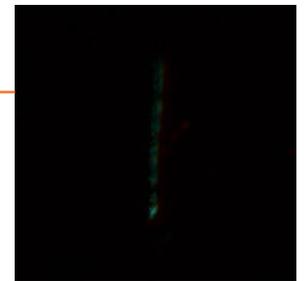
本解析における中性子測定のエネルギー閾値



Grain誤接続



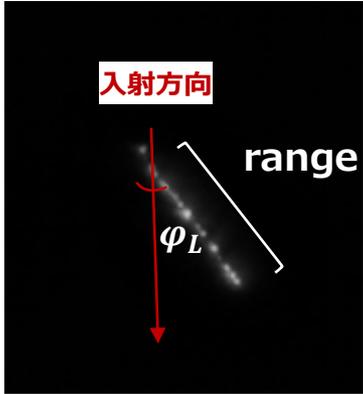
繊維状のdust



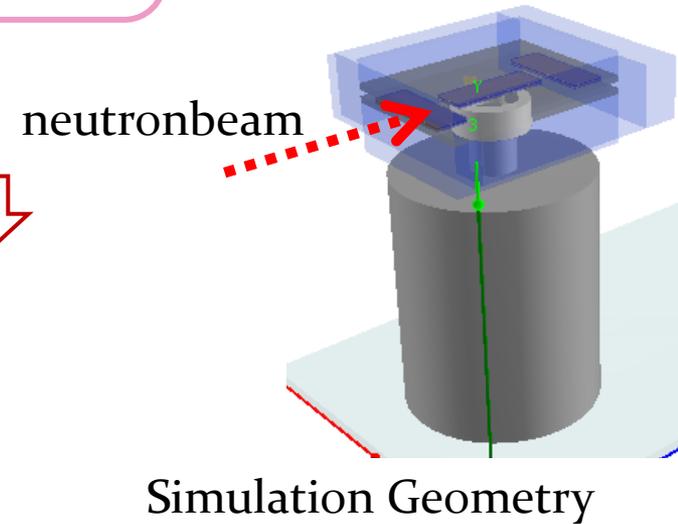
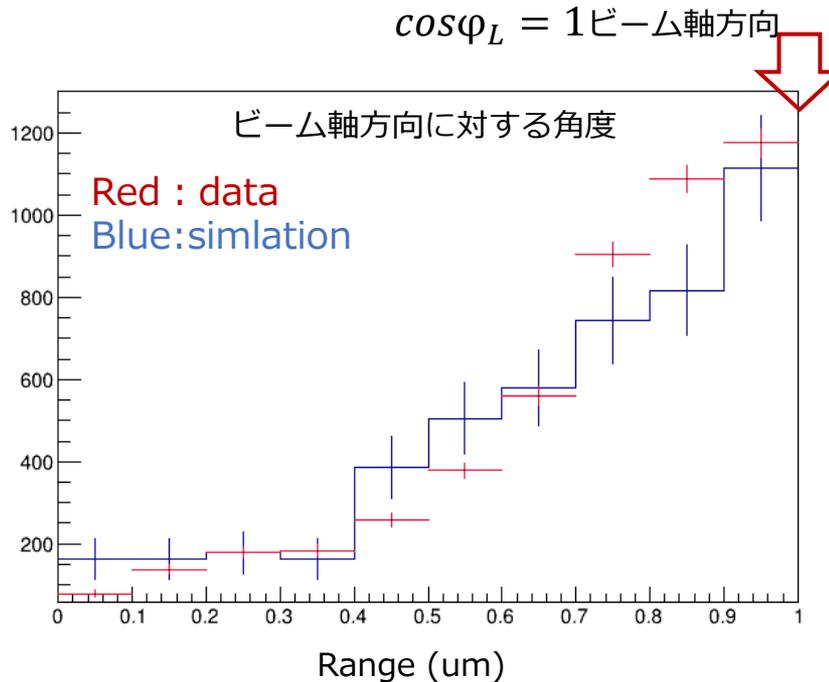
✓ Dustが多く分布する飛程長は2um以下かつ平均輝度が5~700以下

➡本解析では、閾値2.0um(240keV) 平均輝度700以上の事象を信号事象として取り出している。

Sub-MeV中性子測定の実証

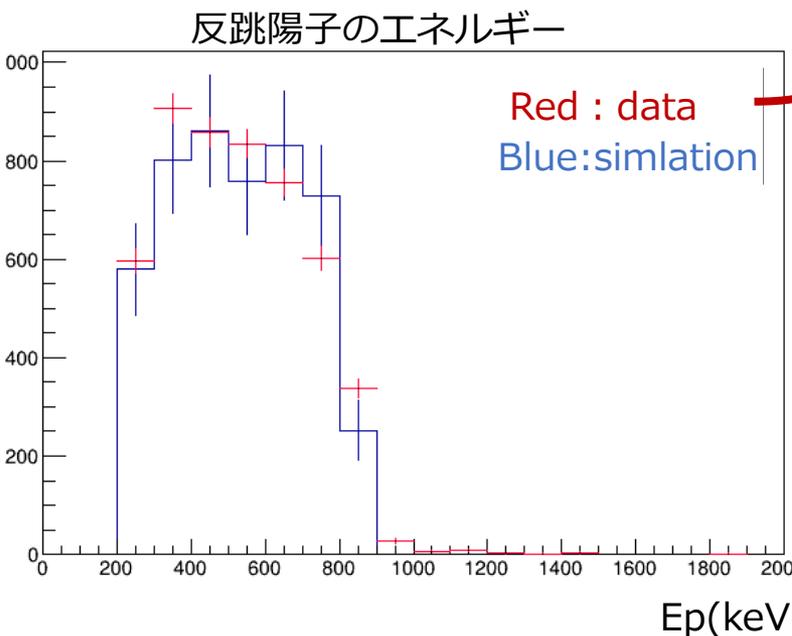
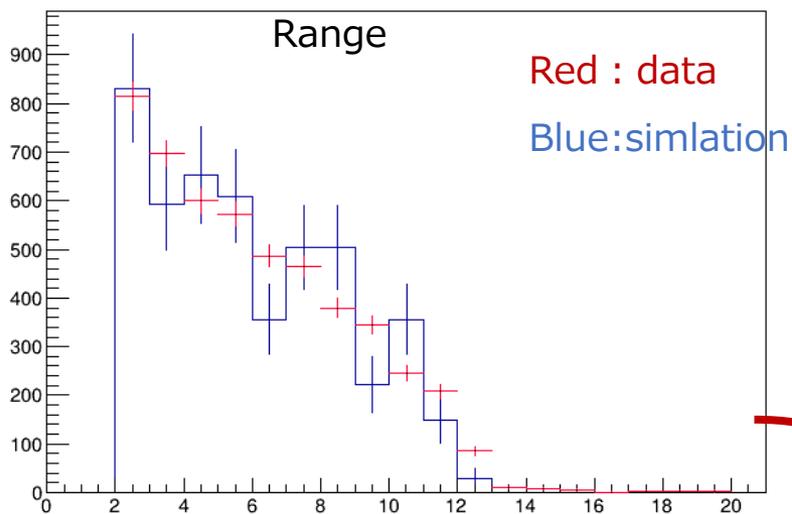


- 検出数 \longrightarrow 入射粒子の到来量
- 飛跡の長さ \longrightarrow 反跳陽子のエネルギー
- ビーム軸に対する角度

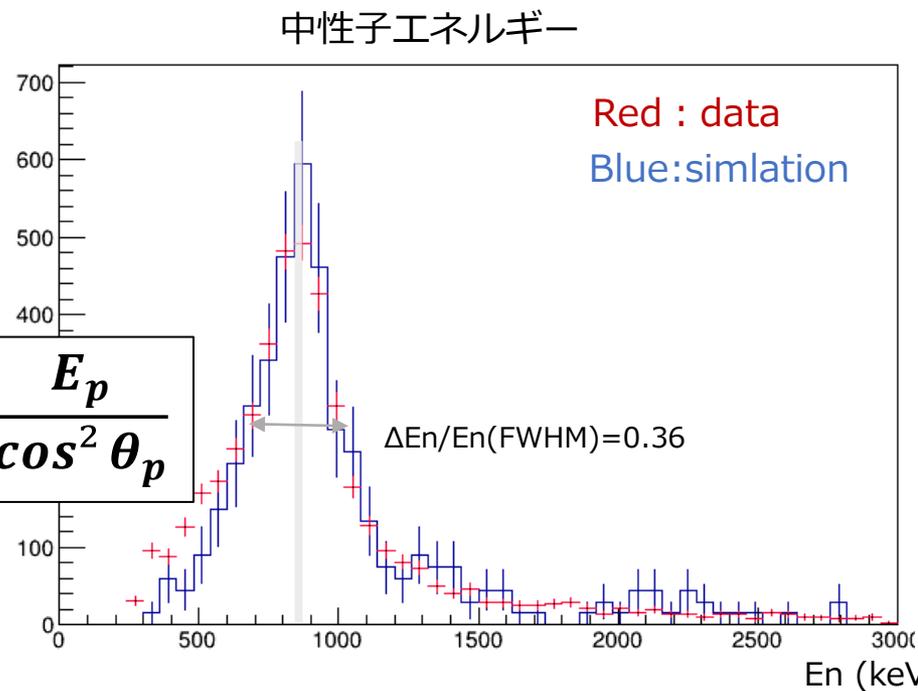


- ✓ ビーム軸方向の角度にピークを持つ。
- ➡ NITに記録された飛跡から方向情報を得ることが出来る。

Sub-MeV中性子測定の実証



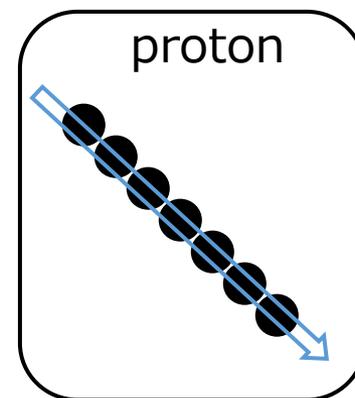
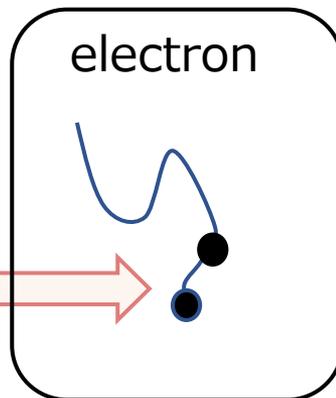
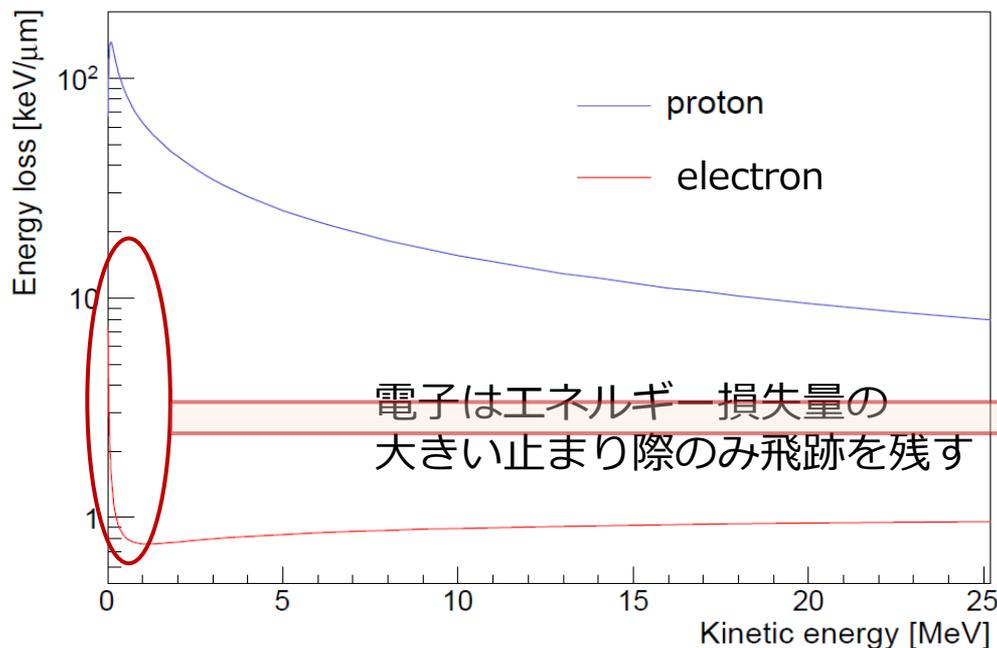
$$E_n = \frac{E_p}{\cos^2 \theta_p}$$



- ✓ 反跳陽子の飛程とビーム軸に対する角度の測定から中性子のエネルギー再構成が可能。
- ✓ シミュレーションに対してエラーの範囲内でよく一致。
- ✓ 検出された事象を100%として無矛盾である。

NIT中での環境γ線について

Energy loss in AgBr



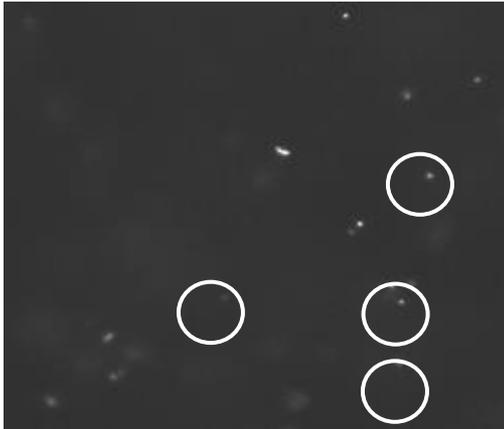
γ線による電子は、protonに比べて dE/dx が低い。

➡直線的、連続的な飛跡を作るprotonに対して電子は dE/dx が高くなる止まり際1μm以下において確率的に現像銀を作るため、単独の現像銀が点のようにNITに記録されることが期待される。

γ線照射サンプルを用いたNIT中のγ線の観測

環境γ線量約1年分を照射したサンプル

Proton



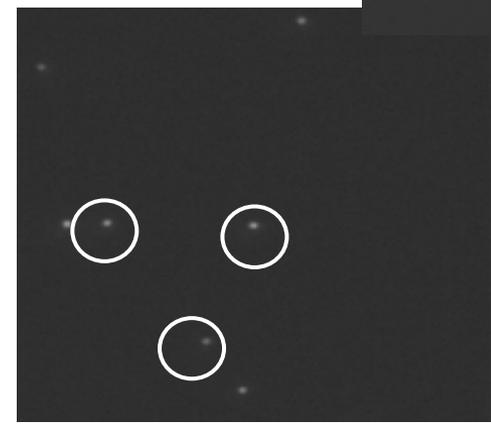
Am_gamma

E_γ 0.016~0.060MeV



Co_gamma

E_γ 0.66~1.33MeV



Cs_gamma

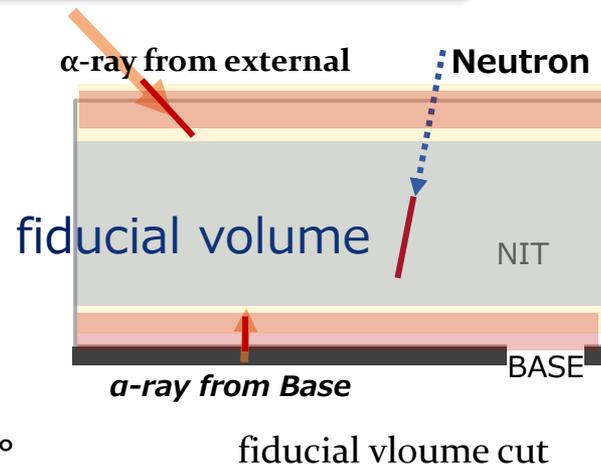
E_γ 0.51~1.18MeV

• Am_gamma Co_gamma Cs_gamma のそれぞれNIT中で直線的な飛跡を作らない。

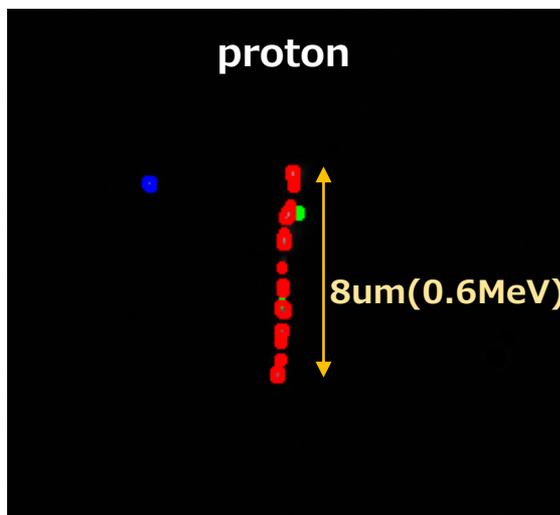
➡NITはγ線のエネルギーによらず、**環境γ線一年分の蓄積**に対して除去能を持つ。

中性子測定における背景事象は存在するか

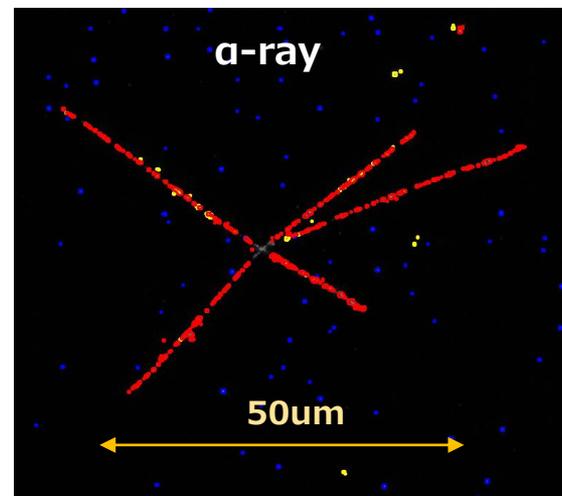
- γ 線
この測定系では検出されない



- α 線
 - ✓外部発生：fiducial volume cutで排除可能.
 - ✓内部発生：飛程長により排除可能
内部発生する α 線の飛程長は25 μm 以上。
sub-MeV帯の中性子の飛程領域には入らない。



A崩壊が記録されている場合
明らかに区別可能。



➡ sub-MeV領域に対してはBGフリーで測定を行うことができる。

LNGS Surface Run 2018

LNGS Laboratory



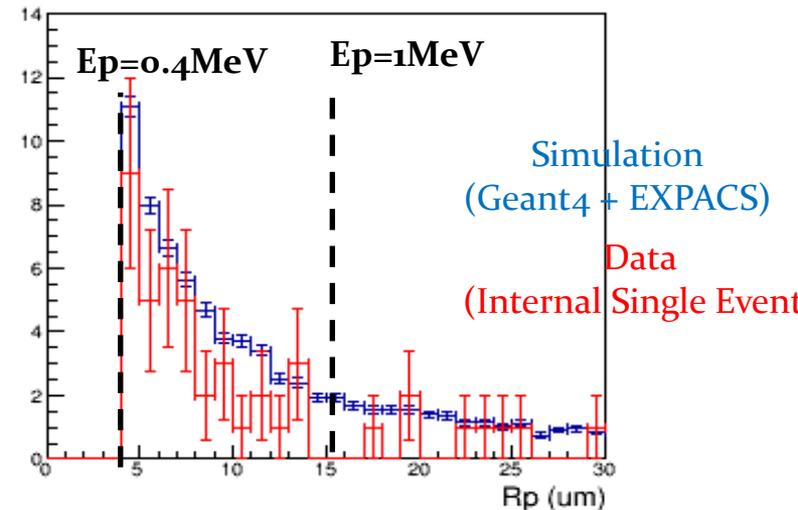
Cooler Box



- NIT was installed outside the building
- Exposure Time : 5.8 day
- Averaged Temperature : 4°C
- Analyzed Mass : 0.55 g
- Neutron Flux (0.2~10MeV) : $7.0 \times 10^{-3} / \text{cm}^2/\text{s}$

- エネルギー閾値0.4MeV
- ✓ シミュレーションとのスペクトルは一致しているが、データの1MeV以下の統計量は約30イベントと小統計。

Range



Neutron flux for sub-MeV region (4~16μm)

Data: $(1.0 \pm 0.2) \times 10^{-3} / \text{cm}^2/\text{s}$

EXPACS: $1.5 \times 10^{-3} / \text{cm}^2/\text{s} @ 0.4\sim 1\text{MeV}$

LNGS Neutron Measurement 2021

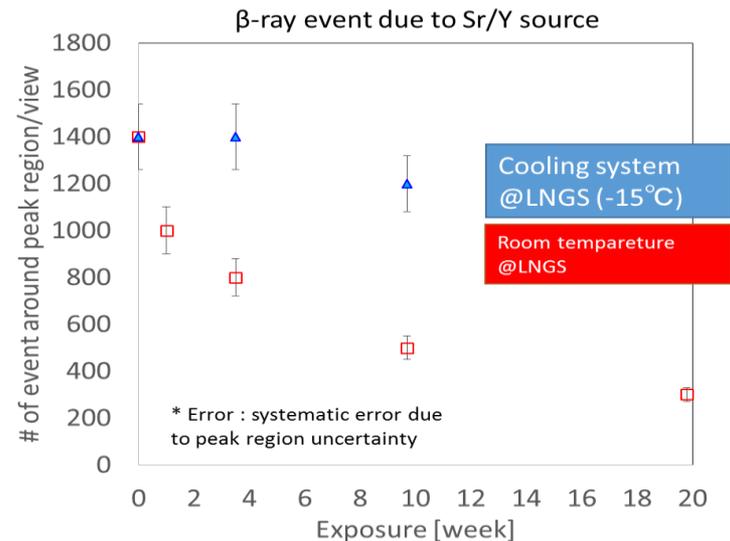
LNGS Laboratory



Cooler Box



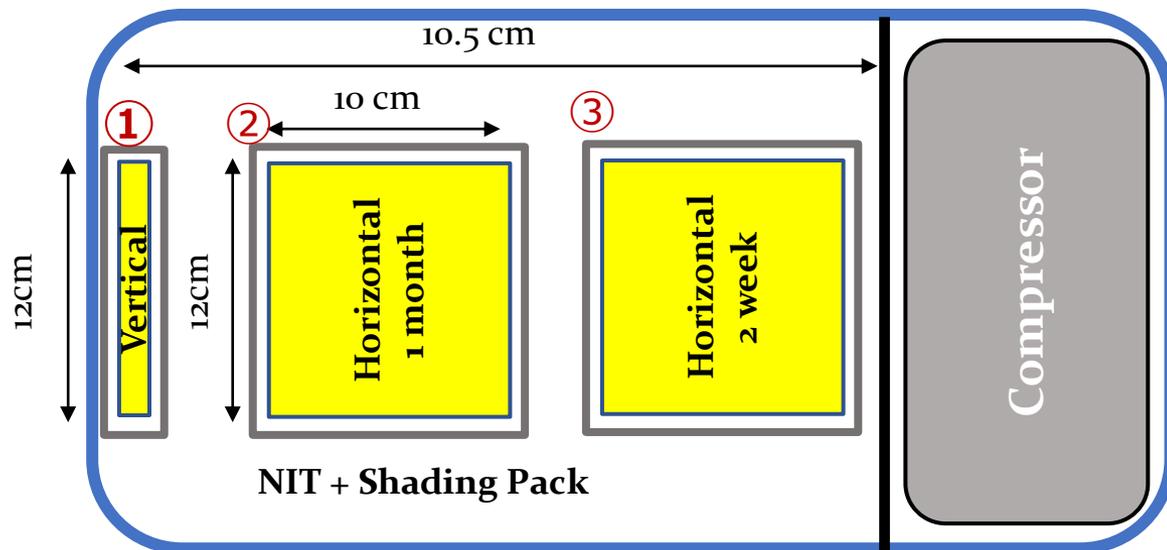
- NIT was installed outside the building
- Exposure Time : 5.8day \Rightarrow 30 day
- Averaged Temperature : 4degree \Rightarrow -25 degree
- Total TargetMass : 10g



Run Sample Setting

Freezer Box

Top view



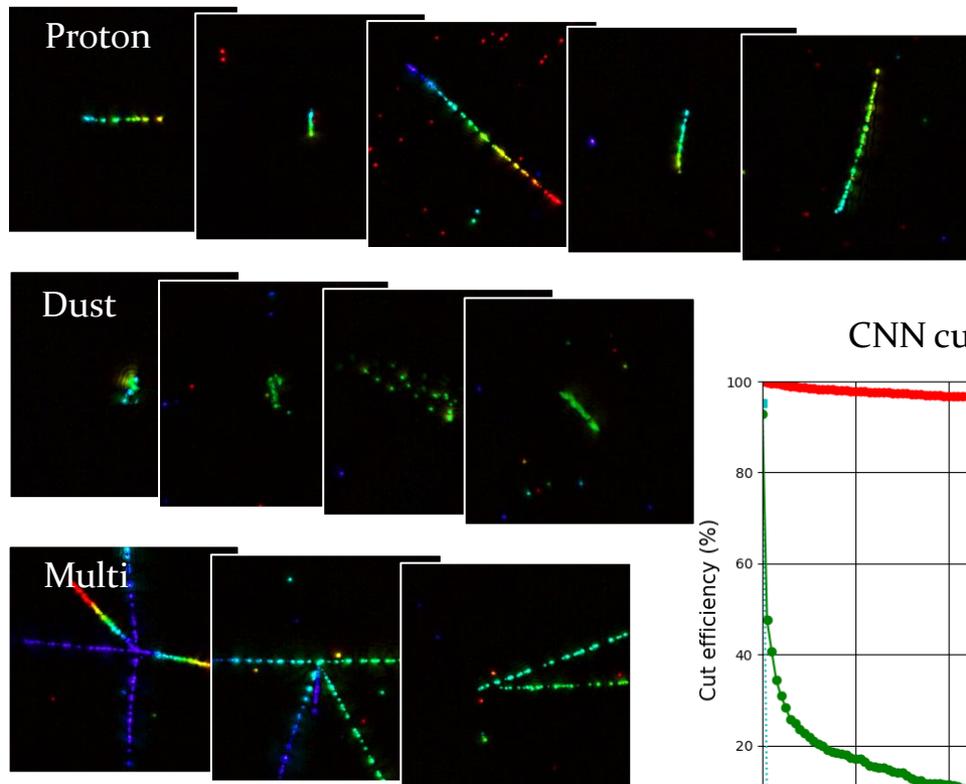
- Horizontal 1month
- Horizontal 2week
- Vertical 1month

地上環境中性子のflux及びスペクトル測定 + 事象の到来方向の角度異方性の有無
事象数の時間依存性

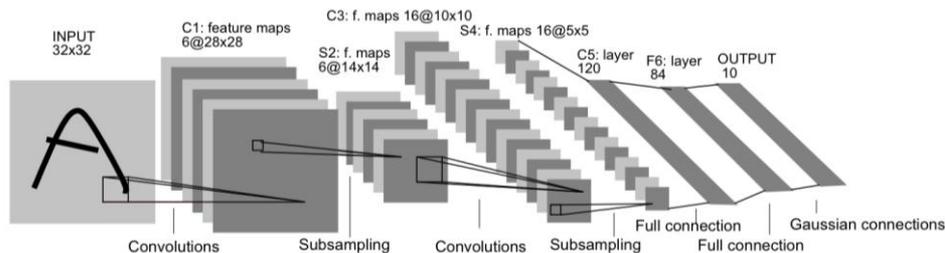
➡ 閾値240keVでのsub-MeV環境中性子スペクトルの測定 及び
中性子fluxの少ない地下での測定へのデモンストレーション の意義を持つ

CNNによる自動飛跡識別

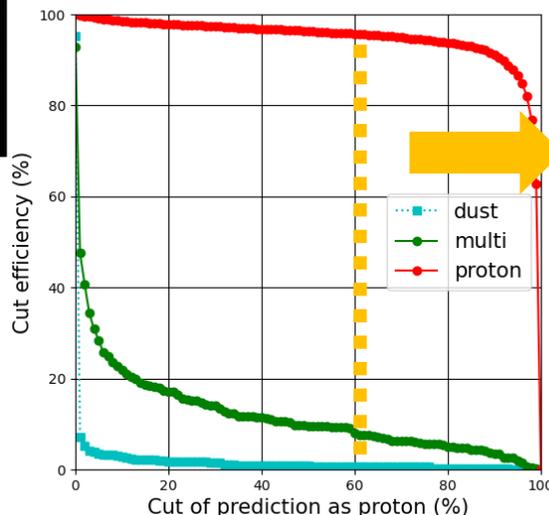
Training Samples



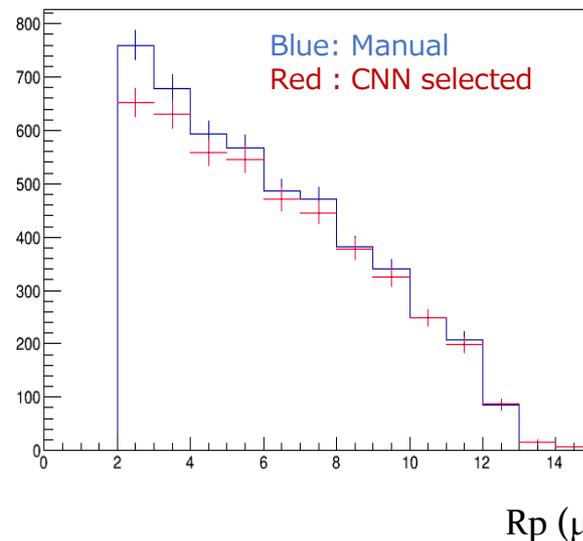
Convolutional Neural Network



CNN cut efficiency



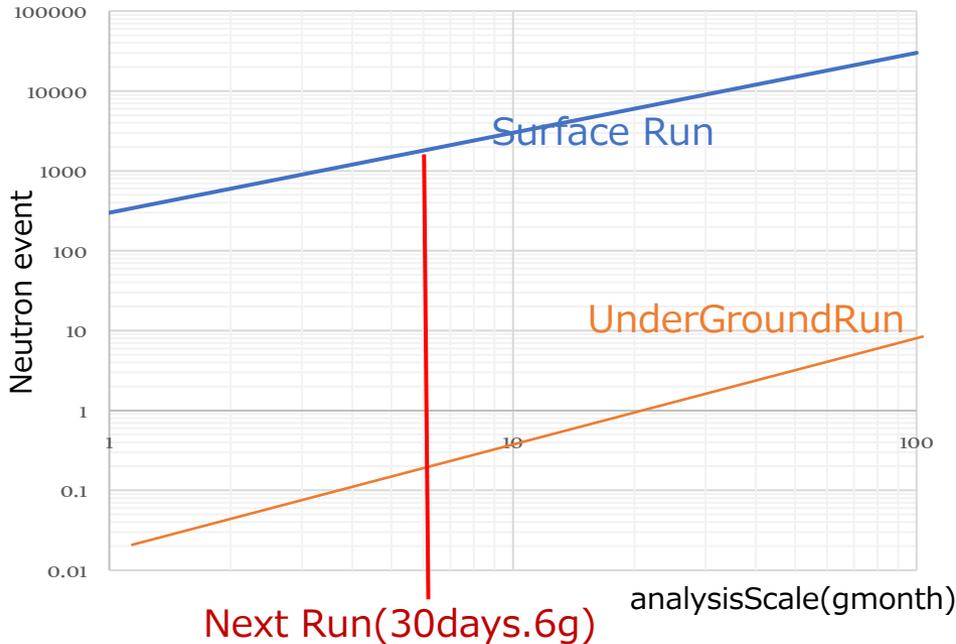
Relative efficiency to manual (705 keV neutron sample)



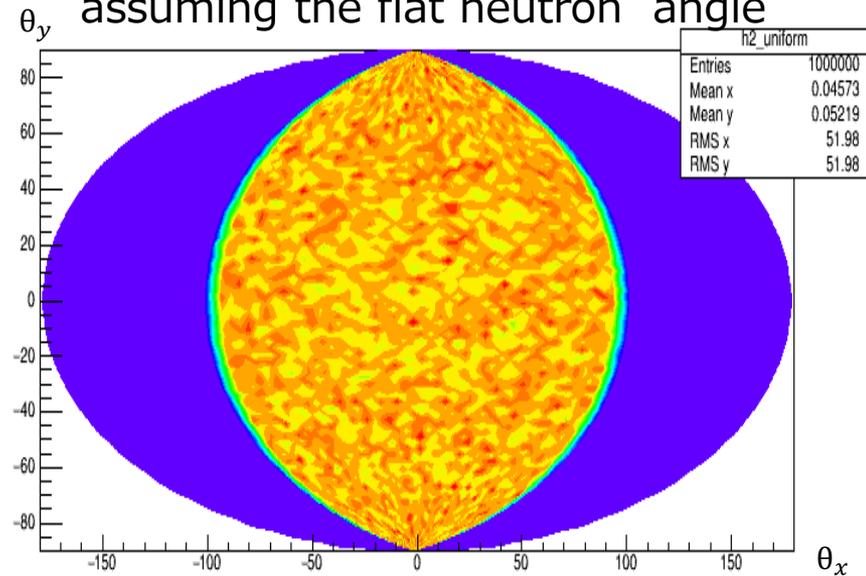
得られた画像を学習データとし、protonらしさ60%以上と判断された事象を取り出すことでマニュアルチェックの自動化も可能になっている。

Expected Result at This Run

ExposureTime vs Expected events



Expected Sky Map assuming the flat neutron angle



- 左図:期待されるイベント数の概略図。今回の解析(6g)では約2000eventを見込む。
➡2018年runと比較して大統計量。
- 右図は環境中性子が等方的に到来すると仮定した場合のスカイマップ。
➡到来方向の異方性の議論

2022年3月末までに中性子runサンプルの解析完了を予定している。

NITを用いた中性子測定では..

✓ sub-MeV帯の中性子スペクトル測定がBGフリーで行える。

- ・ γ 線は検出されない(γ 線に対して不感)
- ・ α 線事象については 外部起因：fiducial volume Cut
内部起因：飛程長で排除

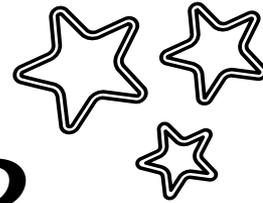
➡信号を飛跡として得られる原子核乾板ならではの特徴。

✓ 現在LNGSでの環境中性子測定run中

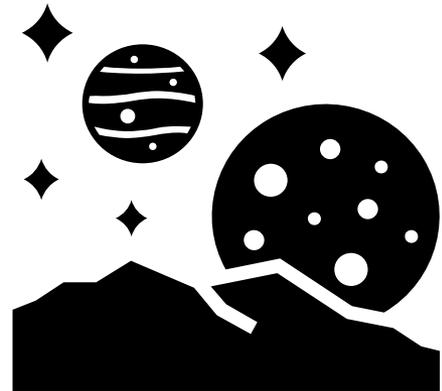
- ・ 照射期間、設置NITmassの拡大。
照射期間: 5.8day -> 30day
NITmass: 2g -> 6g

➡大統計でのスペクトル測定、方向異方性の議論が期待。

BACK UP



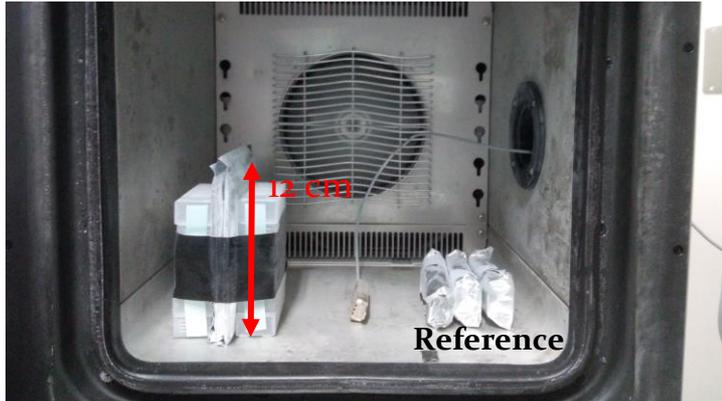
-Front Down



Nagoya Surface Run 2020

2021.03 物理学会報告[白石]

Nagoya (inside the building)

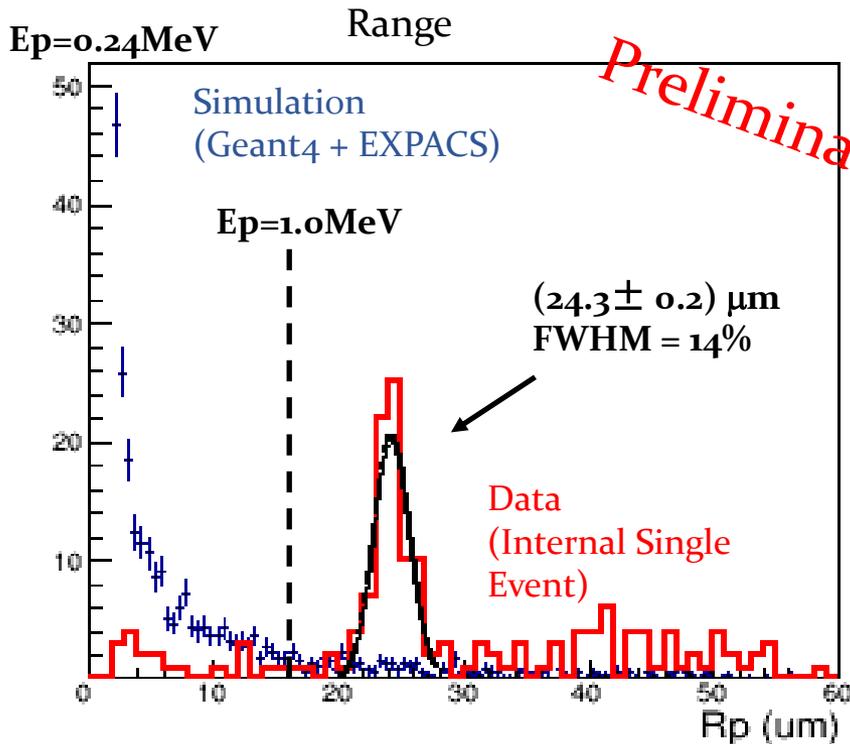


Inside the cooling chamber on the 1st floor of a five-story building at Nagoya University

- NIT was installed inside the building
- Device purification was done with 0.22 μ m PES filter
- Exposure Time : 31 day
- Averaged Temperature : -26 $^{\circ}$ C
- Analyzed Area : 36.2 cm 2
- Analyzed Mass : 0.71 g
- Neutron Flux (0.2~10MeV) : 2.0 x 10 $^{-3}$ /cm 2 /s

Nagoya Surface Run 2020 Result

2021.03 物理学会報告[白石]



Neutron flux for sub-MeV region (2~16 μm)

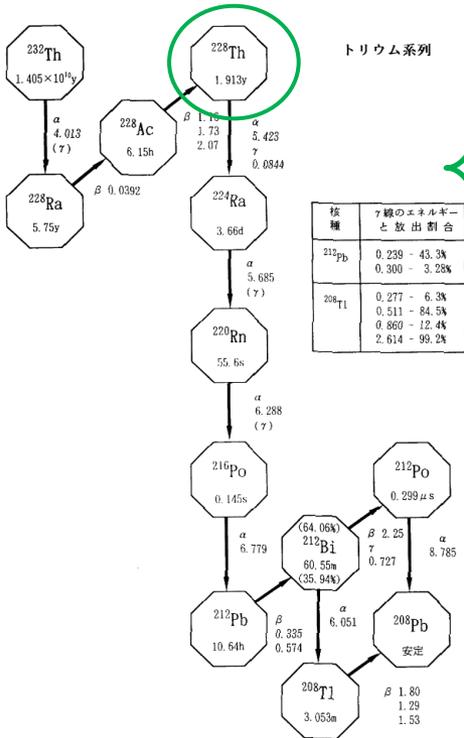
Data: (6.0 ± 1.8) $\times 10^{-5}$ / cm^2/s

EXPACS: 6.3×10^{-4} / cm^2/s @
0.24~1MeV

- ✓ Succeeded to set threshold lower (0.24 MeV)
- ✓ There were quite less signal than expectation in sub-MeV region (maybe due to building effect?)
- ✓ Unexpected signal around 24 μm is detected (this is not essential background for sub-MeV region)

238U と 232Th 系列からのα線について

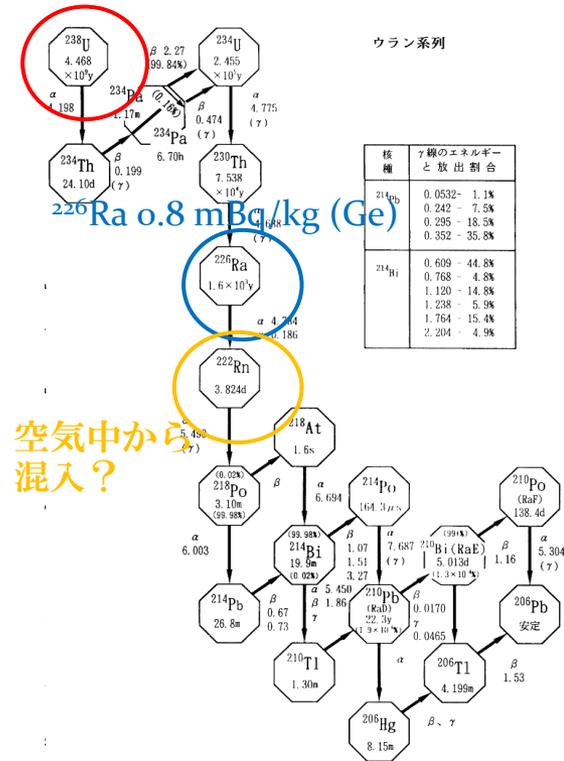
228Th 6 ± 1 mBq/kg (Ge)



トリウム系列

α線本数	期待値 (31day* 0.71g)	データ
5本 (228Th始まり、212Po経由)	6.4 (Ge)	5
5本 (228Th始まり、208Tl経由)	3.6 (Ge)	3
4本 (224Ra始まり、212Po+208Tl経由)	~1 (Ge)	1
4本 (226Ra始まり)	51 (ICP-MS) 1.5 (Ge)	2
3本 (222Rn始まり)	~5 (ICP-MS) ~0.1 (Ge)	3
1本 (238U, 234U, 230Th)	それぞれ 51 (ICP-MS) 1.5 (Ge)	それぞれ < 3
1本 (210Po)	51 (ICP-MS) 1.5 (Ge)	80

238U 27 mBq/kg (ICP-MS)

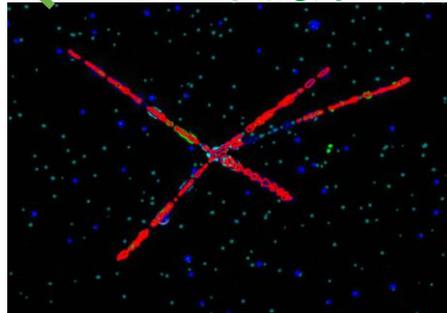
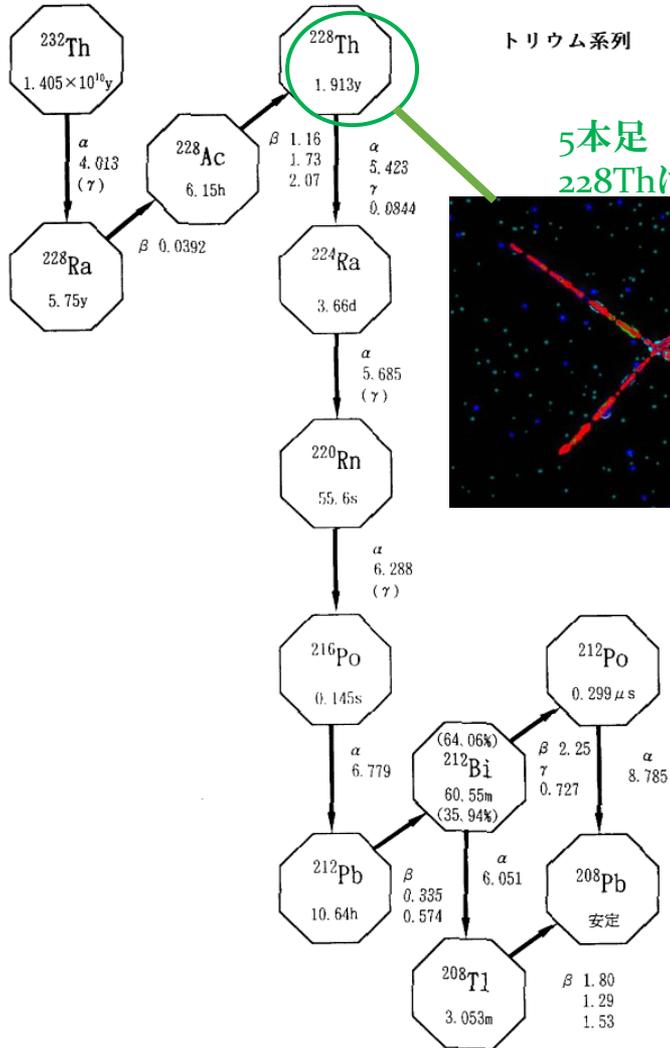


ウラン系列

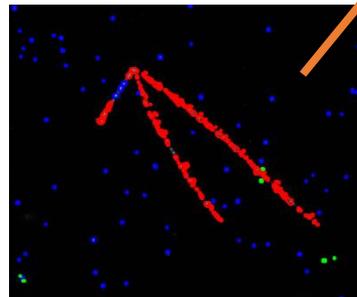
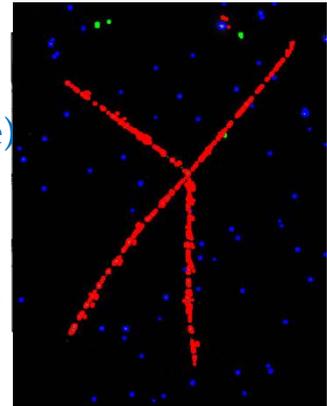
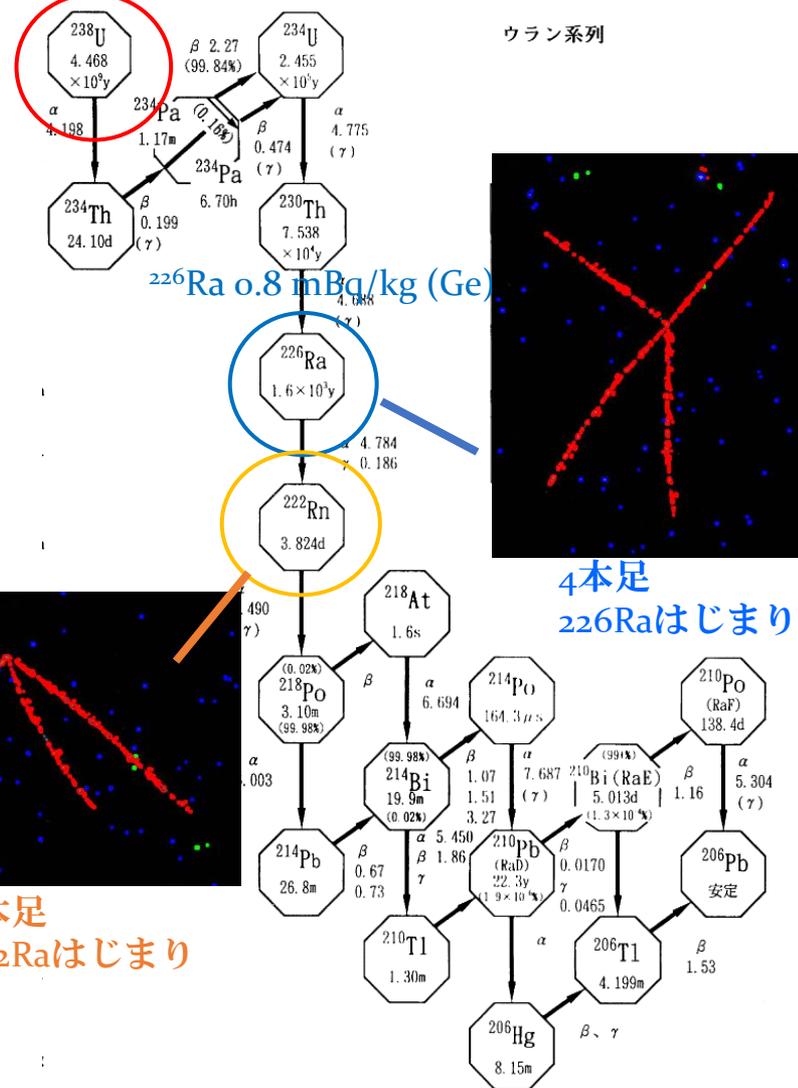
空気中から混入?

30dayRunでの α 崩壊の本数からの崩壊系列の特定

^{228}Th 6 ± 1 mBq/kg (Ge)

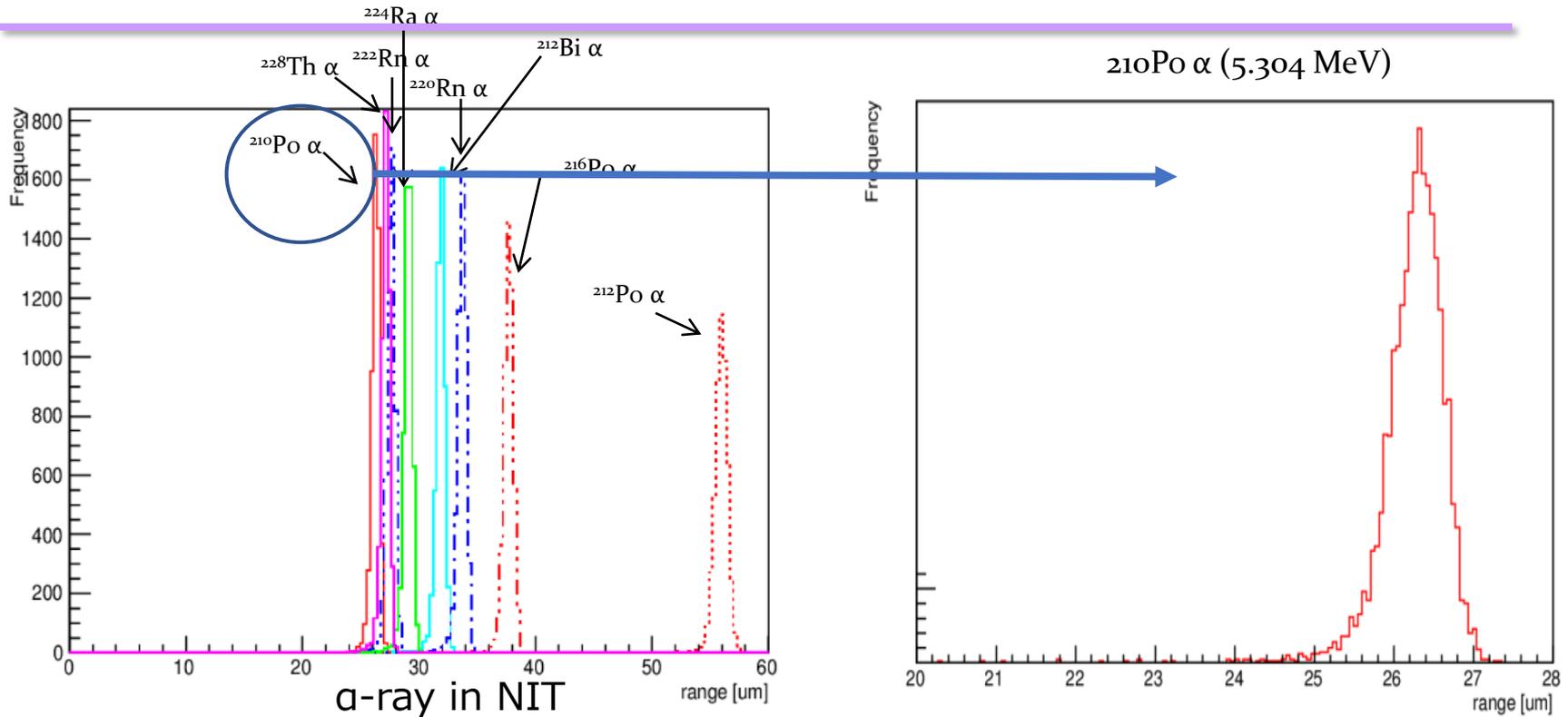


^{238}U 27 mBq/kg (ICP-MS)



3本足
 ^{222}Ra はじまり

α -ray MC simulation (TRIM)



NIT内部で発生しうる α 線のエネルギーと飛程の関係。
 ^{210}Po が最もエネルギーが低く(5.3MeV)その飛程は約25 μm 以上。

➡sub-MeV帯中性子領域には入らない。

Timespan (Underground)

Procedure		2021/12	2022/01	2022/02	2022/03
0 day	Run		→		
	Transportation		→		
	Analysis			→	
2 week H	Run		→		
	Transportation		→		
	Analysis			→	
1 month H	Run		→		
	Transportation			→	
	Analysis				→
1 month V	Run		→		
	Transportation			→	
	Analysis				→

地下Runサンプルについては、2022年3月までの解析を目指す。

Timespan (Surface)

Procedure		2021/11	2021/12	2022/01	2022/02
0 day	Run		→		
	Transportation		→		
	Analysis			→	
2 week H	Run		→		
	Transportation			→	
	Analysis				→
1 month H	Run		→		
	Transportation			→	
	Analysis				→
1 month V	Run		→		
	Transportation			→	
	Analysis				→

地上RunサンプルについてはRunから解析までを2022年1月末ごろの完了を目指す。
地上Runが終了した後、地下Runに移る。

Ref

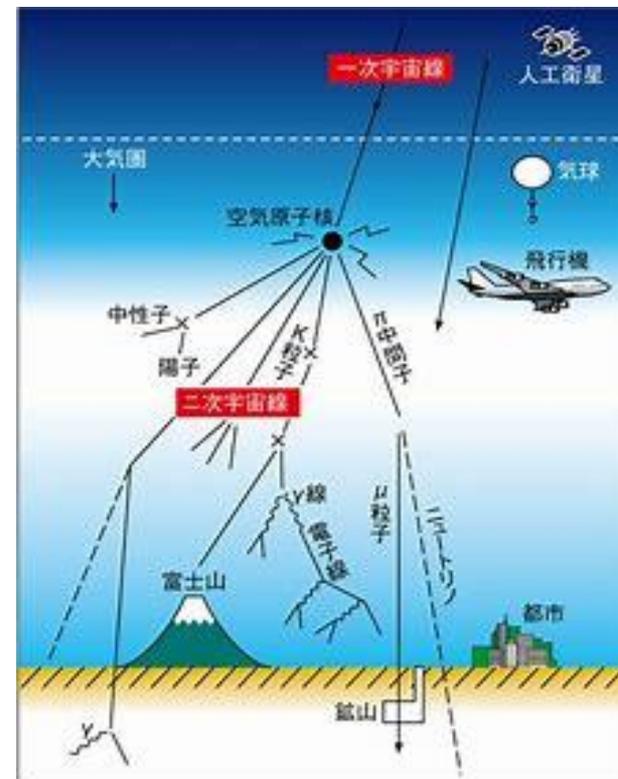
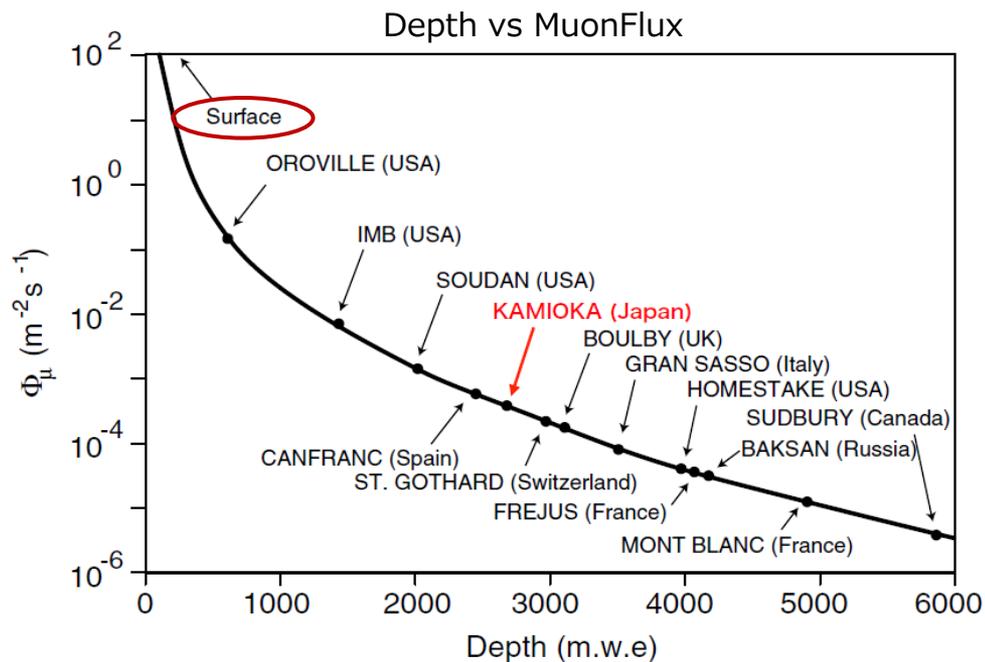
[1]C. Bari, et al., (LVD), Nucl. Instr. and Meth. A 277 (1989) 11.

[2]M. Haffke, et al. "Background measurements in the gran sasso underground laboratory." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 643.1 (2011): 36-41.

地上環境中性子源

1次宇宙線と大気との各破碎反応

➡ ミューオンが物質中を通過する際の各破碎反応により中性子が生成される。



https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1314222.htm

地下環境中性子源

1. 岩盤中のThU 系列の原子核が起こす自発核分裂
2. 岩盤中のThU 系列の原子核が起こす α 崩壊によって発生する α 線が軽元素に吸収される(α, n) 反応

Table 3
 ^{238}U and ^{232}Th activities in LNGS rock

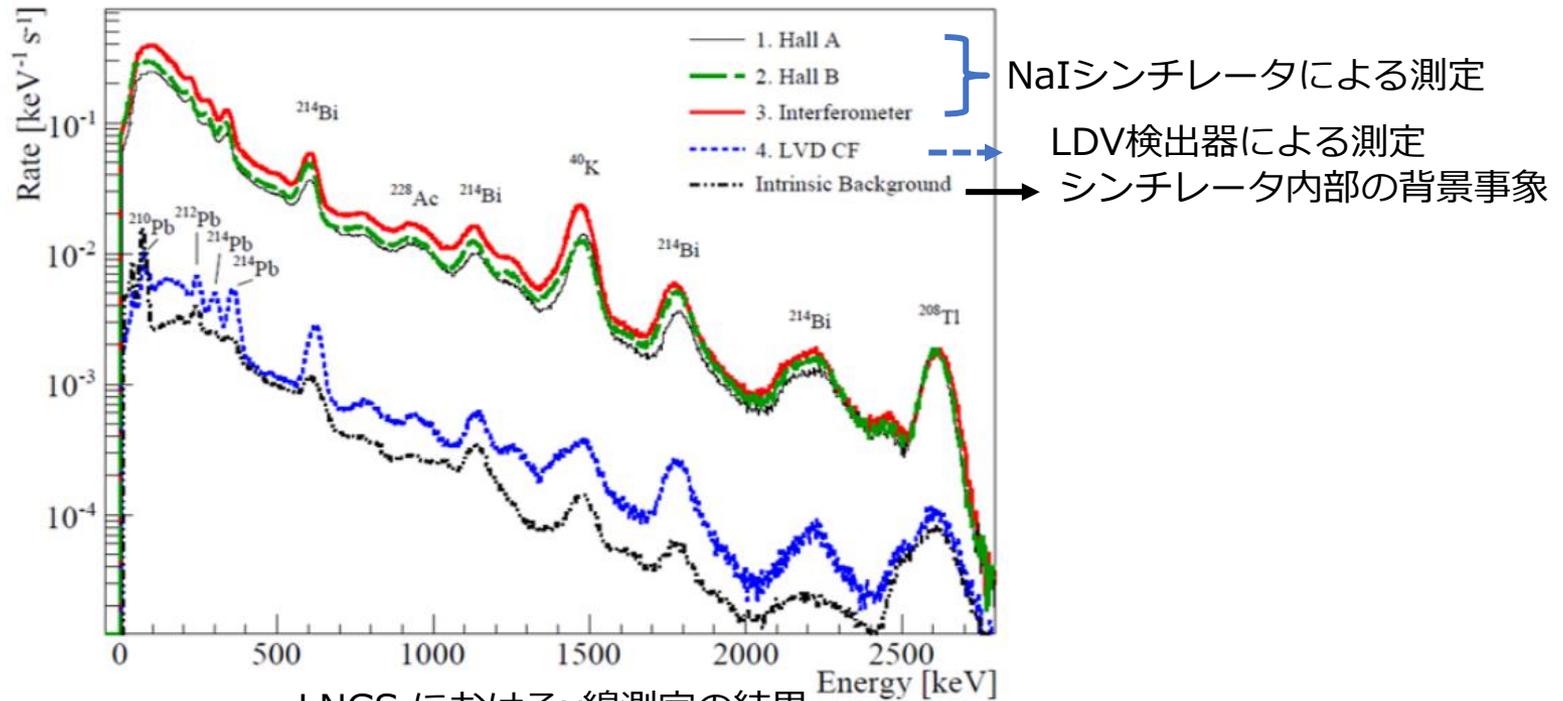
Hall	Activities (ppm)	
	^{238}U	^{232}Th
A	6.80 ± 0.67	2.167 ± 0.074
B	0.42 ± 0.10	0.062 ± 0.020
C	0.66 ± 0.14	0.066 ± 0.025

Table 5
Neutron yields from (α, n) interactions in the rock

Element	Total elemental yield (neutrons/year/ g rock)	
	Hall A	Hall C
C	$4.60\text{E}-1$	$4.07\text{E}-2$
O	$8.80\text{E}-1$	$7.90\text{E}-2$
Mg	$2.31\text{E}+0$	$2.04\text{E}-1$
Al	$3.50\text{E}-1$	$3.05\text{E}-2$
Si	$6.00\text{E}-2$	$5.21\text{E}-3$
K	$9.00\text{E}-2$	$7.60\text{E}-3$
Ca	$2.40\text{E}-1$	$2.05\text{E}-2$
Total yield	$4.38\text{E}+0$	$3.88\text{E}-1$

➡地下においては岩盤に含まれるU,Th量に依存する。
そのため、地層や岩盤の成分の違いに依存する。

環境γ線について



LNGS におけるγ線測定の結果

✓ LNGSにおけるγ線の平均flux $\sim 0.3[\gamma/\text{cm}^2/\text{s}]$

➡ 中性子 flux の $\sim 10^5$ 倍のレート

✓ 環境γ線にさらされながらの測定となる。

➡ 高γ線下でも問題なく中性子測定を行う必要がある。

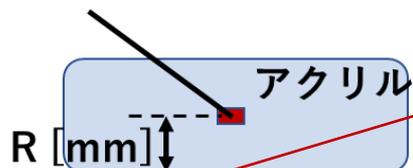
RI線源を用いたNITのγ線分別能の評価

RI	Activity [Bq]	exposureTime[s]	γ_Energy[MeV]	Frecency [%]
			0.05954	35.9
²⁴¹ Am	2.61×10^6	30	0.0263	2.4
			0.0161	37.9
			1.173	100
⁶⁰ Co	2.86×10^3	7200 (2H)	1.332	100
			0.662	85.1
¹³⁷ Cs	2.6×10^4	1800 (30min)	0.514	94.4
			1.176	5.6

- 各線源において原子核乾板への照射量： $\sim 10^7 [\gamma/\text{cm}^2]$
 ➔ LNGSの環境γ線量では約1年分の蓄積量。

- 線源直下付近のNIT5mmx5mmをスキャン。

²⁴¹Am, ⁶⁰Co



Filtering

ガウスフィルタ用カーネル
(3x3 LPF)

1/16	2/16	1/16
2/16	4/16	1/16
1/16	2/16	1/16

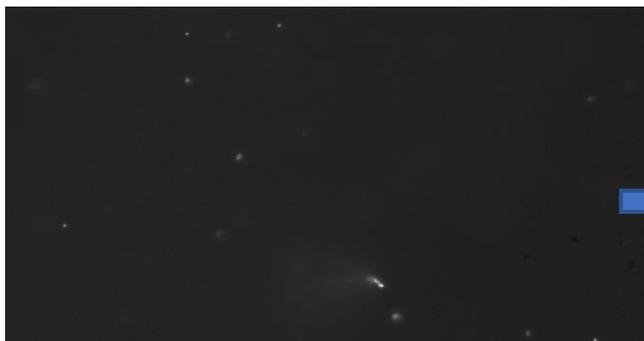
ボックスフィルタ用カーネル

(51x51 HPF)

1	1	...	1	1	...	1	1
1	1	...	1	1	...	1	1
...
1	1	...	0	0	...	1	1
1	1	...	0	0	...	1	1
...
1	1	...	1	1	...	1	1
1	1	...	1	1	...	1	1

$$\frac{1}{norm} \times$$

Raw Image



Filtering

