

宇宙線と鉛の反応による中性子生成

小津龍吉、青山一天、木村真人、櫻井真由、田中雅士、中曾根太地、諸星博之、寄田浩平：早大理工

ANKOK実験

Arを用いた暗黒物質探索実験

2020年8月に行われた物理実験

実験場所：早大西早稲田キャンパス (20m.w.e.)

内部銅シールド内のPMT×2で観測
有感領域: 0.22kg (φ 6.2cm × L 5cm)

液体ArによるVeto
有感領域外で発生した信号は
上にあるPMT×5と下にあるMPPCで
観測してvetoする。

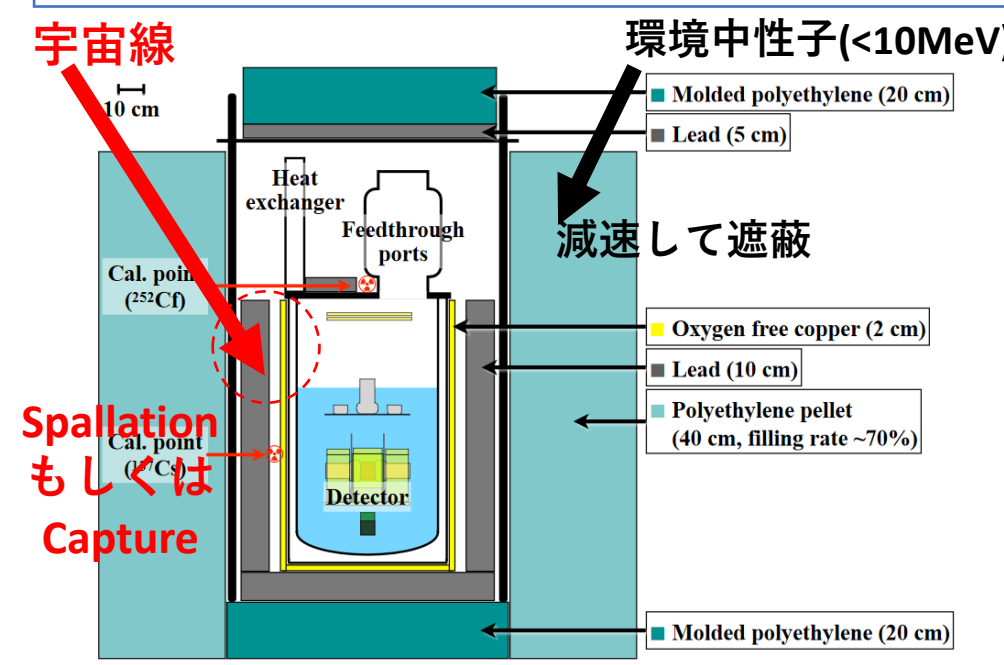
- パッシブシールド:
- 環境中性子対策に20cm厚相当のポリエチレン
 - 環境γ線対策に10cm厚の鉛
 - 鉛から来る低エネルギーγ線対策に2cm厚の無酸素銅

EXPACSのHP: <https://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>

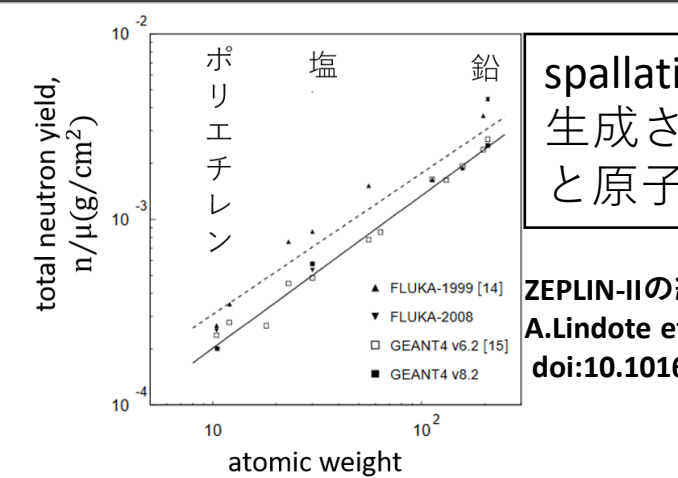
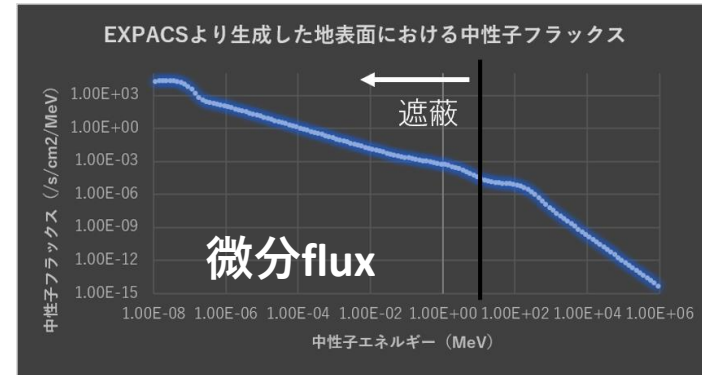
spallationは原子量が高いほど、生成される中性子が増加する特徴がある。captureも原子量が高いほど寿命が短くなるため、中性子が生成される確率が上がる。

シールドに使われている鉛は原子量が208と大きく、また検出器に近いので、生成材として疑われる。

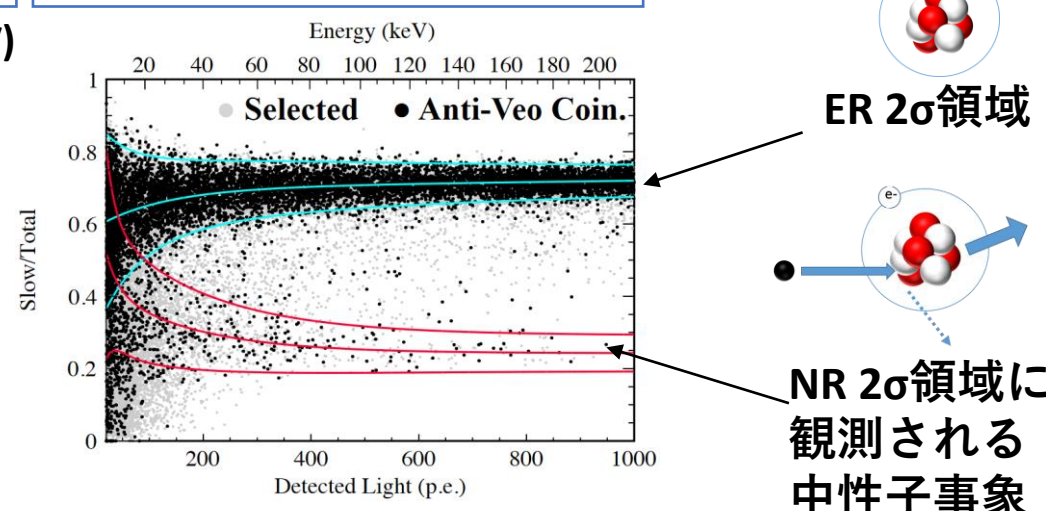
液一相型検出器のセットアップ



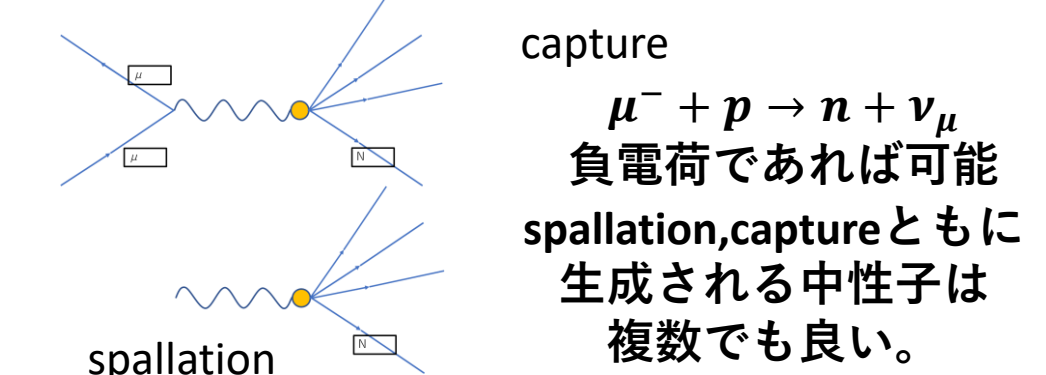
10MeV以下の環境中性子を遮蔽するシールドを積むことで $O(10^{-1})$ events/day/kg/keVが予想されたが、全てのカットをかけても中性子事象が観測されており宇宙線が原因である可能性が高い。



物理実験のPSD分布



- Exposure: 0.2 kg · days
- レート安定性の要求
 - Left-Right AsymmetryによるPMT窓のチェレンコフ事象カット
 - Veto領域で発光した事象のカット



物質中のμ⁻の寿命

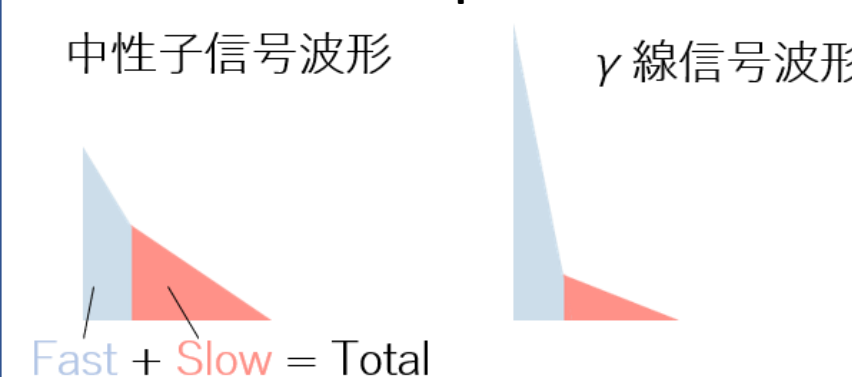
原子	寿命[ns]
C	2026.3 ± 1.5
Cu	163.5 ± 1.0
Pb	75.4 ± 1.0

T. Suzuki et al., DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.35.2212>

本測定では、液体アルゴンに比べ運用が簡単な液体シンチレータを用いる。BC-501A(Bicron社)：キシレンベースで放出波長は425nmにピークを持つ。

測定セットアップ ANKOK実験環境下での測定

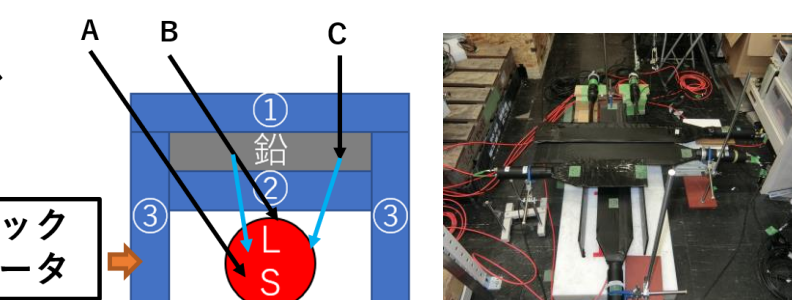
波形弁別で中性子とγ線を分離できる。



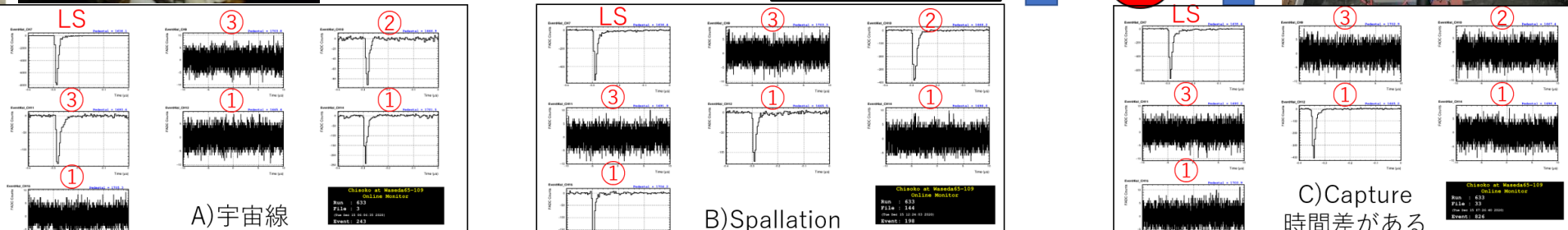
直径:5.08[cm],高さ:5.08[cm]
体積:103.0[mL],質量:89.99[g]
(物理実験とほぼ同じ体積)
H1161(Hamamatsu)と組み合わせて使用する。



5cm厚の鉛(&宇宙線タグ)で囲み、実験環境を再現する。FADC SIS3316 250MS/sで波形を取得する。

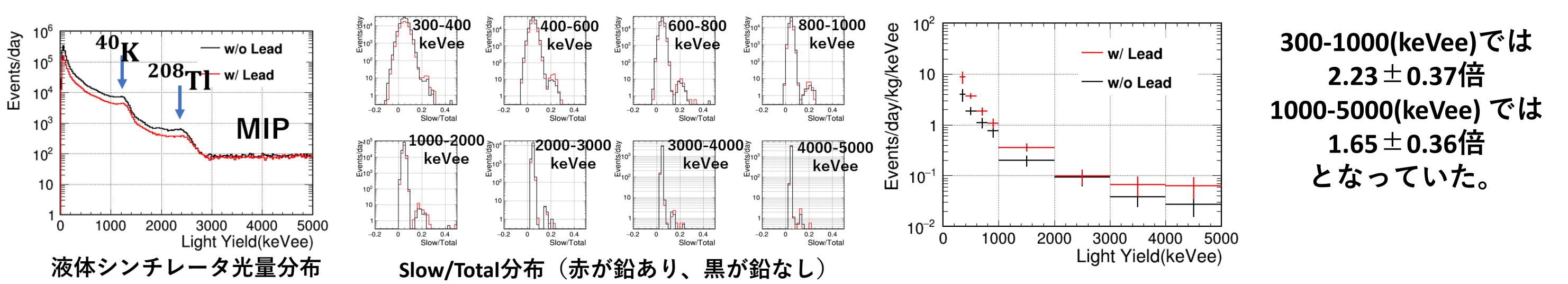


右) 確認できる波形例
①を通過するが②を通過しない事象を見ると、液体シンチレータとの間に時間差がある。



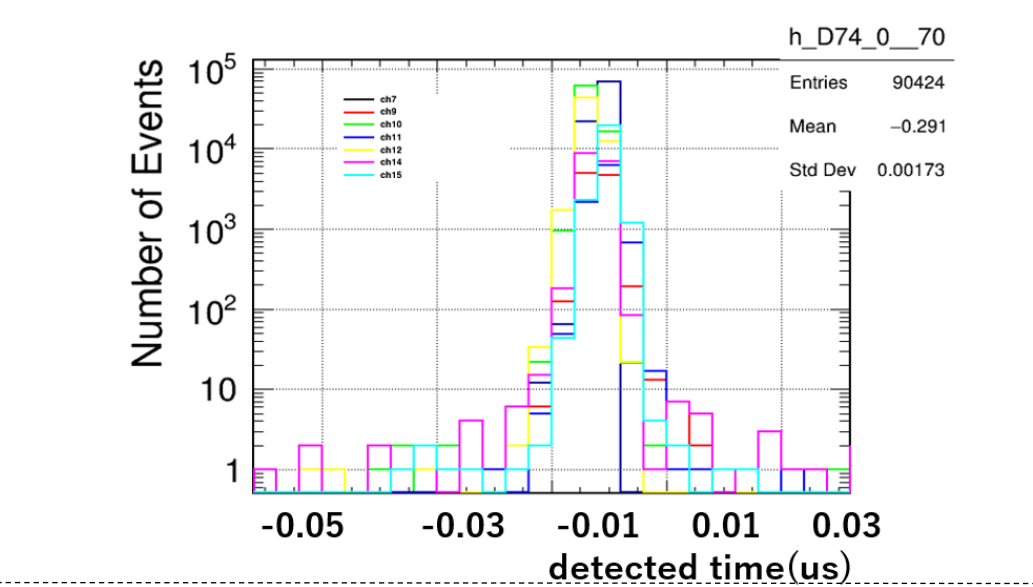
測定結果

まず、鉛があるときとないときに環境γ線は遮蔽されるが液体シンチレータで観測される宇宙線量が変化しないことは確認できる。slow/total分布で比較してみると、どのエネルギーにおいても中性子量が増加していた。



液体シンチレータの信号から前1us以内でプラスチックシンチレータが光った事象に対してはvetoする(緑)。このとき鉛なしの観測量(黒)に誤差の範囲で一致した。

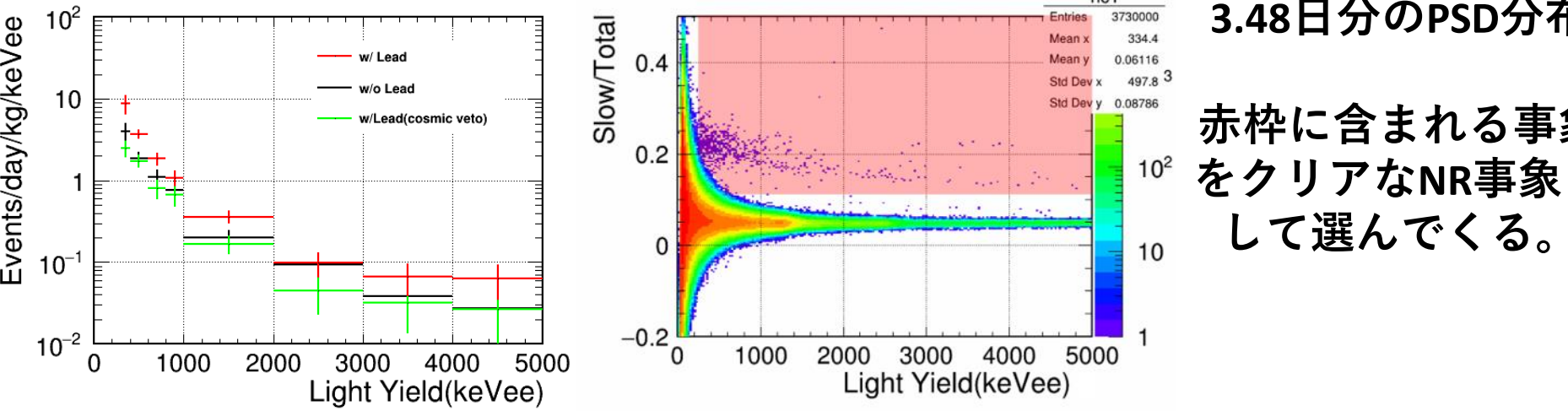
液体シンチレータを宇宙線が貫いた事象を用いて、各プラスチックシンチレータの個体の検出時刻を補正した。4ns以内で一致することは確認済み。実験環境においてCaptureがあれば、液体シンチレータとの時間差のある信号が確認されるはず。



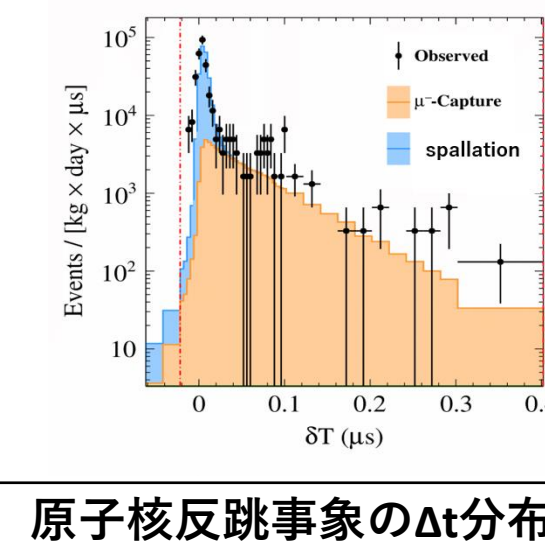
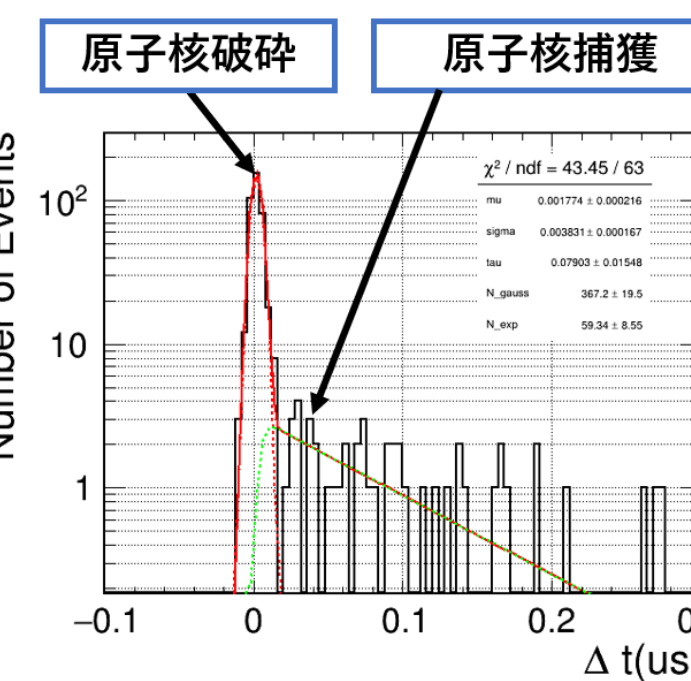
仮定：スペクトラムはEXPACSを使用。

Δt分布からはGeant4がμ⁻ captureする確率を決定。μ⁻ capture以外の成分：Spallation (μ⁻やμ⁺、pを含む)

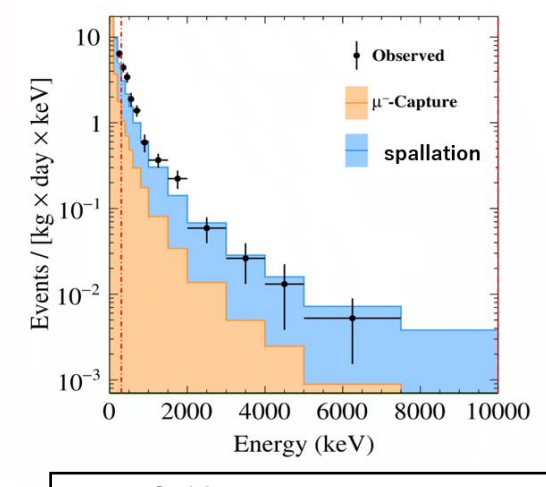
決めた量で液体シンチレータの原子核反跳スペクトラムもよく再現することが確認できた。



プラスチックシンチレータが信号を観測したときのΔt分布



原子核反跳事象のΔt分布



液体シンチレータの原子核反跳スペクトラム

300-1000(keVee)では
2.23 ± 0.37倍
1000-5000(keVee)では
1.65 ± 0.36倍
となっていた。

3.48日分のPSD分布

赤枠に含まれる事象をクリアなNR事象として選んでくる。

Fit Functionはガウシアンとexp.をガウシアンでなませたものを使用。μとσは同一。

$$\left(\frac{N_1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + N_2 \frac{\lambda}{2} e^{\mu\lambda + \frac{1}{2}\lambda^2\sigma^2} e^{-\lambda(x-\mu)} \text{Erfc}\left(\frac{\mu + \lambda\sigma^2 - (x-\mu)}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right) \times \text{Binwidth}$$

T. Suzuki et al., DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.35.2212>
鉛のμ⁻ captureによる時定数は実験ごとのばらつきはあるものの、他実験の測定値(75.4 ± 1.0 [ns])と誤差の範囲で一致。
⇒本実験の測定値: 79.0 ± 15.5 [ns]

ANKOK実験環境下でSpallationとCaptureがいることは確かめられたので、Geant4と組み合わせて元の宇宙線束を推定する。

以上から、実験環境の宇宙線束を推定した!

今後

- 4πを鉛で囲むセットアップを作製してより正確な測定をしたい。
- Spallationは地下での中性子観測にもつながるのでまずは地上で知っておきたい。
- 地下でも鉛内外で変化があるか測定を開始したところ。