^{3}He比例計数管を用いた神岡地下実験室における環境中性子の長期測定と環境要因の影響評価

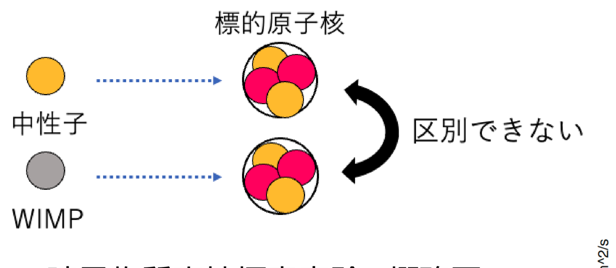
学術変革領域(A)「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化　新たな宇宙物質観創生のフロンティア」第11回 極低放射能技術研究会 ＠神戸大学 百年記念会館　2026/3/6 ～ 2026/3/7

横浜国立大学　修士2年　佐々木優斗

1. 環境中性子

a. 地下宇宙素粒子実験の背景事象(バックグラウンド)

・暗黒物質直接探索実験
　中性子がWIMPと**同様に**原子核反跳事象を起こす
・$0\nu\beta\beta$崩壊探索実験
　中性子捕獲などで探索エネルギー**付近**のγ線が放出される



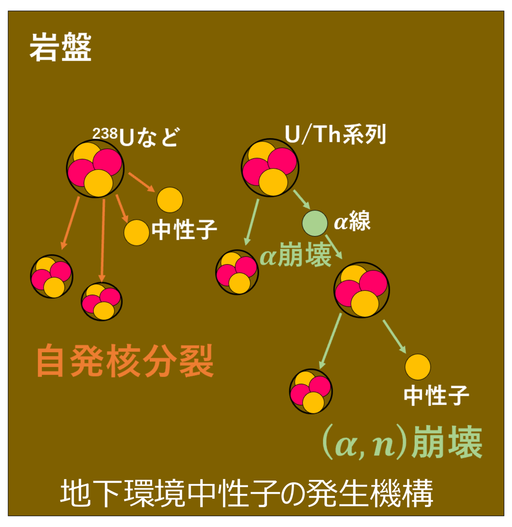
暗黒物質直接探索実験の概略図

地下実験室における環境中性子フラックスを正確に測定しバックグラウンドを定量

b. 環境中性子の発生源

宇宙線由来　二次宇宙線のミューオンによる原子核破砕、etc.
　→ 地下で低減

★ 岩盤由来　^{238}Uなどの自発核分裂
放射性核種(主にU/Th系列)のα崩壊で生じたα線が岩盤内物質と起こす(α,n)崩壊

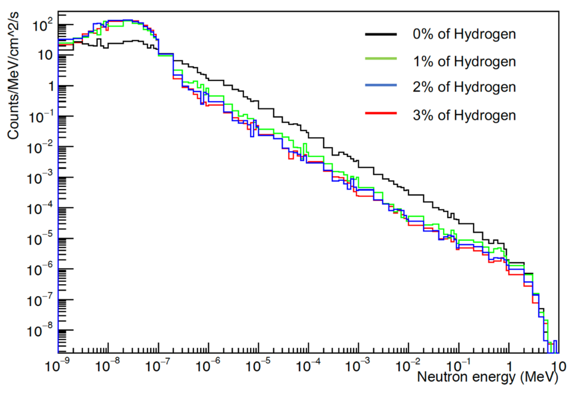


地下環境中性子の発生機構

c. これまでの環境中性子測定

^{3}He比例計数管とシミュレーションを用いた間接的な地下環境中性子スペクトルの測定

岩盤の化学組成と水素含有量（重量比で岩盤の0,1,2,3%）を仮定、球形の実験室を再現し、Geant4やNeuCBOTを用いて環境中性子スペクトルを算出　(横浜国立大学 佐々木遼太氏 2021年修士論文)



Geant4で再現した実験室に輸送された環境中性子のエネルギースペクトル [1]

- 岩盤中の水素含有量が増加すると低エネルギー側のスペクトル形が変化した。
- 岩盤に含まれる**水素**が、岩盤内で生成された中性子が実験室に輸送される際の熱化(低エネルギー化)に関係することを示唆している。

地下実験室の中性子フラックスは岩盤内の水分量で変化する

実際は降水量の変化や春の雪解けにより、神岡地下実験室周囲の岩盤の水素含有量は変化すると予測される

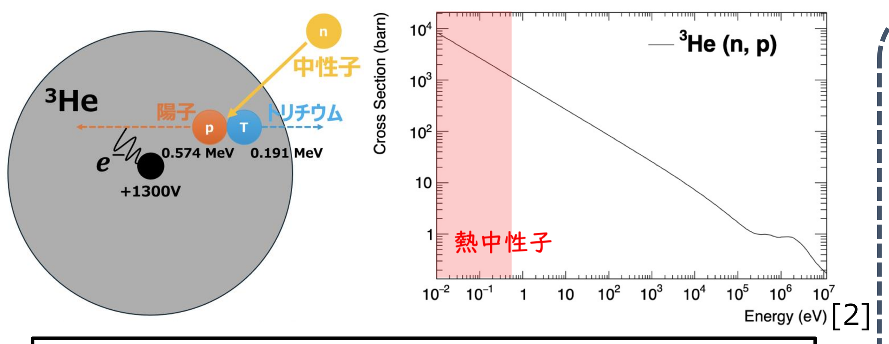
環境中性子の長期測定により神岡地下実験室の岩盤内の水分量変化との相関を調査

2. 測定系とデータ品質評価・改善

a. ^{3}He比例計数管と測定セットアップ

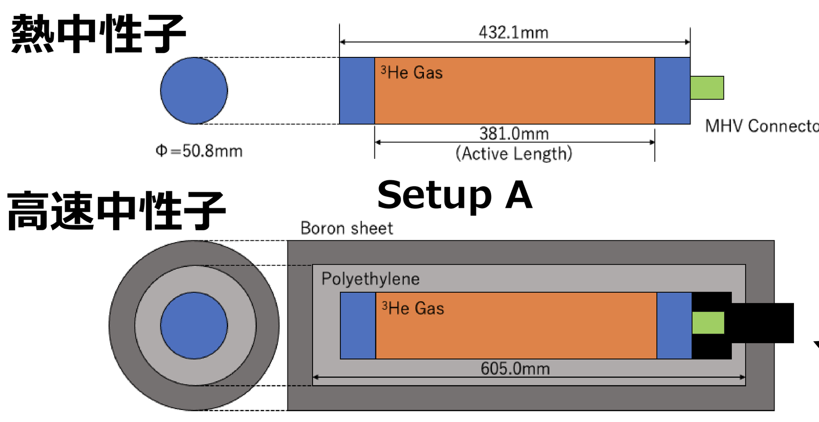
熱中性子：　運動エネルギーが0.5eV以下
高速中性子：運動エネルギーが1MeV以上

ガス検出器の一種で熱中性子に高い感度を持つ



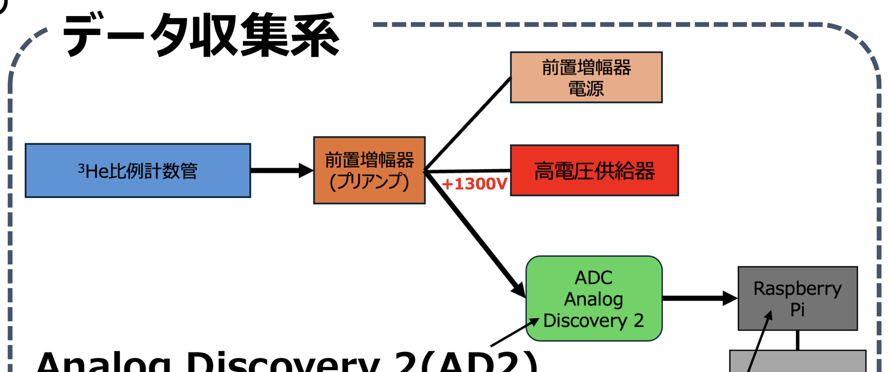
[2]

^{3}He + n → T + p + 0.764MeV



中性子減速材(6.5cm厚のポリエチレン)と熱中性子吸収剤(5mm厚のボロンシート)で包む

データ収集系



Analog Discovery 2(AD2)
USBオシロスコープ及び多機能計測器
→ ^{3}He比例計数管からの信号をデジタル信号として記録

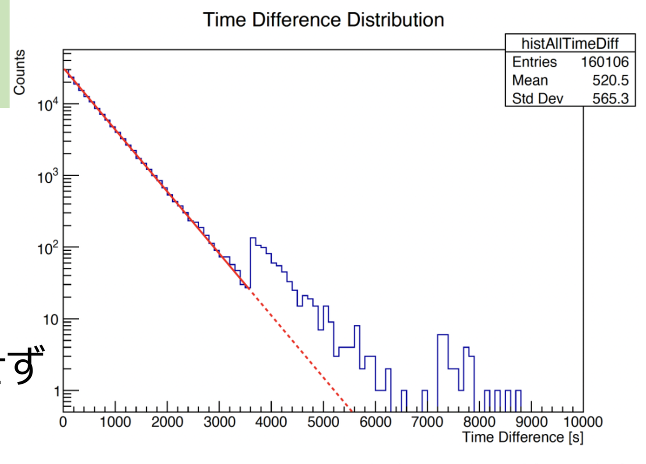
Raspberry Pi (ラズパイ)
手のひらサイズの小型PC

b. データ収集系の信頼性評価と改善

2021年から2024年までの測定にDAQフリーズがあったと断定

事象間時間差Δtが**指数分布**に従うかを調査
結果：SetupAで3600s以降、Bで7200s以降で指数減衰と一致せず

データファイル切り替え条件
① 事象数が所定の上限に到達した場合(本研究では1000イベント)
② 一定時間信号が検出されずタイムアウトに達した場合
　(本研究ではSetupA:3600s　SetupB:7200s)



2021/7/16~2024/8/7 SetupA 事象間時間差Δt分布
赤実線は指数関数によるフィット、赤点線はその外挿を示す

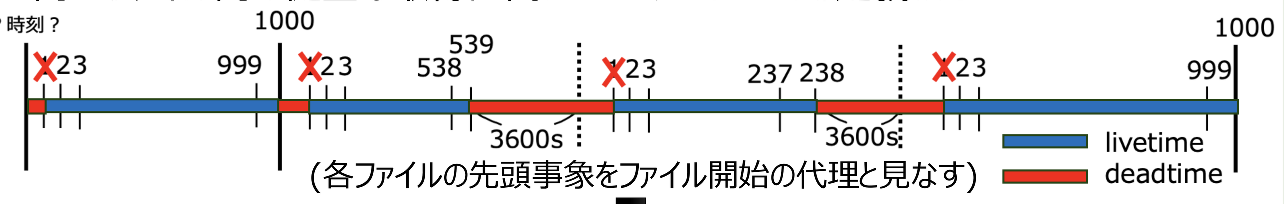
同一ファイル内のΔt分布は指数減衰とよく整合 → ファイル切り替え時にDAQフリーズがあった可能性が支持

ハード面の改良
- 高耐久SDカードに変更
- 冷却ファンを追加
- 高出力ACアダプターに変更

＋

データ収集系の二重化
信号を分岐器で分け2つのADCで読みデータ損失リスクの低減を図った

ソフト面の改善(livetime補正)
ファイル境界近傍の不透明な時間帯を保守的にdeadtimeとして除外し、同一ファイル内の健全な取得区間に基づくlivetimeを定義した



(各ファイルの先頭事象をファイル開始の代理と見なす)

本研究で関心があるのは中性子レートの相対的な時間変動のため、この手法をデータ全期間に適用し同一規則で長期時系列を再構成

3. 中性子長期測定データの整理と時間変動

※ここでは代表して週binの結果を示す

a. 測定期間と測定条件の変化

測定期間：2021/7/16~2025/12/11
測定場所：神岡宇宙素粒子実験施設 地下実験室Lab-B

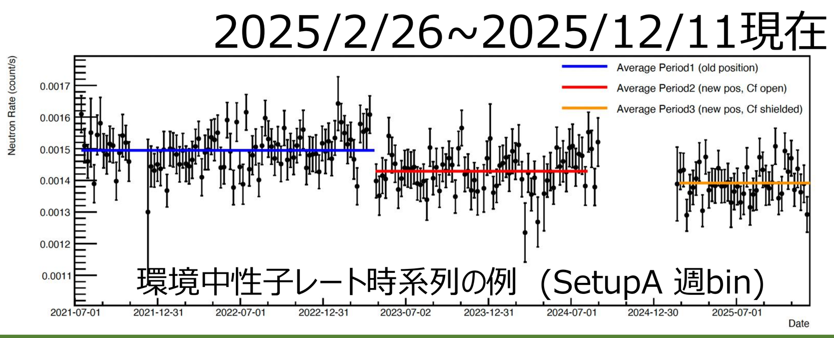
① 測定位置の変更　地点1→地点2
他実験グループの運用上の都合により2023/4/25に実施

② 地下線源金庫内の中性子線源の影響
同じLab-BのNEWAGE実験のBG研究から、金庫内の^{252}Cf中性子源が^{3}He中性子測定へ影響し得る可能性について報告があった

NEWAGEで25cmポリエチレン中性子遮蔽を導入
2024/11/11に実施

平均レートが有意に低減したことを確認
SetupAで-2.7%(3σ)、Bで-6.5%(4σ)

period1：測定地点**1** ＋ ポリエチ遮蔽**前**
2021/7/16~2023/4/24
period2：測定地点**2** ＋ ポリエチ遮蔽**前**
2023/4/27~2024/8/7
period3：測定地点**2** ＋ ポリエチ遮蔽**後**
2025/2/26~2025/12/11現在



環境中性子レート時系列の例　(SetupA 週bin)

b. 時間変動と季節性の評価

フィットモデルと評価指標

- **Model 0 (定数)**　$R(t) = C$　フィットの妥当性 χ^2/dof
- **Model 1 (定数+指数減衰)**　半減期2.645yで固定
  $R(t) = C + A_{exp}e^{-\lambda(t-t_0)}$　有意度 $Z_A = \frac{|A_{exp}|}{\sigma_{A_{exp}}}$
  金庫内^{252}Cf中性子源の測定への影響を検証
- **Model 2 (定数+年周期)**　周期は1年で固定
  $R(t) = C + a\cos\omega t + b\sin\omega t$　有意度 $Z_{Amp} = \frac{Amp}{\sigma_{Amp}}$
  period境界差を補正して接続した合成時系列で季節性の有無を評価
  季節項の寄与割合 $f_{season} \equiv \frac{Amp}{C}$

モデルの要否の検定(モデル比較)

単純なモデル(small、**Model 0**)とsmallを含むより複雑なモデル(large、**Model 1** & **Model 2**)を比較

χ^2フィットの改善量 $\Delta\chi^2 = \chi^2_{\mathrm{small}} - \chi^2_{\mathrm{large}}$で評価

帰無仮説「追加モデルは不要は真のモデルはsmall」→ Wilksの定理より$\Delta\chi^2$は追加パラメータ数$\Delta\nu$のχ^2分布に従う

観測$\Delta\chi^2$以上の改善が統計ゆらぎだけで起こる確率p値：

$p = P(\chi^2_{\Delta\nu} \geq \Delta\chi^2)$　慣習的な有意水準 $p < 0.05$ で追加モデルを議論

period別のフィット結果 (Model 0 vs 1)

period	Series	bin	N	χ^2/dof	p(M0→1)	A_{exp}	Z_A
1	SetupA	week	87	1.006	0.089	-1.02×10^{-4}	1.70
1	SetupB	week	87	1.083	0.638	+1.65×10^{-5}	0.47
2	SetupA	week	65	0.862	0.614	-4.42×10^{-5}	0.50
2	SetupB	week	52	0.863	0.194	-7.47×10^{-5}	1.30
3	SetupA	week	41	0.913	0.634	-7.62×10^{-5}	0.48
3	SetupB	week	41	1.294	0.165	-1.27×10^{-4}	1.39

- SetupA,B、いずれのperiodでもperiod内の中性子レートは定数モデル(**Model 0**)で記述できる。
- ^{252}Cf半減期の指数減衰成分(**Model 1**)を統計的に要請する根拠は得られない。

period合成時系列のフィット結果 (Model 0 vs 2)

Series	bin	N	χ^2/dof	p(M0→2)	Z_{Amp}	f_{season}
SetupA	week	193	0.928	0.710	0.82	0.0033
SetupB	week	180	1.056	0.110	2.10	0.0176

- SetupA,Bどちらも定数モデル(**Model 0**)が妥当。
- 年周期(**Model 2**)も統計的に有意でなく、相対寄与も上限がSetupAで$f_{season} < 1\%$、SetupBでも~2%に留まる。

➡ 環境中性子レート長期時系列は全体として定常
強い季節変動も支持されなかった

4. 環境要因との相関解析

a. 解析に用いたパラメータ

岩盤への水分の輸送過程に伴う時間遅れを考慮し、時間シフトΔに対する相関を「$x(t)$と$R(t+\Delta)$の対応」で評価

① **雨量 P**　(KAGRA雨量計　跡津、茂住)　Δ :0~90days
降水が岩盤への浸透・貯留を経て含水量の増加へ
※冬季は融雪能力不足で雨量が過少評価されるため、毎年12/16~3/15を除外

② **排水量 Q**　(KAGRA Y-arm流量計)　Δ :-90~90days
地下水応答としての観測量 地下側情報を含むと期待
※春は雪解けで水面が荒れ計測が不安定になるため、毎年4,5月を除外

③ **絶対湿度 H**　(Lab-B内 Rn Monitoring System)
坑内空気水分の中性子熱化への寄与　Δ :0~10days

[3]

R_A→正、R_B→負の相関と予想
(雨量と排水量については熱化まで一定のタイムラグがあると想定)

b. 相関解析手法

以下の**モンテカルロシミュレーション**で相関係数rの**頑健性**と**有意性**を検定

Measurement-error MC

rの符号や大きさが各点のポアソン誤差によってどれだけ安定かを評価

1. 環境パラメータx_iは固定、各binの中性子レートy_iを正規分布$\mathcal{N}(y_i, \sigma_{y,i})$から再サンプリング
2. その相関係数 $r_{MC}(\Delta)$ を10000個計算
3. r_{MC}の分布から実際に得られたr_{data}と符号が一致する確率P_{sign}を計算

No-correlation toy MC

有限サンプル数で偶然に大きな$|r|$が出る可能性を見積もりp値を評価

1. 観測データ点の集合$\{(x_i, y_i)\}$ に対し、中性子レートyの順序をランダムシャッフル → 無相関の帰無分布H_0を作成
2. 各H_0の相関係数$r_{H_0}(\Delta)$を10000個計算
3. 以下で定義したp値を計算

$$p = \frac{\#\{|r_{H_0}| \geq |r_{data}|\} + 1}{10000 + 1}$$

(+1は有限試行に対する保守的補正)

頑健性・有意性判定の条件

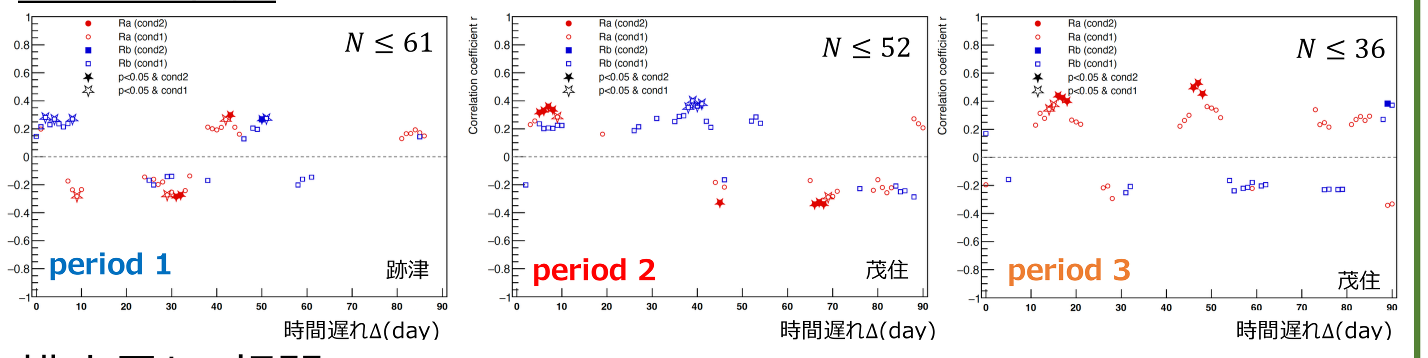
cond1: $P_{sign}(\Delta) > 0.84$ **(片側1σ)**
cond2: $P_{sign}(\Delta) > 0.975$ **(片側2σ)**
} 符号の頑健性

cond3: $p(\Delta) < 0.05$ **(有意水準5%)**
見えた相関が本当に"偶然では出にくい"と言えるか

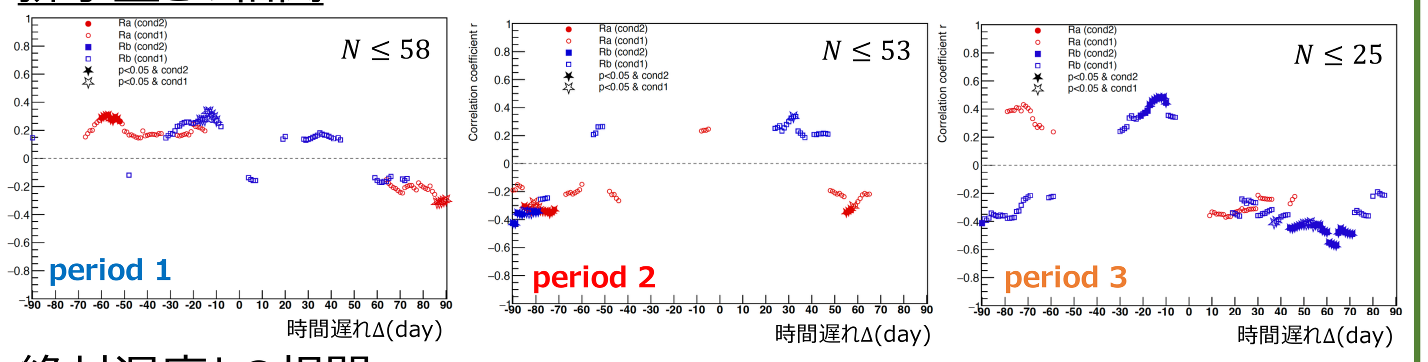
← 右の結果では☆で表記

c. 環境パラメータとの相関結果

雨量との相関



排水量との相関



絶対湿度との相関　省略

どのパラメータでもrの符号・強さ・優勢Δ帯域がperiodで変化し、再現する安定ピークなし
➡ 本データからは単一環境要因が長期変動を一義的に支配する強い証拠は得られず

5. まとめ

- ^{3}He比例計数管2台で神岡地下実験室Lab-Bにおける環境中性子を長期測定 (2021-)
- DAQ二重化など+保守的livetime補正 → 長期解析用レート時系列を整備
- 中性子レートの時間変動は確認されず、環境要因との相関を示す強い証拠も得られなかった

6. 参考文献

[1] 佐々木遼太. 地下実験施設における環境中性子測定. 横浜国立大学 大学院理工学府 修士論文, 2021
[2] Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 4th ed., Wiley, 2010, 864p.
[3] KAGRA大型低温重力波望遠鏡. 図2. 2014. https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/1858/%e5%9b%b32