

XENONnT実験における ^{85}Kr のバックグラウンド評価

The 29th ICEPP Symposium February 21st, 2023
東京大学宇宙線研究所 森山研究室M1神長 香乃

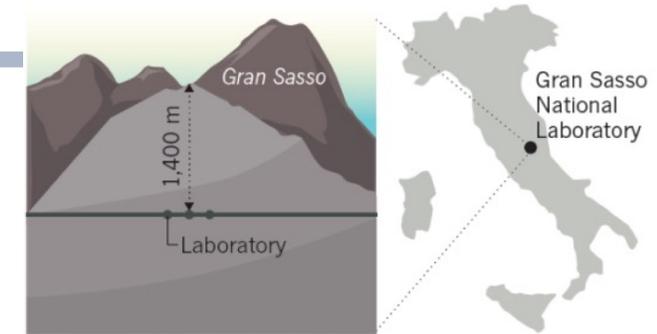


XENON

Introduction

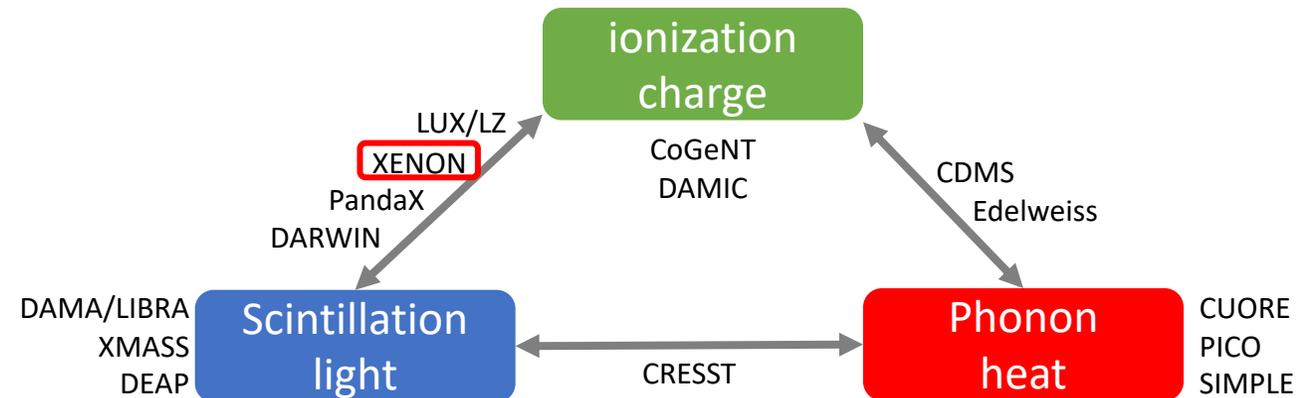
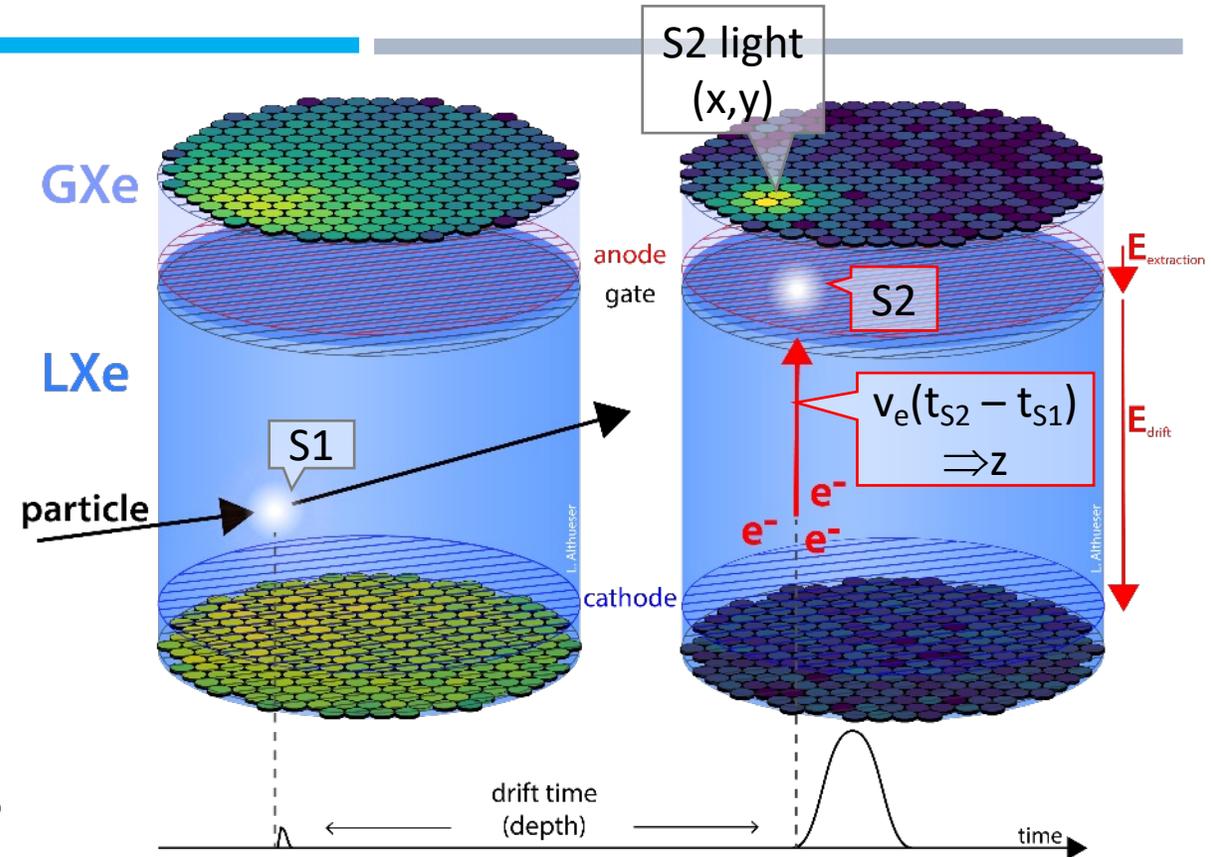
■ XENONnT実験

- イタリア グランサッソ国立研究所(LNGS)地下実験施設
- 暗黒物質(DM)直接探索実験
- 液体Xeを高さ・直径1.5mのTPC(後述)に使用
- 現在の有効体積は約4.4t



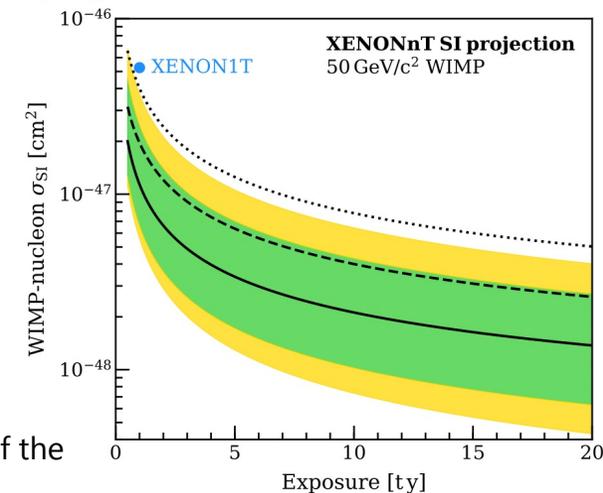
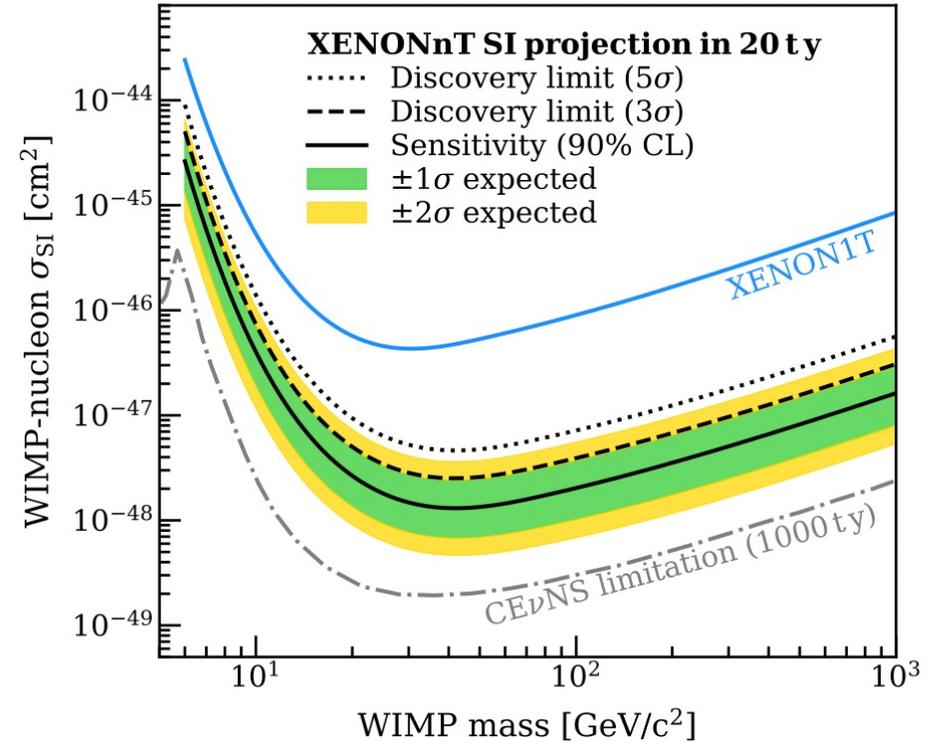
XENONnT実験

- 2相式 (liquid+gas) Xe Time Projection Chamber (TPC)
- DM直接探索実験
 - ▶ Main target: Weakly interacting massive particles (WIMPs)
 - ▶ Other targets: solar pp ν , $0\nu\beta\beta$, other DM...
- 入射粒子の energy deposit から生じる
 - ・ シンチレーション光(S1),
 - ・ 電離電子による信号(S2)
 を用い、反応の付与エネルギーと3次元位置を再構成



■ XENONnT実験

- 2相式 (liquid+gas) Xe Time Projection Chamber (TPC)
- DM直接探索実験
 - ▶ Main target: Weakly interacting massive particles (WIMPs)
 - ▶ Other targets: solar pp ν , $0\nu\beta\beta$, other DM...
- WIMP質量に対する、Spin-IndependentなWIMPの核子とのcross-section
- $1.4 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ for 50 GeV/c² mass WIMP at 90%
⇒ 前身のXENON1T実験の約20倍



From "Projected WIMP Sensitivity of the XENONnT Dark Matter Experiment"

■ Solar pp ν

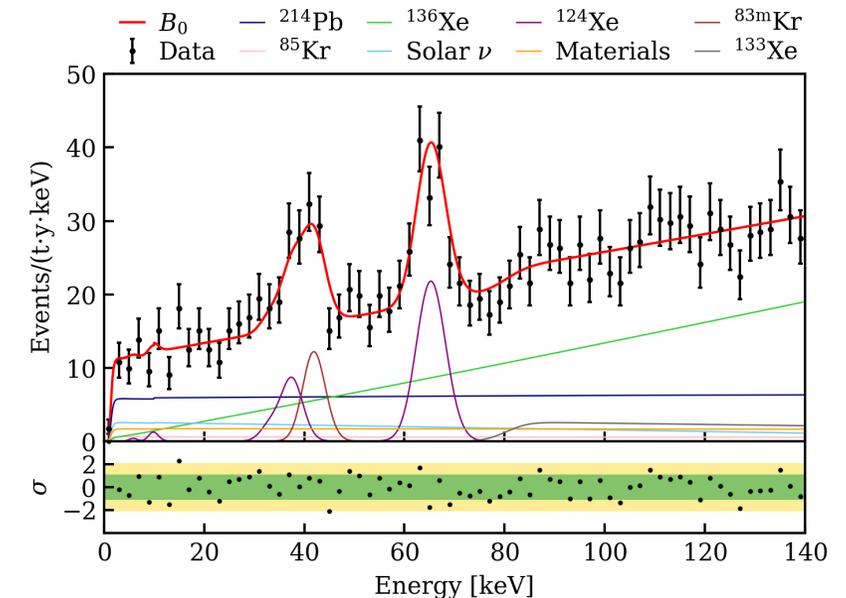
- 太陽のエネルギー機構を理解する鍵
- 過去の実験で ^8B ν は観測されたが、solar ν の0.17%でしかない
- pp ν は低エネルギーのため観測が難しい（Borexinoが観測）
- 100 keV以下の低エネルギー領域でpp ν を観測したい
⇒ 電子反跳現象でこの領域の探索が可能

低エネルギー領域
での高精度なBG
モデルが必要

■ 低エネルギー領域の主要background(BG)

- ^{222}Rn の娘核 ^{214}Pb
- 検出器部材から放出される γ 線,
- Xeに含まれる放射性同位体 ^{85}Kr

⇒ ^{85}Kr の正確な存在量推定が
高精度なBGモデルの作成に必要



低エネルギー領域の観測結果と予想BGモデル
From XENONnT Science Run 0 result

Background

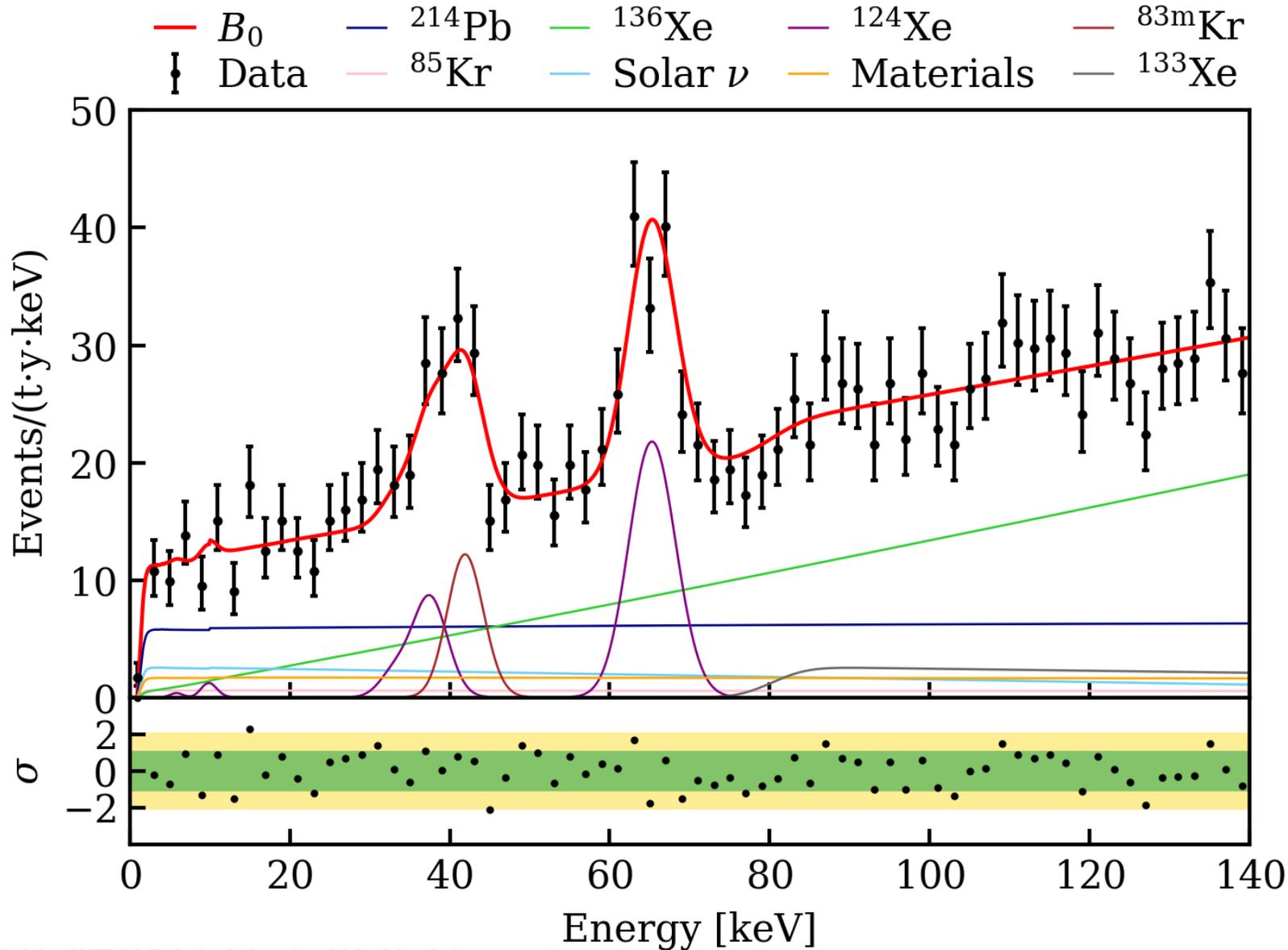
Solar pp

- 太陽の
- ^8B ν は
- pp ν は
- 100 keV
- ⇒ 電子

低エネルギー

- ^{222}Rn の
- 検出器
- Xeに含

⇒ ^{85}Kr ...
 高精度なBGモデルの作成に必要



エネルギー領域
 の高精度なBG
 デルが必要

低エネルギー領域の観測結果と予想BGモデル
 From XENONnT Science Run 0 result

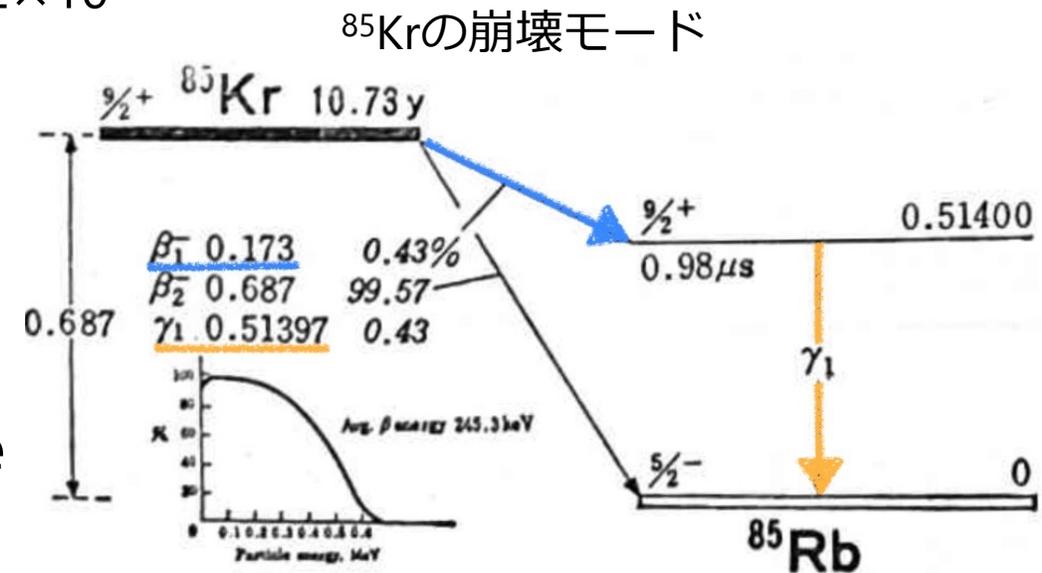
■ Xe中の ^{85}Kr

- KrはXeの製造過程で混入 (10^{-6} - 10^{-9} 程度) \Rightarrow 蒸留で 10^{-12} - 10^{-15} (=ppt-ppq)に低減
 - 現在、 ^{85}Kr 量は残留ガス質量分析(RGMS)によって推定されている
 - ▶ RGMSでXe中のKr量を測定: Science Run 0(SR0)にて 56 ± 36 ppt
 - ▶ 実験施設内の空気サンプルから $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ 比を測定: $\sim 2 \times 10^{-11}$
 - ▶ 2つの結果からXe中の ^{85}Kr 量を推定: $(56 \pm 36) \times 2 \times 10^{-11}$
- \Rightarrow ^{85}Kr 自体の存在量は測定できていない

■ ^{85}Kr の崩壊

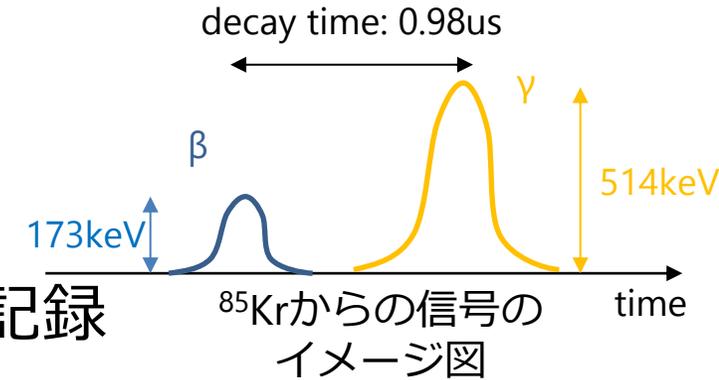
- 687keV β (BR: $\sim 99.6\%$)
- 173keV β + 514keV γ w/ 0.98us decay time (BR: $\sim 0.4\%$)

\Rightarrow この信号を利用しKrによる事象数から存在量を求める



■ ^{85}Kr による信号の検出原理

- 173keV β + 514keV γ w/ 0.98us decay time(BR: ~0.4%)
- PMTで検出された信号は基準を満たしたらピークとして記録
- 各ピークのPMTヒットパターンやヒット数, タイミングなどからmain S1, alt S1, main S2, alt S2にアルゴリズムによって分類される
- 連続するS1(S2)のうち、エネルギーの大きい方 \Rightarrow main S1(S2)
- エネルギーの小さい方 \Rightarrow alt(alternative) S1(S2)



- Xe中 ^{85}Kr 濃度[mol/FV/day]: $N_{\text{event}} \times \left(\frac{4.4 \text{ t(FV)}}{132 \text{ g(Xe)}} \times N_0 \times 0.004 \times 1.77 \times 10^{-4} \right)^{-1}$
 ※有効体積(fiducial volume, FV) = 4.4t
 (Labels: Number of events [event/FV/day], Avogadro number, ^{85}Kr decay probability in a day, branching ratio)

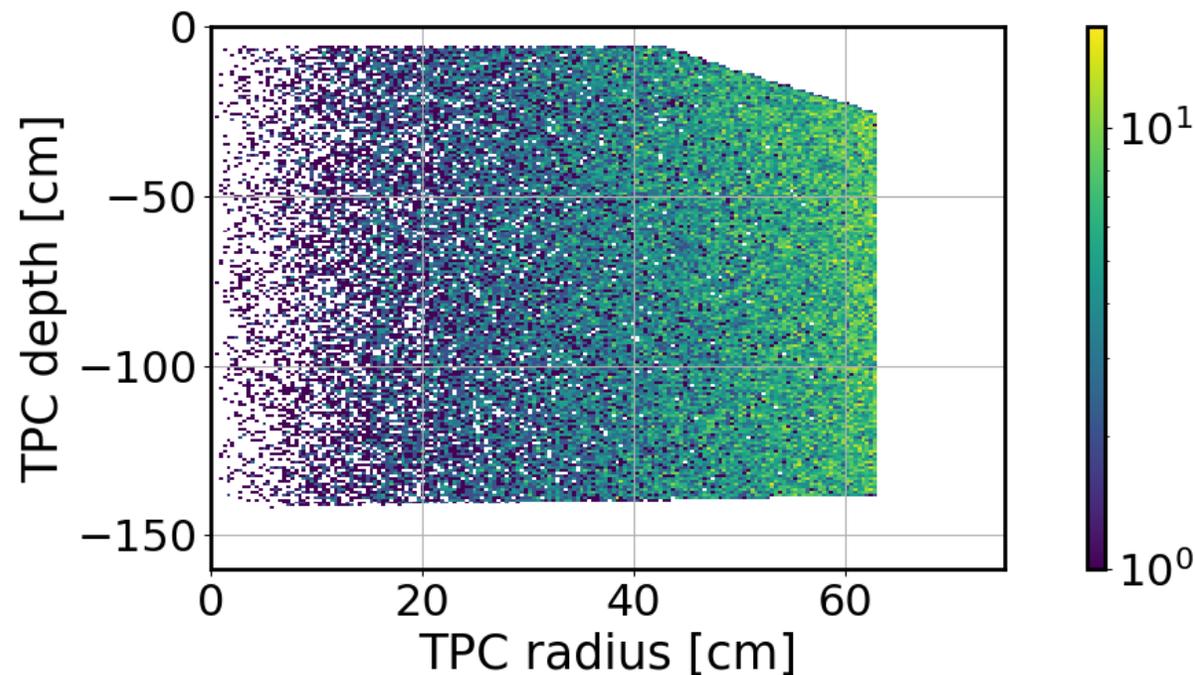
\Rightarrow RGMSからの結果と比較し、算出に使われた $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ 比の正当性を評価する

■ 観測データから ^{85}Kr の信号を探すためのカット

- ^{85}Kr のシミュレーションデータからカットの基準を決める
- 条件: γ 線のdecay time \cdot β, γ のエネルギー \cdot 同じ位置から来た β, γ であること
- BG事象は十分少ないため、信号に対する効率を最大化する

■ 使用データ

- 全事象は有効体積内(FV, 4.4t)のものを対象とする
- ^{85}Kr による事象をgeant4ベースでTPCの応答を含めてシミュレート



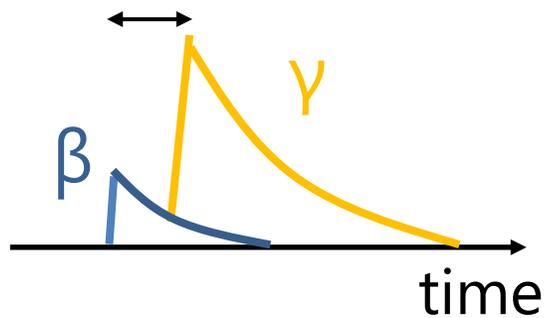
Condition 1. γ -ray decay time cut

■ alt S1 · main S1間の時間差(dt) (eff: 0.5317)

- decay time $\sim 1\mu\text{s}$ の β (alt S1), γ (main S1) を探す
- シミュレーション結果より $dt < 10\mu\text{s}$ までの事象を取得
- $dt > 0.5\mu\text{s}$ の事象のみを使用

$0.5\mu\text{s} < dt < 10\mu\text{s}$

$dt = 0 \sim 0.5\mu\text{s}$



- ▶ 分離されず1ピークとして記録される
- ▶ ($dt = 0\mu\text{s}$ のイベント)

⇒ 最大の efficiency loss

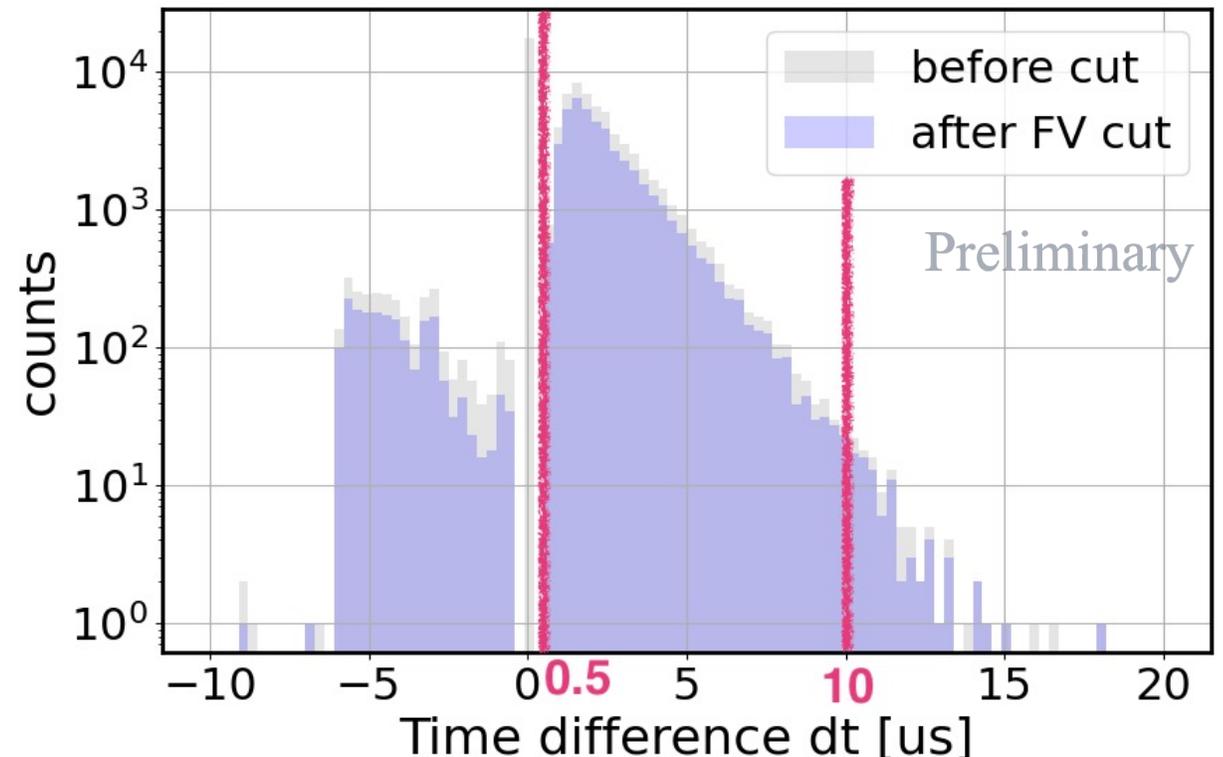


Fig. 1D histogram of dt b/w main and alt S1

Condition 2. Energy cuts (1/2)

■ Main S1 (=γ線) のエネルギー (eff: 0.9874)

- 514 keV γ がエネルギーをS1に100%落とす時、5600 pe程度で観測される
- 実際は一部はS2でも観測されるため、殆どの事象が 3000~5000 pe で観測
- dt cut後のヒストグラム(赤)が dt cut前(青)に比べ高エネルギー側で減少している

⇒ マージした β と γ がmain S1として記録された事象がカットで除去されたため

3000pe < main S1 < 5000pe

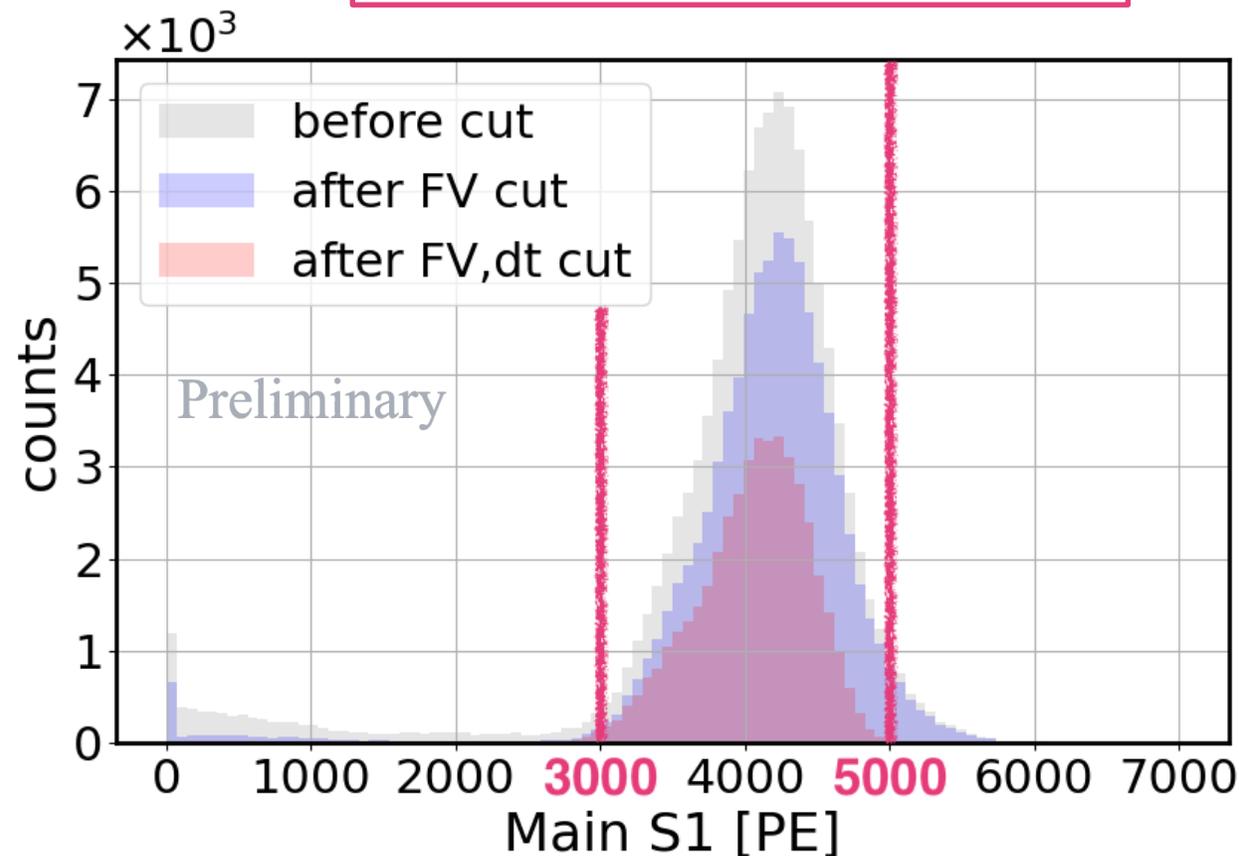


Fig. 1D histogram of main S1 energy

Condition 2. Energy cuts (2/2)

■ Alt S1 (=β線) のエネルギー (eff: 0.9076)

- 173 keV β がエネルギーをS1に100% 落とす時、1900 pe程度で観測される
- 30~40 pe に single electron 事象が入るので、50 pe<alt S1に下限を設定

■ Main S2 (β+γ線) (eff: 0.9997)

- S2で β, γ それぞれの観測は難しい
⇒ S2の存在のみを要請

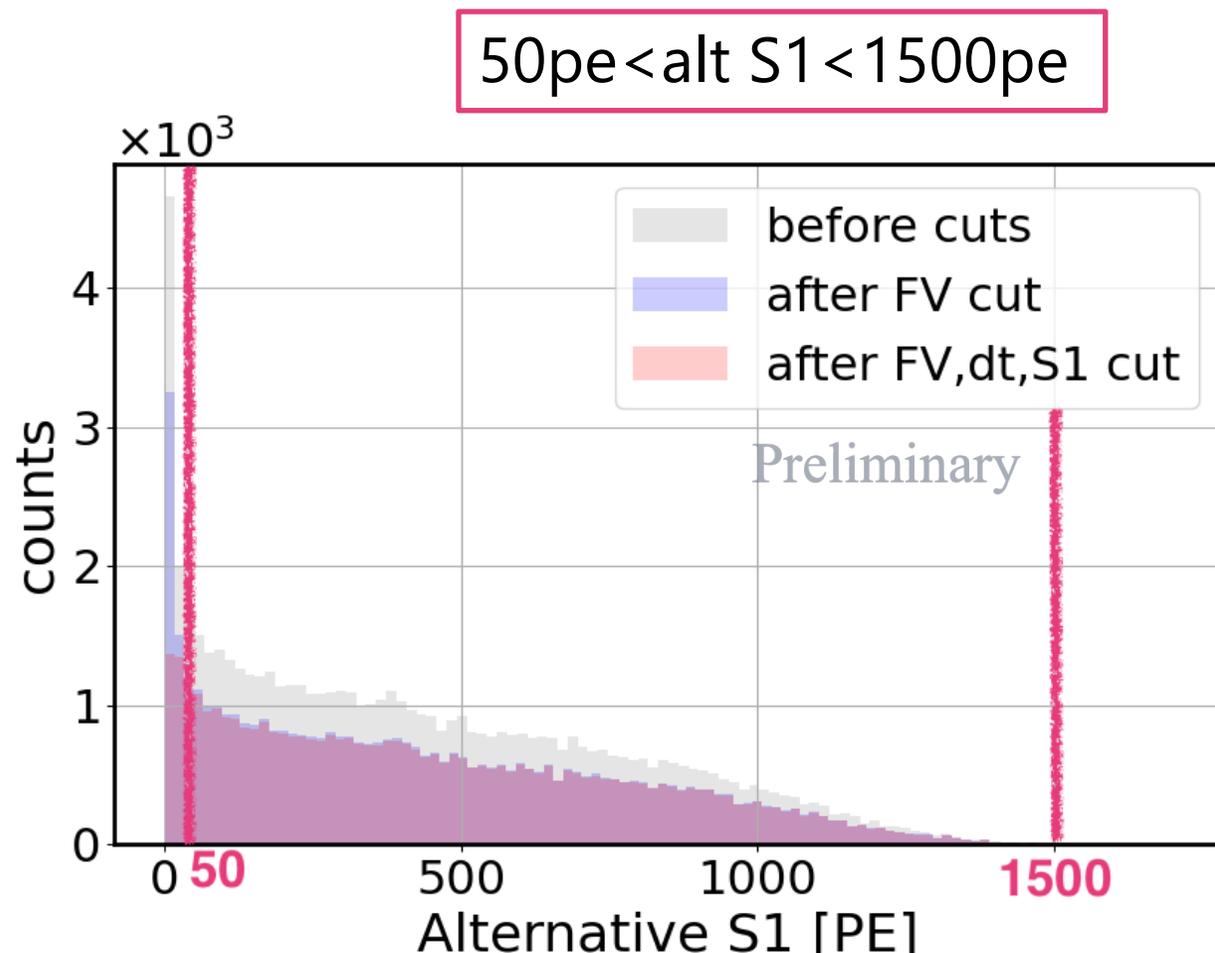
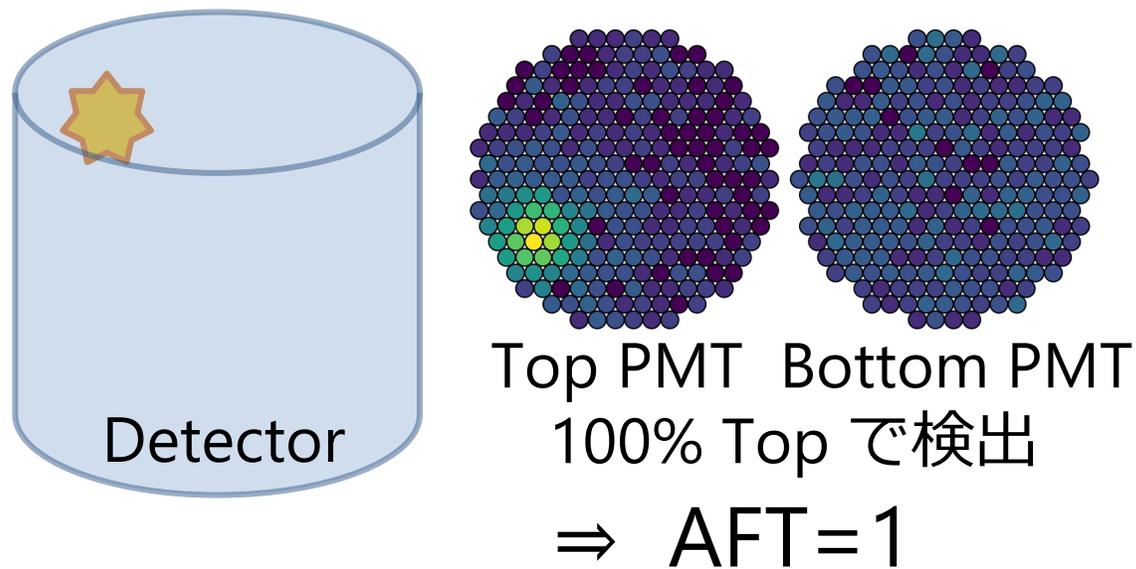


Fig. 1D histogram of alt S1 energy

■ Area Fraction Top(AFT) difference cut (eff: 0.9874)

- 信号が Top PMTで観測された割合、TPC内の反応点のz方向の位置を表す



- Main, alt S1のAFT値が乖離
⇒ 信号の発生点が離れている
- Alt S1 energy でbinに分け、99% quantileの点でフィッティング

Fitting curve of 99% quantile points

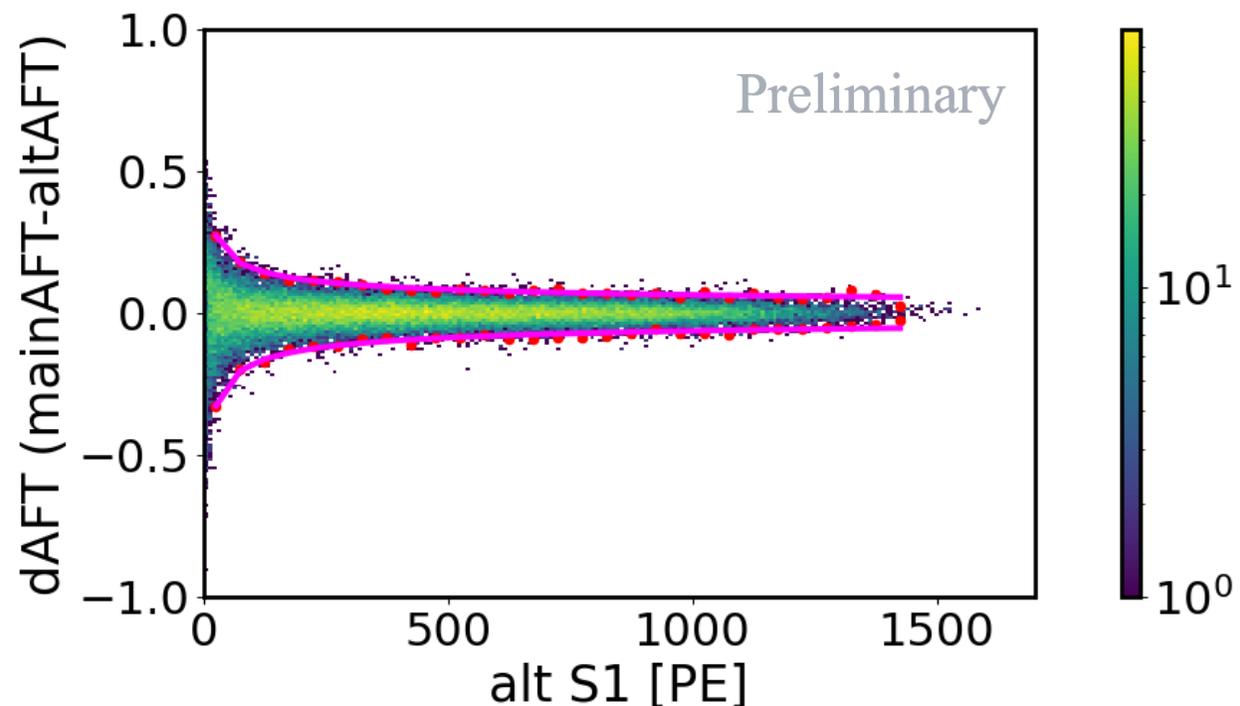
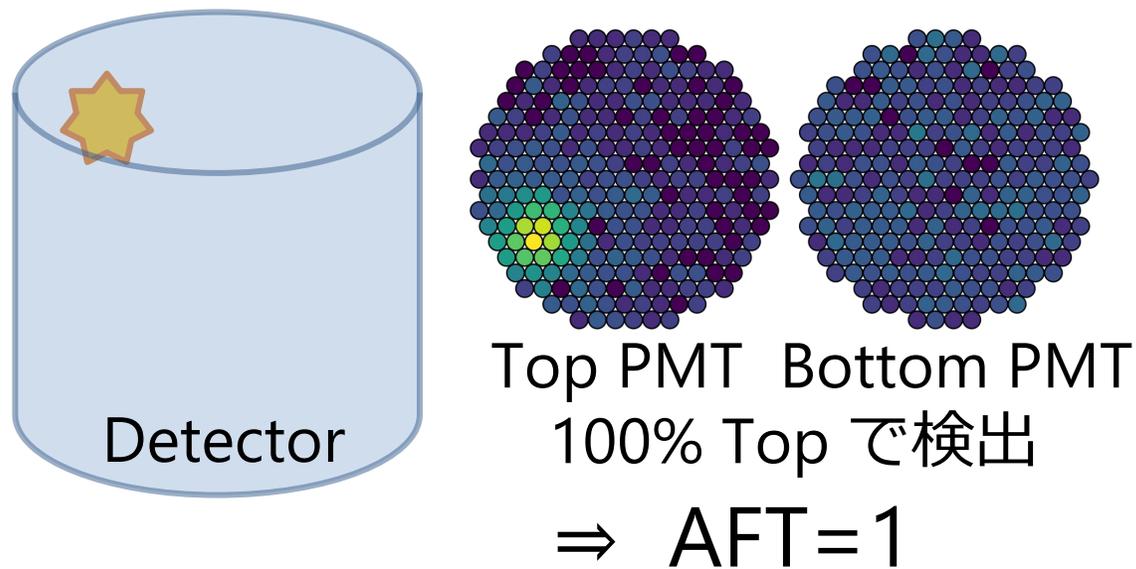


Fig. 2D histogram of alt S1 energy vs delta AFT

Condition 3. Position cut

■ Area Fraction Top(AFT) difference cut (eff: 0.9874)

- 信号が Top PMTで観測された割合、TPC内の反応点のz方向の位置を表す



- Main, alt S1のAFT値が乖離
⇒ 信号の発生点が離れている
- Alt S1 energy でbinに分け、99% quantileの点でフィッティング

Fitting curve of 99% quantile points

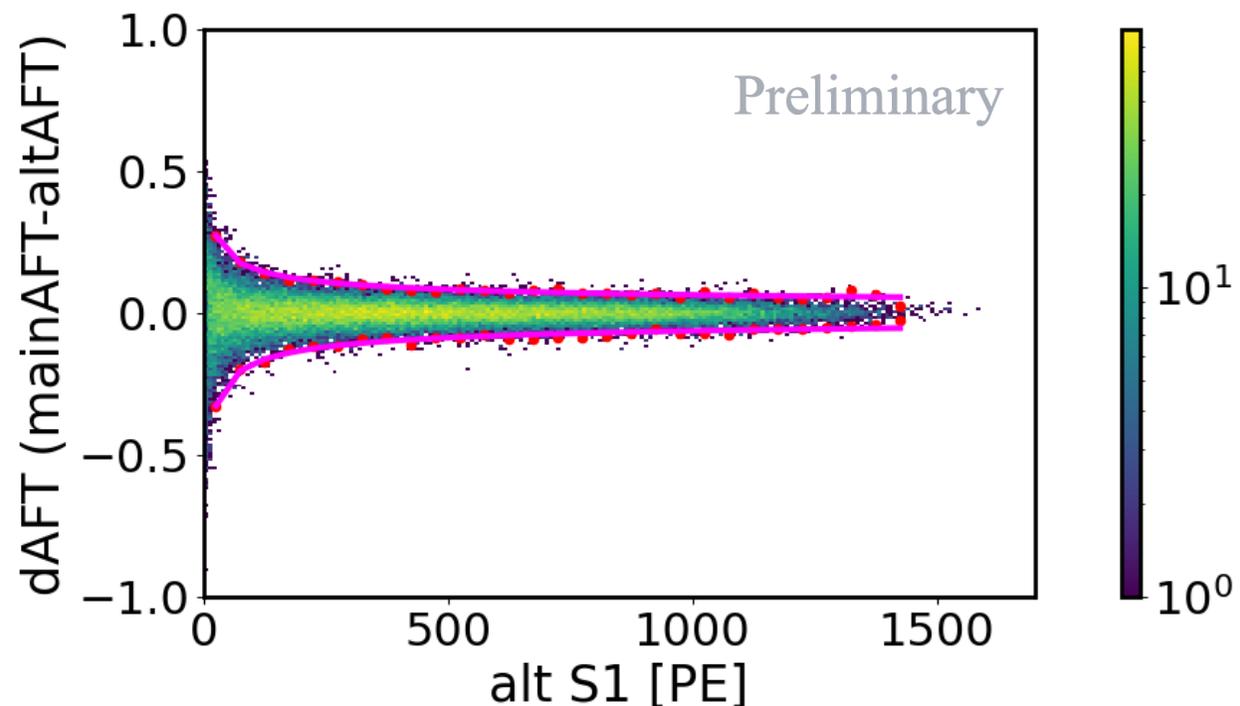
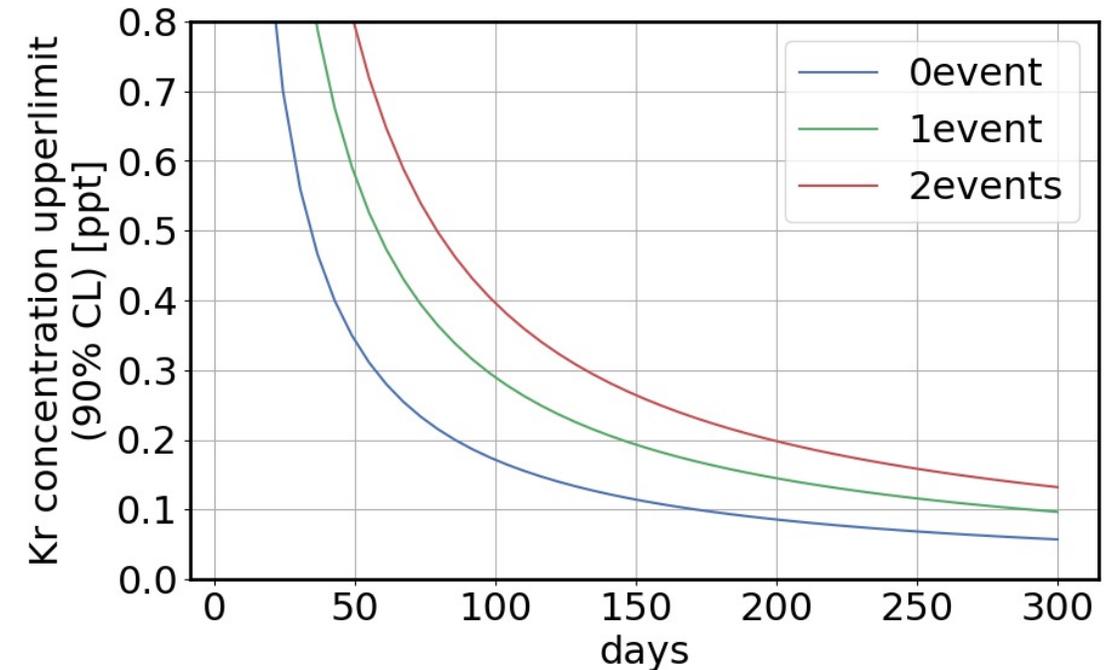


Fig. 2D histogram of alt S1 energy vs delta AFT

Final efficiency: 0.4704

■ exposure timeに対するKr濃度の upper limit curve (90% 信頼区間)

- 200 days exposureで 0 eventの時、90% CL 上限値が~90 ppt に到達
- RGMS (56 ± 36 ppt) より強い制限
- cut efficiency (47%) の改善に必要な exposure timeの短縮が可能



■ Accidental background

- $3000\text{pe} < S1 < 5000\text{pe}$ の信号が $50\text{pe} < S1 < 1500\text{pe}$ の信号の10us以内に
AFT値 ± 0.125 の差の範囲内で検出される頻度
- 正確な数値は現在算出中だが、200 days exposureで
 $< 0.1 \text{ event}/(\text{FV} \cdot 200\text{d})$ 程度と考えられる ←negligible

■ Kr濃度の cross-check

- カットを実データに適用し、 ^{85}Kr による事象数をカウント
- Xe中のKr濃度、または濃度の上限値を算出し、RGMSの結果と比較
- 使用している $^{85}\text{Kr}/\text{Kr}$ 比の正当性を評価

■ 高精度なBGモデル

- cut criteriaの見直しや ^{85}Kr による事象の判別が他にできないか検討し、cut efficiency を向上させる
- ^{85}Kr の存在量に対し、より強い上限を与える
- 高精度な低エネルギー領域のBGモデルを作り、solar pp ν や DMの探索に貢献