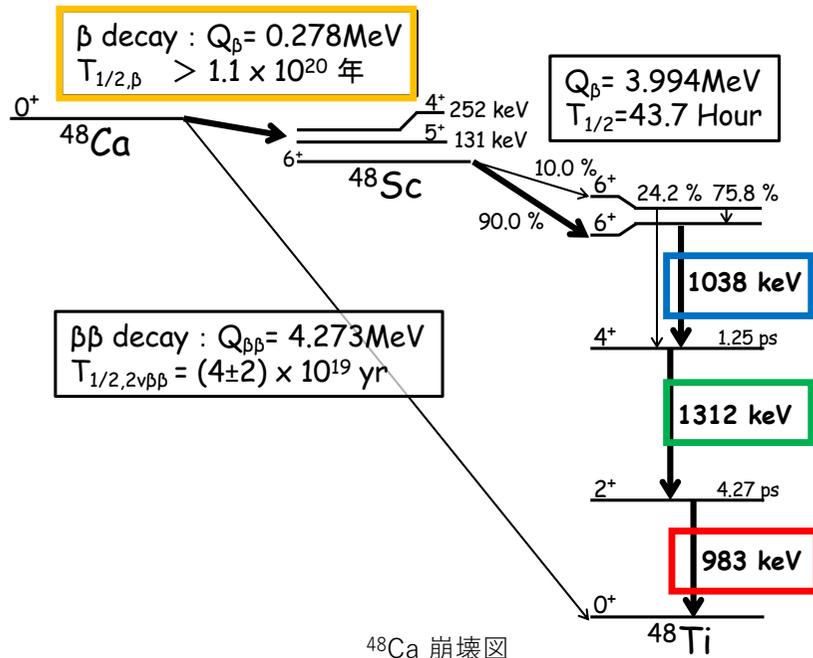


^{48}Ca の β 崩壊測定のための実験装置と改良
Experimental equipment and improvement for
measuring β decay of ^{48}Ca

山本朝陽、原田卓明、吉田斉、梅原さおり^A
阪大理,RCNP^A

Osaka Univ. ,^ARCNP
A.Yamamoto,T.Harada,S.Yoshida,S.Umehara^A

動機



- ^{48}Ca は $0^+ \rightarrow 6^+$ への β 崩壊をする。
 - 半減期 $T_{1/2} > 1.1 \times 10^{20}$ 年 と下限値が与えられているだけで、有限値が得られていない
- **^{48}Ca β 崩壊半減期を求める**

• $T_{1/2}(^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc}) \gg T_{1/2}(^{48}\text{Sc} \rightarrow ^{48}\text{Ti})$
 → $^{48}\text{Ti}^*$ から放出される**3本の γ 線を計測すること**で半減期 $T_{1/2}(^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc})$ を評価できる

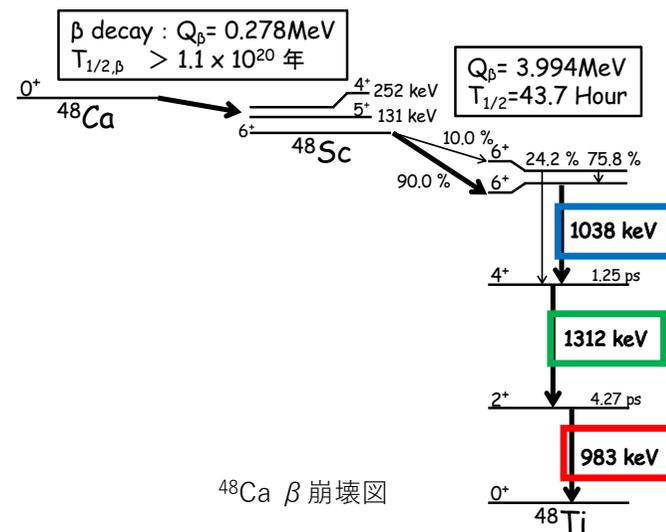
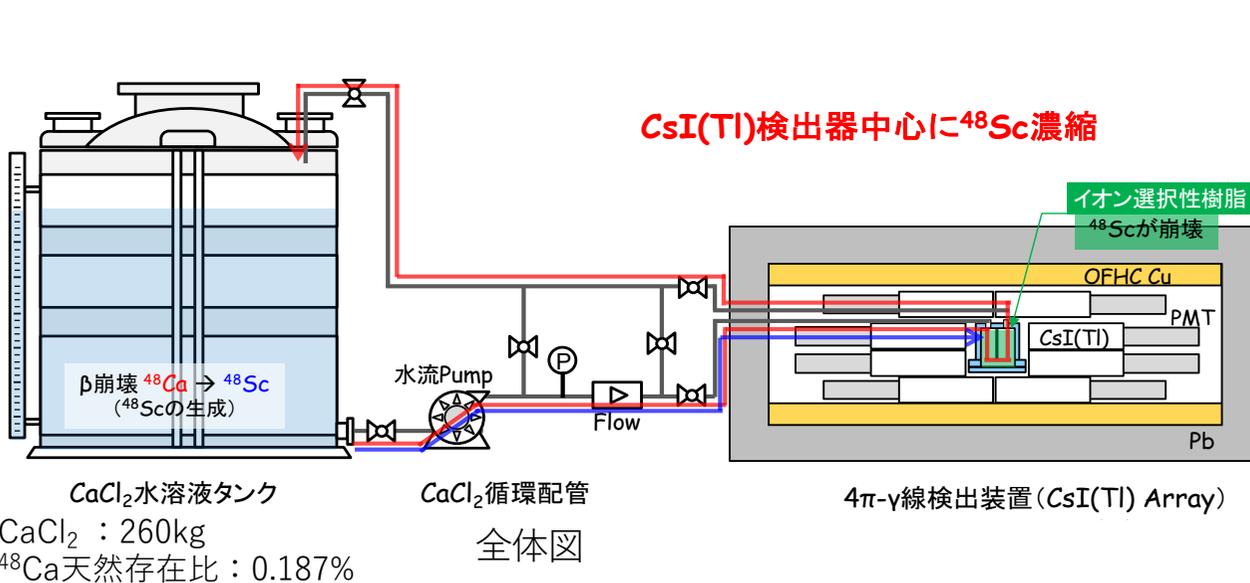
$$\text{半減期 } T_{1/2} = \frac{\ln 2 \times \epsilon \times M^{48}\text{Ca} \times T}{N_{\text{obs}}} \quad \text{測定感度 } T_{1/2} < \frac{\ln 2 \times \epsilon \times M^{48}\text{Ca} \times T}{\sqrt{N_{\text{B.G.}}}}$$

$M^{48}\text{Ca}$: 目的核個数 N_{obs} : 観測数
 T : 測定時間 ϵ : 検出効率 $N_{\text{B.G.}}$: バックグラウンド数

高い検出効率と少ないバックグラウンド(B.G.)が求められる

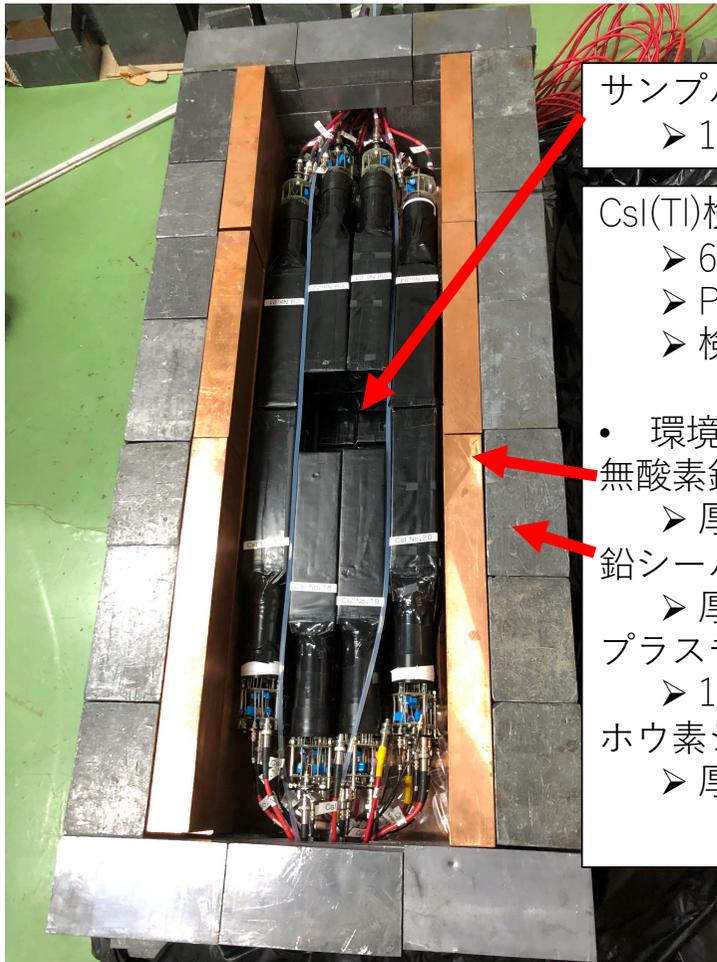
- (モンテカルロシミュレーション(Geant4)を用いて) 検出器の効率の見積もり、改善。
- B.G. の計数と要因。

実験セットアップ



- 検出器外部に48Caソースを用意し、検出器内部で樹脂によりScを化学的に捕集。
→ 目的核の増量
- 30本のCsI(Tl)検出器で4πを囲い計測
→ 3γ同時検出効率の向上

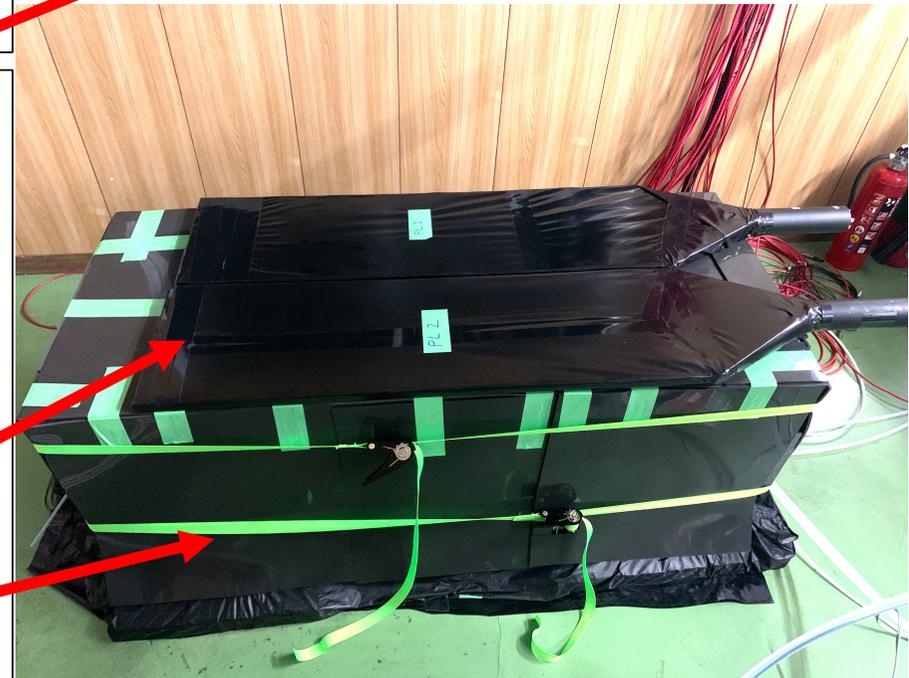
実験セットアップ



サンプルスペース
➤ 130 mm × 130 mm × 130 mm

CsI(Tl)検出器
➤ 65 mm × 65 mm × 250 mm
➤ PMT口径 50 mm Φ
➤ 検出器 × 30本

- 環境放射線遮蔽物
 - 無酸素銅シールド(OFHC銅)
➤ 厚さ 50 mm
 - 鉛シールド
➤ 厚さ 100 mm
 - プラスチックシンチレータ(μ Veto)
➤ 1000 mm × 300 mm × 20 mm
 - ホウ素シート(中性子吸収剤)
➤ 厚さ 5 mm



実験目標

^{48}Ca の半減期を求める

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{N_{obs}} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}}$$

ϵ : 検出効率

$$\epsilon = \epsilon_{\gamma} \cdot \epsilon_{trap} \cdot \epsilon_{circuit}$$

(γ 線検出効率) × (Sc吸着効率) × (循環効率)

N_{BG} : BG計数

N_{atom} : 原子核数

T: 測定時間

• γ 線検出効率(ϵ_{γ})の見積もり

- A) MCを用いて実験を再現。 $(^{48}\text{Sc}$ は半減期が長く効率を求めるのには不向き)
→Geant4で、人工線源(^{60}Co)を測定した結果を再現。
B) 再現したMCで ^{48}Sc を崩壊させ、 γ 線検出効率(ϵ_{γ})を見積もった。

• γ 線検出効率向上とBG削減のための解析方法の改善

- A) ϵ_{γ} を向上させるために解析方法を改善した。

• N_{BG} の削減

- A) BGの特定(TIでは足りないってとこまで、追加実験中)

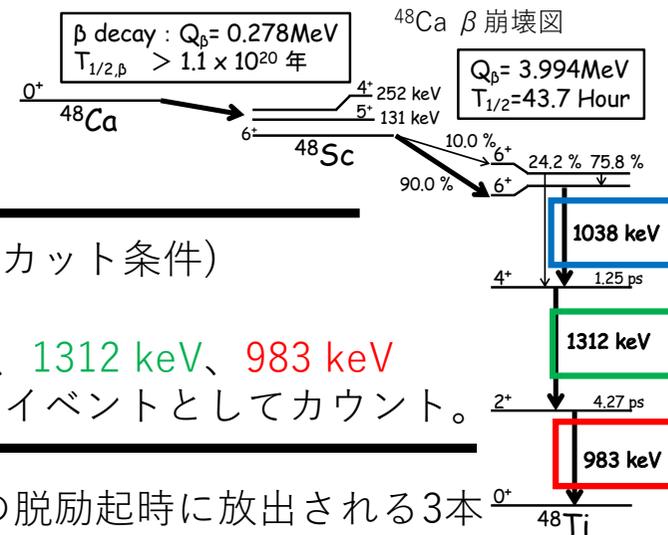
- γ 線検出効率(ϵ_γ)とB.G.の見積もり

$$T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}}$$

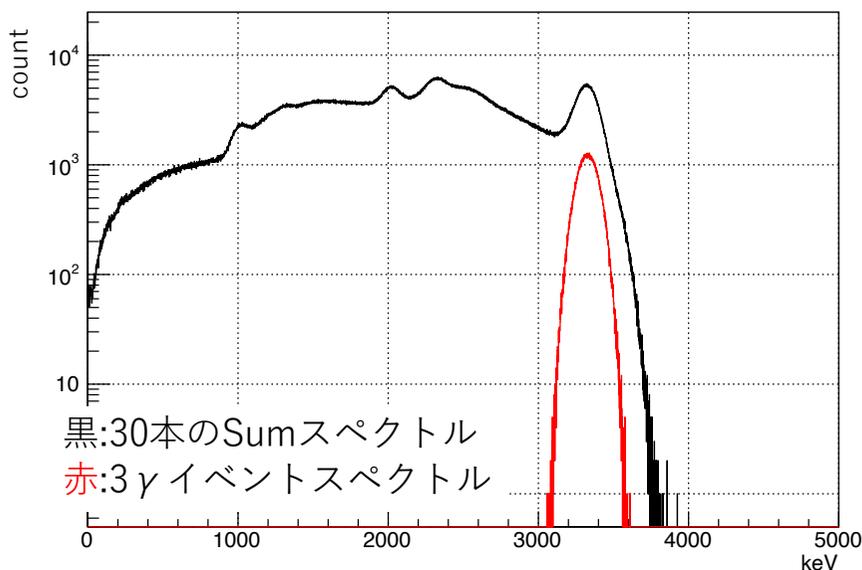
- γ 線検出効率向上とB.G.削減のための解析方法の改善

- N_{BG} の削減

48Sc検出効率の見積もり



48Scの再現スペクトル



黒:30本のSumスペクトル
 赤:3γイベントスペクトル

CsI(Tl)30本の合計エネルギー

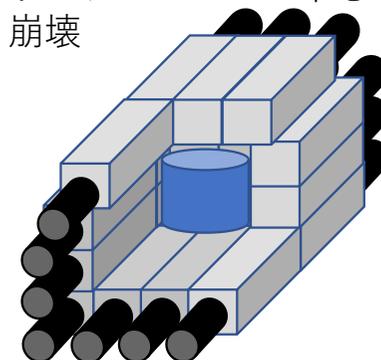
3本のγ線同時検出方法(カット条件)

1. HitしたCsIが3本
2. 3つのHitが1038 keV、1312 keV、983 keVであるイベントを目的のイベントとしてカウント。

- 上記カット条件で48Ti*の脱励起時に放出される3本のγ線を同時検出。
- シミュレーションで崩壊させた数と同時検出された数より検出効率を見積もる。

48Sc線源での3本のγ線同時検出効率
 = 2.2 %

48ScのMC発生条件
 サンプルスペース中心で崩壊



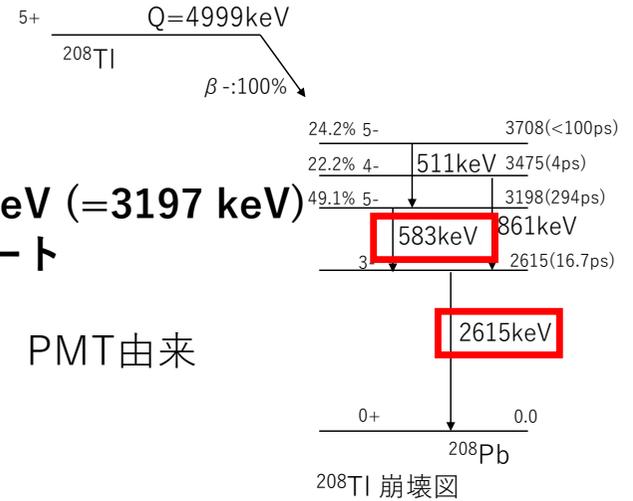
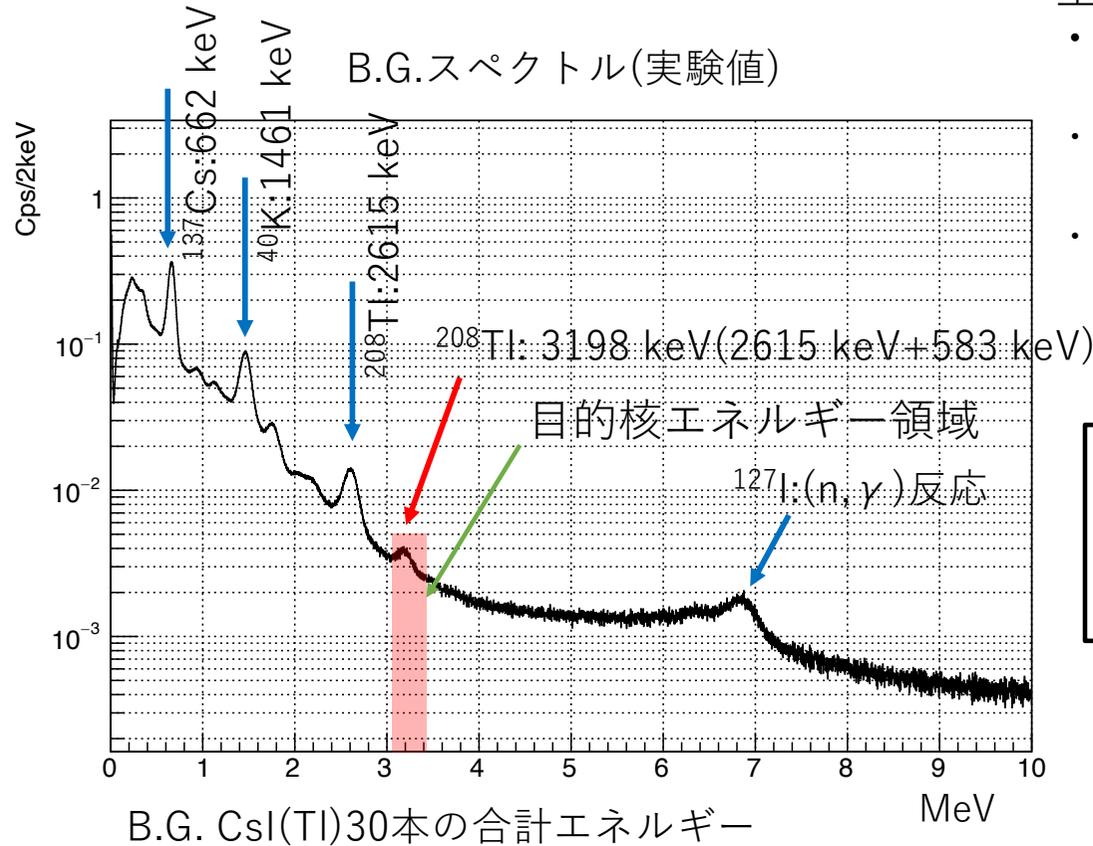
- γ 線検出効率(ϵ_γ)とB.G.の見積もり

$$T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}}$$

- γ 線検出効率向上とB.G.削減のための解析方法の改善

- N_{BG} の削減

B.G.計数



主なB.G.と要因

- ^{208}Tl : 2615 keV、583 keV (=3197 keV)
→PMT由来、ホウ素シート
- ^{214}Bi :
→大気中の ^{222}Rn の崩壊、PMT由来
- 宇宙線、中性子

3本のγ線同時検出方法(カット条件)

1. HitしたCsIが3本
2. 3つのHitが1038 keV、1312 keV、983 keVであるイベントを目的のイベントとしてカウント。

BG計数:48 count/day

1年で測定可能な半減期

$$T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{\text{atom}} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{\text{BG}}}} = 8.2 \times 10^{19} \text{ year}$$

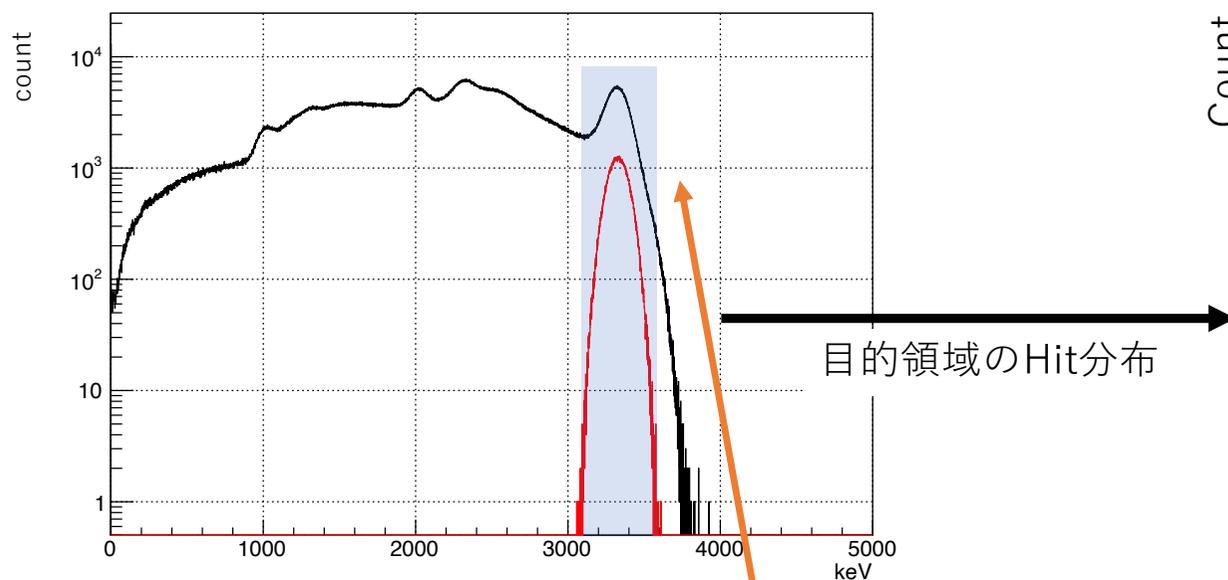
• γ 線検出効率(ϵ_γ)の見積もり

• γ 線検出効率向上とBG削減のための解析方法の改善 $T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}}$

• N_{BG} の削減

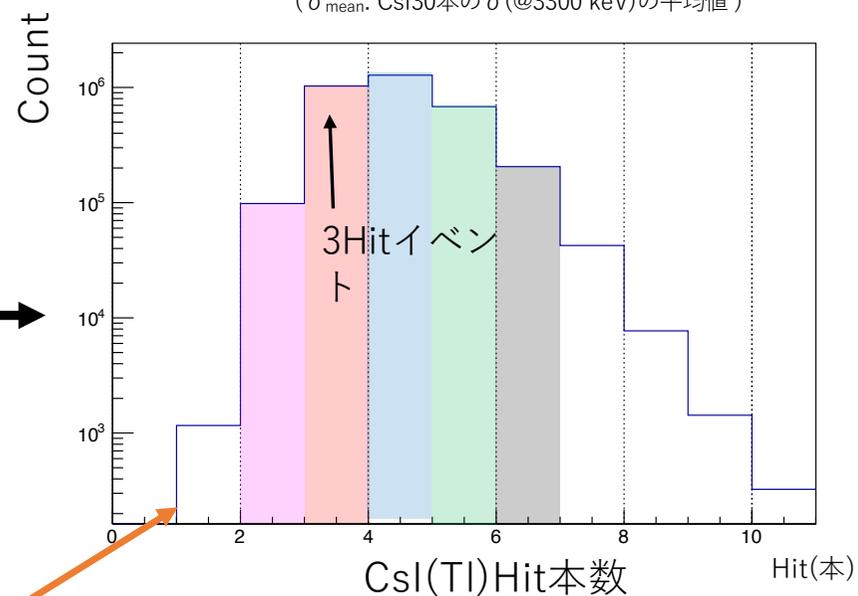
解析の課題と改善

^{48}Sc の再現スペクトル



MCで再現した ^{48}Sc の
 $3333 \pm 2\sigma_{\text{mean}}$ keV領域のカウン

(σ_{mean} : CsI30本の σ (@3300 keV)の平均値)



これまでの解析の問題点

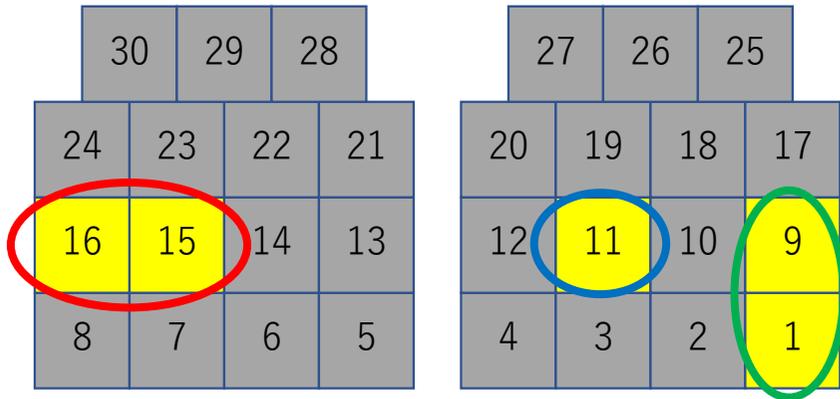
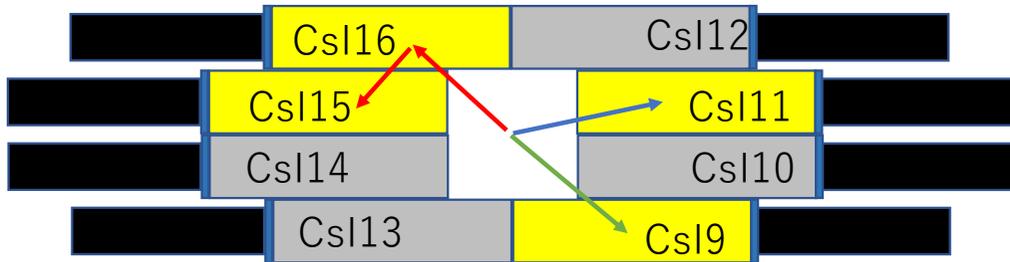
- ^{48}Sc のイベントを失いすぎている(検出効率 2.2%)
- コンプトン散乱したイベントを捨てている
- 特徴的なBGイベントも拾っている

新たな解析

- クラスターリングし4Hit以上のイベントを拾う
- 最尤法を用いて分布の特徴を条件に加える

クラスタリング

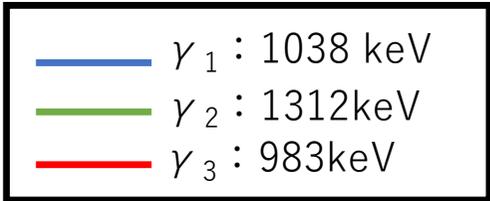
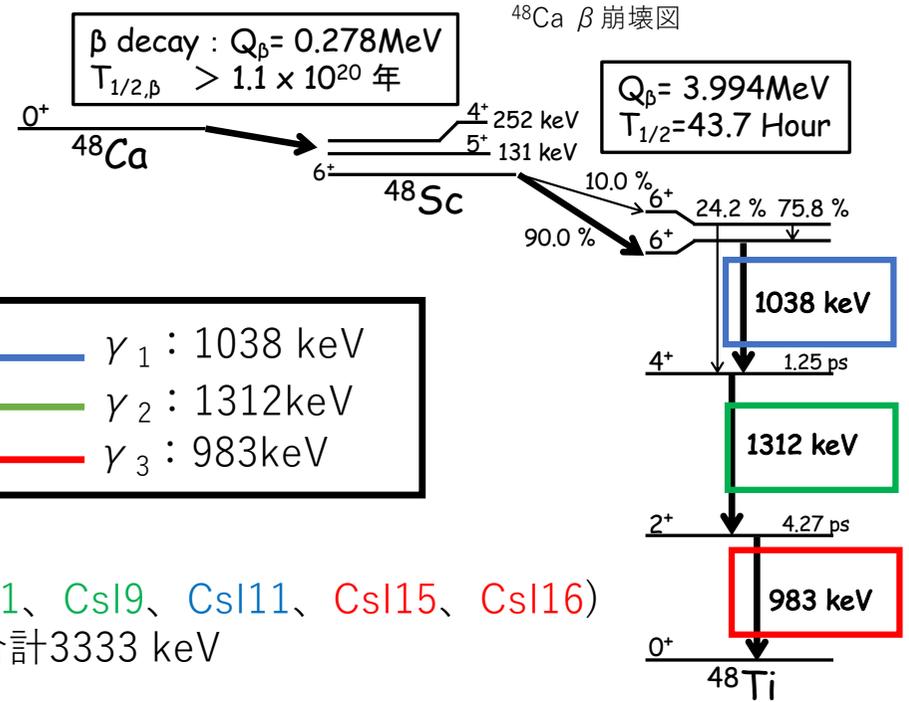
5Hitした場合の例



- Hit数：5本(CsI1、CsI9、CsI11、CsI15、CsI16)
- エネルギー：合計3333 keV

- 元の解析
→5Hitであるためカウントされない
- 改善後の解析
→クラスタリングによりカウントされる

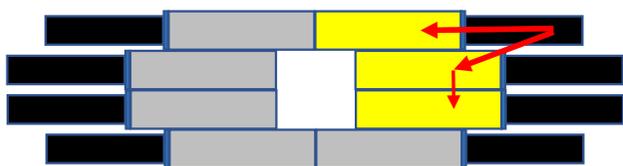
4Hit以上のイベントがクラスタリングにより検出可能→検出効率向上。



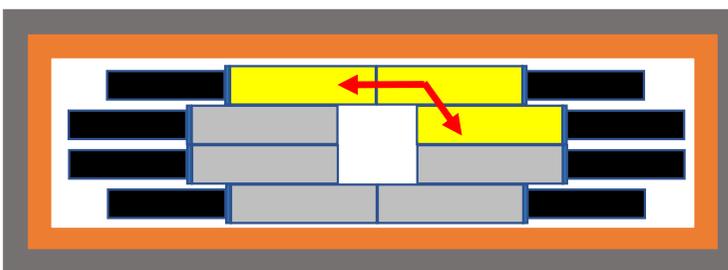
最尤法: イベントの特徴

BG イベント

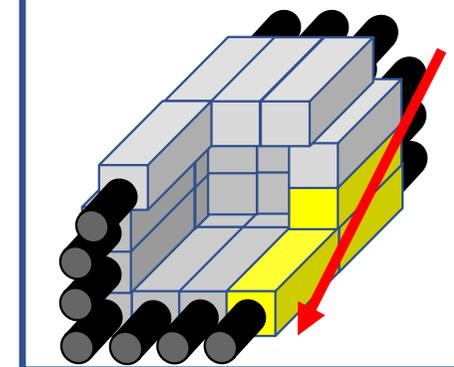
^{208}Tl : PMTに含まれるTl
→ 放出されたPMT側に偏る



中性子: CsI(Tl)内の中性子捕縛
→ 放出された周辺にまとまる

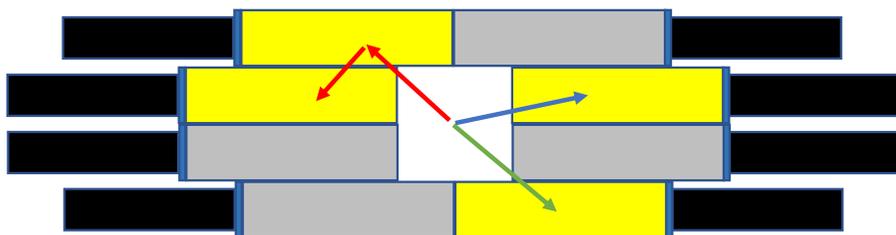


宇宙線: ミューオン
→ 軌跡上にまとまる



Signal イベント

^{48}Sc : サンプルスペースから放出
→ サンプルスペースを中心に対照的な分布

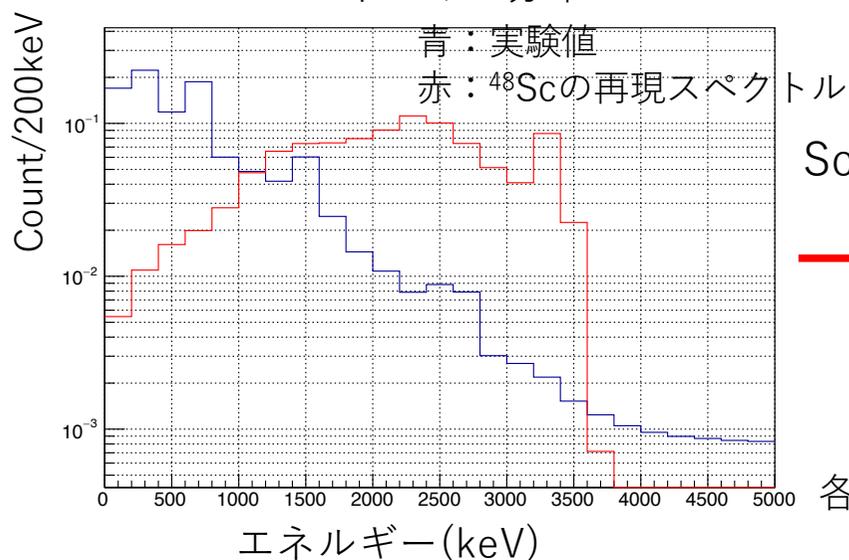


特徴を抽出できるパラメータを使い
BGとSignalをSignalらしさによって弁別する。

最尤法:Cut方法

1.点数を決める

エネルギー分布



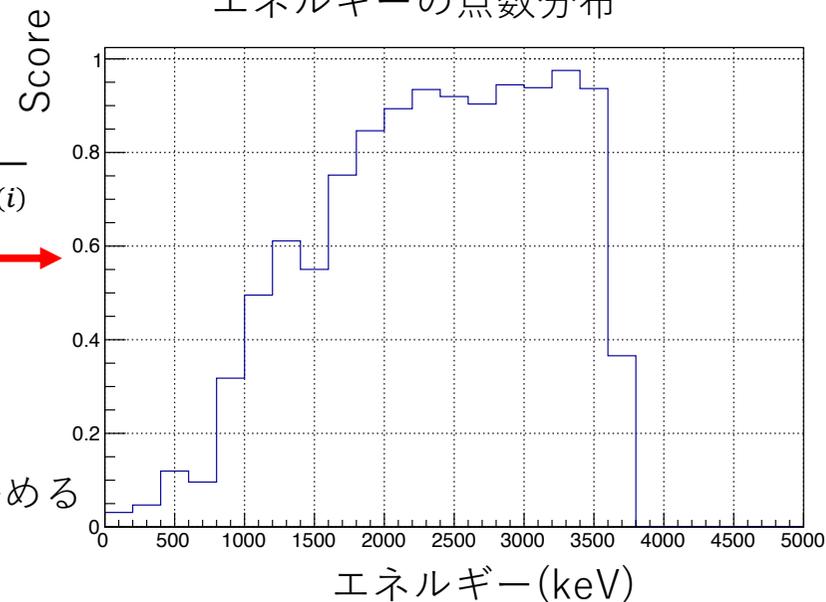
$$\text{Score}(i) = \frac{f_{MC(i)}}{f_{MC(i)} + f_{BG(i)}}$$

$$f_{MC(i)} = \frac{N_{MC(i)}}{\sum N_{MC(i)}}$$

$$f_{BG(i)} = \frac{N_{BG(i)}}{\sum N_{BG(i)}}$$

各値に対して点数を決める

エネルギーの点数分布



(全体を1として規格化)

2. BestCutを決める。(何点以上をイベントとするか)

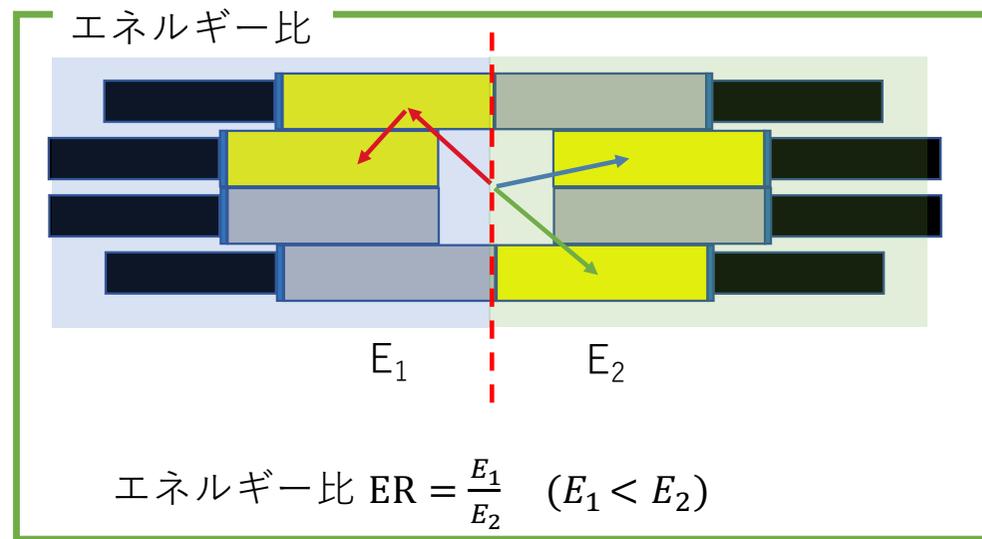
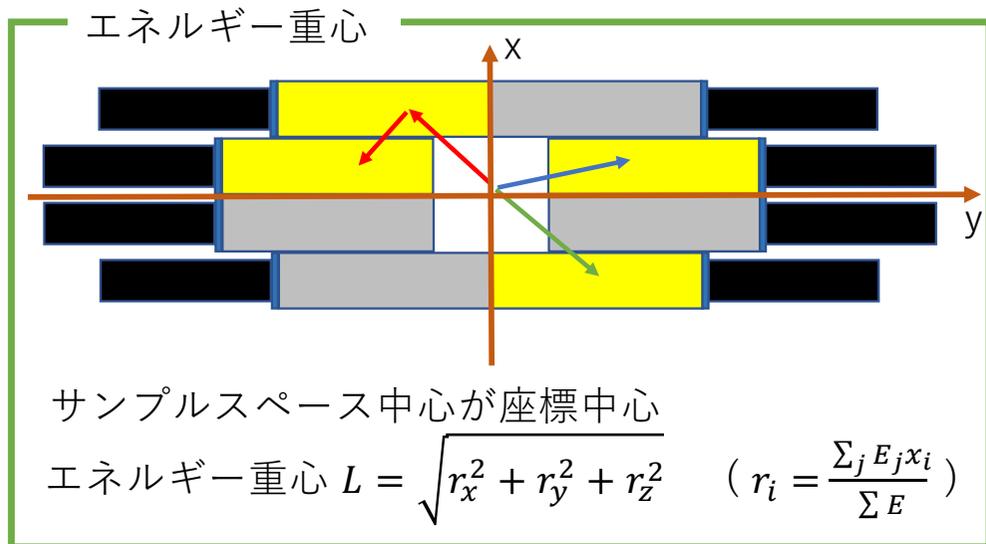
$$SN_{score} = \frac{N_{MC}}{\sqrt{N_{EXP}}}$$

$$T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}} = \frac{\ln 2 \cdot N_{atom} \cdot T}{3} \cdot \underbrace{\frac{\epsilon}{\sqrt{N_{BG}}}}_{SN_{Score}}$$

0 < Score < 1で最もSN値が最も高いものをBestCutの点数とする。

最尤法:結果

最もSNの値が高かった「(エネルギー重心+エネルギー比)+クラスタリング」をCutとして採用。



エネルギー重心とエネルギー比を用いて最尤法を適応

検出効率 2.2 → 9.7 %

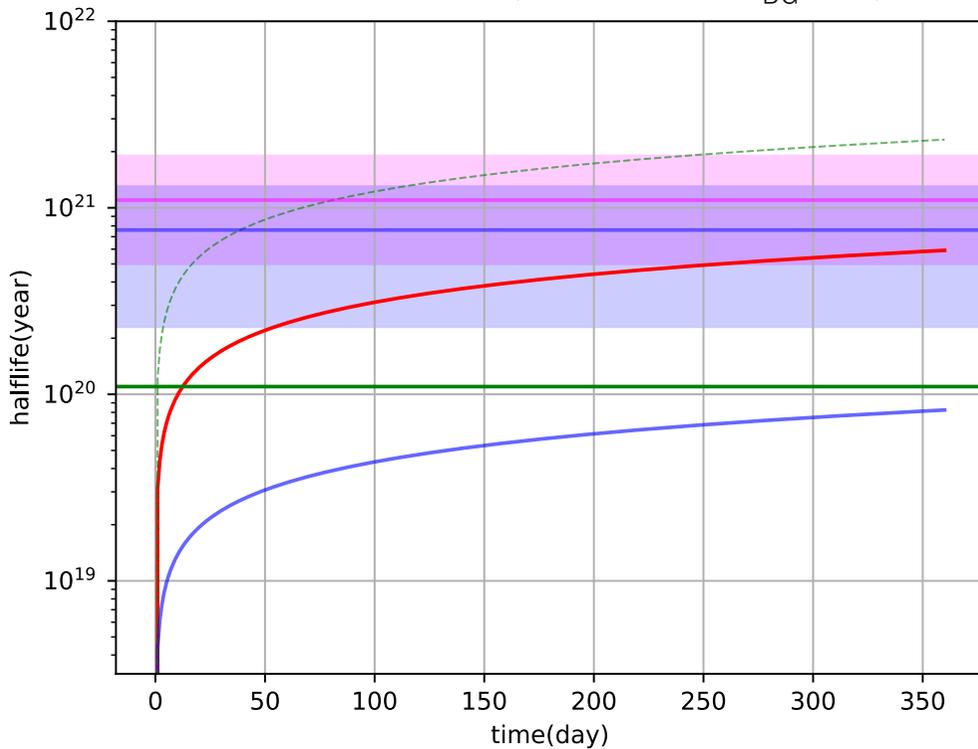
BG計数 48 → 18 count/day

測定可能半減期

曲線

赤：現状一番良いSN (eff=9.7%、 $N_{BG}=18$) $< 5.9 \times 10^{20}$ year

青：解析改善前 (eff=2.2%、 $N_{BG}=48$) $< 8.2 \times 10^{19}$ year



点線(緑)：目標値: (eff=20%、 $N_{BG}=5$) $< 2.3 \times 10^{21}$ year

ピンク: $1.1^{+0.8}_{-0.6} \times 10^{21}$ year

(Shell-model study of the highly forbidden beta decay $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc}$)

青: $7.6^{\pm 5.3} \times 10^{20}$ year

(Calculation of the $^{48}\text{Ca}(\text{beta-}) \text{Sc}$ decay rate)

緑: 1.1×10^{20} year

(A. Bakalyarov et. al., Nuclear Physics A700 (2002) 17)

$$T_{1/2} = \frac{(\ln 2 \cdot \text{eff} \cdot N_{\text{atom}})}{\text{sigma} \cdot \sqrt{\frac{N_{BG}}{T}}} \cdot \sqrt{T}$$

eff : 検出効率

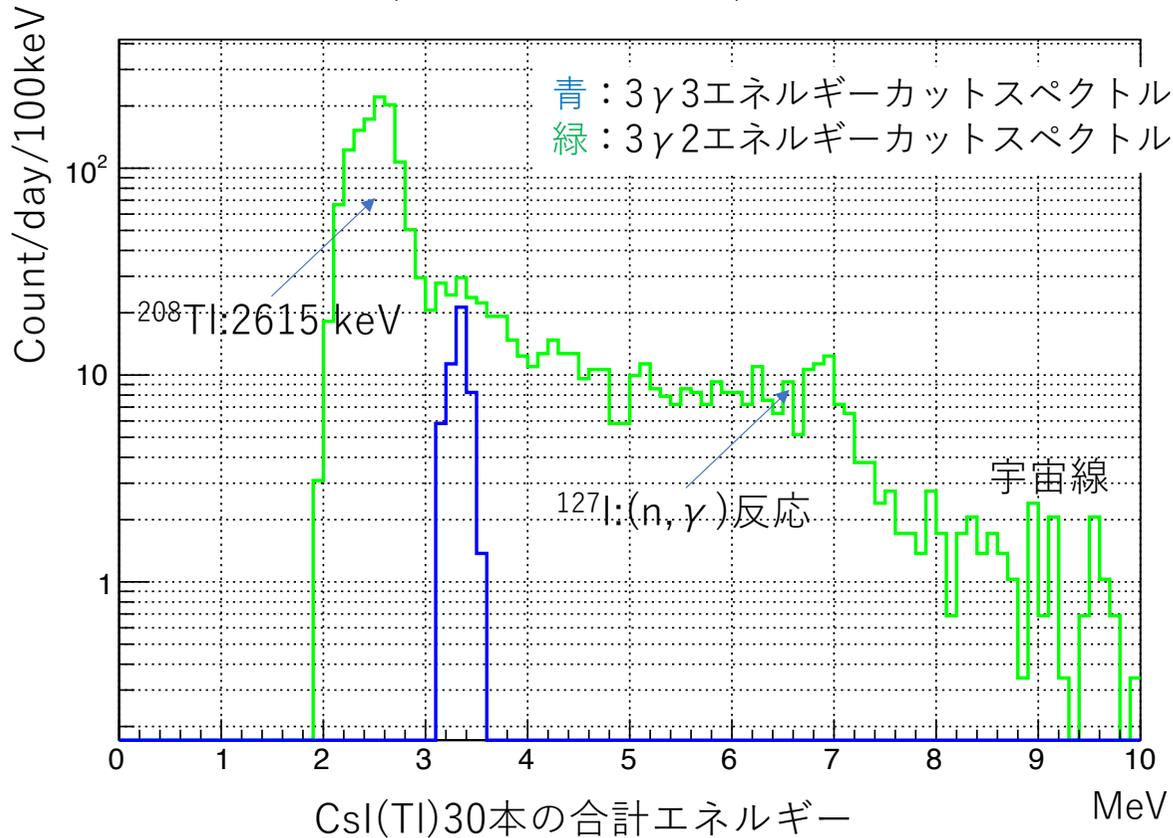
sigma=3

- γ 線検出効率(ϵ_γ)の見積もり
- γ 線検出効率向上とBG削減のための解析方法の改善
- N_{BG} の削減

$$T_{1/2} < \frac{\ln 2 \cdot \epsilon \cdot N_{atom} \cdot T}{3 \cdot \sqrt{N_{BG}}}$$

B.G.の見積もり

3Hit:(983 keV:1038 keV) スペクトル



高エネルギーの影響を確認する

カット条件

1. HitしたCsIが3本
2. 983 keV 1038 keVの γ 線を含む

高いエネルギーからの染み込み

- $^{127}\text{I}:(n, \gamma)$ 反応
→ホウ素シート(中性子吸収剤)により軽減
- 宇宙線
→プラスチックシンチレータにより軽減

→高エネルギー領域の更なるB.G.除去が必要
(水で中性子を減速させる、地下で実験を行う)

まとめ・展望

まとめ

- 実験で測定困難な ^{48}Sc の3 γ 同時検出効率を、モンテカルロシミュレーションで再現し求めた。
- 新しい解析方法を導入することで、SignalとBGの識別精度が向上した。
→測定可能半減期 $< 5.9 \times 10^{20}$ 年

展望

- 実験による宇宙線、中性子B.G.の除去（実験中）
→水で中性子を減速させる。地下で実験を行い宇宙線の影響を減らす。
- B.G.の再現性の向上
→ ^{208}Tl 以外のBGの特定と再現。解析による除去