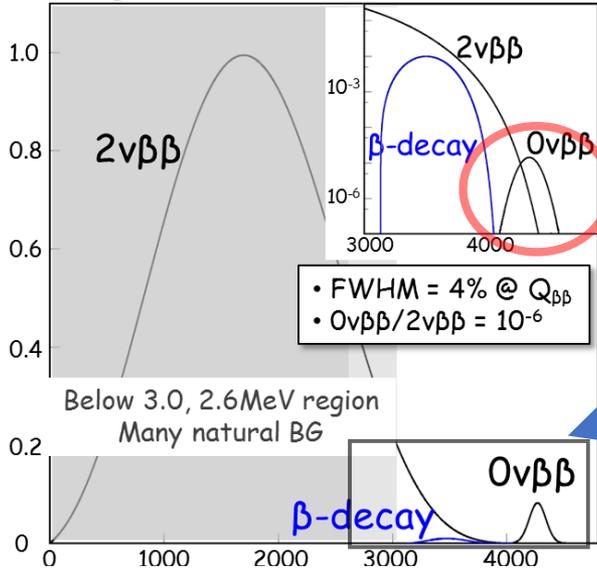


48Caのシングルβ崩壊の 半減期の測定に向けた実験計画

大阪大学

原田 卓明 山本 朝陽

導入 ^{48}Ca について



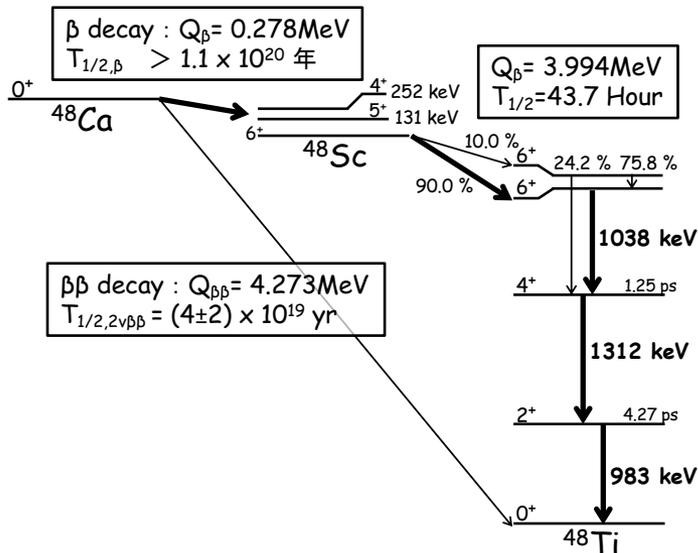
$0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見にはQ値(4.271MeV)Background(BG)として $2\nu\beta\beta$ の染み込み量を評価しなければならない。

$2\nu\beta\beta$ 崩壊を精密に測るために、自然放射線の少ない2.6~4.3MeV領域の $2\nu\beta\beta$ 崩壊を使いたい。

-> ^{48}Sc の β 崩壊がBGとしてあるので、 ^{48}Sc の事象数を精密に評価できないといけない。

^{48}Sc の β 崩壊は ^{48}Ca の β 崩壊に起因するものなのでこの実験では、

「 ^{48}Ca の β 崩壊の半減期を測定すること」を目標とした。



^{48}Ca の β 崩壊の半減期は、 1.1×10^{20} 年以上である。

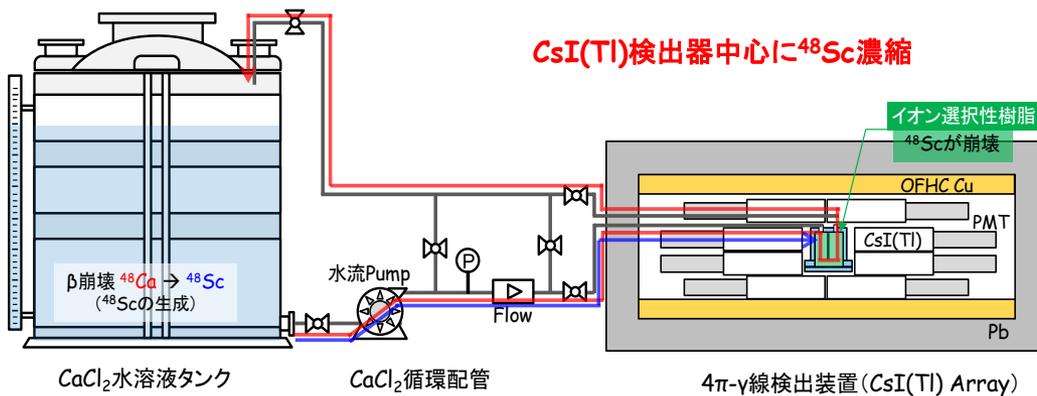
(参考文献：A. Bakalyarov et. al., Nuclear Physics A700 (2002) 17)

この実験では、半減期の検出限界は 10^{22} 年程度を目指している。

導入 実験装置の説明

- 放射平衡状態: $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ を利用
- $^{48}\text{Ti}^*$ から放出される3本の γ 線を、CsI(Tl)検出器30本で観測する
- nat. CaCl_2 (~ 255 kg) 水溶液(630 L) を使用; $^{48}\text{Ca} \sim 170 \text{ g}$

- Sc^{3+} イオンがキレート樹脂に濃縮されて、 ^{48}Sc が β 崩壊する。
 - Ca^{2+} イオン(大量): 樹脂には吸着されず、経路内を循環し続ける
 - Sc^{3+} イオン: ^{48}Ca の β 崩壊でタンク内で生成され、キレート樹脂内で捕獲される



上から見た検出器部分

本実験の特徴

1. 崩壊核(^{48}Sc)を全方位(4 π)覆った検出

→CsI(Tl)を30本用いることで全方位を囲む

2. 崩壊核(^{48}Sc)の選択的な捕集

→キレート樹脂は ^{48}Sc を化学的に吸着することがきる。一方、 ^{48}Ca は吸着されない。その為、キレート樹脂部分に ^{48}Sc を濃縮することができる。

モンテカルロシミュレーション (MC)

$$T_{1/2} = \frac{T \ln 2}{N_{det}} \varepsilon N_0$$

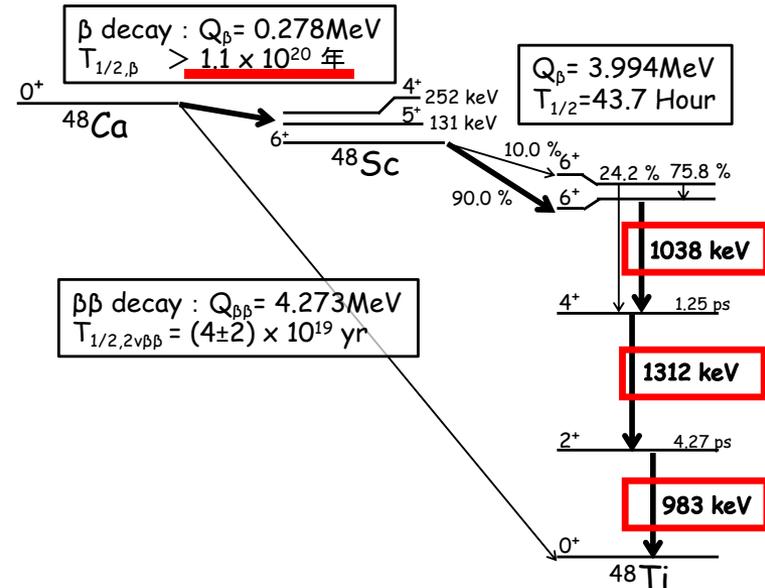
N_{det} : 観測イベント数 ε : 実験装置の効率
 T : 測定時間 N_0 : サンプルの原子数

実験装置の効率では、

1. 循環に関する効率 $\varepsilon_{circulation}$
2. 樹脂の捕集効率 $\varepsilon_{capture}$
3. 検出器の検出効率 ε_{detect}

がありが今回はその中の ε_{det} を求める。

現在理論値では 2×10^{21} 年まで予想されているため、観測期間を1年と仮定したときに少なくとも $\varepsilon_{det} > 10\%$ が求められる。

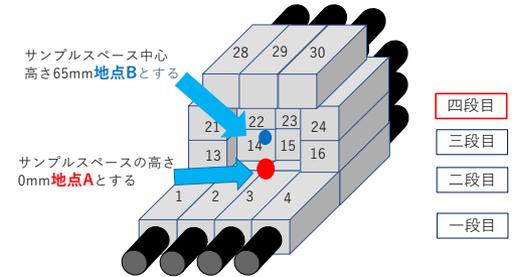


3本のγ線の検出効率が必要であるが、 ^{48}Sc を人工的に作ることはできない。

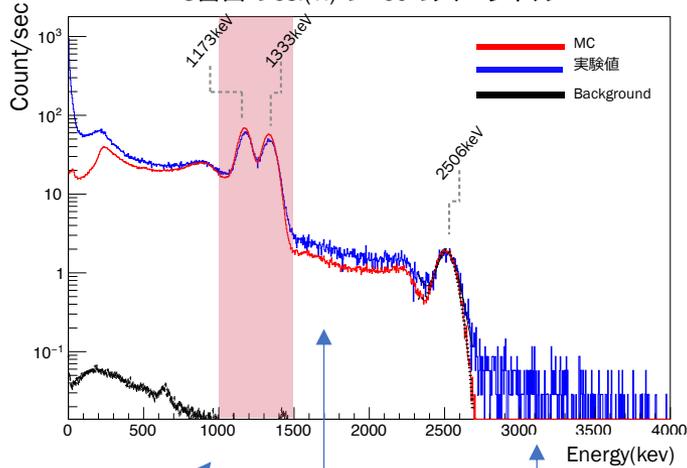
→MCシミュレーションを用いる。

MCが正しく再現されているかは、γ線のエネルギーが近い ^{60}Co (1173keV,1333keV)を用いて確認した。

MCの再現性の評価



3番目のCsI(Tl)の⁶⁰Coのスペクトル



48Scのγ線のエネルギー領域

偶然同時係数によるずれ

MCと実験値の検出効率を比較することで、MCの精度を確かめる。

⁶⁰Co(高さ0mm)の1173keVと1333keVのγ線の同時検出効率

実験値 $12.80 \pm 0.03 \%$

MC $13.70 \pm 0.01 \%$

→MC/実験値 = 1.07

→7%のずれ

⁶⁰Co(高さ65mm)の1173keVと1333keVのγ線の同時検出効率

実験値 $13.10 \pm 0.02 \%$

MC $14.60 \pm 0.01 \%$

→MC/実験値 = 1.11

→11%のずれ

現時点では最大で11%程度のずれと考えられる。

パッケージ : geant4.10.06

Physics list : shielding

2本のγ線の角度相関は考慮されていない。

このMCをもとに、⁴⁸Scの3本のFull energy peak (983keV,1038keV,1312keV)の同時検出効率を算出

→ 11.2 %

MCの精度を上げる為の課題

MCではCsI(Tl)を等間隔、同じ検出効率で再現している。
そのため、MCをより実験値に近づけるために以下のことが考えられる。

1. 検出器の配置のズレ

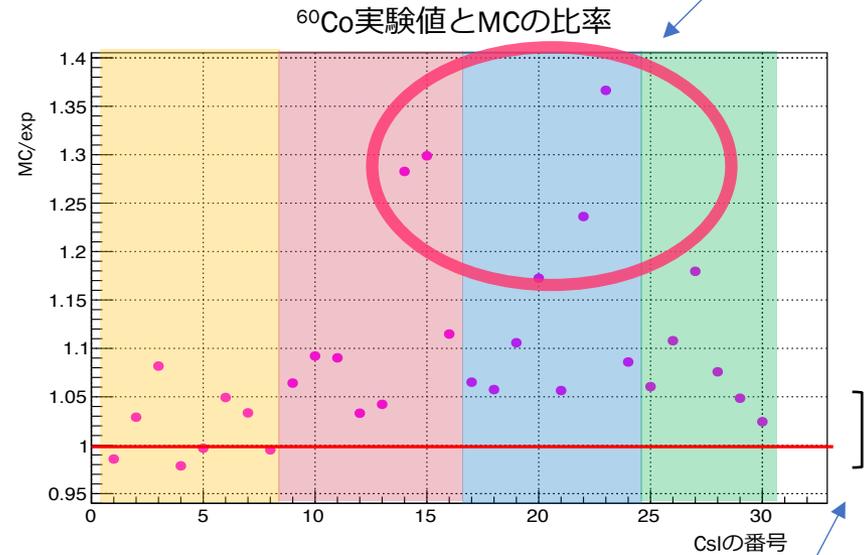
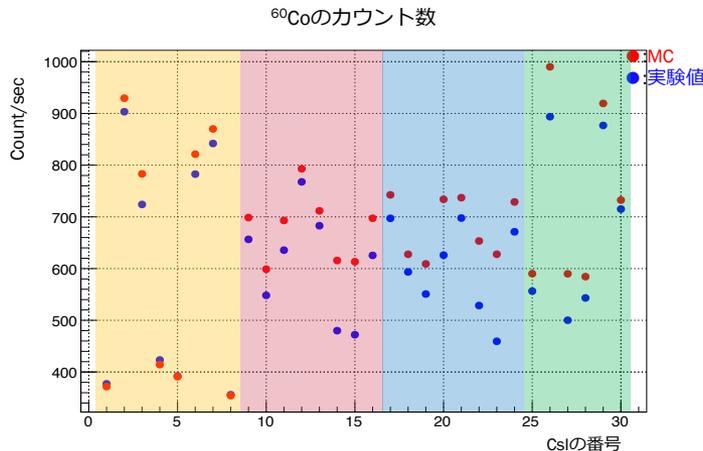
→CsI(Tl)の結晶をブラックシート等で覆っている為、検出部分にズレが生じてしまう。

1. 各CsI(Tl)固有の特性の考慮

→CsI(Tl)結晶の発光量の違い、PMTの検出率の違い

→各CsI(Tl)のカウントを見ることで要因を探す。

大きなズレは検出器の個体差が大きいものと考えられる。

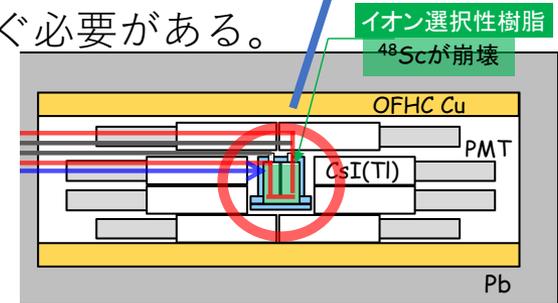
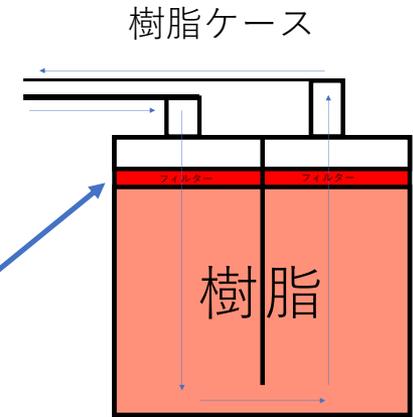


左図は各CsI(Tl)のカウントをプロットしたもので、比率をとること(右図)で実験値からのズレを見ることができる。

配置のズレは、**検出器の位置と検出数の比例関係を求める**ことで修正することができる。

今後の展望

- MCの精度向上
- 溶液循環時、樹脂が流れでない様にするフィルターの用意。
→Ca溶液を循環させているとき、キレート樹脂はケースに入っている。
そのキレート樹脂がケースから漏れてしまうのを防ぐ必要がある。



- 残りの検出効率($\epsilon_{\text{circulatoion}}$, $\epsilon_{\text{capture}}$)を求める。

→ $\epsilon_{\text{capture}}$ は、樹脂が化学的に ^{48}Sc を吸着する性質を利用し、同位体である ^{46}Sc を用いて測定する。 ^{45}Sc (天然存在比100%)に加速器で中性子照射し ^{46}Sc を用意することができるため、 ^{48}Sc よりも容易に実験に用いることができる。

BGの達成目標

- 目的の事象とBGの統計量を N_s, N_{BG} とすると

$$N = N_s + N_{BG} > N_{BG} + \sqrt{N_{BG}}$$

が必要(BG+BGの統計誤差を上回る)

- 計測時間 t で割って計数率に直すと

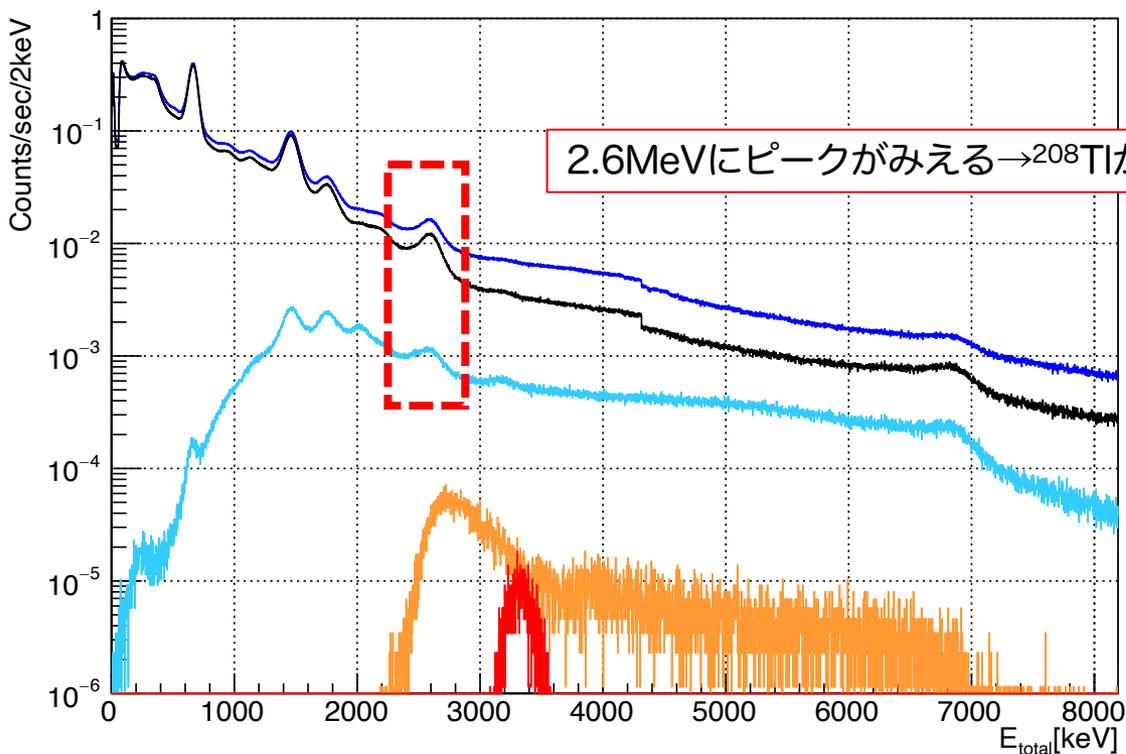
$$n = n_s + n_{BG} > n_{BG} + \sqrt{\frac{n_{BG}}{t}}$$

$$\therefore n_{BG} < n_s^2 t$$

- ^{46}Sc の場合… $N_s \sim 10^4$, $t = 1$ 日 $\rightarrow n_{BG} < 10^3$ cps
- ^{48}Sc の場合… $n_s \sim 10^{-5}$, $t = 1$ ヶ月 $\rightarrow n_{BG} < 10^{-4}$ cps

BGの現状

BGの低減の達成状況



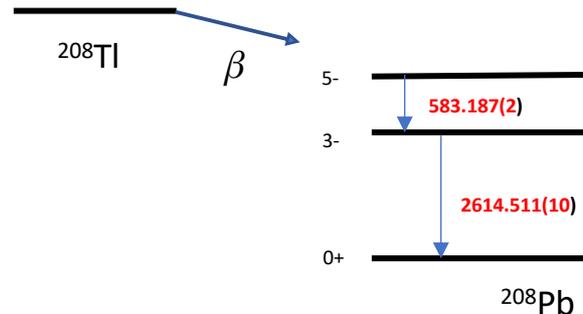
宇宙線 μ を検出するプラシンを設置
VETO信号に入れて μ イベントを排除

Cutなし
μVETO
3Hit

$E_1=1312\text{keV}$, $E_2=1038\text{keV}$
 $E_3=984\text{keV}$

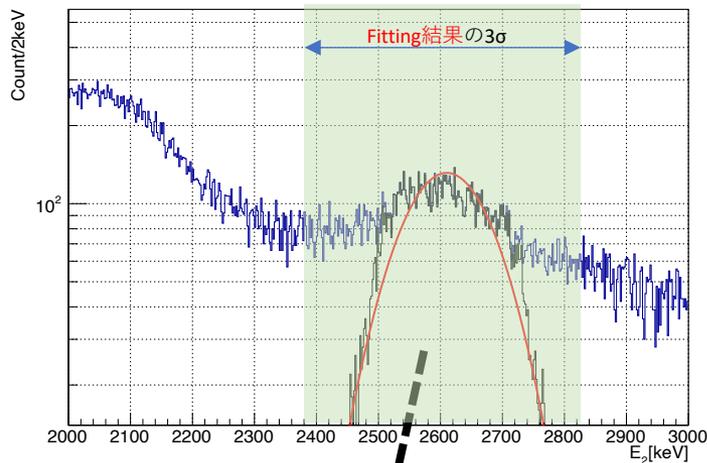
→現状 ^{48}Sc で 10^{-3}cps

BG源の特定



583keVと2614keVのコインシデンスで ^{208}Tl によるBGを評価

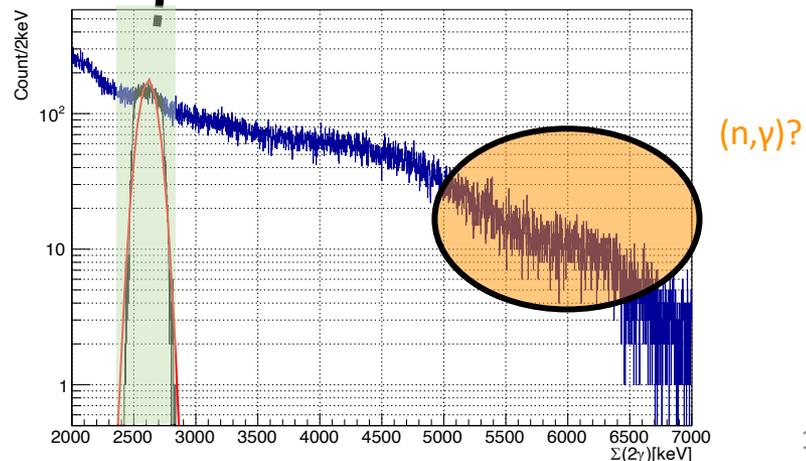
2Hit, μVETO , $E_1=583\text{keV}$
 $E_2=2614\text{keV}$



19471 event
 13024 event
 →2Hitの場合 66.9%がTl由来と思われる

28280 event
 18033 event
 →3Hitの場合 63.8%がTl由来と思われる

3Hit, μVETO , $E_1=583\text{keV}$
 $E_2+E_3=2614\text{keV}$



さらなるBG低減に向けて

- MCシミュレーション TIを置いてBGスペクトルを再現
→TI由来であることを確定させる
- 5MeV以上の領域の連続BGは(n, γ)反応?
 - 鉛ブロックを支えるためのステンレスフレームを置いている
 - ステンレス内のFeで(n, γ)?
 - CsやI, またはCuの可能性もある
 - ^{252}Cf (中性子線源)を置いて 5MeV以上の領域を調べる