

CANDLES報告

大阪大学核物理研究センター
梅原さおり

umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp

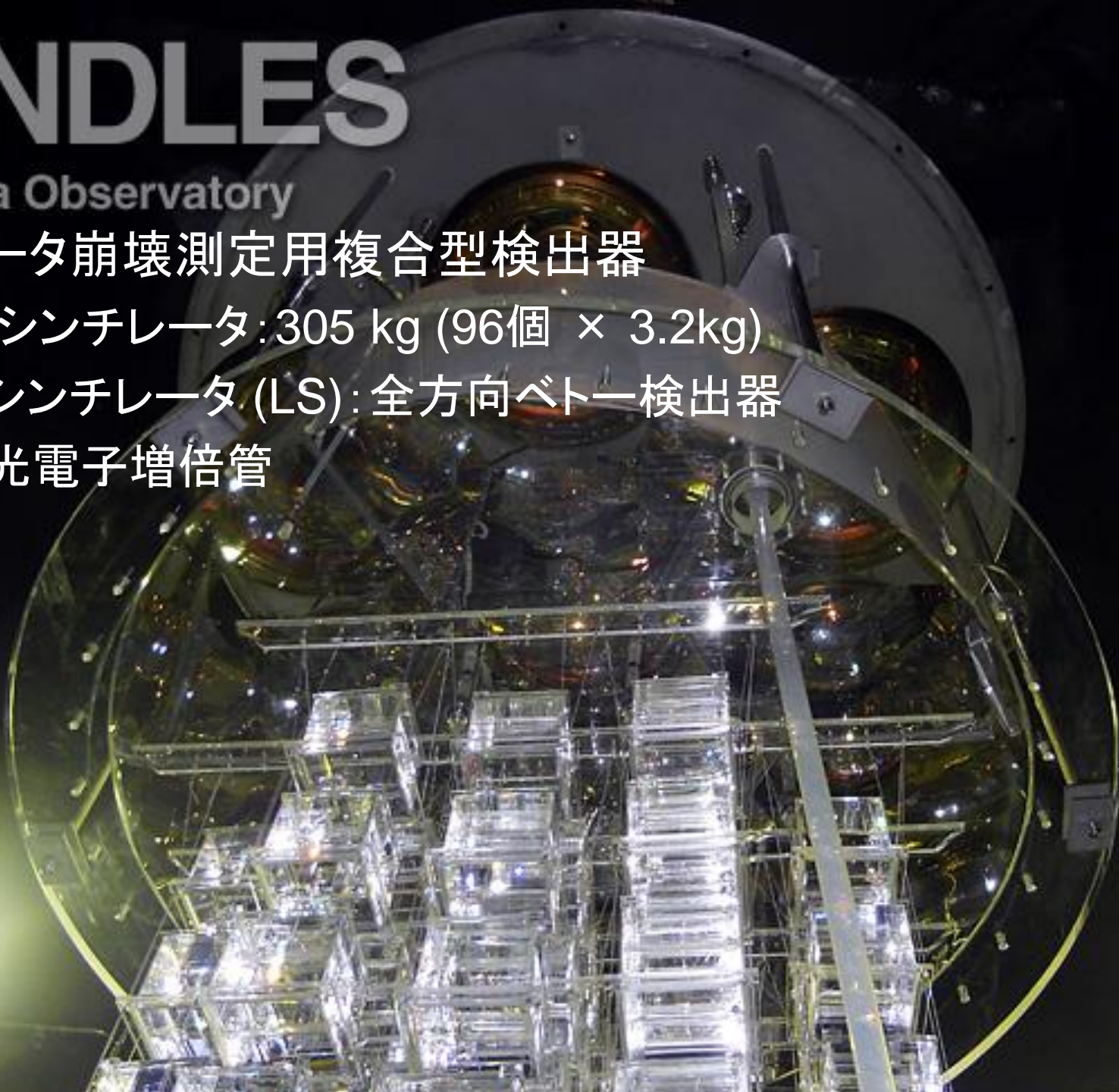
CANDLES Collaboration

- 二重ベータ崩壊測定装置: CANDLES
- 低放射能、低バックグラウンドのために
 - 高純度結晶(これまでの開発)
 - 解析的除去(現状報告)
 - ^{208}Tl 除去解析
 - 連続信号($^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$)除去解析

CANDLES

@Kamioka Observatory

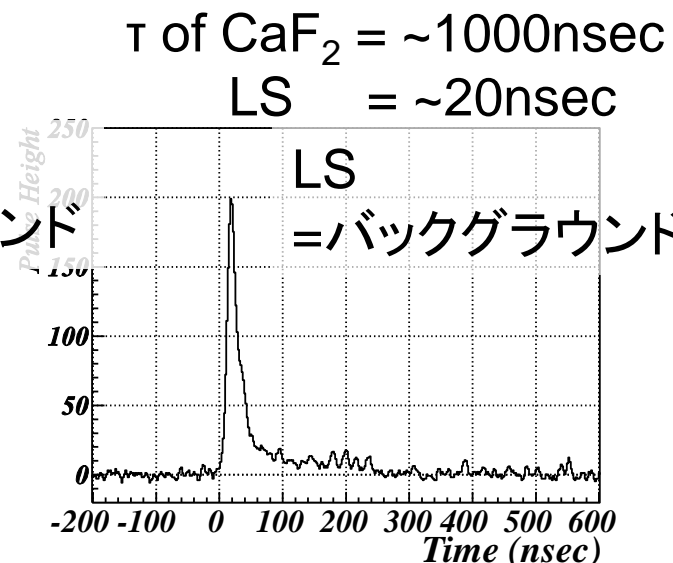
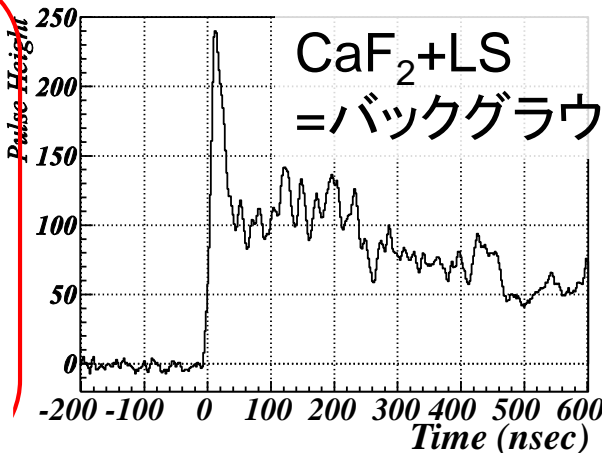
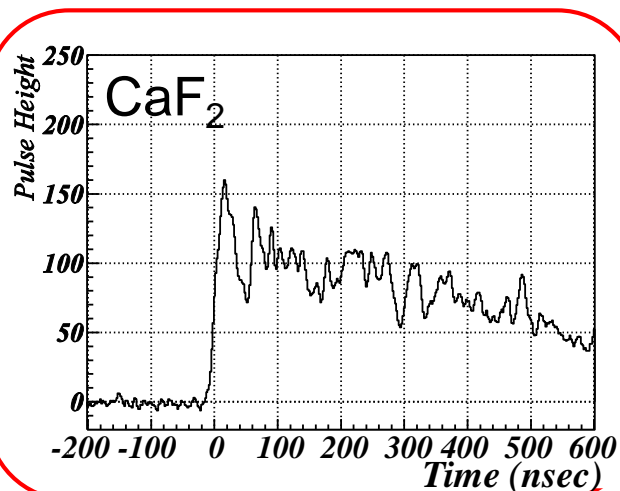
- 二重ベータ崩壊測定用複合型検出器
 - CaF_2 シンチレータ: 305 kg (96個 × 3.2kg)
 - 液体シンチレータ (LS): 全方向ベータ検出器
 - 大型光電子増倍管



CANDLESのBG除去

□ CANDLES システムで観測される波形

■ 3つの典型的波形



トリガーレート : 低い
(検出器体積: 1 for CaF₂)

<<<<
:

高い
(20 for LS)

CANDLES システムでは ...

- ・短い波形と長い波形: CaF₂信号を選択
- ・CaF₂の選択的トリガー
→低バックグラウンド環境へ

結果

□ 131日の測定結果

高純度 $^{21}\text{CaF}_2$ 結晶の結果

	結果
$0\nu\beta\beta$ 検出効率	0.36($^{21}\text{CaF}_2$)
事象数(exp)	0
予想されるBG量	1.02
$0\nu\beta\beta$ 半減期	$>5.6 \times 10^{22}$ year
測定感度	2.8×10^{22} year

* 先行検出器ELEGANT VI 論文投稿中

測定時間: 4947kg·day(2年強)

半減期 : $>5.8 \times 10^{22}$ 年

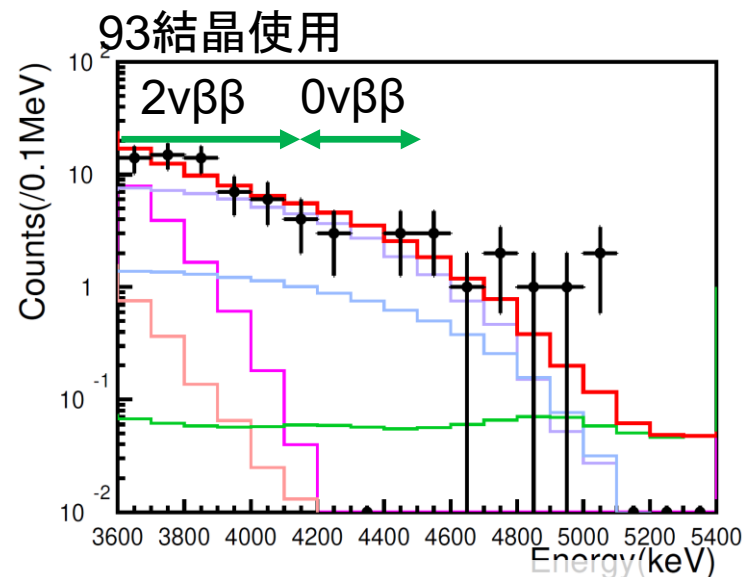
$2\nu\beta\beta \sim 0\nu\beta\beta$ エネルギー領域

・ CaF_2 結晶内部の放射性不純物がBG源

^{208}Tl :80%~、連続信号:~20%

- データ
- 全Simデータ
- 中性子捕獲 γ 線
- 結晶内部不純物(^{208}Tl 、連続信号)
- $2\nu\beta\beta$

エネルギースペクトルと
BGシミュレーション



^{208}Tl :80%~

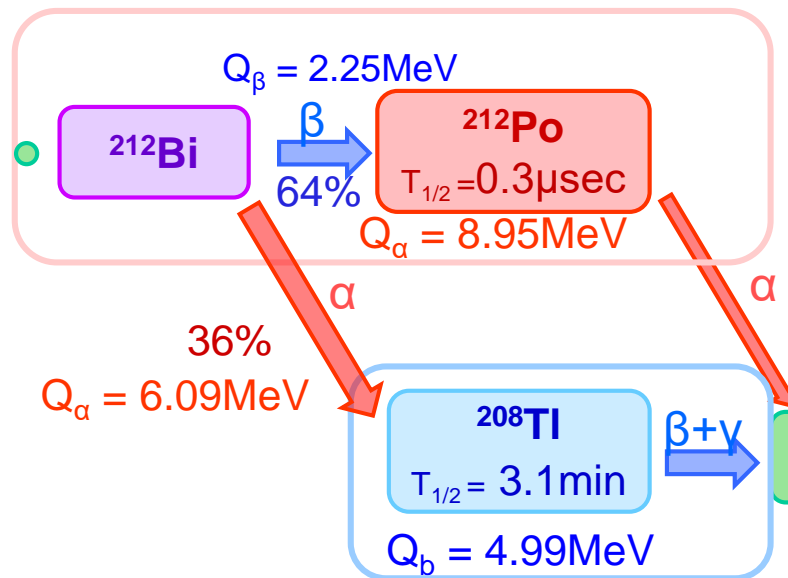
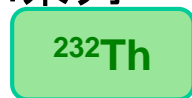
連続信号:~20%

バックグラウンド事象：低減方法

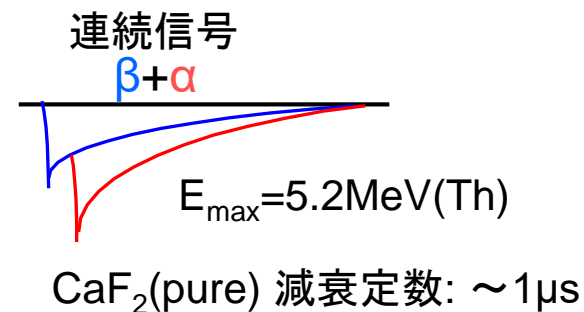
- $2\nu\beta\beta$ 崩壊：エネルギー分解能
- 中性子捕獲反応からの γ 線：遮蔽システム
- CaF_2 内不純物起源のバックグラウンド事象
 - 高純度結晶
 - 解析的バックグラウンド低減

連続信号

Th系列



^{208}Tl 事象

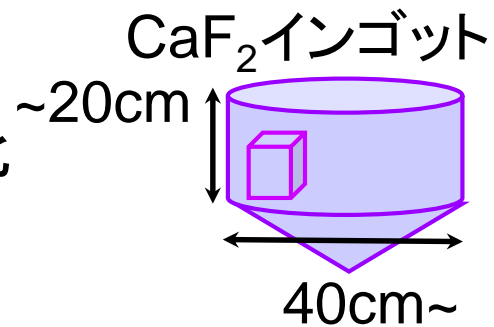


^{212}Bi と ^{208}Tl ($T_{1/2} = 3\text{分}$) ...
事象位置と
時間相関から除去

結晶入れ替え作業

□ 結晶モジュール: CaF_2 結晶+結晶容器+波長変換層

- 高純度 CaF_2 製造14個: インゴット選定
- 波長変換層の純化作業: 液々抽出による純化
- CANDLESへの導入



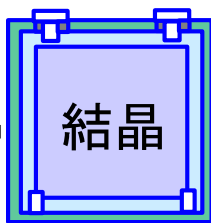
クリーンルーム内で
結晶モジュール組み立て

CANDLES内の結晶入れ替え

結晶モジュール

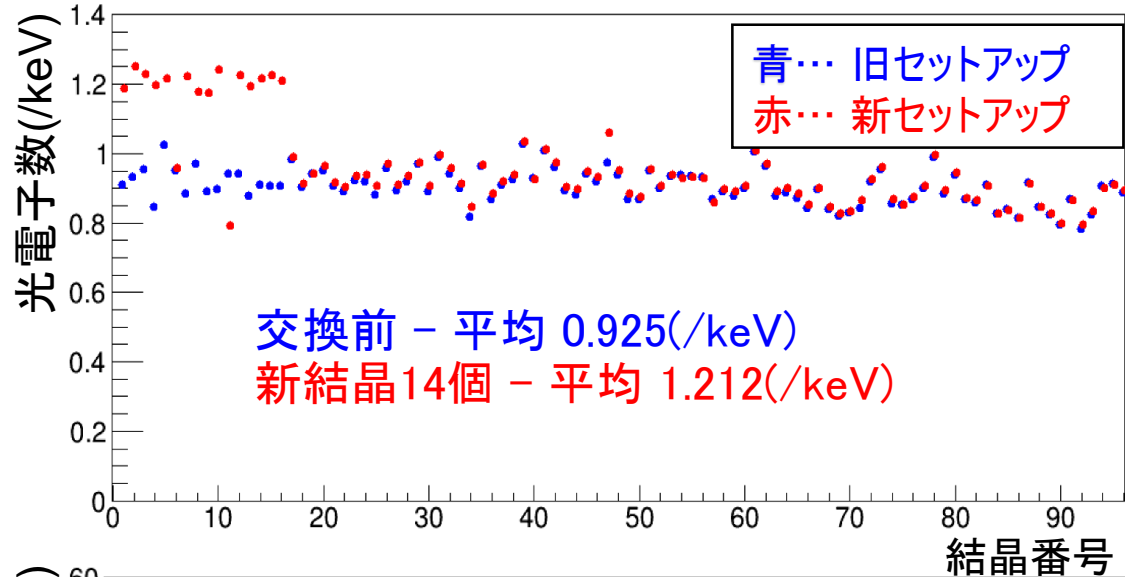


波長変換層



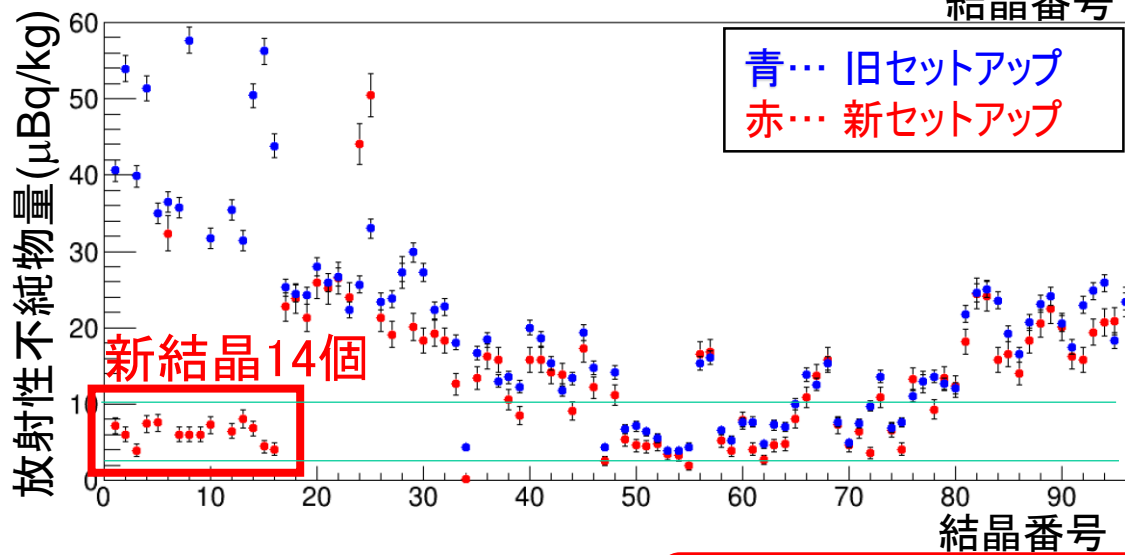
結晶容器
(アクリル容器)

新CaF₂結晶の性能



□ 光量

- 光電子数が25%増加
- エネルギー分解能は7%改善
- 波長変換剤の入れ替え(透過率改善)による効果



□ トリウム系列不純物量

- 平均6.2±1.0μBq/kg
- 使用可能結晶は1.7倍に。

次期検出器(熱量計)要求(20meV)
次期検出器(熱量計)要求(数meV)

さらに純度を上げる開発→伏見さんの発表

バックグラウンド除去解析: ^{208}Tl

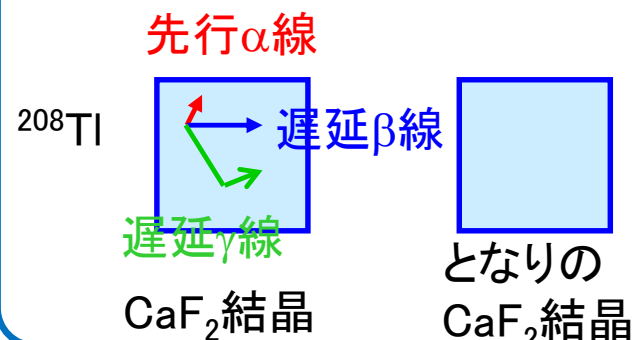
□ ^{208}Tl 事象

■ 除去方法: 先行 ^{212}Bi 識別による低減

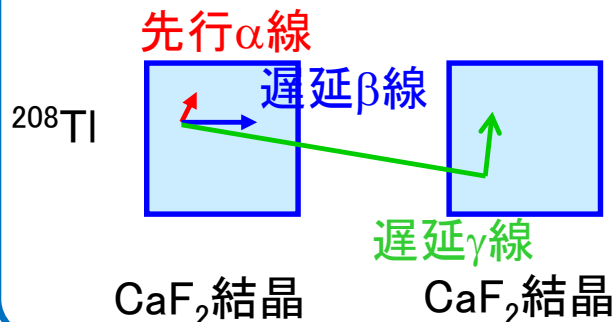


■ 残る ^{208}Tl 率: ~ 0.22 、ベトー時間: ~ 0.27

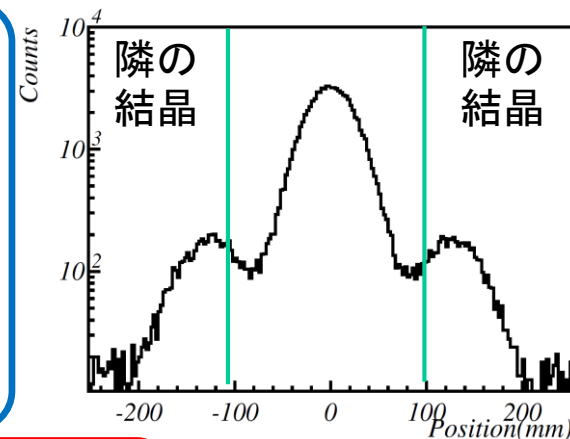
除去できる事象: ~ 0.78



除去できない事象例: ~ 0.22



シミュレーションによる
事象位置分布



- ・ベトー時間を減らして
隣の結晶との事象時間相関もベトーする

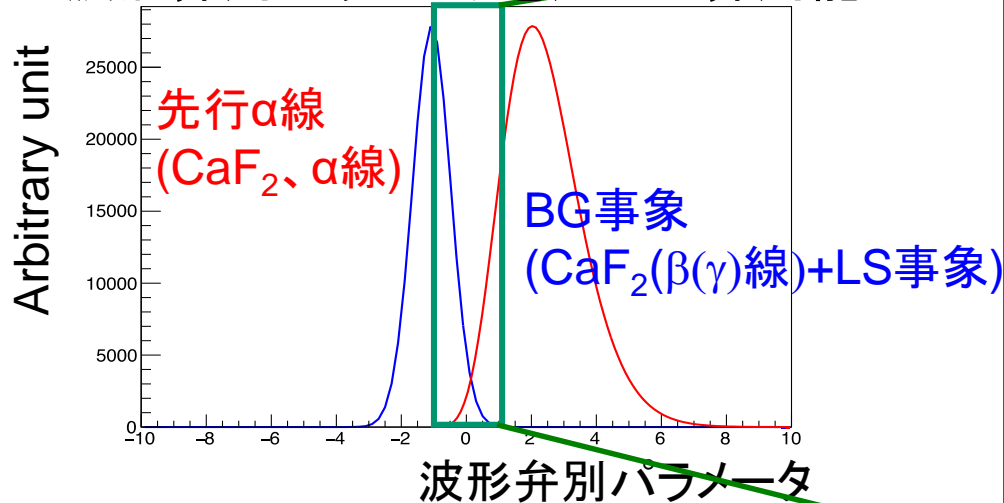
208Tl除去

□ 新たに導入: 最尤法

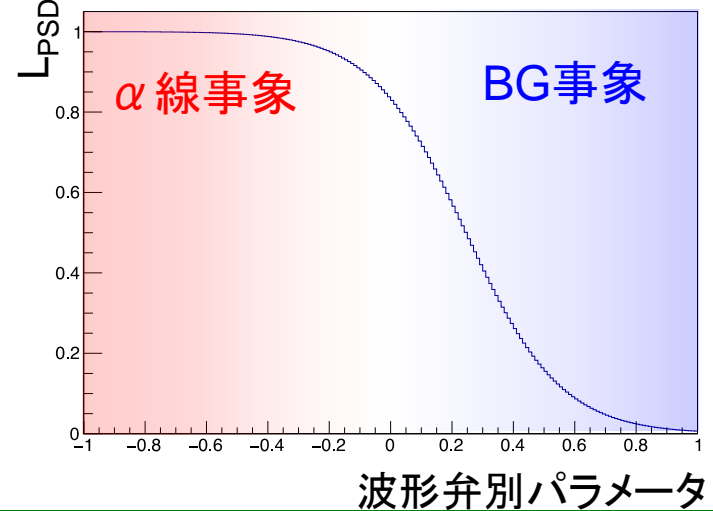
- 先行信号 ^{212}Bi (α 線)信号のエネルギー情報、波形
- 遅延信号 ^{208}Tl 信号のエネルギー情報、時間差

導入例: 波形情報

波形弁別パラメータを用いた弁別能



波形弁別パラメータの尤度 (α 線波形らしさ)

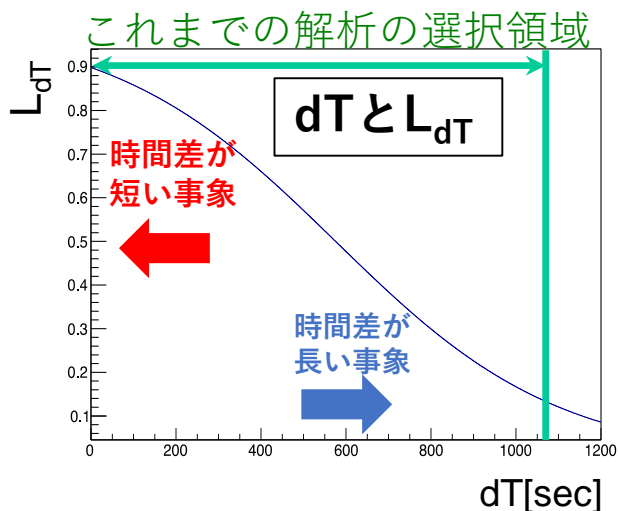


- ・ 波形情報のほか、先行信号のエネルギー、遅延信号のエネルギー、時間差にも尤度評価を導入

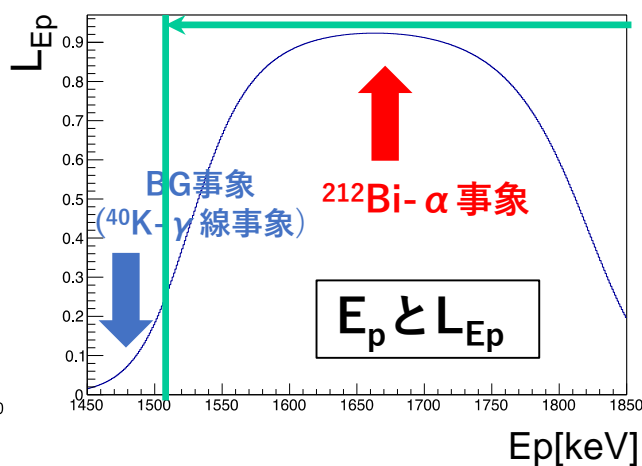
□ 各パラメータの尤度

- ⇒ 他のパラメータにおける尤度も同様に評価する。
各L面は、 ^{212}Bi - α 事象、 ^{208}Tl $\beta + \gamma$ 事象らしさを表す。

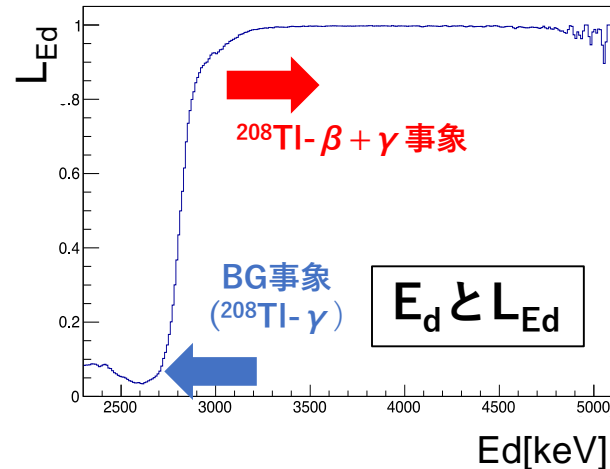
先行-遅延事象の時間差



先行事象エネルギー



遅延事象エネルギー



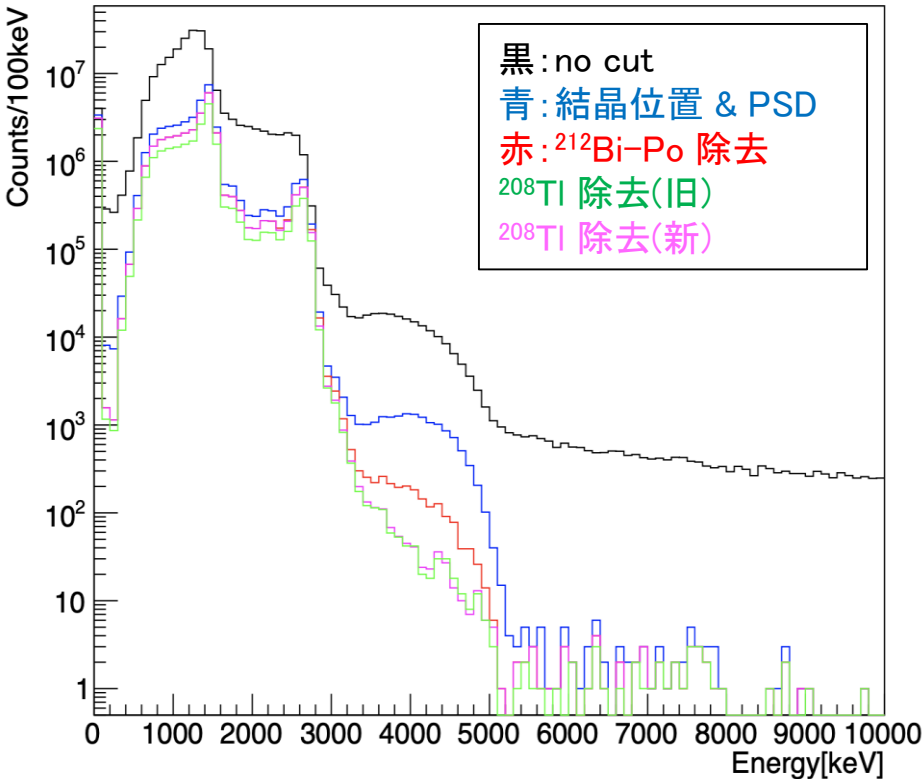
同定効率を確保しつつ、ベトー(不感)時間を短くする。

- ・現状 ^{208}Tl 同定効率(タグ効率 \times 同一結晶での事象): $\sim 0.89 \times 0.88$
- ・現状ベトー(不感)時間: ~ 0.27

208Tl除去結果

□ エネルギースペクトル

- 測定時間: 780.2日
- 93結晶使用



	残った事象数 (3.5~5.1 MeV)	Veto time /Live time(%)
旧解析	576 ± 24	25.5%
新解析	600 ± 25	8.8%

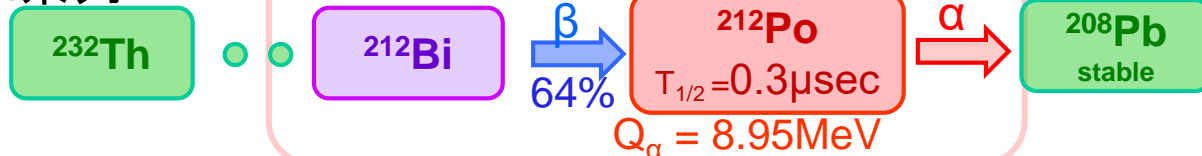
- 208Tl-β+γ崩壊領域 (3500~5100 keV)において、これまでと同等の事象数まで除去。
- Veto timeを**65.5% 減**
 ⇒ 実験感度が**1.22 倍**向上

- 残った事象について
- 212Bi-α事象と異なる結晶に再構成された 208Tl-β+γ事象
 ⇒ **周囲の結晶も考慮した最尤法**

バックグラウンド除去解析: $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$

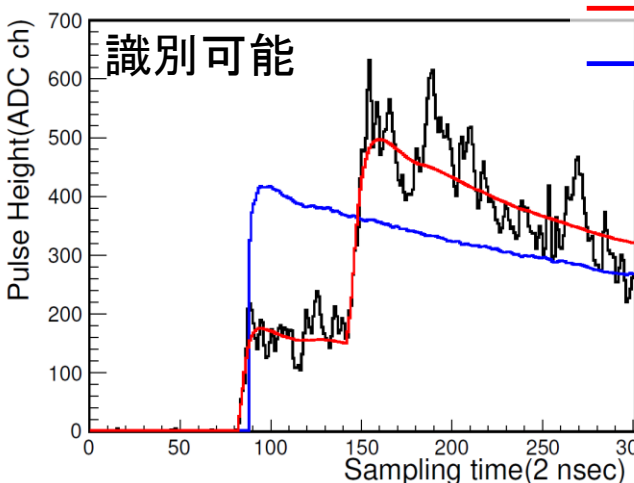
連続信号 $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$

Th系列

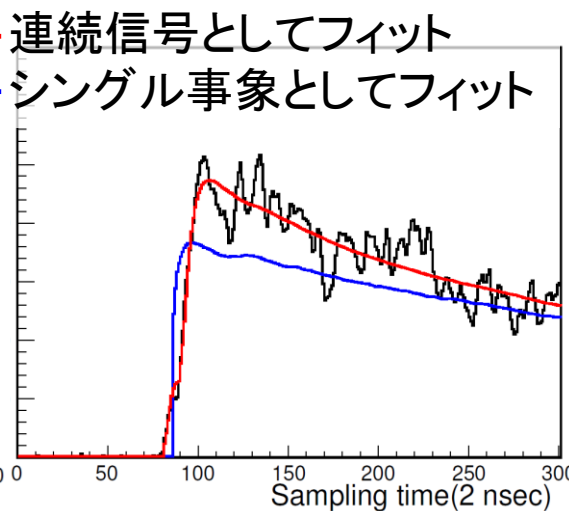


■ フィッティング法: これまでの方法

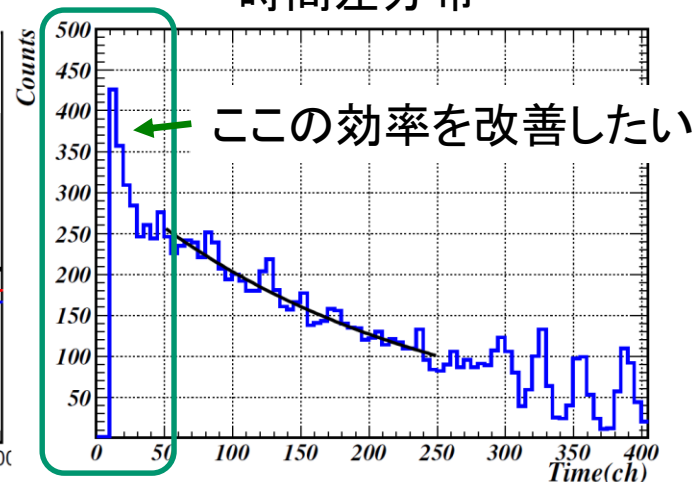
時間差 ~ 100nsec



時間差 ~ 20nsec



時間差分布



従来の方法

- ・時間差 20nsec では、識別ミスが増える。
(二重ベータ崩壊信号の検出効率が下がる)

Half-life(data) = $295 \pm 13\text{nsec}$
(^{212}Bi 半減期 = 296nsec)

$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$ (連続信号)除去

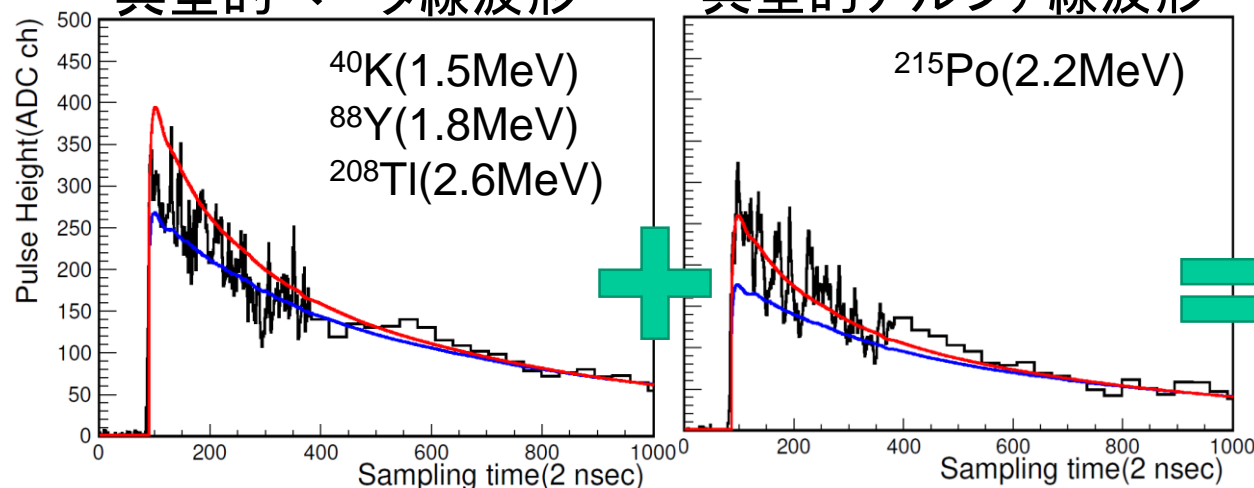
Temuge Batpurev(博士論文)
阪井 俊樹(卒業論文)

- 機械学習による除去
 - 人工的に連続信号を作成
 - 人工データで学習、テスト
 - 実データへの適用

□ 人工的連続信号

典型的ベータ線波形

典型的アルファ線波形



全エネルギー
3.7MeV
4.0MeV
4.8MeV

疑似の連続信号波形

下記エネルギー領域をカバー

- ・ $0\nu\beta\beta$ のエネルギー領域: 4.17-4.48MeV
- ・ $2\nu\beta\beta$ のエネルギー領域: 3.3-4.2MeV

連続信号除去の結果

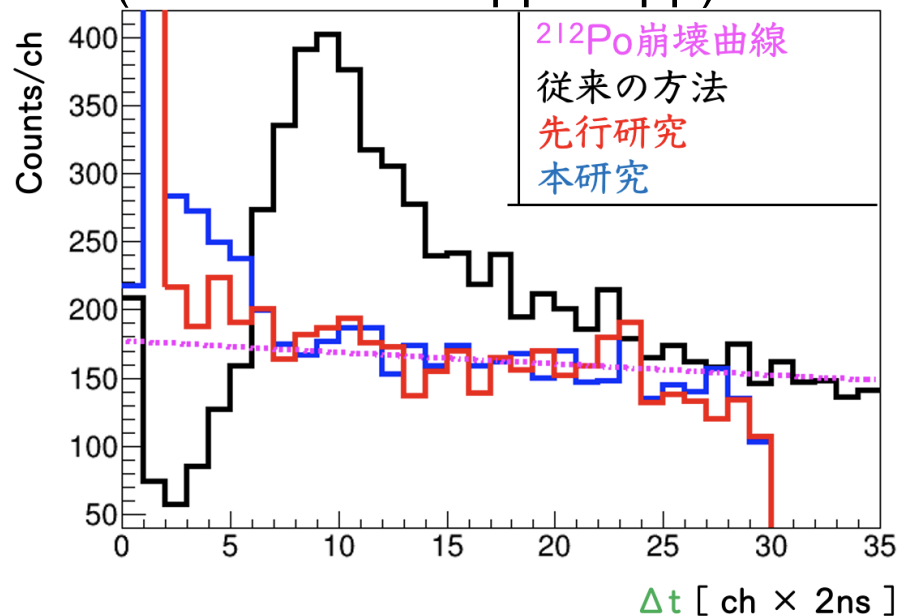
Temuge Batpurev(博士論文)
阪井 俊樹(卒業論文)

時間差スペクトル

- 測定時間650日、使用結晶20/93個 (→まだ全データではない)

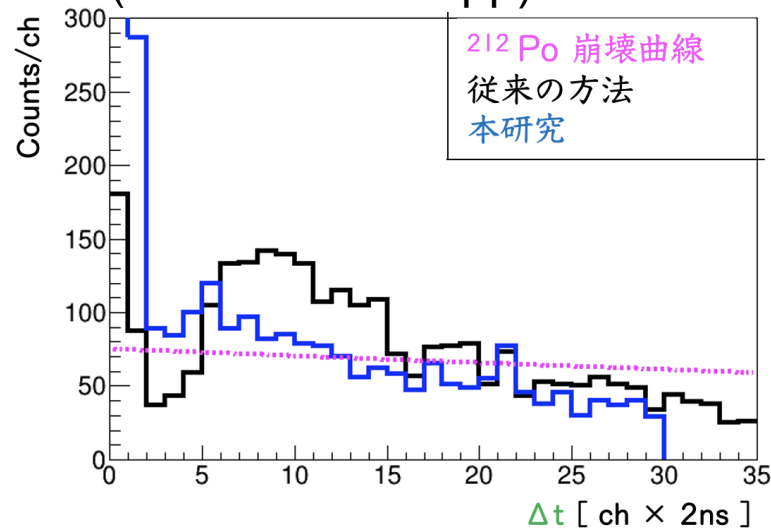
時間差スペクトル

(3.6-4.6MeV: $0\nu\beta\beta\sim 2\nu\beta\beta$)



時間差スペクトル

(3.3-3.6MeV: $2\nu\beta\beta$)



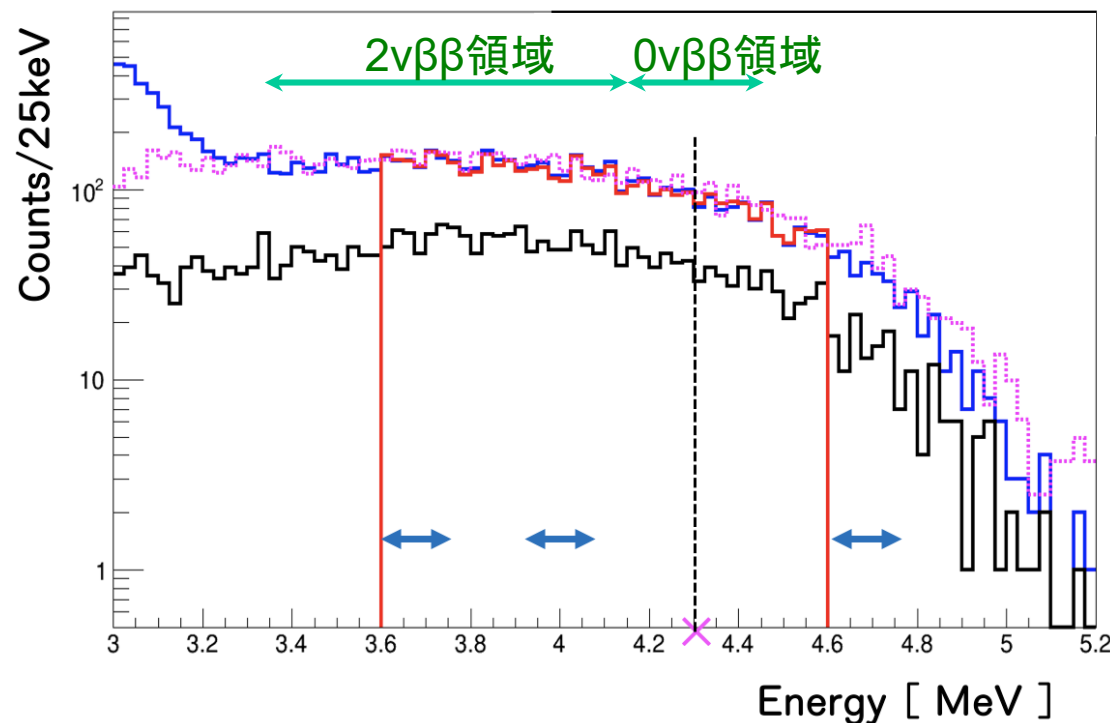
$0\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\beta\beta$ のエネルギー領域いずれでも、
連続信号識別効率は改善している。

連続信号除去の結果

Temuge Batpurev(博士論文)
阪井 俊樹(卒業論文)

□ エネルギースペクトル比較

■ 連続信号と識別された事象



- 新しく導入した解析(10nsec~)
- ⋯ 従来の解析から
(時間差60nsec以上事象(確実に連続信号事象)を使用)
- 従来の解析から
(時間差40nsec以上事象を使用)

* 時間差>10nsecをカットすると
BG量は半減できる

新しい連続信号除去解析の有効性→これから全データへ適用

- ・3.3MeV以上領域: 正確な連続信号識別が可能
- ・3.3MeV以下領域: 改善が必要
低エネルギー波形の学習不足

まとめ

□ CANDLES報告

- 放射性不純物によるバックグラウンド事象量を低減するための新しい解析
- ^{208}Tl の除去: 最尤法の導入
 - 780日データ、93結晶に対して導入済み
 - 近接結晶での ^{212}Bi 事象を検出することによる除去率改善見込み
- 連続信号の除去: 機械学習
 - 650日データ、20結晶に対して性能評価済み
 - これから780日データ、93結晶に対して導入予定
- 全データへ適用を進行中
 - 測定時間130日→780日
 - 同数の CaF_2 で測定感度($0v\beta\beta$ 半減期)を更新見込み
 - $2v\beta\beta$ 半減期測定を目指す: 他グループ結果に決着