

^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究

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

LIS Collaboration

- 二重ベータ崩壊測定装置: CANDLES
- 次世代二重ベータ崩壊測定装置開発

CANDLES

@Kamioka Observatory

- ^{48}Ca 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



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 |

Phys Rev D, 103, 092008 (2021)

* 先行検出器ELEGANT VI

測定時間: 4947 kg·day(2年強)

半減期 : $>5.8 \times 10^{22}$ 年

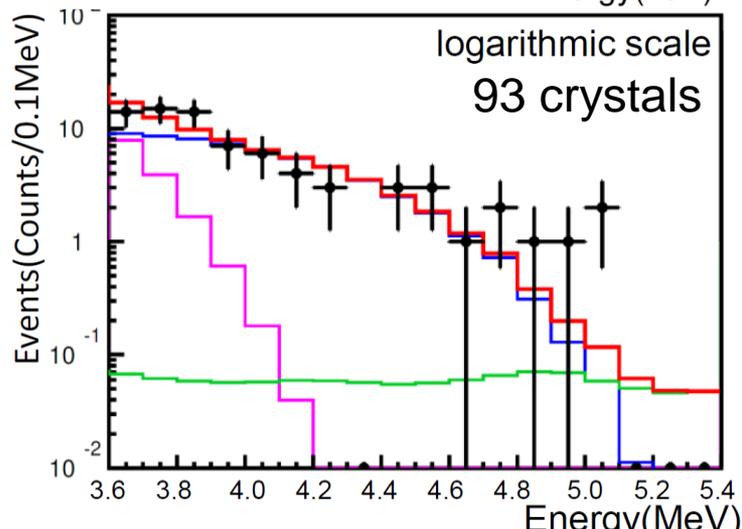
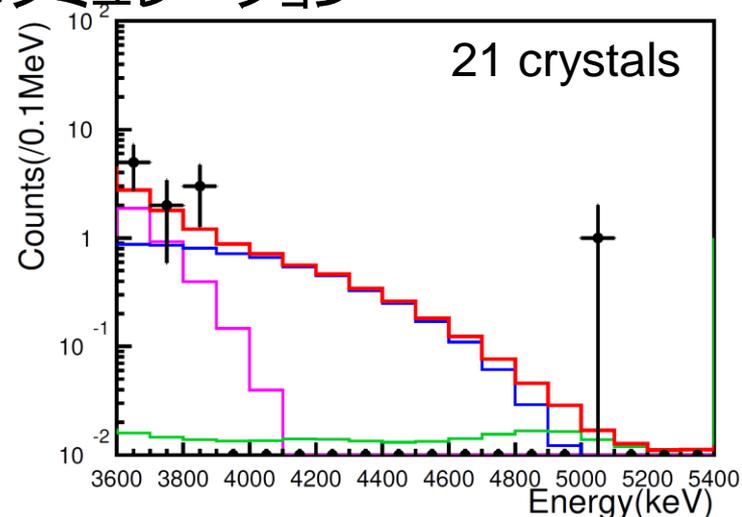
・続く2年分のデータ解析中(新解析導入中)

・ CaF_2 結晶内部の放射性不純物がBG源

^{208}Tl 、 $^{212}\text{BiPo}$ 除去の新しい解析

- データ
- 全Simデータ
- 中性子捕獲 γ 線
- 結晶内部不純物
- $2\nu\beta\beta$

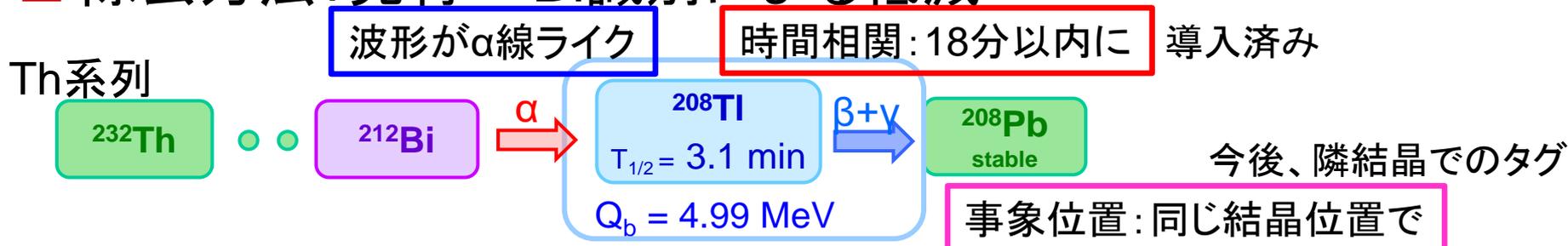
エネルギースペクトルと
BGシミュレーション



最尤法による ^{208}Tl 除去

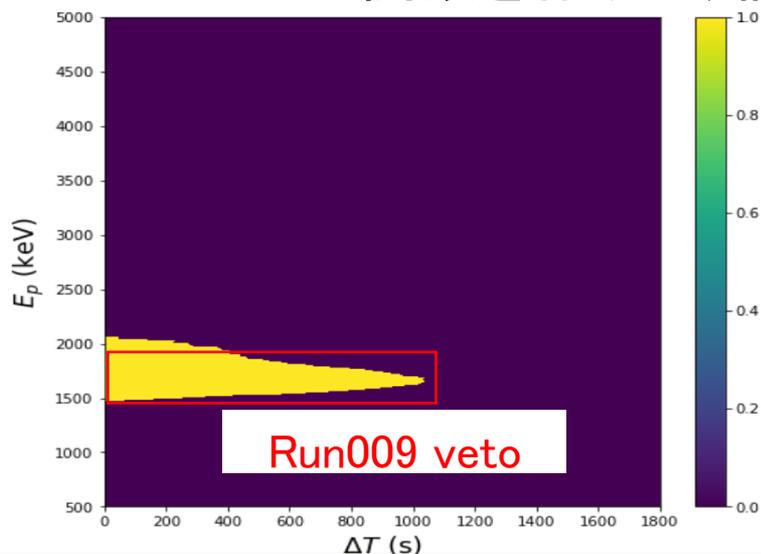
伊賀友輝(JPS(2021)、修士論文)
南雄人(TAUP2021)

□ 除去方法: 先行 ^{212}Bi 識別による低減



□ 現在: エネルギー、時間差を最尤法に導入

- 信号と背景事象の確率分布関数をシミュレーションから作成
- Likelihood関数を作成し、信号を背景事象から分ける



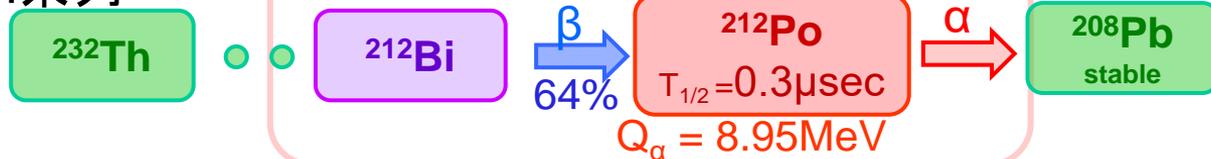
- ^{208}Tl - $\beta+\gamma$ 崩壊領域
Veto time (同一結晶タグ) を **11% 減**
(除去率は改善)
- 今後
 α 線波形・位置情報を最尤法に導入
⇒ veto時間の改善
⇒ **隣結晶も考慮した最尤法**
(現在の残っている事象の~80%)
BG事象の低減 & 使用結晶数の増加

機械学習によるBG除去

Temuge Batpurev(博士論文)
阪井 俊樹(卒業論文)

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

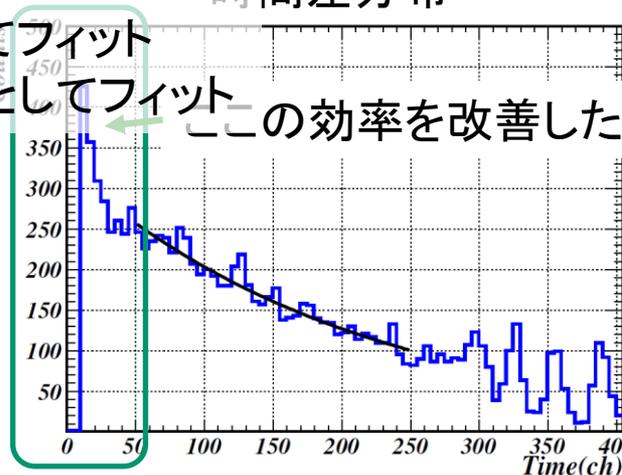
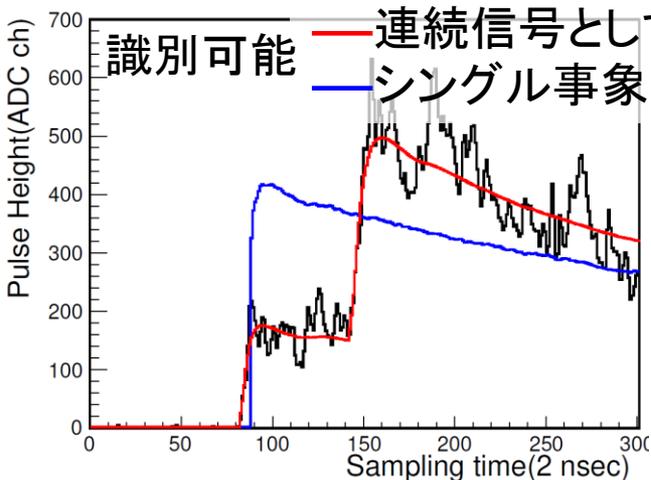
Th系列



■ フィッティング法 → 機械学習

時間差 ~ 100 nsec

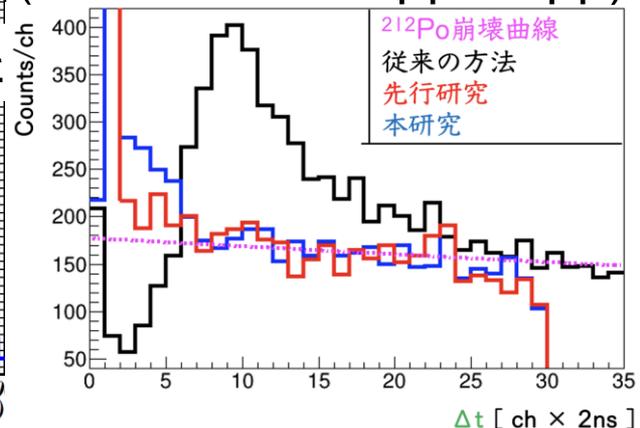
時間差分布



Half-life(data) = 295 ± 13 nsec
(^{212}Bi 半減期 = 296 nsec)

機械学習導入
時間差スペクトル

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



論文執筆中。

$0\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\beta\beta$ 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た。

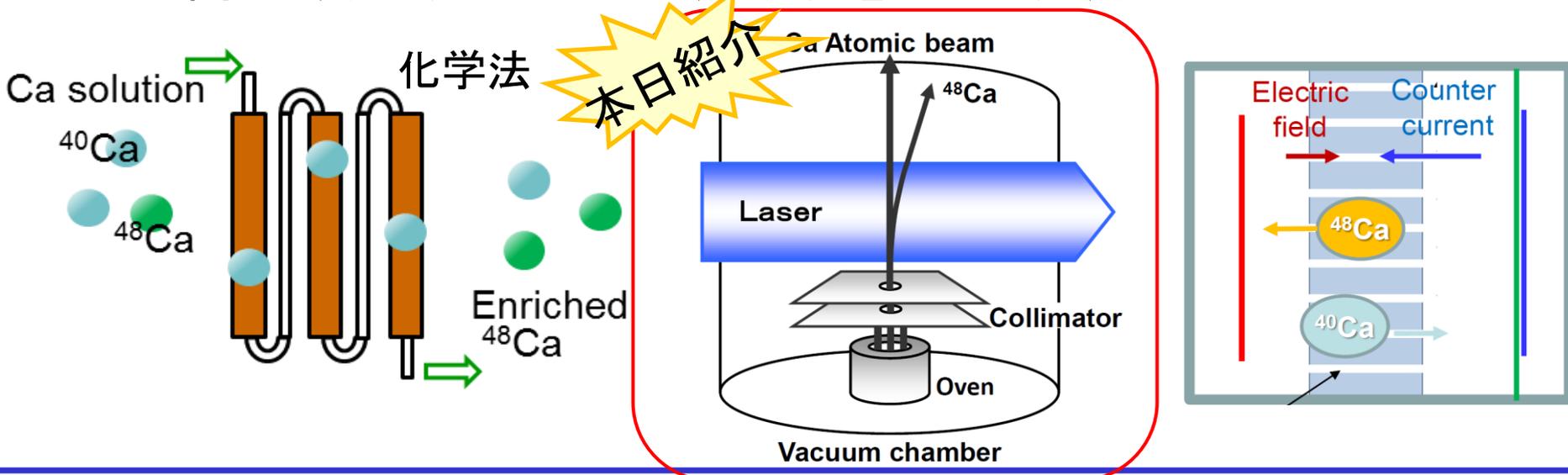
次世代検出器：濃縮

□ カルシウム48

- 天然同位体比が低い：0.19 %
- 濃縮によって感度向上が可能
- 一般には濃縮は行われていない

□ 新しい濃縮手法を開発

- 樹脂濃縮、レーザー濃縮、電気泳動濃縮

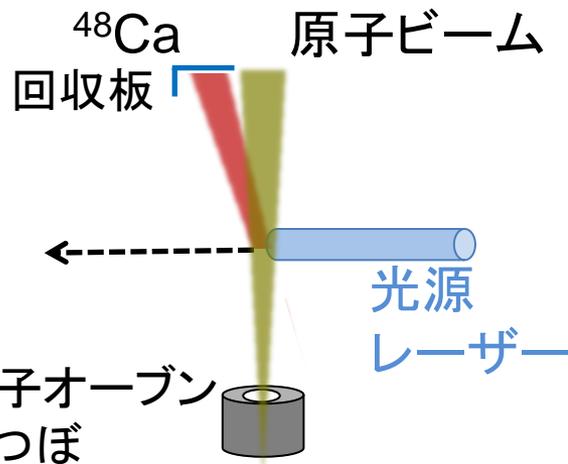


濃縮

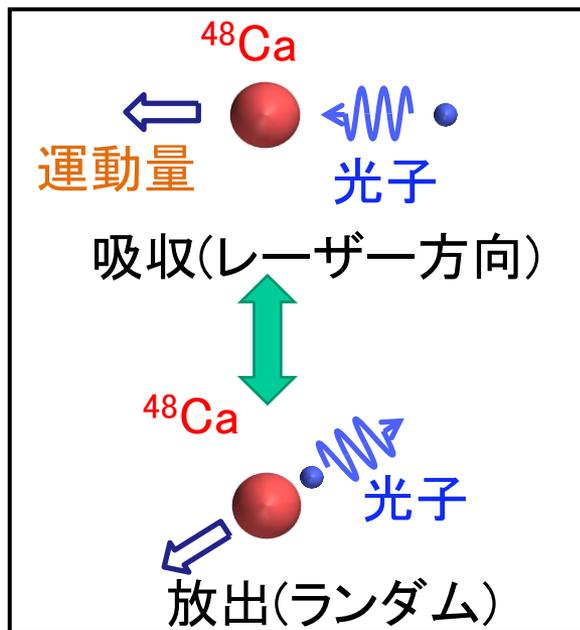
福井大工:仁木、小川
小川泉(SPLG2021)

□ ^{48}Ca の低い天然同位体比:濃縮法の一つレーザー濃縮を紹介

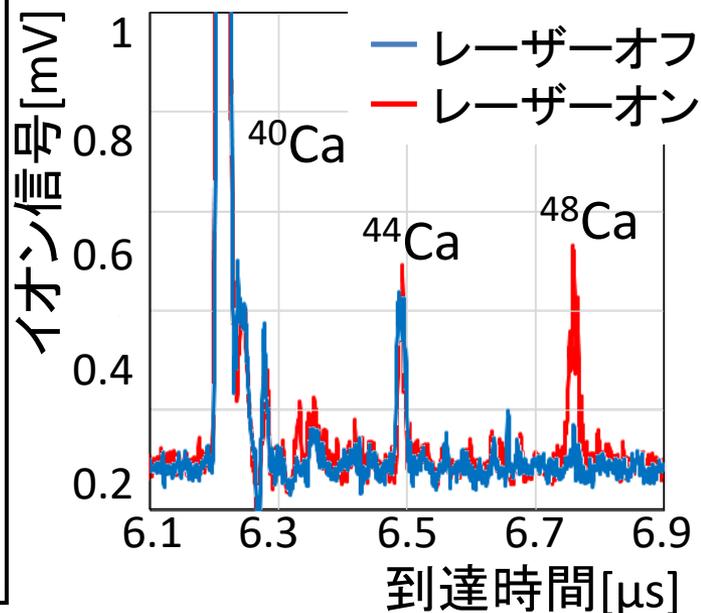
装置概略



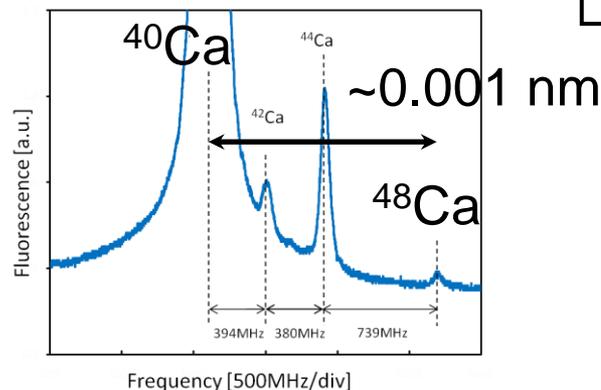
偏向法原理



濃縮結果



Caの吸収波長スペクトル



1本のレーザーで濃縮
・偏向用
繰り返しての光吸収・
放出を利用
↑
2本のレーザーが必要
・イオン化用

・偏向法による同位体濃縮を
確認
→濃縮生産にはレーザー高
出力化が必要

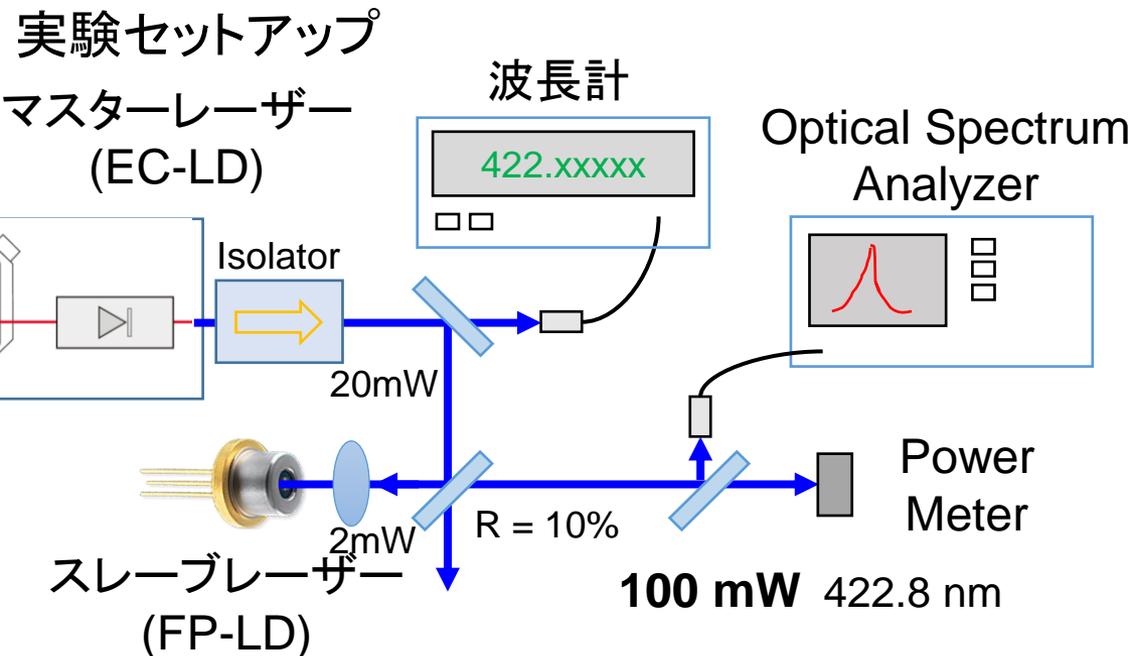
次世代検出器：濃縮(レーザー)

レーザー総研:宮永
大阪大レーザー研:時田

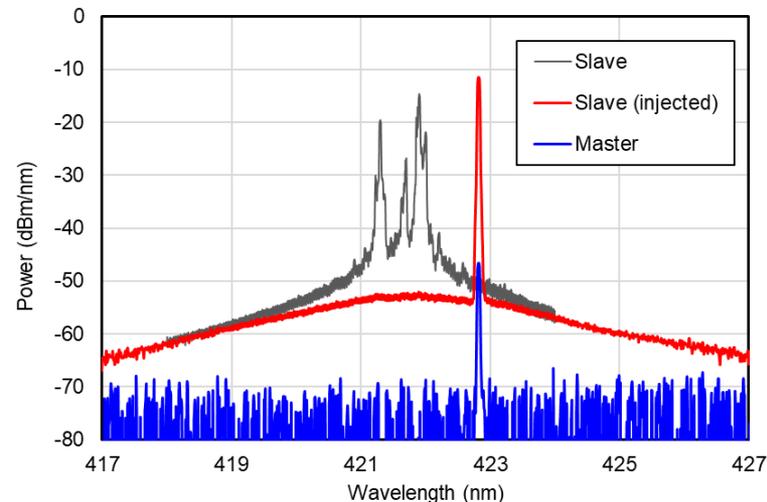
□ 注入同期システム：安価にレーザー出力を上げる

■ 多数のスレーブレザーの波長

■ 一つのマスタレーザーを用いて合わせる



同期の結果



- マスタレーザー
- スレーブレザー
- スレーブレザー(同期)

スレーブレザー (100 mW × n個) の波長を
温度・電流で制御する

スレーブレザーの注入同期:OK→スレー
ブレザーの数を増やしていく

次世代検出器開発

□ $^{48}\text{CaF}_2$ 蛍光熱量検出器

■ 予想されるバックグラウンド

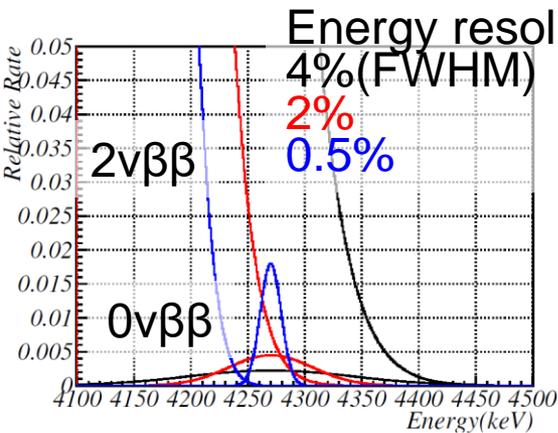
■ $2\nu\beta\beta$ 事象: エネルギー分解能 0.5 %、1トン ^{48}Ca で ~ 0.02 事象/年

■ 結晶内部放射性不純物による α 線事象: 粒子弁別

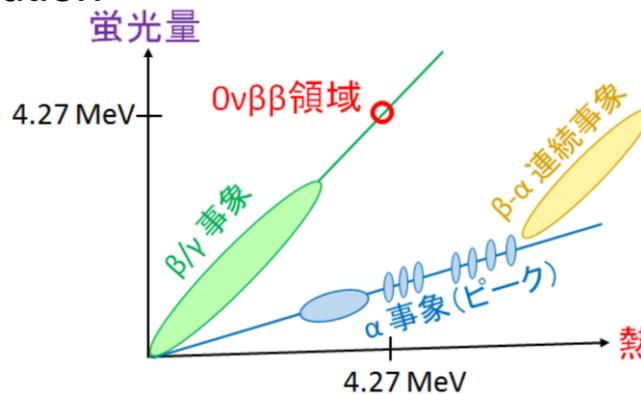
蛍光熱量検出器: 10 mKで使用

$0\nu\beta\beta$ と $2\nu\beta\beta$ の
エネルギースペクトル

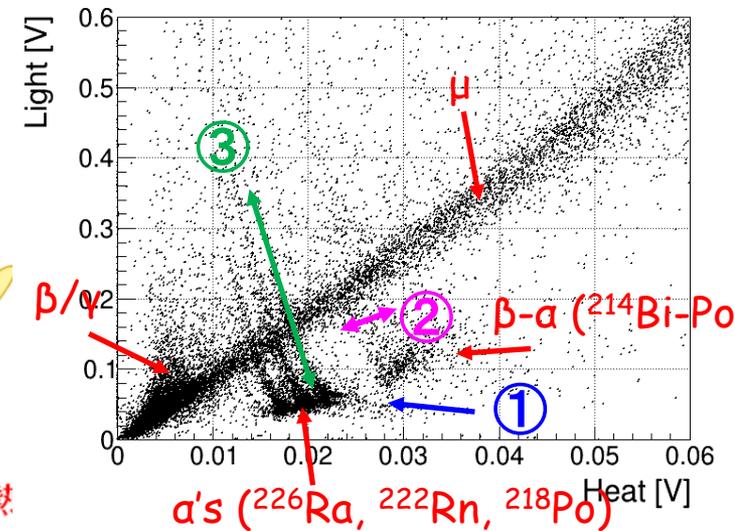
$$\langle m_\nu \rangle = 5 \text{ meV}$$



蛍光熱量検出器に
よる粒子弁別
蛍光量vs熱量



熱量と蛍光量



熱信号、光信号、ともに、結晶内において収集効率に位置依存性がある
・光信号の依存性は、真空紫外発光によるものではないか？

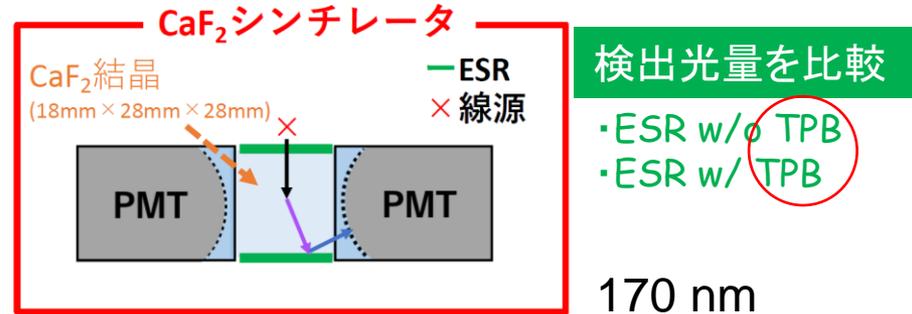
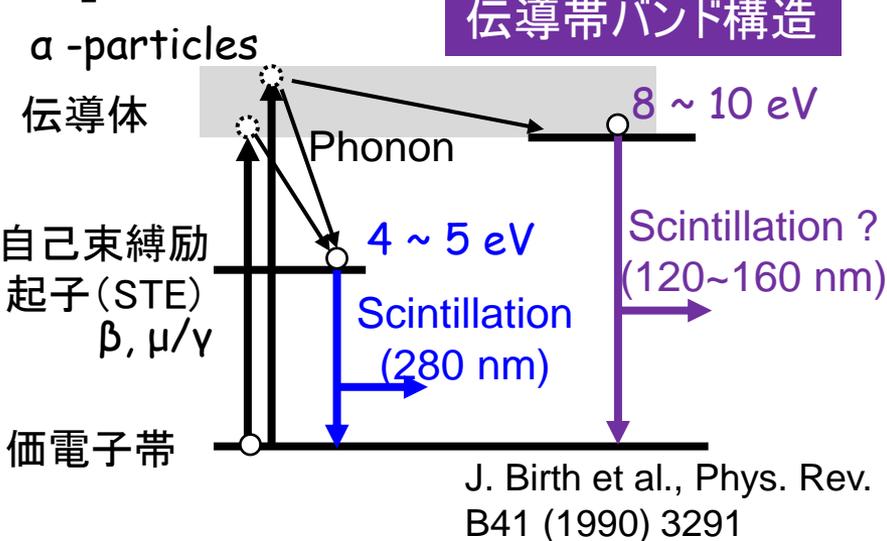
CaF₂蛍光熱量計の光信号

TPB付ESR:ANKOK実験による提供

- CaF₂結晶からの真空紫外発光
 - 真空紫外光の透過率は悪い
 - 集光率の位置依存性？

- 波長感度領域の異なるPMTを用いて光量測定

CaF₂のバンド構造



各PMTの $\frac{\text{Peak channel (with TPB)}}{\text{Peak channel (w/o TPB)}}$

| | |
|------|---------------|
| PMT1 | 1.342 ± 0.004 |
| PMT2 | 1.411 ± 0.002 |
| PMT3 | 1.585 ± 0.008 |

最も感度波長が広い

PMT1で増光 → VUVが存在

最も感度波長が狭い

PeakをFitした際の統計誤差

我々がよく知っている発光 = 280 nm
~ 160 nm(結晶で自己吸収)にも発光？

単純ではないがPMT1で増光
→ 真空紫外発光ありを示唆

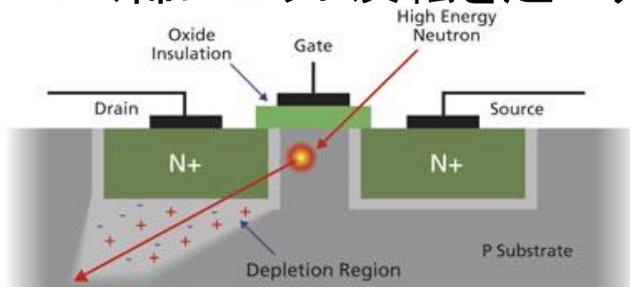
液体キセノン用発光波長測定システムを用いた測定(横国大)

半導体デバイスの ソフトウェア発生率の評価

研究課題: B19
代表: 中野貴志
日立製作所

□ 再現性のない電氣的エラー

- 主な起因は中性子やミュオン
→生成された荷電粒子
→ごく稀にビット反転を起こす



半導体デバイスの微細化→
ソフトウェア > ハードエラー

□ 加速器(RCNP)を用いた高負荷評価+地下実験室での低負荷評価

- 想定より多数発生
- 宇宙線以外の原因(α線、不安定性)が大きいことが判明(昨年度報告済み)

□ 測定装置(改良)を設置

- これまでと同じデバイス480個
- 中耐性デバイス480個
- 高耐性デバイス480個

□ 今年度測定開始出来た



□ 3種デバイスを用いた測定によって不安定性評価も行う予定

まとめ

- B14: ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の測定
 - 130日の測定データで論文出版済み
 - 2年のデータに対して最尤法・機械学習の導入
 - 並行して次期検出器開発
 - 濃縮: 注入同期システム
 - 蛍光熱量計: 真空紫外発光
- 予算: 査定額
 - 共同研究費22万円
 - 旅費に使用予定→旅費+物品使用
 - 神岡への旅費、監視用モニタ
 - サポートありがとうございました。
 - * 来年度もよろしくお願いします。