

48Caを用いたニュートリノマヨラナ性の研究と 次世代高感度化技術開発

新学術領域「地下宇宙」領域研究会

第六回極低放射能技術研究会

2020年06月03日

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

研究分担者・協力者

小川泉、仁木秀明

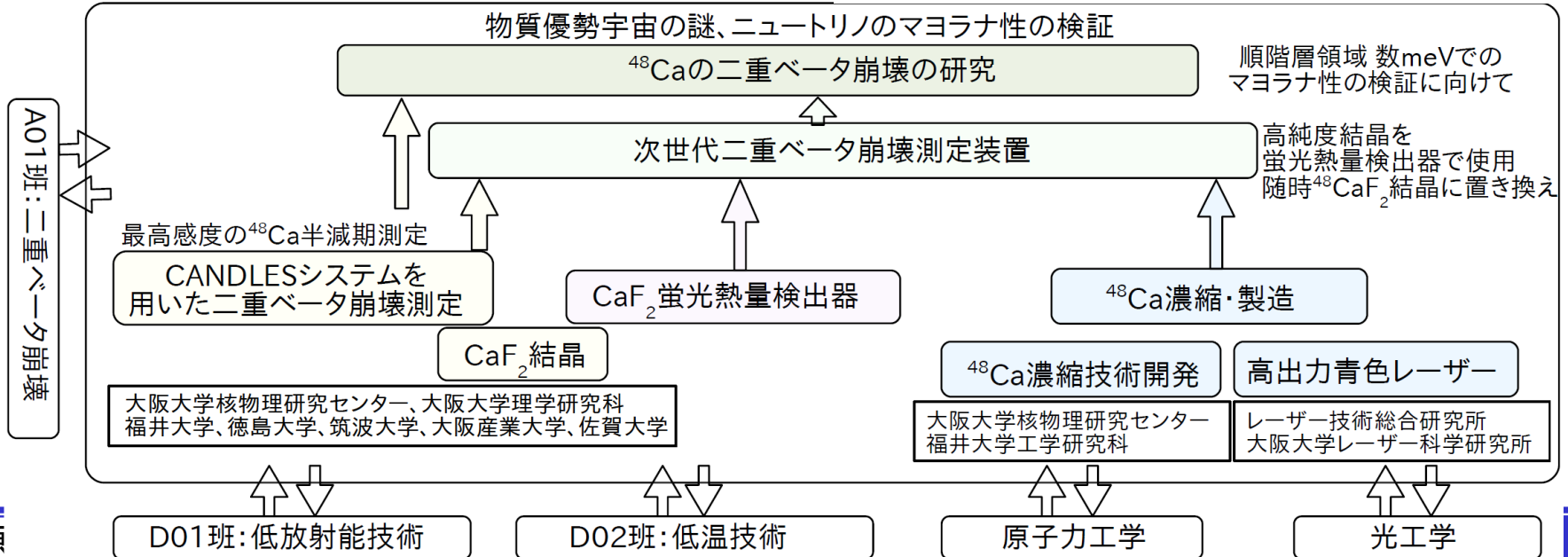
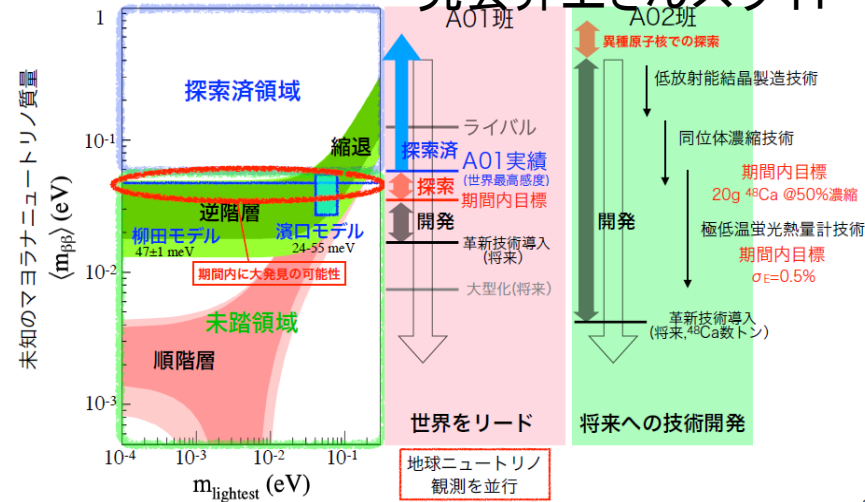
宮永憲明、時田 茂樹

概要:二重ベータ崩壊次世代高感度化技術

48Caの二重ベータ崩壊測定

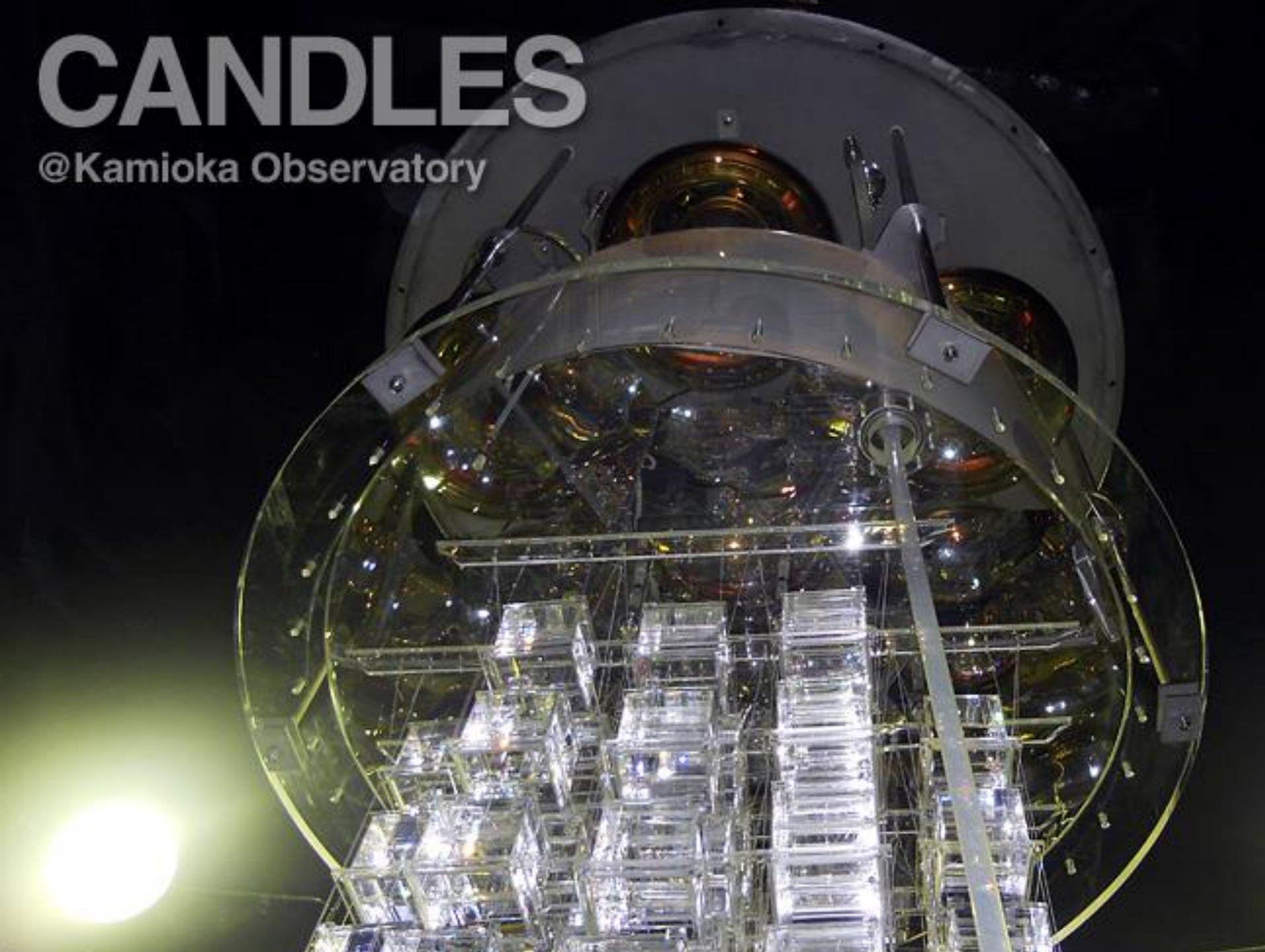
2019年「地下宇宙」研究会井上さんスライド

- CANDLES III(CaF₂)
 - 0νββ測定、2νββ測定
 - 高純度結晶
- 48CaF₂蛍光熱量検出器
 - CaF₂蛍光熱量計
 - 48Ca濃縮



CANDLES

@Kamioka Observatory



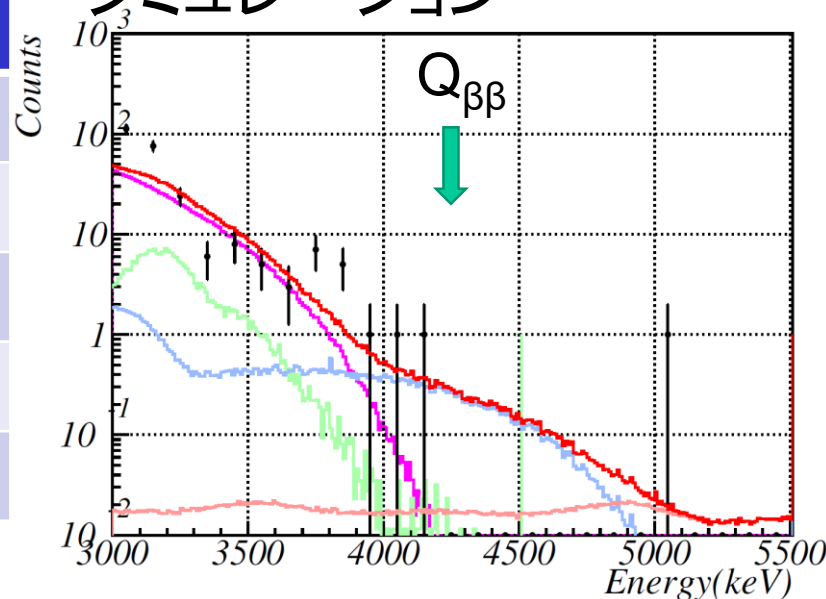
結果

□ 131日の測定結果

	結果(27結晶)
0vββ検出効率	0.39 ± 0.06
事象数(exp)	0
予想されるBG量	~1.2
0vββ半減期	>6.2 × 10 ²² year
測定感度	3.6 × 10 ²² year

- データ
- 全Simデータ
- 2vββ
- 外部放射性不純物
- 結晶放射性不純物
- 中性子捕獲γ線

エネルギースペクトルとシミュレーション



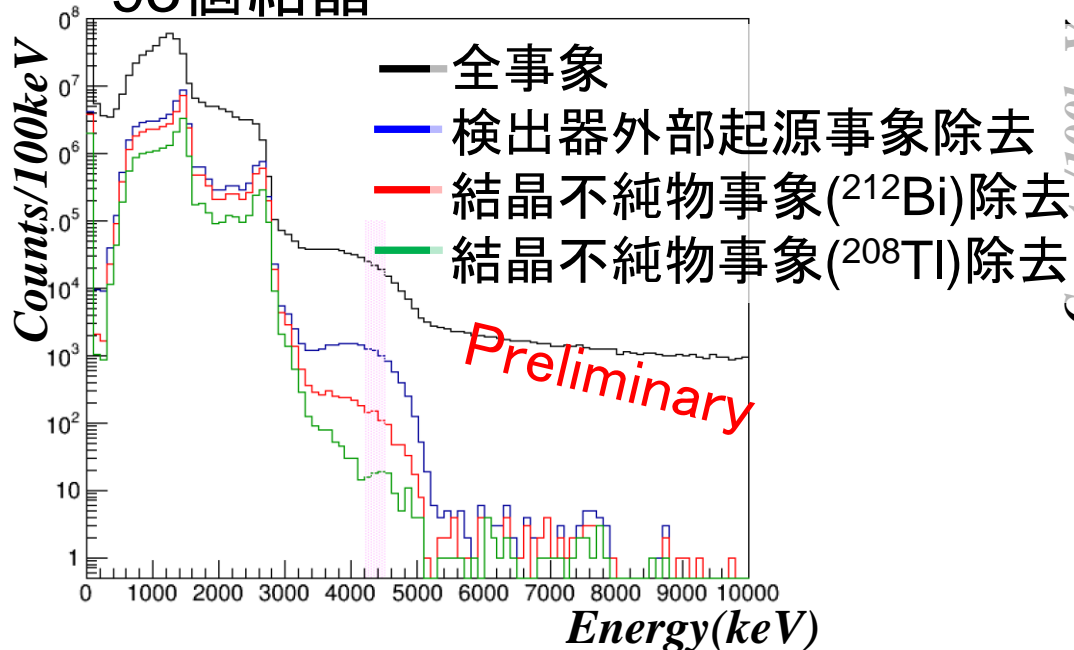
* 先行検出器ELEGANT VI
測定時間: 4947kg・day(2年強)
半減期 : 5.8 × 10²²年

⁴⁸Caのニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊測定
→高感度測定を達成

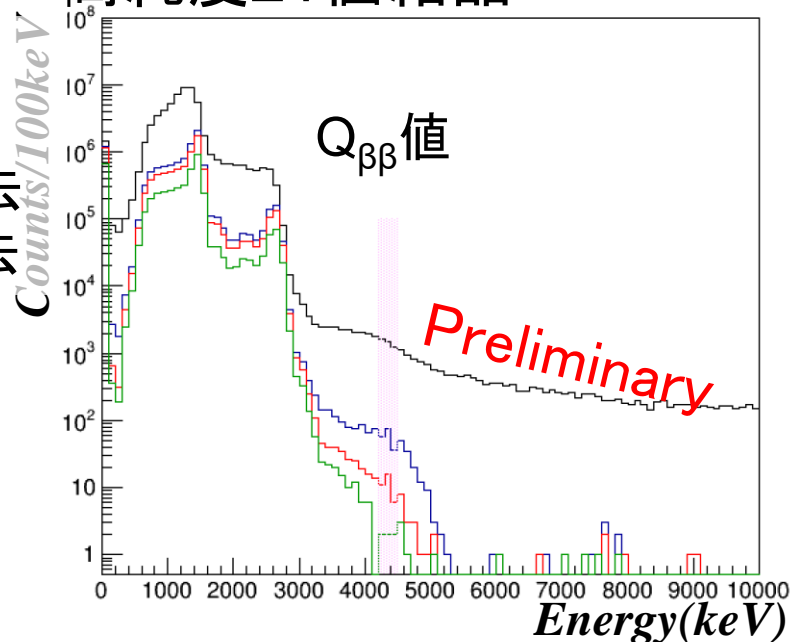
エネルギースペクトル

□ 新しく解析: 測定時間778日分

93個結晶



高純度21個結晶



93結晶

高純度21結晶

$Q_{\beta\beta}$

4-5MeV

5.5-6.5MeV

$Q_{\beta\beta}$

4-5MeV

5.5-6.5MeV

事象数

67

148

13

6

17

1

結晶内部放射性不純物量から予想される事象数と矛盾はない
測定半減期～半減期感度

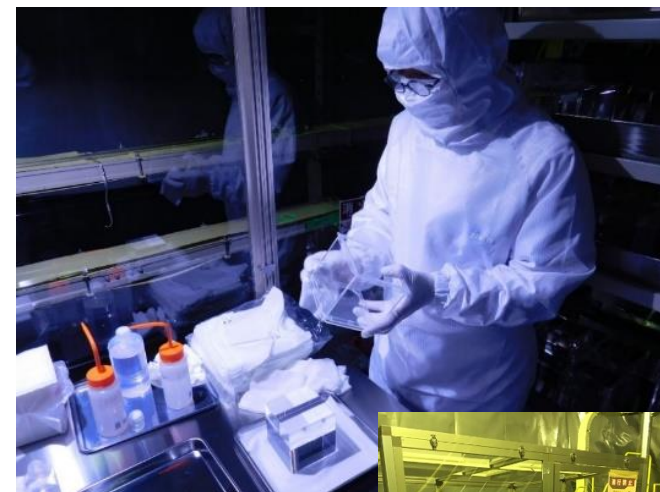
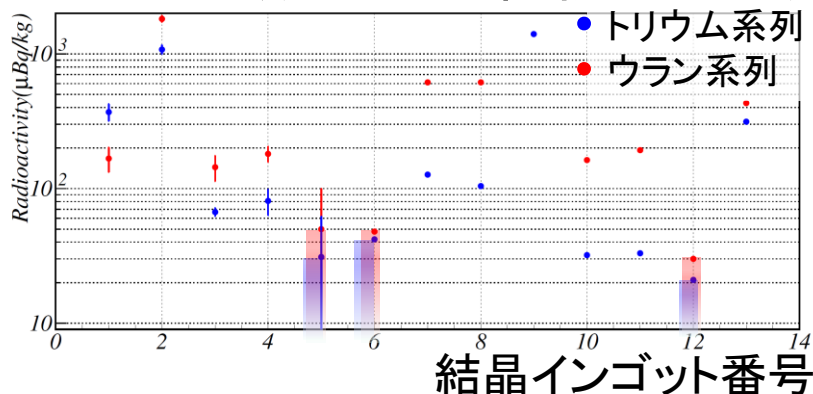
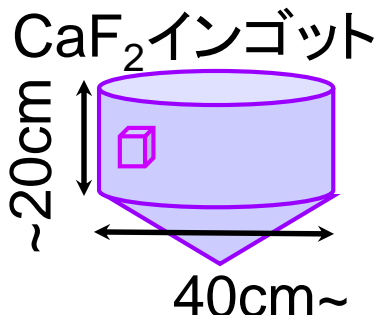
高感度化: CaF₂結晶の入れ替え作業

- バックグラウンド事象: 大部分はCaF₂内部の不純物が起源
 - 高純度結晶に入れ替えることで高感度化
 - →結晶モジュールの入れ替え

竹本、瀧平他

結晶モジュールへの
組み立て作業

インゴットの放射性不純物量の測定

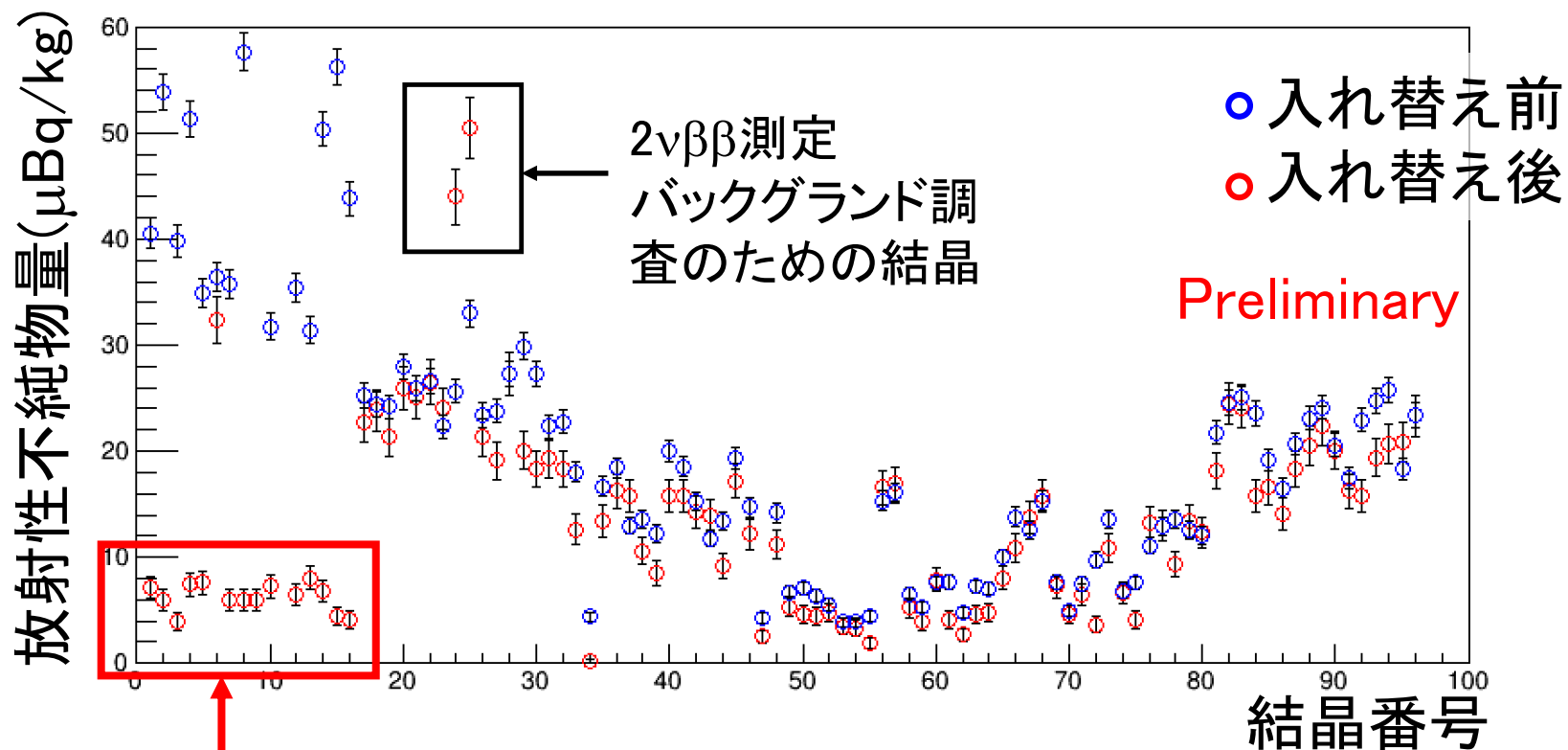


■ 新結晶導入作業

- 2019年 : 入れ替え作業
- 2019年末 : CANDLES装置で結晶性能評価測定

高感度化: CaF₂結晶の入れ替え

□ 入れ替え前後での放射性不純物量(トリウム系列)比較



新規導入結晶14個

想定通りの放射性不純物量
同インゴット中の放射性不純物量ばらつきは小さい

高純度結晶開発
伏見(6月4日)
低放射能技術研究会

次世代検出器開発

D02班協力

□ $^{48}\text{CaF}_2$ 蛍光熱量検出器

■ 予想されるバックグラウンド

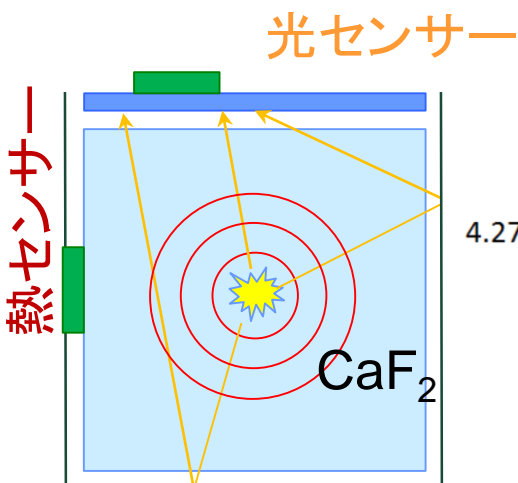
- $2\nu\beta\beta$ 事象: エネルギー分解能0.5%、1トン ^{48}Ca で~0.02事象/年
- 結晶内部放射性不純物による α 線事象: 粒子弁別

蛍光熱量検出器: 10mKで使用

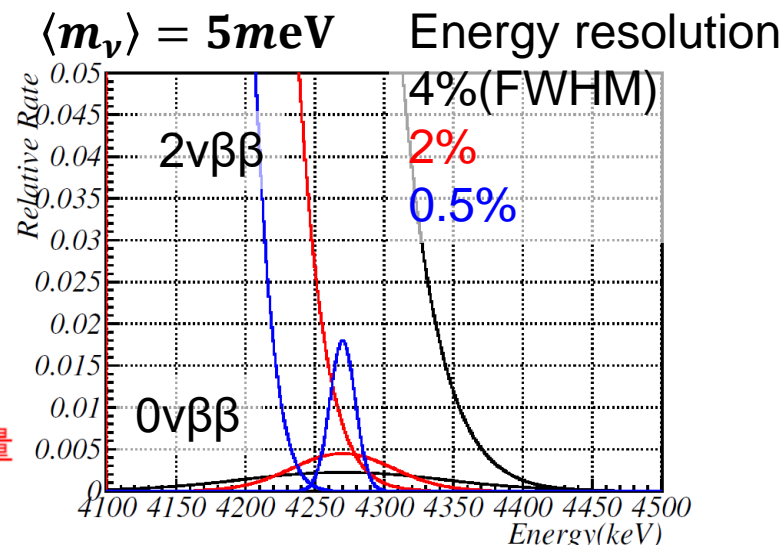
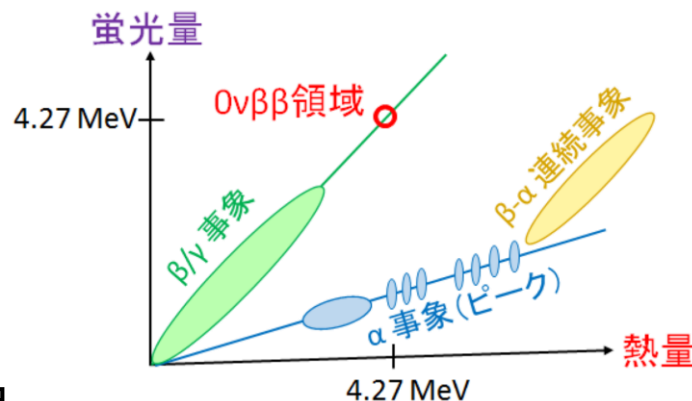
蛍光熱量計

蛍光熱量検出器による粒子弁別

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



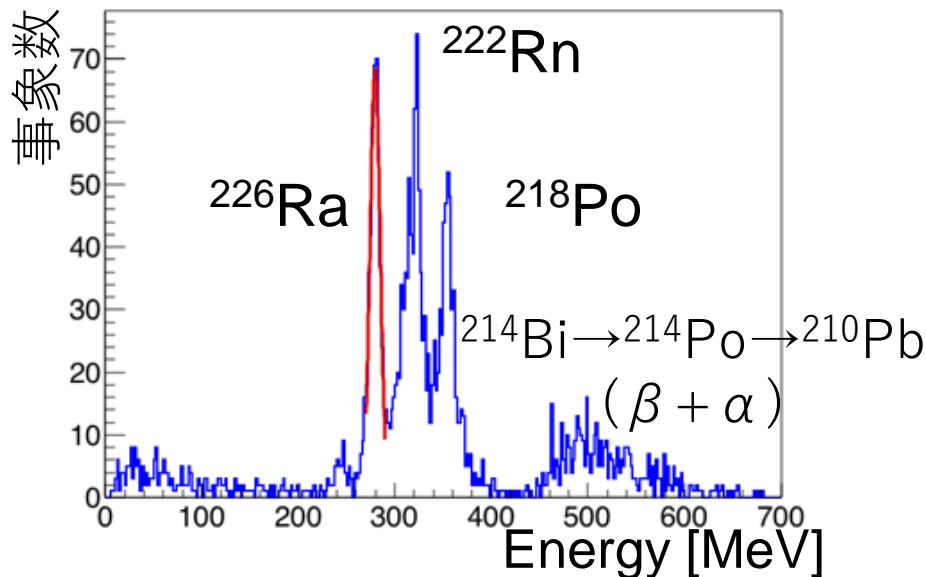
○ 熱信号 → 光信号



蛍光熱量検出器

エネルギースペクトル

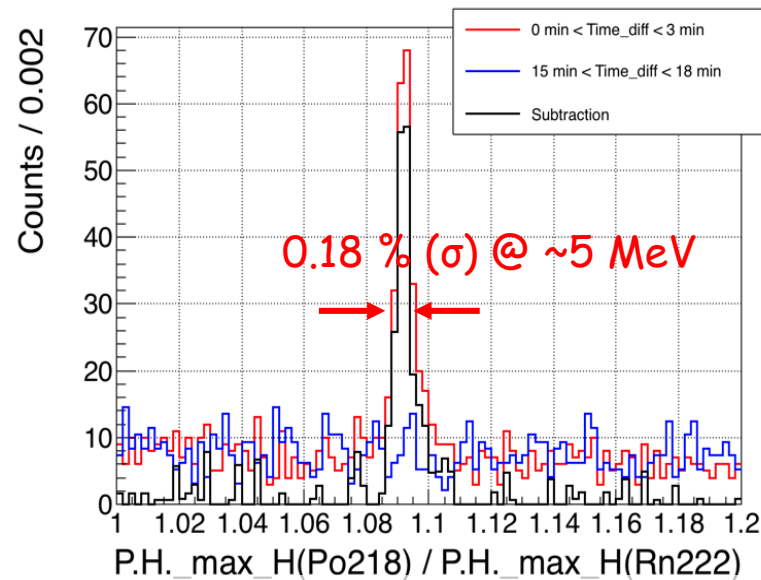
エネルギー分解能1.86%



鉄野高之介
(TAUP2019)

韓国Kim Yong-Hamb氏ら
AMoREサブグループ
CANDLESサブグループ

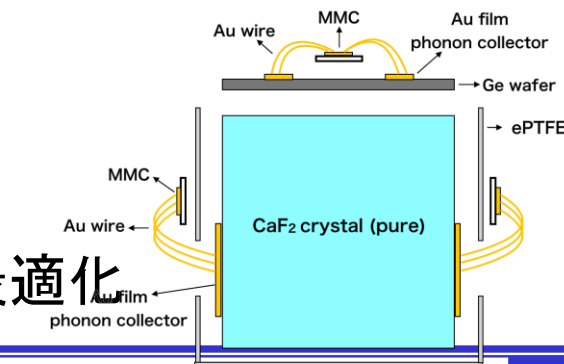
同じ位置で起こった二つのアルファ線事象のエネルギー比



$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po}(3\text{分}) \rightarrow ^{214}\text{Pb}$

CaF₂(pure)結晶を蛍光熱量検出器として使用

- エネルギー分解能(σ): $1.86 \pm 0.11\%$
- 要分解能改善: 場所依存性が原因
- 反射材(波長変換剤塗布)、複数温度センサー最適化

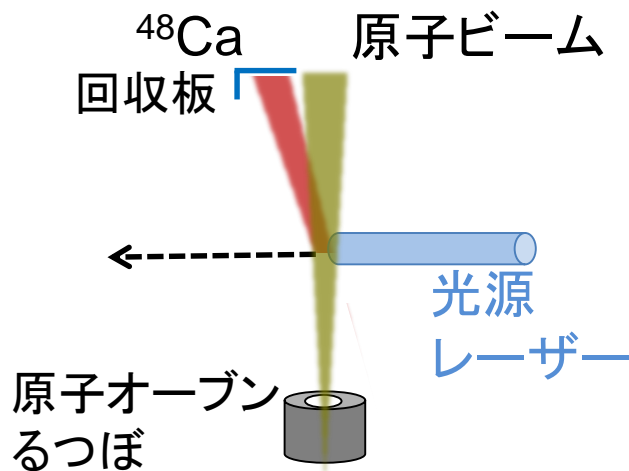


次世代検出器：濃縮

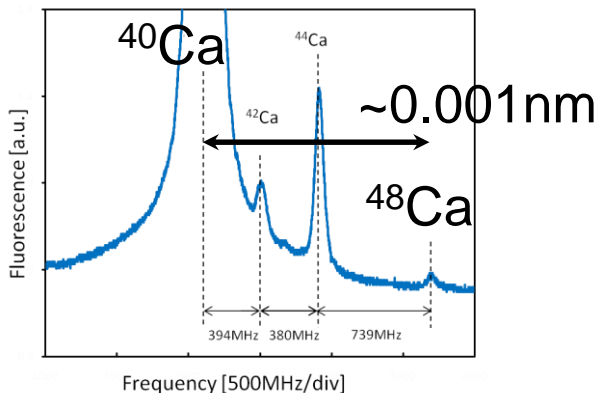
福井大工：仁木、小川

□ ^{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

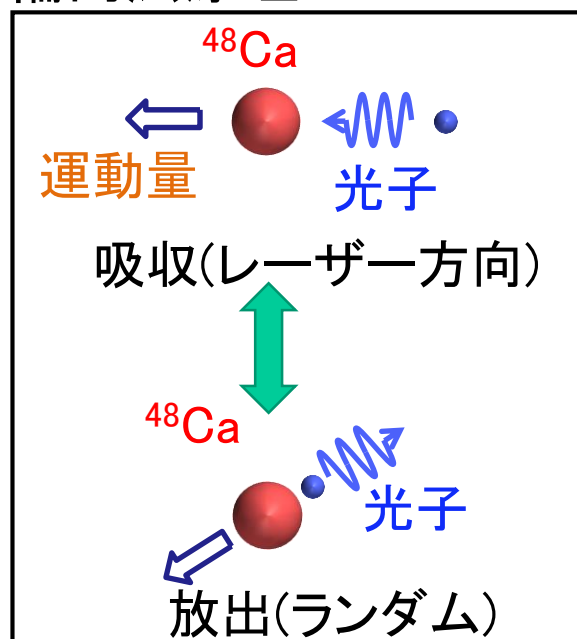
装置概略



Caの吸収波長スペクトル

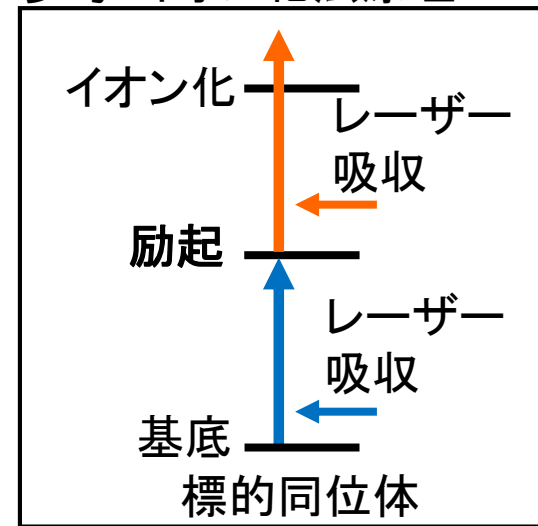


偏向法原理



1本のレーザーが必要
・偏向用
繰り返しての光吸収・
放出を利用

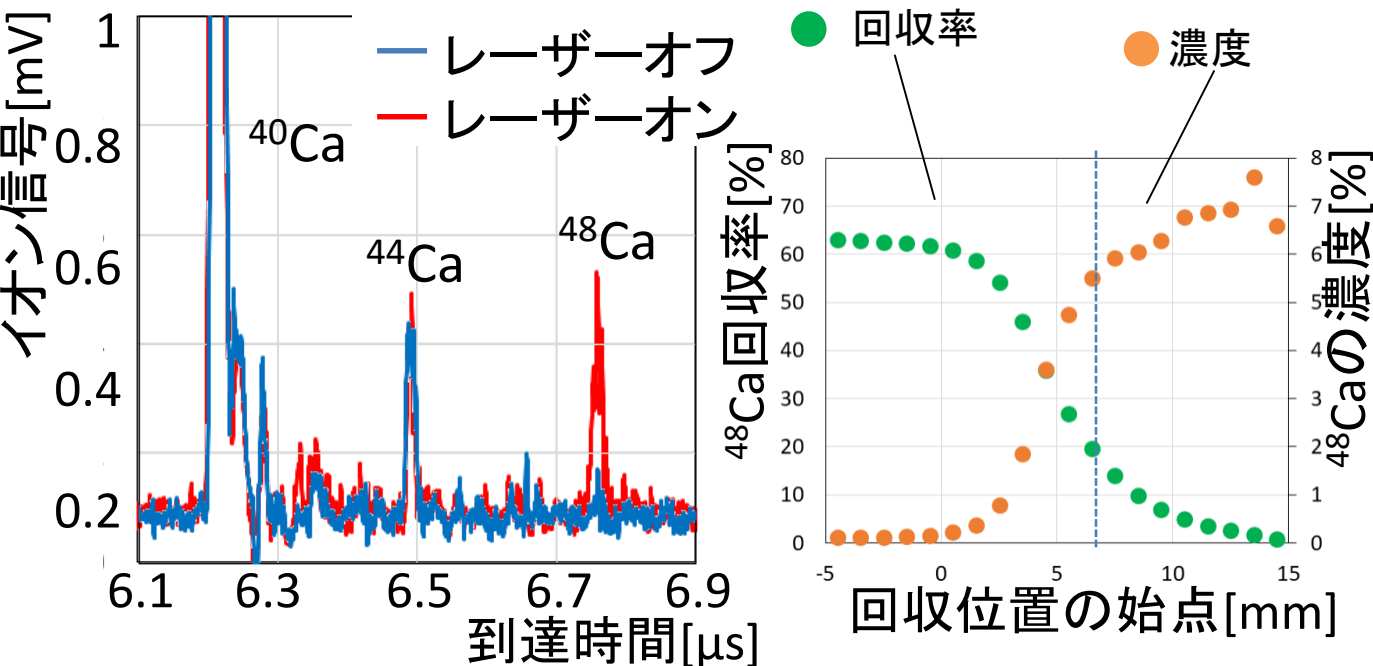
参考：イオン化法原理



2本のレーザーが必要
・選択的励起用
・イオン化用
韓国等でも開発

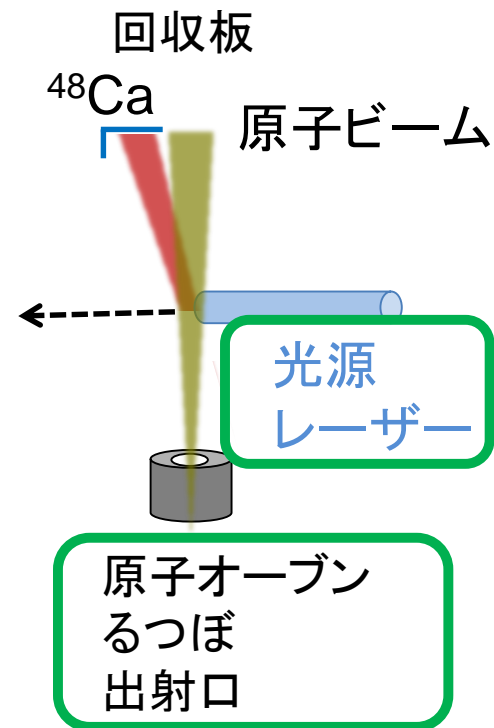
次世代検出器：濃縮（偏向法）

濃縮効果



6.5mm以上の原子を全て回収した場合・・・
回収率 19.6% 濃度 5.5%

装置概略

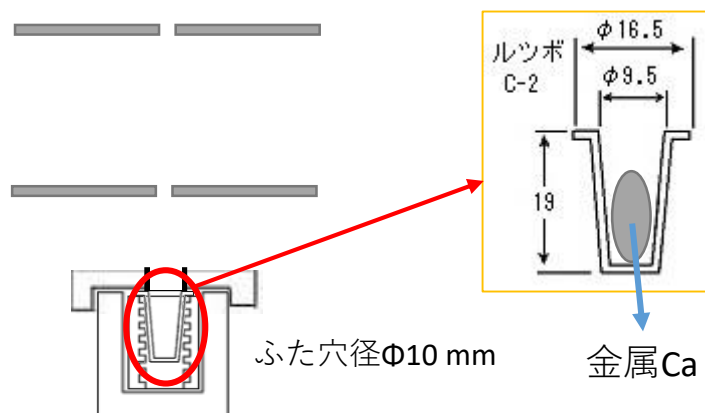


- より高濃度・高回収率へ→偏向角の増加が必要
- 偏向用レーザーの照射システムの改良

原子オーブンの改良

□ これまで

- 既成の蒸着源を使用
(ニラコ CH-14)
 - コリメータ2段の組み合わせ
- ↓
- ビームとしての使用は一部
 - 1回の充填量が少ない
 - 1回の充填で数時間程度
 - るつぼ部分のみの加熱



□ 大型の原子オーブンの製作

- 大型化
 - $\Phi 36 \times h60$
- 上下独立のヒーター
 - それぞれに熱電対
- 様々な出射口を試験可能
- ランニングコストの低減
 - 断熱ブランケット・カバーなど

3月末に
納品済み



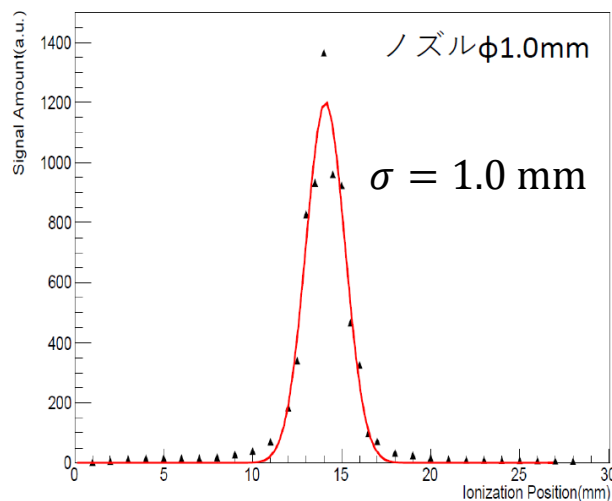
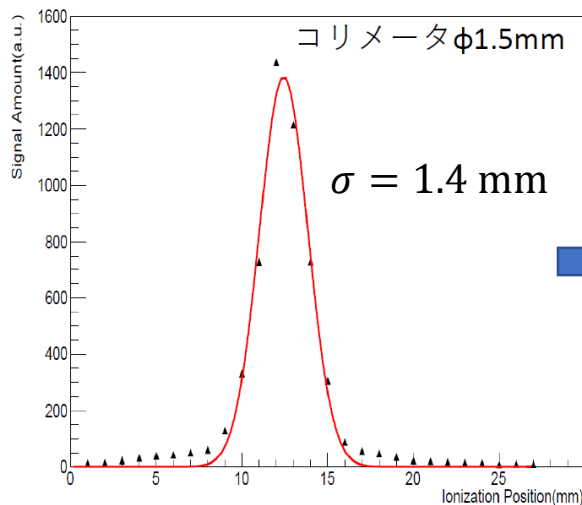
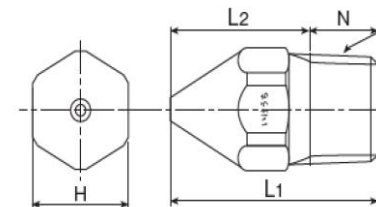
今後
試験予定



出射口のテスト

□ 簡単な先細ノズルでテスト

- 蒸着源+コリメータ2段
 - 上のコリメータにノズルを設置
- TOF測定



コリメータφ1.5mm	1.4
コリメータφ2.5mm	2.1

ノズルφ1.0mm	1.0
ノズルφ2.5mm	1.7

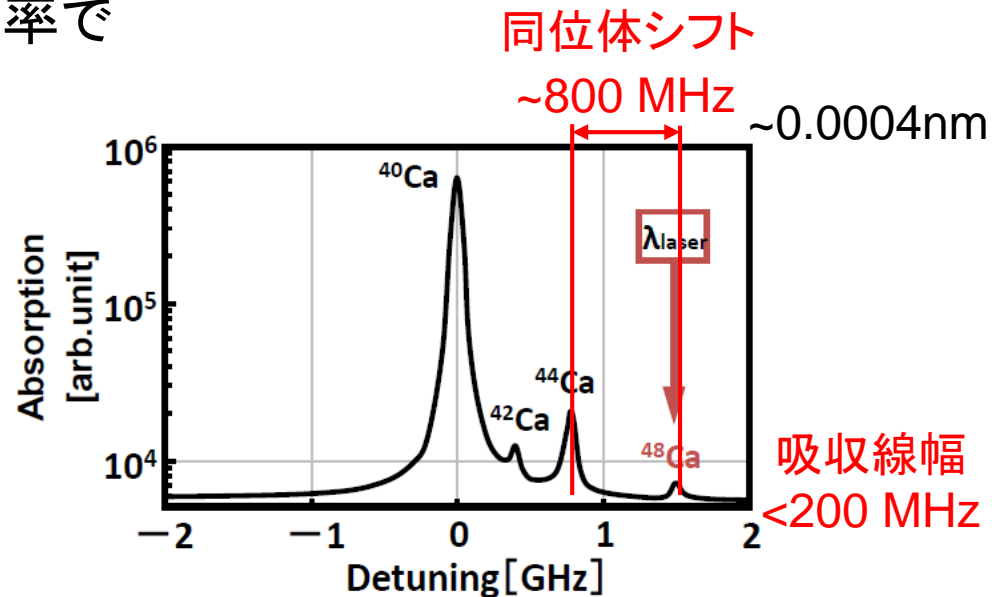
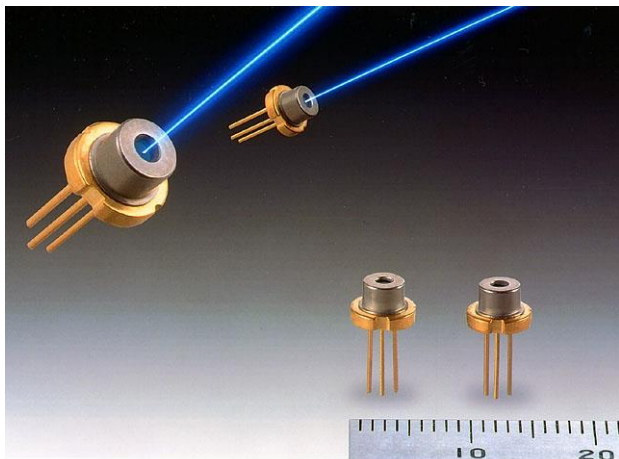
□ 今後

- 新ノズルなどの試験

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

- 青色半導体レーザー
 - 新しい光源:2000年ごろに実用化
 - 350-500nmの幅広い波長域
- 本研究用途に、422.7nm、狭線幅レーザー開発
 - 20%の高い電気-光変換効率で



<https://av.watch.impress.co.jp/docs/20030326/sanyo.htm>

Absorption spectrum of Ca at 423nm

$\pm 20 \text{ MHz} \rightarrow 422.792xx \pm 0.00001 \text{ nm} (0.01-0.1 \text{ pm})$
の波長安定性が必要

次世代検出器：濃縮(レーザー)

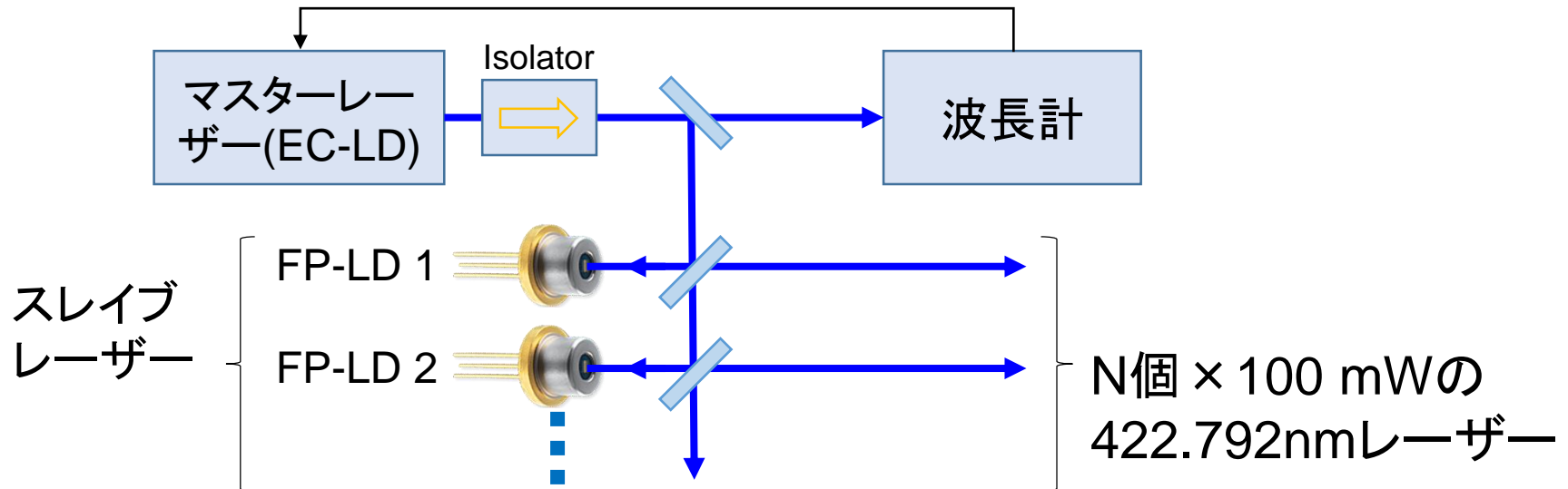
□ 注入同期による高出力化

■ マスターレーザーとスレイブレーザー

■ 外部共振器型レーザー(EC-LD)の狭線幅レーザー光

■ 要求: 0.1pmオーダーの狭線幅発振

■ ファブリペロー型レーザー(FP-LD)の高出力レーザー光



出力Wレベルの青色レーザー構築

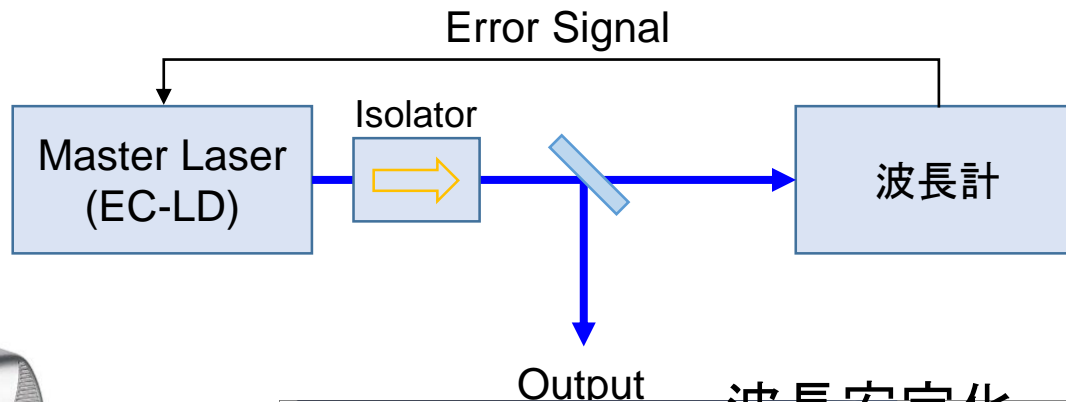
- ・マスターレーザーの安定化
- ・スレイブレーザーの注入同期

→ 高出力化

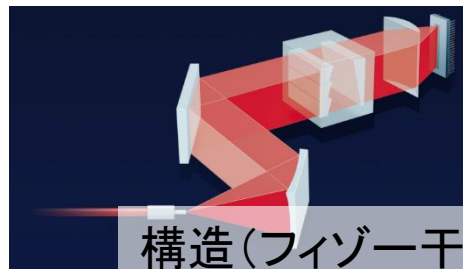
次世代検出器：濃縮(レーザー)

□ 波長計による波長安定化

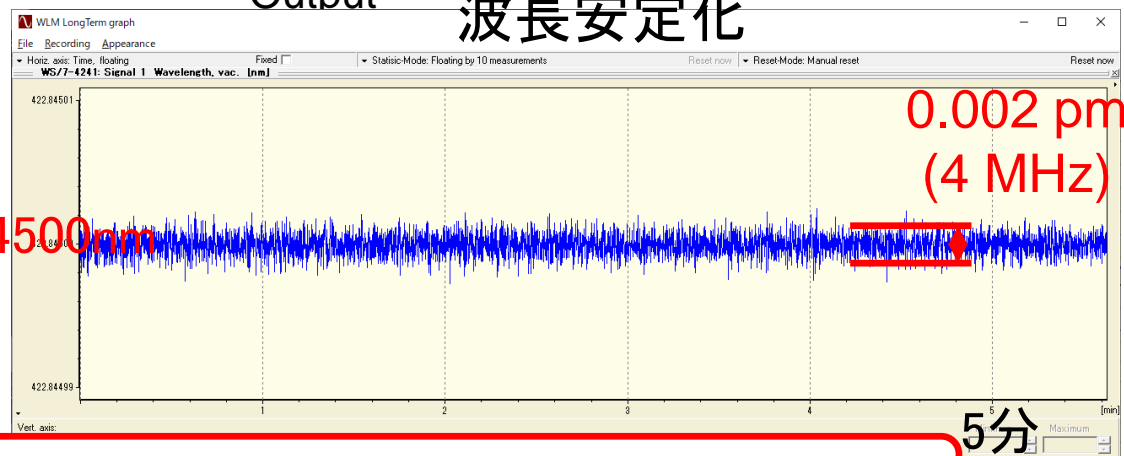
- 外部共振器型レーザー(EC-LD)の狭線幅レーザー光→波長計でロック



光波長計



構造(フィゾー干渉計)



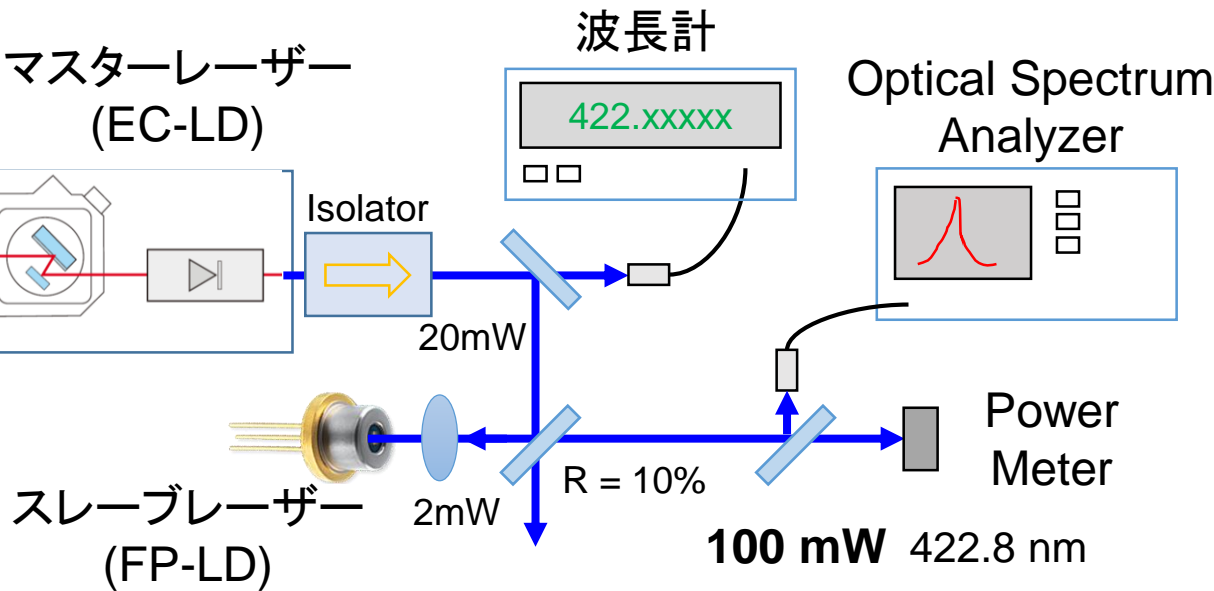
マスターレーザーの波長安定化:OK

次世代検出器：濃縮(レーザー)

□ 注入同期

■ スレーブレーザーの波長

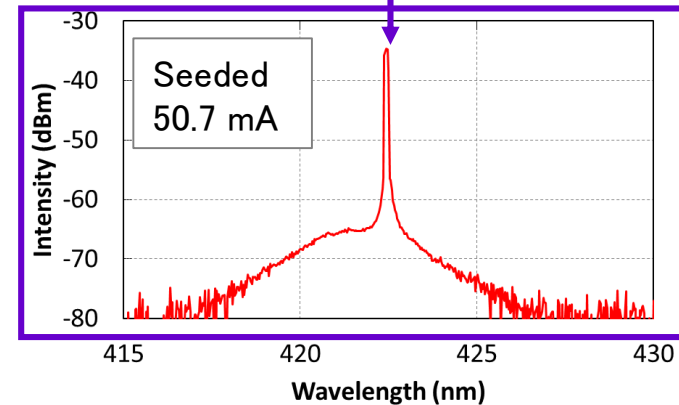
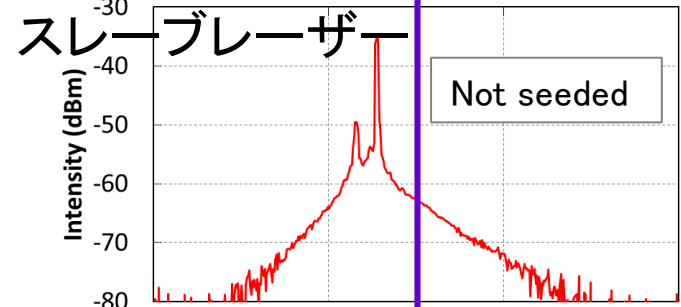
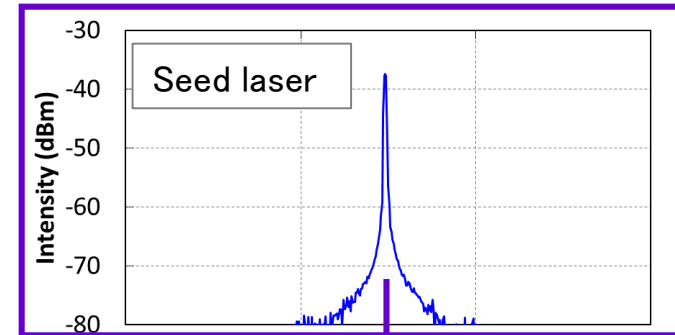
■ マスターレーザーを用いて合わせる



スレーブレーザー(100mW)の波長を
温度・電流で制御する

スレーブレーザーの注入同期:OK

マスターレーザー



まとめ

- 低バックグラウンド測定
 - 蛍光熱量検出器
 - 濃縮
- 高純度結晶
- 結晶入れ替え
 - 高純度結晶技術
 - 長期測定データ解析
 - $0v\beta\beta$ 半減期
 - $2v\beta\beta$ 半減期
- 0.5%エネルギー分解能
- 熱センサー
 - 粒子弁別能評価
 - 小結晶でのエネルギー分解能
 - 実用サイズ結晶でのエネルギー分解能
- mol/年の濃縮装置
- 濃縮原理検証
 - 実用濃縮装置開発
 - 原子オーブン
 - 青色レーザー高出力化
 - マスターレーザー
 - スレーブレーザー
 - gオーダーの濃縮

数meV感度の測定装置開発の基礎技術