

A02班: マヨラナ性検証に向けた 二重ベータ崩壊測定の高感度化 —CANDLES—

大阪大学核物理研究センター/名古屋大学
梅原さおり

Umehara, Saori
RCNP, Osaka University
umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp

CANDLES

■ ^{48}Ca 二重ベータ崩壊測定検出器: CANDLES プロジェクト
@Kamioka Observatory

■ シンチレーターシステム: CANDLES III

■ 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

■ 次世代二重ベータ崩壊測定装置: 必要技術

■ ^{48}Ca 濃縮

■ CaF_2 蛍光熱量検出器

■ 高純度結晶



結果

130日の測定結果

高純度21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

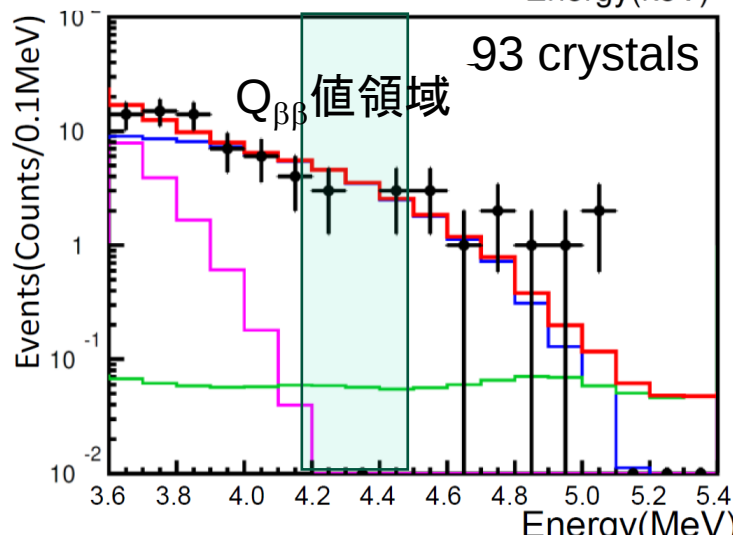
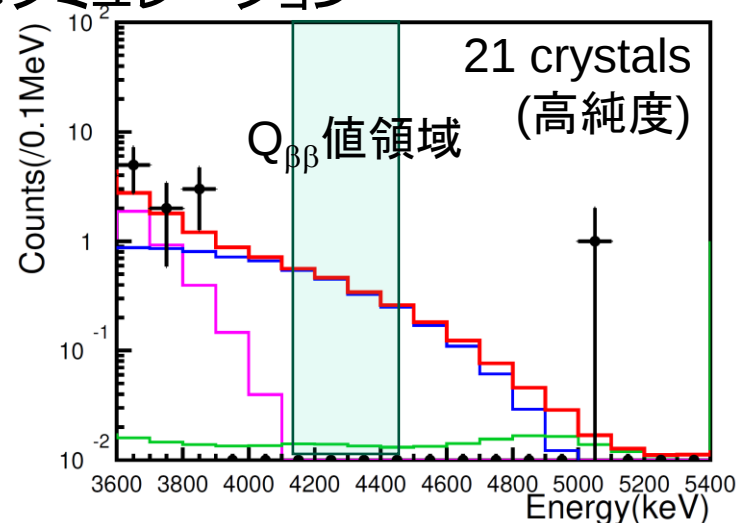
・達成バックグラウンドレベル

・ $< 10^{-3}$ events/keV/year/(kg of $^{\text{nat}}\text{Ca}$)

・comparable to lowest background level

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

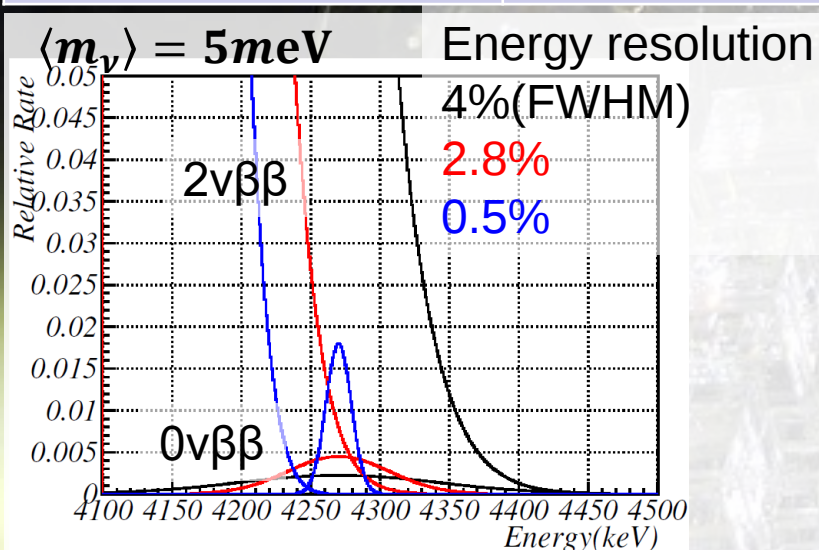
エネルギースペクトルと
BGシミュレーション



次世代検出器開発: 測定感度

■ CANDLES シリーズ

	CANDLES III	次世代検出器
^{48}Ca 存在比	0.187%	80%~
^{48}Ca 量	0.35 kg : CaF_2 300kg	数ton (2ton~)
エネルギー分解能	6%	1.0% (required)
$\langle m_\nu \rangle$ 感度	0.5eV	数meV (4-20meV)
特徴	CaF_2 冷却 低バックグラウンド測定	濃縮 ^{48}Ca & 高E分解能&低BG 逆階層~順階層



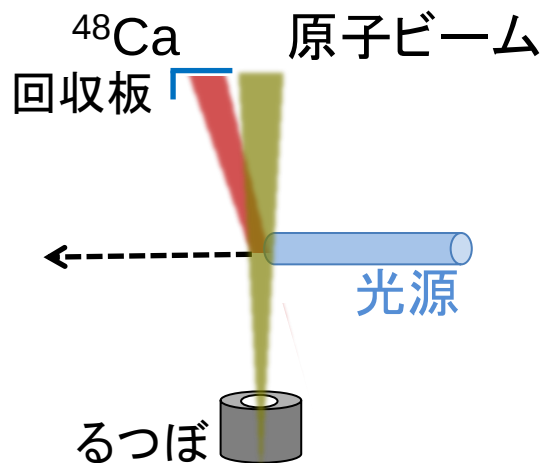
- ^{48}Ca 増量
 - ^{48}Ca 量が感度を制限
- 高エネルギー分解能
 - 蛍光熱量計
- 低BG
 - 高純度 $^{48}\text{CaF}_2$ 結晶

次世代検出器：濃縮

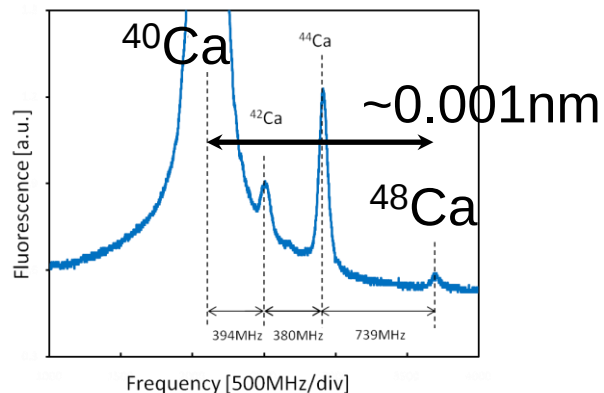
原子力工学、光工学協力
福井大工仁木研究室

□ レーザー濃縮(LIS)を紹介：

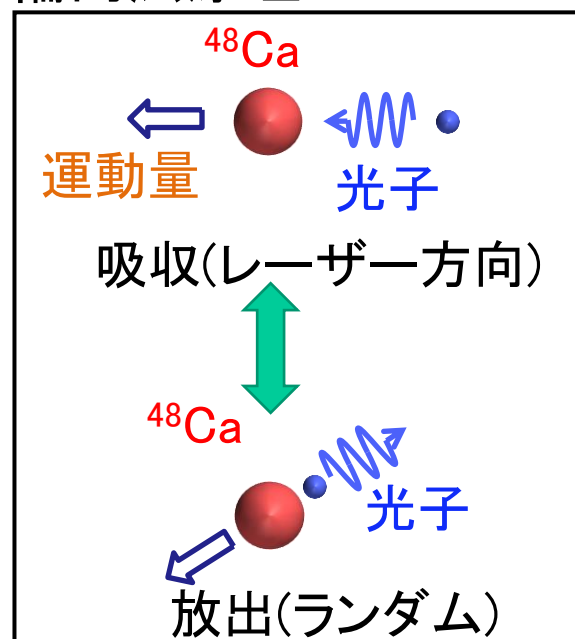
装置概略



Caの吸収波長スペクトル

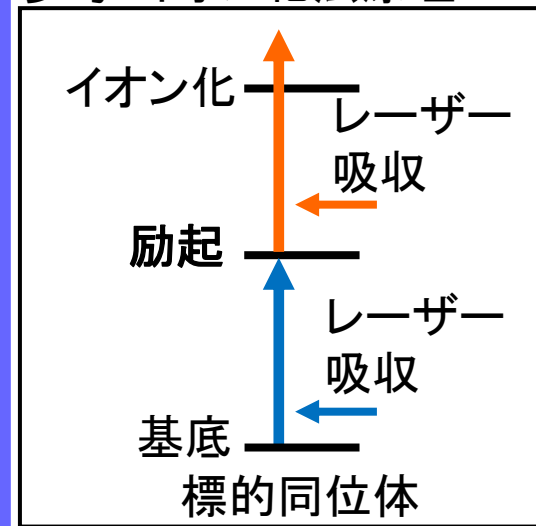


偏向法原理



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



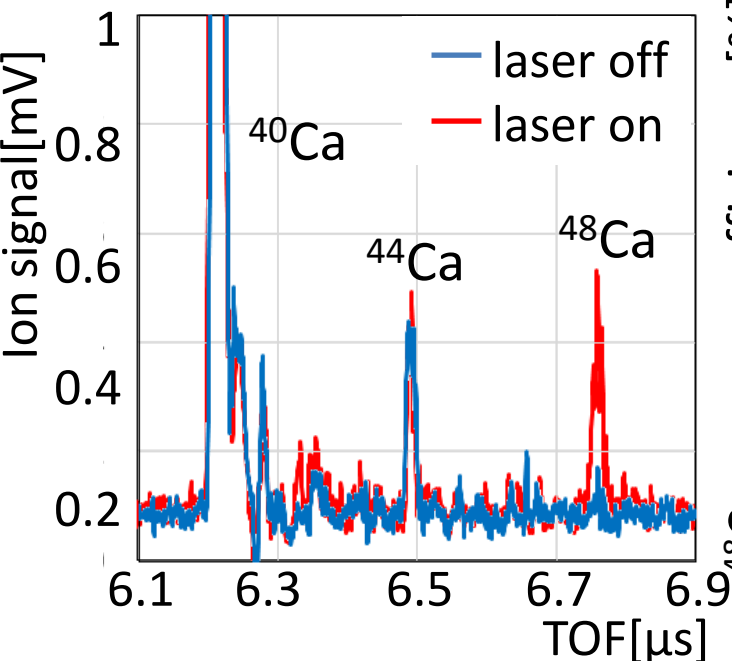
2本のレーザーが必要
・選択的励起用
・イオン化用
韓国等でも開発

大量濃縮に向けた装置開発
高出力高波長精度の青色レーザー

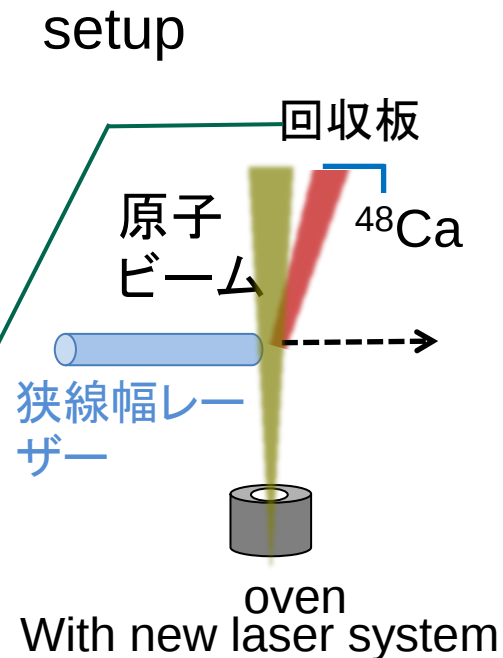
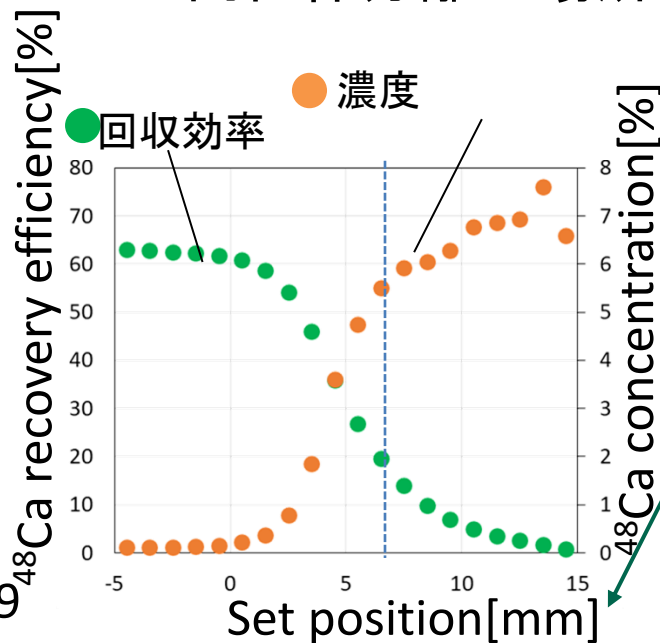
次世代検出器：濃縮（偏向法）

Ref :K. Matsuoka et al, J. of Phys. :
Conf. Ser. 1468, (2020), 012199
Ref : Presentation
by I. Ogawa in SPLG2021

同位体効果



LIS同位体分離の場所依存性



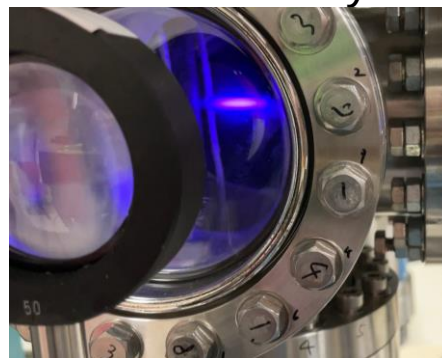
偏向法による同位体分離

高濃縮・高効率回収

大きな偏向角

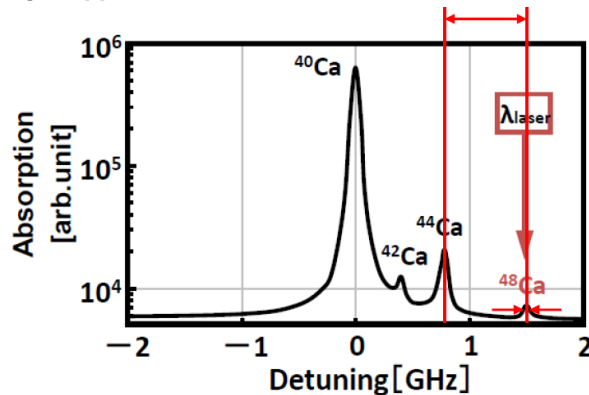
偏向レーザーの照射システムの最適化

高出力青色レーザー：レーザー研（大阪大学）



要求される青色レーザー性能

□ 安定な狭線幅レーザーの出力



同位体シフト: ~ 800 MHz

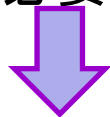
自然幅: ~ 34 MHz

■ 目指す波長幅安定性

■ 2MHz rms $\rightarrow 422.792xxxx \pm 0.0000006$ nm

□ ^{48}Ca 生産のためのレーザー出力

■ ^{48}Ca 偏向に必要な光子数: 1,000 photon



■ 1kg/year ^{48}Ca のために >1 kW

■ (base power) 100 mW $\rightarrow$ (FY2023) 2 W $\rightarrow$ (future) 2 kW $\rightarrow 300$ kW

第一段階

・複数レーザーを用いた同期システム
による高出力化

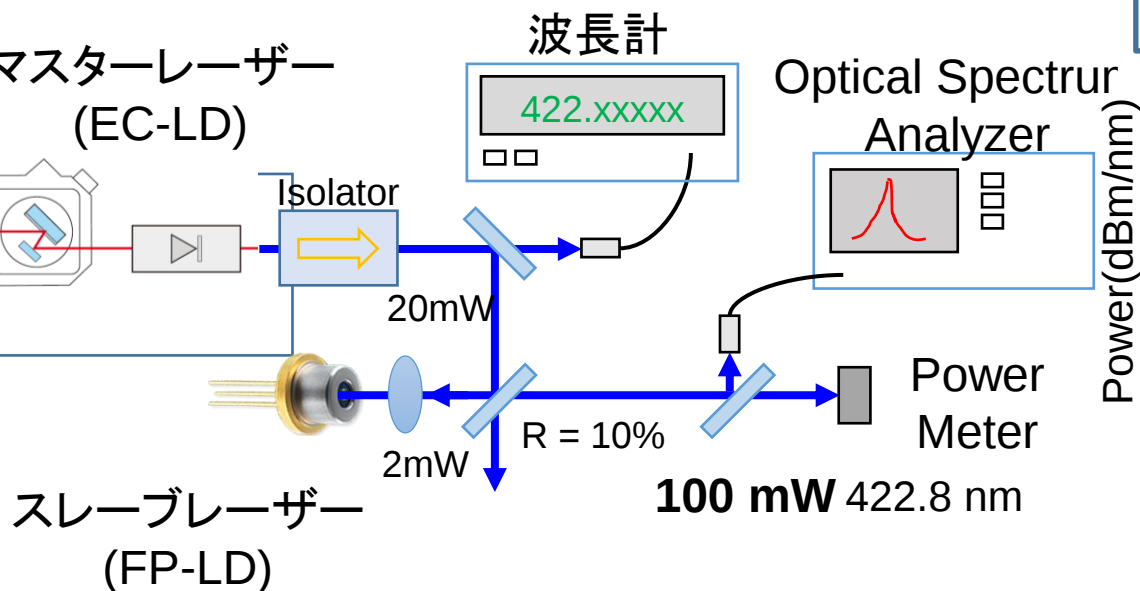
次世代検出器：濃縮(レーザー)

時田(京大化研)
宮永(レーザー総研)
マスターレーザー

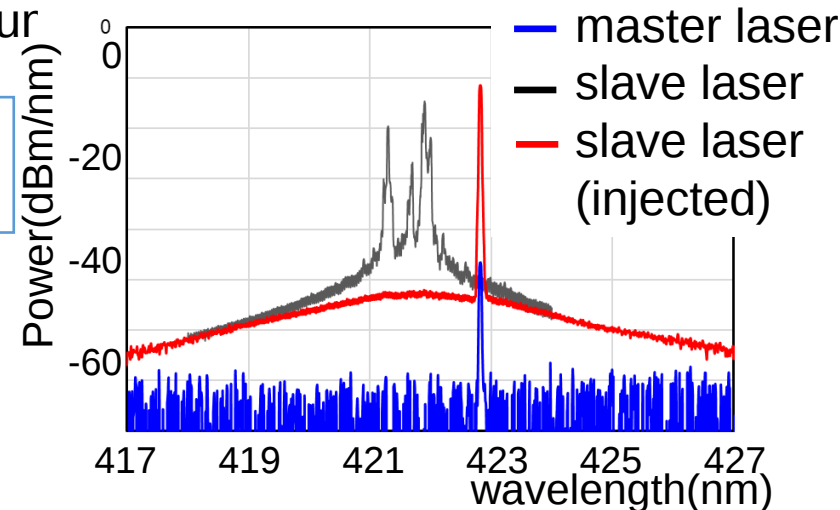
□ 注入同期

■ 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

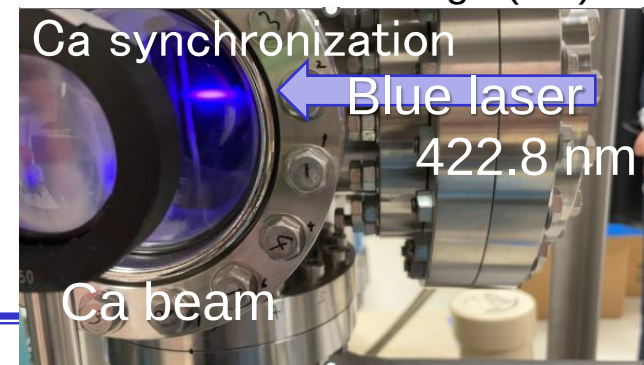


Wavelength of lasers



スレーブレーザー(100mW)の波長を
温度・電流で制御する

注入同期システム:OK
次 : 出力アップ 20mW to ~2W



青色レーザー: 安定性

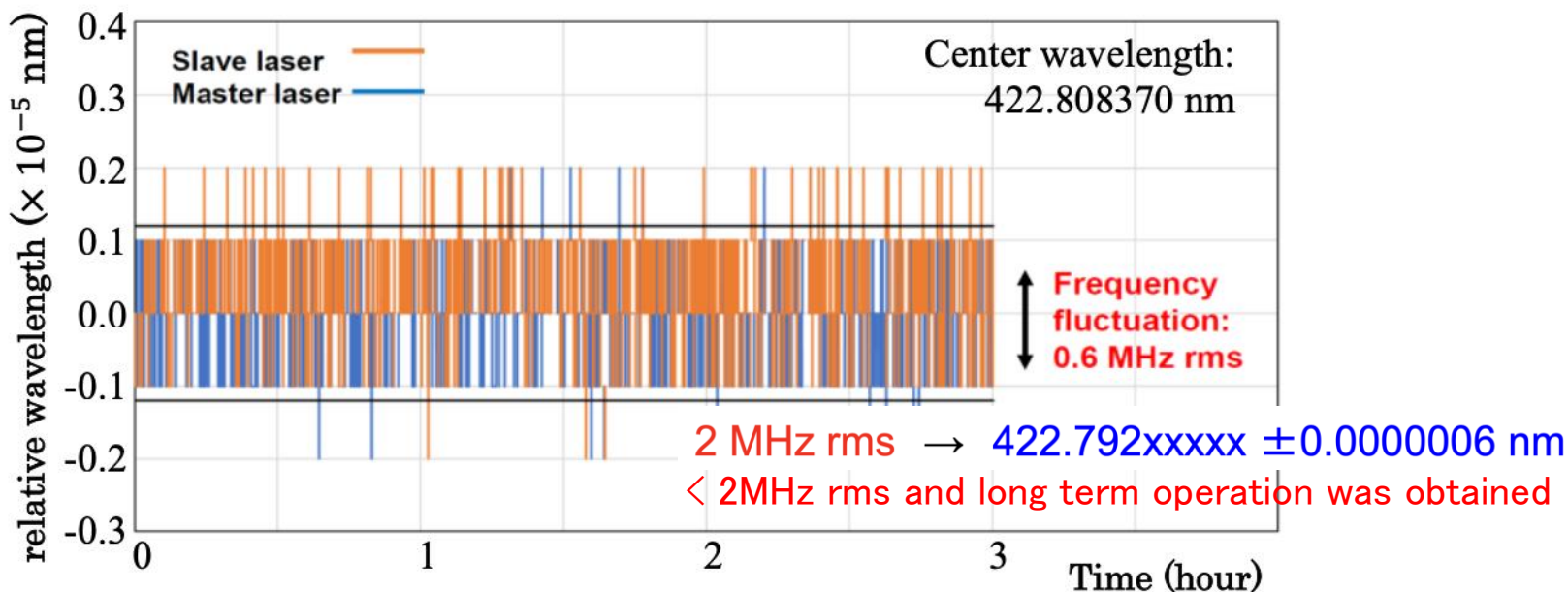
□ 青色レーザーの安定性テスト

■ PDH法による安定化

■ コントロール信号を各スレーブレーザーへ

■ 温度調整による波長コントロール

波長安定性テスト

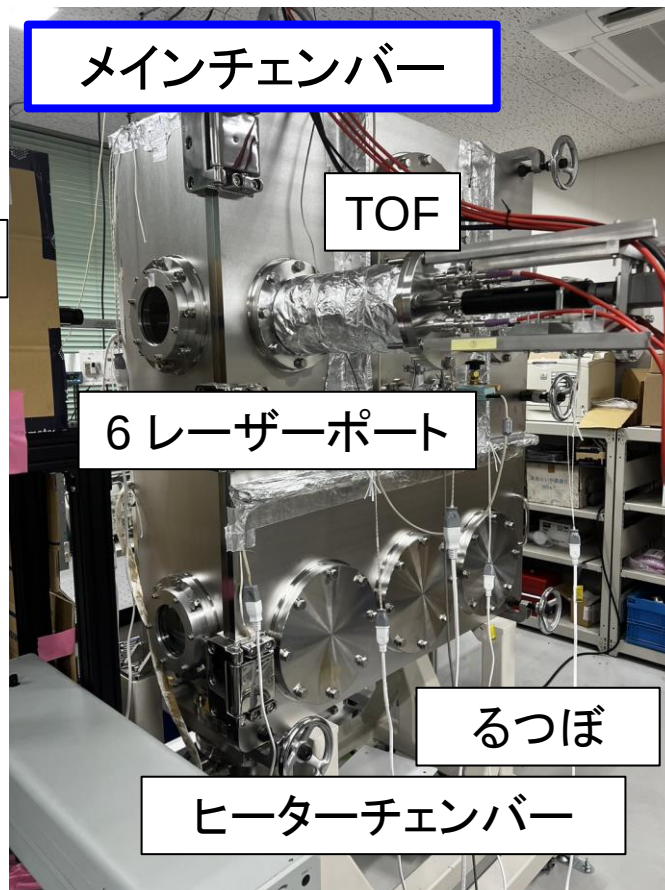
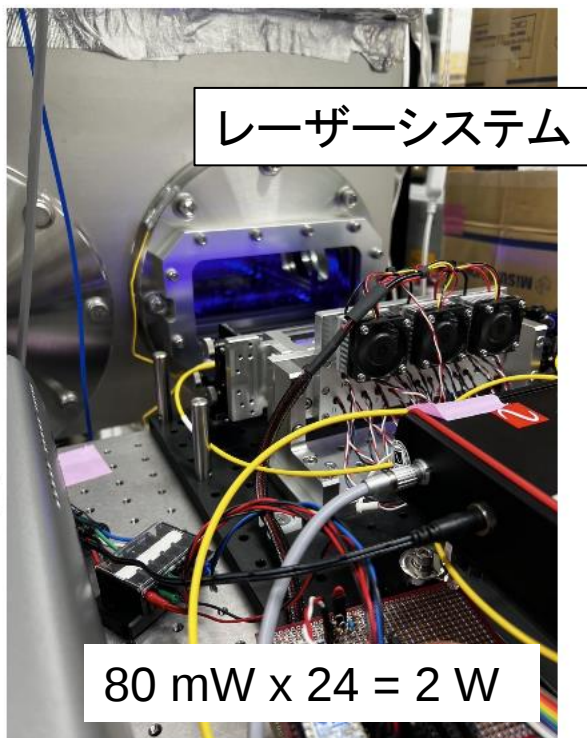


波長の安定コントロールを実現: $\sim 2 \times 10^{-5}$ nm 幅

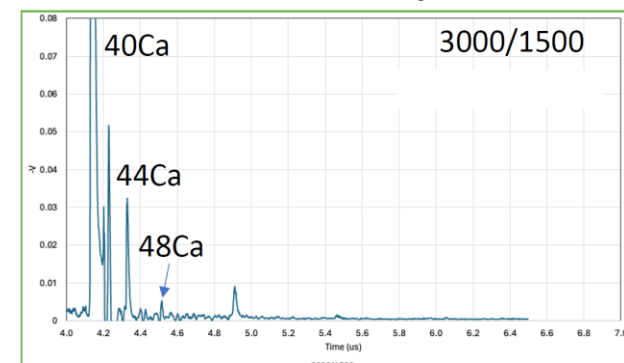
濃縮装置: メインチェンバー

ポスター発表
(R. Anawatさん)

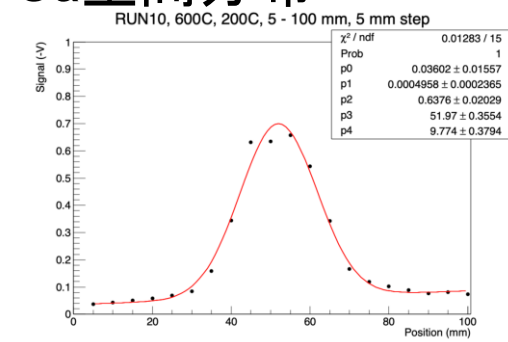
基本システムの構築



Ca モニタ(TOF system)



Ca空間分布

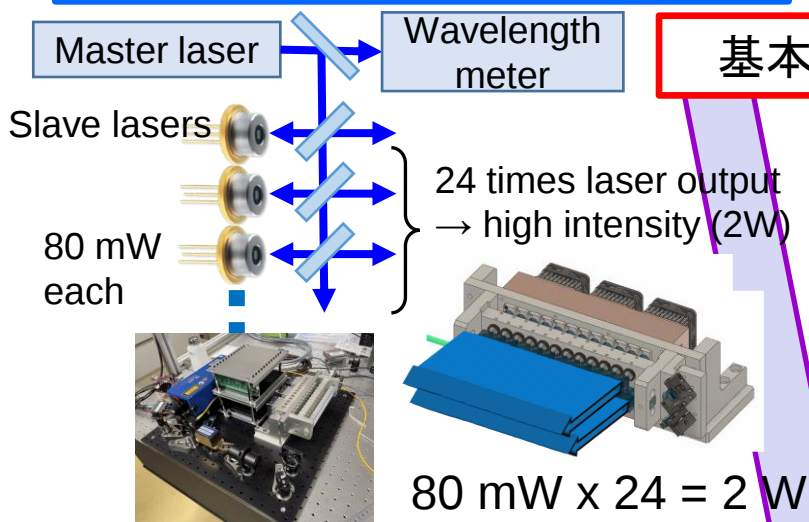


メインチェンバー: 6 レーザー & 3 ヒーターチェンバー
まず最小システムで運転(1 レーザー & 1 チェンバー)

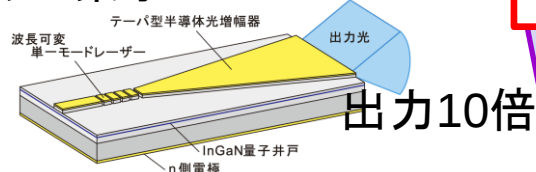
検出器開発：同位体濃縮

大阪大学RCNP、福井大学
京都大学化研、レーザー総研
大阪大学大学院工学研究科

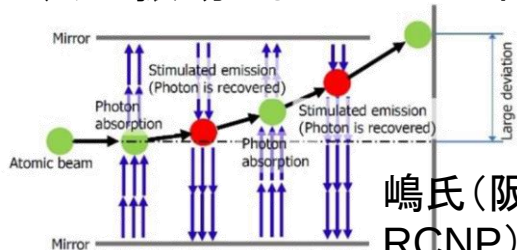
集積高出力レーザーシステム



高出力レーザー素子



他、ラビ振動によるレーザー再利用システム



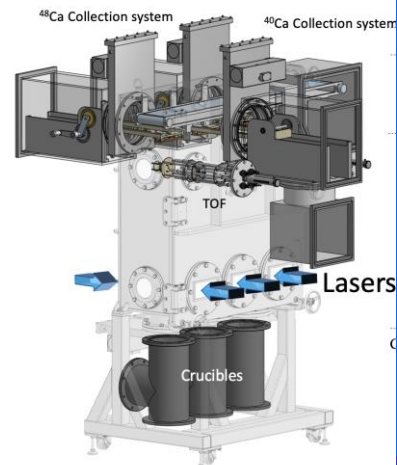
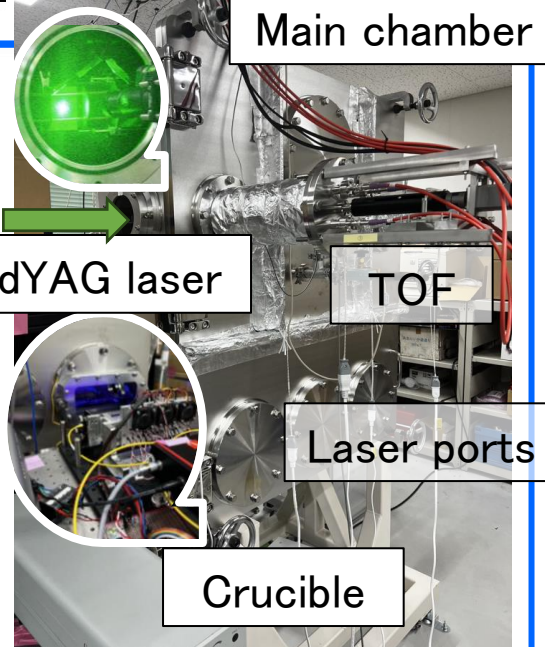
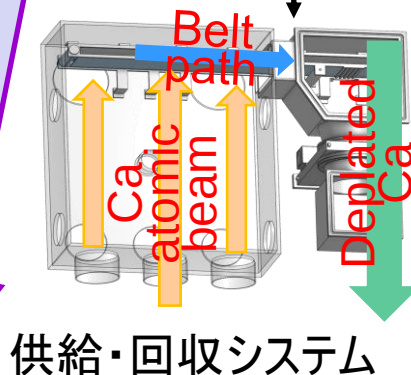
嶋氏(阪大
RCNP)資料から

メインチェンバー

基本システムの構築

次のステップ

生産量の強化



次世代検出器開発

□ $^{48}\text{CaF}_2$ 蛍光熱量検出器

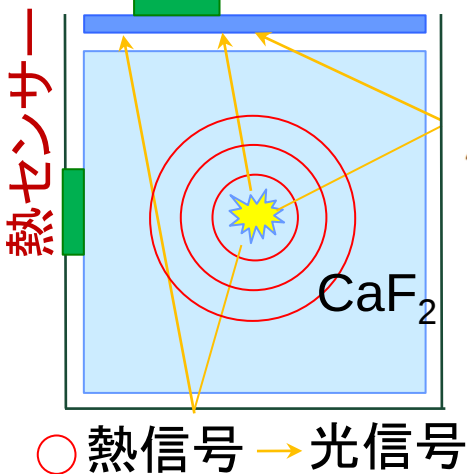
■ 予想されるバックグラウンド

- $2\nu\beta\beta$ 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

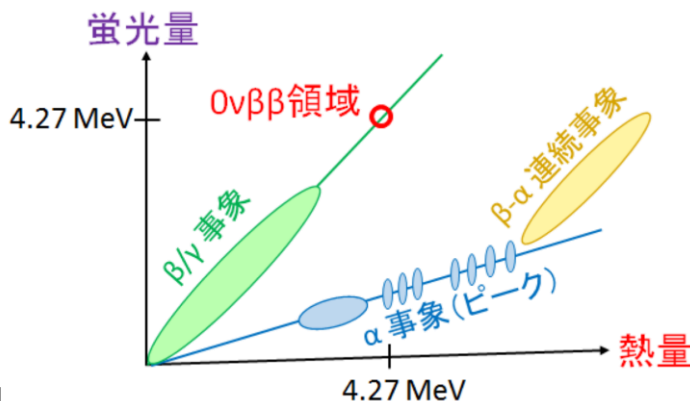
蛍光熱量検出器: 10mKで使用
蛍光熱量計



光センサー

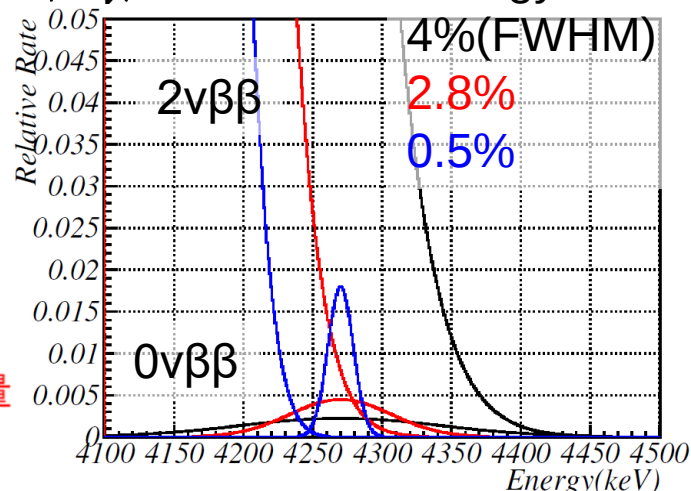


蛍光熱量検出器による粒子弁別
蛍光量vs熱量



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

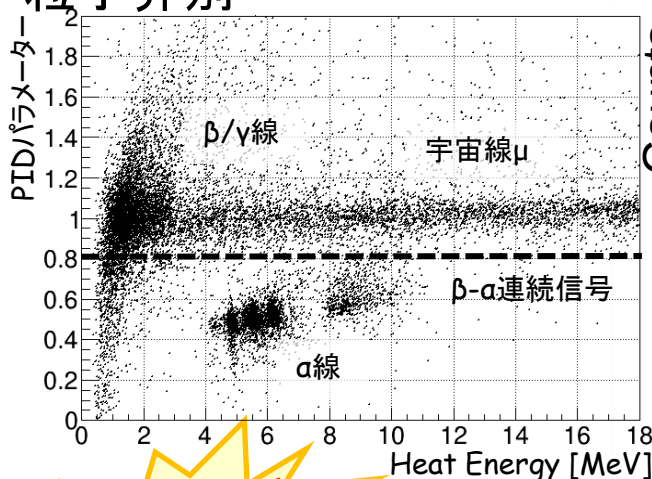
$\langle m_\nu \rangle = 5\text{meV}$ Energy resolution



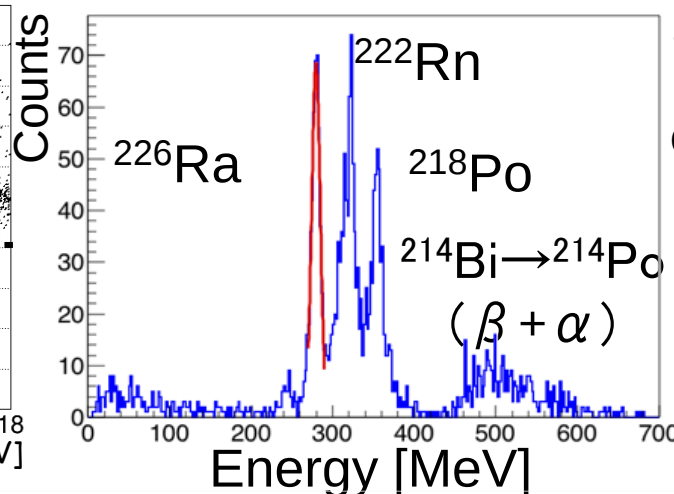
CaF₂(pure) 蛍光熱量検出器

IBS Kim Yong-Hamb
AMoRE sub group
CANDLES sub group

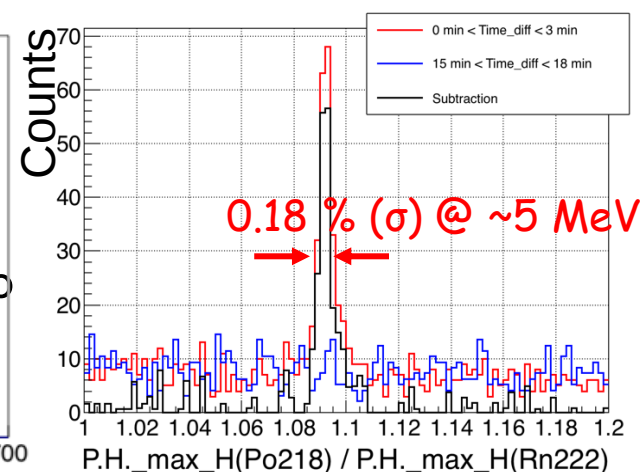
CaF₂ 蛍光熱量検出器の
粒子弁別



エネルギースペクトル
エネルギー分解能1.86%



同じ位置で起こった事象の
エネルギー比



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

世界最初

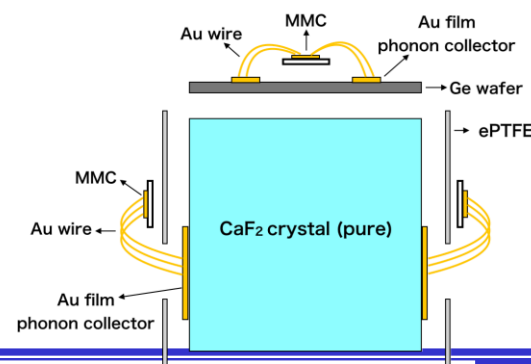
CaF₂(pure) 蛍光熱量検出器

■ エネルギー分解能(σ): $1.86 \pm 0.11\%$

■ 位置依存性の影響は大きい

■ 位置依存性がない事象に対して0.18%

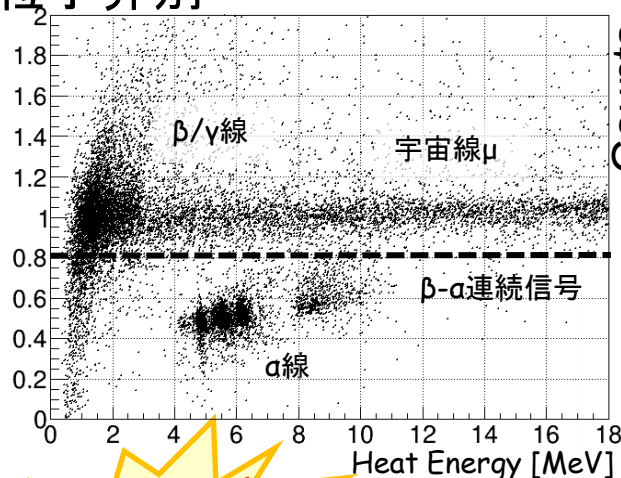
■ 位置依存性を減らすために熱センサーの追加



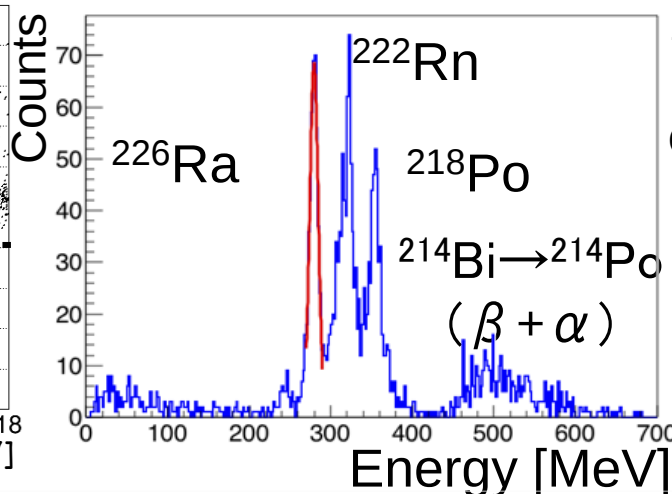
CaF₂(pure)蛍光熱量検出器

IBS Kim Yong-Hamb
AMoRE sub group
CANDLES sub group

CaF₂蛍光熱量検出器の
粒子弁別



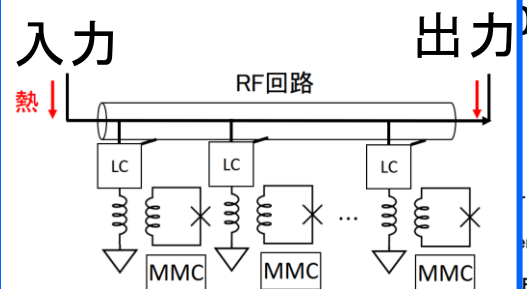
エネルギースペクトル
エネルギー分解能1.86%



同
工

次ステップ: データ
読み出し

1000個結晶からの信号読み出しが必要
だが、配線を増やすと
熱流入が増大
→ 超伝導検出器での
多重化読み出しの実
現が効率的



多重読み出し
システム

世界最初

CaF₂(pure) 蛍光熱量検出器

■ エネルギー分解能(σ): $1.86 \pm 0.11\%$

■ 位置依存性の影響は大きい

■ 位置依存性がない事象に対して0.18%

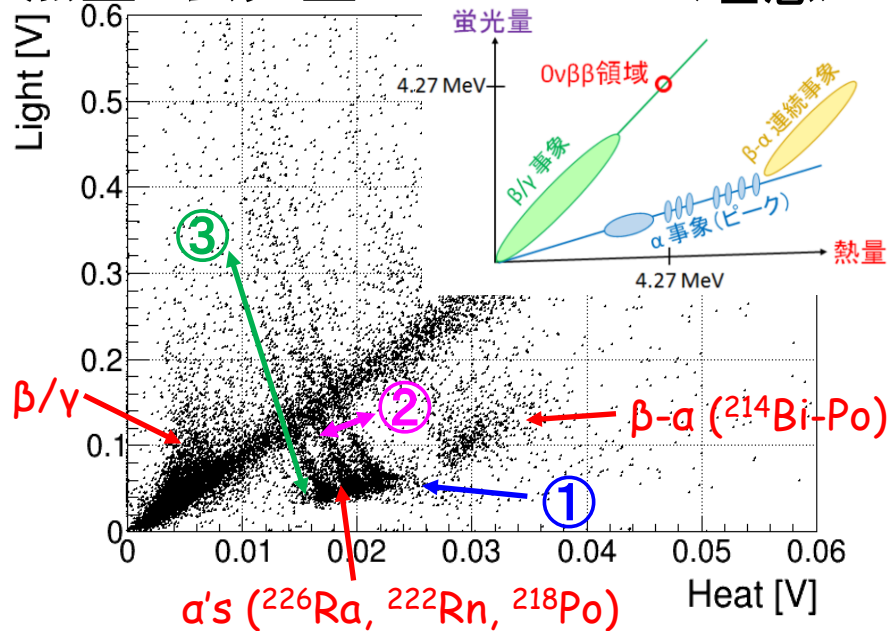
■ 位置依存性を減らすために熱センサーの追加

CaF₂蛍光熱量計の光信号

CaF₂蛍光熱量計光信号

場所依存性がある原因

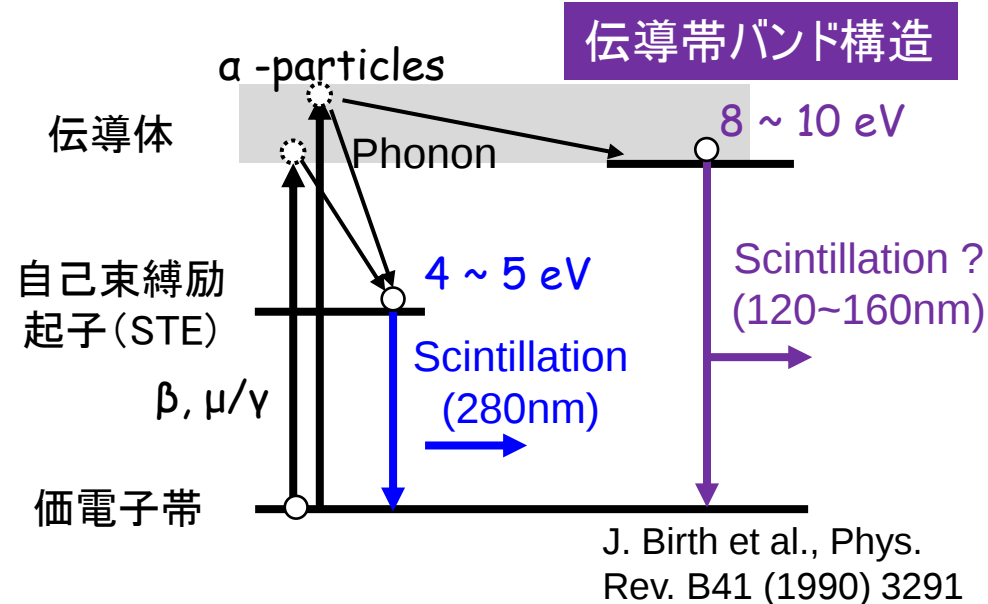
熱量と蛍光量



問題点

- ③ Light信号が広く分布
(~10倍以上に広がる)

CaF₂のバンド構造



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

~160nm発光の吸収は位置依存性あり
光信号量が広く分布する原因になる

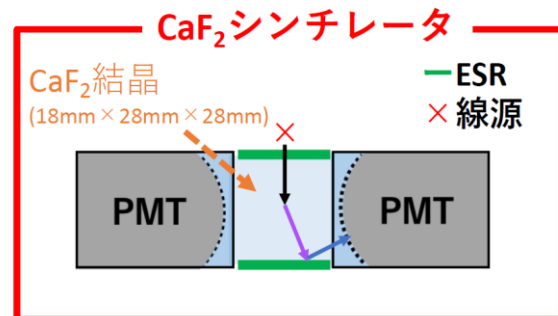
CaF₂のVUV発光

山本詩織(卒業研究)

TPB付ESR:ANKOK実験による提供

CaF₂結晶の発光測定

感度波長の異なる光電子増倍管を使用して光量測定



検出光量を比較

- ・ESR w/o TPB
- ・ESR w/ TPB

170nm

➤ 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

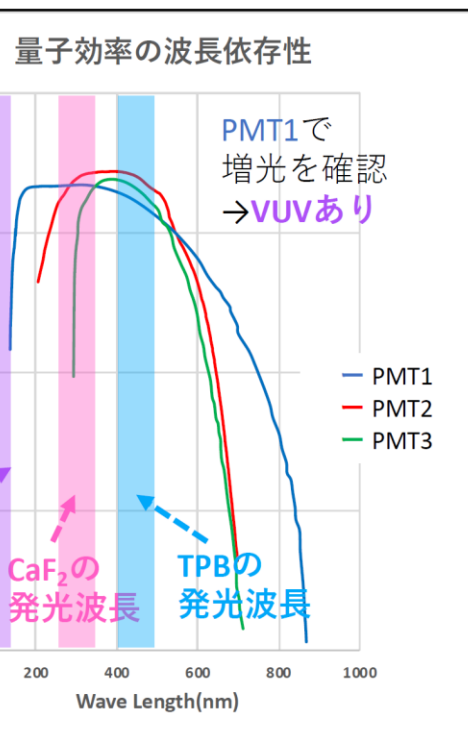
PMT1で増光
→ VUVが存在

最も感度波長
が狭い

PeakをFitした際の統計誤差

単純ではないがPMT1で増光 → VUV発光あり
波長ごとの光量を測定したい！

液体キセノン用発光波長測定システムを用いた評価



CaF₂発光 ~160nm、280nm
液体キセノン発光 180nm

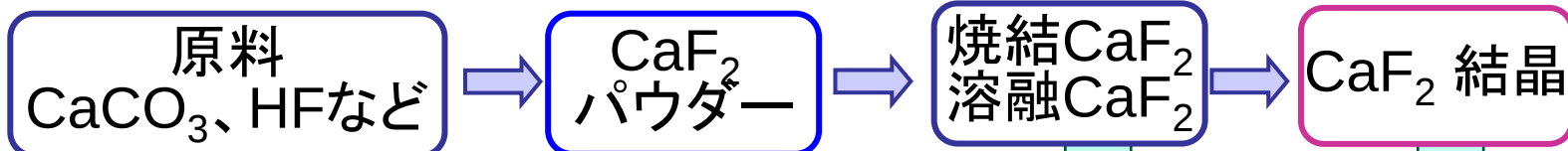
ポスター発表(伊藤さん)
B02班連携

検出器開発：高純度CaF₂結晶

RCNP
東北大学金研
徳島大学

CaF₂結晶の製造過程

要求純度~μBq/kg
歩留まり~80%



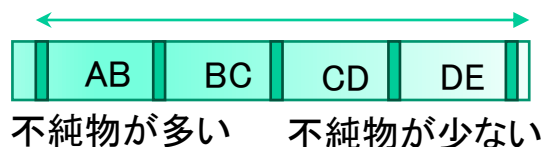
⁴⁸CaF₂結晶製造に向けた高純度化手法

樹脂法(再純化が可能)

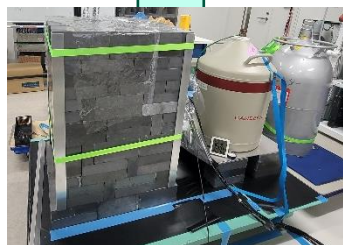


ウラン・トリウム吸着樹脂
塩化カルシウム水溶液等

偏析法(再純化が可能)



必要分析手法



数10mBq/kg感度



数mBq/kg感度

D班：ICP-MS

学術変革で共同開発



数μBq/kg感度

ポスター発表(西島さん)

偏析法による結晶高純度化

□ 偏析効果による不純物の偏り

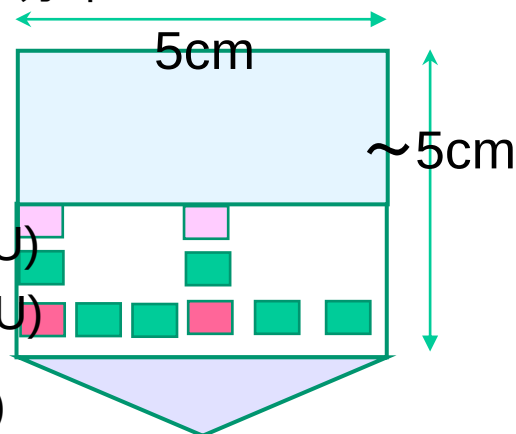
結晶内での不純物の分布

α線分析: <1mBq(U)

~0.5~ppb(~5~mBq)(U)

~1~ppb(~10~mBq)(U)

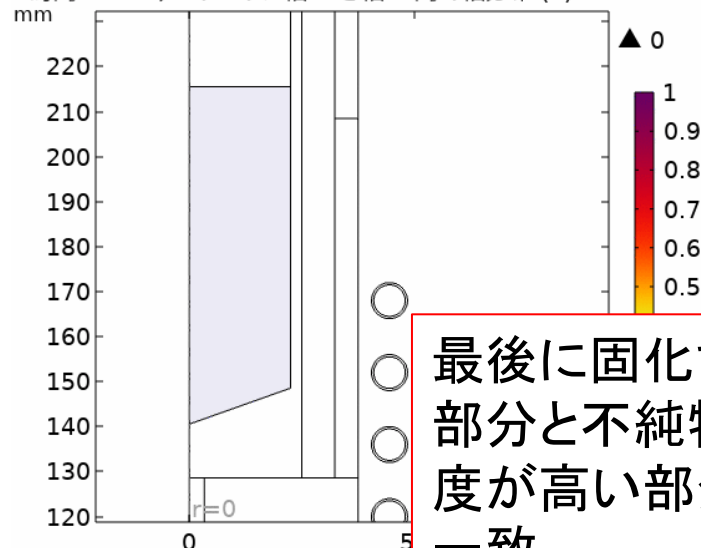
α線分析: <2mBq(U)



結晶溶解と固化の様子
(温度シミュレーション)

黒澤氏(東北大
金研)資料より

時間=0 h サーフエス: 相 1 と相 2 間の相分布 (1)

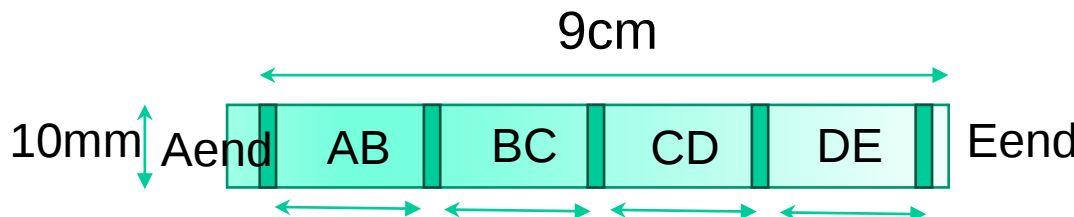


最後に固化する
部分と不純物濃
度が高い部分が
一致

□ 偏析効果を高める結晶製造

■ 長尺結晶製造

不純物が多い
と思われる側



不純物が少ない
と思われる側

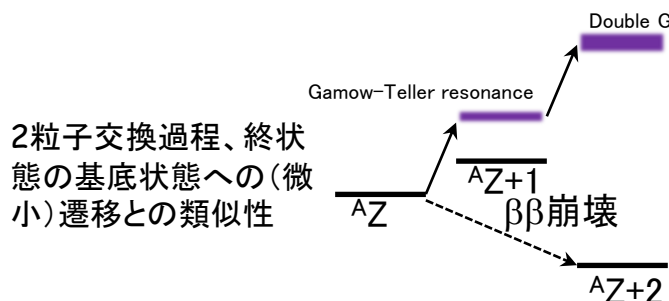
偏析法による高純度結晶製造法確立をめざす

二重ベータ崩壊核：核行列要素

□ 二重ベータ崩壊研究

明日の発表(岩田順敬さん)

- 核行列要素：実験値がないので理論計算。しかしモデル依存。
 - 理解を深め、不定性を低減するために核物理のデータが必須。
 - 原子核の質量、結合エネルギー、励起エネルギー準位、遷移強度



Shell ModelやEDF計算では、
それぞれの核行列要素に広い質
量領域で、非常に良い相関あり
RCNP, RIKENで実験計画

M. Takaki et al. JPS Conf. Proc. 6 020038 (2015)

K. Takahisa, Ejiri et al. arXiv:1703.08264

■ $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

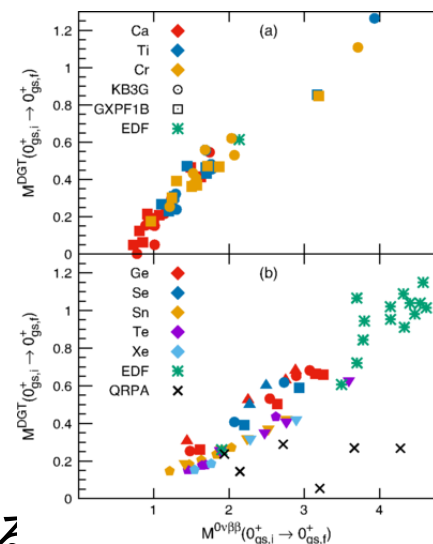
- 質量項：核行列要素の精度が $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の精度
- 右巻き相互作用項：相互作用強さは原子核によって異なる

■ 例： ^{48}Ca 、 ^{82}Se 、 ^{96}Zr らと ^{76}Ge 、 ^{100}Mo 、 ^{130}Te 、 ^{136}Xe らは相補的

■ 多様核種での測定

□ 将来的に多様核種での測定：結晶をいれかえた測定

- 蛍光熱量検出器： ^{48}Ca 、 ^{82}Se 、 ^{100}Mo 、 ^{130}Te など



T. Fukuyama and T. Sato,
arXiv:2209.10813 (2022)
JHEP, 2023, 49(2023)

まとめ

□ CANDLES プロジェクト

- シンチレーターシステム: CANDLES III
- 次世代二重ベータ崩壊測定装置: $^{48}\text{CaF}_2$ 蛍光熱量検出器
 - ^{48}Ca 濃縮
 - 基本濃縮装置構築
 - コスパよい高出力レーザーの開発
 - 高出力レーザー素子等
 - 蛍光熱量検出器
 - 位置依存性を取り除くための複数センサーシステム導入
 - 大型化に向けて多重化読み出しシステムの開発
 - 高純度結晶
 - 偏析法による高純度化技術確立

□ まとめ