

# 二重ベータ崩壊 : 極低放射能環境でのニュートリノ研究

大阪大学核物理研究センター  
梅原さおり

Umehara, Saori

RCNP, Osaka University

[umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp](mailto:umehara@rcnp.osaka-u.ac.jp)

# 原子核・素粒子：二重ベータ崩壊研究

□ 二重ベータ崩壊の測定：マヨラナ性の検証

■  $\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}} \propto G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$

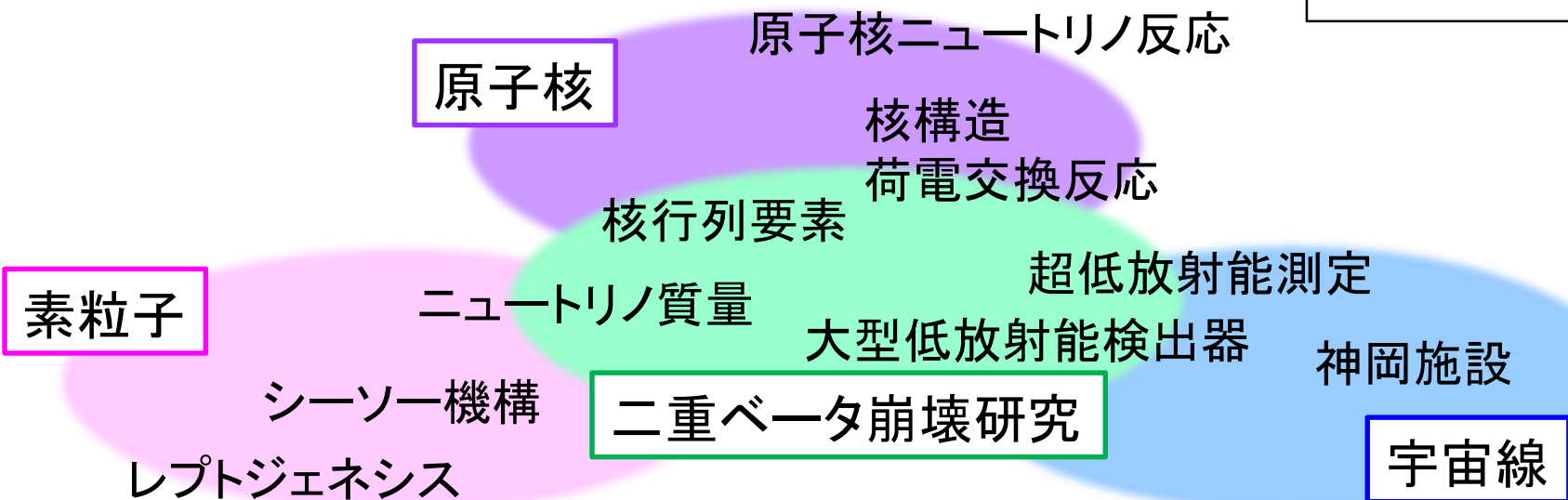
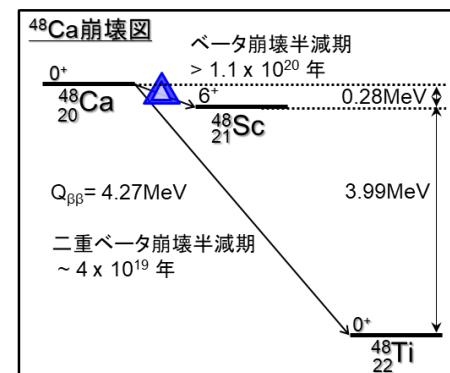
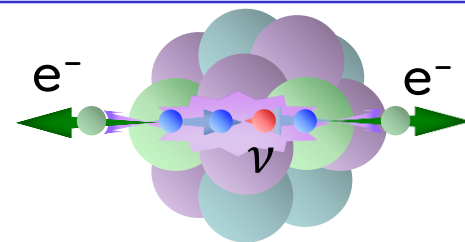
■  $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$  : 半減期 「超低放射能測定」

■  $|M_{0\nu}|^2$  : 核行列要素 「原子核」

■  $\langle m_{\beta\beta} \rangle^2$  : ニュートリノ質量 「素粒子」

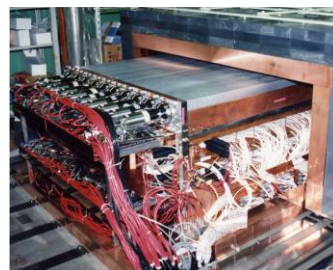
■ 次世代装置 (高感度・多様核種)

□ 超低放射能宇宙素粒子研究施設の共同利用



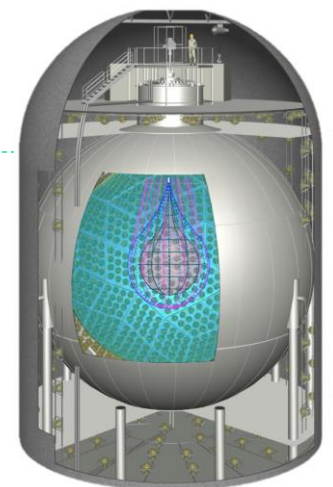
# 二重ベータ崩壊研究

- 1940 : マヨラナニュートリノ(E. Majorana) &  $0\nu\beta\beta$ (W.H.Furry): 稀な原子核崩壊
- 2010 : ELEGANT V( $^{100}\text{Mo}$ 、 $^{116}\text{Cd}$ ): 原子核実験  
ELEGANT VI( $^{48}\text{Ca}$ ): 原子核実験  
KamLAND-Zen( $^{136}\text{Xe}$ ): 素粒子実験
- 2020 : KamLAND2-Zen( $^{136}\text{Xe}$ )
- 2030 : 次世代装置( $^{136}\text{Xe}$ 、 $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{96}\text{Zr}$ 、 $^{160}\text{Gd}$ 、...) : 原子核+素粒子実験
- 2040 : 原子核+素粒子実験

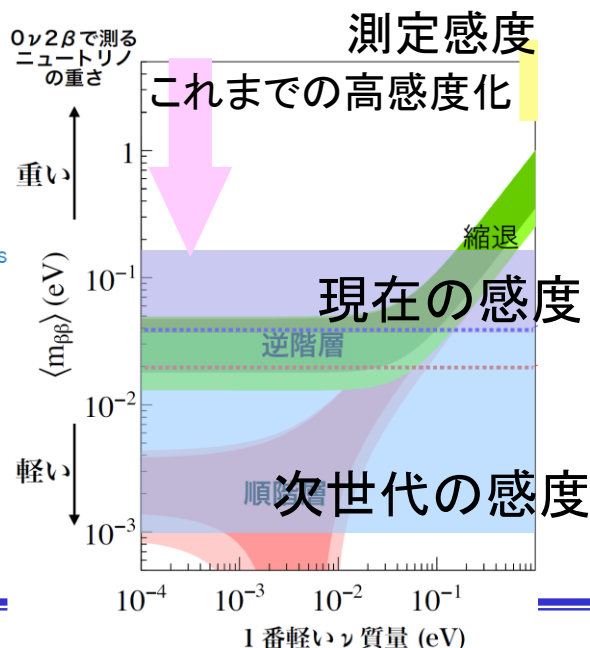
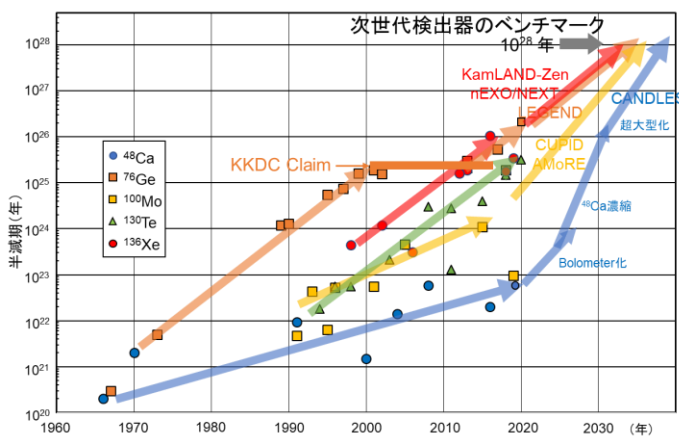


ELEGANT V

KamLAND-Zen



## 二重ベータ崩壊測定歴史



逆階層に手が届く。  
素核宇連携で  
順階層も視野に。

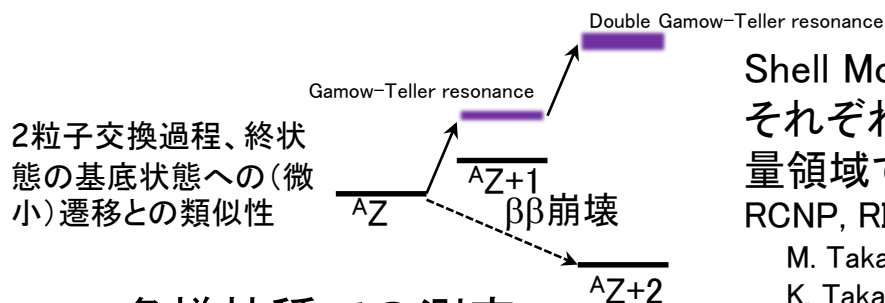
# 二重ベータ崩壊研究

## 二重ベータ崩壊研究

### $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

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

T. Fukuyama and T. Sato, arXiv 4506834(2022)



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

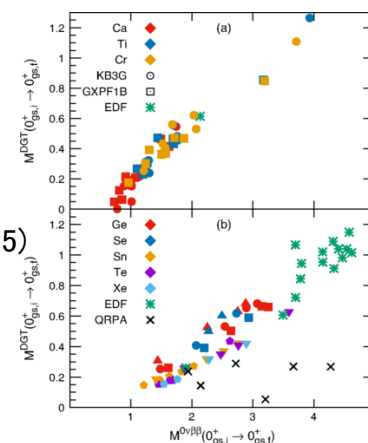
M. Takaki et al. JPS Conf. Proc. 6 020038 (2015)

K. Takahisa, Ejiri et al. arXiv:1703.08264

### 多様核種での測定

## 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:  $^{48}\text{Ca}$ 、 $^{82}\text{Se}$ 、 $^{100}\text{Mo}$ 、 $^{130}\text{Te}$ など
- 蛍光検出器:  $^{160}\text{Gd}$ など

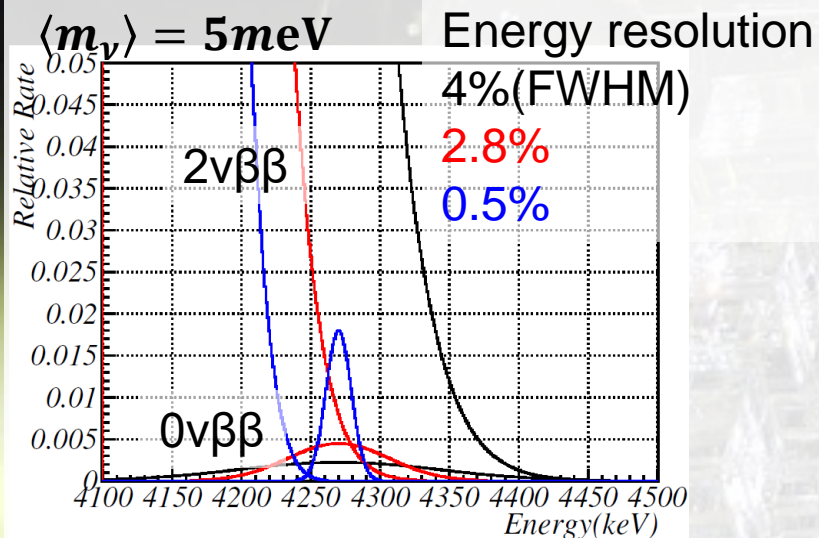


N. Shimizu et al., Phys. Rev. Lett., 120, 142502, (2018)

# 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: 地下宇宙新学術(核・素・宇)
$^{48}\text{Ca}$ 存在比	0.187%	80%~
$^{48}\text{Ca}$ 量	0.35 kg: $\text{CaF}_2$ 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	$\text{CaF}_2$ 冷却 低バックグラウンド測定	濃縮 $^{48}\text{Ca}$ & 高エネルギー分解能&低BG 逆階層~順階層



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

# 低バックグラウンド測定

## □ 蛍光検出器測定結果

高純度<sup>21</sup>結晶の結果

	結果
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	$2.8 \times 10^{22}$ year

Phys Rev D, 103, 092008 (2021)

バックグラウンド量:  $1.0 \times 10^{-3}$  events/keV/yr/kg

検出器質量当たりでは世界最高レベル

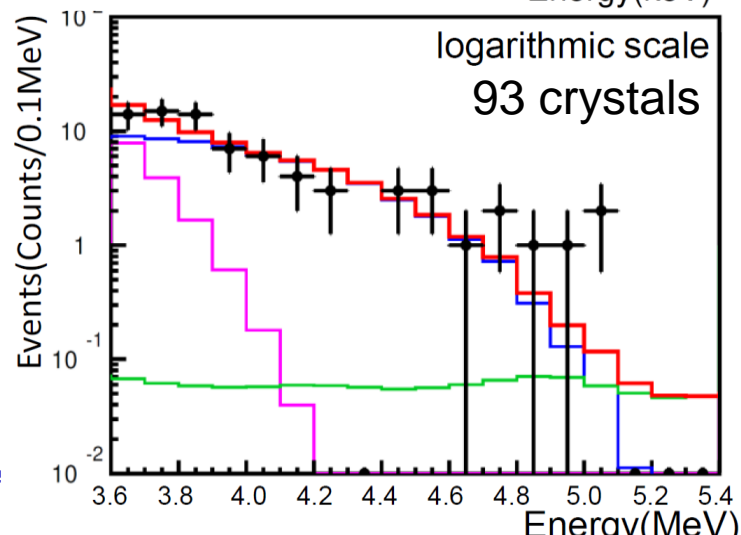
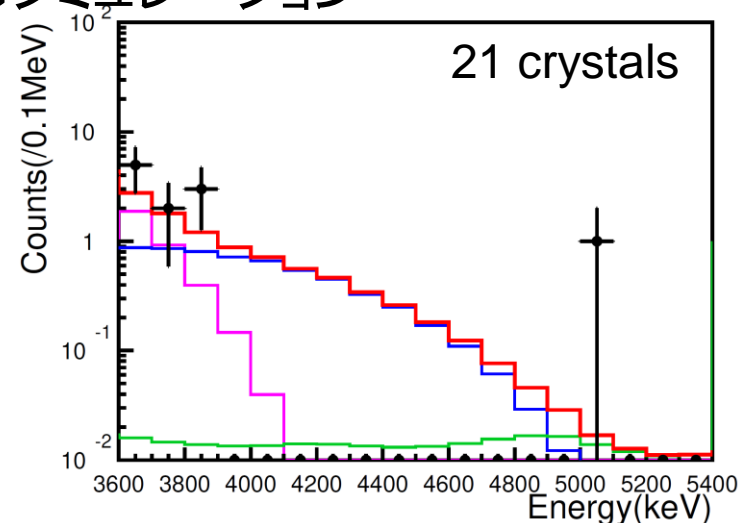
\* 先行検出器ELEGANT VI

測定時間: 4947 kg·day(2年強)

半減期 :  $>5.8 \times 10^{22}$  年

- データ
- 全Simデータ
- 中性子捕獲 $\gamma$ 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

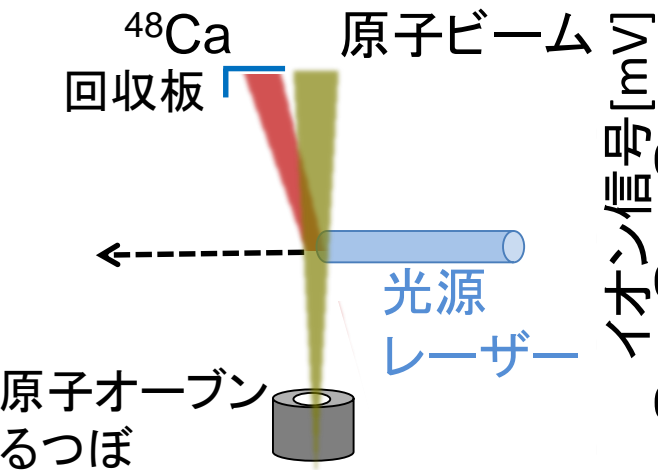




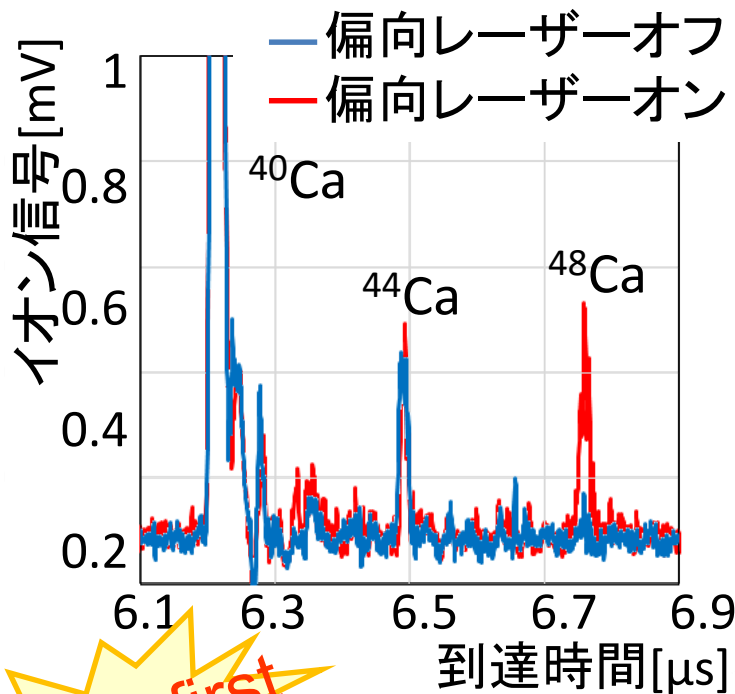
# 濃縮

## □ $^{48}\text{Ca}$ 濃縮

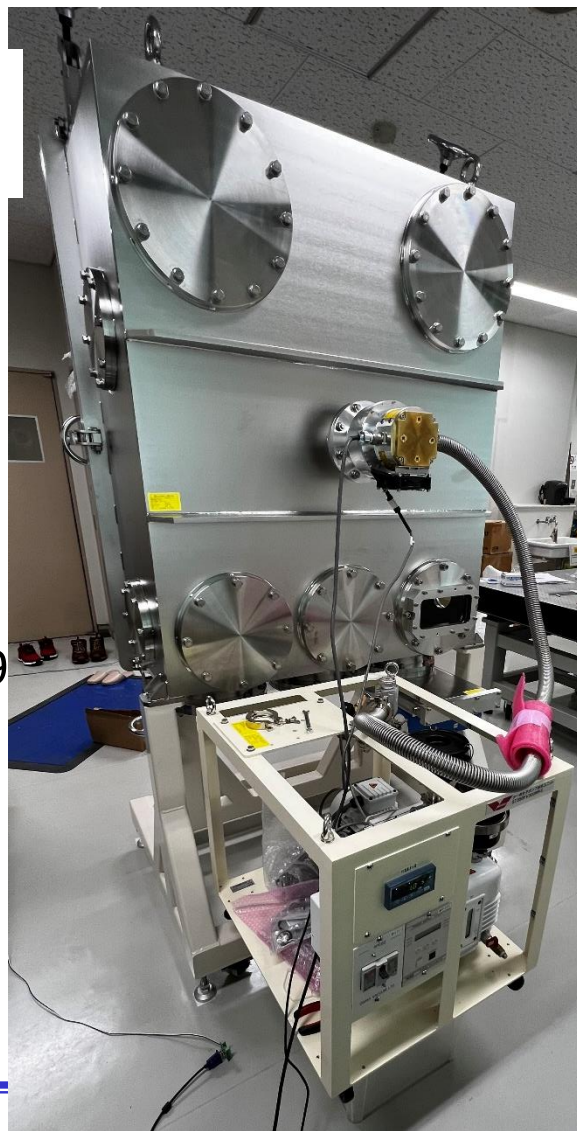
### 装置概略



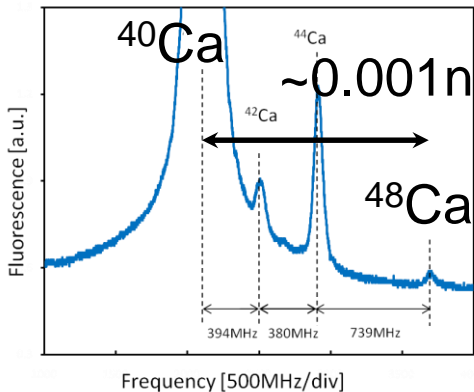
### 質量スペクトル



## 実用装置構築中



### Caの吸収波長スペクトル



**World's first**

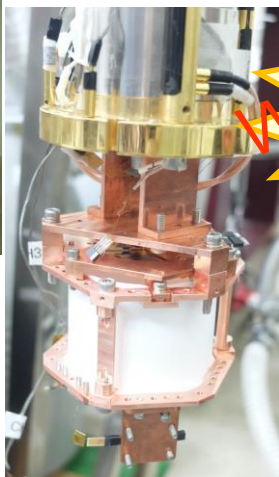
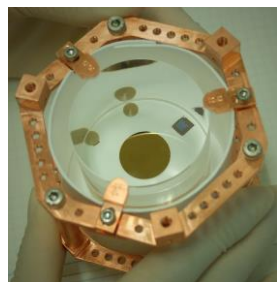
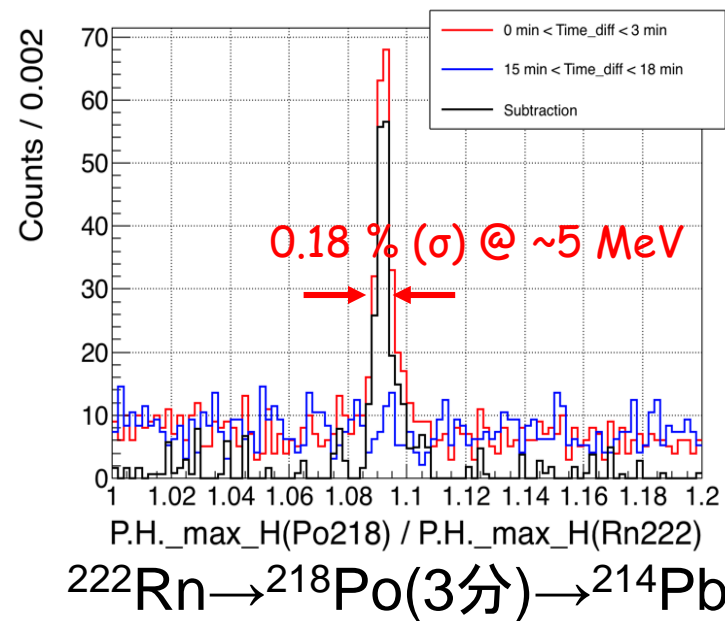
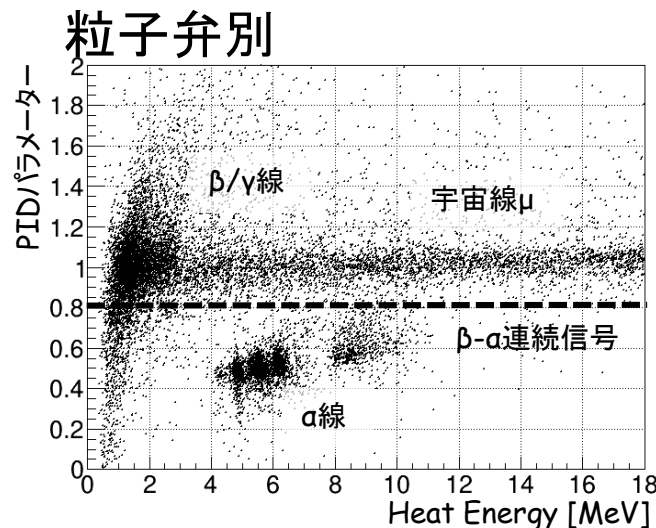
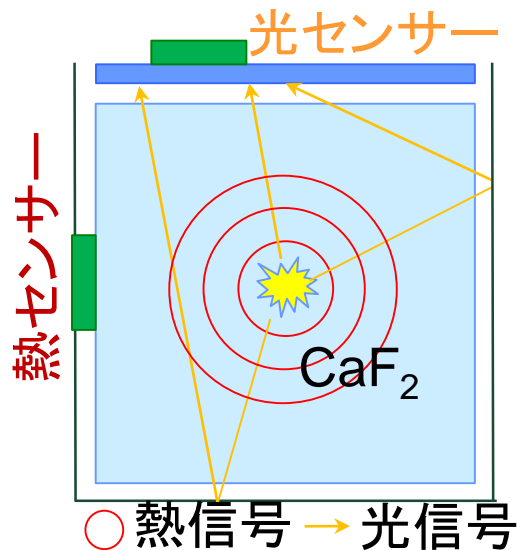
偏向レーザー同位体分離原理検証  
大量濃縮装置の構築中  
要偏向青色レーザーの高出力化

# 蛍光熱量検出器

IBS Kim Yong-Hamb  
AMoRE sub group  
CANDLES sub group

蛍光熱量検出器: 10mKで使用

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



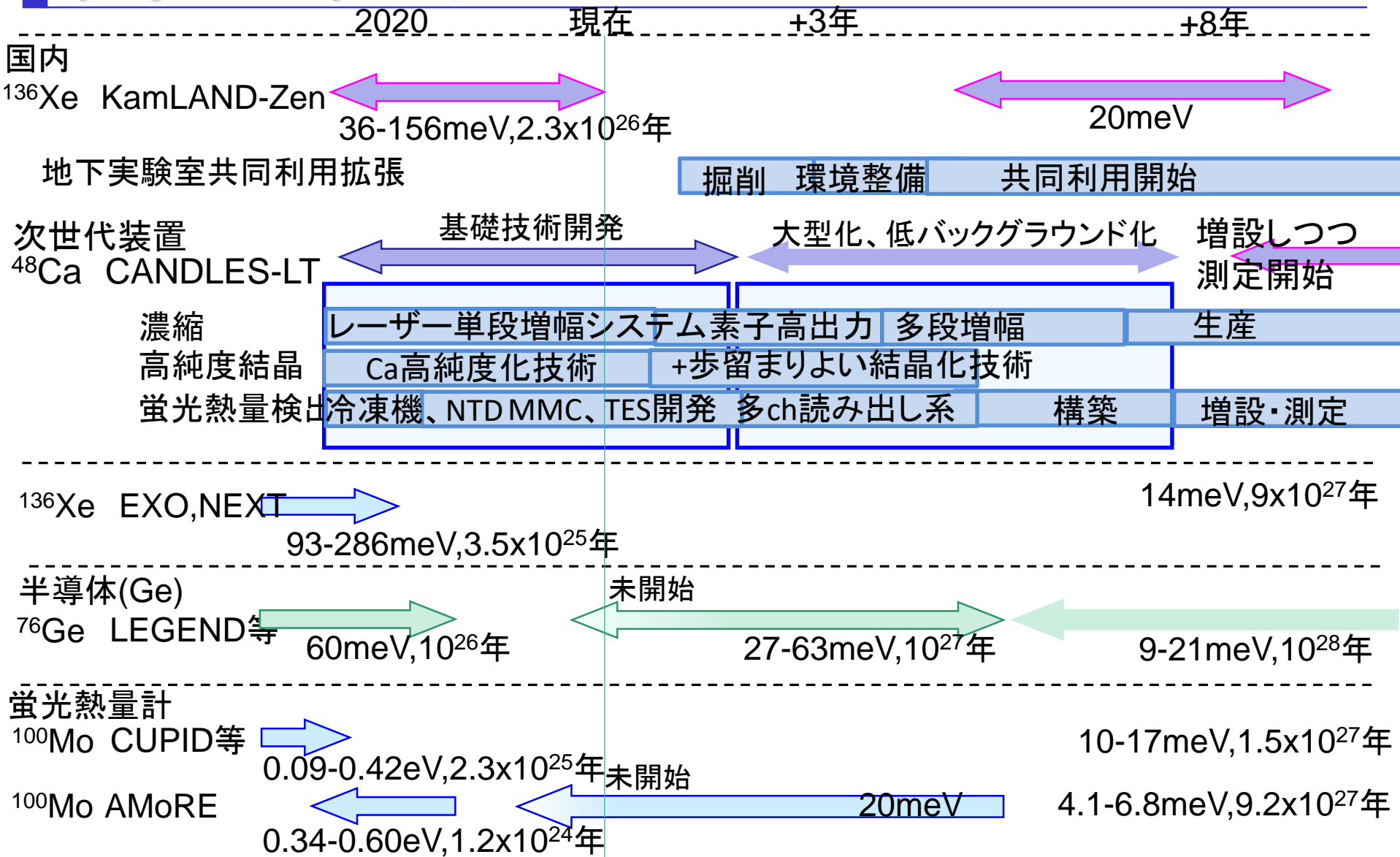
**World's first**

## CaF<sub>2</sub> 蛍光熱量検出器

- 高エネルギー分解能・高い粒子弁別能力実証
- 位置依存性がない場合
  - エネルギー分解能(σ): 0.18% at ~5.0MeV



# タイムスケール



# 超低放射能宇宙素粒子研究施設 技術協力、共同利用

## RCNP

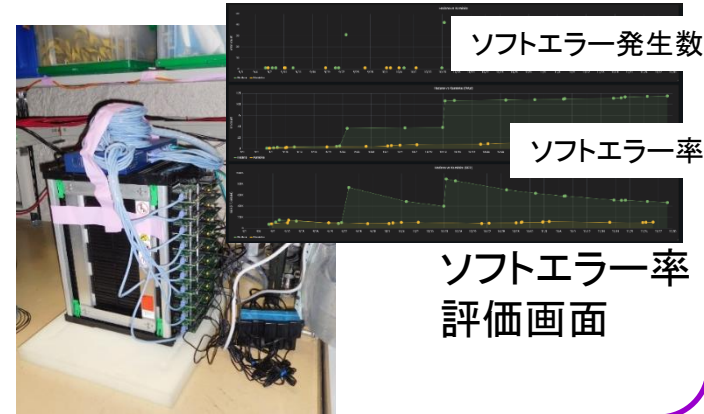
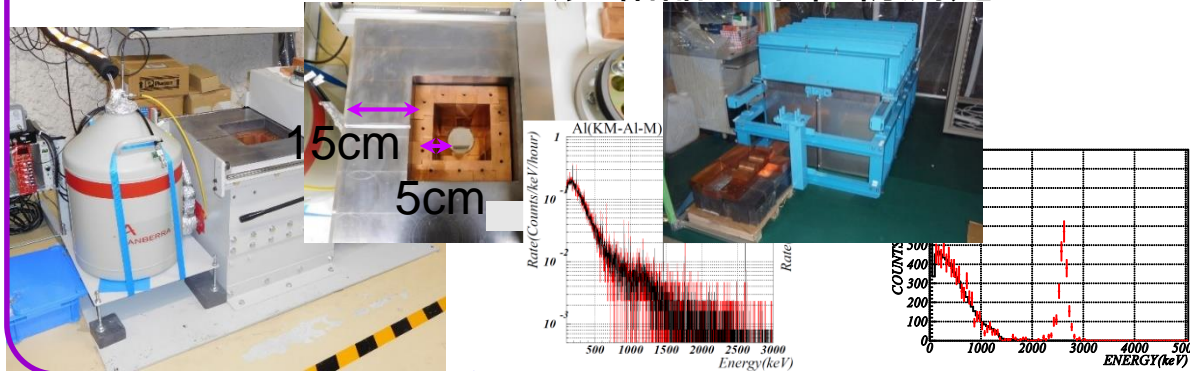
- 地下施設の利用: 低放射能検出器を用いた微量分析など

### ■ 低放射能技術提供

Ge半導体検出器

蛍光結晶の不純物測定

半導体デバイスの放射線耐性評価



## ■ 東北大学ニュートリノ科学研究センター との部局間連携協力協定書

- 2021年締結
- 実験装置の共有
- 研究従事者の受け入れ

## ■ 東京大学宇宙線研究所

# 地下実験 & 二重ベータコミュニティ

## コミュニティの成長

2013

- ・極低バックグラウンド研究者コミュニティ、現在200名：2013年～
- ・DBD国際会議隔年、100名：[double beta decay and underground science]
- ・新学術領域：2014年「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」

2020

- ・新学術領域：2019年「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」
- ・領域研究会、毎年、100～200名
  - ・素粒子原子核理論研究会、150名
  - ・「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺」

原子核

核行列要素(加速器含む)：開催予定

核構造

新学術領域研究会

荷電交換反応

～200人

核行列要素

超低放射能測定

素粒子

ニュートリノ質量

大型低放射能検出器

神岡施設

シーソー機構

二重ベータ崩壊研究

宇宙線

レプトジェネシス

ニュートリノ

暗黒物質

極低放射能コミュニティ(二重ベータ崩壊、暗黒物質、ニュートリノ)の拡大

# まとめ

## □ 二重ベータ崩壊 & 極低放射能

### ■ 二重ベータ崩壊

- マヨラナ性の検証

- 観測されるのも間近

### ■ 日本で大きなコミュニティが成長

- 地下測定: 原子核+素粒子+宇宙線コミュニティ

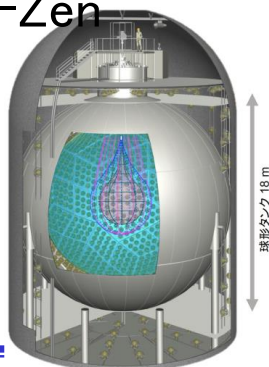
- ELEGANT、KamLAND-Zen、KamLAND2-Zen、次世代装置

- 原子核: 核行列要素 → ニュートリノ質量、原子核の多様性

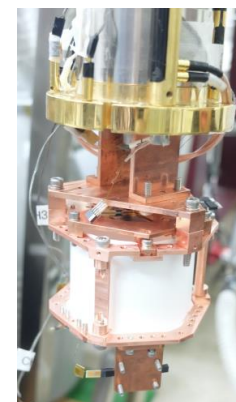
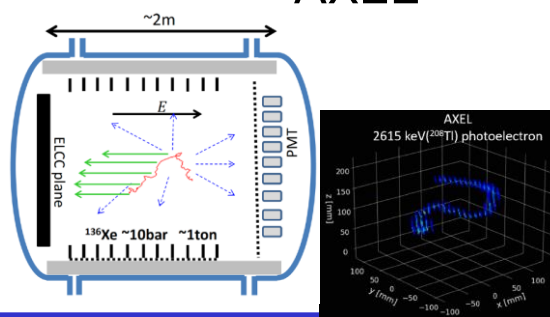
- 素粒子: ニュートリノ質量

### ■ 超低放射能宇宙素粒子研究施設とその共同利用

KamLAND-Zen



AXEL



CANDLES +R&D

