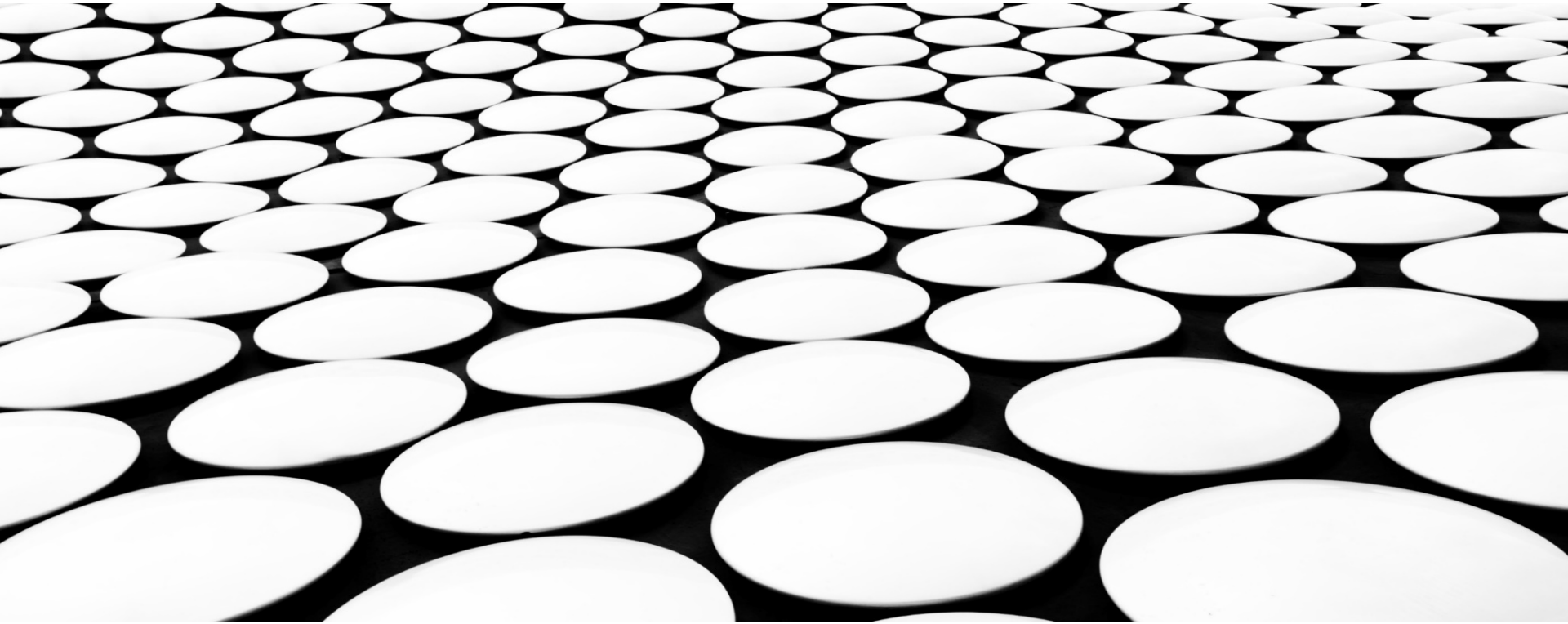
AXEL（あくせる）
A Xenon ElectroLuminescence detector

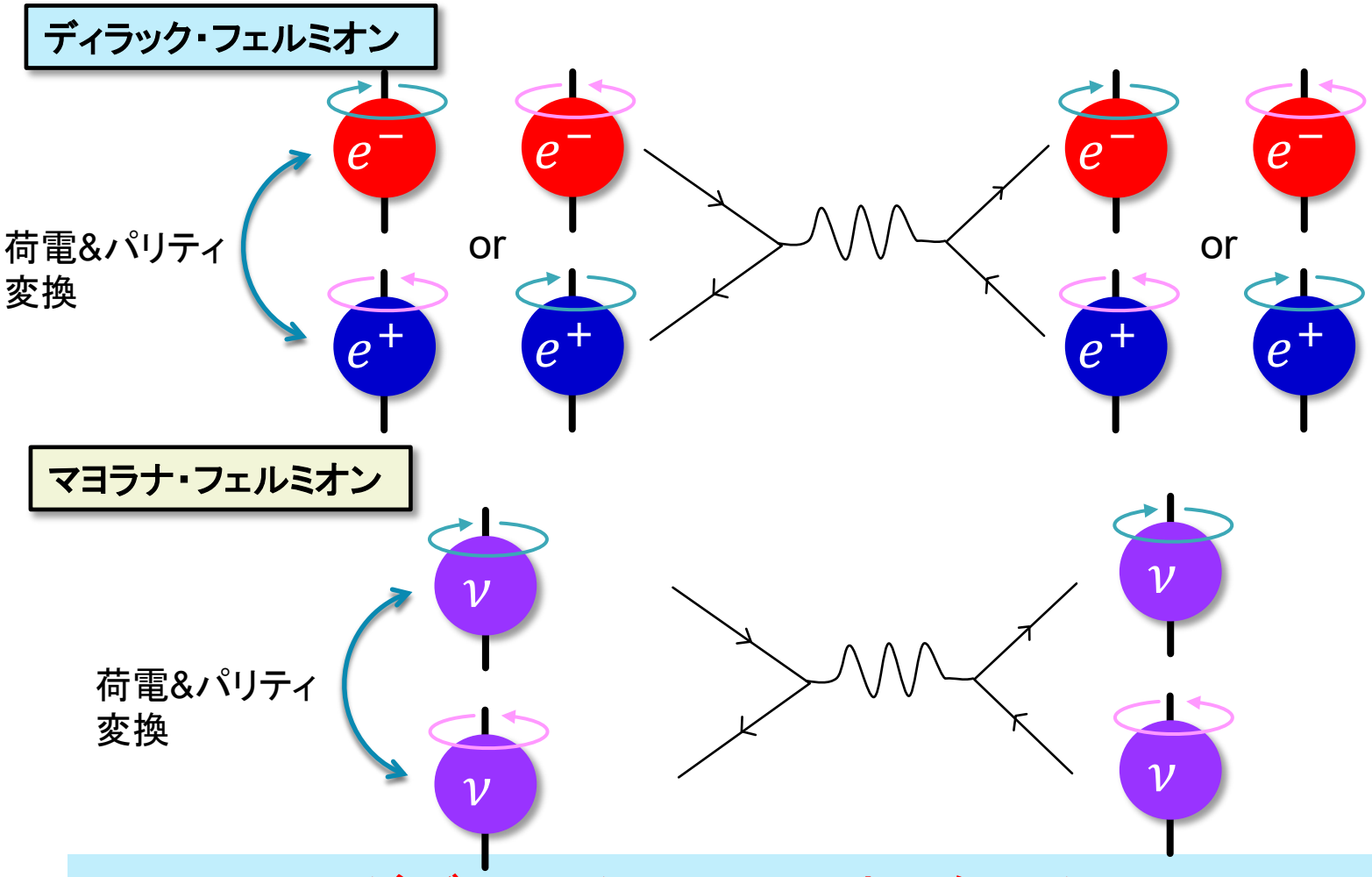
✓ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を見つけたい

✓世界に一つの究極のすごい検出器を自分達で作りたい



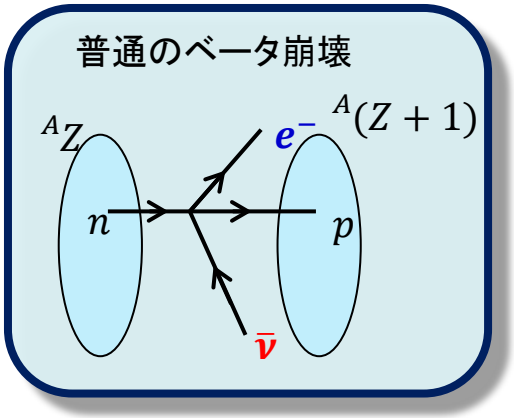
ニュートリノは、他のフェルミオンとはちょっと違うかもしれない

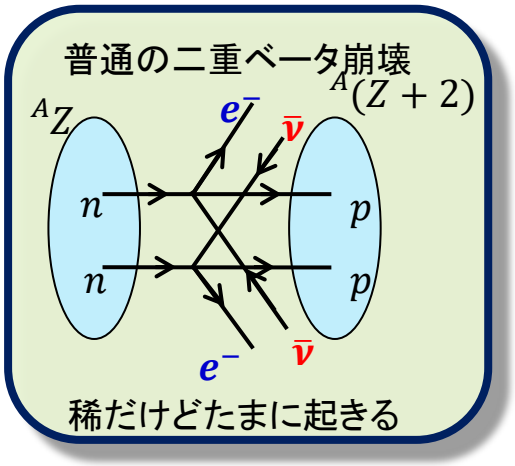
他のフェルミオンより飛び抜けて軽い/混合が大きい/
宇宙の物質・反物質非対称の起源たり得る。

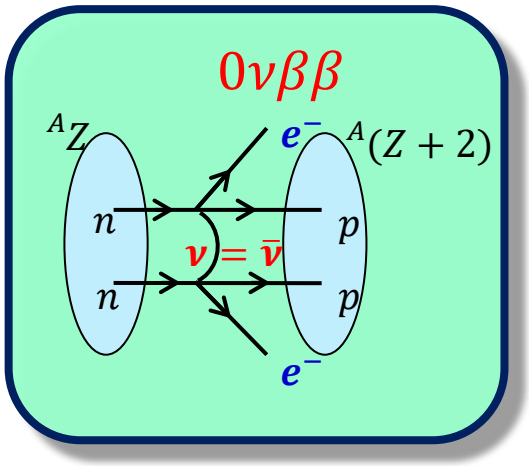


ニュートリノがディラック・フェルミオンなのかマヨラナ・フェルミオンなのかは、わかっていない。

“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”($0\nu\beta\beta$)







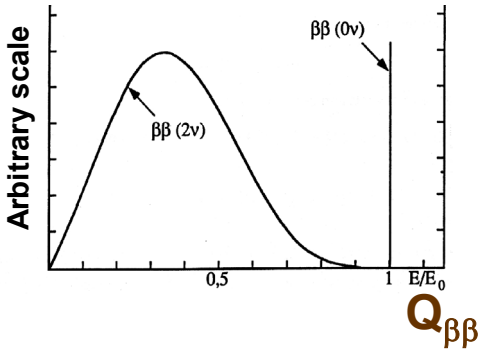
ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる

　　が、まだ見つかっていない.

この反応の起きやすさ $\propto$ (ニュートリノ有効質量)$^{-2}$

　　ニュートリノの質量が小さいため、なかなか起きない

電子2個のエネルギーが一定の値になることで、識別

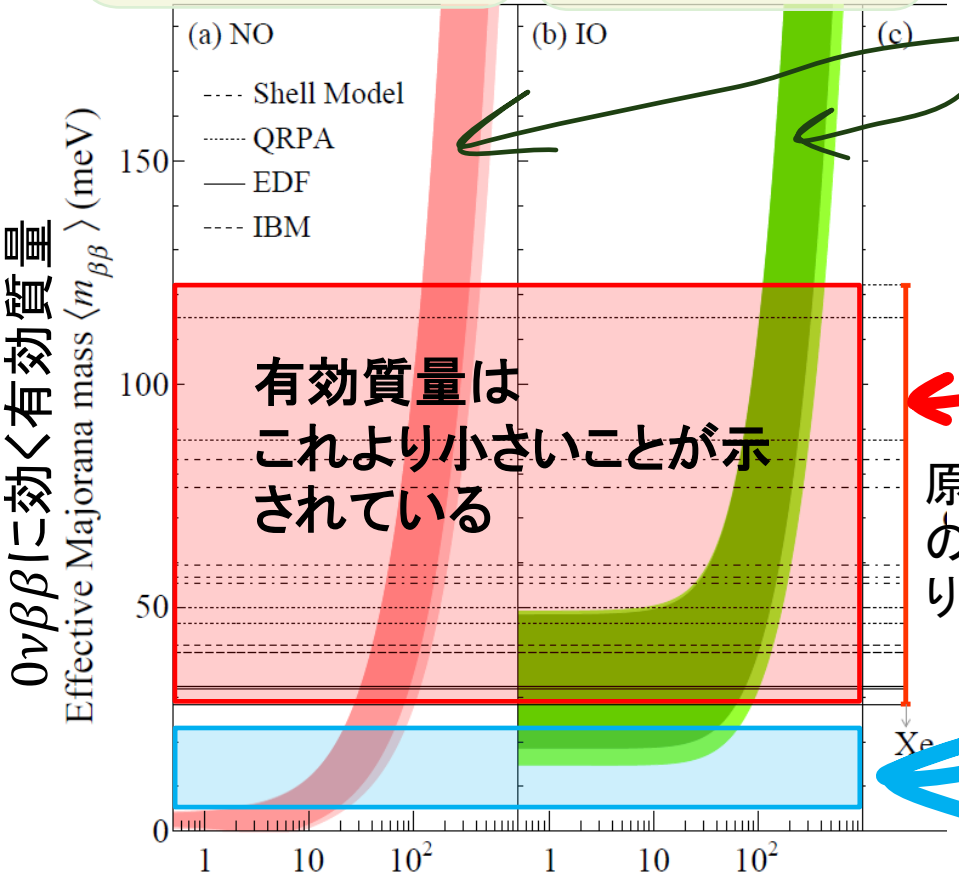


$0\nu\beta\beta$ 世界の現状

ニュートリノの質量のパターン

Normal
$m_1 < m_2 < m_3$の場合

Inverted
$m_3 < m_1 < m_2$の場合



KamLAND-Zen arXiv:2406.11438

ニュートリノ振動から
の制限

KamLAND-Zen
半減値の90%下限値 3.8×10^{26} 年
~2.6 ton-yrで得られた制限

有効質量は
これより小さいことが示
されている

原子核モデル
の不定性によ
り幅がある)

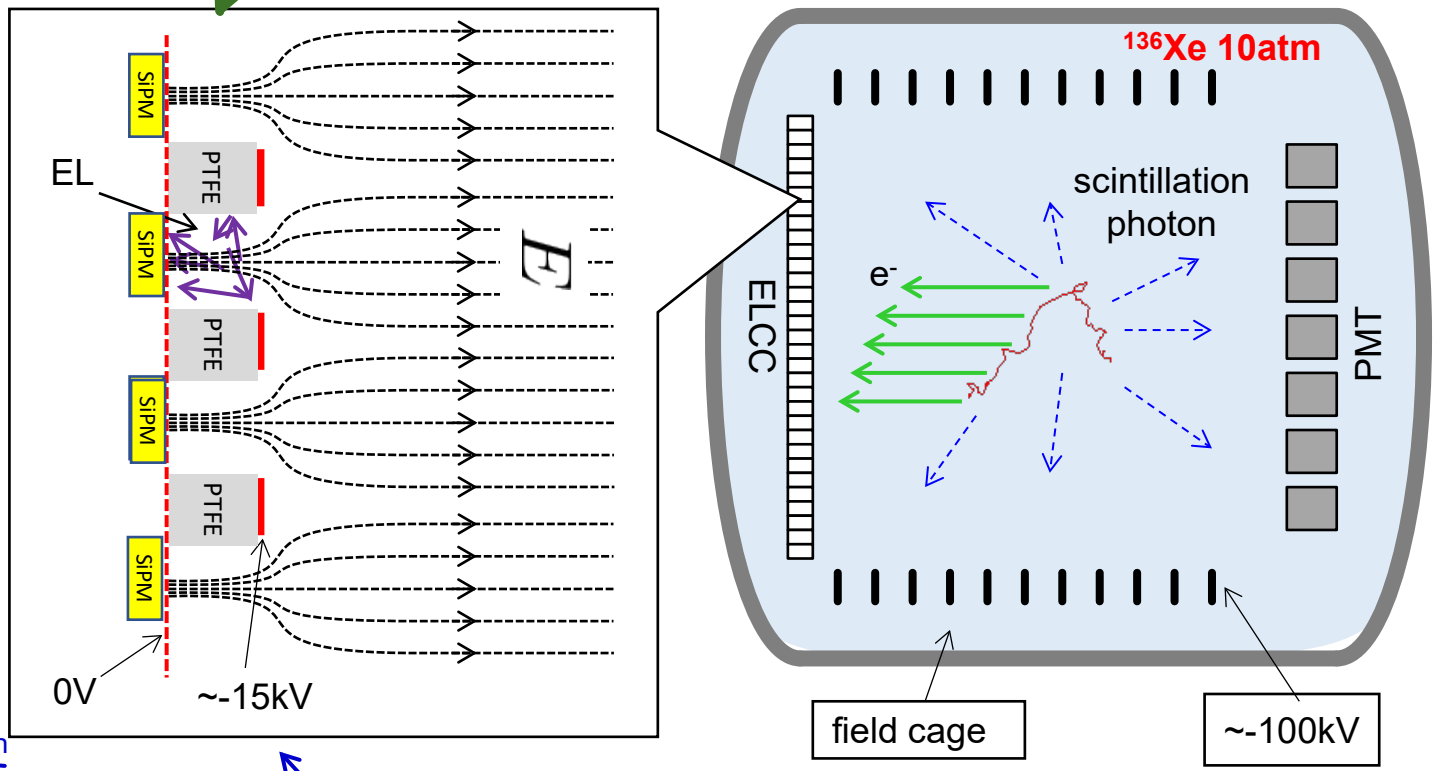
バックグラウンドを
なしにできると

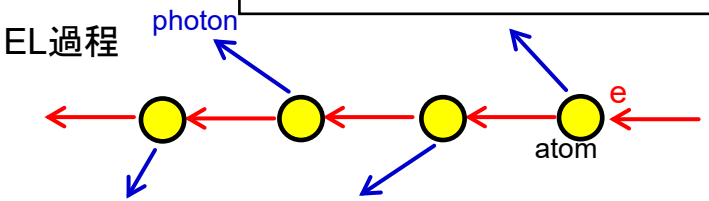
同じデータ量で
47×10^{26} 年の感度。
5 ton-yrだと

AXELが最終的に
目指すは、これ！

Concept

ELCC AXELグループ独自の読み出し機構
これにより、大きな検出器で高いエネルギー分解能を実現





メンバー

- **京都大学**

  疋田純也、佐々木 駿斗、中家剛、木河達也、廣瀬昌憲、岩下芳久

- **東北大学**

  市川温子、中村輝石、秋山 晋一、浦野壮規、初見聡太、芦田　洋輔、エヴァン・リン

- **東京大学**

  潘晟、関谷洋之、中島康博、池田一得、吉田将

- **KEK**

  坂下健、中平武

- **神戸大学**

  身内賢太朗

- **横浜国立大学**

  南野彰宏

Road Map

10 ton scale

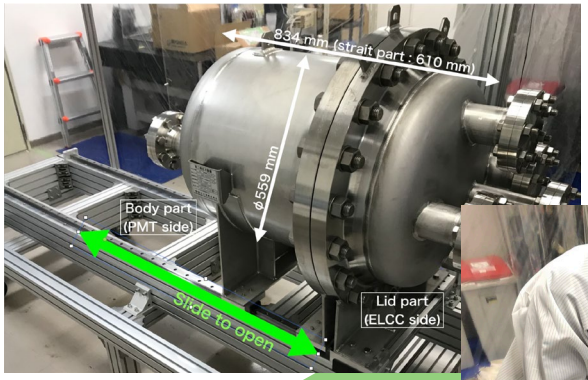
1 ton scale

140kg scale

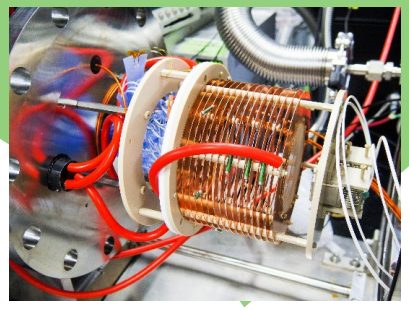
2024–
physics data taking

1000L(24 kg) scale

中国Jinping Labで実験の可能性



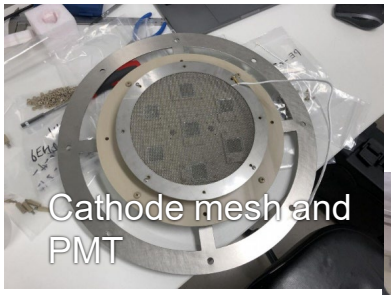
10-L prototype
2014–2018
- ～0.05kg @8bar
- ELCC proof of principle

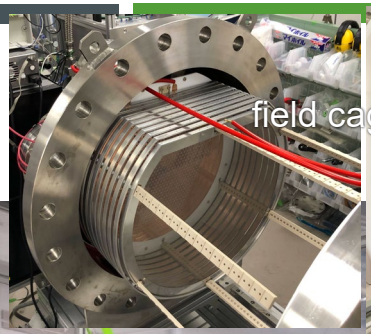


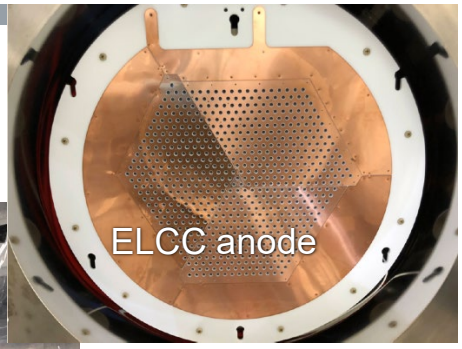
180-L prototype
2018–2021
- ～4.5kg @8bar

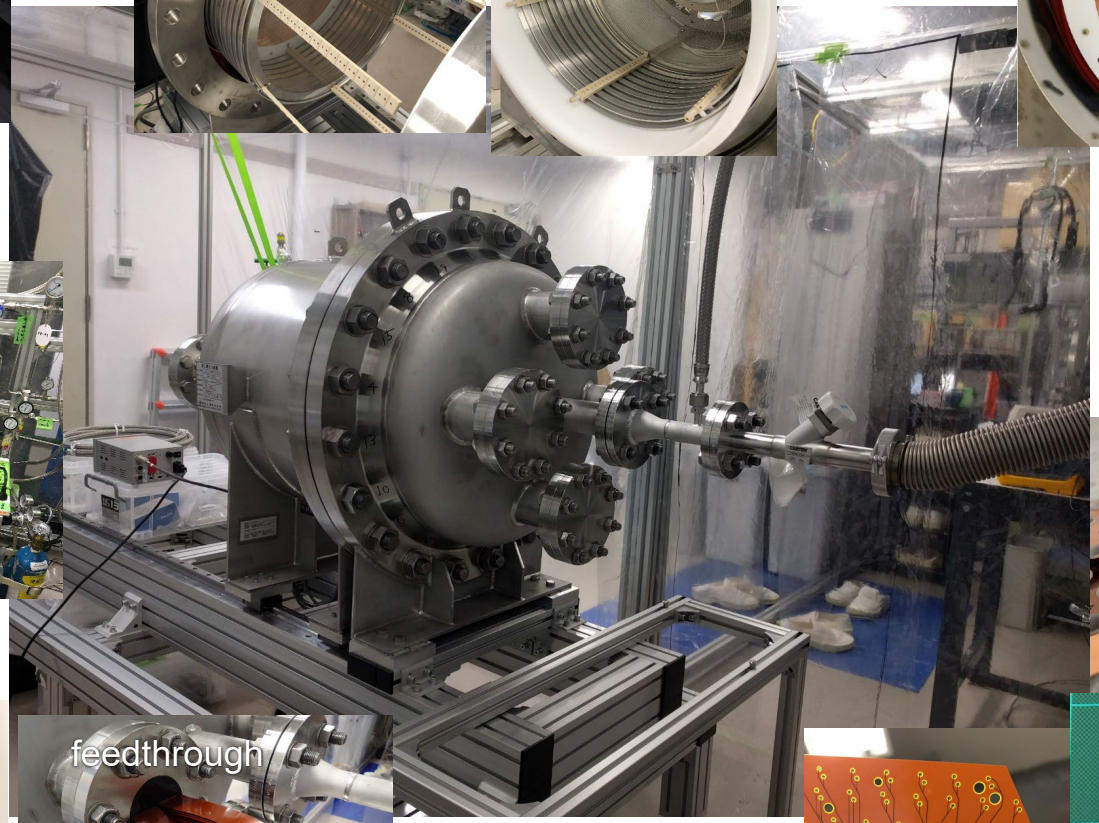
phase-1 : 168 ch
phase-2 : 672ch

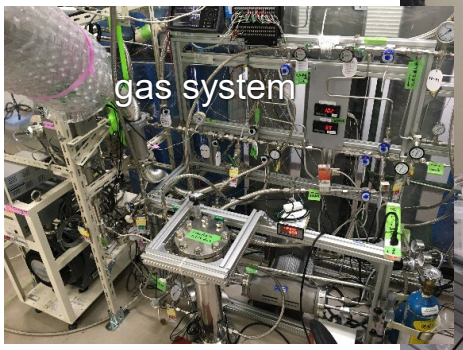
180L検出器: 先輩たちの汗と涙の結晶

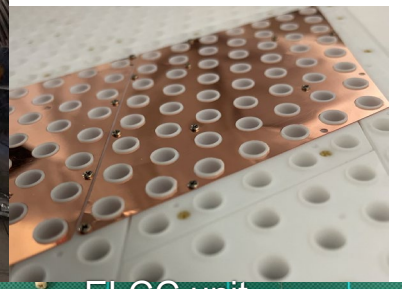


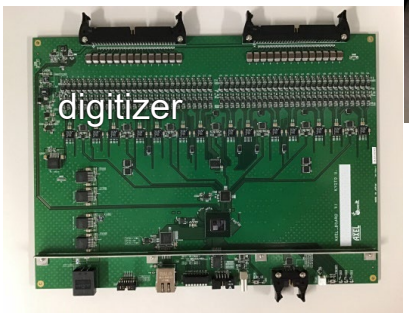


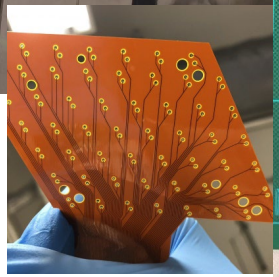


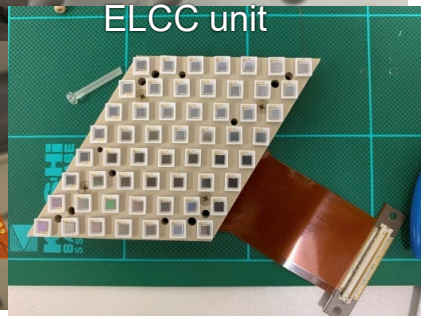




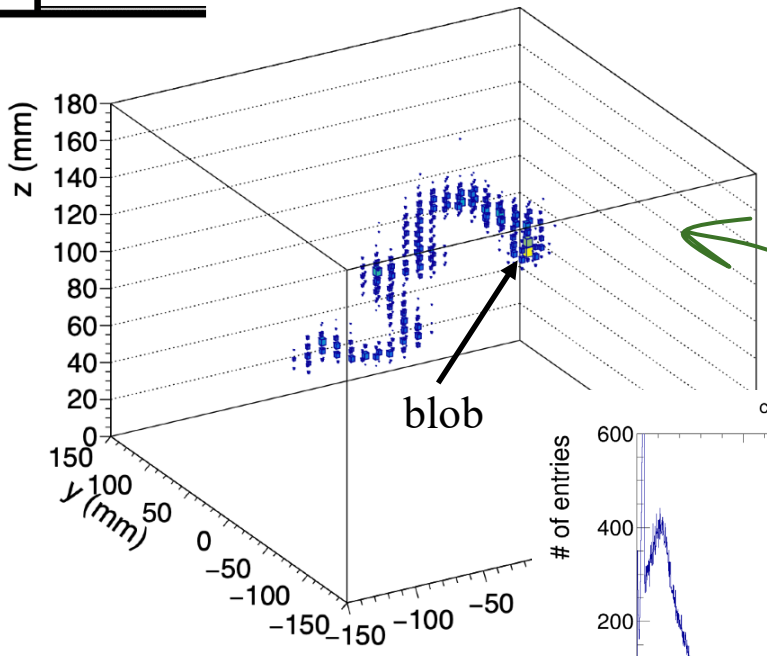


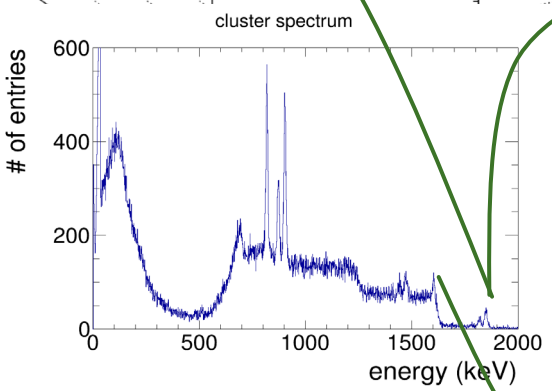


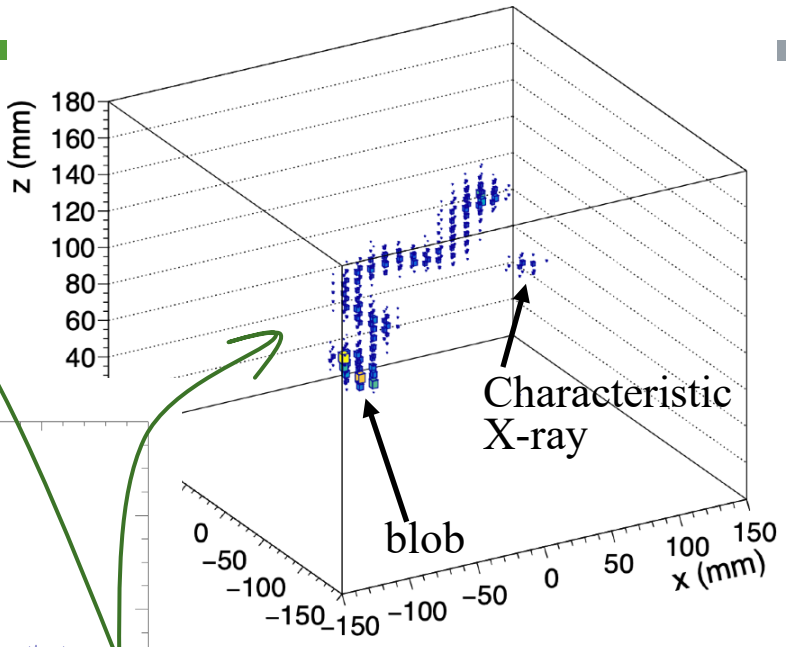




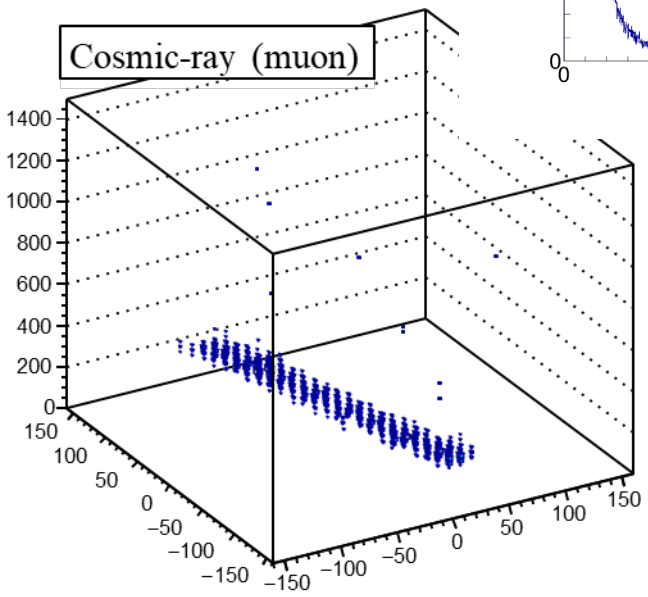
HP180L



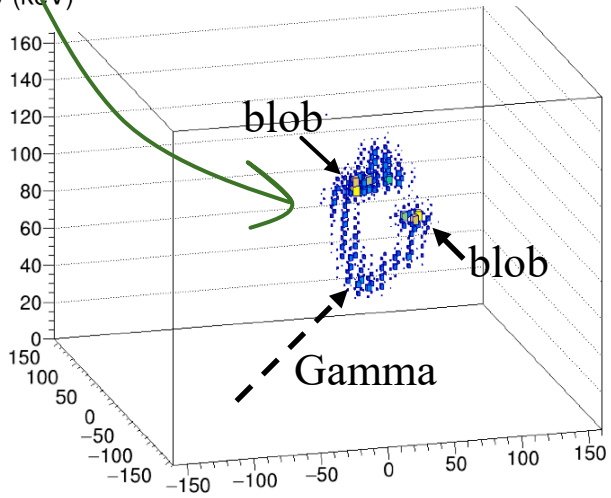




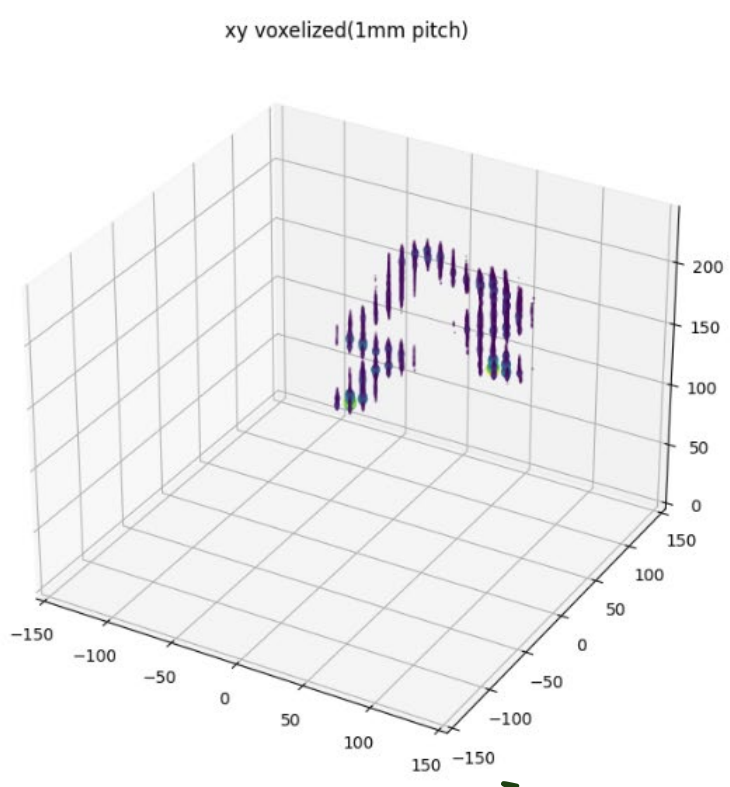
Cosmic-ray (muon)

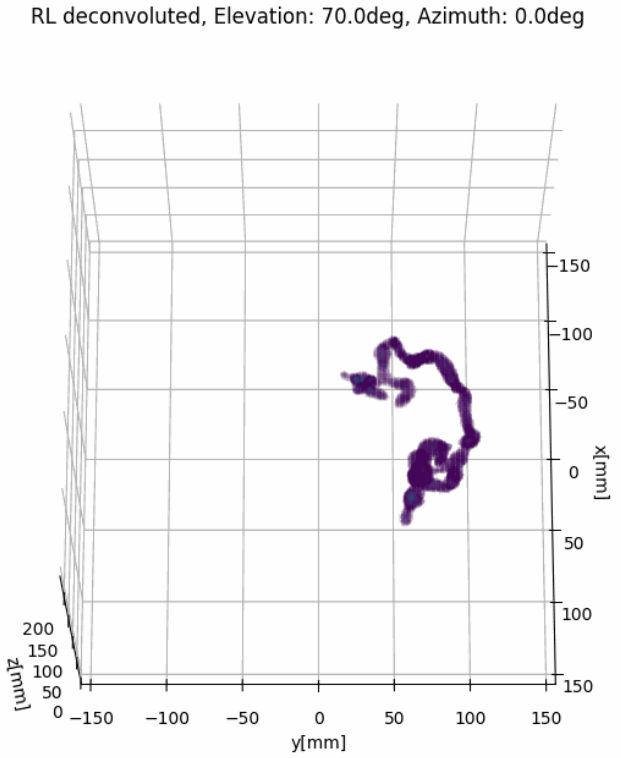


Double escape of pair creation (2.6MeV, ^{208}Tl)



180L prototype 2.6 MeV Track image





逆畳み込みアルゴリズムで

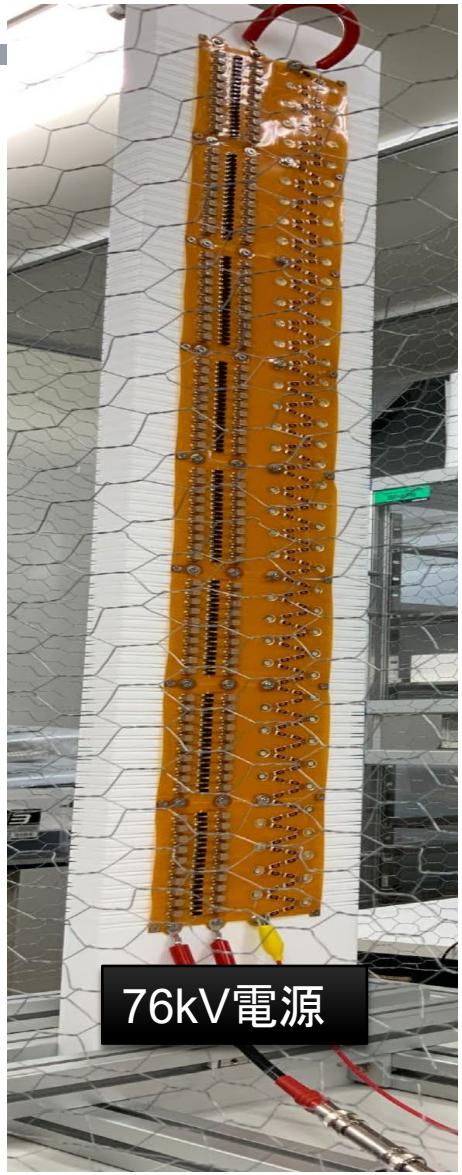
今後3～4年間の予定

- ✓世界記録であるニュートリノ有効質量領域100meV/c2 を超えて0νββを探索できる検出器技術をほぼ確立。
- ✓ 大型化に向けてやることあり。
- ✓今後、1~2年で1000L検出器を（部分的に）製作し、物理測定開始
- ✓ PandaXグループと協力することで3~5年で140kg検出器による測定を始めることを目指す。
- ✓1トン検出器の実現も目指す。

  世界の他の実験グループと議論を開始している。

修士の学生さんのテーマ例

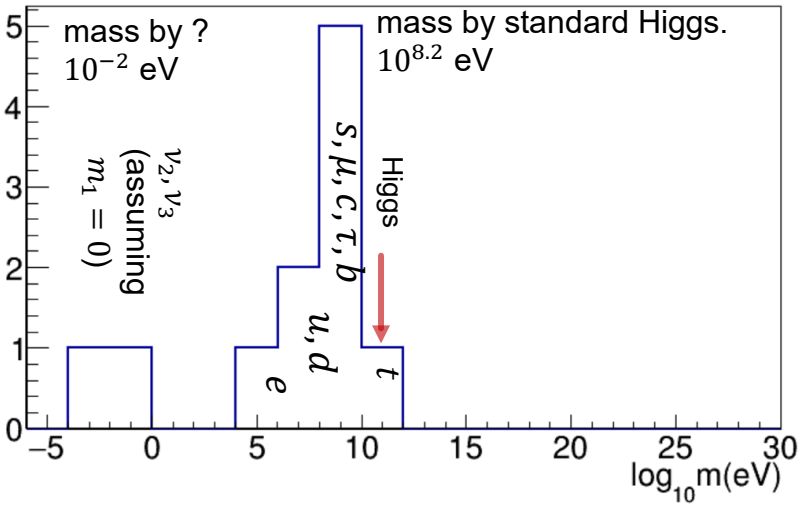
- ELCC
  疋田凸型ELCCの大量生産に向けて、Flexible Print Circuitでトライ
- 低バックグラウンド高電圧生成回路
- データ取得系
  特に、トリガーのファームウェア
- シミュレーションによるエネルギー分解能の理解
  digitizerの影響、ヒット閾値の影響など
- 1000L検出器の建設、立ち上げ
- 飛跡パターン解析
  逆畳み込み後のエネルギー補正
  逆畳み込み後の機械学習
  グラフネットワークによる飛跡領域の拡大
- PandaX 140kg実験の設計

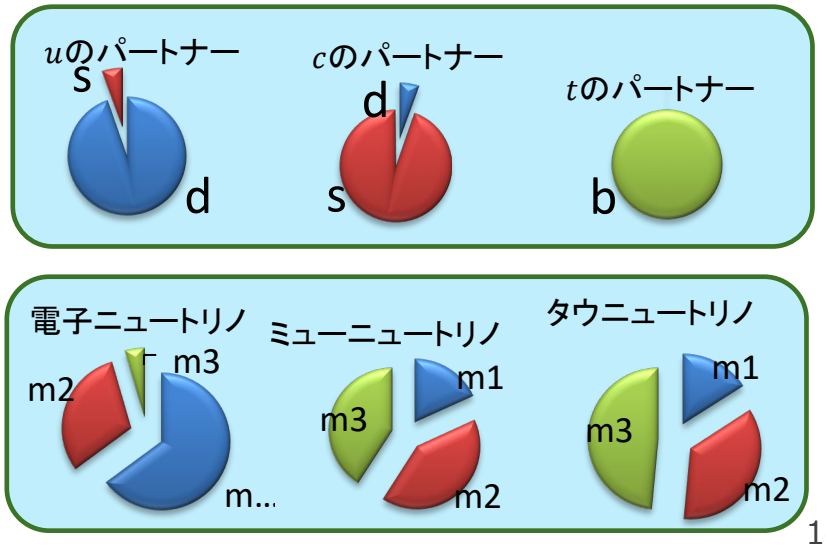


ニュートリノの質量が変なのはなぜか？

- フェルミオン（クォーク、荷電レプトン（電子、ミュー、タウ））の質量
  - 真空中に凝縮したヒッグス粒子と相互作用することで右巻き状態⇔左巻き状態の絡まった質量を持つ状態に

    クォークの質量の固有状態とフレーバーはまあまあ一致。
  - 標準理論ではニュートリノは、左巻きしかないので、質量を持てない。
- ニュートリノ振動の発見　⇒　ニュートリノも質量を持つ！
  - が、飛びぬけて小さい
  - レプトンは質量の固有状態とフレーバーがぐちゃぐちゃ





ニュートリノの変な質量、そして宇宙の物質・反物質非対称を説明する有力な理論模型は、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを要請

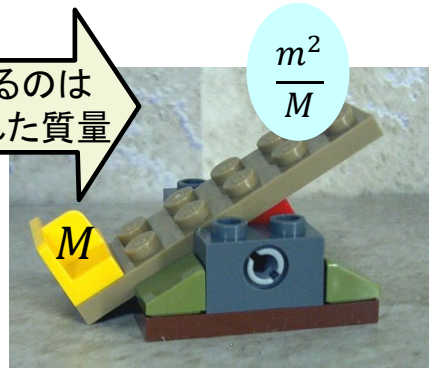
シーソー模型

ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子=反粒子)で、重い右巻きマヨラナ質量を持つと

$$\left(\overline{\nu_L}, \overline{(\nu_R)^c}\right)\begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}\begin{pmatrix} (\nu_L)^c \\ \nu_R \end{pmatrix}$$

Dirac mass ~1MeV　　Majorana mass

観測されるのは
対角化された質量



クォークの混合行列との違いもこれに起因？

10^8 ~10^{15} GeVのN_R(右巻きニュートリノ)が存在

レプトジェネシス

- N_R(重い右巻きニュートリノ)の崩壊で軽いνとHiggsを生成。この時にCPの破れ→レプトン数の生成（重い。混合角が大きい可能性大）
- スファレロン過程（標準理論で許される過程。）

  宇宙初期の真空の遷移で、B−Lを一定に保った状態で粒子を生成。レプトン数→バリオン数が生成

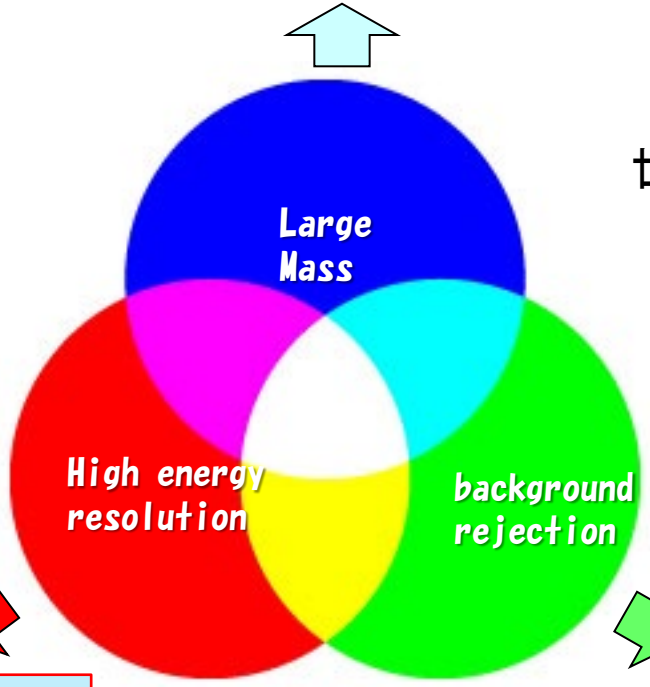
ニュートリノがマヨラナ粒子であることを示す！(または否定する！)ことが重要

高圧キセノンガスによるタイムプロジェクションチェンバーは、オールラウンドプレーヤー

^{136}Xe

abundance : 8.9%

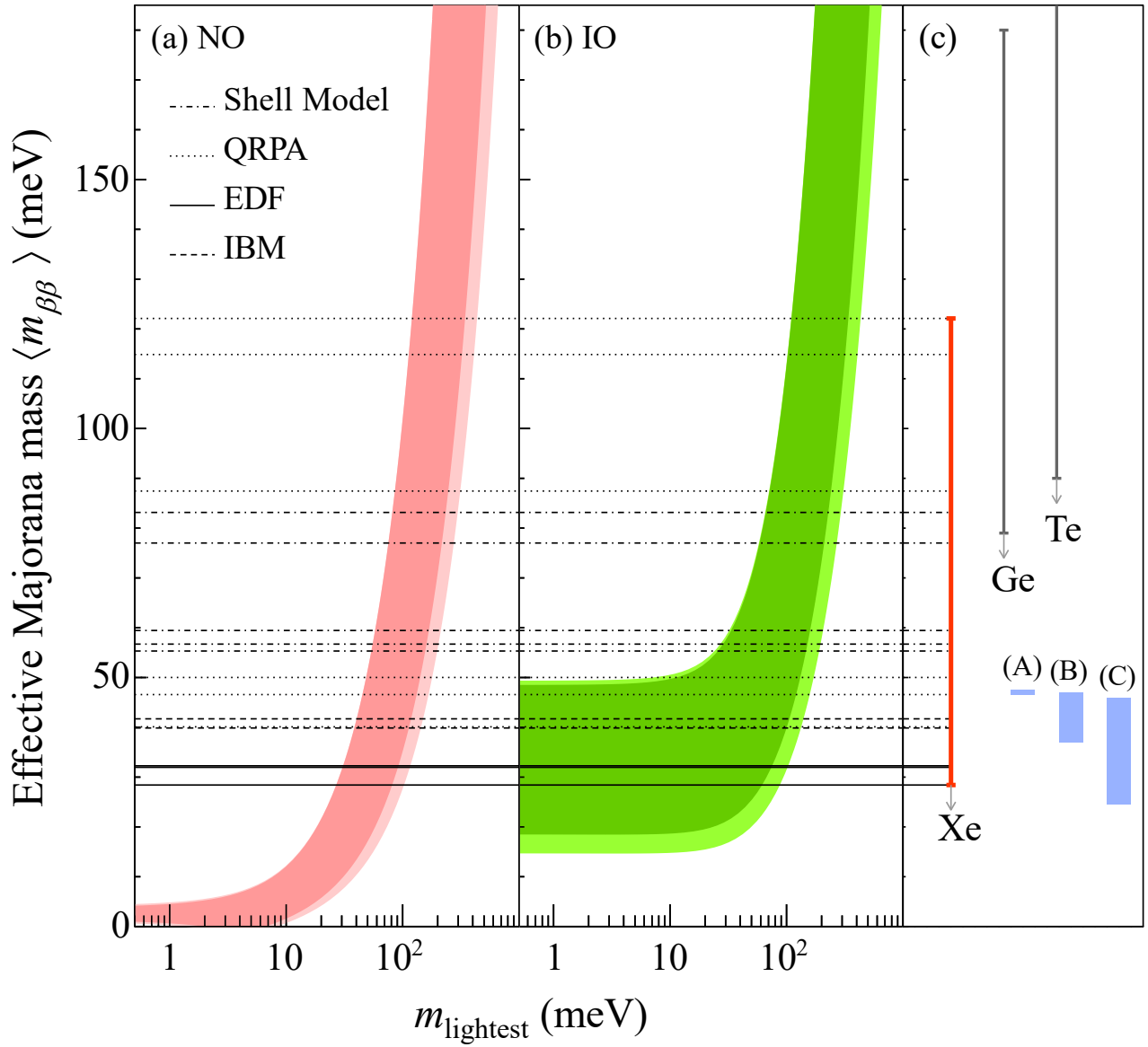
$Q_{\beta\beta} = 2.46$ MeV



世界一のすごい検出器を！

希ガスの電離電子

電子が2本走っているのを捉える


(a) NO
(b) IO
(c)
Shell Model
QRPA
EDF
IBM
Effective Majorana mass $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV)
150
100
50
0
1
10
10^2
m_{lightest} (meV)
Ge
Te
Xe
(A)
(B)
(C)