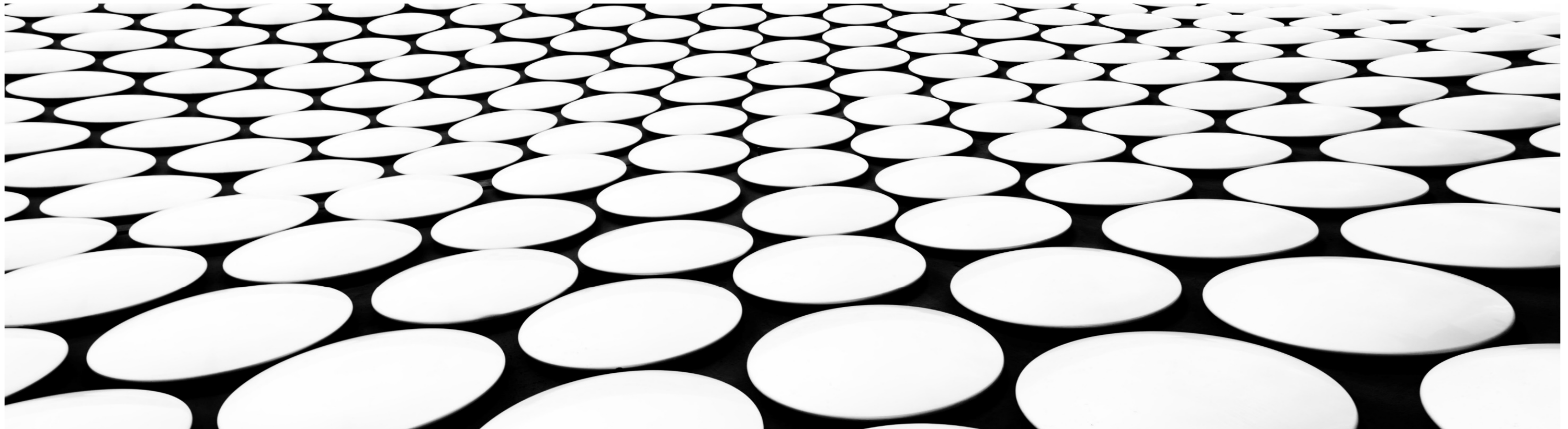


AXEL (あくせる)

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で作りたい



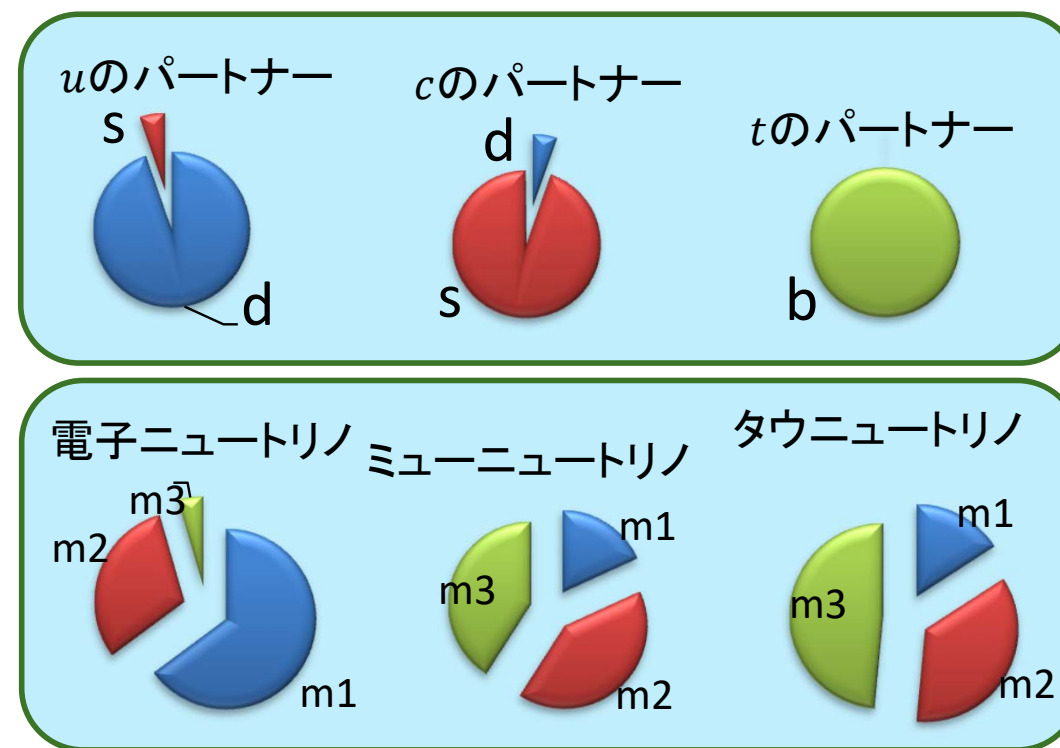
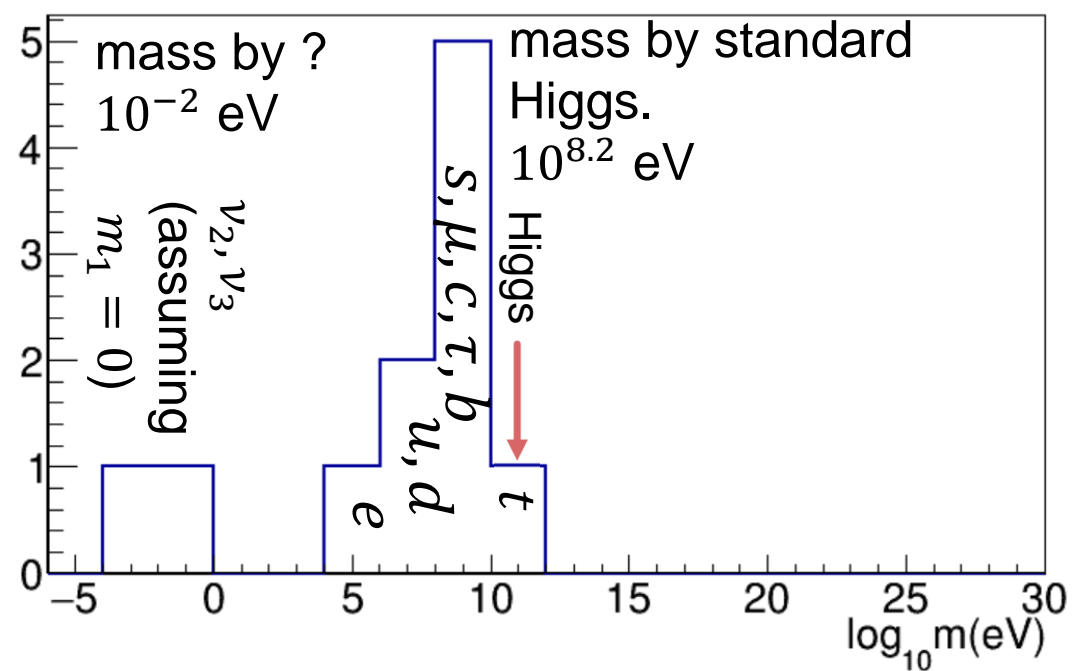


なぜニュートリノ？



質量が変。

- 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 \leftrightarrow 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、質量を持ってない。
- ニュートリノ振動の発見 \Rightarrow 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

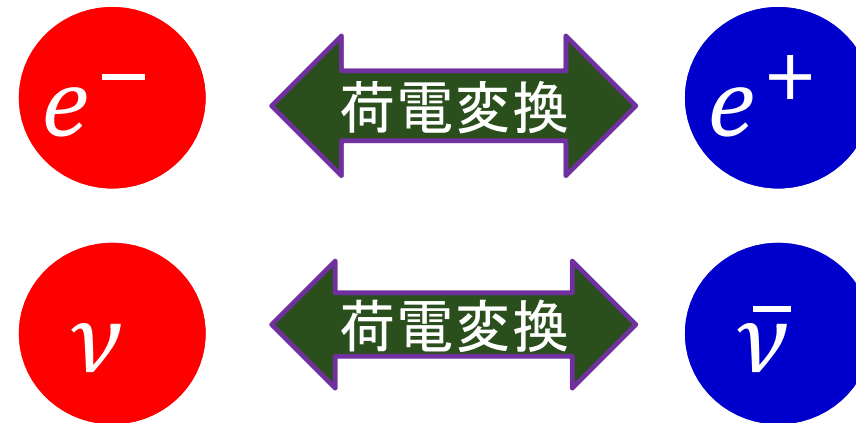


ニュートリノは、他のフェルミオンとはちょっと違うかもしれない。



エットレ・マヨラナ
1906年 - 1938年に行方不明
“中性フェルミオンは自身の反粒子になり得る”

ディラック・フェルミオン



マヨラナ・フェルミオン



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。

シーソー機構？

Minkowski('77), Yanagita('79), GellMann, Ramondo, Slansky('79),Glashow('79)

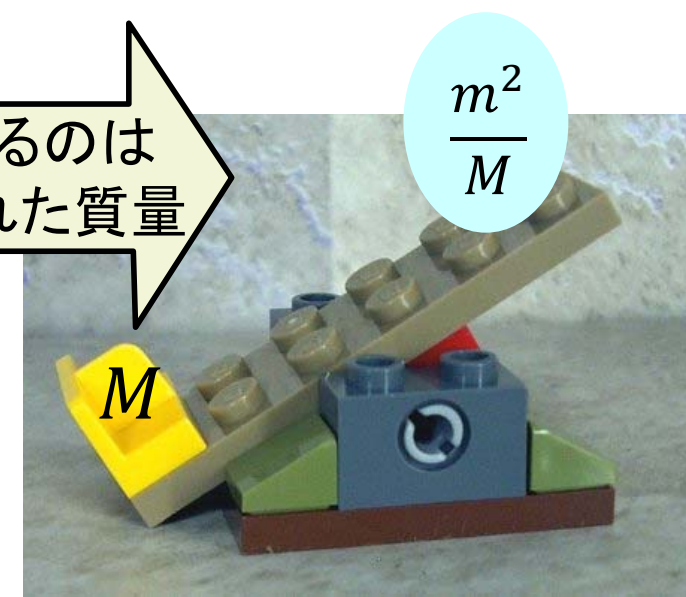
ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子=反粒子)で、重い右巻きマヨラナ質量を持つと

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

Dirac mass
~1MeV

Majorana mass

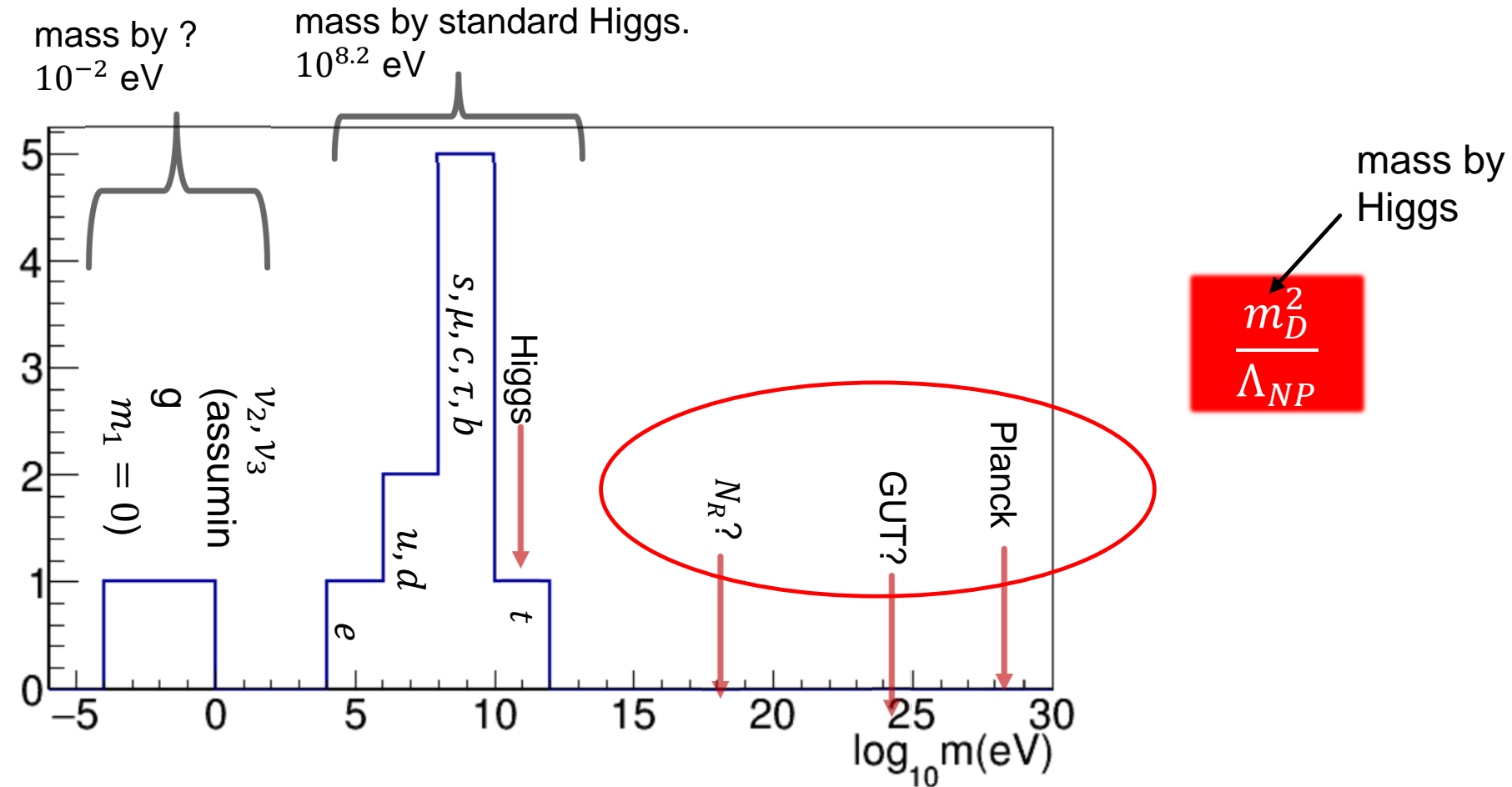
観測されるのは
対角化された質量



クォークの混合行列との違いもこれに起因？

$10^8 \sim 10^{15}$ GeVの N_R (右巻きニュートリノ)が存在

ニュートリノの変な質量は、高いエネルギースケールの物理による？



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

宇宙には、なぜ反物質がない????

- 宇宙の始まりには、クォークもレプトンもなかった。宇宙創成の時のエネルギーから、クォーク・反クォーク、レプトン・反レプトンが生成。
- では、宇宙には、同じ数だけの物質と反物質が存在するはず。
- 身の回りには、物質しか見当たらない。

現代科学で未解決の謎

物質優勢宇宙の起源？レプトジェネシス

■ 宇宙生成時

クォーク数 : 反クォーク数 = 100000000001 : 100000000000

この差(10^{-9})を説明するのに標準理論のCPの破れでは7桁足りない。 (10^{-16}) しか生成できない (軽すぎる。混合角が小さい)

■ 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。) <http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2017/09/72-09trends.pdf>

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

■ シーソーで仮定される N_R は、ちょうどいい重さらしい

■ レプトジェネシスは、現在の物質・反物質非対称宇宙を作り得る最も有力な模型。

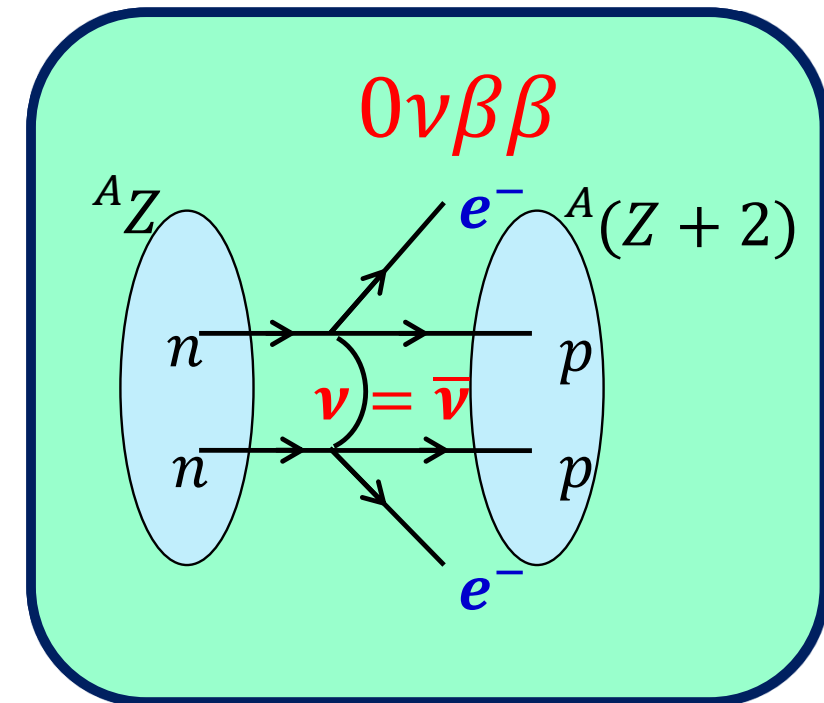
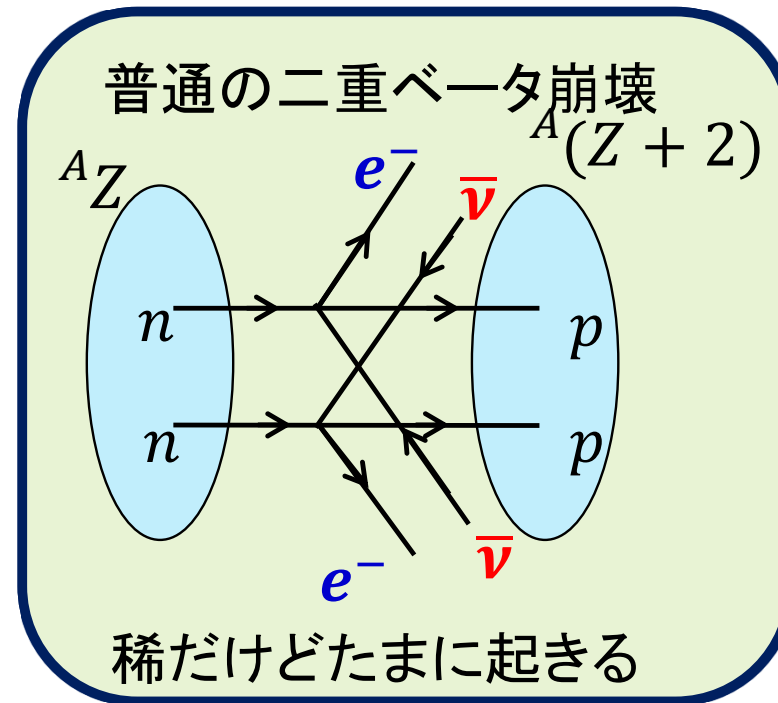
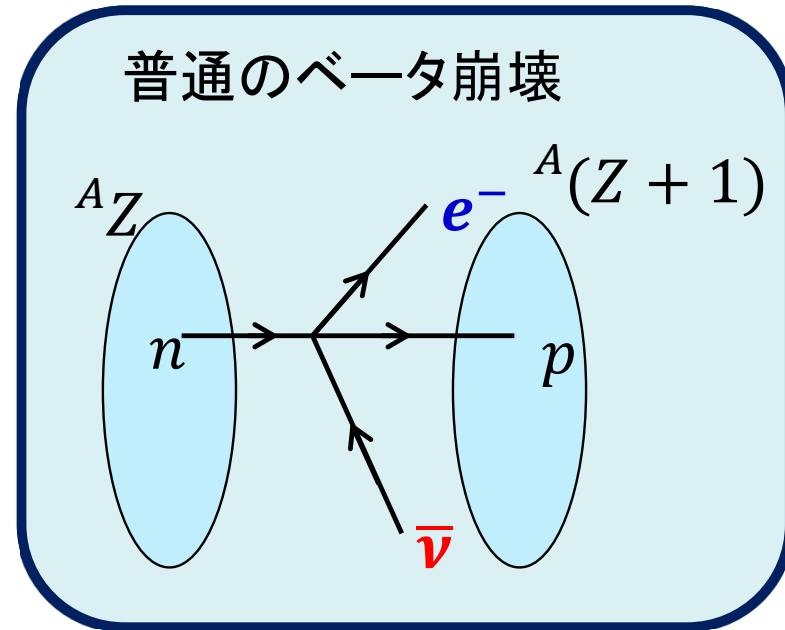
ニュートリノがマヨラナ粒子であることを示す！(または否定する！)ことが重要

なぜ

“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”？



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

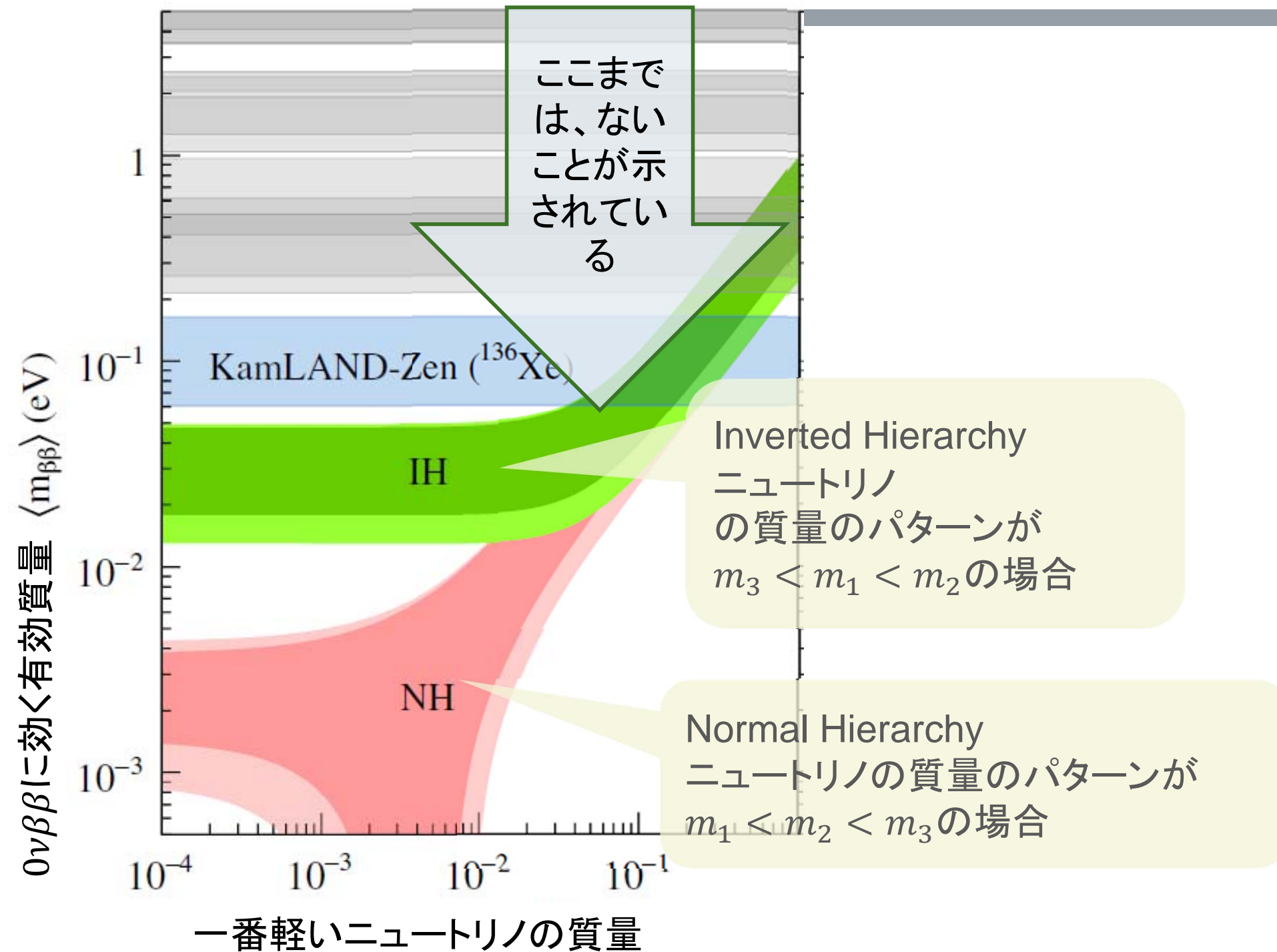


ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる
が、まだ見つかっていない。

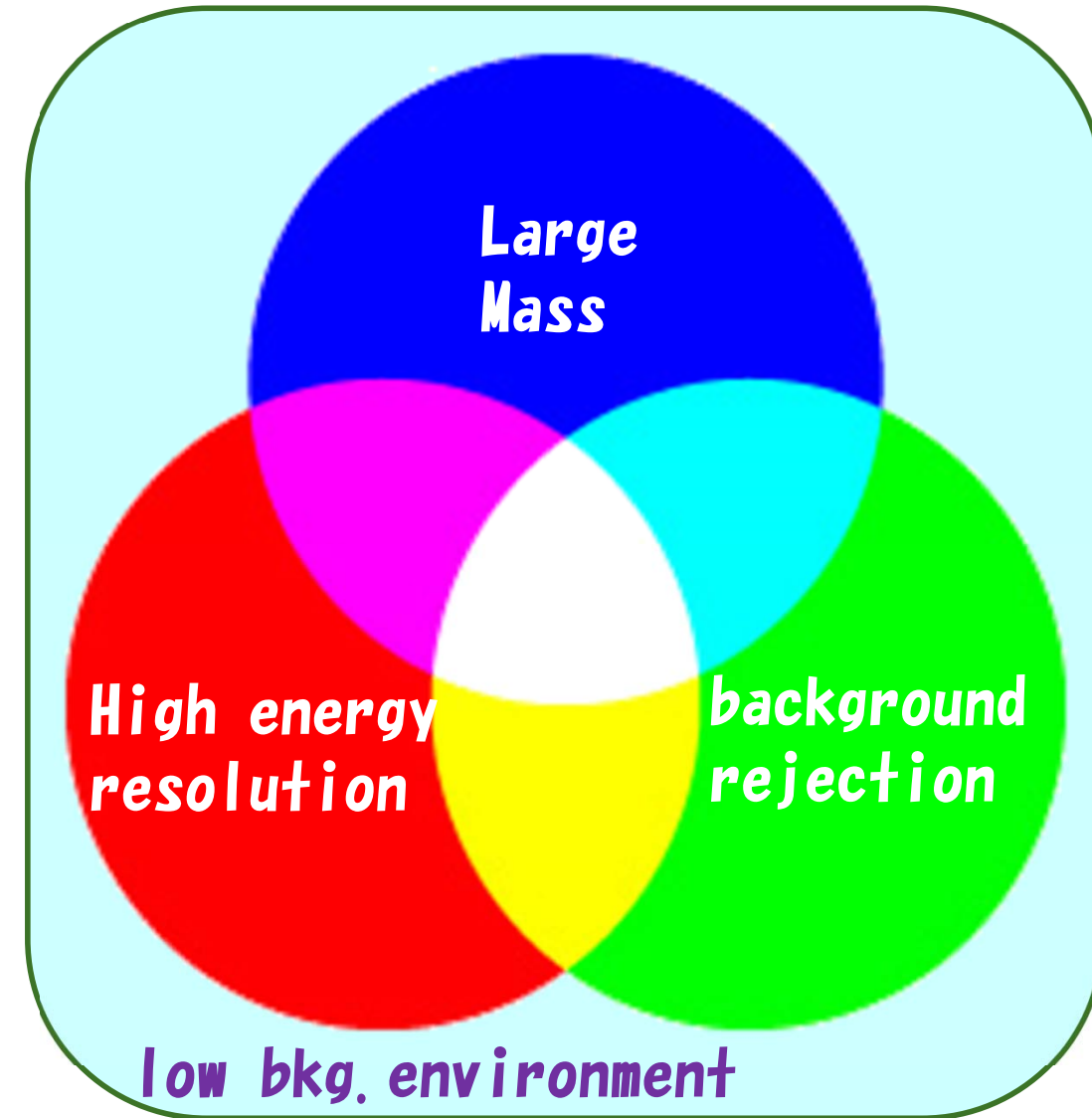
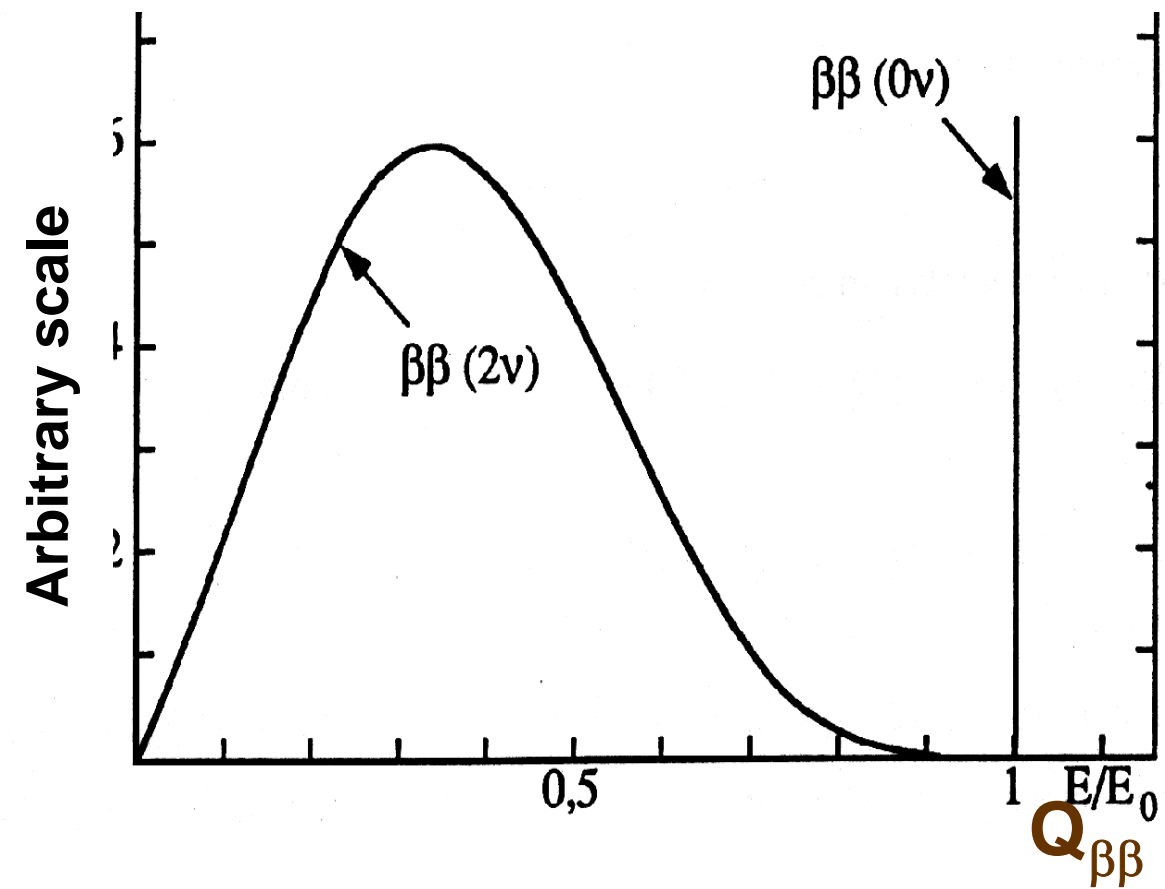
この反応の起きやすさ \propto (ニュートリノ有効質量) $^{-2}$
ニュートリノの質量が小さいため、なかなか起きない

現状

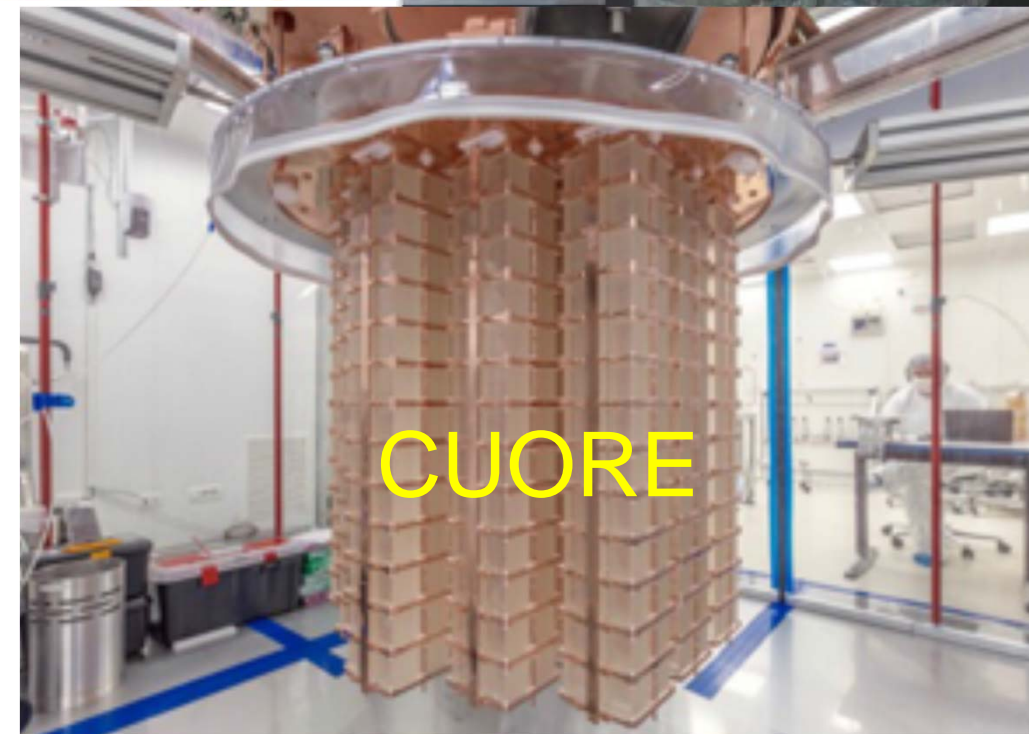
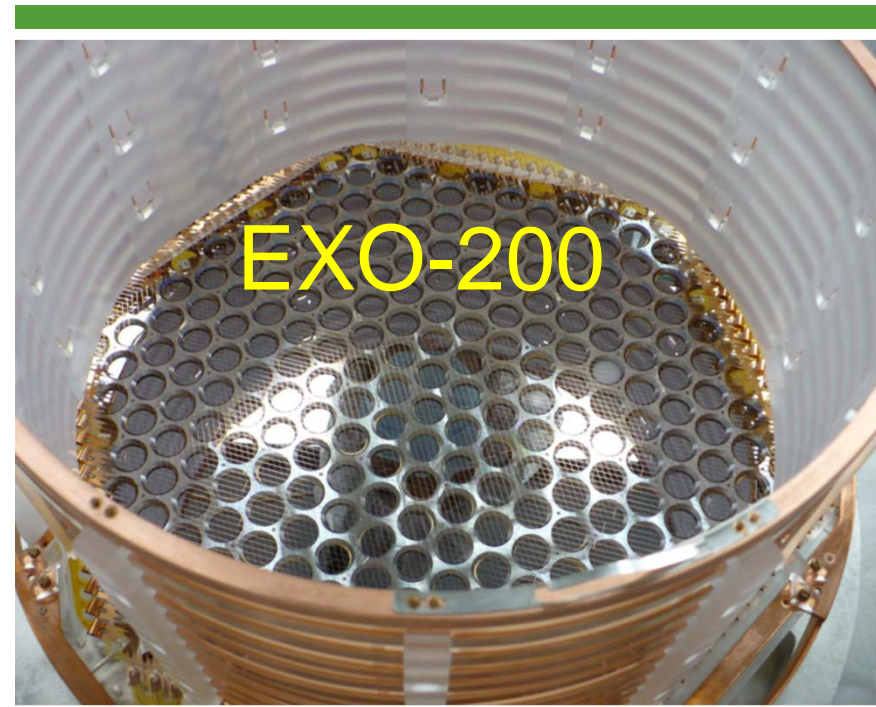
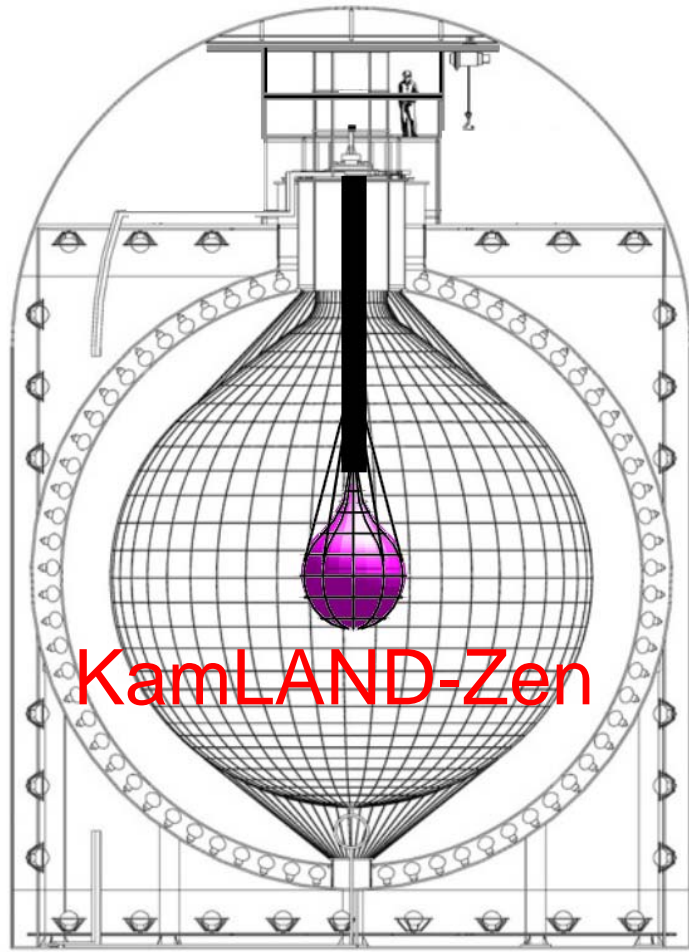
* マヨラナCP位相の関係で変な形になる



必要なもの

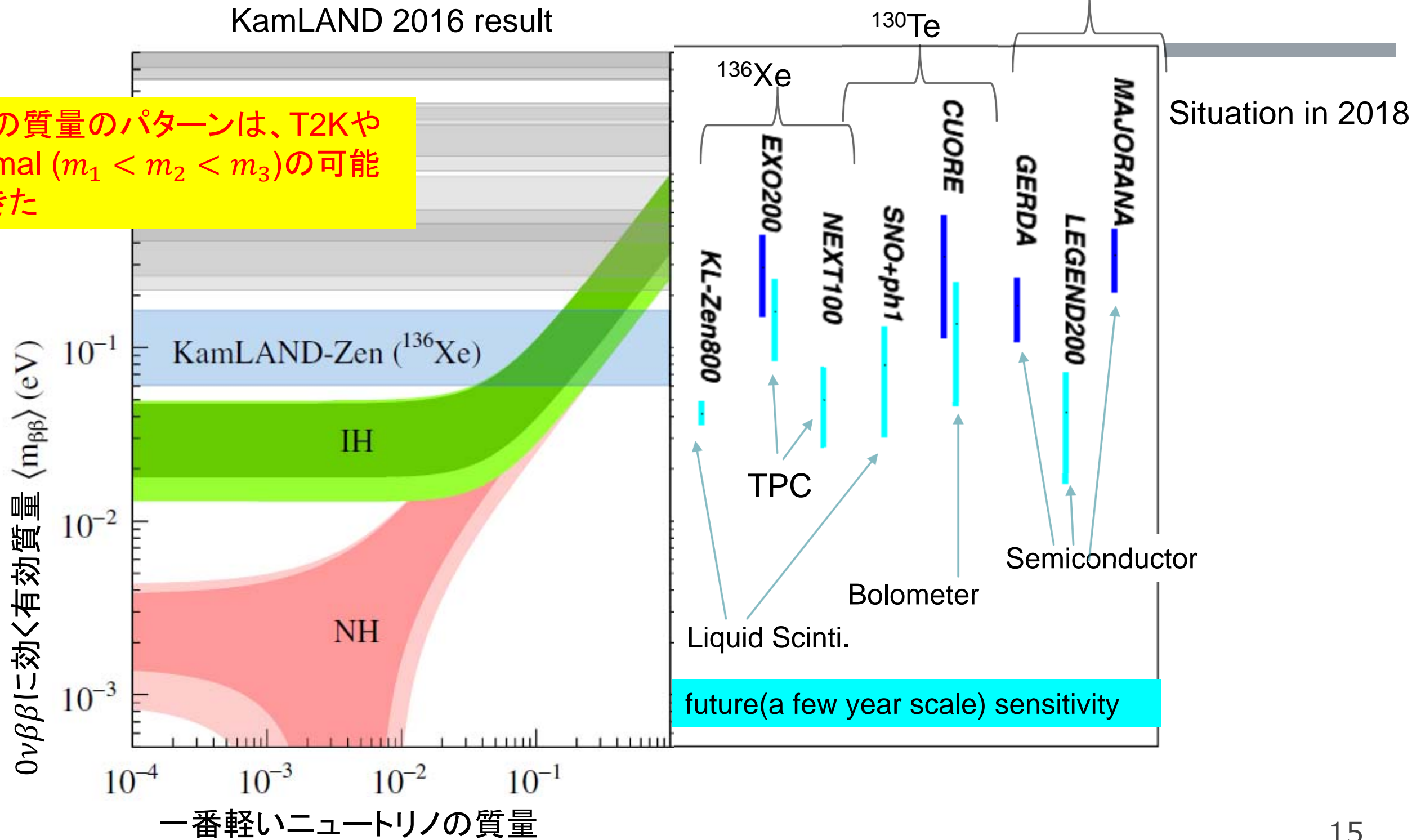


世界

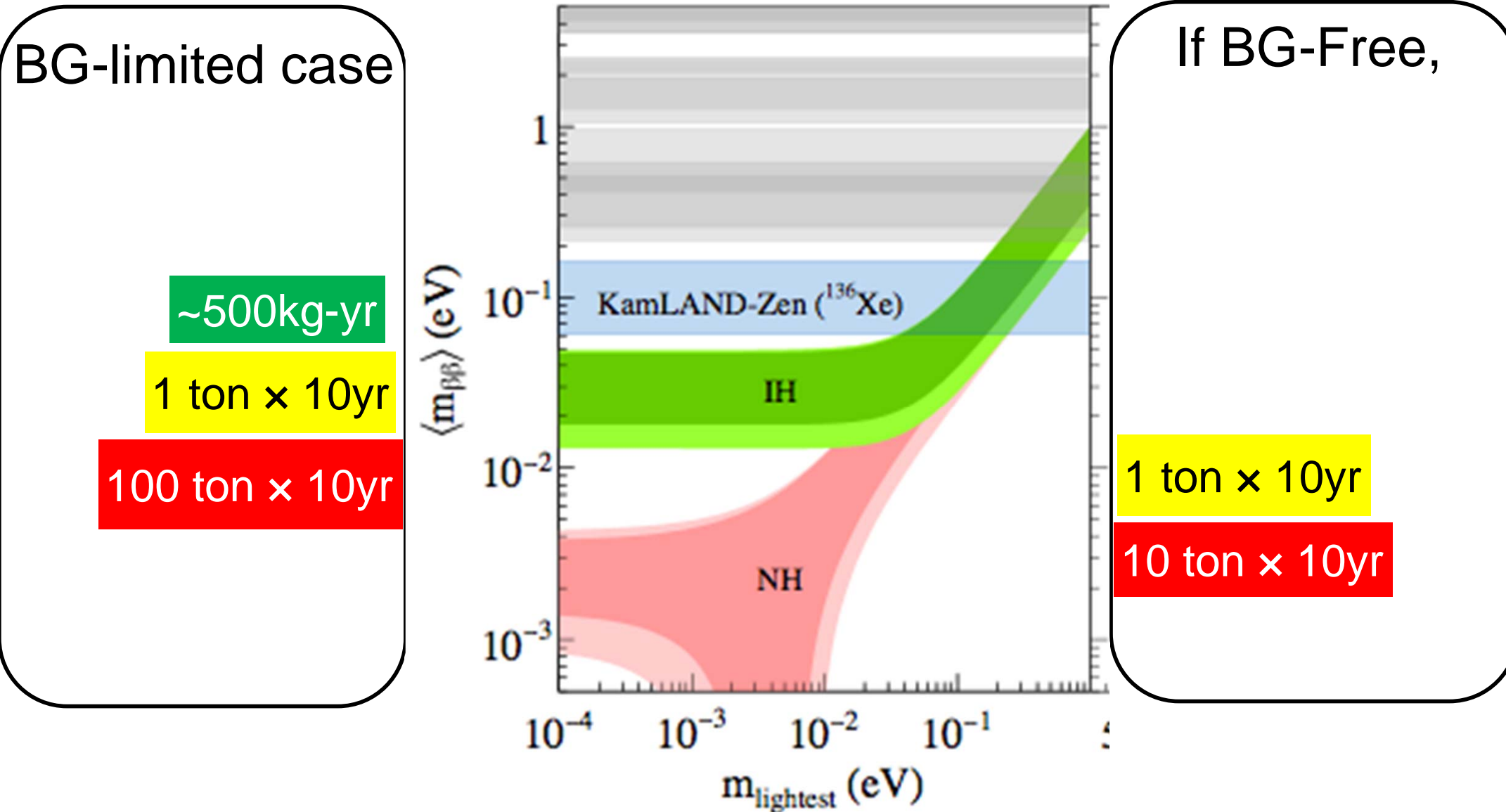


展望

が、ニュートリノの質量のパターンは、T2KやSKによってNormal ($m_1 < m_2 < m_3$)の可能性が高くなってきた

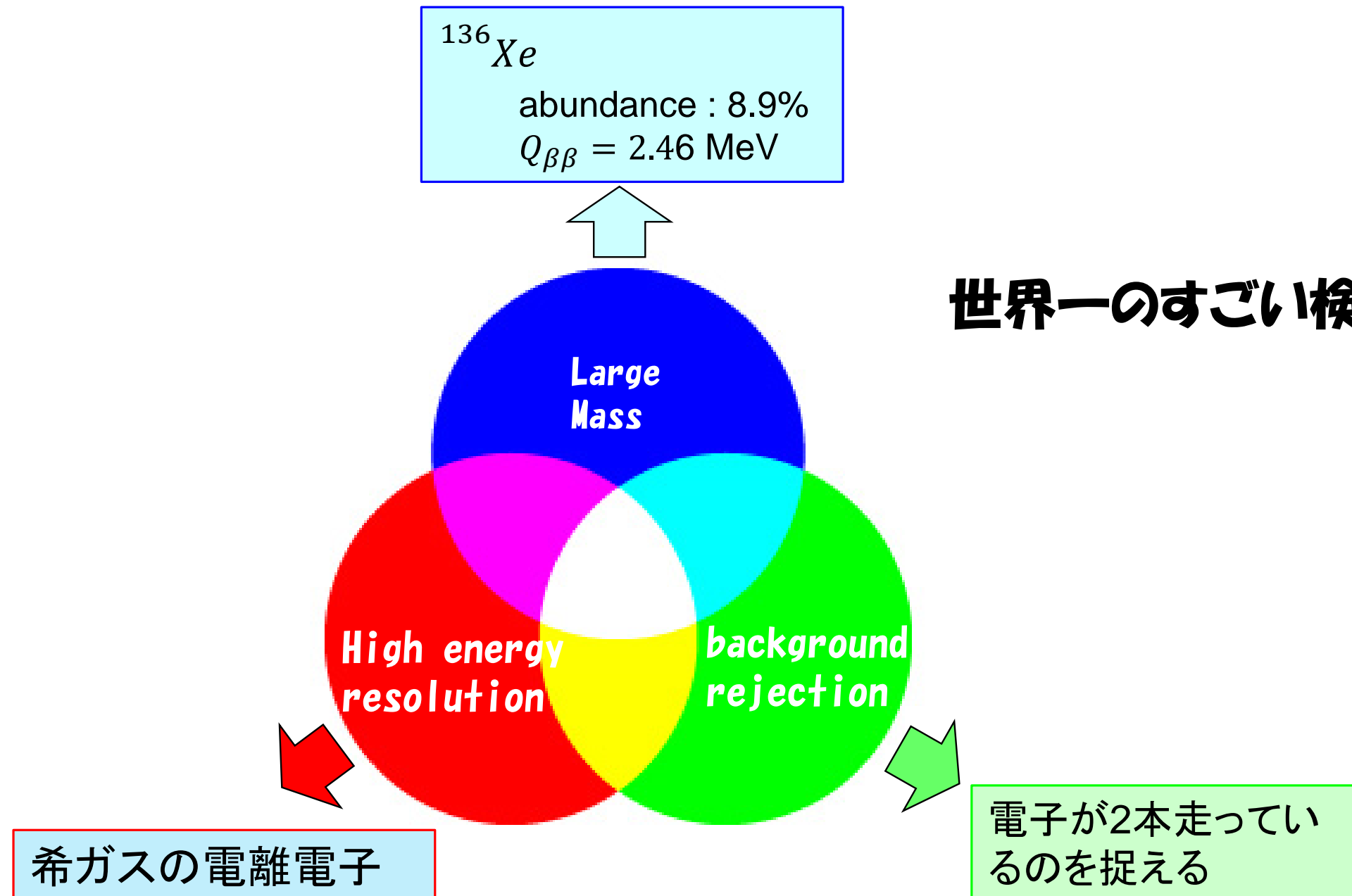


必要な(サイズ) × (時間)



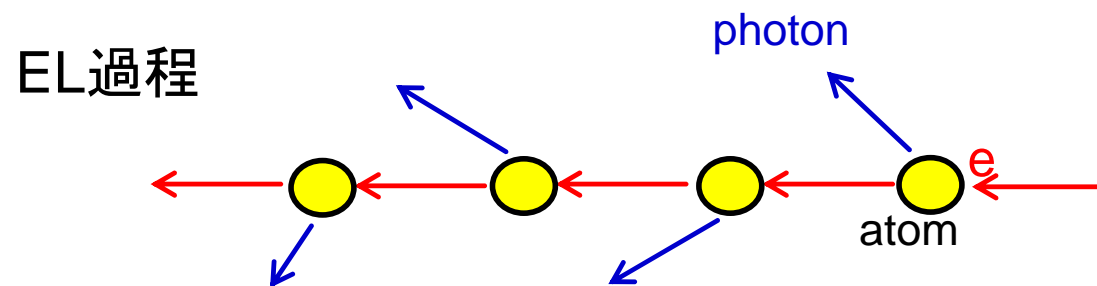
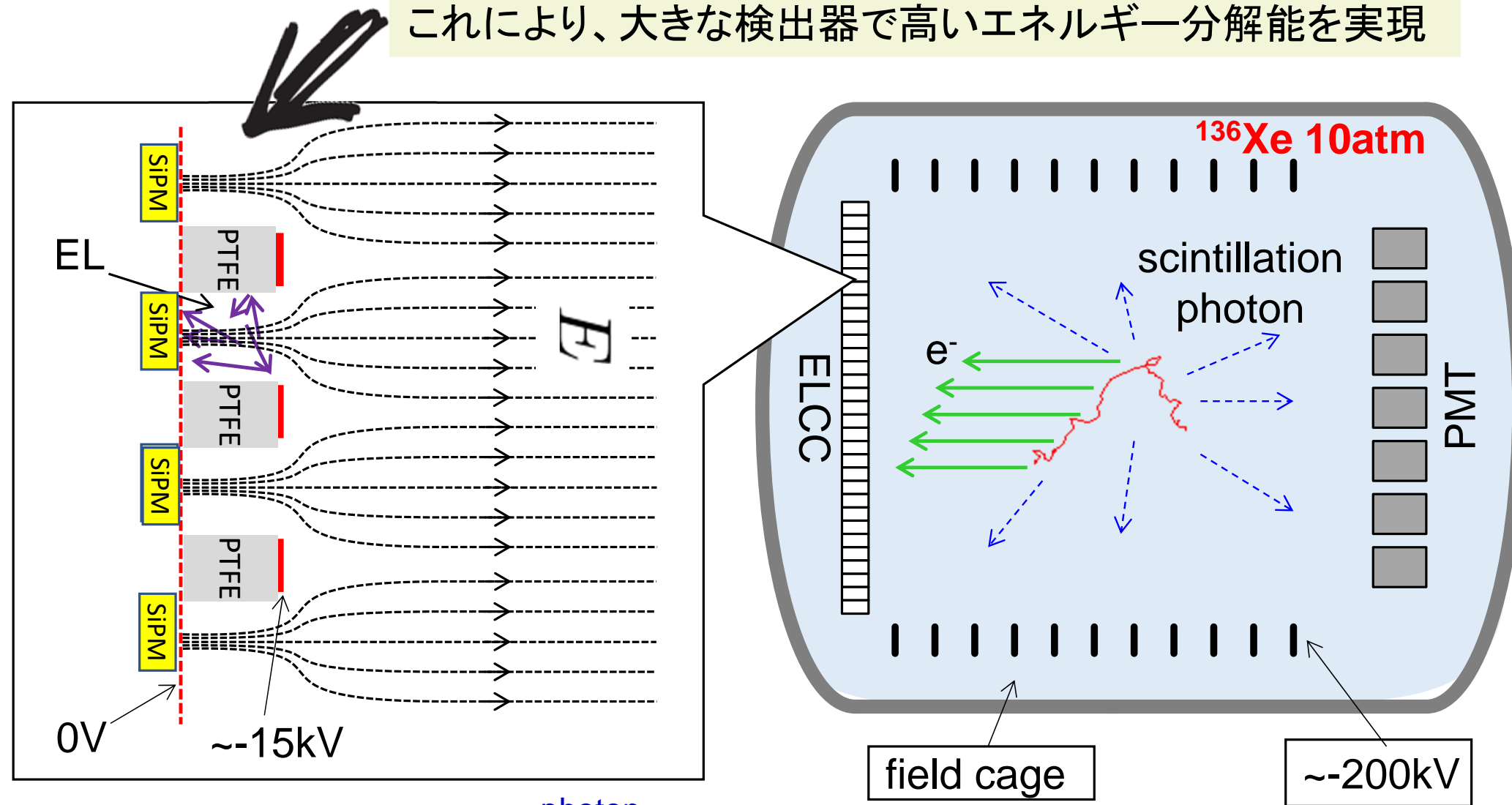
Background-free & ton-scale detector

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

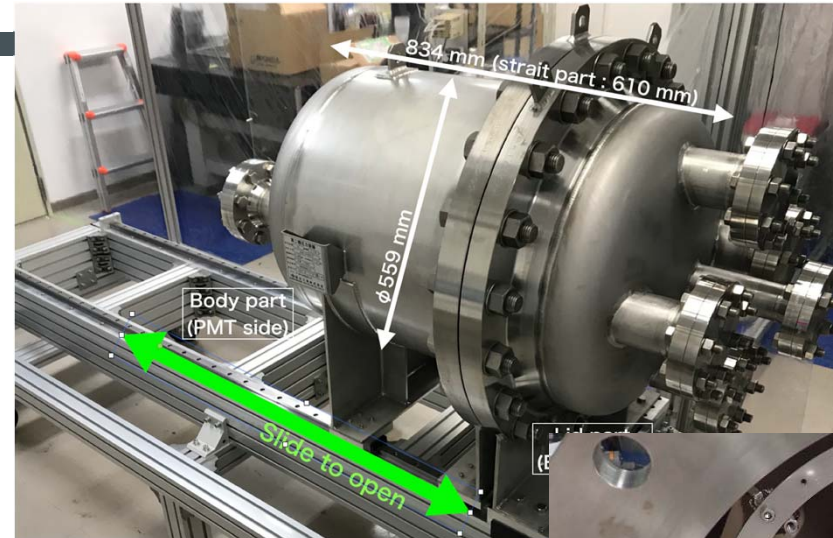


世界一のすごい検出器を！

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



AXEL Load Map



1 ton scale

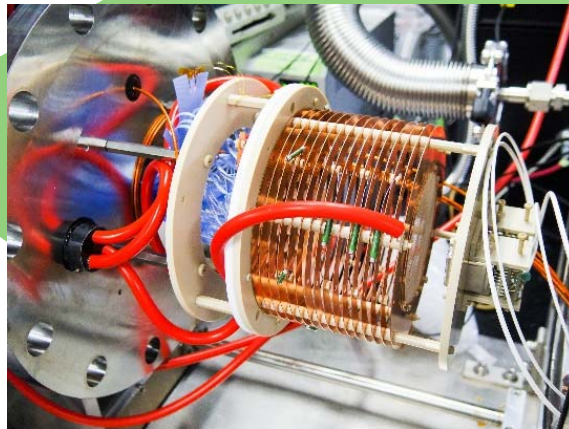
1000L(40 kg) scale

2024-
physics data taking

10-L prototype

2014-2018

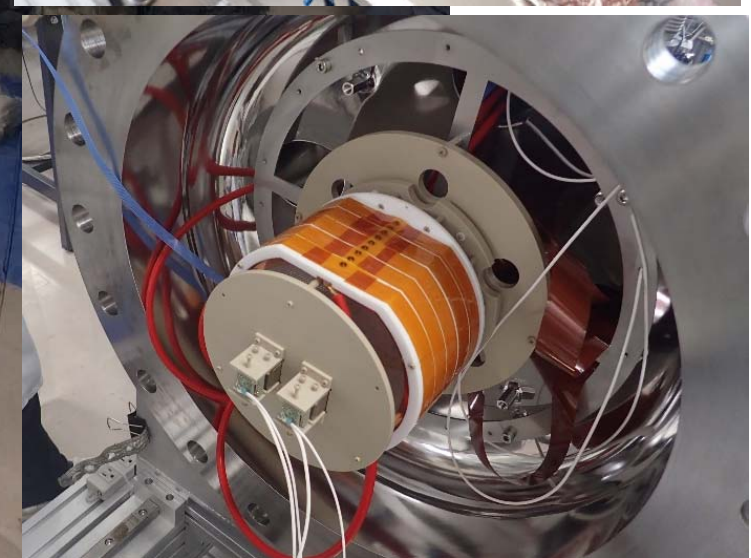
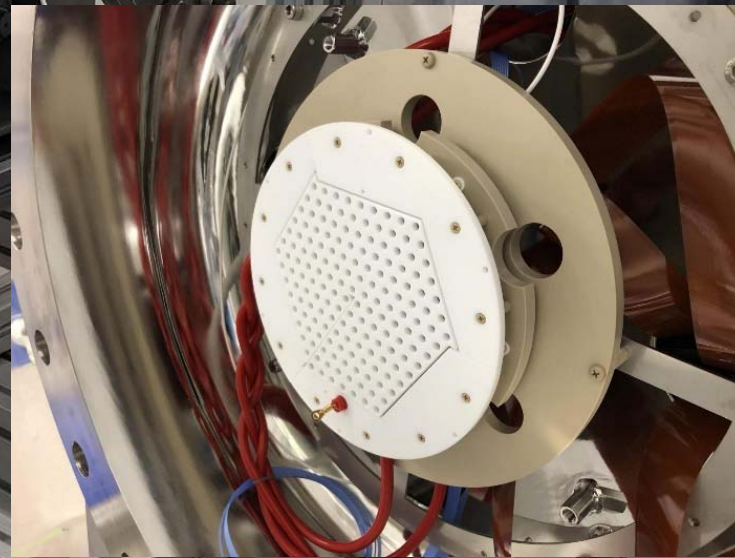
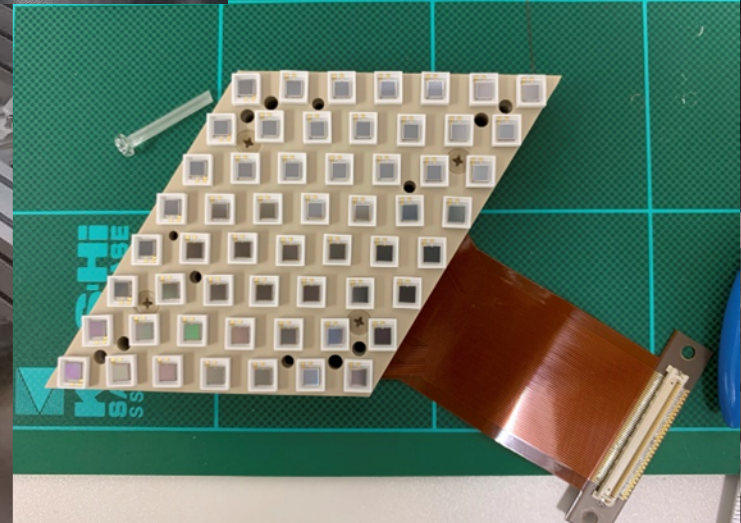
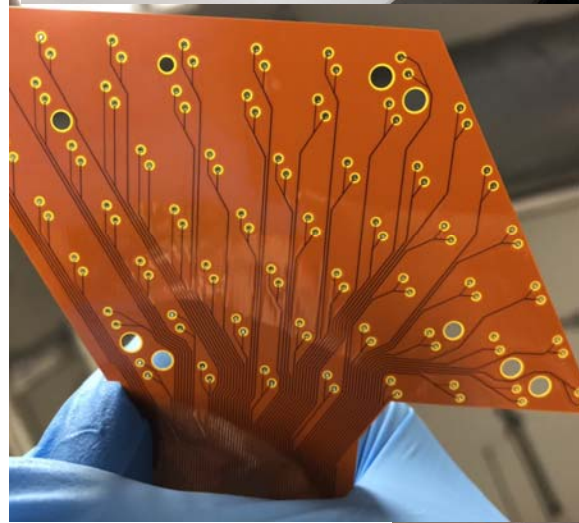
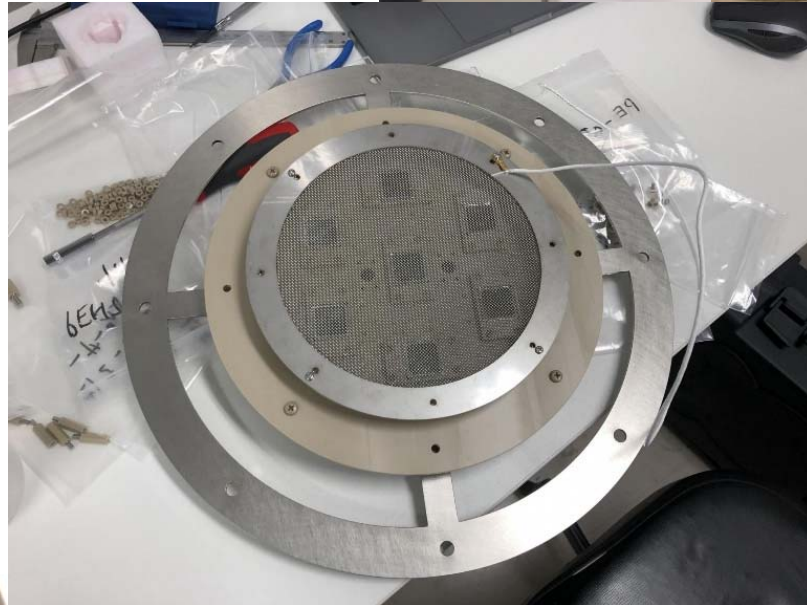
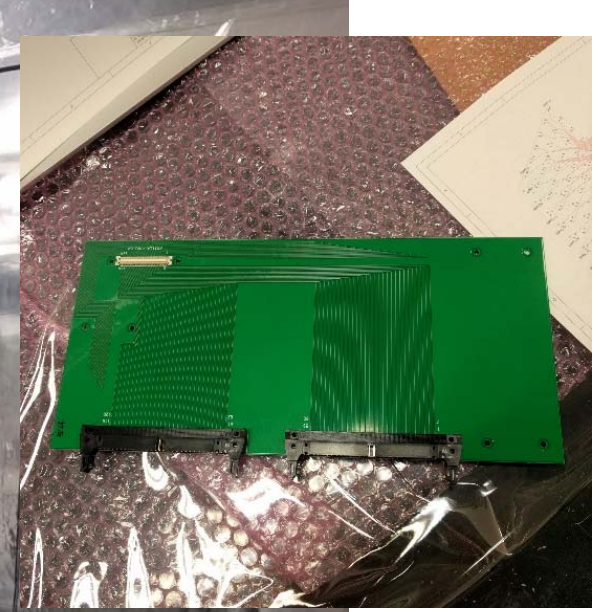
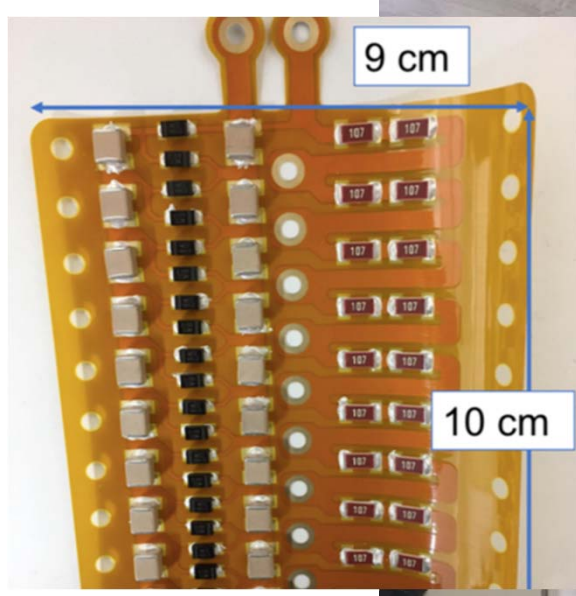
- ~0.05kg @8bar
- ELCC proof of principle



180-L prototype

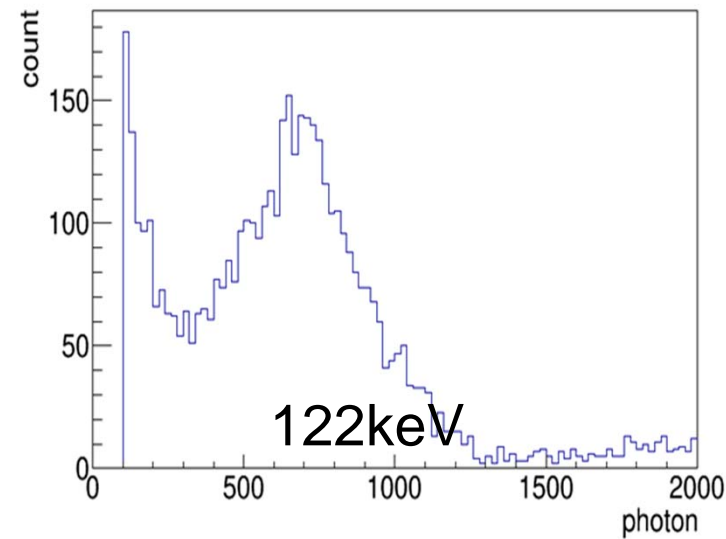
2018-2020

- ~4.5kg @8bar
- phase-1 : 168 ch
phase-2 : 672ch
phase-3 : 1,512 ch

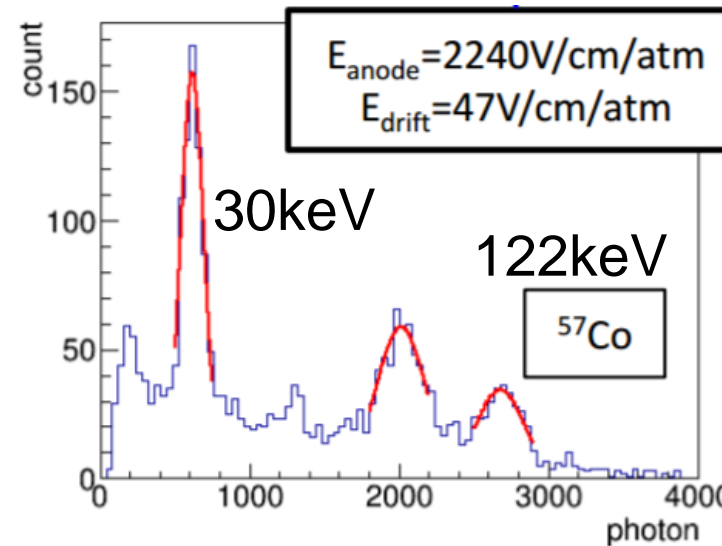


エネルギースペクトル (の歴史) (≡潘君の歴史)

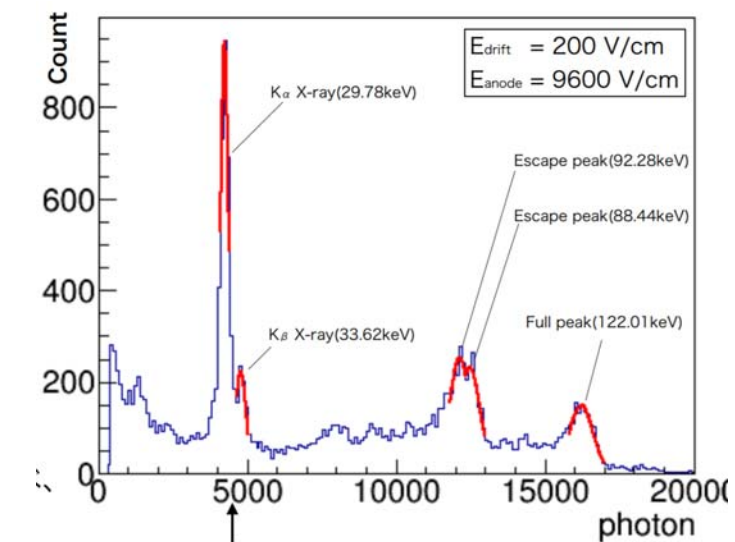
初信号@1atm



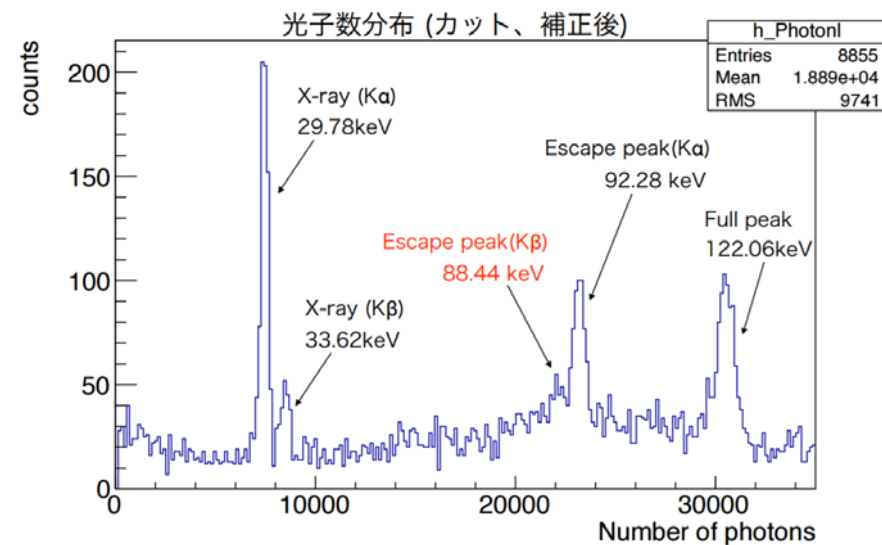
高圧化: 4atm、fid-cut



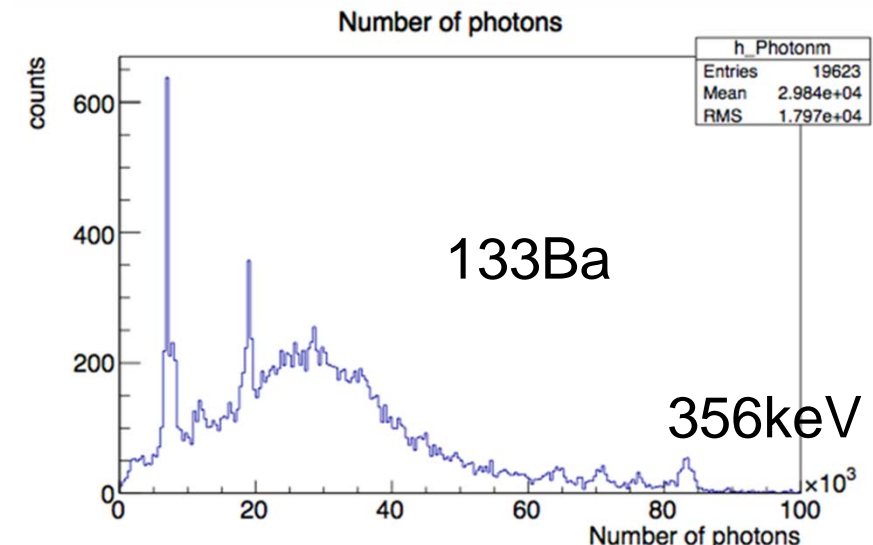
8atm、32⇒64ch、PMT追加



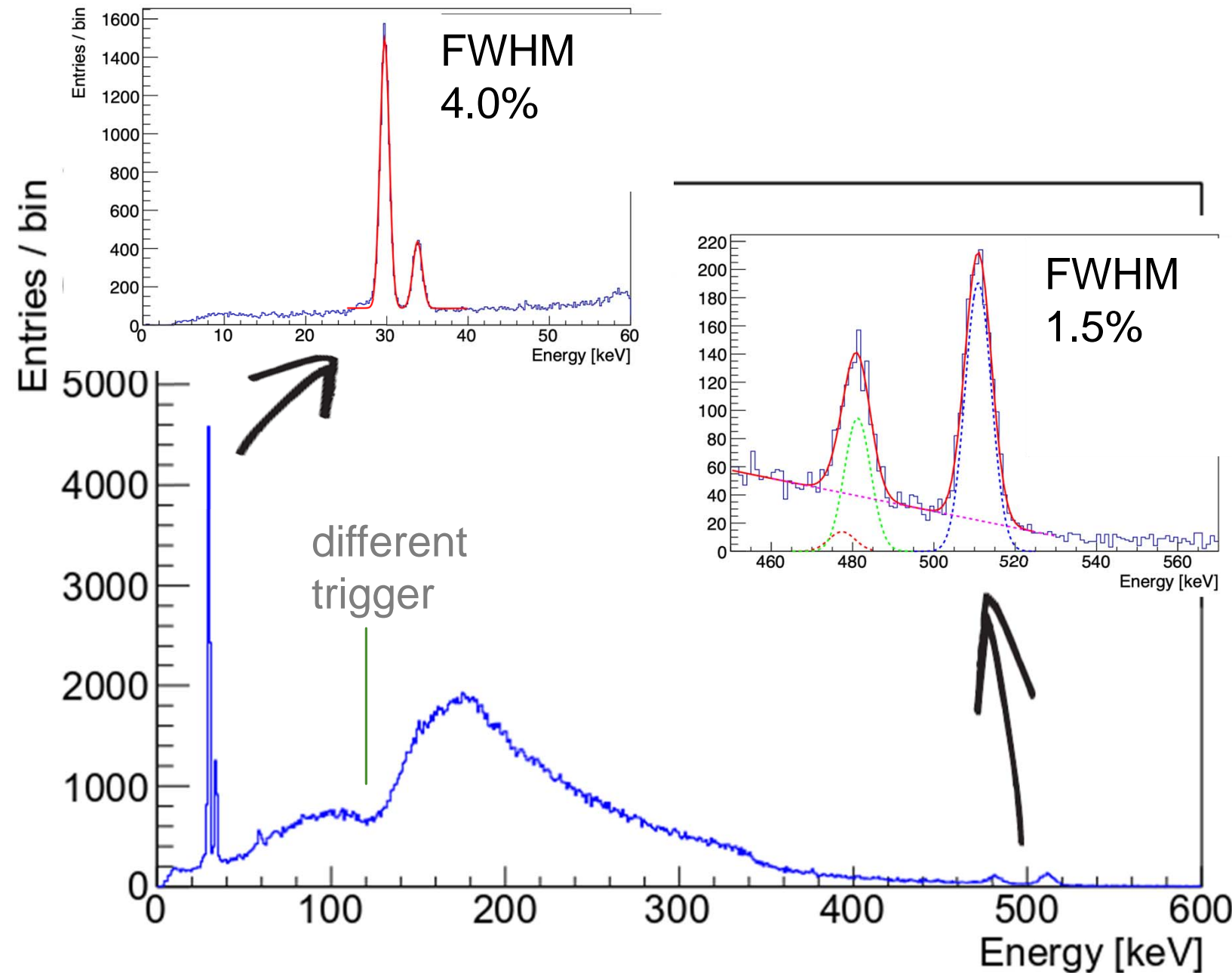
放電対策、ガス循環



ELCC大型化



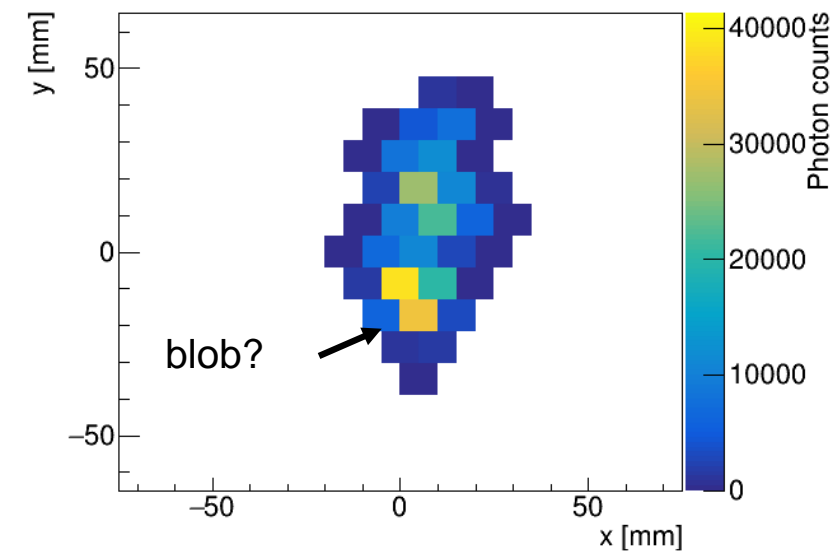
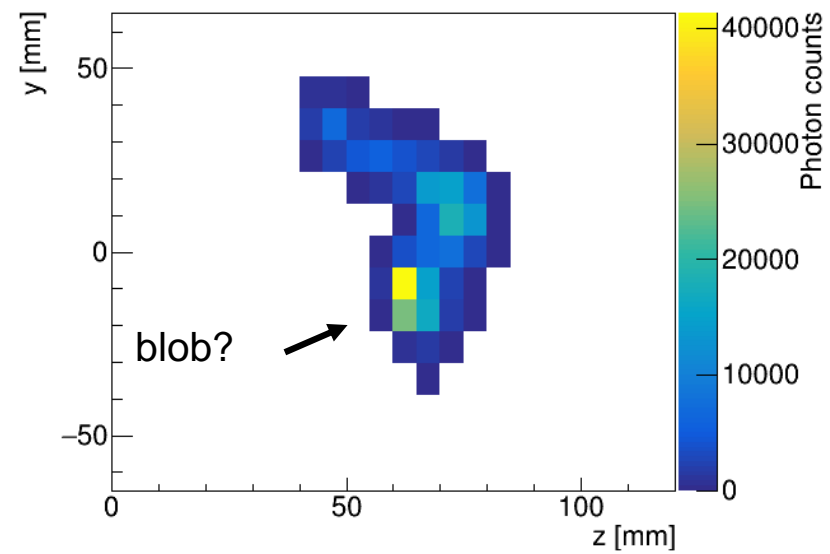
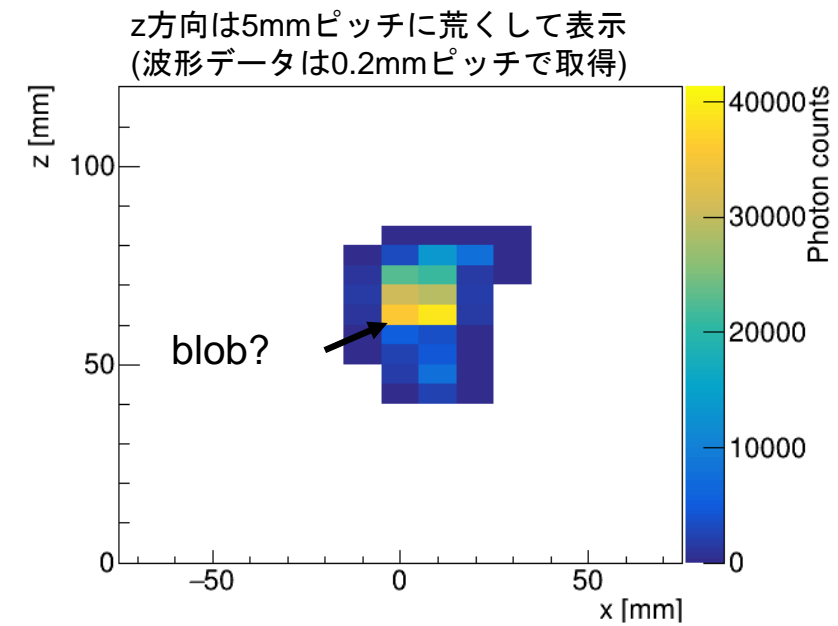
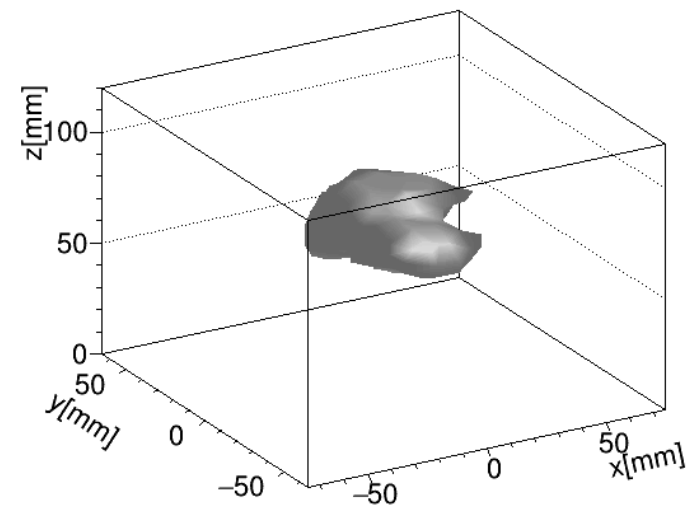
180L phase-1 Energy resolution



世界最高レベルのエネルギー分解能達成
 $0\nu\beta\beta$ Q値(2.5 MeV)換算で、
0.7%~1.2% (FWHM)
目標の0.5%まで、もう少し。
2020年度中に~2MeVでの性能を実証予定

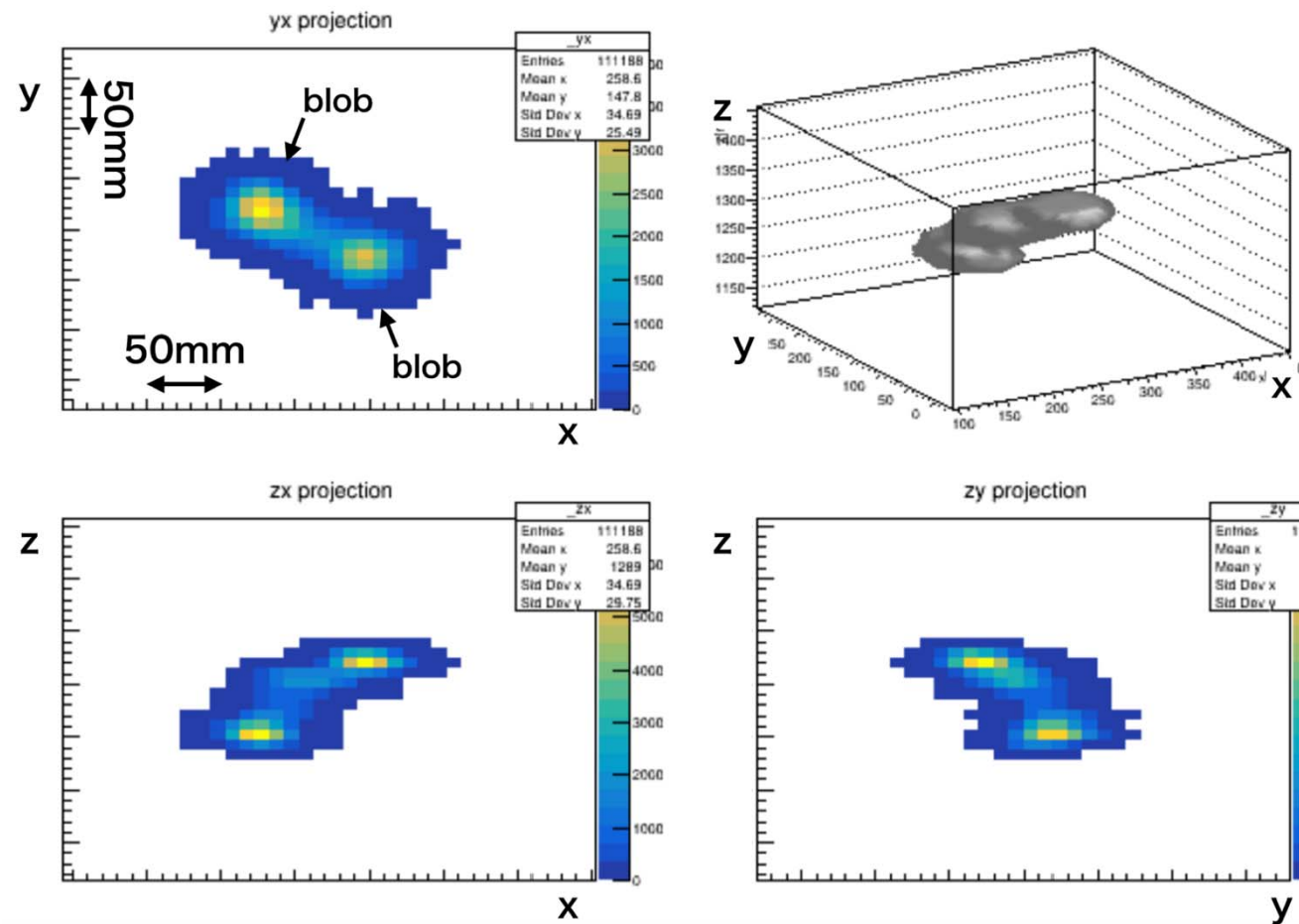
PTEP 2020 Issue 3, 033H01

180L phase-1 511 keV electron Track Pattern

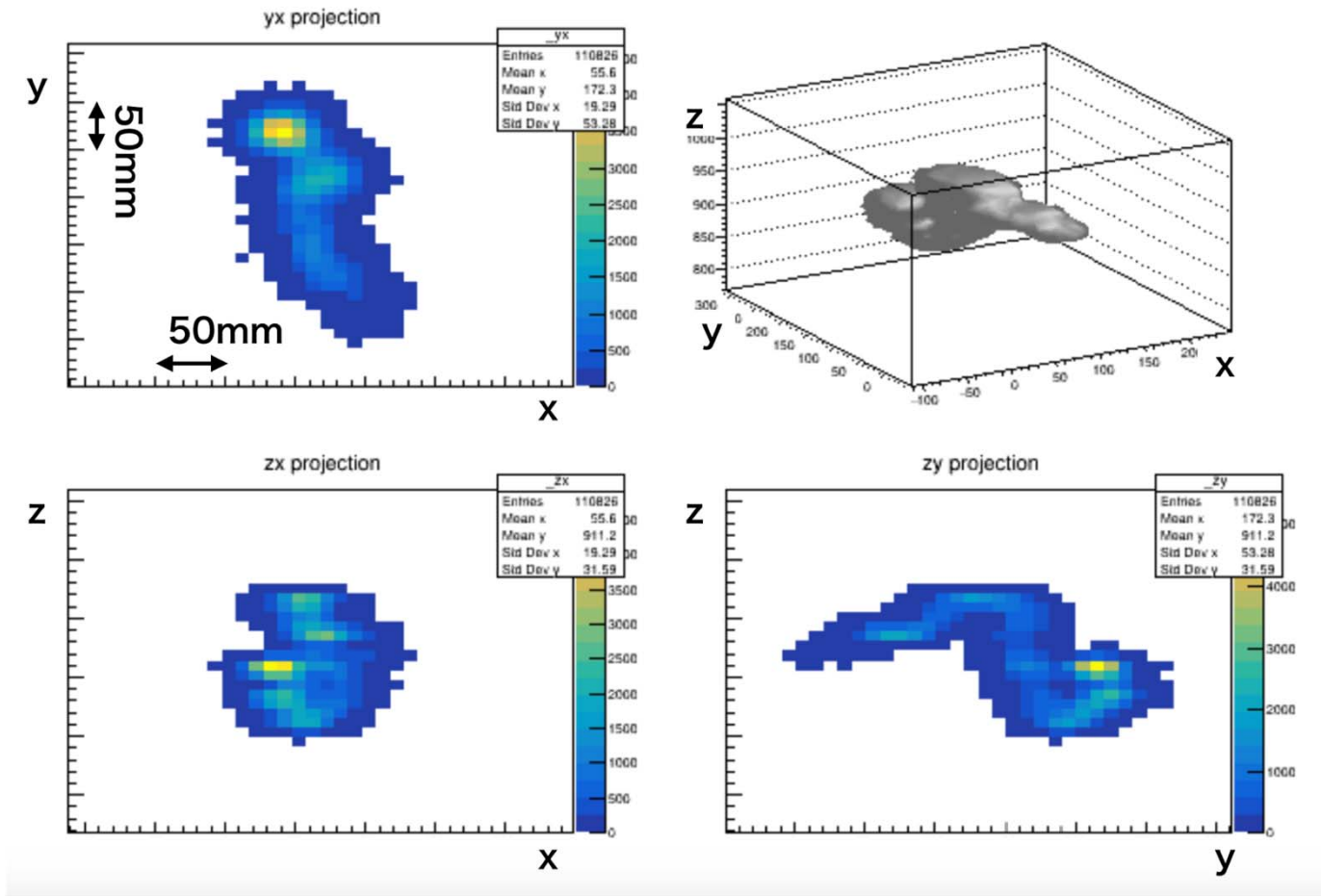


Simulated track pattern for $0\nu\beta\beta$ signal and background

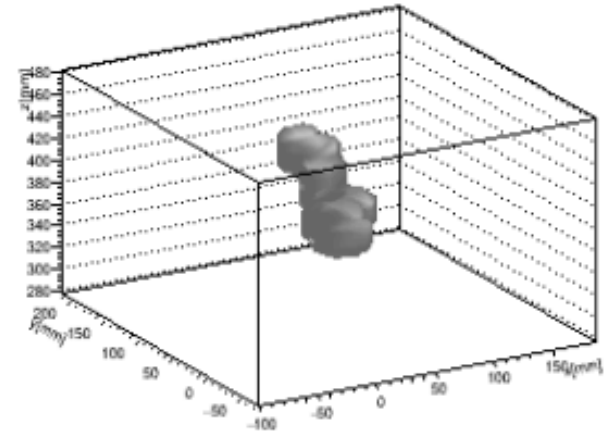
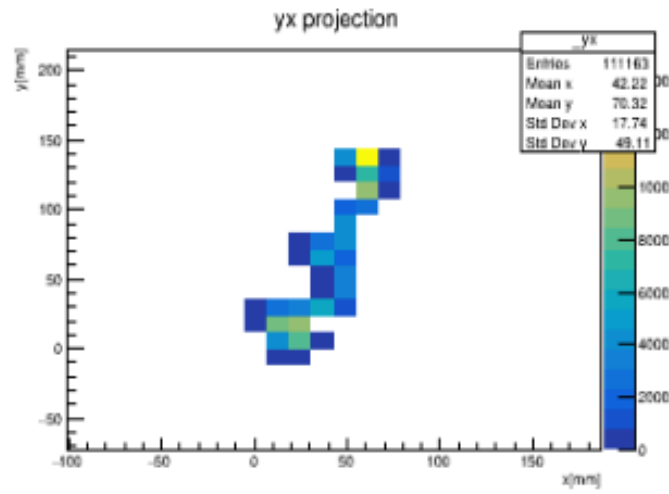
$0\nu\beta\beta$ signal



γ -ray w/ Photo-absorption



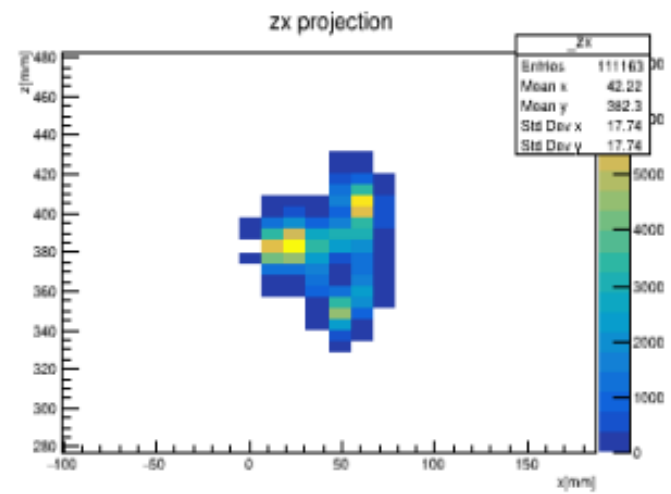
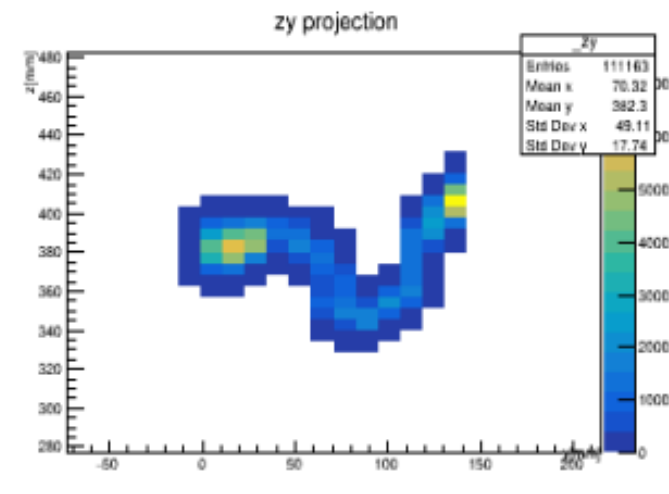
Event generation: Geant4
 Gas : xenon 10 bar
 Cell pitch : 10 mm (square)



vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 0

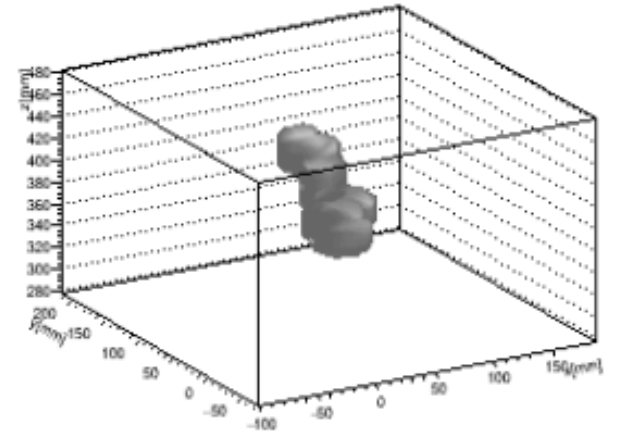
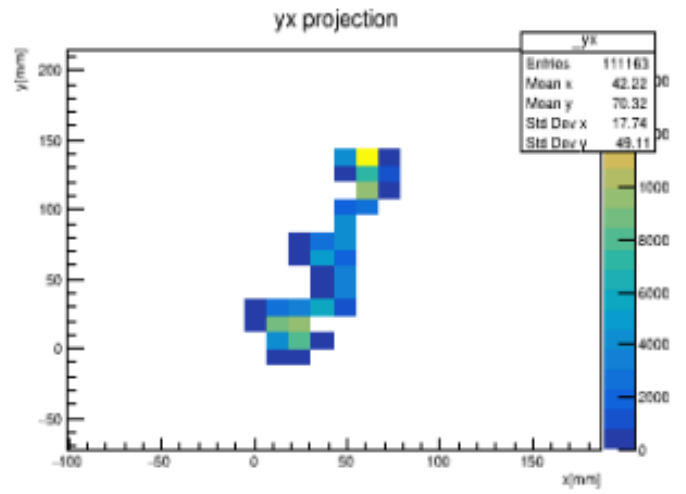
DL score
model04_01_06_180927_023:
0 / 0



reset

gamma

Onββ !!



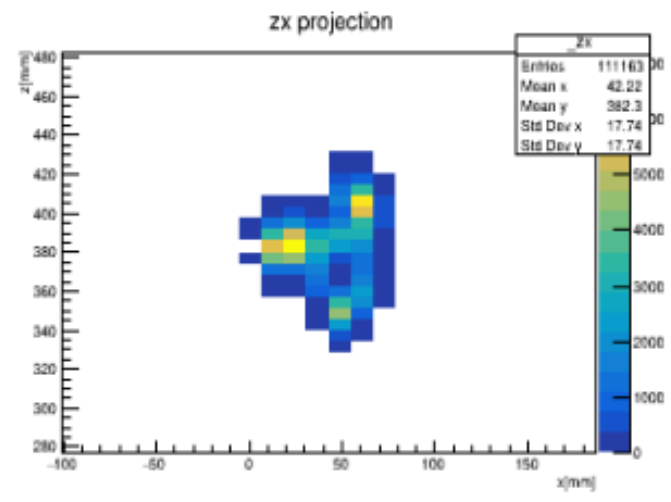
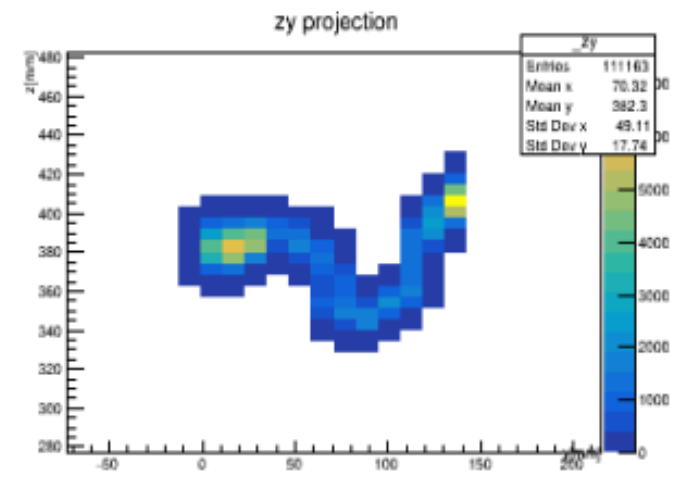
vs Deep Learning ▾

Your score
1 / 1

DL score
model04_01_06_180927_023:
1 / 1

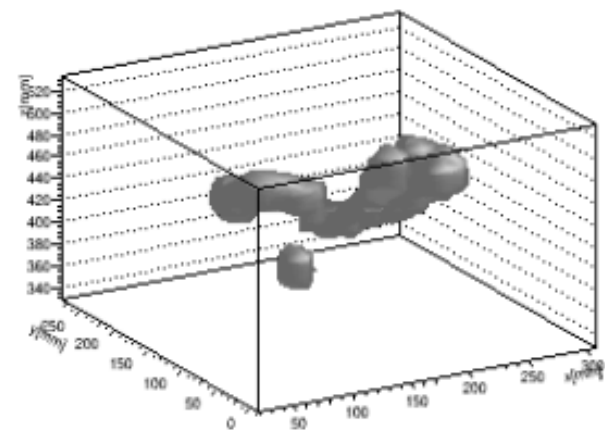
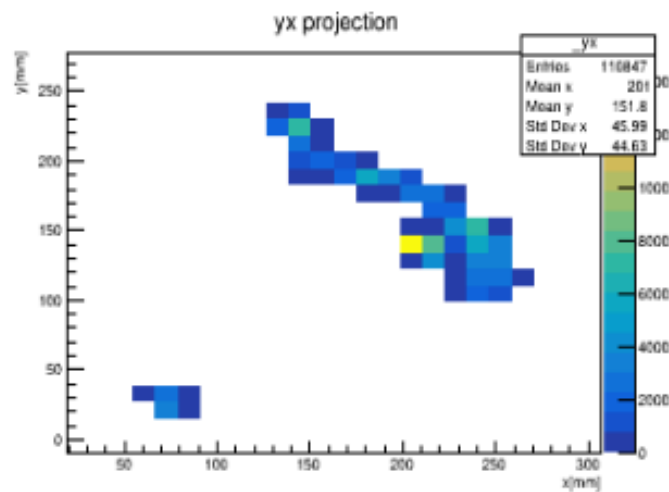
Correct!!!
sig9837
DL(sig_cand) = 0.986

reset



gamma

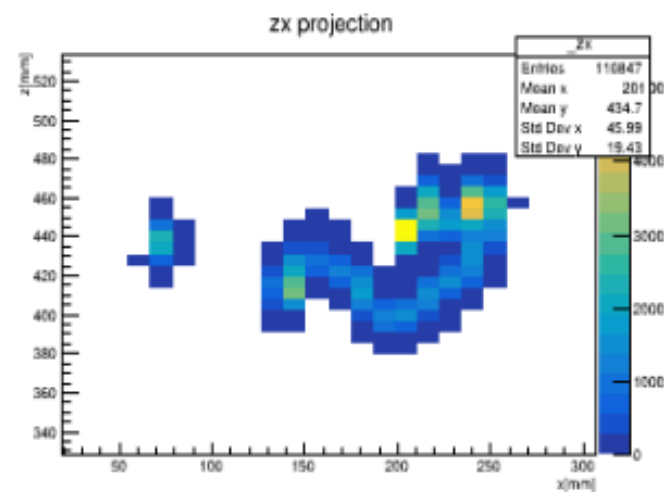
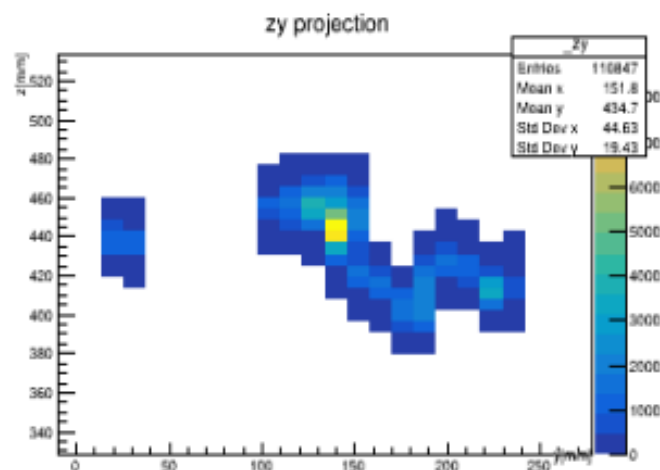
Onββ !!



vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 0

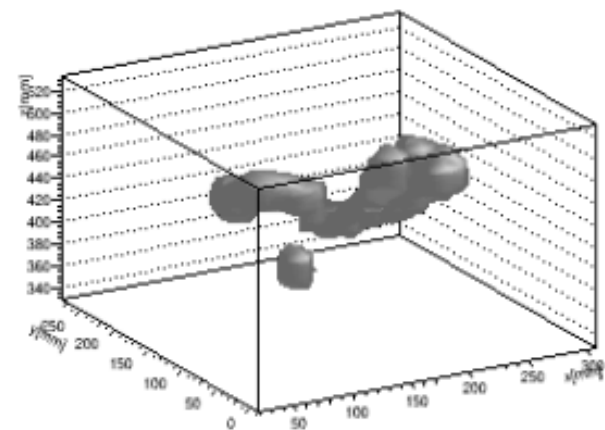
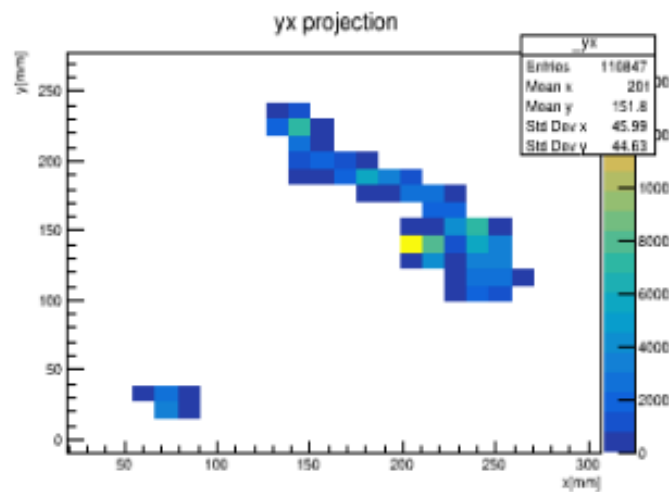
DL score
model04_01_06_180927_023:
0 / 0



reset

gamma

$\text{On}\beta\beta$!!



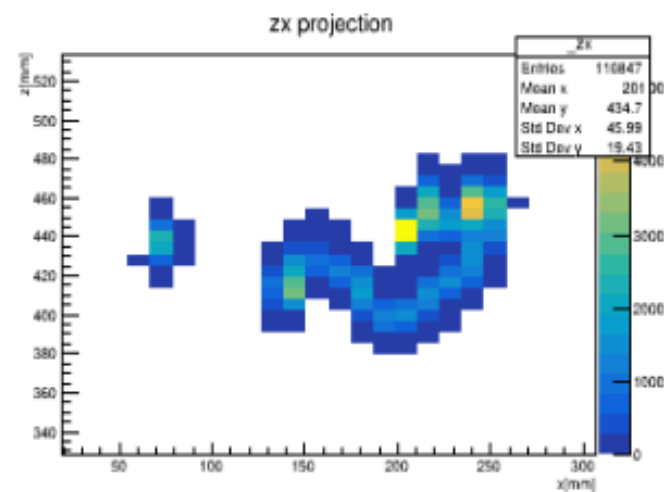
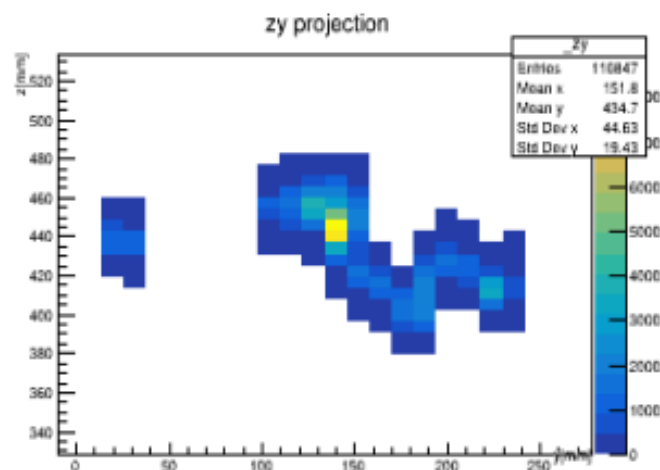
vs Deep Learning ▾

Your score
1 / 1

DL score
model04_01_06_180927_023:
1 / 1

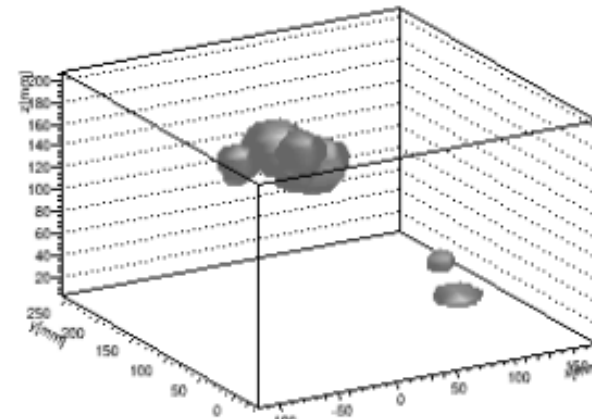
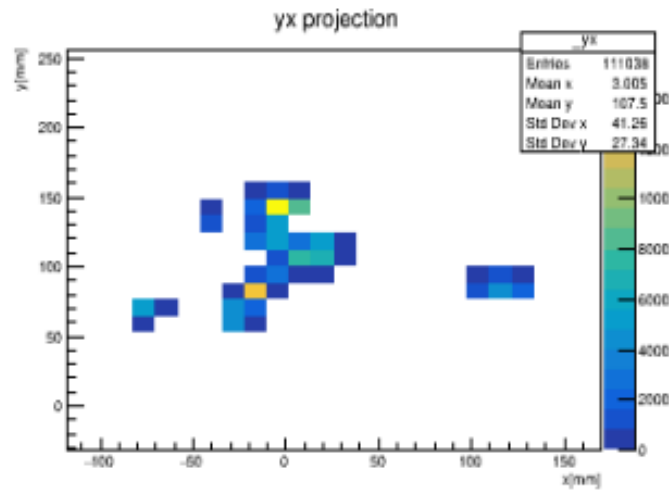
Correct!!!
bg9502727
DL(sig_cand) = 0.353

reset



gamma

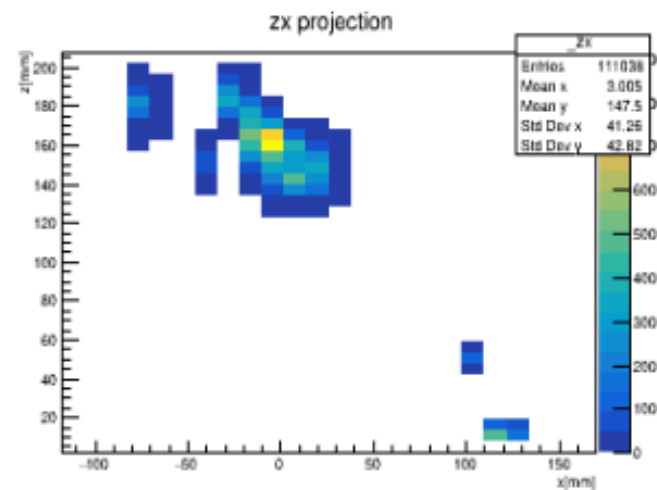
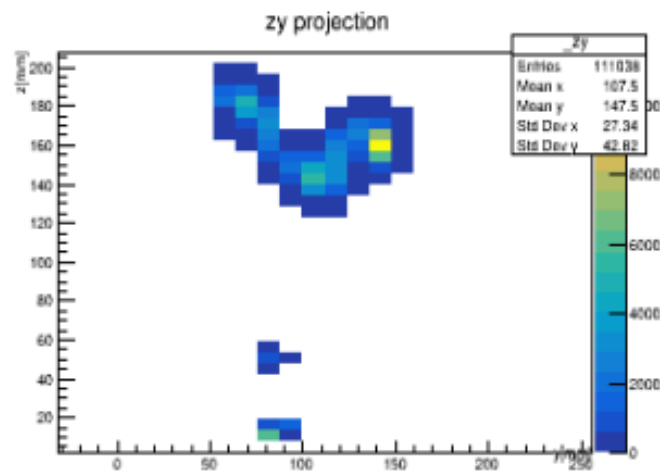
Onββ !!



vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 0

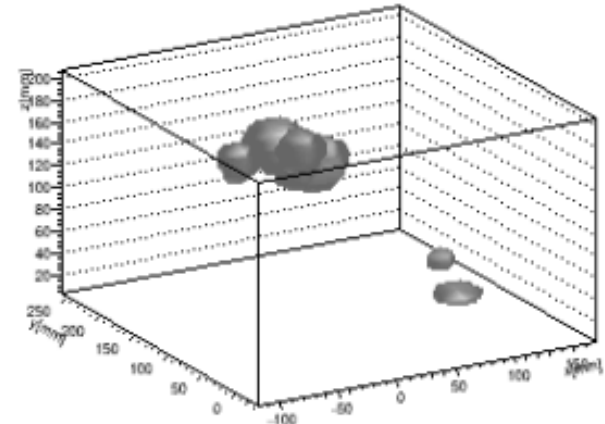
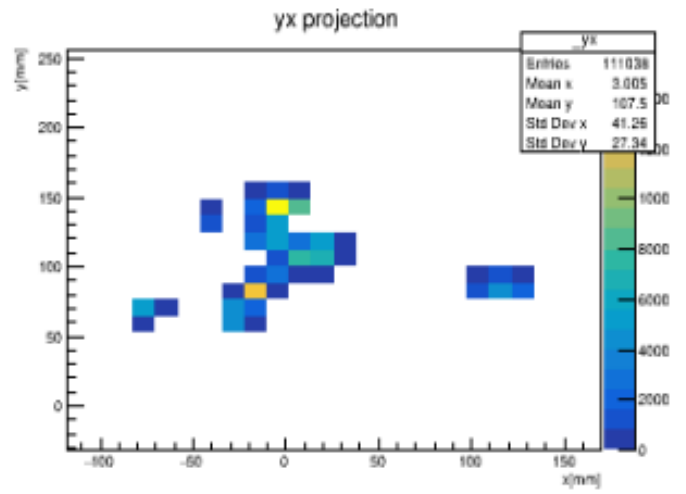
DL score
model04_01_06_180927_023:
0 / 0



reset

gamma

Onββ !!



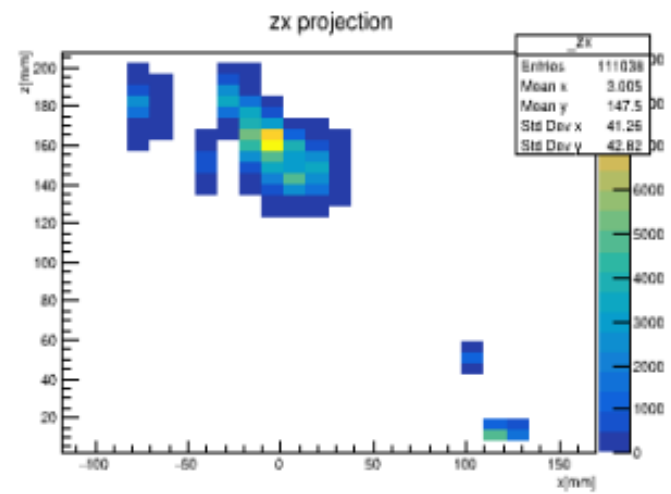
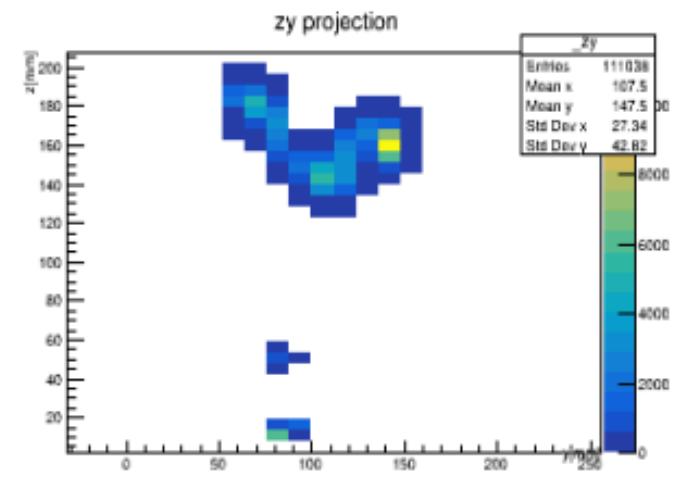
vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 1

DL score
model04_01_06_180927_023:
1 / 1

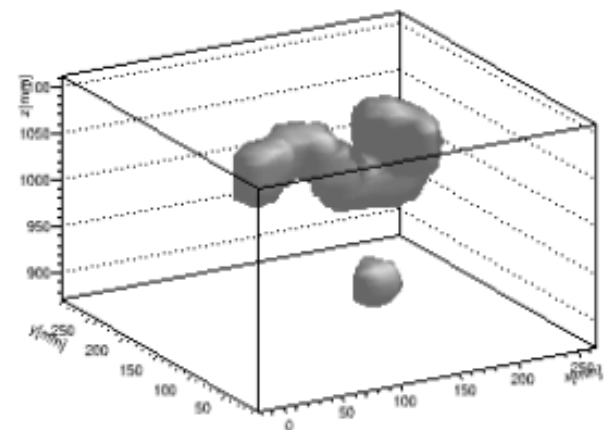
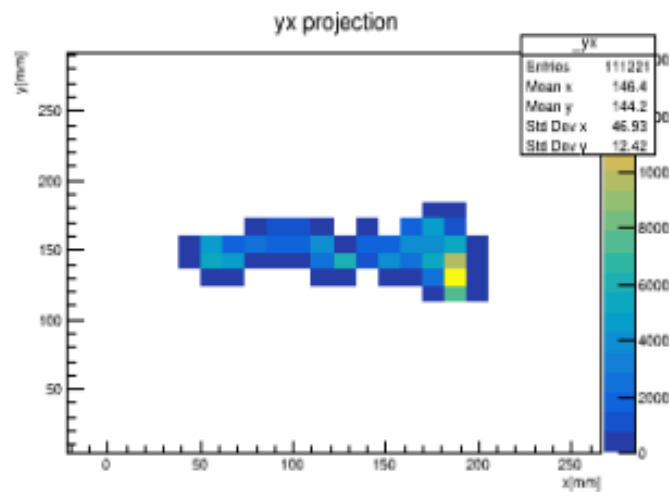
Wrong..
sig9707
DL(sig_cand) = 0.898

reset



gamma

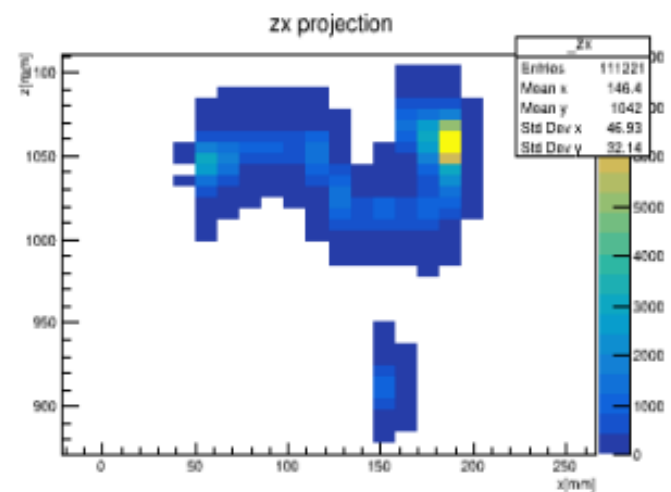
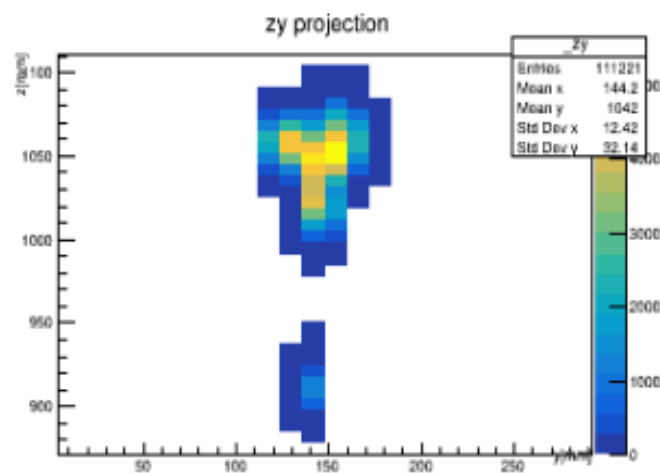
Onββ !!



vs Deep Learning ▾

Your score
63 / 100

DL score
model04_01_06_180927_023:
85 / 100

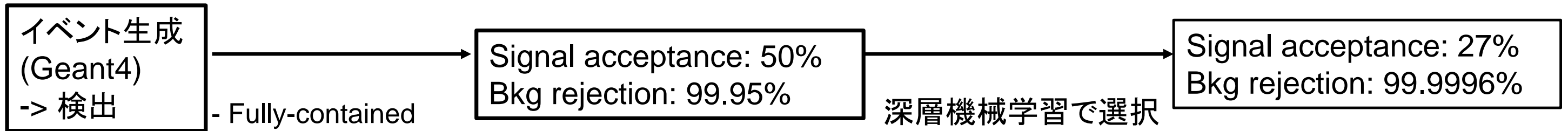


gamma

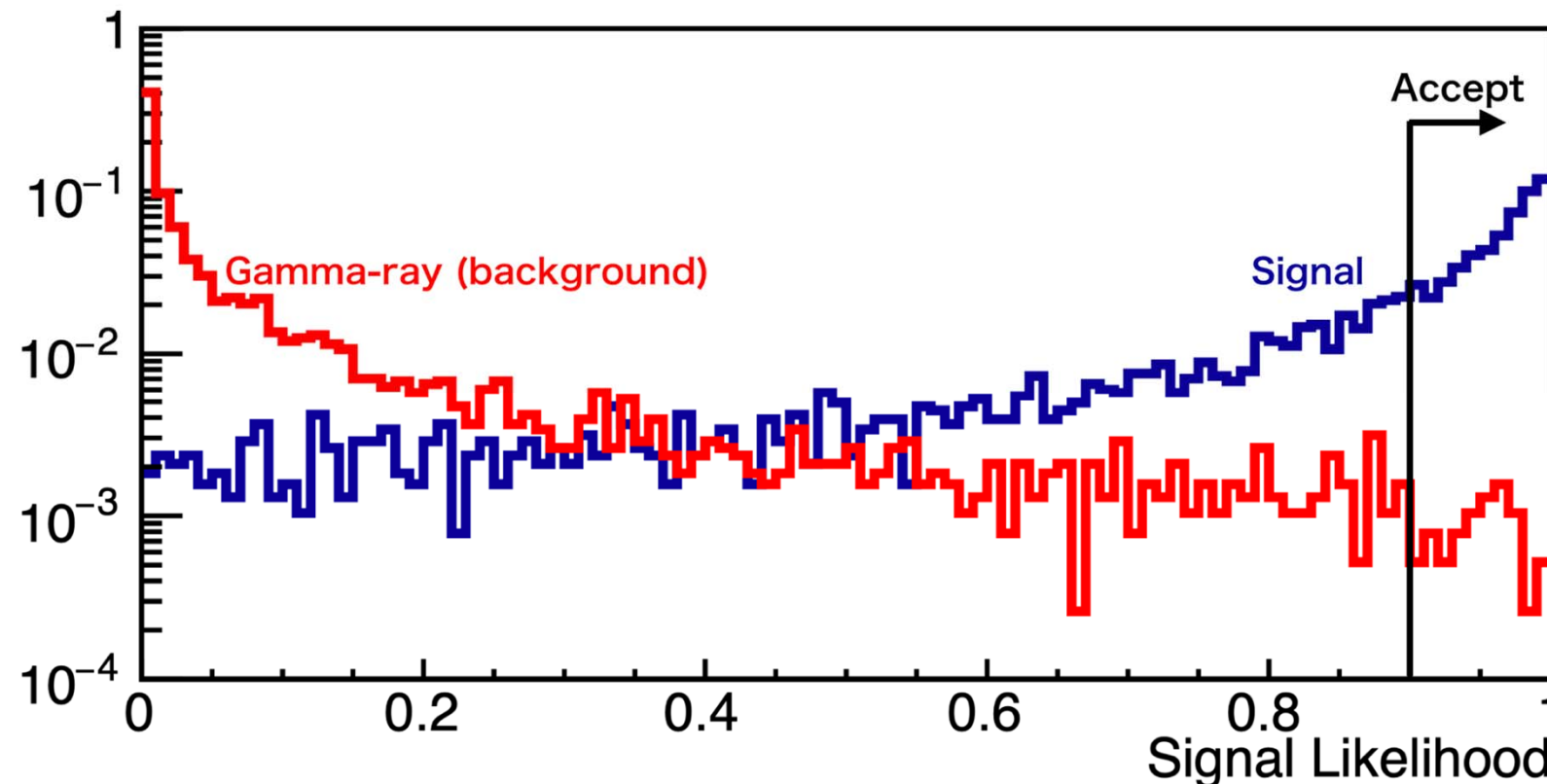
$\text{On}\beta\beta$!!

reset

感度予測



- Fully-contained
 - ROI: Q-value $\pm 0.5\%$
 - 36x36x36 pixels
- に含まれるイベント



- Background :
0.8 cnts/year/ton
- Sensitivity :
 $T_{0\nu} = 1.0 \times 10^{27}$ years
 $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 19.7 - 53.5$ meV
(with 6-year observation)

- ✓ 世界記録であるニュートリノ有効質量領域 $100\text{meV}/c^2$ を超えて $0\nu\beta\beta$ を探索できる検出器技術を**かなり**確立 → 2020年度に180L phase3で実証予定

今後、5年で1000L検出器を製作し、物理測定へ

- ✓ ニュートリノ質量の順階層構造に対応する領域($10\text{meV}/c^2$ 以下)へと切り込むには、背景事象の2桁の削減が必要

^{136}Ba tagging

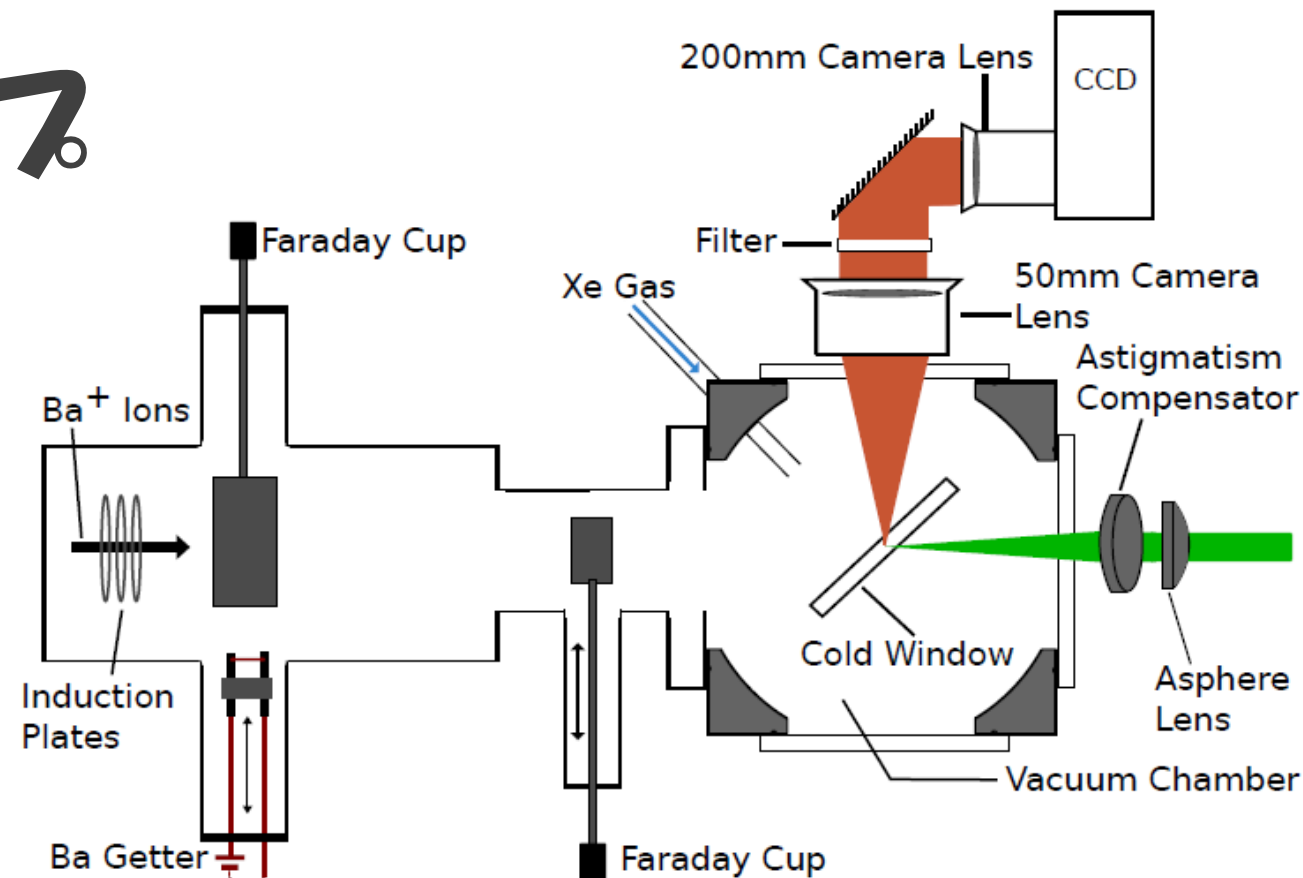
^{136}Xe の娘核 1 個をタグする。 **最終兵器！**

分光でタグしたいが、難しい点は

- $^{136}\text{Ba}^{++}$ は、閉殻なので可視光では、励起しない。
- イオン1個に感度を持たなければいけない。

nEXO実験 実証セットアップ

- 試行錯誤の結果、572nmで照射すると、619nmの発光が30秒程度続くことを確認
- Ba⁺が、固体キセノン中の単一欠損に入り込み、中性化した状態と解釈



PHYSICAL REVIEW A **91**, 022505 (2015)

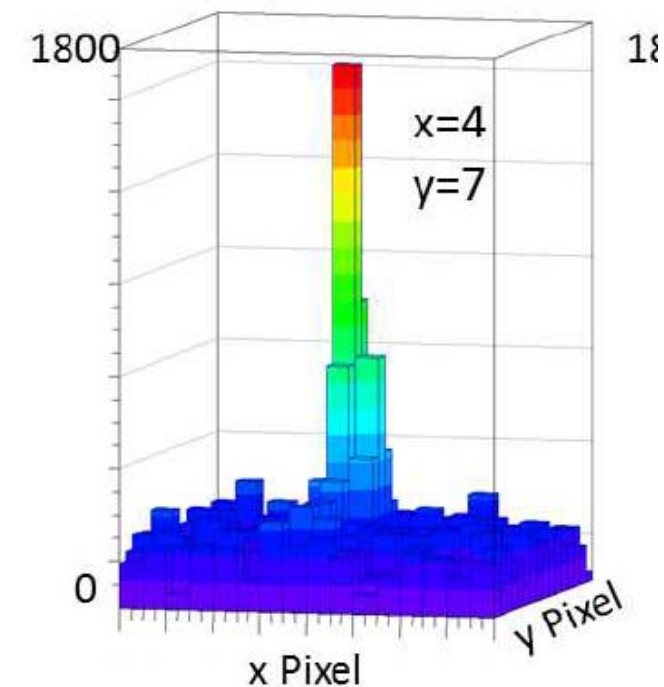
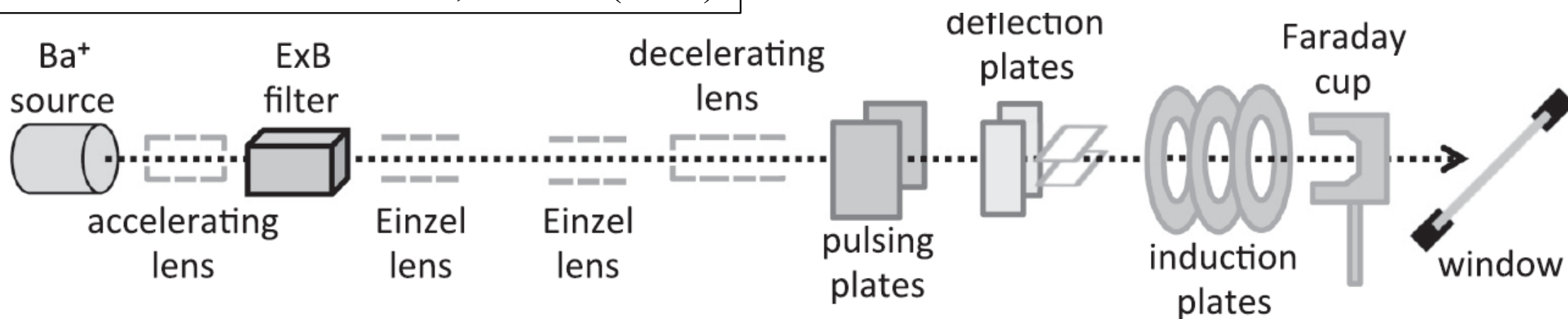
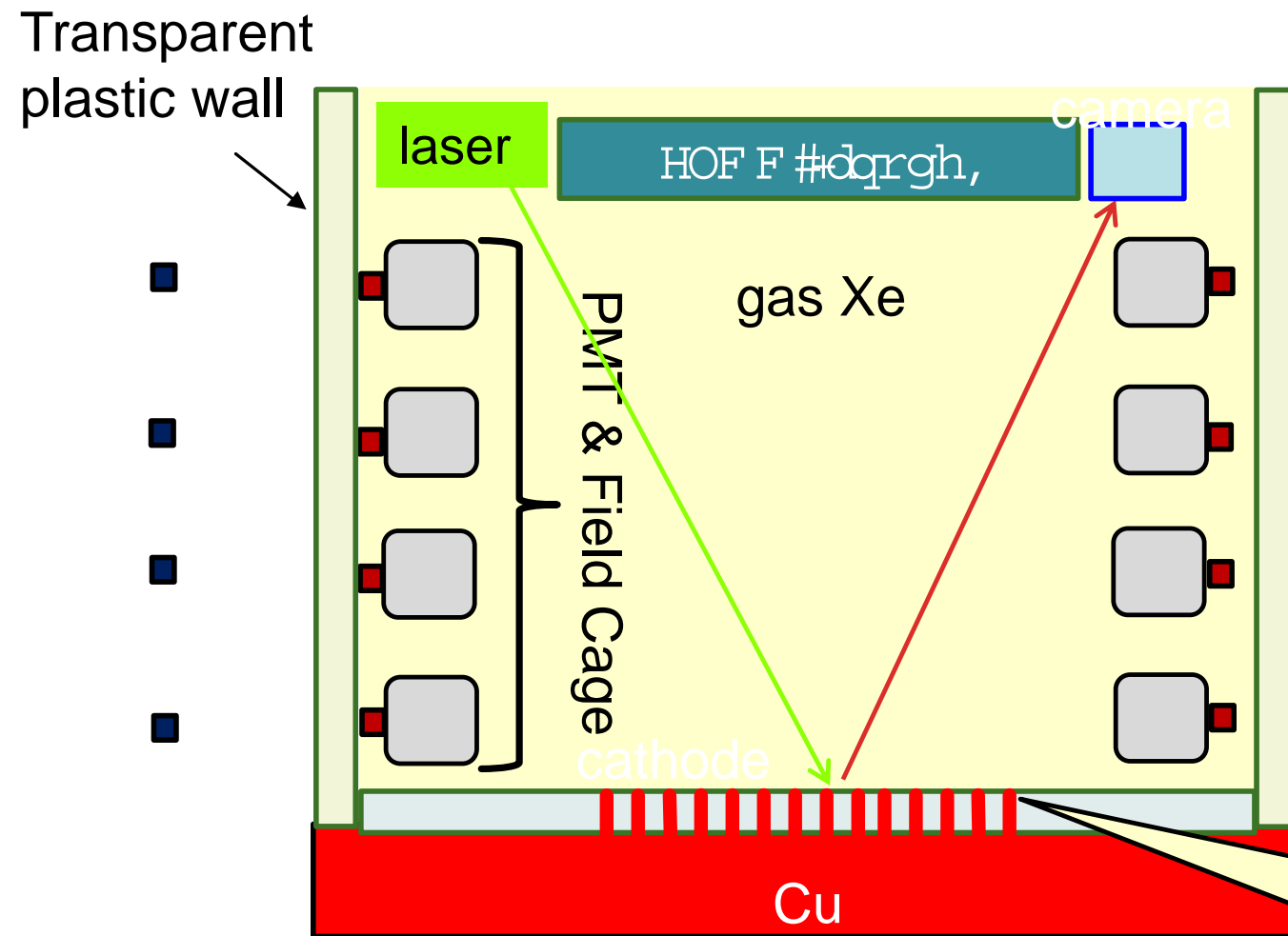
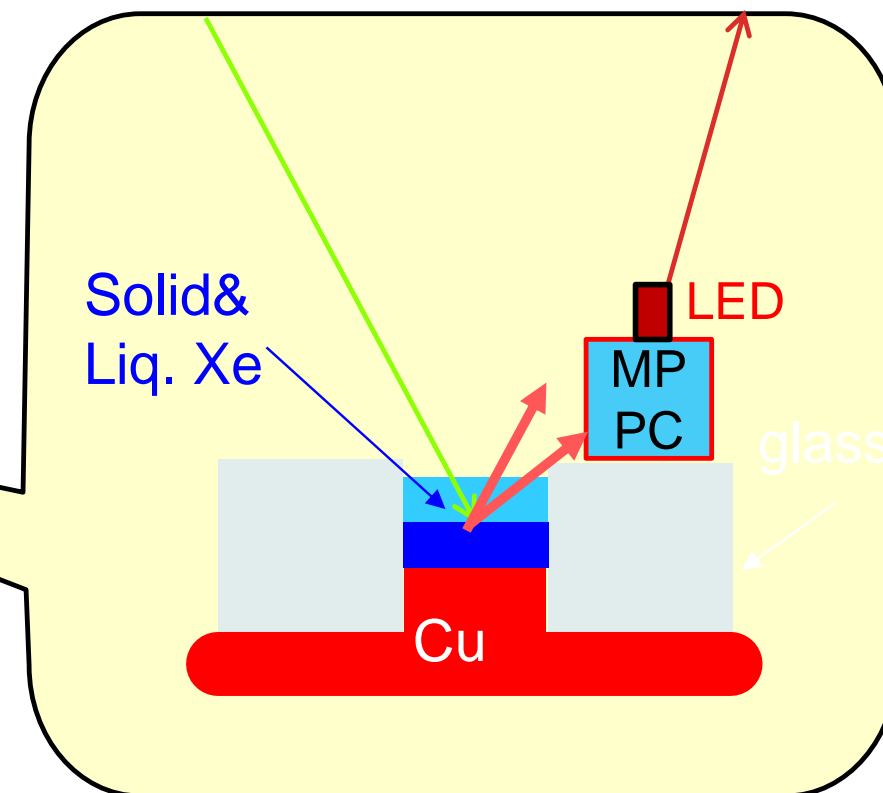


FIG. 3. Ion-beam apparatus.

AXEL方式



nEXOは、液体キセノン検出器でありプローブを崩壊点に持っていったBaイオンを捉えられるかどうか疑問
AXELは実験装置に組み込みやすい



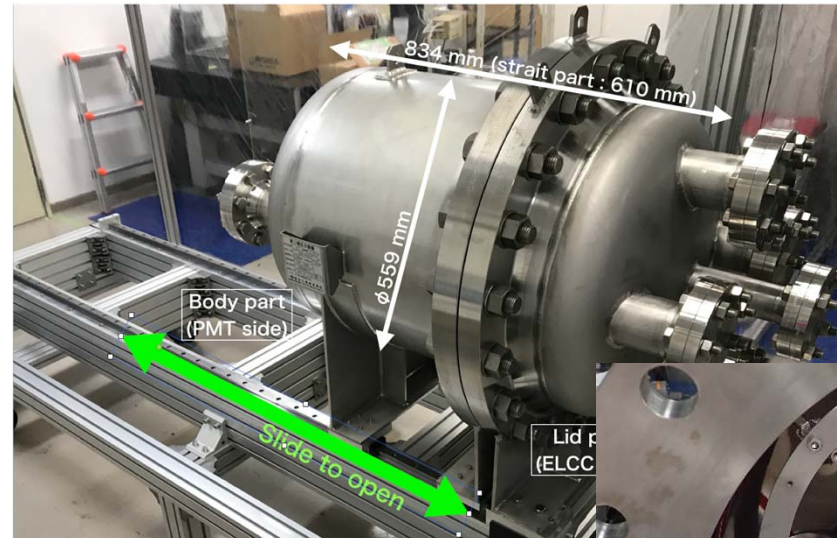
AXEL Load Map

1 ton scale

1000L(40 kg) scale

Baタグ開発

2024-
physics data taking



10-L prototype

2014-2018

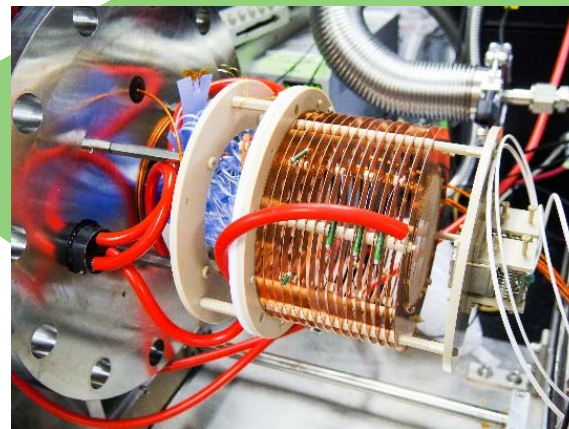
- ~0.05kg @8bar
- ELCC proof of principle



180-L prototype

2018-2020

- ~4.5kg @8bar
- phase-1 : 168 ch
phase-2 : 672ch
phase-3 : 1,512 ch



修士の学生さんのテーマ例

- 1,000L検出器の建設に向けたR&D
 - 第二世代AXELフロントエンドボード
 - ELCC大量生産技術
 - PMTフィールドケージ
 - 透明（アクティブ）ガス容器
 - 各素材の選定
- ^{136}Ba タグ
 - イオン源、レーザー、光検出器、温度コントロール機構
- 修士課程でハードウェア開発の経験を持つのは、すごく大切
- 博士課程では、状況にあわせ、AXELを続けるなり、別の実験の解析をするなり、選択肢あり。

