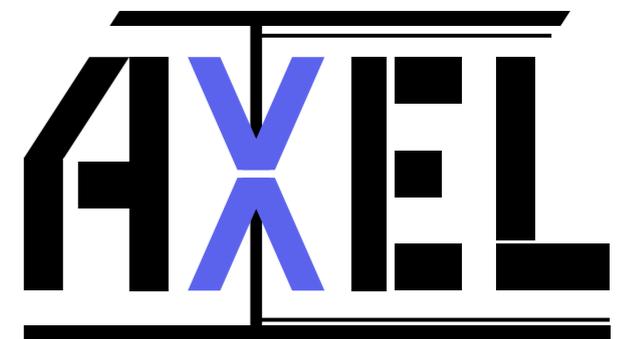


ガス飛跡検出器で探る マヨラナ・ディラック 決着への道

東北大学 学際科学フロンティア研究所

小原脩平

and for the AXEL collaboration



ニュートリノはマヨラナか？



Paul Adrien Maurice Dirac

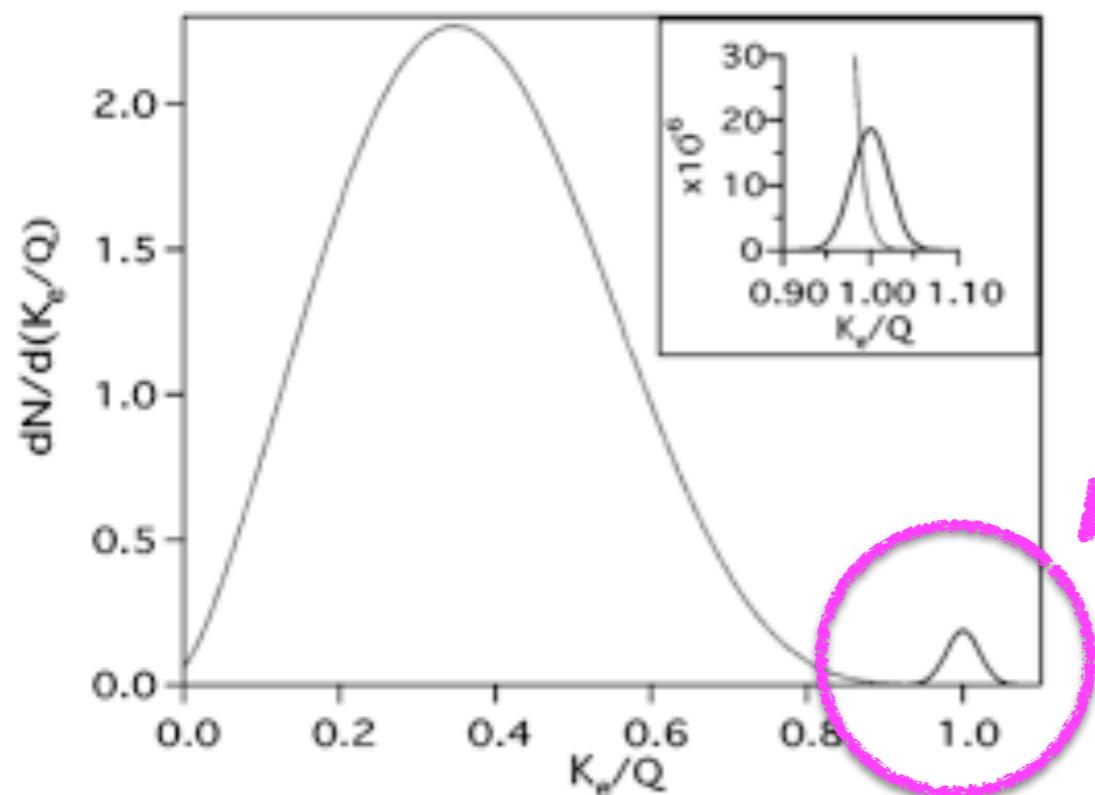


Ettore Majorana

- ▶ ニュートリノは唯一のマヨラナフェルミオンの候補
- ▶ マヨラナであってもよい

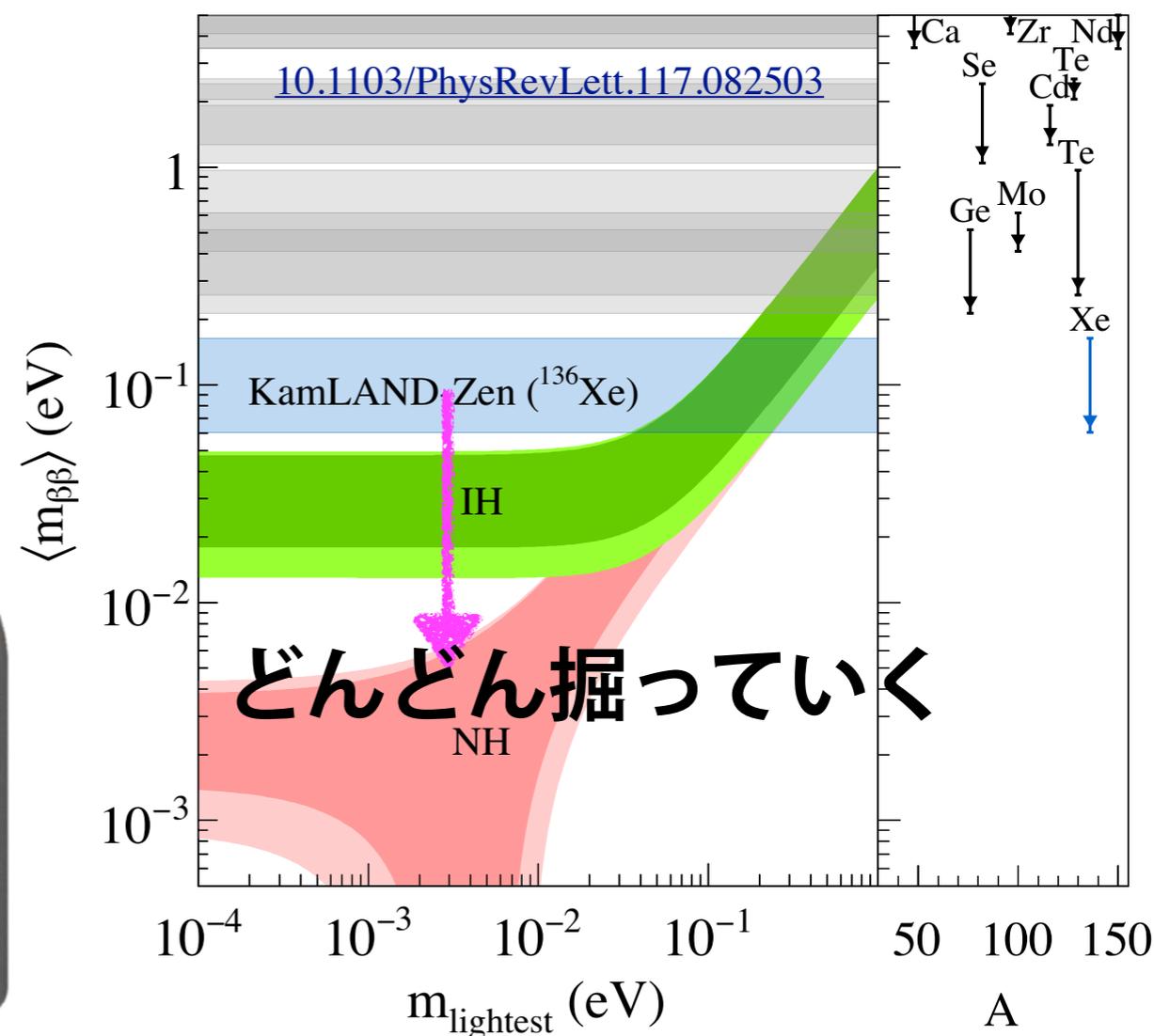
※画像はwikipediaより

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索実験

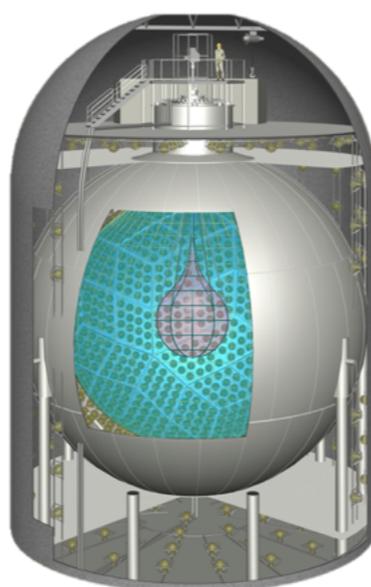
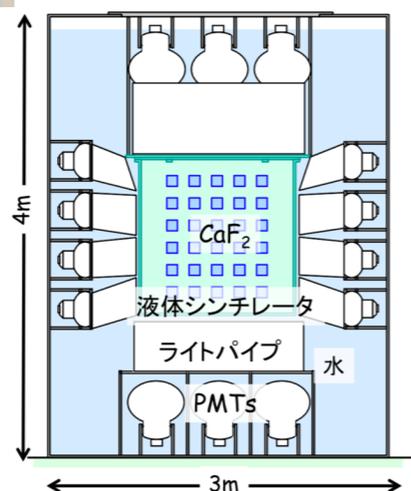
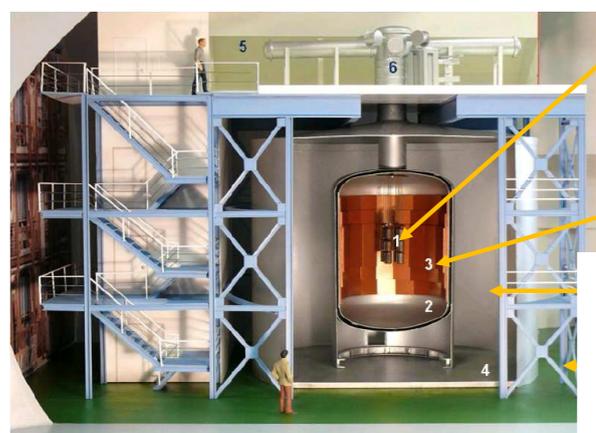


モノクロのピークを探して
半減期に制限をつけていく

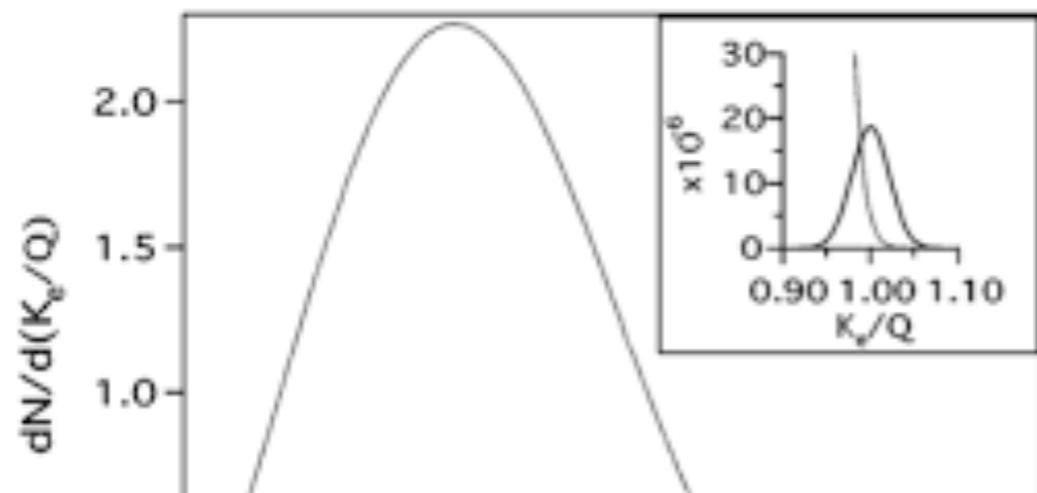
$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$



どんどん掘っていく



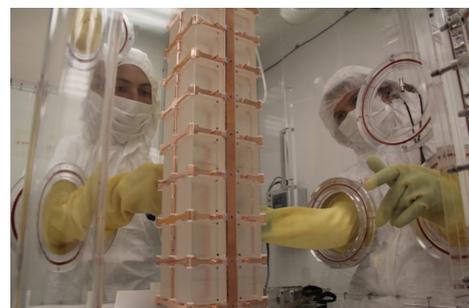
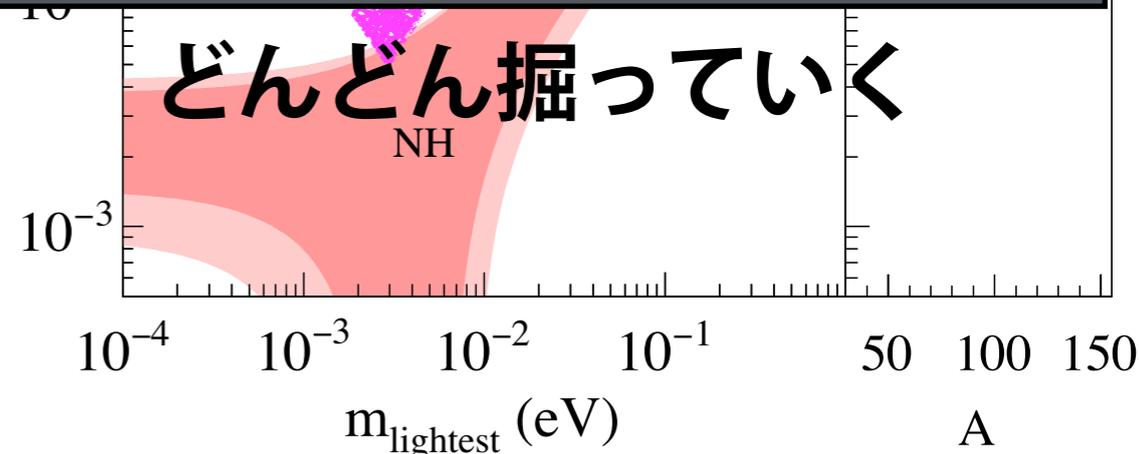
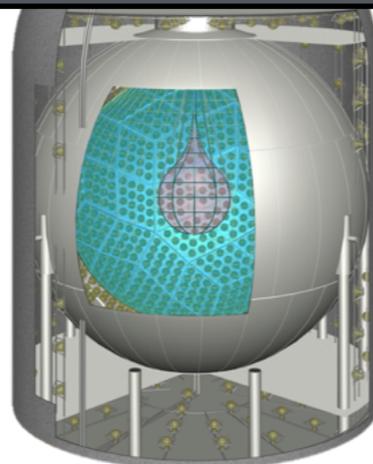
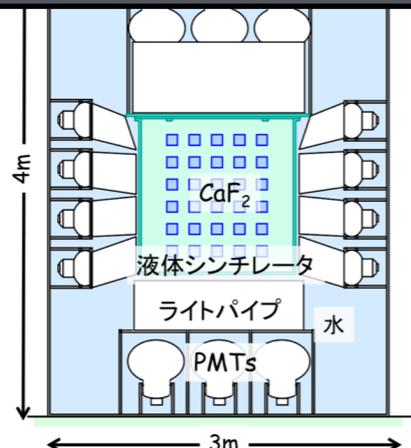
ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索実験



モノクロのピークを探して
半減期に制限をつけていく

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

0ν2β実験の高感度化 (大質量, 低背景事象)



ニュートリノはマヨラナか？



Paul Adrien Maurice Dirac

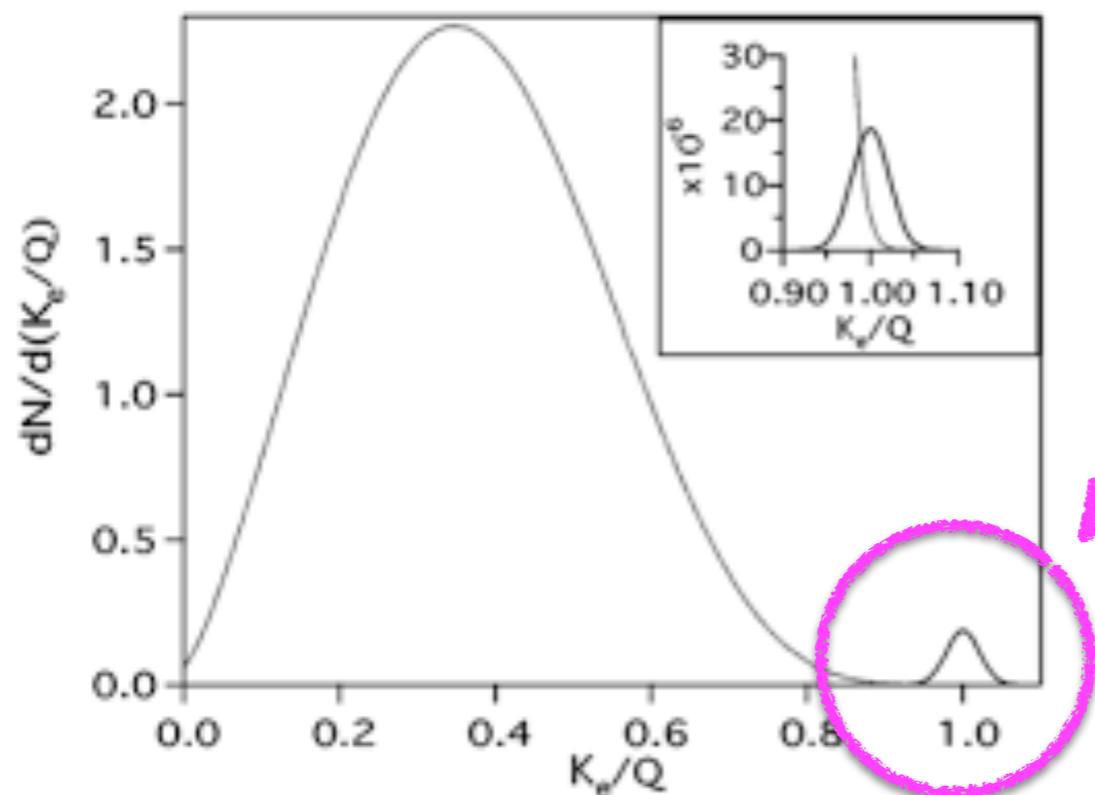


Ettore Majorana

- ▶ ニュートリノは唯一のマヨラナフェルミオンの候補
- ▶ マヨラナ であってもよい

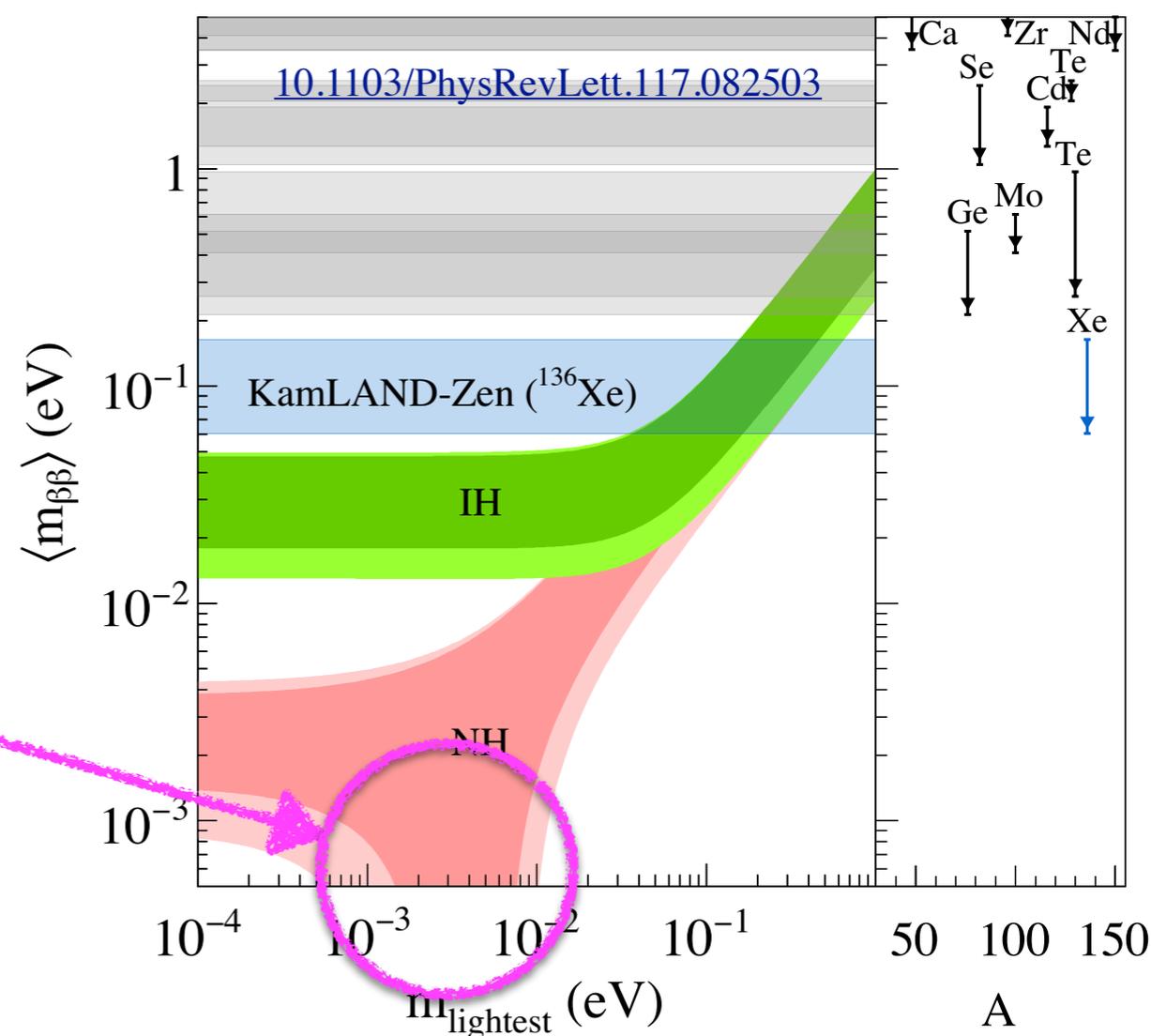
※画像はwikipediaより

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索実験



モノクロのピークが
見つからなかったら
どこまでも探索?

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$



仮に将来,
高感度実験&長期測定できたとして
運が悪かったら本当はマヨラナでも
信号はずっと見えないまま

ニュートリノを伴わない四重ベータ崩壊の探索

J. Heeck, Phys. Rev. D 88, (2013) 076004

[10.1103/PhysRevD.88.076004](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.88.076004)

[10.1016/j.physletb.2018.03.073](https://arxiv.org/abs/10.1016/j.physletb.2018.03.073)

<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.119.041801>

<https://arxiv.org/pdf/1906.07180.pdf>

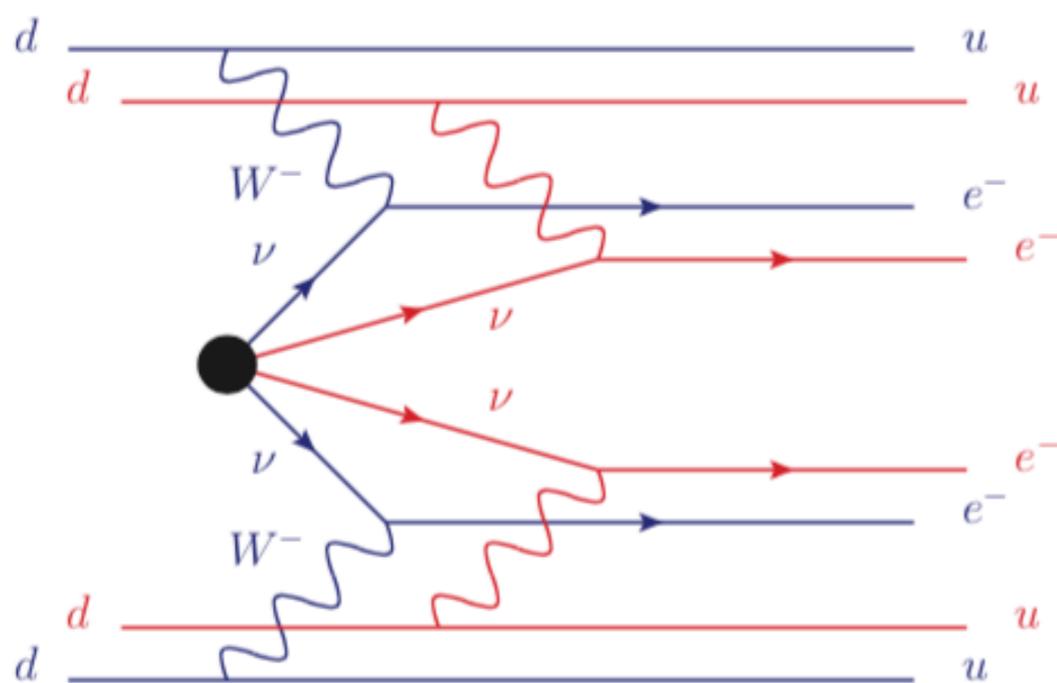


Figure 2: Neutrinoless quadruple beta decay $4d \rightarrow 4u + 4e^-$ via a $\Delta L = 4$ operator $(\bar{\nu}^c \nu)^2$ (filled circle). Arrows denote flow of lepton number, colors are for illustration purposes.

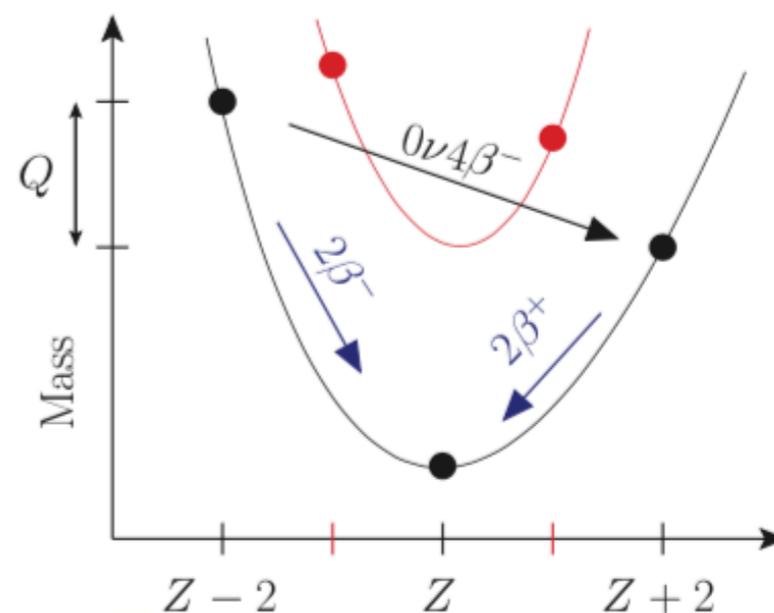


Figure 3: Three beta-stable even-even nuclei on their mass parabola (black). The heaviest isobar ($A, Z - 2$) can decay either via double beta decay into the lowest state (A, Z), or via $0\nu 4\beta^-$ into the medium state ($A, Z + 2$). Also shown are the “forbidden” odd-odd states in between (red).

• DiracニュートリノでLeptonNumberViolationをつくる事を考えた

• この時 0ν2βは起こらないが 0ν4βが起きうる

※他 0ν4ECなども

ニュートリノを伴わない四重ベータ崩壊の探索

J. Heeck, Phys. Rev. D 88, (2013) 076004

[10.1103/PhysRevD.88.076004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.076004)

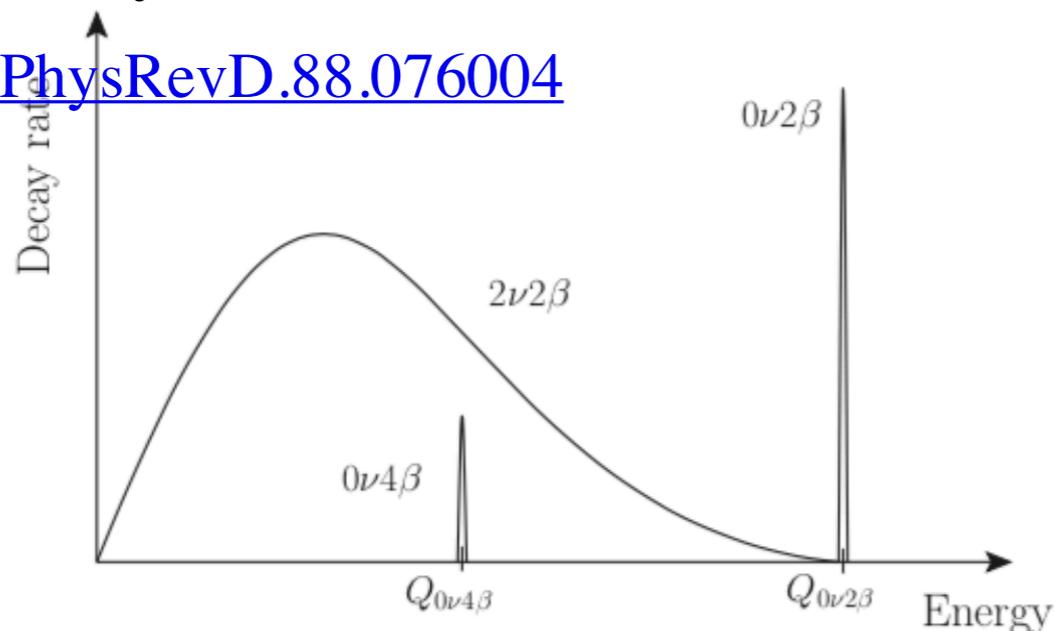


Figure 4: Sum of kinetic electron energies in the beta decays $0\nu 2\beta$, $2\nu 2\beta$, and $0\nu 4\beta$. Relative contribution not to scale.

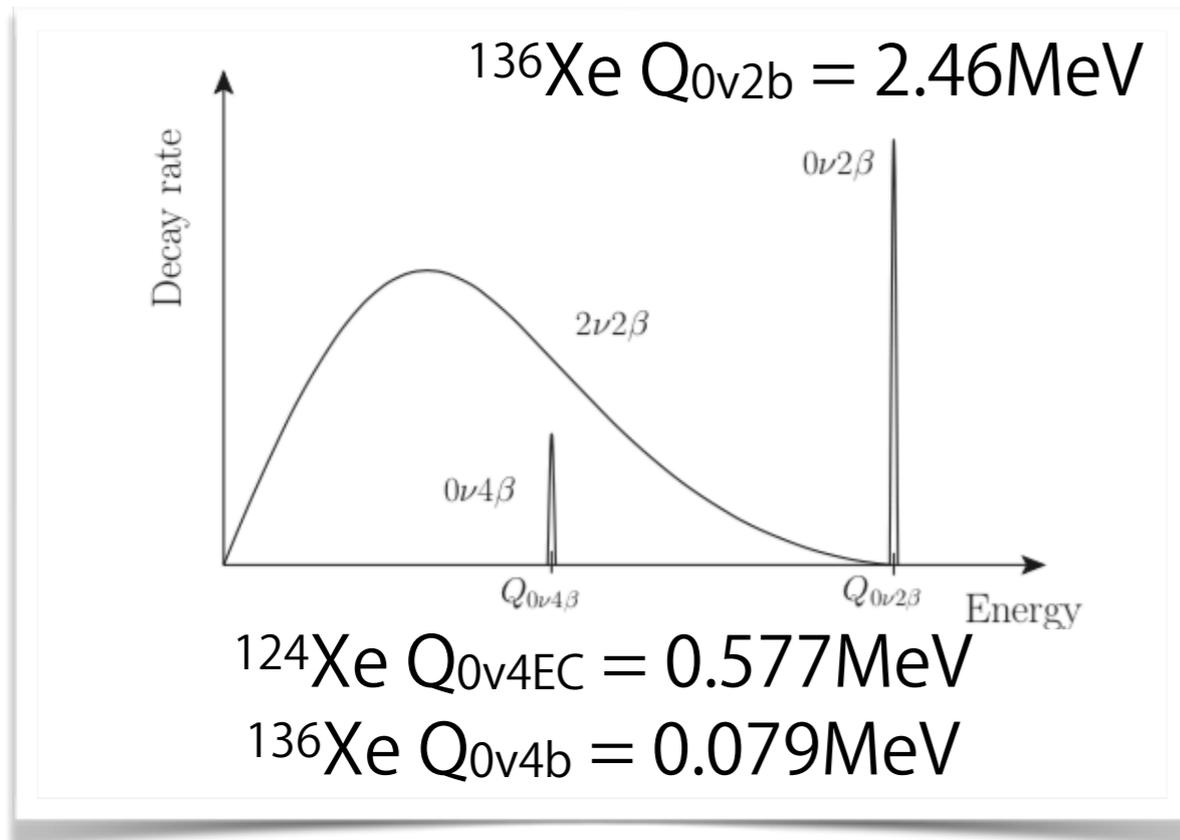
	$Q_{0\nu 4\beta}$	Other decays	NA
${}^{96}_{40}\text{Zr} \rightarrow {}^{96}_{44}\text{Ru}$	0.629	$\tau_{1/2}^{2\nu 2\beta} \simeq 2 \times 10^{19}$	2.8
${}^{136}_{54}\text{Xe} \rightarrow {}^{136}_{58}\text{Ce}$	0.044	$\tau_{1/2}^{2\nu 2\beta} \simeq 2 \times 10^{21}$	8.9
${}^{150}_{60}\text{Nd} \rightarrow {}^{150}_{64}\text{Gd}$	2.079	$\tau_{1/2}^{2\nu 2\beta} \simeq 7 \times 10^{18}$	5.6
	$Q_{0\nu 4\text{EC}}$		
${}^{124}_{54}\text{Xe} \rightarrow {}^{124}_{50}\text{Sn}$	0.577	—	0.095
${}^{130}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{130}_{52}\text{Te}$	0.090	$\tau_{1/2}^{2\nu 2\text{EC}} \sim 10^{21}$	0.106
${}^{148}_{64}\text{Gd} \rightarrow {}^{148}_{60}\text{Nd}$	1.138	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 75$	—
${}^{154}_{66}\text{Dy} \rightarrow {}^{154}_{62}\text{Sm}$	2.063	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—
	$Q_{0\nu 3\text{EC}\beta^+}$		
${}^{148}_{64}\text{Gd} \rightarrow {}^{148}_{60}\text{Nd}$	0.116	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 75$	—
${}^{154}_{66}\text{Dy} \rightarrow {}^{154}_{62}\text{Sm}$	1.041	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—
	$Q_{0\nu 2\text{EC}2\beta^+}$		
${}^{154}_{66}\text{Dy} \rightarrow {}^{154}_{62}\text{Sm}$	0.019	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—

- 普通は 2ν のスペクトルに埋もれてしまうので探索が難しい
- 例えばNEMOなどの飛跡検出器では4本の飛跡を探して上限値を出している
- でもTracker-Typeでは大質量にできないので統計が稼げない

ガス検出器 → 大質量 && 高エネルギー ΔE && 飛跡検出器

高圧XeガスTPCでの $0\nu 2b$ & $0\nu 4b$ 探索

- $0\nu 2b$ の発見 \Rightarrow Majorana neutrino
- $0\nu 2b$ の未発見 & $0\nu 4b$ を発見 \Rightarrow Dirac neutrino



- $0\nu 2b$ or $2\nu 2b$?
 $\rightarrow \Delta E$ で見分ける
- LongLife?
 \rightarrow 大質量が使える
- $(2\nu)2b$ or $(0\nu)4b$?
 \rightarrow 飛跡の本数で見分ける

キセノンガスTPCで

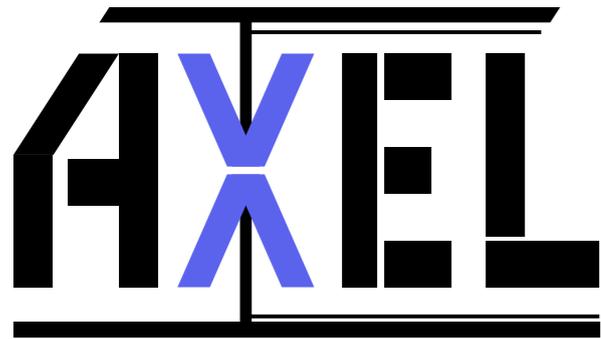
大質量 & 高エネルギー ΔE & 飛跡検出器

\rightarrow まずは原理検証

を実現したら、両方同時に探索ができる

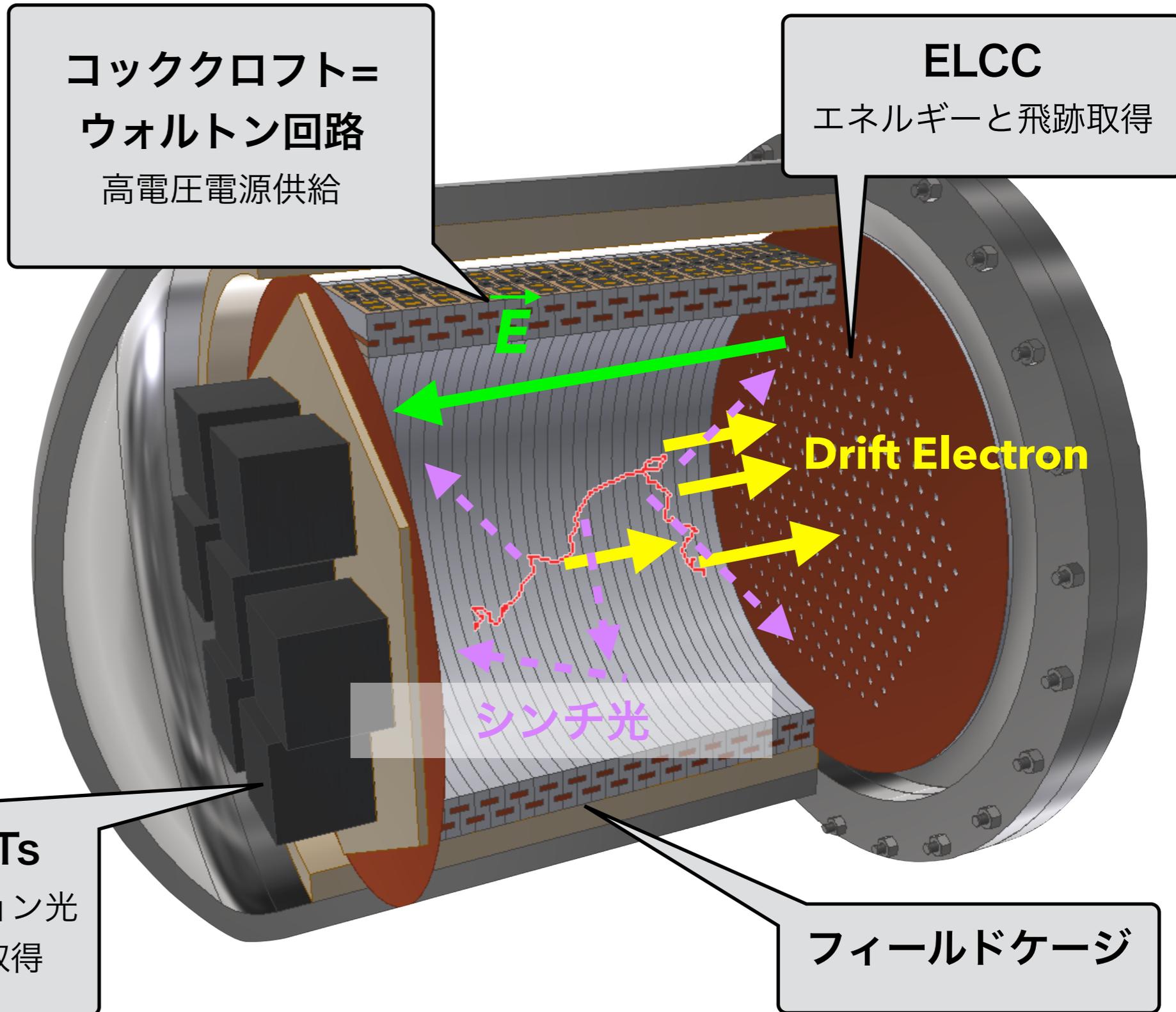
AXEL

(A Xenon ElectroLuminescence detector)



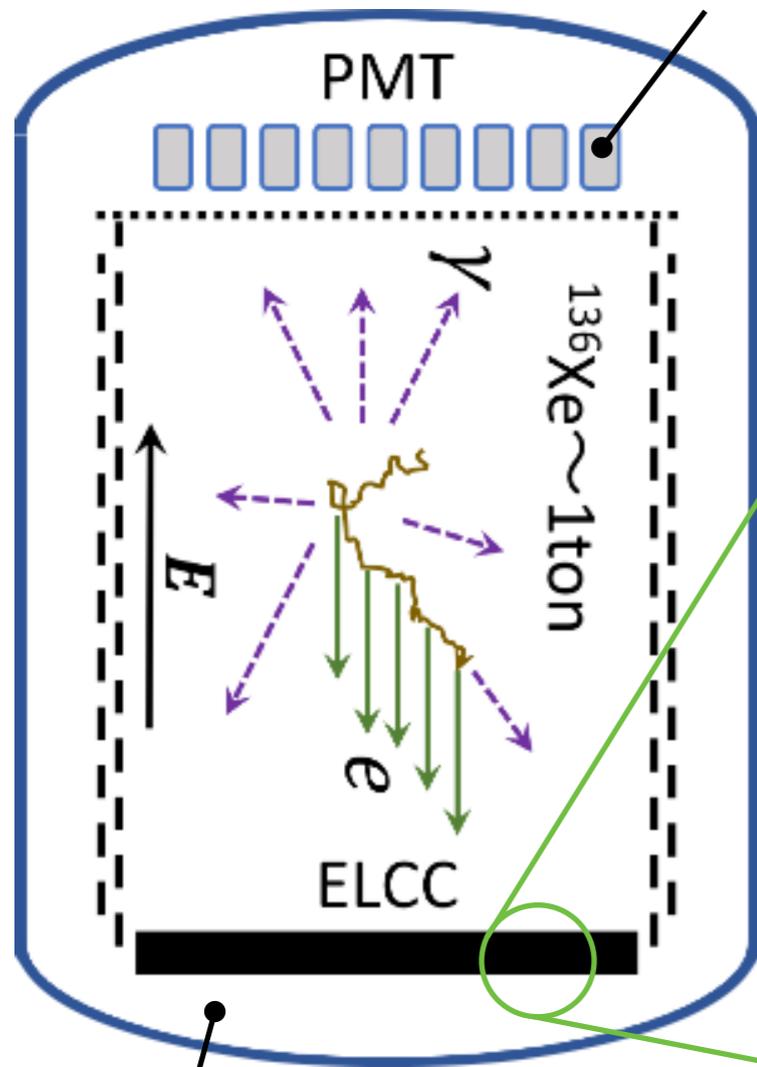
NEXT, PANDAX-III実験
と似たコンセプト

- ^{136}Xe for $0\nu 2\beta$
- 1ton? キセノンガス
- ~6--8気圧?



AXEL検出器 & ELCC (3-Units)

PMT; Xe-シンチを捉えて事象発生時刻を記録



ELCC; 電離電子を捉えて

エネルギー & 飛跡取得
(ElectroLuminescence Collection Cell)

Cathode

Anode

5mm

MPPC

MPPC

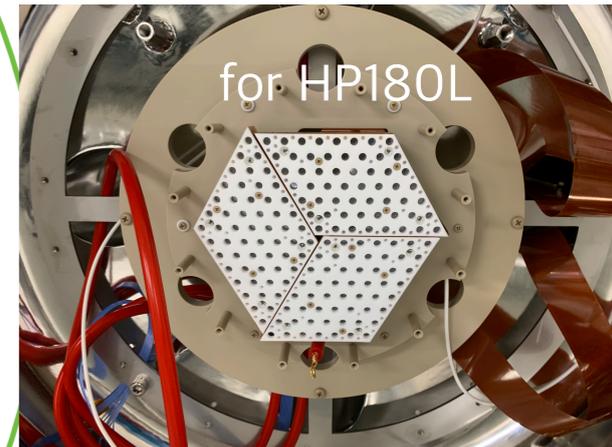
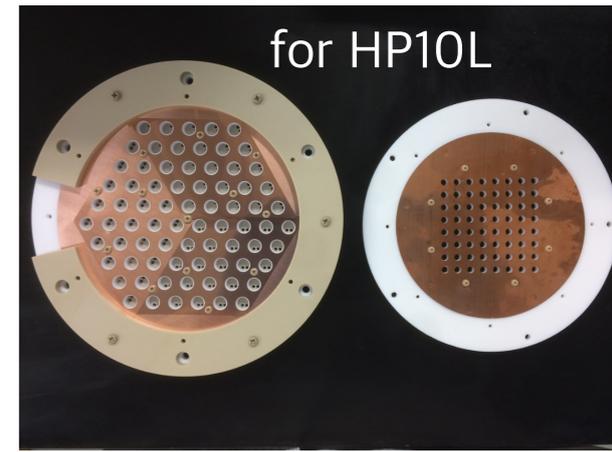
MPPC

E_{Drift}

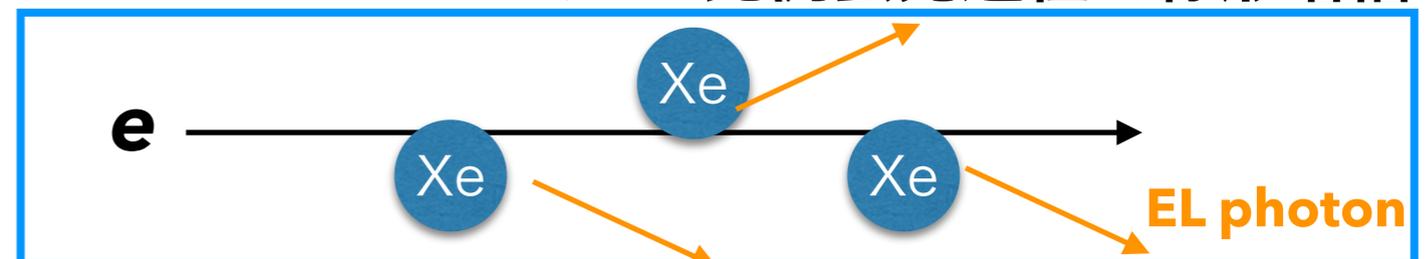
$E_{Drift} \sim 0.1 \text{ kV/cm/atm}$

$E_{EL} \sim 2.5 \text{ kV/cm/atm}$

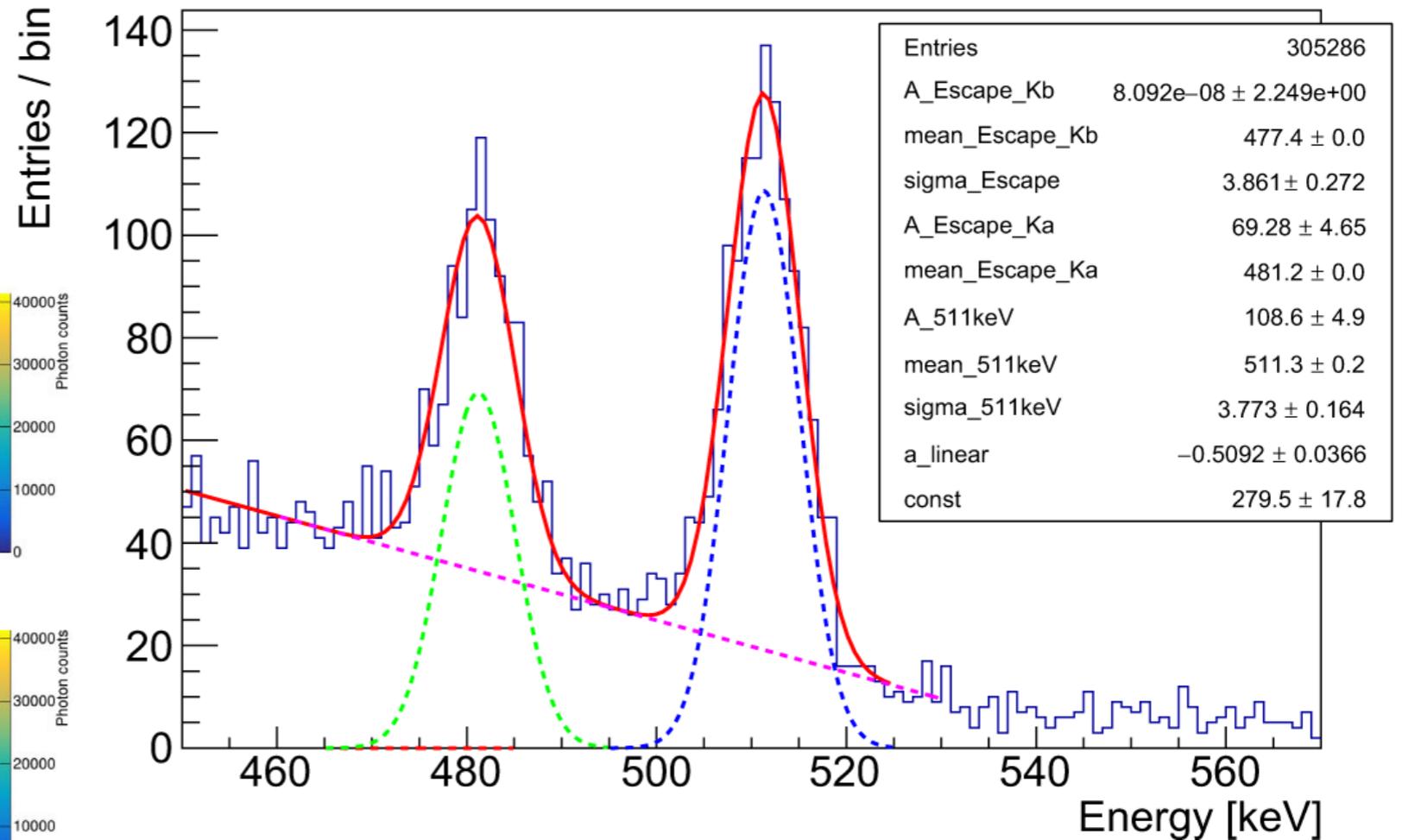
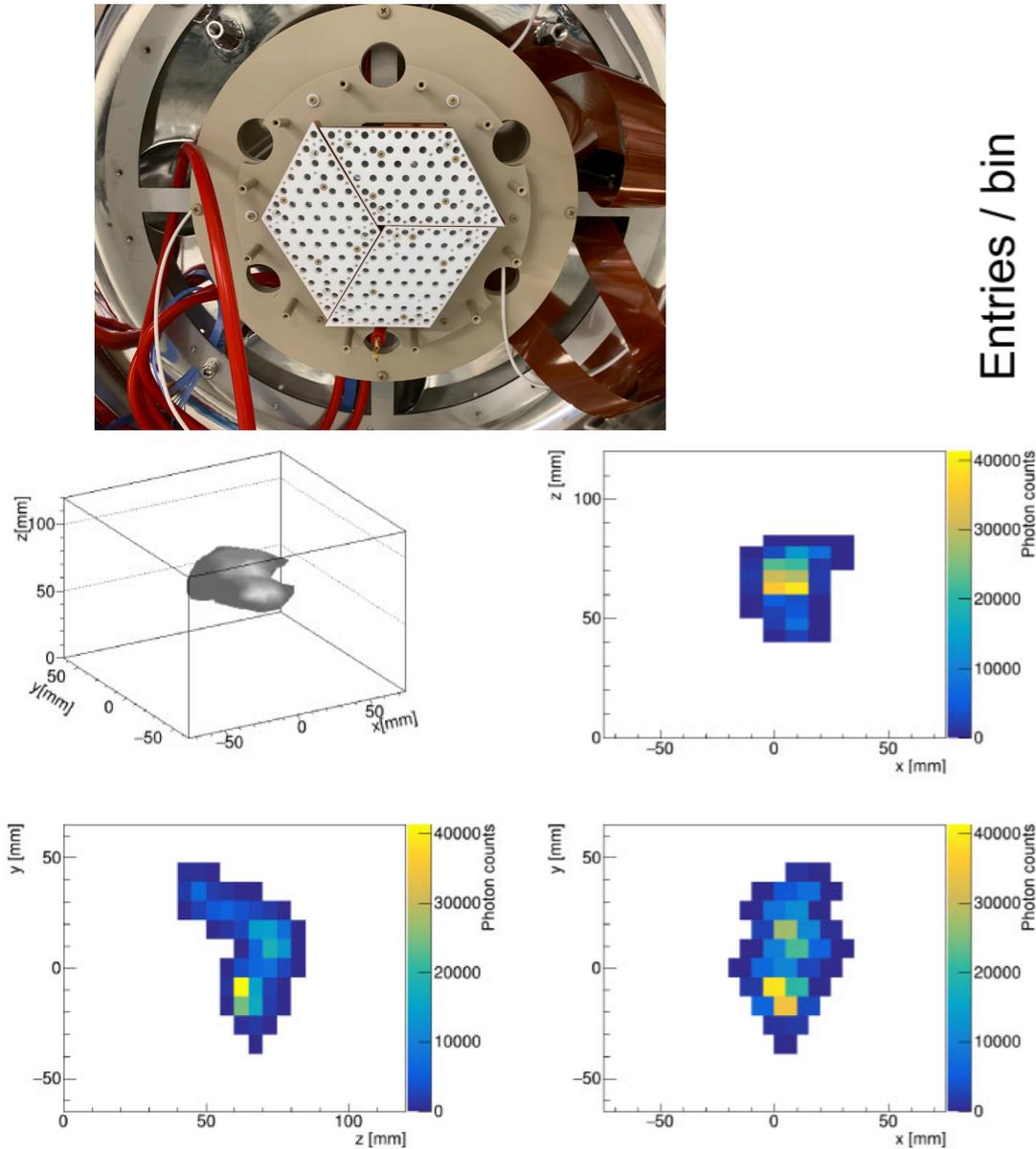
EEL



比例蛍光過程で線形増幅



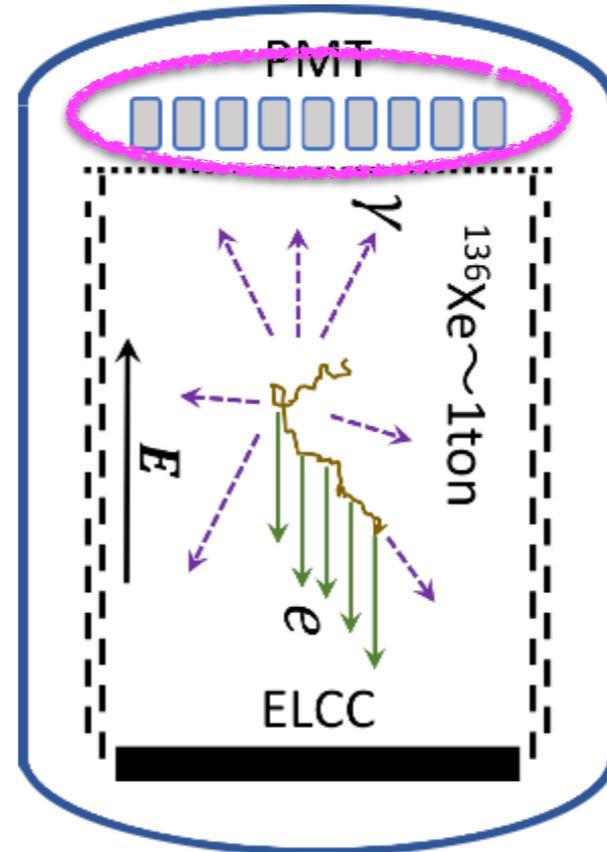
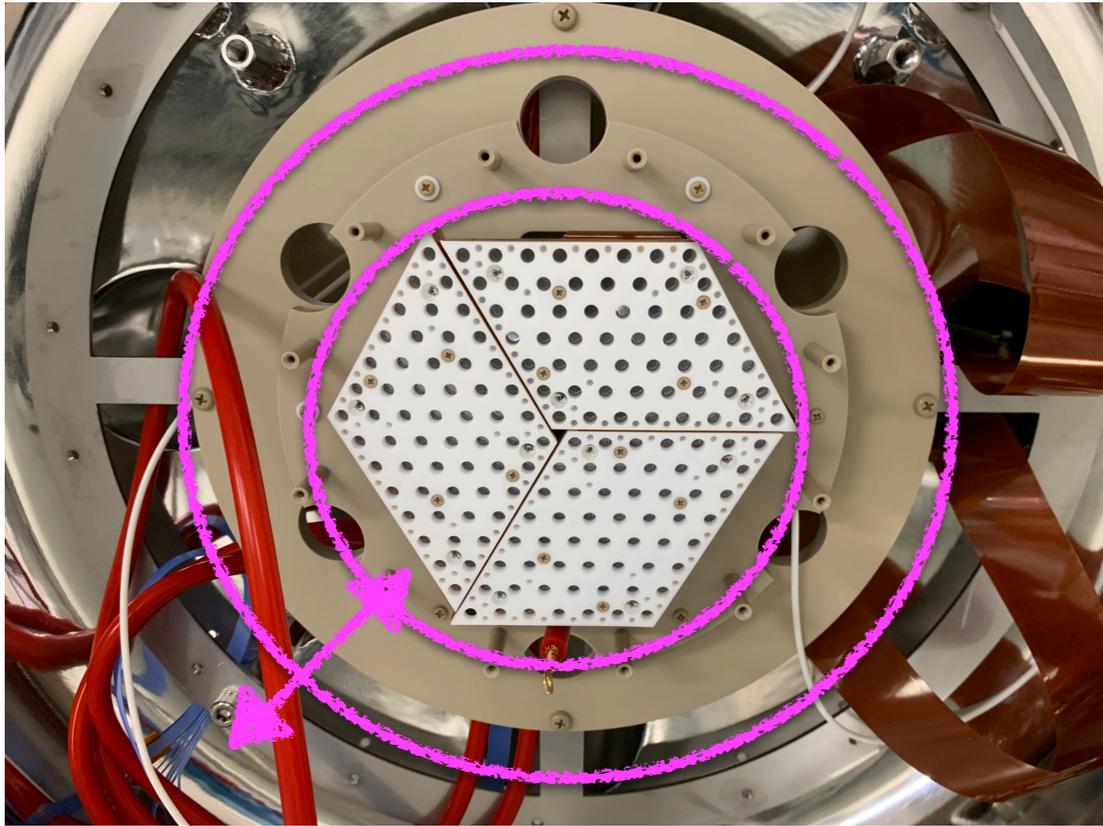
最近の結果 (with 3-Units)



<https://academic.oup.com/ptep/article/2020/3/033H01/5812338>

- ☑ 基本的な設計概念が確立, 大型化の目処
- ☑ 有効面積は3/27-unitだが, 511keVで良い ΔE を得た
- ☑ あとは大型化をして地下実験へ

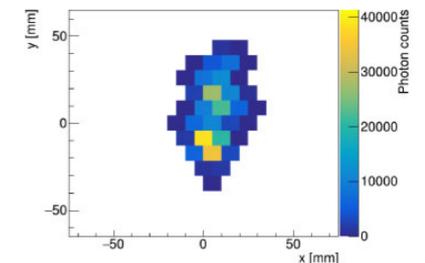
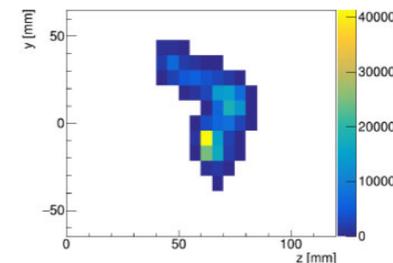
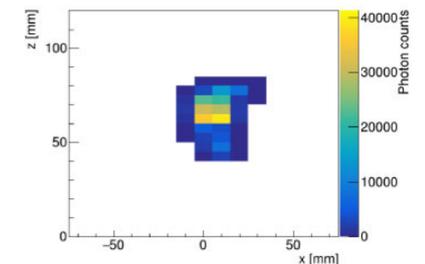
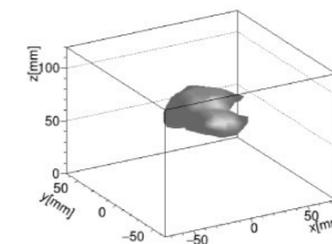
本研究で行うこと



PMT, アセンブリが高価
first flightでは波形/電荷
量を捨てたtriggerで
DAQ

MPPC, プリント基板等が高価でまだ揃っていない

- 飛跡検出面の残りユニットを埋める
- 時間検出面をセットする
- データから飛跡の再構成/分析を行う
- ブロブが4点分離できる位置分解能/飛跡検出を達成できればなんとか



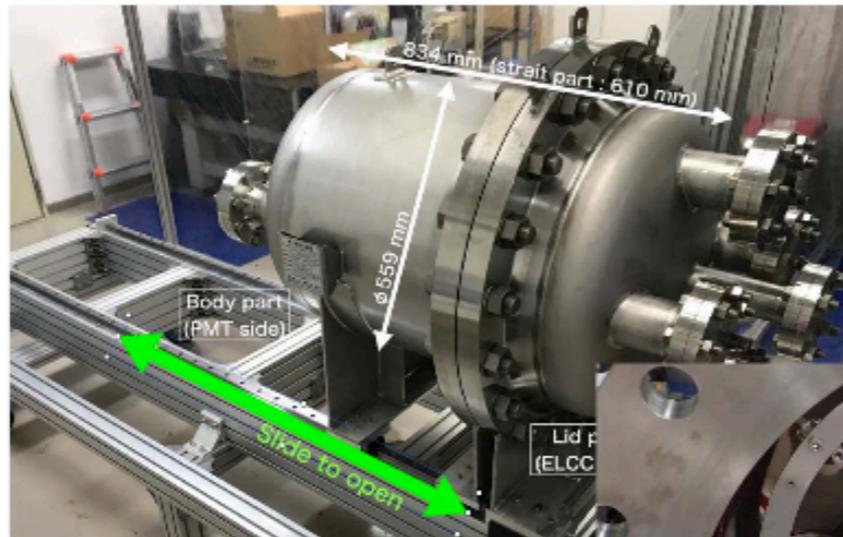
AXEL Load Map

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

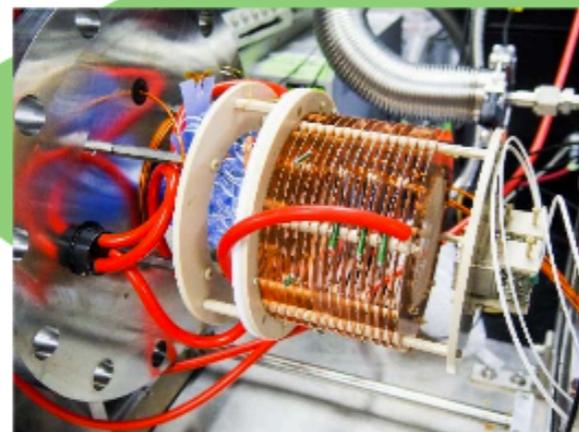


180-L prototype

2018-2020

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

※市川さんの資料から



**XeガスTPCで、0v2b(マヨラナ探索)も0v4b(ディラック探索)も
両方同時にできる検出器であるということを証明して、将来の大型地下実験につなげる**

本研究で(なんとか)与えられそうな物理結果

	$Q_{0\nu4\beta}$	Other decays	NA
${}_{40}^{96}\text{Zr} \rightarrow {}_{44}^{96}\text{Ru}$	0.629	$\tau_{1/2}^{2\nu2\beta} \simeq 2 \times 10^{19}$	2.8
${}_{54}^{136}\text{Xe} \rightarrow {}_{58}^{136}\text{Ce}$	0.044	$\tau_{1/2}^{2\nu2\beta} \simeq 2 \times 10^{21}$	8.9
${}_{60}^{150}\text{Nd} \rightarrow {}_{64}^{150}\text{Gd}$	2.079	$\tau_{1/2}^{2\nu2\beta} \simeq 7 \times 10^{18}$	5.6
	$Q_{0\nu4EC}$		
${}_{54}^{124}\text{Xe} \rightarrow {}_{50}^{124}\text{Sn}$	0.577	—	0.095
${}_{56}^{130}\text{Ba} \rightarrow {}_{52}^{130}\text{Te}$	0.090	$\tau_{1/2}^{2\nu2EC} \sim 10^{21}$	0.106
${}_{64}^{148}\text{Gd} \rightarrow {}_{60}^{148}\text{Nd}$	1.138	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 75$	—
${}_{66}^{154}\text{Dy} \rightarrow {}_{62}^{154}\text{Sm}$	2.063	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—
	$Q_{0\nu3EC\beta^+}$		
${}_{64}^{148}\text{Gd} \rightarrow {}_{60}^{148}\text{Nd}$	0.116	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 75$	—
${}_{66}^{154}\text{Dy} \rightarrow {}_{62}^{154}\text{Sm}$	1.041	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—
	$Q_{0\nu2EC2\beta^+}$		
${}_{66}^{154}\text{Dy} \rightarrow {}_{62}^{154}\text{Sm}$	0.019	$\tau_{1/2}^{\alpha} \simeq 3 \times 10^6$	—

現行のAXEL検出器(HP180L)

natXe 約8kgを保持

- ${}^{136}\text{Xe}$ 0v4b (Q = 79 keV) \rightarrow ~0.8kg
- ${}^{124}\text{Xe}$ 0v4EC (Q = 577 keV) \rightarrow ~0.008kg

4本のプロブ + Q値の分解能を生かして探索

上限値をつける

(1年間データ取得ができれば $T_{1/2}^{0\nu4\beta} > \mathcal{O}(10^{21})$ yr (90% C.L.)くらいいける…かな…?)

*この表だと $Q({}^{136}\text{Xe}_{0\nu4b}) = 44$ keVだが、AME2016の論文を見ると79 keV

Summary

- $0\nu 2b$ 探索と $0\nu 4b$ 探索は相補的にニュートリノのディラック⇔マヨラナを検証できる
 - $0\nu 2b$ の発見 \Rightarrow Majorana neutrino
 - $0\nu 2b$ の未発見 && $0\nu 4b$ を発見 \Rightarrow Dirac neutrino
- XeガスTPCだったら $0\nu 2b$ と $0\nu 4b$ を同時に探索することができる
 - まず地上実験で $0\nu 4b$ を探索しうる能力 (飛跡分解能, エネルギー分解能など)があることを実証したい
 - 検出器 (AXEL-HP180L試作機) の開発・完成, 性能評価
 - Nat-Xeに含まれる核種で半減期に上限値をつける
- 低エネルギー事象なので, 背景事象の見積/除去についてD班と協力したい