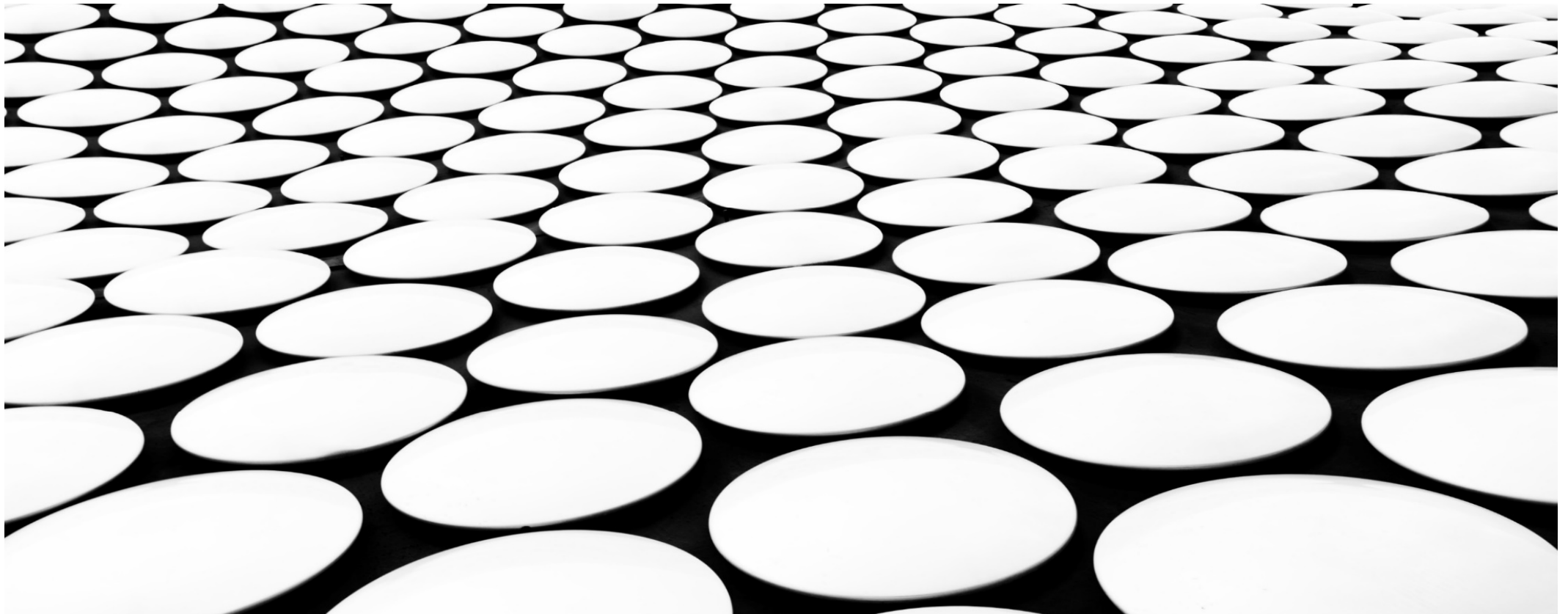


# AXEL(あくせる)

## 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ない
- ✓世界に一つの究極のすごい検出器を自分達で作りたい

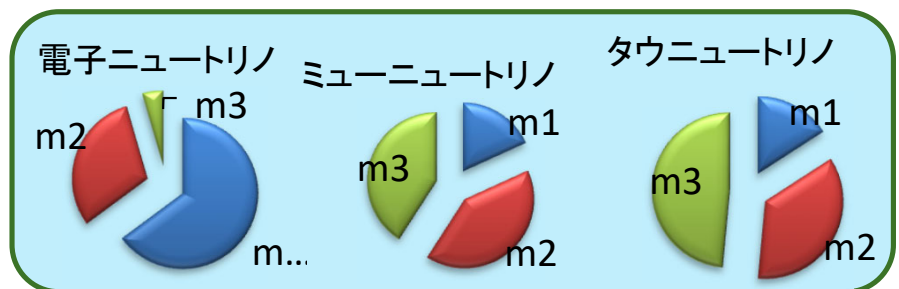
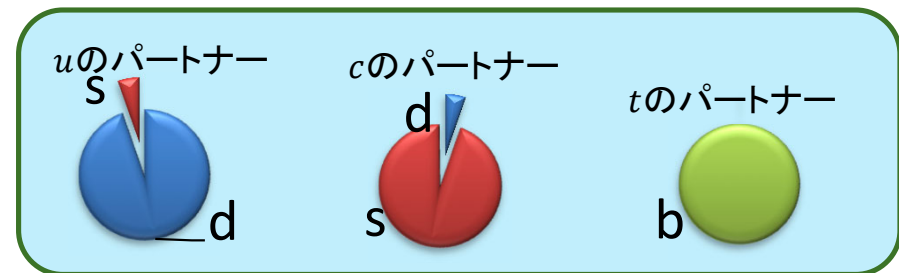
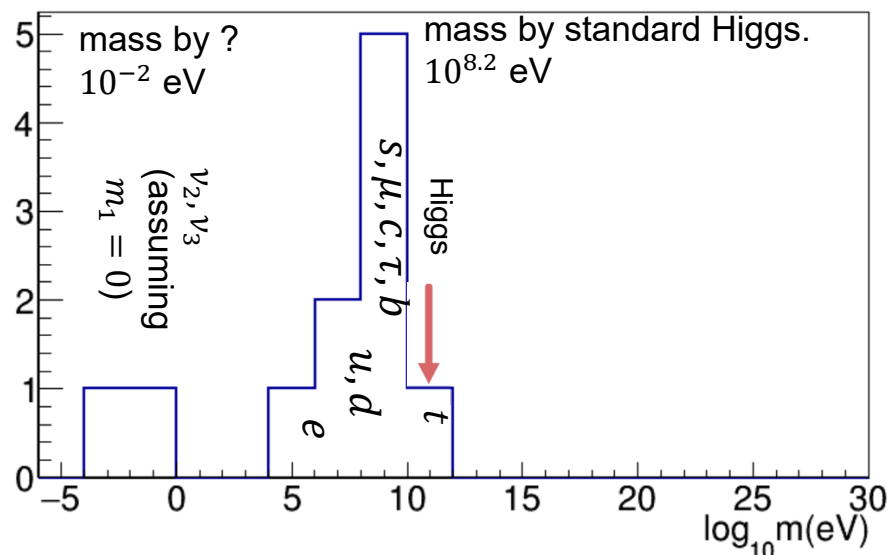


# ニュートリノの質量が変なのはなぜか？

- 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

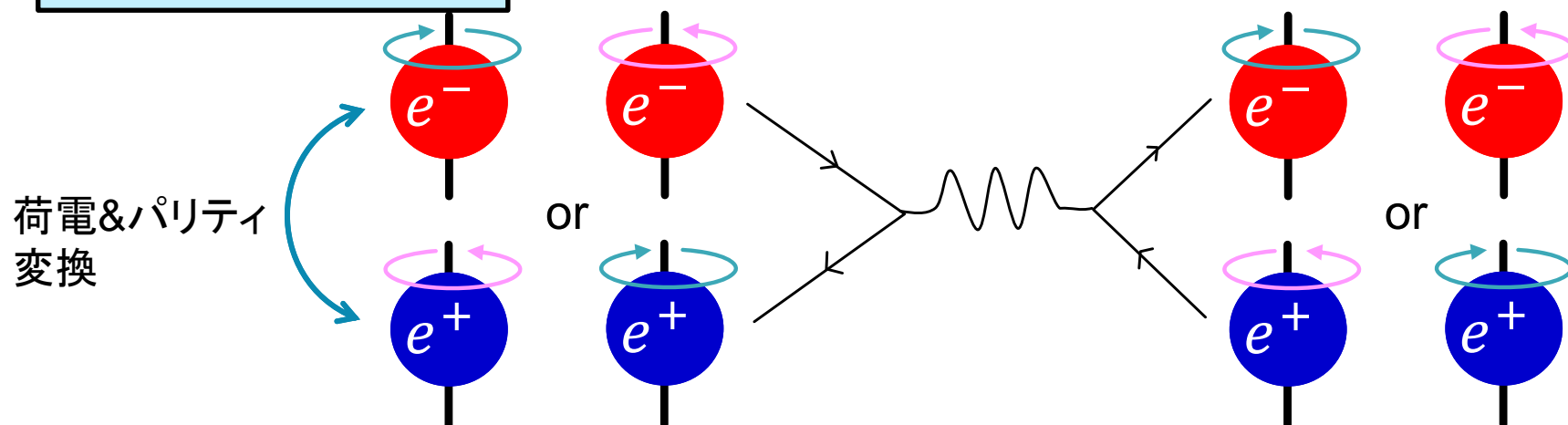
クォークの質量の固有状態とフレーバーはまあまあ一致。

- 標準理論ではニュートリノは、左巻きしかないので、質量を持ってない。
- 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

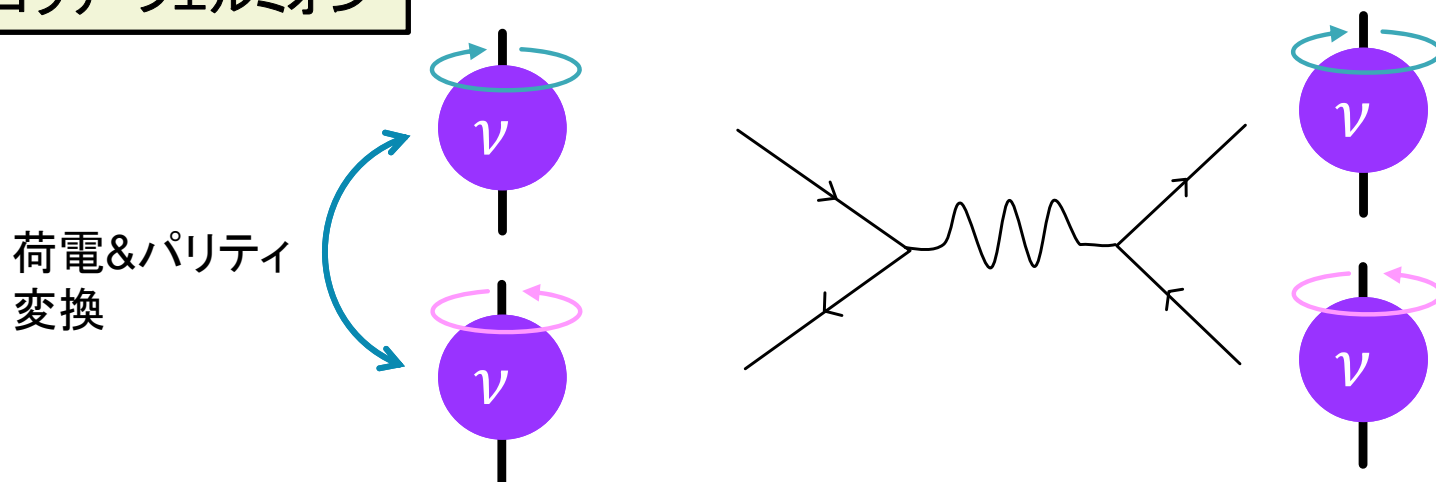


# ニュートリノは、他のフェルミオンとはちょっと違うかもしれない

## 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。

# 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モデルは、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

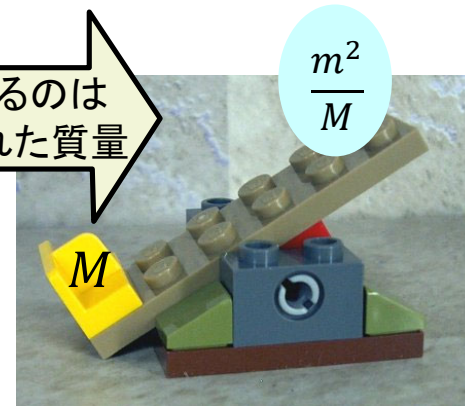
$$\begin{pmatrix} \overline{\nu_L}, \overline{(\nu_R)^c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\nu_L)^c \\ \nu_R \end{pmatrix}$$

Dirac mass  $\sim 1\text{MeV}$

Majorana mass

クォークの混合行列との違いもこれに起因？

観測されるのは  
対角化された質量



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

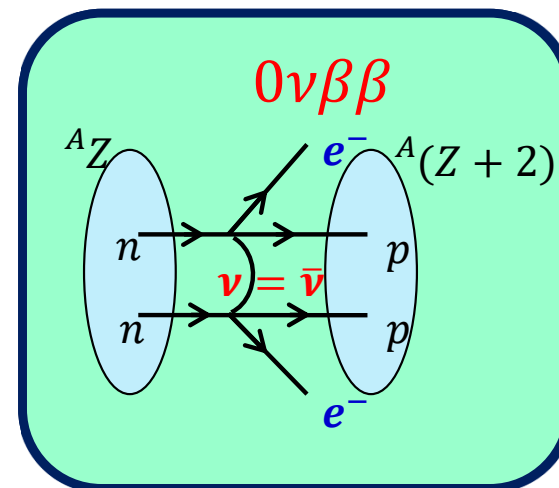
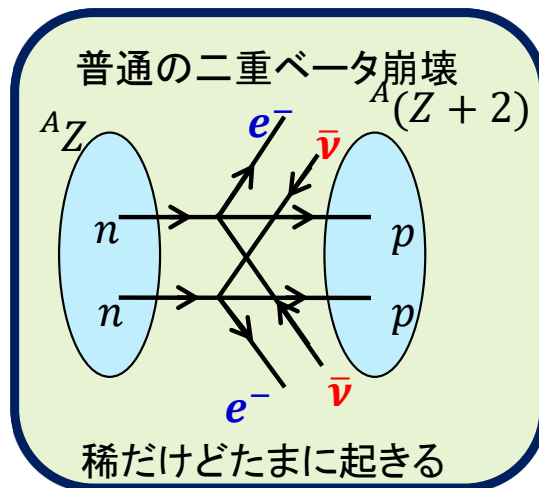
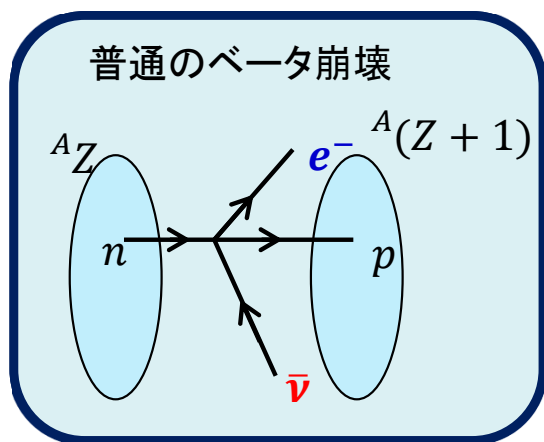
## レプトジェネシス

- $N_R$  (重い右巻きニュートリノ) の崩壊で軽い  $\nu$  と Higgs を生成。この時に CP の破れ  $\rightarrow$  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  $\rightarrow$  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

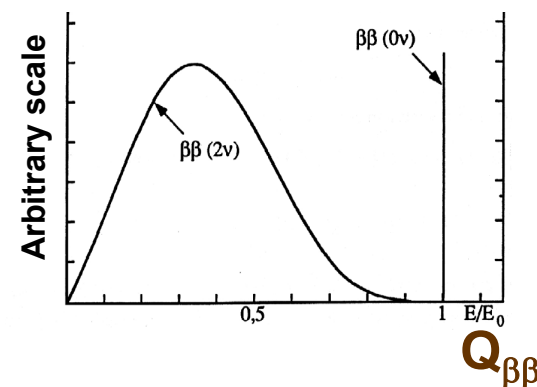
# “ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”(0νββ)



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)<sup>-2</sup>

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

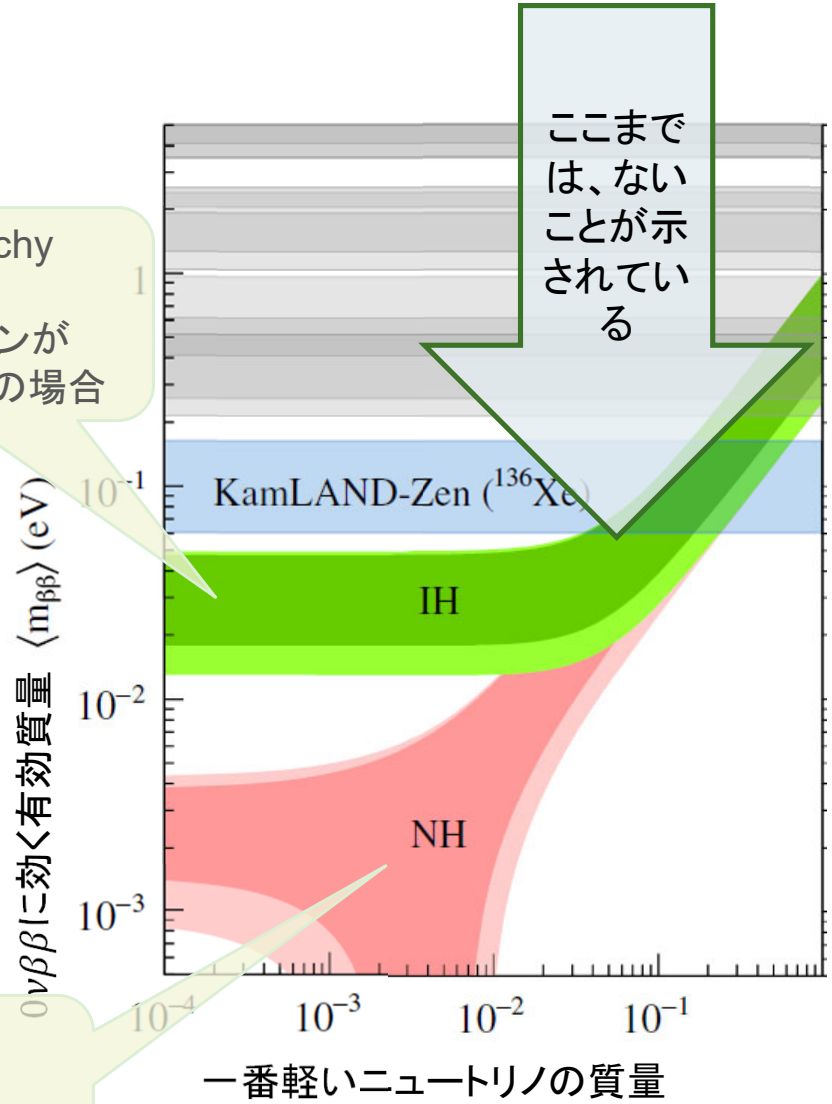


# 現状

目指すは、  
これ！

Inverted Hierarchy  
ニュートリノ  
の質量のパターンが  
 $m_3 < m_1 < m_2$ の場合

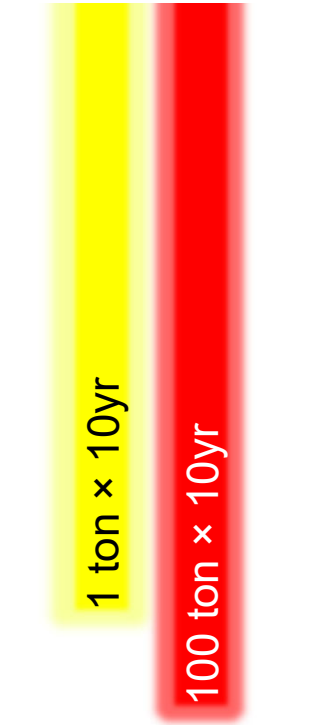
Normal Hierarchy  
ニュートリノ  
の質量のパターンが  
 $m_1 < m_2 < m_3$ の場合



バックグラウンドがあると  
(某K実験の例)

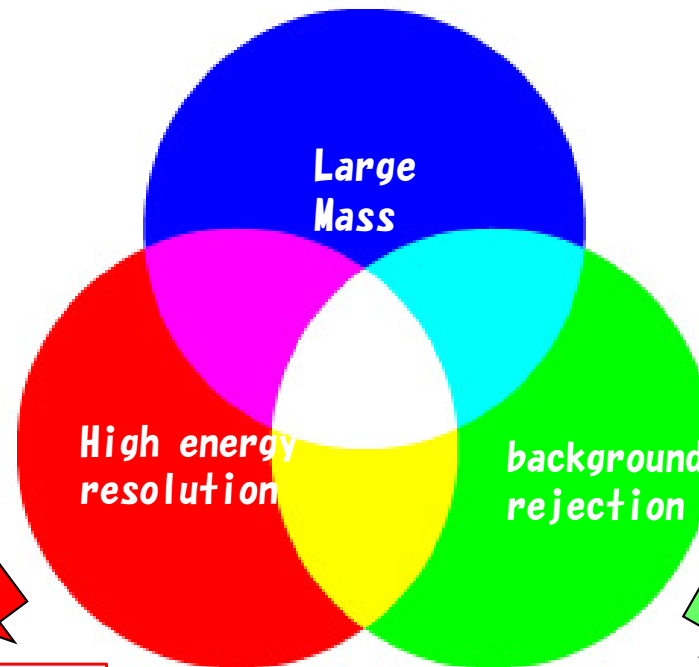


バックグラウンド  
をなしにできると



# 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イヤー

$^{136}\text{Xe}$   
abundance : 8.9%  
 $Q_{\beta\beta} = 2.46 \text{ MeV}$

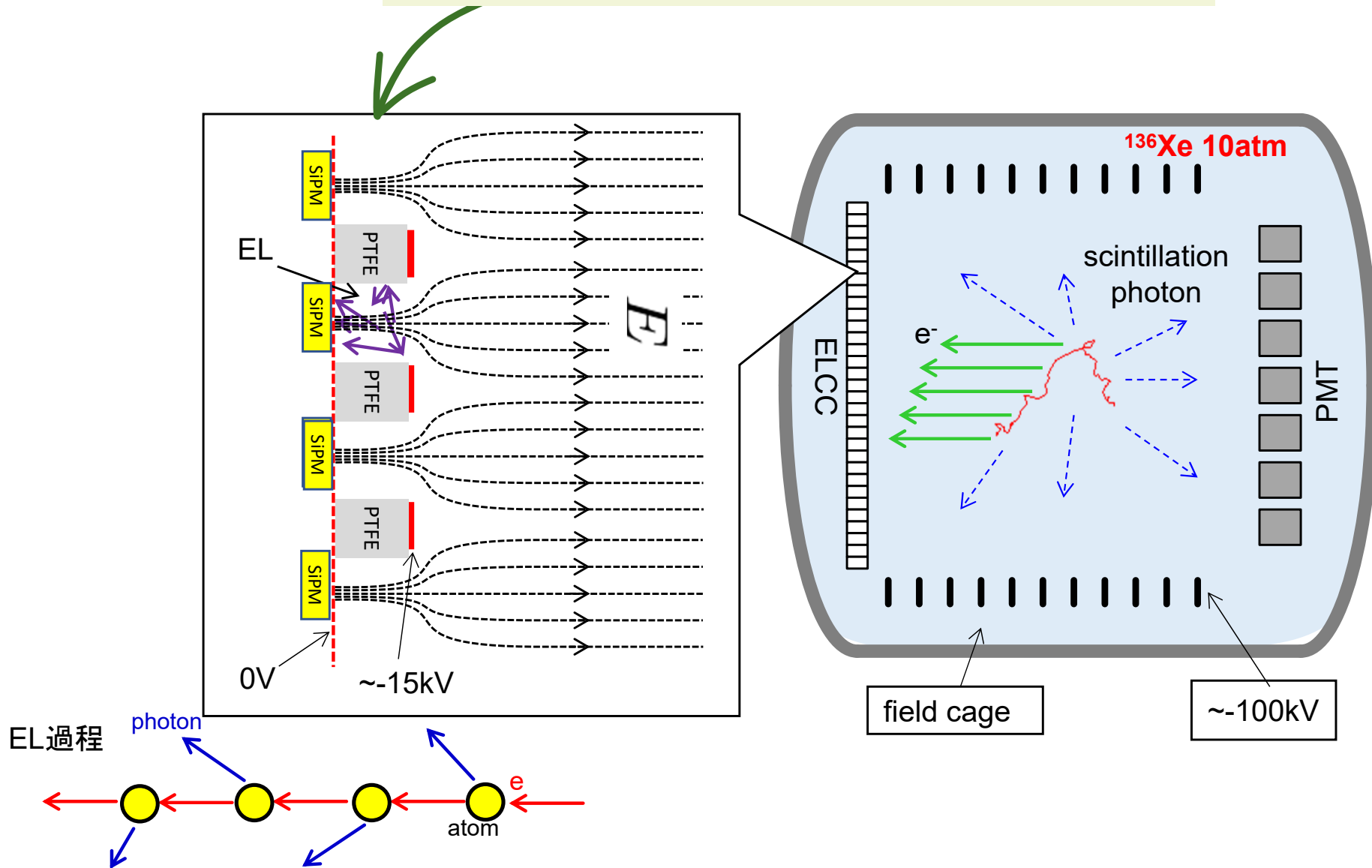


世界一のすごい検出器を！

希ガスの電離電子

電子が2本走っているのを捉える

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 メンバー

---

- 京都大学

中村和広、吉田将、菅島文悟、檜野幸将、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、小原脩平

- 東京大学

潘 晟、関谷洋之、中島康博

- KEK

坂下健、中平武

- 神戸大学

身内賢太郎

- 横浜国立大学

南野彰宏

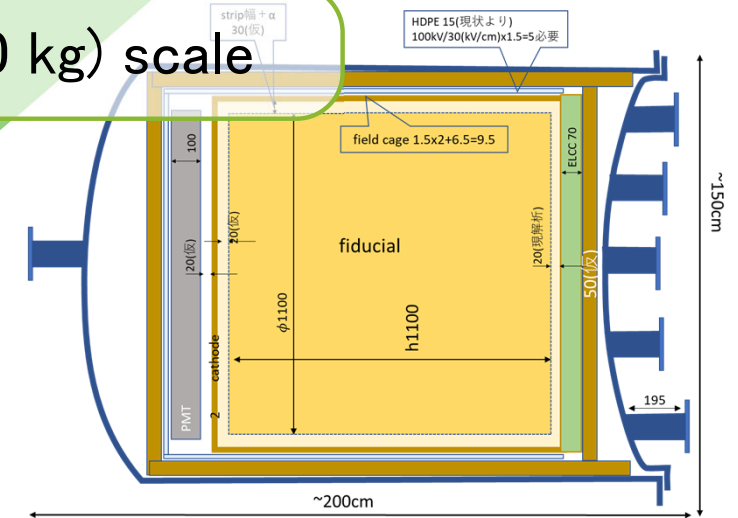
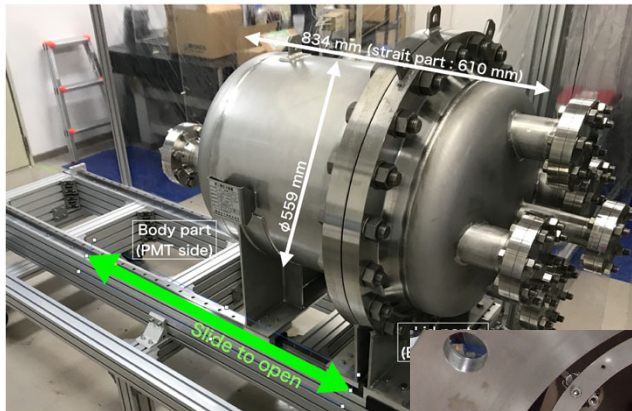
# AXEL Load Map

10 ton scale

1 ton scale

2023-  
physics data taking

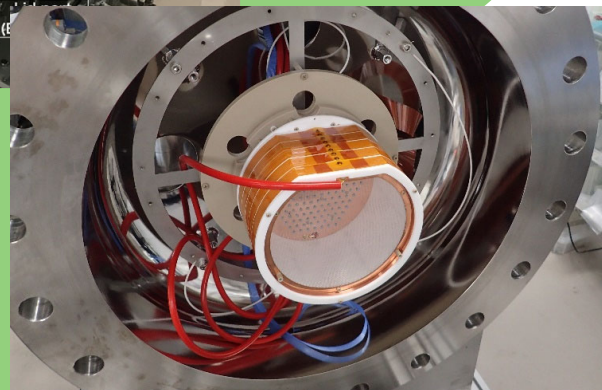
1000L(40 kg) scale



10-L prototype

2014-2018

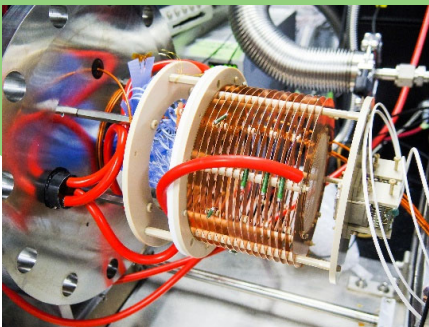
- ~0.05kg @8bar
- ELCC proof of principle



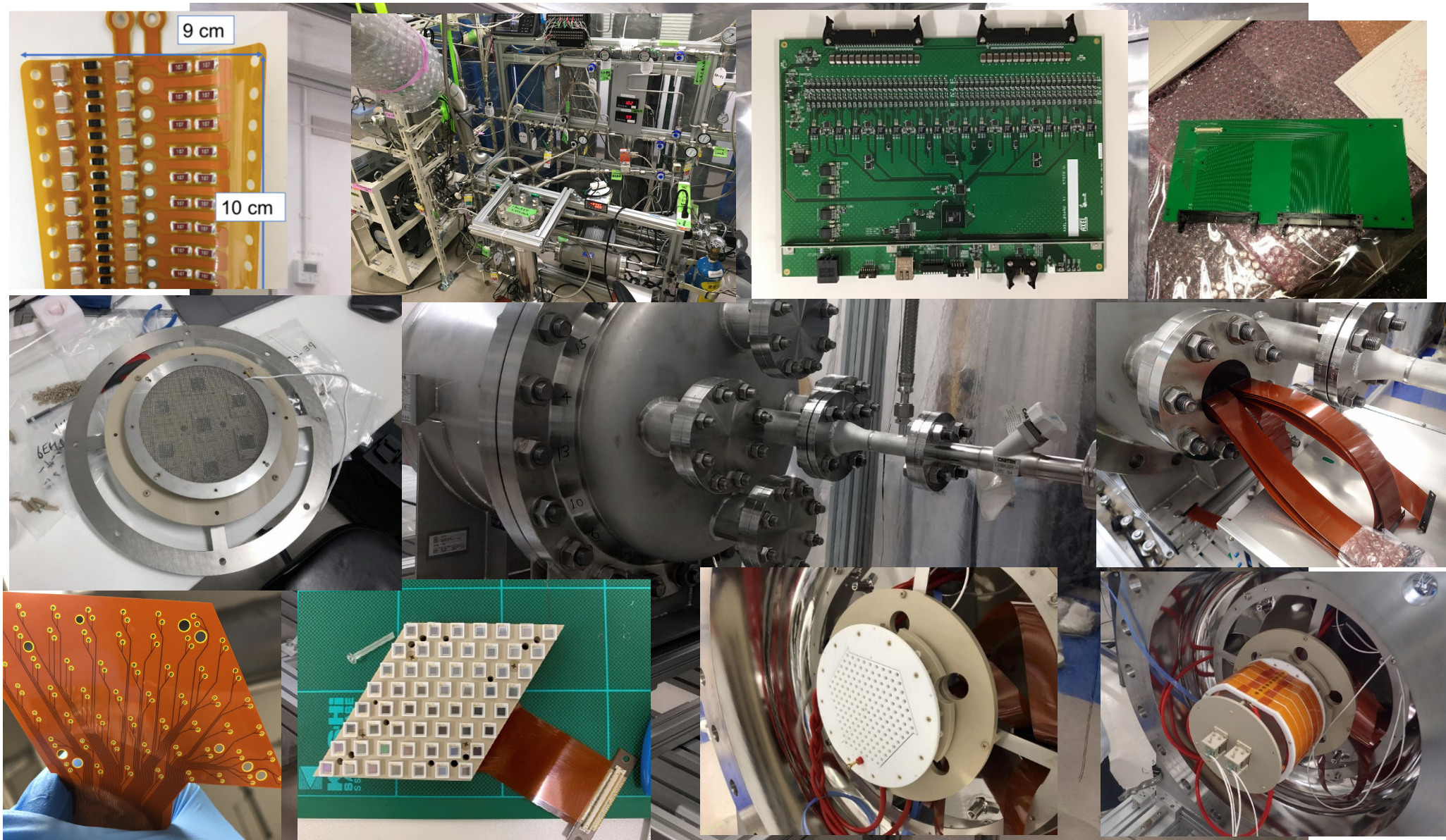
180-L prototype

2018-2021

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



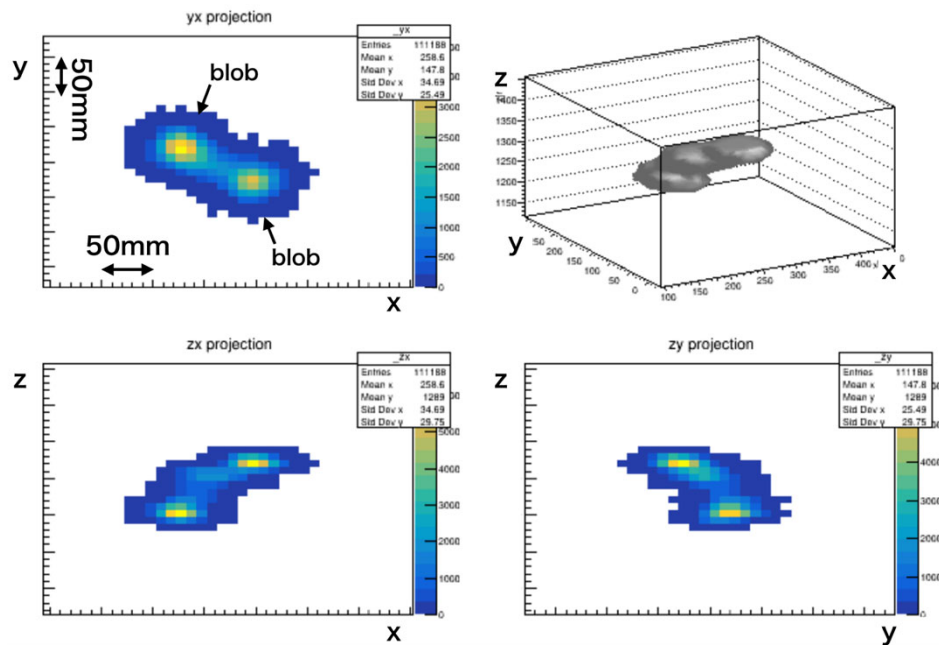
# 先輩たちの汗と涙の結晶



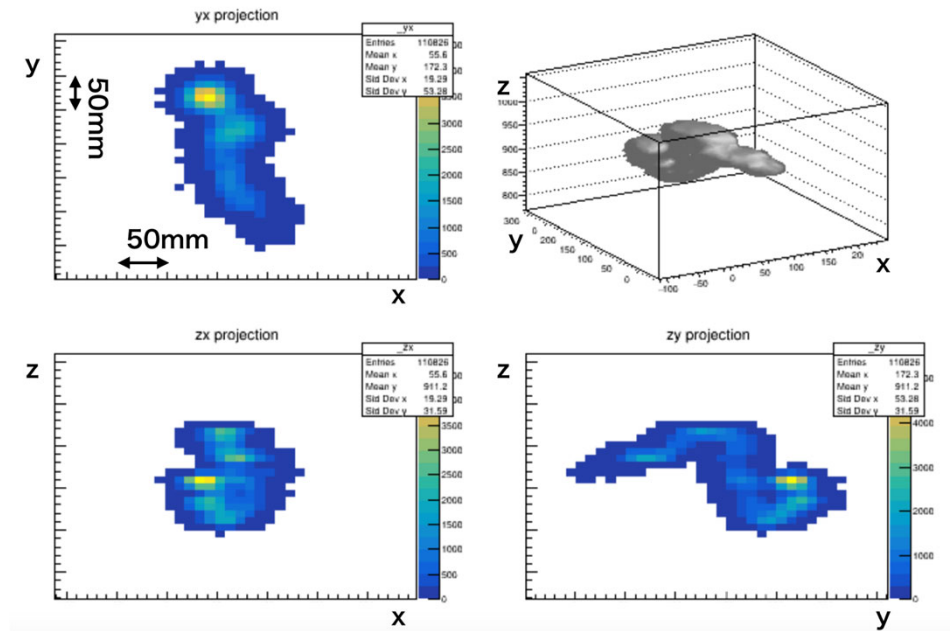


# Simulated track patterns of $0\nu\beta\beta$ signal and background

$0\nu\beta\beta$  signal



$\gamma$ -ray w/ Photo-absorption



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

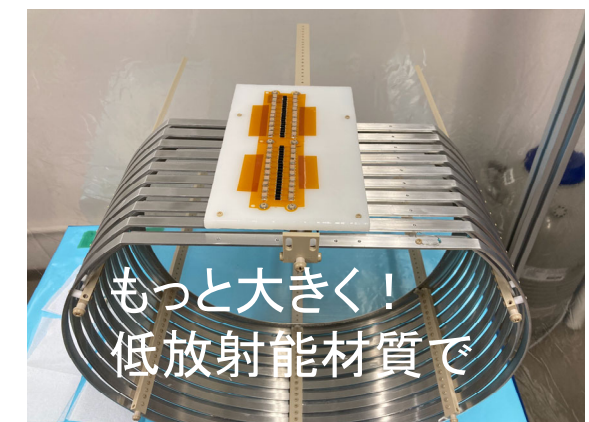
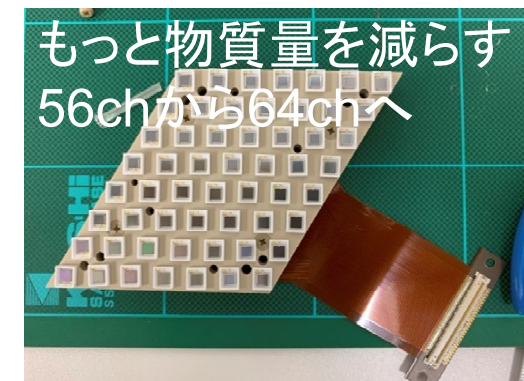
# 今後3～4年間の予定

---

- ✓ 世界記録であるニュートリノ有効質量領域  $100\text{meV}/c^2$  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 → “かなり” を無くして中村和君、吉田君のD論に
- ✓ 今後、3年で1000L検出器(の一部)を製作し、物理測定開始
- ✓ ニュートリノ質量の標準質量順序に対応する領域 ( $10\text{meV}/c^2$  以下) へと切り込むために、新しい技術開発も続ける

# 修士の学生さんのテーマ例 ～1000L検出器編～

- ◆ 第二世代AXELフロントエンドボードの開発
- ◆ ELCC低放射能化と大量生産技術の確立
  - 浜松ホトニクスが低放射能パッケージのMPPCを開発中
  - それを表面実装でFlexible Print Circuitに載せる
- ◆ フィールドケージとコッククロフトウォルトン回路
  - 吉田君が22 kVまで成功
  - HP180Lでは、100 kV!
  - 低放射能化も必要
- ◆ 建設して神岡地下へ！
  - 来年度やりたいが、まだスケジュールの不確定要素が大きい



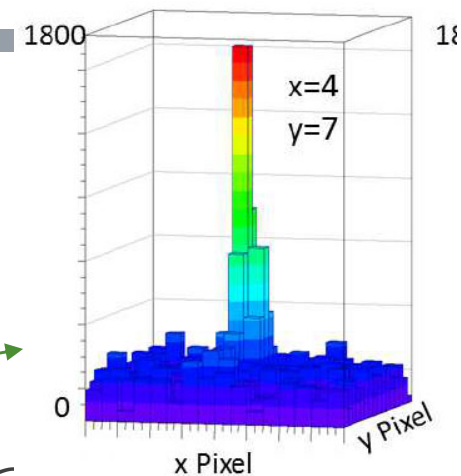
# 修士の学生さんのテーマ例 ～新しい技術開発編～

## ◆ Baイオンタグ

$^{136}\text{Xe}$ の娘核1個をタグする。 **最終兵器!**

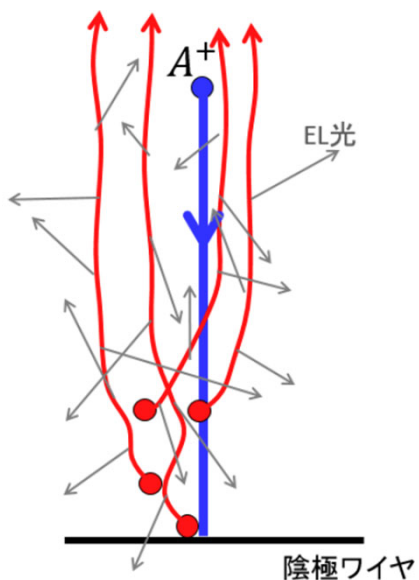
分光でタグしたいが、難しい点は

- $^{136}\text{Ba}^{++}$ 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。
- 海外のグループが、特殊なセットアップで成功→検出器に実装までは行かず菅島君からバトンタッチ
- テフロンを使ってBaイオンをトラップすることを考えている。

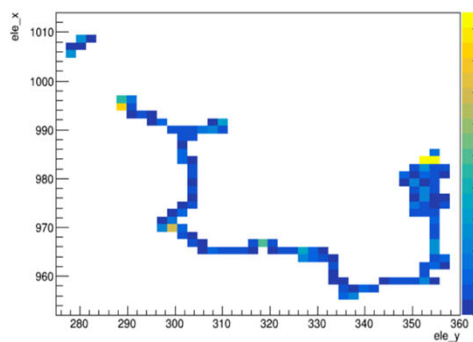


## ◆ 陽イオンタグ

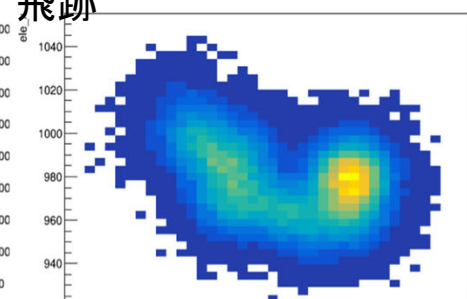
中村和君がイオンからの信号らしきものを捉えている→効率を上げてトラック検出へ



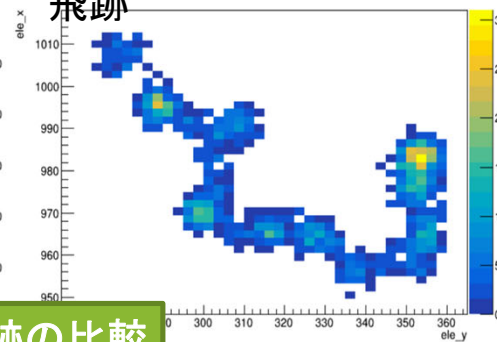
生の飛跡



電離電子から再構成された飛跡



イオンから再構成された飛跡



シミュレーションによる飛跡の比較





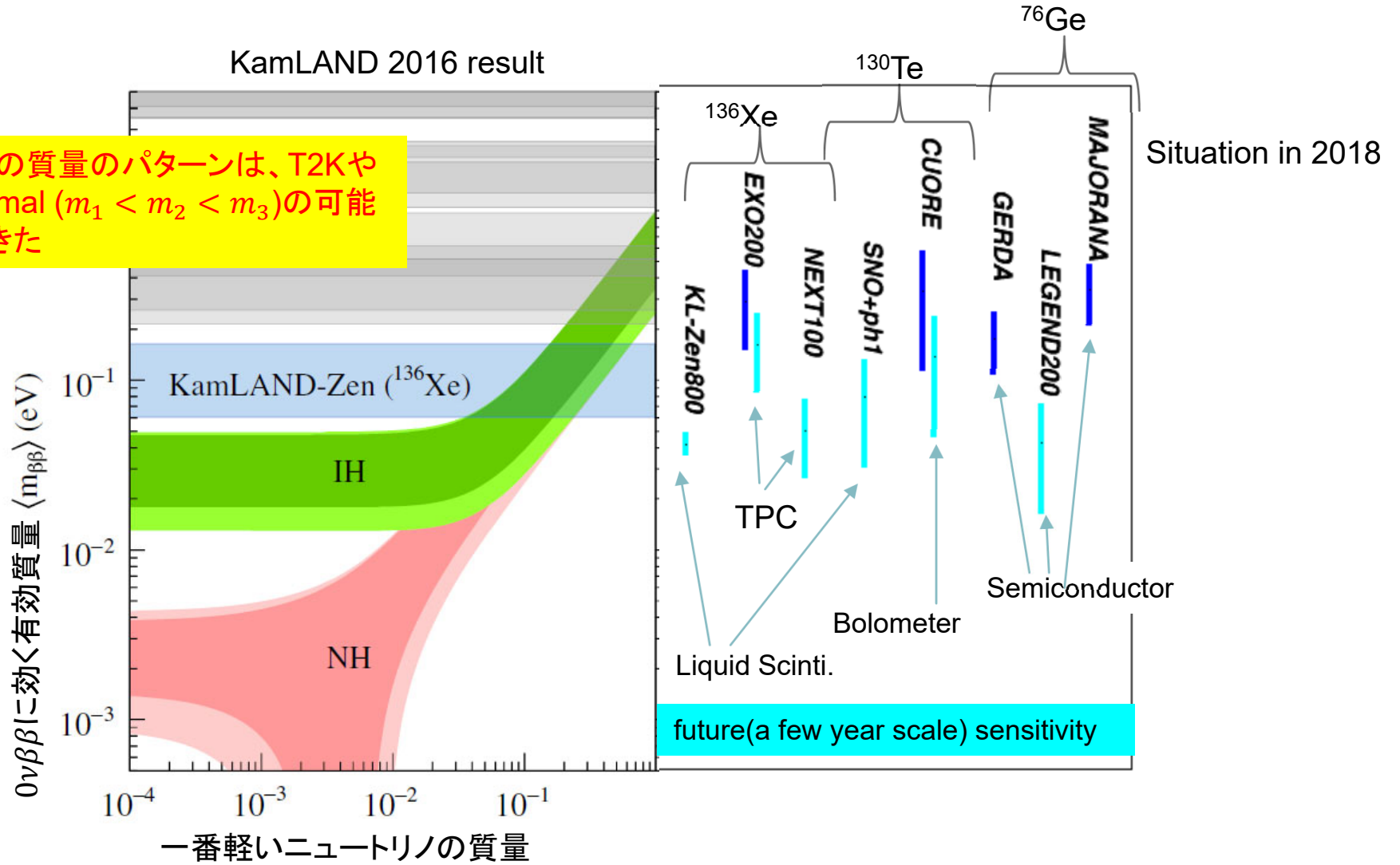
一緒に『自分(達)の検出器』を作りますか？



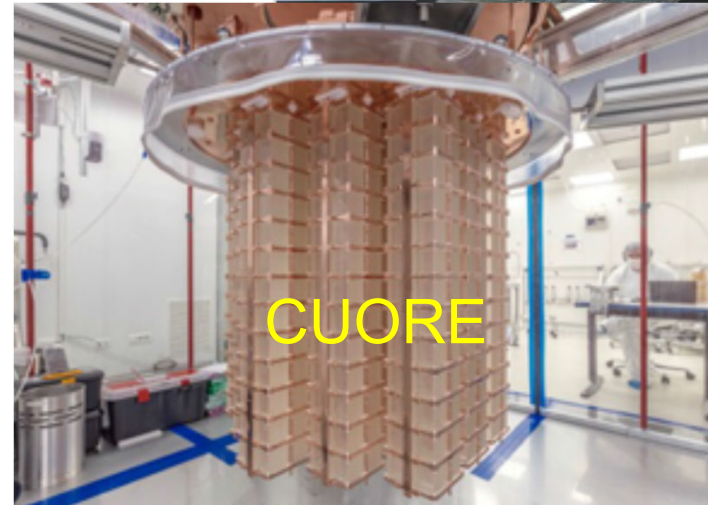
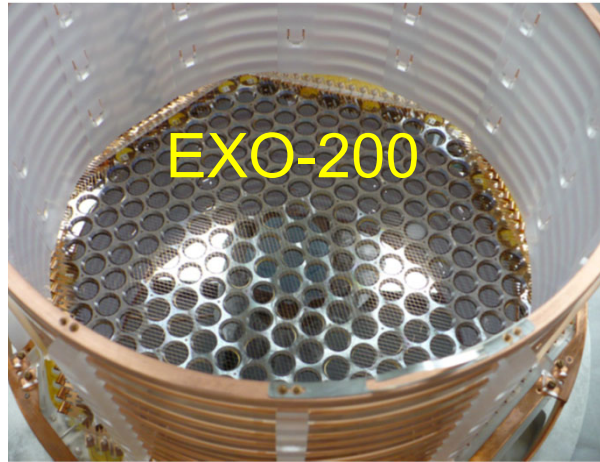
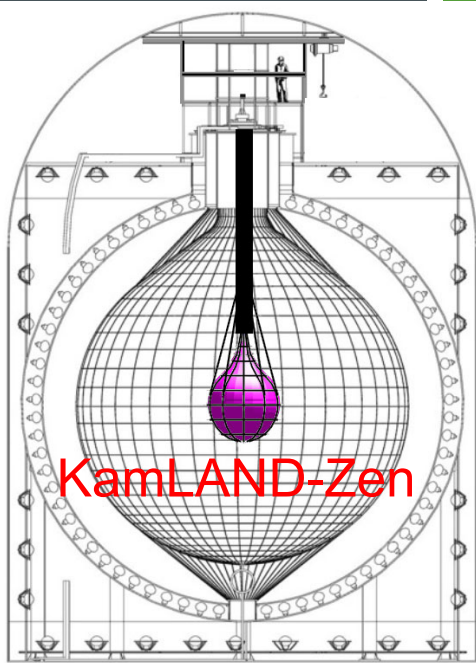
# 展望

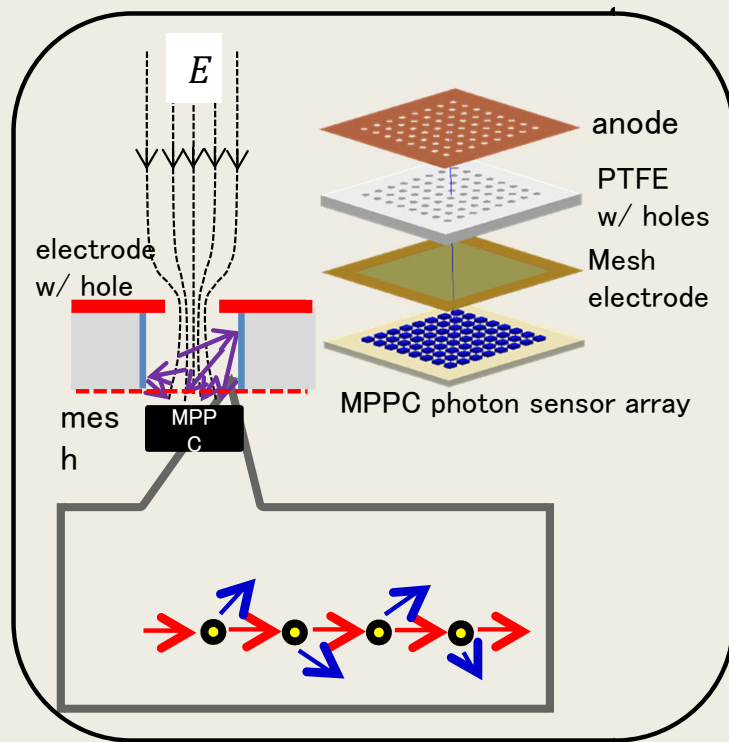
released result

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

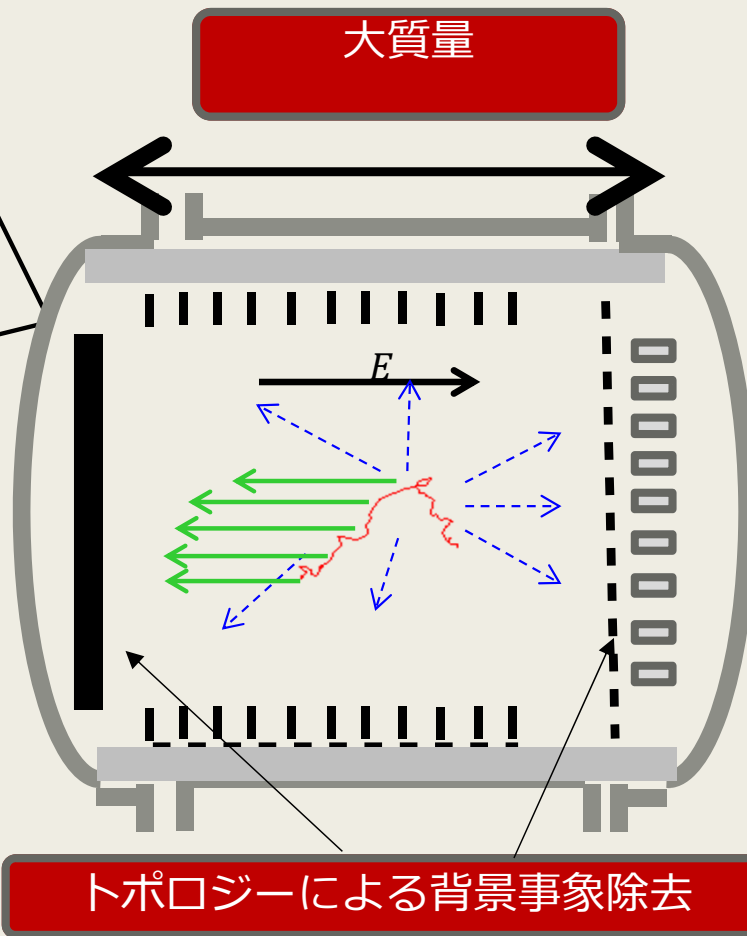


# 世界





高エネルギー分解能

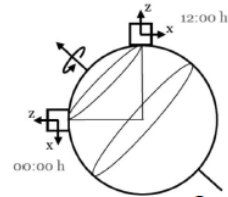
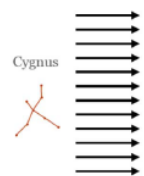
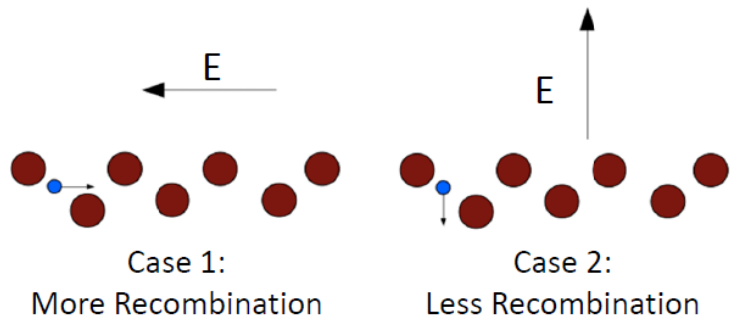


柱状再結合で暗黒物質探索をしよう！

だんくアキセル

Dark AXEL

Approaches to directionality detection (3):  
Columnar recombination and  
Inferring direction without track image



Concept by [Dave Nygren](#), LBNL

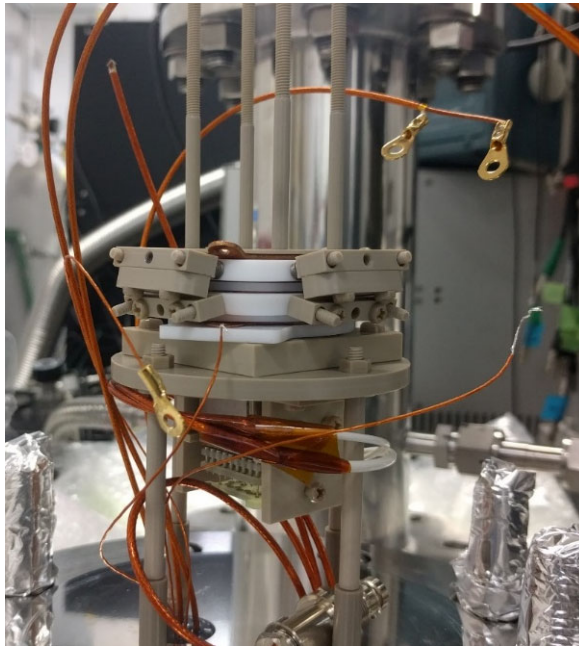
- 方向感度を持った暗黒物質探索ができれば、暗黒物質探索におけるブレイクスルーになる。
- 電離電子の再結合の割合で、電場に対する角度を測る。
- 中村きが、今、やばい！？

柱状再結合を用いた  
大質量かつ  
方向に感度を持つ

# 暗黒物質 探索

にむけた研究開発

- 柱状再結合の方向依存性を観測！！！！
- 低エネルギーにおいて観測できれば、原理実証は完成！



PREPARED FOR SUBMISSION TO JINST

<https://arxiv.org/pdf/1803.00752.pdf>

**Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profile of scintillation emission**

K.D.Nakamura,<sup>a</sup> S.Ban,<sup>b</sup> M.Hirose,<sup>b</sup> A.K.Ichikawa,<sup>b</sup> Y.Ishiyama,<sup>b</sup> A.Minamino,<sup>b</sup> K.Miuchi,<sup>a</sup>  
T.Nakaya,<sup>b</sup> H.Sekiya,<sup>c</sup> S.Tanaka,<sup>b</sup> K.Ueshima,<sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Kobe University,  
Rokkodai, Nada-ku Kobe-shi, Hyogo, 657-8501, Japan*

<sup>b</sup> *Kyoto University,  
Kitashirakawaoiwake-cho Sakyo-ku Kyoto-shi Kyoto, 606-8502, Japan*

<sup>c</sup> *Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo,  
456 Higashimozumi Kamioka-cho Hida-shi Gifu, 506-1205, Japan*

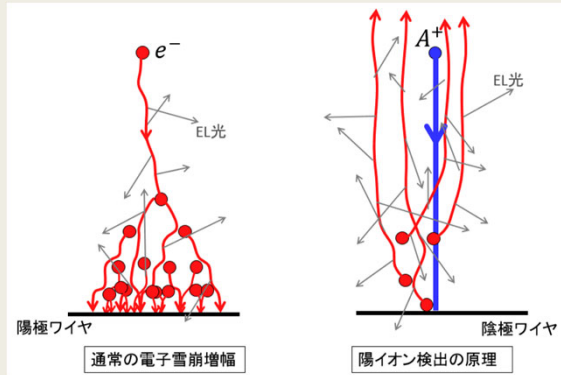
<sup>d</sup> *RCNS, Tohoku University,  
6-3 Aramakiazaoba, Aoba-ku Sendai-shi, Miyagi, 980-8578, Japan*

E-mail: [kiseki@harbor.kobe-u.ac.jp](mailto:kiseki@harbor.kobe-u.ac.jp)

[astro-ph.IM] 15 Mar 2018

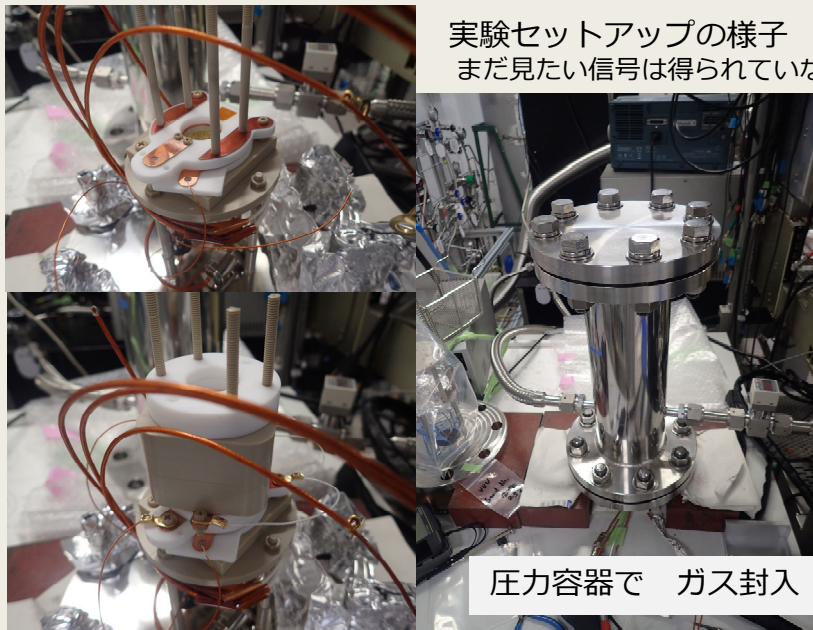
# 陽イオン検出に挑戦

小原

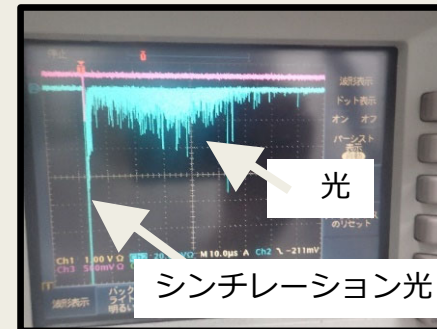


シンチレーション光を出した後  
イオンを電場で引きつけて  
陰ワイヤから出てくる電子を 光で確認したい

とりあえず  
のワイヤを張った



実験セットアップの様子  
まだ見たい信号は得られていない(´・ω・`)



※こんな感じの 信号が かなりの時間差で出るはず

まだスタートしたばかり



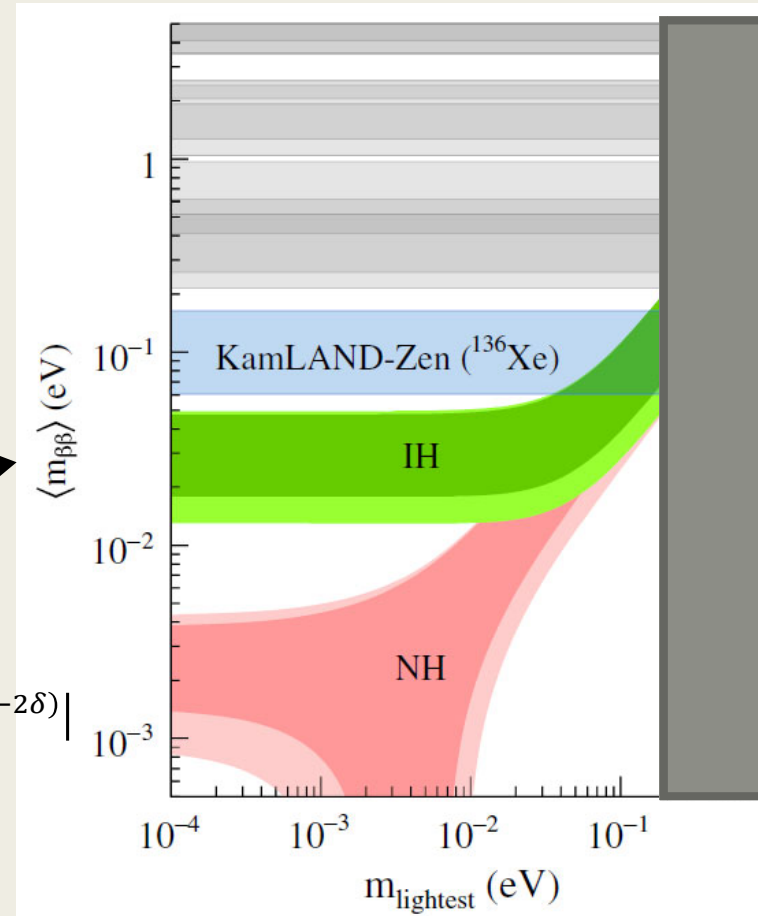
# 現状

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle^2 = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_{\nu_i} \right|^2$$

$$= \left| (m_1 c_{12}^2 + m_2 s_{12}^2 e^{i\alpha_{21}}) c_{13}^2 + m_3 s_{13}^2 e^{i(\alpha_{31} - 2\delta)} \right|^2$$

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

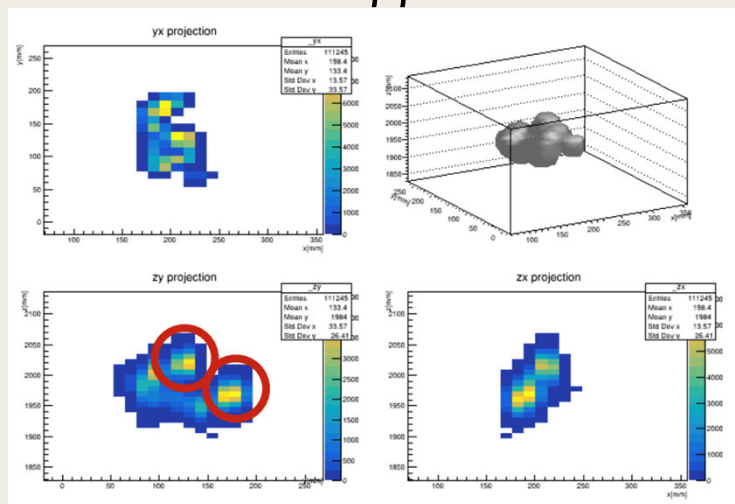
PRL 117, 082503 (2016)



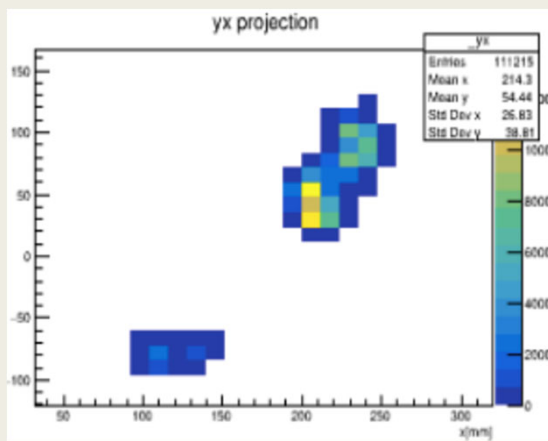
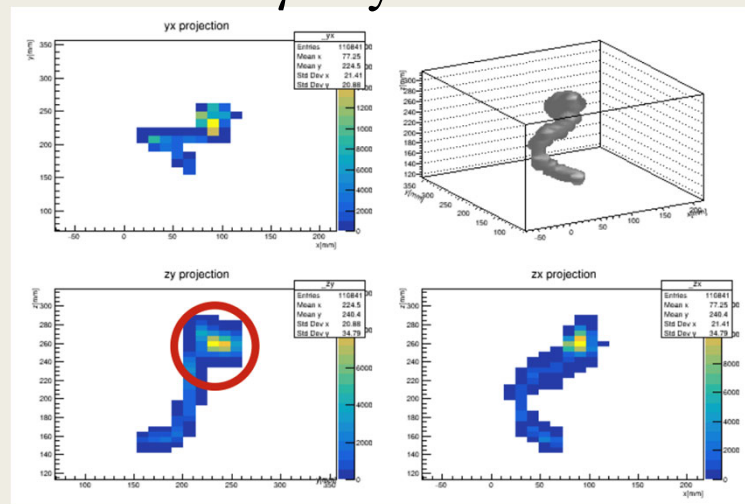
一番軽いニュートリノの質量

# 君は、deep learningに勝てるか？

$0\nu\beta\beta$



$\gamma$ -ray



WAVE

https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html

yx	
Birthes	111163
Mean x	42.22
Mean y	70.32
Std Dev x	17.74
Std Dev y	49.11

vs Deep Learning ▾

Your score  
0 / 0

DL score  
model04\_01\_06\_180927\_023:  
0 / 0

reset

zy	
Birthes	111163
Mean x	70.32
Mean y	382.3
Std Dev x	49.11
Std Dev y	17.74

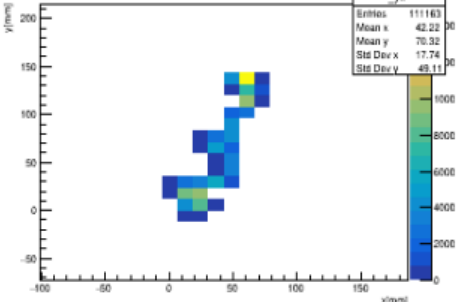
gamma

zx	
Birthes	111163
Mean x	42.22
Mean y	382.3
Std Dev x	17.74
Std Dev y	49.11

Onββ !!

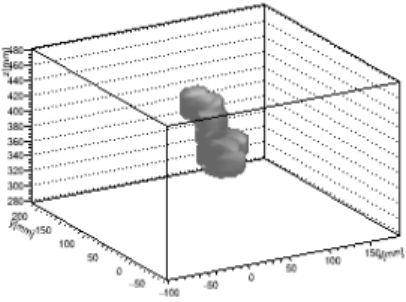
WAVE

https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html



yx projection

Series	111163
Mean x	42.22
Mean y	70.32
Std Dev x	17.74
Std Dev y	49.11



vs Deep Learning ▾

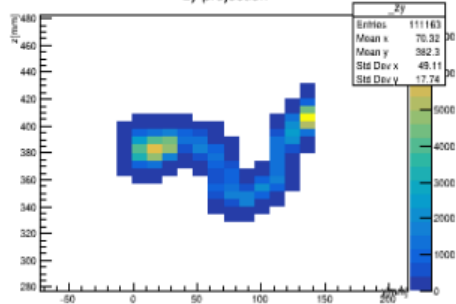
## Your score

# 1 / 1

DL score

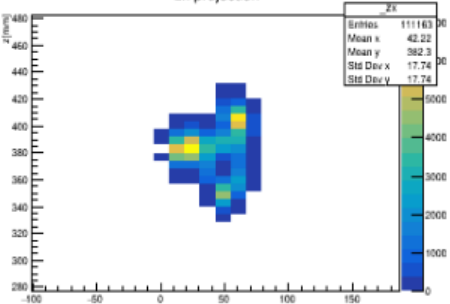
model04\_01\_06\_180927\_023

# 1 / 1



zy projection

Series	111163
Mean x	70.32
Mean y	382.3
Std Dev x	49.11
Std Dev y	17.74



zx projection

Series	111163
Mean x	42.22
Mean y	382.3
Std Dev x	17.74
Std Dev y	17.74

gamma

Onββ !!

reset

**Correct!!!**

sig9837

DL(sig\_cand) = 0.986

WAVE

https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html

yx projection

Series	116847
Mean x	201.00
Mean y	151.8
Std Dev x	45.99
Std Dev y	44.63

vs Deep Learning ▾

## Your score

# 0 / 0

DL score

model04\_01\_06\_180927\_023:

# 0 / 0

zy projection

Series	116847
Mean x	151.8
Mean y	434.7
Std Dev x	44.63
Std Dev y	19.43

zx projection

Series	116847
Mean x	201.00
Mean y	434.7
Std Dev x	45.99
Std Dev y	19.43

gamma

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

reset

WAVE <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html>

yx projection

Series	116847
Mean x	201
Mean y	151.8
Std Dev x	45.99
Std Dev y	44.63

vs Deep Learning ▾

## Your score

# 1 / 1

DL score

model04\_01\_06\_180927\_023:

# 1 / 1

zy projection

Series	116847
Mean x	151.8
Mean y	434.7
Std Dev x	44.63
Std Dev y	19.43

zx projection

Series	116847
Mean x	201
Mean y	434.7
Std Dev x	45.99
Std Dev y	19.43

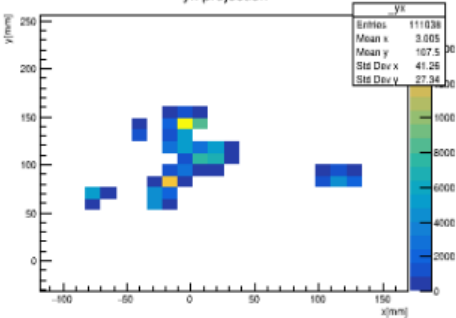
**Correct!!!**  
 bg9502727  
 DL(sig\_cand) = 0.353

gamma

Onββ !!

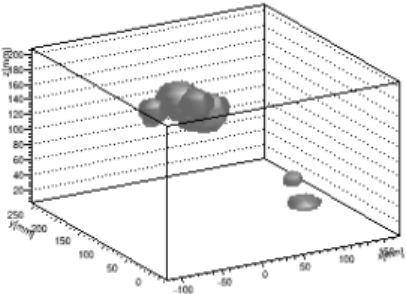
reset

WAVE <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html>



yx projection

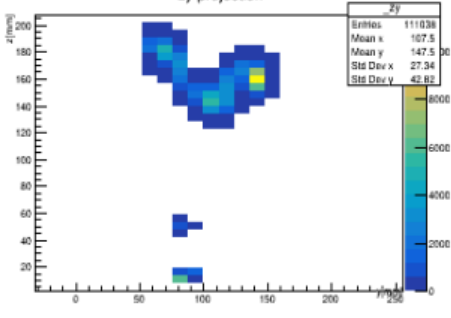
Entries	111038
Mean x	3.005
Mean y	107.5
Std Dev x	41.26
Std Dev y	27.34



vs Deep Learning ▾

Your score  
0 / 0

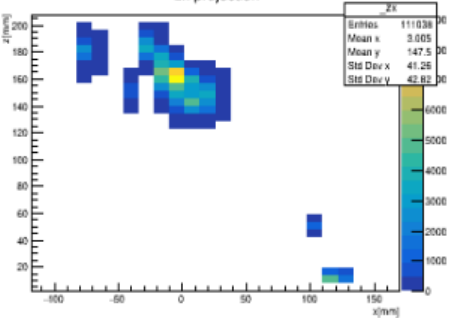
DL score  
model04\_01\_06\_180927\_023:  
0 / 0



zy projection

Entries	111038
Mean x	107.5
Mean y	147.5
Std Dev x	27.34
Std Dev y	42.82

gamma



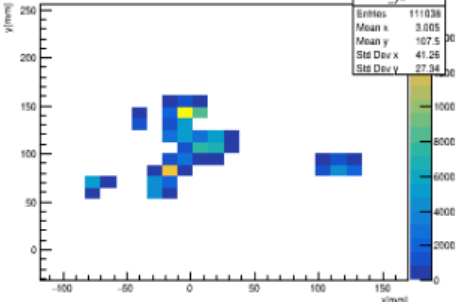
zx projection

Entries	111038
Mean x	3.005
Mean y	147.5
Std Dev x	41.26
Std Dev y	42.82

Onββ !!

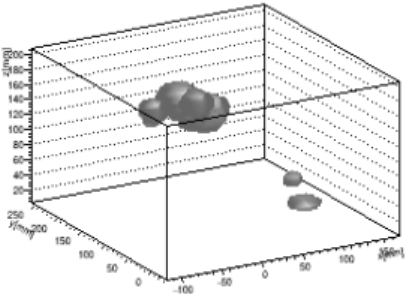
reset

WAVE <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html>



yx projection

Entries	111038
Mean x	3.005
Mean y	107.5
Std Dev x	41.26
Std Dev y	27.34



vs Deep Learning ▾

# Your score

## 0 / 1

DL score

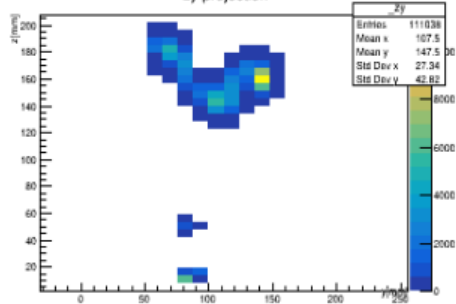
model04\_01\_06\_180927\_023:

## 1 / 1

Wrong..

sig9707

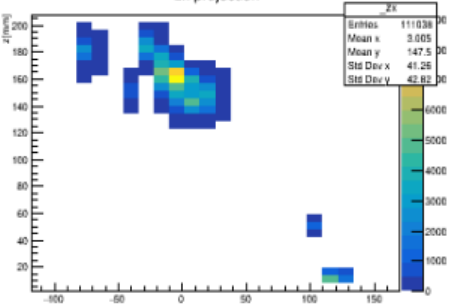
DL(sig\_cand) = 0.898



zy projection

Entries	111038
Mean x	107.5
Mean y	147.5
Std Dev x	27.34
Std Dev y	42.82

gamma



zx projection

Entries	111038
Mean x	3.005
Mean y	147.5
Std Dev x	41.26
Std Dev y	42.82

Onββ !!

reset



WAVE <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html>

yx	
BinNo	111221
Mean x	146.4
Mean y	144.2
Std Dev x	46.93
Std Dev y	12.42

vs Deep Learning ▾

**Your score**  
63 / 100

DL score  
model04\_01\_06\_180927\_023:  
85 / 100

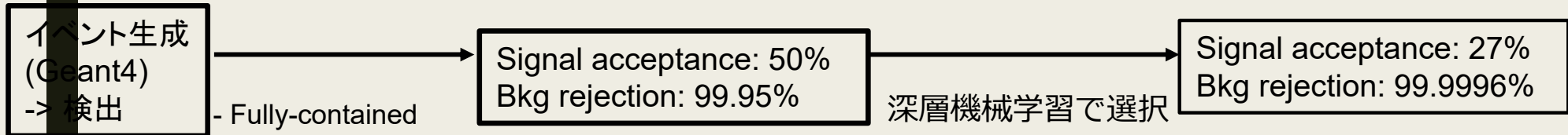
zy	
BinNo	111221
Mean x	144.2
Mean y	1042
Std Dev x	12.42
Std Dev y	32.14

gamma

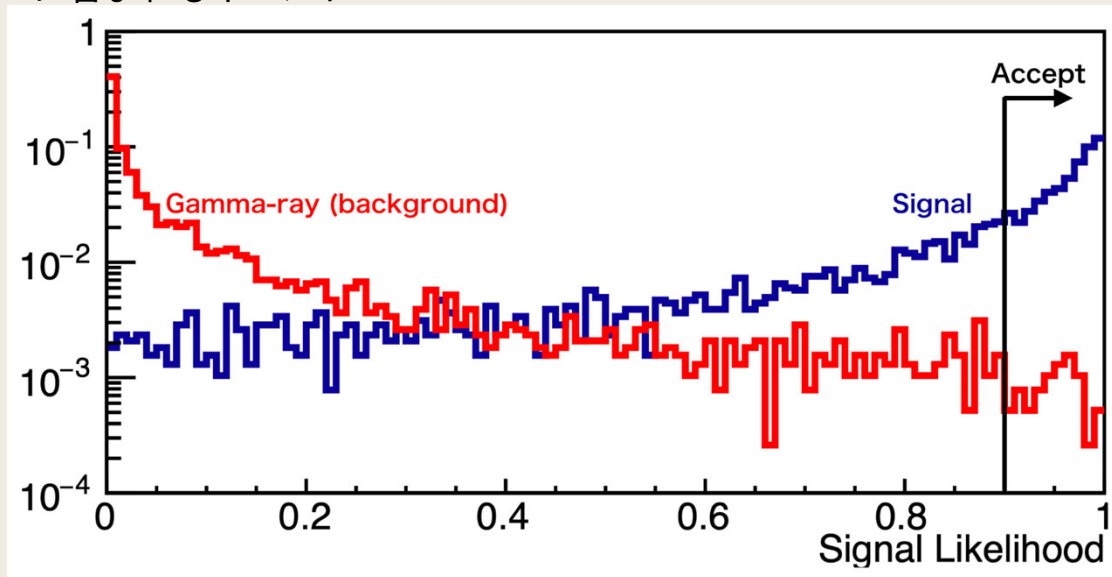
zx	
BinNo	111221
Mean x	146.4
Mean y	1042
Std Dev x	46.93
Std Dev y	32.14

Onββ !!

# 感度予測



- Fully-contained
- ROI: Q-value  $\pm 0.5\%$
- $36 \times 36 \times 36$  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)