



AXEL(あくせる)

A Xenon

ElectroLuminescence

detector

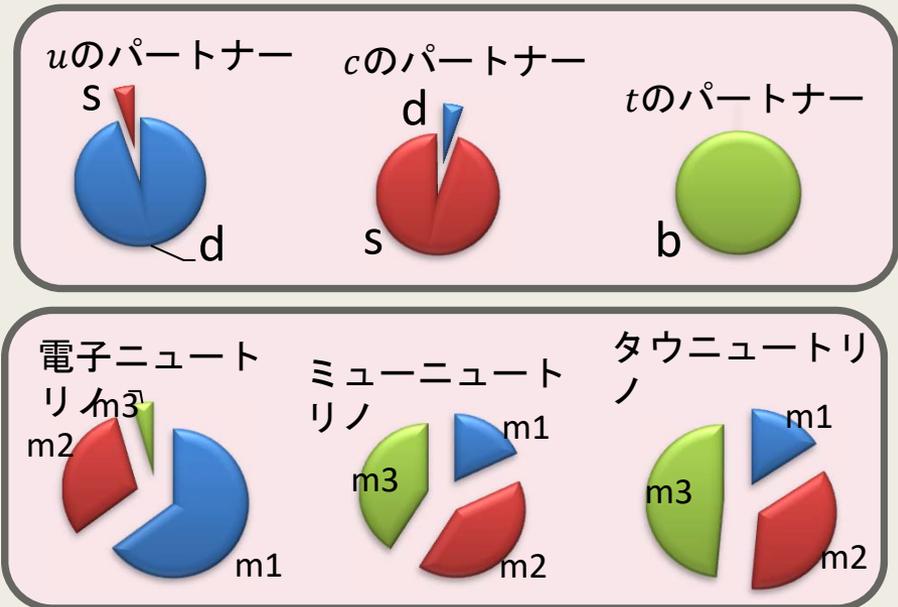
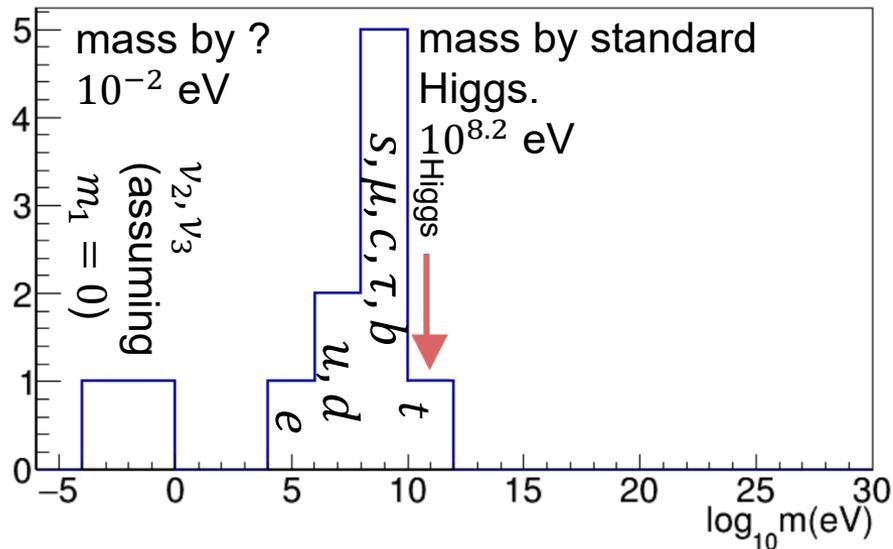
なぜ？

- ✓ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を見つけない
- ✓新し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。

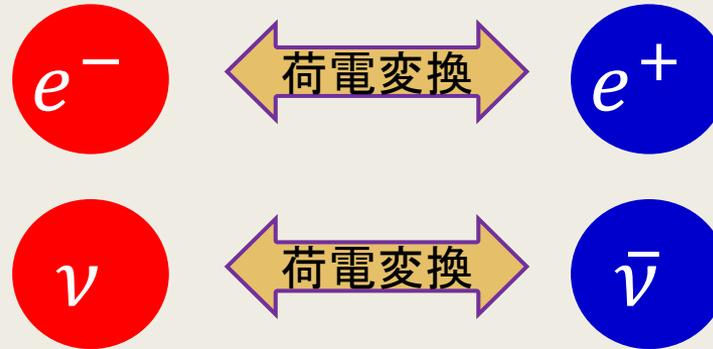
- フェルミオン(クォーク、荷電レプトン(電子、ミュー、タウ))の質量
 - 真空中に凝縮したヒッグス粒子と相互作用することで右巻き状態 \leftrightarrow 左巻き状態の絡まった(?)質量を持つ状態に
 - クォークの質量の固有状態とフレーバーはまあまあ一致。
 - 標準理論ではニュートリノは、左巻きしかないので、質量を持ってない。
- ニュートリノ振動の発見 \Rightarrow ニュートリノも質量を持つ！
 - が、飛びぬけて小さい
 - レプトンは質量の固有状態とフレーバーがぐちゃぐちゃ



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。



ディラック・フェルミオン



マヨラナ・フェルミオン

エttore・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”



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)

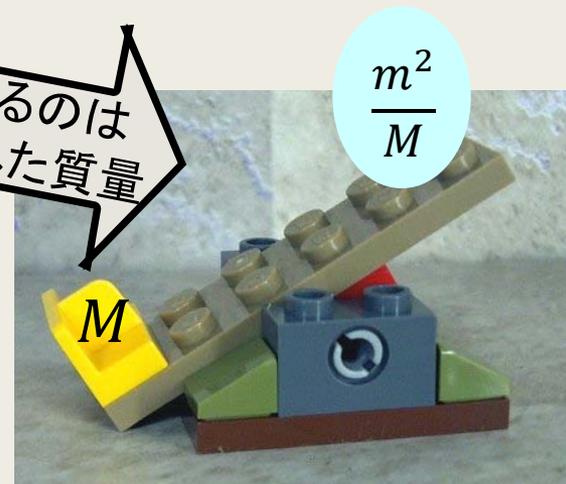
ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子=反粒子)で、重い右巻きマヨラナ質量を持つと

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

Dirac mass
~1MeV

Majorana mass

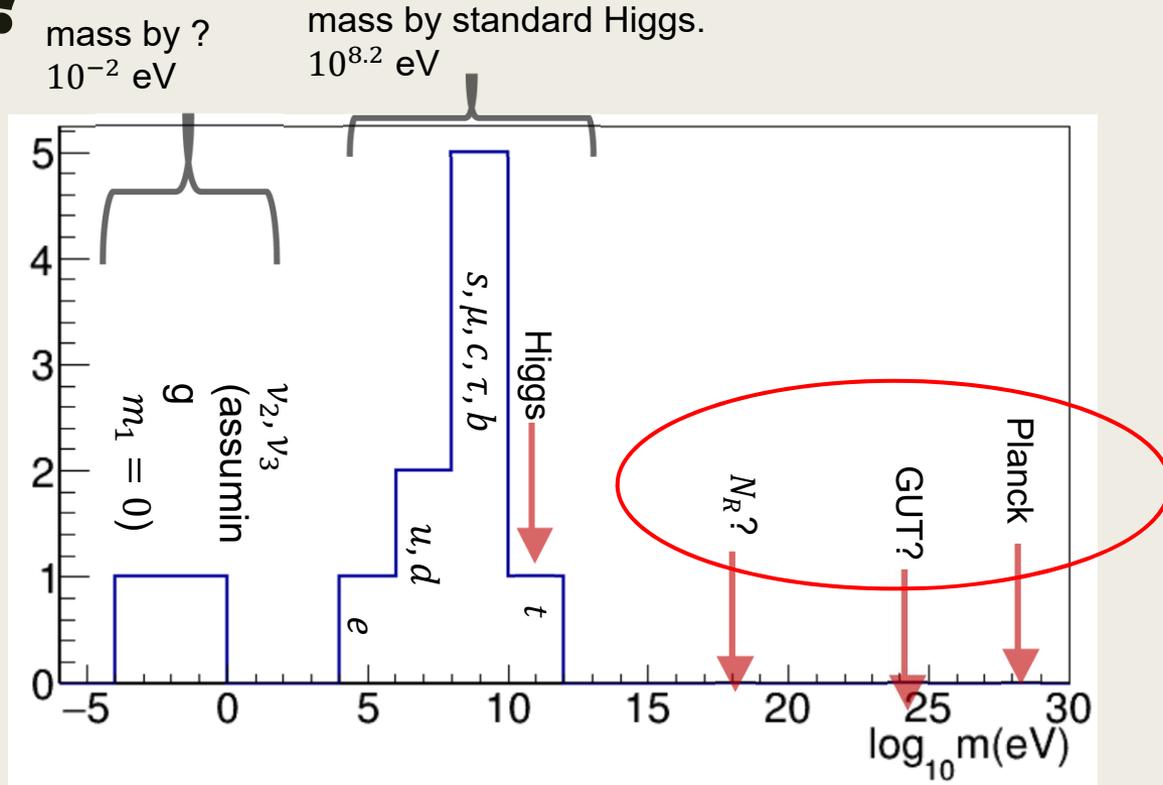
観測されるのは
対角化された質量



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 = 10000000001 : 10000000000

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

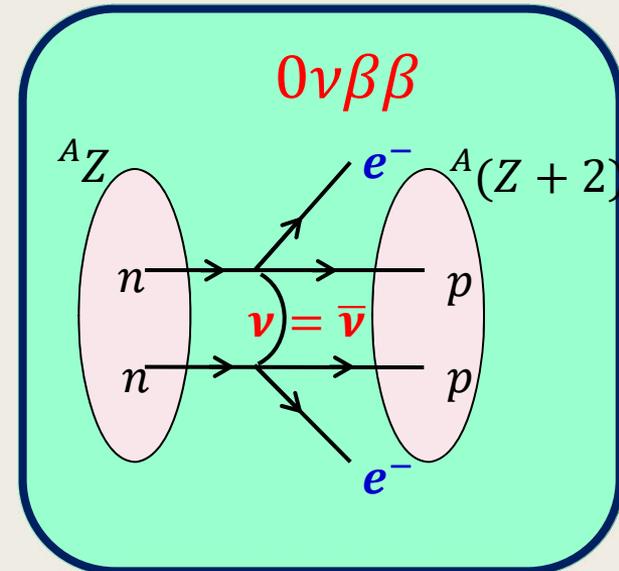
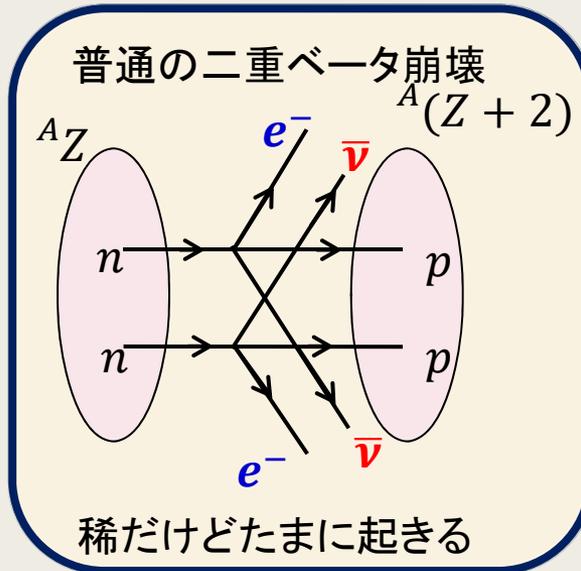
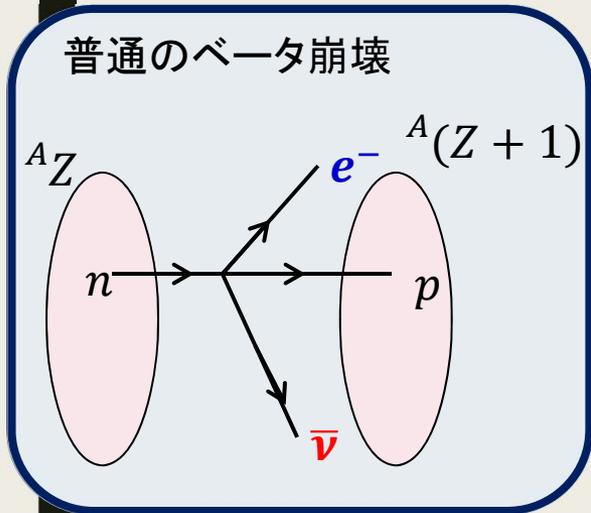
- N_R (重い右巻きニュートリノ)の崩壊で軽い ν とHiggsを生成。この時にCPの破れ→レプトン数の生成(重い。混合角が大きい可能性大)
- スファレロン過程（標準理論で許される過程。）
宇宙初期の真空の遷移で、B-Lを一定に保った状態で粒子を生成。
レプトン数→バリオン数が生成
- シーソーで仮定される N_R は、ちょうどいい重さらしい

■ 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” ($0\nu\beta\beta$)

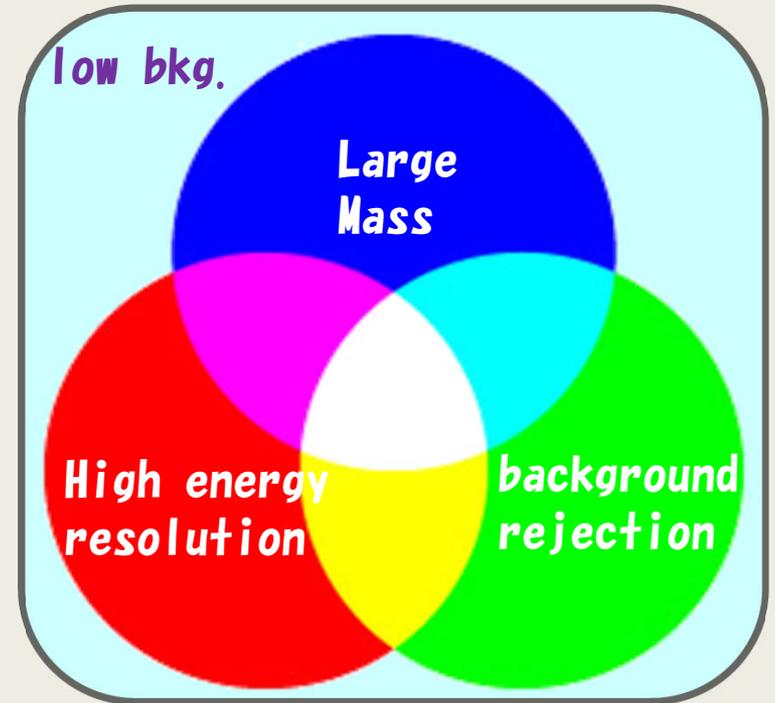
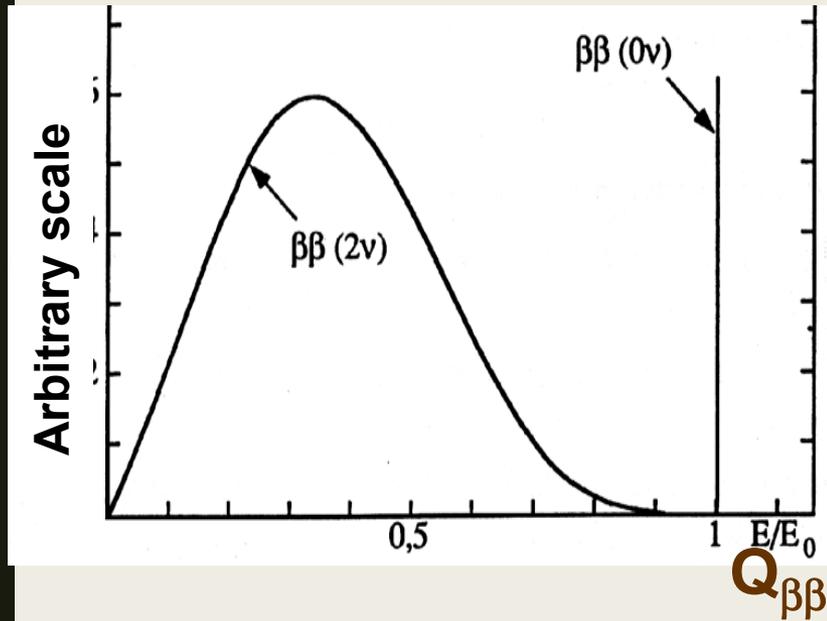


ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる
が、まだ見つかっていない。

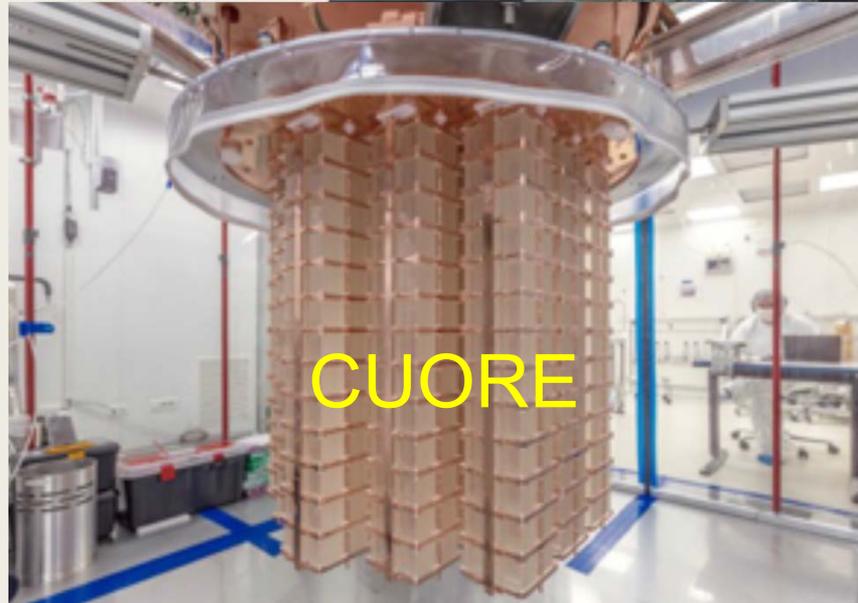
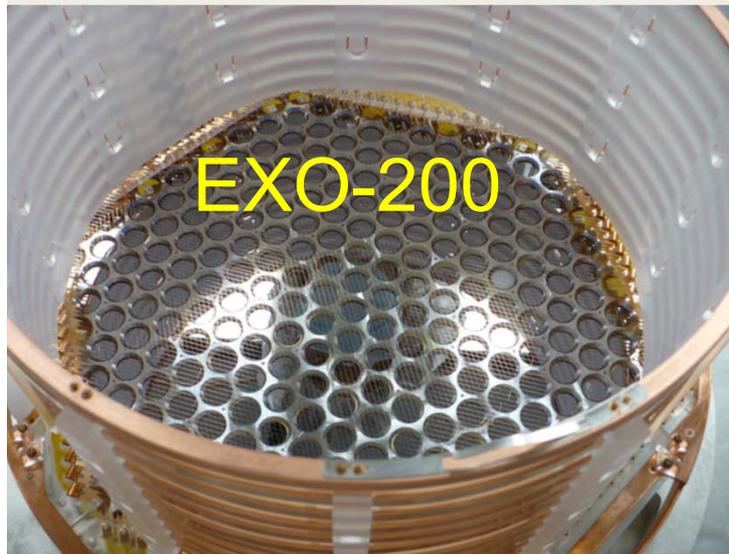
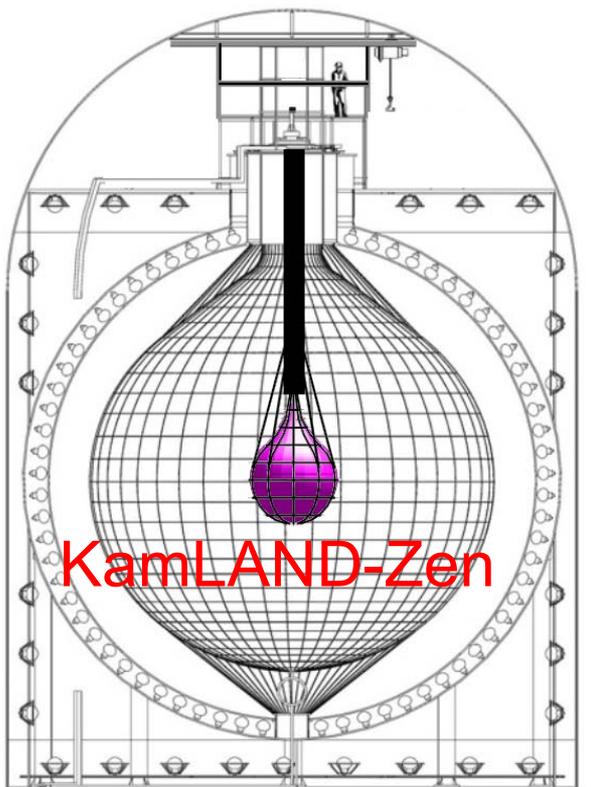
この反応の起きやすさ \propto (ニュートリノ有効質量) $^{-2}$

ニュートリノの質量が小さいため、なかなか起きない

必要なもの

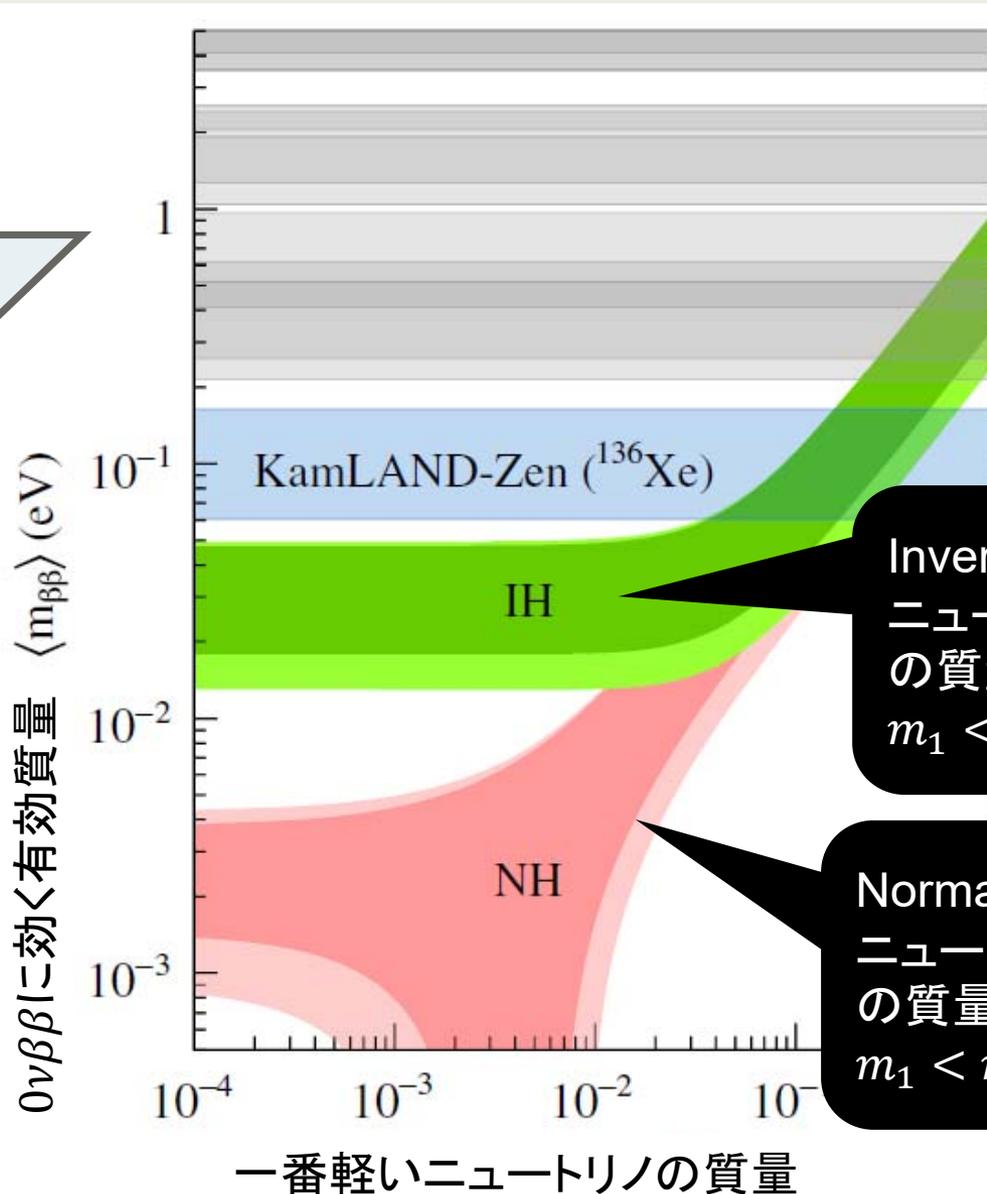


世界



現状

ここまでは、ないことが示されている

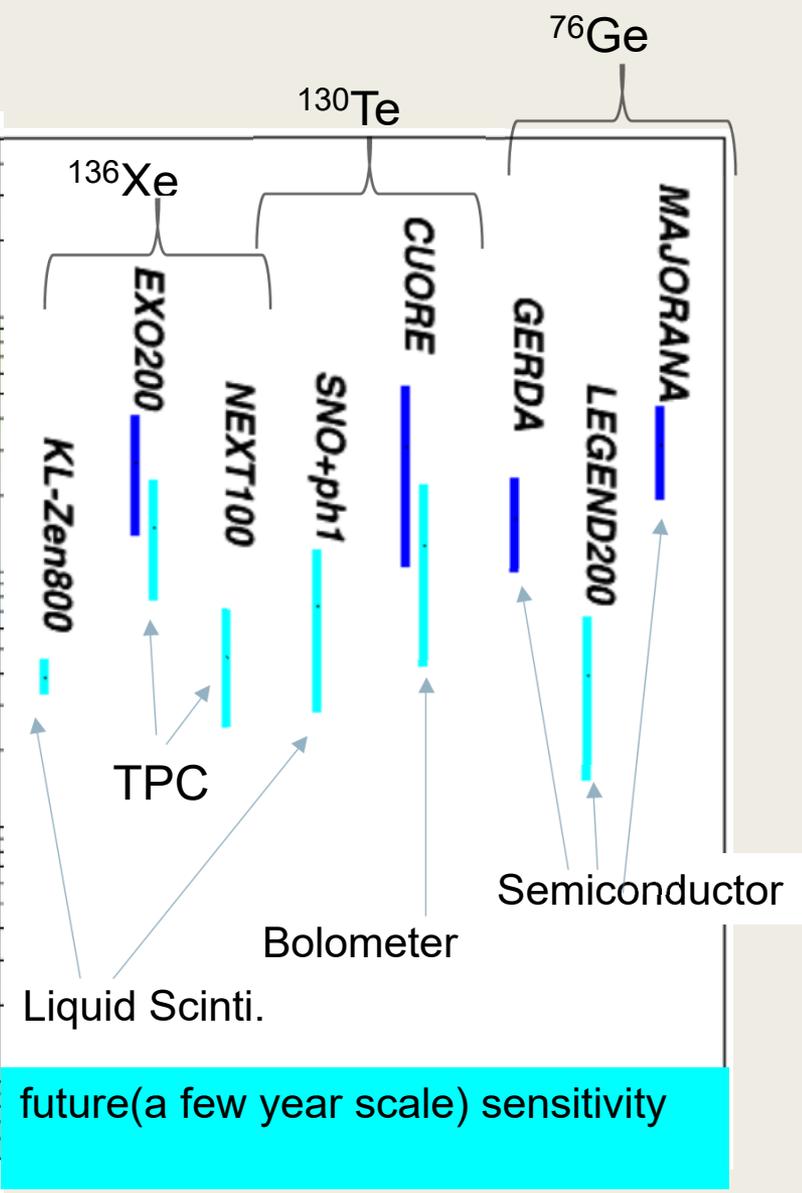
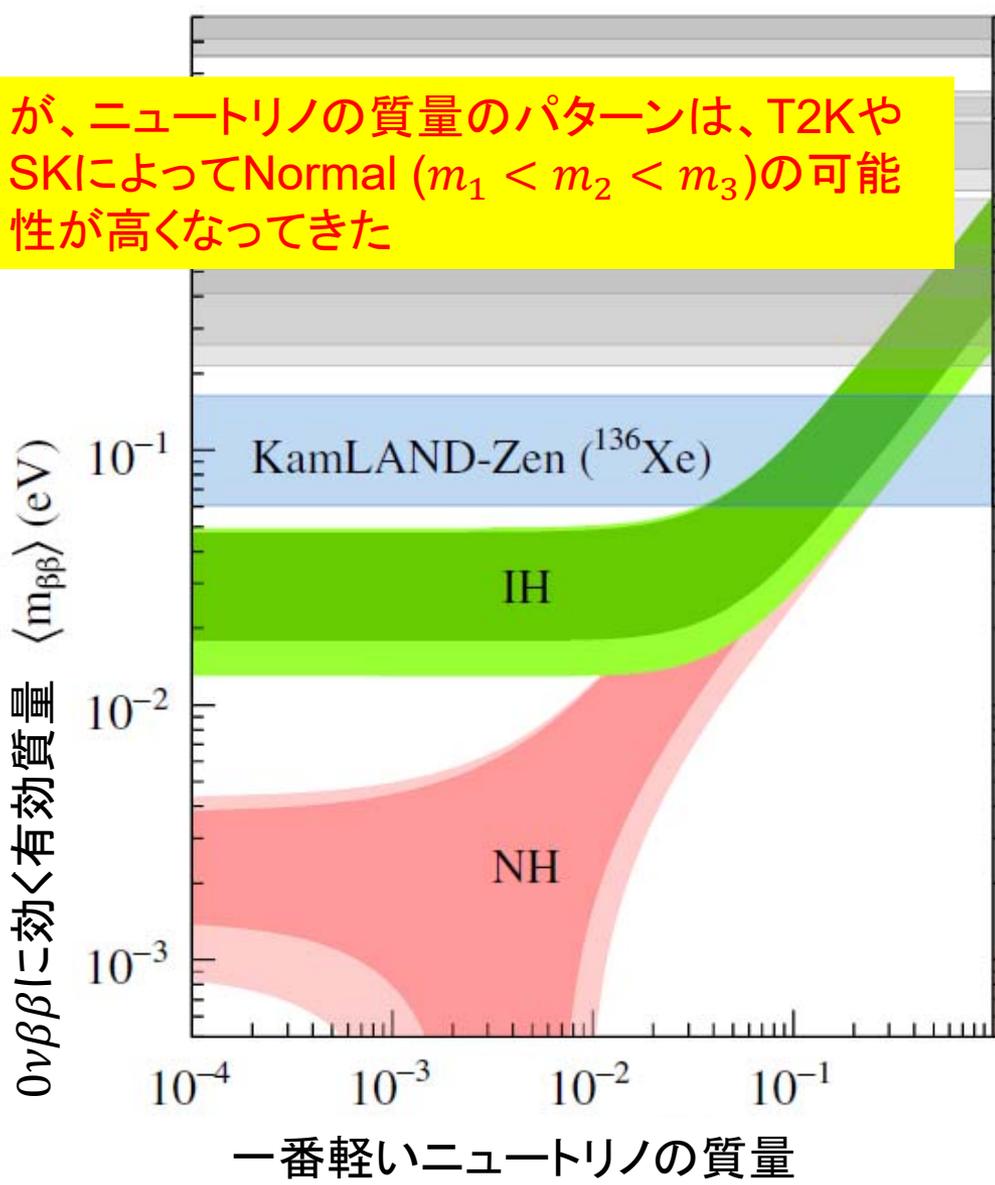


Inverted Hierarchy
ニュートリノ
の質量のパターンが $m_3 < m_1 < m_2$ の場合

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

KamLAND 2016 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

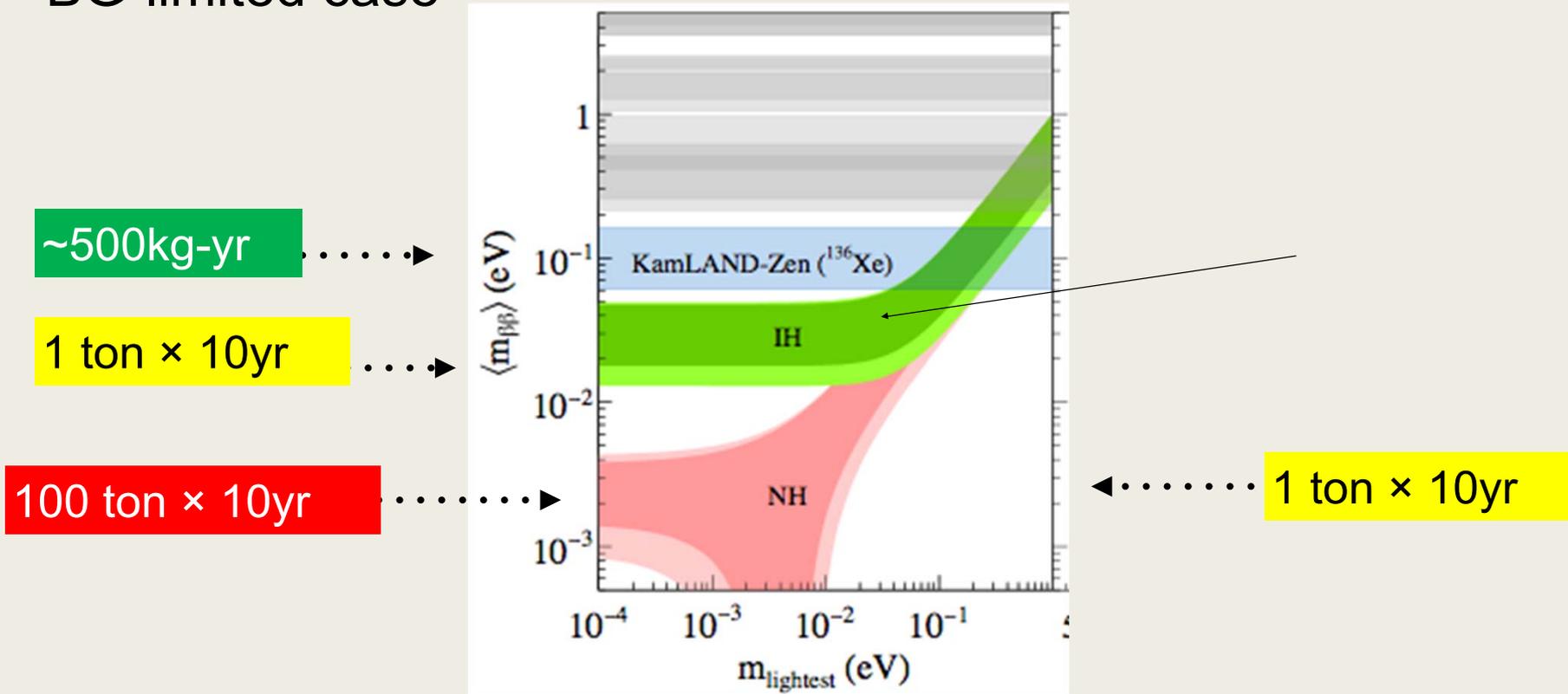


必要な(サイズ) × (時間)

小原 脩平

BG-limited case

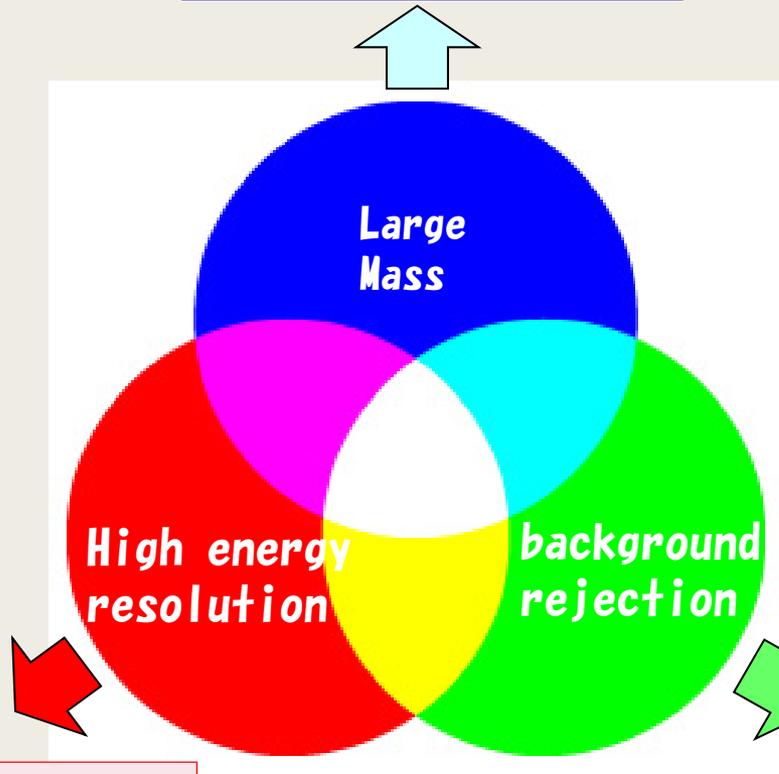
If BG-Free,



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 ンチェンバーは、オールラウンドプレーヤー

^{136}Xe
abundance : 8.9%
 $Q_{\beta\beta} = 2.48 \text{ MeV}$



新しい世界に一つの
究極のすごい検出器
を！

希ガスの電離電子

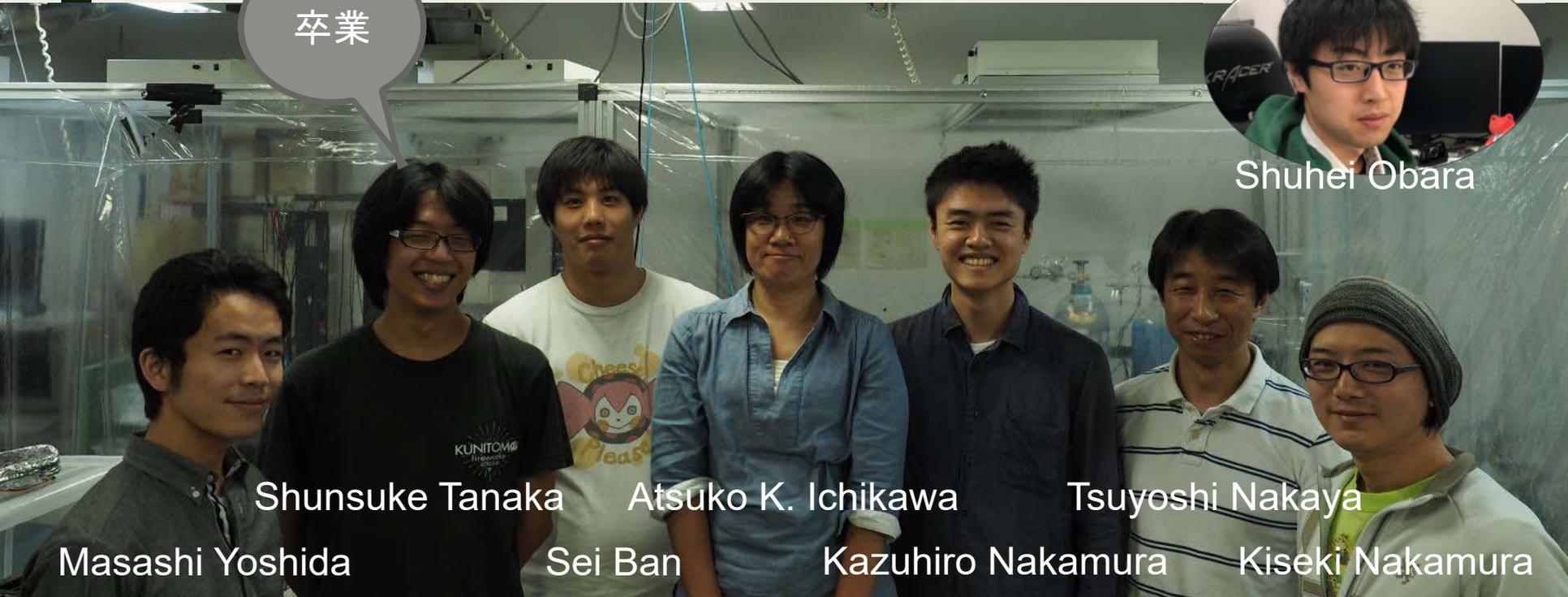
電子が2本走っているのを捉える

AXEL 構成員

卒業



Shuhei Obara



Shunsuke Tanaka

Atsuko K. Ichikawa

Tsuyoshi Nakaya

Masashi Yoshida

Sei Ban

Kazuhiro Nakamura

Kiseki Nakamura

H. Sekiya

K. Ueshima

Y. Nakajima

K. Miuchi

M. Hirose

K. Sakashita

S. Obara

T. Nakadaira

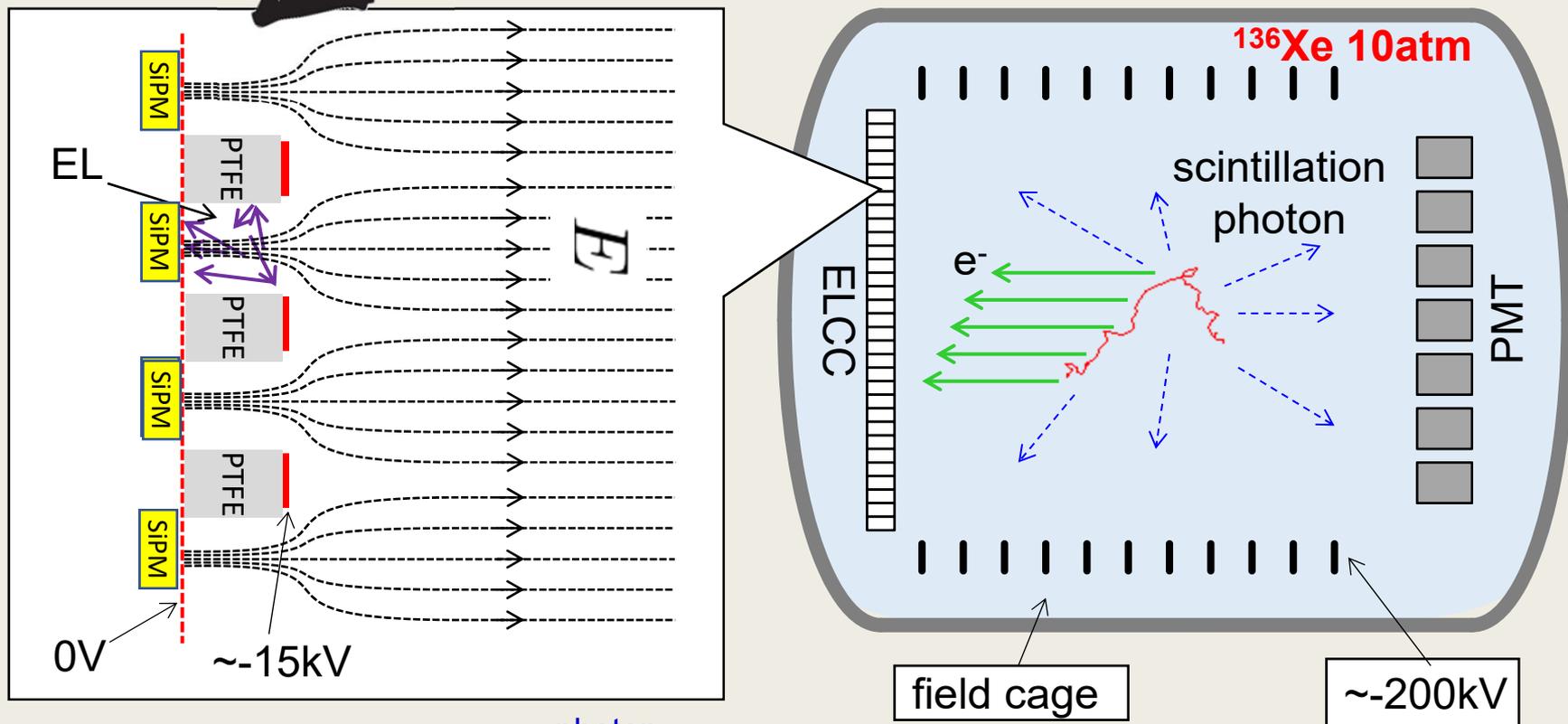
T. Kikawa

A. Minamino

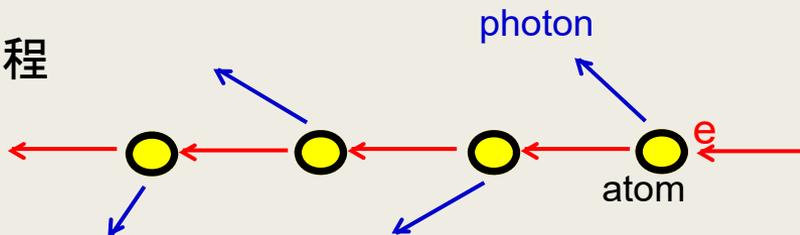
Y. Iwashita



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

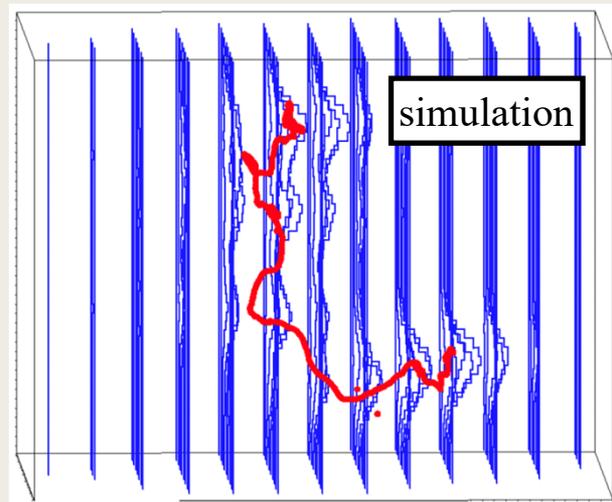


EL過程

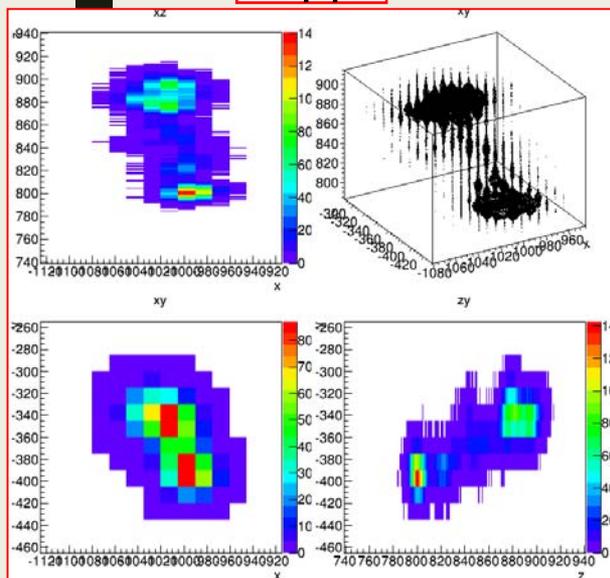


見える飛跡パターン はこんな感じ

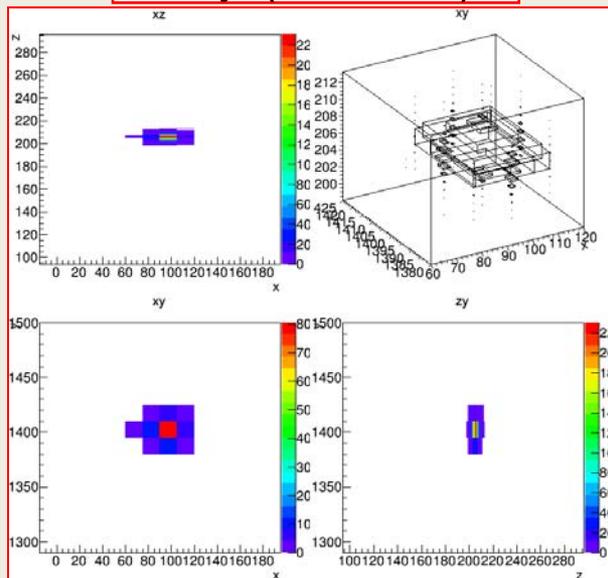
expected event displays
(simulation : 10 atm Xe, 15mm-pitch, 1MHz sampling)



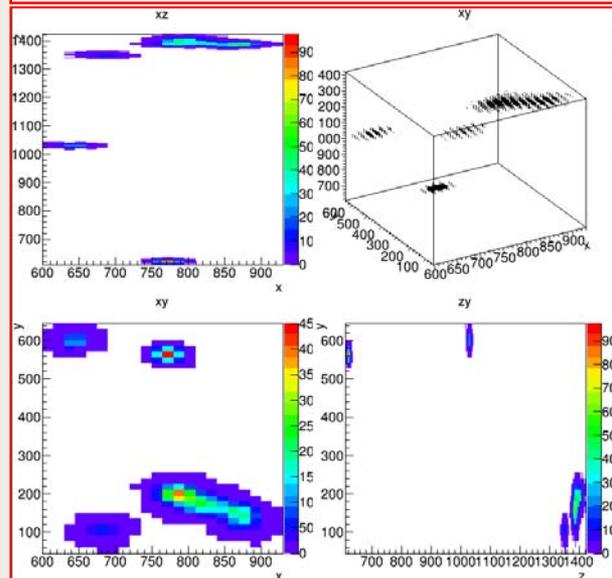
$0\nu\beta\beta$



α -ray (2.5MeV)



コンプトン γ -ray(2.5MeV)

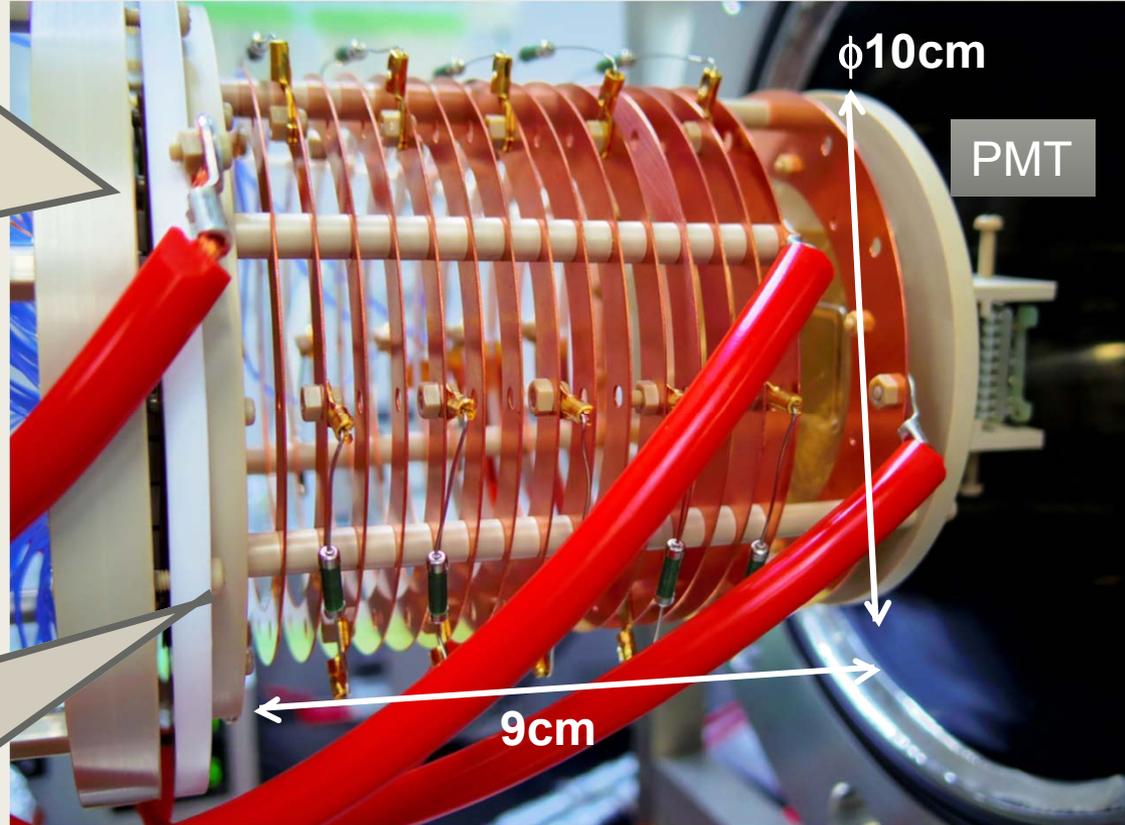
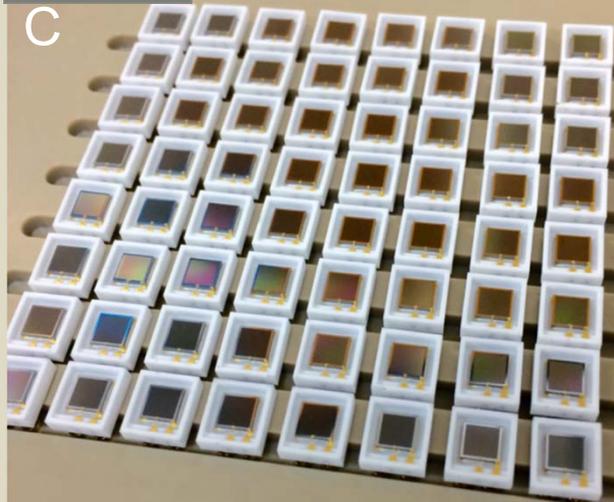


10L試作機 (原理検証機)

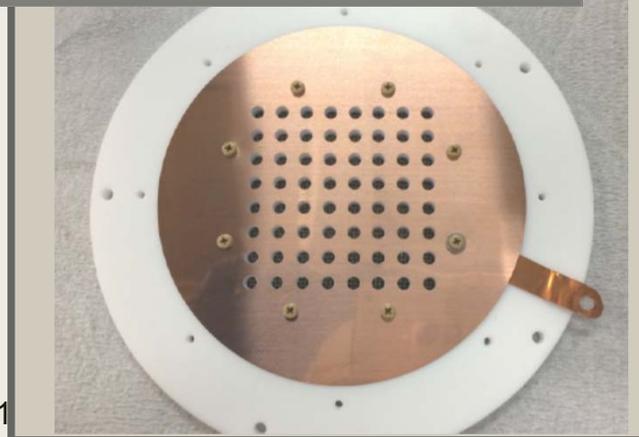
NIMA 875 (2017) 185
arxiv: 1701.03931

8x8 sensors
sensitive to VUV(175nm) photons

MPP
C

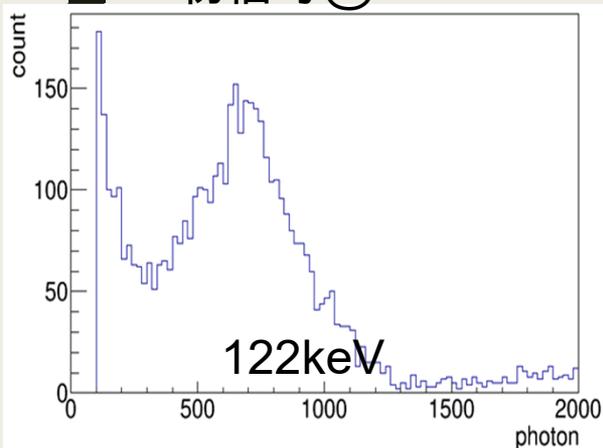


ELCC anode and PTFE

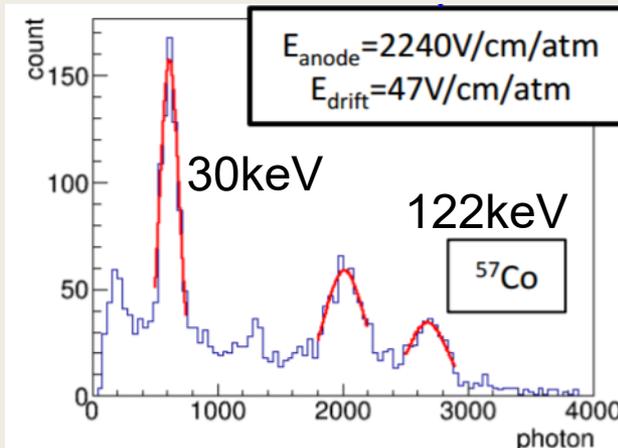


エネルギースペクトル(の歴史) (≒潘君の歴史)

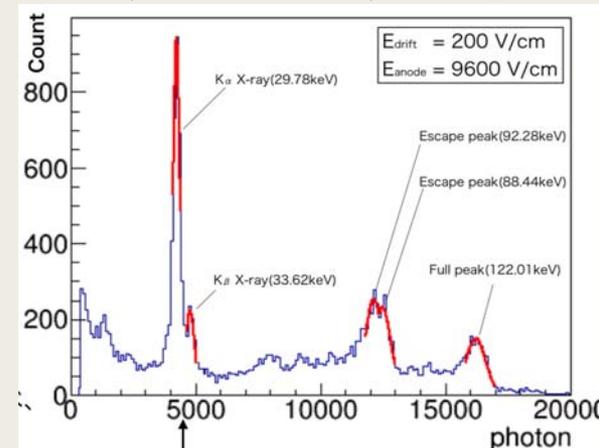
初信号@1atm



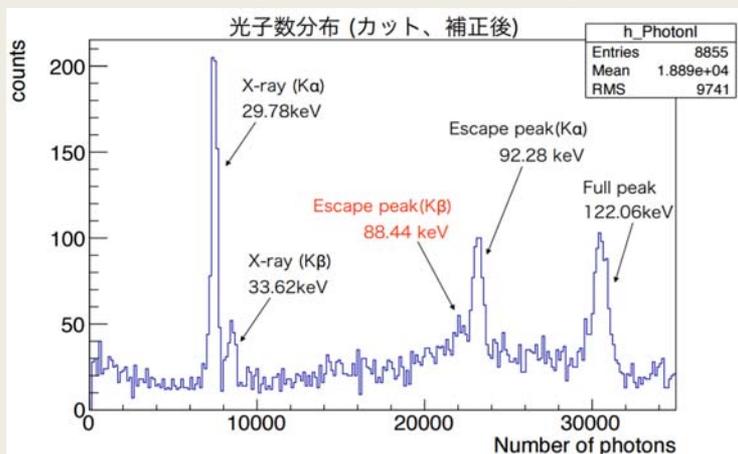
高圧化: 4atm、fid-cut



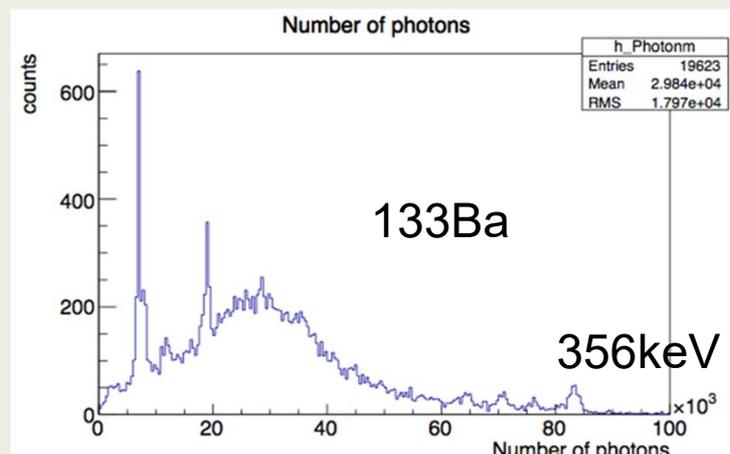
8atm、32⇒64ch、PMT追加



放電対策、ガス循環

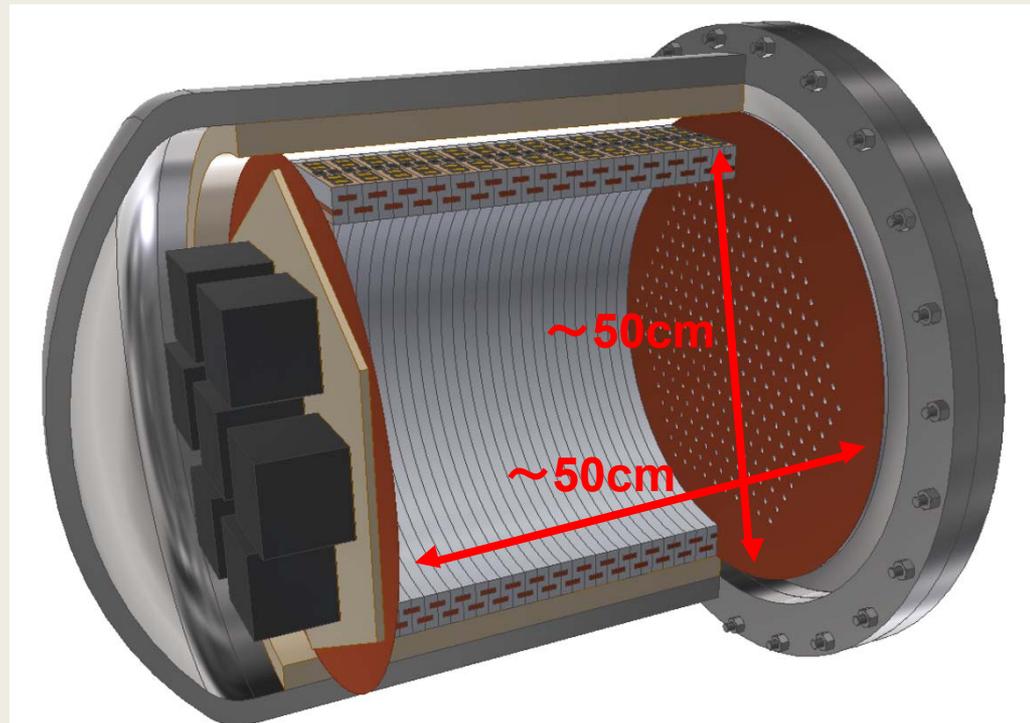


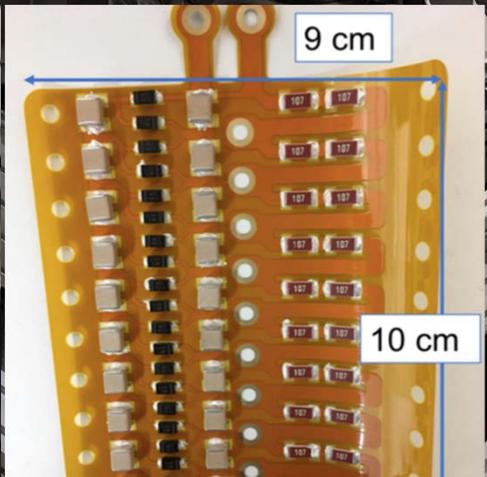
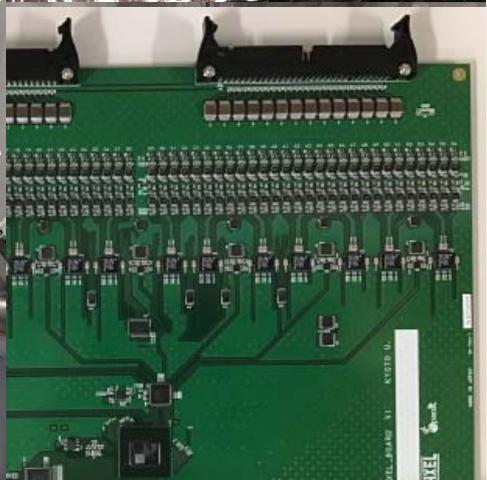
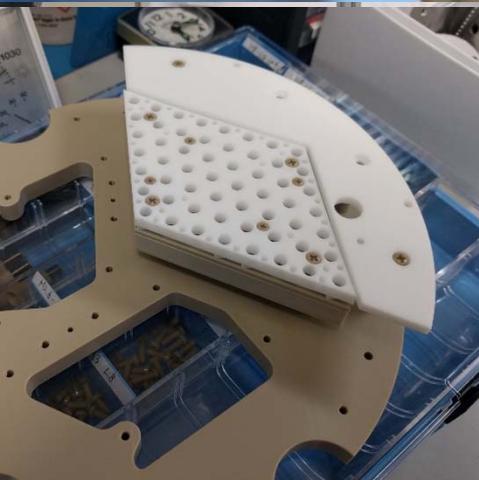
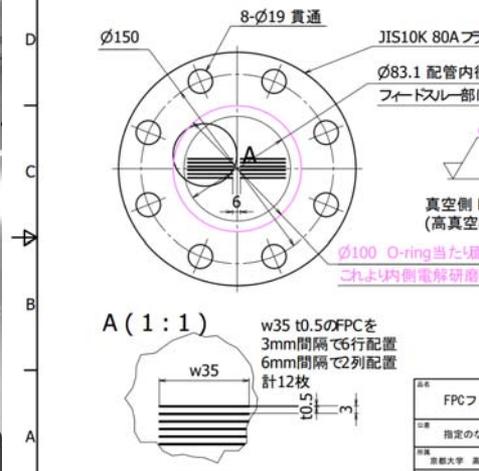
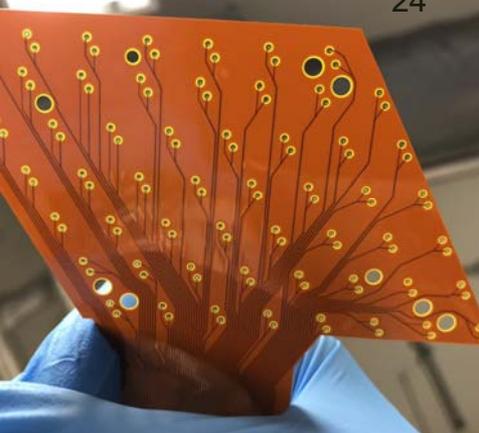
ELCC大型化



180L試作機

- $0\nu\beta\beta$ 信号である2.5MeVでのエネルギー一分解能測定を！
- 大型化の技術確立
- Xe 9kg、 ~ 1000 ch

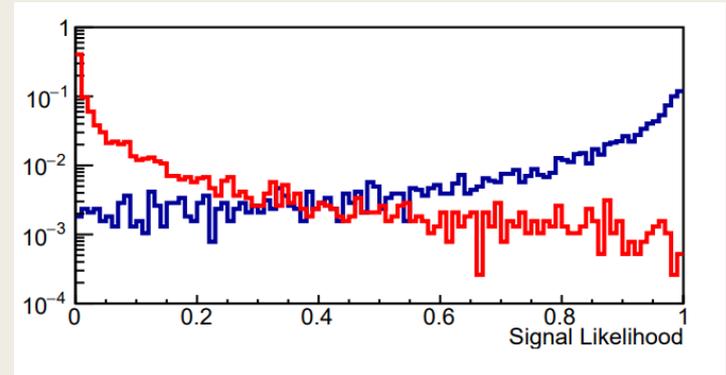




ウェーブフローニング

飛跡の形状でバックグラウンド分離

- $0\nu\beta\beta$: 電子の終点が2つ
- γ -ray (光電吸収): 電子の終点が1つ

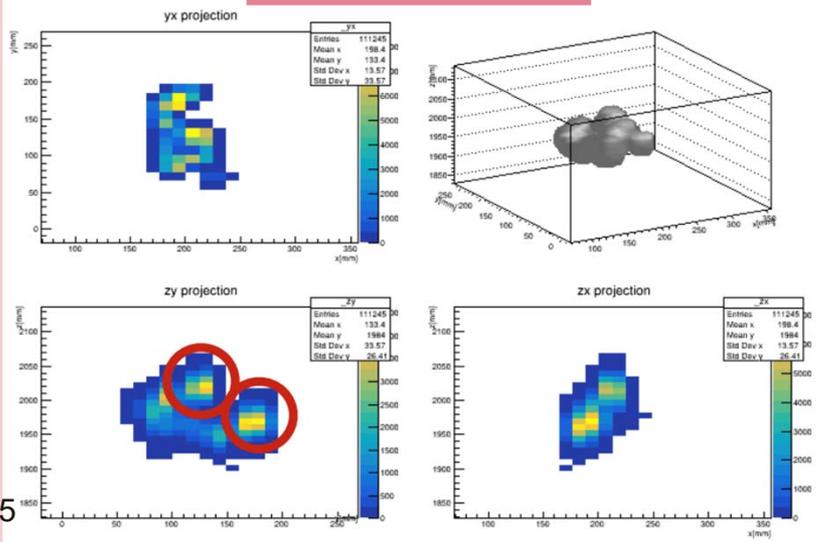


	sig_eff	bg_eff	bg_count
pre_cut	50.90 [%]	0.0556 [%]	99.2[cnt/year]
Total	27.37 [%]	0.0004 [%]	0.80[cnt/year]

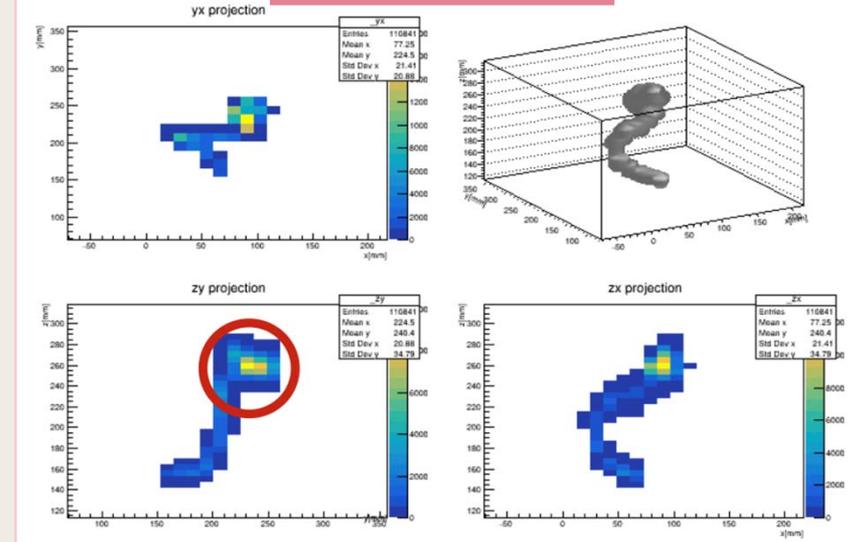
DL_eff 53.78 [%], 0.8073 [%] (Total / pre_cut)

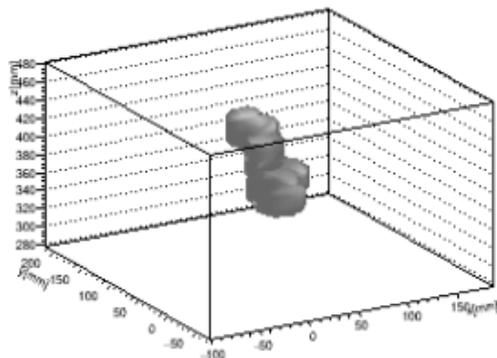
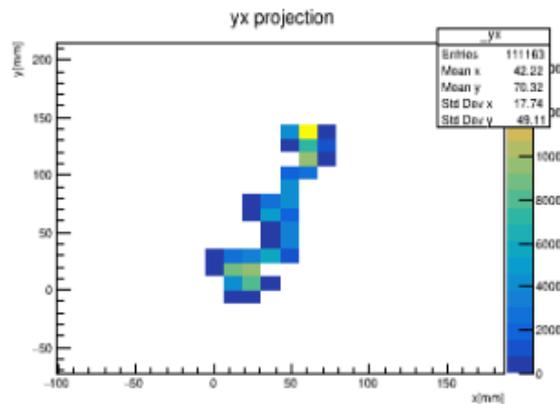
機械学習とバトル → <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/syun.tanaka/wave/wave.html>

$0\nu\beta\beta$



gamma-ray





vs Deep Learning ▾

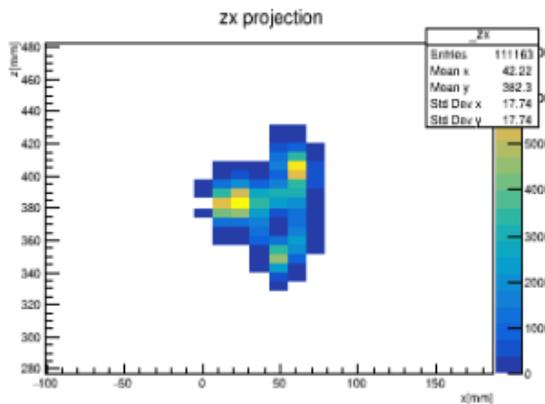
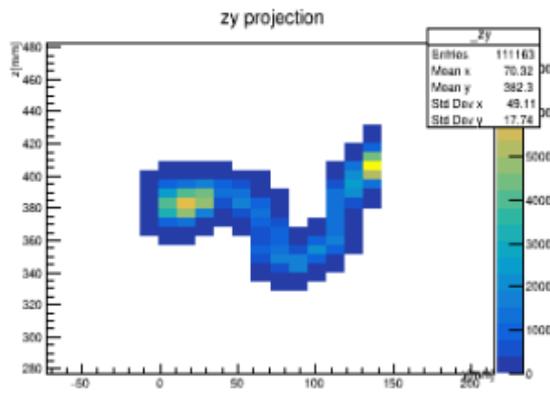
Your score

0 / 0

DL score

model04_01_06_180927_0230

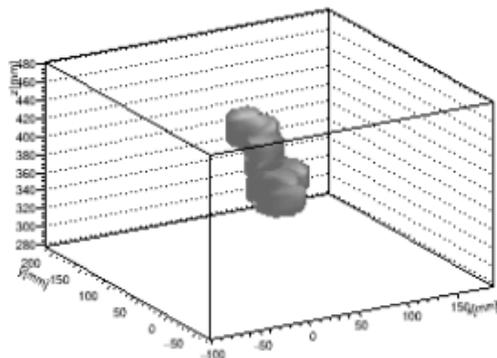
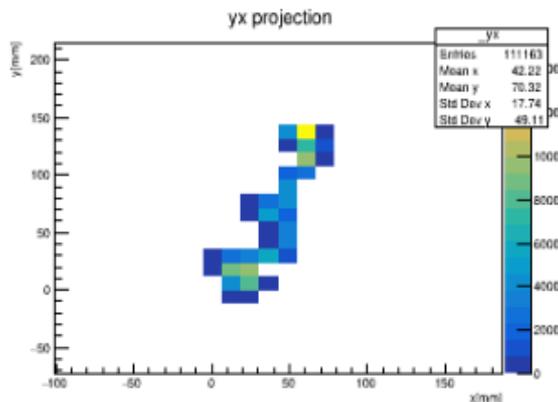
0 / 0



reset

gamma

Onββ !!

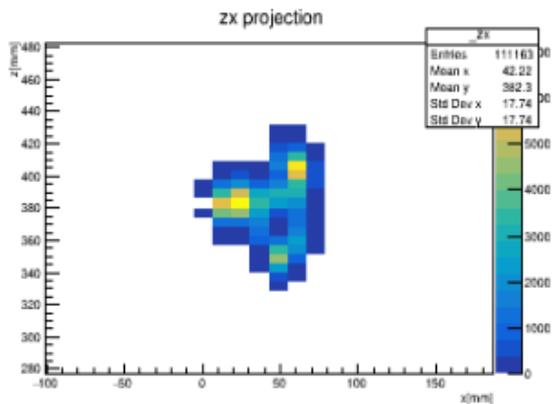
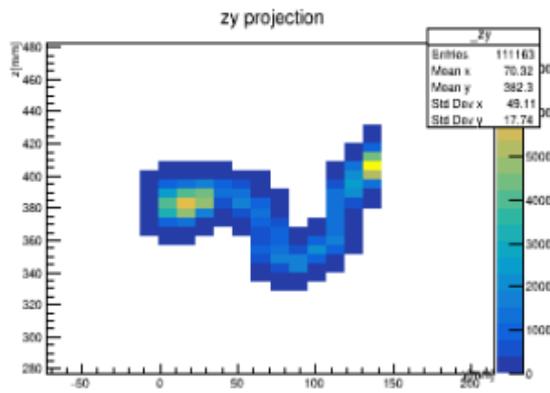


vs Deep Learning ▾

Your score
1 / 1

DL score
model04_01_06_180927_0230
1 / 1

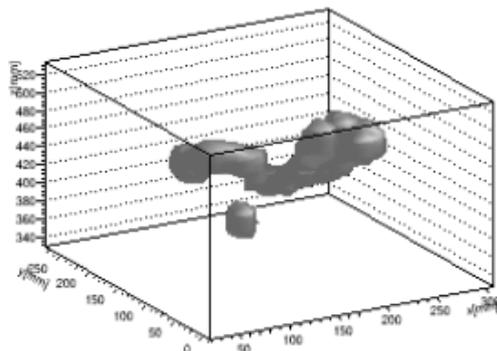
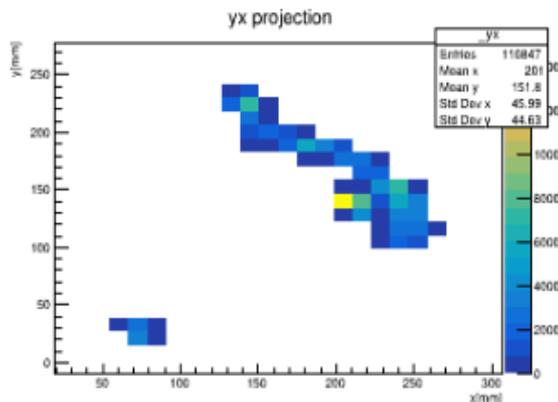
Correct!!!
sig9837
DL(sig_cand) = 0.986



gamma

Onββ !!

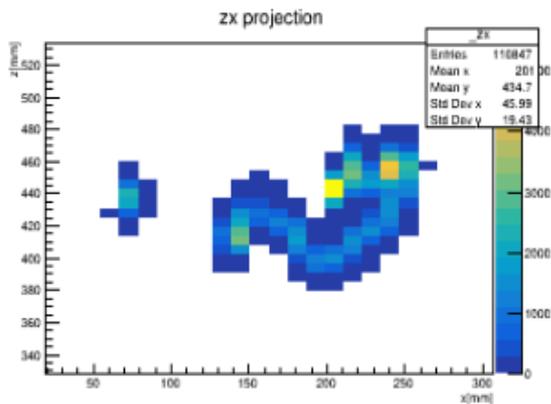
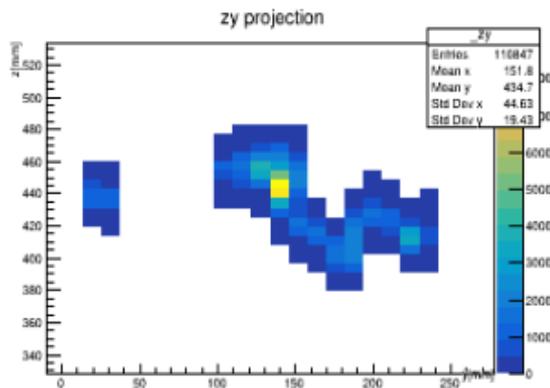
reset



vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 0

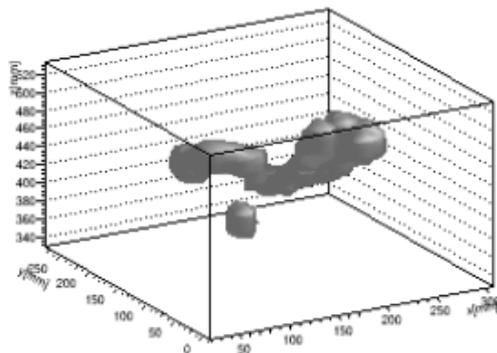
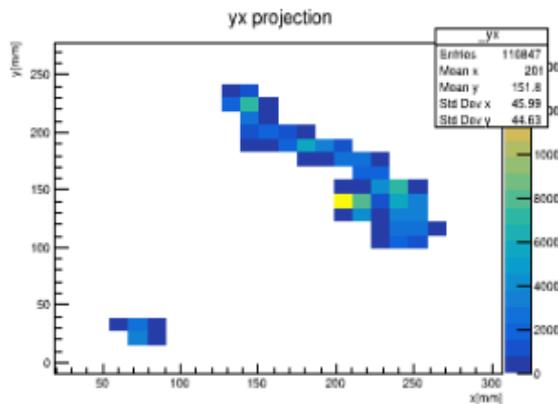
DL score
model04_01_06_180927_0230
0 / 0



gamma

Onββ !!

reset



vs Deep Learning ▾

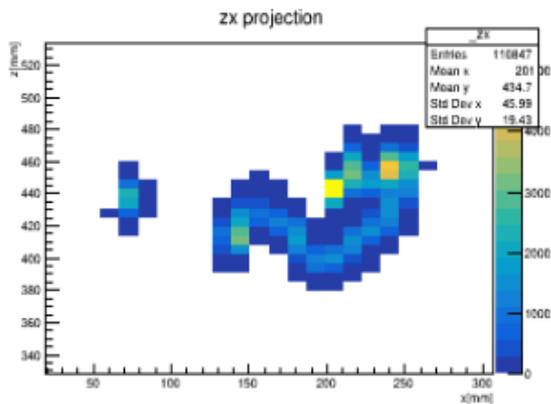
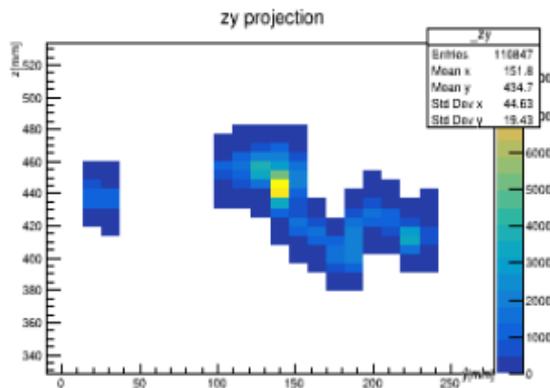
Your score
1 / 1

DL score
model04_01_06_180927_0230
1 / 1

Correct!!!
bg9502727

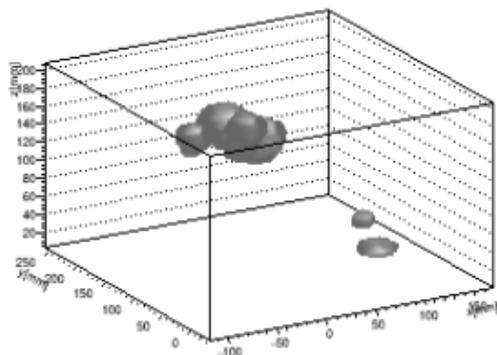
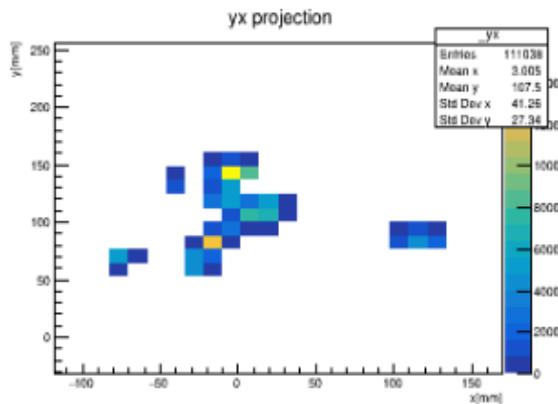
DL(sig_cand) = 0.353

reset



gamma

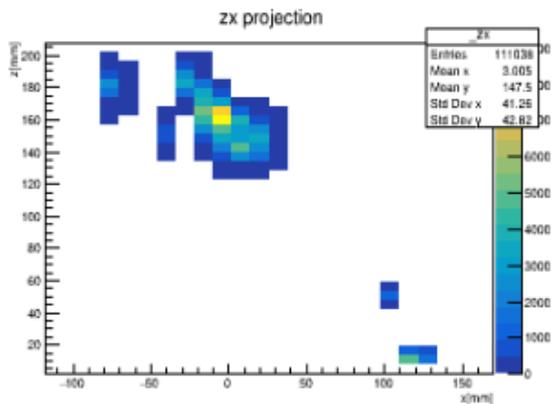
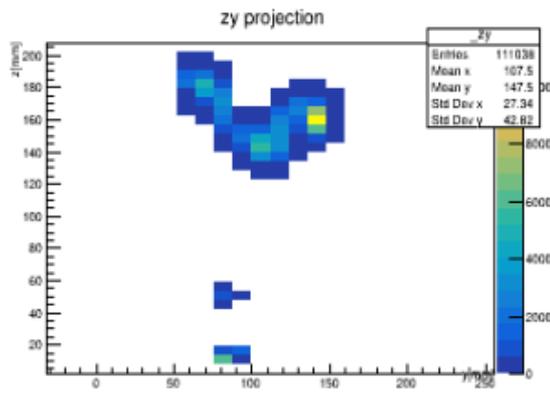
Onββ !!



vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 0

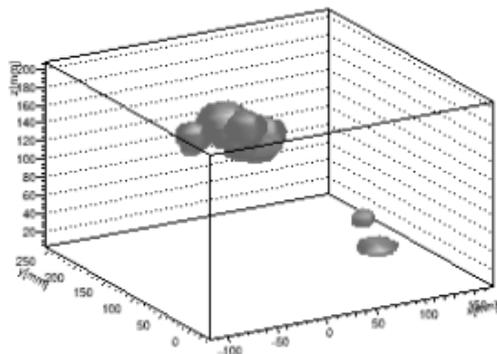
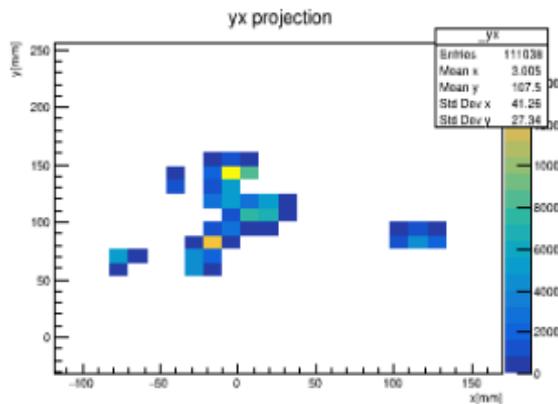
DL score
model04_01_06_180927_0230
0 / 0



gamma

Onββ !!

reset



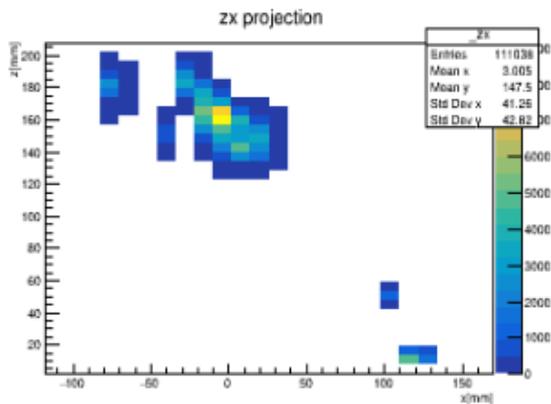
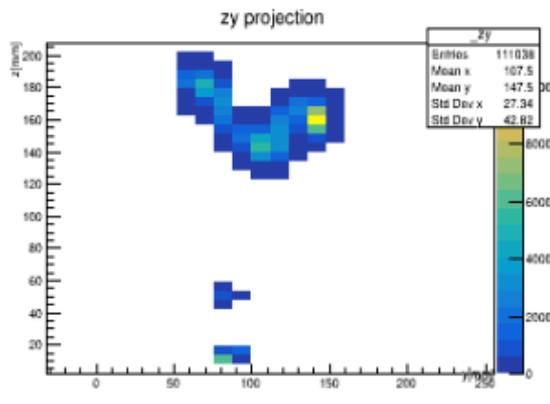
vs Deep Learning ▾

Your score
0 / 1

DL score
model04_01_06_180927_0230
1 / 1

Wrong..
sig9707

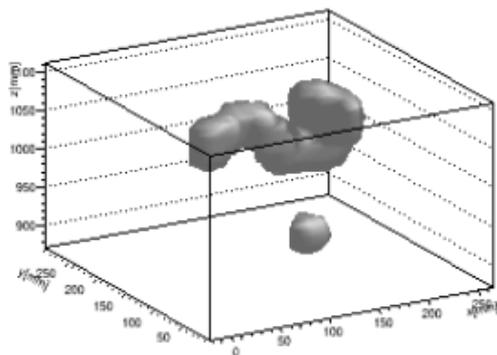
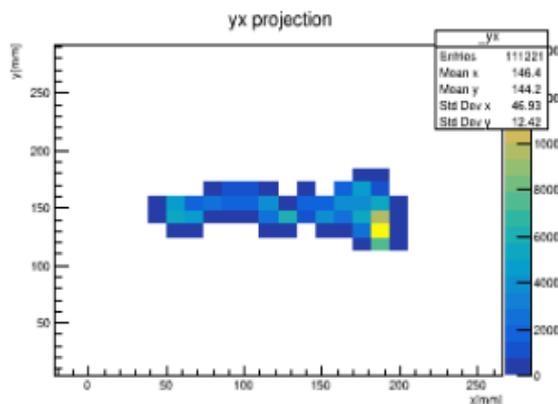
DL(sig_cand) = 0.898



gamma

Onββ !!

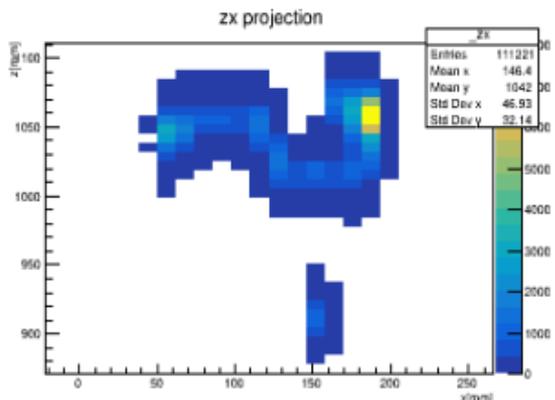
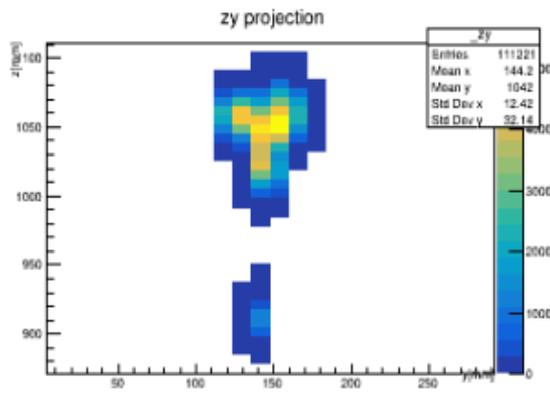
reset



vs Deep Learning ▾

Your score
63 / 100

DL score
model04_01_06_180927_0230
85 / 100



gamma

Onββ !!

reset

AXEL 計画 物理探索

2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026

建設 試作機180L 測定 & upgrade

建設 AXEL3000L 物理RUN

建設 AXEL1ton 物理RUN

2 $\nu\beta\beta$ なら1000ev/年
(地下でのR&Dも
視野にいれつつ)

AXEL3000L (~100kg)

- 背景事象がない場合は1年観測で世界最高感度となる質量
- スケールアップ技術の獲得
- バックグラウンド事象の測定・理解

AXEL1ton

- 目的: 逆階層を探索(20meV)
- そして順階層へ

**が、前ページのように進めて、
世界に打って出るには、もう
一桁、背景事象を削減する技
術を開発しなければいけない。**

修士の学生さんのテーマ例

- 180L検出器を来年度、神岡へ
 - 地下での運用を学ぶ
 - 背景事象の調査
- 3,000L検出器に向けたR&D
 - 各構成要素の大型化
 - 集積回路素子(ASIC)
 - 表面実装低放射化MPPC
 - シミュレーション
- 背景事象削減に向けたR&D
 - アクティブまたは極薄容器
 - 陽イオン検出⇒ピンぼけしていない飛跡観測
 - アルゴリズム開発(Deep Learningなど)
 - 時間情報 ($0\nu\beta\beta$ はガンマ線背景事象よりも飛行時間が短い)
 - ^{136}Ba をタグしたい!
次ページ

^{136}Ba tagging

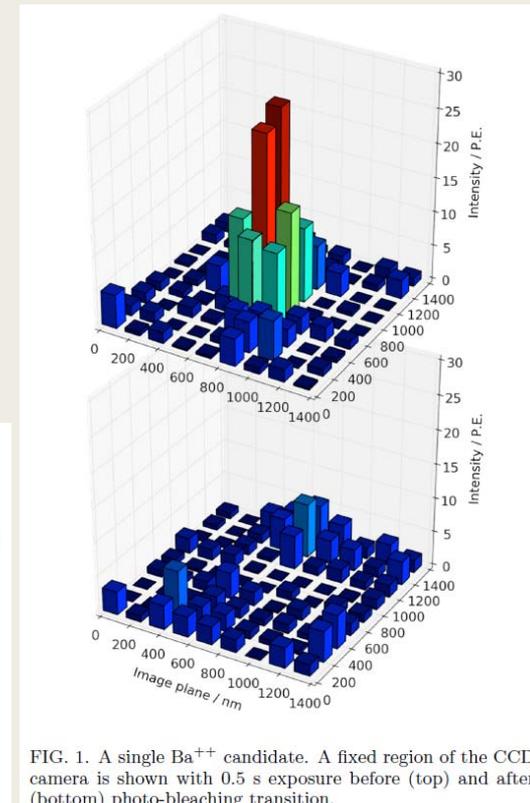
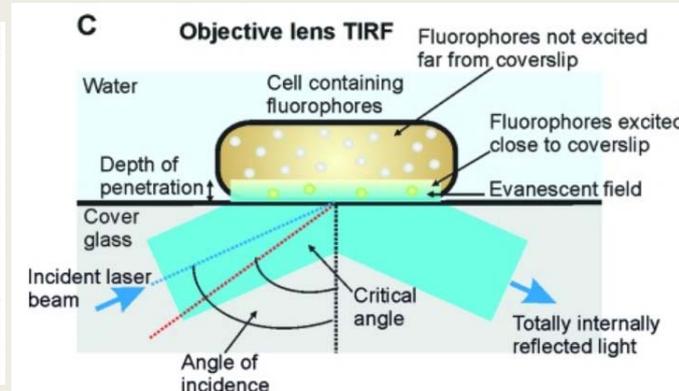
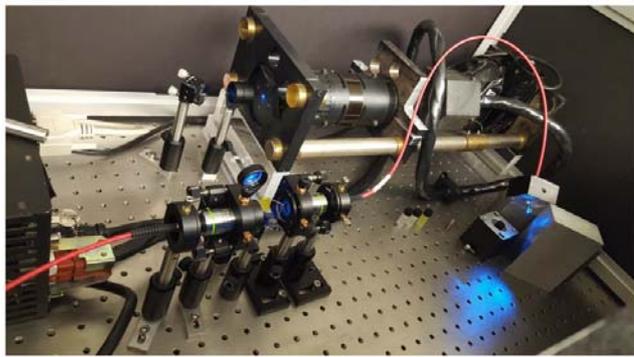
^{136}Xe の娘核1個をタグする。 **最終兵器!**

AXELコアメンバー未承認

D. Nygren (TPCを発明した人。高圧キセノンで $0\nu\beta\beta$ をやるのがいいというのも、この人が火をつけた)は、SMFI(single molecule fluorescent imaging)で、やろうとしている。

$^{136}\text{Ba}^{2+}$ を含む蛍光分子に適切な波長の光を当てる。そこから特定の波長の光がでるのを検出する。

SMFIのポイントは、見たい所にだけローカルに光を当て、顕微鏡でそこを焦点に置いて観測



^{136}Ba tagging

- $^{136}\text{Ba}^{2+}$ は可視光に蛍光線を持たないので、蛍光分子を使っている \Rightarrow ドリフトして電極にたどり着いた $^{136}\text{Ba}^{2+}$ は電子を受け取るのでは？
- カバーガラスのエバネッセント光の代わりにファイバーが使えるのでは？

(この辺のことは、すでにNygrenが考えて、ダメだと判断した可能性はある。)

学生さんへ

- 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
 - AXELでは既存の技術の組み合わせではない本当の開発に挑戦
- 博士課程では、状況にあわせ、AXELを続けるなり、T2KやATLAS等の解析をするなり、選択肢あり。
 - ハードウェアを極めれば、博士号は取れる
(大切なのは何かを極めるということ)
- ✓ **ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を見つけたい**
- ✓ **新しい世界に一つの究極のすごい検出器を自分で作りたい**

と思いませんか？