

ニュートリノを巡る未解決の問題群



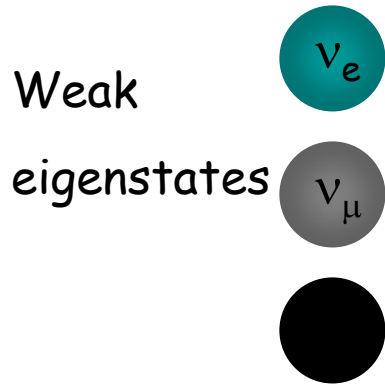
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

ニュートリノを巡る未解決の問題群

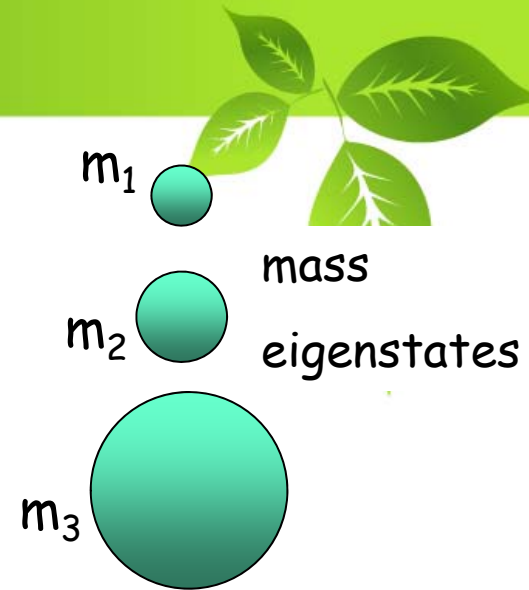


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

混合行列



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{MNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij})$$

$$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$$

$$+ \delta \text{ (+2 Majorana phase)}$$

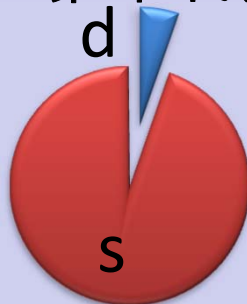
$$\Delta m_{12}, \Delta m_{23}, \Delta m_{13}$$

絵にしてみると

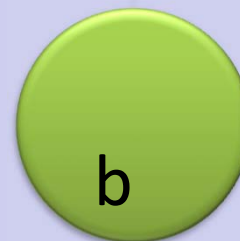
s 第1世代クオーク



第2世代クオーク



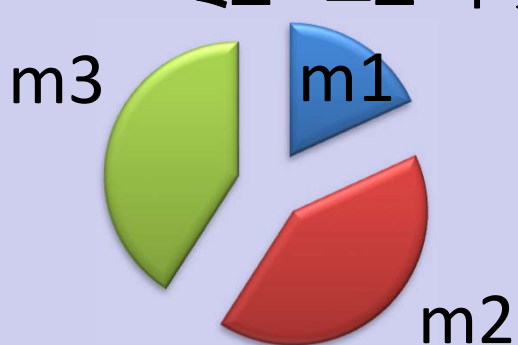
第3世代クオーク



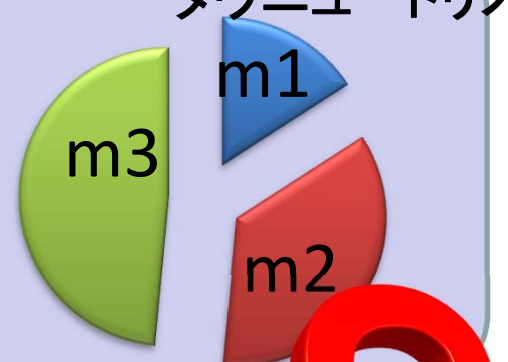
m3 電子ニュートリノ



ミューニュートリノ



タウニュートリノ



- クォークは、ほとんど混合していない (変)
- ニュートリノは大きく混合している (変)



ニュートリノを巡る未解決の問題群



- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

(クォークと同じように)CP対称性は破れているのか？

3x3のユニタリ行列は、複素位相を1個もつことができますね。

$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$(c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij})$

ニュートリノ $\delta \rightarrow$ 反ニュートリノ
 $-\delta$

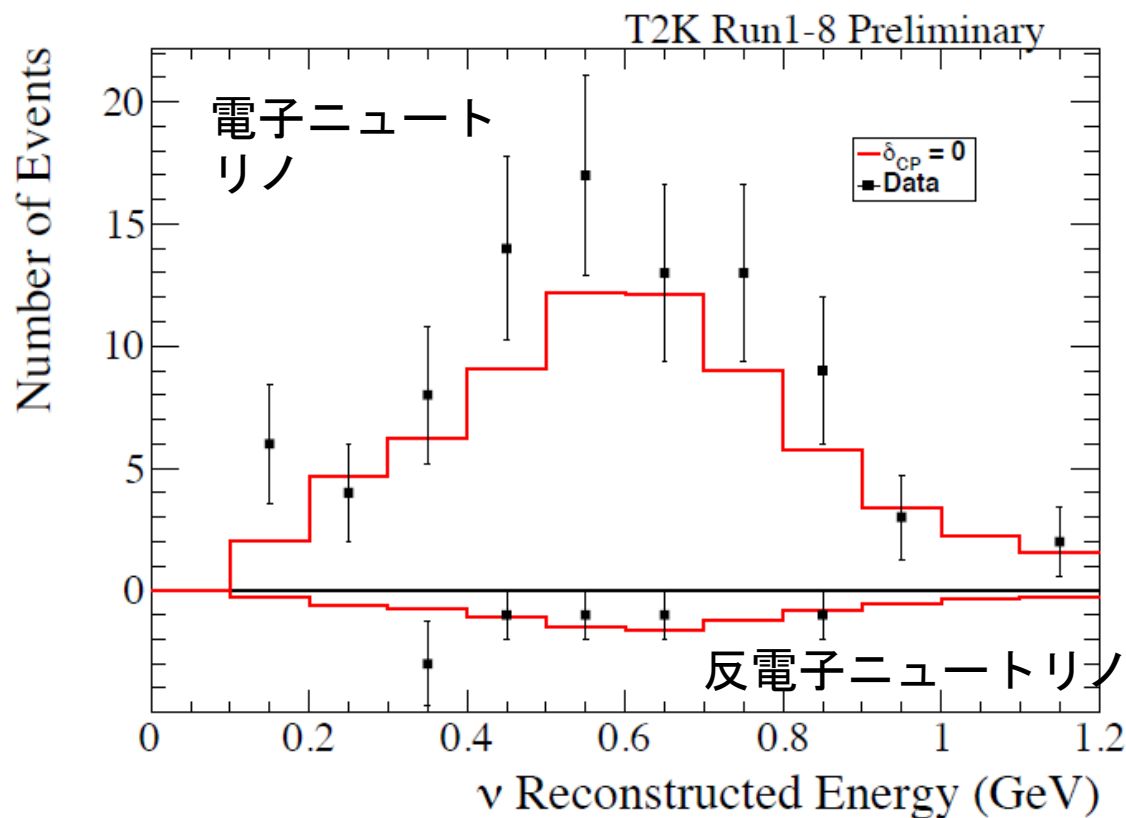
T2K??? Hyper-K?

CKM (quark sector) $\delta \sim 60^\circ \rightarrow$ CP violation in K and B

T2Kの最新結果(8月に公表)



- CPの破れが予想以上に大きい??????



赤線は $\delta_{CP} = 0$ の予想
(ただし、 θ_{23} の不定性などにより幅がある)

ニュートリノを巡る未解決の問題群



- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- **質量の絶対値**
- 宇宙背景ニュートリノ

質量の絶対値



- ニュートリノ振動で測定できるのは、
$$m_i^2 - m_j^2$$

で、絶対値は測定できない。

- わかっている上限値

- 直接測定

$$m_{\nu_e} : 2 \text{ eV}, \quad m_{\nu_\mu} : 0.19 \text{ MeV}, \quad m_{\nu_\tau} : 18.2 \text{ MeV}$$

- 宇宙論的観測 (Planck 2013)

$$m_{\nu_e} + m_{\nu_\mu} + m_{\nu_\tau} : < \sim 0.23 \text{ eV?}$$

ニュートリノを巡る未解決の問題群



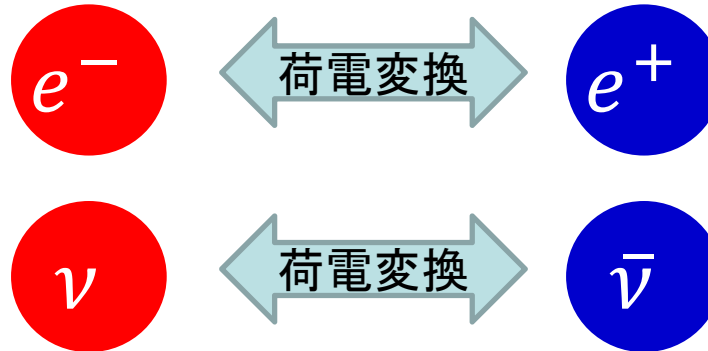
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ



ニュートリノのもう一つの可能性



ディラック・フェルミオン



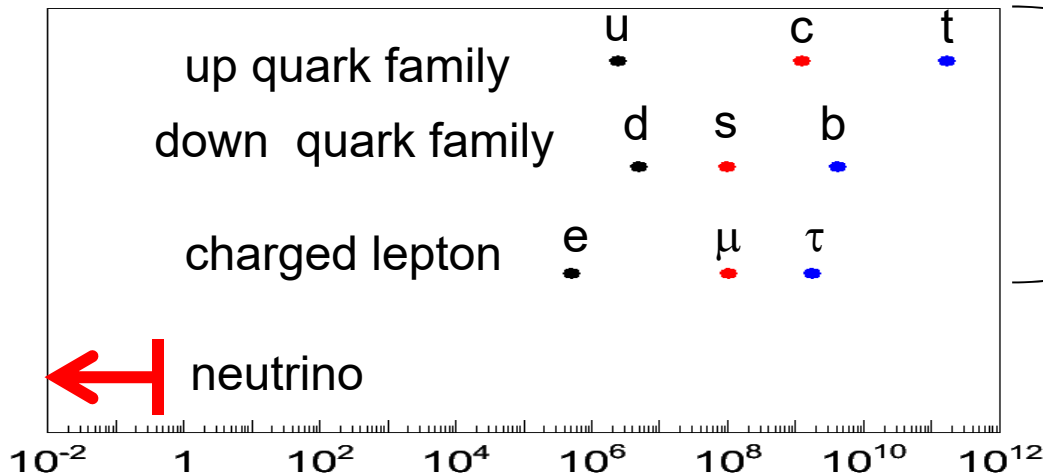
マヨラナ・フェルミオン



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。

ニュートリノはマヨラナ粒子？



ディラック粒子
(たぶん)Higgs粒子との
結合で質量を獲得

ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、マヨラナ質量を持つことができる。

Seesaw mode

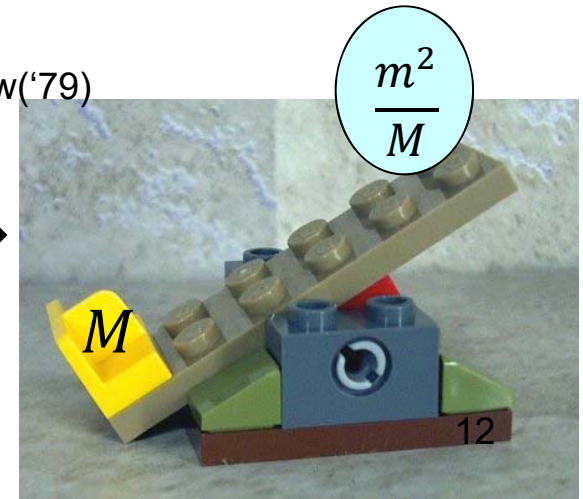
Minkowski('77), Yanagita('79), GellMann, Ramondo, Slansky('79), Glashow('79)

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

観測されるのは
対角化された質量

Dirac mass
~1MeV

Majorana mass
GUT scale?



ニュートリノを巡る未解決の問題群



- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- **物質優勢宇宙の起源？**
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

物質優勢宇宙の起源？レプトジェネシス



- 宇宙生成時

クオーク数：反クオーク数 = 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 (質問禁止！)

- Wのプラズマ。Wが揺らぐと q_L と l_L のエネルギーレベルが変化して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

- 実験屋の責務

- ニュートリノ振動におけるCPの破れと、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)

ニュートリノを巡る未解決の問題群

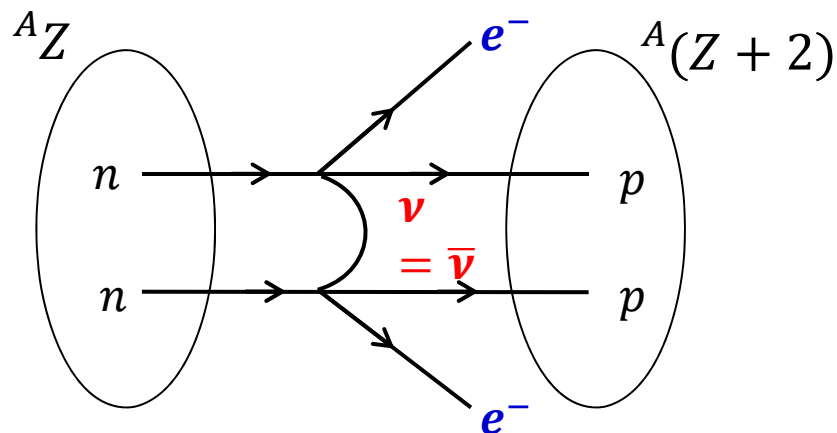


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

ニュートリノ
振動

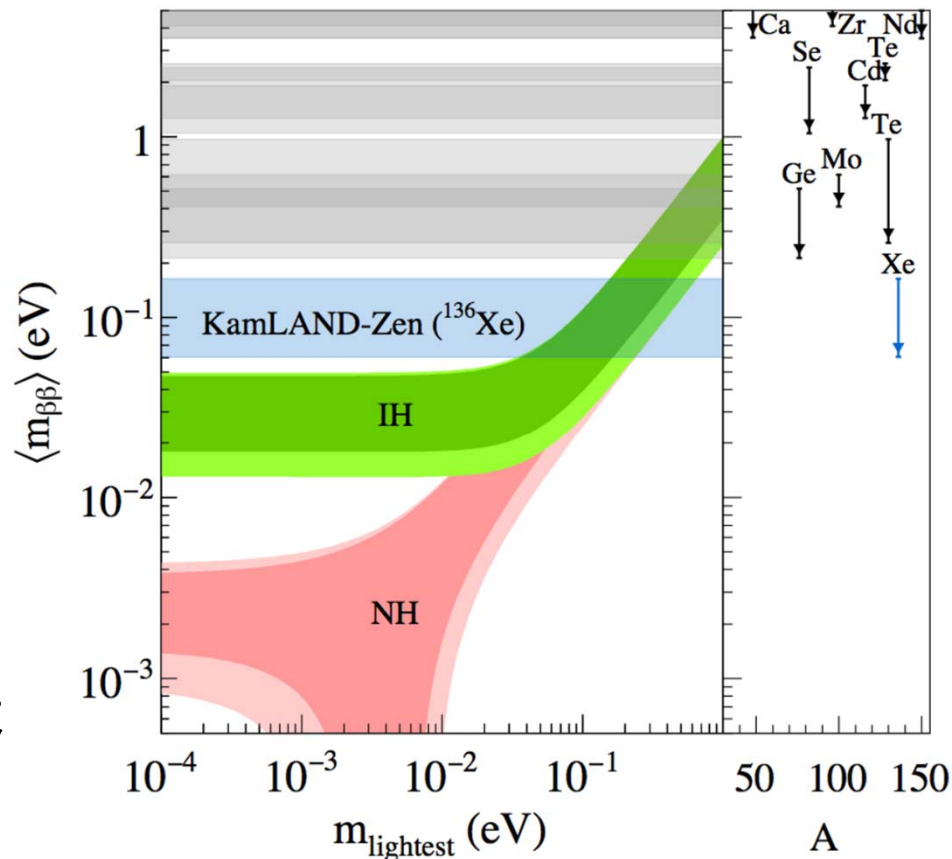
ダブルベータ
崩壊

neutrino-less double-beta ($0\nu\beta\beta$) decay



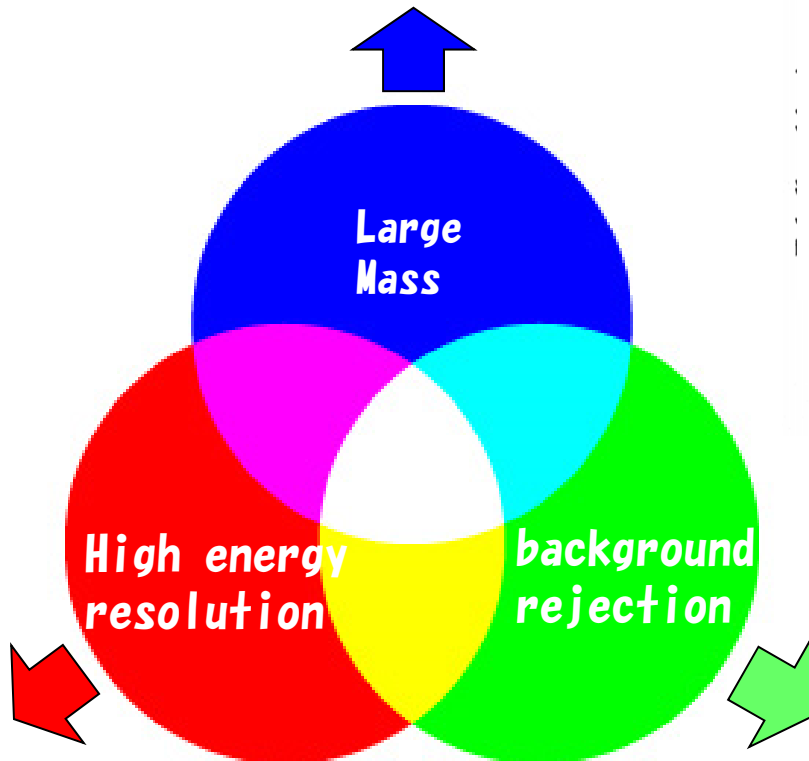
- ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる現象
- 質量の絶対値もわかる。
- 次の目標は~20meV領域
Life time $\propto m_{\beta\beta}^{-2}$
- > 1トンの崩壊核が必要
- が、質量階層性は、SKとT2Kより順階層(NH)っぽくなってきた。
- テクノロジーブレークスルーが求められている
- 新参者にチャンス!

J. Shirai, Neutrino2016

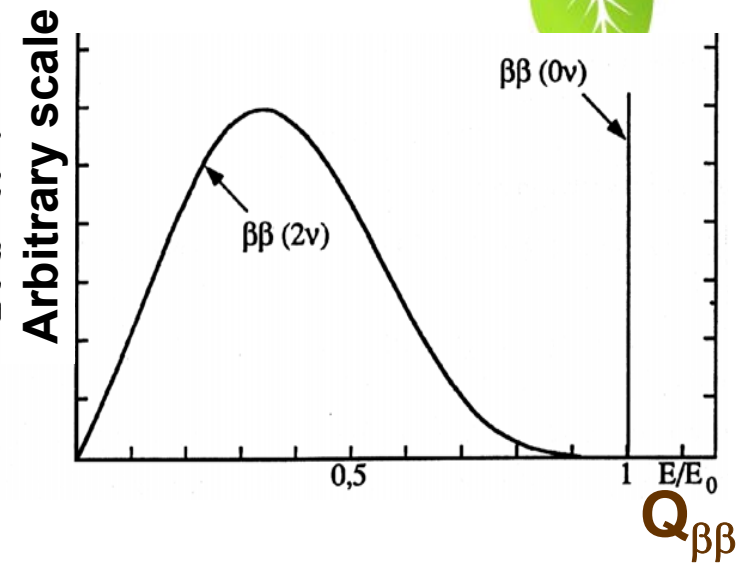


Keys for $0\nu\beta\beta$ decay search and our approach

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

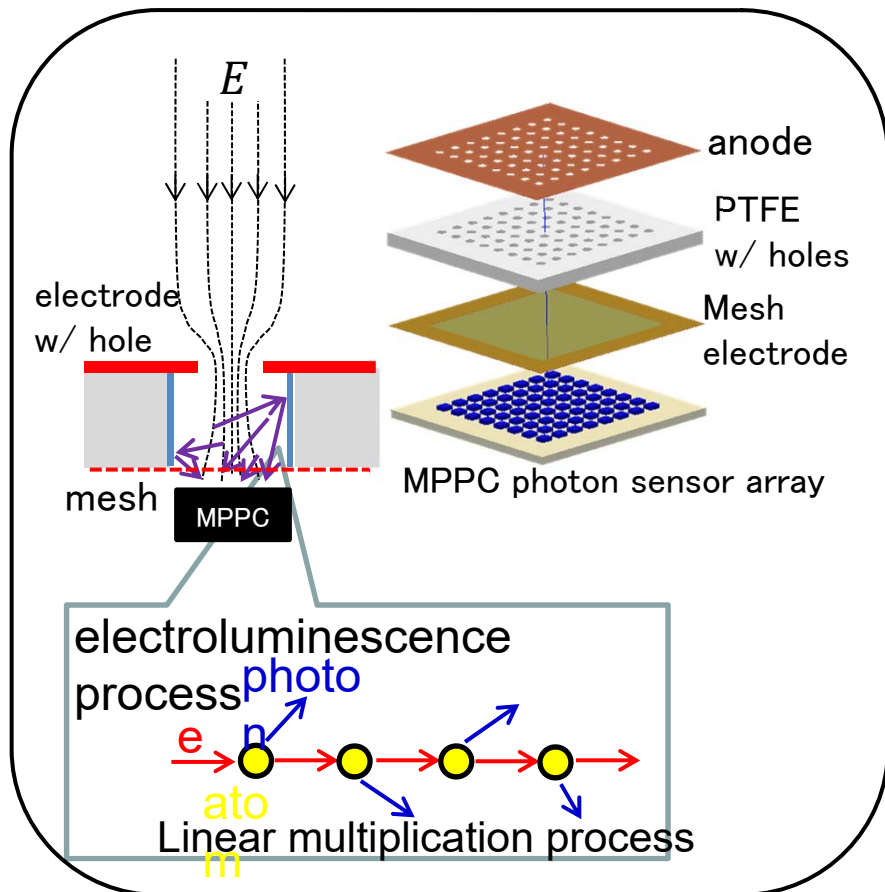


Semiconductors, bolometers
and
Ionization of noble gas!



tracking detectors
(電子が2本走っているのを捉える)

AXEL – A Xenon ElectroLuminescence detector to search for neutrinoless double-beta decay -

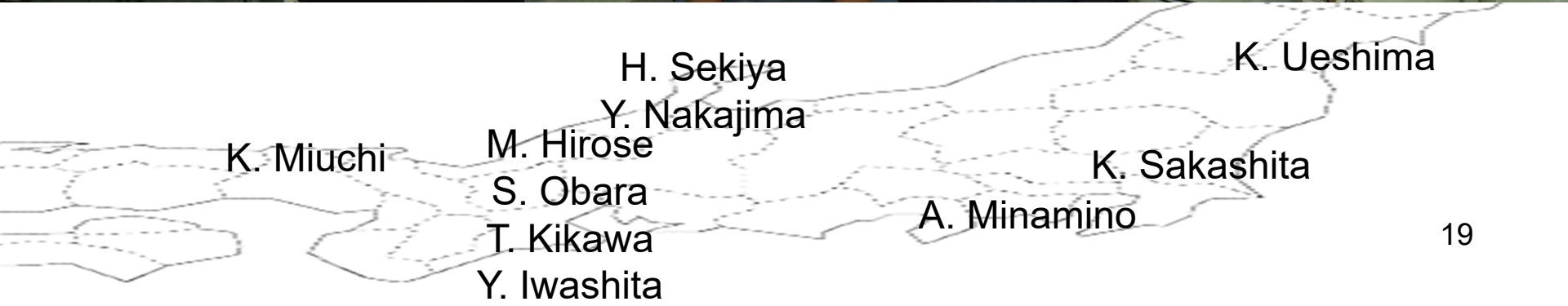
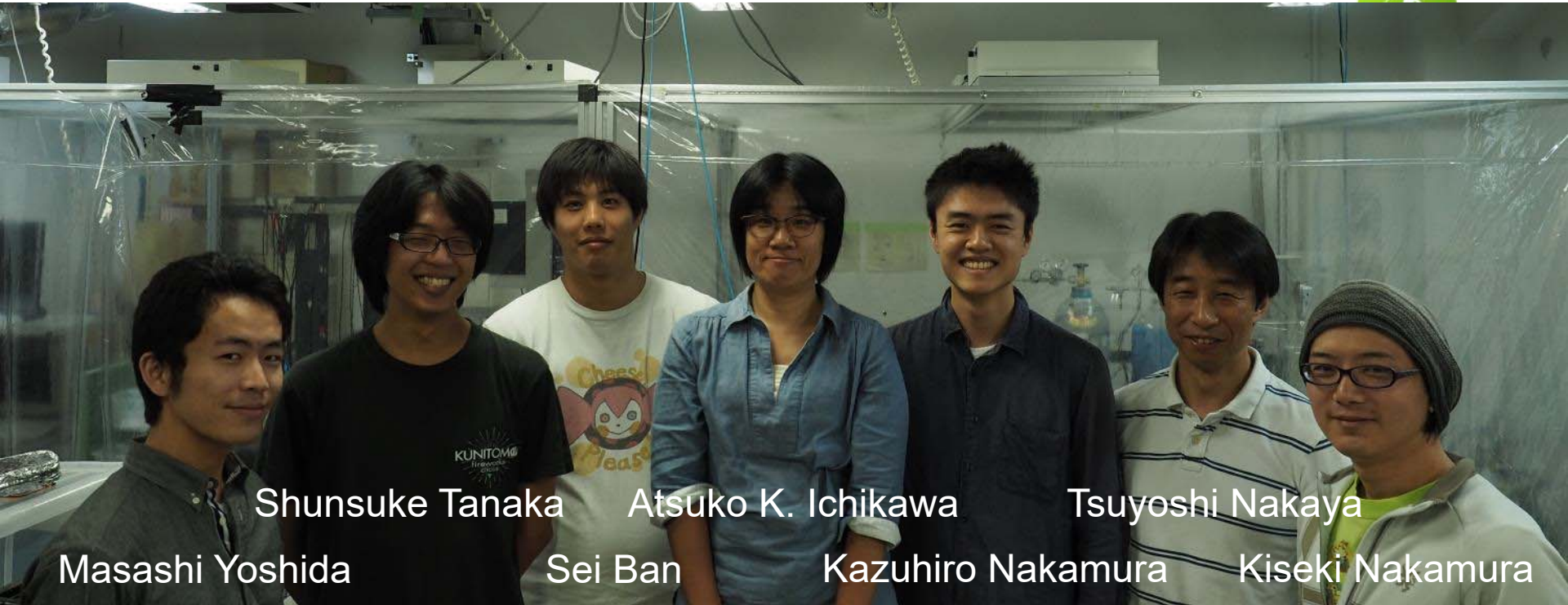


高エネルギー分解能
(goal: <math><0.5\%</math>(FWHM))



トポロジーによる背景事象除去

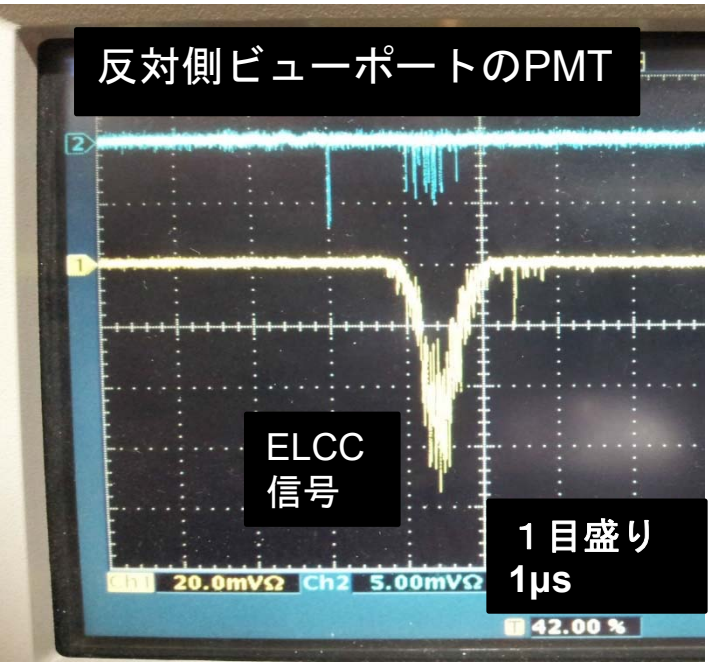
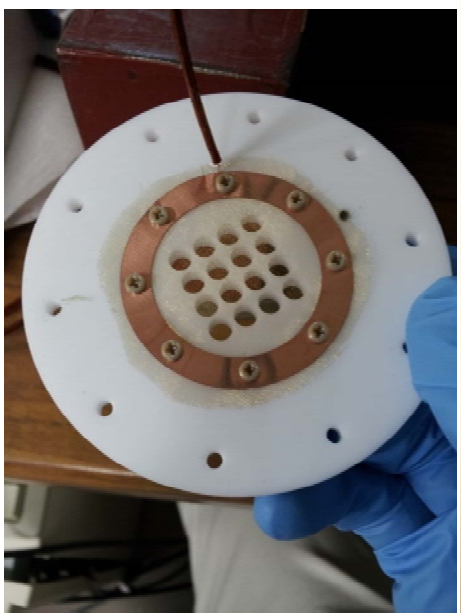
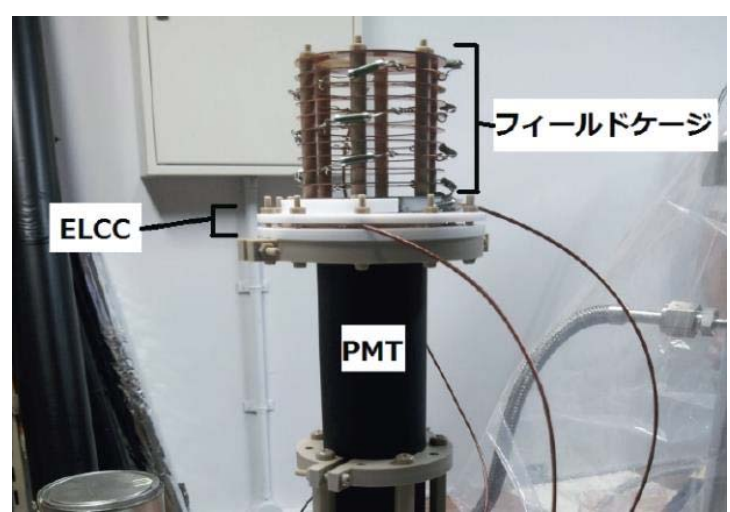
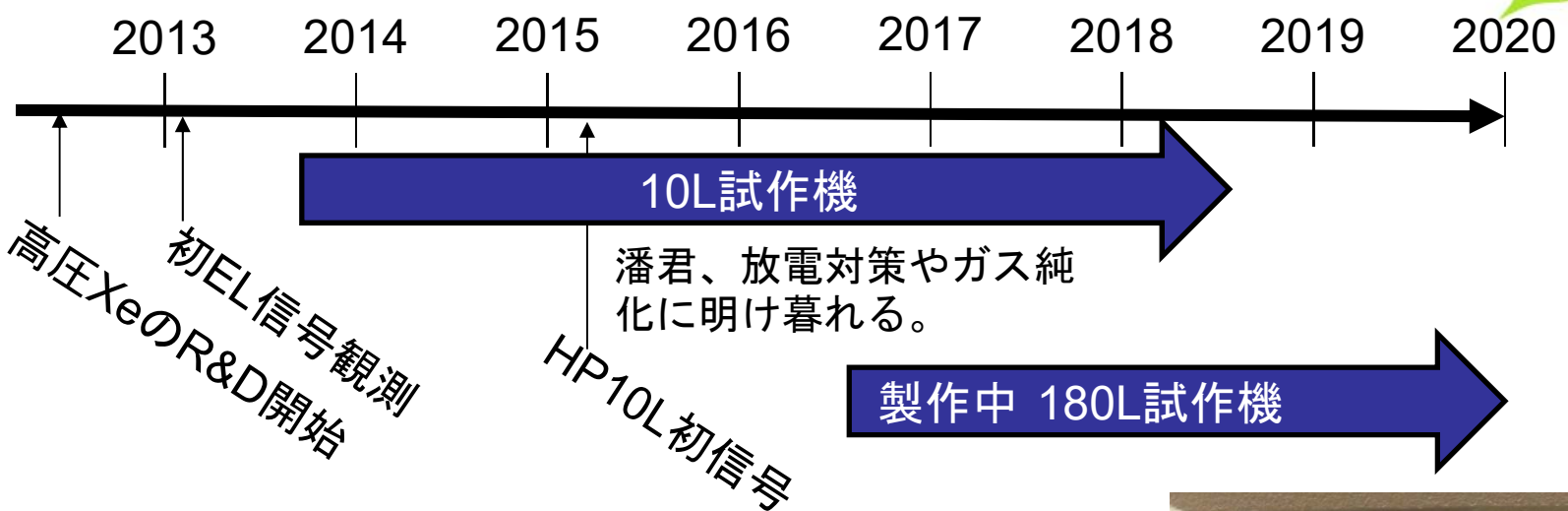
AXEL 構成員





KUNITOMO

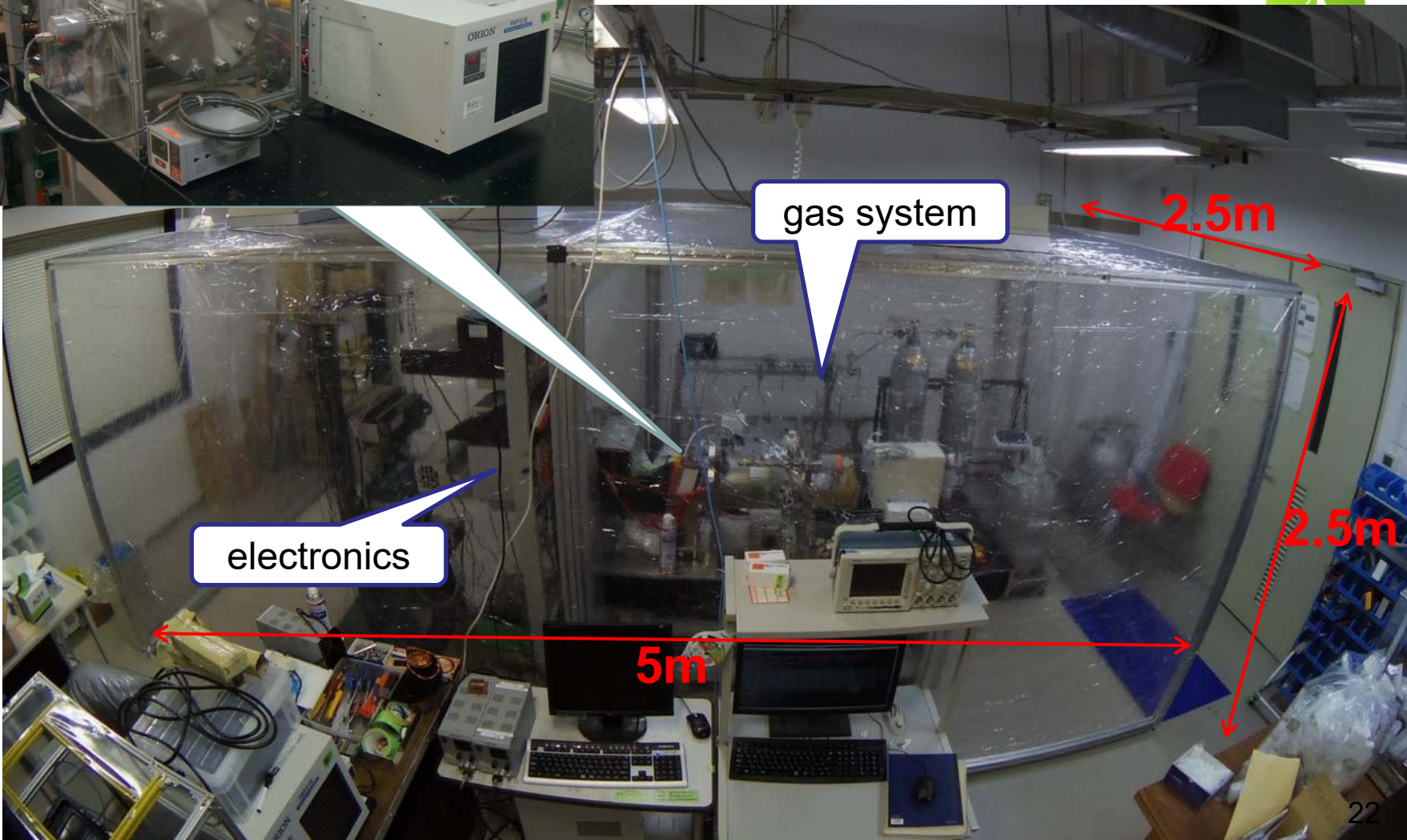
年表



Project space in Kyoto University



Chamber
10L, <10atm



試作検出器の開発と性能評価

@room309

9cm

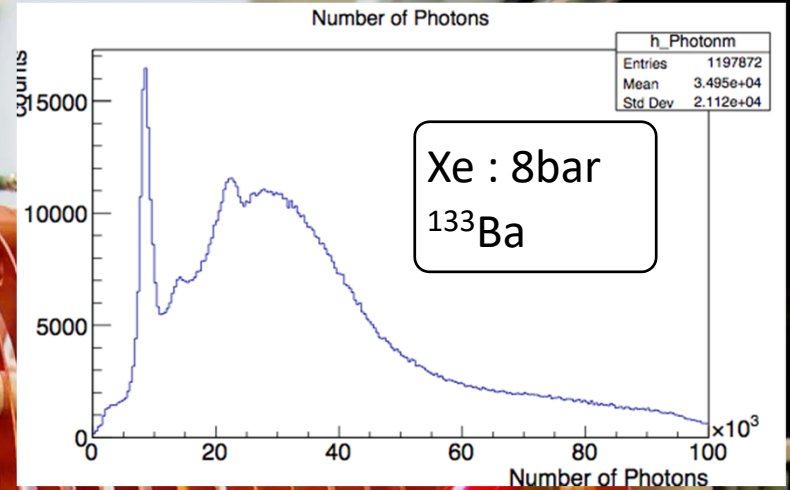
φ10cm



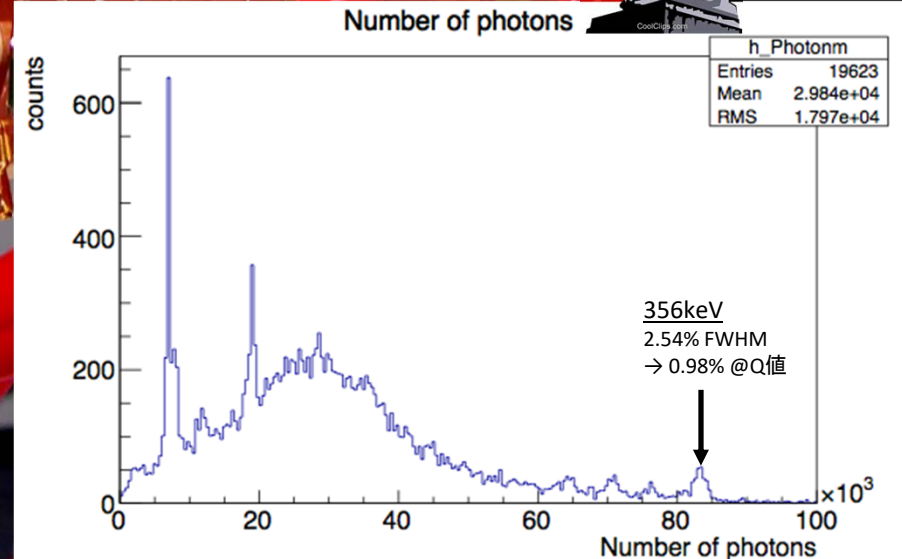
時には.....



潘晟



色々なカットや補正



田中(D2)

○読み出し回路の開発

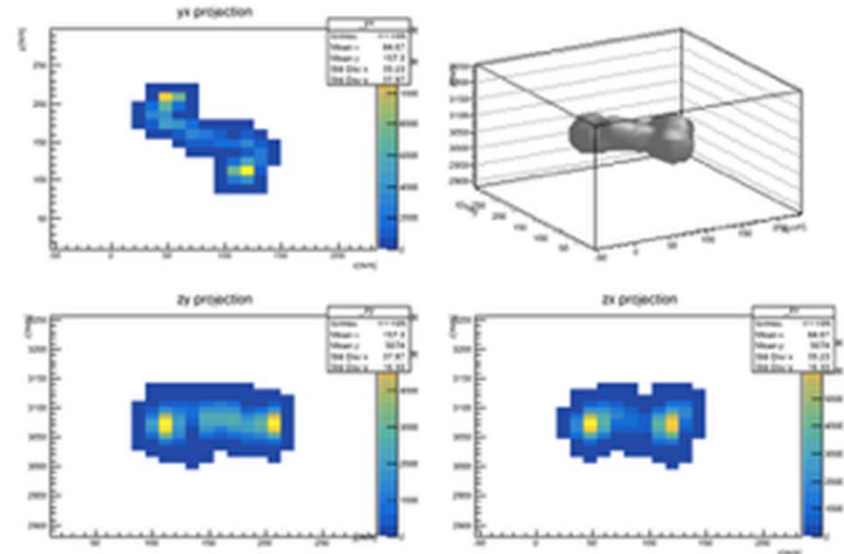
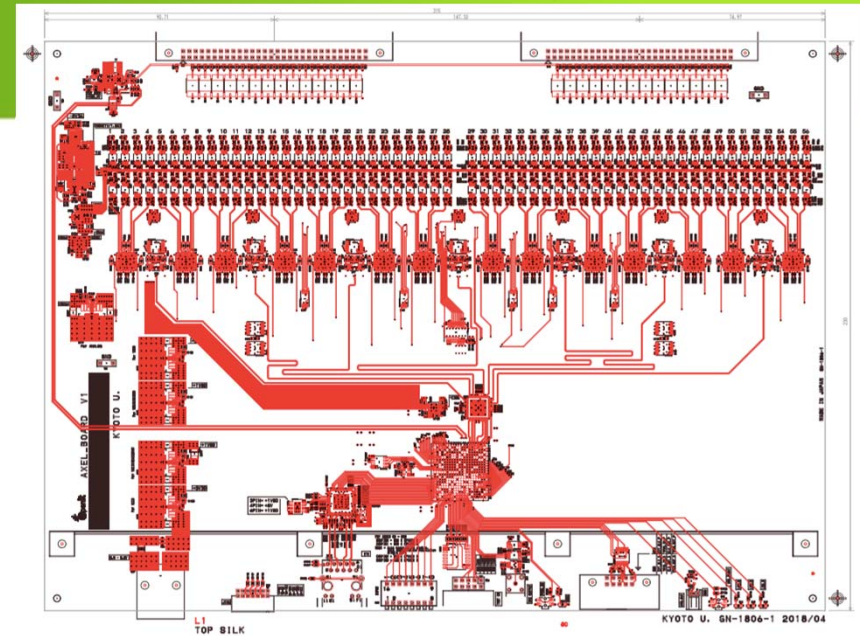
- これまでNIMやFADCで行っていたMPPC(56ch)への電源供給、波形整形、AD変換、トリガ発行を一手に担う
- 今後、多数の回路を連携して読み出すためのシステム構築を行う。

○Deep Learning を用いた波形解析

- 極限まで背景事象を減らすために、 γ 線と $0\nu\beta\beta$ 信号を弁別する必要
- 画像解析の技術を用いて、高性能な弁別方法を開発中
- Deep Learningと対決できます↓

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

人間の識別能力とかなりいい勝負

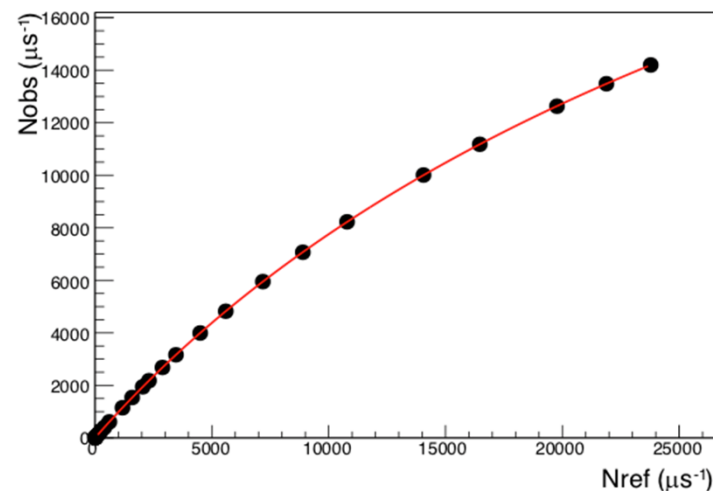
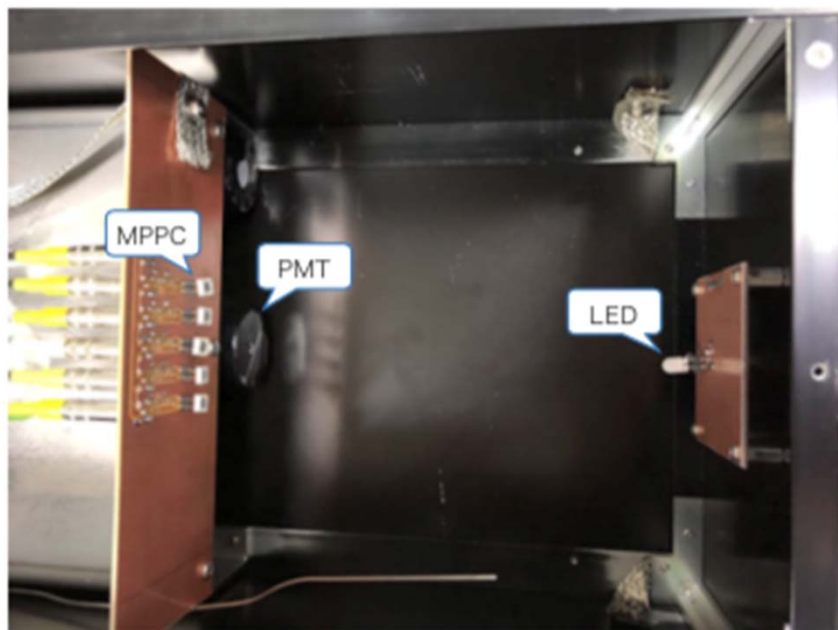
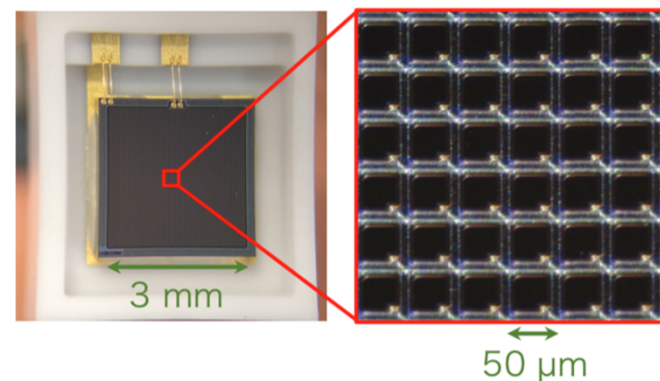


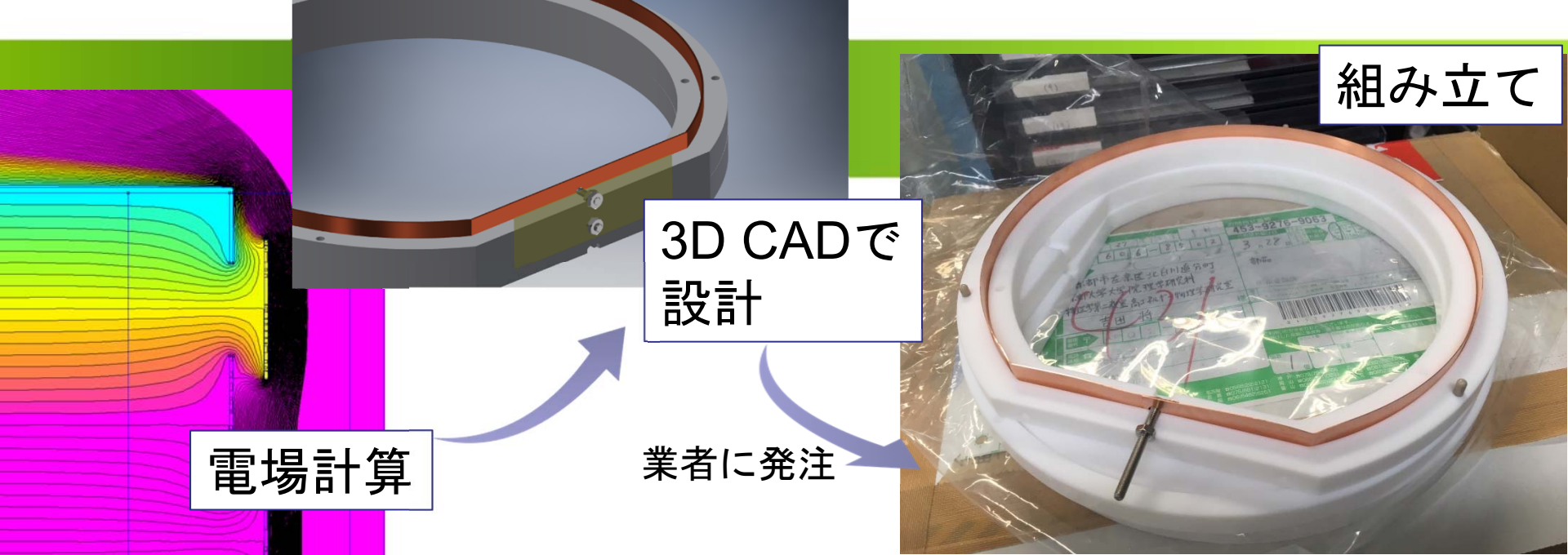
MPPCの応答測定

- 検出器のエネルギー分解能を向上！
 - 光センサーMPPCの応答の正確な理解
 - MPPCの振る舞いを説明するためのモデルの検討
 - 大量測定のためのキャリブレーションシステム開:
日々MPPCと格闘しながら楽しく研究しています。

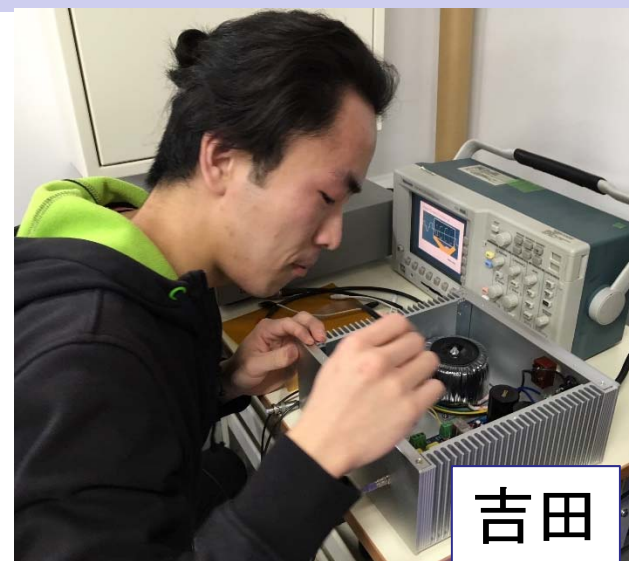
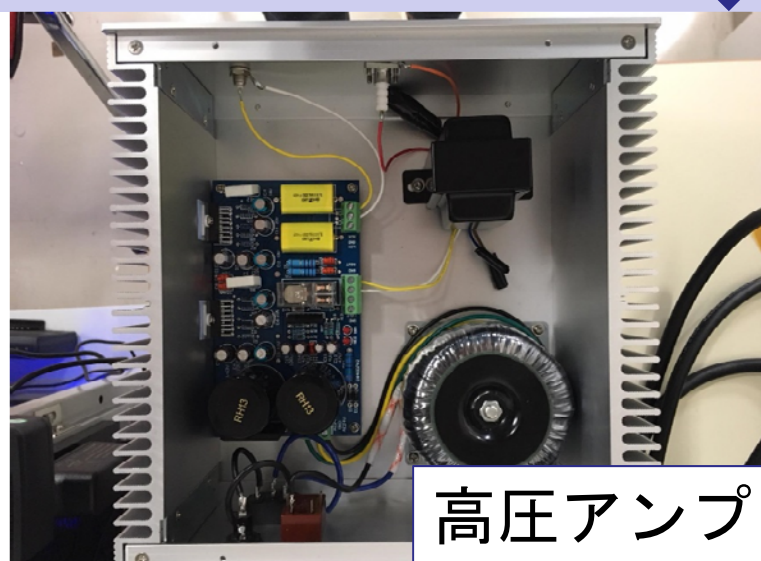
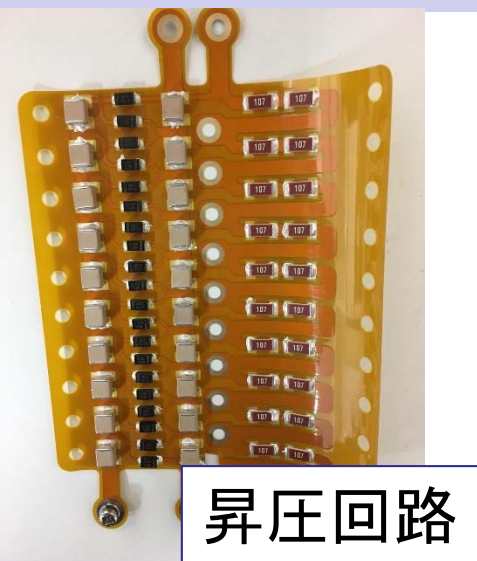


中村和





一様ドリフト電場を作る電極の開発 ↑ と
その電極に電圧を与える高圧電源の開発 ↓ を主にしています。



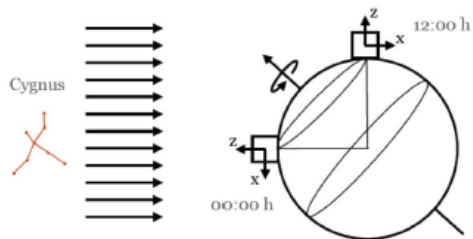
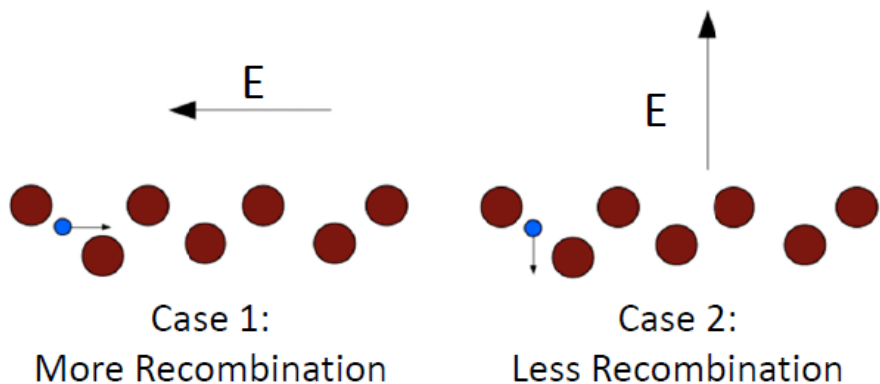
柱状再結合で暗黒物質探索をしよう！

だんくアックスセル

D a r k A X E L



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



Concept by [Dave Nygren](#), LBNL

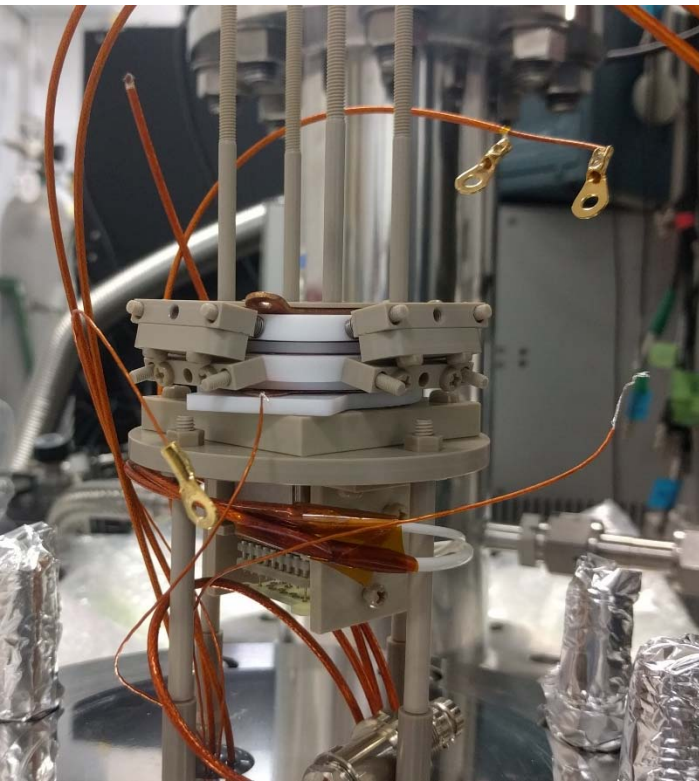
- 方向感度を持った暗黒物質探索ができれば、暗黒物質探索におけるブレークスルーになる。
- 電離電子の再結合の割合で、電場に対する角度を測る。
- 中村きが、今、やばい！？

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,^a S.Ban,^b M.Hirose,^b A.K.Ichikawa,^b Y.Ishiyama,^b A.Minamino,^b K.Miuchi,^a T.Nakaya,^b H.Sekiya,^c S.Tanaka,^b K.Ueshima,^d

^aKobe University,

Rokkodai, Nada-ku Kobe-shi, Hyogo, 657-8501, Japan

^bKyoto University,

Kitashirakawaoiwake-cho Sakyo-ku Kyoto-shi Kyoto, 606-8502, Japan

^cKamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo,

456 Higashimozumi Kamioka-cho Hida-shi Gifu, 506-1205, Japan

^dRCNS, Tohoku University,

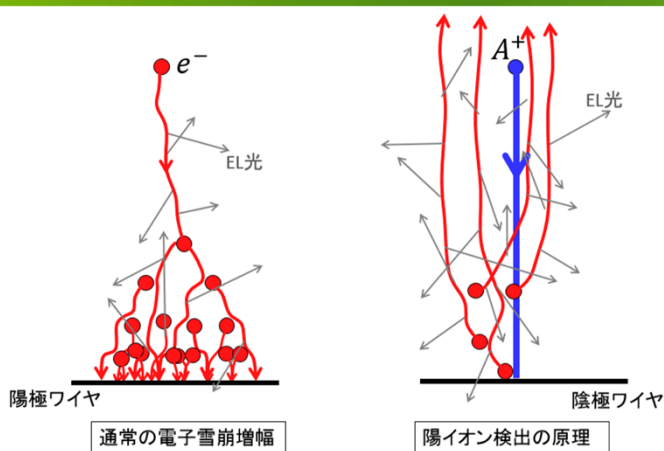
6-3 Aramaki-zaaoba, Aoba-ku Sendai-shi, Miyagi, 980-8578, Japan

E-mail: kiseki@harbor.kobe-u.ac.jp

[astro-ph.IM] 15 Mar 2018

陽イオン検出に挑戦

小原

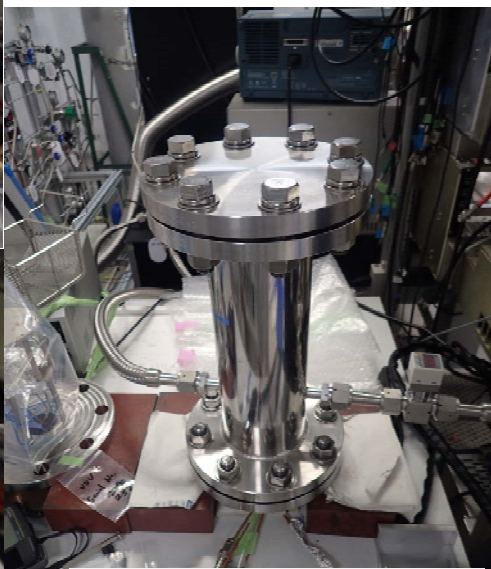
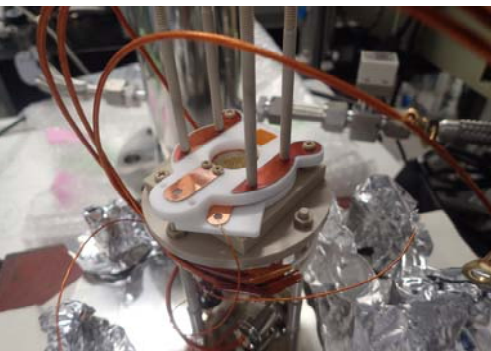


シンチレーション光を出した後、**Xe⁺イオン**を電場で引きつけて陰ワイヤから出てくる電子をEL光で確認したい

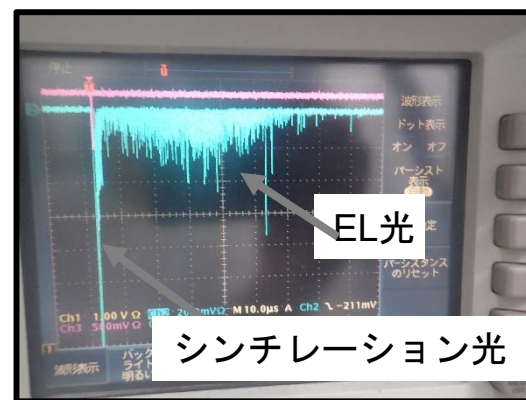
とりあえず
 $\phi 30\mu\text{m}$ のワイヤを張った



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・'))



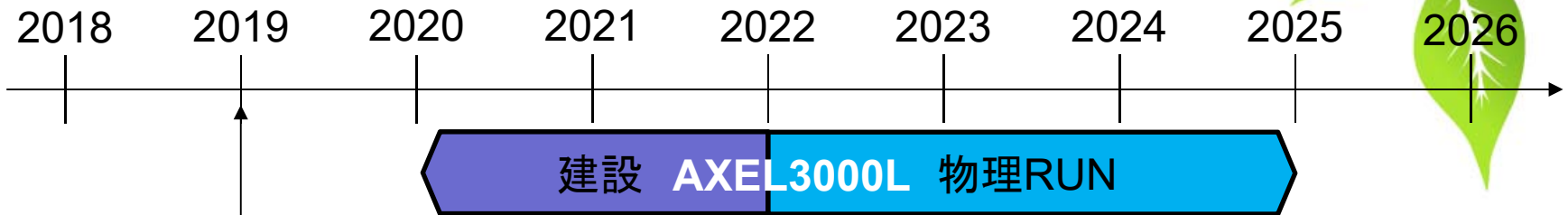
圧力容器でXeガス封入



※こんな感じの2信号が1msecくらいの時間差で出るはず!!!!

まだスタートしたばかり

AXEL 計画 物理探索に向けて



HP180Lの感触が
つかめている頃



- AXEL3000L (有効キセノン~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 (10~20meV)

comments



- 20 meV、そしてその先に行くには、もう一ひねり必要。
- いくつかアイデアはあり。ただし、もちろんstraight forwardではない。が、なんとか、もう一アイデアものにしたい。
 - イオン検出
 - Time-of-flight
 - アクティブ容器
 - 極薄容器
 - 回路チップ(ASIC)の開発
- 近々は、この辺りで遊びながら、180L検出器を成功させる。

学生さんの取り組み方



- 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、ハードを続けるなり、T2KやATLAS等の解析をするなり、選択肢あり。
- 0ν二重ベータ崩壊は、ノーベル賞を狙える物理です！（暗黒物質直接検出も）