

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

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



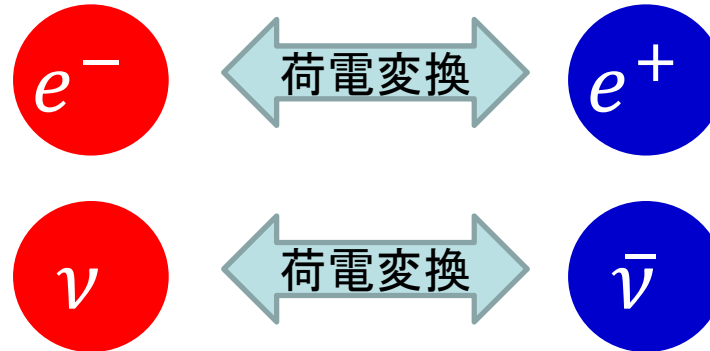
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ



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



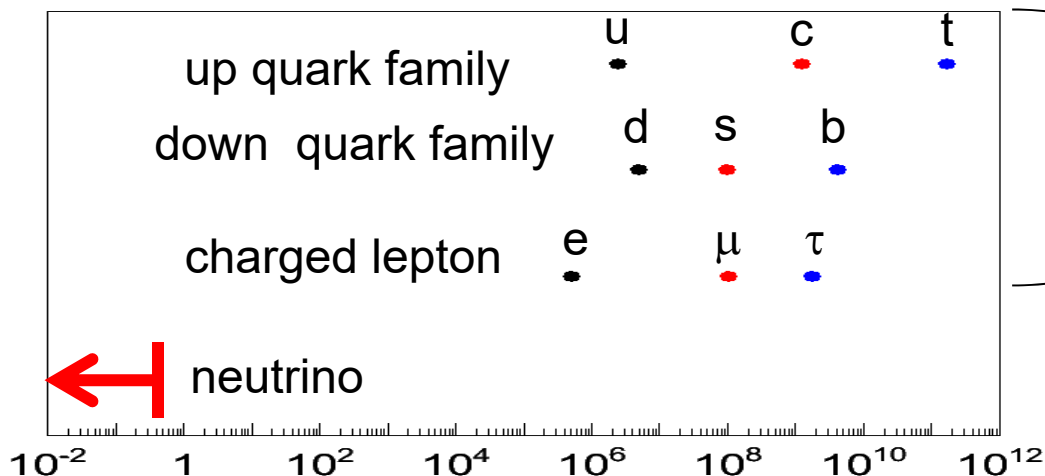
マヨラナ・フェルミオン



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

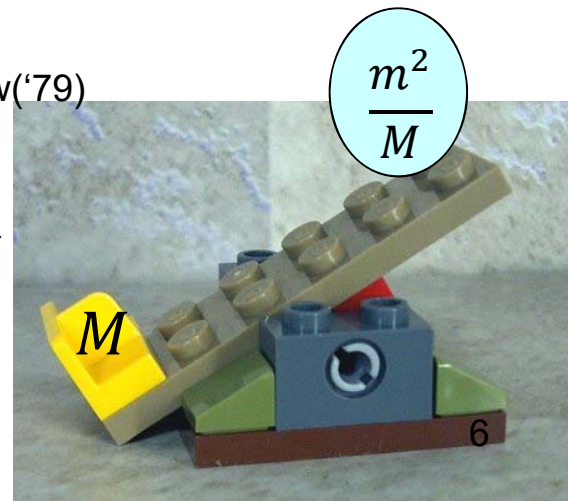
Minkowski('77), Yanagita('79), GellMann, Ramondo, Slansky('79),Glashow('79)

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

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

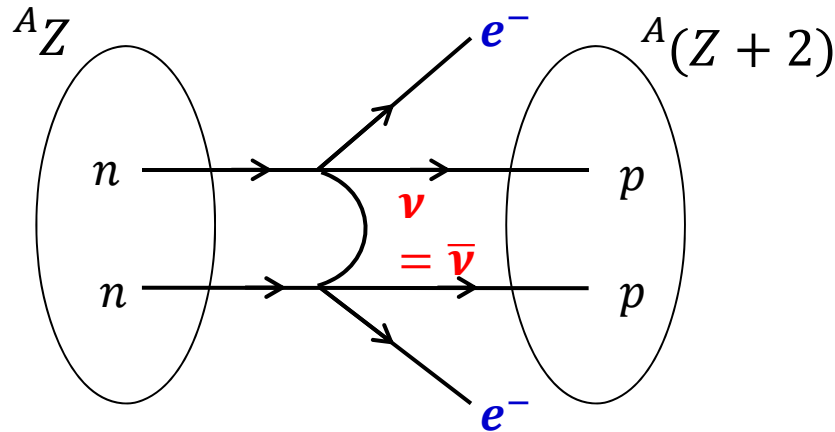


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

ニュートリノ
振動

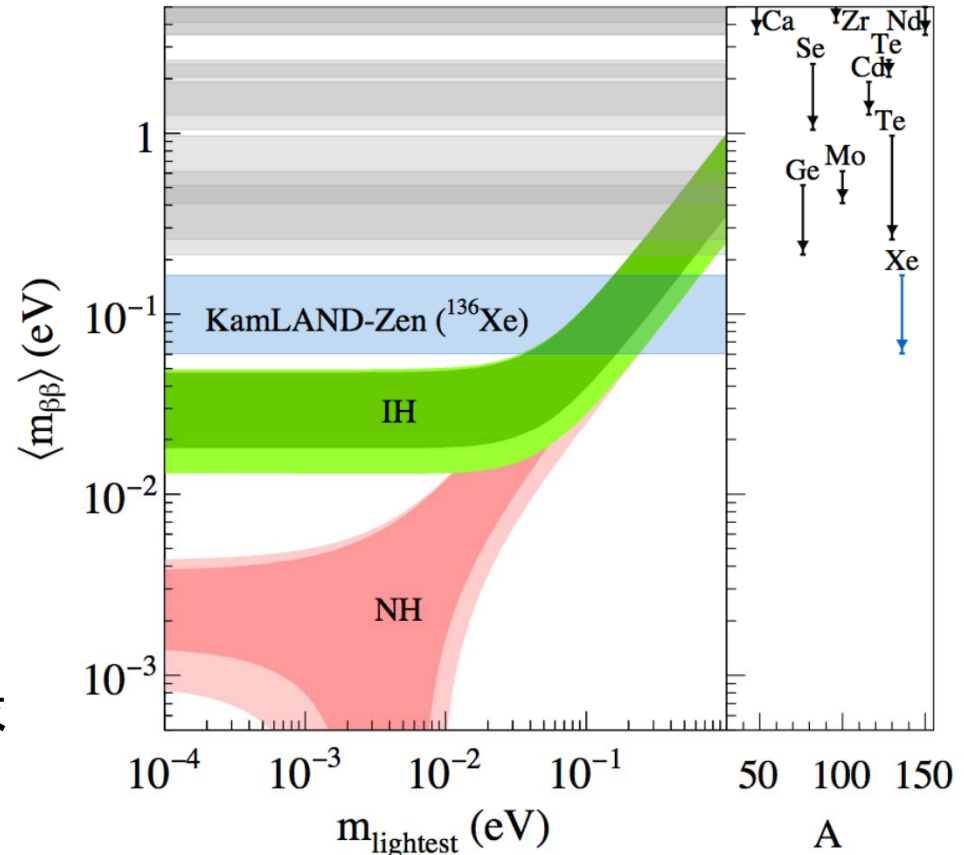
ダブルベータ
崩壊

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



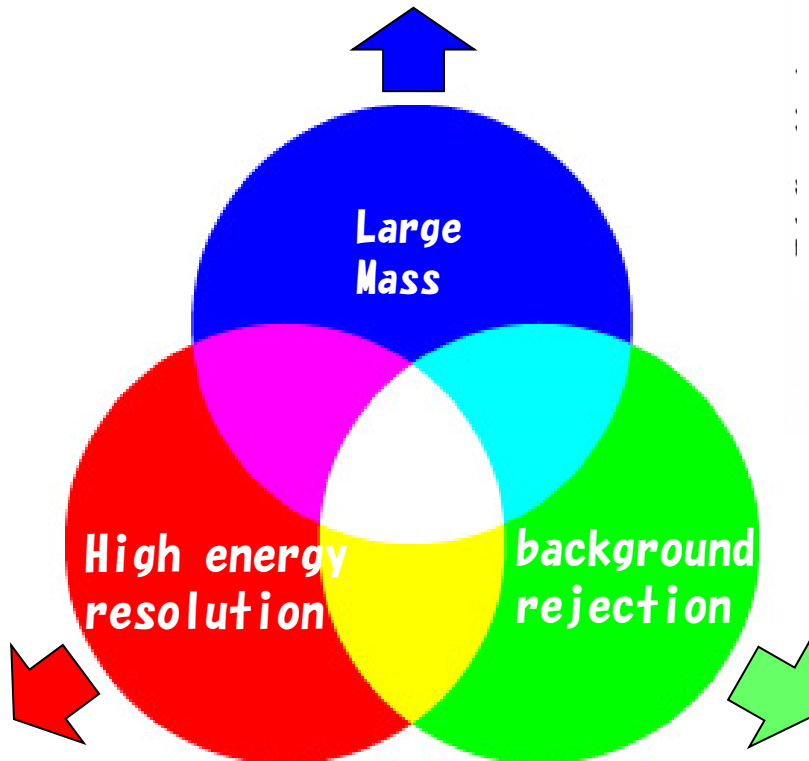
J. Shirai, Neutrino2016

- 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!

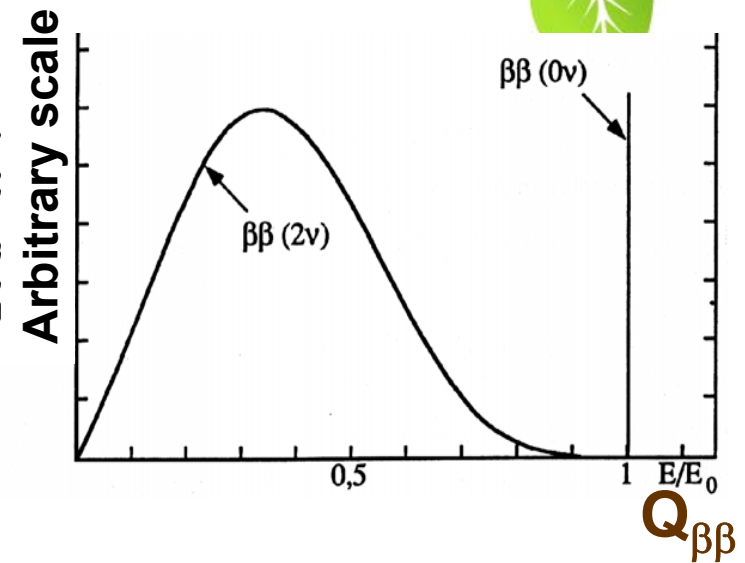


Keys for $0\nu\beta\beta$ decay search and our approach

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

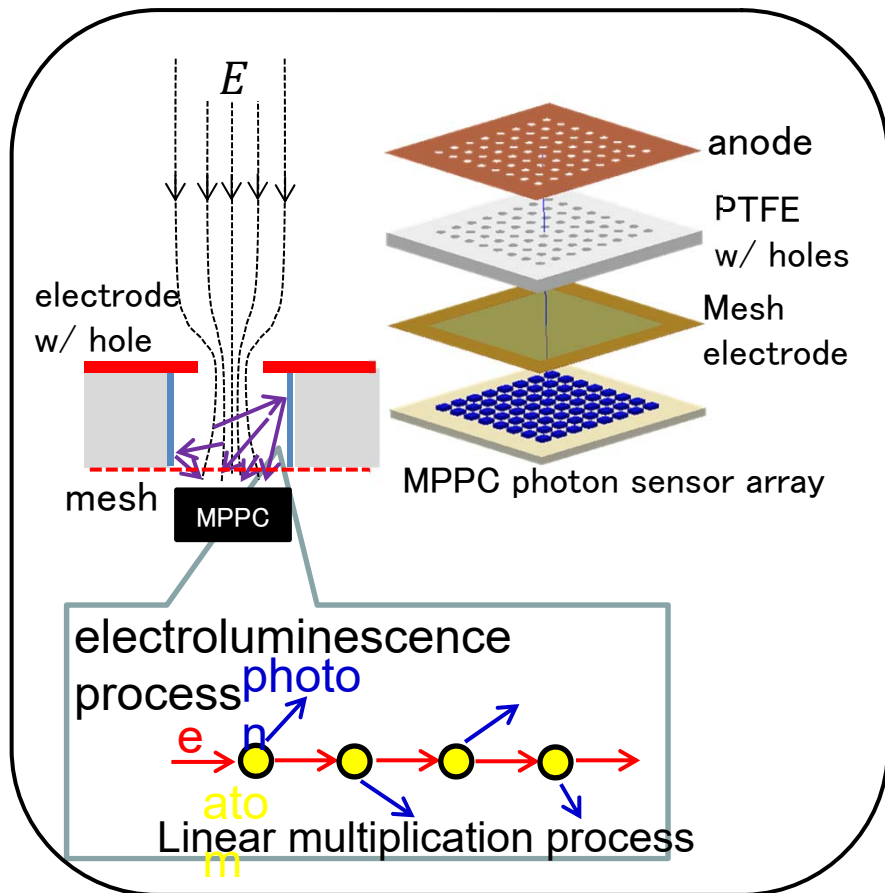


Semiconductors, bolometers
and
Ionization of noble gas!

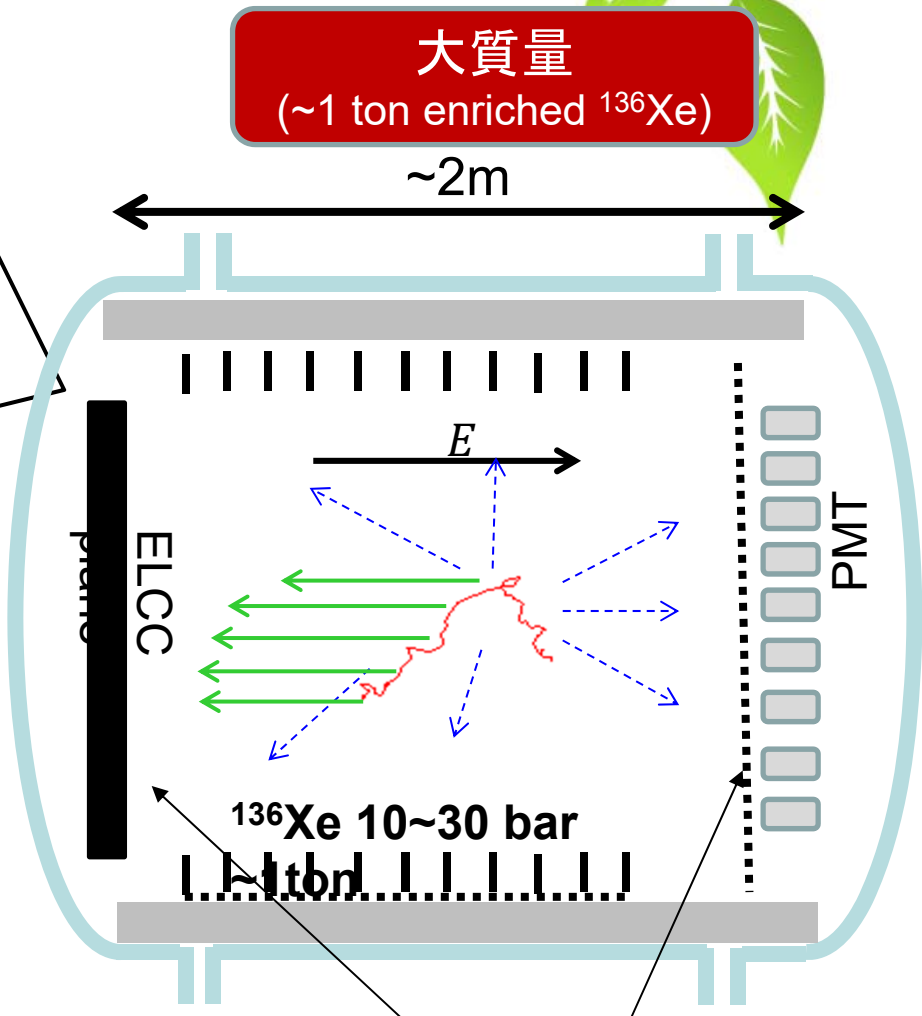


tracking detectors
(電子が2本走っているのを捉える)

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

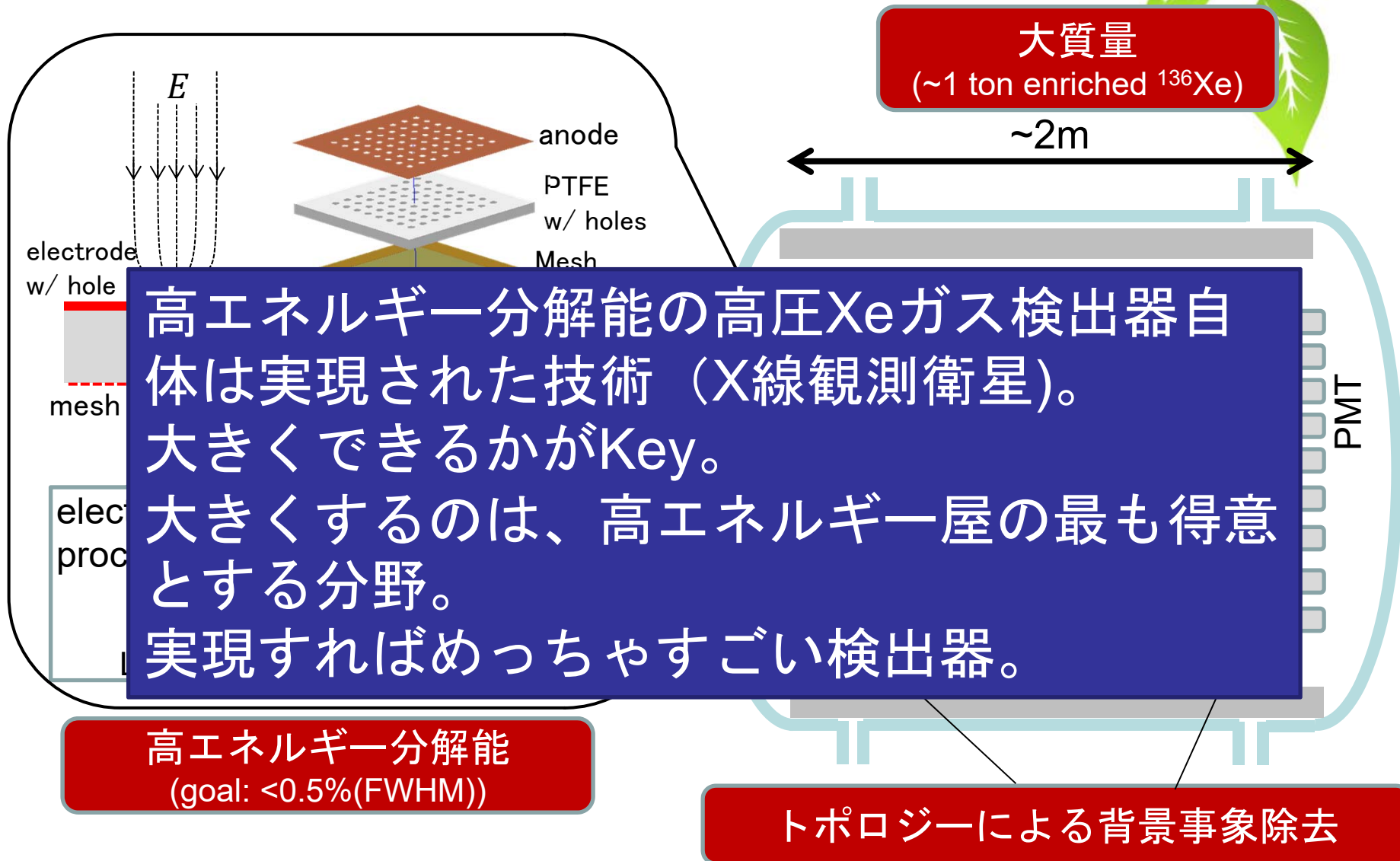


高エネルギー分解能
(goal: <math><0.5\%</math>(FWHM))



トポロジーによる背景事象除去

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



高エネルギー分解能の高圧Xeガス検出器自体は実現された技術（X線観測衛星）。大きくできるかがKey。大きくするのは、高エネルギー屋の最も得意とする分野。実現すればめっちゃすごい検出器。

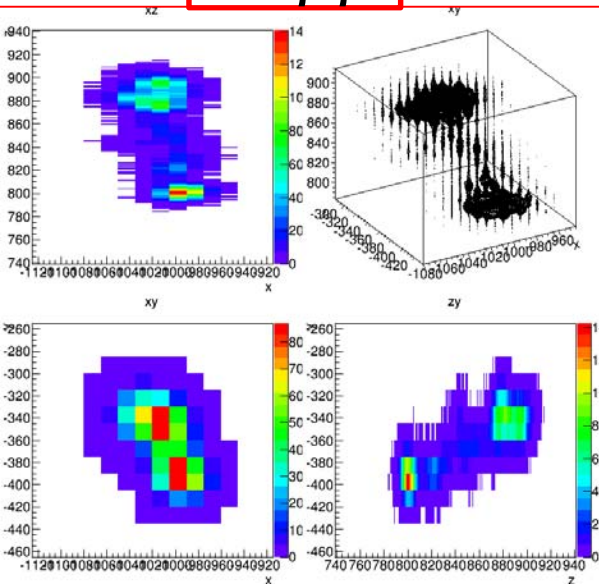
高エネルギー分解能
(goal: $<0.5\%$ (FWHM))

トポロジーによる背景事象除去

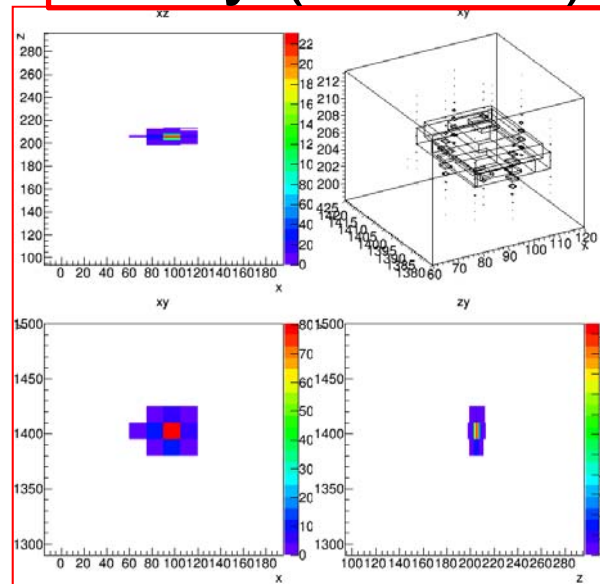
Simulation study for BG rejection

- Track topology (by Geant4)
 - 2-blobs : $0\nu\beta\beta$
 - small : α -ray BG
 - multi-site : γ -ray BG with Compton scattering ($\sim 98\%$)
- Basically, 2.5MeV γ -ray with photo absorption ($\sim 2\%$) is the serious background

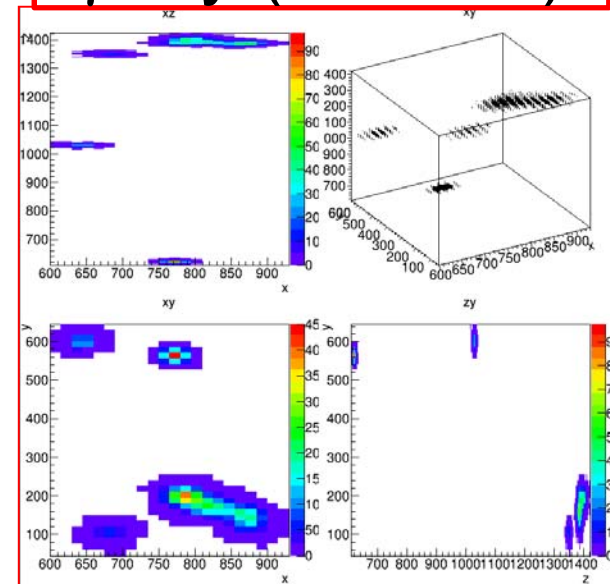
$0\nu\beta\beta$



α -ray (2.5MeV)



γ -ray (2.5MeV)



AXEL group



A. K. Ichikawa (Kyoto)



Ki. Nakamura (Kobe,PD)



S. Ban (Kyoto,D2)



S. Tanaka (Kyoto,D1)



Ka. Nakamura(Kyoto,M2)

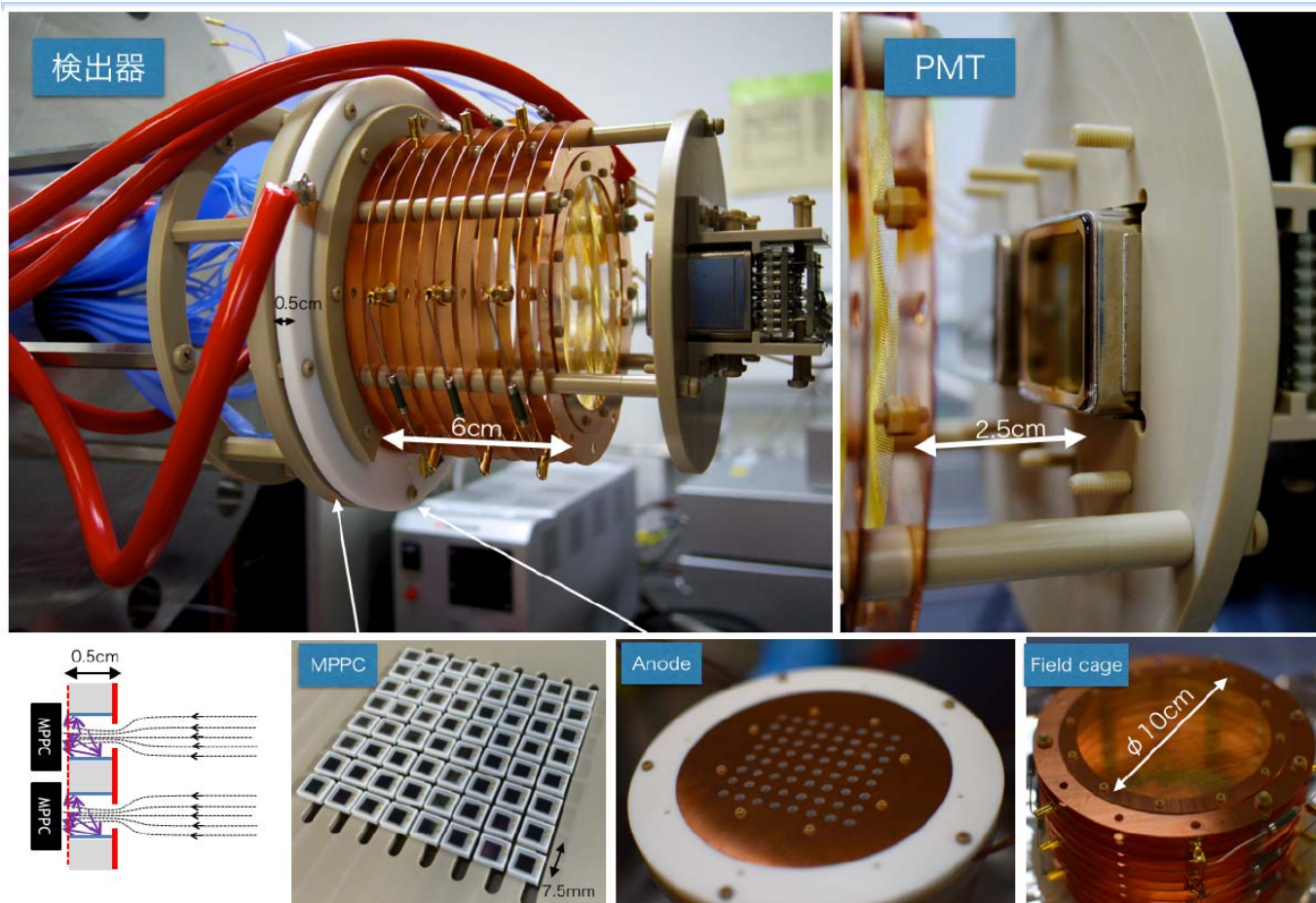


M. Yoshida (Kyoto, M2)

上島考太(東北大RCNS)、関谷洋之(東大宇宙線研)、中島康博(東大宇宙線研)、**中家剛**(京大)、廣瀬昌憲(京大)、身内賢太郎(神戸大)、南野彰宏氏(横国大)

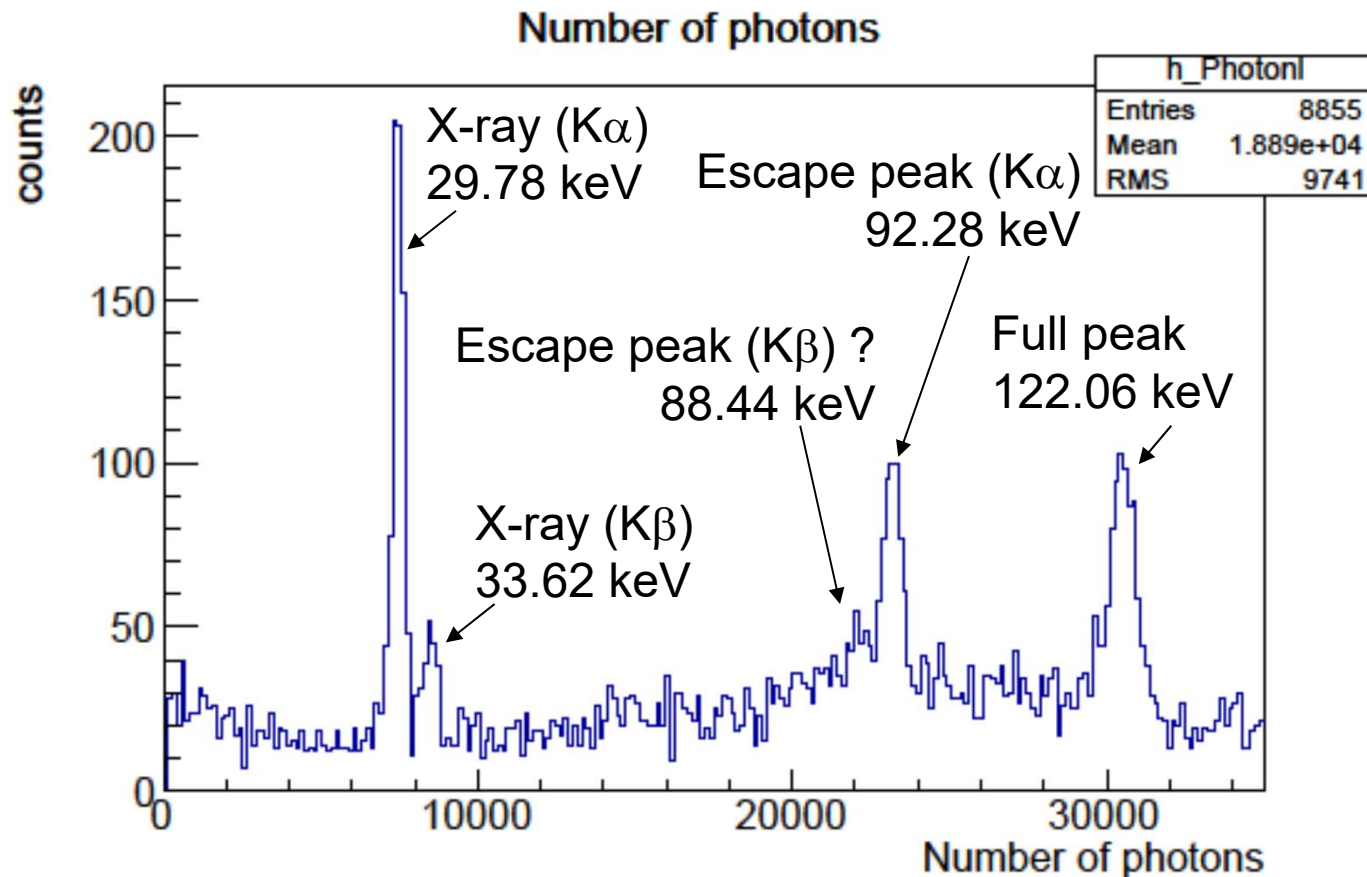
プロジェクト現状

- 10L検出器@309号室



Measured energy spectrum

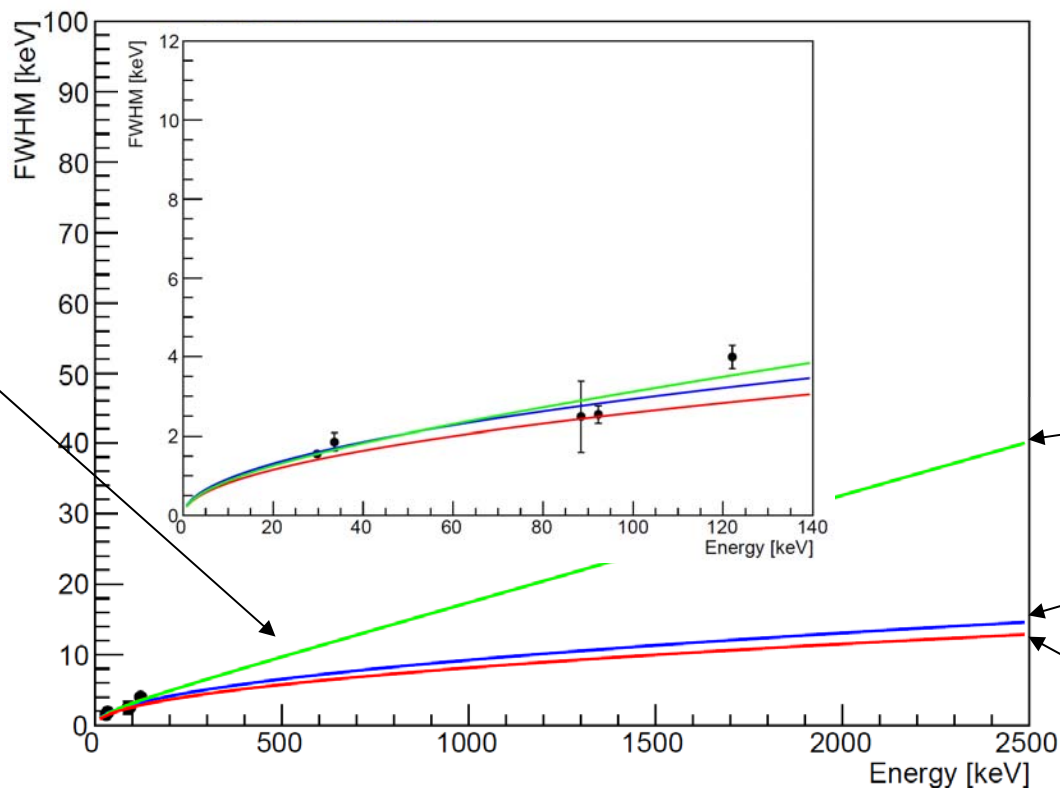
- Four (five?) peaks are observed using ^{57}Co source



Measured energy resolution



- Measured energy: 30,34,88,92,122 keV
- Extrapolating 2.5MeV by assuming
 - $A\sqrt{E + BE^2}$: 1.61%FWHM
 - $A\sqrt{E}$: 0.59%FWHM



何とか、この点を増やそうとして、潘君奮闘中。

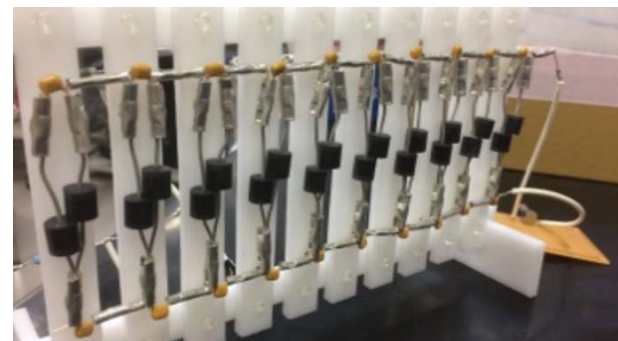
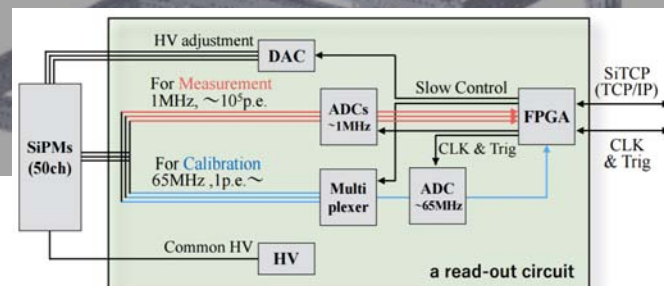
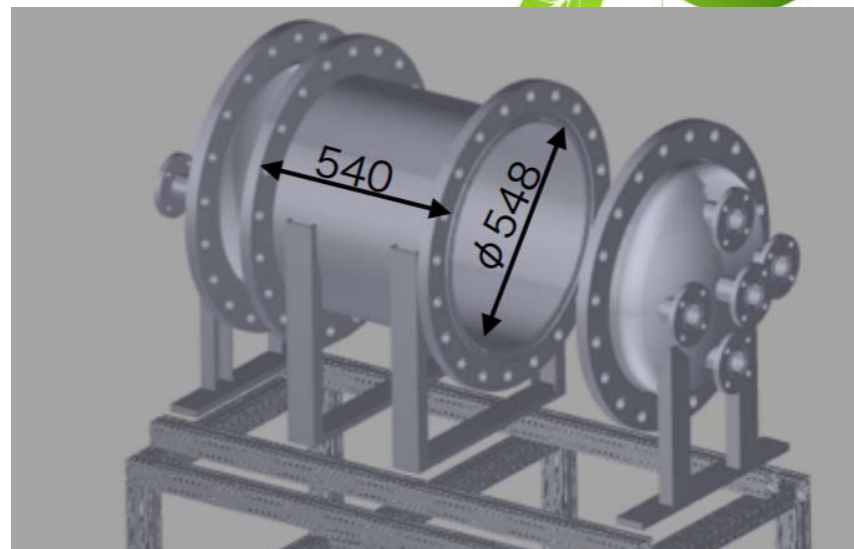
$$A\sqrt{E + BE^2}$$

$$A\sqrt{E}$$

0.5%FWHM@2.5MeV

次期試作機 180L, 8.6kg, 1,146チャンネル

- ~2MeVでのエネルギー分解能とトラッキング性能を実証
- 中村き:シミュレーション
- 潘:容器やELCCの設計
- 田中:読み出し回路
- 中村か:MPPC校正システム
- 吉田:コッククロフトウオルトン高圧電源、フィールドケージ



comments & timeline



- ELCCの原理検証は、かなりできた。
- 近々の課題
 - 高電圧をてなづける
 - コストダウン
 - 次の予算獲得
- スケジュールの目標
 - 2017-2017: 180L検出器 キセノン量 8.6kg @ 9気圧, 1146ch
1.8MeVで性能実証
 - 2017?~2020? : 2,000L検出器 phase 0, キセノン量 100kg@9気圧, 約6,000ch
 - 2020? - : 2,000L検出器に ^{136}Xe を入れて世界記録更新を目指す
 - 202? - 1トン検出器製作に着手。
- 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。

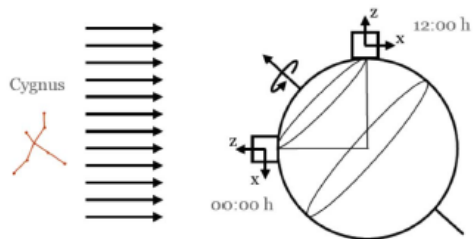
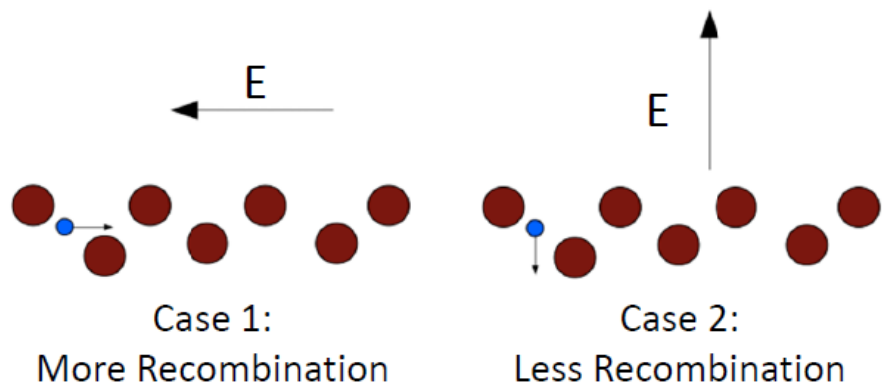
柱状再結合で暗黒物質探索をしよう!

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!?

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）