

# ニュートリノを巡る未解決の問題群



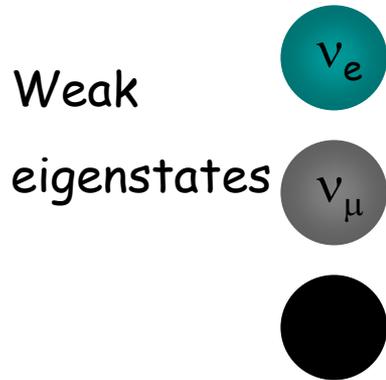
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

# ニュートリノを巡る未解決の問題群

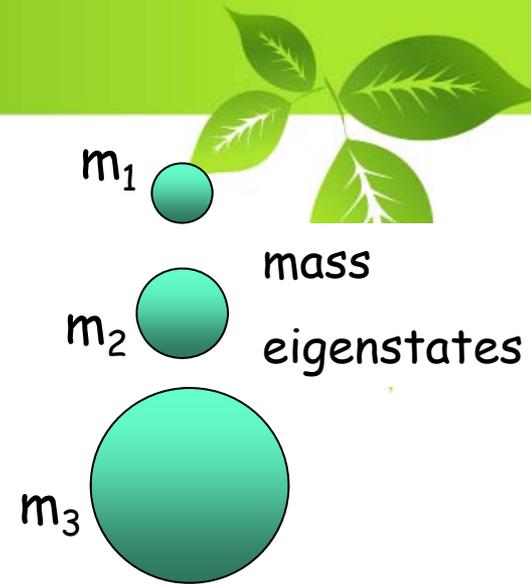


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

# 混合行列



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



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

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

$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$   
 +  $\delta$  (+2 Majorana phase)  
 $\Delta m_{12}, \Delta m_{23}, \Delta m_{13}$

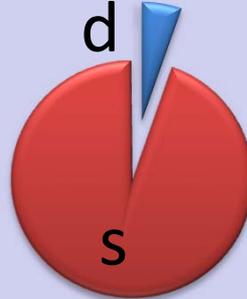
# 絵にしてみると



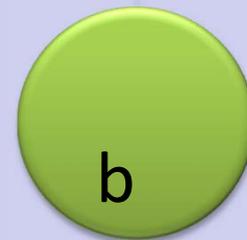
第1世代クオーク



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  $B$

# 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



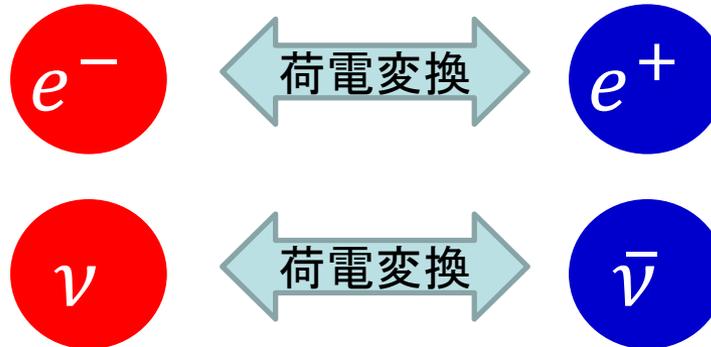
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ



# 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



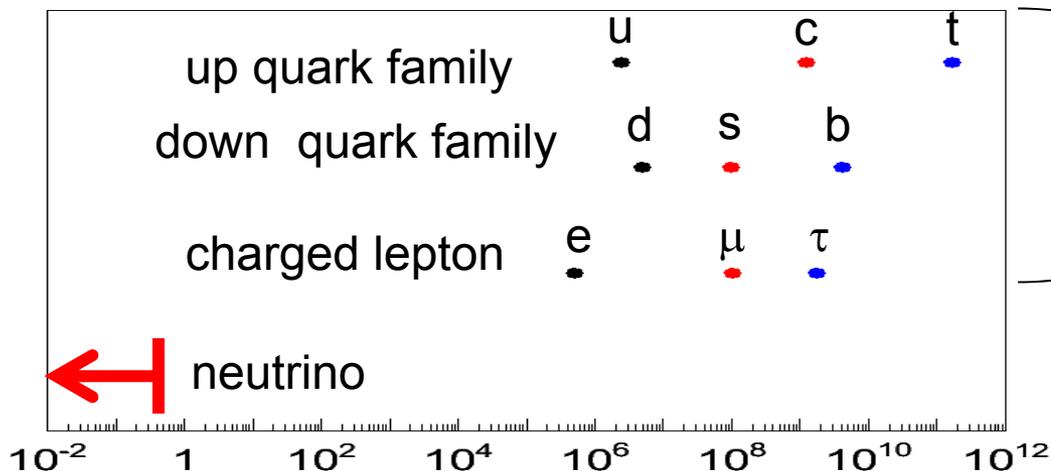
## マヨラナ・フェルミオン



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

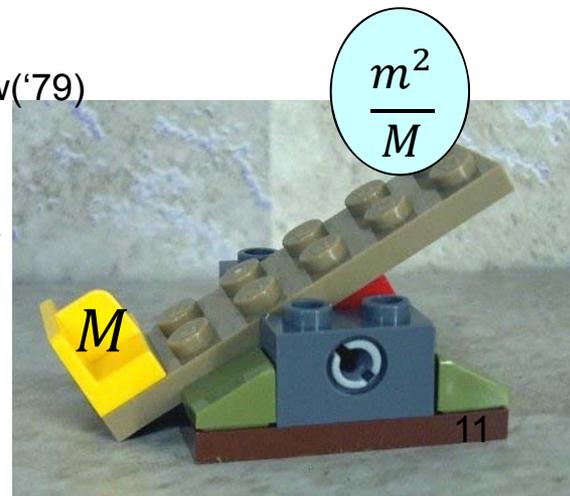
Minkowski('77), Yanagita('79), GellMann, Ramondo, Slansky('79), Glashow('79)

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

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 $\nu$ 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

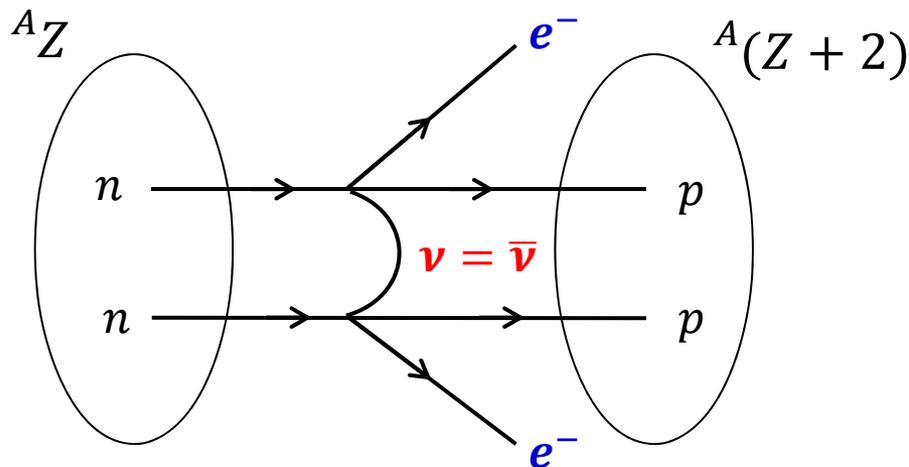


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

ニュートリノ  
振動

ダブルベータ  
崩壊

# 今、 $0\nu\beta\beta$ が来ている！ (もちろん“T2KでCPの破れ”も来ている)

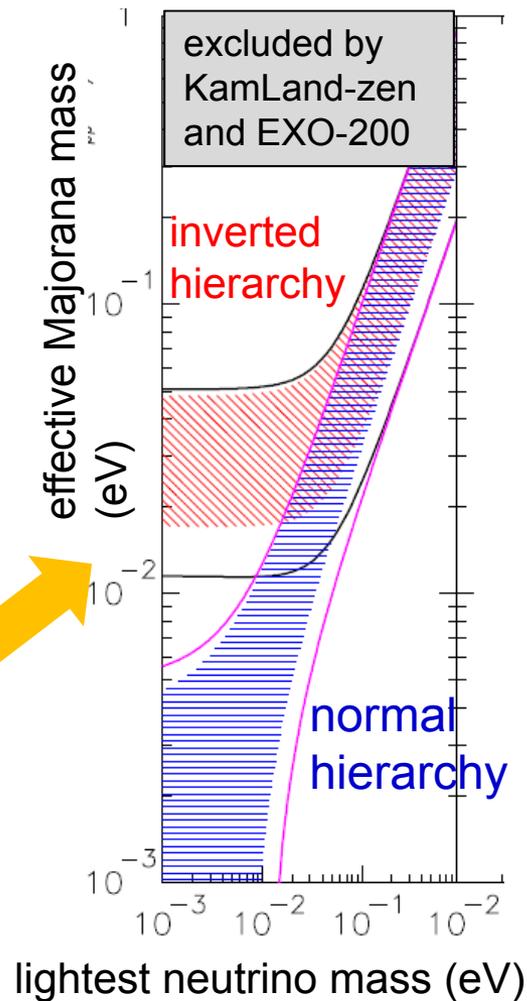


- ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる現象
- Next generation experiments are aiming to cover here, but...

$$\text{Life time} \propto m_{\beta\beta}^{-2}$$

- 質量の絶対値もわかる。
- Need > 1 ton double-beta nuclei

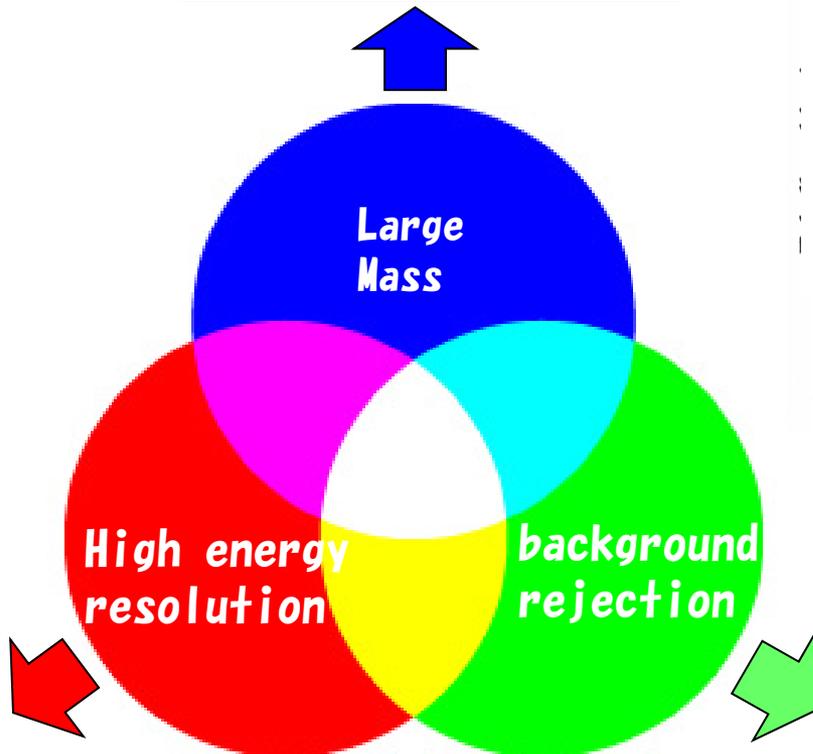
ニュートリノ振動と宇宙観測から予想される領域



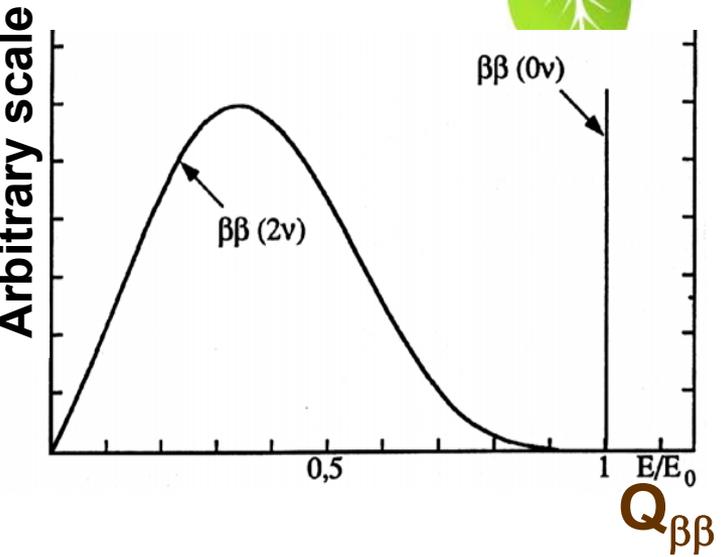
PDG2014

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

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

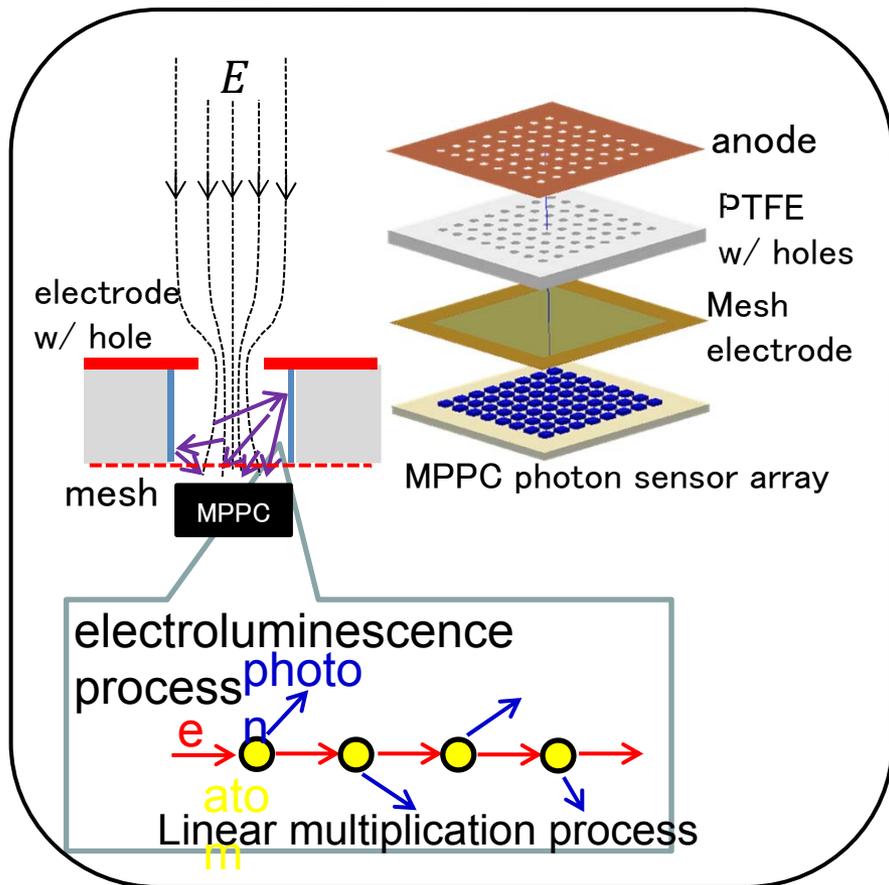


Semiconductors, bolometers  
and  
ionization of noble gas!

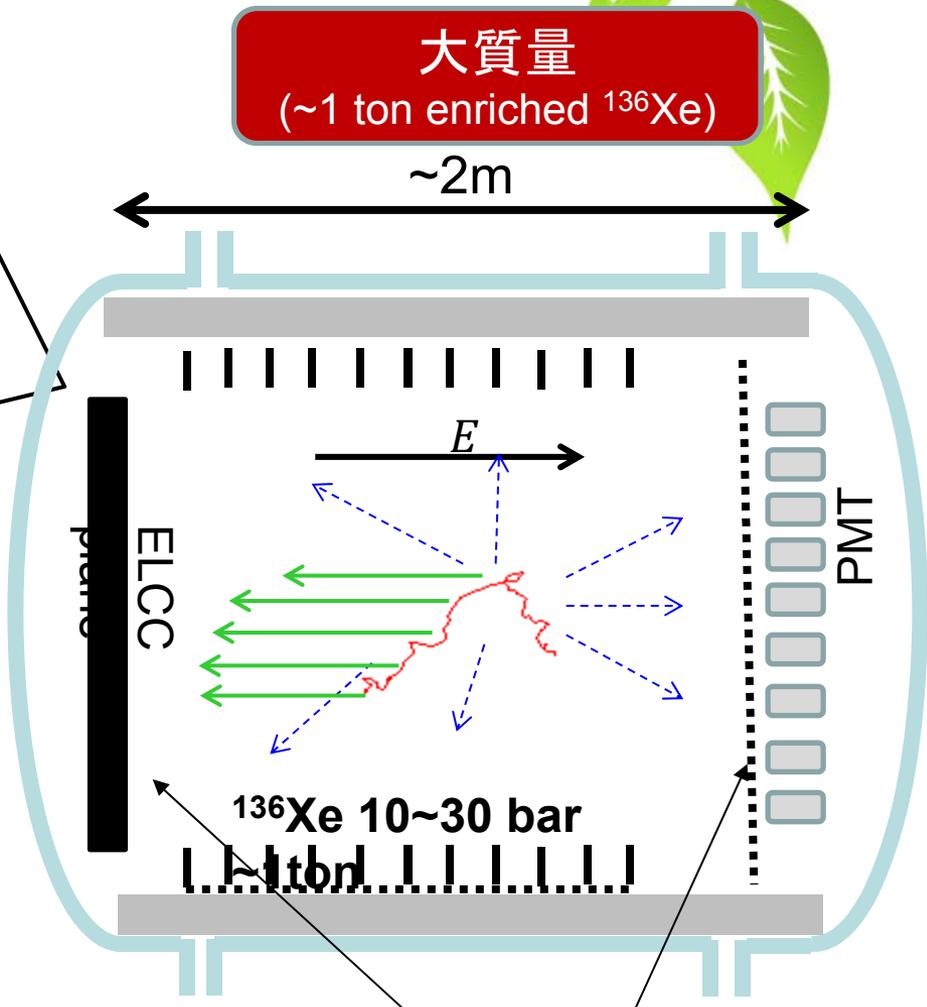


tracking  
detectors

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

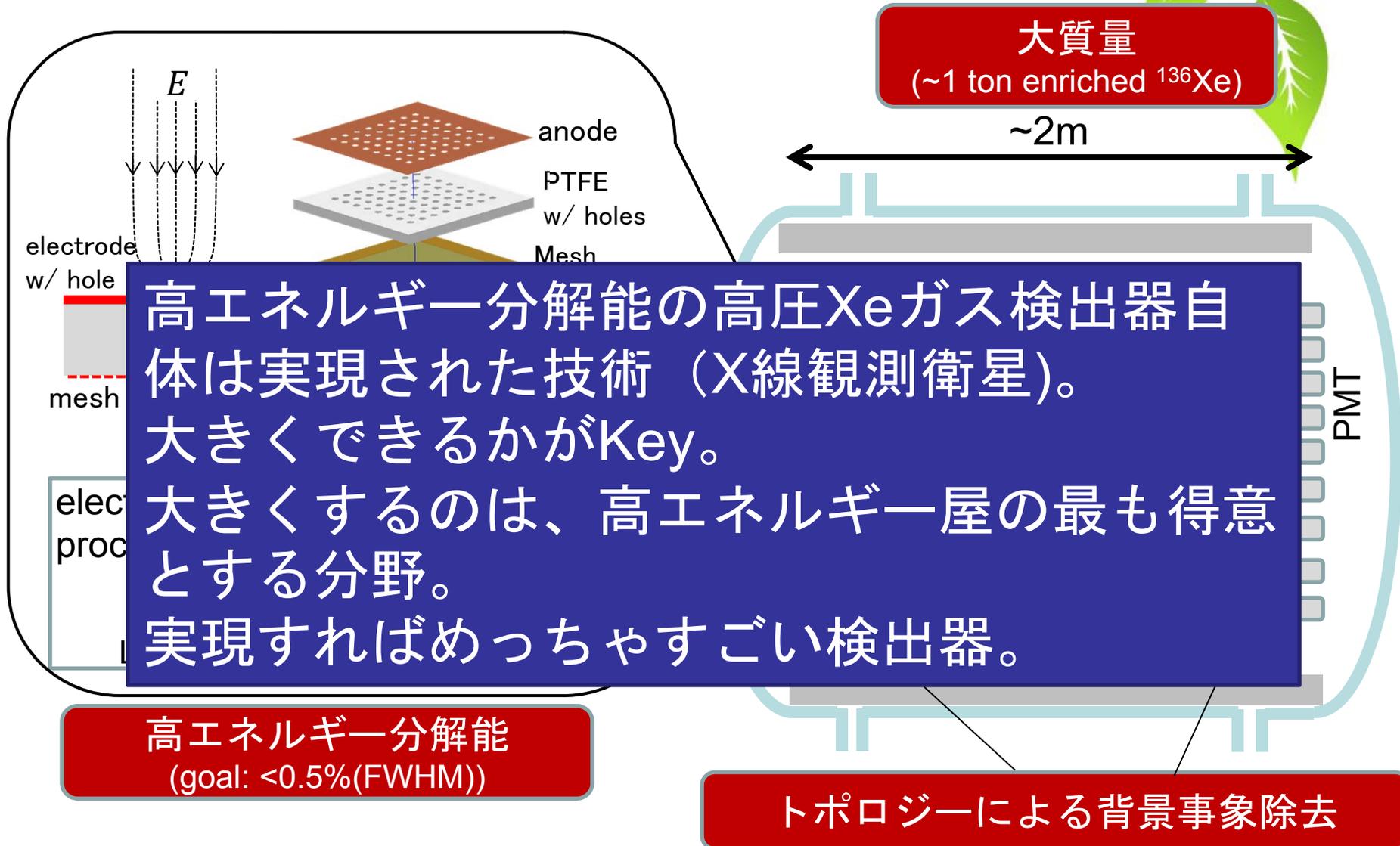


高エネルギー分解能  
(goal: <0.5%(FWHM))



トポロジーによる背景事象除去

# 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。

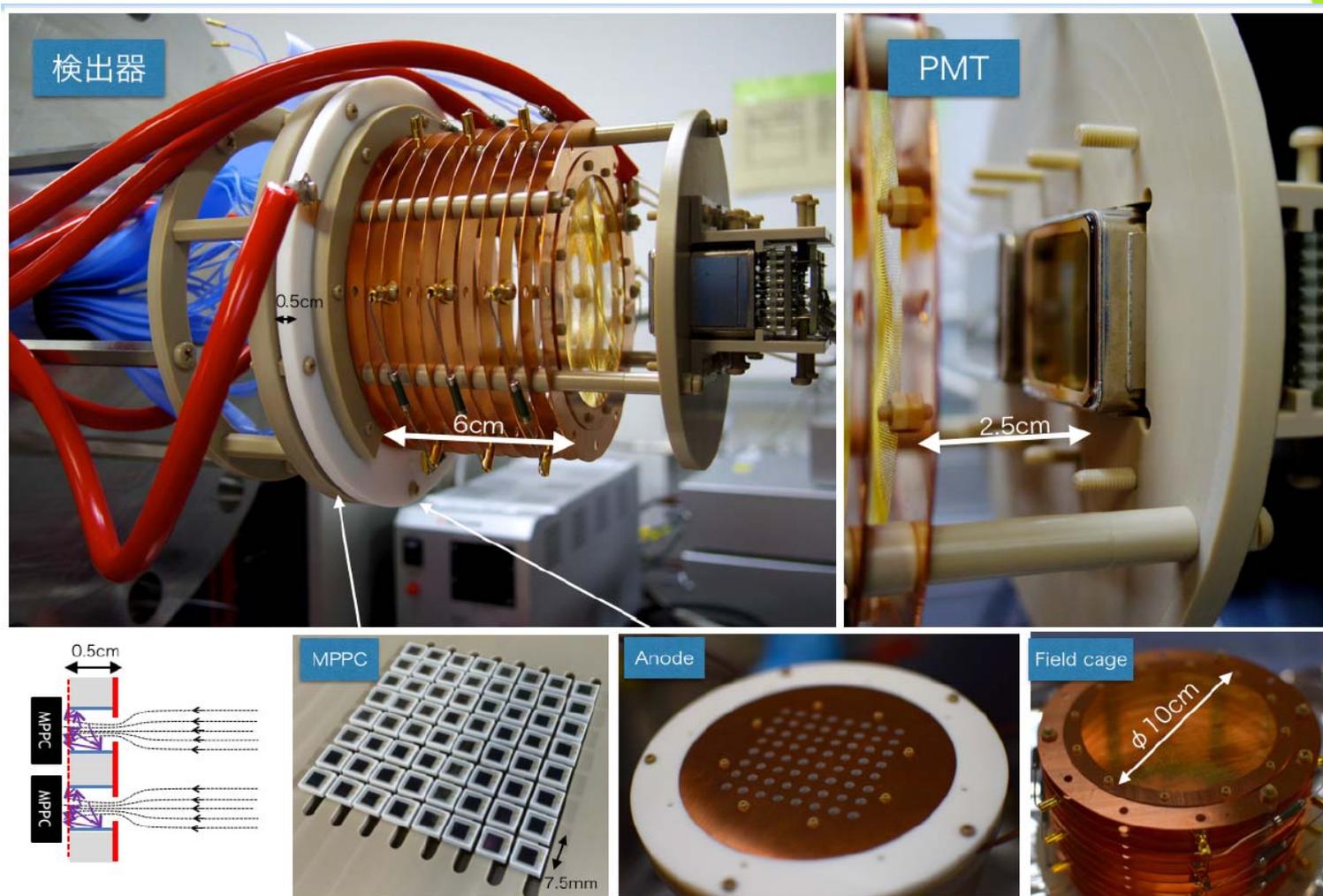
高エネルギー分解能  
(goal:  $<0.5\%$ (FWHM))

トポロジーによる背景事象除去

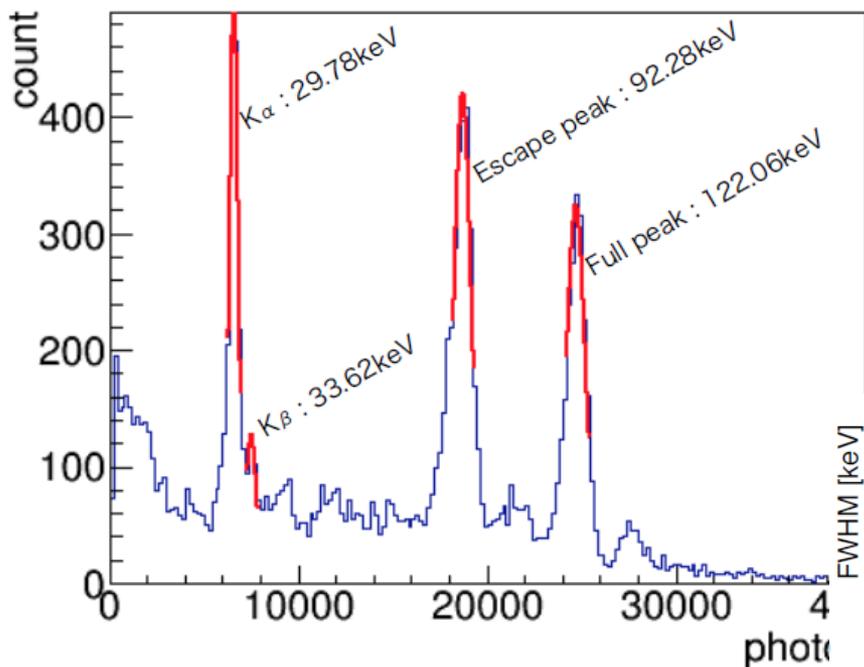
# プロジェクト現状



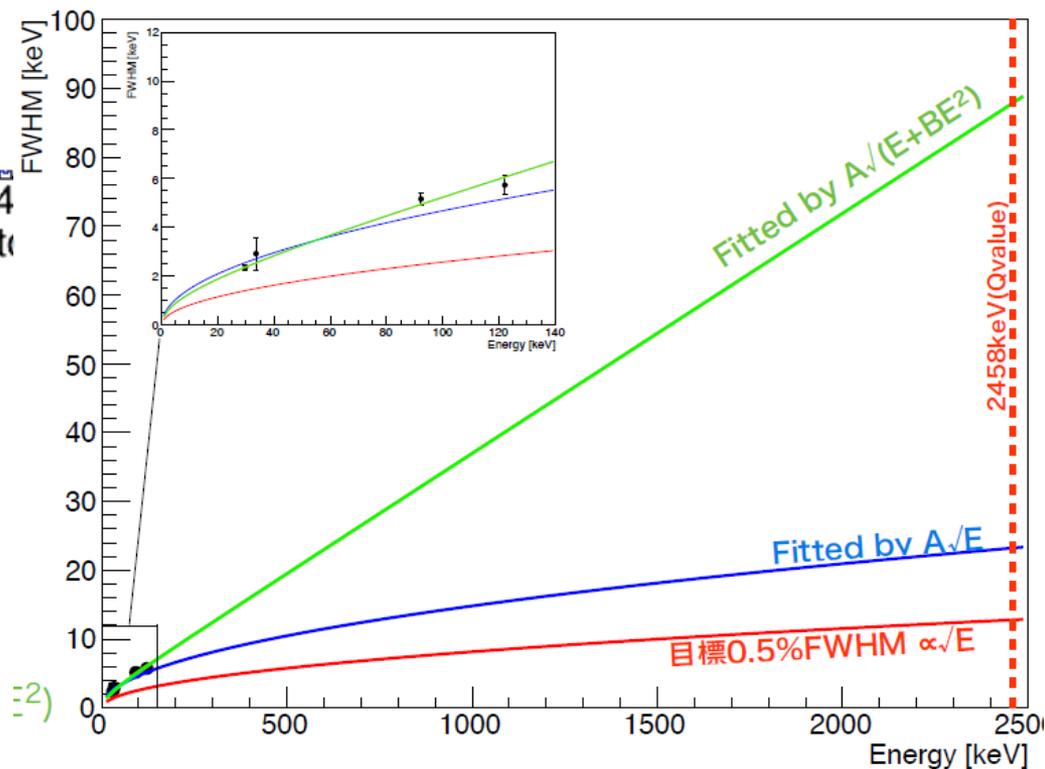
- 10L検出器@309号室



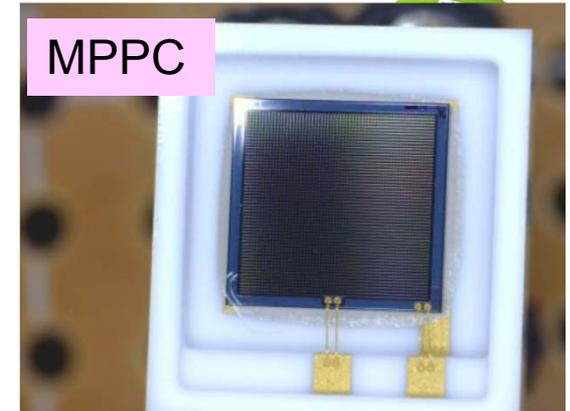
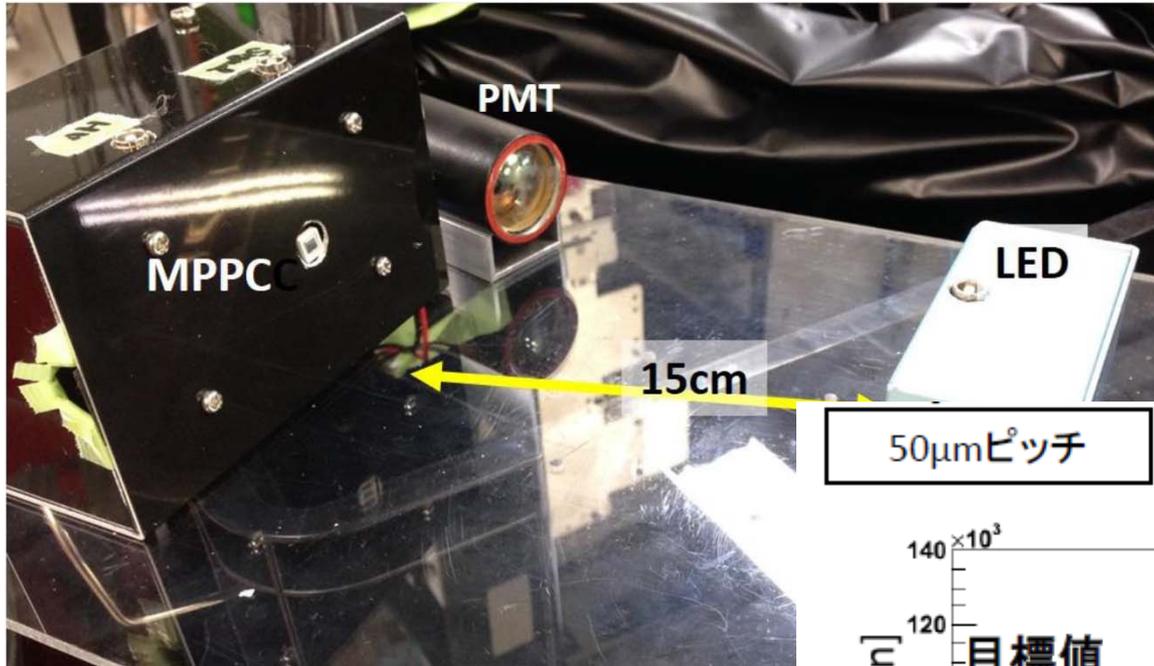
# メンバーと最近の進展 - 潘 -



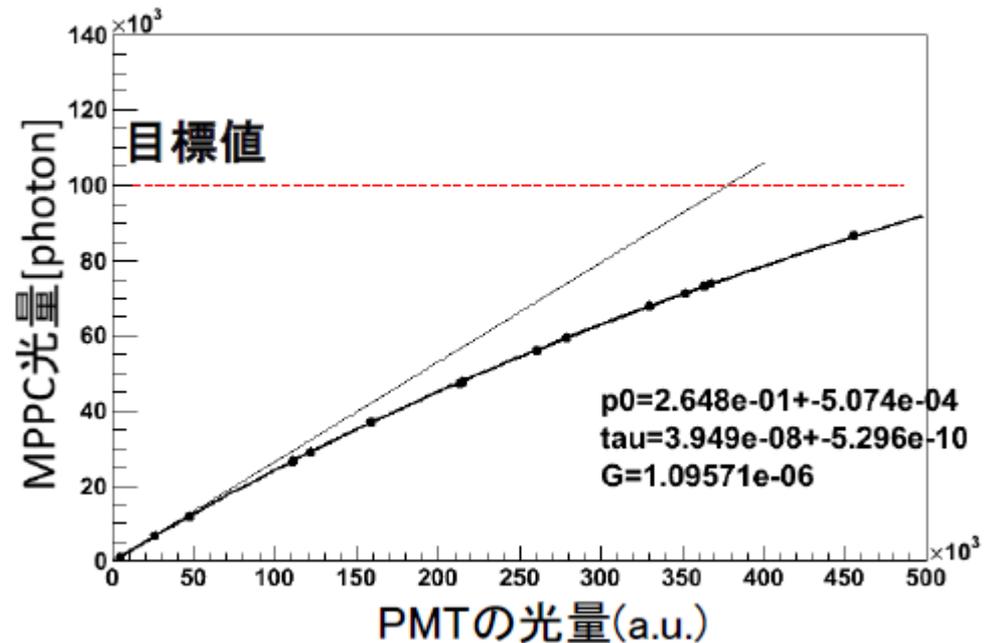
- 122keVでエネルギー分解能を測定
- 10L検出器で中村君の記録を更新。
- 今年度は（まずは）さらにエネルギー分解能の向上 +511keVでの評価



# メンバーと最近の進展 - 柳田 -



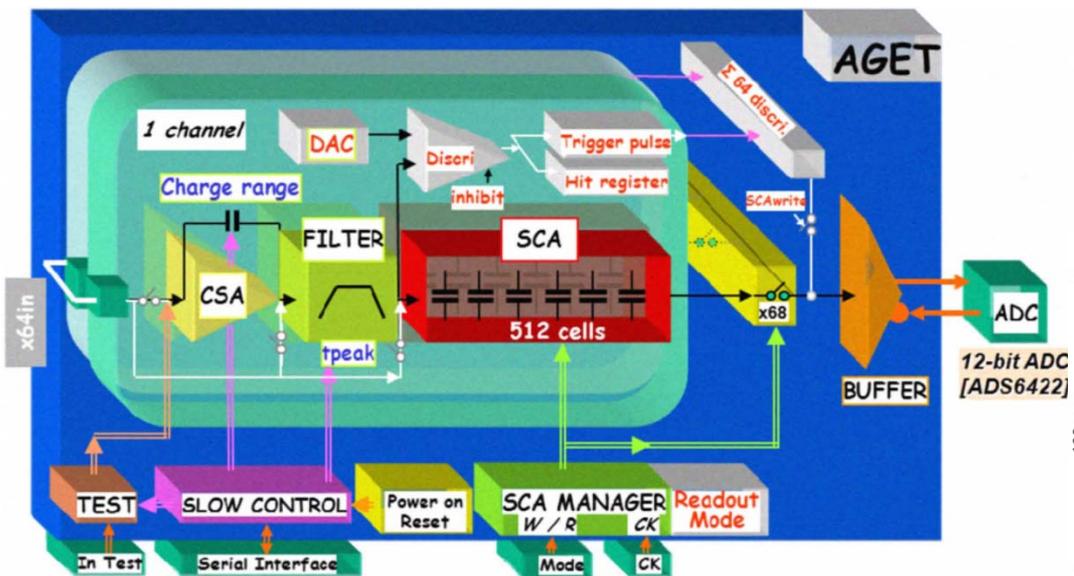
- MPPCC(光検出器)の長いパルスに対する線形性を測定。
- 予想より早く非線形性が見えて、熱い議論を巻き起こした。



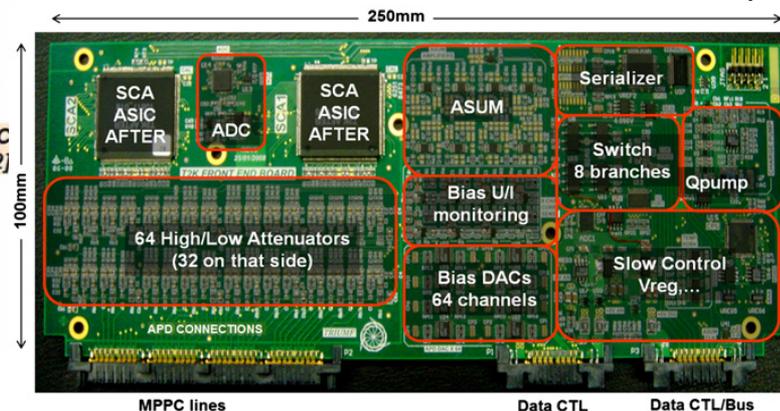
# メンバーと最近の進展 - 田中 -



- 次期試作機(1,000~2,000チャンネル)のデータ読み出しのために、AFTER/AGETチップを用いて波形情報を記録するためのボードを開発中。
- エネルギー分解能をキープするために、アナログ部の設計で四苦八苦中。そこができればKEKへ丁稚。
- 今年度中に試作ボードを作って評価。



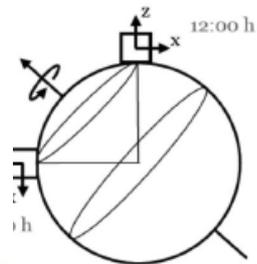
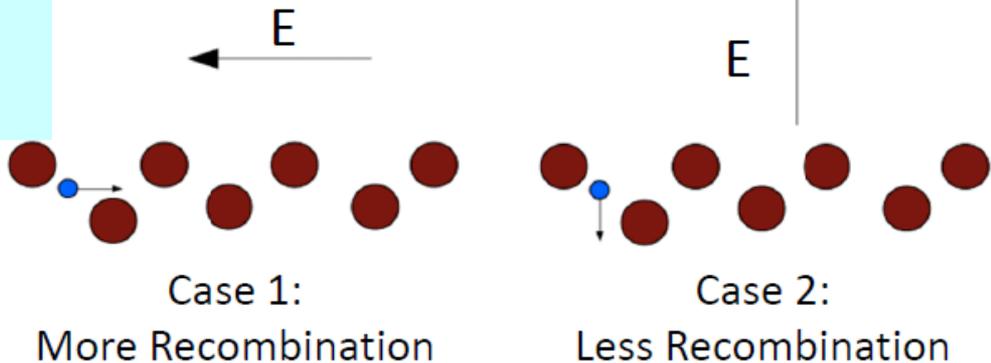
こんな感じのものができるはず。  
(これは、T2KのFGDのボード)



# メンバーと最近の進展 - 中村輝石 -

- 暗黒物質探索でグループを乗っ取ろうとしている。

電離電子の再結合の割合で、  
電場に対する角度を測る。



Concept by [Dave Nygren, LBNL](#)

磁石

ドリフト  
トップ

フィールドケージ+  
ドリフトボトム

誘導  
電荷

APDガード用  
GNDメッシュ

APD

暗黒物質は、(平均すると)  
はくちょう座の方から来て  
いる

# 2016年度~2017年度の目標



## 2016年度

- 10L検出器で511keVで目標エネルギー分解能達成
- 次期検出器(200L?)のチェンバー製作と構成要素の設計確立 (いっぱい開発要素あり)
- 背景除去について、引き続きアイデアを絞り出す。
- アルファ線で方向感度の測定 (磁場で向上?)

## 2017年度

- 次期検出器の製作！
- 方向感度ありそうだったら、シンチレーション光と電離電子をどうやって読み出すのがいいのか、考える。

# 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。
- 0v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）

成功すれば