

# 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

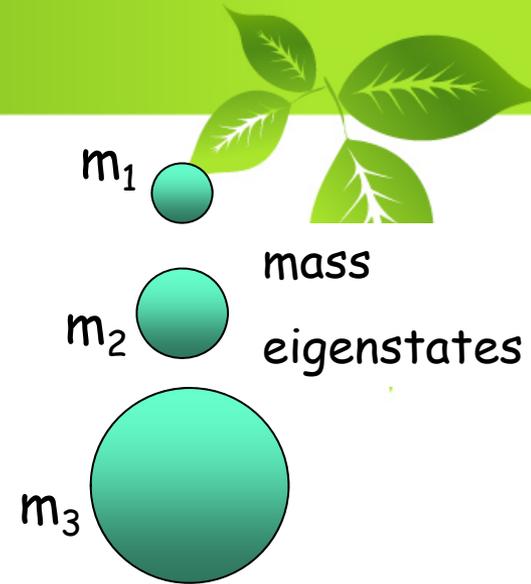
Weak  
eigenstates

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

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



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

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

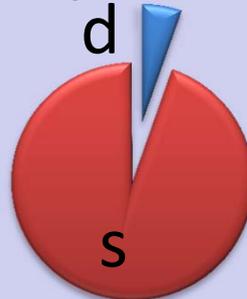
$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$   
 +  $\delta$  (+2 Majorana phase)  
 $\Delta m_{12}, \Delta m_{23}, \Delta m_{13}$

# 絵にしてみると

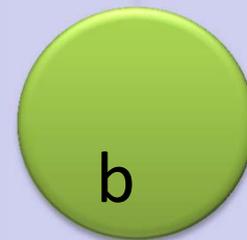
第1世代クオーク



第2世代クオーク



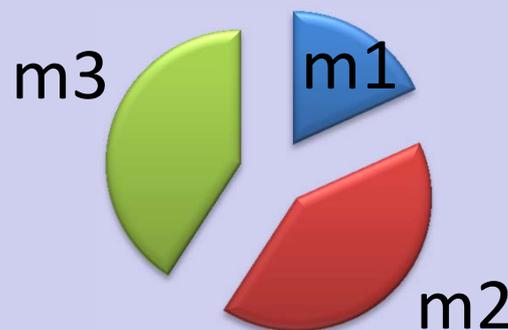
第3世代クオーク



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(クオークと比べて)変な特徴
- (クオークと同じように)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(クオークと同じか？)
- クオークや、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



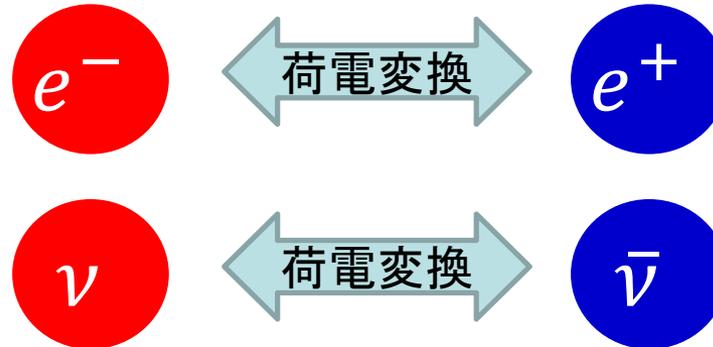
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ



# 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



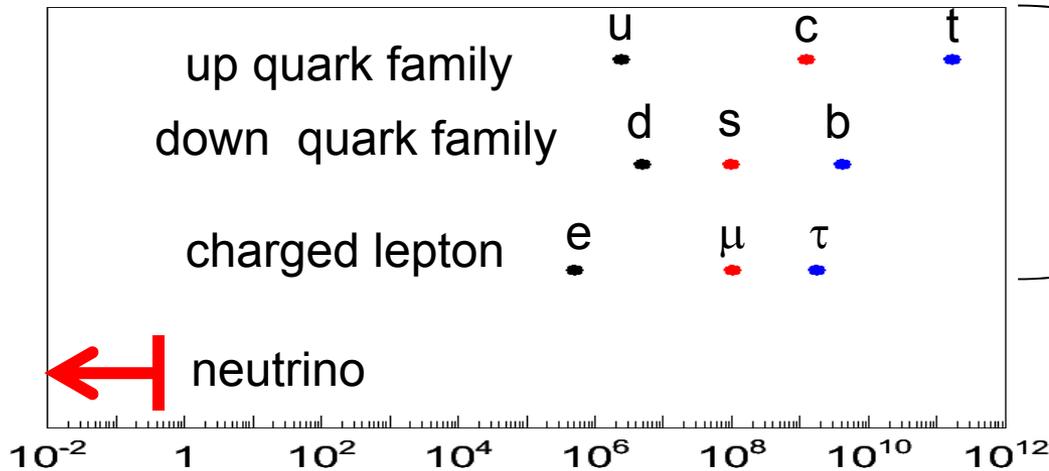
## マヨラナ・フェルミオン



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

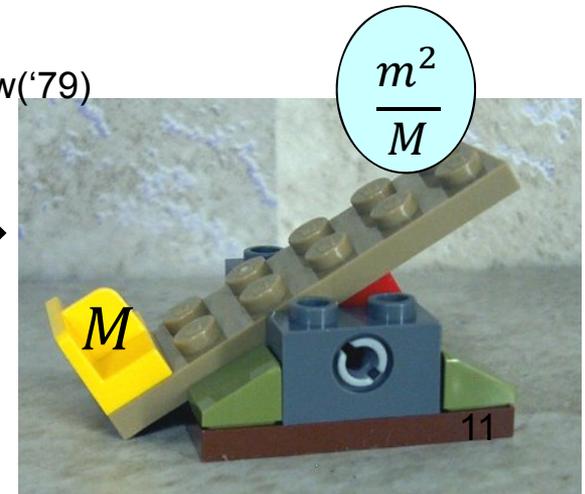
Minkowski('77), Yanagita('79), GellMann, Ramondo, Slansky('79),Glashow('79)

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

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

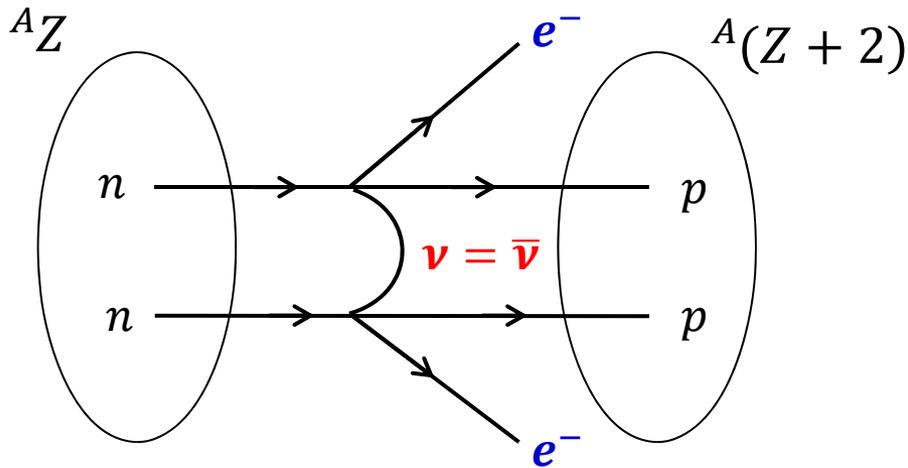


- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

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)

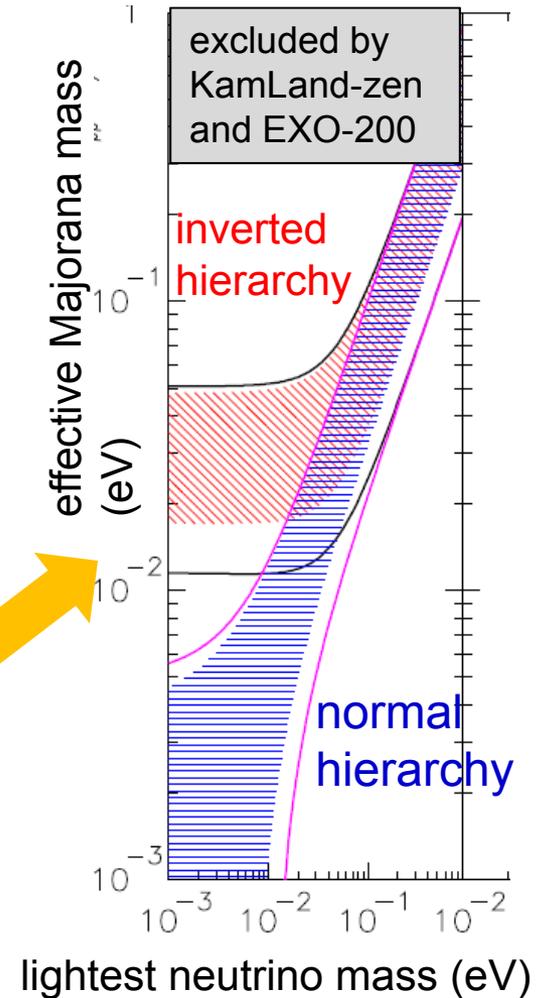


- ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる現象
- Next generation experiments are aiming to cover here, but...

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

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

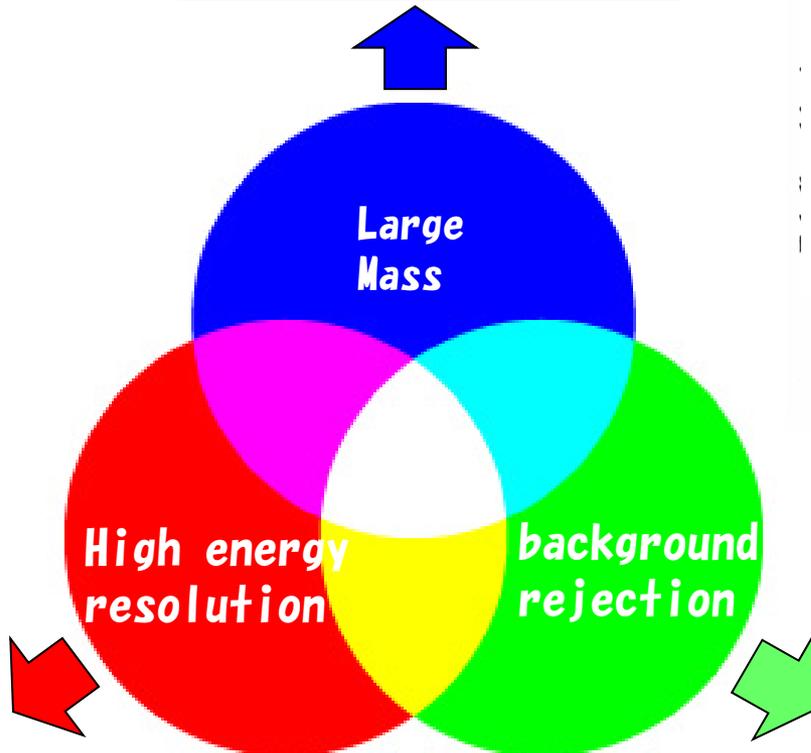
ニュートリノ振動と宇宙観測から予想される領域



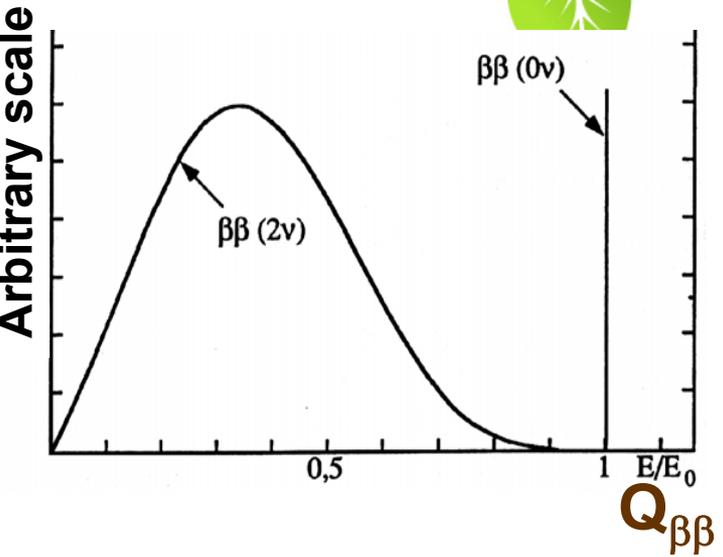
PDG2014

# 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 – for $0\nu\beta\beta$ decay search

High Pressure Xe gas TPC  
w/ proportional scintillation

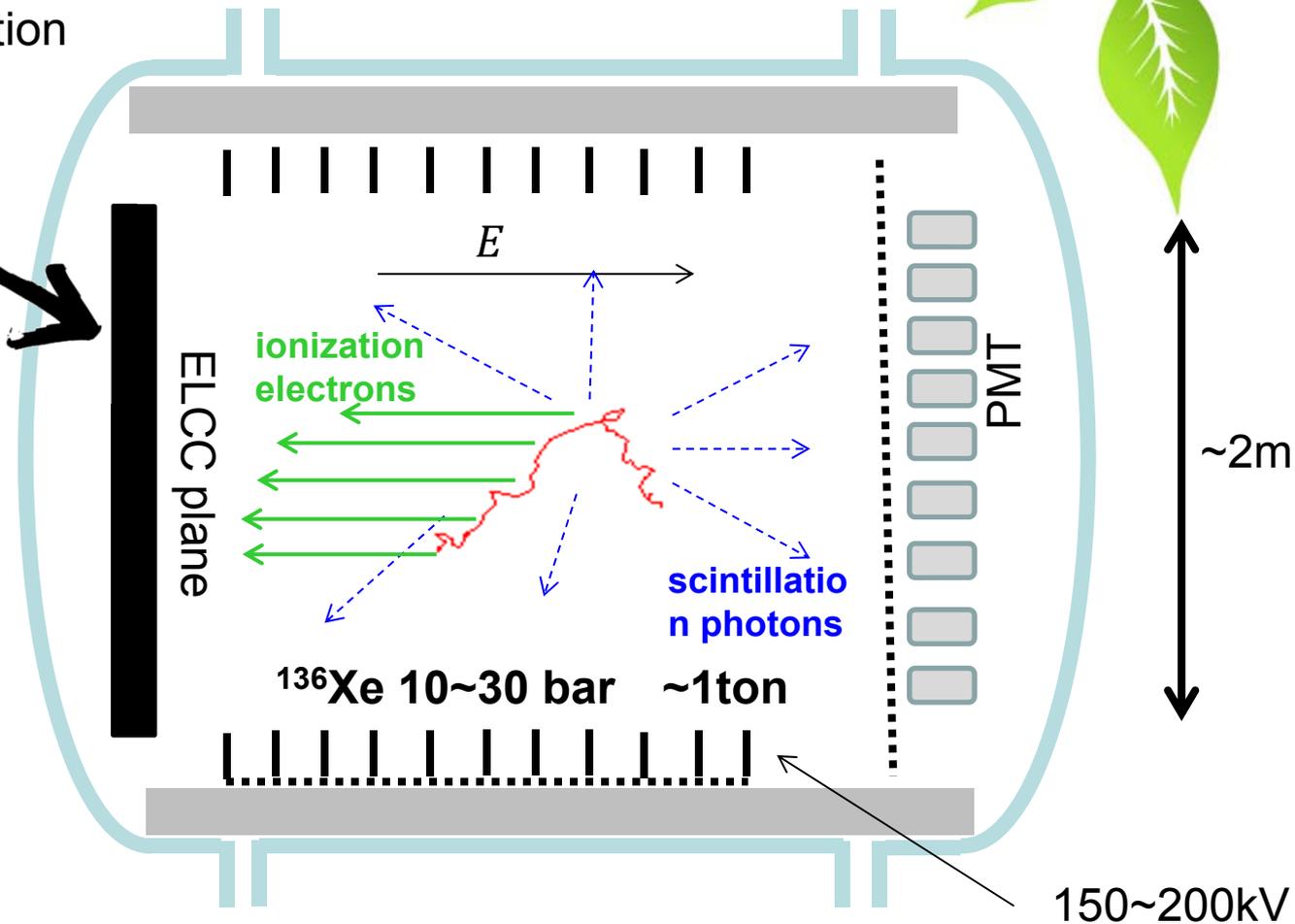
Segmented readout of  
Electroluminescence  
photons “ELCC”

Line of  
electric force

electrode  
w/ hole

mesh

MPP  
C



aim for 0.5%(FWHM) energy resolution (できたらめっちゃすごい)  
background rejection by topology

# AXEL – A Xenon ElectroLuminescence detector – for $0\nu\beta\beta$ decay search

High Pressure Xe gas TPC  
w/ proportional scintillation

Segmented readout of  
Electroluminescence  
photons “ELCC”

Line of

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。1トンなんて、指一本で持ち上  
がる。

electro  
w/ hol

mes

~2m

150~200kV

aim for 0.5%(FWHM) energy resolution (できたらめっちゃすごい)  
background rejection by topology

# メンバーと経緯



石山優貴、市川温子、中家剛、中村輝石、羽田健人、潘晟、廣瀬昌憲、南野彰宏、柳田沙緒里、関谷洋之（東大）

2005年以来、T2Kで科研費を申請していない！（もったいない？）

## 市川の経緯

- 2000年から2006年ころまで加速器ニュートリノ振動一筋
- 2007年頃から二重ベータ崩壊探索をしたくて模索
- いろいろ失敗(詳しくは例えば平木君に聞いてください)
- 2013年 いろいろ反省し考えた末、キセノン高圧ガス検出器が最強との思いに至る。
- 2014年 命名 AXEL。中村輝石をだます(=引き込む) ことに成功
- 2015年 科研費基盤 (A)採択！

市川温子

シリコン検出器によるMeV電子の3次元飛跡構成—高感度ガンマ線カメラへ向けて—  
市川温子  
研究期間：2012年4月1日～2014年3月31日(予定)  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：挑戦的萌芽研究 研究機関：京都大学

市川温子

二重ベータ崩壊探索に向けた大型で高エネルギー分解能CdTe検出器の開発  
市川温子  
研究期間：2011年4月1日～2015年3月31日(予定)  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~→~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~→~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~  
研究種目：基盤研究(B) 研究機関：京都大学

市川温子 ICHIKAWA, Atsuko

高エネルギー分解能CdTe検出器の開発—ダブルベータ崩壊探索に向けて—  
市川温子 ICHIKAWA, Atsuko  
研究期間：2009年度～2010年度  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：若手研究(B) 研究機関：京都大学

中家剛 NAKAYA, Tsuyoshi

加速器ニュートリノビームを用いたニュートリノ混合の究明  
中家剛 NAKAYA, Tsuyoshi  
研究期間：2008年度～2012年度  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：若手研究(S) 研究機関：京都大学

市川温子

ダブルベータ崩壊探索にむけた位置感知型ガタゲルマニウム検出器の開発研究  
市川温子  
研究期間：2007年度  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：特定領域研究 研究機関：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構→京都大学

中家剛 NAKAYA, Tsuyoshi

長基線ニュートリノ振動実験における非軸ニュートリノビーム生成・制御の研究  
中家剛 NAKAYA, Tsuyoshi  
研究期間：2005年度～2006年度  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：基盤研究(B) 研究機関：京都大学

市川温子

長基線ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームの研究  
市川温子  
研究期間：2005年度～2006年度  
研究分野：~~素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理~~ 研究種目：若手研究(B)  
研究機関：~~大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構~~

# 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！

成功すれば