

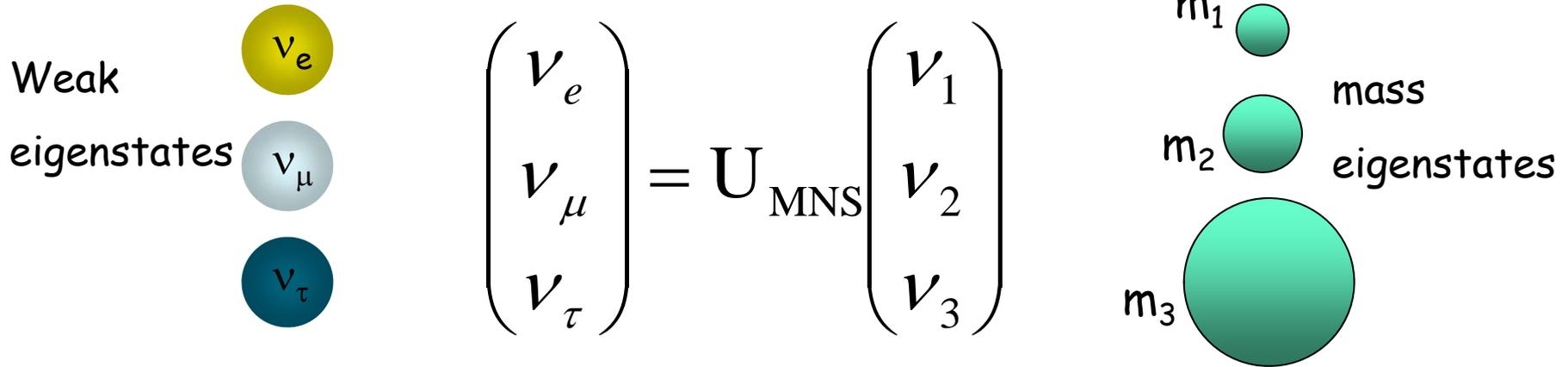
ニュートリノを巡る未解決の問題群

- 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



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

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

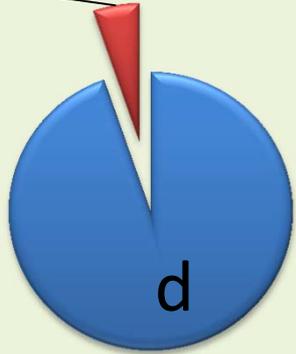
$$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$$

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

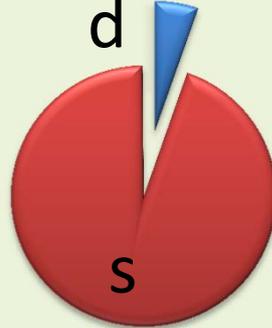
$$\Delta m_{12}, \Delta m_{23}, \Delta m_{13}$$

絵にしてみると

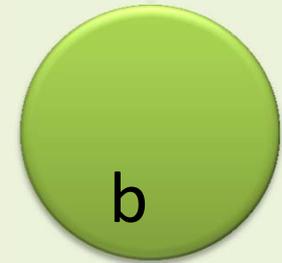
s 第1世代クォーク



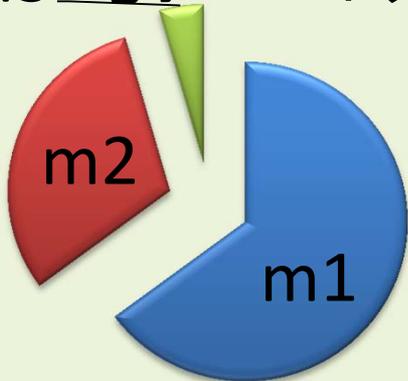
第2世代クォーク



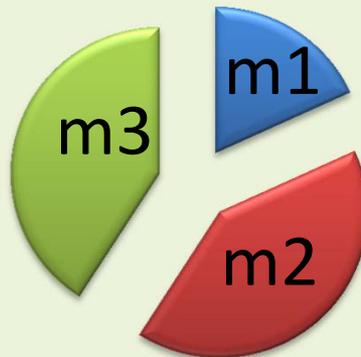
第3世代クォーク



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



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。

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

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

T2K??? Hyper-K???

CKM (quark sector) $\delta \sim 60^\circ$

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

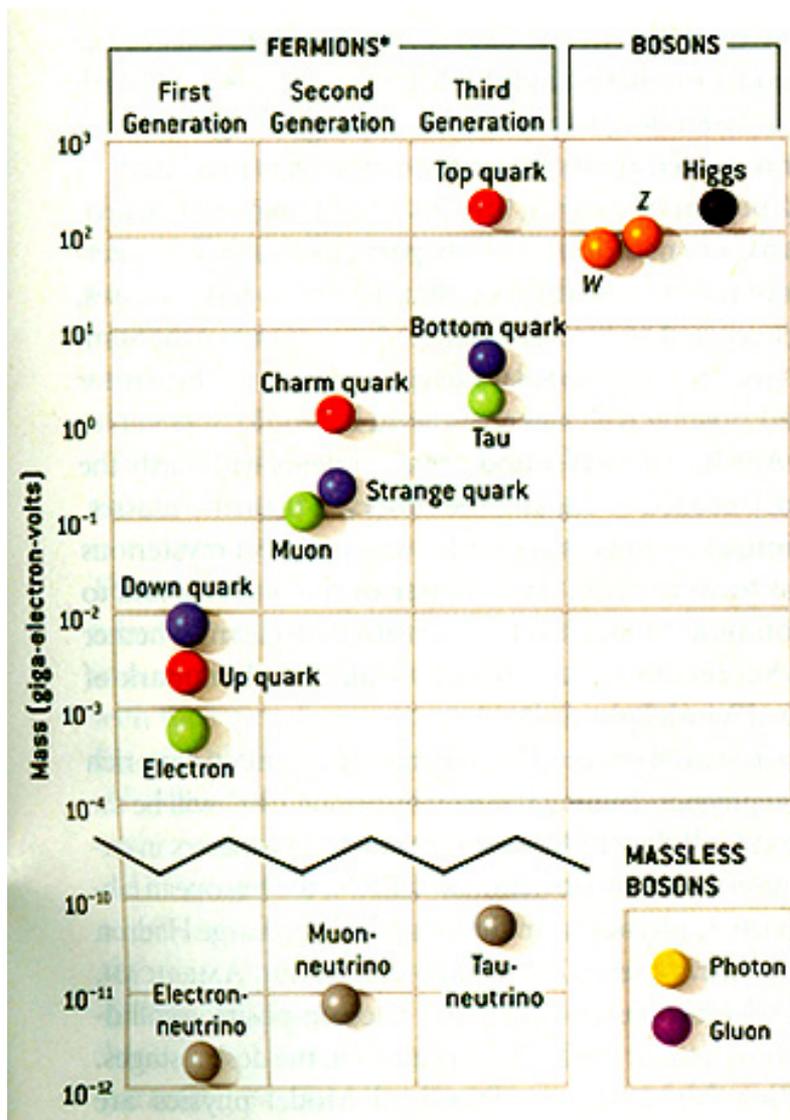
質量の絶対値

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

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？

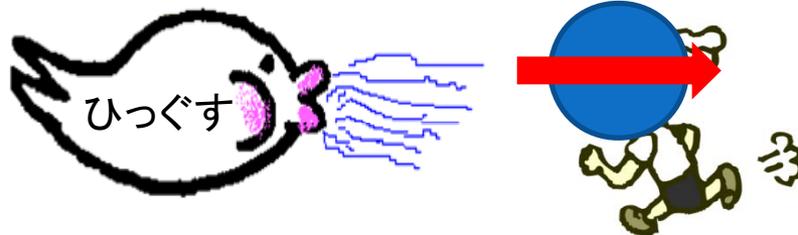


クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？

ディラック質量



俺は、photonだ。
お前は、左巻き君
だな。



俺は、photonだ。
お前は、右巻き君
だな。

有限な質量を持つ= 座
標系によって、右巻き、
左巻きが、代わる。

$$m_D \overline{\Psi}_R \Psi_L$$

ニュートリノを巡る未解決の問題群

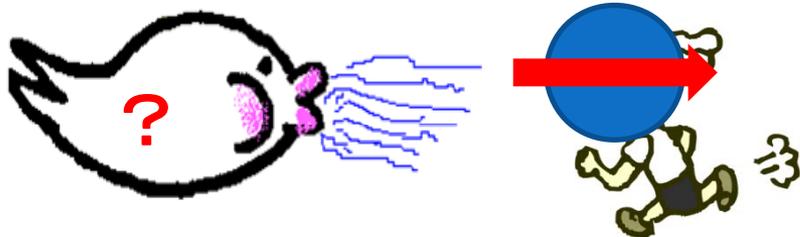
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

マヨラナ粒子

ディラック質量



俺は、photonだ。
お前は、左巻き君
だな。



中性なフェルミオンは、
Dirac質量項とは、違う形
の質量項を持つことが
できる。

$$m_L \overline{\Psi}_L^C \Psi_L$$

$$m_R \overline{\Psi}_R^C \Psi_R$$

俺は、photonだ。
お前は、右巻き君だな。あれ、
君は、思っていたのと、違う人だ
ね？まてよ、どこかで見たよう
な。そうだ、反粒子くんだね。



ただし、レプトン数保存を
破る!!!

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？

- ニュートリノの質量が、荷電レプトンやクォークと同じようにHiggs場を通してDirac質量として獲得していると考ええると、こんなにも軽いのは不自然である。
- ν_L, ν_R がディラック質量 m (例えば1 GeV) を持つと考える。さらに高いエネルギースケール ($\sim 10^{11}$ GeV) の物理により、 ν_R がマヨラナ質量 M ($\sim 10^{11}$ GeV) を持つと、質量項は

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

$m \ll M$ の近似でこの行列を対角化すると、固有値は、 $m^2/M, M$ となる。

$m^2/M \cong 10^{-2} \text{ eV}$ (シーソー機構)

非常に重い右巻きニュートリノがあると、大統一理論的にもうれしいらしい。

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 \rightarrow 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 \rightarrow 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

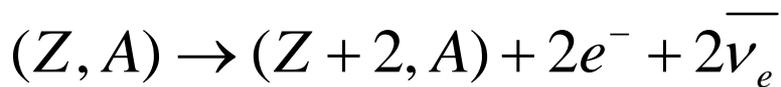
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ 私の大学院の時から。今日はお話しません。

ニュートリノ
振動

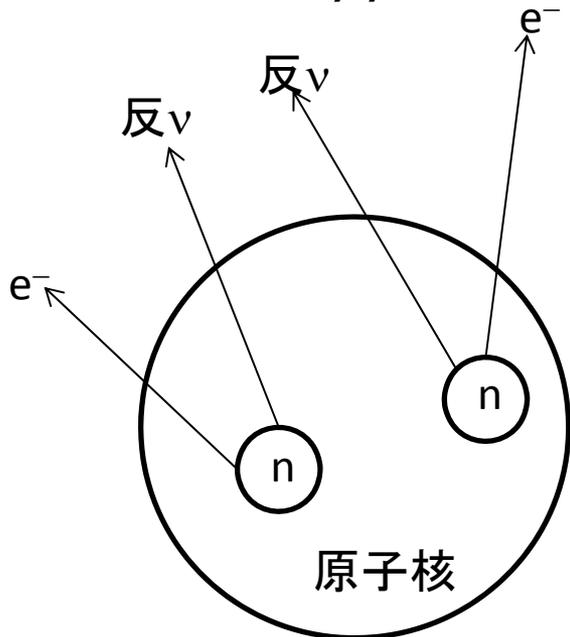
ダブルベータ
崩壊

$0\nu\beta\beta$ 崩壊

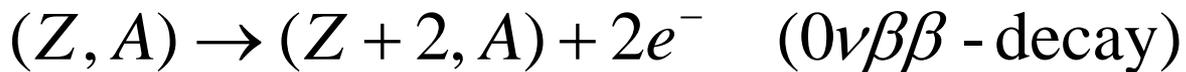
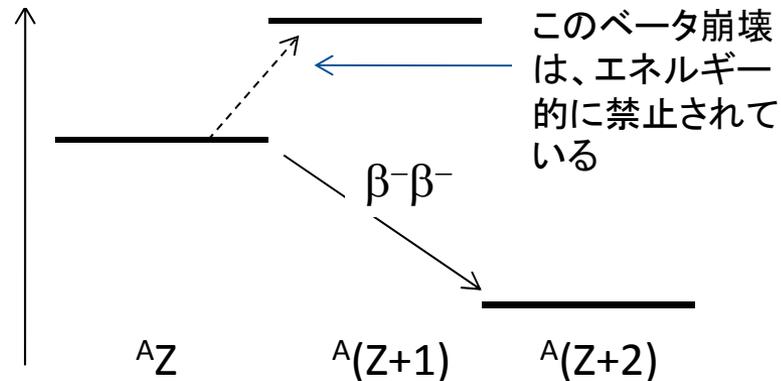
2ν を伴う二重ベータ崩壊



($2\nu\beta\beta$ - decay)



Energy Level

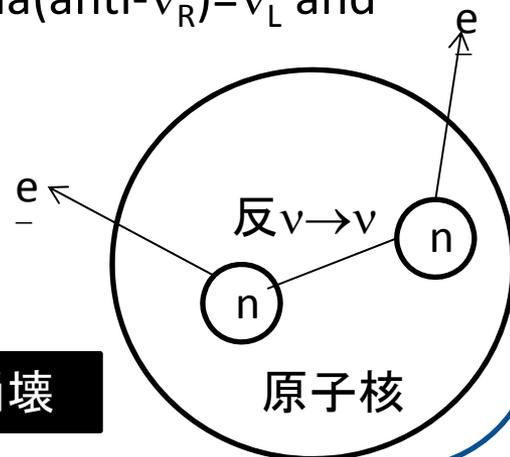


violating lepton number conservation

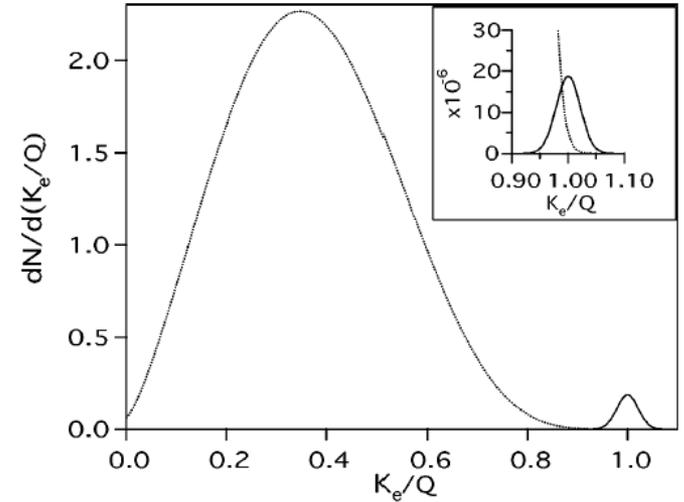
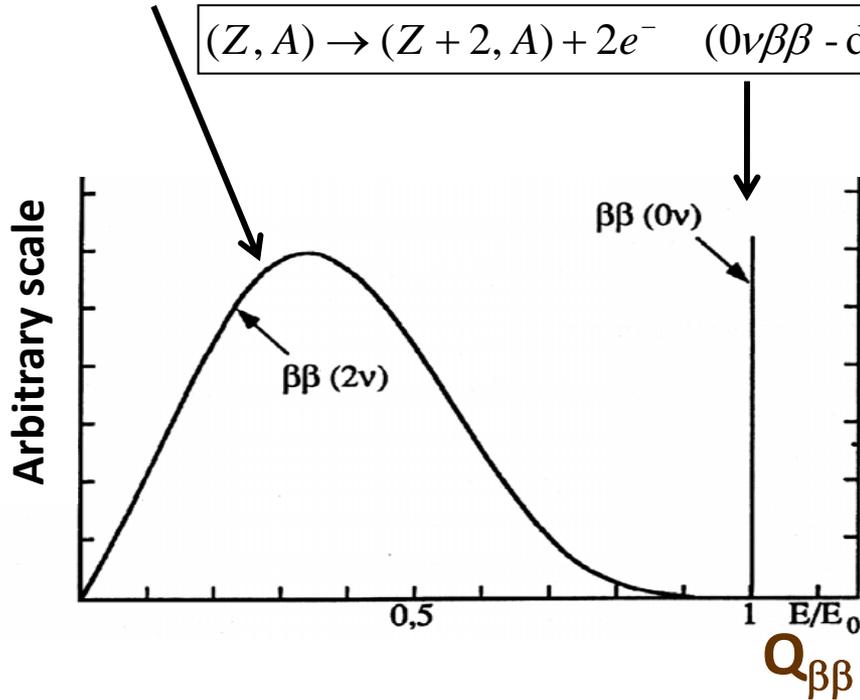
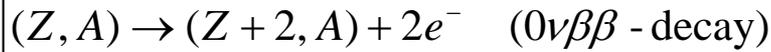
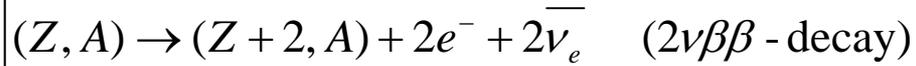
Require neutrino to be Majorana ($\text{anti-}\nu_R = \nu_L$) and to have masses.

Life time $\sim > 10^{25}$ year

ν を伴わない二重ベータ崩壊



$0\nu\beta\beta$ 崩壊の信号



- 2個の電子のエネルギーの和を測る。
2個の電子を個別に測定する実験もある
- キーポイント ($t \sim > 10^{25}$ yr, a few MeVを測る!)
 - エネルギー分解能
 - バックグラウンドの除去
 - 大きくできること。

World record for life time upper limit

Heidelberg/Moscow ^{76}Ge experiment

5 HP-Ge crystals, enriched to 87% in ^{76}Ge ~11kg

total statistics 71.7kg x y

controversial result

KK claim for evidence v.s. refute by collaborators.

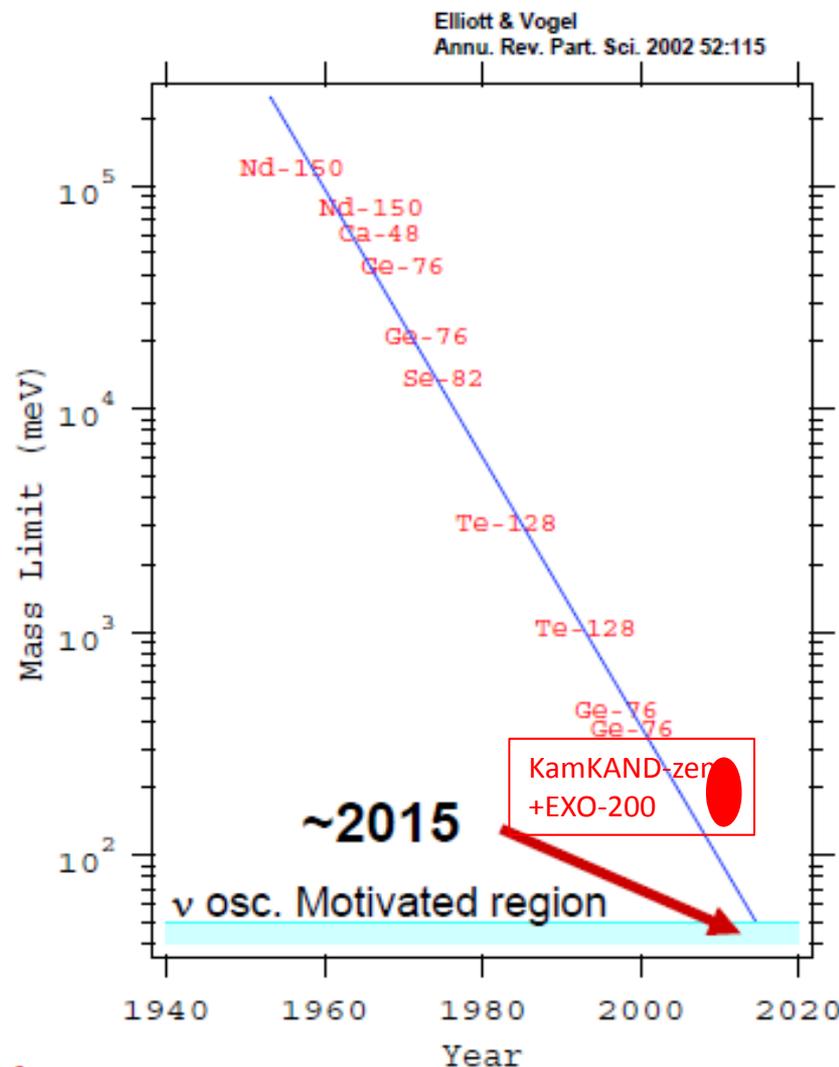
$$\tau_{1/2}^{0\nu} = 1.2 \times 10^{25} \text{ years}$$

$$\langle m_{\nu} \rangle = 0.44 \text{ eV}$$

2013年 KamLAND-zen + EXO !

Refute KK claim by 97.5% C.L.

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120\text{-}250 \text{ meV (90\% C.L.)}$$



1 kg

ダブルベータ探索実験に向けた キセノン比例シンチレーションTPC

命名: AXEL

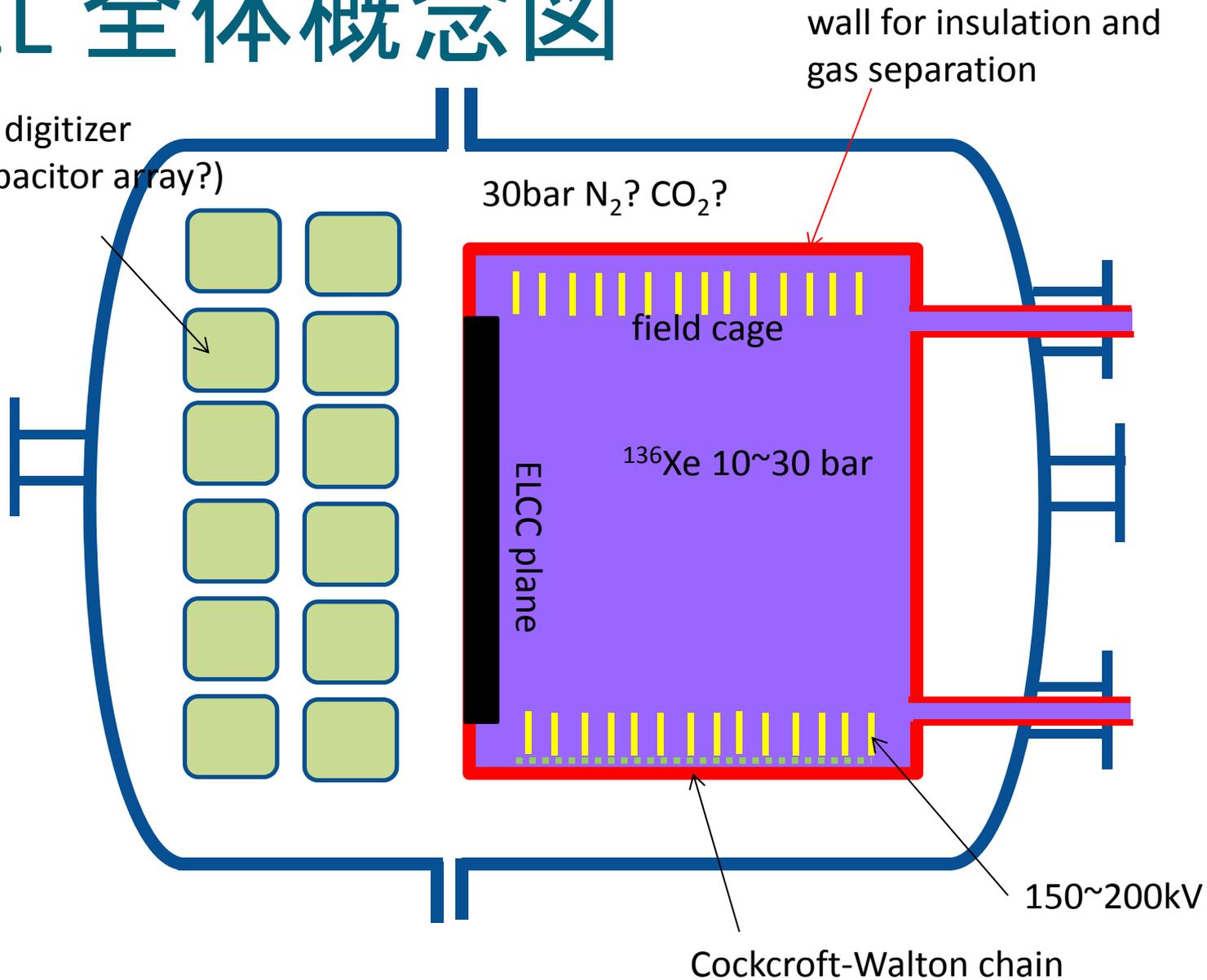
A Xenon ElectroLuminescence Detector

京都に着任(2007年)してから(する前から)ずっと二重ベータ崩壊探索実験を**自分のアイデアで**したいと思っていました。

今、考えうる究極の0v二重ベータ探索検出器！

AXEL 全体概念図

~5MHz wave digitizer
(Switched capacitor array?)



なぜ究極なのか？

- キセノン

- ^{136}Xe が二重ベータ崩壊核: 自然同位体比 9%。1トンの濃縮は金の問題。2メートルの検出器なんて大したことない。
 - 半導体検出器ボロメータはなかなか大きくできない。

- 超高エネルギー分解能

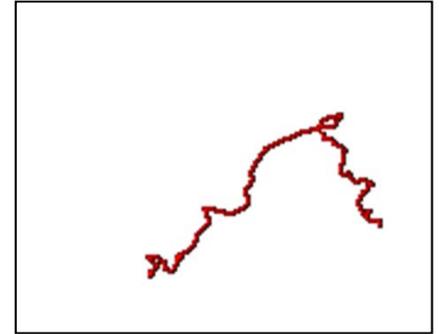
- Proportional Scintillation (=Electro luminescence) modeで読み出すことで、0.5%(FWHM)が可能
 - (KamLAND-Zen 9.6%, EXO 3.8%)

- バックグラウンド除去

- アルファ線やコンプトン散乱するガンマ線は簡単に除去できる。

Baseline design(目標)

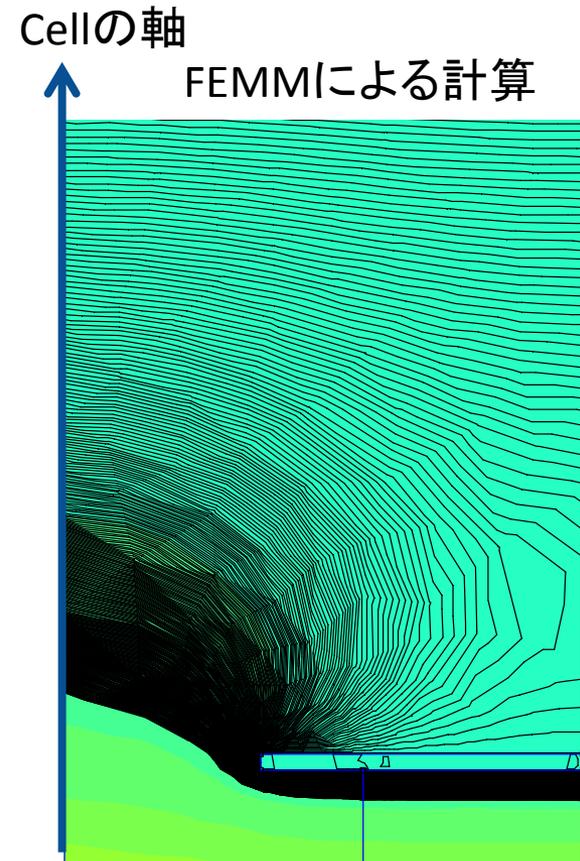
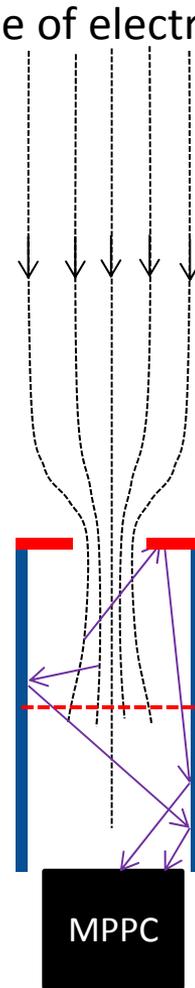
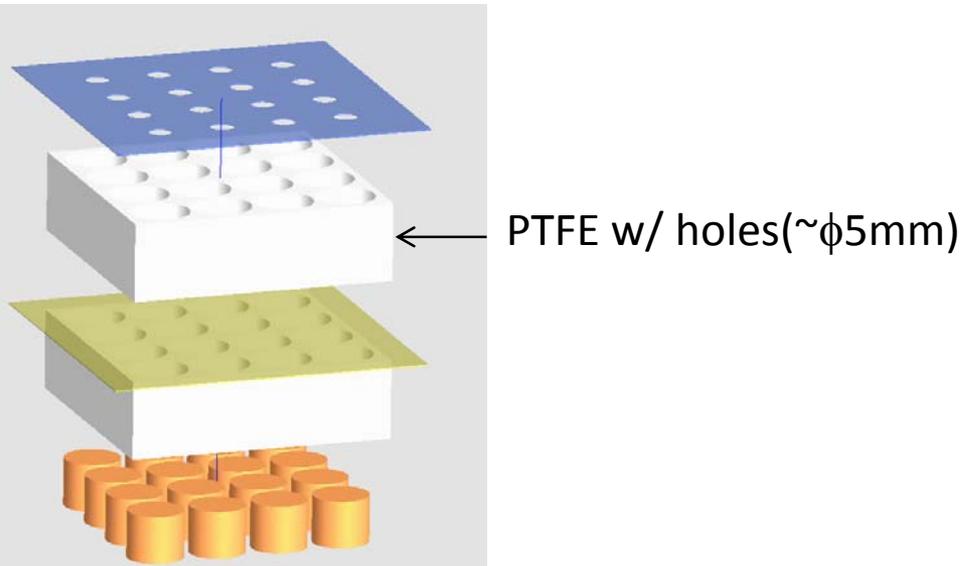
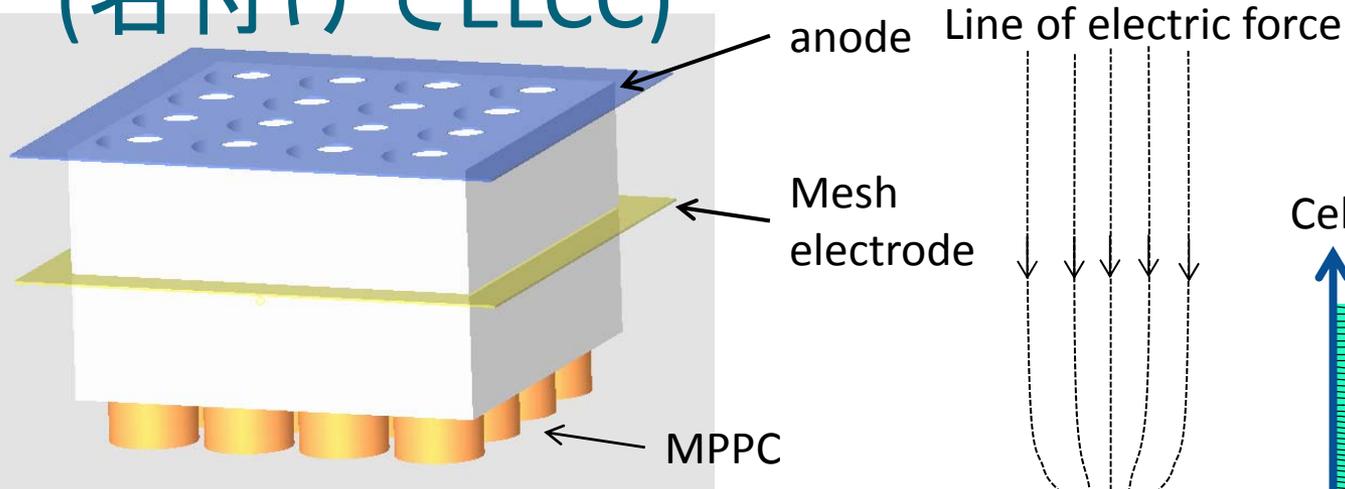
- **1 ton** enriched ^{136}Xe gas (not liquid)
- At 15~30 times higher density than STP
 - $\rho = 0.088\sim 0.18\text{g/cm}^3$
 - e.g. $\phi 2\text{m}\times 1.7\text{m(H)}$ cylinder at 0.18g/cm^3
- Use proportional scintillation mode (Electroluminescence) for energy measurement
 - **Energy resolution goal $< 0.5\%$ (FWHM)**
 - Ultraviolet photon($\sim 170\text{nm}$) detection by **MPPC**
- Tracking as TPC
 - Range(2.5MeV e) $\sim 210\text{ cm}$ at STP
 - T_0 by primary scintillation signal
 - Sample 15~20 points using pads. $5\sim 7.5\text{mm}$ spacing $\rightarrow 5.5\times 10^4\sim 1.2\times 10^5\text{ ch}$
 - Purpose is to identify two blobs at track ends. \rightarrow **distinguish from α 's and γ 's.**
 - Electric field for drift : $\sim 1.5\text{kV/cm}$ @30bar \rightarrow drift velocity $\sim 1\text{m/ms}$
- **Energy measurement by ELCC(see next pages)**



読み出し部に新しいアイデア

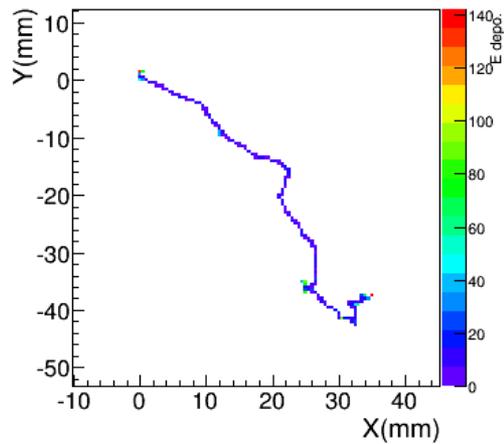
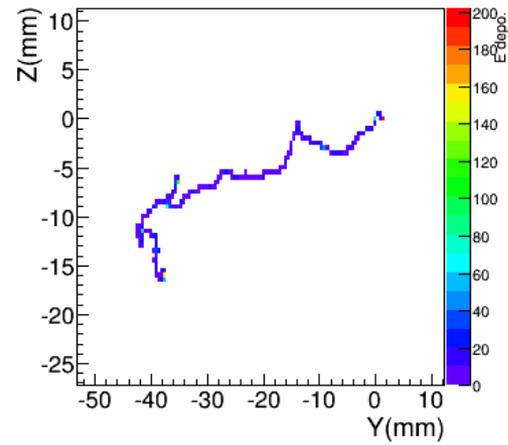
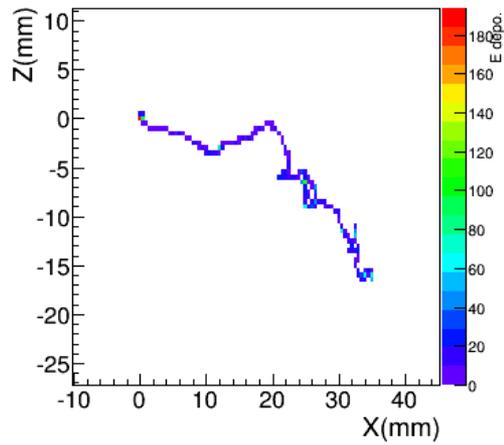
Readout by light collection cell

(名付けてELCC)



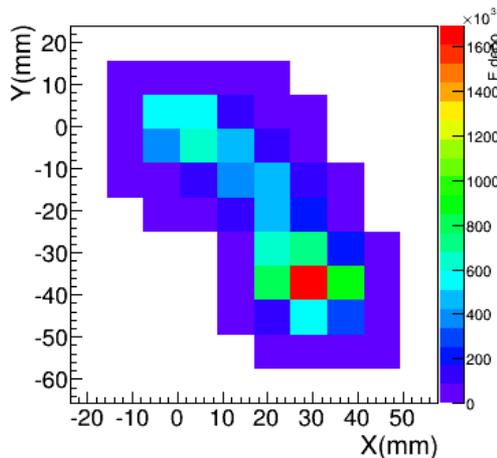
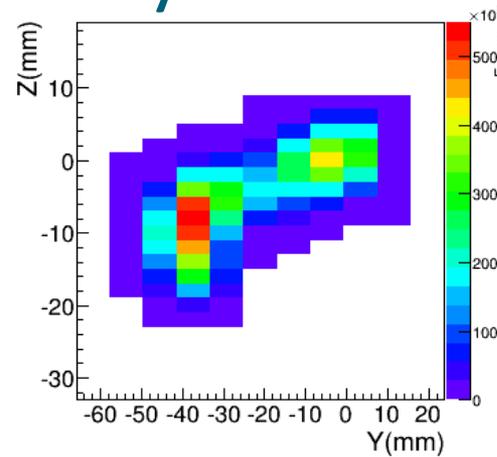
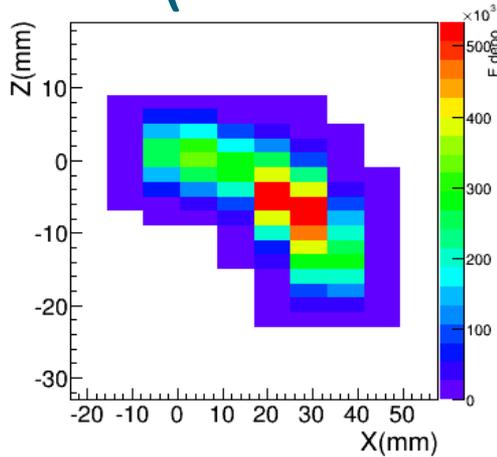
simulation example 1

row track



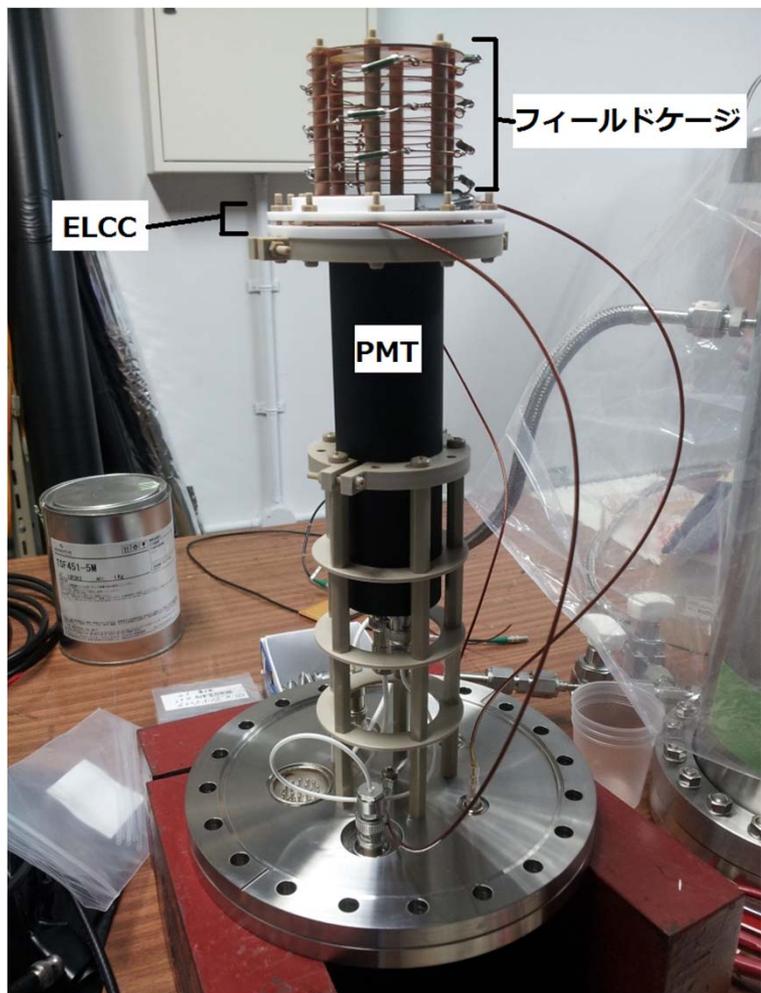
simulation example 1

segmentation (7.5mm in x or y and 2mm in z)

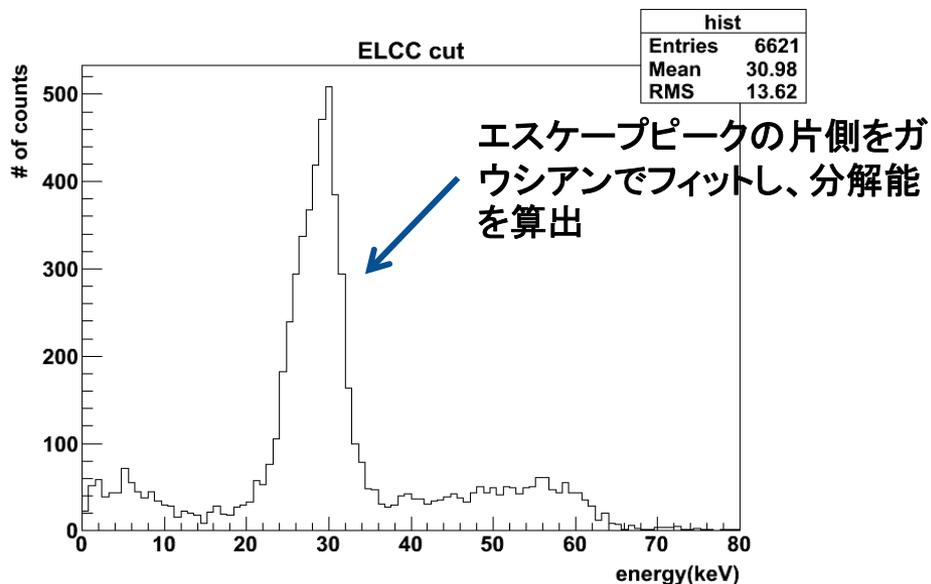


z marginalized by
ELCC generation
time(4 μ s)

秋山君の成果 ELCC Ver.2



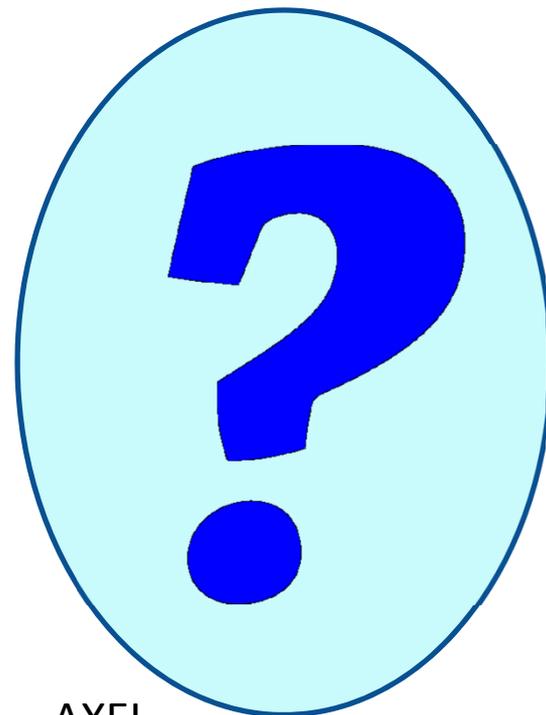
- 1気圧、PMT読み出し試作機
- 30keV X線に対してエネルギー分解能 14%(FWHM) → 二重ベータ崩壊の信号 (2.5MeV)に換算すると1.5%
- 目標(0.5%)まで、あとたったfactor 3!



30keV X線の測定結果

メンバー

- 市川、中家、南野
- **中村、石山**
- 関谷(宇宙線研)、廣瀬(物二技術職員)
- (秋山君卒業)



AXEL
イメージキャラクター

今年のご目標

- MPPC 64チャンネル、10気圧検出器を製作し1.3MeVガンマ線の測定で原理証明
 - このための開発要素、盛りだくさん。
- 来年度以降の目標は
 - キセノン10気圧 9kg検出器
 - ↓
 - 30気圧 27kg検出器で世界記録更新
 - ↓
 - 30気圧1トン検出器で発見！

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