

# 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

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

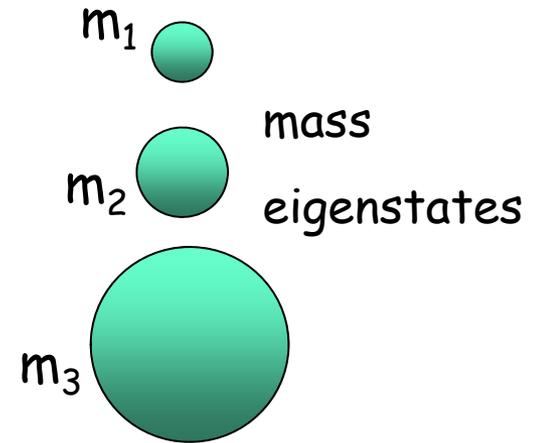
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{MNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$m_1$

$m_2$

$m_3$

mass eigenstates



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

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

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

+  $\delta$  (+2 Majorana phase)

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

# 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴

混合行列: フレーバーの固有状態と質量の固有状態の混ざり具合

Measured in  
2011~2012!

クォーク

レプトン

$$U_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.23 & 0.004 \\ 0.23 & 0.97 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

$\delta \sim 60^\circ$

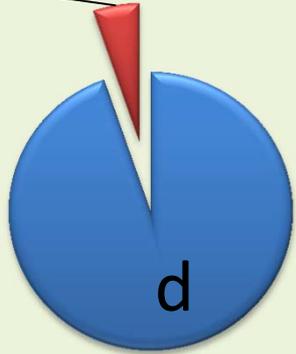
$$U_{MNS} \approx \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & 0.15 \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$\delta = ?$

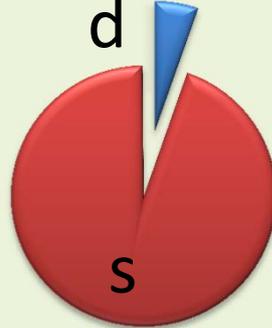
$$\begin{aligned} \theta_{12} &= 34.4^\circ \pm 1.4^\circ (1\sigma) \\ \theta_{23} &= 45^\circ \pm 8^\circ (90\%CL) \\ \theta_{13} &= 8.8^\circ \pm 0.8(1\sigma) \end{aligned}$$

# 絵にしてみると

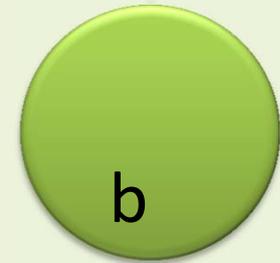
s 第1世代クォーク



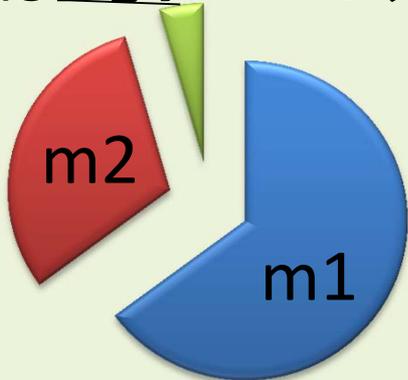
第2世代クォーク



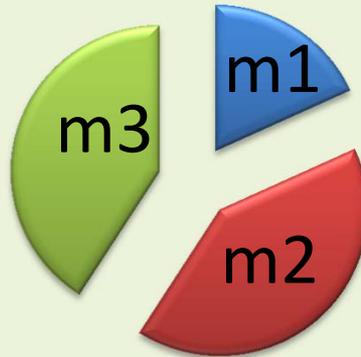
第3世代クォーク



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



# 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴

混合行列: フレーバーの固有状態と質量の固有状態の混ざり具合

クォーク

レプトン

$$U_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 0.97 & 0.23 & 0.004 \\ 0.23 & 0.97 & 0.04 \\ 0.008 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

$\delta \sim 60^\circ$

$$U_{MNS} \approx \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & 0.15 \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$\delta = ?$

Assuming some symmetry among quarks and leptons, some models predict

$$U_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.816 & 0.577 & 0 \\ -0.408 & 0.577 & 0.707 \\ 0.408 & -0.577 & 0.707 \end{pmatrix}$$

# 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

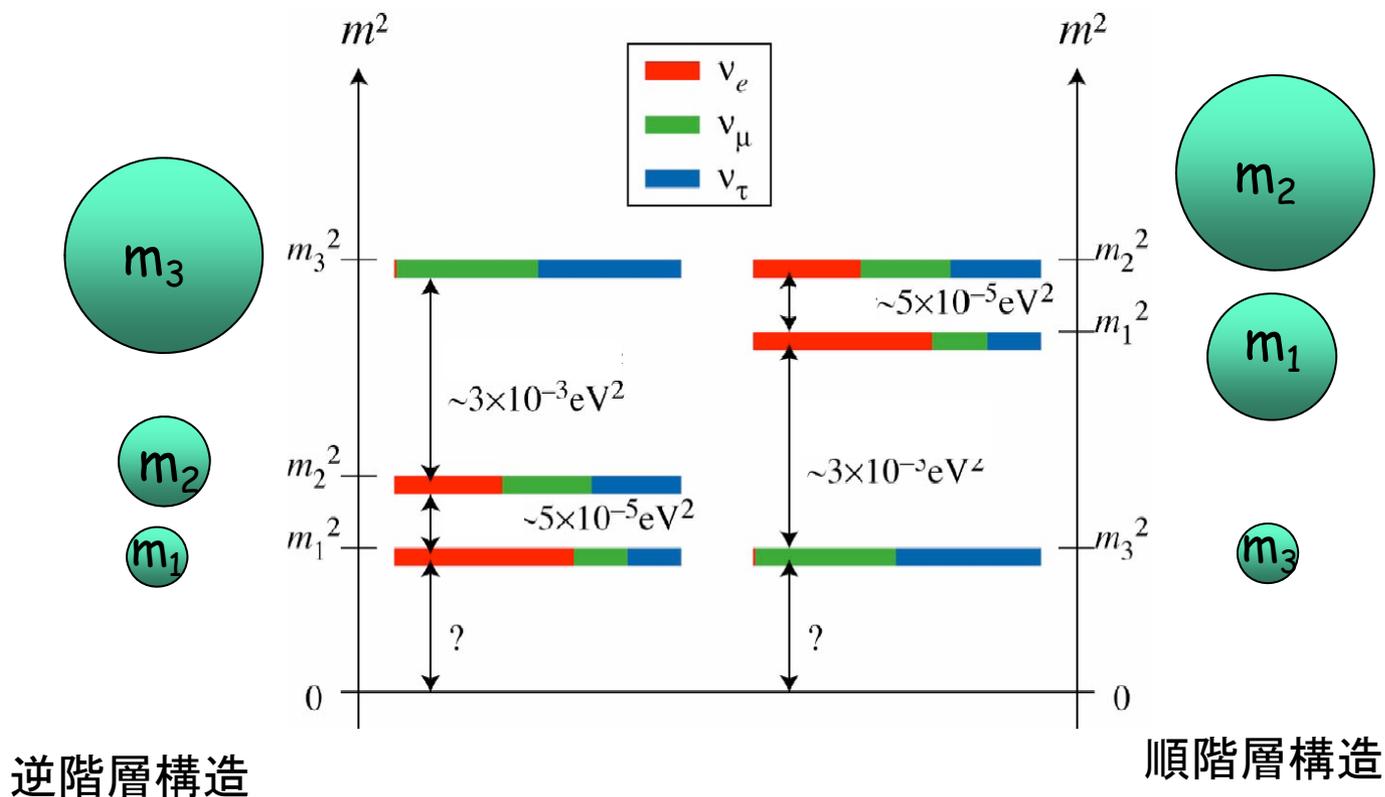
# 本当に3種類だけか

- ステライル(反応しない)ニュートリノがある、と言っている人たちがいる。
- ふううん、面白いんじゃない？

# 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

# 質量の順番(クォークと同じか?)



# 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

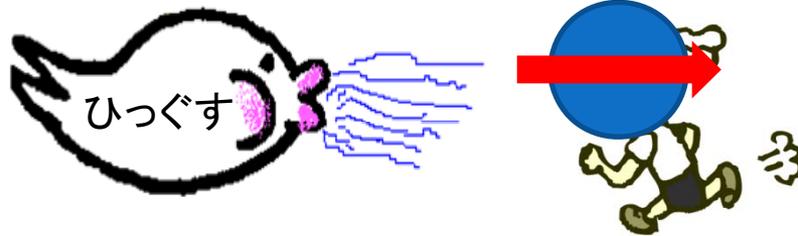
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

# 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？

ディラック質量

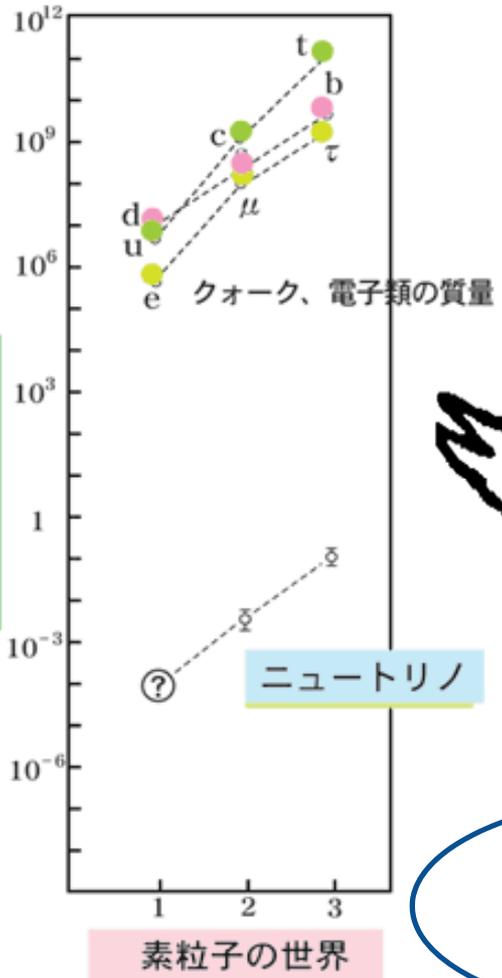


俺は、photonだ。  
お前は、左巻き君  
だな。



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

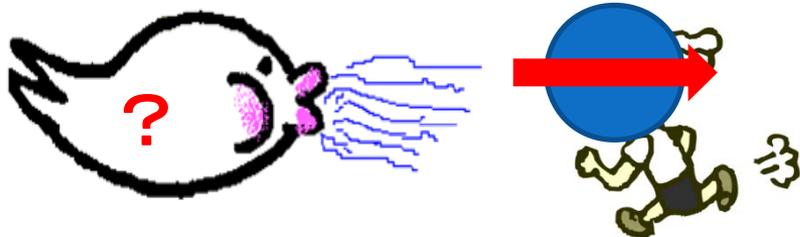
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ

# 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。

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。



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

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

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れば、こんなにも軽いのは不自然である。
- $\nu_L, \nu_R$  がディラック質量  $m$  ( $\sim 1$  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、 $\nu_R$  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。

$m^2/M \cong 10^{-2}$  ( $m \sim 1$  MeV ならば、 $M \sim 10^{17}$  GeV)

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 $\nu$ 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

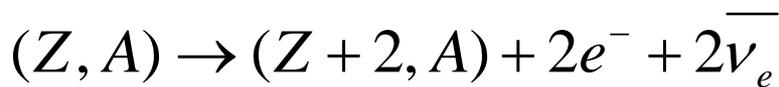
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- (クォークと同じように)CPは破れているのか？
- 本当に3種類だけか？
- 物質優勢宇宙の起源？
- 質量の順番(クォークと同じか？)
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？
- マヨラナ粒子？
- 質量の絶対値
- 宇宙背景ニュートリノ 私の大学院の時から夢。今日はお話しません。

ニュートリノ  
振動

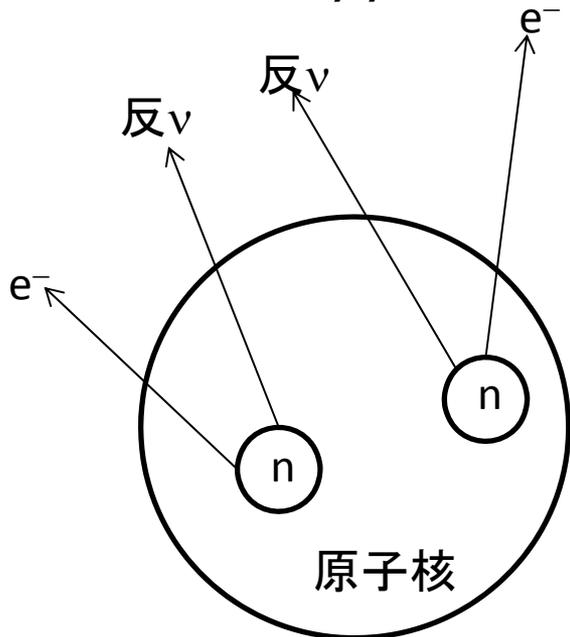
ダブルベータ  
崩壊

# $0\nu\beta\beta$ 崩壊

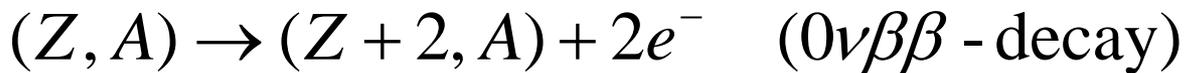
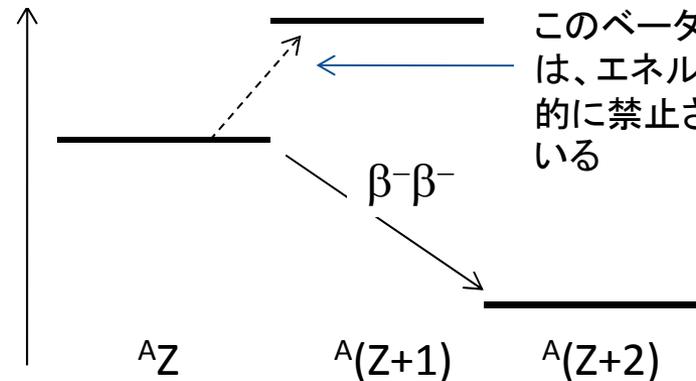
$2\nu$ を伴う二重ベータ崩壊



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



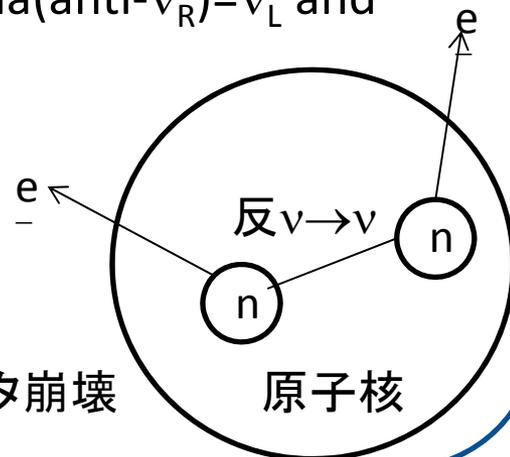
Energy Level



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



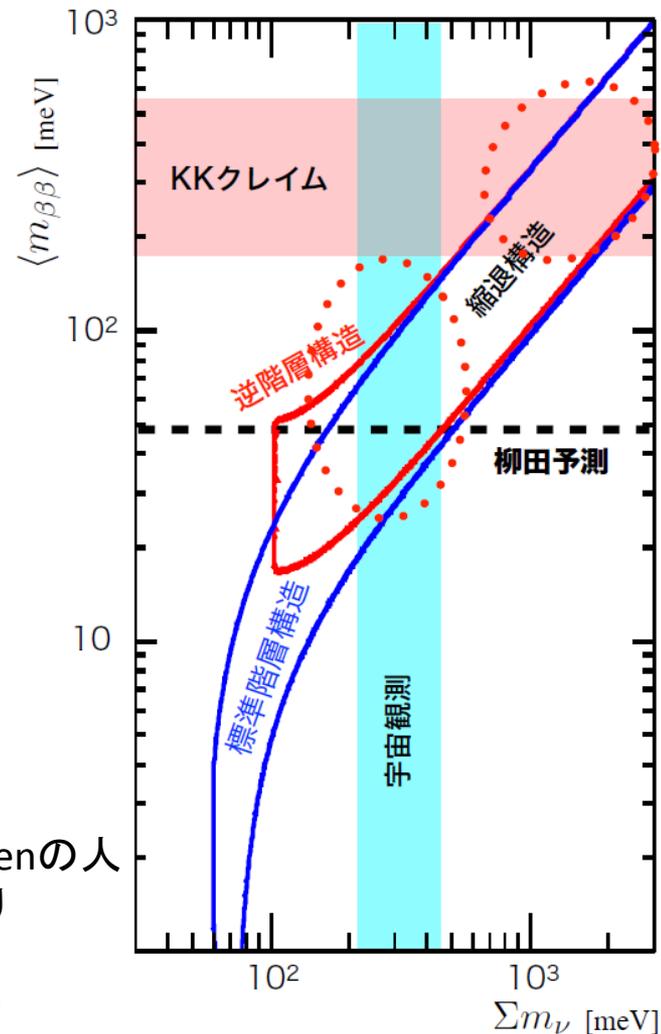
$\nu$ を伴わない二重ベータ崩壊

# ダブルベータ崩壊で測定される質量とニュートリノ振動で測られる質量の関係

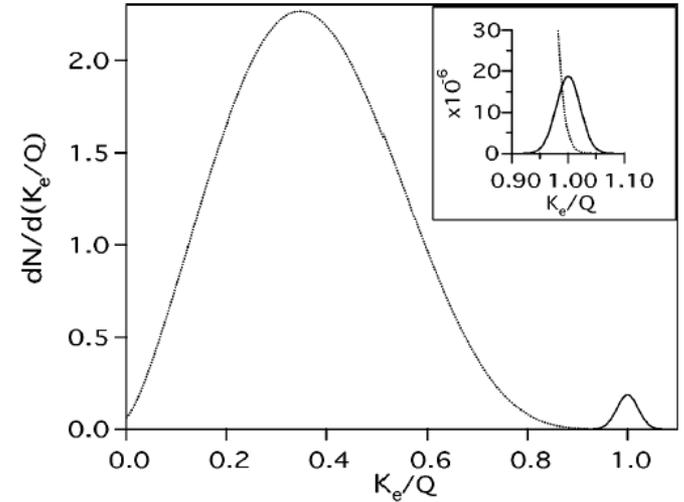
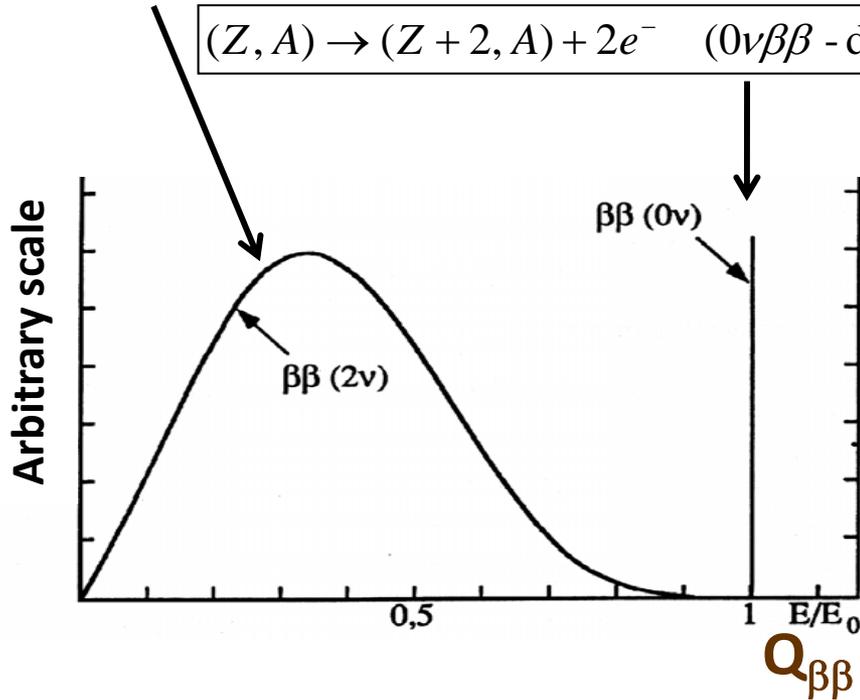
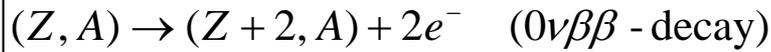
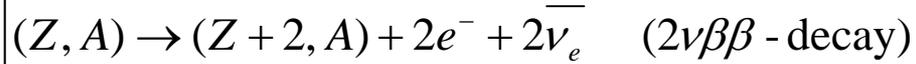
$$\frac{1}{\tau_{1/2}^{0\nu}} = \frac{|m_\nu|^2}{m_e^2} \cdot G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}^5, Z) |M^{0\nu}|^2$$

$$|\langle m_\nu \rangle| = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right|$$

KamLAND-zenの人のトラペより



# $0\nu\beta\beta$ 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  $^{76}\text{Ge}$  experiment

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

total statistics 71.7kg x y

controversial result

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

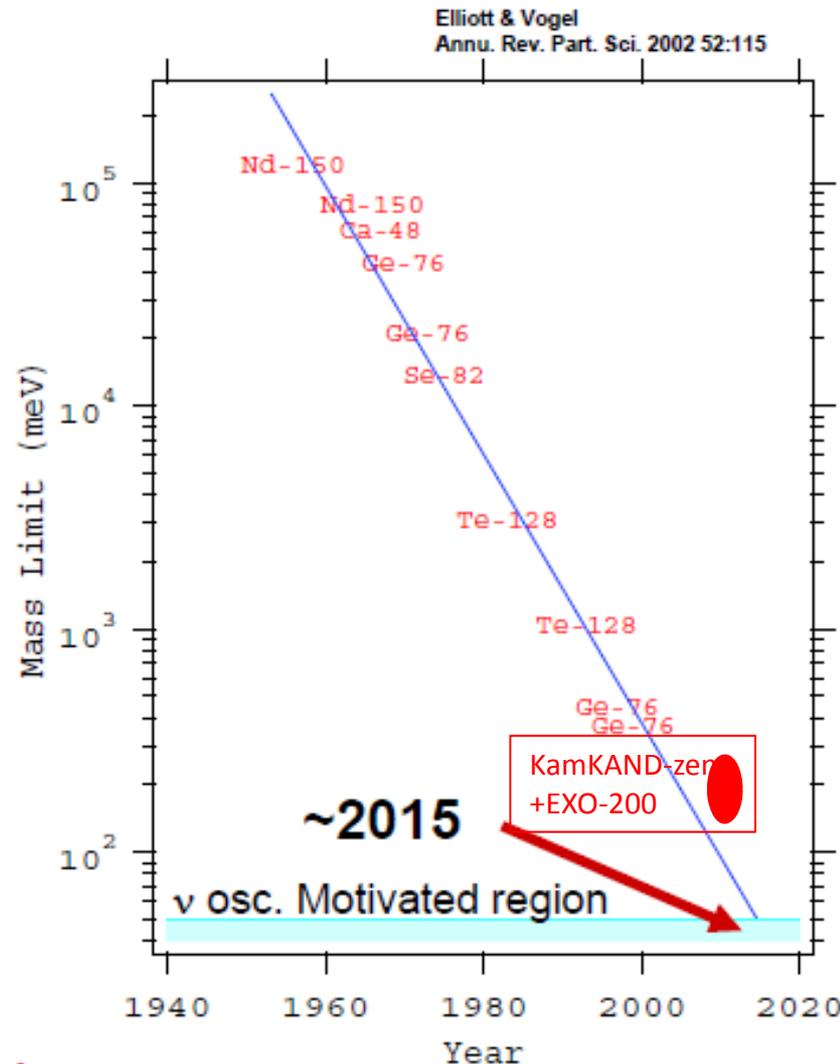
$$\tau_{1/2}^{0\nu} = 1.2 \times 10^{25} \text{ years}$$

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

2013年 KamLAND-zen + EXO !

Refute KK claim by 97.5% C.L.

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



# ダブルベータ探索実験に向けた CdTe(テルル化カドミウム)検出器の 開発・研究

偉大な先人たち

木河君、平木君、合田君、君たちのことは忘れないよ。

# 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の 開発・研究

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。

昨年度、CdTeを断念。

(Daya Bay事件もあって)傷心の毎日、考えた。”0から考え直そう”

去年のトラペから

# CdTe(CZT? Siガンカメラ?) プロジェクトへの参加の仕方

大型実験(ATLAS, T2K)では、実験が走り始めるとハードウェアに触れる機会が減ってしまう。

→ 外国ではハードに触ったことのない使えない博士を量産  
修士の間、R&D段階にあるプロジェクトでハードウェアの腕を磨く。(もしかすると、プロジェクトとして花開くかも)



博士論文は、大きな実験で書く

というのは、悪くない、と、正直思う。

私は、ニュートリノ振動( $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\delta$ )の次は、物理としてはダブルベータ崩壊をやりたいんだけど、五里霧中。一緒にもがきませんか？ (KamLAND-zenとかすごいんだけど、そうはいつでも最後に勝つのは分解能の高い実験なんじゃないかと。。。。)

# なぜキセノンなのか？

- Xenon production rate
  - 5000-7000m<sup>3</sup>/yr ~50ton in 1998.
- 2x10<sup>6</sup> kton exists in air
- Enrichment and purification are relatively easy.

2νに対する0νの  
起き易さ(a.u.)

	abound(%)	$\tau(2\nu\beta\beta)$ yr	Q(keV)	$Q^5 \times \tau(2\nu\beta\beta) / 1E36$	
48Ca	0.187	3.9E+19	4271	55.4	enrichment difficult
76Ge	7.8	1.7E+21	2039	59.9	
82Se	9.2	9.6E+19	2995	<b>23.1</b>	
96Zr	2.8	2.0E+19	3350	8.4	
100Mo	9.6	7.1E+18	3034	<b>1.8</b>	
110Pd	11.8		2013		
116Cd	7.5	2.8E+19	2802	4.8	
124Sn	5.64		2228		
130Te	34.5	7.6E+20	2529	78.6	
136Xe	8.9	2.2E+21	2479	<b>208.8</b>	
150Nd	5.6	9.2E+18	3367	4.0	enrichment difficult

\*  $\tau(2\nu\beta\beta) \propto Q^{11}$ ,  $\tau(0\nu\beta\beta) \propto Q^5$

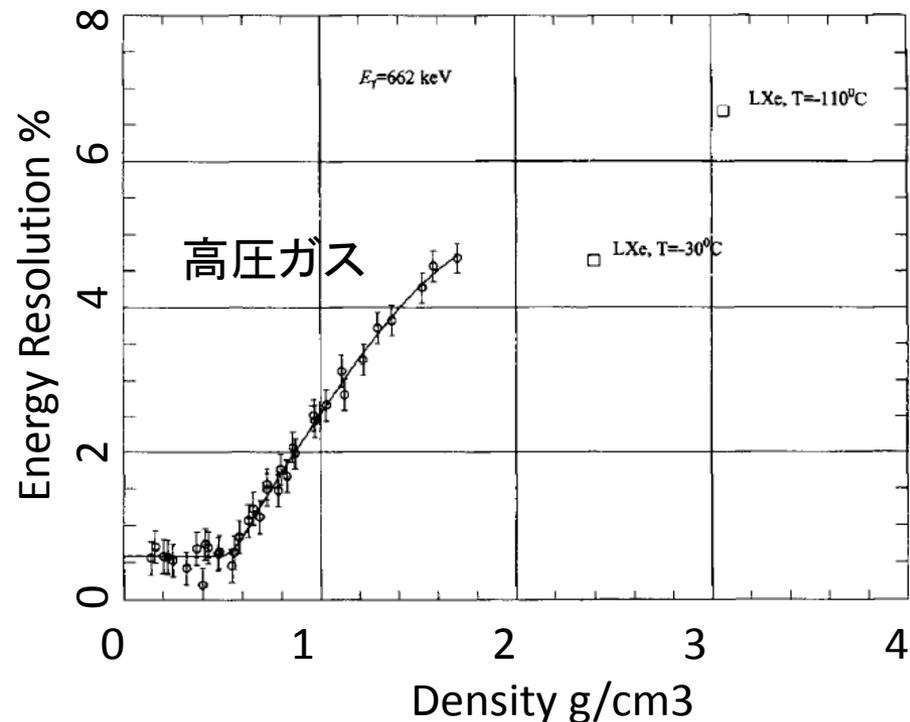
KamLAND-zen すごいなあ。でもエネルギー分解能  
4.1%( $\sigma$ )なら付け入る隙があるんじゃない？(2 $\nu\beta\beta$ の寿命も短いみたいだし)

Xenonで**ionization**を使う場合のStatistical limit

- W-value 21.5 eV, Fano factor < 0.17  
→ 0.12%(FWHM)@2.48MeV (0.23%(FWHM)@662keV)

0.05%( $\sigma$ )!!!

A. Bolotnikov, B. Ramsey Nucl. Instr. And Meth. A396(1997) 360



# Electroluminescence

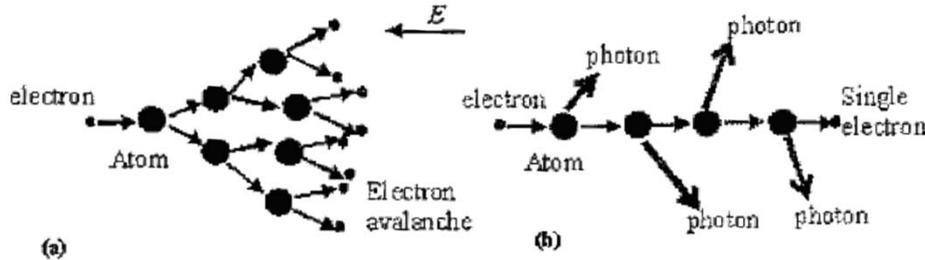


Fig. 6.2 Amplification process in gas detectors with gas gain (a) and electroluminescence (b) or proportional scintillation.

Good and stable linearity because

- A linear amplification process.
- #photons  $\propto$  voltage drop rather than to the field strength.

w/ 4 mm gap

To get 200 (400) photons,

3.3(6.1) kV@1atm.

4.9 (7.7) kV@5atm.

15(18)kV@30atm.

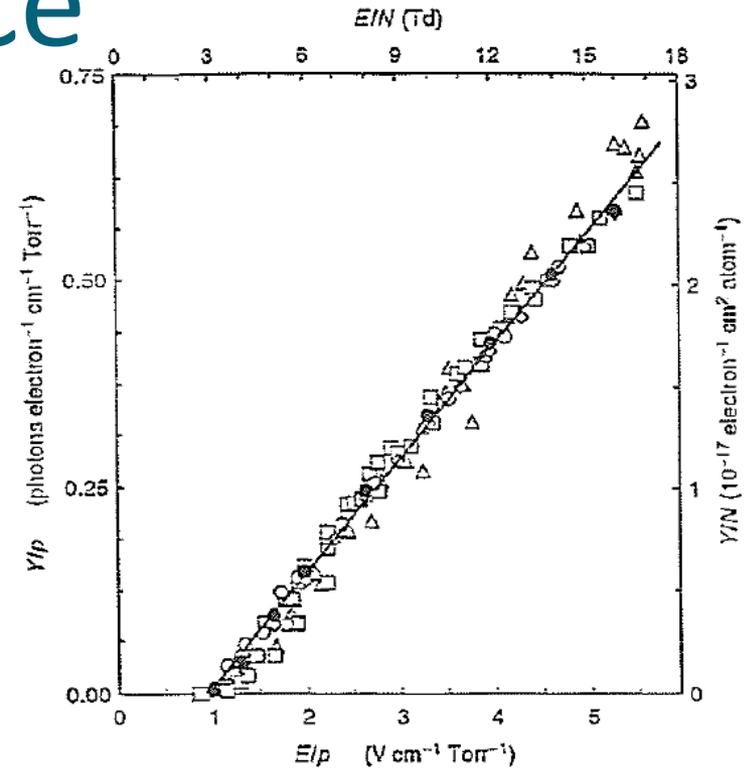


Fig. 3.17 Reduced light output of electroluminescence of xenon gas at 293 K temperature and normal pressure as a function of the reduced electric field strength (compilation of experimental and computer simulation data by Conde [143]).

# Baseline design(目標)

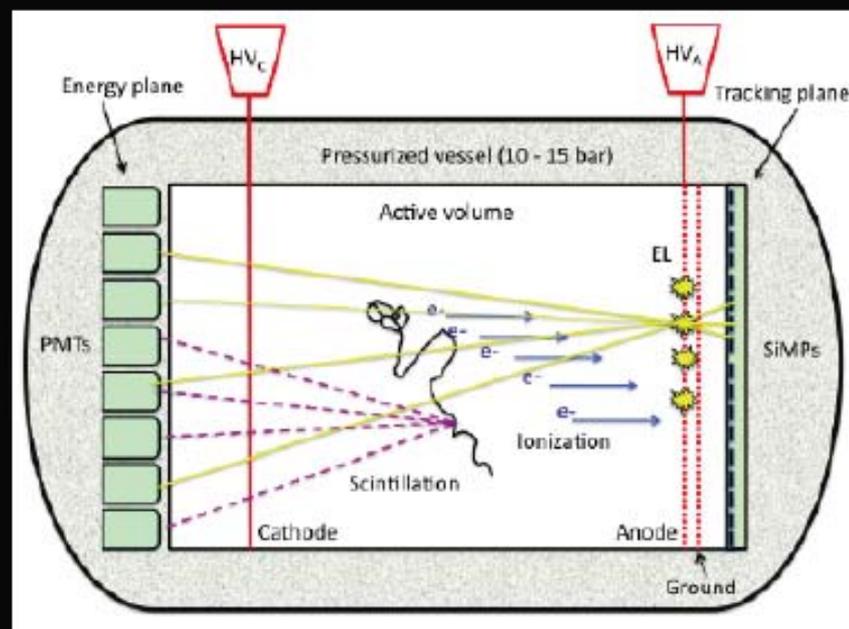
- 1 ton enriched  $^{136}\text{Xe}$  gas (not liquid)
- At 15~30 times higher density than STP
  - $\rho = 0.088\sim 0.18\text{g/cm}^3$
  - e.g.  $\phi 2\text{m}\times 1.7\text{m(H)}$  cylinder at  $0.18\text{g/cm}^3$
- Use proportional scintillation mode (Electroluminescence) for energy measurement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



実現すれば、世界最強の0v二重ベータ探索実験  
実は、こういう計画、すでにあります。

## NEXT Detection Concept

- Cylindrical single drift volume
- Scintillation signal for  $t_0$
- Ionization signal for separated energy and tracking measurements
  - Converted into EL light
- Instrumented endcaps
  - PMTs on energy plane
  - SiPMs on tracking plane
- TPB coating: 170  $\rightarrow$  430 nm light



### NEXT strengths:

- Scalability to ton-scale relatively easy
- 0.5-1% FWHM energy resolution
- Tracking and  $dE/dx$  information for event topology

# どこが違うの？

(自分のアイデアで実験したいんでしょ?)

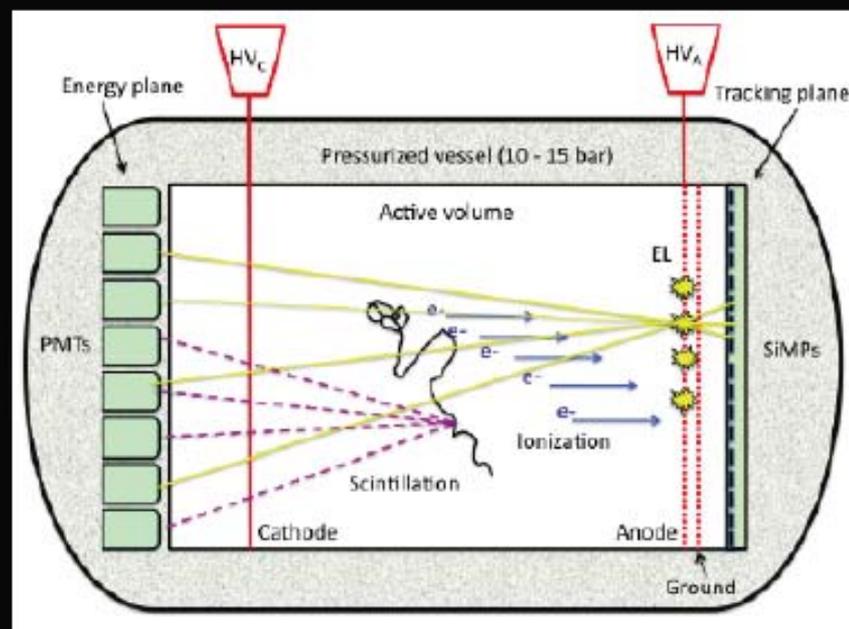
1. WLS+MPPCではなく、UV sensitiveなMPPCを使う。  
最近、MEGと浜ホトでいい感じ。

つつこみ:それなら、向こうも購入するんじゃない？

2. Proportional scintillation (Electro-luminescence)の  
読み出し部にアイデア

## NEXT Detection Concept

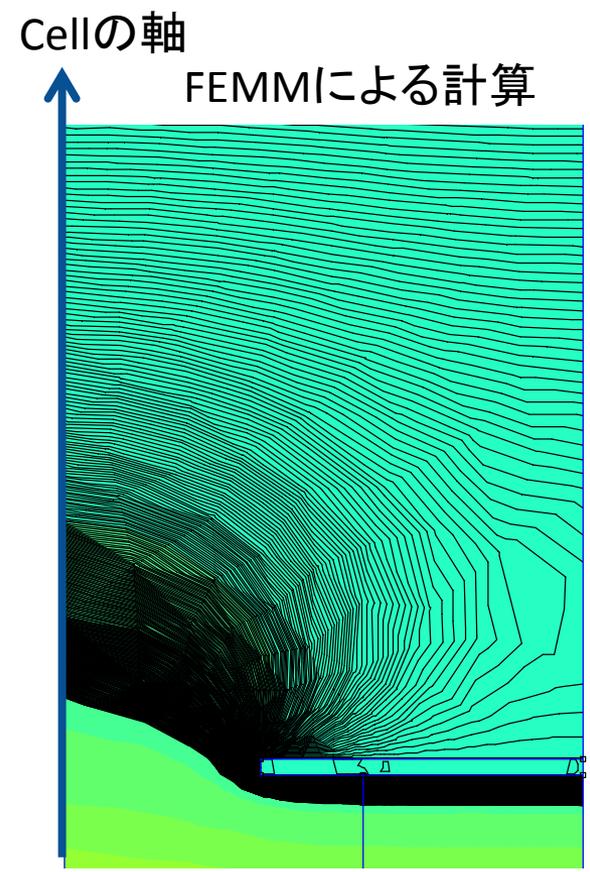
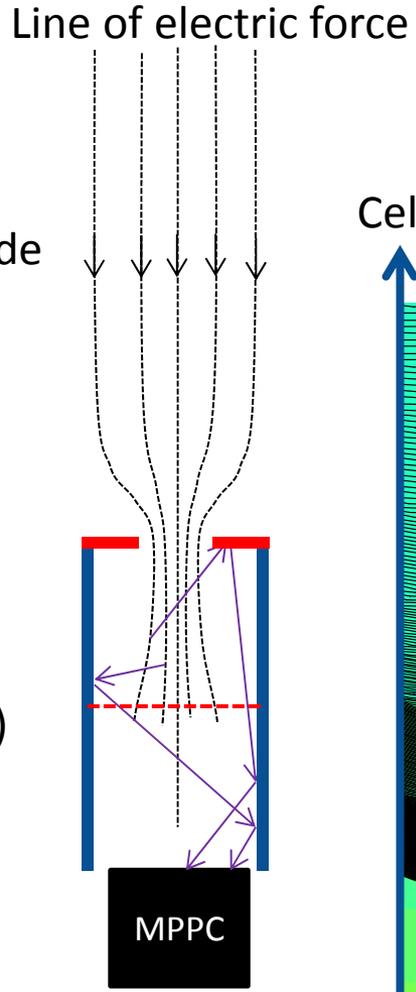
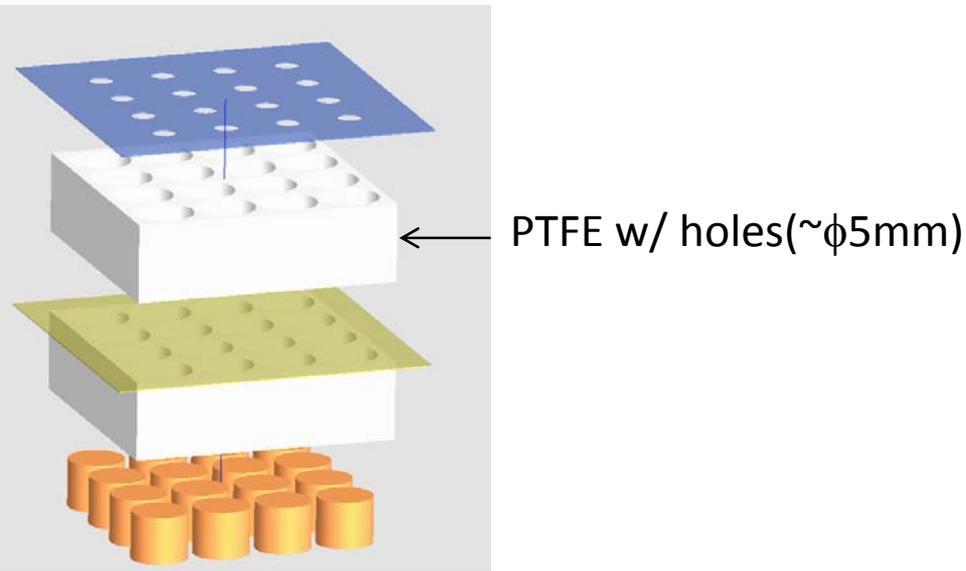
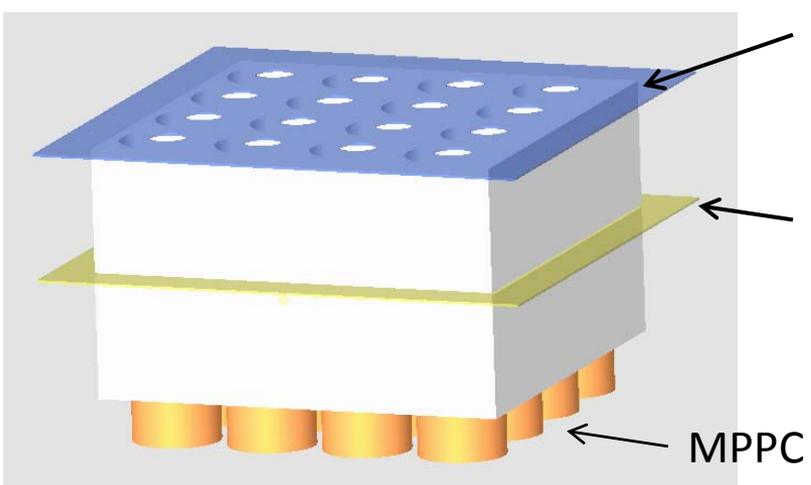
- Cylindrical single drift volume
- Scintillation signal for  $t_0$
- Ionization signal for separated energy and tracking measurements
  - Converted into EL light
- Instrumented endcaps
  - PMTs on energy plane
  - SiPMs on tracking plane
- TPB coating: 170  $\rightarrow$  430 nm light



### NEXT strengths:

- Scalability to ton-scale relatively easy
- 0.5-1% FWHM energy resolution
- Tracking and  $dE/dx$  information for event topology

# Readout by light collection cell (名付けてELCC)



# どこが違うの？

1. WLS+MPPCではなく、UV sensitiveなMPPCを使う。  
最近、MEGと浜ホトでいい感じ。

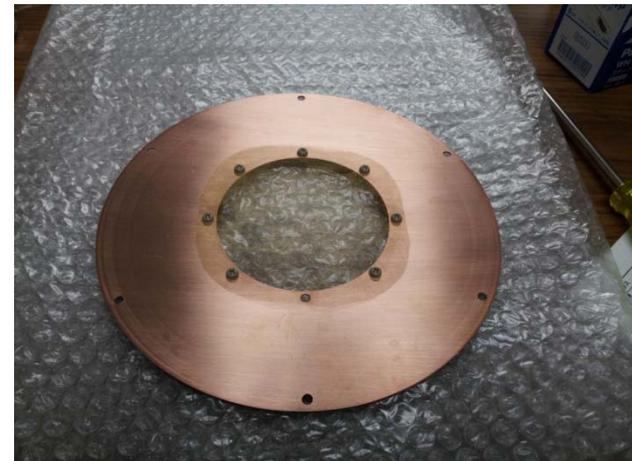
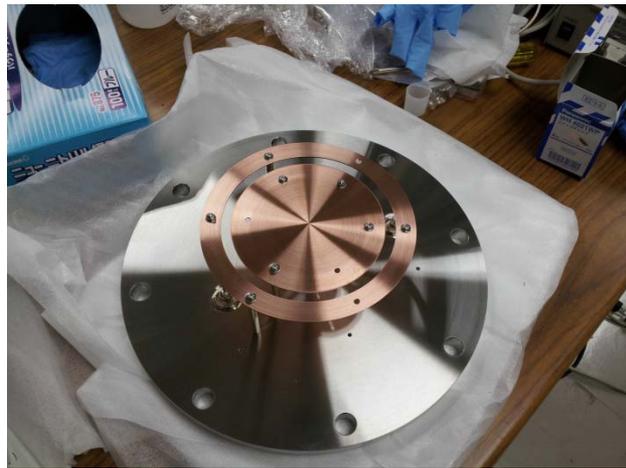
つっこみ:それなら、向こうも購入するんじゃない？

2. Proportional scintillation (Electro-luminescence)の読み出し部にアイデア

## ELCC

- ① Electro-luminescence光の収集効率は格段に良くなる(はず)
- ② トラッキングの際のクロストークが小さくなる(はず)
- ③ エネルギーもMPPCで測定。場所依存が小さくなってエネルギー分解能が上がる(はず)
- ④ 構造的にも大きくしやすい(はず)

# 開発実情 by 秋山君、秋山君、秋山君 まず、Electro-luminescence光を見る。



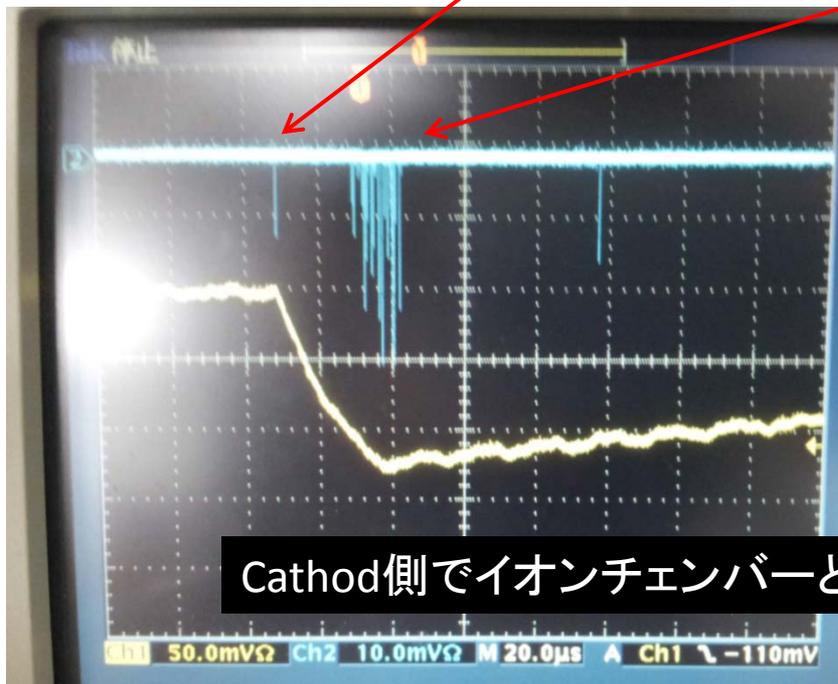
# ランタンのThからの $\alpha$ 線

Arガスでテスト

シンチレーション光

パルス幅=アルファ線トラックの傾き

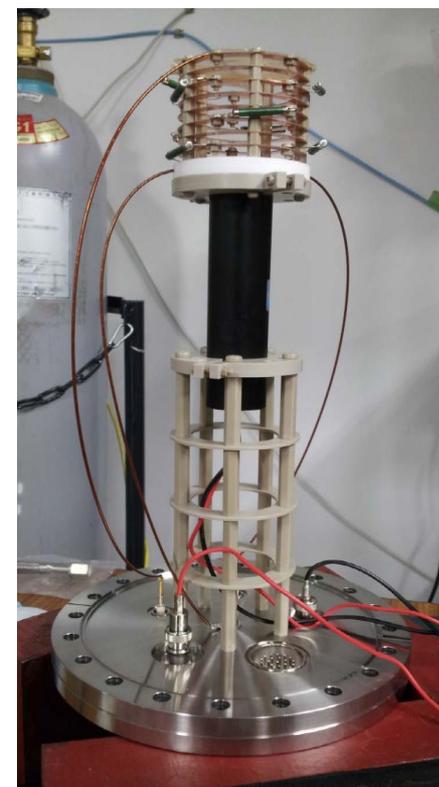
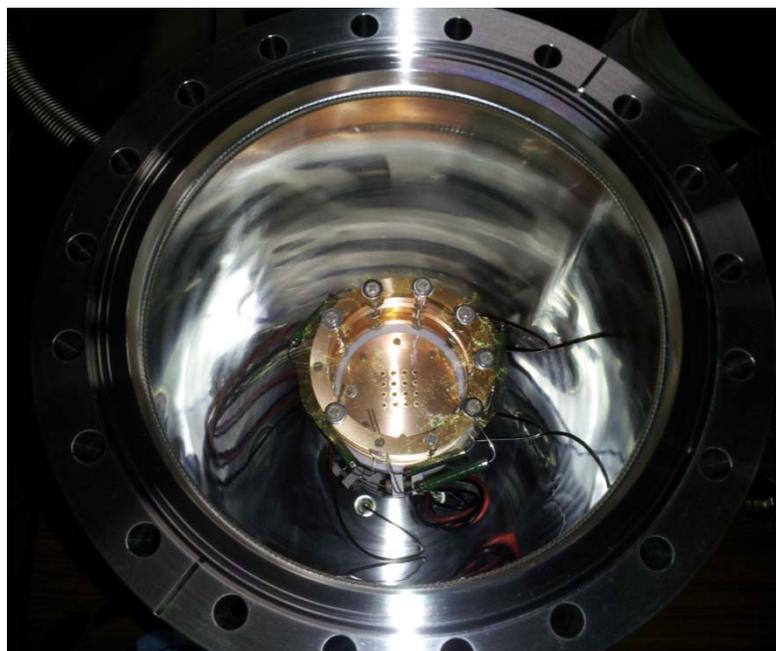
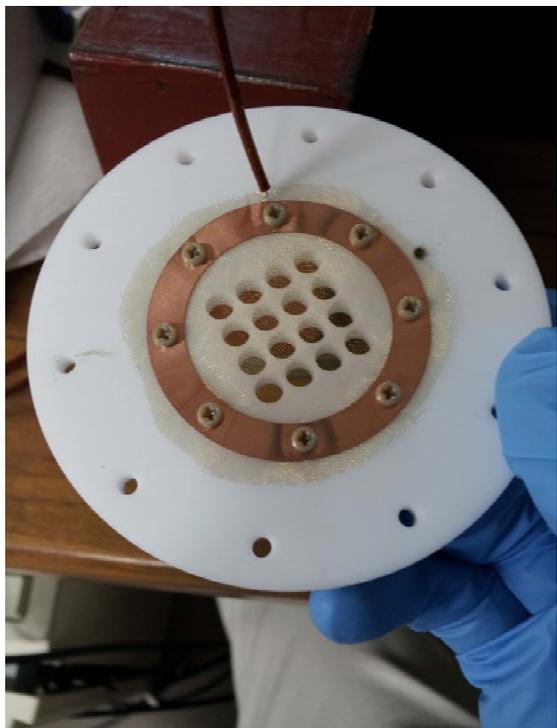
EL光



Cathod側でイオンチェンバーとして読み出し(プリアンプ出力)

1メモリ20μs

開発実情(2) by 秋山君、秋山君、秋山君  
ELCCプロトタイプをPMTで読みだす。





Arガス  
ランタン Thからのアルファ線

ランタンをELCC アノードプレートに乗っている。  
増幅の時間幅とドリフトの時間幅が同じくらいなので、三角形の信号

# 年次計画

## 今年度

- Xe 1気圧, UVPMTでELCC conceptを実証 (X線、 $\gamma$ 線、 $\alpha$ 線でエネルギー分解能評価)
- UV sensitiveなMPPCでelectro-luminescenceの検出
- MPPCの開発 (w/ 浜ホト)
- MPPC用の読み出し回路の検討
- 5気圧~10気圧のシステム製作
- 科研費を通す。

## 来年度

- 5気圧~10気圧、MPPCでトラッキングとエネルギー測定
- 読み出し回路の開発
- 全体のコンポーネントの詳細をつめる。

## 再来年度以降

- まず有効体積 1kgスケール (10気圧  $\phi$ 20cmx50cmくらい)を実現。

原理検証	チェンバー2を使って1気圧で	UVPMTで60keV X線ないし $\alpha$ 線でエネルギー分解能を評価。 UVMAPMTでトラッキング
ガス	純化系統	純度モニター フィルター
	回収系統 N2	液体窒素で回収 シンチレーション光、EL光を減らしてしまう？ quencher(放電)として有効か WLSとして有効か diffusionを抑える。
ELCC	電場設計 機械設計 材質選定 評価	
電極	電場設計 機械設計 材質選定 評価	
高圧電源	コッククロフト・ウオルトンを容器内に設置？	
光センサー	配置	主シンチレーション光用のセンサーは必要か？
	MPPC キャリブレーション 圧力対応	テストベンチを作って、UVに対するPDEを評価
回路	波形処理	容器内に配置？ カスタムASIC？
DAQ		
圧力容器	法規対応 機械設計 フィードスルー ガスケット	
シミュレーション	信号	電子のドリフト 増幅 信号読み出し
	物理	0nbb 2nbb バックグラウンド
プロトタイプ	チェンバー1 チェンバー2 チェンバー3	イオンチェンバー ICF 1気圧 10気圧？
遮蔽		

# ところで

CdTeで半導体の信号を見るうちに、思いついたアイデア一つ。

科研費挑戦的萌芽『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—』

ガンマ線一個一個に対して、その到来方向を決定することができれば、通常のガンマ線カメラよりも高い感度で微弱なガンマ線源の特定等に応用できる。ガンマ線望遠鏡として、気球や衛星に搭載すれば、微弱なガンマ線源天体の観測に用いることもできる。MeV領域でのガンマ線での天体観測は、他のエネルギー(波長)領域に比べて困難が多く、新しい検出器の開発が望まれている。

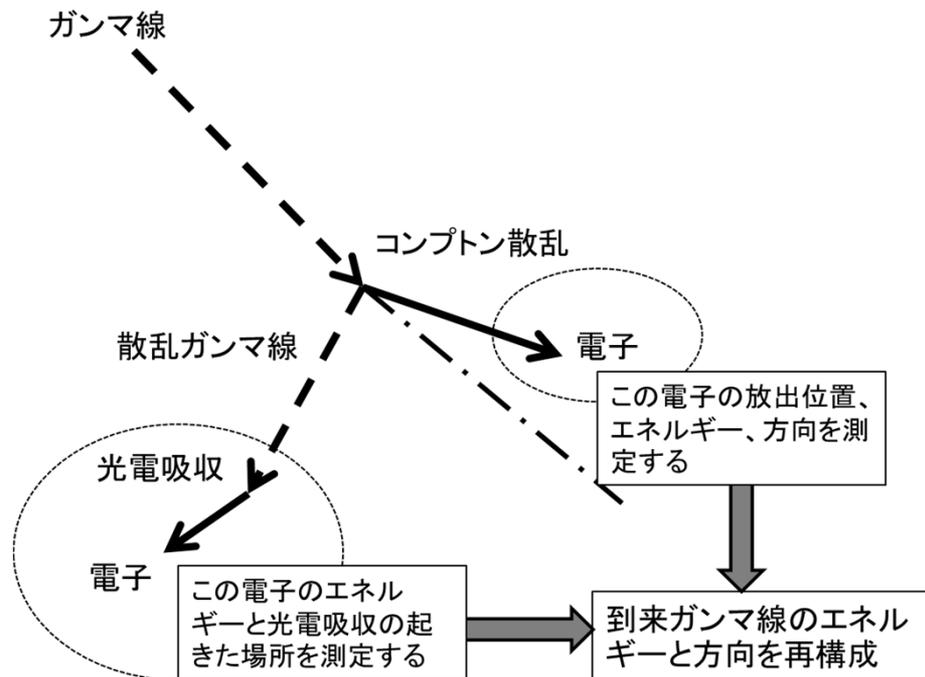


図1 ガンマ線のエネルギーと方向の測定の原理

# 単一素子の厚みの中で、飛跡を3次元的に再構成することを目指す

シリコンマイクロストリップ検出器は、数十 $\mu\text{m}$ のストリップ構造により荷電粒子の通った位置を測定。厚み(300 $\mu\text{m}$ )の中で飛跡が横切った場所の重心を測定する。多重に重ねれば、飛跡の方向を測定することができるが、MeV領域の電子では、最初の検出器の300 $\mu\text{m}$ の厚みの中で多重散乱を起こしてしまい(例えば3MeVで $10^\circ$ 程度)、放出角度に対する精度は悪くなってしまう。

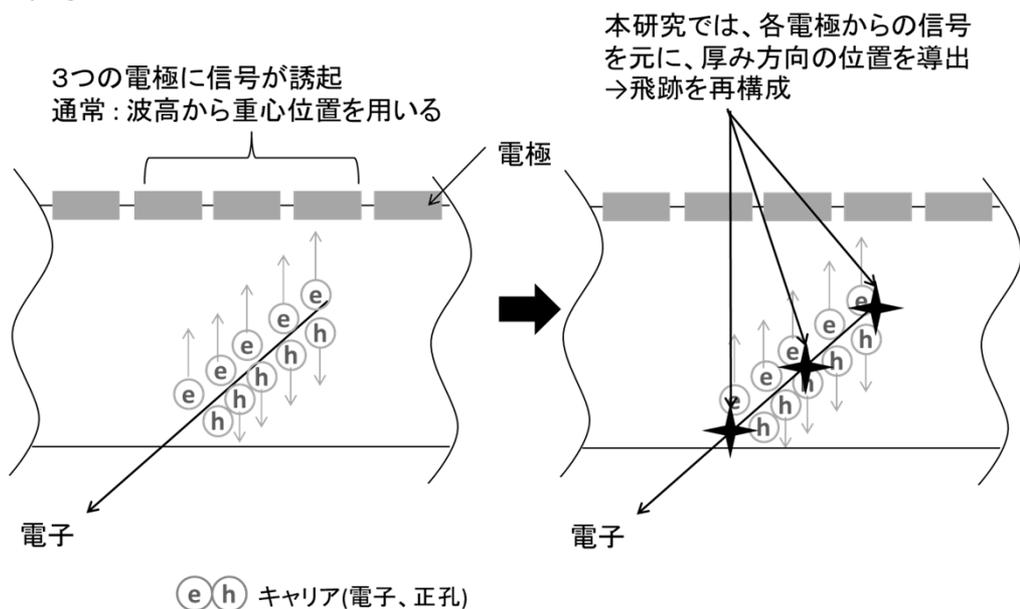


図3 シリコン素子内での飛跡再構成の概念

# キセノン比例シンチレーションTPC プロジェクトへの参加の仕方

大型実験(ATLAS, T2K)では、実験が走り始めるとハードウェアに触れる機会が減ってしまう。

→ 外国ではハードに触ったことのない使えない博士を量産  
修士の間、R&D段階にあるプロジェクトでハードウェアの腕を磨く。(もしかすると、プロジェクトとして花開くかも)



博士論文は、大きな実験で書く

というのは、悪くない、と、正直思う。

または、これから1,2年でこのプロジェクトの成功への道筋が見えてきたら、それで博士論文を書く、という可能性もあると、思う。

これから1,2年はプロジェクトを軌道に乗せる正念場なので、人は多いほどいい。



**Back up**

# Next generation $0\nu\beta\beta$ experiments

toward  $\sim 0.01\text{eV}$  on  $\langle m_\nu \rangle$

- $^{76}\text{Ge}$  diode
  - Mojarana, GERDA
    - more mass several x 100kg
    - special electrode for higher resolution and background suppression
- Bolometers
  - CUORE ( $^{130}\text{Te}$ )
  - Edelweiss ( $^{76}\text{Ge}$ )
  - MOON ( $^{100}\text{Mo}$ )
- Scintillators
  - KamLAND-ZEN ( $^{136}\text{Xe}$ )
  - CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )
  - XMASS ( $^{136}\text{Xe}$ )
- Ionization (TPC)
  - EXO ( $^{136}\text{Xe}$ )
  - NeXT ( $^{136}\text{Xe}$ )
- Tracking detectors
  - MOON ( $^{100}\text{Mo}$ )
  - DCBA ( $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ )
  - SuperNEMO ( $^{82}\text{Se}$ )