

# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 混合行列

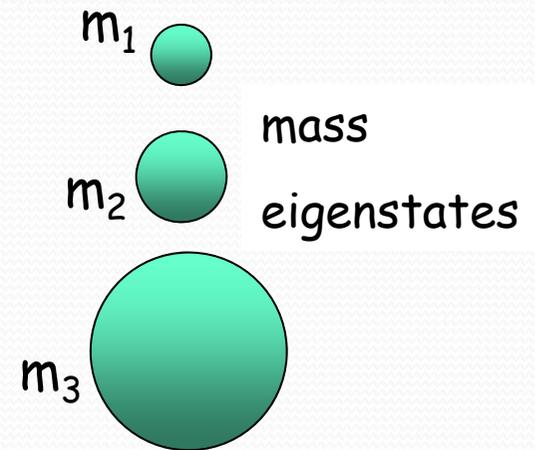
Weak eigenstates

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

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



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

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

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

+  $\delta$  (+2 Majorana phase)

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

# 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

0.15 (!?)

クォーク

レプトン

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

$\delta \sim 60^\circ$

$$U_{MNS} \approx \begin{pmatrix} 0.8 & 0.55 & < 0.21 \\ -0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$\delta = ?$

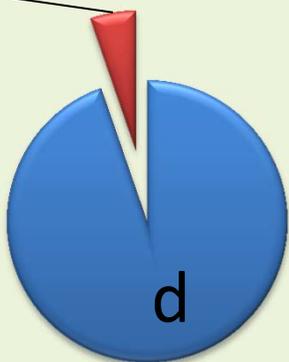
Assuming some symmetry among quarks and leptons, some models predict

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

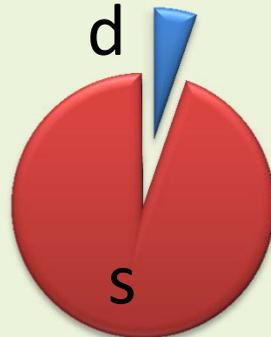
$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0.816 & 0.577 & 0 \\ -0.408 & 0.577 & 0.707 \\ 0.408 & -0.577 & 0.707 \end{pmatrix}$$

# 絵にしてみると

s 第1世代クォーク



第2世代クォーク



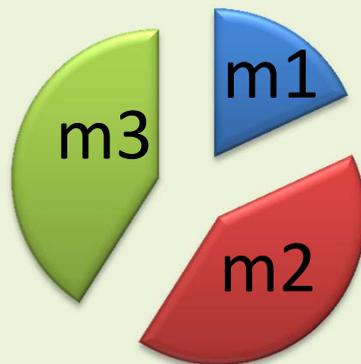
第3世代クォーク



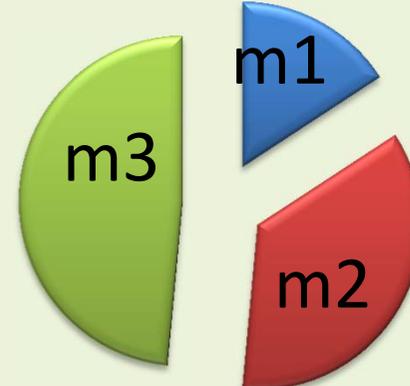
m3 電子ニュートリノ



ミューニュートリノ



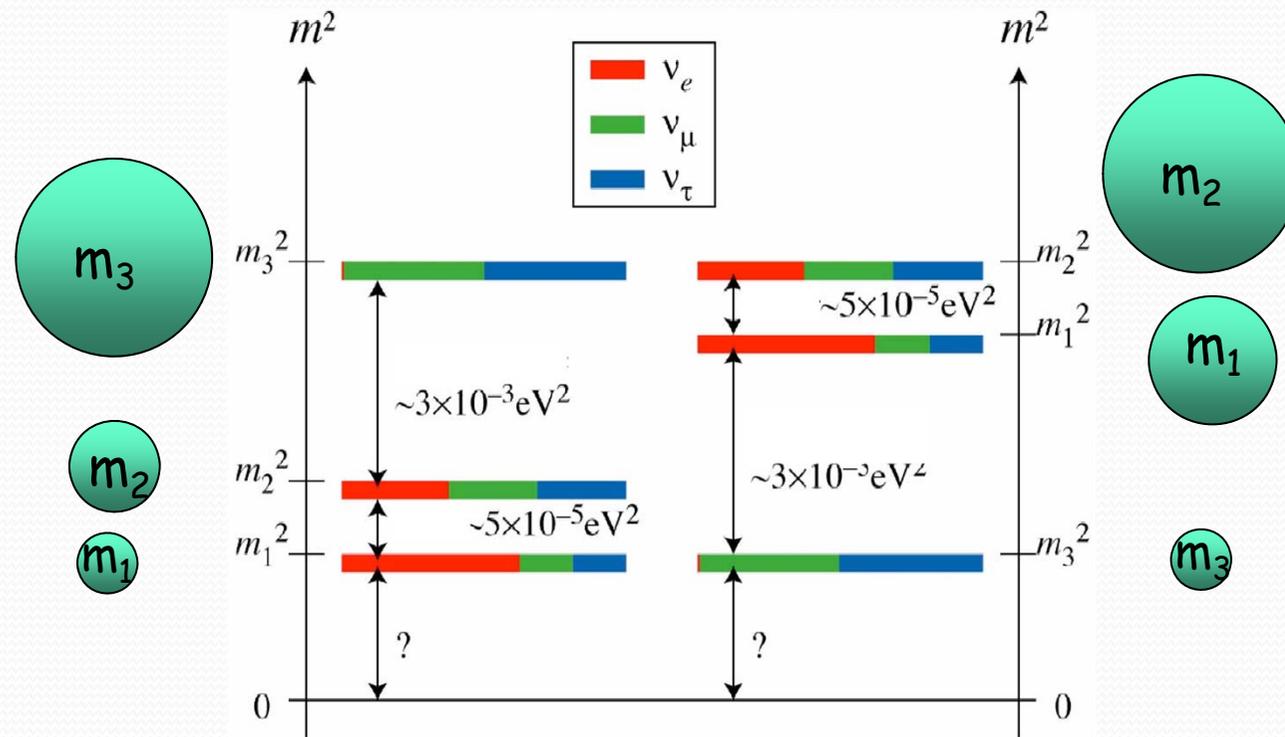
タウニュートリノ



# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# (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。

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

$\delta \sim 60^\circ$

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

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

**$\delta=?$**

T2K??? Hyper-K???

# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

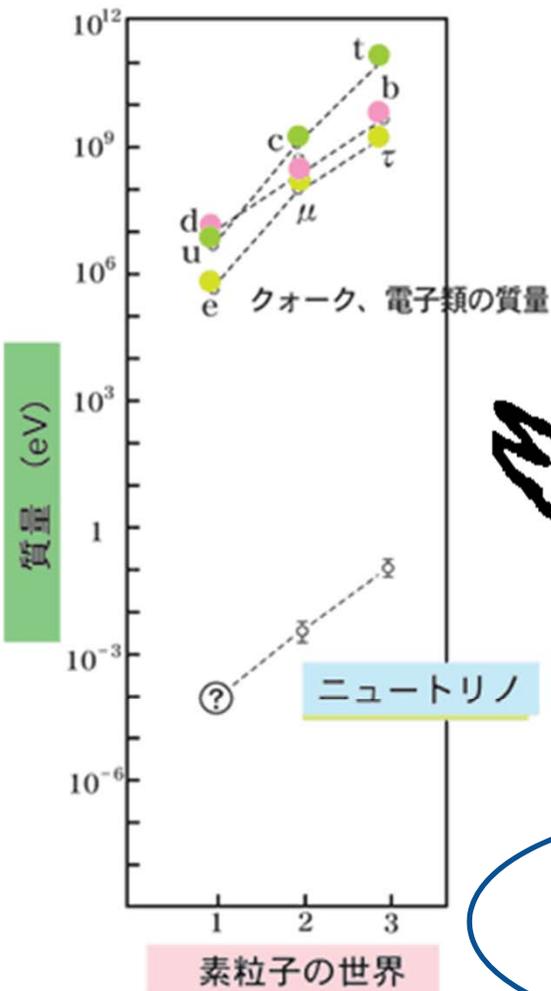
# 質量の絶対値

- 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 eV,  $\nu_\mu$  : 0.19 MeV,  $\nu_\tau$  : 18.2 MeV
  - 宇宙論的観測
    - $m_{\nu_e} + m_{\nu_\mu} + m_{\nu_\tau}$  :  $< \sim 0.5$  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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

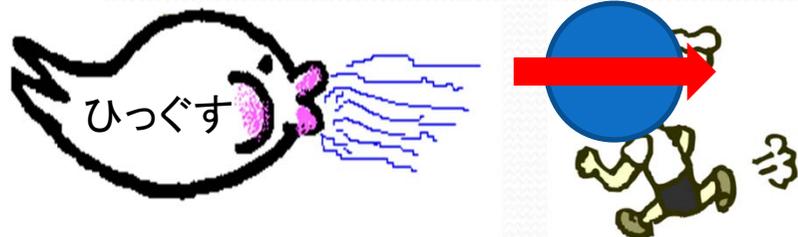
# クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？



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

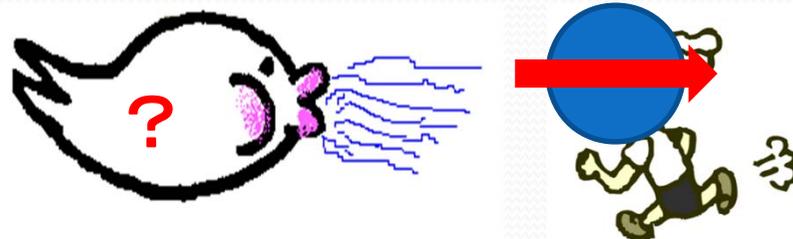
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (クォークと同じように)CPは破れているのか?
- 本当に3種類だけか?
- 質量の絶対値
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか?そもそも、物質の質量の起源とは?
- マヨラナ粒子?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 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、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

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

$m \ll M$  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。

$$m^2/M \simeq 10^{-2}$$

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
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

# 物質優勢宇宙の起源？

## レプトジェネシス(質問、禁止)

- 宇宙生成時

クォーク数 : 反クォーク数 = 10000000001 : 10000000000  
この差が標準理論のCPの破れでは説明できない。

### レプトジェネシス

M. Fukugita and T. Yanagida, PLB174, 45;

W. Buchmüller, P. Di Bari, and M. Plümacher, Annals. Phys.315,305; G. F. Giudice *et al.*, NPB685,89; . . .

基本的なアイデアは

- $N$  の CP を破るような崩壊が平衡からはずれたときに、 $B - L$  数が生成される ( $L$  を作って  $B$  を作らない)
- 標準模型では、 $100\text{GeV} \leq T \leq 10^{12}\text{GeV}$  のときに、スファレロン過程 ( $B$  と  $L$  を破って  $B - L$  を保存する) が十分速い過程になる。
- $N$  の崩壊で作られた  $B - L$  がスファレロンを通して  $B$  に化ける

進藤さん(DESY)のトラペを拝借

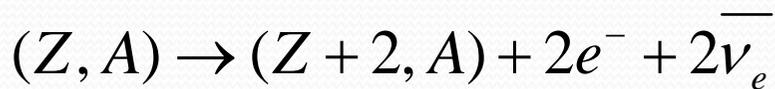
# ニュートリノを巡る未解決の問題群

- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (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?
- 質量の絶対値
- 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?
- 物質優勢宇宙の起源?

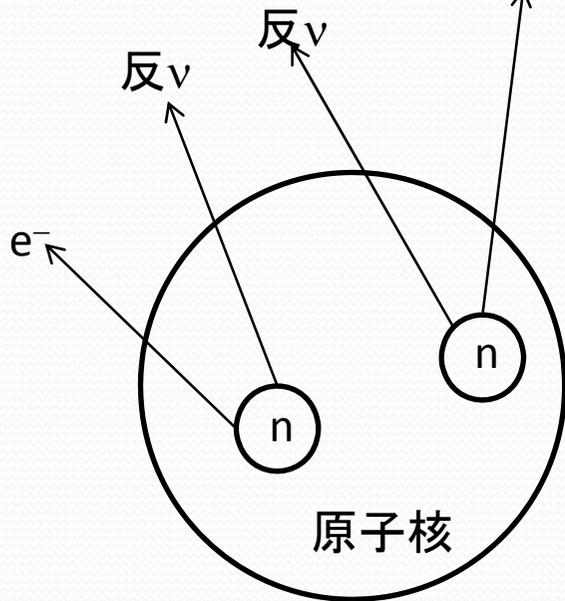
ニュートリノ  
振動

ダブルベータ  
崩壊

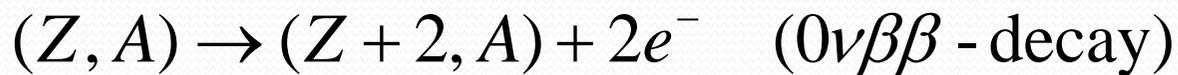
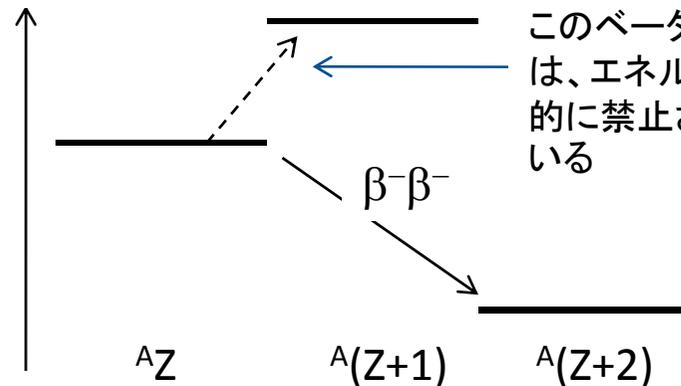
# $0\nu\beta\beta$ 崩壊



( $2\nu\beta\beta$  - decay)  
 $2\nu$ を伴う二重ベータ崩壊



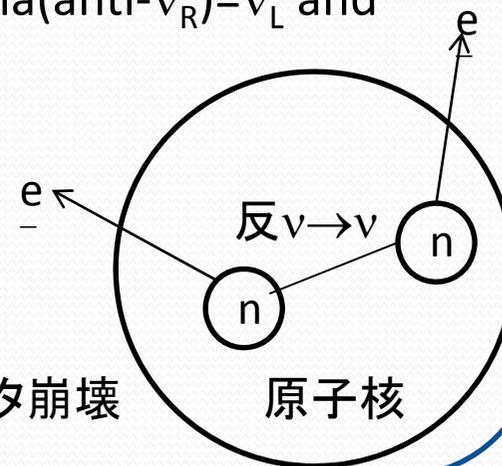
Energy Level



violating lepton number conservation

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

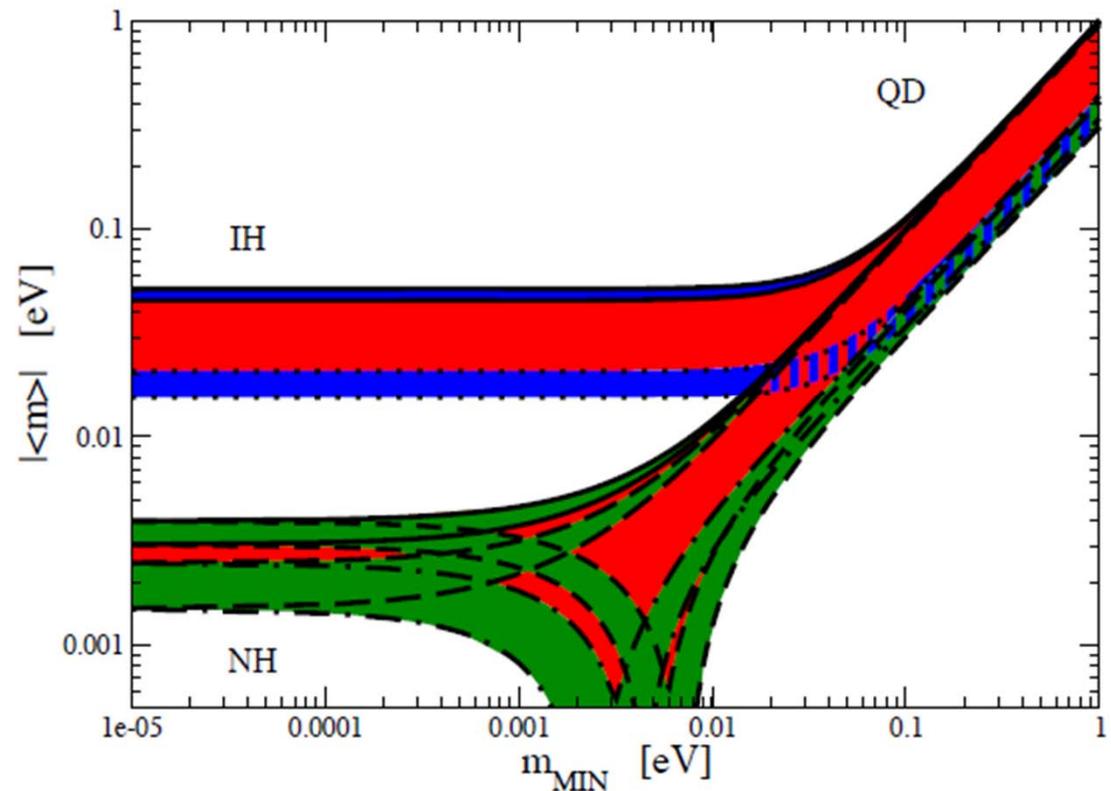
$\nu$ を伴わない二重ベータ崩壊



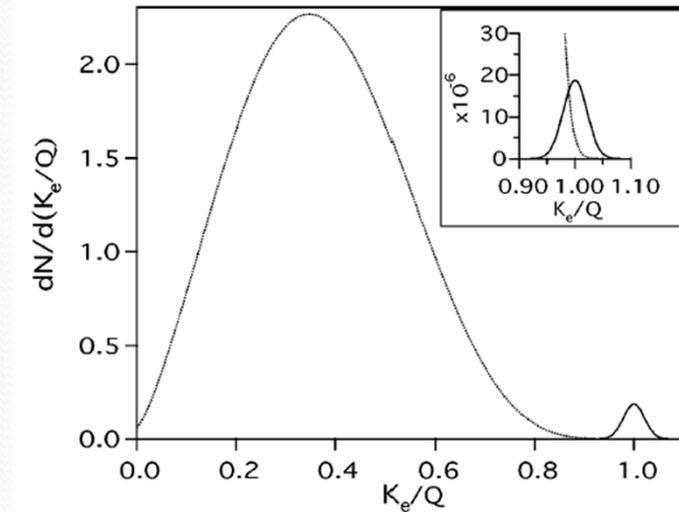
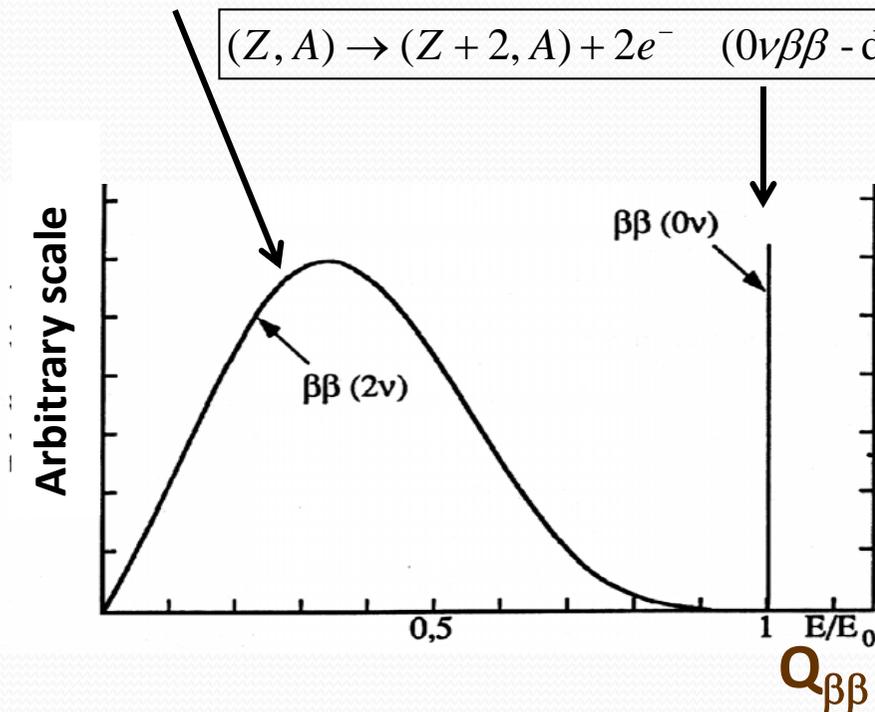
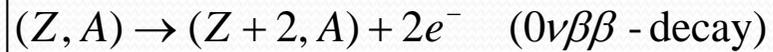
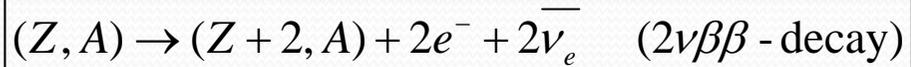
# ダブルベータ崩壊で測定される質量とニュートリノ振動で測られる質量の関係

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

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



# $0\nu\beta\beta$ 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
  - 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

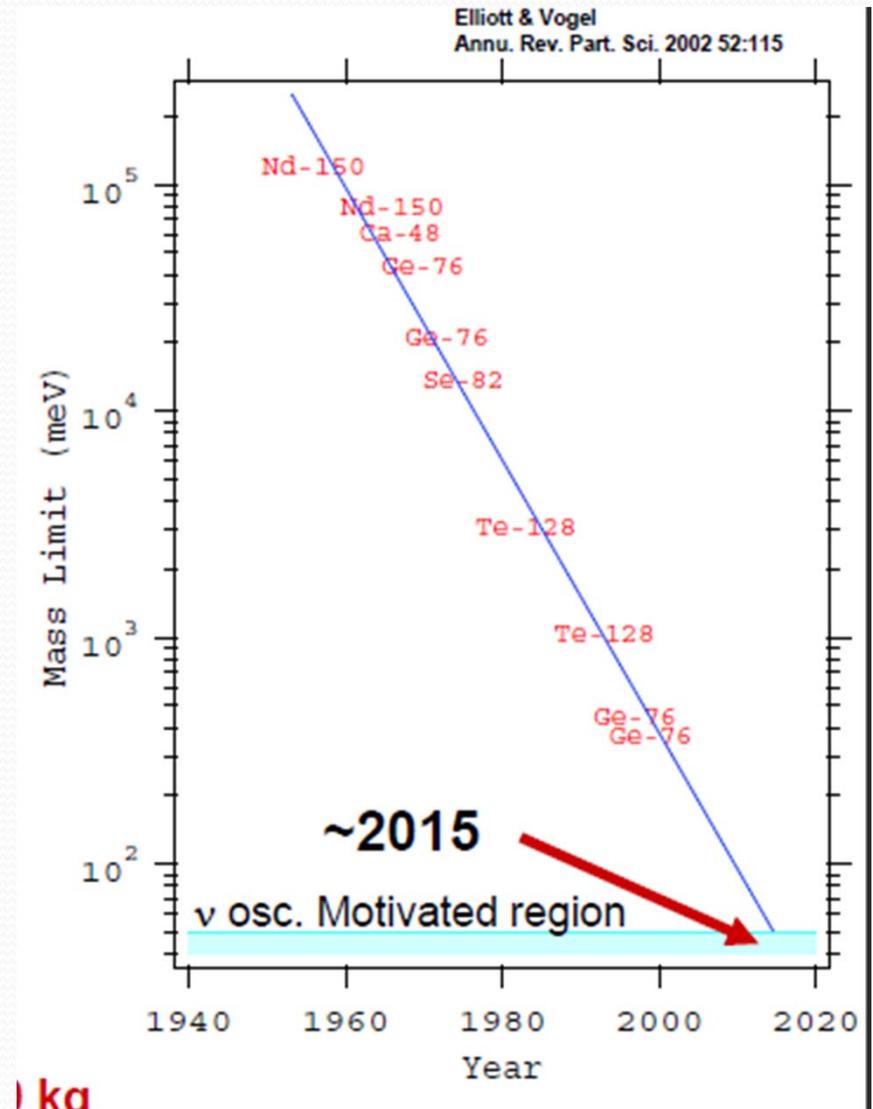
total statistics 71.7kg X y

controversial result

claim for evidence v.s. refute  
by collaborators.

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

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



# 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 ( $^{82}\text{Se}$ )

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

# CdTe検出器とは

テルル化カドミウム(CdTe)を半導体素子として用いた検出器  
CdTeの性質

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	バンド ギャップ (eV)	電子易動度 (cm <sup>2</sup> /V/s)	ホール易動度 (cm <sup>2</sup> /V/s)	電子寿命 (s)	ホール寿命 (s)
Ge	5.33	0.67	3800	1820	>10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-3</sup>
Si	2.33	1.11	1900	500	>10 <sup>-3</sup>	2x10 <sup>-3</sup>
<u>CdTe</u>	<u>5.85</u>	<u>1.47</u>	<u>1100</u>	<u>50</u>	<u>3x10<sup>-6</sup></u>	<u>2x10<sup>-6</sup></u>

## CdTe検出器の特徴

電極の接合にオーミック型とショットキー型がある。

長所

- ガンマ線吸収率が高い。(原子番号と密度が高いため)
- 常温で使うことができる。(バンドギャップが大きいため)

短所

- 半導体検出器としてはエネルギー分解能が低い。  
(ホールの易動度が低いため)

# 何故CdTe?

	Q値	同位体存在比
$^{130}\text{Te}$	2.5 MeV	34%
$^{116}\text{Cd}$	2.8 MeV	7.5%
$^{106}\text{Cd}(\beta^+\text{EC})$	1.7MeV	1.5%

Q (MeV) Abund.(%)

$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.271	0.187
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2.040	7.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.995	9.2
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3.350	2.8
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	9.6
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2.013	11.8
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.802	7.5
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.533	34.5
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.479	8.9
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.367	5.6

しかし、ダブルベータ崩壊探索するには、今の大きさ(~2mm厚)、エネルギー分解能(ピークがコンプトンと区別つかない)ではいかんともしがたい。

# 何故、大きくできないのか？ 何故、エネルギー分解能が悪いのか？ -ホールトラッピング-

ドリフト中に多くのホールが捕獲されてしまう。



信号の大きさが、生成された電子・ホール対の数だけでなく、生成の場所にも依存してしまう。

ショットキー接合を用いたダイオードタイプの検出器が開発されている。

厚さ ~0.5mm

積層して、 $^{60}\text{Co}$ (1.33MeV)に対して0.45%の分解能が得られている！

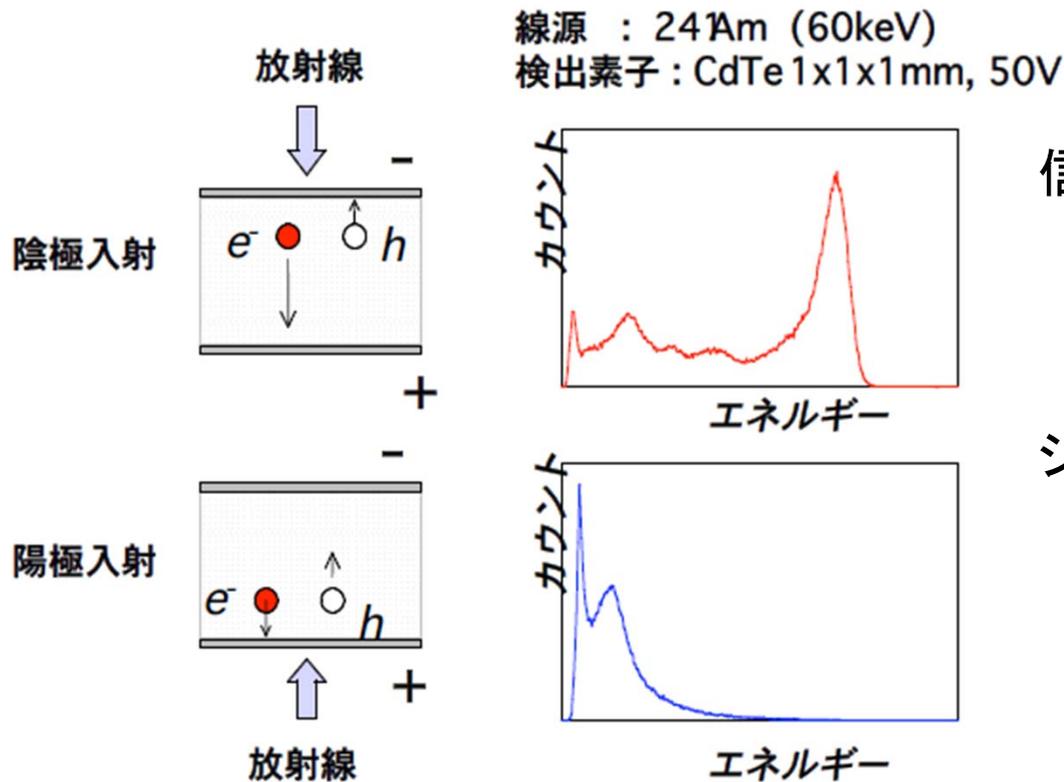
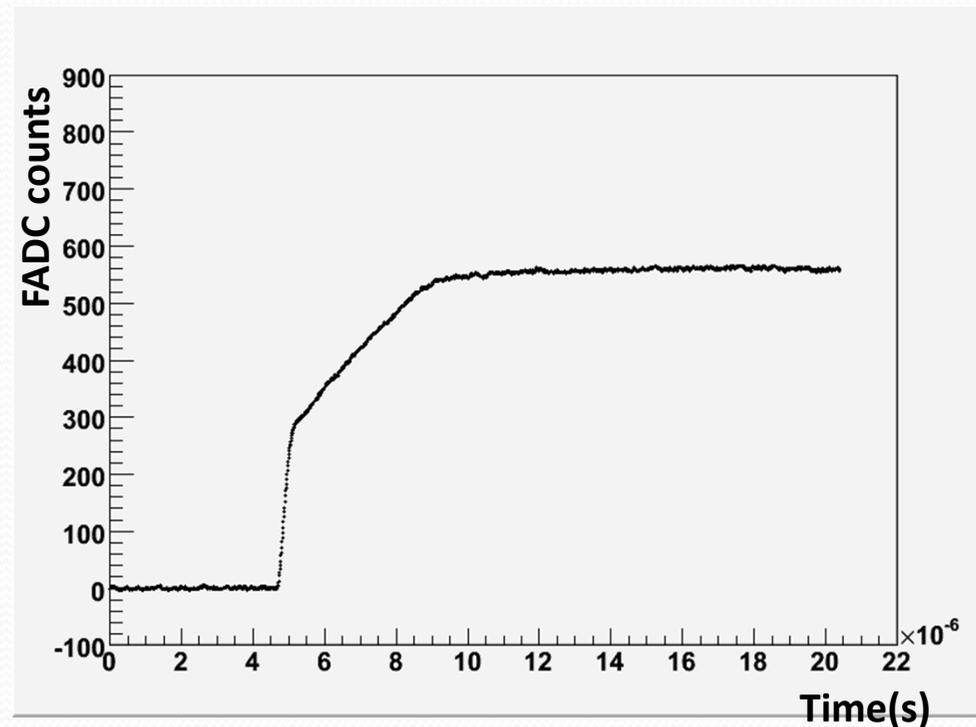


図2 検出放射線の入射面によるスペクトルの違い

大野良一 放射線vol.30, No.1 (2004)より

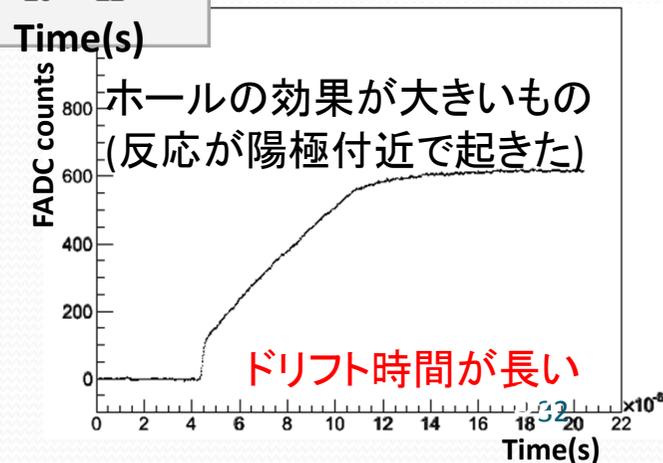
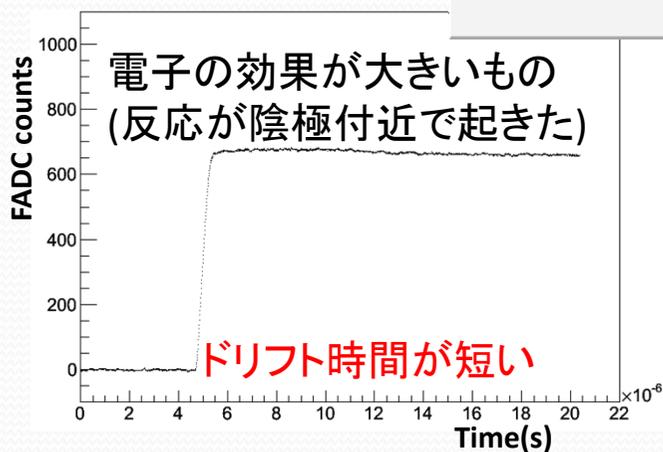
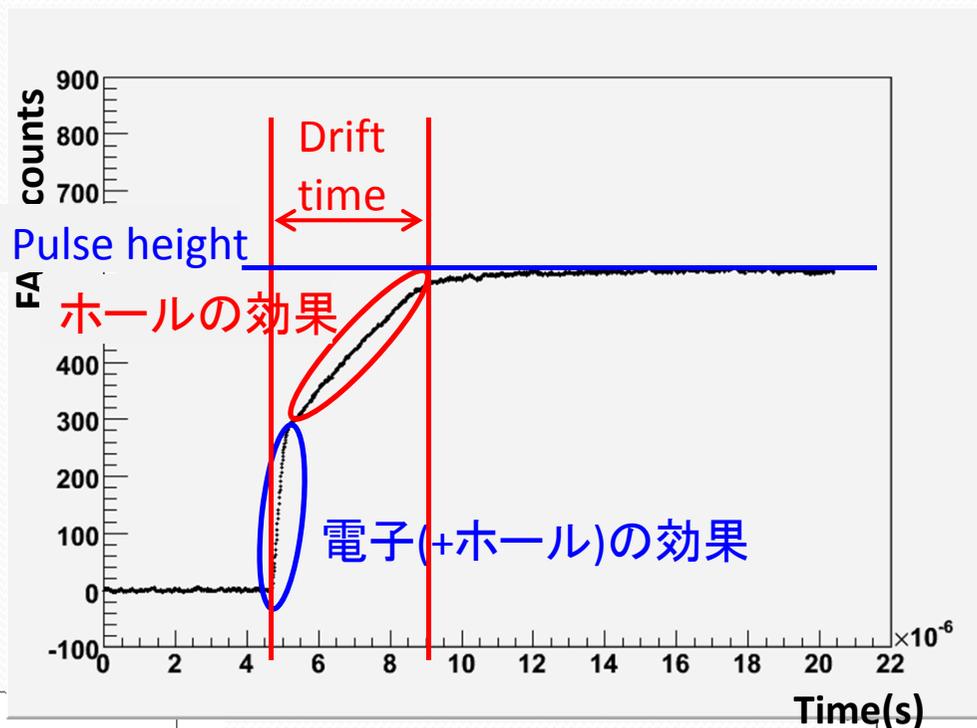
0.5mmを積層するのは大変なので、オーミックタイプで  
波形情報を使って何とかできないか？

5mm角素子を試  
作。プリアンプ出力  
波形  
( $^{137}\text{Cs}$ 線源)



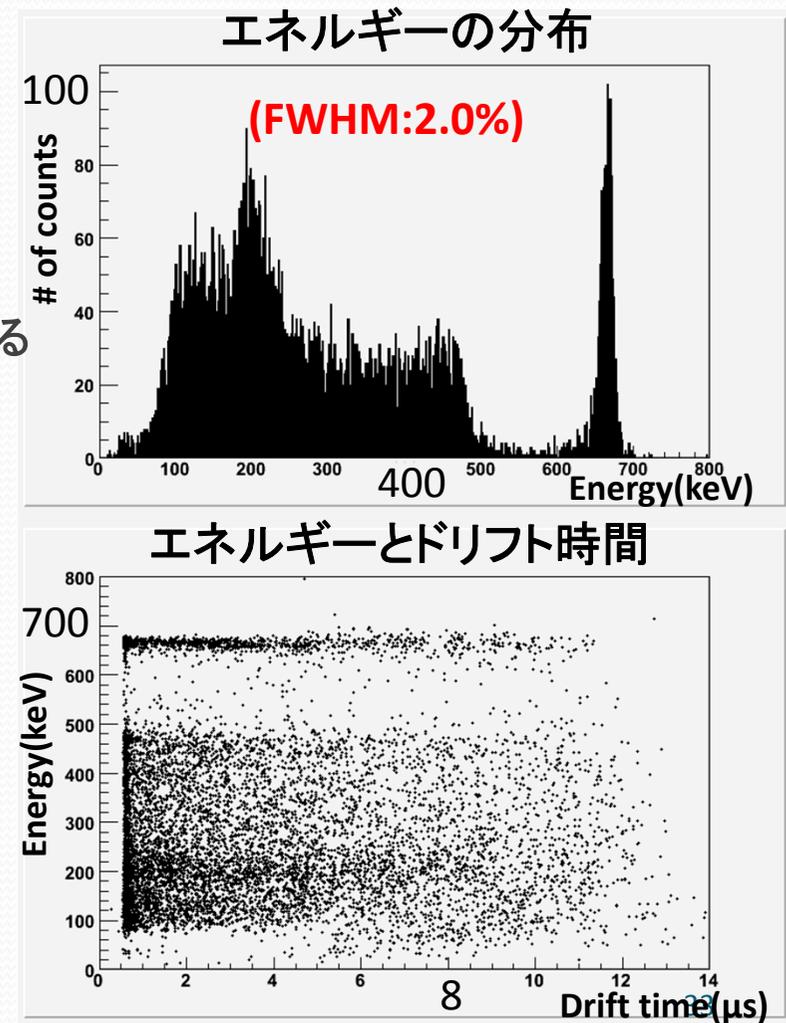
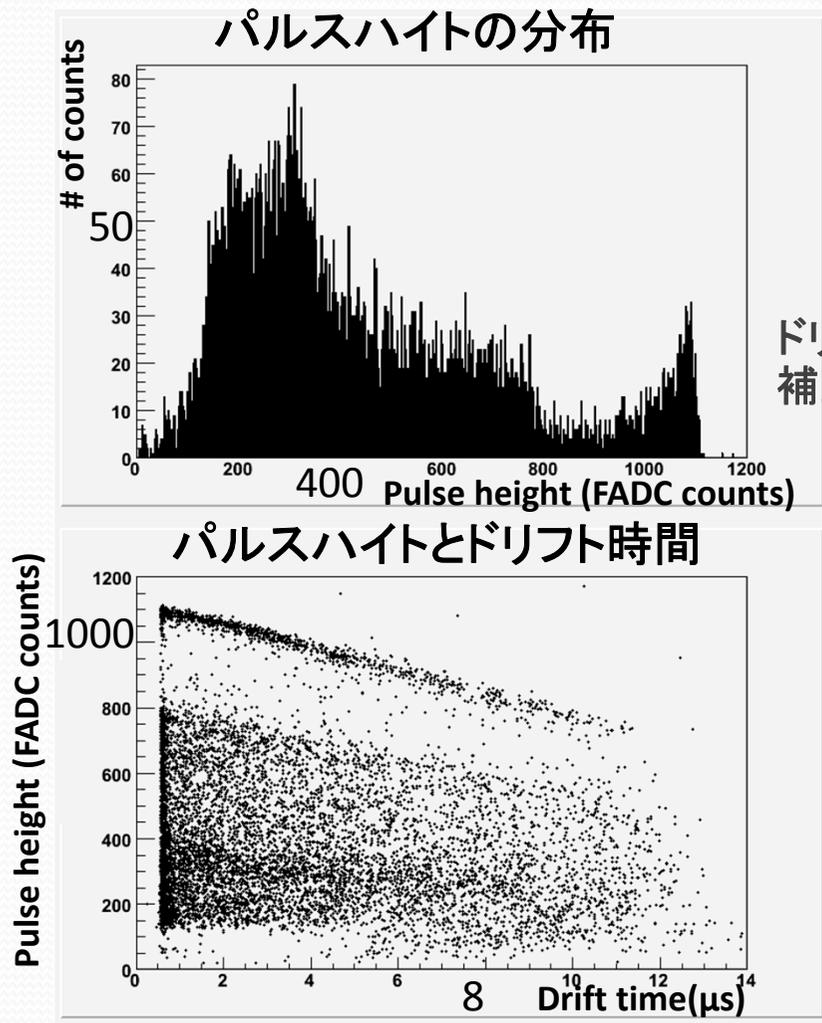
# 0.5mmを積層するのは大変なので、オーミックタイプで波形情報を使って何とかできないか？

5mm角素子を試作。プリアンプ出力波形  
( $^{137}\text{Cs}$ 線源)



# 本河大先輩の研究成果

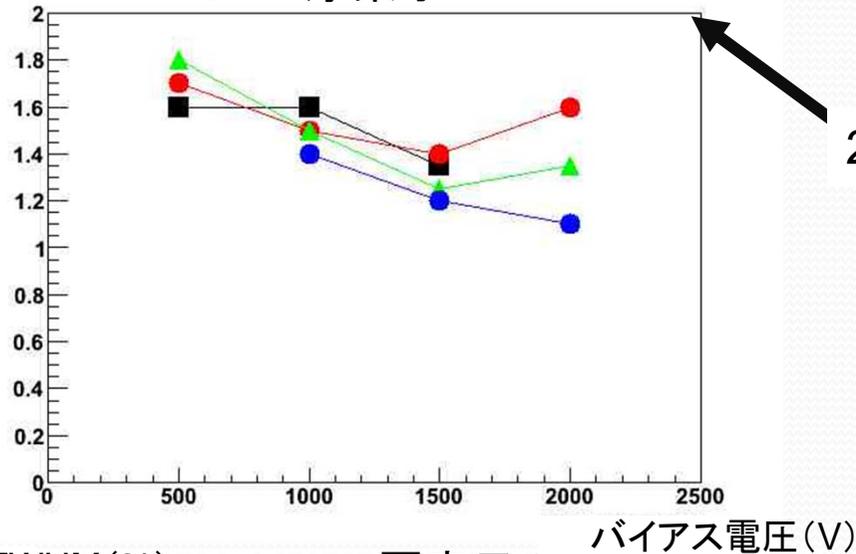
## ドリフト時間からパルス高さを補正 $^{137}\text{Cs}$



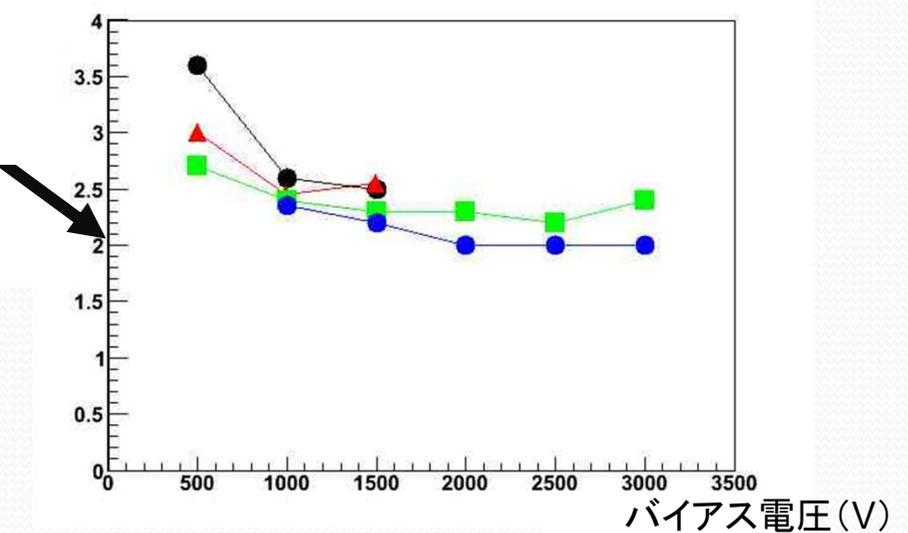
# 平木先輩の研究成果

## いくつかのサンプルについて性能評価 ( $^{60}\text{Co}$ 1.33 MeV)

FWHM(%) 5mm厚素子A

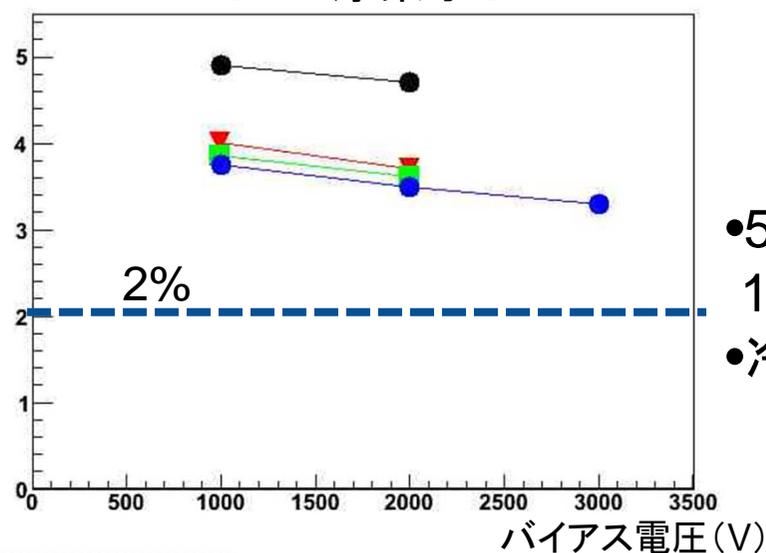


FWHM(%) 5mm厚素子B



2%

FWHM(%) 10mm厚素子C



黒:20°C 赤:10°C  
緑:0°C 青:-10°C

- 5mm厚素子Aのエネルギー分解能が最も良く、10mm厚素子のエネルギー分解能は悪い
- 冷却して高電圧を印加すると分解能は良くなる

# エネルギー分解能の要因

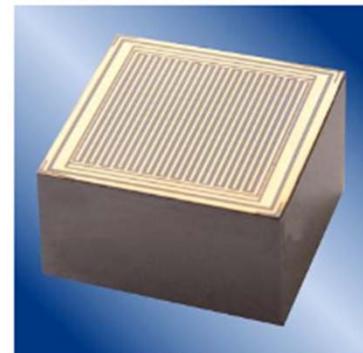
−10°C、バイアス電圧2000Vで1332.5keV光電ピークを調べる

	5mm厚素子A	5mm厚素子B	10mm厚素子
実データのエネルギー分解能	14.9keV	26.8keV	46.8keV
生成キャリア数の不定性	2.2keV	2.2keV	2.2keV
ノイズの寄与	8.9keV	12.0keV	15.8keV
その他	10.3keV	23.7keV	44.0keV

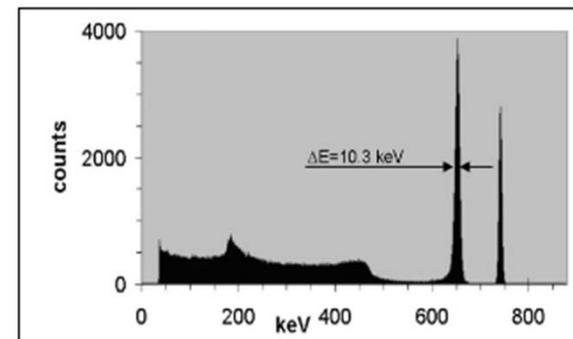
- どの素子もその他の項の寄与が大きいがCdTe結晶の非一様性に起因する成分が大きいと考えられる
- 5mm厚素子Aと素子Bではホールの移動度が素子Bの方が低いためホールが捕獲されやすく捕獲されるホールの数の不定性の寄与が大きい
- 10mm厚素子では結晶が大きいため非一様性が大きく、エネルギー分解能が悪いと考えられる

# 5/22 CdTeメーカーと打ち合わせ

- 結晶の開発は会社の方向性と合わない。。。。インフルで弱っていたので、結構、落ち込んだ。
- CZTを勧められた。
  - Cdの10%程度をZnで置き換えた物。
  - リーク電流が小さい。
  - 大型で一様な結晶が得られにくい？
  - 特殊形状の電極でelectronからの信号のみを取り出し、高い分解能を得ている実績がある。
  - COBRAというdouble beta decay探索projectがある。
  - とりあえず、外国の会社から購入して試してみるか？



Coplanar grid detector based on  $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$  CdZnTe crystal



Spectrum Cs-137 for coplanar grid detector based on  $15 \times 15 \times 10 \text{ mm}^3$  CdZnTe crystal  
CZT2-4-4 ( $\Delta E=1.59\%$ ), p/c =13, p/valley=136, registration efficiency = 8.3%.

# 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。

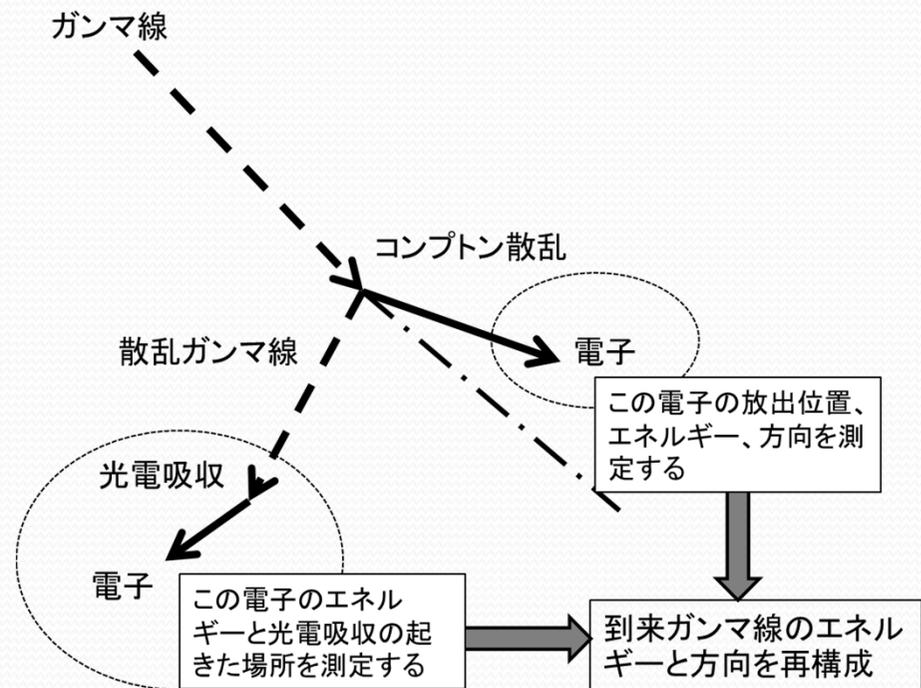


図1 ガンマ線のエネルギーと方向の測定の原理

# 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ふ。

将来的には、5~10mm厚のリチウムドリフト型シリコン(Si(Li))検出器にストリップ電極を配置して、飛跡の3次元再構成をすることを目指す。

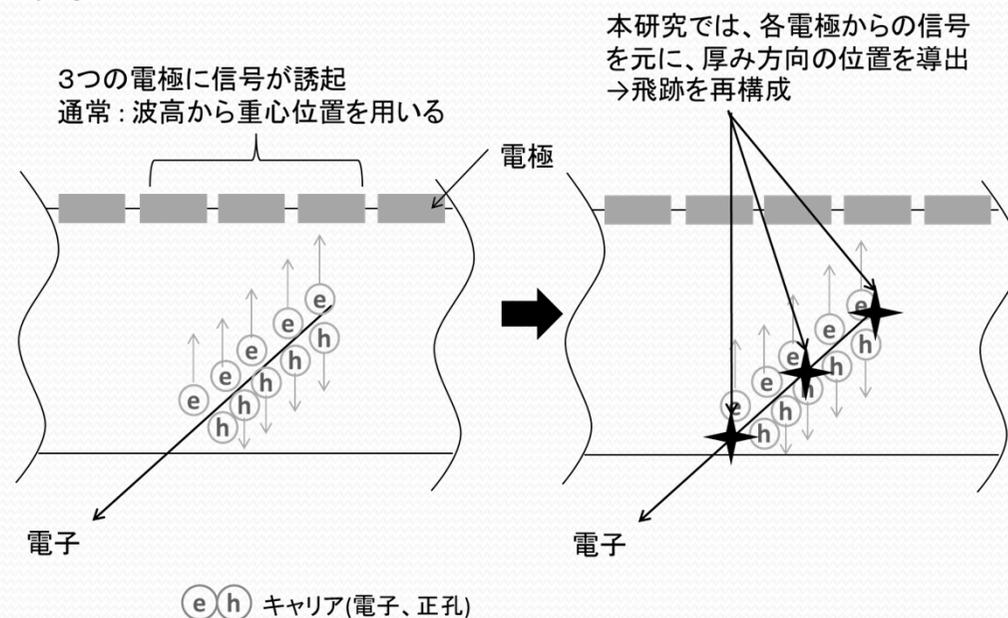


図3 シリコン素子内での飛跡再構成の概念

# CdTe(CZT? Siガンマ線カメラ?) 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。。。。)