

# 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

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

$\delta \sim 60^\circ$

$$\theta_{12} = 34^\circ \pm 1^\circ$$

$$\theta_{23} = 45^\circ \pm 18^\circ \quad (90\% \text{CL})$$

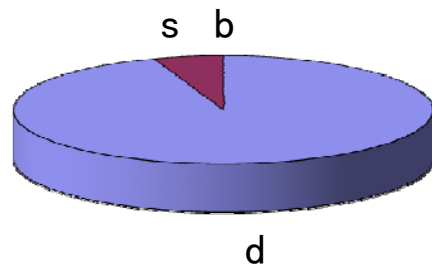
$$\theta_{13} \leq 12^\circ \quad (90\% \text{CL})$$

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

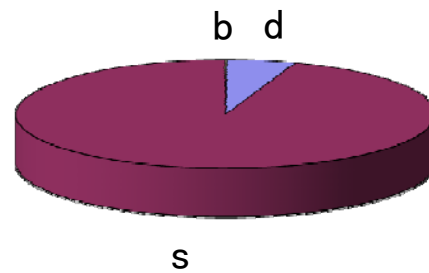
$\delta = ?$

# 絵にしてみると

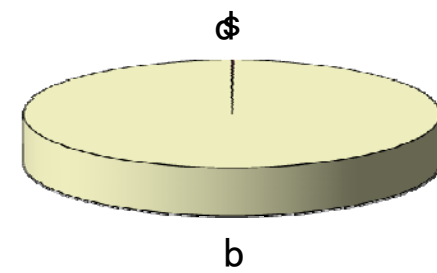
第1世代クオーク



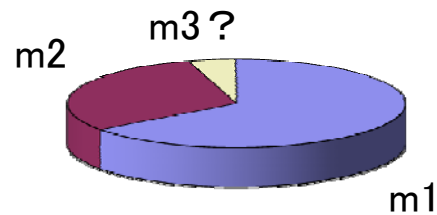
第2世代クオーク



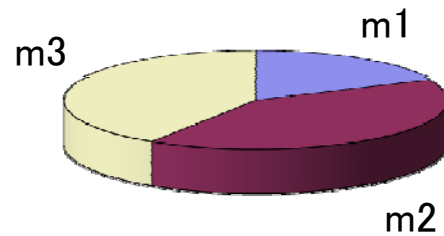
第3世代クオーク



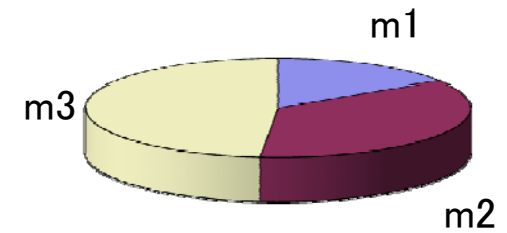
電子ニュートリノ



ミューニュートリノ



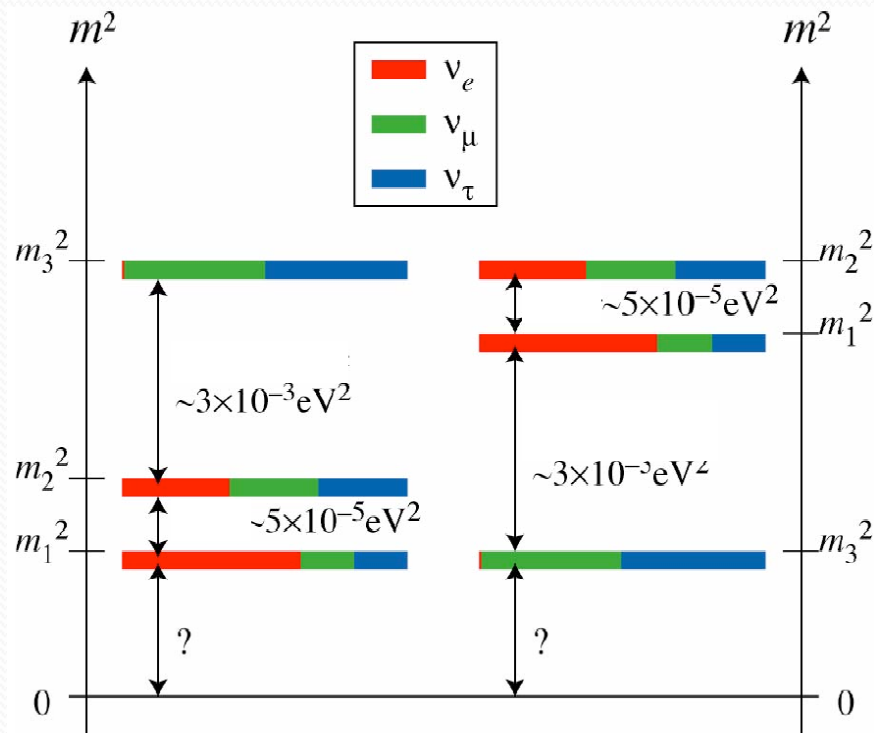
タウニュートリノ



# 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。

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

$$\delta \sim 60^\circ$$

$$\theta_{12} = 34^\circ \pm 1^\circ$$

$$\theta_{23} = 45^\circ \pm 18^\circ \quad (90\% \text{CL})$$

$$\theta_{13} \leq 12^\circ \quad (90\% \text{CL})$$

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

$$\delta = ?$$



# 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?

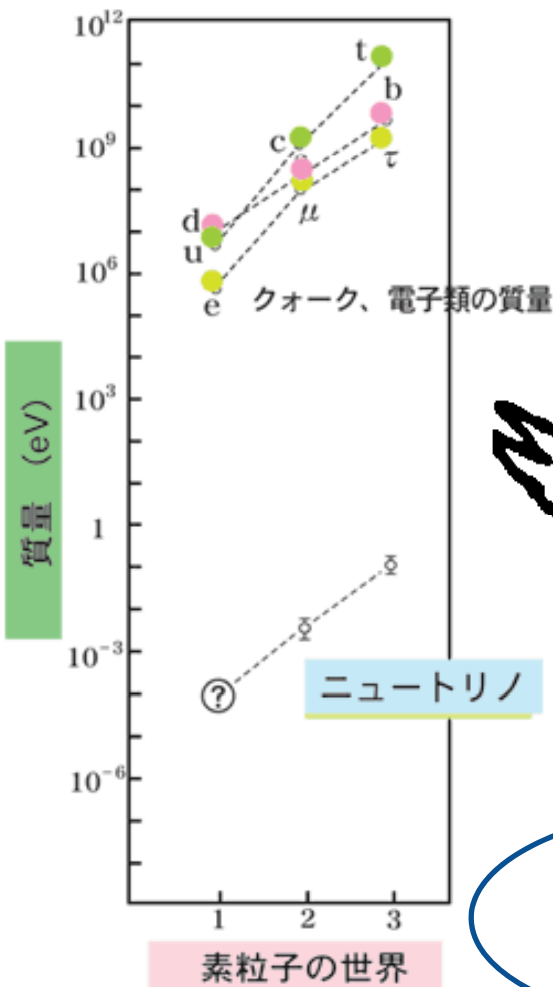
# 質量の絶対値

- 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。

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

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

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、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。

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

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 = 100000000000 : 100000000001

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

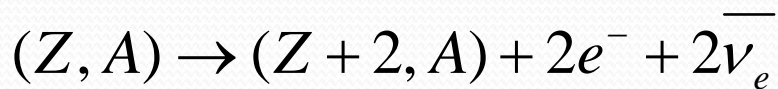
# ニュートリノを巡る未解決の問題群

- 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?

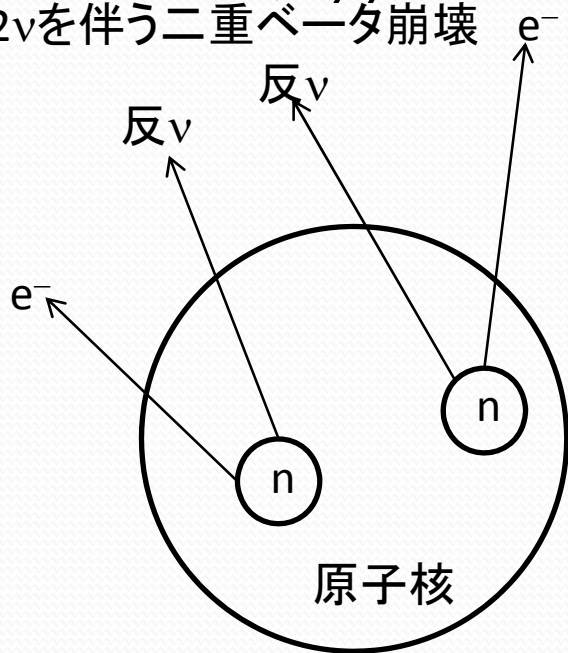
ニュートリノ  
振動

ダブルベータ  
崩壊

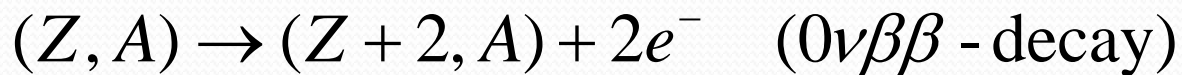
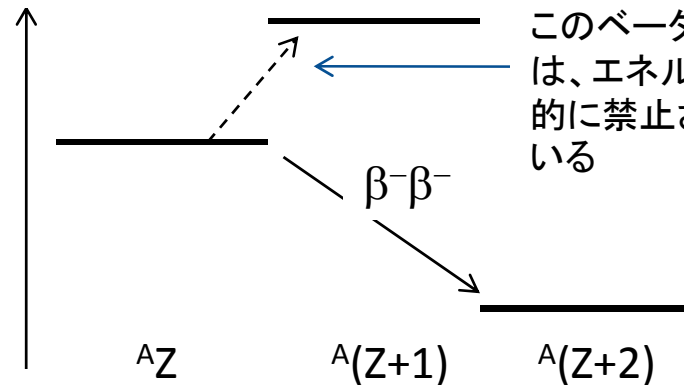
# $0\nu\beta\beta$ 崩壊



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



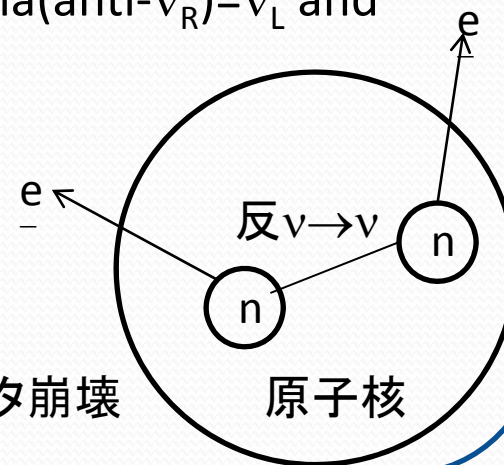
Energy Level



violating lepton number conservation

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

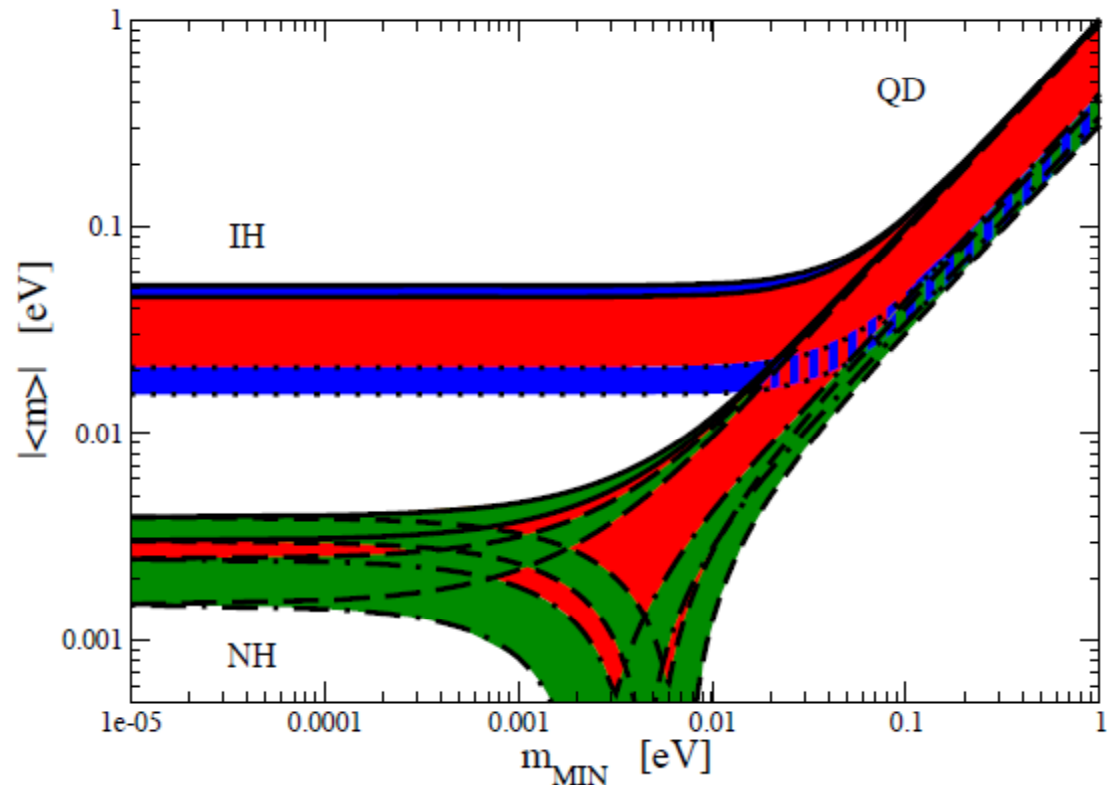
$\nu$ を伴わない二重ベータ崩壊



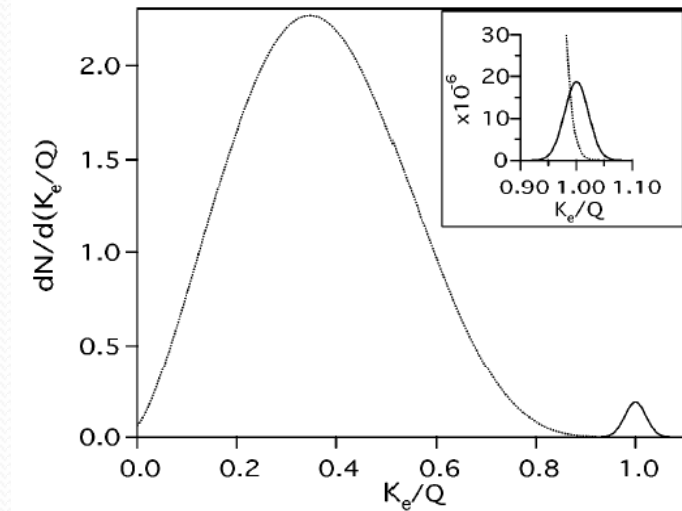
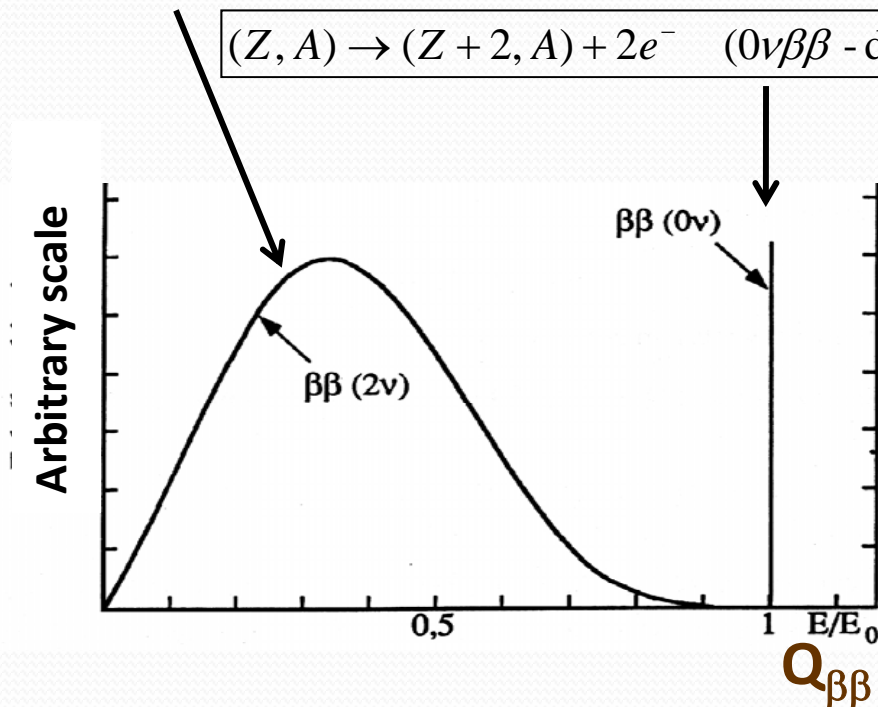
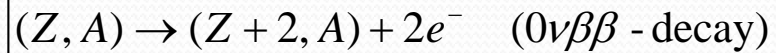
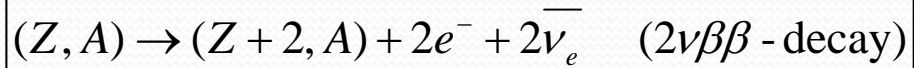
# ダブルベータ崩壊で測定される質量とニュートリノ振動で測られる質量の関係

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

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



# $0\nu\beta\beta$ 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

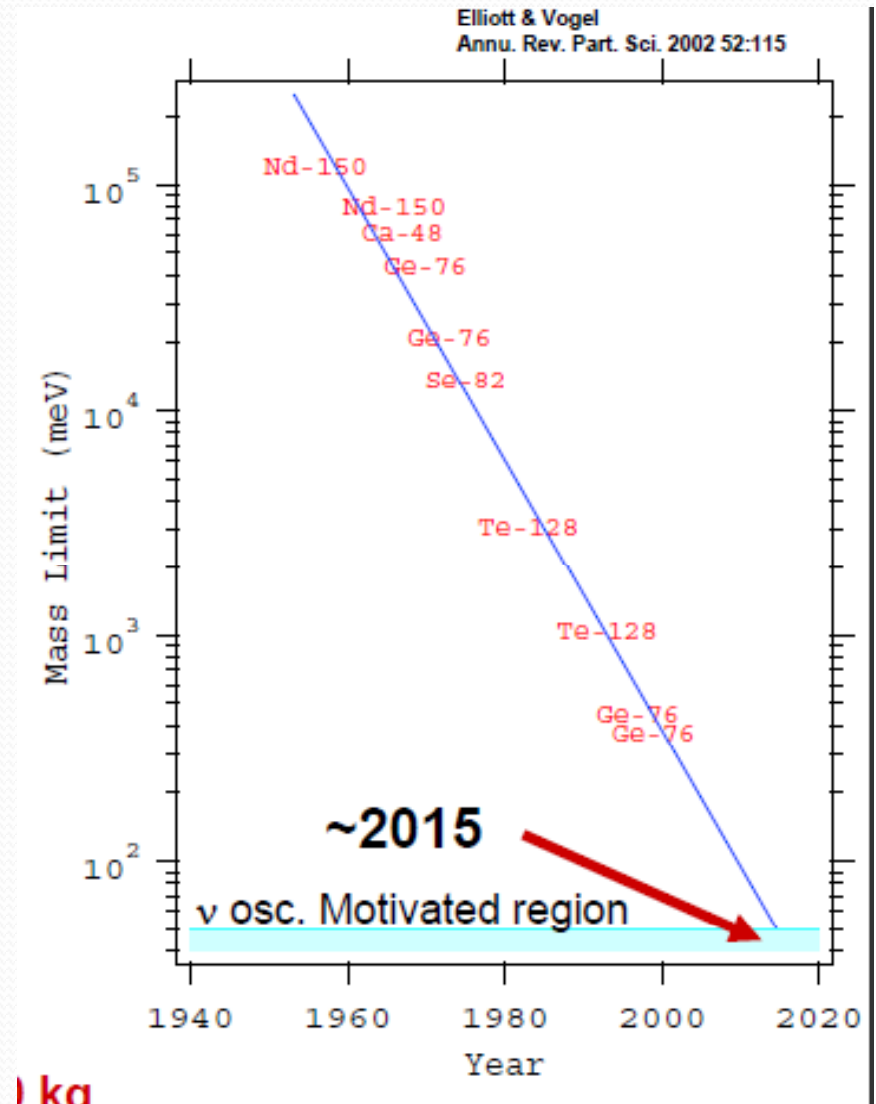
total statistics 71.7kg X y

controversial result

claim for evidence v.s. refute  
by collaborators.

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

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



! ka



# 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
    - segmented electrode to suppress background
- Bolometers
  - CUORE ( $^{130}\text{Te}$ ) ← フロントランナー
  - Edelweiss ( $^{76}\text{Ge}$ )
  - MOON ( $^{100}\text{Mo}$ )
- Scintillators
  - KamLAND-ZEN ← 今や、本命？
  - CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )
  - XMASS ( $^{136}\text{Xe}$ )
- 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)

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%

放射線 Vol.36 No.2(2010)

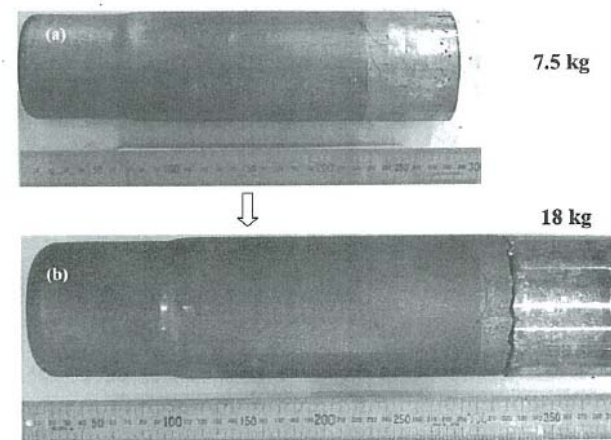


Fig. 4. (a) The standard 75 mm diameter CdTe single crystal and (b) a newly developed 100 mm diameter CdTe single crystal grown by THM.

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！

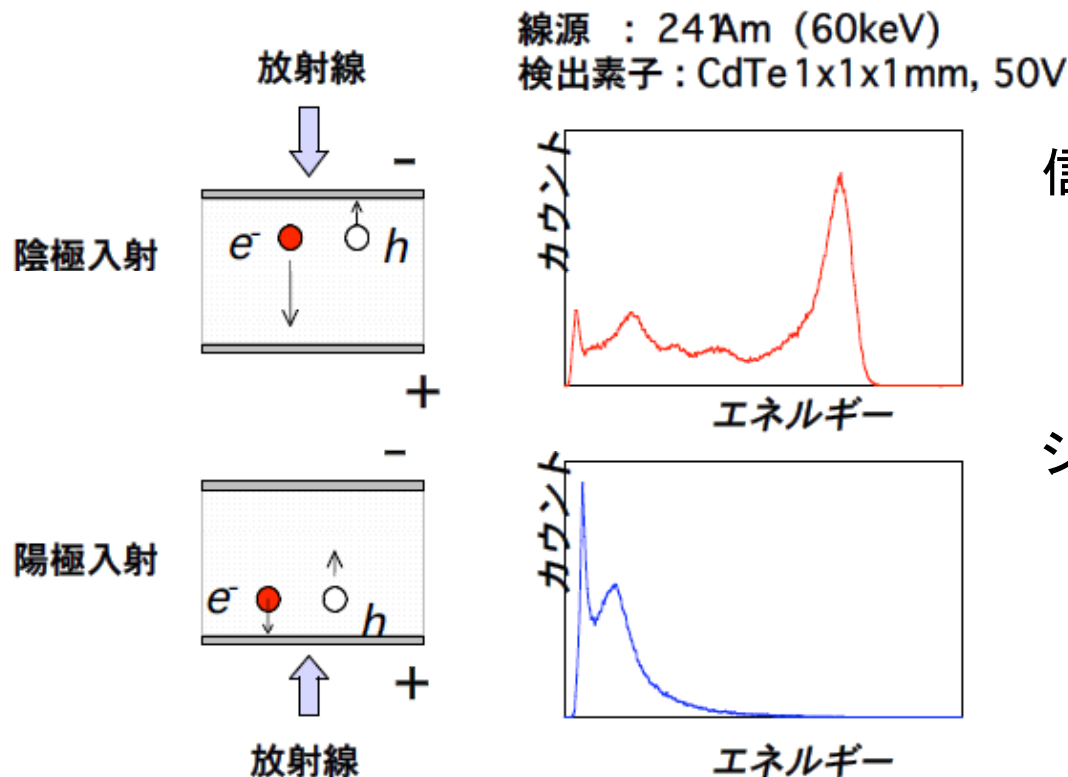
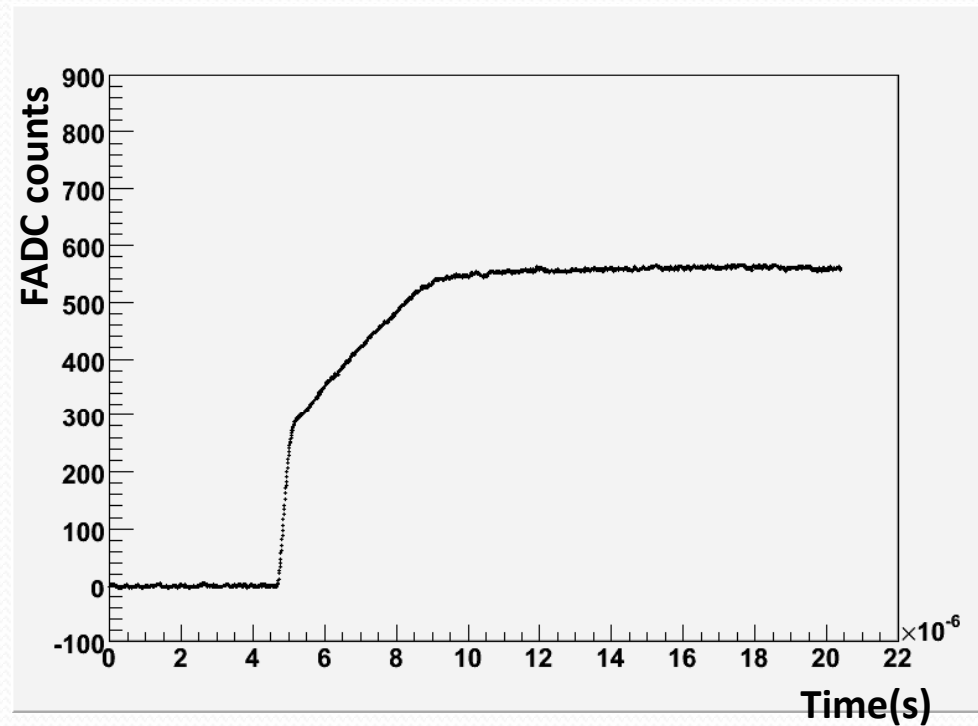


図2 検出放射線の入射面によるスペクトルの違い

大野良一 放射線vol.30, No.1 (2004)より

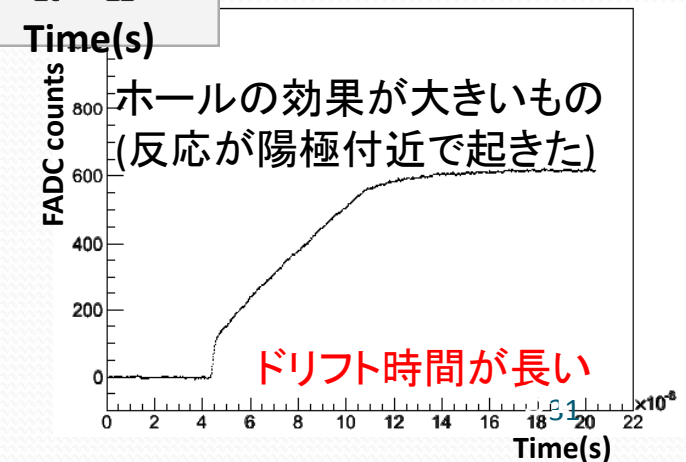
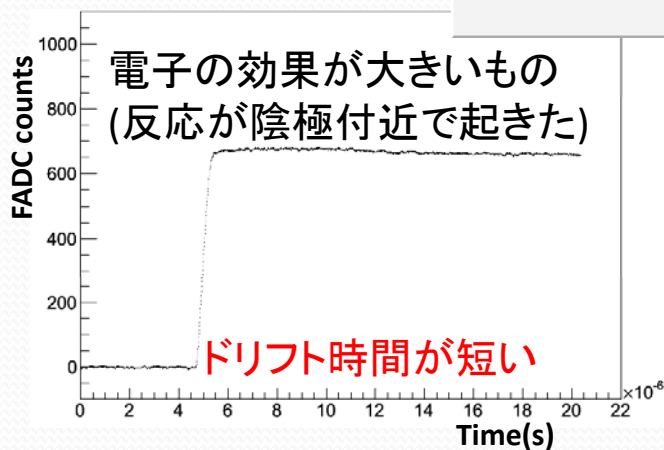
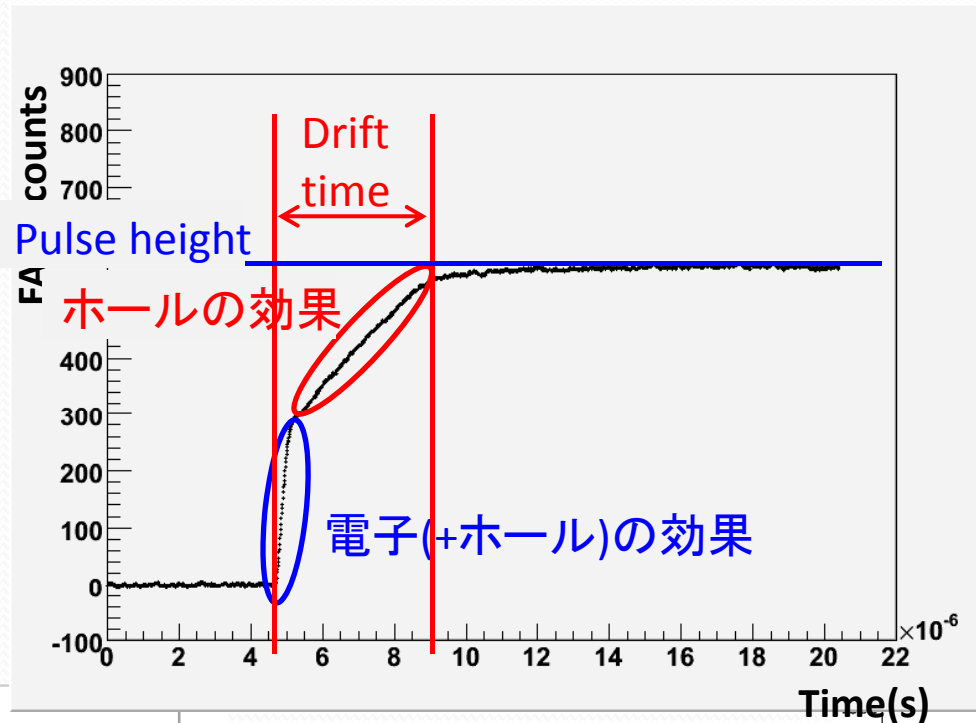
0.5mmを積層するのは大変なので、オーミックタイプで  
波形情報を使って何とかできないか？

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)

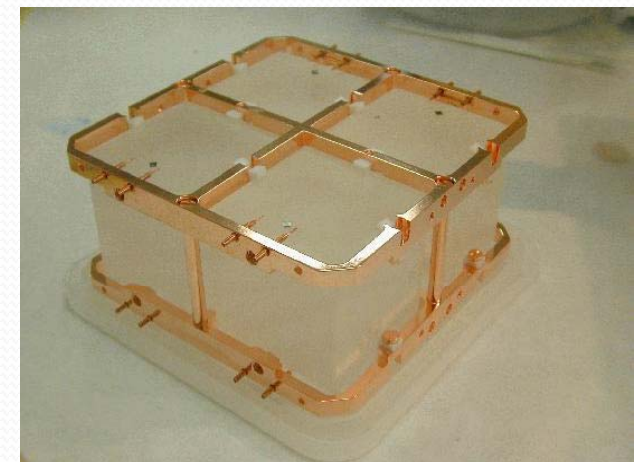
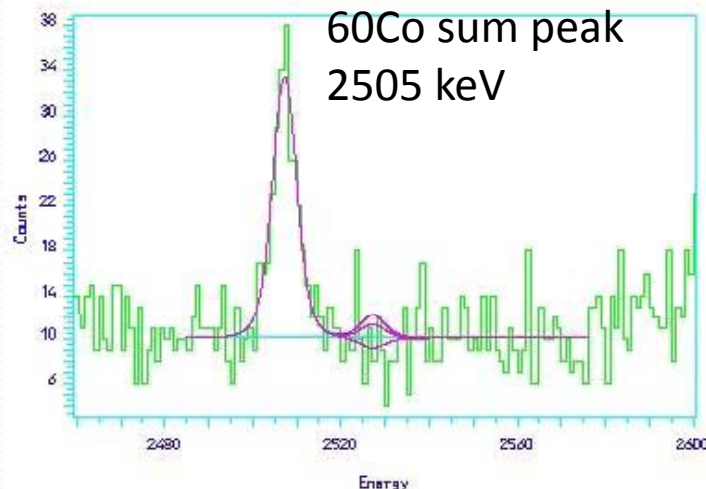


# CUORICINO(CUORE)との関係

$^{130}\text{Te}$ と言え、これ。

- ボロメータ! 0.3%FWHM@2.6MeV
- CUORICINO  $>3 \times 10^{24}$  year w/ 11.8kg $^{130}\text{Te}$ \*y
- CUORE 133kG  $^{130}\text{Te}$
- 時定数 ~秒 (時間分解能 数十ms)
- 表面で起きたアルファ線が連続スペクトラムのバックグラウンド  
これに対抗しようと思ったらエネルギー分解能~0.5%程度は欲しい  
CdTeの時間分解能は、もっと良いので $\gamma$ 線のコンプトンなどは、かなり除けるのではないだろうか。(隣合う素子でveto & 1個の素子内でも波形情報で)

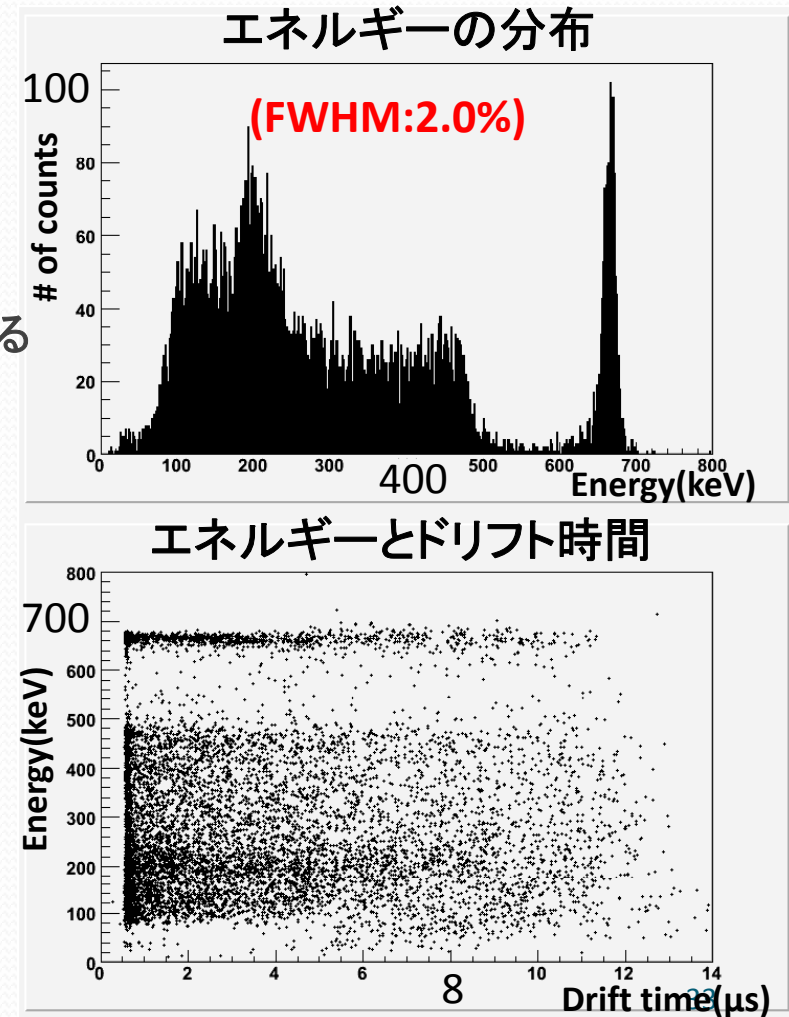
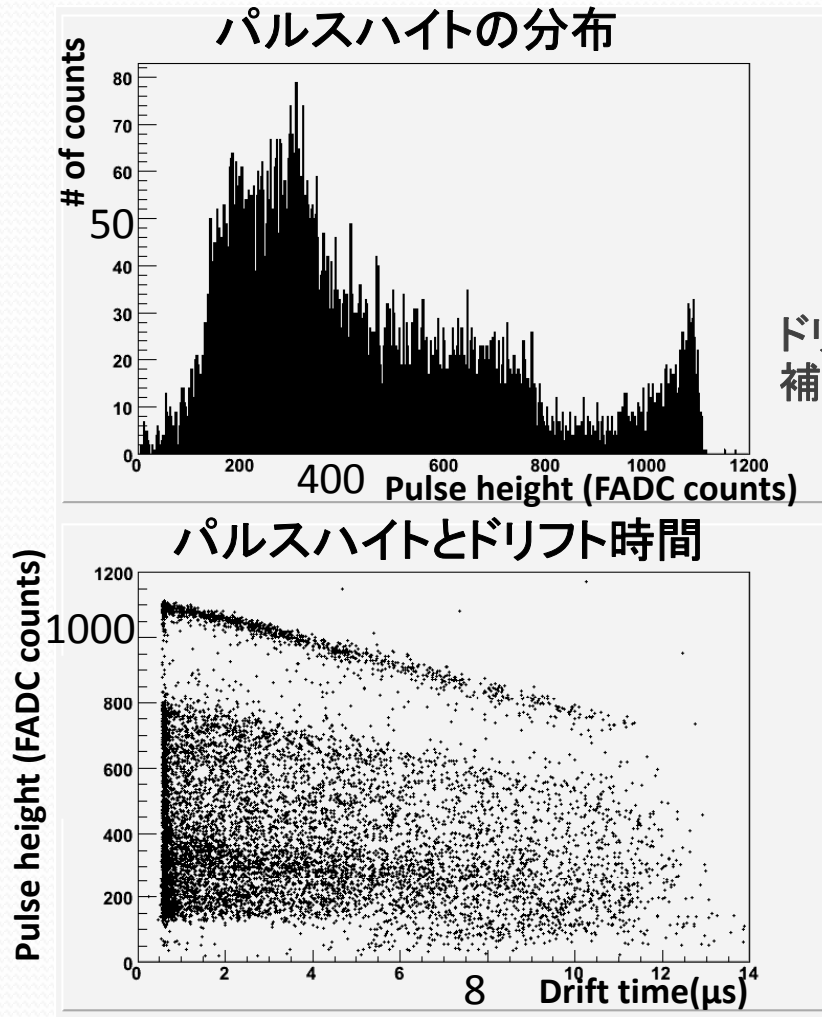
波形情報+ガードリング構造で、表面のイベントは落とせる。





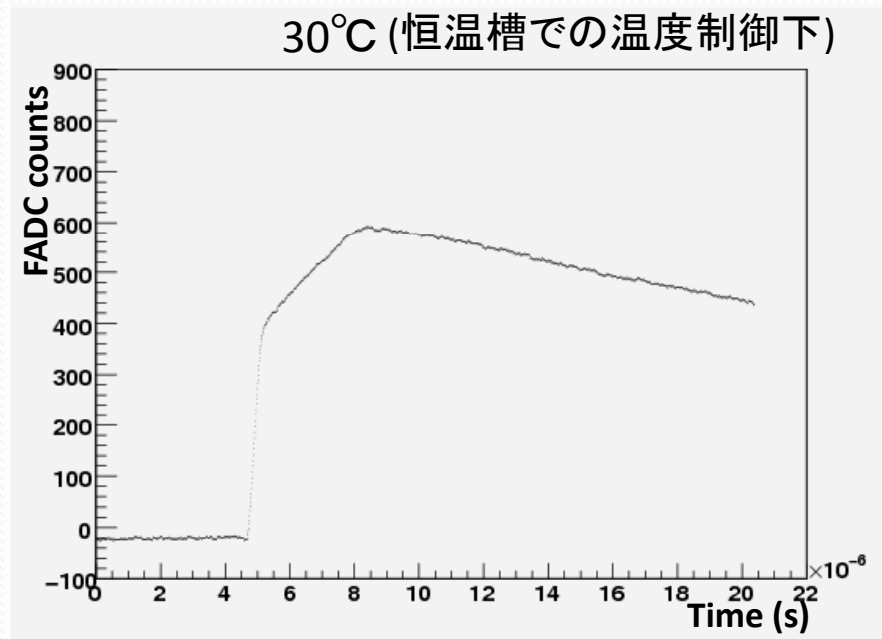
# 本河大先輩の研究成果

## ドリフト時間からパルス高さを補正 $^{137}\text{Cs}$

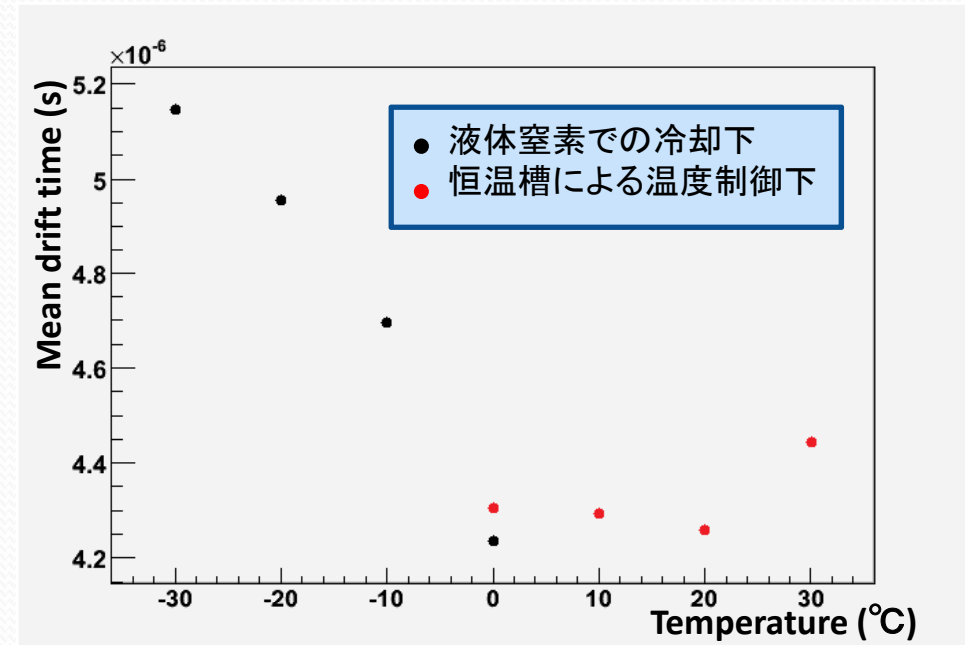


# 木河大先輩の研究成果2

## 温度とドリフト時間(5mm角素子)



温度による波形の変化

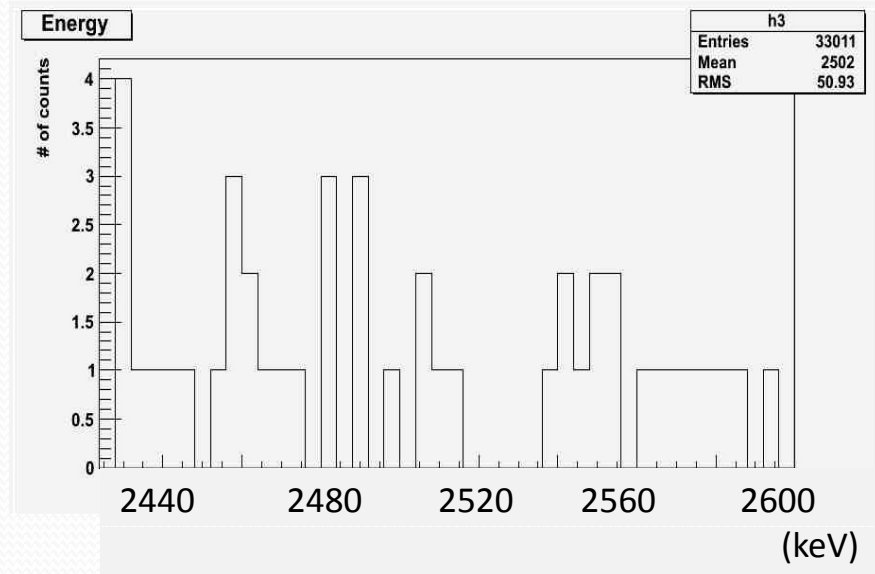
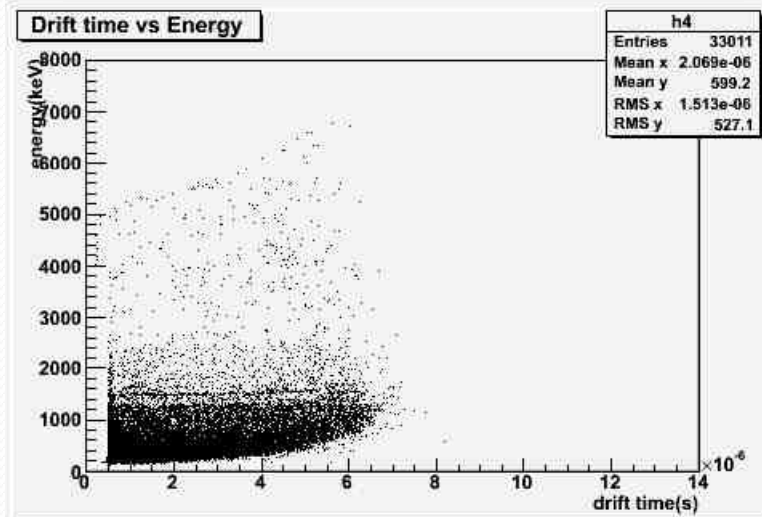
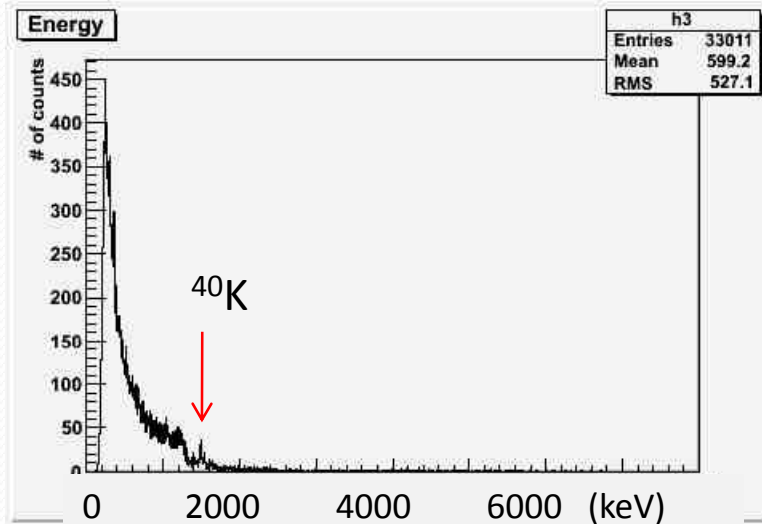


温度と平均ドリフト時間の関係

- 0°C~-60°Cくらいまで温度が下がるとホールの易動度が下がる。
- -70°C以下ではホールの移動の効果がまともに見えない。

実際の測定では0°C~10°Cで最も分解能が良くなった。

# 研究室でバックグラウンドの測定 平木君、山内君のM1debut実験テーマ



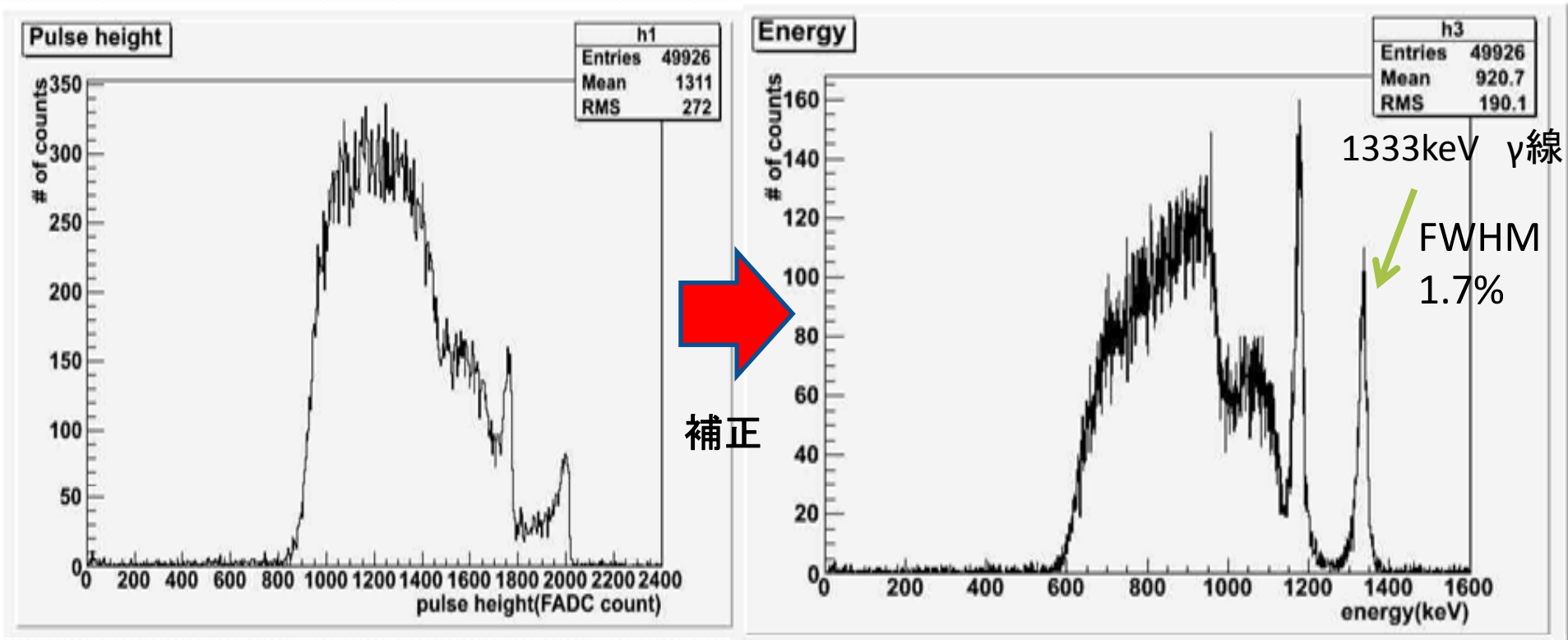
5mm角素子120時間、宇宙線Veto

# 平木先輩の成果

- 15mmx15mmx10mm素子の評価
- 補正コードの改良
- 分解能評価の定量化
- ノイズの評価
- 各条件(温度、バイアス電源)下での性能の評価

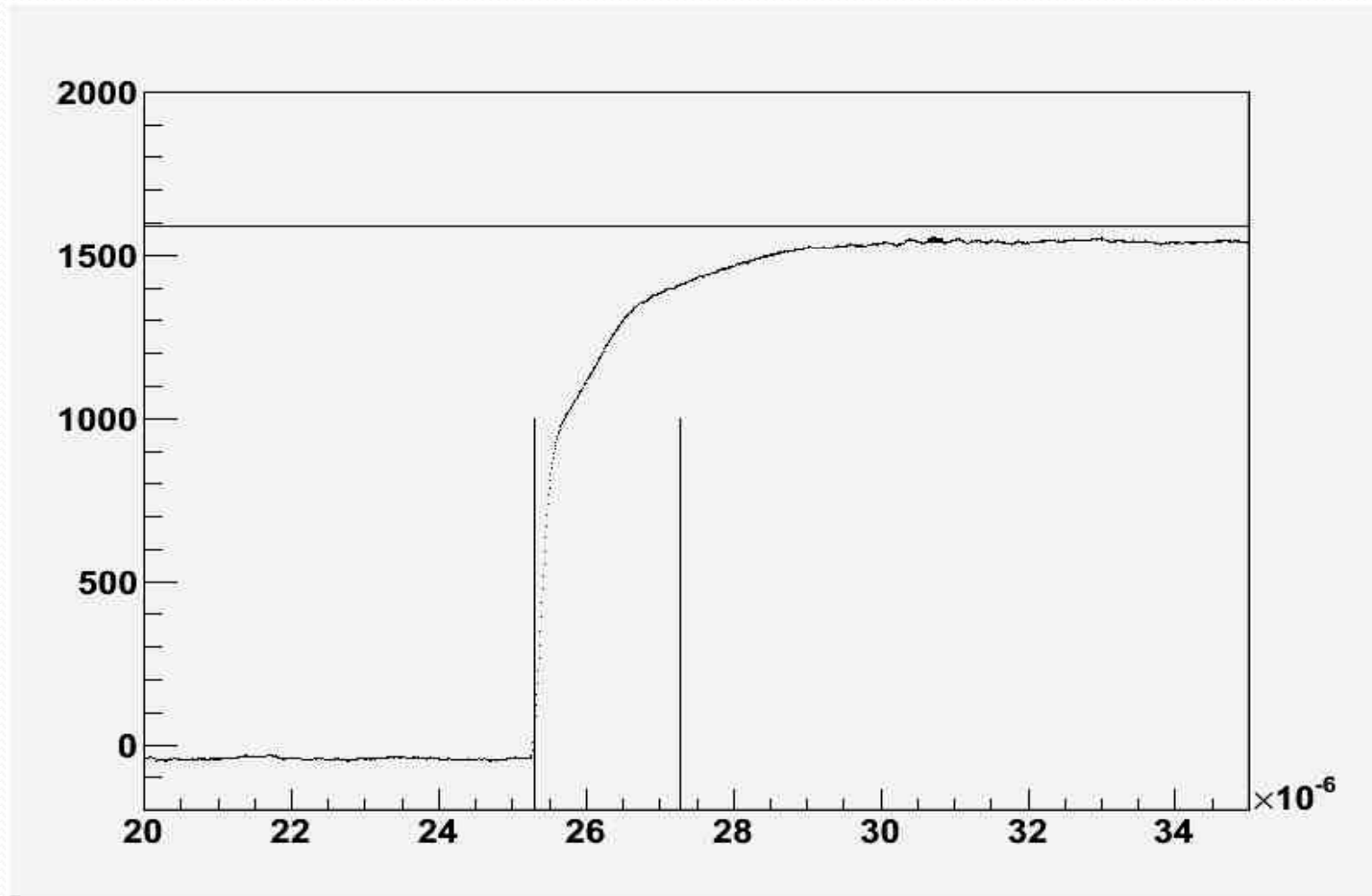
# 平木先輩の成果1

## $^{60}\text{Co}$ での評価

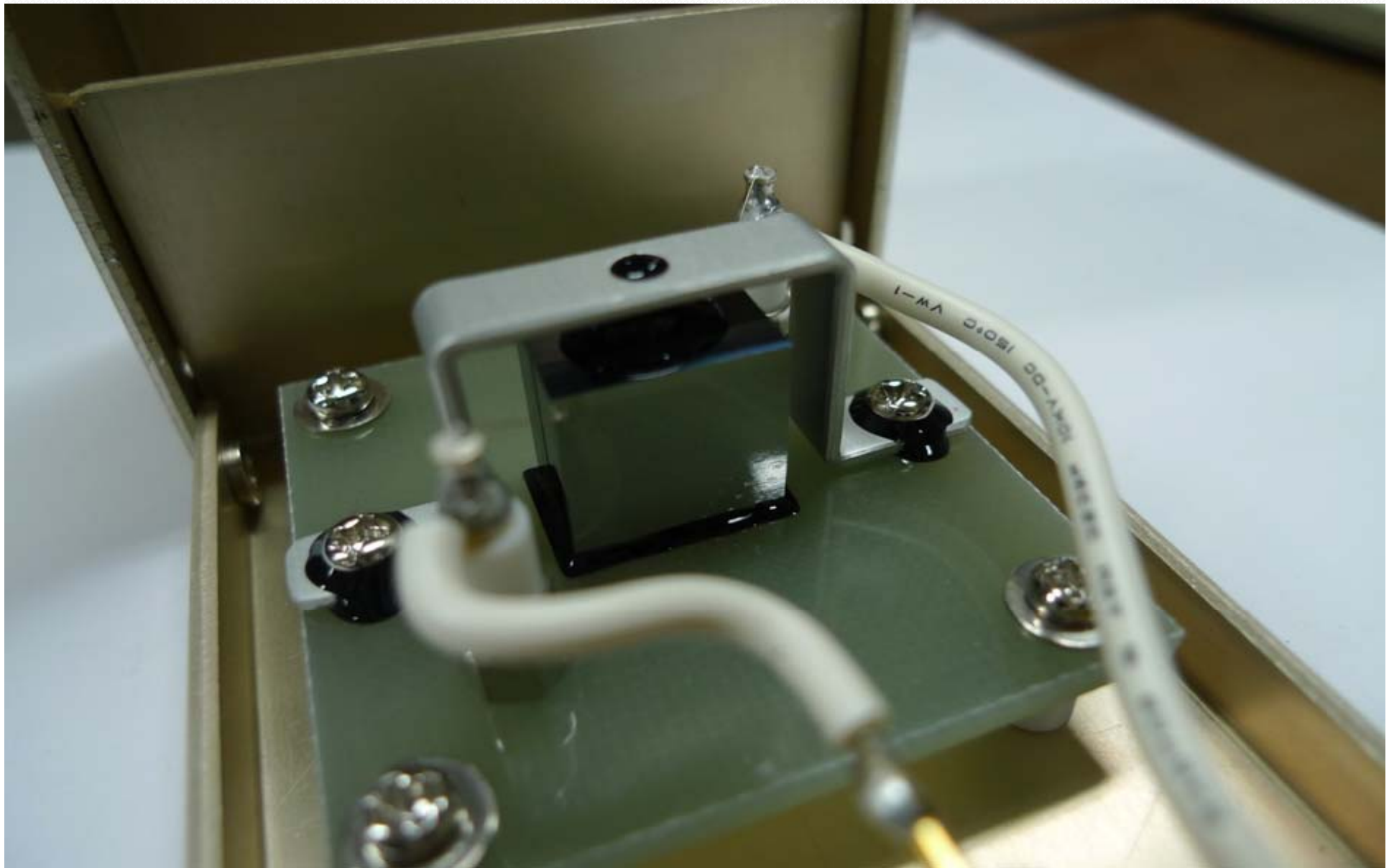


5mm × 5mm × 5mm CdTe検出器に $^{60}\text{Co}$ 線源(1173keVと1333keVの $\gamma$ 線を出す)を当ててデータを取得し、上に述べた波高の補正を行いエネルギー分解能を求めると1333keVの $\gamma$ 線でFWHM1.7%を得た

# 多重散乱? (5mm角) by 平木

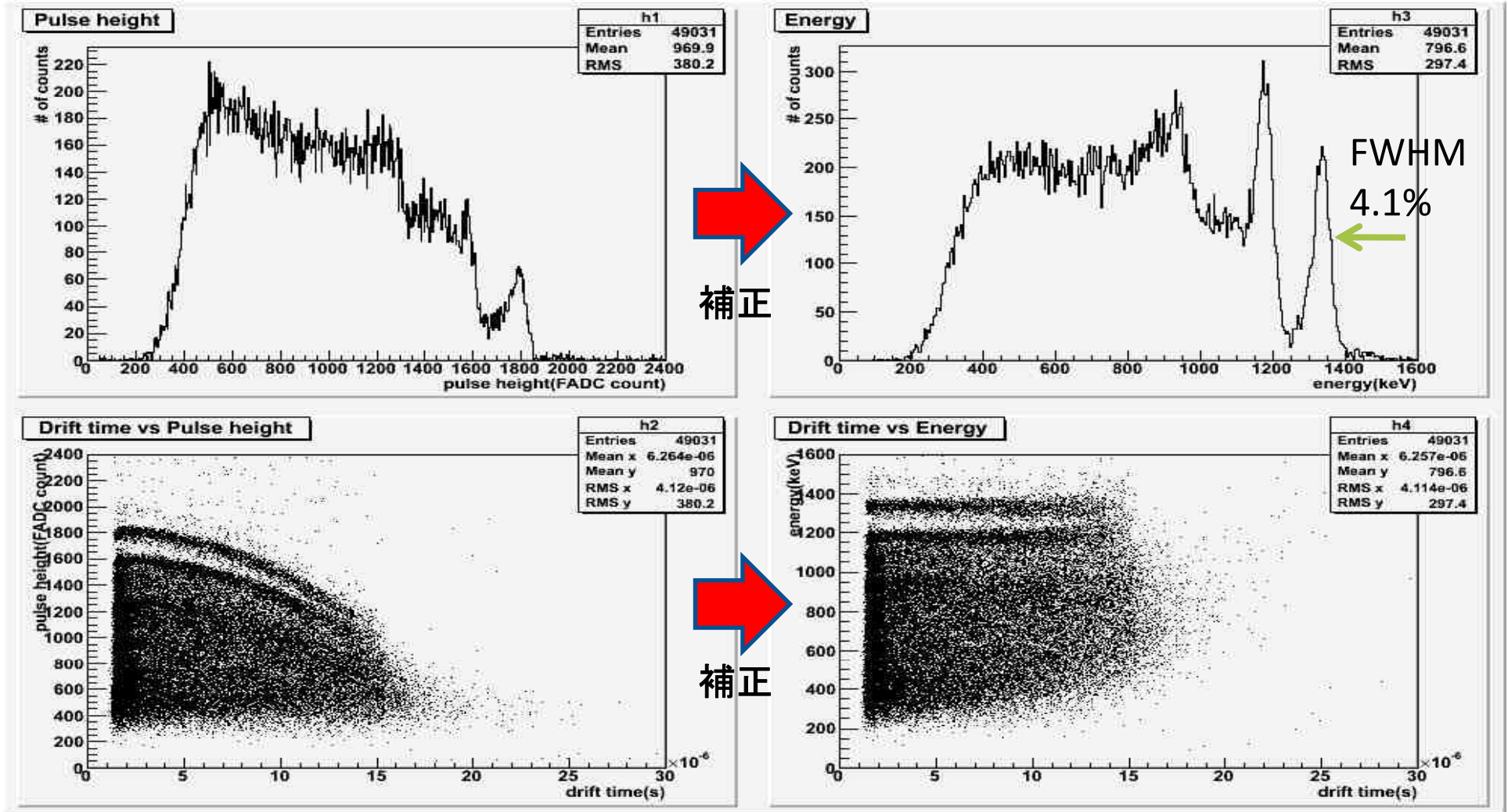


15 × 15 × 10(t) mm<sup>3</sup> CdTe素子



# 平木先輩の成果2

## 15x15x10mm<sup>3</sup>素子の評価



一方、大型のCdTeでは同様の方法で補正しエネルギー分解能を求めるとFWHM4.1%と5mm角に比べてかなり悪い



# エネルギー分解能 by 平木

5mm角CdTe

常温

FWHM	new preamp @1000V	new preamp @750V
Co(1333keV)	1.8%	1.5%
Cs(662keV)	2.4%	2.6%

0°C 恒温槽on

FWHM	new preamp @1000V	new preamp @750V
Co(1333keV)	1.7%	1.9%
Cs(662keV)	1.9%	2.2%

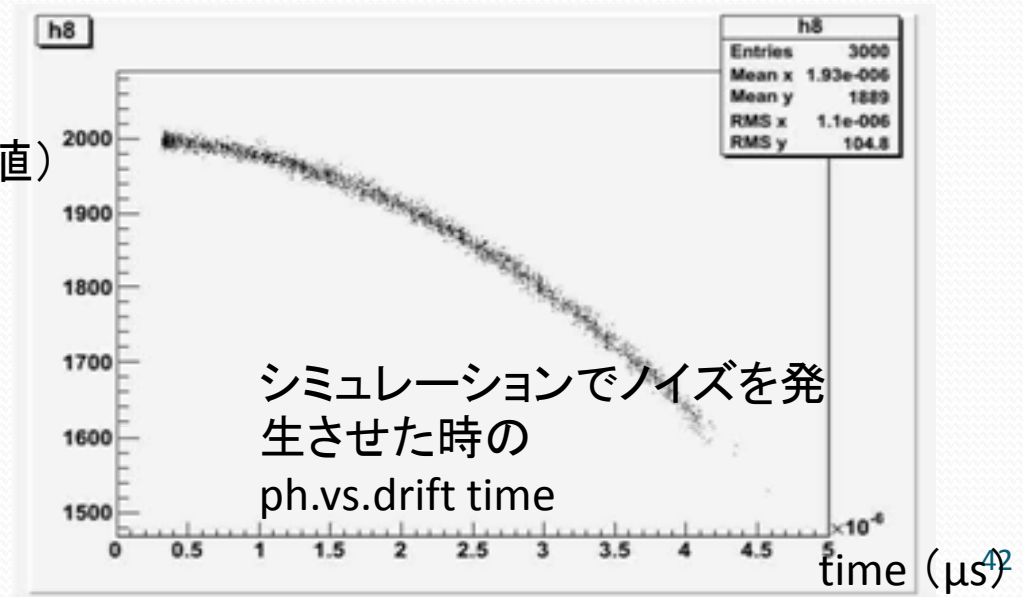
ついに木河君の  
記録を更新

1000Vと750Vでは、正孔の移動度は上がっているのに、分解能の向上はmodest

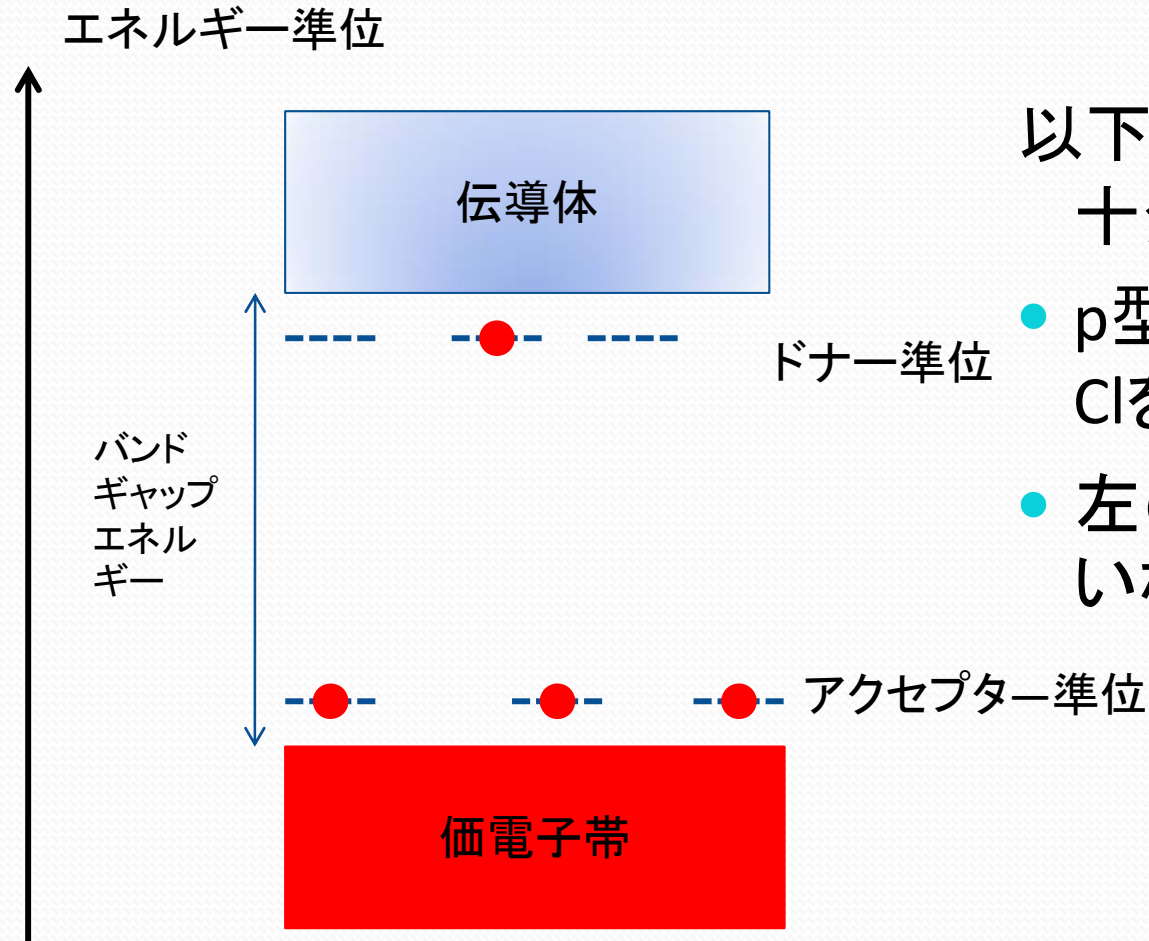
# 分解能に影響する要因 by 平木

- 再結合されるホールの数のふらつき
- キャリアの熱励起による内部リーク電流
- CdTe結晶の表面で発生するリーク電流
- 電子回路(プリアンプなど)で発生するノイズ
- CdTeにかかる電場の非一様性
- CdTe結晶の非一様性
- 波高やドリフト時間をプログラムで求める時に発生する誤差

FADC  
count  
(換算値)



# エネルギー分解能0.5%@2.5MeVへの道

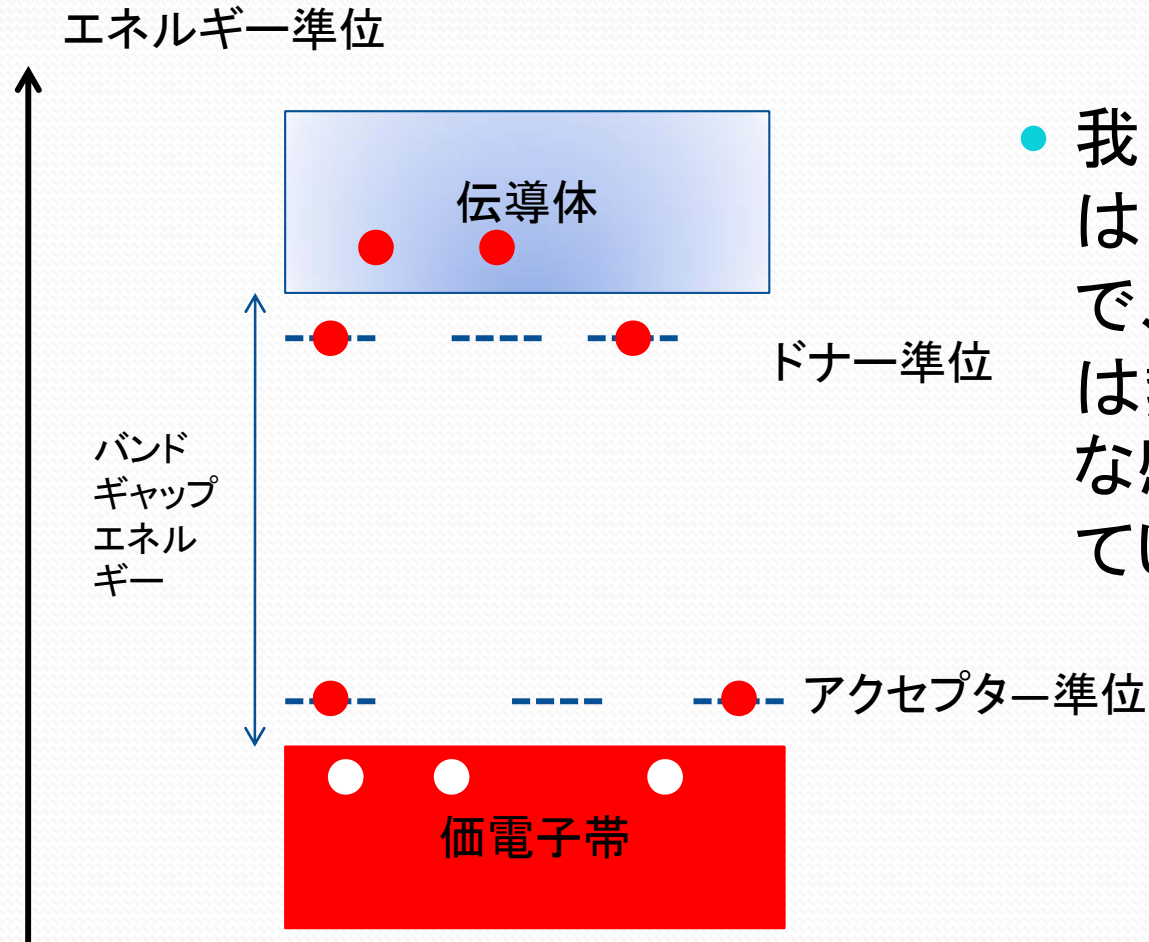


以下、推測(まだ、理解が  
十分でない)

- p型CdTeにドナーとしてClをドーピングしてn型に
- 左の図は、熱励起していない場合。

赤は、電子で占められている  
ことを示している。

# エネルギー分解能0.5%@2.5MeVへの道



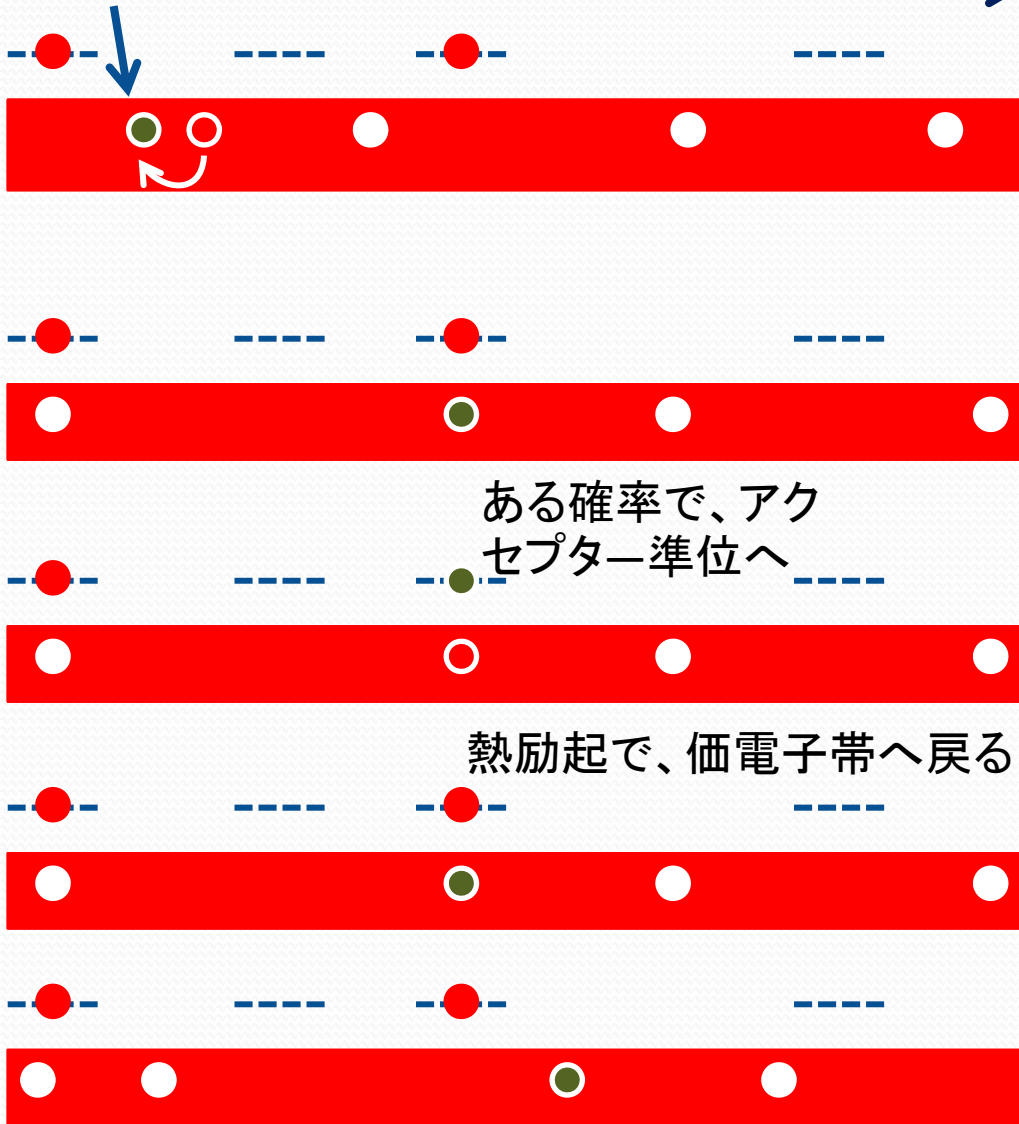
- 我々が使っているのは、オーミック接合なので、基本的に、常温では熱励起のため、こんな感じ。(空乏層を作っていない)

赤は、電子で占められていることを示している。

# エネルギー分解能0.5%@2.5MeVへの道

放射線で生成した正孔

$E_{bias}$



- 正孔の移動、捕獲機構を考える
- 低温では、電子のいるアクセプター準位が増えるので、正孔のアクセプター準位への捕獲が増える。
- 低温では一度、捕獲された正孔は、中々、元に戻れない。
  - ↓
- 低温で、正孔が凍りつく
  - ↓
- アクセプターのドーピングをやめてみたら？
  - リーク電流は増えるけど、正孔の捕獲は減る？
- ドナーの濃度、バイアス電圧、温度が、キーパラメータ

# Q. 本当に勝ち目があると思ってるの？

- はっきり言って、道は遠い。(そもそもこの道はゴールにつながっているのか?)
  - エネルギー分解能0.5%@2.5MeV(=1%@662keV)が達成できるのか?  
現状 2%@662keV
  - エネルギー分解能を保ったまま、大型化できるのか?
    - $m_\nu \sim 10\text{meV}$ を探索するには、 $\sim 1\text{ton}$ 必要。
    - 数千chに押さえないので、素子の体積は、 $10\sim 50\text{cm}^3$ ぐらいにはしたい。
    - 現状  $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 10\text{mm}$ で、 $2.25\text{cm}^3$
  - background levelをどれくらい低くできるのか、まだ手をつけていない。
  - 結晶代だけで20万円/kgぐらいなので、1tonだと2億
    - 大したことないという見方もできる？
  - CUOREやKamLAND-ZEN等、もっと進んだプロジェクトがある

# Q. 本当に勝ち目があると思ってるの？

- しかし

- いまだに見つかっていない大発見なんだから難しくてあたりまえ
  - CUOREやKamKAND-ZENがうまくいくとは、限らない。  
KamLAND-ZENのエネルギー分解能は、5%。
  - 何かを極めると、別の方面で活路が開けたりする(これ、ほんと)
    - ワイヤーチェンバー、浜ホトのPMT、Kamiokande, KamLAND, 名大のエマルジョン、超伝導技術等々
- から、まだ、当面、あきらめない。

# CdTe実験への参加の仕方

1. M1実験として、夏ぐらいまで、何かを測定してみる。  
平木、山内組の寿命上限値を更新？
2. 修論のテーマとして取り組む
  - あなたが主役です。
  - エネルギー分解能の向上、大型化、バックグラウンドの評価、回路の開発等々
  - 常温で高いエネルギー分解能を持つコンパクトな放射線検出器は、これから需要が伸びる？
  - (少なくとも今の所)地震で実験が止まったりしない。
  - D論は、T2KでもKOTOでもATLASでも
3. D論も？？？  
ダブルベータ崩壊発見は、ノーベル賞級  
ちなみに、これまで資金繰りに苦労したこのプロジェクトですが、今年  
は科研費基盤(B)が当って、4年間お金が付きまして。