

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

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

$\delta \sim 60^\circ$

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

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

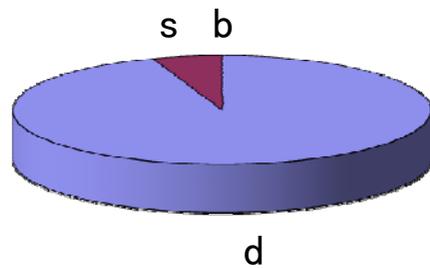
$$\theta_{13} \leq 12^\circ \quad (90\% \text{ CL})$$

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

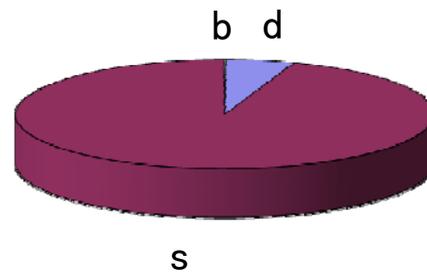
$\delta = ?$

絵にしてみると

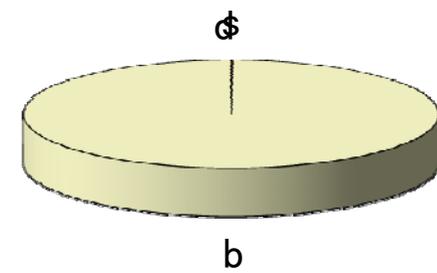
第1世代クオーク



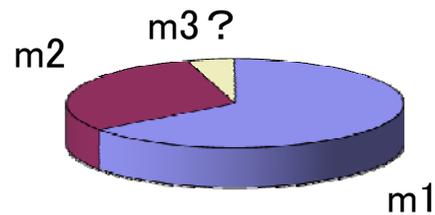
第2世代クオーク



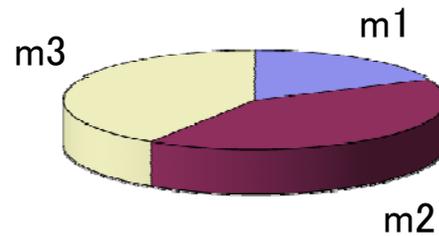
第3世代クオーク



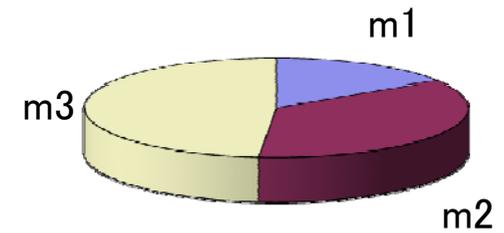
電子ニュートリノ



ミューニュートリノ



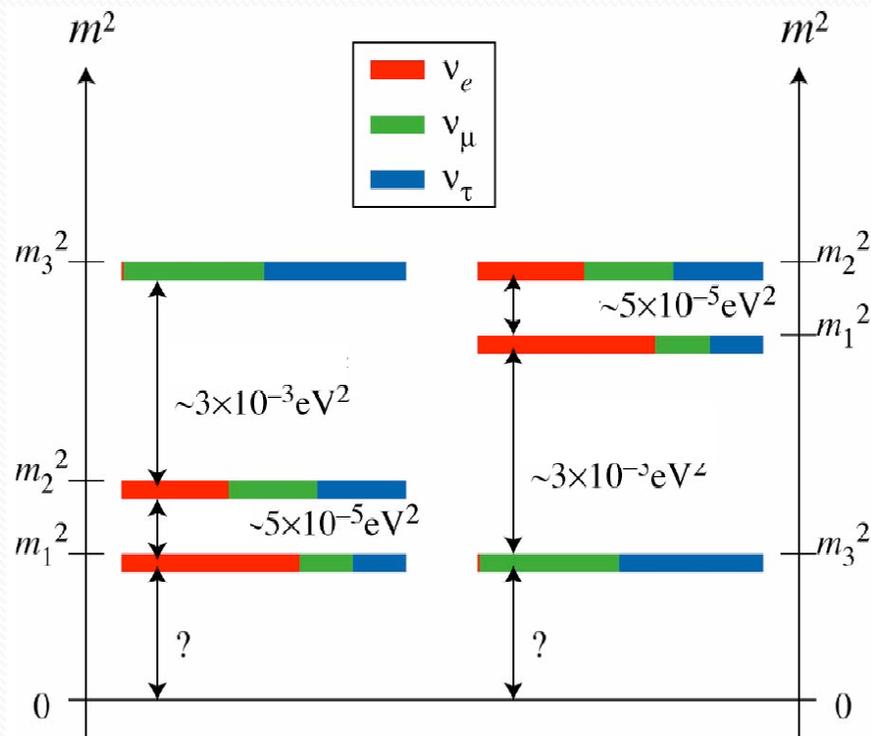
タウニュートリノ



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?

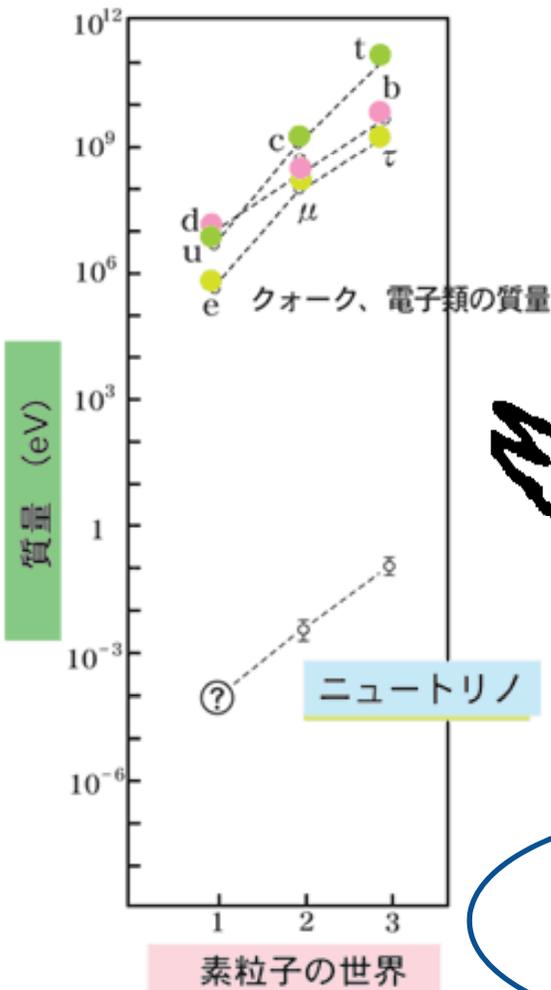
質量の絶対値

- 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
 - $\nu_e : 2 \text{ eV}$, $\nu_\mu : 0.19 \text{ MeV}$, $\nu_\tau : 18.2 \text{ MeV}$
 - 宇宙論的観測
 - $m_{\nu e} + m_{\nu \mu} + m_{\nu \tau} : < \sim 0.5 \text{ eV}$

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
- 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?

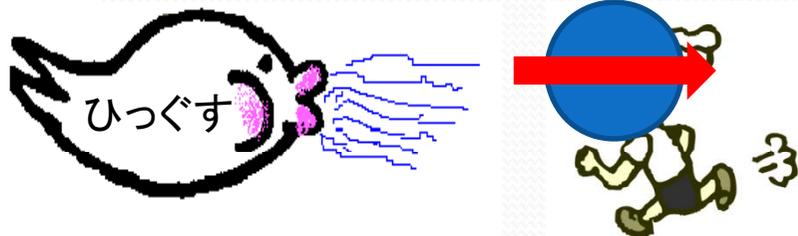
クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？そもそも、物質の質量の起源とは？



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

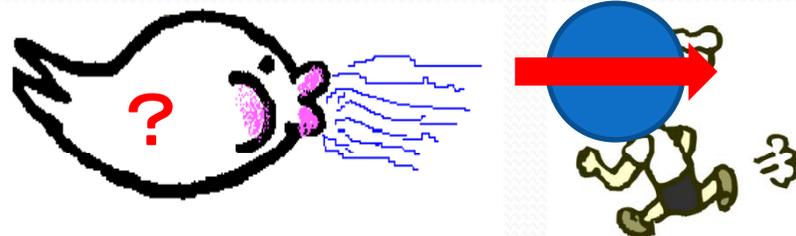
- 混合行列の(クォークと比べて)変な特徴
- 質量の順番(クォークと同じか?)
- (クォークと同じように)CPは破れているのか?
- 本当に3種類だけか?
- 質量の絶対値
- クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか?そもそも、物質の質量の起源とは?
- マヨラナ粒子?
- 物質優勢宇宙の起源?

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。
- ν_L, ν_R がディラック質量 m (~ 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。

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

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

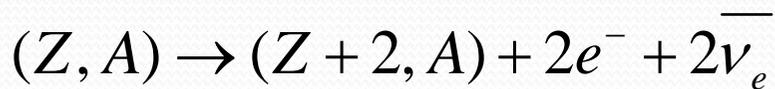
ニュートリノを巡る未解決の問題群

- 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?

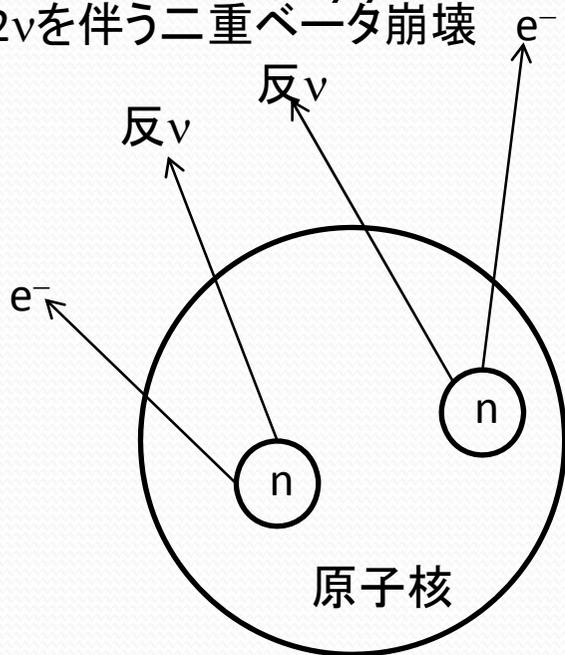
ニュートリノ
振動

ダブルベータ
崩壊

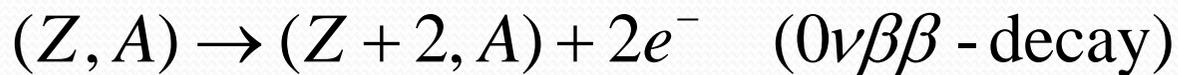
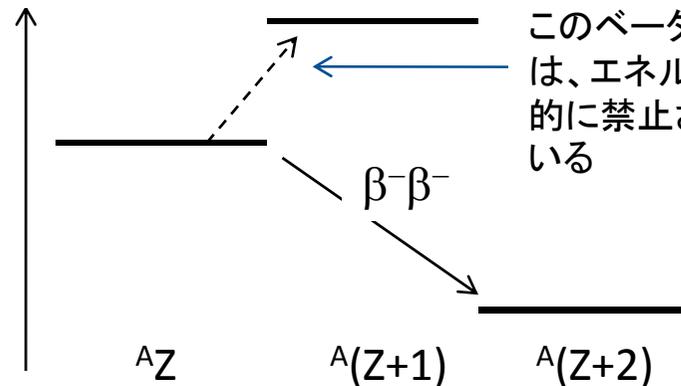
$0\nu\beta\beta$ 崩壊



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



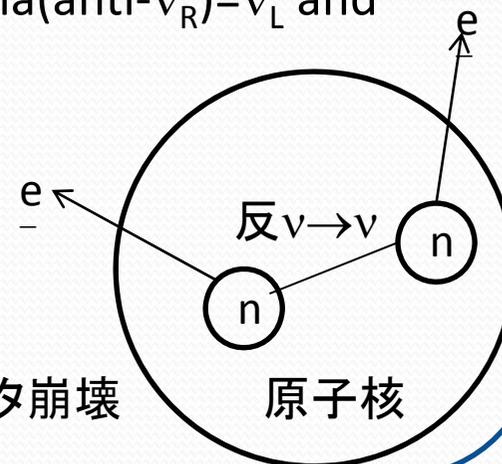
Energy Level



violating lepton number conservation

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

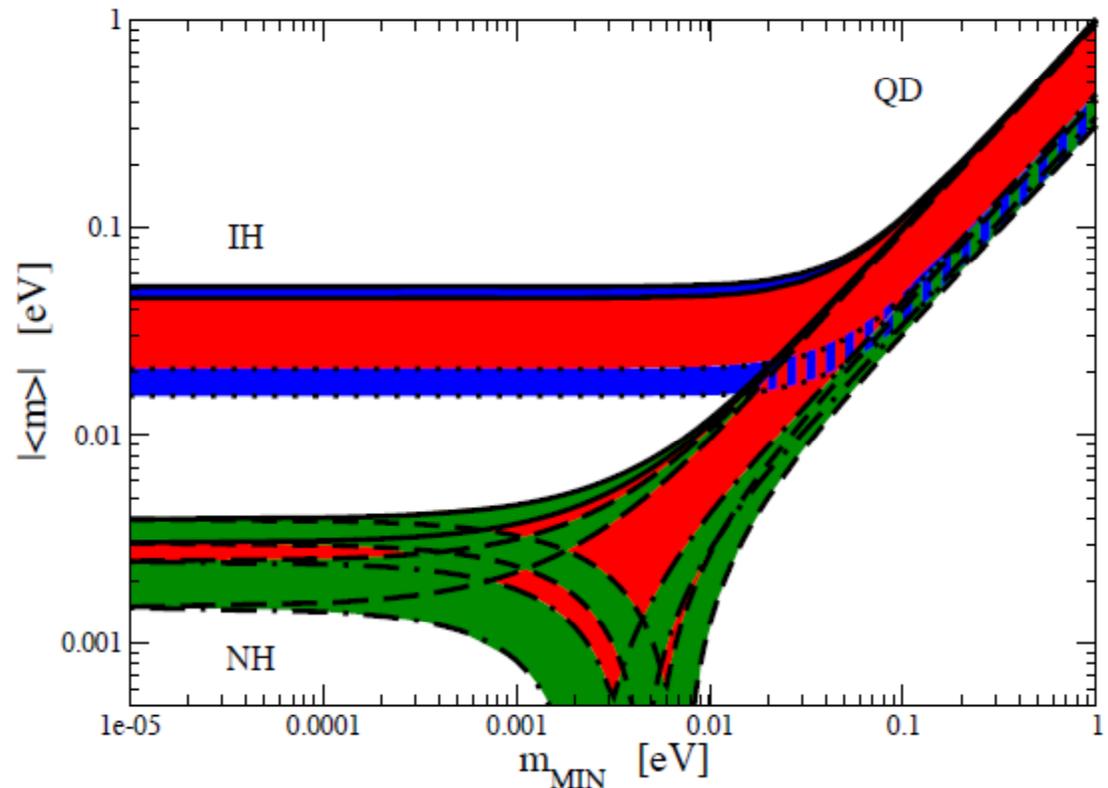
ν を伴わない二重ベータ崩壊



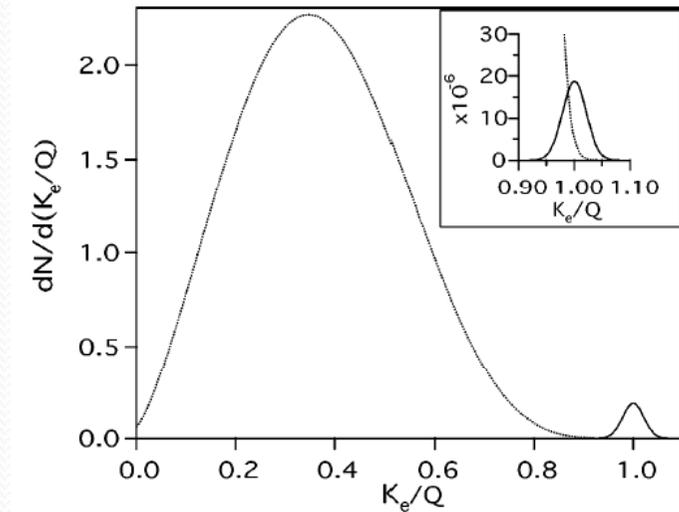
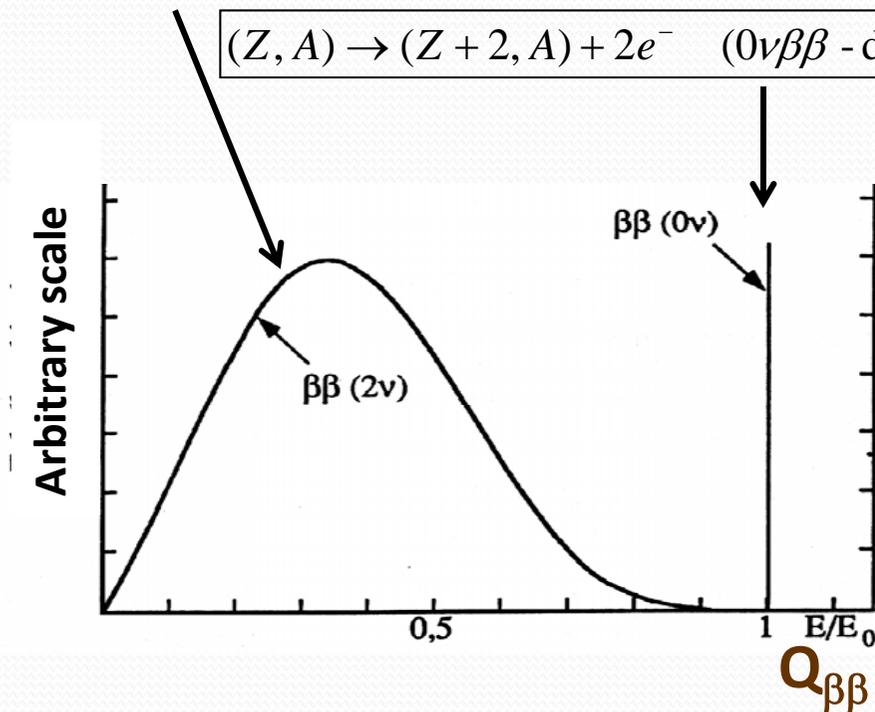
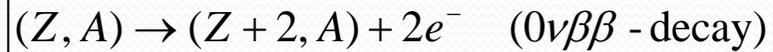
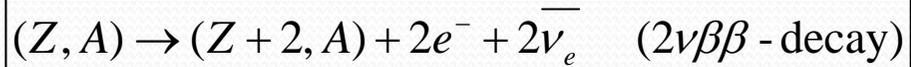
ダブルベータ崩壊で測定される質量とニュートリノ振動で測られる質量の関係

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

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



$0\nu\beta\beta$ 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}Ge experiment

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

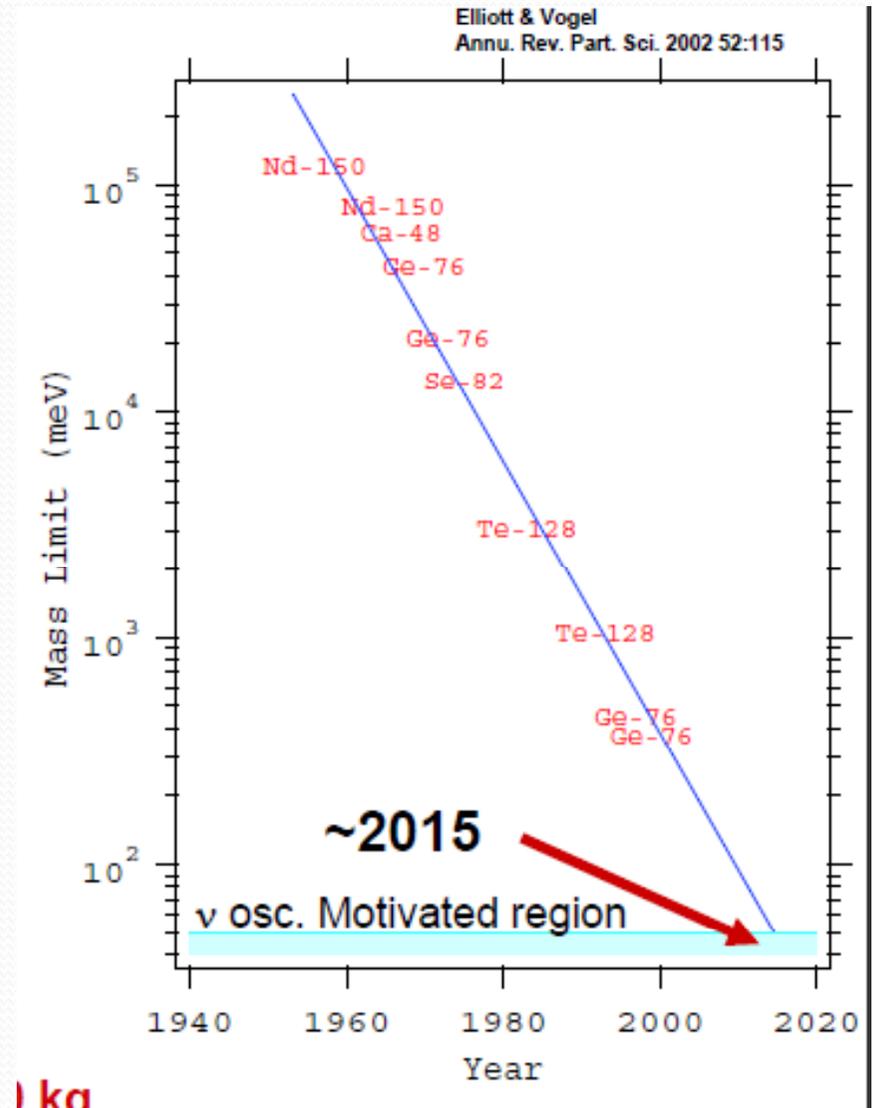
total statistics 71.7kg X y

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}Ge diode
 - Mojarana, GERDA
 - more mass several x 100kg
 - segmented electrode to suppress background
- Bolometers
 - CUORE (^{130}Te) ← フロントランナー
 - Edelweiss (^{76}Ge)
 - MOON (^{100}Mo)
- Scintillators
 - KamLAND-ZEN ← 今や、本命？
 - CANDLES (^{48}Ca)
 - XMASS (^{136}Xe)
- Tracking detectors
 - MOON (^{100}Mo)
 - DCBA (^{82}Se , ^{150}Nd)
 - SuperNEMO (^{82}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 ³)	バンド ギャップ (eV)	電子易動度 (cm ² /V/s)	ホール易動度 (cm ² /V/s)	電子寿命 (s)	ホール寿命 (s)
Ge	5.33	0.67	3800	1820	>10 ⁻³	1x10 ⁻³
Si	2.33	1.11	1900	500	>10 ⁻³	2x10 ⁻³
<u>CdTe</u>	<u>5.85</u>	<u>1.47</u>	<u>1100</u>	<u>50</u>	<u>3x10⁻⁶</u>	<u>2x10⁻⁶</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}Te	2.5 MeV	34%
^{116}Cd	2.8 MeV	7.5%
$^{106}\text{Cd}(\beta^+\text{EC})$	1.7MeV	1.5%

放射線 Vol.36 No.2(2010)

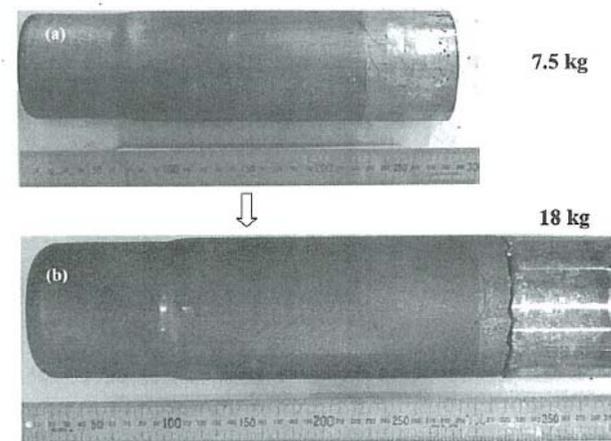


Fig. 4. (a) The standard 75 mm diameter CdTe single crystal and (b) a newly developed 100 mm diameter CdTe single crystal grown by THM.

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}Co (1.33MeV)に対して0.45%の分解能が得られている！

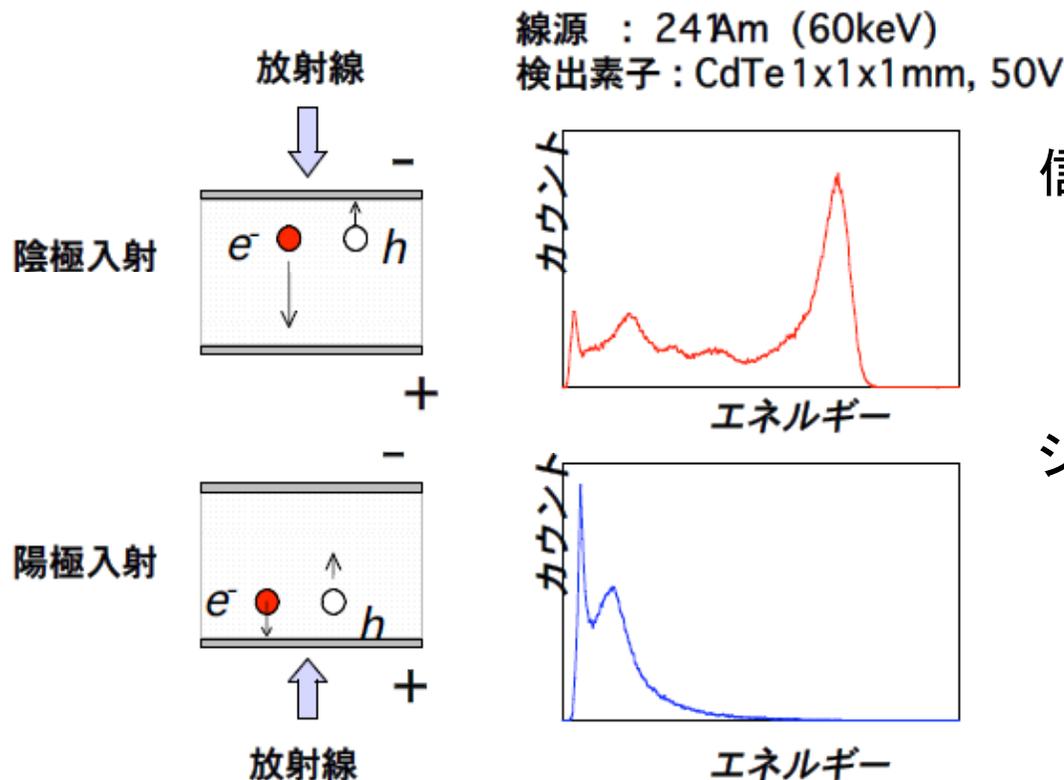
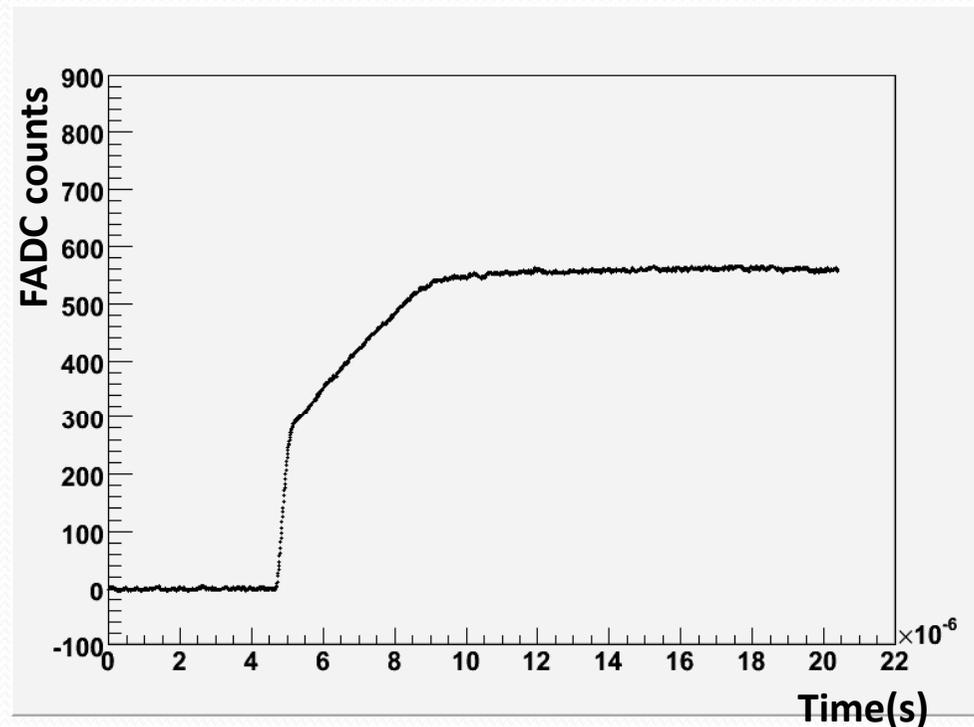


図2 検出放射線の入射面によるスペクトルの違い

大野良一 放射線vol.30, No.1 (2004)より

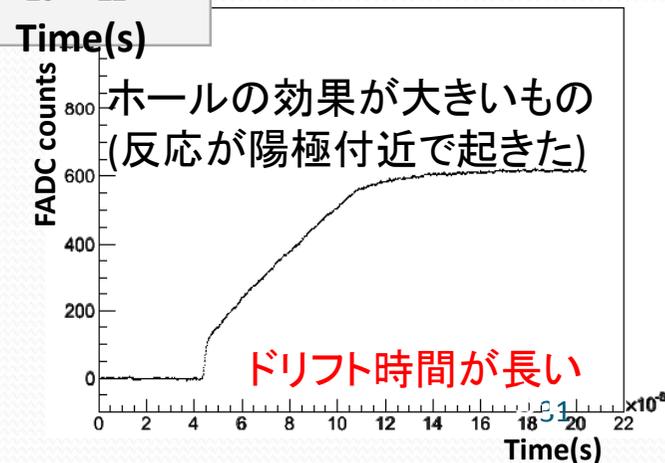
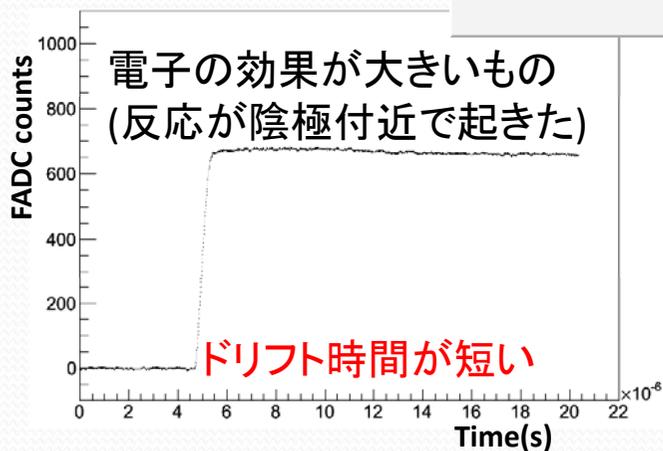
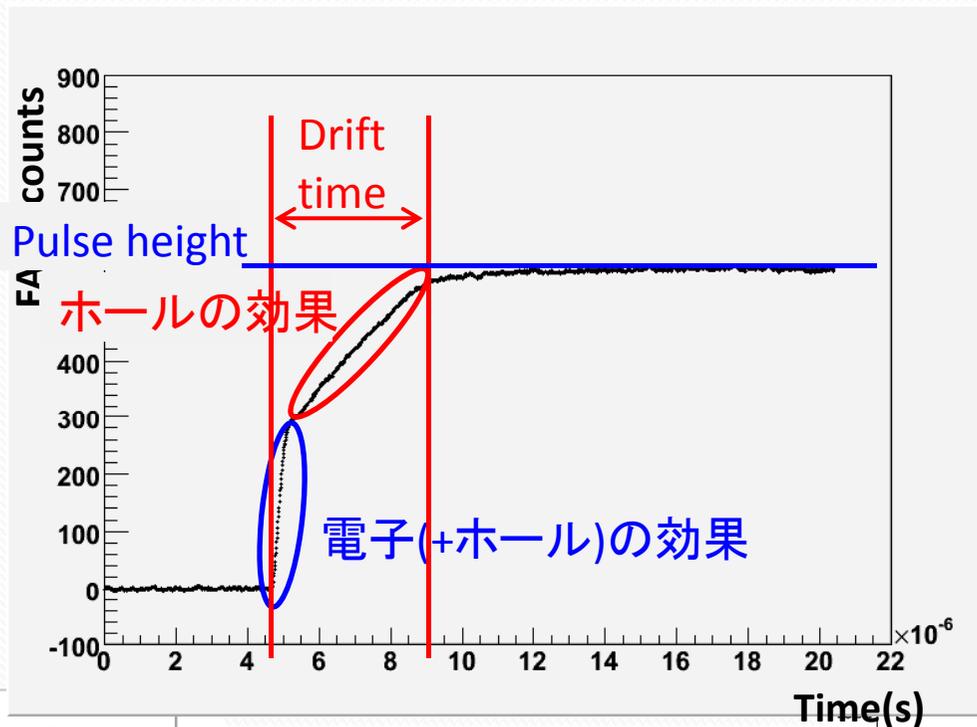
0.5mmを積層するのは大変なので、オーミックタイプで
波形情報を使って何とかできないか？

5mm角素子を試
作。プリアンプ出力
波形
(^{137}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}Cs 線源)

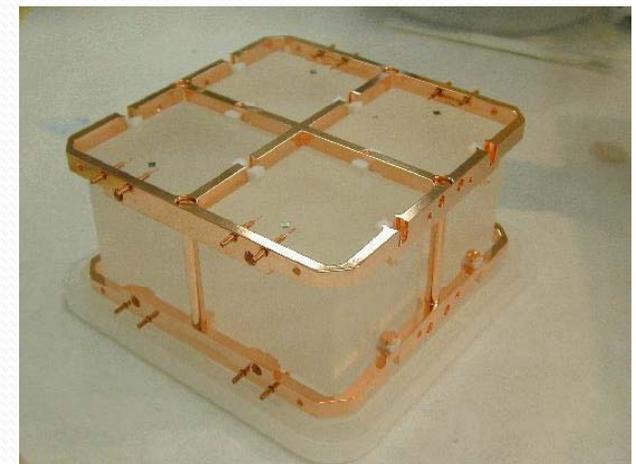
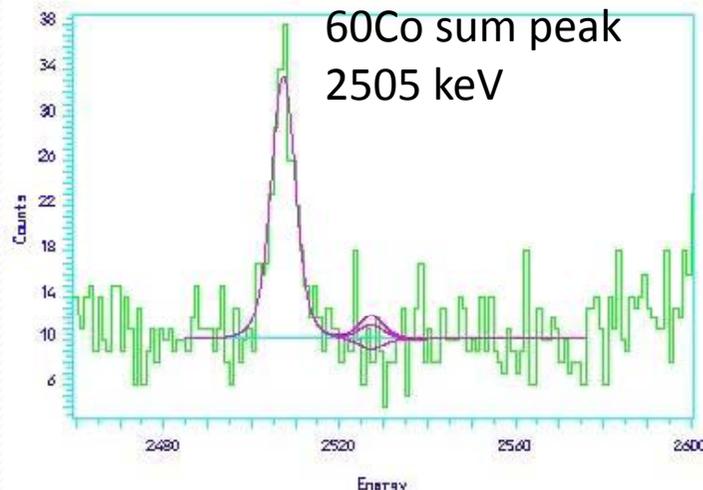


CUORICINO(CUORE)との関係

^{130}Te と言えば、これ。

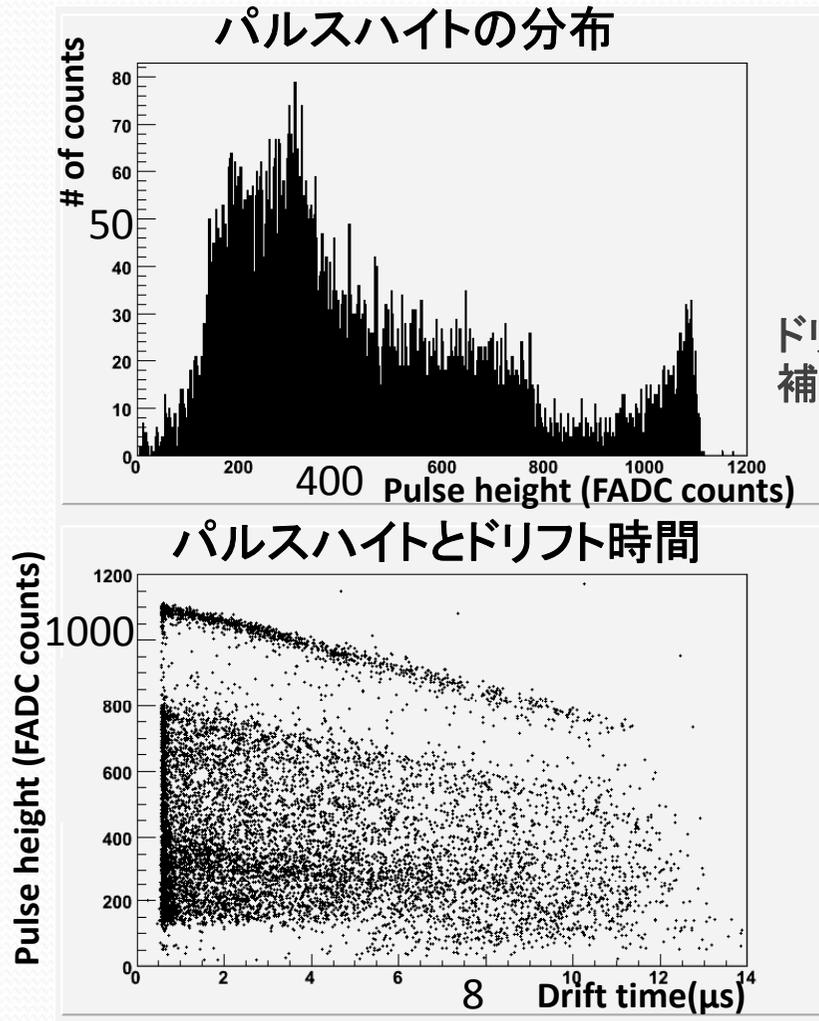
- ボロメータ! 0.3%FWHM@2.6MeV
- CUORICINO $>3 \times 10^{24}$ year w/ 11.8kg ^{130}Te *y
- CUORE 133kG ^{130}Te
- 時定数 ~秒 (時間分解能 数十ms)
- 表面で起きたアルファ線が連続スペクトルのバックグラウンド
これに対抗しようと思ったらエネルギー分解能~0.5%程度は欲しい
CdTeの時間分解能は、もっと良いので γ 線のコンプトンなどは、かなり除けるのではないだろうか。(隣合う素子でveto & 1個の素子内でも波形情報で)

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。

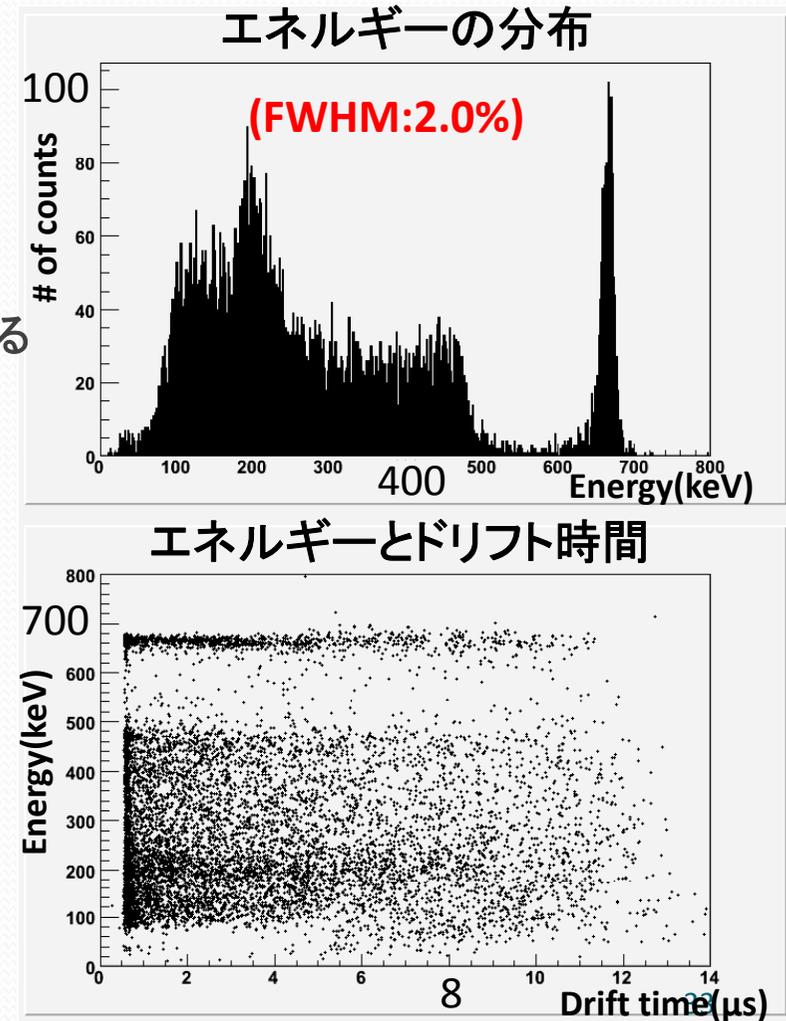
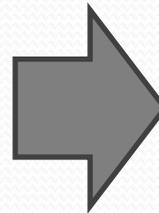


本河大先輩の研究成果

ドリフト時間からパルス高さを補正 ^{137}Cs

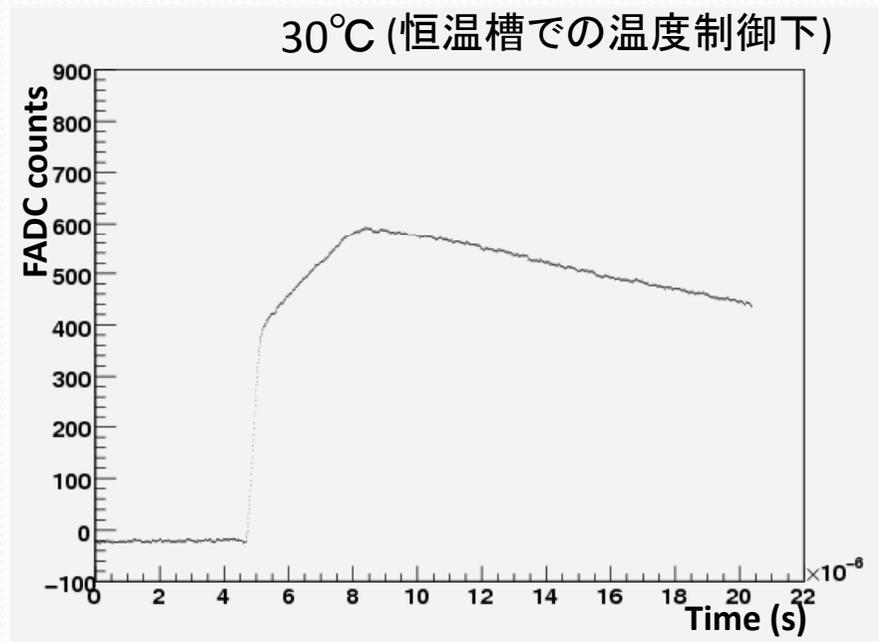


ドリフト時間による
補正

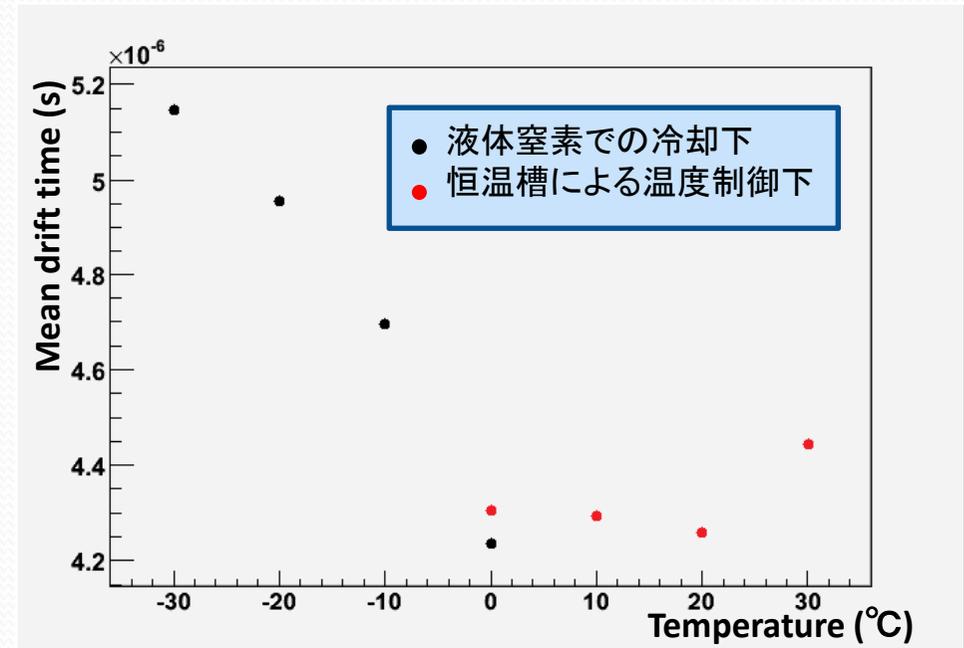


木河大先輩の研究成果2

温度とドリフト時間(5mm角素子)



温度による波形の変化

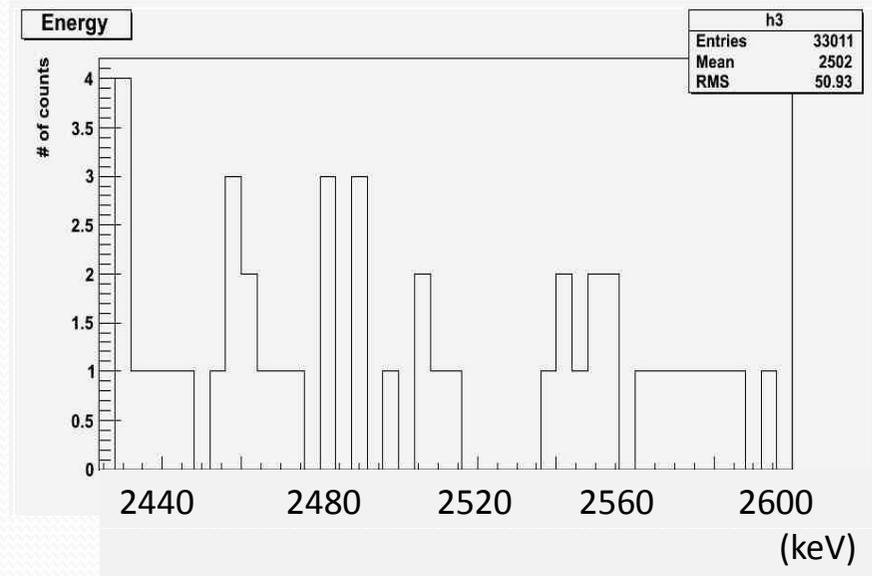
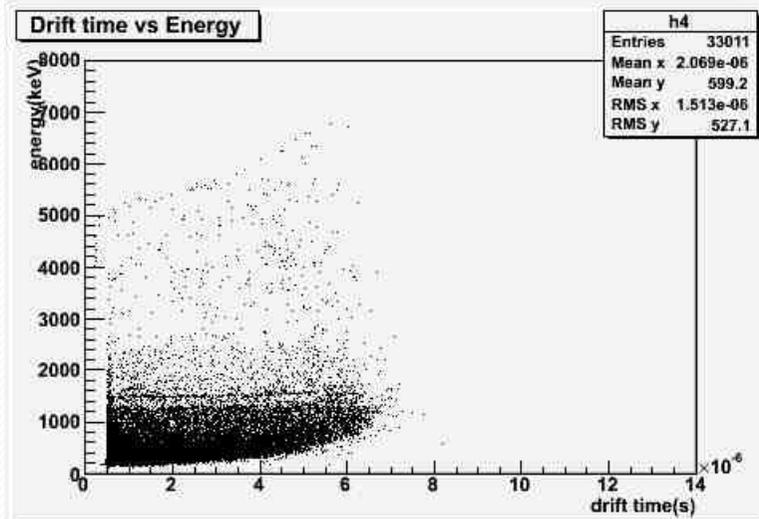
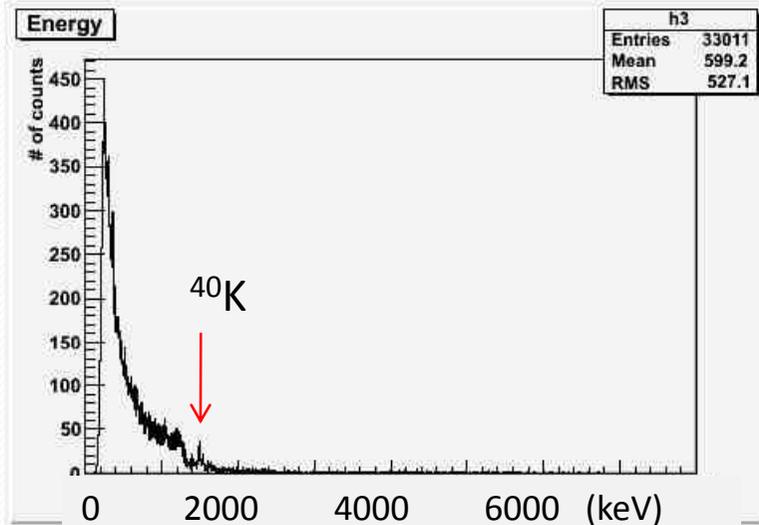


温度と平均ドリフト時間の関係

- 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



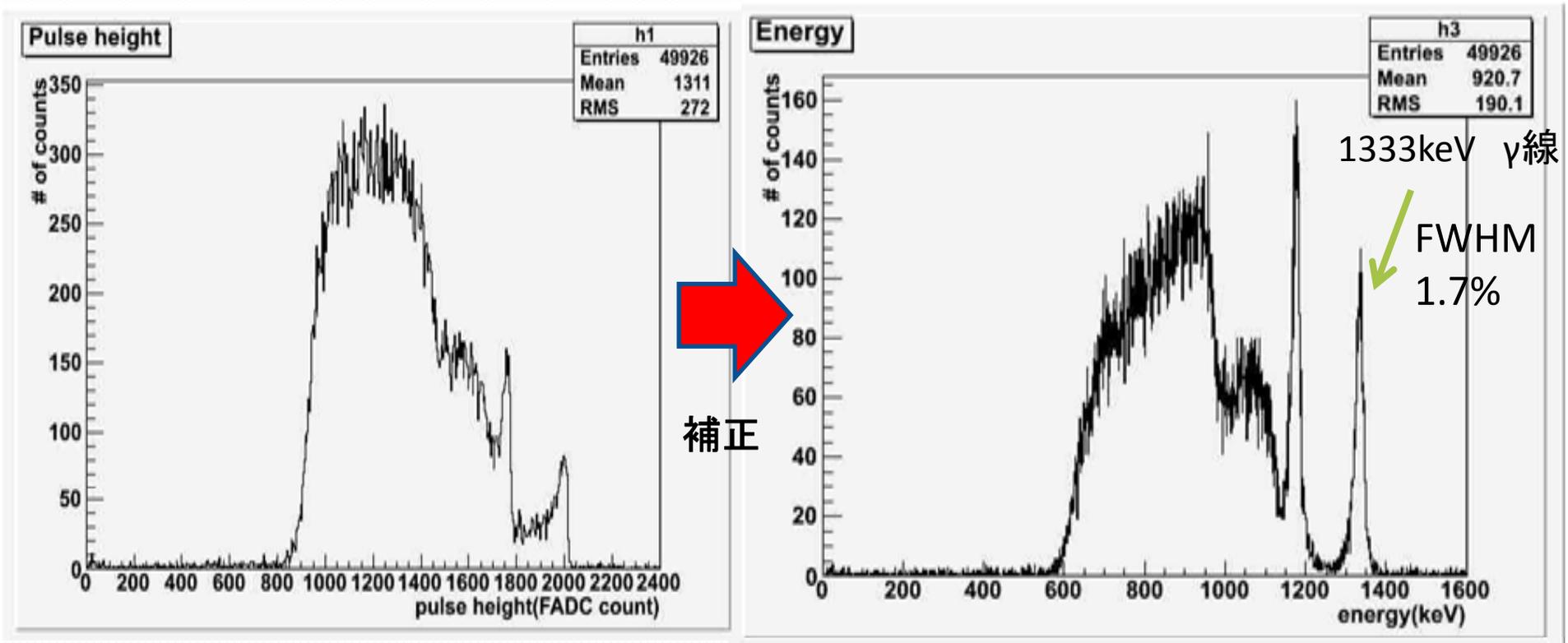
5mm角素子120時間、宇宙線Veto

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

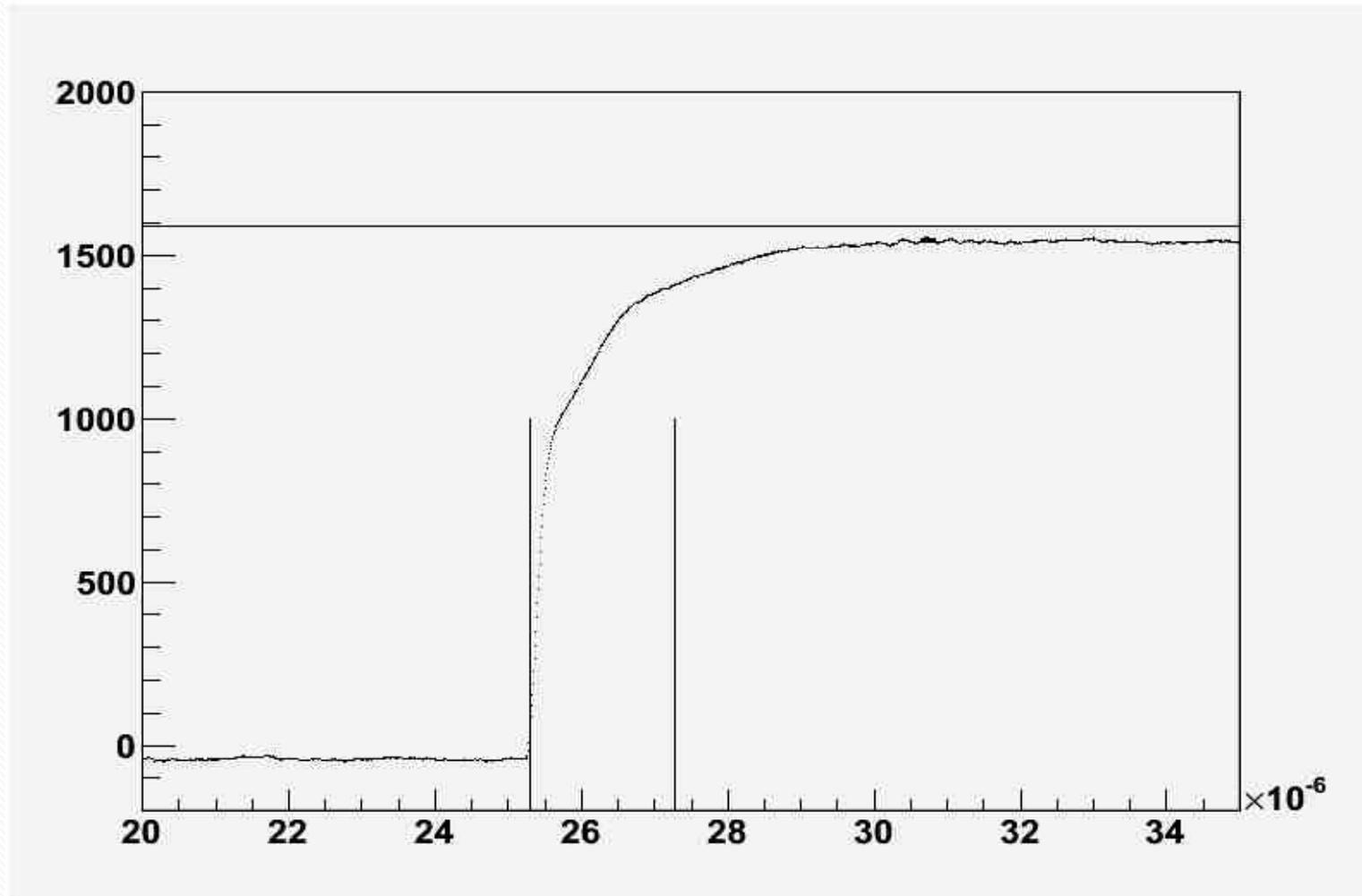
平木先輩の成果1

^{60}Co での評価

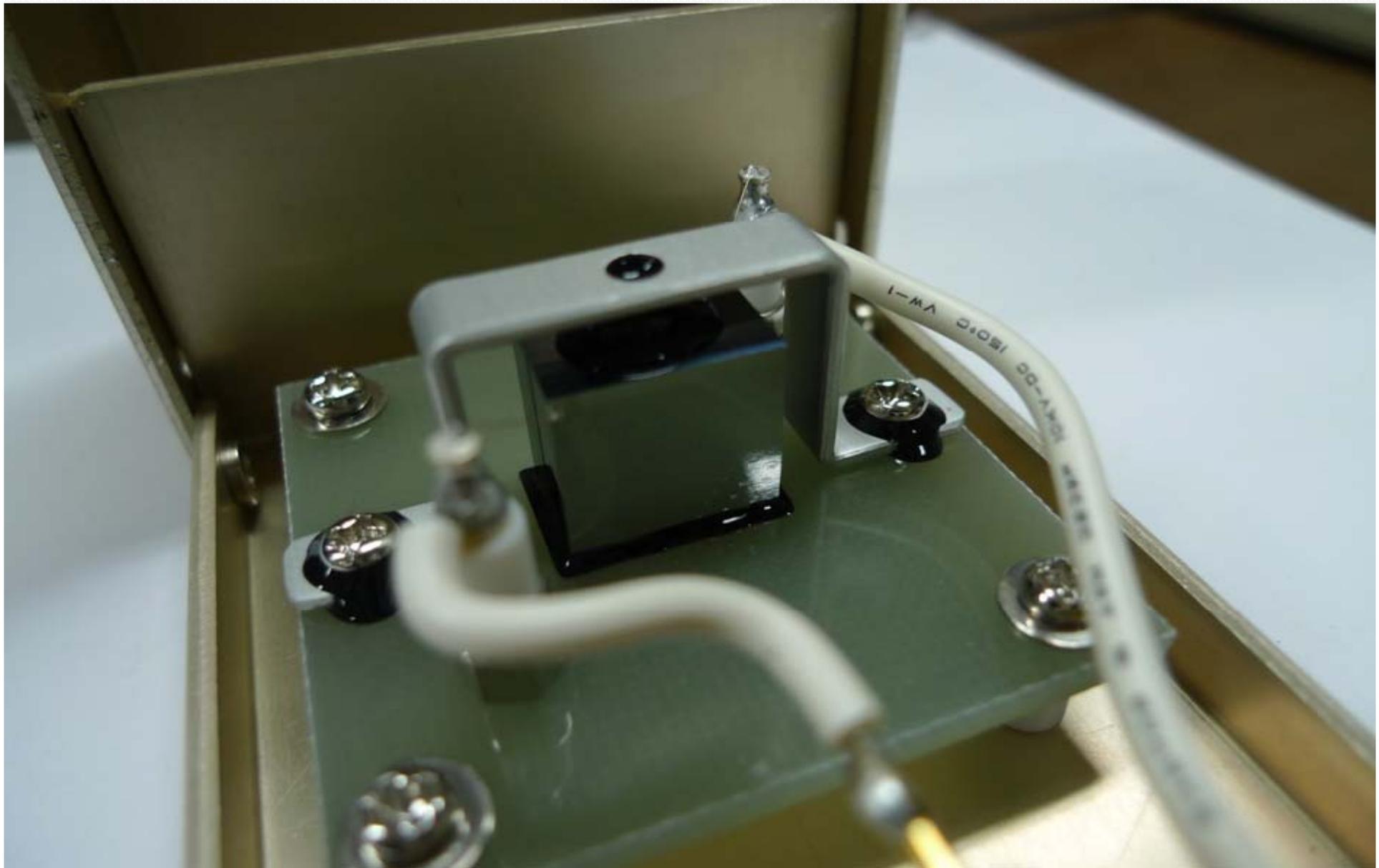


5mm × 5mm × 5mm CdTe検出器に ^{60}Co 線源(1173keVと1333keVの γ 線を出す)を当ててデータを取得し、上に述べた波高の補正を行いエネルギー分解能を求めると1333keVの γ 線でFWHM1.7%を得た

多重散乱? (5mm角) by 平木

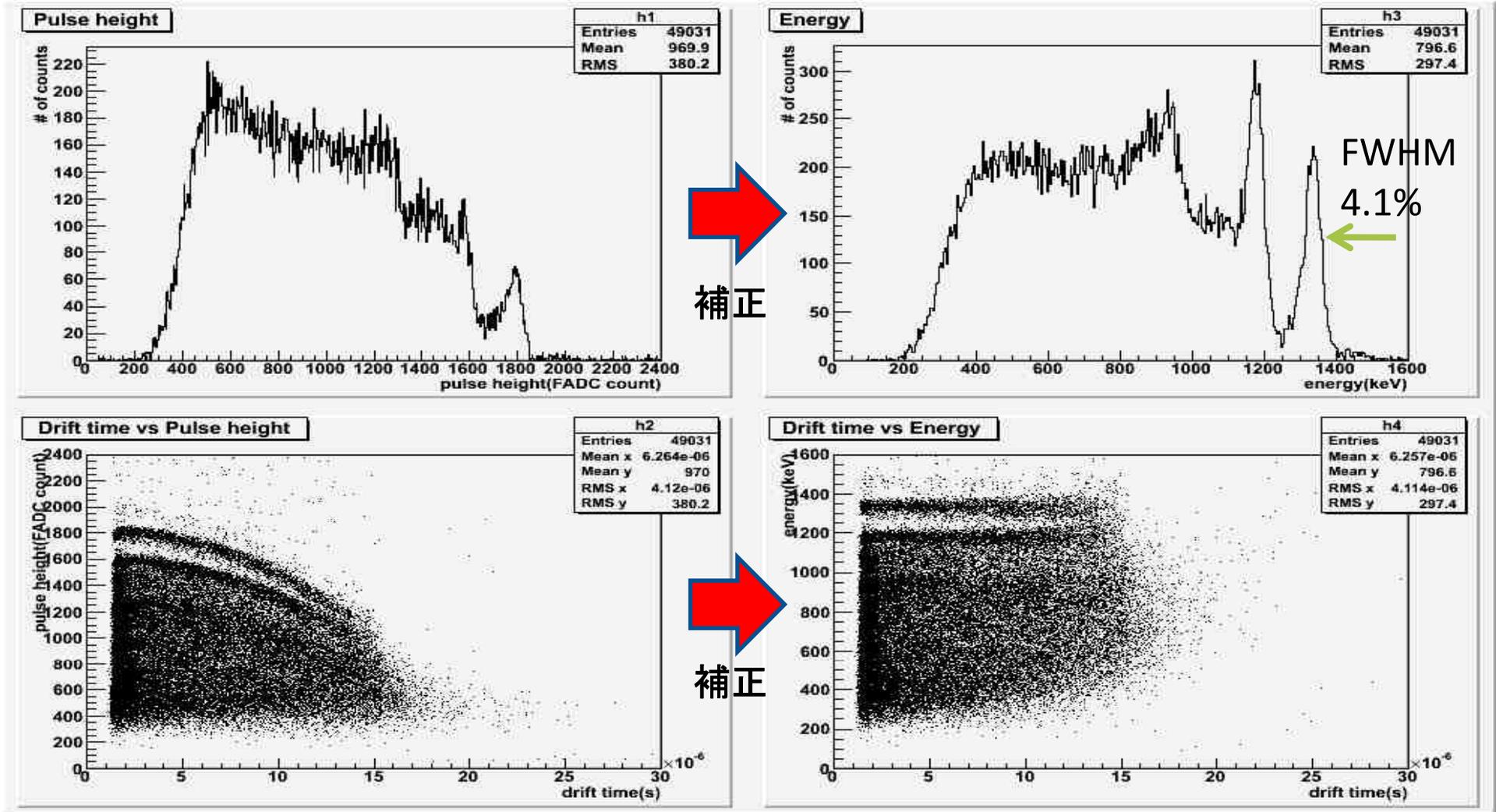


15 × 15 × 10(t) mm³ CdTe素子



平木先輩の成果2

15x15x10mm³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%

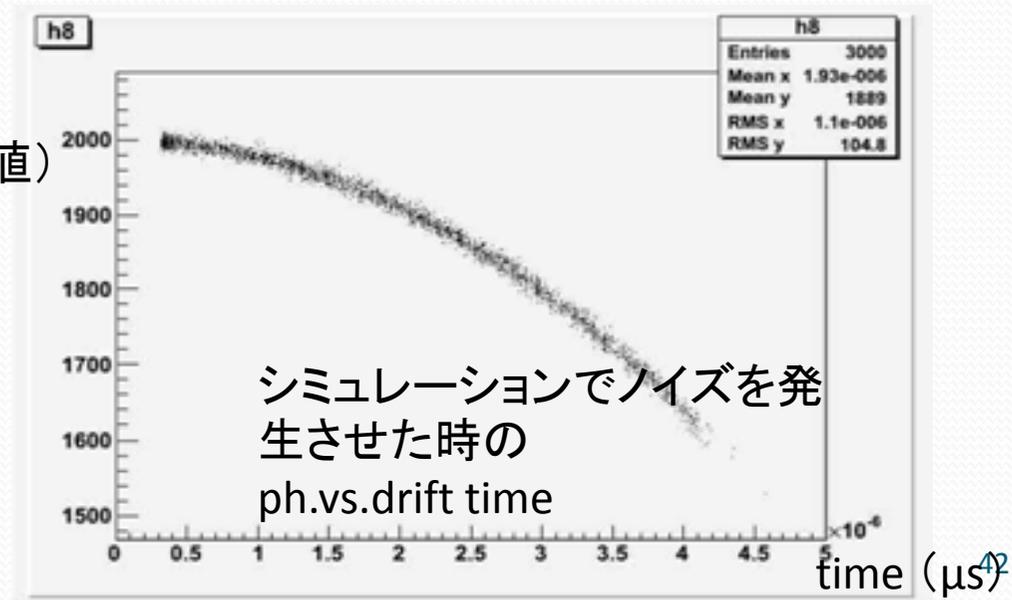
ついに木河君の
記録を更新

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

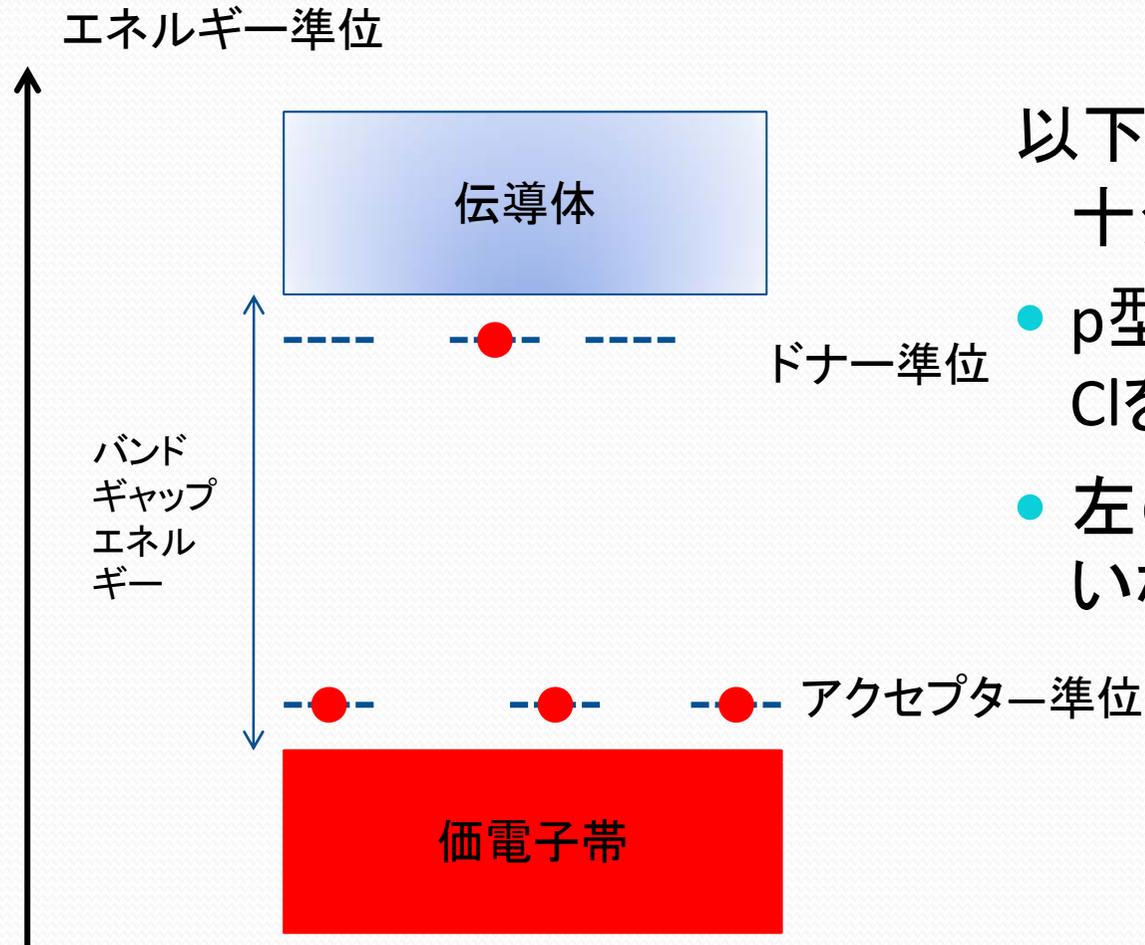
分解能に影響する要因 by 平木

- 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

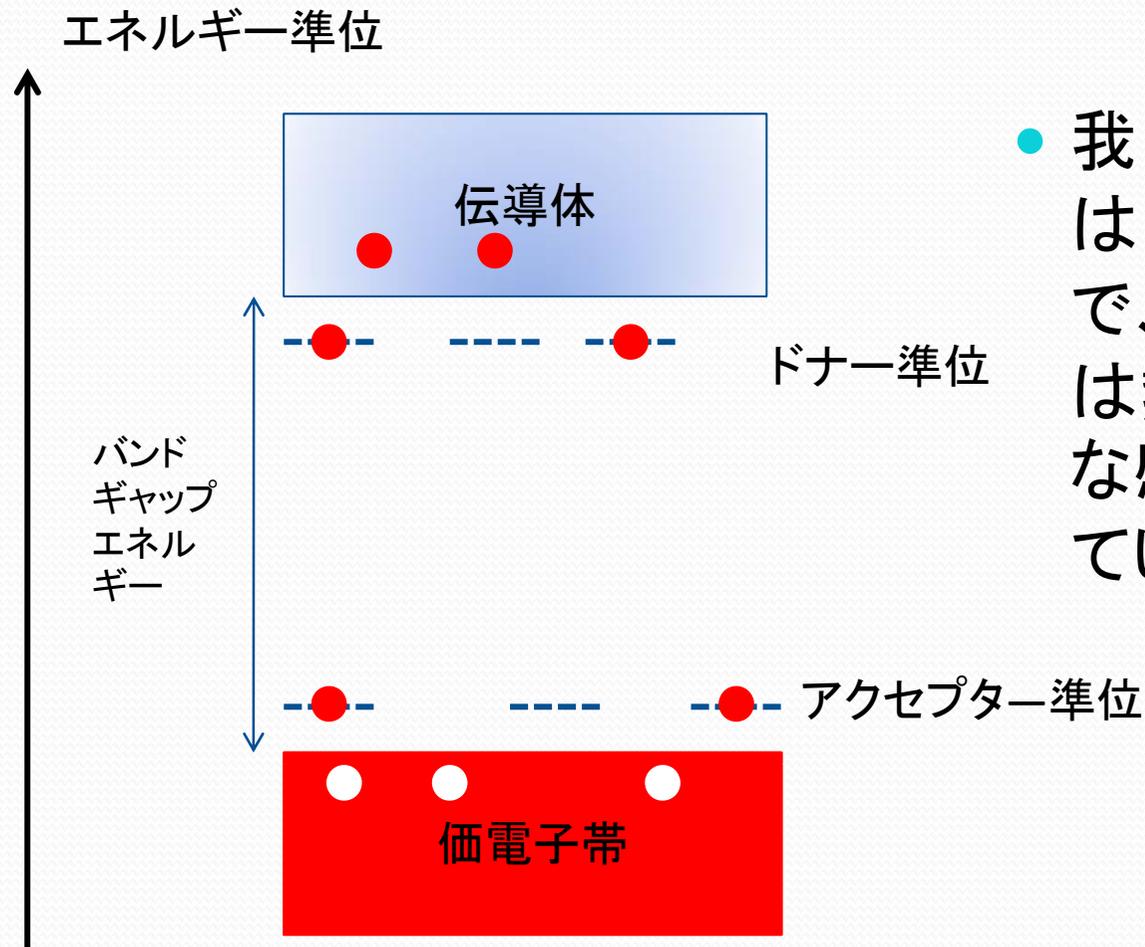


以下、推測(まだ、理解が十分でない)

- 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



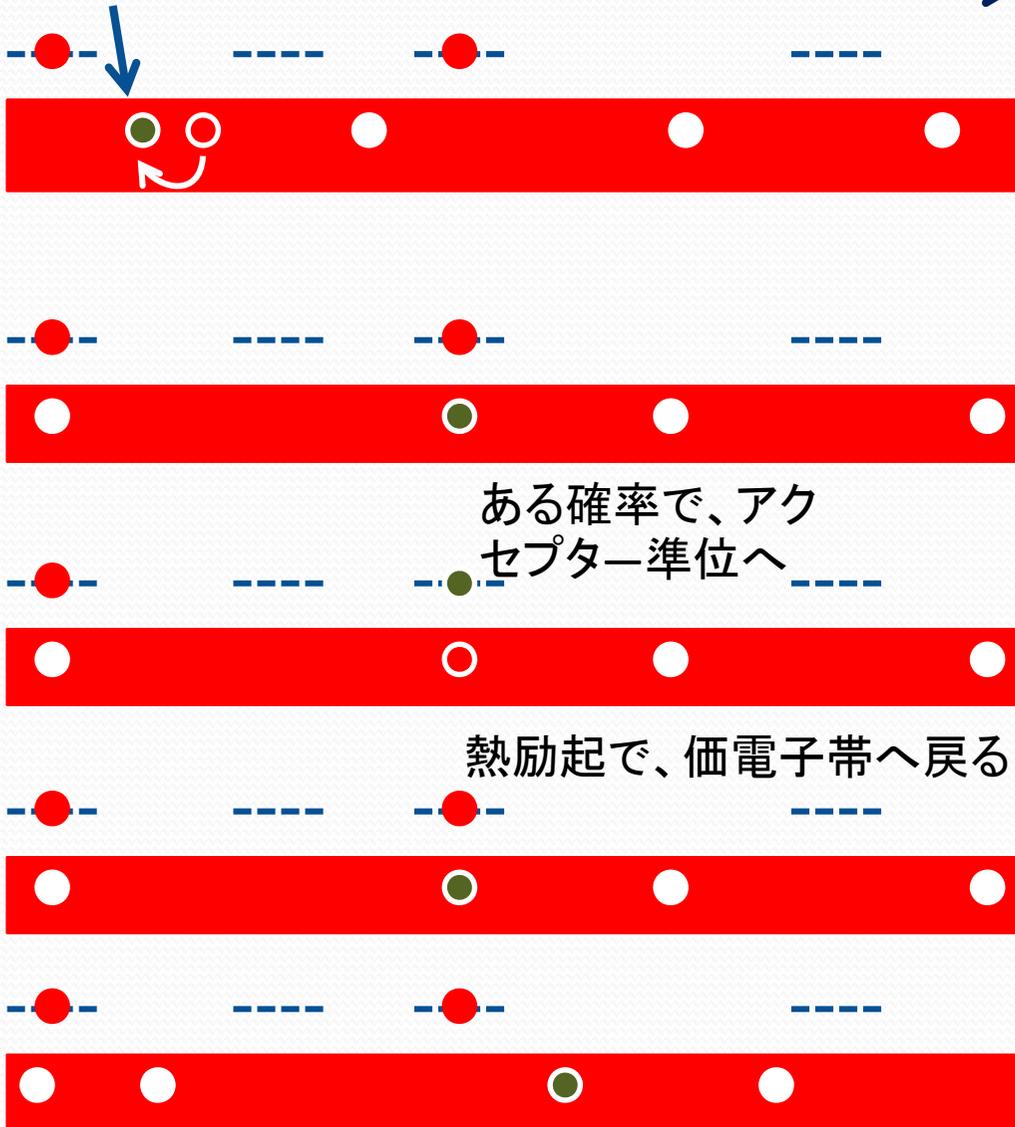
- 我々が使っているのは、オーミック接合なので、基本的に、常温では熱励起のため、こんな感じ。(空乏層を作っていない)

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、 2.25cm^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。