

波形解析による大容積 CdTe 結晶を用いた  
 $\gamma$  線検出器の開発

卒業論文

立教大学理学部物理学科

02cb059e 森口 哲朗

指導教員：下浦 享

2006 年 5 月



# 目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	研究内容	2
第 2 章	原理	3
2.1	半導体検出器の電荷収集	3
2.2	位置の導出	4
2.3	CdTe の Pulse Shape	5
第 3 章	実験 A	7
3.1	実験セットアップ	7
3.2	実験装置	7
3.2.1	CdTe 検出器	7
3.2.2	Flash ADC	8
3.2.3	Pre Amp	9
3.2.4	高圧電源 (H.V)	9
3.3	実験	9
3.4	結果・解析	9
3.4.1	CdTe の波形	9
3.4.2	Pre Amp による減衰の補正	10
3.4.3	波形解析 (フィッティング・エネルギー補正)	11
3.4.4	再結合率 $\tau$ の決定	12
3.5	考察・結論	12
第 4 章	実験 B (外部 Trigger によるデータ収集)	17
4.1	実験セットアップ	17
4.2	実験装置	17
4.2.1	Shapping Amp	17
4.2.2	Timing Single Channel Analyzer (Timing SCA)	17

4.2.3	Gate Generator . . . . .	18
4.2.4	Attenuator . . . . .	18
4.3	実験 . . . . .	19
4.4	結果・解析 . . . . .	19
4.4.1	収集した Trigger Pulse、Strip.Sum、及び、Guard ring.Sum の信号 . . . . .	19
4.4.2	Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号の足し合わせ . . . . .	21
4.4.3	再結合したキャリアの量 . . . . .	22
4.4.4	フィッティング・エネルギー補正 . . . . .	22
4.5	まとめ . . . . .	23
第 5 章	位置の感度 . . . . .	25
5.1	シミュレーション . . . . .	25
5.2	CdTe 中での $\gamma$ 線の吸収 . . . . .	26
5.3	照射方向の違いによる変化 . . . . .	26
第 6 章	再結合によって捕らわれた電荷 . . . . .	29
6.1	Guard ring.Sum の信号の原理 . . . . .	29
6.2	再結合によって捕らわれた電荷 . . . . .	29
第 7 章	今後の課題 . . . . .	31
7.1	Hecht の式の限界 . . . . .	31
7.2	フィッティングプログラムのバグ . . . . .	32
第 8 章	まとめ . . . . .	33
謝辞		35
参考文献		37

# 目次

2.1	電荷収集の概念図 . . . . .	3
2.2	電子と正孔の移動速度が違うときの半導体検出器の出力波形 (厚さ 5mm、バイアス 700V の計算) . . . . .	4
2.3	再結合を考慮した CdTe 信号 (厚さ 5mm、バイアス 700V の計算) . . . . .	6
3.1	実験 A のセットアップ . . . . .	7
3.2	CdTe 検出器 (ACRORAD 社製) . . . . .	8
3.3	電極構造 . . . . .	8
3.4	Pixie-4 内のデジタル台形整形 [5] . . . . .	8
3.5	Pixie-4 内の Trigger とサンプリング [5] . . . . .	8
3.6	CdTe 検出器 . . . . .	9
3.7	Pixie-4 . . . . .	9
3.8	CdTe 検出器から得られた波形 . . . . .	10
3.9	微分回路 . . . . .	10
3.10	補正後の波形 . . . . .	11
3.11	CdTe 信号と式 (2.7) をモデルとしたフィッティング . . . . .	12
3.12	CdTe 検出器のエネルギースペクトル (点線・白はエネルギー補正前のヒストグラム、実線・灰はエネルギー補正後のヒストグラムを示す。) . . . . .	13
3.13	再結合率の違いによる、光電ピークの低エネルギー側へのカーブ . . . . .	14
3.14	エネルギー補正前のエネルギーと位置の関係 . . . . .	14
3.15	エネルギー補正後のエネルギーと位置の依存性 . . . . .	15
4.1	実験 B のセットアップ . . . . .	18
4.2	Trigger Pulse . . . . .	19
4.3	Trigger Pulse、Strip.Sum、及び、Guard ring.Sum の信号 . . . . .	20
4.4	Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号の足し合わせた信号 . . . . .	21
4.5	エネルギー補正前後のエネルギーと位置の関係。左が補正前、右が補正後である。 . . . .	22
4.6	エネルギー補正前後のエネルギースペクトル。左が補正前、右が補正後である。 . . . .	23
5.1	GEANT3 でシミュレーションしたエネルギーと位置の関係 . . . . .	25

---

5.2	CdTe の線吸収係数 . . . . .	26
5.3	図 5.1 のコンプトン領域にあるイベントを縦軸にプロジェクトした。 . . . . .	27
5.4	図 5.1 の光電効果の領域にあるイベントを縦軸にプロジェクトした。 . . . . .	27
5.5	照射方向を変化させたときのエネルギーと位置の関係。 . . . . .	27
6.1	Guard ring 電極からの信号。左は陽極近傍で、右は陰極近傍で $\gamma$ 線の相互作用が起こったとき。 . . . . .	30
6.2	再結合によって捕らわれた電荷による誘導電荷 . . . . .	30
7.1	Hecht の式でフィッティングできない波形データ . . . . .	31
7.2	真横から $\gamma$ 線を照射したときの補正後のエネルギーと位置の関係。フィッティングプログラムのバグのため、イベント数が極端に少ない領域がある。 . . . . .	32
7.3	適切に最小化されていないイベント . . . . .	32

# 表目次

1.1	半導体物質の諸特性 . . . . .	1
-----	---------------------	---



# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究の背景

原子核実験において、 $\gamma$ 線を測定することは核構造を理解する最も有効な手段の一つである。現在、原子核実験で使用されている代表的な $\gamma$ 線検出器として、NaI シンチレーション検出器や Ge 半導体検出器がある。NaI シンチレーション検出器は検出効率は良いが、エネルギー分解能が Ge 半導体検出器に比べると悪い。Ge 半導体検出器は非常に高いエネルギー分解能を持つが、原子番号が低く、冷却装置を必要とするため、検出器の構造上検出効率を上げることは難しい。一方、Ge よりも検出効率が良く、NaI よりもエネルギー分解能の良い $\gamma$ 線検出器の候補として、テルル化カドミウム (CdTe) 検出器がある。表 1.1 に半導体物質の諸特性を示す。二元素半導体である CdTe は原子番号が大きいため $\gamma$ 線に対する吸収率が高い。そのため、CdTe 中の単位長さ当りの光電吸収の確率はよく用いられている $\gamma$ 線に対して、Ge の 4~5 倍、Si の 100 倍も大きい [1]。また、バンドギャップが Ge よりも高いことから、冷却不要の検出器として使うことができる。エネルギー分解能 (FWHM) に関して、Ge は 0.1%、NaI は 8.5% である一方で、CdTe 検出器は 1.13% を出すことが報告されている [2]。

物質	CdTe	Ge	Si
原子番号	48/52	32	14
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	6.02	5.33	2.33
バンドギャップ (eV)	1.52	0.72	1.12
電子正孔対生成エネルギー (eV/対)	4.43	2.98	3.61
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	800 ~ 1100	3900	1350
正孔移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	50 ~ 100	1900	480

表 1.1 半導体物質の諸特性

CdTe 検出器は、正孔キャリアの移動速度が電子キャリアに比べ約 10 倍遅い。そのため、正孔キャリアの移動中に格子欠陥等で再結合が生じ、全エネルギーを信号として取り出せないという欠点がある。現在実用化されている CdTe 検出器は、この再結合の影響を少なくするための工夫がなされてきた。例えば、X

線観測を目的としたピクセル型検出器がある [3]。これは、CdTe 結晶の厚さを 0.5 ~ 1.0mm と薄くすることで、キャリアの移動距離を短くし、再結合の影響を少なくしてある。また、CdTe 検出器から得られる信号を早い時定数と遅い時定数の 2 種類の回路で整形する FAST-SLOW 法がある [4]。これは、整形後の波高の違いから、電子と正孔が信号の立ち上がりで寄与した割合を求め、その割合からエネルギーを補正する方法である。他には、電子回路的なパルスの除去・修正をすることで、エネルギー分解能を上げる方法がある [2]。

原子核実験において、数 MeV 以上の  $\gamma$  線を効率良く吸収するためには、結晶にある程度の厚さが必要である。X 線のような低エネルギー領域では、CdTe 結晶の厚さは 0.5 ~ 1mm でも有効である。しかし、吸収率の良い CdTe でも、0.5 ~ 1mm 厚の結晶を  $\gamma$  線測定で使うことは難しい。

原子核実験において、CdTe 検出器を実用化するために、CdTe の波形の違いに注目することで再結合の割合を導出し、その割合からエネルギー減衰の効果を補正することで、大容積の CdTe 結晶を用いた  $\gamma$  線検出器の開発をした。また、同時に、波形の違いから  $\gamma$  線が検出された位置情報を得た。すでに、Ge では波形の違いによる位置導出に成功しているため、それを CdTe に応用した [6] [7]。このように、原子核実験を目的とした、大容積の CdTe 結晶を用いた  $\gamma$  線検出器の開発は、半導体検出器開発の最先端の研究である。

## 1.2 研究目的

本研究の目的は、従来困難であるとされてきた大容積の CdTe 結晶を用いた  $\gamma$  線検出器を使い、波形解析をすることにより、エネルギーの検出、位置の検出が可能であることを示すことである。本研究では Flash ADC を用いたデジタル波形解析をする。

## 1.3 研究内容

本研究には、深さ 5.0mm、縦 10mm、横 10mm の CdTe 結晶を使用した。 $^{137}\text{Cs}$  ソースからの  $\gamma$  線を CdTe に照射し、Flash ADC を用いて Pre Amp から出力される波形 (以後、単に「波形」を示すものは、Pre Amp から出力される波形のことを示す) を収集した。Flash ADC は波形そのものをデジタル化して取り込むことができるので、波形解析には必要不可欠である。CdTe の波形は電子・正孔それぞれの移動速度  $v_e$ 、 $v_h$ 、と寿命 (再結合率)  $\tau_e$ 、 $\tau_h$ 、及び、結晶の深さ方向の位置  $x$  の関数で近似できる。得られたデータを再現するよう、これらのパラメータ ( $v_e$ 、 $v_h$ 、 $\tau_e$ 、 $\tau_h$ ) をフィッティングによって導出し、エネルギー補正をした。より精度の良いフィッティングを行い、検出した  $\gamma$  線のエネルギーと、 $\gamma$  線が相互作用した結晶の深さ方向の位置を導出した。

## 第 2 章

# 原理

CdTe 半導体検出器が他の半導体検出器と異なる点は、正孔の移動速度が電子に比べて約 10 倍遅く、キャリアの移動中の再結合の効果が顕著になることである。再結合の効果によって、生成された電子正孔対を完全収集できないため、波高が低くなり、測定されたエネルギーが低く見えてしまうという欠点がある。しかし、電子と正孔の移動速度の違いは波形の違いにあらわれる。そのため、CdTe の波形を見ることで、 $\gamma$  線が相互作用した位置がわかり、エネルギーの減少を補正することができる。本章では、位置の導出と CdTe 検出器からの波形を近似するモデル (Hecht の式) を紹介し、波形解析の原理を説明する。

### 2.1 半導体検出器の電荷収集

図 2.1 のようなプレナ型の半導体検出器の電荷収集を考える。検出器の両側の電極に電圧を印加すると、結晶内に電場が形成される。電場は一定とする。 $\gamma$  線が結晶内に入射すると、結晶の原子 (主に、その中の電子) と相互作用を起こし、電子・正孔対が生成される。電子・正孔は、結晶内の電場によって、それぞれ陽極・陰極に移動する。このとき、キャリアの移動によって電極に誘導電荷があらわれる。誘導電荷は、

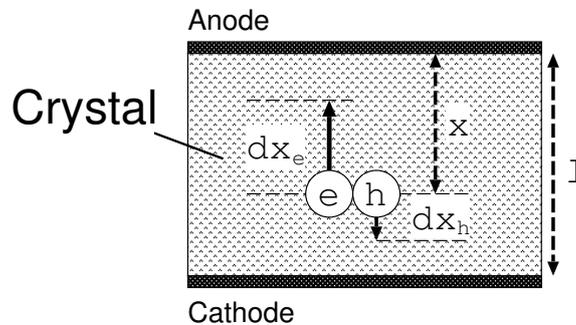


図 2.1 電荷収集の概念図

$$dQ(x) = \frac{eN_0}{l}(dx_e + dx_h) \quad (2.1)$$

と表すことができる。 $dQ(x)$  は誘導電荷、 $N_0$  は電子正孔対数の初期値、 $l$  は結晶の厚さである。電子・正孔の移動速度をそれぞれ  $v_e, v_h$  とし、移動時間をそれぞれ  $t_e, t_h$  とすると、式 (2.1) は、

$$dQ(t) = \frac{eN_0}{l} (v_e dt_e + v_h dt_h) \quad (2.2)$$

と、時間の関数に書き換えることができる。この式から、キャリアの移動時間とともに誘導電荷が大きくなるのがわかる。式 (2.2) を  $\gamma$  線が相互作用した時刻から、ある時刻  $t$  までの時間積分をすると、

$$Q(t) = \frac{eN_0}{l} (v_e t_e + v_h t_h) \quad (2.3)$$

となる。さらに、キャリアの移動が終了するまでの時間積分をすると、

$$Q = eN_0 = Q_0 \quad (2.4)$$

となり、生成された全ての電子正孔対が電極へ移動したときの全誘導電荷  $Q_0$  を得ることができる。また、入射した  $\gamma$  線の全エネルギー  $E_\gamma$ 、Pre Amp からの出力波形  $V$ 、そして、全誘導電荷  $Q_0$  の間には、

$$E_\gamma \propto V \propto Q_0 \quad (2.5)$$

という関係がある。ただし、 $V(t)$  は出力電圧、 $C$  は積分定数である。

## 2.2 位置の導出

生成された全ての電子・正孔対が電極へ移動すると、式 (2.3) の計算から、Pre Amp からの出力波形は図 2.2 のようになる。横軸は時間であり、 $t = 0$  は  $\gamma$  線が入射し結晶内で相互作用の起きた時刻である。縦軸は  $Q_0$  を 1 とした時の誘導電荷の積分値である。

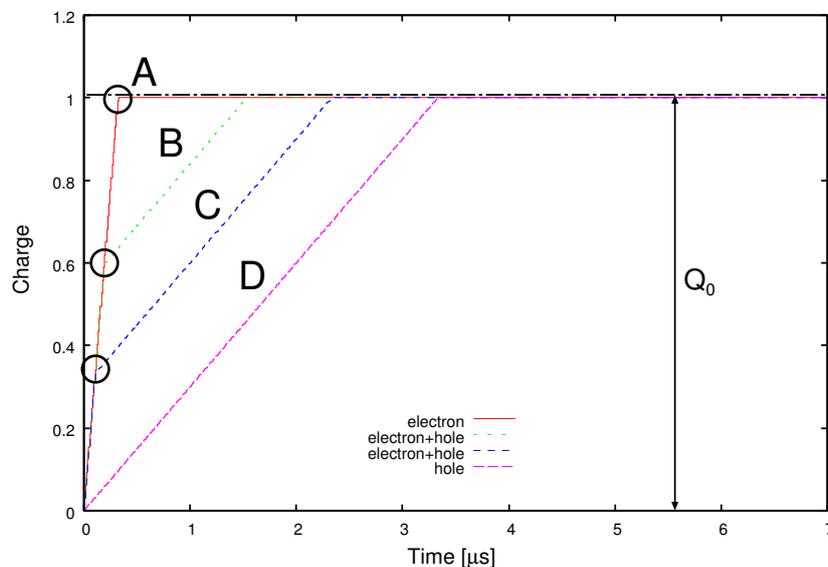


図 2.2 電子と正孔の移動速度が違うときの半導体検出器の出力波形 (厚さ 5mm、バイアス 700V の計算)

図 2.2 の波形には、二つの傾きを持つ。緩やかな傾きは正孔の移動をあらわし、急な傾きは電子の移動 (実際、電子と正孔の両方の移動をあらわすが、正孔の移動速度は小さいため、ほぼ電子による移動とみなす) をあらわす。

相互作用の直後、波形 A、B、C は電子の速い移動速度のため、急な立ち上がりをする。図中の 印は電子が陽極に到達した時刻である。波形 A は、電子が陽極に到達後、正孔による遅い立ち上がりがなく、flat な波形となっている。これは電子が結晶中を移動したことをあらわす。

相互作用の直後、波形 A、B、C は電子の速い移動速度のため、急な立ち上がりをする。一方、波形 D は急な立ち上がりをすることなく、緩やかな立ち上がりをする。これは、波形 D の立ち上がりが、電子の寄与が全くなく、すべて正孔によることを示す。このことから、正孔の移動距離が結晶の厚さ  $l$  と等しいことがわかり、波形 D を生じさせた  $\gamma$  線は CdTe 結晶内の陽極付近で相互作用したことがわかる。やがて、波形 B、C は図 2.3 中の 印の時刻で、電子による急な立ち上がりから、正孔による遅い立ち上がりへと移る。これは、電子が陽極に到達し、その後、正孔がゆっくりと陰極に向かって移動する様子をあらわしている。図中の 印は、各波形において電子が陽極に到達した時刻である。電子の移動速度は  $v_e$  なので、この時刻との積は電子の移動距離  $x$  である。このことから、波形 B、C を生じさせた  $\gamma$  線が陽極から  $x$  の位置で相互作用したことがわかる。また、図中の 印を見ることで、波形 B の方が波形 C よりも陽極側で相互作用が起こったことが瞬時的にわかる。最後に、波形 A は電子が陽極に到達後 (図中の 印後)、正孔による遅い立ち上がりがなく、flat な波形となっている。これは、波形 A の立ち上がりが、正孔の寄与が全くなく、すべて電子によることを示す。このことから、電子の移動距離が結晶の厚さ  $l$  と等しいことがわかり、波形 A を生じさせた  $\gamma$  線は CdTe 結晶内の陰極付近で相互作用したことがわかる。

このように、電子と正孔の移動速度が大きく異なる半導体は、二つの傾きを持つ立ち上がりをする。そのため、波形の違いを見ることで  $\gamma$  線が結晶と相互作用した位置を導出できる。

## 2.3 CdTe の Pulse Shape

実際に、キャリアが結晶内を移動すると、結晶内の格子欠陥等でキャリアの再結合が起こる。再結合の確率が結晶内で一様であるとする、電子正孔対の数は、キャリアの移動時間とともに指数関数的に減少する。Ge の場合、キャリアの移動速度が速いため、再結合の効果は無視することができる。しかし、実際の CdTe の場合、キャリアの移動速度が遅いため、キャリアの移動による再結合の効果が無視できなくなる。そのため、図 2.2 のような信号にはならない。式 (2.2) に再結合の効果を検討すると、

$$dQ(t) = \frac{eN_0}{l} (v_e \exp(-\frac{t}{\tau_e}) dt_e + v_h \exp(-\frac{t}{\tau_h}) dt_h) \quad (2.6)$$

と、近似できる。ここで、 $\tau_e$ 、 $\tau_h$  は電子・正孔それぞれの再結合率を表す。式 (2.6) を  $\gamma$  線が相互作用した時刻から、ある時刻  $t$  までの時間積分をすると、

$$Q(t) = \frac{eN_0}{l} \left( v_e \tau_e (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_e})) + v_h \tau_h (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_h})) \right) \quad (2.7)$$

となり、電極にあらわれる誘導電荷を近似することができる [8]。一般的に、式 (2.7) は Hecht の式と呼ばれる。式 (2.7) をもとに、CdTe 信号を計算すると図 2.3 のようになる。

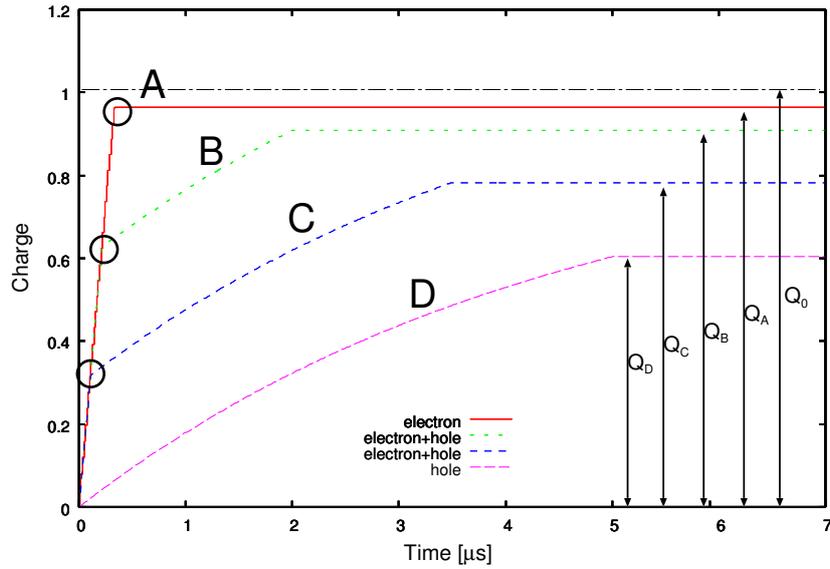


図 2.3 再結合を考慮した CdTe 信号 (厚さ 5mm、バイアス 700V の計算)

図 2.2 と比べると、図 2.3 は各イベントの波高が低いのがわかる。これは、再結合の効果によってキャリアの数が減り、誘導電荷が小さくなったためである。特に、正孔の寄与する割合が多いほど、電荷は大きく減衰する。図 2.3 より、

$$Q_{A\sim D} = k_{A\sim D} Q_0 \quad (2.8)$$

とすると ( $0 < k < 1$ )、 $k$  は再結合の割合をあらわす。

式 (2.7) において、電荷  $Q(t)$  を結晶の深さ方向の位置  $x$  (電子キャリアの移動した距離) の関数で表すと、

$$\begin{aligned} Q(x) &= \frac{Q_0}{l} \left( v_e \tau_e \left( 1 - \exp\left(\frac{-x}{v_e \tau_e}\right) \right) + v_h \tau_h \left( 1 - \exp\left(\frac{-(d-x)}{v_h \tau_h}\right) \right) \right) \\ &= k(x) Q_0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

と、近似できる。式 (2.9) は、 $\gamma$  線の相互作用した位置がわかれば、元の全エネルギーを導けることを示す。位置は前節で説明した方法によって求まるので、再結合の割合を導出できる。よって、元のエネルギーを導くことができ、エネルギー補正をすることができる。これが、本研究で用いた波形解析の原理である。

## 第 3 章

# 実験 A

本章では、実験 A についてのセットアップ、実験装置、結果・解析、考察について述べる。実験 A は、Flash ADC を用いて波形データを収集し、波形解析をすることでエネルギー補正を行うことが目的である。波形解析によって、結晶の深さ方向の位置を導出し、 $^{137}\text{Cs}$  ソースからの  $\gamma$  線に対して、35 keV (FWHM) のエネルギー分解能を得た。

### 3.1 実験セットアップ

図 3.1 に実験のセットアップを示す。Trigger Pulse は Flush ADC 内のフィルタリングによって作った。これによって、回路の簡素化が可能である。

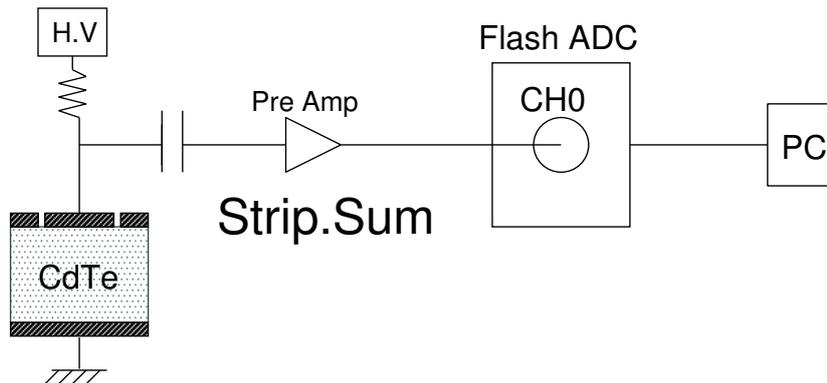


図 3.1 実験 A のセットアップ

### 3.2 実験装置

#### 3.2.1 CdTe 検出器

研究に使用した CdTe 検出器は図 3.2 のようなプレナ型の検出器である。結晶は厚さ 5 mm、縦 10 mm、横 10 mm である。電極は両極とも Pt 金属でできており (Pt/CdTe/Pt)、結晶の上下に 4 つの Strip 電極 (S1,S2,S3,S4) と 3 つの Guard ring 電極 (G1,G2,G3) がある (図 3.3)。Strip 電極は上下で交差するように作

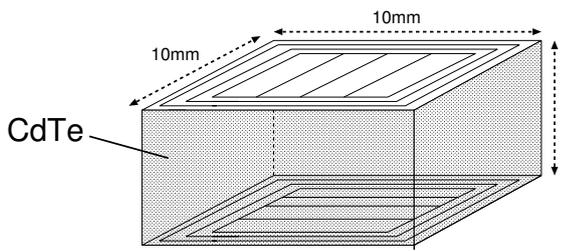


図 3.2 CdTe 検出器 (ACRORAD 社製)

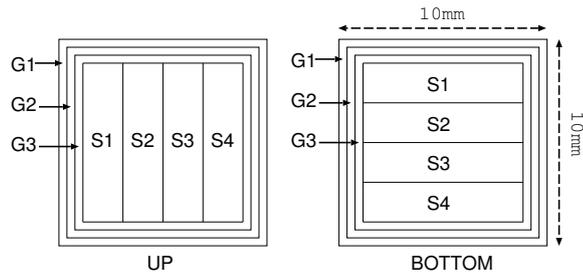


図 3.3 電極構造

られている。そのため、使用した CdTe 検出器は本研究で行う波形解析に加えて、電極と平行な面の位置も知ることができるように設計されている。今回の実験では、深さ方向の位置を知りたいので、電極を分割せず、一つの大きな電極として測定した。また、Guard ring 電極は、リーク電流の主な原因である表面電流（結晶表面を流れる電流）を下げる効果がある [3]。研究に使用した CdTe 検出器のリーク電流は測定済みであり、結晶の端面からの寄与と内側からの寄与の違いは顕著に見られないことがわかっている [4]。

### 3.2.2 Flash ADC

Flash ADC は波形そのものをデジタル化して取り込むことができるので、波形解析に必要な不可欠である。本実験では Pixie-4 (XIA 社製) を使用した。Pixie-4 は 14 ビットの分解能、サンプリングレート 75 MHz の Flash ADC である。CdTe の立ち上がり時間に比べ、サンプリングレートが十分に早いので、Pre Amp からの出力波形を精度良く再現することができる。ダイナミックレンジは  $\pm 2$  V である。Pixie-4 は PXI/Compact PCI 規格のモジュールである。PXI/Compact PCI シャーシには PXI と Compact PCI の両規格対応の NI PXI-1042 (NATIONAL INSTRUMENTS 社製) を使用した。これには CPU ボード (Windows2000) が差し込まれていて、PC ベースの計測をすることができる。また、Pixie-4 には、Fast Filter と Slow Filter の二種類のデジタル台形整形回路が内蔵されている。台形整形は、図 3.4 のように行われ、Pre Amp からの出力波形の立ち上がり時間に応じて、Rise Time と Flat Time を設定することができる。図中の  $L$  が Rise Time、 $G$  が Flat Time をあらわす。Fast Filter は信号を検出するための Trigger として、Slow Filter は波高値を測定するためのサンプリングとして整形される (図 3.5)。

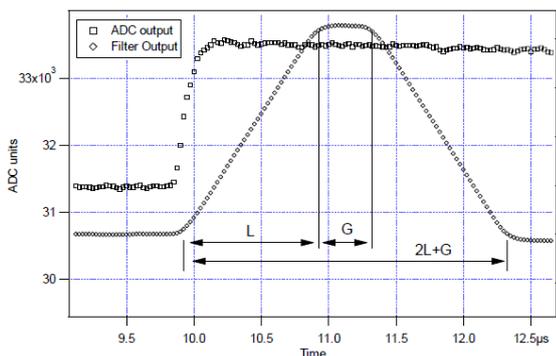


図 3.4 Pixie-4 内のデジタル台形整形 [5]

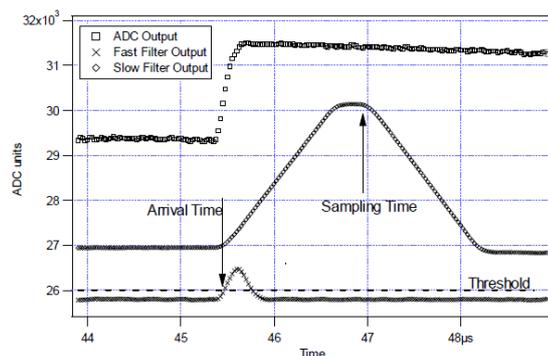


図 3.5 Pixie-4 内の Trigger とサンプリング [5]

### 3.2.3 Pre Amp

CLEAR-PULSE 社製の 528A を使用した。3000 V の高圧にも耐えられるように、Input コネクタは SHV になっている。帰還抵抗は 100 M $\Omega$  で、帰還容量は 1 pF である。1 台で 8 チャンネル使用することができる。

### 3.2.4 高圧電源 (H.V)

ORTEC 660 を使用した。

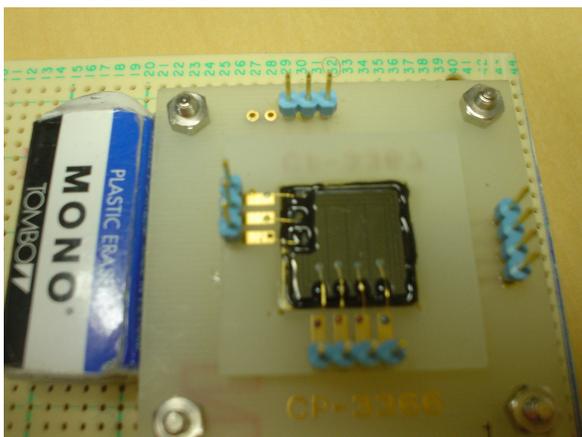


図 3.6 CdTe 検出器



図 3.7 Pixie-4

## 3.3 実験

700V の電圧を Strip 電極と Guard ring 電極の両方に印加し、4 本の Strip 電極をまとめた (Strip.Sum) の信号を収集した。CdTe 検出器を遮光されたアルミ製の箱の中に入れ、GND は箱の GND に落とした。箱と Pre Amp をアルミホイルで繋ぐことで、Pre Amp の GND も箱の GND に落とした。Trigger Pulse は Pixie-4 内のフィルタリングによって作った。Rise Time は正孔による遅い立ち上がりの信号に対応するため、最大の 0.413  $\mu$ s に設定し、Threshold はノイズを多く拾わない程度に低く設定した。線源は  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) を使用し、陰極側から照射したデータを収集した。信号は全 5400 イベントを収集した。

## 3.4 結果・解析

### 3.4.1 CdTe の波形

図 3.8 は実際に CdTe 検出器より得られた CdTe の波形である。式 (2.7) から計算した波形 (図 2.3) と良く似ている。

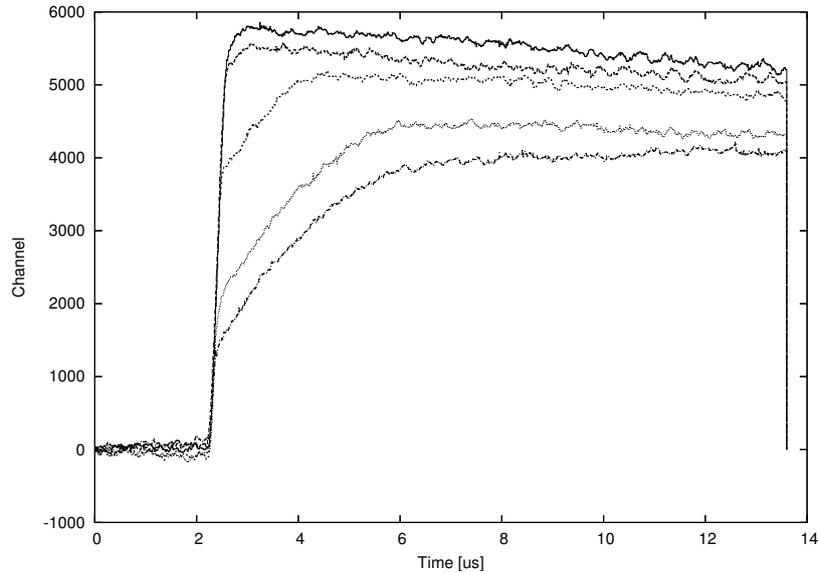


図 3.8 CdTe 検出器から得られた波形

### 3.4.2 Pre Amp による減衰の補正

図 3.8 は Pre Amp からの出力波形であり、波高が Pre Amp の時定数で減衰する。このような立下りのある波形は式 (2.7) でフィッティングできない。そのため、波形の立下りを補正する必要がある。そこで、図 3.9 のような微分回路を考える。 $f(t)$  は Pre Amp に入る前の信号の電圧、 $F(t)$  は Pre Amp 後の信号の電圧

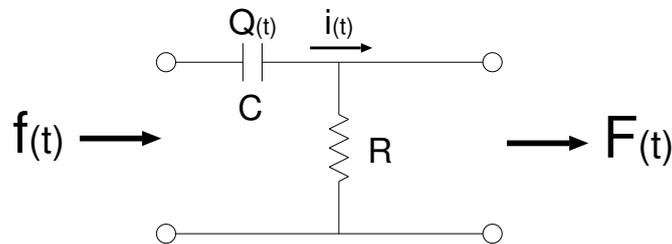


図 3.9 微分回路

をあらわす。これより、

$$F(t) = Ri(t) \quad (3.1)$$

$$Q(t) = C(f(t) - F(t)) \quad (3.2)$$

が成り立つ。式 (3.2) の両辺を時間微分すると、

$$i(t) = C\left(\frac{df(t)}{dt} - \frac{dF(t)}{dt}\right) \quad (3.3)$$

式 (3.1)、式 (3.3) より、 $\tau = RC$  とし整理すると、

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} + \frac{F(t)}{\tau} \quad (3.4)$$

Pre Amp に入る前の電圧は式 (3.4) の両辺を時間積分すれば良いので、

$$f(t) = \int \left( \frac{dF(t)}{dt} + \frac{F(t)}{\tau} \right) dt \quad (3.5)$$

と表すことができる。

式 (3.5) を用いて、Pre Amp からの出力波形を補正した (図 3.10)。実験で使用した Pre Amp の時定数は

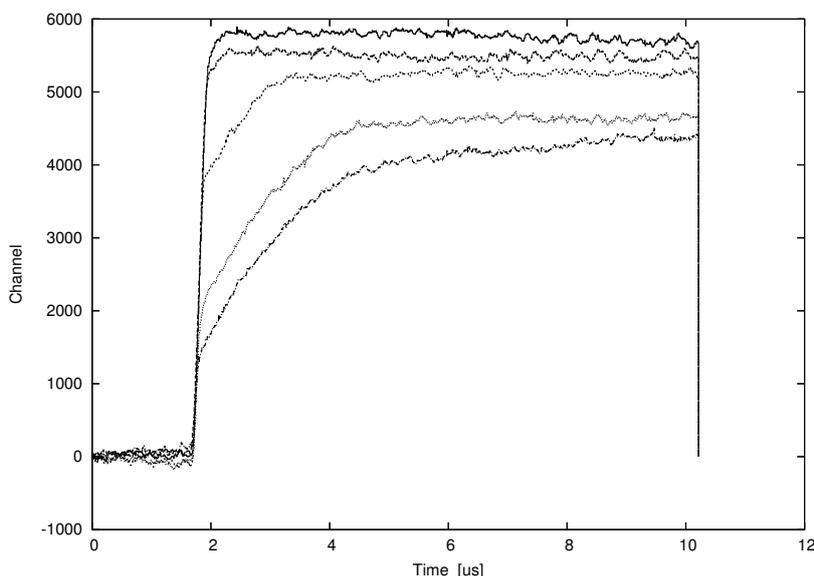


図 3.10 補正後の波形

$\tau = 100000$  ns である。図 3.8 と図 3.10 を比較すると、信号の立下りが補正されているのがわかる。フィッティングは図 3.10 のように立下りの補正後の波形を使用した。

### 3.4.3 波形解析 (フィッティング・エネルギー補正)

5 ページの式 (2.7) を関数としたフィッティングを行った。フィッティングでは、 $\tau = \tau_e = \tau_h$  とした。6 個のパラメータ ( $v_e, v_h, \tau, x, Q_0, t_0$ ) として、CdTe 検出器からの出力波形に一致するよう、最適のフィッティングをした。 $t_0$  は、 $t = 0$  から信号の立ち上がりまでの時間である。ここで、設定時に Delay を  $2.5 \mu\text{s}$  としたので、 $t = 0$  は、トリガーにかかった時刻から  $2.5 \mu\text{s}$  前の時刻をあらわす。その結果、 $v_e = 1.4 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 $v_h = 0.15 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 $\tau = 4.5 \mu\text{s}$  のとき、最も精度よくフィッティングすることができた。そして、再度、上記のパラメータを代入し、フィッティングすることで、 $\gamma$  線の相互作用した位置  $x$  と、 $\gamma$  線のエネルギー  $E_\gamma$  ( $E_\gamma$  は元の電荷量  $Q_0$  と比例関係にあるので、以後、 $E_\gamma$  は  $Q_0$  と同等のものとする) を導出した。

図 3.11 は実際の CdTe の信号を式 (2.7) をモデルとしてフィッティングしたものである。フィッティングすることで、 $\gamma$  線のエネルギー  $E_\gamma$  と、 $\gamma$  線の相互作用した位置  $x$  を導出することができた。補正後のエネルギースペクトルを補正前のものと併せて示す (図 3.12)。エネルギー補正前に比べて、補正後の光電ピークはシャープになる。

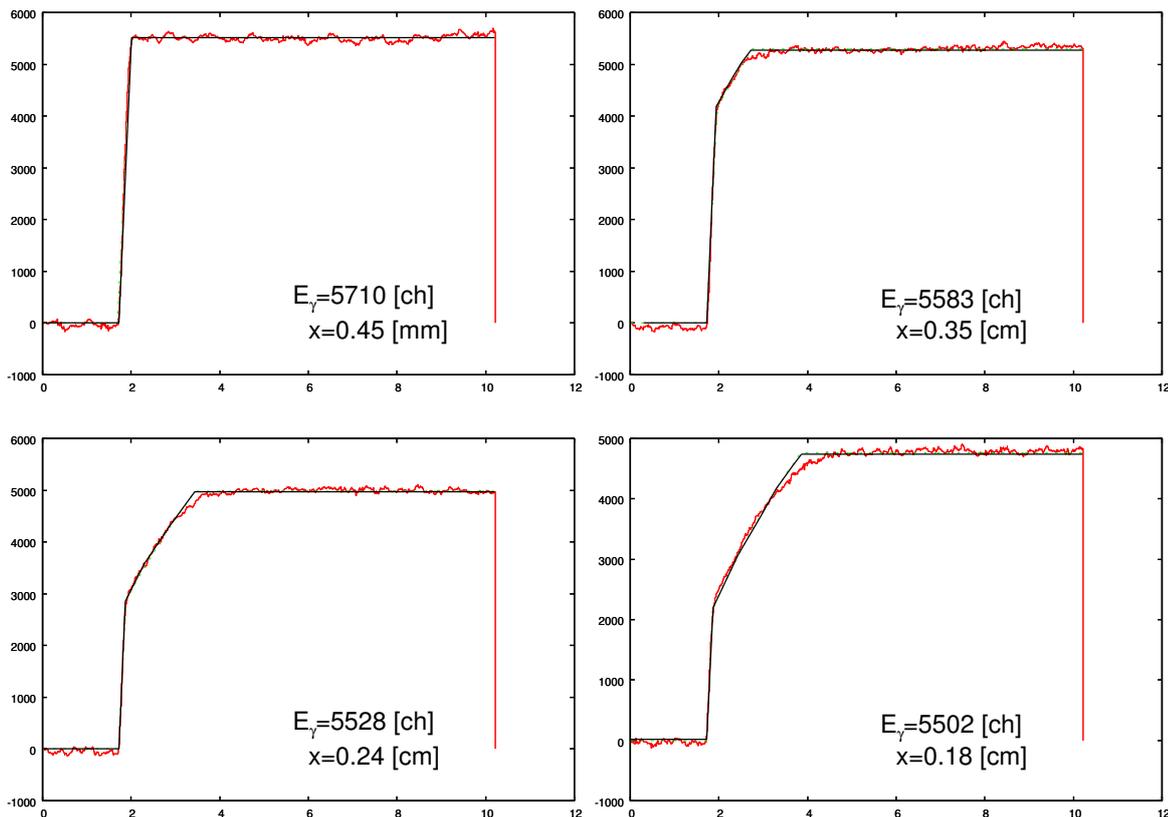


図 3.11 CdTe 信号と式 (2.7) をモデルとしたフィッティング

### 3.4.4 再結合率 $\tau$ の決定

フィッティングにより、各イベントのエネルギー  $E_\gamma$  と相互作用した位置  $x$  を導出した。本節では、エネルギーと位置の依存性から、フィッティングで導出した再結合率  $\tau = 4.5 \mu\text{s}$  の検証を行う。式 (2.9) より、エネルギーと位置の依存性を計算することができる。横軸にエネルギー (ADC Channel)、縦軸に位置をとり、再結合率をいろいろ変化させてプロットした (図 3.13)。

正孔の移動する割合が多くなるにつれて ( $x$  が小さくなるにつれて)、光電ピークが低エネルギー側へカーブしている。この曲がり具合は再結合率  $\tau$  で決まる。フィッティングより得られた位置と、エネルギー補正前のエネルギーの関係をプロットした (図 3.14)。

図 3.14 の光電ピークのカーブに注目すると、図 3.13 の  $\tau = 4.5 \sim 5.5$  の曲線と一致する。よって、フィッティングで導出した  $\tau = 4.5$  は、式 (2.9) から計算される値と矛盾のない結果と言える。最後に、エネルギー補正後のエネルギーと位置の依存性を示す (図 3.15)。

## 3.5 考察・結論

実験 A では、 $^{137}\text{Cs}$  からの  $662 \text{ keV}$  の  $\gamma$  線を CdTe 検出器に照射し、Flash ADC を用いて波形データを収集し、波形解析をすることでパラメータを決定した。電子、正孔の移動速度は印加電圧  $700 \text{ V}$  に対して、

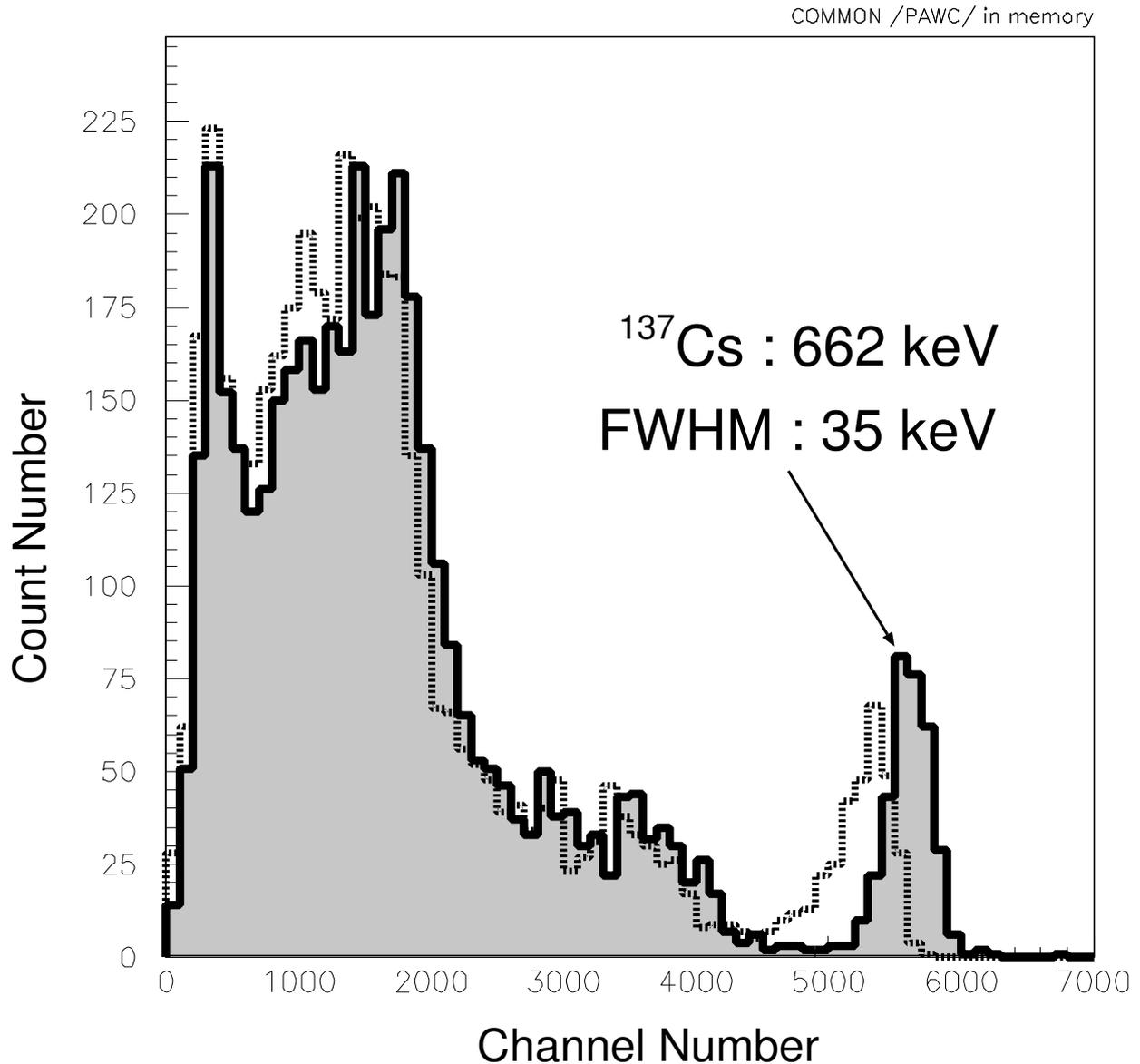


図 3.12 CdTe 検出器のエネルギースペクトル (点線・白はエネルギー補正前のヒストグラム、実線・灰はエネルギー補正後のヒストグラムを示す。)

それぞれ、 $v_e = 1.4 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 、 $v_h = 0.15 \text{ cm}/\mu\text{s}$  であった。この値は正孔の移動速度が電子に比べ約 10 倍遅く、報告されている移動度 (第 1 章表 1.1) から導かれる値に近いものである。再結合率は  $\tau = 4.5 \mu\text{s}$  と決定し、前節 (3.4.4) の検証より式 (2.9) から計算される値と矛盾のない結果だった。さらに、波形解析により、 $\gamma$  線の相互作用した位置を求め、そこから再結合の割合を導出し、エネルギー補正を行った。図 3.12 のように、補正の前後で、光電ピークを細くすることができ、補正後のエネルギー分解能 (FWHM) は 35 keV であった。これは、波形解析をすることで、エネルギー補正できたことを示す。よって、5 mm 厚の結晶を用いた CdTe 検出器は、波形解析をすることによって、再結合による電荷損失という欠点を克服できることがわかった。

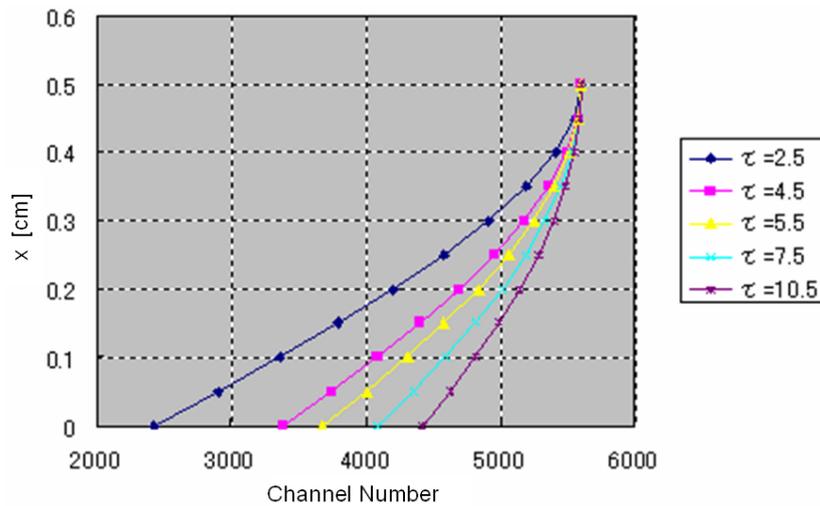


図 3.13 再結合率の違いによる、光電ピークの低エネルギー側へのカーブ

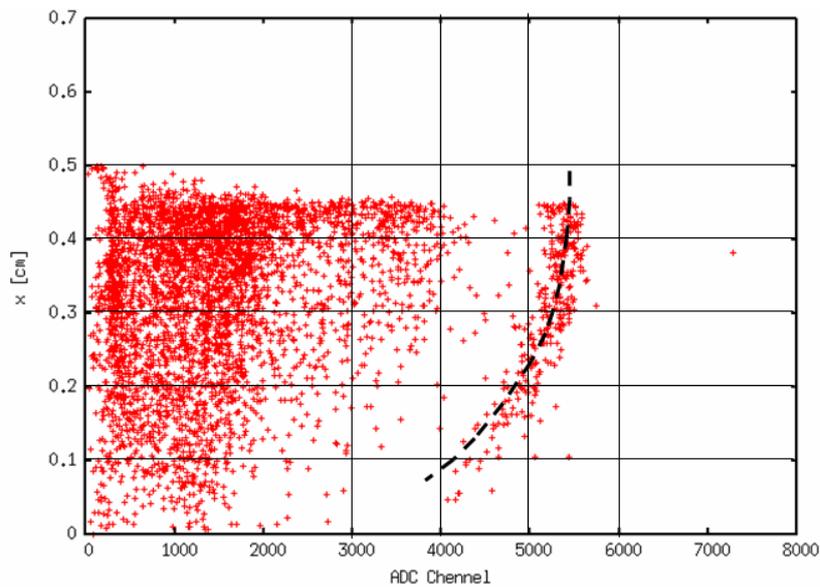


図 3.14 エネルギー補正前のエネルギーと位置の関係

しかし、図 3.15 を見ると、正孔のみが寄与したイベントが極端に少ないことがわかる。これは、CdTe 信号の正孔による立ち上がり時間が非常に遅いため、Pixie-4 内で Trigger Pulse を整形することができなかったことが原因と考えられる。Pixie-4 内で正孔による遅い立ち上がり時間に対して、十分な長い時間の Rise Time を設定する必要がある。しかし、実験 A では、Rise Time を最大値に設定して測定を行ったので、これ以上、Rise Time を長くすることはできない。そこで、次章、実験 B では、外部に Trigger 用の回路を作り、そこで作られた Trigger Pulse を Pixie-4 に入れ、正孔によるイベントを収集した。

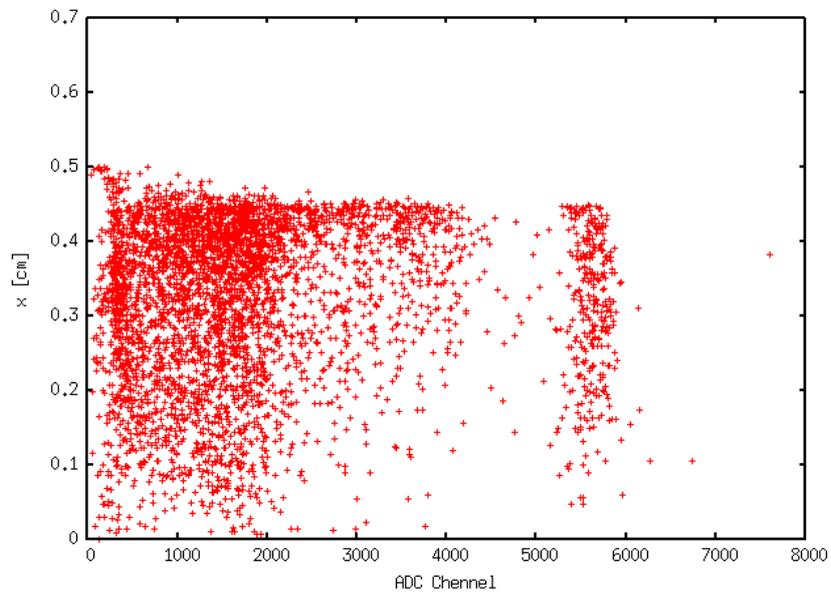


図 3.15 エネルギー補正後のエネルギーと位置の依存性



## 第 4 章

# 実験 B (外部 Trigger によるデータ収集)

実験 A では、 $x = 0 \sim 0.1$  のイベントが極端に少なかった。これは、正孔の立ち上がり時間が遅いため、Trigger Pulse を Pixie-4 内のフィルタリングによって作れなかったことが原因と考えられる。Pixie-4 の整形時定数 (Rise Time) は MAX に設定したが、それよりも正孔の立ち上がり時間が遅いので、Pixie-4 内のフィルタリングでは Trigger の限界である。そこで、実験 B では、Strip.Sum の信号から外部回路を通して Trigger Pulse を作り、これを Pixie-4 に入れ、 $\gamma$  線が CdTe 結晶内で相互作用したイベントをもれなく収集することにした。また、実験 B では Strip 電極だけでなく、Guard ring 電極からの信号も収集し、互いの応答について調べた。

### 4.1 実験セットアップ

図 4.1 に実験のセットアップを示す。実験 A のセットアップと違い、Trigger Pulse を作るための回路が組まれている。また、実験 B では、Guard ring.Sum の信号の効果を見るために、Pixie-4 には Trigger Pulse を CH0 に、Strip.Sum の信号を CH1 に、Guard ring.Sum の信号を CH2 に入れ、全 3ch を使用した。

### 4.2 実験装置

CdTe 検出器、Flash ADC、Pre Amp、及び、高圧電源は実験 A と同じものを使用したので省略する。

#### 4.2.1 Shapping Amp

ORTEC 571 を使用した。Strip.Sum の信号を時定数  $6 \mu\text{s}$  で整形した。これは、正孔寄与による CdTe 信号の立ち上がり時間が  $6 \mu\text{s}$  程だからである。Strip.Sum の信号を時間約  $20 \mu\text{s}$ 、波高約  $1000 \text{ mV}$  の信号に整形した。

#### 4.2.2 Timing Single Channel Analyzer (Timing SCA)

ORTEC MODEL 420A を使用した。Timing SCA は、設定した範囲内の波高を持つ信号がきた時、TTL (Transistor-Transistor Logic) 規格のロジックパルスを出す回路である。設定は、波高が  $0.48 \text{ V}$  以上、 $10 \text{ V}$

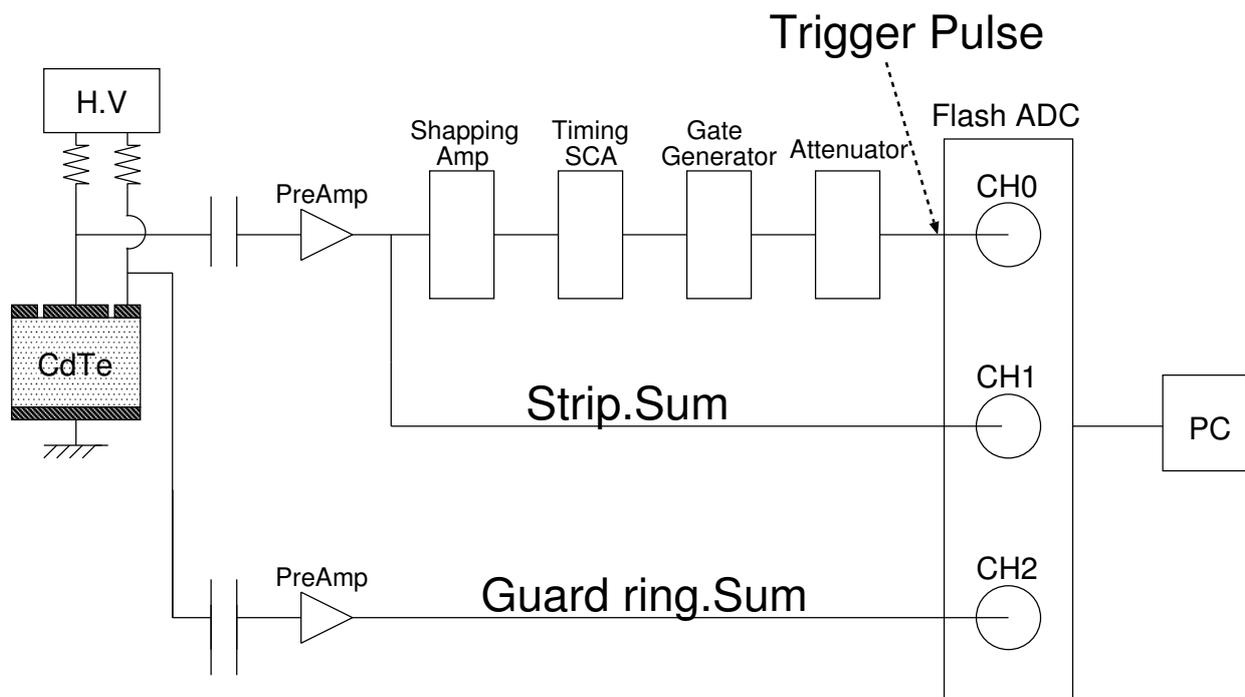


図 4.1 実験 B のセットアップ

以下の範囲にした。これは、上限値 10 V が設定可能範囲の MAX であり、下限値を 0.48 V 以下に下げるとノイズを多く含んでしまうためである。また、ロジックパルスが出力するタイミングを、入力波の立下りが下限値を切った時に設定した。Shapping Amp から送られた信号を、Timing SCA に通すことによって、時間 500 ns、波高 4.5 V のロジックパルスに整形した。

### 4.2.3 Gate Generator

ORTEC 416A を使用した。Gate Generator はロジックパルスの横幅 (時間)、高さ (電圧) を調整することができる。使用した ORTEC 416A は、横幅  $0.4 \sim 4 \mu\text{s}$ 、高さ  $2 \sim 10 \text{ V}$  のロジックパルスに整形できる。Pixie-4 に入れるために、波高最小のロジックパルスに整形したいので、横は  $4.5 \mu\text{s}$ 、高さは 2 V に設定した。Timing SCA から送られたロジックパルスは横は  $2 \mu\text{s}$ 、高さは 2 V のロジックパルスになった。

### 4.2.4 Attenuator

(株) 海津製作所製のものを使用した。Attenuator は波高を調整することができる。Gate Generator からのロジックパルスは 2 V だった。Pixie-4 のダイナミックレンジは  $\pm 2 \text{ V}$  であるが、このパルスを Pixie-4 に直接入れても測定できなかった。そこで、Attenuator によって波高を低くして、Pixie-4 にロジックパルスを送った。波高を 100 mV に下げた。

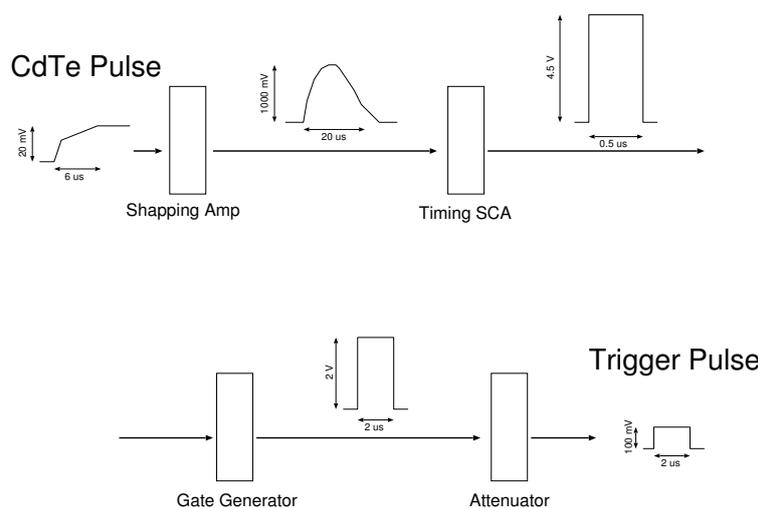


図 4.2 Trigger Pulse

## 4.3 実験

Ch0 にロジックパルスが入ったときを Trigger として、その時に Ch1、Ch2 に入った Strip.Sum と Guard ring.Sum の信号を収集した。これらの 3 信号を同時に収集できるように、Ch1、Ch2 に  $10 \mu\text{s}$  の Delay をかけ、ロジックパルスが Trigger にかかった時刻にあわせた。CdTe 検出器は実験 A と同様に、アルミ製の箱に入れ、GND を箱の GND とした。また、線源は実験 A と同様、 $^{137}\text{Cs}$  を使用し、CdTe 結晶の側面から照射した。信号は 5400 イベントを収集した。

## 4.4 結果・解析

### 4.4.1 収集した Trigger Pulse、Strip.Sum、及び、Guard ring.Sum の信号

図 4.3 は、収集した波形データの代表的なものである。Trigger Pulse が来たときの Strip.Sum、及び、Guard ring.Sum の信号が取れている。赤の信号は Trigger Pulse、緑の信号は Strip.Sum、青の信号は Guard ring.Sum である。

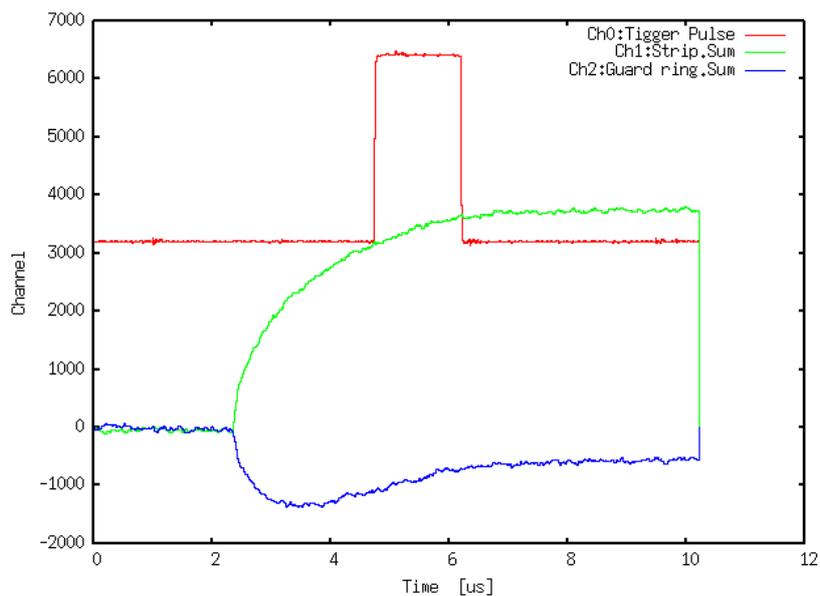


図 4.3 Trigger Pulse、Strip.Sum、及び、Guard ring.Sum の信号

Guard ring.Sum の信号については、第 6 章で述べる。図 4.3 より、Strip 電極と Guard ring 電極にあらわれた誘導電荷の時間発展を見ることができる。

キャリアの移動によってあらわれる誘導電荷は、電極全体に影響を与える。このことから、電極全体の誘導電荷を見るためには、Strip 電極と Guard ring 電極を一つにまとめる必要がある。そこで、次節では、Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号を足し合わせ、電極全体としての信号について解析する。

## 4.4.2 Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号の足し合わせ

足し合わせた信号の波形を図 4.4 に示す。今までは、図 4.4 中の Strip.Sum の信号 (赤の波形) のみを見

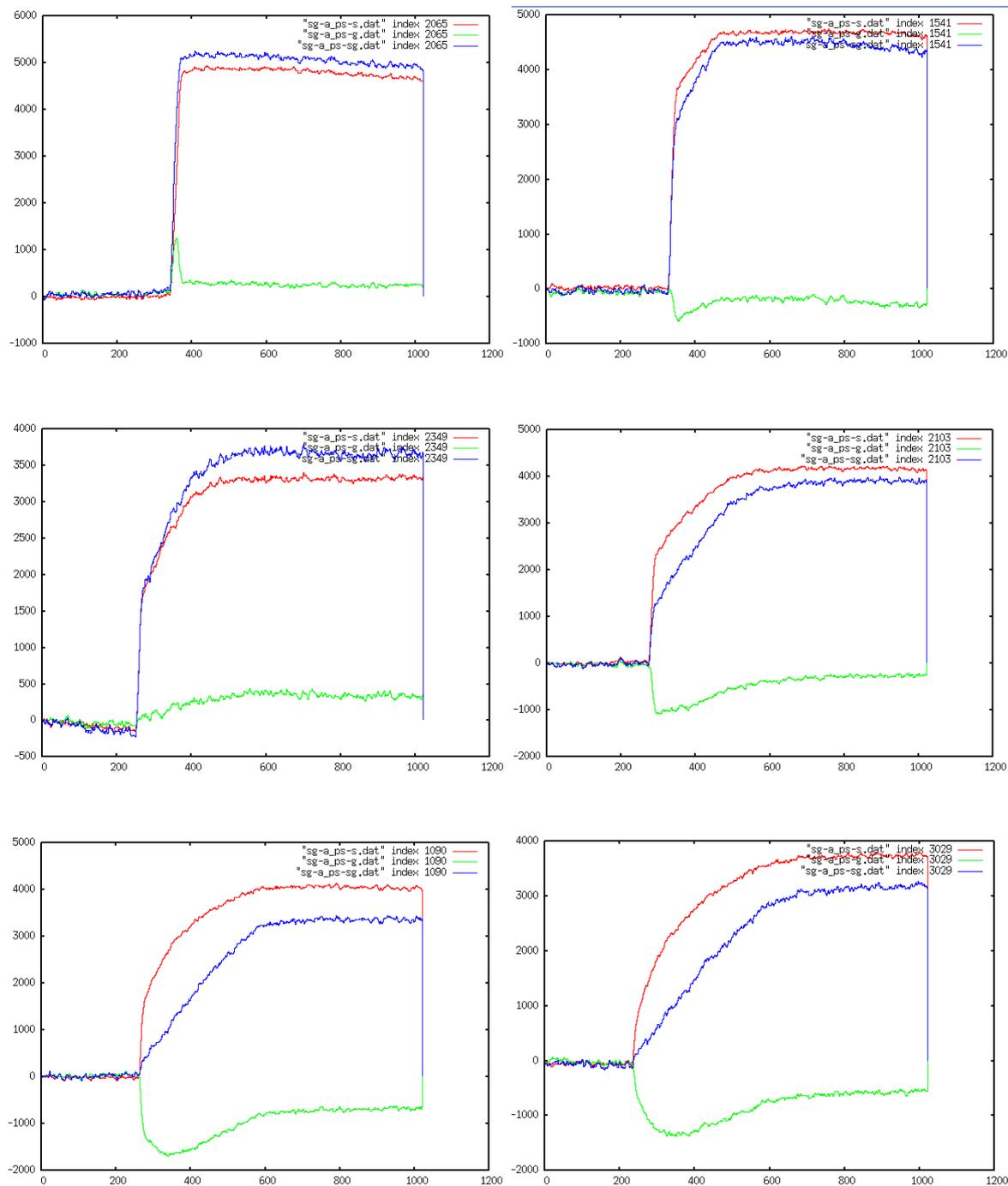


図 4.4 Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号の足し合わせた信号

ていた。しかし、Guard ring.Sum の信号 (緑の波形) を足し合わせることで、電極全体の CdTe 信号 (青の波形) を得た。Guard ring.Sum の信号に関して、電子が主に立ち上がりに寄与にした波形では、上に凸の細い

ピーク、一方、正孔が主に立ち上がりに寄与した波形では、下に凸の緩やかなピークであることがわかった。足し合わせることによって、今まで、電子・正孔の両方のキャリアが寄与したイベントだと思っていた波形は、実は、正孔によるイベントであるということもわかった。

#### 4.4.3 再結合したキャリアの量

Guard ring.Sum の信号を見ることで、再結合したキャリアの量の情報を得た。図 4.4 の下段にある 2 枚の波形の中の Guard ring.Sum の信号に注目する。Guard ring.Sum の信号の始めと終わりの波高に違いがある。この差が再結合したキャリアの量と考えることができる。理由は、結晶中をキャリアが移動した後に、電荷が残っていることを示しているからである。特に、正孔の寄与した波形については、再結合の影響が顕著になるため、Guard ring.Sum の信号の始めと終わりの波高に大きな違いがある。詳しくは、第 6 章で示す。

#### 4.4.4 フィットTING・エネルギー補正

実験 A と同様のパラメータを使い、式 (2.7) をモデルとしたフィッティングをして、エネルギー補正を行った。フィッティングには Strip.Sum の信号と Guard ring.Sum の信号の足し合わせた、電極全体の信号を使った。式 (2.7) は無限平面の電極を仮定している関数なので、電極全体の信号は、式 (2.7) のモデルに、より近くなった。図 4.5 に、エネルギー補正前後のエネルギーと位置の関係を示す。実験 A (図 3.14、図 3.15) と比べると、図 4.5 は、正孔が主に立ち上がりに寄与したイベント ( $x = 0.1$  付近) が多い。よって、外部から Trigger Pulse を作ることで、立ち上がりの遅い信号を多く収集することができた。また、図 4.6 は

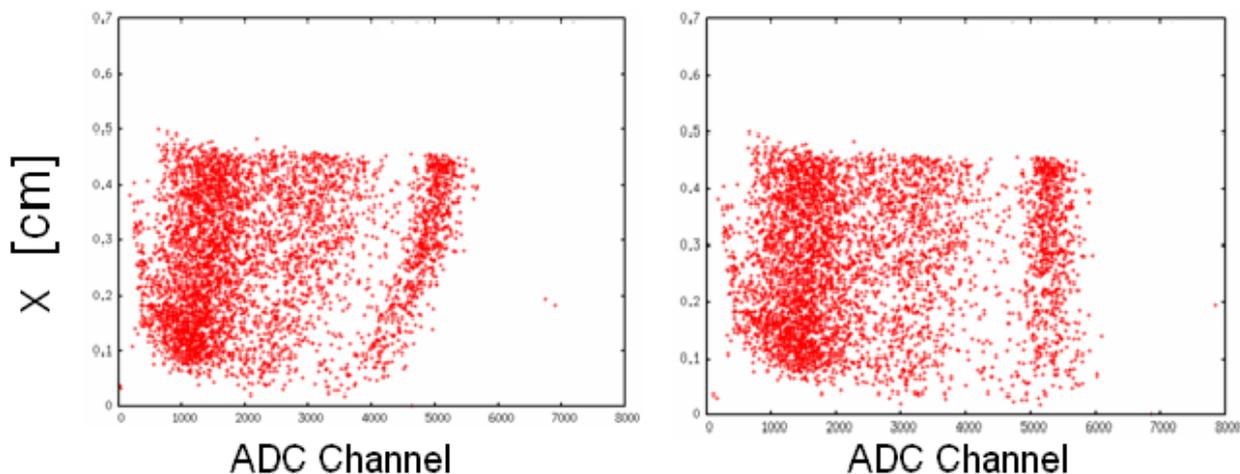


図 4.5 エネルギー補正前後のエネルギーと位置の関係。左が補正前、右が補正後である。

図 4.5 を横軸方向に射影した補正前後のエネルギースペクトルである。補正前のスペクトルに注目すると、実験 B では、立ち上がりの遅いイベントを多く収集することが出来たので、実験 A (図 3.12 の補正前) に比べ、はっきりと低エネルギー側にテールを引いている。エネルギー補正をすることで、ピークは鋭くなり、エネルギー分解能 (FWHM) は 67 keV であった。分解能は実験 A に比べて悪くなった。原因として、

フィッティングプログラムのバグが考えられるが、詳しくは第7章で述べる。

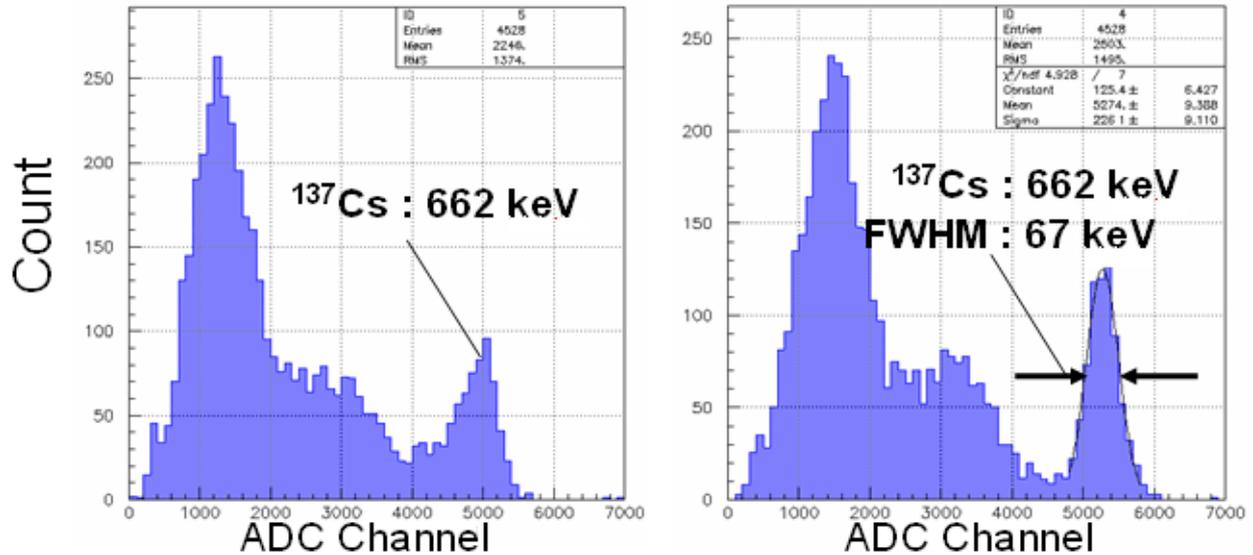


図 4.6 エネルギー補正前後のエネルギースペクトル。左が補正前、右が補正後である。

## 4.5 まとめ

実験 A では、主に正孔のみが寄与するイベントが少なかった。そのため、実験 B では、外部から Trigger Pulse を作った。それによって、図 4.5 からわかるように、光電ピークにおける  $x = 0.1$  付近のイベント数が、図 3.15 に比べて多く収集することができた。 $x = 0$  付近のイベントが少ないのは、正孔のみが寄与する波形が正しくフィッティングできていないためと考えられる。また、実験 A では  $Q=2000 \sim 4000$  のイベント数が少なかったが、図 4.5 ではムラなく収集できた。



## 第 5 章

# 位置の感度

本章では、波形解析によって導いた位置がどのくらいの精度を持つのかを述べる。そのために、シミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。

### 5.1 シミュレーション

実験 A、B で得られたエネルギーと位置の関係 (第 3 章図 3.15、第 4 章図 4.5) において、位置はどのような精度でプロットされているのかを調べるために、GEANT3 を用いてシミュレーションを行った (図 5.1)。

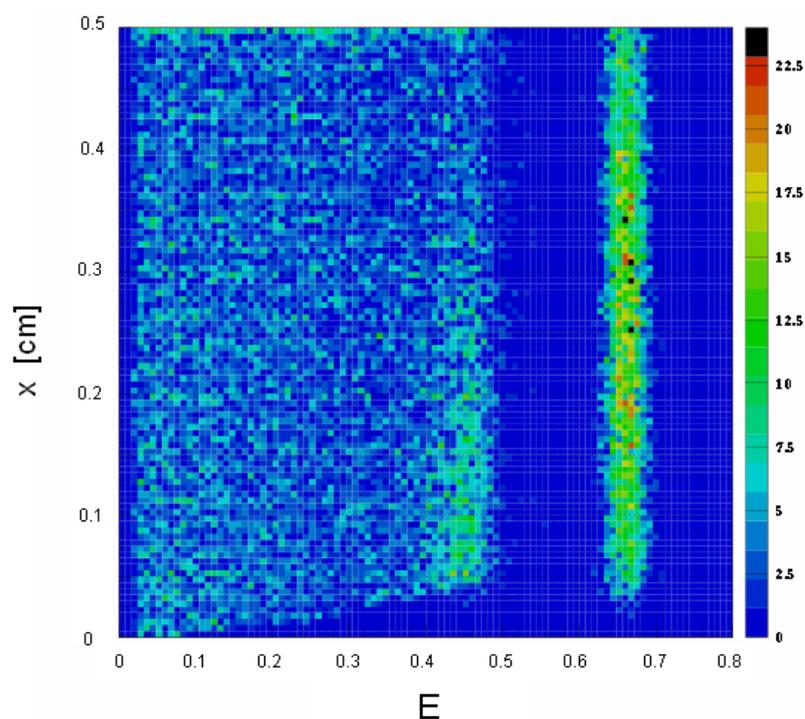


図 5.1 GEANT3 でシミュレーションしたエネルギーと位置の関係

縦軸は結晶の厚さ方向の位置で、 $x = 0$  が陽極、 $x = 0.5$  が陰極を表す。横軸は  $\gamma$  線のエネルギーに相当する量である。 $\gamma$  線は陽極側から照射した。

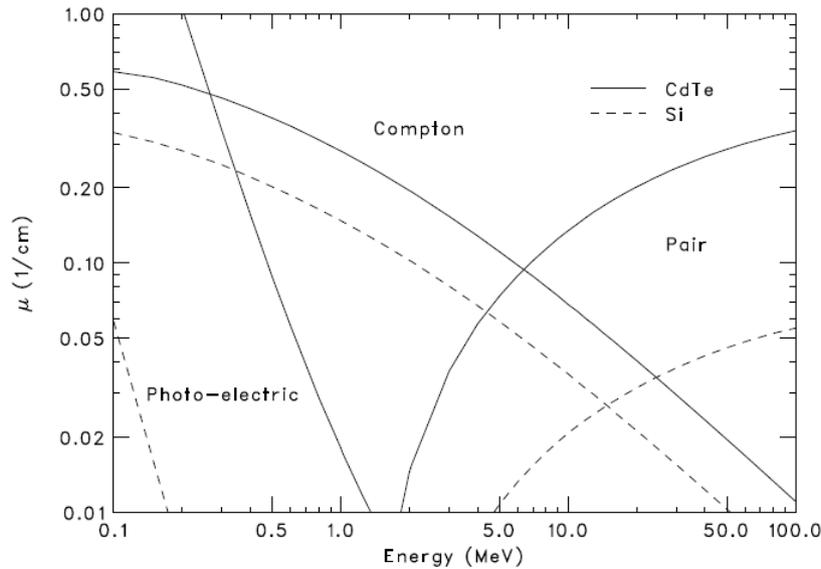


図 5.2 CdTe の線吸収係数

## 5.2 CdTe 中での $\gamma$ 線の吸収

図 5.2 は CdTe 中での  $\gamma$  線の線吸収係数を表す [9]。図 5.2 を見ると、実験で使用した 662keV の  $\gamma$  線は、CdTe 中で、主に、コンプトン散乱をする。このときの線吸収係数を  $\mu = 0.4 (\text{cm}^{-1})$  とすると、CdTe 中でコンプトン散乱による  $\gamma$  線の減弱は図 5.3 中の曲線のようにになる。図 5.3 は、図 5.1 のコンプトン領域のイベントを縦軸 (結晶の深さ方向) にプロジェクトしたものである。シミュレーション結果とほぼ一致する。しかし、光電効果の領域にあるイベントを縦軸にプロジェクトすると、図 5.4 のようになり、exponential で減衰しない。陽極側から  $\gamma$  線を照射したにもかかわらず、結晶の中央にイベントが密集していることがわかる。光電効果の領域において、このようになるのは、CdTe 結晶内で  $\gamma$  線の相互作用が複数回行われているためと考えられる。図 5.2 のように、662keV ではコンプトン散乱が主に起こり、光電効果の起こる確率は低くなる。そのため、 $\gamma$  線は一回、又は、数回コンプトン散乱を起こし、エネルギーが低くなった後、光電効果によって CdTe 内に吸収されるのである。CdTe 内で数回のコンプトン散乱をすることで、平均的に結晶の中央で吸収されるため、図 5.4 のようになるのではないかと考えられる。

## 5.3 照射方向の違いによる変化

前節のシミュレーションと考察をもとに、実際に、照射位置を変えて実験を行った。実験セットアップ等は第 4 章「実験 B」と同様にし、 $\gamma$  線源を置く位置を陰極側、結晶の横側、陽極側と変化させてデータを収集した。結果は図 5.5 である。図中の (1) は陰極側から、(2) は結晶の横側から、(3) は陽極側からそれぞれ  $\gamma$  線を照射したときのエネルギーと位置との関係である。これを見ると、コンプトン領域においては、 $\gamma$  線の照射した方向によって、違いがあらわれた。また、光電効果の領域においては、(1)~(3) に大きな違いは見られなかった。これは、前節のシミュレーションと一致する。しかし、第 7 章でも述べるが、フィッ

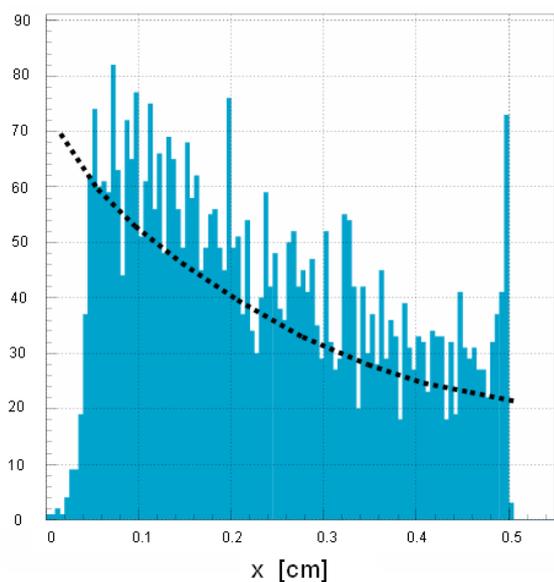


図 5.3 図 5.1 のコンプトン領域にあるイベントを縦軸にプロジェクトした。

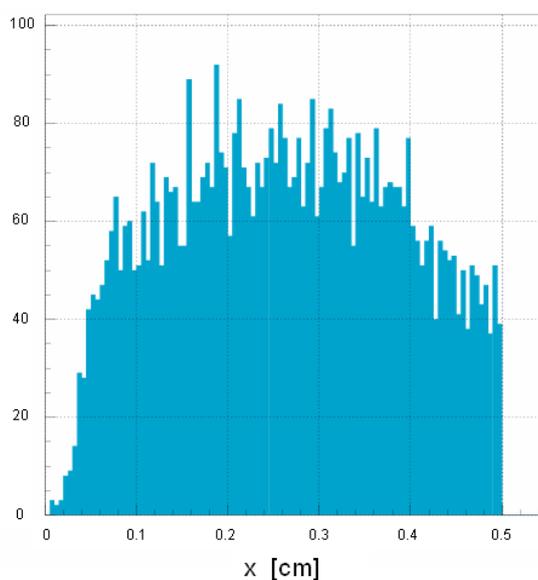


図 5.4 図 5.1 の光電効果の領域にあるイベントを縦軸にプロジェクトした。

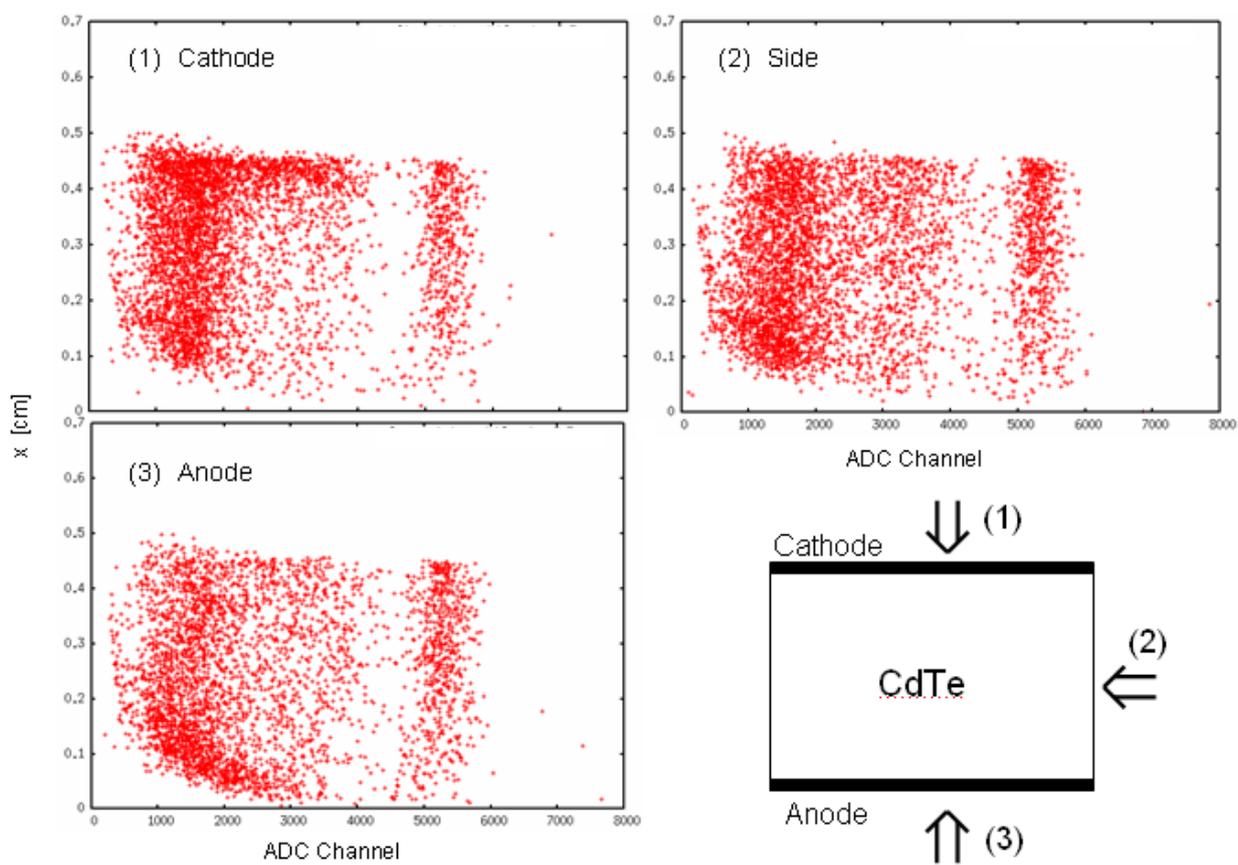


図 5.5 照射方向を変化させたときのエネルギーと位置の関係。

フィッティングプログラムにバグがあるため、分布に偏りが生じている。そのため、光電効果の領域において、イベントが中央に集中する様子が見られない。よって、今回の実験で CdTe 検出器の位置の感度として、大まかな傾向をつかめることができた。しかし、フィッティングプログラム上、位置を正確にプロットすることはできなかった。これらは今後の課題と言える。

## 第 6 章

# 再結合によって捕らわれた電荷

再結合によって結晶内には電荷が残る。結晶内の電荷は保存するので、これらの捕われた電荷もいつかは電極へ移動する。Guard ring.Sum の信号を見ると、捕われた電荷が移動することによって生じる誘導電荷の情報を含んでいることがわかった。

### 6.1 Guard ring.Sum の信号の原理

Guard ring.Sum の信号の原理を説明する。簡単のために、陰極近傍と陽極近傍の電極中央で  $\gamma$  線が相互作用する場合を考える (図 6.1)。信号は陽極から見るとする。陽極近傍で相互作用が起こった場合は、主に正孔が立ち上がりに寄与する。 $\gamma$  線との相互作用によって、正孔が生成されると、陽極に負の電荷が帯電する。ところが、陽極近傍かつ電極中央であるため、帯電した電荷のほとんどは Strip 電極に帯電し、Guard ring 電極には帯電しない。生成後、正孔が移動すると Guard ring 電極にも誘導電荷が帯電し始める。正孔は結晶のある地点まで移動すると、電極のとの距離が離れてしまうために、誘導電荷は極値を迎え、その後、減少する。やがて、正孔は陰極に到達すると、電荷を失うことになるので、Guard ring 電極の誘導電荷は 0 となる。よって、陽極近傍で相互作用が起こった場合の Guard ring.Sum の信号は下に凸になる。一方、陰極近傍で相互作用が起こった場合は、主に電子が立ち上がりに寄与する。同様の原理から、Guard ring.Sum の信号は鋭い上に凸の形になる。これは、キャリアが電子のため、Guard ring 電極にあらわれる誘導電荷が正であり、また、電子の移動速度は速いため鋭い形となる。

### 6.2 再結合によって捕らわれた電荷

図 6.2 は、実験に得られた波形データである。図中  $t_h$  は電子・正孔の両キャリアが電極に到達し、キャリアの移動が終了した時刻である。前節の原理からすると、時刻  $t_h$  において、Guard ring 電極の電荷は 0 である。しかし、左図では、負の電荷  $Q'_1$  が帯電し、右図では、正の電荷  $Q'_2$  が帯電している。図 6.1 中の  $\times$  印は、キャリアの経路に沿ってできた再結合によって捕らわれたキャリアを表している。正孔が移動すると、正の電荷が結晶内に残るため、これらの誘導電荷が負の電荷  $Q'_1$  として電極に帯電すると考えられる。同様に、電子が移動すると、負の電荷が結晶内に残るため、これらの誘導電荷が正の電荷  $Q'_2$  として電極に帯電すると考えられる。よって、電荷  $Q'_1$ 、 $Q'_2$  は再結合によって捕らわれた電荷であると考えることができる。

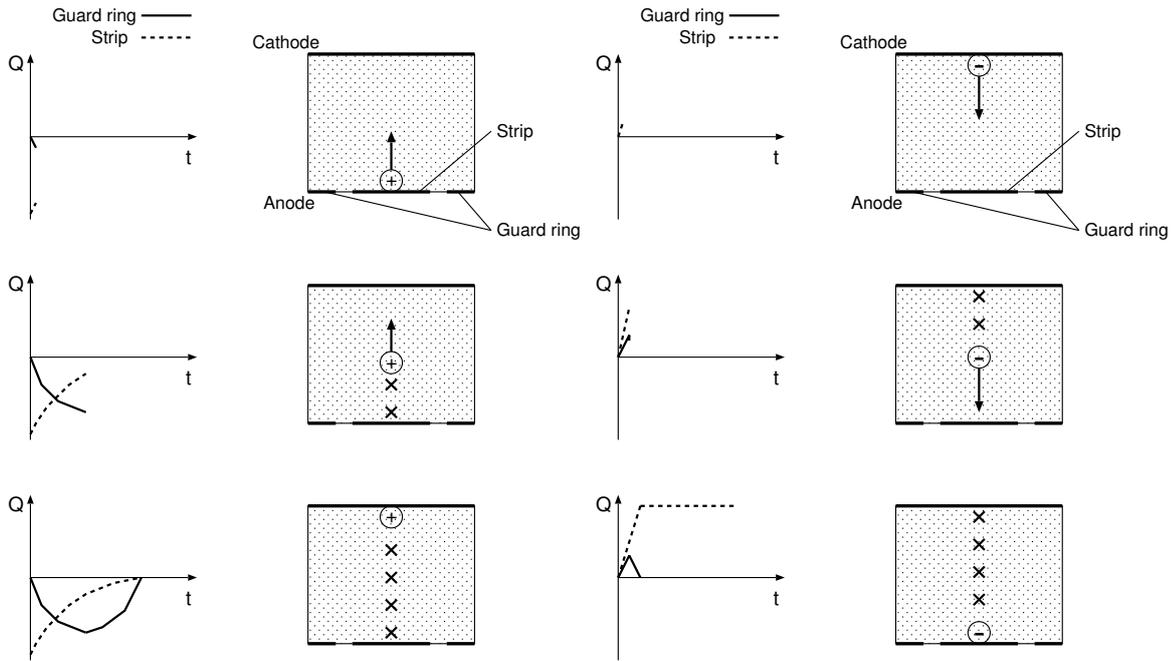


図 6.1 Guard ring 電極からの信号。左は陽極近傍で、右は陰極近傍で  $\gamma$  線の相互作用が起こったとき。

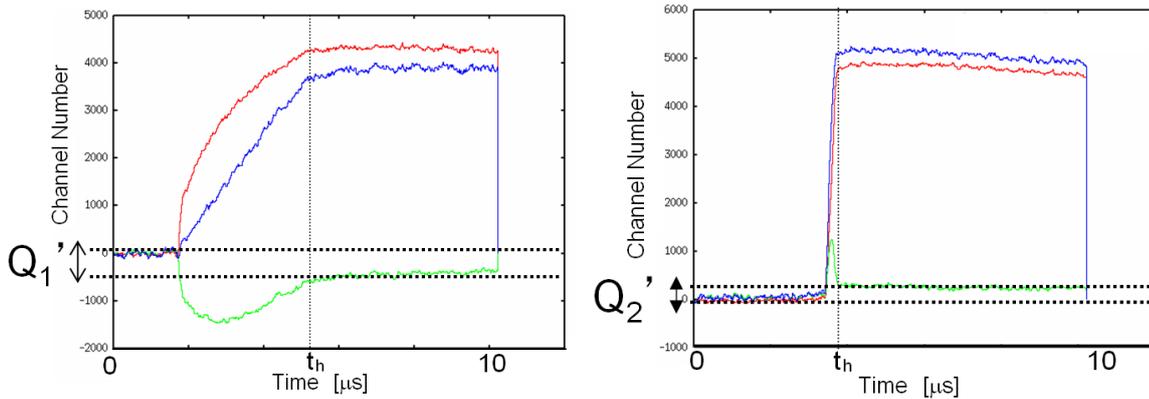


図 6.2 再結合によって捕らわれた電荷による誘導電荷

本研究では、波形解析として、キャリアの移動による過度現象から再結合の割合を導出した。実験の結果から、再結合によって捕らわれた電荷量を見る事で、再結合した割合を出すこともできると考えられる。そのために、さらに詳しく Guard ring.Sum の信号を解析する必要がある。例えば、図 6.2 中の  $t_h$  後、Guard ring.Sum の波形は時定数いくらかで減衰するのか。また、本研究で使用した CdTe 検出器の電極構造を基にした Guard ring.Sum の波形モデルをシミュレーションすること等である。

## 第 7 章

# 今後の課題

### 7.1 Hecht の式の限界

フィッティングにおいて、モデルとして使用した関数は Hecht の式である (第 2 章式 (2.7))。Hecht の式は無有限平面電極、電場一定、一度の相互作用が起こった場合を仮定した関数である。しかし、研究で使用した CdTe 検出器は、有限の電極を持つため、電場は結晶の縁で一定ではない。研究で使用した線源は  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) であったが、CdTe に関して、このエネルギー領域では主にコンプトン効果が効いてくる (第 5 章 図 5.2)。そのため、 $\gamma$  線は CdTe 結晶内で数回コンプトンが起こった後、吸収されていると考えられる。また、実験で得られた波形データには、Hecht の式でフィッティングできないものがあった。例えば、図 7.1 の波形である。Hecht の式では、正孔が電極に到達すると、flat になるが、この波形は正孔が電極に到達後、さらに立ち上がっている。また、Hecht の式において、波形の立ち上がりは上に凸であるが、図の波形は下に凸のような反った形をしている。

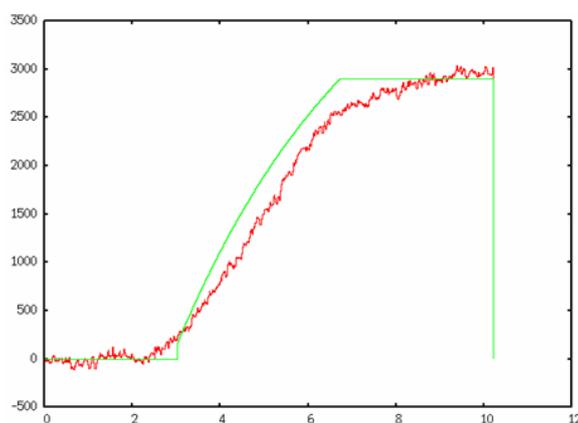


図 7.1 Hecht の式でフィッティングできない波形データ

このような理由により、Hecht の式を用いて波形データを正確にフィットすることはできない。対策としては、2 回の相互作用の場合において、おそらく 2 種の波形の合成波になるので、それもフィッティングするようにプログラムを組むこと、また、再結合によって捕らわれた電荷の移動によって生じる誘導電荷の立ち上がりを考慮すること等である。今後、何かしらの他のモデルを考える必要がある。

## 7.2 フィッティングプログラムのバグ

波形をフィッティングするプログラムにバグがあると考えられる。図 7.2 は補正後のエネルギーと位置の関係を表した図である。図中 A の領域を見ると、イベントがほとんどないことがわかる。図 7.2 は  $\gamma$  線を結晶の真横から照射したが、極端に A の領域だけ  $\gamma$  線が相互作用しないとは考えられない。そこで、実際には、 $x = 0.4 \sim 0.5$  の位置で  $\gamma$  線が相互作用しているが、フィッティングプログラムの関係上、位置を正しく出せていないのではないかと考えられる。

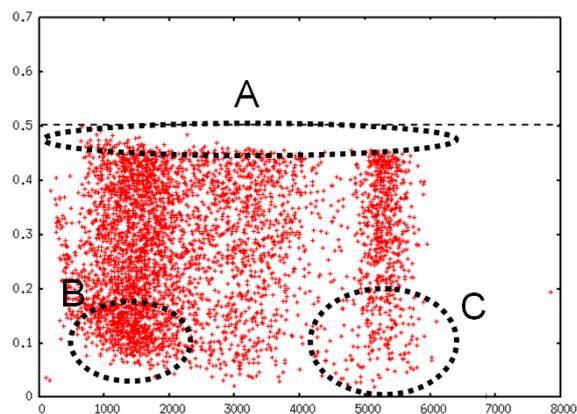


図 7.2 真横から  $\gamma$  線を照射したときの補正後のエネルギーと位置の関係。フィッティングプログラムのバグのため、イベント数が極端に少ない領域がある。

また、正孔が主に立ち上がりに寄与する図中 B,C の領域では、正しく最小化されてない。例えば、図 7.3 は領域 B のイベントである。この波形を見ると  $x = 0$  近傍で相互作用が起こったと考えられるが、フィッティングでは  $x = 0.1$  以上として最小化されている。このため、領域 B ではイベントが密集している。領域 C では光電ピークが横に広がっているが、これも適切に最小化がされてないことが原因と考えられる。以上の理由より、フィッティングプログラムの改善が必要となる。

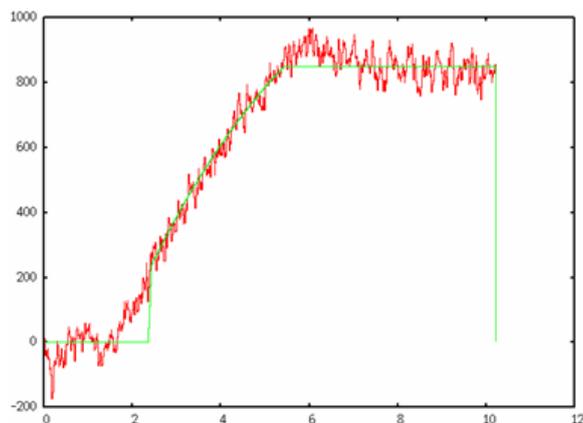


図 7.3 適切に最小化されていないイベント

## 第 8 章

### まとめ

5 mm 厚の CdTe 結晶を用いた  $\gamma$  線検出器の開発をした。波形解析をすることで、再結合の割合を導出し、 $\gamma$  線のエネルギーと  $\gamma$  線の相互作用した位置を得た。

実験 A では、Strip.Sum の信号を Flash ADC 内のフィルタリングによって Trigger を作り、波形データを収集した。得られた波形を、Hecht の式でフィッティングすることで、電子正孔の移動速度と再結合率のパラメータを決定し、それぞれ、 $v_e = 1.4 \text{ cm}/\mu$ 、 $v_h = 0.15 \text{ cm}/\mu$ 、 $\tau = 4.5 \mu\text{s}$  を得た。また、再結合率の割合から、エネルギー補正を行い、 $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV の  $\gamma$  線に対して、35 keV (FWHM) の分解能を得た。これは NaI(Tl) シンチレータ以上の結果である。実験 A によって、いままで困難とされた 5 mm 厚の CdTe 結晶が、 $\gamma$  線検出器として、さらに、位置検出器としても使用可能であることがわかった。

実験 B では、Strip.Sum と Guard ring.Sum の両方の信号を収集した。実験 A で、立ち上がりの遅いイベントが収集されなかったことから、実験 B では、外部で Trigger を作った。これによって、Flash ADC 内のフィルタリングでは収集できないイベントを多く収集できた。また、Guard ring.Sum の信号には、再結合によって捕らわれた電荷が、移動することによって生じる誘導電荷の情報を持つことがわかった。

今後の課題は、フィッティングプログラムを改善することである。フィッティング関数として Hecht の式を用いたが、収集した波形データを見ると Hecht の式ではフィッティングできないものがあった。これらの波形をフィッティングするために、他のモデルを考える必要がある。そうすることで、さらなるエネルギー分解能を得ることができる。また、4 つの Strip 電極と 3 つの Guard ring 電極の信号を別々に見ることも必要である。これによって、各電極の波形の違いから、平面方向の位置を特定できる。

$\gamma$  線の吸収率が高く、冷却不要という特徴を持つ CdTe、本研究において、原子核実験における  $\gamma$  線測定を目的とした CdTe 検出器の実現に向けての第一歩踏み出した。



## 謝辞

私は多くの皆様のご指導とご協力のおかげで本研究をすることができ、心から感謝しております。

指導教官の下浦享先生には、CdTe の知識や物理はもちろんのこと、研究とは何か、科学とは何かという奥深いことまで、教えていただきました。これら一つ一つは私のこれからの研究生活で欠かせないことばかりでした。理解ができず、何度も同じことを繰り返し質問してしまう私に対しても、下浦先生がいつも丁寧に教えていただいたことに、私は感謝しております。

新倉潤さんには、非常にお世話になりました。新倉さんが忙しくしているときでも、何かわからないことあるとすぐに何でも尋ねてしまう私で、申し訳ございませんでした。しかし、私は新倉さんからこの一年で得たものはかなり大きいです。CdTe の面白さを知り、研究に対するモチベーションがあがりました。そして、このレポート添削をしていただいたことに、深く感謝しております。

下浦研究室の大田晋輔さん、馬場秀忠さん、福地知則さん、井手口栄治先生には、物理に関することや、実験、解析等、僕の些細な質問に対しても親身になって教えていただき、本当にありがとうございました。また、CNS の皆様からも多くのアドバイスや助言をいただき、本当にありがとうございました。

私は一年間という短い期間でしたが、本研究を通じて、多くの人と出会い、多くの知識を得ることができました。CNS で学んだ全てのこと(スタイリッシュを含む)を糧に、今後の研究生活に役立てて行きたいです。最後になりますが、私を支えてくれました皆様に、改めて、感謝いたします。ありがとうございました。



## 参考文献

- [1] グレン F. ノル 「放射線計測ハンドブック」(日刊工業新聞社)
- [2] M.Richter and P.Siffert,Nucl.Instrum.and Methods Phys.Res.,Sect.A**322**,529 (1992).
- [3] 小林謙仁 「放射線計測 VLSI の開発と衛星搭載用の CdTe ピクセル検出器への応用」 修士論文、東京大学、2003
- [4] 玉城充「CdTe 半導体検出器の特性評価」 東京大学原子核科学研究センター (2005)
- [5] XIA 社 Pixie-4 User's Manual [[http://www.xia.com/Manuals/Pixie-4\\_UserManual.pdf](http://www.xia.com/Manuals/Pixie-4_UserManual.pdf)]
- [6] M.kurokawa *et al.*,IEEE Trans.Nucl.Sci.**50**,1309(2003).
- [7] S.Shimoura,Nucl.Instrum.and Methods Phys.Res.,Sect.A**525**,188(2004).
- [8] K.Hecht,Z.Phys.**77**,235(1932).
- [9] T.Takahashi *et al.*,SPIE.vol**4851**,1228(2003).