

2009年度P6実験  
MPPCアレイを用いたガンマ線測定

青野正裕、橋本暁弘

## 目次

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	コンプトンカメラ	3
1.2	シンチレーションカメラ	3
1.3	MPPC	4
1.4	MPPCを使用した先行研究	4
<b>2</b>	<b>今年の実験の目的</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>セットアップ</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>エネルギー分解能</b>	<b>8</b>
4.1	データ	8
4.2	解析方法	10
4.3	エネルギー分解能の統計	10
4.4	エネルギー較正	11
4.5	エネルギー分解能	12
4.6	結果と考察	13
<b>5</b>	<b>イメージング</b>	<b>15</b>
5.1	解析1(最大値法)	15
5.2	解析2(重心法)	16
5.3	結果と考察	18
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>19</b>

# 1 Introduction

## 1.1 コンプトンカメラ

当研究室では電子飛跡検出型コンプトンカメラというガンマ線観測装置を開発している。これはガス検出器とシンチレーションカメラから構成されている。ガス検出器でガンマ線をコンプトン散乱させ、散乱電子の3次元飛跡とエネルギーを測定する。シンチレーションカメラでは散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを測定する。ガンマ線と電子の散乱方向とエネルギーがそれぞれ明らかになるので、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーの情報が得られる。

コンプトンカメラの応用例としては、気球や衛星に搭載して観測するガンマ線天体観測用、がんの発見または放射線治療時の治療モニターに使う医療用などがある。

## 1.2 シンチレーションカメラ

シンチレーションカメラはガンマ線の到来方向を測定できるものでなければならぬ。シンチレーターを複数個並べて複数の「目」を持つ光検出器と繋いだ位置感応度型シンチレーションカメラはその役割を果たすことができる。

シンチレーターにGSO、光検出器にPMTを用いてシンチレーションカメラを作った先行研究では再構成イメージ(図1)を作ること成功している。しかし、大型化や気球搭載という応用に向けて課題も明らかになった。PMTを100個以上使用するのでコストが高いという点と、PMTを使うので印加電圧が大きい必要があり、消費電力がかかってしまうという点が主なデメリットである。

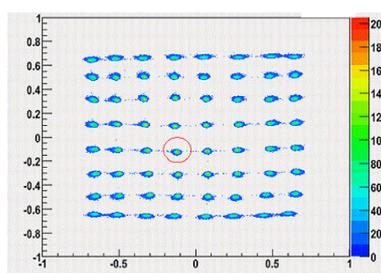


図 1: 再構成イメージ

### 1.3 MPPC

MPPC(Micro Pixel Photon Counter) は前述のデメリットを解消することが期待される光検出器である。図 2 が MPPC の写真で、中心部の色が黒っぽくなっているところが受光面である。受光面には APD(Avalanche Photon Diode) がたくさん並んでいる。PMT はバイアス電圧が 1000V 以上必要だが MPPC は低バイアス電圧 (<100V) で動作する。また、将来的には単位受光面積あたりの価格も PMT より安くなると言われている。MPPC の構造、APD、シンチレーターについての説明は前年のレポートと重複するので本レポートでは割愛する。

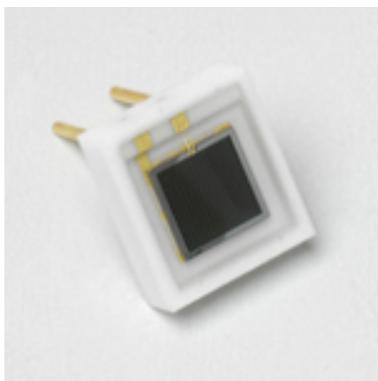


図 2: MPPC

### 1.4 MPPC を使用した先行研究

2008P6 シンチ班では MPPC と 6mm 角 LaBr<sub>3</sub>、3mm 角 GSO を用いて分解能の測定を行い、662keV での分解能は LaBr<sub>3</sub> で 8.6 %、GSO で 18.7 % という結果を得ている。R.Pestonik 他は MPPC を並べて置いて、各々の MPPC に光が入っていることを示す再構成イメージを得ている (図 3)。

## 2 今年の実験の目的

新型の MPPC アレイ (S10985-025C) を使用する。従来の MPPC は受光面が 3mm 角であったのに対して、新型では 6mm 角となり受光面積は 4 倍になっている。受光面積が大きくなり、入射光子の数が増えるのでエネルギー分解能の向上が期待できる。また、素子の数も 4 倍になっているので、今までは 1 つの MPPC から 1 つの信号しか取り出せなかったのに対し、4 つの信号を取り出すことが可能になった。R.Pestonik 他の実験のように MPPC を

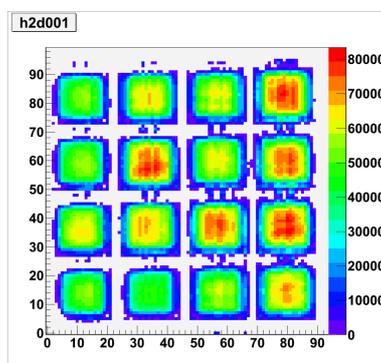


図 3: 再構成イメージ

並べれば、MPPC の置いてある場所ごとに光を検出できる。しかし受光面と受光面との間のデッドスペースがあるので開口率が低くなり、検出効率も低下する。新型の MPPC では 1 つの受光面に 4 つの素子が載っているためデッドスペースがない。つまり、エネルギー分解能を向上させ、4 つに分離されたイメージを取得することが今回の実験の目的である。

### 3 セットアップ

分解能の測定とイメージングの二つの実験において、セットアップはシンチレータ以外は同じである。セットアップは図 4 のようになっている。MPPC アレイの上にシンチレータを乗せる。読み出し回路は図 5.6 のようになっている。ガンマ線が入射するとシンチレータが発光し、シンチレーション光を MPPC が信号に変える。信号の電圧は Pre Amp で増幅され、Shaper で整形されてから Peak Hold ADC に送られる。Peak Hold ADC では Gate Generator で絞った範囲にある電圧のピークを ADC 情報に変換する。ADC 情報を PC で取得してデータの解析をする。

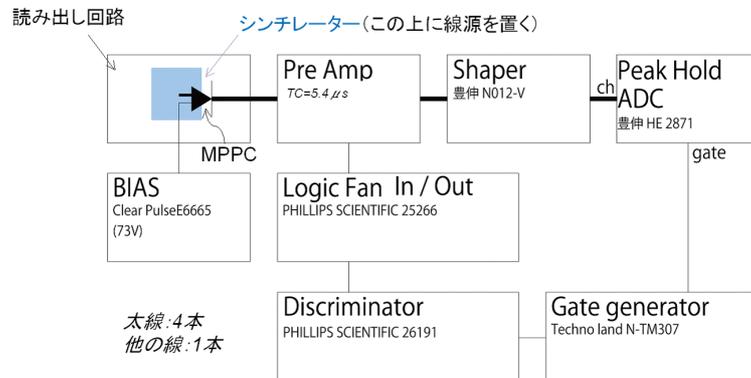


図 4: セットアップ

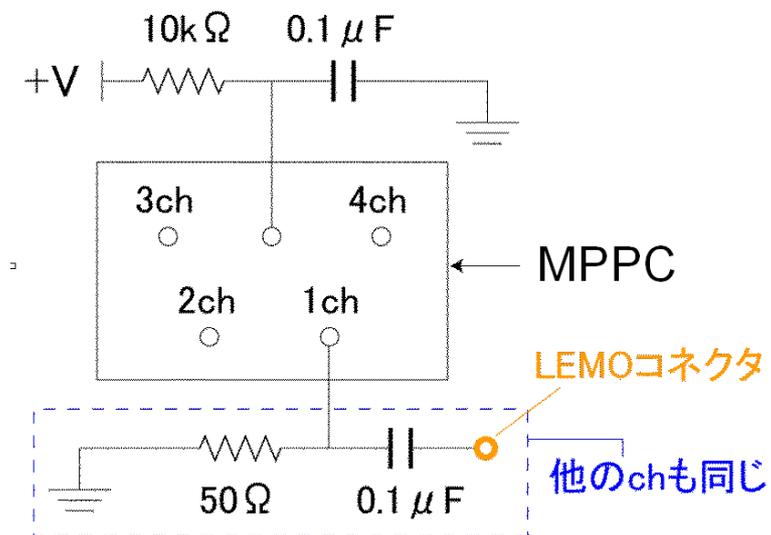


図 5: 読み出し回路

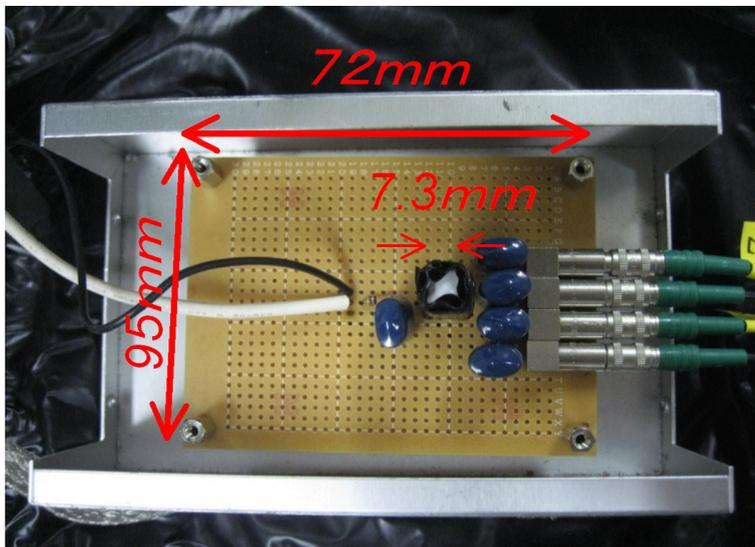


图 6: 読み出し回路 (写真)

## 4 エネルギー分解能

まず、MPPC アレイを用いてエネルギー分解能の測定を行った。シンチレータには 6mm 角 LaBr<sub>3</sub> と 6mm 角 GSO を用いた。(図 7,8) セットアップは前述のとおりであるが、MPPC アレイに欠けるバイアス電圧は LaBr<sub>3</sub> のときは 73V、GSO のときは 71V にした。測定に用いた線源は LaBr<sub>3</sub> に対して <sup>137</sup>Cs、<sup>133</sup>Ba、<sup>22</sup>Na、<sup>57</sup>Co であり、GSO に対して <sup>137</sup>Cs、<sup>133</sup>Ba、<sup>22</sup>Na である。

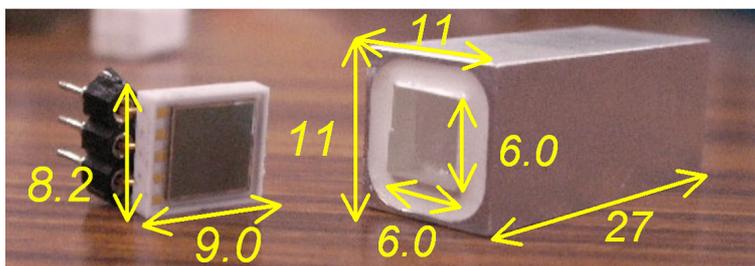


図 7: LaBr の取り付け

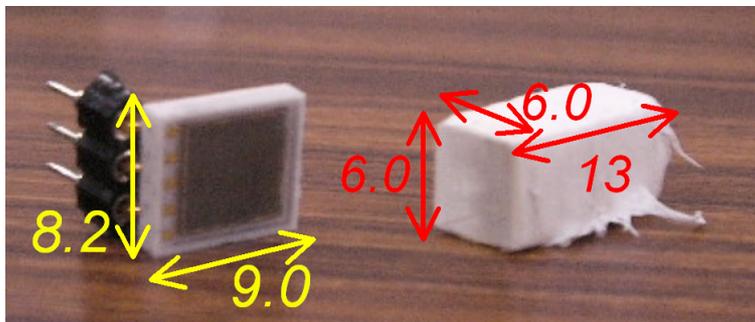


図 8: GSO の取り付け

### 4.1 データ

今回の実験では  $2 \times 2$  の MPPC アレイを用いているため MPPC アレイの 4 つのチャンネルそれぞれからデータが得られる。そこで ADC で同時に得られた 4 つのデータの和をとりそれをヒストグラムにしたのが図 9 である。(図 9 はシンチレーターに LaBr<sub>3</sub> を用い、<sup>137</sup>Cs を全面照射した。横軸は ADC

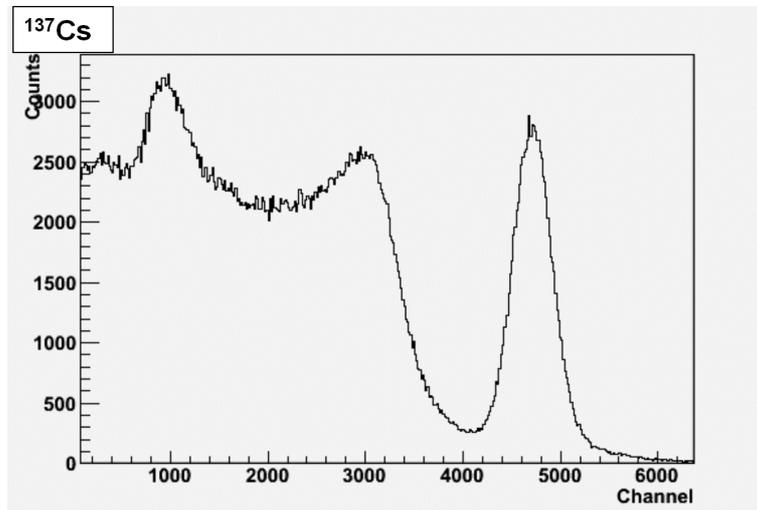


図 9: Cs のスペクトル

の channel)

これを用いてエネルギー分解能を求める。  
各シンチレーター、線源のスペクトルも示しておく。

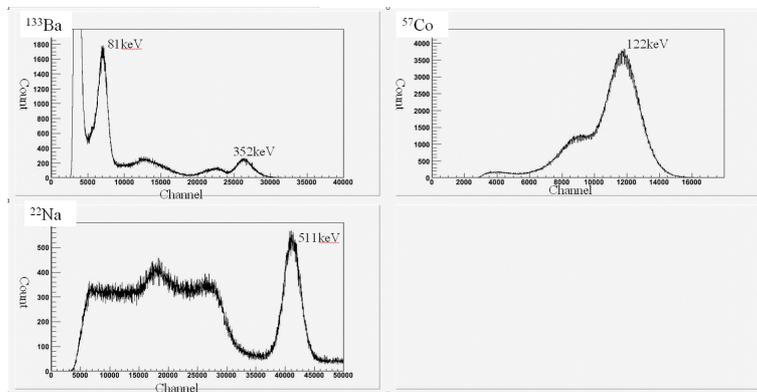


図 10: LaBr<sub>3</sub> によるスペクトル

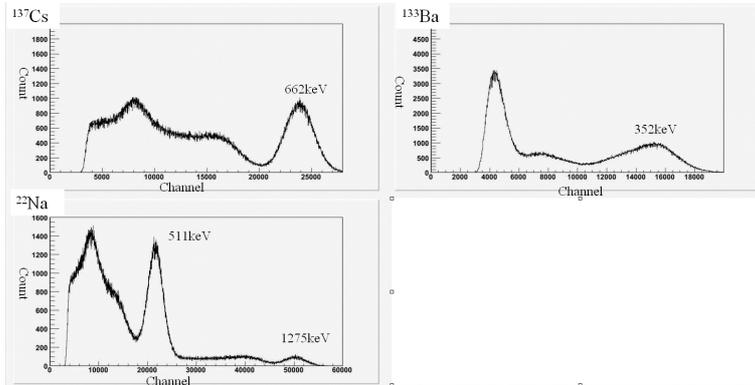


図 11: GSO によるスペクトル

## 4.2 解析方法

まず得られたスペクトルの光電吸収ピークに対してフィッティングを行う。フィッティングにはガウス関数 + 一次関数

$$a \times \exp \left\{ -\frac{(x-b)^2}{2c^2} \right\} + dx + e$$

を用いた。ただしピークが重なっている所には適宜ガウス関数 + ガウス関数 + 一次関数の形を用いた。

次にエネルギー較正を行った。ADC の channel は MPPC から得られる電圧、ひいては測定した放射線のエネルギーと比例関係にある。よって複数の線源のスペクトルのピークのチャンネル (上式の b) を使うことで次の比例関係の係数を決定できる。

$$\text{ピークのチャンネル} = A \times \gamma \text{線のエネルギー} + B$$

エネルギー分解能 (FWHM) はガウシアンの高さ (上式の a) の半分の場所の幅の、ピーク位置に対する割合であり、ガウシアンの分散である c と入射する放射線のエネルギー E を用いて次式により決定する。

$$\text{エネルギー分解能 (FWHM)} = \frac{2.35c/A}{E} \times 100$$

以上の作業により各シンチレーターに対する分解能を求めることができる。

## 4.3 エネルギー分解能の統計

シンチレーターでのシンチレーション光子の発生過程はポアソン過程でよく近似できる。よってシンチレーション光子数を N とすると、その統計的な

ゆらぎは  $\sqrt{N}$  となる。また検出効率を  $\epsilon$  とすると MPPC の励起ピクセル数は  $\epsilon N$  となる。放射線のエネルギーと MPPC の励起ピクセル数がおよそ比例関係にあり、その係数を  $K$  とするとエネルギー分解能は、

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.35K\sqrt{\epsilon N}}{K\epsilon N} = \frac{2.35}{\sqrt{\epsilon N}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

となる。放射線のエネルギーとそれに対するエネルギー分解能を両対数でプロットすると、傾きが-0.5の直線に乗ることが期待される。

#### 4.4 エネルギー較正

図 12,13 は x 軸にエネルギー y 軸にチャンネルをプロットしたものである。

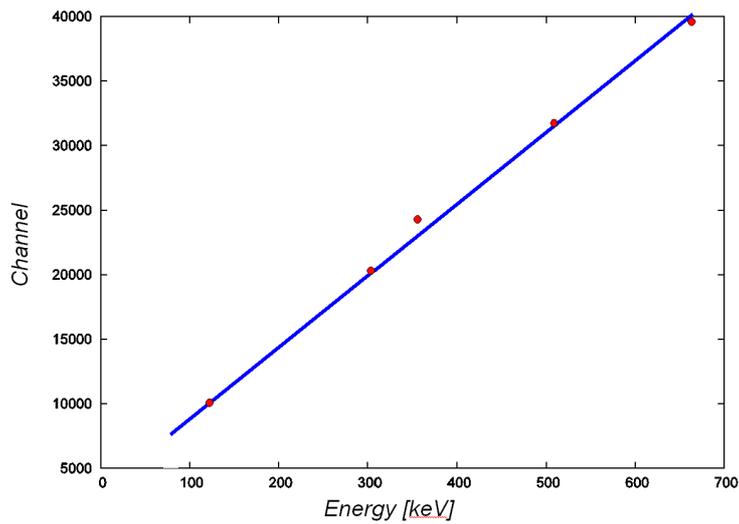


図 12: LaBr<sub>3</sub> のエネルギー較正

エネルギーとチャンネルの関係は次のようになった。

$$\text{LaBr}_3:\text{Ch} = (55.3 \pm 1.0) \times \text{Energy}[\text{keV}] + (3266 \pm 360)$$

$$\text{GSO:Ch} = (38.2 \pm 3.0) \times \text{Energy}[\text{keV}] + (-748 \pm 2313)$$

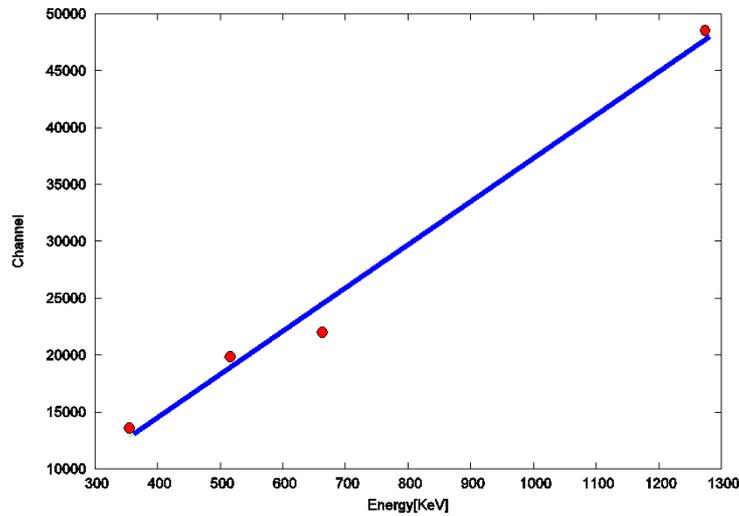


図 13: GSO のエネルギー較正

#### 4.5 エネルギー分解能

表 1,2、図 14 は各シンチレーターの分解能を示したものである。(グラフは両対数プロット)

エネルギー [keV]	FWHM[%]
662	$7.8 \pm 0.1$
511	$9.9 \pm 0.1$
356	$11.9 \pm 0.2$
122	$31.1 \pm 0.5$
81	$34.9 \pm 0.5$

表 1: LaBr<sub>3</sub> のエネルギー分解能

グラフを fitting した式は

$$\text{LaBr}_3 : \text{Res.} = (0.08 \pm 0.001) \times (\text{Energy}/662\text{keV})^{(-0.74 \pm 0.05)}$$

$$\text{GSO:Res.} = (0.134 \pm 0.012) \times (\text{Energy}/662\text{keV})^{(-0.65 \pm 0.09)}$$

となり、傾きもおよそ-0.5 となった。なお、LaBr<sub>3</sub> において <sup>133</sup>Ba の 303keV のピークは用いていない。これは Ba303keV は 356keV のピークとかさなっておりなおかつその周りに今回の測定では分離できなかったピークも存在していて正確に fitting できていないからである。

エネルギー [keV]	FWHM[%]
1275	10.7 ± 0.8
662	14.6 ± 1.1
511	20.6 ± 1.3
356	24.1 ± 1.8

表 2: GSO のエネルギー分解能

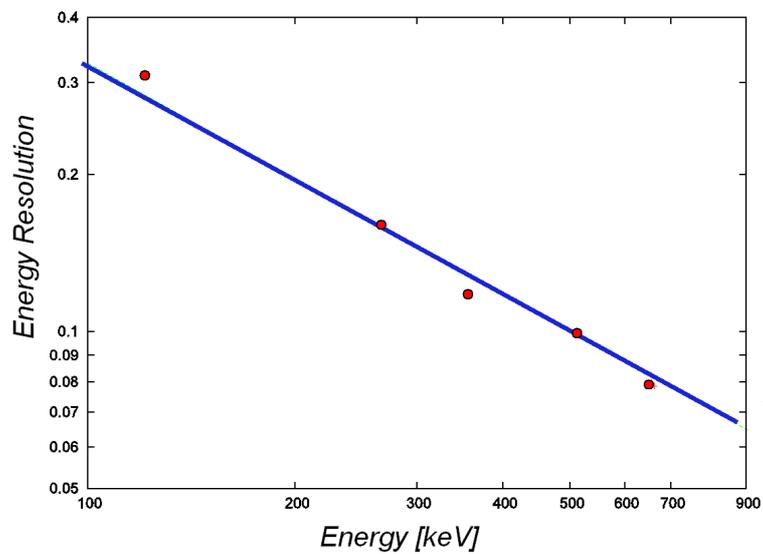


図 14: LaBr<sub>3</sub> のエネルギー分解能

#### 4.6 結果と考察

今回得た分解能は 662keV で 7.8% であった。この結果を昨年の P6 実験 (シングル MPPC を用いたもの) と比較すると 0.8% の向上であった。しかしノイズ対策等の周辺環境まで昨年の再現をしたわけではないのでこの分解能の向上が直ちに MPPC アレイによるものだと結論付けることはできない。ただ、MPPC アレイにすることによって、分解能に著しい低下は見られないことが分かった。

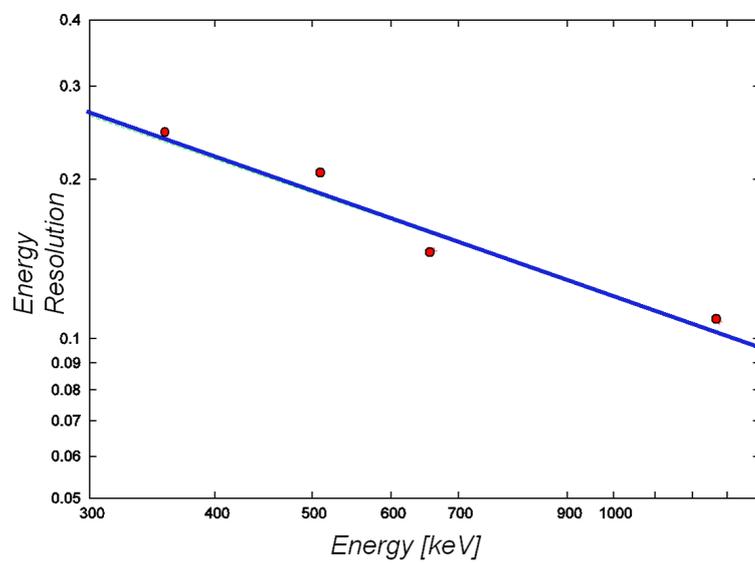


図 15: GSO のエネルギー分解能

## 5 イメージング

イメージングの実験にはシンチレーターとしてGSOアレイを用いる。GSOアレイとは4つの3mm角GSOをアレイにしたもので、各GSOには反射材としてのテフロンテープが巻かれている。これによりGSOの間を可視光が透過することはない。

このGSOアレイをMPPCアレイに乗せることで各GSOとMPPCアレイの4つのチャンネルが1対1対応する。こうすることで放射線がGSOアレイのどこに入射したかがわかり、MPPCの各チャンネルについて独立したデータを取得することができる。

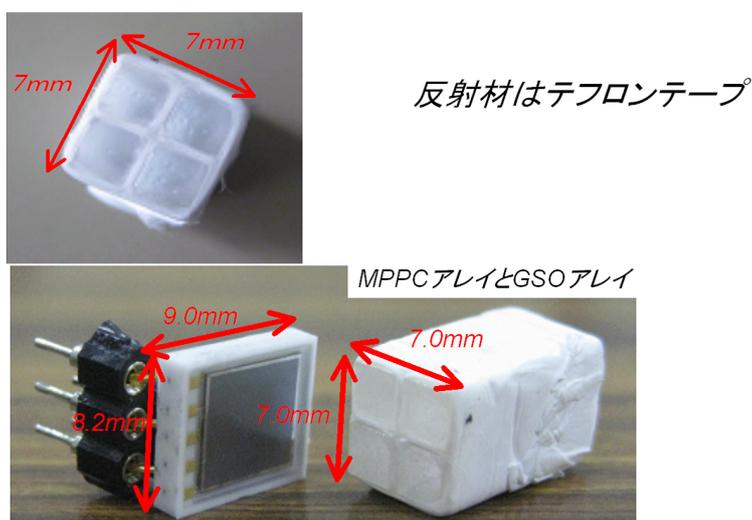


図 16: GSO アレイ

### 5.1 解析1(最大値法)

$^{137}\text{Cs}$ を全面照射したとき、得られるデータはイベント数 $\times$ 4chである(今回の実験では100000カウント)。そこで同時に得られる4つのデータのうちそれが最大のチャンネルをそのイベントが起きたチャンネルとみなす。そして、各チャンネルに対してそこで起きたイベント数をプロットしたのが図17である。

これを見てわかるとおり各チャンネルにおよそ均等に放射線が入射しているのがわかる。誤差は約8%となった。  
また、各チャンネルに対して、そこで起きたイベントのみをプロットしたの

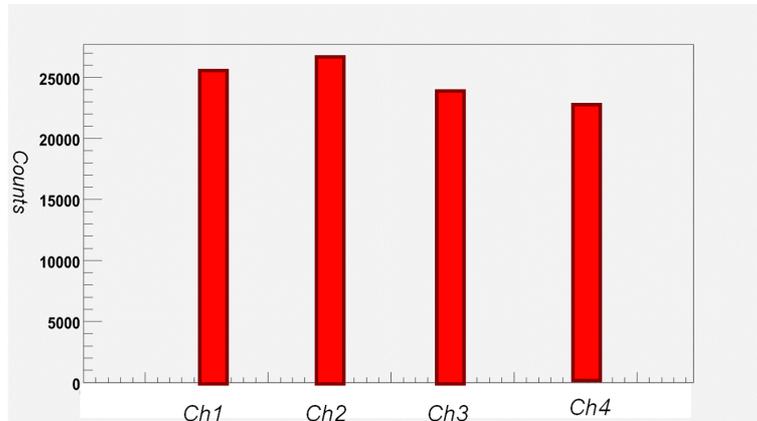


図 17: 各チャンネルのイベント数

が図 18 である。

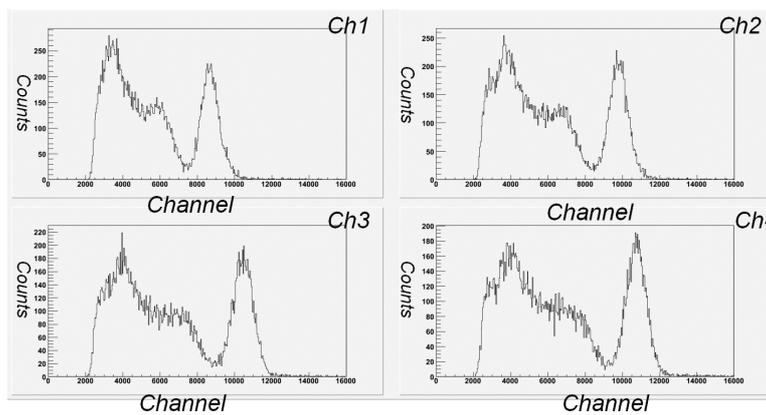


図 18: 各チャンネルから得られたヒストグラム

各チャンネルの分解能は表 3 の通り

## 5.2 解析 2(重心法)

上記の解析で他のチャンネルを考慮していないため、別の解析法も試みてみた。同時に得られる 4 つデータの重心位置を次のように定義する。

$$X = \frac{ch1 - ch2 + ch3 - ch4}{ch1 + ch2 + ch3 + ch4}$$

Ch1	$13.7 \pm 0.2$
Ch2	$15.1 \pm 0.3$
Ch3	$16.1 \pm 0.2$
Ch4	$16.7 \pm 0.2$

表 3: 各チャンネルの分解能

$$Y = \frac{ch1 + ch2 - ch3 - ch4}{ch1 + ch2 + ch3 + ch4}$$

得られた  $100000 \times 4$  のデータに対して重心をとり、それをプロットしたのが図 19 である。

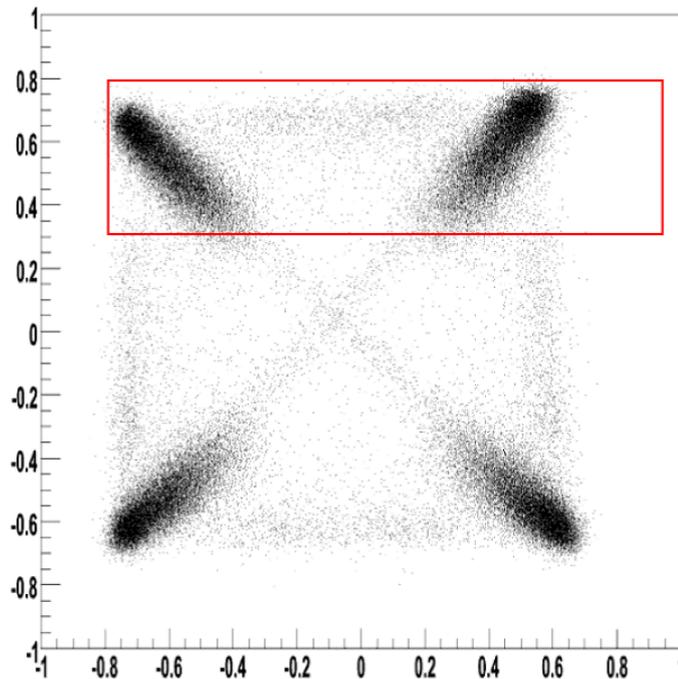


図 19: 各イベントの重心位置

また枠の部分について y-projection をとったのが図 20 である。

さらに、各チャンネルに対応する重心位置に来たイベントのみを用いてヒストグラムをかいたのが図 21 である。

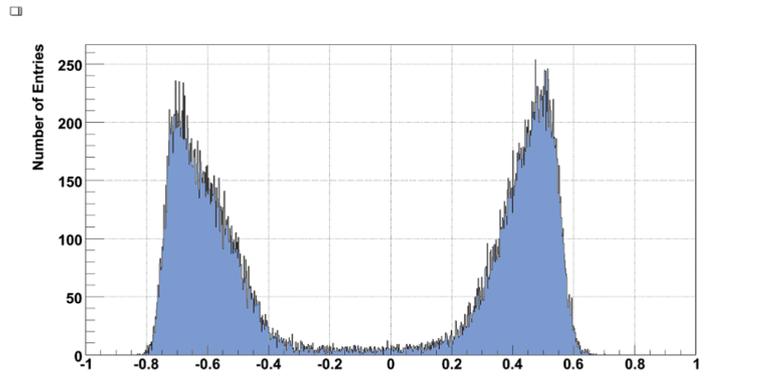


図 20: 射影図

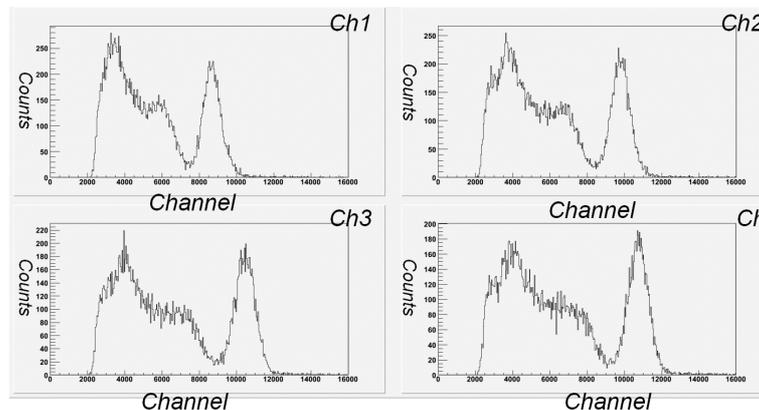


図 21: 各チャンネルから得られたヒストグラム

各チャンネルの分解能は表 4 の通り。

最大値法と 3 ケタまで一致した。

### 5.3 結果と考察

この実験により MPPC アレイを用いることで 4 つの独立したデータをとることができ、それぞれのスペクトルを取得することが可能であることが分かった。これによりこの MPPC アレイを並べることで位置分解能を持たせることができるのではないかと考えられる。また解析方法において最大値法と重心法のどちらでもほとんど変わらない解析結果を得ることができた。これはすなわち、アレイの各 MPPC の同時計測による誤差等が少ないことを意味し、MPPC の数を増やしていったときに大きく関係してくると思われる。

Ch1	$13.7 \pm 0.2$
Ch2	$15.1 \pm 0.3$
Ch3	$16.1 \pm 0.2$
Ch4	$16.7 \pm 0.2$

表 4: 各チャンネルの分解能

## 6 まとめ

イントロダクションでも述べたように今回の実験では、MPPC がコンプトンカメラにおけるシンチレーション部分の PMT の代わりになりうるかというのがモチベーションの一つであった。その観点から本実験をまとめてみる。まず、分解能であるがこの実験では 7.8% (@662keV) となった。これは PMT+LaBr<sub>3</sub> で 3% であることを考慮するとまだまだ今後の改良に期待したいところである。

つぎに、イメージングであるがとりあえず本実験で可能であることは分かった。ただデータを見てわかるとおり (図 17, 表 3)、各 MPPC の値にばらつきがある。これは MPPC の性能差ではなく MPPC とシンチレーターの接着を手で行ったことによるずれであると思われる。よって今後はその点を工夫することによって MPPC 自体の性能のばらつきを評価しそのうえで位置分解性能を調べていく必要がある。

以上いずれの点においても MPPC のコンプトンカメラへの使用の道程は長いかもしれない。

最後にこのレポートの分担を記しておく。

§1-3: 橋本暁弘 §4-6: 青野正裕

## 謝辞

この課題研究を行うにあたり、たくさんの方に助力いただきました。とくに直接実験を見ていただいた黒澤さんには大変お世話になりました。本当にありがとうございました。