

2005年度  
P6 課題研究

マルチアノード光電子増倍管と  
ヘッドアンプユニットを用いた動作実験

豊田武  
安井健

# 目次

1	目的と概要	2
2	実験で使用する装置について	3
2.1	シンチレータ	3
2.2	マルチアノード光電子増倍管	4
2.3	ヘッドアンプユニット	5
3	装置のセットアップについて	6
3.1	一連の装置の接続	6
3.2	PCでのデータ取得までの流れ	7
4	実験・解析	8
4.1	前段階実験・自作プリアンプ	8
4.2	1ch Na22	9
4.3	16ch Na22	10
4.4	256ch x 30000 event の波高値	11
4.5	256ch 分 Na22	12
4.6	256ch 分 Co57	13
4.7	256ch 分 Ba133	14
4.8	Background について	15
4.9	キャリブレーション	16
5	結果・まとめ	17
5.1	これまでのまとめ	17
6	謝辞	18
7	参考文献	19

## 1 目的と概要

今回の実験では、マルチアノード光電子増倍管\* (浜松フォトニクス製 H9500) にヘッドアンプユニット (読み出し回路) を直接とりつけデータを取得して処理する。

このヘッドアンプユニットは上記の MAPMT 用なので、接続が容易であり、コンパクトである。MAPMT に接続したものを二次元平面に敷き詰めたりすることが可能である。†

また同時に、実験を通して回路を自作したり、解析手法を学ぶ。

---

\*Multi Anode Photomultiplier 略 : MAPMT

†「取扱説明書 80058 型 MAPMT ヘッドアンプユニット」(CLEAR-PULSE 社 2005) より

## 2 実験で使用する装置について

### 2.1 シンチレータ

荷電粒子は物質と相互作用すると、その物質の分子を電離・励起する。励起された分子は基底状態に戻るが、励起エネルギーが熱エネルギーに変換されてエネルギーを失い、基底状態に戻ることが、多いが、シンチレータは基底状態へ戻る際にエネルギーの一部を光として放出する。励起されて光を放出するまでの時間が短いものが放射線の検出に利用されている。

今回は CsI(Tl) シンチレータを用いた。CsI(Tl) の特徴としては原子番号、密度が NaI よりも大きく、線に対する吸収が大きく、検出効率は大きい、シンチレーション効率は NaI の約半分である。潮解性はない。蛍光減衰時間は  $1 \mu \text{ sec}$  である。

今回用いたのは縦 50mm × 横 50mm × 厚さ 2mm の大きさのものである。

結晶	蛍光減衰時間	蛍光量最大波長	相対蛍光効率	密度
NaI(Tl)	230ns	415nm	100%	$3.67\text{cm}^3$
CsI(Tl)	1000ns	530nm	45%	$4.51\text{cm}^3$

表 2.1: NaI(Tl) と CsI(Tl) の比較

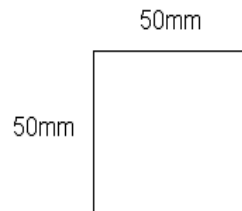


図 2.1: CsI(Tl) シンチレータのイメージ (縦 × 横)

## 2.2 マルチアノード光電子増倍管

光電子増倍管はシンチレータからの光によって光電子を発生させる光陰極、発生した光電子を効率よく第一ダイノードに集める収束電極、光電子の数を増倍させるダイノード電極、増倍された電子を集める陽極からなる。

今回使用するマルチアノード光電子増倍管は、256ch に対してそれぞれアノード・増幅部が対応し多数の信号の読み出しが可能になっている。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128
129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192
193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208
209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224
225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256

図 2.2: MAPMT の各 ch の配列

また、今回使用するマルチアノード光電子増倍管のダイノードは 12 段である。ゲインは、各 ch ごとで異なっていて、中心付近の ch に大きいゲインの ch が揃っている。最小のゲイン：最大のゲイン=1:5.5 の比率の差がある。ただ、今回は各ゲインの違いについて考慮する段階までは至らなかった。

電流増倍率 (ゲイン)	陽極暗電流
$1.05 \times 10^6$	2.85nA

表 2.2: 今回の MAPMT:H9500 のゲインと暗電流<sup>†</sup>

### 増倍率 (ゲイン) につて

光電子増倍管の増倍率を  $M$  とすると、 $M = \delta^n$  で与えられる。 $\delta$  は二次電子放出率、 $n$  はダイノード電極の段数。例えば、 $\delta = 4$ 、ダイノード 10 段のとき、 $M = \delta^n = 4^{10} \simeq 10^6$ 。<sup>†</sup>

### 陽極暗電流について

光電子増倍管を作動状態にしておくと、光が全然入らないくても陽極に流れるわずかな電流のこと。主な原因は光陰極からの熱電子放出。ノイズの原因になる。

\* 「H9500 試験成績表」(HAMAMATSU PHOTONICS 2004) より

<sup>†</sup> $\log 4 \simeq 0.602$

## 2.3 ヘッドアンプユニット

今回使用するヘッドアンプユニットは CLEAR-PULSE 社製で、マルチアノード光電子増倍管に繋いで使用する。また、PC のボードとの接続には RJ-45 コネクタの LAN ケーブルを使用するなど、セットアップも容易。\*また、外形は、縦 52mm× 横 52mm× 長さ 110mm。

ADC の分解能は 12bit、4096ch。主な役割としては Preamplifier (アナログパルス増幅) + Shaper (波形整形) + ADC (アナログパルスをデジタルデータに変換) + トリガー (イベントの発生を知らせるのに使用) の機能を持つ。

今回は通常の全 256ch 読み出しモードでデータを取得した。1event で 512byte (2Byte x 256ch) (SDS モードというトリガーが鳴ったデータだけを取得するモードもあるが今回は使用しなかった。)

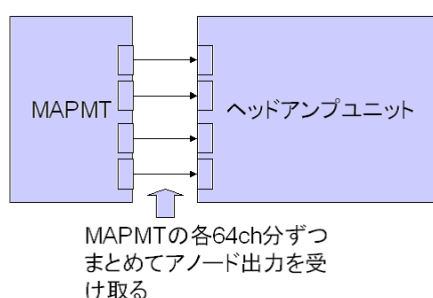


図 2.3: MAPMT とヘッドアンプの接続イメージ (矢印 1 本が 64 個の出力に対応)

64ch ごとにとというのは、ヘッドアンプユニットと MAPMT の接続形態上、各アノードが 64 個ごとでまとめて接続されているだけで、256 個のアノード出力は全部情報としてきちんと出力されている。

トリガースレッシュホールドについては、ヘッドアンプ裏面のイモネジを外し、さらに内部にあるネジ<sup>†</sup>を回して、調整する。ネジは 4 つ存在し、それぞれ、64ch 分に相当しているが、この方法では 64ch 分各 ch ごとの細やかな調整はできず、まとめて調整するということになる。<sup>‡</sup>

\*トリガー入出力用には LEMO ケーブルを使用

<sup>†</sup>はじめ、イモネジの方を回していたのでスレッシュホールドの調節ができなかった。

<sup>‡</sup>もっと細かく ch ごとにスレッシュホールドの調節をするには、データを読み出すプログラム上で、1336bit のレジスタマップという情報のスレッシュホールド情報に対応する部分に値を書きこんでやればよいということだがうまくいかなかった。同じレジスタマップ上のマスクという部分の値を書き換え、その ch を反応させなくするといった単純な書き換えの動作確認はうまくいったが、結局レジスタマップ情報の扱いについては完全には理解できなかった。

### 3 装置のセットアップについて

#### 3.1 一連の装置の接続

まず、シンチレータをマルチアノード光電子増倍管に接着した。接着面は全反射を避けるためにガラスに近い屈折率を持つグリッドで密着させた。また、このとき光を遮蔽するために、シンチレータの周りを白のテープで覆い、さらに上から暗幕で覆った。黒のテープでもって、MAPMTとシンチレータの接合部分は黒のテープで覆った。最後に、全体を暗幕で覆って遮蔽した。図 3.2 参照。

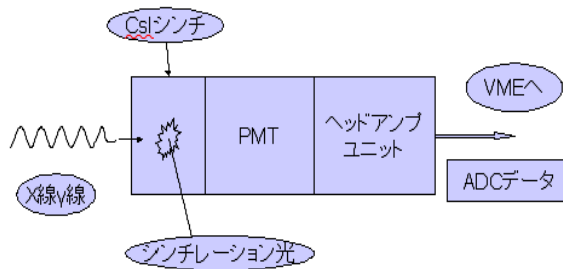


図 3.1: 検出器イメージ

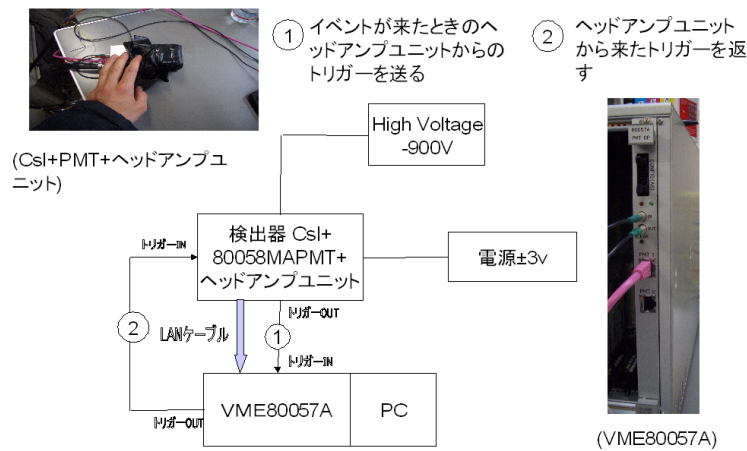


図 3.2: 装置とデータの流れのイメージ

PC のボードは CLEAR-PULSE 社製の 80057A 型の PMT DATA Processor という VME バスに対応した物を使用した。RJ-45 コネクタに対応するポートが二つあり、そのひとつにヘッドアンプを LAN ケーブルでもって繋いだ。<sup>†</sup>

おおまかに言って、図の で検出器にイベントが来た時にトリガーをヘッドアンプからボードに送る。そして、 でトリガーを返す。この間にデータを取り続ける。

<sup>†</sup>あとはトリガー入出力用の LEMO ケーブルを繋ぐところがある

### 3.2 PC でのデータ取得までの流れ

PC 上でプログラムを走らせた後の流れを以下に示す。

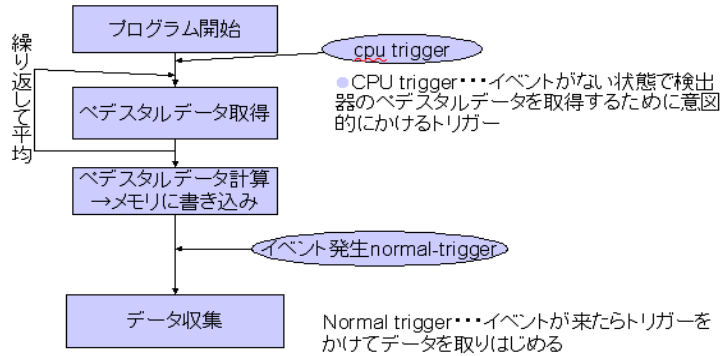


図 3.3: イメージ

はじめに、プログラム\*を PC 上で走らせたとき、まだ、線源のイベントのデータは取り始めない。まずは意図的に CPU トリガーをかけてペDESTALデータ†を取得する。そのペDESTALデータは 80057A 型ボード上のメモリに書き込まれる。‡ 次に、イベントが来ればノーマルトリガーがかかり、データの取得が始まる。このときボード上でペDESTAL分のデータが引き算される。また、1ch あたりのデータのフォーマットが 16 ビットになっていて実際の 12 ビットのデータにヘッダがくっついている¶ ので、ヘッダのデータを見てやることによって、256ch のデータのはじめの ch のデータと終わりの ch のデータが分かる。それで 1 イベント・256ch ごとにデータをうまく区切って集めることが可能となる。

\*64chMAPMT 用のサンプルプログラムを 256ch 用に調整した

†ペDESTALデータとは、検出器に何もイベントが来ていない状態のときにもある程度出てくる数値データのこと。イベントが来た時のデータを補正するために使う。補正しない時との差は明らかに補正した方がよいと分かるものだった。ペDESTALデータは 1ch あたり 32 ビットのメモリを容量が確保されているが、下位 12 ビットのみを使用する。12 ビット符号無し整数となる。

‡100 回分取得してそれを平均した。ペDESTALの補正はどれ位やればいいのか（回数や掛かる時間）についてはあいまいになってしまった。

¶さらに符号データに 1 ビット分使われるので、13 ビットとなる。ペDESTALデータを引き算するためのもの。



## 4 実験・解析

### 4.1 前段階実験・自作プリアンプ

まず、本実験の前段階として、MAPMT の生の信号を確認するために、プリアンプを自作し、256ch の内の一つの ch の生の信号をオシロスコープで見た。線源は Cs137。

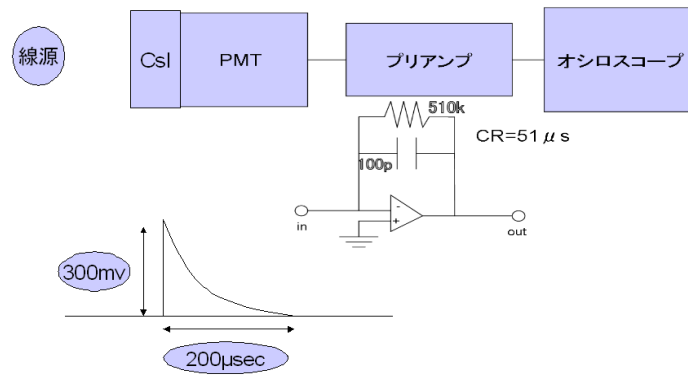


図 4.1: 接続とイメージ

プリアンプの時定数  $CR=51\mu\text{sec}$ 。\*

\*減衰時間が  $1\mu\text{sec}$  程度だから、 $51\mu\text{sec}$  で問題ない。

## 4.2 1ch Na22

ここからは、実際にヘッドアンプユニットを接続してデータを取得。  
 とりあえず、一つ一つの ch ごとのパルス高さをグラフ化して見ていったが各 ch ごとのグラフ  
 で最大の波高値の位置が異なっていたので、ピークを決めることは無理と判断した。  
 以下は代表として ch1 のグラフ。

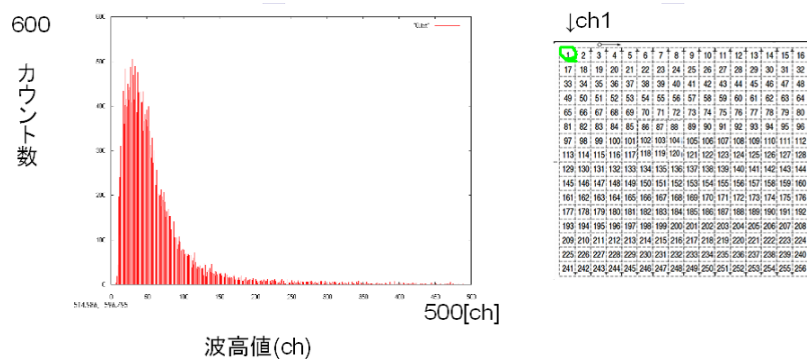


図 4.2: ch1 の Na22

標準偏差 [ch]	最大 [ch]
23.5	35

表 4.1: 1ch Na22

### 4.3 16ch Na22

次に、ひとつの ch を見た場合と同じく、今度は、16 の ch ごとに区切ってグラフにしてみた。このとき、16ch 分のデータを足して、一つのデータとした。この場合も、さきほどと同じく、やはり、各 ch ごとのグラフで最大の波高値の位置が異なっていた\*ので、ピークを決めることは無理と判断した。以下は代表としてそのひとつのグラフ。

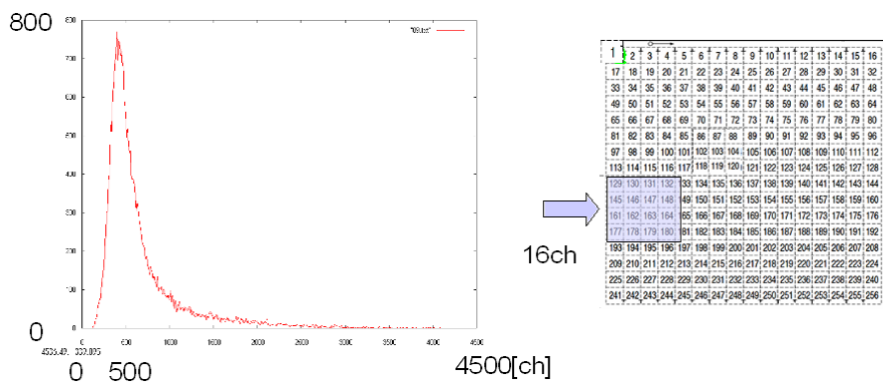


図 4.3: MAPMT16ch 分の Na22

標準偏差 [ch]	最大 [ch]
99.4	417

表 4.2: MAPMT16ch 分の Na22

\*標準偏差の値  $\sigma = 100 \sim 300$  位のばらつきがあった。

#### 4.4 256ch x 30000 event の波高値

以下は、30000event のデータ<sup>†</sup>を、MAPMT 上の ch で区別せず、波高値を全て書き出して、カウント数を縦軸にとってグラフ化したものである。この場合は、 $256 \times 30000 = 768000$  個のデータになる。また、右側は縦軸を対数にしたもの。

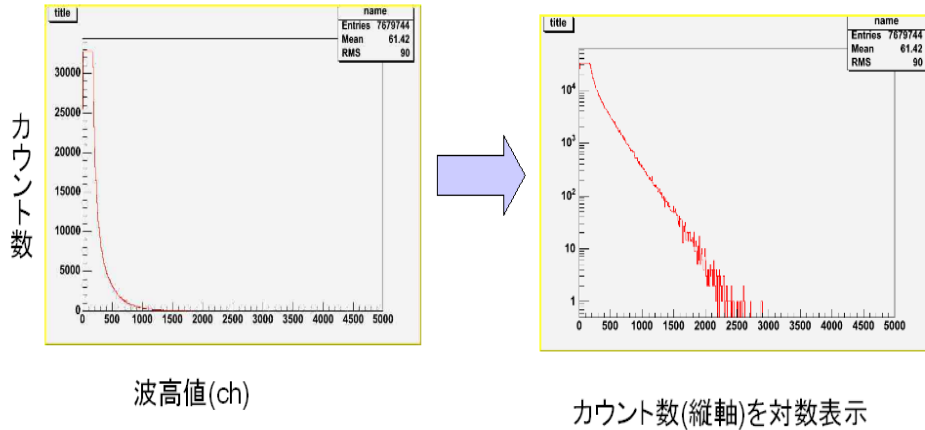


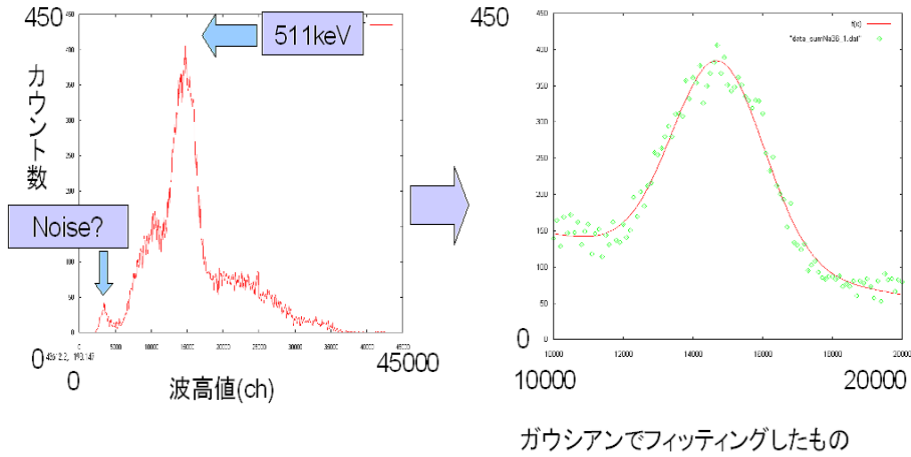
図 4.4: 256ch x 30000 Na22

このグラフからも、結局、ある波高値のところにピークが見えるということが分からないかった。以上より、結局 256ch 分を足して見ていくことにした。

<sup>†</sup>1event は 256ch の各 ch それぞれの波高データでまとまっている。

## 4.5 256ch 分 Na22

線源 Na22。256ch 足して見てやった場合。



標準偏差ch	ピークch
1135	15074(511keV)

図 4.5: 256ch 分 Na22

Na22 のピークは 511keV(89.8%) で、これは約 15000 のピークに対応していると判断できる。10500 程度にもピークが立っているがこれはエネルギーに換算すると、320keV 程度となって、この位置にピークが出てしまうのはよく分からなかった。\*

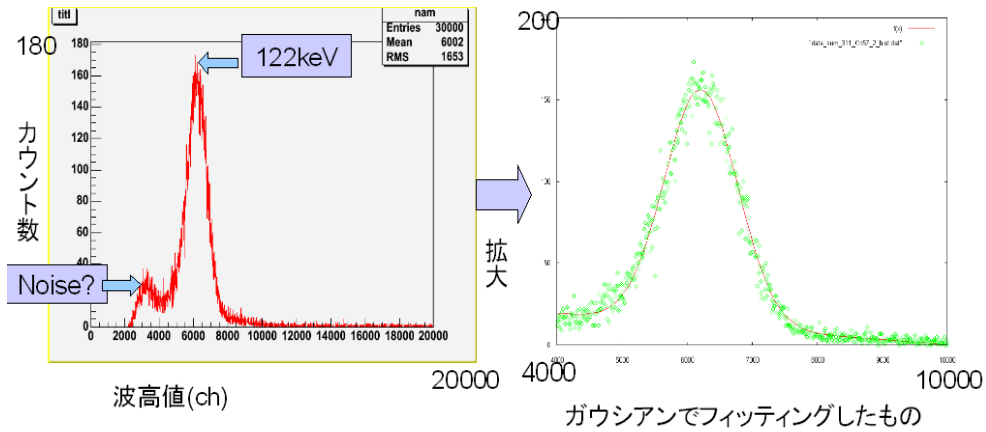
3400ch 程度にあるピークは Noise かどうかははっきりしなかった。†

\*コンプトン散乱の可能性を考えると、 $h\nu'$  の最大 =  $\frac{h\nu_0}{1+mc^2/2h\nu_0}$   
 $h\nu=511\text{keV}$ ,  $mc^2=511\text{keV}$  より、340keV 程度にはなるがはっきりしない。

†4.8 バックグラウンドとの比較参照

## 4.6 256ch分 Co57

線源 Co57。256ch 足して見てやった場合。



標準偏差ch	ピークch
563	6212(122keV)

図 4.6: 全 chCo57

Co57 は一番大きなピークは 122keV(85.6%) なので図の 6212ch のピークに対応すると判断できた。他のエネルギーの値は 136keV(10.7%) があるが、これは 6400ch 程度のピークになるはずであるが、122keV のピークに近くて判別は無理だと思われる。また、14.4keV(9.2%) のときは 3700 程度のところにピークが立つはずであるが、バックグラウンド<sup>†</sup>でも表れてしまうよく分からない 3000~3400ch 付近のピークのせいで見られないと判断した。

<sup>†</sup>4.8 のバックグラウンド比較を参照

## 4.7 256ch 分 Ba133

線源 Ba133。\* 256ch 足して見てやった場合。

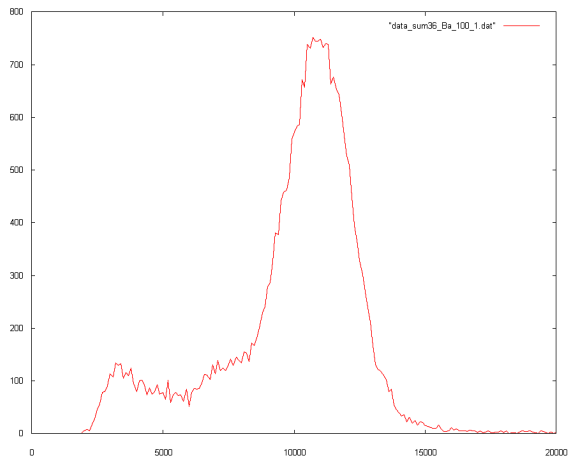


図 4.7: Ba133

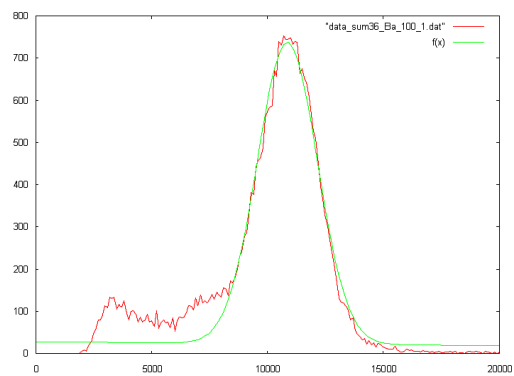


図 4.8: Ba133 ガウシアンでフィッティング

標準偏差 [ch]	最大 [ch]
1300	10692(356keV)

表 4.3:

Ba133 は 356keV のピークが 62%であるので、図でもっともピークが立っているのが 356keV のピークだと判断できるが、81keV(34.1%) のエネルギーに対応する ch は 3500 程度<sup>†</sup>になるが 3200ch 位にピークがあって(この 3200 程度のピーク自体が他の線源の場合と同じく Ba133 によるものとは言えないと判断したので)これによってはっきり見えているとは言えなかった。他にも、303keV(18.3%) の場合は 10000 程度になるが、これは図の 356keV のピークの中に埋もれていてはっきり区別できなかったと思われる。

\*この他に Cs137 も見てやったが分かりにくかったので、Na22 Ba133 Co57 の 3 つの線源に絞った。

<sup>†</sup>次々ページのキャリブレーションの式より

## 4.8 Background について

線源 Na22 でバックグラウンドとの比較を試みた。

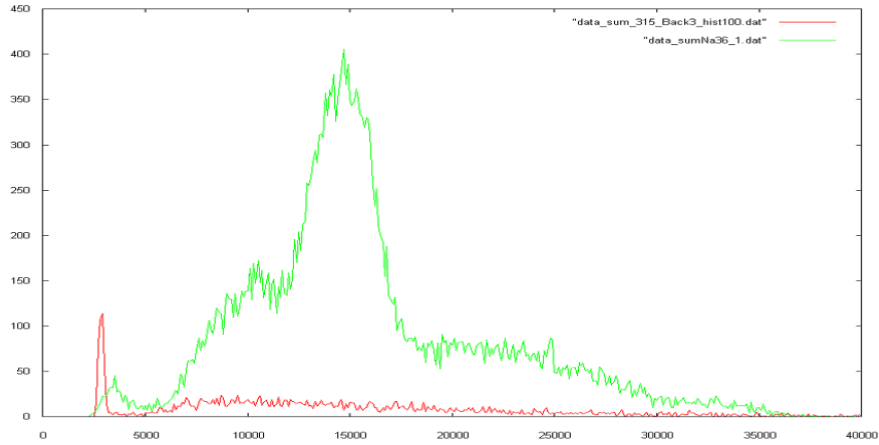


図 4.9: Na22 vs Background

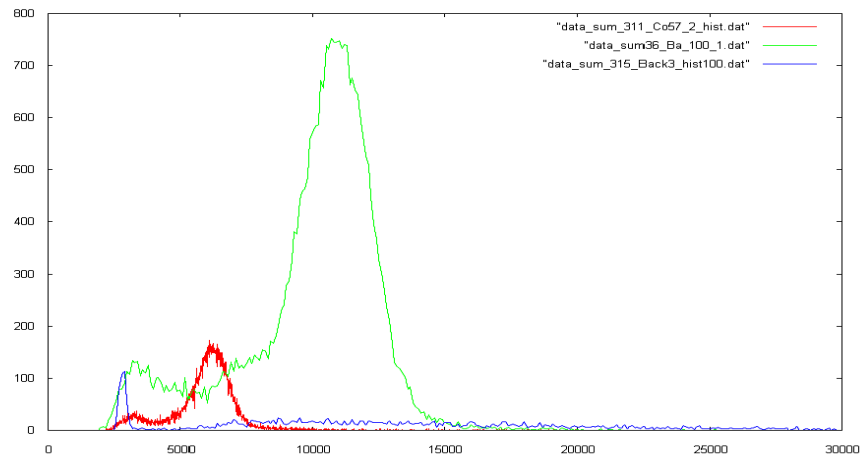


図 4.10: Co57(赤)&Ba133(緑) vs Background(青)

Na22 の計数率を求める。測定時間は Na22 の 30000event が 15 分だったので、それを基準に Background を測定した。

Na22	Background
30000events	3847events

表 4.4: Na22 とバックグラウンドの比較

計数率= $22 \pm 0.12/\text{sec}$  となった。よって、Background は無視しても問題ないと思われる。やはり、2900ch 付近にピークが立ってしまっているが、この原因がよく分からなかった。<sup>†</sup>

<sup>†</sup>5.1 まとめ参照



## 4.9 キャリブレーション

以上三つの線源での値を使いキャリブレーション<sup>†</sup>して、エネルギーと波高値の関係を求めた。

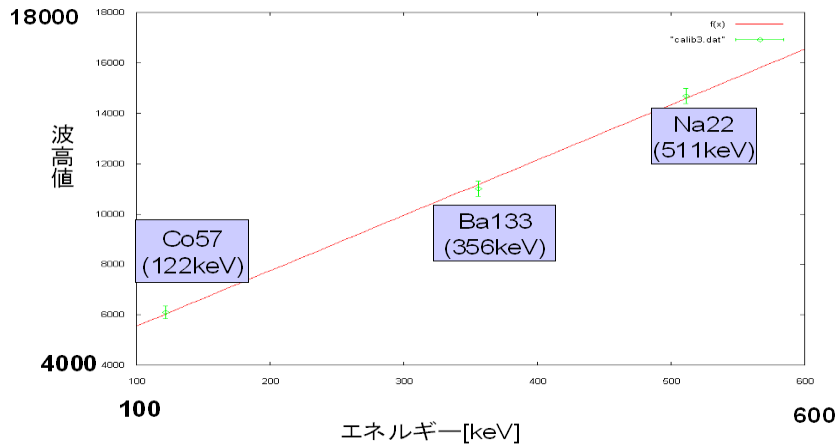


図 4.11: NaBaCo

キャリブレーションによってキャリブレーションの直線の式を求めた。

$$ch = 22(\pm 0.8)E(\text{keV}) + 3396(\pm 300)$$

<sup>†</sup>実験の最後の方において、試しに SDS モードを使ってみた。すると、通常モードでのキャリブレーションよりもうまく直線がグラフの 3 点を通った。しかし、なぜそうなるのかなどよく分からなかった。あるいは、もっと何度もデータを取得して通常モードと比較する必要があると思われる。

## 5 結果・まとめ

### 5.1 これまでのまとめ

各線源に対してキャリブレーションの式でエネルギー分解能を計算して表にしたものを以下に示す。

	分解能	誤差
122keV (Co57)	45%	±2 %
356keV (Ba133)	35%	±1 %
511keV (Na22)	22 %	±0.3 %

図 5.1: 分解能:FWHM で評価した

各 ch ごとに評価せず全 ch 足し上げることで評価した。そのために、分解能が悪くなってしまった。また、Ba133, Co57 にピーク位置細かなピークがあるので Na22 よりも分解能が悪くなったと思われる。

課題としては、やはり、バックグラウンドで 2900ch 位に存在するピークの説明がうまくできなかった。しかも、微妙に各線源の同じものかと思われたピークとは一致しない。Na22 $\simeq$  3400, Co57 $\simeq$  3000 or 3400<sup>†</sup>, Ba133 $\simeq$  3200 となり、完全に同じものかどうか判断し兼ねた。256ch 足してやっているためかもしれない。16ch ごとに足して見ていった場合にも同じようなピークが見えたりして、原因がはっきり確かめられなかった。また、ゲインの違いも今回は考慮していないので、そのこともあるかもしれない。さらに、本来は 256ch についての位置分解能についても考慮すべきと思われるが、その実験をするまでに至らなかった。

<sup>†</sup>細かいピーク 3000 と 3400 に立っていた

## 6 謝辞

今回の実験に関しまして、御指導頂きました助手の松本さん、TAの乾さんに深く感謝を申し上げます。また、線源などを快く貸して頂いた宇宙線研究室の方々に感謝を申し上げます。P6のメンバーにも同じく感謝申し上げます。最後に、レポートが遅れてしまったことをお詫びします。

## 7 参考文献

- 「放射線計測ハンドブック」 グレン F. ノル (日刊工業新聞社 2001)
- 「アイソトープ手帳 10 版」 日本アイソトープ協会 (丸善 2002)
- 「放射線計測学」 長哲二 (南山堂 2002)
- 「放射線計測」 加藤貞幸 (培風館 1994)
- 「計測における誤差解析入門」 John R. Taylor (東京化学同人 2000)
- 「取扱説明書 80057A 型 PMT Data Processor ファームウェア Ver.2」 (CLEAR-PULSE 2005)