

$\gamma$ 線検出器としての  
PbWO<sub>4</sub>シンチレーターの特性

平成9年度  
原子核物理学講座  
佐藤史尚 関口昌嗣

## 1章 Introduction

この実験では将来、高エネルギー $\gamma$ 線検出器として期待されている $\text{PbWO}_4$  (以下PWOと省略)シンチレータの特性を調べることを目的としている。

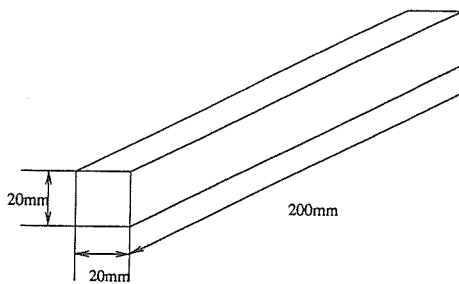
### ○ $\text{PbWO}_4$ の性質

	$\text{PbWO}_4$ (PWO)	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)	$\text{NaI(Tl)}$
密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	8.2	7.13	3.67
最大発光波長 [nm]	490	480	413
radiation length [cm]	0.92	1.12	2.59
蛍光減衰時間 [nsec]	2.1/7.5/26	300	230
潮解性	なし	なし	あり
相対発光量	0.25	7	100
屈折率	2.2~2.3	2.15	1.78

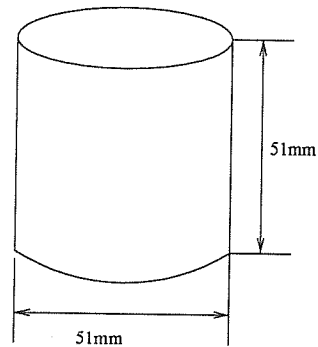
上の表からわかるように、PWOは\*発光量が非常に小さい。\*屈折率が大きい。という短所を持っているが、\*radiation lengthが短い。\*蛍光減衰時間が短い。という長所も持っている。この長所に加えて放射性耐性が高い ( $> 10^7 \text{rad}$ ) ということもあり、発光量の少なさがカバーされる高エネルギーでの鉛ガラスに代わる $\gamma$ 線検出器として期待される。

### ○結晶の形状

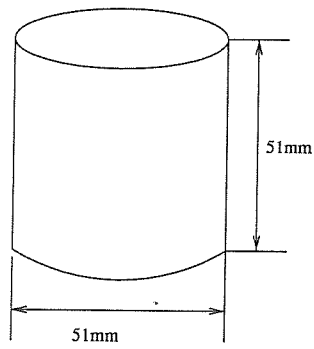
この実験で用いたPWO,BGO,Plastic,NaIシンチレータの形状は以下の通りである。



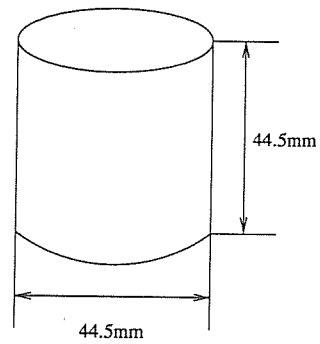
PWO シンチレータ



BGO シンチレータ



プラスチックシンチレータ



NaI シンチレータ

今回、0.511~4.43Mev エネルギー領域で PWO シンチレータの特性 (具体的には BGO との発光量の比較、 $\gamma$  線検出器としては重要な検出効率、エネルギー分解能、時間分解能) を議論していくこととなる。

## 第2章 BGO との発光量の比較

### 1、実験の目的

シンチレータ中で、 $\gamma$ 線との相互作用によって電子が励起される。この電子は光や熱などの形で励起されたエネルギーを失う。PWO では光の形で放出される割合が低く、このことがエネルギー分解能や時間分解能などに大きな影響をもたらしている。(後述)

ここでは PWO のシンチレーション発光量を BGO と比較し考察する。

### 2、実験の方法

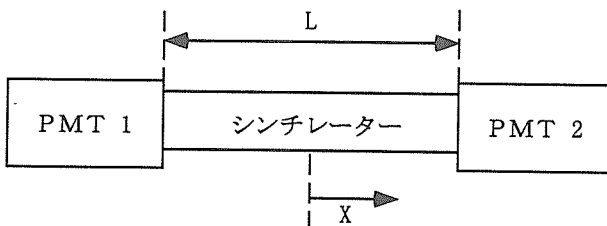
PWO は前の図のように細長い形状をしており発光量も少ないので、Photo Multi Tube(以下 PMT) を結晶の両端に取り付け効率よく蛍光を集めるようにした。

この際、入射してきた  $\gamma$  線が結晶のどの位置に入ってきて、スペクトル上で同じ所に現れるようにする必要がある。

今、下の図のように位置  $x$  に入射した  $\gamma$  線の場合を考えてみる。(簡略化のため 1 次元とし、 $x$  で全エネルギーを失い  $N_0$  個の光子を発生したと仮定する。)

そうすると PMT 1 に届く光子の数  $N_1$  は、 $\alpha$  を光の減衰係数として

$$N_1 = N_0 \exp(-\alpha(\frac{L}{2} + x))$$



同様に PMT2 に届く光子数  $N_2$  は

$$N_2 = N_0 \exp(-\alpha(\frac{L}{2} - x))$$

ここで上の 2 つの式をかけあわせ平方根をとると

$$\sqrt{N_1 N_2} = N_0 \exp(-\frac{\alpha L}{2})$$

すなわち位置  $x$  に無関係で、シンチレーション光  $N_0$  に比例する値が得られる。

しかしこの実験では、図のように発光波長のまわりで結晶はほとんど透明 ( $\alpha \sim 0$ ) なので、単純に  $(N_1 + N_2) / 2$  を全シンチレーション光子の数とした。

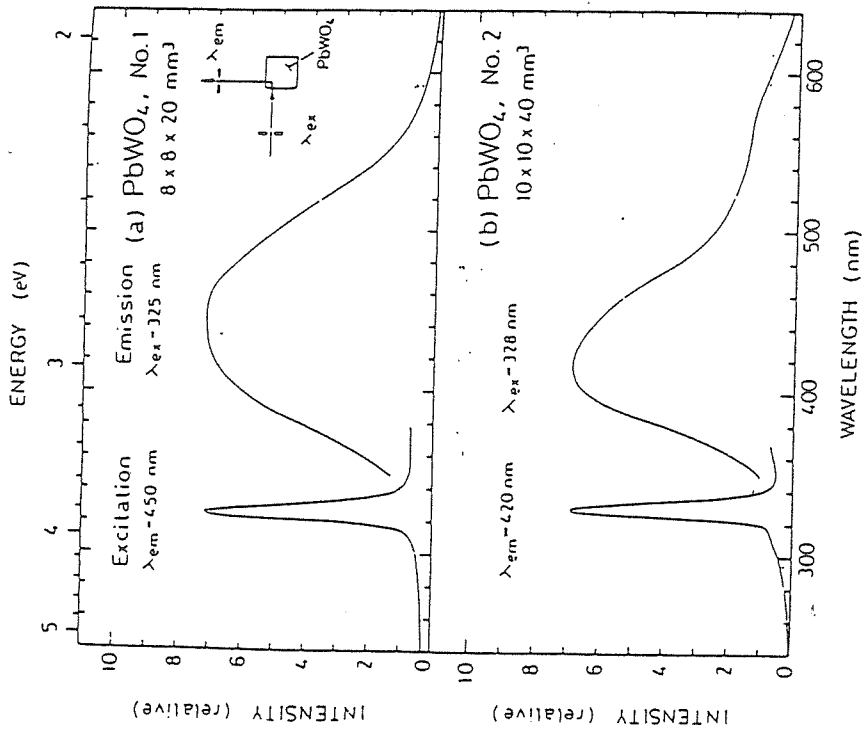


Fig. 1. Excitation-emission spectra of  $\text{PbWO}_4$  single crystals, (a) No. 1 and (b) No. 2, at room temperature. The bandwidths were 3 nm and 5 nm for the excitation and the emission spectra, respectively.

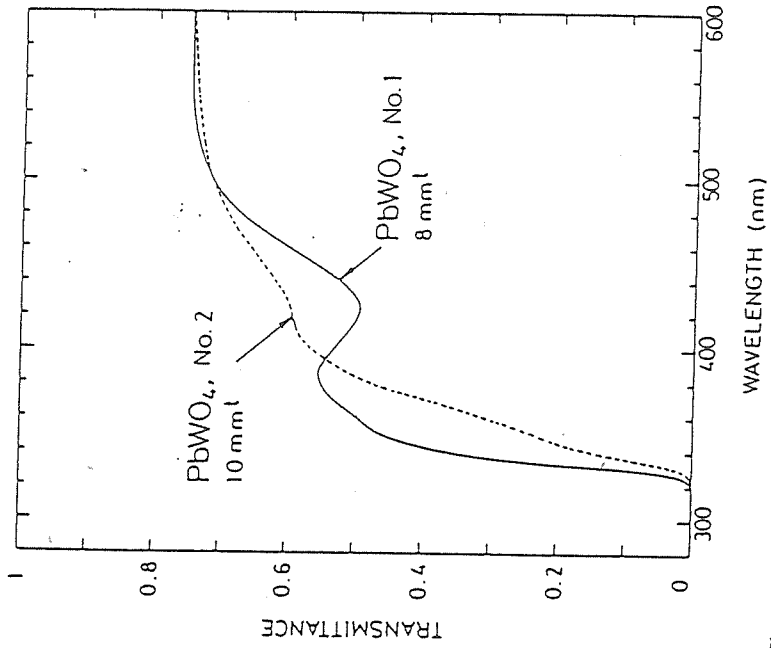
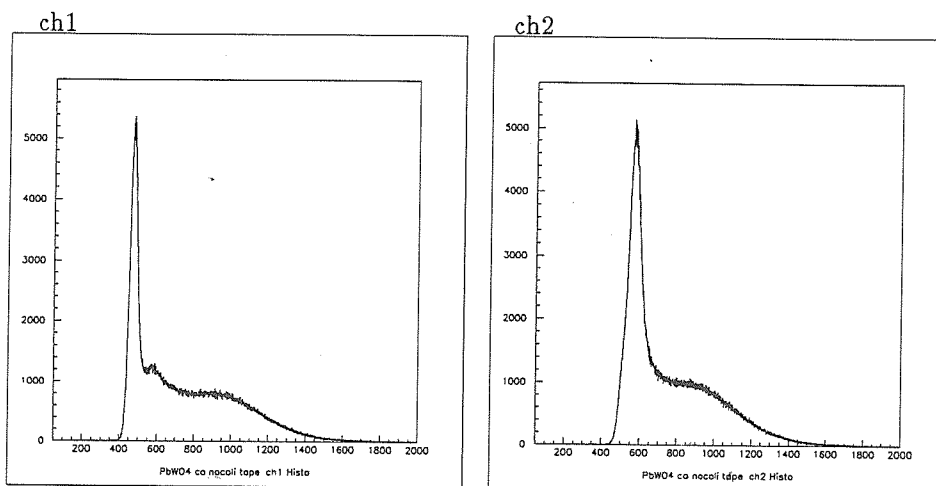


Fig. 2. Transmission spectra of the  $\text{PbWO}_4$  single crystals.

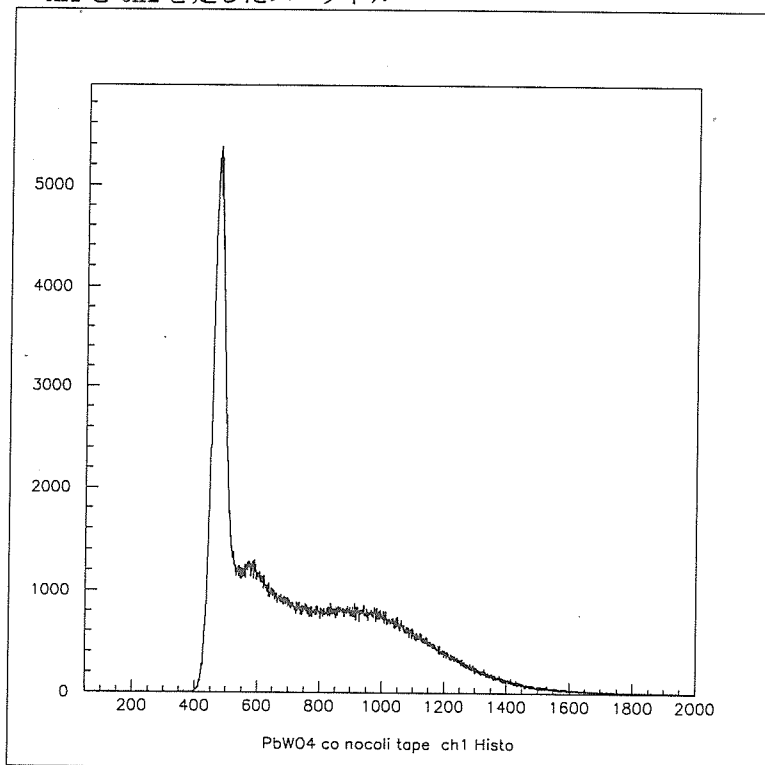
○スペクトルの例

線源: $^{60}\text{Co}$

コリメート:なし 測定時間:300sec 反射材:テフロンテープ



ch1 と ch2 を足したスペクトル



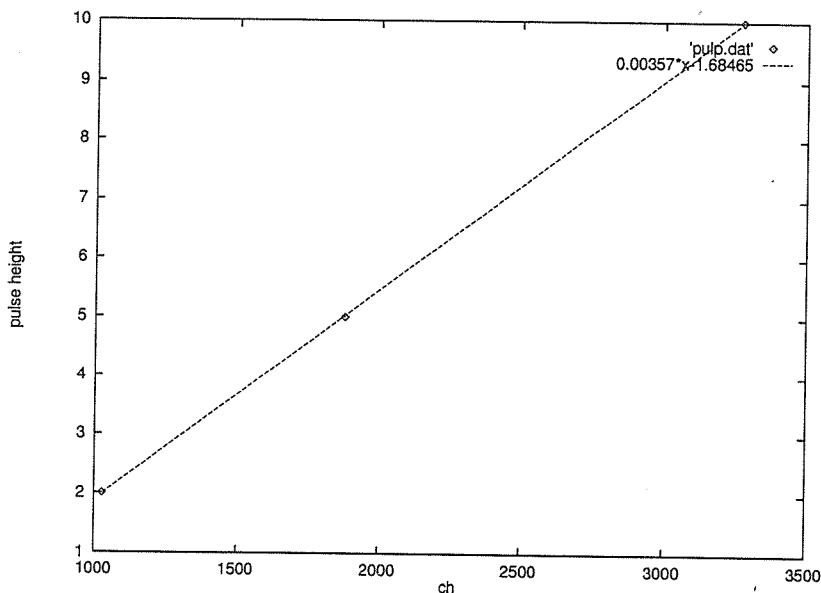
ここで、ch 1系と ch 2系の Gain は等しくなっていない。そこで同じパルスそれぞれの Pre Amp に入れ回路系 (Pre Amp 以下) の Gain を KODAQ 上で校正し、NaI をそれぞれの PMT につけ同じエネルギーの  $\gamma$  線は同じ高さの信号になるように PMT の High Voltage を調整した。(ch1 は 1600V, ch2 は 1640V となった。) この際、NaI と PMT の接合は等しいものと仮定した。

さてここから発光量の比較だが、まず前提としてシンチレータの発光量は ch 数に比例するとする。測定は Amp の Gain のみを変え、他の条件は変わらないものとする。PWO と BGO の発光量の比は、Gain の違いとピークの ch 数の変化から求めるものとする。Amp の Gain の違いは Pulser を使って前もって調べるものとする。

### 3、測定結果

PWO の測定と同じ gain での pulse height と ch の関係

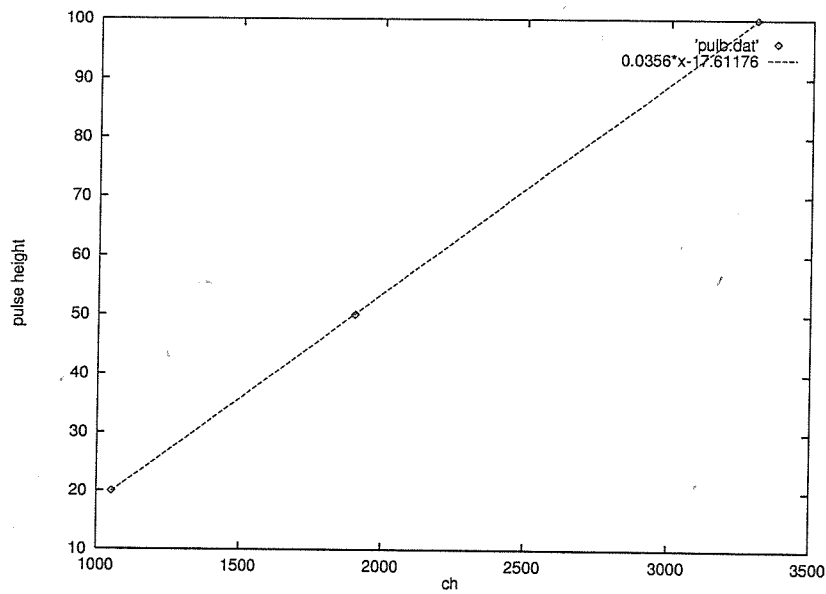
	ch	attenuator	pulse(BGO の pulse3 $\equiv$ 100)
pulse1	1028	$\times 10 \times 10 \times 5$	2
pulse2	1877	$\times 10 \times 10 \times 2$	5
pulse3	3276	$\times 10 \times 10$	10



$$y = 0.00357x(\text{ch}) - 1.68 \quad (1)$$

BGO の測定と同じ gain での pulse height と ch の関係

	ch	attenuator	pulse(BGO pulse3≡100)
pulse1	1054	×10 × 5	20
pulse2	1903	×10 × 2	50
pulse3	3302	×10	100



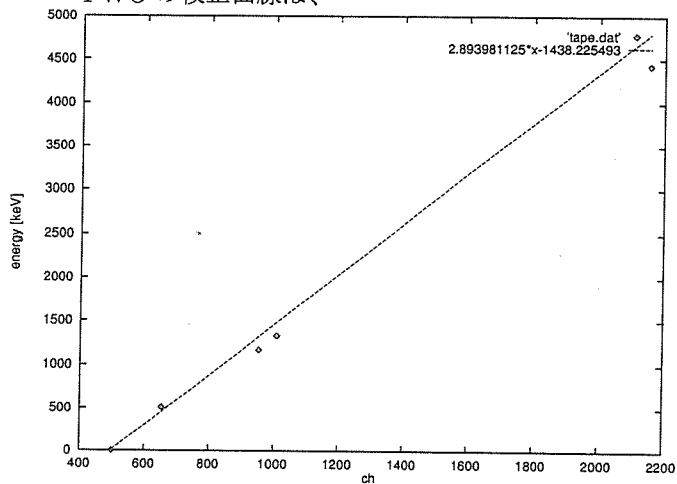
$$y = 0.0356x(\text{ch}) - 17.6 \quad (2)$$

(1) 式 (2) 式より PWO の測定では BGO の測定より amp の gain が  $\frac{0.0356}{0.00357} = 9.97$  倍高いことがわかる。



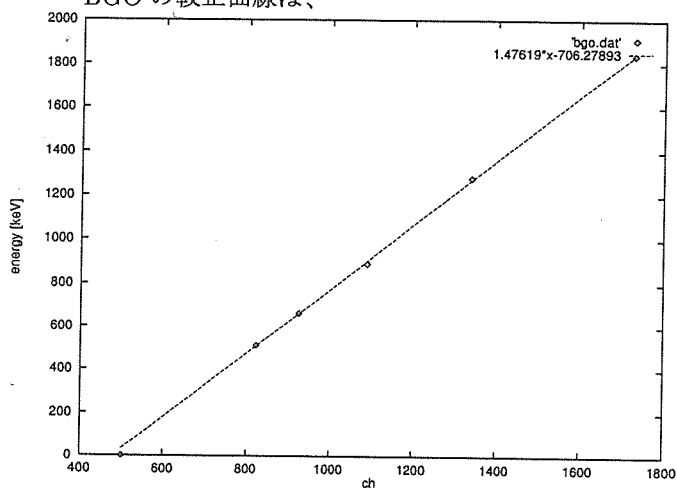
また PWO と BGO の較正曲線は、

PWO の較正曲線は、



$$E(\text{keV}) = 2.839x(\text{ch}) - 1438$$

BGO の較正曲線は、



$$E(\text{keV}) = 1.476x(\text{ch}) - 706.3$$

これより同じエネルギー間隔だと PWO は BGO の  $\frac{1.476}{2.839} = 0.5199$  倍の ch 間隔となる。

したがって BGO の発光量を 100 とすると

$$100 \times 0.5199 \times \frac{1}{9.97} = 5.21$$

PWO は BGO の 5.21% の発光量となることがわかる。

#### 4、PWOの発光量についての考察

PWOの発光量をBGOの5%とすると

$$\frac{\text{PWOのエネルギー分解能}}{\text{BGOのエネルギー分解能}} = \frac{\frac{\sqrt{N_{\text{PWO}}}}{N_{\text{PWO}}}}{\frac{\sqrt{N_{\text{BGO}}}}{N_{\text{BGO}}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{N_{\text{PWO}}}}}{\frac{1}{\sqrt{N_{\text{BGO}}}}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{5}}}{\frac{1}{\sqrt{100}}} \approx 4.47$$

(PWO,BGOそれぞれのシンチレーションの光子数を  $N_{\text{PWO}}, N_{\text{BGO}}$  とする)

この実験で得られたBGOのエネルギー分解能は、

エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (%)
511	28.7
662	28.8
898	25.3
1170 1330	27.5
1280	21.4
1840	19.3

なので

PWOのエネルギー分解能 = 4.47 × BGOのエネルギー分解能  
より

PWOのエネルギー分解能は

エネルギー (keV)	エネルギー分解能 (%)
511	128
662	129
898	113
1170 1330	123
1280	95.7
1840	86.1

となることが予想される。

また今回シンチレーション光の温度依存性については調べなかったが、約-2%/°Cの温度依存性をもつことが知られている。実験中は10~12°Cであったことを述べておく。

## 第3章 光電ピークの検出効率

### 1, 実験の目的

$\gamma$ 線と物質との相互作用として重要なものは、以下の3種類があげられる。

#### 1. 光電効果

入射 $\gamma$ 線光子が吸収原子の電子（主にK殻）にエネルギー  $h\nu$ を与え束縛エネルギーを差し引いた値を運動エネルギーにもつ電子が放出される。吸収原子の原子番号を  $Z$  として  $Z^5$ に比例して起こる。

#### 2. コンプトン散乱

$\gamma$ 線が物質中の電子（自由電子とみなせる）に散乱され、反跳電子と散乱 $\gamma$ 線がつくられる。 $Z$ に比例して起こる。

#### 3. 電子対生成

吸収物質中の原子核の場で $\gamma$ 線が消滅し電子-陽電子の対ができる。 $Z^2$ に比例して起こる。

これら3つの相互作用とも原子番号  $Z$  が大きければ相互作用を起こしやすくなる。PWOはPbの  $Z=82$ なので当然 $\gamma$ 線と相互作用をしやすく、結晶内でエネルギーを失う確率が高い。事実 radiation length は短く知られているシンチレータ中で最短である。

したがってシンチレータ中で $\gamma$ 線の全エネルギーが失われる光電ピークの検出効率は大きいことが期待される。

ここでは3種類の反射材（テフロンシート、ナフロンテープ、アルミ箔）を用いて実験してみる。

### 2, 実験方法

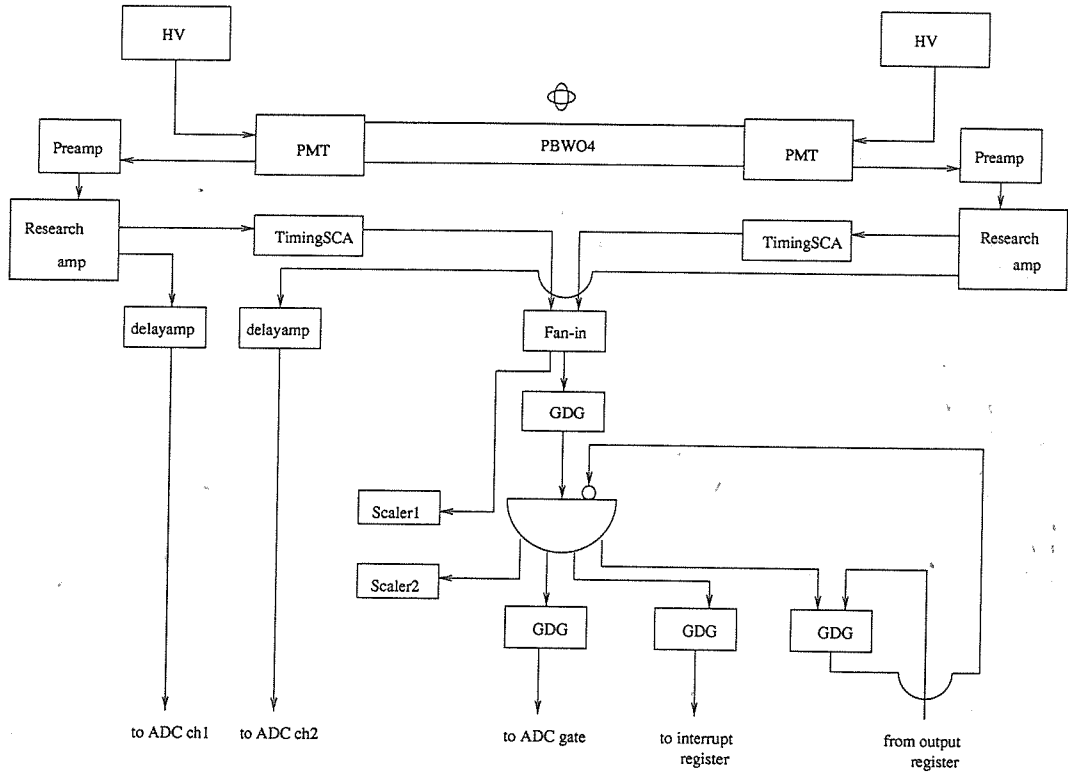
ここで用いた回路は基本的には前の回路と同じだが、回路の dead time を補正するために scaler1 と scaler2 を coincidence の前後に加えた。

光電ピークの検出効率  $\equiv \frac{N \frac{\text{scaler1 の値}}{\text{scaler2 の値}}}{\text{結晶内にはいった } \gamma \text{ 線の光子数}}$

( $N$ =スペクトル上での光電ピークの積分値)

として検出効率を求める。

回路図



線源から測定時間 (300sec) のうちに放出される $\gamma$ 線光子の数は、

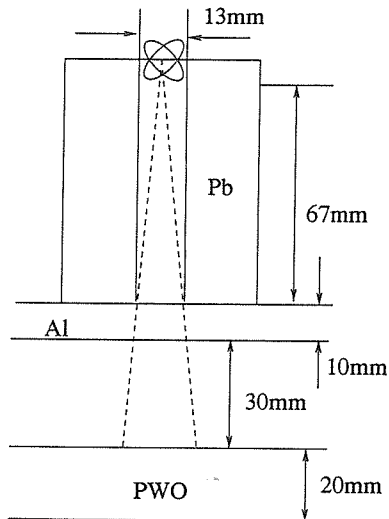
線源	エネルギー (MeV)	半減期 (year)	現在の崩壊数 (Bq)	$\gamma$ 線光子数 (300sec)
$^{137}\text{Cs}$	0.662	30.17	$3.042 \times 10^5$	$8.615 \times 10^7$
$^{60}\text{Co}$	1.17 1.33	5.27	$7.117 \times 10^4$	$4.268 \times 10^7$

である。このうち PWO の結晶内に入った $\gamma$ 線の光子数はそれぞれの配置での立体角をかけたものである。

それぞれの条件での立体角 $\Omega$ （線源を点状線源とする。）

○コリメートしたもの

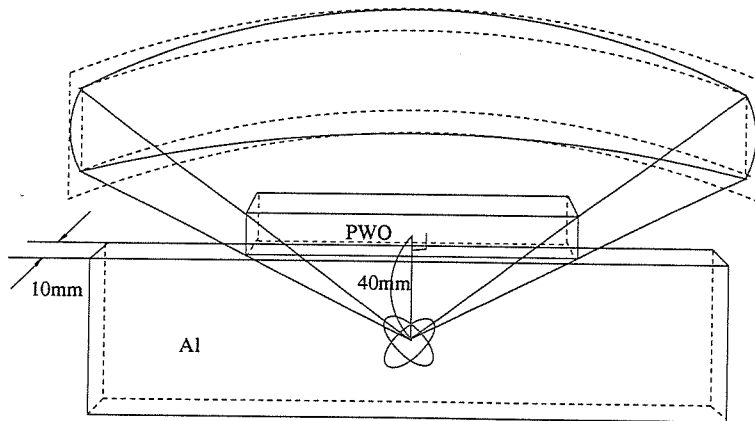
測定の配置図



$$\Omega = \frac{2\pi(1-\cos\theta)}{4\pi} = 2.336 \times 10^{-3}$$

○コリメートしていないもの

測定の配置図



この場合立体角が正確に求められなかったため、点線の長方形の値を用いて

$$3.476 \times 10^{-2} < \Omega < 9.282 \times 10^{-2}$$

として検出効率を求める。

よって結晶内に入射する $\gamma$ 線の光子数(300sec)は、

線源	コリメート	$\gamma$ 線光子数(300sec)	立体角	結晶に入射する $\gamma$ 線光子数
$^{137}\text{Cs}$	あり	$8.615 \times 10^7$	$2.336 \times 10^{-3}$	$2.012 \times 10^5$
$^{60}\text{Co}$	あり	$4.268 \times 10^7$	$2.336 \times 10^{-3}$	$9.970 \times 10^4$
$^{137}\text{Cs}$	なし	$8.615 \times 10^7$	$3.476 \sim 9.282 \times 10^{-2}*$	$2.995 \sim 7.996 \times 10^6$
$^{60}\text{Co}$	なし	$4.268 \times 10^7$	$3.476 \sim 9.282 \times 10^{-2}*$	$1.484 \sim 3.962 \times 10^6$

この値を用いて、

$$\frac{N \text{ scaler1 の値}}{\text{scaler2 の値}} \\ \text{結晶に入射した } \gamma \text{ 線の光子数}$$

として光電ピークの検出効率を求める。

### 3、測定結果

光電ピークの総数は以下のようにして求めた。まず gaussian+exponential で光電ピークをフィットし(バックグラウンドを exponential と仮定)exponential と実際のスペクトルが交わる ch からピークの上限と思われる ch までスペクトルを積分し、その後バックグラウンドと仮定した exponential の部分の面積を差し引いた。

その結果

テフロン

線源	コリメート	積分の範囲(ch)	積分値	exp の面積	光電ピーク的面積
$^{137}\text{Cs}$	あり	500~1281	$3.350 \times 10^5$	$1.829 \times 10^5$	$1.521 \times 10^5$
$^{60}\text{Co}$	あり	600~1600	$1.680 \times 10^5$	$1.060 \times 10^5$	$6.199 \times 10^4$
$^{137}\text{Cs}$	なし	515~1250	$4.172 \times 10^5$	$7.268 \times 10^4$	$3.445 \times 10^5$
$^{60}\text{Co}$	なし	648~1600	$5.573 \times 10^5$	$2.861 \times 10^4$	$2.712 \times 10^5$

テープ

線源	コリメート	積分の範囲(ch)	積分値	exp の面積	光電ピーク的面積
$^{137}\text{Cs}$	あり	558~1501	$6.779 \times 10^4$	$4.864 \times 10^3$	$6.293 \times 10^4$
$^{60}\text{Co}$	あり	560~1492	$1.641 \times 10^5$	$1.119 \times 10^5$	$5.224 \times 10^4$
$^{137}\text{Cs}$	なし	503~1196	$3.058 \times 10^5$	$1.418 \times 10^5$	$3.445 \times 10^5$
$^{60}\text{Co}$	なし	550~1500	$5.862 \times 10^5$	$2.379 \times 10^5$	$2.712 \times 10^5$

アルミ箔

線源	コリメート	積分の範囲 (ch)	積分値	exp の面積	光電ピーク的面積
<sup>137</sup> Cs	あり	541~1297	$1.064 \times 10^5$	$2.196 \times 10^4$	$8.444 \times 10^4$
<sup>60</sup> Co	あり	579~1499	$1.654 \times 10^5$	$9.639 \times 10^4$	$6.901 \times 10^4$
<sup>137</sup> Cs	なし	503~1195	$3.058 \times 10^5$	$1.288 \times 10^5$	$1.770 \times 10^5$
<sup>60</sup> Co	なし	548~1799	$6.261 \times 10^5$	$3.918 \times 10^5$	$2.343 \times 10^5$

したがって

光電ピークの検出効率

テフロン

線源	コリメート	光電ピーク的面積	補正值*	結晶に入射する $\gamma$ 線光子数	検出効率 (%)
<sup>137</sup> Cs	あり	$1.521 \times 10^5$	1.208	$2.012 \times 10^5$	91.3
<sup>60</sup> Co	あり	$6.199 \times 10^4$	1.441	$9.970 \times 10^4$	89.6
<sup>137</sup> Cs	なし	$3.445 \times 10^5$	1.414	$2.995 \sim 7.996 \times 10^6$	6.09~16.3
<sup>60</sup> Co	なし	$2.712 \times 10^5$	1.607	$1.484 \sim 3.962 \times 10^6$	11.0~29.4

テープ

線源	コリメート	光電ピーク的面積	補正值*	結晶に入射する $\gamma$ 線光子数	検出効率 (%)
<sup>137</sup> Cs	あり	$6.293 \times 10^4$	1.080	$2.012 \times 10^5$	33.8
<sup>60</sup> Co	あり	$5.224 \times 10^4$	1.214	$9.970 \times 10^4$	63.6
<sup>137</sup> Cs	なし	$3.445 \times 10^5$	1.331	$2.995 \sim 7.996 \times 10^6$	5.73~15.3
<sup>60</sup> Co	なし	$2.712 \times 10^5$	1.475	$1.484 \sim 3.962 \times 10^6$	10.1~27.0

アルミ箔

線源	コリメート	光電ピーク的面積	補正值*	結晶に入射する $\gamma$ 線光子数	検出効率 (%)
<sup>137</sup> Cs	あり	$8.444 \times 10^4$	1.098	$2.012 \times 10^5$	46.1
<sup>60</sup> Co	あり	$6.901 \times 10^4$	1.266	$9.970 \times 10^4$	87.6
<sup>137</sup> Cs	なし	$1.770 \times 10^5$	1.350	$2.995 \sim 7.996 \times 10^6$	2.99~7.98
<sup>60</sup> Co	なし	$2.343 \times 10^5$	1.497	$1.484 \sim 3.962 \times 10^6$	8.85~23.6

\*補正值 $\equiv$ saler1/scaler2

#### 4、検出効率についての考察

得られた検出効率は、まちまちの値であるが<sup>60</sup>Coの方が高い値になっているのがわかる。図から<sup>137</sup>Csの方が全吸収されやすいので高い値になるはずである。これはスペクトルからわかるようにエネルギー0の下にまでピークが広がっているためだろう。このため積分範囲に左右され検出効率はまちまちの値になっている。積分範囲の決定およびフィッティングの方法を改良す

べきであるのではないかと思う。

コリメートした方が高い値になるのは、コリメータの鉛中で反射が起こり計算で求めた入射 $\gamma$ 線光子の数より多くの $\gamma$ 線が入射しているためであると思われる。このため反射した $\gamma$ 線が結晶に入らないような実験配置にすべきであった。

また今まで述べていなかったが線源と結晶の間には厚さ 10mm のジュラルミン (主に Al) があつた。コリメートしていない場合結晶の端では $\gamma$ 線は 2.7cm の厚さの Al を通過することになり、この間に約 2 割の $\gamma$ 線が全吸収される。このことを考えるとコリメートしていない場合の検出効率はもう少し高いのではないだろうか。

PWO の屈折率  $n$  は  $n=2.2\sim 2.3$  と大きい。このため臨界角 $\theta_c$ は  $\theta = 26^\circ \sim 27^\circ$  と小さい値になる。よってシンチレーション光のほとんどは全反射し反射材による違いはほとんどなかったと考えられる。



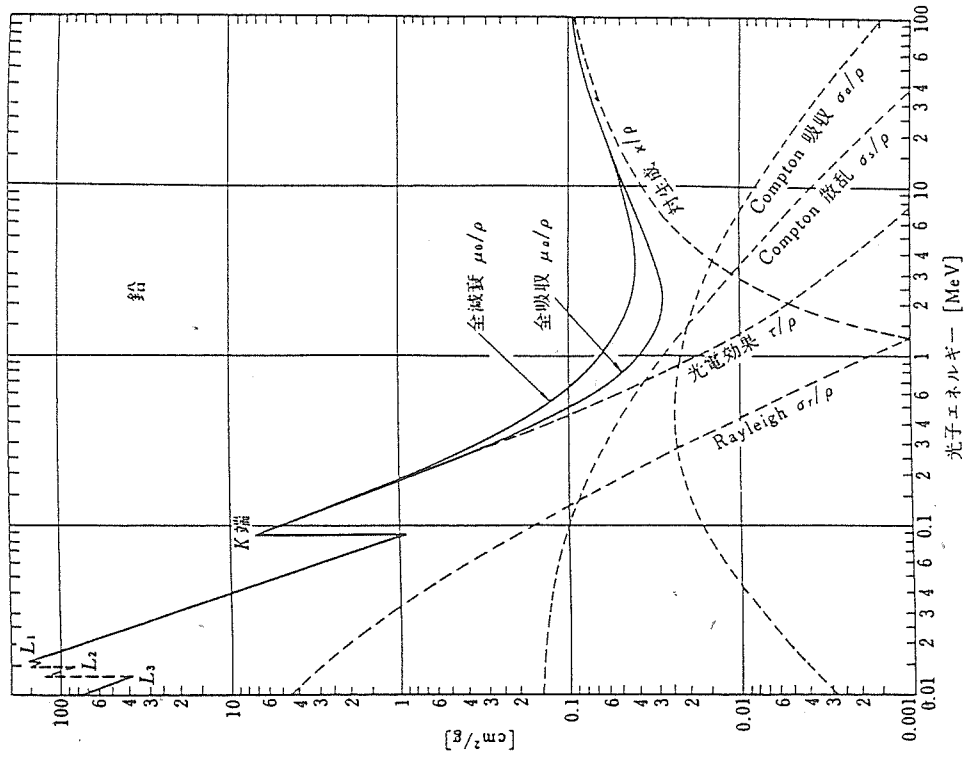


図 1.74 鉛における光子の質量減衰係数  $[\text{cm}^2/\text{g}]$

$\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$

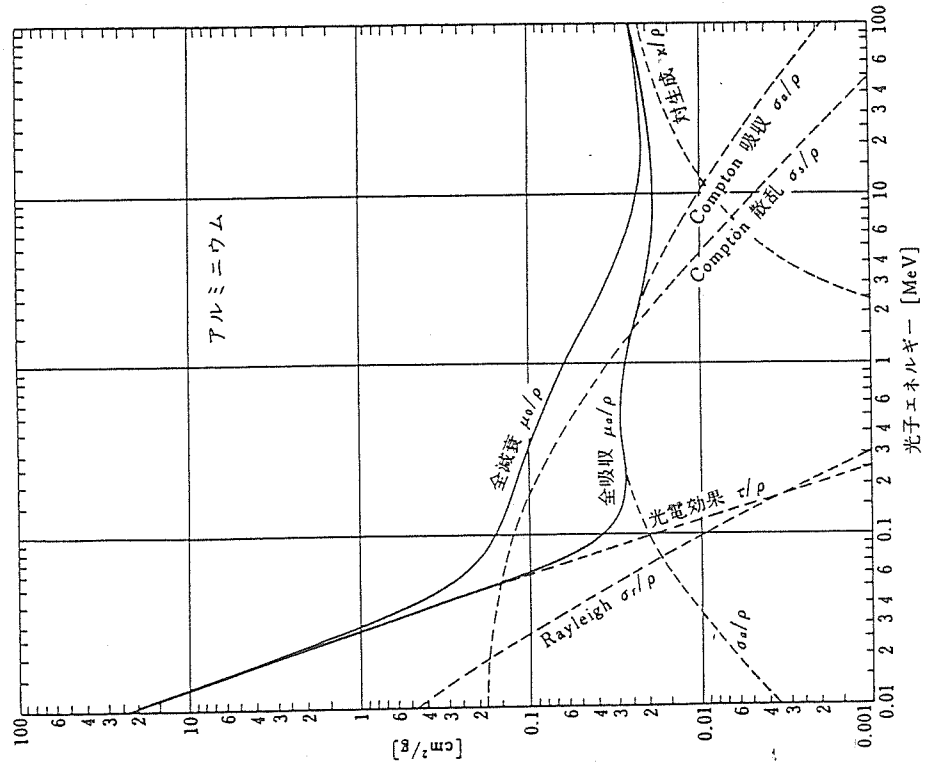


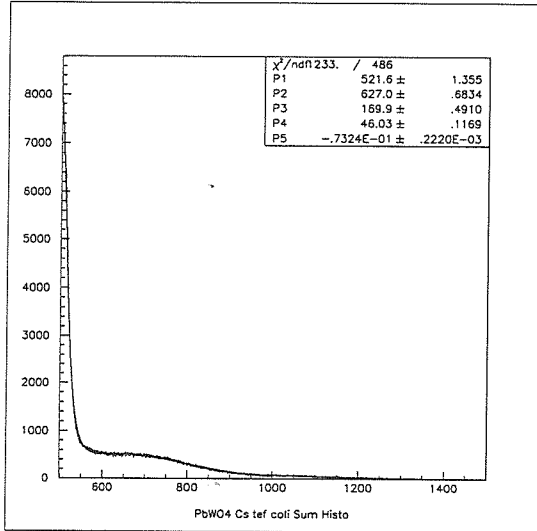
図 1.72 アルミニウムにおける光子の質量減衰係数  $[\text{cm}^2/\text{g}]$

$\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$

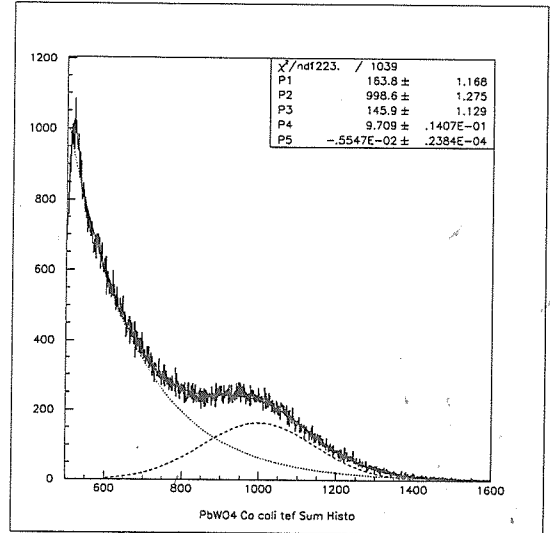
○フィッティングの例

テフロン

コリメートあり

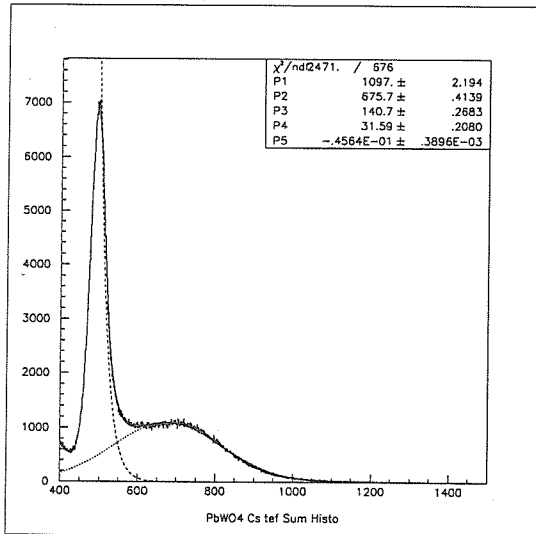


$^{137}\text{Cs}$

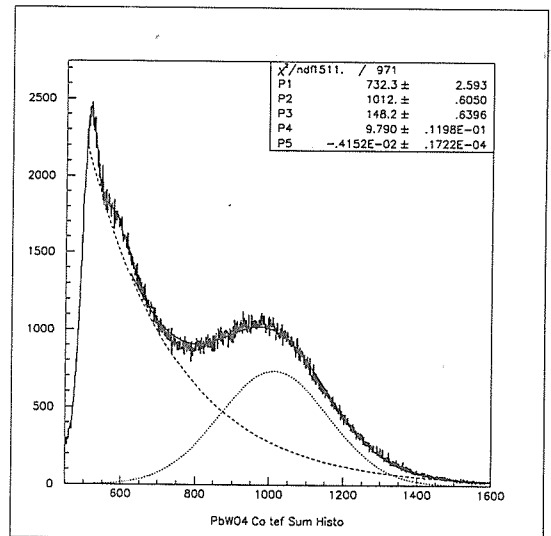


$^{60}\text{Co}$

コリメートなし



$^{137}\text{Cs}$



$^{60}\text{Co}$

## 第4章 エネルギー分解能

### 1, 実験の目的

放射線スペクトル測定において、入射放射線のエネルギーを詳細に解析するための測定能力では、そのスペクトルの幅が狭ければ狭いほど、つまりエネルギー分解能のよさが重要となってくる。この章では、前章の  $\text{PbWO}_4$  の発光量を考慮に入れながら、 $\text{PbWO}_4$  のシンチレーターの特性を考えてゆく。

### 2, 実験方法

後ろのページの  $\text{PbWO}_4$  の単独でとったスペクトルをみてもわかるように、光電ピークの面積と全体の応答関数の面積の比、つまり光電比小さい。実際、光電ピークをフィットするのが困難だったため、NaIシンチレータと、Na22の511keV対消滅線、Co60の1.17&1.33MeVカスケード線、Y88の0.89&1.84MeVカスケード線で同時計数を行なった。ここでは、NaIのスペクトルをモニターで見ながら、Timing SCAでそれぞれのエネルギーのピークをはさむようにupper levelとlower levelを設定し $\text{PbWO}_4$ とコインシデンスをとった。

### 3, エネルギー校正

エネルギー (keV)	0	511	662	890	1170	1330	1840	4430
チャンネル (ch) テフロンテープ	501	654 ±0.4	*	*	956 ±2.2	986 ±2.1	*	2055 ±2.7
チャンネル (ch) テフロンシート	501	650 ±0.8	675 ±0.3	822 ±17.0	975 ±2.8	986 ±3.0	*	*
チャンネル (ch) アルミ	501	649 ±0.1	693 ±6.5	*	957 ±3.6	963 ±2.5	1189 ±5.4	*

※ Cs137の662keVとAm\Beの4430keV以外は全てNaIと同時計数。

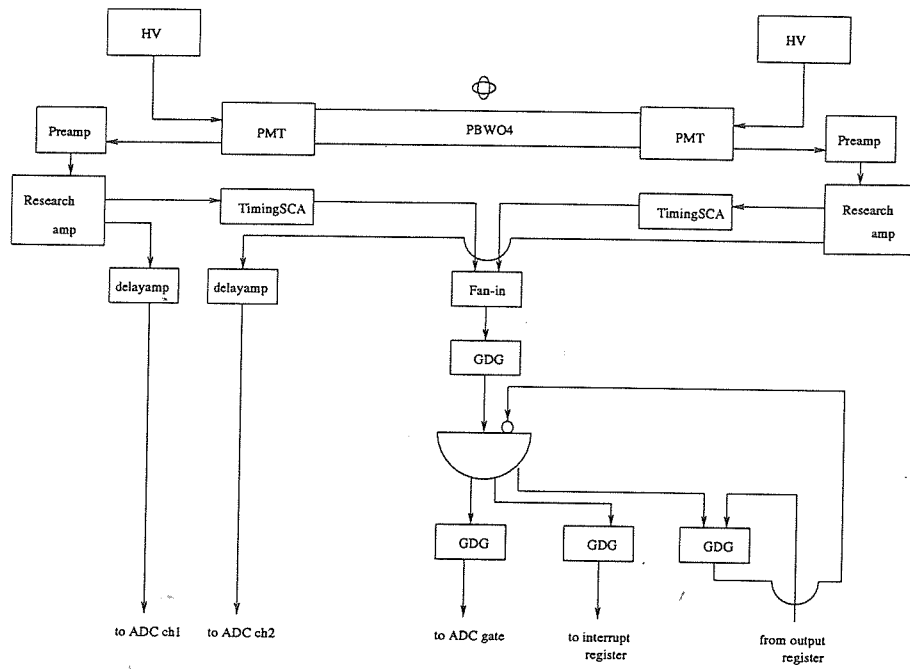
※ \* 印は、フィットが困難だったもの。

$$\text{エネルギー (keV)} = \text{チャンネル (ch)} \times 2.893 - 1438 \text{ (テフロンテープ)}$$

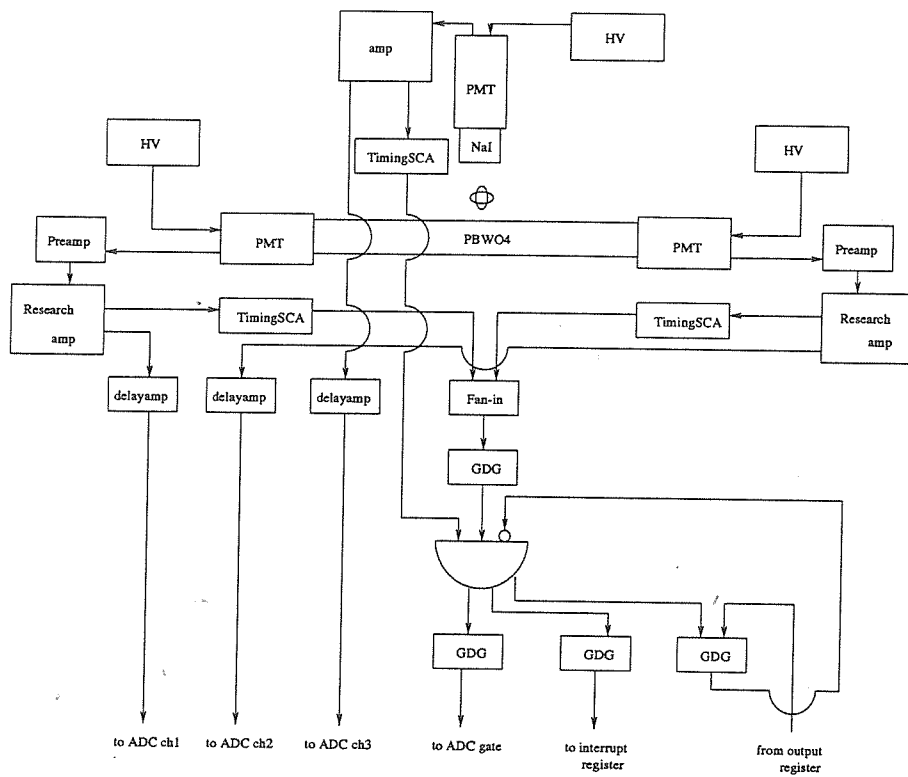
$$\text{エネルギー (keV)} = \text{チャンネル (ch)} \times 2.444 - 1117 \text{ (テフロンシート)}$$

$$\text{エネルギー (keV)} = \text{チャンネル (ch)} \times 2.569 - 1203 \text{ (アルミ)}$$

以上は、最小二乗法を用いて直線にした。

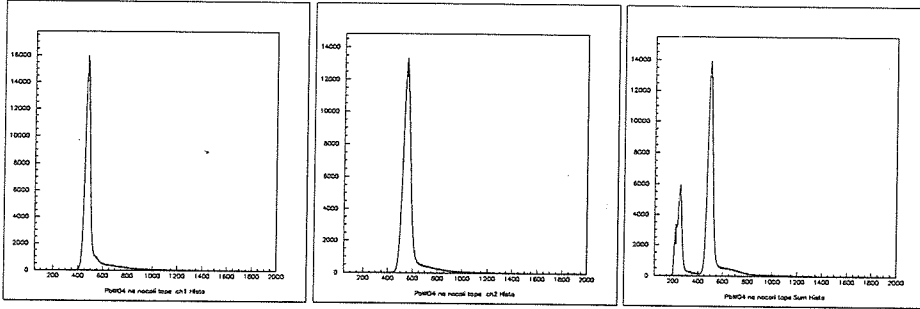


(PbWO<sub>4</sub> 単独の回路)



(NaI とコインシデンスをとった回路)

PbWO<sub>4</sub> 単独でとったスペクトル (テフロンテープ)

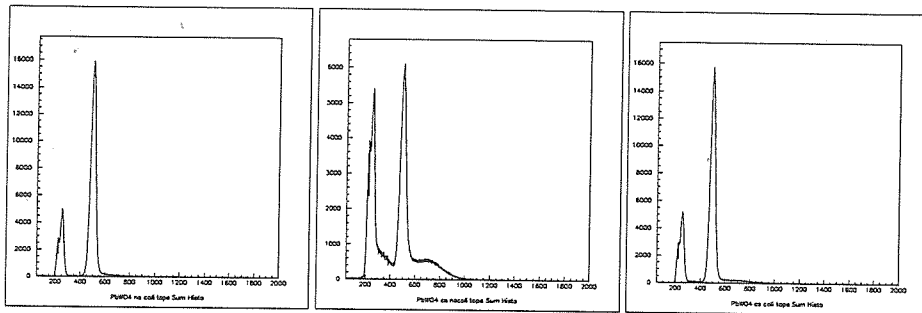


Na22(コリメートなし)  
ch1

Na22(コリメートなし)  
ch2

Na22(コリメートなし)  
合計

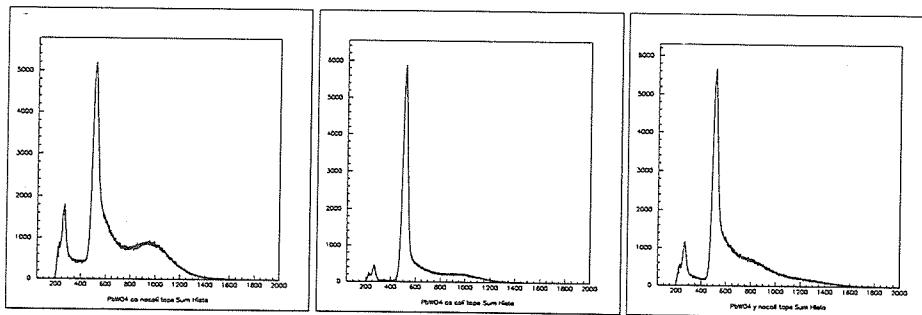
以下、合計のみ



Na22(コリメートあり)

Cs137(コリメートなし)

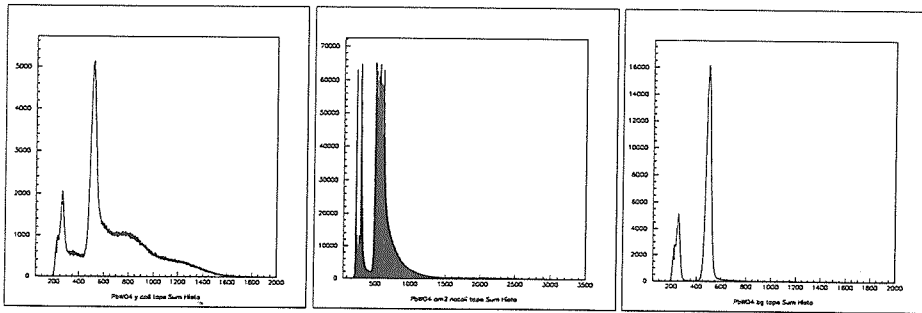
Cs137(コリメートあり)



Co60(コリメートなし)

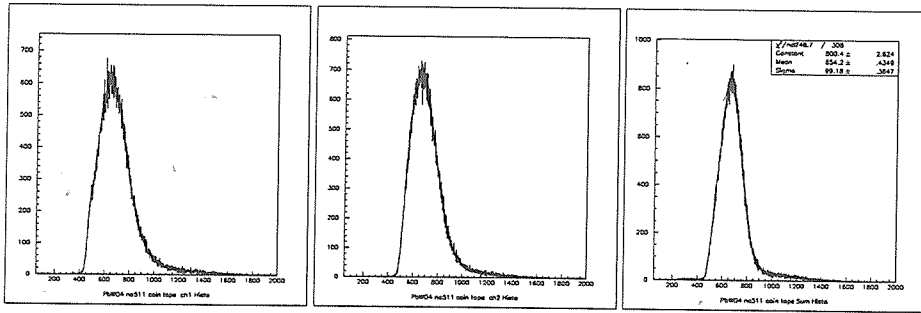
Co60(コリメートあり)

Y88(コリメートなし)



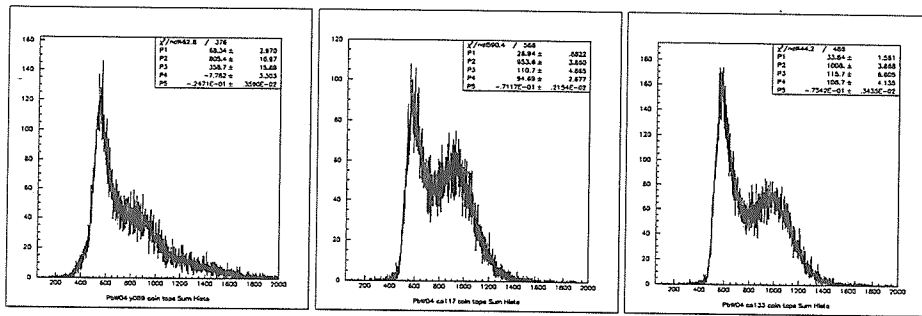
Y88(コリメートあり)      Am/Be(コリメートなし)      Background

PbWO<sub>4</sub> と NaI のコインシデンスをとったスペクトル

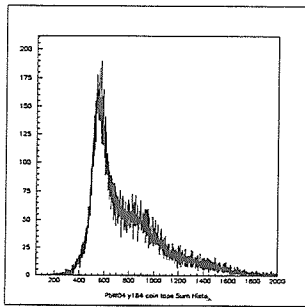


Na22 511keV ch 1      Na22 511keV ch2      Na22 511keV 合計

以下、合計のみ

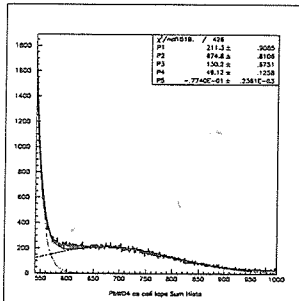


Y88 0.89MeV      Co60 1.17MeV      Co60 1.33MeV

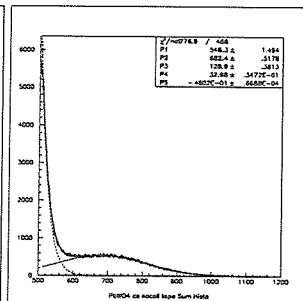


Y88 1.84Mev

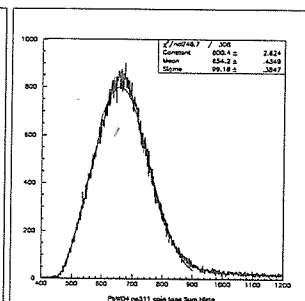
それぞれのピークをフィットしたもの



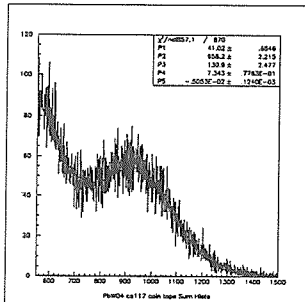
Cs137 662keV



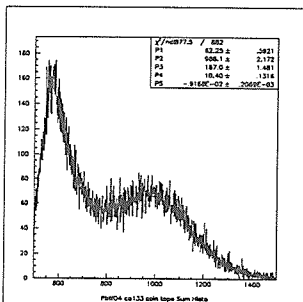
Cs137 662keV



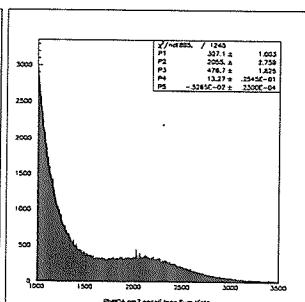
Na22 511keV



Co60 1.17Mev



Co60 1.33Mev



Am/Be 4.43Mev



#### 4、エネルギー分解能の結果

測定されたスペクトルのピークは、バックグラウンドの肩にのっているため、(ガウス分布関数)+(EXP) でフィットした。ここでは

$$(\text{ガウス分布関数})=P(1) \cdot \exp\{(P(2) - X)^2/P(3)^2\}$$

$$(\text{EXP})= \{ P(4)+P(5) \cdot X \}$$

とした。またエネルギー分解能 R を

$$R = \frac{2\sqrt{2\ln 2} \cdot P(2)}{P(1)} \times 100 \quad (\%)$$

$$= \frac{FWHM(\text{半値幅})}{\text{入射線のエネルギー}} \times 100 \quad (\%)$$

と定義した。以上のことから求めた結果は次の通りである。

エネルギー (kev)	テフロンテープ 分解能 (%)	テフロンシート 分解能 (%)	アルミ 分解能 (%)
511	129.7 ±0.5	122.5 ±0.6	120.2 ±0.8
662	*	122.6 ±0.2	129.3 ±0.3
890	*	119.4 ±9.2	*
1170	74.8 ±1.4	70.3 ±1.0	76.2 ±1.2
1330	83.9 ±0.7	73.9 ±0.9	77.5 ±0.8
1840	*	*	77.4 ±1.3
4430	71.9 ±0.2	*	*

## 5、エネルギー分解能についての考察

PbWO<sub>4</sub>のエネルギー分解能の結果をしてみると、NaIシンチレータ、BGOと比較してもわかるように、BGOとの発光量との比較で考察した通り格段に悪いことがわかる。

PbWO<sub>4</sub>のエネルギー分解能の結果をしてみると、NaIシンチレータ、BGOと比較してもわかるように、格段に悪いことがわかる。この事実を次のように考えてみる。

エネルギー (kev)	分解能 (%)
511	20.6
662	18.4
1280	14.7

参：BGOのエネルギー分解能

エネルギー分解能は、電荷収集の統計、電子回路雑音、有限体積内での検出器の応答の変動、測定中の動作パラメーターの変動、光電子増倍管の利得の変動などの効果による寄与を含んでいる。この中で、ピークの幅を広げるもっとも重要な要因は、電荷収集の統計的な広がりである。特に統計的変動は、情報キャリアの数が最小となるところで、つまり光電子の状態が重要となってくる。ここで1つの例として、 $\gamma$ 線光子が正確に0.5Mevの電子エネルギーをシンチレーション結晶中に付与すると仮定する。BGOのシンチレーション効率が1%前後であることを考えると、2章の発光量の違いからPbWO<sub>4</sub>のシンチレーション効率0.05%前後であると考えられる。よってここでは、平均エネルギーが約3evの可視光に変換されるとすると、1回のイベントで、0.25kevがシンチレーターの中で約83個のシンチレーション光子に変化することになる。また結晶の集光効率を50%前後とすると、42個の光子が光電陰極に入ってくることとなる。よって、光電陰極量子効率が、およそ20%前後なので、8個の光電子が発生することとなる。その後は、光電子増倍管の中で電子の数を増倍することとなるので、この8個が情報キャリアの最小ということとなる。

ここでポアソン分布が成り立つとすると、ここでの標準偏差は $\sqrt{8}=2.828$ となる。よって全個数の35%ということになる。またFWHM(半値幅)は $2 \times \sqrt{2 \ln 2} \times (\text{標準偏差})$ なので、この例におけるエネルギー分解能の、電荷収集の統計的広がりの寄与は83%となる。

また、ここで

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

$$N = \frac{E}{E_0} \times \epsilon \times g \times \eta$$

N : 光電子数

E :  $\gamma$ 線エネルギー

$E_0$  : 蛍光光子の平均エネルギー

$\epsilon$  : 蛍光効率

g : 集光効率

$\eta$  : 光電陰極量子効率

とすると

$$\frac{R_{pwo}}{R_{bgo}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{bgo}}{\epsilon_{pwo}}} = \sqrt{\frac{100}{5.2}} = 4.38$$

となる (ここでは集光効率を同じとした)。これを前ページの表の BGO のそれぞれのエネルギー分解能にかけてみると、下の表のようになる。

エネルギー (kev)	分解能 (%)
511	90.3
662	80.7
1280	64.5

参 : BGO のエネルギー分解能から求めた PWO のエネルギー分解能

これをみると、前々ページのエネルギー分解能の実験結果も納得できるものと思われる

次に、電子回路雑音による寄与を考えてみる。Pre Amp にテストパルスだけを入れてみた時のピークの広がりがそれと考える。(もちろん他の条件は変えない) するとここで、全体の標準偏差  $\sigma$  に関して

$$\sigma^2 = \sigma_{pwo}^2 + \sigma_{cir}^2$$

$\sigma_{pwo}$  :  $PbWO_4$  のピークの標準偏差

$\sigma_{cir}$  : 回路系のピークの標準偏差

が成り立つと思われる。以上のことを考慮したエネルギー分解能は以下の通りである。

エネルギー (kev)	テフロンテープ 分解能 (%)	テフロンシート 分解能 (%)	アルミ 分解能 (%)
511	129.7 ⇒ 128.7	122.5 ⇒ 121.1	120.2 ⇒ 118.7
662	*	122.6 ⇒ 121.8	129.3 ⇒ 128.5
890	*	119.4 ⇒ 119.0	*
1170	74.8 ⇒ 74.2	70.3 ⇒ 69.9	76.2 ⇒ 75.8
1330	83.9 ⇒ 83.5	73.9 ⇒ 73.6	77.5 ⇒ 77.3
1840	*	*	77.4 ⇒ 77.3
4430	71.9 ⇒ 71.9	*	*

上の表を見るとわかるように、回路系の雑音による寄与は、非常に小さく主に PWO の発光量によるものと考えられる。

最後に、反射材によるエネルギー分解能の違いを考えてみたかったが、電荷収集の統計による寄与があまりに大きいため、前にも述べた臨界角が小さいため結晶内を光が進むため、その効果はよく現れないものとなってしまった。

## 5章 時間分解能

### 1、実験の目的

放射線計測において、時間的ゆらぎが少なく正確に情報を取り出すことは重要となってくる。この章では、 $\text{PbWO}_4$ の減衰時間が短いこと、発光量が少ないことなどを考慮に入れて、Plasticシンチレータの時間分解能のデータと比較しながら、 $\text{PbWO}_4$ の時間分解能を考えていく。

### 2、実験方法

ここでは、 $\text{Na}22$ の511keV対消滅線、 $\text{Co}60$ の1.17&1.33MeVカスケード線、 $\text{Y}88$ の0.89&1.84MeVカスケード線で同時計数を行なった。また $\text{PbWO}_4$ は、テフロンテープで巻いたものを使用した。

### 3、時間校正

n-delayの値 (ns)	0	16	32	47	62
チャンネル (ch)	271	574	877	1163	1448

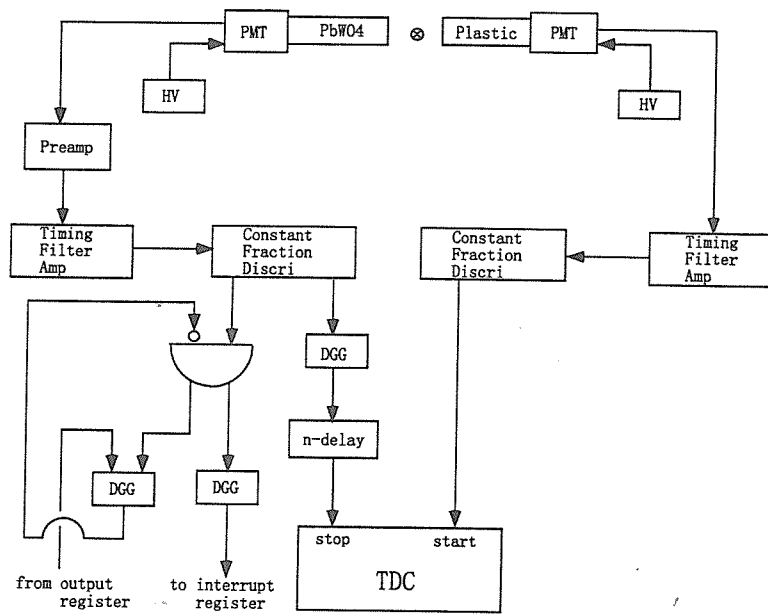
$$\text{時間 (ns)} = \text{チャンネル (ch)} \times 0.052 - 14.24$$

ここでの校正は、n-delayさせた時のピークの中心チャンネルの変化(上の表)で考えた。

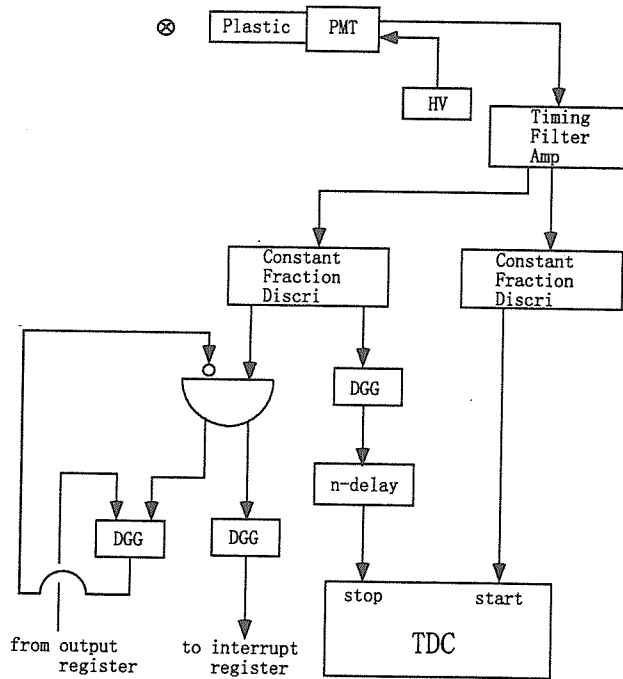
### 4、時間分解能の結果

それぞれのピークは、(ガウス分布関数)でフィットした。ピークの右半分が広がっているため、左半分を中心にフィットした。求めたFWHM(半値幅)は次の通りである。

エネルギー (keV)	FWHM(ns)
511	9.142
1170~1330	8.125
890~1840	8.962



(時間分解能測定回路)



(回路系時間分解能測定回路)

## 5、時間分解能についての考察

時間的ゆらぎのない信号がいつも来ているならば、時間スペクトルの幅は全く広がらないが、実際は 図のスペクトルのようにある程度の広がりを見せる。これは、シンチレータ発光過程による時間のゆらぎ、PMT 内部での増幅過程での時間の揺らぎ、回路系のゆらぎ、などのためである。PMT についての時間分解能を測定することができなかつたので考慮に入れないことにする。前の表の時間分解能は Plastic と  $\text{PbWO}_4$  の相対的なものなので、次式を用いて  $\text{PbWO}_4$  の結晶固有の時間分解能を求めてみる。

$$\delta^2 = \delta_{start}^2 + \delta_{stop}^2 + \delta_{cir}^2 + \delta_{PMT}^2$$

$\delta_{start}^2$ : start 結晶の時間分解能 (この場合は Plastic)

$\delta_{stop}^2$ : stop 結晶の時間分解能 (この場合は  $\text{PbWO}_4$ )

$\delta_{cir}^2$ : 回路系の時間分解能

$\delta_{PMT}^2$ : PMT の時間分解能

また、ここで Plastic の時間分解能  $\delta_{start}$  は以前の論文のデータを使用した(下の表)。

結晶	511keV	1.17~1.33meV
Plastic	544(psec)	523 (psec)

以上のことから求めた  $\text{PWO}$  の時間分解能は以下の通りである。

結晶	511keV	1.17~1.33meV
$\text{PbWO}_4$	9.125(ns)	8.107(ns)

※ Y88 の 0.89&1.84MeV のデータはなかつたため計算できなかった。

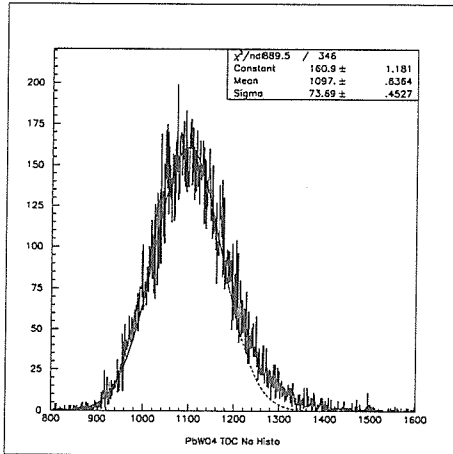
Post-shiff の理論 (時間半値幅)  $\propto \frac{1}{N}$

N:光電子数

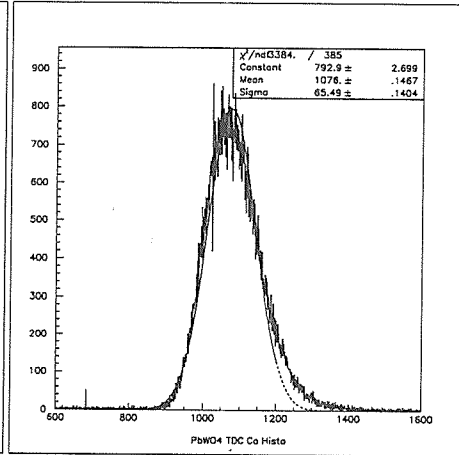
$\text{PbWO}_4$  は減衰時間が BGO、NaI に比べて非常に短い (10ns<80%) ので、時間分解能は良いものと期待されたが、上の Post-shiff 理論より、発光量に関係してくるため、結果的に時間分解能は悪いものとなっている。

また  $\text{PbWO}_4$  の結晶の長さ 20cm あるので、いちばん端からでた光は PMT に入るまで、 $0.2/(3 \times 10^8 / 2.2) = 1.4\text{ns}$  かかることになる。(2.2は屈折率) 結晶の長さも時間分解能に寄与しているものと思われる。

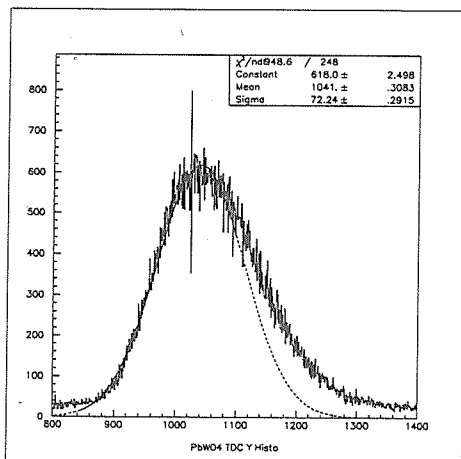
Start(Plastic),Stop(PWO)における時間スペクトル



Na 511keV



Co 1.17&1.33MeV



Y 0.89&1.84MeV



## 第6章 結論

この実験で得られた 0.511 ~ 4.43MeV のエネルギーでのエネルギー，時間分解能は大きい値であった。これは発光量が BGO の 5% という少さのためと考えられる。しかし高エネルギーでは発光量は増え、またチェレンコフ光が生じることが知られている。このことと放射線耐性  $10^7 rad$  ということから鉛ガラスに代わるような検出器として期待できる。