

- ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関
- $\gamma - \gamma$ 同時計測法による
 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の *level scheme* の作成

東北大学 理学部 物理学科 素粒子・原子核物理学講座
原子核物理 平成9年度卒 佐々尾 淳一

目次

1	Introduction	.....	1
1.1	実験の目的	.....	1
1.2	半導体検出器の一般的な特性	.....	1
1.3	実験の概要	.....	2
1.3.1	^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関	.....	2
1.3.2	$^{152}_{63}\text{Eu}$ の <i>level scheme</i> の作成	.....	3
2	^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関	.....	4
2.1	エネルギー分解能の測定	.....	4
2.1.1	実験の方法	.....	4
2.1.2	解析の結果	.....	5
2.2	detector 並びに回路系の時間分解能の測定	.....	6
2.2.1	実験の方法	.....	6
2.2.2	測定並びに解析の結果	.....	7
2.3	角相関の測定	.....	9
2.3.1	実験の方法	.....	9
2.3.2	測定の結果	.....	11
2.4	解析の方法並びにその結果	.....	14
2.4.1	解析に於ける注意点	.....	14
2.4.2	解析の結果	.....	15
2.5	考察及び結論	.....	18
3	$\gamma - \gamma$ 同時計測法による $^{152}_{63}\text{Eu}$ の <i>level scheme</i> の作成	.....	23
3.1	エネルギー分解能の測定	.....	23
3.1.1	実験の方法	.....	23
3.1.2	解析の結果	.....	24
3.2	detector 並びに回路系の時間分解能の測定	.....	25
3.2.1	実験の方法	.....	25
3.2.2	測定及び解析の結果	.....	26
3.3	$^{152}_{63}\text{Eu}$ のエネルギースペクトルの測定	.....	27

3.3.1	実験の方法	.....	27
3.3.2	測定並びに解析の結果	.....	28
3.4	$^{152}_{63}\text{Eu}$ の <i>level scheme</i> の作成 (i)	.....	31
3.4.1	coincidence している γ 線の基本的な知識	.....	31
3.4.2	エネルギー準位の決定	.....	32
3.5	$^{152}_{63}\text{Eu}$ の <i>level scheme</i> の作成 (ii)	.....	34
3.5.1	実験の方法	.....	34
3.6	解析の方法並びにその結果	.....	34
3.6.1	解析に於ける注意点	.....	34
3.6.2	解析の結果	.....	35
3.7	考察及び結論	.....	37
4	Summary	.....	39
5	付録	.....	40
5.1	多重極放射による角相関について	.....	40
5.1.1	多重極放射について	.....	40
5.1.2	多重極放射の固有関数について	.....	41
5.1.3	角分布について	.....	42
5.1.4	角相関について	.....	43
5.2	実験器具の説明並びに本実験の条件	.....	44
5.2.1	使用した detector・module の説明	.....	44
5.2.2	実験の条件	.....	45
5.3	参考図；立体角の考慮による補正 (NaI(Tl) 結晶の場合)	.....	49
	謝辞	.....	51
	Reference	.....	52

1 Introduction

1.1 実験の目的

エネルギー分解能が優れている High Purity Germanium Detector を使用して、前に挙げた2つのテーマについて実験を行なう。そしてその過程、即ち実験前の準備並びにその計画作成、実験上での注意、データ収集の方法、各実験器具 (module など) の特性・使用方法、及び解析の仕方などを学んでいこうと思う。

また本実験を通して、原子核を学ぶ上での基礎的な知識 (スピン、パリティ etc) を習得し、より深く原子核を探求するための足掛かりにしていこうと思う。

1.2 半導体検出器の一般的な特性

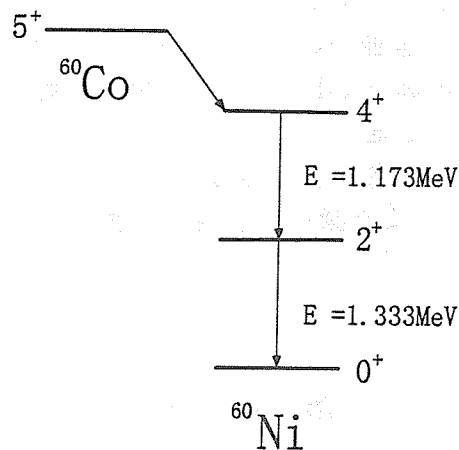
半導体検出器の大きな特徴は、そのエネルギー分解能の良さにある。その理由は、1個の情報キャリア (光電子) を生成するのに要するエネルギーが小さいためである。例えば代表的なシンチレーション検出器のキャリア生成エネルギーはおおよそ 100 eV であり、これにより代表的な放射線の相互作用で作られるキャリアの数は普通数千個以上にはならない。よって NaI(Tl) の 662 keV の γ 線に対するエネルギー分解能は約 6% にまで制限されてしまう。これに対し、Si や Ge のキャリア生成エネルギーは約 3 eV と低い値を持つ。これにより生成されるキャリアの数が増えて、統計的揺らぎを小さくすることができる。

また一般に半導体検出器は高い電界で作動させるので、電荷キャリアの流動速度が 10^7 cm/s 程度と速く、0.1 cm 以下の距離にわたってキャリアを収集するのに要する時間が 10 ns 以下となる。これにより半導体検出器は応答の速い検出器に分類されている。

欠点としては、良質の結晶があまり大きくできないので小型のものに限られること、原子番号が小さいので検出効率が比較的小さいこと、また放射線損傷による劣化を起こしやすいことなどが挙げられる。

1.3 実験の概要

1.3.1 ^{60}Co の γ - γ 角相関

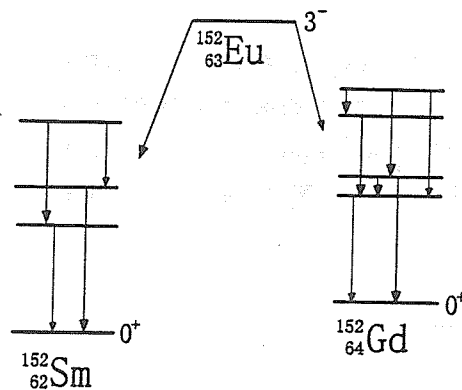


^{60}Co の γ 線は $E=1.17\text{MeV}$ と $E=1.33\text{MeV}$ の γ 線が、ほぼ同時に線源から出ている。この2本の γ 線を同時計測すると、その角度分布にある法則があることがわかる。それは ^{60}Ni の励起状態のスピンの依存しており、その導出は後述 (< 5.1 > で述べる) するが、 ^{60}Co から出てくる γ 線の角度分布は

$$W(\theta) \propto 1 + 0.102P_2(\cos\theta) + 0.009P_4(\cos\theta)$$

で表すことができる。このことを実験的に確かめてみたいと思う。

1.3.2 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の *level scheme* の作成



$^{152}_{63}\text{Eu}$ は複雑な γ 線のエネルギースペクトルを持っている。これらのスペクトルにどのような関係があるのかを、< 1.3.1 > の場合と同様に $\gamma-\gamma$ の同時計測で調べることにより、娘核である $^{152}_{62}\text{Sm}$ と $^{152}_{64}\text{Gd}$ の *level scheme* を作成することができる。具体的に言うと次の通りである。

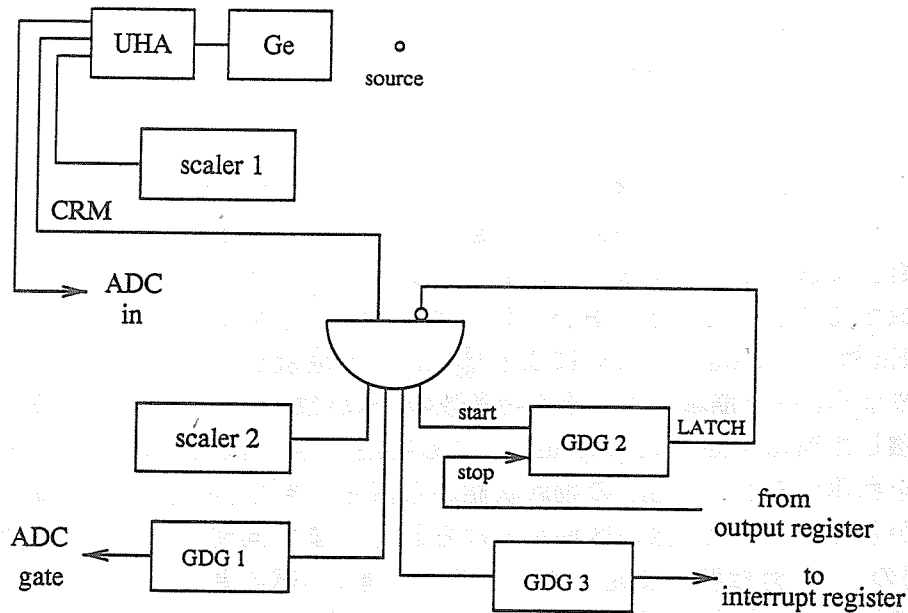
$^{152}_{63}\text{Eu}$ は Electron Capture により $^{152}_{62}\text{Sm}$ へと崩壊し、また別に β^- 崩壊により $^{152}_{64}\text{Gd}$ へと崩壊する。その時多数の γ 線が放出されるのだが、 $^{152}_{62}\text{Sm}$ へ崩壊した時は Electron Capture による特性 X 線が同時に観測される。これを利用すると、 $^{152}_{62}\text{Sm}$ の励起状態から落ちてきた γ 線と $^{152}_{64}\text{Gd}$ の励起状態から落ちてきた γ 線の区別が付けられる。また同時に出てくる 2 本の γ 線の $\gamma-\gamma$ 角相関を測定すると、その 2 本の γ 線の基となっている 3 つの準位の相対的なスピン・準位間のエネルギー等がわかり、それを基に *level scheme* を組み立てることができる。この *level scheme* をおおまかにではあるが作成してみようと思う。

2 ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関

2.1 エネルギー分解能の測定

2.1.1 実験の方法

まずは ^{60}Co の checking source を用いて、HP Ge detector と rate に強い Ultra High-rate Amp. の組み合わせでどれだけの energy resolution を得られるかを、2つの HP Ge detector (Ge1 と Ge2 と呼ぶことにする) それぞれの場合でテストした。配置は、source と detector との距離が 10 cm で、また使用した回路は次の通りである。



※ Ge=High Purity Germanium detector(reset 型 preamp. 内蔵)

UHA=Ultra High-rate Amp.

GDG=gate and delay generator

<回路図 1 >

2.1.2 解析の結果

この時は source として⁶⁰Coしか使用しなかったため、そのみを載せることにする。解析の結果は次の通りである。

< Ge1 の energy resolution >

energy[keV]	FWHM[keV]	FW(1/10)M[keV]
1173.249	4.413 ± 0.401	8.425 ± 0.401
1332.516	4.614 ± 0.401	9.227 ± 0.401

< Ge2 の energy resolution >

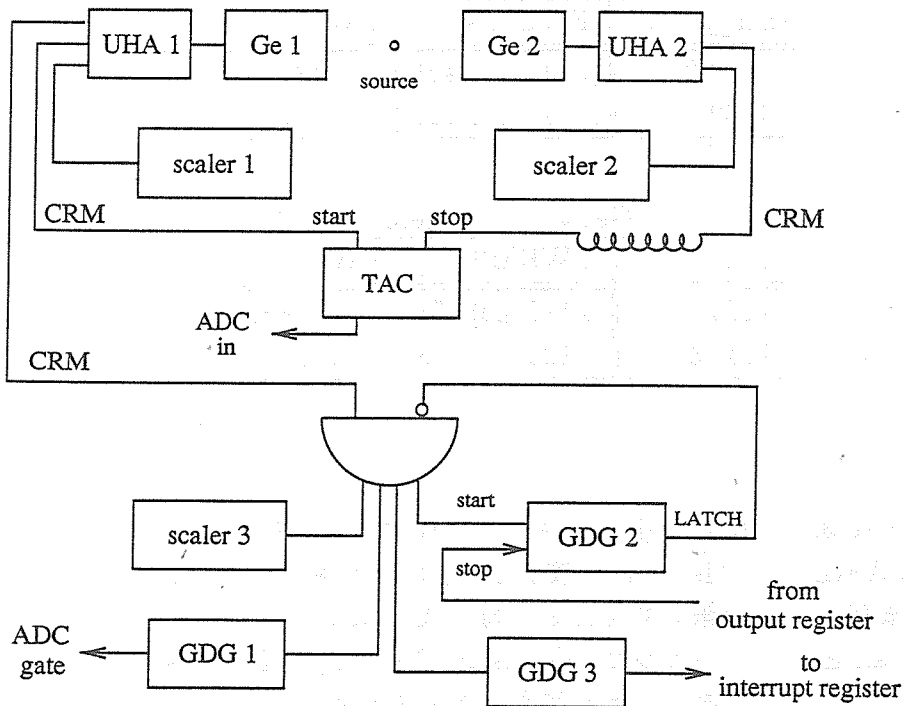
energy[keV]	FWHM[keV]	FW(1/10)M[keV]
1173.249	3.512 ± 0.458	7.849 ± 0.458
1332.516	4.123 ± 0.458	8.551 ± 0.611

この結果は Ultra High-rate Amp. のマニュアルに載せてあるデータ (2.95keV@E=1.33MeV) と比較すると、かなり悪い。理由としては、この時はまだノイズ対策をちゃんと行なっていなかったこと、またスペクトルが tail を引いているので、Gaussian で fitting する時多少無理があったため、このような測定結果を得たのだと思われる。

2.2 detector 並びに回路系の時間分解能の測定

2.2.1 実験の方法

まず最初に、実験で用いる回路系の時間的なタイミングが揃っているか、そしてその回路系の時間分解能がどの程度なのかを把握する為に、 ^{22}Na の 511keV の γ 線 (これはほぼ同時に 2 本の γ 線が、互いに反対方向に出ている) を用いて測定した。実験で使用した回路の概要は下図の通りである。



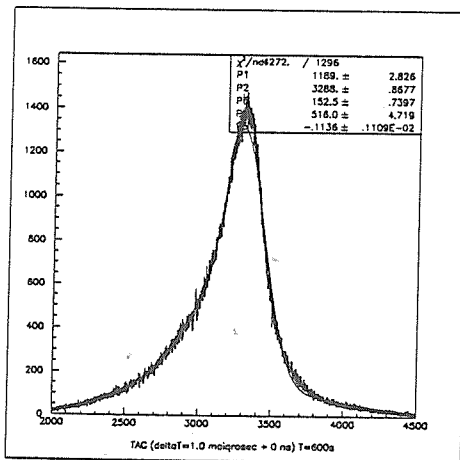
TAC=time to analog converter

<回路図 2 >

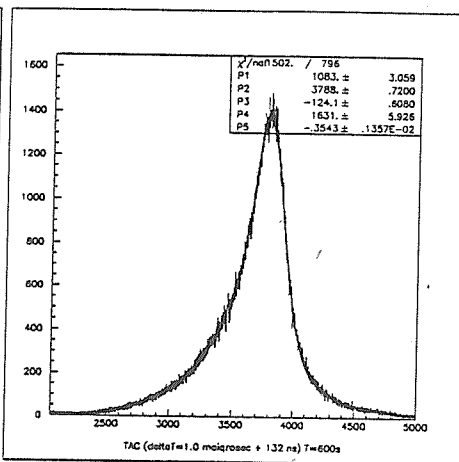
2.2.2 測定並びに解析の結果

TAC の start signal に対する stop signal の delay を (i) $1\mu\text{s} + 0\text{ ns}$ (ii) $1\mu\text{s} + 132\text{ ns}$ (iii) $1\mu\text{s} + 264\text{ ns}$ の 3 通りで測定した。測定結果は次の通りである。

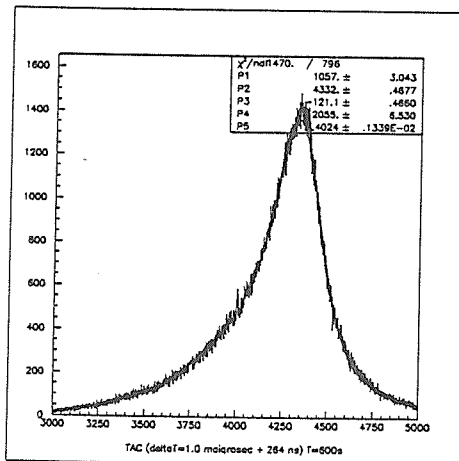
<時間スペクトルの測定結果 Part I.>



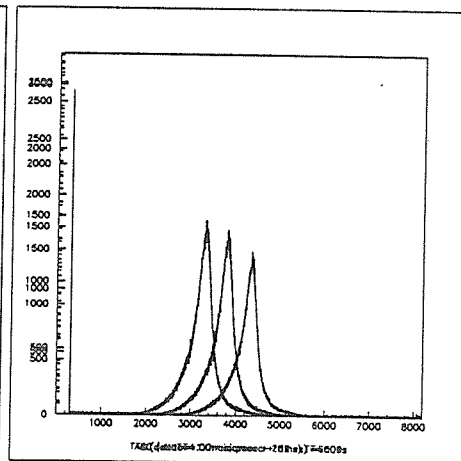
(i) $1\mu\text{s} + 0\text{ ns}$



(ii) $1\mu\text{s} + 132\text{ ns}$



(iii) $1\mu\text{s} + 264\text{ ns}$



<まとめたもの>

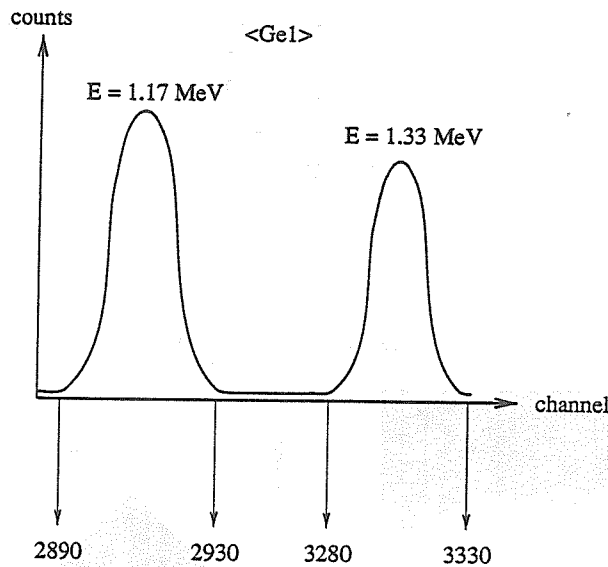
※測定時間は $T=600\text{ s}$

この測定の結果、2つの回路系の時間的なタイミングはほぼ揃っていて、また時間分解能はおおよそ90 nsであることがわかった。time-resolutionがかなり悪いが、これは実験で使用した Ultra High-rate Amp. の Count Rate Meter(詳しくは5.2で述べる)の特性だと思われる。(後でわかったことであるが、この回路では $E=511\text{keV}$ のエネルギーだけを選んでいるわけではないので、正確な意味での時間分解能を測定することはできなかった。ここでわかったことは、「時間分解能は少なくとも90 nsである」ということだけである。)

2.3 角相関の測定

2.3.1 実験の方法

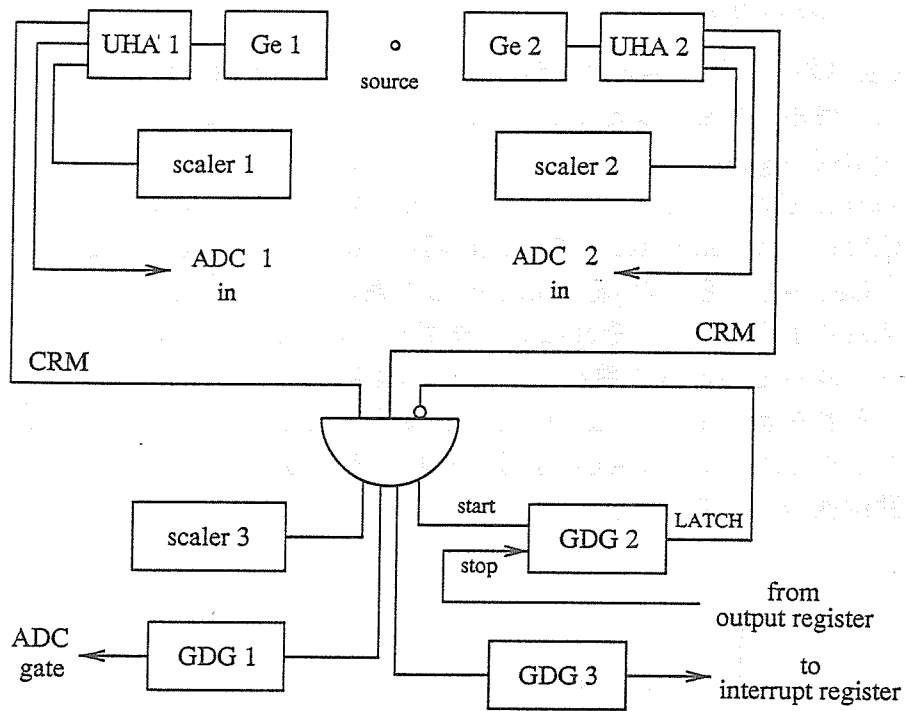
今度は線源を取り換えて、 ^{60}Co の2本の γ 線の角相関を測定することにした。使用した回路は先ほどの回路に加えて、Ultra High-rate Amp. の output から signal を取り出し ADC に入れたものである。このとき gate の方は先ほどのものを2つに分けて使用した。2本の γ 線の coincidence は、CAMAC で computer に取り込む時に program 上で取ることにした。即ち、Ge1 がどちらかの γ 線を detect した時に、Ge2 が detect した γ 線を取り入れるようにした。それには、まず Ge1 の ADC で予め2本の γ 線のスペクトルがどの位置に現れ、またどの程度の幅を持つのかを測定しておき、それを基に2本の γ 線の channel 範囲を指定し、その範囲で count されたときだけ、Ge2 の ADC を取り込むように program を作成した。その範囲は次の通りである。



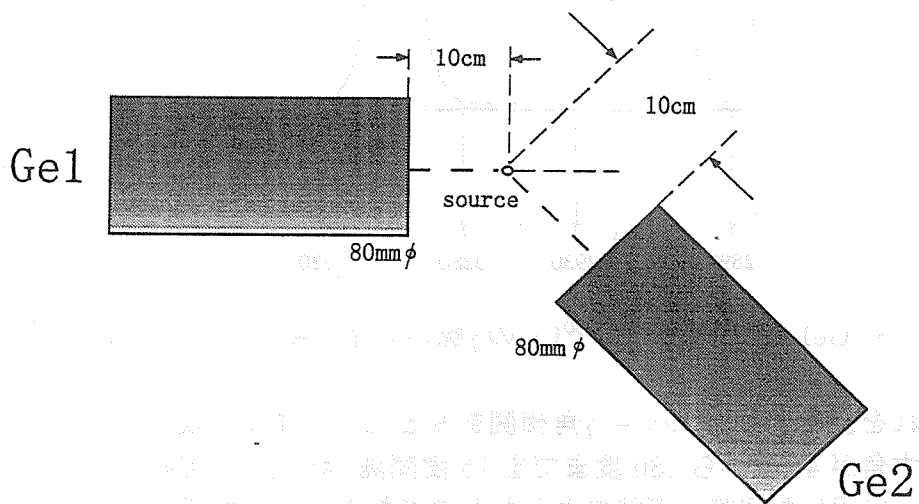
< Ge1-ADC に於ける ^{60}Co の γ 線のエネルギースペクトル >

これを基に、 ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関をみることにする。測定は detector の成す角が45度から180度までを15度間隔(計10点)で行なうことにした。使用した回路は下図のようなものである。なお線源は ^{60}Co を使用し、線源と detector との距離は、detector の geometry の関係と線源の強

さから、10cm とした。概略図は次の通りである。



<回路図 3>

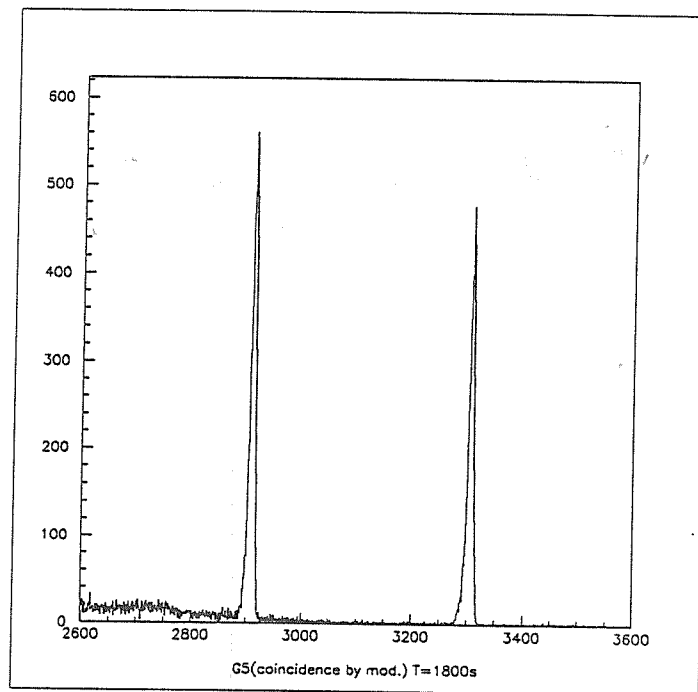


< geometry の概略図 >

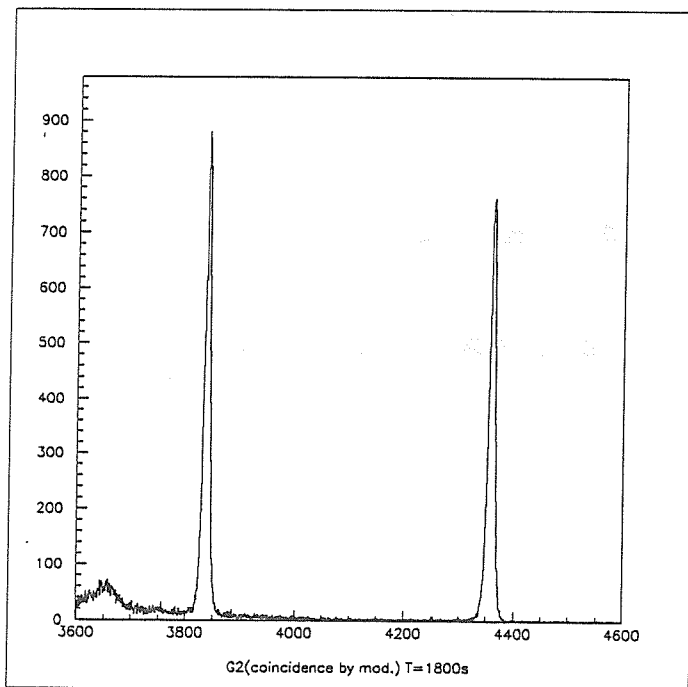
2.3.2 測定の結果

以上のような条件の基で測定を行なった。結果の一例を挙げると、次のようになる。

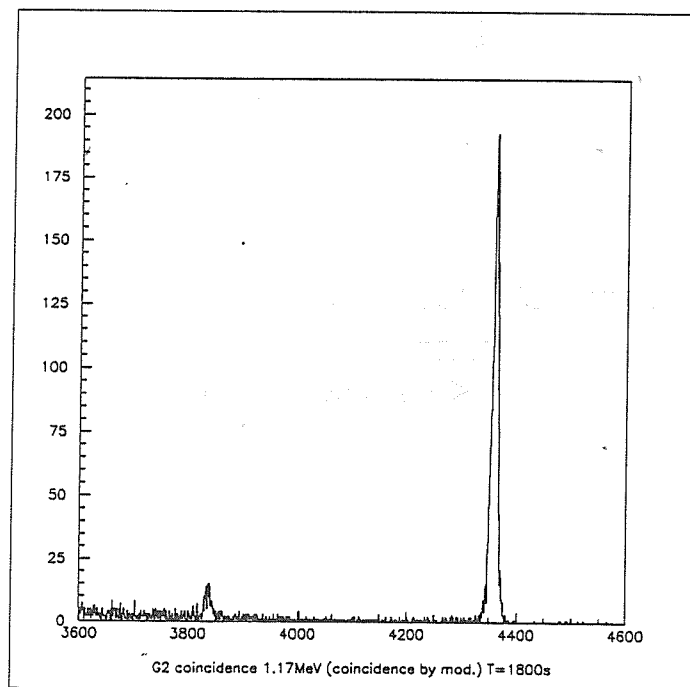
測定結果の一例 (DEG=180)



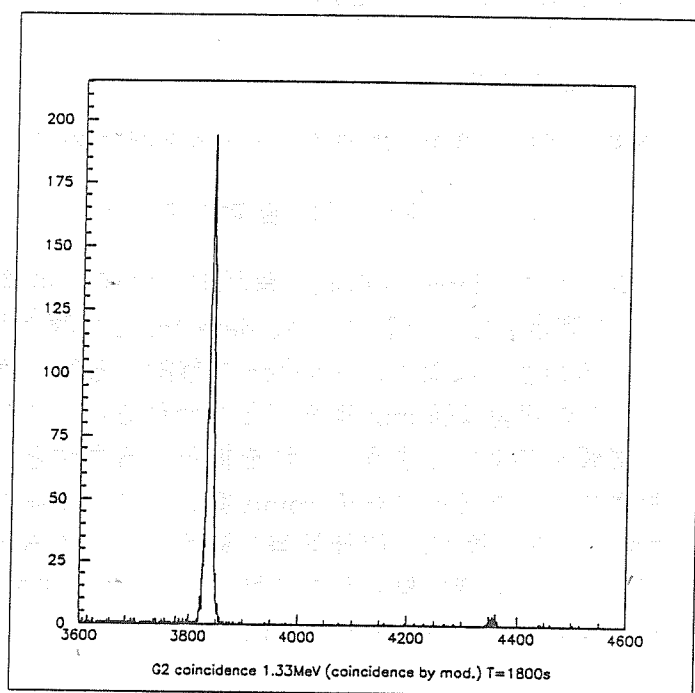
< Gel のみ >



< Ge2 のみ >



< Ge1 に E=1.17MeV の γ 線来た時の Ge2 >



< Ge1 に $E=1.33\text{MeV}$ の γ 線来た時の Ge2 >

※測定時間は $T=1800\text{ s}$

この測定結果を基に、解析を行なうことにした。

2.4 解析の方法並びにその結果

2.4.1 解析に於ける注意点

ここでは、解析に於いて注意した点をいくつか挙げてみることにする。

< detector と線源の間の距離の変化 >

角相関を調べるために、detector の成す角が 45 度から 180 度までを 15 度間隔 (計 10 点) で測定をしているのだが、detector と線源の間の距離が必ずしも一定であるわけではなく、detector を移動する際にその距離が変化してしまう。その誤差は数 mm 程度だと思われるが、これが結構検出される計数に影響を与えてしまう。これを補正する方法として、まず測定ごとに移動させていた detector の count 数、即ち scaler 2 (※回路図 3 参照) の計数が、ある計数 C_0 の統計誤差の範囲内にできるだけ多くあるように C_0 を採り、この範囲に無いものに対してのみ、その計数が C_0 になるように適当な数を掛けて補正することにした。

< Compton 散乱による誤差の考慮 >

もとは別の方向に飛び出したはずの coincidence した γ 線が、Compton 散乱により別の角度の detector に入射し、detect される場合がある。

この実験では、 $E=1.33$ MeV の γ 線の Compton-edge が $E=1.117$ MeV と、もう一方の γ 線のエネルギー ($E=1.173$ MeV) よりも十分低く、また ^{60}Co の checking source からは他に γ 線が発生していないので、考慮しなくてもよさそうに思われる。

< accidental coincidence による誤差の考慮 >

別々の事象で発生した γ 線が、あたかも coincidence しているかのように見えることがある。これを考慮して補正しなければならない。詳しくは < 2.5 考察及び結論 > で述べたいと思う。

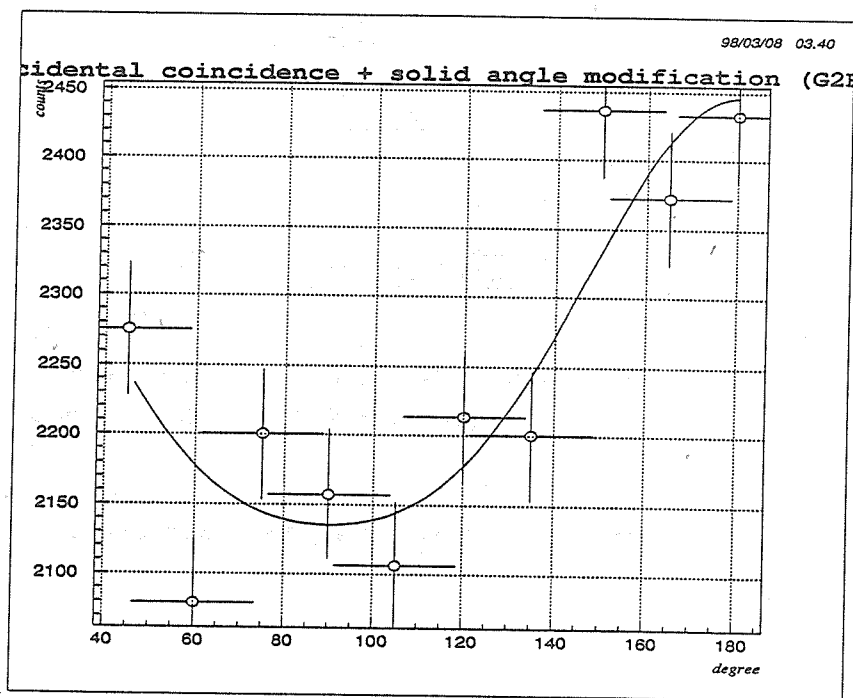
< 立体角の考慮による補正 >

今までの考察では detector の大きさを無視して考えてきたが、実際は detector は有限の大きさを持つので、それにより角相関に鈍りが生じてくる。この補正を考えなければならない。詳しくは < 2.5 考察及び結論 > で述べたいと思う。

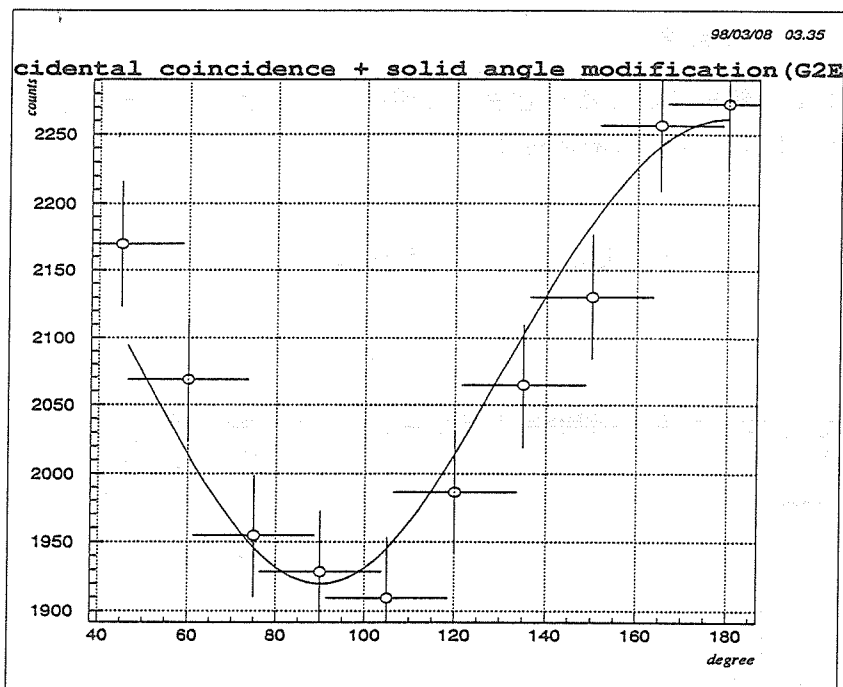
2.4.2 解析の結果

< 2.4.1 解析に於ける注意点 > で述べたようなことを考慮して解析を行ない、下のような結果を得た。

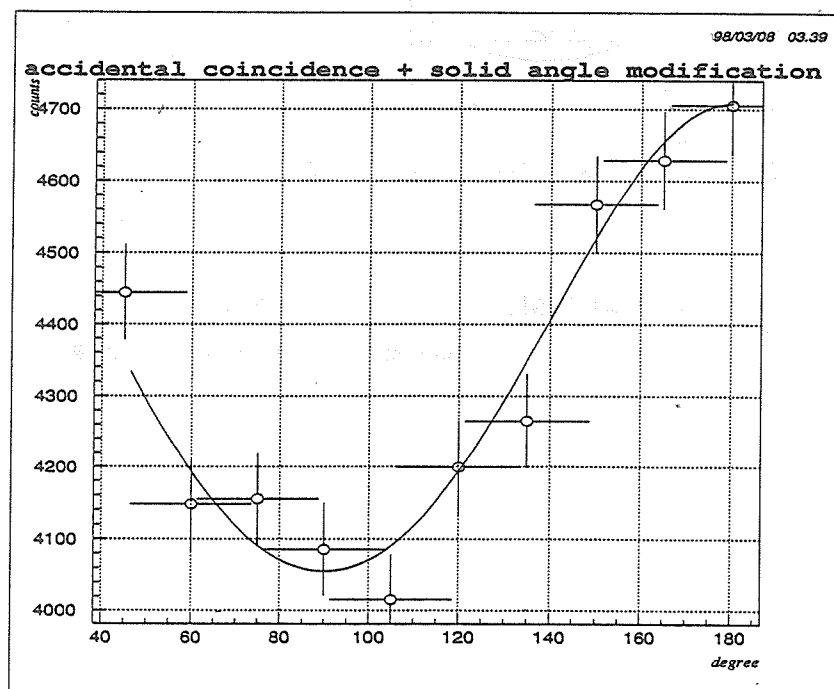
< ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関の一覧 >



< (i) Ge1 に $E=1.17\text{MeV}$ 、Ge2 に $E=1.33\text{MeV}$ の γ 線が detect されたときの Ge2 の計数 >



< (ii) Ge1に E=1.33MeV、Ge2に E=1.17MeV の γ 線が detect されたときの Ge2 の計数 >



< (iii) (i) と (ii) を足し合わせたもの >

ここでは fitting 関数として、次のような関数を用いた。

$$W(\theta) = W_0 \times \{1 + A_2 P_2(\cos\theta) + A_4 P_4(\cos\theta)\} \quad (*)$$

ここで $P_2(\cos\theta)$ 及び $P_4(\cos\theta)$ は、それぞれ 2 次と 4 次の Legendre 多項式で、 W_0 及び A_2 、 A_4 をパラメータとして最小 2 乗法で fitting させた。その結果得られたパラメータの値に、立体角の補正を施すと次のような値になった。

(i) の場合

$$W = 2213.9 \pm 15.5 \quad A_2 = 0.0855 \pm 0.0146 \quad A_4 = 0.0194 \pm 0.0167$$

(ii) の場合

$$W = 2040.2 \pm 14.9 \quad A_2 = 0.1138 \pm 0.0152 \quad A_4 = -0.0054 \pm 0.0175$$

(iii) の場合

$$W = 4255.5 \pm 21.5 \quad A_2 = 0.0992 \pm 0.0105 \quad A_4 = 0.0071 \pm 0.0121$$

これらの値は、理論から計算される値 ($A_2 \simeq 0.102$ 、 $A_4 \simeq 0.009$) と比べると、大まかながら一致している。

2.5 考察及び結論

ここでは前に出てきた考慮すべき誤差のうち、accidental coincidence と立体角について考えてみたいと思う。なお source の半減期が約 5 年と長いので、ここでは測定期間内に於ける崩壊率は一定であるとした。

まずは accidental coincidence についてだが、今回用いた回路に於いて考えられる accidental coincidence を挙げてみる。なお Ge1 で $E=1.17\text{MeV}$ の γ 線を detect した時に Ge2 で $E=1.17\text{MeV}$ の γ 線を detect した数を $N_{\text{acci}1.17\text{MeV}}$ 、Ge1 で $E=1.33\text{MeV}$ の γ 線を detect した時に Ge2 で $E=1.33\text{MeV}$ の γ 線を detect した数を $N_{\text{acci}1.33\text{MeV}}$ とおくと、

$$N_{\text{acci}1.17\text{MeV}} = 216 \sim 298$$

$$N_{\text{acci}1.33\text{MeV}} = 45 \sim 70$$

となった。

前の実験で Count Rate Meter の時間分解能が 90 ns であることを考慮して、coincidence module に入れる NIM-signal の幅を、それぞれ 70 ns にしてみた。これと 2 本の γ 線の計数率を出すために、予め各々の detector に於いて self-trigger で採ったデータ (測定時間は同じ) を基に 2 本の γ 線の計数を割り出しておき、それから accidental coincidence を計算してみた。具体的な計算の例は、

< Ge1 の 1.17MeV の γ 線と Ge2 の 1.33MeV の γ 線の場合 >

$$N_{\text{accidental}} = N_{\text{Ge1:1.17MeV}} \times N_{\text{Ge2:1.33MeV}} \times (70\text{ns} + 70\text{ns}) / T_{\text{測定時間}}$$

このようにして計算していくと、

$N_{\text{Ge1:1.17MeV}}$ と $N_{\text{Ge2:1.17MeV}}$ の場合	$N_{\text{accidental}} = 33.5 \pm 0.1$
$N_{\text{Ge1:1.17MeV}}$ と $N_{\text{Ge2:1.33MeV}}$ の場合	$N_{\text{accidental}} = 29.7 \pm 0.1$
$N_{\text{Ge1:1.33MeV}}$ と $N_{\text{Ge2:1.17MeV}}$ の場合	$N_{\text{accidental}} = 29.5 \pm 0.1$
$N_{\text{Ge1:1.33MeV}}$ と $N_{\text{Ge2:1.33MeV}}$ の場合	$N_{\text{accidental}} = 26.2 \pm 0.1$

(※値に揺れがあるのは、測定点に於ける trigger の計数及び detector の計数に揺れがあるためである。)

となった。なお、 γ 線の計数は予め指定した ADC の channel の範囲にある計数を数えることにした。

この値は測定値と比べると足りない。理由として考えられるのは、今回の回路ではコンピューターへの取り込み効率がわからなかったなのでその

分があるのと、detector の charge collection time を考えて Amp. の Pulse Pile-up Rejector Delay を調節しなければならなかったのだが、それを怠ってしまったので Count Rate Meter が正確に作動しなかった可能性があることである。

今度の実験では正確な意味での accidental coincidence が出せなかったので、解析に於いてはその分の誤差も考慮することにした。

また立体角の補正についてであるが、詳しい解説は後述の文献⁽¹⁾に譲るとして結論を先に言うと、detector の大きさを無視して得られた角相関係数 A'_0, A'_2, A'_4 に対して立体角の補正を項別に行うことができ、

$$\begin{aligned} W(\theta) &= 1 + A_2 P_2(\cos\theta) + A_4 P_4(\cos\theta) \\ &= 1 + (A'_2/Q_2) P_2(\cos\theta) + (A'_4/Q_4) P_4(\cos\theta) \end{aligned}$$

のようにおくことができる。即ち、

$$A_l = (A'_l/Q_l)$$

となる。この補正係数は次の計算から導かれる。

まず各 detector の検出効率を $\epsilon_1(\beta_1), \epsilon_2(\beta_2)$ とおく。ここで β_1, β_2 は、source と detector の中心軸を結んだ線とそれぞれの γ 線とのずれの角である。すると角相関 $W(\theta)$ は、

$$W(\theta) = \frac{\int d\Omega_1 d\Omega_2 W(\theta') \epsilon_1(\beta_1) \epsilon_2(\beta_2)}{\int d\Omega_1 d\Omega_2 \epsilon_1(\beta_1) \epsilon_2(\beta_2)}$$

となる。ここで θ' は 2 本の γ 線の成す角である。 $W(\theta')$ を Legendre 多項式に展開すれば積分を項別にでき、また加法定理

$$P_l(\cos\theta') = \frac{4\pi}{2l+1} \sum_{-l}^l Y_{lm}^*(1) Y_{lm}(2)$$

を用いると、 Y_{lm} の $m = 0$ の項だけが残る

$$I_l = \int d\Omega_1 d\Omega_2 P_l(\cos\theta') \epsilon_1(\beta_1) \epsilon_2(\beta_2)$$

$$I_l = 2\pi \int_0^{\gamma_1} \sin\beta_1 d\beta_1 P_l(\cos\beta_1) \epsilon_1(\beta_1) \times \int_{-\gamma_2}^{+\gamma_2} \int \sin\beta_2 d\varphi_2 d\beta_2 P_l(\cos\vartheta) \epsilon_2(\beta_2)$$

となる。ここで θ は各 detector の中心軸間の角度で、 ϑ は γ_2 の方向と detector 1 の中心軸との角度であり、 γ_1, γ_2 はそれぞれ各 detector の開きの角の半分 (即ち β_{max}) である。ここでもう一度加法定理を適用し、

$$P_l(\cos\vartheta) = P_l(\cos\beta_2) P_l(\cos\theta) + \dots$$

を得る。さらに φ_2 に関して積分を行なうと、

$$I_l = 4\pi^2 P_l(\cos\theta) J_l(1) J_l(2)$$

$$J_l = \int_0^{\gamma} P_l(\beta) \epsilon(\beta) \sin\beta d\beta$$

を得る。これから、補正係数は

$$Q_l = \left(\frac{J_l(1)}{J_0(1)} \right) \left(\frac{J_l(2)}{J_0(2)} \right)$$

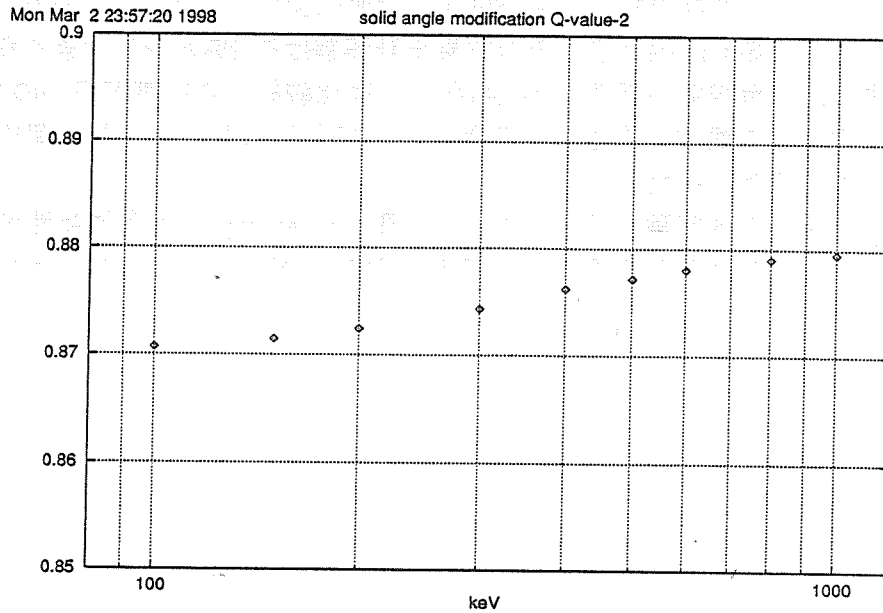
となる。

さて実際の方に戻るが、本実験の場合 detector を円筒形に近似し、Germanium の γ 線の全吸収係数 $\tau(E)$ を利用して

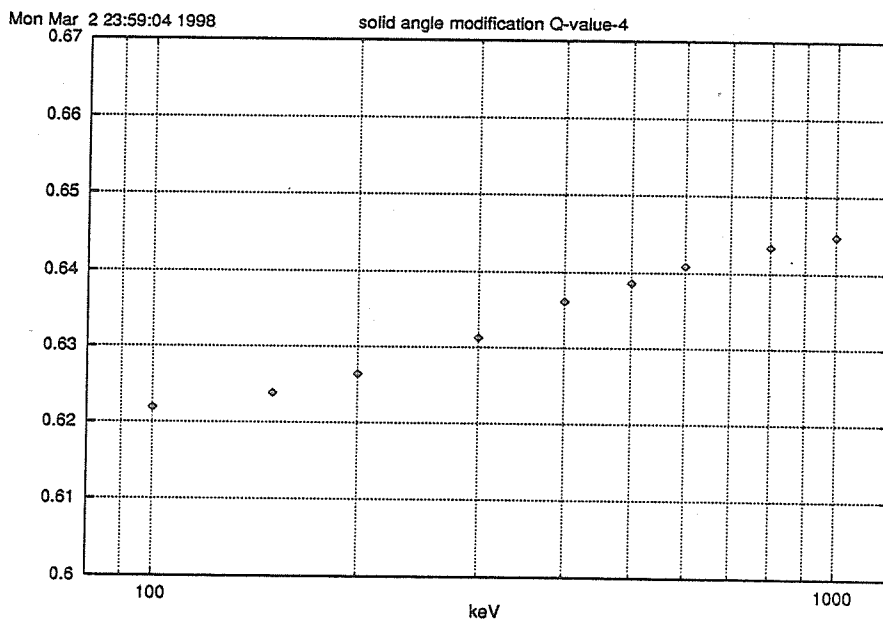
$$\epsilon(\beta) = 1 - e^{-\tau x}$$

(x ; γ 線が detector を通過するとき横切る距離) と置き積分を実行し、おおまかではあるが補正係数 Q_l の値をだした。

ここで $\tau(E)$ の値は、文献⁽²⁾からおおよそではあるが割りだした。これから計算して出した Q_2, Q_4 の値をプロットすると、次のようなグラフになる。



< detector の立体角補正係数— Q_2 >



< detector の立体角補正係数— Q_4 >

実験で得られた ^{60}Co の角相関係数は、この Q_2, Q_4 の値を用いて補正を行なった。なお、参考のために巻末に NaI(Tl) 結晶の場合を載せておいた。(以上は文献⁽¹⁾から借用した。)

この実験では測定時間が一点 1800 s と比較的少なかったこともあり、統計をそれほど多くは採れず、その結果統計誤差は約 2% と少し大きくなってしまった。角相関の係数 (A_2, A_4 など) は比較的小さい値が多いので、fitting する時の誤差を小さくするために、できればもっと統計を溜めるようにすれば良かったと思う。

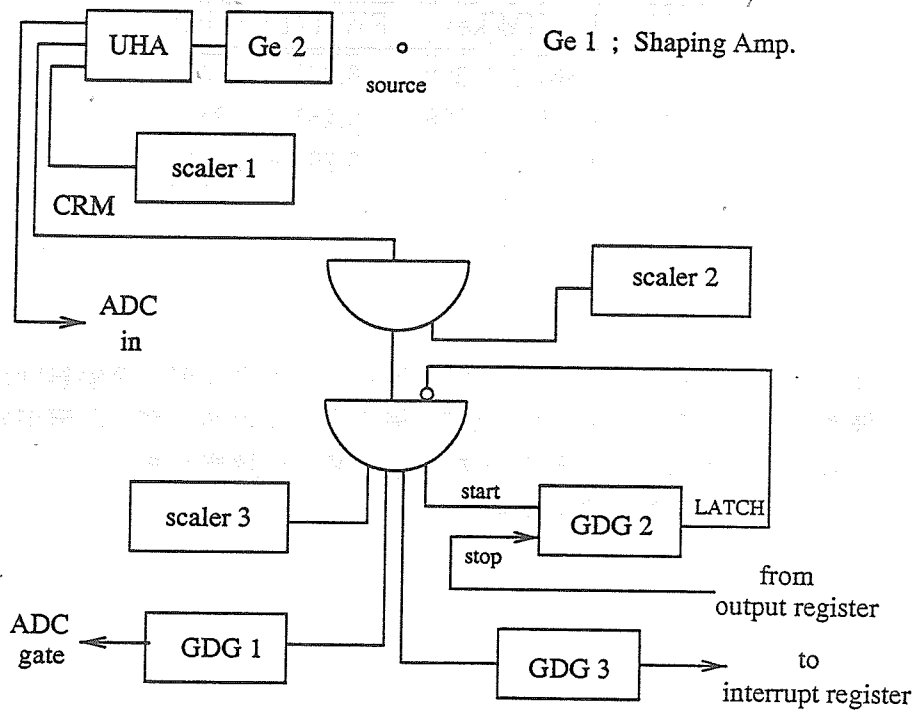
しかしながら本実験の目的、即ち「 γ 線の intensity に角度依存性がある」ということは確かめることができたので、満足できる結果だったと思う。

3 γ - γ 同時計測法による $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成

3.1 エネルギー分解能の測定

3.1.1 実験の方法

今度は $^{152}_{63}\text{Eu}$ の γ 線を測定するのだが、ここでは Ultra High-rate Amp. の内の1台を取り換えて、代わりに Shaping Amp. を使うことにしたので、< 2.1.1 >の時と同様にエネルギー分解能を測定してみることにした。今度は線源に ^{60}Co と ^{137}Cs を用いた。source と detector の距離は 10 cm で、また使用した回路は次の通りである。



<回路図 4 >

3.1.2 解析の結果

解析の結果は次の通りである。

< Ge1+Shaping Amp. の energy resolution >

energy[keV]	FWHM[keV]	FW(1/10)M[keV]
661.660	1.344 ± 0.024	2.794 ± 0.233
1173.249	1.729 ± 0.021	3.492 ± 0.330
1332.516	1.888 ± 0.099	3.842 ± 0.352

< Ge2+Ultra High-rate Amp. の energy resolution >

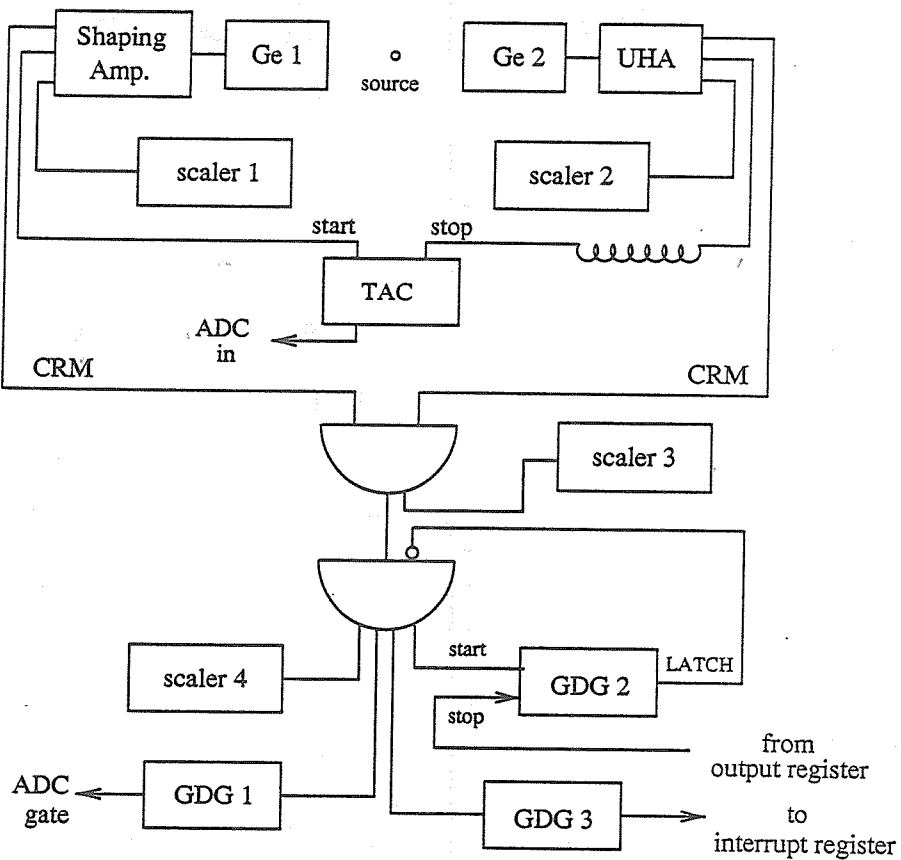
energy[keV]	FWHM[keV]	FW(1/10)M[keV]
661.660	1.867 ± 0.082	6.228 ± 0.453
1173.249	2.320 ± 0.028	6.455 ± 0.340
1332.516	2.620 ± 0.033	6.794 ± 0.340

今回はノイズ対策をそれなりにしていたので、エネルギー分解能はだいぶ改善された。 ^{152}Eu からは出てくる γ 線の中にはエネルギー間隔が非常に狭いものもあるので、これだけのエネルギー分解能があれば、これから行なう測定にも非常に有効である。

3.2 detector 並びに回路系の時間分解能の測定

3.2.1 実験の方法

もう一度実験回路の時間的なタイミングを揃えつつ、また時間分解能を測定するために、 ^{22}Na を用いて $E=511\text{keV}$ の γ 線の同時計測を行なった。なお回路は、下図のような回路を使用した。

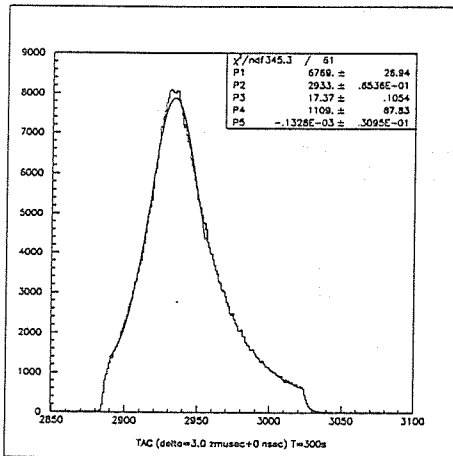


<回路図 5>

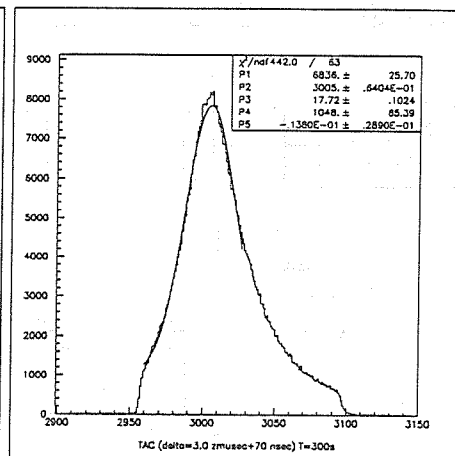
3.2.2 測定及び解析の結果

この実験の測定結果は次のようになった。

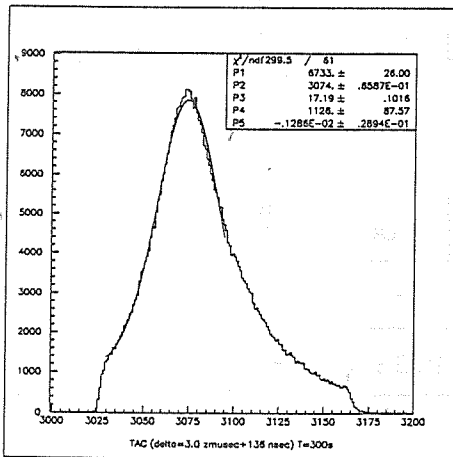
<時間スペクトルの測定結果 Part II.>



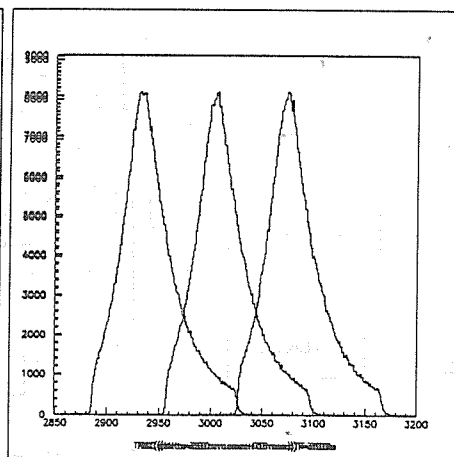
(i) $3\mu\text{s} + 0\text{ ns}$



(ii) $3\mu\text{s} + 70\text{ ns}$



(iii) $3\mu\text{s} + 136\text{ ns}$



(iv) <まとめたもの>

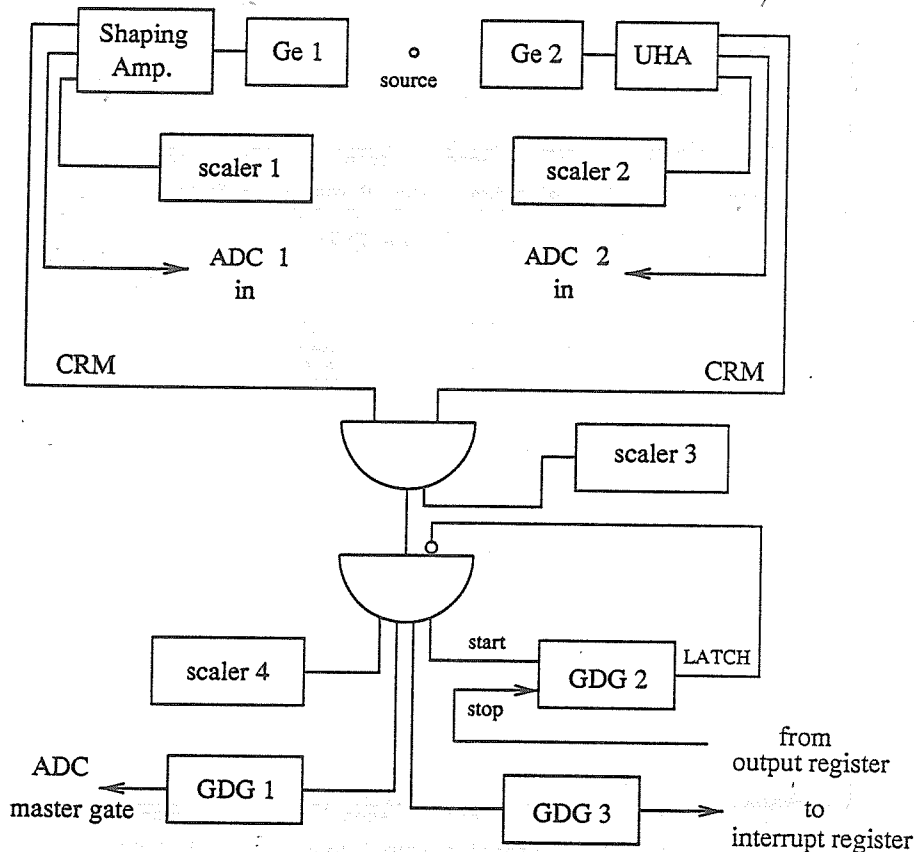
※測定時間は T=300 s

この測定の結果、2つの回路の時間的なタイミングはほぼ揃っていて、また時間分解能はおおよそ 50 ns であることがわかった。

3.3 $^{152}_{63}\text{Eu}$ のエネルギースペクトルの測定

3.3.1 実験の方法

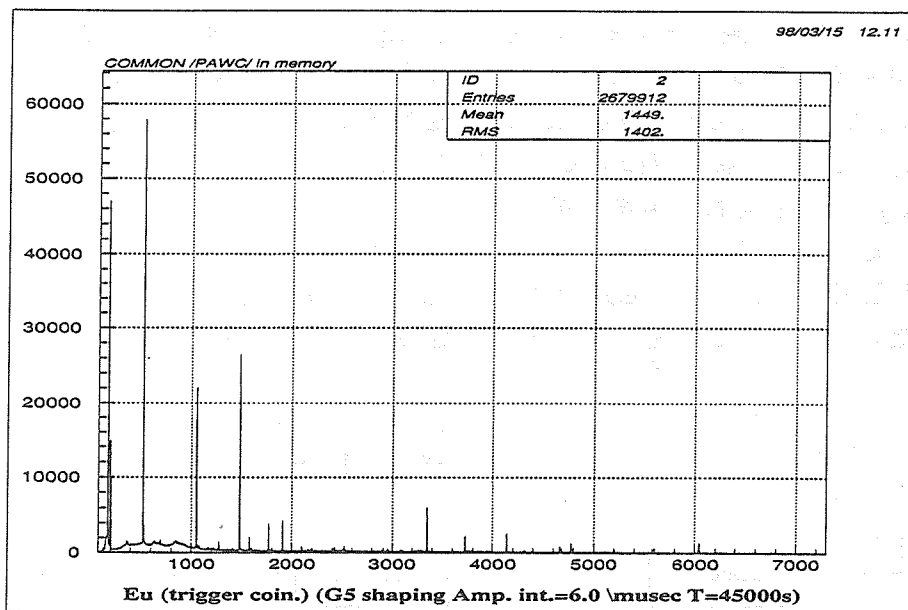
$^{152}_{63}\text{Eu}$ からは、色々なエネルギーの γ 線がさまざまな強度で出ており、強度の低い γ 線は、高エネルギーの γ 線の Compton 散乱に埋もれて見えない場合がある。依ってこれらのスペクトルを見れる形にするために、triggerには2つの detector の coincidence を採ることにした。またこれに加えて、< 2.3.1 実験の方法 >で述べたような program 上での trigger を、self-trigger でも見れるエネルギーのスペクトル (後で出てくる#1~#15のこと。他に4つのスペクトルについても行なった。) に対して行なった。用いた回路は、先ほどの回路では computer への取り込み効率がわからなかったので少々改良を施した。その回路図は次の通りである。



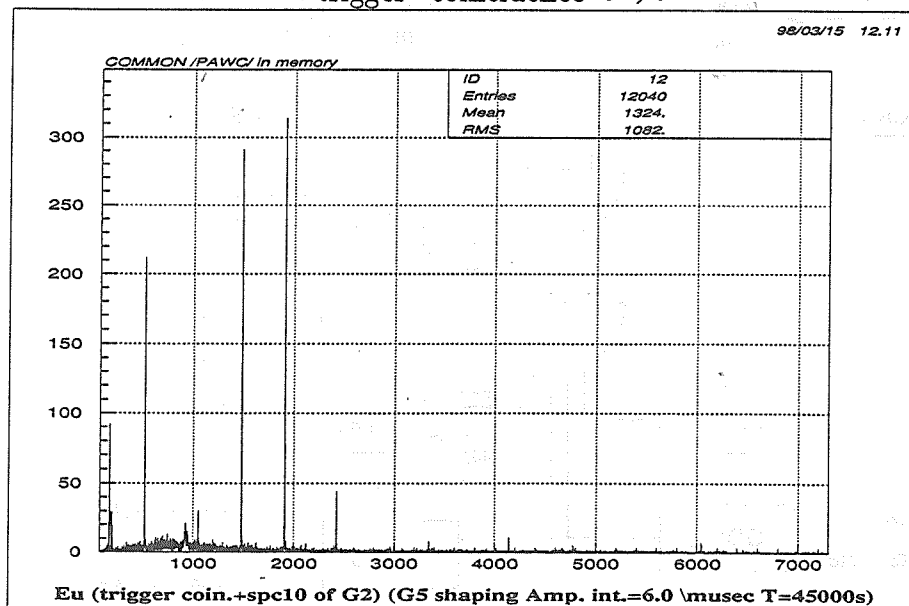
<回路図 6 >

3.3.2 測定並びに解析の結果

先ほど述べたように、trigger をそれぞれ (coincidence+#1), ..., (coincidence+#15) としてスペクトルを採ってみた。その一例を挙げてみる。



< trigger=coincidence のみ >



< trigger=coincidence+#10 >

※測定時間は 45000 s

次にそれぞれのスペクトルがどのエネルギーに対応しているのかを調べてみた。その結果、それぞれのスペクトルのエネルギーは次の通りである。

主なスペクトルのエネルギー [keV]

#1	40.5±0.3
#1'	45.9±0.3, 47.1±0.3
#2	122.1±0.3
#3	244.7±0.3
#4	344.2±0.3
#5	411.1±0.4
#6	443.9±0.4
#7	778.9±0.4
#8	867.3±0.6
#9	964.0±0.5
#10	1085.8±0.7
#11	1089.6±0.6
#12	1112.0±0.5
#13	1212.8±0.5
#14	1299.1±0.6
#15	1407.9±0.6

となった。また弱いながらもピークと認識されるもの（特に coincidence したときに見受けられるピーク）も一応表にしておく。

ピークと認識されるもののスペクトルのエネルギー [keV]

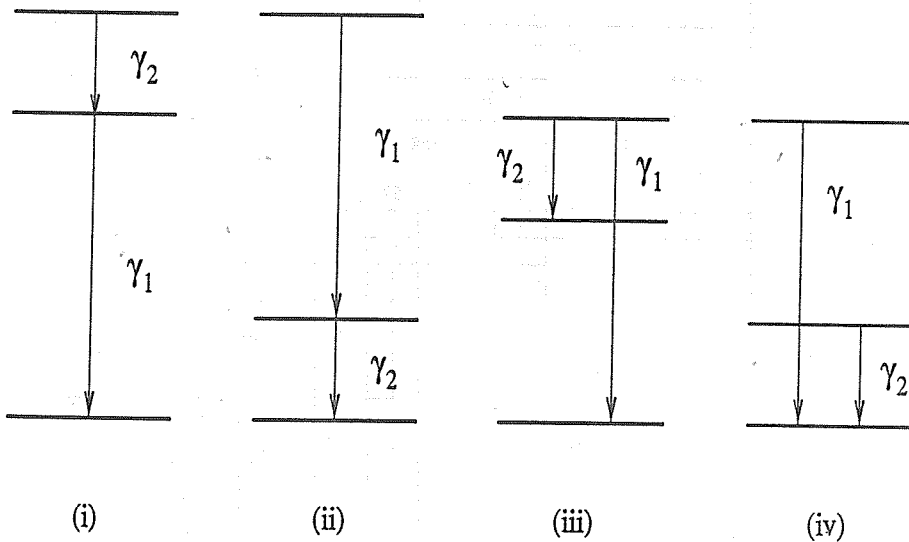
(1)	73.3	(2)	75.4	(3)	80.2	(4)	83.3	(5)	125.0	(6)	148.2
(7)	152.2	(8)	161.8	(9)	167.5	(10)	189.4	(11)	191.2	(12)	211.4
(13)	212.1	(14)	247.8	(15)	251.6	(16)	271.1	(17)	284.5	(18)	* ¹ 295.9
(19)	315.2	(20)	324.8	(21)	329.3	(22)	340.2	(23)	366.3	(24)	* ² 367.7
(25)	415.9	(26)	465.5	(27)	488.6	(28)	503.4	(29)	511.0	(30)	520.3
(31)	526.9	(32)	563.9	(33)	566.3	(34)	586.2	(35)	591.8	(36)	644.8
(37)	656.4	(38)	670.7	(39)	674.7	(40)	* ³ 678.6	(41)	688.6	(42)	703.9
(43)	712.7	(44)	719.3	(45)	723.2	(46)	764.8	(47)	795.1	(48)	841.1
(49)	842.2	(50)	901.7	(51)	906.9	(52)	919.3	(53)	926.2	(54)	958.1
(55)	959.1	(56)	* ⁴ 1005.0	(57)	1261.5	(58)	1274.4	(59)	1348.5	(60)	1528.0

なお calibration は、実験直後に checking source (⁶⁰Co、¹³⁷Cs) を用いて行なった。

3.4 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成 (i)

3.4.1 coincidence している γ 線の基本的な知識

先ほどの測定結果から、どのエネルギーの γ 線とどのエネルギーの γ 線が coincidence しているかがわかる。これを利用してエネルギー準位を決めるわけだが、まずは2本の γ 線 γ_1 と γ_2 (エネルギー; E_{γ_1} , E_{γ_2}) が coincidence しているというのはどういうことなのかを下の図を使って考えることにする。



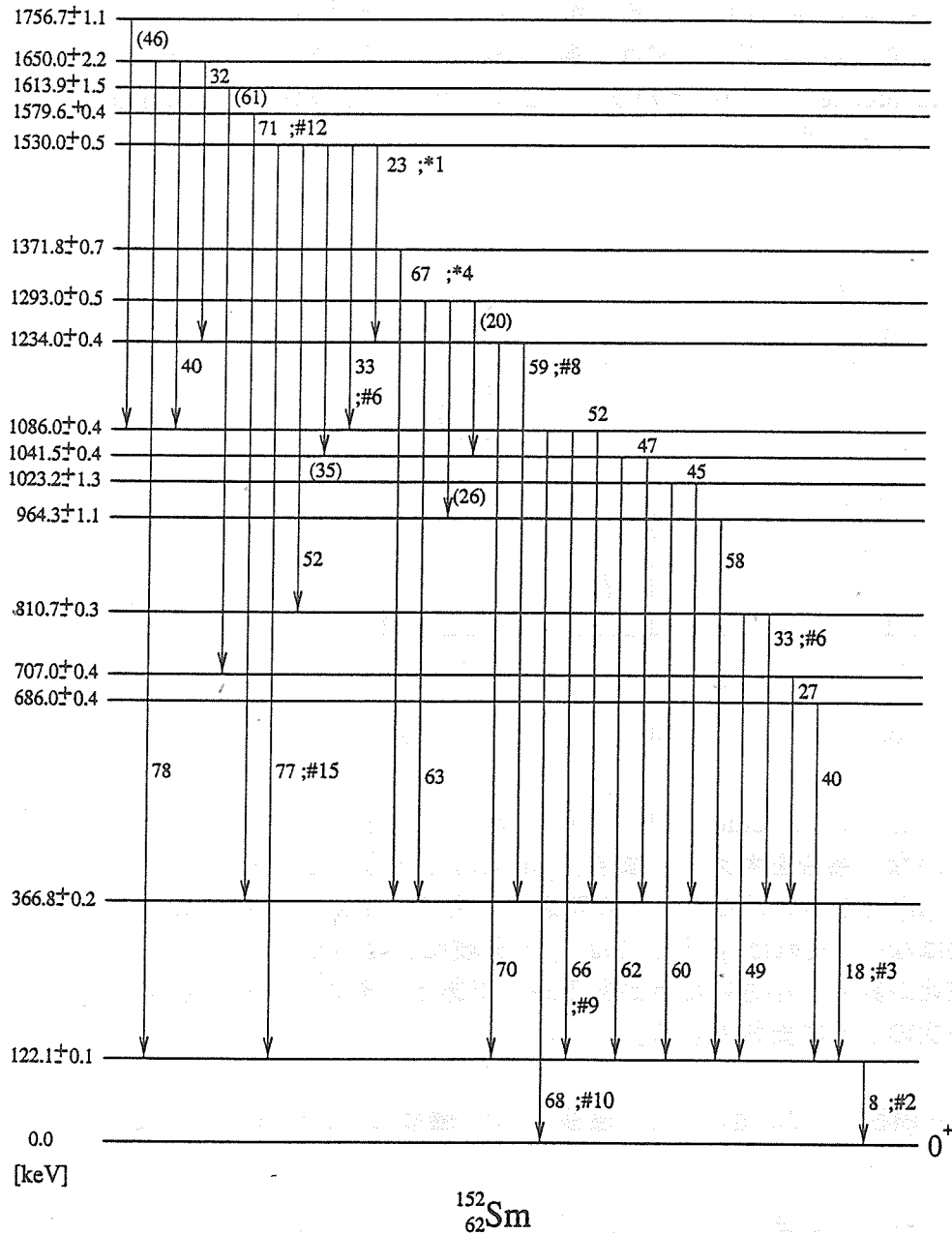
γ_1 と γ_2 が coincidence していて、なおかつ他に coincidence している γ 線がない場合を考える。まず、(iii),(iv) は違うことがわかる。よって (i) か (ii) となるわけだが、この時必ずしも $E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$ の γ 線が観測される必要はない。それは γ_1 もしくは γ_2 の分岐比と比べて、 $E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$ の γ 線 の分岐比が非常に小さい場合があるからである。その分岐比の関係はだいたい次のように要約できる。

$$E0 \text{ 遷移} \gg M0 \text{ 遷移} \simeq E1 \text{ 遷移} \gg M1 \text{ 遷移} \simeq E2 \text{ 遷移} \gg M2 \text{ 遷移} \dots$$

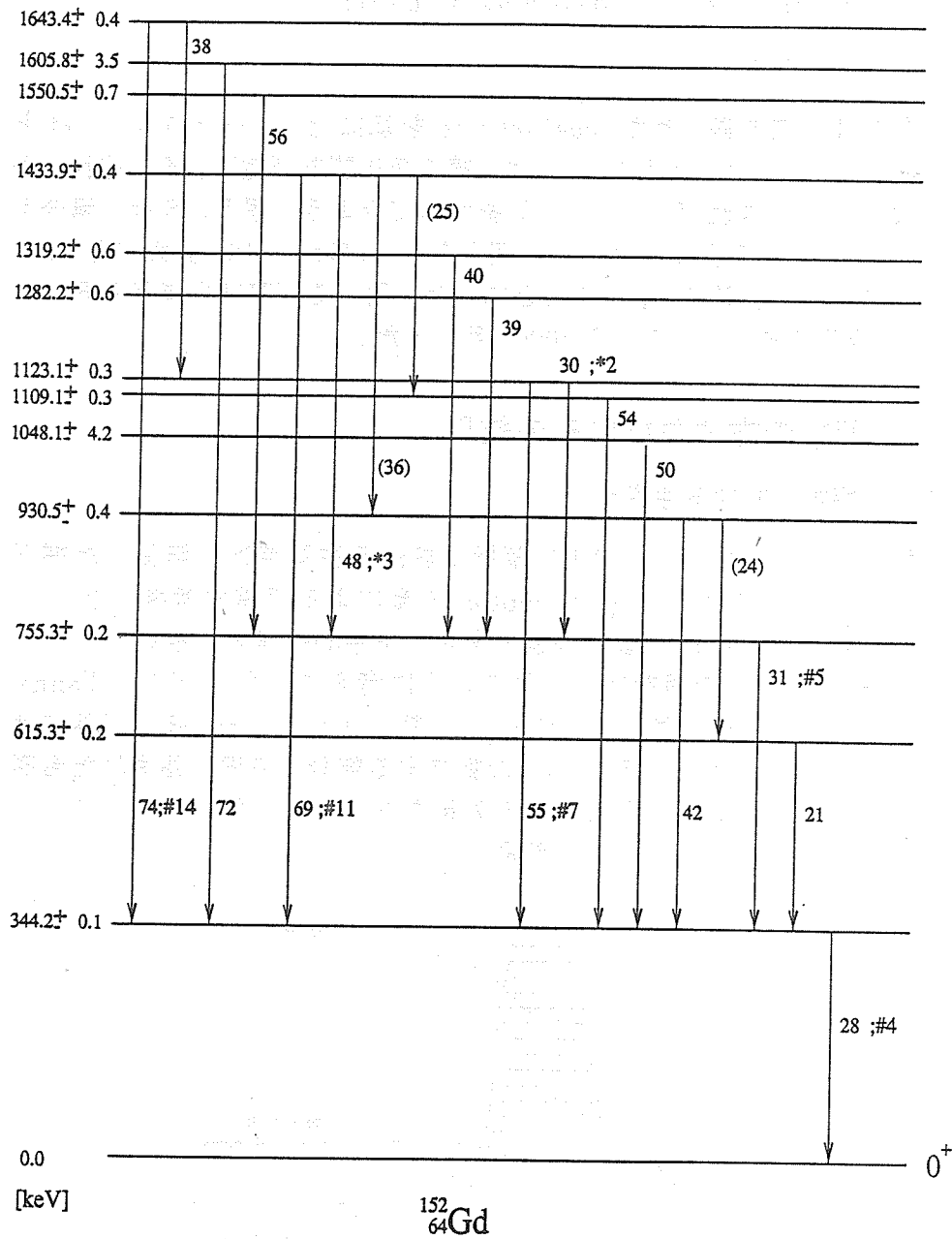
このことを全ての γ 線に対して行ない、またこれらから適切な組合せを探ることにより、level を組むことができる。

3.4.2 エネルギー準位の決定

< 3.3 >に於ける測定結果及び< 3.4.1 >から、おおよその *level scheme* が求まった。結果は次の通りである。



< 電子捕獲により $^{152}_{62}\text{Sm}$ の励起状態へと遷移した時 >



< β^- 崩壊により $^{152}_{64}\text{Gd}$ の励起状態へと遷移した時>

(※番号はエネルギーの低い順に記している。括弧付きは直接的には確かめてはいないが、そうではないかと思うもの。)

3.5 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成 (ii)

3.5.1 実験の方法

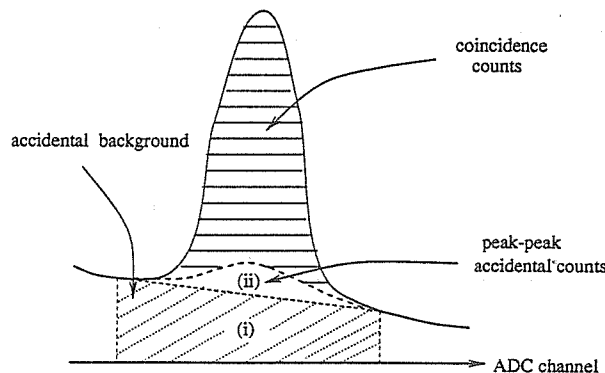
今度は前節で得られた level scheme を基に、 $\#1, \dots, \#15, *1, \dots *4$ と coincidence しているはずの隣あった γ 線の角相関を測定し、それぞれの準位のスピン (できればパリティも) を求めてみようと思う。今度の場合も $\langle 2.3 \rangle$ の時と同様に、detector の開き角が 45 度から 180 度までを 15 度間隔で計 10 点を測定してみることにした。用いる回路は先ほどと同じで、測定時間は統計が溜るよう 40000 秒にした。

3.6 解析の方法並びにその結果

3.6.1 解析に於ける注意点

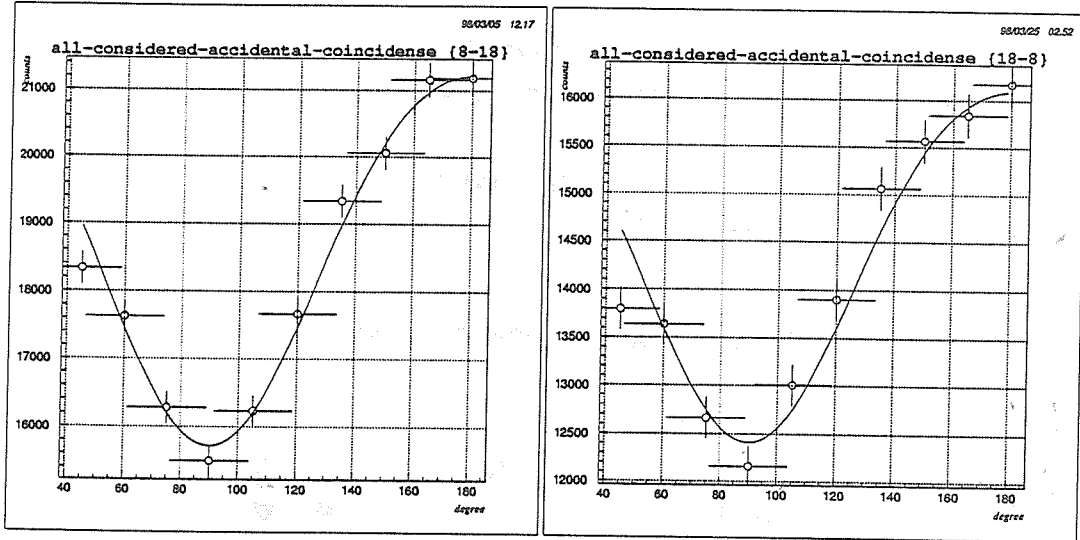
解析に当たっては、 $\langle 2.4.1$ 解析に於ける注意点 \rangle で議論した補正を行なった。そのうち、「(i) Compton 散乱による誤差の考慮」と「(ii) accidental coincidence による誤差の考慮」を中心に考えてみる。

上で挙げた 2 つの誤差は下の図のように考えてみた。即ち、channel range が小さい場合に於いて、Compton 散乱は Compton-edge 以外ではほぼなだらかであるとする、(i) の寄与する部分は点線で囲まれた台形に近似できる。また、これに (ii) の効果を加えるわけだが、これは予め self-trigger で測定したものから計算した。

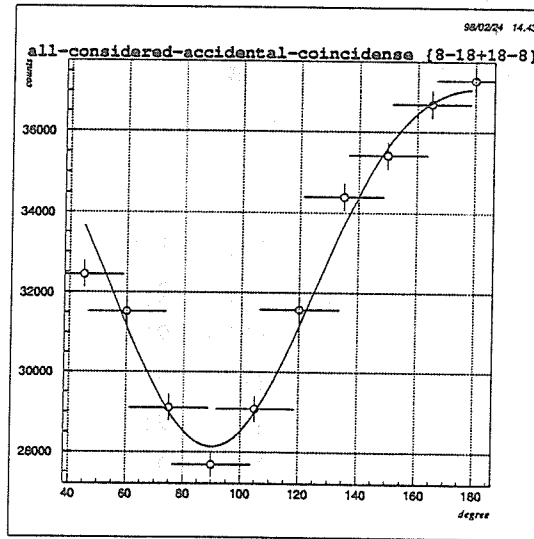


また、この実験の解析では「 $^{152}_{62}\text{Sm}$ と $^{152}_{64}\text{Gd}$ の基底状態の spin-parity は 0^+ である」ということを前提としている。これは even-even 核の特徴からきている。energy level のスピンを決めるに当たっては、これを足掛かりに構築していくわけだが、ここでは一例として $\langle \#2 - \#3 \rangle$ の解析結果を見てみることにする。

3.6.2 解析の結果



<左図 (i) #2 と coincidence している #3 の count 数の角度分布>
 <右図 (ii) #3 と coincidence している #2 の count 数の角度分布>



< (i) と (ii) を足し合わせたもの >

ここでも fitting 関数として < 2.4.2 > の (*) 式を用い、最小 2 乗法して角相関係数を求めてみた。その求めた角相関係数に立体角による補正を施すと、次のようになる。

(i) の場合

$$A_2 = 0.1887 \pm 0.0093 \quad A_4 = -0.0158 \pm 0.0106$$

(ii) の場合

$$A_2 = 0.1632 \pm 0.0110 \quad A_4 = -0.0146 \pm 0.0126$$

(iii) の場合

$$A_2 = 0.1750 \pm 0.0072 \quad A_4 = -0.0071 \pm 0.0082$$

この角相関係数から予想される準位間のスピンは

$$\begin{array}{ccccc} & (l_1, m_1) & & (l_2, m_2) & \\ (I_1, M_1) & \longrightarrow & (I_2, M_2) & \longrightarrow & (I_3, M_3) \\ \text{始状態} & & & & \text{終状態} \end{array}$$

I = その準位のスピン

M = その準位のスピン z 成分

l = γ 線が持ち去るスピン

m = γ 線が持ち去るスピンの z 成分

とおくと、

$$\begin{aligned} I_1 (m_1, l_1) I_2 (m_2, l_2) I_3 = & 2 (2, 2) 1 (1, 2) 2 \\ & 2 (1, 2) 2 (2, 2) 1 \\ & 3 (1, 1) 2 (1, 2) 1 \\ & 4 (2, 2) 2 (1, 2) 1 \\ & 4 (2, 2) 3 (2, 2) 3 \\ & 4 (1, 2) 4 (2, 2) 2 \end{aligned}$$

となった。これらは、「基底状態のスピンは 0^+ である」という条件を満たしていない。誤差の値にある程度ゆとりを持たせてみたが、改善はされなかった。他のエネルギーのものも確かめてみたが、結果は同じであった。

3.7 考察及び結論

< 3.4 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成 (i) > について

本実験で断定した level scheme は < 3.4.1 > の関係だけを用いたものなので、多少正確さに欠ける。これを補うために、ある level から落ちる γ 線が 1 つの場合、例えば #2 の落ちる level に落ちてくる γ 線のピーク計数を全て足し合わせたものが、ちゃんと #2 のピーク計数になっているかどうかを調べればよい。

ただしここで問題になってくるのは、ピーク検出効率のエネルギー依存性を調べる必要があることである。しかしエネルギー校正用として使用した checking source (^{60}Co , ^{137}Cs) で調べることができるエネルギーは低い方で 662 keV までなので、それより低いエネルギーのピーク検出効率を知ることができない。

また後で議論することだが、みかけの同時計数によりエネルギーの低い γ 線に対して正確なピーク計数を知ることができるかどうかわからない。

少なくとも #2 ~ #15 及び *1 ~ *4 を用いた level は正確だと思うが、上の議論から、それ以外の γ 線を用いて組んだ level は確かめる手段が見つからないので、全体として level scheme が正確なものなのかどうかはわからない。

< 3.5 $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成 (ii) > について

本実験では、前の ^{60}Co の $\gamma-\gamma$ 角相関ではなかった考慮すべき問題点があった。それは Compton 散乱によるみかけの同時計数である。これは例えばある γ 線が片方の検出器に入り、Compton 散乱の結果エネルギー a に相当する散乱電子を吸収し、散乱 γ 線が他の検出器に入り、エネルギー b を与える場合である。もちろん始めの γ 線のエネルギーは $(a+b)$ でなければならないが、 a, b が crossover な転移の場合しばしば起こり得ることで、検出器の距離が近い場合に於いてはなおのこと考慮しなければならない。

文献⁽¹⁾によると、みかけの同時計数は検出器の開き角が大きいほど顕著に現れてきて、また特に 200 keV 前後の γ 線の角相関に注意を要することである。この実験ではこれに対する対策、例えば detector を鉛などで完全に遮へいして、他の角度からの γ 線を入らないようにするといったことを怠っていた。

また遷移の混ざり具合 (例えば M1 遷移と E2 遷移) も考えなければならないなど、今回の簡単な実験では把握することが困難な問題が多く存在した。

以上の議論から、それぞれの準位のスピンを定めるまでには到らなかった。

4 Summary

< ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関> について

角相関係数は少し変わっただけでかなり違った level-spin に変化してしまうので、実験データから ^{60}Co の level-spin を一意的に決めることは困難なように思われる。ただ、この実験の目的は ^{60}Co の $\gamma - \gamma$ 角相関の理論から導かれる関係を実験的に確かめることだったので、そのことに関しては目的に叶った結果が得られた。

< $^{152}_{63}\text{Eu}$ の level scheme の作成> について

今回の実験で用いた $\gamma - \gamma$ 同時計測法によって P.32 や P.33 に挙げられるような level を組むことができた。

今回の実験では trigger 用に 21 種類のエネルギー・スペクトルを採用したのだが、これだけでは把握できないような γ 線もあったので、もう少し trigger 用のスペクトルを増やす工夫をすべきだったと思う。

今後の課題としては、efficiency のエネルギー依存性の調査 (特に低エネルギー領域)、みかけの同時計数の考慮・削減化を図ることである。

5 付録

5.1 多重極放射による角相関について

5.1.1 多重極放射について

原子核がエネルギー E_i 、スピン J_i 、パリティ π_i の状態から、エネルギー E_f 、スピン J_f 、パリティ π_f の状態へ γ 線を出して遷移したとすると、 γ 線のエネルギー $\hbar\omega$ 、スピン λ 、パリティ π は、それぞれ

$$\hbar\omega = E_i - E_f$$

$$\vec{J}_i = \vec{\lambda} + \vec{J}_f$$

$$\pi_i \times \pi = \pi_f$$

の関係を満たす。これは多重極度 λ の遷移と呼ばれている。

原子核の場合、原子核が陽子と中性子からなることから電気双極子（電荷の重心と質量重心のずれ）を作りにくいいため、重要となる遷移は、E2 遷移（電気四重極子遷移）や M1 遷移（磁気双極子遷移）となる。

また、一般に $E\lambda$ 遷移（電気 2^λ 極子遷移）の場合、

$$\pi_i \pi_f = (-)^\lambda, \pi(\vec{H}) = (-)^\lambda$$

$M\lambda$ 遷移（磁気 2^λ 極子遷移）の場合

$$\pi_i \pi_f = (-)^{\lambda+1}, \pi(\vec{E}) = (-)^\lambda$$

となることが知られている。

5.1.2 多重極放射の固有関数について

光子の角運動量 J は、軌道部分の L と光子のスピン S から

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

のように合成されている。軌道角運動量の固有関数は球面調和関数 Y_{lm} で表せ、またスピンの固有関数は、 x, y, z 方向の単位ベクトル $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ を用いて定義された「球単位ベクトル」

$$\vec{\xi}_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{e}_x + i\vec{e}_y)$$

$$\vec{\xi}_0 = \vec{e}_z$$

$$\vec{\xi}_{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{e}_x - i\vec{e}_y)$$

をとると、 ξ は互いに直交し、また $S_z \xi_m = m \xi_m$ となる。

これらを用いると、全角運動量 J^2 の固有値が $\lambda(\lambda+1)$ で、 J_z の固有値が μ であり、かつ軌道部分 L^2 の固有値が $l(l+1)$ であるような固有関数 $\vec{X}_{\lambda\mu}$ は、

$$\vec{X}_{\lambda\mu} = \sum_m C_{l\mu-m, 1m}^{\lambda\mu} Y_{l\mu-m} \vec{\xi}_m$$

と表せる。ここで $C_{j_1 m_1, j_2 m_2}^{JM}$ は $|j_1 m_1\rangle$ と $|j_2 m_2\rangle$ から $|JM\rangle$ を合成する Clebsh-Gordan 係数と呼ばれている。

5.1.3 角分布について

多重極度が λ の時、 l のとり得る値は $\lambda-1, \lambda, \lambda+1$ の3つがある。ここで $E\lambda$ 遷移の H と $M\lambda$ 遷移の E のパリティが $(-)^{\lambda}$ であることに注意すると、

$$\vec{E}(M\lambda) \propto \vec{X}_{\lambda\lambda\mu}$$

$$\vec{M}(E\lambda) \propto \vec{X}_{\lambda\lambda\mu}$$

となる。ここで、 γ 線の強度を知るには Pointing vector $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ の大きさがわかればよいのだが、真空中では $E/H = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ の関係があるので、 γ 線の強度は $|\vec{E}|^2$ または $|\vec{M}|^2$ で与えられる。よって角運動量 λ, z 成分 μ の多重極放射の角度分布は

$$Z_{\lambda\mu} = |\vec{X}_{\lambda\lambda\mu}|^2$$

で求めることができる。 Z の重要な性質としては、

1. 電気放射と磁気放射は多重極度 λ が同じであれば、同じ角分布を示す。
2. $Z_{\lambda\mu}(\pi - \theta) = Z_{\lambda\mu}(\theta)$ 、 $Z_{\lambda-\mu}(\theta) = Z_{\lambda\mu}(\theta)$ という対称性を持つ。
3. $\mu = \pm 1$ の時以外は $Z(0) = 0$ 。
4. $\sum_{\mu} Z_{J\mu} \propto 1$ つまり、「偏りのない」始状態から放射される光は等方的に分布する。

が挙げられる。

5.1.4 角相関について

始状態 $|J_i\rangle$ の磁気量子数分布に偏りがあつたとすると、そこから放射される γ 線には角分布が生じる。 $|J_i m_i\rangle$ から $|J_f m_f\rangle$ へ多重極度 λ 、 z 成分 μ の γ 崩壊が起きる場合、この γ 遷移率は Clebsh-Gordan 係数の 2 乗に比例し、さらに始状態が磁気量子数 m_i にある確率 $p(m_i)$ にも比例するはずである。したがって $W(\theta)$ は

$$W(\theta) = \sum_{m_i, \mu} |C_{J_f m_f, \lambda \mu}^{J_i m_i}|^2 p(m_i) Z_{\lambda \mu}(\theta)$$

と書ける。

逆に偏りのない始状態から放射された γ 線を z 方向で捉えたとすると、終状態の磁気量子数分布に偏りが生じるはずである。これは前に述べたように、 z 方向に進む光は $\mu = \pm 1$ 以外はとりえないことから明らかである。この時、終状態の磁気量子数分布 $p(m)$ は

$$p(m) = (|C_{J_m, \lambda 1}^{J_i m+1}|^2 + |C_{J_m, \lambda -1}^{J_i m-1}|^2)$$

で与えられる。

これらを組み合わせれば、 $J_1 \rightarrow J_2 \rightarrow J_3$ のように cascade に起こる γ 遷移の間に角相関が生じることが理解される。即ち最初の遷移を捉えることにより J_2 状態に偏りが生じ、その結果として $J_2 \rightarrow J_3$ の放射に角分布が生じるのである。(以上は文献⁽³⁾から借用した。)

5.2 実験器具の説明並びに本実験の条件

5.2.1 使用した detector・module の説明

ここでは本実験で使用した module について、簡潔にはあるが紹介したい。

High Purity Germanium Detector

・ EURISYS 社製 High Purity Germanium Detector

Ge1 : type EGC-60-210-ER serialnumber 72674 HV=-4500V (G5)

Ge2 : type EGC-50-210-ER serialnumber 72658 HV=-4000V (G2)

立体角などを割り出すために、参考資料として同じ EURISYS の type EGC-60-210-ER serialnumber 72756 の operating manual を使用した。それによると

Geometrical characteristics of the germanium crystal :

External diameter : 64.5 mm

Length : 77.6 mm

Sensitive volume : 246 cm³

Ultra High-rate Amplifier

・ ORTEC Model 973U Ultra-High-Rate Spectroscopy Amplifier

詳細は Manual に譲るとして、ここでは Amp. の出力にある Count Rate Meter について説明したい。(これは Shaping Amp. についても同様である)

Count Rate Meter ; この Amp. には Automatic Noise Level Sensor というものが搭載されていて、Fast Amp. からの signal が、その Automatic Noise Level Sensor でセットされた threshold(rising edge) を越えれば、Fast Discriminator から Logic signal(TTL-pulse) を出すようになっている。Count Rate Meter これを利用して TTL-pulse を発生させる。これは主に detector の count 数を monitor するのに使われる。

5.2.2 実験の条件

ここでは本実験の条件、特に使用した Amp. module の条件について述べることにする。

今回、実験を通じて統一していた条件としては、

discriminator : $V_{threshold} = -0.4 \text{ V}$

interrupt module への signal : gate signal より $\sim 30 \mu\text{sec}$ delay

である。また、実験ごとの条件は次の通りである。

< 2.2 detector ……の測定>に於ける条件 (図 1 参照)

Ultra High-rate Amp. (Ge1) : gain 33.25
integrate time $3.0 \mu\text{sec}$

Ultra High-rate Amp. (Ge2) : gain 36.75
integrate time $3.0 \mu\text{sec}$

detector と線源との距離 8.5 mm

< 2.3.1 実験の方法>に於ける条件 (図 2 参照)

Ultra High-rate Amp. (Ge1) : gain 33.25
integrate time $1.5 \mu\text{sec}$

Ultra High-rate Amp. (Ge2) : gain 36.75
integrate time $1.5 \mu\text{sec}$

detector と線源との距離 10 cm

< 3.2 detector ……の測定>に於ける条件 (図 3 参照)

Shaping Amp. (Ge1) : gain 60.0
integrate time $6.0 \mu\text{sec}$

Ultra High-rate Amp. (Ge2) : gain 53.0
integrate time $3.0 \mu\text{sec}$

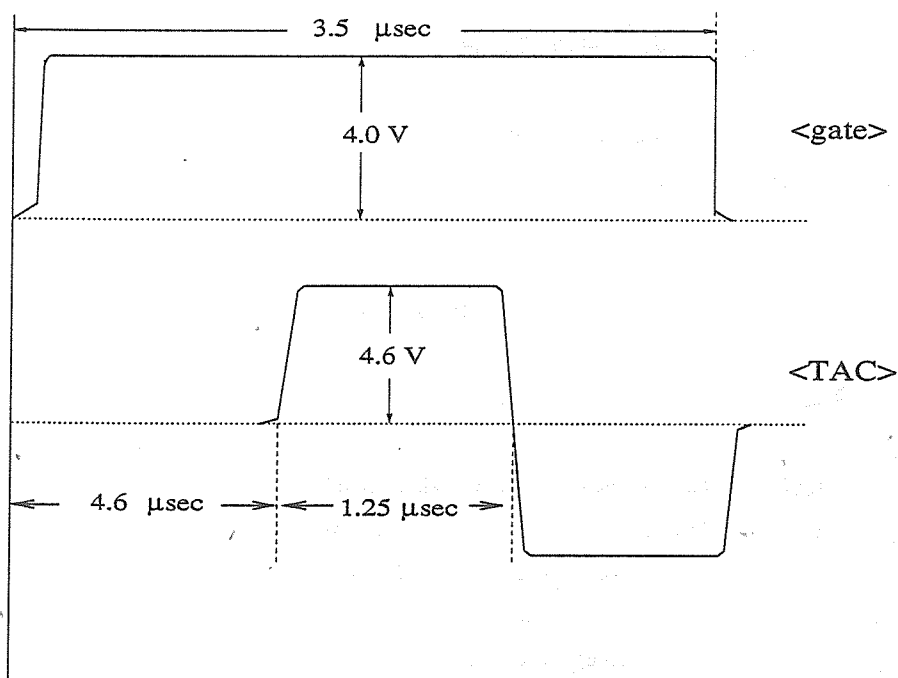
detector と線源との距離 55 mm

< 3.3 ¹⁵²Eu の..及び 3.5 ¹⁵²Eu の..>に於ける条件 (図 4 参照)

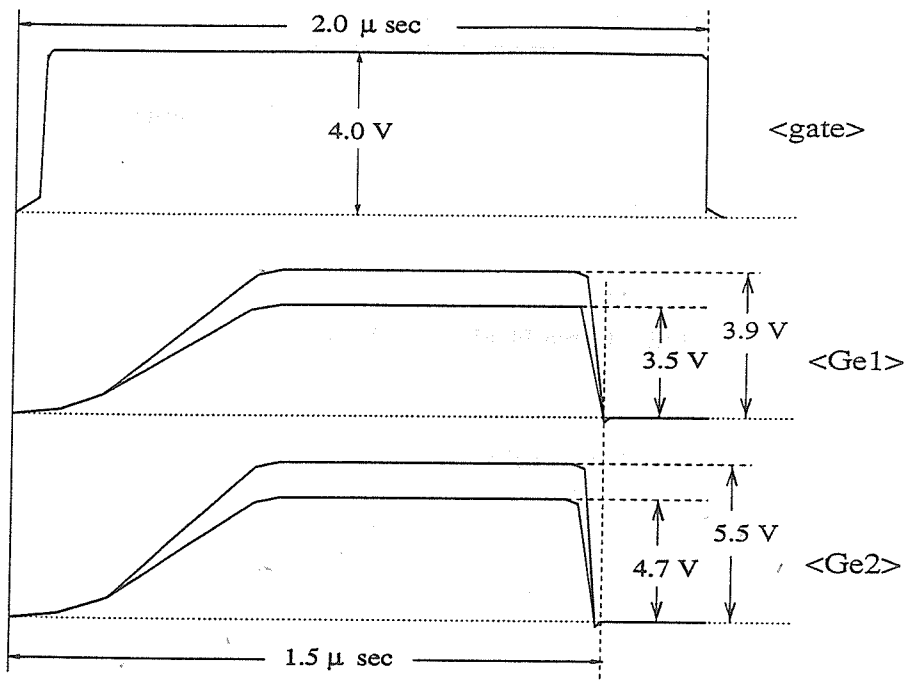
Shaping Amp. (Ge1) : gain 60.0
integrate time 6.0 μsec

Ultra Highrate Amp. (Ge2) : gain 53.0
integrate time 3.0 μsec

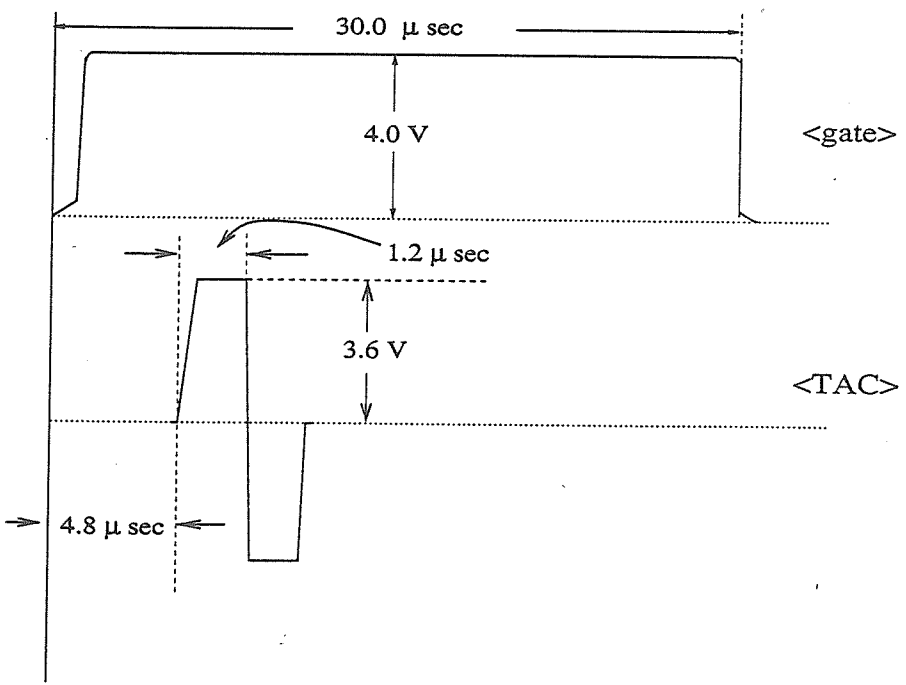
detector と線源との距離 10 cm



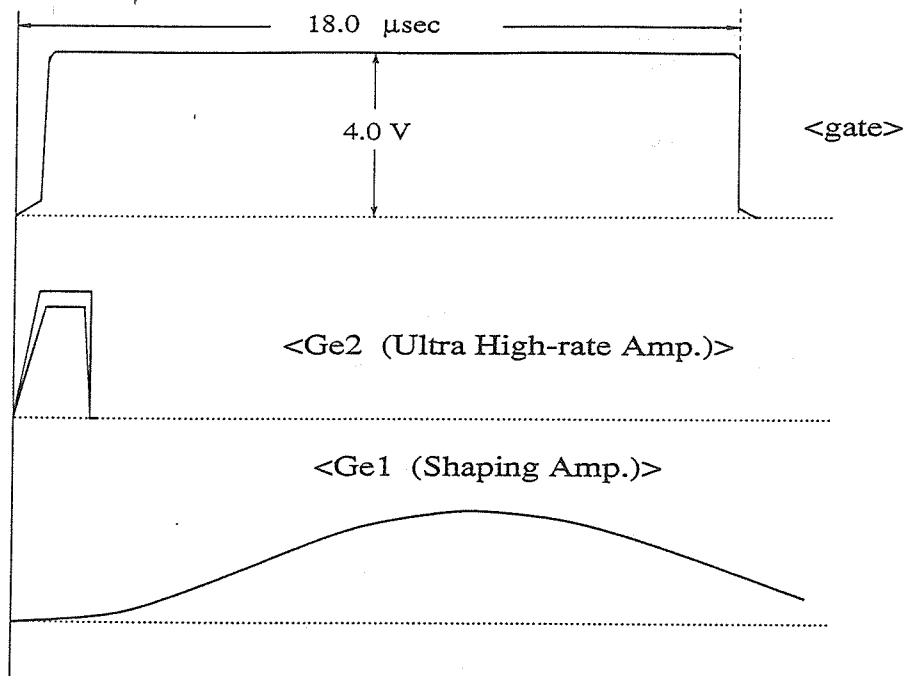
< 図 1 >



< 2 >

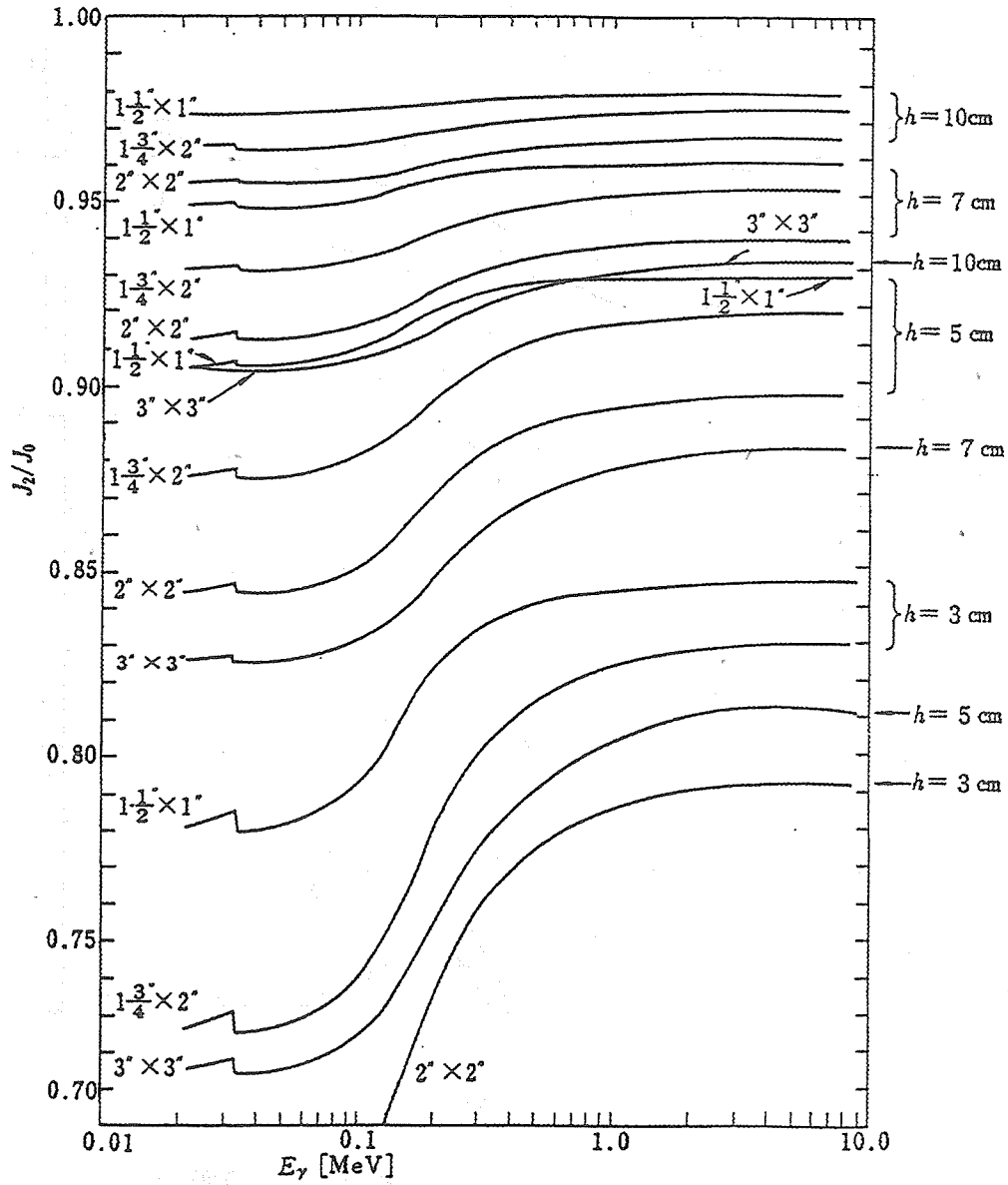


< 3 >



< 4 >

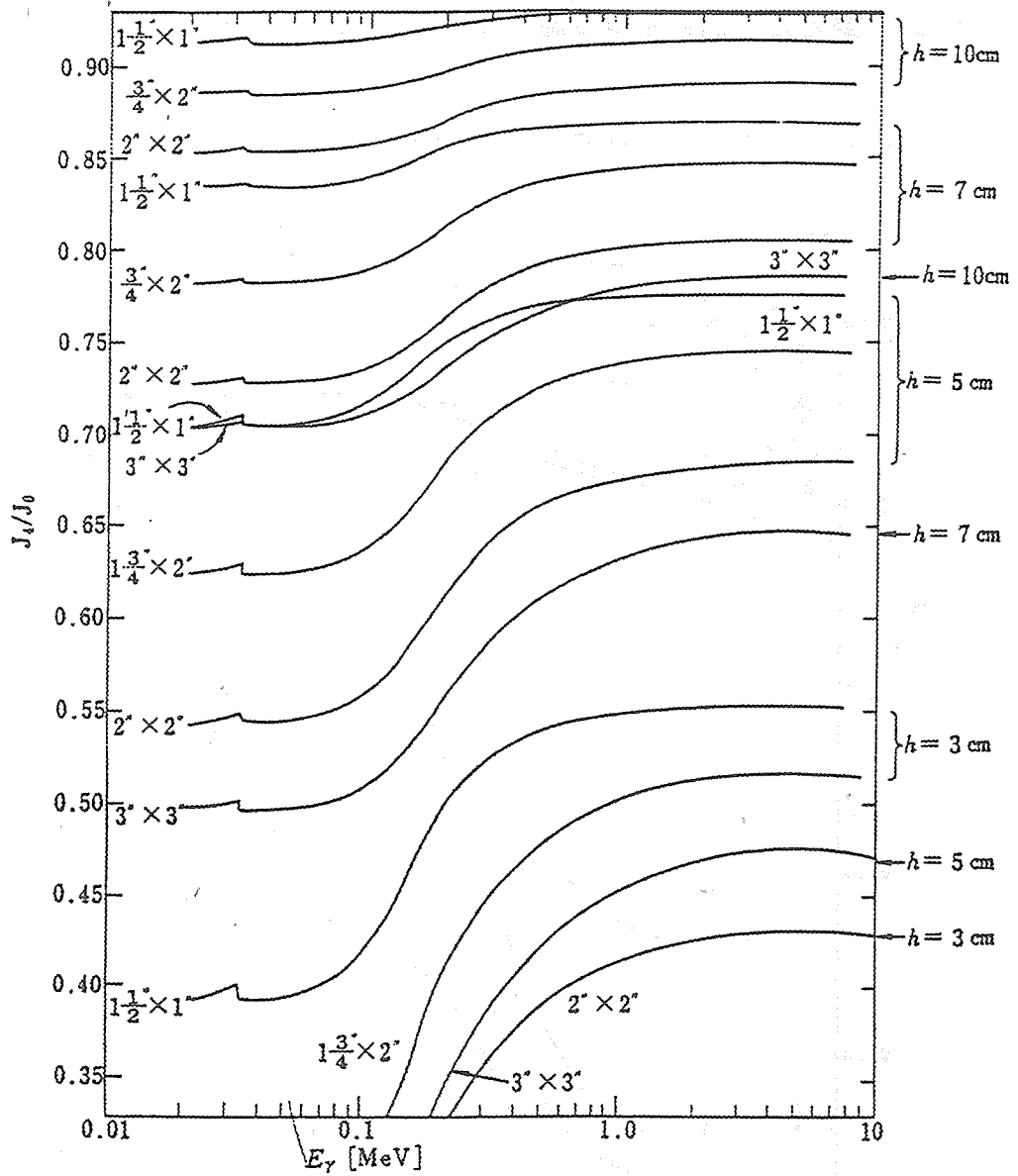
5.3 参考図;立体角の考慮による補正 (NaI(Tl) 結晶の場合)



(a) J_2/J_0

※グラフ右側数値は NaI(Tl) 結晶の大きさ。左側 h は線源と結晶の距離である。

< γ 線のエネルギーに対する J_2/J_0 の値>



(b) J_4/J_0

< γ 線のエネルギーに対する J_4/J_0 の値 >

謝辞

本論文をまとめる上で多くの方々から御指導・御協力を頂き感謝致しております。

橋本治教授には、物理に対する御指導はもちろん、学業全般に於いて温かく見守って頂き、深く感謝しております。

田村裕和助教授には、原子核物理に於いて興味深い本研究テーマを行なう機会を与えてくれ、また物理に対する姿勢や測定・解析に到るまで熱心に御指導して頂き感謝致します。

高橋俊行助手には、実験の方針やデータ解析の方法など教授して頂き感謝致します。

素粒子原子核物理学講座の中川武美教授、小林俊雄教授、田中英二助教授、加藤守男氏、川村直子さんには、多くの御指導並びに励ましを頂き、感謝致します。

本研究室の大学院生の方々並びに同期の四年生の方々には、本論文をまとめる際にだけでなく、あらゆる面に於いて数え切れないほどお世話になりました。深く感謝致します。

Reference

- (1) 「実験物理学講座 27 - 原子核」 (野中到責任編集) 共立出版
- (2) 「放射線計測の理論と演習 (下) 応用編」 著者ニコラス=ツルファニ
デイス 訳者阪井英次 現代工学社
- (3) 「核分光」 東京大学「物理学実験 2」解説 担当 早野龍五、石川隆、
田村裕和
- (4) 「物理測定技術第 6 巻 放射線測定」編集者 飯田修一、大野和郎、他
- (5) 「Alpha-,Beta- And Gamma-Ray Spectroscopy Volume 2」 Kai Siegbahn
North-Holland publishing company (1965)