

大型 GSO (Gd_2SiO_5) シンチレータの分解能

東北大学理学部物理学科
素粒子・核物理学講座
原子核物理

菊地 雄司

平成 10 年 3 月

目次

1. 目的	.....	2
2. GSO の特徴	.....	3
他の無機シンチレータとの比較 発光機構		
3. 実験：反射材と分解能	.....	6
4. 実験：高エネルギー γ 線の測定	.....	21
5. 最後に	.....	35

1. 目的

Λ ハイパー核の P 軌道から S 軌道への遷移とともに放射される 10 MeV 程度の γ 線を測定すると、l-s スプリッティングが確かめられ、 Λ N スピン軌道相互作用が明らかになる。このためには、高エネルギーの γ 線を高分解能、かつ高検出効率で測定できることが望ましい。この目的にかなったシンチレータの1つとして GSO が期待されている。

ここではまず一般的に GSO 結晶に巻く反射材を変えてその分解能について調べる。

また同じ GSO 結晶で、工学部施設高速中性子実験室で陽子ビームによる $\text{Al}(p, \gamma)\text{Si}$ の共鳴反応からの高エネルギー γ 線を測定する。

2. GSO の特徴

A. 基本的な性質

他のシンチレータとの比較

	GSO (Ce)	NaI (Tl)	BGO	BaF ₂
密度 (g/cm ³)	6.71	3.67	7.13	4.89
放射長 (cm)	1.38	2.59	1.12	2.06
蛍光減衰時間 (ns)	60	230	300	0.6-620
実効原子番号 (Z)	59	50	74	54
最大発光波長 (nm)	450	415	440	210-310
相対発光出力	20	100	7~10	5-16
屈折率	1.85	1.85	2.15	1.56
値段 (\$/cm ³)	20~25	1~2	10~12	3~6
融点 (°C)	1900	651	1050	1354
潮解性	無	強	無	無

参考文献[3]

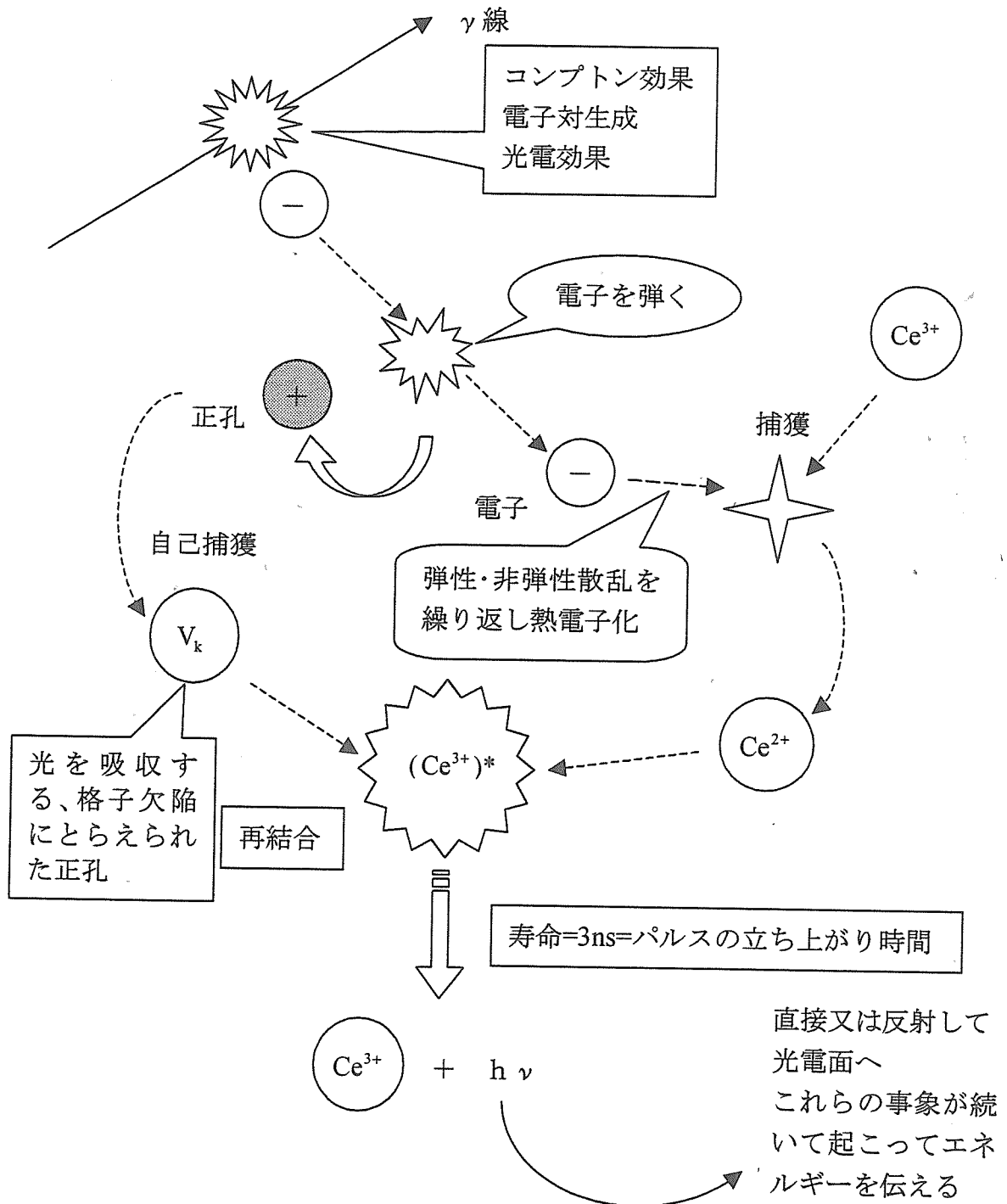
特徴：NaI より原子番号が大きく、BGO よりも蛍光出力が高く蛍光減衰時間が短い。

MEMO : Gd₂SiO₅(Ce)

蛍光の減衰	温度が上がると早くなる Ce 濃度が上がると早くなる
発光波長	Ce 濃度や励起エネルギーに依存しない
立ち上がり時間	Ce 濃度に依存しない

参考文献[1]

B. 発光機構(再結合発光モデル)



追記： 蛍光の時間変化 $I(t)$ は、再結合発光の時間変化を表す関数を $f(t)$ とすると $I(t) \propto f(t) - f(0)\exp(-t/\tau)$

と近似され、 τ は立ち上がり時間で、これは蛍光の減衰曲線と一致している。

参考文献[2]

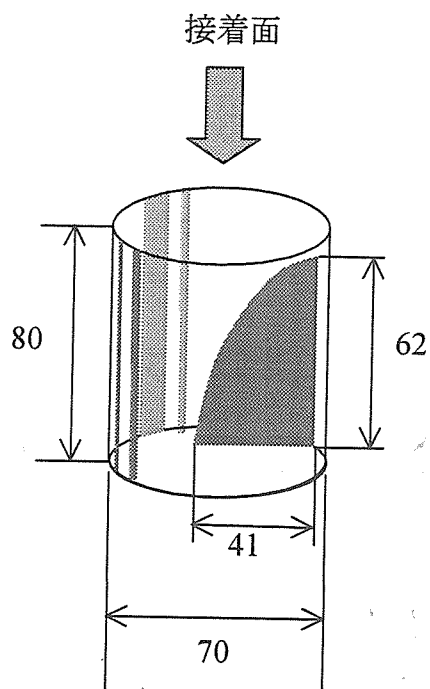
・実験装置

・実験に用いた GSO

制作 : 日立化成工業
寸法 : $\phi 70.1 \times 79.8 \text{ mm}$ (実測)
Ce 濃度 : 0.5mol%
表面 : 全鏡面
備考 : へき壊割れ有り
縁が少し欠けてきている
淡白色の結晶

・光電子増倍管

製造元 : 浜松ホトニクス
型番 : R1911-05
採光面 : $\phi 3 \text{ inch}$ ($\phi 76 \text{ mm}$)
応答波長 : 300~650nm
量子効率 : 28 %
印可電圧 : 1500~1800 V



・光電子増倍管との接着

GSO 結晶をきれいに拭く。結晶に反射材をきれいに巻く。反射材の上を遮光テープ (3M 製) できれいに塞ぐ。ここで結晶の接着面にグリース (応用光研工業 : OKEN6262A) を十分のせ、光電子増倍管を押し付けながらまわし、空気が入らないようにまたまんべんなく広がるように接着する。接着面の周りに、光電子増倍管の面との隙間を塞ぎ接着を固定するために遮光テープを特に念入りに巻く。その上に黒いビニールシートをさらに巻く。光電子増倍管のシールドをネジ止めする。準備完了。高電圧電源へ接続する。

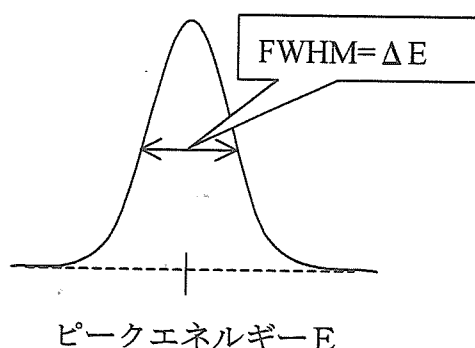
・へき壊割れについて

比較する結晶がないため、その影響についてはなにも言えないが、まずまずの分解能 (137Cs662keV : 11%今回データより) であることから、あまり考慮しなくてよいと思われる。

その影響を調べるのは興味深いのが、困難な作業になるだろう。

3. 実験：反射材と分解能

分解能とは…スペクトル上ではピークエネルギーに対するFWHM(Full Width at Half Maximum：半値幅)の割合を分解能としている。実際問題では、光電面に入ってくるシンチレーション光が光電子に変換されるときに統計誤差が最も目立ち、これが光電子増倍管での増幅された電子数へと受け渡され、スペクトルへと反映される。



GSO で測定する γ 線のエネルギー範囲ではスペクトルをガウシアンで近似している。

分解能の定義：
$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (N: \text{シンチレーション光} \cdot \text{光子数})$$

参考： 分解能の比較 (参考文献[1])

137Cs 662keV γ 線に対する分解能

GSO(Ce)	NaI(Tl)	BGO	BaF2
10%	9%	11%	13%

・使用した反射材

よりよい分解能で結晶をより有効に利用するために、結晶に巻く反射材をいろいろ変えてその変化を考察する。また、反射材が変わるということは、単純に言えば光電面へ到達する光子数が変わるということで、このことと分解能の関係についても注目してみる。

アルミホイル 外側	表：綺麗に反射している方
上同 内側	裏：鈍く反射している方
テフロン テープ	白色、一般にガス管などの密封に 結構伸縮する、二重にまいた
テフロン シート	白色、鈍い反射 4フッ化エチレン樹脂（日立化成製：高価）
遮光テープ	黒色、結晶に直接貼付
黒画用紙	画材屋（ともえや）で買ったもの
白紙	コピーなどに使う普通紙、二重にまいた

・使用した γ 線源

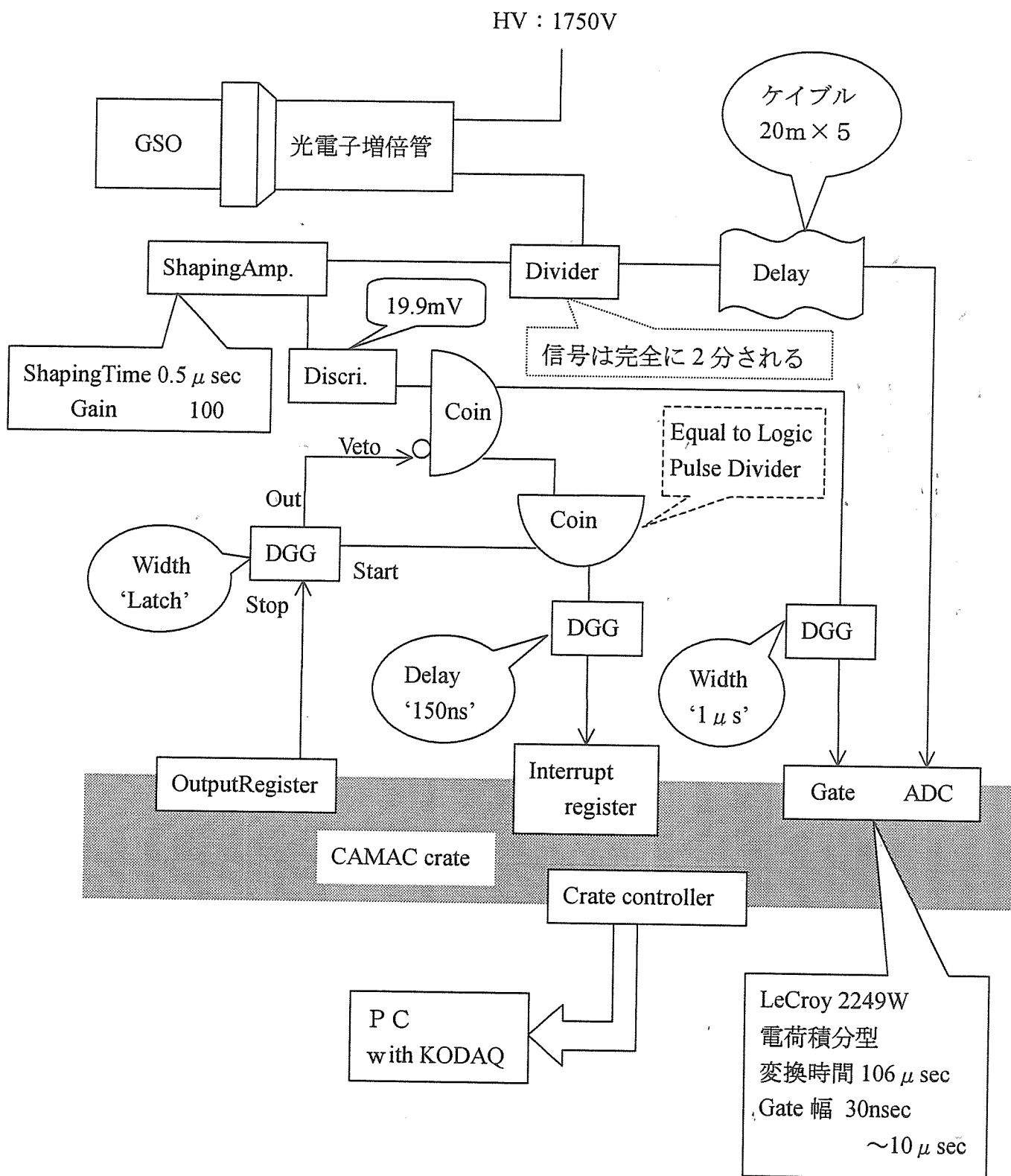
物理C棟にある標準線源を用いた。

測定時間はピークチャンネルの計数が10000を超える程度に設定した。

遮光テープではカウント数が多くなったため、測定時間を短くした。

	放射される γ 線 エネルギー	測定時間 (KODAQ上のタイマ)	放射線強度 (1998年3月6日現在)
^{22}Na	551keV 1275keV	300秒 (遮光テープのみ200秒)	4.252 kBq
^{137}Cs	662keV	120秒 (遮光テープのみ100秒)	291.3 kBq
^{60}Co	1173keV 1333keV	300秒	46.30 kBq

・ 実験回路図



・測定結果

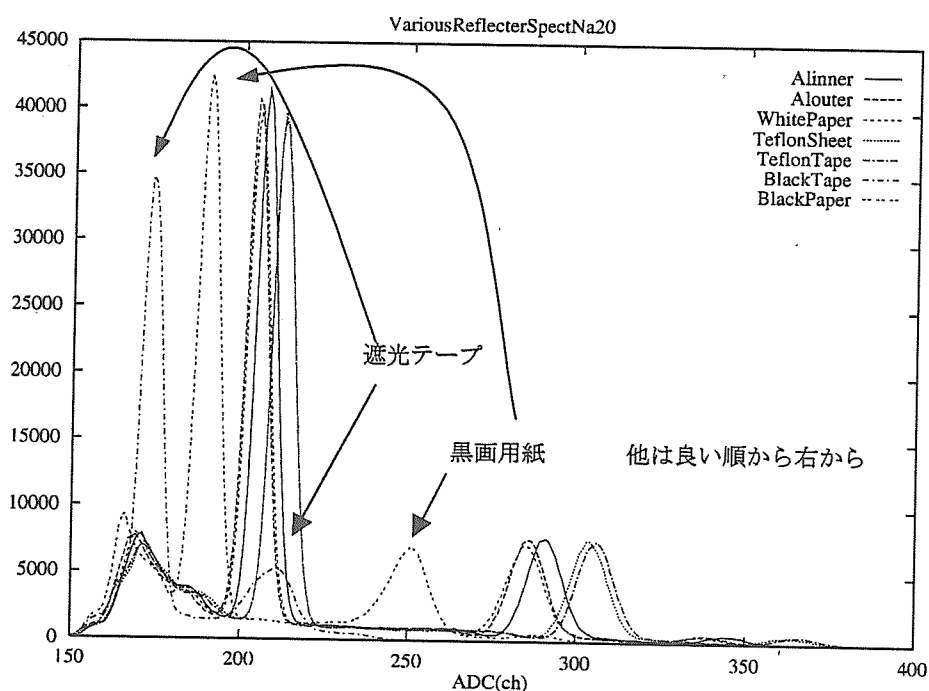
以下にそれぞれの線源のスペクトルを挙げる。

反射が多くなっていると思われるものでは、光量が増え、スペクトルは相対的に右に寄っている。黒画用紙と遮光テープでは、目立って光量が減っていると考えられ、ピークチャンネルは左に寄っている。

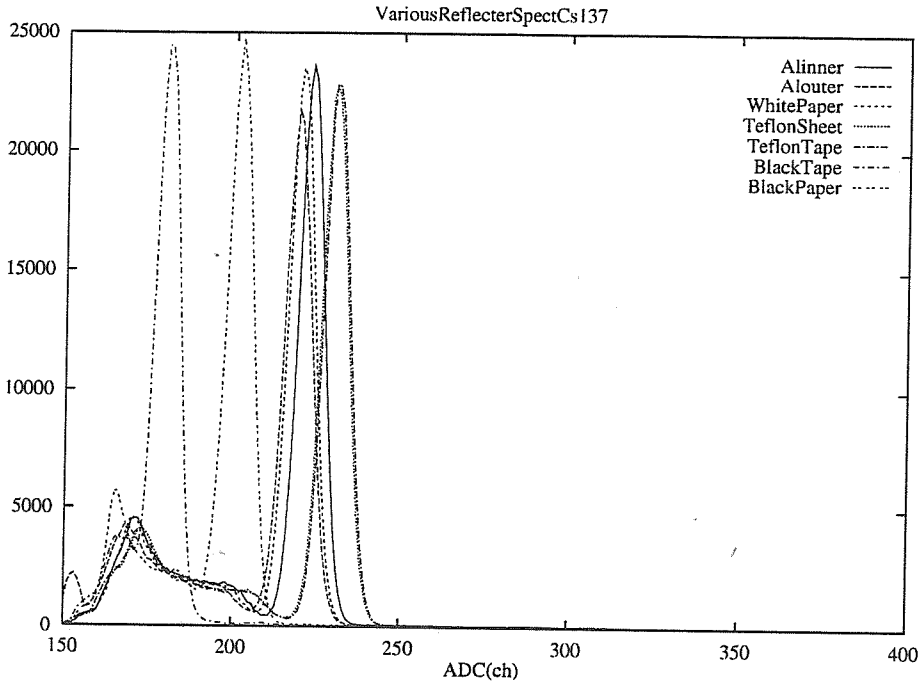
光量としてパルス高さをみるために、x軸はそのまま ADC のチャンネルにしてある。

共通のペDESTALチャンネルは 158ch である。参考に、アルミ外、テフロンシートは 157、テフロンシートは 159、と少し変動したのもあった。

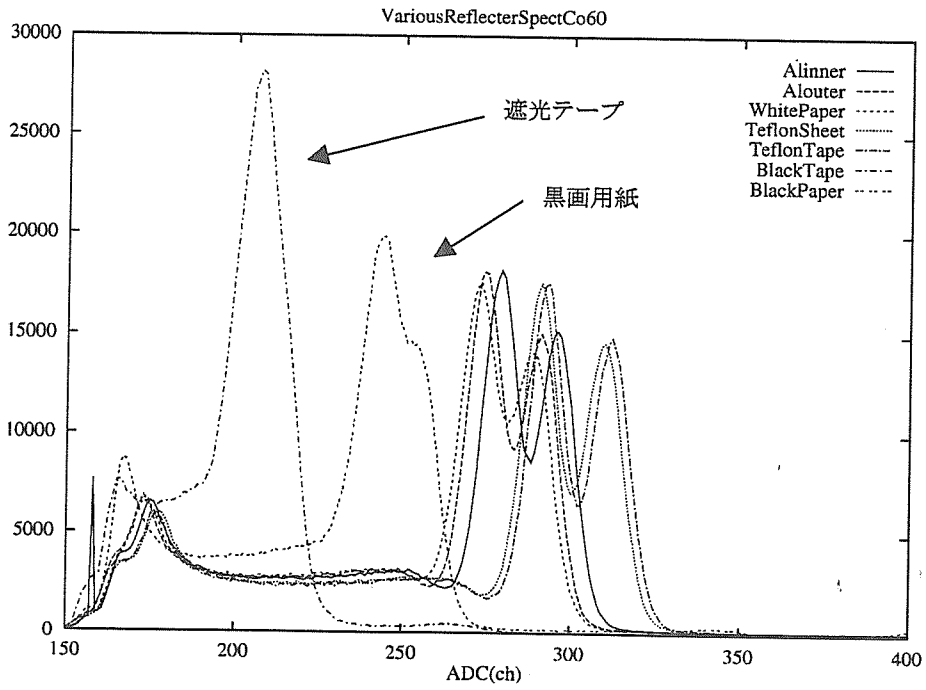
・ナトリウム 511keV と 1275keV の γ 線



・セシウム 662 keV の γ 線



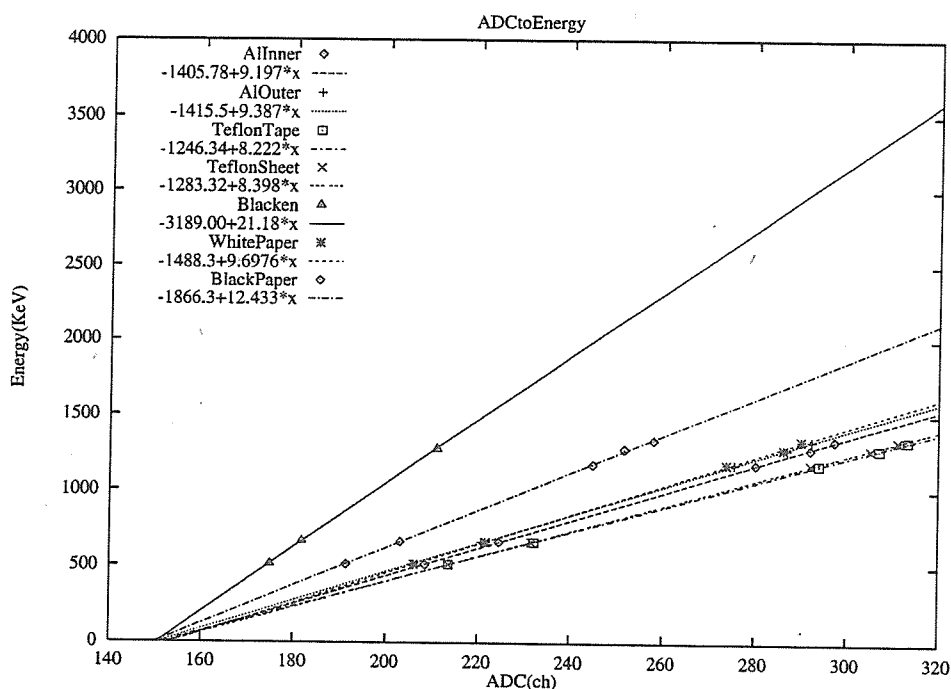
・コバルト 1173keV と 1333keV の γ 線



・エネルギー較正曲線

PAW(Physics Analysis for Workstation)でスペクトルデータを解析し、そこから求められたピークチャンネルの値をエネルギーに対応させて、最小二乗法で較正曲線を描いた。

エネルギーの零点はそれぞれ、アルミ内側 153、アルミ外側 151、テフロンテープ 152、テフロンシート 153、遮光テープ 151、白紙 153、黒画用紙 150 となっている。

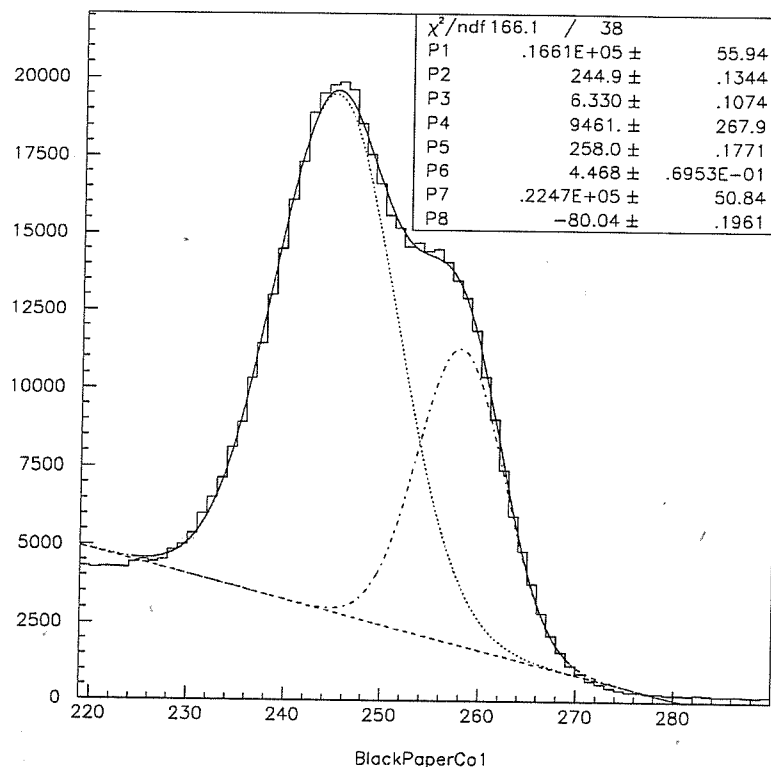


MEMO：ペDESTALはADCにゲイトだけを入れてKODAQを走らせたときに立つ巾1chの信号である。

共通のペDESTALは158chであることを考えると、エネルギーの零点は5~6ch小さい。これは、光電子増倍管からパルスを受けていない場合にも、ADCが電流を流しているためである。

・測定結果からの分解能の計算の例

PAW でのフィッティングの方法を簡単に述べる。



例えばこのスペクトルは反射材黒画用紙のコバルトのものである。
 まず、ガウシアン関数のみで、2つのピークをおおよそ近似する。ガウシアンは

$$y = a \times \exp\left(-0.5 \frac{(x-b)^2}{c^2}\right) \quad : (a, b, c \text{ はそれぞれ変数})$$

で与えている。

次に、先程得られた 3×2 の変数とバックグラウンドの関数(ここでは 1 次直線、エクスポネンシャルを使う場合もある)の 2 変数(初期値は 0 とした)を加えた 8 変数で、ガウシアン 2 つとバックグラウンド関数をあわせて近似する。

誤差を表す χ^2 がほどよく落ち着いたところで近似を終了し、そこで得られた値を測定からの実験値として採用した。

χ^2 という指標があるものの、この作業は人間のアバウトな部分がかかり含まれているのであしからず。

測定、計算された分解能と反射材の表を以下に掲げる。

R(%) \ γ 線(keV)	511	662	1173	1275	1333
テフロンテープ	12.22	10.96	8.40	8.07	8.05
テフロンシート	12.41	11.24	8.61	8.27	8.24
アルミホイル内側	13.12	11.82	9.28	8.78	8.74
アルミホイル外側	13.61	13.04	9.61	9.03	8.94
白紙(コピー用紙)	14.30	12.93	10.25	9.68	9.59
黒画用紙	17.43	16.13	(15.75)	13.15	(9.86)
黒遮光テープ	26.45	24.01	—	22.51	—

※ 黒遮光テープの Co スペクトルは1つになってしまった。(フィット不可)
 黒画用紙の Co もフィットはできたが、変な形(前頁参照)なので分解能は信用できない。

・考察

・エネルギーと分解能の関係

エネルギーと分解能は

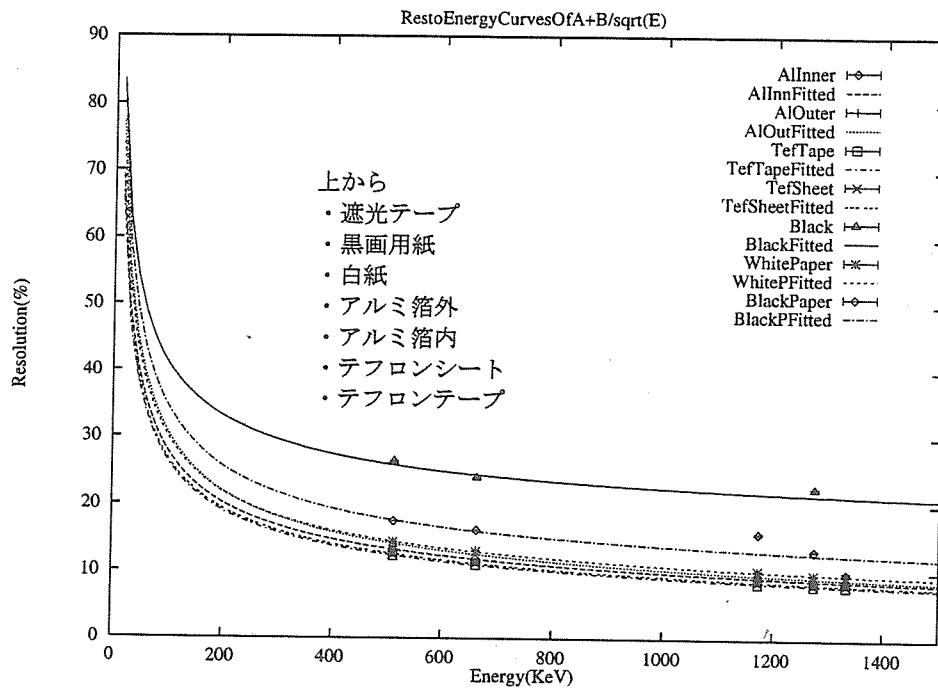
$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{E}}(\%)$$

という関係なので、式 $R=A+B \times \frac{1}{\sqrt{E}}$ (A, B は定数)、または $R=A \times \frac{1}{\sqrt{E}}$ の2式で近似するとよいと考えられる。以下にその近似式とグラフを挙げる。

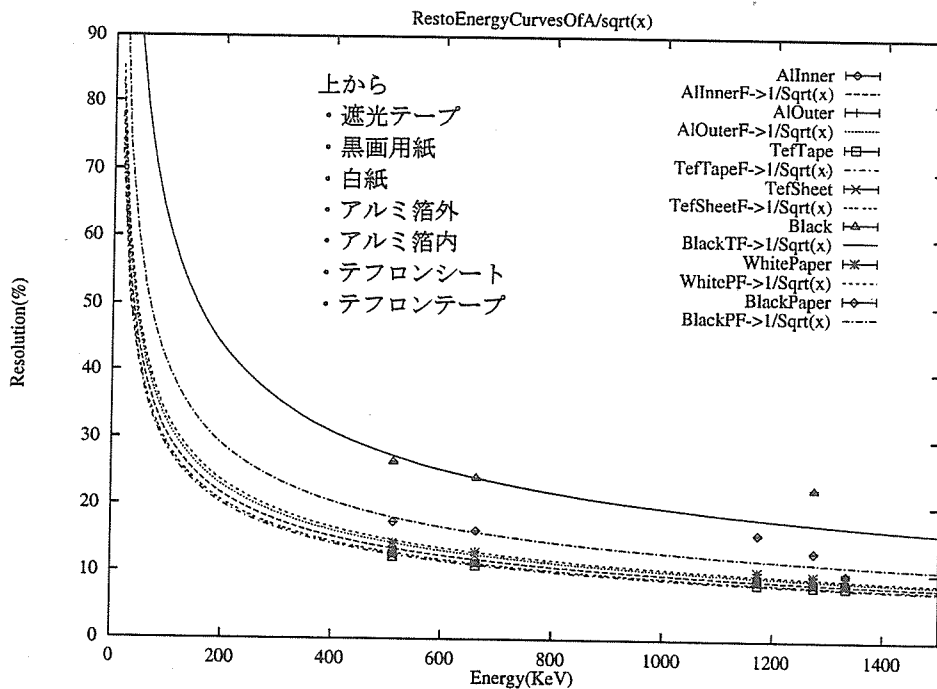
χ^2 の値は、切片を加えた方が小さく近似の精度が良い。

純粹に比較したいとき(誤差を考えずに)は、後者のほうが理解しやすい。

反射材 \ 近似式	$R=A+B \times \frac{1}{\sqrt{E}}$	χ^2	$R=A \times \frac{1}{\sqrt{E}}$	χ^2
テフロン テープ	$1.06(\pm 0.05) + \frac{253.6(\pm 1.54)}{\sqrt{E}}$	60.3	$\frac{283.6(\pm 0.30)}{\sqrt{E}}$	543.3
テフロン シート	$1.18(\pm 0.05) + \frac{256.0(\pm 1.57)}{\sqrt{E}}$	31.9	$\frac{289.5(\pm 0.30)}{\sqrt{E}}$	459.
アルミホイル 内	$1.50(\pm 0.06) + \frac{263.8(\pm 1.74)}{\sqrt{E}}$	32.8	$\frac{304.4(\pm 0.33)}{\sqrt{E}}$	603.3
アルミホイル 外	$0.90(\pm 0.06) + \frac{297.1(\pm 1.82)}{\sqrt{E}}$	891.9	$\frac{322.5(\pm 0.35)}{\sqrt{E}}$	1113.
白紙	$1.92(\pm 0.08) + \frac{281.1(\pm 2.22)}{\sqrt{E}}$	33.2	$\frac{332.0(\pm 0.39)}{\sqrt{E}}$	624.4
黒画用紙	$4.10(\pm 0.14) + \frac{304.5(\pm 3.64)}{\sqrt{E}}$	1973.	$\frac{408.4(\pm 0.61)}{\sqrt{E}}$	2812.
遮光テープ	$13.88(\pm 0.41) + \frac{271.5(\pm 10.16)}{\sqrt{E}}$	157.2	$\frac{617.9(\pm 1.08)}{\sqrt{E}}$	1333.



式 $R = A + B \times \frac{1}{\sqrt{E}}$ による近似



式 $R = A \times \frac{1}{\sqrt{E}}$ による近似

・反射材の違い

黒いものや紙など、反射が鈍くなると考えられる材質の方が分解能が悪くなっている。これは光量が減っていることのとれである。

テフロンシートは、テフロンテープよりも分解能がよいと思われていて、今まで主な実験はシートの方を反射材として用いてきた。しかし、今回の結果をみると、テープの方が若干よいということがわかった。

テフロンシートは表面がつるつるではなく、アルミホイルの裏のような鈍い反射の感じがある。これは乱反射を考慮してのことと思われる。テフロンテープもよく見ると表面はざらついている。また、伸縮するので、ぴったり巻くことができ、空気の影響を減らせたことも分解能に表れていると思われる。シートの方はほとんど伸びないため、空気の追い出しに失敗していたと考えられる。

アルミ箔では、ぎんぎんの表よりも鈍い反射の裏の方が分解能がよくなった。文献によると、一般に乱反射の方が光電面へより一様な光を集めることができるとされている。このために表の全反射よりも裏の乱反射の場合の方が分解能がよくなっているのであろう。ちなみに乱反射は反射材の表面の凸凹が、入射光の波長（ここでは 450nm）に同程度のときか、それより大きいときに起こる。

白紙は、空気の層の存在と、その表面の影響から、今回の実験ではまずまずの分解能が得られた。

表面が黒い反射材は、黒いことにより光は吸収されてしまい、とりあえず光量は減る。さらに、遮光テープは直接貼り付けたため、空気の層がなくなり、そのことが逆に反射できるような光に対しても吸収を増やしたため、分解能が目立って悪くなった。それに比べると画用紙の方は空気の層が存在できており、また表面がざらざらしているので、遮光テープほどの悪化はみられなかった。

結果をみるかぎり、この実験からはテフロンテープが最も良い反射材であると結論できる。

・分解能とパルスハイト

分解能は定義より、光量の統計誤差に関係する。
パルスハイトを光量としたとき、

$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

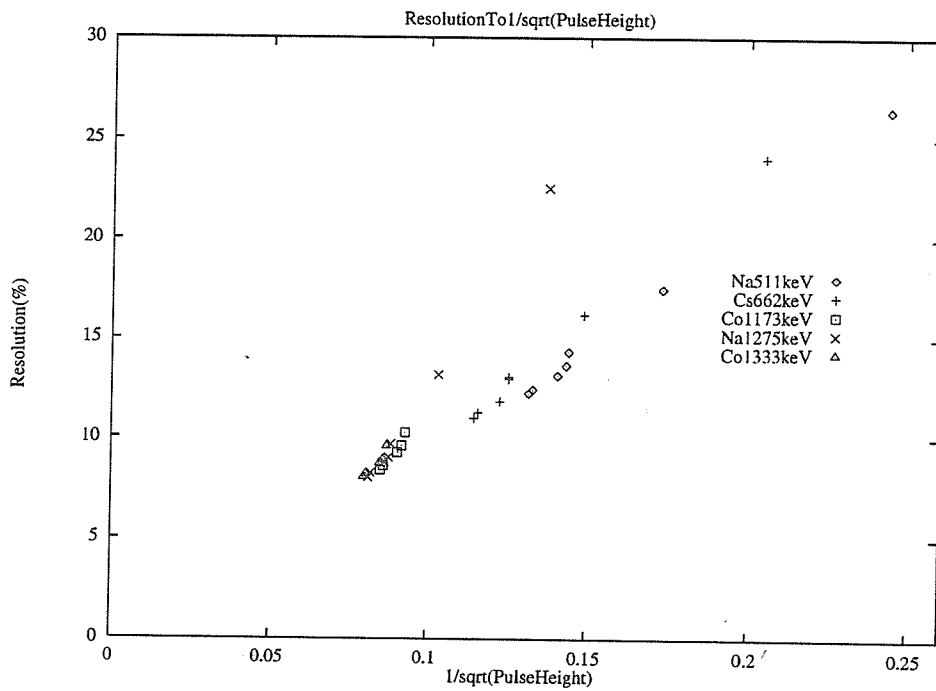
の関係を確かめるために、x軸に $\frac{1}{\sqrt{\text{PulseHeight}}}$ を、y軸に分解能を
プロットしてみた。

データが上の式に従うならば、グラフは一本の直線になるはずである。

エネルギーとパルスハイトの表

Ch 数 \ \gamma 線 (keV)	511	662	1173	1275	1333
テフロンテープ	57.68	76.14	138.00	151.18	157.29
テフロンシート	56.68	74.59	135.22	148.27	154.08
アルミホイル内側	50.61	66.57	122.17	134.10	139.36
アルミホイル外側	48.71	63.70	118.61	130.14	135.45
白紙(コピー用紙)	48.21	63.74	115.81	128.30	132.12
黒画用紙	33.37	45.17	(86.86)	93.64	(99.94)
黒遮光テープ	16.78	23.80	(47.52)	52.99	(55.60)

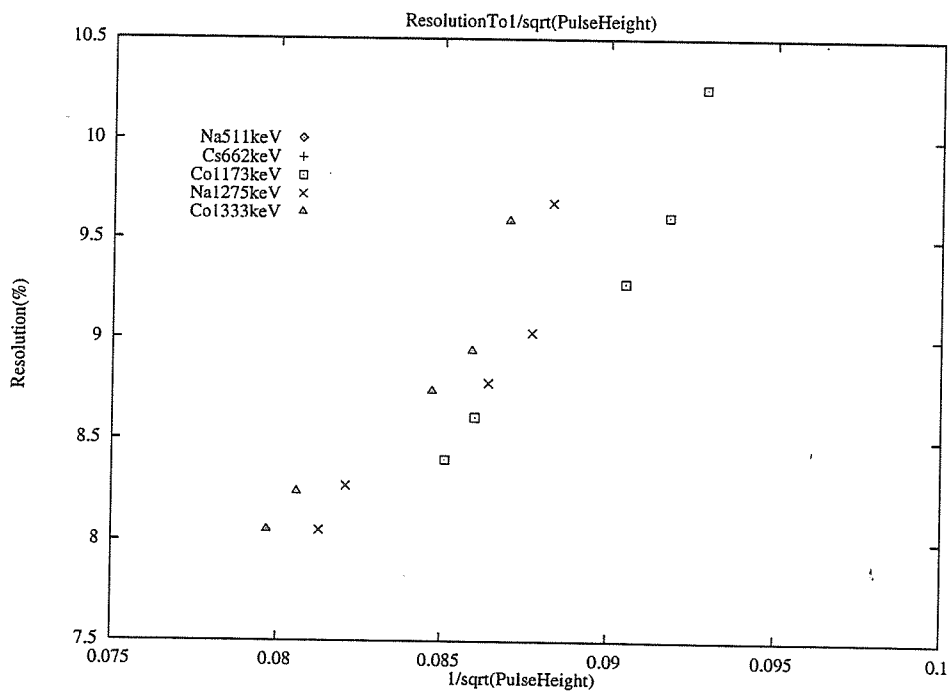
※パルスハイトは計算から得られたピークチャンネルからペダスタルチャンネルを単にひいたもの。



MEMO : 精度をあげるため、黒画用紙のコバルトの2点は省いた。

上図 : エネルギー別のプロット

下図 : 上図の部分拡大図



・光量と分解能

定義の式からは、光量の平方根の逆数が分解能に等しいが、今は光量に比例すると思われるパルスハイトしかわからないので、パルスハイトの平方根の逆数と比例関係にあると考える。

エネルギー別でみると（前頁上図）、直線に並んでいるように見える。

光量が同じなら、分解能も同じはずである。だが、エネルギーがあがると、同じパルスハイトでも分解能が悪くなっている。

この原因はいくつか考えられる。

参考のために次頁にエネルギー別に最小二乗法で求めた近似直線を描いてみた。エネルギーが上がるごとに傾きが大きくなりそれはほぼ線形的に増えている。これはどういうことかと考えると、 $N=A \times \text{PulseHeight}$ として、

$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{A \times \text{PulseHeight}}}$$

という式で、 $\frac{1}{\sqrt{A}}$ が増える、つまりAが小さくなる、電子の増幅率が減るということである。しかし、このようなことは考えられないので（通常光電子増倍管もかかる電圧も安定であるので）、もう一步踏み込んで考えてみる。

ここで気になるのは量子効率である。量子効率は、入射光の波長がながくなると、下がっていく。光のエネルギーが高くと、変換効率が低くなる。しかしこれも、シンチレータの発光波長は、ある波長でピークを持っているということから、今の条件では正しくないといえる。

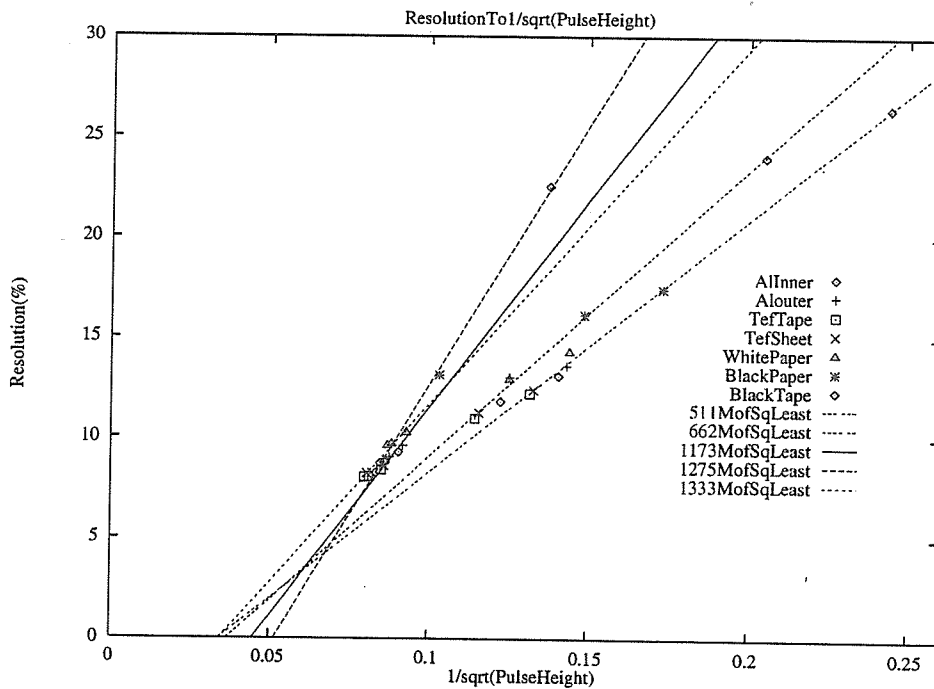
次に、エネルギーに関係すると言い切ると、回路系での影響が考えられる。シェイピングアンプの変換時間が $0.5 \mu \text{sec}$ と GSO の成分と比べると長く、エネルギーが大きいとそれだけ変換時間も長くなるので、信号はだいぶ遅れてしまう。こうなると、ゲイト幅が $1 \mu \text{sec}$ なので、パルスハイトの低い方が同時係数が多くなり、分解能がより悪くなる原因と成り得ると考えた。

最後に挙げる点は較正曲線（p11）をみればわかるが、エネルギーの零点とペDESTALチャンネルが違うということである。ゲイトが広いために、パルスがきていないときのADCの電荷の積分が大きくなってしまっているためと考える。このことを修正するのは、それはパルスハイトを較正してエネルギーに置き換えてしまっているもので、本質的でない。試しにおこなうと、散らばりの巾は確かにせまくなった。

完全な答えは出すことができなかったが、分解能の悪い方をのぞけば、一本の帯状にグラフは乗っているとみることができるので、

$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \left(= \frac{1}{\sqrt{A \times \text{PulseHeight}}} \right)$$

という関係にしたがっているのが、ばらつきはあるものの、確認できた。



反射材別のプロットと前々頁の図からの最小二乗法による近似直線

4. 実験：高エネルギー γ 線の測定

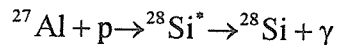
GSO が将来期待されている特徴は、高エネルギーに耐え得る対放射線強度と、高計数率に対応できる蛍光減衰時間の短さである。

工学部施設の高速中性子実験室の Dynamitron をお借りして、共鳴反応からの高エネルギー γ 線を測定し、どの程度の分解能が得られるか実験した。

・ 共鳴からの γ 線

Dynamitron を利用して、水素イオン=陽子を加速し、そのビームをとりだし、アルミニウムの薄い膜にあて、共鳴状態からの遷移による γ 線を測定する。

反応式は、



使用した陽子ビームのエネルギーは 2 種類で、それぞれ 992keV と 2046keV である。

まず、Si の基底状態を相対的にエネルギー 0 とすると、Al に 992keV の陽子ビームをあてると 12540keV の Si の共鳴状態に、2046keV のビームをあてると 13558keV の共鳴状態にそれぞれ移行する。

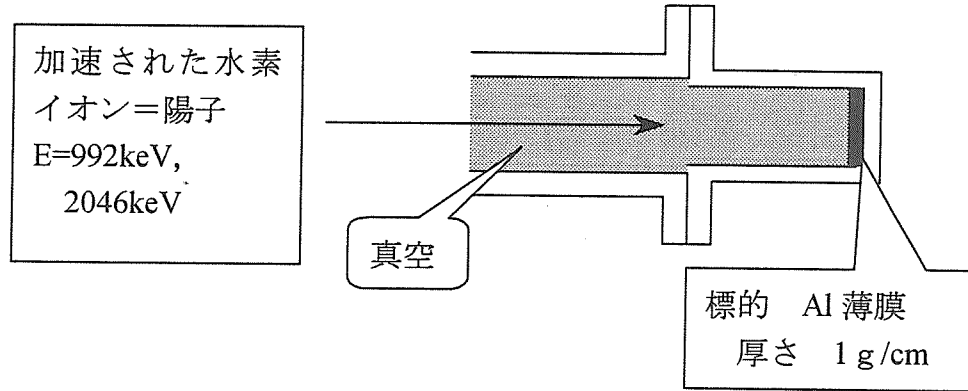
それぞれの状態からの主な γ 線とその相対強度を以下にあげる。相対強度は共鳴状態数を 100 としたときのものである。

対 992keV ビーム		対 2046keV ビーム	
γ 線のエネルギー(MeV)	相対強度	γ 線のエネルギー(MeV)	相対強度
1. 52	3. 26	1. 66	1. 0
1. 78	93. 37	1. 78	100. 4
2. 27	2. 00	2. 06	3. 0
2. 84	4. 02	2. 84	60. 6
3. 05	2. 00	3. 04	1. 0
4. 50	4. 87	3. 14	6. 6
4. 61	5. 00	3. 93	1. 3
4. 74	10. 00	4. 14	5. 4
6. 02	6. 59	4. 24	1. 0
6. 26	2. 00	4. 33	4. 8
7. 92	3. 00	4. 50	5. 5
7. 93	4. 16	4. 61	8. 4
8. 49	1. 16	5. 02	1. 3
9. 49	1. 71	5. 11	33. 3
10. 76	76. 00	6. 70	30. 0
		8. 94	50. 5

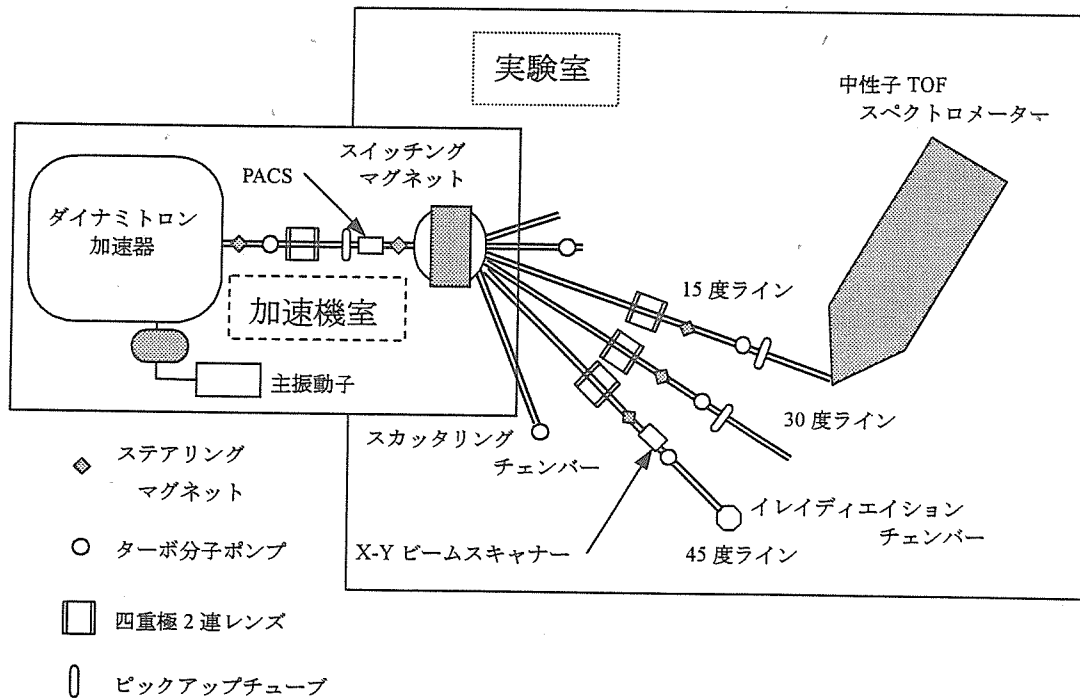
上の相対強度はそれぞれ参考文献[4][5]より

実験系

工学部施設の高速中性子実験室の加速器のビームラインの一本をお借りして実験した。



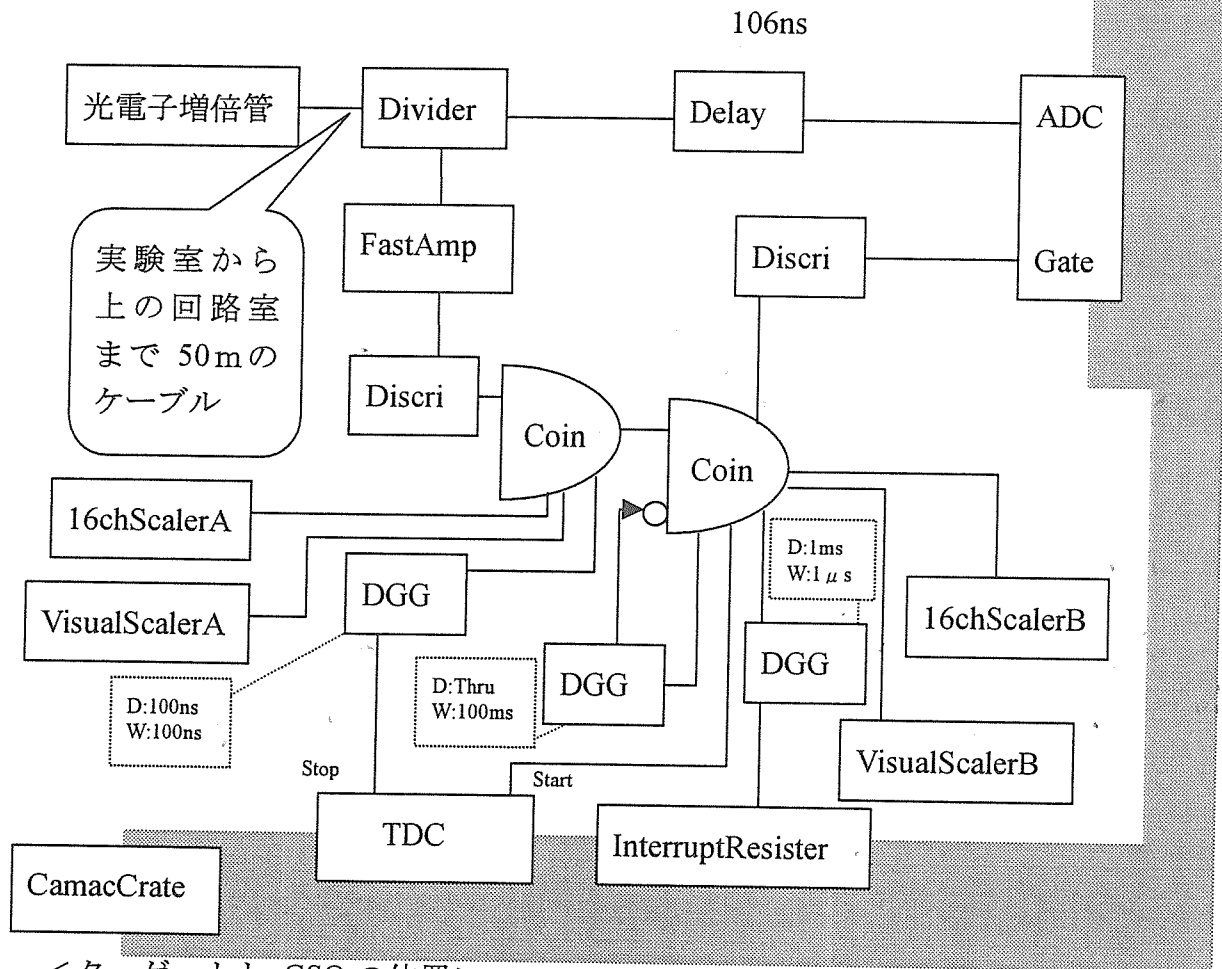
実験室はおおまかに次のようになっている。



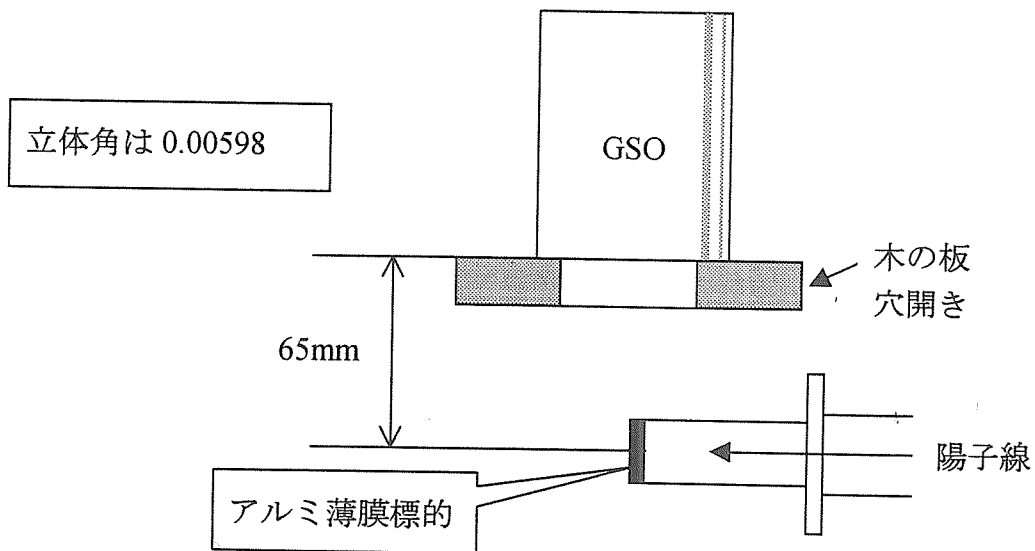
実験室内は放射線管理区域になっている。
また、一応地下の施設である。

使用したターゲットは高速中性子実験室からの借り物である。

・回路系



<ターゲットと GSO の位置>



・その他の実験条件

用いた反射材はテフロンシート。高電圧は 1750V。レートに負けてしまうことが予想されたため、ブースタ(電源とは別に電圧をかけ、光電子増倍管のカレントが増えすぎるのを防ぐ)を装着した。

また、ノイズを減らすための絶縁トランスを電源コードに接続したり、絶縁のためにモジュールや PC の下に薄いテフロンの箔をしいたりした。

実験室の GSO から測定室の回路まで 50m という長いケーブルの途中で、信号が減衰してしまうことを考慮にいれ、ファーストアンプをもちいた。

また、今回利用させてもらったビームラインは 30 度のラインである。

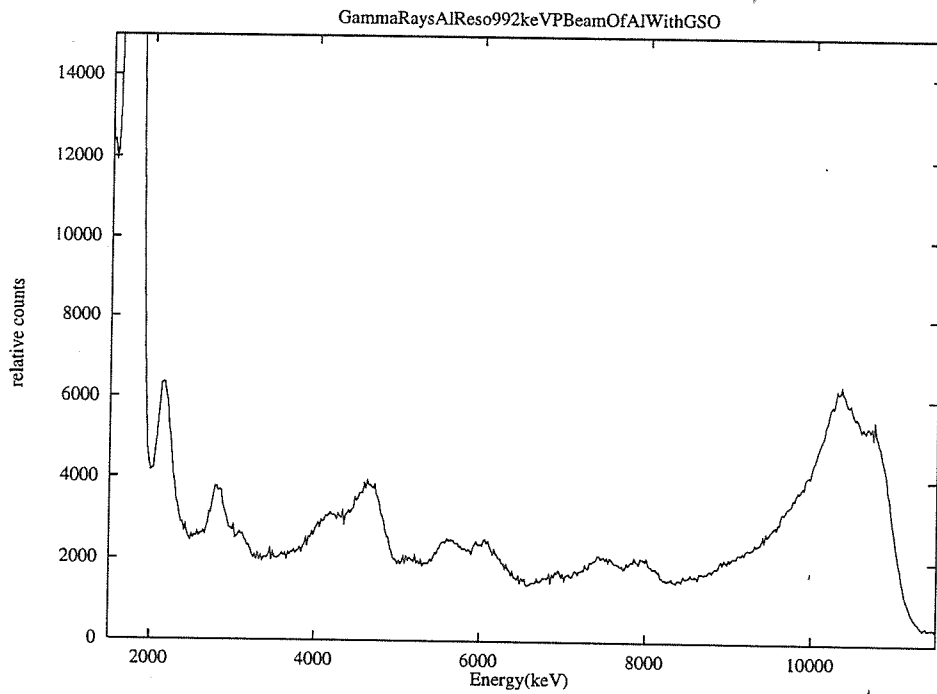
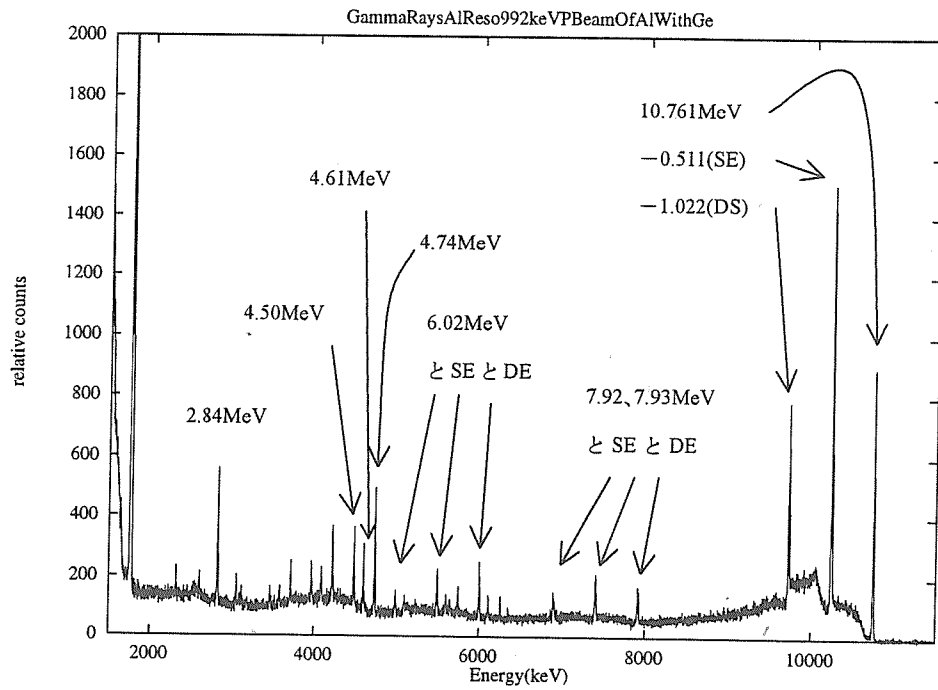
以下に結果として 1MeV 以上の γ 線のスペクトルをビームのエネルギー 992keV、2046keV の順にあげた。

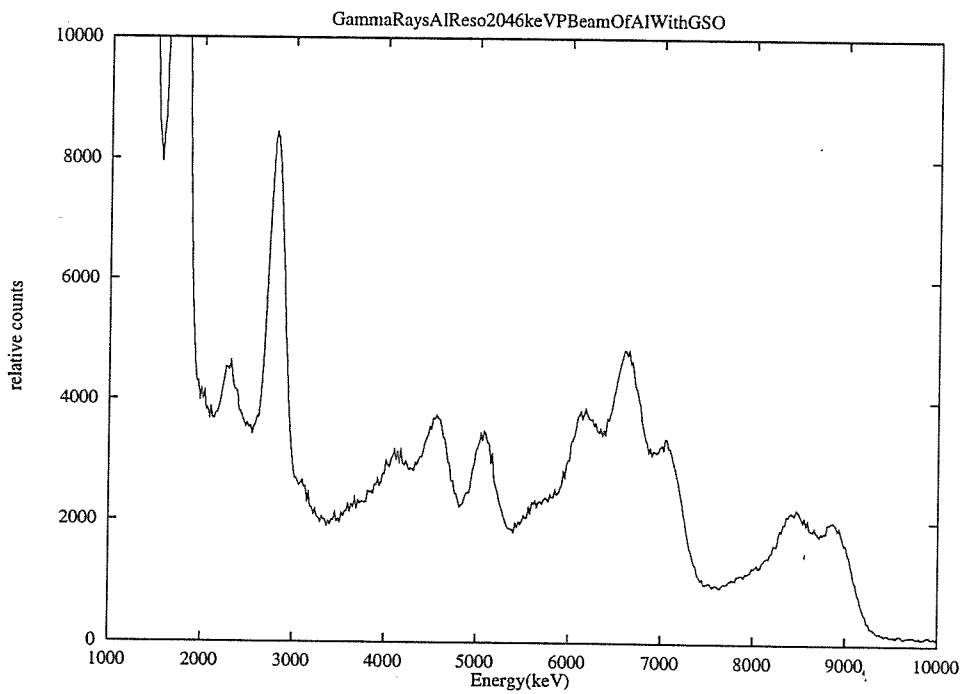
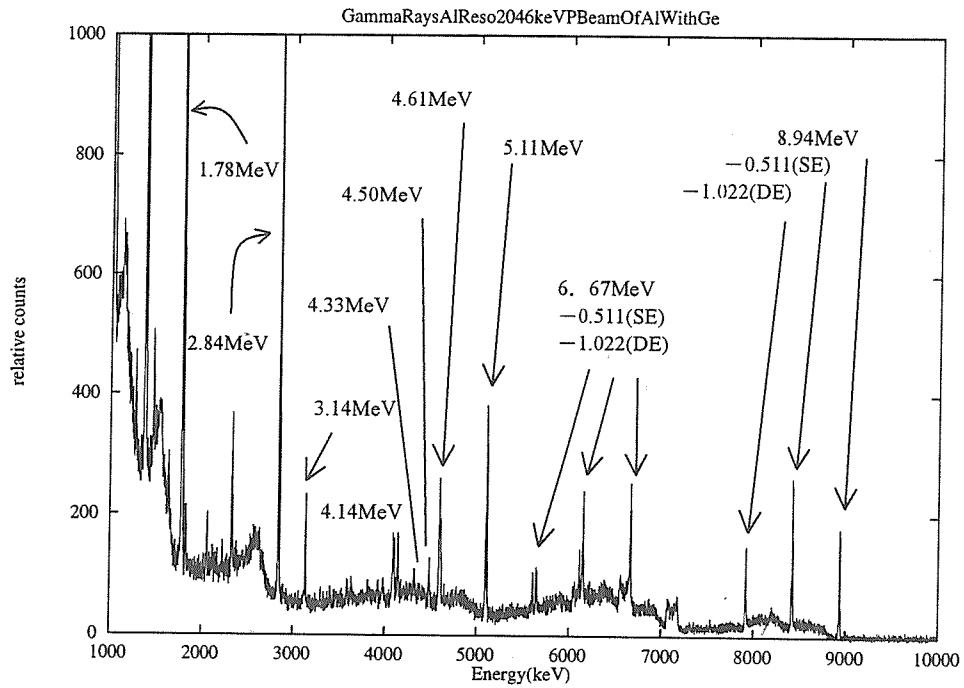
それぞれ上のスペクトルはゲルマニウム半導体検出器のものである。縦軸は相対的なカウント数である。いっしょに主な γ 線のエネルギーを記した。

見比べると、分解能の悪くなっている様子が良く分かる。

GSO では強度の小さいものは埋もれてしまっているが、目立つピークは何とか見分けることができる。

高エネルギーになると、電子対生成の割合が増え、その陽電子が対消滅する際に生成される 2 本 0.511MeV のうち片方の γ 線が結晶内ではつかまえられなくなり、どのスペクトルにも表れているように、シングルエスケープがオリジナルのピークよりもカウント数が増えている。





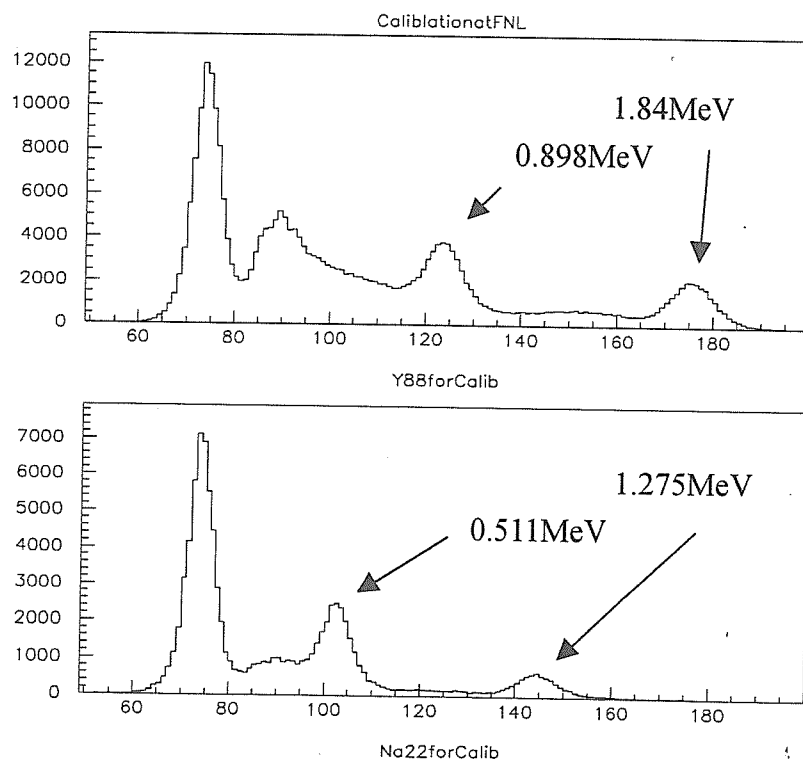
・エネルギー分解能

スペクトルが上のような状態なので、目立つピークに関してのみ分解能の値を考えることができるとする。ちょうど同じ反射材の分解能のデータがあるので（条件はかなり違う）、それとくらべるのも興味深い。

この実験ではまず、ビームのエネルギーを共鳴があるであろうエネルギーの付近で少しずつ変え、なんどもスペクトルを測定し、共鳴を探した。ちなみにビームが出ている間実験室は管理区域として閉鎖され、出入りができない。

まず最初に標準線源による分解能の計算値をあげる。ここで用いた線源は、イットリウム 88 とナトリウム 22 である。

511keV は計算できなかったが、898keV は 16.3%、1275keV は 12.88%、1840keV は 9.68% と出た。



以下計算された分解能をあげる。分解能の計算法などは後で詳述する。

対 992keV 陽子線		対 2046keV 陽子線	
γ 線のエネルギー(MeV)	分解能(%)	γ 線のエネルギー(MeV)	分解能(%)
1. 78	9. 06	1. 78	8. 83
2. 84	6. 22	2. 84	6. 76
6. 02-1. 022	7. 40	4. 14	27. 06
6. 02-0. 511	6. 68	5. 11-0. 511	6. 35
6. 02	7. 91	5. 11	8. 29
7. 92&7. 93-1. 022	7. 59	6. 67-0. 511	9. 36
7. 92&7. 93-0. 511	6. 20	6. 67	5. 22
7. 92&7. 93	6. 60	8. 94-0. 511	3. 68
10. 762-0. 511	3. 66	8. 94	5. 51
10. 762	5. 62		

1.78MeV はカウント数も多いので信用できる。

2.84MeV はスペクトルをみるとわかるが、かなり鋭くなっており、だいぶよい分解能が計算されてしまっている。

中程度のエネルギー領域では、綺麗に別れたものがなく、ガウシアン3つとバックグラウンドといったような複雑な近似をしなければならず、予想もできないような値がでてしまったりしたいるので、あまり信用できない。

(近似方法：参考文献[6])

さて、一番重要である高エネルギーの γ 線であるが、10.761MeV、8.94MeV の場合には特殊な近似関数を用いる。

GSO のスペクトルの形をみると、上にあげた 2 つの高エネルギー γ 線は、較正するとわかるのだが、前にも述べたようにシングルエスケープの方が高いピークとなり、それがオリジナルのコンプトン端と、ダブルエスケープのピークと重なって、結果的に低エネルギー側にテイルをひく形になる。

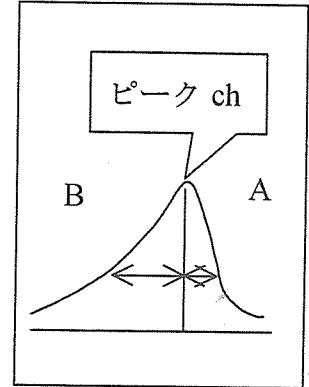
このスペクトルをガウシアンで近似するのは物理的に意味がなくまた困難であるため、シミュレータ GEANT の計算結果からの近似関数を用いて、計算をおこなった。

その関数は以下のように表される。

$$y = NG \quad E \geq E_{\text{peak}} \quad \text{領域 A}$$

$$y = N \left(G + \exp\left(\frac{E - E_{\text{peak}}}{\lambda}\right)(1 - G) \right) \quad E \leq E_{\text{peak}} \quad \text{領域 B}$$

$$G = \exp\left(-\frac{(E - E_{\text{peak}})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{ガウシアン})$$



分解能は σ/E_{peak} で与えられる。

フィッティング方法：N、 E_{peak} 、 σ 、 λ を順々に4つのパラメータに

おいて、フィッティングする。

λ の値は、テイルの部分を変数で近似して、そのスロープの逆数の値を初期値とする。前3つのパラメータの値は高エネルギー側をガウシアンで近似し、それらを初期値として使う。

このようにして4つのパラメータで近似する。

今の場合、分解能が高エネルギーピークが2つになんとか別れるほどよかったので、上の関数の高エネルギー側に、さらにガウシアンを加えた関数で、両陽子線とも近似計算をおこなった。

この結果、両方ともシングルエスケープの方がかなり良くなってしまったが、オリジナルといっしょに考えれば目安になるような値が出ていると言えよう。

・ 検出効率について

なにぶん分解能が悪いので、1.78、2.84、8.94、10.762MeV の γ 線についてだけ考えようと思う。

まず、理論値を計算する。

実験回路の中の4つのスケーラーから、コインシデンスに入ったカウント数とコンピュータが測定したカウント数がわかり、そこから不感時間の補正ができる。

また、別のスケーラーから陽子ビームのビームカレントがわかる。設置条件から立体角は0.0598である。

参考文献[7]による生成される励起状態数の推定の式：

$$(2J+1) \frac{\Gamma_p \Gamma_\gamma}{\Gamma} = \left(\frac{1}{A+1} \right)^2 (2J_p+1)(2J_i+1) \frac{M_p \times E \times \Sigma(E)}{\pi^2 \times \hbar^2} \frac{e}{Q} N^0_\gamma$$

求めたいのは生成される励起状態数： N^0_γ

$$(2J+1) \frac{\Gamma_p \Gamma_\gamma}{\Gamma} = 24.2\text{eV} : 992\text{keV}, 18.9\text{eV} : 2046\text{keV}$$

$$J_p = 1/2 \quad (\text{陽子のスピン}), J_i = 5/2 \quad (\text{アルミニウムのスピン})$$

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2 \quad (\text{陽子質量})$$

$$E = 992\text{keV}, 2046\text{keV} \quad (\text{入射ビームのエネルギー})$$

$$\Sigma(E) = 7.9 \times 10^{-25} \text{ (MeV m}^2) \quad : 992\text{keV} \quad \text{阻止能断面積} \left(\rightarrow \frac{1}{N} \frac{dE}{dx} \right)$$

$$5.0 \times 10^{-25} \text{ (MeV m}^2) \quad : 2046\text{keV}$$

$$Q = 100 \mu \text{ C} \quad (\text{自分で設定する})$$

これらから、電荷 $100 \mu \text{ C}$ あたりの励起状態数は、

7. 3×10^5 992 keV 陽子ビーム
4. 4×10^5 2046keV 陽子ビーム

ここで、測定したビームカレントから全電荷がわかる。ビームカレントの10倍がパルス数であり、1パルスは 10^{-8} C である。

その他の測定条件

	対 992keV 陽子ビーム	対 2046keV 陽子ビーム
測定時間	1996 秒	2937 秒
ビームカレント	668475	856880
SingleRate (CamacScaler)	84127477	164961204
Accept (CamacScaler)	4669252	8136157
立体角	0. 0598	
不感時間補正	18. 02	20. 28

相対強度とさきの理論値と立体角とビームカレントをかけて結晶に入射する γ 線数を計算する。

対 992keV 陽子ビーム		対 2046keV 陽子ビーム	
エネルギー	理論線数	エネルギー	理論線数
1.78MeV	27324218	1.78MeV	22636411
2.84	1172501	2.84	13663013
10.762	22178022	8.94	11385844

今度はスペクトルを積分し、実際のピークのカウント数を出してみる。PAW++で手動でかつ目分量で積分した。低い2つはバックグラウンドをひいたガウシアンを、高い2つはオリジナルのピークのガウシアンだけを積分した。

対 992keV 陽子ビーム		対 2046keV 陽子ビーム	
エネルギー	積分値	エネルギー	積分値
1.78MeV	390100	1.78MeV	148100
2.84	12230	2.84	62600
10.762(エスケープ除く)	61500	8.94(エスケープ除く)	28840

次は実際に検出された数である。上の積分値に不感時間補正をかけると検出された数に等しくなる。

対 992keV 陽子ビーム		対 2046keV 陽子ビーム	
エネルギー	検出数	エネルギー	検出数
1.78MeV	7029602	1.78MeV	3003468
2.84	220384	2.84	1269528
10.762	1108230	8.94	584875

検出効率を求めると、

対 992keV 陽子ビーム		対 2046keV 陽子ビーム	
エネルギー	検出効率(%)	エネルギー	検出効率(%)
1.78MeV	25. 73	1.78MeV	13. 16
2.84	18. 83	2.84	9. 29
10.762	5. 00	8.94	5. 13

大雑把な値だが、エネルギーとともに光電ピークの検出効率は下がっていくことが結果としてえられた。

2種のビームでの検出効率の違いだが、2046keV ビームの方が約半分になってしまっている。γ線のエネルギーとの関係においては、どちらもあっているように見える。スペクトルの積分が間違っていないとすると、参考文献が古いことによる2046keVの方の理論の違いだろうか。原因はわからなかった。

しかし、いっしょに実験を行っていた別な直方体(50mm×50mm×135mm)のGSOの検出効率と比べると、こちらのGSOの検出効率はだいぶ低い。参考までに、直方体の方では1.78MeVで41.2%、2.84MeVで35.4%、10.762MeVで15.7%である。この値はGEANTによるシミュレーションにだいぶ近いと報告されている。(参考文献[8])

検出効率が低くなっている理由を考えてみる。

最初に結晶の長さについて考えた。γ線のエネルギーが高いので、通り抜けてしまう割合も増えるだろう。

次に放射線減衰係数について考えた。ただ、GSOに関する図はないので、ちょっと質量数の大きい鉛を参考に考えると、2MeV付近で極小になっており、そこからは増えている。GSOは鉛よりも軽いので、極小がもう少し高エネルギー側にくると予想される。すると、10MeVではもう少し検出効率が高い方が自然と考えられる。

・結

この円柱の GSO は直方体の GSO のように将来的に 9 つ束ねて利用するということはないが、贅沢をいわせてもらえばぜひコンプトンサプレッサーを装備して、どの程度まで分解能が上がるかみてみたい。

また、検出効率は厳密な裏付けがなくなってしまう、あまり信用できない結果となってしまった。

5. 最後に

GSO というシンチレータは、近年開発された新しい素材である。しかも今回用いたような大型の結晶は珍しいという話を聞いた。

そんな素材に触れられて、貴重な経験になったと思う。

GSO に関してはまだ未知な部分が多いので、これからの研究でそれが解き明かされていくことをのぞみたい。

今回の実験では、高エネルギー γ 線に対してだいぶあいまいな点があるものの、10MeV で5%近い分解能が得られたので、まずまずの成功といえるだろう。

また、反射材の実験結果は、これからの研究になにか役立ててもらえれば、と思う。

最後に、お世話になった方々にお礼の言葉を述べたいと思います。

このような貴重な機会をあたえていただき、適切にご指導くださった原子核物理研究室の橋本治教授をはじめとして、適確に助言をしてくださった田村裕和助教授、高橋俊行助手にお礼申し上げます。

高速中性子実験室では松山成男教官にお世話になりました。

また、いろいろな方面で助けてくださった田中英二助教授、加藤守男技官、院生の西田淳氏、秘書の川村直子さんにお礼申し上げます。

そして、GSO 研究の先駆者であり、大変迷惑をかけ、そして大変お世話になった越野一博氏には、本当に感謝しています。ほんとうにありがとうございました。

1 年間ともにすごし、時には議論をかわし、時には鋭い突っ込みをくれ、時にはわかりやすく講釈してくれ、時には酒を酌み交わした 4 年生の皆様には本当にお世話になりっぱなしでした。こころからありがとう、といたい。

参考文献

- [1] 日立化成テクニカルレポート No.8(1987-1)
- [2] 日立化成テクニカルレポート No.16(1991-1)
- [3] 橋本治教授、大型 GSO シンチレータの開発のレポート 1996. 2
- [4] P.M.ENDT et.al NuclearPhysics A521(1990)257
- [5] NuclearInstruments&Methods 140 (1977) 519-527
- [6] 越野氏による GEANT シミュレーション結果
- [7] P.B.LYONS et al NuclearPhysics A130(1969)13
- [8] 越野氏修士論文