

特別実験レポート

天野智仁

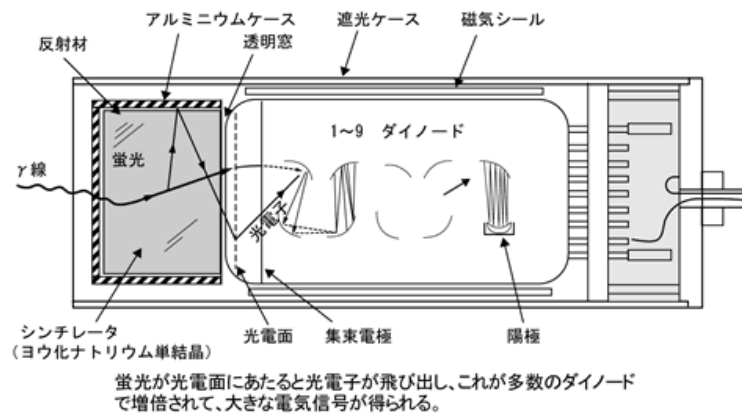
目 次

1	実験の目的	3
1.1	γ 線検出の基礎	3
1.2	GAGG	4
1.3	実験の目的	5
2	予備実験とその結果	5
2.1	結晶と PMT	6
2.2	DAQ のセットアップ	6
2.3	線源と検出器	7
2.4	GAGG 結晶からの信号	7
2.5	電圧の依存性	8
2.6	実験についてのいくつかの指摘と考察	8
3	10MeV の γ 線の検出実験	10
3.1	実験の基本設計	10
3.2	加速器について	11
3.3	ターゲットおよび検出器の配置	11
3.4	データ取得のセットアップ	12
3.5	実験のタイムライン	12
3.6	実験データ	13
3.7	解析	13
3.8	今後の展望	13

1 実験の目的

1.1 γ 線検出の基礎

まずは Γ 線検出の基礎的な知識について概説する。ガンマ線検出器はシンチレータ検出器と半導体検出器に大別される。今回の実験で用いられるのはシンチレータ検出器と呼ばれるもので、これはシンチレータと呼ばれる結晶部分と、信号を増幅する光電子増倍管（以下PMT）によって構成される。外部からやってきたガンマ線はシンチレータに入射するとシンチレータ結晶と相互作用し、一旦電子に変換される。この電子がシンチレータ中を移動するときに次々と周囲の原子を励起し、これらの原子から発生する光（蛍光）が光電子増倍管に入射する。このとき発生する光の波長は結晶に依存し、従ってそれぞれの結晶にあったPMTを用いる必要がある。光電子増倍管に入射した光は光電面と呼ばれる部分で光電効果により電子に変換され、この電子が電圧により加速されながら次々と電極に衝突することで二次電子を放出し、増幅されて電流として取り出される。このようにしてガンマ線を測定しやすい電流に変換することができる。



【出典】日本原子力研究所 国際原子力総合技術センター：原子力基礎用語集（1977年）、p54

図 1: シンチレータ検出器の仕組み

より具体的にこの過程について調べよう。はじめにガンマ線とシンチレータ結晶が相互作用するのは、コンプトン効果、光電効果、電子対生成による。コンプトン効果はガンマ線と電子の弾性散乱であり、電子のエネルギーはその散乱角度 θ によって

$$E = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{mc^2}{E_\gamma(1-\cos\theta)}}$$

と表すことができる。この式からわかるようにコンプトン散乱は最大エネルギーを $2E_\gamma^2/(2E_\gamma + mc^2)$ とする連続スペクトルを作るが、ガンマ線検出ではすぐ後に述べる光電効果、電子対生成の作る光電ピークと呼ばれるピークが大切であり、コンプトン散乱はあまり重要ではない。

光電効果はガンマ線が原子に入射すると電子が放出する現象のことである。これにより放出される電子のエネルギーは、仕事関数 W として

$$E = \hbar\omega - W$$

で与えられる。電子が放出された原子は電子の再配列に伴って残りの W のエネルギーを放出し、結局全てのエネルギーが検出器に与えられることになる。このようにしてできるピークを光電ピー

クといい、入射ガンマ線の全エネルギーに対応していることからスペクトル解析では非常に大切なピークである。光電効果の断面積は原子の Z^5 に比例するため、検出器の Z が大きければより多くの光電効果を起こすことになり、検出器として優れているといえることができる。

最後に電子対生成は、ガンマ線が電子と陽電子を作る反応のことであり、これは γ 線のエネルギーが二つの粒子の静止エネルギーの和 1.022MeV 以上の時に発生する、つまり高エネルギーガンマ線の検出時に大切な反応である。生成した陽電子は原子内の他の電子と対消滅することで再び二本のガンマ線となる。この二本のガンマ線がいずれも検出器内で反応すれば、全エネルギーは γ 線のエネルギーに等しく、光電ピークに一致する。しかしながら一本の γ 線のみが反応すれば全エネルギーより 0.51MeV だけ低いエネルギーになる。これをシングルエスケープピークという。二本とも検出器外へ逃げてしまえば全エネルギーより 1.02MeV だけ低いエネルギーとなり、これをダブルエスケープピークという。

これら三つの相互作用の断面積の大きさを比較するため、例として NaI の断面積の大きさを示したものが図 2 である。表からわかるように低エネルギーではコンプトン散乱が支配的であるが、高エネルギーでは光電効果と電子対生成が重要である。

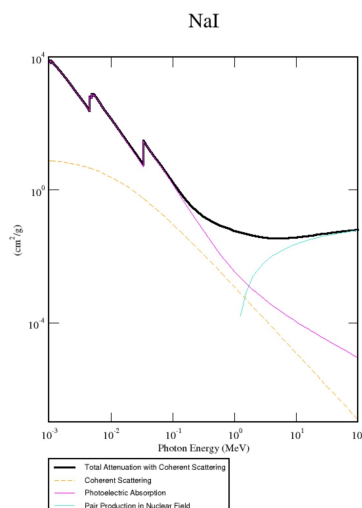


図 2: NaI の反応断面積

1.2 GAGG

今回の実験で用いるのはセシウム添加 $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ という結晶で通称 GAGG と呼ばれる。GAGG は現在理化学研究所で γ 線検出器として用いられている DALI と呼ばれる NaI シンチレータと PMT の組み合わせの後継候補として研究されている結晶で、その最大の利点は結晶の Z が大きいので光電効果や電子対生成の反応断面積が大きく結果として efficiency が良いことである。したがって GAGG は時間の限られた実験や元々の反応断面積が非常に小さい実験に適した結晶であると言える。もう一つの利点は GAGG は NaI と違い潮解性がないことである。DALI はその潮解性により周囲を密閉する必要があるが、多数の DALI を用いて立体角を稼ごうとした時に密閉分だけ不利である。

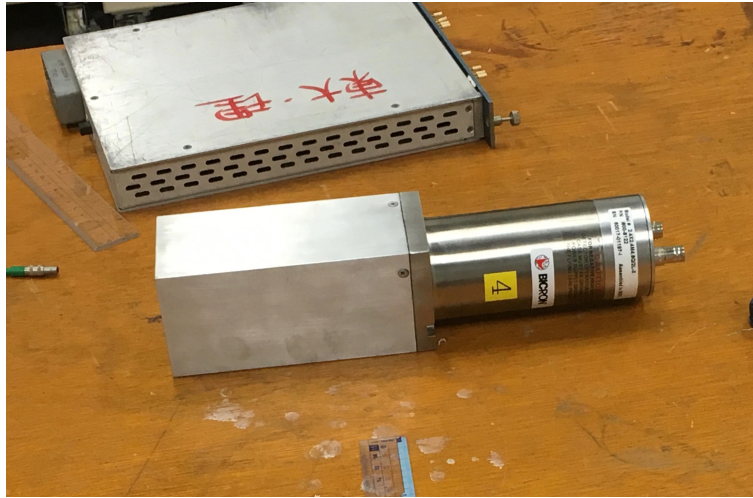


図 3: DALI hongkong

1.3 実験の目的

本実験の目的は、高エネルギーガンマ線に対する GAGG の応答を調べることである。Linearity, Resolution, Efficiency, Timing resolution などが主な解析対象である。特に今回の実験では新しく世界最大級の $10 \times 3.5 \times 3.5[\text{cm}^3]$ の GAGG を用意しており、この GAGG の特性について詳しく調べることを意図している。

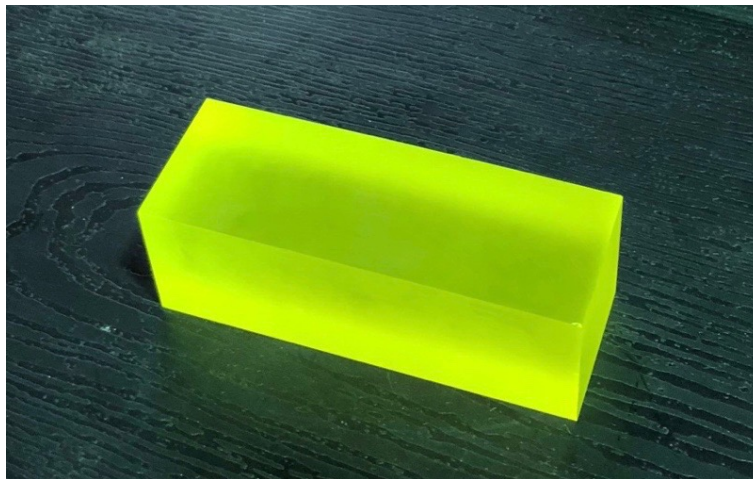


図 4: 世界最大級の GAGG 結晶

2 予備実験とその結果

まずは本郷の 319 号室で行われた予備実験について、はじめの数章で実験全体を通して用いられたセットアップについてのべる。その後 GAGG の性能をテストする複数の実験についてまとめる。

2.1 結晶と PMT

予備実験で用いた結晶と PMT について解説する．結晶としては本実験用に用意された $10 \times 3.5 \times 3.5[\text{cm}^3]$ の GAGG 結晶を用いた．

PMT は三種類用いた．これら三種類の PMT はそのまま本実験でも用いられたものであるが，このうち一つは円柱型，残りの二つは立方体型で形が異なっており PMT と結晶の結合に当たっては別々の方法を取る必要があった．GAGG の蛍光波長は 520nm と NaI の 420nm に比較して長め

PMT 型番	形状	極性

であり，GREEN EXTENDED PMT はこの長波長に適した PMT である．その様子を示したのが図 5 で，GREEN EXTENDED はより長波長側にピークを持っていることがわかる．

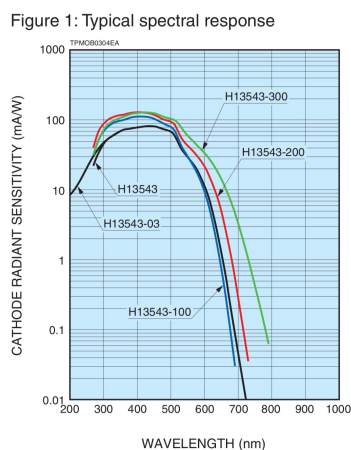


図 5: 各種 PMT の波長依存性

結晶は反射材としてテフロンテープまたは ESR によって巻かれる．その様子は図 6 に示されている．

PMT と結晶の結合は（グリース）によって行われた．グリースは光をよく透過させるため，なるべく PMT および結晶と近い屈折率をもつ方がよい．PMT と結晶の結合は実験中もっともバラツキの出る要素の一つであり，この工程をいかに完璧に実行するかというのが大切である．さらにグリースによって結合された PMT と結晶は，遮光テープを巻いたアクリルケースに入れられることで遮光された．この様子は図 7 に示されている．本実験ではより本格的な PMT ケースが用意され，このケースは利用されなかった．

2.2 DAQ のセットアップ

本郷での実験で用いられた DAQ は QDC と呼ばれる手法で，信号を実験は図 8 のようなセットアップで行われた．用いられたモジュールは表にまとめられている．



図 6: 反射材としてテフロンを巻かれた GAGG

モジュール	型番
高電圧供給	
Discriminator	
QDC	

この回路は PMT の出力信号とその出力信号をトリガーとする Gate からなっており、Gate 信号ではノイズ信号で Gate を開かないようにあらかじめ Discriminator でノイズをカットしている。実験を通して変えられるパラメータは、PMT にかける電圧、ノイズ信号を除去するためのスレッショルド値、積分時間を指定する、および信号の遅らせ具合を指定する Delay time である。このうちスレッショルド値は余程エネルギーの低いガンマ線を測ろうとしない限りほとんど測定結果に影響しない（本実験では、NaI の 0.511MeV のピークがノイズに埋もれてしまうケースが稀に発生した。）。また、Delay time も本質的ではないので、実質的には電圧と積分時間のみが重要である。積分時間は長くともそれだけ信号の減衰を結果に反映させることができるが、同時にノイズの増加や次の信号が来た時にそれを測定できないなどの問題が生じる。電圧については後述するように、PMT によって適正な電圧が存在し、その電圧に設定することが実験を成功させるために必要である。

2.3 線源と検出器

γ 線源としては以下の表 2 に示すものを用いた。

線源は検出器から一定の長さのところに設置される。これは特筆することがなければ本実験では 10cm として実験を行った。

2.4 GAGG 結晶からの信号

まずは GAGG と PMT の組み合わせで得られる生信号をいくつか（これは厳しいかもな,,,）



図 7: アクリルケースに収められた GAGG 結晶

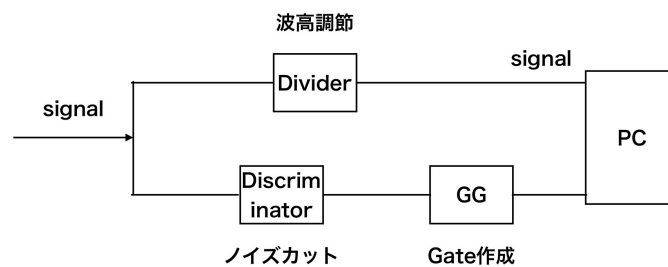


図 8: QDC 回路

2.5 電圧の依存性

色々な PMT との組み合わせで電圧の値を変え、Resolution を測定する実験を行った。実験を通して

2.6 実験についてのいくつかの指摘と考察

予備実験を行っている間に気が付いたことについていくつか箇条書き形式で指摘しておく。

線源名		
Cs		
Co		
Na		

表 1: 実験で用いた線源一覧

- 小型の PMT を用いる場合 GAGG 結晶の方が PMT よりも大きいため、GAGG と PMT の接続面の光漏れをどう阻止するかが重要である。今回は反射材を貼り付けることで対処したが、この反射材がグリースで乱れてしまうことが多く、対策を講じるべきである。
- PMT は電圧をかけ始めてから安定した動作を見せるまでに 30 分程度かかり、電圧をかけ始めてすぐに測定をすると望ましい結果が得られないことがある。しかし今回の理化学研究所で行われた実験では、PMT と GAGG の組み合わせを変えて実験する必要があったため（後述）あまり良くないとわかっていながらも電圧をかけてすぐ測定を行った。
- GAGG は DALI に比較して非常に信号の波高が高く、今回用いた QCD で測るためには波高を小さくする必要があった。これはより高いエネルギーを測る本実験でより顕著であり、波高を小さくするために用いた Divider は（Attenuator に比べれば大分ましなものの）Resolution の悪化に貢献していると考えられる。

3 10MeV の γ 線の検出実験

3.1 実験の基本設計

本実験のメインテーマである高エネルギーのガンマ線検出にあたり、まずは高エネルギーのガンマ線を人為的に作る必要がある。そこで $\text{Al}(p,\gamma)\text{Si}$ の 992keV の反応を用いた。これはアルミニウムに高エネルギーのプロトンビームを入射すると Si の励起状態が出来、そこからよりエネルギーの低い状態になる時に Si からガンマ線が放出される過程であり、そのエネルギーについては下の図 9 にまとめられているが、この左端にある反応が 11MeV の γ 線を放出する反応で、今回の実験で主に観測されるものである。

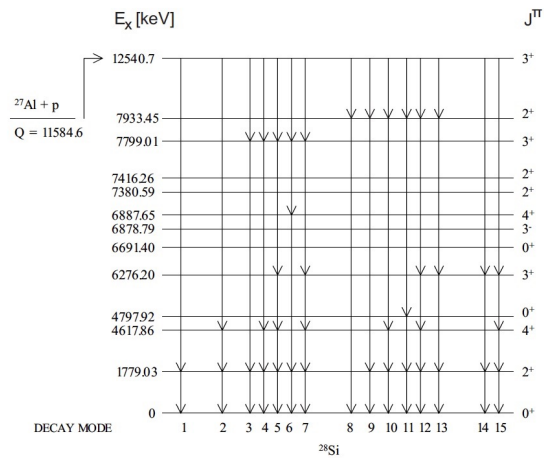


Fig. 2. Decay modes of the 992 keV resonance

図 9: 992keV の遷移の様子

この反応は今までによく研究がなされており、Ge 検出器で測ったスペクトルは図 10 のようになる。従って GAGG 検出器で得られたスペクトルとこれらのスペクトルを比較することにより、各

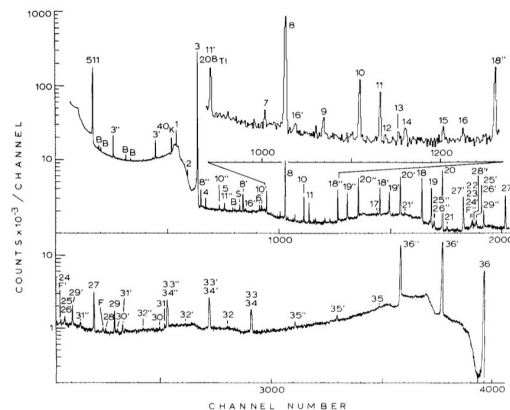


Fig. 1. Gamma-ray spectrum of the $E_x = 992$ keV resonance in the $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reaction taken at the distance of 6 cm and at $\theta = 55^\circ$. The prime and double-prime refer to the single-escape and double-escape peaks, respectively. B means background peak, S the sum peak of the 1779 keV and 511 keV γ -rays and F illustrates $E_x = 6129$ keV energy due to the $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$ reaction. The insert illustrates in more detail the intensity of the weak transitions.

図 10: Ge 検出器で得られたスペクトル

スペクトルを同定することが期待される。

3.2 加速器について

今回の実験では理化学研究所ペレトロン室にある静電加速器が用いられた。この加速器は 3MeV まで粒子を加速することができ本実験に適している。また加速器の仕組みは図 11 に示されている。イオン源から放出された負イオンはまず一段階目の静電場で加速された後、荷電ストリッパガスとの衝突によって電子を奪われ正に帯電され、さらに二段階目の静電場で加速される。このようにすることで一段階で加速するよりも低い電場で加速することができ効率的である。本実験では 992keV の共鳴を用いるため、1MeV のプロトンビームを用いられた。

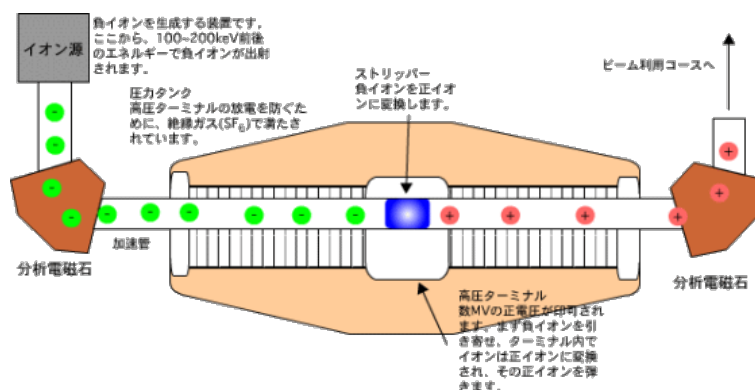


図 11: ペレトロン加速器の原理

3.3 ターゲットおよび検出器の配置

ターゲットはプラスチックでできたターゲットホルダーに固定された mm のアルミニウム箔であり、この厚さのターゲットはベーテブロッホの公式

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = D \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left(\log \left[\frac{2mc^2\beta^2}{I(1-\beta^2)} \right] - \beta^2 \right)$$

に従って、1MeV のプロトンビームのエネルギーを

a

だけ減少させると期待される。アルミニウム箔に繋がれた導線からプロトンビームの電流を測ることができるようにになっている。このターゲットホルダーがビームライン上の真空管に設置される。

今回用いた検出器は DALI hongkong が 9 台、GAGG 結晶が 4 つ、PMT が 4 つであり、DALI は常に同じ配置で固定され、GAGG はいくつかの PMT との組み合わせで測定された。4 つの GAGG および 4 つの PMT については表にまとめられている。

これら検出器はビームラインを取り巻くように図のように設置された。予備実験と同じく、検出器とターゲットの距離がおおよそ 10cm になるように設置されている。



図 12: 検出器の配置の様子

3.4 データ取得のセットアップ

本実験での DAQ には二種類の回路が用いられた．まず一つは予備実験でも用いられた QCD であり，予備実験で用いた図を複数チャンネル用に拡張したものでその様子は図 13 に示されている．これは GAGG の測定に用いられた．

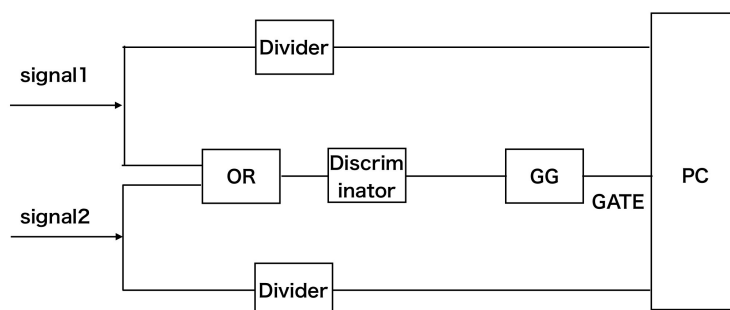


図 13: QDC 回路

もう一つは ADC と呼ばれるもので，これは QDC と異なり自動で信号を積分することができる．回路の概要は下図に示されており，使われたモジュールは表にまとめられている．

この回路には

3.5 実験のタイムライン

本実験は二日間に渡って行われた．実験は以下の表 2 および表 3 の通り実行されデータが取られた．ただし A, B, C, D は前述の 4 つの GAGG 結晶を，normal などは PMT を表す．

回数	A	B	C	D	プリアンプの有無
1	normal	RT	GN	Bialcali	なし
2	GN	Bialcali	normal	RT	なし
3	RN	Bialcali	なし	normal	なし
4	RN	Bialcali	なし	normal	Aのみあり
5	RN	Bialcali	なし	normal	Aのみあり

表 2: ADC による測定

回数	A	D
1	normal	RN
2	RN	normal

表 3: QDC による測定

3.6 実験データ

3.7 解析

3.8 今後の展望