

1 序論

1-1 γ 線について

γ 線は、原子核の崩壊などによって放出される高エネルギー・短波長の電磁波である。ただ、一口に高エネルギーといってもおおよそ 511keV のものから、 50TeV を越えるものまで様々なものがあり、非常に幅広い領域の電磁波を γ 線と呼んでいる。

そんな γ 線の観測は、物理現象を知る上で非常に重要な手がかりとなりうる。例えば、ある天体から飛来する γ 線を観測することで、間接的にその天体の情報を得ることが可能である。 γ 線の計測によって、宇宙の高エネルギー現象について知ることができる。

1-2 実験の目的

今回の実験では、NaIシンチレータを用いて ^{137}Cs と未知線源の γ 線のエネルギーを測定し、未知線源が何であるか、その特定を目指す。また、 ^{137}Cs を用いていくつかの物質の吸収係数を測定し、その物理的性質を理解する。

2 基礎的物理事項

今回の実験を行う上で基礎となる事項を簡潔にまとめておく

2-1 ^{137}Cs

^{137}Cs は、放射性同位元素であり、原子炉内での ^{235}U 分裂による生成物から分離して得られる。半減期30年で β 崩壊を起こし、準安定形である $^{137\text{m}}\text{Ba}$ となり、その後2.6分で 662keV の γ 線を放出して ^{137}Ba の安定形となる。

今回はこの ^{137}Cs を、エネルギー校正用の既知線源として使用する。

2-2 γ 線と物質との相互作用

今回の実験の内容や測定原理を理解する上で必要な物理知識のうち、最も重要と思われる γ 線と物質との相互作用についてまとめておく。

γ 線が物質に入射した際、次の3つの相互作用が起こりうる。どの相互作用がどの程度起こるかは、入射する物質と γ 線のエネルギーによって決まる。

2-2-1 光電効果

光子が束縛された電子と相互作用し、消滅。光電子が叩き出され、不安定化した原子が安

定化する際に特性X線（またはオージェ電子、以下略）が放出される相互作用。

$$T_e = h\nu - E_b$$

たたき出される光電子のエネルギー T_e は、光子のエネルギー $h\nu$ から束縛エネルギー E_b を引いたものになる。

ただ、実際シンシレータ（詳細な解説は3-1節）で測定する際は、特性X線は束縛エネルギー分のエネルギーを持つため、光電子と特性X線が検出器の中で吸収されれば、ほぼ光子の全エネルギーが測定されたこととなる。

光電効果は、光子エネルギーが束縛エネルギーに一致したときに最も起こりやすく、それよりエネルギーが高く（波長が短く）なると急激に減少する（ $\propto (h\nu)^{-3}$ ）

また、原子番号による違いは非常に大きく、 Z^5 に比例する。

2-2-2 コンプトン効果

自由電子や弱い束縛を受けた電子は光電吸収こそ不可能であるが、散乱は起こりうる。

散乱が起こった場合、光子はエネルギーを電子に与えることでその一部を失い、進行方向を変える。電子はその弱い束縛から解放され、運動を始める。

散乱光子のエネルギー($h\nu'$)と散乱角(θ_r)との関係は、入射 γ 線のエネルギーを $h\nu$ 、電子の質量を m_e とし、電子の束縛エネルギーを無視すると、エネルギーと運動量の保存から

$$h\nu' = \frac{m_e c^2}{\frac{m_e c^2}{h\nu} + (1 - \cos\theta_r)}$$

となる。（ $m_e c^2$ は電子質量エネルギーと呼ばれ、 $\approx 0.511\text{MeV}$ である。）

つまり、反跳電子は、

$$T_e(\theta_r) = h\nu \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta_r)} \right)$$

のエネルギーを得る。即ち、散乱された角度 θ によって電子のエネルギーは連続的に変化し、その最大値は、

$$T_{e(\max)} = T_e(\theta_r = \pi) = h\nu \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2h\nu}{m_e c^2}} \right)$$

といえる。

この反応は、電子の数に依存するため、原子番号 Z に比例する。

2-2-3 電子対生成

原子核の近くで光子が消滅し、電子と陽電子が生成される反応。

光子のエネルギーを $h\nu$ 、陽電子・電子の運動エネルギーをそれぞれ T_e^- 、 T_e^+ とすると、

$$h\nu = T_e^+ + T_e^- + 2m_e c^2$$

の関係が成り立つ。

この反応が起こるには γ 線のエネルギーが電子質量エネルギーの二倍 (1.022MeV) を越える必要がある。

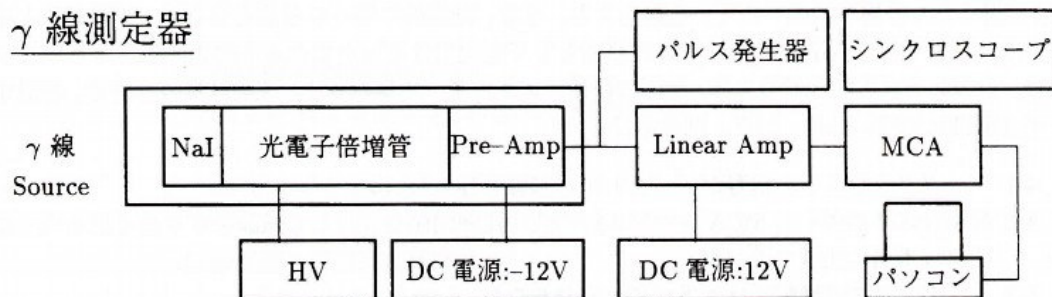
また、余剰エネルギーは全て生成された電子の運動エネルギーとなる。

この反応が起こる確率は、原子番号 Z の二乗に比例する。

3 γ 線測定装置

γ 線を人間は感覚的に直接認識することはできない。そのため、物質と相互作用させることで電気信号に変換し、検出するという方法をとらざるを得ず、測定は他の電荷を持った放射線と比べても、多少複雑なものとなる。

γ 線の測定器は、図①の様な機器で構成されている。以降、それぞれの機器の機能について簡単に述べると共に、 γ 線をいかにして測定するか説明する。



図① γ線測定器具

3-1 NaI シンチレータ

まず、線源から出たγ線は NaI シンチレータに入射し、2章で述べた三つの相互作用いずれかによって電子にエネルギーを渡す。どの相互作用が起こるかは確率による。

その後、電子はシンチレータ内を周辺の原子を励起しながら運動し、徐々に減速する。電子によって励起された周辺の原子の多くは、短時間で光（シンチレーション光と呼ばれる。NaI シンチレータの場合はおよそ $3eV$ のエネルギーを持つ）を放出し、もとの状態にもどる。

荷電粒子が物質中で失うエネルギーが多ければ、それだけシンチレーション光の量も増える。つまり、電子がそのエネルギー全てを物質中で失った場合には、この光の量を計測することで、電子のエネルギーを計測する事が出来る。

注) 入射光子のエネルギーのどれだけがシンチレータ内でシンチレーション光のエネルギーに変わるか、その割合（シンチレーション効率）は厳密には一定ではなく、光子のエネルギーに依存する。

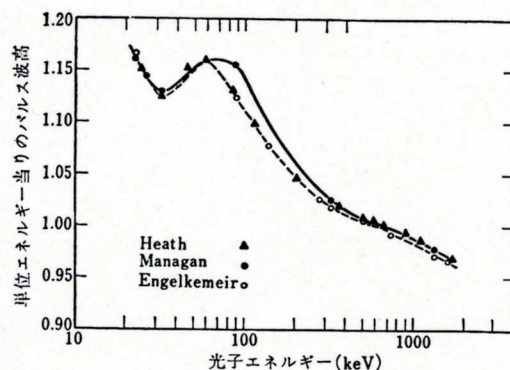


図5 NaI シンチレータのシンチレーション効率

ただ、今回扱う領域でのシンチレーション効率の違いは小さいため、以降 4 章までの議論はその直線性を仮定している。

なお、未知線源の決定を行う際はシンチレーション効率の違いによる補正を行う事とし、その際、値は図 2 のものを使用した。

3-2 光電子増倍管 (Photo Multiplier, フォトマル)

光電子増倍管は、シンチレーション光を読み出すことのできる強度の電気信号に変換する。光電子増倍管は、光電面と増倍部という二つの異なる機能をもったパートで構成されている。光電面は薄い半導体膜からなり、フォトマルに入射したシンチレーション光の一部がここで光電効果を起こし、電子がたたき出される。そしてその電子は、増倍部で増幅される。増倍部には、何枚もの電極 (ダイノード) があり、電極間には電圧がかけられている。電極面 (光電面) から出た電子は、電極間にかけて高電圧に加速され、次のダイノードに達したときには大きな運動エネルギーを持っている。

そのためダイノードに衝突し、光電効果を起こすと、複数の電子がたたき出される。これを、数枚の電極で繰り返すことで、電子の数が増え、信号の強度が増す。(印加電圧と増幅率の関係については、付録①で考察されている)

3-3 Pre-Amp ・ リニアアンプ

Pre-Amp ・ リニアアンプは入力させたパルスの電圧を、電氣的に増幅して出力する。

Pre-Amp は、NaI シンチレータ ・ フォトマルと一体となっているため、実験時に増幅率の変更をする際は、リニアアンプの GAIN を変更するようにした。

リニアアンプ増幅率をある程度自由に設定できる。また、一般的には GAIN を一定とした場合、入力電圧と出力電圧は比例の関係にある。(5-2 節でこの事の検証を行っている。)

3-4 Analog-Digital Converter (ADC)

・ Multi Channel Analyzer (MCA)

ADC はアナログ量である電気パルスの電圧を、デジタル値に変換する装置であり、今回使用したものは、パルスの電圧値を 0 から 4095 のデジタル値 (チャンネル) に変換する ADC である。(5-1 節で入力パルスの電圧とチャンネル値の関係を検証する。)

また、一定の計測時間中に、どのチャンネルにいくつのパルスがきたのかを示す装置が MCA である。MCA によって、後述のグラフ⑤のようなグラフがパソコンの画面に表示さ

れる。グラフの特徴的な構造を読み解くことが、この実験の理解に繋がる。

4 実験方法

光電子増倍管・Pre-Amp・リニアアンプによって増幅される出力が入力に関して比例関係にあり、ADCの数値の割り当て方が入力に対して比例の関係にあれば、シンチレーション光の強度、つまりは荷電粒子のエネルギーに対してMCAチャンネル値が比例する。そこで、例えば一つのチャンネルについて荷電粒子のエネルギーと1000 \Leftrightarrow 500keVといった対応が得られれば、全てのチャンネルについて $x \Leftrightarrow y \text{ keV}$ といった具合に荷電粒子のエネルギーと一対一に対応させることが出来る。

今回の実験では、光電子増倍管に入るシンチレーション光の強度を操作することは難しく、同時にPre-Ampに入る信号を自由に变化させることも困難であるため、リニアアンプとADCそれぞれの比例関係のみを検証し、Pre-Ampの出力信号はシンチレーション光の強度に比例していることを仮定した。

また、2-2-1節で解説した通り、

$$(\gamma \text{ 線のエネルギー}) = (\text{光電効果によって生成された荷電粒子のエネルギー})$$

が成立する。 ^{137}Cs から放出される γ 線のエネルギーが661.7keVであることを既知とし、その光電ピークのチャンネルを測定することで、

(光電ピークのチャンネル) \Leftrightarrow 661.7keV といった関係が得られる。それによって全チャンネルでそれに対応する電子のエネルギーを計算することが出来る。

その後、設定を変えることなく未知線源を測定し、その光電ピークのチャンネルを読みとり、対応する電子のエネルギーを計算する。そのエネルギーは前述の理由から未知線源の γ 線のエネルギーと一致しているため、この実験を行うことで未知線源から出る γ 線のエネルギーが数値として測定できる。つまり、未知線源が何であるかを特定することが可能というわけである。

5 実験装置の動作確認

4章で述べた手順に従い、本実験に先立ってリニアアンプとADCの入出力の比例関係をそれぞれ確認する。

5-1 ADCの比例関係の確認

ADCに入力される電圧とカーソル値の比例関係を確認する。

・実験方法

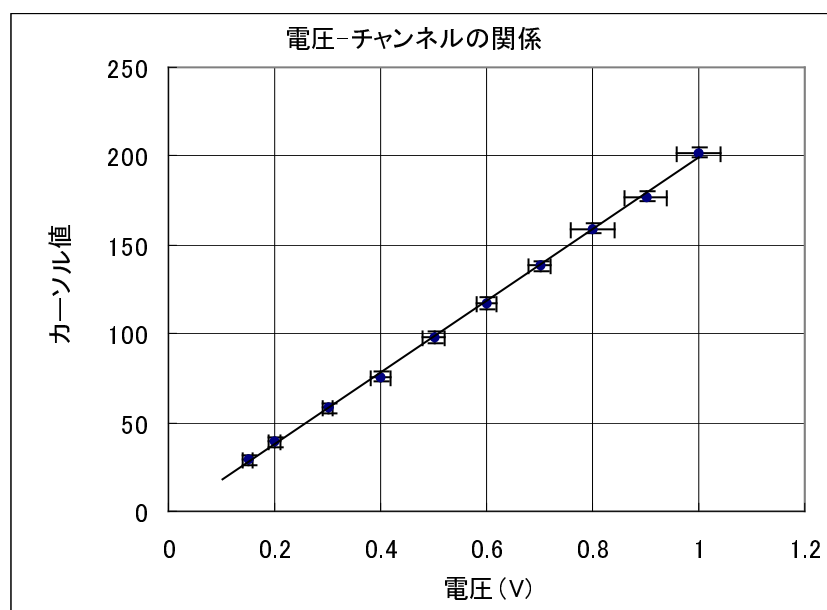
パルサーを使い、ADC に一定電圧の信号を入れ、MCA をつかってどのチャンネルにピークが現れるかを読みとる。電圧を変化させ、同じ事を繰り返す。装置の設定は次の通りである。

パルサー		MCA
周波数	波形	測定時間
50 × 10kHz	正弦波	5sec

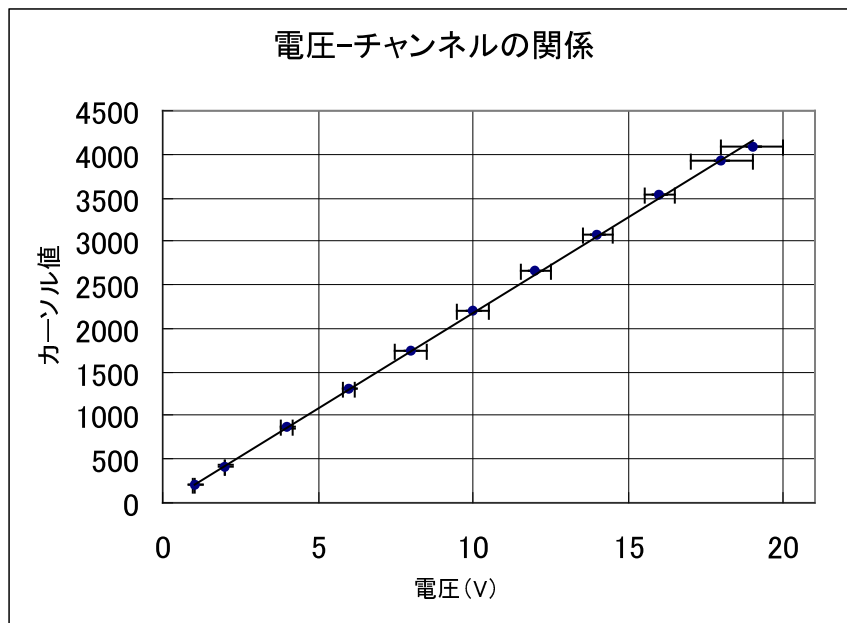
カーソル値については、3 カーソル分、電圧についてはオシロスコープの最小目盛りを誤差とした。

・実験結果

電圧とカーソル値について以下の関係が得られた。



グラフ① 電圧とチャンネル値の関係



グラフ② 電圧とチャンネル値の関係

MCA のおおむね 20 チャンネル以下の部分は、値を得ることが出来なかった。グラフで見ると分かるように、20-4095 チャンネルでは、入力電圧と ADC のデジタル値が比例の関係にあることが読みとれる。

5-2 リニアアンプ出入力の比例関係の確認

リニアアンプの入力信号と、出力信号の比例関係を確認する。

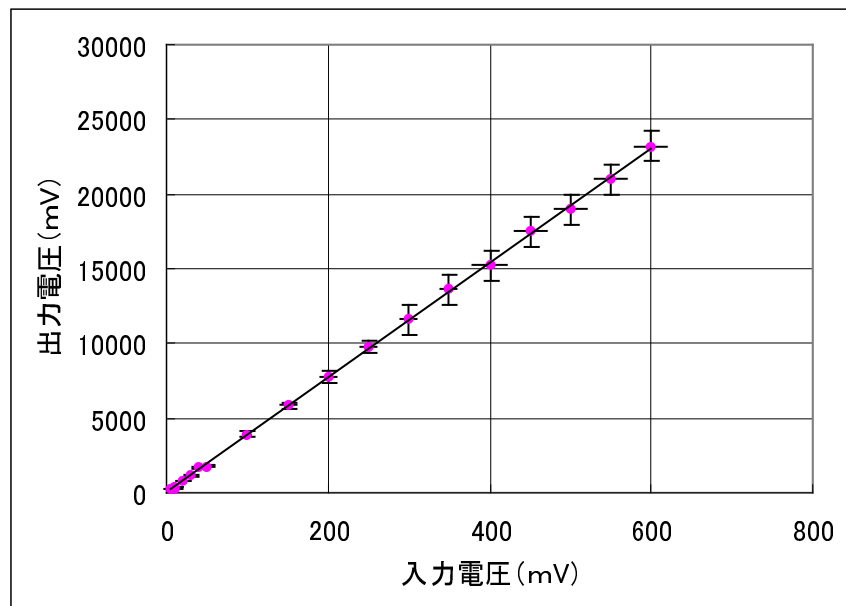
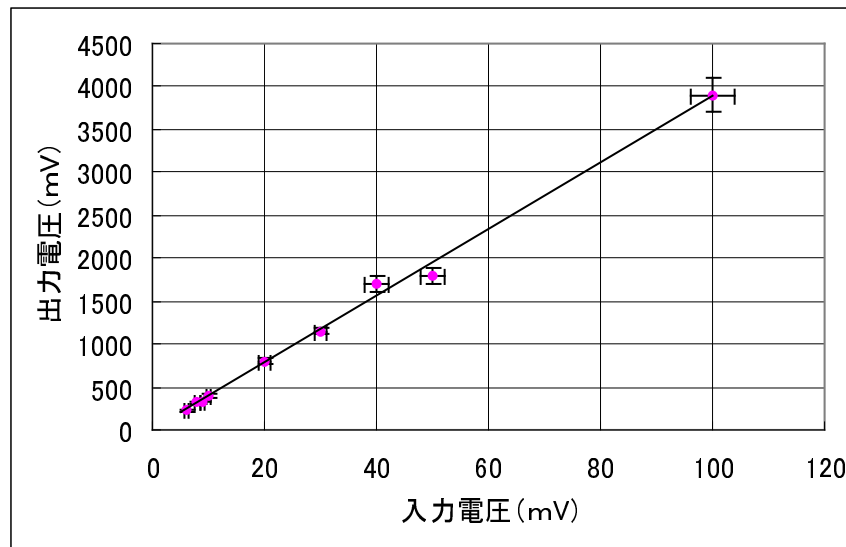
・実験方法

パルサーを使ってリニアアンプに信号を入れる。オシロスコープで入力波形と出力波形を観ることで、その増幅率を調べる。リニアアンプ、パルサーの設定は以下の通り。

パルサー		リニアアンプ	
周波数	波形	COARSEGAIN	FINEGAIN
50 × 10kHz	正弦波	32	1

ここでも誤差はオシロスコープの最小目盛りとした。

・実験結果。



グラフ③上、グラフ④下 リニアアンプ入出力の関係

入力信号の電圧と出力信号の電圧の線形性がグラフから読みとれる。

なお、入力電圧が 600mV を越えたあたり（推測される電圧が 24V 程度をこえた時）から、入力電圧をいくら上げても出力電圧は 23V 程度で変化しなくなった。アンプの出力に制限があるためと考えられる。ただ、前節の測定結果から、MCA で表示可能な領域は、ADC への入力電圧が 20V 程度までであったため、ADC に表示可能な領域に限れば、リニアアンプはリニアであると言える。

5-3 実験装置のまとめ

5-1 節、5-2 節の検証によって、MCA に表示される全領域で、Pre-Amp からの信号と MCA 上のカーソル値が比例する事が分かった。4 章での仮定と合わせて、チャンネルとシンチレーション光のエネルギーは比例することが言えた。以降、それをふまえて未知線源の特定を目指す。

6 ^{137}Cs の測定

今回使用する γ 線計測装置の出力はあくまで相対値である。そのため、未知線源のみを測定し、データーを得られたとしても、エネルギーの絶対値が得られないため、その特定は困難である。4 章でも述べた通り、絶対値を知るためには既知線源 (^{137}Cs) による校正が必要となる。この実験では、 ^{137}Cs の γ 線 (662keV) が、どのチャンネルに相当するか知る事を目的とする。

6-1 実験装置の設定

今回 γ 線の測定に用いる装置は、それぞれその用途に応じて様々な設定が可能である。リニアアンプの GAIN、印加電圧、測定時間はそれぞれの実験で大きく異なるため、実験毎に測定条件を明示する。その他の設定については、一連の実験を通じて次の設定を維持する。

Pre-Amp	電圧	12V
リニアアンプ	LLD	5-50
	ULD/ ΔE	6-0
	ΔE /ULD	ΔE
	POS/NEG	NEG
	INT/DIFF	INT

6-2 MCA 出力グラフの形状

MCA に出力されるグラフの形状について考察するため、適当な条件で一度 ^{137}Cs を測定した。

- ・実験方法

リニアアンプ、光電子増倍管、MCA の設定は以下の通りである。

線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
^{137}Cs	3-46	32	1	300sec

尚、実験装置は、理学部 B 館 B353 室にあるもののうち、北側のものを常に使用する。線源と検出器は密着させ、周囲は厚さ 5 cm の鉛のブロックで囲む。

・実験結果

MCA の出力として、次のようなグラフが得られる。

図

グラフ⑤ ^{137}Cs のスペクトル 1

・考察

2 章の議論から、一番大きなピーク⑥は、 ^{137}Cs の 662keV の γ 線がシンチレータ内で光電効果を起こして観測されたものと考えられる。2-2-1 節の議論にもあるように、本来はデルタ関数的に表示されるはずのものであるが、今回用いた γ 線計測器には計測プロセスの中で確率的な要因を含むものがあり、それによって光電効果によって生じた荷電粒子のエネルギーは“ガウス関数”の様相を呈して MCA に現れる事になる。

④は、コンプトン効果による電子のエネルギーの最大値を示していると考えられる。2-2-2 節で述べられている通り、コンプトン効果によるエネルギーは、0 からある最大値 $T_{e\max}$ まで連続した値をとる。そのため、MCA 上には、光電ピークの左側、立ち上がりから④までのチャンネルに、安定して相当数の粒子が観測される。

④から⑤にかけてのカウントは 2 章の議論だけでは説明できない。この形状は書籍によれ

ば「多重コンプトン散乱」と呼ばれるもので、コンプトン散乱で進路を曲げられた光子が、さらにコンプトン散乱を繰り返すことで一度のコンプトン散乱よりも多くのエネルギーを荷電粒子に与え得るため、MCA 上にはなだらかにカウントが減る形状が現れるとのことである。

また、これまでの議論に因れば理論上、662keV の γ 線が検出器に入った場合、662keV 以上のエネルギーのシンチレーション光に変換されることはあり得ない。従って、⑥の”山”より右側にはカウントは現れないはずである。ただ、現実問題として⑦のような形状が何度測定しても現れるのは、計測器が異なる信号と識別するよりも短い時間で複数の γ 線光子が検出器に入射した際に、そのエネルギーの和を光子一つ分の信号として計測器が処理してしまうためと考えられる。

コンプトン効果による連続したカウント数の部分に、いくつかの特徴的なピークが見える。③のピークは、一度検出器を通過した粒子や、検出器に入射しなかった光子が、検出器の外でコンプトン散乱を受けて曲げられ、検出器のなかで光電効果を起こして観測されたもの（後方散乱とよばれる。）である。

また、①は線源中にあると思われる Ba と γ 線が。②は周囲の鉛と γ 線がそれぞれ光電効果を起こした際の特性 X 線の光電ピークと考えられる。

（注 この考察にあたっては参考資料[2]を参考にした。）

①～④の形状は特徴的な形状ではあるものの、ピーク値や半値が分かりづらいため、実際のエネルギー校正には⑥の光電ピークのみを用いる。

6-3 ^{137}Cs の測定

・実験方法

^{137}Cs の光電ピークのチャンネル値を決定する。計測日は 2005 年 5 月 18 日。リニアアンプ、光電子増倍管、MCA の設定は以下の通り。

線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
^{137}Cs	3-10	32	1	300sec

光電ピーク・特性 X 線のピークはその中央付近で最もカウント数の多いチャンネルをピークとし、そのカウント数のおよそ 80%までカウント数が減るチャンネルの幅を測定誤差とする。

二回計測し、未知線源の特定の際はピーク値・幅共にその平均値を用いる。

・実験結果

MCA の出力として、次のようなグラフが得られた。

図

グラフ⑥¹³⁷Cs のスペクトル 2

それぞれのチャンネルは、次のようになる。

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
チャンネル	30	103	285	637	729	950	1107

ピークの値と、その幅は次のようになる。

	ピーク値		幅
	カウント	チャンネル	
⑥-1	28166	950	19
⑥-2	28013	952	19

よって、次章で未知線源を特定する際は、(951±19)チャンネルを 661.7keV とする。

7 未知線源の特定

未知線源を測定し、¹³⁷Cs と比較することでその特定を目指す。

7-1 未知線源の測定

実際に未知線源を測定する。

・実験方法

4章で説明した通り、この実験は6-2節の ^{137}Cs の測定と同じ条件で行う必要がある。そのため、測定条件は必然的に次のようになる。

線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
未知線源	3.10	32	1	300sec

未知線源を特定するべく、その光電ピークと思われるチャンネルを測定することが、この実験の目的である。

誤差に関しては、6-2節と同様に扱う。

・実験結果

MCAの出力として、次のようなグラフが得られた。

図

グラフ⑦未知線源のスペクトル

それぞれのチャンネルの値を以下に記す

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
チャンネル	21	98	334	1274	1654	1878	3568

^{137}Cs とグラフの形状がよく似ているので、6-2節の考察と対応させて考えると、④がコンプトンエッジ、⑤と⑥が光電ピーク、③が後方散乱、⑦の形状は複数の光子の信号が重なったものと考えられる。また、⑧のピークは⑤と⑥のチャンネルの信号が重なって出来た

ピークと考えることができる。

よって、⑤と⑥のピークについて、そのチャンネルを測定する。

		ピーク		幅
		カウント数	ピークのチャンネル	
一回目	⑤	5040	1654	28
	⑥	3939	1878	30
二回目	⑤	5082	1651	27
	⑥	3893	1876	27

この事から、第一のピーク⑤は (1652.5 ± 27.5) チャンネル、第二のピーク⑥は (1877 ± 28.5) チャンネルに存在するとする。

7-2 未知線源の特定

6-3 節と 7-1 節の実験から、次の関係と値が得られた。

$$661.7\text{keV} \Leftrightarrow (951 \pm 19)\text{ch}$$

未知線源のピーク

$$\textcircled{1}(1652.5 \pm 27.5)\text{ch}$$

$$\textcircled{2}(1877 \pm 28.5)\text{ch}$$

これを元に、比例計算をし、シンチレーション効率を元に補正を行って未知線源から放出される γ 線のエネルギーを計算すると、次のようになる。

	計算値(keV)	最大値(keV)	最小値(keV)
ピーク①	1173	1217	1131
ピーク②	1332	1380	1286

もとめられたエネルギー近傍の γ 線を放出する線源（未知線源の候補）を、次に示す。

線源	γ 線のエネルギー	放出比
^{135}I	526keV	13%
	1132keV	23%
	1260keV	29%
^{182}Ta	67keV	41%
	0.1MeV	14%
	1121keV	35%
	1189keV	17%
	1221keV	27%
^{59}Fe	143keV	1%
	192keV	3%
	1099keV	56%
	1291keV	44%
^{60}Co	1173keV	99.90%
	1333keV	99.98%
^{46}Sc	1120keV	99%
^{24}Na	1368keV	100%
	2754keV	99%

求められたエネルギー値に最も近いものは ^{60}Co である。

その他の線源、あるいはその組み合わせである可能性は、

- ① 他のピークがあるはずの部分に、ピークがみられないこと
 - ② 1100keV~1400keV でみられる γ 線の放出比の違い
- の二つの理由からすべて棄却される。

よって、未知線源は ^{60}Co と特定された。

8 γ 線の減衰

γ 線が物質に入射した時、そのうちいくらかは 2 節で挙げた 3 つの相互作用のいずれかによって内部で反応し、エネルギー・方向が変化する。これを γ 線の吸収（厳密には減衰）という。厚さ x cm の物質に I_0 個の粒子が入射したとき、相互作用せずに透過する個数 I について、次式で表記できる。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

μ は吸収係数と呼ばれる値で、反応を起こす確率に比例するため、 γ 線の波長と入射する物質によって固有の値をとる。

今回は、銅、アルミニウム、アクリル、鉛についてそれぞれ μ の測定を試みた。

実験方法

基本的には、シンチレータと線源の間に測定したい物質でできた板をおき、MCAのカウント数を計測する。その際、以下の二点に注意した。

シンチレータへの光子の入射個数は、線源とシンチレータの距離に依存し、距離を遠ざけることで個数は大きく減少する(付録②参照)。そのため、この実験を行う際には線源とシンチレータの距離を一定に保ち、その間に物質を置いて測定、比較する必要がある。今回の実験では、その距離を10cmで固定し、計測した。(その際、空気による吸収は、物質による吸収と比べて非常に小さいとし、無視することとした。)

また、前述の通り、「透過した粒子」とは物質と一度も相互作用せずにシンチレータに入った粒子を指すため、その粒子を一回以上相互作用した粒子と区別し、計測しなければならない。そこで、今回は光電ピーク近傍の粒子のみをカウントする事とした。シンチレータに入射した時のエネルギーが線源から放出される γ 線と同じであれば、その粒子は一度も相互作用していない可能性が高いからである。具体的には、ピーク値から ± 10 チャンネル分の粒子の個数を計測値(I)とし、ピーク値から ± 5 チャンネル分(I_{\min})、 ± 15 チャンネル分(I_{\max})の粒子の個数を平均し、その値と計測値との差を誤差(ΔI)とした。

$$\Delta I = \left| I - \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \right|$$

なお、ピーク値とその前後のチャンネルの位置は、物質を置かない状態(つまり、シンチレータと、線源が単に10cm離れている状態)で計測したものを基準にとり、厚さによってそれを変化させることはしない。そのため、例えばその後物質を置いた際にピークが変化したとしても、基準にとったチャンネル値で計測する。これも、厳密に透過粒子のみを計測したいがためである。

また、今回6章及び7章の実験に於いては、バックグラウンド(宇宙や人体からの放射線によるカウント)は、線源からの γ 線によるカウントに比べて十分小さいため、無視して議論されている。

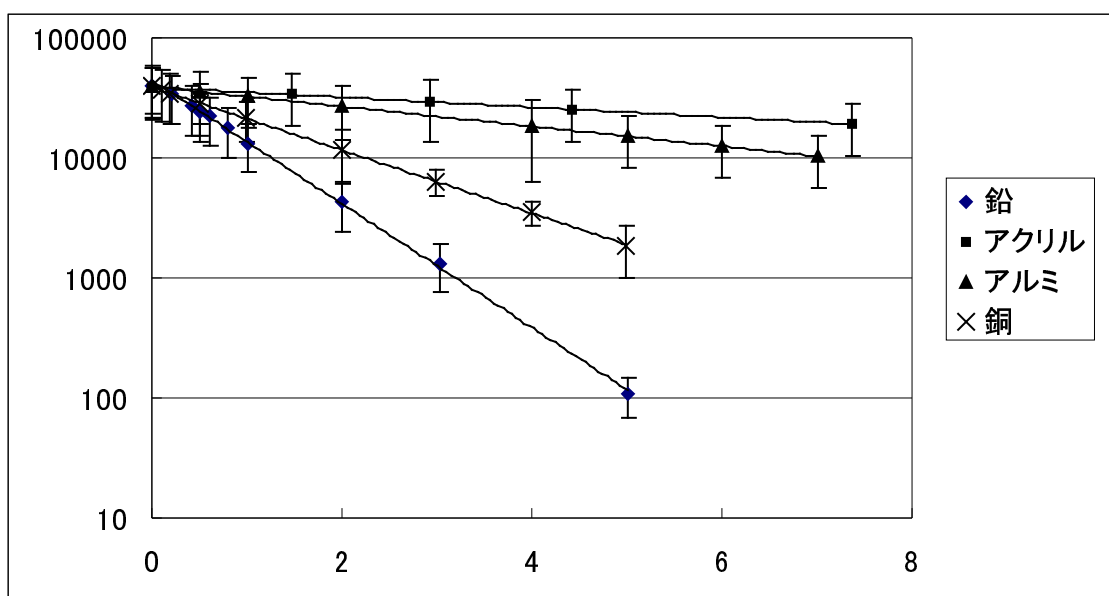
しかし、今回の実験では線源によるカウント数が少なく、バックグラウンドの寄与が大きくなるため、 I, I_{\max}, I_{\min} は、予めバックグラウンドを引いた値を用いる。

印加電圧、リニアアンプの設定、計測時間は次のとおりである。

線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
^{137}Cs	2.94	32	1.42	300sec

・実験結果

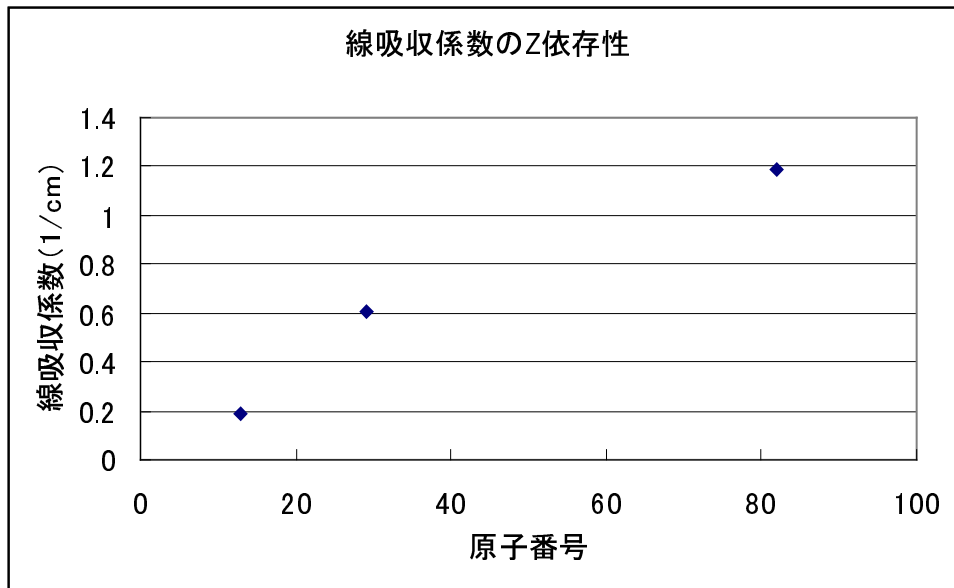
実験結果と誤差を片対数グラフにプロットすると、次のようになった。



最小二乗法を用いてその傾きを導き、線吸収係数 μ を求めると、以下の結果が得られる。

物質	銅	アルミニウム	鉛	アクリル
μ (1/cm)	0.605	0.191	1.19	0.0959

表に基づいて、線吸収係数の Z (原子番号) 依存性について考察する。
横軸に Z をとり、縦軸に μ をプロットすると、次のグラフが得られる。



今回測定した物質は三種類と少ないため、確定的な数式を得ることは難しく、関係を断言することも困難である。ただ、おおまかには右肩上がりのグラフとなっており、 Z が大きくなるにつれて μ も大きくなる傾向が推測できる。

次に、質量吸収係数 (μ_m) を求める。 $\mu_m = \mu \div (\text{物質の密度})$ の関係から導出する。

物質	銅	アルミニウム	鉛	アクリル
密度 (g/cm ³)	8.96	2.6989	11.35	1.16
μ_m (cm ² /g)	0.0675	0.0708	0.105	0.0827

鉛の質量吸収係数が他の三つと比較して大きいことが分かる。

付録① 光電子増倍管の印加電圧と、増幅率の関係

光電子増倍管のについては 3-2 節で述べた通りである。ここでは、印加電圧によって増幅率がどのように変化するかを考察する。

電極間で加速された電子が、次のダイノードに衝突したとき、 α 個の電子が光電効果によって生成されるとする。また、その様な加速が N 段にわたって繰り返されるとすると、増

倍部からの出力 (R_{out}) は、入力 (R_{in}) の α^N 倍となるはずである。

$$R_{out} = \alpha^N R_{in} \quad , \quad (\text{増幅率}) = \frac{R_{out}}{R_{in}} = \alpha^N$$

また、加速によって増加する電子の運動エネルギーは、電極間の電圧 (V) に比例すると考えると、

$$(\text{増幅率}) \propto V^N$$

となる。(電極間によって電圧の分配比は異なるが、ここでは概算のため全ての電極に等しい電圧がかかっているとした。) この関係から、増幅率は電圧の累乗に比例することが予想される。

実際にこの関係が成り立っているのか、以下に検証する。

・実験方法

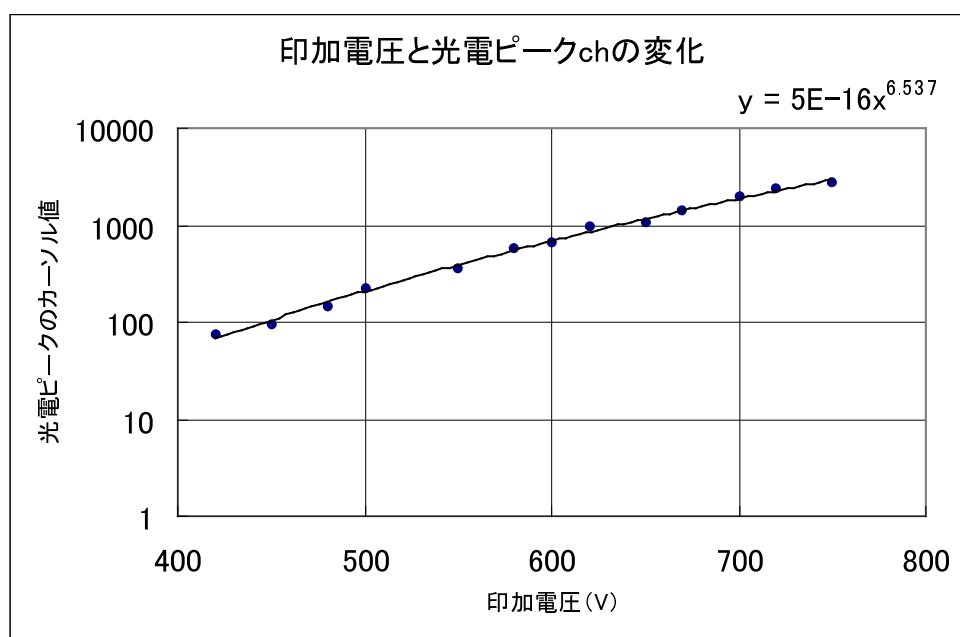
線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
^{137}Cs	-	32	1.42	300sec

この設定は変えずに、光電子増倍管の印加電圧のみを変化させ、光電ピークのチャンネル値を読みとる。なお、この実験は

- ① 他の実験とは独立に行われるものである
- ② 大まかな関係を知るためのものであって、詳細な値を得ることを目的としないという理由から、誤差は考慮されていない。

・実験結果

印加電圧と光電ピークのチャンネル値の関係をグラフにすると、次のようになった。



だいたい電圧の 6.5 乗に比例する、という結果が得られた。

電極の数からすると、理論的には10乗程度になるはずである。ダイノードでのエネルギー変換のロス等の影響で、理想値よりも増幅率が低くなっていると考えられる。

付録② 線源とシンチレータの距離の変化によるカウント数の変化

吸収係数を測定する実験を除いて、今回の実験は線源と計測器を密着させて行った。

この実験では線源と計測器の間に距離をとった場合、測定結果にどのような影響があるかを検証する。

・実験方法

設定は、以下の通りとする。

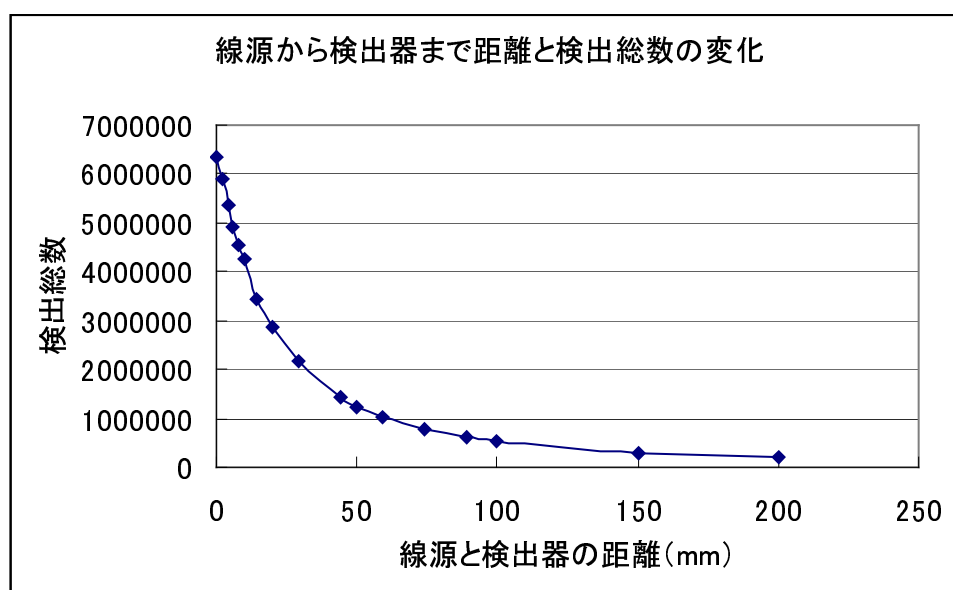
線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
^{137}Cs	2.94	32	1.42	300sec

線源と検出器の距離を変え、それぞれの距離についてMCAのチャンネル20~4096までの総カウント数を測定する。

また、この実験に関しても付録①と同様の理由から、誤差の考慮はなされていない。

・実験結果

線源から検出器までの距離と、検出総数には、以下のグラフのような関係がある。(なお、グラフのラインは、見通しをよくするために測定点を平滑化して結んだものであり、何らかの数式で表されるものではない。)



50mm 程度までは、距離を遠ざける事によって検出数が急激に減少する。しかし、距離が大きくなるにつれて減少は緩やかになり、150mm を越えたあたりからは距離によって検出総数の変化はほとんど変動しなくなる。

グラフがこのような形になるのは、線源を出た光子のうち、検出器に入射できるもの、つまり入射可能光子の数が立体角要素に比例するためと考えられる。

この結果から、実験をする際には、線源の位置に細心の注意を払う必要があることが分かる。

付録③ バックグラウンドの計測

・実験方法

線源を置かない状態で装置を動かし、バックグラウンドを計測する。

条件は次の通り。

線源	印加電圧	COARSEGAIN	FINEGAIN	測定時間
無し	3.10	32	1	300sec

MCA の出力として、次のグラフが得られる。

図

バックグラウンドは日によって変動する。しかし、 ^{137}Cs 線源を密着させた状態での総カウント数が 630 万程度であるのに対し、バックグラウンドの総数は 3 万程度であり、無視できるほど小さい。

そのため、このレポートでは、6,7 章の実験の際はその寄与を考えていない。

参考文献

- [1] 物理学実験 2005 年度版 名古屋大学理学部
- [2] 放射線計測ハンドブック 日刊工業新聞社
- [3] 理科年表 2003 丸善

感想

「よく分からないこと」の多さに戸惑った実験でした。

最初は主に実験装置の扱い方について、中盤は実験結果の振る舞いについて、レポート作成段階では誤差の評価についてかなり悩みました。

メンバー間で議論しながら一つ一つ解決を試みたものの、一つの問題についてかなりの時間をとられ、最初に言われた「これから四日間は、本実験ではなく、機器の使い方に慣れ・どんなものか知るべし」との言葉の意味を理解できたのは八日目が終わってからでした。前段階に時間をとられ、本実験に時間が割けず、精度を高めるには至りませんでした（統計変動に関する考察が出来なかった…）が、その分違うことを実験のプロセスで修得できたと思います。

レポート作成時はまず Word や Excel の使い方がわからず四苦八苦(よって一部手書きとなっています)。さらに作成する過程で新たな疑問や理解の薄い部分が次々と見付き、平行してそれを調べる作業が加わったため、相当時間がかかり、最後は若干妥協してしまいました。

特に、ガウス分布や最小二乗法といった部分の誤差論の知識が薄く、Ba の特性 X 線に関しては誤差の範囲にエネルギーが入らず、具体的な言及を避けることになってしまいました。また、最後の吸収係数を求める実験には、 μ に誤差をつけるべくぎりぎりまで格闘したのですが、適当な誤差を付けるには至りませんでした。(±20%を越える誤差が出てきてしまったので…)

「再提出・再実験も甘んじて受ける」そんな気持ちで一杯です。