比例計数管の作成と性能の把握

060302208 樋掛雅則

2005年11月28日

概 要

比例計数管を製作し、その性能を確認する実験を行った.前実験として MCA や S-amp 等の線形性を確認. その後線源として⁵⁵Fe を用い、様々に条件 を変えて測定を行うことで比例計数管の挙動を探った.

実験後半には、²⁴¹Amを用いて測定を行い比例動作を確認.二つの線源についてアルミ箔で遮蔽を行い,吸収係数を測定した.

目 次

1	序論	4
	1.1 X線	4
	1.2 X 線の発生	4
	1.3 比例計数管	5
2	比例計数管の動作原理	6
	2.1 比例計数管の構造	6
	2.2 X 線のたどる経路	6
	2.3 電子なだれ	7
	2.4 Pre-Amp	9
3	実験装置	10
	3.1 Pre-amplifier(P-amp)・前置回路	10
	3.2 Shaping-amplifire(S-amp)	11
	3.3 Multi Channel Analyzer(MCA)	11
4	前実験-線形性の確認	12
	4.1 P-ampの出入力の関係	12
	4.2 S-amp の出入力の関係	12
	4.3 MCA の channelnumber と入力電圧の関係	17
	4.4 HV のダイアル値と出力電圧の関係	17
5	比例計数管による X 線の測定	19
	5.1 Fe の測定とエネルギー分解能	19
	5.2 印加電圧と出力パルス波高の関係	21
	5.3 印加電圧の変化と MCA 出力	21
	5.4 線源の位置と MCA 出力の関係	25
	5.5 ガス流入量と MCA 出力の関係	26
	5.6 再現性の確認	28
	5.7 空気の混入による MCA 出力の変化	31
	5.8 Am の測定	33
6	吸収係数の測定	34
	6.1 吸収係数	34
	6.2 Fe 線源を用いた吸収係数の測定	34
	6.3 Am 線源を用いた吸収係数の測定	35
\mathbf{A}	バックグラウンド	38

В	気象条件	39
\mathbf{C}	59 ${f keV}\gamma$ 線の測定	41

1 序論

今回の比例計数管実験を行う上で重要な事項について簡単にまとめておく。

1.1 X線

X線は電磁波の一種であり.その波長は10⁹m~10¹²m程度¹である.一部紫外線 や線と重複するエネルギーを持つが、これはそれぞれ発生過程で区別されている 事による.具体的には電子の状態遷移等によって原子核の外部から発生するものを X線、原子核の壊変等によって原子核の内部から発生するものを 線という.X線 は1895年にレンチェンによって発見されて以降、その透過性から医療分野でレン トゲンに応用されたり、波長が短いことを利用して結晶構造解析に用いられたりと 幅広く利用・研究されてきた.

1.2 X線の発生

X線の発生方法には様々な種類がある.一つは制動放射と呼ばれるもので,電子の運動方向が磁場や電場によって急激に変化すると,X線が放射される.この過程 で発生したX線は特定のスペクトルを示さないので,白色X線とも呼ばれる.

電子の励起状態の差によって発生する場合もある.何らかの理由,例えばエネル ギーを持った粒子が原子に入射する事等によってその電子の最内殻にある電子が 失われた際に,よりエネルギー準位の高い外殻の電子が空いた準位に落ち込むこと でそれを補うことがあるが,このとき,その準位間のエネルギー差分がX線として 放出される.準位間のエネルギーの差はある決まった値なため、このX線のエネル ギーは制動放射の場合とは異なり、決まった値となる。

さて,自然界に存在する元素には,安定同位体とは別に放射性同位体が存在する. 放射性同位体は一定周期で壊変を起こす.放射線源⁵⁵Feは,半減期2.7年でβ壊変の一種である軌道電子捕獲を起こす.軌道電子捕獲とは最内殻にある電子を原子核が捕獲し,陽子が核内で中性子に変化する壊変であり,⁵⁵Feはそれによって⁵⁵Mnへと転ずる.このとき最内殻であるK殻に空席が生じ,先に述べたような過程でX線が放出される.今回の実験ではこのX線を検出,測定する.

また,その他の発生方法としては熱によるもの等がある.例としてはブラックホールに落下し加熱されたガスから放射されるX線がある。

¹波長を λ とするとエネルギー E は $E = hc/\lambda$. ここから, E(keV) と λ (Å) の間に E λ =12.4(keV・Å) の関係が見出せる。



図 1: 電子捕獲とX線の発生

1.3 比例計数管

X線やその他の放射線は目には見えない上に電気的に中性であるため、その検出 には特殊な検出器が必要となる.検出器には数多くの種類がある.例えば 線測定 の際用いられるシンチレーターや、水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置²などであ る.今回作成し、測定に使う比例計数管はガス入り増幅器と呼ばれる検出器のひと つである.ガス入り増幅器は入射した X線を内部に充填されたガスとの相互作用 によって電子に変換し、電気的な信号を取り出すことで検出することを目的とした ものである.次章、その詳細を述べる.



図 2: 比例計数管

 $^{^{2}}$ KamiokaNDE **等の例がある**

2 比例計数管の動作原理

2.1 比例計数管の構造

今回用いる比例計数管は窓付き連続フロー型(一回通過)のものであり, 概略は 図2のようになっている.内部には電子付着係数の小さい不活性ガスであるアルゴン(90%), さらにはメタン(10%)の混合気体³が導入され, 芯線と外壁の間には千 数百ボルトという高電圧が印加される.

2.2 X線のたどる経路

線源から比例計数管内に進入した X 線がどのような経路をたどり電子に返還されるか,線源として⁵⁵Feを用いた場合の概要を図に示す.



図 3: 5.9keV X 線のたどる経路

入射した X 線は比例計数管内に充填されたアルゴンガスと相互作用を起こす.ア ルゴン原子の最内殻にある電子がたたき出され,入射 X 線のエネルギーから束縛 エネルギー分を引いた 2.7keV のエネルギーを持った自由電子が生じる.この自由

³P-10 ガスと呼ばれる. 微量のメタンが混合されているのは, 比例計数管が GM 管の様に動作し, それによって比例関係が失われることを防ぐためである. また, これによってアルゴンの電離電位 が下がることで, 分解能の向上につながること (ペニング効果) も理由として挙げられる. このほか にもヘリウム (96 %), イソプタン (4 %) 混合ガスなどが検出ガスとして用いられる.

電子は他のアルゴン原子の外殻にある比較的ゆるく束縛されている電子をはじき 出し,エネルギーを失ってゆく.

一方,アルゴン原子は束縛エネルギー分 3.2keV を持った励起状態となる.このエネルギーは二つの経路をたどる.

ひとつには余剰エネルギーを外殻電子が受け電離されるケースで、オージェー電子と呼ばれる電子が放出される.この電子もその後、先に見た電子と同様に振る舞い、それによってより多くの電子が放出される.この場合、先にみた自由電子とあわせて入射 X 線のもつ 5.9keV のエネルギーすべてが検出されることになる.

もうひとつは,L 殻や M 殻といった外殻から電子が補われるような形で K 殻に 落ち込み,それによって X 線の形でエネルギーが放出されるケースである.M 殻か ら電子が補われる際には余剰エネルギーと殻のエネルギー差が一致しているため, ほぼすべてのエネルギーが X 線となって放出されると考えて良い.L 殻から電子が 補われる際は殻間のエネルギー差 2.9keV が X 線によって放出され,残り 0.3keV は オージェ電子によって放出される. この過程で発生した X 線は多くの場合ガスと 相互作用せず外壁に到達する⁴ため,その分のエネルギーは検出されない. ここまで の過程でつくられる電子は一次電子⁵と呼ばれる. 一次電子はその後,管内の電場に よって芯線に向かって運動する. さらに,芯線近傍では強い電場によって加速され 「電子なだれ」を起こす.

2.3 電子なだれ

ここまでの過程で発生する一次電子は最大でも 230 個程度と少なく, このまま信 号として扱うと雑音の影響を免れない等, 面倒が生じる. そこで比例計数管は一次 電子を電場によって加速することでエネルギーをあたえ, さらに検出ガスと相互作 用させることで, 電子の数を増やす増幅過程をとる. 芯線近傍で加速された電子が 26eV より大きいエネルギーを持ってアルゴン原子に衝突したとき, 光電子やオー ジェ電子の場合と同様にそれによってアルゴンの外殻の電子が電離される. それぞ れの電子が吸着されずに再び電場によって加速された場合, 再び衝突, 電離が起こ る. これによって電子の数は芯線に到達するまでに鼠算的に増加する. この過程を 電子なだれと呼ぶ. 各電子なだれはほぼ独立とみなせる. いま、一次電子 n₀ 個が電 子なだれによって増幅されたとき, それによって得られる全電荷 Q は,

$$Q = en_0 M \tag{1}$$

とかける. 比例定数 M は比例計数管の動作を特徴付ける平均ガス増幅率と呼ばれる値で, 印加電圧やガス密度に依存する.

⁴アルゴンの密度,6 章でみる吸収係数から,外壁までの距離を 1.5cm としたとき,その割合は $e^{-1.66 \times 10^{-3} \times 1.74 \times 10^{2} \times 1.5} = 68$ %が外壁に到達する.

⁵図にあるように,主要な経路の一次電子の数はそれぞれ 227 個,116 個である.生成される電子の数がポアソン分布に従うとすると,そのゆらぎはそれぞれ 15 個 (6.6 %),11 個 (9.3 %) となる.

ここで、ガス増幅率の印加電圧依存性を考える.まず、芯線近傍での電場を考える.いま、比例計数管の検出部分を円筒と考え、その半径をb、芯線の直径をaとし、その間の電位差をV_{ab}とする.このとき管内の電場は、

$$2\pi r E(r) = \frac{Q}{\epsilon} \tag{2}$$

$$E(r) = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r} \tag{3}$$

式(2)より電位差を計算すると,

$$V_{ab} = -\int_{b}^{a} E(r)dr \tag{4}$$

$$= -\int_{b}^{a} \frac{Q}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r} dr \tag{5}$$

$$= \frac{Q}{2\pi\epsilon} \log_e(\frac{b}{a}) \tag{6}$$

*V_{ab}*を用いて式(2)を書き直すと,

$$E(r) = \frac{V_{ab}}{\log_e(b/a)} \frac{1}{r} \tag{7}$$

と記述できる⁶.

一方,電子が微小距離 ΔL 移動する間に電場から受け取るエネルギーは,素電荷 を e とすると

$$U = \int_{L-\Delta L}^{L} (-e)E(r)dr \tag{8}$$

$$= \int_{L}^{L-\Delta L} eE(r)dr \tag{9}$$

$$= \frac{eV_{ab}}{\log_e(b/a)} \int_{L-\Delta L}^{L} \frac{1}{r} dr$$
(10)

電子が n 個ある場合には,

$$U_{total} = nU = ne \int_{L}^{L-\Delta L} E(r)dr$$
(11)

このエネルギーすべてがガスの電離に使われるとすると,生成される電子の個数 はガス電離に必要なエネルギーを W とすると,

$$dn = \frac{U_{total}}{W} = \frac{ne}{W} \int_{L}^{L-\Delta L} E(r) dr$$
(12)

 $^{^6}$ ここで、例えば a=30 $\mu{\rm m,b}{=}15{\rm mm,}V_{ab}{=}1575{\rm V}$ とすると、芯線表面で電場は $7.95\times10^6V/m$ となる、

ここで, ΔL が小さいとすると,

$$dn \sim \frac{ne}{W} E(L) dL \tag{13}$$

よって,

$$\frac{dn}{dL} = \frac{ne}{W}E(L) \tag{14}$$

一般のrに関して、

$$\frac{dn}{dr} = \frac{ne}{W}E(r) = \alpha(r)n \tag{15}$$

ここで、係数 $\alpha(r)$ はタウンゼント係数と呼ばれ、自由電子が単位長さあたりに作る二次電子の数である. (15) 式を、芯線表面から有効半径⁷ c まで積分する.

$$\frac{dn}{n} = \alpha(r)dr \tag{16}$$

$$\int_{n_0}^{n_{total}} \frac{dn}{n} dr = \int_a^c \alpha(r) dr \tag{17}$$

$$\log_e(\frac{n_{total}}{n_0}) = \frac{eV_{ab}}{W\log_e(b/a)}\log_e(c/a)$$
(18)

$$n_{total} = n_0 e^{\frac{eV_{ab}\log_e(c/a)}{W\log_e(b/a)}} \tag{19}$$

となる $.n_{total}$ は芯線に到達する電子の数 $,n_0$ は一次電子の数である. つまり,

$$M = e^{\frac{e \log_e(c/a)}{W \log_e(b/a)}} e^{V_{ab}}$$
(20)

となり,c がa にくらべて十分大きいとき,M は $e^{V_{ab}}$ に比例するといえる.

2.4 Pre-Amp

今回製作した比例計数管は内部に Pre-Amp と呼ばれる回路が組み込まれている. この回路の重要な働きは,電荷の流れという電流の信号である検出部分からの信号 をコンデンサによって電圧信号に変換する事である.電圧を測定することで,X線 の持つエネルギーを測定することができる.回路図等の詳細は3章で述べる.

⁷電子が二次電子を発生させるまでに加速される程度電場が強い範囲. 一般には V_{ab} によって変動する.

3 実験装置

今回使用する実験装置の概要を次の図に示す.



図 4: エックス線検出装置の概要

次節以降それぞれの実験装置について解説する.

3.1 Pre-amplifier(P-amp)・前置回路

回路図は次のようになっている.



図 5: Pre-Ampの回路図

上方の入力端子には HV から高圧が印加される.1000pF のコンデンサがローパス フィルタとなり、周波数を持つようなノイズがカットされることで、安定した高電 圧が印加されることになる.直列に接続されている 10pF のコンデンサはハイパス フィルタとして働くため、直流成分の高電圧はオペアンプ回路の部分に侵入するこ となく比例計数管の検出部分に印加される.検出部分から出力される信号は電子の流れであり,電流の信号である.この電荷がオペアンプ回路に入り,2pFのコンデンサによって電圧信号となる.また,入力部分が反転端子に接続されていることから,電荷による負の信号が正の信号となる.出力される信号の波高は入力信号に比例する⁸.

3.2 Shaping-amplifire(S-amp)

比例計数管からはパルスが出力される.しかし,ガスによって増幅されたとはい えその波高は低く,そのままでは扱いにくい.信号を線形増幅し,さらに波形を変え る装置である⁹する装置である.今回使用したものには+15Vの電圧が印加されて おり,倍率は二つのつまみ¹⁰で5倍から500倍まで調整できるようになっている.

3.3 Multi Channel Analyzer(MCA)

オシロスコープ等の装置を用いて信号の波高を測定すればX線のエネルギーを 一応は測定できる.ただし、パルスの高さはパルスごとに異なるため、その出力画 面を読み取り、正確な値を得るのはなかなか難しい.ADCはアナログ量である電 気パルスの電圧を、ディジタル値に変換する装置であり、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測定、表示する装置がMCAである.こ の二つの装置によって、図のようなグラフがパソコンの画面に表示される.このグ ラフの横軸のチャンネルナンバーは入射するX線エネルギーと対応関係があるた め、全体としてはX線をスペクトル分解したようなグラフである.このグラフの特 徴的な構造を読み解くことで、より正確かつ多様な測定が可能になる.

⁸出力パルスの波形,波高についての詳細は4.1節参照.

^{94.2}節にて実際に波形変化の様子と線形動作の検証がなされている.

¹⁰FINE GAIN(FG) と COARSE GAIN(CG).FG は 2.5 ~ 12.5 まで,CG は 2,4,10,20,40 をとるこ とができ,理想的な増幅率はその二つの値の積である.

4 前実験-線形性の確認

実際にX線を測定する前に、比例計数管に接続する種々の実験装置の動作を確認 する.なお、今回の実験において大切なのは、前章の最後でも触れたが、入射X線の エネルギーに対して MCA の出力チャンネルナンバーが比例関係となっている事 であるので、それを重点的に検証することにした.

4.1 P-amp の出入力の関係

まず,P-amp を比例計数管から外し,それにパルサーで電圧信号を入れ,入力波と 出力波の波形及び信号強度の変化をしらべた.信号強度についての実験結果は図7 のグラフの通りである.出力と入力の間に比例の関係が確認できる.また,P-amp



図 6: パルサーからの波形

からの出力波をみると、パルスの時間変化のスケール¹¹は22(±1)µsとなっており、 これはフィルタ回路のコンデンサと抵抗の値から導出される時定数(9.4µs)の程度 となっている事が分かる.

4.2 S-amp の出入力の関係

次に S-amp にパルサーから信号を入れ,入力波と出力波の波形及び信号強度の変化をしらべた.先ずは波形の変化を見る.S-Amp の設定を CG4 FG 8-0 として,図 6

¹¹具体的には、パルスの高さが 1/e となるまでの時間とした



図 7: P-amp への入力電圧と出力電圧の関係

のパルスを入力、オシロスコープの出力を見ると、図8,9のような波形が観測された. パルスの高さが高くなり、幅が狭くなっていることが分かる.S-ampには増幅 作用のほかに、パルスの幅を狭め、鋭くする働きがある.今回の測定の場合二つ以 上のパルスが重なると、測定結果として有意なものは得られない.原子核の崩壊は 独立な事象であることから、S-ampによりパルスの幅を狭めてやり、信号の重なる 確率をへらすことが実験データの信憑性を向上させることに繋がるといえる.次 に、増幅率を調べる.S-Ampの設定を固定してパルサーからの入力信号の高さを変 化させ、出力信号の高さの変化を見る.S-Ampの設定は次の四種類¹²とする.

FINEGAIN	COARSE GAIN
10-50	20
10-50	4
8-0	4
8-0	2

実験結果を図 10-図 13 に示す.

それぞれの増幅率の設定に対して入力電圧と出力電圧の間に正比例の関係があることが確認された.また,CG4 FG8-0時の実験結果から,最大出力電圧が13V程度であることが分かる.

¹²主に今後の実験に用いそうな値から選択したものである.



図 9: S-amp からの波形



図 10: S-amp の入力電圧と出力電圧の関係 (FG:10-50,CG:20)



図 11: S-amp の入力電圧と出力電圧の関係 (FG:10-50,CG:4)







図 13: S-amp の入力電圧と出力電圧の関係 (FG:8-0,CG:2)

4.3 MCA の channel number と入力電圧の関係

MCA にパルサーから信号を入れ、入力電圧と channelnumber の関係を調べた. なお、MCA のスイッチは 10V、全体を 512ch に区切るよう設定した. 結果は図 14 の ようになった.



図 14: channelnumber と入力電圧の関係

全域にわたってよい比例関係となっていることがグラフから分かる.ただ,同時 に1~12ch,497~512chにはカウント数は現れないことが分かった.この点には実験 を行う上で注意する必要がある.

4.4 HVのダイアル値と出力電圧の関係

比例計数管には高電圧をかける必要がある.後に詳しく述べることになるが,印加する電圧の値によって MCA の出力は大幅に変化する.より正確な実験,考察を行うために,ここで HV のダイアル値と実際の出力電圧の関係を調査する.電圧を降下させる回路を使用し,オシロスコープで出力を観察.換算計算¹³を行った結果,図 15 のグラフが得られた.

ダイヤル値と出力電圧の間に線形性があるとは言える.ただ,ダイアル値が180 の場合は1800Vといったように、ダイアル値の10倍の値の電圧が出力されること

¹³具体的には出力を 501 分の 1 とする回路を使ったため, その値で出力を除した.



図 15: HV ダイアル値と出力電圧の関係

が期待されたが,実際に出力される電圧はそれより低い値となっていることがグラフから読み取れる¹⁴.

¹⁴ただし,正確な電圧値はダイアル値では半端な値となっているため,再現性を高める意味で以降 も電圧の設定にはダイアル値を用いる事にした.

5 比例計数管によるX線の測定

前章において,それぞれの実験装置の動作確認が終了した.ここからはいよいよ その実験装置と製作した比例計数管を用いてX線を測定する.

5.1 Feの測定とエネルギー分解能

線源⁵⁵Feを比例計数管の窓に置き,X線を測定する.それぞれの実験装置の設定 は次のようにする.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月1日 ¹⁵	1-80	100cc/min	8-0	4	300sec

なお,線源は窓の中央に置くことにする.まず,線形増幅器を通したあとの波形 をオシロスコープで観察する.波形は図16のようになっていた.

図 16: S-amp 通過後のパルス

ここから、ガス増幅率を計算する.図12から、S-ampによる増幅率を33.8(±0.4) 倍、図16から、その代表的高さを5.4(±0.1)Vとする.コンデンサに溜まる電荷と 電圧の関係は

$$Q = CV \tag{21}$$

いま,C=2*pF* である,最初に生成された電子の個数が 227 個であるとすれば,式 (1) から, 増幅率 M は,

$$M = \frac{2 \times 10^{-12} \times 5.4}{1.6 \times 10^{-19} \times 33.8 \times 227} = 8.8(\pm 0.1) \times 10^3$$
(22)

ガス増幅率は8800倍となる.

次に,MCA をもちいて 5 分間測定すると,その出力として図 17 ようなグラフを 得る. 横軸が MCA の channelnumber, 縦軸が count 数である.

図 17: Fe 線源測定時の MCA 出力

二つのピークチャンネルの値はエネルギーの高いほうが $314(\pm 1)$ ch,低いほうが $158(\pm 1)$ ch となっており¹⁶,その比は1.98となる.これは理論から予想される値とほぼ一致している.それぞれのピークの強度を計算する.具体的にはそれぞれの分布を積分し,比をとると $6.5(\pm 1) \times 10^4/7.2(\pm 0.9) \times 10^3 = 9.0(\pm 1.1)$ となる.これは2.2節の考察と一致している.

ここで、"エネルギー分解能"を考える.エネルギー分解能とは、その検出器がどれ だけ近接するエネルギーを測定し分けることができるかの目安となる値で、多くの 場合はカウント数がピーク値の半分となる左右のチャンネルの幅¹⁷を、ピークチャ ンネルで除した相対半値幅が用いられる. ピークとエスケープピークの二つにつ いてこの値を計算すると、それぞれ 21(±1)%、31(±8)%となっている¹⁸.

¹⁶以降,⁵⁵Fe 測定の場合, ピークといえば高エネルギー側の分布を指し, 低エネルギー側の分布をエスケープピークと呼ぶ.

¹⁷図 17 参照

¹⁸このことについては後に考察がある

図 18: ピークチャンネルと半値幅

5.2 印加電圧と出力パルス波高の関係

5.1 節では S-amp 通過後のパルス波形を見たが、比例計数管からの信号を直にオシロスコープで観察すると、図 19 のような波形が観察される.

パルスごとに高さが変動している様子がわかる.ここではそのうちで特徴的な波 の高さを HV で印加する電圧を変化させながら観察することで,信号強度の高圧依 存性を調べる.測定条件は次の通り.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月1日	1-50 ~ 2-0	100cc/min	-	-	-

実験結果として図20のようなグラフが得られた.

印加電圧の増加に対してパルス波高が指数関数的に増大していることが分かる. これは 2.3 節の考察に合致した結果といえる. なお,低い電圧領域で直線に乗って いないのは,平均自由行程中にガスを電離させるのに必要なしきい値である 26eV に達しない電子が多いためと考えられる.

5.3 印加電圧の変化とMCA出力

次に,線形増幅器等の設定は変えずに印加電圧を変化させたとき,それに応じて MCA 出力がどのように変化するかを調べた.具体的な測定条件は次の通りである.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月2日	1-65 ~ 1-84	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

このとき, ピークチャンネル, エスケープピークチャンネル, それぞれ相対半値幅の 変化は図 21-図 23 のグラフの様になった.

図 21: HV ダイアル値とピーク,エスケープピークのチャンネルナンバー

それぞれのピークチャンネルは印加電圧の増加に伴い指数関数的に増加する.これは 5.2 節の実験結果と一致するものである.

相対半値幅は電圧を上げると、それに伴って減少する傾向が読み取れる.電子なだれによって最終的に生成される電子の数の分布がポアソン分布に従い、その平均値を \overline{N} とすると、そのゆらぎは \sqrt{N} となる.4章の実験から、信号がカウントされるチャンネルは生成された電子の数に比例することから、ピークチャンネルは生成される電子の数の平均値に比例する.また、半値幅は生成される電子のゆらぎによって決定されるといえる.そう考えるとエネルギー分解能(相対半値幅)は、

$$(エネルギー分解能) = \frac{(半値幅)}{(ピークチャンネル)} \propto \frac{\sqrt{N}}{\overline{N}} = \frac{1}{\sqrt{\overline{N}}}$$
(23)

となり, $\frac{1}{\sqrt{N}}$ に比例する. いまの電圧の領域では,印加電圧を上げるとガス増幅率が上がるため, \overline{N} は増加する. それと同時に,その根の逆数に比例する相対的なゆら

図 23: HV ダイアル値とエスケープピークの相対半値幅

ぎは減少する¹⁹. そう考えることで今回の実験結果は妥当であると判断できる.

5.4 線源の位置とMCA出力の関係

先に行った二つの測定では線源を窓の中央に置いた.そこでこの節では線源の位置を変化させた時,MCA出力がどのように変化するかを調べる.測定条件は次の通り.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月2日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

中央に穴の開いた鉛のブロックを線源と窓の間にはさんだ上で線源の位置を中央、右側、左側²⁰と変化させて測定する. それぞれのケースで図 24 のような出力結 果が得られた.

図 24: 線源の位置による MCA 出力の変化

線源の位置が中央からずれると、エネルギー分解能は悪化する. 検出器の端の部 分では芯線付近の電場に局所的な非一様性が生じていて、どこの位置へ飛散したか によって加速のされ方が異なる、といった現象が起こるためと考えられる.

また,線源を右に置くとピークチャンネルは低く,左側に置くと高くなる傾向が ある.²¹ これに関しては原因を突き止めるには至っていない,垂直な壁面が芯線

¹⁹このことは,5.6節の1600V,1800Vのデータを比較することでも確認できる.

²⁰比例計数管の前置回路に近い側を左,遠い側を右とし,それぞれ検出窓の端に線源を置いた.

²¹何かの間違いではないかと考え,後日測定をやり直したが結果は同様であった.これは信憑性の 高いデータといえる.

に近づく事で加速領域の広さが変化すること、あるいは芯線にかかる電圧が場所に よって一定ではない事などが考えられる.

ただ結果から確実に言えるのは、線源の位置によって測定結果は大きく変化する という事である. そこで、これ以降の実験では線源を窓の中央に置くことに統一 する.

5.5 ガス流入量とMCA出力の関係

ガスボンベから比例計数管に導入する混合ガスの流入量を変化させた時,MCA 出力がどのように変化するかを調べる.測定条件は次の通り.

	比例計数管		S	MCA			
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間		
11月8日	1-80	$50 \sim 250 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec		
この設定でガス流入量を 50cc/min 毎に計測すると, 図 25-図 27 のような測定結果							

図 25: ガス流入量の変化に伴う MCA 出力の変化

ピークチャンネルについてはガス流入量が低い領域では比較的低く,流入量が 150cc/minを越えるとほぼ一定となっている. 流入量が150cc/minより十分小さい ときは管内の検出領域に空気が混入し,ガス純度が下がることで増幅率が落ちるた めと考えられる.

図 27: ガス流入量の変化に伴う相対半値幅の変化

相対半値幅については徐々に減少する傾向にはあるが、その値に大きな変動はないと言える.²²

5.6 再現性の確認

HVの印加電圧の変化に対する再現性を確認する実験を行う.条件は次の通り.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月8日	1-60	$100 \mathrm{cc}/\mathrm{min}$	10-50	20	300sec

	比例計	数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月8日	1-70, 1-80, 1-90	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

この条件で、それぞれの電圧で三度計測を行う.ただし、その際には一回の測定を 終えるごとに一度印加電圧を 0V まで下げてから次の実験の設定を再度行うように する.

そのことで実験結果に差異が出るかどうかを見ることで,再現性を把握する.結果は図 28-図 31 のようになった.なお視覚的に分かりやすくするため,グラフには データのピークをガウス関数で近似し,その関数を表示している.

いずれの電圧の場合もピークチャンネル,半値幅共に測定ごとに若干の違いがみ られる.これを同一の印加電圧に対する測定のゆらぎとみなすべきか,印加電圧自 体の違いであるかを検証するために一つの実験を試みた.

	比例	計数管	S	-amp	MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月9日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

この条件で先の実験同様三回測定を行う.その後,印加電圧を高低目盛り線分だ け意図的にずらして測定を行う.5.3節で見たように印加電圧を変えることでピー クチャンネルは指数関数的に変化する.この実験では,目盛りを読むことでは調整 できないような設定のずれが実験に与える影響を調べるためのものである.結果 は図32の様になった

三つの測定結果のピークチャンネルは,意図的にずらした二つのデータのピーク チャンネルの間にあることが分かる.このことから,印加電圧の再現性に疑問符がつ いたことになる.以降,なるべく HV のダイアルには触れずに実験することにする.

²²このことから,安定したデータを得るには 150cc/min 程度の流量が望ましいと分かったが,二 班並行でデータをとる場合に各々150cc/min の流量を得ることはできないため,以降の実験は(若 干不本意ではあるが)100cc/min で行われている.

図 32: MCA 出力の変化 (1800V-2)

5.7 空気の混入による MCA 出力の変化

空気の電子吸着係数はアルゴンガスに比べて大きいので,比例計数管内に空気が 混入し,ガス純度が下がると比例計数管の性能が低下することが予想される.連続 フロー型の比例計数管はその問題を解消すべく常に体積内を通してガスを循環さ せることでガスの純度を保ち.性能の低下を防いでいる.この節では比例計数管の ガスチューブを外しその循環を意図的に止めることでどのように性能が悪化する かを調べる.

	比例計数管		S-amp		MCA
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月9日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8	4	30sec

この条件で一度測定した後チューブを外し、計測時間を 30 秒に変えてできるだけ手早く繰り返し測定, 10 分の後に再びチューブを取り付け, 同様の測定を行う. MCA の出力の変化をチューブを抜いてからの時間で追うと, 図 33 のグラフが得られた. 尚, 時間 (socond) は測定時間中の中央値をとっている.

チューブを抜いた直後から比例計数管からガスが漏れ,空気が混入することでその性能が急速に悪化していくことが分かる.2分を越えると既に有効な測定結果は 得られないといっていい.

チューブを挿し,ガスを導入した後の MCA 出力の変化の様子を示すのが図 34 で ある.

"gasout.prn"

図 34: ガス導入時間と MCA 出力の関係

検出器のガス純度が高くなり、その性能が回復するまでに流量100cc/minでは5 分程度要することがわかる.特にその日最初の実験の際や、いったんガスを抜いた 後測定を再開する場合にはこのことに留意し、10分程度間をおくようにした.

5.8 Amの測定

ここまで⁵⁵Fe の測定を繰り返してきたが, ここで²⁴¹Am に線源を変えて測定を 行う.

実験方法としてはは⁵⁵Feを標準線源として用いることで,²⁴¹Amから放射される X線のエネルギーを測定し,理科年表の値と照らし合わせることでその妥当性を評 価することにした.測定条件は次のようにした.

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月16日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	2	300sec

この条件下でまず⁵⁵Feを測定したところ, ピーク ch は 138(±1)ch となった. P-Amp,S-Amp,MCA それぞれの出力と入力が線形の関係にあるとすると, チャ ンネルナンバーと入射 X 線のエネルギーの間に次の関係があるといえる.

$$E(keV) = 0.0428 \times Peakchannel \tag{25}$$

同様の条件で241Amを測定する.このとき,MCAの出力は図35の様になった.

図 35: Am 測定時の MCA の出力

二つのピークについてそれぞれピーク値, ピークチャンネル, 半値幅を求めると, 次のようになる (誤差は標準誤差). なお, 二つある大きなピークのうち, 左側にある ものをピーク 1, 右側のものをピーク 2 と呼ぶことにする.

	ピーク値 (count)	ピークチャンネル (ch)	半値幅 (ch)
ピーク 1	$408(\pm 9)$	$281(\pm 1)$	$51(\pm 2)$
ピーク 2	$276(\pm 4)$	$347(\pm 1)$	$69(\pm 4)$

5.8節の式からそれぞれをエネルギーに換算すると、Am から放出される放射線の エネルギーが $12.0(\pm 0.2)$ keV、 $14.9(\pm 0.2)$ keV であることになる.

参考文献6によれば²⁴¹Amから放出される放射線のエネルギーのうち主要なものは13.9keV,17.6keV,59.5keVである.エネルギーレベル的には13.9keV,17.6keVの放射線を測定したと考えられるが,誤差を考えてもずいぶんと実験値とは開きがある.また,それぞれのピークの比を取ると1.23となり,理論値の比1.26と近い値となる.これは⁵⁵Feの測定結果いかんで実験値が理論値と整合することを意味する. 最後の最後で比例計数管の比例動作に疑問符がつく結果となった.^{23 24}

6 吸収係数の測定

6.1 吸収係数

放射線が物質に入射したとき、その光子のいくらかが物質と相互作用を起こし、 放射線は減衰する.減衰は一般に次のように記述される.

$$I = I_0 e^{-\mu\rho x} \tag{26}$$

Iは放射線の強度を示しいる.放射線は物質中で指数関数的に減衰する.肩の係数 は物質,入射放射線のエネルギーによって異なり,普通は密度と質量吸収係数と呼 ばれる値の積で記述される.今回は⁵⁵Fe,²⁴¹Am という二つの線源を用いて,アルミ ニウムの質量吸収係数を三つの異なるエネルギーを持つ放射線についてそれぞれ 求めてみることにする.²⁵

6.2 Fe線源を用いた吸収係数の測定

線源として⁵⁵Feを用い,線源と計数管の間にアルミニウム箔²⁶を挿入し,アルミニウムの 5.9keVのX線に対する吸収係数を測定する.測定条件は次のようにした.

²³ちなみに,²⁴¹Amは 崩壊によって²³⁷Np となり,ネプツニウム系列にのる,そこでは基本的に 原子核は中性子多寡の状態にあるため,⁵⁵Fe のような軌道電子捕獲の壊変は起こらない. 観測され た放射線が 線である可能性を考え,以降 X 線という表現を避け,放射線という呼び方を多用する ことにする.

²⁴今後便宜上²⁴¹Am からでる放射線のうち低エネルギーのものを 12keV の, 高エネルギーのものを 14keV の放射線と呼ぶ. ただし, この値は確定値ではなくあくまで仮のラベルである

 $^{^{25}}$ このことが 241 Am のエネルギー問題に何らかのヒントを与えることも期待したものである. 26 厚さ 12μ m のものを使用した.

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月15日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

挟み込むアルミ箔の枚数を変えて測定を繰り返す.その後それぞれの MCA 出力 のピークについてカウント数を積算し,X 線の強度を求めることで,図 36 のような 実験結果を得た.

図 36: 5.9keVX 線のアルミニウムによる吸収

図 36 のグラフの傾きから,係数は 385(±9) cm^{-1} と求まる. これをアルミニウムの密度 $2.7g/cm^3$ で割ることで,実験によって質量吸収係数 $143(±3)cm^2/g$ が測定された.

6.3 Am 線源を用いた吸収係数の測定

6.2 節同様の実験を線源を²⁴¹Am に変えて行う。節の実験から,²⁴¹Am からエネル ギーの異なる二種類の放射線が出ている.そこで,今回はそれら二つの放射線に対 しての吸収係数を一度に測定する事を狙う.測定条件は次のようにした。

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月16日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	2	300sec

基本的には⁵⁵Feの場合と同様に実験の行い, MCA出力の二つのピークについて 解析することで, それぞれのエネルギーについて図 37, 図 38のような実験結果を 得た.

図 37: 「12keV の放射線」のアルミニウムによる吸収

それぞれのグラフの傾きから、12keV、14keV の放射線についてそれぞれ係数は $34(\pm 2)cm^{-1}$ 、18(±2) cm^{-1} と測定できた.また、双方アルミニウムの密度で除する ことで質量吸収係数の実験値として $12(\pm 2)cm^2/g$ 、6.6(±1.6) cm^2/g が求まる. 理科年表にはアルミニウムの質量吸収係数として次の値が記載されている.

波 長 nm	0.200	0.210	0.200	0.110	0.100	0.090	0.080	0.070
質量吸収係数 cm^2/g	135	118	103	18.2	13.8	10.2	7.25	4.95

実験結果と比較すると、⁵⁵Feと²⁴¹Am双方に関して、誤差の範囲でかなり良く一致しているといえる.

ただ,²⁴¹Amから出る放射線のエネルギーの問題に関して,実験値のほうに近い吸収係数が求められたものの,それを完全に決着させるだけの精度は得られなかった.

図 38: 「14keV の放射線」のアルミニウムによる吸収

A バックグラウンド

今回行った実験方法では、線源からのX線とは無関係な自然界からのX線を同時 に計測することになる.そのようなカウントはバックグラウンドと呼ばれる.バッ クグラウンドは測定日、測定時刻によって異なる.そこでここでは長時間バックグ ラウンドを測定することでその量を見積もり、実験への寄与を考える.次の条件で バックグラウンドを計測した.

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月16日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	3600sec

MCAの出力として図 39のようなグラフを得た.

図 39: バックグラウンドの測定

ー時間の計測に対してそれぞれのチャンネルに10前後のカウントが得られた. 実際の実験での計測時間は多くの場合5分であり、その時、特にピークチャンネル付近のチャンネルではバックグラウンドは計測数に比べて十分小さいといえる. そこで、本編ではそれぞれのバックグラウンドの寄与を無視している.

B 気象条件

図を見ると分かるように比例計数管にはガスの排出先としてポリ容器が備え付けられている.ポリ容器内には一定量の水が張られており,チューブの先は水中にある.これによって比例計数管内部の圧力は一定に保たれる...はずであるが,実際にはチューブの先から出るはずの気泡は確認されない.つまり,ガスは比例計数管の随所から外に漏れだしており,ガス圧は大気圧と共に変化している.

加えて、ガスの体積が気温によっても変化することを考えれば、天候の違いによっ てガス密度が測定日によって変化することが実験結果に影響する可能性が考えられる.以下に、それぞれの測定日の気象条件とガス密度²⁷を示す.

測定日	天気	気圧 (hPa)	気温(C)	ガス密度 (g/cm ³)
11月1日	はれ	1019	21	1.665×10^{-3}
11月2日	はれ	1020	22	1.661×10^{-3}
11月8日	はれ	1013	21	1.666×10^{-3}
11月9日	はれ	1013	20	1.661×10^{-3}
11月15日	はれ	1008	19	1.659×10^{-3}
11月16日	はれ	1013	18	1.672×10^{-3}
11月22日	はれ	1019	20	1.669×10^{-3}

それぞれの測定日で,同一条件で測定した⁵⁵Feのデータを比較する.条件は次の 通り.

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
-	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	8-0	4	300sec

ピークのピークチャンネルと相対半値幅を横軸にガス密度をとってグラフにすると,図40,図41のようになる.

第一に,ガス密度の変動がその誤差に対してかなり小さいことがわかる.また,このデータからはガス密度とピークチャンネル,エネルギー分解能との相関関係は確認できない.このことから今回の実験では5.6節で見た印加電圧等による変動に比べて,ガス密度による変動は十分に小さく無視できるという結論に達した.

²⁷本来なら有効数字4桁は主張できないが,差異を明白にするために4桁分掲載した.

C 59keV γ 線の測定

線源²⁴¹Am からは,5節で測定した 13.9keV の他に,59keV の γ 線が出ている. 最後にこの γ 線の検出を試みる. 測定条件は次の通り.

	比例	計数管	S	MCA	
測定日	印加電圧	ガス流入量	FINEGAIN	COARSEGAIN	計測時間
11月22日	1-80	$100 \mathrm{cc/min}$	2-50	2	1080sec

MCAの出力は図 42のようなものとなった.

図 42: MCA の出力

放射線のエネルギーから考えると、左側のピークの5倍のチャンネルナンバーの 地点、つまり400チャンネル前後にピークが現れるはずであるが、大きなカウント 数は観測されない. 検出器に入射した放射線が最初に起こす相互作用は光電効果 であったが、光電効果は内殻電子の束縛エネルギーと入射放射線のエネルギーの値 が近い場合にしか起こらない. 59.5keVというエネルギーはアルゴンのK殻電子の 束縛エネルギー3.2keVよりかなり大きい値であるため検出の引き金となる光電効 果が起こらず、そのため検出できないのだと考えられる. 今回製作した比例計数管 は低エネルギーの放射線の測定に用途が限定されることが分かった.

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] 放射線計測学 裳華房
- [4] **理科年表** 2003 丸善
- [5] 実験法入門 ピアソン.エデュケーション
- [6] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te₁ $334_web.pdf$