

# 物理学実験 II・III

## ガンマ線

担当教員: 藏重  
教室 A 棟地下(A001)

### 目的

この実験ではガンマ線がどのように検出されるかを理解し、ガンマ線と物質の相互作用について学ぶ。また物理実験学で学んだ統計処理の方法を使ってデータ処理を行い、実験データにつきまとう誤差の評価を習得する。

### 実験方法

実験は以下の説明に従って進めて下さい。  
わからないことがあったら実験中でもレポート作成時でも担当教員まで遠慮なく質問に来て下さい。  
レポート課題は実験中にやらなくても結構です。  
レポート作成に必要な数値があれば必要に応じて理科年表等を自分で調べて下さい。

### 一般的注意事項

- 実験室では**飲食、喫煙は禁止**です。
- 実験室の整理整頓を心がけて下さい。
- 実験が終了したら担当教員に報告して下さい。

### 準備

実験には(筆記用具以外に)以下のものがが必要です。

- 電卓
- 方眼及び片対数グラフ用紙 (若干は実験室に用意してあります)

### レポート作成に関する注意

- 実験課題毎に結果をまとめること。
- 「実験の目的」や「実験の意義」は簡潔に
  - 本解説書や参考書を丸移したような「実験の目的」や「実験の意義」は書かなくて結構です。
- 測定の実データ(測定値の羅列)は不要です。測定結果は全てグラフにしてまとめること。
- グラフには測定条件や誤差等の情報も書き添えて下さい。
- データ解析では解析の指針や方法を明記して下さい。
- レポート課題も全てやること。
- 考察と感想は別物です。両方とも書くように。

### 連絡先

藏重 研究室: 自然科学研究科 3号棟 318号室  
TEL: 078-803-5638(直通)  
e-mail : [kurasige@kobe-u.ac.jp](mailto:kurasige@kobe-u.ac.jp)

## [1]電源投入

### 1.1 手順

- i. 検出器の信号出力とオシロスコープをRG174(細い同軸)ケーブルで接続する。(図1参照)オシロスコープ入力をT字端子で分けて50Ω終端抵抗を付ける。オシロスコープの電源を投入する。
- ii. 検出器の高電圧入力と高電圧電源の出力を太い同軸ケーブルで接続する。既に接続されているときは、高電圧電源のチャンネルを確認する。
- iii. 使用しているチャンネルが選択され、表示切り替えが電圧表示になっていることを確認する。
- iv. 電圧調整つまみがゼロであることを確認してから高電圧スイッチを入れる。
- v. 電圧調整つまみのロックをはずして電圧を徐々に上げる。
- vi. 電圧メータを見ながら電圧を約450Vに設定する。

### 1.2 注意事項

- 検出器に1000V以上の電圧をかけると検出器の中にある光電子増倍管を壊す可能性があります。
- 検出器に強い衝撃を与えないでください。
- 高電圧用同軸ケーブルを接続するときは差し込んだあとロックするのを忘れないように。ロックしないと測定中に電圧が変化する恐れがあります。
- 実験が終わったら逆の手順で電源を切ること。
- 検出器の出力を直接オシロスコープに接続すること。前のグループが増幅器を使っているので検出器の出力が増幅器に接続されているかもしれません。

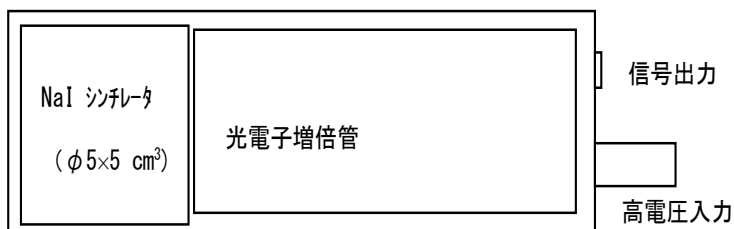


図1 検出器 概略図



図2 高圧電源 操作パネル

## [2] 信号を観察しよう

137Cs の線源を検出器から 5 cm 程度のところに置く。

電圧を上げていくと図 3 のような負極性の信号がぱらぱらと見えてくるはずですが。

### 注意事項

オシロスコープの垂直軸、水平軸、TRIGGER LEVEL、TRIGGER SLOPE は正しく設定されていますか？

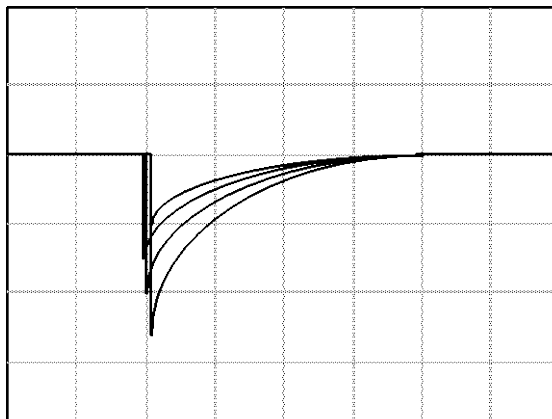


図 3  $\gamma$  線の信号

### ガンマ線を“見る”

- ◆ ガンマ線源を少しずつ検出器に近づける。  
このときガンマ線源の入ったプラスチックケースを絶対に開けないこと。
- ◆ 信号の様子は変わりますか？信号の大きさや形に変化はありますか？
- ◆ 線源を近づけると信号は濃くなり、遠ざけると薄くなるはずですが。自分で線源の位置を変えながら信号の強弱を確かめて下さい。

### 遮蔽効果を調べる

- ◆ 線源と検出器の間にノートのようなものを遮蔽物として置いてみよう。信号の強度に変化はありますか？
- ◆ 鉛板を置いたら変化しますか。鉛ブロックではどうでしょう。

### 重要な注意事項

放射線を必要以上に浴びないために以下のことに注意して今後の実験を進めて下さい。

1. 線源から離れる。
2. 取り扱い時間を短くする。
3. 遮蔽する。一般に原子番号の大きな物質が効果的です。
4. 使用しないときは鉛小屋に保管すること。
5. 実験室での喫煙・飲食は厳禁です。  
万が一放射性物質が体内に入ると距離、遮蔽、時間全ての面で危険。

この実験で使用する放射線源は取り扱い資格を持たない者でも扱うことが出来る程度の弱いものです。放射性物質はプラスチックケース中のアルミ・カプセルの中に密封されており、放射性物質自体が外へ出てくることはありません。ただしカプセルには非常に薄いアルミ箔の窓があるのでプラスチックケースを開けないこと。また盗難、紛失の恐れがあるので使用中に実験室を無人にしないこと。

何か問題が起きたら自分で処理しようとせず、速やかに担当教員（越智、TA 又は粒子物理学研究室教員）に連絡するように。

### [3] ガンマ線の検出原理

オシロスコープのディスプレイに現れている信号は確かにガンマ線源から来ているようですが、どのようなプロセスで信号が見えるのか考えてみましょう。どんな素粒子でもそれが検出器と何らかの反応をしなければ我々はそれを「見る」ことは出来ません。粒子を「見る」原理は検出器の種類によって様々ですが、この実験で使う装置では以下のことがおきています。

#### 3-1 ガンマ線と物質の反応

ガンマ線と物質の反応（「相互作用」と呼びます）には次の3種類があります。

##### 光電効果

図4のようにガンマ線の全エネルギーが吸収されて物質中の軌道電子がたたき出される。電子の運動エネルギーはガンマ線のエネルギーから電子の束縛エネルギーを引いた値になる。この反応は原子核等の作る外場の中でしか起こらない。（レポート課題2参照）

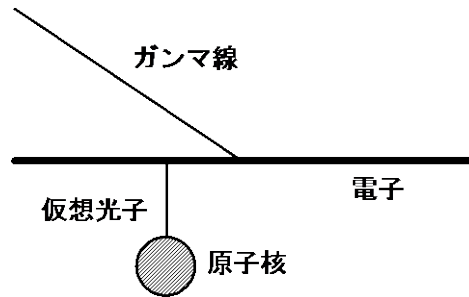


図4 光電効果の模式図

##### コンプトン散乱

図5のように物質中の電子とガンマ線が弾性散乱をしてガンマ線のエネルギーの一部が電子に与えられる。

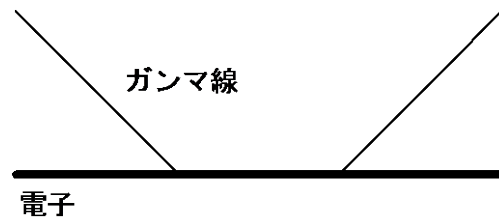


図5 コンプトン散乱の模式図

##### レポート課題1

電子は最初静止していると考えて、ガンマ線の散乱角と散乱後のガンマ線の持つエネルギーの関係を求めよ。また電子の受け取るエネルギーの最大値と最小値を求めよ。

（ガンマ線のエネルギー～電子の静止質量ですから、相対論で考えてください）

##### 対生成

図6のようにガンマ線のエネルギーが電子・陽電子対に与えられる。この反応はガンマ線のエネルギーが電子と陽電子の質量の和、即ち電子質量の2倍、より大きいときに初めておきる。

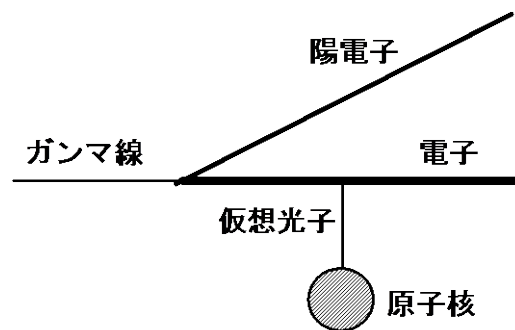


図6 対生成の模式図

##### レポート課題2

対生成は真空中では起こらない。何故か？

##### レポート課題3

対消滅で生成される2つのガンマ線のエネルギーを求めよ。

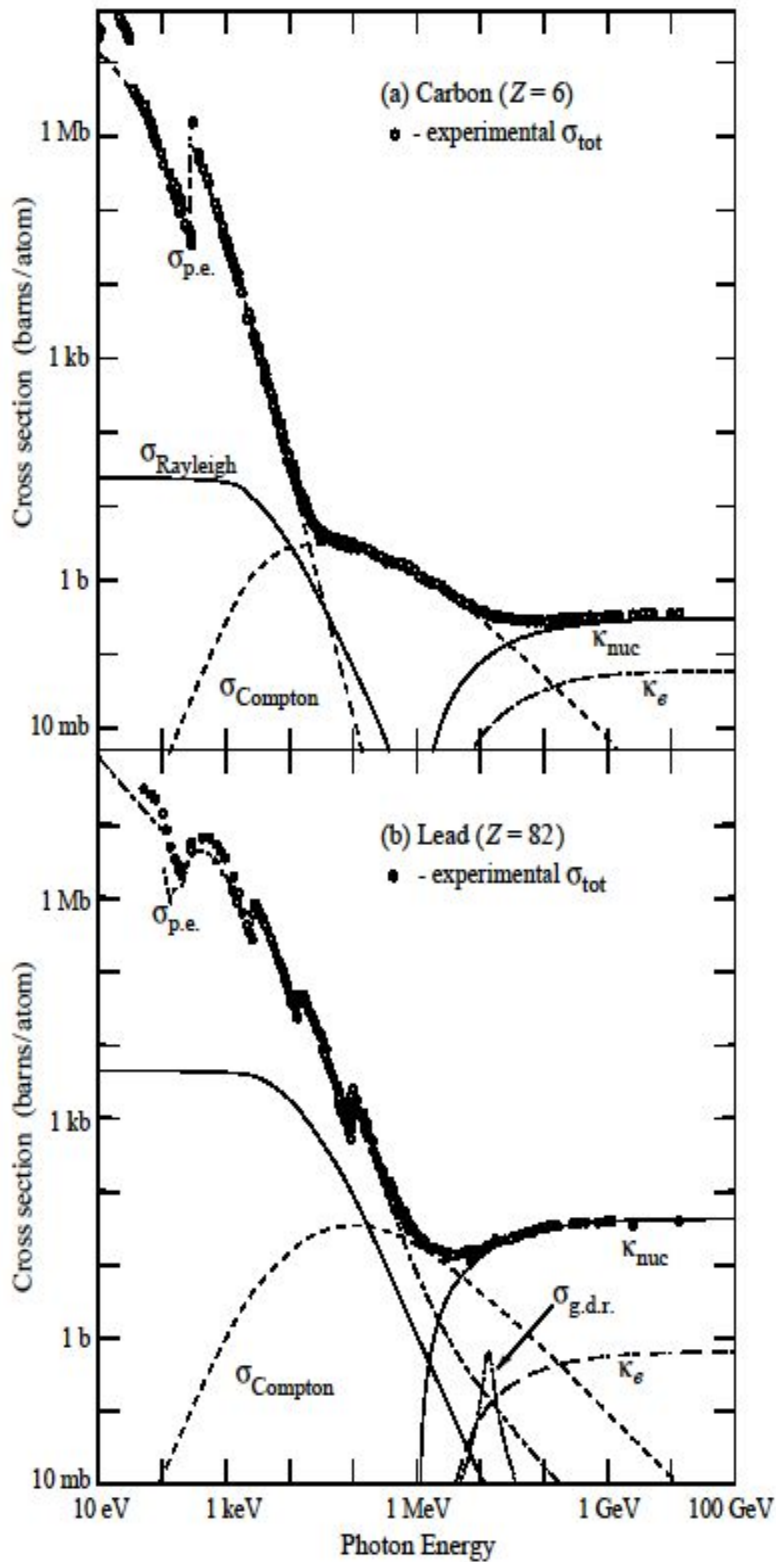


図 7 光子と原子核との散乱断面積

これらのガンマ線と物質の反応は、ガンマ線のエネルギーや物質の種類によって反応の起こる確率が異なります。

図7は炭素（上）と鉛（下）のγ線との反応の断面積（p14 参照）を表したものです。

例えば 100keV 以下のエネルギーでは光電効果が殆どだが、10MeV 以上では対生成の確率もっとも大きくなります。また、原子番号Zが大きい物質ほど、光電効果の確率が大きくなります。

### 3-2 シンチレータ中の荷電粒子

ガンマ線と物質の相互作用によって生成された電子はシンチレータ原子を励起しながらエネルギーを失い、ついには止まってしまいます。電子が止まるまでに走る距離（飛程）は、物質の種類によっても異なりますが、

$$R = 0.542E - 0.133 \quad (\text{但し } E > 0.8\text{MeV})$$

という関係があります (Feather の式)。ここで、電子のエネルギーE は (MeV) で、飛程 R は質量厚さ (g/cm<sup>2</sup>) で与えられます。例えば、1MeV の運動エネルギーを持つ電子の飛程は、おおよそ 0.4g/cm<sup>2</sup> となります。

陽電子も電子と同様にエネルギーを失っていくが、電子と違って周りには陽電子の反粒子である電子が数多く存在します。陽電子は電子と対消滅して2つ（稀に3つ）のガンマ線に崩壊します。

#### 質量厚さ

物質の長さを表す単位として「質量厚さ」をしばしば用いる。物質の密度に長さをかけたもので、固体や液体といった物質の形態によらない量です。(g/cm<sup>2</sup>)

この実験で用いるタリウム活性化沃化ナトリウム NaI (Tl) のような無機シンチレータの場合、シンチレータ中を通過する荷電粒子により結晶中の価電子帯の電子が伝導帯へ上げられ、電子・正孔対を作る。電子と正孔は微量に添加された活性化物質（このシンチレータ場合ナトリウム、Na）の位置へ移動し、そこで再結合してエネルギー準位の差に相当するエネルギーを光の形で放出する。これがシンチレーション光となる。光の波長分布はシンチレータによるが、NaI (Tl) の場合 415nm にピークがある。

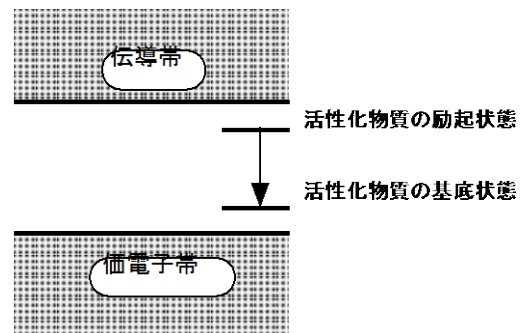


図 8 シンチレータ物質の電子のエネルギー準位の模式図

シンチレーション光の発光時間特性は活性化物質の励起状態から基底状態への遷移時間で決定される。励起状態の寿命を  $\tau$  とすると、光量 = 定数  $\times \exp(-t/\tau)$  で表される。

#### 実験課題 1

検出器の出力波形は発光時間特性を表している。オシロスコープでの観察からこの寿命を求めよ。Hint: 図 3 に示した波形が  $t=0$  で励起された原子が時定数  $\tau$  で指数的に減少する様子を表している。オシロスコープのカーソル機能を使って、パルスのピーク電圧が 1/2 になる時間  $\tau_{1/2}$  を測定し、 $\tau_{1/2}$  から  $\tau$  を求める。また、オシロスコープの BW (BandWidth) Limit 機能を使うと測定しやすくなる。

(参考) オシロスコープで観測される電圧と時定数の関係は以下の通り。

$$V(t) = V \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = V \times \left(\frac{1}{2}\right)^{(t/\tau_{1/2})}$$

### 3-3 光信号から電気信号への変換

荷電粒子の通過によって放出されるシンチレーション光は微弱なため肉眼で見ることが出来ないし、光量を定量的に測定することもできない。そこで光検出器を用いて光信号を電気信号に変換する。この実験では光電子増倍管 (photomultiplier tube, PMT, フォトマル) を用いる。(図9参照)

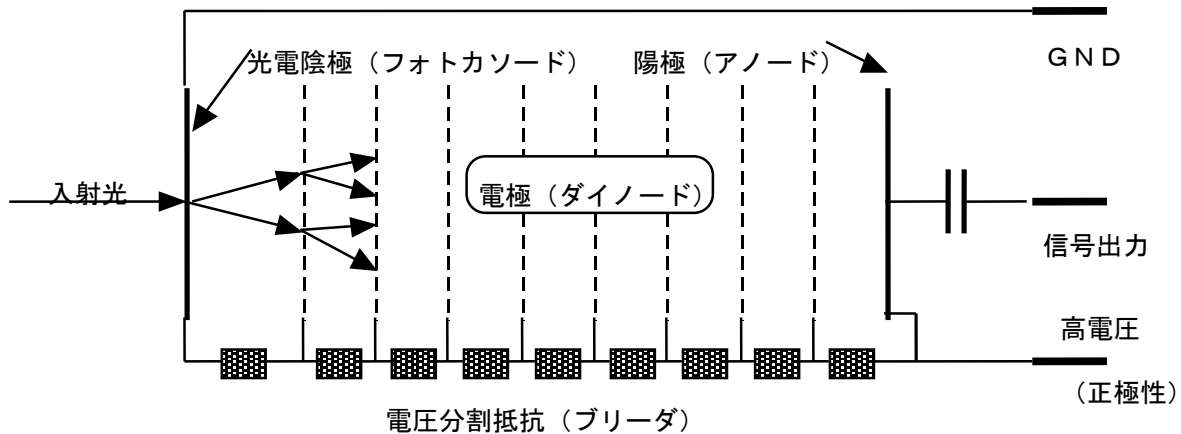


図 9 光電子増倍管の模式図

シンチレーション光はガラスの窓を通して光電面 (光電陰極) に入射する。光電陰極にはアルカリ金属物質が用いられ光電効果により光電子を放出する。光電効果を起こす確率は量子効率と呼ばれ、20-30%程度である。

光電子はカソード・ダイノード間の電圧で加速され第1ダイノードにぶつかり3-4個の2次電子を放出する。この過程が繰り返され最終的に  $10^5$ - $10^6$  倍の増幅率が得られる。光電子増倍管にかける高電圧を上げると電極間の電圧が大きくなり、加速された電子の運動エネルギーが増して、電極でたたき出す電子の数が増加する。

### 3-4 信号の増幅とパルス波形の整形

増幅器には様々な種類の物があるが、この実験で使っているもの (図12参照) には以下の機能がある。シングルチャネルアナライザ (SCA) の機能については後で説明する。

1. 信号を積分して電荷量に比例した電圧出力を出す。
2. 一定の形のパルス波形に整形する。
3. 信号の大きさを増幅する。

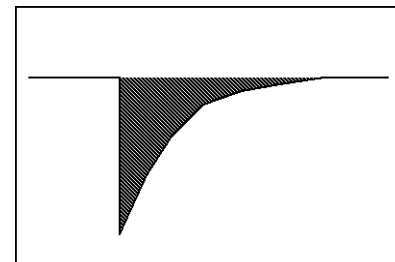


図 10 PMT の出力信号と電荷

## 信号の積分

図9のような電圧パルスを積分するということは、 $I = V/R$ の関係から電流値を積分することに相当し、 $Q = \int I dt$ から積分した値は電荷量に比例する。図11のパルスのピーク電圧が図10の斜線部の面積に比例している。

検出器の出力を増幅器の入力に接続して、AMP出力をオシロスコープで観察しながら増幅率を変えてみよう。増幅率を上げすぎると10V付近でパルスの大きさが頭打ちになり（飽和する）入力と出力の間の比例関係がなくなる。

## 実験課題2

光電子増倍管の増幅率（GAIN）は印加電圧を変ええることで変化する。オシロスコープで増幅器のモニタ出力信号を見ながら電圧を少しずつ変えてみよう。（この時、オシロスコープの50Ωの終端抵抗は外すこと。）信号の大きさが変わりましたか？パルスの濃いところに目を付けてその電圧がどう変化するか測定してみよう。

増幅率と印加電圧の間には  $(GAIN) = (HV)^n$  という関係があります。このnを求める。印加電圧は400-500Vの間を10Vステップで変える。最後は出力信号が2Vになるように印加電圧をセットしておく。

## 参考

べき乗の関係は両対数グラフ用紙にプロットすると直線になる。この直線の傾きがnの値を表している。（電圧の変化幅が小さいときは近似的には片対数グラフで直線を書き、その直線からnを計算してよい。本実験ではこの方法を用いる。）

$V \propto GAIN \propto (HV)^n$  が成り立つ時、両辺の対数を取り、直線上の2点を代入することでnを計算することが可能。

## 注意

- ・増幅器の増幅率を測定中に変えないこと。
- ・オシロスコープのカーソル機能が便利！

## 3-5 まとめ

これまでのプロセスを復習すると以下の量はすべて比例することがわかる。

1. ガンマ線と物質との相互作用によって生成される電子の運動エネルギー
2. シンチレーション光の光量
3. 光電子増倍管の光電面から放出される光電子数
4. 光電子増倍管から出力される電子の数
5. 増幅器の出力電圧

従ってオシロスコープで観察しているパルスのピーク電圧の値は、シンチレータ中で生成された電子のエネルギーに比例している。

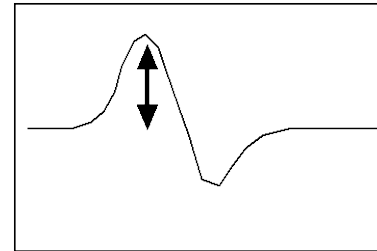


図 1 1 整形された波形



図 12 増幅器の各機能



## [4] エネルギースペクトル

### 実験課題3

オシロスコープで観察しているパルスの波形をスケッチして保存しておこう。（オシロスコープのディスプレイを数秒間露光して写真に撮ったようなスケッチをする）光電子増倍管にかけている電圧、増幅器の増幅率、オシロスコープの水平軸（時間軸）のスケール、垂直軸のスケール等も必ず記録しておくこと。

### 実験課題4

オシロスコープ上の濃淡が信号の頻度を表していることを考慮して、パルスの大きさの頻度分布（波高分布）、即ちある電圧値のパルスがどのくらいの頻度で出ているかを示すグラフを推定してみよう。波高分布の山や谷がどこにあるか、また山の幅はどのくらいか等オシロスコープの観察でわかる限り詳しいグラフを作成して、その意味するところを考えてみよう。

<ここまで1週目>

#### 4-1 ガンマ線源

この実験で使用しているガンマ線は図 13 のように  $^{137}\text{Cs}$  原子核が半減期 30.17 年で  $^{137}\text{Ba}$  原子核に  $\beta$  崩壊することによって放出される。 $^{137}\text{Cs}$  の 94.6% は  $^{137}\text{Ba}$  の励起状態へ遷移するので、ガンマ線のエネルギーは基底状態とのエネルギー準位の差に等しい 0.662MeV となる。 $^{137}\text{Ba}$  の基底状態へ直接遷移する 5.4% についてはガンマ線は放出されない。

(ただし、 $^{137}\text{Ba}$  の励起状態から基底状態への遷移のうち 10.1% は内部転換というガンマ線を放出しない過程により、エネルギーが軌道電子へ直接与えられる為ガンマ線は放出されない)

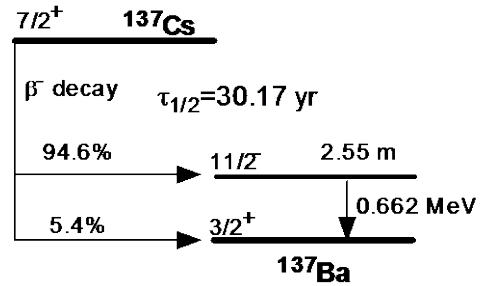


図 13  $^{137}\text{Cs}$  の崩壊形式

#### 4-2 光電ピーク

実験課題 4 で波高分布に鋭いピークがあること、またこのピークより大きなパルスが少ないことが推定されたと思うが、(予想できなかった人はもう一度オシロスコープで信号をよく眺めること) このピークの起源は何だろう? 波高分布は電子のエネルギー分布に対応しているから、ピークを持つということは「ある決まったエネルギーの電子が数多く生成されている」ということを意味する。エネルギーが一定のガンマ線と物質の相互作用の中で電子のエネルギーがある一定の値を持つ反応は光電効果だけで、電子のエネルギーはガンマ線のエネルギーにほぼ等しい。コンプトン散乱では散乱角によって電子のエネルギーが変化する。また対生成は 0.662MeV では起こらない。従って波高分布のピークは光電効果によることがわかる。このピークを光電ピークと呼ぶ。光電ピークより高いパルスが出ないことも容易に理解できる。光電ピークより低いパルスはコンプトン散乱で散乱された電子によるものである。

#### 4-3 波高分布の測定装置

シングルチャネルアナライザ(SCA) (図 12 参照) とカウンタを用いて波高分布を定量的に精度よく測定しよう。SCA のウィンドウ幅を十分に狭い値に設定して、幅を一定に保ちながらウィンドウの位置を少しずつ変化させる。各ウィンドウでのパルスの頻度を計測すれば波高分布が得られる。この時、ダイヤルのゼロ点が正しく設定されていることを確認すること。

##### ディスクリミネータ

信号をその大きさと弁別するための装置をディスクリミネータという。ディスクリミネータは入力信号のピーク値がある閾値

(threshold) を越えたときに論理信号を出力する。ダイヤルのゼロ点が正しく設定されていることを確認すること。

##### シングルチャネルアナライザ

2つのディスクリミネータを内蔵しており、入力信号のピーク値が1つの閾値を越え、もう一方の閾値を越えないときに論理信号を出力する。2つの閾値の間をウィンドウと呼び、ウィンドウの下限値と幅はつまみで調整することが出来る。(図 14 参照)

図 14 のような信号の場合は、ピーク値がウィンドウの上限値より大きいので出力信号は出ない。



図 14 カウンターの各種機能

### カウンタ

カウンタは論理信号の数を計測する。(図 14 参照)

SCA の出力とカウンタの入力を同軸ケーブルでつないで実際にパルスの頻度を測定してみよう。タイマ機能を内蔵しているので、予め測定時間を設定しておけば測定時間経過後自動的に計数を終了する。

### ウィンドウの幅

オシロスコープでパルスを注意深く観察すると、光電ピークの幅が推定できる。ウィンドウの幅をこれより十分に小さい値に設定しないと、光電ピークを再現することは出来ない。ただし幅が小さすぎると測定点の数が膨大になる。またウィンドウ幅の設定目盛りの精度も考慮すると 50mV 以上に設定するのが望ましい。

### 計数率

各測定点での計数率はガンマ線源と検出器の距離によって変化する。ガンマ線は等方的に出ているから、距離を 2 倍にすれば計数率は 1/4 に減る。

オシロスコープでパルスを観察しながらガンマ線源を検出器に近づけるとどうなりますか？だんだんパルスが濃くなり、おかしな形のパルスが目につくようになるでしょう。これは検出器で反応するガンマ線の頻度が増加して、ある反応によるパルスが出ている途中で次の信号が来たために起きます。パイルアップと呼ばれるこのような現象が目立たない程度に線源と検出器の距離を調整して下さい。

## 4-4 Poisson 分布

原子核の崩壊のようなランダムな現象の数をある時間間隔 (例えば 1 分間) 計測した場合、1 回目の測定と 2 回目以降の測定では必ずしも同じ結果になるとは限らない。仮に無限に長い時間測定すれば、または計測を限りなく繰り返せばその結果は真の平均値に近づくであろうが、現実的ではない。従って実験で得られる測定値は測定毎の統計的なバラツキ、即ち統計誤差を必ず持つ。

平均値が  $\mu$  であることがわかっているランダムな現象を計測して計数値  $n$  を得る確率は以下の式で与えられる Poisson 分布をする。  $n$  の期待値は  $\mu$ 、標準偏差は  $\sqrt{\mu}$  となる。

$$P(n, \mu) = \frac{e^{-\mu} \mu^n}{n!}$$

期待値  $n$  の値が大きくなると Poisson 分布は期待値  $\mu$ 、標準偏差  $\sqrt{\mu}$  のガウス分布 (正規分布) に近づく。平均値が 10 を越えると近似はかなり良い。

相対誤差は以下の式で表され、計数値が大きいくほど誤差は小さくなる。

$$\frac{\sigma}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{\mu}}$$

実際には 1 回しか測定しないので、測定値  $n$  が元の分布の平均値  $\mu$  に等しいと仮定することになるので、測定の統計誤差は  $\sqrt{n}$ 、相対誤差は  $1/\sqrt{n}$  となる。

## 実験課題 5 (オプション)

ガンマ線源と検出器の位置を動かさないように注意して、数秒間の測定を数十回繰り返してみよう。平均値が 1~2 となるようにガンマ線源の距離、ウィンドウの幅、測定時間を調整して計数の分布をヒストグラムにして平均値と標準偏差を求める。次に平均値が 100 以上になるように設定して同様の測定をする。

Poisson 分布の予想値と合っていますか？

### 計測時間

各測定点での計測時間はどれくらいにするべきでしょうか？

1 秒に設定すれば実験は早く終了しますが…。

#### 4-5 波高分布の測定

いよいよ測定に入ろう。まず測定装置のいろいろな設定値を見直す。新しい設定値と光電ピークの値は記録しておくこと。出来ればパルスのスケッチを残す。

- 高電圧：  $^{137}\text{Cs}$  の光電ピークが 2V 程度になるように調整する。増幅器の出力は 10V で飽和するので、後で使用するエネルギーの高い別のガンマ線源も同じ設定で測定できるようにする。
- 増幅率： 粗調整は最小の 4 に設定、微調整つまみは左に回して最小にする。  
測定の途中で動かすとそれまでの測定が全て無駄になる！
- ウィンドウ幅： 高電圧、増幅率を変えたので実験課題 5 で決めた方法で設定し直す。
- 装置の配置： パイルアップの効果がなないように位置を決める。  
後で断面積を求めるときに計数値が重要になるので配置（ガンマ線源と検出器の距離等）を正確に記録しておくこと。測定中に動かさないように。
- 計測時間： 波高分布の光電ピークでの測定誤差が 1%以下で測定できるような時間にする。

#### 実験課題 6

以下の手順で波高分布の測定し、エラーバー付きのヒストグラムを書く。

1. ウィンドウの下限値をゼロにして測定を開始。
2. ウィンドウの下限値をウィンドウの幅 (50mV) だけずらしながら測定を続ける。
3. 光電ピークを過ぎて計数率がゼロに近い状態が連続したら測定を終了する。

#### 注意

- 下限値がゼロ付近では莫大な計数値になるかもしれないが、これは装置のノイズによるもので、電圧を上げていけばなくなります。気にしないで下さい。
- 測定中に計測数の記録を取りながら、グラフ用紙にその場でプロットしていくこと。プロットを見ながら、ピークの位置やピークの幅が予想した通りか等のチェックをする。実験が全部終了してレポートをまとめているときにデータがおかしいことに気づいても遅い。

#### バックグラウンド

計数値は果たして 100%ガンマ線源から来ているものだろうか？ 殆どがガンマ線源から来ていることは確かなようですが、念のためガンマ線源以外の要因で信号が出る頻度を測定する。例えば宇宙線が検出器を通過によって、また環境放射能（建物の壁などに含まれる微量の放射性物質）等のバックグラウンドにより検出器は信号を出す。ミュー粒子の測定では宇宙線は決してバックグラウンドではない。

#### 実験課題 7

測定器の配置、設定は変えずにガンマ線源だけを遠ざけて実験課題 6 と同様の測定し、ヒストグラムを書く。課題 6 との比較のために、同じグラフに書く。ただし電圧によって計数率が大きく変化しないところでは測定点を適当に間引いても良い。（例えばウィンドウ幅を 50mV に設定しているならば、ウィンドウの下限値を 250mV ずつ変えていく）

#### 測定誤差

測定値  $n$  には  $\sigma = \sqrt{n}$  の誤差が付く。バックグラウンドを差し引くときは

$$n_{\text{signal}} = n - n_{\text{background}}$$

という計算をするが  $n_{\text{signal}}$  の誤差は

$$\sigma_{\text{signal}} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{\text{background}}^2}$$

で与えられる。

### 実験課題 8 (オプション)

実験課題 6 で得られた波高分布から実験課題 7 で測定したバックグラウンドを差し引いて最終的な波高分布が得られる。データには必ず誤差を付けること。(自信があれば誤差の計算、プロットは時間中に行わなくても可。)

#### 4-6 波高分布の考察

### 実験課題 9

実験課題 6 で得られた波高分布から光電ピークの電圧値と光電ピーク周辺の分布の半値全幅(計数率がピーク値の半分になる電圧値の幅)を求めよ。このような幅を FWHM (Full Width at Half Maximum) という。

平均  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  の正規分布(ガウス分布)

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

の場合、標準偏差  $\sigma$  と FWHM の関係は、

$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \cong 2.35\sigma$$

となる。

光電効果によって生成される電子の運動エネルギーは 0.662MeV と決まった値を持つが、測定された光電ピークは実験課題 8 で求めたような幅を持つ。光電ピークがデルタ関数的に鋭いピークを持たない理由を考えよう。

検出原理で説明したように、ガンマ線がシンチレータと反応してから電気信号として取り出されるまでには様々な過程を経ている。シンチレーション光の光子数、光電子増倍管の光電子数、光電子増倍管で増幅された後の電子数はいずれも Poisson 分布に従って統計的に変動する。これらが光電ピークの幅となって観測されている。4-4 で説明したように、統計的変動(相対誤差)は  $1/\sqrt{n}$  で表されるため、最も数が少なくなる過程(この実験の場合光電子増倍管の光電陰極から放出される光電子数)の誤差が大きな効果になる。

### 実験課題 10

光電ピークの幅から光電子増倍管の光電陰極から放出される光電子数を求めよ。

### レポート課題 4

①波高分布の光電ピークより低い部分はコンプトン散乱によって作られた電子の運動エネルギー分布を示す。エネルギーが 0.662MeV のガンマ線が NaI シンチレータとコンプトン散乱で作られる電子の運動エネルギーの最大値と最小値を計算せよ。

②光電ピークの電圧を 0.662MeV, 0V=0.0MeV だと仮定して、上記のエネルギーを電圧に換算して、実験データと比較せよ。

## [5] 光電効果の断面積

### 断面積

ある反応の起こりやすさを表す量として「断面積」を用いる。断面積を直感的に理解するには標的粒子の物理的な断面積と考え、入射粒子がこの断面に当たれば反応して、その外側を通過すれば反応は起こらないと考えればよい。1個の標的粒子に対して粒子束密度  $n[\text{cm}^{-2}]$  の粒子が入射して  $N$  個の反応が起こるとする。このとき断面積  $\sigma$  は以下の式で定義される。

$$\sigma = \left( \frac{N}{n} \right) \quad (5.1)$$

断面積  $S$ 、長さ  $x$ 、粒子数密度  $\rho$  の検出器に粒子が入射して  $N_{\text{total}}$  個の反応が起こった場合、反応の確率は以下の式で与えられる。

$$P = \frac{N_{\text{total}}}{n \cdot S} = \frac{N \cdot \rho \cdot S \cdot x}{n \cdot S} = \sigma \cdot \rho \cdot x \quad (5.2)$$

ここで  $N_{\text{total}}$  および  $\rho$  は単位時間当たりのもの、観測時間の積分値のどちらかで考えることもできる。

入射粒子が物質中を通過するとき、物質との反応によってその数がどのように変化するかを考える。厚さ  $dx$  の物質中で反応の起こる確率  $dP$  は次の式で表される。

$$dP = \sigma \cdot \rho \cdot dx = \frac{-dN}{N} \quad (5.3)$$

この式を解いて

$$N = N_0 e^{-\sigma \rho x} = N_0 e^{-\mu x} \quad (5.4)$$

が得られる。ここで  $\mu [\text{cm}^{-1}]$  を吸収係数と呼ぶ。物質の状態（気体、液体、固体）によらない量として吸収係数を物質の密度で割った質量吸収係数  $\mu' [\text{g}^{-1} \text{cm}^2]$  を用いることがある。

### ガンマ線の強度

ガンマ線の崩壊頻度は以下のように精密に較正されている。

$^{137}\text{Cs}$  : 1994年11月7日12時に3.62MBq(線源505)及び、1996年7月9日12時に1.10MBq(線源621)

$^{22}\text{Na}$  : 2009年6月15日に、0.945MBq及び、0.909MBq

1Bq = 1ベクレル = 毎秒1崩壊

### 実験課題1.1

- ① 実験課題6の結果を参考にして、光電ピークを(十分に)含むようにウィンドウを設定して計測することによって、光電ピークの総カウント数すなわち反応数 ( $N_{\text{total}}$ ) を求めよ。

### 実験課題1.2

- ① 線源強度の半減期を考慮して実験日での崩壊頻度及びガンマ線の強度を求めよ。
- ② NaIシンチレータの位置でのガンマ線の単位時間当たりの粒子束密度  $n_\gamma [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}]$  を求めよ。ガンマ線は線源から等方的に出るとして、線源と検出器の距離から算出できる。
- ③ シンチレータ中のナトリウム原子(原子量23.0)と沃素原子(原子量126.9)の数密度  $\rho_{\text{Na}} [\text{cm}^{-3}]$  および  $\rho_{\text{I}} [\text{cm}^{-3}]$  を求めよ。NaIの密度は  $3.67 [\text{g}/\text{cm}^3]$  である。

### 実験課題1.3

- ① 課題11で観測された単位時間当たりの反応数  $N_{\text{total}}$  と実験課題12で求めた単位時間当たりの粒子数密度、(5.2)式を使ってガンマ線が沃素原子と光電効果を起こす散乱断面積  $\sigma_{\text{I}}$  を求めよ。(NaIにはナトリウム原子と沃素原子が同数含まれているが、ナトリウムは沃素に比べて原子番号が小さいので光電効果の断面積は無視できる)。NaIシンチレータのサイズは直径5cm、厚さ5cmである。
- ② 統計誤差を含む実験データから求めた断面積は当然実験的な誤差を持っている。即ち全く同じ実験をもう一度やっても、各測定点での計数値は最初の実験とは異なる値になり、そのデータを解析して得られる断面積の値も違うはずである。断面積の統計誤差を評価せよ。

<ここまで2週目>

## [6]吸収係数の測定

ガンマ線が光電効果を起こす断面積を [5] で測定したが、これは“標的粒子=検出器”という場合に使える方法で、例えば鉛板のようにガンマ線と反応しても信号を出さない物質については断面積を求めることが出来ない。ガンマ線源と検出器の間に物質を置くとガンマ線の一部がその物質と反応して検出器での計数率が減る。物質と反応せずに通過するガンマ線の数は [5] で説明したように物質の厚さを増すと指数関数的に減少する。ガンマ線源と検出器の間に置く物質の厚さを変えて計数率を測定すれば吸収係数を求めることが出来る。

### 実験課題 14

上記の方法を用いて、 $^{137}\text{Cs}$  の  $\gamma$  線による (アクリル、) アルミニウム、(ステンレス、) (黄銅、) 鉛について質量吸収係数を求める。( ) はオプション

まず、これまでの方法で  $^{137}\text{Cs}$  のエネルギースペクトルを取得する。次に、光電ピークを十分に含むようにウィンドウ幅を設定して吸収体の厚さを変えながら計数率を測定する。この時、線源の位置や測定時間を調整して、吸収体の無い時のカウント数が 15000 以上になるようにすると良い。

この方法では以下の事象がカウントされ、吸収体中での光電効果とコンプトン散乱(前方散乱を除く)による吸収係数を測定することになる。

1. ガンマ線が全く反応せずに吸収体を通過して検出器内で光電効果を起こす。
2. ガンマ線が吸収体内でコンプトン散乱をして少しだけエネルギーを失って(ウィンドウ幅からはずれない程度)前方に散乱し、検出器内で光電効果を起こす。

### 実験課題 15

測定した各物質の質量吸収係数を計算、比較せよ。片対数グラフにプロットして直線で fit すればよい。質量吸収係数の統計誤差も評価すること。誤差がわからないとそれぞれのデータを比較しても有意な差があるのかわからないのか判断できない。

### 実験課題 16

実験課題 14 と同様に、今度は  $^{22}\text{Na}$  の  $\gamma$  線のエネルギーの大きい方のピーク (1275keV) を用いて、鉛、アルミニウムについて吸収係数を測定する。

まず、エネルギースペクトルを取得、その結果を元にして、光電ピークを十分に含むようにウィンドウ幅を設定すること。可能であれば線源の位置、測定時間などを調整して、吸収体の無い時のカウント数は、概ね 5000 以上になるようにすると良い。

### レポート課題 5 (オプション)

実験課題 14 と 16 において、同じ吸収体を用いた場合の質量吸収係数をそれぞれ比較せよ。また、光電効果の断面積のエネルギー依存性を調べ、今回の測定結果と合っているか、論ぜよ。

## [7]未知試料の同定

素性のわからない放射線源を調べてどのような核種であるかを探ってみよう。例えばガンマ線源であれば光電ピークの測定から放出しているガンマ線のエネルギーを決めることができる。ガンマ線のエネルギーは原子核のエネルギー準位を表しており物質固有のものである。これを手がかりに放射性物質の一覧表から核種を同定することが出来る。

### 放射性同位元素の壊変

放射性同位元素の壊変に伴って発生する放射線には次の3種類があり、放射線の種類、エネルギーは核種によって様々である。

- α線：α粒子（ヘリウム原子核、陽子2個と中性子2個の結合状態）。物質中でのエネルギー損失が大きいため飛程が短く、容器の外に出てくる確率はきわめて低い。
- β線：電子又は陽電子。3体崩壊（電子、ニュートリノ、壊変後の原子核）するので電子のエネルギーは広く分布する。通常、電子（陽電子）の最大エネルギーが表に記載されている。
- γ線：原子核の励起状態間のエネルギー準位の差に等しいエネルギーを持つ。

### 7-1 エネルギー較正

実験値と実際のエネルギーの値の対応をつけることをエネルギー較正という。波高分布の測定で得られた光電ピークの電圧値は0.662MeVというエネルギーに対応しているはずだが、測定装置のオフセットのため必ずしも正確ではない可能性がある。オフセットの原因としては、増幅器出力のベースライン（信号がないときの電圧値）がゼロからずれている、真の電圧値と目盛りの読みが一致していない等が考えられる。そこで複数のエネルギーのわかっているガンマ線の光電ピークを同じ装置で測定して、<sup>137</sup>Csのデータと合わせてエネルギー較正を行う必要がある。

#### ガンマ線源

ここでは下式の崩壊をする<sup>22</sup>Naを用いる。

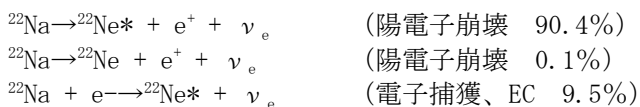


図15からわかるように<sup>22</sup>Neの励起状態(<sup>22</sup>Ne\*)から基底状態への遷移により1.275MeVのガンマ線を放出する。陽電子は対消滅によりレポート課題3で求められたエネルギーのガンマ線を放出する。従って<sup>137</sup>Csのガンマ線と合わせて3つの異なるエネルギーのガンマ線を用いてエネルギー較正を行うことが出来る。

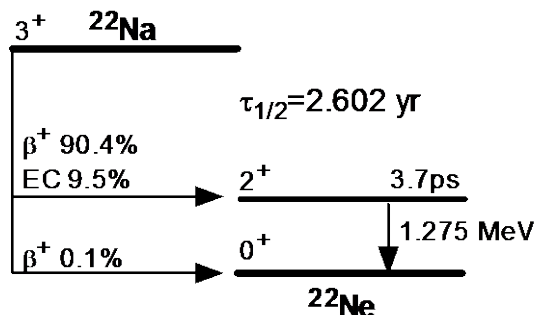


図15 <sup>22</sup>Naの崩壊形式

### 実験課題17

<sup>22</sup>Naおよび<sup>137</sup>Csのエネルギースペクトルから、エネルギーと光電ピークに対応する目盛りの値の間の関係式を求めよ。



## 7-2 未知試料の同定

### 実験課題 18

皆さんが持っている知識を総動員して核種を決めて下さい。

#### ヒント

1.  $\alpha$  線は飛程が短いため線源からたとえ出ていても検出器に到達しないと考える良い。
2. 電子又は陽電子が出ているかどうか調べ、どの程度の最大エネルギーを持つか検討をつける。  
 $\beta$  崩壊で放出される電子のエネルギーは数 MeV 以下である。電子の飛程を調べて、どの程度の物質質量があれば電子を遮蔽できるか考えよ。(電子を遮蔽した方がガンマ線のスペクトルをより正確に測定できる。)
3. 光電ピークを探して波高分布を測定し、ガンマ線のエネルギーを決める。
4. 放射性同位元素の一覧表から怪しい元素を見つけだす。  
 $\beta$  線の有無、もし出ている場合には電子のエネルギーの最大値のおおよその値、半減期、ガンマ線のエネルギー等の情報を最大限活用すること。

**健闘を祈る！**

核種	半減期	崩壊形式	$\beta$ 線の最大エネルギー(分岐比)	$\gamma$ 線のエネルギー[MeV] (分岐比)
$^{46}\text{Sc}$	83.8 d	$\beta^-$	0.357 (100%)	0.889 (100%) 1.121 (100%)
$^{52}\text{Mn}$	5.59d	EC	(71%)	0.774(90%)
		$\beta^+$	0.575(29%)	0.936(95%) 1.434(100%)
$^{54}\text{Mn}$	3122. d	EC	(100%)	0.835 (100%)
$^{58}\text{Co}$	70.92 d	EC	(85%)	0.811 (99%)
		$\beta^+$	0.475 (15%)	
$^{60}\text{Co}$	5.27 y	$\beta^-$	0.318 (100%)	1.173 (100%) 1.333 (100%)
$^{84}\text{Rb}$	32.9 d	EC	(100%)	0.881 (68%)
		$\beta^+$	0.777 (14%) 1.66 (14%)	
		$\beta^-$	0.318 (100%)	
$^{106}\text{Ru}$ $\rightarrow ^{106}\text{Rh}$	371.6 d	$\beta^-$	0.039 (100%)	
	29.8 s	$\beta^-$	2.41 (10%) 3.03 (8%) 3.54 (79%)	0.512 (21%) 0.622 (10%)
$^{134}\text{Cs}$	2.065 y	$\beta^-$	0.0886 (27%) 0.658 (70%)	0.563 ( 8%) 0.569 (15%) 0.605 (98%) 0.796 (85%) 0.802 (9%)
$^{152}\text{Eu}$	13.33 y	EC	(72%)	0.122 (28%) 0.245 (8%) 0.964 (14%) 1.086 (10%) 1.112 (14%) 1.408 (21%)
		$\beta^-$	0.696 (14%) 1.48 (8%)	0.344 (27%) 0.779 (13%)