

演習番号 2

放射線源を用いた γ 線のエネルギー測定

2007 年 高エネルギー加速器研究機構サマーチャレンジ演習
担当：首都大学東京 住吉孝行、汲田哲郎、春名毅、遠藤裕介

1 目的

素粒子実験では、放射線のエネルギー測定を行う必要が頻繁にある。

今回は、 ^{60}Co と ^{137}Cs 、 ^{22}Na のエネルギースペクトルを2種類のシンチレーターと光電子増倍管を用いて測定する。また、NIM回路やCAMAC回路の各モジュールの使い方に慣れ、高エネルギー実験の基礎を学ぶ。

2 測定の原理

2.1 放射線源

本実験では3種類の放射線源を用いる。

① ^{60}Co

^{60}Co は5.26年の半減期で、 ^{60}Ni の2506 keV 4+励起状態に β 崩壊する。この励起状態はすぐ、1332 keV 2+状態、続いて0+状態にカスケード崩壊し、1173、1332 keVの2本の γ 線を放出する。

② ^{137}Cs

^{137}Cs は30.0年の半減期で崩壊し、93.5%の分岐比で ^{137}Ba の661.7 keV 11/2- 励起状態に遷移する。この準位は半減期2.55分で3/2+ 基底状態へ γ 崩壊し、661.7 keVの γ 線を放射する。この競合過程として ^{137}Ba のK殻電子の内部転換が起こり、それに伴い32.2 keVのBa KX線が発生する。

③ ^{22}Na

^{22}Na は5.272年の半減期で崩壊し、90.2%の分岐比で ^{22}Ne の2+励起状態に β^+ 崩壊する。この励起状態はすぐ、1274.5 keVの γ 線を放出して崩壊する。

よって、 γ 線のエネルギー分布には1274.5 keV、および対消滅 γ 線による511 keVのピークが観測されるはずである。

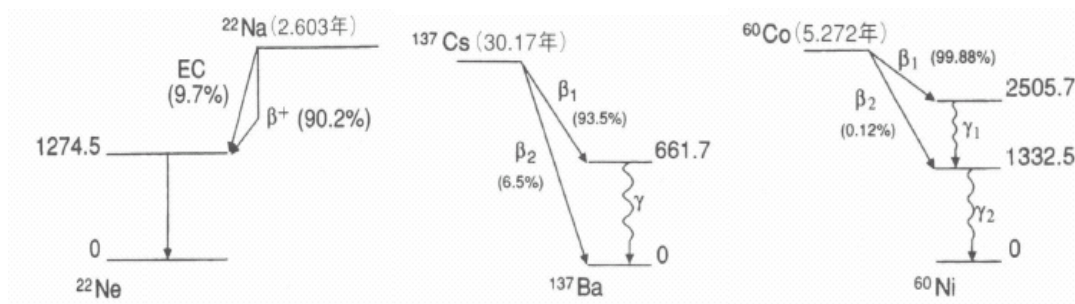


図1 各放射線源の崩壊様式

2. 2 γ 線と物質の相互作用

光子が物質(今実験ではシンチレーター)を通過するとき、光の吸収・散乱が起こり、入射方向と同方向に進む光の強度はだんだん減少する。一般に、任意の振動数の光に対して、光電効果・Compton 効果・電子対生成が起こる。

①光電効果

入射光子のエネルギーがある一定の値より高くなると、光子は原子内に束縛されている電子と衝突した際に相互作用し、自身の全エネルギー $h\nu$ を電子に与える。このとき、電子が $h\nu - I$ だけ運動エネルギーを持って原子の外へ飛び出す現象を光電効果という。ここで、 I は電子が原子の外に飛び出すためのエネルギー、すなわちイオン化エネルギーである。

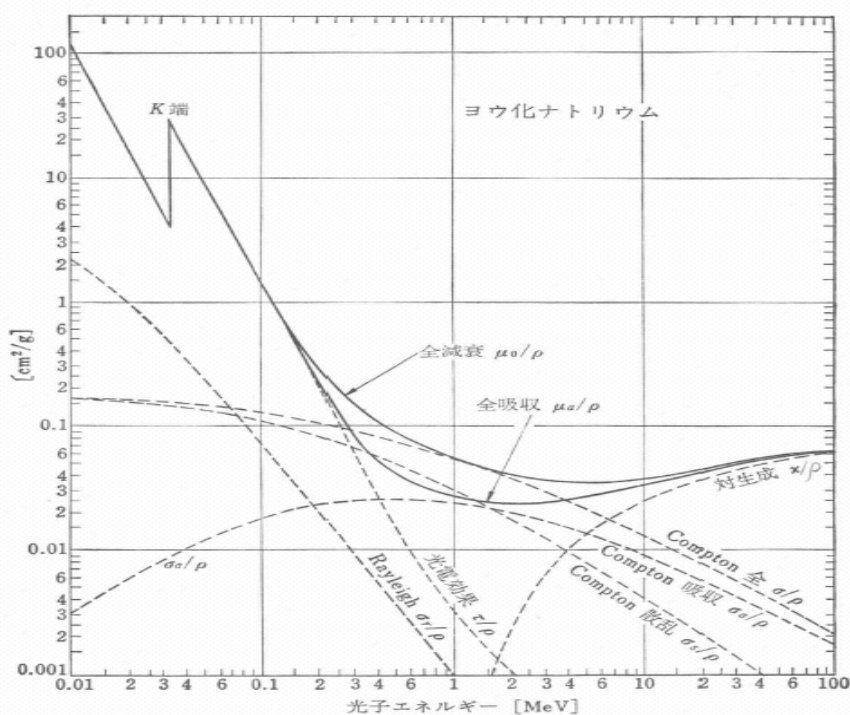
光電効果の起こる確率は、物質の原子番号 Z の 5 乗に比例し、低エネルギー領域では入射 γ 線エネルギーのほぼ 3.5 乗に比例する。

②コンプトン効果

入射光子のエネルギーがさらに大きくなり、原子内の電子の束縛エネルギーが無視できるようになると、光子と電子の衝突は光子と自由電子の衝突と考えることができる。このとき光子は電子によって散乱される。これをコンプトン散乱という。

③電子対生成

光子が原子核の近傍で消滅し、陽電子と電子の対を生成することを電子対生成という。この過程が起こるためには、光子のエネルギーが電子対の全静止質量($2m c^2 = 1.02 \text{ MeV}$)よりも大きくならなければならない。



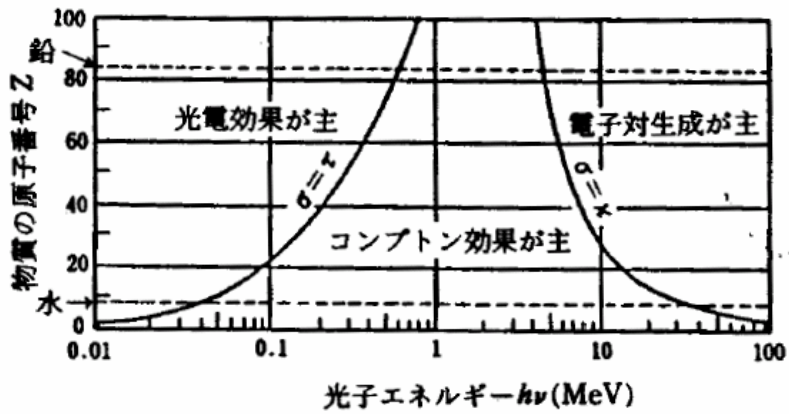


図2 γ 線と物質の相互作用

図2はNaIにおける光子エネルギーと散乱断面積の関係、または物質の原子番号との関係のグラフである。

これを見ると光子エネルギーがだいたい1 MeV 付近であることから、相互作用は主に光電効果とコンプトン効果であることがわかる。

3 実験装置

3.1 電子回路図

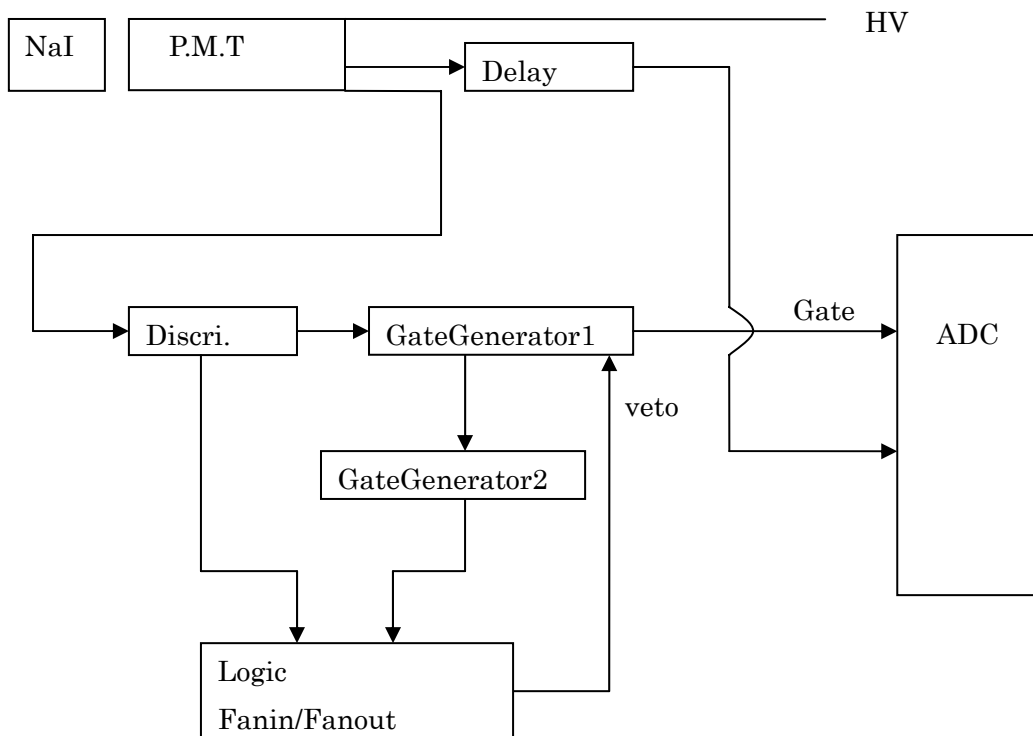


図3 電子回路図

主なモジュールの説明は以下のとおり(詳しい説明は別紙参照)

～Discriminator～

入力パルス信号の波高がある一定の電圧(threshold)を越えた瞬間に、一定の時間幅の出力パルスを送り出すものである。

～Gate Generator～

入力された論理パルスの幅を任意の時間幅に引き伸ばすものである。幅のオーダーをロータリースイッチで選び、微調整をトリマで行う。ADCの gate を作るのに必要。

～ADC(Analog to Digital Converter)～

ある幅を持つ Gate 入力に対して、その幅の時間内に入力された analog IN からのパルスの高さをデジタル量に変換する装置。ADC には Charge sensitive 型と Peak Sensitive 型の 2 種類あり、今回の実験では Charge sensitive 型を用いる。

Charge sensitive ADC では GATE が入っている時間に入力された電荷をコンデンサーに蓄積する。電化はコンデンサー両端の電圧に比例するのでこの電圧をデジタル化する。

3. 2 使用するシンチレーターの特性

・ NaI

NaI に微量の Tl を不純物として添加した結晶。この不純物は NaI 結晶中において活性化中心として働き、シンチレーション効率を高める。NaI(Tl)はガンマ線の測定に最も広く使われているシンチレーターである。発光効率は 25 MeV/1photon。

特性としては以下のことが挙げられる。

- ①結晶の主成分であるヨウ素の原子番号が高いためγ線の光電効果の確率が高く、中・高エネルギーのγ線の測定に適している。
- ②発光効率が非常に高くシンチレーターとしてはエネルギー分解能が高い。
- ③吸湿性のため大気中では変質して劣化しやすいので、通常はアルミニウムのケース内に密封されている。そのため、荷電粒子の測定はできない。

・ CsI

CsI は NaI より密度が少し高いため、γ線の吸収係数が NaI より大きい。また、その結晶は機械的衝撃に強いため、宇宙用の機器としてその応用が見出されている。

種類	密度(g/cm)	屈折率	減衰時間	蛍光波長 max	相対感度
NaI(Tl)	3.67	1.85	230[ns]	410[nm]	100
CsI(Tl)	4.51	1.79	1000[ns]	565[nm]	45
プラスチック	1.03	1.58	2.4[ns]	430[nm]	

3. 3 光電子増倍管(PMT)

シンチレーターからきた光は光電効果により、金属でできた光電陰極膜で表面近くにある電子が20%程度の効率で飛び出す。これを光電子という。この電子は管内の静電場によって加速されて第1段の2次電子電極D1(dynode)に衝突する。その電子が反射してくる他に、金属内の電子が新たに飛び出して来る。これを2次電子という。ここで1個の入射粒子に対し3~4個の2次電子が作られ、これが次の第2段電極D2でさらに3~4倍に増幅される。

こうして最終段の陽極(anode)では空間電化の飽和が起ころぬ限り $2 \times 10^{5 \sim 7}$ に増幅された電流パルスを得る。

光電子増倍管にまったく光が入らない時でもいくらかの陽極電流が流れる。これを暗電流という。この主な原因は

- ・熱電子：光電面、ダイノードからの熱電子放出
- ・残留ガスのイオン化：PMT 内部で残留気体分子がイオン化され、光電面に戻り擬似信号を発生。

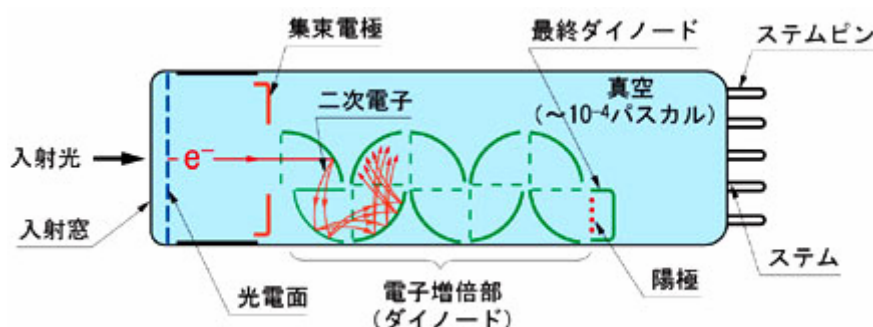


図4：光電子増倍管の構造

4 実験のおおまかな流れ

4. 1 準備

- ① シンチレーターにグリスを塗ってから、それを PMT の光電面にテープでつける。その際、シンチレーターが光電面の中心からずれないように注意する。
- ② PMT の HV コネクタと、NIM の Negative High Voltage Supply を SHV ケーブルでつなぐ。さらに Signal out にもケーブルをつなげておく。
- ③ PMT の周りにブラックシートを巻く。光漏れがあると正しい実験結果が得られないので入念に。
- ④ シンチレーター近くに RI ソースを置く。
- ⑤ シグナルのうち片方をオシロスコープにつないでから HV を徐々に上げていく。だいたい 1000 V 程度まで上げるとパルスが見えるはずである。

4. 2 Gateの調整

次に、Gateを作成する。

もう一方の出力信号を Discriminator につなぎ矩形波を作る。

Discriminatorはthresholdの値を超えたときに矩形波を出す(図5)ので、入力パルス全て Gate に入れるには Gate Generator で幅を広げ、さらに入力パルスを Delay で遅らせる必要がある。

最終的にオシロスコープの波形は図6のようになる。

(ピンク色の線が入力信号。緑色が Gate)

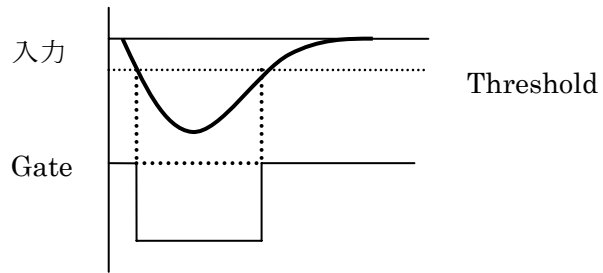


図5

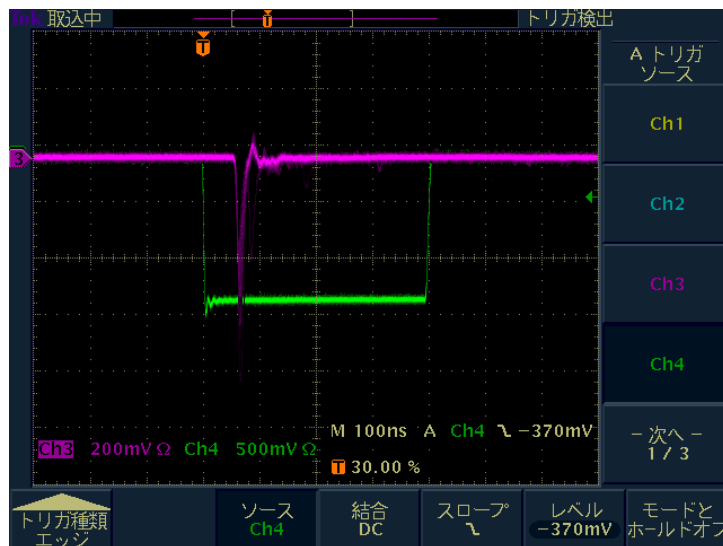


図6：入力信号と Gate

4. 3 実験で計測するデータ

I Cs線源 (661.7keV) における ADC カウントの PMT 高電圧依存性

II ^{137}Cs と ^{60}Co 、 ^{22}Na の γ 線のエネルギー分布を測定する。 ^{137}Cs の分布から ^{60}Co 、 ^{22}Na の γ 線のエネルギーを算出する。

4. 4 考察してほしいポイント

1. この実験における誤差はどのように求められるか。
2. γ 線のエネルギー分布において、光電ピーク以外のピークは何を表しているのだろうか。
3. この実験におけるエネルギー分解能はいくらになるだろうか。
4. シンチレーターの違いは結果にどのように影響するだろうか。

5 注意点

- ・ 放射線源は紛失しないようにきちんと管理する。
- ・ HV の値は 1800 V 以上上げないようにする。
- ・ PMT はわずかな光を増倍する装置なので、暗幕をかけない状態で電圧をかけると壊れる。なので暗幕を取るときは HV の値が 0 V になっていることを確認すること。