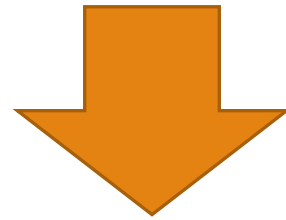


ニュートリノヘリシティの測定

篠田遼太郎
中村七海
藤木恒成
堀祐輔

実験の目的

ニュートリノのヘリシティの測定を行い、ヘリシティが左巻きに偏極していることを確認する。

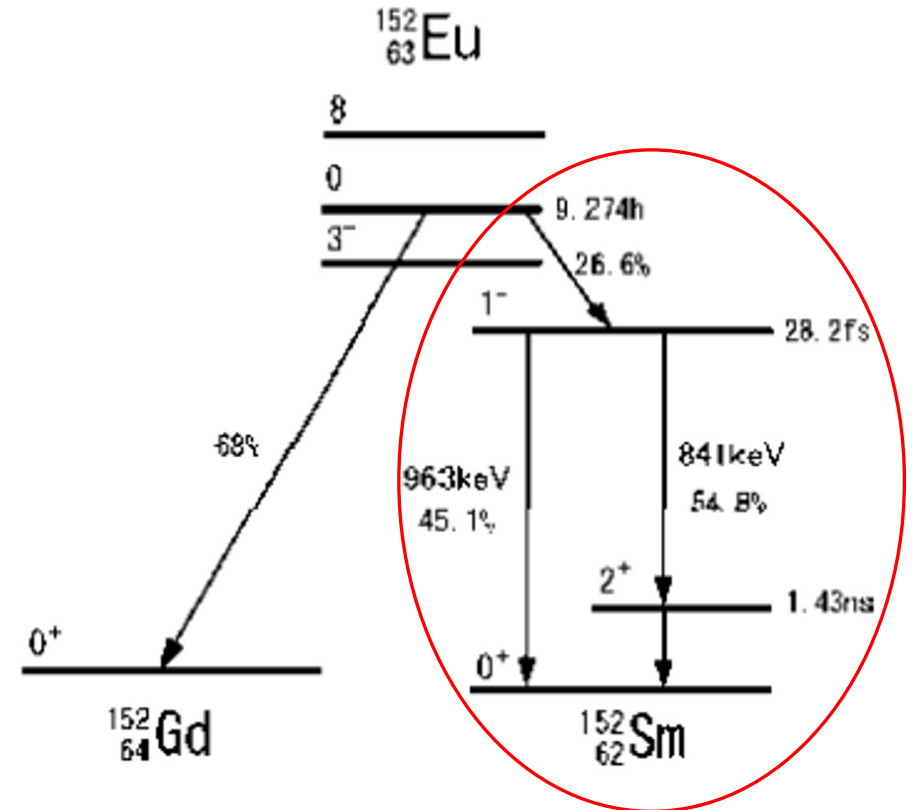


弱い相互作用においてはパリティ対称性が破れていることを確認する。

実験原理(1958年 Goldhaberの実験)

$^{152m1}\text{Eu}$ の崩壊のうち、右側のもの(EC崩壊)に着目する。

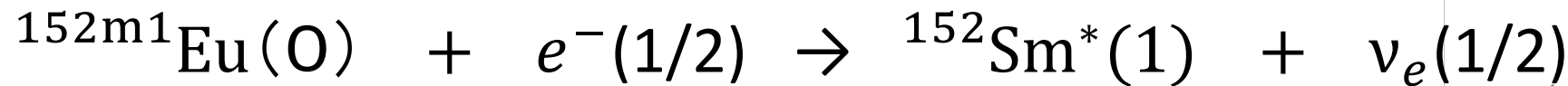
(841keV、963keVは Sm^* 静止系でのエネルギー)



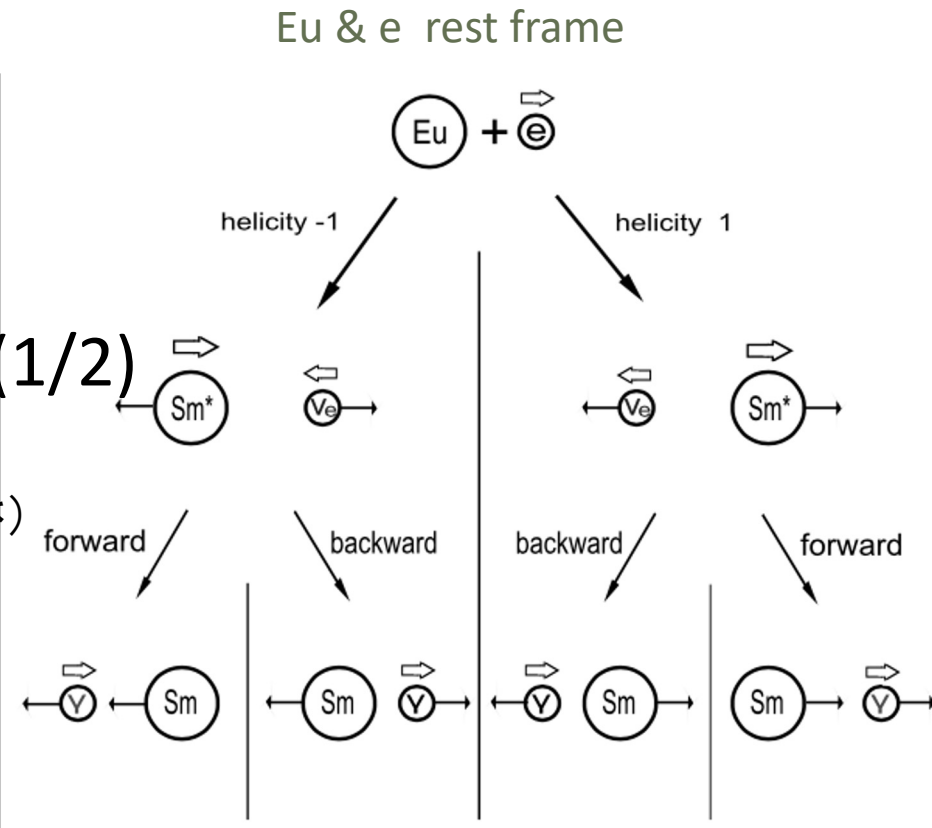
実験原理(1958年 Goldhaberの実験)

利用する反応 \rightarrow $^{152m1}\text{Eu}$ の電子捕獲

① ニュートリノの生成

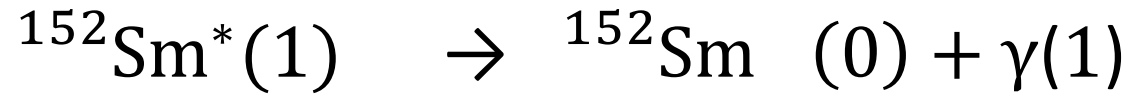


(カッコ内は各粒子のスピンの大きさ)

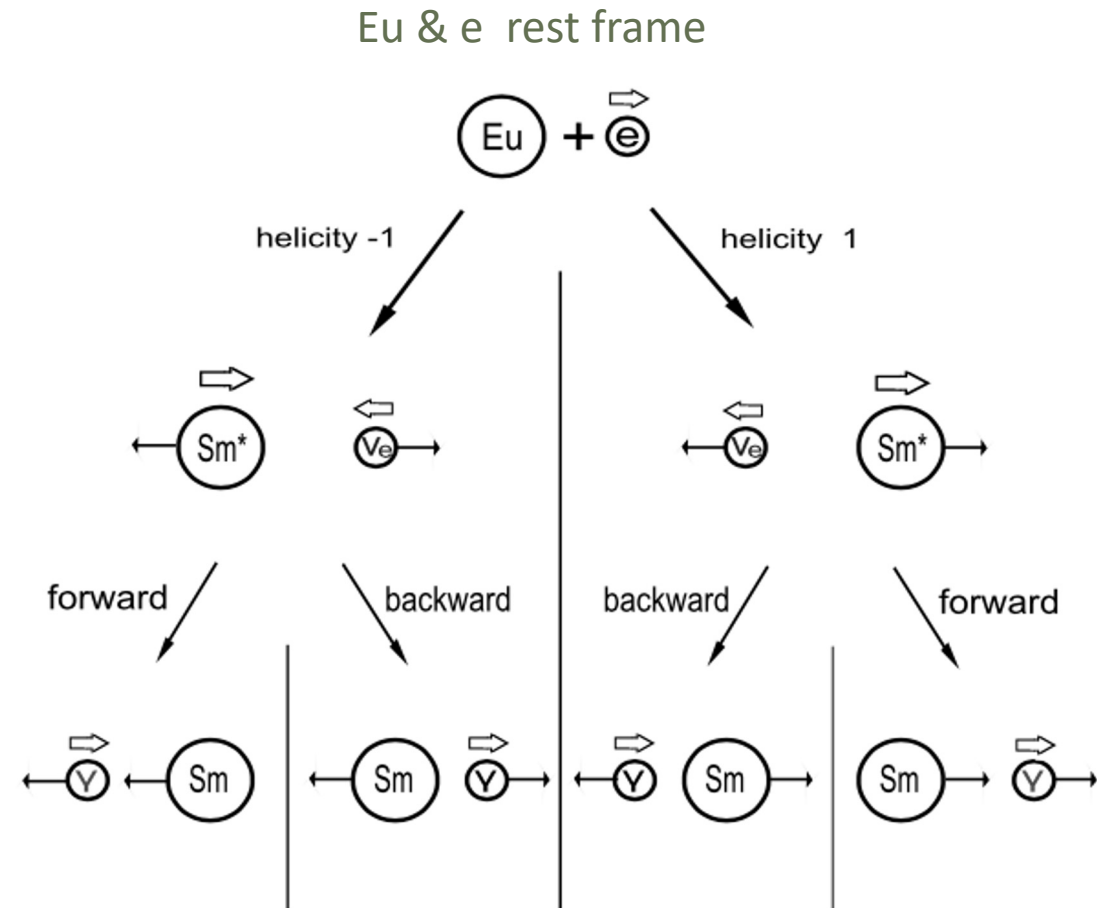


実験原理(1958年 Goldhaberの実験)

②Smの γ 放出



(カッコ内は各粒子のスピンの大きさ)

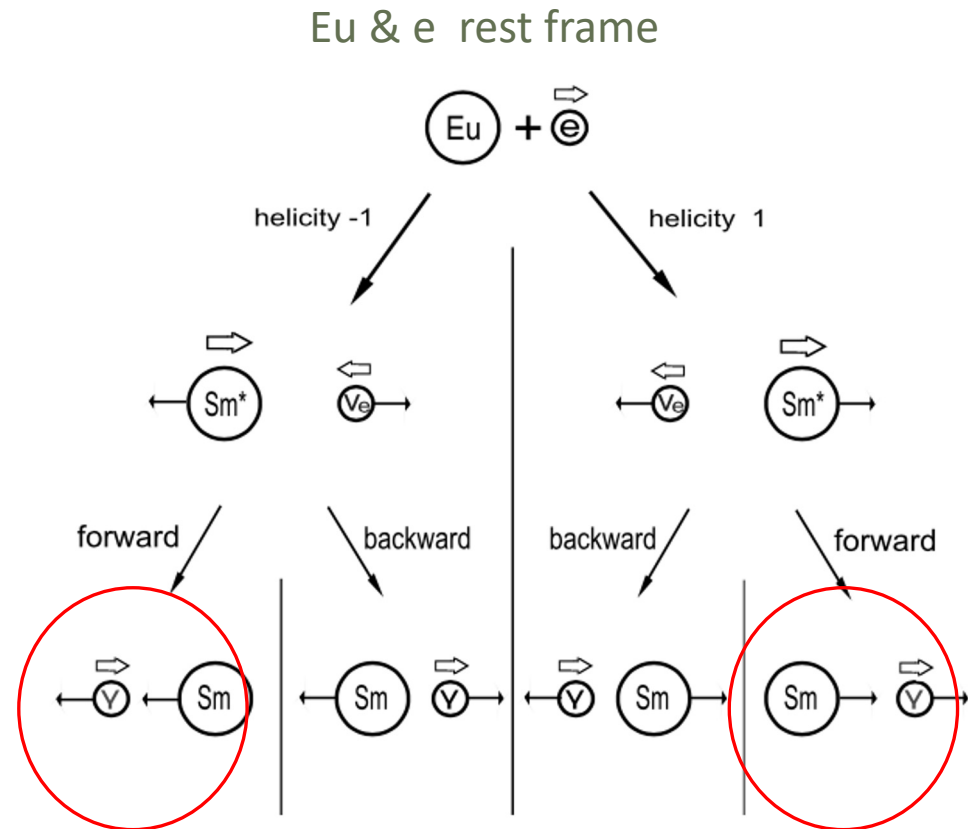


実験原理(1958年 Goldhaberの実験)

Smの前方に放出された γ の偏極がニュートリノの偏極を引き継いでいる



前方放出された γ 線を選択的に測定することでニュートリノの偏極を調べることができる。



実験原理(1958年 Goldhaberの実験)

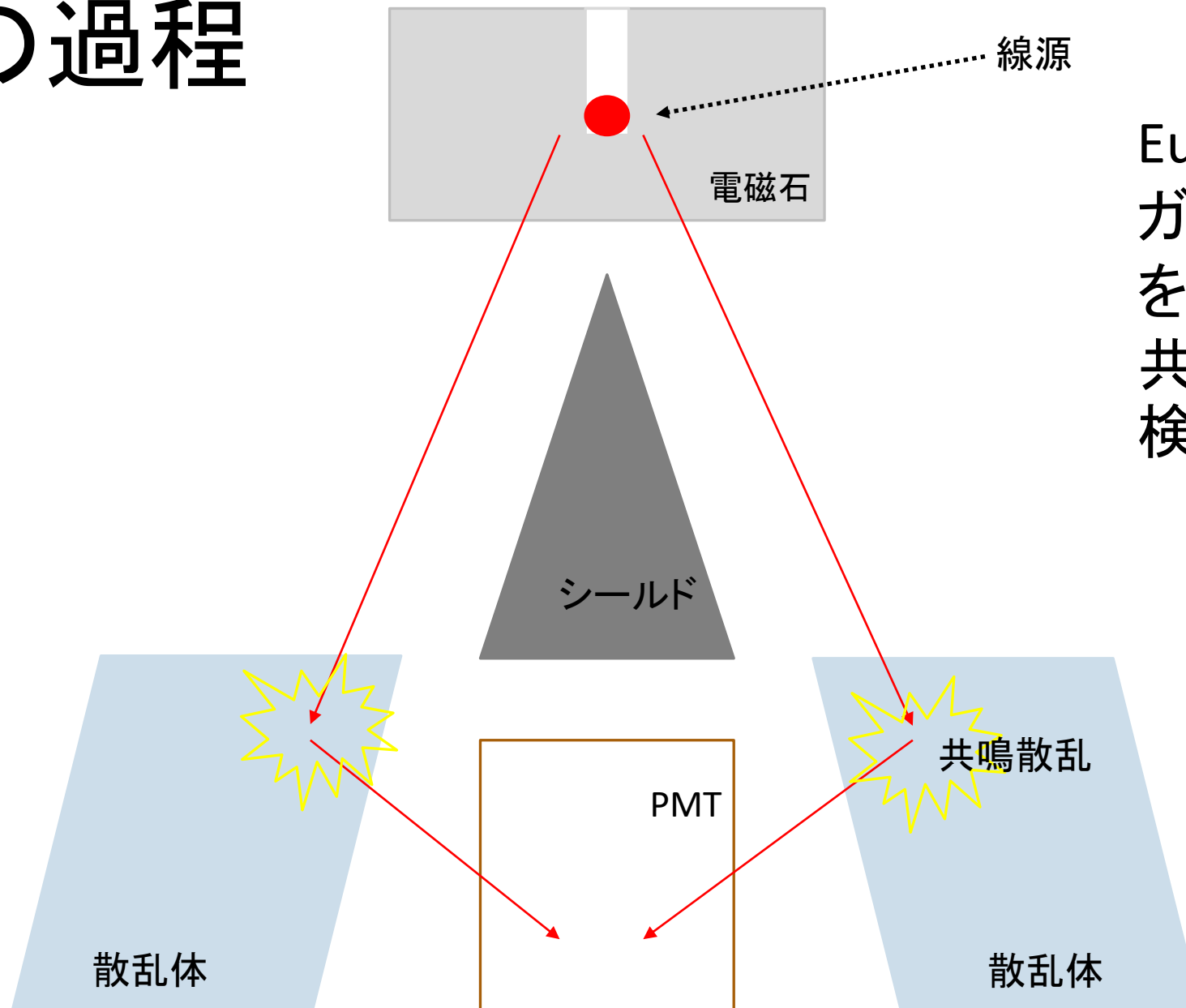
Lab系で見ると、 $^{152m1}\text{Eu}$ と e^- が静止

→ Sm^* から放出された γ 線のエネルギー、963keVは Sm^* 静止系でのエネルギーなので、Lab系で見ると、前方放出された γ は $\sim 974\text{keV}$ 、後方放出された γ 線は $\sim 952\text{keV}$ のエネルギーを持つ。

→前方放出された γ 線が電磁石(後述)でコンプトン散乱し、エネルギーが10keV程度落ちた場合のみ散乱体で共鳴散乱される。
(841keVについても同様。)

この方法により、前方散乱された γ 線のみを選択的に集める。

実験の過程

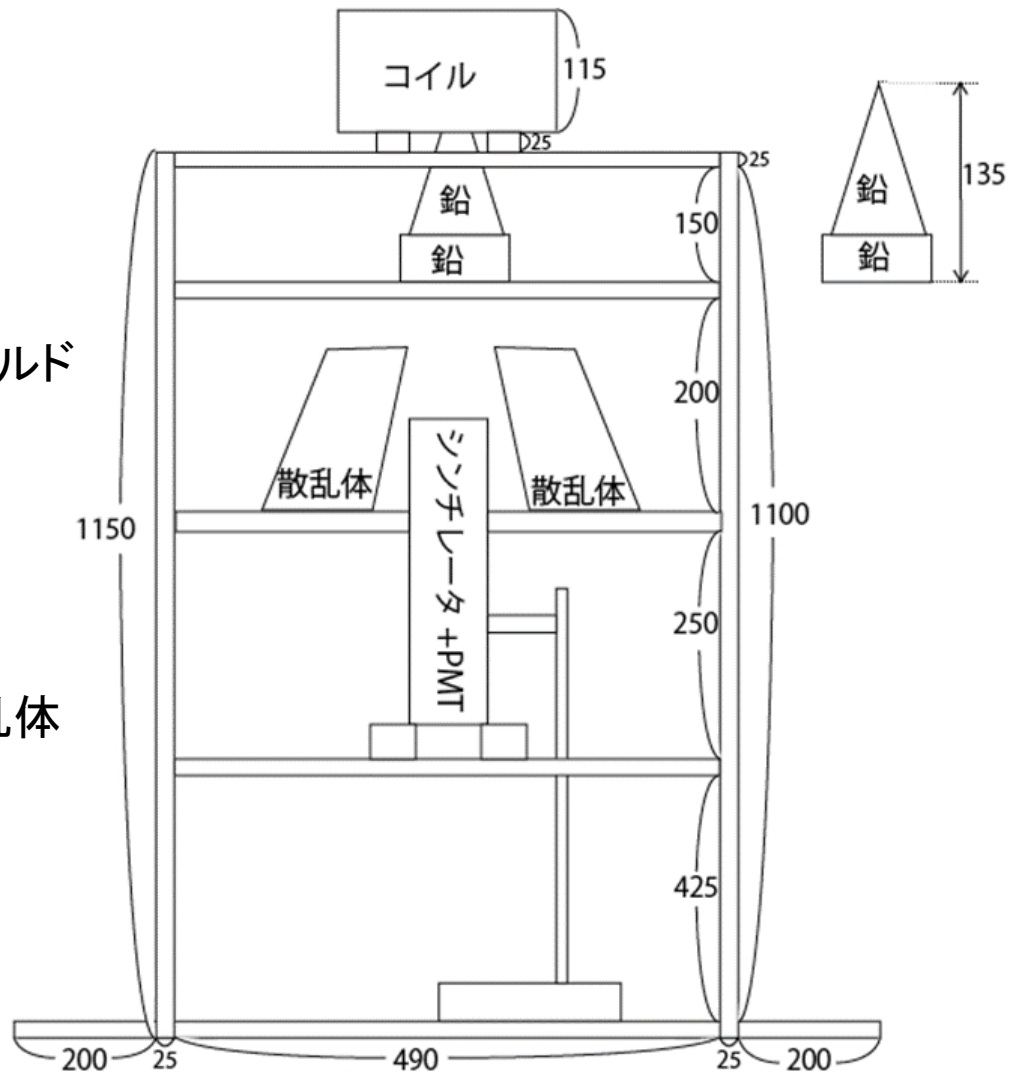
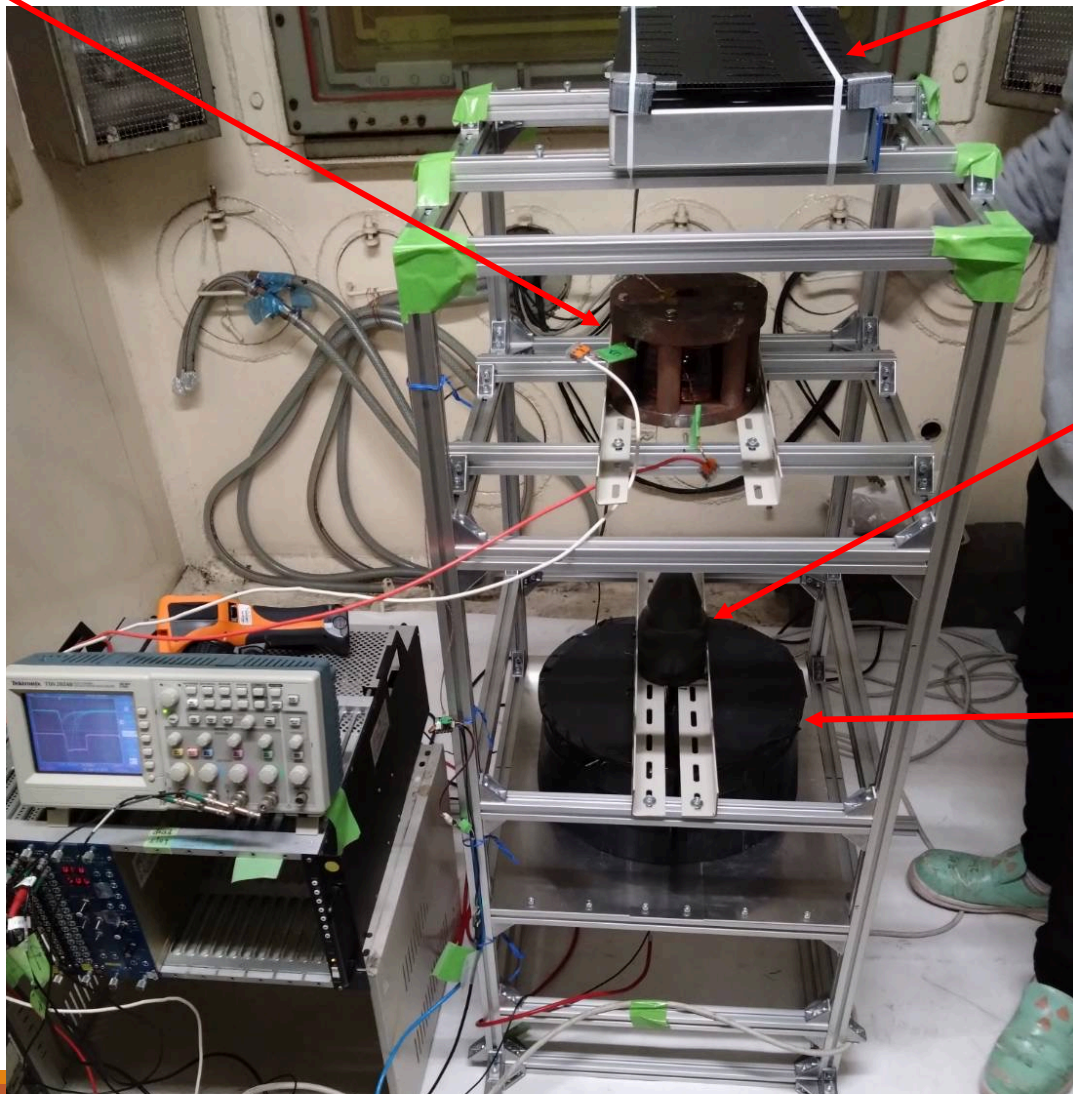


Eu線源から発生したガンマ線は電磁石を通過し、散乱体で共鳴散乱することで検出器に入る。

実験装置(全体図)

電磁石

扇風機(電磁石の冷却用)



シールド

散乱体

線源

$^{152m1}\text{Eu}$ は半減期が9.31hと非常に短く、線源は自ら作る必要がある。

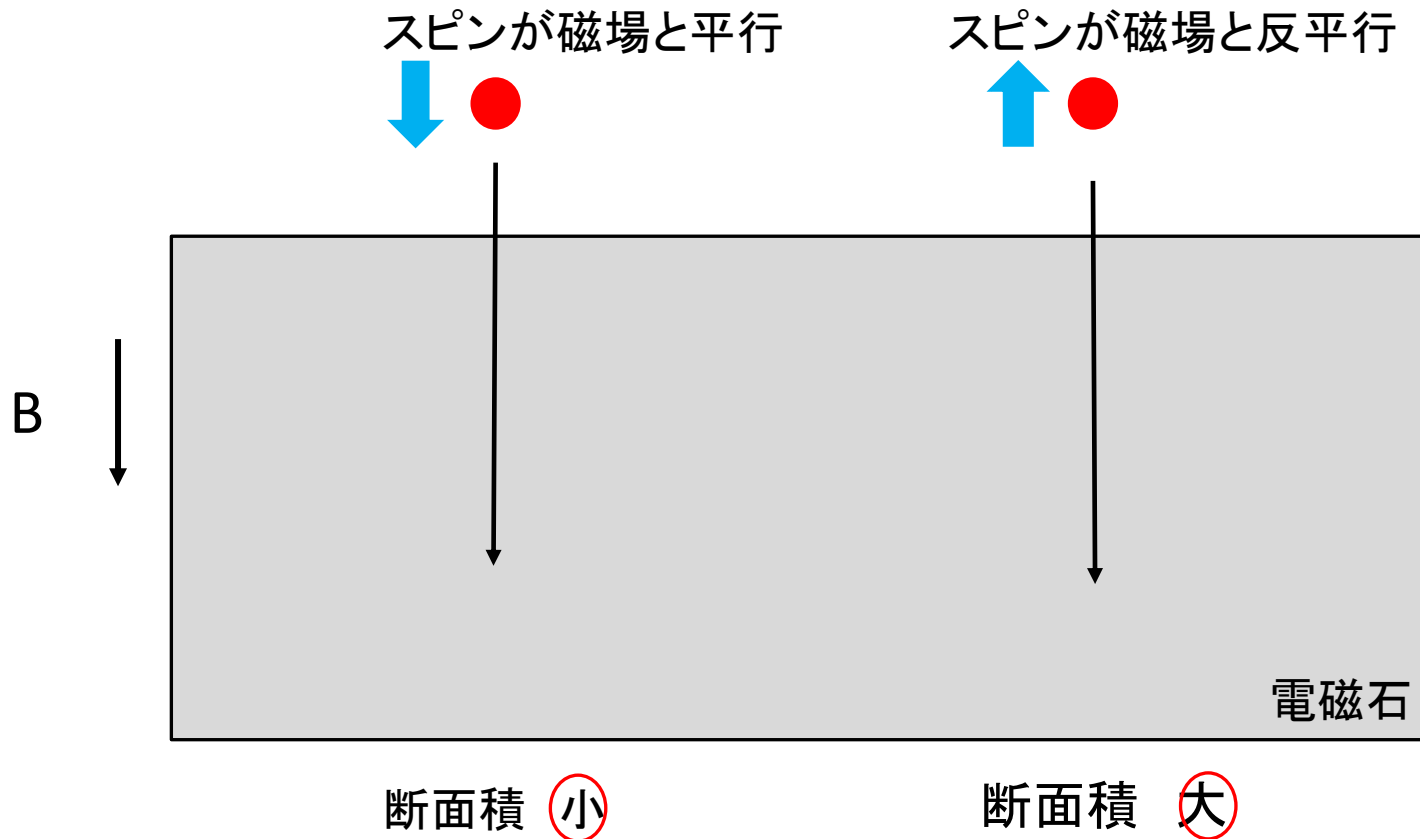
今回は $^{151}\text{Eu}_2\text{O}_3$ 粉末を購入し、京都大学複合原子力科学研究所の中性子照射設備で放射化した。

1回の実験(=4日間)で生成できる放射能の上限は500MBqであった。

中性子照射設備圧気輸送管(Pn-3)

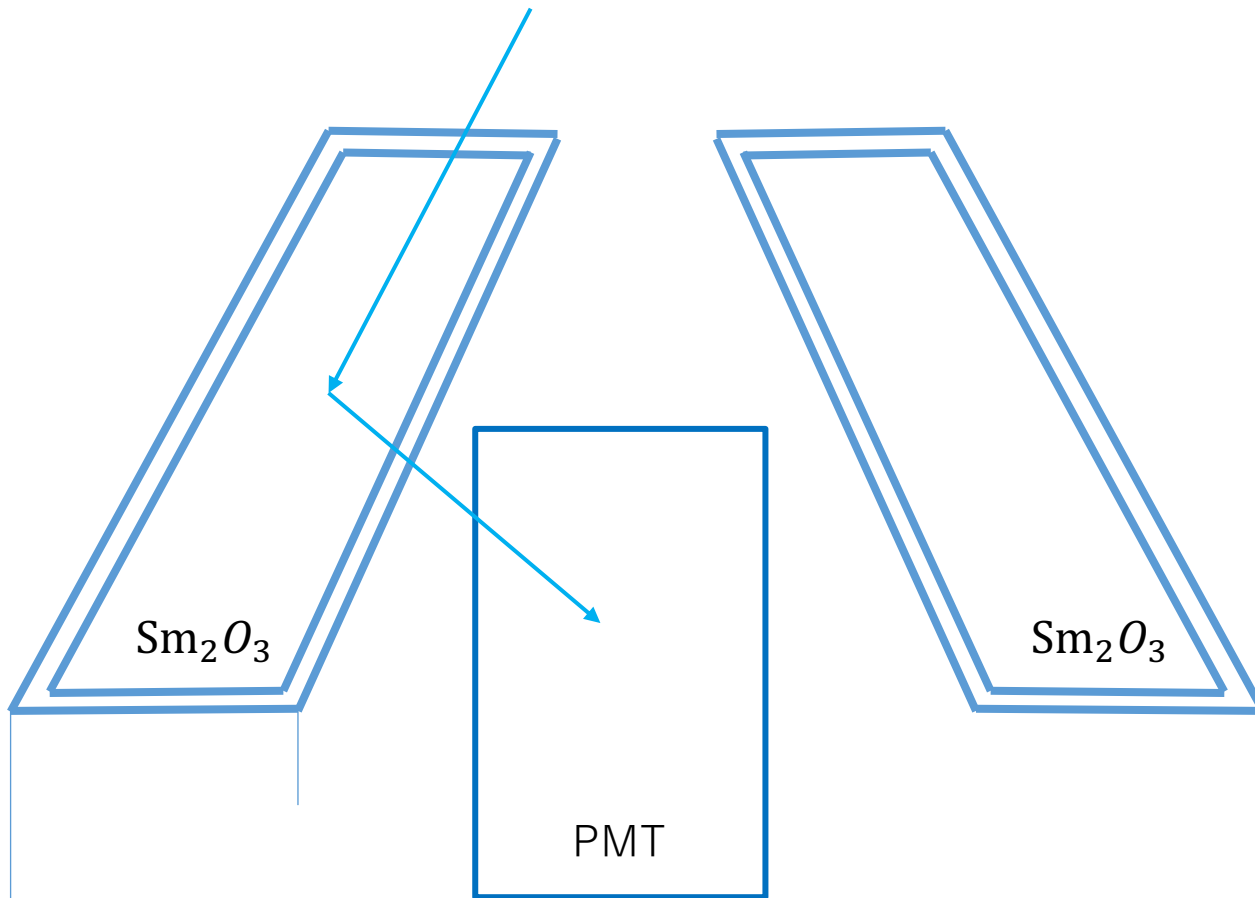


実験装置(電磁石)



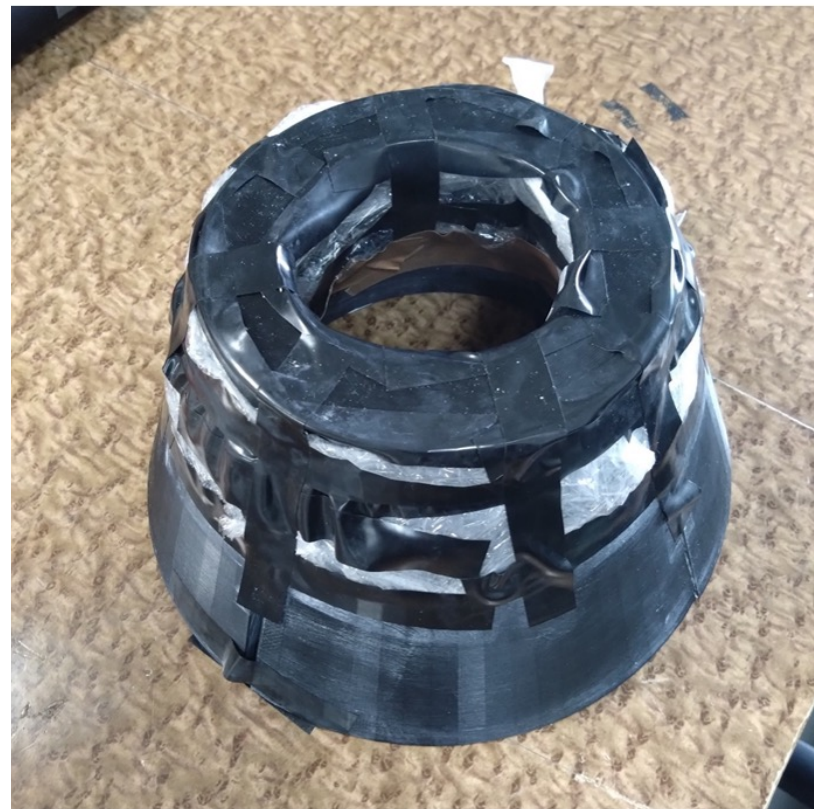
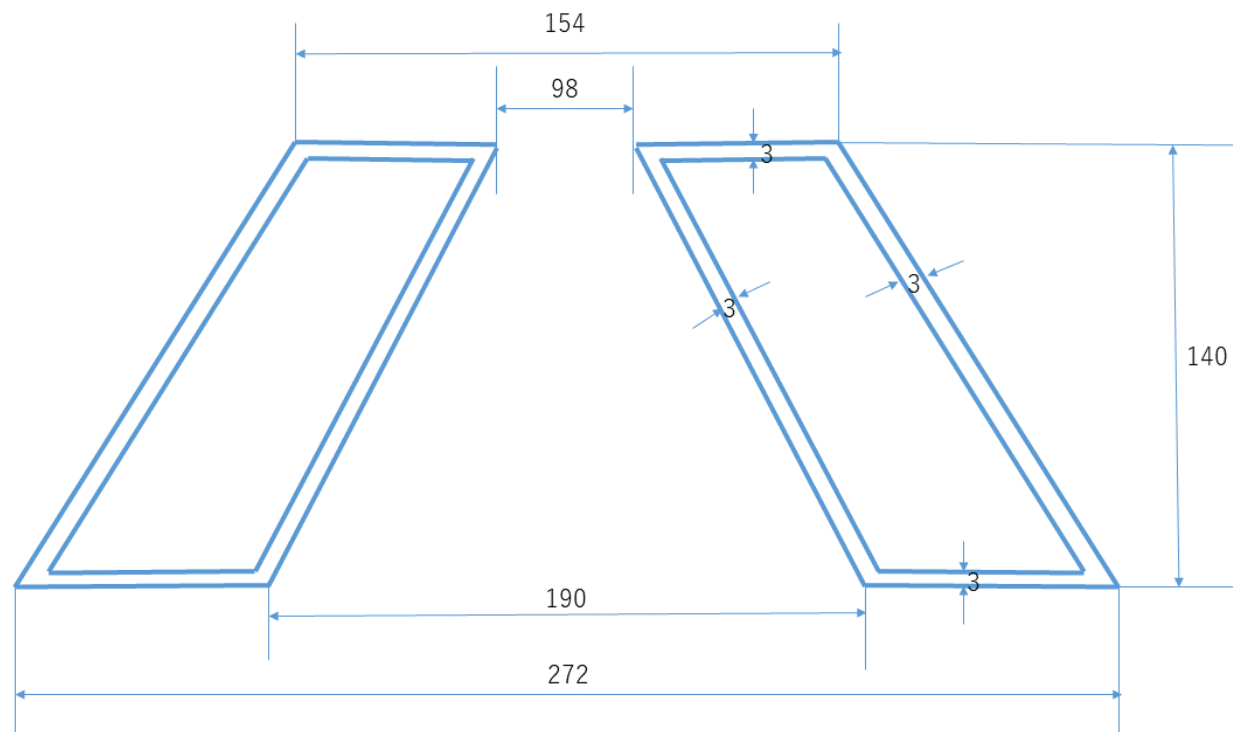
γ 線と鉄中のスピンの
そろった電子とのコン
プトン散乱を起こし、磁
場を反転させた際の計
数の差から h_γ を求める。

実験装置(Sm_2O_3 散乱体)



γ 線は、 ^{152}Sm の特定の準位間のエネルギーを持つため、 ^{152}Sm に吸収されて再放出される。(共鳴散乱)
共鳴散乱を起こしたものののみをとることで、ニュートリノと同じヘリシティを持つものだけを選別してカウントできる。

実験装置(Sm_2O_3 散乱体)



ケースの材質はコンプトン散乱のノイズを減らすためポリ乳酸($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$)を用いて、3Dプリンタで製作した。 2回目の実験で用いた散乱体ケース

実験装置(検出器)

1回目の実験では LaBr_3 シンチレータを用いた。しかし、 ^{138}La の崩壊によるBG(788KeV)が予想よりも多かったため(解析のところでも後述)、

2回目の実験ではNaIシンチレータを用いた。実験時は共に1.5kVを印加した。

NaIシンチレータ



LaBr_3 シンチレータ



実験装置(検出器)

LaBr₃シンチレータとNaIシンチレータの注目するエネルギーでの分解能($R = \frac{2.35\sigma}{E}$)。キャリブレーションの結果をEの逆乗に比例する関数で外挿して求めた。

表 2.2: LaBr₃ のエネルギー分解能

核種	エネルギー	分解能 R	FWHM(keV)
^{152m} Eu	841keV	$6.4 \cdot 10^{-2}$	54.2
^{152m} Eu	963keV	$6.1 \cdot 10^{-2}$	59.4

表 2.4: NaI のエネルギー分解能

核種	エネルギー	分解能 R	FWHM(keV)
^{152m} Eu	841keV	$7.4 \cdot 10^{-2}$	62.2
^{152m} Eu	963keV	$7.0 \cdot 10^{-2}$	67.4

実験装置(エレクトロニクス)

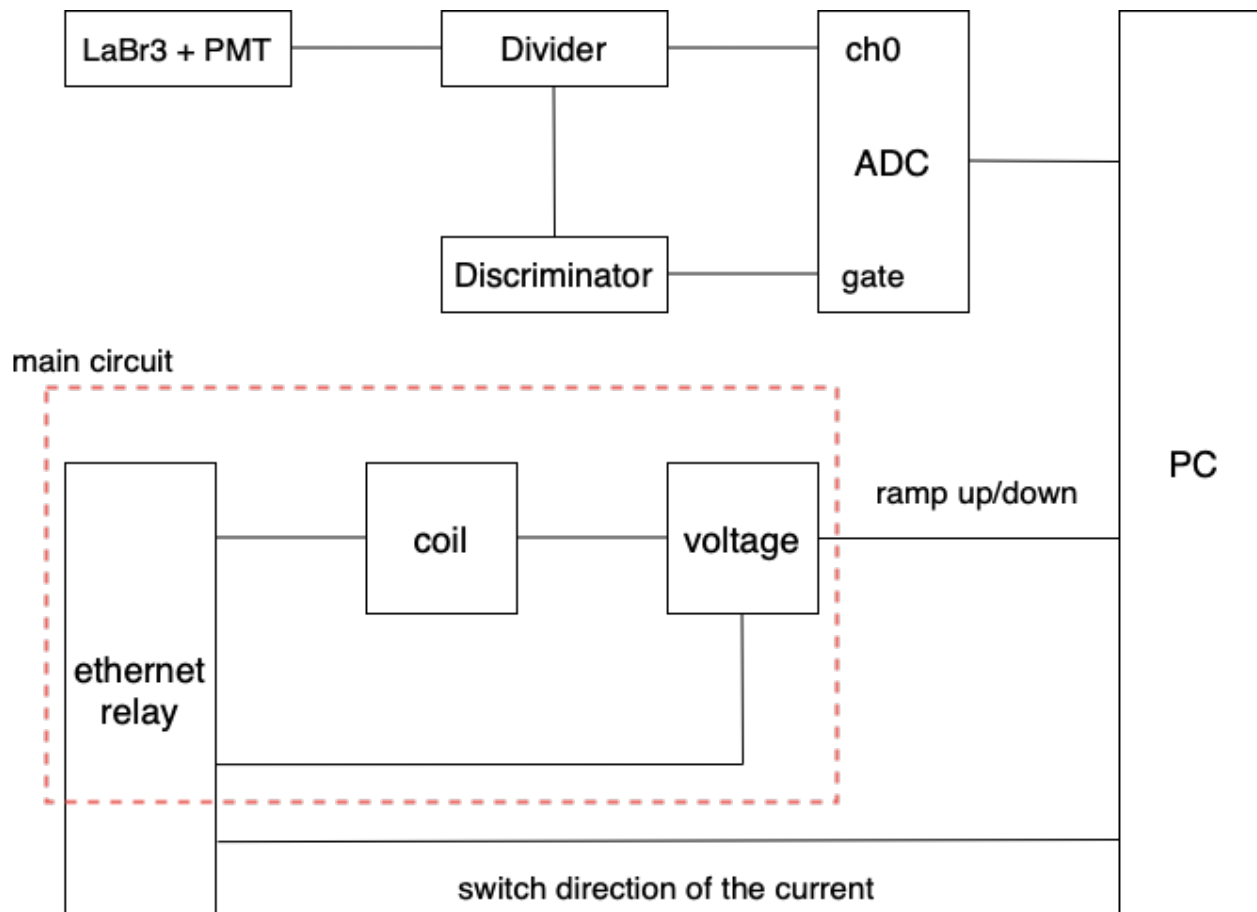
回路全体図

①データ取得部

光子が入射した際に

DiscriminatorでGATEを作り、
ADCでwaveformを取る。

(ADCは1waveformを1024channel
で記録する。トリガーは
512channel目、このと $^{152m1}\text{Eu}$ か
らの γ 線のwaveformはtailまで
キッチリ取れる。)



実験装置(エレクトロニクス)

②電流制御部

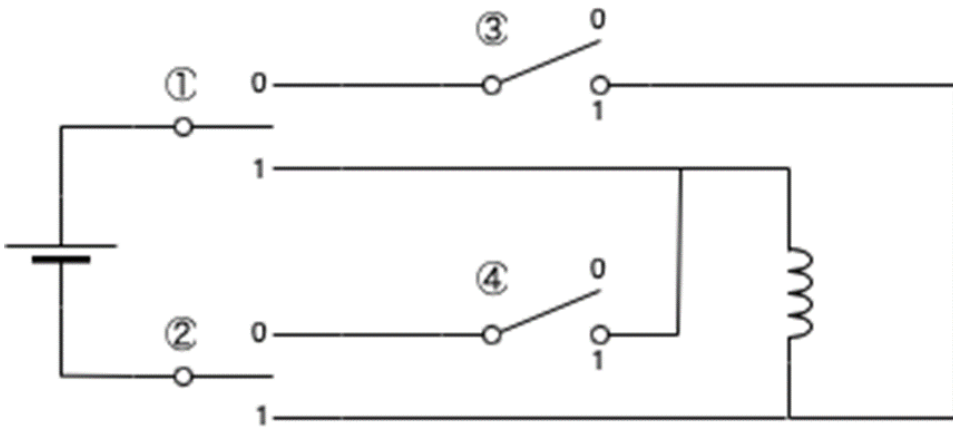


表 2.5: 反転信号

①	②	③	④	status
0	0	0	0	off
1	0	0	0	off
1	1	0	0	on(down)
1	0	0	0	off
0	0	0	0	off
0	0	1	0	off
0	0	1	1	on(up)
0	0	1	0	off

- ・反転回路を利用して、電磁石に流す電流を5分ごとに反転させた。
- ・反転操作はPCからイーサネットリレーに信号を送り制御した。

実験装置(エレクトロニクス)

③温度モニター一部

電磁石に長時間電流を流すため、電磁石温度が100度近くになることが予備実験で確認できた。

今回に実験では線源をポリエチレンケース(融点125度)に入れ電磁石の近くに設置するため、ケースの溶融による放射能汚染が懸念される。

そのため熱電対を利用して、実験中随時ケース温度の読出しを行い、ケース温度が一定の値(100度)を超えた場合に自動的に電流がramp downされるようにした。

解析(γ ヘリシティの計算)

γ ヘリシティは γ 線と電磁石の磁場の向きによる測定のasymmetryから求めることができる。

$$h_{\gamma} = \gamma_{asym} = \frac{N_{asym}}{P_{asym}}$$

$$N_{asym} = \frac{N_{+} - N_{-}}{N_{+} + N_{-}}$$

$$P_{asym} = \frac{P_{\parallel} - P_{\nparallel}}{P_{\parallel} + P_{\nparallel}} = \frac{\exp\left(-\frac{5.3}{2.8}\right) - \exp\left(-\frac{5.3}{2.5}\right)}{\exp\left(-\frac{5.3}{2.8}\right) + \exp\left(-\frac{5.3}{2.5}\right)} = 0.11 \pm 0.068$$

- N_{+} : ヘリシティが+の γ 線と鉄の電子のスピンを平行にしたときに測定される γ の数(観測量)
- N_{-} : ヘリシティが+の γ 線と鉄の電子のスピンを反平行にしたときに測定される γ の数(観測量)
- P_{\parallel} : γ 線と鉄の電子のスピスが平行なときの鉄を透過する確率(理論で予想する量)
- P_{\nparallel} : γ 線と鉄の電子のスピスが反平行なときの鉄を透過する確率(理論で予想する量)

解析(ν ヘリシティの計算)

^{152}Sm の速度方向に対して有限の角度で放出された γ 線のヘリシティは ν_e のヘリシティとは一致しない。

しかしながら共鳴散乱を起こすエネルギーに幅があるためその範囲内のエネルギーを持つ γ 線も共鳴散乱を起こす。

そのような ν_e のヘリシティを引き継いでいない γ 線に対する補正を考える必要がある。 h_γ と h_ν は補正因子 A_c を用いて関係づけられる。補正因子の値は先行実験である2003年P3の値を引用した。

$$h_\nu = \frac{1}{A_c} h_\gamma$$

$$(A_c \pm \Delta A_c = 0.85 \pm 0.005)$$

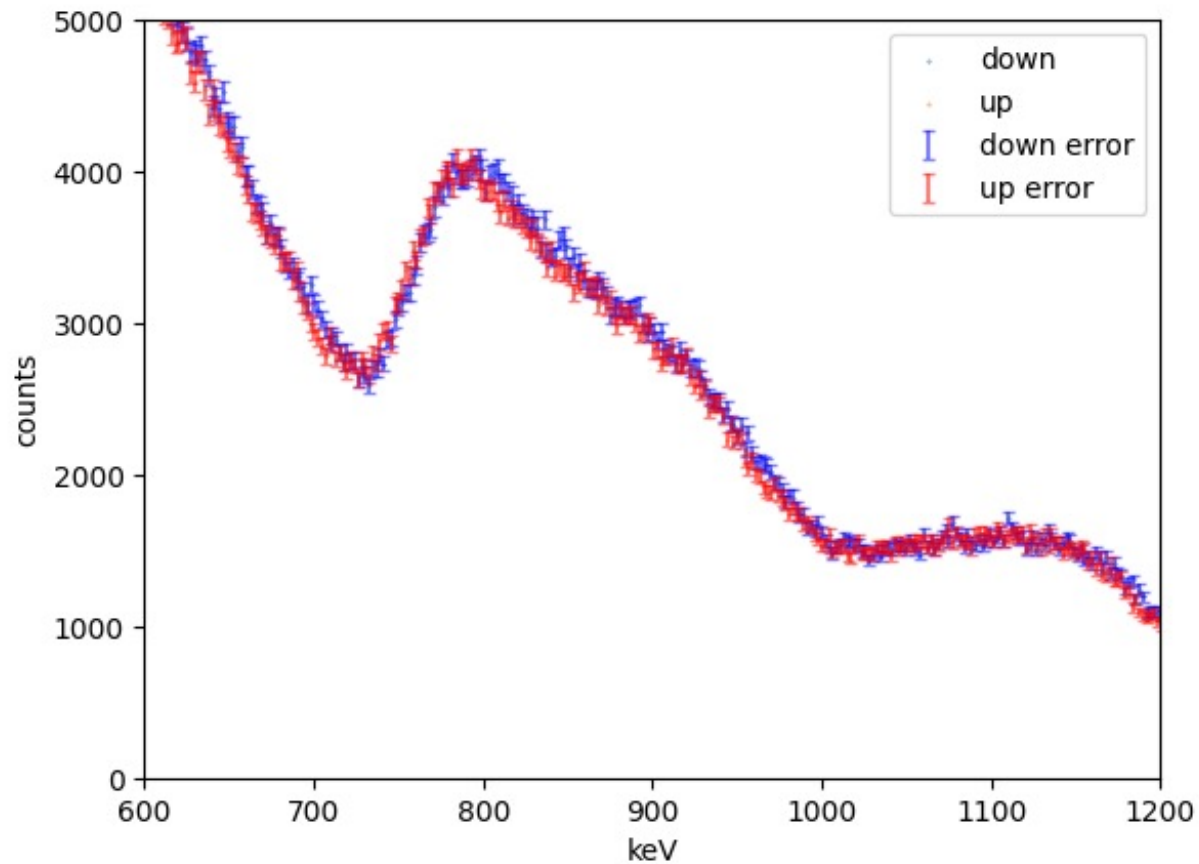
解析(データ処理の方法)

今回重要な計数である N_{asym} を求めるために $N_+ + N_-$ 、 $N_+ - N_-$ を環境放射線、コンプトン散乱等のBGを考慮して処理する必要がある。

$N_+ - N_- \rightarrow$ 差をとっているのでBGも取り除かれるため問題ない

$N_+ + N_- \rightarrow$ ①BGを二次関数でフィッティングし、差し引く
②エネルギー分解能(P14参照)のFWHM内の事象をカウントする。

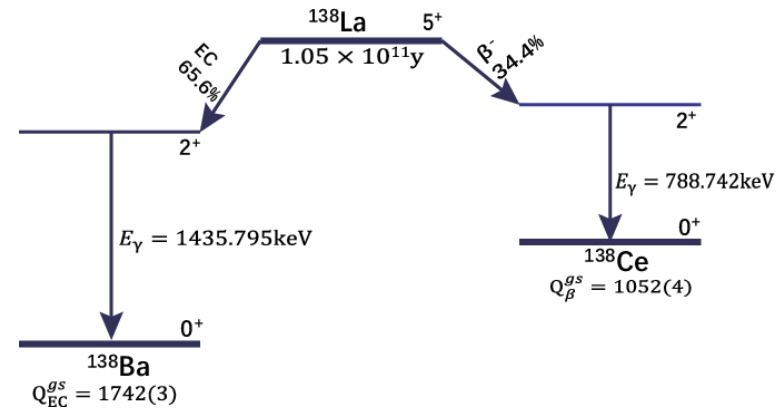
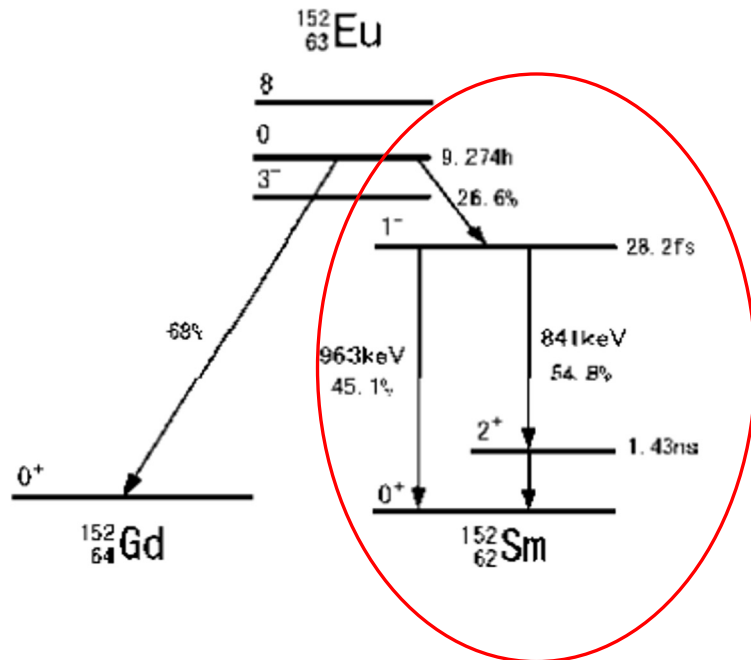
生データ(1回目のデータ)



生データ(磁場下向きと上向き)

問題点 (1回目のデータ)

841keV、963keV共にピークが確認できなかった。



LaBr₃シンチレータ中に含まれる ^{138}La の崩壊モード。

788keVのピークが邪魔をしているのではないかと考え、2回目の実験ではNaIを使うことにした。

問題点 (1回目のデータ)

1回目で用いた散乱体はやや直径方向の厚みが厚くなっていた。

これは、線源から見た散乱体の立体角を少しでも大きくするためだった。

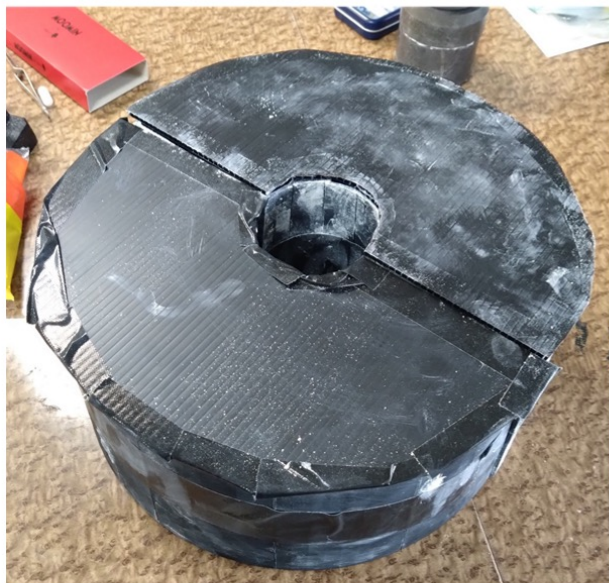
しかし、1回目の実験後に計算すると1MeVの γ 線は、共鳴散乱されても0.3の割合で Sm_2O_3 により散乱されてしまうことが分かった。この効果を減らすため、2回目の散乱体は直径方向がより薄くなるように作られた。

また、この改良には散乱体とケースによるコンプトン散乱のノイズを減らす効果もある。

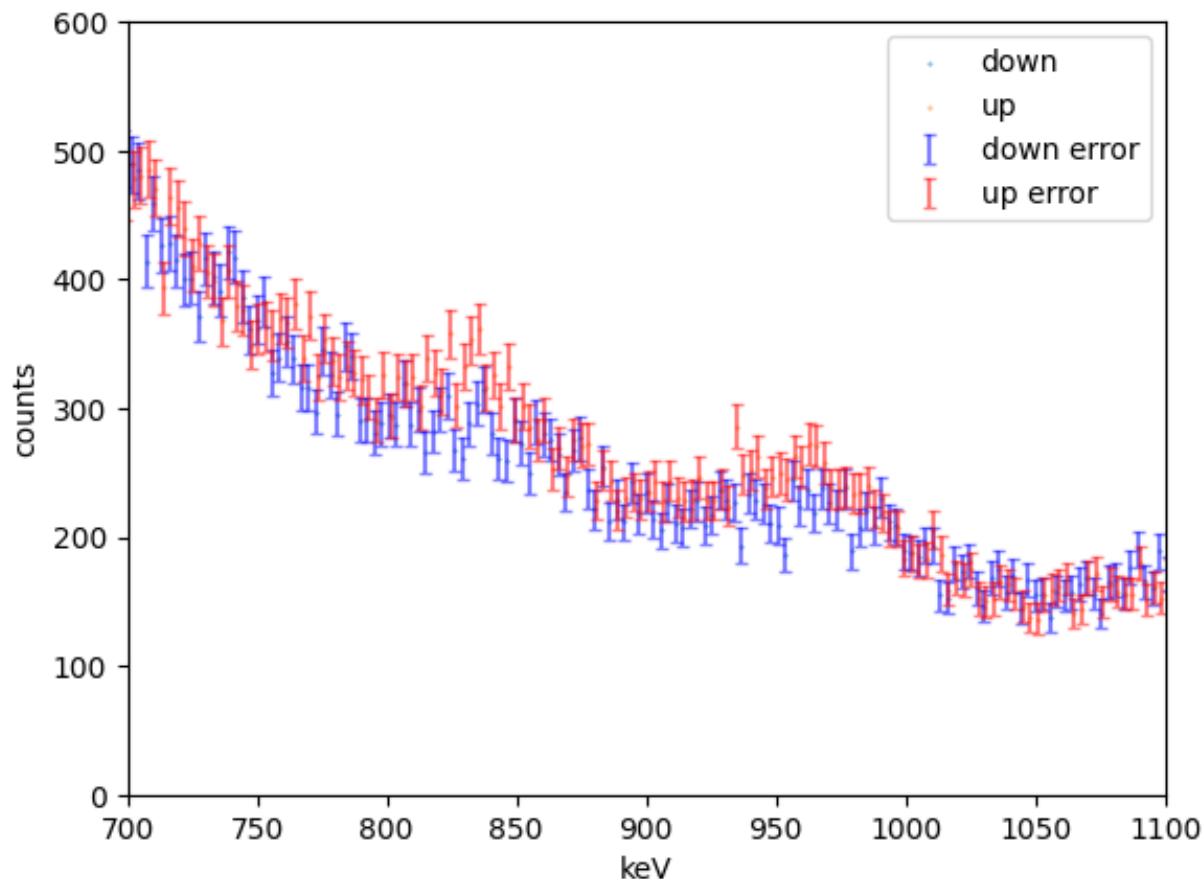
散乱体を薄くすることによる立体角の減少を少しでもカバーするために、散乱体を線源に少し近づけた。

問題点 (1回目のデータ)

1回目の散乱体(左)と2回目の散乱体(右)



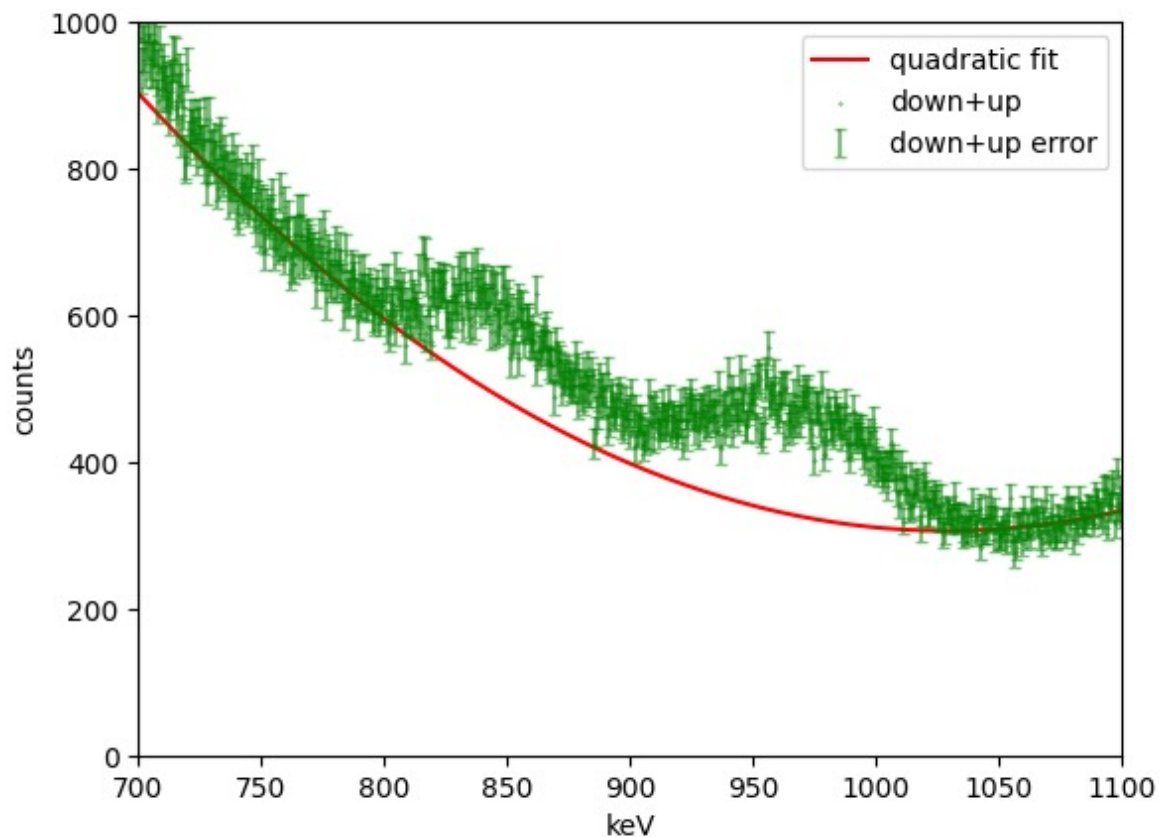
生データ(2回目のデータ)



生データ(磁場下向きと上向き)

1回目(P22)とデータの総数がかかなりちがうが、これは2回目は機材トラブルで測定時間を18時間ほどロスしたことと、散乱体に加えた改良(P25)によりBGが減ったことが要因として考えられる。

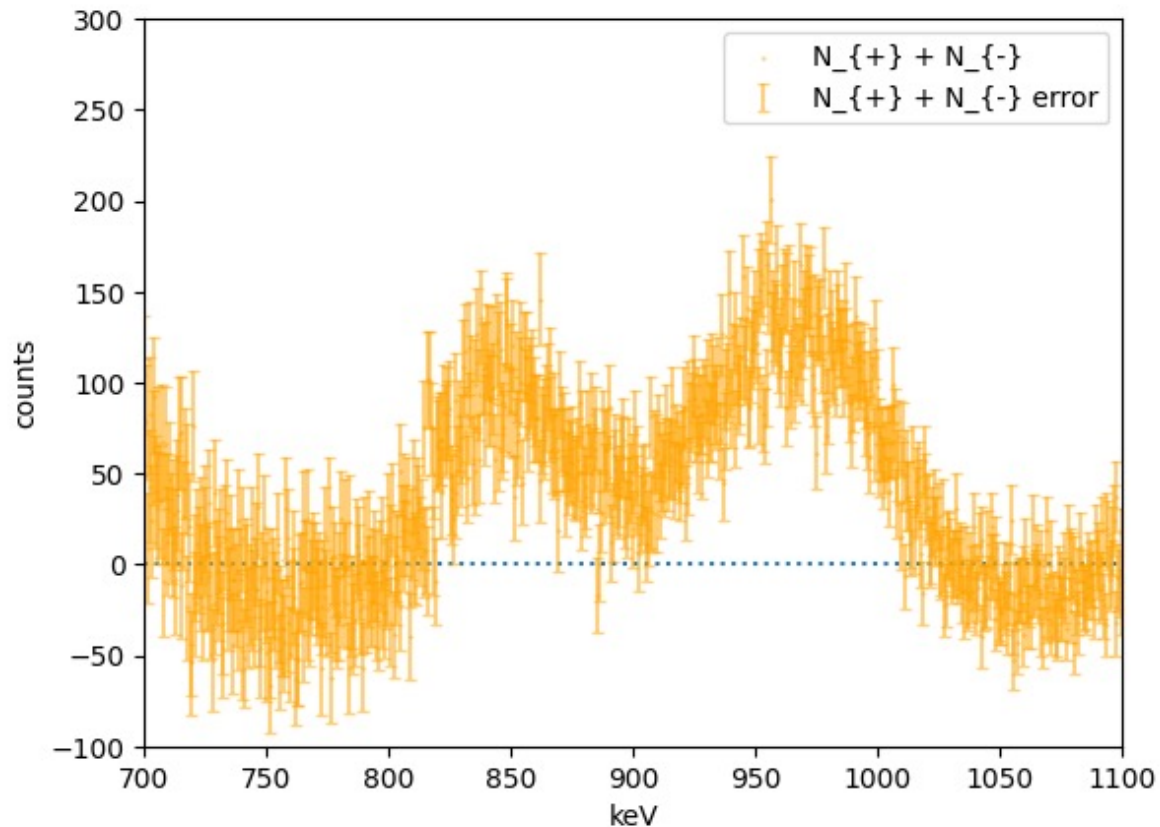
BGの処理(2回目のデータ)



down+upに対するBGのfitting
fitting範囲は

700~800keVと1000~1100keV(今回
注目する事象のある800~1000keV
はfitting範囲からは除外し、fitting
結果を外挿した。)

$N_+ + N_-$ (2回目のデータ)



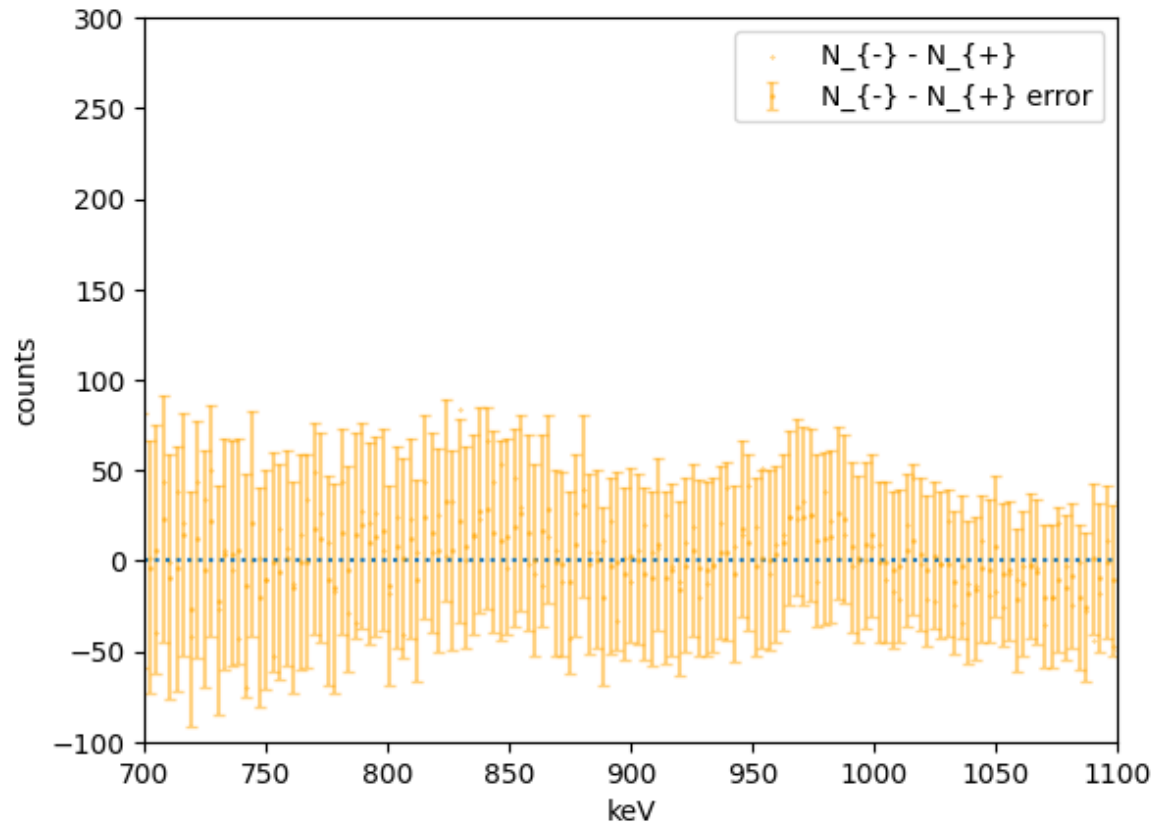
$N_+ + N_-$ のGaussian fit

FWHM内(841 ± 27.1 keVと

963 ± 29.7 keV)の値を注目する事
象数としてカウント

$$N_+ + N_- = 20271.2 \pm 335.6$$

$N_- - N_+$ (2回目のデータ)



$N_- - N_+$ の Gaussian fit

FWHM内(841 ± 27.1 keVと

963 ± 29.7 keV)の値を注目する事
象数としてカウント

$$N_- - N_+ = 2783.6 \pm 321.8$$

$$\rightarrow N_+ - N_- = -2783.6 \pm 321.8$$

(左図は5点のデータ点を1点に丸めて表示している)

ヘリシティ値(2回目のデータ)

- ・測定数Nのアシメトリー

$$N_{asym} = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \frac{-2783.6}{20271.2} = -0.13$$

$$\Delta N_{asym} = \sqrt{\left(\frac{\Delta(N_+ - N_-)}{N_+ + N_-}\right)^2 + \left(\frac{(N_+ - N_-)\Delta(N_+ + N_-)}{(N_+ + N_-)^2}\right)^2} = 0.016$$

- ・ h_γ の値

$$h_\gamma = \gamma_{asym} = \frac{N_{asym}}{P_{asym}} = -1.24$$

$$\Delta h_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_{asym}}{P_{asym}}\right)^2 + \left(\frac{N_{asym}\Delta P_{asym}}{P_{asym}^2}\right)^2} = 0.78$$

- ・ h_v の値

$$h_v = \frac{1}{A_c} h_\gamma = -1.46$$

$$\Delta h_v = \sqrt{\left(\frac{\Delta h_\gamma}{A_c}\right)^2 + \left(\frac{h_\gamma \Delta A_c}{A_c^2}\right)^2} = 0.92$$

ヘリシティ値(2回目のデータ)

今回の結果

$$h_\nu \pm \Delta h_\nu = -1.46 \pm 0.92$$

よって 1.5σ (87%)で $h_\nu < 0$ である

比較: Goldhaberの結果

$$h_\nu \pm \Delta h_\nu = -1.0 \pm 0.3$$

結論

2回目の実験データでは共鳴散乱のピークを見ることができた。

また、Nのアシンメトリーから h_ν の値を決定し、左巻きであることを確かめることができた。

精度を上げるためには

- ・S/Nを向上させる(=線源強度を上げる。Goldhaber実験では、1850~3700MBqの線源を使っていた。)
 - ・分解能の良い検出器(e.g. Ge検出器)を使う
- などがある。

謝辞

複合研の谷口先生、小林先生、北尾先生、谷垣先生には、実験場所を提供いただき、更に実験準備や、放射化など大変お世話になりました。

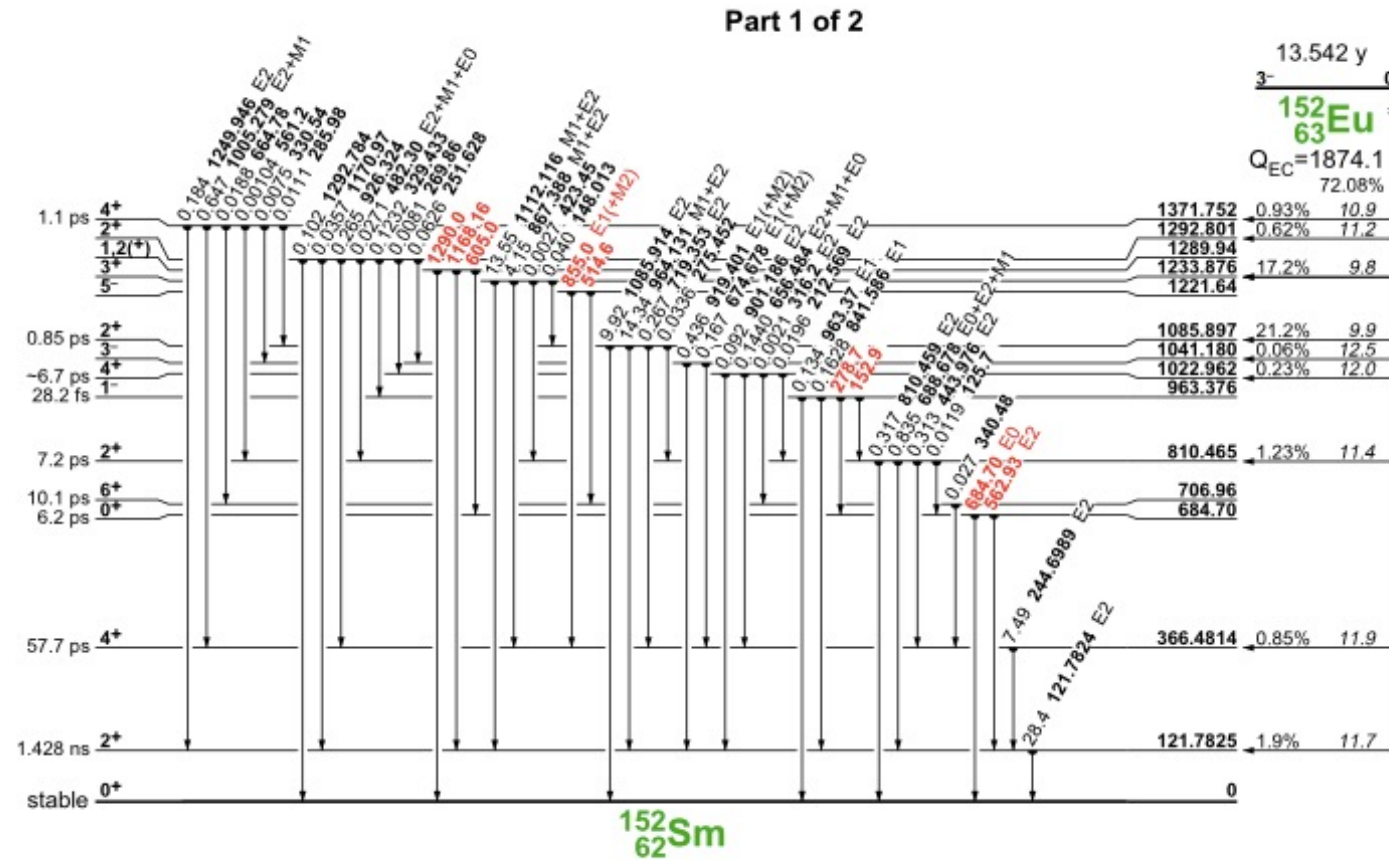
また、1年間担当していただいた田島先生、鈴木先生、TAの川上さん、片岡さんには、実験ゼミや実験準備など大変お世話になりました。

この場をお借りして感謝申し上げます。

ありがとうございました。

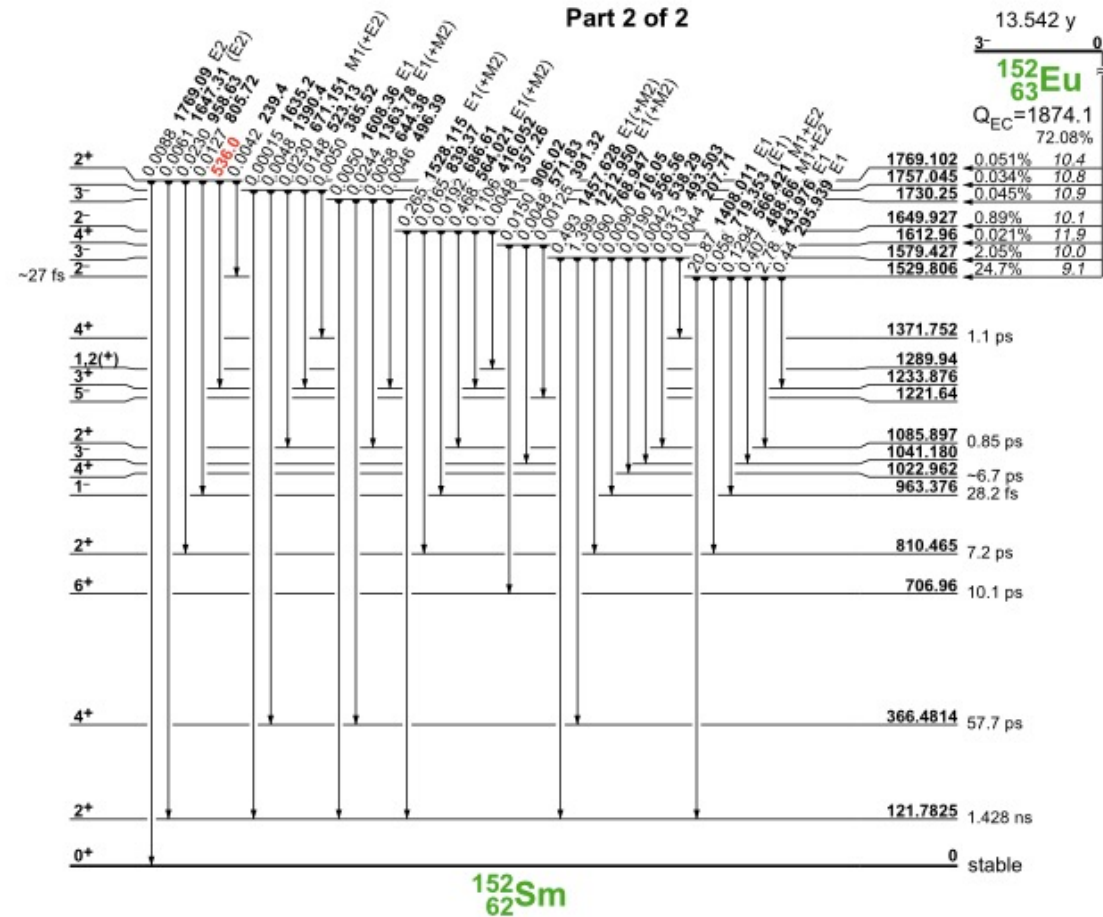
^{152}Eu と、核異性体の崩壊モード

^{152}Eu EC①



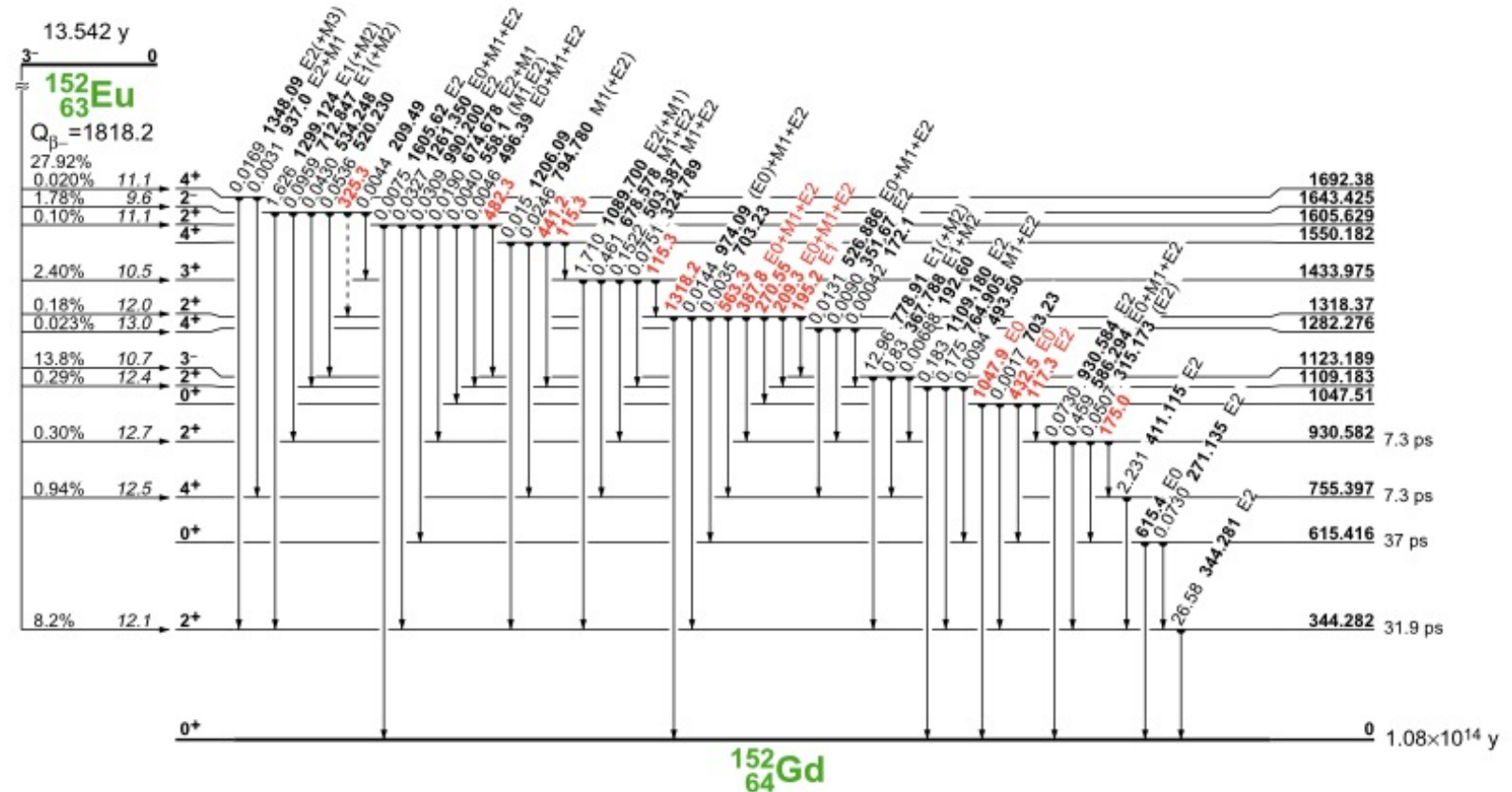
^{152}Eu と、核異性体の崩壊モード

^{152}Eu EC②



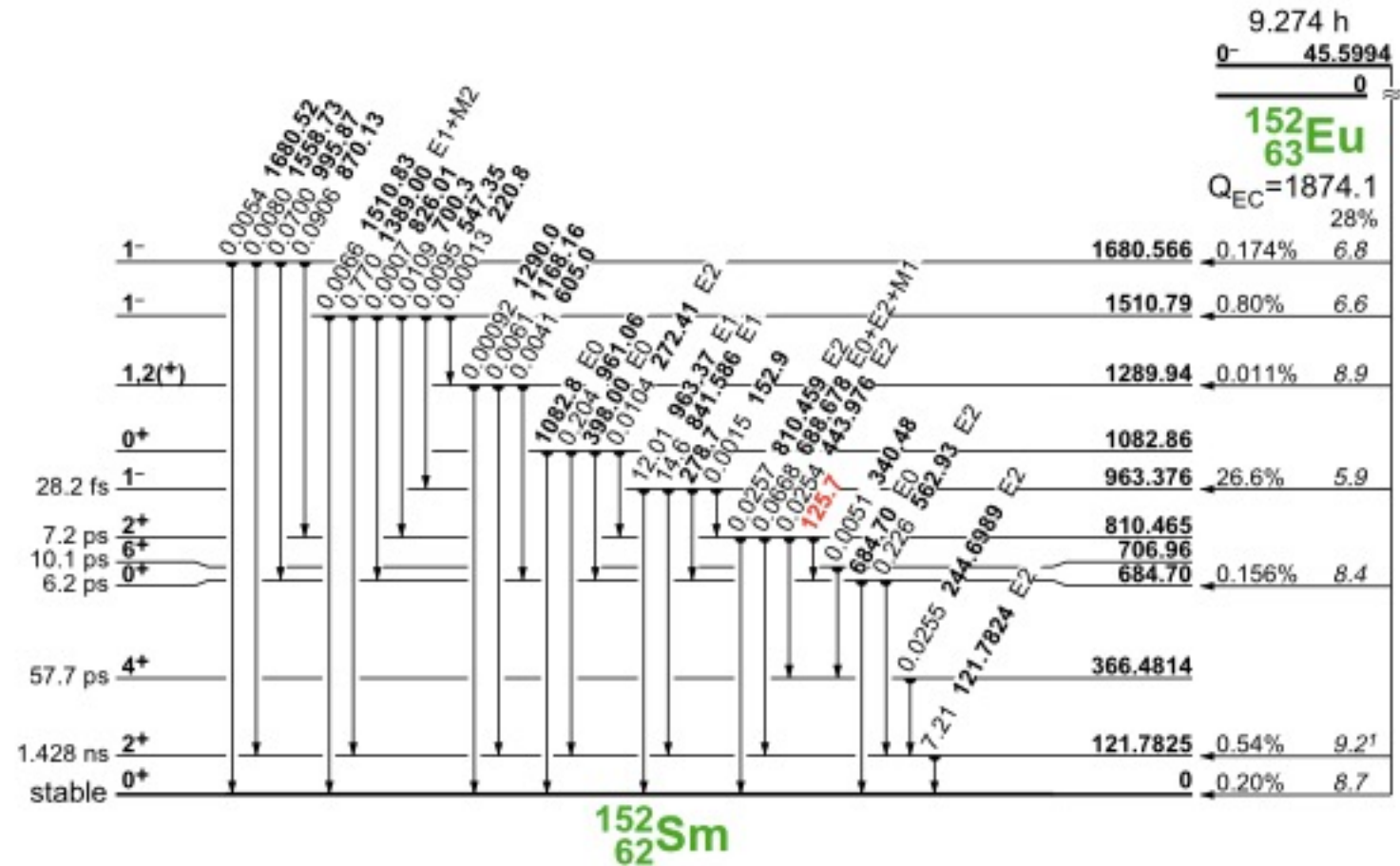
^{152}Eu と、核異性体の崩壊モード

^{152}Eu β^-



^{152}Eu と、核異性体の崩壊モード

$^{152\text{m}1}\text{Eu}$ EC



^{152}Eu と、核異性体の崩壊モード

$^{152\text{m}1}\text{Eu}$ β^-

