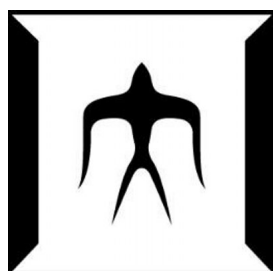


2014 年度
学士論文

ピグミー共鳴測定用 ガンマ線検出器のエネルギー較正



東京工業大学 理学部 物理学科
11B05669
尾崎友志

指導教官 中村隆司

2015/03/05

概要

ピグミー共鳴を測定するために用いられる $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器について、 ^{252}Cf 線源を利用して発生させた高エネルギー γ 線を用いてエネルギー較正を行った。ピグミー共鳴は中性子過剰核の特徴的な励起モードの一つであり、中性子過剰核の非束縛励起状態 (~ 10 MeV) として存在する。ピグミー共鳴は約 2 % の確率で粒子崩壊をせずに、基底状態に直接 γ 崩壊することが知られている。このピグミー共鳴からの脱励起 γ 線を測定するためには実験室系で 20 MeV 程度の非常に高いエネルギーの γ 線の測定が必要である。そのような高エネルギー γ 線を測定するために、高密度かつ大きな原子番号をもち、さらにはエネルギー分解能の優れた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ を用いる予定である。本研究では $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器で高エネルギーでの精度向上を目的とした高エネルギーの γ 線を用いたエネルギー較正について報告する。

そこで我々は ^{58}Ni の熱中性子捕獲反応によって 9 MeV の γ 線を生成し、エネルギー較正に用いることができるかどうかを確認するためのテスト実験を行った。 ^{252}Cf 線源から放出される中性子をポリエチレン板で減速し、 ^{58}Ni (天然存在比 68.0 %) との熱中性子捕獲反応により γ 線を発生させた。ポリエチレン板と Ni 標的の厚さを変えて 9 MeV の γ 線の収量を調べた。本論文では、実験の結果を報告するとともに、今後予定されているカルシウム同位体のピグミー共鳴測定実験における 9 MeV の γ 線を用いたエネルギー較正の実現可能性について議論する。

目次

第 1 章	序	1
第 2 章	中性子過剰核のピグミー双極子共鳴の測定	3
2.1	測定手法	3
2.2	γ 線検出器の概要	4
第 3 章	^{58}Ni の中性子捕獲反応によって得られる 高エネルギー γ 線	9
3.1	中性子捕獲反応	9
3.2	熱中性子の生成法	10
第 4 章	テスト 実験の目的とセットアップ	13
4.1	テスト実験の目的	13
4.2	テスト実験のセットアップ	13
第 5 章	テスト 実験の結果	17
5.1	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の測定結果	17
5.2	$\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器の測定結果	24
第 6 章	テスト 実験の結果についての議論	29
6.1	Ni 標的の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関	29
6.2	ポリエチレン板の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関	30
第 7 章	まとめと今後の展望	37
7.1	まとめ	37
7.2	今後の展望	37
参考文献		39

目次

1.1	光子吸収実験での ^{124}Sn の光子吸収断面積。縦軸が光子吸収断面積、横軸が光子のエネルギー、黒点 が実験値、赤線がローレンツ分布関数を表す [2]	1
1.2	クーロン分解反応を用いて得られた ^{130}Sn の光子吸収断面積。縦軸が光子吸収断面積、横軸が光子の エネルギー、黒色の点が実験値、赤線が GDR と PDR の合計、赤い矢印が PDR のエネルギーを表 す。[2]	2
2.1	^{52}Ca の (γ, γ') 反応の様子	3
2.2	^{52}Ca のクーロン分解反応の様子	3
2.3	^{52}Ca を鉛標的の近くを通過させたときのクーロン励起の模式図。瞬間的な通過に伴い、強い電場に よって励起される	4
2.4	$\beta = 0.6$ の場合の実験室系エネルギーの θ 依存性	4
2.5	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ のバックグラウンドスペクトル	5
2.6	^{138}La の崩壊図	6
2.7	^{227}Ac の主な α 崩壊の崩壊図。赤丸で囲ってあるのが α 崩壊。	6
2.8	本研究で用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 結晶 (3.5 inch $\phi \times$ 8 inch) の写真。後方に PMT が接続されている	6
2.9	CATANA+ $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の完成予定図。ビームは図の右側から入射する。青、水色、緑で描かれ た結晶が $\text{CsI}(\text{Na})$ で、赤で描かれた結晶が $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器である。	7
2.10	CATANA+ $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の完成予定図の断面図。青、水色、緑で描かれた結晶が $\text{CsI}(\text{Na})$ で、赤 で描かれた結晶が $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器である。ピンクの部分が標的の位置を表す。	7
3.1	横軸に中性子のエネルギー [eV]、縦軸に ^{58}Ni との反応断面積 [barn] をとった図。赤い点線が捕獲反 応の断面積、黒線が全断面積、緑の点線が弾性散乱の断面積、紫の点線が非弾性散乱の断面積を表す。[9] 10	10
3.2	横軸に中性子のエネルギー、縦軸に相対収量をとった、 ^{252}Cf の中性子のエネルギースペクトル [8]	10
3.3	横軸に中性子のエネルギー [eV]、縦軸に ^1H との反応断面積 [barn] をとった図。赤い点線が捕獲反 応の断面積を表す。緑の線は、弾性散乱の断面積と全断面積がほぼ重なってる。[9]	11
4.1	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品	13
4.2	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の断面図。書かれた数字の単位は mm である	13
4.3	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品の詳細 (1)。書かれた数字の単位は mm である	14
4.4	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品の詳細 (2)。書かれた数字の単位は mm である	14
4.5	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品の詳細 (3)。書かれた数字の単位は mm である	14
4.6	用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品の詳細 (4)。書かれた数字の単位は mm である	14
4.7	用いた $\text{CsI}(\text{Na})$ 結晶の上面と側面の図。書かれた数字の単位は mm である	14
4.8	用いた $\text{CsI}(\text{Na})$ 結晶の前面の図。書かれた数字の単位は mm である	15

4.9	用いた CsI(Na) 結晶の立体図	15
4.10	LaBr ₃ (Ce) での測定で用いた信号処理回路。パルスをデジタル信号に変換する部分と、ゲート信号を作る部分からなる。	15
4.11	CsI(Na) 検出器での測定で用いた信号処理回路。パルスをデジタル信号に変換する部分と、ゲート信号を作る部分からなる。	15
4.12	9 MeV の γ 線を測定した際の、LaBr ₃ (Ce) 検出器、 ²⁵² Cf、Ni 標的、ポリエチレン板の配置	16
5.1	²² Na の γ 線スペクトル	17
5.2	⁶⁰ Co の γ 線スペクトル	17
5.3	²² Na についてフィッティングを行った図	18
5.4	チャンネルとエネルギーの相関	18
5.5	18 mm の Ni 標的を置いた場合	19
5.6	Ni 標的を置かなかった場合	19
5.7	Ni 標的の厚さ 18 mm	20
5.8	Ni 標的の厚さ 15 mm	20
5.9	Ni 標的の厚さ 13 mm	20
5.10	Ni 標的の厚さ 10 mm	20
5.11	Ni 標的の厚さ 8 mm	20
5.12	Ni 標的の厚さ 5 mm	20
5.13	Ni 標的の厚さ 3 mm	21
5.14	Ni 標的の厚さ 18 mm のスペクトルをフィッティングした図	21
5.15	Ni 標的の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関	21
5.16	ポリエチレン板の厚さ 2 cm	22
5.17	ポリエチレン板の厚さ 3 cm	22
5.18	ポリエチレン板の厚さ 3.4 cm	22
5.19	ポリエチレン板の厚さ 4 cm	22
5.20	ポリエチレン板の厚さ 5 cm	23
5.21	ポリエチレン板の厚さ 10 cm	23
5.22	ポリエチレン板の厚さ 15 cm	23
5.23	ポリエチレン板の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関	23
5.24	$z_0 = 40$ cm にした場合	24
5.25	²² Na の γ 線スペクトル	25
5.26	¹³⁷ Cs の γ 線スペクトル	25
5.27	⁸⁸ Y の γ 線スペクトル	25
5.28	⁶⁰ Co の γ 線スペクトル	25
5.29	¹³⁷ Cs についてフィッティングを行った図	26
5.30	チャンネルとエネルギーの相関	26
5.31	γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係	27
5.32	10 mm の Ni 標的を置いた場合 (青) と、Ni 標的を置かなかった場合 (赤) の比較	27
5.33	γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係をフィットしたグラフ	27
6.1	Ni 標的の厚さを変えて測定した結果を指数関数でフィットした図	29

6.2	Landau 関数によって近似した、横軸エネルギー [MeV]、縦軸カウント数(総イベント数 10^6) の ^{252}Cf の中性子スペクトル	31
6.3	ポリエチレン板の厚さ 0.1 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	31
6.4	ポリエチレン板の厚さ 0.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	31
6.5	ポリエチレン板の厚さ 1 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	32
6.6	ポリエチレン板の厚さ 1.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	32
6.7	ポリエチレン板の厚さ 2 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	32
6.8	ポリエチレン板の厚さ 2.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	32
6.9	ポリエチレン板の厚さ 3 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	33
6.10	ポリエチレン板の厚さ 4 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	33
6.11	ポリエチレン板の厚さ 5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	33
6.12	ポリエチレン板の厚さ 6 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	33
6.13	ポリエチレン板の厚さ 8 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	34
6.14	ポリエチレン板の厚さ 10 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図	34
6.15	横軸にポリエチレン板の厚さ、縦軸に 9 MeV の γ 線の相対的な収量をとったシミュレーション結果	34
6.16	シミュレーション結果と実験結果のスケールをおおよそ等しくし、重ねてプロットした図。青 (*印) がシミュレーション、黒 (丸印) が実験結果である	34
6.17	ポリエチレン板の厚さ 0.1 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布	35
6.18	ポリエチレン板の厚さ 0.5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布	35
6.19	ポリエチレン板の厚さ 1.5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布	35
6.20	ポリエチレン板の厚さ 3 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布	35
6.21	ポリエチレン板の厚さ 5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布	36
6.22	Ni 標的まで到達した中性子数	36
6.23	Ni 標的まで到達した中性子の中で、0.025 eV 以下に減速された中性子数	36

表目次

2.1	代表的な無機シンチレータの特徴	4
3.1	中性子捕獲反応で生成した ^{59}Ni の励起状態が脱励起する際に放出される主な γ 線のエネルギーと相対強度。相対強度は 8.999 MeV を 100 としたときの値。	9
3.2	散乱によって失うエネルギーをその平均値で一定としたときの、2 MeV の中性子が 0.025 eV 以下に減速するまでの過程	12
4.1	各線源の γ 線エネルギーと強度	16
5.1	チャンネルとエネルギーの相関から計算した各ピークチャンネル	18
5.2	チャンネルとエネルギーの相関から計算した各ピークチャンネル	25

第 1 章

序

原子核に特徴的な集団励起モードに巨大共鳴がある。巨大共鳴には様々なモードが存在するが、中でも最もよく知られたモードに巨大双極子共鳴 (GDR :Giant Dipole Resonance) と呼ばれるものが存在する。これは、原子核に光子を吸収させたときに現れる電気双極子応答であり、これまでにほとんどの安定核で確認されている。GDR は巨視的には中性子流体と陽子流体が逆位相で振動する集団的な振動モード (E1 励起) と理解される。一方で、微視的にはそれぞれの核子が励起された 1 粒子-1 空孔状態の重ね合わせと解釈されている。GDR のエネルギーは質量数 A に依存し、励起エネルギー $E_x \sim 80 \times A^{-1/3}$ MeV、共鳴幅は 2.5 ~ 5MeV であることがわかっている。[1] 原子核の電気双極子 (E1) 遷移では特別なモデルによらず、1 つの始状態から他のすべての終状態に至る E1 遷移強度の総和が一定値となることが知られている。すなわち、E1 励起の光子吸収断面積を $\sigma(E)$ 、原子核の質量数を A 、陽子数を Z 、中性子数を N とすると

$$\int_0^{\infty} \sigma(E)dE = 60 \frac{NZ}{A} \text{ MeV mb} \quad (1.0.1)$$

が成り立つ。これをエネルギー重荷総和則と呼ぶ。実験で観測される巨大双極子共鳴の積分値はこの和則値のほぼ 100% を占める。[1] 例として ^{124}Sn の光吸収断面積を光子のエネルギー E_x の関数として図 1.1 に示す。ここで、黒点が実験値であり、赤線がローレンツ分布関数を表す。10MeV ~ 20MeV の光子吸収断面積の大きな部分全体が GDR である。

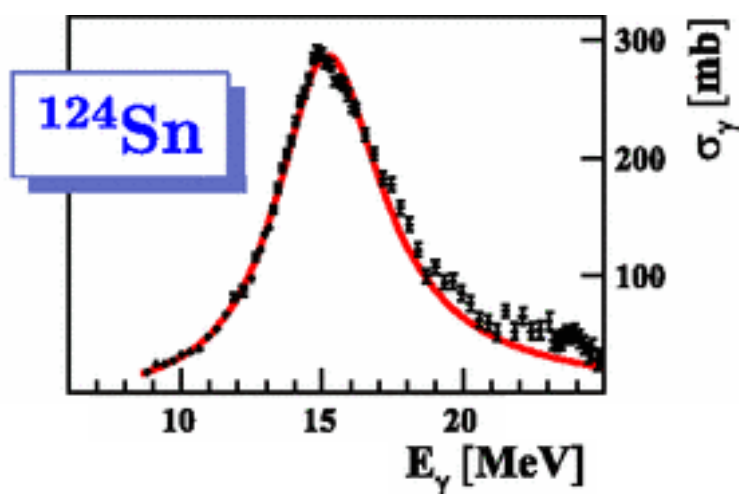


図 1.1 光子吸収実験での ^{124}Sn の光子吸収断面積。縦軸が光子吸収断面積、横軸が光子のエネルギー、黒点が実験値、赤線がローレンツ分布関数を表す [2]

近年、GDR よりエネルギーの低い $E_x = 5 \sim 10$ MeV に現れる電気双極子共鳴であるピグミー双極子共鳴 (PDR

(Pygmy Dipole Resonance) に関する研究が進んでいる。PDR は主に中性子過剰核で観測され、巨視的には中性子スキンとコアの振動であると考えられており、エネルギー重荷総和則の数 % を占める。例として、 ^{130}Sn の光子吸収断面積光子のエネルギー E_x の関数としてを図 1.2 に示す。10 MeV 付近の小さなピークが PDR、15 MeV 付近の大きなピークが GDR である。

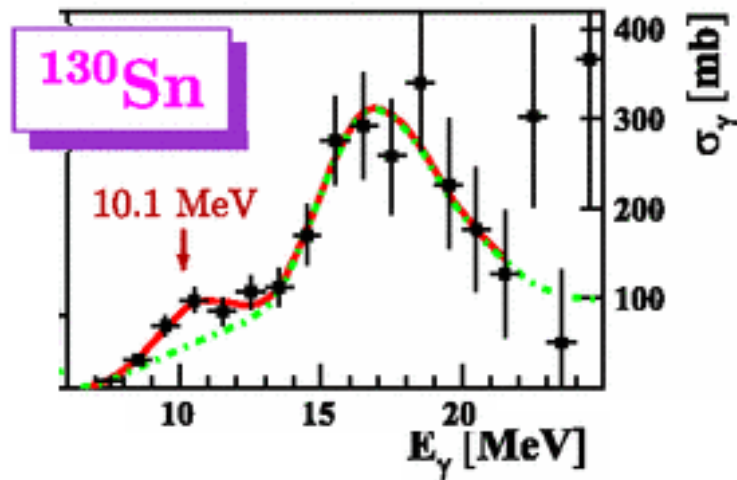


図 1.2 クーロン分解反応を用いて得られた ^{130}Sn の光子吸収断面積。縦軸が光子吸収断面積、横軸が光子のエネルギー、黒色の点が実験値、赤線が GDR と PDR の合計、赤い矢印が PDR のエネルギーを表す。[2]

中性子スキンとコアの振動であると考えられている PDR は、その強度測定により、中性子スキンの厚さなどの情報が得られると考えられる。したがって最終的には核物質の状態方程式に制限を与えることが期待されている。不安定核では、 ^{130}Sn や ^{132}Sn 、 ^{68}Ni などで PDR が見つかっており、励起エネルギーはそれぞれ 10.1(7) MeV, 9.8(7) MeV, 9.55(17) MeV と観測されている。共鳴幅、和則に占める割合も求められ、 ^{68}Ni では中性子スキンの厚さが 0.17(2) fm、エネルギー重荷総和則値の 2.8(5) % と計算されている。[3],[4]

PDR の観測は、 ^{132}Sn の測定 [2] のような不変質量法により行う方法と、 ^{68}Ni の実験 [3] のように基底状態への直接 γ 崩壊の測定を行う方法がある。東京工業大学の中村研究室では、中性子過剰核のカルシウム同位体 $^{48,50,52}\text{Ca}$ の PDR 測定実験を計画している。 $^{48-54}\text{Ca}$ では、PDR 強度の急激な増大が予測されている。[5] 実験では γ 線検出器として $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と、複数の $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器で構成される CATANA を用い、PDR の 2 つの崩壊チャンネルを測定する予定である。我々が予定している $^{48,50,52}\text{Ca}$ の PDR 測定実験は理化学研究所の RI ビームファクトリーで行われ、SAMURAI(Superconducting Analyzer for MUlti-particle from RAdioIsotope beams) を用いて 2 つの崩壊チャンネルを同時に測定する予定である。この同時測定により、測定例の少ないピグミー共鳴からの直接 γ 崩壊の分岐比を求めることができる。

このような PDR の測定では、20 MeV 程度の非常に高いエネルギーの γ 線の測定が必要がある。高エネルギーの γ 線の測定精度を高めるためには、より高エネルギーの γ 線源を用いたエネルギー較正が必要である。そこで我々は、 ^{58}Ni の中性子捕獲反応によって放出される 9 MeV の γ 線を用いてエネルギー較正を行うことを目指している。この方法が確立されれば、PDR の測定に限らず、高エネルギーの γ 線をより良い精度で測定することが可能となる。

本論文では、その $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器のエネルギー較正についての研究を報告する。第 2 章では、PDR 測定手法と γ 線検出器について述べ、第 3 章では本研究で用いる 9MeV の γ 線源の説明を行う。第 4 章では本研究で行った γ 線検出器のエネルギー較正のためのテスト実験のセットアップ、第 5 章では実験の結果、第 6 章では実験結果に対する考察、第 7 章ではまとめと今後の展望を述べる。

第 2 章

中性子過剰核のピグミー双極子共鳴の測定

2.1 測定手法

ピグミー共鳴の励起エネルギーの測定手法の 1 つに、 (γ, γ') 反応の測定がある。 (γ, γ') 反応とは、クーロン励起された原子核が直接基底状態に γ 崩壊する反応である。 ^{52}Ca の (γ, γ') 反応の様子を、図 2.1 に示す。一方、クーロン分解反応を用いた測定手法もある。クーロン分解反応とは、クーロン励起した原子核が中性子を放出し分解する反応である。 ^{52}Ca のクーロン分解反応の様子を、図 2.2 に示す。

ここで、クーロン励起は入射ビームを原子番号の大きい原子核標的の近くを通過させることで起こすことができる。このとき、標的の強い電場（仮想光子）によりクーロン励起が起こる。 ^{52}Ca ビーム、鉛標的を用いた場合のクーロン励起の模式図を図 2.3 に示す。

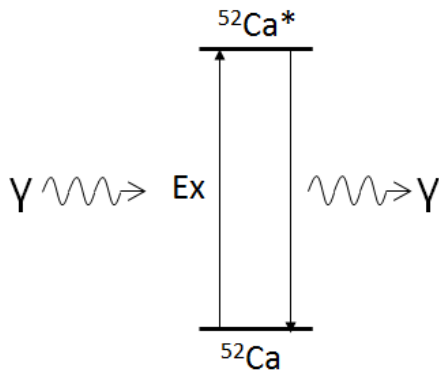


図 2.1 ^{52}Ca の (γ, γ') 反応の様子

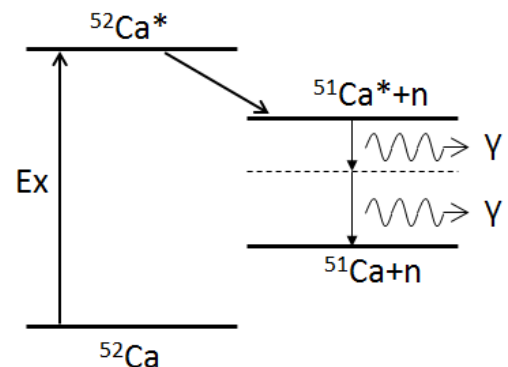


図 2.2 ^{52}Ca のクーロン分解反応の様子

実験では光速の約 60% で進む荷電粒子から放出される γ 線を検出するため、実験室系から見た γ 線エネルギーはドップラー効果によって変化する。粒子進行方向と γ 線の放出される方向とのなす角を θ とすると、実験室系でのエネルギーは

$$E_{\gamma}^{\text{lab}} = E_{\gamma}^{\text{cm}} \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (2.1.1)$$

とかける。 $\beta = 0.6$ の場合の実験室系エネルギーの θ 依存性を 2.1 に示す。これは、前方の検出器では γ 線のエネルギーがおよそ 2 倍程度になることを示している。

よって、 (γ, γ') 反応により直接基底状態に γ 崩壊するピグミー共鳴を測定する場合、実験室系で 20 MeV 程度の γ 線の測定が必要となる。本研究では、このような非常に高エネルギーの γ 線を精度よく測定する方法を確立することを目指す。

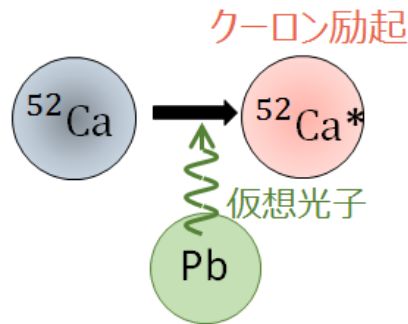


図 2.3 ^{52}Ca を鉛標的の近くを通過させたときのクーロン励起の模式図。瞬間的な通過に伴い、強い電場によって励起される

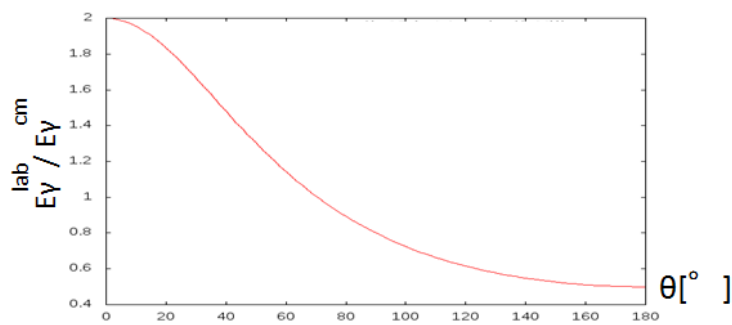


図 2.4 $\beta = 0.6$ の場合の実験系エネルギーの θ 依存性

2.2 γ 線検出器の概要

$^{48,50,52}\text{Ca}$ の PDR 測定実験では、次に述べる $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と、複数の $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器で構成される CATANA (CAesium iodide array for γ -ray Transition in Atomic Nuclei at high isospin Asymmetry) を組み合わせて用いる予定である。ここでは、 LaBr_3 検出器と CATANA の概要を述べる。

2.2.1 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の概要

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ は他の代表的な無機シンチレータに比べ、エネルギー分解能、時間分解能が優れているという特徴がある。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ および代表的な無機シンチレータの特徴を表 2.2.1 に示す。[10]

表 2.1 代表的な無機シンチレータの特徴

結晶	密度 [g/cm^3]	有効原子番号	放出光子数 ($\text{NaI}(\text{Tl})$ 比) [%]	減衰時間 [ns]	放射長 [cm]	潮解性
$\text{CsI}(\text{Tl})$	4.51	54	45	1000	1.7	わずか
$\text{CsI}(\text{Na})$	4.51	54	85	630	1.7	あり
$\text{NaI}(\text{Tl})$	3.67	50	100	250	2.6	あり
BGO	7.13	74	20	300	1.12	なし
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	5.08	48	165	16	2.13	あり

一般的な無機シンチレータである NaI(Tl) では、662 keV における FWHM が 8.5~9.5 % 程度であるのに対し、LaBr₃(Ce) は 2.7~3.3 % と非常に優れたエネルギー分解能を持つ。また、NaI(Tl) に比べ減衰時間が約 10 倍短い。[7],[10] これにより、LaBr₃(Ce) は高エネルギーの γ 線の測定に適している。

一方、LaBr₃(Ce) は自身が微量ながら放射性物質を含んでおり、それがバックグラウンドとして現れる。主に含まれる放射性物質には、¹³⁸La と ²²⁷Ac がある。バックグラウンドのスペクトルを図 2.5 に示す。

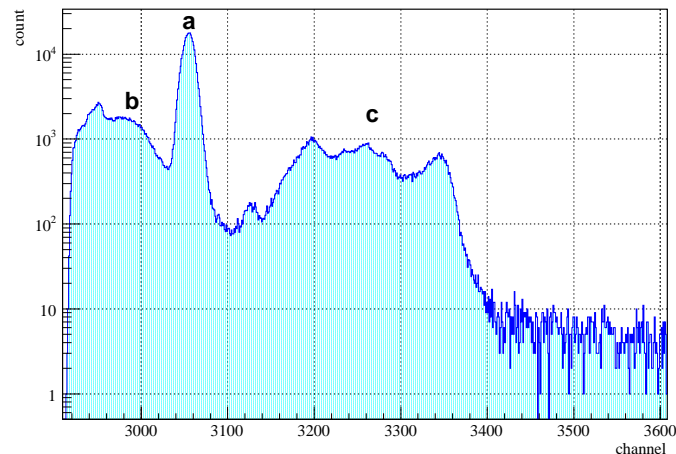


図 2.5 LaBr₃(Ce) のバックグラウンドスペクトル

図中の a に示した部分にあるピークは、¹³⁸La の電子捕獲反応で生成した ¹³⁸Ba の γ 崩壊 (1436 keV) と、その電子捕獲によって生じる K α 線 (32.2 keV, 31.8 keV) の和によるピークである。図中の b に示したのは、その ¹³⁸Ba からの γ 線のコンプトン散乱によるものである。[6],[10] また c の部分 (2.0 MeV ~ 2.7 MeV 付近) は、²²⁷Ac とその娘核からの α 線起源のもので、なだらかなエネルギー分布を持っている。[10] ¹³⁸La の崩壊図、²²⁷Ac の主な α 崩壊の崩壊図を図 2.6, 2.7 に示す。

本研究で用いた LaBr₃(Ce) 結晶の写真を図 2.8 に示す。図 2.8 の写真は INFN グループの LaBr₃(Ce) 検出器である。結晶の大きさは 3.5 inch ϕ \times 8 inch であり、8 つの検出器を次に述べる CATANA と組み合わせて用いる予定である。

2.2.2 CATANA の概要

CATANA はピグミー共鳴測定のために現在開発している γ 線検出器である。高い検出効率と充分なエネルギー分解能を持つ必要があるため、検出器は大立体角を覆う高密度の CsI(Na) 結晶により構成される。さらに γ 線は $\beta = 0.6$ の粒子から放出されるためドップラー補正を行う必要がある。そのために結晶は分割されており、 γ 線の放出角度を測定することができる。この CATANA と LaBr₃(Ce) 検出器を組み合わせ、^{48,50,52}Ca のピグミー共鳴測定実験を行う予定である。CATANA+LaBr₃(Ce) 検出器の完成予定図を図 2.9 に示す。ビームは図の右側から入射する。青、水色、緑で描かれた結晶が CsI(Na) 結晶で、赤で描かれた結晶が LaBr₃(Ce) 検出器である。また、その断面図を図 2.10 に示す。ピンクの部分の部分が標的の位置を表す。

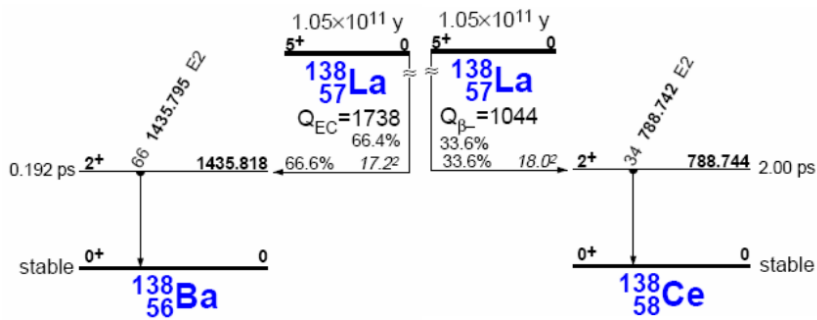


図 2.6 ^{138}La の崩壊図

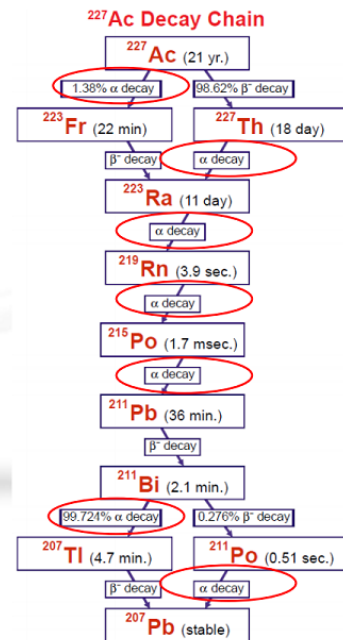


図 2.7 ^{227}Ac の主な α 崩壊の崩壊図。赤丸で囲ってあるのが α 崩壊。



図 2.8 本研究で用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 結晶 (3.5 inch $\phi \times$ 8 inch) の写真。後方に PMT が接続されている

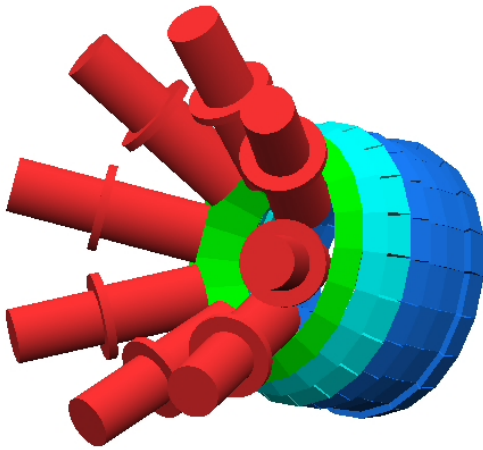


図 2.9 CATANA+LaBr₃(Ce) 検出器の完成予定図。ビームは図の右側から入射する。青、水色、緑で描かれた結晶が CsI(Na) で、赤で描かれた結晶が LaBr₃(Ce) 検出器である。

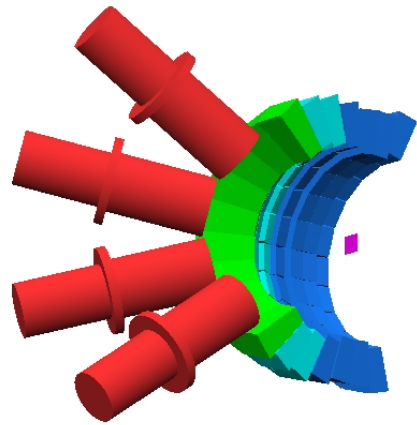


図 2.10 CATANA+LaBr₃(Ce) 検出器の完成予定図の断面図。青、水色、緑で描かれた結晶が CsI(Na) で、赤で描かれた結晶が LaBr₃(Ce) 検出器である。ピンクの部分が標的の位置を表す。

第 3 章

^{58}Ni の中性子捕獲反応によって得られる 高エネルギー γ 線

本研究では ^{58}Ni の中性子捕獲反応起源の 9 MeV の γ 線を用いて検出器のエネルギー較正を行うことを目的としている。ここでは、その 9 MeV の γ 線の発生原理について述べる。

3.1 中性子捕獲反応

3.1.1 ^{58}Ni 中性子捕獲反応

原子核が 1 個または複数の中性子を吸収しより重い原子核に変わる反応を、中性子捕獲反応という。そのとき生成した原子核は励起状態にあるため、脱励起する際に γ 線を放出する。本研究では、 ^{58}Ni の中性子捕獲反応により生成した ^{59}Ni の励起状態が、基底状態に脱励起する際に放出される 9 MeV の γ 線を用いた。 ^{58}Ni の天然存在比は 68.0 % である。[6]

^{59}Ni の励起状態はいくつかの準位に脱励起する。そのとき主に放出される γ 線は以下である。[6]

表 3.1 中性子捕獲反応で生成した ^{59}Ni の励起状態が脱励起する際に放出される主な γ 線のエネルギーと相対強度。相対強度は 8.999 MeV を 100 としたときの値。

エネルギー [MeV]	相対強度
8.999	100
8.534	47.84
0.4649	54.08

この 8.999 MeV の γ 線のことを、以下 9 MeV の γ 線と呼ぶ。

3.1.2 中性子のエネルギーと捕獲反応断面積の関係

中性子捕獲反応は、中性子のエネルギーが低いほど断面積が大きくなることが知られている。特に原子の熱運動と同程度まで減速した中性子を熱中性子と呼び、そのエネルギーは 0.025 eV 程度である。この熱中性子を用いることで、中性子捕獲反応を効率よく起こすことができる。 ^{58}Ni の中性子捕獲反応断面積のエネルギー依存性を、図 3.1 に示す。

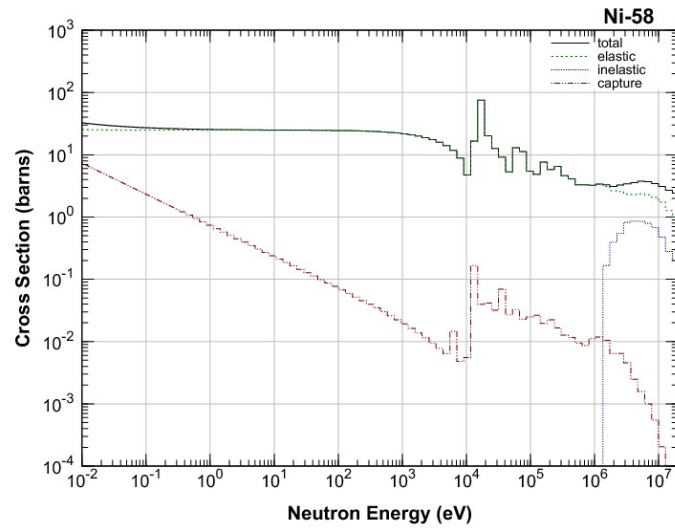


図 3.1 横軸に中性子のエネルギー [eV]、縦軸に ^{58}Ni との反応断面積 [barn] をとった図。赤い点線が捕獲反応の断面積、黒線が全断面積、緑の点線が弾性散乱の断面積、紫の点線が非弾性散乱の断面積を表す。[9]

3.2 熱中性子の生成法

3.2.1 ^{252}Cf 中性子源

本研究では、中性子源として ^{252}Cf を用いた。 ^{252}Cf は 96.9% が α 崩壊する他、3.1% が自発核分裂により崩壊し、1 核分裂あたり 3.76 個の平均エネルギーは約 2 MeV の中性子を放出する。半減期は 2.645 年である。[6] ^{252}Cf 線源による中性子のエネルギースペクトルを図 3.2 に示す。[8]。

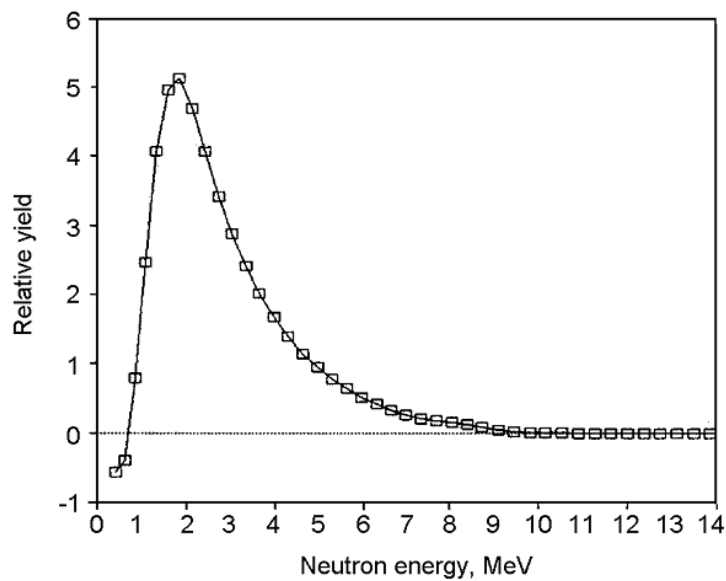


図 3.2 横軸に中性子のエネルギー、縦軸に相対収量をとった、 ^{252}Cf の中性子のエネルギースペクトル [8]

3.2.2 中性子の減速

本研究では、熱中性子化させるための減速材としてポリエチレンを用いた。中性子はポリエチレン中の水素原子や炭素原子との弾性散乱でエネルギーを失う。軽い原子との散乱ほどエネルギーをよく失うため、水素を多く含むポリエチレンは減速材として適しているといえる。また ^1H は中性子との捕獲反応も起こすため、弾性散乱による減速だけでなく中性子を吸収する効果もある。中性子と ^1H の反応断面積を図 3.3 に示す。

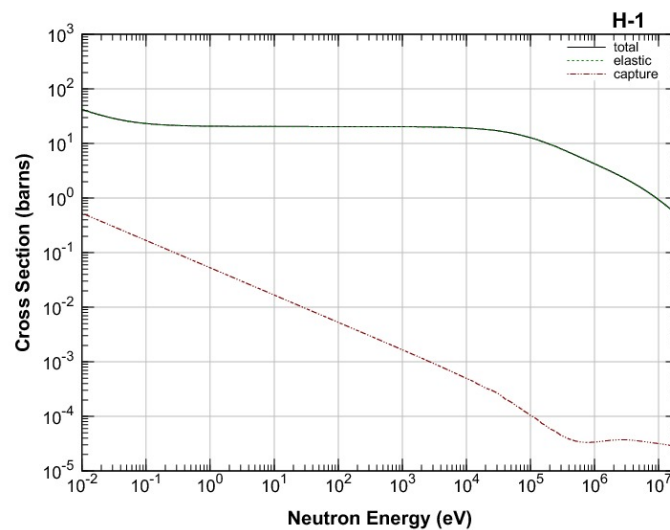


図 3.3 横軸に中性子のエネルギー [eV]、縦軸に ^1H との反応断面積 [barn] をとった図。赤い点線が捕獲反応の断面積を表す。緑の線は、弾性散乱の断面積と全断面積がほぼ重なっている。[9]

反応断面積から平均自由行程を求めることで、熱中性子化するために必要なポリエチレンの量を見積もることができる。反応断面積 σ と平均自由行程 l の関係式は、以下で与えられる。

$$l = \frac{1}{n\sigma} \quad (3.2.1)$$

ここで、 n は物質の数密度である。

入射中性子の速度分布がマクスウェル分布である仮定すると、式 3.2.1 は式 3.2.2 のように書き換えられる。

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} \quad (3.2.2)$$

等方的散乱

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{const.} \quad (3.2.3)$$

を仮定し散乱によって失うエネルギーをその平均値で一定として、図 3.3 の各点での弾性散乱断面積を用いて衝突ごとの平均自由行程を求めた。散乱前後の平均のエネルギー変化を ΔE とすると

$$\Delta E = E_{\text{in}} - \int E_{\text{out}} d\Omega \quad (3.2.4)$$

が成り立つ。ここで、 E_{in} 、 E_{out} はそれぞれ散乱前後の中性子のエネルギーである。

2.0 MeV の中性子が 0.025 eV 以下に減速するまでの過程の様子を示したものが表 3.2.2 である。

平均自由行程の総和を求めると、12 cm となる。

表 3.2 散乱によって失うエネルギーをその平均値で一定としたときの、2 MeV の中性子が 0.025 eV 以下に減速するまでの過程

散乱回数	エネルギー [eV]	断面積 [barn]	平均自由行程 [cm]
	2.0×10^6	2.9	3.0
1	6.7×10^5	5.3	1.7
2	2.2×10^5	9.3	0.95
3	7.4×10^4	14	0.63
4	2.5×10^4	18	0.50
5	8.2×10^3	19	0.46
6	2.7×10^3	20	0.44
7	9.1×10^2	20	0.43
8	3.0×10^2	20	0.43
9	1.0×10^2	20	0.43
10	33	20	0.43
11	11	20	0.43
12	3.8	20	0.43
13	1.3	21	0.43
14	0.42	21	0.42
15	0.14	22	0.40
16	0.046	26	0.34
17	0.015	35	0.25

第4章

テスト 実験の目的とセットアップ

4.1 テスト実験の目的

本研究では、ピグミー共鳴測定実験で用いる $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器と $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器を、9 MeV の γ 線を利用してエネルギー較正するためのテストを行った。9 MeV の γ 線を効率よく得るためのポリエチレン板と Ni 標的の最適な厚さを調べることが目的である。テスト実験では、Ni 標的の厚さ、ポリエチレン板の厚さを変化させて 9 MeV の γ 線の収量を測定した。さらに、カルシウム同位体のピグミー共鳴測定実験のセットアップにおける、9 MeV の γ 線を用いたエネルギー較正の実現可能性について調べた。

4.2 テスト実験のセットアップ

4.2.1 シンチレータ、光検出器

上記の目的のために、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器 (3.5 inch $\phi \times$ 8 inch) と、 $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器について測定を行った。

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器には、PMT (R10233-100SEL) が取り付けられている。[7] $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器には PMT (R11265U) を使用し、接合部には光学グリースを用いた。接合部はスコッチテープによって遮光した。それぞれの図面を図 4.1~図 4.6、図 4.7~図 4.9 に示す。

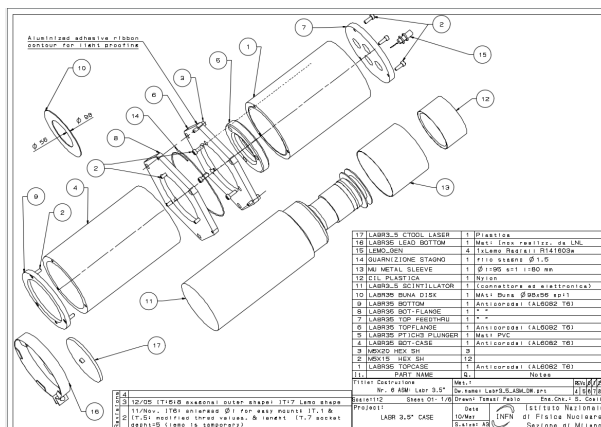


図 4.1 用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を構成する部品

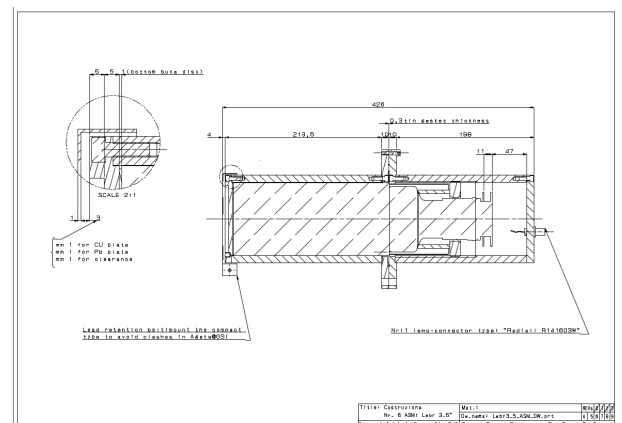


図 4.2 用いた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器の断面図。書かれた数字の単位は mm である

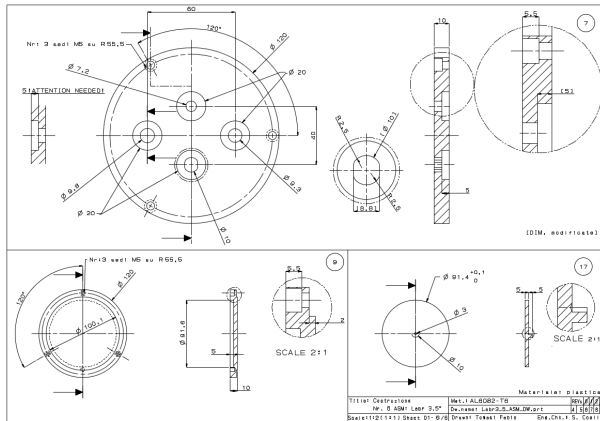


図 4.3 用いた LaBr₃(Ce) 検出器を構成する部品の詳細 (1)。書かれた数字の単位は mm である

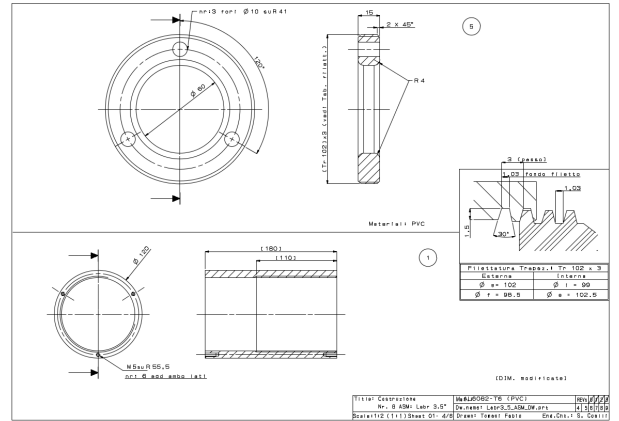


図 4.4 用いた LaBr₃(Ce) 検出器を構成する部品の詳細 (2)。書かれた数字の単位は mm である

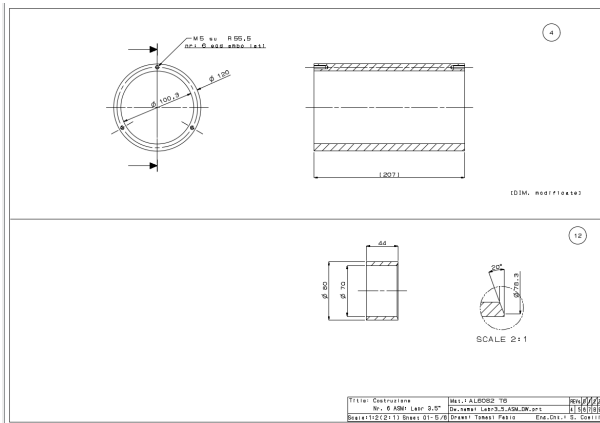


図 4.5 用いた LaBr₃(Ce) 検出器を構成する部品の詳細 (3)。書かれた数字の単位は mm である

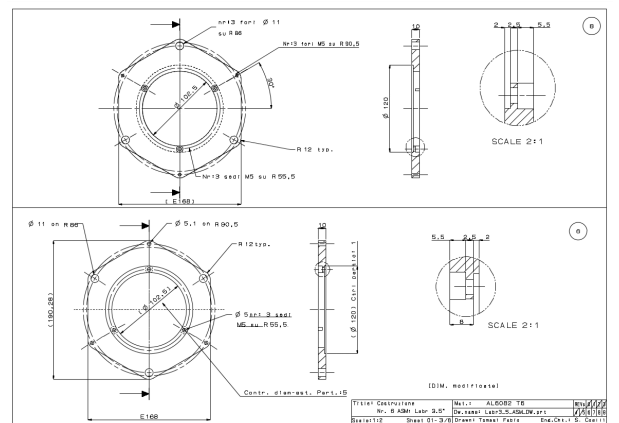


図 4.6 用いた LaBr₃(Ce) 検出器を構成する部品の詳細 (4)。書かれた数字の単位は mm である

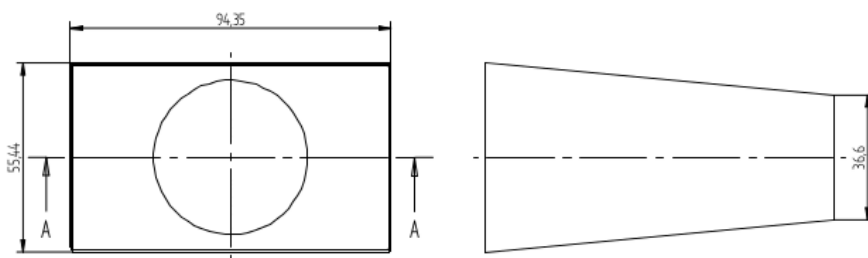


図 4.7 用いた CsI(Na) 結晶の上面と側面の図。書かれた数字の単位は mm である

4.2.2 信号処理回路

信号処理回路の図を、LaBr₃(Ce) 検出器と CsI(Na) 検出器での測定についてそれぞれ図 4.10、図 4.11 に示す。

LaBr₃(Ce) での測定

PMT からの出力信号は splitter で 2 つに分けられ、一方は QTC module (仁木工芸製) に送られる。QTC

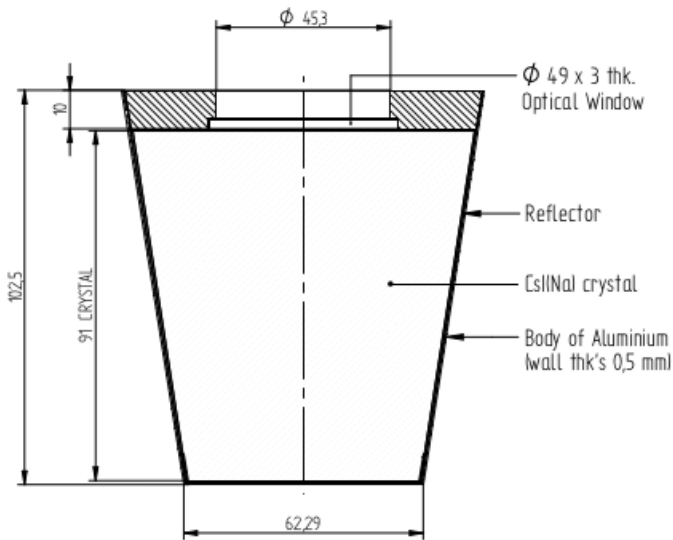


図 4.8 用いた CsI(Na) 結晶の前面の図。書かれた数字の単位は mm である

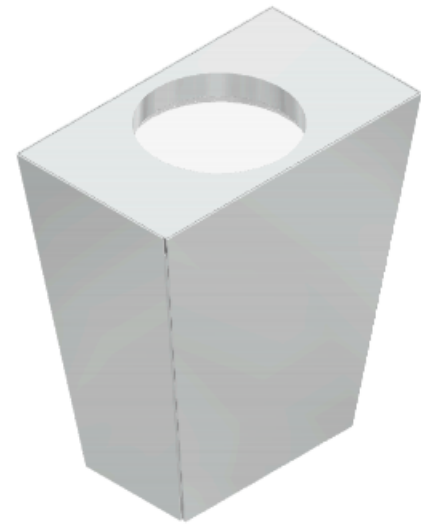


図 4.9 用いた CsI(Na) 結晶の立体図

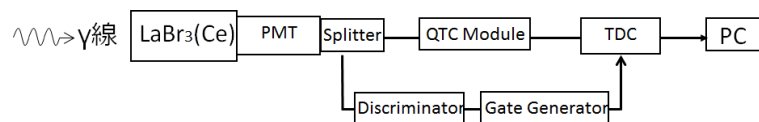


図 4.10 LaBr₃(Ce) での測定で用いた信号処理回路。パルスをデジタル信号に変換する部分と、ゲート信号を作る部分からなる。

module に搭載されている QTC チップ（岩通製）は、パルスの電荷を積分し、対応する幅のパルスを出力する。これにより電荷情報を取得する。この信号を TDC（CAEN V1190A）に送り、デジタル信号として記録する。もう一方のパルス信号は、TDC でのゲート信号となる。

CsI(Na) 検出器での測定

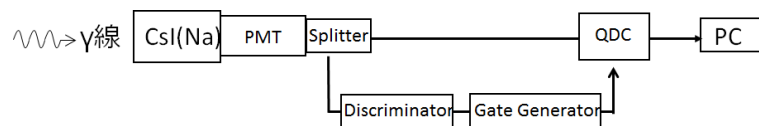


図 4.11 CsI(Na) 検出器での測定で用いた信号処理回路。パルスをデジタル信号に変換する部分と、ゲート信号を作る部分からなる。

LaBr₃(Ce) 検出器での測定と同様に、PMT からの出力信号は splitter で 2 つに分けられ、一方は QDC（CAEN V792）に送られる。QDC では電荷を積分し、デジタル信号として記録する。もう一方のパルス信号は、QDC でのゲート信号となる。

4.2.3 γ線源

²⁵²Cf 中性子線源の他に、¹³⁷Cs, ²²Na, ⁶⁰Co, ⁸⁸Y を γ線源として用いた。それぞれの γ線の強度、エネルギーを、表 4.2.3 に示す。実験時での線源の強度 N は、購入時の強度 N_0 と半減期 $T_{1/2}$ 、購入時からの時間 t から (4.2.1) 式によ

り求めた。

$$N = N_0 \times 2^{-t/T_{1/2}} \quad (4.2.1)$$

表 4.1 各線源の γ 線エネルギーと強度

エネルギー [keV]	線源の強度 [kBq]	半減期 [年]
^{252}Cf	381	2.645
^{137}Cs 662	31.5	30.08
^{60}Co 1173, 1333	7.53	5.27
^{22}Na 511, 1275	14.5	2.603
^{88}Y 898, 1836	18.6	0.292

4.2.4 ポリエチレン板、Ni 標的

減速剤として用いたポリエチレン板には、10 cm×20 cm×5 cm のものと、10 cm×20 cm×0.2 cm のものを組み合わせて用いた。9 MeV の γ 線を発生させるために用いた Ni 標的には、10 cm×10 cm×1 cm、10 cm×10 cm×0.5 cm、10 cm×10 cm×0.2 cm のものを組み合わせて用いた。Ni の純度は 99 % 以上である。

LaBr₃(Ce) 検出器、 ^{252}Cf 線源、Ni 標的、ポリエチレン板を図 4.12 のように配置して測定を行った。以後、図に示した線源から LaBr₃(Ce) 検出器までの距離を z_0 とおく。

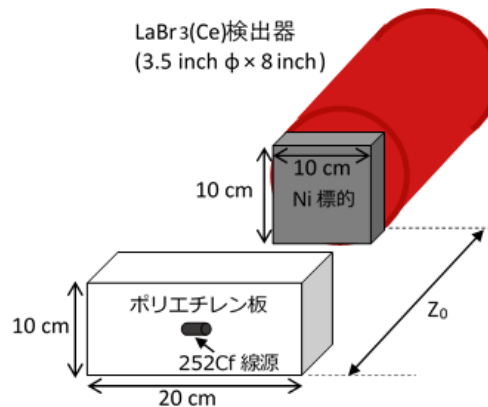


図 4.12 9 MeV の γ 線を測定した際の、LaBr₃(Ce) 検出器、 ^{252}Cf 、Ni 標的、ポリエチレン板の配置

第 5 章

テスト 実験の結果

5.1 LaBr₃(Ce) 検出器の測定結果

5.1.1 エネルギー較正

各線源を用いて得られたエネルギースペクトルを図 5.1,5.2 に示す。PMT に印加する高電圧は -960 V とした。スペクトルは横軸がチャンネル数、縦軸がカウント数を表す。それぞれの γ 線エネルギーに対応した光電ピークが見られる。また LaBr₃(Ce) 検出器中の ^{138}La の崩壊による γ 線によるピーク (1468 keV) も見られる。バックグラウンドはエネルギーが高くなるにつれ指数関数的に減少する。

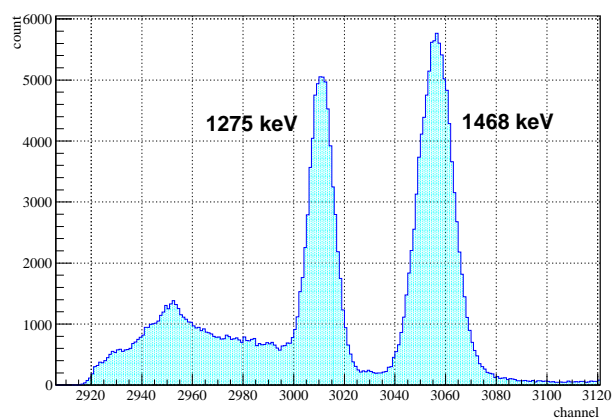


図 5.1 ^{22}Na の γ 線スペクトル

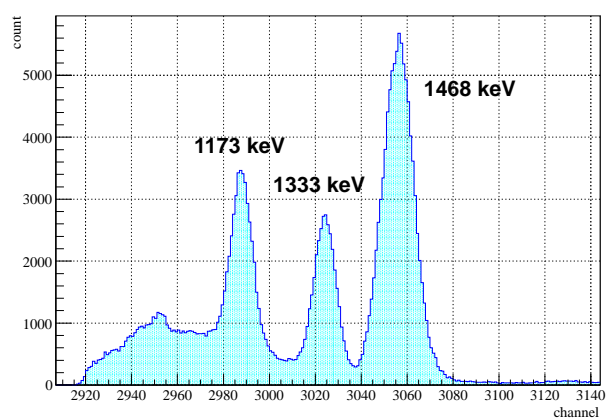


図 5.2 ^{60}Co の γ 線スペクトル

各線源のスペクトルについて光電ピークをガウス関数、バックグラウンドを指数関数としてフィッティングを行い、ガウス関数の中心値 μ [ch] からガンマ線のピークのチャンネルを求めてエネルギー較正を行った。 ^{22}Na についてフィッティングを行ったものを、図 5.3 に示す。

γ 線のピークチャンネルと γ 線エネルギーのグラフを図 5.4 に示す。データ点はそれぞれのスペクトルのピークのチャンネルに対応する。誤差はプロット点とほぼ重なっている。

測定結果から得られた 4 点について 1 次関数でフィッティングを行って線型性を確認し、直線の式を求めた。

$$E_{\gamma}[\text{keV}] = -11610 + 4.279 \cdot \mu \quad (5.1.1)$$

5.1.1 式により 9 MeV 、 9 MeV のシングルエスケープ (8.488 MeV)、 9 MeV のダブルエスケープ (7.977 MeV) に相当するチャンネル数を求めると、それぞれ表 5.1.1 のように求まった。

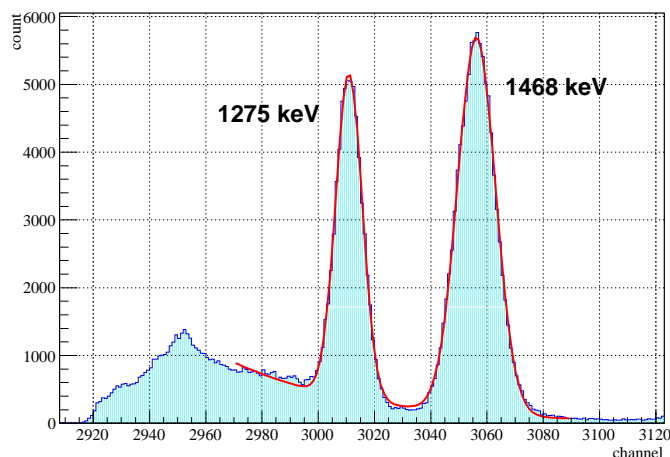


図 5.3 ^{22}Na についてフィッティングを行った図

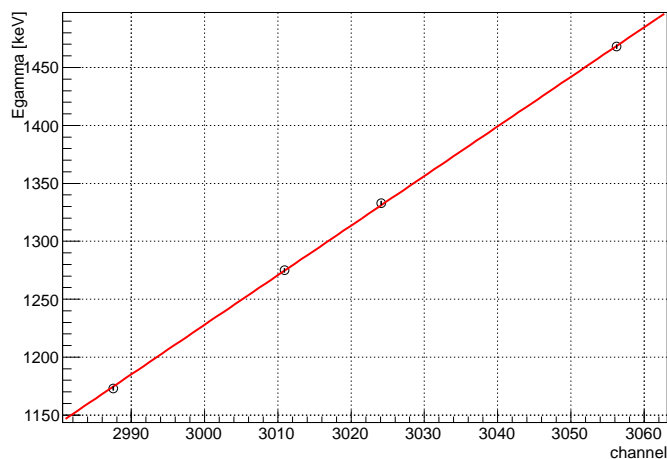


図 5.4 チャンネルとエネルギーの相関

表 5.1 チャンネルとエネルギーの相関から計算した各ピークチャンネル

	エネルギー [MeV]	チャンネル
9MeV	8.999	4816
シングルエスケープ	8.488	4697
ダブルエスケープ	7.977	4577

5.1.2 9MeV の γ 線によるピーク

LaBr₃(Ce) 検出器、 ^{252}Cf 、Ni 標的、ポリエチレン板を用いて行った測定の結果と、LaBr₃(Ce) 検出器、 ^{252}Cf 、ポリエチレン板を用いて行った測定の結果を比較する。両者の測定において、ポリエチレン板の厚さは 5 cm、 $z_0 = 16.8$ cm とした。Ni 標的の厚さは 18 mm とした。5700 ch 付近に見えるピークは、オーバーフローによるものである。

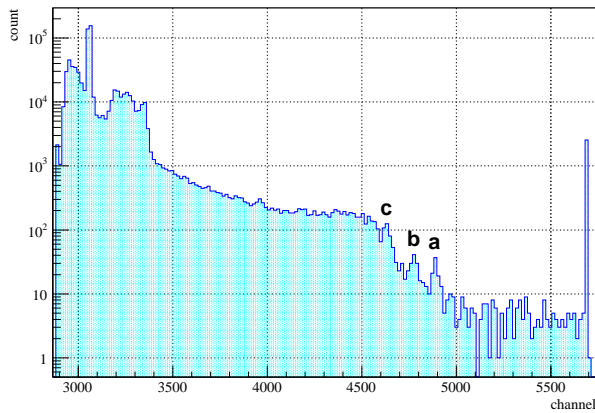


図 5.5 18 mm の Ni 標的を置いた場合

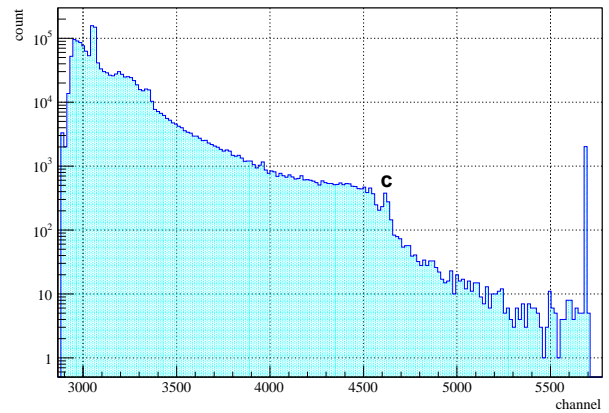


図 5.6 Ni 標的を置かなかった場合

4880 ch、4770 ch 付近に見えるピーク a,b は Ni 標的を置いて測定した図 5.5 にのみ存在するので、これらは Ni 起源の γ 線によるピークであるといえる。これらのピークチャンネルは概ね、表 5.1.1 に示した 9 MeV とシングルエスケープのピークチャンネルと一致している。したがって a のピークが 9 MeV の γ 線によるピークと考えられる。b のピークはシングルエスケープによるピークと、表 3.1.1 で示した 8.534 MeV の γ によるピークが重なっているものと考えることができる。8.534 MeV は 5.1.1 式によりチャンネル数に換算すると 4708 ch となり、ピークの幅が 20 ch 程あるので、両者のピークはほぼ重なっているといえる。

4620 ch あたりにあるピーク c はどちらの図にも存在するが、これは LaBr₃(Ce) 検出器の外装を覆っている ²⁷Al の中性子捕獲反応によって発生する γ 線起源であると考えられる。この γ 線のエネルギーは 7.724 MeV であり、[6]、これは 5.1.1 式によると 4518 ch と換算できる。したがって表 5.1.1 より、9 MeV の γ 線のダブルエスケープによるピークは ²⁷Al 起源の γ 線によるピークより 60 ch 程高い位置に存在するが、図 5.5 においてダブルエスケープによるピークは ²⁷Al 起源の γ 線による強いピークに埋もれて見えていないと考えられる。

5.1.3 Ni 標的の厚さを变化させた場合

Ni 標的の厚さを变化させて測定を行った。得られたエネルギースペクトルを図 5.14 ~ 5.13 に示す。ポリエチレン板の厚さは 5 cm、 $z_0 = 6.8$ cm とした。測定時間は約 15 分とした。

バックグラウンドを指数関数、光電ピークをガウシアンでフィッティングした結果を用い、ピークの幅 σ と高さからガウシアン面積を求めることで、9 MeV の γ 線のカウント数を求めた。Ni 標的の厚さ 18 mm の場合のスペクトルをフィッティングしたものを、図??に示す。横軸に Ni 標的の厚さ、縦軸に 9 MeV の γ 線のカウント数 N をフィッティング誤差を付けてプロットしたのが図 5.15 である。

厚さが大きくなるごとにカウント数が増加する傾向が観測された。

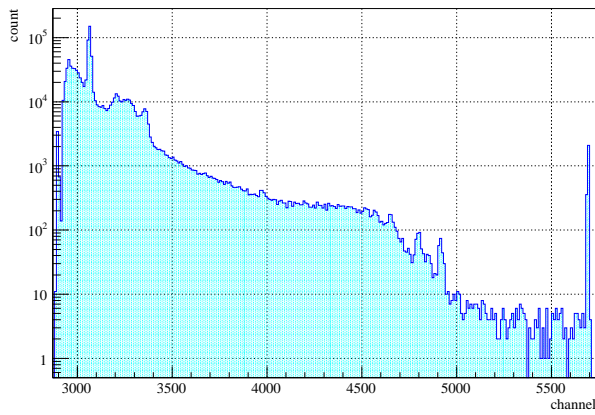


図 5.7 Ni 標的の厚さ 18 mm

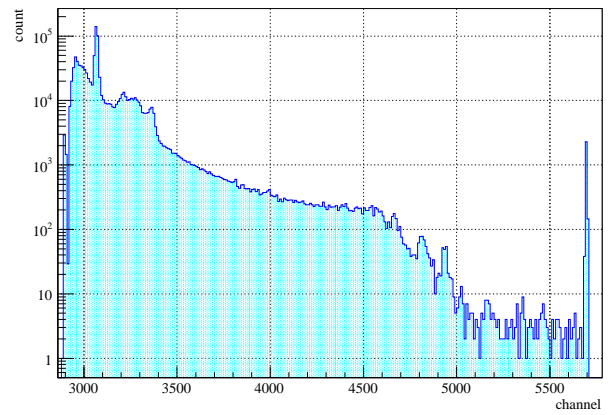


図 5.8 Ni 標的の厚さ 15 mm

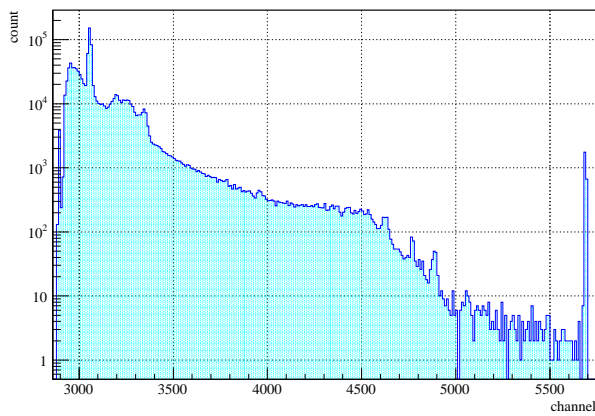


図 5.9 Ni 標的の厚さ 13 mm

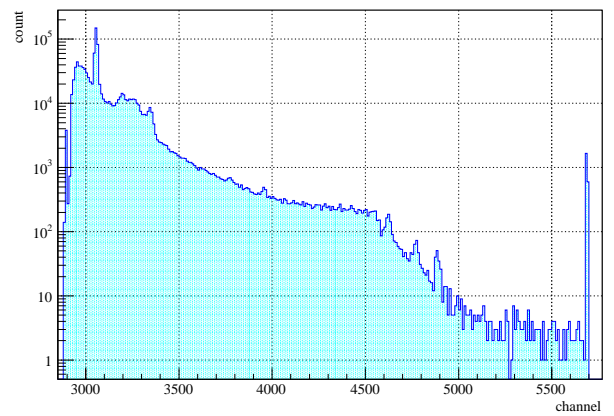


図 5.10 Ni 標的の厚さ 10 mm

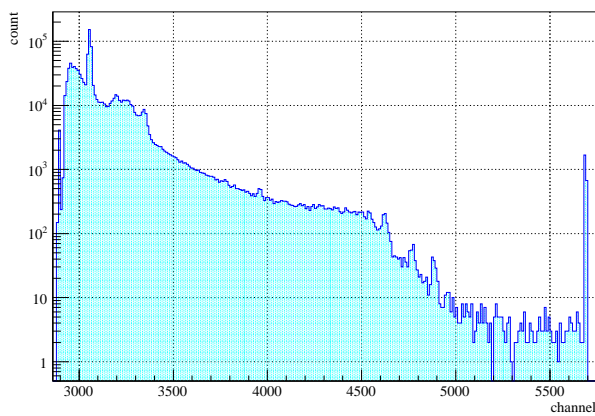


図 5.11 Ni 標的の厚さ 8 mm

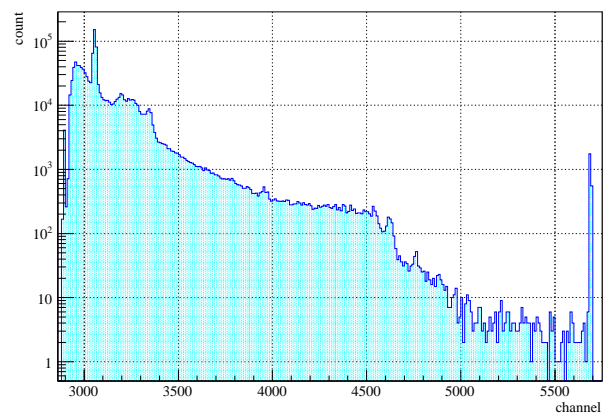


図 5.12 Ni 標的の厚さ 5 mm

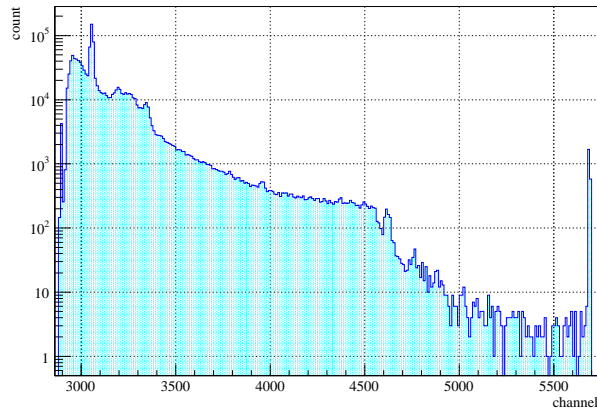


図 5.13 Ni 標的の厚さ 3 mm

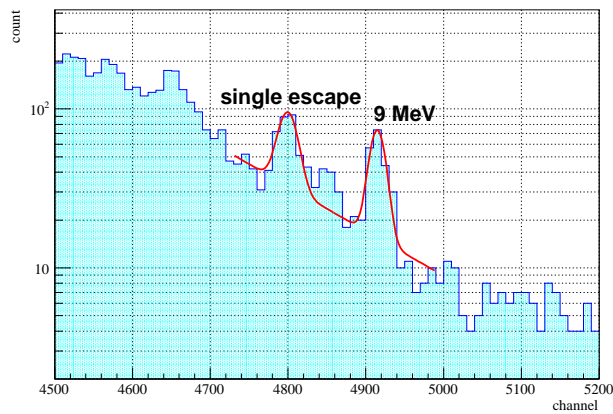


図 5.14 Ni 標的の厚さ 18 mm のスペクトルをフィッティングした図

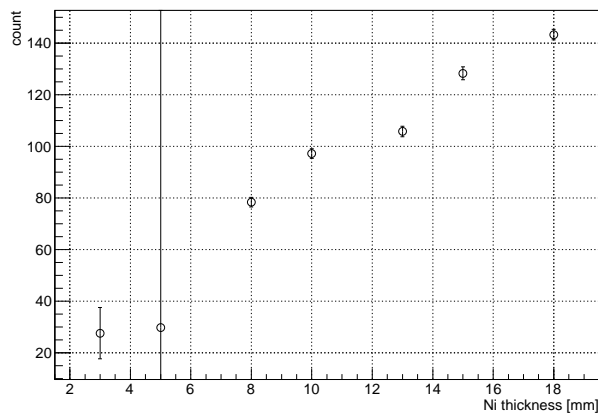


図 5.15 Ni 標的の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関

5.1.4 ポリエチレン板の厚さを变化させた場合

ポリエチレン板の厚さを变化させて測定を行った。得られたエネルギースペクトルを図 5.16 ~ 5.22 に示す。Ni 標的の厚さは 5 cm、 $z_0 = 16.8$ cm とした。測定時間は 15 分とした。

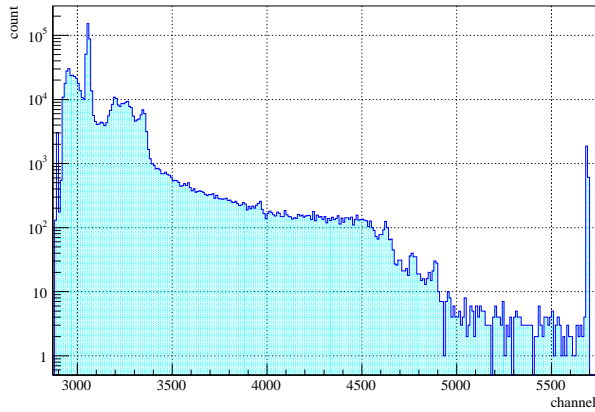


図 5.16 ポリエチレン板の厚さ 2 cm

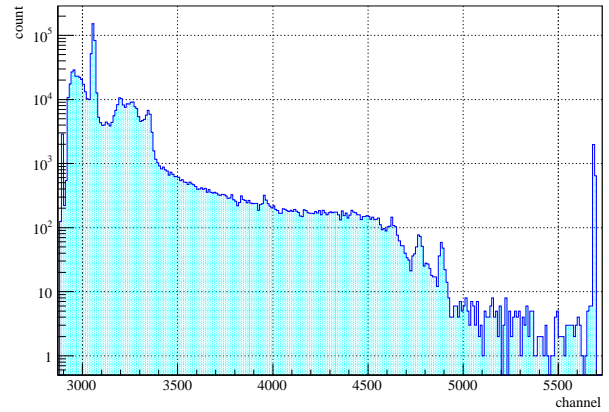


図 5.17 ポリエチレン板の厚さ 3 cm

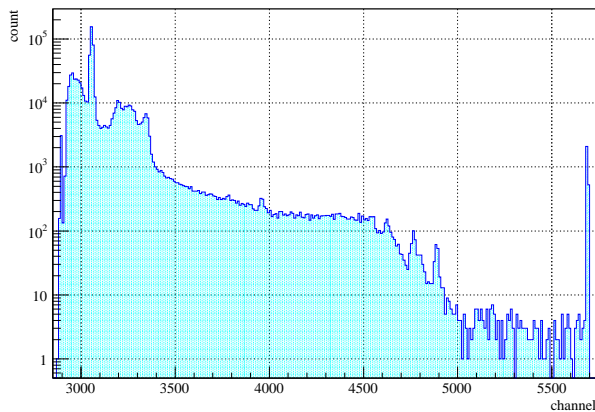


図 5.18 ポリエチレン板の厚さ 3.4 cm

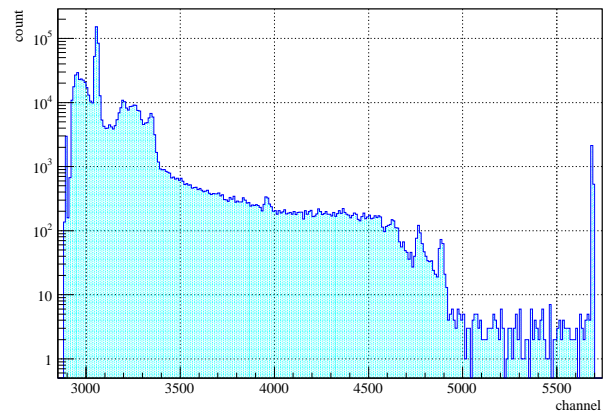


図 5.19 ポリエチレン板の厚さ 4 cm

5.1.3 と同様にバックグラウンドを指数関数、 γ 線ピークをガウシアンでフィッティングし、9 MeV の γ 線のカウン
ト数を求めた。それをフィッティング誤差を付けてプロットしたのが図 5.24 である。

ポリエチレン板の厚さ 4.4 cm のときに 9 MeV の γ 線のカウン
ト数が極大になっている。ポリエチレン板の厚さを
増やすとより多くの中性子が熱化されるため ^{58}Ni の中性子捕獲反応を起こす確率が上がるが、一方で散乱により方向が
変化し、検出器に届かない中性子の数も増加すると推測できる。さらにポリエチレンの増加は水素との中性子捕獲反応
が起こる確率も増加させる。したがって、ポリエチレンの厚さが増すことは 9 MeV の γ 線の発生量を増加させる効果
も減少させる効果もあるため、ある厚さでカウン
ト数が極大になると推測できる。

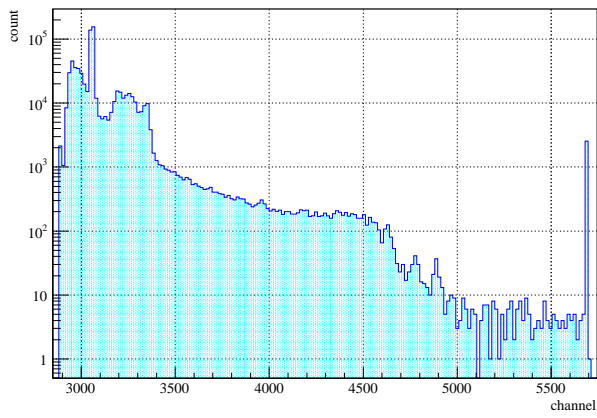


図 5.20 ポリエチレン板の厚さ 5 cm

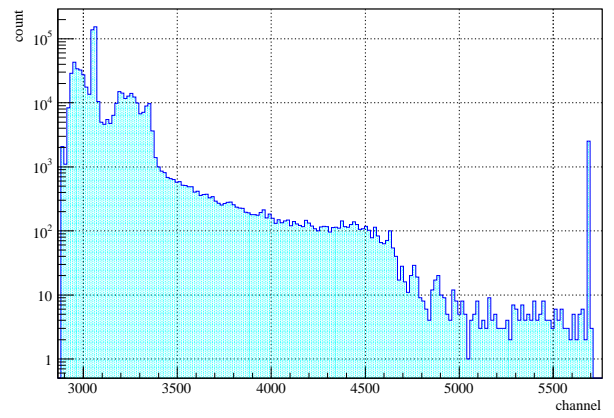


図 5.21 ポリエチレン板の厚さ 10 cm

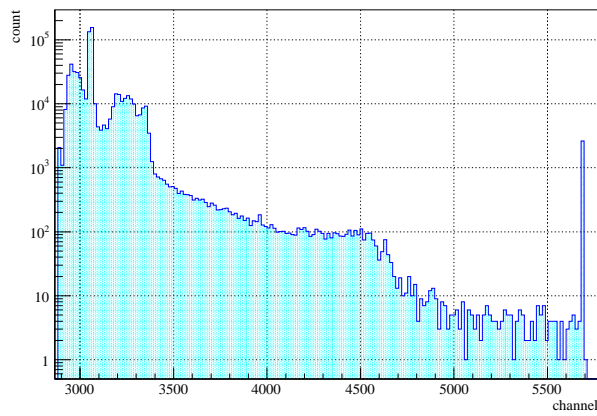


図 5.22 ポリエチレン板の厚さ 15 cm

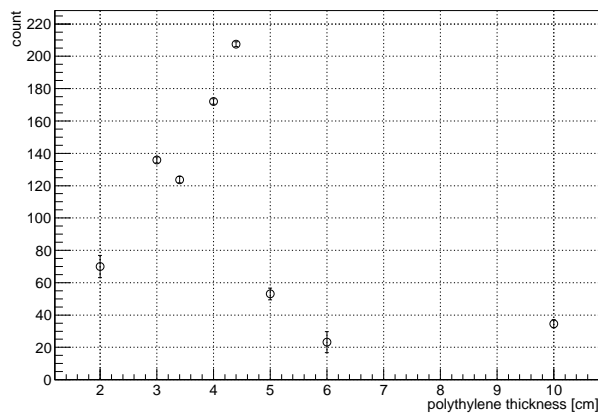


図 5.23 ポリエチレン板の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関

5.1.5 $z_0 = 40\text{cm}$ の場合

$^{48,50,52}\text{Ca}$ のピグミー共鳴測定実験では、標的と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器表面との距離を 40 cm とし、Ni 標的、減速剤は標的位置のすぐ近くに置いて測定を行う予定である。よって線源、ポリエチレン板、Ni 板を標的位置に設置した場合の測定を行った。 $z_0 = 40\text{ cm}$ とし、Ni 標的は 4.12 の位置ではなくポリエチレン板の側に置いた。5.1.3 節、5.1.4 節の結果を踏まえ、Ni 標的の厚さを 18 mm 、ポリエチレンの厚さを 4.4 cm とした。得られたエネルギースペクトルを図 5.24 に示す。測定時間は約 40 分 とした。

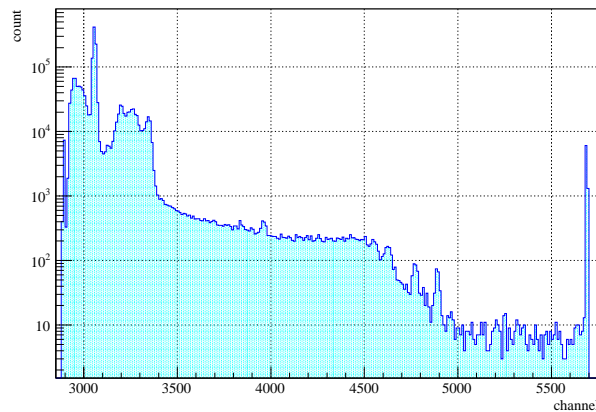


図 5.24 $z_0 = 40\text{ cm}$ にした場合

9 MeV の γ 線を 147 カウント得ることができ、またフィッティングで得られたピーク中心値の誤差が 1.02 ch と、充分小さい値であった。この結果から、 ^{252}Cf 線源と $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ の距離を 40 cm まで離しても、 9 MeV の γ 線についてエネルギー較正に必要な統計量を充分に得られることがわかった。

5.2 $\text{CsI}(\text{Na})$ 検出器の測定結果

5.2.1 エネルギー較正

各線源を用いて得られたエネルギースペクトルを図 5.26 ~ 図 5.28 に示す。PMT に印加する高電圧は、 800 V に設定した。

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ の場合と同様に、各線源のスペクトルについて光電ピークをガウス関数、バックグラウンドを指数関数としてフィッティングを行い、ガウス関数の中心値 μ [ch] からガンマ線のピークのチャンネルを求めてエネルギー較正を行った。 ^{137}Cs についてフィッティングを行ったものを、図 5.29 に示す。

γ 線のピークチャンネルと γ 線エネルギーのグラフを図 5.30 に示す。データ点はそれぞれのスペクトルのピークのチャンネルに対応する。誤差はプロット点とほぼ重なっている。

測定結果から得られた 7 点について 1 次関数でフィッティングを行って線型性を確認し、直線の式を求めた。

$$E_\gamma[\text{keV}] = -324.4 + 3.771 \cdot \mu \quad (5.2.1)$$

5.2.1 式により 9 MeV 、 9 MeV のシングルエスケープ (8.488 MeV)、 9 MeV のダブルエスケープ (7.977 MeV) に相当するチャンネル数を求めると、それぞれ表 5.2.1 のように求まった。

また、横軸に γ 線のエネルギー [keV]、縦軸にエネルギー分解能 (FWHM [ch]) をとると、図 5.31 が得られた。

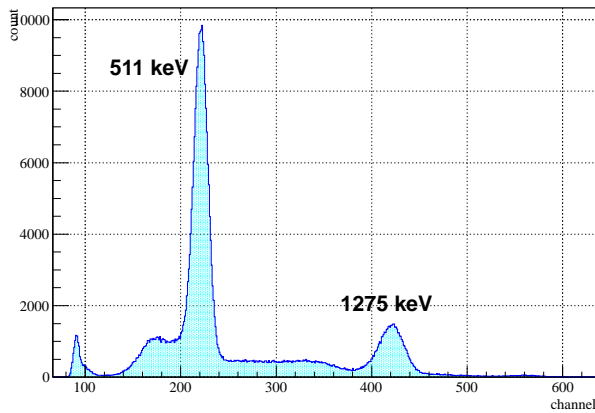
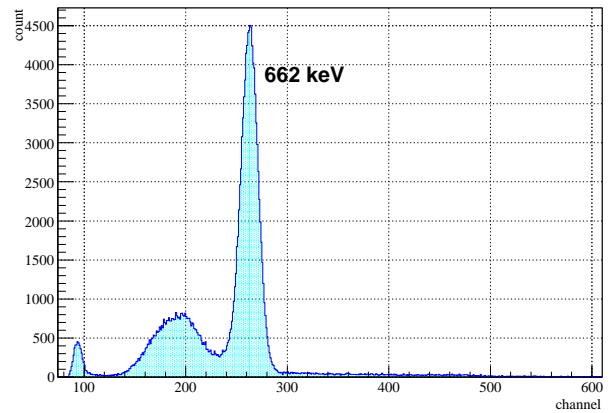
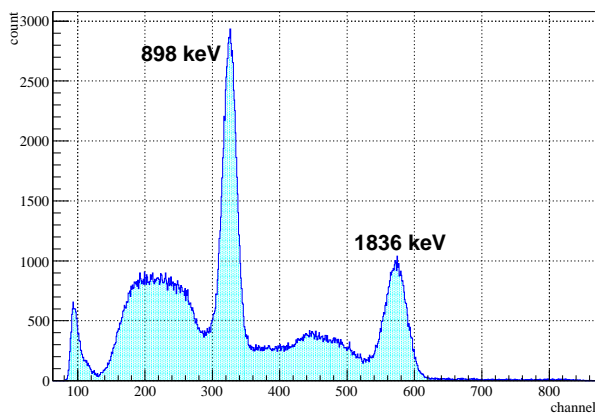
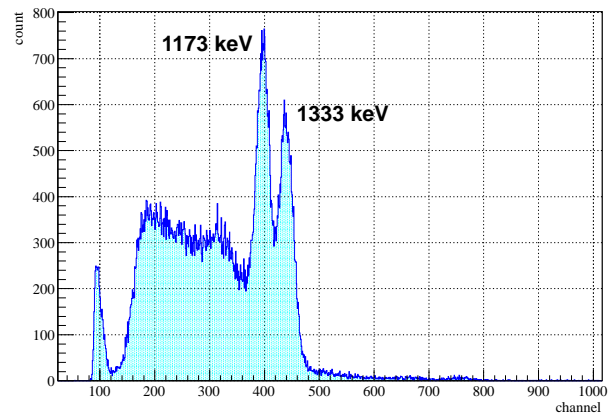
図 5.25 ^{22}Na の γ 線スペクトル図 5.26 ^{137}Cs の γ 線スペクトル図 5.27 ^{88}Y の γ 線スペクトル図 5.28 ^{60}Co の γ 線スペクトル

表 5.2 チャンネルとエネルギーの相関から計算した各ピークチャンネル

	エネルギー [MeV]	チャンネル
9MeV	8.999	2472
シングルエスケープ	8.488	2337
ダブルエスケープ	7.977	2201

5.2.2 9MeV の γ 線の測定

CsI(Na) 検出器、 ^{252}Cf 、Ni 標的、ポリエチレン板を用いて行った測定の結果と、CsI(Na) 検出器、 ^{252}Cf 、ポリエチレンを用いて行った測定の結果を重ねて図 5.32 に示す。

これらを比較すると、Ni 標的を置いた場合は 2200 ch 付近に大きな構造が見られる。これは Ni 標的を置かなかった場合には見られないので、Ni 起源の γ 線によるものだといえる。したがって、Ni 起源の γ 線が観測されたことがわかるがピークとしては見えていない。また、700 ch 付近に ^1H の中性子捕獲反応による γ 線 (2.2 MeV) が見えている。

図 5.31 をエネルギーの平方根の関数としてフィッティングしたものが図 5.33 である。

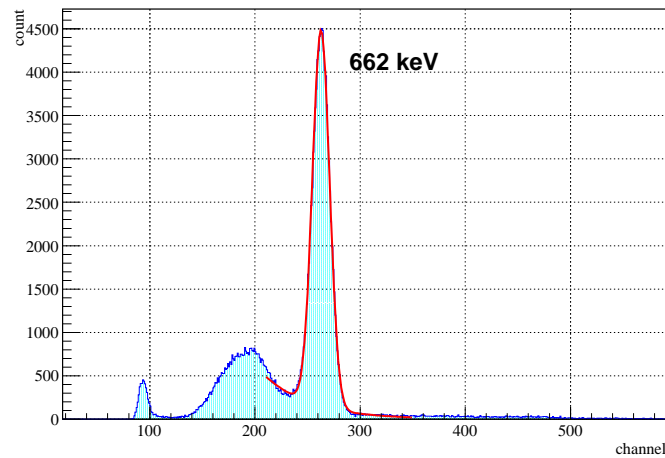


図 5.29 ^{137}Cs についてフィッティングを行った図

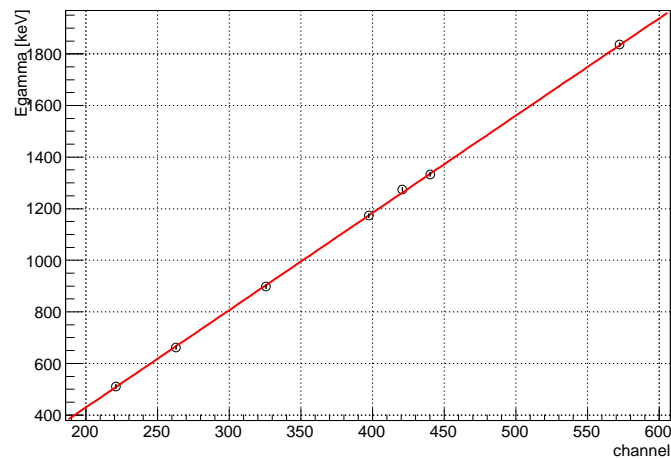


図 5.30 チャンネルとエネルギーの相関

フィットした関数の方程式は

$$\text{FWHM} = -3.39 + 0.869\sqrt{E} \quad (5.2.2)$$

と表される。したがって、この式の E_γ に 9 MeV を代入すると

$$\text{FWHM}_{9\text{MeV}} = 81.6 \text{ ch} \quad (5.2.3)$$

と見積もることができる。

表 5.2.1 より、9 MeV とシングルエスケープ、シングルエスケープとダブルエスケープのピークチャンネルの差は約 130 ch である。このことから、9 MeV とシングルエスケープ、ダブルエスケープによるピークは、CsI(Na) 検出器の分解能では分けることができなかつたと考えられる。

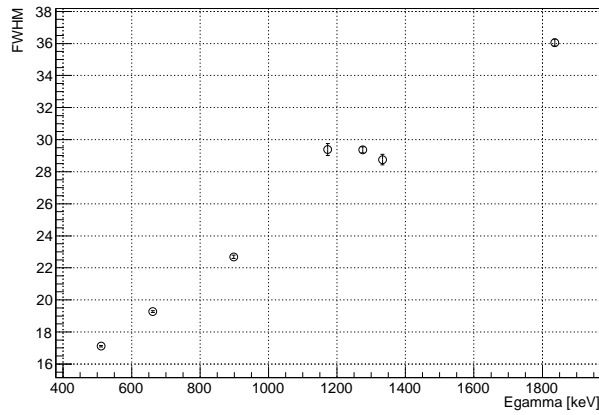


図 5.31 γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係

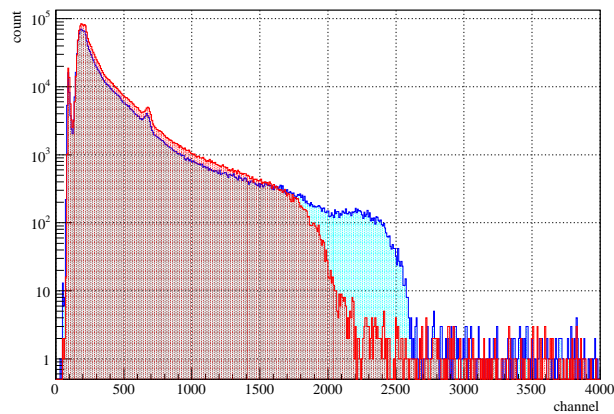


図 5.32 10 mm の Ni 標的を置いた場合（青）と、Ni 標的を置かなかった場合（赤）の比較

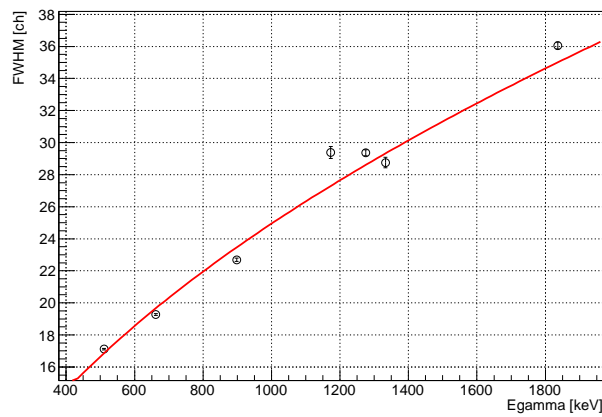


図 5.33 γ 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係をフィットしたグラフ

第 6 章

テスト 実験の結果についての議論

6.1 Ni 標的の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関

Ni 標的の厚さを変えて測定した場合の結果について議論する。厚さ dx の Ni 標的に中性子が入射した場合、捕獲反応を起こす確率 p は

$$p = \frac{N_A \rho \sigma}{A} dx \quad (6.1.1)$$

とかける。ここで、 N_A はアボガドロ数、 ρ は物質の密度、 A は質量数、 σ は反応断面積である。したがって、反応数を N 、入射中性子数を N_0 とすると

$$\begin{aligned} -dN &= Np = N \frac{N_A \sigma}{A} dx \\ N &= N_0 e^{-N_A \rho \sigma x / A} \end{aligned} \quad (6.1.2)$$

となる。したがって、捕獲反応し放出された 9 MeV の γ 線の数 N_γ と Ni 標的の厚さ x の関係は

$$N_\gamma = N_0 (1 - e^{-N_A \rho \sigma x / A}) \quad (6.1.3)$$

とかける。

これを踏まえて、測定結果を指数関数でフィットすると図 6.1 を得た。

フィッティングした関数は

$$N = 247(1 - e^{-0.0475x}) \quad (6.1.4)$$

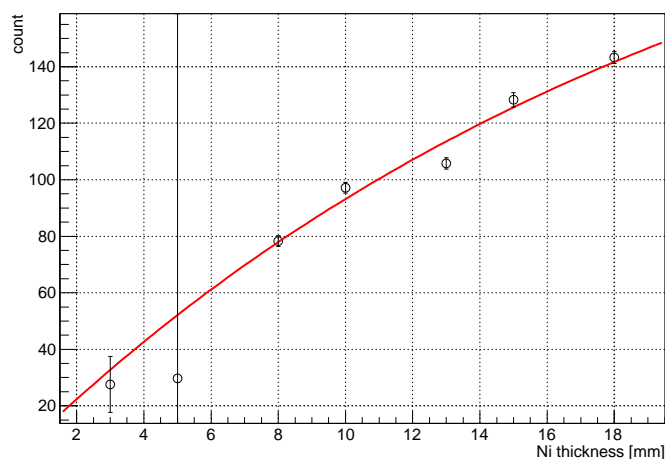


図 6.1 Ni 標的の厚さを変えて測定した結果を指数関数でフィットした図

である。

したがって、アボガドロ数、Niの密度 (8.91 g/cm^3)、 ^{58}Ni の天然存在比 (68.0%)、 ^{58}Ni の質量数 (58) を用いてこの式から断面積を求めると

$$\sigma = 0.754 \text{ barn} \quad (6.1.5)$$

と求まる。これは図 3.1 よりおよそ 0.8 eV の中性子の捕獲反応断面積に相当する。

6.2 ポリエチレン板の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関

ポリエチレン板の厚さと 9 MeV の γ 線のカウント数との相関について、シミュレーションを用いて考察した。本シミュレーションでは以下のことを仮定している。

- 中性子は線源から等方的に飛び出す
- ポリエチレンは ^1H のみで構成される
- 中性子と ^1H との相互作用は、弾性散乱と捕獲反応のみである
- 弾性散乱において、散乱は等方的である
- 水素原子は静止している

本シミュレーションでは 5.1.4 節の実験セットアップと同様に、中性子線源、ポリエチレン板、Ni 標的を配置した。線源を飛び出す中性子に以下の処理を施した。

1. 図 3.2 に示した ^{252}Cf のエネルギースペクトルを持つ中性子を発生させる。エネルギー分布は Landau 分布で近似した。(図 6.2) 線源から等方的に放出されるように乱数を発生させ、中性子が射出される方向を決める。
 - (a) 中性子の入射エネルギーに対応する ^1H との弾性散乱の断面積を計算し、対応する平均自由行程を計算する。弾性散乱の断面積は図 3.3 を近似した式を用いた。(式 6.2.1)
 - (b) 求めた平均自由行程に対して指数関数の乱数を振り、飛行距離を算出する。
 - (c) 入射エネルギーに対応する図 3.3 の捕獲反応の断面積を式 6.2.2 の近似式から計算し、これにより捕獲反応が起こる確率を求める。一様乱数を用いて捕獲されるか否かを決め、捕獲された場合はそこでループを止める。
 - (d) ^1H による中性子捕獲反応が起こらなかった場合には、1b で決定した飛行距離を進む。進んだ先で散乱が起こったとして、乱数により弾性散乱後の方向を決定し、散乱角度から散乱後のエネルギーを計算する。
2. 以後同様に 1a~1d を繰り返す、中性子がポリエチレンの外に出たらループを止める。
3. 中性子の運動の方向から、Ni 標的に到達するかどうかを判定する。

$$\begin{aligned} \sigma [\text{barn}] &= 12.47E^{-0.248} & (E < 0.1 \text{ eV}) \\ \sigma [\text{barn}] &= 20.43 & (0.1 \text{ eV} \leq E < 10^4 \text{ eV}) \\ \sigma [\text{barn}] &= 19.828e^{-4 \times 10^{-7} E} & (10^4 \text{ eV} \leq E < 10^5 \text{ eV}) \\ \sigma [\text{barn}] &= 9456.2E^{-0.565} & (E \geq 10^5 \text{ eV}) \end{aligned} \quad (6.2.1)$$

$$\sigma [\text{barn}] = \frac{0.0528}{\sqrt{E}} \quad (6.2.2)$$

10^6 個の中性子を発生させてこの一連の操作を行い、最終的に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー分布を求め、それに図 3.1 で示した ^{58}Ni の中性子捕獲反応の断面積で重み付けをし、そのシミュレーションで得たプロットを図 6.3~

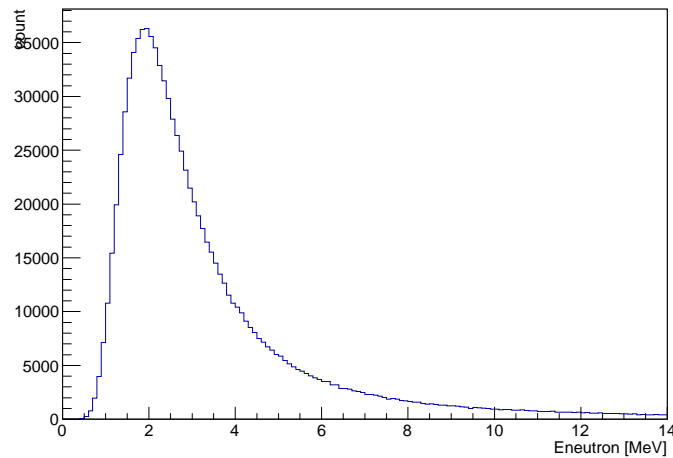


図 6.2 Landau 関数によって近似した、横軸エネルギー [MeV]、縦軸カウント数 (総イベント数 10^6) の ^{252}Cf の中性子スペクトル

図 6.14 に示す。横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした。そのプロットの総面積を求めることで、ポリエチレン板の厚さに対応する 9 MeV の γ 線の相対的な収量を算出した。それをプロットしたのが図 6.15 である。実験結果を重ねたものが図 6.16 である。実験結果の図 5.24 にはカウント数のピークが存在しており、シミュレーションでもそのようなピークを確認することができた。

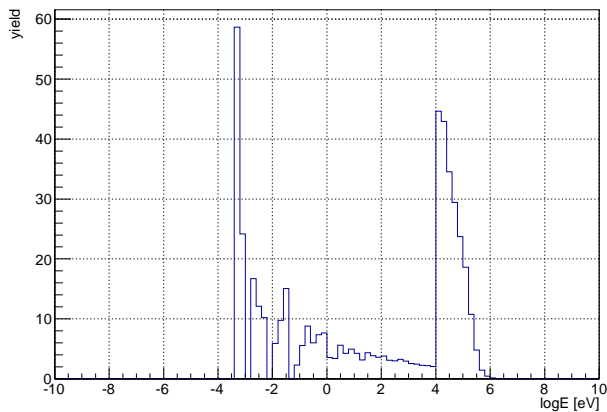


図 6.3 ポリエチレン板の厚さ 0.1 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

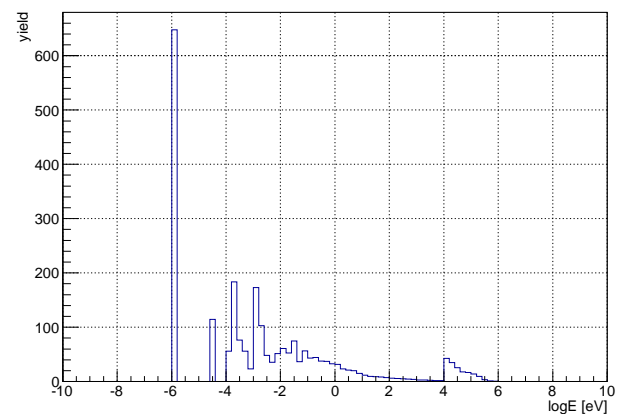


図 6.4 ポリエチレン板の厚さ 0.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

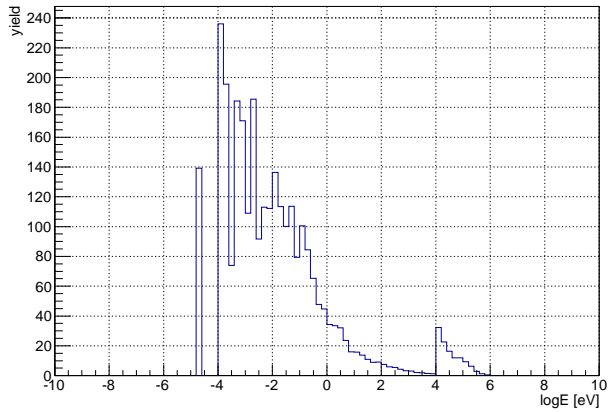


図 6.5 ポリエチレン板の厚さ 1 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

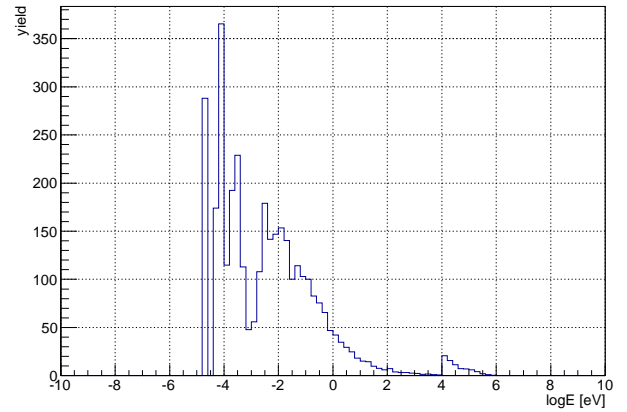


図 6.6 ポリエチレン板の厚さ 1.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

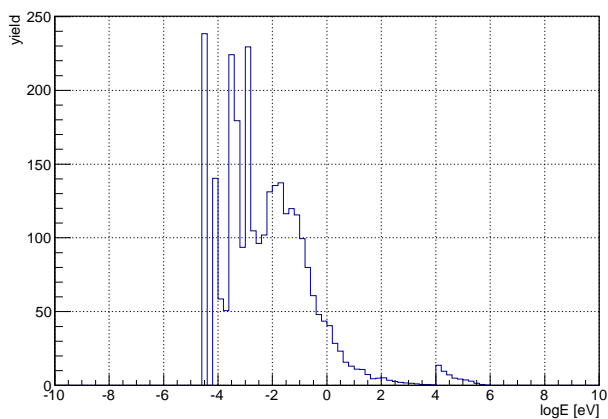


図 6.7 ポリエチレン板の厚さ 2 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

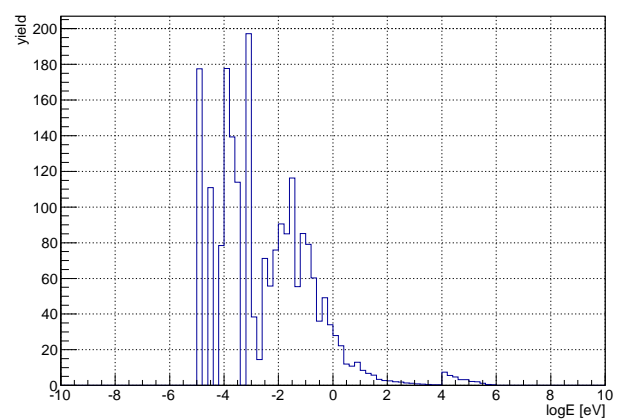


図 6.8 ポリエチレン板の厚さ 2.5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

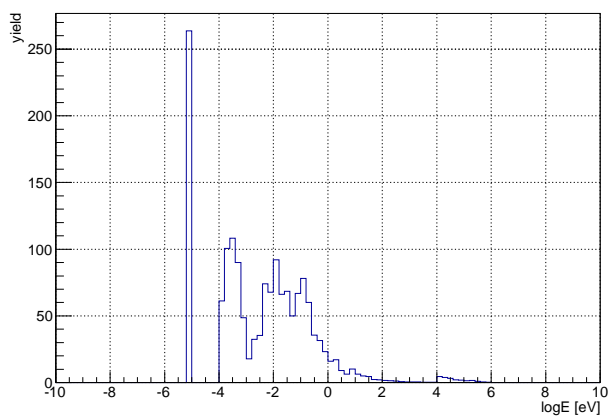


図 6.9 ポリエチレン板の厚さ 3 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

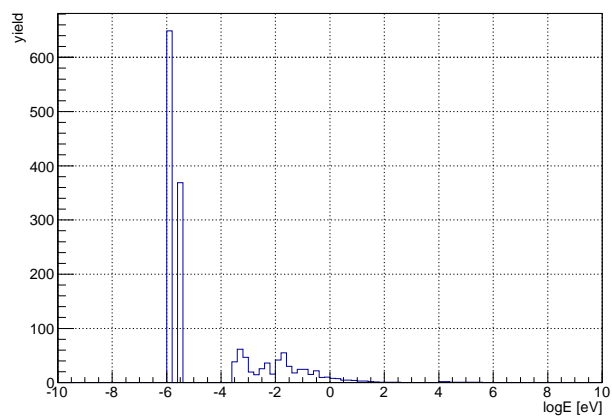


図 6.10 ポリエチレン板の厚さ 4 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

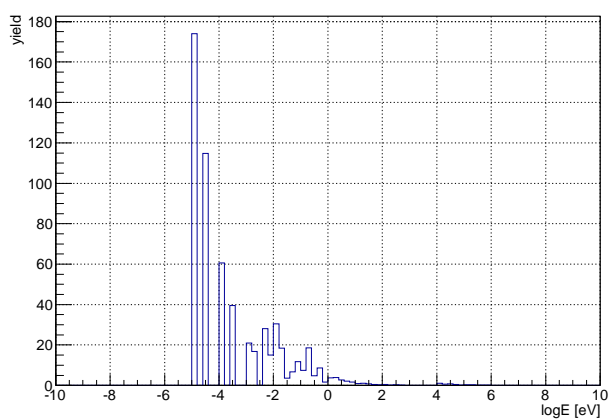


図 6.11 ポリエチレン板の厚さ 5 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

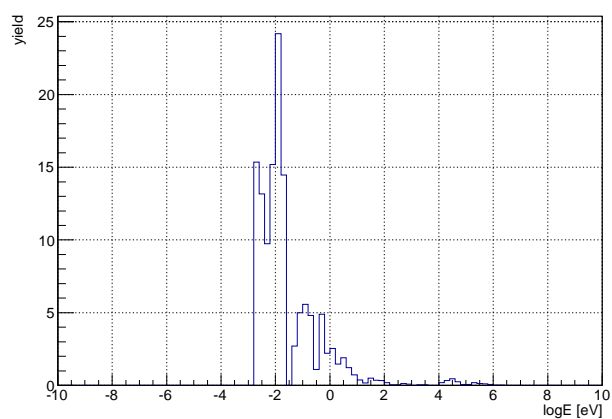


図 6.12 ポリエチレン板の厚さ 6 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

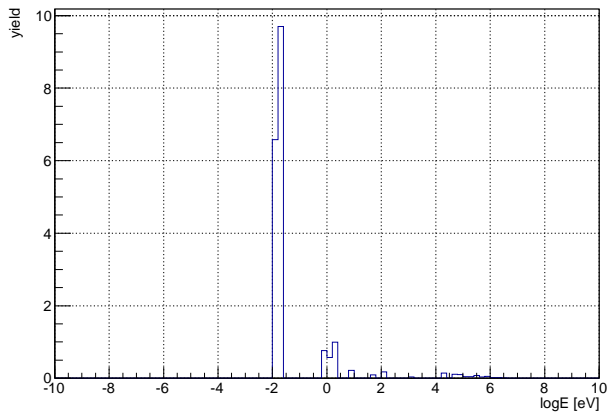


図 6.13 ポリエチレン板の厚さ 8 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

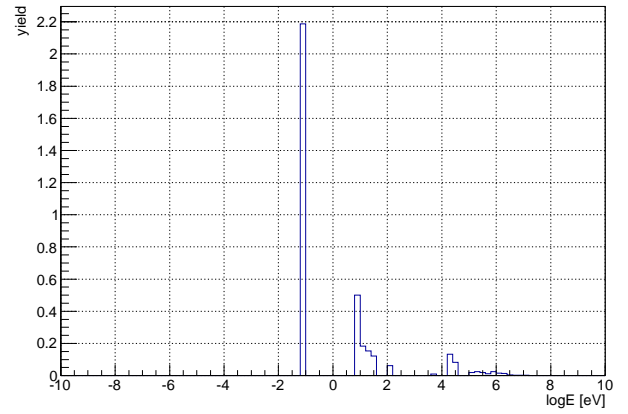


図 6.14 ポリエチレン板の厚さ 10 cm について、横軸に Ni 標的に到達した中性子のエネルギー (eV) に常用対数をとった値、縦軸に重み付けしたカウント数をプロットした図

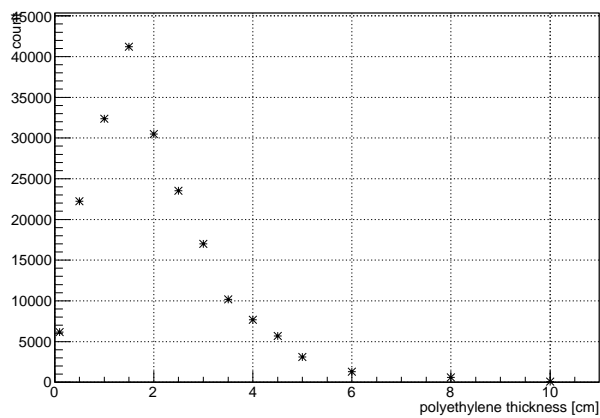


図 6.15 横軸にポリエチレン板の厚さ、縦軸に 9 MeV の γ 線の相対的な収量をとったシミュレーション結果

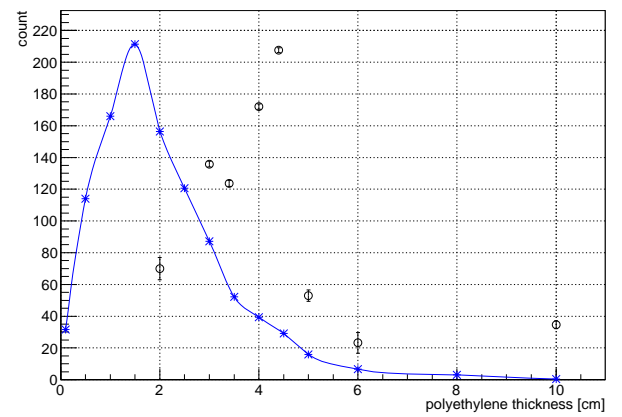


図 6.16 シミュレーション結果と実験結果のスケールをおおよそ等しくし、重ねてプロットした図。青 (*印) がシミュレーション、黒 (丸印) が実験結果である

ポリエチレン板がある厚さのときに 9 MeV の γ 線の収量が極大になる理由を考える。本シミュレーションにおいて、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布を、ポリエチレン板の厚さ 5 点についてプロットしたものが図 6.17~6.21 である。横軸は常用対数をとったエネルギー [eV] の値、縦軸が 9 MeV の γ 線のカウント数である。

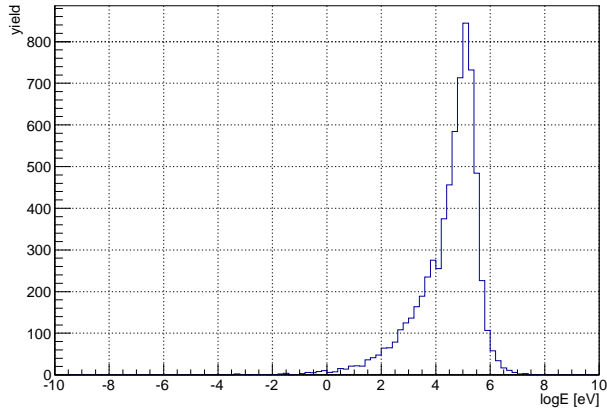


図 6.17 ポリエチレン板の厚さ 0.1 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布

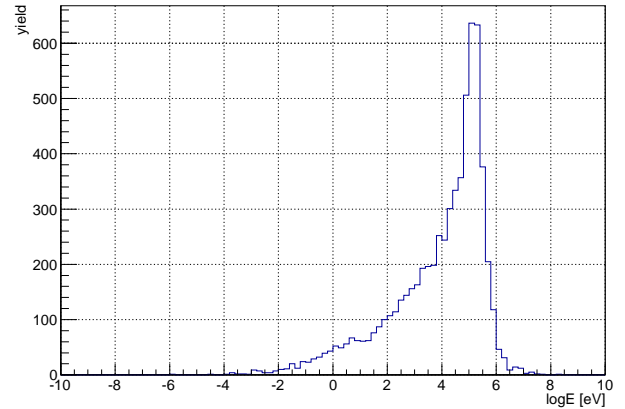


図 6.18 ポリエチレン板の厚さ 0.5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布

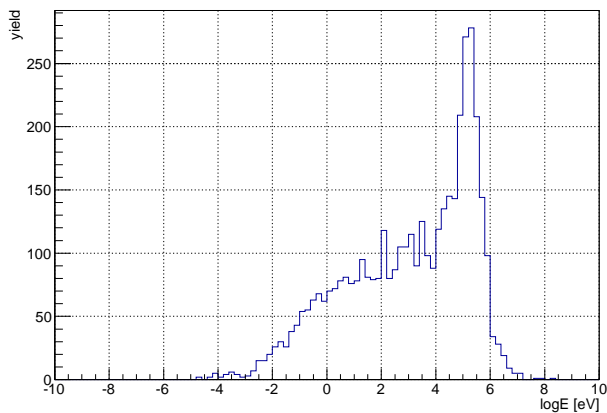


図 6.19 ポリエチレン板の厚さ 1.5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布

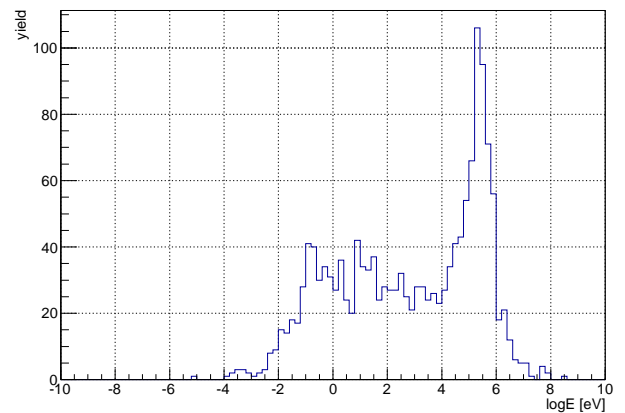


図 6.20 ポリエチレン板の厚さ 3 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布

これらについて、総カウント数、また熱中性子のエネルギーである 0.025 eV 以下まで減速した中性子の数を求めてグラフにすると図 6.22, 6.23 のようになった。

図 6.22 では、ポリエチレンの厚さが増すごとに総カウントは減少している。ポリエチレン厚が増すと散乱回数が増え、ポリエチレン板外へ中性子の漏洩しやすくなり、さらに ^1H による捕獲反応によって中性子が消滅するという寄与の現れである。

図 6.22 においてポリエチレン板の厚さが 0.5 cm~1.5 cm の領域をみると、総カウント数が 4 割ほど減少していても 0.025 eV 以下の中性子数は 2 倍以上になっている。したがって、ポリエチレン厚が比較的小さいと、熱中性子の生成量には、総カウント数の寄与よりも減速の寄与が大きいのといえる。

図 6.22 においてポリエチレン板の厚さが 1.5 cm~3 cm の領域をみると、厚さが 2 倍になると総カウント数が 6 割程度減少している。これを踏まえ図 6.23 をみると、0.025 eV 以下の中性子の数は同じ領域で同様に 6 割程度減少して

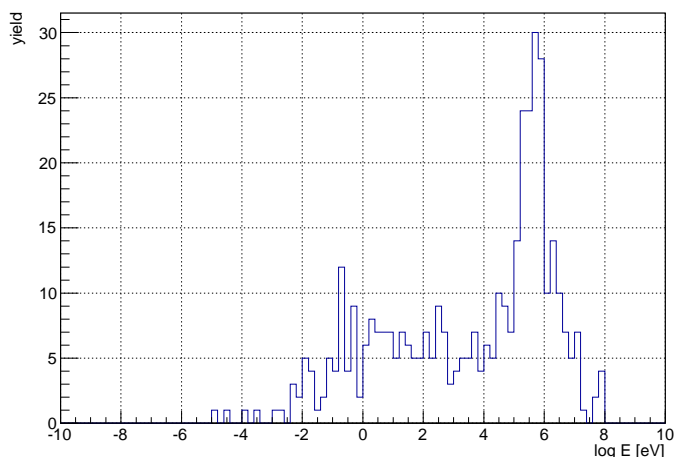


図 6.21 ポリエチレン板の厚さ 5 cm のときの、Ni 標的まで到達した中性子のエネルギー分布

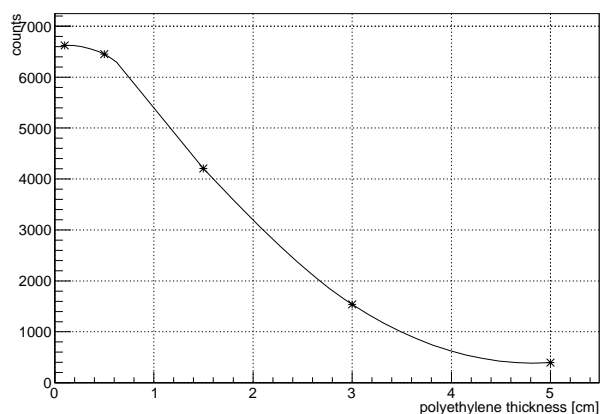


図 6.22 Ni 標的まで到達した中性子数

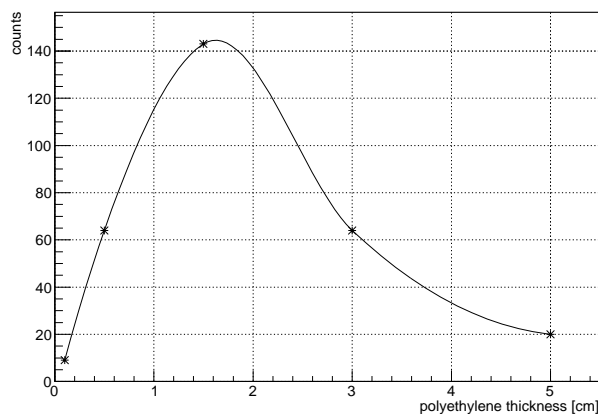


図 6.23 Ni 標的まで到達した中性子の中で、0.025 eV 以下に減速された中性子数

いることがわかる。したがって、ポリエチレン厚が大きくなってくると、ポリエチレン厚が増すことによる減速の効果よりも、Ni 標的に達する総カウント数が減る効果の寄与が大きく、結果として ^{58}Ni との捕獲反応を起こす割合は低くなるといえる。

以上のことから、ポリエチレン板の厚さは Ni 標的に達する総中性子数の減少と、減速による熱中性子化へ寄与するため、それらのバランスが最も効率よくなる厚さのときに、9 MeV の γ 線の収量が極大になると考えられる。

また、実験結果ではポリエチレン板の厚さ 4.4 cm でカウント数が最大となっていたが、このシミュレーション結果では 1.5 cm で最大となっている。この相違の原因には、前述したシミュレーション上の仮定が関係していると推測できる。今後、ポリエチレン中の炭素の存在や原子の熱運動、散乱の非等方性などを考慮に入れたより正確なシミュレーションを行っていく必要がある。

第7章

まとめと今後の展望

7.1 まとめ

$^{48,50,52}\text{Ca}$ のピグミー共鳴測定用 γ 線検出器について、 ^{58}Ni の熱中性子捕獲反応によって生成される 9 MeV の γ 線の測定を行った。この γ 線は、 ^{252}Cf 線源から放出される中性子をポリエチレン板で減速し、 ^{58}Ni (天然存在比 68.0%) との熱中性子捕獲反応により発生させた。ポリエチレン板と Ni 標的の厚さを変えて 9 MeV の γ 線の収量を調べた。テスト実験の結果、ポリエチレン標的の暑さが 4.4 cm での 9 MeV の γ 線の収量が極大になることがわかった。また Ni 板の厚さを増すことで、9 MeV の γ 線の収量が増加することを確認した。実際のピグミー共鳴測定の実験セットアップでは、標的と検出器の距離が 40 cm となるが、この距離で測定を行った結果、40 分で 147 カウントの 9 MeV の γ 線の収量が得られた。これにより、実際の実験セットアップでエネルギー較正を行うにあたって、十分に実用可能であることが確認できた。一方、CsI(Na) 検出器での測定では、分解能の問題で 9 MeV の γ 線とシングルエスケープのピークを分離できないことがわかった。

7.2 今後の展望

本研究ではポリエチレン板や Ni 標的の厚さのみを変化させて測定を行った。今後は厚さだけでなく形状を変えるなどして、より効率よく 9 MeV の γ 線を測定できるセットアップを調べていく。さらに $^{48,50,52}\text{Ca}$ のピグミー共鳴測定実験では、ポリエチレン、Ni 標的の体積や形状の自由度に限りがあるため、実際の実験においてより精度よくエネルギー較正を行うために、最適なセットアップを目指していく。そのためには、本研究で行ったシミュレーションをより精度の高いものに変えていき、それに基づいたテスト実験を行っていく必要がある。

参考文献

- [1] M. N. HARAKEH, A. van der WOUDE “Giant Resonances” (OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS 2000)
- [2] P. Adrich et al., Phys. Rev. Lett. 95, 132501 (2005)
- [3] O. Wieland et al., Phys. Rev. Lett. 102, 092502 (2009)
- [4] D.M. Rossi et al., Phys. Rev. Lett. 111, 242503 (2013)
- [5] T. Inakura et al., PRC84, 021302 (2011)
- [6] National Nuclear Data Center <http://www.nndc.bnl.gov/>
- [7] A. Giaz et al., Physics Research A 729 (2013) 91092
- [8] Sang-Tae Park et al., Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry , Vol. 256, No. 1 (2003) 163166
- [9] 日本原子力研究開発機構 核データ研究グループホームページ http://wwwndc.jaea.go.jp/NuC/index_J.html
- [10] Saint-Gobain ホームページ <http://www.crystals.saint-gobain.com>

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの方々にご指導、助言をいただきました。中村隆司教授には様々な物理の知識、研究の進め方、実験の取り組み方や研究を行う上での物事の考え方など、本当にたくさんのご教授いただきました。特任助教の梅野泰宏氏には、本研究を行う環境を整えていただき、研究を進める中での方針や、私の解決できなかった様々なことの相談に乗っていただきました。助教の近藤洋介氏には、コンピュータの使い方、実験の進め方など、何かある度に助言ををいただき、研究を進めることができました。理研仁科センターの馬場秀忠氏、京都大学の中塚徳継氏には、私が研究に着手し始めたころから常に、たくさんのサポートをいただきました。四方瑞紀氏、坪田潤一氏の先輩方には、研究のことや研究室生活を送る中での小さな質問にも付き合ってくださいました。また、研究室同期の齊藤敦美氏をはじめ、学科同期とは常に刺激しあい、励ましあえたことでここまでやってくることができました。研究を支えて下さった方々に心から感謝いたします。最後に、4年間の大学生生活を常に支えてくれた家族に感謝します。