# 2020 年度 課題研究 P3 レポート 窒素 <sup>14</sup>N の熱外中性子数捕獲反応の断面積測定

京都大学理学部4回生

池田 賢矢, 伊東 祐起, 宇野 大地, 大元 隆史, 落合 信治, ホッジ ルネ 倫, 吉田 匠志

2021年4月30日

## 目次

1	イントロダクション	2
1.1	雷雲中で起こる核反応	2
1.2	1/v則	3
1.3	実験の概要	4
1.4	KUANS について	4
1.5	2018 年度の実験結果、今回の実験での改善点	4
2	実験手順	6
2.1	測定機器	6
2.2	配置、遮蔽	7
2.3	回路	10
2.4	較正	12
2.5	実験手順	14
3	解析	16
3.1	中性子捕獲断面積の算出法	16
3.2	入射中性子数の算出	16
3.3	目的の反応イベント数	17
3.4	暫定的な断面積の算出....................................	29
4	考察	30
4.1	解析結果の問題点....................................	30
4.2	シミュレーションの前提....................................	30
4.3	シミュレーションの結果....................................	32
5	シミュレーション結果の適用	33
5.1	反応断面積の再計算....................................	33
5.2	結果の解釈について....................................	34
5.3	熱中性子領域での解析	37
5.4	1/v 則による検証	38
6	誤差の評価	40
6.1	検出効率の誤差	40
6.2	カウント予想シミュレーションの評価....................................	41
7	まとめ	41
8	謝辞	41

## 1 イントロダクション

2020 年度の課題研究 P3 の実験では、原子核物理に関連のある話題の中で自分たちで意義のある結果が出 せそうな実験に取り組みたいと考え、雷によって引き起こされる一連の核反応の一つである、窒素<sup>14</sup>N の熱 外中性子捕獲反応の断面積の測定に興味を持った。この反応は雷により誘発される核反応の一部であり、未解 明の点が多い雷の発生機構の解明に関わるものである。またこれは 2018 年度の P3 の実験 [1] でも測定が試 みられ、断面積の値は得られたものの改善の余地のある結果となっていた。そこで今年の実験でこのテーマを 再度取り上げ、2018 年度の反省を踏まえてよりよい結果を得ることを目指した。以下ではまず実験の背景や 動機について説明する。

## 1.1 雷雲中で起こる核反応

雷の発生機構や、雷の発生前後にどのような反応が起こるかについては従来より詳しく分かっていない点が 多い。ところが 2017 年の榎戸輝揚氏(京都大学白眉センター/理学研究科 宇宙物理学教室 特定准教授)ら の研究 [2] により、雷放電時に加速された電子が γ 線を放出し、その γ 線が大気中の窒素などの原子核と衝突 し、原子核から中性子をはじき出す現象(光核反応)が起きていることが確認された(図 1 参照)。



図 1 雷発生時に起こる反応過程 ([2] より引用)。今回の実験では図の右上にあたる中性子捕獲 (n, $\gamma$ ) 反応 に着目している。

このような反応は加速器中で起こることは知られていたが、身近な自然現象である雷雲中でも起きているこ とがはじめて観測された。式では次のように表される。

光核反応: <sup>14</sup>N + 
$$\gamma \rightarrow {}^{13}$$
N + n (1)

放出された中性子のエネルギーははじめ 10 MeV 程度であるが、大気中を飛行し、50 ms 程度後には数 eV 以下の熱外中性子までエネルギーを落とす。主にこのとき、大気中の別の窒素原子と反応し (n, γ) 反応、(n, p) 反応の2つの反応経路で吸収される。

$$(\mathbf{n},\gamma) \, \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\bar{\kappa}} : \, {}^{14}\mathbf{N} + \mathbf{n} \, \rightarrow \, {}^{15}\mathbf{N}^*, \tag{2}$$

$$^{15}N^* \rightarrow ^{15}N + \gamma$$
 (3)

$$(n,p) \, \overline{\beta} \overline{k} : {}^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p \tag{4}$$

 $(n, \gamma)$  反応は中性子捕獲により励起状態 <sup>15</sup>N\* が形成され、そこから脱励起の際に即発  $\gamma$  線が放出される という過程である。(n, p) 反応では陽子が放出され、<sup>14</sup>C が生じる。これら 2 つの反応の分岐比は、 $(n, \gamma)$  反応: (n, p) 反応 = 3 : 97 程度と理論計算から予想されている。

また最初の光核反応で生じた  $^{13}N$  は不安定であり、 $\beta^+$  崩壊を起こして  $^{13}C$  になり安定化する。

$$\beta^{+} \ddot{\mathrm{H}} \dot{\mathrm{g}} : {}^{13}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + \mathrm{e}^{+} + \nu_{\mathrm{e}} \tag{5}$$

この過程で陽電子 e<sup>+</sup> が放出され、大気中の電子と衝突して 511 keV の特性 γ 線を出して対消滅する。この ように雷をきっかけに一連の核反応が起こり、上記 3 つの過程に由来した γ 線が発生する。

今回の実験で注目する過程は式 (2) の  $(n, \gamma)$  中性子捕獲反応である。この反応の断面積は、入射中性子エ ネルギーが数 eV 付近では測定データが少ない(図 2 参照)。1/v 則(1.2 節で説明)による予測値 (1eV では 0.01barn) があるのみである。実験でこれを測ることにより、雷の核反応のシミュレーションの精度向上に役 立つ可能性がある。特に  $(n, \gamma)$  反応と (n, p) 反応の分岐比は、(n, p) 反応で生じる <sup>14</sup>C が年代測定に用いられ ることからも重要となる。



図 2  ${}^{14}N(n,\gamma)$ の反応断面積。実線は予想値(JENDL-4.0)、プロットは既存の実験結果。

以上のような背景にもとづき、窒素<sup>14</sup>Nの熱外中性子数捕獲反応の断面積測定を行うことにした。

#### 1.2 1/v 則

中性子の捕獲断面積は、一般には Breit-Wigner の共鳴公式

$$\sigma(E) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma \Gamma_n}{(E - E_r)^2 + (\Gamma/2)^2} \tag{6}$$

で求められる。ここで λ は入射中性子のドブロイ波長、*E* は入射中性子のエネルギー、*E<sub>r</sub>* は共鳴のピークに おける入射中性子のエネルギー、Γ<sub>n</sub> は中性子幅、Γ は共鳴の全幅である。

 $\Gamma_n \propto \sqrt{E}$  であることから [5]、 $E \ll E_r$  が成り立つ低エネルギー領域では、 $\lambda^2 \propto 1/E$  であり、

$$\sigma(E) \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v} \tag{7}$$

となり、断面積が中性子速度に反比例するという 1/v 則が得られる。

#### 1.3 実験の概要

窒素 <sup>14</sup>N の (n, γ) 反応断面積を測定した。入射中性子は、京都大学加速器中性子源 KUANS の中性子ビー ムを用いた。標的には、メラミン粉末をアクリル箱に封入したものを用いた。検出器は、NaI シンチレータに 光電子増倍管 (PMT) を取り付けたもの (以下 NaI と呼ぶ) を用いた。解析、考察ではひとまず暫定的な断面 積を行ったのち、弾性散乱および鉛ブロックからの影響を考慮し、シミュレーションを用いて再計算を行った。

#### 1.4 KUANS について

KUANS は京都大学理学研究科 5 号館東棟にある小型中性子源である。図 3 にその概略図を示した。陽子 線形加速器からの陽子ビームを Be 標的に当てることで Be(p,n)B 反応により中性子が生成される。陽子ビー ムはパルス状であり、100Hz の周期、60µs のパルス幅を持つ。中性子はポリエチレン中で弾性散乱を繰り返 すことで減速されてから、陽子ビームの入射方向から垂直方向に 10cm×10cm の正方形サイズのビームとし て取り出される。



図3 KUANS での中性子ビーム生成の様子

得られる中性子ビームのエネルギーは広がりを持つ。飛行時間 (TOF) で見ると図4のような分布になり、 数 keV 以上の高速成分に加えて数十 eV 程度の熱中性子領域にピークを持つ。

## 1.5 2018年度の実験結果、今回の実験での改善点

今年度の実験は 2018 年度の P3 の追実験であるため、2018 年度の実験 [1] の概要について説明しておく。 2018 年度の実験では、標的に厚さ 30cm の尿素をアクリル箱に封入したものを用いた。また検出器は図 5 の



図4 中性子の TOF 分布

ように標的入射面付近の左右に4つずつ配置された。



図 5 2018 年実験での検出器の配置図

結果としては、求められた断面積の値は 4.5barn で、予想値 0.01barn よりも 2 桁大きな値となった。ただ し標的が 30cm と尿素中での中性子の平均自由行程 1.15cm に比べてかなり厚いため、入射中性子の一部がす ぐに標的外に出ていかずに標的内部に残ることにより、データタイミングより前に入射した中性子が、データ タイミング中にずれこんで (n, γ) 反応を起こしてしまうことがあった。この弾性散乱の影響が大きく、目的の 断面積が正しく導かれたとは言い難い結果となった。

そこで今年度では、主に標的と検出器の配置の再設計を行った。標的物質としては尿素 (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) よりも 窒素の組成比が多いメラミン (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>) を用いた。またメラミンを封入するアクリル箱は厚さを変えられる ようにピストン型に設計した (図 6 参照)。実際の実験では厚さは 1cm に設定した。これはメラミン中での中 性子の平均自由行程と同程度である。

検出器の配置は事前にシミュレーションを行い、反応で生じた γ 線を最も効率よく検出できるようにした。 ただし 2018 年度とは異なり使用可能な NaI は 6 本であった。その結果、標的の上下左右を検出器で覆うよう な配置を採用した (図 9 参照)。

## 2 実験手順

## 2.1 測定機器

1.4 節で紹介した KUANS の設備の他に、実験で用いた装置を列挙する。

- NaI シンチレータ + PMT(NaI とよぶ) 6本
- Li シンチレータ (LiM とよぶ) 1本
- <sup>3</sup>He 比例計数管 (HeM とよぶ) 1本
- アクリル箱 (メラミン粉末を封入)
- NIM モジュール、CAMAC モジュール、CAMAC クレートコントローラ

この他、遮蔽用の鉛ブロックや PE ブロックも用いた (2.2 節で述べる)。

NaI シンチレータ +PMT とは光電子増倍管に NaI シンチレータを取り付けたもので、γ 線の検出に用いた。Li シンチレータおよび <sup>3</sup>He 比例計数管は中性子ビームの入射フラックスの計測に用いた。NIM モジュー ルはデータをアナログ処理し、CAMAC モジュール、クレートコントローラは測定データを記録するのに用 いた。これについては 2.3 節で詳細を説明する。

図6に標的容器であるアクリル箱の写真を、図7にはその寸法を示した。図7のように、アクリル箱はシリ ンダー①、入射面②、ピストン③を組み合わせた構造にすることで入射面の材質および標的の厚さを可変に した。実験本番では厚さは1cmに設定し、養生テープで固定した。



図6 標的:メラミンを1cmの厚さに封入したピストン型のアクリル箱

#### 2.1.1 メラミン標的中の窒素面数密度

事前の測定として、メラミン (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>) 標的中の窒素面数密度を調べた。

まず封入容器であるアクリル箱にメラミンを一杯 (厚さ 5cm) まで封入した後、封入したメラミンの質量 を測った。またアクリル箱の寸法から容積を求めた。これらの値から質量密度を求めた。結果を表1に掲載 する。

これから標的の面数密度が以下の表式で求められる。



図7 アクリル箱の寸法 (単位は全て mm)

表1 メラミン粉末の質量密度測定

アクリル箱の容積	メラミンの質量	質量密度
$[\mathrm{cm}^3]$	[g]	$[g/cm^3]$
460.8	386	0.838

この式に従い、質量密度=0.838 g/cm<sup>3</sup>、アボガドロ数=6×10<sup>23</sup>/mol、1 分子中の窒素数=6、分子量=126、 厚さ=1cm として計算すると、面数密度の値は 2.4×10<sup>22</sup>/cm<sup>2</sup> となる。この値は 3 章の断面積の算出の際に 使用される。

#### 2.2 配置、遮蔽

前節で述べた装置を図 8 に示すように配置した。陽子加速器、Be、PE(減速材) までは KUANS の設備で あり、ここで中性子ビームが作られる。その下流に、まず減速材中心から 1150mm の位置に LiM を設置した (実際には前の実験で設置されたままになっていた)。その後に減速材中心から 2548mm の位置に標的および NaI を設置した。最下流に、減速材中心から 2758mm の位置に HeM を配置した。

図9に標的まわりの機器の配置の写真を示した。ただしこの写真は HeM や遮蔽用の鉛/PE ブロックはま だ設置していない段階のものである。写真の奥がビームの取り出し口で、手前側に向かって中性子ビームが飛 来する。このビームの中心にアクリル箱の中心が一致するよう標的を置いた。標的に対し、NaI6 本を上下左 右を取り囲むように設置した。NaI は図 9 中に示す通りに 2 番から 7 番まで番号が振られている (1 番、8 番 は故障のため欠番になっている)。

このように標的と NaI を配置した後、HeM および遮蔽用の鉛/PE ブロックを設置した。この最終的な配置 の様子を図 10 に示す。灰色のブロックが鉛 Pb であり、γ 線を遮蔽する。緑色のブロックがホウ素 B を含ん だ PE ブロックであり、中性子を遮蔽する。

遮蔽材の設置では、まず鉛ブロックで NaI まわりを覆い、さらに PE ブロックで全体を覆うことでバック



図8 検出器の配置図



図 9 標的まわりの検出器の配置

グラウンドの低減を図った。ただし入射面は図 11 に示すように開けてある (画面手前からビームが飛来)。



図 10 鉛ブロックと PE ブロックによる遮蔽の様子



図 11 遮蔽後のビーム入射面の様子

#### 2.3 回路

図 12 に回路図を示した (ただし一部の主要でないモジュールは省略してある)。使用した主なモジュールと 今回の実験での使用目的を列挙しておく。

- DIVIDER · · · 信号を分岐する
- DELAY · · · 信号を遅延させる
- DISCRIMINATOR · · · threshold を超える電流のときにのみ矩形波を出力する
- QUAD LOGIC FAN I/O ···· 複数信号の入出力を行う。また Σ8(全入力のうち少なくとも一つが信号 を発したときに on の矩形波を出す OR 回路)の信号を作る
- PRESCALER ··· 入力信号を設定したレートで間引く
- GATE & DELAY GENERATOR · · · ゲート (矩形波) を出力したり、delay を掛けられる
- LINEAR FAN I/O ··· 複数信号の入出力を行う
- SCALER ・・・ clear から inhibit までの入力信号の数を数える
- CLOCK GENERATOR · · · 一定周期の信号を出力する
- ADC ・・・ アナログ信号をデジタル化
- TDC · · · 時間情報をデジタル化



図 12 回路図

入力信号としては、NaI+PMT からの信号電流 (黄色)、陽子加速器から供給される陽子ビームのスタート 信号 (赤)、CLOCK GENERATOR の CLOCK 信号 (紫) の 3 つがある。

出力としては、ADC 信号 (エネルギー),TDC 信号 ( $\Sigma$  8 信号から各検出器の信号までの時間)、SCALER 信号 (飛行時間) の 3 つのデータを取得する。

NaI+PMT からの信号電流は 6 本分あるが ×6 とまとめて表記している。これらは divider によりまず 2 つに分岐される。一方は複数の delay(合計 131ns) を経てそのまま ADC 信号として記録される。もう一方は discriminator を経て、さらに 2 つに分岐される。

その一方は、QUAD LOGIC FAN I/O にて  $\Sigma$ 8 信号を作る。この  $\Sigma$ 8 信号は PRESCALER によってデー タ取得が入力過多にならないよう適切なレートに間引かれる。その後、3 つに分岐され、ADC の gate(gate が on のときにのみデータを取得する)、TDC の start、SCALER の inhibit にそれぞれ入力される。 discriminator を出たもう一方の NaI+PMT 信号は、6本の各信号が TDC の stop に入力される。 $\Sigma$ 8 信号 が on の時には 6本全ての ADC の値が記録されるが、TDC 情報はそのうちどの NaI が信号を出したかの判別に用いられる (詳細は 3.3.1 節で述べる)。

SCALER では CLOCK GENERATOR からの input により時間を数えている。clear(加速器信号) から inhibit( $\Sigma$ 8 信号) までの時間 ~ 中性子の飛行時間が取得できる (実際には SCALER の出力は TDC の 1 つのチャンネルに入力され、CAMAC により記録された)。なお SCALER 信号は、GATE & DELAY GENERATOR によりパルス幅を 100 $\mu$ s に加工した加速器信号が QUAD LOGIC FAN I/O の veto(on のと き出力を禁止する) に入力されていることにより、clear から 100 $\mu$ s の間は信号がカットされている。これは 単にデータ取得上の都合 (スタート信号のあまりに直後にストップがかかると正しく動作しない) によるもの で、解析に影響はない。

図 13 には実際のモジュールと配線の様子を示した。



図13 実際のモジュールと配線の様子

またこの回路とは独立に、Li シンチレータ (LiM) と He 比例計数管 (HeM) で中性子フラックスをモニター しデータを取得している。

以上のようなセットアップ、回路で実験を行った。

#### 2.4 較正

実験本番の前に各 NaI で ADC の ch 数とエネルギーの換算を決定する較正を行った。較正には <sup>60</sup>Co 線 源を用いた。<sup>60</sup>Co は  $\beta$  崩壊して <sup>60</sup>Ni になり、この崩壊生成物の <sup>60</sup>Ni が  $\gamma$  崩壊をして 1.173 MeV と 1.332 MeV の 2 本のガンマ線を放出する。この 2 点を基準に較正直線を定める。実験本番と同じ 1200V の高電圧 を各 PMT に印加し、線源を検出器の直前に置いて ADC データを取得した。

得られた ADC 分布において、上述の 1.173 MeV と 1.332 MeV の 2 つのピーク位置をガウス分布のフィッ ティングにより決めた。この様子を図 14 に示す。



図 14 フィッテイング (NaI2 番での例)

その後、ch 数とエネルギーの関係をプロットし、線形として 2 点を通る較正直線を引いた。この結果を図 15 に示した。図中の緑の点は線源を何も置かないときのデータである (pedestal)。しかし線源をおかなくて もノイズ (暗電流および宇宙線)による入力があり、必ずしもエネルギー 0 には対応しないと考え、今回の較正 ではこれらの値は考慮しなかった。3 章以降ではこの結果を用いて、ADC の ch 数をエネルギーに換算した。



#### 2.5 実験手順

実験本番に行った手順を主な操作のみ順に列挙する。なおセットアップ完成後、まず事前にビームを照射 し、オシロスコープで信号を確認しながら回路の調整などを行った。

1. 6 本の PMT に 1200 [V] の高電圧をそれぞれ印加した。ただし正確には、各 PMT の高電圧、電流の 値は表 2 に記載した通りだった。

番号	電圧 [V]	電流 [µA]
2	-1201	188
3	-1201	194
4	-1197	180
5	-1201	176
6	-1201	171
7	-1201	195

表 2 6本の PMT への印加電圧と電流値

また、各 PMT に対する discriminator の threshold を表 3 の値に設定した。

番号	threshold [mV]
2	1350
3	911
4	690
5	573
6	295
7	300

表 3 discriminator の threshold の値

また、prescaler の値を 75 に設定した。

- 2. アクリル箱を置かないでビームを照射した (BG 測定)。run0167 というデータを取得し、測定時間は合計 1 時間であった。
- 3. discriminator の threshold を表 4 に示す通りに変更した (NaI5, 6, 7 番は変更せずそのまま)。また、 prescaler の値を 200 に変更した。
- 4. メラミンを封入したアクリル箱を設置してビームを照射した (signal 測定)。run0174, run0175 という データを取得し、これらの測定時間は合計 1 時間 5 分であった。

上記の手順で実験を行った。以下では、run0174, run0175 を合わせて signal データ、run0167 を BG データ と呼び、解析に使用する。

番号	変更前の threshold [mV]	変更後の threshold [mV]
2	1350	446
3	911	256
4	690	235
5	573	573
6	295	295
7	300	300

表 4 変更前後の threshold の値

## 3 解析

#### 3.1 中性子捕獲断面積の算出法

2章で述べた手順に従って取得した測定データを用いて、 $^{14}N(n,\gamma)$ 反応断面積の値を算出する。断面積を 求める表式は、

断面積 = 
$$\frac{目的の反応イベント数}{標的原子核の面数密度 × 入射中性子数}$$
 (9)

である。ただしこれは多重散乱を無視した表式であり、標的の厚みが標的物質中での入射中性子の平均自由 行程より十分小さい状況で成り立つ式である。今回の実験では標的は平均自由行程程度の厚さがありこの仮定 は満たされていないため、シミュレーションによりずれを見積もる必要がある。これについては4章で考慮す るとして、ひとまずこの表式に基づき断面積の値を得るため必要な量を順に求める。

#### 3.2 入射中性子数の算出

入射中性子フラックスは、Li シンチレータ (LiM) と He 比例計数管 (HeM) の 2 つの検出器によって測定し た。これらの配置は 2 章の図 8 のように、LiM は減速材直後に設置されており、HeM は標的の後方のビーム の最下流に配置している。測定データとしては標的を置いたときのもの (signal と呼ぶ、60 分間測定) と、標 的を取り外したときのもの (BG と呼ぶ、65 分間測定) の 2 通りのデータを使用した。signal と BG での LiM の値は測定時間の違いや陽子加速器のビーム強度のゆらぎによりわずかに異なる。一方 HeM では signal での イベント数が BG でのイベント数よりも (標的による散乱のため) 大幅に少なくなる。この様子を示したのが 図 16 である。



図 16 LiM, HeM の TOF 分布

この HeM の配置状況のため、signal での入射中性子数を求める際に直接 signal での HeM の値を使うこと はできない。代わりに BG での HeM のイベント数に対し、BG と signal での LiM のイベント数の比を掛け 戻すことにより求められる。

また、今回の実験で見たい入射中性子のエネルギーは 1eV なので、TOF 情報により 1eV に相当する中性 子だけを抽出する。エネルギーから TOF への換算は、非相対論的に扱い、

$$\frac{1}{2}mv^2 = E \qquad \therefore v = \sqrt{\frac{2E}{m}},\tag{11}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} \tag{12}$$

とした。ここで E = 1 eV は中性子のエネルギー、 $m = 940 \text{ MeV/c}^2$  は中性子の静止質量、 $v = 1.38 \times 10^4 \text{ m/s}$  は 1eV 中性子の飛行速度、 $\Delta x$  は飛行距離、 $\Delta t$  は 1eV に相当する飛行時間である。 $\Delta x$  の値については LiM と HeM で異なり、表5 に記した (後で使うので NaI での値も併記した)。なおこうして求めた TOFの値は中性子が減速材中心で散乱されてから検出器までに入るまでの時間であり、それ以前の過程 (陽子パルスが照射され Be 標的にあたり中性子が発生し減速材に入る) にかかる時間は考慮されていないが、これは十分小さく無視できると考えた (2018P3[1] の 4.3.4 節参照 )。

検出器	$\Delta x \text{ [mm]}$	TOF $[\mu sec]$
LiM	1150	83
NaI	2548	128
HeM	2758	200

表 5 減速材から各検出器までの距離  $\Delta x$  および 1eV に相当する TOF

また 1.4 節で述べたとおり、陽子加速器での陽子パルスの幅が 60µsec あるので、1eV に対応する TOF で も 60µsec の幅を持たせ、LiM では 80-140µsec, HeM では 200-260µsec の範囲のデータ点を取り足し上げた。 さらに、HeM の検出効率を考慮した。2018P3[1] の 7.1.3 節で計算されている値から 1eV 入射中性子に対す る検出効率を 0.044 として、正味の入射中性子数を求める際に掛け戻した。最終的な結果を表 6 に示す。

	測定時間 [min]	HeM [counts]	LiM [counts]	正味の入射中性子数 [counts]
signal	60	117336	75091	$7.79  imes 10^6$
BG	65	363449	82076	$8.26 \times 10^6$

表 6 1eV 入射中性子数

#### 3.3 目的の反応イベント数

次に  $\gamma$  線検出器で取得したデータについて必要な信号のみ抽出する処理を行い、目的の反応イベント数を算 出する。ADC 信号 (エネルギー), TDC 信号 ( $\Sigma$ 8 信号から各検出器の信号までの時間)、SCALER 信号 (飛行 時間) の 3 つのデータを用いる。

取得した生データは図 17 のように 0 から 4095 までの値の羅列として記録されている。0-5 列は ADC 信号 (NaI2 番から 7 番に対応)、6-11 列は TDC 信号 (同じく NaI2 番から 7 番に対応)、13 列は SCALER 信号で ある。

これをそのままヒストグラムにして描くと、ADC 分布は図 18、TDC 分布は図 19 のようになる。横軸が ch 数 (校正によりエネルギーに対応する)、縦軸が頻度である。6 本の NaI それぞれで検出数にかなりばらつ

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	46	42	70	382	50	46	4095	4095	4095	4095	4095	4095	4095	754
1	74	62	82	1602	66	62	4095	4095	4095	3827	4095	4095	4095	2087
2	50	42	98	222	50	826	4095	4095	4095	4095	4095	3783	4095	1035
3	78	282	82	82	70	74	4095	1975	4095	4095	4095	4095	4095	154
4	46	550	90	62	46	42	4095	2827	4095	4095	4095	4095	4095	422
5	74	74	82	82	954	198	4095	4095	4095	4095	3918	4095	4095	139
6	114	42	78	1142	50	46	4095	4095	4095	3839	4095	4095	4095	819
7	78	62	78	82	70	510	4095	4095	4095	4095	4095	4095	4095	1803
8	50	86	910	66	50	66	4095	4095	1854	4095	4095	4095	4095	135
9	722	66	82	82	70	66	3562	4095	4095	4095	4095	4095	4095	1195

図 17 生データの先頭 10 行。0-5 列は ADC 信号、6-11 列は TDC 信号、13 列は SCALER 信号

きがあるが、これは検出器の個体差があるため同じ高電圧を印加しても見えるエネルギー帯や検出効率が異な るためと考えられる。

以下、行った処理を順に述べる。



図 18 生データの ADC 分布

図 19 生データの TDC 分布

#### 3.3.1 自分以外による信号の除去、エネルギー較正

図 18 で 0ch の頻度が極端に大きいのは、ADC gate に Σ8 信号が入力されていることから、6 本の NaI の うち自分以外が信号を検出したときに取得されたデータが混ざっているためである。これらの不必要なデータ は TDC 情報からどの NaI が鳴ったか判定することで除外した。Σ8 信号の後に信号を発しなかった NaI では TDC 信号の値に最大値の 4095 が記されるため、4095 以外の値が入っていればその NaI が信号を発したと判 定できる。

また 2.4 節で述べた通り行った較正のデータから、ADC の ch 数の値をエネルギーに換算した。こうして除 外と較正を行った後の ADC データ、TDC データが図 20、図 21 である。



図 20 自分以外による信号を除いた後の ADC 分布

図 21 自分以外による信号を除いた後の TDC 分布

#### 3.3.2 TDC の主要成分のみに制限

図 20 の ADC 分布を見ると、ピークが 2 つあるように見える (ただしこれらのピークは discriminator で設 定した threshold により低エネルギーでカットが掛かっているため見えているものであり、どちらも実際の ピークではない)。また図 21 の TDC 分布でも鋭いピークが 2 つある。しかし本来、TDC の値は自分自身に よって発生した Σ8 信号と (一定の Delay を経た) 自分自身の信号との時間差であるから、TDC 分布は理想的 には単一のデルタ関数的な分布になるはずである。さらに図 22 の ADC-TDC2 次元プロットを見るとグルー プ構造が見え、高エネルギー側の主要な成分 (赤矢印で示した) とそれ以外の異なる由来の成分が重なってい ることがわかる。



図 22 ADC-TDC2 次元プロット。赤矢印が主要な成分

このように混入が発生した理由についてははっきりとは分かっておらず、回路設計上の不備の可能性も考え られるが、一本の γ 線が一つの NaI ではエネルギー落とし切らずに、複数の NaI を同時に鳴らしたときの信 号が見えている可能性が高いと考えた。そこで TDC 分布の主要な成分だけ残す処理を行った。この結果が図 23、図 24 である。処理の結果、重なっていたピークが分離し、高エネルギー側のグループのみが残っている ことが分かる。(この処理により単一の NaI でエネルギーの大部分を落としたイベントのみを見ていることに なり、イベント数のオーバーカウントは防げているが過小評価をしている可能性はある。ただしすぐ後で述べ るように 5.7MeV 以下のイベントは数えないので、最終結果にはほとんど影響はないと考えられる。)

図 23 では signal(青) と BG(オレンジ) で信号の左端の位置が異なるように見えるが、これは 2 章で述べた ように BG 測定と signal 測定の間に discriminator の threshold を変更しているためである。

図 25 はこの処理をした後の ADC-TDC2 次元プロットである。図 22 と比較すると主要な成分のみに制限





図 23 TDC の主要成分のみに制限した後の ADC 分布

図 24 TDC の主要成分のみに制限した後の TDC 分布

されていることが分かる。



図 25 主要成分のみに制限した後の ADC-TDC2 次元プロット

#### 3.3.3 5.7MeV 以下をカット

メラミン (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>) 標的中には窒素 N の他に炭素 C、水素 H が含まれる。またメラミン粉末を封入したア クリル箱には酸素 O が含まれる。これらの窒素以外の原子が入射中性子と反応したときの  $\gamma$  線の影響を除去 する必要がある。窒素以外の主な原子核由来の即発  $\gamma$  線スペクトルを図 26 に示した。窒素 N のスペクトルは 10MeV 以上まで励起準位があるのに対し、他の原子核は 5MeV 以上には準位が存在しない。このことを利用 して、検出した信号のうち 5.7MeV 以上の  $\gamma$  線のみを数えることにし、このとき無視してしまった分の影響 は検出効率の中に含めて考慮することにする。



図 26 窒素以外の原子核由来の即発γ線スペクトル。[4] より引用

5.7MeV 以下をカットした後の ADC 分布が図 27 である。NaI4 番の BG のみ discriminator の threshold が 5.7MeV 以上に設定されていることが分かる。このままでは BG の  $\gamma$  線カウント数が実際より少なく見積 もられてしまうため、NaI4 番のみ 7.6MeV までカットの閾値を引き上げて処理した。また NaI6 番はこの段 階でほとんど信号が残っていないことが分かる。このため NaI6 番のデータは以降の解析では除去して値を算 出した。



図 27 5.7MeV 以下をカットした後の ADC 分布

#### 3.3.4 1eV の入射中性子に対応する成分を抽出

様々なエネルギー領域の入射中性子によって生じた  $\gamma$ 線の中から、今見るべき 1eV 入射中性子によって発生したイベントを選ばなければならない。そのために、SCALER 信号から得られる TOF の情報から、1eV の中性子が飛来する時間に対応する信号を抽出する。図 28 に SCALER 信号による TOF 分布を示した。ただしこの図では回路上の都合 (スタート信号のあまりに直後にストップがかかると正しく動作しない) によりスタート信号から 100 $\mu$ s の間は veto により信号がカットされている。このカットは使用する TOF 範囲には被っていないため影響はない。3.2 節の表 5 に示した通り、NaI 検出器の位置では 1eV 入射中性子に対応する TOF は 128 $\mu$ s であり、そこから陽子ビームのパルス幅の分の 60 $\mu$ s の、128 $\mu$ s-188 $\mu$ s の間で抽出を行う。抽出後の ADC 分布が図 29 である。



図 28 scaler による TOF 分布。はじめの  $100\mu s$  は veto によりカットされている。



図 29 1eV 入射中性子に対応する成分を抽出後の ADC 分布

ここまでの処理により、1eV 入射中性子により生じた 5.7MeV 以上の γ 線のカウント数分布 (図 29) が得ら れた。これを各 NaI で数え上げれば、見るべきカウント数の測定値が得られる。ただし正味のカウント数を 得るには、入射中性子数比、プリスケール比および NaI の検出効率をかけ戻す換算を行う必要がある。そし て最後に signal から BG 信号を差し引くことで、最終的な正味のイベント数が得られる。

そこで、次節で NaI の検出効率の見積もりについて述べる。

#### 3.3.5 Nal の検出効率の見積もり

NaIの検出効率を推定するため、geant4 を用いて以下に述べるようなシミュレーションを行った。geant4 は、高エネルギー物理でよく用いられるモンテカルロシミュレーションのツールキットである。

まず、検出効率として考えるべき要素は、大きく分けて

- NaI に入射した γ線がどれだけの確率で検出可能か
- γ 線源に対して NaI をどのように配置するか (立体角や γ 線が NaI 中を進む距離など)

の二つである。多くの場合、検出効率という言葉は前者のみを指すが、今回はシミュレーションによりどちら の点も考慮した値を求める。

続いてシミュレーションの内容を述べる。geant4 により、シミュレーション上で標的 (メラミンとアクリル 箱) および 6 本の NaI を本実験時どおりに配置した (図 30)。ただし、シミュレーション上では PMT 部分を 無視した。



図 30 geant4 を用いたシミュレーションの様子。メラミン標的と NaI シンチレータを本実験通りに配置した。

実験では、標的に中性子ビームを照射することで  $(n,\gamma)$  反応が起こり、等方的に  $\gamma$  線が発生する。そこで、 シミュレーションではメラミン中から空間的に一様かつ等方的な  $\gamma$  線を発生させた。これは、中性子フラック スが標的面に対して空間的に一様であると仮定したことに相当する。このとき、発生させる  $\gamma$  線のエネルギー は先行研究 [6] で示された <sup>14</sup>N の  $(n,\gamma)$  反応由来のものを再現した。また、NaI のエネルギー分解能に関して は 2018 年度 P3 において実験的に調べられたデータが存在したため、これを用いて考慮した。 上の設定でシミュレーションを実行することで、<sup>14</sup>N 由来 γ 線を NaI シンチレータで見た際のエネルギー スペクトルがわかる。さらに、このスペクトルで 5.7MeV 以上に位置するものを数え上げ、それを発生させた γ 線の数で割れば、NaI の配置・エネルギー分解能・解析時のエネルギーカットを含めた実効的な検出効率が 求められる。5.7MeV というカット値は、<sup>14</sup>N 以外の核種に由来する γ 線を同様のシミュレーションで見た際 のエネルギースペクトルの上限値である。

こうして得られた検出効率を表7に示す。ただし、NaI4番については本実験データの一部で Discriminator の threshold が高すぎたため、これに合わせてエネルギーカット値を7.6MeV に変更してある (以下、この検 出効率を単に5.7MeV カットの検出効率と記述する)。

NaI 番号	検出効率
2	$0.00874 \pm 9 \times 10^{-5}$
3	$0.00448 \pm 7 \times 10^{-5}$
4	$0.00166 \pm 4 \times 10^{-5}$
5	$0.00442 \pm 7 \times 10^{-5}$
6	$0.00428 \pm 7 \times 10^{-5}$
7	$0.00698 \pm 8 \times 10^{-5}$
6以外の合計	$0.0263 \pm 2 \times 10^{-4}$

表 7 シミュレーションから求められた各 NaI の検出効率。シミュレーション上で 10<sup>6</sup> 個の γ 線を発生さ せ、その内 NaI 中で 5.7MeV 以上 (4 番のみ 7.6MeV 以上) のエネルギーを落としたものを数え上げて計 算された。

ここで得られた検出効率は、「<sup>14</sup>N(n,γ) 反応由来の γ 線が NaI 中で 5.7MeV 以上のエネルギーを落とす確 率」と解するべきものである。実際には NaI からのシンチレーション光がどれだけ電気信号として取り出せ るか、さらには信号が各モジュールから ADC に入る過程で減衰や遮蔽が起きないかなども考慮する必要があ り、表 7 中の値はいわば「検出効率の最大値」となっている。この点については誤差の評価の際に議論する。

#### 3.3.6 見るべき γ 線の総数

こうして正味のイベント数を得るためのデータが全て用意できた。表 8 に最終結果を示した。ここで「signal」,「BG」は図 29 の分布の総数、「換算後の signal」,「換算後の BG」は signal, BG の値に入射中性 子数比、プリスケール比および検出効率をかけ戻した値、「正味のイベント数」は換算後の signal から換算後 の BG を差し引いた値である。

入射中性子数比は、表 6 の「正味の入射中性子数」の値を用い、BG に対して signal の入射中性子数/BG の入射中性子数 = 7.79/8.26 という値をかけることで signal に合わせて規格化した。

プリスケール比は2章でも述べた通り、データ取得のオーバーフローを防ぐための間引き率で、signal 測定時では200、BG 測定時では75 に設定された。

また検出効率は 3.3.5 節で述べた方法で見積もった値を用いた。

よって NaI2, 3, 4, 5, 7 番の正味のイベント数を合計して、見るべき  $\gamma$  線の総数は  $1.6 \times 10^6$  counts と求まった。

	signal	BG	換算後の signal	換算後の BG	正味のイベント数
NaI 番号	[counts]	[counts]	[counts]	[counts]	[counts]
2	74	116	$4.1 \times 10^5$	$2.3 \times 10^{5}$	$1.8 \times 10^{5}$
3	155	372	$8.7 \times 10^{5}$	$7.6  imes 10^5$	$1.1 \times 10^{5}$
4	473	687	$2.6 \times 10^6$	$1.4 \times 10^{6}$	$1.2 \times 10^{6}$
5	114	282	$6.4 \times 10^{5}$	$5.8 \times 10^{5}$	$6.0 \times 10^{5}$
6(除外)	0	1	-	-	-
7	133	357	$7.5 \times 10^{5}$	$7.3 \times 10^{5}$	$2.0 \times 10^4$
合計	949	1814	$5.4 \times 10^{6}$	$3.7{ imes}10^{6}$	$1.6 \times 10^{6}$

表 8 見るべき γ線カウント数の算出結果

## 3.4 暫定的な断面積の算出

以上で、3.1 節で提示した断面積の表式 (9):

の各因子に代入すべき値が全て得られた。

代入した各値と算出された断面積の値を表 9 に示した。「目的の反応イベント数」は 3.3.6 節で求めた見る べき γ 線の総数である。「入射中性子数」は 3.2 節で求めた signal 測定時の入射中性子数である。「面数密度」 は 2.1.1 節で求めた、メラミン標的中の窒素の面数密度である。

	表 9 断面積		
目的の反応イベント数	入射中性子数	面数密度	断面積
[counts]	[counts]	$[/\mathrm{cm}^2]$	[barn]
$1.6  imes 10^6$	$7.8 \times 10^{6}$	$2.4 \times 10^{22}$	8.6

こうして暫定的に求めた断面積の値は 8.6 barn となり、やはり予想値 0.01 barn より 2 桁大きい値と なった。

## 4 考察

#### 4.1 解析結果の問題点

前章で暫定的に導出された散乱断面積の結果は、以下の点を考慮に入れていない。

- 1. 中性子が弾性散乱してから非弾性散乱する
- 2. 弾性散乱した中性子が鉛ブロックに捕獲される

(1)弾性散乱の断面積は、非弾性散乱の断面積と比べ、桁違いに大きいので、その影響を無視できない。 中性子は、標的中で弾性散乱を繰り返すことにより当初の想定より長い過程を経て窒素に吸収されうる。その ため、データタイミングより早く標的に入射した中性子であっても、弾性散乱を繰り返すうちに時間がかか り、データタイミングに入ってきてしまうことがある。この反応は観測されたγ線から取り除かなければなら ない。(2018 年 P3 の Toy Model で考察されていた反応)また、データタイミングに入射された中性子であっ ても弾性散乱によりエネルギーを失った後に窒素に吸収された中性子は、今回の実験で見たい中性子のエネル ギーで反応したものではないので、やはり取り除く必要がある。(2020P3 で初めて考慮にいれた反応)すなわ ち、観測されたγ線には以下の3つのいずれかの過程を経てきたものが混在している。

(1) データタイムより早く入射したが、弾性散乱により遅れて吸収された中性子

(2) データタイム中に入射したが、弾性散乱を繰り返した結果、低いエネルギーで吸収された中性子

③ データタイム中に入射し、弾性散乱せずに吸収された中性子

このうち、今回の実験で見たい反応は③のみなので、適切なシミュレーションを行い、③の観測された γ 線 への寄与を求めたい。

(2)今回の実験では外部からくるγ線を遮蔽するために NaI シンチレータの外側を鉛ブロックで囲んだ。 しかし、鉛の非弾性散乱の断面積は、窒素の非弾性散乱の断面積と比べ、1桁大きい。そのため、標的によっ て弾性散乱した中性子が鉛ブロックと反応しγ線を放出した可能性がある。この効果を見積もりたい。

したがって、適当な前提をおいてシミュレーションをする。なお、シミュレーションには C++ を用いた。

#### 4.2 シミュレーションの前提

#### 4.2.1 入射中性子の TOF 分布

各 TOF 毎の入射中性子数には、2018 年 P3 の本実験のデータを用いた。

#### 4.2.2 入射中性子のエネルギー

入射中性子は、TOF の値を用いると算出することができる。しかし、実際の実験では陽子パルスの周期が 60 µ s なので、各 TOF に入射する中性子のエネルギーには幅がある。そこで、入射中性子のエネルギーは取 りうるエネルギーの範囲でランダムに与えた。

#### 4.2.3 入射中性子の空間分布

入射中性子の空間分布には偏りがあるはずで、本来は HeM を用いて事前に空間分布を測定すべきであった が、今回の実験ではそこまでできなかったので、シミュレーションでは空間的に一様とした。

#### 4.2.4 標的内の散乱断面積

標的内の各原子核の散乱断面積は JAEA nuclear data center を参考にした。

核種	反応	仮定した断面積 [barn]
<sup>1</sup> H	弾性散乱	20
	$(n,\gamma)$	0.05
<sup>12</sup> C	弾性散乱	5
	$(n,\gamma)$	$7  imes 10^{-4}$
<sup>14</sup> N	弾性散乱	10
	$(n,\gamma)$	0.01
	(n,p)	0.3
<sup>16</sup> O	弾性散乱	4
	$(n,\gamma)$	$3 \times 10^{-5}$

表 10 シミュレーション内で仮定した 1eV 中性子に対する各断面積の値。

#### 4.2.5 散乱までに中性子が進む距離

1回の散乱から次の散乱までに中性子が進む距離は指数分布であると仮定し、その逆関数法を用いてシミュ レーションした。今、*x* を散乱までに中性子が進む距離、*F*(*x*) を指数分布の分布関数、λ を平均自由行程(中 性子のエネルギーによるがおよそ 1 cm)とすると、

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\lambda} \exp\left\{-\frac{x}{\lambda}\right\} \quad (x \ge 0)$$
(14)

これを x について解くと、

$$x = -\lambda \log(1 - F(x)) \tag{15}$$

この *F*(*x*) に乱数で 0 から 1 までのランダムの数値を与えることで散乱までに中性子が進む距離を生成できる。

#### 4.2.6 弾性散乱の散乱角度

弾性散乱の散乱角度分布は重心系で等方とし、シミュレーションではそれを実験室系に変換して用いた。

#### 4.2.7 弾性散乱で失うエネルギー

弾性散乱で失うエネルギーは散乱角度に依る。1回の衝突でエネルギーは平均的して、37% (水素)、85% (炭素)、87% (窒素)になる。

## 4.3 シミュレーションの結果

(1)弾性散乱の影響

ケース	予想される割合
①観測される γ 線の内、データタイムより早く入射した中性子が	
弾性散乱により遅れて吸収された寄与	28 %
②データタイム中に入射した中性子に由来する観測 γ 線の内、	
弾性散乱を繰り返した結果、低いエネルギーで吸収される効果の寄与	89 %
③観測される γ 線の内、データタイム中に入射し、	
弾性散乱せずに吸収された中性子による寄与	8 %

ただし、各値の有効数字は、乱数を振り直してシミュレーションを繰り返し実行することにより推定した。

加えて、中性子のエネルギーの誤差についても述べる。本実験では 1eV 中性子に対する断面積を求めよう と試みたが、先述の通り中性子の TOF に陽子パルスの幅 60µs だけ不定性があるため、中性子エネルギーに 誤差がつく。これをシミュレーションで見積もると、

$$(中性子のエネルギー) = 1.1^{+0.7}_{-0.6} [eV]$$

であった。

(2) 鉛の影響の見積もりについては、5.2.2 節で述べる。

## 5 シミュレーション結果の適用

#### 5.1 反応断面積の再計算

シミュレーションの結果を用い、弾性散乱の影響を除いた断面積を計算する。具体的には以下のような操作 を行った。

(1) 観測されたイベントの内、データタイム中に入射した中性子によって引き起こされ、なおかつ標的中で 弾性散乱することなく起きたものがどれだけあるかをシミュレーションで見積もる。その結果、観測イベント の8%がこれに該当すると推定された。

(2) 標的の最前面で起きた反応に関わり得た中性子の数は入射中性子数そのものであるが、標的の後方では 弾性・非弾性散乱によりこの数は小さくなっていくはずである。本来、薄膜近似ではこの影響を無視するが、 今回は標的の厚さが平均自由行程とほぼ同じであるため、中性子数に補正係数 C をかけることで対応した。C の求め方を以下に述べる。

- 中性子数補正係数 C の求め方 —

- 表10の通りに各反応の断面積を仮定する。 a.
- 入射中性子数 Nin を本実験でのビーム約1時間分である $7 \times 10^6$  個と置き、メラミン内を距離 xb. だけ進んだ時点で何の反応も起こしていない中性子数 N(x) を N(x)=Nin × exp(- $\Sigma M \sigma x$ ) とす る。ただし、Μ はメラミン中の各原子核の密度、σ は各反応の断面積で、和記号 Σ は核種につい て足し上げるものとする。

メラミン中を  $\delta x$  だけ進む間に <sup>14</sup>N と (n, $\gamma$ ) 反応を起こす確率 p( $\delta x$ ) を c.

$$p(\delta x) = \mathcal{M}(^{14}\mathcal{N}) \sigma(^{14}\mathcal{N}(\mathbf{n},\gamma)) \delta x$$

とし、 $N(x)p(\delta x)$ を $x = n \delta x$  (n=0,1,2,…) について足し上げる。実際の計算では $\delta x = 1$ [cm]/1000 とし、*x*を0~1[cm] まで走らせた。

d.

c の結果

 $\sigma(^{14}N, (n, \gamma)) = \frac{1}{$ 補正係数 C × Nin ×<sup>14</sup> N の面数密度 × 標的の厚み 1cm

とし、これが仮定した断面積の値と一致するように C を決めた。その結果、C=0.69 であった。

注意するべき点は、C は仮定した断面積に依存することである。すなわち、この補正係数を用いて算出された 断面積は仮定と一致するべきものであり、異なる場合は仮定の値を変えて再計算しなければならない。以降、  $^{14}$ Nの (n, $\gamma$ )反応断面積の仮定値を引数として C(0.01[barn])のように記す。

なお、<sup>14</sup>N の (n,γ) 反応以外の断面積についても中性子のエネルギーが数 eV の領域で測定値が得られてい ないものがあり、シミュレーションの結果はこれらの値に依存する。本来ならばこれらもパラメータとして扱 う必要があるが、今回は仮定した値が正しいとした上で議論を進め、結果として求められた断面積を評価する 際にこの点を考慮するものとした。

以上を踏まえて断面積を再計算する。繰り返しになるが、弾性散乱を無視した場合のイベント数は実験で得られたカウントの8%であること、またシミュレーションから入射中性子数の補正係数が C(0.01[barn])=0.69 と求められたことを用いた。それ以外の値は表 10 の通りである。その結果、

 $\sigma = 0.8 \pm 0.1$  [barn]

と求められた。これは 1/v 則からの予想値 (0.01 [barn]) より一桁大きい。

#### 5.2 結果の解釈について

#### 5.2.1 結果をどう解釈するべきか

先述の通り、前節での計算には断面積を仮定したシミュレーションを用いているため、この仮定を変えて実 験結果と整合性のある値を探さなくてはならない。しかし、今回観測されたイベント数は予想の約 50 倍であ り、さらに検出効率の推定値からのずれを考慮すれば 100 倍以上にも及ぶと思われる。このことから、実験で 観測されたイベントには依然として目的の反応以外のものが多く含まれていると考え、その原因を突き止めよ うと試みた。

ここで注目すべき点は、観測イベント数からは既に BG 測定で得られたイベント数を (適当な規格化の後に) 差し引いていることである。この段階で他の反応由来のイベントが多数残っているとすれば、それらは BG 測 定時には現れなかったと考えるのが自然である。こうした考察から、本実験時に標的中で弾性散乱された中性 子が検出器まわりの鉛ブロックに入射し、鉛と (n,γ) 反応を起こしていたのではないかと考えた。この可能性 を検証するべく、次の 2 つを行った。

- (1) シミュレーションから鉛由来の $\gamma$ 線計数を見積もる。
- (2) 鉛由来の γ 線が影響しないエネルギー領域で断面積を再計算する。

以下ではその方法、および結果について述べていく。

#### 5.2.2 鉛由来カウントの見積もり

第一の方法として、再びシミュレーションを用いることにより今回の観測結果が鉛の影響で説明し得るかを 検証した。本実験時の検出器・鉛ブロックなどの配置を厳密に考慮することは困難なので、シミュレーション では鉛由来カウントの最大値を見積もる。具体的には以下のようにした。 🖌 鉛由来カウントの見積もり 🗕

- 4章で述べた仮定のもとでシミュレーションを行う
- ・標的の側面から飛び出た中性子 (=標的の背面を通らずに飛び出た中性子) を全て鉛の中に閉じ込
   め、鉛から飛び出ることはないものとする
- ・ 鉛に入った中性子は先述の逆関数法で求められた距離だけ進んだ後、弾性散乱または (n,γ) 反応を 起こす。仮定した断面積は 1eV の中性子に対して以下の通りである。

弾性散乱:11 [barn] 
$$(n, \gamma): 0.024$$
 [barn]

• 上記のようにして起きた (n,γ) 反応の内、データタイム中に起きたものを数え上げる。

こうして得られるカウント数と実験値を比較するには、鉛由来 γ 線に対する検出効率を考慮する必要があ る。そのため再び geant4 を用い、以下の要領でシミュレーションを行った。

- *γ*線のエネルギーは Pb の原子量 204、206、207 の (n,γ) 反応由来の *γ*線の内で 1eV の中性子に
   対する断面積が 0.01 barn 以上のものだけを考慮する。
- ・ γ線の発生位置は検出器に接したビーム下流側の 210mm × 450mm × 100mm の領域で一様と した。これは実験時に置いていた鉛ブロックの内で最も観測に影響したと思われる部分をおおま かに再現したものである。

これらの条件のもとで  $\gamma$  線を 1 × 10<sup>6</sup> 個発生させ、その内 5.7MeV 以上のエネルギーを NaI 中に落としたものは 55286 個であった。よって、

(鉛由来カウントに対する検出効率) = 0.0553 ± 0.0002

と見積もられた。

以上により、シミュレーションによる鉛由来カウントの推定ができた。表 11 にその結果をまとめる。

表 11 の通り、観測されたカウントは鉛由来カウントを含めた予想値の 39 %ほどであった。いま、鉛由来の カウントを (シミュレーション内での) 最大に見積もっているので、今回の観測結果は鉛の影響で説明可能で あると言える。ただし、鉛以外の BG の有無については確定的なことは言えず、次節での解析が必要である。 表 11 シミュレーションによる<sup>14</sup>N と Pb 由来の予想カウント数と実験値との比較。実験値は本実験の約 2 時間分のデータを足し上げた値、予想値は入射中性子数の規格化と検出効率を考慮した後の値を示して ある。

<sup>14</sup> N 由来の予想カウント	$1010 \pm 30$
Pb 由来の予想カウント	$134100~\pm~400$
本実験 (約2時間) で得られたカウント	52693
実験/予想	0.39

#### 5.2.3 鉛の影響を受けないエネルギー領域での解析

続いて、解析に使うエネルギー領域を変えることで鉛の影響を無視することを試みる。鉛の (n,γ) 反応由来 γ線の最大エネルギーは 7.4MeV であり、これを検出効率の推定時と同様に geant4 上で NaI に入射させると 8.5MeV 程度までピークの裾が広がった。よって、観測データの 8.5MeV 以上の領域のみで再度解析を行えば よい。

エネルギーのカット値を変えて断面積を計算するため、この場合の検出効率を再度求めると、

 $(8.5 MeV以上での検出効率) = 2.50 \times 10^{-3} \pm 5 \times 10^{-5}$ 

であった。なお、本実験データと BG 測定を比較して有意なカウントを得たのは NaI の 4、5 番のみであった ため、この 2 本のみを考慮した。それ以外に計算に用いる値は 5.1 節と共通である。表 5.2.3 に結果をまとめ る。

表 12 エネルギーのカット値を 5.7MeV、8.5MeV にした場合に計算された <sup>14</sup>N の  $(n,\gamma)$  反応断面積。 1/v 則による予想値も合わせて示す。

5.7MeV 以上で計算された断面積	$0.8 \pm 0.1$ [barn]
8.5MeV 以上で計算された断面積	$2.6 \pm 0.6$ [barn]
予想值	0.01 [barn]

表 5.2.3 から明らかであるが、鉛の影響を無視しても断面積は予想値よりも 2 桁大きく、5.1 節での計算結 果よりもさらに大きくなっている。ここで考えられることは、

- <sup>14</sup>N の (n,γ) 反応断面積は実際に予想値 0.01 [barn] よりも大きい。ただし、シミュレーションでの 仮定値を固定してしまっているため、上記の計算結果通りとは限らない。
- 鉛以外にも BG の原因があり、その影響で断面積が大きく見えてしまっている。

のいずれかであろう。

#### 5.3 熱中性子領域での解析

ここで、視点を変えて熱中性子 (~25meV) が引き起こした <sup>14</sup>N(n, γ) 反応について解析してみる。このエ ネルギー領域では解析で仮定すべき断面積の値が実験的に定められているため、BG が無ければ断面積の計算 結果が既知の測定値と一致するはずである。これを利用することで、鉛以外の BG の有無や 1/v 則による検 証を試みるのである。

#### 5.3.1 熱中性子領域での断面積計算について

注目する中性子のエネルギーが変わることで、断面積計算に必要な諸量の値も変更される。

まず、25meV の中性子の TOF は、

# $TOF(LiM) = 527 \ [\mu s]$ $TOF(HeM) = 1264 \ [\mu s]$

である。3.2 節と同様に、TOF から 60µs の領域で中性子数を足し上げ、式 (10) に従って入射中性子数を求めた。その結果、約 2 時間分のデータを足し上げて

$$(E = 25 \text{ [meV]} での入射中性子数) = 6.32 \times 10^6$$

であった。

次に、弾性散乱の影響を取り除くための補正を行った。5.1 節で述べたシミュレーションはどちらも入射中 性子のエネルギーに依存するため、仮定を一部変更することで熱中性子に対する補正係数を求め直した。主な 変更点は以下の通りである。

- (1) 弾性散乱せずに反応した割合を求めるシミュレーションについて 入射中性子数を本実験の熱中性子領域での値に設定し、フラックスが時間的にも空間的にも一様とし た。また、中性子のエネルギーは 25meV で一定とした。ただし、時間分布を無視したのは、熱中性子 領域でフラックスおよびエネルギーが 60µs の間でほとんど変化しないためである。
- (2) 中性子数に対する補正係数を求めるシミュレーションについて 入射中性子数と断面積の値を熱中性子に合わせた。なお、25meVの中性子に対する<sup>14</sup>N(n, γ) 反応の 断面積は 0.0800(4) [barn] と測定されている。

その結果、観測されるイベントの内で弾性散乱をせずに起きたものは 24 %、中性子数の補正係数 C(0.08 [barn])=0.68 と求められた。

最後に、ADC のデータを熱中性子の TOF から 60µs の間で切り直し、5.7MeV 以上および 8.5MeV 以上 のそれぞれで総和を求めることで断面積が計算できる。結果は表 13 のようになった。

5.7MeV 以上の γ 線のみで計算された断面積	$3.9 \pm 0.3$ [barn]
8.5MeV 以上の γ 線のみで計算された断面積	$7 \pm 2$ [barn]
既知の測定値	$8.00 \times 10^{-2} \pm 4 \times 10^{-4}$ [barn]

表 13 25meV の中性子に対して計算された断面積。本実験の約 2 時間のデータを全て合わせて計算している。

表 13 より、熱中性子領域のデータでも文献値より 2 桁大きく計算されることがわかる。さらに、鉛の影響 を受けない 8.5MeV 以上カウントで計算した断面積が既知の値の約 100 倍であることから、鉛以外の γ 線源 が BG として存在していることが確認された。

#### 5.4 1/v 則による検証

前節までの議論により、目的としていた 1eV 付近での断面積、および熱中性子に対する断面積が求められた (図 31)。表 14 に、これまで計算された断面積の値を再掲する。



図 31 今回計算された断面積と既存の測定値の比較。赤点が今回の結果、その他の点が既存の測定値 (IAEA のデータベースより)、緑線は 1/v 則による予想 (JENDL-4.0)。

中性子 E \γ 線 E のカット値	$5.7 \mathrm{MeV}$	$8.5 \mathrm{MeV}$	文献値
1eV	$0.8 \pm 0.1$ [barn]	$2.6 \pm 0.6$ [barn]	0.01 [barn]
25meV	$3.9 \pm 0.3$ [barn]	$7 \pm 2$ [barn]	$8.00 \times 10^{-2} \pm 4 \times 10^{-4}$ [barn]

表 14 今回の実験から計算された断面積の値。本実験約 2 時間分のデータを用い、解析に用いた中性子 および  $\gamma$ 線のエネルギー別に示してある。最下段は 25meV の中性子に対する既知の値と、1eV に対する 1/v 則による予想値である。

今回計算された断面積に対し、単純に 1/v 則を当てはめてみる。25meV での断面積を基準にし、1/v 則で

1eV での値を見積もると、

γ線を 5.7MeVでカットした場合: 0.6 [barn] 8.5MeVでカットした場合: 1 [barn]

である。表 14 の値と比べると、いずれも桁が一致している。

ただし、<sup>14</sup>N(n, $\gamma$ ) 反応の断面積が 1/v 則に従うとしても、いまの場合に単純な 1/v 則が正確には成り立た ないことに注意を要する。なぜなら、断面積計算に用いるイベント数には BG が含まれているからである。仮 に BG が全て 1/v 則に従う中性子捕獲反応に由来するとしても、多重散乱の後に捕獲されるイベントが排除 されていないため、やはり正確な 1/v 則は成り立たない。さらに、BG は標的中で弾性散乱された後の中性子 が起こす 2 次的な反応に由来するものであるから、この反応に関与し得る中性子数(正確には入射中性子数に 対する割合) は中性子のエネルギーによって異なり、この点も考慮する必要がある。

8.5MeV 以上の  $\gamma$  線を見た場合については、BG の素性が未知であるため、これ以上の解析は困難である。 そこで、5.7MeV 以上の  $\gamma$  線を見た場合について上記のことをもう少し具体的に検討してみる。まず、鉛に入 射してから弾性散乱せずに中性子捕獲が起きる確率を両者の場合で比較する。シミュレーションによると、鉛 由来の最大カウント数に対し、鉛中での弾性散乱無しで反応したものは 1eV 中性子では 4.5% ほど、25meV では 16% ほどであった。上の計算では <sup>14</sup>N 由来の場合に対する補正が 1eV に対し 0.08、25meV に対し 0.24 であったから、鉛由来カウントがその他のカウント (目的のもの + 未知の BG) よりも多いと予想されること を思えば、1/v 則による予想値は 0.24/0.16=1.5 倍、実験結果から算出された値は 0.08/0.045~1.8 倍ほど大 きく見えていることになる。すなわち、鉛中での弾性散乱の影響で実験値は単純な 1/v 則より 1.8/1.5=1.2 倍 ほど大きくなると考えられる。

続いて、BG に寄与し得る中性子の (入射数に対する) 割合が両者で異なる点を考える。仮に標的中の中性 子捕獲断面積が全て 1/v 則に従うとすると、入射中性子のエネルギーが 25meV の場合に比べ、1eV の場合の ほうが中性子が弾性散乱されやすく、したがって標的の外へ飛び出しやすくなる。再びシミュレーションの結 果を用いると、標的に入射した中性子が側面から飛び出す割合は、1eV 中性子の場合で 0.47、25meV の場合 で 0.39 であり、1eV に対する断面積は 1/v 則による予想より約 1.2 倍大きくなると推定される。

以上より、5.7MeV 以上  $\gamma$  線を見た時の 1eV 中性子に対する断面積は、観測カウントの大半が鉛由来 BG であると仮定すれば、1/v 則によって予想した値の 1.2×1.2~1.4 倍ほどになっているはずである。実際、1/v 則の予想値 0.6[barn] を 1.4 倍すると 0.84[barn] であり、これは実験値と誤差の範囲で一致する。すなわち、 1/v 則からのずれは鉛の影響で自然に説明でき、今回の実験結果は <sup>14</sup>N(n,  $\gamma$ ) 反応断面積が 1/v 則に従うこと を支持しているといえる。ただし、どの反応がどれだけ観測カウントに寄与しているのかは推測の域を出ず、 実証されたとは言い難い。

## 6 誤差の評価

前節までの解析では、各シミュレーションが正しいとした上で議論を進めてきた。しかし、シミュレーショ ン上で正しく考慮されていない要素が存在すれば、当然ながら結果に系統誤差が生じ、断面積の値も変化し得 る。本節ではこの点を検討する。

#### 6.1 検出効率の誤差

3.3.5 節で述べたように、今回は NaI の検出効率をシミュレーションから求めた。しかし、その結果は NaI の個体差、かけていた電圧等を加味しておらず、あくまで実際の検出効率の最大値として得られた値である。 そこで、それぞれの NaI で得られたカウントの比を用い、シミュレーションによる予想値からのずれを見積 もった (表 15)。すなわち、最も得られたカウントが多い NaI4 番が検出効率の予想値に対応しているとみな し、他の NaI の検出効率を

(補正後の検出効率) = (4番とのカウント比)×(4番の予想検出効率)

として求めた。なお、8.5MeV 以上の γ 線を見た場合については 2 本の NaI についてしか議論できないため、 ここでは 5.7MeV 以上を見た場合のみ示す。

NaI 番号	検出効率	補正後検出効率
2	$8.74 \times 10^{-3}$	$6.3(2) \times 10^{-4}$
3	$4.48 \times 10^{-3}$	$9.1(2) \times 10^{-4}$
4	$1.66{ imes}10^{-3}$	$1.66(4) \times 10^{-3}$
5	$4.42 \times 10^{-3}$	$8.6(2) \times 10^{-4}$
6	$4.28 \times 10^{-3}$	0
7	$6.98 \times 10^{-3}$	$9.9(2) \times 10^{-4}$
6 以外の合計	$2.63 \times 10^{-2}$	$5.1(1) \times 10^{-3}$

表 15 NaI の補正後検出効率。表記の簡便のため、誤差は補正後のみ示した。NaI4 番を基準とし、各 NaI のカウント数 (約 2 時間分) の 4 番との比を 4 番の予想検出効率にかけることで補正した。

よって、全体の検出効率は予想値の約 0.2 倍であったと考えられ、それに伴ってカウント数は約 5 倍に見積 もられる。

ただし、表 15 中の予想検出効率は <sup>14</sup>N の (n,γ) 反応に対して適用すべきものである一方、観測されたカウ ントは BG を多分に含んだものであるため、この補正が適切であるかどうかを定量的に評価するのは難しい。 また、カウントがより多く見積もられても、その増加分の内のどれだけが目的の反応由来なのか不明である以 上、断面積計算に与える影響は議論できない。よって、この点についてはこれ以上の解析はせず、断面積の誤 差にも含めないものとする。

#### 6.2 カウント予想シミュレーションの評価

カウントを予想するために行ったシミュレーションは、断面積計算時および BG の影響を議論する時などに 結果が用いられており、その系統誤差は断面積の誤差になる。以下ではこれを検討する。

この評価にあたっては、実験で直接観測される物理量をシミュレーションで見積もり、比較する必要があ る。そこで、入射中性子の内で標的後方に飛び出し、HeM に観測されたものの割合を比較することにする。 実験結果より、1eV 中性子に対するこの割合は 34.09(3)% であるが、シミュレーションでは 39.33(4)% と見 積もられた。よって、入射中性子の 5% ほどが予想されるより多く何らかの反応に寄与した可能性がある。反 応に関与し得る中性子数とイベント発生数はほぼ線形比例するので、断面積にも約 5% の誤差がつくことにな る。今回計算された断面積は、予想値・文献値とそもそも桁が一致しておらず、数 % の誤差は解析・検証に 本質的な違いを生じさせることはない。

また、シミュレーションで仮定していた各断面積の値の不定性も系統誤差として考慮すべきであるが、今回 の実験結果は BG の影響が大きいため、これらを評価することは難しい。ただし、既知の値を用いた熱中性子 領域の解析においても断面積が大きく計算されたこと、その結果との比較で 1eV 中性子に対する断面積が定 性的に 1/*v* 則で説明できることから、<sup>14</sup>N の (n,γ) 反応以外の断面積の仮定値が計算に与えた影響はオーダー を変えるほど大きくはないと思われる。

## 7 まとめ

今回の実験では、観測量とシミュレーションを組み合わせることにより、弾性散乱などの影響が大きい数 eV 中性子での<sup>14</sup>N(n,γ) 反応断面積を求めようと試みた。その結果、計算された 1eV 中性子に対する断面積 は 1/v 則による予想より 1~2 桁大きかった。この結果は求める断面積の値を仮定したシミュレーションに依 存するため、値そのものには意味がなく、1/v 則に従っていないことを示すのみである。しかし、熱中性子に 対して同様の手法を用いても断面積が既知の値より大きく求められたことから、実験結果には予期しないバッ クグラウンドが影響したと考えられ、1eV に対する断面積についても断定的なことは言えない。これら二つの 結果の関係は 1/v 則が成り立つことを支持するが、実証には至らなかった。

今後の展望としては、鉛以外のバックグラウンド源となる物質を特定し、観測結果に影響しないよう対策す ることが第一に挙げられる。また、弾性散乱の影響を小さくするため標的をより薄くし、その分観測時間を長 く取れば、シミュレーション由来の不定性を軽減することができるだろう。

## 8 謝辞

2020 年度 P3 では、理論において菅沼秀夫准教授および TA の鵜沢浩太朗さん、実験において成木恵准教 授および TA の小早川亮さん、有水大地さんにご指導いただきました。また、本実験に際し廣瀬昌憲技官に多 大なご協力をしていただきました。心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 2018 年度課題研究 P3 レポート,「雷由来の核反応に関する中性子捕獲の断面積測定」, https://www-nh. scphys.kyoto-u.ac.jp/gakusei/p3/p3\_2018/P3report\_2018.pdf
- T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, H. Tsuchiya, "Photonuclear Reactions Triggered by Lightning Discharge", Nature 551, 481–484 (23 November 2017) doi:10.1038/nature24630
- [3]「雷雲プロジェクト」, https://www.thdr.info/
- [4] International Atomic Energy Agency, "Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis", https: //www-nds.iaea.org/pgaa/pgaa7/index.html
- [5] 平川直弘、岩崎智彦、連載講座 原子炉物理 第5回 「中性子束のエネルギー分布(2)」日本原子力学会
   誌,Vol.42, No.8(2000) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesj1959/42/8/42\_8\_758/\_pdf
- [6] R. B. Firestonel and Zs. Revay,"Thermal neutron radiative cross sections for <sup>6,7</sup>Li, <sup>9</sup>Be, <sup>10,11</sup>B, <sup>12,13</sup>C, and <sup>14,15</sup>N", PHYSICAL REVIEW C 93, 054306 (2016)