

# PROPOSAL FOR EXPERIMENT AT RCNP

## TITLE

Laboratory exercise for undergraduate students at Kyoto University  
Measurement of the cross section for the  ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$  reaction as a possible solution to the cosmological lithium problem

## SPOKESPERSON

Full Name: Kawabata Takahiro  
Institution: Department of Physics, Kyoto University  
Title of Position: Associate Professor  
Address: Kitashirakawa, Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502 Japan  
Phone number: +81-75-753-3832  
FAX number: +81-75-753-3887  
E-mail: kawabata@scphys.kyoto-u.ac.jp

## EXPERIMENTAL GROUP

Full Name	Institution	Title or Position
T. Hashimoto	Department of Physics, Kyoto University	D2
M. Murata	Department of Physics, Kyoto University	M2
S. Adachi	Department of Physics, Kyoto University	D3
T. Furuno	Department of Physics, Kyoto University	D1
M. Tsumura	Department of Physics, Kyoto University	D1
T. Nanamura	Faculty of Science, Kyoto University	B4
R. Sawada	Faculty of Science, Kyoto University	B4
T. Morimoto	Faculty of Science, Kyoto University	B4
M. Itoh	Faculty of Science, Kyoto University	B4
M. Mizuno	Faculty of Science, Kyoto University	B4
S. Yoshida	Faculty of Science, Kyoto University	B4
D. Takechi	Faculty of Science, Kyoto University	B4
Y. Kanada-En'yo	Department of Physics, Kyoto University	AP
S. Kubono	RIKEN	P
S. Nishimura	RIKEN	Researcher
N. Iwasa	Department of Physics, Tohoku University	AP

## RUNNING TIME

Installation time without Beam:	3 days
Beam tuning time:	8 hours
Detector setup time:	12 hours
Background measurement time:	9 hours
Physics measurement ime:	19 hours
<hr/>	
Total:	3+1 days

## BEAM REQUIREMENTS

Beam line:	WS
Type of particle:	${}^4\text{He}^{2+}$
Beam energy:	39.4 MeV
Beam intensity:	3 pA

## Abstract

The primordial abundances of the light elements produced in the process of Big Bang nucleosynthesis (BBN) provide important and useful information to understand what happens in the early universe. Accurate estimation of the primordial abundances is crucial to test the cosmological theories by comparing the predicted values with the observations.

A comparison between the theoretical predictions of the primordial abundances and the observations is in good agreement with those for the helium and deuterium. However, there remains a serious problem: The  ${}^7\text{Li}$  abundance does not agree with any theoretical BBN calculations. This discrepancy is known as the cosmological lithium problem, and has been of great interest in recent years.

It was pointed out that if the destruction rate of the  ${}^7\text{Li}$  or its mirror nucleus  ${}^7\text{Be}$  is enhanced, the  ${}^7\text{Li}$  abundance can be reduced in the BBN calculation. If a unknown resonant nuclear reaction channel involving  ${}^7\text{Li}$  or  ${}^7\text{Be}$  exists, the  ${}^7\text{Li}$  abundance will be greatly reduced. Then, the lithium problem will be solved. One of the candidate channels to destruct  ${}^7\text{Be}$  is the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  reaction. The cross section for this reaction at the cosmological energy has been never measured.

Since both  ${}^7\text{Be}$  and neutron are short-lived nuclei, it is difficult to directly measure the cross section for the  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  reaction. In the proposed experiment, thus, we will measure the cross section for the time reverse reaction. A He gas target will be bombarded by an  $\alpha$  beam at  $E_\alpha = 38.0\text{--}39.4$  MeV, and emitted neutrons will be detected by the liquid scintillators.

The proposed experiment will be carried out by undergraduate students at Kyoto University as a laboratory exercise for their graduation thesis.

# 1 Scientific Motivation

ビッグバン元素合成 (BBN) によって生成される元素の始原的存在量は、初期宇宙を記述するモデルを検証する有力な指標の一つである。BBN 計算によって予測される元素の始原的存在量と、観測から推定される始原的存在量を比較することにより、初期宇宙を記述するモデルに強い制限を与えることができる。

図 1 に、BBN 計算が予測する軽元素 ( $D$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ) の始原的存在量を示す [1]。BBN 計算における唯一のパラメータはバリオン密度であり、図 1 の青線で示されるように、BBN 計算の予測する始原的存在量はバリオン密度の関数として変化する。バリオン密度は、宇宙マイクロ波背景放射の観測 (WMAP) データから  $\Omega_B h^2 = 0.02249 \pm 0.00056$  であることが報告されており [2]、その値は図 1 の黄縦線に相当する。すなわち、青線と黄縦線の交点が BBN 計算の予測する軽元素の始原的存在量となる。一方で、宇宙の初期に形成されたとされる金属欠乏星における元素存在量の観測値から、宇宙開闢時に相当する金属量ゼロの状態に外挿して推定された元素の始原的存在量は緑のハッチとして図 1 に示されている。ヘリウムと重水素について、BBN 計算による始原的存在量の予測は観測結果とほぼ一致しているが、リチウムについては BBN 計算の予測と観測結果は大きく食い違っている。

BBN 計算から予測される  ${}^7\text{Li}$  の始原的存在量は  ${}^7\text{Li}/\text{H} = 5.24 \pm 0.5 \times 10^{-10}$  であるのに対して、金属欠乏星の観測から推定された  ${}^7\text{Li}$  の始原的存在量は  ${}^7\text{Li}/\text{H} = 1.23^{+0.34}_{-0.16} \times 10^{-10}$  であり、BBN 計算に比べ観測値は約 4 倍ほど小さな値となっている。この不一致は、宇宙リチウム問題と呼ばれ、宇宙初期のビッグバン元素合成を説明する標準的な理論に残る重要な問題である。

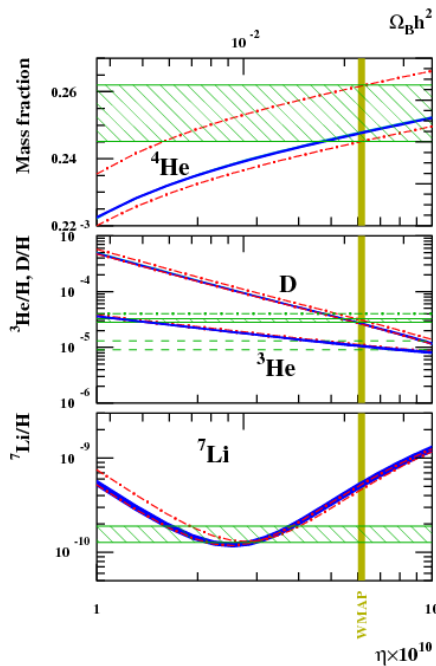


図 1: BBN 計算による軽元素の始原的存在量の予測値と観測による推定値の比較 [1]。青線は BBN 計算の予測値をバリオン密度の関数として示したものであり、緑縦線は WMAP の観測から得られたバリオン密度を示す。また、緑のハッチは金属欠乏性の観測による軽元素の始原的存在量の推定値を示す。

近年、この宇宙リチウム問題を解決するために精力的な議論がなされており、原子核物理学の観点からは、BBNに関連する原子核反応の理解を深める必要がある。BBN 模型において、 ${}^7\text{Li}$  は初期宇宙に存在する自由中性子と  ${}^7\text{Be}$  の衝突による  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  反応を経て生成されると考えられている。仮に、初期宇宙において  ${}^7\text{Be}$  が  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  反応を経て  ${}^7\text{Li}$  に変化するチャンネルと、 ${}^7\text{Be}$  が別の反応によって崩壊するチャンネルの分岐比が、BBN 計算において想定されている値よりも崩壊チャンネル側に偏る場合には、初期宇宙における  ${}^7\text{Li}$  の生成量が減少する。

${}^7\text{Be}$  が関与する反応のうち、50 keV 程度の温度域において最も主要な反応は  ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  であり、97%の分岐比を占める。 ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$  反応の断面積については多くの実験データが存在し、不確定性は比較的少ない。

次いで大きな分岐比を持つと期待されるのは、 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応である。図 1 に  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の模式図を示す。 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応では、 ${}^7\text{Be}$  の基底状態ないしは第一励起状態に中性子が捕獲され、 ${}^8\text{Be}$  の共鳴状態を経て  ${}^4\text{He}+{}^4\text{He}$  に崩壊する。この反応は  ${}^7\text{Be}$  が関与する反応のうち、約 2.5%の分岐比を占めると考えられているが、BBN 過程において重要な低エネルギー領域における反応断面積が測定されていないため、BBN 過程に対する  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の寄与については極めて大きな誤差が残されており、宇宙リチウム問題の原因となっている可能性がある。ゆえに、 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の断面積を測定することは宇宙リチウム問題を解決する上で非常に重要である。

しかし  ${}^7\text{Be}$  と中性子はともに不安定核であるため、これをターゲットとして中性子を照射し、 ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の断面積を直接に測定することは容易でない。そこで本研究では、逆反応である  ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$  反応について、閾値近傍 ( $19.0\text{ MeV} < E_{c.m.} < 19.7\text{ MeV}$ ) における反応断面積の測定を提案する。

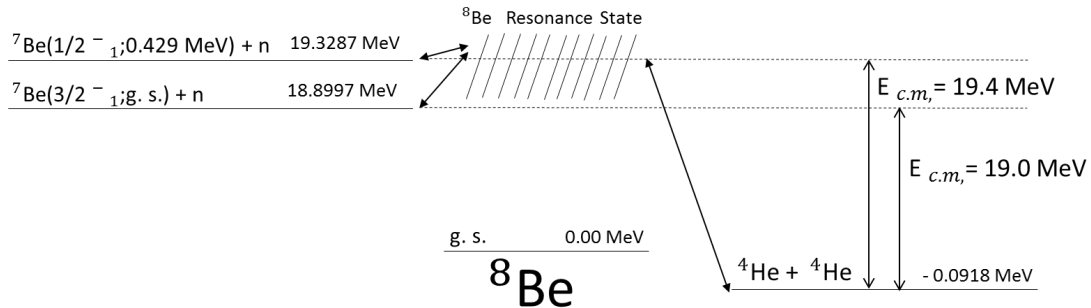


図 2:  ${}^7\text{Be}(n,\alpha){}^4\text{He}$  反応の模式図

本研究では He ガス標的に  $\alpha$  ビームを照射し、 ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$  反応から放出される 5 MeV 以下の低エネルギー中性子を測定する。中性子測定では、標的ガスを封止する容器からの中性子やガンマ線が深刻なバックグラウンドとなりえる。そこで我々は、はじめに、ガス標的容器に  ${}^4\text{He}$  ガスを封入しない状態において  $\alpha$  ビームを照射し、ガス標的容器からのバックグラウンドを測定する。 $\alpha$  ビームが通過するガス標的容器の封止膜について、タンタル、ハバール、アラミドの三種の膜について計測を行い、もっとも有利な材質を決定する。その後、ガス標的容器に He ガスを封入し  ${}^4\text{He}(\alpha,n){}^7\text{Be}$  反応の断面積測定を行う。

## 2 Experimental Procedure

### 2.1 Experimental Setup

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) の西実験室において実施する。RCNP の施設全体図を図 3 に示す。AVF サイクロトロンを用いて加速した 39.4 MeV の  $^4\text{He}^{2+}$  ビームは WS コースを經由して、Grand Raiden の散乱槽内に設置した He ガス標的に輸送される。

WS コース上の BLP1 と BLP2 に、エネルギー減衰板としてそれぞれ  $16\ \mu\text{m}$  と  $33\ \mu\text{m}$  のアラミド膜を設置する。これらの減衰板を出し入れすることで、標的に入射する  $^4\text{He}$  のエネルギーを 0.4 MeV ずつ減少させ、39.4, 39.0, 38.6, 38.2 MeV の異なる四つのビームエネルギーにおいて測定を実施する。

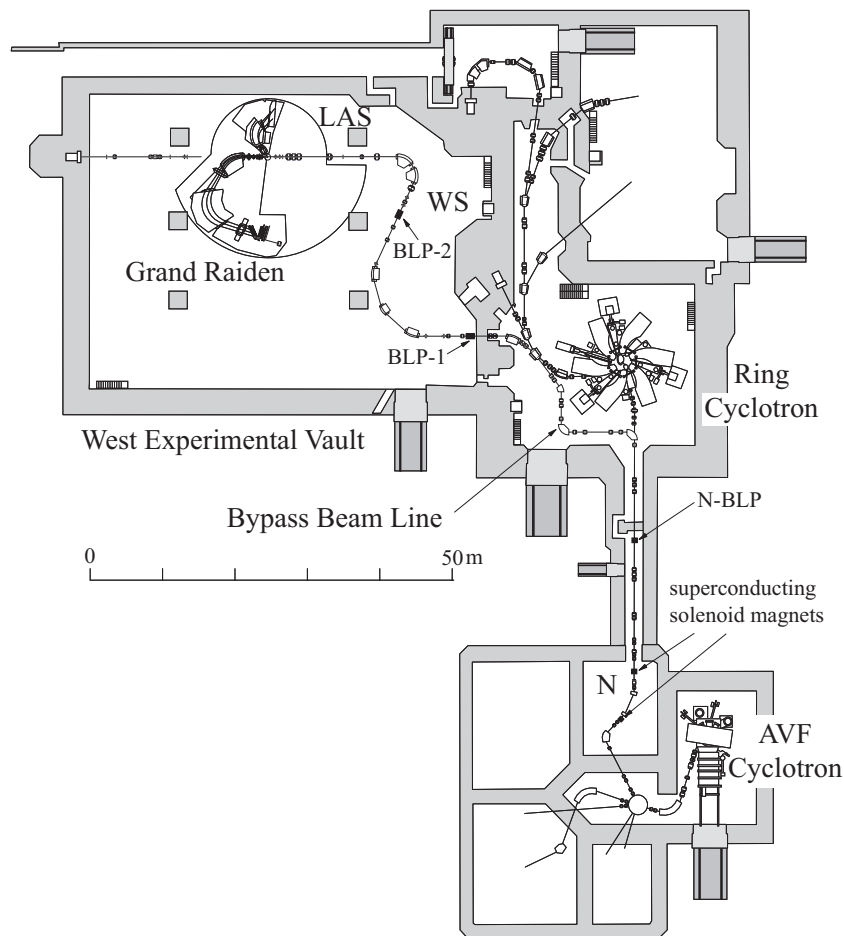


図 3: RCNP 施設全体図。

$^4\text{He}(\alpha, n)^7\text{Be}$  反応により散乱された中性子は、図 4 に示すように、標的から 70 cm かつビームラインから  $20^\circ$  の位置、及び、170 cm かつ  $9^\circ$  の位置に設置した中性子検出器で測定する。図 4 では 4 個の中性子検出器のみが描かれているが、実際には 70 cm の距離と 170 cm の距離にそれぞれ 4 個、計 8 個の中性子検出器を図 5、図 6 に示す配置で設置する。

さらに、 ${}^7\text{Be}$  の励起状態から放出される  $\gamma$  線を NaI 検出器で測定する。

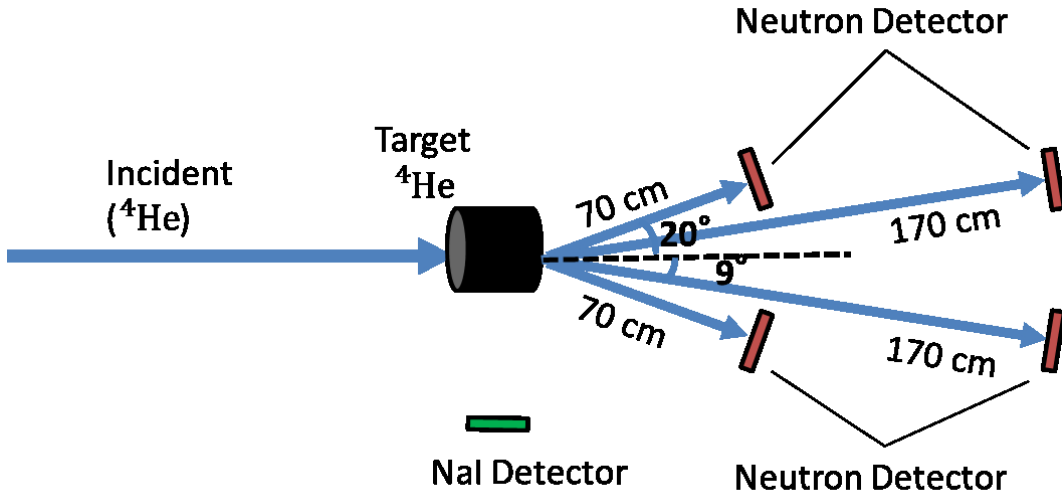


図 4: 実験セットアップの概略図 (上から見た図)。

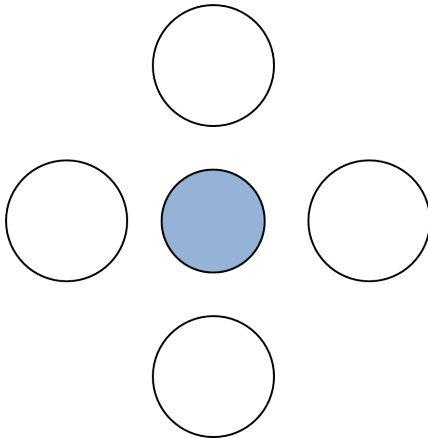


図 5: 標的から 70 cm の距離に設置する中性子検出器 (白丸) の配置をビーム上流から見た図。青い丸はビームのダクトを表す。

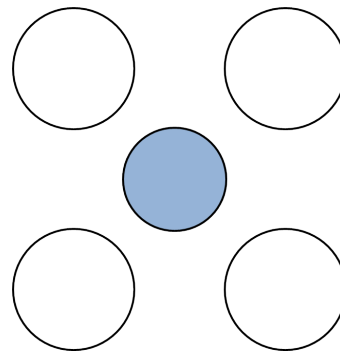


図 6: 標的から 170 cm の距離に設置する中性子検出器 (白丸) の配置をビーム上流から見た図。青い丸は同様にビームのダクトを表す。

各入射エネルギーにおける散乱中性子のエネルギーを実験室系における散乱角度の関数として図 7 に示す。赤線と青線は、 ${}^7\text{Be}$  の終状態が基底状態 ( $3/2_1^-$ ) である場合、および、 $E_x = 429 \text{ keV}$  の第一励起状態 ( $1/2_1^-$ ) 状態である場合に、散乱される中性子のエネルギーであり、黄色と水色の領域は 70 cm、および、170 cm に設置した中性子検出器がカバーする角度領域を示す。

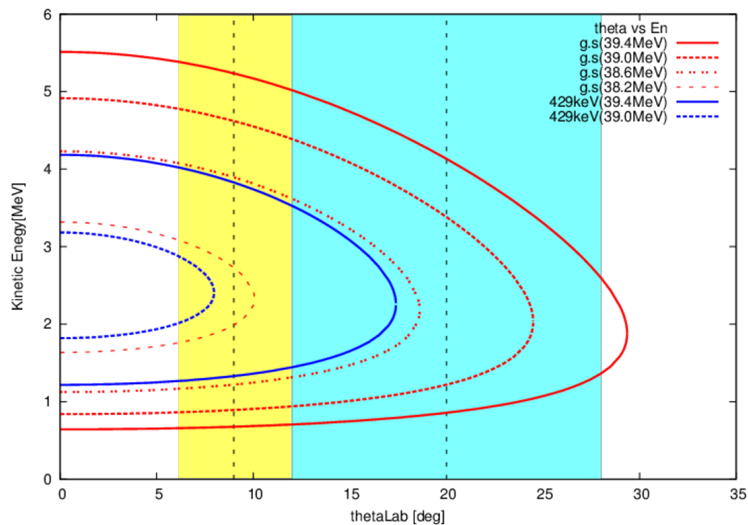


図 7: 各入射エネルギーにおける中性子のエネルギーの角度依存性。黄色、および、水色の領域は  $9^\circ$ 、 $20^\circ$  に置いた中性子検出器がそれぞれカバーする角度領域を示す。それぞれの検出器は  $6^\circ < \theta < 12^\circ$ 、 $12^\circ < \theta < 28^\circ$  の角度領域をカバーするように設置されている。

### 2.1.1 Neutron Detector

中性子検出器には図 8 に示す液体シンチレーション検出器を用いる。液体シンチレーション検出器の有感領域は、直径 20 cm、厚さ 5 cm の円柱である。液体シンチレータの容器はアルミニウム製であり、内面はシンチレーション光の反射率を高めるために酸化マグネシウムでコーティングされている。

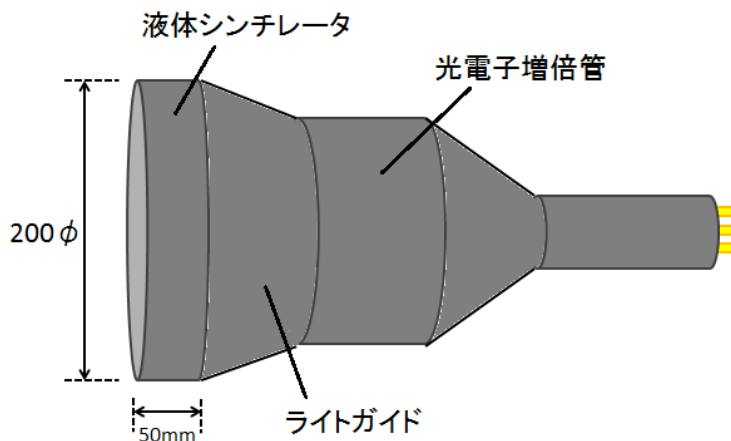


図 8: 中性子検出器

この中性子検出器の検出効率のエネルギー依存性を図 9 に示す [3]。本研究においては、検出する中性子のエネルギーが最大で 5 MeV 程度であるから、3-4 MeV 付近での検出効率を高めるために、0.50 MeV が検出器の閾値となるよう調整する。

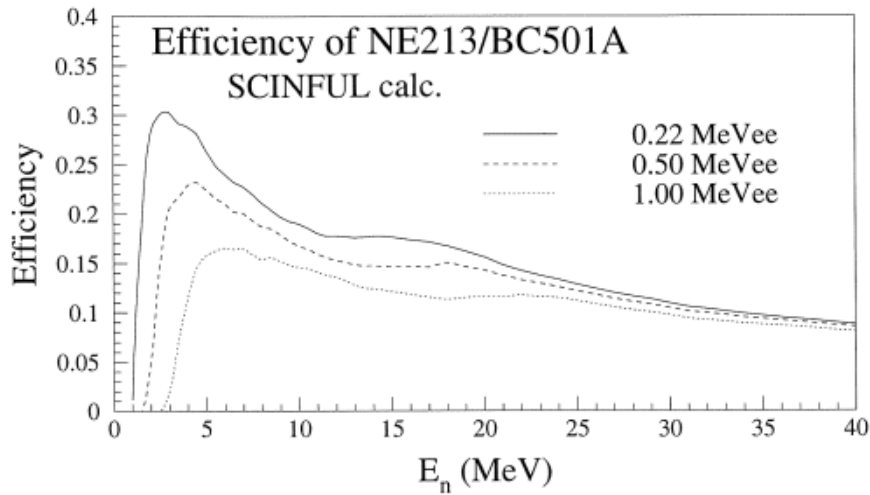


図 9: 中性子検出器の検出効率 [3]。

### 2.1.2 Target

本研究では図 10 に示す円柱形の容器に 1 atm の  $^4\text{He}$  ガスを封入して標的とする。ガス標的容器の封止膜にはタンタル ( $5\ \mu\text{m}$ )、のハバール ( $2.5\ \mu\text{m}$ )、アラミド ( $6\ \mu\text{m}$ ) の三種を用いる。三種それぞれの場合についてバックグラウンド計測を行い、最終的に S/N 比がもっとも良好な物質を用いて  $^4\text{He}(\alpha, n)^7\text{Be}$  反応の断面積測定を行う。

ガス標的容器の長さは、入射粒子が入射エネルギーの変更幅の半分に対応する 200 keV 以上のエネルギーを標的ガス中で失わないように 6 cm とした。

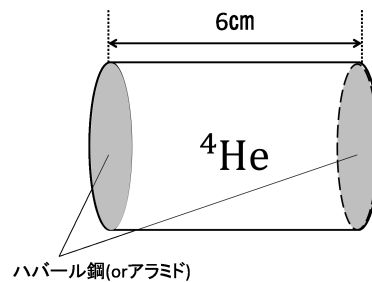


図 10: 標的容器の模式図。

### 2.1.3 Estimation of Energy Resolution

本研究では飛行時間法を用いて中性子のエネルギーを決定する。中性子のエネルギーは 6 MeV 未満なので、中性子の飛行速度は光速に比べて十分小さい ( $\beta < 0.11$ )。そこで、これ以降は簡単な



ために非相対論的に計算することにする。中性子の運動エネルギーは、

$$E = \frac{1}{2}mc^2\beta^2$$

である。ここで、 $\beta$  は、飛行時間  $t$  と飛行距離  $L$  から、

$$\beta = \frac{L}{ct}$$

となる。飛行距離  $L$  は、中性子が厚さ 5 cm のシンチレータの最前面で検出されるか、それとも、最後部で検出されるかによって変化するので、飛行距離の誤差は  $\pm 2.5$  cm となる。加えて、検出器の時間分解能が 1 ns であると仮定すると、誤差の伝搬則により  $\beta$  の誤差は、

$$\Delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial\beta}{\partial L}\Delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial\beta}{\partial t}\Delta t\right)^2} = \frac{1}{L}\sqrt{\left(\frac{\Delta L}{10}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t}{100}\right)^2} = \frac{1}{L} \cdot 3.9 \times 10^{-3}$$

と見込まれる。よって、エネルギーの測定誤差は、

$$\Delta E = mc^2\beta \cdot \Delta\beta \sim 939.5 \times 0.1 \times 3.9 \times 10^{-3} \times \frac{1}{L} [\text{MeV}] = \frac{366}{L} [\text{keV}]$$

のように見積もることができる ( $L$  は m 単位)。

本研究では標的から 70 cm と 170 cm の場所に検出器を設置する。70 cm の距離におけるエネルギー分解能は  $\Delta E \sim 523$  keV となり、標的から 170 cm の距離でのエネルギー分解能は  $\Delta E \sim 215$  keV となる。このエネルギー分解能は、図 7 において  ${}^7\text{Be}$  の基底状態と励起状態を弁別するのに十分である。

### 3 Beam Time Estimation

$E_\alpha > 40$  MeV のエネルギー領域における  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応の微分断面積は、図 11 に示すように、過去の測定によって報告されている [4]。この図において、赤丸で囲まれた三角の点が  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  の微分断面積である。しかし、本研究において測定する閾値近傍 ( $38.0 < E_\alpha < 39.4$  MeV) の過去の実験データは未知であるため、測定の収量を評価するにあたっては、図 11 の実線によって実験データを外挿し、断面積を表 1 のとおり推定した。

表 1: 断面積の推定値

入射エネルギー (MeV)	断面積 (mb)
39.4	20
39.0	10
38.6	5
38.2	1

一方、図 4 に示す検出器の配置と、図 7 に示す  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応の運動学的条件から、各入射エネルギーにおける検出器の有効立体角は表 2 のとおり評価される。

ヘリウムガス標的の厚さは  $1.08$  mg/cm<sup>2</sup> であり、これに  $3$  pA のビームを照射する。中性子検出器の検出効率は図 9 から、概ね 10–20% であるので、10,000 イベントを得るための測定時間は表 3 のようになる。ただし、表 1 で示されている断面積は、重心系での全反応断面積なので、中

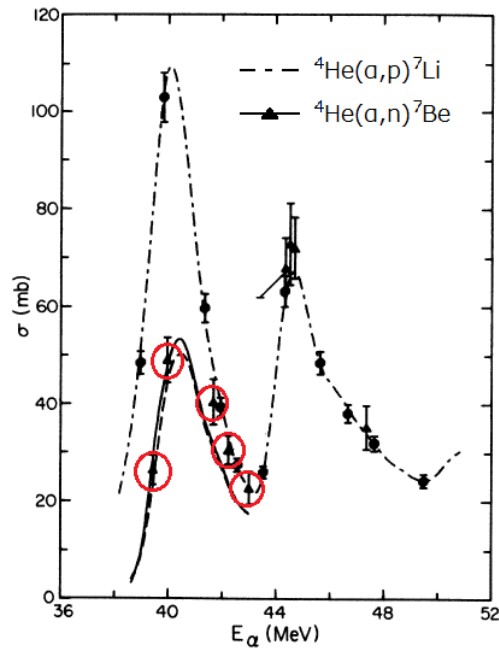


図 11:  ${}^4\text{He}(\alpha, n){}^7\text{Be}$  反応の微分断面積 [4].

表 2: 検出器の有効立体角。

入射エネルギー (MeV)	実験室系における中性子の最大散乱角度 (°)	有効立体角 (Sr)
39.4	29.4	0.28
39.0	24.5	0.22
38.6	18.6	0.16
38.2	10.1	0.01

中性子は重心系では等方的に散乱すると仮定したうえで、実験室系と重心系での微分断面積の変換を行った。

4つのエネルギーの測定には、設定変更のオーバーヘッドを含めて合計で19時間が必要である。また、バックグラウンド測定においては、1種のガス標的容器につき、1時間の測定時間と2時間のガス標的容器の交換作業が必要である。ゆえに、3種のガス標的容器に対するバックグラウンド測定には9時間が必要である。

さらに、測定前には加速器のビーム調整のために8時間、検出器のテストおよびエネルギー較正のために12時間のビームタイムが必要であると見込んでいる。したがって、本実験に必要なビームタイムの総計は48時間である。

## 参考文献

- [1] Alain Coc *et al.*, Phys. Rev. D **87**, 123530 (2013).
- [2] E. Komatsu *et al.*, Astrophys. J. Suppl. **192**, 18 (2011).

表 3: 測定時間

入射エネルギー (MeV)	必要な時間 (min)
39.4	10
39.0	20
38.6	35
38.2	1030
総計	1095

[3] M. Yosoi, Doctor Thesis, Kyoto University (2003).

[4] C. H. King, Sam M. Austin, H. H. Rossner, and W. S. Chien, Phys. Rev. C **16**, 1712 (1977).