

KamLAND エリアにおける中性子フラックス測定

Measurement of neutron flux at KamLAND area

東北大学理学部物理学科

和田佳樹

概要

環境中性子は、暗黒物質直接探索やニュートリノレス二重ベータ崩壊などの地下素粒子実験において、重要なバックグラウンドとなり得る。これらのバックグラウンドは中性子フラックスから推定することができる。本研究では ^3He 比例計数管を用いて KamLAND エリアにおける中性子フラックスを測定した。

^3He 比例計数管は、熱中性子に対する反応断面積が大きく熱中性子測定に優れているが、比例計数管周りに減速材、吸収材を取り付けることによって、熱以外の中性子を測定できる。本測定では、観測したいエネルギーに応じて、3種類の測定セットアップを用いた。

エネルギー較正をして得られた中性子のスペクトルより、ノイズによる影響を除いた範囲における中性子観測数から全中性子観測数への変換係数やカット条件を定めた。また、測定して得られた中性子イベントレートから、先行研究で推定した中性子エネルギースペクトルを用いて中性子フラックスを求めたところ、 $\Phi_n [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] = (6.86 \pm 0.14) \times 10^{-6}$ が得られた。得られた中性子フラックスを用いて、KamLAND エリアにおいて計画されている実験の、中性子バックグラウンドの見積もりを行った。

目次

第 1 章	研究動機	2
1.1	地下素粒子実験における中性子背景事象	2
1.2	中性子の分類	2
1.3	中性子の発生原理	2
第 2 章	中性子検出器	4
2.1	比例計数管	4
2.1.1	動作原理	5
2.1.2	壁際効果	5
2.1.3	^3He 比例計数管を用いた熱以外の中性子測定	5
2.2	有機液体シンチレータ	6
2.2.1	動作原理	6
2.2.2	発光機構と波形分別	6
第 3 章	神岡坑内 KamLAND エリアにおける 中性子フラックス測定	7
3.1	検出器	7
3.2	データ収集系	7
3.3	測定セットアップ	7
第 4 章	検出器校正	10
4.1	エネルギー校正	10
4.2	事象選択効率	10
4.3	カット条件	11
第 5 章	測定結果	13
5.1	中性子イベントレート	13
5.2	中性子エネルギースペクトル	14
5.3	中性子フラックス	14
5.4	先行研究との比較	16
5.5	KamLAND 第二純化エリアにおける中性子バックグラウンド	16
第 6 章	結論	18

目次

2.1	^3He と中性子の反応断面積	5
2.2	^3He 比例計数管における中性子反応のエネルギースペクトル	6
3.1	^3He 比例計数管	7
3.2	減速材 (ポリエチレンカバー、ボロンシート)	8
3.3	データ収集系	8
3.4	実験セットアップ	9
3.5	各セットアップにおける検出効率	9
4.1	エネルギー較正の測定データ	10
4.2	^{252}Cf 線源測定 of エネルギースペクトル	11
4.3	^{252}Cf 線源の測定データ	12
5.1	第二純化エリアでの測定したエネルギースペクトル	13
5.2	中性子エネルギースペクトル	15
5.3	バックグラウンドのエネルギースペクトル	17

表目次

5.1	各セットアップにおける測定結果	13
5.2	中性子イベントレートの誤差	14
5.3	各セットアップにおける中性子イベントレート	14
5.4	KamLAND 第二純化エリアにおける中性子フラックス	15
5.5	先行研究との比較	16

第 1 章

研究動機

1.1 地下素粒子実験における中性子背景事象

岐阜県神岡鉱山内では、暗黒物質直接探索やニュートリノレス二重ベータ崩壊探索などの様々な素粒子地下実験が行われている。これらの実験において、中性子による信号は重要なバックグラウンドとなる可能性がある。暗黒物質直接探索実験においては、標的核子が暗黒物質によって散乱される信号と、中性子によって散乱される信号との区別がつかない。またニュートリノレス二重ベータ崩壊探索では、水素による中性子捕獲によって放出されるガンマ線が、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の Q 値に近いエネルギーを持ちうる。これらのバックグラウンドは、中性子フラックスを測定することによって見積もることができる。

1.2 中性子の分類

中性子は持つエネルギーによって、熱中性子と熱以外の中性子に分類される [1]。

1. 熱中性子

0.5eV 以下のエネルギーを持ち、媒質中の分子の熱運動と熱平衡に達した中性子を指す。約 300K では、エネルギー分布がマクスウェル・ボルツマン分布であり、0.025eV 程度にピークを持つ。

2. 熱以外の中性子

0.5eV 以上のエネルギーを持つ中性子を指す。特に 500keV 以上のエネルギーを持つ中性子を高速中性子と呼ぶ。核分裂、光核反応によって生じる中性子はすべて高速中性子であり、通常数 MeV の運動エネルギーを持つ。高速中性子は物質中で散乱を繰り返すことでエネルギーを落とし、熱中性子へと変換される。H₂O、D₂O、グラファイトなどが、高速中性子を熱化させる減速材として主に使われている。

1.3 中性子の発生原理

中性子の発生場所によって、環境中性子と環境以外の中性子に分類される [2]。

1. 環境中性子

実験装置以外から発生する中性子を指す。神岡坑内における中性子の発生源は主に次の 3 つが考えられる。

- 岩盤中に含まれる U/Th 系列の放射性物質の核分裂によって放出される高速中性子
- 岩盤中に含まれる U/Th 系列の放射性物質の核分裂によって放出される α 粒子を、岩盤内の物質が (α , n) 反応で吸収することによって放出される高速中性子
- 高エネルギー宇宙線ミューオンによる岩盤内の物質の原子核破砕によって放出される高速中性子

2. 環境以外の中性子

実験装置内部（減速材も含む）から発生する中性子を指す。実験装置内部からの中性子の発生源は主に次の 3 つが考えられる [2]。

- 検出器材料に含まれる U/Th 系列の放射性物質の核分裂によって放出される高速中性子
- 検出器材料に含まれる U/Th 系列の放射性物質の核分裂によって放出される α 粒子を、検出器材料が (α , n) 反応で吸収することによって放出される高速中性子
- 高エネルギー宇宙線ミューオンによる検出器材料の物質の原子核破砕によって放出される高速中性子

第 2 章

中性子検出器

この章では、中性子を検出する測定機器について、動作原理などを示す。

2.1 比例計数管

比例計数管で中性子測定を行うとき、中性子検出には主に 3 つの反応が使用されている [3]。

- $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反応

この反応では熱中性子が ^{10}B に捕獲され、 ^7Li と α 粒子が放出される。



反応生成物であるリチウムは基底状態または第 1 励起状態となり、Q 値はそれぞれ 2.792MeV、2.310MeV である。全反応の約 94% が励起状態となる。運動量保存則よりリチウムと α 粒子にそれぞれ 0.84MeV と 1.47MeV の運動エネルギーを持ち、正反対の方向へと放出される。

- $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)$ 反応

この反応では熱中性子が ^6Li に捕獲され、 α 粒子と三重水素原子核 (トリトン) が放出される。



運動量保存則より α 粒子とトリトンにそれぞれ 2.05MeV と 2.73MeV の運動エネルギーを持ち、入射する中性子のエネルギーが低い時に正反対の方向へと放出される。この反応の熱中性子断面積は 940barn[3] と小さいが、Q 値が大きいため反応生成物により高いエネルギーを与えられるという長所で短所が相殺される。

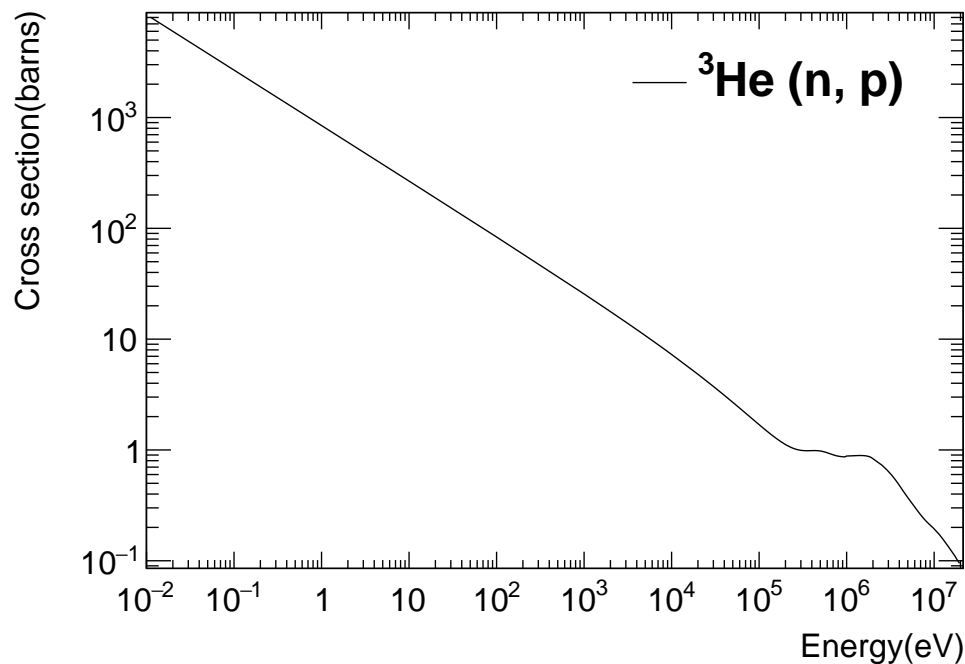
- $^3\text{He}(\text{n}, \text{p})$ 反応

この反応では熱中性子が ^3He に捕獲され、陽子とトリトンが放出される。



Q 値は 764keV であり、運動量保存則より陽子とトリトンにそれぞれ 573keV と 191keV の運動エネルギーを持ち、正反対の方向へと放出される。

以下では本研究で使用した ^3He 比例計数管について説明する。

図 2.1: ^3He と中性子の反応断面積 [3]

2.1.1 動作原理

^3He 比例計数管内で式 (2.3) の反応が起きた時、荷電粒子である生成された陽子とトリトンは、 ^3He ガスを電離させながらエネルギーを失う。電離によって生成された電子は、強い電場によって増幅、陽極線に引き寄せられ電荷として読み出される。 ^3He と中性子の反応にはエネルギー依存性があり、この関係を図 2.1 に示す。特に熱中性子に対して反応断面積が非常に大きく、 0.025eV では 5333barn [3] である。このため、 ^3He 比例計数管は熱中性子測定に優れている。

2.1.2 壁際効果

^3He による熱中性子捕獲反応の Q 値は 764keV であり、エネルギースペクトルは 764keV にピークを持つことが期待される。しかし、実際のエネルギースペクトルは図 2.2 のような形となり、期待されるピーク以外に連続成分が存在する。これは陽子とトリトンが正反対の方向に放出される反応が検出器の壁際で起きた時に、一方がエネルギーを全て失い、他方がエネルギーを全て失う前に検出器の壁に衝突してしまうためである。このことを壁際効果と呼ぶ。

2.1.3 ^3He 比例計数管を用いた熱以外の中性子測定

^3He 比例計数管は熱中性子測定に優れている検出器であるが、減速材を用いることで熱以外の中性子の測定も可能となる。本研究の減速材には、ポリエチレンとボロンシートを採用した。ボロンシートによって環境熱中性子は吸収され、ポリエチレンによって高いエネルギーの中性子が減速し熱中性子となる。これらより高いエネルギーを持つ熱以外の中性子が、 ^3He 比例計数管で測定できる。

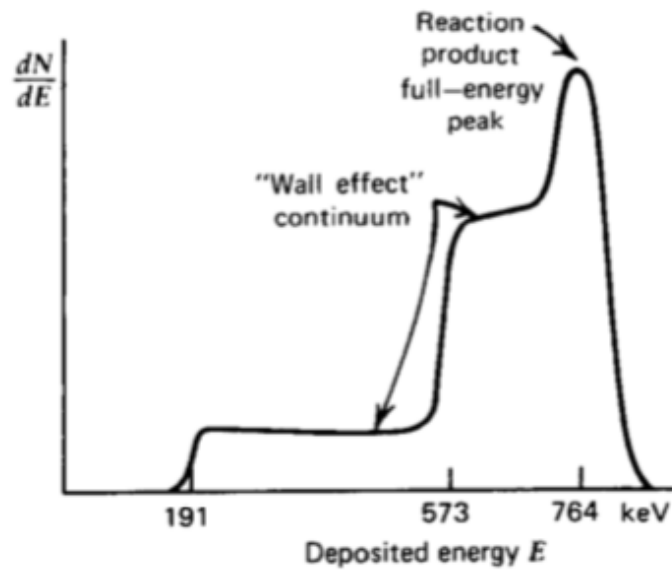


図 2.2: ^3He 比例計数管における中性子反応のエネルギースペクトル [3]。壁際効果による連続成分が見られる。

2.2 有機液体シンチレータ

2.2.1 動作原理

有機液体シンチレータ内を荷電粒子が通過すると、荷電粒子がシンチレータ内の原子と相互作用を起こしエネルギーを落とす。シンチレータによって落としたエネルギーが、シンチレーション光として検出されることで放射線を検出することができる。中性子や γ 線などは、シンチレータ内の原子とコンプトン散乱や弾性散乱を起こすことで荷電粒子を発生させるため、間接検出が可能である。有機液体シンチレータは、主に有機溶媒と蛍光体や波長変換材などの溶質からなる。溶媒物質も発光することがあるが、溶質の発光と比較すると少ない。

2.2.2 発光機構と波形分別

シンチレータ内で落とされた放射線のエネルギーは、最初に溶媒分子を励起させる。直接溶質分子を励起させることもあるが、溶質分子に比べて溶媒分子の方が多いため溶媒分子が励起されることが多い。励起された溶媒分子は、分子間の衝突や双極子間相互作用などによって溶質分子へとエネルギーを与え、溶質分子が励起する。この時、励起した溶質分子がエネルギーを光として放出することで、検出可能な発光量となる。

液体シンチレーションの発光には、蛍光と燐光の 2 種類がある [3]。蛍光は励起の 1 重項状態に起因し、時定数は 2~3 ns 程度である。燐光は励起の 3 重項状態に起因し、時定数は 200~300 ns である。この遅い成分の発光量は、液体シンチレータ内を通過する放射線の電離能が大きいほど増加する。電子に比べて原子核やアルファ線の方が電離能が大きいので、遅い成分である燐光の発光量の違いによって放射線の種類を分類することができる。この粒子識別方法を波形分別と呼ばれ、中性子の場合には遅い成分である燐光の割合が多くなる。

第3章

神岡坑内 KamLAND エリアにおける 中性子フラックス測定

本研究は、神岡坑内 KamLAND 第二純化エリアにおいて測定を行なった。

3.1 検出器

本研究で用いた ^3He 比例計数管を図 3.1 に示す。この ^3He 比例計数管は Reuter-Stokes 社モデル番号 P4-1618-203 であり、 ^3He ガスが 10 気圧で封入されている。外径 5.18 cm、全長 38cm で、検出器の外壁は SUS304、動作電圧 1300V である。減速材を図 3.2 に示す。ポリエチレンカバーは、外径 19.8cm、長さ 51cm、厚さ 6.5cm[4] で内部に ^3He 比例計数管を入れて、ネジで固定できるようになっている。厚さ 4mm のポロンシートは、ポリエチレンカバーの周りに巻かれている。

3.2 データ収集系

本研究で用いたデータ収集系のダイアグラムを図 3.3 に示す。プリアンプによって信号を増幅させ、shaper によって波形が waveform digitizer に合うように整形する。 ^3He 比例計数管からの信号の波形の高さと面積を、waveform digitizer(インターフェース社、LPC-320910) で記録するシステムを用いた [4]。

3.3 測定セットアップ

本研究では、3種類のセットアップを使用した。

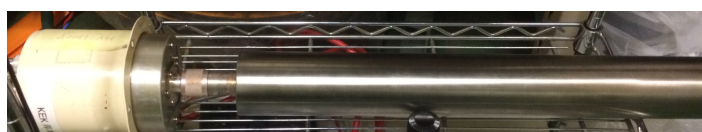


図 3.1: ^3He 比例計数管

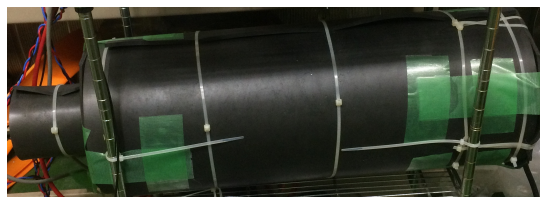


図 3.2: 減速材 (ポリエチレンカバー、ボロンシート)

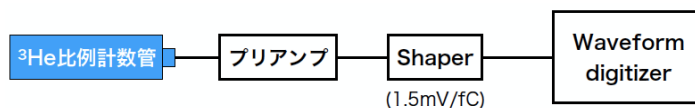


図 3.3: データ収集系

1. "Setup A"

³He 比例計数管に減速材を取り付けず、測定する。このセットアップは熱中性子のみ強い感度を持つため、熱中性子測定に適している。

2. "Setup B"

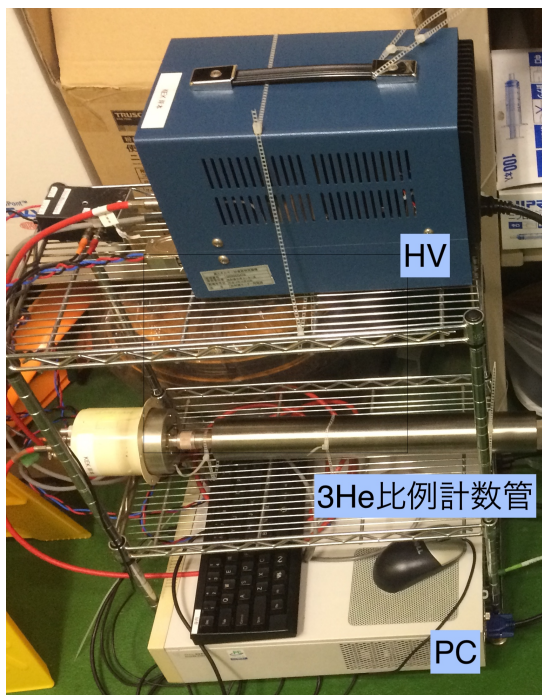
³He 比例計数管の周囲にポリエチレンとボロンシートの減速材が取り付けられている。ボロンシートによって環境熱中性子が吸収され、ポリエチレンが熱以外の中性子を熱化する。そのため、このセットアップでは熱以外の中性子が観測できる。

3. "Setup C"

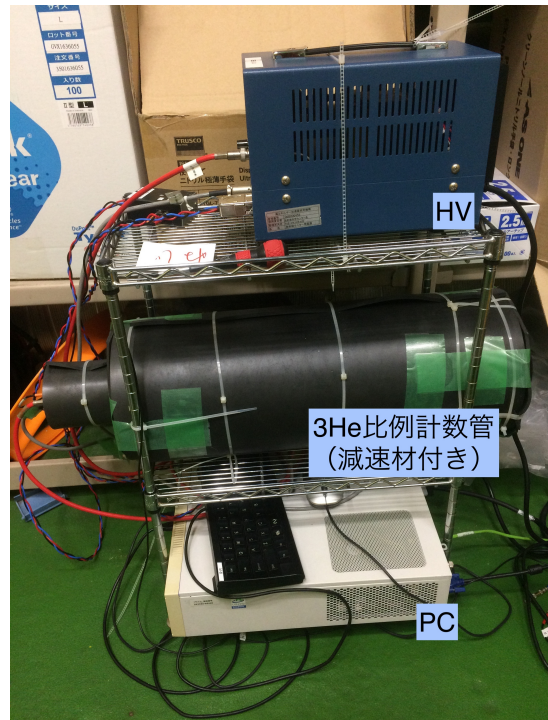
Setup B の周囲に、5cm の厚さのポリエチレンのブロックを置いた。減速材が増えたため、より高エネルギーの中性子を観測できる。このセットアップは、検出器較正用に用いられた。

Setup A、Setup B を図 3.4 に示す。

各セットアップに、様々なエネルギーの中性子を流量 $1/\text{cm}^2$ で当てた時の中性子検出効率を Geant4 でシミュレーションした結果を図 3.5 に示す [4]。減速材を ³He 比例計数管に取り付けることによって、より高いエネルギーを持つ中性子を観測することができる。また、ボロンシートによって熱中性子が吸収されることも確認できる。



(a) Setup A



(b) Setup B

図 3.4: 実験セットアップ

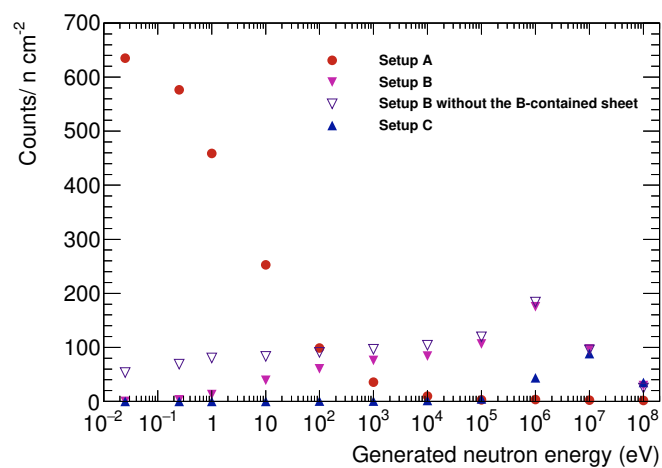


図 3.5: 各セットアップにおける検出効率 [4]。赤は Setup A、ピンクは Setup B、白抜きは ³He 比例計数管にポリエチレンのみを取り付けた時、青は Setup C の結果を示している。

第 4 章

検出器較正

4.1 エネルギー較正

本研究で用いたデータ収集系では、waveform digitizer から得られた信号の波形や面積の数値 (Raw data) をエネルギーに変換することが必要である。そのためエネルギー較正のデータを、第 3.3 章で述べた Setup C を用いて、神岡坑内 LAB-B において ^{252}Cf 線源を用いて測定した。図 4.1 にエネルギー較正の測定データを示す。

図 4.1a では、本研究のスペクトルの特徴である Q 値のピーク 764keV と壁際効果が見られる 191keV について、それぞれガウス関数と誤差関数でフィッティング (赤線) を行なった。図 4.1b は、(a) で得られたフィッティングの結果をプロットし、線形にフィッティング (赤線) を行いエネルギー較正式 (4.1) を得た。

$$\text{Energy [MeV]} = 1.012 \times (\text{Raw data}) + 0.004 \quad (4.1)$$

4.2 事象選択効率

^{252}Cf 線源の測定データにおいて式 (4.1) を用いて、得られたエネルギースペクトルを図 4.2 に示す。本研究では、中性子イベントを 0.16MeV から 0.85MeV とし、この範囲のイベント数を C_{total} と定義した。また環境中性子測定では、エネルギーが低い領域に γ 線や検出器由来のノイズイベントが入ってくるため、中性子イベント数計測の妨げになる。そこで 0.5MeV から 0.85MeV を Region

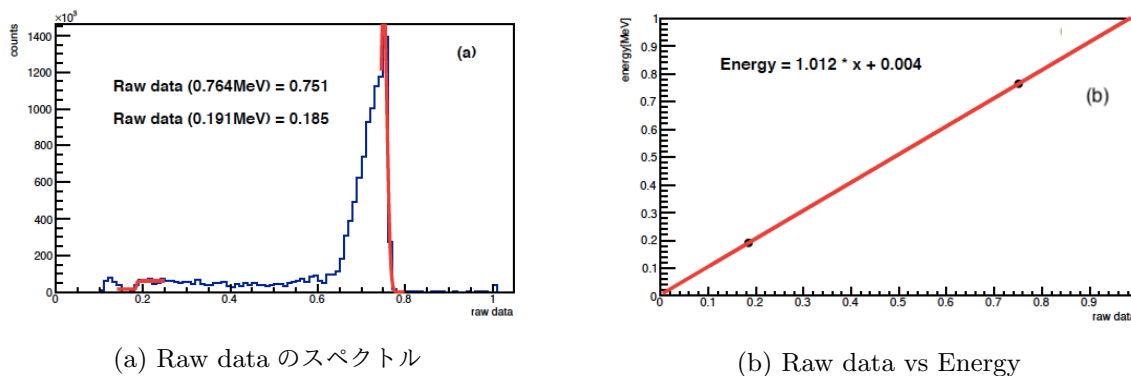
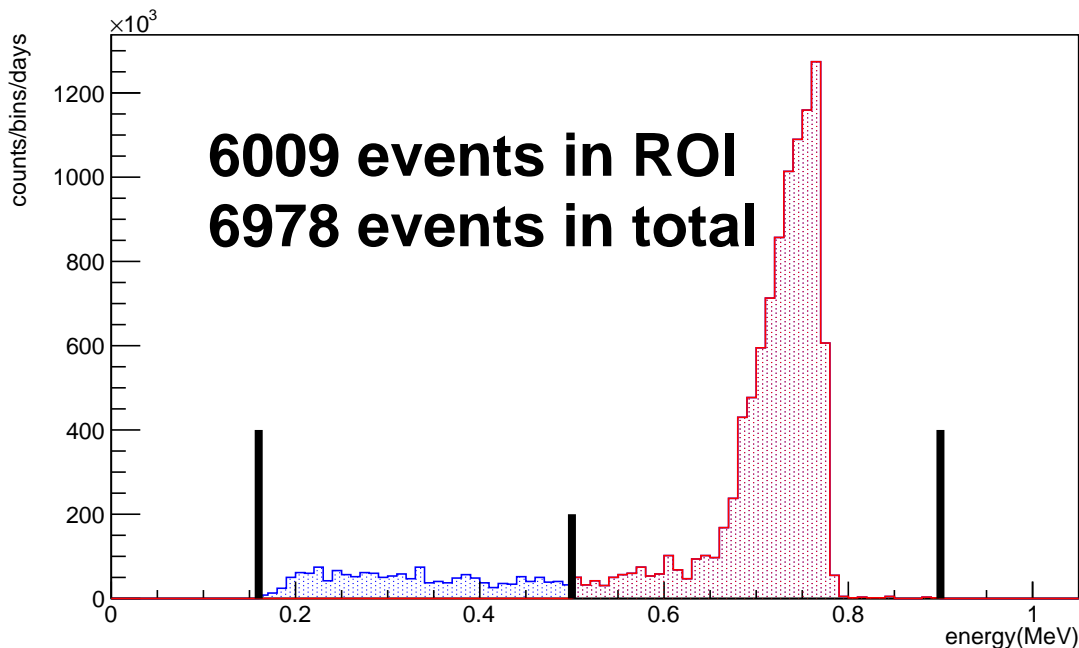


図 4.1: エネルギー較正の測定データ

図 4.2: ^{252}Cf 線源測定のエネルギースペクトル

Of Interest (ROI) とし、この範囲のイベント数を C_{ROI} と定義し、解析に使用した。 C_{ROI} から C_{total} を見積もる変換係数として事象選択効率 ε を式 (4.2) のように定義し、 ^{252}Cf 線源の測定データから求めた。

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{ROI}}}{C_{\text{total}}} = \frac{6009}{6978} = 0.861 \pm 0.015 \quad (4.2)$$

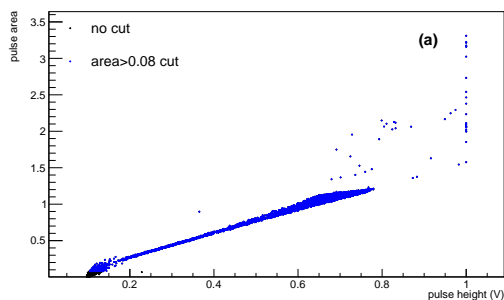
中性子イベントレート $R[\text{cps}]$ は式 (4.3) のように求まる。 T_{live} は測定時間を表す。

$$R[\text{cps}] = \frac{C_{\text{ROI}}}{\varepsilon \times T_{\text{live}}} \quad (4.3)$$

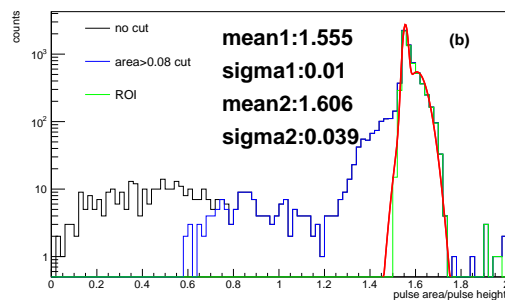
4.3 カット条件

図 4.3 の ^{252}Cf 線源の測定データを用いて、信号の波形の面積 (Pulse area) と高さ (Pulse height) との関係からカットの条件を考える。図 4.3a は area と height の相関を示している。area と height の関係は線形であることが確認できるため、直線から大きく外れたデータをカットする条件を求める。今回解析には ROI 内のイベントを用いるため、ROI 内の結果にフィッティングを行なった。また図 4.3b は (area/height) のスペクトルを示しており、ROI の結果がガウス関数が 2 つ重なったような形だったため、ダブルガウス関数でフィッティング (赤線) した。壁際効果によって、このような形になったと考えている。フィッティングの結果より、カット条件は式 (4.4) のように求まった。この範囲は大きい広がりを持つガウス関数の 4σ の範囲に相当する。

$$1.45 < (\text{Pulse area} / \text{Pulse height}) < 1.75 \quad (4.4)$$



(a) Pulse height vs Pulse area.
 黒点はカットなし、青点は Pulse area > 0.08 の
 カットありの結果を示している。



(b) (Pulse area / Pulse height) vs counts.
 黒線はカットなし、青線は Pulse area > 0.08 のカット
 あり、緑線は ROI の結果を示している。

図 4.3: ^{252}Cf 線源の測定データ

第5章

測定結果

5.1 中性子イベントレート

第3章で述べた通り、KamLAND 第二純化エリアにおいて、 ^3He 比例計数管を用いて中性子測定を行った。図 5.1 に測定したエネルギースペクトルを示す。(a)、(b) はそれぞれ Setup A、B での測定結果である。

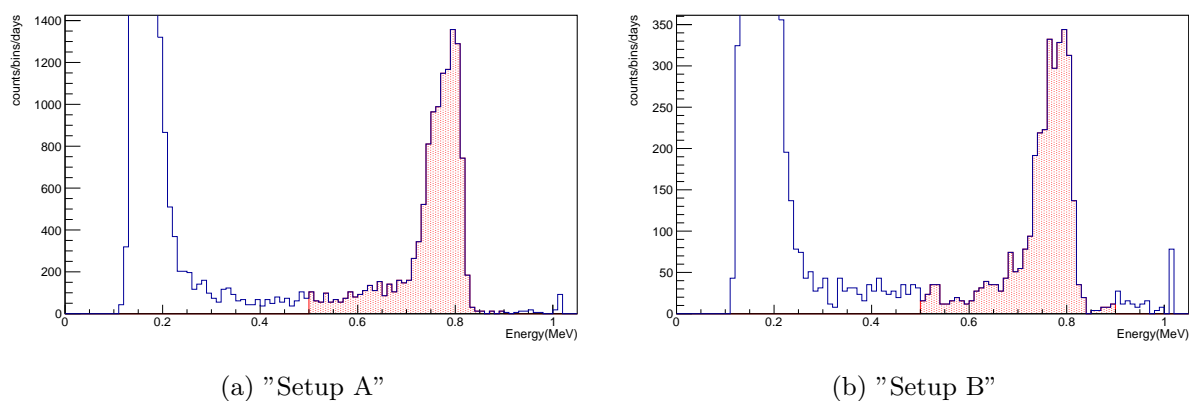


図 5.1: 第二純化エリアで測定したエネルギースペクトル

表 5.1 に各セットアップでの測定時間 T_{live} 、ROI 内で得られたイベント数 C_{ROI} 、式 (4.3) を用いて得た中性子イベントレート R などをまとめた。

表 5.1: 各セットアップにおける測定結果

	"Setup A"	"Setup B"
Start date	2017/11/10	2017/11/26
Stop date	2017/11/26	2017/12/22
T_{live} [days]	16.28	25.58
C_{ROI} [counts]	1957	838
ϵ	0.861	
R [10^{-3} cps]	1.62	0.44

また、以下のような変化を系統誤差として考慮した。

1. 事象選択効率 ε の統計誤差の伝播
2. ROI の定義を $\pm 0.05\text{MeV}$ ずらした時の、イベント数の変化
3. 検出器の gain が $\pm 5\%$ 変化した時の、イベント数の変化

中性子イベントレートに対するそれぞれの誤差を表 5.2 に、これらの誤差を考慮した中性子イベントレートを表 5.3 に示す。

表 5.2: 中性子イベントレートの誤差

誤差	Setup A [%]		Setup B [%]	
系統誤差 1.(事象選択効率)	± 1.8			
系統誤差 2.(ROI)	+0.4	-0.7	+1.4	-0.0
系統誤差 3.(Gain)	+1.5	-1.4	+1.6	-0.0
合計	+2.4	-2.4	+2.8	-1.8

表 5.3: 各セットアップにおける中性子イベントレート

セットアップ	R [10^{-3}cps] $\pm(\text{stat.})\pm(\text{syst.})$
Setup A	$1.62 \pm 0.03 \pm 0.04$
Setup B	$0.44 \pm 0.01 \pm 0.01$

5.2 中性子エネルギースペクトル

本研究で用いた ^3He 比例計数管では、反応した中性子のエネルギーを測定することができない。そのためイベントレートをフラックスに変換するには、中性子エネルギースペクトルの情報が必要となる。本研究では、先行研究 [4] において GEANT4 のシミュレーションから得られたエネルギースペクトルを、形状を固定して使用した。使用した中性子エネルギースペクトルを図 5.2 に示す。

熱中性子を $E \leq 0.5\text{eV}$ 、熱以外の中性を $E > 0.5\text{eV}$ と定義すると、中性子フラックスにおける熱中性子と熱以外の中性子との比は、式 (5.1) のように求まる。

$$\text{熱中性子} : \text{熱以外の中性子} = 0.336 : 0.664 \quad (5.1)$$

5.3 中性子フラックス

中性子フラックスは、入射中性子と ^3He ガスの反応のシミュレーションから導出できる [4]。Geant4 によるシミュレーションで、一様等方に飛んでいる中性子が半径 $r[\text{cm}]$ の球を通過した粒子数 N_{MC} を、球の一番大きな円の面積で割ることで中性子の流量 ϕ_{MC} を式 (5.2) で求める。

$$\phi_{\text{MC}} = \frac{N_{\text{MC}}}{\pi \times r^2} \quad (5.2)$$

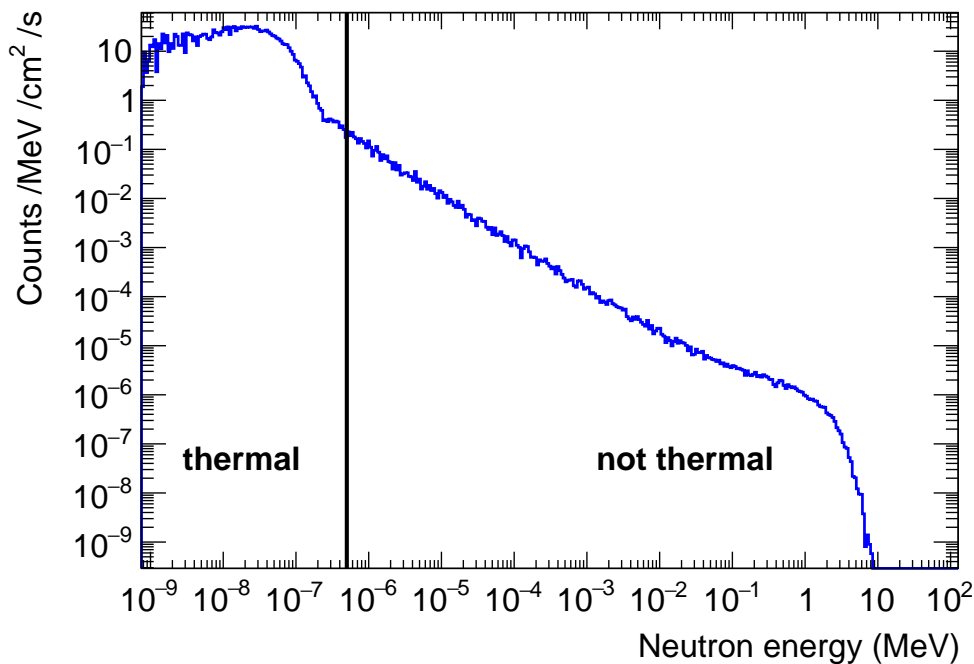


図 5.2: 中性子エネルギースペクトル [4]。黒線より低エネルギーは熱中性子、高エネルギーは熱中性子以外。

ϕ_{MC} が”Setup A”に入射した時に見積もられる中性子の反応数を $N_{MC,A}$ 、”Setup A”での中性子イベントレートを R_A と定義すると、総中性子フラックス Φ_n は式 (5.3) のように求められる。

$$\Phi_n = \frac{\phi_{MC}}{N_{MC,A}} \times R_A = \alpha \times R_A \tag{5.3}$$

$$\alpha = 4.25 \times 10^{-6} \quad (\text{先行研究 [3] より})$$

本研究で得られた R_A から、KamLAND 第二純化エリアにおける総中性子フラックスは式 (5.4) のように求まる。

$$\Phi_n [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] = (6.86 \pm 0.14) \times 10^{-6} \tag{5.4}$$

式 (5.1) を用いて求めた、熱中性子と熱以外の中性子のフラックスを表 5.4 にまとめる。

表 5.4: KamLAND 第二純化エリアにおける中性子フラックス

	$\Phi_n [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$
熱中性子	$(2.30 \pm 0.05) \times 10^{-6}$
熱以外の中性子	$(4.56 \pm 0.09) \times 10^{-6}$

先行研究によると、中性子フラックスの系統誤差の大部分はシミュレーションの際に生じるエネルギースペクトル形状に起因する。本研究ではエネルギースペクトル形状を固定しているため、中性子フラックスの系統誤差については議論せず、統計誤差のみを考慮している。

5.4 先行研究との比較

本研究の結果と先行研究 [4,6] の結果を表 5.5 にまとめた。

表 5.5: 先行研究との比較

中性子フラックス $\Phi_n [\times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$	熱中性子	熱以外の中性子
KamLAND 第二純化エリア		
本研究	2.30 ± 0.05	4.56 ± 0.14
LAB-B (Newage)		
水越氏 (2017)	$1.85 \pm 0.05^{+0.15}_{-0.17}$	$3.67 \pm 0.11^{+0.29}_{-0.33}$
Super-Kamiokande		
南野氏 (2004)	8.26 ± 0.58	11.5 ± 1.2

水越氏との結果と本研究結果を比較すると、ほぼ矛盾のない中性子フラックスの値が得られた。多少の違いは、測定場所周りの岩石組成の違いや岩盤中の水分量などの、測定場所の違いが要因と考えている。一方で水越氏の結果、本研究結果に比べて南野氏の結果は 2~3 倍ほど違いが見られる。このような大きな違いは測定場所の違いだけではなく、他の影響も考慮しなければならない。要因としては、中性子エネルギースペクトルを仮定していないことや、南野氏の測定では減速材を用いて測定をしていないことが考えられる。

5.5 KamLAND 第二純化エリアにおける中性子バックグラウンド

本研究で求めた中性子フラックスを用いて、第二純化エリアにおける中性子バックグラウンドを見積もる。神岡坑内 KamLAND エリアでは、様々な地下素粒子実験が計画されており、ここでは一例として、液体キセノンを用いた泡箱実験に関して議論する。この実験において、液体キセノンと中性子の弾性散乱が深刻なバックグラウンドとなり得る。暗黒物質の散乱によるキセノン原子核の反跳エネルギー E_{nr} は $E_{nr} = \text{数} \sim \text{数十 keV}$ となる。 $E_{nr} > 1\text{keV}$ のエネルギーを与えるには、中性子の入射エネルギー E_n は $E_n > 33.1 [\text{keV}]$ の条件が課される。この条件の範囲の中性子エネルギースペクトルを図 5.3 に示す。このとき、バックグラウンドとしての中性子フラックスは、 $\Phi_{BG} = 3.05 \times 10^{-6} [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$ となる。

1 トンの液体キセノンがターゲットとして使用されると仮定し、長さ 100cm、直径 70cm の円筒形の実験装置を想定する。中性子のエネルギーが $E_n = 33.1 [\text{keV}]$ のとき、液体キセノンの中性子散乱断面積は $\sigma = 8 [\text{barn}]$ となる。キセノン中での中性子の減衰長 λ は、単位面積当たりのキセノン原子核の個数 N 、キセノンの中性子散乱断面積を σ を用いて式 5.5 で求まる。

$$\frac{1}{\lambda} = N\sigma \quad (5.5)$$

$$\lambda = 12.28 [\text{cm}]$$

大まかな見積もりをするために中性子がより大きな断面積を通過するように、すべての中性子が円筒形の側面部から入射することを仮定する。このとき、バックグラウンドとしての中性子フラックスは

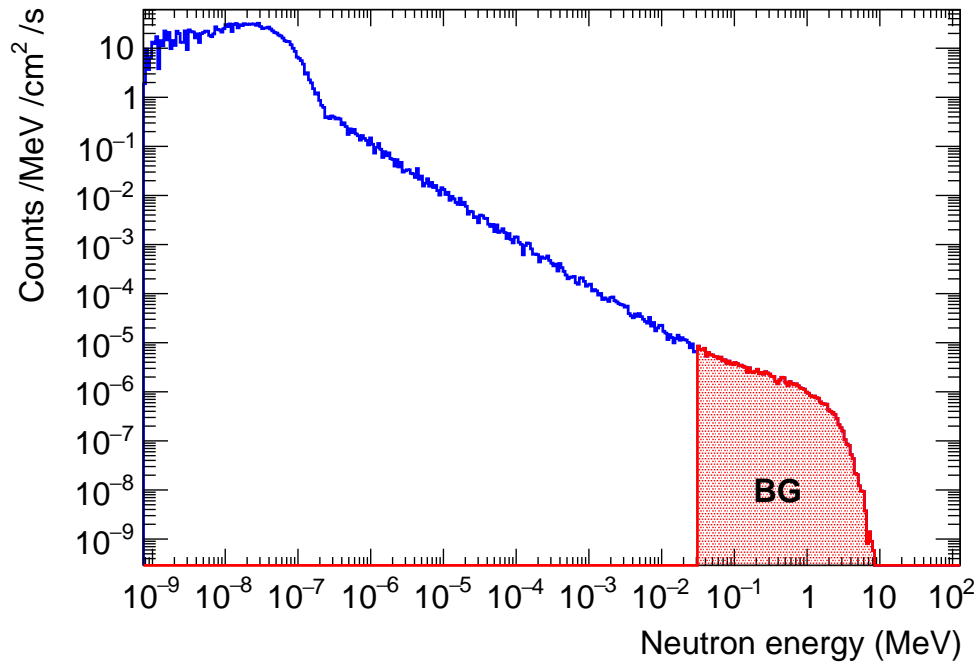


図 5.3: バックグラウンドのエネルギースペクトル

ほぼ全てが減衰する。検出器の側面部の面積は $S = 21991 \text{ [cm}^2\text{]}$ であるため、検出される中性子バックグラウンドレート R_{BG} は式 (5.6) と見積れる。

$$\begin{aligned}
 R_{BG} &= \Phi_{BG} \times S \\
 &= 5793 \text{ [/day]} \\
 &= 5.79 \text{ [/day/kg]}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

このように、中性子によるバックグラウンド事象頻度は非常に高いと期待される。そのため、例えば遮蔽材や減速材を用いた、低バックグラウンド化が強く要請される。

第6章

結論

中性子は地下素粒子実験において、重要なバックグラウンドとなる可能性がある。本研究では、神岡坑内 KamLAND エリアでの環境中性子フラックス測定を、 ^3He 比例計数管を用いて行なった。 ^3He 比例計数管が高い感度を持つ熱中性子の測定に加えて、減速材を比例計数管周りに取り付けることで熱以外中性子の測定も行なった。

先行研究で得られた中性子エネルギースペクトルを使用し、神岡坑内 KamLAND 第二純化エリアにおける中性子フラックスは以下の値を得た。

- 熱中性子： $(2.30 \pm 0.05) \times 10^{-6} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$
- 熱以外中性子： $(4.56 \pm 0.09) \times 10^{-6} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$

本研究の結果を先行研究 [3,6] との結果と比較すると、オーダーは一致していたがファクターによる違いが見られた。この違いは、測定場所の違い、減速材を使ったかなどの測定方法の違いが要因と考えられる。

本研究で得られた中性子フラックスを用いて、液体キセノンを用いた泡箱実験における中性子バックグラウンドを見積った。見積られたバックグラウンド事象頻度は非常に大きく、例えば減速材や遮蔽材などを用いた、低バックグラウンド化が必要であることを示した。

謝辞

本論文の執筆にあたって、多くの方々より多大なるお力添えを賜りました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

はじめに、指導教官である細川さんに心から感謝申し上げます。研究について何も知らなかった私に研究に対する心構えや発表練習、私の拙いスライド・論文の添削、神岡での生活など、様々なことを一からご指導していただきました。

また大阪大学の水越さんには、検出器の使い方や解析方法などを丁寧に教えていただきました。一学年上とは思えないほど豊富な知識量に、いつも驚いていました。少しでも追いつけるように頑張りたいと思います。

所属研究室であるニュートリノ科学研究センターの先生方には、ミーティングの際に様々なご指摘やご助言をいただきました。ご指摘によって私の理解が不十分である点が判明したり、質問に答えられなかった時にご助言をいただいたことにより、本研究への理解が深まりました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 物理学辞典編集委員会、”改訂版 物理学辞典”、培風館、1996年
- [2] 帝釋稜介、”方向に感度のある暗黒物質探索実験におけるバックグラウンドの研究”、神戸大学修士論文 (2017)
- [3] Glenn F. Knoll、”Radiation Detection and Measurement 4th Edition”、Wiley、2010年
- [4] K. Mizukoshi et al、”Ambient neutron measurement in an underground laboratory at the Kamioka Observatory”、arXiv:1803.09757v1 (2018)
- [5] 鈴木優飛、”神岡地下実験室における液体シンチレータを用いた環境中性子測定”、早稲田大学修士論文 (2017)
- [6] 南野彰宏、”XMASS 実験、100kg 液体 Xe 検出器の性能評価と XMASS 実験、100kg 液体 Xe 検出器の性能評価と中性子バックグラウンドの研究”、東京大学修士論文 (2004)