

地下素核実験のための中性子測定コンソーシアム

早稲田大学 理工学術院 理工学研究所

田中 雅士

masashi.tanaka@aoni.waseda.jp

神戸大学 大学院理学研究科物理学専攻

帝釋 稜介

158s113s@stu.kobe-u.ac.jp

早稲田大学 大学院先進理工学研究所

鈴木 優飛

yuto@kylab.sci.waseda.ac.jp

名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 F 研究室

吉本 雅浩

yoshimoto@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

2017 年 (平成 29 年) 3 月 10 日

1 中性子測定コンソーシアムとは

1.1 研究背景と設立経緯

大深度地下実験施設のような極低バックグラウンド環境下での稀事象探索実験（暗黒物質，2重ベータ崩壊など）において環境中性子は主要な背景事象源のひとつであり，そのフラックス，エネルギー分布，年変化などの時間依存性，飛来方向等の詳細な理解が探索感度向上のためには重要となる。中性子はそのエネルギーにより細かく分類されるが，本稿においては，運動エネルギーが 0.5 eV 以下のものを「熱中性子」，それ以上のエネルギーを持つものを「熱以外の中性子」，その中でもおよそ 1 MeV 以上のものを「高速中性子」として区別する。例えば暗黒物質探索実験においては，暗黒物質と標的原子核 (Ar, Xe, F, etc) との弾性散乱事象を捉えるが，高速中性子は暗黒物質同様に標的原子核と弾性散乱するため背景事象となり得る。また，二重ベータ崩壊探索実験においては，熱中性子と岩盤中の原子核との (n, γ) 反応により信号領域エネルギーを持つ γ 線が生成され背景事象となりうる。中性子測定コンソーシアム (チソコ) は実験グループを跨ぎ測定技術・機材等を共有し，測定手法を確立したうえで，多地点・長期間の測定を行いその結果を公表・共有することを目的としている。現在，5つの実験グループ (ANKOK, CANDLES, NEWAGE, NEWSdm, XMASS) から約 15 人が参加し，4種類の測定を進めている。

本コンソーシアムは平成 26 年度より開始した新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」の B02 班「低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究」に端を発している [1]。B02 班に参画している神戸大，名古屋大，早稲田大はそれぞれが小規模の暗黒物質直接探索実験を主導しており，おおよそ 20 名の学生と 4 名の若手スタッフ (30~40 代前半) が活発に研究を進めている。このような環境において，学生同士が自発的に集まって研究会を行おうという雰囲気が出てくるのは必然であり，学生主体の第一回 B02 班若手研究会が 2014 年 8 月に神戸にて行われた (図 1 上)。

学生同士の親交も進んだ 2015 年 5 月の第 3 回若手研究会では，単なる仲良しクラブ活動にとどまらず実質的な研究につながるようなトピックスを選び集中的に勉強・議論しようということとなり，選ばれたのが中性子であった。学生による自身の測定結果発表や論文輪講に加え，数名の講師を迎え集中的に中性子背景事象について議論を行った。特に京都大学 (当時) の南野彰宏氏の講演では，2004 年に行った神岡地下実験施設における ^3He 計数管を用いた中性子測定について詳しく，失敗談や本当はやりたかったが種々制限により果せなかった測定等についてもお話いただいた。

ご存知の通り，神岡地下実験施設では多くのグループが実験を遂行しており，個々のグループの最終的な物理解析結果においては，環境中性子起因の背景事象の見積



図 1: 第一回若手研究会における集合写真 (上), および第三回若手研究会における懇親会 (下)

もりを必要に応じて行っている。しかし共用出来る坑内の中性子測定結果は、この 2004 年の南野氏の測定および、さらに 10 年遡る 1994 年の大谷航氏 (当時東大葦輪研) の 2 修論, 通称「南野修論」[2] および「大谷修論」[3] のみというのが現状であった。

このような背景から、研究会に集まった我々が協力していくことにより、より良い測定を行うことが出来るのではないかという意識が参加者の間に共有され、その夜に三宮のピアガーデンで行われた懇親会にて、神戸大の身内賢太郎氏を名付親として中性子測定コンソーシアムが発足した (図 1 下)。略称の「チソコ」は地底と綴ることができ、地下実験施設における中性子測定という意味合いも込められている。

その後、同じ新学術に参加して同様の測定の可能性を模索していた、CANDLES 実験 (A02) の吉田斉氏と XMASS 実験 (B01) の竹田敦氏にも参加いただき、若手 (主に学生) 発の領域全体に広がる研究活動ということで新学術執行部からも認知いただいて現在鋭意種々測定を計画・遂行している。参考までに、発足以来 1 年半ほどの間に関連する修士論文が 4 編 [4, 5, 6, 7], および 11 の日本物理学会講演を行っている。

1.2 現状のアクティビティ

図 2 にあるように、本コンソーシアムが発足した 2015 年以前、神岡地下実験施設における中性子測定は先に述べた ^3He を用いた大谷修論、南野修論に加えて、2002

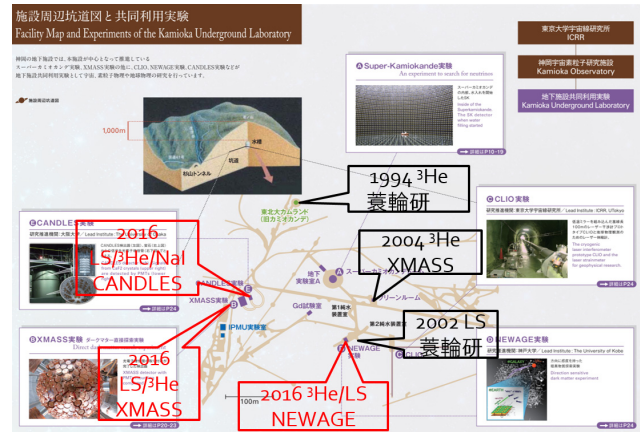


図 2: 神岡地下実験施設における中性子測定のまとめ

年に葦輪研により行われた液体シンチレータを用いた測定 (非公開) の計 3 測定のみであった。現在、本コンソーシアムでは神岡実験施設の中でも NEWAGE 実験が設置されている Lab-B, XMASS 実験が設置されている Lab-C, CANDLES 実験が設置されている Lab-D の 3 箇所で測定を進めている。また、名古屋大学では、長年培った原子核乾板の技術を活かして中性子検出に特化した原子核乾板を新たに開発し、地上及び地下に於ける環境中中性子測定を進めている。

これら測定は現在進行形で行われておりまだ最終結果に至ってはいないが、本稿ではいくつかの測定の現状と展望について報告させていただく。

2 神岡 Lab-B における ^3He 比例計数管を用いた環境中性子フラックスの測定

2.1 ^3He 比例計数管

^3He は熱中性子を捕獲して、陽子と三重水素原子核 (トリトン) に崩壊する ($^3\text{He} + n \rightarrow p + T$)。この反応の断面積は非常に大きく (例えば速度 2189 m/s では 5333 barn), ^3He 比例係数管は中性子測定に広く用いられている。陽子とトリトンは、それぞれ 573 keV と 191 keV の運動エネルギーを持って生成され (Q 値は 764 keV), 比例計数管内で ^3He ガスをイオン化させながらエネルギーを失う際に生成された電子が、陽極線周りの電場で増幅され電気信号として読み出される。

本研究で用いた ^3He 比例計数管 (Reuter-Stokes 社モデル番号 P4-1618-203) は 10 気圧の ^3He が封入しており、直径 5.18 cm, 全長 38 cm で、動作電圧 1300 V である (図 3)。データ取得は PHADC (豊伸電子 v006) を用いて行った。

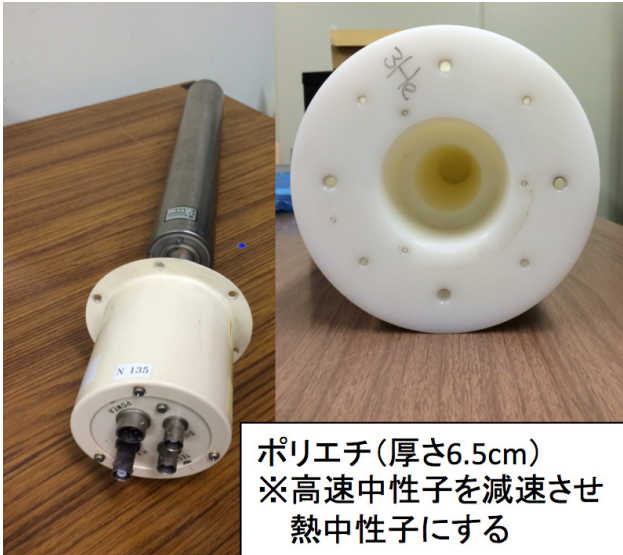


図 3: ^3He 比例計数管とポリエチレンシールド

2.2 事象選別効率の見積もり

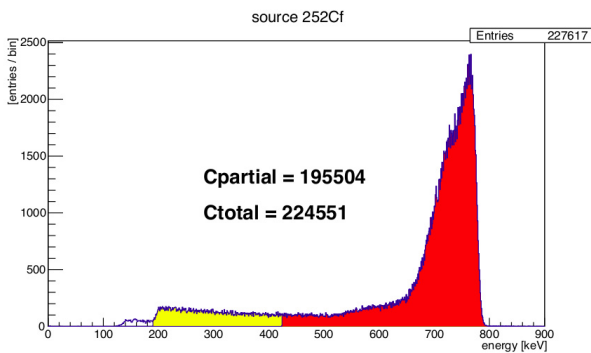


図 4: ^{252}Cf を用いて取得したエネルギースペクトル

^{252}Cf 線源を用いて取得したエネルギースペクトルを図 4 に示す。図の右側のピークが全 Q 値 764 keV に相当するが、比例計数管内でエネルギーを落としきらないイベントが 200 keV のあたりまで広がっている。本研究では、189.9 keV から 843.8 keV までを中性子信号領域 (total) と定義した。線源データでは問題にならないが、環境中性子データの低エネルギー領域では外部放射線や回路由来のバックグラウンドが無視できなくなる。そのため、S/N のよい高エネルギー領域 (partial) を 423.9 keV から 843.8 keV と定義し、この領域のイベント数 C_{partial} を ^{252}Cf を用いて求めた事象選別効率 $\epsilon = C_{\text{partial}}/C_{\text{total}}$ で割ることにより total 領域のイベント数 C_{total} を評価した。また、 ϵ および測定時間 T_{live} を用いて、式 1 のように単位時間あたり中性子イベント数 $R[\text{ns}^{-1}]$ を算出した。

$$R[\text{ns}^{-1}] = \frac{C_{\text{total}}}{T_{\text{live}}} = \frac{C_{\text{partial}}}{\epsilon \times T_{\text{live}}} \quad (1)$$

2.3 測定

測定は東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室 B (Lab-B) で行った。本研究では、先行研究 [2, 3] にならい、中性子をエネルギーにより熱中性子 (0.5 eV 以下) と、熱以外中性子 (0.5 eV 以上) に区分して測定を行った。熱以外中性子に対しては、減速剤として厚さ 6.5 cm の円筒型ポリエチレンシールドを用意し (図 3)、 ^3He 比例計数管を内部に挿入して測定を行った。これらの測定から得られたエネルギースペクトルを図 5 に、結果を表 1 にまとめる。 ϵ は減速材ありと減速材なしの両実験でそれぞれ決定した。

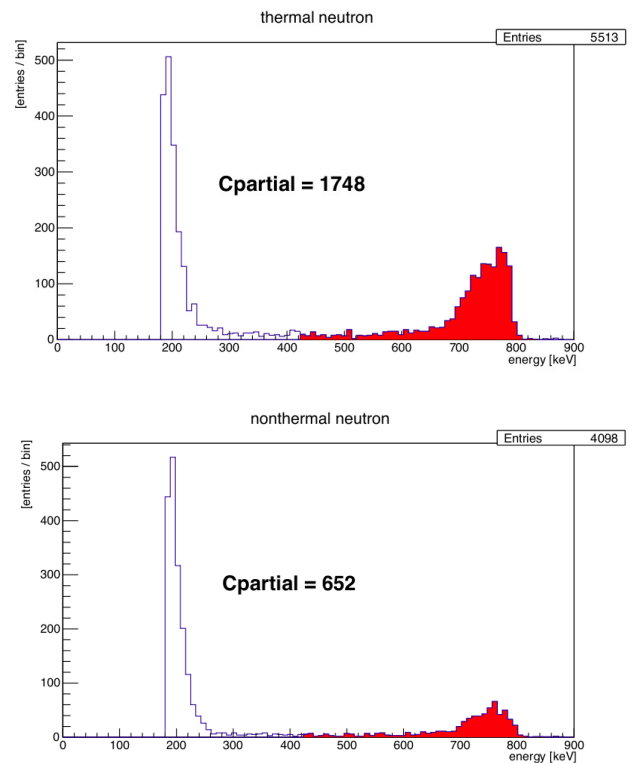


図 5: 神岡地下で測定した ^3He 比例計数管のエネルギースペクトル。上図は減速材なし、下図は減速材ありでの測定結果。

	減速材なし	減速材あり
$T_{\text{live}}[\text{days}]$	15.70	15.88
$C_{\text{partial}}[\text{counts}]$	1748	652
ϵ	0.87	0.87
$R[\text{ns}^{-1}]$	1.47×10^{-3}	5.34×10^{-4}

表 1: 神岡地下での測定結果

2.4 シミュレーションによる較正係数の見積もり

測定値 R から中性子フラックスを求めるにあたり、先行研究では検出器データシートの較正計数を用いているが、本研究ではデータシートの入手がかなわなかった。そのため、シミュレーション (Geant4 および PHITS [9]) を用いて較正係数の見積もりを行った。発生中性子のエネルギースペクトルは 1.0×10^{-3} eV から 0.2 eV をボルツマン分布、0.2 eV から 10 MeV では $1/E$ を仮定し、全方向から等方的に検出器に中性子を入射させた。このシミュレーションで発生させた中性子のフラックス Φ_s [$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] と ^3He 比例計数管での反応数 R_s [ns^{-1}] を評価することで、変換係数 α を求めた。

$$\alpha [(\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1})/(\text{ns}^{-1})] = \frac{\Phi_s}{R_s} \quad (2)$$

シミュレーションで得られた較正係数 α を表 2 にまとめる。

α	減速材なし	減速材あり
Geant4	9.32×10^{-3}	3.30×10^{-2}
PHITS	9.38×10^{-3}	3.88×10^{-2}

表 2: シミュレーションで得られた較正係数

2.5 結果

シミュレーションで得られた較正係数 α を神岡での測定結果に適用した結果および、先行研究 [2, 3] の結果を表 3 にまとめる。単位は全て [$\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] である。南野修論については統計誤差を表記、本研究については第一項に統計誤差、第二項は系統誤差を表記した。熱中性子のフラックス、熱以外中性子フラックスともに誤差の範囲で南野修論の結果と一致する結果が得られた。

	熱中性子
大谷修論 [3]	1.4×10^{-5}
南野修論 [2]	$8.26 \pm 0.58 \times 10^{-6}$
本研究	$9.48 \pm 0.23 \begin{smallmatrix} +2.03 \\ -3.20 \end{smallmatrix} \times 10^{-6}$
	熱以外中性子
大谷修論 [3]	2.8×10^{-5}
南野修論 [2]	$1.15 \pm 0.12 \times 10^{-5}$
本研究	$5.47 \pm 0.21 \begin{smallmatrix} +7.30 \\ -5.04 \end{smallmatrix} \times 10^{-6}$

表 3: 測定中性子フラックスおよび先行研究との比較

本研究の系統誤差に関しては、増幅率の変化、Geant4 と PHITS の違い、シミュレーションで仮定した

中性子エネルギースペクトルの不定性、減速材ありとなしから得られる総中性子フラックスの違い等を考慮したが、その中でも、エネルギースペクトルに起因する誤差がもっとも大きくなっている。積分フラックスの測定においても、エネルギースペクトルの理解が重要であると言える。

今後は背景事象の理解や、ポリエチレンの厚さを変化させることに高速中性子エネルギー分布の測定等をすすめたうえで、多地点・長期間の測定に取り組んでいく予定である。

3 神岡 Lab-B における液体シンチレータを用いた環境中性子測定

3.1 有機液体シンチレータ検出器

中性子が有機液体シンチレータ中に入射すると、シンチレータ中に含まれる水素や炭素原子核と散乱しその反跳エネルギーはシンチレーション光に変化されて光電子増倍管で検出される。液体シンチレータは一般に γ 線にも感度を持つが、今回の環境中性子測定で用いた Saint-Gobain 社製の液体シンチレータ BC501A はキシレンベースの液体シンチレータで γ 線と中性子の PSD (Pulse Shape Discrimination) 能力に優れている。

$$N(E_R) = \int R(E_R, E) \Phi(E) dE \quad (3)$$

式 3 に示すように、液体シンチレータは一次的には中性子によって反跳された原子核のエネルギー E_R のスペクトル $N(E_R)$ を測定することになるが、応答関数 $R(E_R, E)$ を理解することによって中性子そのもののエネルギー E のスペクトル $\Phi(E)$ を算出 (Unfolding) することができる。神岡地下における環境中性子エネルギースペクトルの算出は未だに行われていないが、多くの実験で中性子背景事象理解のために求められているのが現状である。本測定は、神岡地下での環境中性子スペクトルの算出を目標としており、今回はその現状と将来の展望について紹介する。

3.2 測定セットアップと較正

今回中性子測定に用いた液体シンチレータ検出器は大阪大学 RCNP よりお借りしたもので、直径約 30 cm、高さ約 10 cm、の円筒状のアルミ容器内に 5L (4.37kg) の BC501A が封入されており、容器のガラス窓に PMT (HAMAMATSU H6527) がマウントされ一体となっている (図 6)。データ取得は 100 MS/s の FADC (CAEN V1724) を用いて行った。

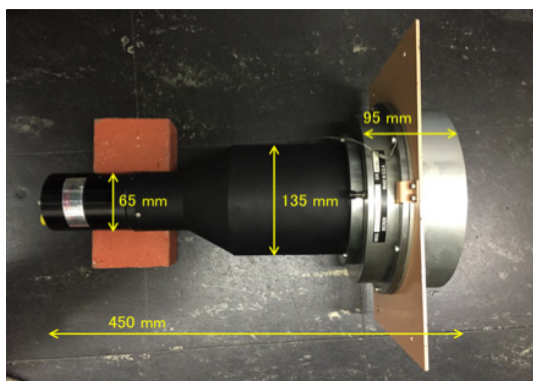


図 6: 液体シンチレータ検出器の写真

検出器の較正に関しては、 ^{137}Cs のバックスキャッターピークにより電子反跳エネルギー (keVee, MeVee) に規格化してエネルギー較正をしたうえで、 ^{252}Cf を用いて、PSDによる n/γ 分離能を検証した。図7は横軸に較正されたエネルギー、縦軸はPSDパラメータであるSlow/Total (全収集光量に対する $t > 100$ nsの遅い発光成分の比)をとった ^{252}Cf に対する応答である。 γ 線と中性子の2つのバンドがはっきりと確認できるが、この2つのバンドをエネルギー領域に区切ってそれぞれガウス分布でフィットすることにより中性子領域を定義した。

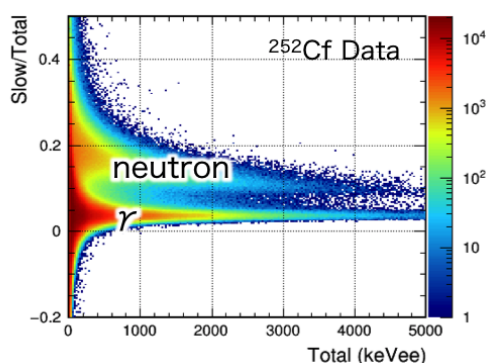


図 7: 液シン検出器の ^{252}Cf に対する応答

3.3 神岡地下での測定

測定セットアップは液体シンチレータ検出器をはじめ、その他の測定機器も含めて移動が容易なセットアップになっており、神岡地下実験施設の他にも早稲田大学構内、名古屋大学や岐阜県瑞浪市東濃地科学センターなどの様々な場所で環境中性子測定を行ってきた。神岡地下実験施設では地上に比べて中性子の量がおよそ1/1000になるが γ 線の量は地上と大きな差はないことが知られている。そこで中性子のS/Nをあげるために、液体シンチレータの周囲を5 cmの鉛ブロックで囲んで γ 線を遮蔽した(図8)。



図 8: 神岡地下実験施設 Lab-B に設置された鉛シールド

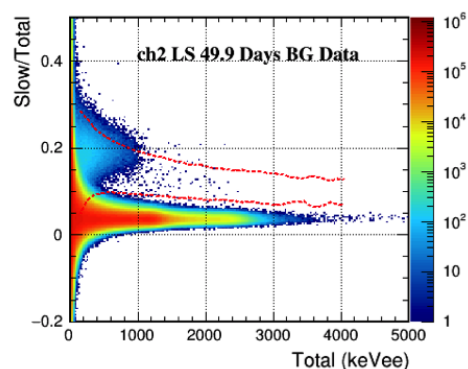


図 9: 神岡地下実験施設 Lab-B における約 50 日分の液体シンチレータ測定結果

神岡地下実験施設 Lab-B において、約 50 日間の環境中性子測定を行った結果を図9に示す。点線は ^{252}Cf により得られた 2σ の中性子信号領域に相当する。1 MeVee以上では中性子領域内に環境中性子と思われるイベントが観測されているが、低エネルギー領域では中性子及び γ では説明できない成分が存在するように見える。この成分についてはBi-Poの遅延同時計測などにより検出器部材(おそらくアルミ容器)に含まれるU/Th系列元素の α 線であることが確認された。図10に中性子、 α および γ の3成分で測定データをフィットした結果を示す。早稲田大学地上で測定したデータと比較すると、神岡地下での測定結果は地上での測定結果に比べておよそ1/1000になっている。また、700 keVee以下のエネルギー領域では α 線に埋もれてしまうため、より内部放射性物質の少ない検出器が必要となることが解った。

3.4 中性子エネルギースペクトルの算出

中性子エネルギースペクトルの算出には、検出器の応答関数 $R(E_R, E)$ の理解が必要となる。そこで ^{252}Cf を用いて図11のようなセットアップを組んで応答関数の測定を行った。 ^{252}Cf からは一回の崩壊で複数の γ および中性子が放出されるが、線源近くに設置したNaI検出

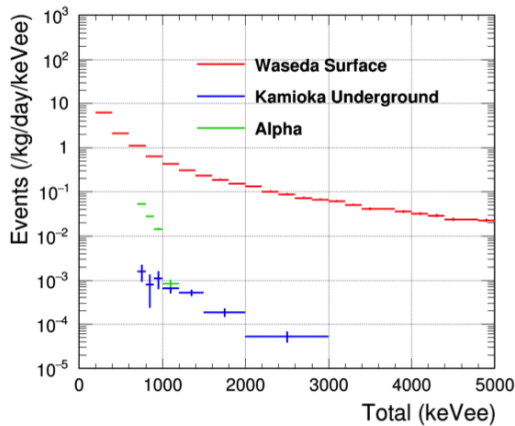


図 10: 液体シンチレータ測定により得られた反跳エネルギースペクトル

器の γ 信号と液シン検出器の中性子信号の時間差 (ToF) から中性子のエネルギーを算出できる。本稿では詳細を割愛するが、この ^{252}Cf の ToF を用いた測定と PHITS シミュレーション [9] を組み合わせることにより連続的な応答関数を算出した。得られた応答関数の一例 (中性子エネルギー 6 MeV 付近) を図 11 に示す。

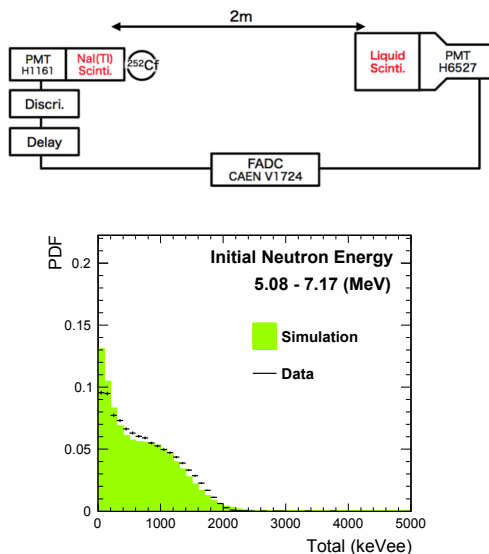


図 11: ^{252}Cf ToF 測定セットアップ (上) と得られた応答関数 (下)

解析手法の検証として、この応答関数を用いて GRAVEL Method[10] により、 ^{252}Cf の測定スペクトルから真の中性子エネルギースペクトルを算出したものを図 12 に示す。Gravel Method は応答関数および測定データが正しく評価されていれば、任意の初期関数を設定し、その後特定の式に従う iteration により徐々に真のスペクトルに近づいていくものである。実際に、よく知られた ^{252}Cf のエネルギースペクトル (ENDF ライブラリ) に Unfolding 結果が近づいていくことが見て取

れる。

以上のことから、将来的には U/Th 系列の含有量の少ない部材を用いて作られた検出器を用いて測定を行い、低エネルギー領域も含めた反跳スペクトルを得ることができれば、Unfolding を用いて神岡地下実験施設における環境中性子のエネルギースペクトルを算出することができると思われる。

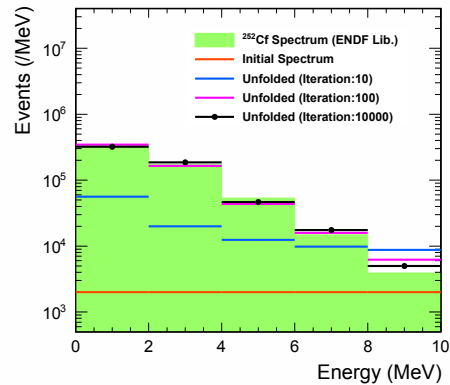


図 12: GRAVEL Method を用いて得られた ^{252}Cf 中性子エネルギースペクトル

4 原子核乾板を用いた環境中性子測定

原子核乾板は、サブミクロンの空間分解能をもつ 3 次元飛跡検出器である。近年では、OPERA 実験において、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ アピランスの実証に貢献した [11]。また、超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker) の開発により [12][13]、暗黒物質からのサブミクロンの飛跡を検出しその到来方向を検出する NEWSdm 実験にも応用されつつある [14]。

原子核乾板は、ゼラチンに臭化銀結晶 (通常、直径約 200 nm) を分散した構造を持っている。荷電粒子が臭化銀結晶を通過すると潜像核と呼ばれる数 nm の銀の塊ができ、現像処理によって顕微鏡で観察可能なグレインと呼ばれる銀粒子になる。このグレインは臭化銀結晶の直径に相当する位置精度を持っている。

高速中性子は、反跳原子核の飛程 (エネルギー) や角度分布から、統計的な手法によりフラックスや到来方向を再構成することができる。しかし、反跳原子核の飛程と角度を同時に得られる検出器は、シンチレーティングファイバートラッカーやガス検出器、原子核乾板などに限られる。この中で原子核乾板は、その高い空間分解能から $O(1 \text{ MeV})$ の中性子からの反跳陽子飛跡の飛程と角度を同時に得ることが期待される。また、標的質量を大

大きくすることが容易であり、地下環境における低フラックスの高速中性子測定にも応用が可能である。

4.1 中性子検出用原子核乾板の開発

中性子からの反跳陽子の飛跡を効率的に得るための原子核乾板の開発を行った。通常、原子核乾板は最小電離粒子 (MIP) に感度を持つよう設計されているが、より短い反跳飛跡まで解析するためにはコンプトン電子による飛跡がバックグラウンドとなるため、感度を下げる必要がある。そこで、通常の原子核乾板で行われている金硫黄増感と呼ばれる増感処理を行わず、MIP に感度を持たない原子核乾板を使用することにした。しかし、この増感処理を行わないことで潜像核が時間経過によって失われてしまうフェーディング現象が発生したため、ハロゲンアセプター (HA) 増感を行うことで、MIP に感度を持たないまま、少なくとも1ヶ月間は読み取りに支障をきたすフェーディング現象が起きない原子核乾板を開発した。この原子核乾板で、反跳陽子の飛跡を顕微鏡で観察したときの画像を図 13 で示す。

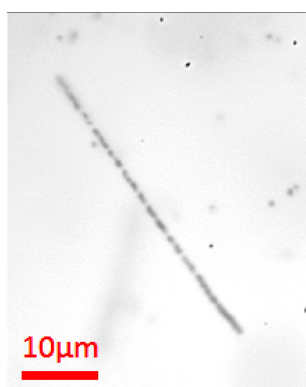


図 13: 反跳陽子飛跡の顕微鏡画像

反跳原子核の飛跡が中性子によるものであると特定するためには、飛跡の線分の両端が乳剤層の中で始まっていることが重要である。そこで、一般的に使用される乳剤厚 $50 \mu\text{m}$ の約2倍となる乳剤厚 $100 \mu\text{m}$ を採用した。乳剤層を厚くしたことによる飛跡の濃さの一様性の確保と、低ノイズ化を目的とし、現像液の温度を従来の20度から5度にし、現像時間を従来の25分から2時間に変更した。

4.2 自動飛跡読み取り

名古屋大学では、原子核乾板の読み取り速度の向上を目指した新型原子核乾板自動読み取り装置 HTS を開発している。現在、従来装置の70倍となる $0.5 \text{ m}^2/\text{h}$ の読み取り速度を達成し、年間 500 m^2 の原子核乾板の読み

取りが可能である。 500 m^2 とは中性子測定用原子核乾板で 300 kg に相当する。通常、HTS は原子核乾板を貫通するような飛跡の読み取りに使用されるが、本研究において $O(10 \mu\text{m})$ の短い飛跡を検出するアルゴリズムを新たに実装した。

飛跡認識は、HTS で原子核乾板の乳剤層の断層映像を取得し、それを2次元平面に射影し、線分の両端の位置を測定する手法を採用した (図 14)。原子核乾板に ^{252}Cf から中性子と、それに付随するガンマ線を照射したときの読み取り応答を図 15 に示す。認識された飛跡部分の輝度の平均値は、乾板の現像や画像処理の条件により異なるが同一条件では各飛跡のエネルギー損失量と正の相関があり、これを相対輝度値と呼ぶ。ガンマ線やランダムに発生してしまうグレインによる飛跡の除去を行うために、飛程が $20 \mu\text{m}$ かつ相対輝度値が11以上をシグナル領域と定義した。このとき、反跳陽子の認識効率は、2次元平面に射影したときの飛跡長が $20\text{--}30 \mu\text{m}$ で50%以上、 $30 \mu\text{m}$ 以上で90%以上となった。

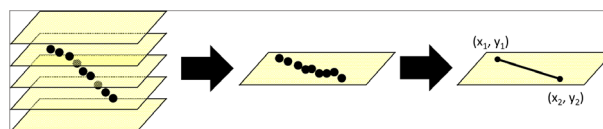


図 14: 反跳陽子飛跡の読み取り手法

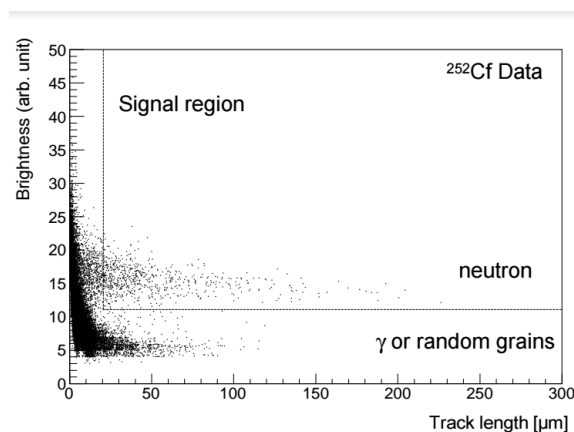


図 15: 原子核乾板の ^{252}Cf に対する読み取り応答

4.3 実験

4.3.1 中性子のエネルギー分解能測定

原子核乾板による中性子のエネルギー分解能測定のために、単色中性子を用いて測定を行った。使用した中性子のエネルギーは原子力機構の核融合中性子源 FNS の 2.8 MeV と産総研の 4.9 MeV である。原子核乾板中に記録された $10 \mu\text{m}$ 以上の飛跡に対し、中性子の入射軸に

対する角度と飛程を測定した。飛跡を反跳陽子と仮定し、物質中のイオン飛程計算プログラム SRIM[15] から得た飛程とエネルギーの関係により反跳陽子のエネルギー E_p を求め、角度 ϕ から $E_n = E_p / \cos^2 \phi$ により中性子のエネルギー E_n を求めた。中性子のエネルギーはそれぞれ 2.7 MeV, 4.8 MeV と再構成された。また、中性子のエネルギー分布から、エネルギー分解能は FWHM でそれぞれ 0.6 MeV, 0.8 MeV となった。

4.3.2 ガンマ線の感度評価

開発した原子核乾板のガンマ線に対する感度評価を行った。ガンマ線源は 2.9 MBq の ^{241}Am を使い、100 μm 厚の原子核乾板に、 $10^8 \gamma \cdot \text{cm}^{-2}$ の強度で照射を行った。

25 mm^2 の面積を HTS で読み取ったところ、上記のシグナル領域に入ったのは 2 イベントであった。最終的に長期間の実験を計画しているイタリア・グランサツソ研究所の地下環境のガンマ線フラックスは $0.3 \gamma \cdot \text{cm}^{-2}$ であり、今回の照射は約 10 年分に相当する。通常の照射環境と照射期間であればガンマ線はバックグラウンドにならないことが示された。

4.3.3 地上の中性子フラックス測定

地上の環境高速中性子の測定を行った。名古屋大学東山キャンパスの理学部 C 館の屋上に原子核乾板を地面に対して平行に設置し、18 日間と 33 日間測定を行った。また、測定を行わず製造・HA 増感後すぐに現像したリファレンスサンプルも作成した。

これらのサンプルのそれぞれ 36 cm^2 の面積を読み取り得られた飛跡数は、18 日間が 410 ± 50 本、33 日間が 690 ± 80 本であった。誤差は読み取りの認識効率に 10%、乳剤層の厚みのむらに 6% を考慮した。またリファレンスサンプルの結果は 32 本であった。地上の中性子スペクトル及びフラックスは EXPACS[16] を使い、Geant4 を用いたシミュレーションを行ったところ、期待される飛跡本数 N は照射期間 t 日に対し $N = 20t$ と得られた。以上の結果より、測定値はシミュレーションの値と矛盾しないことが分かった。

4.4 結論

単色中性子を用いた評価により、原子核乾板の中性子のエネルギー分解能は 2.8–4.9 MeV に対して 20% であり、反跳陽子飛跡の角度と飛程 (エネルギー) により中性子のエネルギーを再構成できることを示した。ガンマ線を照射した原子核乾板の読み取りを行い、ガンマ線に対する感度を評価した。地上で高速中性子の測定を行っ

たところ、測定値はシミュレーションに対し矛盾がないことを確認した。

今後、高速中性子の到来方向を測定する手法の開発を進めていく。また、測定の再現性を確認した上で、グランサツソ研究所などの地下環境において高速中性子の測定を行う予定である。年 4 回交換し計 100 kg の原子核乾板を用いれば、地下環境でも数% の中性子フラックスの季節変動を測定できると期待される。

5 まとめと今後の展望

本稿では、3 種類の検出器 (^3He 、液体シンチレータ、原子核乾板) による測定を紹介したが、表 4 にまとめたようにこれら検出器にはそれぞれ利点と欠点がある。例えば、 ^3He 比例計数管は熱中性子測定に特化した検出器であり、低フラックスの環境においても良い S/N での測定が可能であるが、熱以外の中性子測定への、感度の低さや較正方法の複雑さといった欠点を持つ。液体シンチレータは高速中性子のエネルギー分布に対する感度などの利点がある一方、内部背景事象等の削減という課題が残る。原子核乾板は、高速中性子に関しては飛来方向への感度も含めてその性能を最大限に発揮できれば、まさに理想の検出器といえるが検出器開発、解析技術ともに非常にハードルの高い検出器である。本コンソーシアムにおいては、複数の検出器を同時に運用することによりこれらの利点・欠点を補いながら測定を進めている。

	^3He	液体シンチ	原子核乾板
熱中性子	◎	×	△
高速中性子	△	◎	◎
標的原子核	^3He	H	H
エネルギー分布	×	○	○
方向感度	×	×	◎
n/ γ 分離	◎	△	○
内部 BG	◎	△	○
測定の容易さ	◎	◎	×

表 4: 中性子検出器の比較

例として、 ^3He 検出器と液体シンチレータで測定された地上の環境高速中性子エネルギースペクトルの比較を図 16 に示す。 ^3He については、EXPACS[16] のエネルギー分布を仮定してフラックスのスケールを神戸大学構内での測定により決定したもの、液体シンチレータについては早稲田大学構内での測定データを Unfolding したものとなる。環境中性子は同じ地上でも周囲の環境 (標高、建物内外等) により特に低エネルギーでは大きく異なることが知られてるため、ざっくりとした比較ではあるが、少なくとも 2 MeV 以上ではおおよそ 2 倍の範囲

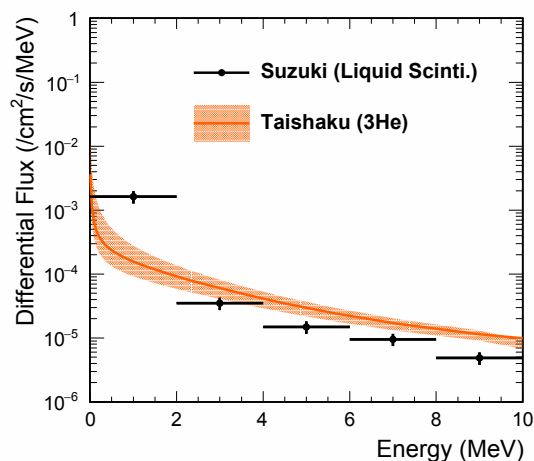


図 16: 地上高速中性子エネルギースペクトル測定結果。ヒストグラムが液体シンチレータ，線が ^3He による測定結果を示す。

内では一致を見せている。今後はこの様なクロスチェックについてもしっかりと進めていく予定である。具体的には、原子核乾板測定をおこなった名古屋大学東山キャンパスの理学部 C 館の屋上にて 3 検出器の同地点での測定，同一線源 (^{252}Cf や中性子ビーム) での較正等を検討している。

今後の活動としては、引き続きフラックスの小さい地下環境における中性子測定手法（エネルギー分布や飛来方向を含む）を確立したうえで、できる限り多地点・長時間のデータを取得し、結果を公表することを目指して研究を進めていく予定である。測定結果に興味のある方、測定手法に関するアイデアをお持ちの方は気軽に声をかけていただければ（メールアドレス: chisoko@list.waseda.jp）と考えている。

最後に、B02 班若手研究会では元気な学生達が生中性子測定コンソーシアムを越える二匹目のドジョウを虎視眈々とねらいながら日々励んでいるので、こちらの方も期待して見守っていただければ幸いである。

6 謝辞

長期間に渡り ^3He 比例計数管を貸していただいた KEK 放射線科学センター岸本祐二様ありがとうございました。液体シンチレータをお借りした大阪大学 RCNP、および測定に協力いただいた東濃地科学センターに感謝致します。原子核乾板実験に際して単色中性子源の使用に協力いただいた FNS 及び産総研に感謝致します。

参考文献

- [1] 新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」 <http://www.lowbg.org/ugnd/>
- [2] 南野彰宏, 2003 年度 東京大学修士論文
- [3] 大谷航, 1993 年度 東京大学修士論文
- [4] 帝釋稜介, 2016 年度 神戸大学修士論文
- [5] 鈴木優飛, 2016 年度 早稲田大学修士論文
- [6] 待井翔吾, 2015 年度 名古屋大学修士論文
- [7] 四ツ永直輝, 2016 年度 大阪大学修士論文
- [8] S. Agostinelli *et al.* [GEANT4 Collaboration], Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250 (2003).
- [9] T. Sato, *et. al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
- [10] Y. Chen *et al.*, Sci. China Phys. Mech. Astron. **57** (2014) 1885-1890
- [11] N. Agafonova *et al.*, Phys. Rev. Lett. **115**, no. 12, 121802 (2015).
- [12] M. Natsume *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **575**, 439 (2007).
- [13] T. Naka *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **718**, 519 (2013).
- [14] A. Aleksandrov *et al.*, arXiv:1604.04199 [astro-ph.IM].
- [15] J.F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B **268**, 1818 (2010).
- [16] T. Sato, PloS one 10.12, e0144679, (2015).