

MoMoTarO の ISS 搭載に向けた陽子照射試験と
軌道上でのバックグラウンドレートの推定

京都大学 宇宙線研究室 修士二年

前田涼太

2025 年 1 月 26 日

目次

第 1 章	月の水資源探査	3
1.1	近赤外分光による観測	4
1.2	中性子分光計による観測	8
1.3	その他の手法での月の水資源探査	11
第 2 章	MoMoTarO 計画	13
2.1	MoMoTarO 計画で目指すサイエンス	13
2.2	ISS での宇宙実証と期待できるサイエンス	16
2.3	MoMoTarO 搭載のシンチレータ	19
2.4	MoMoTarO-ISS の構成	25
第 3 章	宇宙空間でのバックグラウンド	29
3.1	LEO でのバックグラウンド源	29
3.2	過去の検出器で推定もしくは測定されたバックグラウンドレート	32
第 4 章	陽子照射試験による放射線耐性検証	41
4.1	概要	41
4.2	照射前後の測定	41
4.3	照射前後の性能評価	46
4.4	放射性同位体の同定	56
第 5 章	Geant4 シミュレーション	67
5.1	セットアップ	67
5.2	解析結果	73
第 6 章	まとめと今後の展望	87
6.1	まとめ	87
6.2	今後の展望	87
AppendixA	陽子照射試験の図表	89
参考文献		99

概要

NASA のアルテミス計画 [1] など、現在盛り上がりを見せている有人月面開発において、生命維持やロケットの燃料の生成などに重要な役割を果たすのが、月の水資源である。我々は、中性子とガンマ線の放射線測定を軸とした、月面・月周辺での多分野連携プロジェクトの Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) を計画している。MoMoTarO 計画では、月面から漏出する中性子を用いた水資源探査を中心とした複数のサイエンスを、1.0~1.5 U (Unit: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) サイズのキューブサットサイズの検出器で行うことを目指している。

そして月面での運用に先駆けて、2026 年度に MoMoTarO を国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部に設置し、宇宙実証を行うことが決定した。加えて、ISS 上での太陽中性子やガンマ線バーストの観測も目指している。

我々は、MoMoTarO に搭載予定の ^6Li を添加したプラスチックシンチレータ (EJ-270) と GAGG (Ce) シンチレータの二種類のシンチレータに、200 MeV の陽子を 0.1、1、10 krad 照射する試験を行い、放射線耐性を調べた。それぞれ ISS 軌道上での 0.1、1、10 年分の線量に相当する。光量の減少は最大でも 20% 程度であり、エネルギー分解能の低下は最大でも 60~70% 程度であるという結果を得た。また、これらの性能劣化について、照射から数日後には照射前の水準に回復することが確認できた。加えて、核反応により生じる放射性同位体を、EJ-270 では ^7Be など 3 種類、GAGG では ^{153}Gd など 12 種類を特定した。EJ-270 の陽子照射試験は先行研究ではなく、照射後 1 日でバックグラウンドレートが元の水準に戻ることを初めて示せた。また、GAGG の陽子照射試験の先行研究 [2] では扱っていない長寿命成分を特定した。

さらに、簡略化した MoMoTarO のモデルに対して、ISS 軌道上でのバックグラウンド環境をモデル化した種々の粒子を、南大西洋異常帯 (SAA) とそれ以外に分けて照射する Geant4 シミュレーションを行った。バックグラウンドレートは、SAA では GAGG が単位体積あたり約 55 counts/s/cm³、複数ある EJ-270 の平均が約 8.8 counts/s/cm³ となった。SAA 以外では銀河宇宙線由来の陽子が支配的であり、GAGG が約 6.5 counts/s/cm³、EJ-270 の平均が約 2.7 counts/s/cm³ となった。さらに、SAA 上で生じた放射性同位体の崩壊による放射化バックグラウンドのカウントレートは、GAGG が約 0.75 counts/s/cm³、EJ-270 の平均が約 0.11 counts/s/cm³ となった。MoMoTarO 全体では SAA で約 5500 counts/s、SAA 以外で約 1200 counts/s、放射化バックグラウンドは約 73 counts/s と見積もられた。ISS から地上へのテレメトリ量は毎秒 1800 word と限られているため、テレメトリパケットの設計条件が今回の結果で示された。また、サイエンスデータを取得する際のバックグラウンド、観測可能性の見積もりにも大きく寄与する。

第 1 章

月の水資源探査

1969 年 7 月 20 日午後 10 時 56 分、ニール・アームストロングは、人類で初めて月面へと降り立った [3]。

その後 1969 年から 1972 年までの間に、アポロ 11 号からアポロ 17 号までの 6 つの宇宙船（アポロ 13 号を除く）が月面に着陸し、12 人の宇宙飛行士が月面を歩いた [4] が、それ以降有人の月探査は途絶えた。しかし現在、アメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration : NASA）はアルテミス計画 [1] において、再び人類を月に送り、月面と月周回軌道上に拠点を築くことを計画している。さらにその拠点を利用して有人の火星探査を行うことを視野に入れている。日本政府も、アルテミス計画に国際パートナーとして参画し、有人と圧ローバーの提供を検討している [5]。2022 年 11 月 21 日には、アルテミス計画の初号機となるオリオン宇宙船が、月の裏側を飛行して地球に帰還した。このオリオン宇宙船は、人間を運ぶ目的で開発された宇宙船として最も地球から遠い、268,563 マイル（約 43 万キロ）の地点を飛行した。その写真が図 1.0.1 である*1。このように現在、月面開発は世界的に大きな盛り上がりを見せている。

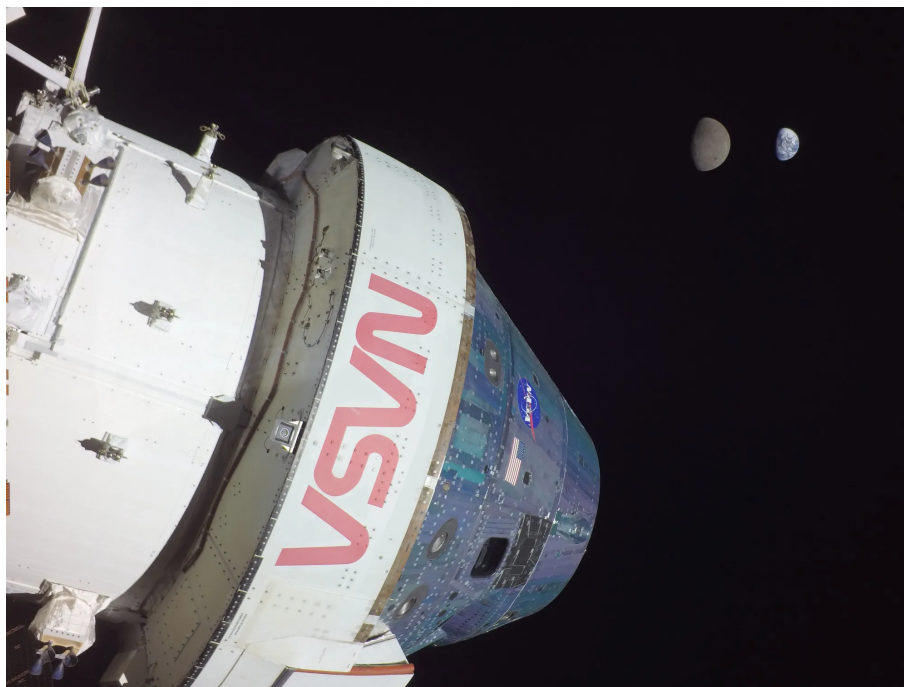


図 1.0.1: オリオン宇宙船から撮影した月と地球の写真。NASA のウェブサイトより引用。

*1 写真は <https://www.nasa.gov/humans-in-space/view-the-best-images-from-nasas-artemis-i-mission/> から引用。

こうした将来の有人月面開発において、人類の生命維持やロケットの燃料の生成などに極めて重要な役割を果たすのが、月の水資源である。月は自転軸の傾きが小さいため、極域などにできたクレーターは太陽光が入らない永久影と呼ばれる領域を持つ [6]。1961年に、原始の月からのガスの噴出や、彗星や小惑星の衝突によってもたらされた水などの揮発性物質が、永久影に貯蔵されている可能性が指摘された [7]。その後の数々の観測から、実際に月の極域、特に永久影には水資源が貯蔵されていることが指摘されてきた [8]。アルテミス計画でも、その第3段階である“Artemis III”において南極域への有人着陸を行う予定である。本章では、現在までに行われてきた主な月の水資源探査の方法と観測結果について述べる。

1.1 近赤外分光による観測

1.1.1 近赤外線による水資源探査の原理

近赤外分光とは、可視光域の長波長端（～750 nm）から赤外域の短波長端（～2500 nm）までの波長域における分光のことであり、主に光の吸収について扱う [9]。試料を透過または反射した光を分光し各波長における強度を計測することで、測定試料やその構成物質の構造解析や定量を行うことができる [6]。

水を含む物質においては、構造水や層間水、霜などの状態に対応する吸収が見られる。水に関連する主な吸収を表 1.1.1 に示す。また、この表に示した3つの振動パターンを図 1.1.1 に示す。月面からの赤外反射光を観測し、吸収の中心波長をみることで、月の水資源の有無のみならずその状態を知ることができる。ただし、観測できる深さは概ね数ミリメートルである [10]。

表 1.1.1: 赤外線領域における水に関連する主な吸収波長。尾崎幸洋、1997[9] の表 1 を改変。

吸収を示す波長 (μm)	対応する構造
2.2	OH の伸縮振動、Si-OH の偏角振動
2.3	metal-OH や OH の伸縮振動
2.5	H ₂ O の対称伸縮振動および偏角振動
2.72	OH の伸縮振動
2.77	H ₂ O と OH 基が水素結合を持った場合 (-OH... ^H OH) の伸縮振動
2.85	SiOH と OH 基が水素結合を持った場合 (-OH... ^H OSi) の伸縮振動
2.91–2.95	H ₂ O の対称・非対称伸縮振動
～3.1	H ₂ O の偏角振動

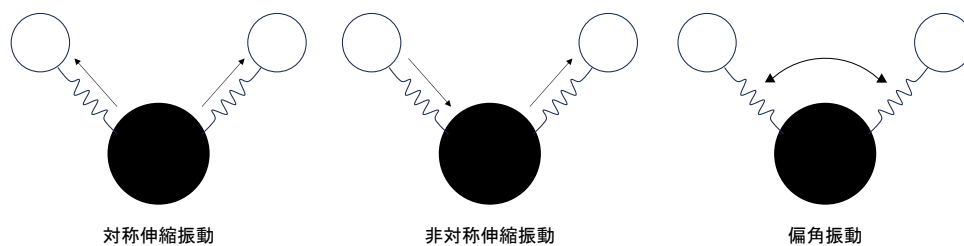


図 1.1.1: 水の振動パターン例 [9]。振動パターンや水素結合の有無により、吸収するエネルギーが異なる。

1.1.2 Visual and Infrared Mapping Spectrometer

Visible and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) は、1997年10月15日にNASAによって打ち上げられた土星探査機 Cassini に搭載された可視・赤外マッピング分光計である。可視光と赤外線を観測可能な二つの回折格子分光計で構成されており、0.3–5.1 μm の波長帯で撮像を行う [11]。

Clark (2009) [12] では、Cassini が1999年に月のそばを通過した際の VIMS による月面の観測から、水に対応する 3 μm の吸収と OH 基に対応する 2.8 μm の吸収が確認されたことを報告した。空間分解能は～175 km である。図 1.1.2 に、VIMS で取得した月面の赤外線スペクトルを示す。月の海のスペクトルには見られない 2.8 μm と 3 μm の吸収を、高地や南極域のスペクトルでは確認することができる。この論文では、これらのスペクトルは 10–1000 ppm の水の量に対応すると主張している。

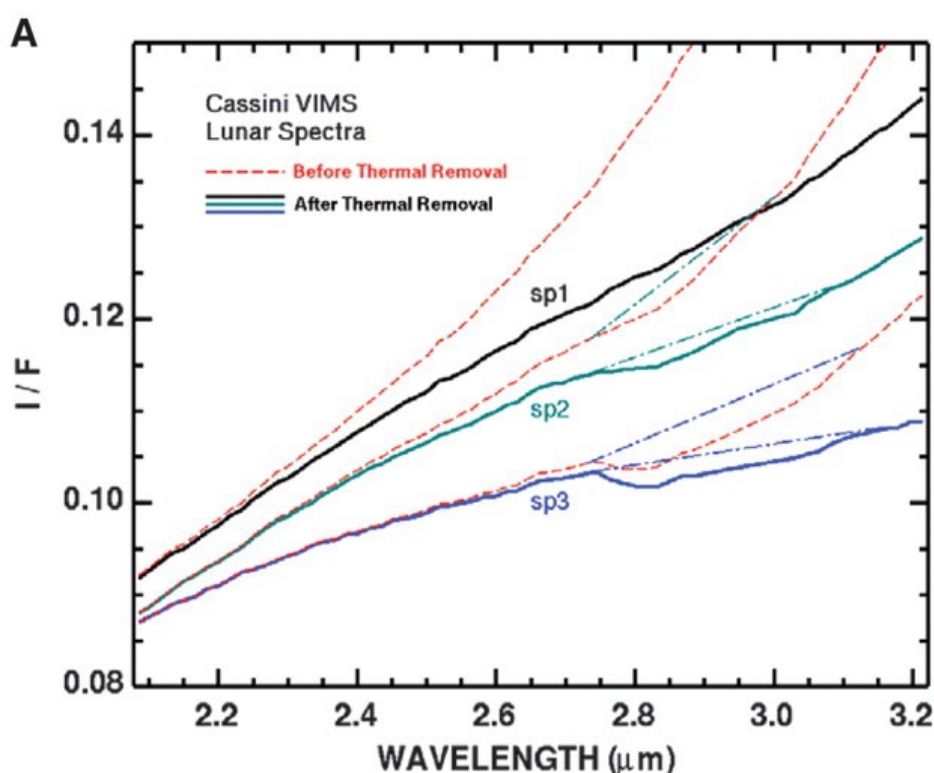


図 1.1.2: VIMS で取得した月面の赤外線スペクトル。Clark (2009) [12] の Fig.2A を抜粋している。赤い点線は熱放射を除く前のスペクトルを示している。sp1 は月の海（平原）の地域、sp2 は高地、sp3 は南極域のスペクトルをそれぞれ示している。

1.1.3 Moon Mineralogy Mapper

Moon Mineralogy Mapper (M^3) は、2008年10月22日にインド宇宙研究機関 (Indian Space Research Organization : ISRO) によって打ち上げられた月周回衛星 Chandrayaan-1 [13] に搭載された可視・赤外マッピング分光計である。VIMS と同様、可視光と赤外線を観測可能な二つの回折格子分光計で構成されており、0.42–3.0 μm の波長帯で撮像を行う [14]。Chandrayaan-1 の高度 100 km の軌道においては、140 m の空間分解能を持っており、70 m のさらに高い分解能に切り替えることも可能である。

Pieters et al. (2009) [15] では、M³ による観測から、水に対応する 3 μm の吸収が月の全域で観測されたことを報告している。図 1.1.3 に、M³ で取得した月面のスペクトルを示す。高緯度の地域ほど、水による赤外線吸収が強いことがわかる。この論文では、Lunar Prospector Neutron Spectrometer (LPNS、詳細は 1.2.2 節) の観測結果との比較も行っている。ゴールドシュミットクレーター (北緯 73.0 度、西経 3.8 度) においては、M³ では 3 μm の吸収が見られているにもかかわらず、LPNS では水素量が少ないという結果が出ている。これは、二つの手法で観測可能な深さが異なっていることに起因し、水ないし水素が表層部分にしか存在していないことを示している。

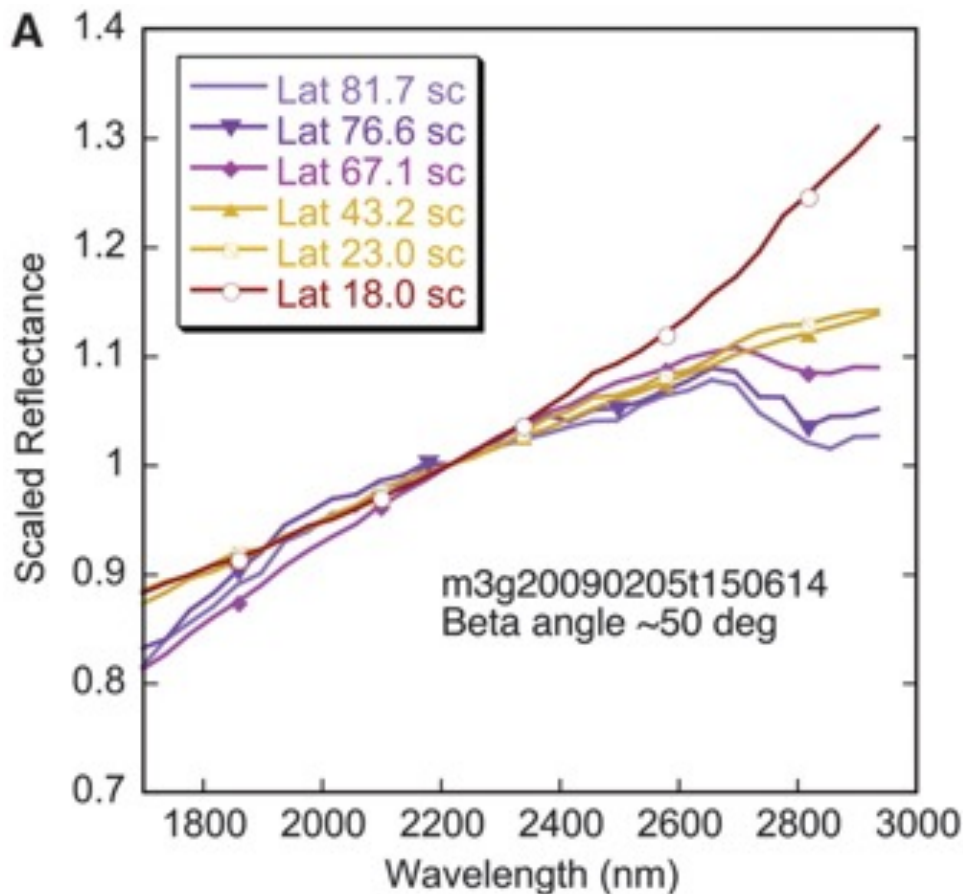


図 1.1.3: M³ で観測した、スケーリングされた月面の赤外線スペクトル。Pieters et al. (2009) [15] の Fig.3A を抜粋している。熱放射成分は引いていない。

Li et al. (2018) [16] では、M³ の観測データを用いて、永久影に露出した氷の存在を示している。この論文では、M³ の観測データの永久影の領域について、周囲の地形からの太陽光の反射を光源として解析を行っている。氷が霜の状態が存在する場合に吸収が見られる波長 (1.3, 1.5, 2.0 μm) の解析を行った結果、一部の永久影の表層が約 30 wt% の氷を含んでいることがわかった。この氷の露出を示しているのは、永久影のうちの約 3.5% のみであった。

1.1.4 High-Resolution Instrument–infrared spectrometer

High-Resolution Instrument–infrared spectrometer (HRI-IR) は、2005年1月12日にNASAによって打ち上げられた彗星探査機 Deep Impact (のちに EPOXI) に搭載された赤外マッピング分光計である。二つのプリズムから構成されたイメージング分光計であり、1.05–4.5 μm の波長帯で撮像を行う [17]。

Sunshine et al. (2009) [18] では、HRI-IR の2007年から2009年の月面の観測データを解析した。この観測の空間分解能は80 km 程度である。この論文では、北極付近の OH 基または水の赤外線吸収が最も強いと述べられており、その吸収量が0.5 wt% 未満の水に対応すると主張している。また、吸収強度は朝から昼にかけて減少し、昼から夕方にかけて増加する傾向が報告されている。その増減量は最も吸収が強い時に対して40% 程度である。このことは、水や OH 基などが太陽風由来で生じていることを示唆している。

1.1.5 Lunar Crater Observation and Sensing Satellite

Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) は、2009年6月18日にNASAによって打ち上げられた月周回衛星である [19]。永久影の水探査を目的として打ち上げられた衛星であり、1.25–2.35 μm を観測可能な赤外線カメラを搭載している。

Colaprete et al. (2010) [20] では、LCROSS による Centaur のクレーター衝突の観測結果を報告している。LCROSS の上段ロケットの Centaur をカベウスクレーターに衝突させ、舞い上がった粉塵に照射される太陽光の反射を赤外線カメラで観測している。その結果、水蒸気由来の1.87 μm の吸収や、氷由来の1.5, 2.0 μm の吸収が見られた (図 1.1.4)。これらの結果から、視野内の水蒸気と氷の量は $155 \pm 12 \text{ kg}$ であり、衝突地点の水の量は $5.6 \pm 2.9\%$ であると見積もられた。

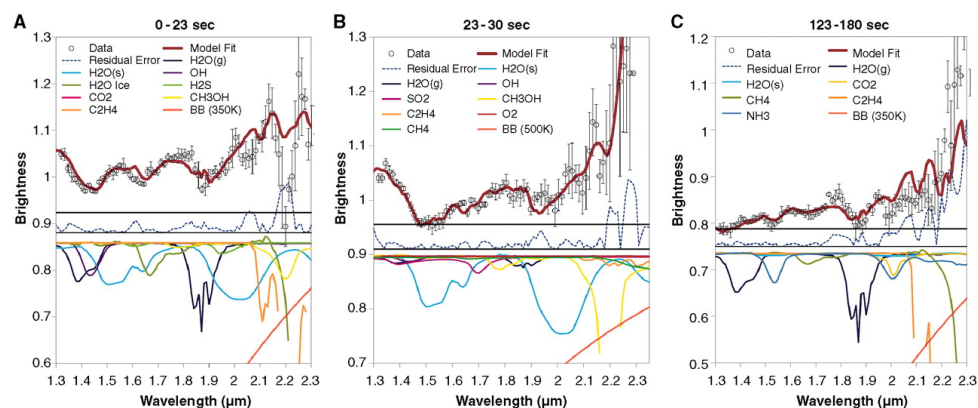


図 1.1.4: LCROSS により観測された、衝突時の粉塵の反射光スペクトル [20]。グラフ上部は衝突からの時間を示しており、それぞれの時間の測定を平均化している。各成分の吸収のモデルを下部に示しており、その吸収量は水で規格化されている。

1.2 中性子分光計による観測

1.2.1 中性子による水資源探査の原理

図 1.2.1 に、月の水資源と中性子の相互作用の概念図を示す。月面では、気圧 3×10^{-15} bar と大気がほとんど存在せず [21] (地球は ~ 1 bar)、さらに磁場は最大でも数百 nT [22] (地球は \sim 数万 nT) と弱いため、銀河宇宙線が遮られることなく、大気シャワーを作らずに降り注ぐ。これが地中の原子核と衝突することで、約 1 m 以内の深さで高速中性子 ($\gtrsim 0.5$ MeV) を発生させる。中性子は地中で散乱し、熱 ($\lesssim 0.5$ eV)・熱外 (0.5 eV–0.5 MeV) 中性子として月面から漏出する。このとき、中性子ほぼ同じ質量である水素の原子核 (陽子) と衝突する際に、中性子の失うエネルギー量が大きくなる。したがって、漏出する熱中性子量が相対的に上昇し、熱外中性子量が減少する (図 1.2.2、[8])。中性子分光で観測できるのはあくまでも水素原子であり、水資源そのものを観測できるわけではない。そのため、中性子分光による観測では、観測された水素がすべて水 (H_2O) の形で存在していると仮定した場合の水濃度である水等価水素量 (water equivalent hydrogen: WEH) が用いられる [23]。中性子による水資源探査は、深さ ~ 1 m までの水を判別できることも特長である。

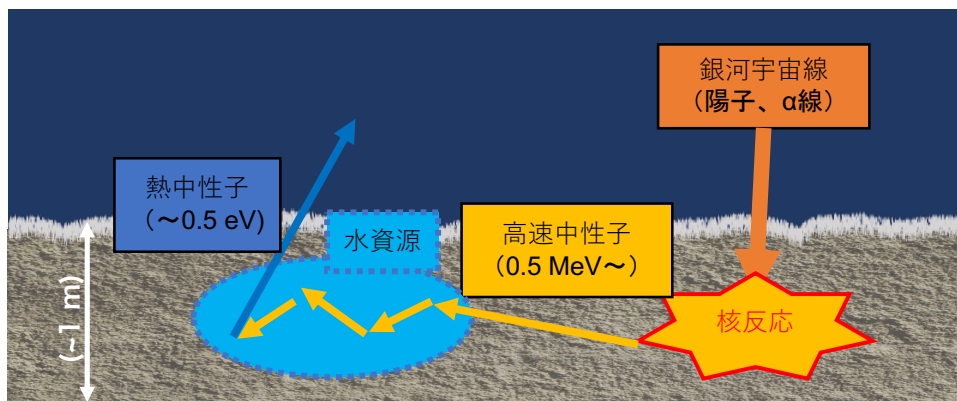


図 1.2.1: 月の水資源と中性子の相互作用の概念図。銀河宇宙線が月面の原子核と衝突して核反応を起こし、高速中性子が生じる。この高速中性子が水に含まれる陽子により効率よく減速され、熱・熱外中性子となり月面から漏出する。

1.2.2 Lunar Prospector Neutron Spectrometer

Lunar Prospector Neutron Spectrometer (LPNS) は、1998年1月8日にNASAによって打ち上げられた月周回衛星 Lunar Prospector (LP) に搭載された中性子分光計である。LPNS は2つの ^3He ガス比例計数管で構成されており [24]、 ^3He の (n, p) 反応で熱・熱外中性子を検出する。

Feldman et al. (1998) [24] では、LP による高速・熱外中性子の全球測定の結果を初期成果として報告している。図 1.2.3 に、Feldman et al (1998) で報告された熱外中性子フラックスを示す。北極域ではその周りに比べて4.6%のフラックス減少が、南極域ではその周りに比べて3.0%のフラックス減少が見られた。一方で、LP 搭載のガンマ線分光計を用いて測定した高速中性子については明確なフラックス減少は見られな

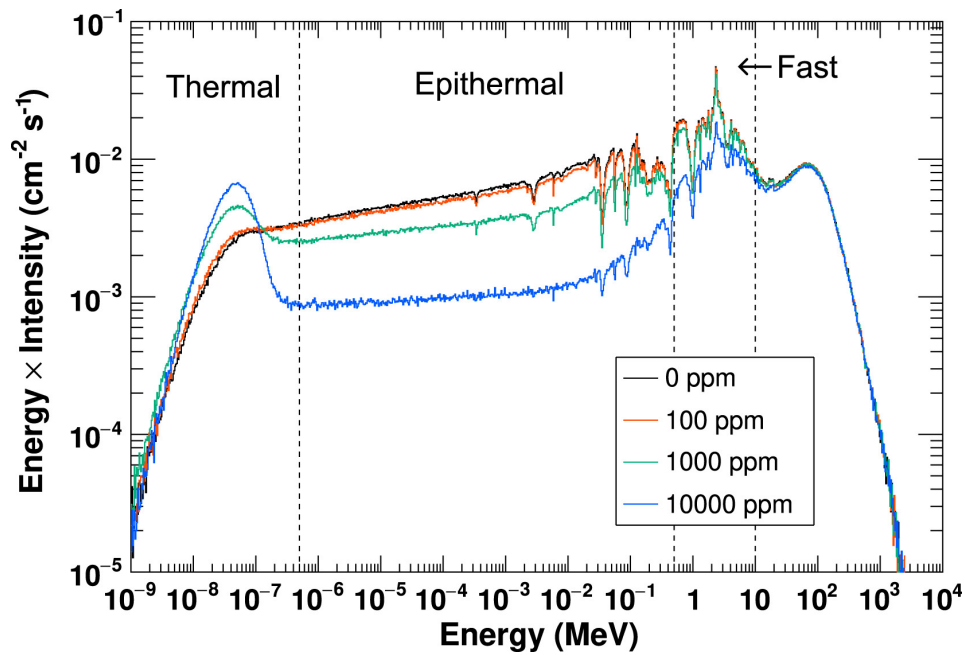


図 1.2.2: 漏出する中性子のエネルギースペクトルの地中の水素濃度ごとのシミュレーション。太陽活動極小期の銀河宇宙線を仮定した計算結果を示している。水素濃度が 100 ppm より高い場合にスペクトルの変化が顕著となる。
[8]

かった。この結果は、極域の近くにある永久影の、乾燥したレゴリスの 40 cm 程度下部に、水の形として水素が貯蔵されていることを示唆している。

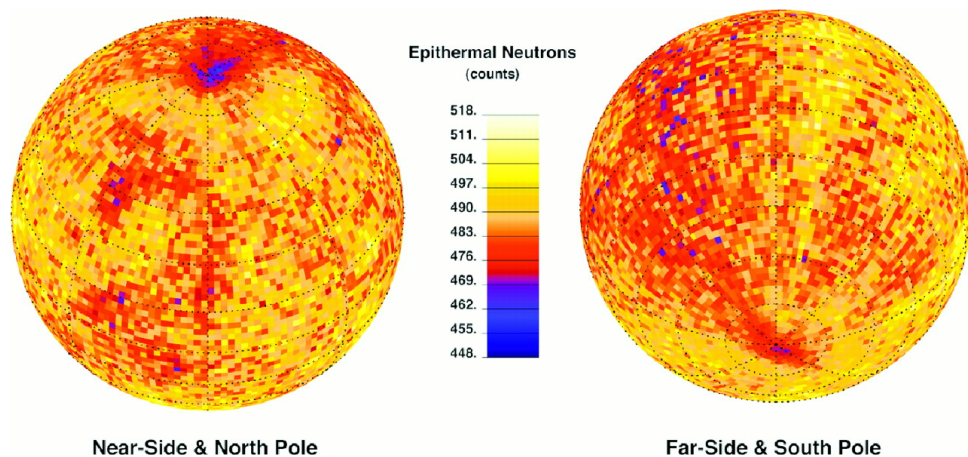


図 1.2.3: 全球の熱外中性子のカウントレート [24]。分解能は緯度経度 2 度 (～60 km) 程度である。左は北側のフラックスを示しており、北緯 45 度以上を示している。右側は南側のフラックスを示しており、南緯 45 度以上を示している。LPNS で 32 秒ごとに取得したカウント数をカラーバーとして中心に示している。

その後の Lawlence et al. (2006) [25] では、月面土壌を模した中性子フラックスのシミュレーション結果と、LP の熱外中性子の観測結果 [26] を比較して、月土壌の水素含有量を算出している。その結果得られた水素含有量のマップを図 1.2.4 に示す。この論文では、月の両極域には 100–150 ppm の水素が含まれており、厚さ 10 ± 5 cm の乾いた土壌の下に埋まっていると結論づけられた。一方で、半径 20 km 未満の永久影の水素含有量については不確実であった。

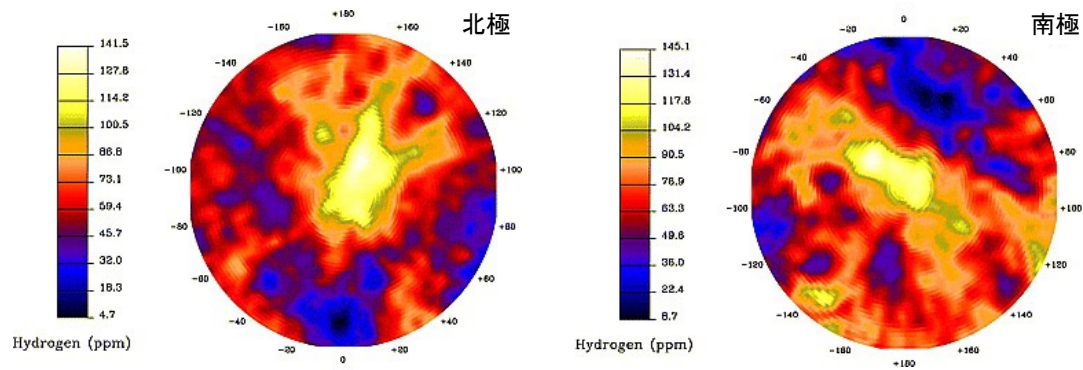


図 1.2.4: LP の熱外中性子の観測結果 [26] から算出した水素含有量のマップ (Lawrence et al. (2006) [25] の Figure 15 を改変)。左は北側で北緯 70 度以上、右は南側で南緯 70 度以上の領域を示している。

1.2.3 Lunar Exploration Neutron Detector

Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) は、2009 年 6 月 18 日に NASA によって打ち上げられ、現在も運用されている月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) [27][28] に搭載された中性子検出器である。LEND は 8 つの ^3He 比例計数管と 1 つの有機結晶シンチレータで構成されており [29]、熱・熱外中性子、高速中性子を検出可能である。高度 50 km で 10 km の高い分解能を持つことを特長としている。

Mitrofanov et al. (2010) [30] では、LEND を用いて南極域のいくつかの永久影の熱外中性子フラックスを測定し、Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) の衝突地点の選定を行なったことを、初期成果として報告している。この論文では、カベウスクレーター内部の LCROSS の衝突地点は 0.5–4.0 wt% の水を含むと推定されている。これは、LCROSS の衝突により求められた値 (5.6 ± 2.9 wt%、[20]) とよい一致を示すことが述べられている。また、熱外中性子フラックスの減少は永久影の領域と必ずしも一致しているわけではないことも分かった。

より詳細な永久影の熱外中性子フラックス測定については Sanin et al. (2012) [31] で報告されている。この論文では北極域と南極域にある 46 個の永久影の観測結果を示している (図 1.2.5)。周囲と比較して統計的に有意に熱外中性子フラックスの減少が見られたのは、カベウス (水素量 460–470 ppm)、シューメーカー (水素量 220–245 ppm)、ロジェストヴェンスキー (水素量 346–365 ppm) のみであることが判明した。

さらに Sanin et al. (2017) [33] では、熱外中性子フラックスの減少量から、地中の水含有量を推定している。この論文では、表層レゴリスの上面 1 m までに含まれる水が 0.5 wt% WEH であると報告されている。

最新の研究結果である McClanahan et al. (2024) [34] では、熱外中性子フラックスとともに、高度の測定と赤外線カメラを用いた表面温度の測定結果を用いた 4 つの永久影の水資源探査を行なっている。永久影の中でも、極側を向いている斜面でかつ温度が 75 K 以下の領域で、熱外中性子のフラックスの減少が見られることが示されており、最大で 0.39 wt% WEH の水資源があることが判明している。

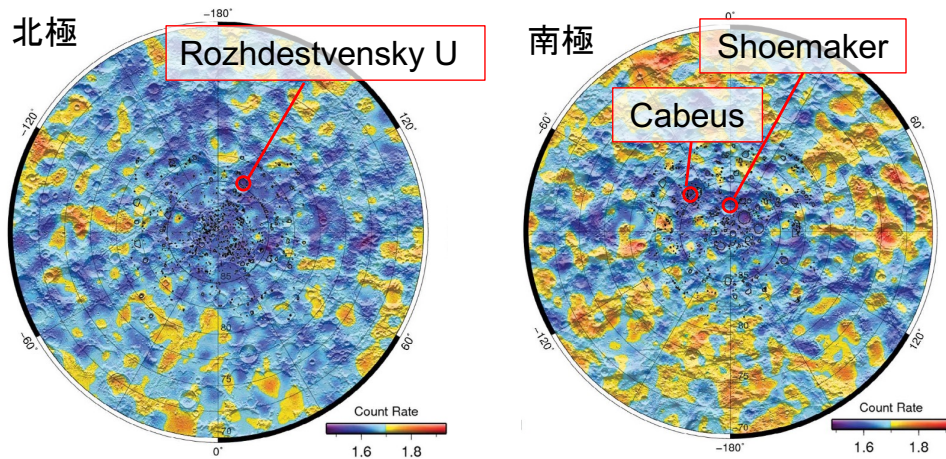


図 1.2.5: LEND で取得した極域の熱外中性子フラックス。Sanin et al. (2012) [31] の Figure 1 を改変した。黒い丸は、LRO のレーザー高度計から得られた永久影の領域である [32]。統計的優位にフラックスの減少が見られた 3 つ永久影をピックアップしている。左側は北緯 70 度以上の北極域、右側は南緯 70 度以上の南極域を示している。

1.3 その他の手法での月の水資源探査

前節までで示した手法以外にも、遠紫外線反射の観測 [35] や、レーザー反射の観測 [36] が行われてきた。また、テラヘルツ波を用いた月の水資源探査である TSUKIMI 計画 [37] も日本で計画されている。

第2章

MoMoTarO 計画

これまで行われてきた月の水資源探査は、周回衛星を用いた広範囲のマッピングの場合には、その空間分解能は最高でも 10 km ほどであった [29]。今後の人類の月面進出において、水資源があると考えられている永久影などの領域を数 m 単位で詳細にマッピングすることは極めて重要である。我々は、1.0–1.5 Unit (1 U=10 × 10 × 10 cm³) サイズの小型・軽量・省電力の検出器 Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) を開発している。MoMoTarO は中性子とガンマ線に感度を持ち、月面から漏出する中性子を用いて詳細な水資源探査を行うとともに、月周辺でのガンマ線バースト (Gamma-ray Bursts; GRB) の観測や、中性子寿命の測定なども同一の装置で行うことを目指している。MoMoTarO は、後述する新しい中性子検出技術によって熱/熱外/高速中性子を弁別可能なこと、ガンマ線と同時観測することにより、従来よりも高感度・高効率で実験を行えることを利点としている。本章では、月面での MoMoTarO 計画の概要と 2026 年度に実施予定の国際宇宙ステーション (International Space Station; ISS) 上での宇宙実証、および MoMoTarO の構成について述べる。

2.1 MoMoTarO 計画で目指すサイエンス

MoMoTarO 計画では、月の水資源探査を始めとした、多分野の科学研究を行うことを目的としている。本節では、それぞれの観測の原理と意義について述べる。

2.1.1 月の水資源探査

第 1 章で述べたように、月の極域にある太陽光の当たらない永久影は温度が低く、水が蒸発せず貯蔵されている可能性があると考えられている。こうした領域で、月面ローバーに搭載した MoMoTarO で中性子観測を行い、水資源の詳細なマッピングを実施する。

図 2.1.1 に、MoMoTarO による月の水資源探査の概念図を示す。銀河宇宙線が月の地中で起こす核反応により生じた高速中性子が、地中の水素原子核と反応し効率よく減速され、熱中性子となって漏出する。これらの中性子を月面ローバーなどに搭載した MoMoTarO で測定することで、地中の含水率を調べることができる。

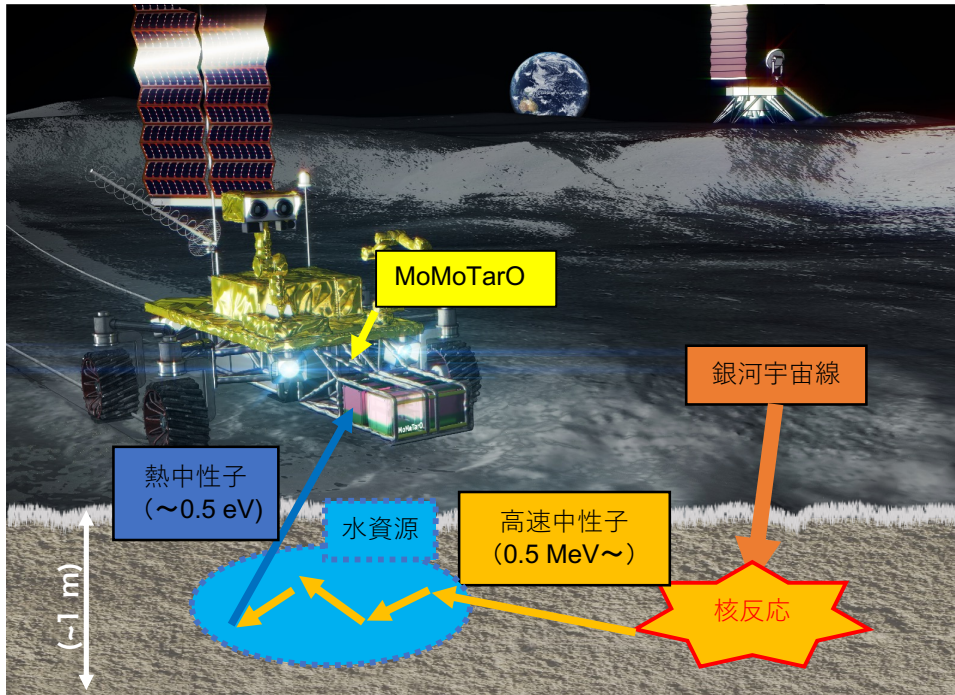


図 2.1.1: MoMoTarO による月の水資源探査の模式図 [38]。水に含まれる陽子によって減速された中性子を、月面ローバーなどに搭載した MoMoTarO で観測する。

2.1.2 ガンマ線バーストの到来方向の決定

2017年、レーザー重力波干渉計 LIGO および VIRGO は、連星中性子星合体による重力波を人類で初めて直天体からの接検出することに成功した [39]。これを契機に、電磁波、宇宙線、ニュートリノ、重力波を情報運ぶメッセンジャーと見立て、複数のメッセンジャーにより総合的に天体現象を解明する「マルチメッセンジャー天文学」が注目されている。その中でも特に重力波は、透過能力が高く重力波イベントのみで重力波源までの距離を推定できるという点において、重要である。また、中性子連星合体では重力波だけではなく、ジェットに伴いガンマ線バースト (Gamma-ray Bursts; GRB) も同様に発生するという点でも、重力波は重要なメッセンジャーである。ただ、現在の重力波干渉計のシステムは発生源の方向決定精度が悪く、重力波とガンマ線バーストの両方を使って方向を決める必要がある。

そこで、MoMoTarO も利用した複数のガンマ線バーストの検出器ネットワークによる三角測量で、ガンマ線バーストの到来方向の決定を行う。図 2.1.2 に、その模式図を示す。離れたところにある検出器でガンマ線バーストを検出し、その到来時間差を利用してガンマ線バーストの方向決定を行う。地上または地球低軌道上にある検出器は、距離が $\lesssim 10^4$ km ほどしか離れておらず、位置決定精度は数度ほどである。一方で、地球低軌道と月周辺の MoMoTarO のガンマ線バースト観測を組み合わせた測定では、検出器どうしの距離が 10^5 km 程度も離れており、複数の MoMoTarO を月周辺に設置することで位置決定精度は 0.1 度ほどまで一桁は上昇できると期待できる。この方法を利用してガンマ線バーストの位置を素早く正確に決定し、大型の望遠鏡にアラートを送ることにより、ガンマ線バーストの即時追跡観測が可能となる。

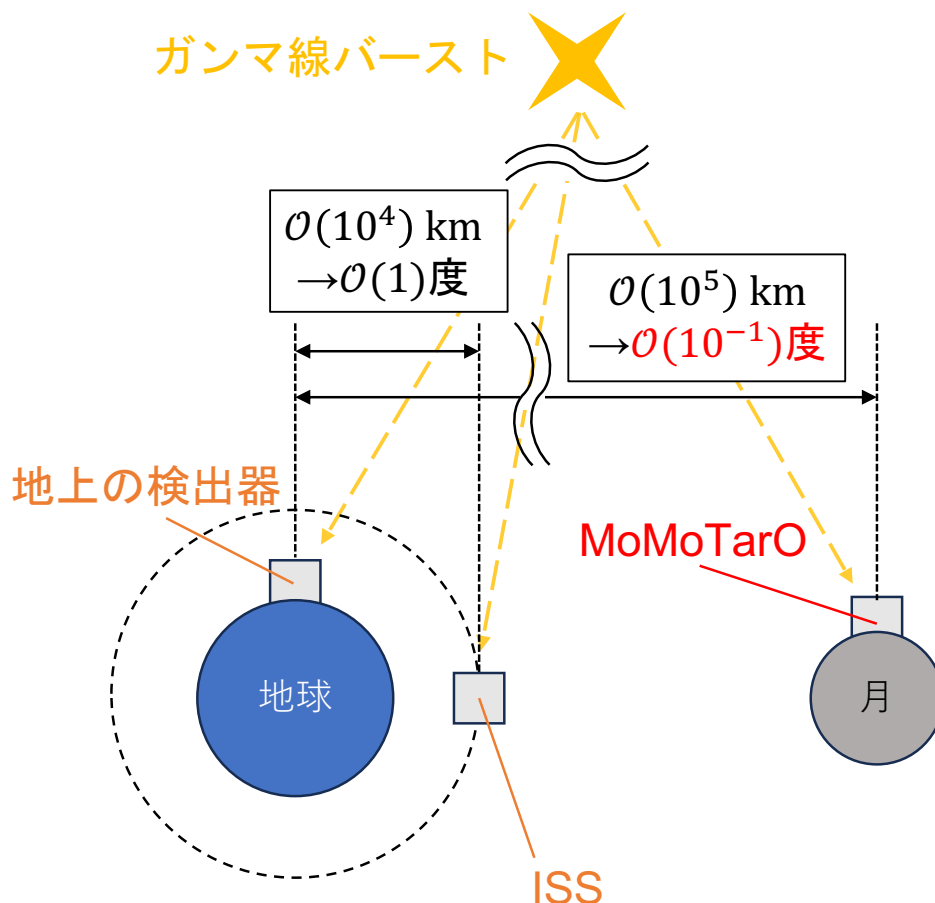


図 2.1.2: ガンマ線バーストの位置決定の模式図。ガンマ線の到来時間差から位置を決定する。月面上の MoMoTarO を利用することで、位置決定精度が一桁ほど上昇できると期待できる。

2.1.3 中性子寿命の測定

基本的な粒子である中性子の寿命は、2つの測定法で一致せず、よくわかっていない。この中性子の寿命を正確に測定することは、素粒子物理学や天体物理学、宇宙論に関わる重要な問題と考えられている [40][41][42]。中性子寿命の測定法として現在主流なものに、「ビーム法」と「ボトル法」がある。ビーム法は、加速器を使って中性子ビームを用意し、飛行中に β 崩壊により放出された陽子や電子を測定する方法である。中性子寿命 τ_n は $dN/dt = -N/\tau_n$ で求められ、ビーム法は dN/dt を求めることになる。一方のボトル法は、物理的な容器や磁場、重力を利用して冷却された中性子を閉じ込めて、中性子の数の時間変化を測定する方法である。この方法では、 $N(t) = N(0)e^{-t/\tau_n}$ の指数関数の減衰を求める。ビーム法で測定した中性子寿命を平均は $\tau_n^{\text{beam}} = 888 \pm 2 \text{ s}$ であり、ボトル法で測定した中性子寿命の平均は $\tau_n^{\text{beam}} = 879.5 \pm 0.5 \text{ s}$ である。両者には、 $4\sigma \sim 9 \text{ s}$ の系統的な違いがある (図 2.1.3[43])。この原因は未解明であり、中性子寿命の値は現在も確定していない。

そこで我々は、MoMoTarO を用いた中性子寿命の測定に挑む。図 2.1.4 に、月周回機に搭載した MoMoTarO で、月面から漏出する中性子を測定し、中性子寿命を測定する模式図を示す。MoMoTarO に到達するまでに中性子が崩壊するため、月面からの高度によって中性子フラックスが変化する。この変化をみることで、第三

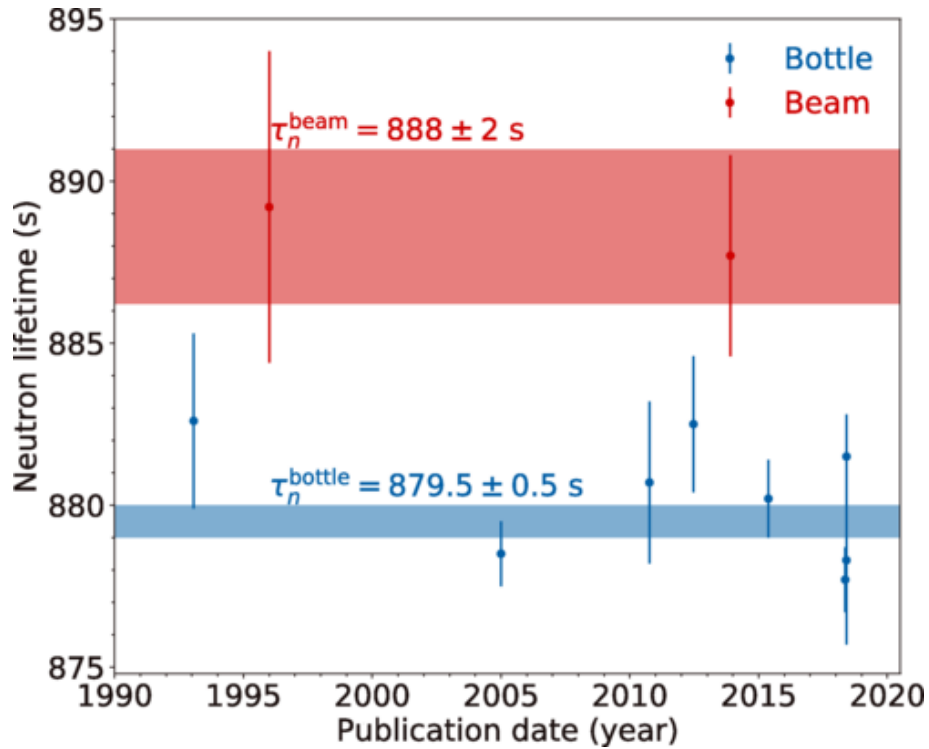


図 2.1.3: 中性子寿命測定の変遷。Particle Data Group と近年の測定をまとめた図 [43][44][45][46][47]。青い帯にボトル法の結果を、赤い帯にビーム法の結果を示している。二つの測定方法で 9 s ほどの系統的な違いが見られる。

の方法で中性子寿命の測定を行うことを試みる。

Wilson et al. (2021) [48] では、Lunar Prospector に搭載された中性子検出器のデータを再解析することで、 $\tau_n = 887 \pm 14_{(\text{stat})}^{+7}_{-3(\text{syst})}$ s という結果が得られている。これは、月周回機を用いて中性子寿命を評価できた大きな成果だが、統計誤差も系統誤差も大きく、ビーム法とボトル法の切り分けには至っていない。LP は月遷移軌道の数周分のデータしか寿命測定に用いられなかったが、MoMoTarO はより観測期間を確保 (半年以上) して、ボトル法とビーム法を統計的に区別できる精度を目指す。また超小型であるため他の衛星に相乗りして観測機会を増やしたり、系統誤差に寄与する筐体 BG も減らしたりすることも期待できる。

2.2 ISS での宇宙実証と期待できるサイエンス

月面での運用に先駆けて、2026 年度に MoMoTarO を国際宇宙ステーション (International Space Station : ISS) の船外実験スペースに半年間設置することが決定した。搭載位置は、JAXA の「きぼう」日本実験棟の中型暴露実験アダプタ (IVA-replaceable Small Exposed Experiment Platform : i-SEEP) である [49]。i-SEEP は、複数の装置を搭載でき、それらの装置に実験や実証の環境を提供するアダプタである。MoMoTarO は、その中でも i-SEEP に取り付けられた小型ペイロード搭載支援装置 (Small Payload Support Equipment : SPySE) に搭載予定である (図 2.2.1)。SPySE は、1~3 U 規模の小型の装置に電力や通信環境を提供するインターフェースを備えており、MoMoTarO の宇宙実証に適している。

MoMoTarO を ISS で宇宙実証する最大の目的は、宇宙環境で正常に動作するかを実証し、技術成熟度を上げることである。具体的には、地上より厳しい放射線環境・熱環境、さらに真空の状態での MoMoTarO が中

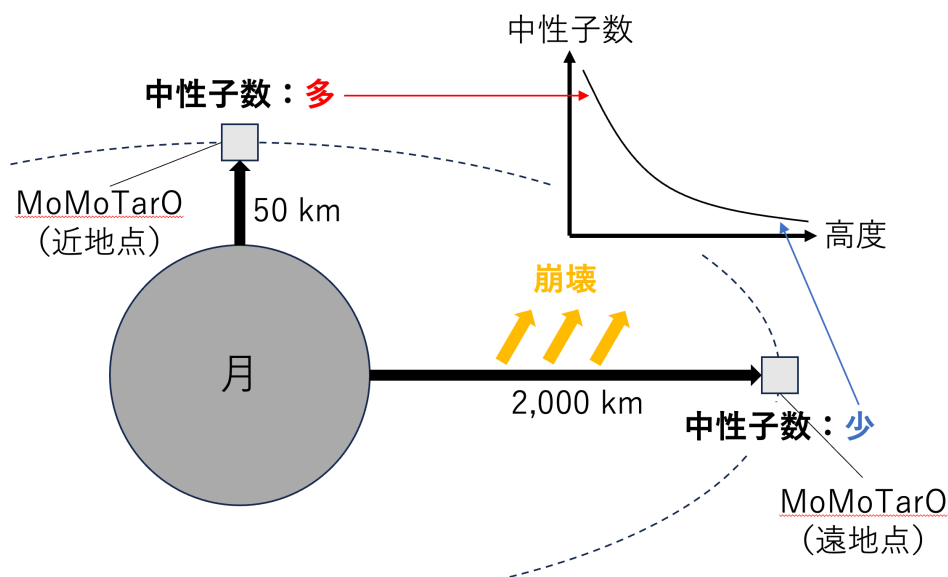


図 2.1.4: MoMoTarO による中性子寿命の測定の模式図。月面から漏出する中性子の崩壊により、中性子フラックスの高度による変化を得ることができる。



図 2.2.1: ISS の船外プラットフォームに設置された小型ペイロード搭載支援装置 (SPySE) の写真 [49]。

中性子やガンマ線を正しく測定できるかどうかを実証することである。これは、今後の宇宙での汎用的な放射線の測定モジュールとしての信頼性を高め、月探査促進ミッション (LEAD) や国内外の民間ミッションへの搭載機会を得る足がかりとなる。さらに我々は、半年間の運用期間中に、ガンマ線バーストと太陽中性子の観測にも挑戦する。

ガンマ線バーストは、主目的の宇宙実証に加えてオプション機能としてバースト状の現象を検出できるかを試みる。

太陽中性子とは、太陽フレアと呼ばれる爆発的なエネルギーの放出が起こった際に、加速された陽子や重イ

オンと太陽大気が衝突することで生じる中性子である [50]。この陽子や重イオンが、太陽フレアでどのように加速されているかは完全にはわかっておらず、加速機構の解明にはこれらの粒子を直接観測する必要がある。しかし、イオンは電荷を持っており、太陽磁場や惑星間空間の磁場により曲げられるため、地球に到達するまでに加速された時間やエネルギーの情報を失ってしまう。そこで、衝突により生じる二次粒子の一つであり、電荷を持たない太陽中性子を観測することで、太陽フレアのイオン加速機構解明を目指す。

1982年6月3日のX8の太陽フレア（スイスに設置の中性子モニターで観測）[51]、2003年10月28日のX17.2の太陽フレア（ナミビアに設置の中性子モニターで観測）と同年11月4日のX28の太陽フレア（ハワイのハレアカラとメキシコシティに設置の中性子モニター、ハワイのマウナケアに設置の太陽中性子望遠鏡で同時観測）[52]など、地上の検出器で太陽中性子を観測した例は現在までに10例ほどある。しかし、中性子は地球大気によって減衰されるため、宇宙空間での観測が重要である。SMM（Solar Maximum Mission）衛星のGRS（Gamma Ray Spectrometer）検出器で、1982年6月3日の太陽フレアによる太陽中性子を観測[53]した結果はあるものの、宇宙空間での太陽中性子の観測は乏しいと言える。MoMoTarOがISSに搭載される2026年ごろは太陽活動の極大期であり（図2.2.2）、太陽フレアを観測できることが期待される。

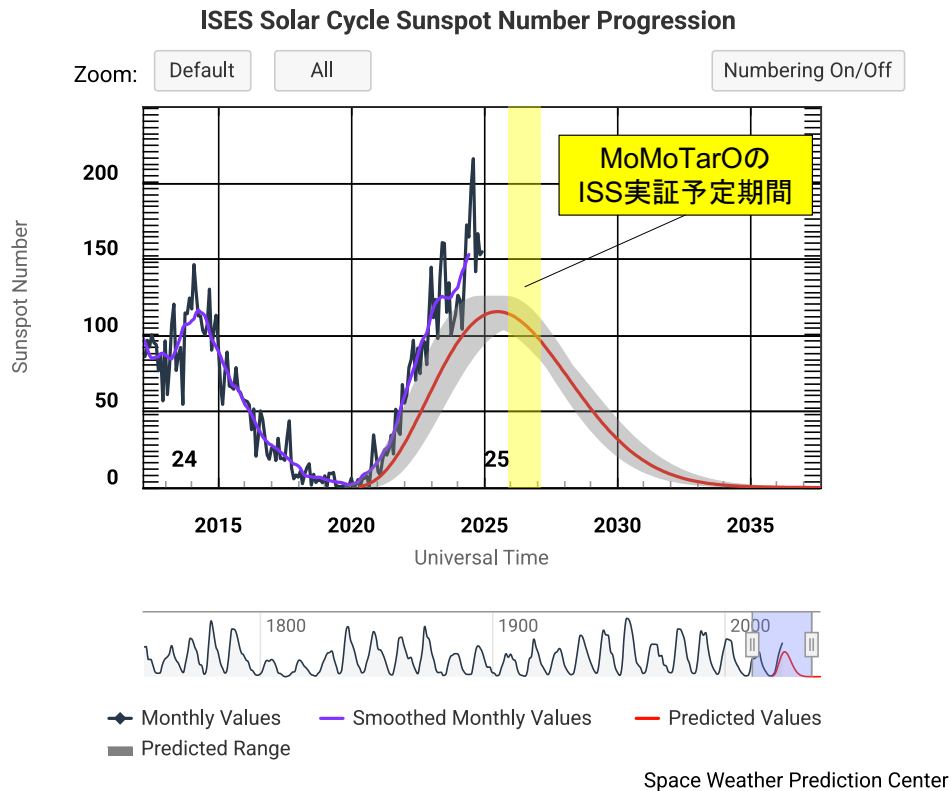


図 2.2.2: 現在までの太陽黒点数と太陽活動の予測。NOAA のウェブサイト [54] から取得した。黒い線が太陽黒点数、紫色の線が月平均の太陽活動量、赤色の線が予測される太陽活動量である。MoMoTarO の打ち上げ時期を黄色い帯で示している。

以上のように、MoMoTarO を ISS に搭載し、宇宙実証を行うとともに、ガンマ線バーストと太陽中性子の観測という二つのサイエンスを実現することを目指す。

2.3 MoMoTarO 搭載のシンチレータ

シンチレータとは、物質中で発生するシンチレーション光によって、電離性放射線を検出できる物体のことである。本計画では、ガンマ線と中性子の観測に、2種類のシンチレータを用いる予定である。ここでは、シンチレータによるガンマ線と中性子検出の仕組みについて説明する。

2.3.1 ${}^6\text{Li}$ を添加したプラスチックシンチレータ

現在までの中性子検出では、 ${}^3\text{He}$ ガス比例計数管が主流であったが、 ${}^3\text{He}$ ガスが高騰し入手しにくくなったことや振動に弱いという欠点があった。そこで MoMoTarO 計画では、 ${}^6\text{Li}$ を添加した新しいプラスチックシンチレータの EJ-270 (Eljen Technology 社) を用いる [55]。図 2.3.1 に、EJ-270 の写真を示す。 ${}^6\text{Li}$ は 95.5 atom% 以上同位体濃縮して添加されており、その配合率は重量比で 0.5% 程度である [55]。このシンチレータは、熱中性子、高速中性子、ガンマ線の3種類の放射線を測定可能であり、それらを弁別することができる。また、SiPM と組み合わせて使う場合に ${}^3\text{He}$ ガス比例計数管に比べて安価である、振動に強い、小型、省電力などの特長を持つ。本節では、一般的なプラスチックシンチレータの発光原理について述べた後、EJ-270 で中性子の検出原理について説明する。ガンマ線のコンプトン散乱の検出原理は後述する。

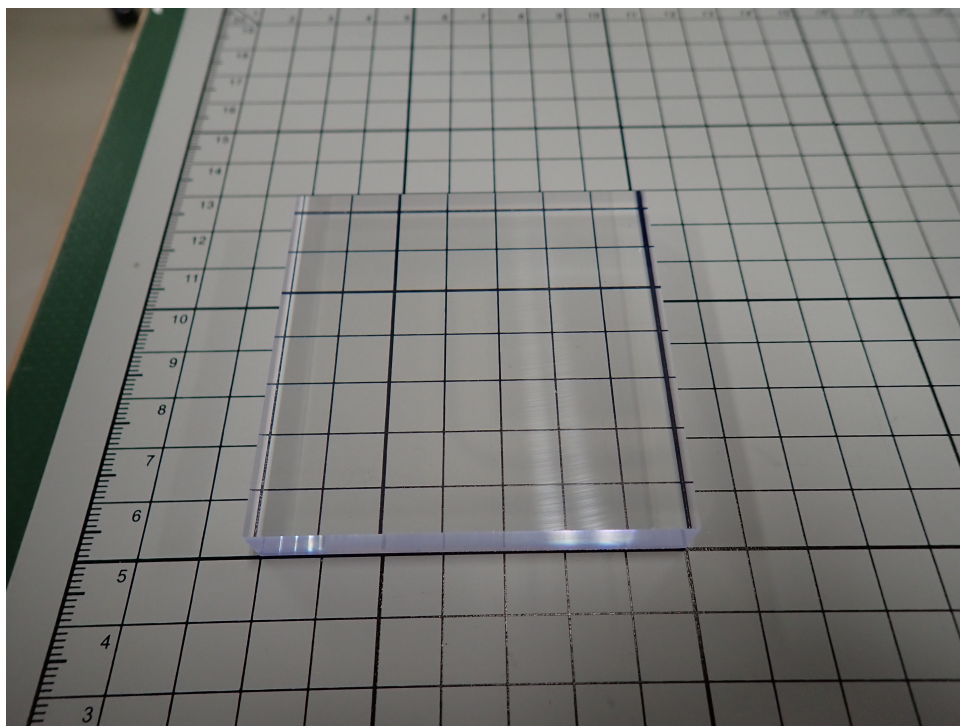


図 2.3.1: EJ-270 の写真。サイズは $7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$ である。

プラスチックシンチレータは有機シンチレータを溶媒に溶かした後、これらを高分子化して作る固体のシンチレータである。有機シンチレータは一般に、応答が速いが発光量が少ないという特徴を持つ。

有機物質中のシンチレーション機構の概念図を、図 2.3.2 に示す。有機物質中の蛍光過程は、単一分子のエネルギー準位間での遷移によって生じる。有機シンチレータは一般にパイ電子構造と呼ばれる対称的な性質を

持った有機分子で構成されており、多数ある励起状態のうちのどれか一つに電子配置を励起してエネルギーを吸収することができる。スピン0のシングレット状態を S_0, S_1, S_2, \dots 、スピン1のトリプレット状態を T_0, T_1, T_2, \dots としている。

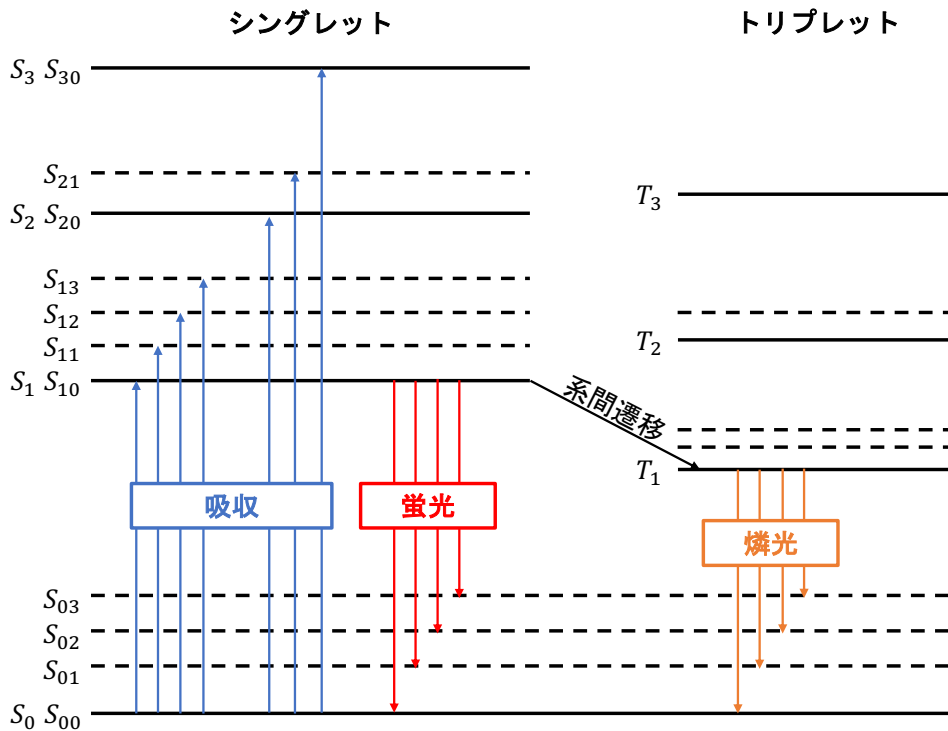


図 2.3.2: パイ電子構造をもつ有機分子のエネルギー準位。左がシングレット状態、右がトリプレット状態を表している。

室温ではほとんどの分子は基底状態 (S_{00}) にあるが、分子によるエネルギー吸収が起こると励起される。この過程は近くを通過した荷電粒子からの運動エネルギーの吸収を表す。励起された高いシングレット電子状態は放射を伴わずに ps 程度の時間で S_1 電子状態へと遷移する。さらに、 S_{11} 、 S_{12} などの過剰な振動エネルギーを持つ状態は近傍の電子と熱平衡になく、すぐにエネルギーを失い S_{10} 電子状態へと遷移する。したがって、有機結晶中の励起過程は無視できるほど短い時間に S_{10} 状態へと遷移する。主要なシンチレーション光すなわち即発発光は、この S_{10} 状態から基底電子状態への振動状態間遷移によって発せられるものである。蛍光の減衰時間は 2-3 ns と速い。その他に、シングレット状態からトリプレット状態へと系間遷移が起こり、そこから基底状態へと遷移することによって燐光が起こることがある。また、励起分子が発光を伴わずに励起エネルギーを熱によって失う遷移モードがあり、消光と呼ばれる [56]。

EJ-270 は、コンプトン散乱でガンマ線を検出するほか、添加した ${}^6\text{Li}$ を用いて熱中性子を、陽子を用いて高速中性子を検出することができる。

熱中性子は、添加した ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応で検出する。 (n, α) 反応はある原子核が中性子を得てトリチウムと α 線を放出する核反応であり、 ${}^6\text{Li}$ の場合は



のように表せる。この反応の断面積は 940 バーンである。Q 値は 4.78 MeV と高いものの、 ${}^6\text{Li}$ 添加のプラスチックには強い消光が見られ、電子当量エネルギー (electron-equivalent energy) は大幅に減少する。した

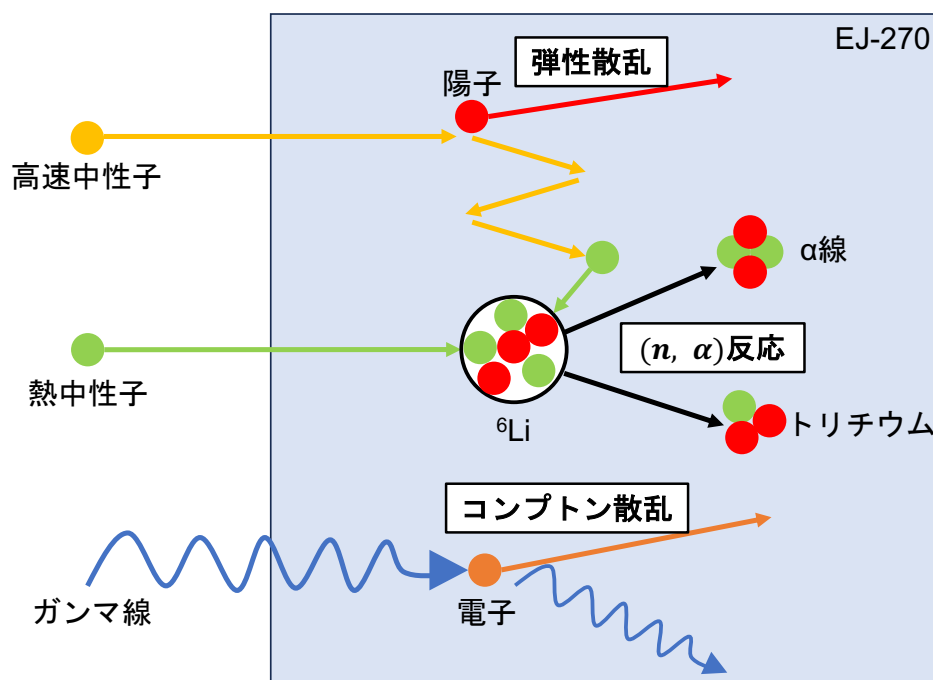


図 2.3.3: EJ-270 と種々の放射線との反応。熱中性子は ${}^6\text{Li}$ との (n, α) 反応、高速中性子は陽子との弾性散乱、ガンマ線はコンプトン散乱によって検出することができる。

がって、EJ-270 内部での熱中性子捕獲は 350 keV 程度のエネルギーとして現れる [57]。

高速中性子は、プラスチックシンチレータに含まれる水素の原子核（陽子）との弾性散乱により検出する。水素の中性子に対する弾性散乱の断面積は非常に大きく、かつそのエネルギー依存性は精度良く求められているため、高速中性子検出に適していると言える。さらに、水素と中性子が質量がほぼ等しいため、1 回の衝突で入射中性子はその全エネルギーまでのエネルギーを水素原子核に与える。この反跳陽子を検出することで、間接的に入射中性子のエネルギーを測定する。弾性散乱により減速された中性子は、最終的に熱中性子と同様に ${}^6\text{Li}$ の (n, α) 反応で捕獲される。

このようにして取得したそれぞれの放射線のパルスについて、波形弁別（Pulse Shape Discrimination : PSD）を行う。中性子とガンマ線の波形で、全電荷量に対する遅発蛍光による電荷量の比が異なることから、弁別を行うことができる。PSD の概念図を図 2.3.4 に示す。パルスの立ち上がりから立ち下がりまでの積分電荷量を Q_{total} 、パルスのピークから立ち下がりまでの積分電荷量を Q_{tail} とおき、PSD の値を

$$\text{PSD} = \frac{Q_{\text{tail}}}{Q_{\text{total}}} \times 1000 \quad (2.3.2)$$

とおく。こうして求めた PSD を元に、実際に波形弁別を行ったのが図 2.3.5 である。減速材を挟んで ${}^{252}\text{Cf}$ を照射した。ガンマ線と高速中性子、熱中性子を弁別することができている。この方法を用いて、EJ-270 による測定では中性子を選択的に取り出し、解析を行う。

2.3.2 GAGG (Ce) シンチレータ

GAGG (Ce) シンチレータ (C&A 社、以下 GAGG) は、化学式が $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ で示される酸化物に、Ce を添加した無機シンチレータである [58]。GAGG の写真を図 2.3.6 に示す。Ce の配合率は質量比で $\sim 1\%$

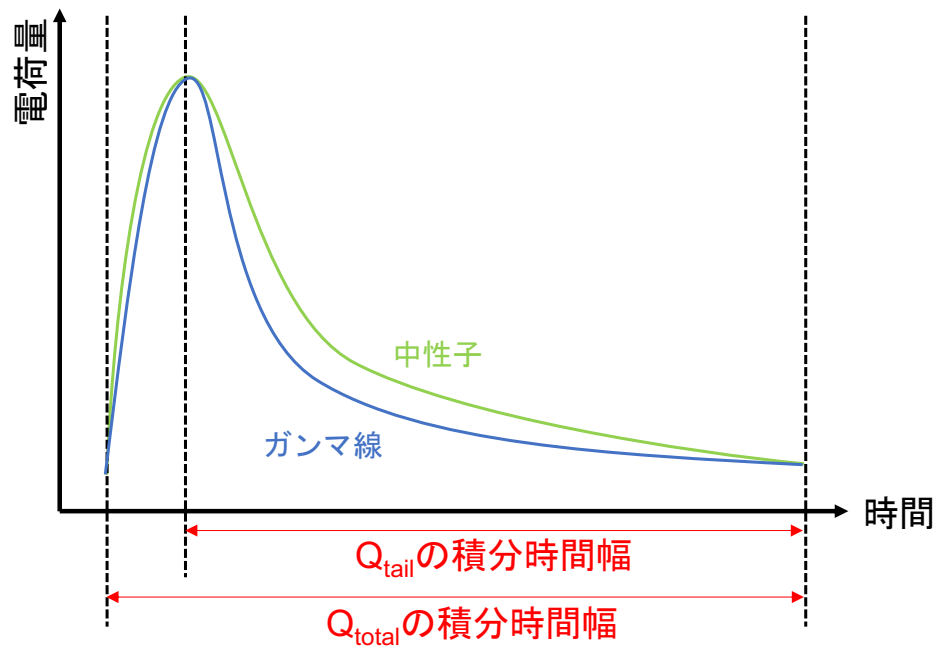


図 2.3.4: EJ-270 で取得したガンマ線と中性子のパルス信号の概念図。中性子の方が遅発蛍光による電荷量大きい。

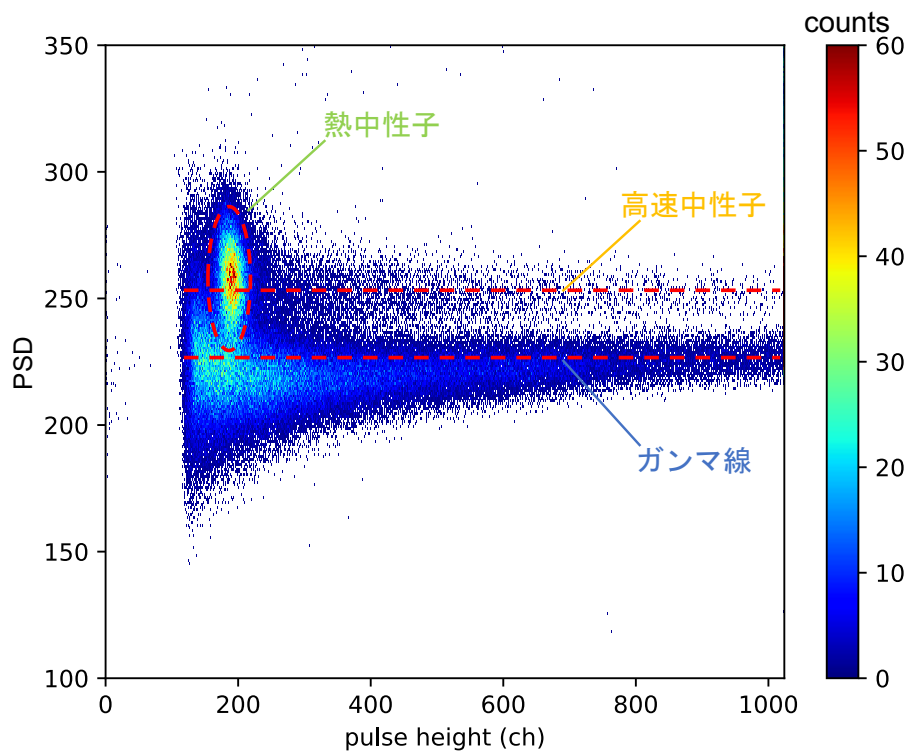


図 2.3.5: EJ-270 で取得したパルス波高値と PSD の二次元ヒストグラムの一例。我々のチームで行なった測定結果である。厚さ 5 cm の高密度ポリエチレン減速材を挟んで ^{252}Cf を照射している。二つの赤い直線はそれぞれガンマ線と高速中性子を、丸で囲まれた部分は熱中性子を示している。

である。GAGG は高い光量 (45,000~55,000 photons/MeV、カタログ値)、高エネルギー分解能 (662 keV で 8~9%、カタログ値)、高い Z 値をもつ新しいシンチレータである。また、潮解性がなく自己放射がないことも特長である。

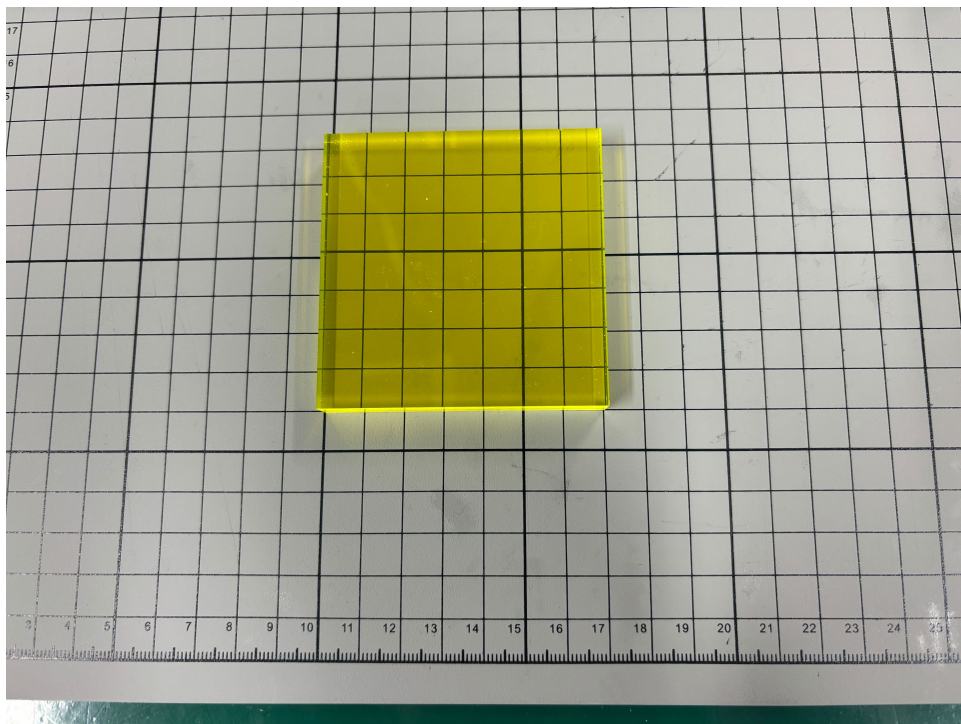


図 2.3.6: GAGG の写真。サイズは $7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$ である。

ガンマ線は物質と複数の種類の相互作用をするが、ガンマ線スペクトル測定で重要なのは光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成の 3 つである [56] (図 2.3.7)。

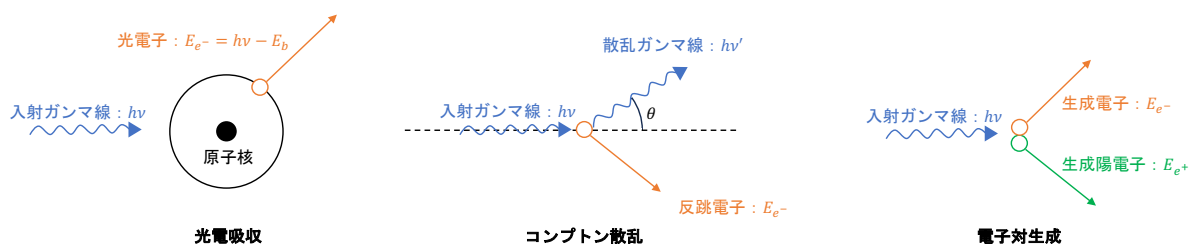


図 2.3.7: ガンマ線と物質の相互作用の概念図。左から光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成を示す。

光電吸収は、入射ガンマ線光子が消失する相互作用であり、入射光子エネルギーを $h\nu$ 、もとの殻の結合エネルギーを E_b としたとき、

$$E_{e^-} = h\nu - E_b \quad (2.3.3)$$

を満たす運動エネルギー E_{e^-} を持つ光電子が吸収原子の電子殻の一つから作られる反応である。光電子放出によって電子殻にできる空席は電子の再配列により埋められ、この過程でその殻の結合エネルギーに対応する特性 X 線またはオージェ電子が放出される。オージェ電子はエネルギーが低く飛程距離は極めて短い。特性 X 線は吸収原子内のより外側の電子殻との光電効果で吸収される。これらが完全に吸収されるものと仮定する

と、ガンマ線エネルギーの大半を持った光電子1個と、その光電子が当初持っていたエネルギーを吸収して作られた1個以上の低エネルギー電子が放出される。したがって、これらの電子の運動エネルギーの和は入射光子のエネルギーに等しいと考えられる。光电吸収のスペクトルは、入射ガンマ線のエネルギーに対応したエネルギーのところに単一のピークが現れる (図 2.3.8)。この反応は数百 keV までのエネルギーのガンマ線に対して重要である。

コンプトン散乱は、入射ガンマ線光子が物質内の電子と衝突し散乱する相互作用である。プランク定数を h 、入射光子の周波数を ν 、散乱光子の周波数を ν' とおくと、散乱ガンマ線のエネルギー $h\nu'$ は

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.3.4)$$

と表せ、反跳電子のエネルギーは

$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' = h\nu \left\{ \frac{\frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \right\} \quad (2.3.5)$$

と表せる。 θ は散乱角、電子質量 m_0 と光速 c を用いて表される m_0c^2 は電子の静止質量エネルギー (0.511 MeV) である。検出器の中では普通あらゆる角度に散乱されるので、 $\theta = 0$ から π までの連続したエネルギーが電子に伝達される。したがって、コンプトン散乱のスペクトルは連続的な分布を示す (図 2.3.8)。散乱角が 180 度のとき散乱光子のエネルギーは最大となり、このエネルギーをコンプトンエッジと呼ぶ、コンプトン散乱はガンマ線のあらゆるエネルギー帯域に対して重要である。

電子対生成は、吸収物質の原子核中で、陽子近傍の強い電界の場において入射ガンマ線光子の消滅位置に電子と陽電子の対を生成する相互作用である。電子の静止質量エネルギーは m_0c^2 であるため、この反応が起こるためには、入射ガンマ線光子が少なくとも $2m_0c^2 = 1.02$ MeV 以上のエネルギーを持っていることが必要である。このとき、生成電子の運動エネルギー E_{e^-} と生成陽電子の運動エネルギー E_{e^+} について

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0c^2 \quad (2.3.6)$$

が成り立つ。通常エネルギーの電子や陽電子は吸収物質で全ての運動エネルギーを失う。したがって簡単なモデルでは、電子対生成のスペクトルは対消滅の2光子が外部に逃げ出し、入射ガンマ線のエネルギーより $2m_0c^2$ 下に、単一のピークとして現れる。これをダブルエスケープピークと呼ぶ (図 2.3.8)。この反応は 5–10 MeV 以上の高エネルギーガンマ線に対して重要である。また、陽電子のエネルギーが吸収物質中の通常の電子の熱エネルギーと同等になると、電子陽電子対消滅が起こる。このとき、エネルギーが m_0c^2 の2個の消滅ガンマ線光子が放出される。陽電子が減速し消滅する時間は短いため、消滅放射線は電子対生成とほぼ同時に起こるように見える [56]。

無機物質中のシンチレーション機構の概念図を図 2.3.9 に示す。電子は絶縁物または半導体材料内部で離散的なエネルギー帯しか持ちえない。最下部のエネルギー帯は価電子帯と呼ばれ、電子が結晶中に束縛されていることを示す。一方最上部のエネルギー帯は伝導帯と呼ばれ、結晶中を電子が自由に動き回ることのできるエネルギーを持つことを示す。これらの間には禁制帯と呼ばれる領域があり、電子は存在し得ない。荷電粒子が結晶中を通過すると、そのエネルギーを吸収して電子が価電子帯から伝導帯へと移動する。もともと電子が満

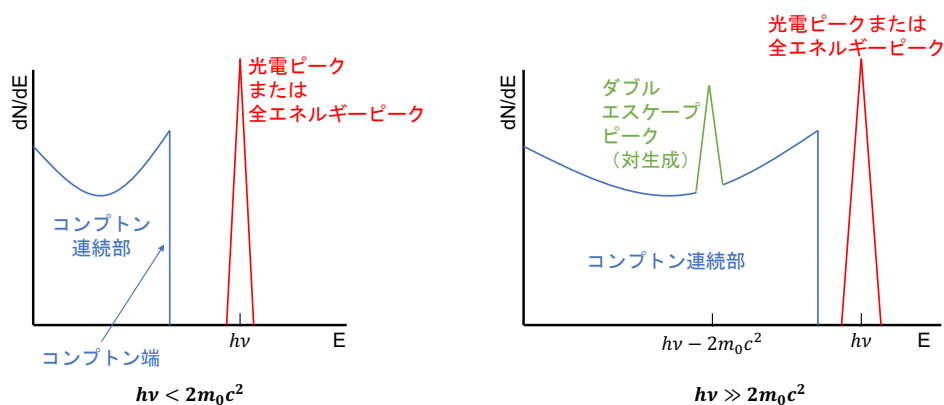


図 2.3.8: ガンマ線と物質の相互作用の結果シンチレータに付与されるエネルギーのスペクトル。左は入射エネルギーが 1 MeV 以下の場合、右は 1 MeV 以上の場合を表す。光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成由来のスペクトルをそれぞれ赤、青、緑で示している。

たしていた場所は正孔として残る。その結果、電子正孔対が生成される。通常、無機シンチレータには活性化物質が含まれている。活性化物質の電離エネルギーは通常の格子位置より低いので、正孔は素早く活性化物質の位置へ移動してそれを電離する。一方電子は、結晶中を自由に移動して電離された活性化物質に出会うまで動く。そこで電子は活性化物質の位置に落ち込み、独自の励起エネルギー状態を持った配位を形成する。これが図 2.3.9 の右側に示した活性化物質の励起状態である。その後活性化物質の基底状態へと遷移することで蛍光（シンチレーション光）を発する。無機シンチレータにおいても、光の遅い成分（燐光）が生じたり可視光の出ない遷移（消光）が起こったりすることがある。

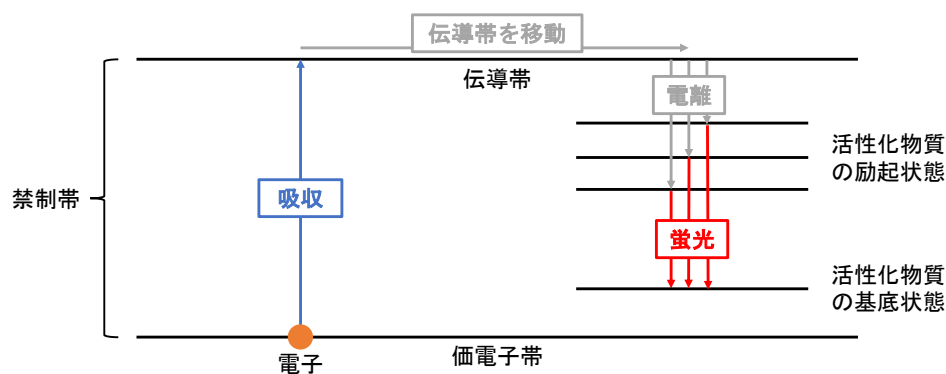


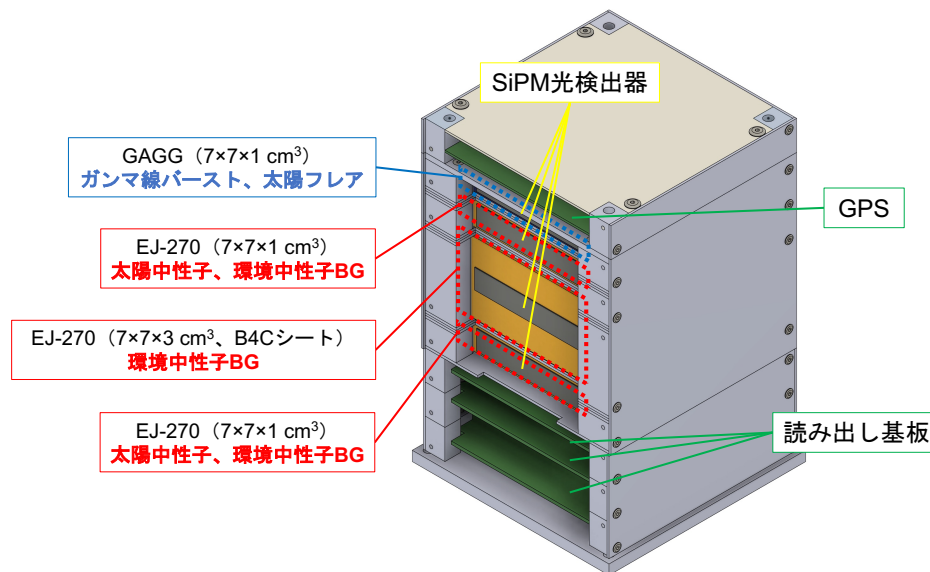
図 2.3.9: 活性化された結晶シンチレータのエネルギー帯構造。

2.4 MoMoTarO-ISS の構成

現在我々は、MoMoTarO-ISS と称した、MoMoTarO の ISS 搭載モデルの開発を行っている。本節では、この MoMoTarO-ISS の構成について述べる。

現在開発中の MoMoTarO-ISS のエンジニアリングモデル (EM) の CAD モデルを図 2.4.1 に示す。MoMoTarO-ISS は、上部から、GAGG ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 3 \text{ cm}^3$)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$) と 4 つのシンチレータが積層されており、図 2.4.2 で示したようなアルミニウム製

の筐体で覆う構造となっている。中央の $7 \times 7 \times 3 \text{ cm}^3$ の EJ-270 は B4C シートで覆われており、熱中性子を遮蔽して熱外中性子を測定する。側面の 4 面は 4 つの EJ-270 ($6 \times 6.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$) で囲まれている。



※側面の4面にEJ-270 ($6 \times 6.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$ 、**太陽中性子、環境放射線BG**) を搭載

図 2.4.1: MoMoTarO の EM の CAD モデル。中央に 2 種類のシンチレータが搭載されており、それぞれに MPPC が取り付けられている。

MoMoTarO のシステムブロックを図 2.4.3 に示す。MoMoTarO には、SiPM ボード、DAQ ボード、インターフェースボードの 3 種類の基板が導入されている。SiPM ボードはシンチレータからの光信号読み出しを行う。DAQ ボードは MPPC への電圧印加、アナログ処理、アナログ-デジタル (AD) 変換、信号波形処理、データ整形・出力などの役割をもつ。インターフェースボードは、SPySE との電源取得・信号送受信、DAQ Board との電源授受・通信、DAQ Board 同士のデータ同期、GPS 信号取得などの役割をもつ。

MoMoTarO 全体の信号処理は以下のような流れである。センター検出部の 4 つ、側面シールド部の 4 つの計 8 つのシンチレータから、浜松ホトニクス製の光検出器 SiPM (Multi-Pixel Photon Counter : MPPC の S13360 系) で光信号を読み出す。2 枚の読み出し用 DAQ ボードを連携して AD 変換し、GPS 時刻信号と合わせて収集する (図 2.4.3 上部)。GPS アンテナは上部に設置し、インターフェースボードで読み出す。このインターフェースボードは、2 枚の DAQ ボードと SPySE 側とのやりとりを媒介する役割もっており、データの回収、地上からの検出器パラメータの設定変更などのコマンド受信が可能である。さらに、検出器の電流値や温度などの House Keeping (HK) data も収集する。MoMoTarO-ISS の諸元を表 2.4.1 に示す。

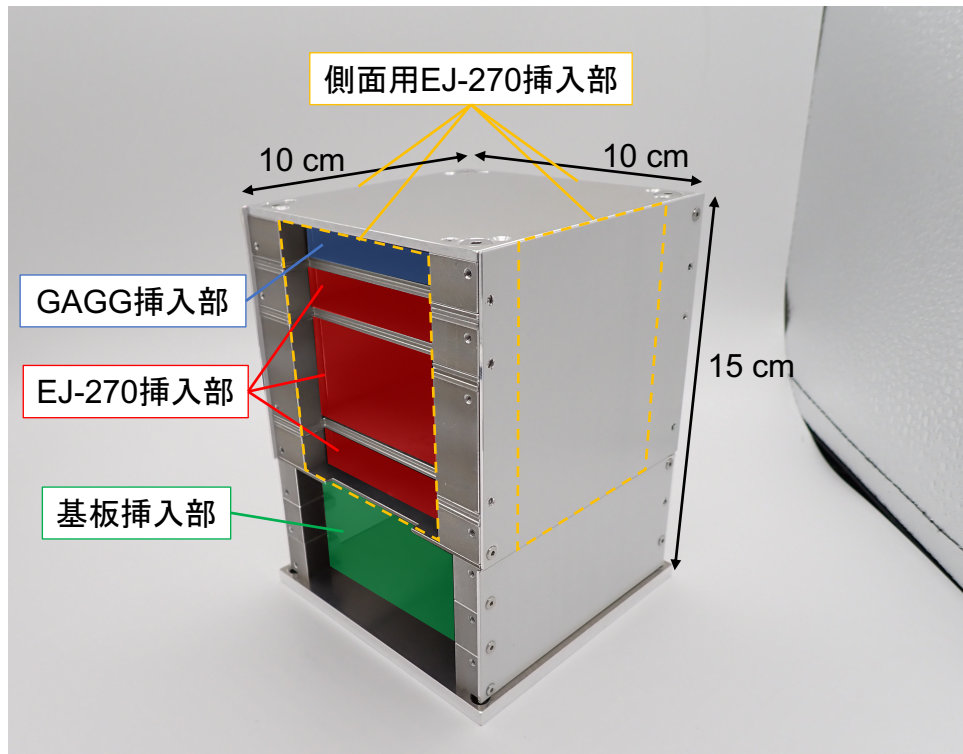


図 2.4.2: MoMoTarO を覆うアルミニウムの筐体の写真。厚さは 3 mm である。内部の空洞にシンチレータや基板を格納する。

表 2.4.1: MoMoTarO-ISS の諸元

諸元	設計値
重量	2 kg 以下
サイズ	10 × 10 × 15 cm ³
駆動電圧	5 V 系
電力	4 W 以下
通信量	1800 word/sec (1 word = 16 bit)
測定対象	熱中性子 熱外中性子 高速中性子 ガンマ線

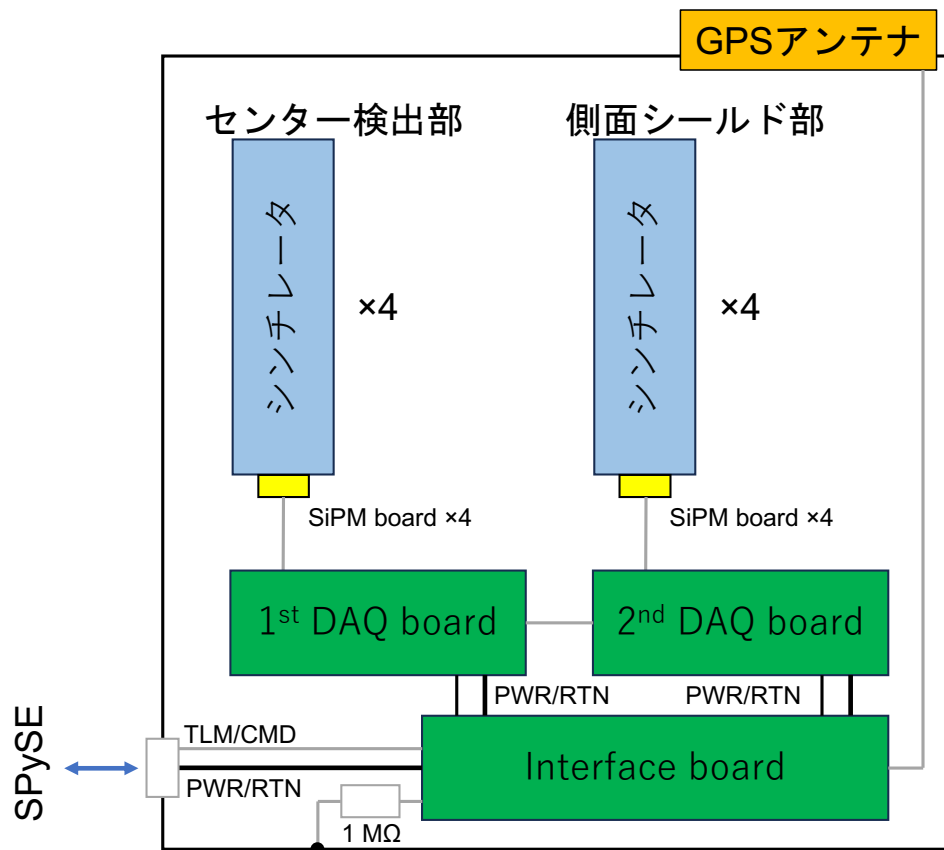


図 2.4.3: MoMoTarO 各部のブロックダイアグラムの概要。左側のセンター検出部のシンチレータは、図 2.4.1 の中央に収められている 3 つの EJ-270 と 1 つの GAGG である。右側の側面シールド部のシンチレータは、周囲の 4 面に搭載する 4 つの EJ-270 である。(MoMoTarO-ISS の提案時)

第3章

宇宙空間でのバックグラウンド

3.1 LEO でのバックグラウンド源

ISS が周回している地球低軌道 (low-Earth orbit : LEO、高度数百 km) 上で運用される装置は、地上で運用される検出器よりも遥かに強い放射線にさらされる。LEO 上でバックグラウンド源となる放射線として、銀河宇宙線、宇宙 X 線背景放射、Earth's radiation belts (ERB) がある。さらに、それらが地球大気と反応して生じるアルベド陽子やアルベド中性子、ISS などの筐体あるいは検出器自身と宇宙線が核反応を起こすことにより生じる粒子、放射化バックグラウンドなど、二次的な放射線も存在する。

銀河宇宙線は、太陽系外から飛来する荷電粒子で、星間空間のあらゆる方向から到来する。銀河宇宙線スペクトルを、図 3.1.1 に示す [59][60]。エネルギーは $10\text{--}10^{12}$ MeV まで幅広く、1 GeV 付近にピークを持つ。銀河宇宙線は、98% が陽子や重イオンなどのバリオン、2% が電子や陽電子などのレプトンで構成されている。さらにバリオンのうち 87% が陽子、12% がヘリウムイオン (α 粒子)、残りの 1% が重イオン (リチウムからウラン) で構成されている。約 1 GeV 以下のエネルギーを持つ銀河宇宙線のフラックスは太陽の 11 年周期の影響を受ける (図 3.1.1)。太陽活動極大期に、フラックスは小さくなる。これは、太陽風により形成される磁場が地球近辺を覆い、低エネルギーの荷電粒子の侵入を防ぐためである [61]。さらに、銀河宇宙線は荷電粒子で構成されているため、地磁気の影響を受ける。赤道あたりでは磁場は地表と並行であるため、高エネルギーの粒子以外は侵入しにくい。北極や南極では、地磁気が地表を向いているため、銀河宇宙線の粒子も地表に向かって流れやすい。そのため極域においては、赤道上よりも多くの銀河宇宙線に晒されることとなる。

宇宙 X 線背景放射 (cosmic X-ray background; CXB) は、数 keV から数百 keV に渡って等方的に観測される X 線である。CXB は、遠方銀河の中心にある超大質量ブラックホールに降着して X 線で輝いている活動銀河核に由来して生じる [62][63][64]。CXB は多数の活動銀河核の重ね合わせであるが、低エネルギー帯域 (数 keV 程度) では X 線望遠鏡による分解が進んでおり [65]、光学的に明るいくエーサーとセイファート銀河が卓越している [66] と考えられている。10 keV 以上では X 線望遠鏡の性能の問題から光源の分解が進んでいないものの、数百 keV の帯域まで依然として活動銀河核が卓越していると考えられている [65]。図 3.1.2 に、いくつかの観測機器で測定された CXB のスペクトルを示す。CXB は、30–40 keV にボール状の緩やかなピークを持つ。

Earth's radiation belts (ERB) は、地磁気に捕捉された高エネルギーの陽子や電子がなす帯状の領域のことであり、ヴァン・アレン帯とも呼ばれている。ERB の構成を図 3.1.3 に示す。荷電粒子は地磁気線に沿っ

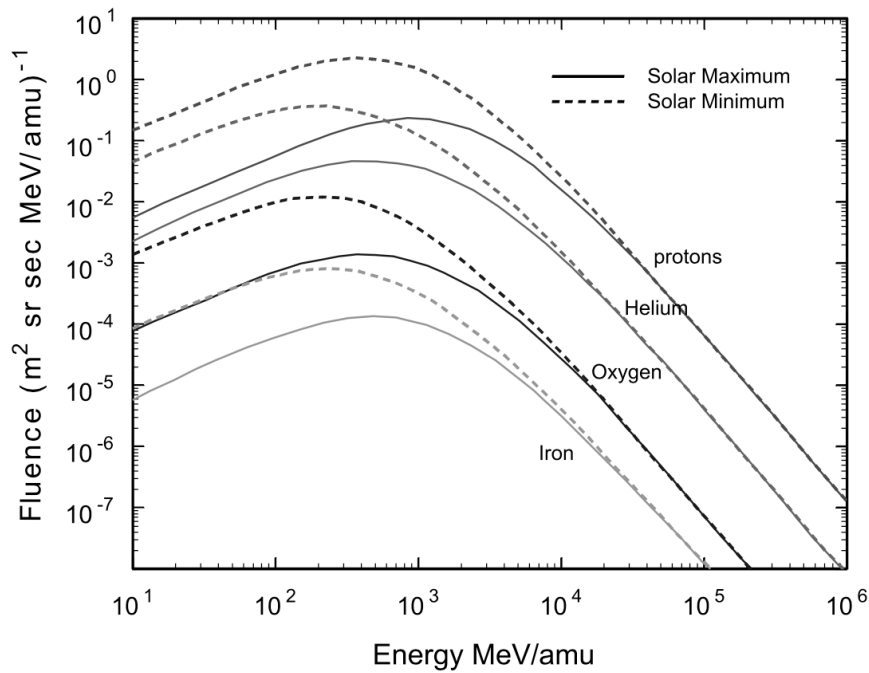


図 3.1.1: 地球低軌道上の銀河宇宙線スペクトルのモデル。横軸に粒子あたりのエネルギー、縦軸にフラックスを示している。実線が太陽の極大期、破線が太陽の極小期を示している。陽子、ヘリウム、酸素、鉄のフラックスを掲載している。[59][60]

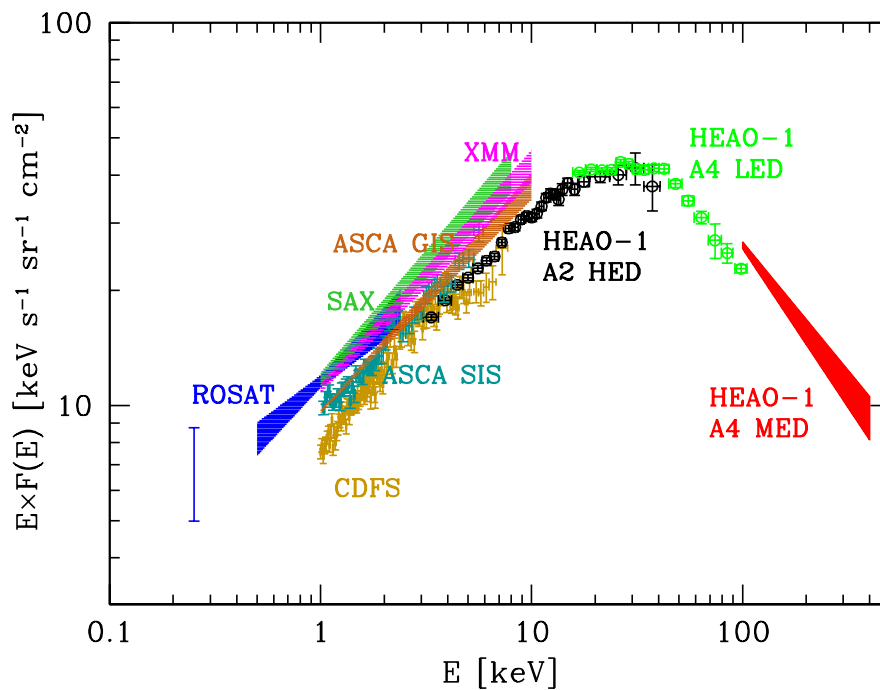


図 3.1.2: 0.2 keV から 400 keV までの宇宙 X 線背景放射のスペクトル [64]。フラックスにエネルギーをかけて表示。参照された観測データは以下：ROSAT 0.25 keV[67]；ROSAT 0.5-2.4 keV[68]；HEAO-1 A2 HED + A4 LED[69][70]；HEAO-1 A4 MED[71]；SAX[72]；ASCA SIS[73]；ASCA GIS[74]；XMM[75]；CDFS[76]；

てサイクロトロン運動を行い、陽子は西に、電子は東に移動する。

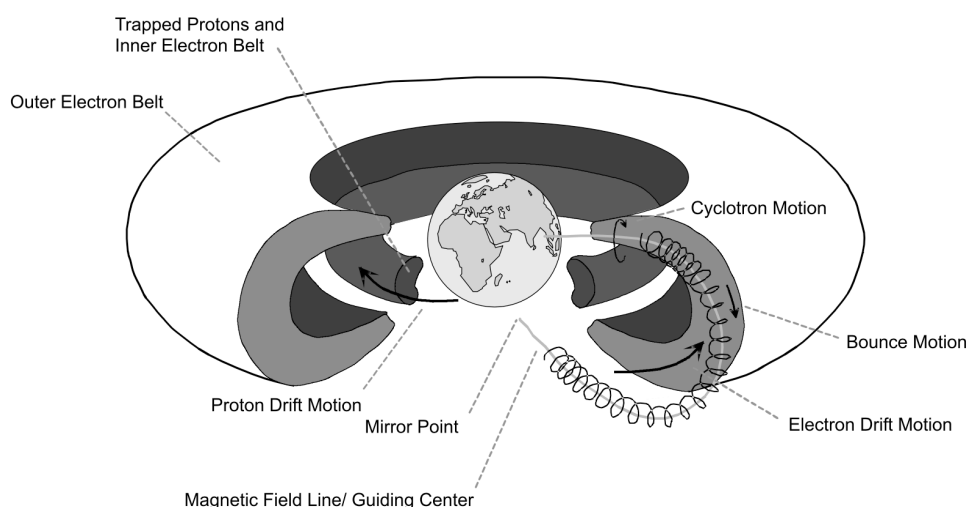


図 3.1.3: ERB の概念図 [59]。荷電粒子は、地磁気の磁力線周りのサイクロトロン運動、磁力線に沿ったバウンス運動、地球の周りのドリフト運動の3種類の運動をする。

捕捉電子は、二つの帯に分かれている。一つ目の内側の帯は高度約 2.4 地球半径まで伸びており、5 MeV 未満のエネルギーの電子で構成されている。二つ目の外側の帯は高度約 2.8 から 12 地球半径まで伸びており、最大で約 7 MeV のエネルギーを持つ電子が含まれている。外側の帯のフラックスは、内側の帯のフラックスよりも一桁大きい。電子フラックスのほとんどは、制動放射 X 線生成が重要になるエネルギー (~10 MeV) よりも低いところにある。これに加えて、最も強い電子は LEO よりかなり高い高度で発生する。

捕捉陽子は、高度約 2.4 地球半径までの領域でのみ発生する。そのフラックスは、地球からの距離の関数として強度が減少する。陽子のエネルギーは数 MeV から数百 MeV におよび、150 MeV から 250 MeV の間に幅広いピークを形成している。捕捉陽子帯の大部分は、ISS の軌道 (高度 380 km) よりも高い高度にある。しかし、地球の磁場が自転軸からわずかにずれている影響で、ブラジル沖上空には地磁気が地表に異常接近する南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly : SAA) と呼ばれる領域がある。ISS が SAA を通過するとき、捕捉陽子による放射は最大となる。したがって、放射線量の半分は SAA に捕捉された陽子から、半分は高緯度での銀河宇宙線からのものとなる [59][60]。

ERB のスペクトルを図 3.1.4 と図 3.1.5 に示す。これは SPENVIS^{*1}を用いて出力したスペクトルである。SPENVIS は、周回軌道やミッションの情報を入力すると (図 3.1.6)、軌道上での捕捉陽子と捕捉電子のフラックスを出力する Web サイトである。ここで用いられている AP-8 (陽子) と AE-8 (電子) の二つのモデル [77] は、1958 年から 1970 年までの観測に基づいて J.I.Vette により開発されたモデルである。太陽活動極大期と極小期の二種類のデータについて、電子は 0.04–7 MeV のフラックスを、陽子は 0.1–400 MeV のフラックスを表示させることができる。

二次粒子は、宇宙線が地球大気と相互作用を起こすことで生じる粒子のことで、アルベド陽子、中性子、光子 (ガンマ線) などがある。それぞれのスペクトルを、図 3.1.7[79]、図 3.1.8[80]、図 3.1.9[81] に示す。アルベド陽子は 10^{-2} – 10 GeV、アルベド中性子は 10 eV– 10^2 MeV、アルベド光子は 10^{-2} – 10^4 MeV までと、い

*1 <https://www.spennis.oma.be/>

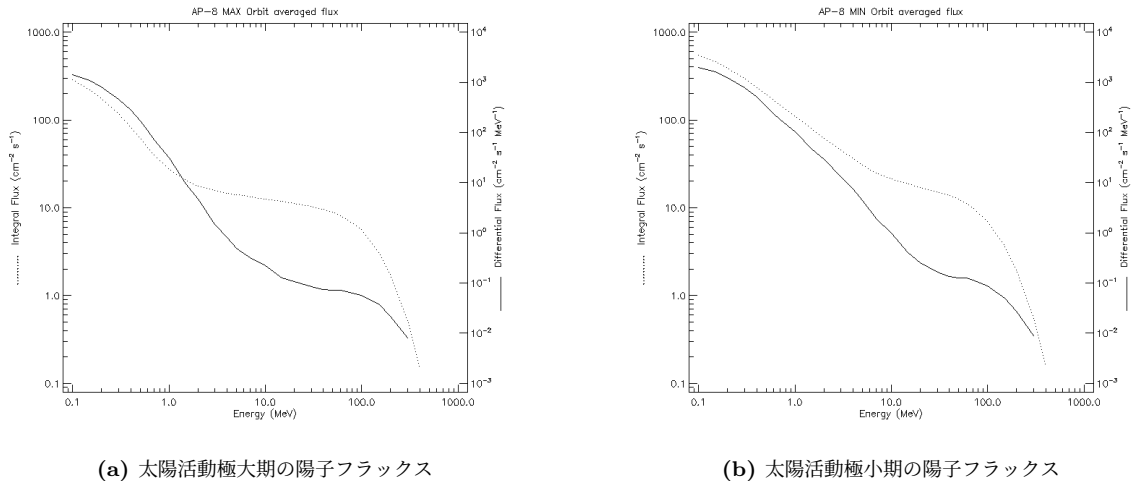


図 3.1.4: SPENVIS[78] で出力した捕捉陽子のフラックス (モデル: AP-8[77])。ISS 軌道上 (高度 380 km) で 10 日間運用した際の平均フラックスを示している。実線は微分フラックス、破線は積分フラックスを表す。(a) は太陽活動極大期、(b) は太陽活動極小期の電子フラックスを示す。軌道の詳細は図 3.1.6 に示している。

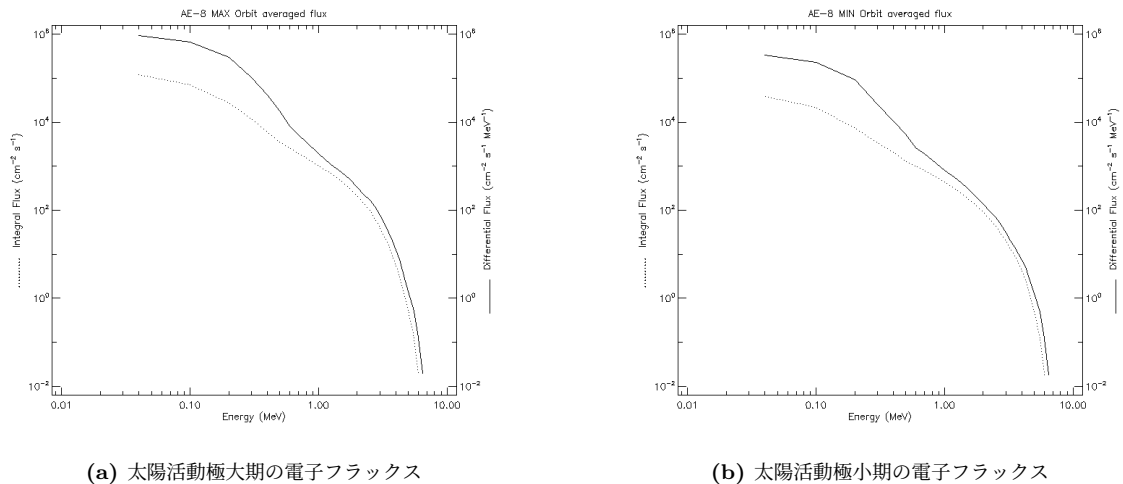


図 3.1.5: 図 3.1.4 と同様の図を捕捉電子について描いた図。

ずれも広範囲のエネルギーに渡って存在している。

以上をまとめたのが表 3.1.1 である。

また、宇宙線で支配的である 100–400 MeV の高エネルギーの陽子が検出器に入射すると、内部で核破砕反応が起きて放射性同位体が生じる。この同位体が崩壊する際に生じるガンマ線や β 線などの放射線を、放射化バックグラウンドという。これは特に SAA を通過する際に顕著となる。短寿命成分は SAA 通過後すぐにレートが下がるが、長寿命成分は徐々に蓄積されていき、重要なバックグラウンド源となる。

3.2 過去の検出器で推定もしくは測定されたバックグラウンドレート

LEO 上で運用される検出器は、前節で示したように多くの放射線に晒されるため、そのバックグラウンドレートの理解は検出器の運用において重要である。本節では、いくつかの検出器におけるシミュレーション

Segment title:

ISS

Orbit type: general

Orbit start: calendar date

01 Jul 2024 00 : 00 : 00

Representative trajectory duration [days]: 10

Altitude specification: perigee and apogee altitudes

Perigee altitude [km]: 417

Apogee altitude [km]: 420

Inclination [deg]: 51.6418

R. asc. of asc. node [deg w.r.t. gamma50]: 279.094

Argument of perigee [deg]: 181.628

True anomaly [deg]: 321.713

図 3.1.6: SPENVIS で入力した ISS の軌道の詳細情報。試行期間を 2024 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒からの 10 日間としている。ISS 軌道の、近地点、遠地点、軌道傾斜角、昇交点赤経、近地点引数、真近点角の情報を入力した。

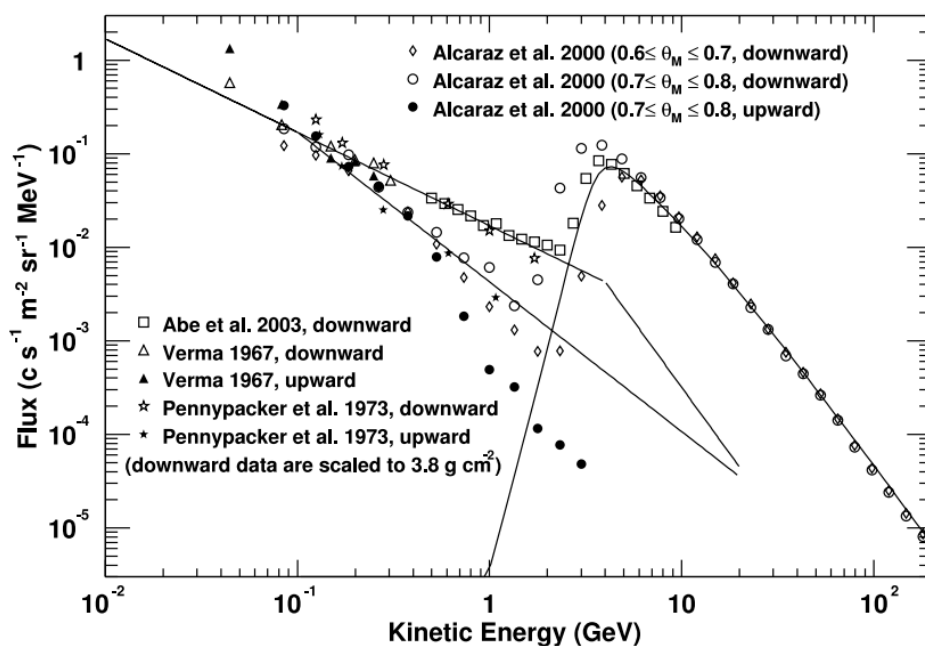


図 3.1.7: 宇宙線の陽子とアルベド陽子のスペクトル。1–10² GeV までの実線が一次宇宙線の陽子、10⁻²–10 GeV までの実線がアルベド陽子を表すモデルである。[79][82][83][84][85]

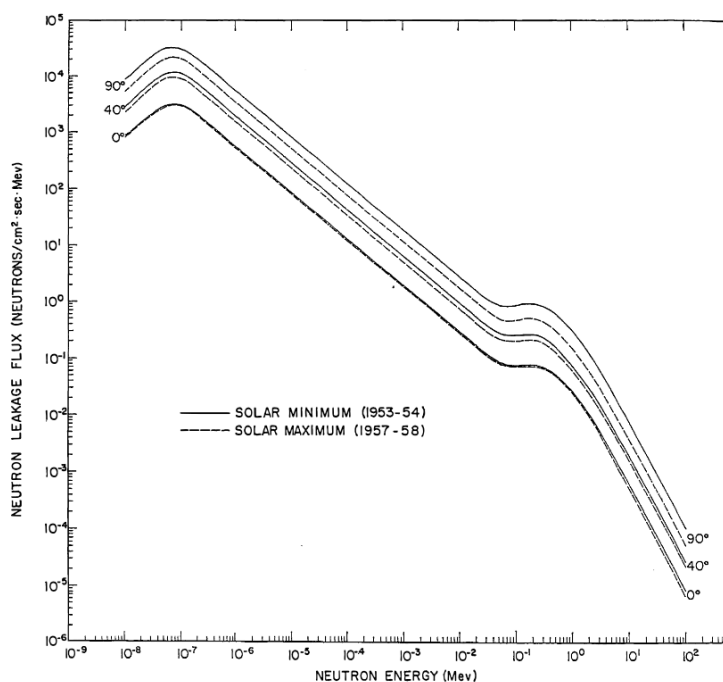


図 3.1.8: アルベド中性子のスペクトルのモデル [80]。実線は太陽極小期、破線は太陽極大期を表し、角度は地磁気緯度を表す。10 MeV より上の領域は Hess et al. (1959) [86] に基づく。

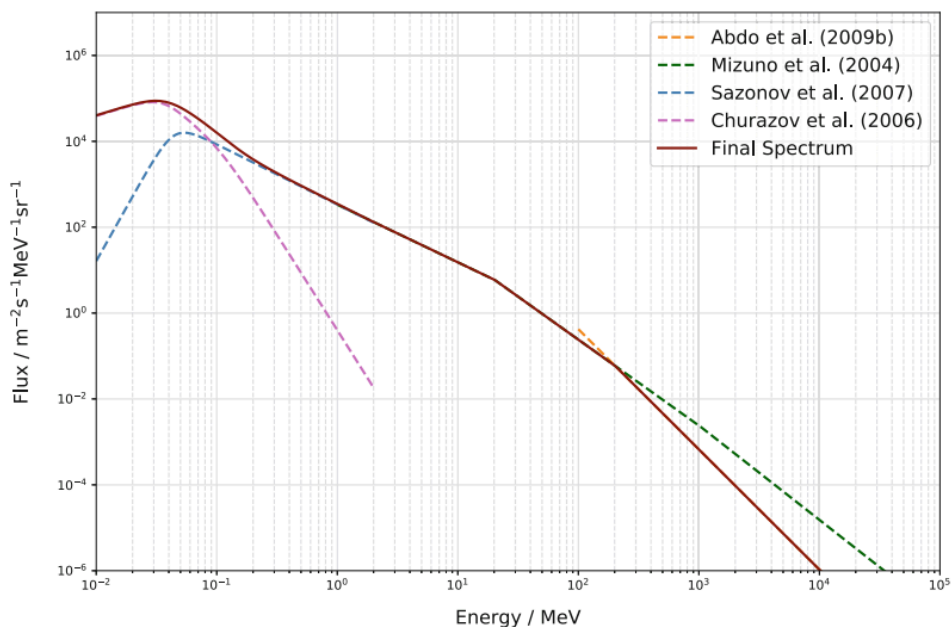


図 3.1.9: アルベド光子のスペクトルのモデル [81]。高度 550 km の軌道を想定しており、INTEGRAL 衛星と Fermi-LAT の観測に基づいた複数のモデル [87][79][88][89] を組み合わせている。

表 3.1.1: 3.1 節で紹介したバックグラウンドのまとめ。

バックグラウンド源	粒子種	エネルギー範囲
銀河宇宙線	バリオン (陽子、 α 粒子、重イオン)、レプトン (電子、陽電子)	$10\text{--}10^{12}$ MeV
CXB	X 線	数 keV–数百 keV
ERB	陽子	1 keV–300 MeV[90]
	電子	1 keV–10 MeV[90]
アルベド	陽子	$10^{-2}\text{--}10$ GeV
	中性子	10 eV– 10^2 MeV
	光子	$10^{-2}\text{--}10^4$ MeV

や、既に運用されている検出器の観測結果を紹介し、それぞれのバックグラウンドレートについて述べる。

Xie et al.(2015)[91] では、Geant4 を用いて、LEO 上で運用する衛星のバックグラウンドレートの推定を行っている。2017 年に打ち上げられた Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT) は、1–250 keV に感度を持つ 3 種類の検出器を搭載 (図 3.2.1[91]) しており、銀河面や X 線連星の観測を目的とした衛星である。この論文では 3 つの検出器のうち、20–250 keV に感度を持つ High Energy Telescope (HE) のレートをシミュレーションしている。この検出器は NaI (Tl) シンチレータ (直径 19 cm、厚さ 3.5 mm の円柱形、検出用) と CsI (Na) シンチレータ (直径 19 cm、厚さ 40 mm の円柱形、シールド用) を重ねたものを 18 個集めて構成されており、有効面積は 5000 cm^2 である。



図 3.2.1: HXMT の構造 [91]。左側の 3 つの箱が Low Energy X-ray Telescope (LE、1–15 keV)、右側の 3 つの箱が Medium Energy X-ray Telescope (ME、5–30 keV)、中心にある 18 個の検出器が High Energy X-ray Telescope (HE、20–250 keV) である。

Xie et al.(2015) で想定しているバックグラウンドは、CXB、銀河宇宙線、SAA、アルベドガンマ線、アルベド中性子の 5 つである。HXMT の軌道 (軌道傾斜角 43 度、高度 550 km) でのこれらの放射線を Geant4

上で照射して得たバックグラウンドレートが表 3.2.1 である。軌道上で 100 日運用した後の HE でのバックグラウンドレートはおよそ 540 counts/s である。有効面積が 5000 cm² であり、エネルギー帯域が 20-250 keV であることを考えると、カウントレートは $5.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-2}$ と変換できる。これは、同じ NaI (Tl) /CsI (Na) シンチレータを利用している Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE) 衛星の High Energy X-Ray Timing Experiment (HEXTE) で取得したバックグラウンドレートの $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-2}$ と概ね同様である [92]。

要素	平均カウントレート (count/s)	統計誤差 (count/s)
CXB (prompt)	51.94	0.23
アルベドガンマ線 (prompt)	86.34	0.25
銀河宇宙線 (prompt/delayed)	32.81/110.72	0.13/0.24
アルベド中性子 (prompt/delayed)	3.32/1.48	0.0097/0.0065
SAA (delayed)	254.01	1.64
合計	540.62	2.51
合計 (1 cm ³ あたり)	~0.30	-

表 3.2.1: 18 個の HE (感度をもつ NaI (Tl) 1 つあたりの体積は ~100 cm³) の 100 日後のバックグラウンドレート [91]。引用元に単位体積あたりのカウント数を追加している。prompt は散乱や電離などの素早い反応によるバックグラウンドを、delayed は放射化バックグラウンドを示す。

MoMoTarO に搭載予定のシンチレータの一つである GAGG を搭載する衛星の計画に、スウェーデンの InnoSat platform を用いて打ち上げられる予定の SPHiNX[93] がある。SPHiNX はガンマ線バーストの偏光観測を目的としており、プラスチックシンチレータ (EJ-204) と GAGG を用いる。GAGG がプラスチックシンチレータを囲む構造となっている (図 3.2.2[93])。プラスチックシンチレータに入射した光子がコンプトン散乱を起こし、散乱した光子を GAGG で取得することで、入射光子の偏光を測る。

Xie et al. (2018) [94] では、SPHiNX の軌道上でのバックグラウンドレートを Geant4 を用いて推定している。SPHiNX の軌道傾斜角が 53 度、高度が 550 km であることを考慮して、Xie et al. (2015) と同様のスペクトルを Geant4 で照射して得たバックグラウンドレートが、表 3.2.2[94] である。SPHiNX の観測において主要となる two-hit event のバックグラウンドレートの合計値は、323 counts/s となった。また、1 年運用した場合の放射化バックグラウンドはおよそ 190 counts/s である (図 3.2.3[94])。放射化バックグラウンドの推移が図 3.2.3 のようになる理由は、SAA を通過するごとに生成される放射性同位体の、長寿命成分が蓄積されていくからである。この推定では、ほとんどが筐体のアルミニウム由来のものであると考えている。合計のバックグラウンドレートは 513 counts/s であるという結果が得られた。

GAGG を用いた LEO 上でのバックグラウンドの計測を実際に行った検出器に、GAGG Radiation Instrument (GARI) がある [95]。GARI には、 $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の GAGG を搭載し、0.040–4.0 MeV に感度をもつ GARI-H7 と、 $3.5 \times 3.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$ の GAGG を搭載し、0.2–2.0 MeV に感度をもつ GARI-H8 の 2 種類が存在する。どちらも $15.7 \text{ cm} \times 14.5 \text{ cm} \times 11.4 \text{ cm}$ のアルミの箱で覆われている。これらの検出器は、

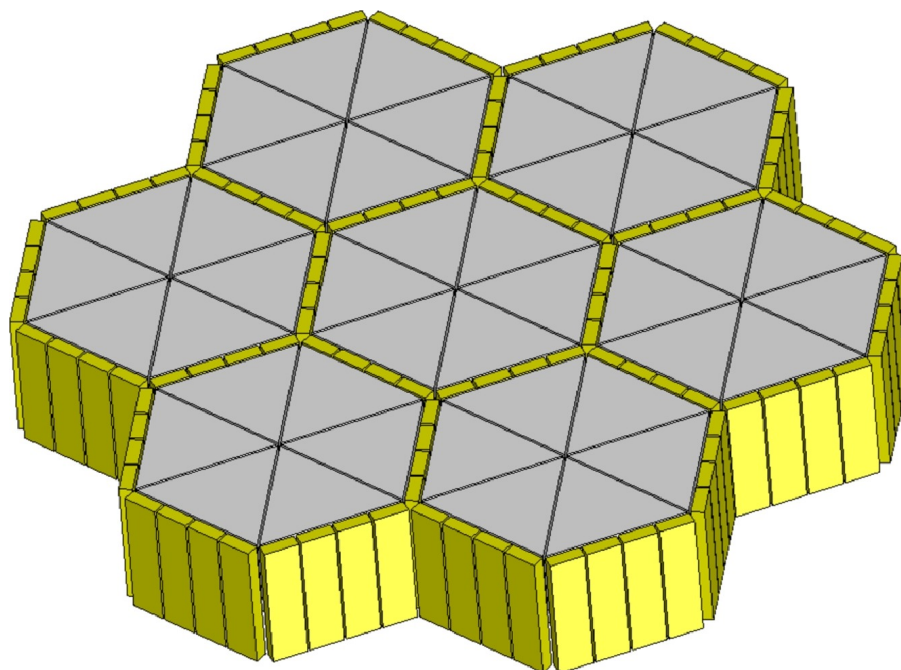


図 3.2.2: SPHiNX に搭載するプラスチックシンチレータと GAGG のジオメトリ。灰色はプラスチックシンチレータを、黄色は GAGG を示している。一つの六角柱構造は一辺が 65 mm、高さが 60 mm であり、全体の最大幅は 40 cm 程度である。[93]

要素	One-Hit Rate (Hz)	Two-Hit Rate (Hz)	Higher-Multiplicity Rate (Hz)
CXB	1270.1	195.3	37.5
アルベドガンマ線	397.5	112.9	30.8
アルベド中性子	14.3	5.1	2.7
一次宇宙線	15.5	5.3	2.9
二次宇宙線	9.2	4.5	3.3
合計	1706.6	323.1	77.2
合計 (1 cm ³ あたり)	~0.42	~0.080	~0.019

表 3.2.2: SPHiNX (体積~4000 cm³) の放射線ごとのバックグラウンドレート [94]。バックグラウンドとシンチレータとの反応回数が一回のものを One-Hit Rate (Hz)、二回のものを Two-Hit Rate (Hz)、三回以上のものを Higher-Multiplicity Rate (Hz) としている。

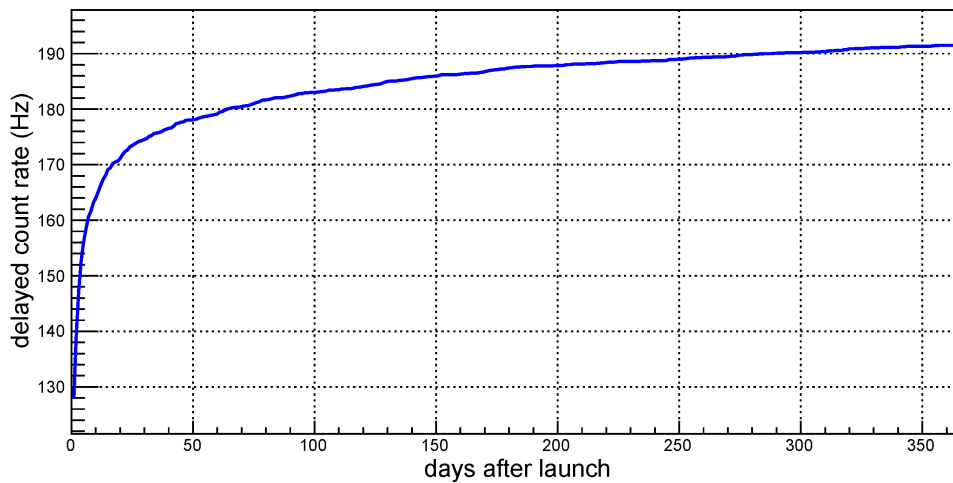


図 3.2.3: SPHiNX の delayed background のレートの推移 [94]。two-hit event のレートを示している。

2021 年 12 月 12 日に打ち上げられ、ISS の曝露部に搭載された (図 3.2.4[95])。

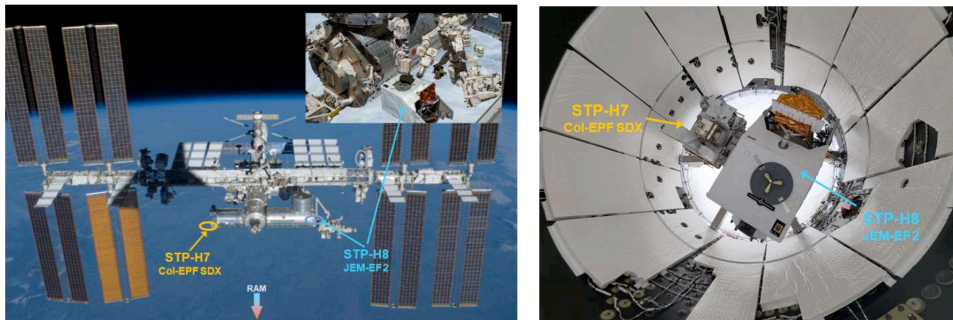


図 3.2.4: 左: ISS 上での GARI の配置。STP-H7 は GARI-H7 の搭載位置、STP-H8 は GARI-H8 の搭載位置を示している。右: スペース X 社のドラゴンに搭載される GARI の写真。[95]

2 種類の GARI で測定した地球上での放射線の強度マップが図 3.2.5、3.2.6 である [95]。この論文のみからは数値データは読み取れないものの、A で示される通常の領域では、GARI-H7 のレートは $O(10^2)$ counts/s、GARI-H8 のレートは $O(10)$ counts/s であることがわかる。また、B で示される SAA の領域では、いずれの検出器でもカウントレートが一桁ほど上昇することがわかった。C で示される領域では、捕捉電子が宇宙船と反応し制動放射を起こすため、レートが上昇した。

それぞれの検出器のライトカーブを示しているのが図 3.2.7 である。SAA を通過するたびにバックグラウンドレートが上昇していることがわかる。08:00 以前の GARI-H7 のベースラインのレートが高いのは、ISS にソユーズがドッキングされており、ソユーズに搭載されていた ^{137}Cs による放射線を受けていたためである。この図から、GARI-H7 の平常時のバックグラウンドレートは 300–600 counts/s、GARI-H8 の平常時のバックグラウンドレートは 50–200 counts/s 程度であると推定できる。SAA 通過時は捕捉陽子由来の高い光

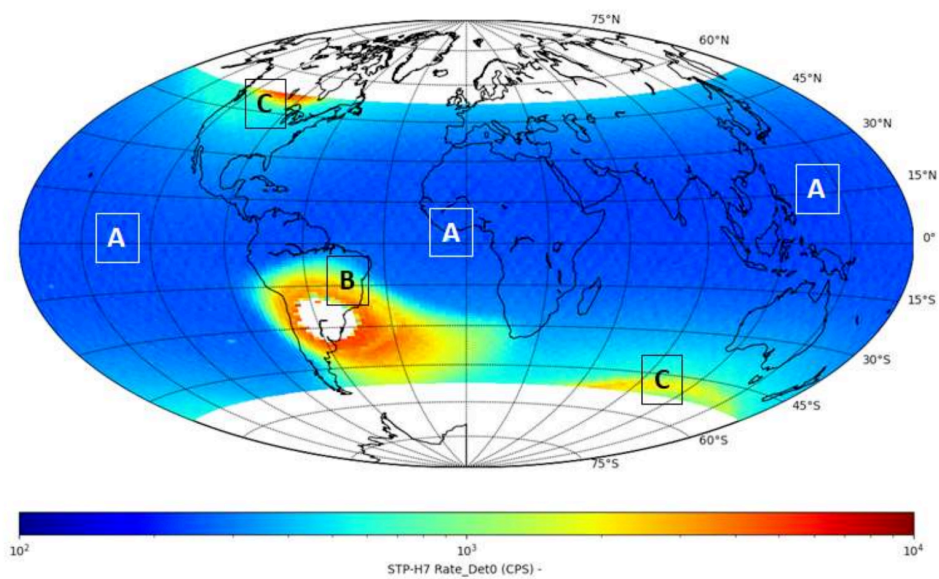


図 3.2.5: GARI-H7 で測定したバックグラウンドレートのマップ [95]。B は SAA、C は捕捉電子と宇宙船による制動放射が支配的になるエリア、A はそれ以外のエリアを表す。

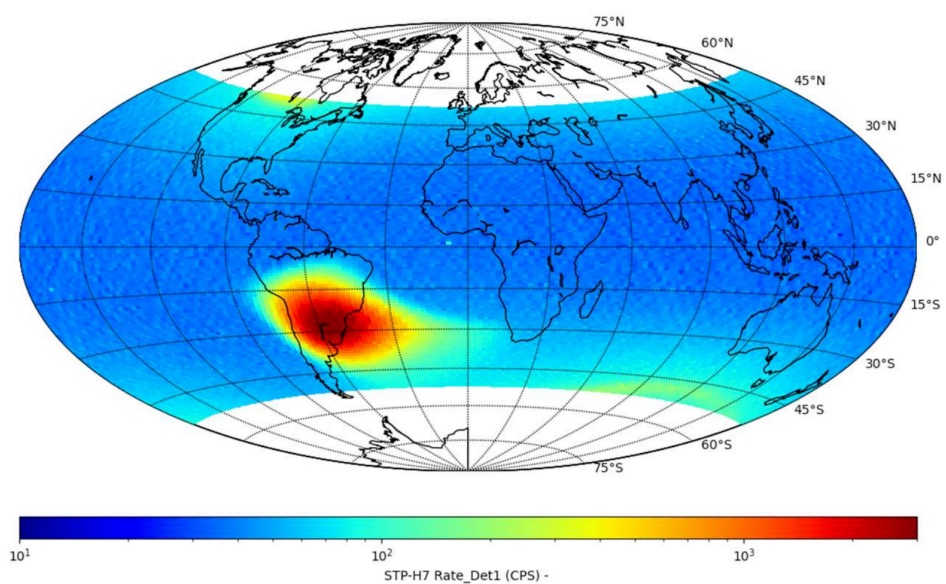


図 3.2.6: 図 3.2.5 と同様に、GARI-H8 で測定したバックグラウンドレートのマップ [95]。

量が見られるため、GARI-H7 の電源は落としていた。

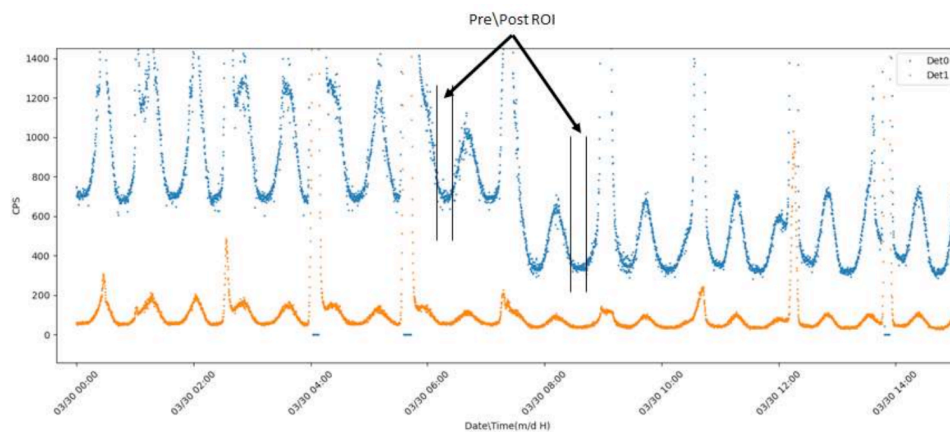


図 3.2.7: GARI で測定した軌道上のバックグラウンドのライトカーブ [95]。青が GARI-H7 による測定、オレンジが GARI-H8 による測定を示す。08:00 以前で GARI-H7 のレートが高いのは、ISS にソユーズがドッキングされており、ソユーズに搭載されていた ^{137}Cs による放射線を受けていたためである。

以上の過去の検出器のバックグラウンドのレビューから、単位体積あたりのバックグラウンドレートを概算したものが表 3.2.3 である。非放射化バックグラウンドについて、推定値と実測値には 2 桁程度の違いがある。MoMoTarO-ISS は 1.0–1.5 U のサイズを想定しており、検出部分全体の体積はおよそ 1000 cm^3 である。表 3.2.3 に基づいて考えると、MoMoTarO-ISS 全体の非放射化バックグラウンドレートはおよそ $10^2\text{--}10^4 \text{ counts/s}$ となることが予想される。放射化バックグラウンドについては、二つのシミュレーションの結果はオーダーで一致している。このことから、MoMoTarO-ISS 全体の放射化バックグラウンドレートはおよそ $10\text{--}10^2 \text{ counts/s}$ となることが予想される。

表 3.2.3: 3.2 節で紹介した種々の検出器の単位体積あたりのバックグラウンドレートのまとめ。

検出器	構成	推定/実測	非放射化 BG	放射化 BG
			(counts/s/cm ³)	(counts/s/cm ³)
HXMT/HE	NaI (Tl)	推定	~0.23	~0.062
SPHiNX	GAGG、 プラスチックシンチレータ	推定	~0.52	~0.048
GARI-H7	GAGG	実測	~10–20	-
GARI-H8	GAGG	実測	~20–40	-

第4章

陽子照射試験による放射線耐性検証

ISS 軌道上では、3.1 節で示したような種々の放射線に晒されるが、特に高エネルギー（～数百 MeV）の陽子が入射すると、核反応によって放射性同位体が生じ、バックグラウンド源となる。この同位体を特定するとともに、シンチレータの性能劣化を定量的に評価し、放射線耐性を調べるために陽子ビームの照射試験を行った。本章では、この照射試験の概要とその前後に行った測定、その結果について報告する。

4.1 概要

陽子照射実験は、若狭湾エネルギー研究センター（Wakasa wan Energy Research Center : WERC、[96]）で、2023 年 10 月 25 日から 2023 年 10 月 27 日にかけて実施された。WERC は福井県敦賀市にある研究施設である。タンデム加速器とシンクロトロン加速器を備えており、陽子を最大で 200 MeV まで加速することができる [97]。

照射対象のシンチレータは EJ-270、GAGG の 2 種類であり、サイズはいずれも $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ である。図 4.1.1 は、それらの写真である。照射したビームについて、照射面積は $2.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$ 、単位時間あたりの照射量は $\sim 2.3 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ である。照射用のシンチレータはそれぞれ 3 つ用意し、照射時間は 7 s、74 s、700 s の 3 回の実験をそれぞれに対して行った。これらはそれぞれ 0.1、1、10 krad の照射と同等である。ISS 軌道上での陽子のドーズ量は 10 年で $\sim 10 \text{ krad}$ [2] であるため、これらの照射はそれぞれ 0.1、1、10 年に対応する。照射した陽子のエネルギーは 200 MeV であり、これは銀河宇宙線で主要となる典型的な陽子のエネルギー（～数百 MeV）と合致する。表 4.1.1 に、照射についてのデータを示す。シンチレータには #4 から #7 までの番号をつけており、#4 : 0.1 krad、#5 : 1 krad、#6 : 10 krad、#7 : 照射なしとしている。

図 4.1.2 は、照射室の様子である。別室にあるタンデム加速器とシンクロトロン加速器で加速された陽子が、奥の装置から手前のシンチレータに向かって照射される。また、陽子照射時の GAGG のモニタリング画面の写真を図 4.1.3 に示す。GAGG が肉眼でわかるほど光っているところを確認できる。

4.2 照射前後の測定

陽子を照射したシンチレータと比較用の照射していないシンチレータに対して、照射前後に性能劣化や放射化バックグラウンド源を調べるためにスペクトル測定を行った。

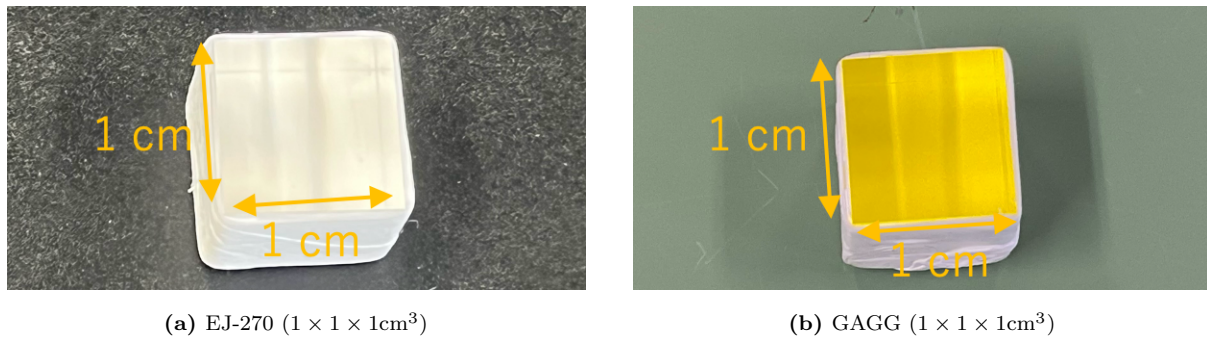


図 4.1.1: 照射したシンチレータの写真。(a) は EJ-270 を、(b) は GAGG の写真である。後の測定のために、5 面はテフロン反射材を数回巻いており、1 面は MPPC を接着するために剥き出しとなっている。

表 4.1.1: 照射内容。いずれも 200 MeV の陽子を照射している。照射面積は $2.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$ 、単位時間あたりの照射量は $\sim 2.3 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ である。また、ビームの上流に EJ-270 を、下流に GAGG を設置している。

日時	照射時間 (s)	照射対象	照射量 (krad)
2023/10/26 11:17	7	EJ-270_4	0.1
2023/10/26 11:17	7	GAGG_4	0.1
2023/10/26 12:16	74	EJ-270_5	1
2023/10/26 12:16	74	GAGG_5	1
2023/10/26 13:26	700	EJ-270_6	10
2023/10/26 13:26	700	GAGG_6	10

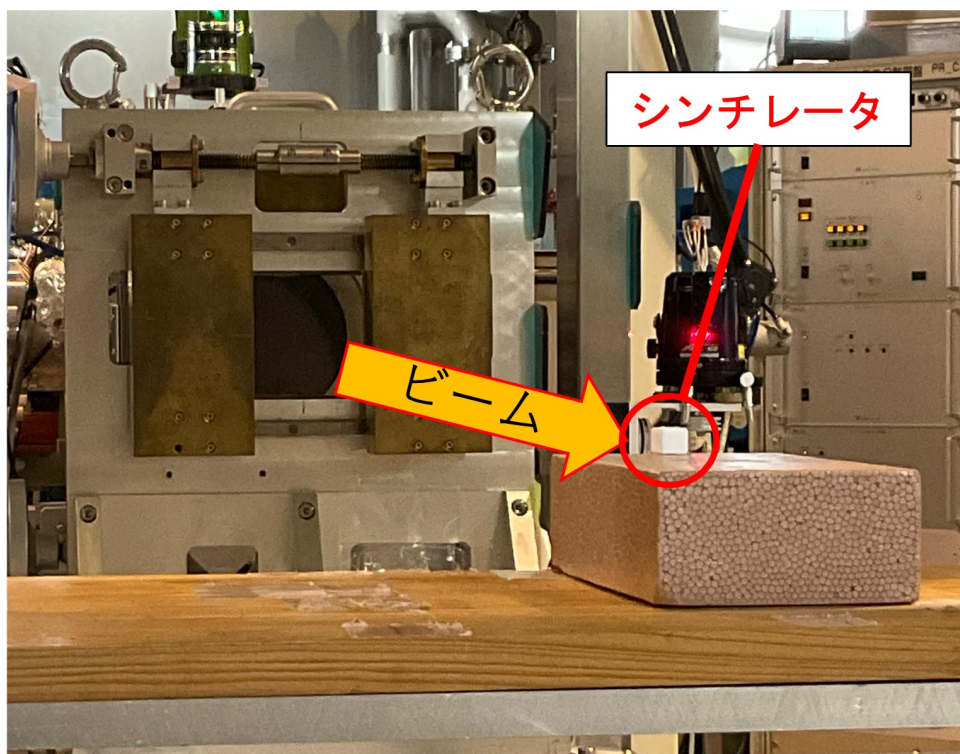


図 4.1.2: 照射室の様子。奥の装置から手前のシンチレータに向かって陽子が照射される。

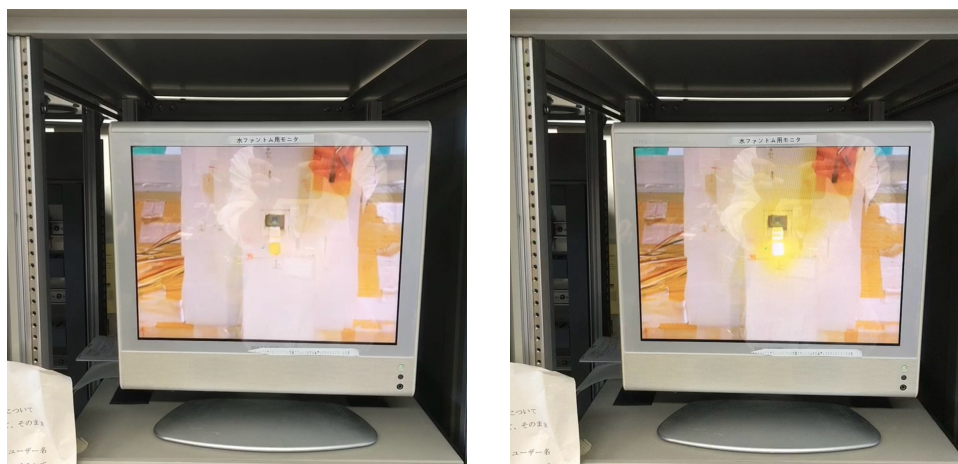


図 4.1.3: GAGG への陽子照射時のモニタリング画面の写真。左は光っていない時、右は光っている時の画像である。

4.2.1 照射シンチレータの内部測定

照射前後のシンチレータの分光スペクトルの性能評価や、短寿命の放射化バックグラウンドの核種の特特定を行うために、シンチレータに MPPC (S14160-6050HS、受光面積 $6.0 \times 6.0 \text{ mm}^2$) を装着して、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{252}Cf 、バックグラウンドのスペクトルを取得した。

図 4.2.1 は、シンチレータからの信号を取得するための治具の写真である。また、測定の設定アップの模式図を図 4.2.2 に示す。シンチレータがむき出しの面に光学グリース (EJ-550、Eljen Technology 社) を塗った後、その面を下にして、左下の発泡スチロールに空けられた穴にシンチレータを差し込む。下部には光検出器 (Silicon Photomultiplier, SiPM) が設置されており、シンチレータの発光を検出する。SiPM は、浜松ホトニクス製の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC、型番は S14160-6050HS) を用いている。MPPC を MoMoTarO ボードに接続する。これは信号のアナログ処理 (電荷電圧変換、増幅、整形) や MPPC の HV 印加を行うデバイスである。出てきた信号を Pocket MCA 8000D で読み出して、PC にデータを保存した。

この治具を用いて、EJ-270 では ^{252}Cf 、 ^{137}Cs 、バックグラウンドの照射データを、GAGG では ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、バックグラウンドの照射データを取得した。測定の一例として、図 4.2.3 に ^{252}Cf 測定の様子を示す。線源とシンチレータの間に側面 $20 \times 10 \text{ cm}^2$ 、厚さ 5 cm のポリエステル製減速材を設置し、熱中性子由来のスペクトルを取得した。取得したデータは、1 イベントごとの時刻情報は取得しておらず、測定時間内に積算されたチャンネルごとのカウント数を出力するものとなっている。

この測定で取得したデータの種類とその個数について、表 4.2.1 と表 4.2.2 に示す。GAGG (10 krad) については、照射試験直後の線量が管理区域から持ち出せるほどに減少していなかったため、京大での実験は行っていない。

4.2.2 CsI シンチレータによる測定

特に EJ-270 について、生じた同位体の半減期から短寿命の放射化バックグラウンドを特定するために、ビーム照射後に CsI シンチレータを用いて EJ-270 から外部に出てくる放射化バックグラウンドのガンマ線を

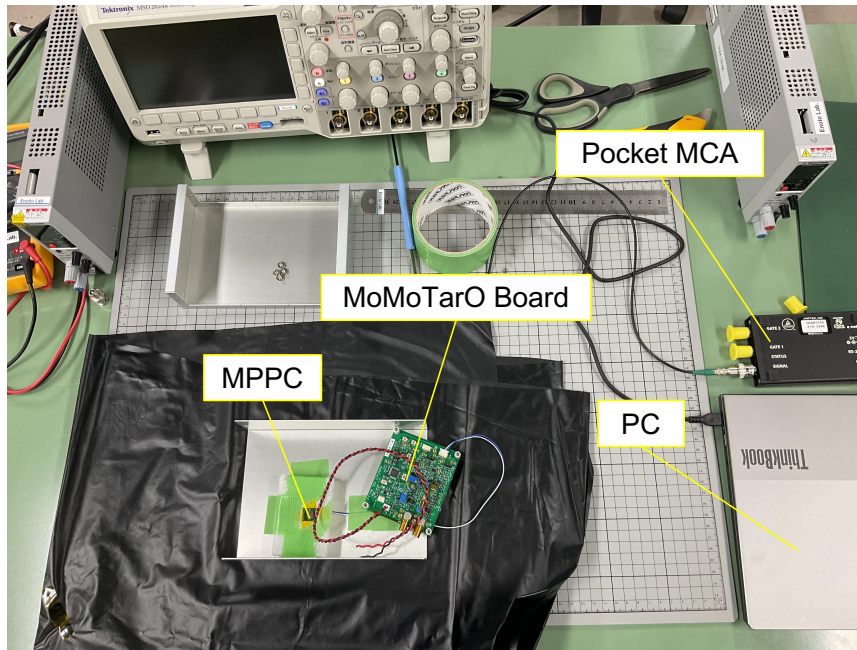


図 4.2.1: 治具の写真。左下の発泡スチロールの穴にシンチレータを差し込んで、データを取得する。

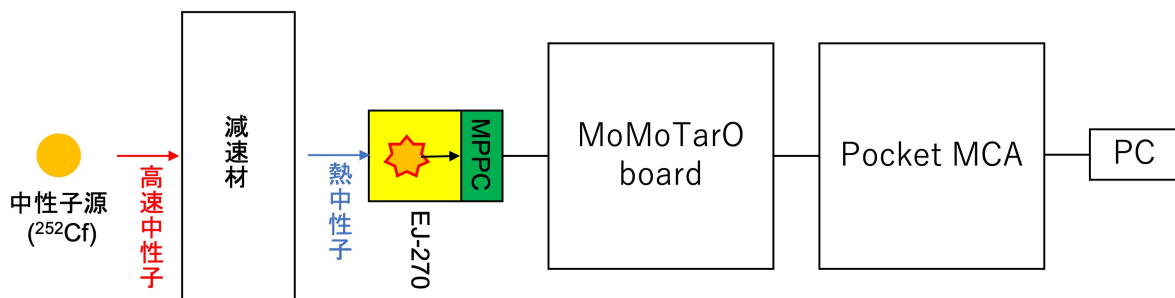


図 4.2.2: ^{252}Cf のスペクトル測定の模式図。 ^{252}Cf から放射された高速中性子が、減速材（ポリエステル製、厚さ 5 cm）によってエネルギーを失い、シンチレータへと入射する。シンチレータ内部で中性子捕獲反応が起こって α 線が放出され、そのエネルギーの一部を測定して MPPC (S14160-6050HS) で読み出す。MoMoTarO ボード Rev1.0 で増幅処理や波形整形を行い、Pocket MCA 8000D でデジタル信号に変換して PC (ThinkBook 13s Gen2 20V9002CJP にデータを保存する。

表 4.2.1: EJ-270 の測定データの種類とその数。BG はバックグラウンドを示している。データの測定時間などの詳細は Appendix A の表 A.1~A.4 に示している。

場所 (状況)	京大 (照射前)			WERC (照射前)		WERC (照射後)		京大 (照射後)			
	線源	^{137}Cs	^{252}Cf	BG	^{252}Cf	BG	^{252}Cf	BG	^{137}Cs	^{252}Cf	BG
#4		1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
#5		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
#6		1	1	1	1	1	1	16	1	1	1
#7		1	1	1	1	1	-	-	1	1	1

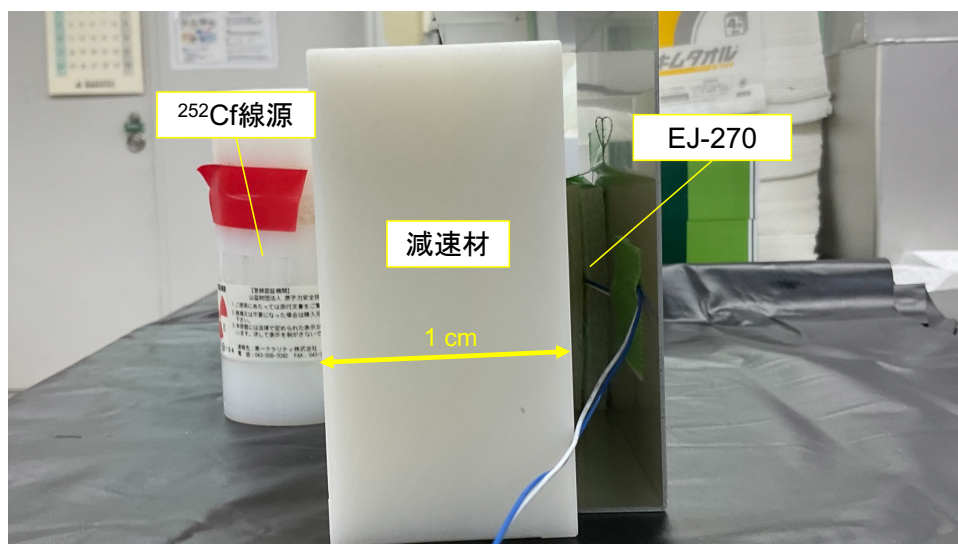


図 4.2.3: EJ-270 による ^{252}Cf 測定の写真。91 kbq の ^{252}Cf 線源を用いている。中心がポリエステル製の減速材で、厚さは 5 cm である。

表 4.2.2: GAGG の測定データの種類とその数。BG はバックグラウンドを示している。データの測定時間などの詳細は Appendix A の表 A.5~A.8 に示している。

場所 (状況) 線源	京大 (照射前)			WERC (照射前)		WERC (照射後)		京大 (照射後)		
	^{60}Co	^{137}Cs	BG	^{137}Cs	BG	^{137}Cs	BG	^{60}Co	^{137}Cs	BG
#4	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
#5	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
#6	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
#7	1	1	1	1	1	-	-	1	1	1

測定した。

図 4.2.4 に示したように、照射したシンチレータから 10 cm 離れたところに、 $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$ の CsI シンチレータ) を設置し、放射化バックグラウンドの外部スペクトルを取得した。この CsI シンチレータは、Compact Gamma-ray Monitor (CoGaMo) という装置に搭載されているものを利用している。CoGaMo は、我々の研究室で行なっている「雷雲プロジェクト」にて用いられている小型軽量のシンチレータである。CoGaMo はイベントごとの時刻情報も得られるため、短時間ライトカーブを作成することができる。この方法で取得したデータの一覧は、Appendix A の表 A.9 に示している。なお、これらの測定時間外も CoGaMo の電源を ON にして、バックグラウンドの測定を 2023 年 10 月 25 日から 10 月 27 日まで継続的に行なった。

4.2.3 ゲルマニウム検出器による外部測定

放射化バックグラウンドの長寿命成分の特定を行うために、高エネルギー分解能のゲルマニウム半導体検出器 (以下 Ge 検出器) を用いて EJ-270 と GAGG を測定した。

Ge 検出器は、1% 以下の高いエネルギー分解能をもっており、ガンマ線を放出する同位体の特定に広く用い

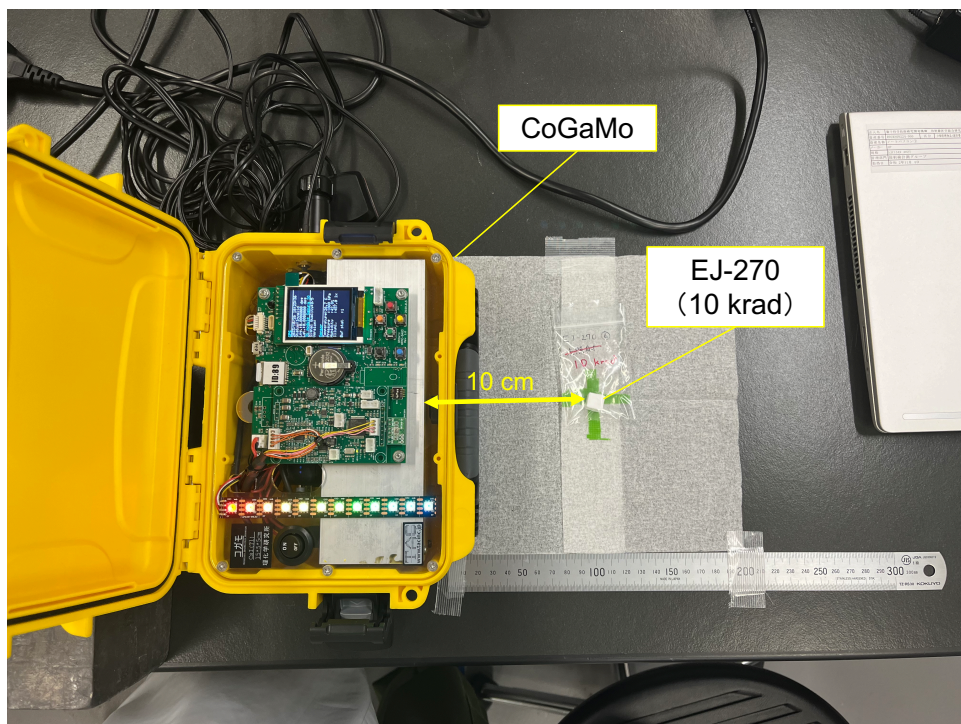


図 4.2.4: CsI シンチレータによる放射化 BG 測定の写真。中心には EJ-270 (10 krad) を置いている。左の黄色い箱状のものが CoGaMo であり、基板の下にある銀色の直方体が CsI シンチレータである。

られてきた放射線検出器である。理研小型中性子源 (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source : RANS) チームが所有する Ge 検出器を用いて、照射からおおよそ 20 日後と 220 日後に、EJ-270 (1 krad) と GAGG (1 krad) の 2 種類のシンチレータからのガンマ線を測定した。取得したデータの一覧は Appendix A の表 A.10 に示している。

4.3 照射前後の性能評価

本節では、照射前後でシンチレータの性能にどのような変化が現れるかを議論する。

4.3.1 フィッティング

EJ-270 による ^{252}Cf のスペクトルを図 4.3.1 に、GAGG による ^{137}Cs のスペクトルを図 4.3.2 に示す。これらのスペクトルに現れるピークに対して、

$$f(x) = A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + Bx + C \quad (4.3.1)$$

でフィッティングを行なった。x は横軸の pulse height であり、 $Bx + C$ の部分はオフセットを表す。fitting の一例を図 4.3.3 に示す。上部にスペクトル、下部に残差を示している。

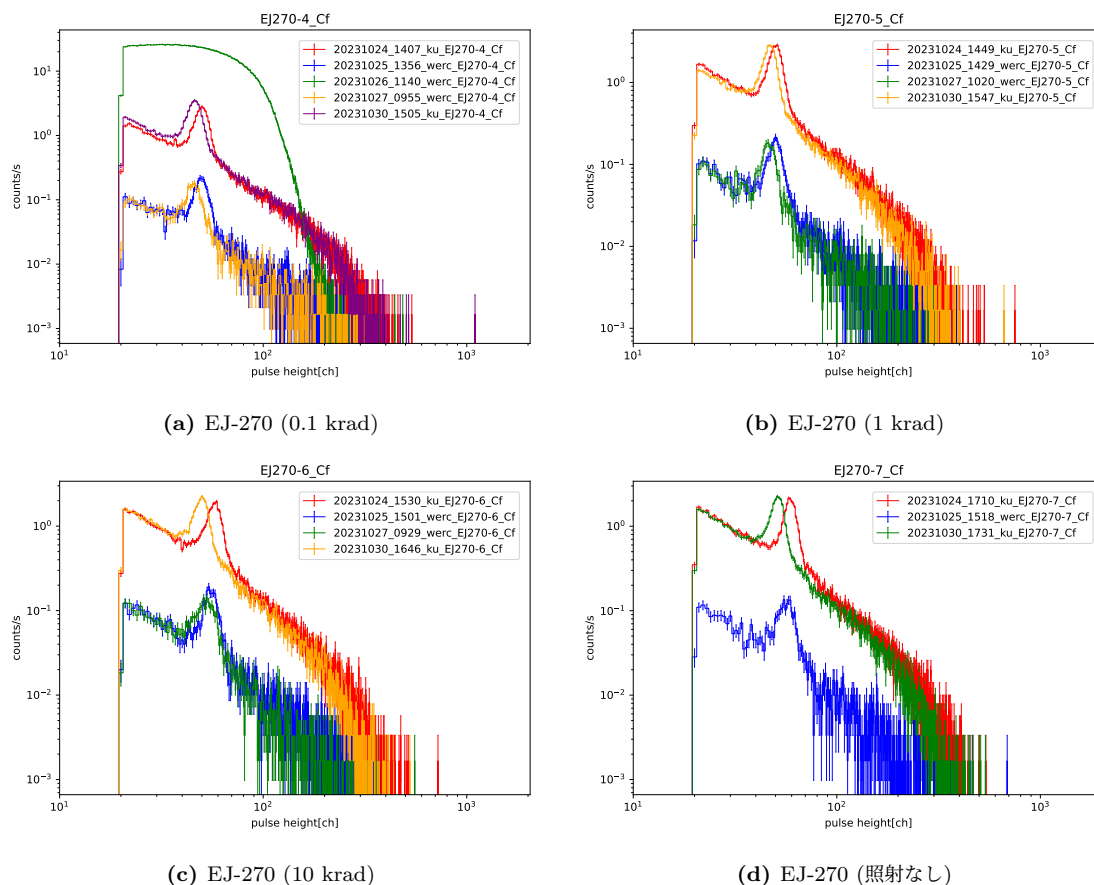


図 4.3.1: EJ-270 で測定した ^{252}Cf のスペクトル。MPPC により読み出している。横軸は pulse height[ch]、縦軸は counts/s である。左上の凡例はデータファイルの名前である。フォーマットは年月日_時刻_場所_シンチレータ名_番号_対象となっている。

4.3.2 光量評価

前節のフィッティングで得られたピークを中心 μ を用いて、照射前後の光量の変化を評価した。ガンマ線または中性子が入射した際のエネルギーに応じてシンチレータが発光し、その光量に比例する。従って、 μ の値を照射前と照射後で比較することにより、光量の変化を評価できる。

図 4.3.4 に EJ-270 の光量評価の図を、図 4.3.5 に GAGG の光量評価の図を示している。EJ-270 (0.1 krad) の照射直後のデータは、放射化バックグラウンドに埋もれてピークを測定することができなかった。横軸は陽子照射からの時間を分単位で示している。縦軸については、(a) では ch の値、(b) では照射前を 1 とした相対的な光量を示している。京大と WERC では温度が 1 度ほど異なっており (表 A.1 から表 A.8 参照)、MPPC の温度補償を行っていないことを考慮して、照射後の相対的な光量を計算するには同じ場所で測定した照射前のデータを用いている。

EJ-270 について、照射後の光量の減少はたかだか 5~10% 程度である。また、図 4.3.1 から、光量の減少はあれど熱中性子のピークはシンチレータが測定できるエネルギー範囲に収まることがわかる。これは、EJ-270 が陽子の照射を受けても問題なく熱中性子を測定できることを示唆している。ただし、最も照射量が少ない

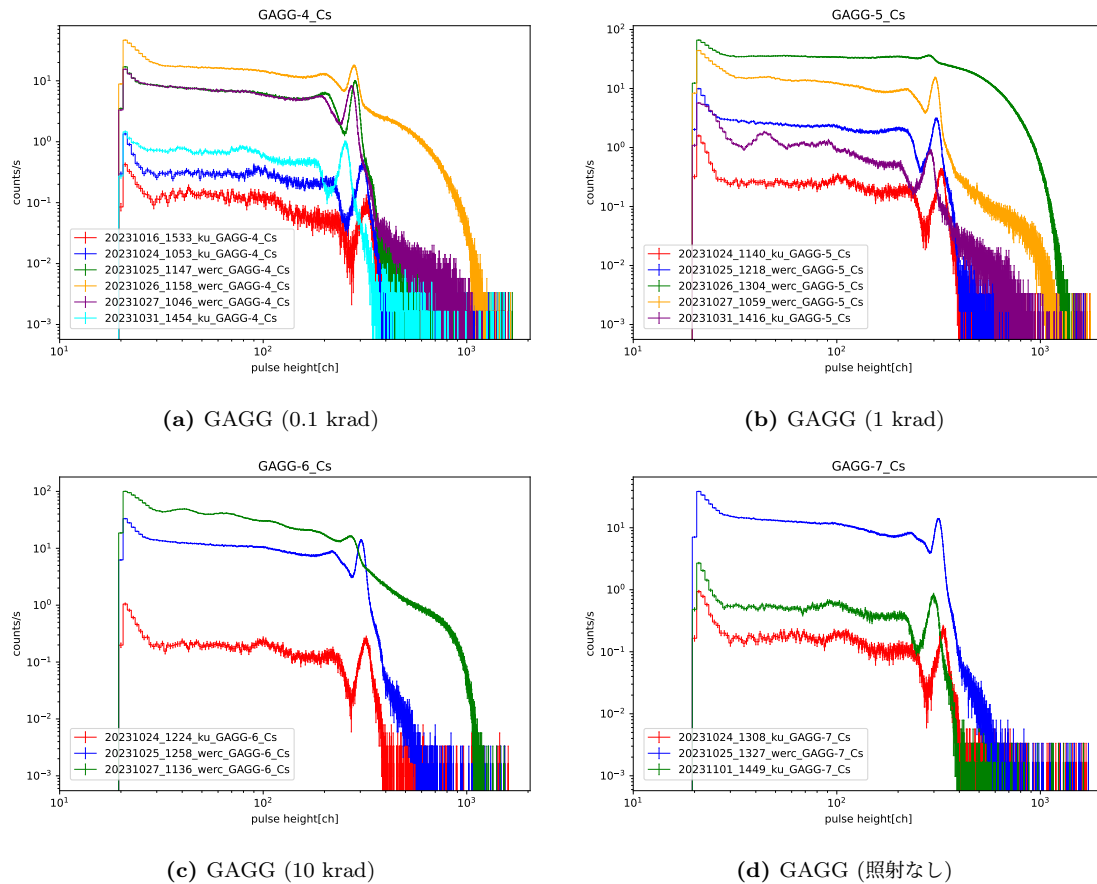


図 4.3.2: GAGG で測定した ^{137}Cs のスペクトル。MPPC により読み出している。横軸はパルス波高値、縦軸はカウントレートである。左上の凡例はデータファイルの名前である。フォーマットは年月日_時刻_場所_シンチレータ名_番号_対象となっている。

0.1 krad の結果であっても照射直後は放射化バックグラウンドが卓越し、ピークを測定できなくなる。従って、SAA 通過直後などの多量の放射を受けた場合は、一時的に測定ができなくなることも考えられる。

GAGG についても、照射から 1 日後の光量の減少は 5~10% である。また、10 krad 照射したものは他のものより 2 倍ほど強く光量が減少することがわかった。さらに、照射後の京大の測定では 20% ほど減少している。このような光量の減少は、図 4.3.2 の (d) のように、照射を行っていない GAGG にも見られる。従って、照射とは関係のない、温度や湿度、MPPC とシンチレータの接続など、外的な要因が関連していると考えられる。

4.3.3 エネルギー較正

エネルギー分解能の評価を行うために、まずエネルギー較正を行なった。これは、ch とエネルギーの対応を決める式を求めることであり、

$$\text{energy} = a \times \text{ch} + b \quad (4.3.2)$$

のように表すことができる。

EJ-270 はプラスチックシンチレータであり、光電吸収ピークは測定できない。そのため、EJ-270 のエネルギー

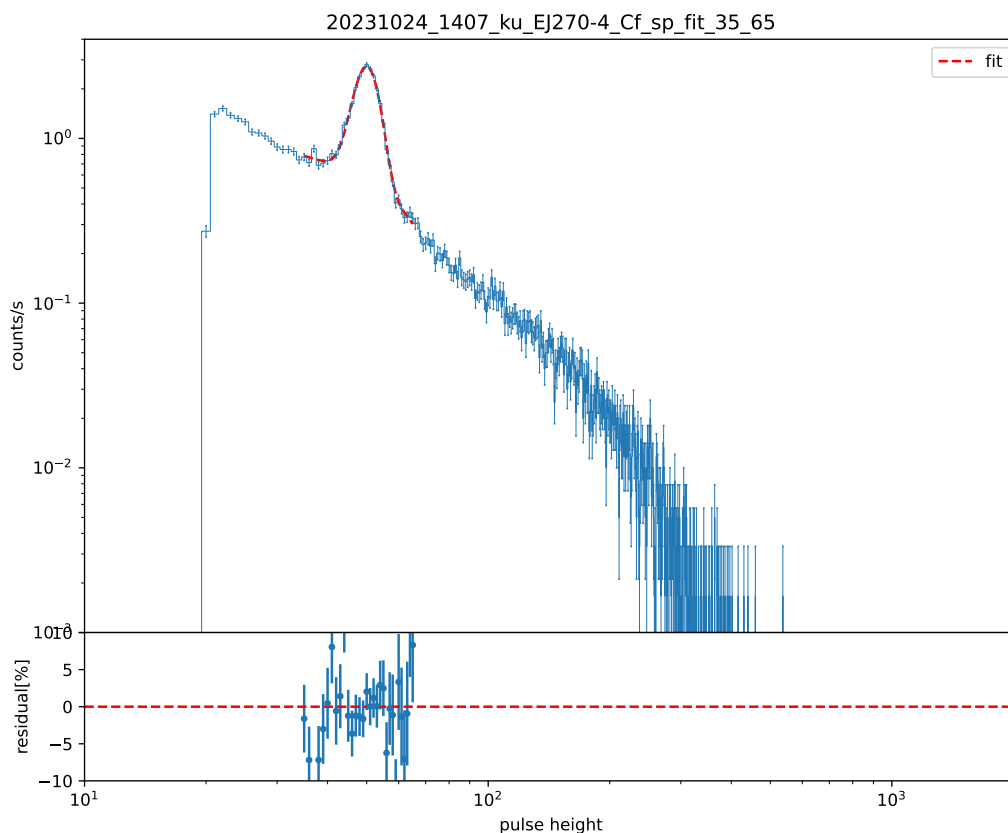
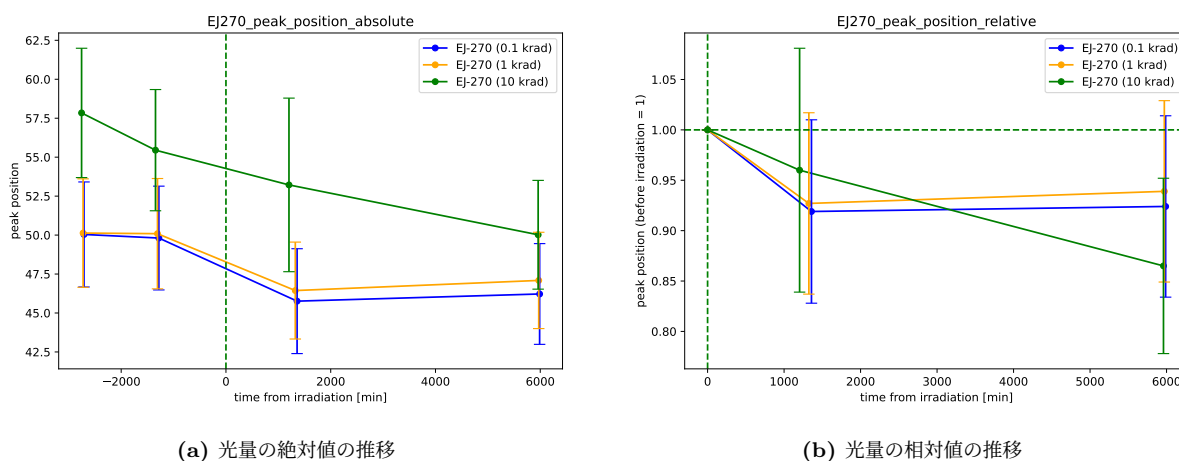


図 4.3.3: 照射前に京大で取得した EJ-270 (0.1 krad) による ^{252}Cf による熱中性子のスペクトルのフィット結果。式 4.3.1 でフィッティングを行なった。横軸はパルス波高値、縦軸はカウントレートを示す。下部には残差を示している。



(a) 光量の絶対値の推移

(b) 光量の相対値の推移

図 4.3.4: EJ-270 の光量評価の図。線源は ^{252}Cf 。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は ch の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な光量を示している。絶対値のピーク位置の誤差には 1σ の値を用いている。相対値の誤差には、それぞれのピークの誤差の伝播を用いている。

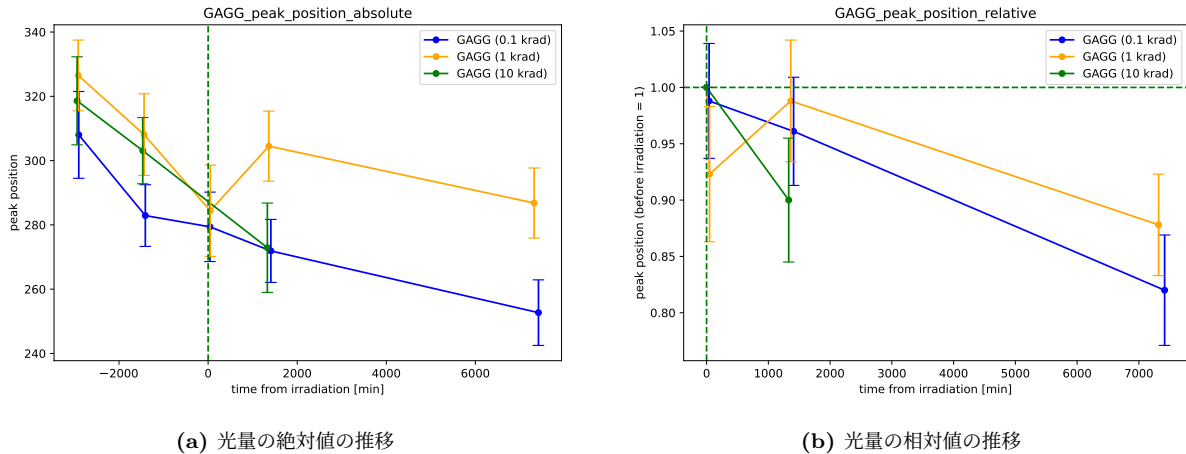


図 4.3.5: GAGG の光量評価の図。線源として ^{137}Cs を用いており、662 keV のピークに対して fitting を行なった。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は ch の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な光量を示している。絶対値のピーク位置の誤差には 1σ の値を用いている。相対値の誤差には、それぞれのピークの誤差の伝播を用いている。

ギー較正には、図 4.3.6 に示される ^{137}Cs のコンプトンエッジのエネルギーである 477 keV と、図 4.3.1 に示される中性子捕獲反応によるエネルギーの 350 keV の 2 点を用いることができる [98]。コンプトンエッジのパルス波高値抽出は目測で行なった。本来エネルギー較正は 3 点以上のデータを用いて行うことが望ましいが、本実験では ^{137}Cs と ^{252}Cf の測定のみを行なっているため、2 点で較正を行なった。また、WERC では ^{137}Cs の測定は行なっていないため、WERC で測定したデータについてはエネルギー較正を行うことができなかった。

図 4.3.7 に、EJ-270 のエネルギー較正の一例を示す。これは、EJ-270 (0.1 krad) の照射前に京大で測定したデータに対してエネルギー較正を行なったものである。横軸は ch の値、縦軸はエネルギー (keV) を示している。その結果、

$$\begin{cases} a = 10.12 \pm 0.48 \\ b = -156.2 \pm 26.1 \end{cases} \quad (4.3.3)$$

が得られた。このエネルギー較正を用いて作成したのが図 4.3.8 である。横軸はエネルギー、縦軸は counts/s である。

GAGG のエネルギー較正には、図 4.3.2 に示される ^{137}Cs のエネルギー 662 keV と、図 4.3.9 に示される ^{60}Co のエネルギー 1.17 MeV と 1.33 MeV の 3 点を用いた。また、WERC では ^{60}Co の測定を行なっていないため、 ^{137}Cs のエネルギー 662 keV とコンプトンエッジ 477 keV の 2 点でエネルギー較正を行なった。コンプトンエッジのパルス波高値抽出は目測で行なった。

図 4.3.10 に、GAGG のエネルギー較正の一例を示す。これは、GAGG (0.1 krad) の照射前に京大と WERC で測定したデータに対してエネルギー較正を行なったものである。前者では 3 点、後者では 2 点を用いている。横軸は ch の値、縦軸はエネルギー [keV] を示している。その結果、照射前の京大のデータについては

$$\begin{cases} a = 2.675 \pm 0.074 \\ b = -161.5 \pm 35.3 \end{cases} \quad (4.3.4)$$

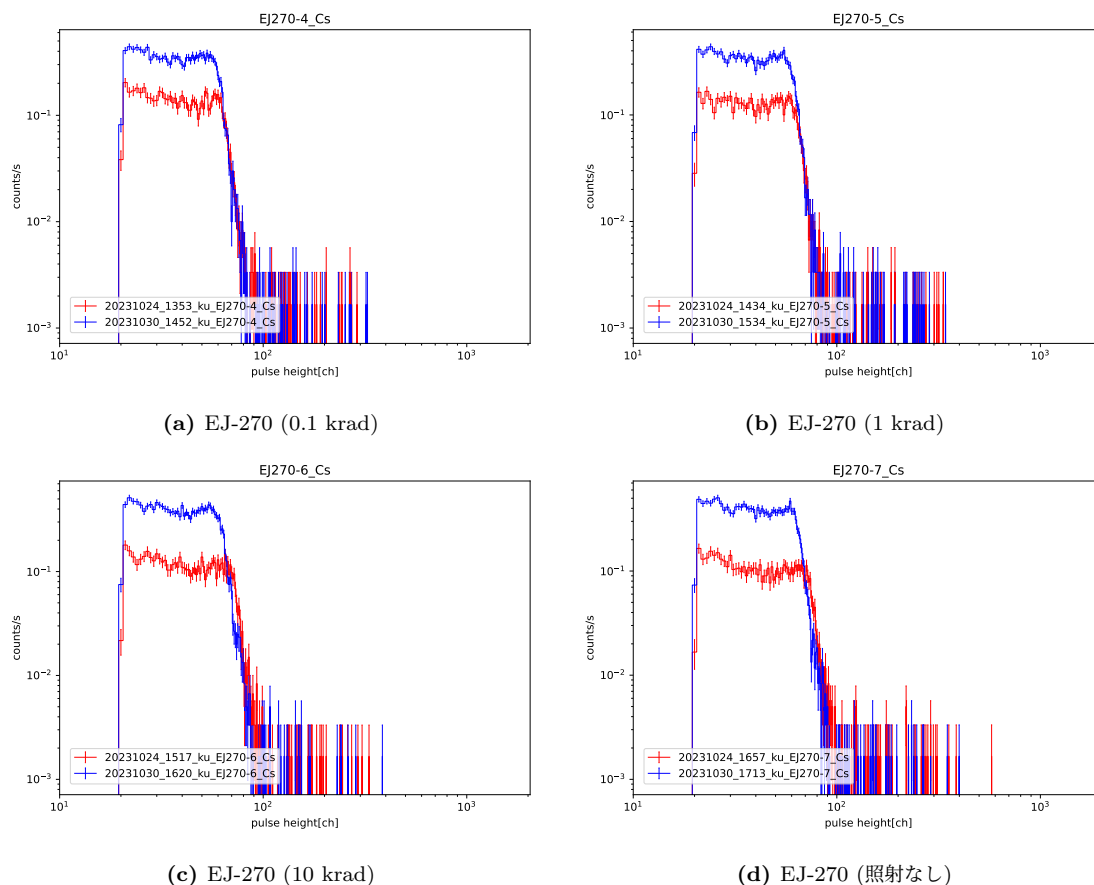


図 4.3.6: 4 種類の EJ-270 で測定した ^{137}Cs のスペクトル。横軸は ch、縦軸は counts/s を示す。照射前後に京大で ^{137}Cs の測定を行なった。

が、照射前の WERC のデータについては

$$\begin{cases} a = 2.438 \pm 0.183 \\ b = -27.77 \pm 45.62 \end{cases} \quad (4.3.5)$$

が得られた。このエネルギー較正を用いて作成したのが図 4.3.8 である。横軸はエネルギー、縦軸は counts/s である。

4.3.4 エネルギー分解能評価

前節のエネルギー較正を行い、さらにスペクトルのフィッティングを行うことで、エネルギー分解能の変化を評価した。

フィッティングを行うことで、半値全幅 (Full Width at Half Maximum) が得られる。これは放射線のエネルギー測定の精度を表す指標であり、ピークの高さが半分となる位置の、x 軸の広がりを表す。この値は、 σ を用いて $2\sqrt{2\log 2}\sigma$ と表される。およそ半値全幅だけ離れたスペクトルの 2 つのピークは判別することができる。つまり、この値が小さいほど、測定の精度は高い。これをピークの中心のエネルギーで割った値、つまり

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\sqrt{2\log 2}\sigma}{\mu} \quad (4.3.6)$$

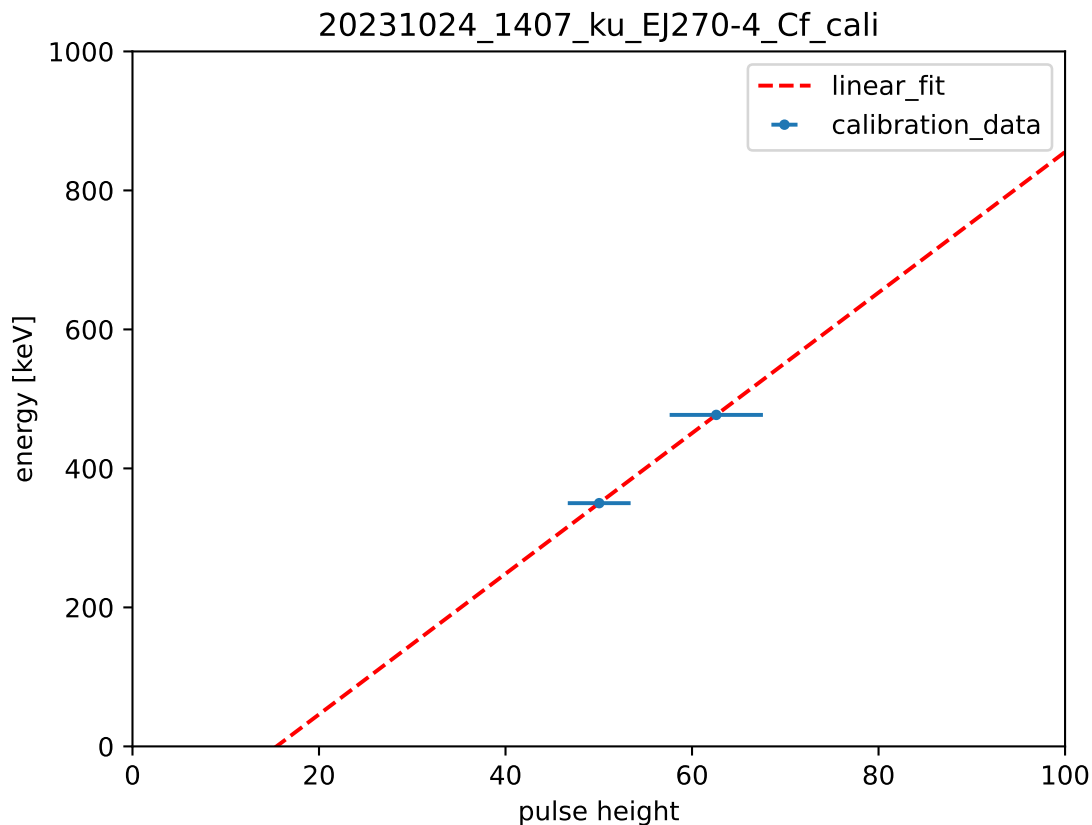


図 4.3.7: EJ-270 のエネルギー較正の一例。EJ-270 (0.1 krad) の照射前に京大で測定したデータを用いている。横軸は ch の値、縦軸はエネルギーを示す。エネルギー較正の直線を赤い破線で示している。誤差はピークの 1σ の値を用いた。

をエネルギー分解能と呼ぶ。この値を照射前後で比較することにより、測定の精度の減少を計算することができる。一般に、これに 100 を乗じて % 単位でエネルギー分解能を表すことが多い。

各データについて、エネルギー較正を行なった後にエネルギー分解能を求めた。このとき、各データを取得したのと同じ条件で得たデータを用いてエネルギー較正を行なっている。ただし EJ-270 については、京大では 2 種類の線源 (^{252}Cf と ^{137}Cs) を測定することができたが、WERC では 1 種類の線源 (^{252}Cf) しか測定できていない。したがって、なるべく適切な較正結果を用いてエネルギー分解能を算出するために、WERC での測定データについては、照射前に京大で取得したデータを元にした較正結果を利用している。

図 4.3.12 に EJ-270 の、図 4.3.13 に GAGG の分解能評価の図を示している。(a) は分解能の絶対値の推移を示しており、縦軸に分解能を % 単位で示している。(b) は分解能の相対値の推移を示しており、縦軸に、照射前を 1 とした分解能の相対値を示している。光量の評価と同様に、相対値の計算には同じ場所で測定した照射前のデータを用いている。

EJ-270 の分解能の変化について、0.1 krad 照射したものと 1 krad 照射したものの最大では 15% 程度の分解能の低下が見られた。一方で、10 krad 照射したものは、最大で 70% の分解能の低下が見られた。いずれの照射を受けたシンチレータも、照射から 4 日後の京大での測定では照射前の水準にまで分解能が回復した。

GAGG の分解能の変化について、0.1 krad 照射したものは照射直後に 10% 程度の低下が見られた。時間経

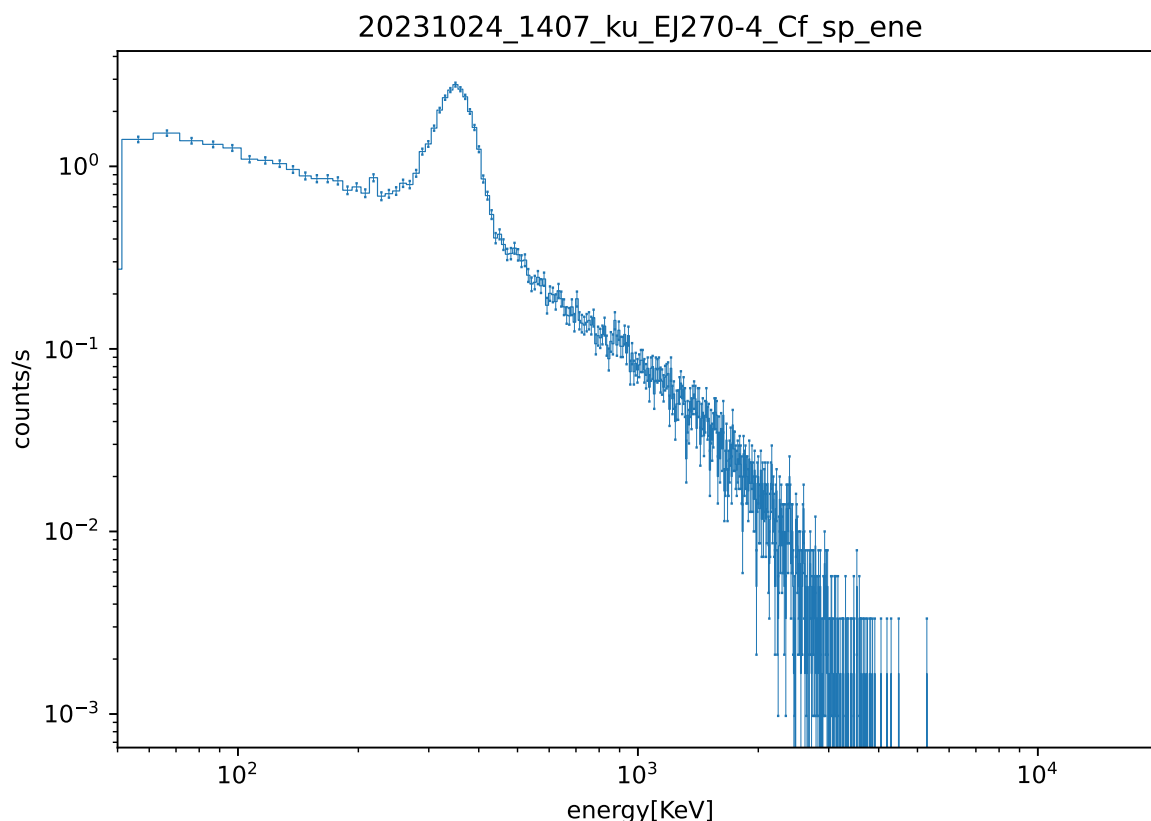


図 4.3.8: エネルギー較正後の EJ-270 による ^{252}Cf のスペクトルの一例。EJ-270 (0.1 krad) の照射前に京大で測定したデータを用いている。横軸はエネルギー、縦軸は counts/s を示す。

過による回復は見られなかった。1 krad 照射したものは、照射直後に 50% 程度の低下が見られたが、1 日後には元の水準まで回復した。10 krad 照射したものは 1 日後に 60% 程度の低下が見られた。

また、図 4.3.1 や図 4.3.2 の照射後のデータを見ると、放射化バックグラウンドによって S/N が悪くなり、エネルギー分解能が悪くなっていることがわかる。分解能の劣化は放射線劣化と S/N の低下が主要因だと思われる。

実際の MoMoTarO の宇宙空間での運用では、エネルギー較正に利用できるような、エネルギーの値が確かなスペクトルのピークが得られない状況が想定される。この場合、地上でのエネルギー較正結果を用いて観測を続ける必要がある。この状況に即した解析として、照射前の京大のデータを用いた較正結果を、全てのデータに適用した場合のエネルギー分解能の変化も評価した。EJ-270 については図 4.3.14 に、GAGG については 4.3.15 に、この方法で解析したエネルギー分解能の相対値と絶対値の推移を示している。

EJ-270 では、いずれのシンチレータも 4 日後に元の水準にまで回復している。GAGG では、それぞれのデータでエネルギー較正を行なったデータにおいては、10 krad 照射したものの分解能の低下は 50% 程度だった。その一方で、この解析では 90% 程度の分解能の低下が見られた。これは、同じ較正結果を用いた解析だと、光量が減少するとそれに対応してエネルギーの値が減少して式 4.3.6 における分母の値が減少し、エネルギー分解能が上昇することに起因する。

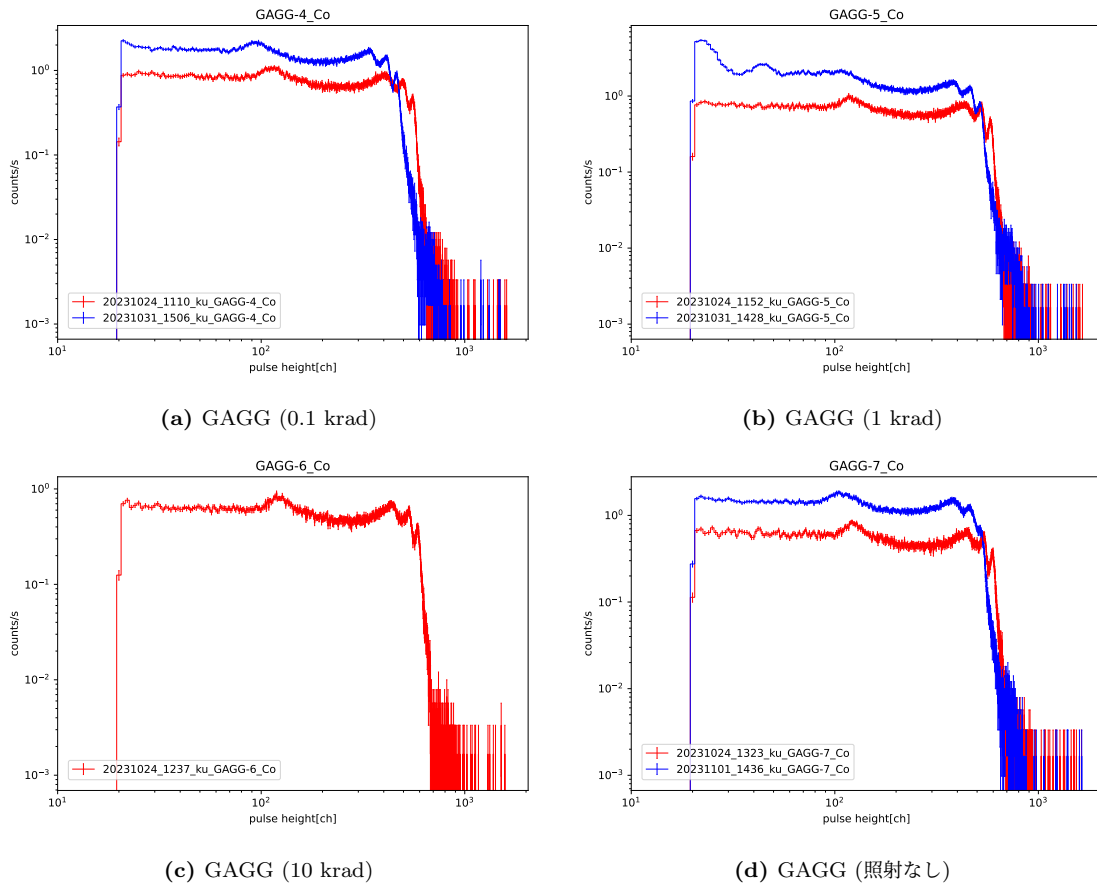


図 4.3.9: 4 種類の GAGG で測定した ^{60}Co のスペクトル。横軸は ch、縦軸は counts/s を示す。照射前後に京大で ^{60}Co の測定を行なった。GAGG (10 krad) については、WERC の管理区域から持ち出すことができなかったため、照射後の京大での測定は行っていない。

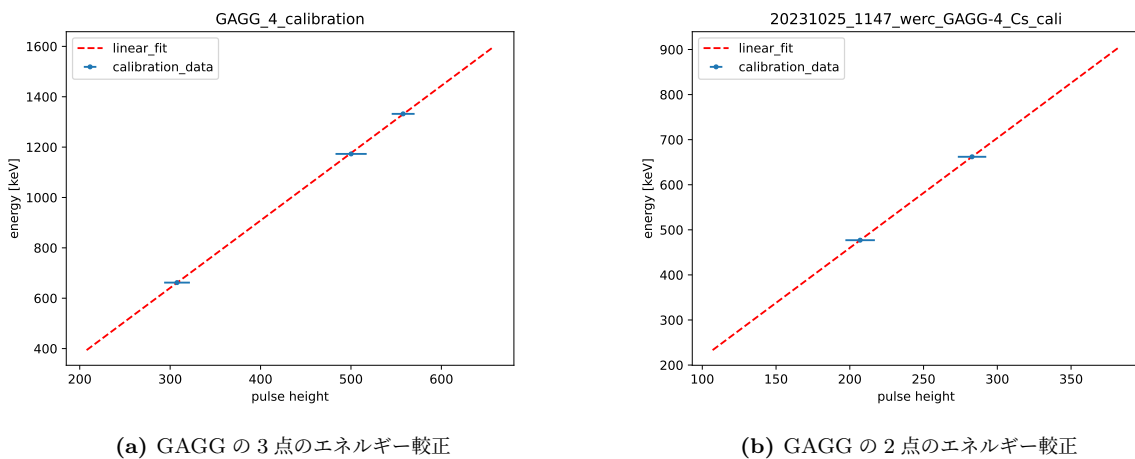


図 4.3.10: GAGG のエネルギー較正の一例。GAGG (0.1 krad) のデータを示している。(a) は照射前に京大で測定したデータによるもの。 ^{137}Cs の 662 keV、 ^{60}Co の 1.17 keV と 1.33 keV の 3 点を用いている。(b) は照射前に WERC で測定したデータによるもの。 ^{137}Cs の 662 keV、そのコンプトンエッジの 477 keV の 2 点を用いている。横軸は ch の値、縦軸はエネルギーを示す。エネルギー較正の直線を赤い破線で示している。誤差はピークの 1σ の値を用いた。

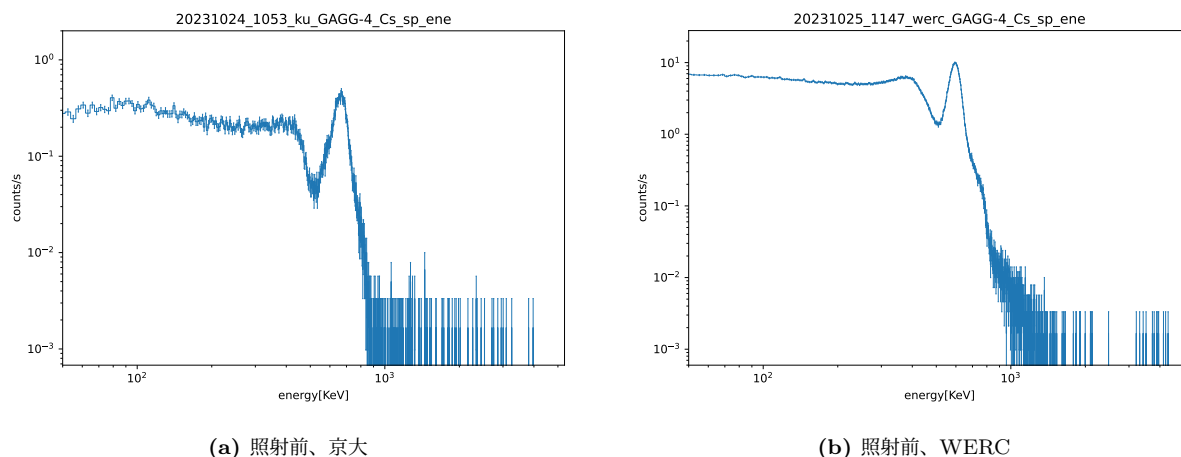


図 4.3.11: エネルギー較正後の GAGG による ^{137}Cs のスペクトルの一例。GAGG (0.1 krad) のデータを示している。(a) は照射前に京大で測定したデータ。(b) は照射前に WERC で測定したデータ。横軸はエネルギー、縦軸は counts/s を示す。

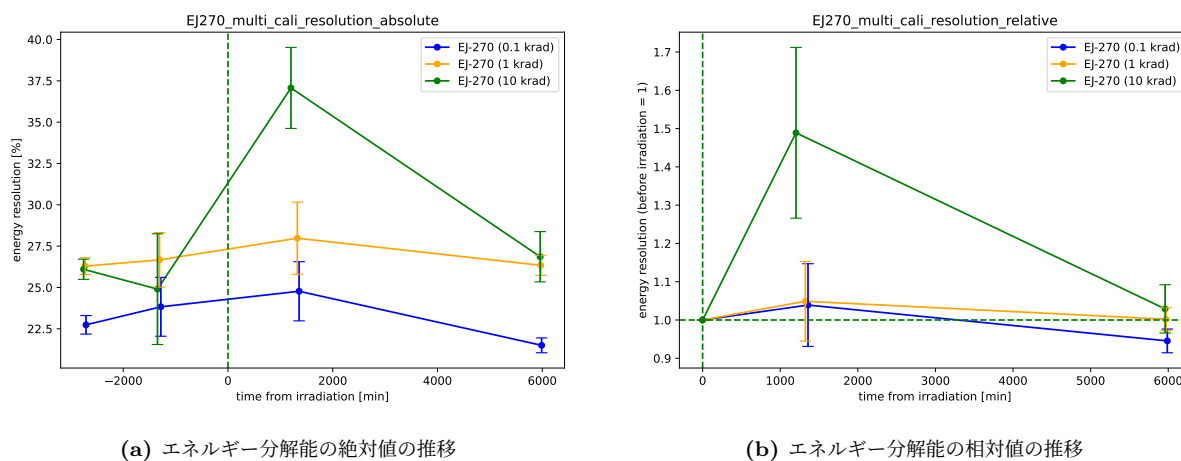


図 4.3.12: EJ-270 のエネルギー分解能評価の図。線源は ^{252}Cf 。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は % 単位で示した分解能の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な分解能を示している。

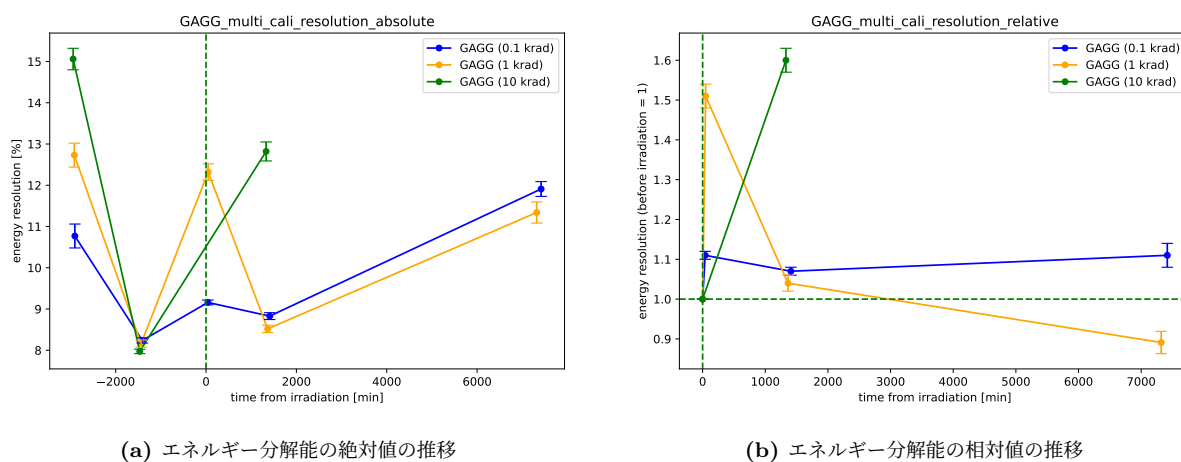


図 4.3.13: GAGG のエネルギー分解能評価の図。線源は ^{137}Cs 。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は % 単位で示した分解能の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な分解能を示している。

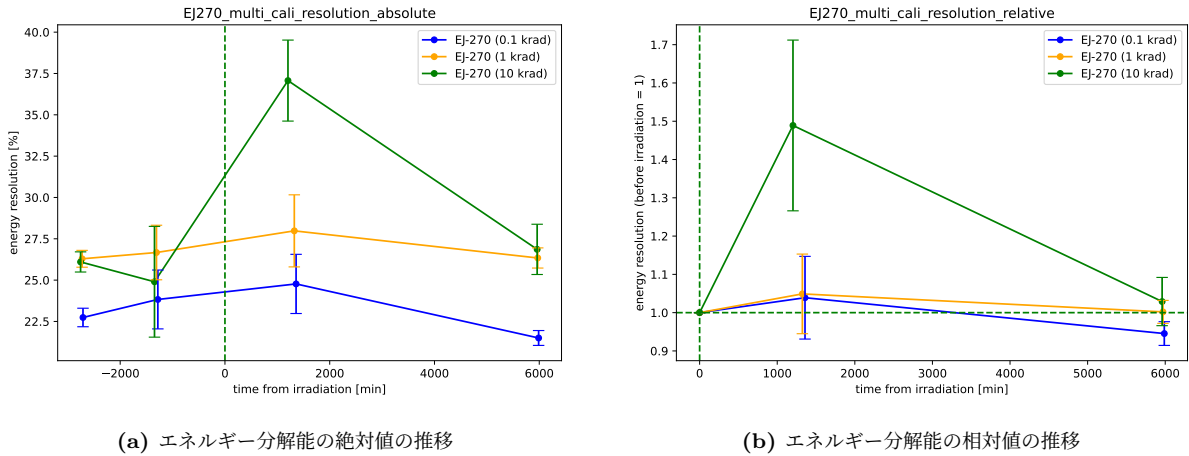


図 4.3.14: EJ-270 のエネルギー分解能評価の図。全てのデータのエネルギー較正に、照射前の京大でのデータによる較正結果を用いている。線源は ^{252}Cf 。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は % 単位で示した分解能の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な分解能を示している。

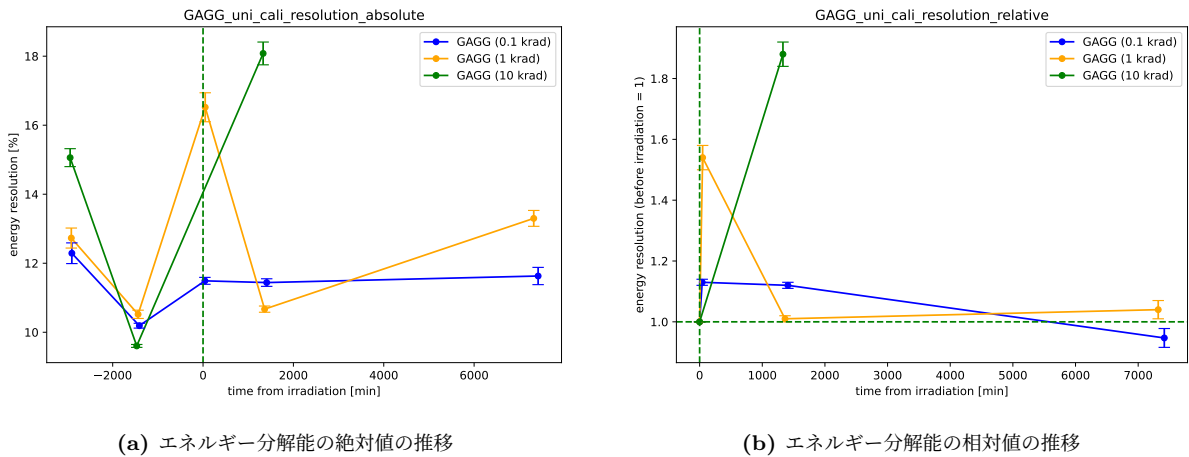


図 4.3.15: GAGG のエネルギー分解能評価の図。全てのデータのエネルギー較正に、照射前の京大でのデータによる較正結果を用いている。線源は ^{137}Cs 。横軸は陽子照射からの経過時間を示す。縦軸については、(a) は % 単位で示した分解能の値、(b) は照射前を 1 とした場合の相対的な分解能を示している。

4.4 放射性同位体の同定

MoMoTarO 計画で宇宙空間で使用する予定のシンチレータに高エネルギー陽子を照射し、その際に生じる放射性同位体を、いくつかの方法で同定した。本節では、その結果を述べる。

4.4.1 ^6Li 添加のプラスチックシンチレータ

この項では、EJ-270 内で生じた放射化バックグラウンドの同定について述べる。

まず、4.2.2 項で取得した放射化ターゲットの外部に置いた CsI シンチレータによる測定データを用いた結果を調べる。本解析のために、4.3.3 項で行なったエネルギー較正を、測定に用いた CsI シンチレータでも行

なった。図 4.4.1 に、CsI で測定した環境放射線バックグラウンドのスペクトルを示す。これは、WERC において継続的に測定していたバックグラウンドデータのうち、2023 年 10 月 26 日 0 時 0 分から 1 時間分をプロットしたものである。140 ch あたりのピークは ^{40}K の 1461 keV、250 ch あたりのピークは ^{208}Ti の 2615 keV で、これらは環境放射線に由来する輝線である。これらに対してガウス関数でフィットを行い、さらに式 4.3.2 でエネルギー較正を行なった結果、

$$\begin{cases} a = 10.51 \pm 0.01 \\ b = -5.872 \pm 2.607 \end{cases} \quad (4.4.1)$$

となった。

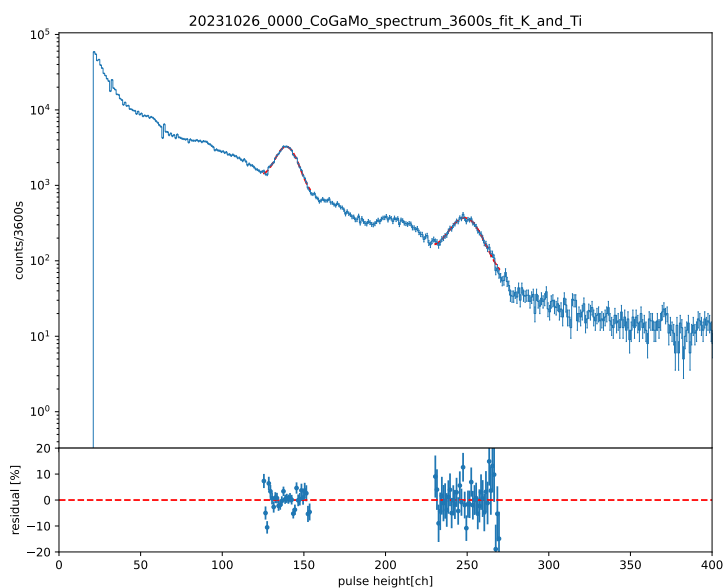


図 4.4.1: WERC において CsI で測定した環境放射線のバックグラウンドのスペクトル。2023 年 10 月 26 日の 0:00 から 1:00 までの 1 時間積分のカウントを表示している。横軸はパルス波高値、縦軸はカウント数を示している。140 ch あたりのピークは ^{40}K の 1461 keV、250 ch あたりのピークは ^{208}Ti の 2615 keV である。これらのピークに対してガウス関数 + 連続成分でフィッティングを行なった結果が赤い破線である。下部に残差を示している。

このエネルギー較正を用いて CsI で取得した EJ-270 (10 krad) の外部スペクトルが図 4.4.2 ある。2023 年 10 月 26 日の 18:30 からの 10 分間のカウント数を積算したものから、前日に同じ場所で取得したバックグラウンドのスペクトルを引き算して示した。この操作を行うことで、EJ-270 の放射化バックグラウンド由来のスペクトルのみを取得することができる。これに対してガウス関数でフィットを行なった結果、

$$\begin{cases} \text{中心エネルギー} = 508.3 \pm 0.2 \text{ keV} \\ \text{標準偏差} = 39.44 \pm 0.02 \text{ keV} \end{cases} \quad (4.4.2)$$

が得られた。これは、陽子照射により生じた同位体由来の 511 keV の対消滅ガンマ線であると考えられる。したがって、このピークのエネルギー範囲のみを取り出したライトカーブの時定数を得ることで、同位体の半減期を求めて同定することができる。このようにしてプロットしたのが、図 4.4.3 である。表 A.9 に示した 2023 年 10 月 26 日 18:24 からの測定結果を用いている。この中から、エネルギーが $508.3 \pm 39.44 \text{ keV}$ の

データ、すなわち先ほどの fit 結果の $\mu \pm 1\sigma$ の範囲のデータのみを取り出してプロットしている。このライトカーブに対して、

$$C(t) = A \exp\left(-\frac{\log 2}{t_{\text{half}}} t\right) + C \quad (4.4.3)$$

で fitting を行なった。 t_{half} は半減期を示しており、同位体固有のものである。また C は定数であり、放射化バックグラウンドではない実験室のバックグラウンド成分に相当する。その結果、

$$t_{\text{half}} = 6.30 \times 10^3 \pm 0.92 \text{ s} \quad (4.4.4)$$

が得られた。

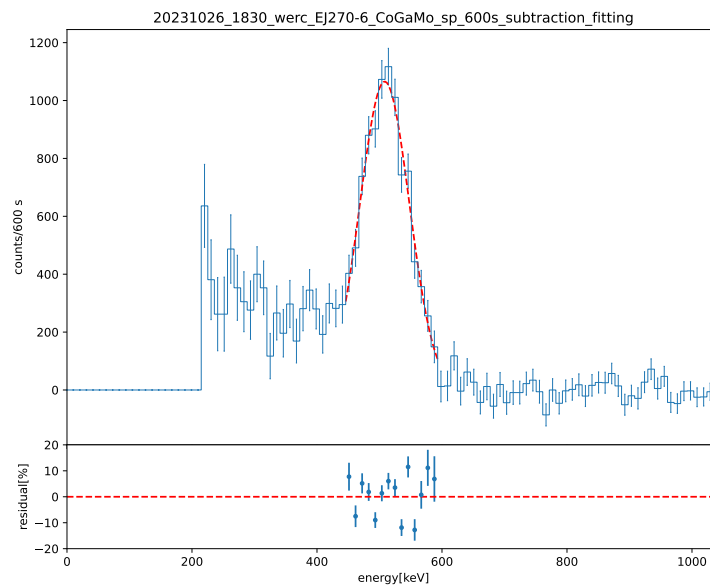


図 4.4.2: CsI で取得した EJ-270 (10 krad) の外部スペクトル。2023 年 10 月 26 日 18:30 から 18:40 までの EJ-270 (10 krad) のスペクトルから、2023 年 10 月 25 日 16:03 から 16:13 までの照射前の EJ-270 (0.1 krad) のカウント数を減じたものをプロットしている。横軸はエネルギー (keV)、縦軸は積算のカウント数を示している。ガウス関数でフィットを行なった結果が赤い破線で、下部に残差を示している。

以上のようにして求めた値に近い半減期を持っており、また EJ-270 が H、C、 ${}^6\text{Li}$ 、O、N で構成されている [55] ことを考えると、考えられる同位体に ${}^{18}\text{F}$ がある。 ${}^{18}\text{F}$ の半減期は $6.55 \times 10^3 \text{ s}$ であり、 β^+ 崩壊で放出するエネルギーは 511 keV である。国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency; IAEA) のウェブサイト Experimental Nuclear Reaction Data*1 を用いて、想定される生成過程を推定した。 ${}^{18}\text{F}$ が生じる反応として、 ${}^{17}\text{O}(p, \gamma){}^{18}\text{F}$ が考えられる。また、照射前後の測定、照射時を通してテフロン反射材を巻いていたので、テフロン (ポリテトラフルオロエチレン、F と C で構成) 内の F と陽子が反応した可能性も考えられる。

次に、4.2.3 項で取得した Ge 検出器による測定データも調べた。図 4.4.4 に、Ge 検出器で取得した環境バックグラウンドのスペクトルを示している。ここに見られる環境放射線の ${}^{40}\text{K}$ (1461 keV) と ${}^{232}\text{Th}$ (2615

*1 <https://www-nds.iaea.org/exfor/>

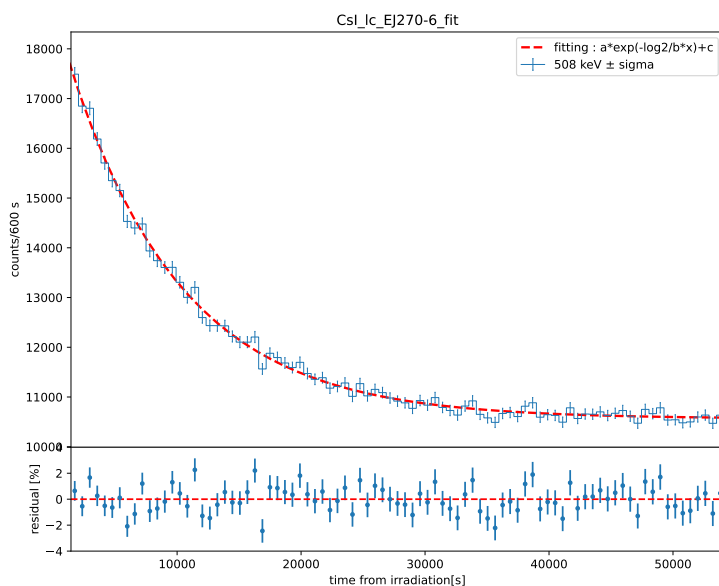


図 4.4.3: CsI で取得した EJ-270 (10 krad) のライトカーブ。表 A.9 の 2023/10/26 18:24 からの測定データを用いた。式 4.4.2 で得た $\mu \pm 1\sigma$ の範囲のデータについてプロットしている。横軸は測定開始からの時間 [s]、縦軸は 1bin (600 s) あたりのカウント数を示す。指数関数 + 定数で fit しており、その結果を赤い破線で示している。下部に residual を示している。

keV) の光電吸収ピークを用いて、Ge 検出器でもエネルギー較正を行なった。その結果、式 4.3.2 において

$$\begin{cases} a = 0.2500 \pm 0.0022 \\ b = 1.646 \pm 15.552 \end{cases} \quad (4.4.5)$$

が得られた。

このエネルギー較正を用いてプロットしたのが、図 4.4.6 と図 4.4.7 である。この二つのスペクトルについて、EJ-270 (1 krad) のデータからバックグラウンドのデータを減算したのが、図 4.4.6 である。減算したスペクトルを見ると、およそ 410 keV と 480 keV のところに二つのピークを確認することができる。この二つのうち、左側の 410 keV あたりのピークは、GAGG に対する Ge 検出器でも見られているが、原因を特定することができなかった。右側の 480 keV あたりのピークに対して、式 4.3.1 で fitting を行うと、

$$\begin{cases} \mu = 478.4 \pm 0.3 \text{ keV} \\ \sigma = 16.07 \pm 0.86 \text{ keV} \end{cases} \quad (4.4.6)$$

が得られた。

以上のようにして求めた値に近いエネルギーのガンマ線を放出する軽元素の同位体に、 ${}^7\text{Be}$ がある。 ${}^7\text{Be}$ の半減期は 53.29 d であり、電子捕獲により放出するエネルギーは 478 keV である。これが生成される反応として、 ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$ が考えられる。一般的なプラスチックシンチレータには ${}^6\text{Li}$ は含まれていないため、 ${}^7\text{Be}$ が放射化によって生じるのは EJ-270 固有の現象であると考えられる。

なお、2024 年 6 月に実施した Ge 検出器による EJ-270 (1 krad) の測定では、照射から時間が十分経っていることもあり、放射化は見られなかった (図 A.2 参照)。

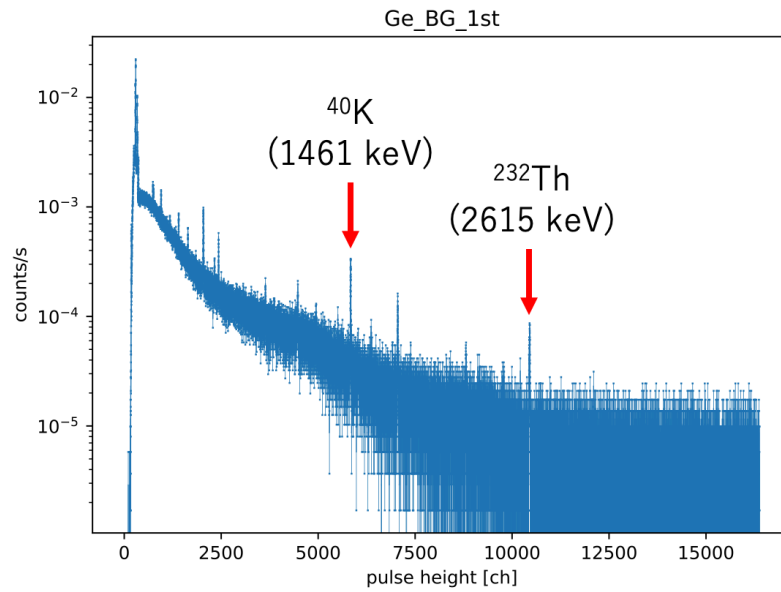
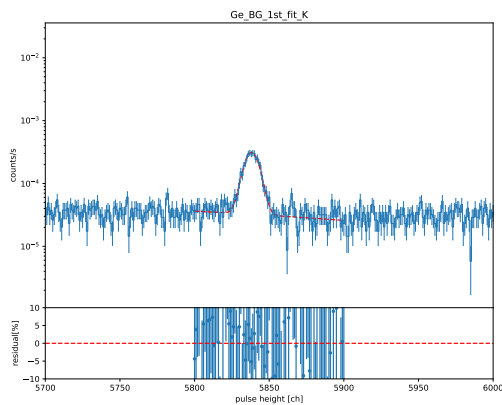
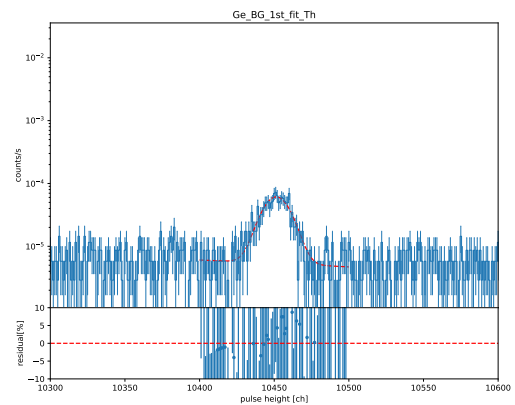


図 4.4.4: Ge 検出器を用いて、2023 年 11 月 25 日 18:11 から 4 日間計測した環境バックグラウンドのスペクトル。横軸にパルス波高値、縦軸に counts/s を示している。エネルギー較正に用いた ^{40}K と ^{232}Th の光電吸収ピークを矢印で示している。



(a) ^{40}K の光電吸収ピークのフィット結果



(b) ^{232}Th の光電吸収ピークのフィット結果

図 4.4.5: 環境放射線バックグラウンドのフィット結果。(a) は ^{40}K 、(b) は ^{232}Th を示している。横軸は pulse height、縦軸は counts/s を示している。ガウス関数によるフィット結果を赤い破線で示しており、下部には残差を表示している。

最後に、4.2.1 項で取得した MPPC による内部バックグラウンドも調べた。図 4.4.8 は、表 A.3 における環境バックグラウンドの測定データのうち、照射後に取ったものについてカウントレートを求めて作成したライトカーブである。この放射化バックグラウンドのうち、 10^2 min から 10^3 min の期間は ^{18}F 由来、 10^3 min 以降の期間は ^{7}Be 由来のものであると考えられる。CsI シンチレータと Ge 検出器で同定できなかった 10^2 min 以前の放射化バックグラウンドの期間を、MPPC による測定データを用いて特定した。

図 4.4.8 のうち、 10^2 min 以前の部分についてフィッティングを行なった結果を、図 4.4.9 に示す。式 4.4.3

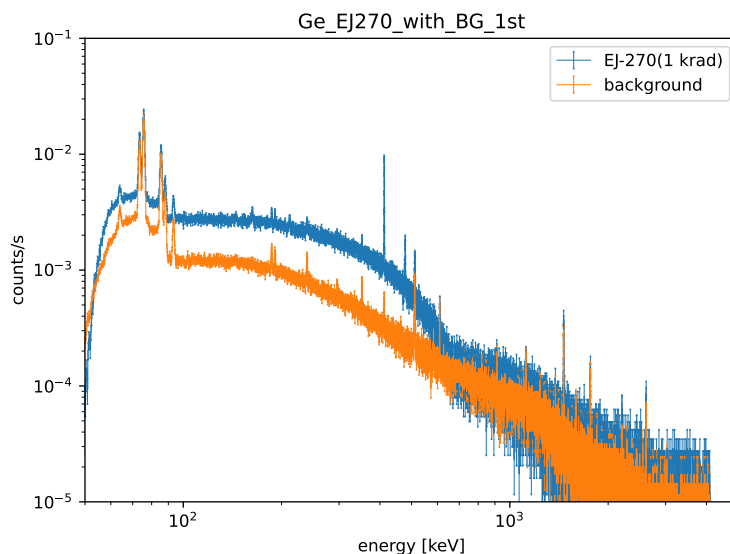


図 4.4.6: Ge 検出器を用いて測定した EJ-270 (1 krad) のスペクトル (青) と環境バックグラウンドのスペクトル (橙) を重ねた図。EJ-270 は 2023 年 11 月 13 日 13:53 から 2 日間、環境バックグラウンドは 2023 年 11 月 25 日 18:11 から 4 日間計測したデータを用いている。横軸にエネルギー (keV)、縦軸に counts/s を示している。

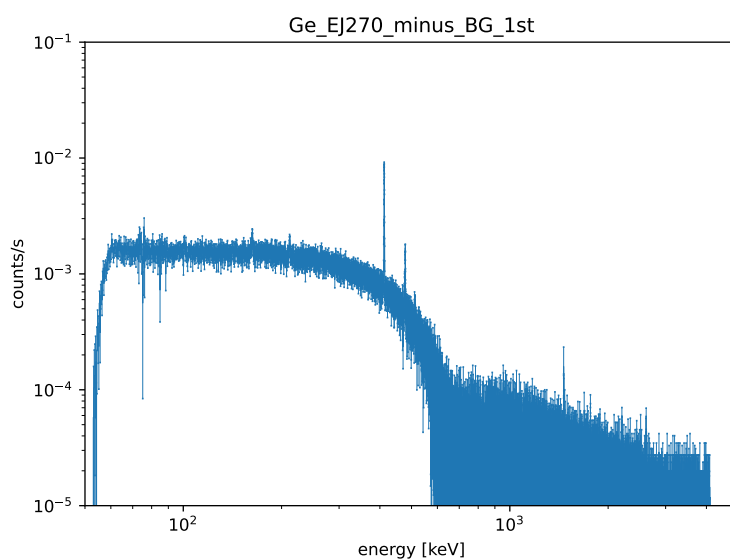


図 4.4.7: Ge 検出器を用いて測定した EJ-270 (1 krad) から background を減算したスペクトル。使用した測定データは、図 4.4.6 と同様である。横軸にエネルギー [keV]、縦軸に counts/s を示している。

を用いたフィッティングの結果、

$$t_{\text{half}} = 27.99 \pm 0.03 \text{ min} \quad (4.4.7)$$

が得られた。

以上のようにして求めた値に近い半減期を持っている軽元素の同位体に、 ^{11}C がある。 ^{11}C の半減期は 20.39 min であり、 β^+ 崩壊により放出するエネルギーは 511 keV である。これが生成される反応として、 $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(p, 3p3n)^{11}\text{C}$ などが考えられる。実験で求めた値と文献値には 10 分ほどの乖離がある。

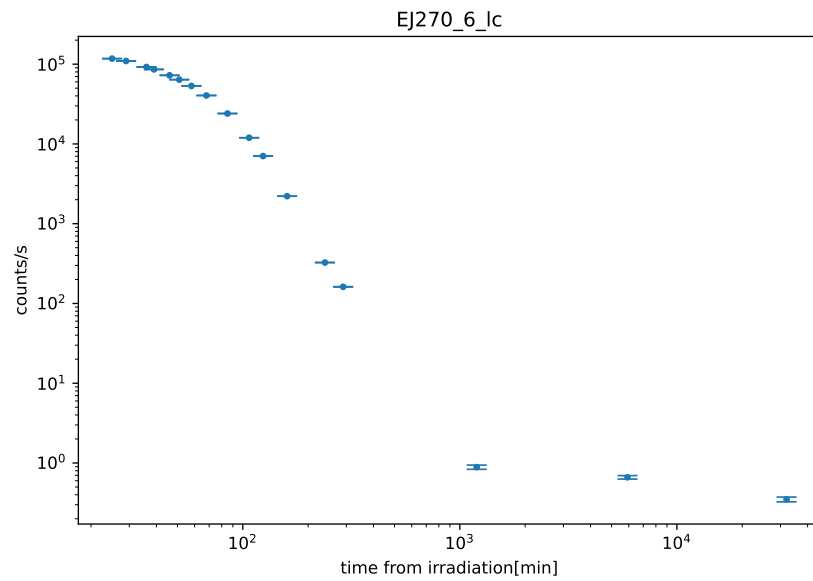


図 4.4.8: EJ-270 (10 krad) の放射化バックグラウンドのライトカーブ。表 A.3 の照射後の放射化バックグラウンドのデータから、合計カウントレートを求めてプロットしている。横軸は陽子照射からの経過時間、縦軸は counts/s を表している。

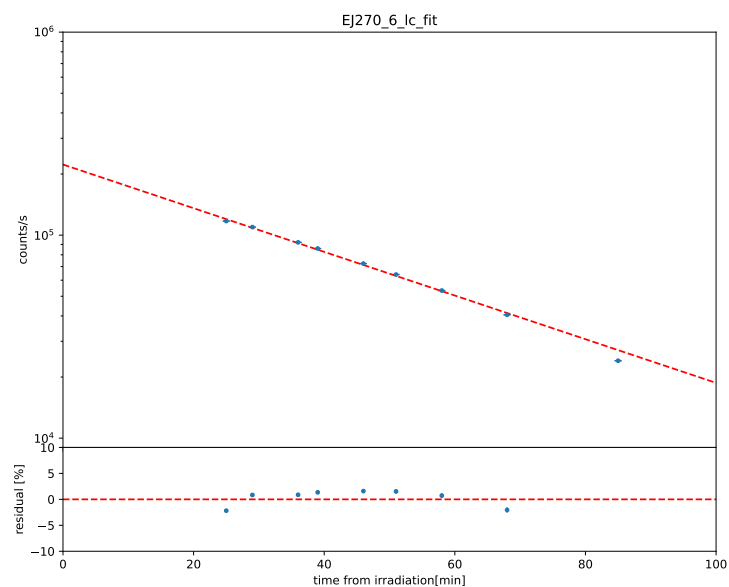


図 4.4.9: 図 4.4.8 のうち、陽子照射から 100 min 後までの部分。横軸は陽子照射からの経過時間、縦軸は counts/s を表している。式 4.4.3 によるフィット結果を赤い破線で、示しており、下部には残差を表示している。

これは、照射直後には短寿命の同位体が多く生成されており、測定される放射化バックグラウンドが純粋に ^{11}C によるものではないからであると考えられる。

以上の解析で特定した、EJ-270 内部で生じた放射性同位体の一覧を表 4.4.1 に示す。想定される生成過程も掲載している。EJ-270 に対する陽子照射試験は先行研究にはなく、生成される放射性同位体を初めて特定することができた。

表 4.4.1: EJ-270 (1 krad) の測定から特定した放射性同位体の一覧。半減期順に並べている。

同位体	半減期	生成過程
^{11}C	20.39 min	$^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(p, 3p3n)^{11}\text{C}$
^{18}F	109.8 min	$^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$
^7Be	53.29 d	$^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$

4.4.2 GAGG

この項では、GAGG 内で生じた放射化バックグラウンドの同定について述べる。

4.4.1 項では、CsI シンチレータや MPPC による長期間の測定データを用いた解析を行なった。しかし GAGG については CsI と MPPC による長時間測定を行っていないため、Ge 検出器による測定のみを解析を行なった。これにより、ISS 軌道上で主要な放射化バックグラウンド源となるような長寿命の放射性同位体の特定を目指した。

表 A.10 で示した 2023 年 11 月と 2024 年 6 月のそれぞれの GAGG (1 krad) の測定データに、4.4.1 項で述べた Ge 検出器の較正結果を適用して、さらに同時期に取得したバックグラウンドのデータを減算したスペクトルが図 4.4.11 と 4.4.12 である。較正結果は 2023 年 11 月と 2024 年 6 月のデータで同様であった。この二つのスペクトルで見られるピークに対して、式 4.3.1 でフィッティングを行なった。出てきた輝線のエネルギー値から、IAEA が提供している核図表^{*2}の検索機能を用いて同位体を特定した。その特定方法を図 4.4.10 に示している。フィッティングの結果と対応する同位体の一覧を、Appendix A の表 A.11 と A.12 に示している。

以上の解析で特定した、GAGG 内部で生じた放射性同位体の一覧を表 4.4.2 に示す。想定される生成過程について、特定できたものについては表に示している。先行研究 [2] では、Eu や Gd の同位体の生成を確認しており、今回の結果はそれと一致する。また本研究では、先行研究で扱っていない数日から数十日の長寿命成分を特定することができた。

*2 <https://www-nds.iaea.org/relnsd/NdsEnsdf/QueryForm.html>



図 4.4.10: IAEA の核図表を用いた放射性同位体特定の手法。上部は検索画面である。質量数の上限は、GAGG の組成 (Gd₃Al₂Ga₃O₁₂) から最大の質量数 160 に照射陽子分の 1 を足した 161 とした。半減期の下限は、長寿命成分を見ていることを考慮して 1 日とした。エネルギー範囲は表 A.11 と表 A.12 のそれぞれのエネルギー値を用いている。下部は検索画面である。分岐比と半減期を確認し、適切な同位体を取り出している。この図では ¹⁵³Gd を特定している。

表 4.4.2: Ge 検出器による GAGG (1 krad) の測定から特定した放射性同位体の一覧。半減期順に並べている。

同位体	半減期 (d)	生成過程
¹⁴⁶ Eu	4.61	-
¹⁴⁵ Eu	5.93	-
¹⁶¹ Tb	6.88	-
¹⁴⁹ Gd	9.28	-
¹⁴⁷ Eu	24.1	-
¹⁴⁶ Gd	48.27	¹⁴⁸ Gd(p, t) ¹⁴⁶ Gd
¹⁴⁸ Eu	54.5	-
⁵⁸ Co	70.86	-
¹⁴⁹ Eu	93.1	-
¹⁵³ Gd	240.4	-
⁶⁵ Zn	244.26	⁶⁹ Ga(p, x) ⁶⁵ Zn、 ⁷¹ Ga(p, x) ⁶⁵ Zn
¹⁴³ Pm	265	-

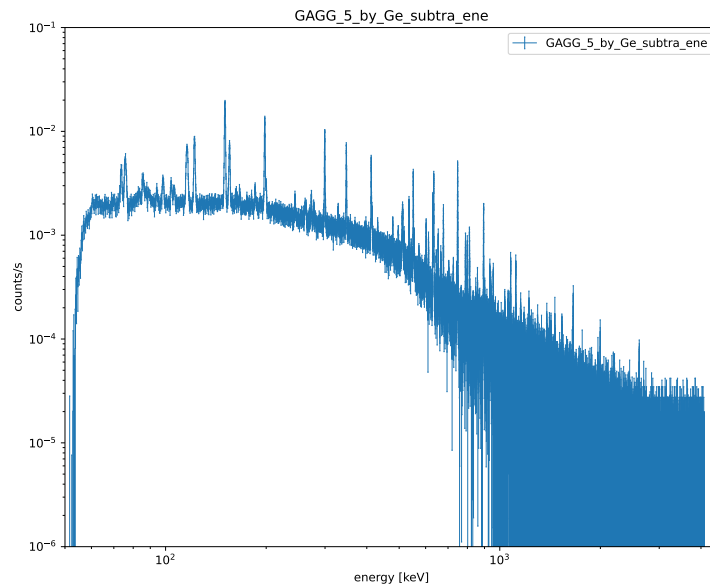


図 4.4.11: Ge 検出器を用いて測定した GAGG (1 krad) から環境バックグラウンドを減算したスペクトル。GAGG は 2023 年 11 月 15 日 14:09 から 2 日間、環境バックグラウンドは 2023 年 11 月 25 日 18:11 から 4 日間計測したデータを用いている。横軸にエネルギー (keV)、縦軸に counts/s を示している。

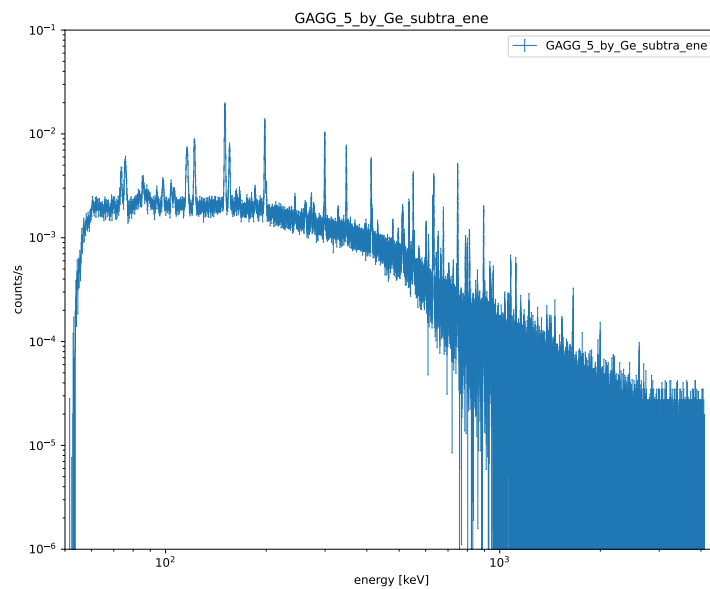


図 4.4.12: Ge 検出器を用いて測定した GAGG (1 krad) から環境バックグラウンドを減算したスペクトル。GAGG は 2024 年 6 月 7 日 00:14 から 2 日間、環境バックグラウンドは 2024 年 6 月 11 日 22:21 から 2 日間計測したデータを用いている。横軸にエネルギー (keV)、縦軸に counts/s を示している。

第 5 章

Geant4 シミュレーション

第 3 章で述べたように、ISS 軌道上では種々の放射線に晒される。この宇宙放射線によって、シンチレータは定常的なバックグラウンド信号を発する。さらに、MoMoTarO-ISS は SAA 通過時には数百 MeV ほどの高エネルギーの陽子に晒され、シンチレータ内部で放射性同位体が生じる。この蓄積された同位体が崩壊するときに放出されるガンマ線や荷電粒子はバックグラウンド源となる。MoMoTarO-ISS のバックグラウンドレートを見積もるために、Geant4[99] を用いたモンテカルロシミュレーションを行った。本章では、このシミュレーションのセットアップと照射した粒子の種類、解析結果について述べる。

5.1 セットアップ

Geant4 は、欧州原子核研究機構 (CERN) が提供する、物質内部を通過する粒子の反応過程をシミュレーションするソフトである [99]。素粒子物理学をはじめ、核物理、加速器の設計、宇宙開発や医学物理の分野で広く用いられている。このシミュレーションで用いた Geant4 のバージョンは、Geant4-11.2.2[100] である。本節では、照射対象となるジオメトリ、照射する粒子のスペクトル、用いた物理モデルについて述べる。

5.1.1 ジオメトリ

表 5.1.1 に、MoMoTarO-ISS のジオメトリを組むために作成した物質の一覧とその組成を示す。GAGG の組成について、Ce は分解能や光量の向上のために配合されており、粒子の反応過程には大きくは影響しないと考えたため今回のシミュレーションでは省いた。

図 5.1.1 に、本シミュレーションで行ったジオメトリを示す。左の図は、作成したジオメトリの全体像である。簡単のために、SPySE は $60 \times 90 \times 40 \text{ cm}^3$ のアルミニウム製の直方体としている。SPySE の宇宙方向の面の中心に、MoMoTarO-ISS を設置した。右の図は MoMoTarO-ISS 本体の断面図である。GAGG ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$, #1)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 3 \text{ cm}^3$, #2)、EJ-270 ($7 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$, #3) を積層し、3 mm 厚のアルミニウム筐体で覆った構造でジオメトリを仮定した。3 cm 厚の EJ-270 については、2 mm 厚の B4C シートで覆っている。4 つの EJ-270 ($6 \times 6.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$, #S1~#S4, #S1 と #S3 が SPySE の短辺側を向いている) は、アルミニウム筐体の側面の 4 面の中央にそれぞれ設置し、さらにその周りを 3 mm 厚のアルミニウムで覆う構造とした。

表 5.1.1: シミュレーションを行うにあたり定義した物質の組成の表

物質	密度 (g/cm ³)	原子	質量比 (%)	備考
EJ-270	1.14	H	6.90	Eljen Technology 社提供のカタログ [55] をもとに作成。 Li は ⁶ Li が 95.5%、 ⁷ Li が 4.5% で構成
		C	79.5	
		Li	0.503	
		O	11.2	
		N	1.90	
GAGG	6.63	Gd	50.9	C&A 社提供のカタログ [58] をもとに作成。 Ce は省いた。
		Al	5.82	
		Ga	22.6	
		O	20.7	
B4C	1.36	B	62.6	Mirrotron 社提供のカタログ [101] をもとに作成。 B は ¹⁰ B が 20%、 ¹¹ B が 80% で構成。
		C	31.4	
		O	5.00	
		H	1.00	

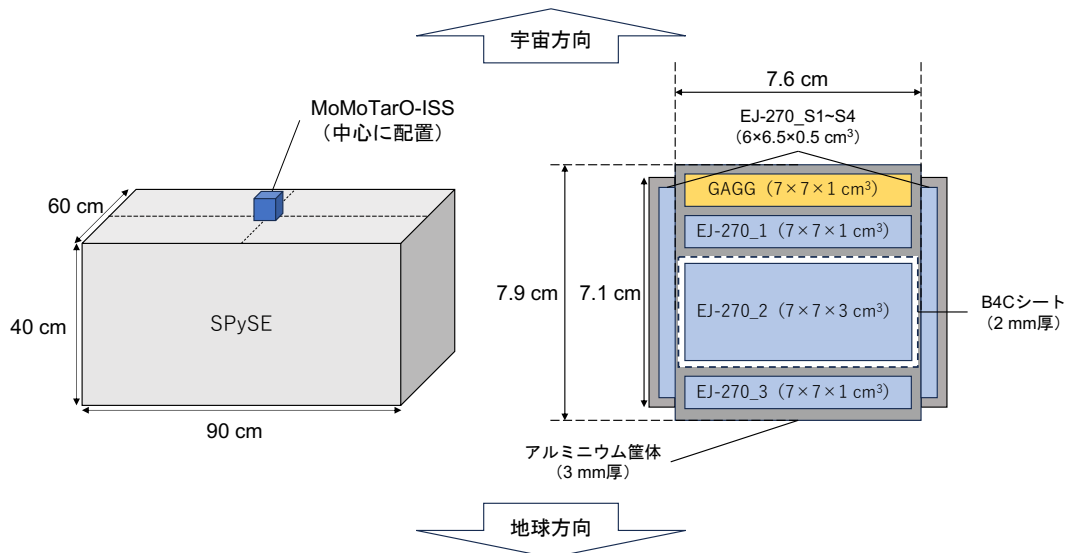


図 5.1.1: Geant4 上で設定したジオメトリ。左の図は SPySE と MoMoTarO-ISS の概観で、右の図は MoMoTarO-ISS のジオメトリの断面図である。どちらの図も、上が宇宙方向、下が地球方向である。

5.1.2 照射したスペクトル

粒子の照射は、SAA 以外と SAA に分けて行った。いずれの照射でも、図 5.1.1 の宇宙方向、または地球方向から長方形のビーム状に照射しており、その面積は SPySE に合わせて $60 \times 90 \text{ cm}^2$ としている。照射面積内では一様かつランダムに粒子を入射した。以下に述べるように、宇宙線陽子のエネルギースペクトルを仮定し、入射粒子の統計量を大きくできるよう Geant4 で一度に入射できる粒子数は 10^9 個程度であるという条件のため、最大の 100 秒を設定した。その結果を軌道上での実測定に一致させるよう、適切に規格化する。

SAA の照射は、3.1 節で示した AP-8 (捕捉陽子) と AE-8 (捕捉電子) のモデル [77] を用いた。SPENVIS

では、各エネルギーごとの積分フラックスを出力することができる（図 5.1.2 が実際に出力したデータ）ため、この値に SPySE の面積（ $60 \times 90 \text{ cm}^2$ ）と照射時間（100 秒、ただし電子は 1 秒）を乗じて照射量を計算した。SAA について Geant4 で入射した粒子のスペクトルを、図 5.1.3 に示す。

Energy (MeV)	Total mission average flux (/cm2/s)	Total mission fluence (/cm2)
0.10	5.3073E+02	8.3686E+09
0.15	4.4227E+02	6.9736E+09
0.20	3.7315E+02	5.8839E+09
0.30	2.8440E+02	4.4844E+09
0.40	2.2343E+02	3.5231E+09
0.50	1.8810E+02	2.9659E+09
0.60	1.6147E+02	2.5461E+09
0.70	1.4278E+02	2.2514E+09
1.00	1.0605E+02	1.6723E+09
1.50	7.8048E+01	1.2307E+09
2.00	6.1190E+01	9.6484E+08
3.00	4.5530E+01	7.1791E+08
4.00	3.6137E+01	5.6981E+08
5.00	3.1123E+01	4.9074E+08
6.00	2.7535E+01	4.3417E+08
7.00	2.5413E+01	4.0071E+08
10.00	2.1578E+01	3.4024E+08
15.00	1.8962E+01	2.9899E+08
20.00	1.7473E+01	2.7552E+08
30.00	1.5571E+01	2.4553E+08
40.00	1.4091E+01	2.2219E+08
50.00	1.2826E+01	2.0224E+08
60.00	1.1460E+01	1.8071E+08
70.00	1.0214E+01	1.6105E+08
100.00	7.1474E+00	1.1270E+08
150.00	3.6975E+00	5.8302E+07
200.00	1.9725E+00	3.1103E+07
300.00	5.5894E-01	8.8133E+06
400.00	1.6059E-01	2.5322E+06

図 5.1.2: SPENVIS で出力した捕捉陽子のフラックス。軌道は図 3.1.6 に示した設定である。エネルギー、平均の積分フラックス、半年間のフルエンスを示している。本シミュレーションでは積分フラックスの値を用いた。

SAA 以外の照射は、Cumani et al. (2019) [81] に示されている粒子ごとのモデルを用いた。著者は、軌道傾斜角と高度を入力すると各モデルの微分フラックスを計算することができる Python コードを Github 上で公開している*1。これを用いて出力した微分フラックスが図 5.1.4 である。また、それぞれのモデルの概要を表 5.1.2 に示している。シミュレーションでは、この微分フラックスのモデルの有効範囲を対数スケールで 100 等分して、エネルギー E_n ($1 \leq n \leq 100$) をもつ粒子の照射量 C_n を

$$C_n = \text{SPySE area (m}^2) \times 100 \text{ s} \times 4\pi \times \int_{E_n}^{E_{n+1}} f(E)dE \quad (5.1.1)$$

*1 <https://github.com/pcumani/LEOBackground>

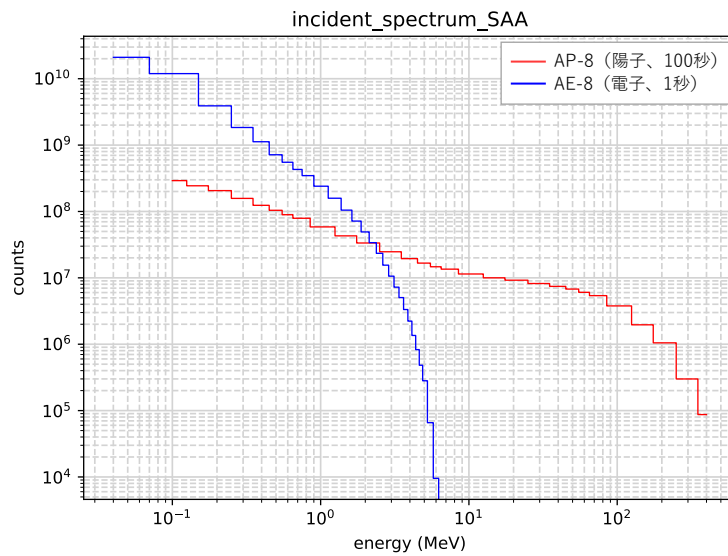


図 5.1.3: AP-8 と AE-8 に基づいて計算した、SAA での入射粒子のスペクトル。赤色が AP-8 に基づく陽子のスペクトル、青色が AE-8 に基づく電子のスペクトルである。AE-8 については、Geant4 で照射可能な粒子数の都合上、1 秒分の粒子数を照射した。そのため、見かけ上電子のフラックスが少ないように見えている。

とした。ここで、 $f(E)$ はモデルの関数、 4π は立体角の補正である。全球分のフラックスを 1 方向から降らせているので、実測値より高い値が出るのが予測される。SAA 以外について Geant4 で入射した粒子のスペクトルを、図 5.1.5 に示す。表 5.1.3 に、入射した粒子の詳細な情報を示す。粒子が宇宙方向から到来するか地球方向から到来するかによって、Geant4 上で入射する向きを変えている。

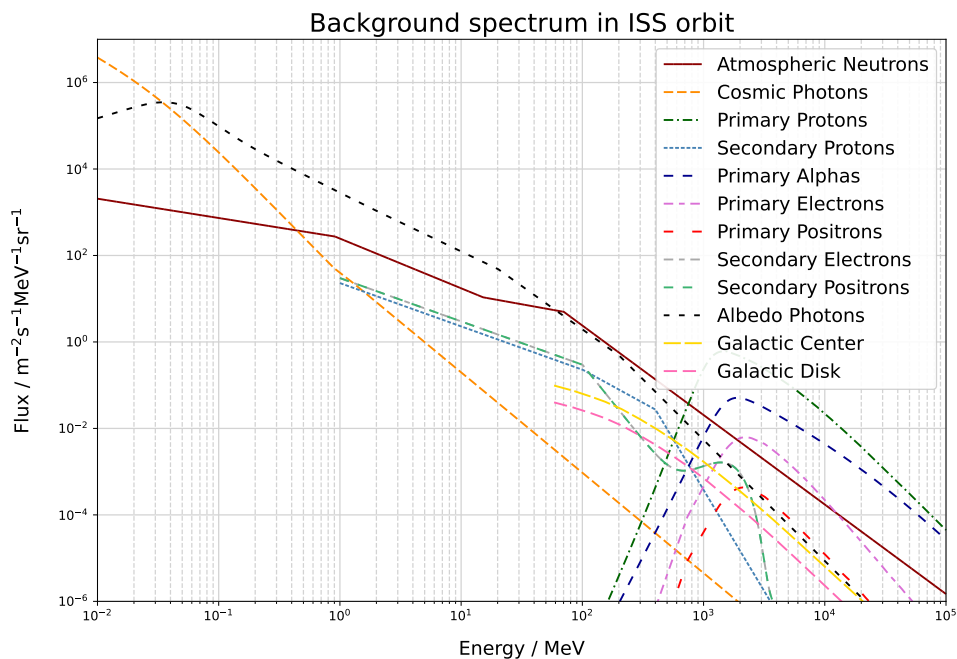


図 5.1.4: Cumani et al. (2019) [81] の著者が Github で公開しているコードを利用して出力した、SAA 以外の ISS 軌道上のバックグラウンドの微分フラックス。コードは BackgroundPlotter_All.py を用いた。タイトルは変更している。

表 5.1.2: Cumani et al. (2019) [81] に示されている各モデルの概要

モデル名	参照	概要
Atmospheric neutrons	Kole et al. (2015) [102] Lingenfelter (1963) [80]	銀河宇宙線と大気との相互作用による中性子
Cosmic Photons	Turler et al. (2010) [103] Mizuno et al. (2004) [79] Ackermann et al (2015) [104]	銀河系外から等方的に到来する X 線とガンマ線
Primary Protons	Aguilar et al. (2015) [105]	銀河宇宙線に含まれる陽子
Secondary Protons	Mizuno et al. (2004) [79]	銀河宇宙線と大気との相互作用による陽子
Primary Alphas	Aguilar et al. (2015) [105]	銀河宇宙線に含まれるアルファ線
Primary Electrons	Aguilar et al. (2015) [105] Mizuno et al. (2004) [79]	銀河宇宙線に含まれる電子
Primary Positrons	Aguilar et al. (2015) [105] Mizuno et al. (2004) [79]	銀河宇宙線に含まれる陽電子
Secondary Electrons	Mizuno et al. (2004) [79]	銀河宇宙線と大気との相互作用による電子
Secondary Positrons	Mizuno et al. (2004) [79]	銀河宇宙線と大気との相互作用による陽電子
Albedo photons	Sazonov et al. (2007) [88] Churazov et al. (2008) [89] Turler et al. (2010) [103] Mizuno et al. (2004) [79] Abdo et al (2009) [87]	銀河宇宙線と大気との相互作用や反射によるガンマ線
Galactic Center/Disk	Fermi-LAT collaboration[106]	銀河面、銀河中心から到来するガンマ線

5.1.3 物理モデル

今回のシミュレーションで用いた物理モデルは、G4EmLivermorePhysics である。このモデルには、宇宙環境でのシミュレーションに必要な電磁相互作用、強い相互作用、放射性崩壊が含まれている。また、低エネルギー（コンプトン散乱は 250 eV 以上、制動放射は 10 eV 以上 [107]) の反応についてもシミュレーションが可能である。

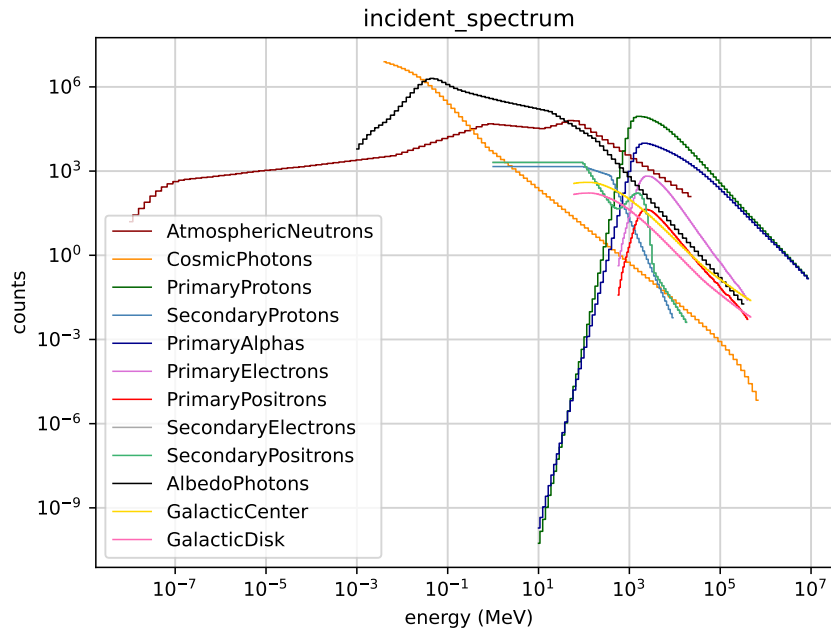


図 5.1.5: Cumani et al. (2019) [81] に基づいて計算した SAA 以外の入射粒子のスペクトル。

表 5.1.3: 入射した粒子の情報。SAA 以外のエネルギー帯域については、Cumani et al. (2019) [81] で示しているモデルの有効範囲に基づいているが、Galactic Center/Disk の 2 成分については、計算の都合上文献値とは異なる 60 MeV からとしている。また、Geant4 で照射可能な粒子数の都合上、AP-8 は 1 秒分の粒子数を照射した。照射の向きについては、図 5.1.1 の宇宙方向からの入射を「上」、地球方向からを「下」と定義している。

分類	モデル	粒子	照射量 (個)	エネルギー帯域	照射の向き
SAA	AP-8	陽子	1.6×10^9	0.1 MeV–400 MeV	上
	AE-8	電子	4.3×10^8	0.04 MeV–7 MeV	上
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	中性子	1.2×10^6	0.01 eV–30 GeV	下
	Cosmic Photons	ガンマ線	5.6×10^7	4 keV–820 GeV	下
	Primary Protons	陽子	1.1×10^6	10 MeV–10 TeV	上
	Secondary Protons	陽子	8.9×10^4	1 MeV–10 GeV	下
	Primary Alphas	アルファ線	1.4×10^5	10 MeV–10 TeV	上
	Primary Electrons	電子	1.3×10^4	570 MeV–429 GeV	上
	Primary Positrons	陽電子	8.1×10^2	570 MeV–429 GeV	上
	Secondary Electrons	電子	1.0×10^5	1 MeV–20 GeV	下
	Secondary Positrons	陽電子	1.0×10^5	1 MeV–20 GeV	下
	Albedo Photons	ガンマ線	2.7×10^7	1 keV–400 GeV	下
	Galactic Center	ガンマ線	1.0×10^4	60 MeV–513 GeV	上
	Galactic Disk	ガンマ線	4.2×10^3	60 MeV–513 GeV	上

5.2 解析結果

今回のシミュレーションでは、粒子タイプごとに照射を行った。プロセスごとに得たデータの一覧を表 5.2.1 に示す。このデータから適当な項目を取り出して解析を行った。

表 5.2.1: シミュレーションでプロセスごとに得たデータの種類の一覧

列	名前	概要
1	EventID	粒子を照射するイベントの ID
2	ChamberNb	検出器の ID
3	ParticleID	生成粒子の ID
4	ParticleParticleID	親粒子の ID
5	ParticleName	粒子種
6	PreProcessName	前回のプロセス
7	PostProcessName	今回のプロセス
8	CreatorProcessName	粒子の生成プロセス
9	CreatorModelName	粒子の生成プロセスに用いられたモデル
10	PreKineticEnergy	プロセス前の運動エネルギー (eV)
11	PostKineticEnergy	プロセス後の運動エネルギー (eV)
12	Edep	検出器へのエネルギーデポジット (eV)
13	GlobalTime	イベント開始からの時間 (ns)
14	LocalTime	粒子が生成されてからの観測者視点での時間 (ns)
15	ProperTime	粒子が生成されてからの粒子視点での時間 (ns)
16	DeltaTime	前回のプロセスからの経過時間 (ns)
17~19	PrePos	プロセス前の (x, y, z) 座標 (m)
20~22	PostPos	プロセス後の (x, y, z) 座標 (m)

5.2.1 検出器ごとのエネルギーデポジットと各粒子のカウントレート

各検出器のそれぞれの照射に対するエネルギーデポジットを得るために以下の操作を行った。

- ChamberNb を抽出して、対象の検出器でのイベントのみを抜き出し
- 同じ EventID を持つプロセスの Edep を足し合わせてヒストグラムを作成
- Edep が 100 keV–20 MeV のものを抜き出し
- 照射時間に合わせて補正 (AE-8 は 1 秒、それ以外は 100 秒)

このような操作に基づいて出力した、各検出器のエネルギーデポジットのヒストグラムを、SAA は図 5.2.1、SAA 以外は図 5.2.2 に示す。また、それぞれのモデルで得られたカウント数について、積層されたシンチレー

タは表 5.2.2、側面に搭載されたシンチレータは表 5.2.3 にまとめている。

SAA 上のカウントレートは、GAGG が 2674.0 ± 47.0 counts/s と最大であり、単位体積あたりのカウントレートも 54.6 ± 1.0 counts/s と全ての検出器の中で最大だった。これは、GAGG が最上部に搭載されており、AE-8 により照射された電子と最初に反応し、主に電離が起こるためである。また、この多層構造のため、同じサイズの EJ-270.1 (511.1 ± 10.4 counts/s) と EJ-270.3 (245.1 ± 8.5 counts/s) では 2 倍ほどのレートの差が見られた。これらのエネルギーデポジット (図 5.2.1 (b) と (d)) の 10 MeV あたりに見られる山型の構造は、最小電離粒子 (minimum ionizing particles : MIP) によるものである。MIP は、物質内を通過するときその飛程に比例して落とすエネルギーが最小の荷電粒子を指し、粒子と物質の種類によって一定である。B4C シートで覆われている EJ-270.2 のカウントレートは 412.6 ± 14.6 counts/s であり、単位体積あたりでは 2.8 ± 0.1 counts/s と、全ての検出器の中で最小であった。側面の EJ-270 のカウントレートは 400 counts/s 前後であり、 1 cm^2 あたりでは 20 counts/s 程度と、その他の EJ-270 に比べて 2 倍以上のカウントレートを持っていた。これは、GAGG と同様に AE-8 により照射された電子と最初に反応する割合が高いためである。ただし、実測ではあらゆる方向から粒子が入射することを考えると、実測値はこの値よりさらに高くなることが考えられる。

SAA 以外のカウントレートは、SAA と同様に GAGG が全ての検出器の中で最大となる 325.2 ± 4.1 counts/s (1 cm^2 あたり 6.6 ± 0.1 counts/s) という結果が得られた。内訳は、Primary Protons が 60%、Cosmic Photons が 16%、Albedo Photons が 12%、その他が 22% であった。特に Cosmic Photons については、積層されたシンチレータでの反応のうち 95% 以上が GAGG で生じている。図 5.2.1 (a) の Primary Protons で 10 MeV あたりに確認できるピークは MIP である。EJ-270.1 (181.1 ± 2.7 counts/s) と EJ-270.3 (212.7 ± 2.9 counts/s) については、SAA と異なり 15% ほどの差であった。これは、地球方向から照射した成分が寄与しているためである。例えば、Atmospheric Neutrons では EJ-270.3 が EJ-270.1 に比べて 50% ほどカウントレートが高い。SAA と同様に、EJ-270.2 の 1 cm^2 あたりのカウントレートは 2.0 counts/s 程度と、全ての検出器の中で最小であった。側面の EJ-270 のカウントレートは 50 counts/s 前後であり、 1 cm^2 あたりでは 2.5 counts/s 程度と、SAA と異なり EJ-270.1 や EJ-270.3 の半分程度のカウントレートであった。EJ-270 のエネルギーデポジットでは、式 2.3.1 で示した熱中性子の捕獲による 4.78 MeV のピークを確認することができる。

今回のバックグラウンド解析を元に、ガンマ線バーストの観測可能性を検討していく。簡単な見積もりを行った結果、ガンマ線バーストのカウントレートは 10^4 counts/s 程度なので、バックグラウンドに比べて十分優位に観測できると想定している。

3.2 節に示した Mitchell et al. (2023) [95] の実測値から、 $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の GAGG の単位体積あたりのカウントレートは 10–40 counts/s 程度であることがわかる。今回のシミュレーションの結果と比較すると、実測値の方が一桁程度カウントレートが大きい。この原因として、ISS の構造体に宇宙線が衝突して生じる二次粒子を考慮していないことが考えられる。

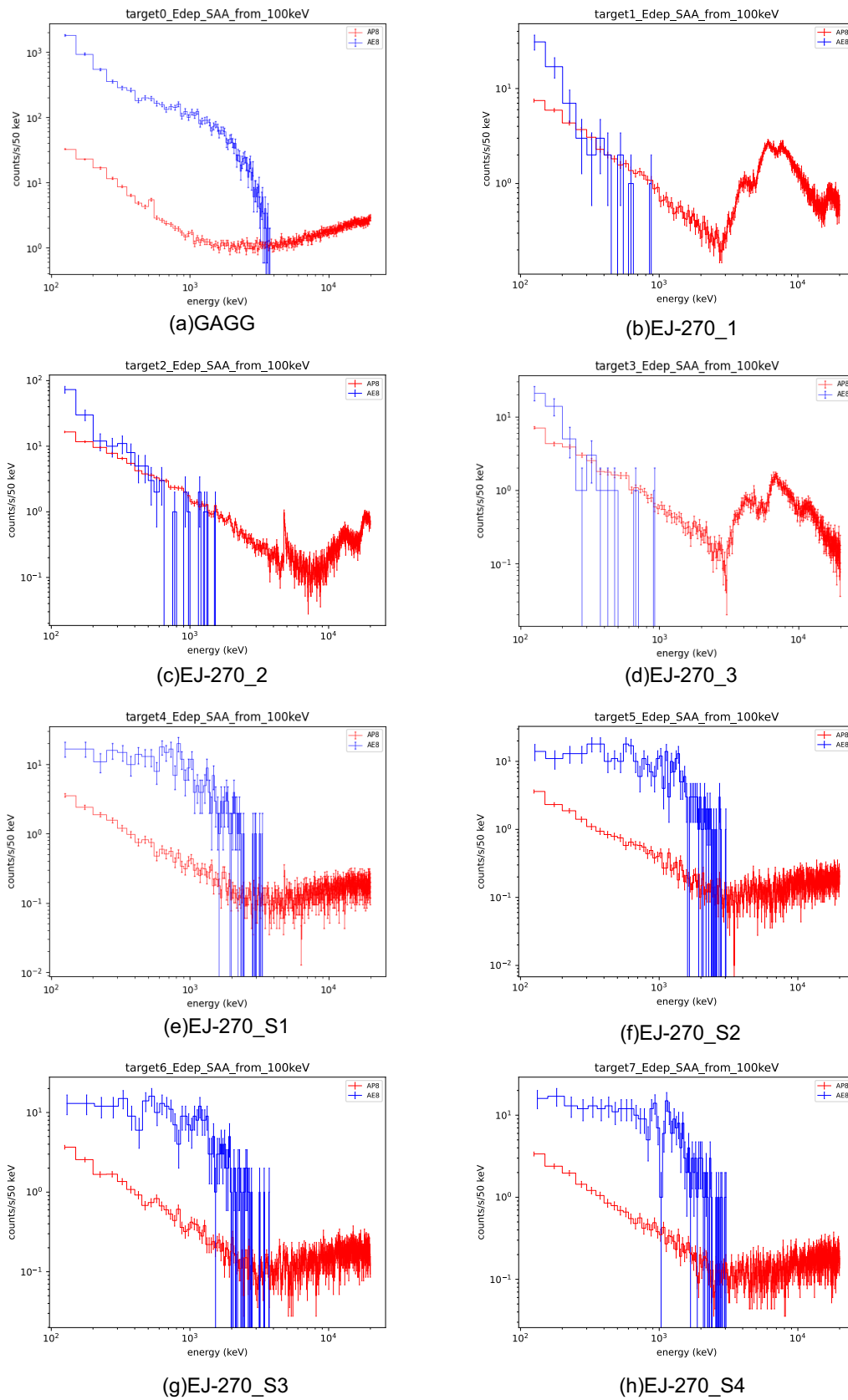


図 5.2.1: 全ての検出器の SAA におけるエネルギーデポジット。取り出したエネルギー範囲は 100 keV–20 MeV である。ピンの幅は 50 keV としている。

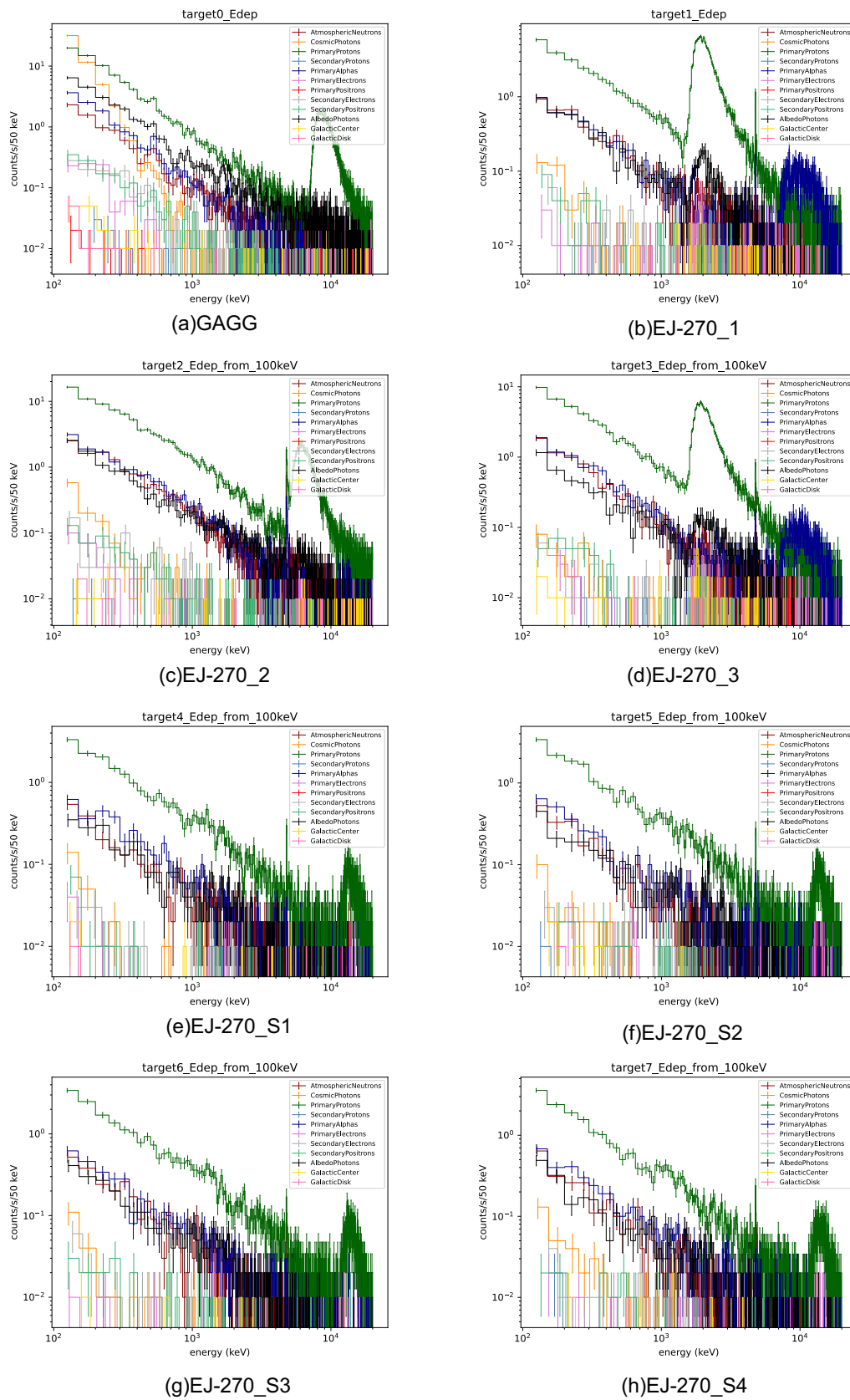


図 5.2.2: 全ての検出器の SAA 以外におけるエネルギーデポジット。取り出したエネルギー範囲は 100 keV–20 MeV である。ピンの幅は 50 keV としている。

表 5.2.2: 積層された 4 つのシンチレータの入射粒子ごとのレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	GAGG (counts/s)	EJ-270.1 (counts/s)	EJ-270.2 (counts/s)	EJ-270.3 (counts/s)
SAA	AP-8	709.97 ± 2.66	442.12 ± 2.10	241.63 ± 1.55	226.07 ± 1.50
	AE-8	1964.00 ± 44.32	69.00 ± 8.31	171.00 ± 13.08	49.00 ± 7.00
	計	2673.97 ± 46.98	511.12 ± 10.41	412.63 ± 14.63	275.07 ± 8.50
	計 (1 cm ² あたり)	54.57 ± 0.96	10.43 ± 0.21	2.81 ± 0.10	5.61 ± 0.17
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	12.68 ± 0.36	7.72 ± 0.28	20.85 ± 0.46	11.75 ± 0.34
	Cosmic Photons	53.24 ± 0.73	0.42 ± 0.06	1.29 ± 0.11	0.27 ± 0.05
	Primary Protons	195.64 ± 1.40	141.17 ± 1.19	219.43 ± 1.48	162.91 ± 1.28
	Secondary Protons	0.13 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.09 ± 0.03
	Primary Alphas	17.44 ± 0.42	19.59 ± 0.44	23.05 ± 0.48	24.39 ± 0.49
	Primary Electrons	1.76 ± 0.13	1.24 ± 0.11	1.05 ± 0.10	1.23 ± 0.11
	Primary Positrons	0.10 ± 0.03	0.07 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.06 ± 0.02
	Secondary Electrons	2.22 ± 0.15	0.56 ± 0.07	1.09 ± 0.10	0.55 ± 0.07
	Secondary Positrons	2.20 ± 0.15	0.58 ± 0.08	1.11 ± 0.11	0.65 ± 0.08
	Albedo Photons	39.16 ± 0.63	9.24 ± 0.30	19.82 ± 0.45	10.27 ± 0.32
	Galactic Center	0.40 ± 0.06	0.33 ± 0.06	0.38 ± 0.06	0.42 ± 0.06
	Galactic Disk	0.21 ± 0.05	0.13 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.12 ± 0.03
	計	325.18 ± 4.13	181.13 ± 2.69	288.35 ± 3.44	212.71 ± 2.91
	計 (1 cm ² あたり)	6.64 ± 0.08	3.70 ± 0.05	1.96 ± 0.02	4.34 ± 0.06

表 5.2.3: 側面に搭載された 4 つの EJ-270 の入射粒子ごとのレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	EJ-270_S1 (counts/s)	EJ-270_S2 (counts/s)	EJ-270_S3 (counts/s)	EJ-270_S4 (counts/s)
SAA	AP-8	80.41 ± 0.90	80.81 ± 0.90	81.12 ± 0.90	80.26 ± 0.90
	AE-8	337.00 ± 18.36	344.00 ± 18.55	311.00 ± 17.64	327.00 ± 18.08
	計	417.41 ± 19.25	424.81 ± 19.45	392.12 ± 18.54	407.26 ± 18.98
	計 (1 cm ² あたり)	21.41 ± 0.99	21.79 ± 1.00	20.11 ± 0.95	20.89 ± 0.97
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	3.62 ± 0.19	3.53 ± 0.19	3.87 ± 0.20	3.79 ± 0.19
	Cosmic Photons	0.25 ± 0.05	0.25 ± 0.05	0.23 ± 0.05	0.33 ± 0.06
	Primary Protons	36.26 ± 0.60	35.55 ± 0.60	35.92 ± 0.60	35.00 ± 0.59
	Secondary Protons	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.03 ± 0.02
	Primary Alphas	5.38 ± 0.23	5.19 ± 0.23	4.91 ± 0.22	5.34 ± 0.23
	Primary Electrons	0.27 ± 0.05	0.20 ± 0.04	0.21 ± 0.05	0.23 ± 0.05
	Primary Positrons	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01	-	-
	Secondary Electrons	0.26 ± 0.05	0.27 ± 0.05	0.29 ± 0.05	0.19 ± 0.04
	Secondary Positrons	0.28 ± 0.05	0.23 ± 0.05	0.32 ± 0.06	0.26 ± 0.05
	Albedo Photons	3.99 ± 0.20	3.98 ± 0.20	3.97 ± 0.20	3.88 ± 0.20
	Galactic Center	0.08 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03
	Galactic Disk	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.02
	計	50.48 ± 1.51	49.33 ± 1.48	49.81 ± 1.47	49.17 ± 1.48
	計 (1 cm ² あたり)	2.59 ± 0.08	2.53 ± 0.08	2.55 ± 0.08	2.52 ± 0.08

5.2.2 中性子のエネルギーデポジットと捕獲のカウントレート

EJ-270 は中性子の測定を目的としている。図 2.3.3 に示したように、高速中性子は陽子との弾性散乱で、熱中性子は ${}^6\text{Li}$ による捕獲によって測定する。中性子の弾性散乱によるエネルギーデポジットを得るために、シミュレーションの結果に対して以下の操作を行った。

- ChamberNb を抽出して、対象の検出器でのイベントのみを抜き出し
- ParticleName が "neutron"、PostProcessName が "hadElastic" (弾性散乱に対応) であるものを抽出
- PostKineticEnergy から PreKineticEnergy を減算し、検出器へのエネルギーデポジットを算出
- 同じ EventID を持つプロセスの Edep を足し合わせてヒストグラムを作成
- Edep が 100 keV–20 MeV のものを抜き出し
- 照射時間に合わせて補正 (AE-8 は 1 秒、それ以外は 100 秒)

このような操作に基づいて算出した、それぞれの EJ-270 の中性子の弾性散乱によるエネルギーデポジットのヒストグラムを、SAA は図 5.2.3 に、SAA 以外は図 5.2.4 に示す。また、中性子の弾性散乱によるカウントレートを表 5.2.4 と表 5.2.5 にまとめている。EJ-270_1 (36.17 ± 1.00 counts/s) と EJ-270_2 (114.26 ± 1.78 counts/s) の 1 cm^2 あたりのカウントレートはおよそ $0.7\text{--}0.8$ counts/s 程度であり、SPySE 筐体からの散乱の影響を受けやすい EJ-270_3 (63.90 ± 1.35 counts/s) の 1 cm^2 あたりのカウントレートは 1.30 ± 0.03 counts/s であるという結果が得られた。側面の EJ-270 については、いずれも 19 counts/s 程度 (1 cm^2 あたりは 1 counts/s 程度) という結果が得られた。これらも SPySE の散乱の影響を受けていると考えられる。

今回のバックグラウンド解析を元に、太陽フレアからの中性子観測可能性を検討していく。簡単な見積もりを行なった結果、太陽中性子のカウントレートは 10 counts/s 程度なので、バックグラウンドに比べて十分優位に観測できると想定している。

また、中性子捕獲によるカウントレートを得るために以下の操作を行った。

- ChamberNb を抽出して、対象の検出器でのイベントのみを抜き出し
- ParticleName が "neutron"、PostProcessName が "neutronInelastic" (中性子捕獲に対応) であるものを抽出
- これを満たすプロセスをカウントし、照射時間に合わせて補正 (AE-8 は 1 秒、それ以外は 100 秒)

この操作に基づいて算出した中性子捕獲のカウントレートを表 5.2.6 と表 5.2.6 にまとめている。いずれの EJ-270 についても、 1 cm^2 あたりのカウントレートは $0.05\text{--}0.1$ counts/s 程度であった。主要な発生源は Primary Protons であり、核破砕反応によって生じたものが支配的である。また、中性子の弾性散乱と捕獲でカウントレートの桁がおよそ一致しており、PSD で高速中性子と熱中性子を弁別することができると考えられる。

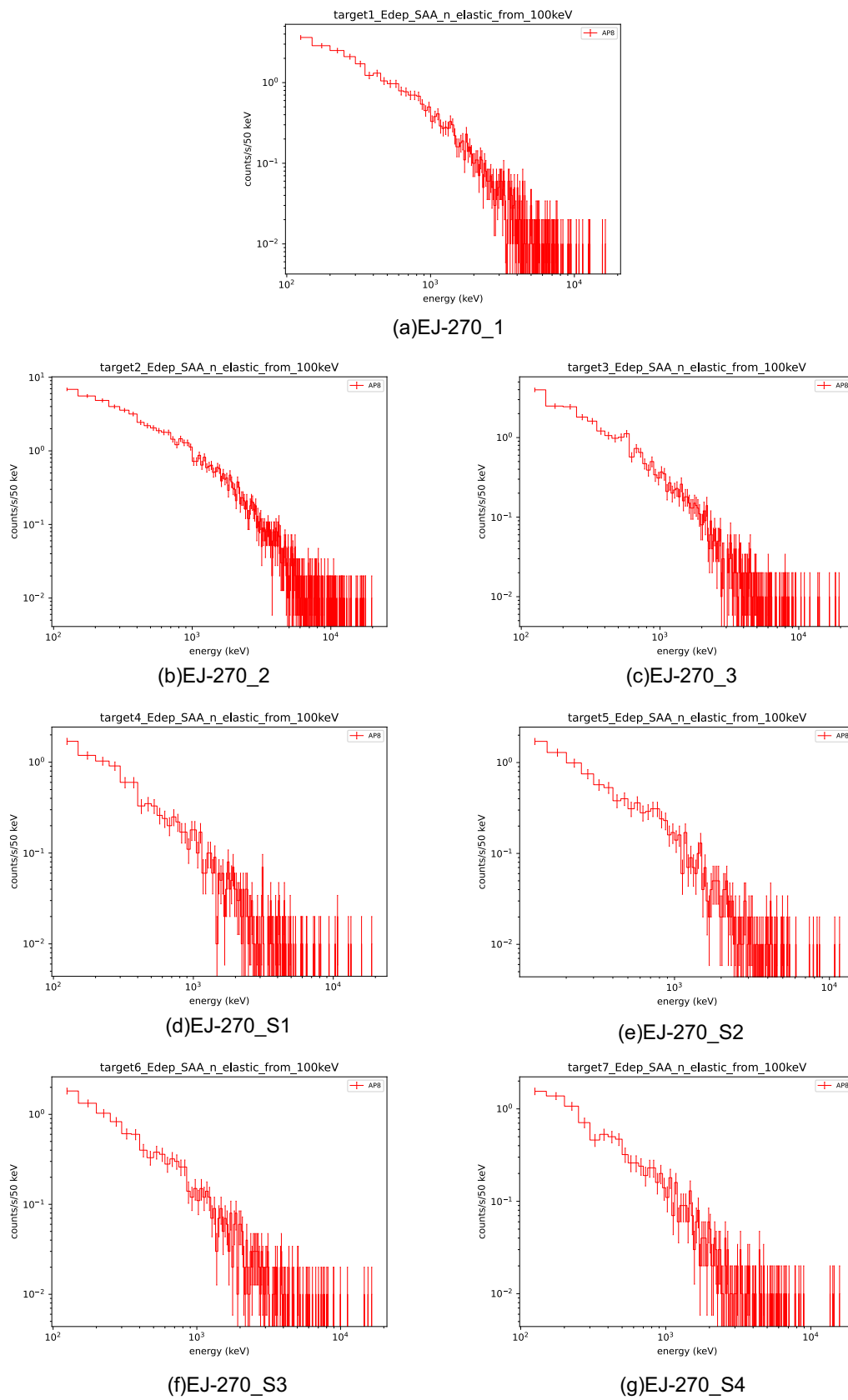


図 5.2.3: SAA の照射における、全ての EJ-270 の中性子の弾性散乱によるエネルギーデポジット。取り出したエネルギー範囲は 100 keV–20 MeV である。ピンの幅は 50 keV としている。

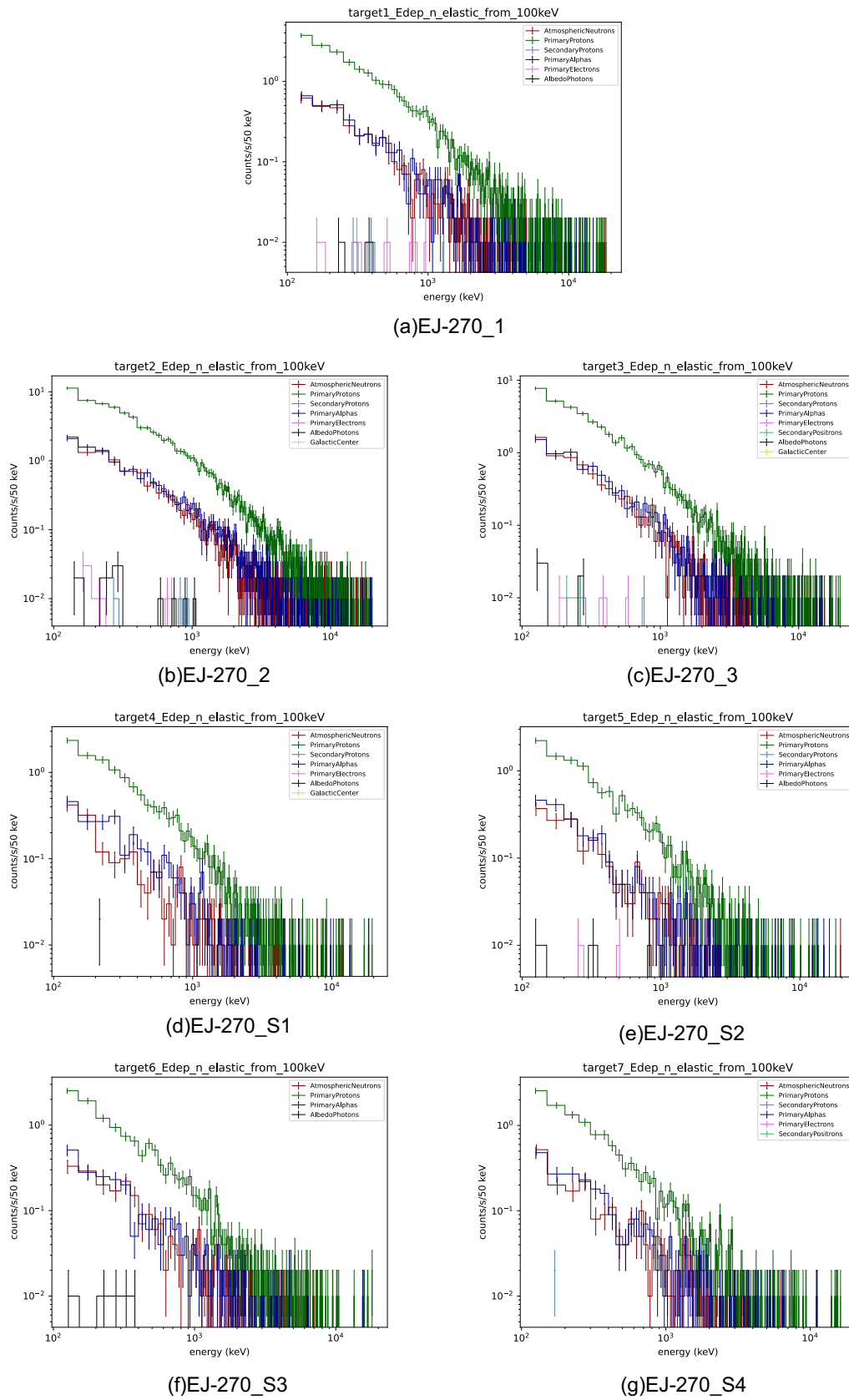


図 5.2.4: SAA 以外の照射における、全ての EJ-270 の中性子の弾性散乱によるエネルギーデポジット。取り出したエネルギー範囲は 100 keV–20 MeV である。ビンの幅は 50 keV としている。

表 5.2.4: 積層された 3 つの EJ-270 のモデルごとの中性子弾性散乱カウントレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	EJ-270.1 (counts/s)	EJ-270.2 (counts/s)	EJ-270.3 (counts/s)
SAA	AP-8	31.16 ± 0.56	66.82 ± 0.82	27.78 ± 0.53
	AE-8	-	-	-
	計	31.16 ± 0.56	66.82 ± 0.82	27.78 ± 0.53
	計 (1 cm ² あたり)	0.64 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.57 ± 0.01
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	4.29 ± 0.21	14.18 ± 0.38	8.23 ± 0.29
	Cosmic Photons	-	-	-
	Primary Protons	27.11 ± 0.52	84.20 ± 0.92	46.46 ± 0.68
	Secondary Protons	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.01
	Primary Alphas	4.65 ± 0.22	15.65 ± 0.40	9.08 ± 0.30
	Primary Electrons	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.02
	Primary Positrons	-	-	-
	Secondary Electrons	-	-	-
	Secondary Positrons	-	-	0.02 ± 0.01
	Albedo Photons	0.03 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.05 ± 0.02
	Galactic Center	-	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
	Galactic Disk	-	-	-
	計	36.17 ± 1.00	114.26 ± 1.78	63.90 ± 1.35
	計 (1 cm ² あたり)	0.74 ± 0.02	0.78 ± 0.01	1.30 ± 0.03

表 5.2.5: 側面に搭載された 4 つの EJ-270 のモデルごとの中性子弾性散乱カウントレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	EJ-270.S1 (counts/s)	EJ-270.S2 (counts/s)	EJ-270.S3 (counts/s)	EJ-270.S4 (counts/s)
SAA	AP-8	11.28 ± 0.34	11.60 ± 0.34	12.10 ± 0.35	11.28 ± 0.34
	AE-8	-	-	-	-
	計	11.28 ± 0.34	11.60 ± 0.34	12.10 ± 0.35	11.28 ± 0.34
	計 (1 cm ² あたり)	0.58 ± 0.02	0.59 ± 0.02	0.62 ± 0.02	0.58 ± 0.02
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	2.06 ± 0.14	2.15 ± 0.15	2.34 ± 0.15	2.32 ± 0.15
	Cosmic Photons	-	-	-	-
	Primary Protons	14.44 ± 0.38	13.84 ± 0.37	14.50 ± 0.38	14.07 ± 0.38
	Secondary Protons	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	-	0.02 ± 0.01
	Primary Alphas	2.91 ± 0.17	2.72 ± 0.16	2.74 ± 0.17	2.71 ± 0.16
	Primary Electrons	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01	-	0.01 ± 0.01
	Primary Positrons	-	-	-	-
	Secondary Electrons	-	-	-	-
	Secondary Positrons	-	-	-	0.01 ± 0.01
	Albedo Photons	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.02	-
	Galactic Center	0.01 ± 0.01	-	-	-
	Galactic Disk	-	-	-	-
	計	19.46 ± 0.74	18.79 ± 0.73	19.63 ± 0.72	19.14 ± 0.73
	計 (1 cm ² あたり)	1.00 ± 0.04	0.96 ± 0.04	1.01 ± 0.04	0.98 ± 0.04

表 5.2.6: 積層された 3 つの EJ-270 のモデルごとの中性子捕獲カウントレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	EJ-270.1	EJ-270.2	EJ-270.3
		(counts/s)	(counts/s)	(counts/s)
SAA	AP-8	1.34 ± 0.12	5.07 ± 0.23	1.34 ± 0.12
	AE-8	-	-	-
	計	1.34 ± 0.12	5.07 ± 0.23	1.34 ± 0.12
	計 (1 cm ² あたり)	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	0.63 ± 0.08	2.70 ± 0.16	0.95 ± 0.10
	Cosmic Photons	-	-	-
	Primary Protons	2.71 ± 0.16	10.58 ± 0.33	3.21 ± 0.18
	Secondary Protons	-	0.01 ± 0.01	-
	Primary Alphas	0.48 ± 0.07	1.97 ± 0.14	0.68 ± 0.08
	Primary Electrons	-	-	-
	Primary Positrons	-	-	-
	Secondary Electrons	-	-	-
	Secondary Positrons	-	-	-
	Albedo Photons	0.01 ± 0.01	-	-
	Galactic Center	-	-	-
	Galactic Disk	-	-	-
	計	3.83 ± 0.08	15.28 ± 0.16	4.84 ± 0.10
	計 (1 cm ² あたり)	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.00	0.10 ± 0.01

表 5.2.7: 側面に搭載された 4 つの EJ-270 のモデルごとの中性子捕獲カウントレートとその積算値。統計誤差を示している。

環境	モデル	EJ-270_S1	EJ-270_S2	EJ-270_S3	EJ-270_S4
		(counts/s)	(counts/s)	(counts/s)	(counts/s)
SAA	AP-8	0.52 ± 0.07	0.53 ± 0.07	0.40 ± 0.06	0.40 ± 0.06
	AE-8	-	-	-	-
	計	0.52 ± 0.07	0.53 ± 0.07	0.40 ± 0.06	0.40 ± 0.06
	計 (1 cm ² あたり)	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00
SAA 以外	Atmospheric Neutrons	0.18 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.15 ± 0.04	0.26 ± 0.05
	Cosmic Photons	-	-	-	-
	Primary Protons	0.85 ± 0.09	0.92 ± 0.10	0.83 ± 0.09	0.87 ± 0.09
	Secondary Protons	-	-	-	0.01 ± 0.01
	Primary Alphas	0.17 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.13 ± 0.04
	Primary Electrons	0.02 ± 0.01	-	-	-
	Primary Positrons	-	-	-	-
	Secondary Electrons	-	-	-	-
	Secondary Positrons	-	-	-	-
	Albedo Photons	-	-	-	-
	Galactic Center	-	-	-	-
	Galactic Disk	-	-	-	-
	計	1.22 ± 0.04	1.32 ± 0.05	1.11 ± 0.04	1.27 ± 0.05
	計 (1 cm ² あたり)	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01

5.2.3 SAA の放射化バックグラウンドレート

3.1 節で述べたように、SAA 通過時に生じる放射性同位体の崩壊によって、放射化バックグラウンドが生じる。このレートの推定を、以下の手順で行った。

- ChamberNb を抽出して、対象の検出器でのイベントのみを抜き出し
- GlobalTime について、-1 day、1 day-10 day、10 day-にわけて抜き出し
- CreatorProcessName が”Radioactivation” (放射性崩壊に対応)である行と同じ EventID、GlobalTime を持つプロセスを 1 カウントとし、100 秒の照射に対応するライトカーブを作成 (例を図 5.2.5 と図 5.2.6 に示す)
- ライトカーブのカウントレートを 864 倍して、1 日の照射に対応するライトカーブを作成
- SAA の通過が 1 日 10 回であると仮定し、ライトカーブのカウントレートを 10 分の 1 したものを、SAA を 1 回通過する際のライトカーブと仮定する
- MoMoTarO-ISS のミッション期間である半年間にわたり、SAA 通過時のライトカーブを積算し、半年経過後のカウントレートを取得する

AP-8 と AE-8 のデータについてこの操作を行ったが、AE-8 では放射化バックグラウンドを確認できなかった。したがって以下では AP-8 のデータのみについて述べる。

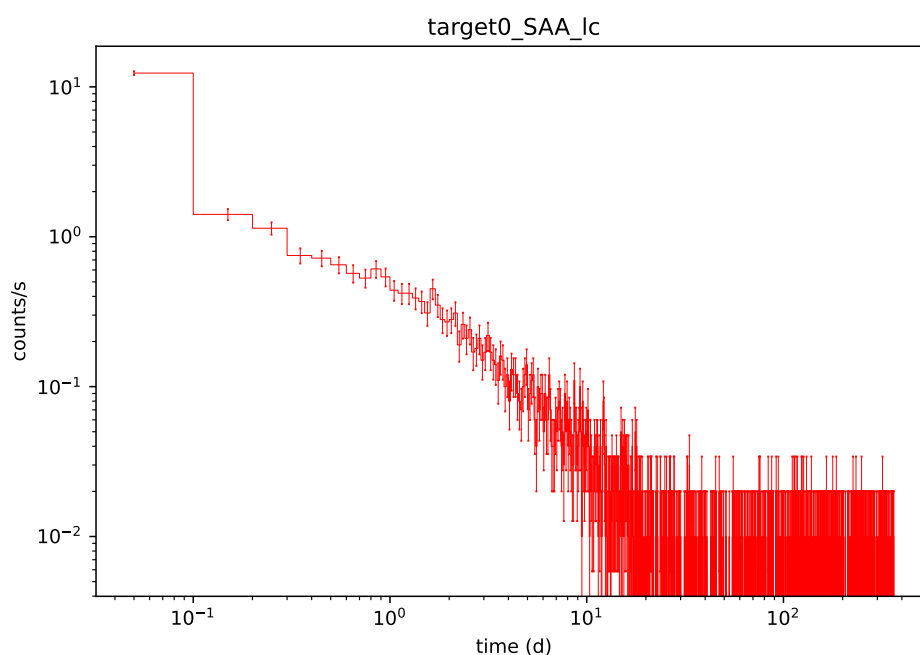


図 5.2.5: AP-8 を照射した際の GAGG の放射性崩壊のライトカーブ。ビンの幅は 0.1 日であり、0.1 日ごとの counts/s を示している。

この操作に基づいて出力した放射化バックグラウンドのライトカーブを、図 5.2.7 に示す。また、表 5.2.8 と表 5.2.9 に、半年後の放射化バックグラウンドのカウントレートをまとめた。合計のカウントレートについて

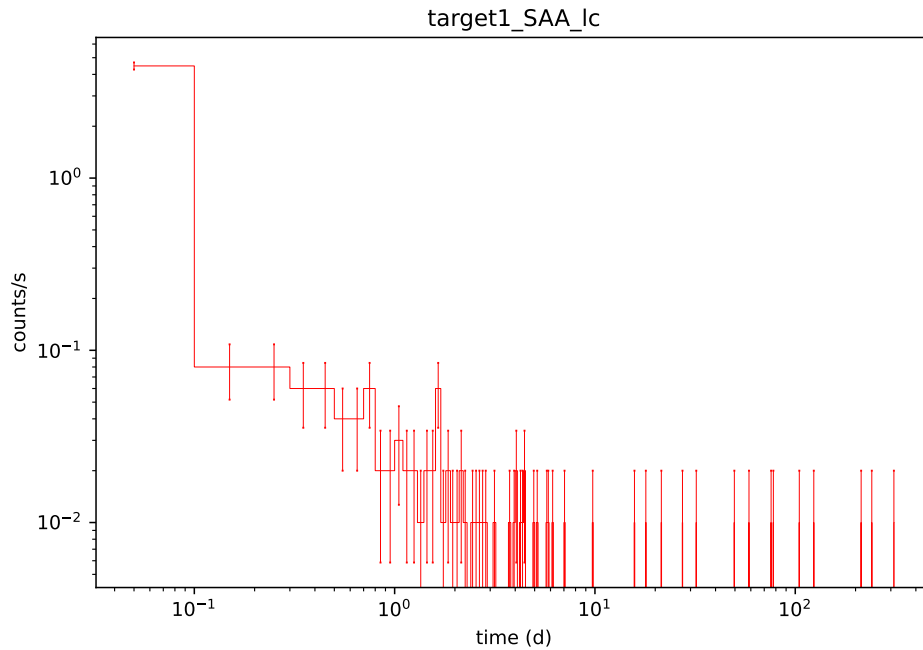


図 5.2.6: AP-8 を照射した際の EJ-270.1 の放射性崩壊のライトカーブ。ビンの幅は 0.1 日であり、0.1 日ごとの counts/s を示している。

では、GAGG では 36.64 ± 8.93 counts/s であり、SAA 以外のカウントレート (325.18 ± 4.13 counts/s) と比較するとおよそ 10% 程度となる。また、EJ-270 については、積層されたものは SAA 以外のカウントレートのおよそ 5–10% 程度、側面のおよそ 10% 程度の放射化バックグラウンドを発生することがわかった。また、 1 cm^2 あたりのカウントレートを比較すると、最大のものは GAGG の 0.75 ± 0.18 counts/s、最小のものは EJ-270.3 の 0.06 ± 0.01 counts/s であり、GAGG からの距離に応じてカウントレートが減少していくことがわかる。以上から、放射化バックグラウンドの主要因となる放射性同位体は、GAGG から生じていることがわかった。

放射化バックグラウンドとそれ以外のバックグラウンドのそれぞれのレートの比について、観測結果を明確に述べている文献は見当たらなかった。一方 Xie et al. (2018) [94] の SPHiNX のシミュレーション結果では、放射化バックグラウンドレートは ~ 190 counts/s、それを除く one-hit と two-hit、higher-multiplicity の全てのバックグラウンドレートの積算値が 2106.3 counts/s であることが示されており、その割合はおよそ 9% である。これは今回の MoMoTarO-ISS の結果とオーダーで一致していると言える。

表 5.2.8: 積層された 4 つのシンチレータの 183 日 (半年) 後の放射化バックグラウンド。統計誤差とともに示している。

崩壊までの時間 (d)	GAGG (counts/s)	EJ-270.1 (counts/s)	EJ-270.2 (counts/s)	EJ-270.3 (counts/s)
–1	19.28 ± 1.13	4.94 ± 0.41	9.25 ± 0.54	2.53 ± 0.30
1–10	11.50 ± 2.99	0.47 ± 0.37	0.76 ± 0.51	0.17 ± 0.14
10–	5.86 ± 4.81	0.11 ± 0.11	0.18 ± 0.18	0.04 ± 0.04
計	36.64 ± 8.93	5.52 ± 0.89	10.19 ± 1.23	2.74 ± 0.48
計 (1 cm^2 あたり)	0.75 ± 0.18	0.11 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01

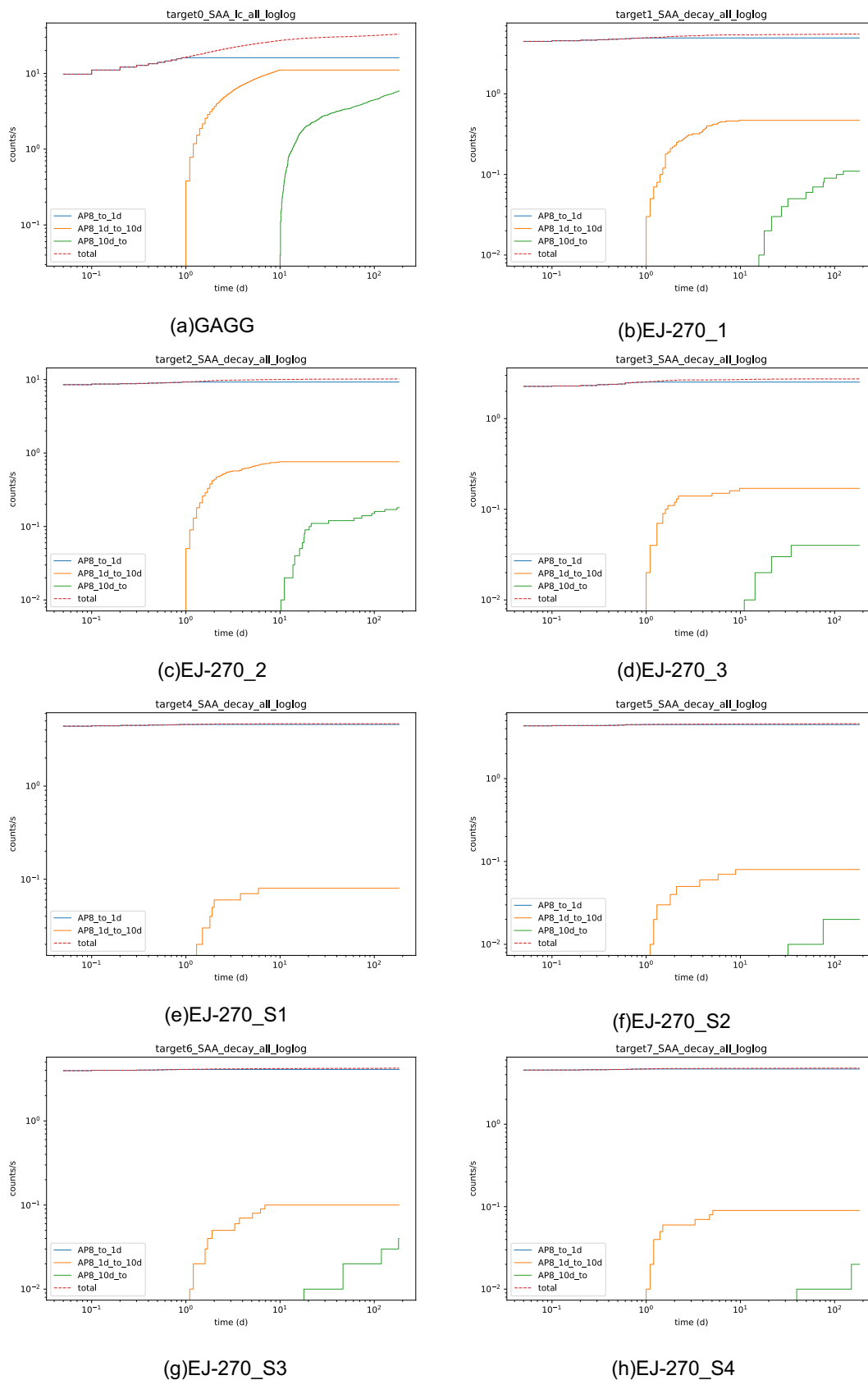


図 5.2.7: 全検出器の放射化バックグラウンドレートの推移。1日以下の成分を青、1日から10日の成分を橙、10日以上
の成分を緑で示している。視認性を高めるために誤差棒の表示を省いている。

表 5.2.9: 側面の4つの EJ-270 の183日(半年)後の放射化バックグラウンド。統計誤差とともに示している。

崩壊までの時間 (d)	EJ-270_S1 (counts/s)	EJ-270_S2 (counts/s)	EJ-270_S3 (counts/s)	EJ-270_S4 (counts/s)
	GAGG	EJ-270 1	EJ-270 2	EJ-270 3
1	4.58 ± 0.34	4.49 ± 0.31	4.10 ± 0.30	4.68 ± 0.32
1-10	0.08 ± 0.07	0.08 ± 0.08	0.10 ± 0.10	0.09 ± 0.08
10-	-	0.02 ± 0.02	0.04 ± 0.04	0.02 ± 0.02
計	4.66 ± 0.41	4.59 ± 0.41	4.24 ± 0.44	4.79 ± 0.43
計 (1 cm ² あたり)	0.24 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.25 ± 0.02

第6章

まとめと今後の展望

6.1 まとめ

我々は、中性子とガンマ線の放射線測定を軸とした、月面・月周辺での多分野連携プロジェクトの Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) を計画している。MoMoTarO 計画では、月面から漏出する中性子を用いた水資源探査を中心とした複数のサイエンスを、キューブサットサイズの検出器で行うことを目指している。月面での運用に先駆けて、2026 年度に MoMoTarO を国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部に設置し、宇宙実証を行うことが決定した。加えて、ISS 上での太陽中性子やガンマ線バーストの観測も目指している。

ISS での宇宙実証の設計・製作に必要な検討項目として、軌道上での放射化バックグラウンドの検討、および多様な宇宙環境での放射線バックグラウンドレートについての検討を行った。

MoMoTarO に搭載予定の ${}^6\text{Li}$ 添加のプラスチックシンチレータ EJ-270 と GAGG に 200 MeV の陽子を 0.1、1、10 krad 照射する試験を行い、放射線耐性を調べた。光量の減少は最大でも 20% 程度であり、エネルギー分解能の低下は最大でも 60~70% 程度であるという結果を得た。また、これらの性能劣化について、照射から数日後には照射前の水準に回復することが確認できた。さらに核反応により生じる放射性同位体を、EJ-270 では 3 種類、GAGG では 12 種類特定した。

簡略化した MoMoTarO のモデルに対して、ISS 軌道上でのバックグラウンド環境をモデル化した種々の粒子を、南大西洋異常帯 (SAA) とそれ以外に分けて照射する Geant4 シミュレーションを行った。MoMoTarO 全体のカウントレートは、SAA で約 5500 counts/s、SAA 以外で約 1200 counts/s、放射化バックグラウンドは約 73 counts/s と見積もられた。したがって、宇宙線成分は反同時計数やパルス波高値などを使って地上に全データを降ろさない工夫をする必要がある。ISS から地上へのテレメトリ量は毎秒 1800 word と限られているため、MoMoTarO-ISS のテレメトリパケットの設計条件が今回の結果で示された。また、サイエンスデータを取得する際のバックグラウンド、観測可能性の見積もりにも大きく寄与する。

6.2 今後の展望

第 4 章では、いくつかの同位体の特定に成功したものの、その生成過程のすべてを特定するところまではできなかった。Geant4 シミュレーションを用いて陽子照射試験を再現し、同位体の生成過程を追うことで、よ

り正確な放射化バックグラウンドの解析ができるのではないかと考えている。

第5章では、全体のカウンtrateの推定はできたものの、その細かい発生源や、検出器以外の筐体 (SPySE) などの寄与などは考えられていない。これらの解析を通して、MoMoTarO の筐体設計やデータダウンリンクでのソフトウェア設計へのフィードバックを行いたい。また、今回のシミュレーションでは、MoMoTarO-ISS のジオメトリを単純化する、ビームを全て一方向から降らせる、など簡略化を行なっている。正確なジオメトリを作成したり、ビームを現実に即した形で照射すれば、より正確な結果を得られることが期待できる。

AppendixA

陽子照射試験の図表

表 A.1: EJ-270.4 (0.1 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 13:40	京大	600	25.3	31	0.060	バックグラウンド
2023/10/24 13:53	京大	600	25.3	31	0.060	¹³⁷ Cs
2023/10/24 14:07	京大	600	25.5	31	0.060	²⁵² Cf
2023/10/25 13:44	WERC	600	24.2	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/25 13:57	WERC	600	24.1	55	0.061	²⁵² Cf
2023/10/26 11:40	WERC	600	24.2	54	0.060	²⁵² Cf
2023/10/26 12:48	WERC	600	24.6	55	0.061	バックグラウンド
2023/10/27 09:42	WERC	600	24.0	57	0.061	バックグラウンド
2023/10/27 09:55	WERC	600	24.1	57	0.060	²⁵² Cf
2023/10/30 14:22	京大	600	24.4	38	0.060	バックグラウンド
2023/10/30 14:52	京大	600	25.5	36	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/30 15:05	京大	600	25.5	36	0.061	²⁵² Cf

表 A.2: EJ-270.5 (1 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 14:22	京大	600	25.5	31	0.060	バックグラウンド
2023/10/24 14:35	京大	600	25.3	31	0.060	¹³⁷ Cs
2023/10/24 14:50	京大	600	25.5	31	0.060	²⁵² Cf
2023/10/25 14:15	WERC	600	24.1	55	0.061	バックグラウンド
2023/10/25 14:30	WERC	600	24.2	55	0.061	²⁵² Cf
2023/10/27 10:09	WERC	600	24.3	57	0.060	バックグラウンド
2023/10/27 10:21	WERC	600	24.3	56	0.061	²⁵² Cf
2023/10/30 15:21	京大	600	25.6	36	0.061	バックグラウンド
2023/10/30 15:34	京大	600	25.4	36	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/30 15:47	京大	600	25.5	36	0.061	²⁵² Cf

表 A.3: EJ-270_6 (10 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 15:02	京大	600	25.5	31	0.060	バックグラウンド
2023/10/24 15:17	京大	600	25.3	32	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/24 15:30	京大	600	25.3	32	0.061	²⁵² Cf
2023/10/25 14:47	WERC	600	24.2	56	0.061	バックグラウンド
2023/10/25 15:01	WERC	600	24.2	57	0.061	²⁵² Cf
2023/10/26 13:26	WERC	10	24.8	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 13:53	WERC	10	24.9	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:00	WERC	10	24.9	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:03	WERC	10	24.9	56	0.061	バックグラウンド
2023/10/26 14:10	WERC	10	24.9	59	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:15	WERC	10	24.9	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:22	WERC	10	24.8	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:32	WERC	10	24.9	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 14:49	WERC	10	24.7	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 15:11	WERC	10	24.7	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 15:28	WERC	10	24.7	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 16:04	WERC	180	24.6	55	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 17:23	WERC	180	24.8	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/26 18:14	WERC	180	24.6	54	0.060	バックグラウンド
2023/10/27 09:07	WERC	180	23.5	59	0.060	バックグラウンド
2023/10/27 09:20	WERC	300	23.7	56	0.060	バックグラウンド
2023/10/27 09:29	WERC	600	23.9	57	0.060	²⁵² Cf
2023/10/30 16:04	京大	600	25.6	36	0.060	バックグラウンド
2023/10/30 16:20	京大	600	25.6	36	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/30 16:46	京大	600	25.6	37	0.061	²⁵² Cf

表 A.4: EJ-270_7 (比較用、照射なし) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 16:00	京大	600	25.4	32	0.060	バックグラウンド
2023/10/24 16:58	京大	600	25.2	32	0.060	¹³⁷ Cs
2023/10/24 17:10	京大	600	25.4	32	0.061	²⁵² Cf
2023/10/25 15:18	WERC	600	24.4	56	0.061	²⁵² Cf
2023/10/25 15:32	WERC	600	24.4	56	0.061	バックグラウンド
2023/10/24 17:00	京大	600	25.6	37	0.061	バックグラウンド
2023/10/30 17:13	京大	600	25.6	37	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/30 17:31	京大	600	25.6	37	0.061	²⁵² Cf

表 A.5: GAGG_4 (0.1 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 10:38	京大	600	25.5	31	0.060	バックグラウンド
2023/10/24 10:55	京大	600	25.5	31	0.060	¹³⁷ Cs
2023/10/24 11:10	京大	600	25.8	31	0.060	⁶⁰ Co
2023/10/25 11:29	WERC	600	23.6	67	0.061	バックグラウンド
2023/10/25 11:47	WERC	600	23.6	67	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/26 11:58	WERC	600	24.2	55	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/27 10:35	WERC	600	24.6	56	0.061	バックグラウンド
2023/10/27 10:46	WERC	600	24.6	56	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/31 14:41	京大	600	25.8	31	0.061	バックグラウンド
2023/10/31 14:54	京大	600	25.7	31	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/31 14:05	京大	600	25.7	31	0.061	⁶⁰ Co

表 A.6: GAGG.5 (1 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 11:37	京大	600	25.5	31	0.061	バックグラウンド
2023/10/24 11:41	京大	600	25.4	31	0.060	¹³⁷ Cs
2023/10/24 11:53	京大	600	25.3	31	0.060	⁶⁰ Co
2023/10/25 12:04	WERC	600	23.7	59	0.061	バックグラウンド
2023/10/25 12:18	WERC	600	23.7	59	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/26 13:04	WERC	600	24.7	54	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/27 11:00	WERC	600	24.6	55	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/27 11:12	WERC	600	24.6	55	0.061	バックグラウンド
2023/10/31 14:04	京大	600	25.0	31	0.060	バックグラウンド
2023/10/31 14:16	京大	600	25.1	31	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/31 14:28	京大	600	25.9	31	0.061	⁶⁰ Co

表 A.7: GAGG.6 (10 krad) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 12:12	京大	600	25.3	31	0.064	バックグラウンド
2023/10/24 12:25	京大	600	25.4	31	0.062	¹³⁷ Cs
2023/10/24 12:25	京大	600	25.4	31	0.062	⁶⁰ Co
2023/10/25 12:35	WERC	600	24.0	59	0.066	バックグラウンド
2023/10/25 12:59	WERC	600	24.2	58	0.061	¹³⁷ Cs
2023/10/27 11:25	WERC	600	24.7	55	0.068	バックグラウンド
2023/10/27 11:37	WERC	600	24.9	56	0.063	¹³⁷ Cs

表 A.8: GAGG.7 (比較用、照射なし) の MPPC 読み出しによる測定データ。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	回路全体の電流値 [A]	測定対象
2023/10/24 12:52	京大	600	24.2	32	0.063	バックグラウンド
2023/10/24 13:08	京大	600	25.3	32	0.061	^{137}Cs
2023/10/24 13:23	京大	600	25.4	32	0.061	^{60}Co
2023/10/25 13:15	WERC	600	24.2	57	0.064	バックグラウンド
2023/10/25 13:27	WERC	600	24.2	55	0.061	^{137}Cs
2023/10/30 14:24	京大	600	25.0	31	0.065	バックグラウンド
2023/10/31 14:37	京大	600	25.0	32	0.060	^{60}Co
2023/10/31 14:49	京大	600	24.2	33	0.061	^{137}Cs

表 A.9: CoGaMo によるシンチレータの測定データ。温度と湿度の記録が無いデータについては空欄としている。

日時	場所	計測時間 [s]	温度 [°C]	湿度 [%]	測定対象
2023/10/25 16:02	WERC	1800	24.5	57	EJ-270 (0.1 krad)
2023/10/25 16:34	WERC	1800	24.7	57	GAGG (0.1 krad)
2023/10/26 12:12	WERC	1800	24.4	55	EJ-270 (0.1 krad)
2023/10/26 12:34	WERC	1800			GAGG (0.1 krad)
2023/10/26 13:20	WERC	600	24.7	54	GAGG (1 krad)
2023/10/26 18:24	WERC	53280	24.6	54	EJ-270 (10 krad)

表 A.10: Ge 検出器による測定データ。照射からおおよそ 20 日後と 220 日後に測定を行なった。

日時	計測時間 [s]	測定対象
2023/11/13 13:53	172785	EJ-270 (1 krad)
2023/11/15 14:09	172781	GAGG (1 krad)
2023/11/25 18:11	345577	バックグラウンド
2024/06/07 00:14	172788	GAGG (1 krad)
2024/06/09 03:09	172792	EJ-270 (1 krad)
2024/06/11 22:21	172792	バックグラウンド

表 A.11: Ge 検出器による 1 回目の GAGG 測定の fitting 結果と特定した同位体の一覧。式 4.3.1 を用いて fit している。fit 結果のうち、 μ と σ を表示している。

μ [keV]	誤差 [keV]	特定した同位体
73.686	0.36141	^{161}Tb
115.92	0.68065	^{146}Gd
122.05	0.48456	^{147}Eu
150.55	0.48527	^{149}Gd
155.35	0.53959	^{146}Gd
198.11	0.50703	^{147}Eu
243.89	0.47329	^{148}Eu

次のページへ続く。

μ [keV]	誤差 [keV]	特定した同位体
273.15	0.69063	^{149}Gd
299.43	0.55665	^{149}Gd
347.45	0.56847	^{149}Gd
412.39	0.65015	background 由来
414.81	0.59213	^{148}Eu
431.06	0.49831	^{148}Eu
497.18	0.60567	^{149}Gd
517.31	0.80140	^{149}Gd
535.11	0.65902	^{149}Gd
543.40	0.52072	^{145}Eu
551.00	0.62795	^{148}Eu
553.94	0.61570	^{148}Eu
602.16	0.70416	^{147}Eu
611.96	0.72381	^{148}Eu
630.72	0.64943	^{148}Eu
634.41	0.92802	^{146}Eu
646.32	0.85446	^{149}Gd
654.32	0.74291	$^{148}\text{Eu}, ^{145}\text{Eu}$
666.26	0.88367	^{146}Eu
678.26	0.69333	^{147}Eu
726.37	0.58851	^{148}Eu
748.04	0.86206	$^{146}\text{Eu}, ^{149}\text{Gd}$
789.59	0.76849	^{149}Gd
799.45	0.74014	^{147}Eu
811.58	0.81872	^{58}Co
857.69	0.79876	^{147}Eu
894.47	0.79907	^{145}Eu
901.22	0.92430	^{146}Eu
915.28	1.00860	^{148}Eu
933.89	0.83605	^{147}Eu
939.54	0.57034	^{149}Gd
956.60	0.76347	^{147}Eu
1034.9	0.62151	^{148}Eu
1059.1	1.04080	^{146}Eu
1077.8	0.87293	^{147}Eu

次のページへ続く。

μ [keV]	誤差 [keV]	特定した同位体
1116.2	0.93385	^{65}Zn
1534.2	1.26580	^{146}Eu
1659.3	1.02290	^{145}Eu
1997.7	0.75509	^{145}Eu
2615.6	1.21640	^{232}Th (環境放射線)

終了

表 A.12: Ge 検出器による 2 回目の GAGG 測定の fitting 結果と特定した同位体の一覧。式 4.3.1 を用いて fit している。fit 結果のうち、 μ と σ を表示している。

μ [keV]	誤差 [keV]	特定した同位体
97.671	0.41479	^{153}Gd
103.52	0.44931	^{153}Gd
115.30	0.66264	^{146}Gd
122.38	0.51308	^{147}Eu
154.24	1.1143	^{146}Gd
243.53	0.48831	^{148}Eu
277.65	0.75624	^{149}Eu
327.68	0.31604	^{149}Eu
412.09	0.60863	background 由来
510.58	1.28000	対消滅
550.51	0.75864	^{148}Eu
630.42	0.79715	^{148}Eu
633.72	1.2972	^{146}Eu
742.77	0.49584	^{148}Eu
747.19	0.78102	$^{146}\text{Eu}, ^{149}\text{Gd}$
810.76	0.59967	^{58}Co
1115.6	0.88718	^{65}Zn
2204.2	0.28119	環境放射線

終了

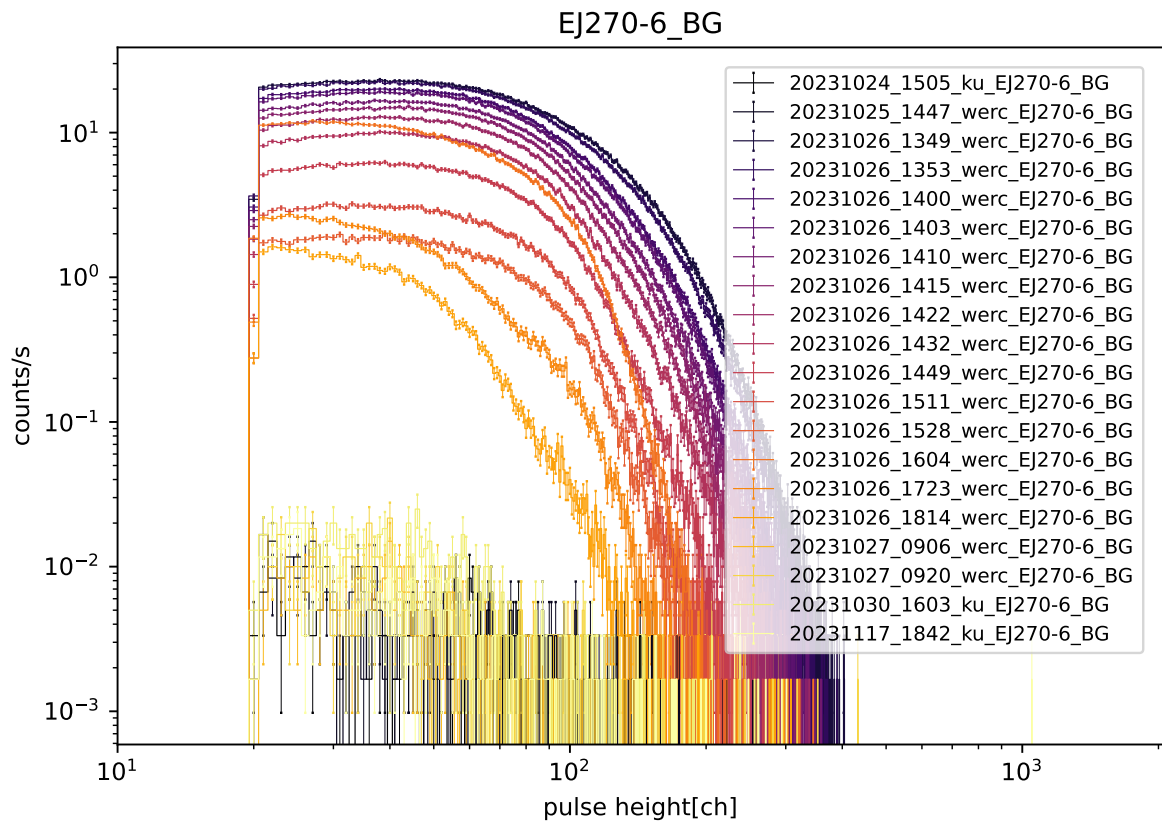


図 A.1: EJ-270 (10 krad) の MPPC 読み出しによる内部測定のスเปクトル変化。時間が進むほど色が薄くなっている。

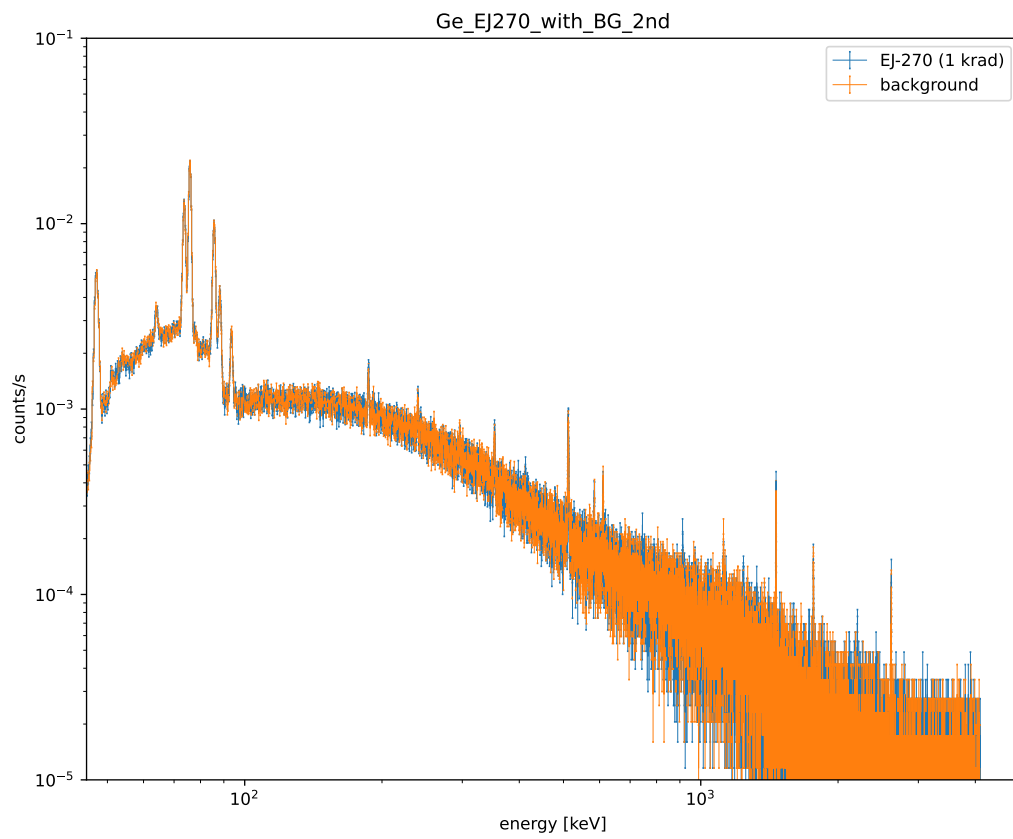


図 A.2: 二回目の EJ-270 (1 krad) のゲルマニウム検出器による測定結果。青が EJ-270 のスペクトルを、橙がバックグラウンドのスペクトルを表している。

謝辞

大学院生になり、宇宙線研究室に所属されてからというもの、大変多くの方にご指導とご協力を賜りました。この場をお借りして、心より御礼申し上げます。

指導教官である京都大学の榎戸輝揚准教授には、2年間大変お世話になりました。何もわからなかった私に、研究の手法や学会での発表方法、修士論文の執筆まで、一から叩き込んでいただきました。頂く言葉を励みに、充実した研究生活を送ることができました。榎戸さんの元で研究できたことを誇りに思います。心より御礼申し上げます。

MoMoTarO チームの先輩のお二人には、たくさんのアドバイスをいただきました。辻直希さんは、私の質問に対して常に的確で簡潔な回答をいただけて、非常に助かりました。優しく見守ってくださったことに大変感謝しています。鶴見美和さんは、入学直後から私のことを気にかけてくれて、解析ツールの使い方から個人的な相談まで、たくさんのアドバイスをくださいました。本当にありがとうございました。

MoMoTarO チームの後輩の二人にも、大変助けられました。小俣雄矢さんはいつも明るく接してくれたりご飯に行ったりと、研究に疲れたときの癒しを与えてくれました。中山和哉くんは Geant4 の使い方を教えてくれたりパズルの話をしたりと、様々なことを議論できて楽しかったです。お二人ともありがとうございました。

同期の三人も私と仲良くしていただきました。塚本博丈さんは個人的なことも含めてなんでも話せる相手で、研究に疲れているときに対応してもらってありがたかったです。斉藤裕次郎さんはよく私の部屋に遊びに来てくれてただの雑談から真剣な議論まで色んな話ができ楽しかったです。穴澤萌衣さんはよく笑う人で、私のくだらない話も笑って聞いてくれていつも心の支えになりました。これからもよろしく願います。三人ともありがとうございました。

同じ部屋の三人にも非常にお世話になりました。成田拓仁さんは、大学院入学当初研究室での生活について教えてくれたり、煮詰まっているときに声をかけてくれたりとか何かと気にかけてくれて嬉しかったです。佐藤太陽さんは、私が疲れているときに愚痴に付き合ってくれたり雑談をしてくれたりと優しく接してくれました。行方宏介さんは、出張のお土産をたくさん買ってくれたので、それをお供に研究を頑張ることができました。皆様ありがとうございました。

雑談に乗ってくれた松永海さん、いつもご飯に連れ出してくれた加藤寛之さん、すれ違うたびに笑わせてくれた寺内健太さんをはじめとして、他の宇宙線研究室のメンバーの皆さんにも大変お世話になりました。大学院の2年間を過ごした場所が宇宙線研究室で良かったです。本当にありがとうございました。また、2年間の研究生活で出会った全ての方々に感謝申し上げます。

最後に、私と関わってくれている友人の皆さんと、いつも応援してくれている家族に感謝します。

参考文献

- [1] Steve Creech, John Guidi, and Darcy Elburn. Artemis: an overview of nasa’s activities to return humans to the moon. In *2022 ieee aerospace conference (aero)*, pp. 1–7. IEEE, 2022.
- [2] M Yoneyama, J Kataoka, M Arimoto, T Masuda, M Yoshino, K Kamada, A Yoshikawa, H Sato, and Y Usuki. Evaluation of gagg: Ce scintillators for future space applications. *Journal of Instrumentation*, Vol. 13, No. 02, p. P02023, 2018.
- [3] NASA. July 20, 1969: One giant leap for mankind, 2019. <https://www.nasa.gov/history/july-20-1969-one-giant-leap-for-mankind/>.
- [4] NASA. July 20, 1969: One giant leap for mankind, 2019. <https://www.nasa.gov/history/july-20-1969-one-giant-leap-for-mankind/>.
- [5] Japan Aerospace Exploration Agency. 有人と圧ローバー. 2025年1月16日に閲覧.
- [6] 仲内悠祐. 近赤外分光観測から得られた月の水の証拠. 日本惑星科学会誌遊星人, Vol. 28, No. 1, pp. 45–52, 2019.
- [7] Kenneth Watson, Bruce Murray, and Harrison Brown. On the possible presence of ice on the moon. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, No. 5, pp. 1598–1600, 1961.
- [8] Hiroki Kusano, Hiroshi Nagaoka, Teruaki Enoto, Naoyuki Yamashita, Yuzuru Karouji, Takeshi Hoshino, Munetaka Ueno, and Makoto Hareyama. Sensitivity of leakage neutrons to the abundance and depth distribution of lunar subsurface water. *Planetary and Space Science*, Vol. 251, p. 105968, 2024.
- [9] 尾崎幸洋. 近赤外分光法 現状と将来. 農業機械学会誌, Vol. 59, No. Supplement, pp. 385–386, 1997.
- [10] Bruce Hapke. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge university press, 2012.
- [11] Robert H Brown, Kevin H Baines, Giancarlo Bellucci, J-P Bibring, Bonnie J Buratti, Fabrizio Capaccioni, Priscilla Cerroni, Roger N Clark, Angioletta Coradini, Dale P Cruikshank, et al. The cassini visual and infrared mapping spectrometer (vims) investigation. *Space Science Reviews*, Vol. 115, pp. 111–168, 2004.
- [12] Roger N Clark. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the moon. *Science*, Vol. 326, No. 5952, pp. 562–564, 2009.
- [13] JN Goswami and M Annadurai. Chandrayaan-1: India’s first planetary science mission to the moon. *Current science*, pp. 486–491, 2009.
- [14] Carle M Pieters, Joseph Boardman, Bonnie Buratti, Alok Chatterjee, Roger Clark, Tom Glavich,

- Robert Green, James Head III, Peter Isaacson, Erick Malaret, et al. The moon mineralogy mapper (m^3) on chandrayaan-1. *Current science*, pp. 500–505, 2009.
- [15] Carle M Pieters, JN Goswami, RN Clark, M Annadurai, J Boardman, B Buratti, J-P Combe, MD Dyar, R Green, JW Head, et al. Character and spatial distribution of oh/h₂o on the surface of the moon seen by m3 on chandrayaan-1. *science*, Vol. 326, No. 5952, pp. 568–572, 2009.
- [16] Shuai Li, Paul G Lucey, Ralph E Milliken, Paul O Hayne, Elizabeth Fisher, Jean-Pierre Williams, Dana M Hurley, and Richard C Elphic. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 115, No. 36, pp. 8907–8912, 2018.
- [17] Donald L Hampton, James W Baer, Martin A Huisjen, Chris C Varner, Alan Delamere, Dennis D Wellnitz, Michael FA’ Hearn, Kenneth P Klaasen. An overview of the instrument suite for the deep impact mission. *Space Science Reviews*, Vol. 117, pp. 43–93, 2005.
- [18] Jessica M Sunshine, Tony L Farnham, Lori M Feaga, Olivier Groussin, Frédéric Merlin, Ralph E Milliken, Michael FA’ Hearn. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft. *Science*, Vol. 326, No. 5952, pp. 565–568, 2009.
- [19] Anthony Colaprete, Richard C Elphic, Jennifer Heldmann, and Kimberly Ennico. An overview of the lunar crater observation and sensing satellite (lcross). *Space Science Reviews*, Vol. 167, pp. 3–22, 2012.
- [20] Anthony Colaprete, Peter Schultz, Jennifer Heldmann, Diane Wooden, Mark Shirley, Kimberly Ennico, Brendan Hermalyn, William Marshall, Antonio Ricco, Richard C Elphic, et al. Detection of water in the lcross ejecta plume. *science*, Vol. 330, No. 6003, pp. 463–468, 2010.
- [21] David R. Williams. Moon fact sheet, 2024. 2024年12月26日に閲覧.
- [22] DL Mitchell, JS Halekas, RP Lin, S Frey, LL Hood, MH Acuña, and A Binder. Global mapping of lunar crustal magnetic fields by lunar prospector. *Icarus*, Vol. 194, No. 2, pp. 401–409, 2008.
- [23] 長岡央. 中性子分光による月表層の水検出の現状. 日本惑星科学会誌遊星人, Vol. 28, No. 1, pp. 37–44, 2019.
- [24] WC Feldman, BL Barraclough, KR Fuller, DJ Lawrence, S Maurice, MC Miller, TH Prettyman, and AB Binder. The lunar prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 422, No. 1-3, pp. 562–566, 1999.
- [25] David J Lawrence, WC Feldman, RC Elphic, JJ Hagerty, S Maurice, GW McKinney, and TH Prettyman. Improved modeling of lunar prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 111, No. E8, 2006.
- [26] S Maurice, DJ Lawrence, WC Feldman, RC Elphic, and O Gasnault. Reduction of neutron data from lunar prospector. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 109, No. E7, 2004.

-
- [27] Richard Vondrak, John Keller, Gordon Chin, and James Garvin. Lunar reconnaissance orbiter (lro): Observations for lunar exploration and science. *Space science reviews*, Vol. 150, pp. 7–22, 2010.
- [28] NASA. Lunar reconnaissance orbiter, 2024. 2025 年 1 月 17 日に閲覧.
- [29] IG Mitrofanov, A Bartels, YI Bobrovniksky, W Boynton, G Chin, H Enos, L Evans, S Floyd, J Garvin, DV Golovin, et al. Lunar exploration neutron detector for the nasa lunar reconnaissance orbiter. *Space science reviews*, Vol. 150, pp. 183–207, 2010.
- [30] IG Mitrofanov, AB Sanin, WV Boynton, G Chin, JB Garvin, D Golovin, LG Evans, K Harshman, AS Kozyrev, ML Litvak, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the lro neutron detector experiment lend. *science*, Vol. 330, No. 6003, pp. 483–486, 2010.
- [31] AB Sanin, IG Mitrofanov, ML Litvak, A Malakhov, WV Boynton, G Chin, G Droege, LG Evans, J Garvin, DV Golovin, et al. Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: Lend results from lro. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 117, No. E12, 2012.
- [32] E Mazarico, GA Neumann, DE Smith, MT Zuber, and MH Torrence. Illumination conditions of the lunar polar regions using lola topography. *Icarus*, Vol. 211, No. 2, pp. 1066–1081, 2011.
- [33] AB Sanin, IG Mitrofanov, ML Litvak, BN Bakhtin, JG Bodnarik, William V Boynton, G Chin, LG Evans, K Harshman, F Fedosov, et al. Hydrogen distribution in the lunar polar regions. *Icarus*, Vol. 283, pp. 20–30, 2017.
- [34] TP McClanahan, AM Parsons, TA Livengood, JJ Su, G Chin, D Hamara, K Harshman, and RD Starr. Evidence for widespread hydrogen sequestration within the moon’ s south pole cold traps. *The Planetary Science Journal*, Vol. 5, No. 10, p. 217, 2024.
- [35] G Randall Gladstone, Kurt D Retherford, Anthony F Egan, David E Kaufmann, Paul F Miles, Joel W Parker, David Horvath, Paul M Rojas, Maarten H Versteeg, Michael W Davis, et al. Far-ultraviolet reflectance properties of the moon’s permanently shadowed regions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 117, No. E12, 2012.
- [36] Maria T Zuber, James W Head, David E Smith, Gregory A Neumann, Erwan Mazarico, Mark H Torrence, Oded Aharonson, Alexander R Tye, Caleb I Fassett, Margaret A Rosenburg, et al. Constraints on the volatile distribution within shackleton crater at the lunar south pole. *Nature*, Vol. 486, No. 7403, pp. 378–381, 2012.
- [37] Lunar Terahertz SURveyor for KIlometer-scale MappIng (TSUKIMI) mission team. Lunar terahertz surveyor for kilometer-scale mapping, 2024. 2025 年 1 月 21 日に閲覧.
- [38] 京都大学. 中性子で月の水資源を探す, 2024 年 10 月. 2025 年 1 月 21 日に閲覧.
- [39] Benjamin P Abbott, Rich Abbott, TDea Abbott, Fausto Acernese, Kendall Ackley, Carl Adams, Thomas Adams, Paolo Addesso, Rana X Adhikari, Vaishali B Adya, et al. Gw170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical review letters*, Vol. 119, No. 16, p. 161101, 2017.

- [40] Dirk Dubbers and Michael G Schmidt. The neutron and its role in cosmology and particle physics. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 83, No. 4, pp. 1111–1171, 2011.
- [41] Fred E Wietfeldt and Geoffrey L Greene. Colloquium: The neutron lifetime. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 83, No. 4, pp. 1173–1192, 2011.
- [42] AT Yue, MS Dewey, DM Gilliam, GL Greene, AB Laptev, JS Nico, William M Snow, and FE Wietfeldt. Improved determination of the neutron lifetime. *Physical review letters*, Vol. 111, No. 22, p. 222501, 2013.
- [43] Jack T Wilson, David J Lawrence, Patrick N Peplowski, Vincent R Eke, and Jacob A Kegerreis. Space-based measurement of the neutron lifetime using data from the neutron spectrometer on nasa’s messenger mission. *Physical Review Research*, Vol. 2, No. 2, p. 023316, 2020.
- [44] Masaharu Tanabashi, Particle Data Grp, K Hagiwara, K Hikasa, Katsumasa Nakamura, Y Sumino, F Takahashi, J Tanaka, K Agashe, Giulio Aielli, et al. Review of particle physics. *Physical Review D*, Vol. 98, No. 3, 2018.
- [45] RW Pattie Jr, NB Callahan, C Cude-Woods, ER Adamek, Leah J Broussard, SM Clayton, SA Currie, EB Dees, Xinjian Ding, EM Engel, et al. Measurement of the neutron lifetime using a magneto-gravitational trap and in situ detection. *Science*, Vol. 360, No. 6389, pp. 627–632, 2018.
- [46] AP Serebrov, EA Kolomensky, AK Fomin, IA Krasnoshchekova, AV Vassiljev, DM Prudnikov, IV Shoka, AV Chechkin, ME Chaikovskiy, VE Varlamov, et al. Neutron lifetime measurements with a large gravitational trap for ultracold neutrons. *Physical Review C*, Vol. 97, No. 5, p. 055503, 2018.
- [47] Viktor Fedorovich Ezhov, AZ Andreev, G Ban, BA Bazarov, P Geltenbort, AG Glushkov, VA Knyazkov, Nikolai Aleksandrovich Kovrizhnykh, GB Krygin, O Naviliat-Cuncic, et al. Measurement of the neutron lifetime with ultracold neutrons stored in a magneto-gravitational trap. *JETP Letters*, Vol. 107, pp. 671–675, 2018.
- [48] Jack T Wilson, David J Lawrence, Patrick N Peplowski, Vincent R Eke, and Jacob A Kegerreis. Measurement of the free neutron lifetime using the neutron spectrometer on nasa’s lunar prospector mission. *Physical Review C*, Vol. 104, No. 4, p. 045501, 2021.
- [49] Japan Aerospace Exploration Agency. 中型曝露実験アダプタ (i-seep) . 2025 年 1 月 7 日に閲覧.
- [50] Xiao Xia Yu, Hong Lu, Guan Ting Chen, Xin Qiao Li, Jian Kui Shi, and Cheng Ming Tan. Detection of solar neutron events and their theoretical approach. *New Astronomy*, Vol. 39, pp. 25–35, 2015.
- [51] H Debrunner, E Flückiger, EL Chupp, and DJ Forrest. The solar cosmic ray neutron event on june 3, 1982. In *IN: International Cosmic Ray Conference, 18th, Bangalore, India, August 22-September 3, 1983, Conference Papers. Volume 4 (A85-22801 09-93). Bombay, Tata Institute of Fundamental Research, 1983, p. 75-78. Research supported by the Swiss National Science Foundation and NASA.*, Vol. 4, pp. 75–78, 1983.

-
- [52] Kyoko Watanabe, M Gros, PH Stoker, K Kudela, C Lopate, JF Valdés-Galicia, A Hurtado, O Musalem, R Ogasawara, Y Mizumoto, et al. Solar neutron events of 2003 october-november. *The Astrophysical Journal*, Vol. 636, No. 2, p. 1135, 2006.
- [53] EL Chupp, H Debrunner, E Flückiger, DJ Forrest, Fet al Golliez, G Kanbach, WT Vestrand, J Cooper, and G Share. Solar neutron emissivity during the large flare on 1982 june 3. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 318, July 15, 1987, p. 913-925. USAF-supported research., Vol. 318, pp. 913–925, 1987.
- [54] National Oceanic and Atmospheric Administration. Solar cycle progression. 2025 年 1 月 7 日に閲覧.
- [55] ELJEN TECHNOLOGY. ⁶lithium loaded psd plastic scintillator ej-270, 2021. 2025 年 1 月 4 日に閲覧.
- [56] Glenn F Knoll. Radiation detection and measurement. *John & Wiley Sons Inc*, pp. 242–243, 321–326, 538, 571, 2010.
- [57] E Mark Ellis, Charles Hurlbut, Chris Allwork, and Brooke Morris. Neutron and gamma ray pulse shape discrimination with ej-270 lithium-loaded plastic scintillator. In *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, pp. 1–5. IEEE, 2017.
- [58] CA. Gagg (ce) シンチレータ. 2025 年 1 月 5 日に閲覧.
- [59] Eric R Benton and EV Benton. Space radiation dosimetry in low-earth orbit and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 184, No. 1-2, pp. 255–294, 2001.
- [60] Gautam D Badhwar and Francis A Cucinotta. Depth dependence of absorbed dose, dose equivalent and linear energy transfer spectra of galactic and trapped particles in polyethylene and comparison with calculations of models. *Radiation research*, Vol. 149, No. 3, pp. 209–218, 1998.
- [61] John A Lockwood. Forbush decreases in the cosmic radiation. *Space Science Reviews*, Vol. 12, No. 5, pp. 658–715, 1971.
- [62] G Setti and L Woltjer. Active galactic nuclei and the spectrum of the x-ray background. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 224, no. 1-2, Oct. 1989, p. L21-L23., Vol. 224, pp. L21–L23, 1989.
- [63] A Comastri, G Setti, G Zamorani, and Gunther Hasinger. The contribution of agns to the x-ray background. *arXiv preprint astro-ph/9409067*, 1994.
- [64] R. Gilli. The x-ray background and the deep x-ray surveys. *Advances in Space Research*, Vol. 34, No. 12, p. 2470–2477, January 2004.
- [65] E Churazov, R Sunyaev, M Revnivtsev, S Sazonov, S Molkov, S Grebenev, C Winkler, A Parmar, A Bazzano, Maurizio Falanga, et al. Integral observations of the cosmic x-ray background in the 5–100 keV range via occultation by the earth. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 467, No. 2, pp. 529–540, 2007.

- [66] Filippo Frontera, Mauro Orlandini, Raffaella Landi, Andrea Comastri, Fabrizio Fiore, Giancarlo Setti, Lorenzo Amati, Enrico Costa, Nicola Masetti, and Eliana Palazzi. The cosmic x-ray background and the population of the most heavily obscured agns. *The Astrophysical Journal*, Vol. 666, No. 1, p. 86, 2007.
- [67] RS Warwick and TP Roberts. The extragalactic x-ray background at 0.25 keV. *Astronomische Nachrichten*, Vol. 319, No. 1-2, pp. 59–62, 1998.
- [68] I Georgantopoulos, GC Stewart, T Shanks, BJ Boyle, Griffiths, and RE. A deep rosat survey—v. the extragalactic populations at faint fluxes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 280, No. 1, pp. 276–284, 1996.
- [69] D.E. Gruber. The hard x-ray background. In Xavier Barcons and Andrew C. Fabian, editors, *The X-Ray Background*, pp. 44–53. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [70] DE Gruber, JL Matteson, LE Peterson, and GV Jung. The spectrum of diffuse cosmic hard x-rays measured with heao 1. *The Astrophysical Journal*, Vol. 520, No. 1, p. 124, 1999.
- [71] RL Kinzer, GV Jung, DE Gruber, JL Matteson, Peterson, and LE. Diffuse cosmic gamma radiation measured by heao 1. *The Astrophysical Journal*, Vol. 475, No. 1, p. 361, 1997.
- [72] A Vecchi, S Molendi, M Guainazzi, F Fiore, and AN Parmar. The beposax 1-8 keV cosmic background spectrum. *arXiv preprint astro-ph/9908323*, 1999.
- [73] Keith C Gendreau, Richard Mushotzky, Andrew C Fabian, Stephen S Holt, Tsuneko Kii, Peter J Serlemitsos, Yasushi Ogasaka, Yasuo Tanaka, Marshall W Bautz, Yasushi Fukazawa, et al. Asca observations of the spectrum of the x-ray background. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 47, p. L5-L9., Vol. 47, pp. L5–L9, 1995.
- [74] Akihiro Kushino, Yoshitaka Ishisaki, Umeyo Morita, Noriko Y Yamasaki, Manabu Ishida, Takaya Ohashi, and Yoshihiro Ueda. Study of the x-ray background spectrum and its large-scale fluctuation with asca. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 54, No. 3, pp. 327–352, 2002.
- [75] DH Lumb, RS Warwick, M Page, and A De Luca. X-ray background measurements with xmm-newton epic. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 389, No. 1, pp. 93–105, 2002.
- [76] P Tozzi, Piero Rosati, M Nonino, J Bergeron, S Borgani, R Gilli, R Gilmozzi, G Hasinger, N Grogin, L Kewley, et al. New results from the x-ray and optical* survey of the chandra deep field-south: The 300 kilosecond exposure. ii. *The Astrophysical Journal*, Vol. 562, No. 1, p. 42, 2001.
- [77] John D Gaffey Jr and Dieter Bilitza. Nasa/national space science data center trapped radiation models. *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 31, No. 2, pp. 172–176, 1994.
- [78] Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB). Spenvis: Space environment information system, 2024. Developed by BIRA-IASB for ESA’s Space Environments and Effects Section under the General Support Technology Programme (GSTP). Current project manager: Erwin De Donder. Accessed: 2024-12-16.
- [79] Tsunefumi Mizuno, T Kamae, G Godfrey, T Handa, DJ Thompson, D Lauben, Y Fukazawa, and

- M Ozaki. Cosmic-ray background flux model based on a gamma-ray large area space telescope balloon flight engineering model. *The Astrophysical Journal*, Vol. 614, No. 2, p. 1113, 2004.
- [80] RE Lingenfelter. The cosmic-ray neutron leakage flux. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 20, pp. 5633–5639, 1963.
- [81] P Cumani, M Hernanz, J Kiener, V Tatischeff, and A Zoglauer. Background for a gamma-ray satellite on a low-earth orbit. *Experimental Astronomy*, Vol. 47, No. 3, pp. 273–302, 2019.
- [82] Koh Abe, T Sanuki, K Anraku, Y Asaoka, H Fuke, S Haino, N Ikeda, M Imori, K Izumi, T Maeno, et al. Measurements of proton, helium and muon spectra at small atmospheric depths with the bess spectrometer. *Physics Letters B*, Vol. 564, No. 1-2, pp. 8–20, 2003.
- [83] Satya Dev Verma. A calculation of the flux and energy spectrum of secondary electrons at high altitudes in the atmosphere. In *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, Vol. 66, pp. 125–143. Springer, 1967.
- [84] CR Pennypacker, George F Smoot, Andrew Buffington, Richard A Muller, and Lloyd H Smith. Measurement of geomagnetic cutoff rigidities and particle fluxes below geomagnetic cutoff near palestine, texas. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 78, No. 10, pp. 1515–1527, 1973.
- [85] J Alcaraz, D Alvisi, B Alpat, G Ambrosi, H Anderhub, L Ao, A Arefiev, P Azzarello, E Babucci, Luca Baldini, et al. Protons in near earth orbit. *Physics Letters B*, Vol. 472, No. 1-2, pp. 215–226, 2000.
- [86] Wilmot N Hess. Van allen belt protons prom cosmic-ray neutron leakage. 1959.
- [87] AA Abdo, Markus Ackermann, Marco Ajello, WB Atwood, Luca Baldini, Jean Ballet, Guido Barbiellini, Denis Bastieri, BM Baughman, K Bechtol, et al. Fermi large area telescope observations of the cosmic-ray induced γ -ray emission of the earth's atmosphere. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology*, Vol. 80, No. 12, p. 122004, 2009.
- [88] S Sazonov, E Churazov, R Sunyaev, and M Revnivtsev. Hard x-ray emission of the earth's atmosphere: Monte carlo simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 377, No. 4, pp. 1726–1736, 2007.
- [89] E Churazov, S Sazonov, R Sunyaev, and M Revnivtsev. Earth x-ray albedo for cosmic x-ray background radiation in the 1–1000 keV band. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 385, No. 2, pp. 719–727, 2008.
- [90] Sébastien Bourdarie and Michael Xapsos. The near-earth space radiation environment. *IEEE transactions on nuclear science*, Vol. 55, No. 4, pp. 1810–1832, 2008.
- [91] Fei Xie, Juan Zhang, Li-Ming Song, Shao-Lin Xiong, and Ju Guan. Simulation of the in-flight background for hxmt/he. *Astrophysics and Space Science*, Vol. 360, pp. 1–7, 2015.
- [92] RE Rothschild, PR Blanco, DE Gruber, WA Heindl, DR MacDonald, DC Marsden, MR Pelling, LR Wayne, and PL Hink. In-flight performance of the high energy x-ray timing experiment on the rossi x-ray timing explorer. *The Astrophysical Journal*, Vol. 496, No. 1, p. 538, 1998.

- [93] Mark Pearce, Linda Eliasson, N Kumar Iyer, Mózsi Kiss, Rakhee Kushwah, Josefin Larsson, Christoffer Lundman, Victor Mikhalev, Felix Ryde, T-A Stana, et al. Science prospects for sphinx—a small satellite grb polarimetry mission. *Astroparticle Physics*, Vol. 104, pp. 54–63, 2019.
- [94] Fei Xie and Mark Pearce. A study of background conditions for sphinx—the satellite-borne gamma-ray burst polarimeter. *Galaxies*, Vol. 6, No. 2, p. 50, 2018.
- [95] Lee J Mitchell, Bernard F Phlips, Richard S Woolf, Anthony L Hutcheson, Wiley N Johnson, and Mary Johnson-Rambert. On-orbit results of the gagg radiation instruments. In *UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXIII*, Vol. 12678, pp. 303–316. SPIE, 2023.
- [96] Wakasa wan Energy Research Center. 若狭湾エネルギー研究センター, 2025年. 2025年1月22日に閲覧.
- [97] Wakasa wan Energy Research Center. 加速器, 2025年. 2025年1月22日に閲覧.
- [98] E. Mark Ellis, Charles Hurlbut, Chris Allwork, and Brooke Morris. Neutron and gamma ray pulse shape discrimination with ej-270 lithium-loaded plastic scintillator. In *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, pp. 1–5, 2017.
- [99] Sea Agostinelli, John Allison, K al Amako, John Apostolakis, Henrique Araujo, Pedro Arce, Makoto Asai, D Axen, Swagato Banerjee, GJNI Barrand, et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 506, No. 3, pp. 250–303, 2003.
- [100] CERN. Download geant4-11.2.2, 2024. 2025年1月12日に閲覧.
- [101] Mirrotron Ltd. Radiation shielding, 2025. 2025年1月24日に閲覧.
- [102] Merlin Kole, Mark Pearce, and Maria Muñoz Salinas. A model of the cosmic ray induced atmospheric neutron environment. *Astroparticle Physics*, Vol. 62, pp. 230–240, 2015.
- [103] M Türler, M Chernyakova, T-J-L Courvoisier, P Lubiński, A Neronov, N Produit, and R Walter. Integral hard x-ray spectra of the cosmic x-ray background and galactic ridge emission. *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 512, p. A49, 2010.
- [104] Markus Ackermann, M Ajello, Andrea Albert, WB Atwood, Luca Baldini, J Ballet, G Barbiellini, Denis Bastieri, K Bechtol, R Bellazzini, et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 mev and 820 gev. *The Astrophysical Journal*, Vol. 799, No. 1, p. 86, 2015.
- [105] M Aguilar, Damiano Aisa, B Alpat, A Alvino, G Ambrosi, K Andeen, L Arruda, N Attig, P Azzearello, A Bachlechner, et al. Precision measurement of the proton flux in primary cosmic rays from rigidity 1 gv to 1.8 tv with the alpha magnetic spectrometer on the international space station. *Physical review letters*, Vol. 114, No. 17, p. 171103, 2015.
- [106] J.D. Myers. Lat background models, 2023. 2025年1月13日に閲覧.
- [107] LT Anh, PV Cuong, NH Ha, and HT Thao. Intercomparison of geant4 low energy electromagnetic models in 90y dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 178, p. 109938, 2021.