

(別紙様式-2)

アルベドの融合科学～国際宇宙ステーションから探るアルベドX線・ガンマ線・中性子線～
Space-Earth Science fusion on Albedo X/Gamma rays and Neutrons observed from ISS

中澤知洋、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所

1：研究目的

本研究は、2つの国際宇宙ステーション（ISS）搭載ミッションで、2026-2027年に相次いで打ち上げ予定の、「MoMoTar0-ISS実証」および「SUIM（旧名 XRPIX-MISSE）」で計測されるアルベドX線、ガンマ線、中性子線のデータ、さらに天体X線の地球大気吸収を、ISEEの磁気圏データと組み合わせる連携を軸として、高エネルギーアルベドの融合研究を行うことを目的とする。

地球大気の高エネルギーアルベドは、MeVガンマ線と高速中性子および熱中性子が強い。似たエネルギーの荷電粒子と異なり、この2（or 3）種の粒子の計測、とくに他の粒子との弁別は容易ではないが、それぞれが異なる相互作用を通じて、X線およびMeVガンマ線の天文衛星のバックグラウンド源となる。荷電粒子由来のバックグラウンドを徹底的に除去する技術が進展しており、これらの成分が感度を支配する時代になっているため、高エネルギーアルベドの理解が重要であるが、そのモデル化はシンプルなものに止まり、時間変動なども取り込まれていない。

高エネルギーアルベドは宇宙線と物質の相互作用に起因するが、月面からの放射は銀河宇宙線や太陽フレア高エネルギー粒子の遠隔観測を可能とし、月面で水が多い地域では熱中性子が増えるなど月面探査の鍵も握る。バンアレン帯などの trapped proton/electron の起源ともされる。高エネルギーアルベドの生成は高層大気の状態に関わるはずであるが、高度100 km付近の大気密度や組成、時間変化は、観測の難しさからよく分かっていない。これをX線の吸収というリモセンで探る研究が始まったところである。宇宙線と大気の相互作用は、もちろん大気ニュートリノのモデル化とも密接に関わるため、素粒子研究にもつながる。

これとは独立に大気中で30 MeV電子が生まれる雷ガンマ線現象も存在する。これは雷雲中で電子が電場加速されるもので、雲中で継続的にガンマ線が放射されるGlow、雷放電と同期する突発放射 Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF)や電子ビーム Terrestrial Electron Beam (TBE)、そして2024年になって発見されたFlickering gamma-ray flashes (FGF)や極めて弱い Weak TGFなど多様な高エネルギー現象が観測される。スプライトやブルージェットなどの上層大気 transient luminous event (TLE) も雷放電に伴って観測される。いずれもその存在は確立したものの物理プロセスの解明には至っていない。

本研究の目的は、低軌道衛星や大気球実験における、大気ガンマ線・中性子計測、軌道上からのX線吸収計測、雷ガンマ線計測などを統合し、地球磁気圏や宇宙天気予報の研究分野と連携することで、いままでもX線・ガンマ線天文系のミッションで「バックグラウンドとして捨てていた信号」「見えていたけれども、観測目的と関係ないための無視してきた信号」の中から、磁気圏および高層大気研究に寄与するサイエンスを抽出すること、そして後者の知見から天文系のバックグラウンド推定精度の革新的な向上や、上層大気高エネルギー粒子のモデルの高精度化を狙う。

2：研究方法

この分野は、「MoMoTar0-ISS実証」、「SUIM」のコラボレーション、「X線天文衛星の地食データを用いた上層大気密度測定」のコラボレーション、そして「雷ガンマ線測定」のコラボレーションを、それぞれISEEを巻き込む形で連携して立ち上げることが最初の一步である。2024年度はこれらのコラボレーション各々の研究を進めるのと並行し、名古屋大学のGRAINE sub-GeVガンマ線気球実験、京都大学のSMILE MeV気球実験のチームにも積極的に声かけして、12/17にISEEにて最初の小ワークショップを開催した。「月面ガンマ線のMeV衛星COSIおよびGeV衛星Fermiによる遠隔計測の見積もり及び解析」という新しい視点も導入した。この結果が、上記の研究目的にまとめたものである。その内容は1年前よりも進展しており、今後もこの連携を通じて「地球大気の高エネルギーアルベド」の融合研究の定義を進める。

3：研究結果と考察

「MoMoTar0-ISS実証」実験は来年の打ち上げへ向けてハードウェアの開発が着々と進められ、すでにフライト品(FM)の設計を固めたBBM/EMの環境試験、性能試験が精力的に進められている(別予算)。一方で検出器システムの軌道上実証が主目的であることと、開発の忙しさもあり、実際にISS軌道からアルベド中性子(とガンマ線)がどのように見えるのか、そこにどのようなサイエンスが含まれるのかの

具体的な検討は大きくは進展していない。FMの準備が重要な時期でやむを得ないが、打ち上げを迎えて装置の動作実証に成功しデータが出てくれば、熱中性子を含めた軌道上中性子の良いサイエンスが期待できる。2025年度へ向けてその連携を進めることが必要である。

大気中性子のフラックスモデルには大きな不定性があるが、12/17に小ワークショップで、SMILEやGR AINE気球実験のデータの中に大気中性子の信号が含まれることが確認された。これらの信号は今では除去しているためしっかりと解析をしていないが、原理的には大気中性子を地上から大気球高度30-40 kmまでより高精度に連続して計測できる可能性が示された。MoMoTar0実験によるISS軌道からのデータと組み合わせることで、大気中性子モデルが刷新できる可能性がある。

「X線天文衛星の地食データを用いた上層大気密度測定」では、トンガフンガ火山噴火時の上層待機の密度低下が観測された成果が論文となった。論文執筆の中で、噴火などの突発現象に対しては高層大気の運動・時間変動が重要なことが示され、ますますISEEとの連携の必要性が示された。同様のサイエンスを狙う「SUIM」実験は、国際宇宙ステーションから上層大気ごしの宇宙X線背景放射の吸収を測定するもので、これも2027年のフライトへ向けてハードウェア開発に全力をかけているところである(別予算)。

「月面ガンマ線のMeV衛星COSIおよびGeV衛星Fermiによる遠隔計測の見積もり及び解析」では、2027年打ち上げのMeV観測衛星COSIの開発はNASA予算および国内の別予算で進められている。本研究のなかで、赤道軌道上から月面を遠隔観測することで、銀河宇宙線のガンマ線アルベドと、太陽フレア高エネルギー粒子(SEP)によるアルベドが観測できる可能性が高いことが示された。開発中の他の検出器によるSEPその場観測を組み合わせるとどのようにサイエンスを得るか、さらなる検討が必要である。

雷ガンマ線関連では、名大のグループがTGFの地上多点観測に成功するなど個別の研究は大きく進展した(別予算)。なおISEEの気象研究者とはすでに連携している。別予算で進めてきた過去データの解析では、「上空向きのマルチパルスTGFの逆行放射(陽電子由来)を捉えた結果」をまとめ論文としたが、これにより「宇宙向きTGFを、地上側から同時に計測できる」ことが実証された。雷ガンマ線関連では、2025年2月ごろに2回目の小ワークショップで議論する予定であったが、日程調整ができず2025/4 or 5月に実施する方向で進めている。宇宙からの観測と組み合わせつつ、地上観測でこそ実現する観測と組み合わせ、雷ガンマ線の「物理」に迫るアプローチの重要性が確認された。原理がわかることで、将来的には金星や木星、土星での観測可能性も検討したい。

2024年度の大きな反省として、ISEEの気象分野、磁気圏分野と深く連携するところまで推進できなかった点が挙げられる。一方で本研究の方向性に多様なサイエンスが見えることが確認でき、高層大気や低軌道における高エネルギーアルベド計測の横の連携は立ち上がりつつあることから、2025年度は、本研究の意義と可能性をしっかりと広報・共有し、秋に予定するワークショップをより大きくして融合研究の立ちあげを推進する。天文衛星が検出器バックグラウンドを検討するときに、月面探査計画での被曝や高エネルギーアルベドを研究するときに、宇宙天気予報と絡んで高層大気を理解を深めたいときに、そして雷ガンマ線やTLEと上層大気との関わりを知りたいときに、国内の研究者が情報共有をする場を提供できると良いと考えている。また、オーロラのX線計測を目指すLAMP2実験の関係者とも連携を確認したところであり、今はまだ連携できていない分野との連携を広げてゆきたい。

[成果発表]

- ・ 査読論文: Satoru Katsudal, Hiroyuki Shinagawa², Hitoshi Fujiwara³, Hidekatsu Jin⁴, Yasunobu Miyoshi⁵, Yoshizumi Miyoshi⁶, Yuko Motizuki^{1,7}, Motoki Nakajima⁸, Kazuhiro Nakazawa⁹, Kumiko K. Nobukawa¹⁰, Yuichi Otsuka⁶, Atsushi Shinbori⁶, Takuya Sori⁶, Chihiro Tao⁴, Makoto S. Tashiro^{1,11}, Yuuki Wada¹², and Takaya Yamawaki, “X-Raying Neutral Density Disturbances in the Mesosphere and Lower Thermosphere Induced by the 2022 Hunga-Tonga Volcano Eruption - Explosion”, GRL Vol. 51, 26 October 2024
- ・ 学会発表: 大口 真奈里ら「2023年11月18日に北陸で発生した TGFのチェレンコフ検出器による指向性観測」、JpGU 2024, 幕張メッセ, 2024/5/29
- ・ 学会発表: 伊藤耶馬斗(近畿大学)ら「超高層大気を観測する ISS 曝露部搭載 X線カメラ SUIM の非 X線バックグラウンドのシミュレーション」、日本天文学会 2025春の年会、水戸市、2025/3/19
- ・ 学会発表: 大熊佳吾(名大理)ら「COSI 衛星による月面 MeV ガンマ線観測: 宇宙線と Solar Energetic Particle イベントの間接観測の検討」、日本天文学会 2025春の年会、水戸市、2025/3/19、など