

(別紙様式-4)

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：導入

本提案では、国際宇宙ステーション (ISS) 搭載ミッションで、2026年ごろに相次いで打ち上げ予定の、MoMoTaRO-ISSによる軌道上アルベド中性子計測、およびXRPIX-MISSE実験による地球上層大気測定へのチャレンジをきっかけとし、加えて、宇宙線シャワーをきっかけとする大気中でのMeV電子加速による雷ガンマ線の研究、人工衛星や大気球によるMeV天文学のアルベドバックグラウンド推定精度向上による感度向上を目的とし、アルベドX線、ガンマ線、中性子線のデータを、ISEEの磁気圏研究と組み合わせる融合研究を行う。

目的の1つ目は、アルベド中性子および電子・陽電子の、エネルギースペクトル、空間・指向依存性、それらの時間変化を磁気圏物理の文脈で理解することである。これらはX線・ガンマ線天文観測を邪魔する一方で、アルベド中性子はバンアレン帯内帯の陽子や電子の起源ともされるなど、それ自身の科学的な価値がある。2つ目は、X線観測を用いた大気吸収観測を、高層大気密度の計測手段として融合することである。既存天文衛星のデータ利用と、XRPIX-MISSE利用、そして次世代装置の概念検討が含まれる。3つ目は、新しいシナジーの探索である。物理的に明確に関係があるはずにもかかわらず、現状でX線・ガンマ線天文衛星の高エネルギーアルベド測定と、高層大気・磁気圏研究とは融合されていない。代表者が参加する2027年打ち上げのMeV天文衛星COSIは、地球や月のアルベドガンマ線、赤道上の雷ガンマ線や高エネルギー電子のデータも得る。新たな観測を磁気圏物理と融合し、双方にとって有益な結果を得るのみならず、新しい研究が立ち上がると期待している。

2：高エネルギーアルベドとその影響

地球大気上層には、宇宙のかなたで加速された陽子などの銀河宇宙線が降り注ぐ。GeVをも超えるこれらの高エネルギー粒子は大気と相互作用して π 粒子などを生成し、 μ 粒子やガンマ線、中性子線を含む宇宙線シャワーを形成する。これらの高エネルギー粒子は分厚い大気に遮られ、地上の平地には μ 粒子以外はほとんど届かないが、宇宙に向かって跳ね返る成分があり、アルベドガンマ線、アルベド中性子線などと呼ばれる。本研究ではこれらを高エネルギーアルベドと総称する。また高山や大気球観測高度(20-50 km)では大気放射線として非常に強いバックグラウンド源となる。

X線天文学(keV帯域の光子)で高感度な観測装置が開発される中で、荷電粒子由来のバックグラウンドはほぼ100%除去される。結果として、研究代表者は開発してきたX線・硬X線の衛星搭載観測機器開発でも、感度を支配する残留バックグラウンドは、アルベドガンマ線と中性子に由来する成分である(Nakazawa et al. JATIS 2018, Hagino et al. JATIS 2018)。実際に天体観測をするときには、このバックグラウンドをモデル化してデータから差し引く必要がある。銀河宇宙線が大気にぶつかる割合は geomagnetic cut off rigidity (COR) に依存し、磁気北極では多く、磁気赤道では少ない。バックグラウンドはこれまでCORの関数としてモデル化されてきたが、その再現性は10%そこそこで、暗い天体に対してはこれが観測限界を決定している。MeV帯域のガンマ線天文観測は、衛星と大気球実験で行われるが、いずれにおいても高エネルギーアルベドがバックグラウンド源となる。京都大学を中心に大気球での観測を進めているSMILE実験では、宇宙背景ガンマ線放射の観測で成果を出しつつあるが、その感度限界は大気ガンマ線のモデル化精度で決まっている(高田ら 2026 科学気

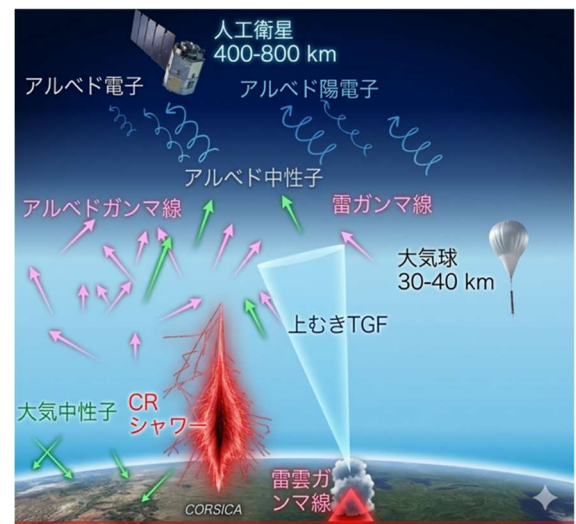


図 1: 高エネルギーアルベドと関連する科学

図 1: 高エネルギーアルベドと関連する科学

球コミュニティ研究会)。来年NASAが打ち上げ予定のCOSI MeVガンマ線性では、メインサイエンスの一つ511 keV電子陽電子対消滅線の観測感度はアルベド陽電子が決める(Gallego et al. ApJ 2025)。

高エネルギーアルベド観測に深く関係する分野として、宇宙X線の大気掩蔽を用いた上層大気の密度測定も重要である。トンガ諸島の大規模火山噴火では衝撃波が地球大気を大きく揺らし日本でも潮位が大きく変動したが、この時の大気の揺らぎをX線天文衛星の大気掩蔽から観測できている(Katsuda et al. GRL 2024)。100 kmレベルの高層大気の継続的な観測は難しく、宇宙X線の大気掩蔽は新たな手段として注目されている。これを専門に試みるのがSUIM計画(Nobukawa et al. Proc. SPIE 2024)であり、宇宙ステーションからの継続的な観測の実証を狙っている。

3: 高エネルギーアルベドの科学

高エネルギーアルベドそのものにも新しい科学価値が生まれつつある。MoMoTarOミッションは、月面か火星での中性子測定を目指している。宇宙線が月面を叩くと高速中性子が発生するが、物質との散乱によって熱化する。周辺にH₂Oがあると散乱による熱化が急速に進み、熱中性子が増えるため、水探査の有力な手段である。熱中性子は秒速 ~2 km で月面を飛び出し、その一部は落下してくるが、その数は9分ほどの中性子の寿命に依存する。中性子寿命は素粒子物理学の基礎量であるにも拘らず、測定の実験誤差が残っており、この「惑星法」での独立の測定も重要である。MoMoTarO-ISSは技術実証も兼ねて地球大気上のアルベド中性子を測定するミッションであるが、地球大気の中性子アルベドのモデル化に寄与するデータをもたらすと期待される。

地球大気の底、対流圏では積乱雲が発達する。強く帯電する雷雲の中では30 MeVエネルギーに達する電子が大量に増幅されるときがあり、ガンマ線を放射する。放電と同期するものは Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF)と呼ばれ、高度600 kmの衛星からも観測できるほど明るい。地上向きのTGFも冬季の北陸でよく観測されるため、日本がその観測の最前線に立っている(Enoto et al. Nature 2017, Nakazawa et al. JGRD 2025)。雷雲そのものが10分以上も継続的にガンマ線を放射するglowと呼ばれる現象も知られる。タネとなるのは宇宙線シャワーとされるが、その定量的な解釈はまだできておらず、モデル化の試みが始まったところである(Tsurumi et al. AGU 2025)。自然界における珍しい静電場加速として、最も身近な粒子加速器として、まだまだ謎が多く、研究が進められている。

高エネルギーアルベド陽電子や電子の測定も地球磁気圏の観測と強く関連している。面白いのが、上向TGFが生み出す電子陽電子ビームであり、これが地磁気に沿って伝播して観測衛星に直撃し、強い 511 keV電子陽電子対消滅線観測を発生させることがある(Briggs et al. GRM 2011)。これはCOSI衛星でも観測されるはずであり、そのモデル化の重要性を示している。

3: 融合研究としての位置付け

高エネルギーアルベドの科学はまさに地球磁気圏の科学でもある。この分野では逆に測定データが足りないために正確なモデル化ができていない。天文学者が見ている多くの現象も、地球磁気圏のコミュニティにはまだ見えておらず、大きな分野間融合のチャンスがある。上記のように間接的に、そして直接的に多くのサイエンスで高エネルギーアルベドの科学の進展が期待される状態になっており、しかも2020年ごろからこれに日本の研究グループが深く関わる状況となった。各分野のメンバーが集まってこれを推進することが、いままさに融合研究として大変面白いと考えている。

馬場 萌花, 大口真奈里, 中澤知洋 et al. 「2024年11月29日に金沢で発生した下向きTGFのチェレンコフ指向性検出器による多点観測」, JpGU 2025, 幕張, 2025/5/25-30

Enoto, T.; Tsuji, N. et al. "Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) Project to Combine Exploration of Lunar Water Resources with Astronomy and Particle Physics on the Moon", Lunar Surface Science Workshop, April 9-10, 2025, Virtually.

三輪聖, 馬場萌花, 中澤知洋 et al. 「TGF電子加速域の位置測定のための指向性チェレンコフ検出器開発」UVSORシンポジウム2025, 岡崎, 2025/10/30

Baba M., Oguchi M., Ando M., Nakazawa K. et al. "Directional Measurements of On-ground TGFs using Simple Cherenkov Detectors", AGU 2025, New Orleans, 2025/12/15-19

Miwa Tsurumi, Teruaki Enoto et al. "Simulation Study on Gamma-Ray Glows Induced by Cosmic-Ray Air Showers in Winter Thunderclouds", AGU 2025, New Orleans, 2025/12/15-19