

南天における PeV 領域ガンマ線広視野連続観測 (Mega ALPACA)

① ビジョンの概要

宇宙線観測による学際的研究の新展開を目指す。宇宙線の起源天体の解明は最重要課題だが、近年の多波長・多粒子天文学 (マルチメッセンジャー天文学) の発展によって、その答えが手の届く所に迫っている。その鍵となる「銀河系中心を含む南半球における PeV ガンマ線の観測」を実現することで、宇宙線を利用した宇宙物理、素粒子原子核物理、太陽地球物理、考古学、防災等を含む多彩な学術研究領域を発展させる。

② ビジョンの内容

宇宙線の起源天体の解明は最も重要な課題である。近年の多波長・多粒子天文学 (マルチメッセンジャー天文学) の発展によって、宇宙線起源の解明が手の届くところに迫っている。その中でも最も重要な「銀河系中心を含む南半球における PeV ガンマ線の観測」を実現することで、宇宙線を利用した宇宙物理、素粒子原子核物理、太陽地球物理、考古学、防災等を含む多彩な学術研究領域をさらに発展させる。宇宙線 (原子核宇宙線) は、 10^8 eV から 10^{20} eV の最高エネルギー領域に至るまで観測されているが、その加速機構や加速源の実験的証拠は未だ見つかっていない。Knee 領域 (=PeV 領域: 10^{15} eV から 10^{16} eV) で宇宙線エネルギースペクトルの折れ曲がり (冪 -2.7 から -3.1) と化学組成の変化 (軽核から重核) が観測されているが、これは超新星残骸 (SNR) での宇宙線加速限界によるものであることが示唆され、これより低いエネルギーの宇宙線は銀河系内の SNR で加速されているというのが理論的コンセンサスである。しかし、電荷を持った Knee 領域宇宙線は銀河磁場に曲げられるため、その宇宙線を PeV 領域まで加速している加速源 (PeVatron) の方向を特定できない。一方、SNR で原子核宇宙線が加速されると、その一部は近傍の物質と衝突して、中性パイ中間子を発生し、その崩壊ガンマ線のエネルギーは親原子核宇宙線の持つエネルギーの約 $1/10$ 、即ち PeV 領域に達する。そのガンマ線を観測すれば銀河磁場に邪魔されずに加速源の方向を特定できる。

③ 学術研究構想の名称

南天における PeV 領域ガンマ線広視野連続観測 (Mega ALPACA)

④ 学術研究構想の概要

本計画では、南米アンデス山脈の高地に総面積 1 平方キロメートルの観測装置を建設し、南天における PeV (可視光の 1,000 兆倍のエネルギー) 領域宇宙ガンマ線の広視野連続観測を世界最高感度で行う。PeV 以上の宇宙ガンマ線は現在まで有意に観測されておらず、南天での PeV 領域ガンマ線天文学を世界に先駆けて開拓する。特に、銀河系中心付近の広がった領域は、宇宙線を PeV 領域まで加速している宇宙加速器 PeVatron (宇宙線の発見以来百年以上の謎である宇宙線の起源天体) の最有力候補である。本計画は、その領域から放射されているガンマ線が PeV 領域まで延びていることを世界で初めて実証し、PeVatron の発見を目指す。また、銀河面に沿って広がって分布するガンマ線 (拡散ガンマ線) を観測することにより、銀河系内における宇宙線の加速エネルギー限界や、高統計で宇宙線のエネルギー分布の場所依存性 (PeV 領域宇宙線の拡散過程) を世界で初めて観測することを目指す。

その他、超高エネルギー (1-100 PeV) 宇宙線の化学組成とエネルギースペクトルの測定、宇宙線中の太陽の影の観測による太陽地球間磁場の研究や宇宙天気予報、宇宙線異方性の超精密測定による太陽圏周辺磁場の研究など多様な研究テーマが可能である。



図 1 Mega ALPACA 観測装置の予想図

⑤ 学術的な意義

本計画は、多波長・多粒子マルチメッセンジャー天文学の最後の欠けたピース、すなわち鍵となる南天での PeV 領域宇宙ガンマ線広視野連続観測を世界に先駆けて行う。PeV 領域ガンマ線放射天体の発見（研究期間内に 40 天体以上が予想される）、その中でも銀河中心近傍や超新星残骸等からの PeV 領域宇宙ガンマ線の検出（宇宙線の発見以来 100 年以上の謎である、原子核宇宙線を PeV 領域まで加速している宇宙粒子加速器：PeVatron 発見とその正体の解明）、PeV 銀河系内拡散ガンマ線の観測による PeV 原子核宇宙線の銀河系内拡散の解明、原子核宇宙線成分の大規模異方性の測定、宇宙線中の太陽の影の観測による地球太陽間磁場構造のモデリングや宇宙天気予報、原子核宇宙線加速機構の解明を、世界最高感度で世界に先駆けて行う。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

南米ボリビアでは本計画のプロトタイプである、sub-PeV 領域ガンマ線観測を目指す ALPACA 実験が建設中であるが、その面積は Mega ALPACA より一桁以上小さいために sub-PeV までのガンマ線天体を発見するにとどまり、その正体を解明するための物理的な議論ができるデータ統計量ではない。従って、ALPACA よりも 1 桁以上統計量の多い Mega ALPACA による PeV 領域ガンマ線サーベイの科学的位置づけは非常に高い。

日中共同の Tibet AS γ 実験、米国の HAWC 実験や中国の LHAASO 実験に対して、本計画は観測する視野が北天/南天と相補的である。CTA 実験（南）は狭視野で低エネルギー領域に感度が高く、本計画と相補的である。南半球で広視野ガンマ線天文学を実現したいという着想は複数提案されている（SWG0, LATTES, ALTO 等）が、実際に科学観測可能な準備ができているのは建設中の ALPACA 実験と本計画だけである。

⑦ 社会的価値

本計画により、今まで南天での観測データが欠如していたエネルギー領域である PeV 領域宇宙ガンマ線広視野連続観測が世界最高感度で開始される。すなわち、本計画はマルチメッセンジャー天文学のガンマ線天文学に欠けている最後のピースを提供し、「人類の知の地平を開く」ことに資することになる。

また、現代社会において巨大太陽フレアに伴うプラズマや磁気嵐の到来は、社会インフラへの大きな脅威である。光の速度で太陽地球間環境を探ることができる原子核宇宙線は、宇宙天気予報の新たなプローブとして社会に貢献する。

⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール

2027 年 建設準備、2028-2032 年 地下ミュオン粒子検出器+空気シャワーアレイ設置 部分観測、2033-2042 年 本観測

実施機関

東京大学（宇宙線研究所）、横浜国立大学、神奈川大学、宇都宮大学、信州大学、大阪公立大学、ボリビア・サンアンドレス大学、国立情報学研究所、中部大学、都立産業技術高等専門学校、日本大学、理化学研究所、原子力機構、大阪電気通信大学、広島市立大学、メキシコ・グアダハラハラ大学等、現在約 50 人である。

総経費 40 億円

所要経費

2027 建設準備 5 億円、2028-2032 観測装置建設+部分観測 毎年 5 億円→5 億円×5 年 =25 億円、2033-2042 本観測 毎年 1 億円→1 億円×10 年=10 億円、いずれも日本は半分程度を負担予定。

⑨ 連絡先

瀧田 正人（東京大学宇宙線研究所）

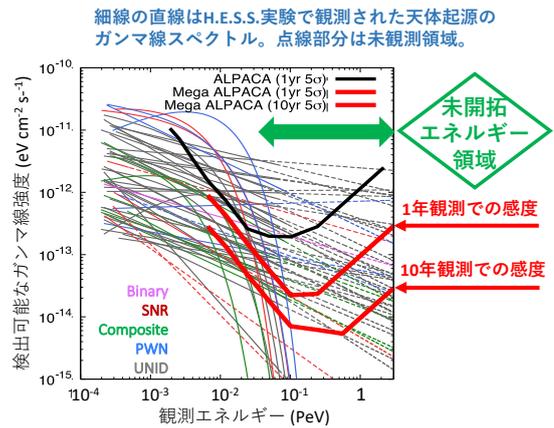


図2 Mega ALPACA のガンマ線検出感度（赤実線）と南天高エネルギーガンマ線放射天体の PeV 領域予想強度（色付き点線）