

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ところに迫っている。中でも「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。宇宙線（原子核宇宙線）は、 10^8eV 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 1000 兆倍のエネルギー）領域宇宙ガンマ線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北半球で数例が観測されているだけで、南天の PeV 領域ガンマ線天文学を世界に先駆けて開拓する。特に、0.01 PeV 程度までのガンマ線放射が観測された銀河系中心付近の広がった領域は、宇宙線を PeV 領域まで加速する宇宙加速器 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拡散ガンマ線を観測することで、銀河系内の宇宙線の加速エネルギー限界や、宇宙線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。

⑤ 学術的な意義

本申請では、南半球で初めての広視野（約 2sr ）宇宙線望遠鏡である空気シャワー観測装置と大型水チェレンコフ型ミュー粒子観測装置を連動して、世界最高感度で PeV 領域の宇宙からのガンマ線を観測する独創的な計画である。これは、狭視野（数度）で月の無い晴天夜しか観測できない大気チェレンコフ望遠鏡では、極めて困難な観測である。南天で初となる大型空気シャワーアレイと大型水チェレンコフ型ミュー粒子観測装置の連動実験の導入は画期的な試みである。



図 1 Mega ALPACA 実験の予想図

本研究により、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 領域の宇宙ガンマ線観測が開始される。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（PeVatron 発見）、原子核宇宙線成分の大規模異方性の測定や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。また、暗黒物質の崩壊から生じる PeV 領域ガンマ線探索も興味深いテーマである。本研究は、日本が世界を主導する最高エネルギーガンマ線天文学・天体物理学の幕開けと位置付けられる。宇宙線加速源 PeVatron は、現存する世界最高エネルギー加速器 LHC の 100 倍以上のエネルギーまで粒子を加速する宇宙加速器であり、その加速機構の研究が加速器科学や素粒子物理学に与えるインパクトも大きい。

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 実験が部分観測を開始しているが、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、南半球で科学観測を始めている本計画が世界をリードしている。

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。

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>

2028 建設準備、2029-2033 地下ミュー粒子検出器+空気シャワーアレイ設置 部分観測、2034-2043 本観測
<実施機関と実施体制>

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、長野県工科短期大学校、メキシコ・グアダラハラ大学等で、現在のメンバーは約 50 人である。今後、欧米の研究機関等さらに多くの外国研究機関と国際共同していく予定である。

<総経費> 65 億円

<所要経費>

2028 建設準備 5 億円、2029-2033 観測装置建設+部分観測 毎年 10 億円→10 億円×5 年 =50 億円

2034-2043 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から 1/3 程度を負担予定。

⑨ 連絡先

荻尾 彰一（東京大学宇宙線研究所）

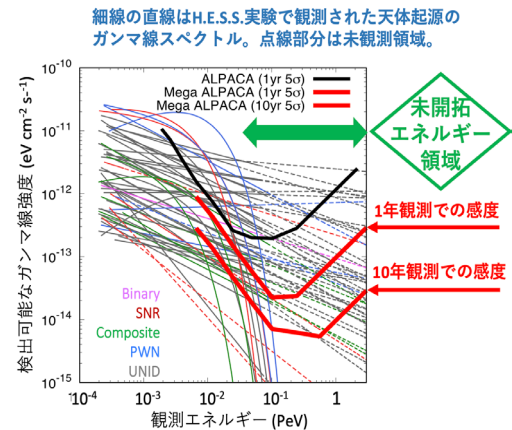


図2 Mega ALPACA ガンマ線感度(赤実線)と南天ガンマ線放射天体の PeV 領域予想強度(点線)