

## 宇宙線 3 分野（ガンマ線天文学、最高エネルギー宇宙線、地下実験）概況

宇宙線分野の中規模将来計画を議論する「CRC 中規模将来計画タウンミーティング」において 8 つの計画が提案された。これらの計画の議論には、現在の研究分野の状況と、研究分野における各計画の位置づけの理解が必要である。そこでこの文書では、今回提案された 8 プロジェクトの関連する研究分野の状況と、そのなかでの各提案プロジェクトの大まかな位置づけを以下に記す。

### 【最高エネルギー宇宙線観測分野】

$10^{20}\text{eV}$  を超える最高エネルギー宇宙線の起源は現代宇宙物理学の最重要問題のひとつである。現在南米にある Auger と北米にある TA による研究が進み、GZK 効果(宇宙背景光子との衝突により、超高エネルギー宇宙線の到達距離が限られる現象)と矛盾しないエネルギースペクトルのカットオフの存在はほぼ確実にになった。カットオフの起源の完全な理解には、最高エネルギー宇宙線の組成(陽子か重原子核か)の決定が重要であるが、相反する実験結果があり決着はついていない。一方、加速源となる天体の正体はまったく未知のまま残されている。加速天体の同定には活動銀河・銀河団等の既知天体との相関を見出すことが必須であるが、決定的な結果は得られてはいない。

Auger を凌ぐ規模の地上実験として提案されている TA 2 は銀河磁場の影響を受けにくい北半球での観測を拡張し、現行技術により統計精度を向上させ、エネルギー、到来方向、組成を決定して最高エネルギー宇宙線の起源の解明をめざす。一方、衛星軌道から空気シャワーを観測する JEM-EUSO は、南北両半球をカバーするとともに最高エネルギー宇宙線に対して考えられる最大の有感面積を実現できる野心的な計画であり、要素技術の開発が進められてきた。

また、高エネルギーニュートリノの観測は最高エネルギー宇宙線の伝搬に新たな情報を与えると期待されている。最高エネルギー宇宙線が陽子ならば必ず存在する GZK ニュートリノの検出を目指し、既存の IceCube 実験の拡張計画や、その前段階として電波的手段を用いて拡張案 ARA 計画が提案されている。

最高エネルギー宇宙線の研究は、超高エネルギー加速天体の解明だけではなく、宇宙の磁場構造、超高エネルギーでの相互作用や相対性原理の検証など、幅広い分野に大きなインパクトを与える研究へと進展が期待される。

### 【ガンマ線天文学分野】

非熱的宇宙の研究は、GeV-TeV ガンマ線天文学により、宇宙線の起源や中性子星・ブラックホールからのジェット機構といった高エネルギー天体諸現象の包括的な理解へと発展してきた。さらにガンマ線観測は、宇宙の天体形成史と光赤外背景放射、最遠方天体などの宇宙論にかかわる知見や、ダークマター、相対論・量子重力の検証、超高

密度物性などの基礎物理に関わる知見の発展にも寄与している。

現在、GeV 領域ではガンマ線衛星 Fermi により 1000 を超えるガンマ線天体がカタログ化されている。一方 TeV 領域では、ガンマ線チェレンコフ望遠鏡群により高解像度観測が進んでいるが、観測されている天体は氷山の一角のはずであり、次世代の望遠鏡で 1000 個オーダーの TeV ガンマ線天体を観測して、非熱的宇宙の全体像を捉えることが望まれる。この状況のもと、TeV 領域では世界のチェレンコフ望遠鏡観測の統合を目指して CTA (大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ) 計画が提案された。現在日本は CTA-Japan として参加し、今後の建設や観測段階においても高いプレゼンスが期待されている。また、銀河系内宇宙線の加速限界と考えられる Knee 領域宇宙線に関連する 100TeV 領域では、既存の Tibet 空気シャワー検出器にミュオン検出器を併設することで感度を上げ広視野観測を行う計画が提案されている。これらの将来計画が実現すれば、ガンマ線衛星と地上チェレンコフ望遠鏡により牽引されてきた現在の体制が、GeV から 100TeV 領域までカバーするガンマ線天文学の観測拠点として完成し、高エネルギー宇宙物理学のみならず、宇宙論・基礎物理まで含めて新たな発展につながるであろう。

#### 【地下非加速器実験分野】

最近の宇宙観測は、暗黒物質や暗黒エネルギーなど現在の素粒子の標準理論では説明できない重大な謎を提起している。また、ビッグバン以後なぜ物質が生き残ることができたのかという古くからの根源的な謎も究明されなければならない。Super-Kamiokande など日本がリードしてきたニュートリノ振動研究の進展によりニュートリノが質量を持つことが明確になったが、その質量は他の素粒子と比べて極端に軽くなければならないことが示されている。このようにニュートリノの質量構造や質量機構という解明が必要な問題が残る一方で、ニュートリノ天文学や地球物理への応用はますます進展している。一例として、KamLAND における地球ニュートリノ観測と地熱の解明があげられる。

一方、過去の超新星爆発に起源をもつニュートリノの探索 (GADZOOKS! 計画)、暗黒物質の直接探索 (XMASS-1.5) やニュートリノを伴わない二重崩壊の探索 (KL2-Zen) などが提案され、新たな研究で世界をリードしようとしている。これらの研究は、宇宙の大質量星形成の歴史の解明や、暗黒物質、宇宙物質優勢・軽いニュートリノ質量に対する知見を得ようとするもので、理論・実験の進展により明確な目標がそれぞれ設定されている。今回取り上げられた研究課題は既存の設備を利用して着実に目標感度を達成できる状況にあり、中規模の研究計画でありながら大きな学術的な進展が期待できる。