

# 論文審査の結果の要旨

氏名 榎 直人

本論文は、12章からなり、第1章は序章として高エネルギー宇宙線の観測の現状・問題点がまとめられ本論文の目的が述べられている。第2章では超高エネルギー宇宙線の実験とその結果を紹介した後、宇宙線の宇宙での伝搬に関する物理とその宇宙線の起源についてレビューされている。第3章は超高エネルギー宇宙線を観測する上で重要な地球大気中での宇宙線が引き起こす空気シャワー現象を説明している。

第4章からが学位論文の本題である明野広域空気シャワーアレイ (AGASA) 実験について、その実験装置の説明、データ解析、結果が述べられている。まず、第4章では現在世界最大の最高エネルギー宇宙線観測装置であるAGASAの概要が説明され、第5章では観測された空気シャワーに対するイベントの再構成・イベント選択・イベント例が示されている。第6章では観測された各イベントから元々の宇宙線（1次宇宙線）のエネルギーを評価するために使用される空気シャワーのシミュレーション計算プログラムについての説明が詳しく述べられ、実際にシミュレーションコードCORSIKAとAIRESを使ったシャワー粒子のエネルギー分布・高度分布などの計算結果が示されている。空気シャワー中の荷電粒子の横方向発達分布に関して、このようなシミュレーションは、シャワー軸からの距離数100メートルから4キロメートルまで、シャワー軸の天頂角が0度から60度の範囲で実験結果をよく再現することが示されている。また、この結果は使用したハドロン相互作用モデル(QGSJETまたはSIBYLL)や1次粒子の種類(陽子か鉄か)にはほとんどよらないことも示されている。AGASAでは1次粒子のエネルギーを推定するために、シャワー軸から600mでの荷電粒子密度 $S(600)$ を用いているが、シミュレーションの結果から $S(600)$ がシャワー中の全電子数よりも個々のシャワーイベントによる揺らぎが少なく、 $S(600)$ を用いることでより安定なエネルギー推定ができることが示された。

実際にAGASAによって観測された空気シャワーの特徴が第7章にまとめられ、第8章では観測データをシミュレーションと比較して得られる $10^{18.5}$ eV以上の1次宇宙線のエネルギースペクトルが示されている。 $10^{19.6}$ eV以上のエネルギーを持った宇宙線が陽子や鉄などの原子核の場合、宇宙背景輻射の光子と衝突してエネルギーを失うため、スペクトルにカットオフ（GZKカットオフ）ができると予想されていた。しかし、AGASAの観測結果は、このエネルギーを超えてスペクトルが延びており、 $10^{20}$ eV以上のイベントが15例観測された。この結果は宇宙線の起源や加速機構を考える上で非常に重要で、この結果の誤差とシャワーシミュレーションの正当性が続く第9章で議論されている。特に、シャワーシミュレーションは1次宇宙線のエネルギーを決める上で重要な役割を果たしているため、その信頼性が問題になる。本論文では低エネルギー領域（ $10^{14-16}$ eV）での空気シャワーの観測と比較してシミュレーションがその結果を良く再現することやシミュレーションに使われるハドロン相互作用のモデルが加速器実験のデータと合っていること、さらに、他の実験グループ（Yakutsk Group）が別の手法で求めた $S(600)$ と宇宙線エネルギーの関係式と今回シミュレーションで求めた関係式との整合性があることなどからAGASAの結果が信頼できることが述べられている。第10章では到来方向に関する議論が述べられている。最後に11章で実験のまとめと超高エネルギー宇宙線の起源が議論されている。

このように本論文は世界的に注目されている超高エネルギー宇宙線のスペクトルを観測し、特に、そのエネルギー推定にとってきわめて重要な空気シャワーシミュレーションについてその正当性が現在入手可能なデータを使って詳しく検討されている点で、物理学的に高く評価できる。なお、本論文は共同実験に基づいているが、空気シャワーシミュレーションの改善それを使用した解析や結果の正当性の検証等は論文提出者が中心となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。