

論文審査の結果の要旨

氏名 山本康史

主として陽子、ヘリウムから構成される一次宇宙線は太陽活動の影響を受けてその強度が時間変動する。また、入射する荷電粒子は地球磁場によりその軌道が曲げられるため、観測地での地磁気緯度に関連したカットオフエネルギー以下の宇宙線は地球に到達することはできない。一次宇宙線と大気原子核（主として窒素及び酸素）との相互作用で生成される二次宇宙線は、そうした一次宇宙線強度変化の影響を受け、その強度が変化する。二次宇宙線の中で代表的なものはミュオンで、これは比較的長寿命（2.2 マイクロ秒）であり、大気とも主として電離損失以外の相互作用をしないので、大気中での宇宙線の相互作用や空気シャワーの発達を調べるために古くより様々な検出装置を用いて、そのエネルギースペクトルが測定されてきた。特に、近年ではスーパー神岡実験で発見された大気ニュートリノ振動の研究に関連して、大気ニュートリノ発生と深い関連を持つ上空での大気ミュオンのエネルギースペクトルの精密測定が行われるようになった。一次宇宙線が大気と相互作用する平均自由行程は約 100g/cm^2 であり、大気ミュオン強度は地表からの高度により異なる値を持つことになる。大気ミュオンの強度はその生成と崩壊のバランスの結果、約 $100\text{--}200\text{g/cm}^2$ にピークを持つ特徴的なカーブ（グロースカーブ）を描く。従って検出器を気球に搭載して高空に打ち上げて測定することにより、大気ミュオン強度の高度変化を観測することができる。

本論文は気球に搭載された単一の測定装置（BESS 実験）を用いて 1999 年から 2001 年の連続した 3 年間に異なる 2 つの場所において様々な高度で行われた大気ミュオン強度の精密測定に関する研究である。

本論文は 7 章からなり、第 1 章は導入部、第 2 章は BESS 実験に搭載された測定装置とその校正の詳細、第 3 章は本論文の気球飛行の概略、第 4 章は大気ミュオン事象の選別、検出効率およびその系統誤差に関する議論、第 5 章は実験結果、およびそれと世界の他の実験結果との比較、第 6 章はシミュレーションと実験結果についての比較及び議論、第 7 章は結論について述べている。

第 1 章では BESS 実験による大気ミュオン強度観測の物理的意義および本論文に関係する気球飛行の概略が述べられている。スーパー神岡実験で発見さ

れた大気ニュートリノ振動の研究に関連して、大気ニュートリノ発生と深い関連を持つ上空での大気ミュオンエネルギースペクトルの精密測定は今後大気ニュートリノ強度の精密シミュレーションを構築する際の基礎データとして極めて重要な価値を持つ。

第2章では、BESS 実験に搭載された測定装置とその校正の詳細が述べられている。BESS 測定器は薄肉超伝導ソレノイドを使用した気球搭載型超伝導スペクトロメーターであり、これまでの観測装置と比較して大面積、大立体角、一様な磁場を持っている。ソレノイドの内側の均一な磁場領域にはドリフトチェンバーが設置され、荷電粒子の飛跡を測定し、その運動量を高い精度で決定する。粒子の識別はこの運動量と TOF ホドスコープで測定される粒子速度から粒子の質量を同定する信頼性の高い方法で行っている。測定器はエアロジェルチェレンコフカウンターを備えており、陽子とミュオン、電子を広いエネルギー範囲で識別することができる。さらに厚さ 11.8mm の鉛板を用いた電磁シャワーカウンターを搭載しており、TOF ホドスコープで測定される粒子のエネルギー損失を用いてミュオンと電子・陽電子を識別することが可能である。

第3章では、本論文の気球飛行の概略が述べられている。1999年と2000年は8月にカナダのリンレーク（カットオフエネルギー0.08GeV）で、2001年は9月にアメリカのフォートサムナー（カットオフエネルギー3.4GeV）で観測を行った。飛行時間は1999,2000年は34時間程度、2001年は14時間程度であった。いずれの年も気球が地上から大気最上層（37km=4.6g/cm²）に達する間の上昇時にデータを取得し、また、上空37kmにおいても一日以上にわたる長時間の観測を行い、過去に測定されたデータよりも高い統計量で、系統誤差の小さい非常に質の高いデータを得た。ただし、2001年は大気最上層にとどまっていた時間は2時間程度で、その後は気球は4.5-28g/cm²の範囲でゆっくり下降を始めた。この下降中のデータは宇宙線と大気との相互作用を議論するのに用いられた。

第4章では、大気ミュオン事象の選別、検出効率およびその系統誤差に関する議論をしている。解析ではまず、上下の TOF ホドスコープを通過してドリフトチェンバーの中で飛跡を一つだけ残した事象を選びだし、アクシデンタルおよび測定器内部で反応した事象を除去する。その後、粒子の速度と磁気硬度を用いて決めた質量と、上下の TOF ホドスコープで測定される粒子のエネルギー損失から求めた電荷を用いる。パイオン、陽子、電子・陽電子の混入等の差し引きまでも含めた検出効率および大気ミュオン強度の系統誤差はおよそ数%程度である。

第5章では、大気ミュオン強度の実験結果を示して、世界の同種の実験結果と比較している。大面積・大立体角のため、世界最高統計精度大気ミュオ

ン強度を測定することができる。また、同軸円筒上に配置された複数の検出器のために、系統誤差を非常に小さくおさえることが可能である。

第6章はシミュレーションと実験結果についての比較及び議論が述べられている。1999年と2000年の大気ミュオン強度を比較すると、太陽活動度の差違により、正電荷ミュオン ($0.9\text{-}2.55\text{GeV}/c$) の年度毎の差が負電荷ミュオン ($0.9\text{-}9.76\text{GeV}/c$) よりも低エネルギー側で大きくなっていることが判明した。これは一次宇宙線が正電荷を持つ陽子であるために起こることで、特に低エネルギー側では陽子と大気原子核との相互作用で生じる正負電荷パイオンの発生数に偏りがあるためと考えられる。一方、2001年のデータは誤差の範囲で、2000年のデータと比べて大きな差はない。これは、一次宇宙線の太陽活動による変化と地磁気のカットオフによる抑制効果が低エネルギー側で互いに打ち消しあうことが原因であることが判明した。GEANTを用いた宇宙線の大気発達シミュレーションを行った結果、大気ミュオン強度に関するこれらの効果を定量的に説明できることがわかった。

第7章では、この実験の結論が述べられている。

以上のように、本論文は気球に搭載された単一の測定装置 (BESS 実験) を用いて1999年から2001年の連続した3年間に異なる2つの場所において様々な高度で行われた大気ミュオン強度の世界最高精度の測定に関する研究であり、素粒子物理学 (大気ニュートリノ振動の精密解析に必要な不可欠な大気ニュートリノ強度計算の精密化のための基礎データ) および宇宙線物理学に大きく貢献するものである。したがって、審査員一同は本論文が博士 (理学) の学位論文として合格であると判定した。なお、本論文の実験は BESS 実験という大きなグループ実験であるが、論文提出者が主体となってデータ取得及び解析を行い、さらにハードウェアの貢献として、解析で重要な役割を果たす電磁シャワーカウンターおよびドリフトチェンバーの設計・製作を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。また、共同実験者全員から論文内容の結果を学位論文として提出することについて了承を得ているものであることを確認した。