論文の内容の要旨

論文題目　Measurement of Atmospheric Muon Flux at Various Altitudes.

(大気ミューオン流束の高度依存性の測定)

氏名　山本 康史

宇宙から飛来する一次宇宙線 (主に陽子とヘリウム) は太陽活動の影響を受けてその強度が変化する。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、その地域での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ができない。一次宇宙線と大気原子核との相互作用により生成される二次宇宙線は、これら一次宇宙線の変化により当然影響を受け、その強度は変化する。二次宇宙線の中で代表的なものはミューオンで、これは比較的寿命が長く、また大気ともほとんど相互作用をしないため、大気中での宇宙線の相互作用や発達を調べるために昔から様々な測定器を用いて、そのエネルギースペクトルが測定されてきた。特に、最近ではスーパーカミオカンデに代表されるニュートリノ振動の研究に関連して、大気ニュートリノの発生に深い関連を持つ上空のミューオンのエネルギースペクトルの精密測定が行なわれるようになってきた。一次宇宙線が大気と相互作用を起こす平均自由行程は約 100 $\mathrm{g/cm^2}$ である。大気ミューオンの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。大気ミューオンの強度はその生成と崩壊のバランスの結果、$100 - 200$ $\mathrm{g/cm^2}$ 辺りにピークを持つ特徴的なカーブ (グロスカーブ) を描く。従って、測定器を気球に搭載して高空に打ち上げて測定すれば、大気ミューオン強度の高度変化が観測できる。

BESS 実験では大気ミューオンを 1999 から 2001 年の連続した 3 年間に異なる 2 つの場所で観測した。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) で行なった。1999 年と 2000 年との間で太陽活動は急激に変化し (図 1 参照)、その影響を受けて一次宇宙線も低エネルギー側で大きく変化した (図 2 参照)。また、2000 年と 2001 年とでは太陽活動にそれほど変化はなかったが (図 1 参照)、実験場所が異なるため、地磁気の影響を受けて、フォートサムナーでの一次宇宙線は低エネルギー側では地球に入射できない (図 2 参照)。いずれの年も気球が地上から大気最上層 (37 km) に達する間の上昇時にデータを取得し、また、上空 37 km においても一日以上に亘る長時間の観測を行ない、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 時間で、その後気球は $4.5 - 28$ $\mathrm{g/cm^2}$ 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モデルを議論するのに用いられた [3] ([3]K. Abe, et al., Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba), HE2.4. 1463, 2003)。その結果、相互作用モデルとして DPMJET3 が実験データを比較的良く再現できることが示されている。

このように、異なる太陽活動期にまたがり、また地磁気の異なる場所で大気ミューオンを 3 年連続して測定し、地上から大気最上層に至る様々な高度で大気ミューオンのエネルギースペクトルを得たというのはこれまでになかった。ミューオンの大気中での発生及び減衰について詳しい議論を行なうことができる基礎データが得られたことになる。

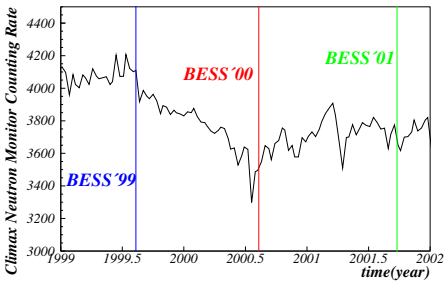

図 1: 太陽活動の変化に伴う Climax[1] の Neutron Monitor の観測データ ([1] http://odysseus.uchicago.edu/NeutronMonitor/: University of Chicago, "National Science Foundation Grant ATM-9613963")

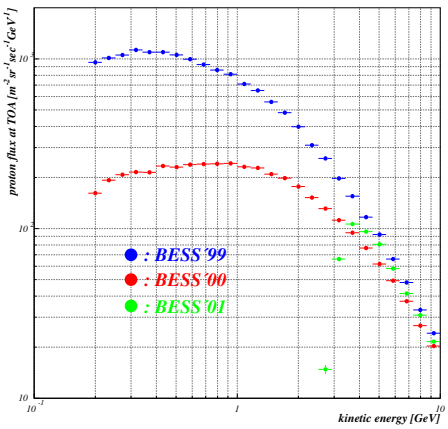

図 2: BESS-1999,2000,2001 で得られた一次宇宙線陽子のエネルギースペクトル ([2]Y. Shikaze, et al., Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf. (Tsukuba), SH3.4. 4027, 2003)

本研究ではこれら 3 回の飛翔実験により得られた大気ミューオンのエネルギースペクトルを互いに比較することで、太陽活動による一次宇宙線の変化が大気ミューオンに与える影響と地磁気のカットオフの効果による一次宇宙線の抑制が大気ミューオンに与える影響を研究した。そしてこれら二つの効果が大気ミューオンに与える影響を調べるために、宇宙線の大気中の発展についてシミュレーションを行ない、得られた結果から実際の大気ミューオンの強度変化を説明できるということを明らかにした。

図 3 に示した 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、ソレノイドの採用により気球搭載型測定器としては、これまでの観測器に比較して大面積・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置かれ、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非常に確実な方法で行っている。測定器は閾値型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 μ、電子を広いエネルギー領域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、ミューオンと電子・陽電子を識別することが可能になっている。大面積・大立体角であることから大量のデータを測定することが可能で、統計誤差を小さくすることができる。ドリフトチェンバーでは複数の飛跡の検出も容易で、測定器内で相互作用を起こした事象については確実に識別でき、また同軸円筒上に配置された検出器で入射粒子に対する面積立体角を見積もることも容易にできる。これらの特徴から系統誤差についても非常に小さく抑えることが可能である。

解析ではまず、上下の TOF ホドスコープを通過し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

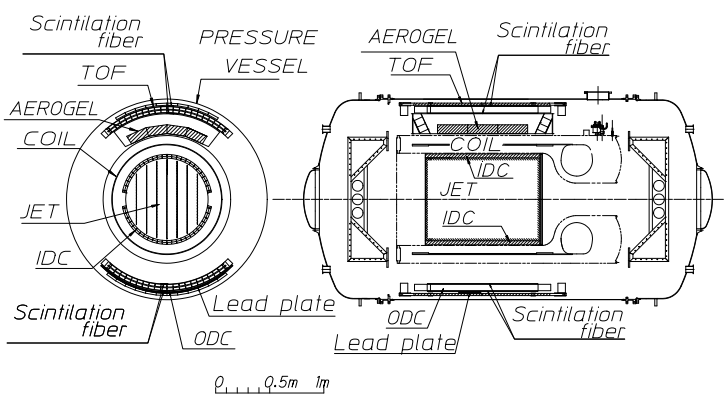

図 3: BESS 2001 測定器

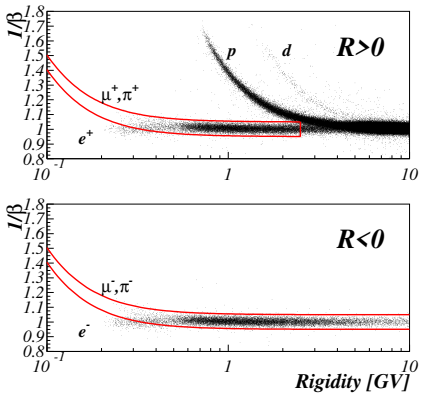

図 4: $1/\beta$ vs magnetic rigidity

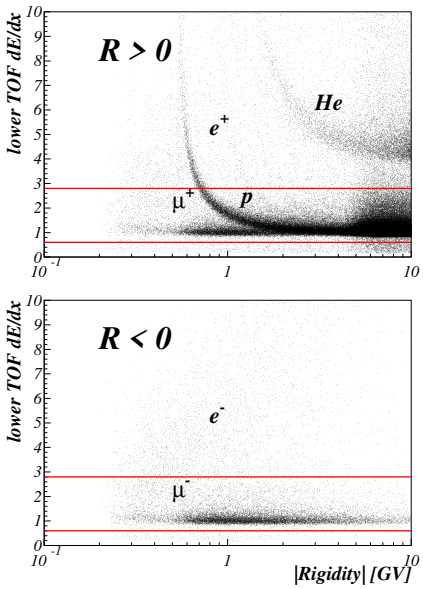

図 5: TOF ホドスコープでのエネルギー損失 vs magnetic rigidity

だし、アクシデンタルな事象とわずかに存在する測定器内で相互作用を起こした事象を取り除く。このようにして選んだ事象から粒子を識別するには、$1/\beta$ と磁気硬度 (magnetic rigidity) 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。図 4、5 に横軸に磁気硬度をとった $1/\beta$ とエネルギー損失の分布を示してある。図中の赤線がミューオンサンプルに対するカットの境界である。

ミューオン識別の際に問題となるバックグラウンドの電子 · 陽電子を見積もるため、ミューオンの識別は鉛板を通過した事象だけを用いる。鉛板を通過する際、電子 · 陽電子は電磁シャワーを起こして複数の粒子が発生し、鉛の下にある TOF ホドスコープからは大きなシグナルが出る。一方、ミューオンはほとんど相互作用をせず小さなシグナルしか出さない。鉛板の厚さが 11.8 mm しかないため、1 事象毎にはっきりと識別できるほどシグナルに差はできないが、シグナルの分布図をモンテカルロシミュレーション GEANT を用いて計算した電子 · 陽電子およびミューオンそれぞれのシグナル分布図と比較することで (図 6 参照) 、電子 · 陽電子/ミューオン比を見積もることができる。求められた電子 · 陽電子 / ミューオン比は磁気硬度 1.0GV 付近で約 10%で、エネルギーが高くなると急速に小さくなり、10 GV 付近では 10^{-3} 程度である。一方、プラス側には陽子という大きなバックグラウンドが存在する。図 4 において陽子は μ^+ に運動量で 2GeV/c 付近から交じり始め、3GeV/c を越えると μ^+ とほとんど区別ができなくなる。図 7 は陽子と μ^+ の $1/\beta$ 分布で、図中の緑の線は μ^+ として抜き出したカットの境界を示しており、この領域に入り込んでくる陽子の数をダブルガウシアンでフィットすることで、そのバックグラウンドを見積もることができる。ただし、3GeV/c 以上では陽子と μ^+ は完全に交じりあってしまい、μ^+ のスペクトルを求めることは困難である。従って、μ^+ のスペクトルの上限を 2.55GeV/c に定めた。

観測された大気ミューオンの高度変化 (グロスカーブ) は図 8 に示してある。高度と共にミューオンの流束が増加し、$100-200$ g/cm^2 辺りでピークを迎え、その後減少するというグロスカーブの特徴がよく示されている。図 9 に大気最上層における 1999 年と 2000 年 と 2001 年のミューオンスペクトルについて正負ミューオンそれぞれの比較を示しておいた。平均の大気深さは各年毎に異なるため、この画では 1999 年と 2001 年のスペクトルを 2000 年の大気深さに規格化して載せた。この図で、1999 年と 2000 年とを比べると、正ミューオンの年度毎の差が負ミューオンよりも低エネルギー側で大きくなっていることがわかる。これは一次宇宙線が正の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パイオンの発生の仕方 (マルチプリシティ) に偏りがあるためと考えられる。一方、 2001 年は上空のデータが少ないため他の 2 年と比べて統計誤差が大きいが、誤差の範囲内では 2000 年と比べて大きな変化はない。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の効果が低エネルギー側で互いに打ち消しあう効果を

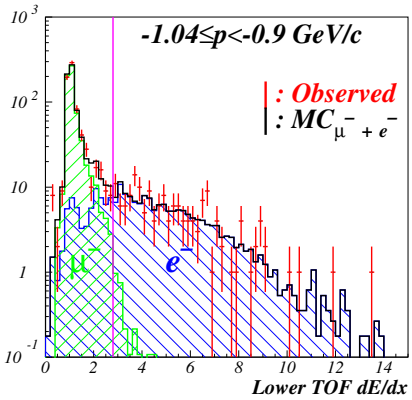

図 6: μ^- と e^- のシグナル分布についてのデータと MC との比較

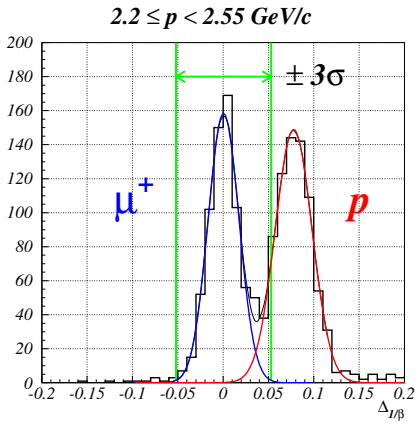

図 7: μ^+ と p の $1/\beta$ 分布

持つために起こると考えられる。GEANT を用いた宇宙線の大気発展のシミュレーションを行なった結果、大気ミューオン強度に対するこれら 2 つの効果を定量的に説明できることがわかった。

本研究では、各高度における精度の高い大気ミューオン強度を導き、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の効果が大気ミューオン強度にどのように影響を与えるか、という議論を行なった。BESS 実験から得られた精度の高いデータだけを用いてスペクトル同士の比較及び宇宙線の大気発展のシミュレーションを行なって、その相互関係を詳細に議論して定量的に明らかにし、大気ミューオンの強度を議論する際に有用な新しい観点からの研究を行なった。

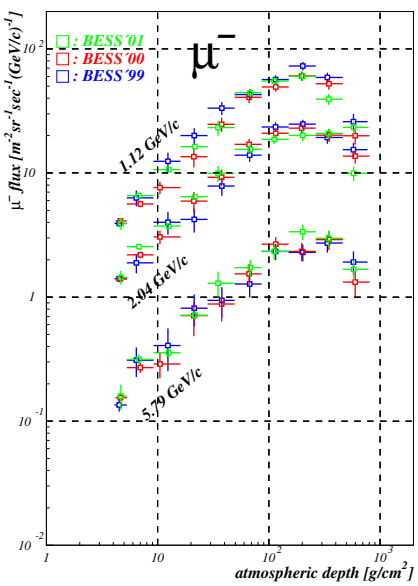

図 8: μ^- のグロスカーブ

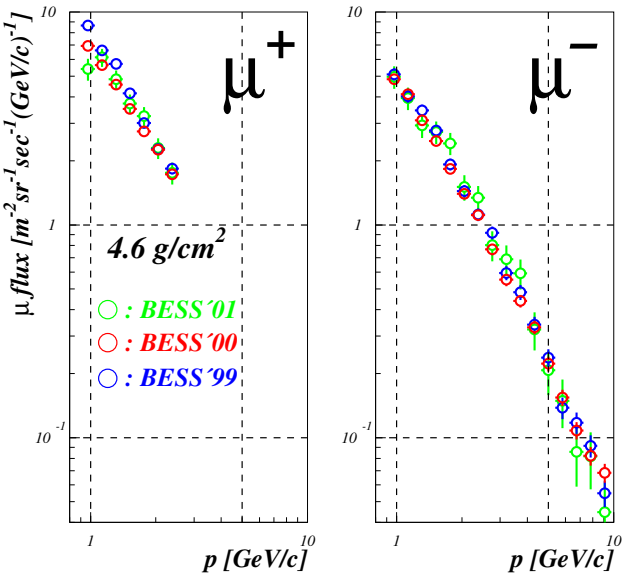

図 9: 1999,2000,2001 の上空での $\mu^\pm$ のエネルギースペクトラム
1999 と 2001 は 2000 の高度に合うようにスペクトラムを規格化している