

論文の内容の要旨

論文題目 Measurements of Galactic and Atmospheric Cosmic-ray Absolute Fluxes

(銀河及び大気宇宙線絶対流束の測定)

氏名 灰野 禎一

銀河から飛来する一次宇宙線は、そのスペクトルの形や絶対流束が宇宙線の起原や伝播を知る上で重要な手掛りとなる。また、大部分が陽子やヘリウム原子核などで構成されるため、地球の大気上層部で大気の原子核と衝突してシャワーを起こし、パイオンやミュオン、陽子、中性子などの二次宇宙線や、ニュートリノなどを生成する。そのため、一次宇宙線の精密な測定は、宇宙線そのものを知る上で重要な情報となるばかりでなく、二次宇宙線や大気ニュートリノの量を正確に見積もるためにも不可欠である。

近年、スーパーカミオカンデなどの地下実験施設で、大気ニュートリノ流束の天頂角分布がシミュレーションで得られた予想と食い違い、上向きのミュニュートリノが欠損しているという現象が観測され、以前から議論されていた電子ニュートリノ/ミュオンニュートリノ比の異常を裏付け、ニュートリノに微小の質量があり、複数の世代間の混合状態の中で振動しているという有力な証拠となった。大気ニュートリノ振動の研究をより進め、振動のエネルギー依存性、質量差 Δm^2 の精度の高い測定などを行なうためには、スーパーカミオカンデで行なわれている幅広いエネルギー範囲にわたって研究を行なうことが必要である。特に、10 GeV 以上のミュオンニュートリノはまわりの岩盤でできた上向きのミュオンのイベントとして観測されている。

このようなイベントの予想フラックスを正しく計算するためには、親となる 100 GeV 以上の一次宇宙線の精密な流束が必要となる。1998 年に行なわれた、BESS、AMS、および CAPRICE といった磁場スペクトロメータを使った実験によって、100~200 GeV 以下の一次宇宙線の絶対流束は 5% 程度の精度で得られた。しかしながら、それ以上のエネルギー範囲では気球搭載用のカロリメータやエマルジョンチェンバを使った実験結果しか存在しておらず、磁場スペクトロメータに比べて測定精度は悪くなっている。これらの気球実験では、大きさや重量、露光時間に制限があるためイベント数が少くなり、統計誤差が大きい。また、重量の制限から限られた量の標的物質しか使えず、不完全なシャワーからの入射エネルギーの決定にはシミュレーションなどが必要で、それによる系統誤差が無

視できない。一方磁場スペクトロメータを用いた測定では、入射粒子の運動量を飛跡から得られる曲率半径のみから決定するので、系統誤差が生じにくい。しかしながら、磁場スペクトロメータでは曲率の測定に限界があるため、これまでは 300 GeV 以上の高エネルギーで一次宇宙線流束を測定した例はなかった。磁場スペクトロメータを改良し、その運動量測定可能範囲を大幅に向上できれば、カロリメータやエマルジョンチェンバを使った実験と相補的な役割を担い、一次宇宙線のスペクトルの形および絶対流束の正確な決定において大きな貢献をすることができる。

一次宇宙線と同様に、大気でニュートリノと同時に二次的に生成されるミュオンの絶対流束の測定も、大気ニュートリノ流束の計算精度を検証するために重要である。近年、BESS や CAPRICE といった気球搭載用の超伝導スペクトロメータを用いた測定によって、100 GeV/c 以下の運動量領域では大気ミュオンの絶対流束が精密に測定されてきた。また、100 GeV/c 以上の高い運動量領域では、CERN にある LEP などの大型加速器実験で用いられている測定器を利用してミュオンの絶対流束が測定され、最近、その結果が報告され始めている。しかしながら、大気ミュオン流束は、場所や高度、大気圧力と温度などに依存するため、単一の測定器で広い運動量範囲を一気に測定したデータの方が、大気ニュートリノ流束の計算を系統的に検証するためには望ましい。1 GeV/c 以下の低い運動量まで測定できる超伝導スペクトロメータを改良し、運動量測定可能範囲を向上すれば、それを行なうことが可能である。

銀河、及び大気宇宙線の測定可能運動量領域を拡大するため、BESS グループでは 100 GeV までの一次宇宙線絶対流束の精密測定を行なった実績のある BESS-98 を改良し運動量分解能を一桁近く向上させた BESS-TeV スペクトロメータを開発した。両者の測定器断面図は図 1 に示した。BESS 測定器は、主に、ソレノイド型超伝導磁石と、ドリフトチェンバを使った飛跡検出システム、およびシンチレーションカウンタを使った飛行時間測定システムで構成されている。BESS-98 ではソレノイドの内側にある中央飛跡検出器 (JET, IDC) を使って入射粒子の曲率を測定していた。BESS-TeV では JET, IDC の測定点数を倍に増やし、位置測定精度も約 $200\mu\text{m}$ から $150\mu\text{m}$ へと向上するように設計されている。さらに、ソレノイドの外側に新しい飛跡検出器 (ODC) を搭載することで、飛跡長を二倍に拡大でき、大幅な運動量分解能向上が達成された。

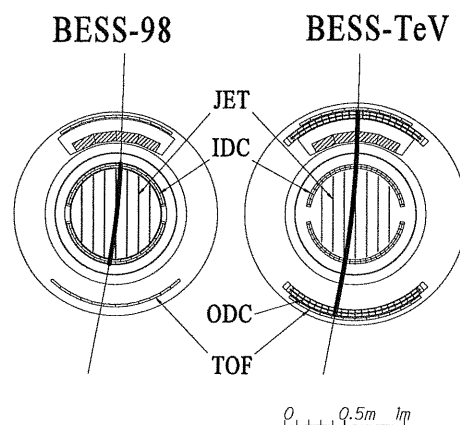


図 1: BESS-98 と BESS-TeV の測定器断面図比較

BESS-TeV 測定器を用いて 2002 年 8 月にカナダ北部のリフレックにおいて大気上層部での一次宇宙線の気球観測を行なった。また、同年 10 月にはつくば市の高エネルギー加速器研究機構の敷地内において地表での大気宇宙線の観測を行なった。水平飛行、地表それぞれで 10.6 時間および 105 時間分のデータを収集した。これらのうち約 90 % に相当する 9.5 時間、および 91.5 時間分のデータ

を宇宙線の絶対強度を得るために使った。

今回の実験データの解析で最も重要な点がイベントの再構成である。入射粒子の運動量を正確に決定するには、磁場中での曲率を得るための正確なトラックの再構成が必要である。トラックの再構成はソレノイドの内側に配置された JET と IDC、および外側に配置された ODC で検出された粒子の飛跡を使って行なっている。これらのドリフトチェンバからの信号はフラッシュ型アナログ-デジタル変換器 (FADC) を使ってデジタル情報に変換されているが、消費電力を抑えるため変換周波数をあまり増やすことができない。そのため、ドリフト速度が比較的遅い、炭酸 90%、アルゴン 10% の混合ガスを使っている。炭酸ガスは電子の拡散係数が他のガスに比べて低く低消費電力で遅いエレクトロニクスでも十分高い位置測定精度が達成できるが、ドリフト速度のガス温度や圧力への依存性が高い。気球実験中は圧力容器のなかにドリフトチェンバやエレクトロニクスが納められて、大気圧に保たれているが、昼夜の温度変化などにより容器内部の温度と圧力が変動する。そのため、正確な飛跡位置を得るにはドリフト速度などの較正が必要である。今回の解析では、特にこの較正作業をいかに高い信頼性で行なうかに焦点があてられた。ドリフト速度の他にも、ローレンツ角度、FADC の時間オフセット、読みだしワイヤーの正確な位置、ドリフト電場の乱れの影響など構成すべきパラメータはいくつか有るが、それらのうち、温度や圧力など実験条件に依存して変わるものと、実験を通して一定であるべきものを明確に区別し、測定データ自体を使って較正を行なった。較正は、パラメータを変えたときに再構成したトラックの一貫性の指標となる、フィッティングの χ^2 が最少になるようにして行なったが、このときに適切なイベントサンプルを選ぶことで、着目しているパラメータのみの変動に対して χ^2 が大きく変動するような条件を作った。こうして全ての較正パラメータを精度よく決定し、信頼性の高いトラックの再構成を行なうことができた。

また、パラメータ較正が正しく行なわれているかどうかの確認として、ガス中でのイオン化、電子の拡散、アノードワイヤー近傍での雪崩現象による増幅、FADC でのデジタル化といったドリフトチェンバの詳細な応答を、実際の測定器の詳細な配置のもとにシミュレートし、実データを比較した。パラメータ較正が正しく行なわれていない場合、トラック再構成の時に一貫性が崩れるためチェンバでのヒットの残渣分布や、 χ^2 などのトラックのクオリティを示す分布のテールが大きくなる。今回得られたデータでは分布のテール部分に至るまでシミュレーションと良い一致が見られた。

再構成したイベントデータを使い、上空及び地表で観測した一次及び大気宇宙線の絶対流束を求めた。BESS 測定器は、均一な磁場、単純なシリンダー型測定器配置、および低物質量で特徴づけられるが、これにより、観測イベントの運動量分布からエネルギースペクトルに規格化する際の補正量が最小限に抑えられ、それに伴う系統誤差は 5% 程度であった。図 2 および図 3 に、得られた一次宇宙線陽子および大気ミューオンのエネルギースペクトラムを示したが、どちらの結果も過去の実験と重なる部分では誤差の範囲で良い一致が見られた。

一次宇宙線陽子のスペクトラムでは、電磁スペクトロメータを使った実験として始めて 500 GeV という高いエネルギー範囲までの絶対流束が 15% 以下の精度で得られた。銀河宇宙線のスペクトル F がエネルギー E_k 単一のべきで表せると仮定し、データを式 $F = \Phi \cdot \left(\frac{E_k}{E_0}\right)^\gamma$ でフィットした。 $E_0=100$ GeV、フィッティング範囲を $30 \text{ GeV} < E_k < 500 \text{ GeV}$ したときのフィットの結果は、 $\Phi = (4.66 \pm 0.09) \times 10^{-2} (\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV})^{-1}$ 、 $\gamma = -2.715 \pm 0.025$ となった。

関数を 10^6 GeV の高エネルギーまで外挿すると、カロリメータやエマルジョンチェンバを使った実験結果と良い一致が見られた。今回の結果とこれらの高エネルギー領域のデータを使えば、10 GeV 以上の大気ニュートリノの予想フラックスを計算する上での不定性を減らすことができるはずである。また、大気ミューオンのスペクトラムは、0.6~400 GeV/c という 3 桁近い広い運動量領域にわたって約 10% の精度で得られ、これまでの過去の実験結果のほぼすべてをカバーできるユニークな結果となり、大気ニュートリノ計算を検証する上で重要なデータとなる。

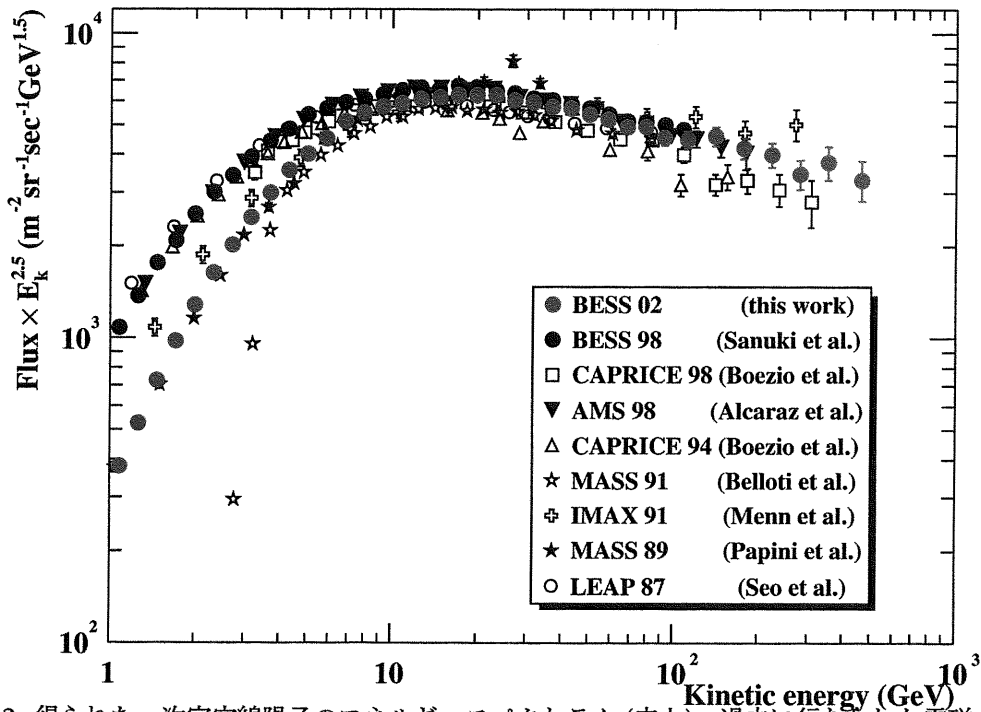


図 2: 得られた一次宇宙線陽子のエネルギースペクトラム (赤丸)。過去に行なわれた電磁スペクトロメータを使った実験の結果も示す。10 GeV 以下のずれは太陽モジュレーションの影響による。

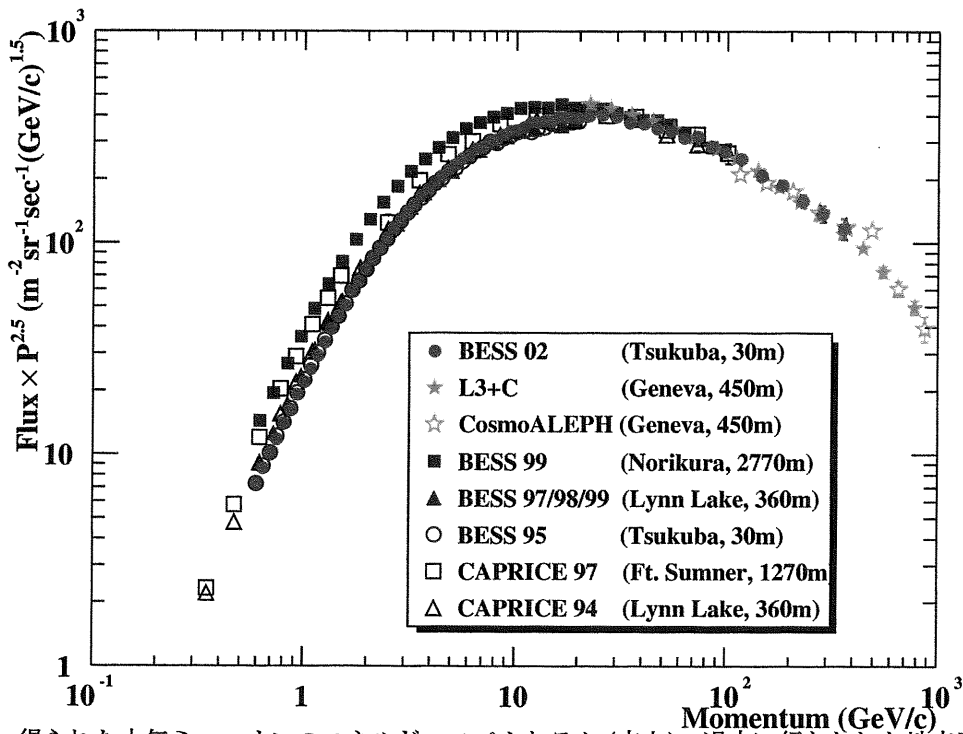


図 3: 得られた大気ミュオンのエネルギースペクトラム (赤丸)。過去に行なわれた地表及び山上での実験結果も示す。10 GeV/c 以下ではミュオンの崩壊とエネルギー損失の影響が無視できないため観測地点の高度によって流束に違いが出る。