

論文の内容の要旨

論文題目 Precise Measurements of Low Energy
Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra
following a Solar Field Reversal
(太陽磁場の反転期における低エネルギー
宇宙線陽子・ヘリウムスペクトルの精密測定)

氏名 志 風 義 明

宇宙から地球に降り注ぐ宇宙線の約 90%は陽子、約 10%はヘリウムが占めている。従って、宇宙線陽子・ヘリウムの流束やエネルギースペクトルは、宇宙線物理学に於いて最も基礎的かつ重要な基本量である。エネルギースペクトルの形は、宇宙線の源の情報や伝播過程の歴史を含んでいる。また、太陽活動の変動の影響を受けて変化する低エネルギーに於ける流束は、惑星間空間での宇宙線伝播を理解するために不可欠となる情報である。

宇宙線陽子・ヘリウムのエネルギースペクトルは、過去にも幾つかのグループによって測定されてきた。ところが、与えている流束の絶対値はグループによって差異が大きい。この宇宙線陽子・ヘリウムのエネルギースペクトルを正確に決定することが必要不可欠である。

太陽活動による宇宙線強度に対する影響 (solar modulation) は約 10GeV 以下に現れ、低エネルギー側ほどその影響の度合いが大きい。特に 1GeV 以下のエネルギー領域は太陽活動の周期による経年変化を調べる上で非常に興味深い領域である。一方、1GeV 以下のエネルギー領域においては大気による 2 次生成陽子の割合がエネルギーの低下に伴い急増し、その割合の見積りが補正後の結果に大きく影響する。その補正に広く利用される計算も太陽活動極大期と極小期に対してしか行われていない。また、その計算自体の信頼度も充分には検討されていない。このため、中間期も含めた宇宙線強度の推移についての研究に困難があった。

本研究では太陽活動の極小期から極大期へかけて同一測定器で収集した連続観測データを基に、BESS(Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) 実験の気球上昇中に各高度で得られた低エネルギー陽子データとの比較により、

- [1] 大気による 2 次生成陽子に関する数値計算を評価し、大気頂上での宇宙線陽子流束の信頼度を向上させ、
- [2] 同一の系統誤差を含むという観点からデータとして一貫性のある solar modulation の 1 次宇宙線陽子・ヘリウムに対する影響を経年変化として示す、

ことを目的としている。その結果、BESS 実験で精密観測されている反陽子と合わせて、長らく望まれていた反陽子/陽子の比の経年変化を、特に、太陽磁場の極性がプラス期からマイナス期へ反転する 2000 年の太陽活動極大期において観測し、charge dependent solar modulation のデータを与えることを目的とする。

過去の測定で用いられた測定器は、宇宙線の飛跡を記録できる領域が狭く、測定点も少いという弱点を持っていた。このために、測定器に入射した粒子が測定器中で相互作用を起こしてしまうと、解析の段階で見つけ出すことが難しく、大きな系統誤差を含んでいる恐れがあった。

BESS 99

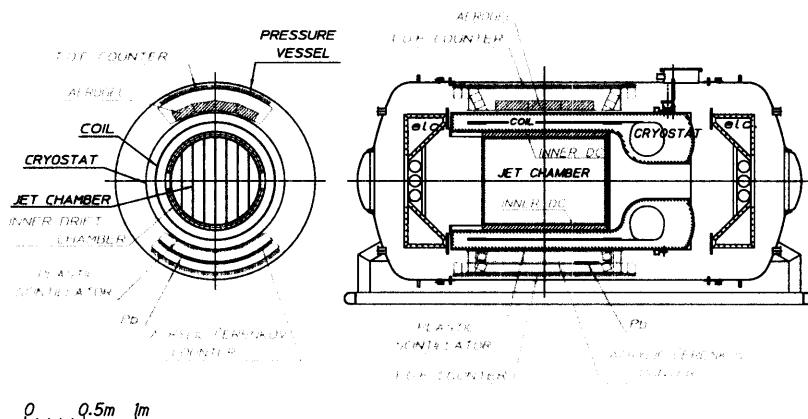


図 1: BESS 測定器。超伝導ソレノイドの内外に磁気硬度測定用ドリフトチェンバー (JET Chamber)、トリガー用ドリフトチェンバー (Inner/Outer Drift Chamber)、粒子速度・エネルギー損失測定用シンチレーションカウンタ (TOF Counter) を同軸円筒状に配置した、大立体角・高精度のスペクトロメータ。

宇宙線中の反粒子観測を目的とする BESS グループでは、宇宙線中の荷電粒子を観測するために、大気の影響の少ない高空へ大型気球を用いて打ち上げることのできる超伝導ソレノイド型スペクトロメータ BESS を開発した。BESS 測定器 (図 1) は、薄肉超伝導ソレノイドを使用することによってほぼ均一な強磁場を作り出し、その中に置かれたドリフト・チェンバーによって宇宙線粒子の磁気硬度 (magnetic rigidity) を精密に測定することが可能である。BESS 測定器の最大の特徴は、飛跡を記録できる磁場が均一な領域が広いことと、飛跡を記録する点が最大で 28 点に及ぶことである。この特徴を生かして、磁気硬度の絶対値を正確に測定することが可能である。また、チェンバー出力信号の記録には、出力波形を記録できるフラッシュ型 ADC を用いているために、検出器内で宇宙粒子線が反応を引き起こし、複数の飛跡を残したとしても識別は容易である。また、同軸円筒状に配置した検出器は面積立体角を正確に見積もることが容易である。これらの特徴により、系統誤差を小さく押えることが出来る。さらに、大きな面積立体角は高速のデータ収集システムと相俟って、一日の飛翔実験で約一千万事象もの膨大な情報を記録することを可能にし、統計誤差も小さくできる。

BESS 測定器 (図 1) の立体角は過去の同種の測定器に比較して数十倍を有している。その大立体角に対応した高速データ収集システムは測定器内のチェンバーを通過する粒子のヒットパターンや飛跡の曲率及びプラスチックシンチレータでのエネルギー損失の情報を基に記録すべきイベントかどうかを予めプログラムされた記録方針に従ってオンラインで判断し記録するようになっている。これを利用して、気球上昇時に低エネルギー陽子に重点をおいてデータ収集することにより、大気での 2 次生成陽子の補正計算の評価に重要な低エネルギー側で統計精度

の大幅な向上が達成された。

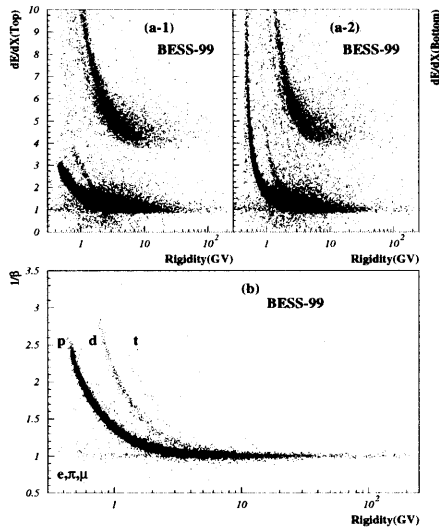


図 2: (a-1,2): 測定器上部 (a-1)・下部 (a-2) のシンチレーションカウンタにおけるエネルギー損失 (dE/dx) と磁気硬度 (Rigidity) の分布。(b): 速度の逆数 ($1/\beta$) と磁気硬度 (Rigidity) の分布。

1997 年から 2000 年の 4 年間に渡り、地磁気の影響の少ない北磁極近くのカナダ北部、Lynn Lake($56^{\circ}48'N, 101^{\circ}25'W$)、rigidity のカットオフ ≈ 0.4 GV) において 4 回の飛行実験を行った。浮遊高度は上空 36km に達し、残留大気は $5g/cm^2$ 以下であった。4 回の飛行実験で記録した総事象数は、 7.1×10^7 にのぼった。1999 年からは気球上昇中の限られた時間内に低エネルギー陽子のデータが効率良く得られている。

データ解析に於いては、入射粒子の測定器中の物質との相互作用による散乱や二次粒子の生成により起こり得る粒子の誤認を防ぐため、幾つかの条件を課して事象を選別した。

条件を通過した事象については、粒子のシンチレーションカウンタ内に於けるエネルギー損失や粒子の速度 対 磁気硬度の分布は図 2 のようになる。図中に示した点線は、陽子を選び出すために施した選別条件を示している。

また、99 年に測定された各高度での陽子のエネルギースペクトルを利用して数値計算との比較により大気での 2 次生成陽子成分を評価した。

数値計算は、Papini et al. で用いられている連立輸送方程式により行った。連立輸送方程式では、電荷 2 以上の重粒子をそれと等価なヘリウムとしてヘリウムの扱い、ヘリウム、1 次陽子、2 次陽子、2 次中性子の 4 種類について天頂角成分を 0 度から 85 度までの 5 度刻みで 18 区分することで 72 の連立輸送方程式を構成している。連立輸送方程式を Runge-Kutta 法で解くことにより、観測される陽子のエネルギースペクトルを算出できる。この計算では、2 次陽子は、電荷 2 以上の重粒子からの寄与、エネルギーの高い粒子からの寄与、重粒子の spallation からの寄与、及び、recoil や evaporation からの寄与が考慮されている。

この論文では、Papini の計算方法の精度を確認するために大気深度 $5g/cm^2$ での陽子のエネルギースペクトルをインプットとして計算を $20g/cm^2$ まで行った。計算で得られた陽子のエネルギースペクトルと 99 年の上昇中の測定で得られた各高度での陽子のエネルギースペクトルとの比較からこの計算方法の精度を $5g/cm^2$ の変化に対して 5% 以内で観測値を再現していることを確認した。

大気頂上でのスペクトルを求めるために、 $5g/cm^2$ でのスペクトルを再現するように、大気頂上でのスペクトルを動かしつつ繰り返し計算を行った。その際、大気頂上でのスペクトルをエネルギーで細分化し、そのデルタ関数的インプットに対するレスポンス関数を組み合わせることで計算を簡略化した。

2 次ヘリウムについては、空気核からの recoil の寄与と宇宙線 C/N/O と空気核との相互作用で生じる fragmentation の寄与が考えられるが、前者については、過去の宇宙線の原子核乾板を用いた実験結果により、2 次ヘリウムと 2 次陽子との生成比が $100MeV/n$ 以上で約 0.01 でほとんど変化しないといえることから、得られた 2 次陽子の結果を用いて求める。宇宙線 C/N/O

と空気核との相互作用からの寄与については、multiplicity と cross section から輸送方程式を用いて計算した。

こうして得られた宇宙線陽子・ヘリウムのエネルギースペクトルをそれぞれ図3・4に示す。また、横軸を Kinetic Energy や Rigidity にしてのヘリウム対陽子比の経年変化が得られた。

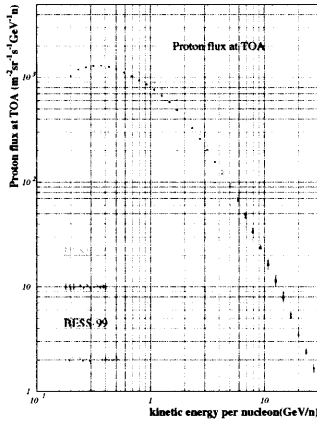


図 3: BESS 測定器で測定した宇宙線陽子のエネルギースペクトル

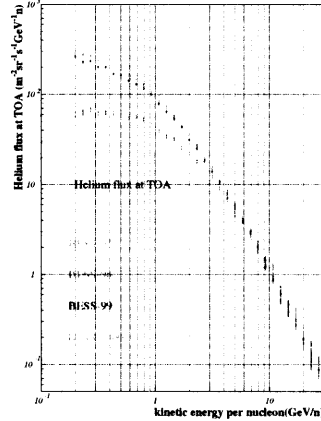


図 4: BESS 測定器で測定したヘリウムのエネルギースペクトル

rigidity 横軸で見た時の比に変化が見られないことは、同じ Rigidity つまり同じ曲率半径を持つ粒子ならば、太陽活動による rigidity スペクトルの変化の割合が粒子の種類に依らないことを示しており、モジュレーションが rigidity によって支配されていることを示すデータであると言える。

4 年間に測定されたエネルギースペクトルは、太陽活動の影響を受けにくい高エネルギー領域では、統計誤差の範囲内で良く一致している一方で、低エネルギー領域では、太陽活動の変化の影響を受けて流束が変化する様子が見られる。特に、太陽活動極大期で太陽磁場の極性がプラス期からマイナス期へ反転した 2000 年のデータは大きな変化を示している。

図5は、Bieber らが charge dependent solar modulation モデルで予言した反陽子と陽子の強度 (上)、及び、反陽子/陽子の比 (下) の tilt angle 依存性を示し、極大期かつ反転期の 2000 年には、陽子強度の急激な減少が予言されていた。本論文では、Bieber ら予言した太陽磁場の極性反転期における陽子流束の急激な変化を観測で確認した。

現在解析中の BESS 実験で同時観測された反陽子のデータと合わせて、反陽子/陽子比の経年変化を追うことにより、charge dependent solar modulation モデルの詳細な議論をするための基盤となる重要なデータを提供した。

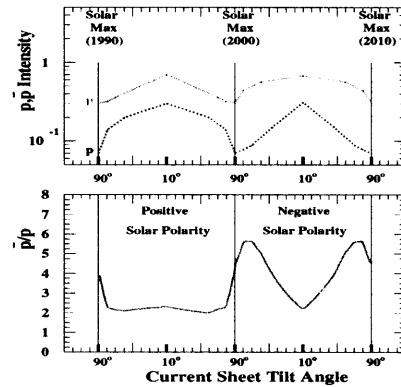


図 5: Bieber によって予言された反陽子と陽子の強度 (上)、及び、反陽子/陽子の比 (下) の tilt angle 依存性