

図 1: BESS-2000 測定器.

荷依存性は質量の大きく異なる電子と陽子やヘリウムの核子の比の時間変化として調べられてきたが、BESS 実験では質量の等しい陽子・反陽子の同時測定が可能であり、より純粋に電荷依存性を研究することができる。

本研究では、太陽活動極大期に BESS 実験によって測定された宇宙線反陽子流束の測定結果を基に、太陽変動及びその電荷依存性について詳しく議論・検証し、太陽系内での低エネルギー宇宙線への理解を深めると共に、宇宙線反陽子の起源に迫ることを目的とする。また、2000 年までに 2000 例を越える反陽子事象を観測し、今や精密測定となった宇宙線反陽子流束の測定において支配的な系統誤差となっていた BESS 測定器反陽子検出効率の絶対較正についても詳細に記述する。

図 1 に示した BESS 測定器は、極低頻度な宇宙線成分の探索と様々な一次宇宙線の精密測定を行うことを目的として提案され、発展してきた気球搭載型の超伝導スペクトロメータである。薄肉超伝導ソレノイドの採用は、大面積・大立体角、一様な性能という他の反粒子探索実験にはないユニークな、そして本質的な利点をもたらした。粒子識別は“質量の同定”という最も確実な方法で行われており、薄肉超伝導ソレノイドと共に、BESS 測定器の大きな特徴となっている。なお、質量の再構築は、磁場中 (1 T) での粒子飛跡から運動量と電荷を、TOF ホドスコープから粒子速度を測定することによって行われている。測定器はさらに閾値型のアエロゲルチェレンコフカウンタ (Aerogel) を搭載し、反陽子識別可能領域の大幅な拡大を実現している。

一方、これまでの反粒子探索実験において薄肉超伝導ソレノイドが採用されなかったのは、入射粒子に対して不可避な透過物質量が存在するためであり、ヘルムホルツ型の磁石を採用している他実験に比べ透過物質量が大きくなることは避けられない。このため、より大きな測定器内相互作用による損失の補正を必要とし、反陽子検出効率に対して最大 15 % の系統誤差を評価している。我々は測定器の粒子検出効率を、GEANT/GHEISHA に基づくモンテカルロシミュレーション (BESS MC) によって評価している。BESS MC には測定器の詳細な物質量分布や現実的な応答が含まれており、さらに、反陽子原子核間の相互作用断面積には過去の実験データを再現するように変更したものが用いられている。しかしながら、二次粒子の振舞いや測定器の応答に対する不定性が検出効率に与える影響を精度よく推定することは難しく、特に低エネルギー領域では、相互作用による損失が支配的な系統誤差の原因となっている。

99 年に KEK の 12 GeV PS (K2 エリア) にて行った BESS 測定器のビームテストは、反陽子ビームを用いた検出効率の直接測定によって、その系統誤差の大幅な削減を目指したものである。図 2 に、BESS 測定器ビームテスト時の K2 ビームラインのセットアップを示した。ビームラインには、4 枚のトリガーカウンタ、2 台のドリフトチェンバー、1 台のアエロゲルチェレンコフカウンタを配置した。これらの測定器によって、BESS への入射粒子の識別、入射位置・エネルギーの決定を十分な精度で行うことができる。BESS へのビームの入射位置としては、透過物質量

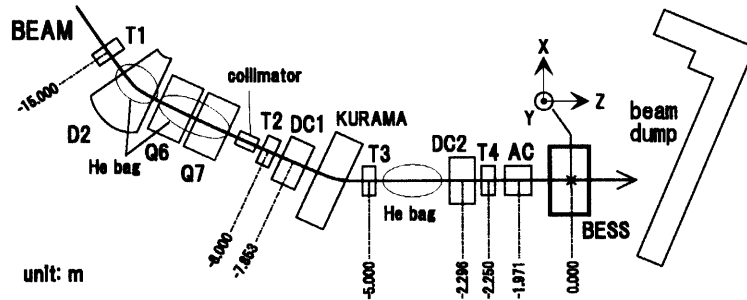


図 2: BESS ビームテスト時の, K2 ビームラインのセットアップ

や通過領域の観点から宇宙線の入射を代表することができるような 3 点を図 3 に示すように選び (CFG1-3), それぞれの位置に対して, BESS 測定器直上で 1 GeV 以下の運動エネルギーを持つ反陽子, 陽子を入射し, データを取得した

図 4 に, このビームテストの結果得られた BESS 測定器検出効率の直接測定結果を示す. ビーム起源の系統誤差 (ビームダンプの影響, 偶発性粒子混入の影響など) については詳細に検討して見積もっている. 図には, 同じ条件で生成した BESS MC の結果も示しておいた. 約 0.2 GeV 以下でビームテスト結果と MC の検出効率に大きなずれが見られるが, この領域は急激に検出効率に変化するところであり, ビームエネルギーの決定に伴う系統誤差が原因である可能性が高い. それ以上のエネルギーでは, 陽子・反陽子とも, 非常に良く一致しており, データと MC の間の差は, 検出効率に対して相対的に反陽子で 3 %, 陽子で 2 % 以内に押さえられている. さらに, ビームテストの結果を用いて, BESS MC の詳細な理解, 検証を行い, 検出効率の決定に対して GHEISHA が十分に信頼できることを確認した. また, MC に含まれている物質や測定器の記述についても検証した. この結果, 反陽子の検出効率に伴う系統誤差が, 測定器直上で, 0.16 - 1.0 GeV のエネルギー範囲で 5 % 以内に押えられていることを確認した. また, 陽子についても, 0.4 - 1.0 GeV の範囲で 2 % 以下に押えられていることが示された. BESS 測定器は年々改良されているが, 質量の同定による粒子識別に代表される測定器の特徴が保たれていること, 及び BESS MC の信頼性に対する詳細な検証が行われたことから, ここで得た結果は過去および将来 (南極での長期フライトも含む) の反陽子流束の測定にも適用可能である.

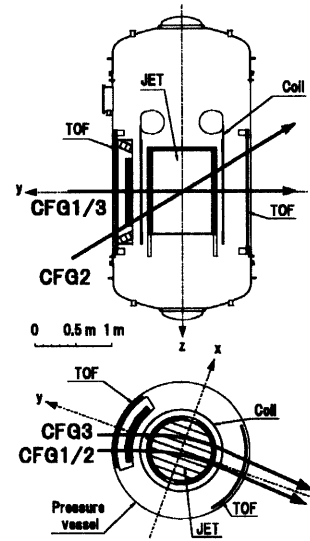


図 3: CFG1-3 それぞれの, BESS 測定器への反陽子ビーム入射位置.

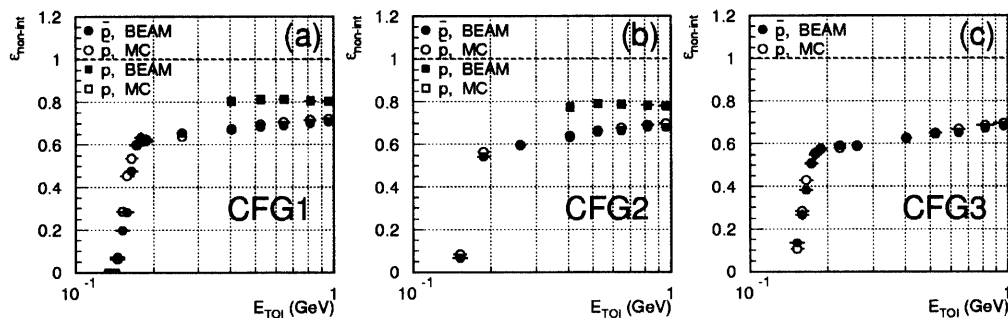


図 4: (a) CFG1, (b) CFG2, CFG3 における, 反陽子, 陽子検出効率の直接測定.

図5に、太陽活動極小期の97年の結果と共に、99年、2000年の反陽子・陽子比を示した。反陽子陽子は共に絶対流束として測定しており、その後比の形を取って示している。反陽子、陽子は質量の同定によって識別し、上述の検出効率絶対較正の結果を用いて大気頂上での流束計算を行った。流束に対する系統誤差も詳細に推定している。

二次起源反陽子と宇宙線陽子はスペクトラムの形と電荷の符合において異なる。電荷依存性を組み込んだモデル(ドリフトモデル)によると、これらの効果は太陽極性が正のときは相殺する方向に、極性が負のときは強め合う方向に働く。従って、極性が正の期間の反陽子・陽子比はほぼ一定で、極性反転に際して急激な上昇を示すことが期待される。図中の破線、一点差線、実線は、それぞれ、正極性における太陽活動極小期、正極性における太陽活動極大期、負極性における太陽活動極大期における Bieber 等の計算結果である。それぞれの線が、ほぼ 97(破線), 99(一点差線), 2000年(実線)のフライト時期に対応する。一方、電荷依存性を含まない球対称なモデルによると、比の変化にはスペクトラムの違いのみが寄与することになる。よって、球対称なモデルによる 99年と 2000年のフライト時における反陽子・陽子比は図中の点線のように予測され、極性反転前後の比の変化は電荷依存性を含むモデルの予測より小さく押えられる。我々の得た結果は 2000年に急激な上昇を示しており、ドリフトモデルの予測により合致している。一方、図6には、93年から 2000年までの反陽子・陽子比の経年変化を ≈ 0.3 (四角), ≈ 1.0 (丸), ≈ 1.9 GeV (星)のエネルギーについて、銀河間での値で規格化して示した。図中破線がドリフトモデル、点線が球対称モデルの予測である。ここでもドリフトモデルとの全体的な一致が見られる。また、モデルパラメーターや銀河間での流束の異なるドリフトモデルも、定性的に同様な振舞いを予測している。

BESS 実験は 93年の初飛行において低エネルギー宇宙線反陽子の存在を証明し、その後の測定器の改良と合わせて 2000年までに 2000 事象を越える反陽子を検出し、太陽活動の極小期から極大期までの流束の経年変化の測定に成功している。99年から 2000年にかけての太陽活動極大期には太陽極性反転に伴う反陽子・陽子比の急激な上昇をとらえ、太陽変調の電荷依存性についての決定的なデータを提示した。さらに、太陽活動極小期から極大期までの広いエネルギー領域における反陽子・陽子の絶対流束の同時測定は、太陽変調のモデルをより深く研究するために非常に重要なデータとなる。また、低エネルギー反陽子の起源を探索する上でも、太陽変調の詳細な理解は不可欠である。特に、一次起源反陽子はソフトなスペクトラムが予想され、太陽活動によって大きく影響を受けるため、太陽変調の総合的な理解は、今後より精密に一次起源成分を探索していく上で欠くことのできない非常に重要な情報である。

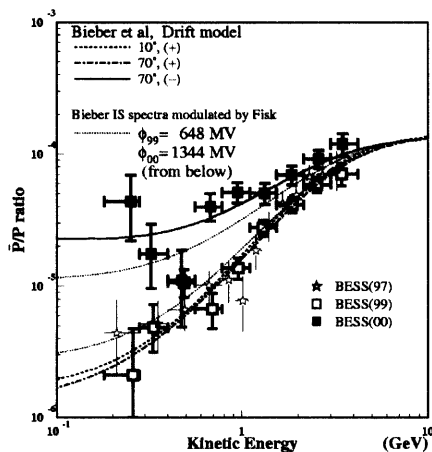


図5: 1997, 1999, 2000年における、反陽子陽子比スペクトラムの測定。

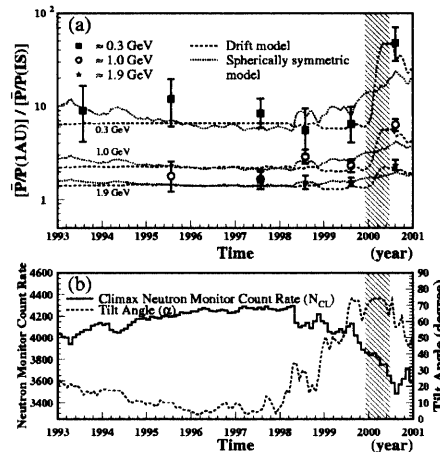


図6: 太陽活動極小期から極大期における、反陽子陽子比の経年変化。ハッチは磁極反転の時期を表す。