

論文の内容の要旨

論文題目 Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum at solar minimum with a long-duration balloon flight in Antarctica

(南極周回気球実験による太陽活動極小期の宇宙線反陽子スペクトラム測定)

氏名 坂井 賢一

宇宙線反陽子エネルギースペクトルの精密観測および宇宙線反物質の探索は、初期宇宙における素粒子描像の理解を深める上で重要な役割を果たす。しかし、これらの宇宙線は他の宇宙線粒子と比較してその流束が極端に少なく、測定には高精度な粒子識別能力を持つ測定器と、大面積立体角・長時間の観測が不可欠である。BESS 実験では大面積立体角を有する超伝導スペクトロメータを気球に搭載し、1993 年の実験開始から現在まで計 10 回のフライトを成功させ宇宙線反陽子、陽子・ヘリウムなどの精密測定、反ヘリウム探索を行ってきた。

宇宙線内の反陽子の主な起源は、6GeV を超える一次宇宙線(陽子)と星間物質(陽子)の衝突により生成される二次起源と考えられている。宇宙線伝播モデルから予測される二次起源反陽子のスペクトルは 2GeV 付近に鋭いピークを持ち、低エネルギーになるにつれて、衝突時の運動学的な理由により反陽子の生成確率が低下する。一方、一次起源反陽子は運動学的な抑制を受けない為に、低エネルギー領域の成分が顕著に現れる可能性がある。初期宇宙の激しい擾乱により形成される原始ブラックホール(PBH)の蒸発過程で、Hawking 放射により放出される反陽子は、一次起源反陽子の有力候補の一つであり、その流束は低エネルギー領域で平坦なスペクトルを有すると予測される。

以前の太陽活動極小期に得られた反陽子流束(BESS'95+'97)は、低エネルギー領域において二次起源モデルよりも平坦な構造をしていた。これは PBH 起源反陽子の存在を示唆していたが、データの統計精度が十分ではない上に、モデルの不定性も大きく、結論を導くには至らなかった。

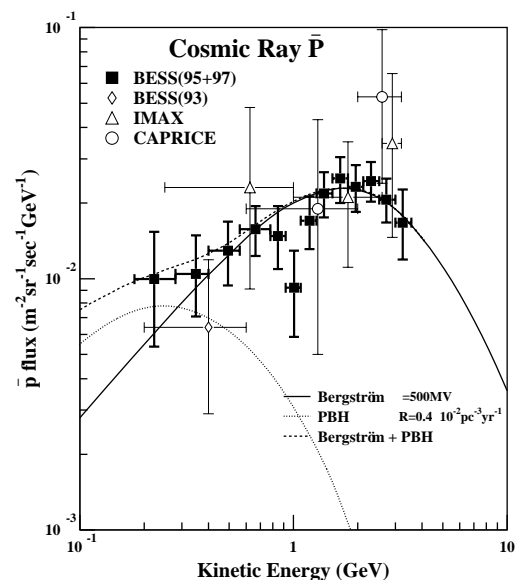


図 1 BESS'95+'97 反陽子流束と PBH 起源の予想スペクトル(点線)

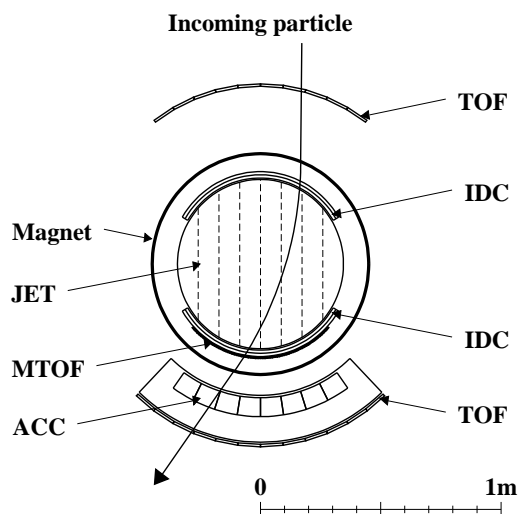


図 2 BESS-PolarII 測定器概念図

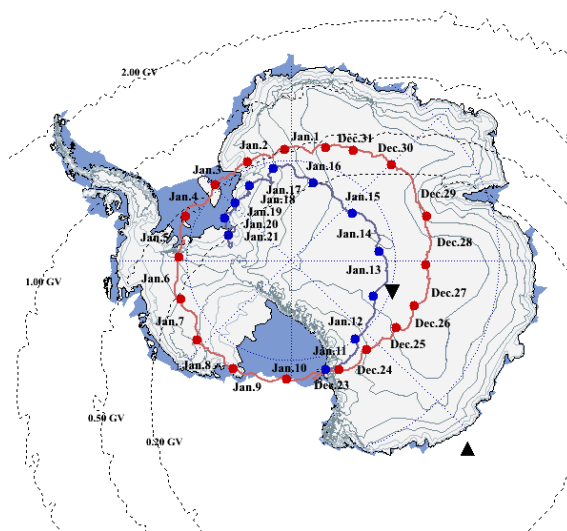


図 3 BESS-Polar II フライト軌跡

BESS-Polar 実験の研究目的は、統計精度をあげた反陽子流束を測定する事で、BESS'95+'97 観測結果から示唆されている一次起源反陽子の存在を検証し、結論を導く事にある。研究目標を達成する為の手段は、「高精度かつ大面積立体角を有する検出器」と「南極周回による長時間観測」、「太陽活動極小期」の三つの条件を満たす事で、圧倒的な統計量の宇宙線事象を検出する事にある。BESS 実験から BESS-Polar 実験への移行に際し、1 日観測から 10 日間以上の連続観測への観測時間長期化と極低エネルギー反陽子を検出する為の物質量の大幅削減が行われた。2004 年 12 月に実施された BESS-Polar I 実験の結果を踏まえて、BESS-Polar II 実験では、連続観測の更なる長期化 (20 日間以上)、検出器の性能向上、構造体の改良が、測定器の全面的な新開発により達成された。図 2 に測定器概念図を示す。

太陽活動極小期である 2007 年 12 月から 2008 年 1 月にかけて実施された南極周回飛翔実験 BESS-Polar II では、高度約 36km で 24.5 日間の連続観測を行い、46 億宇宙線事象を記録する事に成功した。得られたデータは、前回太陽活動極小期のデータ (BESS'95+'97) の約 14 倍の統計量 (<1GeV) に匹敵する。

フライト中、安定したデータ取得が行われる一方で、中央飛跡検出器の高電圧が不安定になる事態が発生した。この問題は運動量測定精度の悪化を招いたが、高電圧の不規則な時間変動に対応する較正方法を開発する事で、BESS-Polar II 実験で取得された 90% 近くのデータにおいて、従来と同等の性能を獲得した。質量同定から総数 7997 個の反陽子識別に成功し、太陽活動極小期の流束が得られた (図 4)。

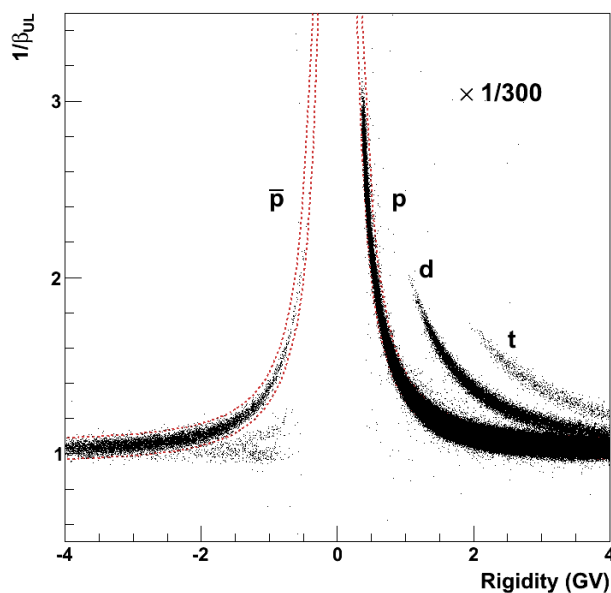


図 4 BESS-Polar II 実験における反陽子識別図 (反陽子数:7997 個)

BESS'95+'97と同様に太陽活動極小期に観測された BESS-Polar II 反陽子流束は、その統計量の違いだけでなく、BESS'95+'97の低エネルギー領域での平坦な構造に対し鋭い下降勾配を示すなどの違いが存在している(図5)。BESS-Polar II 反陽子流束を用い、研究目的の物理も含め、以下の3つの議論を行った。

- (A) 二次起源モデルとの比較
- (B) 宇宙線伝播モデルの考察
- (C) 一次起源反陽子の評価

(A) 二次起源モデルとの比較

宇宙線反陽子の主成分と考えられている二次起源反陽子は、次のモデル計算により導かれる。一次宇宙線陽子が銀河内を伝播している過程において、銀河磁場による拡散、対流、星間ガスによる加速を受けながら、衝突反応により反陽子を生成する。そして地球近傍で観測される全ての銀河宇宙線は太陽圏内において太陽磁場の擾乱により変調を受ける。二次起源反陽子モデルは、銀河内伝播の物理過程を記述する宇宙線伝播モデルと、太陽活動の影響を記述する太陽変調モデルの結果を掛け合わせた物となる。図6は、代表的な二次起源反陽子モデルと BESS-Polar II 反陽子流束の比較を示す。それぞれの二次起源反陽子モデルでは、仮定している宇宙線伝播モデルと太陽変調モデル、また各種反応断面積などの設定値が違うにもかかわらず、BESS-Polar II 反陽子流束は様々な二次起源反陽子モデルと良い整合性を示した。

(B) 宇宙線伝播モデルの考察

全体として良い整合性を示した二次起源反陽子モデルの中において、流束形状の違いに着目し、各二次起源反陽子モデルが採用している宇宙線伝播モデルの違いについて考察を行った。太陽活動極小期の宇宙線反陽子に対する太陽磁場の擾乱の効果が非常に小さく、太陽変調モデルの違いが見えにくい事を前提に、二次起源反陽子モデルの低エネルギー成分と BESS-Polar II 反陽子流束の比較を行った。その結果、二次起源反陽子モデルの中でも、低エネルギー反陽子の過剰成分

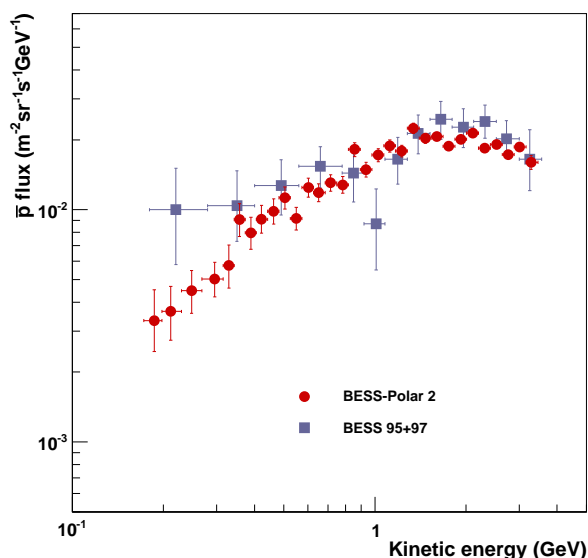


図5 BESS-Polar II 反陽子流束

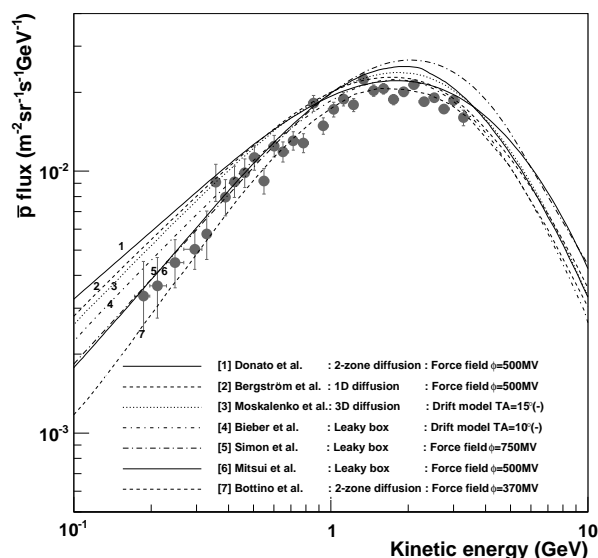


図6 二次起源反陽子モデルとの比較

を含まないモデルの方が観測結果とより良い整合性を有する事が判明した。図 8 は、非弾性散乱によるエネルギー損失により、低エネルギー反陽子の主成分になりえる Tertiary 反陽子の寄与を抑制したモデルの方が、整合性が良い事を示す。

(C) 一次起源反陽子の評価

二次起源反陽子モデルからの過剰として議論される一次起源反陽子、特に低エネルギー領域においてその寄与が顕著に現れる可能性がある PBH 起源の反陽子流束の評価を行った。評価方法は、BESS-Polar II 反陽子流束から、二次起源反陽子モデルより計算される流束を差し引き、その差分を説明できる PBH 起源反陽子流束の絶対量を見積もり、蒸発率 \mathcal{R} で記述する。従って、PBH 起源反陽子流束の評価結果は、二次起源反陽子モデルの選択に依存する。二次起源反陽子モデル不定性の影響を考慮する為に、数種の二次起源反陽子モデルについて計算を行い、PBH の蒸発率 \mathcal{R} の上限値を求めた。その一例を、図 7 に示す。BESS-Polar II 反陽子流束から予想される PBH 起源反陽子流束は赤破線で示してある。蒸発率 \mathcal{R} の確率密度関数を確認する事で、以下の結論が導かれた。

BESS'95+'97 の低エネルギー反陽子流束の過剰を説明できるレベル、即ち蒸発率 $\mathcal{R} = 3.6 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}$ で蒸発する PBH を起源とする一次起源反陽子は確認されず、統計精度を一桁以上高めた BESS-Polar II 実験から上限値 $\mathcal{R} = 1.0 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}$ (90% C.L.) が得られた。

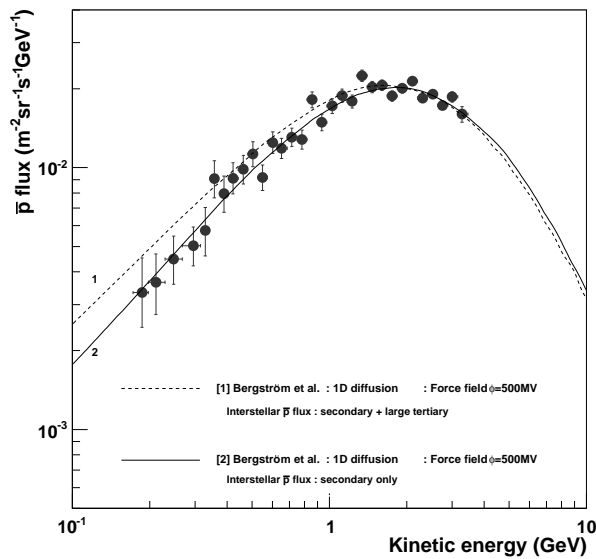


図 8 BESS-Polar II 反陽子流束と二次起源反陽子モデルの比較: [1]Tertiary 反陽子の寄与が大きいモデル [2]Tertiary 反陽子の寄与を抑制したモデル

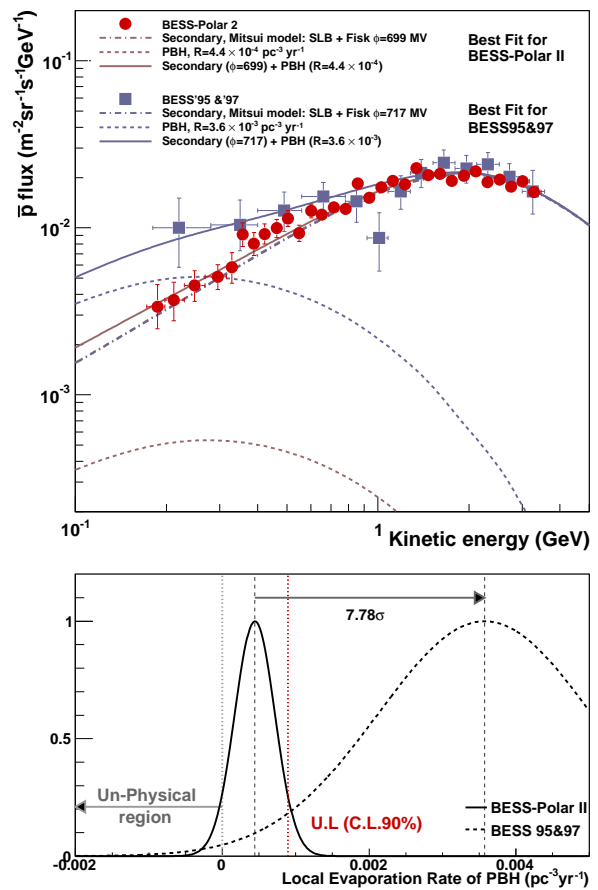


図 7 [上]BESS-Polar II 観測結果と BESS'95+'97 観測結果から予想される PBH 起源反陽子流束 [下]PBH の蒸発率 \mathcal{R} の確率密度関数