

BESS 実験による宇宙線反粒子観測結果

NASA/Goddard Space Flight Center Code661

坂井 賢一 佐々木 誠

kenichi.sakai@nasa.gov makoto.sasaki@nasa.gov

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

吉村 浩司

koji.yoshimura@kek.jp

2013 年 (平成 25 年) 3 月 2 日

1 はじめに

昨年は、宇宙線が発見されてから 100 年ということで宇宙線業界はいろいろなイベントで大いに賑わったが、BESS 実験にとっても大きな節目となる年であった。反陽子流束の精密測定と反ヘリウム探索について最終結果を報告し、実験の当初から掲げてきた目的を 4 半世紀をかけてようやく達成することができた。本稿では、その長い道のりを振り返りつつ、反陽子と反ヘリウムの最終結果を報告する。

2 BESS 実験の始まり

BESS 実験が誕生する直接の契機となったのは、1980 年頃、アメリカ、ソ連のグループにより、宇宙線反陽子の観測結果が初めて報告されたことである [1, 2, 3]。報告された反陽子流束は標準的な宇宙線伝播モデルから予測される（一次宇宙線が星間ガスとの衝突により二次的に反陽子を生成する）ものよりも大きく、特に Buffington らの結果は数桁も上回る衝撃的なものであった (図 1)。この結果を説明するような様々なモデルが提唱されたが、中でも注目を浴びたのは、超対称性粒子で構成された暗黒物質が対消滅するというモデルであった。

当時、加速器実験で超対称性粒子の探索を行っていた故折戸周治氏は、これにいち早く目をつけて、反粒子を観測する実験を考案していた。一方、アメリカでは宇宙線研究者が結集し、宇宙ステーションに大型のスペクトロメータを建設する“ASTROMAG”計画が提案され、日本からは薄肉超伝導マグネット技術の第一人者である山本明氏はその議論に加わっていた。そして、折戸氏のグループが加速器実験で培ってきた測定器技術と山本氏の開発した薄肉超伝導マグネットが運命的に出会い、超

伝導スペクトロメータ BESS が誕生することになったのである。1987 年に日本で開かれた ASTROMAG ワークショップで、BESS 実験の原型が提案された [4](図 2)。そこで折戸氏は『10 日間の南極周回フライトで反陽子を 50 万個観測し、反ヘリウムは 10^{-8} まで探索することが可能である』と述べている。アクセプタンスおよび検出効率が若干大きく見積もられ、また、反陽子の予測値が Golden, Buffington らの高いフラックスをもとに計算された事を考えると、驚くべき精度で 25 年後の成果を見越していたということになる。もちろん、その頃はそんなに時間がかかるとは思われていなかっただろうが。

その数年後、東京大学、KEK、宇宙研、NASA、ニューメキシコ大学、(のちに神戸大学、メリーランド大学、デンバー大学) による、日米の BESS コラボレーションが正式に誕生し、実験を目指して準備をすすめることになった。

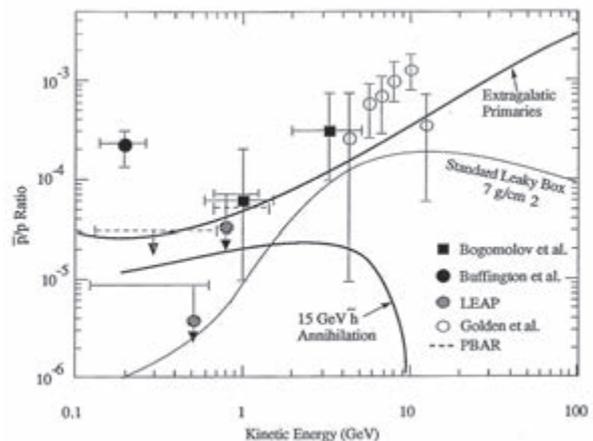


図 1: 80 年代の反陽子観測状況

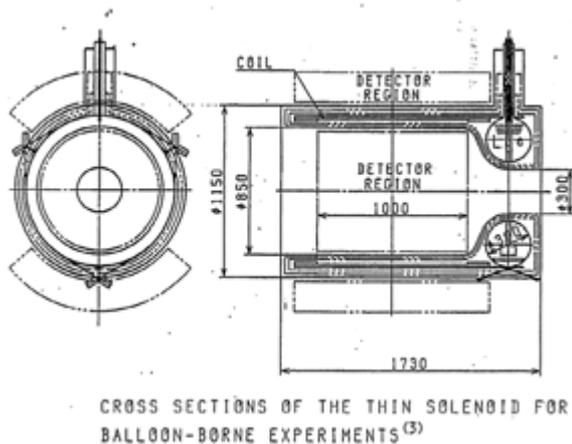


図2: BESS測定器の最初のアイデア (ASTROMAGワークショップ1987)



図3: 宇宙科学研究所三陸気球観測所でのテストフライト風景(1988):実験の立ち上げに尽力した、折戸, 山上, 野崎, 吉田, 安楽(敬称略)の若かりし姿が見られる。

3 北米でのフライトに成功

BESS測定器の基本コンセプトは、薄肉超伝導ソレノイドと大型飛跡検出器を同軸に配置し、高精度な運動量測定、高性能な粒子識別をおこない、従来の数十倍のアクセプタンスを実現している。これを、上空では直径200 m近くにまで膨らむ大気球により残留大気がほとんどない(地上の約0.5%)高空に上げて、宇宙から降り注ぐ宇宙線を大気の影響のほとんどないところで観測するというプロジェクトである。地磁気に巻き付いて遮蔽される低エネルギー粒子を観測するために、磁極に近い場所で観測を行い、0.1 GeVから100 GeVまでの宇宙粒子線を精度よく観測し、特に反陽子、反ヘリウムなどの、宇宙線に微量に含まれるかもしれない反粒子を観測

することにより、宇宙での素粒子現象を探求することを目的としている。

実験を始めた時は、気球実験に関する知識、ノウハウは全くなく、宇宙科学研究所(現JAXA/ISAS)の故山上隆正氏が率いる大気球グループに一から教えていただき、三陸気球観測所において二度のテストフライトにより鍛えていただいた(図3)。気球実験は「一発勝負のばくち」とよく言われるが、どんなに綿密な準備をしても、天候、風、あらゆる条件がそろわないと、実験を実施できない。また、自然の中での実験なので、常に不測の事態(衝撃、熱、電池、真空環境、通信不良)が起こる可能性がある。また、一度打ち上げてしまうと、リモートで制御できることは限られている。常にいろいろな可能性を予期し、それに備えた準備をしておき、不測の事態に関しては臨機応変に対応するしかない。起こりうることはすべて起こりうると思って十二分のプロテクションが必要である。(三重のプロテクションは破られる。野崎氏談)

当初は1991年に初フライトをする予定であったが、測定器をカナダに発送する前日に悲劇に見舞われた。発送準備と測定器の整備で作業が錯綜する中で、測定器内部をCO₂-Arガスで置換している際に、誤ってガスの出口を塞いでしまったのだ。間が悪いことに丁度そのとき全員が現場を離れて打ち合わせを行っていた。打ち合わせ中に、ふと折戸氏がいやな予感がするから測定器を見に行くように指示し、大惨事を免れた。あのまま打ち合わせを続けていたら、大爆発を起こしてその後のBESS実験はなかったかもしれない。しかしながら、飛跡検出器の一部が圧力により損傷して、その年のフライトはキャンセルになった。今から思い起こすと、突貫工事のために一重のプロテクションすらかかっていなかった。翌1992年は、カナダへの遠征は実現し実験の準備は完了したものの、日米間の協定がうまく締結できず、フライトはできなかった。2年連続でフライトが不調に終わり、BESSはもうこのまま飛ばないのではないかという噂がたつようになっていた。しかし、我々はあきらめることなく準備を続け、ついに1993年にBESSの最初のフライトが実現した。BESSの誕生から足かけ6年の年月が流れていた。

その後は、測定器の改良を続けながら順調にフライトを重ねていき、気がつけば、1996年を除いて毎年フライトを成功し、北米での9回の観測に成功している。その途中で、非常に残念なことにBESS実験の生みの親である折戸氏が病に倒れられ帰らぬ人となった。だが、彼の遺志は山本氏が率いるBESSのメンバーに引き継がれ、究極の目標である南極フライトへと続いていくことになる。

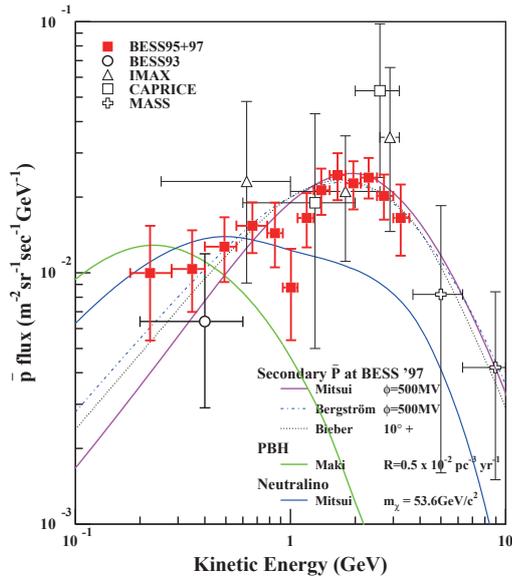


図 4: 前々回の太陽活動極小期で観測された反陽子スペクトル: 衝突起源の反陽子に特徴的な 2 GeV 付近のピークが観測された。低エネルギー領域においては予測よりも平坦になっているように見られる。

4 南極での長時間フライトへ BESS-Polar 実験

低エネルギーの反陽子は太陽風の変調をうけるため、太陽活動が弱い時期しか観測できない。われわれが実験を開始してから初めて迎えた太陽活動極小期、1995 年および 97 年のフライトでは、測定器の大幅なアップグレードを果たして、合計 450 個を超える反陽子を観測し、それをもとに反陽子のスペクトルを得ることができた。得られたスペクトルは 2 GeV 付近に特徴的なピークを持ち、衝突起源の反陽子から予測される流束とよく一致していた (図 4)。しかし、低エネルギーでは予測よりも平坦に見え、あるいは、一次起源の反陽子を示唆している可能性も指摘されたが、統計精度が十分ではなく、結論をだすことはできなかった [5, 6]。

この状況に決着をつけるべく、究極の精度の測定を目指して、南極周回気球飛翔による長時間宇宙線観測 BESS-Polar 実験 [7, 8, 9, 10] を行うことになった。南極点の周りを周回する風に乗せて、2 周回フライトすることができれば、1ヶ月程度の観測時間が得られる (これまでの最高は 3 周回で 55 日)。ただし、従来の BESS 測定器は重量、パワー、観測時間の面で、南極フライトの条件を満たさないため、BESS 測定器のコンセプトはそのままに、新たに BESS-Polar 測定器を開発する必要があった。10 日以上 of 長時間の観測時間の実現と極低エネルギー反陽子を検出するための物質量の削減のため

に、太陽電池、超伝導マグネット、測定器、データ収集装置、ほぼすべての観測装置を、設計から見直して、新たに開発をおこなった。さらに、2004 年 12 月に実施された第 1 回 BESS-Polar 実験 (BESS-Polar I) の結果を踏まえて、第 2 回の 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。

4.1 BESS-Polar II 測定器

図 5 に BESS-Polar II 測定器を示す [11, 12, 13]。

直径 0.9 m の同心円状の極薄肉超伝導ソレノイドで生成された 0.8 Tesla の一様な磁場中には、シリンダー型の中央飛跡検出器 (JET chamber) と、アーク状の Inner Drift Chamber (IDC) を配置している。入射粒子の飛跡の再構成は、最大 52 点の飛跡検出器のヒットをフィットすることにより三次元的に行われ、各点の分解能は JET において r - ϕ 方向 (磁場に垂直) $\sim 150 \mu\text{m}$, z 方向 (磁場に平行) $\sim 35 \text{ mm}$ であり、IDC では、 r - ϕ 方向 $\sim 140 \mu\text{m}$, z 方向 $\sim 800 \mu\text{m}$ である。飛跡検出器の性能として、1 GeV で 0.4% の運動量分解能が得られ、MDR (Maximum Detectable Rigidity) は 240 GV である。最外層にはプラスチックシンチレータからなる Time-Of-Flight (TOF) カウンターがあり、粒子の飛行時間と dE/dx 測定、またトリガー信号を提供する。TOF システムの時間分解能は 120 ps であり、 $1/\beta$ 分解能において 2.5% に相当、そして従来の気球搭載型検出器よりも桁高い $0.23 \text{ m}^2\text{sr}$ という面積立体角を実現している。超伝導磁石と TOF カウンターの間の領域下側には閾値型 Aerogel Cherenkov Counter (ACC) が配置されており、屈折率 $n=1.03$ のシリカエアロゲルを輻射体に用いることにより、反陽子の背景事象である電子・ミュオン粒子を 6100 倍の除去係数で取り除き、約 3.5 GeV までの反陽子識別を可能とする。更に、IDC とソレノイド間に Middle TOF (MTOF) カウンターを配置し、ソレノイド下部でエネルギーを失って透過することができない超低エネルギー粒子の測定を行っている。MTOF の時間分解能は 320 ps であり、測定器の下から上へ通り抜けるアルベドの同定 (磁場による偏向が逆になり、陽子を反陽子に間違える可能性がある) にも利用されている。各測定器の開発時の写真を図 6 に示す。

4.2 第 2 回南極フライト-BESS-Polar II

2007 年 10 月 26 日に、実験メンバーが米国の南極マクマード基地入りして実験準備を開始し、宇宙線を用いての各測定器の最終組み立てと性能評価と調整、断熱

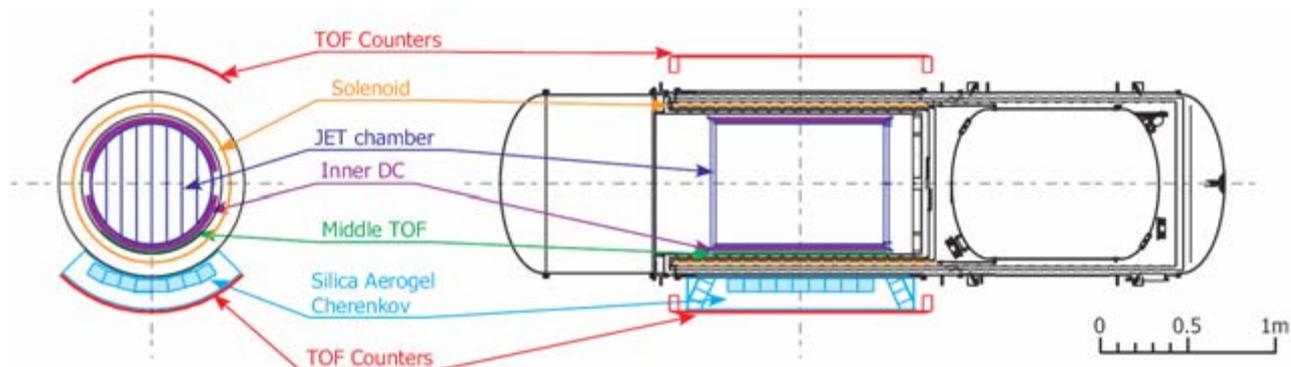


図 5: BESS-PolarII 測定器概念図

保護を経て、11月末に最終噛み合わせ試験（気球制御システムと測定器の整合性チェック）が行われた。2007年12月22日18:27 (UTC) にマクマード基地近くのウィリアムズフィールド (S77-51, E166-40) より打ち上げられた BESS-Polar II 測定器は、南極周回軌道上を約1周 + 3/4 周飛行し、24.5 日間に及ぶ宇宙線観測を達成 (図 7:A, 図 7:B) した後、2008年1月21日09:02 (UTC) にペイロードを気球から切り離し、パラシュートによって緩やかに着地させた。図 8 は BESS-Polar II フライト軌跡を表しており、飛行高度は 34 ~ 38 km (残留大気は平均で 5.8 g/cm^2)、カットオフ Rigidity は 0.5 GV 以下であった。観測された宇宙線は約 47 億イベントに達し、13.6 テラバイトのデータとしてハードディスクに記録された。ハードディスクを含むデータベッセルは 2008年2月3日に着地点 (S83-51, W073-04) より回収された (図 7:C)。しかしながら、測定器本体は南極の冬が近づいていたため、時間切れで回収できず、そのまま、約 2

年間南極の雪原に放置されることになる。

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。幸いリモートで電圧調整を行う事で観測期間中高電圧が落ちることなくデータをとり続けることができた。高電圧の不規則な時間変動に対しては、オフラインで較正方法を開発する事で、特に激しく変動している期間を除いて、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回復することができた。また upper TOF における 20 本の PMT と lower TOF の 24 本の PMT の内のそれぞれの一本の PMT が高電圧制御が不調になり、南極フライト中に電源を落とした。今回の解析においては、安全をみて両側の PMT がいずれも動作しているもののみを使用したため、面積立体角はデザインの 80% になった。

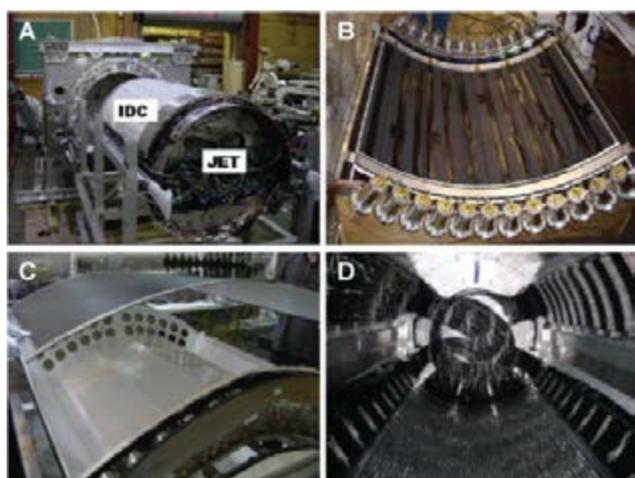


図 6: 開発時の BESS-Polar II 測定器 (A) 超伝導ソレノイドと中央飛跡検出器 JET chamber, Inner Drift Chamber (B) Time-Of-Flight カウンター (C) 閾値型 Aerogel Cherenkov Counter (D) Middle TOF カウンター

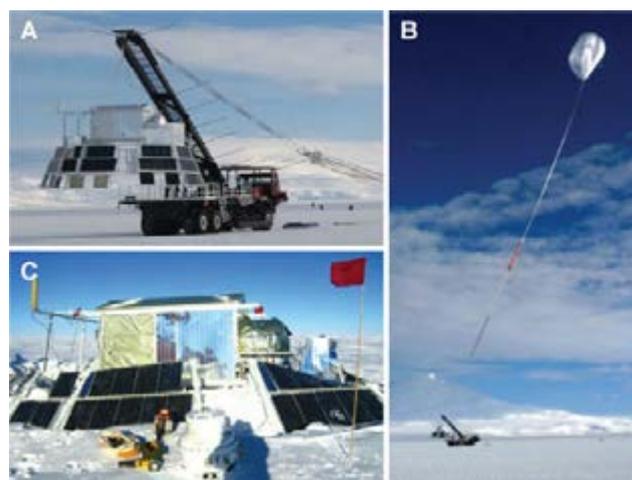


図 7: BESS-Polar II 南極フライトの実験風景 (A) 打ち上げ直前の BESS-Polar II 測定器 (B) 放球の瞬間 (C) 着地点におけるデータベッセル回収時の測定器

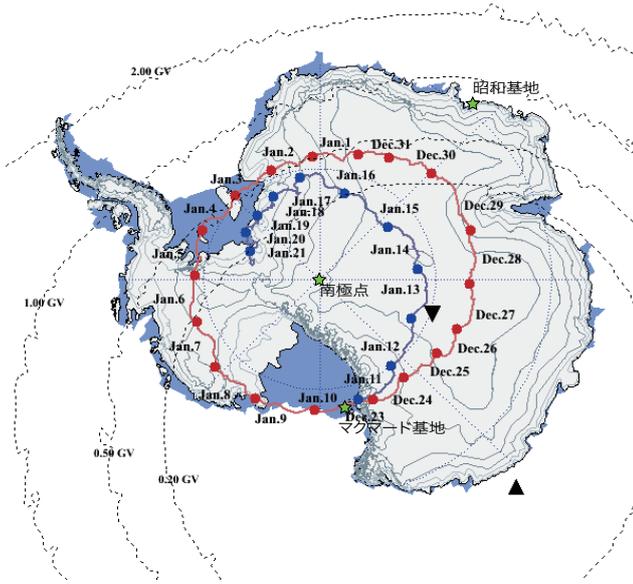


図 8: BESS-Polar II フライト軌跡 外側の軌跡と内側の軌跡はそれぞれ周回軌道一周目と二周目を示す。

5 反陽子流束の精密測定

BESS-Polar II 実験における反陽子解析の研究目的は、究極の精度で反陽子流束を決定する事で、二次起源モデルとの整合性を確認した上で一次起源反陽子の存在を検証し、前々回の太陽活動極小期でのデータでは得られなかった結論を導く事にある。

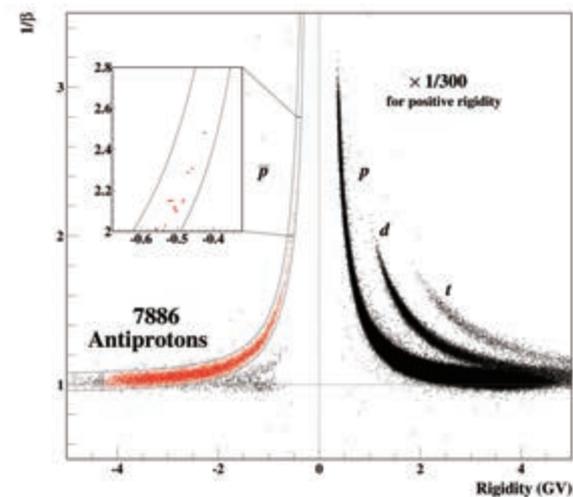


図 9: 粒子速度 ($1/\beta$) と rigidity (R : 運動量 / 電荷) における BESS-Polar II 実験の反陽子事象識別と反陽子の質量バンド。拡大図において、最低エネルギーの反陽子事象を示す。

5.1 反陽子識別

BESS-Polar II 実験で得られた 47 億宇宙線事象のデータは、前回太陽活動極小期のデータ (BESS'95+'97) の約 14 倍の統計量 (<1 GeV) に匹敵する。反陽子識別は、反陽子の明確な検出と入射エネルギーの正確な決定が目的である。相互作用をしていない陽子の事象選択から基準を決定して適用し、総数 7886 個の反陽子を質量同定した。図 9 は、rigidity (R : 運動量を電荷で割ったもの) に対して $1/\beta$ をプロットしたもので、正電荷を持つ陽子と軸対称の位置に負電荷を持つ反陽子が明確に識別された。また、ACC により電子・ミュー粒子の背景事象が除去され、反陽子の検出可能領域を拡大している。背景事象の混入は各エネルギーバンドで 0.0% (0.2-1.0 GeV), 1.0% (1.0-2.0 GeV), 2.3% (2.0-3.5 GeV) と見積もられた。その他の背景事象となりえる、正電荷粒子のなだれこみやアルベド粒子の混入は $1/\beta$, R 分解能により完全に除去をされ、反陽子がアルベド粒子の再入射でない事も地磁気中でのトレースバックにより確かめてある。

5.2 反陽子流束

識別された反陽子事象から、大気直上での反陽子微分流束 (Φ_{TOA}) が以下の式に従って計算される。

$$\Phi_{TOA} dE = (N_{TOI} - N_{atmos}) / \epsilon_{air} / (S\Omega \cdot T_{live}) \quad (1)$$

$$N_{TOI} = (N_p - N_{BG}) / (\epsilon_{det} \cdot \epsilon_{non-int}) \quad (2)$$

ここで、 T_{live} は実観測時間、 N_p , N_{BG} と N_{atmos} はそれぞれ検出された反陽子事象数、反陽子バンド内に混入した電子・ミュー粒子数と大気生成された反陽子数を表す。 $S\Omega$ は測定器の面積立体角、 $\epsilon_{non-int}$ は相互作用損失の割合、 ϵ_{det} は反陽子の検出効率、 ϵ_{air} は大気での生存確率である。 ϵ_{det} は測定器が対称であり、原子核反応を除くと測定器のレスポンスが反陽子と陽子で同じであることを利用して、陽子サンプルを利用して求めている。 $S\Omega$ と $\epsilon_{non-int}$ はモンテカルロシミュレーション (GEANT3, GEANT4) で求めた。反応断面積は BESS 測定器にビームをあてて直接測定したものをを用いた。 N_{atmos} は大気内でのシミュレーション計算により求めた。大気中で生成された反陽子の観測された反陽子事象にしめる割合は $17.6 \pm 2.0 \%$ (0.2 GeV), $27.6 \pm 0.1 \%$ (2.0 GeV) である。

図 10 は、太陽活動極小期に観測された BESS-Polar II 反陽子流束を、前太陽活動極小期に観測された BESS'95+'97 反陽子流束 [6] と PAMELA 実験 [14] による反陽子流束と共に表示している。BESS-Polar II における大幅な統計精度の改善は、1 GeV 以下の領域において BESS'95+'97 の 14 倍、PAMELA の 30 倍にも

及ぶ反陽子事象数が支えている。また、その統計量の違いだけではなく、BESS'95+'97の低エネルギー領域での平坦な構造に対し、BESS-Polar II反陽子流束は鋭い下降勾配を示すなどの違いが存在している。

5.3 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、次の概念に基づいたモデル計算により導かれる[15, 16, 17, 18, 19]。一次宇宙線(陽子, ヘリウム等)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。従って、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10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。全体として、BESS-Polar II反陽子流束は二次起源反陽子モデルと良い整合性を示した。

5.4 宇宙線伝播モデルの考察

今回のデータからは、精度のよいスペクトル形状が得られたため、これを利用してもう少し踏み込んだ考察を行うことが可能となっている。二次起源反陽子を生成するモデル計算においては、一次宇宙線陽子流束, 各種反応断面積, 宇宙線伝播モデルと太陽変調モデルの選択や

設定値に不定性を抱えている。これらは、流束の絶対値を変化させるものとスペクトル形状を変化させるものの二つに大別される。スペクトル形状の違いとして顕著に現れるのは、宇宙線伝播モデルと太陽変調モデルの違いである。そこで、モデル計算された二次起源反陽子流束を、BESS-Polar II反陽子流束のピーク付近(2 GeV)で規格化すると共に、エネルギースペクトルに E_k^{-1} を掛ける事で、各二次起源反陽子のスペクトル形状の違いを浮き彫りにした(図11)。観測結果であるデータは規格化を行っていない。それに加え、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反陽子流束の比較から、宇宙線伝播モデルの考察を行った。図11における斜線バンドは太陽変調の不定性を明示した物で、それぞれMitsui model [20]におけるForce-Field近似, Bieber model [16]におけるドリフト計算により導かれている。太陽活動極小期における太陽変調の不定性の影響は、宇宙線伝播モデルの差異から生じる変動に比べて十分に小さい事を示している。

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。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反陽子の寄与を大きく見積もっているモデル(図11:曲線3)や、ソフトなスペクトルを有するdiffusive reaccelerationモデル(図11:曲線4)では、BESS-Polar II反陽子流束との χ^2 が悪化した。

5.5 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の中で、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原始ブラックホール(Primordial Black Hole: PBH)起源の反陽子流束の評価を行った。宇宙初期の相転位等の激しい擾乱による極短波長のゆらぎによって、非常に小さなPBHが作られた可能性がある。PBHのうち、質量が太陽の 3×10^{-19} 倍程度に相当するものはHawking放射によって現在寿命を迎えているはずであり、爆発的に蒸発する直前に低エネルギーの反陽子を生成すると考えられている。

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 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

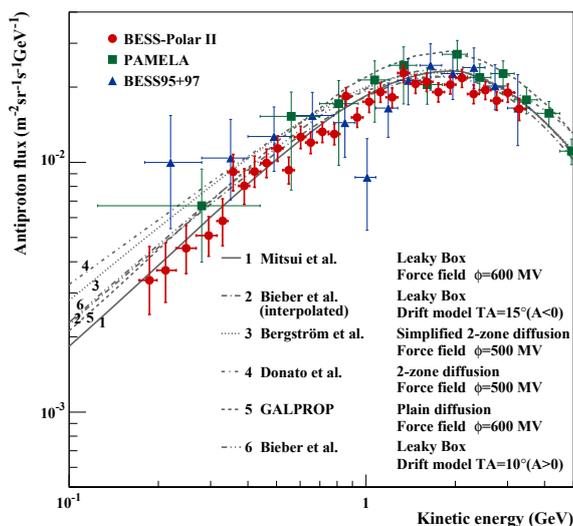


図10: 太陽活動極小期に観測されたBESS-Polar II反陽子流束。前太陽活動極小期に観測されたBESS'95+'97反陽子流束とPAMELA実験による反陽子流束を共に示す。

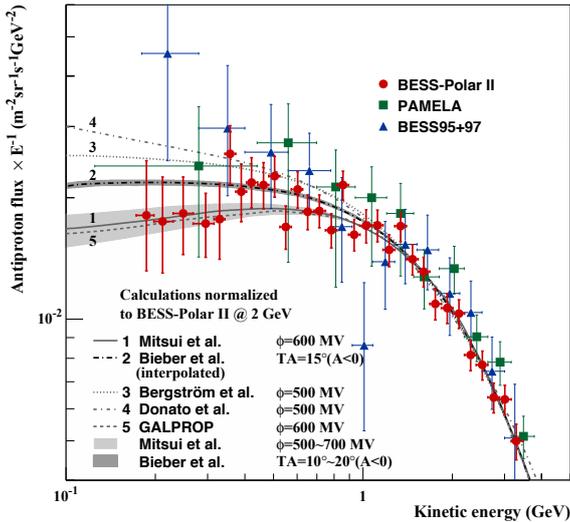


図 11: 二次起源反陽子モデルと反陽子流束の形状比較。低エネルギー領域の反陽子流束形状の違いを明確にするために、計算結果は反陽子流束の固有ピーク ~ 2 GeV で規格化してある。太陽変動による不確定性は、Mitsui model における太陽活動極小期 (500 \sim 700 MV) の領域として、斜線バンドにより示してある。

い、PBH の蒸発率 \mathcal{R} の上限値を求めた。その一例を、図 12 に示す。BESS-Polar II 反陽子流束から予想される PBH 起源反陽子流束は破線 A で示してあり、蒸発率 $\mathcal{R} = 5.0_{-4.0}^{+4.1} \times 10^{-4} \text{pc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ が導かれた。

BESS'95+'97 の低エネルギー反陽子流束の過剰から示唆された蒸発率 $\mathcal{R} = 4.2 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ は、BESS-Polar II 実験の結果から 9σ で否定され、統計精度を一桁以上高めた BESS-Polar II 実験から上限値 $\mathcal{R} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3}\text{yr}^{-1}$ (90% C.L.) が得られた [21]。

6 反物質探索

6.1 反物質と反銀河

反物質の存在は Dirac により予言され、Anderson による宇宙線中の陽電子の発見により確認された。その後、加速器を用いた陽子衝突実験により反陽子の生成が確認され、現在では反ヘリウムの生成までが報告されている。先に示したように宇宙線中においても一次宇宙線と星間物質の衝突により加速器実験同様に反陽子が生成され、そのスペクトルが精密に測定されているが、いまだ電荷 Z が 2 以上の反物質は宇宙線中において確認されていない。この物質と反物質の明らかな非対称性は宇宙論における根本的な問題であるが、ビッグバン直後におこった物質と反物質の対称性の破れにより宇宙の初期段階で反物質は消滅したと考えられている。理論的には反物質で出来た領域が宇宙にまだ残っている可能性がある

が、拡散ガンマ線の観測や宇宙背景放射のゆがみの検証により、観測可能な宇宙にはある程度の大きさを持った反物質で出来た領域は存在しないことが示されている。比較的小さい反物質領域がある可能性はまだ完全に否定されたわけではない。

6.2 反ヘリウム探索

反陽子と異なり反ヘリウムは宇宙線と星間物質の衝突により生成される確率が極めて低いため、宇宙線中に反ヘリウムを観測することが出来れば、それは反物質領域から漏れ出てきたものであると言える。反ヘリウムおよびヘリウムの同定は dE/dx 測定により得られる絶対電荷 $|Z|$ と以下の式で与えられる質量 M により行われる。

$$M^2 = R^2 Z^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right). \quad (3)$$

図 13 に TOF dE/dx を用いた粒子同定の様子を示す。横軸は R^{-1} 、縦軸は TOF dE/dx である。Rigidity が負の領域 (電荷が負)、すなわち反粒子側には電荷 $|Z| = 2$ となるイベントがないことがわかる。しかしながら、 $|Z| = 2$ の粒子の R^{-1} 分布を見てみると (図 14) 0 付近の負の領域にイベントが存在する。これは測定器

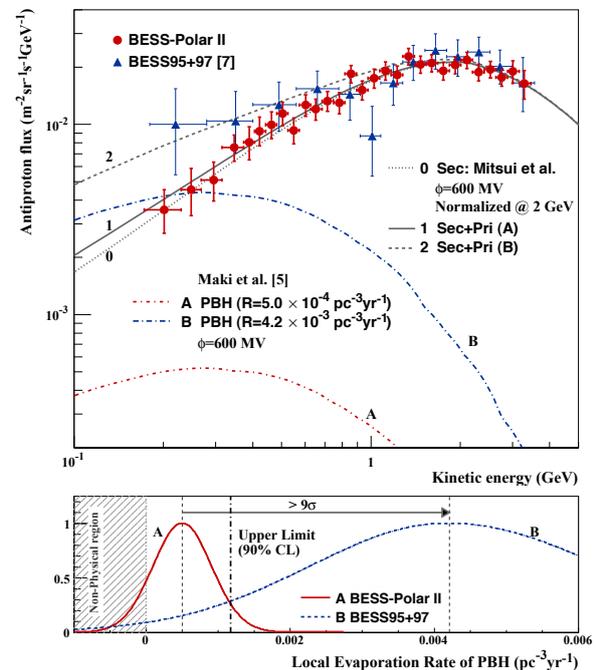


図 12: [上] BESS-Polar II 観測結果 (A) と BESS'95+'97 観測結果 (B) から予想される PBH 起源反陽子流束。Mitsui モデルによる二次起源反陽子流束の計算結果と観測された流束の差分をフィットすることで PBH 起源反陽子流束は計算された。[下] BESS-Polar II 観測結果と BESS'95+'97 観測結果から導かれた PBH の蒸発率 \mathcal{R} の確率密度関数。 \mathcal{R} が負の領域は非物理的。

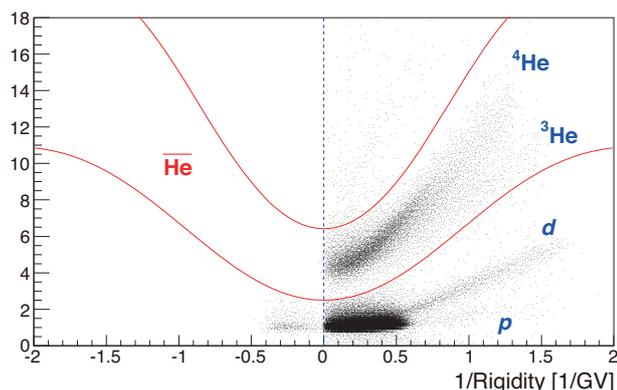


図 13: TOF dE/dx による粒子識別。2つの曲線の内部の粒子 ($|Z| = 2$) を選択。横軸は $1/\text{rigidity}$ ，縦軸は TOF dE/dx 。

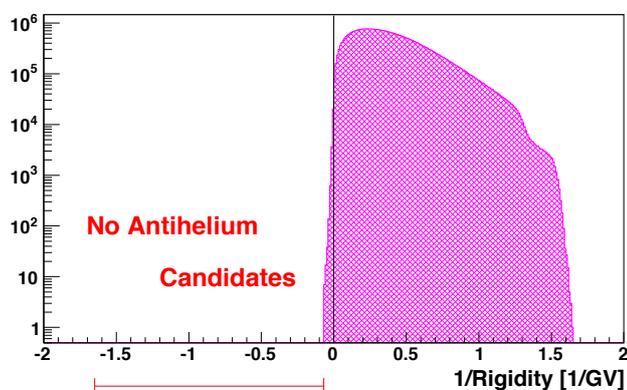


図 14: BESS-Polar II で得られた絶対電荷 $|Z| = 2$ の粒子の R^{-1} 分布。負の領域のイベントは測定器の分解能によるヘリウムのなだれ込みである。

の分解能により正電荷のヘリウムが負の領域になだれ込んだものである。反ヘリウムを探索可能な rigidity 領域は低 rigidity における測定効率の急激な減少と上記のヘリウムのなだれ込みにより制限される。BESS-Polar II では 1.0 から 14 GV の間に反ヘリウムの探索を行ったが、その領域には一例も反ヘリウムイベントは確認されなかった。

図 15 にこれまでの実験で得られた反ヘリウムとヘリウムの存在比の上限を示す。今回 BESS-Polar II で得られた結果より定められた上限値 6.9×10^{-8} はもっとも厳しいものとなっている [22]。現在 AMS-02 による反ヘリウムの探索が行われており、さらなる高感度での探索が期待されている。

7 おわりに

本稿では BESS の集大成とも言える結果を、そこへ至るまでの道のりを含めて報告した。まだ、データ解析は続けられており、解析すべきテーマ（一次宇宙線（陽

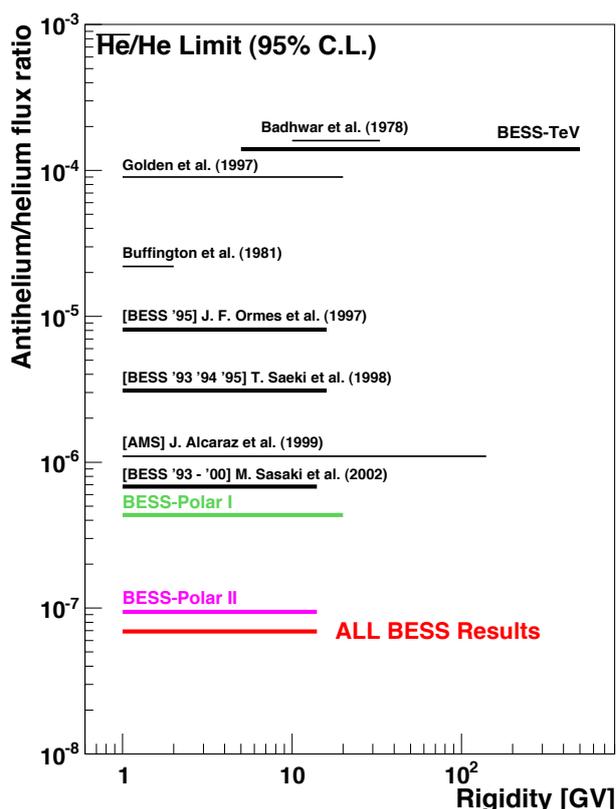


図 15: BESS-Polar II の結果とこれまでに行われてきた実験で得られた反ヘリウム／ヘリウムの存在比の上限。計算に際し、反ヘリウムのスペクトルがヘリウムのスペクトルと同じであることが仮定されている。特定のスペクトルを仮定せずに計算した結果は 25%程度高い値となる。

子、ヘリウム) の精密流束およびその時間変動、反重陽子の探索、軽元素同位体の流束) は残っているが、当初から目的にあげていた二つの大きなテーマについて報告できたのは喜ばしいことである。

測定器自体は、南極の氷原に 2 年間放置されていたが、多大な努力を払って、ほぼ完全な形で回収することができた。現在、NASA ゴダードスペースフライトセンターに送られ、しかるべき次期プロジェクトに備えて、待機している状態である。

実験の立ち上げに尽力された折戸氏は、前々回の太陽活動極小期に得られた反陽子の結果 (BESS'95+'97) を興奮して受け止めるとともに、長時間フライトで決着をつけることに意欲を燃やされていた。その道半ばで倒れられ、クライマックスとなる南極フライトを見ずに、他界されたのは誠に残念なことである。慎んで BESS の結果を捧げたい。彼が今回の結果を見ていたら、なんて言っていたか誠に興味深いものである。

これほど長い間、BESS を続けてこられたのは、毎年入ってくる学生が、気球実験という一発勝負において、それぞれ責任のある仕事を任されて、人生をかけて真剣

に取り組んで成功に導いてきた成果だと思う。BESS をテーマに書かれた博士学位論文は 23 にもおよび、他の加速器実験と比べてもひけをとらない。余談になるが、本記事の執筆者は 3 人とも BESS 実験で学位をとったものであり、そのうち二人は約 15 年を隔てて最初と最後に学位を取ったということを付け加えさせていただきたい。

8 謝辞

最後になりましたが、長い間、BESS 実験にご助力いただき、支えていただいた関係者の皆様、大学、研究所、企業、NASA、CSBF、NSF の方々、また、資金面でのサポートをいただいた文科省、日本学術振興会に心から感謝の意を表します。これまでの成果を故折戸周治氏、故山上隆正氏に捧げます。

参考文献

- [1] R. L. Golden et al., Phys. Rev. Lett., **43** 1196 (1979).
- [2] O. A. Bogomolov et al., International Cosmic Ray Conference, Kyoto, Japan, **1** 330 (1979).
- [3] A. Buffington et al., Astrophys. J., **248** 1179 (1981).
- [4] S. Orito, KEK REPORT, **87-19** 111–123 (1987).
- [5] H. Matsunaga, Phys.Rev.Lett., **81** 4052–4055 (1998).
- [6] S. Orito et al., Phys. Rev. Lett., **84** 1078 (2000).
- [7] A. Yamamoto, Adv. Space Res., **30** 1253 (2002).
- [8] J. W. Mitchell et al., Nucl. Phys. (Proc. Suppl.), **134** 31 (2004).
- [9] T. Yoshida, Adv. Space Res., **33** 1755 (2004).
- [10] K. Yoshimura, Adv. Space Res., **42** 1664 (2008).
- [11] Y. Ajima et al., Nucl. Instrum. Meth., **A443** 71 (2000).
- [12] S. Haino et al., Nucl. Instrum. Meth., **A518** 167 (2004).
- [13] S. Haino et al., Phys. Lett., **B594** 35 (2004).
- [14] O. Adriani et al., Phys. Rev. Lett., **105** 121101 (2010).
- [15] T. Mitsui, Ph.D. thesis, University of Tokyo.
- [16] J. W. Bieber, Phys. Rev. Lett., **83** 674–677 (1999).
- [17] L. Bergstrom, J. Edsjo, P. Ullio, Astrophys. J., **526** 215 (1999).
- [18] F. Donato, Astrophys. J., **563** 172 (2001).
- [19] V. S. Ptuskin, Astrophys. J., **642** 902 (2006).
- [20] T. Mitsui, K. Maki, S. Orito, Phys. Lett., **B389** 169 (1996).
- [21] K. Abe, Phys. Rev. Lett., **108** 051102 (2012).
- [22] K. Abe, Phys. Rev. Lett., **108** 131301 (2012).