

# BESS-Polar: 南極周回超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の探索

KEK 山本 明, NASA-GSFC John W. Mitchell for  
BESS Collaboration

## 1 はじめに

BESS 気球実験 (Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) は、大気球・飛翔実験の為に開発された大立体角、高精度超伝導マグネットスペクトロメータ (Fig. 1) による一次起源反粒子、反物質の探索を通して、初期宇宙における素粒子像を探ることを目的としている (Fig. 2) [1-5]。また、太陽活動の変化による宇宙線変調効果に着目しつつ、大気上空における宇宙線精密観測を系統的に推進している。東京大学、KEK、ISAS/JAXA、NASA、メリーランド大、デンバー大による日米協力実験として研究を推進している。太陽活動極小期にあたる 2007~2008 年に亘り、南極周回気球による長時間宇宙線観測実験(第二回)を実現し、高度 34~38 km の南極周回軌道上において 24.5 日間に亘る宇宙線観測に成功した。フライト中、飛跡検出器の動作が不規則に時間変動する問題が発生したが、観測後のデータ解析のなかで、適正な較正方法を開発する事で、期待する性能を獲得している。周回軌道一周半に亘る観測後、南極点から約 1,000 km の高地雪原に着地し観測データが無事回収された。宇宙線観測、実データサイズは、第一回観測(2004年)の 6.2 倍となる 13.5 TB に達し、

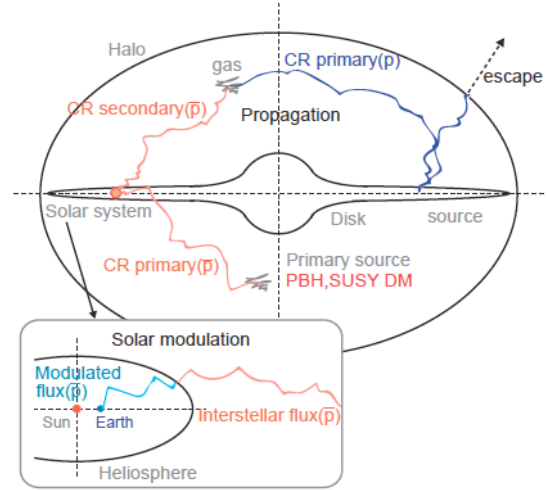


Fig. 2. Cosmic-ray antiproton production and the propagation in the universe.

宇宙線観測イベントは、5 倍を上回る 47 億イベントに達している。BESS-Polar II 実験のまとめを Polar I 実験との比較し、Table 1 に示す。なお、スペクトロメータ本体は、2 年後の 2009 年に、健全な形で回収された。3 年以上に亘る解析では、前回の太陽活動極小期 (平成 7~9 年) に、低エネルギー領域 (<1GeV) において観測された、モデル計算よりも僅かに平坦なスペクトル [6] が、今回の太陽活動極小期での、高い統計精度での観測で再現されるかが、大きな焦点となった。

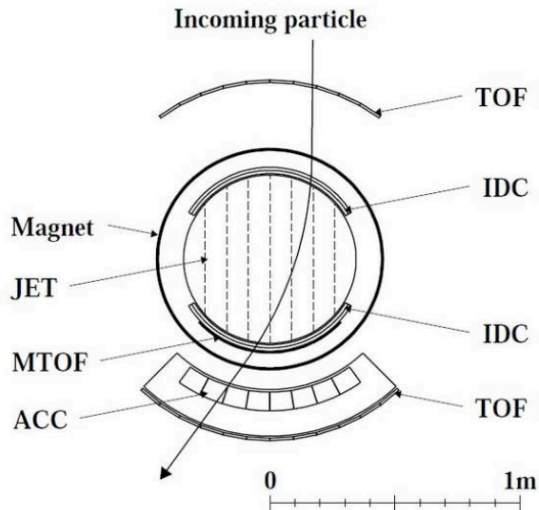


Fig. 1. Cross section of the BESS-Polar spectrometer

Table 1. Records from BESS-Polar -I and -II experiments.

	Polar I [Ref. 7]	Polar II [Ref. 8]
Observation (hrs)	8.5	24.5
Altitude (km)	37 - 39	34 - 38
Res. air (g/cm <sup>2</sup> )	4 - 5	4.5 - 8
Data size (TB)	2.1	13.5
Obs. events (10E9)	0.9	4.7
Trigger rate (kHz)	1.4	3.4
Live-Time Fraction	0.8	0.77

## 2 BESS-Polar II のデータ解析 低エネルギー反陽子流束の精密観測

質量同定による明解な解析結果として、総数 7886 個の反陽子検出に成功し、それまでの全フライトにおける観測数を大きく上回る統計を実現した (Table 2)。

Table 1. Low energy antiproton measurements with BESS and BESS-Polar flights.

Year	Energy-range	# p-bar
BESS-93	0.18 - 0.5 GeV	6
BESS-94	0.18 - 0.5	2
BESS-95*	0.18 - 1.5	43
BESS-97*	0.18 - 3.6	415
BESS-98	0.18 - 4.2	384
BESS-99	0.18 - 4.2	668
BESS-00	0.18 - 4.2	558
BESS-02 (TeV)	0.18 - 4.2	166
BESS-04 (Polar-I)	0.10 - 4.2	1,520
BESS-07*(Polar-II)	0.17 - 3.5	7,886

\* Observation at solar minimum period.

BESS-Polar II 反陽子流束は、1GeV 以下の領域において、前回太陽活動極小期のデータ (BESS' 95+97) の約14 倍の統計量に匹敵する。2007-2008年太陽活動極小期における流束を Fig. 3 に示す [8]。

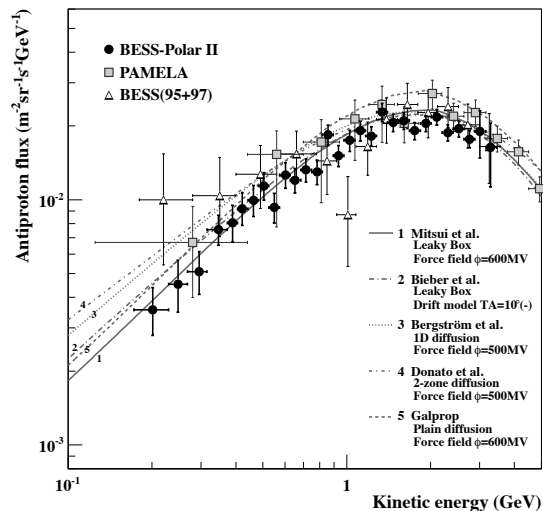


Fig. 3. Antiproton flux observed in the BESS-Polar II experiment, compared with the previous flights at solar minimum (95+97) and various secondary p-bar model calculations. [7]

反陽子流束の観測結果をもとに、二次起源、一次起源反陽子について考察を深めた。二次起

源反陽子のモデル計算は、一次宇宙線である陽子が、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生成をする過程 (宇宙線伝播モデル) と、太陽圏内における太陽磁場の擾乱による変調 (太陽変調モデル) の効果をかけ合わせたものとなる。Fig. 3 から、BESS-Polar II 反陽子流束観測結果が、二次起源反陽子流束の様々なモデル計算と全体として良く整合する事が分かる。更に、二次起源反陽子モデル計算の比較において、流束形状の違いに着目し、宇宙線伝播モデルの違いについて考察を進めた。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い事を確認したうえでの考察において、二次起源反陽子モデルの中でも、低エネルギー反陽子の副次的な過剰成分を含まないモデルが観測結果とさらに良い整合性を有する事を示した。その具体例として、非弾性散乱によるエネルギー損失により、二次起源反陽子の低エネルギー成分を増加させる反応 (Tertiary 反応) を抑制しているモデルが

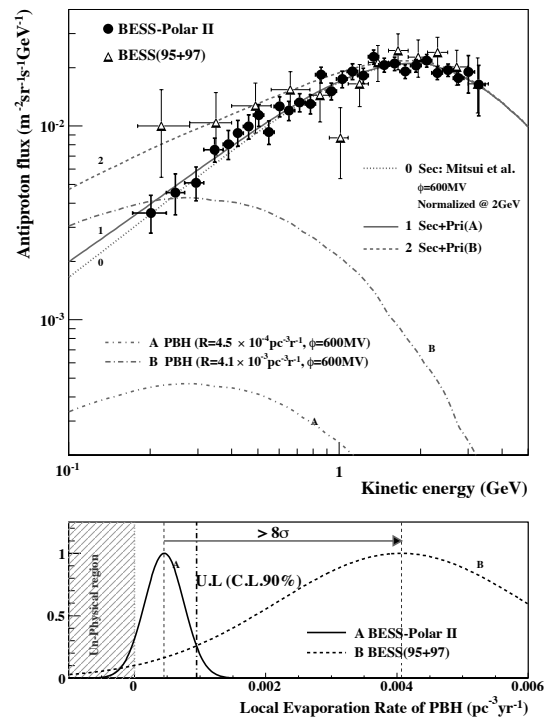


Fig. 4. Primary antiproton fluxes from evaporating PBHs expected by fitting with BESS-Polar II and BESS95&97 observation respectively (top). Distribution of the explosion rate of PBH ( $R$ ) calculated with Mitsui secondary antiproton flux (top), for BESS-Polar II and BESS95&97 (bottom) [8].

BESS-Polar II 実験結果とより良い整合性を持つ事を明らかにした。

宇宙起源反粒子探索のバックグラウンドとなる二次起源は反陽子流束評価を基に、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。BESS-Polar II 反陽子流束観測結果から、二次起源反陽子モデル計算を引いた差分を説明できるPBH 起源反陽子流束の絶対量を見積もり、PBH の蒸発率Rの上限値を計算した。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Rの上限値を求めた。その例を、Fig. 4 に示す。蒸発率Rの確率密度関数を確認する事で、以下の結論に到達した。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 $R \sim 4 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}$  で蒸発するPBH を起源とする一次起源反陽子は観測されず、この結果、統計精度を一桁以上高めたBESS-Polar II 実験から精度を高めた結果として、 $R \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{pc}^{-3} \text{yr}^{-1}$  (90% C.L.) を上限値とする結果を得た。

### 反ヘリウムの探索

BESS-Polar 実験では、長時間フライトの特色を活かし、反物質としての反ヘリウム探索を

飛躍的に進展させた。全フライトを通したヘリウム流束の統計は  $4 \times 10^7$  イベントに達し、反ヘリウムは観測されず、BESS のこれまでの全フライトの統計量から、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値  $6.9 \times 10^{-8}$  を得た。BESS 実験における反ヘリウム探索の結果を Fig. 4 に示す。これは、BESS 実験以前のデータに対して、探索感度を二桁以上高める上限値を達成した [9]。

### 3 まとめ

BESS実験は、日米国際協力実験として1993年に第一回観測を実現して以来、18年に亘る歴史を重ねた。このなかで、南極での観測2回を含み、合計11回の気球飛翔・宇宙線観測実験に成功した。宇宙起源反粒子の探索および宇宙線の絶対流束の精密観測データの提供、太陽活動による変動を観測し、精密な実験結果を提供し続けてきた。その集大成として、2007年度の第二回南極周回気球実験では、南極周回軌道、高度34~38kmにおいて24.5日間に亘る観測を実現し、宇宙線観測総数、47億イベントの観測量を得た。3年以上を費やして観測データの解析が進み、太陽活動極小期における反陽子粒束を決定するとともに、原始ブラックホール等の宇宙(一次)起源反陽子の存在可能性に対して、厳しい上限値を導いた。また、BESSのこれまでの全フライトの統計量から、1~14 GV の領域で、反ヘリウム/ヘリウム上限値  $6.9 \times 10^{-8}$  を導く成果を得た。

まとめとして、BESS-Polar II 実験では圧倒的な統計精度で低エネルギー反陽子スペクトルを決定し、宇宙線伝播モデル、初期宇宙の素粒子描像の精密な理解に不可欠な基礎データを提供する事に貢献した。

### 謝辞:

BESSおよびBESS-Polar 実験は、1993年以来、ISAS および NASA を日米政府間協力の代表機関とする国際共同宇宙科学実験として推進されてきました。これまでの御指導、御支援に心より感謝申し上げます。

現在の BESS-Polar 実験は、ISAS, KEK, 東京大学、神戸大学、NASA-GSFC, University of Maryland, Denver University の7機関の協力により推進されて、科学研究費、特別推進研究および基盤研究(S, A, B) の御支援を頂きました。深く感謝申し上げます。

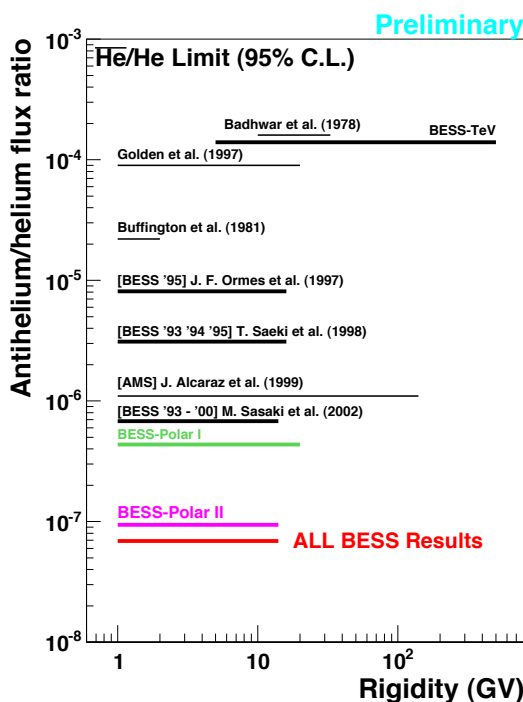


Fig. 4. Progress in upper limits of Antihelium/helium flux ratio with BESS-Polar II and all BESS experiments [9].

BESS-Polar 実験は、以下のメンバーにより構成されている。

BESS Collaboration:

A. Yamamoto<sup>a\*</sup>, J.W. Mitchell<sup>b</sup>, K. Yoshimura<sup>a</sup>, K. Abe<sup>c,1</sup>, H. Fuke<sup>d</sup>, S. Haino<sup>a,2</sup>, T. Hams<sup>b,3</sup>, M. Hasegawa<sup>a</sup>, A. Horikoshi<sup>a</sup>, A. Itazaki<sup>c</sup>, K.C. Kim<sup>e</sup>, T. Kumazawa<sup>a</sup>, A. Kusumoto<sup>c</sup>, M.H. Lee<sup>e</sup>, Y. Makida<sup>a</sup>, S. Matsuda<sup>a</sup>, Y. Matsukawa<sup>c</sup>, K. Matsumoto<sup>a</sup>, A.A. Moiseev<sup>b</sup>, Z. Myers<sup>b,4</sup>, J. Nishimura<sup>f</sup>, M. Nozaki<sup>a</sup>, R. Orito<sup>c,5</sup>, J.F. Ormes<sup>g</sup>, K. Sakai<sup>f</sup>, M. Sasaki<sup>b,6</sup>, E.S. Seo<sup>e</sup>, Y. Shikaze<sup>c,7</sup>, R. Shinoda<sup>f</sup>, R.E. Streitmatter<sup>b</sup>, J. Suzuki<sup>a</sup>, Y. Takasugi<sup>c</sup>, K. Takeuchi<sup>c</sup>, K. Tanaka<sup>a</sup>, T. Taniguchi<sup>a,8</sup>, N. Thakur<sup>g</sup>, T. Yamagami<sup>d</sup>, and T. Yoshida<sup>d</sup>

<sup>a</sup>*High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan, akira.yamamoto@kek.jp*

<sup>b</sup>*National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC), Greenbelt, MD 20771, USA*

<sup>c</sup>*Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan*

<sup>d</sup>*Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA), Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan*

<sup>e</sup>*IPST, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA*

<sup>f</sup>*The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033 Japan*

<sup>g</sup>*University of Denver, Denver, CO 80208, USA*

文献:

1. A.Yamamoto *et al.* “BESS and its future prospect for polar long duration flights”, *Adv. Space Res.* 30 (5), 1253–1262, 2002.
2. K. Yoshimura, Cosmic-ray antiprotons and antinuclei. *Adv. Space Res.* 27 (4), 693–703, 2001.
3. T. Yoshida, *et al.* “BESS-Polar experiment”, *Adv. Space Res.* 33 (10), 1775-1762, 2004.
4. K. Yoshimura *et al.* “BESS-Polar experiment”, *Adv. Space Res.* 42(10), 1664-1669, 2008.
5. A.Yamamoto and J. Mitchell *et al.* ”Search for primordial antiparticle with BESS”, to be published in *Adv. Space Res.* (2011).
6. S. Orito *et al.* “precise measurement of cosmic-ray antiproton spectrum”, *Phys. Rev. Lett.* 84, 1078-1081, 2000.
7. K. Abe *et al.* “Measurement of the cosmic-ray low-energy antiproton spectrum with the first BESS-Polar Antarctic flight”. *Phys. Lett. B* 670, 103–108, 2008.
8. K. Abe *et al.* “Measurement of cosmic-ray antiproton spectrum at solar minimum with a long-duration balloon flight in Antarctica” submitted to *Phys. Rev. Letter*, and arXiv available at: <http://arxiv.org/abs/1107.6000>
9. M. Sasaki *et al.* presented at *ICRC-2011, Beijing, Aug., 2011.*