

## 超伝導マグネットスペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測

### —BESS国際共同気球実験(1)—

#### 測定器及び気球飛翔実験

山本 明<sup>\*1</sup>・吉田哲也<sup>\*2</sup>・安楽和明<sup>\*1</sup>・稲葉 進<sup>\*1</sup>・井森正敏<sup>\*2</sup>・上田郁夫<sup>\*2</sup>・音羽真由美<sup>\*2</sup>  
折戸周治<sup>\*2</sup>・木村誠宏<sup>\*1</sup>・佐貫智行<sup>\*2</sup>・鈴木純一<sup>\*1</sup>・田中賢一<sup>\*1</sup>・西村 純<sup>\*3</sup>・野崎光昭<sup>\*4</sup>  
槇田康博<sup>\*1</sup>・松永浩之<sup>\*3</sup>・松本 浩<sup>\*4</sup>・元木正和<sup>\*4</sup>・矢島信之<sup>\*3</sup>・山上隆正<sup>\*3</sup>・吉村浩司<sup>\*2</sup>  
Robert Golden<sup>\*5</sup>, Barbara Kimbell<sup>\*5</sup>, Jon Mitchell<sup>\*6</sup>, Jonahtan Ormes<sup>\*</sup>,  
Donald Righter<sup>\*6</sup>, Robert Streitmatter<sup>\*6</sup>

## Balloon-Borne Experiment with a Superconducting Magnetic Rigidity Spectrometer (BESS)--(1)

### -- BESS Spectrometer and Balloon Flights --

By

Akira YAMAMOTO, Tetsuya YOSHIDA, Kazuaki ANRAKU, Susumu INABA, Masatoshi IMORI,  
Ikuo UEDA, Mayumi OTOBA, Shuji ORITO, Nobuhiro KIMURA, Tomoyuki SANUKI,  
Jun-ichi SUZUKI, Ken-ichi TANAKA, Jun NISHIMURA, Mitsuaki NOZAKI, Yasuhiro MAKIDA,  
Hiroyuki MATSUNAGA, Hiroshi MATSUMOTO, Masakazu MOTOKI, Nobuyuki YAJIMA,  
Takamasa YAMAGAMI and Koji YOSHIMURA, Robert Golden, Barbara Kimbell,  
Jon Mitchell, Jonahtan Ormes, Donald Righter and Robert Streitmatter

**Abstract:** Balloon-borne Experiment using a superconducting magnetic rigidity spectrometer is being carried out as a NASA-ISAS cooperative project. The spectrometer features to have a large geometrical acceptance of 0.4 m<sup>2</sup>sr based on a concept of transparent solenoidal magnet and horizontally cylindrical layout of the spectrometer, and it may realize a highly sensitive search for cosmic ray antiparticle search. This paper describes the spectrometer and progress of the balloon-borne spectrometer as the part(1).

キーワード：宇宙線、反粒子、反物質、気球実験、超伝導マグネット、スペクトロメーター

### 概 要

超伝導マグネット・スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測・気球実験 (Balloon Borne Experiment with a Superconducting Magnetic Rigidity Spectrometer) は、宇宙起源反粒子

\* 1 高エネルギー物理学研究所    \* 2 東京大学    \* 3 宇宙科学研究所    \* 4 神戸大学  
\* 5 New Mexico State University    \* 6 NASA Goddard and Space Flight Center

探索及び宇宙粒子線の精密観測を目的とする日米・国際共同実験として推進されている[1-7]。NASAおよび宇宙科学研究所を相互の代表機関とし、東京大学、高エネルギー物理学研究所、神戸大学、ニューメキシコ州立大学が研究に参加している。日本側グループがスペクトロメーター本体を準備し、アメリカ側グループが気球の飛翔、制御を担当している。この実験計画は、1980年代にNASAを中心に検討されたASTROMAG計画の準備研究に於て、ソレノイド型超伝導マグネット・スペクトロメーターの構想を提案し、基礎開発を行なった事から、その第一段階となる気球実験としてスタートした[8-9]。この実験協力が1987年にスタートして以来6年の準備期間を経て、1993年に第一回の気球飛翔実験に成功した。1994年には第二回、1995年には第三回・気球飛翔実験に成功した。実験は、北磁極に近いカナダ北部のマニトバ州リンレークからアルバータ州ピースリバーにかけて実施され、合計約50時間の科学観測に成功し、実験機器も無事回収されている。これまでにBESS93の気球飛翔実験についてデータ解析を完了し、運動エネルギー500MeV以下の運動エネルギー領域で、反陽子を4イベント検出した[10-12]。この結果は、低エネルギー領域(<500MeV)での初めての明確な宇宙線反陽子の観測として評価を受けている。BESS93~95の総合的なデータ解析からは、途中経過として、運動エネルギー<1.2GeVに於て、合計~50イベントの反陽子候補を検出している。また反ヘリウムの探索については、1993年~1995年のデータを合わせ、従来の観測よりも一桁高い感度での存在上限値(反ヘリウム/ヘリウム比= $8 \times 10^{-6}$ , @95%CL)を得ている[13-15]。

実験は、結果が現われ始めた段階であるが、経過と現状を報告する。

## 1. 実験の目的

現在我々の宇宙は、物質優勢で有り、一次粒子としての宇宙線反粒子はこれまでに観測されていない。よく知られている様に、現在の素粒子物理学における「標準理論」となっている「大統一理論」では、これをビッグバンの直後に起こった「物質/反物質の自発的対称性の破れ」として解釈し、「反物質は宇宙初期過程に消滅した」と説明している。しかしながら、宇宙の冷却過程のなかで、反銀河のような反物質領域が生成される可能性も、完全には否定出来ない。Stecker等によれば、数百Mpc程度の宇宙スケールのなかにこのような反物質クラスターが存在したとすれば、宇宙線観測を通して $10^{-6}$ のオーダーで宇宙線中に反粒子が観測されるとの算定も示されている[16]。z=1の反粒子である反陽子については、宇宙粒子線相互作用に伴う二次粒子として生成され得るが、超対称性粒子の対消滅または原始ブラックホールの蒸発に伴う二次生成粒子としての可能性も指摘されている。BESS実験では、宇宙起源反粒子を直接観測という手段によって探索し、宇宙の生成と初期過程への理解を深めようとしている[17]。

## 2. BESS実験及びスペクトロメーターの特色

BESS実験では、高エネルギー加速器実験分野に於て培われた、最先端の粒子検出器技術を、気球による宇宙線観測に応用し、これまでに比べ、圧倒的に高感度な宇宙粒子線スペクトロメーターを実現した。最大の特色は、粒子透過性を究極的に高めた薄肉ソレノイド型超伝導マグネットとJETチェンバーを中心とした高精度粒子検出器システムの組み合わせによって、大立体角、高精度での宇宙粒子線の観測を可能としている事である。この「超伝導マグネット・スペクトロメーター」によって、明確な反荷電粒子の識別及び高感度な宇宙線反粒子の直接観測を試みる。従来の測定器に比べ、一ケタ高い感度を有し、一日の飛翔実験により、 $10^{-6}$ の反粒子/粒子の感度で観測が可能となる。スペクトロメーターの主要パラメーターは表1に示される通りである。スペクトロメーターは、図1に示される様に、横型円筒構造を有し、骨格となる直径1mの薄肉超伝導電磁石の内外に粒子検出器要素が配置されている。

表1 BESSスペクトロメーターの主要パラメーター

幾何学的アクセプタンス	0.4 m <sup>2</sup> str
最大測定可能運動量 (MDM)	200 GeV/c
反陽子識別・運動量一範囲	2 GeV/c (~3GeV/c)
反ヘリウム識別・運動量範囲	50 GeV/c
トリガー・レート	1-2 kHz
イベント (保存) レート	10 <sub>6</sub> - 200 H <sub>z</sub>
反粒子探索・感度	10 - 10 <sub>7</sub> H <sub>z</sub>
測定器透明度 (壁当たり)	7.5 g/cm <sup>2</sup>
大きさ (圧力容器)	1.7 m $\phi$ $\times$ 3.6 m
総重量	2.2 ton
電力	1.2 kW

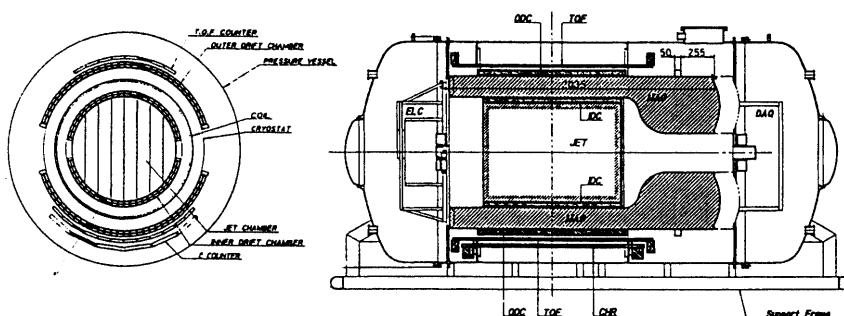
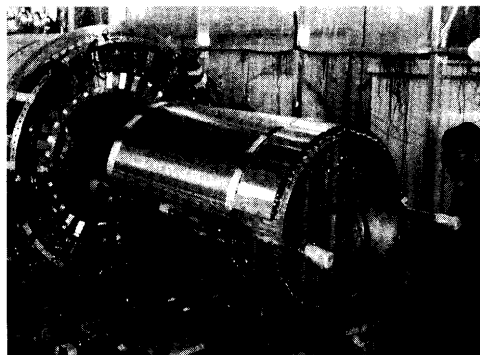


図1 BESSスペクトロメーター写真 (マグネット、JETチャンバー、全景) 及び断面概観図

表2 BESS-93,-94,-95気球飛翔条件

	BESS-93	BESS-94	BESS-95
打ち上げ	19:20, July 26	21:30, July 31	21:00, July 25
地点 (緯度)	N - 56 - 30,	>>	>>
(経度)	W - 101 -	>>	>>
地上温度	25 deg. C	25 deg. C	25 deg. C
スペクトロメーター重量	2060 kg	2060 kg	2190 kg
バラスト重量	330kg	330kg	200 kg
全吊り下げ重量	2700kg	2700kg	2700 kg
全飛翔重量	4700kg	4700kg	4700 kg
バルーンサイズ	29MCF	29MCF	29 MCF
飛翔・浮遊条件			
浮遊高度到達時間	22:30, July 26	2:30, Aug. 1	0:30, July 26
浮遊時間	17.5 hours	17 hours	19.5 hours
浮遊高度	35 - 36.5 km	35 - 36 km	35 - 36 km
残留空気	< 5 g/cm <sup>2</sup>	< 5 g/cm <sup>2</sup>	< 5 g/cm <sup>2</sup>
風速 (飛翔速度)	30 knot	30 knot	25 - 30 knot
電力消費			
エレクトロニクス側 (South)	600 W	600 W	650 W
マグネット側 (North)	300 W	300 W	350 W
電池等	100 W	100 W	100 W
熱絶縁厚さ			
胴部	20 mm	20 / 60 mm	20 / 60 mm
端部 (前後) フランジ部	0 mm	10 mm	10 mm
バッテリー-	>=40 mm	10 - 20 mm	10 - 15 mm
温度バランス (initial - min. - last.)			
JET [JET]	38 - 9 - 15deg. C	30 - 17 - 32 deg. C	29 - 16 - 32
TOF (PMT)	40 - 10 - 16	32 - 25 - 41	34 - 19 - 41
Electronics (DSCR)	53 - 23 - 35	45 - 36 - 51	50 - 36 - 55
Vessel Gas (VMEA)	36 - 4 - 14	28 - 12 - 28	32 - 15 - 33
Dome-south (CAP-S)	32 - 0 - 8	33 - 19 - 39	33 - 17 - 40
Dome-north (CAP-N)	30 - (-10)- 9	28 - 2 - 19	28 - 2 - 28
Battery-south (BAT-S)	50 - 100	32 - -66	38 - (-57)- 83
Battery-north (BAT-N)		30 - -62	31 - (-32)- 44
ターミネーション			
時間	15:47, July 27	19:45, Aug. 1	20:00 July 26
パラシュート開傘時・衝撃荷重	8 G		
着地時間	16:30	20:20	20:45
着地点 (緯度)	N-57-52	N-55-52-30	N-55-51-
(経度)	W-117-30	W-113-55-00	W-115-09
着地時・衝撃荷重	10 G		
科学観測時間 (Calibration含む)	14 hours	15 hours	17.5 houa
実データ収集時間	8.6 hours	7.3 hours	8.2 hours
蓄積データサイズ	4.5 Gbytes	6.5 Gbytes	8.0 Gbytes
宇宙線トリガーレート	2.3 KHz	2.3KHz	2.3 kHz
イベント記録レート	80Hz	90 - 130 Hz	110 - 120 Hz
観測宇宙線総数	100M	120M	(100 M)
イベント保存数	3.6 M events	4.2 M events	4.6 M events

BESSスペクトロメーター各コンポーネントの特色及び役割は以下の通りである。

・超伝導電磁石 (MAG) :

直径0.8m、長さ1 mの空間に1-1.2Tのソレノイド型の磁場を、15%の均一度で発生する。コイルはアルミ安定化NbTi/Cu超伝導線が用いられ、コイル一端の配置されたヘリウムタンクから熱伝導による間接的な冷却方式により、クエンチの際の安全性及び物質量の低減が計られている。粒子透過性が非常に良い事 (0.2輻射長/壁) を特徴とし、永久電流モードにて約5日間ヘリウムの補給なしで連続に磁場を発生し続ける事ができる。入射粒子は、荷電極性、運動量に従い、磁場によって偏向され、振り分けられる[18]。

・中央飛跡検出器 (JET) :

最大95mmのドリフト距離を持つドリフトチェンバーで、円筒断面・水平 (x) 方向に0.2mm、円筒軸 (z) 方向に2 cmの測定精度を有する。粒子の軌跡に沿って最大24点 (r $\phi$ : 円筒平面) 及び16点 (z: 軸方向) の測定が可能であり、0.5R% (R: Rigidity (GV) = 運動量/電荷) の分解能を有する。信号の読みだしにはフラッシュ型ADCを用いる事によって、同一ワイヤーでの複数の飛跡認識が可能である。またガス中でのエネルギー損失 (dE/dX) を利用し、入射粒子の識別にも用いられる。電離気体としては、ドリフト速度が遅く、拡散が少ない、炭酸ガスとアルゴンの混合ガス (90% - 10%) が採用されている[19]。

・トリガー用飛跡検出器 (IDC/ODC) :

反粒子を選択的に記録する為のオンライントリガーを目的として、セル方式のドリフトチェンバーが超伝導磁石の内外に配置されている。R方向に12mmの厚さを持ち、周 ( $\phi$ ) 方向に50mmのセルが各々2層フェーズをずらして周方向に配列されている。各セルのヒット情報はハードウェア (ROMに書き込まれたロジック) によりオンライン処理される。粒子偏向角の極性が瞬時 (<50 $\mu$ sec) に判断されて、トラック・トリガー信号として発生され、反粒子のデータ収集を効率良く行なう事が出来る。ジェットチェンバーと同様のガスを用い、R $\phi$ 方向の200 $\mu$ mの位置分解能に加え、1周期100mm/120mmのダイヤモンド型のバーニアパッドを用いてz軸方向の位置を30 $\mu$ mの精度で測定する事ができる[20]。

・飛行時間測定器 (TOF) :

システムの最外層 (R=0.65m) に配置された厚さ2 cmのプラスチック・シンチレーションカウンター・ホドスコープによって、粒子検出器データ収集が初期トリガーされる。1.8kGの磁場中動作するメッシュ型光電子増倍管 (浜松ホトニクスH2611SXA) と組み合わせ、飛行時間測定 (1/ $\beta$ ) の時間分解能は、100ps (但し94年以前は280ps)、エネルギー損失 (dE/dX) 分解能15%を有する。それらの測定を組み合わせ、入射粒子が識別される[21]。

・チェレンコフカウンター (CHR) :

下部TOFカウンターの下側に配置された、厚さ2.3cmのUVTアクリル・チェレンコフカウンター (屈折率1.5) により、しきい値法及び波高値の $\beta$ 依存性 (ゲイン差) を併用して、1.5GeV/c以下での反陽子/電子 (陽子/陽電子) の分離を行なう。微弱なチェレンコフ信号を検出する為、光電子増倍管には光電面の広い (直径64mm) のR5542SP (浜松ホトニクス) を用いている[22]。

・データ収集システム (DAQ) :

観測中のデータ処理は(1)初期トリガー、(2)トラック・トリガー、(3)ソフトウェア・フィルタを経て、予備的に選択された観測データがオンボードの磁気テープに保存される。(実験中のトリガーの最適化については、次の報告を参照)。高速エレクトロニクス及びトランスピューターを駆使したデータ処理システムの構築により、宇宙線初期トリガーレート、2kHz、及びデータ収集・蓄積レート、100-200Hzを可能としている(図2参照)[23-25]。

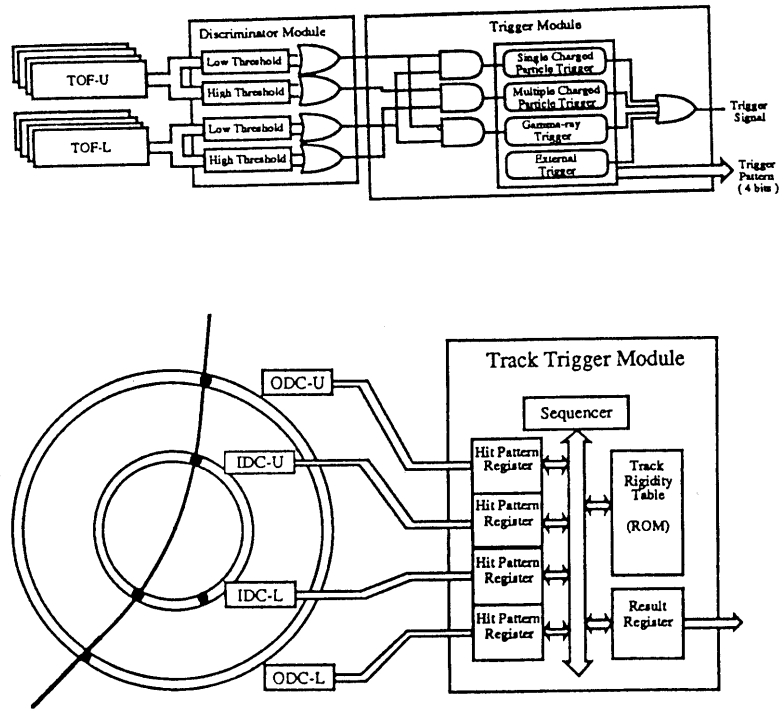


図2-a TOF及びトラック・トリガーの概念図

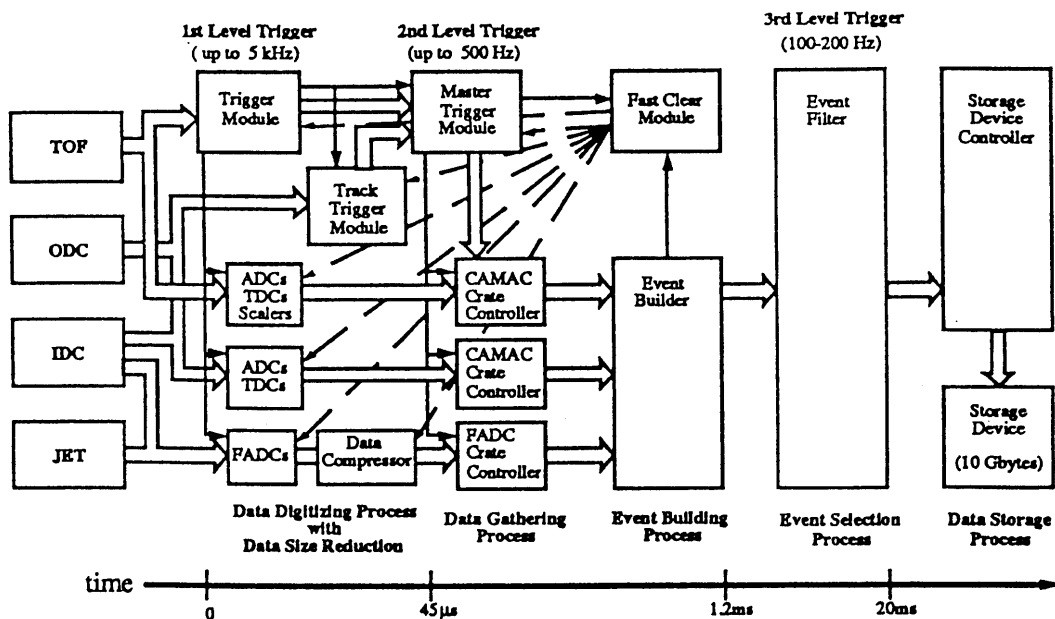


図2-b BESSスペクトロメーター・データ収集システムダイアグラム。

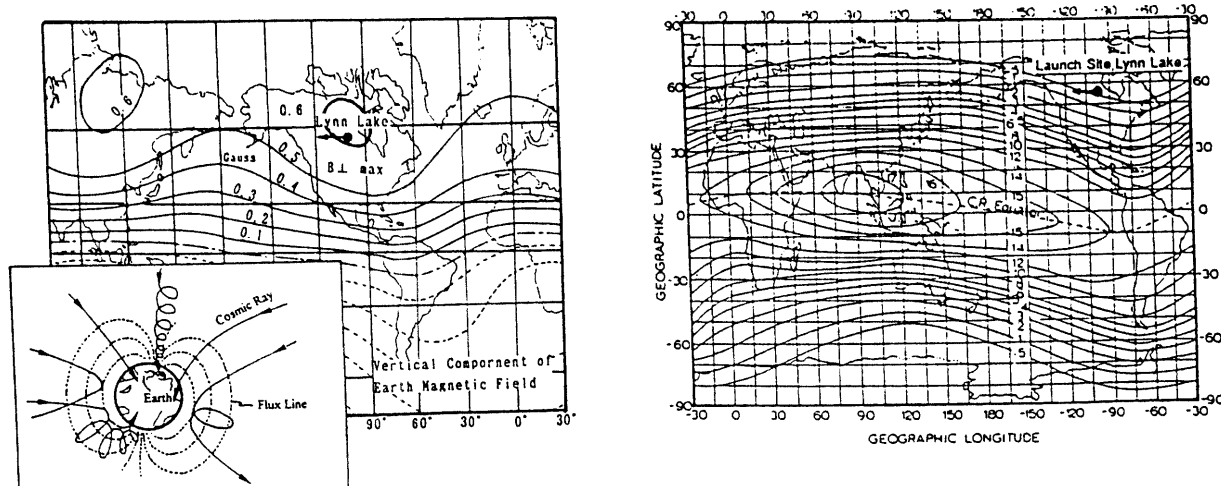


図3 (a)地球磁場鉛直成分分布[26]、及び(b)宇宙線入射運動量しきい値[27]。

### 3. カナダ北部におけるBESS国際共同気球飛行実験への経緯

「宇宙起源反物質探索実験」には、宇宙線フラックス・頻度の高い極地での観測が、非常に有効となる。北極及び南極の両磁極の周辺では、地球磁力線の垂直成分が最大となる事から、宇宙粒子線の地上への到達・運動量しきい値が $0.5\text{GeV}/c$ と低く、宇宙粒子線フラックスがピークとなる低エネルギー宇宙線が地表近辺（気球実験高度）まで到達する事が出来る（図3参照）。これらの観点から、カナダ・リンレークでの気球飛行実験は、南極と並んで、最適な条件を有している。一方カナダ北部での気球飛行実験には、気象条件（風向・風速・天候）の制約から、ごく限られた7月後半から8月上旬の数日（回）しか打ち上げ条件が整わない。この為、その時期に合わせ、周到な実験準備が求められる。NASAでは、リンレークでの科学観測気球飛行実験キャンペーンを毎夏、推進しており、BESS気球実験は、NASAとの協力で、カナダでの気球飛行実験を推進すべく準備を進めてきた。

BESS気球実験は、1987年より、高エネルギー物理学研究所、東京大学、宇宙科学研究所が協力し実験準備をスタートさせた。この時期には、宇宙ステーション計画の一環として、NASAが中心となり、ASTROMAG計画が提唱され、同様の実験をステーション上での大規模な恒久施設として建設すべく、準備研究が進められていた[8]。BESS気球実験は、日米間にも、重要なステップと位置づけられ、1989年、日米共同の科学観測気球実験「BESS」が組織された。1992年には神戸大学、1993年にはNASA/GSFCが参加し、現在の研究協力体制が正式にスタートした。一方、1989年には宇宙科学研・三陸大気球観測所で粒子検出器の為のテストフライトを実施し、1990年からは、カナダでの実験準備・現地調査が進められた。1991年にはスペクトロメーターがほぼ完成し、1992年には現地での予備実験を行い、実験準備が整った。この国際共同実験の為には、政府間の「外交・交換文」及び所轄機関の「取り決め・覚え書」が必要な為、科学観測に至るまでには、さらに忍耐を必要としたが、関係者の方々の多大な努力により、1993年6月1日に正式に政府間協定が締結され、実験の実施が可能となった。

#### 4. BESS93-95・気球飛翔・科学観測経過

これまでに、1993年、1994年及び1995年の3回にわたり、カナダでの科学観測・気球飛翔実験に成功した。図4に示されるように、打ち上げは、マニトバ州リンレークにておこなわれ、約17—20時間の飛翔後アルバータ州ピースリバー近郊にて地上に回収された。この間、各々14—18時間の科学観測に成功し、合計約50時間の科学観測データを蓄積する事ができた。表2に各フライトの総合的な気球実験飛翔条件を示す。また表3及び4には、各々スペクトロメーターの運転条件及びデータ収集トリガー条件を示す。3年目にあたるBESS95には1 GeV以上の高エネルギー領域での粒子識別機能の大幅な改善を計る為、TOFカウンターのセグメンテーションを倍増し、時間分解能を300psから100psへと大幅に改善している。またアクリル・チェレンコフカウンターを付加し、2 GeV近傍までの反陽子探索を可能とする改善を行なった。これに伴い、プレッシャーベッセルを大型化し、将来、さらに粒子識別機能を付加できるよう配慮した。

図4にBESS-93,94,95に於けるフライトルートを示す。図5には、BESS-93,94実験中のスペクトロメーターの温度環境及び高度等のプロファイル、また図6にはBESS93における各プロセスで観測された最大衝撃荷重を示す。最大衝撃荷重は、着地時に最大10Gを観測した。図7はBESS93に於ける打ち上げから回収までのプロセスを示す写真記録である。

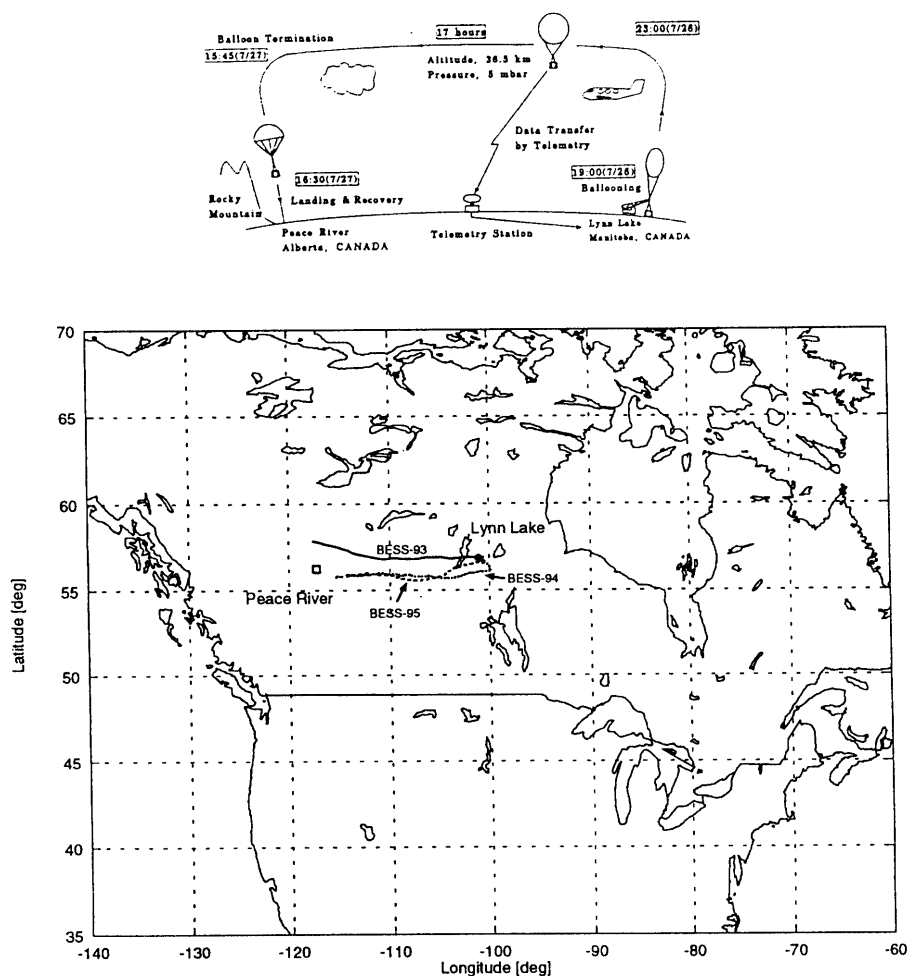


図4 BESS気球飛翔実験の飛行ルート。



表3 BESS93-95に於けるスペクトロメータ運転性能及びアップグレード

	BESS-93 (BESS-I)	BESS-94 >>	BESS-95 (BESS-II)
<u>超伝導電磁石</u>			
中心磁場	1.0 tesla	>>	>>
透明度	0.2 Rad. Length (4 g/cm <sup>2</sup> )		>>
コイルサイズ	1.0 mφ x 1.3 m	>>	>>
有効空間 (室温、dB/B=15 %)	0.85 mφ x 1.0 m	>>	>>
液体ヘリウム・ライフ時間	6 days	>>	>>
<u>粒子・飛行時間測定器(TOF)</u>			
シンチレータ・サイズ	0.2 x 1.1 m	>>	0.1 x 0.9 m
厚さ	2 cm	>>	2 cm
時間分解能 厚さ	300 ps	>>	110 ps
上/下・ホドスコープ構成枚数	4/8	>>	8/12
平均半径	0.657 m	>>	0.668 m
<u>中央飛跡検出器 (JETチェンバー)</u>			
有効空間 (直径 x 長さ)	0.763 x 1 m	>>	>>
サンプリング点数(x / z)	24	24 / 16	>>
ドリフト (フィールド) 電圧	10.5 KV	10.85 KV	>>
最大ドリフト距離	90 mm	>>	>>
位置分解能 (x)	0.2 mm	>>	>>
(z)	20 mm	>>	>>
<u>トラックトリガー・チェンバー</u>			
・インナー・ドリフトチェンバー			
仰角	78 deg.	>>	>>
セル数 (ノチェンバー)	11/12	>>	>>
φ方向セルサイズ	40 mm	>>	>>
位置分解能 (rφ)	0.2 mm	>>	>>
(z)	0.35 mm	>>	>>
・アウター・ドリフトチェンバー			
仰角	71.5 deg.	>>	>>
セル数 (ノチェンバー)	15/16	>>	>>
セルサイズ	50 mm	>>	>>
位置分解能 (rφ)	0.2 mm	>>	>>
(z)	0.35 mm	>>	>>
<u>アクリル・チェレンコフカウンター</u>			
カウンター・サイズ		0.2 x 1.1	0.2 x 1.1 m
厚さ		2.3 cm	2.3 cm
ホドスコープ構成枚数		5	3
設置位置		ベッセル外側	内側
<u>プレッシャー・ベッセル</u>			
容器内径	1.5 m	>>	1.7 m
容器全長	3.4 m	>>	3.8 m
構造体 (フレーム) 外寸法	2x3.4 m	>>	2x4 m
測定器重量	2060 kg	>>	2190 kg

表4 BESS-93,94,95の観測オンライントリガー条件

	BESS-93	BESS-94	BESS-95
<b>TOF Discriminator Threshold</b>			
Time-of-flight (TDC) measurement	15 mV	15 mV	15 mV
Charge-trigger: Lo*	15 mV	30 mV	30 mV
High	150 mV	200 mV	280 - 350 mV
<b>Track-Trigger Rigidity threshold (@ efficiency = 0.8)</b>			
Clean p-bar enriched	-6.89	-1.59	-3.26 GV
Noisy p-bar enriched (multi-track etc)	-2.14	-0.899	-3.26
Clean He-bar enriched	2.48	3.65	3.65)
Noisy He-bar enriched (multi-track etc.)	12.14	-6.89	62
Missing hits	-2.14	-1.27	-1.27
Annihilation	-2.14	-1.27	-1.27
Gamma			
<b>Unbiased Sampling (Count-down)</b>			
Single charge	1/140	1/70	1/90
Multi charge	1/40	1/15 (1/30)	1/20
Gamma (1/256 x )		1/256 x 1/100	1/256 x 1/256
<b>Optimized trigger rate conditions</b>			
Clean p-bar enriched	12	40	38.5 Hz
Noisy p-bar enrich	18	14	27.5
Clean He-bar enriched	3	16	11.5
Noisy He-bar enriched	6	10	10.5
Missig	3	13	0.1
Annihilation	24	37	3.0
Gamma	1	1	0.1
Single charged Count-down	12		14.5
Multi-charge Count-down	12		8.2
Randam (external)			0.2
Gamma	0.5		0.2
<b>Overall trigger rate</b>			
Trigger rate	90	120	110
Overall trigger efficiency (1/ dead-time)	0.7	0.6	0.65

\* V (min. ionization-proton) = 100 - 125 mV

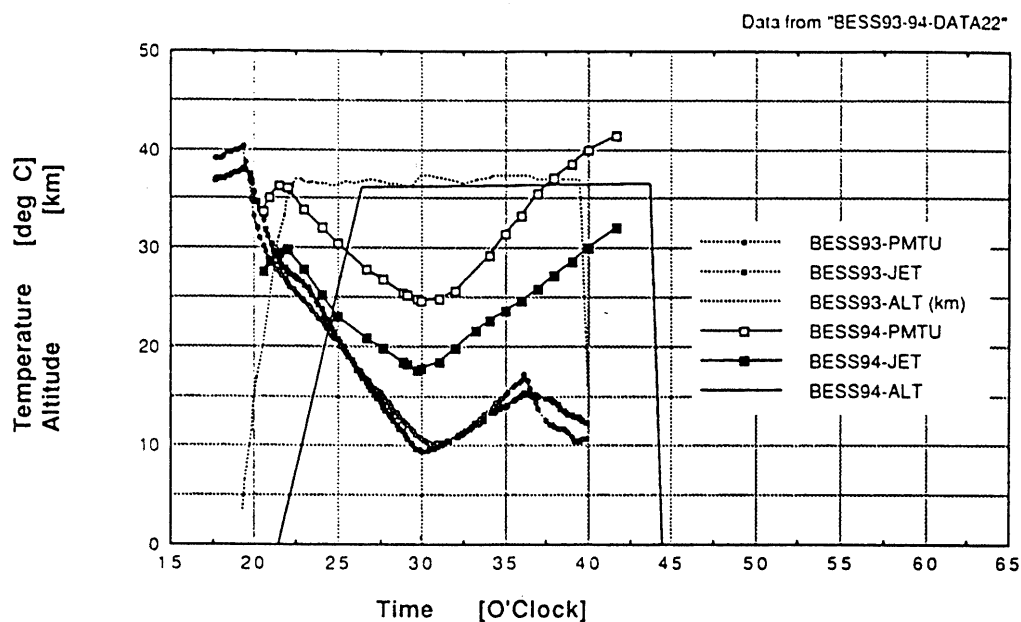


図5 BESS-93,94実験中のスペクトロメーターの温度環境及び高度等のプロファイル

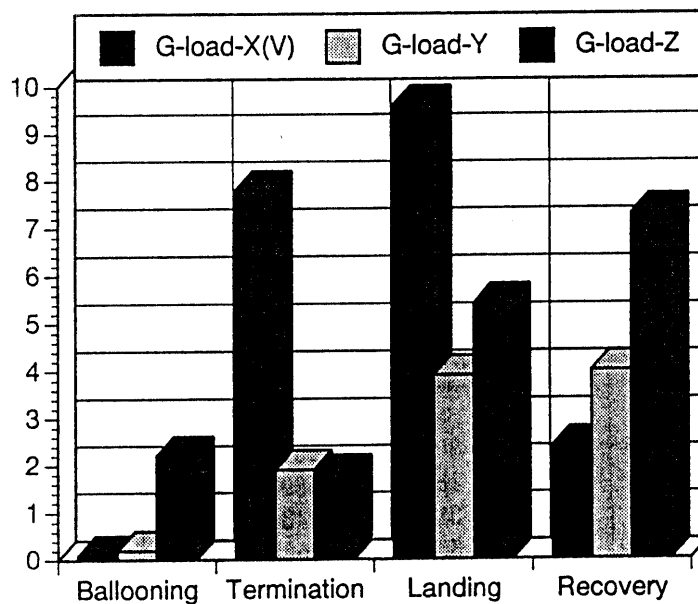


図6 BESS93における各プロセスで観測された最大衝撃荷重。

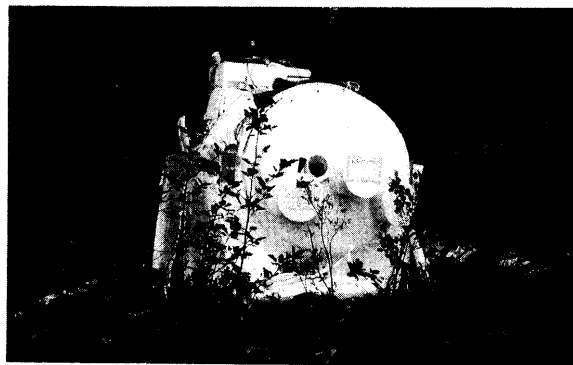
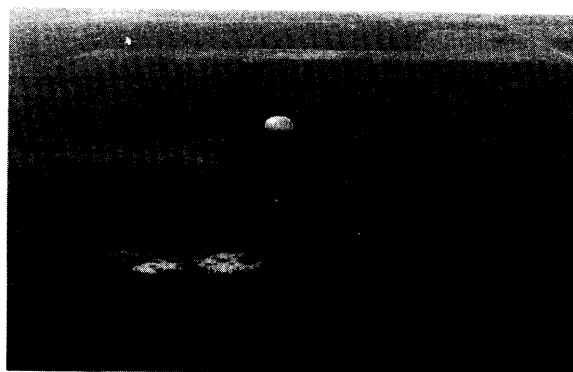
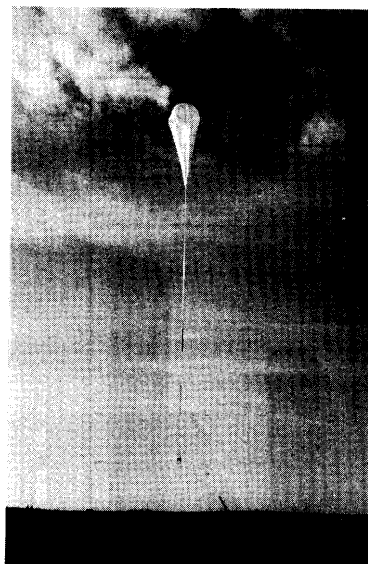
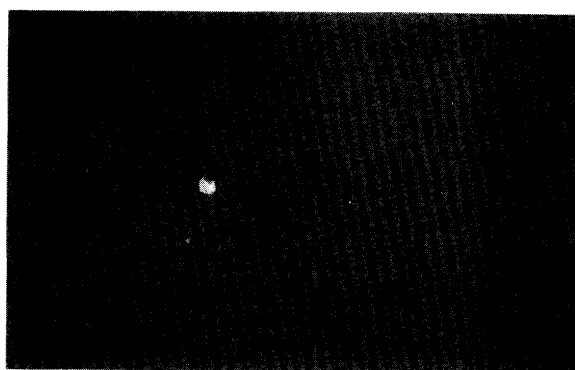
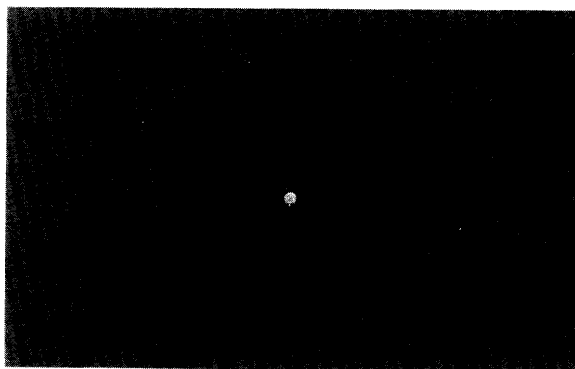
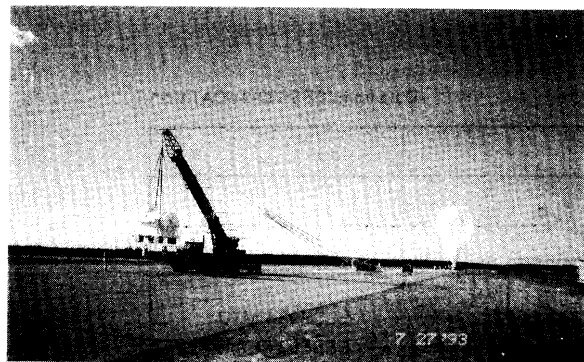


図7 BESS-93気球飛翔プロセスを示す写真  
a)気球インフレーション、b)打ち上げの瞬間、  
c)打ち上げ成功、d)36 km上空での浮遊、  
e)飛翔ターミネーション直後、  
f)パラシュートによる緩降下、g)着地後の回収。

## 5. 飛翔実験中の測定器性能

BESSスペクトロメータは3回の飛翔実験中共にほぼ期待された性能で動作した。図8は宇宙粒子線が観測された際のイベントディスプレイの例である。BESS93において検出された500MeV以下の運動量を持つ反陽子イベントを示している。超伝導マグネットによる磁場によって入射粒子が運動量に従って偏向された様子が解かる。運動量の精密測定は中央のJETチェンバーの内の飛跡の曲率から求められるが、その分解能を示す数値となる最大測定可能運動量 ( $dp/p=1$ となる運動量) として200GeV (分解能0.5R%) が得られている (図9参照)。粒子の識別は、TOFカウンターによる粒子速度 ( $\beta$ ) 測定及びエネルギー損失 ( $dE/dx$ ) より求められる。図10は、横軸をリジディティ (運動量/電荷) として縦軸  $1/\beta$  及び  $dE/dx$  とした粒子識別特性 (BESS94フライトデータより) を示している。1 GeV/c以下の低エネルギー領域において  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $He$  の識別が十分に達成される事が解かる。これらを組み合わせてさらに精度の高い粒子の同定が達成される。図11は  $(M/Q)^2 = (1/\beta^2 - 1)R^2$  及び  $dE/dx = k(Q/\beta^2)f(\beta)$  の関係を用いて現した、同位体及び軽原子核の識別特性を示している。

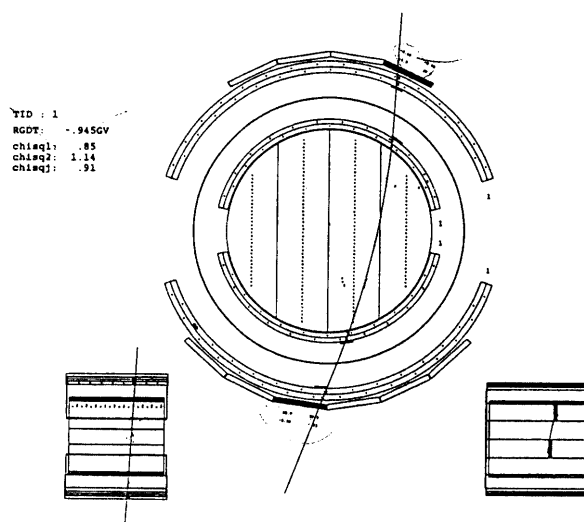


図8 BESS93に於て観測された負電荷を持つ宇宙粒子線 (反陽子候補) のイベントディスプレイ

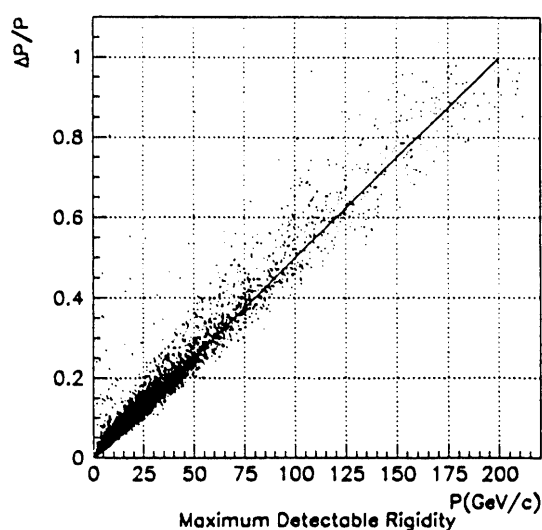


図9 運動量測定分解能  $V$ .  $S$ . 最大測定可能運動量 (MDM)

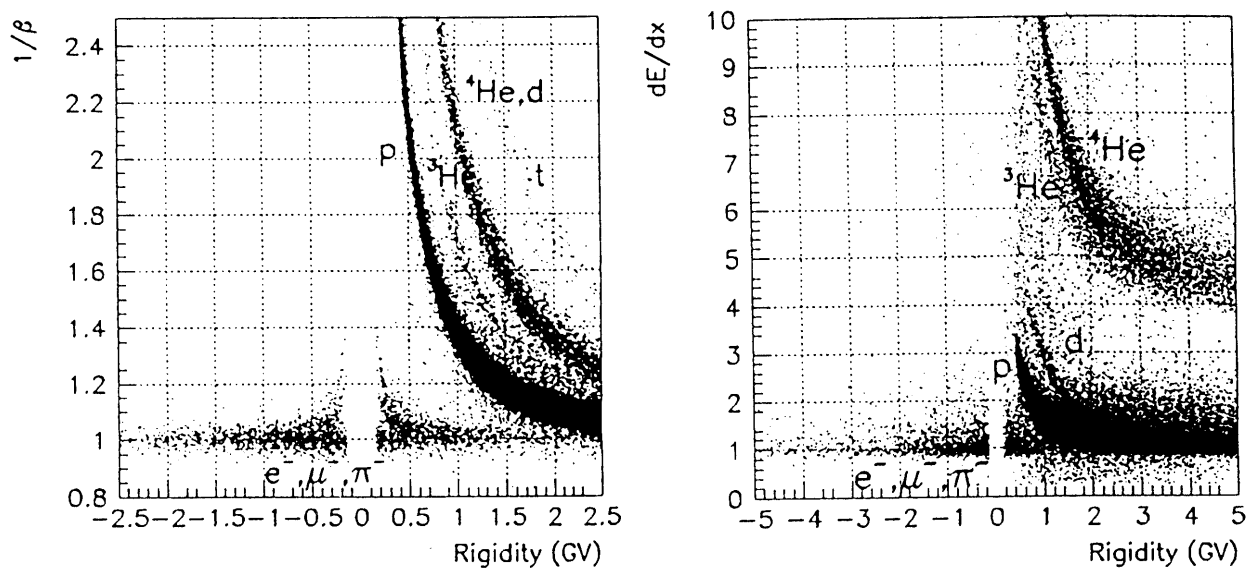


図10 粒子識別特性、a)  $1/\beta$  v.s. Rigidity, 及び b)  $dE/dx$  v.s. Rigidity.

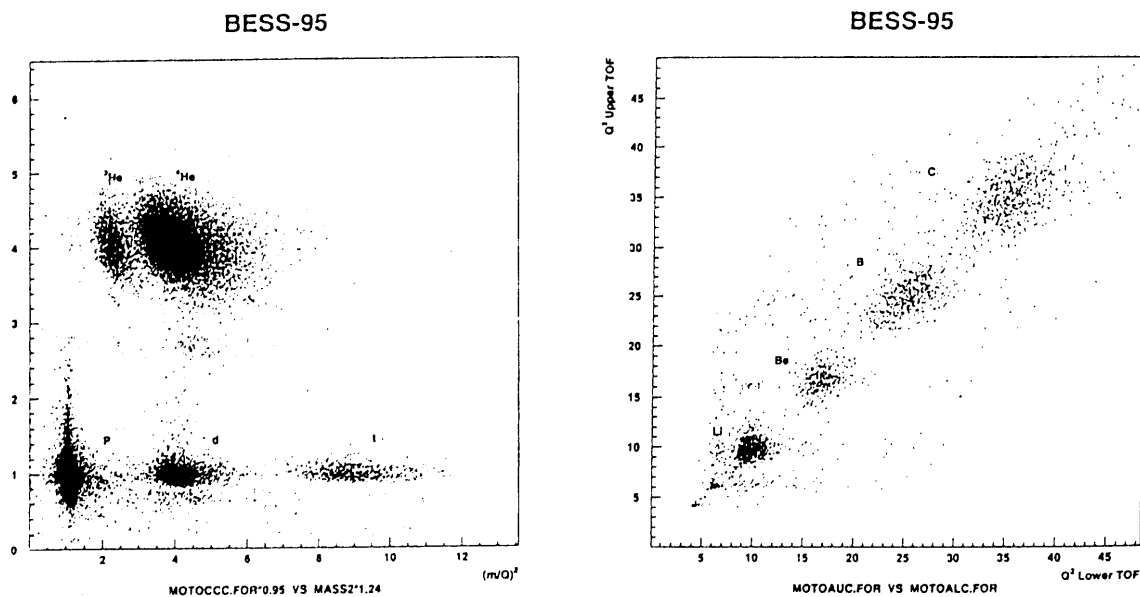


図11 同位体及び軽原子核の粒子識別特性。

以上の測定器性能をベースに、次に続くレポート（BESS国際共同実験[2]）に示す物理解析が進められた[28]。

## 7. まとめ及び今後の計画

BESS気球実験は93年、94年、95年の3回のフライトに成功し、所定の測定器性能を発揮するとともに科学観測において、はじめて明確な低エネルギー（ $<50\text{NeV}$ ）宇宙線反陽子の観測に成功した。反ヘリウムについては、従来の観測を一桁以上感度を高め、反ヘリウム／ヘリウム比、 $10^{-6}$ レベルでの探索に成功した。

96年以降のフライトでは、アエロジェル・チェレンコフカウンター等によってさらに粒子識別性能をアップグレードし、運動エネルギー数GeVまでの、より精密な反陽子スペクトラムを測定する事を目標に準備を進めている。また、より大きなスコープとして長時間フライトによる、さらに感度の高い反粒子探索及び宇宙粒子線スペクトラムの精密測定を、以下のフライトを目標として推進し、計画を完結させたいと考えている。

96年 リンレークよりのフライト（20～30h）

97年     〃

98—99年 イヌビク～グリーンランドへの～10日間の長時間フライト（図12参照）。

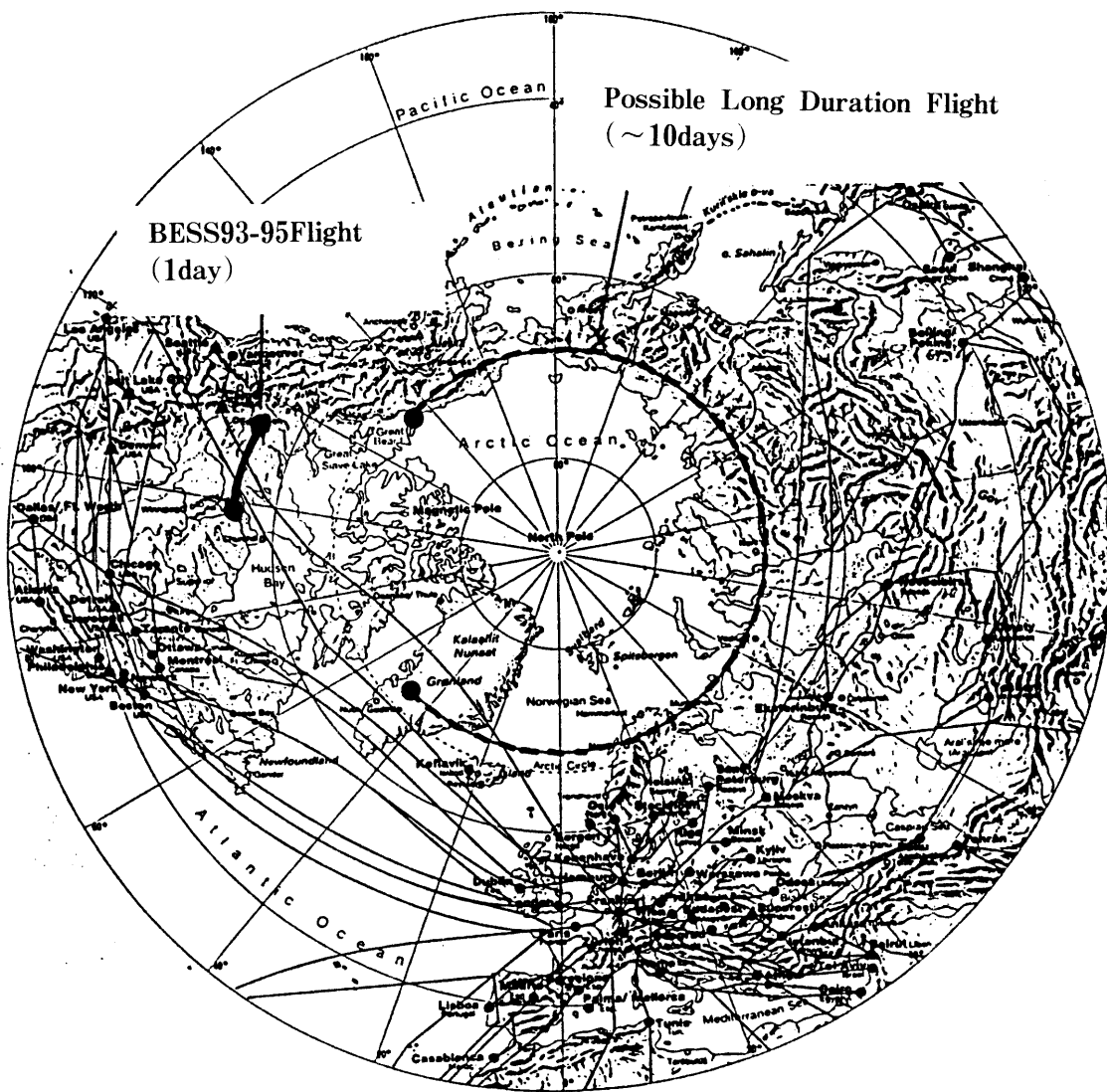


図12 リンレーク及び北極圏での長期間フライト予想ルート

## 謝 辞

この計画の実現の為には大変多くの方々にお世話になり、またご指導頂きました。BESS実験の為の協定の締結に際し、文部省、外務省、在ワシントン日本大使館、日本学術振興会ワシントン事務所の方々に、大変お世話になりました。この紙面をお借りして深くお礼申し上げます。この計画の日米協力の代表機関として、計画実現に御支援、御努力頂いた宇宙科学研究所の秋葉所長、西田副所長をはじめ、大気球委員会（奥田委員長）及び管理部の方々に感謝致します。この計画に深い御理解を頂き、実験の準備から実現まで、常に多くの御支援を頂いた高エネルギー物理学研究所の菅原所長、木村副所長、管理部各位、平林（前）センター総括主幹物理研究部・岩田総主幹、小林主幹、中井（前）実験企画調整室長、山岡広技官、及び工作センター・小泉センター長、東保男助手、安島泰雄技官の方々に感謝いたします。また実験遂行にあたっては、東京大学、神戸大学の大学院学生諸氏の支援に感謝致します。

この実験は、特定研究（高エネルギー研、山本）、科学研究費、重点領域「素粒子的宇宙像」、計画研究（東大、野崎）、科学研究費、一般研究（東大／神戸大、野崎）一般研究（高エネルギー研、山本）のサポートを受けて推進されています（カッコ内は代表者）。又、カナダでの実験は、特定研究（宇宙研、矢島）、科学研究費、国際学術研究（高エネルギー研、山本）、倉田財団研究奨励基金、住友財団研究奨励基金によって、サポートされています。この紙面をお借りして、深く感謝申し上げます。

## 参考文献

1. S.Orito; "Antiproton and Antimatter: A balloon Experiment with the Model Solenoid", Proc. of ASTROMAG Workshop. KEK-87,(Editors.J.Nishimura, K.Nakamura and A.Yanamoto, 1987), p.111.
2. A.Yamamoto(Editor); Proc. of 3rd Workshop on Balloon-Borne Experiment with Superconducting Magnet Spectrometers, KEK Proceeding 92-2, (1992).
3. A.Yamamoto, K.Anraku, R.Golden, T.Haga, Y.Higashi, M.Imori, S.Imori, S.Inaba, B.Kimbell, N.Kimura, Y.Makida, H.Matsunaga, M.Motoki, J.Nishimura, M.Nozaki, S.Orito, T.Saeki, J.Suzuki, N.Takimi, K.Tanaka, I.Ueda, N.Yajima, T.Yanagami, T.Yoshida and K.Yoshimura; "Balloon-Borne Experiment with Superconducting Solenoidal Magnet Spectrometer", Adv. Space Res., Vol.14, No.2. (1994), pp.2-75, (Proc. of XXIX COSPAR, Washington DC, 1993).
4. A.Yamamoto et al, "Balloon-Borne experiment using a superconducting solenoidal magnet spectrometer" Proc.of the 19th Int. Symp.on Space Technology and Science, Yokohama, (1994) 793-798.
5. J.Nishimura et al, "Status and Result from BESS", Proceeding of 30th COSPAR assembly held at Hamburg (1994), Adv. Space Res. Vol.17, No.9 (1996) pp.(9)101-(9)110.
6. A.Yamamoto(Editor); Proc.of 5rd Workshop on Balloon-Borne Experiment with Superconducting Magnet Spectrometers, KEK Proceeding 94-11, (1995).
7. M.Nozaki et al, "Performance of BESS Detector" Proc. of ICRC, Rome, (1995)
8. 山本明、西村純; 「宇宙における反物質、同位体の探索計画」、パリティ Vol.3, No.11, (1988), p.50.
9. A.Yamamoto, T.Mito, Y.Makida, H.Inoue, H.Yamaoka, Y.Do, K.Nakamura and J.Nishimura; "Conceptual Design of a Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics", IEEE Mag. Vol.24, No.2, (1988), p.1421.
10. S.Orito et al, "First Result from BESS" Nuclear Physics B 43 (1995) 237 - 240.
11. K.Yoshimura et al., "Observation of Cosmic-Ray Antiprotons at Energies below 500 MeV", Phys. Rev.



- Lett., Vol.75, No21 (1995), P3792, KEK-preprint 94-202, UT-ICEPP 95-02, Kobe-HEP 95-04.
12. K.Yoshimura, "A measurement of cosmic antiproton flux at low energies " Doctor Thesis, University of Tokyo, (1995).
  13. S.Orito et al., "Observation of cosmic-ray antiprotons at energies below 500 MeV", Proc. ICRC, Rome, (1995).
  14. K.Anraku et al, "Searching for Primordial Antimatter at Distance of 30 to 300 Mpc Using a Balloon Borne Experiment with a Superconducting Solenoidal Spectrometer (BESS), Proc. of Int. Cosmic Ray Conf. Calgary, (1993).
  15. J.Ormes et al., "A search for cosmic ray antihelium with BESS" Proc. ICRC, Rome, (1995).
  16. F.W.Stecker, R.J.Protheroe and D.Kazanas; Astrophys. Space Sci. 96, (1989), p.171.
  17. J.Ormes and R.E.Stretmatter, "Searching for Primordial Antimatter", 1st Course: Current Topics in Astrofundamental Physics, Erice (1992).  
T.Gaisser, "Cosmic rays and particle", Cambridge University Press, Cambridge, (1990).
  18. Y.Makida, Y.Doi, T.Haruyama, H.Inoue, N.Kimura, S.Saitou, K.Tanaka, A.Yamamoto and H.Yamaoka; "Performance of a Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics", Adv. in Cryog. Eng., Vol.37. Part, (1992), P.101.
  19. T.Yoshida, "Progress of JET chamber", Proc. 3rd BESS Workshop, KEK-Proc. 92-2. (1992) p.23.
  20. K.Yoshimura, "Progress of Inner and Outer Drift Chamber" Proc. 3rd BESS Workshop, KEK-Proc. 92-2 (1992) p.33.
  21. H.Matsumoto, "New time-of-flight counter for BESS-II spectrometer", Proc. 5th BESS Workshop, KEK-Proc. 94-11, (1995). p.43.
  22. T.Sanuki, "Cherenkov Counters" Proc. of 5th BESS Workshop, KEK-Proc. 94-11, (1995) p.53.
  23. M.Imori, K.Anraku, S.Inaba, I.Ueda, T.Saeki, T.Haga, T.Tsunoda, M.Nozaiki, T.Yamagami, T.Yoshida and K.Yoshimura; "Real-Time Data Processing in a Balloon-Borne Apparatus", IEEE NS-39, No.5, (1992), P.1389.
  24. K.Anraku et al, "A Flash-ADC system with fast data compression for a balloon-borne experiment", IEEE Trans. Nuclear Science Vol.39, No.4, (1992) p.987.
  25. T.Saeki et al., "Intelligent CAMAC crate controller incorporating a transputer" Nucl. Insts. Method. in Phys. Res. A 355 (1995) p.506.
  26. 理科年表、(1972)
  27. L.I.Dorman; Cosmic Rays (North-holland publishing Company), (1974), p.384.
  28. 吉村浩司他、超伝導スペクトロメータを用いた宇宙粒子線観測(2)、本宇宙科学研究所報告、大気球特集号。