



Measurement of atmospheric antiproton spectrum

大和, 一洋

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Date of Publication)

2009-05-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3106

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003106>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 282 】

氏 名・（本 籍） 大和 一洋 （ 徳島県 ）

博士の専攻分野の名称 博士（理学）

学 位 記 番 号 博い第252号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成16年3月31日

【 学位論文題目 】

Measurement of Atmospheric Antiproton Spectrum
(大気反陽子スペクトラムの測定)

審 査 委 員

主 査 教 授 野崎 光昭
教 授 武田 廣
教 授 山中 大学

宇宙より飛来する反陽子は、宇宙線の研究において、銀河内での成因、伝搬や太陽風による変調を調べるうえで、非常に適した存在である。また、原始ブラックホールの消滅やニュートラリーノの対消滅といった極めて興味深い現象から生成されうることも指摘されている。

このような素粒子・宇宙物理にとって重要な現象を観測するため、気球による大気頂上での観測が盛んに行われている。しかしながら、気球によって実用的に到達できる高度はおおよそ地上 37 km であり、この高度における残留大気圧は、5 g/cm² である。この残留大気物質と高エネルギーの宇宙線によっても反陽子が生成される。これは、宇宙起源の反陽子を精密に観測する上で大きなバックグラウンドとなっている。そのため、この大気起源の反陽子の絶対量を知ることは、多くの実験にとって極めて重要かつ不可欠な要素であった。

また、宇宙起源の反陽子の大部分は、星間ガスと高エネルギー宇宙線の衝突による 2 次起源であることが近年明らかになった。しかし、より精密な検証のためには、生成される反陽子の頻度、エネルギー分布、あるいは、宇宙空間を伝搬する際、どのようにそのスペクトラムが変化するかという詳細な情報が必要である。加速器による反陽子の生成・反応頻度の測定も、あらゆるエネルギー範囲、生成角にわたって成されているわけではない。多くのモデルでは、既存の実験データを出発点として、何らかの補正・補間をおこなっている。大気で反陽子が生成・消滅するプロセスは、宇宙空間での 2 次起源の反陽子のそれと多くの類似性をもつ。従って、この大気反陽子を研究することは、同時に直接測定が不可能な宇宙起源の反陽子の研究にもつながる。このような理由から、本研究では大気反陽子の生成・消滅をそのエネルギースペクトラムの測定を通じて行った。これは気球高度において純粋な大気反陽子を観測した初めての実験結果である。

本実験で使用した BESS 検出器は、極めて透過性のよい薄型の超伝導ソレノイドを使用し、大きな有効面積立体角を有している。このため、絶対流束が小さい反陽子の検出に成功することが出来た。粒子の識別は、まずこのソレノイドの磁場を利用し、トラッキング・チェンバーによって運動量を計測する。さらに時間分解の 80ps の TOF カウンタにより、粒子の速度も同時に計測し、粒子の質量を同定する。また、圧倒的な頻度で観測される電子やミュー粒子などのバックグラウンド事象は、スレッシュホールド型のアエロジェル・チェレンコフ・カウンタを使用して排除できる。このような測定原理により、きわめて信頼性の高いデータを得ることが可能となった。

本研究では、まずアメリカ、ニューメキシコ州において、気球を用いた実験を 2001 年の夏に行った。この地域では、おおよそ運動量 4.2 GeV/c 以下の宇宙線は、地磁気の効果により大気頂上に到達することが出来ない。このため、この運動量以下では、大気で生成される反陽子のみを観測することが可能である。観測は、おおよそ 16 時間行われ、運動エネルギー範囲 0.2~3.3 GeV、大気深度 4.5~26 g/cm² において、243 事象の反陽子候補の検出

した。また、茨城県のつくば市において、計 3 週間にわたる観測実験を地上で行った。地上における反陽子の流束は、きわめて小さいが、同じく 0.2~3.3 GeV の運動エネルギー範囲にわたって 25 事象の反陽子候補を、検出することに成功した。

データ解析における反陽子事象の選別は、次の 3 つのステップからなっている。第 1 ステップでは、測定器を通過する際、反応を起こさずに通過した事象のみを選出する。ここでは、トラッキング・チェンバーにおける、トラックの数はもちろん、測定器間の整合性が 3 次元的に厳しく要求される。第 2 ステップでは、測定条件のよい事象のみを抽出するため、分布の端やヒット数の少ない事象を除く。最終ステップでは、運動量と速度の 2 次元平面上で、反陽子事象の形成するバンド内に存在する事象を選別する。このバンドは、陽子事象がつくるバンドから運動量を反転したところに存在すると考えられ、実際、その場所に反陽子と推測される事象が確認された。

さらに測定器直上におけるスペクトラムを算出するために、以下のように検出効率をもとめた。選別の第 1 ステップに対応する検出効率は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて求めた。このモンテカルロによる検出効率の算出は、実際のビームテストにおいて、よく一致することが確かめられている。第 2、第 3 ステップに対応する検出効率は、陽子事象に対して同様の選別を行った場合の選別効率を反陽子の検出効率とした。

求められたスペクトルは、おおむね、これまで計算されていたものと整合性のある結果を示した。反陽子の生成頻度の高い上空でのデータを用いて、反陽子の生成について、既存のモデルと比較した。A. Stephens のモデルと我々の観測データは、誤差の範囲内で一致した。一方、地上で得られたスペクトラムの形は、C. Y. Huang のモデルに近いという結果を得た。これにより、反陽子の流束は大気との非弾性散乱で減少する際、その散乱後に、反陽子はこれまで考えていたほど多くは生成されず、2GeV 付近にピークをもつ特徴的な形をしたまま、減衰していくという結論を得た。

氏名	大和 一洋		
論文 題目	Measurement of Atmospheric Antiproton Spectrum (大気反陽子スペクトラムの測定)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	野崎 光昭
	副 査	教授	武田 廣
	副 査	教授	山中 大学
	副 査		
要 旨			
本論文は、BESS (Balloon borne Experiment with a Superconducting Solenoid) 測定器を用いて大気宇宙線反陽子のエネルギースペクトラムを世界で始めて観測した気球観測の報告と、その結果に関する考察をまとめたものである。 第 1 章では、研究の動機と意義について書かれている。BESS 実験では、原始ブラックホールの蒸発やニュートラリーノダークマター粒子の対消滅によって生成される「宇宙起源反陽子」の探索や、銀河内の一次宇宙線と星間ガスの衝突によって生成される「衝突起源反陽子」のエネルギースペクトラムの測定を主目的としている。本論文の意義のひとつは、これら「銀河起源反陽子」を気球観測で捉える際にバックグラウンドとなる「大気反陽子」のフラックスを決定することである。典型的残留大気の厚さ $5\text{g}/\text{cm}^2$ の高度で行われる気球観測では、銀河反陽子と大気反陽子の総量を観測しており、全体の約 $1/4$ が大気反陽子である。しかし、大気反陽子の直接観測はこれまで存在せず、理論計算に頼っていた。そのため、本研究は多くの気球実験にとって有用なデータとなる。 2 つめの意義は、大気中での宇宙線伝搬過程を検証することである。大気反陽子は、一次宇宙線と大気原子核の衝突で生成される。しかし、生成断面積に関するデータがほとんどないため、その決定精度は不十分であった。また、生成された反陽子は、大気伝搬の過程で大気原子核と衝突し、対消滅あるいは π 粒子の二次粒子生成により、そのエネルギーや進行方向を変える。しかしながら、それぞれの反応断面積やエネルギー分布についても加速器データがほとんどない。大気反陽子のスペクトラムの理論計算では、これらの過程について、いくつかのモデルが提唱されている。大気反陽子スペクトラムを観測することにより、これらのモデルを検証することが可能である。さらに、大気反陽子の生成・伝搬過程は、宇宙空間において衝突起源反陽子が生成されるプロセスと類似点が多く、宇宙空間での反陽子スペクトラムの計算への影響も大きいと考えられる。 第 2 章では、本実験で使用した BESS 測定器について述べられている。BESS 測定器は、きわめて透過性のよい超伝導ソレノイドを搭載したスペクトロメータであり、ソレノイドによる磁場と中心部に設置されたトラッキング用ドリフト・チェンバーおよび TOF カウンターを組み合わせることで、質量による粒子同定が可能である。さらに、スレッシュホールドタイプのシリカ・エアロジェル・カウンターを搭載し、バックグラウンドとなる μ 粒子や電子を除去することができる。 BESS 測定器は、従来の気球搭載型の宇宙線検出器にくらべて 10 倍以上の面積立体角をもち、1 秒間に 2000 近い宇宙線が測定器を通過する。このため、圧倒的な感度で宇宙線を観測することが可能であり、反陽子のようなきわめて希な事象を捕らえることができる。同時にこれは、大量のデータをリアルタイムに処理しなければならぬという課題に直面する。BESS 測定器では、100 本以上の PMT および、300 チャンネルを超えるドリフトチェンバーの信号を、専用のハードウェアを用いて 1 つのイベントデータにまとめている。このイベントデータは、Transputer Link とよばれるネットワークを通じて組み込みコンピュータに転送され、保存用テープドライブに記録される。記録容量は 120GB あり、書き込みレートは最大 1MB/s 程度である。 第 3 章では、実験の遂行について述べられている。大気のみで観測される反陽子の観測をおこなうため、カットオフ運動量が $4.2\text{ GeV}/c$ であるアメリカ・ニューメキシコ州・フォートサムナーにおいて飛翔実験を行った。4~26g/cm^2 の残留大気圧下において約 12 時間の宇宙線観測に成功した。また、大気中の伝搬を調べるために大気深度の大きい地上での観測をつくば市で春と秋に合わせて約 3 週間行った。			

氏名	大和一洋
第 4 章では、収集したデータから反陽子事象を選び出す解析手法について述べられている。解析は主として次の 3 つのステップからなる。(i) 測定器で反応を起こさずに通過したイベントの選択、(ii) 測定条件のよいイベントの抽出、(iii) 質量と電荷の情報から反陽子を同定。(i)は single track selection とよばれ、次のような条件を課している。ドリフト・チェンバーにおけるトラックの数が 1 本であること。測定器上部に設置された 10 本のシンチレータのうち、ヒットが 1 本のみであること。測定器下部の 12 本のシンチレータでは、ヒットが 1 または 2 本であること。ドリフト・チェンバーの有感度領域を十分に長く通過していること。粒子は上から下へと通過していること。ドリフト・チェンバーから求められるトラックをシンチレータまで外挿したとき、対応するシンチレータにヒットがあること。また、シンチレータでの電離損失が陽子のつくるバンドのなかにあること。 (ii)では、トラックのフィティングに使用した点が 10 以上、かつ χ^2/dof が 6.5 以下であることを要求している。さらにフィティングされたトラックから予期される位置にヒットがないワイヤーが 3 本以下であること。シンチレータは、その両側から PMT で読み出しているが、左右の光量の比が正常であることも要求している。 (iii)では、まず、スレッシュホールドタイプのエアロジェルカウンターにおいてバックグラウンドとなる μ 粒子や電子を除去する。ついでドリフト・チェンバーにおける電離損失が陽子のそれと同等なものを選ぶ。残っているイベントを rigidity と $1/\beta$ の 2 次元平面上にプロットすると、質量の違いにより、粒子ごとにバンドが形成される。反陽子の作るべきバンドは、陽子と対称の位置にあることが測定原理より期待される。実際に期待されるバンド内に事象が確認され、フォートサムナーにおける飛翔実験では 243 イベントを、地上実験では 25 イベントを反陽子候補として同定した。 第 5 章では、選択された反陽子事象から各高度におけるフラックスの算出法について述べられている。フラックスの定義は、測定器直上での反陽子の数を測定器の面積立体角と観測時間で割ったものである。面積立体角は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて求めている。観測時間は、測定器に搭載した 1MHz のクロックをカウントすることにより直接測定しており、精度よく測定できる。検出効率は、第 4 章で述べたステップ(i)に対応する検出効率とステップ(ii)および(iii)に対応する検出効率、およびトリガー効率に大別できる。 ステップ(i)に対応する効率は、モンテカルロ・シミュレーションを用いて求めている。BESS 測定器の上部で反応が起きた場合、二次的に生成される粒子が BESS 測定器の有感度領域を通過しないケースもあるので、測定器直上での宇宙線の数は、観測されたイベントのみからは知ることができない。そこで、モンテカルロ・シミュレーションにより、実際の状況を再現して、このような割合を見積もっている。シミュレーションの再現性は、加速器を使ったビームテストにより 3~5%程度の誤差であることがわかっている。 ステップ(ii)および(iii)に対応する効率は、陽子に対して同じ選別を行った際の効率を反陽子の検出効率としている。これは、陽子は宇宙線中に十分豊富にあり統計的に優れていること、反応を起こさない反陽子の振る舞いは、陽子と同等であると見なせるからである。 BESS 実験でのデータ収集は、トリガーシステムの判断とは無関係に、数イベントに一度必ずデータを記録している。このバイアスのないイベントから、測定器で行われるトリガーシステムの条件判断を再現して、トリガーシステムの効率を求めている。この章の最後では、これら種々の検出効率を考慮して、反陽子のエネルギースペクトラムが、はじめて示された。 第 6 章では、観測された大気反陽子スペクトラムを元に反陽子生成・伝播モデルを検証した。反陽子生成モデルは、A. Stephens 氏のモデルを元にした計算と観測データが、誤差の範囲内で一致している。また、反陽子が大気中を伝搬する際に、大気原子核との反応で反陽子がエネルギーを変えることがあるが、そのエネルギー分布は入射エネルギーとほとんど同じで、大きなエネルギー変化はないとして計算した結果と、観測されたスペクトラムの形がよく合うという結論を得た。 以上のように、本研究は世界初の大気反陽子の直接観測とそれに基づいた大気伝播モデルの検証を行ったものであり、大気反陽子の生成・伝播過程について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって学位申請者の大和一洋は、博士(理学)の学位を得る資格があると認める。	