

論文内容の要旨

論文題目 Search for Cosmic-Ray Antideuterons

(宇宙線反重陽子の探索)

氏名 福家英之

近年の宇宙線反陽子の高精度な測定により、一次宇宙線中の反陽子のエネルギー Spektrum が運動エネルギー 2 GeV 付近にピークを持つことが明らかになってきた。これにより、宇宙線反陽子はその大半が二次起源、即ち銀河宇宙線と星間物質との衝突により生成されていることが広く認識されるようになってきている。しかし一方で、観測された反陽子 Spektrum の 1 GeV 以下の低エネルギー領域部分は、二次起源反陽子の Spektrum として予測されているよりもややフラットな形をしており、その他の起源を持つ未知の成分が含まれている可能性を示している。二次起源反陽子は、その生成における運動学的理由により、ピークよりも低いエネルギー領域では流束が急激に減少すると考えられている。従って、ややフラットな低エネルギー反陽子 Spektrum が観測されたという事実は、反陽子の非衝突起源、即ち一次起源が存在する可能性を示している。一次起源の候補としては超対称性ニュートラリーノ・ダークマターの対消滅や原始ブラックホールの蒸発などの未知の現象が考えられており、宇宙論的・素粒子物理学的に興味深いテーマとなっている。

しかしながら、反陽子の観測によって一次起源の存在の有無を決定することは容易ではない。反陽子の一次起源成分は低エネルギー二次起源成分を示す Spektrum の形のずれとして検証しなければならないが、低エネルギー二次起源反陽子の予測 Spektrum の理論的な不定性が未だ無視できないからである。加えて、反陽子 Spektrum の測定精度そのものも現在の統計精度では不十分である。

この反陽子における不利な点を回避できる観測対象として宇宙線反重陽子が挙げられる。宇宙線反重陽子はこれまでに一例も観測されたことがないが、反陽子と同様の生成仮定、即ち二次起源或は一次起源により存在している可能性がある。一次起源の存在の有無を検証する上で反重陽子の観測が反陽子の場合よりも原理的に有利である点は、一次起源の反重陽子は二次起源反重陽子 Spektrum の形のずれとしてではなく、より直接的に探索することが可能であるという点である。これは、二次起源反重陽子

の生成エネルギー閾値が反陽子の場合に比べて高くなることにより、二次起源反重陽子スペクトラムが高エネルギー側にシフトする為である。一方、非衝突起源の反重陽子は反陽子の場合と同様に低いエネルギーを持つと考えられる。その結果、約 1 GeV/n 以下の低エネルギー領域にも一例でも反重陽子が観測されれば、一次起源の存在が強く示唆されることとなる。ただし、反重陽子の存在量は、反陽子よりもさらに少ないと考えられる。そのような稀少宇宙線の探索は、大面積立体角の測定器を用いた BESS 実験によって初めて可能となった。

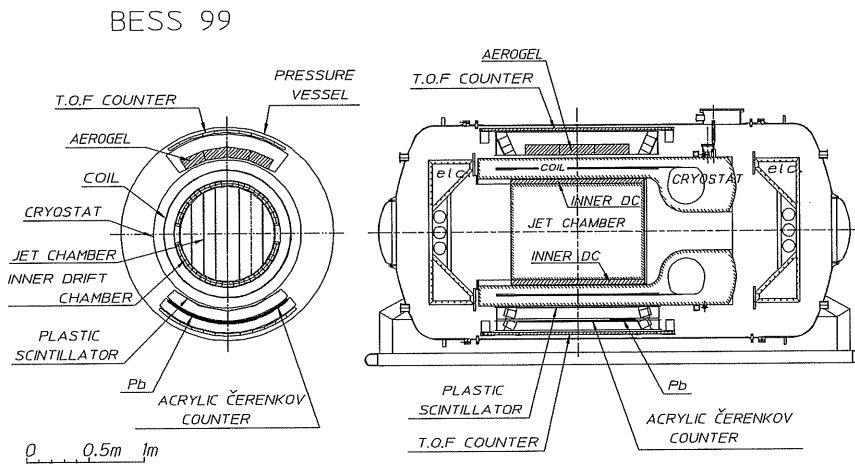


図 1 : BESS 測定器 (1999 年時)

図 1 に BESS の測定器の断面図を示す。BESS 測定器は薄肉超伝導ソレノイドを使用した気球搭載型超伝導スペクトロメータであり、ソレノイドの採用により気球搭載型測定器としては、かつてない大面積・大立体角と一様な磁場を持っている。ソレノイドの内側の均一な磁場領域にはドリフトチェンバが置かれ、粒子の飛跡を測定することにより、その磁気硬度（運動量/電荷）を高い精度で決定する。磁気硬度の正負により粒子の電荷の極性が判別される。電荷の絶対値は TOF ホドスコープなどで測定されるエネルギー損失から求められる。粒子の識別は、磁気硬度と TOF ホドスコープで測定される粒子速度を用いて、粒子の質量を同定するという非常に確実な方法で行なわれている。これにより、低エネルギー反重陽子の探索において最も大きなバックグラウンド源となる反陽子との明確な識別が可能となる。また、閾値型エアロジェルチェレンコフカウンタを備えており、バックグラウンド源となり得る電子・ミュー粒子からの分離・識別も可能である。

BESS 測定器が大面積・大立体角であることから、高感度の探索が可能である。ドリフトチェンバでは複数の飛跡の検出も容易であり、測定器内で相互作用を起こした事象を識別できるため、相互作用を起こしていない明瞭な反重陽子事例を探索することができる。また、同軸円筒状に配置された検出器はその面積立体角を精度良く見積もることが容易である。これらの特徴から系統誤差についても低く抑えることができる。

宇宙線反重陽子の探索には、1997 年度から 2000 年度の 4 回に亘る気球観測データを用いた。実験はカナダ北部のリンレークにおいて行なわれ、高度約 36 km (残留大気圧約 5 g/cm²) の高空における計約 89 時間の観測によって、総事象数約 7100 万のデータが収集された。

解析ではまず、上下の TOF ホドスコープを通過しドリフトチェンバの中で飛跡を一つだけ残した事象を選び出し、アクシデンタルな事象や僅かに存在する測定器内で相互作用を起こした事象を取り除く。続いて、トラックのフィッティングの χ 二乗や 飛跡と TOF ホドスコープのヒットとの整合性など、トラックの質に関わるパラメータについてのカットを施す。これにより、入射粒子の速度と磁気硬度

の測定値をより信頼性の高いものとする。選ばれた事象からの反重陽子事象の識別は、先に述べたように、磁気硬度と粒子速度を用いた質量の同定 およびエネルギー損失からの電荷の算出によって行なう。エアロジェルチェレンコフカウンタによる電子・ミュー粒子の排除も併せて行なう。

図2は1998年度データに関する電荷±1の事象についての速度と磁気硬度の分布である。正電荷側に陽子・重陽子事例が、また負電荷側の陽子と対象な位置には反陽子事例が、明確に識別されている。これに対し、重陽子と対称な位置に存在すると期待される反重陽子の候補事例は一例も存在していない。解析の結果、四年分のデータ中に反重陽子候補事例は存在しなかった。

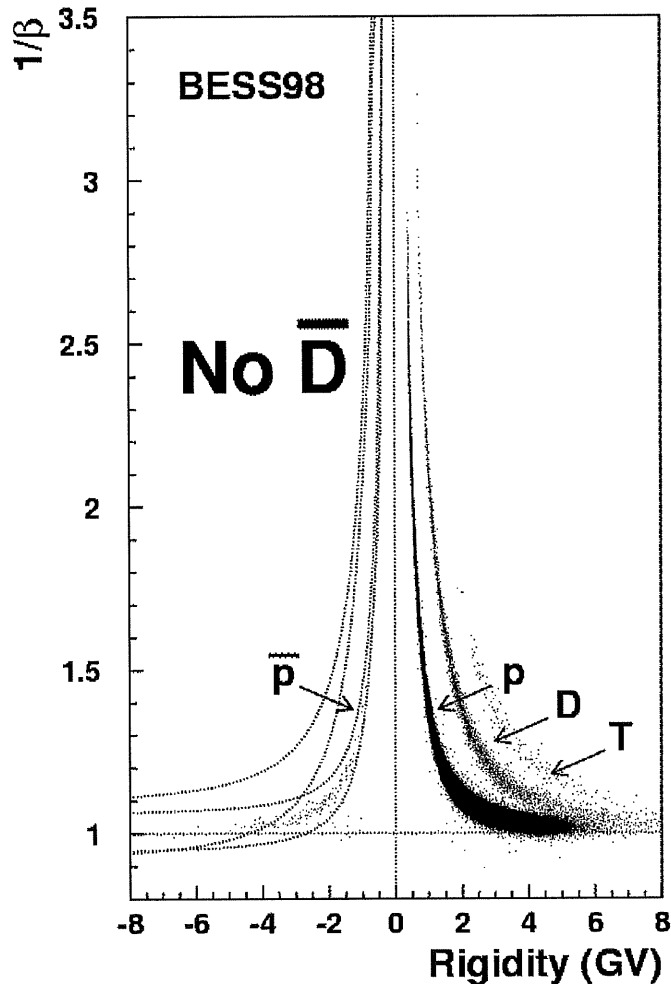


図2：速度と磁気硬度の分布（1998年度データ）

この解析結果を踏まえ、大気頂上における宇宙線反重陽子の微分エネルギースペクトラムに対する上限値を算出した。BESS 測定器の反重陽子に対する検出効率、主に同じ観測データ中の重陽子事例を用いて見積もった。検出効率のうち反重陽子の核相互作用に関わるものや大気中での反重陽子数の損失などは GEANT を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって求めた。反重陽子の反応断面積は実験データが無い場合、反陽子のそれからスケールするモデルにより仮定し、GEANT に組み込んだ。各種系統誤差も、主に重陽子事例を用いて見積もった。

これらにより得られた、系統誤差を含む確からしさ 95% の上限値は、運動エネルギー 0.17 GeV/n から 1.15 GeV/n の範囲で $1.9 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \text{s sr}^2 \text{ GeV/n})^{-1}$ であった。なお、この上限値は宇宙線反重陽子流束

に対して世界で初めて得られた実験結果である。

最後に、この得られた上限値を、現在までに提案されている一次起源反重陽子に関する理論的な予測スペクトラムと比較した (図 3)。原始ブラックホールを起源とする反重陽子の予測スペクトラムを用いることにより、太陽系近傍の原始ブラックホールの蒸発頻度に対する上限値 $1.8 \times 10^0 \text{ pc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ が得られた。これはガンマ線バーストの観測から得られている上限値よりも五桁低く、宇宙線反陽子の測定から得られているものよりは二桁高い。その他、いくつかの理論パラメータに対する特定の仮定のもとに、反重陽子をプローブとして、原始ブラックホールやニュートラリーノ・ダークマターの密度パラメータに対する上限値 $\Omega_{\text{PBH}} < 1.2 \times 10^{-6}$ 、 $\Omega_{\chi} < 3.6 \times 10^0$ などが、初めて得られた。ただし、これらの解釈に当たっては、一次起源反重陽子スペクトラムの予測が多くの理論仮定を含んでいることに留意する必要がある。特に、反重陽子と反陽子の生成確率の比が持つ不確かさは、全ての起源に共通して、反重陽子流束の絶対値の予測に対する不定性をもたらしている。

なお、宇宙線反重陽子は、BESS の次期計画である BESS-Polar 実験を始め、様々な将来計画において探索される予定である。本研究で得られた結果は、それら次世代の反重陽子探索における基盤となるものである。

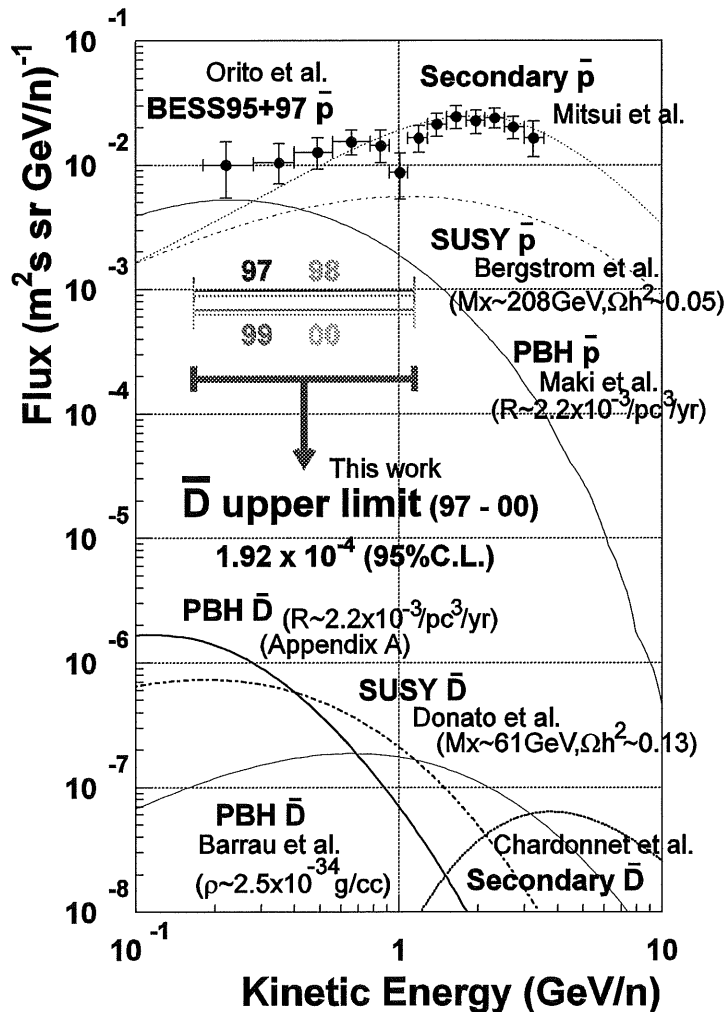


図 3：得られた宇宙線反重陽子流束に対する上限値と各種予測スペクトラムの関係。BESS による反陽子測定結果と反陽子予測スペクトラムも併せて示す。二種類ある原始ブラックホールからの反重陽子スペクトラムの差異は、主に、異なる銀河内伝播モデルを用いていることに起因している。