

■ 研究紹介

Alpha Magnetic Spectrometer の最新結果と 暗黒物質の間接探索

中央研究院物理研究所 (台湾)

灰野 禎一

Sadakazu.Haino@cern.ch

2015年5月22日

1 はじめに

Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)が国際宇宙ステーション (ISS) 上で宇宙線のデータ収集を開始してからまる4年となった。この間、5つの結果を論文に公表するとともに、今年2015年4月には"AMS days at CERN"というAMSとして初の公式イベントを三日間開催し、理論の研究者や大型宇宙線実験のリーダ達を招いて、最新のAMSの結果と解析の途中経過や、宇宙線研究の将来について議論をした。

本稿では、発表した時系列に沿ってAMSの最新結果を紹介するとともに、AMSの重要な物理テーマの一つである、暗黒物質の間接探索についても議論する。

2 AMS 実験

2.1 AMS 実験とは

AMS 実験は、アジア、欧州、米国の大学、研究機関から集まった、約300人の研究者からなる国際コラボレーションで行われている。アジアからは台湾、中国、韓国が参加しているが、日本の機関は参加していない。1976年にノーベル物理学賞を受賞したサミュエル・ティン氏がプロジェクトリーダーを務めている。2011年5月に測定器がスペースシャトルエンデバーによって打ち上げられ、ISSに設置された。以来、現在に至るまで、四年間、宇宙線データを蓄積し続けている。ISSの運用と同じ2020年以降までデータを収集し続け、圧倒的な統計量により、これまでの実験とは桁違いの宇宙線の精密観測を行う。

2.2 AMS 測定器の概要

AMS は磁気スペクトロメータである。測定器の概要を示すため、図1にISS上で得られた、-363 GVの反陽子イベントの例を示す。中央に配置された高さ1m、内径1.1mの円環状の永久磁石によって生成される1.4キログaussの磁場中での荷電粒子の偏向から rigidity ($R = pc/qe$ 運動量を電荷で割ったもの) を精度よく測定することにより入射粒子の運動量とその電荷符号を精密に決定する。粒子の飛跡は、厚さ300 μm の両面型シリコンマイクロストリップセン

サー2,264枚から構成され、9層からなるシリコントラッカーによって、 $Z=1$ の粒子に関して約10 μm の精度で決定する。

宇宙線は常に上から来るとは限らず、測定器下方から上向きに入射した粒子は電荷符号が逆に見えるため、粒子の飛来方向を決定する必要がある。TOF (Time Of Flight) システムは、この役目を果たすとともに、粒子の速度の測定と、データ収集のトリガーを発生させる。また、RICH (リングイメージング・チェレンコフ検出器) は粒子の速度を0.1%の精度で測定し、rigidityと組み合わせることで、入射粒子の質量を同定することができる。発光体は二種類あり、中央部には屈折率1.33のフッ化ナトリウム (NaF)、その周囲には屈折率1.05のエアロジェルを配置している。

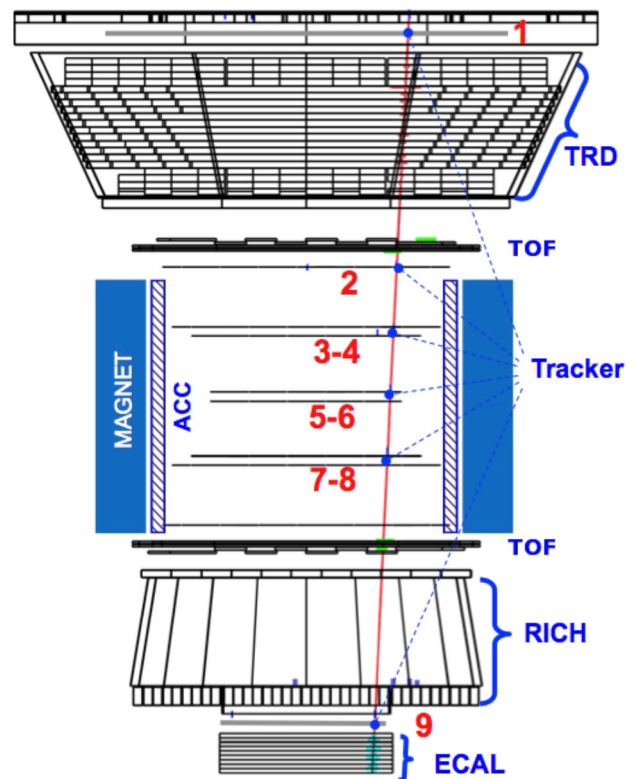


図1 AMS 測定器の概要図と、ISS 上で実際に観測された、rigidity=-363 GVの宇宙線反陽子イベント。

電荷符号を決定できても、陽電子、反陽子には、それぞれ、陽子、電子といった、同じ電荷符号をもつ膨大なバックグラウンドが存在する。これらを除去するために、測定器上部に TRD (遷移輻射検出器)、最下部に Ecal (電磁カロリメータ) を配置している。TRD は 20 層の信号を合成してライクリフッド指数を用いることで、100 GeV/c では、陽電子の識別効率を 90% に保ちつつ、陽子を約 1/3,000 まで抑制できる。Ecal は 17 輻射長の厚さを持ち、電子、陽電子のエネルギーを測定するとともに、シャワーの三次元イメージ解析とトラッカーで測定された運動量とのマッチングにより、陽電子の識別効率を 90% に保ちつつ、陽子を約 1/10,000 まで抑制する。

3 AMS のこれまでの結果

3.1 ファーストリザルト

AMS に関する記事は、今から約二年前の 2013 年に寄稿させて頂いた[1]。当時はファーストリザルトが出る直前のタイミングで予告編という形になり、AMS の測定原理や、打ち上げに至る様々な困難との戦いについて詳しく書いた。その直後に、予告通り、AMS の最初の結果として、宇宙線陽電子比率(positron fraction, 陽電子数を電子と陽電子の和で割ったもの)を 350 GeV まで精密測定したものを公表した[2]。この論文は、Phys. Rev. Lett. の Editor's choice および、Viewpoint in Physics of American Physical Society (APS) Journals として取り上げられるとともに、2013 年の APS Physics Highlights にも選ばれた。これには、毎年数本の論文しか選ばれない。また、論文の引用数は増え続けており、INSPIRE 論文データベースによると、公表から二年経った 2015 年 4 月現在で、350 回以上引用されている。

3.2 陽電子比率のアップデート

最初の結果から一年以上の後、2014 年 9 月に二つの結果を公表した[3,4]。そのうち、陽電子比率のアップデートでは、解析した電子陽電子の統計量が前回の 680 万事象から 1090 万事象に大幅に増え、エネルギー上限値も 350 GeV から 500 GeV に拡張された[3]。

現在の宇宙線の標準モデルでは、 10^{15} eV 程度以下の宇宙線は、超新星爆発に伴う残骸中での衝撃波により加速され、銀河系内を拡散的に伝搬しながら外へ漏れ出すと考えられている。源で直接加速されるため一次宇宙線と呼ばれ、その数はエネルギーのべき関数で減少する。一方、反粒子の生成過程として主に考えられるのは、一次宇宙線と星間物質との衝突である。こうして生成された宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。二次宇宙線として、反粒子の他に、リチウム、ベリリウム、ホウ素などのいわゆる二次核も知られている。二次核の存在比率は太陽系での組成に比べて何桁も多いた

め、非常に長い時間にわたり宇宙線が銀河系内に閉じ込められていることの傍証となっている。

二次宇宙線としての陽電子のエネルギースペクトルは、一次宇宙線の衝突によるパイ中間子(π^0)の生成頻度を元に、崩壊して生じた電子と陽電子の銀河磁場による散乱と、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱によるエネルギー損失を考慮した拡散方程式を解くことによって予想することができる。ホウ素/炭素比(B/C 比)に代表される宇宙線の二次核/一次核比率から、拡散係数はエネルギーとともに増加する、すなわち、エネルギーの高い宇宙線ほど早く銀河系から漏れ出すことがわかっている。陽電子の親となる一次宇宙線の強度がべき関数で減少することも考慮すると、陽電子比率もエネルギーとともに減少するはずである。

しかしながら、AMS で得られた結果は、図 2 に示すように、比率が 8 GeV で底をうった後、単調増加している様子がわかる。同じ図に示された実線は陽電子が宇宙線の衝突によって二次的にのみ生成されるとした場合の予想曲線である。この比較から、8 GeV から増加している陽電子は今まで考えられてきた衝突起源のみならず、新たな別の起源が存在していることが強く示唆される。

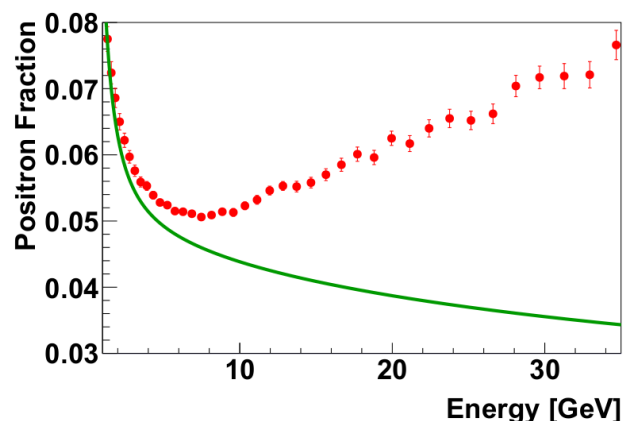


図2 AMSで精密測定された陽電子比率(丸印)の低エネルギーでの振る舞い[3]と、宇宙線の衝突によって二次的に陽電子が生成される場合の予想曲線(実線)。

次に、高エネルギー側に目を向けてみる。図 3 は陽電子比率を 10 GeV 以上の領域で示したものである。この図からわかるように、単調増加してきた比率は、約 200 GeV 以上ではもはや増加せず、平坦になっているということである。陽電子比率が増加しているのではないかということは、PAMELA[5]や、Fermi[6]といった衛星実験の結果から既に示唆されていたが、このような詳細な振る舞いは、AMS の観測によって初めて明らかになった。

AMS の使命は精密で正確なデータを提供することであるが、必要最低限のパラメータでデータをフィットすることも試みた。宇宙線のフラックスは一般的にべき関数になると言われているため、式 (1), (2) に示すように、べき関数で表される拡散成分(電子は一次成分も含む)と電子陽電

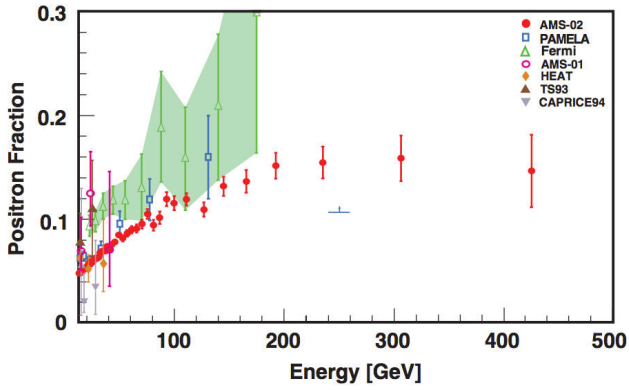


図3 AMSで精密測定された陽電子比率の高エネルギーでの振る舞いと、他の実験データとの比較。文献[3]より引用。

子共通のソースからなる、べき関数に指数関数的なカットオフ(エネルギー E_s)を掛けあわせた項を加えたものを宇宙線のモデルとした。

$$\Phi_{e^+} = C_{e^+} E^{-\gamma_{e^+}} + C_s E^{-\gamma_s} e^{-E/E_s} \quad (1)$$

$$\Phi_{e^-} = C_{e^-} E^{-\gamma_{e^-}} + C_s E^{-\gamma_s} e^{-E/E_s} \quad (2)$$

図4に示すように、1 GeV以上で非常によくフィットでき、カイ二乗として、 $\chi^2/d.f. = 36.4/58$ が得られた。カットオフエネルギーは $1/E_s = 1.84 \pm 0.58 \text{ TeV}^{-1}$ となり、これは、540 GeVに相当する。こうした簡単な陽電子比率の解析によって、電子、陽電子共通のソースがあることが示唆されているが、この正体が暗黒物質から来るのか、それともパルサーなど天体由来のものなのか、あるいは、宇宙線の加速や伝播で説明ができるのかについては、理論の研究者の間でも議論が続いている。

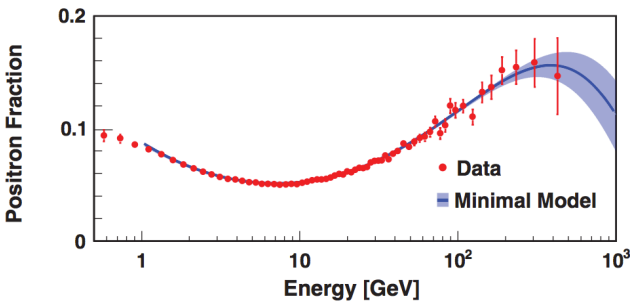


図4 AMSの陽電子比率のデータ(赤丸)を式(1),(2)の簡単な関数(Minimal Model)でフィットしたもの(青線)と68% C.L.の誤差領域(青ハッチ)。文献[3]より引用。

3.3 電子と陽電子それぞれのフラックス

2014年9月に公表したもう一つの論文は電子と陽電子それぞれの宇宙線フラックスの測定である[4]。統計量の制限により、電子は700 GeV、陽電子は500 GeVまでのフラックスを測定した。図5に示すように、電子と陽電子のフラックスは全く異なった振る舞いをしていることがわかる。電

子、陽電子のフラックスはエネルギーのおよそマイナス三乗に比例して減少しているため、詳細な構造を調べる時にはエネルギーの三乗をかけてプロットするのが一般的である。この時、陽電子のフラックスは10 GeV 辺りまでは増加し、30 GeV 辺りまでは一定になるが、その後、再び増加を始める。こういった詳細な振る舞いはAMSによって初めて明らかにされた。

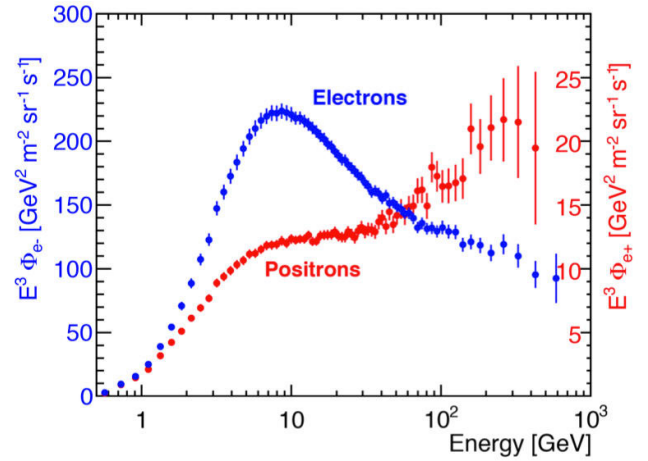


図5 AMSの電子(青点、左縦軸)陽電子(赤点、右縦軸)フラックスの比較[4]。

フラックスをより詳しく理解するため、図6に示すように、スペクトルのべきをエネルギーの関数で求めた。これにより、電子、陽電子どちらも一定のべき関数で表されることはなく、エネルギーとともに徐々に変化していることがわかった。特に、20~200 GeVでは、陽電子のべきは電子に比べてよりハード(値が大きい)になっており、陽電子比率の増加は、陽電子自体が増えていることによるもので、電子が減っていることではないということを証明している。

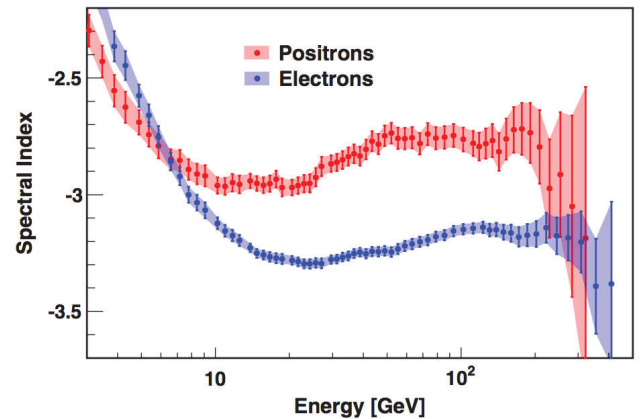


図6 電子(青点)陽電子(赤点)スペクトルのべきをエネルギーの関数で求め、比較した。文献[4]より引用。

3.4 電子+陽電子フラックス

電荷符号の識別をせずに、電子と陽電子を合わせたフラックスは、磁場を必要とせず、カロリメータだけで測定することができる。そのため、気球や衛星、そして、地上での

チェレンコフ望遠鏡など様々な実験で測定されてきた。ここでは、例えば、ATIC 気球実験が公表したように[7]、スペクトルに特徴的なシャープな構造が見られるといったデータが存在し、暗黒物質からの信号を示唆するものとして注目されていた。

AMS としても、電子+陽電子フラックスの測定では電荷符号を決定する必要がないため、カットをゆるくする、有効アクセプタンスを大きくとるなどの解析の最適化を行って統計量を増やし、現在までのデータでも 1 TeV に到達することができる。また、17 輻射長の厚さを持つ Ecal によって、10 GeV 以上の電子陽電子の入射エネルギーを、2%以下の精度で測定するとともに、打ち上げ直前に行った CERN でのビームテストにより、エネルギーの絶対精度も数%で較正されている。図 7 に示すように、AMS で得られたスペクトルは、構造をもたずに滑らかな形をしている[8]。Fermi など他実験との違いについてよく聞かれるが、AMS としては、ビームテストと ISS 上のデータを元に解析しており、モンテカルロ・シミュレーションへの依存を最小限に抑えて、測定の系統誤差を小さくしているため、われわれのデータに関しては確信をもって公表している。

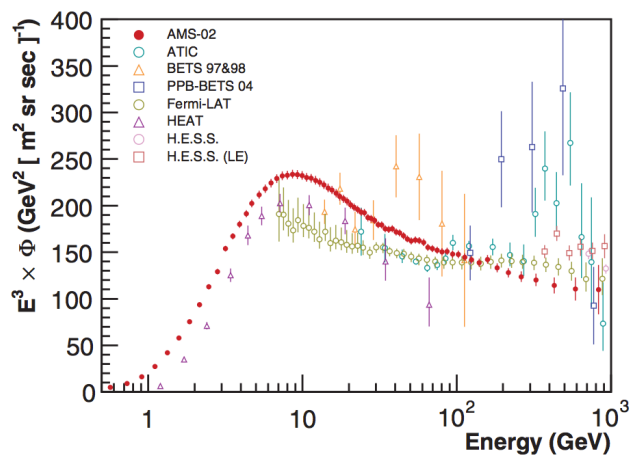


図 7 AMS で測定した電子+陽電子フラックスと他の実験との比較。文献[8]より引用。

4 AMS の最新結果

4.1 AMS days at CERN

冒頭にも書いたが、2015 年 4 月 15~17 日に三日間の公開会議を行って、AMS の最新結果と解析の途中経過を報告した。以下では、その中でも特に重要な、反陽子、陽子、ヘリウム、そして、B/C 比に関して詳しく議論する。

4.2 反陽子/陽子比

宇宙線反陽子は陽電子と同じように、暗黒物質からの対消滅や崩壊から生成される可能性があるといわれている。宇宙線中の反陽子の存在自体は、1980 年代に見つかってお

り[9]、その後行われた BESS 気球実験などによって、2 GeV 付近にピークをもつ特徴的なエネルギースペクトルがあることがわかった[10]。このスペクトルは、陽子やヘリウムなどの一次宇宙線と星間物質との衝突で生成される、いわゆる衝突起源の宇宙線で説明することができる。しかし、高エネルギー側では、上で議論した陽電子の比率と同じ原理で、陽子に比べて、反陽子のスペクトルのべきが急になっていると考えられているため、反陽子/陽子比率が高エネルギーに従って減少すると考えられる。これは、後で詳しく議論する B/C 比がエネルギーとともに減少していることから示唆される。

AMS days では、反陽子/陽子比の解析の途中経過が初めて報告された。反陽子の解析は、陽電子の解析と基本的には同じであるが、反陽子特有の困難も存在する。主なバックグラウンドとなるのは、同じ負の電荷をもつ電子であるが、低エネルギーでは、宇宙線と測定器の物質との反応によって生成されたパイ中間子(π^-)も寄与する。また、高エネルギーでは、陽子の電荷符号決定を間違えて、反陽子と同定してしまうイベントがでてくるため、陽子もバックグラウンドとなる。

まず、電子に関しては、基本的には陽電子に対して行った解析と同じだが、シグナルとバックグラウンドを入れ替えることで、比較的、簡単に対処できる。次に、パイ中間子に関しては、TOF や RICH で測定した粒子の速度と、Tracker で測定した粒子の rigidity から、質量を同定することで、反陽子と分離することができる。この解析では、粒子の速度が測定誤差の範囲で光速よりも十分に低い必要があるため、RICH を用いたとしても、10 GeV 程度のエネルギーまでしかパイ中間子と分離できない。しかしながら、パイ中間子の寄与は主に数 GeV 以下に限られているため、問題はない。最後に、高エネルギーの陽子を反陽子と間違えてしまうイベントであるが、これは主にシリコントラッカーの間にある物質によって陽子が弾性散乱を起こすことが原因であるため、トラックをフィットした時のカイ二乗や、測定器の上半分と下半分でそれぞれ測定された rigidity が誤差の範囲で一致することなどを要求することで除去することができる。

図 8 に AMS days で発表した、反陽子、陽子比率の途中経過を、BESS-Polar II[11]、PAMELA[12]と比較したものを示す。低エネルギーでは、後で詳しく述べるように、地磁気のカットオフの影響で有効観測時間が限られており、低エネルギー反陽子に特化した BESS-Polar 実験の方が統計量が優れていることがわかる。BESS と AMS のデータは同じ太陽磁場の極性の時期に観測されているため、太陽変動の影響が反陽子/陽子比率をとることでほぼキャンセルされていることがわかる。2012~3 年頃に太陽磁場の極性が反転したと考えられており、その前後の AMS の観測では、反陽子

/陽子比が変化するかもしれない。こうした、太陽変調に関する研究も今後時間をかけて行っていく予定である。

一方で、高エネルギー側を見ると、20 GeV 以上で、比率がほぼ一定の値となっていることがわかる。これは、二次起源宇宙線から期待される、右肩下りのスペクトルとは違っており、それを説明するための新たな起源が必要となるかもしれない。暗黒物質の対消滅などは、有力候補の一つであり、AMS days の後すぐに複数の論文が arXiv に投稿され、暗黒物質による解釈が議論されている[13-18]。しかし、暗黒物質を用いずに、既知の天体起源の解釈も可能であるため、現段階では、暗黒物質の証拠と言うには時期尚早である。天体起源として、例えば、太陽系近傍に宇宙線を加速させることができる超新星残骸があった場合、宇宙線衝突で二次的に生成された反陽子が直ちに加速されるというモデルを考えると、AMS で観測された反陽子と陽電子のどちらの過剰も説明できるとされている[19]。ただし、この場合、同じ二次粒子であるホウ素などの二次核のスペクトルがどこまでこのモデルで説明できるかが重要となるため、今後の更なる議論の展開が注目される。

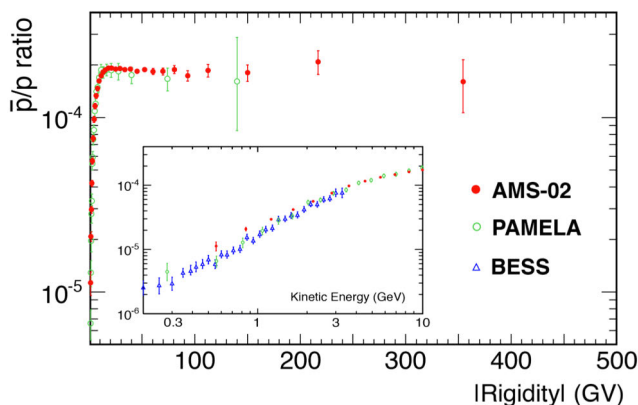


図 8 AMS days で報告した AMS の反陽子/陽子比の解析の途中経過と、BESS-Polar II[11]および PAMELA[12]との比較。

4.3 宇宙線スペクトルの精密測定

AMS の目的は、暗黒物質の間接探索となる、陽電子や反陽子などのデータだけに留まらない。二次起源や天体起源となる反粒子の正確なスペクトルを予想し、暗黒物質の間接探索に対してバックグラウンドとなるスペクトルの詳細な理解も同じように重要である。そのために、AMS は宇宙線陽子、ヘリウム、そして原子核の精密なエネルギースペクトルを測定することで、宇宙線の加速と伝播の理解を深め、反粒子のバックグラウンドとなるスペクトルを決定しようとしている。

4.3.1 陽子スペクトル

陽子は銀河からの宇宙線でもっとも多い成分である。そのため、GeV~TeV 領域では気球や衛星を用いて早くから直

接観測がなされてきた。測定方法としては、主に、磁場スペクトロメータと、カロリメータが用いられている。前者は粒子のエネルギーが高くなるほど磁場中の曲率が小さくなるため運動量測定の分解能が悪くなり、数 TeV 以上のエネルギーでスペクトルを求めるのは難しい。一方で、後者のカロリメータの方は、飛翔体に搭載するためにどうしても重量の制限があり、初期のハドロン反応で生じた $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ からの電磁成分のシャワーエネルギーから入射エネルギーを見積もっている。そのため、エネルギー決定には系統誤差が生じる。

100 GeV 程度のエネルギーまでは磁場スペクトロメータを用い、多くの測定がなされてきた。特に、BESS 実験では、1998 年のフライトによる測定[18]とそれを拡張した、BESS-TeV によって 500 GeV まで測定するとともに[19]、20 GeV 以下では、1997 年から 2002 年までのほぼ毎年のスペクトルが測定され[20]、宇宙線の太陽変調の研究に貢献している。2011 年には、PAMELA によって、1 TeV までの陽子、ヘリウムスペクトルが測定され、数百 GeV に傾きが急なブレークが存在することが示唆された[21]。一方、TeV のエネルギー領域では、ATIC[22]、CREAM[23] などのカロリメータ実験で得られたスペクトルのべきが 100 GeV 以下で磁場スペクトロメータ実験で得られたべきとずれていたが、PAMELA のデータはブレークによって両者を接続していた。このデータを説明するために、様々な宇宙線の加速や伝播モデルが提唱された[24]。

AMS は 2013 年の第 33 回宇宙線国際会議(ICRC)にてデータ解析の途中経過を発表していたが、その後約二年間かけて、系統誤差を減らすように努めてきた。陽子はイベント数が膨大にあるため、測定誤差には統計誤差はほとんど寄与せず、系統誤差で決まってしまう。陽子スペクトルの最終結果は、2015 年 4 月の AMS days で報告され、そのすぐ後に論文が公表された[25]。図 9 に公表した AMS 陽子スペクトルと他の実験[21-23,26]との比較を示す。違いを分かりやすくするため、縦軸にはエネルギーの 2.7 乗をかけている。30 GeV 辺りまでは太陽変調の影響をうけており、測定の時期によってフラックスが異なるが、高エネルギーでは一致するはずである。しかし、AMS のスペクトルには PAMELA や CREAM で示されたような傾きが急なブレークはなく、ゆるやかな傾きの変化がみられる。

スペクトルのより詳細な理解のため、式(3)にあるような、二つのべき関数を rigidity R_0 でスムーズパラメータ s によって接続したような関数を用いると、45GV 以上で非常によくフィットでき、カイ二乗として、 $\chi^2/\text{d.f.} = 27/26$ を得た。

$$\Phi = C \left(\frac{R}{45 \text{ GV}} \right)^\gamma \left[1 + \left(\frac{R}{R_0} \right)^{\Delta\gamma/s} \right]^s \quad (3)$$

これにより、45 GV 以上ではスペクトルを単一のべきで表すことができないということが定量的にわかった。図 10 に 8 GV 以上の陽子データとフィットで得られた曲線、及び、単一のべきを仮定した場合を示す。

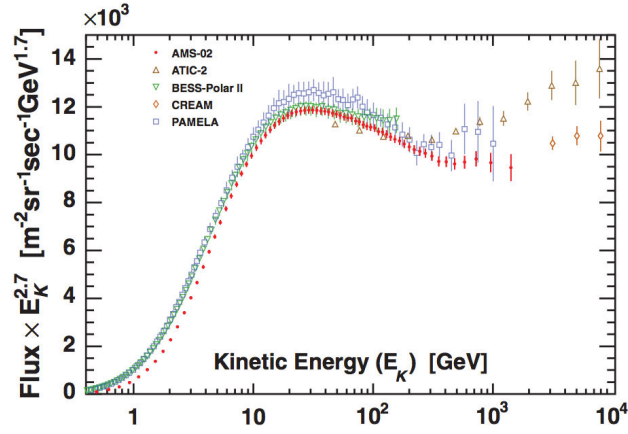


図9 AMSの陽子スペクトルと他実験との比較。文献[25]より引用。

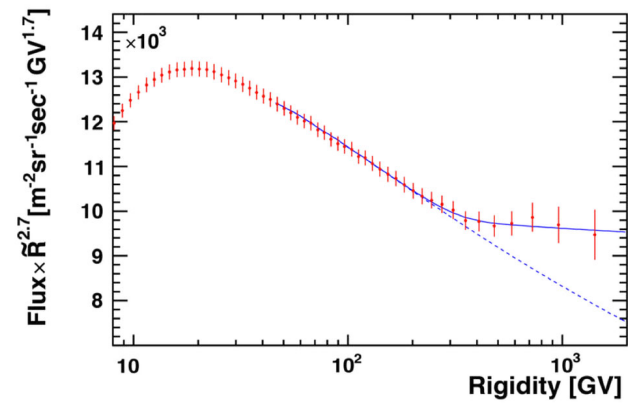


図10 AMSの陽子スペクトル(赤点)を式(3)でフィットしたもの(青い実線)と単一のべきを仮定した場合(点線)。文献[25]より引用。

4.3.2 ヘリウムスペクトル

AMS days では、ヘリウムのスペクトルのほぼ最終結果も報告された。図 11 に示すように、陽子同様ヘリウムのスペクトルでも、PAMELA や CREAM で示唆された傾きが急なブレークは見られず、なめらかに、ゆるやかに傾きが変化している。また、陽子同様式(3)を用いて非常によくフィットでき、単一のべきでは表すことができないことが、ヘリウムのスペクトルでも示された。一方で、ヘリウムのスペクトルは陽子に比べてハードになっており、加速あるいは伝播が両者で全く同じではなく、べきの違いを説明するあたりの何らかのメカニズムが必要になることもわかった。

更に驚くべきことに、rigidity の関数として陽子、ヘリウム比をとると、25 GV 以上で単一のべき関数でフィットすることができ、それぞれのスペクトルで見られた、300 GV

辺りにあったべきの変化が、比をとることでキャンセルされることがわかった。

AMS で得られた精密な陽子、ヘリウムスペクトルを細部にわたって再現できる宇宙線モデルは、現在のところないため、今後、詳細な理論的研究がなされて、宇宙線の加速と伝播モデルが発展していくことを願っている。

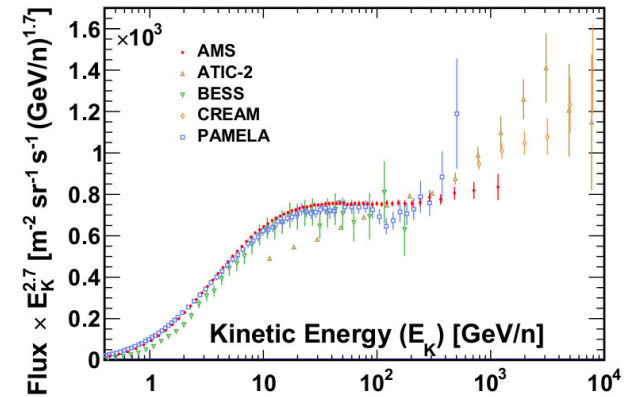


図11 AMS days で報告したヘリウムスペクトルと他実験との比較。

4.4 B/C 比

AMS days では軽原子核のデータ解析についても議論した。その中でも特に重要なのが B/C 比の測定である。3.2 節でも説明したが、ホウ素はリチウム、ベリリウムと同じように、太陽系での組成比が非常に少ない(炭素に比べて 10^{-5} 以下)一方、宇宙線中には数%~数十%存在する。このため、この三種類の原子核はそれより重く天然に多く存在する、炭素、窒素、酸素が宇宙線として伝播している間に星間物質と核破砕反応を起こした二次生成物と考えられている。図 12 に AMS days で報告した、AMS のデータ解析の途中経過と他実験との比較を示す。圧倒的な統計量によって統計誤差が小さくなり、測定器の各層での原子核を同定することによるバックグラウンドの理解によって、系統誤差も十分小さく抑えられている。

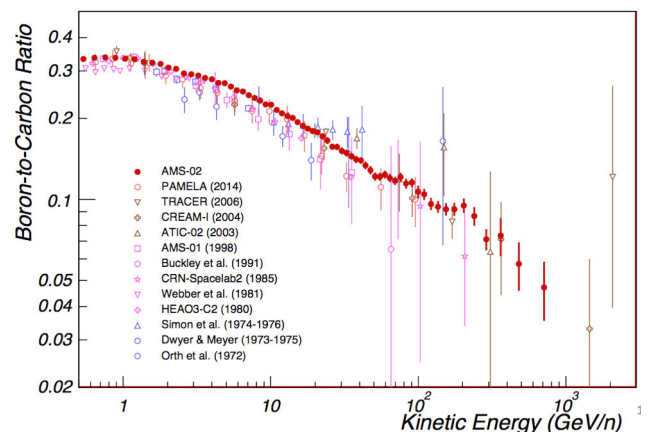


図12 AMS days で報告した B/C 比と他実験との比較。

5 暗黒物質の間接探索

AMSによる暗黒物質の間接探索はまだ始まったばかりである。暗黒物質が WIMP(Weakly Interacting Massive Particles) であると仮定すると、理論的解釈のアプローチとしては、大まかに言って二つある。一つは、文献[27]にあるように、太陽系から近傍の暗黒物質からの対消滅により陽電子が飛来した場合、陽電子比率に特徴的な鋭いピークをもった構造が現れるはずなので、AMS のデータ中に構造がないかを探し、なければそこから暗黒物質の質量や反応断面積に対して上限値をつけることができる。仮定する崩壊チャンネルにもよるが、こういった解析により、数 GeV~数百 GeV の WIMP 質量に対し、反応断面積で $10^{-28} \sim 10^{-26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度以下という厳しい上限値が得られる。これは、宇宙初期の熱平衡の状態から、宇宙の膨張とともに WIMP 同士の反応の凍結が起こって、現在の物質密度になったとした場合に得られる、いわゆる熱的残存量を満たすための断面積、 $3 \times 10^{-26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と同程度かより小さい。

もう一つのアプローチは、4.2 節にも書いた文献[13-18]の例にあるように多くの文献で行われているもので、宇宙線の衝突など、いわゆる Astrophysical バックグラウンドとなる陽電子比率や反陽子比のスペクトルをきめた後に、データからそれを差し引いたものが暗黒物質の信号であると仮定する方法である。AMS のデータをフィットした場合、モデルに大きくよるが、大まかにいって、WIMP 質量にして TeV のオーダーが必要となり、断面積も $10^{-24} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度と熱的残存量からの要求よりも桁が大きくなってしまいうため、それを解消するためのしくみが必要となってしまうことが、理論家の頭を悩ませている。

今後は、AMS の宇宙線核子データを順次公表していく中で宇宙線伝播モデルを洗練し、バックグラウンドのスペクトルの精度を高めていくことが重要となろう。また、加速器実験などで、WIMP の候補となり得る新粒子の兆候が得られれば、WIMP 質量や通常の粒子への反応のチャンネルに条件つけることで、間接探索の信頼性も大きく上がるはずである。

6 まとめ

AMS は 1990 年初めに計画されてから、約 20 年の歳月をかけて準備され、2011 年に ISS 上に測定器を設置して実験を開始した。本稿では紹介しきれなかったが、宇宙から来るかもしれない反物質(反ヘリウムや反炭素原子核)の探索など、現在の素粒子物理学や宇宙論を揺るがしかねない興味深い物理テーマもある中で、現在は、エネルギースペクトルの精密測定による、宇宙線の加速と伝播の詳細な理解、及び、反粒子スペクトルの測定による、暗黒物質の間接探索をメインのテーマとしてデータ解析を進めている。

ISS が飛び続ける限り、AMS はデータ収集をできるため、現在は、少なくとも 2020 年までの運用が期待されている。これは、日本を含む関係各国が合意すれば、2024 年まで延長される見通しである。長期間観測で統計量を増やし、陽電子スペクトルの測定を 1TeV まで行くと共に、飛来方向の異方性の探索も行う予定である。今後も AMS 実験の成果に期待して頂きたい。

参考文献

- [1] 灰野禎一, 高エネルギーニューズ **31-4**, 305 (2013).
- [2] M. Aguilar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 141102 (2013).
- [3] L. Accardo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 121101 (2014).
- [4] M. Aguilar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 121102 (2014).
- [5] O. Adriani *et al.*, Nature **458**, 607 (2009);
O. Adriani *et al.*, Astropart. Phys. **34**, 1 (2010).
- [6] M. Ackermann *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 011103 (2012).
- [7] J. Chang *et al.*, Nature **456**, 362 (2008).
- [8] M. Aguilar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113**, 221102 (2014).
- [9] R. L. Golden *et al.*, Phys. Rev. Lett. **43**, 1196 (1979).
- [10] K. Yoshimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 3792 (1995);
S. Orito *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 1078 (2000) など。
- [11] K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 051102 (2012).
- [12] O. Adriani *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 121101 (2010).
- [13] G. Giesen *et al.*, arXiv:1504.04276 (2015).
- [14] H.B. Jin *et al.*, arXiv:1504.04604 (2015).
- [15] M. Ibe *et al.*, arXiv:1504.05554 (2015).
- [16] K. Hamaguchi *et al.*, arXiv:1504.05937 (2015).
- [17] S.J. Lin *et al.*, arXiv:1504.07230 (2015).
- [18] C.H. Chen *et al.*, arXiv:1504.07848 (2015).
- [19] K. Kohri *et al.*, arXiv:1505.01236 (2015).
- [18] T. Sanuki *et al.*, Astrophys. J. **545**, 1135 (2000).
- [19] S. Haino *et al.*, Phys. Lett. B **594**, 35 (2004).
- [20] Y. Shikaze *et al.*, Astropart. Phys. **28**, 154 (2007).
- [21] O. Adriani *et al.*, Science **332**, 69 (2011).
- [22] A. D. Panov *et al.*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **73**, 564 (2009).
- [23] Y. S. Yoon *et al.*, Astrophys. J. **728**, 122 (2011)
- [24] P. Blasi, Astron. Astrophys. Rev. **21**, 70 (2013) など。
- [25] M. Aguilar *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 171103 (2015).
- [26] K. Abe *et al.*, to be published.
- [27] L. Bergstrom *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 171101 (2013).