

■研究紹介

Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)

- 様々な困難を乗り越え、遂にファーストリザルトへ -

台湾中央大學

灰野 禎一

Sadakazu.Haino@cern.ch

2013年2月28日

1 AMS 実験

1.1 AMS 実験とは

AMS 実験は、アジア、欧州、米国の約 60 の大学、研究機関から集まった、約 600 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 J/ψ 粒子の発見で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、LEP L3 実験での主要メンバーの多くが参加している。コンセプトは LEP で培った素粒子実験技術を宇宙空間に応用し、GeV~TeV 領域の宇宙線を徹底的に調べようというものである。2011 年 5 月に AMS 測定器がスペースシャトルによって打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS) に設置された。以来、現在に至るまで、約二年間、宇宙線データを蓄積し続けている。ISS と同じ 2020 年以降まで、最長で 20 年間以上の運用を目指しており、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。

1.2 AMS の物理

10^8 eV から 10^{20} eV まで 12 桁にわたってエネルギースペクトルが観測されている宇宙線は、ヘスによる発見から 100 年を経てもなお、加速や伝播の機構など未解決の問題が多数残っている。また、地上での加速器実験では到達できないような高エネルギー事象を研究するためにも、非常に重要な研究分野である。AMS が対象とする、GeV~TeV 領域は、太陽系外から来る宇宙線としては相対的にはもっともエネルギーの低い部分である。しかし、流束がもっとも高いため、近年は気球や衛星を用いた直接観測により、様々な精密観測が行われてきた。特に、原子核の組成やアイソトープ、更には、反粒子に至るまで、宇宙線の成分比率がエネルギーの関数で詳細に測定されている。

1.2.1 宇宙線反粒子の観測

宇宙線中に反粒子が存在することは、1970 年代に Goldenらの気球実験で反陽子が初めて観測されたことで、既にわかっていた[1]。そして、1990 年代に始まった日米共同の気

球実験 BESS により、質量の同定という方法でより明確に反陽子が観測され、精密な流束が測定された[2]。そして、陽電子は同じ正電荷である陽子の膨大なバックグラウンドの除去が難しかったが、気球実験 HEAT[3]などが同定に成功した。反陽子も陽電子も、銀河中での高エネルギー宇宙線と星間ガスなどによる衝突で生成された二次粒子が主だと考えられている。そのため、親となる陽子スペクトルがエネルギーのべき乗で減少していくことを考慮すると、陽電子と電子の比率 $e^+ / (e^+ + e^-)$ は、やはりべき乗で減少することが予想されていた。しかし、近年、AMS と同じ磁場スペクトロメータである衛星実験 PAMELA によって[4]、そして、地磁気効果を用いた Fermi ガンマ線観測衛星によって測定されたデータ[5]では 10 GeV から 100 GeV へとエネルギーが増えるに従って、陽電子比率が増加しており、その説明には、宇宙線の衝突以外のメカニズムが必要との理解が一般的となっている (図 1)。

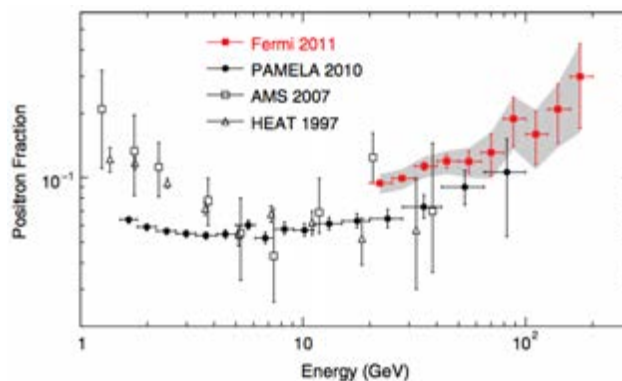


図1 PAMELA, Fermi による陽電子比率の測定結果 ([5]より引用)

1.2.2 陽電子過剰問題

現在、様々な理論的説明が考えられているが、可能性の一つとしては、パルサーのような強磁場を持つ天体が太陽系近傍にあって、ガンマ線と磁場との相互作用などによる電子対生成と、それらの加速を同時に行なっているのではないかという説である[6]。

しかし、もしも、加速天体起源でない場合には、標準理論を超えた新たな理論が必要になる可能性がある。たとえ

ば、暗黒物質は未だにその正体がわかっていないが、正体が何であれ、対消滅や崩壊によって、電子と陽電子が同数生成されるならば、べき乗のスペクトルをもつ電子スペクトルに対して、エネルギーが高くなるに従って陽電子比率が増えていくことが説明できる[7]。更に、もしも、暗黒物質を構成する粒子の質量が数百 GeV～数 TeV であるならば、増加している陽電子比率があるエネルギーで急激に減少するスペクトルを観測できるかもしれない。その場合、間接的ではあるが、標準理論を超えた現象の有力な証拠になるとともに、さらには新粒子の質量の推定も可能になる。

一方で、PAMELA は 100 GeV までの反陽子対陽子の比率のデータも測定しており、これは、衝突起源のモデルと一致している。仮に暗黒物質が宇宙線反粒子の起源の一つだったとしても、陽電子のみに過剰を与えるには、単純なモデルでは難しいため、特殊な崩壊または対消滅過程が必要になるかもしれない。

陽電子の過剰が加速起源なのか、それとも、暗黒物質などからの対生成によるものかの判断には、電子や陽電子の異方性を調べることも重要である。PAMELA は粒子識別性能に優れた測定器であるが、面積立体角が小さいため、異方性を調べられるほどの事象数は得られない。反粒子の異方性探索は大面積を誇り長期間観測を目指す AMS によって初めて可能になる。

1.2.3 宇宙線モデルの検証

スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見の例にあるように、宇宙線を用いた素粒子研究は、地上での加速器実験では得られないようなユニークな現象を垣間見せてくれる時がある。一方で、宇宙線という天然のビームを用いる場合には、キャリブレーションに相当する観測も必要不可欠である。宇宙線成分の大部分を占める、陽子、ヘリウムエネルギースペクトルのべきは、数百 GeV まで磁場スペクトロメータで測定された値[8]と、数 TeV 領域でカロリメータやエマルジョンチェンバで測定された値[9]に若干の変化が報告されている。また、その間のエネルギー領域で測定した PAMELA の結果[10]自体も単純なべき関数では記述できないことが示唆されている。より詳細なスペクトルの測定は、宇宙線加速のメカニズムを調べる上でも重要になる。

また、重い粒子のスペクトルも大事である。特に、太陽系の元素組成に比べて宇宙線中では高い比率をもつホウ素原子核などは、二次生成起源と考えられるため、同じ二次生成による反陽子や陽電子のスペクトルモデルの検証には欠かせない。これまでの気球や衛星観測によって、宇宙線スペクトルや元素組成はかなり理解が進んでいるが、AMS は更に精密なデータを提供できるはずである。

1.2.4 反物質探索

ヘリウムや炭素原子核に関しては反粒子が星間での衝突で生成される確率が極めて低く、もし一例でも検出されれば、初期宇宙に起源があると考えられる。現在のところ BESS-Polar 実験によって得られた反ヘリウム対ヘリウムの流束比として、 6.9×10^8 以下 (95%信頼度) という結果がもっとも厳しい上限値となっている[11]が、AMS ではエネルギー範囲、感度ともに二桁近い領域まで拡張することが可能になる。

1.3 AMS 測定器

AMS は磁気スペクトロメータである。マグネットによる強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符号を精密に決定する。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。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、TRD (遷移輻射検出器)、Ecal (電磁カロリメータ) を配置している。また、アイソトープ識別のために、RICH (リングイメージング・チェレンコフ検出器) も配置している。図 2 にその概要を示す。以下ではそれぞれの測定器要素の詳細を述べる。

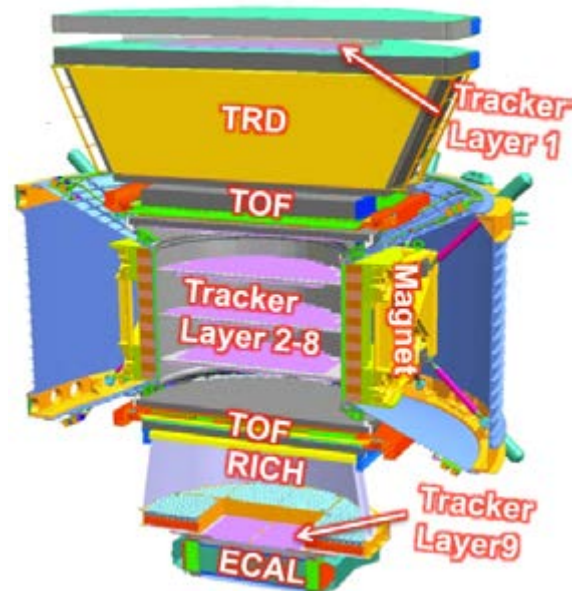


図 2 AMS 測定器の概要図

1.3.1 マグネット

Rigidity の測定、および、電荷符号決定の精度は、磁場の強さと飛跡の長さの自乗に比例する。また、打ち上げ重量

の制限のある中で、マグネットの大型化、強磁場化を行うには、超電導磁石がもっとも適している。そのため、AMSも当初は超電導磁石を用いる計画であった。しかしながら、超電導状態を常に保持するために液体ヘリウムが必要で、実験期間がヘリウムの寿命によって制限されるとともに、過酷な宇宙空間での運用は簡単ではないため、後で述べるように、準備の最終段階において、急ぎよ、永久磁石に変更された。永久磁石は高さ1 m、内径1.1 mの円環状に配置された64個のネオジウム磁石(Nd-Fe-B)からなり、中心磁場1.4 キロガウスのダイポール磁場を発生させている。ISS やスペースシャトルにかかる地磁気によるトルクをなくすため、外部のダイポール成分は無視できるほど小さく保たれている。

1.3.2 飛跡検出器

Rigidity 分解能は、磁場の強さの他に、飛跡の位置分解能にも比例する。また、多重散乱にも影響されるため、物質量をできるだけ少なくすることも重要である。AMSではLEP L3 実験で使われたバーテックス検出器をもとにしたシリコン飛跡検出器を採用した。面積 $41.4 \times 72.0 \text{ mm}^2$ 、厚さ $300 \mu\text{m}$ の両面型シリコンマイクロストリップセンサー2,264枚から構成されている。シリコンセンサーは複数(7~15)枚並べてラダーと呼ばれる基本構造を作り、読み出しやバイアス電圧を共通化している。最大の読み出しストリップ長は60 cmに達するため、陽子のような単一電荷粒子の検出効率と位置分解能を落とすことなく、ノイズレベルを実用範囲まで低減するのは容易ではなく、様々な工夫がなされている。また、同時に、鉄までの原子核識別を可能にするためにダイナミックレンジも十分広く設定されている。技術的な詳細は文献[12]および、2008年春の高エネルギーニュース27-1に掲載されているのでそちらを参照されたい。全部で192本あるラダーは当初はマグネットの内筒領域に8層に配置されていたが、マグネットを超電導から永久磁石に変更した際に、運動量分解能を向上させるため、9層に再配置された。再配置の詳細は後で述べる。

1.3.3 TRD

TRDは主に、陽電子と陽子、そして、反陽子と電子の識別をする[13]。密度 0.06 g/cm^3 、細さ $10 \mu\text{m}$ のポリプロピレン/ポリエチレン繊維の発光体と、Xe:CO₂ (80%:20%)混合ガスを充填した、直径6 mm、最大長2 mの、5,248本のストローチューブのX線検出器からなる。チューブは16本ずつでモジュールを構成し、20層に配置されている。Xeは49 kg、CO₂は5 kgが搭載された状態で打ち上げられ、20年以上にわたって安定的な性能を出せる設計になっている。陽子、反陽子と、電子、陽電子を分離するために、20層のTRD信号を合成してライクリフト指数を用いること

で、100 GeV/cでは、陽電子の識別効率を90%に保ちつつ、陽子に対しては3,000の除去能力を発揮する。

1.3.4 TOF

TOFはマグネットの上に2層、下に2層に配置され、4層のコインシデンスによってトリガーの生成を行うとともに、粒子の速度の測定と方向の決定を行う[14]。各層は8~10本のシンチレーションカウンターからなり、各カウンターは両側からそれぞれ2~3個のPMTによって読み出される。カウンター毎の単一電荷粒子に対する時間分解能は160ピコ秒で、速度の分解能は4%である。分解能は粒子の電荷とともに向上し、炭素原子核に対しては、時間分解能50ピコ秒、速度分解能は1%に達する。

1.3.5 RICH

RICHは粒子の電荷と精密な速度を測定する[15]。発行体は二種類あり、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。チェレンコフ光は45 cm下に配置された合計10,880チャンネルのマルチアノードPMTによって検出され、リングを再構成する。RICHの下には更にEcalがあるため、Ecalの領域の部分にはPMTは配置されていない。中央部に屈折率の大きな発光体を配置しているのは、リングを大きくすることで、中央部にPMTがなくても十分な光子を検出できるようにするためである。速度分解能は0.1%である。

1.3.6 Ecal

Ecalは電子、陽電子とガンマ線のエネルギーを測定するとともに、ハドロンとレプトンの識別を行う[16]。有効面積は $648 \times 648 \text{ mm}^2$ 、厚さは166.5 mmあり、17輻射長に相当する9層のモジュールからなる。各モジュールは1 mmの鉛板11枚と直径1 mmのシンチレーションファイバー10層をサンドイッチにした構造になっており、シャワーの三次元イメージを再構成する。シャワーイメージ解析、および、飛跡検出器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、陽子に対しては10,000の除去能力を発揮する。

1.3.7 ガンマ線観測

AMSは荷電粒子宇宙線に対して最適化された測定器であるが、ガンマ線の観測も可能である。二種類の方法があり、一つは測定器上部で生成された電子対を飛跡検出器で同定する方法、もう一つは、Ecalでの電磁シャワーを用いる方法である。どちらも、より上部にある検出器をvetoに用いることで陽子や電子のバックグラウンドを除去する。ISSの姿勢は天体観測衛星のように安定していないため、AMS

の両側に計二箇所、スタートラッカーを配置し、ガンマ線到来方向を精度よく決定する。Ecalは2~3%のエネルギー分解能で電子、陽電子のみならずガンマ線のエネルギーも測定可能なため、特に、100 GeV ~ 1 TeV の Fermi と Magic/HESS の間のエネルギー領域で有意な結果が期待される。

2 実験準備と打ち上げ

2.1 予備実験 AMS-01

AMS の歴史は 1994 年に発表された論文[17]にまでさかのぼる。そこでは、重量と漏れ磁場を最低限に抑えつつ粒子偏向と有効領域を最大化するためのネオジウム磁石の配置が議論され、AMS の原型が考案された。そして、その原理を検証するための予備実験、AMS-01が1998年に行われた。本実験 AMS-02 と同じ永久磁石を用い、有効領域には同じシリコン飛跡検出器を本実験の約半分の領域に、上下には2層ずつTOFカウンターを配置した。測定器はスペースシャトル、ディスカバリ (STS-91) に搭載され、9日間のフライトによって、約 10^7 の宇宙線事象を観測し、反ヘリウム探索、一次宇宙線 (陽子、ヘリウム、電子) 流束の測定の他に、陽電子比率やホウ素/炭素 (B/C) 比率のデータなどを測定した[18]。

2.2 測定器建設

本実験 AMS-02 測定器の建設には、予備実験の後から実に10年以上の歳月を費やした。主な理由の一つは、宇宙空間での応用が容易ではない超電導磁石に直前までこだわったことにあるが、各粒子検出器、エレクトロニクスに関しても一筋縄ではいかず、宇宙ステーションで実験を行うためには、様々な技術的課題を克服する必要があった。具体的な課題とその対策を表1に示す。

表1 AMS の技術的な挑戦

技術的課題		対策
振動耐性	6.3 G (r.m.s.)	耐性設計, 振動試験
減圧耐性	1 気圧/2 分	
真空	熱対流なし	伝導放熱設計
温度変化	耐性: -40 ~ 80 度	部品選別, 耐熱設計, 熱サイクル試験
	動作: -30 ~ 50 度	
放射能	1 kRad/年	吸収線量試験
宇宙線 重粒子	ラッチアップ, ビット反転	ビームテスト, エラー検出機能
紫外線	経年変化	部品選定, 保護板
流星塵 軌道デブリ	穿孔	保護板
電磁干渉	ISS 条件	アース, フィルタ
磁場	最大 500 ガウス	耐磁試験, 設置場所
修理	不可能	信頼性, 冗長性

宇宙仕様の部品や機器を用いばいくつもの問題は解決できたが、膨大にコストがかさむため、どうしても必要な部品以外はできるだけ商用のものを使い、耐熱試験、耐放射能試験などを行なって最適な部品を選定した。一方で、あらゆるモジュールに対して冗長性をもたせることで、一部分に不具合が発生しても、致命的な問題にならないような設計を徹底した。更に、選定された複数の部品や設計案から最適なものに絞り込むため、4種類の異なるモデルを設計、製作した。まず、エンジニアリングモデル (EM) を製作して、動作面での試験を行った。次に、各部品を耐性のあるものに置き換えたクオリフィケーションモデル (QM) を製作した。QM は更に、振動試験と熱サイクル試験を行うための QM1 と、熱真空試験と電磁干渉試験を行うための QM2 と、二段階で製作された。QM1, QM2 に対しては、部品選定、装置設計、製作、そして、試験というサイクルを何度も繰り返して、最終的な部品と設計を決定し、フライトモデル (FM) とフライトスペア (FS) が製作された。熱サイクル試験は、想定されるもっとも過酷な環境を試験し、試験自体で機器がダメージを受ける可能性があったため、FM と FS に関しては最低限の試験のみ行い試験をパスした QM2 と同等の性能を持つことを確認するに留めた。

この一連の工程で鍵となったのは、部品の選定、特に、重粒子線によるラッチアップに対する耐性であった。2000年から2003年にかけてドイツにある GSI 研究所でのビームテストを繰り返し、Xe, Au, U といった超重粒子ビームを照射して性能の劣化が要求内だった部品だけを選び出した。また、耐振動試験、熱真空試験、電磁干渉試験を自前でを行うために、イタリア、ペルージア大学に、宇宙仕様試験施設を開設し、熱真空チェンバーや振動試験ステージ、電磁干渉測定器などを設置して、AMS の検出器やエレクトロニクスはもちろん、他の宇宙実験の機器の試験も行なえるようにした。

最終試験は2007年までにほぼ終わり、2008年から CERN において、AMS の仮組み上げが行われ、検出器毎の機械的な干渉などがなくチェックされた。その頃はまだ超電導磁石が完成しておらず、磁石なしでひととおり組み上げ、宇宙線ミュオン粒子を用いて測定器の試験やトリガーの調整などが行われた。そして、超電導磁石は2009年によく完成し、本組立が行われた。仮組み立ての経験もあって、本組立はスムーズに進み、2009年末に AMS は完成した。

それは、ちょうどクリスマス頃であったが、プロジェクト開始から15年以上、予備実験から10年以上を経て、ついに、宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルが測定できたときは、皆、感慨ひとしおであった。翌年の2月には CERN でビームテストを行いスペクトロメータの運動量分解能や Ecal のエネルギー分解能を測定した。

2.3 宇宙仕様テスト

ISS 搭載の条件として NASA から課せられていたのが、完成した AMS 測定器の真空中での熱サイクル試験と、電磁干渉試験であった。これには、オランダ北部にある欧州宇宙機構の宇宙仕様試験施設 (ESTEC) にある巨大な真空チャンバーを用いて行われた。モジュールレベルでは何度も試験がなされていたため、粒子検出器やエレクトロニクスに関しては特に問題はなかったが、超電導磁石に必要なクライオ関連装置に関しては簡単ではなかった。中でも特に重要だったのが、液体ヘリウムの蒸発速度を測定し、寿命を見積もることであった。地上と ISS の微重力環境では液体ヘリウムの振る舞いがまったく異なるため、寿命の正確な見積もりは簡単ではなかったが、様々な試験と考察の結果、寿命は 28 ヶ月程度と見積もられ、当初の設計の 3 年からはやや短い結果となった。

2.4 マグネット交換

AMS の宇宙仕様試験が行われたのとはほぼ同時期の 2010 年 2 月、米政府が当初 2015 年までの計画だった ISS 運用を 2020 年まで延長するという方針を示し、2011 年度予算に組み込まれた。また、3 月に東京で開催された宇宙機閣長会議においても運用延長の方針が確認され、各国政府での合意をとるという共同声明が出された。そのため、延長される ISS の運用期間に対して、超電導磁石を用いた宇宙線観測期間が著しく短くなるという懸念が生じたため、マグネットを永久磁石に置き換えるという、思い切った決断を下した。(ちなみに、ISS 上での液体ヘリウムの再充填はできないのかとよく聞かれたが、技術的にも予算の面からもほぼ不可能であった。) 十数年という歳月、そして膨大な予算をつぎこんで、ようやく完成した超電導磁石を諦めるというのは、決して簡単な決断ではなかったが、より有意義な物理観測を行うという観点に立てば当然の決断であった。

しかしながら、このような結果になるということは、超電導磁石が問題を抱えたまま何とか完成した時点で予見されていたため、永久磁石を用いるプラン B として、数ヶ月前から平行して準備が進められていた。具体的には、AMS-01 で使われ、その後一定の温度で保存されていた永久磁石を点検し、詳細な磁場のマッピングを行なって測定結果が 12 年以上前の値と 1% 以内で一致することを確認した。また、最低限の機械加工でマグネットを置き換えできるように、アタッチメントの設計を進めていた。更に、もっとも重要なことだが、永久磁石にすることで、磁場強度が約 1/5 になってしまうという問題があったため、8 層あった飛跡検出器の一部を再配置してトラック長を増やすことで、運動量分解能の向上を図るという計画を検討していた。マグネッ

トの交換を決定した後は、これらの計画を早急に実現すべく急ピッチで作業が進められた[19]。

最終組立されたはずの AMS 測定器は CERN に戻って再び解体され、マグネットの置き換えが行われた。そして、最下層にあった飛跡検出器の一層を TRD の上部に配置するとともに、スペアとして準備していた、飛跡検出器のラダーを用いて新たな検出層を作り Ecal と RICH の間に配置した。これにより、 $L=1$ m だったトラック長が $L=3$ m にまで伸び、磁場が均一でないため、 L^2 ほどの効果はなかったが、rigidity 分解能にして、5 倍の向上が見込まれた。ただし、実際に確認するためには、ビームを用いた測定が必要であった。そのため、2 月に一度行なってはいたが、8 月に、再びビームテストを行うことになった。

2.5 ビームテスト

ビームテストの一番の目的は、飛跡検出器を再配置したことで、狙い通りの rigidity 分解能の回復が得られるかということであった。しかし、永久磁石に置き換えたことによるデメリットは、磁場の減少だけでなかった。超電導磁石の場合は、ISS 上で励磁する予定であったため、磁場なし条件での直線トラックを用い、運動量無限大に相当する粒子を使ったキャリブレーションを行うことができた。永久磁石ではこれが不可能になったため、地上で十二分にキャリブレーションをしておく必要もあった。そのため、AMS に対して約 900 点もの異なるビーム照射位置と角度の組み合わせを算出し、全方位からくる宇宙線とほぼ同じアクセプタンスを再現できるようにした。さらに、ビームを AMS 下方および真横にあて、アクセプタンス外からくる宇宙線に対する測定器の応答も調べた。

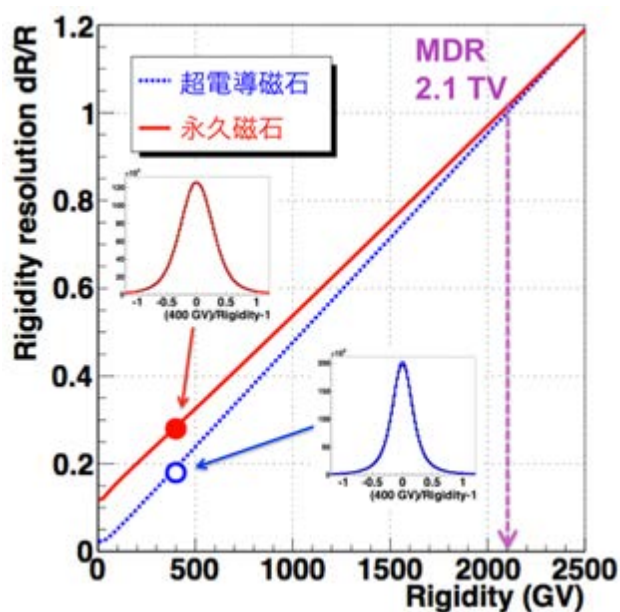


図3 2度のCERN 400 GeV/c陽子ビームテストで得られ rigidity 分解能の測定結果。曲線はそれぞれの条件でのモンテカルロシミュレーション。

ビームは、CERN からイタリア、グランサッソ研究所の間の長基線実験のニュートリノビームを生成するのに使われている、400 GeV/c 陽子ビームを用いて行われた。図 3 に 2 月と 8 月の二度のビームテストで得られた運動量分解能測定の結果を示す。結果はモンテカルロで見積もった値とよく一致し、分解能が 100% になる rigidity (Maximum Detectable Rigidity, MDR) が超電導磁石を使った場合と同じ 2TV になることが確認できた[20]。

2.6 スペースシャトルへの搭載

ビームテストが終了した数日後の 2010 年 9 月初旬に、AMS は CERN を離れ米国に向かった。AMS のコンテナのサイズが民間の貨物用航空機の規格を超えていたため、世界最大級といわれている米国空軍の輸送機 C-5 (ギャラクシー) を用いて輸送が行われた。C-5 の一機がちょうど同じ時期に、イラクとアフガニスタンへの補給を済ませたところであったため、米国への帰途の際にジュネーブ空港に立ち寄ってもらい、空になった貨物室に AMS を搭載し、最低限のコストで輸送することができた (図 4)。



図 4 ジュネーブ空港にて米軍輸送機 C-5 に積み込まれる AMS

通常スペースシャトルが帰還するのと同じケネディ宇宙センターの滑走路に C-5 は着陸し、AMS は直ちに宇宙ステーション準備棟 (SSPF) に運ばれ、スペースシャトルに搭載するための最終準備が進められた。準備は主に、通信関連の整合性テスト、ISS 設置のための機械的な整合性テストなどであり、約半年の期間を要した。同時に、AMS 自体も、宇宙線ミュオンを用いて検出器の動作チェック、トリガーやオンラインデータ圧縮アルゴリズムの調整、そして、ミュプラスとミュマイナス粒子がほぼ同数あることを用いて、粒子の符号決定精度のチェックなどを行い、MDR 2TV が達成できる見込みであることを改めて確認した。

AMS はスペースシャトル、エンデバー (STS-134) に搭載され、4 月末の打ち上げ時期に向けて最終準備がおこなわれた。

ちなみに、エンデバーのマーク・ケリー船長の妻、ギフォード議員が、同年 1 月に銃撃事件に巻き込まれたが、打ち上げを見学できるまでに回復したことは日本でも大きく報道されていた (AMS に関する報道がほとんどなかったことは少し残念であった)。

2.7 打ち上げまでの困難

AMS の建設は 10 年以上の歳月を要し、マグネットを置き換える最後の最後まで困難に満ちたものだったことを書いてきたが、困難はそれだけではなかった。建設に予想以上の時間がかかったため、打ち上げの機会を逃し、計画自体が白紙に戻される危機が何度もあった。2003 年にスペースシャトル・コロンビアの空中分解事故が起きたが、その後、2005 年に野口聡一宇宙飛行士も搭乗したディスカバリの飛行によって再開するまでの約 2 年間、スペースシャトル計画は一次中断された。また、当時のブッシュ大統領が米国宇宙計画の大幅な変更を表明し、スペースシャトルの運用は、ISS の完成予定だった 2010 年をもって終了することになった。そして、残り限られた飛行回数で ISS を完成させるため、AMS は一度、飛行搭載リストから外された。

しかしながら、ティン氏は、「有意義な基礎科学研究が期待できる実験を止めてまで完成させる ISS に何の意味があるのだろうか」という疑問を投げかけ続け、有力な米国議員にも働きかけることで、議会によって大統領の決定を覆すことに成功し、AMS は再び搭乗リストに載ることができた。この陰には、昨年末に亡くなるまで、最長の在任期間を務めていた、ハワイ州の日系上院議員、ダニエル・ケン・イノウエ氏の尽力があったことを書き添えておく。

2.8 打ち上げ

エンデバーは最後のスペースシャトルとなるはずだった。しかし、エンデバーの救護機として準備されていたアトランティスを、その後、通常の輸送に使うことになったため、エンデバーはスペースシャトル史上、最後から 2 番目の飛行となった。打ち上げは、直前に見つかった補助動力装置のヒータのトラブルにより、当初予定だった 4 月下旬から延期され、米国東部夏時間の 2011 年 5 月 16 日午前 8 時 56 分に行われた。打ち上げ総重量は約 2,000 トンだが大部分を燃料が占めるため、約 1,000 トンは最初の 2 分程で燃焼された。スペースシャトル自体の重量は 110 トンで、そのうち AMS は 7.5 トンであった。ISS へのドッキングは飛行 3 日目、AMS の設置は 4 日目の 5 月 19 日に行われ (図 5)、直ちに電源の投入と初期動作チェックを行った後、数時間後には宇宙線データの収集を開始した。以来、今日に至るまで約二年間、ほとんど休むことなくデータを取り続けている。

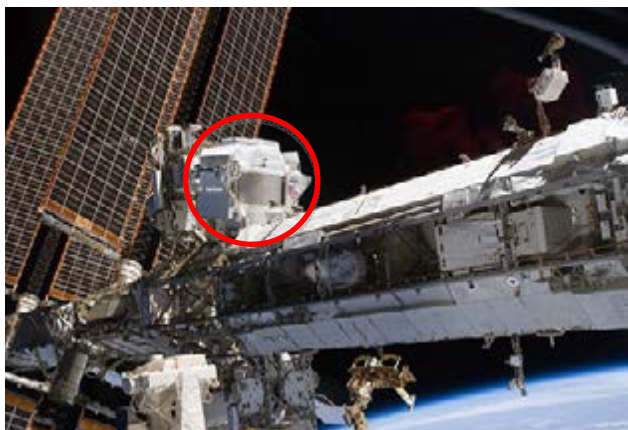


図5 ISSに設置されたAMS (丸で示す)

3 実験運用とデータ解析

3.1 データ収集

AMSが1イベントに対して読み出すADC(16ビット)のチャンネル数は約22万になる。そのうちの大部分はシリコン飛跡検出器からである。トリガーは基本的には4層のTOFのコインシデンスで発生し、ISS軌道上では緯度によってトリガーレートが変化するが、地磁気カットオフの小さい極付近では最大約2キロヘルツに達する。単純計算では読み出しデータ数は、最大7ギガビット毎秒となる。収集したデータはすべてISSからデータ中継衛星(TDRS)を通して地上に送られる。TDRSはISSのみならず様々な衛星でシェアされているため、AMSに対して保証されているのは軌道平均で2メガビット毎秒である。データを安定して地上に送り続けるためには1/3,500のデータ圧縮が必要となる。これはDSP(Digital Signal Processor)を搭載したデータ圧縮ボードによって行われる。基本的には、コモンノイズの見積もりとその差し引き、そして、ゼロサプレッションを行う。粒子信号情報を失うことなく高い効率を常に保つために、軌道毎に2回、データ圧縮しきい値のキャリブレーションが行われる。

3.2 監視体制

地上に送られたデータはインターネットを通じてCERNにあるPOCC(Payload Operation Control Center)に送られ、常時4~5人のコラボレーションメンバによって、24時間体制で監視が続けられている。昨年夏には台湾において、アジア監視センターも開設し(図6)、現在は時差を利用して監視時間を分担している。

ISS上での測定器の運用は、予想していた以上に複雑であった。たとえば、データ圧縮用に使われるDSPのメモリは宇宙線によって約年に一回の確率でビット反転を引き起こす。個々の頻度はそれほど高くないが、全部で約300個のDSPが動作しているため、平均して一日に一回の割合で



図6 台湾に開設されたAMSアジア監視センター。左から、ティン氏、馬英九台湾総統、筆者。

どこかのDSPメモリがビット反転を起こしていることになる。そのため、軌道毎にメモリ内のチェックサムを調べて問題があればリセットするということが自動的に行われている。しかし、反転するビットによっては、データ収集に直ちに影響し、動作を中断させてしまう場合がある。そのため、データのロス最低限に抑えるためにも、常時監視と、問題の対処が必要である。

3.3 ISS特有の問題

ISSの軌道は、天体観測衛星のように観測に最適になるように決められている訳ではなく、米国とロシアの双方からの運用を可能にするため、軌道傾斜角は51.6度と高く設定されている。そして、約90分で地球を一周する。

AMSへの入熱バランスを考える上で、太陽ベータ角と呼ばれる角度の理解が重要である。これはISS軌道面と、地球と太陽を結ぶ線とのなす角を表す。ベータ角が0度の時は、ISSから見て太陽が真東から昇り、ISSの真上を通過して真西に沈むように見える。これが90分に一度起こる。ベータ角は日々変化し、夏至と冬至のあたりで最大75度まで達する。そのため、一年のうち二回、それぞれ一週間ほど太陽が沈まずに、絶えず片側から当たり続ける時期がある。これまで約二年間の観測のなかで、AMSの一部分の温度が上がり過ぎたり下がり過ぎる問題が何度かあったため、その度に、ISSの太陽電池パネルを動かして影を作ったり、ISSの放熱板をAMSに向けて放射熱で過度の冷却を防ぐといった策がとられてきた。また、ISSは当然、AMSだけのものではなく、宇宙に浮かぶ共同実験施設である。我が国のHTVの他に、ロシアのソユーズ宇宙船、プログレス補給船、欧州補給機などが、平均すると月に一度の割合でドッキングしている。ISSはその度に姿勢を変更するため、想定外の方向からAMSに太陽光が照射される場合もあるため、特に注意を必要としている。

3.4 データ解析

3.4.1 イベント再構成

最初の一年間は各粒子検出器の詳細な振る舞いの理解とイベント再構成に必要なソフトウェアの開発に費やされた。上に書いたように ISS 上では特有な熱サイクルが起きるため測定器表面の温度は年間を通して30度以上の幅で変化している。Rigidity など物理量の測定精度、そして、粒子識別性能を一定に保つために温度変化を考慮した様々な補正パラメータが時間の関数で導出された。主なものは、飛跡検出器の各層のアライメント、TOF の時間オフセットと PMT ゲイン、TRD のガスゲインとアライメント、RICH 発光体の屈折率、Ecal の PMT ゲインなどである。

3.4.2 陽電子比率測定

物理解析は、まず、100 GeV までの陽電子比率の解析に絞って行われた。またティン氏の方針として、コラボレーションを2つのグループに分け、それぞれで独立して解析を進めた。陽電子比率の測定に重要なのは、TRD、Ecal を用いた陽子バックグラウンドの除去と、電子と識別するための電荷符号決定精度である。陽子バックグラウンドの除去は、TRD では、陽電子による遷移輻射信号と陽子によるエネルギー損失信号を効率よく識別するためのライクリフッド解析が、そして Ecal では、電磁シャワーとハドロンシャワーを識別するための、BDT (Boosted Decision Trees) 解析が行われ、それぞれのパラメータを二次元で比較することで、互いの陽電子識別効率と、陽子除去能力を評価した。その結果、100 GeV の陽電子に対して90%の識別効率を保ちつつ、TRD は 1/3,000、Ecal は 1/10,000 の陽子除去能力を発揮することを確認した。飛跡検出器による電荷符号の決定精度は、主に MDR で特徴づけられる rigidity 分解能による。しかし、電子と陽電子に対しては特に、制動輻射によって軌跡が不連続となる問題があったため、Ecal での測定エネルギーとの比較をすることで、散乱角度の大きなイベントを除去し、電荷符号決定精度を高めた。ビームテストデータやモンテカルロシミュレーションをもとに、100 GeV において陽電子側になだれこむ電子の割合を見積もり、1%以下に抑えていることを確認した。

3.5 ファーストリザルト

その後、エネルギー範囲を拡張し、最終的に、18ヶ月間の観測データを用いて、0.5 GeV ~ 350 GeV において、約680万の電子と陽電子事象を同定した。特に、100 GeV ~ 350 GeV においては、約1,100の陽電子事象を同定し、統計誤差および系統誤差は、それぞれ約10%以下で陽電子比率を決定した。結果は、ファーストリザルトとして論文にまとめられた[21]。

3.6 その他の解析

現在は、電子および陽電子フラックス、ホウ素/炭素(B/C)原子核比率、陽子およびヘリウムフラックス、宇宙線の異方性解析、そして、ガンマ線観測の5つにテーマを絞って、それぞれに対して独立した2つの解析グループを形成し、解析を進めている。反陽子に関しては、もう少し統計が蓄積されるのを待ってから解析を進める予定である。この夏にブラジルで開催される宇宙線国際会議では、特別セッションを設けて AMS の結果が議論できると期待されている。

4 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 年について国際宇宙ステーション上に測定器を設置して実験を開始した。主に宇宙線反粒子の観測を通して、地上での加速器実験などでは得られないようなエネルギー領域や、素粒子の標準理論では予想もされないような未知の現象を発見できる日を期待しつつ、測定器の運用と、データ解析に取り組んでいる。すでに、約二年分のデータを蓄積し、陽電子比率に対しては、350 GeV まで、数%以内の誤差で決定できているが、これは、最長で20年間の観測を予定している長期運用計画の中では、ほんの一部でしかない。最終目的は TeV 領域までの、反粒子を含めたあらゆる宇宙線のエネルギースペクトルを測定し、暗黒物質などの間接的な証拠を見つける(または否定する)とともに、反ヘリウムや反炭素原子核の探索など、奇想天外な物理がないか、目を凝らして探すことである。今後も AMS 実験の成果に期待して頂きたい。

参考文献

- [1] R. L. Golden et al., Phys. Rev. Lett. **43**, 1196 (1979).
- [2] K. Yoshimura et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 3792 (1995); S. Orito et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 1078 (2000); K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 051102 (2012) など。
- [3] J. J. Beatty et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 241102 (2004).
- [4] O. Adriani et al., Nature **458**, 607 (2009); O. Adriani et al., Astropart. Phys. **34**, 1 (2010).
- [5] M. Ackermann et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 011103 (2012).
- [6] K. Norita et al., Astrophys. J. **710**, 958 (2010) など。
- [7] J. Hisano et al., Phys. Rev. **D 79**, 083522 (2009) など。
- [8] T. Sanuki et al., Astrophys. J. **545**, 1135 (2000); S. Haino et al. Phys. Lett. **B 594**, 35 (2004) など。
- [9] K. Asakimori et al., Astrophys. J. **502**, 278 (1998); M. Hareyama et al., J. Phys. Conf. Ser. **31**, 159 (2006) など。

- [10] O. Adriani et al., *Science* **332**, 69 (2011).
- [11] K. Abe et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 131301 (2012).
- [12] B. Alpat et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **613**, 207 (2010).
- [13] Ph. Doetinchem et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **558**, 526 (2006).
- [14] V. Bindi et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **623**, 968 (2010).
- [15] J. Casaus et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **113**, 147 (2002).
- [16] F. Cadoux et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **113**, 159 (2002).
- [17] S. Ahlen et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **350**, 351 (1994).
- [18] M. Aguilar et al., *Phys. Rep.* **366/6**, 331 (2002);
M. Aguilar et al., *Astrophys. J.* **746**, 105 (2011).
- [19] K. Lubelsmeyer et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **654**, 639 (2011).
- [20] S. Haino et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **699**, 221 (2013).
- [21] AMS collaboration, M. Aguilar et al., to be submitted (2013).