국제우주정거장에서의 반물질 및 암흑물질 탐색 실험

DOI: 10.3938/PhiT.22.047

김경숙·손동철·양종만·김귀년

Searches for Antimatter and Dark Matter at the International Space Station

Kyung Sook KIM, Dongchul SON, Jongmann YANG and Gui-Nyun KIM

The Alpha Magnetic Spectrum (AMS) at the International Space Station (ISS), the most precision experiment carrying out searches for antimatter and dark matter in space, recently published its first result in Physical Review Letters after analyzing the 18 months of data acquired since the initiation of operation. In this article, we summarize the unique capabilities of the AMS detector and the first result on the positron fraction measurement in the search for a dark-matter source. We also summarize some aspects of the Korean participation in the collaboration and its future aspects.

국제우주정거장(International Space Station, ISS)은 미국, 러시아, 독일, 프랑스, 이탈리아, 영국, 벨기에, 일본, 캐나다, 브라질 등 16개국이 참여하여 1998년 첫 모듈이 설치된 다국적 우주연구시설이다. 1994년 전 세계 입자물리계는 초전도 초가속기(Superconducting Super Collider, SSC) 계획이 중단되어 큰 충격을 받았는데, 현재 가동되고 있는 유럽입자물리연구소(CERN)에서 대형강입자가속기(Large Hadron Collider) 계획이 제안될 당시, 텅(Samuel C. C. Ting, J/Psi 입자 발견

으로 1976년 노벨상 수상) 교수는 우주에서의 반물질 검출 성능을 종전보다 1만~10만 배 높일 수 있는 ISS 실험인 AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)를 제안하였다. 1995년에 미국 에너지부(DOE)의 사업으로 AMS 실험을 공식 승인을 받은 텅 교수는 저자 중 한 사람(손동철)에게 참여를 권유하였다. 경북대 연구진은 어떤 부분에 기여할지를 고민하다가, 1996년 참여를 결심하고, 1998년 6월 우주왕복선(디스커버리)에 탑재된 예비실험용 AMS-01에 비행시간측정장치(Time of Flight)의 프리앰프 시험장치를 제작하였다.

우리나라가 ISS 사업에 참여하지 않고 있기 때문에 ISS에 탑재되는 우주선 검출기 제작에 참여함으로써 우주과학 기술 개발에 일조할 수 있다는 특별한 의미와 기대감을 가지고 있었다. 한편 AMS는 우주에서 최초로 적용하는 초전도자석 기술을 채택하기로 결정하였다. 2000년 고에너지물리연구센터가 경북대에 설립되면서 비교적 장기적인 투자가 가능하게 되어 한국연구진은 이화여대를 포함한 연구진으로 확대하고, 본격적으로 AMS-02 검출기를 위한 우주에서의 특별한 기술이 필요한 초전도자석 제작에 참여하기로 하였다. 이 연구를 수행하는 과정에서 초유체 헬륨(Superfluid helium)의 유동성, 액체유출 문제, 전력, 안전 등에 대한 제반 제어 기술이 우주에서 최초로 구현되어야 하므로, 이러한 최첨단 기술들이 우리나라 향후 대형우주연구기기 또는 위성 탑재체에 언젠가 사용될 것으로 기대하였다. 당시 NASA 계획은 2004년 AMS-02 검출기가 설치되어 3년 운영하는 것이었다. 또한 양성자와 전자의 구분을 목적으로 하는 전이복사검출기(Transition Radiation Detector) 개발에도 참여하기로 하고, 관련 신호 장치 회로 제작과 성능 시험작업에 인력과 예산을 투여하였다.

AMS 실험의 주 연구목적인 반물질 탐색은 빅뱅 직후 물질과 반물질의 대칭성이 어떤 이유로 깨지게 되었는지 그리고 현재 반물질이 어느 정도 남아있는지를 이해하기 위한 연구이다. 만일 검출되는 반물질의 양이 예상보다 많다면, 반물질로 구성된 우주의 존재에 대한 단초를 얻을 수도 있을 것이다.

표준모형보다 더 근본적인 이론 중에서 대표적 이론인 초대칭(Supersymmetry) 모형에 의하면, 암흑물질 후보인 뉴트랄리노(neutralino)들이 상호 충돌하여 양전자와 전자의 쌍생성이 일어나게 된다. 따라서 양전자와 전자를 우주에서 정밀 관측함으로써 뉴트랄리노와 같은 암흑물질의 존재와 그 질량에 대한 정보를 얻을 수가 있게 된다. 참고로, 지하에서 암흑물질을 직

저자약력

김경숙 연구교수는 이화여자대학교 물리학 박사(2007)로서 스위스 ETH에서 AMS 검출기 제작에 참여하고, 현재 경북대학교 고에너지물리연구소에서 AMS 실험을 수행 중이다. (kyungkim@knu.ac.kr)

손동철 교수는 메릴랜드대학교 고에너지물리학 박사(1982)로서 컬럼비아대학교 네비스연구소 연구원을 거쳐(1982-1985) 현재 경북대학교 물리학과 교수(1985-현재)로 재직 중이다. (son@knu.ac.kr)

양종만 교수는 시카고대학교에서 1981년 박사학위를 취득하고, 칼텍을 거쳐 현재 이화여자대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 연구분야는 빅뱅핵합성, 안정동위원소, 우주선 등이며 현재 AMS, TA 등의 우주선, 반물질, 암흑물질 실험을 수행하고 있다. (jyang@ewha.ac.kr)

김귀년 교수는 경북대학교 입자물리학 박사(1988)로서 UC-Davis, Notre Dame U, 포항공속기연구소의 연구원을 거쳐(1994-2000) 현재 경북대학교 물리학과 교수(2000-현재)로 재직 중이다. (gnkim@knu.ac.kr)

Fig. 1. The moment of launch of the space shuttle, Endeavour, at the Kennedy Space Center, May 16, 2011. The AMS detector was carried to the Space Station in the cargo bay of the Endeavour.

Fig. 3. The AMS detector mounted at the International Space Station. [Courtesy of NASA]

Fig. 2. Korean AMS teams at the Center for High Energy Physics of the Kyungpook National University are celebrating the successful launch of the AMS detector at the Kennedy Space Center, May 16, 2011.

접 탐색하는 실험도 다양하게 이루어지고 있는데, DAMA, SuperCDMS 등에서 암흑물질을 검출하였다는 보고가 있으나 뉴트랄리노의 존재에 대한 확정적인 증거는 미약하다.

뉴트랄리노의 질량이 수십 GeV 이상일 경우의 탐색 방법은 매우 다양할 수 있다. LHC의 양성자충돌에 의한 생성에 의한 검출 방법과 뉴트랄리노와 물질의 충돌에 의한 신호를 검출하

Fig. 4. AMS Collaboration, with 600 physicists of 60 institutes from 16 countries.

는 지하의 실험과 달리, 우주에서의 AMS 실험은 매우 넓은 수 GeV에서 수 TeV 영역까지의 질량 범위의 뉴트랄리노를 탐색할 수 있다는 강점을 가지고 있다. 광범위한 영역이지만 검출기의 전자, 양전자의 에너지 분해능이 뛰어나기 때문에 가능하며, 예상 외의 성과도 얻을 수 있는 이점을 가진다.

AMS 검출기가 최종적으로 우주정거장에 안착되기까지는 약 16년의 시간이 걸렸으며, 우주왕복선의 폭발과 운영정지가 지의 여러 사건들이 있었으나, 마침내 미동부 표준시간으로 2011년 5월 16일 오전 8시 56분 AMS 검출기가 우주왕복선 엔데버(Endeavour)호에 실려 우주정거장으로 발사되었다. (그림 1) 한국의 연구진은 케네디우주센터에 갔지만, 발사가 지연되어 직접 참관하지 못하고 원격으로 축하하였다. (그림 2) 2011년 5월 19일 오전 5시 46분 AMS 검출기가 ISS에 성공적으로 탑재되었다. (그림 3) AMS 검출기의 무게는 7.5톤이며, 크기는 64 m^3 이다. 전력 소모량도 2.5 kW로 ISS의 태양전지로

공급되고 있다.

공식적으로 ISS는 2020년까지 운영되지만, AMS는 ISS가 작동을 멈출 때까지 10년 이상 데이터 획득을 목표로 하고 있다. 우리나라는 이 연구에 우수연구센터, 도약연구, WCU 사업비 등으로 약 35억 원의 연구비를 투자하였고, AMS 실험 전체로는 약 2조 원의 연구비가 투입되었다. 현재의 AMS-02의 연구진은 16개국 60여 기관의 약 600명의 물리학자들이 참여하고 있다. (그림 4)

AMS 물리학 연구 목표와 검출기의 특성

AMS-02 실험에 앞서 AMS-01 실험은 1998년 6월 2일부터 우주왕복선 디스커버리호에서 열흘간 수행되었다. 이 실험을 통하여 얻은 주요 결과들^[1] 이미 AMS 실험의 우수성과 AMS-02 실험의 가능성을 보여 주었다. 몇 가지 예를 들면, 에너지가 1~140 GeV인 영역에서 원자번호가 2인 입자들을 분석하여 286만 개의 헬륨핵을 찾았지만, -2인 헬륨핵 즉 반물질은 검출되지 않아서 반물질인 반헬륨핵자와 물질인 헬륨핵자의 비의 상한선이 1.1×10^{-6} 임을 밝혔다. 양성자는 0.1~200 GeV, 헬륨은 0.1~100 GeV, 전자는 0.2~30 GeV, 양전자는 0.2~3 GeV 영역, 반양성자는 0.2~4 GeV, 중수소(deuteron)는 0.09~0.85 GeV 영역에서 에너지 스펙트럼을 측정하였다.

입자물리학 및 천체물리학계의 현안들 중 우주의 기원, 암흑물질과 암흑에너지의 본질, 우주 구조의 형성, 반물질의 존재를 포함한 초대칭성의 문제 등은 초관심사이다. 이들은 서로 결부되어 있는 문제들로, 학계에서는 이론과 실험에 의해 다각도로 이들을 규명하려고 노력하고 있다. 138억 년 전 빅뱅으로 탄생한 우주는 아직도 거대한 신비로 남아 있다. 2013년 3월 Planck 실험은 현재 우주를 구성하고 있는 물질 중 암흑물질과 암흑에너지가 거의 대부분임을 밝혔으며, 알려진 원자 등은 4.9%, 보이지 않는 물질인 암흑물질은 26.8%, 암흑에너지는 68.3%나 된다는 것을 밝혔다.^[2] 이는 이전 WMAP의 실험보다 훨씬 더 정확한 실험 결과이다.^[3]

한편, 우주 기원과 우주 구조의 형성 과정에 대해 아직 많은 의문들이 있다. 특히 빅뱅 이후 현재 관측된 물질 위주의 우주는 몇 가지 문제점을 제시하고 있다. 현재, 초기 우주의 물질과 반물질 대칭성 깨짐을 기술하는 중입자생성이론(baryogenesis)은 중요한 관심거리이며, 우주의 대칭적인 초기조건에서 중입자 비대칭이 일어날 수 있는 조건으로 사하로프는 중입자대칭성 깨짐, CP 대칭성 깨짐, 열적평형에서의 벗어남을 제시하였다. 입자 표준모형은 사하로프 조건을 만족시키는 데 필요한 모든 요소들을 포함하고 있지만 정량적인 값이 맞지 않아서 중입자 생성을 정확히 설명하지는 못한다.

우주에서의 반물질과 물질의 비, 우주선입자의 전과과정, 그리고 암흑물질 후보, 특히 초대칭 모형에서의 뉴트랄리노, 여분차원 모형에서 가정된 칼루자-클라인(Kaluza-Klein) 입자 등을 직접 우주에서 탐색하는 연구들은 중요한 의미를 가진다.

AMS 실험은 크게 3가지의 중요한 과학적인 목적이 있다. 첫째는 반물질의 존재를 현재의 한계보다 약 10^4 의 정밀도로 검출하거나 새로운 한계를 얻는 것이다. 둘째는 우주의 26.8%를 차지하고 있는 암흑물질의 존재를 탐색하는 것이다. 셋째는 우주선의 기원과 구성 그리고 예상하지 않는 현상들을 탐색 검증하는 것이다.

반헬륨핵자, 반중수소핵자, 반탄소핵자 등과 같이 반입자 핵자로 구성된 복잡한 구조는 보통의 입자 충돌에서 거의 생성되지 않는다. 반헬륨핵자를 우주에서 관측함은 반물질로 구성된 우주 영역 또는 은하의 존재를 시사하게 된다. 현재의 우주론들은 현존의 물질과 반물질의 비대칭을 설명하고 있지 못하고 있으므로 반헬륨핵자 탐색은 그 자체로 매우 중요한 의미를 갖는다. 현재 진행 중이거나 계획된 다른 실험에서는 AMS-02 실험과 같은 고에너지 영역에서의 반헬륨핵자 탐색은 불가능하다.

많은 초대칭 모형에서 뉴트랄리노는 냉암흑물질(cold dark matter) 후보로 간주되며, 뉴트랄리노끼리의 충돌 붕괴에서 고에너지의 양전자와 전자를 생성할 것으로 예상된다. 암흑물질의 양이 많으면 뉴트랄리노 붕괴로 생긴 고에너지 양전자는 낮은 에너지의 양전자를 방출하는 양전자 스펙트럼과 달리 특이한 스펙트럼을 보여줄 것으로 예상하고 있다. 이 스펙트럼들은 우주의 성간물질의 분포들에 의해서도 달라질 수도 있으며, 또한 암흑물질의 질량이 클 경우 스펙트럼이 크게 달라질 수 있다. 이러한 경우, 특히 수십 GeV~TeV 영역의 고에너지에서의 반양성자(또는 양전자) 스펙트럼에서도 신호가 검증될 수 있으며, 보론/탄소의 비, 불안정한 핵자와 안정한 핵자의 비($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 등)에서도 나타날 수 있고, 반양성자와 양성자의 비의 스펙트럼에서도 단서가 나타날 수 있다.

AMS-02 검출기(그림 5)의 우수한 성능은 축구장과 비슷한 크기의 ISS에 기반한 크기, 무게, 전력 소비량 범위 내에서 다

REFERENCES

- [1] J. Alcaraz, *et al.* (AMS Collaboration), Physics Report, **366/6**, 331 (2002).
- [2] Planck Collaboration, Results XVI, arXiv:1303.5076v1 (2013) and http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe.
- [3] Bennett C.L., *et al.* (WMAP Collaboration), accepted to Astrophysical Journal Supplement (2013), http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr5/pub_papers/nineyear/basic_results/wmap_9yr_basic_results.pdf.

Fig. 5. Major Sub-detectors of the AMS.

른 어떠한 위성 실험보다도 월등한 분해능을 가지며, 검출기 구경이 큰 장점들에 의해 보장되고 있다. 7개의 세부 검출기와 영구자석, 관련 자료획득장치와 이외에도 외부의 방열장치, 수많은 온도 센서와 히터, 가스공급장치, 검출기 정렬 등을 점검하고, 보정할 여러 보조장치와 컴퓨터들로 구성되어 있다.

9개의 평면으로 구성된 실리콘 궤적추적장치(Tracker), 전이복사검출기(TRD), 비행시간측정장치(TOF), 전자기에너지열량계(Electromagnetic Calorimeter, ECAL), 링이미지체렌코프검출기(Ring Image Cherenkov Detector, RICH), 궤적추적장치를 둘러싼 알파형 영구자석과 옆 방향의 백그라운드 입자를 배제하기 위한 반대일치계수기(Anti-coincidence Counter, ACC), 별추적장치(Star Tracker)로 세부 검출기로 구분한다. (그림 5)

궤적추적장치는 전하를 띤 우주선 입자의 궤적과 전하량, 전하의 부호를 측정하며, 궤적의 각 평면 당 위치 분해능은 10 μm 이하이다. 마이크론 단위까지 위치 정렬이 가능한 20개의 IR 레이저 빔을 사용하여 ISS의 진동 등에 대해 보정한다. 자기장은 0.15 T이지만 궤적추적장치의 궤적곡률분해능은 상하단 평면의 간격과 자기장이 있는 공간의 거리의 곱의 역수에 비례하여, 헬륨의 경우 2.7 TV, 양성자와 전자의 경우, 1.2 ~ 2 TV까지 강성(rigidity) 측정이 가능하다. 영구자석은 64개 고순도 Nd-Fe-B 블록으로 알파형 자석을 구성하는 실린더 형태이다. 내부반경은 1.1 m, 높이는 0.8 m에 이른다. 자석의 내부에서 검출기의 한 축(x -축) 방향으로 0.15 T의 자기장이 형성되어 있고, 외부 자기장은 무시될 수 있는 크기다.

전이복사검출기는 전자 또는 양전자를 양성자 또는 헬륨 등의 원자핵과 구분이 주목적으로 20 mm 두께의 플리스츠와 5248개의 가스튜브검출기의 총 20개의 층으로 이루어져 있다.

Xe:CO₂의 90:10 혼합가스가 튜브를 채우고 있으며, 탑재된 총 49 kg의 Xe와 5 kg의 CO₂ 가스로 향후 30년간 전이복사검출기 운영이 가능하다.

비행시간측정장치는 아래와 위 각각 2개의 섬광플라스틱판이 있어 AMS-02 검출기의 주요 트리거로 사용된다. 시간분해능은 160 ps이며, 시간차를 측정함으로써 입자의 속도와 입사 방향을 판별한다. 또한, 신호의 크기에 따라 전하의 구분도 약 $Z=26$ 까지도 판별이 가능하다.

링이미지체렌코프 검출기는 하전입자의 전하량과 속도를 측정하는 것이며, 굴절율이 각각 1.33과 1.05인 두 가지 유전체와 이로부터 발생하는 광 신호를 수집하는 10,880개의 광센서로 이루어져 있다.

1 mm 두께의 납 호일 98개와 직경 1 mm의 섬광 섬유 약 5만 개로 이루어진 전자기 열량계는 유효면적이 $648 \times 648 \text{ mm}^2$ 이며 두께가 166.5 mm이다. 흡이 있는 납 호일 11개 층 사이에 섬광섬유를 끼워 넣어서 만들어진 18.5 mm 두께를 갖는 구조체 9층을 x , y 축으로 교차로 쌓아서 복사길이(radiation length)의 17배에 해당하도록 설계함으로써 입자가 남기는 샤워의 모양을 3차원으로 볼 수 있도록 제작되었다. 1,296개의 광센서로부터 측정되는 입자의 에너지 분해능은 $\sigma(E)/E = \sqrt{(0.104)^2/E + (0.014)^2}$ 과 같이 에너지(GeV)의 함수로 주어진다.

AMS를 이루는 전자장비는 650여 개의 마이크로프로세서들과 300,000여 개에 달하는 신호 채널들로 구성되어 있다. AMS 전자장비 내의 데이터 처리과정에서는 물리학적 정보를 훼손하지 않는 한도 내에서 원시자료의 크기를 1,000분의 1로 줄이게 된다. 수집된 데이터들은 초당 10 Mbits의 평균 전송률로 다운 링크되어 지상으로 전달된다.

검출기 내에 단위시간당 포착되는 입자 수는 가장 적을 때가 적도 근방에서 200 Hz 정도이고, 많을 때는 지구의 자기극 근처에서 2000 Hz 정도이다. 데이터 수득률은 평균 약 86% 정도로, 결과적으로 평균 이벤트 획득률은 약 600 Hz 정도이다. 전자장치에 사용된 모든 부품 및 회로들은 엄정한 우주환경검사를 거쳐 채택되었으며, 2중 또는 4중의 여분을 갖도록 제작되었다. 방사선 노출 환경(irradiation)에서의 성능 검사를 위하여 독일 GSI와 이탈리아의 카타니아(Catania)에서 중이온 빔을 비롯하여 미국 인디애나 및 CERN SPS에서 양성자 빔이 이용되었으며, 온도의존성 검사 및 열-진공 검사는 대만 CSIST 및 이탈리아 테르니(Termini)와 SERMS에서 수행되었다.

AMS 검출기가 설치된 국제우주정거장의 온도는 시시각각으로 변화한다. 모든 부품들이 극한의 온도 변화에 의해 파손되지 않게 하기 위하여 AMS에는 1,118개의 온도센서, 5개의 라디에이터, 298개의 히터가 장치되어 있어, 전자장비들이 정상

적으로 가동될 수 있는 온도($-20^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$)를 유지할 수 있도록 되어 있다. 이에 더하여 트랙커의 온도제어 시스템은 영구자석 내부에 위치한 트랙커의 온도 변화를 1도 이내로 통제하여 최적의 성능을 보일 수 있도록 한다. 또한 약 $1\ \mu\text{s}$ 의 정밀도를 갖는 GPS 시스템과 한 쌍의 광학 망원경으로 이루어진 별추적기를 통해 AMS-02의 시간 별 위치 정보를 확인할 수 있다.

2011년 5월 19일 첫 가동 이후 2013년 6월 13일까지 약 340억 개의 이벤트에 의한 약 74 TB의 raw data가 획득되었으며, AMS 소프트웨어(AMSROOT)를 이용하여 검출기별 신호 변환 처리 및 보정 작업을 비롯하여 물리적 정보로의 변환 작업이 수행되어 약 405 TB의 재구성 데이터가 생성되어, 유럽 입자물리연구소(CERN)의 데이터라이브러리를 통해 제공되고 있다. 이 대용량의 자료로부터 연구진들의 연구 목적에 맞추어서 필요한 정보만을 추출하는 2차 데이터 가공 작업이 수행된 후 개별 원격 데이터센터로 다시 이송 저장된다.

현재 경북대 고에너지물리연구소의 모든 연산 노드는 사용자 로그인 서버와 동일하게 AMS 스토리지 서버와 연결되어 있고, 사용자 홈 디렉토리 환경을 그대로 사용할 수 있도록 구축되어 있다. 컴퓨팅 시스템의 가용성을 최대화하기 위해 시스템 중단이 일어난 경우 신속하게 대처할 수 있게끔 2분 간격으로 모든 서버들을 모니터링하고 있다. 모니터링 항목은 시스템 온라인 여부와 프로세스별 CPU 사용량, 메모리 점유율로서, 만약 시스템이 중단되었을 경우에 문제를 일으킨 프로세스와 사용자를 신속하게 파악할 수 있어 장기적이고 안정적인 시스템 관리가 가능하다. 또한 연구 자료의 안전한 보관을 위해 6개월 마다 스토리지 데이터 전체에 대한 백업을 수행하고, 2개월 간격으로 증분 백업을 실행하고 있다.

양전자 비 측정 결과

20년 운용을 목표로 2011년 5월 19일 국제우주정거장에 설치된 이후 2012년 12월 10일까지의 18개월 데이터를 분석하여 얻은 과학적 결과에 대한 첫 논문이 2013년 4월 5일에 발표되었다.^[4] 0.5에서 350 GeV 사이의 에너지에서 전자와 양전자 신호를 총 6백80만 개 측정된 결과분석으로, 이는 관측될 전체 신호의 8%에 해당하는 양이다. 지난 20년 동안 입자물리학과 천체물리학에서 우주선의 양전자비율(양전자 입사량을 전자와 양전자의 입사량의 합으로 나눈 값)에 대한 관심이 지대하였다. 이 논문에서는 이 비율을 에너지의 함수로, 그리고 방향에 따라 특수한 분포가 존재하는가를 알아보는 내용을 기술하고 있다.

AMS 검출기는 양전자와 전자 신호와 양성자, 헬륨 등에 기

Fig. 6. The positron fraction compared with the most recent measurements from PAMELA and Fermi-LAT.^[5] The comparatively small error bars for AMS are the quadratic sum of the statistical and systematic uncertainties, and the horizontal positions are the centers of each bin. [Courtesy of Physical Review Letters]

인한 배경신호를 매우 정지하게 선별하기 위해 자석 위에 위치한 TRD, 트랙커와, 자석 아래에 위치한 ECAL의 정보들을 주로 이용하였다. TRD의 경우 90%의 효율을 가지고 양전자 제거 능력이 1,000-10,000이고, ECAL의 경우 에너지가 운동량보다 0.75배 이상이어야 한다는 조건을 이용하면 이 능력이 약 10,000에 이르렀다. 운동량 10-290 GeV/c인 2차 양전자와 전자, 운동량 400 GeV/c인 1차 양성자, 10-180 GeV/c인 전자를 띤 파이온 빔 등을 이용한 빔테스트를 실시하였고, 그 결과 400 GeV/c에서 양전자와 전자가 양성자로부터 분리될 수 있는 비율이 1,000,000에 이르는 것을 확인하였다.

분석한 총 사건의 수는 250억 개였고 빔테스트의 결과를 활용한 최적의 재구성 알고리즘을 사용하였다. 국제우주정거장의 우주 환경변화에 따른 데이터 보정을 하였다. GEANT-4.9.4에 기반하여 몬테카를로 사건들을 생산하였다. 이를 통해 입사 입자들이 AMS 검출기 물질과 어떻게 전자기적 또는 강입자적으로 상호작용하고, 세부검출기들이 어떻게 반응하는가를 시뮬레이션하였다.

이번 분석에는 입사한 우주선이 지구 자기권에 의해 중복 입사되는 2차 양전자와 전자를 제거하기 위해 ECAL에서 측정된 에너지가 최대 스톨머(Stoermer) 제한치를 1.2배 이상 초과하는 조건을 사용하였다.

양전자비의 통계적인 오차는 10 GeV 이하의 구간에서는 거의 1 % 이하가 되었으며, 계통오차에는 양전자와 전자의 비대

REFERENCES

- [4] M. Aguilar, *et al.* (AMS Collaboration), *Physical Review Letters* **110**, 141102 (2013).

Fig. 7. A 1.03 TeV electron event as measured by the AMS detector on the ISS in the bending (y-z) plane. [Courtesy of Physical Review Letters]

칭적 입사(acceptance), 양전자와 전자의 선별, 에너지 구간 결정에서의 불확실성, 표준 스펙트럼, 전하 혼동 등이 고려되었다. 계통오차 크기는 통계오차를 넘지 않으며, 이전 실험에 비해 거의 전 구간에서 수십 배 정밀한 결과를 얻게 되었다. 분석 결과 그림 6과 같은 매우 정확한 양전자비 스펙트럼을 얻었다.

10 GeV 이하의 영역에서는 (양)전자의 에너지가 증가할수록 양전자비는 감소하였는데 이는 우주선이 성간물질과 충돌하면서 2차 입자를 만드는 과정에서 예견되는 결과이다. 양전자비는 이보다 높은 에너지에서 약 250 GeV에 이르기까지 점진적으로 증가하지만 20에서 250 GeV 사이에서 그 기울기가 약 10배 정도 점차 감소함을 보여주었다. 높은 에너지에서의 계통오차는 주로 전하 혼동으로부터 기인하였다. 몇 연구그룹들이 독립적으로 데이터를 분석하였는데 모두 위 그림과 일치하는 결과를 보여주었다. 그림은 최근의 PAMELA와 Fermi-LAT 결과들^[5]을 비교하여 보여주고 있다. AMS-02의 오차는 통계오

차와 계통오차를 모두 고려한 총 오차이다.

타 실험에 비해 매우 정밀한 우리 결과는 새로운 물리적 현상을 찾아내기 위한 많은 정보를 포함하고 있다. 얻어진 정밀한 양전자비를 몇 모형에 적용하여 볼 수 있다. 우선 동일한 원천으로부터 생성된 전자와 양전자들의 우주공간에서의 확산과 낮은 에너지에서 관측된 일반적인 확산에 의해 생긴 최소한의 모형을 고려한 결과, 1-350 GeV에서의 다섯 가지 모델 변수를 결정할 수 있었다. 이 모형에 의하면 자료는 특별한 원천으로부터의 양전자의 세기는 확산에 의한 전자에 비해 $0.78 \pm 1.2\%$ 가 되어 암흑물질과 같은 새로운 원천의 존재 가능성을 보여주고 있다. 그림 7은 AMS-02 검출기가 1 TeV의 전자를 기록한 것을 보여주듯이 향후 더 높은 에너지에서의 양전자 비에 대한 AMS-02 결과가 더욱 기대된다.

맺음말

한국의 연구진을 포함하는 우주의 국제우주정거장에서 진행되고 있는 AMS 실험은 양전자 비 측정에서 약 1%의 오차범위를 가진 가장 정밀한 AMS 실험을 수행하였다. AMS 실험에 참여하는 연구진은 우주에서의 매우 특별한 환경에서의 대형연구시설에 대한 새로운 초정밀 기술들인 전력과 온도 제어 기술 등에 대하여 습득한 바가 있으며, AMS 실험 제작, 성능검증실험에 참여하여, 우주과학 기술 부문의 인력 양성과 함께 우주과학연구에 필요한 중요한 정보들을 습득하였다.

현재 진행 중인 여러 중요한 과제, 반양성자 비 측정, 반헬륨핵자 탐색 등의 반물질 탐색과 함께, 양성자, 헬륨핵, B/C비 등 많은 연구 주제들에 대해 연구를 하고 있으며, 향후 연구결과는 학계에서도 크게 주목을 받을 것으로 기대한다. 또 우리의 연구진이 향후 AMS 실험에 대한 기여도를 2~3 % 수준으로 증가시켜 국제 학계에 크게 기여하게 될 것을 기대한다.

REFERENCES

- [5] Adriani O., *et al.* (PAMELA Collaboration), *Nature* **458**, 607 (2009); *Astroparticle Physics* **34**, 1 (2010); Eckerman M., *et al.* (Fermi-LAT Collaboration), *Physical Review Letters* **108**, 011103 (2012).