

크림(CREAM) 프로젝트

초고에너지 우주선(線)의 실체 밝힌다

글_ 양종만 이화여자대학교 물리학과 교수 jyang@ewha.ac.kr

우주선(cosmic ray)은 지구를 향해 들어오는 자연방사능을 말하는 것으로, 1912년 오스트리아 물리학자 V. 헤스가 기구를 타고 산소통 없이 지상 8km 상공으로 올라가서 발견했다. 지난 20년간 관측된 우주선 데이터에 의하면, 높은 에너지를 가지고 있는 우주선 입자의 98%는 원자핵이고 2%는 전자이다. 핵종별로 살펴보면, 87%가 양성자, 12%가 헬륨, 그리고 탄소, 산소, 철 등 나머지 핵들이 1%를 차지하고 있다.

우주선의 에너지 높을수록 선속은 급격히 줄어

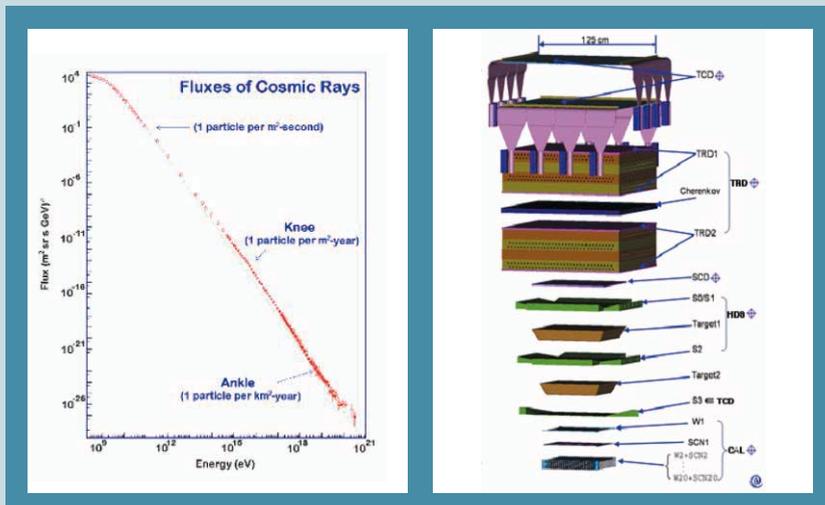
우주선의 여러 가지 특징 중에 눈에 가장 먼저 띄는 것은 우주선의 에너지에 대한 선속(flux)의 변화인데, 에너지가 높아질수록 선속이 급격하게 줄어든다는 것이다. 자세히 보면, 높은 에너지 영역에서 두 군데에서 기울기가 달라지는 지점이 있다. 3천조 전자볼트(3×10^{15} eV) 지점을 '무릎'이라고 부르고, 그보다 1천배 더 높은 지점을 '발목'이라고 부른다. 이런 식으로 선속의 기울기가 바뀌는 지점들이 생기는 이유에 대한 보편적인 해석으로는 에너지에 따라 우주선을 생성하는 에너지원의 종

류, 혹은 가속 메커니즘의 한계 등을 예상하고 있으나, 보다 구체적인 내용에 대해서는 우주초기의 위상결함물체를 포함한 여러 가지 이론들이 있다. 그 중에서 가장 기본적인 이론으로는 이탈리아 물리학자로 시카고대학 교수였던 E. 페르미가 제시한 1차와 2차 가속모형으로 같은 에너지원일지라도 핵종별로 그 지점이 다를 것으로 예상되고 있다. 초신성에 의한 가속의 경우 무릎의 위치가 다를 것이 예상되고 있으며, 현재 여러 종류의 실험에서 이에 대한 측정을 시도하고 있다.

처음으로 생성된 우주선 입자를 '원시입자'라고 부르고, 그 원시입자가 지구까지 날아오는 도중에 성간물질과 같은 여러 종류의 물질들을 만나 분쇄되어 만들어진 입자들을 '2차입자'라고 부른다. 실제로 태양계 물질의 구성성분 비율과 우주선 입자들의 구성성분을 비교해 보면, 리튬, 베릴륨, 보론이나 스칸듐, 바나듐 등의 입자들은 태양계 물질이 우주선에 비해 매우 작은 양밖에 존재하지 않는데, 이는 우주선이 지구로 날아오는 도중에 만나는 물질들과 반응하여 분쇄되는 현상이 중요함을 말해준다. 또, 이 입자들의 에너지에 따른 선속 변화에서도 차

이가 있다. 원시입자에 비하여 2차입자는 에너지가 증가함에 따라 선속이 좀 더 급격하게 감소한다. 원시입자와 2차입자의 양을 비교해 보는 것은 우주선 입자가 어떤 물질을 통과하였는지를 알아내는데 유용하다.

우주선에 관련된 실험은 위치에 따라 크게 세 가지로 나누어볼 수 있다. 지상에서 하는 배열실험(AGASA, Hires, AUGER 등), 성층권까지 풍선을 띄워 올리는 실험(BESS, ATIC, CREAM 등), 그리고, 우주에서 행하는 실험(AMS, EUSO 등)이 그것이다. 배열실험의 경우



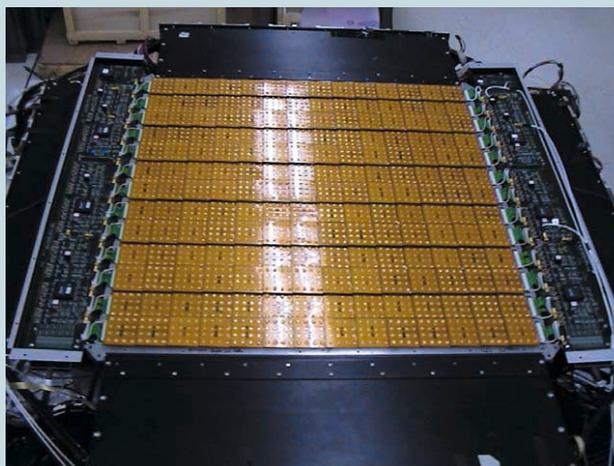
는 체렌코프복사검출기(Cerenkov)나 섬광검출기를 넓은 면적에 늘어놓고 대기권에서 샤워를 일으키면서 지상으로 떨어지는 우주선을 측정한다. 따라서 대기권에서 만들어지는 뮤온 등의 2차입자를 측정하게 되므로, 복잡한 핵반응을 흉내냄으로써 얻어진 결과를 이용하여 원시입자에 대한 정보를 얻게 된다. 그러나 장시간 넓은 면적에서 관측하기 때문에 선속이 극히 적은 고에너지 입자를 관측하는 데 매우 유용하다. 그에 비하여 풍선 실험의 경우는 원시입자를 직접 측정하기 때문에, 원시입자의 종류와 에너지를 정확히 알 수 있다. 그러나 풍선 실험은 보통 1회에 5~20일 정도의 기간밖에 측정할 수 없으므로 높은 에너지의 입자에 대한 관측이 어렵다. 국제우주정거장과 같이 우주에서 측정하는 실험의 경우는 비교적 오랜 기간의 검출이 가능하기 때문에, 높은 에너지를 가진 원시입자에 대한 정보를 많이 얻을 수 있지만 우주라는 환경적인 요소에 대한 충분한 검토가 필요하며 많은 비용이 소요된다.

1천조 볼트 에너지 가진 입자까지 측정

CREAM 실험은 원래 초장기체공풍선ULDB(Ultra Long Duration Balloon) 실험을 위하여 만들어진 검출기로, 1천조 볼트 에너지를 가진 입자까지 측정하는 목적으로 만들어졌다. CREAM은 궁극적으로는 무릎 부근까지의 우주선을 측정하여 우주선의 기원, 가속, 전달 기작을 이해하고자 하는 목적을 띠고 있다. 이와 같은 목적을 만족시키기 위해서 CREAM은 고에너지 우주선 입자들의 에너지와 전하량(z)을 측정할 수 있는 검출기들을 가지고 있다.

전하량의 측정은 우주선 입자의 에너지가 매우 클 경우 고체 매질층을 통과하는 입자가 이온화하면서 잃는 에너지 손실이 핵자 전하량의 제곱에 비례하므로, 이온화된 전자의 양을 측정해 얻을 수 있다.

에너지 측정은 두 가지 접근이 가능하다. 첫째는 무거운 흡수

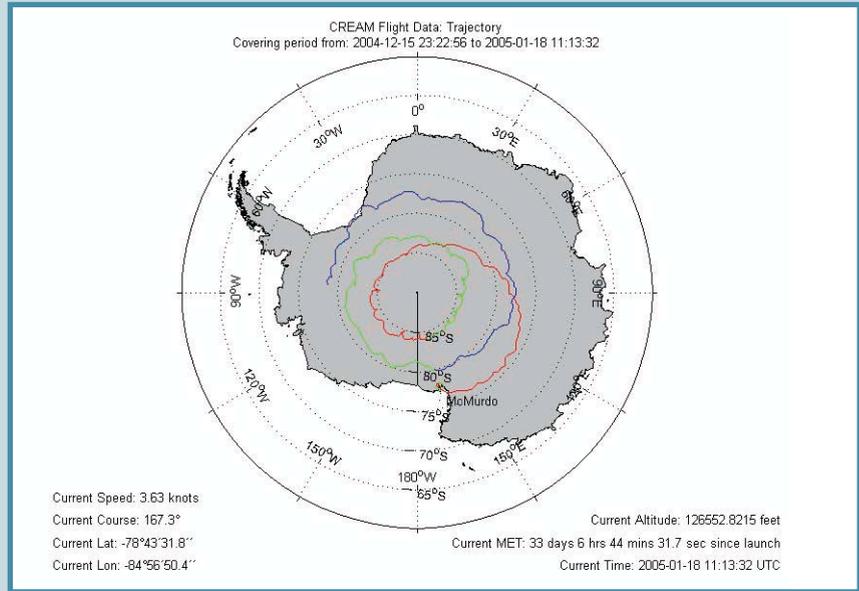


체를 이용하여 입자가 상호작용해 이차 입자들을 생성하도록 한 뒤, 이를 측정하여 전체적인 에너지량에 대한 분석을 하는 것인데, 열량계라 부른다. 원시입자와 그것의 파편과 2차 입자에 대한 강(hadronic) 상호작용 길이는 다소 큰 양이고 따라서 핵자의 열량계는 무거운 장치가 된다. 두 번째는 전자기적 상호작용을 이용하는 것이다. 이러한 검출기는 자기분광계, 체렌코프검출기 또는 가스내에서 이온화 손실을 측정하는 것이다. 이러한 장치들에서 입자들은 강한 상호작용을 일으키지 않기 때문에 원시입자 에너지에 비해 적은 양의 신호를 남기게 된다.

CREAM은 크게 다섯 가지의 부검출기들로 이루어져 있다. 위에서부터 입자의 성분을 검출하기 위한 TCD(Timing based Charge Detector, Penn State Univ. & Ohio Univ.), 입자의 에너지를 측정하고 입사궤도를 알아내기 위한 TRD(Transition Radiation Detector, Univ. of Chicago), 입자 성분 검출을 위한 SCD(Silicon Charge Detector, 한국팀), 들어온 입자의 입사궤도를 알아내기 위한 Hodoscope(S0/S1 Univ. of Maryland, S2 Siena Univ. Italy), 그리고 에너지 측정을 위한 열량계(Univ. of Maryland)가 그들이다. 그 외에도 TCD에서 만들어 내는 Z HI 트리거(Z₂)에 대한 한계를 만들어 내기 위해 들어가 있는 체렌코프복사검출기(Univ. of Chicago)와 열량계에서 반사되는 되튐입자들과 입사한 입자들을 구분하여 TCD가 제대로 작동하게 하기 위해 들어가 있는 S2 등이 있다.

SCD, 0.005 기압에서 양성자부터 철까지 검출

실리콘전하검출기는 핵종 분석을 위한 검출기로 이화여자대



학교, 경북대학교, 한국과학기술원, 천문연구원 등이 공동으로 제작하였다. SCD의 목적은 우주선 입자의 성분을 정확하게 측정하고 열량계에서 일어나는 샤워의 재구성을 돕는 것이다. SCD는 입자의 샤워를 일으키기 위하여 들어가 있는 탄소판 위에 있기 때문에, 정확한 성분 검출을 위해서는 열량계에서 올라오는 반사효과를 고려하여 디자인할 필요성이 있다. 실제로 SCD는 흉내내기 결과와 제한된 환경조건에 따라 약 1.4cm x 1.5cm 정도의 크기를 가진 380 μ m두께의 실리콘 센서가 하나의 채널을 이루고 있으며, 전체 2천912개 채널의 실리콘 검출기로 이루어져 있다.

제작된 검출기는 양성자부터 시작하여 원자번호 26인 철까지의 입자 성분을 검출할 수 있음이 2003년 제네바에 있는 유럽입자물리연구소 CERN에서의 입자빔 실험으로 검증되었다. 또, 잡음이 적고 안정된 출력을 위하여 낮은 누수전류(100V, 25 $^{\circ}$ C에서 5 ± 3 nA/cm 2)를 가지도록 설계하였으며, 풍선실험의 고도에서 일어나기 쉬운 고전압의 누수현상을 고려하여 낮은 전압에서 충분히 작동되도록 고저항($5 \cdot 10^9 \cdot \text{cm}$) 실리콘웨이퍼를 사용하였다.

제작된 센서는 대부분이 80 \pm 15V에서 380 μ m두께가 전체적으로 반응하며, 2004년 'Goddard 우주센터'에서 일주일간 있었던 열-진공검사 결과 실제 실험 환경인 0.005기압에서 아무 문제없이 작동함이 밝혀졌다.

남극 40km 상공에서 실험 진행중

CREAM은 2004년 12월 16일 남극에 있는 미국 맥머도 기지에서 직경 180m에 이르는 LDB 풍선에 실려 발사되었으며 2005년 1월 20일 현재 성공적으로 지상 40km 상공에서 실험이 진행되고 있다. 왼쪽 그림에서 보는 바와 같이 현재 남극을 중심으로 세 번째 주기를 거의 마쳐가고 있는데, 3년 전 TIGER 실험이 수립한 풍선의 체공기록 32일을 이미 돌파하였다.

관측된 우주선을 정밀 분석하려면 1년 여의 시간이 필요할 것이나 이미 탄소와 산소 등의 성분 분석이 잘 되는 것으로 보고 되고 있다. 앞으로 한국 팀은 1년 후에 있을 CREAM II 실험을 위한 SCD 검출기를 제작하고 있으며 고에너지 우주선 입자 검출분야에서 한국의 위상을 국제적으로 확고히 할 기틀을 마련했다고 하겠다.

CREAM 실험 책임자는 메릴랜드대학의 서은숙 교수다. 한국 연구진은 이화여대(박일홍, 양종만, 남신우), 경북대(박환배, 김홍주), KAIST(민경욱), 한국천문연구원(한원용, 선광일, 남욱원)이고, 과학기술부와 미항공우주국의 연구비 지원으로 수행되고 있다.



글쓴이는 서울대학교 물리학과를 졸업 후, 동대학원에서 석사학위를, 미국 시카고대에서 물리학과 박사학위를 받았다. 캘리포니아공대 연구교수 및 방문교수를, 스위스연방공대 방문교수, 이화여대 기초과학연구소장 및 자연과학대 학장을 역임했다.