

2015.11.05.(목) 조간(온라인은 11.05.03:00) 이후 보도해주시기 바랍니다.
*국제엠바고 11.05.03:00

대전(본원): 대외협력실 이식 042 - 869 - 0960 / 강동기 0967

문의: 노서영 대용량데이터허브실장(0860)

안상언 대용량데이터허브실 선임연구원(0840)

유인권 부산대학교 교수(+41-76-253-3400)(현재 스위스 체재 중)

오근수 부산대학교 박사과정생(010-3284-1519)

배포번호 : 2015-47

매수 : 보도자료 11매

배포처 : 대외협력실

배포일자 : 2015.11.04.(수)

(참고자료 8매 포함)

KISTI 참여 'STAR' 국제공동연구진, 반양성자 간 상호작용 규명

- 세계 최초 반물질 간의 상호작용 측정에 성공해 물질-반물질의 대칭성 확인 -
- 국내 연구진(KISTI, 부산대) 참여 실험팀, 네이처에 논문 게재 -

□ 한국과학기술정보연구원(원장 한선화, 이하 KISTI)과 부산대학교(총장직무대리 안홍배, 이하 부산대)가 참여한 미국의 상대론적 중이온 충돌기(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)의 스타(STAR) 국제공동연구진이 세계 최초로 반양성자-반양성자간의 상호작용 측정에 성공하였다.

□ 연구결과의 주요 내용은 다음과 같다.

1. 연구의 필요성

가. 핵물리학의 중요한 목표는 원자핵을 구성하고 있는 핵자들¹⁾간의 강한 상호작용을 이해하는 것이다. 1911년 러드퍼드가 원자핵을 발견한 이래로 100여년동안 광범위한 연구가 진행되면서, 핵자를 구성하고 있는 쿼크들 및 그 반물질입자²⁾인 반쿼크의 존재가 확인되고 우주를 구성하는 기본입자에 대한 표준모형³⁾이 확립되었다. 또한 여러 개의 양성자들과 중성자들로 구성된 원자핵은 같은 전하를 띠는 양성자들간의 전자기적인 반발력보다 더 센 인력인 강한 핵력에 의해 결합되어 있음이 밝혀졌다.

하지만, 이후 반쿼크 3개로 구성된 반양성자의 발견 (세그레, 채임벌린⁴⁾) 에 이어, 최근에는 가장 무거운 반물질원자핵인 반헬륨원자핵⁴⁾의 존재 및 질량까지 측정 (STAR, Nature 2011) 되었음에도 불구하고, 반핵자들⁵⁾간의 상호작용은 아직까지 전혀 알려진 바 없었다.

나. (반)입자들간에 작용하는 상호작용을 규명하려면 그들의 물리적 성질(질량, 전하량 및 운동량)을 측정하여 그 둘 간의 간섭효과를 측정해야 한다. 반양성자들간의 상호간섭효과를 측정하기 위하여, 반물질을 충분히 생성시킬 만큼의 고에너지 중이온(원자핵)⁶⁾ 충돌, 이를 정밀하게 측정하는 다양한 고성능의 검출기 및 엄밀한 데이터분석 기술과 컴퓨팅 자원이 요구된다.

2. 발견 원리

가. STAR (Solenoidal Tracker At RHIC) 국제공동연구진은 미국 브룩헤이븐 국립 연구소(Brookhaven National Laboratory, BNL)에 건설된 상대론적중이온충돌기(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)에서 금원자핵끼리 핵자당 2천억 전자볼트의 중심에너지로 충돌시켜 생성되는 입자들을 STAR 검출장치 (그림1) 를 이용해 측정하는 실험을 수행하였다. 고에너지의 중이온(원자핵)끼리의 충돌은 우주 탄생(Big Bang) 직후와 비슷한 환경으로 입자와 거의 같은 양의 반입자들을 생성시켰고, STAR 검출장치는 이들의 물리적 성질을 정밀하게 측정함으로써 반양성자-반양성자 사이의 상호작용을 규명할 수 있었다. (그림 2)

나. 중이온 충돌 실험으로 생성된 반양성자들과 양성자들을 이용해, 반양성자들간의 간섭효과와 양성자들의 간섭효과를 HBT 간섭법 (Hanbury-Brown and Twiss intensity interferometry)⁷⁾을 이용하여 직접적으로 비교하고, 이미 알려진 양성자 간 인력으로 작용하는 강한 핵력의 작용거리⁸⁾와 산란거리⁹⁾를 토대로 반양성자들 간의 상호작용을 규명하였다.

3. 연구 성과

가. 양성자-양성자 및 반양성자-반양성자의 세기간섭을 나타내는 상관함수(correlation function)을 통해서 반양성자 사이에는 세계 당기는 강한 핵력이 작용하며, 반양성자쌍의 산란거리(scattering length)가 약 $7.41 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.36(\text{sys})$ fm이고¹⁰⁾, 유효거리(effective range)가 약 $2.14 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 1.34(\text{sys})$ fm로 측정되었다. 이는 기존에 잘 알려져 있던 양성자-양성자의 측정결과와 오차 내에서 일치하며, 양성자 사이의 상호작용과 반양성자 사이의 상호작용이 차이가 없음을 입증한 것이다. 이로써 상호작용에서도 물질과 반물질 대칭성이 존재한다는 것을 규명했다.

나. 기존의 입자의 대칭성 확인 측정에서 몇 단계 더 나아간 이번 연구는 인류역사상 최초로 반물질 핵자의 상호작용 대칭성을 측정함으로써 강한 핵력 및 상호작용의 대칭성 연구를 진일보시켰다.

1) 핵자 = {양성자, 중성자}

2) 물질입자와 반물질입자: 물질입자(=입자)와 반물질입자(=반입자)는 질량 등 모든 물리량이 똑같지만 스핀의 방향이 달라서 전하만 반대를 띤다.

3) 6개의 쿼크, 6개의 경입자 및 각각의 반물질입자들이 4개의 상호작용을 통해 우주를 구성하고 있다는 모형

4) 1955년 노벨물리학상

- 이번 연구결과로 작성된 논문은 네이처(Nature)지 온라인(Advanced Online Publication)판 11월 4일자(미국시간 기준)에 게재되었다.
 - 논문제목: Measurement of interaction between antiprotons
 - 게재저널: 네이처 (Nature) 온라인 (10.1038/nature15724)
 - 저자 정보: STAR 국제공동연구진(교신저자), 노서영(공저자, 한국과학기술정보연구원), 오근수(공저자, 부산대학교 박사과정), *유인권(공저자, 부산대학교 교수), 장행진 (공저자, 한국과학기술정보연구원) 이상 한국 2개 연구기관 (부산대학교, 한국과학기술정보연구원) 소속 4명
 - *STAR 한국 연구진 대표

- 유인권 부산대학교 물리학과 교수와 부산대 및 KISTI 소속 연구원 4명은 한국연구재단(NRF)이 지원하고 있는 “반물질의 생성과 진화(중견연구자 지원사업)” 및 미래창조과학부의 지원을 통해 국제공동연구그룹 스타(STAR)의 “반양성자-반양성자 사이의 상호작용의 측정 및 비교 연구”에 참여했다.
 - KISTI는 이번 연구에서 KISTI의 컴퓨팅 인프라(CPU: 1,000코어 / 저장 디스크: 500TB)를 2012년부터 2014년까지 3년간 지원하며 데이터 관리 및 분석에 많은 기여를 했다.

- 한국 연구진 대표인 유인권 교수는 “원래 반물질 입자들의 존재 자체도 놀라운 일이지만, 그들이 물질들과 똑같이 상호작용한다는 것은 더욱 신기한 일”이라며 “이렇게 형성된 또 다른 반물질의 우주가 존재할 가능성도 있다”고 말했다.(끝) (이어서 참고자료)

5) 반양성자 및 반중성자

- 6) 중이온(heavy ion) : 원자에서 전자를 모두 떼어내면 순수한 양이온(=원자핵)이 됨. 통상적으로 헬륨(He) 이온(원자핵) 이상의 질량을 갖는 이온(원자핵)을 뜻함.
- 7) 1950년대 별의 반경을 측정하기 위해 헨버리브라운-트위스 (HBT)가 개발한 세기간섭현상을 이용한 거리측정방법. 이후 입자및핵물리에 응용되어 입자들의 상대적인 운동량으로부터 상호작용의 거리를 측정하는 데 활용되었다.
- 8) 강한상호작용이 영향을 미치는 유효거리
- 9) 전자기적인 반발력에 의하여 산란이 일어나는 거리
- 10) 1fm는 1천조분의 1 미터로 양성자의 대략적인 반경이다.

- 〈참고자료〉 : 1. 연구결과 개요
2. 연구결과 문답
3. 용어설명
4. 그림설명

연구 결과 개요

1. 연구의 필요성

- 기본적으로 자연계의 보편적인 대칭성이란, 전하(C), 공간(P) 및 시간(T)의 반전과 상관없이 물리법칙이 통용된다는 범우주적 대칭성에 해당하는 것으로 현재의 표준모형에서 예측하고 있는 아주 중요하고 기본적인 대전제이다. 예를 들어 현재의 물리법칙이 특정 전하, 특정 공간 (좌표), 특정 시간 에에서만 유효한 것이라면 대칭성이 깨져 있는 것이지만, 서로 상대적인 정의인 전하에 있어서 음전하를 양전하로, 양전하를 음전하로 뒤집어 정의한다고 해도 물리법칙은 모두 통용된다면 이는 전하에 대해 '대칭성'을 갖는다고 얘기할 수 있다. (공간 좌표나 시간에 대해서도 마찬가지이다.)
- 물질입자와 반물질입자는 기본적으로 이러한 대칭성을 확인하는 중요한 정보를 제공한다. 물질입자와 반물질 입자의 물리적 성질 (질량, 전하량 등)을 측정하는 일이 필요하지만, 이를 정밀하게 측정하는 일은 검출기의 성능과 엄밀한 데이터분석 기술이 요구된다.
- 반물질입자는 현재의 자연상태에서 거의 존재하지 않기 때문에 본격적인 연구가 진행되지 못하였으며, 특히 반물질핵자간의 상호작용에 대한 연구는 전무하였다.

2. 연구 내용

- 이러한 측정을 위해서는 우선 풍부한 양의 반물질 입자가 생성되는 실험환경이 조성되어야 하며, 반물질 입자의 물리량을 정확하게 측정할 수 있는 다양하고 정밀한 검출기가 필요하다.
- STAR 검출장치를 이용한 실험은 미국 브룩헤이븐국립연구소 (BNL)의 상대론적중이온충돌기 (RHIC)의 대형실험 프로젝트로, 최고 에너지 (1000억 전자볼트*)의 금이온 (금원자핵)을 양쪽에서 충돌시켜 중심에너지가 2000억 전자볼트에 이르는 원자핵 충돌실험을 진행하고 있다.
 - * 1전자볼트는 전자 하나가 1V의 전압에서 가속되어 얻게 되는 에너지로서, 핵자(양성자 혹은 중성자)당 2000억전자볼트의 에너지는 핵자 하나를 광속의 99.999%로 가속시키는 에너지에 해당한다. 금 원자핵은 대략 197개의 핵자로 이루어져 있어 총에너지는 무려 39.4조 전자볼트에 이른다.
- 2000년부터 다양한 에너지로 중이온(원자핵)-중이온(원자핵) 충돌을 비롯한 양

성자-양성자 , 중이온-헬륨3, 중이온-중수소, 중이온-양성자 충돌실험이 이루어지고 있는 STAR 실험은 원자핵 충돌을 통한 초고온, 초고밀도의 극한 환경에서의 핵물질연구를 수행하고 있다.

- 고에너지 중이온충돌이라는 극한 환경에서 입자와 반입자들의 생성은 거의 동일하게 풍부해지며, 이번 정밀측정의 대상이 되었던 양성자와 반양성자도 그 결과로서 생성된 입자와 반입자들이다.
- 충돌에서 생성된 (반)입자들이 STAR 검출 장치의 거대 자기장 내에 남긴 궤적의 곡률반경, 입자고유의 에너지손실 및 비행시간의 정밀한 측정이 이번 입자와 반입자의 상호작용 측정을 가능하게 하였다.
- STAR 실험에서 이루어진 중심에너지 200GeV의 금핵-금핵 충돌실험에서 반양성자-반양성자 사이에는 강한 인력 (강한 핵력) 이 작용하며 그 유효거리 (effective range)가 약 $2.14 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 1.34(\text{sys})$ fm, 전자기적인 반발력을 일으키는 산란 길이(scattering length)가 약 $7.41 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.36(\text{sys})$ fm로 측정되었다.
- 이는 사실상 데이터의 통계 및 검출기 시스템 오차를 고려했을 때 양성자-양성자 사이의 상호작용과 차이가 없음을 입증한 것이다.

3. 기대 효과

- 2010년과 2011년에 STAR 국제공동연구진에 의해서 사이언스와 네이처에 발표된 반물질초삼중수소 및 반물질헬륨4원자핵 등의 무거운 반물질의 생성원리를 규명하는데 중요한 단서를 줄 것으로 생각된다. 나아가 반물질의 대칭성을 이해하는 데에도 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.
- 이번의 반양성자-반양성자 상호작용 측정 및 비교의 결과는 향후 물질-반물질 대칭성과 반물질원자핵의 구성 연구에 중요한 단서를 제공한다.

연구 결과 문답

이번 성과 뭐가 다른가	중전에 전자, 양성자와 같은 기본입자, 기본 핵자들에 대한 대칭성을 발견했던 것에서 한단계 더 나아가 반물질입자 사이의 상호작용을 규명하고 이는 물질입자들 사이의 상호작용과 차이가 없음을 확인했다는 것이 큰 의미이다.
어디에 쓸 수 있나	우주의 기본입자들과 구성원리에 대한 표준모형의 대전제인 대칭성을 다시 한번 확인함으로써 표준모형 이론의 확장에 중요한 가이드라인을 제공하였다. 나아가 반물질원자핵을 구성하는 반물질핵자의 상호작용을 이해함으로써 반물질원자핵의 구조와 그들 사이의 상호작용을 이해 할 수 있는 중요한 측정이다.
실용화까지 필요한 시간은	인류의 우주에 대한 이해와 지식을 진보시킨 업적으로서 실용화와는 거리가 멀다. 단지, 이번 실험결과의 측정에 사용된 정밀한 입자검출기는 의료 및 원자력 등 방사선기술 응용에 이미 널리 사용되고 있으며, 정밀도 면에서 첨단 방사선검출기술의 원천기술 확보와 연구개발에 기여할 수 있다.
실용화를 위한 과제는	이런 대형 국제공동연구에 활용된 초정밀 첨단 입자검출기의 직접적인 연구개발과 제작에 참여하여, 국내연구진의 노하우와 국내의 검출기 연구개발 인프라를 구축해가는 일이 필요하다.
연구를 시작한 계기는	고에너지 중이온충돌실험은 일반적인 입자충돌실험과는 달리 대단히 복잡하고 엄청난 빅데이터의 재구성과 분석기술을 필요로 하며, 동시에 우주최초의 물질구성에 대한 중요한 단서를 제공한다. 본 연구업적은 물질과 반물질입자들을 다루는 우주최초의 물질상태 연구의 도중에 얻어진 부수적인 성과이다.
에피소드가 있다면	300여명의 국제적인 전문가그룹이 함께 공동의 실험을 수행하고 그 연구결과를 분석하는 일은 대단히 치밀한 공조로 이루어지며, 어느 한사람의 공로로 여겨질 수 없다. 한국도 2000년대 초반부터 꾸준한 지원을 통해 데이터 분석에 기여하고 있으며, 최근 KISTI는 순수 컴퓨팅 그룹으로 STAR 실험에 참여하면서 컴퓨팅 자원을 기여하였다. 이는 이번 연구결과를 도출하는데 국내연구자가 직접적으로 기여할 수 있게 한 중요 인프라이며, 앞으로도 많은 인프라 기여가 기대된다.

용 어 설 명

1. 네이처 (Nature)

- Nature에서 출판하는 과학분야 국제학술지 (IF 41.456, Rank 1/56)*
*http://www.nature.com/npg_/company_info/impact_factors.html

2. 반물질입자 = 반입자

- 표준모형에 의하면, 현재 우리 주위에 존재하는 모든 입자들(전자, 양성자, 중성자 등)은 각각의 짝이 되는 반입자 (=반물질입자)를 갖고 있으며, 이것들은 반물질 기본 입자들로 구성된다. 실제로 지금까지 무수한 반입자들이 발견되었고, 우주최초를 재현하는 중이온충돌실험에서는 물질입자들과 반물질입자들이 거의 동등하게 생성되고 있음도 실험적, 이론적으로 입증되었다. 반입자는 입자와 모든 것이 똑같지만 스핀의 방향이 달라서 전하만 반대를 띤다.

3. 상대론적중이온충돌기

- 상대론적중이온충돌기 (Relativistic Heavy Ion Collider) 는 미국 뉴욕주 소재 브룩헤이븐국립연구소 (BNL) 에 건설된 중입자 가속기시설이다. 이 가속기 내부에는 각기 반대방향으로 가속되는 두 개의 가속 빔라인이 있고, 이 두 빔라인이 마주치는 곳에서 충돌실험이 이루어지도록 설계되었다. 현재 이 상대론적중이온충돌기에서는 2개의 대형검출장치(STAR, PHENIX)가 설치되어 각각 독립적인 충돌실험을 진행하고 있다.

그림 설명

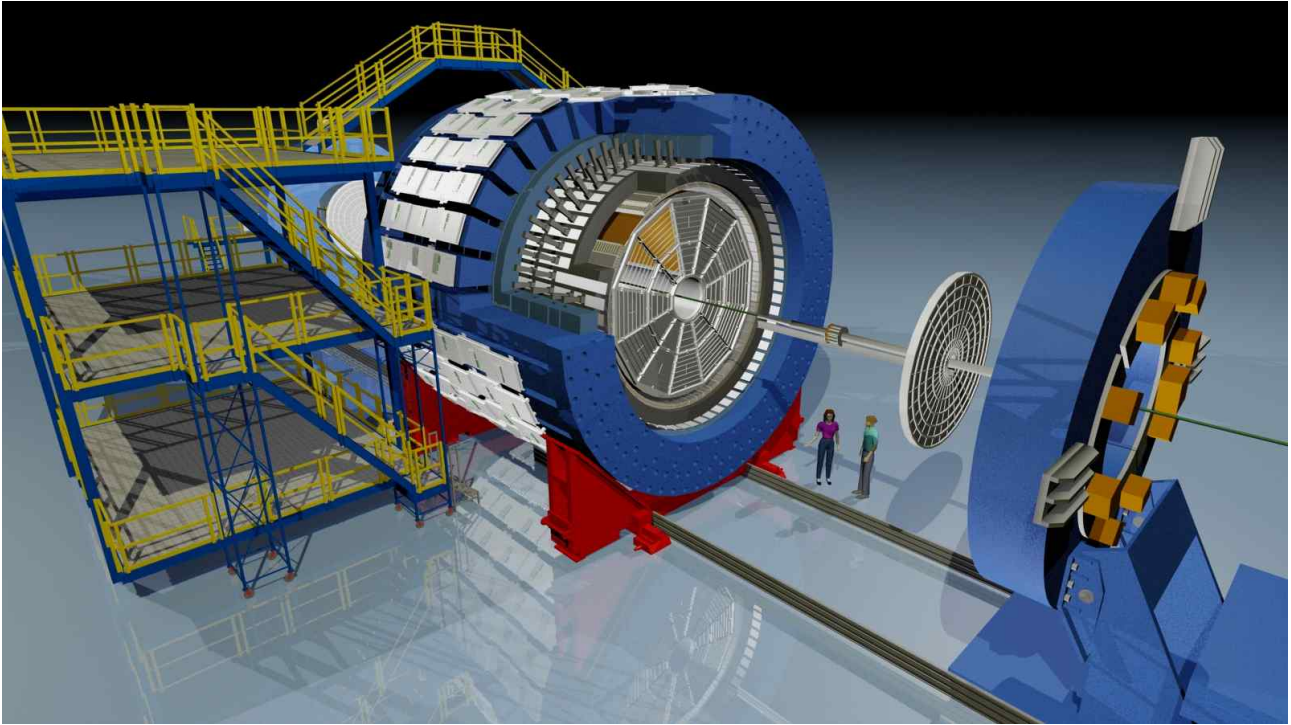


그림 1 **STAR 검출기 개요**. STAR 검출기는 중이온충돌에서 발생하는 수천개의 입자를 동시에 측정 할 수 있도록 설계되어졌다. 약 건물 3층 높이에 1,200톤 이상의 하중을 갖고 있다. 시간 투영 상자 검출기(Time projection chamber, TPC)를 주검출기로 하여 수많은 부검출기들의 조합으로 만들어져있다. 2000년부터 실험이 시작되어 현재까지 검출기 업그레이드를 거치면서 더 정밀하고 빠르게 입자의 궤적과 특성들을 측정 할 수 있다.

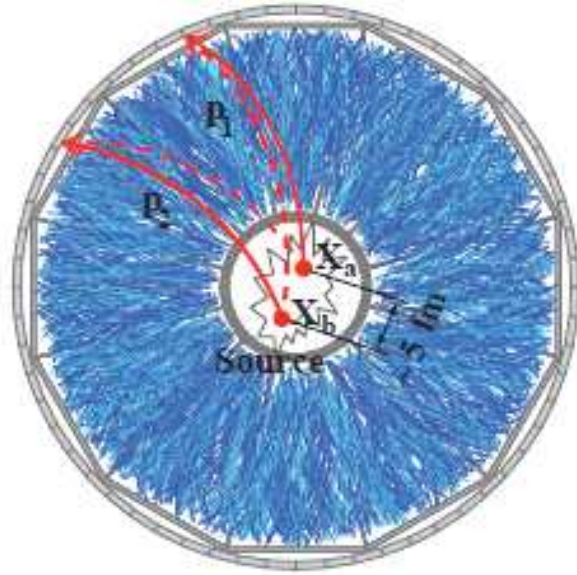


그림 2 STAR 검출기에 측정된 여러 가지 (반)입자들의 궤적. 주어진 자기장 내에서 휘어진 (반)입자들의 궤적은 (반)입자들의 운동량을 결정한다. 두 (반)입자의 궤적들로부터 결정된 각각의 운동량들 (p_1 과 p_2) 로부터 생성당시 두 (반)입자들의 간섭작용을 계산해낼 수 있다. 이 간섭작용으로부터 두 (반)입자 간의 강한 상호작용을 규명할 수 있다.

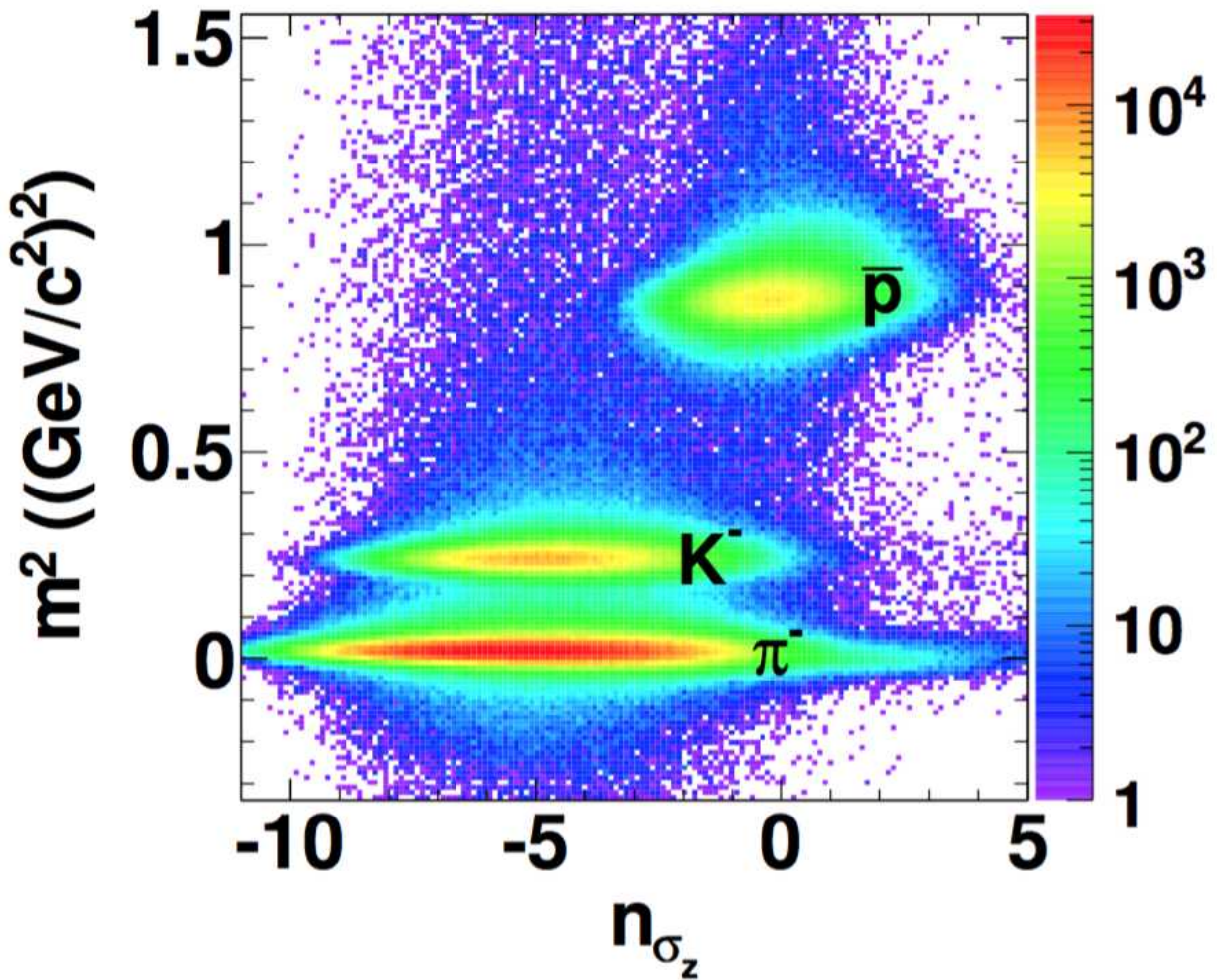


그림2. 반물질입자들의 질량 제공에 대한 고유에너지손실 분포. y축은 비행 시간 검출기(Timing of flight, TOF)로부터 얻어진 입자의 질량 제공 분포를, x축은 시간 투영 상자(Time projection chamber, TPC) 검출기로부터 얻어진 물질속의 고유에너지손실률을 함께 나타낸 그림이다. 다양한 반물질들을 구별할 수 있다. 특히 이번 연구에서는 반양성자(\bar{p})를 약 99%의 순도로 측정하였다.