

# CMS 에서 매우 희귀한 붕괴 사건이 관측되다.

CMS 실험, CERN

2013 년 7 월 19 일

표준모형에 의해 예견되던 매우 희귀한 붕괴사건이 CMS 국제공동연구단에 의하여 관측되었다. 지난 25 년간 그토록 오랫동안 찾아 왔던 뮤온 입자 쌍으로 붕괴하는  $B_s$  (B-sub-s 로 읽음) 중간자가 마침내 발견되었다는 소식이 오늘 오후 스웨덴 스톡홀름에서 개최되는 격년제 유럽물리학회-고에너지물리(EPS-HEP) 컨퍼런스에서 발표될 예정이다.

표준모형에 따르면  $B_s$  중간자가 두 개의 뮤온 입자(전자의 무거운 사촌 입자)로 붕괴되는 경우는 약 10 억개 중 약 3 번 정도로 매우 드문 현상이다. 따라서 이 붕괴율이 측정되어 표준모형의 예측과 다른 값을 얻게 된다면, 이는 곧 표준모형(Standard Model, SM)을 넘어서는 새로운 입자 모형(Beyond the Standard Model, BSM)이 있음을 시사하는 것이 되어서 이 붕괴의 관측은 새로운 물리를 찾는 이상적인 실험으로 여겨져 왔다.

CMS 는 이번 실험을 통해  $4.3\sigma$  정도의 통계적 의미[1]로 그 붕괴율이  $3.0^{+1.0}_{-0.9} \times 10^{-9}$  정도로 표준모형의 예측 값인  $3.6 \pm 0.3 \times 10^{-9}$  과 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다고 발표하였다. 이번에 얻는 결과를 배경사건의 통계적인 요동 효과로 얻게 될 확률은 100000 번에 1 번 정도뿐이다.

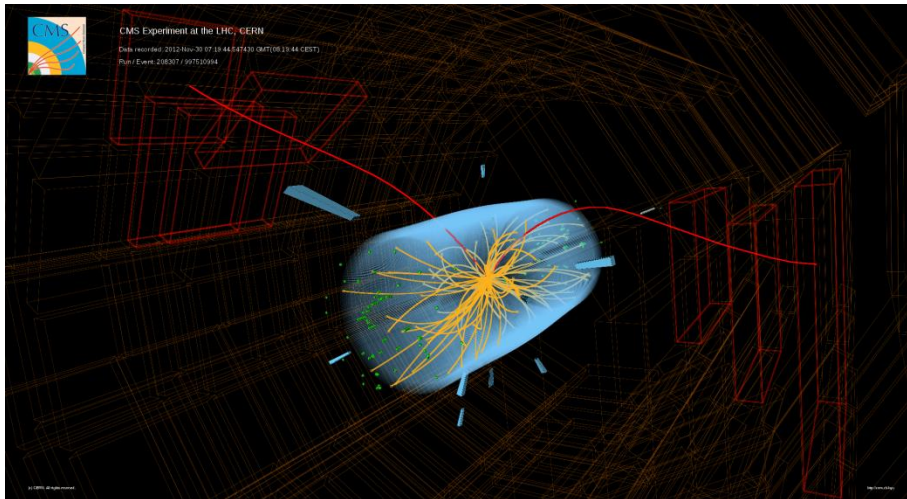


그림 1: CMS 검출기에 기록된 2012 년 8TeV 양성자-양성자 충돌에서 생성된  $B_s \rightarrow \mu\mu$  후보 사건

## 새로운 물리를 찾아서

지난 수십 년간 표준모형의 모든 예측들이 다 정밀하게 맞아 들어갔음에도 불구하고, 우리는 표준모형이 여전히 완전한 이론이 아님을 알고 있다. 예컨대, 표준모형은 암흑물질의 천체

실험에서의 증거에 대해 어떠한 설명도 제공하고 있지 못하고 있고, 또 우주 내에 왜 물질이 반물질보다 훨씬 더 많은 지도 전혀 설명하지 못하고 있다. 그래서 CMS 국제공동연구단은 새로운 입자 모형(BSM)의 신호가 충분히 LHC 가속기를 통해 보여질 수 있다는 가정하에 체계적으로 다양한 자료 분석을 해오고 있었다.

특히 한 개의 b 쿼크와 그보다 가벼운 쿼크의 쌍으로 구성된 B 중간자가 두 개의 뮤온 입자로 붕괴하는 사건을 조사하는 것은 BSM의 존재를 증명할 수 있는 매우 이상적인 방법으로 알려져 왔다. B 중간자는 두 가지 형태로 존재하는 데, 그 첫 번째가 b 쿼크와 d 쿼크로 구성된  $B^0$  중간자이고, 그 다음이 b 쿼크와 s 쿼크로 구성된  $B_s$  중간자다. 이 두 가지 유형의 B 중간자가 두 개의 뮤온 입자로 붕괴되는 일은 표준모형 하에서는 매우 드물게 일어나는 현상인 반면 많은 새로운 입자 모형에서는 이러한 뮤온 쌍 붕괴가 더 많이 일어나거나, 더욱 적게 일어남을 예측하고 있다. 따라서 이 두 중간자 상태의 뮤온 쌍 붕괴율이 표준모형의 예측 값과 잘 맞는지를 알아보는 것이 바로 새로운 입자 모형의 존재여부를 알 수 있는 깨끗한 증거이기도 하다. 따라서 지난 25년간 십여 개 이상의 가속기 실험팀이 포착하기 힘든 이 붕괴신호를 찾고자 했다. 이 긴 세월 동안 실험의 정밀도가 매우 높아져, 이제는 표준모형이 예견하는 붕괴율을 측정할 수 있는 수준에 도달한 것이고,  $B_s \rightarrow \mu\mu$  채널의 경우, 2012년 11월에 LHCb가  $3.5\sigma$ 의 통계적 의미로 이 붕괴모드의 관측을 최초로 보고했다.

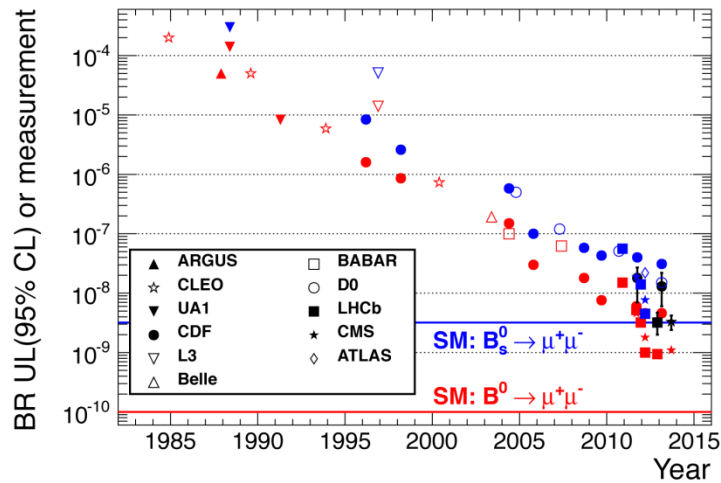


그림 2: 측정치의 상한선이 만여 배 정밀해 졌음을 보여주는 과거부터 현재까지의 여러 충돌실험에서 얻어진  $B_s$  와  $B^0$  탐색 결과들.

### 쉽지 않은 B 중간자 연구

이렇게 드문 현상을 실험적으로 찾는다는 것은 압도적으로 많은 배경사건 중에서 몇 개의 사건만을 꼭 집어 골라낼 수 있어야 함을 의미한다. 실제로 십여 개의  $B_s$  중간자 중 약 3 개의 사건만이 2 개의 뮤온 입자로 붕괴될 것으로 기대되고,  $B^0$  중간자의 경우는 이보다 더 적다.

이런 희귀 신호를 찾는 일은 CMS 검출기를 통해 양성자-양성자 충돌에서 만들어진 수많은 사건들 중에서 후보가 될 만 한 사건을 우선 선별해 내는 일에서 시작한다. CMS 는 매초 약 400 개의 충돌사건을 모아, 이중 약 10 개의 사건을  $B \rightarrow \mu\mu$  검색을 위해 골라낸다. 이렇게 골라진 사건들은 신호사건을 보존하는 상태에서 최대한 배경사건을 없애기 위하여 뮤온 입자들의 성질을 활용하여 추가로 분류한다.

CMS 가 붕괴율을 측정하기 위해서는 B 붕괴에서 나온 뮤온 쌍을 찾는 일뿐 아니라, 생성된 B 중간자 총수를 높은 정밀도로 알고 있어야 만 한다. 이 숫자는 이미 잘 연구된 다른  $B^0$  중간자 붕괴 사건들의 정보로부터 얻는다.

### 고대했던 첫 결과

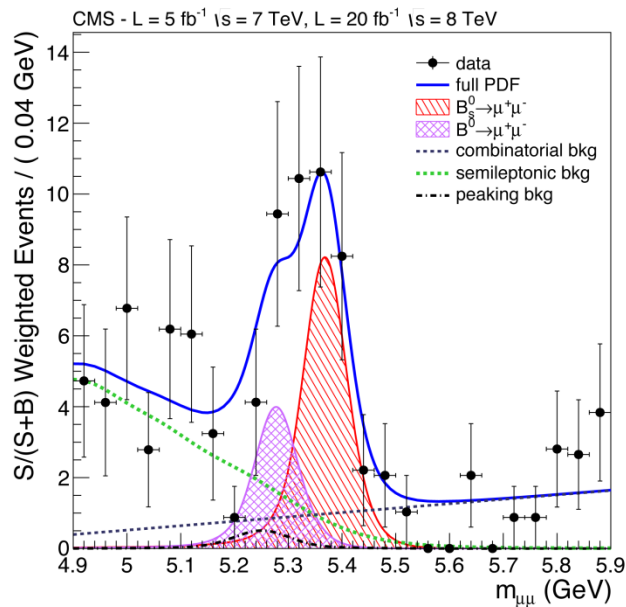


그림 3: 뮤온쌍의 불변질량 분포. 보라색과 빨간색 곡선은 각각  $B_s$  와  $B^0$  신호를 나타내고, 점선과 초록색 점선, 검은색 교차 점선은 3 가지 서로 다른 배경사건을 나타낸다. 파란색 실선은 이들 모두의 공헌을 합쳐 놓은 것이다.

이번 결과를 만들기 위해 2011 년과 2012 년에 수집된  $4.9 \text{ fb}^{-1}$  과  $20.4 \text{ fb}^{-1}$  (inverse femtobarns [2]) 에 해당하는 CMS 데이터가 사용되었다. 결과로 보여진 뮤온 입자 쌍의 불변질량 분포는 배경사건만으로 그려진 분포 위에 명확히  $B_s \rightarrow \mu\mu$  사건이 더 있음을 보여주고 있고, 이로부터 얻은

붕괴율은  $3.0^{+1.0}_{-0.9} \times 10^{-9}$  이다. 이는  $4.3\sigma$  의 통계적 의미에 해당하는 결과로 피지컬 리뷰 레터스 (Physical Review Letters) 저널에 최근 제출됐다.

CMS 의 이번  $B_s \rightarrow \mu\mu$  측정 결과는 표준모형의 예측 값인  $3.6 \pm 0.3 \times 10^{-9}$  과 일치한다. 같은 데이터에서  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  의 붕괴율도 측정되었지만, 아직까지는 이러한 붕괴를 관측하지 못하였고, 이를 통해 이 붕괴율의 상한선을 95%의 신뢰수준[3]으로  $1.1 \times 10^{-9}$  으로 정할 수 있었다. 이 또한 표준모형의 예상과 잘 일치하고 있다.

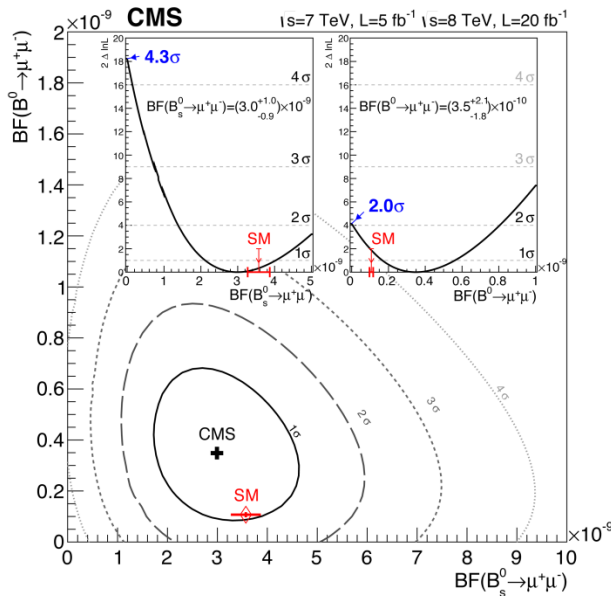


그림 4:  $B_s \rightarrow \mu\mu$  와  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  붕괴율의 측정값으로 등고선은 표준편차의 크기를 나타낸다. 그림 속의 두 개의 그래프는 각 붕괴모드를 독립적으로 나타낸 것으로 곡선이 최저값에 도달 할 때가 가장 적절한 붕괴율 값이며, x 축 값이 0 인 곳과 만나는 점이 측정치의 통계적 의미를 나타낸다.

#### 이 연구의 다음 목표는?

스릴 넘치는 이번 발견이 새로운 물리를 찾아왔던 사람들에게는 어느 정도 실망스러울 수는 있겠다.  $B_s \rightarrow \mu\mu$  붕괴 채널의 연구가 표준모형의 결함을 보기 위해 추진되어 왔었지만, 그렇다고 이번 결과가 이 연구의 끝을 의미하지는 않는다. LHC 실험이 계속되어 더 많은 데이터가 제공될수록 CMS 를 포함한 여러 실험들의 이 붕괴율 측정의 정밀도가 향상될 것이다. 이로써 데이터와 부합하는 새로운 이론적 모형의 형태를 알 수 있음과 동시에 오늘날의 고에너지물리학을 넘어 물리학이 나아갈 방향을 제시할 수 있다. 참고로 LHC 는 2015 년에 다시 가동에 들어가고, 이번에는 표준모형이 예견하는  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  의 붕괴율을 검증할 수 있는 충분한 데이터를 제공할 것이다.

이번  $B_s$  중간자의 희귀붕괴 모드의 관측이 지난 25 년간의 긴 여정에 중요한 이정표로 자리잡을 것은 확실하지만, 입자 물리학에는 여전히 많은 미지의 영역이 우리 앞에 놓여 있을 것이다.

## CMS 에 대하여

CMS 에 대한 자세한 정보는 <http://cern.ch/cms> 와 [cms.outreach@cern.ch](mailto:cms.outreach@cern.ch) 를 통해서 얻을 수 있다. CMS 는 새로운 물리학을 찾기 위해 건설된 LHC 가속기에서 수행되는 두 개의 거대 실험중의 하나이다. CMS 는 LHC 의 고에너지 양성자-양성자 충돌 그리고 중이온 충돌에서 얻어지는 다양한 입자들과 현상들을 관측하기 위해 건설되었고, "우리의 우주는 무엇으로 어떤 힘들에 의해 만들어졌는가?", "모든 물질의 질량은 어디서 왔는가?"같은 근원적인 질문들의 해답의 실마리를 준다. 또한 CMS 를 통해 잘 알려진 입자들의 성질을 최고의 정밀도로 측정할 수 있을 뿐 아니라 예상하지 못했던 전혀 새로운 현상도 발견할 수 있다. 이러한 연구는 우리의 우주가 어떻게 돌아가는 가를 이해하게 해 줄 뿐 아니라 과거에도 그래왔듯이 완전히 새로운 기술문명을 가져다 주기도 한다.

CMS 실험의 개념단계의 설계는 1992 년에 시작되었다. 직경 15 미터의 약 29 미터의 길이를 가진 이 1 만 4 천톤의 거대한 CMS 검출기는 16 년에 걸쳐 역사상 가장 큰 국제공동연구팀에 의해 건설되었다. 이 국제공동연구팀은 전세계 41 개국의 179 개의 대학과 연구소에서 참여한 3275 명의 과학자 (1535 명의 대학원생 포함)와 790 명의 기술자로 구성되어 있다.

## 주석

[1] 표준편차는 어떤 값을 여러 번 측정할 때 얻어지는 분포가 평균값으로부터 얼마나 넓게 퍼져 분포하는 가를 말해준다. 이 값은 측정된 결과가 어떤 주어진 가정과 얼마나 잘 부합하는 지 정도를 정량화하여 말하는 데 사용 될 수 있다. 물리학자들은 종종 이 표준편차를 "시그마"라 불리는 단위로 표현한다. 시그마 값이 더 클수록 데이터는 가정과 잘 맞지 않는 것으로 볼 수 있다. 보통 기대하기 힘든 발견 일수록 실험 결과에 더 큰 확신을 갖기 위하여 더 큰 시그마 값을 요구한다.

[2] <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femtobarn-721.html>

[3] 신뢰도란 테스트 결과가 어떤 정해진 구간 안에 있을 것이라고 기대되는 확률의 통계적인 지표이다. 예를 들어 95%의 신뢰도란 측정된 결과가 기대값과 부합하는 경우가 95%임을 의미한다.