

125GeV의 질량을 갖는 새로운 입자의 발견

CMS 실험, CERN

2012년 7월 4일

요약:

오늘 열린 유럽핵입자물리연구소(CERN)의 연합 세미나와 호주 멜버른의 "ICHEP 2012" 학술대회[1]에서 대형강입자충돌기(LHC)의 Compact Muon Solenoid (CMS) 실험팀의 연구자들은 2012년 6월까지 얻어진 데이터를 바탕으로 표준모형(SM) 힉스 입자 탐색에 대한 그들의 예비결과를 발표하였습니다.

CMS는 125GeV[2]의 질량대에서 예상되는 배경사건의 양보다 5배 이상의 표준편차(5 시그마)[3]를 벗어난 통계적 의미를 갖는 잉여사건들을 관측했습니다. 배경 사건만으로 통계적인 요동에 의해 이 정도 또는 그 이상의 특별한 일이 나타나는 것은 3백만번에 1번 정도의 희박한 일입니다. 이 관측의 증거는 질량 정밀도가 높은 두 개의 사건형태에서 가장 두드러지게 나타납니다. 그 첫 번째는 두 개의 광자를 포함한 것이고 두 번째는 두 쌍의 하전 경입자(전자 또는 뮤온)로 이루어진 사건형태입니다. 우리는 이를 지금까지 관측되지 않은 약 125GeV의 질량을 가진 새로운 입자의 생성 때문이라고 해석합니다.

CMS는 또한 95%의 신뢰도로 110-121.5GeV 그리고 127-600GeV 영역에서는 표준모형의 힉스 입자가 존재할 수 없음을 발표하였습니다[4]. 이보다 더 작은 질량 대는 이미 같은 신뢰도로 CERN의 LEP 실험을 통해 배제된 바 있습니다.

통계적 그리고 실험적 오차를 고려하여 다양한 채널들의 분석을 통해 얻어진 결과는 표준모형의 힉스 입자와 부합하는 결과를 보입니다. 하지만 이번에 발견된 입자의 성질이 모든 면에서 표준모형의 힉스 입자와 같은지, 아니면 다른 점들이 있어 표준모형을 넘어서는 새로운 물리학이 존재함을 의미하는지를 판단하기 위해서는 더 많은 데이터 분석이 필요합니다.

LHC는 현재 놀라운 속도로 새로운 데이터를 만들어 내고 있습니다. CMS는 2012년 말이 되면 현재 데이터의 세 배 이상의 데이터가 모일 것으로 기대하고 있습니다. 이렇게 되면 CMS는 이번에 새롭게 관측된 입자의 본질을 더 자세히 알 수 있을 것입니다. 더 나아가 CMS는 미지의 새로운 물리학을 찾아 새로운 입자탐색의 영역을 넓힐 수 있을 것입니다.

CMS의 탐색 방법

CMS는 2011년 수집된 데이터와 2012년 6월 18일까지 모인 2012년도 양성자-양성자 충돌 데이터 샘플을 모두 분석하였다. 2011년도 데이터는 7 TeV의 질량중심에너지를 갖고 총 휘도[5]는 5.1 fb^{-1} 에 해당하고, 2012년도 데이터는 8TeV로 5.3 fb^{-1} 에 해당한다.

표준모형에 따르면 힉스 입자는 아주 짧은 시간 동안만 존재할 수 있고, 곧바로 다른 입자들로 붕괴해 버린다. 붕괴형태에 따라 CMS는 5개의 사건형태를 주요 채널로 분석했다. 이중 3개의 채널은 $\gamma\gamma$, ZZ 또는 WW 등 보존입자의 쌍으로 붕괴한 것이고, 나머지 2개의 채널은 bb 또는 $\tau\tau$ 의 페르미온 입자 쌍으로 붕괴한 것이다. 여기서 γ 는 광자, Z와 W는 약한 상호작용을 매개하는 입자이고, b는 bottom 쿼크 그리고 τ 는 타우 경입자를 나타낸다. $\gamma\gamma$, ZZ 및 WW 채널들은 125GeV 영역의 힉스 입자 탐색에 있어 서로 비슷한 정도의 효율을 가지고 있고, bb 또는 $\tau\tau$ 채널들보다는 더 좋은 효율을 보인다.

$\gamma\gamma$ 와 ZZ 채널은 새로운 입자의 정밀한 질량 측정을 가능하게 하여 특별히 중요한 채널이다. $\gamma\gamma$ 채널의 질량은 CMS 크리스탈 전자기 열량계 (ECAL, 그림 1)에 나타나는 두 개의 광자의 에너지와 방향으로부터 얻어진다. ZZ 채널의 경우에는 각각의 Z 입자가 두 개의 전자쌍 또는 두 개의 뮤온 쌍으로 붕괴하거나, 한 개의 전자쌍과 다른 한 개의 뮤온 쌍으로 붕괴하는 경우로부터 질량을 결정할 수 있다 (그림 2). 이들 최종 입자들은 ECAL과 내부 트랙 검출기, 그리고 뮤온 검출기로 측정된다.

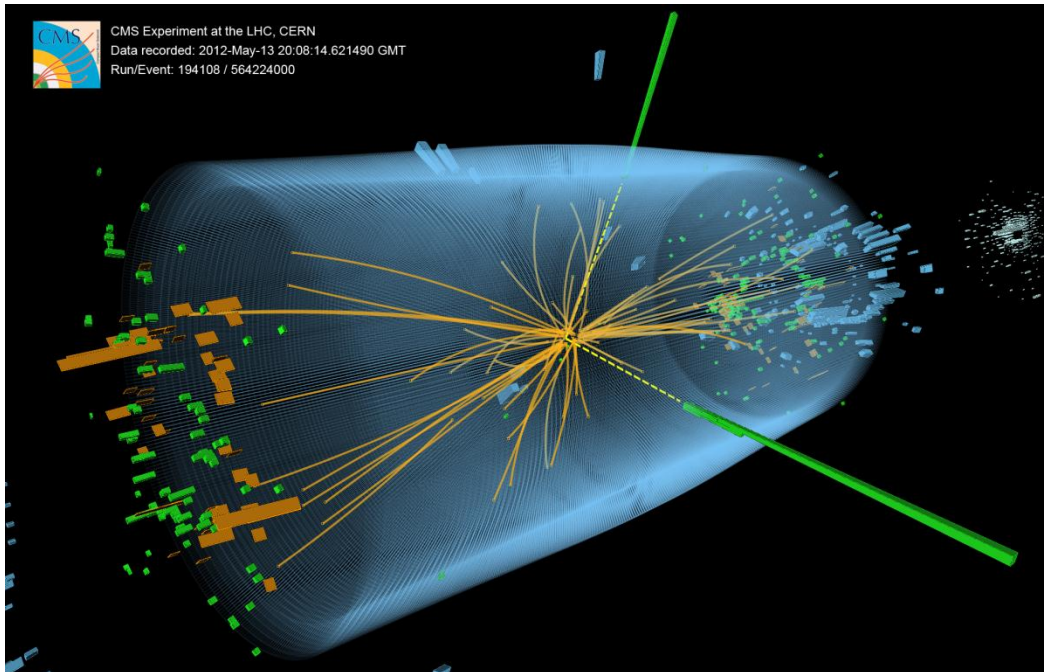


그림 1. 2012 년도 CMS 검출기에 기록된 질량중심에너지 8 TeV 의 양성자-양성자 충돌 사건의 예. 표준모형의 힉스 입자가 두 개의 광자(노란 점선과 녹색 막대기)로 붕괴되는 특징을 잘 보여주고 있다. 이 사건은 물론 표준모형의 다른 배경사건 과정으로부터도 나타날 수 있다.

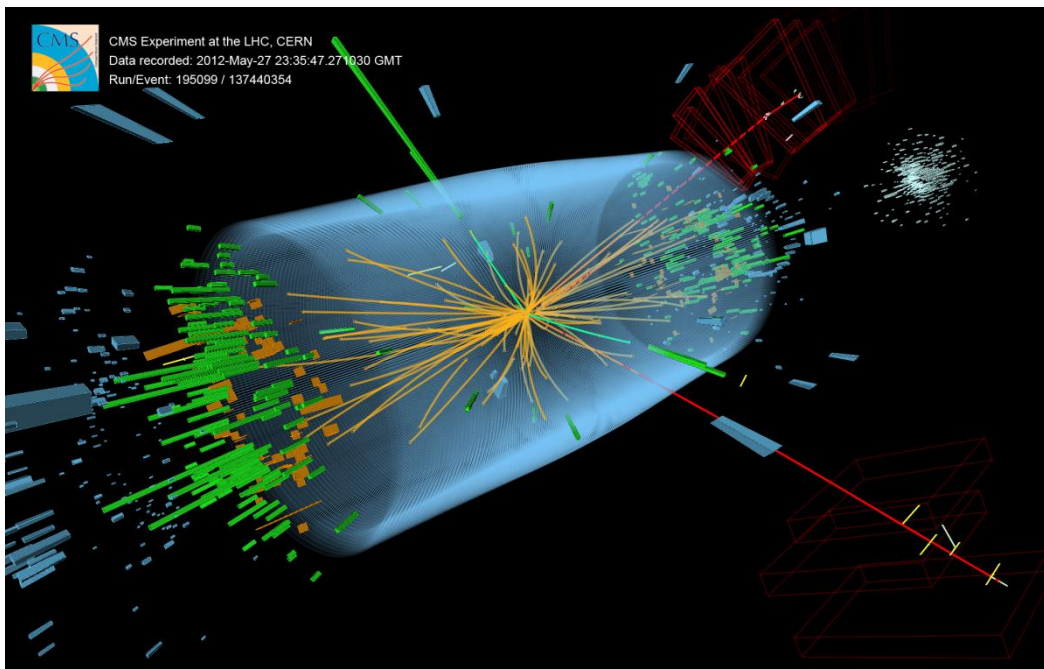


그림 2. 2012 년도 CMS 검출기에 기록된 질량중심에너지 8 TeV 의 양성자-양성자 충돌 사건의 예. 표준모형의 힉스 입자가 두 개의 Z 보손을 만들고 이들이 각각 두 개의 전자(녹색선과 녹색막대기)와 두 개의 뮤온 입자(적색 선)로 붕괴되는 특징을 잘 보여주고 있다. 이 사건은 물론 표준모형의 다른 배경사건 과정으로부터도 나타날 수 있다.

WW 채널은 조금 더 복잡하다. 이 경우 각각의 W 입자는 전자와 중성미자 또는 뮤온 입자와 중성미자로 붕괴되는 것으로 확인한다. 그러나 중성미자는 CMS 검출기에 의해 검출되지 않고 그대로 빠져나가기 때문에 표준모형의 힉스 입자가 WW 채널로 붕괴할 경우 특정 질량값에서 잉여사건이 집중되어 관측되지 않고, 넓은 질량 영역 대에서 골고루 잉여사건이 관측되게 된다. bb 채널의 경우는 표준모형 내에서도 비슷한 사건형태를 갖는 배경사건이 많아 분석이 쉽지 않고, 그래서 힉스입자가 전자나 뮤온 등으로 붕괴하는 W 또는 Z 보존이 같이 생성된 경우로 한정해 탐색한다. $\tau\tau$ 채널은 전자, 뮤온, 또는 강입자로 붕괴되는 τ 입자를 측정하여 분석한다.

CMS 탐색 결과의 정리

CMS의 데이터 샘플은 표준모형의 힉스 입자가 존재하지 않을 경우 95%의 신뢰도로 110-600GeV 질량 영역에서 그 존재를 완전히 배제할 수 있을 정도로 충분하다. 현재 CMS 데이터는 힉스 입자가 두 개의 큰 질량 영역인 110-122.5GeV와 127-600GeV 영역에는 95%의 신뢰도로 존재하지 않음을 보여주고 있다.

한편 122.5-127GeV 영역은 우리가 분석한 5개의 채널 중 3개의 채널에서 과도한 잉여사건이 관측됨으로써 배제될 수 없었다. 이들은 각각 아래와 같다.

1. **$\gamma\gamma$ 채널:** 그림 3은 두 개의 광자가 갖는 질량분포를 보여주고 있다. 125GeV 영역에서 4.1 시그마의 잉여사건이 보여진다. 최종입자가 두 개의 광자로 나타나는 것은 생성된 새로운 입자가 페르미온이 아닌 보존임을 나타내고, 동시에 그 입자의 스핀이 1이 아님을 말해준다.
2. **ZZ 채널:** 그림 4에서는 4개의 경입자로부터 재구성된 질량분포를 보여주고 있다 (두 개의 전자쌍 또는 두 개의 뮤온쌍, 또는 한 개의 전자쌍과 다른 한 개의 뮤온쌍). 입자들의 붕괴각 특성까지 고려하여 125GeV 영역에서 배경사건과 비교하여 3.2 시그마의 통계적 의미를 갖는 잉여사건이 관측되고 있다.
3. **WW 채널:** 넓은 질량 영역에서 1.5 시그마 정도의 통계적 의미를 갖는 잉여사건이 관측되고 있다.
4. **bb와 $\tau\tau$ 채널:** 현 단계에서는 잉여사건이 관측되고 있지 않다.

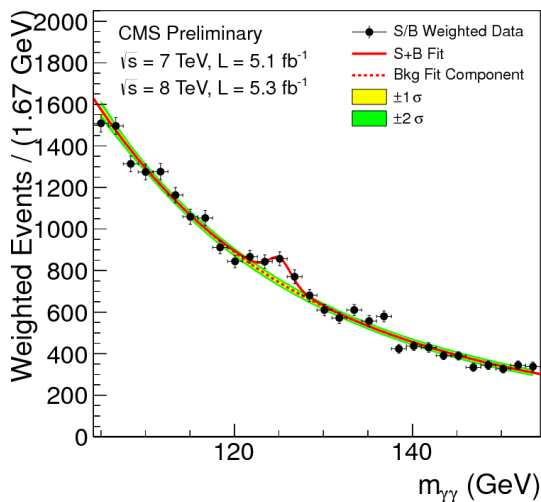


그림 3. 2011 년도와 2012 년도의 데이터로부터 얻은 두 개의 광자($\gamma\gamma$)의 불변 질량 분포(검은점과 오차영역). 데이터 값은 각각의 신호대비노이즈의 양으로 가중치가 주어진다. 적색실선은 배경사건을 포함한 데이터의 최적화 결과이다. 적색점선은 배경사건만을 나타낸다.

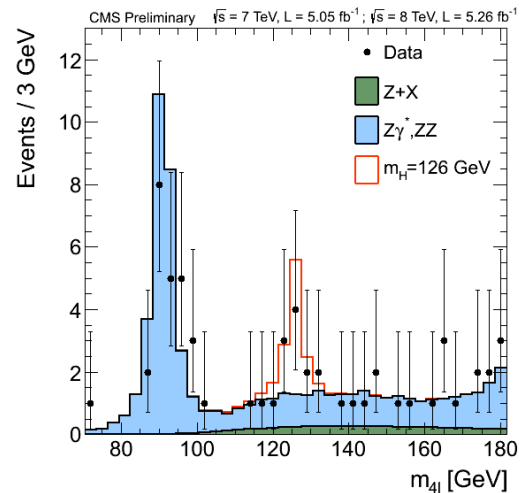


그림 4. $4e, 4\mu$, 또는 $2e-2\mu$ 채널의 질량 분포. 검은점은 데이터를 나타내고 색이 칠해진 막대그래프는 배경사건을 그리고 적색선으로 나타나는 막대그래프는 최적화된 신호를 나타낸다. 7TeV와 8TeV 데이터를 합쳐서 보여주고 있다.

5 개 채널을 모두 합하여 계산하면 그 통계적 의미는 신호가 배경사건보다 4.9 시그마 정도 초과한다(그림 5). 분해능이 높은 두 개의 채널 (즉 $\gamma\gamma$ 와 ZZ 채널)을 합하여 계산하면 통계적 의미는 5.0 시그마에 이른다. 배경 사건만으로 통계적인 요동에 의해 이 정도 또는 그 이상의 특별한 일이 나타나는 것은 3 백만번에 1 번 정도로 희박하다.

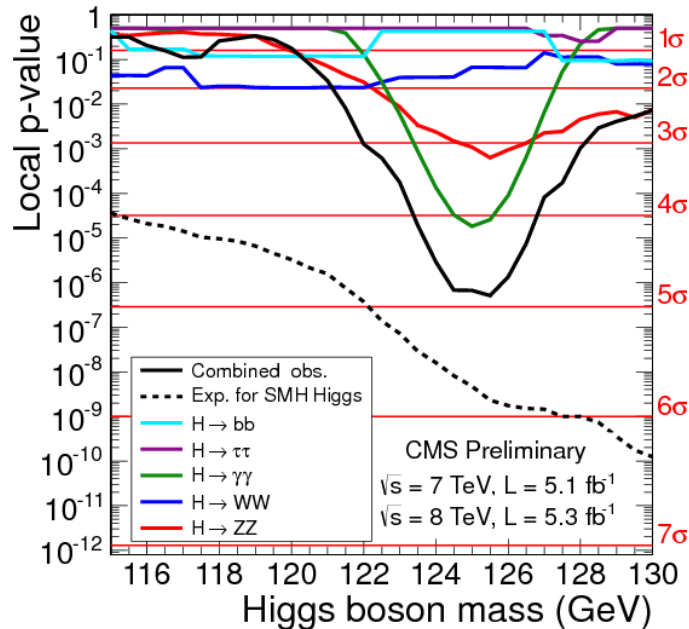


그림 5. 5 개의 채널을 모두 고려하여 배경사건만으로 CMS 가 관측한 잉여사건을 보일 확률 (국소 p-값)을 표준모형 힉스 입자의 질량의 함수로 나타내고 있다. 검은 실선이 모든 채널을 합친 국소 p 값이다.

새로이 발견된 입자의 질량은 여러 채널들의 상대적인 생성 비율에 관한 가정들과 무관하게 125.3 ± 0.6 GeV 로 결정된다. 이 입자의 생성률(σ_{DAT})은 표준모형 힉스 입자의 생성률 (σ_{SM}) 과 비교하여 $\sigma_{\text{DAT}}/\sigma_{\text{SM}} = 0.80 \pm 0.22$ 로 표준모형의 힉스 입자에 부합한다.

이번 실험 결과를 얻기 위하여 검출기 성능, 데이터 샘플의 선정, 배경사건 양의 결정, 다양한 통계적, 시스템적 오류 등 많은 세부 사항들에 대한 연구가 신중하게 진행되었다. 2011 년 데이터 분석결과[6]로 이미 125GeV 대에서 잉여사건을 보고한바 있다. 샘플 선정에 의해 같은 질량에서 잉여사건을 인위적으로 만들어 낼 수 있는 왜곡을 없애기 위해, 2012 년도 데이터 분석은 실험의 모든 분석 과정이 검증 받을 때까지는 신호가 있을 관심 영역을 미리 고려 않은 상태[7]에서 수행되었다.

전 분석 과정에 대한 상호 검증을 위해 내부적으로 두 개 이상의 독립된 분석그룹을 조직하여 데이터 분석을 수행하였다. 아울러 아래와 같은 여러 중요한 관측이 이 번 결과에 신뢰도를 높여주고 있다.

- 125GeV 에서의 잉여사건은 7TeV 데이터 샘플인 2011 년도 결과와 8TeV 인 2012 년도 결과에 공히 나타난다;
- 잉여사건은 두 개의 고분해능 채널($\gamma\gamma$ 와 ZZ)에서 같은 질량에서 나타난다;
- WW 채널에서의 잉여사건은 125GeV 대의 입자로부터 만들어진 것과 잘 부합된다;
- 잉여사건은 광자, 전자, 뮤온, 강입자들이 포함된 다양한 채널들에서 나타난다.

오늘 발표된 예비결과를 잘 다듬어 올 여름 내로 논문에 투고 할 예정이다.

앞으로의 계획

125GeV 에서 새로이 관측된 입자는 통계적인 정밀도 내에서 표준모형이 말하고 있는 힉스 입자에 부합한다. 그러나 이 입자가 표준모형의 힉스 입자인지 아니면 표준모형을 넘어선 새로운 물리학이 예측하는 전혀 새로운 입자인지를 판단하기 위해서는 이 입자의 다양한 채널($\gamma\gamma$, ZZ, WW, bb 그리고 $\tau\tau$)로의 붕괴확률과 이 입자의 스핀 그리고 반전성(parity) 등을 측정하여야 하는데 그러기 위해서는 더 많은 데이터가 필요하다.

현재 LHC 가속기는 매우 잘 작동되고 있다. 2012 년말까지 CMS 실험은 현재 데이터의 양의 세 배 이상을 확보할 것으로 보이며, 따라서 새로이 발견된 입자의 성질을 심층 연구할 수 있을 것으로 예상된다. 실제로 이 입자가 표준모형의 힉스 입자라고 밝혀진다면 표준모형과 힉스 입자의 성질에 대한 세밀한 연구가 이뤄질 것이다. 만약 이 입자가 표준모형의 힉스 입자가 아니라면 CMS 는 이 입자를 LHC 에서 만들어 낼 수 있는 새로운 물리학이 과연 무엇인지에 대하여 연구하게 될 것이다. 어느 경우든지 더 높은 에너지와 휘도를 갖는 빔을 이용해서 새로운 입자 및 새로운 자연계의 힘을 찾고자 하는 LHC 실험은 계속될 것이다.

CMS 에 관하여

CMS 에 대한 자세한 정보는 <http://cern.ch/cms> 와 cms.outreach@cern.ch 에 통해서도 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 그랬듯이 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] ICHEP 은 호주 멜버른에서 2012 년 7 월 4 일부터 11 일까지 열리는 제 36 차 국제 고에너지물리학 학술대회의 약어이다. 학술결과들은 CERN 의 발표자로부터 그리고 ICHEP 실시간 동영상으로 함께 발표된다.

[2] 전자볼트(eV)는 에너지의 단위이다. 1 GeV 는 1,000,000,000eV (10 억전자볼트)이다. 입자물리학에서는 $E=mc^2$ (c 는 광속)에 의해 질량의 단위인 (eV/c^2)과 에너지의 단위인 (eV)가 종종 혼재되어 쓰인다. 많은 경우 자연단위계를 사용해 광속을 1로 놓고 질량의 단위를 eV 와 GeV 로 쓴다.

[3] 표준편차는 평균값을 중심으로 측정값들이 얼마나 떨어져 분포하는가를 나타낸다. 가설의 검증을 위해 사용되는 표본데이터가 어느 정도 가설에 부합하는지 아니면 맞지 않는지를 판단하는 데 주로 사용된다. 물리학자들은 표준편차를 시그마의 단위로 표현한다. 시그마 값이 높을 수록 가정과 더 맞지 않는 것으로 해석한다. 예상하지 못했던 발견을 확신하기 위해서는 더 큰 값의 시그마 값을 요구한다.

[4] 신뢰도는 표본으로부터 얻어진 값이 기대되는 값을 갖게 될 확률을 나타내는 통계적인 지표이다. 예를 들어 95%의 신뢰도는 어떤 실험의 결과가 95% 확률로 기대 범위 내에 들어온다는 의미이다.

[5] <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femto barn-721.html>

[6] <http://cms.web.cern.ch/news/cms-search-standard-model-higgs-boson-lhc-data-2010-and-2011>

[7] <http://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses>