LHC에서의 표준모형 힉스입자 탐색 결과

DOI: 10.3938/PhiT.21.043

박 인 규

Standard Model Higgs Searches at the LHC

Inkyu PARK

An observation of a new particle was reported on July 4, 2012, at CERN(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), and the news was generally interpreted by many media as a declaration of the discovery of the Higgs particle. However, CERN did not confirm the discovery due to some missing clues, which are needed for a positive identification of the Standard Model Higgs particle. Thus, whether the newly-discovered particle is the Higgs particle that we have been looking for is the hottest question these days. CERN should be able to clearly answer this question by the end of this year because the LHC(Large Hadron Collider) is now running with its higher performance ever. We will briefly summarize here what has been done so far at CERN, the latest results, and the future of the experiment.

전 세계 매스컴의 관심이 집중된 가운데 2012년 7월 4일 유럽핵입자연구소에서 “새로운 입자”가 발견되었다는 소식이 전해졌다. 몇몇 성급한 대중매체에서는 이번 발견이 사실상의 힉스입자 발견을 선언하는 것이라고 앞다퉈 기사를 전했다. 하지만, CERN¹⁾은 공식적인 논평을 통해 “새로운 보존”의 발견은 맞으나, 아직 힉스입자라고 단정 지을 수는 없는 상황이라는 결론을 전달하였다. 발견된 입자가 힉스입자인지를 확인하기 위하여서는 더 많은 데이터의 분석이 필요한데, 마침 LHC의 가동 성능이 최고의 상태에서 연말까지는 충분히 결론을 낼 수 있을 것이라는 희망찬 메시지도 잊지 않았다. 이 글을 통해 지금까지 LHC에서 진행돼온 힉스탐색 실험의 경과, 도출된

저자약력

박인규 교수는 파리 11대학 이학박사(물리학)로서 현재 서울시립대학교 물리학과 교수로 재직 중에 있으며, 한국CMS실험사업팀의 대변인으로 일하고 있다. (icpark@uos.ac.kr)

Fig. 1. Higgs mass expectation from LEP experiments.

결과, 그리고 향후 전망에 대해 알아보도록 하겠다.

힉스입자의 생성

힉스입자의 발견을 위해서 가장 먼저 해야 할 일은 힉스입자를 생성시키는 일일 것이다. 게이지대칭성을 깨는 힉스장의 양자화된 상태인 힉스입자를 생성시키기 위해서는 우선 예상되는 힉스입자의 질량보다 더 큰 에너지를 진공 중에 만들어 놓는 일이 될 것이다. 이렇게 모아진 에너지는 아인슈타인의 $E=mc^2$ 의 공식에 따라 곧 질량으로 변할 수 있으며, 만약 힉스입자가

- 1) CERN은 불어 “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”의 약자이고, 영문 명칭은 “European Organization for Nuclear Research”이다. 한국 명칭은 “유럽핵입자물리연구소”로 통용되지만, 엄밀히 말하면 연구소이면서 동시에 국제기구형태이다.
- 2) 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.
- 3) 전자볼트(eV)는 에너지의 단위이다. 1 GeV는 1,000,000,000 eV (10억 전자볼트)이다. 입자물리학에서는 $E=mc^2$ (c 는 광속)에 의해 질량의 단위인 (eV/c²)과 에너지의 단위인 (eV)가 종종 혼재되어 쓰인다. 많은 경우 자연단위계를 사용해 광속을 1로 놓고 질량의 단위를 eV와 GeV로 쓴다.

Fig. 2. Large Hadron Collider.

존재한다면 다른 입자들과 더불어 힉스입자가 만들어질 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 1990년대에 수행되었던 CERN의 LEP 실험을 통해 얻은 힉스입자 질량에 대한 간접적인 측정 결과는 힉스의 질량이 95% 정도의 신뢰도²⁾ 최소 114 GeV³⁾ 이상의 질량을 가질 것이라는 사실을 우리에게 알려주었다.^[1] 따라서 힉스입자를 만들어 내기 위해서는 최소 질량중심에너지가 100 GeV보다 훨씬 큰 가속기를 만들어내야 했고, 그렇게 건설된 가속기가 바로 LHC(Large Hadron Collider)인 것이다.

LHC는 현재까지 인류가 만든 가장 큰 가속기이다. 엄밀히 말하면, 두 개의 입자를 서로 반대방향으로 가속시켜 충돌시키는 장치이므로 LHC 충돌기라 부르는 것이 더 좋겠으나, 이미 LHC 가속기란 이름으로 널리 쓰이고 있어 여기서는 LHC 가속기 또는 그냥 LHC라고 부르겠다. LHC는 그 둘레만 27 km에 달하고, 빔의 진행방향을 꺾기 위한 dipole 자석만 1230여 개가 쓰인다. 이 거대한 원형터널에서 양성자는 빛의 속도의 99.999999%에 해당하는 엄청난 속도까지 가속되는데, 이는 로렌츠 팩터로 약 7500 정도가 되고, 양성자 하나가 940 MeV의 질량을 가지므로, 가속된 양성자의 에너지는 약 7조 전자볼트에 해당된다. 따라서 서로 반대방향으로 가속된 양성자들이 충돌하게 되면 그 질량중심에너지는 14 TeV에 달하게 된다. 물론 이렇게 이론적으로 계산된 질량중심에너지가 모두 힉스입자를 만드는 데 사용되는 것은 아니다. 실제로는 양성자 내의 쿼크와 글루온들이 충돌하여 입자들을 생성시키므로 실제 입자생성에 쓰이는 에너지는 이보다 훨씬 낮다. 그래도 100 GeV대의 질량을 갖는 힉스입자 생성에는 충분한 에너지임에 틀림없다.

LHC는 약 1000억 개의 양성자들을 덩어리로 묶쳐 가속하는

4) 1 b는 1 barn을 나타낸다. 1 barn=10⁻²⁴ cm²로 barn은 원래 넓은 들판에 홀로 있는 헛간 같은 건물을 일컫는 말이다. 초창기 핵물리학자들은 마치 원자의 크기를 넓은 농장에 비교하였을 때, 핵의 크기가 헛간의 크기만큼이나 작음을 연상하면서 barn이란 단위를 썼고, 이제는 입자물리학의 표준단위로 쓰이고 있다.

5) TeV는 테라전자볼트로 10¹² 즉 1조 전자볼트를 말한다.

Fig. 3. Higgs production cross-section as a function of Higgs mass at 7 TeV.

데 이를 양성자 빔 번치(bunch)라고 부른다. LHC에서는 이러한 빔 번치가 2800개나 모여 기차처럼 길게 늘어선 채 가속되게 된다. 번치와 번치 사이는 약 7.5 m 정도씩 떨어져 있고, 이렇게 기차모양으로 생긴 빔이 광속도로 27 km를 달리게 되므로 번치와 번치가 충돌하는 주기는 25 ns(단위설명: 10⁻⁹초) 정도가 된다. 이를 바탕으로 양성자빔의 휘도(단위시간에 단위면적을 통과하는 입자의 개수)를 계산하면, 이는 약 10³⁴ cm⁻²s⁻¹ 정도가 된다. 이를 바탕으로 1년간 LHC를 가속하여 얻을 수 있는 이론적인 최대 휘도는 300 fb⁻¹까지도 될 수 있다.⁴⁾

LHC가속기는 2008년에 최초로 가동에 들어갔다. 하지만 초전도 자석 시스템에 문제가 발견되어, 거의 1년간의 수리과정을 겪어야만 했고, 결국 이듬해인 2009년 11월에 최초 가동에 들어갈 수 있었다. 그리고 그 해 12월, 그때까지 인류가 만든 가장 큰 충돌에너지였던 테바트론의 충돌에너지보다 높은 2.36 TeV의 충돌에 성공하게 되었다.⁵⁾ 2010년 3월에는 각각의 양성자 빔을 3.5 TeV까지 가속하는데 성공하여 2011년까지 7 TeV의 충돌 사건을 성공적으로 만들어 내었고, 이때까지 축적된 데이터는 총 휘도 6 fb⁻¹에 달하였다. 2012년도에 들어 LHC는 8 TeV로 그 충돌에너지를 더욱 높였고, 동시에 순간 휘도도 높일 수 있어서, 2012년 6월까지 또 다른 6 fb⁻¹에 해당하는 충돌데이터를 얻게 되었다.

LHC에서 양성자-양성자 충돌로부터 힉스입자들이 만들어지는 방법은 다양하다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 힉스의 질량에 따라 그 생성율이 변화하기는 하지만, 어쨌든 가장 많은 힉스는 글루온-글루온 충돌로부터 생성된다. 그 다음으로 쿼크들로부터 생성되는 벡터보존들의 충돌에 의해 생성된다. 이외에도 그림 4에서 보는 바와 같이 탑쿼크나 벡터보존

REFERENCES

- [1] "Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP", CERN-EP/2003-011 (2003).
- [2] LHC Higgs Cross Section Working Group Homepage, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections>.

Fig. 4. Higgs production channels at LHC.

들로부터 힉스가 방출되는 경우(Higgs strahlung) 등 다양한 채널이 존재한다.^[2]

힉스입자의 검출

생성된 힉스입자는 그 질량이 매우 무겁기 때문에 곧바로 다른 입자들로 붕괴될 것으로 예상된다. 따라서 힉스입자의 탐색은 힉스입자가 붕괴되어 생성된 물질을 찾아내어 역추적하는 과정을 통해 이루어진다. 그렇다면 힉스가 어떻게 붕괴되는가를 아는 것이 매우 중요한데, 이는 또 다시 힉스의 질량에 따라 다양한 붕괴 시나리오가 있다. 우선 중점적으로 찾고자 하는 100 GeV대의 낮은 질량의 힉스를 가정하면, 이 정도의 질량으로는 벡터보존 쌍을 만들기가 힘들므로 (W 보존 또는 Z^0 보존 질량의 두 배가 필요하므로), b 쿼크와 그의 반입자 쌍으로 붕괴할 확률이 가장 높다고 할 수 있다. 특히 b 쿼크는 트랙을 바탕으로 다른 쿼크의 붕괴사상으로부터 구별해내기가 쉬운 편에 속해 주요 탐색대상이 된다. 얼핏 보기에는 힉스보존의 결합상수가 입자들의 질량에 비례하므로, 탑쿼크 쌍으로 붕괴하기가 가장 쉬울 것으로 예상할 수 있으나, 탑쿼크는 질량은 173 GeV 정도로 매우 무거우므로, 대략 350 GeV 이상의 질량을 갖는 힉스입자라야만 붕괴가 가능하다. 다음으로 타우(τ) 입자쌍으로 붕괴하는 채널과 참쿼크쌍으로 붕괴하는 채널도 눈여겨 볼 필요가 있다. 특히 타우 입자의 경우에는 다른 입자와의 구별이 용이한 편에 속해, CMS나 ATLAS 국제공동연구가 관심을 가지고 분석하는 채널이기도 하다.

가장 각광을 받고 있는 붕괴채널은 힉스입자가 두 개의 광자($\gamma\gamma$)로 붕괴하는 채널인데, 이는 검출된 두 개의 광자로부터 직접 힉스보존의 질량을 바로 알 수 있기 때문이고, 실제로 이번 CERN의 발표에서도 두 실험이 모두 새로운 입자의 발

Fig. 5. Higgs decay branching ratio as a function of Higgs mass.

견을 선언하게 된 주요 근거가 되는 채널이다. 힉스의 질량이 조금 더 커지면, W 보존쌍이나 Z 보존쌍이 힉스의 주된 붕괴 채널로 등장한다. 이중 두 개의 Z 보존으로 붕괴하는 채널은 특히 관심을 끌고 있는데, 그 이유는 두 개의 Z 보존이 각각 경입자쌍으로 깨끗하게 붕괴되는 채널들이 있기 때문이다. 예를 들어 힉스붕괴로 생성된 Z 보존이 각기 뮤온 또는 전자쌍으로 붕괴한다면, 우리는 검출기에서 4개의 경입자를 찾아, 두 개씩 짝을 이루어 Z 보존의 질량을 갖는지 확인하고 이로부터 힉스입자를 구별해 낼 수 있기 때문이다. 이 채널은 렙톤을 4개 포함하는 깨끗한 채널인 동시에 힉스입자의 질량을 바로 재구성해 낼 수 있어서 골든채널이라고 불린다.

이와 같이 힉스입자는 다양한 붕괴채널을 가지고 다른 입자들로 붕괴하며, 또한 이렇게 붕괴되어 생성된 입자들은 또 다른 입자들로 붕괴하는 과정을 거쳐, 최종적으로는 검출기에 궤적을 남기거나 에너지를 남기게 된다. 물론 붕괴과정에 생성되는 입자가 중성미자라면 검출기와 전혀 반응하지 않고 사라지게 된다. 이 경우에는 충돌하는 빔의 방향과 수직인 횡방향 운동량보존법칙이 깨져, 우리는 잃어버린 운동량(missing PT)을 갖게 된다. 이 잃어버린 운동량은 힉스입자 탐색에 매우 중요한 단서가 되기도 한다. 이렇게 최종입자들이 남긴 자취를 검출해내는 검출기에 대해서 알아보자.

CMS 검출기

검출기는 마치 아주 커다란 디지털 카메라라고 상상하면 쉽게 그 작동원리를 이해할 수 있다. 다른 점이 있다면, 디지털 카메라는 손에 들 수 있을 만큼 작은 반면, 입자검출기는 보통 5-6층짜리 건물만큼 크다는 점이다. 또한 디지털 카메라가 피사체에 반사되어 렌즈 속으로 들어오는 빛을 센서를 통해 전기신호로 바꾸는 장치라고 하면, 입자검출기는 빛뿐만 아니라 여러 다양한 입자들이 직접 센서에 남긴 신호를 모아 저장

Fig. 6. CMS Detector.

실리콘 껍적 검출기 다음으로는 전자기열량계와 하드론열량계가 있는데, 전자기열량계는 광자와 전자 같은 입자가 PbWO_4 와 같이 투명의 신철레이팅 소재를 만나 발생시킨 형광 빛을 APD라 불리는 광증배다이오드를 통해 검출함으로써, 그 입자들의 총 에너지를 알 수 있는 검출기이다. 한편 하전 파이온과

CMS 검출기는 힉스의 발견 및 표준모형을 넘어서는 새로운 물리의 발견에 적합하도록 디자인되었다. CMS 검출기는 보통 하전입자의 경우, 100 GeV 근처에서 1% 정도의 운동량 측정 오차를 보이며, 두 개의 뮤온의 invariant mass⁶⁾의 정밀도도 100 GeV 영역에서 약 1% 정도의 오차를 보인다. 또 실리콘 트랙 검출기를 활용해 타우입자나 b 쿼크로부터 생성된 제트 안에 포함되어 있는 하전입자의 임팩트 파라미터를 측정함으로써 그들을 구별해 낼 수도 있다.⁷⁾ 전자기열량계의 에너지 분해능은 100 eV대 이상에서 대략 0.4% 정도로 매우 정밀한 수준이며, 얻어진 제트의 에너지 분해능은 10% 정도의 오차를 나타낸다.^[3]

지난 7월 4일에 발표한 결과는 CMS가 2011년에 수집한 데이터와 2012년 6월 18일까지 수집한 양성자-양성자 충돌 데이터를 바탕으로 한다. 앞서 언급한 바와 같이 2011년도 데이터는 7 TeV의 질량중심에너지를 갖고 총 휘도는 5.1 fb^{-1} 에 해당하고, 2012년도 데이터는 8 TeV로 5.3 fb^{-1} 에 해당한다. 힉스입자의 탐색을 위해 CMS는 5개의 주요채널을

[3] CMS homepage, <http://cern.ch/cms>.

- 6) “불변질량”이라 불린다. 정치좌표계에서의 질량으로 생각하면 되고, 이 경우 두 개의 묶음으로 붕괴한 모입자의 고유질량을 나타낸다.
- 7) 충돌로 생긴 입자들의 궤적은 항상 그 충돌지점을 포함하여야만 한다. 그러나 평균수명이 긴 입자가 붕괴하면, 붕괴된 입자의 궤적은 꼭 충돌지점을 통과하지는 않는다. 임팩트 파라미터는 바로 이 입자의 궤적과 충돌지점간의 최소거리를 말한다. 이는 러더포드의 충돌실험에서 임팩트 파라미터와 같은 개념에서 출발한다.

Fig. 8. Event recorded with the CMS detector in 2012 at a proton-proton centre of mass energy of 8 TeV. The event shows characteristics expected from the decay of the SM Higgs boson to a pair of photons (dashed yellow lines and green towers).

Fig. 9. Event recorded with the CMS detector in 2012 at a proton-proton centre of mass energy of 8 TeV. The event shows characteristics expected from the decay of the SM Higgs boson to a pair of Z bosons, one of which subsequently decays to a pair of electrons (green lines and green towers) and the other Z decays to a pair of muons (red lines).

분석했다. 이중 3개의 채널은 $\gamma\gamma$, ZZ 또는 WW 등 보손입자의 쌍으로 붕괴한 것이고, 나머지 2개의 채널은 bb 또는 $\tau\tau$ 의 페르미온 입자 쌍으로 붕괴한 것이다. 125 GeV 영역의 힉스 입자 탐색에 있어 $\gamma\gamma$, ZZ 및 WW 채널들은 서로 비슷한 정도의 효율을 가지고 있고, bb와 $\tau\tau$ 채널들보다는 더 높은 효율을 보인다.

앞서 설명한 바와 같이 $\gamma\gamma$ 와 ZZ 채널은 힉스입자의 정밀한 질량 측정이 가능한 중요한 분석 채널이다. $\gamma\gamma$ 채널의 질량은 CMS 크리스탈 전자기열량계(ECAL)에 그림 8과 같이 나타나는 두 개의 광자의 에너지와 방향을 측정함으로써 얻

8) 시그마(표준편차)는 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 높을수록 가정과 더 맞지 않는 것으로 해석한다. 예상하지 못했던 발견을 확신하기 위해서는 더 큰 값의 시그마 값을 요구한다.

Fig. 10. Di-photon($\gamma\gamma$) invariant mass distribution for the CMS data of 2011 and 2012.

을 수 있다. ZZ 채널의 경우에는 각각의 Z 입자가 두 개의 전자쌍 또는 두 개의 뮤온 쌍으로 붕괴하거나, 한 개의 전자쌍과 다른 한 개의 뮤온 쌍으로 붕괴하는 3가지 경우를 모두 분석하였다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 이들 경입자들은 내부 트랙검출기와 ECAL 또는 뮤온 검출기의 신호를 통해 검출된다.

WW 채널은 조금 더 복잡하다. CMS는 각각의 W 입자는 전자와 중성미자 또는 뮤온입자와 중성미자로 붕괴하는 사건만 분석에 고려하였다. 왜냐하면 W 보존의 경우 W가 하드론으로 붕괴하는 채널은 QCD 배경사건이 너무 많아 구별이 쉽지 않기 때문이다. 이 경우 2개의 중성미자가 검출되지 않으므로, 큰 Missing PT를 갖는 사건의 특징을 활용할 수 있는 반면 최종입자의 질량을 직접 계산해 낼 수 없으므로, 힉스 입자가 특정 질량 값에 잉여사건으로 집중되어 관측되지 않고, 넓은 질량 영역 내에서 골고루 퍼진 잉여사건으로 관측되게 된다. bb 채널의 경우는 표준모형 내에서도 비슷한 사건 형태를 갖는 배경사건이 많아 분석이 쉽지 않고, 그래서 힉스 입자가 전자나 뮤온 등으로 붕괴하는 W 또는 Z 보존이 같이 생성된 경우로 한정해 탐색하였다. $\tau\tau$ 채널은 전자, 뮤온, 또는 강입자로 붕괴되는 τ 입자를 우선 재구성하여 최종입자의 질량을 계산하게 된다.

현재까지의 CMS의 데이터 샘플은 110–600 GeV 질량 영역 대부분에서 표준모형 힉스입자의 존재여부를 95%의 통계적 신뢰도로 결론 낼 수 있을 정도로 충분하다. 현재의 CMS 데이터는 두 개의 큰 질량 영역인 110–122.5 GeV와 127–600 GeV 영역에는 95%의 신뢰도로 표준모형의 힉스 입자가 존재하지 않음을 보여주고 있다. 반면 배제되지 않은 영역인 122.5–127 GeV 영역 대에서는 CMS가 분석한 5개의 채널 중 소위 힉스입자의 질량을 직접 계산해 낼 수 있는 2개의 깨끗한 채널에서 과도한 잉여사건이 관측되었다.

그 첫 번째 채널로 두 개의 광자로 붕괴하는 채널에서는 125 GeV 영역에서 4.1시그마⁸⁾의 잉여사건이 관측되었다. 그림 10

Fig. 11. Distribution of the four-lepton mass for the sum of the $4e$, 4μ , and $2e2\mu$ channels. The measurements are presented for the sum of the data collected at centre of mass energies of 7 TeV and 8 TeV.

에서 보는 바와 같이 양성자의 충돌로부터 얻은 데이터 포인트 (에러바를 포함한 검은색 점)는 125 GeV 영역에서 힉스입자가 없다고 가정하는 예상치(빨간색 점선)와 그 통계적 허용치(노란색과 연두색으로 각기 1시그마와 2시그마 표시)를 초과하여 존재하고 있고, 이는 125 GeV 표준모형힉스입자를 포함한 몬테카를로 데이터의 예상치(빨간색 실선)와 잘 일치한다. 두 개의 광자로 붕괴되었다는 것은 광자의 스핀이 1인 것을 고려한다면, 그 모입자가 페르미온이 아닌 보존임을 나타낸다. 동시에 그 모입자의 스핀은 0이거나 2일 수는 있어도, 1은 아니라는 것이므로, 표준모형의 힉스일 가능성을 배제할 수 없다.

두 번째 채널인 ZZ 채널에서는 4개의 경입자로부터 125 GeV 영역에서 약 3.2 시그마의 통계적 의미를 갖는 잉여사건이 관측되었다. 그림 11에서 보는 바와 같이 4개의 전자, 4개의 뮤온, 또는 2개의 전자와 2개의 뮤온을 포함한 사건들의 최종 불변질량 분포를 보면 125 GeV 영역대에서 데이터 포인트 (에러바를 포함한 검은색 점)들이 몬테카를로(파란색과 초록색 막대그래프) 예측선보다 높이 튀어오른 것을 알 수 있다. 이는 126 GeV의 힉스입자를 가정한 몬테카를로(빨간색 실선으로 표시된 막대그래프)와 매우 비슷한 형태를 보여주고 있다.

한편 2개의 중성미자와 2개의 경입자로 붕괴하는 WW 채널의 분석 결과에서는 매우 넓은 질량 영역에서 아주 미약한 (1.5시그마 정도) 정도의 잉여사건만이 관측되었다. 마지막으로 분석된 힉스입자가 두 개의 페르미온 쌍으로 직접 붕괴하는 채널인 bb 와 $\tau\tau$ 채널에서는 잉여사건이 관측되지 않았다.

5개 채널을 모두 합하여 계산하면 그 통계적 의미는 125 GeV를 갖는 새로운 입자에 대한 신호가 배경사건보다 4.9시그마 정도 초과한다(그림 12). 분해능이 높은 두 개의 채널(즉 $\gamma\gamma$ 와 ZZ 채널)만을 합하여 계산하면 통계적 의미는 5.0시그마에 이른다. 배경 사건만으로 통계적인 요동에 의해 이 정도 또는 그 이상의 특별한 일이 나타나는 것은 3백만 번에 1번

Fig. 12. The observed probability that the background-only hypothesis would yield the same or more events as are seen in the CMS data, as a function of the SM Higgs boson mass for the five channels considered.

정도로 희박한 일이어서 이는 새로운 입자가 LHC에서 생성되었다고 보는 것이 타당할 것이다. 이렇게 새롭게 발견된 이 입자의 질량은 125.3 ± 0.6 GeV로 계산된다. 이 입자의 생성률(σ_{DAT})은 표준모형 힉스 입자의 생성률(σ_{SM})과 비교하여 $\sigma_{\text{DAT}}/\sigma_{\text{SM}} = 0.80 \pm 0.22$ 정도로 표준모형의 힉스 입자에 부합한다.

이번 실험 결과를 CMS는 검출기 성능, 데이터 샘플의 선정, 배경사건 양의 결정, 다양한 통계적, 시스템적 오류 등 여러 세부 사항들을 점검하였고, 전 분석 과정에 대한 상호 검증을 위해 내부적으로 두 개 이상의 독립된 분석그룹을 조직하여 데이터 분석을 수행하였다. 한편 이번엔 새로운 입자의 발견을 선언하게 된 데에는 다음 몇 가지 의미 있는 시사점이 그 신빙성을 더해줬기 때문이기도 하다.

- 1) 125 GeV에서의 잉여사건은 7 TeV 데이터 샘플인 2011년도 결과와 8 TeV 데이터인 2012년도 결과에 공히 나타난다는 점.
- 2) 잉여사건이 두 개의 고분해능 채널인 $\gamma\gamma$ 와 ZZ 채널분석에서 같은 질량에서 나타난다는 점.
- 3) WW 채널에서 보여지는 미약한 잉여사건은 앞의 두 채널에서 얻어진 125 GeV대의 입자와 잘 부합된다는 점.
- 4) 잉여사건은 광자, 전자, 뮤온, 강입자들이 포함된 다양한 채널들에서 나타난다는 점.
- 5) 끝으로 CMS에서 관측된 결과가 완전히 다른 검출기로 실험을 수행하는 ATLAS국제공동연구단의 결과와 일치하는 점.

이와 같은 시사점을 고려하면 CERN이 바로 그 다음날 호주 멜버른에서 열리는 ICHEP의 개회 직전에 “새로운 입자”의 발견을 선언하게 된 충분한 자신감과 그 배경을 이해할 수가

있게 된다. CERN의 정리된 발표가 없었다면, ICHEP에서 발표되는 각각의 실험결과로부터 매우 혼란스런 결론이 예상되었기 때문이다.^[4]

CMS와 한국CMS실험사업팀

CMS는 표준모형의 검증과 새로운 물리학을 찾기 위해 건설된 LHC가속기에서 수행되는 두 개의 거대 실험 중 하나이다. CMS 실험은 LHC의 고에너지 양성자-양성자 충돌 그리고 중이온 충돌에서 얻어지는 다양한 입자들과 현상들을 관측하기 위해 건설되었고, 인류가 갖고 있는 궁극적인 질문인 “우리의 우주는 무엇으로 어떤 힘들에 의해 만들어졌는가?”, “모든 물질의 질량은 어디서 왔는가?” 같은 철학적인 물음에 해답의 실마리를 준다. 우리는 CMS를 통해 잘 알려진 입자들의 성질을 최고의 정밀도로 측정할 수 있을 뿐 아니라 예상하지 못했던 전혀 새로운 현상도 발견할 수 있다. 과거를 되새겨 보면 이러한 연구가 우주에 대한 우리들의 이해를 넓게 해줄 뿐 아니라, 연구 도중 예상치 못한 놀라운 기술 혁명을 가져다주기도 한다.

CMS 실험의 개념 설계는 1992년에 시작되었다. 직경 15미터의 약 29미터의 길이를 가진 이 1만4천 톤의 거대한 CMS 검출기는 16년에 걸쳐 역사상 가장 큰 국제공동연구팀에 의해 건설되었다. 이 국제공동연구팀은 전 세계 41개국의 179개의 대학과 연구소에서 참여한 3275명의 과학자(1535명의 대학원생 포함)와 790명의 기술자로 구성되어 있다. 한국은 CMS가 처음 설계되던 1990년대부터 CMS 국제공동연구에 참여하여, 저항판 검출기, 초전도 솔레노이드 이동장치, 데이터 획득장치(DAQ) 부분에서 주요 공헌을 하였고, 현재는 국내 10여 개 대학의 60여 명의 참여자가 “한국CMS실험사업팀”을 구성하여 실험에 임하고 있다. 한국팀은 이중전하를 갖는 힉스입자의 탐색, QCD 제트 연구, 세 개의 렙톤으로 붕괴하는 SUSY 입자의 탐색, W' (프라임) 입자 등 표준모형을 넘어선 새로운 물리의 가능성 탐색, 끈이론이 기술하는 중력자의 탐색 및 중이온 충돌에서의 J/Psi, Upsilon 상태들의 형성, 입자들의 플로우 현상 측정 등 다양하고 독특한 주제로 실험에 참여하고 있다. 특히 올해에는 고려대학교 최수용 교수팀이 이끄는 연구진이 세계최초로 탑쿼크 사상 중에 b 제트로 붕괴되는 사건의 생성비를 측정하여 보고하는 등 나날이 한국CMS실험사업팀의 결과가 양적으로 질적으로 발전하고 있다.^[5]

결 언

125 GeV에서 새로이 관측된 입자는 통계적인 정밀도 내에서 표준모형이 말하고 있는 힉스 입자에 부합한다. 그러나 이

입자가 정말로 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 한다. 그러기 위해서는 더 많은 데이터가 필요할 것이다. 현재 LHC 가속기는 매우 잘 작동되고 있고, 2012년 말까지 CMS 실험은 지금까지 분석된 데이터의 양의 세 배 이상을 확보할 것으로 보인다. 따라서 이번엔 새로이 발견된 입자의 성질을 자세히 연구할 수 있을 것이고, 그렇다면, 이 입자가 표준모형에서 예견되는 힉스입자인지의 여부가 판가름 날 것이라 여겨지고 있다. 그 결과에 따라 향후 벌어질 LHC 실험의 미래는 두 갈래로 나뉘다고 할 수 있겠다. 우선 실제로 표준모형의 힉스 입자라고 밝혀질 경우인데, 이럴 경우에는 힉스 입자의 성질에 대한 정밀 연구가 필요해질 것이다. 그러기 위해서는 힉스입자를 대량으로 만들어 내기 위한 고휘도 LHC 실험이 필요하게 될 것이다. 또 국제 선형가속기 프로그램도 같이 탄력을 받을 것이다. 만약 반대로 이 입자가 표준모형의 힉스 입자가 아니라면, 이 입자가 무엇인지, 어떤 새로운 물리학에서 왔는지가 초미의 관심사로 떠오를 것이다. 이 경우 역시 LHC를 업그레이드하여 더 높은 에너지와 더 높은 휘도를 갖는 빔을 이용한 실험은 불가피할 것이다. 어느 경우이든 현재까지 인류가 구축한 가장 강력한 실험장치인 LHC는 그 가치를 유지할 것으로 보인다. 맺음말로 한 가지 더 붙일 것이 있다. 향후 계속되는 LHC 실험에서 한국CMS실험사업팀의 공헌이 점점 더 커질 것이라는 예상을 할 수 있다. 사실 전체 CMS국제공동연구단의 크기에 비하면 우리나라 실험팀은 아직 규모면에서 매우 작은 편에 속한다. 한국CMS실험사업팀은 외형적으로는 국내 다른 입자실험 팀들과 비교해서 큰 규모임이 확실하나, 아직까지 해외의 한 두 대학의 연구팀에 비교할 만큼 충분한 전문인력을 확보하고 있지 못한 것도 사실이다. 그래도 지금까지 CMS 내에서의 연구 실적을 보면, 저자 참여율의 2배가 넘는 내부연구노트가 발표되는 등, 한국 팀의 실적은 매년 눈에 띄게 향상되고 있는 것도 사실이다. 한국CMS실험사업팀이 앞으로도 계속 우수한 연구 인력을 확보해 가면서, 대학 간의 공동연구를 활성화해 나간다면, 머지않아 국제적인 연구팀으로 발전해 나갈 것임은 자명하다. 우리나라 과학계의 끊임없는 지지와 관심이 많이 필요한 상황이다.

REFERENCES

- [4] Observation of a new Particle with a Mass of 125 GeV, <http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev>.
- [5] Korea CMS Collaboration, <http://www.cms-kr.org>.