가속기 실험에서의 힉스입자 탐색과 발견

DOI: 10.3938/PhiT.22.056

최수용

Searches for and Discovery of a Higgs Particle at Collider Experiments

Suyong CHOI

Various efforts at particle collider experiments to search for the Standard Model Higgs particle are summarized. Serious attempts at Higgs searches were performed by experiments at CERN LEP and the Fermilab Tevatron. However, it took the highest energy collider to discover the Higgs. The ATLAS and the CMS experiments were designed to find the Higgs boson in a variety of channels over a wide range of possible Higgs boson masses, unlike previous experiments. Discovery of a Standard Model Higgs boson at the ATLAS and the CMS experiments led to the 2013 Nobel Prize in physics belong jointly awarded to Peter Higgs and François Englert.

서론

2012년 7월 유럽 핵입자 물리연구소 CERN ATLAS와 CMS 실험에서 양성자 질량의 약 130배에 달하는 질량이 125 GeV 인 새로운 입자의 발견을 발표했다. 이어서 2013년 초 그 입자의 성질이 표준모형(Standard Model)에서 힉스(Higgs) 입자의 성질과 일치한다는 사실을 밝혔고 이는 2013년 노벨 물리학상 수상에 결정적인 역할을 했다.

1964년 힉스, 앙글레르(Englert), 브라우트(Brout)는 자발적

저자약력

최수용 교수는 서울대학교 대학원 물리학과 이학박사(1999)로서 미국 UC Riverside 연구원(1999-2005), 성균관대학교 물리학과 조교수/부교수(2005-2010)를 역임하고, 현재 고려대학교 물리학과 교수(2010-)로 재직 중이다. 한국-CMS 실험 사업팀장으로 CMS 실험에서 한국을 대표하고 있다. (suyong@korea.ac.kr)

대칭성 깨짐에 의해 스핀 0인 질량이 있는 입자의 존재를 예측했다. 이들의 이론은 표준모형(Standard Model) 형성에 있어 가장 중요한 역할을 했다. 처음에 단순한 하나의 이론적 모형으로 출발한 표준모형은 그 후 수많은 실험에 의해 자연을 가장 잘 기술하는 이론으로 발전했다. 전자기력, 약력, 강력에 의한 상호작용은 다양한 에너지와 가속기 환경에서 정밀도를 높여가며 검증이 되었다. 1995년 미국 페르미 연구소 테바트론(Tevatron) 가속기를 이용한 CDF와 D-Zero 실험에서 탑 쿼크(top quark)를 발견한 다음 유일하게 발견을 기다리는 입자는 힉스입자였다.

CERN LEP(Large Electron Positron accelerator)와 테바트론 가속기 실험에서 힉스입자를 찾았지만 2012년 7월 LHC(Large Hadron Collider) 가속기를 사용하는 ATLAS와 CMS에서 발견됐다. 다음에 입자 충돌 실험에서 힉스입자를 찾았자 한 노력과 LHC 실험에서의 표준모형 힉스입자에 결과들을 정리했다.

입자 충돌 실험에서의 힉스입자 생성

표준모형에서 정량적인 예측을 위해서는 실험적으로 결정해야 할 변수들이 20개 있지만 이들 값을 알면 상당히 높은 정밀도로 예측이 가능한 이론이다. 힉스입자 발견 전까지 표준모형에서 몰랐던 변수는 표준모형 힉스입자의 질량이다. 다른 표준모형 변수 값들은 알고 있었으므로 힉스입자의 질량만 알면 모든 물리량에 대한 예측이 가능해진다. 가속기에서 힉스입자가 어떤 메커니즘으로 생성되며 어떻게 붕괴할지 힉스 질량의 함수로 이론적 계산이 가능하다. LHC 가속기를 이용하는 ATLAS와 CMS 실험의 대형 입자 검출 장치들은 힉스입자 발견에 최적화되어 있다.

충돌하는 입자의 종류에 따라 힉스입자 생성에서 중요시되는 채널(channel)이 다르다. 그것은 힉스입자의 일반적인 성질은 질량이 큰 입자와 더 잘 상호작용이 일어나는 데에 따른 것이다. 1990년대 가동되었던 CERN의 LEP 가속기처럼 전자와 양

Fig. 1. Standard Model Higgs production cross section at 8 TeV center-of-mass energy at LHC.

전자를 충돌하는 실험에서는 가속기의 에너지가 충분하면 힉스 입자를 하나만 생성시키는 것보다는 무거운 Z 입자와 함께 생성되는 채널에서 힉스입자가 훨씬 더 많이 나온다. 따라서 한 충돌 사건에서 Z 입자와 힉스입자를 동시에 찾으면 된다.

강입자(hadron)인 양성자 또는 반양성자를 가속하여 충돌시키는 실험에서는 위의 과정보다 힉스입자를 훨씬 더 많이 만들어내는 메커니즘이 있다. 미국 페르미연구소 테바트론 가속기에서는 양성자-반양성자 충돌을 하고 CERN LHC 가속기는 양성자끼리 충돌시키는 실험을 하는데 이들 강입자끼리의 충돌은 강입자 안의 쿼크와 글루온(gluon)의 충돌로서 설명이 잘 된다. 테바트론, LHC 가속기에서 가장 힉스를 많이 만들어내는 채널은 글루온 두 개가 충돌하여 힉스를 만드는 사건이다. 물론 글루온은 강한 상호작용에만 관여하는 입자이고 질량이 없어 힉스입자와 직접 반응할 수 없다. 그러나 양자고리(quantum loop)에 가상(virtual)의 탑쿼크가 있는 과정을 통해 힉스입자 하나만 생성되는 사건이 있을 수 있다. (그림 1의 $pp \rightarrow H$)

W, Z, 힉스입자들은 수명이 10^{-25} 초 정도로 매우 짧아 바로 붕괴한다. 힉스입자는 그 질량에 따라 가능한 한 가장 무거운 입자로 붕괴하는 것을 선호한다(그림 2). 힉스입자의 질량을 모르는 상태에서는 다양한 생성과정과 붕괴 채널에서 탐색이 이뤄져야 한다. 이 중 붕괴 확률이 크고 넓은 힉스 질량 영역에서 중요한 붕괴 채널들에는 약력 매개 입자 쌍으로 붕괴하는 채널들(W^+W^- , ZZ)과 페르미온 쌍, 즉, b쿼크 쌍으로 붕괴하는 $b\bar{b}$ 채널, 타우입자 쌍으로 붕괴하는 $\tau\tau$ 채널이 있다.

힉스입자가 W^+W^- 으로 붕괴하는 경우 중 실험적으로 관측하기 비교적 용이한 경우는 각 W 입자가 전하를 띤 경입자와 중성미자, 예컨대 전자 + 중성미자 또는 뮤온 + 중성미자와 같이

Fig. 2. Branching fractions as a function of mass for various Standard Model Higgs decays.

붕괴하는 경우다. 전자 또는 뮤온 입자는 검출이 가장 용이한 입자들이기 때문이다. 중성미자는 검출기와 반응을 거의 하지 않기 때문에 검출기에서 검출된 입자들의 마치 운동량 보존이 안 되는 것처럼 보여 소위 missing transverse energy가 큰 형태로 측정이 된다. 이 채널은 힉스 질량이 160 GeV일 때 힉스입자의 붕괴확률이 최대가 되어 그 중요성이 부각된다. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 130 GeV 이상에서 힉스가 이 채널로 붕괴할 확률이 가장 크다. 이 채널에서는 2개의 중성미자의 운동량을 정확히 재구성하는 것이 불가능하기 때문에 힉스입자의 질량을 알기가 용이하지 않다는 단점이 있다.

ZZ 채널은 소위 golden channel이라 불리는데 각각의 Z 입자가 경입자 쌍으로 붕괴할 경우 힉스입자 사건이 두드러지게 나타나게 되고 매우 정밀하게 힉스입자의 질량을 측정할 수 있는 모드가 된다. 또한 힉스입자의 스핀을 측정하는 데에 있어서 가장 중요한 채널이기도 하다.

LHC 실험들은 감마선 2개로 붕괴하는 $\gamma\gamma$ 채널에 맞도록 검출기 설계를 했다. 이 채널로 붕괴할 확률은 10^{-3} 정도로 매우 낮지만 에너지 분해능을 좋게 만들 경우 충분히 적은 통계량에 대한 보완이 가능하다. 또한 정밀한 질량 측정이 가능한데 두 개의 감마선의 에너지를 이용하여 계산한 불변질량 분포가 특정 힉스입자의 질량영역에서 봉우리를 만들 것이다. 단점은 양자색소역학 과정을 통해서 힉스에 의한 것이 아닌 많은 양의 $\gamma\gamma$ 사건들이 있을 것으로 기대되지만 다행스럽게도 이러한 배경사건들의 분포는 부드럽게 감소하는 형태일 것으로 기대되어 신호와 구분이 가능하다. 이 채널을 통해 힉스입자를 보게 되면 Yang의 정리에 의해 힉스입자는 스핀이 0 또는 2

인 입자여야 한다.

이러한 다양한 붕괴 채널에서 측정을 해야 하는 이유는 힉스입자를 발견할 경우 표준모형이 힉스의 성질과 일치하는지를 따져보기 위해서다. 입자의 중요한 성질들에는 질량, 각종 양자수(스핀, Parity, C-parity), 다른 입자들과의 상호작용의 강도(coupling strength) 등이 있는데 질량을 제외한 나머지 성질들은 이미 다 예측이 된 상태다. 상호작용 강도는 생성단면적의 측정을 통해 유추할 수 있고 스핀은 붕괴되어 나오는 입자들의 각(angle) 분포를 측정함으로써 정할 수 있다.

LHC 실험전 힉스입자 탐색

1970년대까지 힉스입자에 대한 실험적 실질적인 탐색은 이뤄지지 않았다. 본격적인 힉스입자 탐색은 CERN 연구소의 LEP 가속기를 이용한 실험들에서 이뤄졌다.

1. LEP 가속기에서의 힉스입자 탐색

LHC 가속기가 있는 둘레 27 km 터널은 본래 LEP 가속기를 위해서 만든 것이다. 1970년대에 LEP 가속기 건설이 계획될 당시 목적은 Z 보손을 직접 생산하고 이의 성질을 정밀 측정하는 데에 있었다. 후에 초전도 가속관을 설치하여 가속기의 에너지를 점차 높여 W 입자를 쌍생성시키는 연구 계획을 세웠다. 초기 연구 계획에는 힉스입자 탐색은 염두에 두지 않았다.

힉스입자 탐색이 LEP 가속기 실험의 목표 중 하나로 나온 것은 1986년 LEP에서 가능한 물리학을 정리하면서다. 이 문서에서는 20 GeV와 160 GeV 사이 힉스입자의 질량이 있다고 가정하고 상당히 다양한 가능성에 대한 이론적 결과가 기술되어 있다.

LEP 가속기의 4개 실험(Aleph, Delphi, L3, Opal)은 각기 대형 입자 검출 장치로 1989년부터 2000년까지 진행되었다. 질량 중심에너지 91.2 GeV에서 수행된 LEP 1이라 불리는 시기에는 Z 보손을 주로 생산하도록 에너지가 Z 보손 입자의 질량에 맞춰져 있었다. 물론 힉스 질량은 몰랐기 때문에 Z 입자가 힉스입자로 붕괴할 가능성을 탐색했다. Z 입자의 성질을 정밀하게 연구함으로써 직접 만들기 어려운 무거운 입자가 양자고리에 미치는 영향까지도 연구할 수 있었다. 이때 얻은 결과들은 아직까지도 표준모형의 일관성을 검증하는데 중요한 데이터로 쓰인다.

이후 에너지를 점점 높여 2000년에 질량 중심에너지를 206 GeV까지 올린 LEP2 실험 데이터로는 ZH 생성 채널에 대한 힉스입자 탐색을 진행했었지만 결정적인 신호는 보이지 않았다. 그 결과 표준모형 힉스입자의 질량은 114 GeV보다 커야

Search for the Higgs Particle

Status as of July 2010

95% confidence level

Fig. 3. 95% Confidence level exclusions of Standard Model Higgs mass as of July 2010, including direct searches at LEP and Tevatron, and indirect upper limit from precision electroweak measurements.

한다는 결론에 도달했다. 이후 LEP 가속기는 해체되어 그 터널에 LHC 가속기가 건설되었다.

2. 힉스 메커니즘의 간접적인 증거

1995년 페르미 연구소의 당시 테바트론 가속기를 이용한 세계 최고 에너지 양성자-반양성자 충돌 실험인 CDF와 D-Zero 실험 그룹에서 기본 입자 중 가장 질량이 큰 탑 쿼크를 발견했다. 탑 쿼크 발견 전에 LEP 실험들의 Z 입자의 정밀 연구를 통해서 얻은 데이터로 탑 쿼크의 질량을 예측했고 실제 발견된 탑 쿼크의 질량과 일치했다. 표준모형의 섭동적 계산 중 양자고리에 탑 쿼크의 영향이 작지만 분명히 존재하기 때문에 가능했다.

탑 쿼크와 W 입자의 질량을 정밀하게 측정하는 것은 중요한 문제로 대두되었다. 이는 힉스장이 무거운 입자와 상호작용이 강하기 때문에 가상의 힉스입자에 의한 양자고리 효과가 가장 크게 나타나기 때문이다. 이들 질량의 정밀 측정 및 LEP 실험의 Z 입자 정밀 측정 데이터를 종합할 때 2000년대에 이미 힉스입자의 질량이 200 GeV 이하일 것이라는 것을 알고 있었다.

3. 미국 페르미 연구소(Fermilab) 테바트론(Tevatron) 가속기에서의 힉스입자 탐색

미국 테바트론 가속기 Run 2 시기는 양성자와 반양성자를 질량 중심에너지 1.96 TeV에서 충돌시켜 LHC 가속기 에너지에 비해 약 4배 작다. CDF와 D-Zero의 두 개의 대형 입자 검출 장치로 본격적인 데이터를 2004년부터 수집했다. LHC가 동전까지 세계 최고의 에너지에서 운영된 가속기다. 테바트론에서 수행된 실험들의 목적 중 하나가 힉스입자 탐색이었다.

테바트론 가속기는 LHC보다는 에너지가 작아 무거운 입자를 입자 충돌로 만들기 쉽지는 않다. CDF와 D-Zero 검출기들

도 충돌에서 나오는 다양한 입자를 검출할 수 있는 범용성 대형 검출기지만 힉스입자를 발견을 염두에 두고 설계된 검출기들이 아니어서 분해능이 LHC 실험들에 비해 좋지 않다. 특히, 감마선에 대한 에너지 분해능이 좋지 않아 테바트론 가속기 실험들에서 힉스입자 탐색에 중요한 것은 WW 채널이다. 이 채널은 특히 160 GeV 근처에서 유효하다. 140 GeV보다 작은 질량의 힉스는 주된 탐색 채널이 $b\bar{b}$ 이지만 역시 분해능이 떨어져서 배경사건과 충분한 구분이 되지 않는 단점이 있어 힉스입자 탐색이 쉽지 않을 것으로 기대되었다.

CDF와 D-Zero 실험들에서 힉스 탐색이 본격 진행되었고 WW 채널에서의 데이터가 배경사건에서의 기대와 같아 힉스입자의 증거를 찾지 못했다. 힉스입자가 존재한다면 그 질량은 95% 신뢰 수준으로 158 GeV보다 작거나 175 GeV보다 큰 영역에 있을 것이라는 결론을 내렸다(그림 3). 다른 실험 결과들에 의한 직간접적 결과와 종합할 때 114-158 GeV 또는 175-185 GeV에 있어야 한다는 사실을 알게 되었다. 만일 실제 힉스입자의 질량이 160 GeV 근처였다면 LHC가 아닌 테바트론 실험들에서 힉스입자를 먼저 봤을지도 모른다.

LHC 가속기 실험에서의 표준 힉스입자 발견

2008년에 LHC의 가동 중 사고로 힉스의 발견은 지연될 수 밖에 없었고 2011-2012년 데이터로 분석을 진행하던 중 2012년 7월 125 GeV의 질량에서 새로운 입자를 발견했고 2013년 3월에 이 입자의 성질이 표준모형의 힉스와 일치한다는 결론에 이르렀다.

1. LHC 가속기 및 ATLAS와 CMS 실험

LHC 가속기는 지하 약 100 미터 둘레 27 km인 LEP 터널에 있다. 가속기 건설은 2001-2008년에 진행되었고 건설 비용은 약 5조 원으로 인류 최대 순수 과학 프로젝트다. 이 가속기에서 양성자는 7 TeV까지 가속이 된다. 양성자들은 1950년대부터 지어진 여러 종류의 가속기를 통해 정지 상태로부터 서서히 가속이 되고 LHC 가속기에서 최대에너지에 이른다.

양성자 10^{11} 개가 한 빔 다발(beam bunch)로 모여서 가속되고 이러한 양성자 다발이 2800개가 있다. 최종적으로 각 양성자는 광속의 99.999999%, 에너지는 7 TeV에 이르러 질량 중심 에너지는 2배, 즉 14 TeV가 되도록 설계되어 있다. 대형 입자 검출 장치가 있는 위치에서 양성자 다발이 25 나노초마다 충돌하게 되어있다. 2010-2012년 동안에는 설계 에너지보다는 낮게 7-8 TeV까지 운영했다. 2015년 이후에는 가속기 보수 및 업그레이드를 통해 설계 에너지에 다다를 것으로 전

Fig. 4. Aerial view of Geneva, Switzerland with CERN LHC accelerator, CMS and ATLAS detectors (not drawn to scale).

망된다. 향후 빔의 밝기를 꾸준히 높이는 가속기 업그레이드 10년 계획이 있고 이에 발맞춰서 검출기 업그레이드도 계획되어 있다.

CMS 및 ATLAS 대형 실험 장치들 역시 지하 터널에 위치하고 있으며 검출기 정중앙에서 양성자 다발끼리 충돌이 일어나도록 되어있다. 이러한 입자 검출기는 검출기까지 도달할 수 있는 수명이 긴 입자들을 검출하도록 설계되어 있다. 이중 감마선, 전자, 뮤온(muon)은 운동량과 에너지를 매우 정밀하게 측정할 수 있다. 강입자(양성자, 중성자, Kaon 등)는 열량계에서 정지시켜 검출기에서 나온 신호와 입자의 에너지가 비례하도록 설계되어 있지만 경입자나 감마선에 비해 에너지 측정 분해능은 떨어진다. 각 입자들은 에너지에 따라 mean free path들이 상당히 달라 각 입자 검출에 특화된 부검출기들을 만들어 조합한 것이 CMS와 ATLAS 대형 검출기다.

검출기 내부에는 강한 자기장이 걸려 있어 하전 입자는 나선 형태로 중앙에서 바깥으로 나가고 입자들이 지나가는 위치를 측정, 궤적을 재구성하여 입자의 운동량을 측정할 수 있다. 감마선, 전자, 그리고 강입자 제트는 정지시켜 검출기에 남기는 총 에너지를 직접 측정한다. 검출기에 도달하는 입자들의 에너지와 운동량을 알면 힉스입자뿐만 아니라, 탑 쿼크, Z 입자, W 입자 등 수명이 아주 짧은 입자들의 존재를 데이터 분석을 통해 붕괴 사건을 재구성함으로써 찾을 수 있게 된다.

각각의 실험 장치들은 LHC 가속기와 같은 시기에 건설되었고 소요된 비용만 각각 약 4000억 원, 무게 15000톤, 5층 건물 높이에 해당하는 15미터 크기로 압도하는 스케일이다. 검출기는 25 나노초마다 일어나는 충돌에 반응할 수 있도록 설

Fig. 5. $\gamma\gamma$ invariant mass distribution from CERN CMS experiment. Bump around 125 GeV is due to the Higgs particle. The width is due to finite energy resolution of the detector.

계되어 있다. 총 전자신호의 채널수가 약 천만 채널이어서 마치 디지털 카메라로 초당 4천만 번 사진을 찍는 것과 같은 매우 빠른 신호처리 기술 및 전송 기술을 필요로 하고 이러한 기술을 판매하는 곳은 없어서 물리학자들이 여러 기업과 공동으로 개발을 했다.

각 실험에는 현재 약 40개국, 3000명 이상의 연구 인력이 참여하는 거대 실험 그룹이다. 우리나라는 1990년대부터 CMS 실험에 참여하여 전방 묶은 저항관 검출기의 중요 부품, 솔레노이드 초전도 자석 회전 장치, 데이터 수집(DAQ) 장치 건설에 직접 기여했고 이러한 장치들은 실제 힉스입자 탐색에 사용됐다. 우리나라는 2013년 현재 전국 8개 대학 약 80명의 연구진이 CMS 실험에 참여, 2012년까지 모은 CMS 데이터 분석을 통해 탑쿼크, 힉스, W, Z 입자, 강한 상호작용 등 표준 모형 검증과 새로운 힘의 증거를 찾는 등의 연구를 활발히 진행 중이다. 또한 2013-2014년에 진행되는 업그레이드 묶은 입자 검출기 제작의 핵심 부품을 국내에서 제작하고 있다. 2018년에 있을 업그레이드를 위해 새로운 검출기 개발을 국내 기업과 함께 시작하여 장기 계획을 수립하여 위상을 확대하고자 한다.

2. 125 GeV 질량의 새로운 입자의 발견

2011년에 LHC 건설의 가장 중요한 목적 중 하나인 힉스입자의 발견에 ATLAS와 CMS 실험의 본격적인 경쟁이 이뤄졌다. 이때 LHC 설계 에너지의 반인 질량중심 에너지 7 TeV로 1년 가동을 했고 누적 휘도(integrated luminosity) 5.5/fb의

Fig. 6. $H \rightarrow ZZ$ signal seen around 125 GeV from CERN ATLAS experiment.

데이터를 수집했다.

2011년 8월 힉스입자가 존재할 수 있는 질량 영역이 많이 줄어들어 114 - 145 GeV 사이에 있다는 발표를 했다. 그리고 12월에 새로운 입자의 가능성을 발표했다. $\gamma\gamma$ 및 ZZ 채널에서 126 GeV 질량에서 ATLAS는 2.3 시그마,¹⁾ 즉 배경 사건이 우연히 많이 보였을 확률은 약 2% 정도로 힉스입자의 증거로 주장하기에는 충분치 않은 결과를 얻었다. CMS는 같은 질량에서 1.9 시그마의 사건의 잉여를 봤다. 두 개의 실험에서 같은 질량에서 2 시그마의 신호를 우연히 볼 확률은 1/1000보다 작기 때문에 이는 새로운 입자의 증거라고 인식됐다. 따라서 2012년에 수집할 데이터로는 확실하게 표준모형 힉스 존재 여부를 밝힐 수 있을 것으로 기대됐다.

2012년 2월부터 질량 중심 에너지를 8 TeV로 올려 실험을 했다. 가속기의 성능 한계 가까이 운영, 양성자 빔의 밝기를 높여서 불과 수개월 만에 6/fb의 데이터를 수집했다. 데이터를 더 많이 수집하면 신호사건과 배경사건도 모두 늘어나지만 통계적인 민감도도 향상된다. 그리고 양성자의 에너지가 높아져서 힉스 생성 단면적 증가에 의한 민감도 향상이 20-30% 추가로 더 있었다.

실험 그룹 내부에서는 여러 어려움이 있었다. 실제 실험에서는 양성자 10^{11} 개의 다발끼리 충돌지점에서 직경 64 마이크로미터 정도로 만나게 되는데 2012년에는 빔 다발안 양성자 중 평균적으로 20개의 양성자끼리 충돌하게 된다. 따라서 힉스를

1) 관측된 사건이 배경사건이 우연히 많이 보이는 것으로 설명할 수 있는 확률을 계량화하는 방법으로 정규분포에서 몇 표준편차 이상의 면적과 같은지를 나타냄. 예) 3 시그마는 0.0013 확률에 해당.

Fig. 7. 3D perspective view of a $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ Higgs candidate event from CMS experiment. Red lines indicate the trajectories muons traveled through the detector.

만들어낸 충돌 사건 이외의 충돌사건이 많고 이로 인한 파편은 여러 방향으로 날아가 검출기에 신호를 남기게 된다. 이는 힉스를 포함한 다양한 사건의 검출 효율과 분해능을 조금 저하시키는 결과를 가져온다. 더욱이 2011년 환경과는 실험 환경이 많이 다르기 때문에 검출기 이해를 다시 연구해야 하는 어려움도 있었다. 그리고 모의 실험사건 데이터들도 새로이 생산해야만 해서 컴퓨팅 자원이 부족하여 시간에 상당히 쫓겼다. 2012년 7월 4일 발표된 새로운 입자의 발견 결과는 불과 몇 개월 만에 수백 명의 노력으로 이뤄질 수 있었다.

2011-2012년 상반기 데이터를 분석한 ATLAS 실험에서는 126 GeV 질량 근처에서 $\gamma\gamma$ 4.5 시그마, ZZ 채널에서 3.6 시그마, WW 채널에서는 2.8 시그마에 해당하는 사건의 잉여를 관찰했고 모든 채널을 종합했을 때 6.0 시그마의 잉여, 즉 배경사건에 의한 것일 확률은 10^{-9} 으로 매우 작아 확실하게 발견이 되었다고 볼 수 있다.

단순히 많이 보였다고 힉스입자라고 할 수는 없고 그 입자의 성질이 표준모형에서 기대하는 것과 일치해야 한다. 표준모형에서는 특정 채널에서의 힉스입자를 몇 개 검출할 수 있을지도 알려주기 때문에 이와 비교해야 한다.

실험적으로 측정한 힉스의 생성단면적의 실험 측정값과 이론값의 비가 $\mu = 1.4 \pm 0.3$ 이어서 이상적인 1보다 오차범위를 크게 벗어나지 않아 표준모형 힉스입자와 유사한 듯 보였다. 표준모형 힉스입자임을 보이기 위해서 더욱 중요한 것은 입자의 스핀이다. 새로 보인 입자는 γ 으로 붕괴하기 때문에 Yang의 정리에 의해 이 입자는 스핀이 0 또는 2라는 값을 가질 수밖에 없다. 그러나 당시 데이터로는 스핀을 측정하기에는 데이터가 부족했다. ATLAS 실험 결과를 종합한 힉스입자의 질량은 126.0 ± 0.6 GeV인 정밀한 값을 얻었다.

CMS 실험에서는 125 GeV 질량 근처에서 $\gamma\gamma$ 4.1 시그마, ZZ 채널에서 3.2 시그마에 해당하는 사건의 잉여를 확인하여 종합적으로 4.9 시그마의 통계적 유의미한 지닌 신호를 발견

Fig. 8. CMS shows a combined Higgs signal strengths of $\mu = 0.80 \pm 0.14$ using their full data, which is close to the Standard Model value of 1.

했다. 다른 채널에서는 데이터의 부족으로 신호 관측은 못했지만 당시 데이터에서 기대했던 것에서 크게 벗어나지 않았다. 측정한 힉스의 생성단면적과 이론값의 비는 $\mu = 0.8 \pm 0.2$ 로 1과 오차 범위 내에서 일관성이 있어 표준모형 힉스처럼 보였다. CMS실험이 측정한 새로운 입자의 질량은 125.3 ± 0.6 GeV로 ATLAS 실험 결과와 일치했다.

3. 표준모형 힉스

2012년 7월 발표 이후 8 TeV에서 양성자-양성자 충돌 실험을 2012년 12월까지로 연장하여 각 실험에서 15/fb의 추가 데이터를 수집하여 새로운 입자의 희귀한 붕괴 채널과 스핀을 측정할 수 있게 되었다. 그리고 모든 데이터를 활용한 결과가 2013년 3월에 발표됐다.

ATLAS 실험에서는 최종 데이터를 사용한 결과 WW 채널에서는 3.8 시그마, $\gamma\gamma$ 에서는 6.1 시그마, ZZ 채널에서는 6.6 시그마 잉여를 측정했다. 신호 크기는 1.30 ± 0.20 로 1에 더욱 접근했다. 질량은 126.8 ± 0.6 GeV이다. 새로 발견된 입자의 스핀이 0 또는 2인가에 따라 $\gamma\gamma$ 채널의 경우 두 감마선의 각 분포가 WW 와 ZZ 채널의 경우 최종 붕괴 산물인 경입자의 각 분포가 다르다. 따라서 데이터에서 얻은 분포로부터 99.9% 신뢰수준에서 스핀 2 가설을 배제시킬 수 있었다.

CMS 실험의 경우도 더 많은 데이터로 인해 힉스입자 사건의 통계적 유의미성이 더욱 증가했다. WW 채널에서는 3.9 시그마, $\gamma\gamma$ 에서는 3.2 시그마, ZZ 채널에서는 6.7 시그마 잉여

Fig. 9. 2013 Nobel laureate Prof. Peter Higgs in front of the CMS detector.

를 측정했다. 이외에 $b\bar{b}$ 채널과 $\tau\tau$ 채널을 합쳐 3.4 시그마의 신호를 관측했다. CMS에서는 0.80 ± 0.14 로 1에서 오차 범위에서 약간 벗어난다. 그러나 ATLAS의 결과와 평균을 취하면 거의 1에 근접함을 알 수 있다. CMS에서도 스핀 2의 가능성을 99.9% 배제했다. CMS에서 측정한 입자의 질량은 125.7 ± 0.4 GeV로 ATLAS와 일치한다.

125 GeV 질량을 지닌 새로운 입자는 스핀이 0이고 다른 입자들과의 상호작용도 표준모형에서 예측하는 힉스입자와 오차 범위 내에서 일치하기 때문에 표준모형 힉스입자라고 결론을 내렸다. 이것으로 힉스입자의 발견은 성공적으로 끝났다.

결론

CERN LHC 가속기로 2011-2012년 수집한 ATLAS, CMS 데이터에서의 힉스입자의 발견은 물리학 역사에 남을 중요한 사건이다. 표준모형의 모든 입자가 발견되어 비로소 완성된 이론으로서 인정을 받을 수 있게 되었다고 해도 과언이 아니다. 힉스입자 연구는 끝난 것이 아니라 비로소 시작되었다. 2023년까지 지금의 15배에 달하는 데이터를 수집할 것이고 힉스입자의 성질에 정밀 측정과 지금까지 보지 못했던 붕괴 채널도 볼 수 있을 것이다. 그 이후에 150배에 달하는 데이터 수집을 목표로 장기 계획을 수립, 표준모형이 과연 입자 물리학의 끝인지 아닌지 알 수 있게 될 것이다.

REFERENCES

- [1] Physics at LEP, CERN-86-02 Volume 1.
- [2] D. Buskulic *et al.*, [ALEPH Collaboration], Search for the Standard Model Higgs boson, Phys. Lett. B **313**, 299 (1993).
- [3] LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>.
- [4] CDF Public Higgs Results, <http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/hdg/Results.html>.
- [5] D-Zero Public Higgs Results, <http://www-d0.fnal.gov/Run2Physics/WWW/results/higgs.htm>.
- [6] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
- [7] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [8] ATLAS Public Higgs Results, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>.
- [9] CMS Public Higgs Results, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsHIG>.