LHC CMS 실험과 힉스입자의 발견

DOI: 10.3938/PhiT.22.028

유 인 태

LHC CMS Experiment and Discovery of the Higgs Particle

Intae YU

Nearly half a century ago, the Higgs mechanism was proposed to explain the W and the Z masses, as well as the masses of fundamental quarks and leptons. The CMS collaboration has observed a new particle with a mass of approximately $125 \text{ GeV}/c^2$ by analyzing proton-proton collisions at the LHC. Within the experimental uncertainties, the measured properties of the new particle are consistent with those predicted for the Higgs particle based on the mechanism.

현대의 입자물리학은 표준모형(standard model)의 틀(frame-work)을 통하여 우주를 구성하는 기본입자인 쿼크(quark)와 렙톤(lepton)과 그들 사이의 상호작용을 이해하고 있다. 표준모형은 기본적으로 강한 상호작용(strong interaction), 약한 상호작용(weak interaction), 전자기 상호작용(electromagnetic interaction)에 대한 게이지 장이론(gauge field theory)으로 지난 수십 년 동안 거의 모든 입자물리현상을 성공적으로 설명하고 있다. 특히 전자기 상호작용과 약한 상호작용은 와인버그, 살람, 글래쇼^[1]에 의해 전기·약 작용이론(electroweak theory)으로 통합되어 표준모형의 핵심적인 부분이 되었다. 그러나 원래의 와인버그-살람 이론에서는 약한 상호작용을 매개해 주는 W 입자나 Z 입자와 같은 게이지 보손(gauge boson)이 질량을 가질 수 없는데 이는 명백히 실험결과와 배치되는 것이었다.

이러한 난점을 해결하기 위해 독립적으로 세 그룹에^[2-4] 의해 새로운 이론이 제안되었는데 이 이론에서는 자발적으로 대칭성이 깨지는(spontaneous symmetry breaking) 힉스 장(Higgs

field)을 추가로 도입하여 게이지 보손(gauge boson)이 질량을 갖는 것을 설명할 수 있었다. 또한 쿼크나 렙톤도 힉스 장과의 작용을 통하여 질량을 가지게 됨을 증명할 수 있었으며 힉스 입자(Higgs particle)라는 새로운 보손(boson)의 존재도 예측하였다. 이 결과는 우주 질량의 근원이 힉스 장에 있음을 의미하였으며 힉스입자의 발견은 표준모형을 완성시켜 주는 새로운 이정표가 되었다.

힉스 입자와 꼭대기 쿼크(top quark)는 방사 보정(radiative correction)을 통하여 미세하게 W 입자와 Z 입자의 질량에 영향을 미치는데 만약 꼭대기 쿼크와 W, Z 입자의 질량을 정밀하게 측정할 수 있다면 간접적으로 힉스입자의 질량을 추론할 수 있다. 그 결과 최신 질량 측정값들을 사용하여 95%의 신뢰 수준(confidence level)을 가지고 힉스입자 질량의 상한선을 $152 \text{ GeV}/c^2$ 로 결정할 수 있었다.^[5] 한편 전자(electron)나 양성자(proton)를 고에너지로 가속 충돌시켜 힉스입자를 생성하여 직접적으로 탐색할 수 있는데 LEP II 전자-양전자 충돌 가속기(electron-positron collider)를 사용하여 힉스입자 질량이 최소한 $114 \text{ GeV}/c^2$ 이상이라는 사실을 밝혀냈다.^[6]

힉스입자 질량의 범위를 고려할 때 힉스 입자를 생성할 수 있을 정도의 고에너지 입자 가속기는 미국 페르미 국립 가속기 연구소(Fermi National Accelerator Laboratory)의 테바트론(Tevatron) 양성자-반양성자 가속기와 유럽 CERN 연구소의 LHC(Large Hadron Collider) 양성자-양성자 가속기이다. 테바트론 가속기는 1 TeV의 양성자와 1 TeV의 반양성자를 충돌시키는 방식의 가속기인데 2002년~2011년의 기간 동안 수행한 실험에서 $120 \text{ GeV}/c^2$ 와 $135 \text{ GeV}/c^2$ 사이의 구간에서 힉스

REFERENCES

- [1] S. L. Glashow, Nucl. Phys. **22**, 579 (1961); S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967); A. Salam, *Elementary Particle Physics: Relativistic Groups and Analyticity* (1968).
- [2] F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964).
- [3] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964).
- [4] G. S. Guralnik, C. R. Hagen and T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964).
- [5] LEP Electroweak working group (<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>).
- [6] ALEPH, DELPHI, L3, OPAL Collaborations, Phys. Lett. B **565**, 61 (2003).
- [7] CDF and D0 Collaboration, Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).

저자약력

유인태 교수는 예일대학교에서 1996년 박사학위를 취득하였으며 미국 페르미 가속기 연구소 연구원을 거쳐 현재 성균관대학교 물리학과 교수(1998-현재)로 재직 중이다. 페르미 연구소의 CDF 실험의 멤버로서 고에너지 양성자 충돌에서 바닥쿼크 생성 및 붕괴에 대한 연구(1991-2011)를 하였으며 2007년 이래로 CERN의 CMS 실험에 참여하여 꼭대기 쿼크 및 새로운 물리현상에 대한 연구를 진행 중이다. (intaeyu@skku.edu)

Fig. 1. Overview of the LHC accelerator ring.

입자가 존재할 가능성을 제시하였다.^[7] 그러나 그 통계적인 중요도(statistical significance)가 작아 발견으로까지는 이어지지 않았고 힉스입자 발견의 주도권은 CERN 연구소의 LHC 가속기실험에게로 넘어오게 되었다.

스위스 제네바 근교에 위치한 CERN 연구소는 1954년 설립되었으며 전 세계 100여 개 국가에서 매년 10,000여 명의 과학자들이 방문하여 연구를 하고 있는 세계에서 가장 큰 입자 물리연구소이다. 또한 월드와이드웹(World Wide Web: WWW)의 탄생지로도 널리 알려져 있으며 W 입자 및 Z 입자의 발견 등 표준모형의 확립에 큰 공헌을 한 연구소이다. CERN 연구소의 핵심적인 연구시설은 LHC 양성자-양성자 가속기인데 이 원형(circular) 가속기는 가속기 링의 전체 길이가 27 km나 되는 세계 최대 규모의 입자가속기이다(그림 1). 2008년 8월에 첫 가동을 하였지만 불과 한 달 뒤 가속기 자석에 문제가 생겨 가동을 중단하였으며 전반기적인 수리 후 2009년 11월에 와서 재가동을 하였다. 처음에는 3.5 TeV의 양성자와 3.5 TeV의 양성자를 충돌시켜 7 TeV의 충돌에너지로 가동하였지만 2012년 3월에 충돌에너지를 8 TeV로 올려서 올해 초까지 실험을 계속하였다.

LHC 가속기 링 주위로 4개의 대형 입자검출기(CMS, ATLAS, LHCb, ALICE)가 설치되어 있는데 그 중 CMS(Compact Muon Solenoid) 입자검출기와 ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus) 입자검출기는 힉스 입자와 같은 새로운 입자와 물리현상의 탐색에 최적화된 입자 검출기이다. CMS 입자 검출기는 양성자-양성자 충돌에서 나오는 입자들의 종류를 판별하고 그 운동량과 에너지를 GeV~TeV의 범위에서 정밀하게 측정할 수 있는 거대한 규모의 첨단 입자 검출기이다(그림 2). CMS 실험그룹(CMS collaboration)은 대규모 국제 공동연구그룹으로 38개국, 184개 대학 및 연구소에서 온 3000여 명의 연구자로 구성되어 있다. 한국 CMS 실험팀에는 2013년 현재 7개 대학의 60여 명의 연구자들이 참여하고 있으며 전방 뮤온 검출기(forward muon detector)인 RPC(resistive plate chamber) 검

Fig. 2. Schematic view of the CMS particle detector.

출기의 제작 및 운영을 담당하고 있다.

수 TeV의 에너지를 가진 양성자와 양성자가 충돌할 때는 양성자를 구성하고 있는 기본입자들인 쿼크나 글루온(gluon)이 직접적으로 상호작용한다. LHC 양성자가속기에서 힉스입자의 주요 생성 메커니즘은 글루온 융합(gluon fusion) 과정인데 이 과정에서는 글루온과 글루온이 강한 상호작용을 통해 힉스입자를 생성하게 된다. 힉스입자는 생성 직후 단계적인 붕괴과정을 거쳐 최종적으로는 광자(photon)나 뮤온(muon)같은 안정한 입자들로 붕괴되고 그 입자들을 입자검출기가 검출한다. 붕괴입자들의 종류, 에너지, 운동량을 측정하게 되면 붕괴하기 전 원래 입자 X의 질량을 다음과 같은 방법을 사용하여 재구성할 수 있다.

$$\text{붕괴: } X \rightarrow A + B$$

$$\text{에너지 보존: } E_X = E_A + E_B,$$

$$\text{운동량 보존: } \vec{P}_X = \vec{P}_A + \vec{P}_B$$

$$\text{질량-에너지 관계식: } E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4, \quad c: \text{빛의 속도}$$

재구성된 X의 질량:

$$m_X = \frac{\sqrt{E_X^2 - \vec{P}_X^2 c^2}}{c^2} = \frac{\sqrt{(E_A + E_B)^2 - (\vec{P}_A + \vec{P}_B)^2}}{c^2}$$

이렇게 계산된 질량은 불변질량(invariant mass)이라고 불리는데 힉스입자와 같은 새로운 입자의 존재는 불변질량분포에서 공명 상태(resonance)로 확인할 수 있다. 보통의 경우 입자검출기의 에너지나 운동량 측정 오차의 효과 때문에 공명 상태는 가우스 분포로 나타나게 된다.

힉스입자는 다양한 모드(mode)로 붕괴하는데 각각의 붕괴 갈래비(branching ratio)는 그림 3에서 보여주는 바와 같이 힉스입자의 질량에 강하게 의존한다. 질량범위 120 GeV/c² - 135 GeV/c²에서는 H→bb̄ (H: 힉스입자, b: 바닥쿼크, b̄: 바

Fig. 3. Branching ratio of the Higgs particle as a function of the Higgs mass.

다크의 반입자의 붕괴갈래비가 가장 크고 그 다음으로는 $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow gg$ (g : 글루온), $H \rightarrow \tau\tau$ (τ : 타우렙톤), $H \rightarrow c\bar{c}$ (c : 맵시쿼크, $\bar{c}$: 맵시쿼크의 반입자), $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ (γ : 광자)의 순서로 붕괴갈래비가 크다. 이 중에서 CMS 실험에서 힉스입자를 탐색하는데 사용된 주요 붕괴모드는 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$ 이다. 힉스입자의 생성은 LHC 가속기에서 100억 번의 양성자-양성자 충돌에서 1개의 힉스입자가 생성될 정도로 희귀한 사건이다. 결과적으로 수없이 많은 충돌이 만들어내는 배경사건(background event)과 힉스 신호사건(signal event)을 분리하고 신호 대 배경사건의 비를 최적화하는 것이 힉스입자 탐색의 관건이 된다. 붕괴갈래비가 가장 큰 $H \rightarrow b\bar{b}$ 의 경우 배경사건이 너무 많아 힉스입자 탐색에 적합하지 않으며 $H \rightarrow gg$ 등도 마찬가지이다. 위에서 언급한 세 개의 붕괴모드는 신호 대 배경사건의 비가 비교적 높아 힉스입자의 탐색에 가장 적합할 것으로 예측되었다.

테바트론 가속기 실험인 CDF 실험과 D0 실험결과로부터^[7] 힉스입자의 질량이 120 GeV/c^2 과 135 GeV/c^2 사이의 영역에 존재할 가능성이 커짐에 따라 CMS 실험은 이 질량 범위 안에서 힉스입자 탐색에 전력을 경주하게 되었고 2012년 봄 즈음에는 힉스입자를 발견했다는 소문이 퍼져나갔다. 그러나 공식적으로 힉스입자의 발견을 공표한 것은 2012년 7월 4일 오스트레일리아 멜버른에서 열린 ICHEP2012 학회였다. 힉스를 비롯하여 저명한 입자물리학자들이 운집한 학회에서 CMS 실험의 대표인 조 인칸델라(Joe Incandella) 교수와 ATLAS 실험의 대표인 파비올라 지아노티(Fabiola Gianotti) 교수는 공동으로 힉스입자일 가능성이 큰 새로운 입자의 발견을 발표하였다.^[8,9] 이 입자의 질량은 약 125 GeV/c^2 이며 여러 물리적 성질이 실험오차 이내에서 예측된 힉스입자의 특징과 일치하였다.

CMS 실험에서는 2011~2012년의 기간 중 입자검출기가

Fig. 4. Invariant mass distribution of two photons.

추적한 방대한 데이터를 분석하여 힉스입자의 탐색이 각 붕괴 모드별로 독립적으로 진행되었다. 가장 극적으로 새로운 입자의 존재를 보여주는 증거는 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 붕괴모드의 연구결과로부터 나왔다. 그림 4는 2개의 광자의 불변질량 분포를 보여주고 있는데 배경사건에 의한 연속적인 불변질량분포 위에 새로운 공명 상태가 125 GeV/c^2 근처에서 존재함을 명확하게 볼 수 있다. 배경사건이 통계적 요동을 하여 이와 같은 공명 상태를 만들 확률은 0.01% 이하로 발견된 공명 상태가 새로운 입자임을 강력히 시사하였다. $H \rightarrow ZZ$ 붕괴모드에서도 통계적 중요도(statistical significance)는 작지만 그림 5에서 나타난 바와 같이 125 GeV/c^2 근처에서 공명 상태를 발견하였다. 이 연구에서는 Z 입자가 각각 전자쌍(electron pair)이나 뮤온쌍(muon pair)으로 붕괴하는 모드($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, l : 전자 또는 뮤온렙톤)를 사용하였는데 최종적으로 4개 렙톤의 불변질량분포를 측정하여 힉스입자를 탐색하였다. 공명 상태를 관찰하여 새로운 입자를 탐색하는 방법은 $H \rightarrow WW$ 붕괴모드에서는 사용할 수 없다. 왜냐하면 각 W 입자가 전자와 전자 중성미자 또는 뮤온과 뮤온 중성미자로 붕괴하는 모드($H \rightarrow WW \rightarrow l\nu_l l\nu_l$)를 데이터 분석에 사용하였는데 개별적인 중성미자의 에너지나 운동량은 CMS 입자검출기로 측정할 수 없기 때문이다. 이 경우에는 공명 상태를 찾는 대신 특정 물리량의 분포를 측정하여 알려진 배경사건의 분포 이외에 초과분(excess)을 탐색하여 새로운 입자의 존재를 증명하고자 하였다. CMS 실험은 2개의 렙톤의 불변질량분포를 측정하였는데 그림 6에서 나타난 것처럼 기존에 알려진 배경사건 위에 새로운 입자의 붕괴에서 오는 성분을 측정할 수 있었다. 여러 붕괴모드에 대한 연구를 종합한 결

REFERENCES

- [8] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [9] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).

Fig. 5. Invariant mass distribution of 4 leptons.

과 약 $125 \text{ GeV}/c^2$ 의 질량을 가지는 새로운 입자가 존재함을 결정적으로 증명하였다. ATLAS 실험도 비슷한 결과를 얻어 새로운 입자의 존재는 더 이상 이론의 여지가 없게 되었다.

CMS 실험과 ATLAS 실험에 의해 힉스입자라고 예상되는 새로운 입자가 발견되었지만 입자의 고유 물리량 중 정확히 측정된 양은 질량뿐이며 이것만으로는 이 입자가 힉스입자라고 확신할 수 없다. 별도로 질량 이외에 생성단면적(production cross section)과 보손(boson)과의 결합상수(coupling constant)를 각각 측정하였는데 표준모형 힉스입자에 대해 예측한 결과와 실험오차 범위 내에서 일치하였다.^[8,9] 또한 $H \rightarrow ZZ$ 붕괴에서 Z 입자의 각분포(angular distribution)를 분석함으로써 스핀(spin)이나 반전성(parity)을 측정하였는데 측정의 오차가 크기는 하지만 스핀 0과 반전성이 +1로 예상되는 힉스입자의 성질과 부합하였다.^[8,10] 결과적으로 $125 \text{ GeV}/c^2$ 근처에서 발견된 새로운 입자는 힉스입자와 여러 물리적 특성이 일치하고 있으며 대다수 입자물리학자들은 이 입자가 힉스입자일 것으로 믿고 있다.

LHC 가속기는 2013년 초 가동을 중단한 후 현재 가속기 및 입자검출기의 업그레이드 작업이 진행 중이다. 2014년 말 다시 재가동을 하게 되는데 가속기 에너지는 기존의 8 TeV에서 13 또는 14 TeV로 올라갈 예정이다. 이와 함께 양성자 빔(beam)의 휘도(luminosity)도 향상시켜 2010~2012년의 실험

Fig. 6. Invariant mass distribution of two leptons. The red-colored region denotes the contribution from $H \rightarrow WW$ decays.

에 비해 데이터양을 10배 이상 늘릴 수 있을 것으로 예상하고 있다. 힉스입자에 대한 연구는 발견의 단계를 지나 정밀 측정의 단계로 들어갈 것이고 힉스입자의 여러 물리적 성질이 보다 자세하게 연구될 것으로 기대된다.

거의 반세기 전에 일군의 물리학자들이 질량의 기원을 설명하기 위해 이론적으로 예측한 힉스입자는 CERN 연구소의 LHC 가속기 실험들에 의해 드디어 발견되었다. 힉스입자의 발견은 표준모형에서 완성되지 않은 마지막 부분을 채워 넣은 것으로서 그 물리적 중요성은 매우 크다고 볼 수 있다. 그러나 표준모형은 궁극적인 이론이 되기에는 여러 문제점과 한계를 가지고 있으며 최소한 TeV 이하의 에너지영역에서 물리현상을 비교적 잘 설명하는 이론적 패러다임(paradigm)으로 간주할 수 있다. TeV 이상의 고에너지 영역에서도 표준모형이 유효한지에 대한 의문 또한 표준모형을 넘어서는 새로운 패러다임이 존재하는가에 대한 의문 등은 향후 LHC 가속기실험에 의해 해답을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [10] ATLAS-CONF-2013-013 (2013).