힉스 메커니즘 확증과 힉스입자 발견의 의미

DOI: 10.3938/PhiT.22.055

최 성 렬

Implications of the Confirmation of the Higgs Mechanism and the Discovery of a Higgs Particle

Seong Youl CHOI

Recently a Higgs boson was discovered at two LHC experiments called ATLAS and CMS. In this report, we review the history of particle physics in close relation to the Higgs mechanism and then describe the theoretical implications of the discovery of the new Higgs boson in light of the establishment of the Standard Model.

서 론

약 두 달 전인 2013년 10월 8일은 다른 날들과 다름이 없이 밝아 왔다. 하지만 필자는 그날 저녁에 발표될 노벨물리학상이 30여 년 전부터 거의 매일 읊조리어 왔고 귀에 때가 앉을 정도로 다른 사람들로부터 들어 왔던 힉스(Higgs)와 관련된 업적에 수여될 거라는 기대감에 아침부터 가슴이 두근거리는 흥분을 감출 수가 없었다. 원래 예정보다 한 시간 이상 지연되어 애를 태우고 발표된 2013년 노벨물리학상^[1]은 벨기에의 앙글레(Francois Englert)와 영국의 힉스(Peter W. Higgs)가 “소립자 질량의 근원에 대한 이해에 기여하고 최근에 CERN의 거대강입자가속기(LHC)의 ATLAS 실험과 CMS 실험을 통해 그들에서 예견된 입자가 발견^[2]됨으로써 확실하게 검증이 된 메커니즘의 이론적 발견”에 대한 업적으로 공동 수상하게 되었다(그림 1 참조). 이 발표는 필자가 아침부터 가진 흥분을 애대

Fig. 1. 2013 nobel prize winners in physics; Francois Englert and Peter W. Higgs (<http://www.nobelprize.org>).

움에 배가하여 더욱 고조하였다.

또한, 벌써 일 년 이상이나 지난 2012년 7월 4일에 처음으로 적도 너머 남반구의 호주 멜버른에서 개최된 국제학술대회^[3]에 참가하여 만오천 km 이상 떨어진 유럽입자물리연구소(CERN)에서 원격 생중계로 회의장에 전송되는 새로운 입자를 발견하였다는 학술발표를 직접 접했을 때는 [지금까지 15년 이상 동안 힉스입자와 관련된 연구를 해 온 과학자로서] 무엇이라고 형언하기 어려운 가슴 충만한 감동을 느꼈었다.

아직도 채 사그라지지 않은 감동의 여운을 간직한 채, 이 글을 통해 이 노벨물리학 수상자들이 이론 업적의 의미를 지난 반세기 동안의 입자물리학 발전에 비추어 고찰한다. [힉스입자의 영웅적 실험 탐색의 역사는 본 특별호의 다른 논고들을 참

저자약력

최성렬 교수는 서울대학교 대학원 물리학과 이학박사(1990)로서 독일 DESY 연구원(1990), 서울대학교 이론물리연구소 연구원(1992), 일본 KEK 연구원(1994), 연세대학교 우수두뇌 초빙연구원(1996)과 고등과학원 연구원(1998)을 역임하고, 현재 전북대학교 물리학과 교수(2000-)로 재직 중이다. (sychoi@jbnu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/.
- [2] G. Aad *et al.*, [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B **716**, 1 (2012); S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration], Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [3] ICHEP2012 - 36th International Conference for High Energy Physics (July 4 - 11, 2012, Melbourne, Australia).

고하기 바란다. 특히 세상을 구성하는 근본물질이 무엇이고 그것이 어떻게 상호작용하는지에 대해 인류가 현재까지 이론 가장 완벽한 답안인 표준모형(Standard Model)이 정립되어 온 역사와 밀접하게 맞물어 그 업적에 대한 이야기를 펼친다.

기본 입자와 상호작용의 탐색 여정

세상은 무엇으로 이루어졌나? 이는 인류가 지구상에 출현한 이후로, 또한 아기가 탄생하여 주변에 관심을 가지기 시작하면서 가장 먼저 품었을 의문의 하나일 것이다. 실제로 인류의 전 역사를 통해 이 근본물질에 대한 질문은 세상 즉 우주 자체는 무엇인가 라는 질문과 더불어 자연에 대한 가장 근본적인 의문이였다.

잘게 쪼개 물질을 탐구함으로써, 물질이 전자와 같은 경입자(lepton)들과 원자핵을 구성하는 쿼크(quark)로 이루어짐을 밝히고 그 입자들이 상호작용하는 방식도 이해하게 되었다. 다른 한편으로 거대 우주의 구조와 진화를 연구해, 우리 우주가 138억 년 전에 매우 작고 뜨거운 상태에서 팽창하며 현재의 거대한 우주로 진화에 왔다는 것도 파악하게 되었다. 이는 마치 자신의 꼬리를 물고 있는 뱀 Ouroboros의 모습처럼 근본물질의 미시적 이해와 우주진화의 거시적 탐구는 서로 밀접하게 맞물려져 있음을 의미한다.

고대부터 물질의 근본을 파악하려는 과정에서 제시된 가장 성공적 제안은 세상은 더 이상 쪼갤 수 없는 원자(atom)로 이루어졌다는 것이었다. 기원 전 5세기경 그리스의 데모크리토스 등이 처음 가졌던 이 개념은 19세기에 이를 바탕으로 한 화학적 물성 분석과 열 현상의 기체 운동론적 해석 등을 통해 재조명되었고, 20세기에 접어들어 원자가 실제로 존재함이 밝혀져 더욱 진지하게 탐구되었다.

1897년 영국의 톰슨이 원자에는 매우 가벼운 음전하의 전자가 있음을 밝히고 1911년 영국의 러더퍼드가 원자 속에서 원자 질량의 거의 전부를 가진 양전하의 원자핵을 발견하였다. 더 나아가 원자들의 미시적 구조와 성질은 [고전 역학적으로 설명할 수 없고] 완전히 새로운 체계인 양자역학에 바탕을 두고 전자기(electromagnetic) 상호작용(interaction)을 기술해야만 이해할 수가 있었다. 원자핵 속을 더 깊이 들여다보니 핵도 강한(strong) 상호작용으로 서로 묶여 있는 양전하의 양성자와 전하가 없는 중성자로 이루어져 있음이 밝혀졌다. 또한 지구로 날아 들어오는 우주선(cosmic rays)에서 발견된 [유가와가 1935년에 핵자간의 강한 상호작용을 매개하는 것으로 밝히고, 1947년에 발견된 전하를 가진 중간자인] 파이온(pion)과 전자에 비해 질량은 약 200배 크지만 반응 특성은 전자와 동일한 뮤온(muon)이란 경입자 등이 소위 베타붕괴를 통해 더

Fig. 2. The Standard Model with 3 generations of leptons and quarks and 4-type gauge bosons as well as the Higgs boson (Wikipedia).

가벼운 입자들로 변환되는 것도 관측되었다. 이렇게 입자의 종류가 바뀌는 독특한 변환현상은 전자기 상호작용과 강한 상호작용과는 전혀 다른 약한(weak) 상호작용으로 일어난다는 것도 알게 되었다.

우주선에서 새로운 입자가 속속 발견되고 가속기 실험을 통해 생성된 수많은 새로운 입자가 발견되면서, 이러한 입자 동물원의 계층적 구조를 지탱하는 더 근본적인 구조에 대한 탐구가 이루어졌다. 결정적으로, 1960년대 말에 양성자도 내부구조가 있다는 것이 실험적으로 확인되고, 이론적으로 겔만이 수많은 핵 입자들의 성질이 일정한 규칙을 따름을 파악하여 이를 수학적 대칭으로 정리하고 근간이 되는 입자로 쿼크(quark)를 제안한다. 계속된 후속연구를 통해 핵자들 간의 강한 상호작용은 이 더 근본적인 쿼크들 간의 강한 상호작용으로 이해할 수 있게 되었다.

현재까지 밝혀진 스핀이 1/2인 물질 구성입자는 강한 상호작용을 하는 쿼크들과 강한 상호작용을 전혀 하지 않는 경입자(lepton)로 분류된다. 경입자의 대표적 예가 전자이며 그림 2의 왼쪽 상단에서 보여주는 것처럼 3종의 중성미자(neutrino)도 경입자에 속한다. 1995년 가장 질량이 큰 톱(top) 쿼크(quark)를 발견하고 2000년에는 타우(tau) 중성미자를 발견하여 현재 총 6개의 쿼크와 6개의 경입자가 각각 2개씩 짝을 이루어 대칭적 구조를 가지고 3세대를 형성하고 있음이 밝혀졌다.

게이지 대칭적 상대론적 양자장론

위에 언급된 세 가지 상호작용 중 가장 먼저 이론적 형태가 완성되어 실험적으로 정밀하게 검증된 것이 전자기 상호작용이다. 1940년대 후반 슈윙거(Julian Schwinger), 도모나가(Sin-Itiro Tomonaga), 파인만(Richard Feynman)과 다이슨(Freeman

Dyson)의 연속적 연구를 통해 전자기 상호작용은 특수상대론과 양자역학을 모순 없이 융합한 이론적 토대 위에, 각 입자의 양자장(quantum field)과 $U(1)_{EM}$ 국소 게이지 대칭성(local gauge symmetry)에 기초한 게이지 양자장 이론(quantum field theory)으로 완벽하게 기술됨이 밝혀졌다. 이 국소 게이지 대칭성은 전하를 가진 입자의 양자장이 각 시공간 위치에서 임의의 위상을 가지더라도 물리 법칙이 변하지 않는 불변성을 의미한다. 그 국소 위상 변화를 정확히 상쇄하여 물리 법칙이 불변이기 위해서는 필연적으로 위상 변화와 맞물려 게이지 변환하는 스핀이 1이며 질량이 영인 입자가 존재해야 한다. 바로 이 입자가 전하를 가진 입자간의 전자기 상호작용을 매개하는 게이지 입자인 광자(photon, γ)인 것이다. 전자기 현상의 상대론적 양자장론은 특별히 양자전기역학(quantum electrodynamics, QED)이라 부른다.

국소 게이지 대칭적 상대론적 양자장론으로 전자기 상호작용이 성공적으로 이해된 것에 고무되어, 1954년 양전닝(Chen-Ning Yang)과 밀스(Robert Mills)는 양성자와 중성자를 한 짝으로 하는 아이소스핀(isospin) 비가환 $SU(2)$ 군 게이지 대칭성을 가진 양-밀스(Yang-Mills) 이론이라 불리는 상대론적 양자장론을 전개하였다.^[4] 이 경우는 더 확장된 비가환 게이지 군에 의해 서로 자체적으로 상호작용하는 여러 개의 게이지 입자들이 있다. 그러나 지니고 있는 아름다운 대칭성에도 불구하고 이 이론은 곧바로, 특히 파울리(Wolfgang Pauli)의, 심각한 비판에 직면하게 된다. 게이지 대칭성 있다면 게이지 입자는 질량이 영이므로 이미 실험적으로 발견되었어야 하는데 그렇지 않다는 것이다. 게다가 질량이 영인 게이지 입자가 매개하는 상호작용은 원거리까지 영향을 주는 데 반해서, 강한 상호작용은 아주 작은 원자핵 크기 영역에서만 작용하고 있다. 따라서 이 제안은 수년 동안 잠재해 있다가 후에 약한 상호작용을 설명하는 시도로 다시 수면에 떠오르게 된다.

약한 상호작용은 입자의 종류를 바꾸는 특징뿐만 아니라 다른 상호작용과는 다른 결정적 특성을 가지고 있다. 1957년 이칭다오(Tsung Dao Lee)와 양전닝(Chen-Ning Yang)이 약한 상호작용 과정은 공간의 반전변환과 관련된 좌우 대칭성을 깨는 것을 밝혔다.^[5] 즉 오른쪽(right-handed) 입자와 왼쪽(left-handed) 입자가 서로 다른 방식과 세기로 약한 상호작용을 한다. 좌우 대칭성 깨짐이 실험으로 확인되자 곧바로 1957년 마르샤크(Robert Marshak)와 수다르산(George Sudarshan)이 그리고 1958년 파인만과 겔만이 각각 베타붕괴를 기술하는 페르미(Enrico Fermi)의 기존 이론을 확장하여 V-A 이론이라 불리는 양자장론을 제안한다. 재규격화(renormalization)를 제대로 할 수는 없지만 이 이론은 다양한 실험사실들을 매우 잘 설명하여 약한 상호작용의 올바른 이론의 선결적 토대 역할을

할 것으로 믿어졌다. 더 나아가, 1961년 글라쇼우(Sheldon Glashow)는 복합군 $SU(2) \times U(1)$ 에 기초해 전자기 상호작용과 약한 상호작용을 통합적으로 다룰 수 있는 게이지 이론을 구축한다.^[6] 이 이론에선 짧은 영역에서만 작용하는 약한 상호작용을 위해 4개의 게이지 입자 중 3개의 게이지 입자에 특별한 근거가 없이 노골적으로(explicitly) 질량을 부여하였다. 이 질량 항으로 원래의 게이지 대칭성이 명백히 깨지고 재규격화도 할 수가 없었다. 그럼에도 불구하고, 이후에 밝혀지지만 글라쇼우의 시도는 상호작용들을 한 틀에 담아 통합하려는 과정에서 이론 성공적인 첫 단계였다.

무엇보다 통합의 가장 결림돌이 된 상호작용 간의 두드러진 차이점은 강한 상호작용과 약한 상호작용은 전자기 상호작용과 다르게 매우 작은 원자핵 크기 영역에서 작용한다는 것이다. 전자기 상호작용은 질량이 없는 광자를 매개로 전달되기 때문에 얼마든지 멀리 영향을 미치지만, 게이지입자가 질량이 있으면 상호작용의 범위가 질량에 비례하여 국한되고 작아진다. 따라서 작은 범위에서만 상호작용하는 이유를 자연스럽게 해결하는 방안은 상호작용을 매개하는 게이지 입자에 질량을 부여하는 것이다. 문제는 게이지 입자의 질량 항은 원래 물리법칙이 가지고 있던 게이지 대칭성을 깨는 것이다. 어떻게 하면 상호작용을 게이지 대칭성에 기초해 정립하면서도 모순 없이 게이지 입자에 질량을 부여하여 상호작용이 짧은 거리에만 작용하게 할 수 있을까? 이에 대한 해결책으로 1960년대 초반에 자발적 대칭성 깨짐(spontaneous symmetry breaking)이란 방식이 제안되어 여러 굴곡진 여정을 거친 후 결국에 힉스 메커니즘에 귀착하게 된다.

자발적 대칭성 깨짐

사물의 천차만별의 모습이나 수시로 바뀌는 변환과정에서 물리법칙의 대칭성이 규정하는 방식을 따르지 않는 일이 다반사로 일어난다. 대칭성이 깨져 보이는 현상 중에서 자연법칙 자체는 내재된 아름다운 대칭성을 가지고 있지만 진공이나 주변의 환경이 대칭성을 유지하지 못해 그 대칭성이 깨진 (또는 숨겨진) 모습으로 있는 경우가 있다. 이러한 대칭성 깨짐 방식을 일컬어 자발적 대칭성 깨짐(spontaneous symmetry breaking)이라 칭한다.

자발적 대칭성 깨짐의 대표적인 예는 1928년에 하이젠버그

REFERENCES

- [4] C.-N. Yang and R. L. Mills, Phys. Rev. **96**, 191 (1954).
- [5] T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. **104**, 254 (1957).
- [6] S. L. Glashow, Nucl. Phys. **22**, 579 (1961).

Fig. 3. Spontaneous symmetry breaking. An object residing in a rotationally symmetric potential finds a stable but asymmetric position (Wikipedia).

(Werner Heisenberg)가 설명한 철이나 니켈 금속이 영구자석이 되는 현상인 강자성(ferromagnetism)이다. 또한, 1950년에 저항이 영이 되는 초전도(superconductivity) 현상을 설명하기 위해 긴즈버그(Vitaly Lazarevich Ginzburg)와 란다우(Lev Davidovich Landau)가 자발적 대칭성 깨짐 방식을 활용하였다. 초전도 현상에 대한 더 근본적인 이론은 1957년에 바딘(John Bardeen), 쿠퍼(Leon Cooper) 그리고 슈리퍼(John Robert Schrieffer)에 의해 완성이 되었는데 이 이론을 그들의 이름의 영문 앞머리 글자를 따서 BCS 이론이라 부른다.

1960년에 남부(Yoichiro Nambu)는 초전도 상태가 전자기 게이지 대칭성이 자발적으로 깨어져 있는 상태임을 설파하고 이를 입자물리학 분야로 확대하여 적용하였다.^[7] 그 이듬해인 1961년에 골드스톤(Jeffrey Goldstone)은 한 복소 스칼라 장 $\phi = (\phi_1 + i\phi_2)/\sqrt{2}$ 의 포텐셜 $V(\phi)$ 가 스칼라 장의 위상이 모든 시공간에서 똑같은 값으로 바뀌는 변환에 대해 불변인 광역대칭성을 가지고 있지만 그림 3처럼 형태가 멕시코 모자 형태이면 진공에서 장의 값은 ❶ 위치의 영 대신 ❷처럼 가장 낮은 에너지의 원형의 계곡의 영이 아닌 값을 자발적으로 또는 임의로 취하고 그 결과 광역 대칭성이 깨지고 필연적으로 질량과 스핀이 영인 입자가 나타남을 파악하였다.^[8] 이를 골드스톤 정리라 부르며 이때 나타나는 질량 영인 입자를 골드스톤 보존 또는 남부-골드스톤 보존이라고 부른다. 그런데 당시에는 질량 영인 입자는 광자밖에 발견되지 않았기에 자발적 대칭성깨짐 현상이 응집물질물리 분야처럼 입자물리 분야에서 나타나지는 큰 의구심을 가지게 되었다.

입자물리학계가 골드스톤 정리를 회피해야 하는 과제에 직면한 상황에서 응집물질물리학자인 앤더슨(Phillip Anderson)은 1963년에 결정적으로 의미 있는 연구내용을 발표한다.^[9] 내용인 즉 초전도체에서는 대칭성 깨짐으로 나타난 골드스톤 입자가 전자기 상호작용으로 플라즈몬(plasmon)이란 질량을 가진

입자가 원래 진행방향에 가로인(transverse) 진동모드만 가지는 광자와 결합하여 질량이 있는 벡터장의 세로(longitudinal) 모드로 흡수된다는 것이다. 즉 게이지 입자인 광자가 초전도체에서는 질량을 가지게 된다는 것이다. 비록 상대론적으로 불변인 이론들에서도 마찬가지로 주장을 할 수 있는지는 구체적으로 보여지지 않았지만, 앤더슨의 연구는 질량이 영인 입자가 나타남이 없이 상호작용을 매개하는 게이지 입자가 질량을 가지게 할 수 있다는 것을 보여준 매우 중요한 진전이었던 것이다. 앤더슨의 획기적 아이디어는 입자물리학자들에 의해 그렇게 많이 추구되지 않았지만, 1964년 3월에 발표된 논문^[10]에서 클라인(Abraham Klein)과 이휘소(Benjamin W. Lee)는 초전도체의 스펙트럼 표현이 상대론적 불변성이 부과된 것보다 더 일반적인 형태를 취하고 여분의 항들을 통해 골드스톤 정리를 회피할 수 있음을 보였다. 더불어, 그들은 상대론적 이론에서도 아마도 유사한 상황이 있을 수 있다는 올바른 추론을 하였는데, 곧바로 길버트(Walter Gilbert)가 상대론적으로 불변인 이론에서는 절대로 골드스톤 정리를 회피할 수 없다고 반박하였다.^[11] 이것이 1964년 여름 이후부터 일련의 연구들로 상대론적 이론에서도 골드스톤 정리를 모순 없이 피할 수 있다는 획기적 진전이 있기 직전의 상황이었다.

힉스 메커니즘

1964년 후반 제일 먼저 벨기에의 앙글레(Francois Englert)와 브라우트(Robert Brout)가 8월 31일 출간된 논문^[12]을, 그 다음 영국의 힉스(Peter Higgs)가 각각 9월 15일과 10월 19일^[13,14]에 출간된 논문들을 그리고 미국의 구랄니크(Gerald Guralnik), 하겐(C. Richard Hagen), 키블(Tom Kibble)이 11월 16일 출간된 논문^[14]을 각각 내놓았다. 독립적으로 수행된 연구에서 저자들은 각각 국소적 게이지 대칭성이 자발적으로 깨져 게이지 입자가 질량을 가지는 과정을 서로 다른 방식으로 기술하고 있다.

한 예로 힉스의 논문의 핵심내용을 (그림 3의 도식과 일관되게 기호를 약간 바꿔서) 살펴보자. 고려된 것은 U(1)군에 기초한 이론으로 벡터장 A_μ 와 전하가 e 인 복소 스칼라장 ϕ 의 국

REFERENCES

- [7] Y. Nambu, Phys. Rev. **117**, 648 (1960).
- [8] J. Goldstone, Nuovo Cim. **19**, 154 (1961).
- [9] P. W. Anderson, Phys. Rev. **130**, 439 (1963).
- [10] A. Klein and B. W. Lee, Phys. Rev. Lett. **12**, 266 (1964).
- [11] W. Gilbert, Phys. Rev. Lett. **12**, 713 (1964).
- [12] F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964).
- [13] P. W. Higgs, Phys. Lett. **12**, 132 (1964).
- [14] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964).

소 게이지 변환에 대해 불변이다. 그림 3 모양의 퍼텐셜 $V(\phi)$ 때문에 이 스칼라장의 진공기대치 $\langle \phi_1 \rangle = v$ 는 게이지 대칭성이 깨진다. 이 진공 주위의 요동을 고려하여 벡터장은 게이지 변환을 통해 스칼라장의 허수부분 ϕ_2 를 흡수한 B_μ 로 복소 스칼라장의 실수부분 ϕ_1 은 진공 기대치에 대한 요동항으로 다음과 같이

$$B_\mu = A_\mu + \frac{1}{ev} \partial_\mu \phi_2 \quad \text{and} \quad \phi_1 = v + H \quad (1)$$

표현하면 벡터장 B_μ 과 퍼텐셜의 반경 방향 양자요동에 해당하는 스칼라장 H 는 각각

$$[\partial_\nu \partial^\nu - (ev)^2/2] B_\mu = 0 \quad \text{with} \quad \partial_\nu B^\nu = 0 \quad (2)$$

$$[\partial_\nu \partial^\nu - V''(v/\sqrt{2})] H = 0 \quad (3)$$

인 운동 방정식을 만족한다. 다시 말해 게이지 대칭성이 자발적으로 깨진 후에 게이지 입자는 골드스톤 보손을 흡수하여 $ev/\sqrt{2}$ 인 질량을 가지고 퍼텐셜 계곡의 곡률에 따라 질량 값이 주어지는 스칼라 입자 H 가 남아 있게 된다. 피터 힉스만이 식 (3)에 주어진 형태의 방정식을 논문에 구체적으로 언급하였는데, 이것이 바로 이휘소가 1972년에 페르미 연구소에서 열린 국제학회에서 이 스칼라 입자를 힉스 메존이라고 부르면서 그 후에 힉스라는 용어가 이 입자뿐만 아니라 자발적 게이지 대칭성 깨짐 메커니즘에도 붙게 된 이유 중 하나다. 이제 힉스와 함께 앙글러에게도 노벨상이 수여되었으므로 이제는 대칭성 깨짐은 BEH (Brout-Englert-Higgs) 메커니즘으로 불리는 것이 더 적절하다.

알겠지만 위에 언급된 연구들 모두 자발적 대칭성 깨짐으로 강한 상호작용을 설명하려고 했기에 LHC 실험을 통해 이번에 발견한 힉스입자의 존재를 직접 예견한 것은 아니다. 자발적 게이지 대칭성 깨짐이 약한 상호작용에 적용된 것은 1967년과 1968년 각각 와인버그(Steven Weinberg)^[16]와 살람(Abdus Salam)^[17]에 의해서였다. 와인버그는 글라쇼우가 전자기 상호작용과 약한 상호작용을 통합적으로 다룬 $SU(2) \times U(1)$ 게이지 이론에 힉스 메커니즘을 적용하여 전자와 중성미자 경입자 쌍의 전자기와 약한 상호작용을 기술하였다.

이 이론에 따르면 약한 상호작용의 게이지 대칭성이 하나의 $SU(2)$ 이중항(doublet) 표현을 가진 힉스장이 진공기대치를 가져서 깨지고 세 개의 게이지 입자인 $W^\pm$ 와 Z 보손이 질량을 가지게 된다. 그 결과로 약한 상호작용이 매우 가까운 거리에 서만 작용하고 세기가 매우 약하게 된다. 반면에 전자기 상호작용에 대한 게이지 대칭성은 깨지지 않아 그 상호작용의 게이지 입자인 광자가 질량이 영인 채로 있는 것이다. 바로 이것이 표준모형의 전자기와 약한 상호작용과 관련된 부분에 대한

핵심 골격이다. 이 이론처럼 기본 스칼라 장에 의해 약전기(electroweak) 게이지 대칭성이 깨지면, 중성인 그러나 질량 값은 결정되지 않은 스핀 영인 표준모형 힉스 보손이 존재해야 한다. LHC에서 발견한 입자가, 표준모형 힉스입자와 동일하지는 아직 확실하지 못하였지만, 힉스입자의 한 종류인 것은 확실한 것으로 밝혀졌다.

와인버그의 이론^[16]은 게이지 입자의 질량뿐 아니라 쿼크와 경입자의 질량도 동일한 힉스 메커니즘으로 부여한다. 경입자와 쿼크와 같은 스핀이 1/2인 입자는 일반적으로 공간반전과 관련해 오른쪽 모드와 왼쪽 모드가 존재하고, 두 모드는 서로 다른 약한 상호작용을 한다. 따라서 게이지 대칭성이 있다면 두 모드를 결합한 질량은 반드시 영이어야 한다. 그러나 힉스 메커니즘으로 게이지 입자가 질량을 가지는 것과 동일한 방식으로 쿼크와 경입자가 질량을 가질 수 있다. 진공기대치를 가져 자발적으로 약한 상호작용 게이지 대칭성을 깨는 힉스장은 당연히 약한 상호작용을 한다. 이 약한 상호작용하는 힉스장과 페르미온의 왼쪽과 오른쪽 모드를 결합하면 게이지 불변인 소위 유가와(Yukawa) 항을 쓸 수가 있다. 바로 이 항에서 힉스장 대신 진공기대치를 대입하면 결합상수와 진공기대치의 곱으로 페르미온 질량이 주어진다. 진공기대치는 모든 입자에 공통으로 관여하는 값이므로 힉스입자와 각 입자의 상호작용 세기는 그 입자의 질량에 비례한다.

전자기 상호작용과 약한 상호작용을 모순 없이 통합했음에도 불구하고, 와인버그 이론은 처음엔 크게 주목을 받지 못하다가, 1971년에 트후프트(Gerhard 't Hooft)가 게이지 대칭성이 자발적으로 깨진 양자장론도 재규격화가 가능하다는 것을 증명^[18]한 후에 폭발적 관심을 받게 된다. 다른 한편, 1960년대 후반과 1970년대 초반에 쿼크의 존재와 그 상호작용 특성이 실험적으로 속속 알려지게 되었다. 1973년에 비가환 군 양자장론에선 입자의 상호작용이 거리가 짧아질수록 약해지는 점근적 자유도(asymptotic freedom)를 가짐이 밝혀진다.^[19,20] 이런 발전들에 기초하여, 강한 상호작용을 기술하는 이론으로 비가환 $SU(3)$ 군 게이지 양자장론인 양자색소역학(quantum chromodynamics, QCD)이 완성되었다.

바로 이 양자색소역학과 와인버그의 약전기(electroweak) 이론을 합침으로써 비로소 표준모형의 구조가 완결이 되었고,

REFERENCES

- [15] G. S. Guralnik, C. R. Hagen and T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964).
- [16] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967).
- [17] A. Salam, Conf. Proc. C **680519**, 367 (1968).
- [18] G. 't Hooft, Nucl. Phys. B **3**, 167 (1971).
- [19] D. J. Gross and F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **30**, 1343 (1973).
- [20] H. D. Politzer, Phys. Rev. Lett. **30**, 1346 (1973).

Fig. 4. The Higgs particle H completes the Standard Model that describes building blocks of the universe (<http://www.nobelprize.org>).

1983년 $W^\pm$ 와 Z 보존이 CERN에서 양성자-반양성자 충돌실험을 통해 발견^[21]된 것을 위시해서, 2000년까지 그림 2에 보여준 입자 중 힉스입자를 제외하곤 모두 발견되었다. 물론 모든 전자기, 약한 그리고 강한 상호작용과 관련된 셀 수 없는 실험결과가 표준모형의 틀 안에서 완벽하게 설명됨도 밝혀져 왔다. 이로써 인류는 거의 모든 것의 이론(Theory of Nearly Everything)이라 부를 수 있는 이론을 보유하게 된 것이다.

힉스입자 발견의 의미와 전망

우선 새로 발견된 입자가 표준모형 힉스입자인 것으로 판명되면 그림 4의 퍼즐 조각모음이 보여주는 것처럼 표준모형이 완벽하게 완성되는 것이다.

이 새로운 입자의 발견이 주는 또 다른 의미는 바로 우리의 존재가 우주에 깔려 원자를 구성하는 전자를 포함한 기본 입자에 질량을 부여하는 힉스장에 결정적으로 의존하고 있다는 것이다. 질량이 없으면 전자는 우리 몸과 주변 물질의 구성원인 원자를 형성하지 못한다. 이런 근거로, 크로스(Frank Close)는 한 강연에서 힉스입자 발견과 관련된 업적은 노벨물

리학상보다 화학상을 수여해야 더 적절하다는 견해를 피력하기도 하였다.

하나의 힉스입자 발견으로 입자물리학 연구가 끝난 것이 아니라 오히려 새로운 탐색 영역으로 가는 창구가 열린 것이라고 볼 수 있다. 2년 후 2015년부터 더 정교한 검출장치들이 장착되고 더 높은 에너지와 빔 광도로 거대강입자가속기가 다시 가동되면, 발견된 힉스입자의 특성이 더욱 정확하게 밝혀질 것이고 획기적인 새로운 발견도 이루어질 것으로 기대된다.

[본 호의 다른 논고들에서 자세히 다루어지겠지만] 새로운 발견에 대한 희망을 품는 근거 중 하나는 표준모형의 틀 안에서는 중성미자 질량의 근원과 중성미자 섞임 특성을 설명할 수 없다는 것이다. 또 다른 근거는, 우주를 구성하고 있는 것 중에 70% 정도를 차지하고 있는 암흑에너지는 차치하고라도 나머지 30% 정도를 구성하는 물질의 약 1/6 정도밖에 표준모형으로 설명할 수 없다는 것이다. 나머지 5/6는 아직 특성이 잘 알려져 있지 않은 암흑물질이다. 아마도 여러 측면에서 볼 때 이 암흑물질은 보통 물질과 직접적으로 연결이 되어 있지 않을 수도 있다. 반면에 다른 표준모형 입자와는 확연하게 다른 특성을 가진 힉스입자는 이 수수께끼 같은 암흑세계를 연결하는 통로(portal) 역할을 할 수도 있다.

이러한 이유로, 이제 막 새로 도달한 입자물리학 아니 인류 지성의 봉우리에 올라, 아직 안개 속에 있는 신천지가 조만간 전 방위적 탐험을 통해 우리 앞에 말끔하게 펼쳐져 보일 것이라는 거대한 희망을 가져 본다.

마지막으로 본 논고를 마치면서, 글의 작성에 물리학과 첨단 기술과 국내신문과 인터넷 등에 힉스와 관련해 이전에 기고된 동료 연구자들 [특히 이강영과 이종필]의 자료를 적극 참고하였음을 밝혀둔다.

REFERENCES

- [21] G. Arnison *et al.*, [UA1 Collaboration], Phys. Lett. B **122**, 103 (1983).