입자물리학의 표준모형과 힉스 입자

DOI: 10.3938/PhiT.21.042

이 강 영

The Standard Model of Particle Physics and the Higgs Boson

Kang Young LEE

We explain the Standard Model of particle physics and the Higgs mechanism. The Higgs mechanism is the spontaneous symmetry breaking of the gauge symmetry and the Higgs boson is a massive, neutral, scalar particle that appears in the Higgs mechanism process. We introduce a brief history of the Higgs mechanism and the Higgs boson.

물질이란 무엇인가 하는 질문은 우주란 무엇인가 하는 질문과 함께 자연에 대한 가장 근본적이면서도 궁극적인 물음이다. 하나는 물질의 가장 기본을 생각하는 것이고, 다른 하나는 세상 전체에 대해 이해하려는 것이다. 우주를 연구해온 사람들은 우리 우주가 약 137억 년 전에 탄생해서 팽창하며 진화해 왔음을 알게 되었다. 물질의 구조를 탐구해온 사람들은 물질을 이루는 원자가 원자핵과 전자로 이루어져 있음을 확인했고, 원자핵을 이루는 더 근본적인 입자인 쿼크의 존재를 파악했으며, 그들이 상호작용하는 방식을 이해했다. 그러면서 놀랍게도 우주는 처음에 빅뱅이라고 불리는 아주 작고 뜨거운 상태였기 때문에, 우주의 시작을 논하기 위해서는 기본입자들의 물리학을 이용해야 한다는 것을 알게 되었다. 20세기를 거치면서 두 질문은 서로 만난 것이다.

인간이 물질의 근본적인 구조에 대해서 이해하는 과정에서 가장 중요한 개념은 원자였다. 기원전 5세기경 그리스의 데모크리토스 등이 처음 생각한 원자라는 개념은 19세기에 들어서 화학과 열역학의 기계운동론이 발전하면서 점점 더 중요

해졌다. 20세기에 접어들어 마침내 원자는 그 존재가 확인되고, 구체적인 실체로서 연구되기 시작했다. 원자의 구조를 설명하기 위해서 양자역학이라는 완전히 새로운 체계가 태어났다. 양자역학을 통해서 원자를 알게 되면서 인간은 이전과는 비교도 할 수 없도록 깊이 물질을 이해할 수 있게 되었다.

원자를 이루는 힘은 전자기력이다. 이는 곧 우리가 일상생활에서 보는 대부분의 현상의 원인은 전자기력이라는 것을 의미한다. 그런데 1911년 영국의 러더퍼드가 원자핵이 존재한다는 것을 발견하면서, 우리는 더 이상 전자기력으로는 설명할 수 없는 대상을 만나게 되었다. 원자는 (+) 전기를 지닌 원자핵과 (-) 전기를 지닌 전자가 전자기력으로 결합해 있는 상태지만, 원자핵은 (+) 전기를 가진 양성자와 전기를 띠지 않는 중성자가 원자보다도 훨씬 작은 크기로 뭉쳐있는 상태이므로, 전기적인 반발력보다 훨씬 강한 힘으로 묶여 있는 상태다. 이 새로운 힘을 강한 핵력이라고 부른다.

자연에는 전자기력과 강한 핵력 외에 또 다른 힘이 존재한다. 입자를 바꿀 수 있는 이 독특한 힘은 지상에서는 원자핵의 베타 붕괴에서, 그리고 우주선(cosmic ray)을 관찰할 때 보는 파이온과 뮤온의 붕괴 등에서 볼 수 있다. 이탈리아의 엔리코 페르미(Enrico Fermi)는 이들 현상을 기술하는 이론을 만들었고, 이 상호작용은 전자기 상호작용도, 강한 핵력도 아닌 새로운 힘이라는 것을 확인했다. 이 새로운 힘을 약한 핵력이라고 부른다. 약한 핵력이 관계하는 현상은 우리 주변에서는 흔히 보기 어려우므로 이 힘은 우리 삶과는 거리가 멀다고 생각하기 쉽다. 그러나 사실 지구의 생명체가 살아가는 것은 약한 상호작용 덕분이라고 해도 과언이 아니다. 바로 태양이 타오르는 과정이 약한 상호작용에 의한 반응이기 때문이다. 이를 그대로, 전자기력의 크기를 1이라고 하면 강한 핵력은 100배 이상 강하고, 약한 핵력의 크기는 천분의 1 정도에 불과하다. 이로써 자연을 이루는 법칙은 전자기력, 강한 핵력과 약한 핵력, 그리고 천체를 지배하는 힘인 중력까지 네 가지 힘을 근원으로 하고 있다는 것이 밝혀졌다.

원자는 원자핵과 전자로 이루어져 있으며, 원자핵은 다시 양성자와 중성자로 이루어져 있다. 이러한 물질의 계층 구조가 계

저자약력

이강영 교수는 KAIST에서 입자물리학으로 박사학위를 받고(1996), 서울대학교, KAIST, 연세대학교, 고등과학원 연구원과 KAIST, 고려대학교, 건국대학교 연구교수를 거쳐 2012년부터 경상대학교 사범대학 물리교육과 조교수로 재직 중이다. 저서로 "LHC 현대물리학의 최전선", "보이지 않는 세계"가 있다. (kylee.phys@gnu.kr)

Fig. 1. The seminar to deliver the latest results of the search for the Higgs boson at the European Organization for Nuclear Research (CERN) on July 4, 2012. (CERN Document Server, <http://cdsweb.cern.ch>)

속 발견됨에 따라 물리학자들은 물질의 기본 입자가 무엇인가 하는 질문을 계속 던져왔고 검증해 왔다. 실험실에서는 우주선(cosmic ray)이나 가속기 실험을 통해서 수많은 입자들이 새로 발견되었다. 또한 1968년부터 스탠퍼드 선형 가속기 연구소(SLAC)에서는 높은 에너지의 전자로 양성자의 내부를 탐색하는 실험을 시작해서, 양성자도 역시 내부에 구조를 가지고 있다는 것을 발견했다. 미국의 머레이 겔만(Murray Gell-Mann)은 양성자를 비롯해서 실험실에서 발견된 수많은 입자들 사이의 패턴을 발견하고 수학적 대칭성으로 이를 정리했으며, 나아가서 이 대칭성의 근본이 되는 입자인 쿼크를 제시했다.

물질의 상호작용을 설명하는 이론은 1950년대에 전자기 상호작용을 설명하는 양자이론인 양자전기역학이 완성되면서 한 단계 도약한다. 양자전기역학에 이르러서 비로소 물리학자들은 상대성 이론과 양자론이 완전하게 결합한 양자 장이론을 가지게 되었고, 양자역학적으로 극히 정밀하게 진짜 물리량을 계산할 수 있게 되었다. 양자전기역학과 같은 방식으로 상호작용을 설명하는 이론을 게이지 이론이라고 한다. 게이지 이론은 게이지 대칭성, 또는 게이지 불변성이라는 성질을 근원으로 한다. 게이지 대칭성이란 양자 장이 위치에 따라 임의의 위상을 가지더라도 이론이 변하지 않음을 의미한다. 이론의 게이지 대칭성을 유지하기 위해서는 스핀이 1인 게이지 입자가 존재해야 하는데, 게이지 입자는 그 힘의 근원이 되는 전하(charge)를 가진 물질 사이의 힘을 전달한다. 양자전기역학의 경우 힘의 근원은 우리가 아는 전기(electric charge)이며, 힘을 매개하는 게이지 입자는 빛이다.

1954년 중국 출신의 양진녕(Chen-Ning Franklin Yang)은 밀스(Robert Mills)와 함께 양자전기역학의 게이지 이론을 더 일반적인 형태로 확장했다. 흔히 양-밀스 이론이라 불리는 이 일반적인 형태의 게이지 이론에서는, 더 복잡한 게이지 대칭성이 존재하고, 따라서 게이지 입자도 여러 개가 있을 수 있다. 양-밀

스 이론을 통해서, 겔만을 비롯한 여러 사람들이 강한 핵력을 설명하려고 시도했으며, 미국의 셸던 글래쇼(Sheldon Lee Glashow) 같은 사람은 양-밀스 이론을 바탕으로 약한 상호작용을 설명하는 게이지 이론을 제안했다. 이런 노력들이 결실을 맺어서, 강한 핵력으로 결합해서 양성자 등을 이루는 쿼크와, 전자처럼 강한 핵력의 영향을 받지 않는 렙톤을 물질을 이루는 기본입자로 하고 이들 사이의 전자기력과 약한 핵력과 강한 핵력을 양-밀스 이론으로 설명하는 하나의 방정식을 쓸 수 있게 되었다. 이 이론을 표준모형(the Standard Model of particle physics)이라 한다.

표준모형은 우리 주변의 꽃과 돌과 자동차와 빗방울과 우리 몸을 이루는 모든 물질은 물론이고, 우주가 태어난 후 약 백억분의 1초가 지난 순간부터 오늘날까지 우리가 아는 거의 모든 물질의 성질과 상호작용을 설명해 주는 이론이다. 그런 의미에서 표준모형은 인간이 이 세상에 대해서 가지고 있는 가장 근본적인 지식이라고 할 수 있다. 표준모형의 핵심이 되는 방정식이 처음 발표된 1967년 이후, 40년이 넘는 시간 동안 표준모형의 모든 세세한 부분까지 온갖 종류의 테스트를 통해 정확하게 검증되었으며, 오늘날도 더욱 더 정밀하게 확인되고 있다.

표준모형은 기본적으로 세 가지 원리를 기초로 하고 있다. 하나는 양자론이며, 다른 하나는 특수 상대성 이론, 그리고 마지막 원리는 게이지 대칭성이다. 이렇게 세 개의 원리와, 관측된 몇 가지 사실에 의해서, 이 우주 거의 모든 것을 설명하는 하나의 방정식이 나오는 것이다. 그런데 사실 이 원리만을 가지고는 설명하지 못하는 부분이 하나 있다. 그것은 바로 입자의 “질량”이다. 입자의 질량을 설명하기 위해 표준모형에는 한 가지 과정이 더 필요하다. 이 과정이 힉스 메카니즘이다.

강한 핵력과 약한 핵력은 20세기에 들어서서 비로소 발견되었다. 그 이전에 이 힘에 대해서 사람들이 알지 못했던 까닭은, 이 힘들은 원자핵보다 작은 스케일에서만 작용하는 힘이기 때문이다. 왜 이 힘들은 그렇게 작은 범위에서만 작용하는 것일까? 자연스러운 한 가지 설명은 이들 힘을 전달하는 입자가 무겁기 때문이라는 것이다. 전자기력은 질량이 없는 빛을 통해서 전달되기 때문에 얼마든지 먼 거리까지 작용하지만, 힘을 전달하는 입자가 질량이 있으면 전달되는 범위에 한계가 생긴다. 그런데 문제는 게이지 대칭성에 의하면 힘을 전달하는 입자는 질량을 가질 수 없다는 것이다. 그렇다면 게이지 이론인 표준모형에서 어떻게 게이지 입자는 힘을 전달하면서 동시에 짧은 거리에만 작용하는 것일까?

우리가 주변을 둘러보면 곧 느낄 수 있듯이, 자연의 대칭성은 늘 정확하게 지켜지지 않는다. 현실에서는 많은 경우에 대칭성이 깨져 있고 그 결과로 우리는 더욱 풍부한 자연 현상을 보게 된다. 대칭성이 깨지는 데는 여러 가지 방법이 있는데, 자발적 대칭성 깨짐(spontaneous symmetry breaking)이라는 방식

Fig. 2. British physicist Peter Higgs (right) speaks with Belgium physicist Francois Englert at the auditorium of CERN. (Photograph: Fabrice Coffrini/AFP/Getty Images)

은 그 중에서 특히 중요한 과정이다. 이 아이디어는 1928년 하이젠베르크(Werner Heisenberg)가 강자성(ferromagnetism, 철이나 니켈처럼 영구자석이 되는 금속의 자기적 성질)을 설명하면서 처음 제안했다. 1947년 소련의 보골류보프(Nicholay Bogoliubov)는 낮은 온도에서 유체의 점성이 사라지는 현상인 초유동(superfluidity) 현상을 설명하면서, 또 역시 소련의 긴즈버그(Vitaly Lazarevich Ginzburg)와 란다우(Lev Davidovich Landau)는 1950년 금속의 전기 저항이 낮은 온도에서 0이 되는 현상인 초전도(superconductivity)를 설명하면서 이들 과정에서 자발적 대칭성 깨짐이 일어남을 지적했다. 초전도 현상의 이론은 1957년 미국의 존 바딘(John Bardeen), 리온 쿠퍼(Leon Neil Cooper), 그리고 바딘의 대학원생 슈리퍼(John Robert Schrieffer)에 의하여 완성되었는데, 이 이론은 그들의 이름을 따서 BCS 이론이라 불린다. BCS 이론은 물성에 관한 이론의 금자탑 중 하나다.

하이젠베르크의 강자성 이론을 통해서 자발적 대칭성 깨짐의 아이디어를 간단히 살펴보자. 강자성 물질은 아주 작은 자석들로 이루어진 것으로 생각될 수 있다. 보통의 경우에는 이들 자석들이 제각각 다른 방향을 향하고 있어서 전체적으로는 자성이 서로 상쇄되어 자기를 갖지 않는 것으로 보인다. 이럴 때 이 물질은 특정한 방향성을 가지고 있지 않다. 즉 방향에 관해서 대칭적이다. 그런데 온도가 점점 내려가면 작은 자석들은 점점 같은 상태가 되어 한 방향으로 정렬하게 되고, 마침내 가장 낮은 에너지 상태가 되면 전체가 모두 같은 방향이 된다. 그러면 이제 특정한 방향성이 생겼으므로, 원래 가지고 있었던 방향에 대한 대칭성이 깨진 것이다. 이때 작은 자석들이 택하는 방향을 결정하는 물리적인 방법은 없으며, 따라서 이 방향은 전적으로 임의로 정해진다. 이렇게 이론의 대칭성은 남아 있지만 계의 더 낮은 에너지 상태가 대칭성이 깨진 상태라서 우리가 보는 현상은 대칭성이 깨진 것일 때

이를 대칭성이 자발적으로(spontaneously) 깨졌다고 부른다.

1960년 미국 시카고 대학의 남부(南部 陽一郎, Nambu Yoichiro)는 자발적으로 깨지는 대칭성이라는 아이디어를 입자물리학에 처음 도입한다. 이듬해 골드스톤(J. Goldstone)은 모든 시공간에서 똑같이 변환할 때 나타나는 광역 대칭성(global symmetry)이 자발적으로 깨질 때는 반드시 질량이 없고 스핀이 0인 입자가 하나 나타나야 함을 보였다. 이를 골드스톤의 정리라고 하며, 이때 나타나는 질량이 없는 입자를 그의 이름을 따서 골드스톤 보존이라고 부른다. 그런데 질량이 없는 입자는 빛을 제외하고는 실험에서 발견된 적이 없었으므로 사람들은 자발적 깨짐이 과연 입자물리학에서 실제로 일어나는가를 확신할 수 없었다.

1963년 앤더슨(Philip Warren Anderson)은 초전도 현상에서 나타나는 골드스톤 보존은 전자기장의 일부가 되면서 질량을 가진다는 것을 지적했다. 그러므로 이 경우 전자기 대칭성이 자발적으로 깨진 것이다. 이는 게이지 대칭성이 자발적으로 깨지는 과정을 논한 첫 논문이었고, 사실상 힉스 메카니즘을 이야기한 것이라고 할 수 있다. 그러나 앤더슨은 응집물리학자였고 그가 다룬 현상은 초전도에 대한 것이었으므로 이 논문은 비상대론적인 경우에 대해서만 논의하고 있었다.

1964년 마침내 이론은 결정적인 진전을 보인다. 벨기에 브뤼셀 대학의 앙글레(François Englert)와 브라우(Robert Brout),^[1] 영국 에딘버러 대학의 힉스(Peter Higgs),^[2] 그리고 미국의 구랄니크(Gerald Guralnik), 하겐(C. Richard Hagen), 키블(Tom Kibble)^[3]은 각각 독립적으로 게이지 대칭성이 자발적으로 깨지는 과정에 대한 논문을 내놓았다. 이들은 스핀이 0인 스칼라 장이 가지는 가장 낮은 에너지 상태가 게이지 대칭성이 깨진 상태라면, 이론적으로는 게이지 대칭성이 성립하면서도 드러나는 현상에서는 게이지 대칭성이 깨지고 게이지 입자가 질량을 가진다는 것을 보였다. 이 경우 골드스톤 정리가 수정되어, 질량이 없는 골드스톤 보존이 아니라 질량을 가진 스칼라 입자가 나타난다는 것을 발견했다. 바로 힉스 메카니즘과 힉스 보존의 개념이 태어난 것이다.

여러 사람이 공헌한 이론에 하필이면 힉스의 이름이 붙게 된 것은, 1972년 미국 페르미연구소에서 열린 컨퍼런스에서, 당시 페르미연구소 이론물리학 부장이던 이휘소가 약한 핵력 세션을 최종적으로 정리하는 강연을 하면서 여러 이론을 언급할 때 처음으로 “힉스 메손(Higgs meson)”이라는 말을 쓰면서부터였다고 피터 힉스는 기억한다.^[4]

REFERENCES

- [1] F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964).
- [2] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964).
- [3] G. S. Guralnik, C. R. Hagen and T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964).
- [4] P. Higgs, “My Life as a Boson”, talk presented at Kings College London, Nov. 24th, 2010.

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
				Higgs boson	

Source: AAAS

Fig. 3. Particle contents of the Standard Model. (AAAS)

사실 이들은 모두 자발적 대칭성 깨짐으로 강한 핵력을 설명하려고 했기 때문에 이들이 지금 LHC에서 발견한 힉스 입자를 직접 예측한 것은 아니다. 이 아이디어를 약한 상호작용의 이론에 적용한 것은 와인버그(Steven Weinberg)와 살람(Abdus Salam) 등이었다. 1967년 미국의 스티븐 와인버그는 글래쇼가 전자기 상호작용과 약한 상호작용을 통합적으로 기술하기 위해 제안한 $SU(2) \times U(1)$ 게이지 이론에 힉스 메커니즘을 적용해서 전자와 중성미자의 약한 상호작용과 전자기 상호작용을 기술하는 논문을 발표했다.^[5] 이것이야말로 표준모형의 핵심적인 구조를 담고 있는 논문이며, 이 논문이 발표된 순간이 바로 표준모형이 완성된 순간이라고 해도 좋을 것이다.

와인버그의 이론에서는 약한 상호작용의 게이지 대칭성이 깨지면서 약한 핵력을 전달하는 게이지 입자인 W와 Z 보손이 질량을 가지게 되며, 이때 W와 Z 보손의 질량 때문에 약한 상호작용은 매우 가까운 거리에서만 작용하고, 약한 핵력의 크기는 전자기 상호작용보다 작아지게 된다. 그리고 깨지지 않고 남아있는 대칭성에 해당하는 것이 전자기력이며, 그래서 빛은 여전히 게이지 대칭성에 의해서 질량이 0인 채로 남아있다. 이것이 표준모형의 핵심 구조이며, 힉스 등이 예측한 대로 표준모형에서 힉스 메커니즘이 구현될 때 나타나는 전기적으로 중성인 스칼라 입자가 바로 현재 LHC에서 발견된 것으로 보이는 힉스 입자다.

표준모형을 이루는 구성 성분은 크게 물질을 이루는 입자와, 상호작용을 매개하는 게이지 입자, 그리고 이론의 상태를 정해주는 힉스 입자로 나눌 수 있다. 물질을 이루는 입자는 강한 상호작용을 하는 쿼크와 강한 상호작용을 하지 않는 렙톤이다. 쿼크 중 가장 가벼운 업 쿼크와 다운 쿼크는 다시 강한 상호작용에 의해 양성자와 중성자를 이루게 된다. 렙톤은 전자와 같은 입자와 그 짝이 되는 중성미자다. 그 중에서 가장 가벼운 업 쿼크,

다운 쿼크, 전자가 원자를 이루며, 원자핵의 베타 붕괴에서 전자 중성미자가 발생한다. 이들 입자를 쿼크와 렙톤의 첫 번째 세대(generation) 혹은 가족(family)이라고 한다. 그러나 와인버그가 그의 이론을 제시할 때, 이미 자연에는 또 하나의 쿼크와, 전자와 같으면서 질량만 더 큰 뮤온 및 그 짝이 되는 중성미자가 존재했다. 처음에 와인버그의 이론은 쿼크에는 적용되지 않았는데, 이는 당시까지 알려진 쿼크가 모두 세 종류라서 이론의 대칭성에 맞지 않았기 때문이다. 그러나 얼마 후 1974년 네 번째 쿼크로 만들어진 J/ψ 입자가 발견되면서, 마침내 와인버그 이론은 두 세대로 이루어진 쿼크와 렙톤을 모두 아우를 수 있게 되었다. 또한, 이즈음 강한 상호작용을 설명하는 게이지 이론인 양자색역학(Quantum Chromodynamics)이 완성되었다. 강한 핵력이 짧은 거리에만 작용하는 이유는 약한 핵력과는 전혀 달라서, 양-밀스 이론의 특징적인 성질과, 강한 상호작용이 너무 강하다는 사실이 합쳐진 결과다. 와인버그의 이론에 양자색역학을 합침으로써, 표준모형의 구조가 완성되었고 마치 퍼즐이 맞듯이 모든 것이 맞아 들어갔다. 드디어 진짜 ‘모든 것의 이론’이라고 부를 수 있는 이론이 나타난 것이다.

1975년에 SLAC에서 세 번째 세대의 렙톤이 발견되면서 표준모형의 입자는 좀 더 확장된다. 사실 표준모형은 쿼크와 렙톤이 얼마나 많이 존재하는지에 대해서는 답을 해주지 않는다. 표준모형이 말해주는 것은 쿼크 사이의 그리고 렙톤 사이의 대칭성뿐이다. 그러므로 세 번째 렙톤이 발견되었다는 것은, 표준모형의 구조가 맞다면 세 번째 중성미자, 그리고 세 번째 세대의 쿼크들도 존재해야 한다는 것을 의미한다. 이는 점차 확인되었다. 1977년에 다섯 번째의 쿼크가, 1994년에 여섯 번째의 쿼크가, 그리고 2000년에 세 번째 중성미자가 각각 미국 시카고 근교의 페르미 연구소에서 발견됨으로써 표준모형은 지금 우리가 알고 있는 모습을 갖추게 되었다.

표준모형의 질량 문제는 사실 게이지 입자에만 있는 것이 아니다. 쿼크와 전자 같은 페르미온 입자들은 일반적으로 두 가지 상태를 가진다. 이 두 가지 상태는 공간을 반전시키는 패리티(parity) 대칭성에 대해서 반대의 성질을 가지기 때문에 흔히 오른쪽 입자와 왼쪽 입자라고 부른다. 그런데 페르미온의 질량은 이 두 상태를 연결시키는 역할을 한다. 그런데 표준모형의 특징은 약한 핵력이 왼쪽 입자에만 작용하고 오른쪽 입자에는 작용하지 않는다는 것이다. 따라서 만약 페르미온에 질량이 있다면 왼쪽 입자가 질량에 의해 오른쪽 입자로 바뀌면서 약한 핵력이 사라지게 되거나, 그 반대로 무(無)에서 생겨나야 한다. 그런 일은 일어날 수 없으므로, 표준모형에서

REFERENCES

- [5] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967).

Fig. 4. Interactions between the Standard Model particles.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model)

는 페르미온도 질량을 가질 수가 없다. 그런데 이 문제 역시 힉스 메커니즘에 의해 깔끔하게 해결된다. 힉스 메커니즘에서 우주의 상태를 결정해 주는 스칼라 장을 흔히 그냥 힉스 장이라고 부르는데, 힉스 장은 약한 핵력에 해당하는 게이지 대칭성을 깨는 역할을 하므로 약한 핵력과 상호작용한다. 그러니까 우주 전체에 약한 핵력과 상호작용하는 힉스 장이 바닥에 깔려있는 셈이다. 그러면 페르미온의 왼쪽 입자는 우주의 기본 상태를 결정해주는 힉스 장과 함께 약한 상호작용을 하면 되므로 오른쪽 입자와 자유로이 결합할 수 있다. 즉 질량을 가질 수 있다. 이때 힉스 장이 정해주는 우주 상태의 기본값은 모든 입자에 공통이므로, 입자의 질량은 그 입자가 힉스 장과 상호작용하는 크기에 의해서 정해진다.

표준모형의 게이지 대칭성은 전자기력과 약한 핵력을 설명하는 대칭성과, 강한 핵력에 해당하는 대칭성이 있다. 각각의 대칭성에 따라 힘을 매개하는 게이지 입자로 전자기 상호작용을 매개하는 빛과, 강한 상호작용을 매개하는 글루온, 그리고 약한 상호작용을 매개하는 W와 Z 보손이 있다. 빛은 오래 전부터 우리가 잘 알고 있는 존재다. 글루온은 1970년대 말, 독일의 DESY 연구소에서 존재를 처음 확인했다. 약한 상호작용을 매개하는 W와 Z 보손은 1983년 유럽 입자물리학 연구소 CERN의 양성자-반양성자 충돌 실험에서 발견되었다. W와 Z 보손의 질량과 결합 상수는 표준모형에서 예측한 값과 일치했고, 이로써 표준모형의 기본 구조가 결정적으로 검증되었다. 나아가서 1989년부터 가동되기 시작한, CERN의 전자-양전자 충돌실험인 LEP에서 W와 Z 보손의 여러 성질들 및 표준모형의 세부 사항들이 정밀하게 측정되어 자세히 검증되었고, 표준모형이 놀라운 만큼 모든 면에서 정확한 이론임이 확인되었다.

이렇게 표준모형이 정밀하게 검증되면서, LHC가 가동되는 시점에서 표준모형에는 정말 힉스 메커니즘이 작용하는가 하는 문제만 남게 되었다. 물론 W와 Z 게이지 보손이 질량을 가지며, 그 질량과 그들 사이의 결합 관계가 정확하게 표준모형에서 예측한 바와 같다는 사실에서 많은 과학자들은 힉스 메커니즘이 작동

Fig. 5. Higgs candidate event which denotes the Higgs boson decay into two photons. (Talk delivered by Marco Pieri (CMS) at the Moriond conference, La Thuile, 3-10 March 2012)

한다는 사실을 믿었다. 그러나 그것을 완전히 확인하려면 그 부산물로 나오는 스핀이 0인 입자, 힉스 보손을 직접 발견해야만 한다.

힉스 보손의 질량 역시 힉스 장의 기본값에 의해 정해지므로, W와 Z 게이지 보손의 질량과 비슷한 값을 가지는 것이 자연스럽다. 그리고 LEP에서 측정한 여러 가지 양자역학적 효과도 힉스 보손의 질량이 거기서 멀지 않다는 것을 가리킨다. 그러나 힉스 보손의 질량은 원리적으로는 어떤 값이든 가능하다. 그래서 애초에 LHC는 약 $600 \text{ GeV}/c^2$ 의 질량을 가지는 힉스 보손까지 탐색할 수 있도록 계획되었다(Z 보손의 질량은 약 $90 \text{ GeV}/c^2$ 이다). 2000년까지 CERN의 LEP 실험에서 힉스 보손을 탐색한 결과로는 표준모형에서 예측하는 힉스 보손의 질량은 약 $114 \text{ GeV}/c^2$ 보다 크다는 것이 확인되었다. 여기에 “표준모형에서 예측하는”이라는 단서가 붙는 이유는, 실험에서 채택한 검출 과정이 표준모형의 힉스 보손을 가정한 것이기 때문이다. 만약 표준모형과 다른 방식으로 존재하는 힉스 보손이라면 생성 확률과 붕괴 방법 등이 다를 것이므로 실험 결과가 다르게 해석되어야 한다.

표준모형은 20세기에 들어서 인류가 성취한 양자론, 특수상대론, 양자 장이론, QED, 게이지 이론, 자발적 대칭성 깨짐과 같은 물리학의 주요 성과가 집약된 인간의 이성 활동에 있어서의 금자탑이다. 그리고 중력을 제외한 모든 물리 현상의 근본이 되는 이론이다. 이 하나의 방정식은 빅뱅 직후와 같은 아주 특별한 경우와 중력 현상을 제외하면, 우리 우주의 거의 모든 물리현상을 설명하는데 있어 기본이 된다. 즉, 우리가 알고 있는 거의 모든 물리 법칙은 표준모형이 복합적으로 작용한 결과라고 해도 무방하다. LHC가 가동을 시작할 때, 표준모형에서 유일하게 실험적으로 검증되지 않은 부분은 힉스 보손이 유일했고, 그래서 LHC의 첫 번째 가장 중요한 목표는 힉스 보손을 발견하는 일이었다. 그리고 4년이 지난 오늘, 우리는 그 대답을 눈앞에 두고 있다. 다음 글에서 LHC에서 관측된 힉스 입자를 만나보기로 하자.