힉스입자의 발견과 향후 과제

DOI: 10.3938/PhiT.22.057

고 병 원

Particle Physics after the Discovery of the Higgs Boson

Pyungwon KO

The long-sought-for Higgs boson has been finally discovered at the LHC, and the Standard Model (SM) for particle physics is being completed now. Still, many interesting unsolved problems remain within the SM, and one has to consider its extensions. Here, I describe what would be the most pressing questions for the coming years in particle physics. For the shorter term, measuring the Higgs self-couplings and reconstructing the Higgs potential in order to verify the SM Higgs paradigm or to see if extra Higgs boson(s) are needed would be important. For the longer term, the nature of nonbaryonic dark matter particles (how many species, their masses and spins, their interactions and the origin of their masses) have to be identified.

표준모형에서의 힉스입자

2012년 7월 4일 스위스 CERN에서 힉스입자의 발견을 발표하고 2013년도 노벨 물리학상이 앙글레르와 힉스에게 수여됨에 따라 S. Weinberg가 1967년에 제안한 표준모형은 마침내 완성단계에 도달했다고 할 수 있다 (힉스입자를 포함한 표준모형에 등장하는 입자들은 그림 1 참조).

저자약력

고병원 교수는 서울대학교 학사(1983), 서울대학교 석사(1985), University of Chicago PhD(1991)로서, University of Minnesota 박사후 연구원(1991-1994), 홍익대학교 조교수(1994-1997), KAIST 물리학과 부교수, 교수(1997-2005)를 거쳐, 현재 고등과학원 물리학부 교수(2005-)로 재직 중이다. (pko@kias.re.kr)

Fig. 1. Fundamental building blocks of the standard model.

힉스입자는 표준모형 내의 여러 입자들의 질량을 만들어내는 중요한 역할을 한다. 약한 상호작용을 전달하는 W, Z 입자의 질량이 소위 힉스 메커니즘(Higgs mechanism)에 의해서 생성되며 W, Z 입자의 질량은 핵자에 비해 90-100배 가량 크다. 이 때문에 약한 핵력이 미치는 힘의 범위가 핵자의 크기보다 훨씬 작고 중성자 붕괴를 일으키는 약한 핵력이 전자기력보다 훨씬 약하게 된다. W, Z 입자의 질량뿐만 아니라 전자를 비롯해서 중성미자를 제외한 대부분의 페르미온들의 질량 역시 힉스 메커니즘에 의해서 주어진다. 표준모형은 하나의 힉스 더블릿(Higgs doublet)을 통해서 페르미온과 약한 핵력의 전달자인 W, Z 입자의 질량을 동시에 설명하는 가장 효율적인 모형이며 현재 입자물리학의 근간을 이루고 있다. 따라서 이 표준모형을 모든 가능한 방법으로 완전히 검증하는 것이 매우 중요하다. 현재 전자기 약작용의 정밀검증(electroweak precision tests)과 플레이버(flavor) 데이터로부터 표준모형은 양자고리 효과를 포함한 수준에서 매우 정확하게 검증되었다. 최근 힉스입자가 발견됨에 따라 앞으로 남은 과제는 힉스입자끼리의 결합상수

(self coupling)들을 측정하여 표준모형의 예측과 비교 검증하는 일이다. 이를 통해서 힉스 더블릿이 하나만 존재하는 표준모형이 맞는지 아니면 여러 개의 힉스입자들이 존재할 수 있는지 알 수 있다. 이를 위해서는 좀 더 많은 실험연구가 필요하고 특히 고휘도의 전자-양전자 가속기 건설이 필수적이다.

역사적으로 힉스 메커니즘은 초전도체 계에서 처음 알려졌다. 1950년에 제안된 Ginzburg-Landau 이론은 대칭성의 자발적 붕괴라는 개념으로 초전도체가 자기장을 밀쳐내는 Meissner 효과를 설명해주며, 1935년에 제안된 London 방정식이 자연스럽게 유도된다. Landau-Ginzburg 이론의 상대론적 확장이 바로 표준모형에서의 힉스 메커니즘이다. 한편 초전도체의 경우에는 Cooper pair의 형성여부로 초전도체로의 상전이 현상을 설명하는 소위 BCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer, 1957) 이론이라는 미시적 이론이 존재한다. 따라서 초전도체에서의 BCS이론처럼 표준모형에서 힉스 메커니즘을 일으키는 미시적인 이론이 존재하는지 여부가 입자물리학에서 매우 중요한 문제의 하나로 간주되어 왔으며 이에 대한 많은 이론들이 제안되었다. BCS와 가장 유사한 이론이 Technicolor, Top condensate 모형들이라고 볼 수 있는데 이들 이론에서는 힉스 메커니즘에 의해서 질량을 가지게 되는 종편극(longitudinally polarized) 상태의 W, Z 게이지 입자들이 composite particle이 되므로 구조가 없는 횡편극 입자와는 그 성질이 다르게 된다. 아울러 미시적 이론의 종류에 따라서 힉스입자도 구조가 없는 기본입자가 아니라 composite이거나 아예 존재하지 않을 수도 있다. 최근에 발견된 힉스입자의 성질이 표준모형의 힉스입자와 매우 흡사하기 때문에 composite Higgs 시나리오가 맞을 가능성은 점점 더 줄어들고 있다고 할 수 있다. 만일 힉스입자가 기본입자라면 이는 최초로 발견된 스핀이 영인 기본입자이다. 물론 파이 중간자처럼 스핀이 영인 입자가 발견되었지만 이 입자는 $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ 정도의 크기를 가지고 있으며 쿼크와 그것의 반입자로 이루어진 composite 입자이다. 힉스입자가 과연 구조가 없는 기본입자일지는 좀 더 정밀한 실험이 이루어져야 하며 LHC@14 TeV 실험을 통해서 좀 더 확실한 답을 얻을 것으로 기대된다.

새로운 물리법칙의 필요성

표준모형이 $\sim 1\text{ TeV}$ 이하에서 일어나는 대부분의 입자물리 현상들을 매우 잘 설명하고 있지만 표준모형이 확장되어야 하는 여러 이유가 있는데 크게 현상론적인 이유와 이론적인 이유로 나누어 볼 수 있다. 이 섹션에서 각각의 이유를 간단히 살펴보기로 하겠다.

자연계에는 표준모형으로 설명되지 않는 현상들이 존재하기

때문에 표준모형을 포함하는 새로운 물리법칙을 구축하는 것이 필요하다. 표준모형을 포함하는 새로운 물리법칙(Beyond the Standard Model)이 필요하다는 것에 대한 이유는 (i) 중성미자의 질량과 변환, (ii) 우주의 물질-반물질 비대칭성과 (iii) 암흑물질 및 (iv) 우주의 가속팽창 등이다. 이 네 가지 관측사실들을 설명하기 위해서는 표준모형을 반드시 확장해야 한다. (물론 muon 경입자의 비정상 쌍극자와 top quark의 전후방 비대칭성, $\sin^2\theta_W$ 등 표준모형 내에서 이해하기 어려운 현상들이 몇 가지가 더 있는데 이들을 새로운 물리법칙에 대한 확실한 증거로 볼 수 있는지는 좀 더 두고 봐야 할 것이다.)

이 중에서 질량의 기원으로서의 힉스입자 발견과 관련된 문제로서 우주의 25% 가량을 이루고 있는 암흑물질이 어떤 입자들로 이루어진 것인지, 그리고 암흑물질 입자의 질량이 어떻게 생성되는지가 향후 중요한 문제로 부각될 것이다.

새로운 물리법칙의 필요성에 대한 좀 더 이론적인 이유들도 있다. 자연계의 모든 힘들을 하나의 힘으로 통일할 수 있는가 (grand unification), 그리고 힉스입자의 질량이 플랑크 스케일에 매우 예민하게 의존하는 문제를 어떻게 이해할 수 있는가 (Hierarchy problem), 중성자의 전기쌍극자가 왜 그렇게 작은가 (strong CP problem) 등등이 흔히 거론되는 문제들이다. 힘의 통일은 이론적으로 매우 매력적인 가능성이며 이 경우 쿼크와 경입자가 하나의 multiplet에 속하기 때문에 양성자 붕괴가 가능해진다. 현재 일본의 수퍼 카미오칸데 실험실에서 측정된 양성자의 수명은 2×10^{33} 년보다 길어야 하며 이 결과는 세 개의 게이지 힘들이 통합되는 에너지 스케일에 대한 중요한 구축조건이 된다.

Hierarchy problem이나 strong CP problem 등은 소위 말하는 미세조정문제(Fine Tuning Problem)으로서 Naturalness problem으로 불리기도 한다. 하지만 이 문제들은 입자물리의 기반이 되는 상대론과 양자역학을 결합한 양자장론의 기본원칙들을 위배하는 것이 아니기 때문에 진정으로 심각한 문제인지에 대해서는 논란의 여지가 있다고 하겠다. 물론 특정 파라미터가 왜 아주 작은지를 자연스럽게 설명할 수 있으면 좋겠지만 그렇지 않다고 해서 이론을 수정해야 할 정도의 심각한 문제는 아니다.

우주의 질량은 어디서 오는가 ?

흔히들 힉스입자의 발견으로 질량의 기원이 밝혀졌다고 이야기하지만 이는 표준모형에 등장하는 입자의 질량에만 해당하는 것으로 정확한 이야기는 아니다. 우주의 대부분은 우리가 그 정체를 알지 못하는 암흑물질 및 암흑 에너지로 되어있으며 암흑물질 입자의 정체와 그 질량의 기원에 대해서는 전혀 알

Fig. 2. Energy budget of the universe at present (top) and 13.7 billion years ago (bottom).

려진 바가 없다. 우리가 빛을 통해서 볼 수 있는 우주는 우주 전체의 5% 정도밖에 되지 않는다. 표준모형 내의 입자들은 우주의 5% 정도만을 구성하고 있으며 우주의 23%는 암흑물질로, 그리고 나머지 72% 가량은 소위 암흑에너지로 구성되어 있다(그림 2 참조).

그리고 그 5%가 우리가 보는 세계를 이루고 있는 원자들을 만드는데 원자의 질량은 대부분 핵자로부터 오며 전자의 질량은 1/2000 정도밖에 되지 않으므로 우주의 질량을 계산할 때 전자의 기여는 무시할 수 있다. 그런데 전자의 질량이 힉스 메커니즘에 의해서 주어지는 반면에 핵자의 질량은 대부분이 강한핵력에 의해서 동역학적으로 생성된다. 물론 핵자는 질량이 있는 쿼크와 질량이 없는 글루온으로 되어있고 쿼크의 질량은 전자의 질량과 마찬가지로 힉스 메커니즘에 의해서 생성되지만 쿼크의 질량이 워낙 작기 때문에 핵자의 질량에 미치는 영향은 매우 작다. 다시 말해서 힉스입자가 핵자의 질량에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 요약하면 우리가 볼 수 있는 우주는 원자로 이루어져 있고 그 질량은 대부분 핵자에서 오는데 핵자의 질량은 힉스 메커니즘에 의해서 생성되는 것이 아니라

쿼크와 글루온의 강한 상호작용에 의해서 동역학적으로 생성된다. 이를 수학적으로 엄밀하게 증명하는 문제가 바로 Clay Mathematics Institute가 제안한 7개의 Millenium Prize Problems 중에 하나로써, 질량이 없는 양-밀스 비가환 게이지 이론(Yang-Mills NonAbelian Gauge Theory)에서 질량간극(mass gap)이 어떻게 생기는지를 보이는 문제이며 바로 이 문제가 우리가 볼 수 있는 우주의 질량(즉 핵자의 질량)을 이해하는 것과 밀접하게 연결되어 있다. 물리학에서는 이 문제를 소위 격자게이지이론(lattice gauge theory)으로 다루고 있고 수학적인 접근 방법과는 독립적으로 지난 10여 년간 눈부시게 발전해 왔다. 이 문제는 앞으로도 많은 발전이 있을 것으로 기대된다.

향후 과제: 암흑물질의 질량의 기원

암흑에너지가 이론물리학의 가장 어려운 분야인 양자중력과 연관성이 있을 것으로 여겨지는데 반하여 암흑물질은 우리가 잘 알고 있는 양자장론 내에서 기술이 가능하다고 생각된다. 현재 암흑물질의 존재는 중력과 우주관측을 통해서만 알려져 있다. 현재 암흑물질 입자를 발견하려는 실험연구가 세계 곳곳에서 진행 중이다. 이를 통해서 우주의 암흑물질 입자들의 질량과 스핀, 그리고 그들과 표준모형 입자들 사이의 상호작용을 밝혀내는 것이 향후 입자물리학과 우주론의 주요 과제가 될 것이다. 이러한 연구를 통해서 암흑물질 입자의 성질들이 규명되고 나면 비로소 암흑물질 입자의 질량이 어떻게 생성되는가 하는 질문을 던질 수 있으며 이를 이해하는 것은 향후 입자물리의 주요 연구 과제가 될 것이다.

암흑물질 입자의 질량의 기원에 대해 (적어도 필자에게) 가장 매력적인 가능성은 강한 핵력이 핵자의 질량을 설명하듯이 새로운 강한 핵력이 암흑물질의 질량을 만들어내는 것이라고 생각된다. 이 경우 암흑물질의 질량은 핵자의 질량과 마찬가지로 양자효과에 의해서 동역학적으로 생성된다. 필자는 최근 암흑물질과 표준모형 내의 모든 입자들의 질량들이 모두 새로운 강한 핵력에 의해 생성될 수 있는 모형을 구축한 바 있다. 이러한 이론의 특징은 힉스입자와 성질이 비슷하고 전하가 영인 새로운 스칼라 입자가 하나 이상 더 있어야 한다는 것이다. 그리고 LHC에서 측정하는 힉스입자의 신호세기(signal strength)가 힉스입자의 생성과 붕괴모드에 상관없이 1이거나 또는 1보다 작아야 한다는 것이다. 그리고 암흑물질과 핵자의 산란을 이용한 암흑물질 직접 탐색에서 이들 암흑물질을 발견할 가능성이 있다. 이들 예측은 매우 간단하지만 기존의 다른 모델들과는 정성적으로 매우 다른 예측이며, 향후 LHC 힉스입자 탐색 실험을 통해서 이 이론의 검증이 가능하다. 물론 표준모형 힉스

입자와 새로운 스칼라 입자와의 섞임이 아주 작으면 이론을 검증하는 것이 쉽지는 않을 것이며 차세대 국제선형가속기가 더 많은 정보를 줄 것으로 기대된다.

향후 실험과제

힉스입자 발견 후 LHC에서는 표준모형의 지속적인 검증과 더불어 초대칭입자, 부가차원에서 나오는 입자, 새로운 게이지 입자 그리고 약한 상호작용을 하는 무거운 암흑물질(WIMP = weakly interacting massive particle) 입자 등을 탐색하는 실험들이 계속 될 것이다. 현재 LHC 7 TeV 및 8 TeV에서 발견된 힉스입자의 질량이 125 GeV 정도라는 것을 가장 간단한 초대칭모형 내에서 이해하려면 스칼라 페르미온(sfermion) 입자가 매우 무거운 가능성이 많다. 또한 현재까지 초대칭입자에 대한 흔적이 발견되지 않은 것 역시 초대칭 입자가 매우 무거운 가능성이 있음을 암시하고 있다. 이에 따라서 100 TeV 정도의 에너지를 낼 수 있는 매우 거대한 강입자가속기(VLHC = Very Large Hadron Collider)를 건설해야 한다는 움직임들이 서서히 일어나고 있다. 조만간 100 TeV 양성자 가속기에서의 중요한 물리현상 연구들이 현상론 분야의 주요 연구주제가 될 것으로 보인다.

또한 국제 선형가속기를 건설하여 최근 발견된 힉스입자의 성질을 최대한 정확하게 측정하여 표준모형을 검증하려고 하는 움직임도 매우 활발하다. 이를 위해서 2013년 11월에 일본 동경대에서 국제 선형가속기 워크숍이 개최되어 세계 각국에서 약 400여 명의 학자들이 모여서 국제선형가속기 건설 가능성에 대해 활발한 논의를 하였다. 물론 현재 가장 중요한 문제는 가속기를 건설하는 데 드는 비용을 세계 각국이 어떻게 분담할 것인가일 것이다. 가속기 물리학은 더 이상 한 국가가 할

수 있는 것이 아니라 필연적으로 국제공동연구 형태로 이루어질 수밖에 없으며 앞으로 국제선형가속기 사업이 어떤 식으로 진행될지 매우 흥미진진하다.

국제선형가속기 외에도 CERN과 중국 북경의 고에너지 물리연구소(IHEP)에서 전자와 양전자를 충돌시키는 원형충돌가속기에 대한 논의도 진행되고 있다. 이 경우에는 선형가속기에 비해서 훨씬 높은 빔 휘도(beam luminosity)를 유지할 수 있으므로 힉스입자의 성질을 매우 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이 실험이 끝난 후에 빔입자를 양성자로 바꾸어 VLHC로 갈 수 있는 옵션이 있기 때문에 이에 대한 연구도 계속 되어야 할 것이다.

맺는 말

흔히 힉스입자의 발견으로 입자물리에는 더 이상 할 문제가 없다는 이야기들을 한다. 하지만 힉스입자의 발견과 표준모형의 완성으로 새로운 물리법칙을 발견하기 위한 시작점에 불과하다. 이제 우리는 현재 우주의 겨우 5% 정도만을 이해하게 된 것이며 나머지 95%의 우주는 완전히 베일에 둘러싸여 있다. 이는 마치 지구상의 하나의 섬에 사는 사람들이 섬 밖에 무엇이 있는지 모르고 미지의 세계를 탐험하러 나가려고 하는 상황과 마찬가지로, 미지의 세계를 발견함으로써 우주의 신비에 대해 좀 더 잘 이해하게 됨과 동시에 새로운 기술개발을 통해 인류의 생활이 편리해지고 윤택해지듯이 우주의 나머지 95%를 과학적으로 이해하기 위한 노력은 계속 되어야 하고 거기에서 얻어지는 많은 부산물들은 궁극적으로 인류의 문명발전에 공헌하게 될 것이다. 전자기학과 방사능에 대한 이해가 오늘날 우리 생활을 어떻게 변화시켜 왔는지를 되돌아보면 이는 매우 자명하다고 하겠다.