힉스 입자와 새 물리학

DOI: 10.3938/PhiT.21.046

박 성 찬

The Higgs Particle and New Physics

Seong Chan PARK

The recent discovery of the Higgs-like 125-GeV boson has shed light on new physics. In this article, we review the implications of the new 125-GeV boson for the standard model, as well as new physics possibilities.

서 론

표준 입자물리학 모형 혹은 짧게 표준모형(The Standard Model)은 각각 6종류의 맛깔(flavor)을 가지는 쿼크(quark)들과 렙톤(lepton)들을 물질입자로 포함하고, 이들이 특별한 게이지 대칭군 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 에 정의되는 강한 핵력, 약한 핵력과 전자기력에 의해 상호작용한다는 양자게이지 장이론(quantum gauge field theory)의 이론 틀(theoretical framework)로 기술된다. 표준모형은 양자역학적으로 완결성을 갖고 있으며, 그 디테일이 실험적으로도 대단한 정밀도의 검증을 받아온 이론으로 인류가 고에너지 최전선에서 얻어낸 가장 정밀한 물리학 법칙이라 하겠다.

하지만 최근까지도 표준모형은 그 ‘완성’에 한발자국 떨어져 있었다. 바로 $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$ 즉, 약전자기 상호작용(electroweak force)이 100 GeV 이하 낮은 에너지에서 전자기 상호작용(electromagnetic interaction)과 약한핵-상호작용(weak nuclear interaction)으로 분화하는 과정을 설명하기 위해 도입한 스칼라장의 양자입자(quanta)인 힉스보손

(Higgs boson) 혹은 힉스 입자(the Higgs particle) 혹은 짧게 힉스가 실험적으로 발견되지 않았기 때문이다.

당시 이론가들은 힉스 입자가 발견되지 않았던 이유를 여러 가지 다른 가설로 설명하려 시도하였고, 만약 발견된다면 그리고 특히 약전자기력의 분화 에너지 근처의 질량을 가지고 발견된다면 어떤 이론적 문제점이 있을 수 있는지 알아내려 노력해왔다.

그런 가운데 지난 7월 4일 ‘Higgs-day’에 CERN에는 대대적으로 힉스로 생각되는 125 GeV 질량의 새로운 입자의 발견을 발표했고, 비록 엄밀한 의미에서 표준모형의 ‘그 힉스(the Higgs)’인지에 대해 완전한 답이 나온 상황은 아니었지만 입자물리학자들을 흥분시켰다.

본 원고에서는 이 125 GeV의 입자의 해석을 둘러싼 새로운 물리학의 가능성에 대해 이론가들이 어떤 생각들을 하고 있는지에 대해 다시 생각해보고자 한다.

힉스가 125 GeV라는 것의 의미 (1)

우선 표준 모형은 힉스의 질량에 대해 직접적인 이론적 예측(theoretical prediction)을 할 수 없다는 점을 이해할 필요가 있다. 힉스 입자의 포텐셜 에너지를 보자.

$$V(H) = -\mu^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2.$$

이는 힉스장의 게이지 변환에 대해 불변이며, 낮은 에너지에서 유효하며(effective), 유의미한(relevant) 일반적인 표현이다. 여기서 두 개의 파라메타가 필요함을 알 수 있다. 힉스의 질량($m_H = \sqrt{2}\mu$)과 4제곱결합상수(λ)가 그것이다. 힉스 입자의 질량에 대한 관계식은 포텐셜의 진공근처에서 중성 여기 상태를 고려하여 얻는다. 4제곱항의 계수인 λ 는 양수여서 고려되는 에너지 범위에서 임의로 높은 에너지에서 진공기대치가 결정되지 않는다는 가정과 일치한다. 하지만 그 정확한 값들은 오직 실험을 통해 결정할 수 있다.

저자약력

박성찬 교수는 서울대학교에서 입자물리학 이론전공으로 박사학위를 받고 고등과학원, 미국 코넬대학교 박사후연구원, 일본 동경대학교 수리물리학 연구소(IPMU) 특임연구원, 전남대학교 물리학과 교수를 거쳐 현재 성균관대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (s.park@skku.edu)

포텐셜 에너지의 최소점, 즉 진공에서 진공기대치와 포텐셜의 파라미터들 사이에 성립하는 다음 식을 찾을 수 있다.

$$\langle H^\dagger H \rangle_0 = \frac{\mu^2}{2\lambda} = \frac{v^2}{2} \dots (1)$$

여기서 v 를 힉스장의 진공기대치라 부르는데, 이 값은 W 입자의 질량(m_W)과 $SU(2)_L$ 결합세기(g) 혹은 동등하게 페르미 상수($\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2}$)로부터 측정해 낼 수 있다. 힉스장이 약전 자기력의 분화에 기여하며 게이지 입자인 W 입자에 질량을 부여한다는 점을 생각하면 놀라운 일이 아니다. 힉스의 진공 기대치는 다음과 같다.

$$v = \frac{2m_W}{g} = 2^{-1/4} G_F^{-1/2} \simeq 246.221(2) \text{ GeV}.$$

그런데 (1)번 방정식에서 보듯 진공기대치는 힉스의 질량(μ)과 결합상수(λ)의 조합으로 표현된다. 다시 말해 설사 진공기대치를 안다고 해도 힉스의 질량은 여전히 결정되지 못한다는 뜻이다. 이로부터 표준모형 자체가 힉스 질량을 예측해 낼 수 없음을 알 수 있다.

힉스 입자의 질량 125 GeV를 알게 되어 이제 힉스 포텐셜의 완전한 모양을 찾게 되었다!

$$\mu = \frac{m_H}{\sqrt{2}} \simeq 88.4 \text{ GeV},$$

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{m_H^2}{v^2} \simeq 0.129.$$

그런데 이 특별한 값은 우주의 진공 안정성에 대해 대단히 흥미로운 새로운 정보를 제공한다. λ 는 소위 재규격화군의 흐름(Renormalization Group running)에 의해 측정하는 에너지 스케일에 의존하여 변화하는 값이다. 표준모형에 따르면 λ 는 높은 에너지에서 점점 작은 값을 가지며, 대략 10^{10} GeV 이상에서 $\lambda < 0$ 이 된다(그림 1 참조).^[1] 이는 포텐셜 에너지가 높은 에너지 쪽에서 점점 낮은 값을 가진다는 뜻으로, 진공이 불안정해짐을 알 수 있다.

우주의 진공은 높은 에너지에서 정말로 불안정했을까? 아마도 그렇지 않았을 것이다. 왜냐하면 우주는 높은 에너지에서 현재까지 지속적으로 존재하며 팽창해왔음이 우주론적 관측을 통해 이미 알려져 있기 때문이다. 그렇다면 125 GeV 힉스는 과연 어떻게 받아들여야 할까? 아마도 $\lambda < 0$ 이 되기 훨씬 전의 낮은 에너지에서 표준모형은 새로운 물리학에 의해 변경되었을 것이라고 보는 것이 보다 타당해 보인다. 어떤 새로운 물리학이 있어야 하는지 뒤에서 좀 더 살펴보자.

Fig. 1. The renormalization group running of the Higgs quartic coupling constant.^[1]

힉스가 125 GeV라는 것의 의미 (2)

힉스는 스칼라이므로 스핀이 0이며 표준모형의 물질들($s=1/2$), 게이지 보손들($s=1$)과 다르다. 표준모형은 소위 카이랄 이론(chiral theory)의 범주에 속하며 왼쪽-오른쪽 비대칭이다. 즉, 왼쪽 페르미 입자와 오른쪽 페르미 입자의 양자수는 다르며 게이지 상호작용에 의해 구분된다. 이 경우 페르미 입자는 힉스와의 상호작용 없이 질량을 획득하지 못한다. 게이지 보손들도 게이지 대칭성이 힉스와의 상호작용을 통해 깨지지 않는 한 질량이 0이다. 즉, 힉스 입자 없이는 표준모형의 모든 입자들은 질량이 없다. 힉스가 질량을 부여하고 있다.

예를 들어 전자(electron)의 질량과 톱쿼크(top quark)의 질량은 다음과 같다.

$$m_e = y_e v = 0.51 \text{ MeV}, \quad m_t = y_t v = 173 \text{ GeV}.$$

여기서 $y_{f=e,t}$ 는 페르미온 입자 f 와 힉스장의 결합세기로 흔히 유카와 결합상수(Yukawa coupling)라고 부른다. 전자의 유카와 결합상수는 톱쿼크의 결합상수에 비해 현저히 작으며 따라서 전자는 톱쿼크에 비해 훨씬 가볍다고 할 수 있다. 그런데 왜 전자의 유카와 결합상수가 톱쿼크의 결합상수에 비해 현저히 작은 값을 가지는지 혹은 반대로 톱쿼크의

REFERENCES

- [1] G. Degrandi, S. Di Vita, J. Elias-Miro, J. R. Espinosa, G. F. Giudice, G. Isidori and A. Strumia, JHEP **1208**, 098 (2012).

결합상수가 현저히 큰지는 표준모형 내에서 설명할 수 없다. 이 또한 새로운 물리학이 필요한 부분이다.

물질입자, 게이지 입자들과 달리 힉스 입자의 질량 자체는 이론적으로 어떤 값을 가져도 이론적 문제를 일으키지 않는다. 양자역학에서 ‘금지되지 않은 현상은 항상 발생한다.’는 유명한 원리를 따른다는 점을 생각했을 때 힉스 질량이 표준모형이 성립하는 에너지의 상한값(cut off) 정도로 높지 않고 100 GeV 정도로 낮다는 것은 오히려 부가적인 설명을 요구한다. 실제로 양자역학적 요동을 고려한 힉스 입자의 질량치는 대단히 높을 것으로 예상된다.

$$m_{H,phys}^2 = m_0^2 + \frac{g^2}{16\pi^2} \Lambda^2 \ll \Lambda^2(??)$$

여기서 우변의 첫 번째 항은 베어 질량(bare mass) 항, 두 번째 항은 1-loop에서 유도된 항인데, 두 항의 조합으로 물리적인 힉스 질량이 결정된다. 물리적인 질량은 125 GeV 정도인데 cut-off가 훨씬 높은 값을 가진다는 것은 이론적인 입장에서 대단히 부자연스러운 상쇄(cancellation)를 요구한다. 첫 번째 항과 두 번째 항이 우연히 상쇄한다는 것은 믿기 힘들다. 이를 소위 (높은 컷오프 스케일과 낮은 힉스 질량 사이의) 위계문제(Hierarchy Problem)라 부른다. 이 문제는 실제로 표준모형이 정립된 이후 상당한 기간 동안 입자물리학계가 풀고 싶어 한 가장 중요한 문제로 자리 잡고 있으며, 새로운 물리학이 존재한다는 증거로 생각되어왔다. 특히 새로운 물리학이 나타나야 하는 에너지 스케일이 1 TeV 근처일 것을 시사하고 있기 때문에 대단히 중요하다.

가장 널리 연구되어온 위계문제의 해법들은 1. 초대칭성, 2. 여분차원 등이 있다. 하지만 최소 모형의 경우 그 어느 쪽도 부가적인 실험적 뒷받침을 찾지 못했으며 보다 높은 에너지의 실험을 요구하거나 심각하게 이론을 수정해야 하는 것으로 여겨진다. LHC 시대가 흥미로운 이유다.

그 힉스가 그 힉스일까?

우선 CERN의 두 실험팀인 ATLAS와 CMS가 발견한 125 GeV 입자가 어떤 입자인지 다시 한 번 살펴보자.

ATLAS와 CMS는 공히 두 개의 포톤으로 붕괴하는 채널(c1)과 4개의 렙톤으로 붕괴하는 채널(c2)에서 5시그마 정도의 통계적 유의성을 가지고 125 GeV 질량을 가지는 입자를 발견하였는데, 이는 표준모형의 힉스 입자의 성질과 합치된다.

특히 첫 번째 채널(c1)에서의 발견은 이 125 GeV 질량을 가진 입자가 스핀이 1이 아닐 것으로 결론짓게 한다. 이는 소

Fig. 2. The comparison between the experimental signatures of the Higgs boson and the standard model predictions.^[2]

위 란다우-양 정리(Landau-Yang theorem)에 따른 것인데, 질량이 있는 스핀-1인 입자는 질량이 없는 두 개의 스핀-1 입자(포톤)로 붕괴할 수 없다. 그리고 (c1)과 (c2) 공히 이 입자가 페르미 입자가 아니라는 것을 말해주는 때문에 결론적으로 새로운 입자의 스핀은 0이거나 2이다. 물론 표준모형에서 유일한 스핀 0인 입자는 힉스 입자이다. 자연계에 스핀 2인 입자의 예로 중력자(graviton)가 있는 것은 사실이지만 여러 성질로 비추어 이 125 GeV 입자가 중력자일 가능성은 사실상 없다고 보아도 무방하다.

그렇지만 표준모형의 힉스 입자가 붕괴할 수 있는 채널은 (c1)과 (c2)만 있는 것이 아니다. 그리고 (c1)과 (c2)가 정확히 표준모형의 예측한 양상을 그대로 따르고 있는지 현재까지의 데이터만으로 결론짓기 힘들다. 그림 2의 그래프는 CMS에서 발표한 최신 데이터로 각 채널별로 표준모형의 예상 시그널 수와 실제 관측 시그널 수를 비교한 것이다.^[2]

위 데이터를 보면 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 채널(c1)의 시그널의 경우 거의 표준모형 예측치의 2배 정도되며, $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$ (c2) 채널은 표준모형 예측치와 잘 일치하고 그 외의 채널은 오히려 표준모형 예측치보다 작게 관측되었음을 알 수 있다.

다시 한 번 강조하지만 통계적으로 보았을 때 단지 경향성 정도로 이해하는 것이 옳을 것이며, 이를 새로운 물리학의 증거로 볼 수는 없다. 이 데이터는 내년 초까지 더 많이 쌓일

REFERENCES

- [2] S. Chatrchyan *et al.*, [The CMS collaboration], Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).

것이고 그때도 이 경향성이 남을 것인지 아무도 알 수 없다.

만약 이 경향성이 그대로 남는다면 어떨까? 이는 이 새로운 125 GeV 입자가 표준모형의 힉스와 대단히 유사하면서도 차이가 있는 입자라는 것으로 해석할 수 있을 것이다.

구체적으로 어떤 새로운 물리학이 가능할까? 힉스의 대표적인 발생 메커니즘인 글루온 퓨전에 의한 생성($gg \rightarrow H$)은 표준모형에서 오직 양자역학적 요동의 효과로 발생할 수 있다. 가장 중요한 요동은 힉스 입자가 가장 강하게 결합하는 톱쿼크의 요동이다. 새로운 물리학의 효과는 이 양자역학적 요동을 변화시킬 수 있는데, 예를 들어 여분의 차원이 존재할 때 쿼크(q)의 여기상태인 칼루자-클라인 쿼크($q^{(n)}$)(여기서 n 은 여기상태를 나타내는 인덱스로 정수)가 관여하여 $gg \rightarrow H$ 를 변화시킬 수 있다. 특히 톱쿼크의 효과가 가장 클 것이다.

구체적으로 어느 정도 표준모형의 힉스 생성률을 변화시키는지 여분의 차원의 크기와 모양 그리고 그 속에서 쿼크 입자들의 분포에 의해 결정되는데, 힉스 생성률이 촉진되거나(Universal Extra Dimension 모형의 경우), 감소한다(Randall-Sundrum 모형의 경우). 따라서 힉스 관련 채널 이외의 채널에서 구체적인 모형의 예측이 테스트되어야 한다.^[3,4]

결론

힉스 입자의 발견은 표준모형의 완성으로서 뿐 아니라 새로운 물리학과 우주의 운명에 대한 흥미로운 결론들을 암시한다. 힉스 입자에 대한 정밀한 측정은 새로운 물리학의 모습에 대해 더 많은 정보를 낳을 것이고, 지난 30여 년간 거듭

Fig. 3. The gluon fusion to make the Higgs due to the Kaluza-Klein quark contribution.

강화된 표준모형의 실험적 검증으로부터 나아가 새로운 물리학 발견의 길로 인도해줄 수 있을 것으로 기대한다.

표준모형이 해결해주지 못하는 위계문제를 비롯한 암흑물질 문제나 플레이버 구조 문제 등 여러 문제들은 분명히 새로운 물리학의 존재를 강력히 시사하고 있다.^[5] 이 새로운 물리학은 LHC 시대의 또 다른 의무를 물리학자들에게 부여하고 있다.

REFERENCES

- [3] K. Nishiwaki, K.-y. Oda, N. Okuda and R. Watanabe, Phys. Rev. D **85**, 035026 (2012).
- [4] M. Carerra, S. Casagrande, F. Goertz, U. Haisch and M. Neubert, JHEP **1208**, 156 (2012).
- [5] G.-Yu Huang, K. Kong and Seong Chan Park, JHEP **1206**, 099 (2012).