초대칭으로 본 힉스입자의 이론적 의미

DOI: 10.3938/PhiT.21.044

최 성 렬

Theoretical Implications of Higgs Particles in Light of Supersymmetry

Seong Youl CHOI

Recently, a new boson with a mass of about 125 GeV was discovered at two LHC experiments called ATLAS and CMS. In this report, we review the reasons why the supersymmetric extensions of the Standard Model, especially, its minimal extension called MSSM, has been extensively investigated for more than 30 years. Then, we describe various theoretical implications of the new boson for the supersymmetric path beyond the Standard Model in some detail and some experimental prospects in brief.

서 론

올해 2012년 7월 4일에 거대 강입자 가속기(LHC)의 두 거대 검출기 실험 팀들(ATLAS와 CMS)은 약 125 GeV^[1]의 질량을 가진 새로운 보손입자를 발견하였다고 발표하였다.^[2] 물론 이 입자가 전자기-약작용 게이지 대칭성을 자발적으로 깨는 힉스 메커니즘의 유일한 전달자 역할을 하는 표준모형의 스핀 영인 힉스입자^[3]와 동일할지 여부는 더 규명해야 한다.

정말로 이 보손 입자가 표준모형 힉스 입자라면 지난 40년 이상의 기간 동안에 차곡차곡 조각들이 채워져 온 표준모형^[4]이란 조각그림의 마지막 조각을 찾아 채운 것이다. 만약에 다른 특성을 가진 보손입자로 밝혀지면 입자물리학 아니 전 과

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)

학 분야에서 새로운 혁명을 목격하고 있는 것이다. 어느 경우가 맞는지 검증하기 위해 우선 더욱 많고 정교한 실험 자료를 확보하여 이 입자의 특성을 정밀하게 측정하는 것이 필수적이다. 또한 이 입자 발견의 물리적 의미를 아직 이해가 되지 않고 해결이 되지 않은 여러 다른 문제들과 현상들에 비추어 가까운 장래에 어떤 새로운 결과를 얻을지 조명해 보는 것이 중요하다.

이 글에서는 많은 매력적인 특성을 지닌 TeV 에너지 영역에서 나타날 것으로 가장 유력하게 조명 받고 있는 표준모형 너머 새로운 이론적 체계인 초대칭(supersymmetry=SUSY) 이론 중에서 가장 간결한 초대칭 표준모형^[5]을 개괄적으로 조명하고자 한다. 이를 바탕으로 최근에 발견된 보손 입자가 초대칭 표준모형의 힉스입자 중 가장 가벼운 중 힉스입자라면 어떤 이론적 의미를 가지는지 밝히고 LHC와 같은 고에너지 실험과의 연관관계를 간략하게 언급하고자 한다. [실험과 관련된 더 자세한 내용은 본 특집호의 최수용 교수의 글을 참조]

다방면의 문제해결사로서의 초대칭

1. 양자보정의 자연스럽고 안정된 미세 조정

새로 발견된 입자가 표준모형 힉스와 유사한 성질을 가진 스핀이 영인 스칼라 입자라면 무엇보다 개념적으로 이해할

REFERENCES

- [1] The unit of mass is expressed in an energy unit GeV.
- [2] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B **716**, 1 (2012) [arXiv:1207.7214 [hep-ex]]; S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration], Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [3] F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13**, 321 (1964); P. W. Higgs, Phys. Lett. **12**, 132 (1964); Phys. Rev. Lett. **13**, 508 (1964); Phys. Rev. **145**, 1156 (1966); G. S. Guralnik, C. R. Hagen and T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13**, 585 (1964).
- [4] S. L. Glashow, Nucl. Phys. **22**, 579 (1961); S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967).
- [5] J. Wess and B. Zumino, Phys. Lett. B **49**, 52 (1974).

Fig. 1. Cancellation mechanism between fermionic and bosonic quantum fluctuations in supersymmetric theories, described in Feynman diagrams in the upper part and in a cartoon illustration in the lower part.

것 중 하나는 약작용 게이지 입자들 $W^\pm$, Z 와 이 힉스입자의 질량들이 100 GeV의 ‘전자기약력 크기’ 정도의 값을 가지고 10^{19} GeV 크기의 ‘플랑크 크기’의 거대한 양자요동에도 불구하고 어떻게 그 값이 자연스럽게 유지되고 있는지를 밝히는 것이다.^[6]

좀 더 구체적으로 이 입자물리학에서 자주 언급되는 소위 ‘자연스러움’ 문제(naturalness problem)를 이해하기 위해 우선 힉스 질량에 대한 양자역학적 보정을 고려하자. 양자 역학적으로 진공상태는 입자와 반입자 쌍이 불확정성 원리에 따라 생성과 소멸을 끊임없이 반복하는 매우 역동적인 곳이다. 스칼라인 힉스입자가 이런 진공을 지나갈 때 요동하는 각종의 가상 입자들(virtual particles)과 상호작용하여 힉스입자 질량에 양자역학적 보정 $\delta M_H^2 = \alpha \Lambda^2$ 을 받는다. 여기서 Λ 는 가상입자가 가질 수 있는 (혹은 이론이 유효한) 최대 에너지 또는 질량이며, α 는 10^{-2} 정도의 상수이다. Λ 값이 10^{19} GeV의 플랑크 크기라면 자연스러운 힉스입자 질량은 플랑크 크기 정도일 것이다. 그러나 이는 125 GeV로 측정된 힉스입자의 질량과 너무나 크게 배치된다. 이를 계층성 문제(hierarchy problem)라 부른다. 어떻게 미세 조정(fine-tuning)하여, 100 GeV 근방의 힉스입자 질량을 주고 그 값을 그대로 유지하게 하는가를 밝혀내야 한다.

이렇게 엄청나게 큰 양자고리보정 값들을 서로 상쇄하고 극도로 미세조정(fine-tuning)하는 가장 자연스런 방법은 스핀 값이 1/2 차이가 나는 보존과 페르미온을 연결하는 대칭성인 초대칭을 도입하는 것이다. 초대칭이 있는 경우는 힉스입자 질량에 대한 보존(페르미온)의 양자요동 기여와 초대칭 짝 입자인 페르미온(보존)의 양자요동 기여가 (파울리의 배타 원리에 의한 부호의 반전에 의해) 정확히 상쇄된다. 즉, 초대칭이 있으면 미세조정이 완벽하게 이루어지는 것이다.

그러나, 표준모형 입자들의 초대칭 짝 입자(이후로 때때로

Table 1. A few examples for SM particles and their superpartner particles in the MSSM. For example, the superpartner of any spin-1/2 SM matter particle is a spin-0 particle and that of any spin-1 gauge boson is a spin-1/2 particle.

Spin	SM particle	Spin	Superpartner particle
1/2	electron (e) quark (q)	0	selectron ($\tilde{e}$) squark ($\tilde{q}$)
1	gluon (g) photon (γ)	1/2	gluino ($\tilde{g}$) photino ($\tilde{\gamma}$)

초입자라 부름)는 실험적으로 아직 발견되지 않았으며, 이 사실은 초대칭이 자연에 존재한다면 완벽하게 구현되지 않고 약간이나마 깨어진 방식으로 구현되어 있음을 의미한다. 초대칭의 깨짐 정도가 종종 테라스케일이라 칭하는 약 1 TeV 정도의 전자기-약작용 스케일이면, 보존과 페르미온 초대칭 짝의 힉스입자 질량에 대한 거대한 양자 보정 값은 이 ‘전자기약력 크기’ 정도의 차이만 남기고 거의 정확히 상쇄되어, 미세조정 문제가 자연스럽게 해결된다 [그림 1 참조].

2. 전자기, 약한 그리고 강한 상호작용의 대통일

이러한 자연스러운 미세조정을 제공하는 한편 현재의 모든 입자물리 실험 결과와 잘 맞는 초대칭 이론 모형 중에 가장 간단하고 많이 연구된 것이 ‘초대칭 표준모형’(Minimal Supersymmetric Standard Model = MSSM)이다.^[7] 초대칭 표준모형은 표준모형을 (적당한 방식으로 깨어진) 초대칭을 갖도록 확장한 이론이다. 스핀 1/2인 쿼크와 렙톤의 초대칭 짝입인 초쿼크(squark)와 초렙톤(slepton)들은 스핀 0인 스칼라 입자들이다. 또한 정수의 스핀을 갖는 표준모형의 보존입자들, 즉 스핀 1인 광자, W , Z^0 , 글루온 그리고 스핀 0인 힉스입자들의 초대칭 짝입자들이 존재하는데 각각 포티노(photino), 위노(wino), 지노(zino), 글루이노(gluino), 힉시노(Higgsino)라고 불리는 스핀 1/2인 페르미온이다 [표 1 참조]. 이들 초대칭 입자들은 그 짝입자인 표준모형입자들과 동일한 게이지 상호작용을 하지만, 초대칭 깨짐과 전자기 약작용 대칭성 깨짐으로 질량이 다르게 되고 서로 섞이기도 한다.

REFERENCES

- [6] L. Maiani, Proceedings of the 1979 Gif-sur-Yvette Summer School on Particle Physics, 1; G. 't Hooft, Recent Developments in Gauge Theories, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Cargese, 1979, eds. G. 't Hooft *et al.* (Plenum Press, NY, 1980); E. Witten, Phys. Lett. B **105**, 267 (1981).
- [7] H. P. Nilles, Phys. Rept. **110**, 1 (1984); H. E. Haber and G. L. Kane, Phys. Rept. **117**, 75 (1985); D. J. H. Chung, L. L. Everett, G. L. Kane, S. F. King, J. D. Lykken and L. T. Wang, Phys. Rept. **407**, 1 (2005).

Fig. 2. Evolution of three SM gauge coupling strengths in the SM on the left panel and in the MSSM on the right panel. The masses of supersymmetric particles in the MSSM are assumed to be around 1 TeV.

표준모형 내에서는 그림 2의 왼쪽에 보였듯이 세 가지 상호작용의 결합상수가 모두 일치하는 경우가 없지만, 초대칭 표준모형에서는 초대칭 깨짐에 의한 초대칭 입자의 질량이 1 TeV 정도라면 그림 2의 오른쪽에서 확인할 수 있듯이 이 상호작용들의 세기가 약 10^{16} GeV 정도의 아주 높은 에너지 스케일에서 놀랍게도 잘 일치한다.^[8]

3. 방사보정효과로서의 힉스 메커니즘(mechanism)의 구현

흥미롭게도 초대칭 이론에서 힉스메커니즘이 방사보정효과로 자연스럽게 구현할 수 있다.^[9]

톱 쿼크 질량 m_t 가 150 GeV와 200 GeV 사이인 경우 색소 상호작용 게이지 대칭성은 보존되면서 전자기-약 작용 대칭성의 깨짐이 방사보정을 통해 유도될 수 있는 것이다. 좀 더 구체적으로 보면 대통일 스케일에서 모든 스칼라 입자가 같은 크기의 질량을 가진 것으로 가정하면 재규격화 과정을 거쳐 전자기-약작용 스케일로 내려오면 나머지 쿼크와 렙톤 초입자의 질량제공 항은 양으로 유지되나 힉스입자의 질량제공 항 중 하나가 음의 값을 취하게 되어 전자기-약 게이지 대칭성이 깨지게 되는 것이다.

4. 암흑물질의 입자의 가장 강력한 후보 제공

MSSM을 구성할 때, 중입자의 수를 나타내는 바리온수(baryon number)와 경입자의 수를 나타내는 렙톤수(lepton number)를 보존하지 않는 상호작용도 도입할 수 있지만, 이 항들은 양성자가 너무나 빠르게 붕괴하게 한다.^[10] 이 심각한 현상론적 문제를 피하는 가장 간결한 방법은 표준모형 입자에는 짝(+), 초대칭 입자에는 홀(-)의 값을 갖는 소위 R 우수(parity)가 보존될 요구하는 것이다. R 우수가 보존되면, 초대칭 입자는 항상 쌍으로 생성되고 가장 가벼운 초대칭 입자 LSP(lightest supersymmetric particle)는 붕괴하지 않는 안정된 입자가 된다. 이 LSP는 전기적으로 중성이고, 질량이 테라스케일이며,

Fig. 3. (Left) the allowed M_h region versus X_t and (Right) the mass region of the lighter top squark under the assumption that the lightest MSSM neutral Higgs boson has its mass between 123 and 127 GeV, consistent with the mass value of the recently discovered boson.

약한 상호작용하는 경우에 우주 암흑물질의 구성비를 잘 설명할 수 있다.^[11]

초대칭 표준모형에서의 힉스물리

1. 초대칭 표준모형 힉스입자들의 질량

초대칭 이론의 힉스부분은 가장 단순한 초대칭 표준모형의 경우에도 표준모형 힉스부분과 여러 측면에서 매우 다르다.^[12]

첫 번째로, 초대칭 표준모형에서는 초대칭과 게이지 대칭성을 동시에 가지기 위해서는 표준모형에서와는 다르게 한 개가 아닌 두 개의 아이소-스핀(iso-spin) 이중극(doublet) 복소장들을 도입한다. 이 8개 성분들 중에서 3개의 성분은 약작용 게이지 보존에 성분들로 바뀌어 질량생성에 기여하게 되고, 5개의 스핀 영인 힉스입자가 존재하게 된다. 3개의 입자 h, H, A 는 전기적으로 중성이며 나머지 2개의 입자 $H^\pm$ 는 ± 1 인 전하를 띠고 있다.

두 번째로 힉스 포텐셜의 4중항(quartic term)의 계수는, 임의의 값을 가질 수 있는 표준모형과 다르게, 초대칭 표준모형

REFERENCES

- [8] J. Ellis, S. Kelly and D. V. Nanopoulos, Phys. Lett. B **260**, 131 (1991); U. Amaldi, W. de Boer and H. Furstenau, Phys. Lett. B **260**, 447 (1991); P. Langacker and M.-X. Luo, Phys. Rev. D **44**, 817 (1991); C. Giunti, C. W. Kim and U. W. Lee, Mod. Phys. Lett. A **6**, 1745 (1991).
- [9] L. E. Ibanez and G. G. Ross, Phys. Lett. B **110**, 215 (1982).
- [10] R. Barbier *et al.*, Phys. Rept. **420**, 1 (2005).
- [11] H. Goldberg, Phys. Rev. Lett. **50**, 1419 (1983); J. Ellis, J. S. Hagelin, D. V. Nanopoulos, K. A. Olive and M. Srednicki, Nucl. Phys. B **238**, 453 (1984); G. Jungman, M. Kamionkowski and K. Griest, Phys. Rept. **267**, 195 (1996); G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, Phys. Rept. **405**, 279 (2005).
- [12] A. Djouadi, Phys. Rept. **457**, 1 (2008) [arXiv:hep-ph/053172]; Phys. Rept. **459**, 1 (2008) [arXiv:hep-ph/0503173].

Table 2. Coupling strengths of MSSM neutral Higgs bosons to fermions and gauge bosons normalized to the corresponding ones of the SM Higgs boson.

Φ	g_u^Φ	g_d^Φ	g_v^Φ
SM H	1	1	1
MSSM h	$\cos\alpha/\sin\beta$	$-\sin\alpha/\cos\beta$	$\sin(\beta-\alpha)$
H	$\sin\alpha/\sin\beta$	$\cos\alpha/\cos\beta$	$\cos(\beta-\alpha)$
A	$\cot\beta$	$\tan\beta$	0

에서는 이 계수가 게이지 결합상수로 완전히 결정되기 때문에 양자고리효과를 고려하지 않는 경우에는 가장 가벼운 힉스입자의 질량 M_h 가 Z 보손 질량 $M_Z = 91$ GeV보다도 작아야만 한다. 하지만 다행스럽게도 매우 큰 톱 쿼크의 유가와(Yukawa) 결합상수와 초대칭 붕괴에 따른 톱 쿼크와 톱 초쿼크(squark)의 질량의 차이로 인해 양자고리효과를 고려하면 가장 가벼운 힉스 입자의 질량이 상당히 크게 증가된다. 그 값은 대략적으로 다음 식으로 주어진다.^[13]

$$M_h^2 \leq M_Z^2 + (3G_F M_t^4 / 2\sqrt{2}\pi^2) \times [\log(M_S^2/m_t^2) + (X_t^2/M_S^2)(1 - X_t^2/12M_S^2)] \quad (1)$$

여기서 M_S 는 $\sqrt{M_{\tilde{t}_1} M_{\tilde{t}_2}}$ 로 두 톱 초쿼크 질량의 기하평균이고 X_t 는 두 톱 초쿼크들이 얼마나 섞여 있는지를 나타내는 매개변수이다.

그림 3의 두 가지 관점에서 분석한 그림으로 파악할 수 있듯이 가장 가벼운 힉스의 질량은 이 매개변수들 M_S 와 X_t 에 크게 의존한다. 측정된 허용힉스의 질량영역을 만족하려면 두 톱 초쿼크들은 매우 강하게 섞여 있어야 한다. 반면에 두 힉스 진공기대치의 비 $\tan\beta$ 가 상당히 큰 경우에는 톱 초쿼크는 질량이 500 GeV 정도로 아직은 가벼울 수 있다.^[14]

2. 초대칭 표준모형 힉스입자들의 결합상수

초대칭 표준모형에서의 중성인 힉스입자들의 표준모형 입자들과의 결합상수는 표준모형 힉스의 결합상수에 대해 두 가지 종류의 섞임각들 α 와 β 에 따라 달라진다. [여기서 α 는 CP 우수가 짝(even)인 두 중성힉스의 섞임각을 나타낸다.] 그 결합상수들을 표준모형의 결합상수와 비교하여 나타낸 크기는 위의 표 2와 같다.

양자고리효과를 주어 섞임각 α 는 β 와 CP 우수가 홀(odd)인 힉스입자 A 의 질량 M_A 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tan 2\alpha = \tan 2\beta \frac{M_A^2 + M_Z^2}{M_A^2 - M_Z^2 + \epsilon / \cos 2\beta} \quad (2)$$

$$\epsilon = (3G_F m_t^4 / \sqrt{2}\pi^2 \sin^2\beta) \log(M_S^2/m_t^2)$$

질량 M_A 가 커서 200 GeV 이상이 되면 $\alpha \rightarrow \pi/2 - \beta$ 가 되어 가장 가벼운 힉스 h 의 페르미온과 게이지 입자와의 결합세기는 표준모형의 값에 접근하게 되고 무거운 중성 힉스 H 는 게이지 보손과 결합하지 않게 된다. 더 나아가 h 만 제외하고 다른 힉스 입자들의 질량들이 $M_A \simeq M_H \simeq M_{H^\pm}$ 로 비슷해져 모두 무겁게 된다.

가장 가벼운 힉스만 남기고 나머지는 관측하기 어려워지는 소위 분리영역(decoupling regime)에서는 결합상수가 표준모형 값과 작은 차이를 보이므로 초대칭의 존재 여부를 확인하기 위해서는 매우 정밀하게 결합상수를 측정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 LHC 실험보다 훨씬 더 깨끗한 초기 실험환경을 가진 전자-양전자 선형가속기인 ILC(international linear collider) 실험이 필요할 것이다.^[15]

3. 초대칭 표준모형의 확장이론

125 GeV 힉스입자의 질량을 자연스럽게 설명하기 위한 한 방향으로 초대칭 표준모형을 확장한 이론들을 고려할 수 있다.

그 중에서 가장 대표적인 이론이 힉스부분에 새로운 단일극(singlet) 힉스를 도입하여 확장한 NMSSM(next to minimal supersymmetric standard model)이다.^[16] 이 모형은 원래 초대칭 표준모형이 가지고 있는 소위 μ 문제를 해결하기 위해 제안된 이론으로 이 새로운 중성 단일한 힉스입자의 도입으로 다음의 약간 단순화된 식이 보여주는 것처럼

$$(M_h^{\max})^2 \simeq (M_{h, \text{NMSSM}}^{\max})^2 + \lambda^2 M_Z^2 \sin^2 2\beta + \dots \quad (3)$$

가장 가벼운 힉스입자의 질량을 효과적으로 증가시킬 수 있다.

힉스부분뿐 아니라 게이지 부분도 확장하는 등 다른 여러 가지 방식으로 확장된 이론을 고려할 수 있는데, 일반적으로 이 확장된 초대칭 이론이 대통일 스케일까지 약하게 상호작용한다

REFERENCES

- [13] Y. Okada, M. Yamaguchi and T. Yanagida, Prog. Theor. Phys. **85**, 1 (1991); H. E. Haber and R. Hempfling, Phys. Rev. Lett. **66**, 1815 (1991); J. R. Ellis, G. Ridolfi and F. Zwirner, Phys. Lett. B **257**, 83 (1991).
- [14] A. Arbey, M. Battaglia, A. Djouadi, F. Mahmoudi and J. Ouevillon, Phys. Lett. B **708**, 162 (2012).
- [15] The website, <http://www.linearcollider.org/>, provides us with recent ILC news and developments.
- [16] P. Fayet, Nucl. Phys. B **90**, 104 (1975); H.-P. Nilles, M. Srednicki and D. Wyler, Phys. Lett. B **120**, 346 (1983); U. Ellwanger, M. Rausch de Traubenberg and C. A. Savoy, Z. Phys. C **67**, 665 (1995); S. Y. Choi, D. J. Miller and P. M. Zerwas, Nucl. Phys. B **711**, 83 (2005).
- [17] J. R. Espinosa and M. Quiros, Phys. Lett. B **279**, 92 (1992); G. L. Kane, C. Kolda and J. D. Wells, Phys. Rev. Lett. **70**, 2686 (1993).

Fig. 4. The allowed Higgs mass region in the CPX scenario (indicated by the colorless white areas).

면 가장 가벼운 힉스 입자의 질량은 200 GeV 이하이어야 한다.^[17] 따라서 125 GeV의 힉스입자의 발견은 초대칭론의 관점에서는 이론적으로나 실험적으로 매우 고무적인 것이다.

초대칭 표준모형 힉스입자의 탐색

1. 힉스입자의 탐색

위에서 언급한 것처럼 초대칭 표준모형과 같은 초대칭 이론들에서는 가장 가벼운 중성힉스의 질량이 135 GeV보다는 가벼운 것으로 예상된다. 바로 이런 예측이 LEP 실험 등에서 힉스입자를 발견하려는 강한 동기를 부여해 주었다. 반면에 다른 중성 힉스입자와 하전 힉스입자의 질량은 1 TeV 정도일 것으로 예상되었다.

표준모형 힉스보존의 탐색과 마찬가지로 초대칭 이론에서의 힉스 입자의 탐색은 최대 209 GeV의 에너지 영역까지 LEP 실험을 통해 진행되어 왔다. 모든 실험결과를 종합해 본 결과 힉스-스트랄룽(Higgs-strahlung) 과정 $e^+e^- \rightarrow Zh, ZH$ 와 두 개의 힉스가 생성되는 과정 $e^+e^- \rightarrow Ah, AH, H^+H^-$ 들 중 어느 과정도 의미 있는 신호를 검출하지 못하였다.

이러한 탐색을 기반으로 특정 모형에서 힉스와 유사한 입자의 생성 단면적 크기의 유의미한 상한선을 잡을 수 있지만 가능한 매개변수 영역에 대해 LEP 실험을 통해 M_h 에 대한 직접적인 허용 하한치는 어떤 시나리오가 구현되었느냐에 따라 크게 다르다.^[18] 예를 들어 초대칭 표준모형 톱 초쿼크 부분이 CP 대칭성을 허용한다 내에서 최대로 깨는 소위 CPX 시나리오를 고려하면 그림 4와 같이 거의 제한이 없는 경우도 있다.

하전된 힉스 입자 $H^\pm$ 의 질량도 LEP의 빔 에너지보다 상당히 낮은 약 79 GeV 정도의 하한 값을 가지고 있다.

개략적으로 LHC에서 높은 빔광도(luminosity)를 가지면 가

장 가벼운 힉스입자 h 와 1 TeV까지의 질량을 가진 다른 힉스 입자 $H, A, H^\pm$ 의 생성과정을 통해 초대칭 표준모형의 힉스 부분은 관측될 것으로 기대된다. 그러나 5 종류의 모든 힉스 입자를 발견하는 것은 일부의 영역에서만 가능하다.^[19]

2. 초대칭 입자의 탐색

초대칭이 구현되어 있으면 TeV 근방의 질량을 가진 다수의 초대칭 입자가 존재할 것이고, 따라서 조만간 14 TeV의 충돌 에너지를 가지게 되면 LHC 실험을 통해 이러한 입자들이 충분히 많이 생성될 것으로 기대된다. LHC 실험은 양성자와 양성자를 충돌시키므로 강력을 통한 입자의 생성이 압도적이다. 즉 초대칭 입자의 경우에도 강한 상호작용을 하는 입자인 글루이노와 초쿼크가 주로 생성될 것이다.

LHC 실험을 통해 특히 표준모형의 제1세대 쿼크 u, d 의 초대칭 짝입자의 질량은 이미 TeV 정도 이상이어야 할 것으로 보인다. 반면에 앞에 기술한 계층성 문제의 해결과 고리보정효과를 통해 간접적으로 예측한 것처럼 제3세대 쿼크의 짝입자인 초쿼크는 아직 상대적으로 가벼울 수가 있어 LHC에서 발견될 것으로 크게 기대되고 있는 것이다.

맺음말

새로 발견된 약 125 GeV 질량의 보존입자가 정말로 힉스 입자라면 이는 전자기-약 작용 스케일의 초대칭 이론들에는 매우 고무적인 일이다.

초대칭 이론은 자연스럽게 가벼운 힉스의 질량을 예견하며 초대칭 입자의 존재가 검증되지 않았지만 조만간 LHC의 충돌에너지가 14 TeV가 되고 충분한 빔광도를 가지면(특히 강한 색소작용을 하는) 초입자가 발견될 가능성이 매우 높다.

초대칭의 발견은 20세기 초의 상대론과 양자역학에 버금가는 진정한 의미의 물리학 혁명의 시작을 알리는 것이 될 것이다. 이 발견은 현재는 짐작만 가능한 많은 질문과 과제를 제시할 것이다. 우주 암흑물질, 물질과 반물질 비대칭성 그리고 빅뱅의 근원 등과 같은 천체물리학적 질문들에 명확하게 답을 줄 수도 있다.

결론적으로 요약하면, LHC에서 초대칭의 발견 전망은 아직 밝으며, 125 GeV 질량의 새로운 보존의 발견으로 그 전망이 더욱 밝아졌다.

REFERENCES

- [18] M. Carena, S. Heinemeyer, C. E. M. Wagner and G. Weiglein, Eur. Phys. J. C **26**, 601 (2003).
- [19] For more detailed explanations on SUSY Higgs searches, read the article by Prof. Suyong Choi in this special edition.