힉스 입자 - 탑 쿼크 및 초대칭 현상과의 관계

DOI: 10.3938/PhiT.21.045

최 수 용

Higgs Particle - Its Relationship with the Top Quark and Supersymmetric Theories

Suyong CHOI

The recently discovered 125-GeV particle has yet to be confirmed as the Standard Model Higgs boson. Of particular interest is the top quark, whose coupling to the Higgs boson is expected to be maximal and may play a special role in the electroweak symmetry breaking. We examine how the top quark coupling to Higgs boson can be studied in the near future. If the 125-GeV particle is the Standard Model Higgs boson, that will have implications on supersymmetric theories and new physics beyond the Standard Model.

개 요

최근에 발견된 125 GeV 질량의 입자가 표준 모형(Standard Model)에서 말하는 힉스 입자인지 아닌지가 이론 및 실험가들의 최대의 관심사다.^[1,2] 현재로서는 실험적인 오차가 커서 표준 모형 힉스라고 단정 짓기는 이르다. 힉스 입자의 질량, 스핀 등 각종 양자 수(quantum number) 및 붕괴 양상 등을 실험적으로 측정하고 표준 모형에서 예측하는 값과 비교하는 과정이 필요하다. 이 문제는 단기간에 해결될 것 같지는 않고 LHC에서는 최소한 4~5년 기간이 필요할 것으로 보이며 개념 단계에 머무르고 있는 국제 선형 가속기

(International linear collider)와 같은 차세대 가속기가 필요할 것으로 예상된다.

가까운 미래에 LHC 실험 데이터로 힉스 입자와 탑 쿼크(top quark)와의 상호작용을 연구할 수 있을 것이다. 탑 쿼크 질량과 힉스장의 진공 기대치(vacuum expectation value)의 비는 $v/\sqrt{2}m_t \approx 1.00$ 여서 힉스 입자와의 coupling이 거의 1이라는 뜻이다. 전기-약 대칭성 깨짐에 있어 탑 쿼크가 지금은 모르지만 어떤 특별한 역할을 할 것으로 많은 사람들이 생각하고 있다. 한 가지 흥미로운 사실은 125 GeV라는 값은 Z 입자의 질량($M_Z = 91.2$ GeV)과 탑 쿼크의 질량($m_t = 173.5$ GeV)의 기하 평균, 즉, $M_H \approx \sqrt{M_Z m_t}$ 또는 $M_H/m_t \approx M_Z/M_H$ 이라는 점이다.^[3] 궁극적인 입자 이론이 있다면 이러한 기막힌 우연을 설명할 수 있어야 할 것이다.

궁극적인 이론의 TeV 에너지 대역의 현상에서 초대칭 모형을 빼 놓을 수 없다.^[4] 많은 노력에도 불구하고 초대칭 모형은 아직 그 실재 여부가 불투명한 상태다. 초대칭 모형은 암흑 물질이 될 수 있는 입자가 있고 약 전자기력과 강력이 통일될 수 있는 등 분명 매력이 있는 이론적 모형이다. 입자의 수가 표준 모형 입자의 두 배로 초대칭 입자들이 발견되지는 않았지만 지금까지의 실험적 결과들을 설명할 수 있어 표준 모형을 포함하는 초대칭 이론들은 각광을 받았다. 그러나 LHC에서 먼저 발견되었어야 할 글루이노, 스퀴크 등의 초대칭 입자의 신호는 아직까지 없다.

아직까지 초대칭 현상이 발견 안 된 이유는 초대칭 모형의 많은 이론적 변수들 값에 따라 입자들의 질량이 상당히 클

저자약력

최수용 교수는 Fermi 연구소 D0 실험 데이터로부터 탑 쿼크의 스핀에 관한 연구로 1999년 서울대학교에서 박사 학위를 취득하였고, 2004년부터 2006년까지 미국 D0 실험에서 힉스 입자 탐색 그룹리더로서 활동했다. 성균관대학교 물리학과 교수를 거쳐 현재 고려대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (suyong@korea.ac.kr)

REFERENCES

- [1] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
- [2] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [3] J. Beringer *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012).
- [4] H. Baer and X. Tata, *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events* (Cambridge University Press, 2011).

수 있기 때문이다. 초대칭 모형의 문제점으로 제기되는 넓은 이론적 변수의 가능 영역이 비로소 새로운 입자의 발견과 더불어 상당 부분 줄어들게 되었다. 비교적 간단한 초대칭 모형인 cMSSM(constrained MSSM) 모형은 데이터와 부합하는 이론적 변수값들이 매우 특이해서 그 매력이 반감되었다. 따라서 좀 더 자연스런 모델을 만들고자 하는 시도가 진행 중이다.

탑 쿼크와 힉스 입자

2012년 말까지 CMS 및 ATLAS 실험에서 각각 20 fb^{-1} 이상의 데이터를 수집할 것으로 기대된다. 이는 올해 7월 새로운 입자의 발견을 발표할 때 분석한 데이터의 2배가 넘는 양으로 125 GeV 입자에 대한 새로운 사실들이 밝혀질 것이다. 더욱 정밀한 질량의 측정과 더불어 표준 모형 입자들과의 상호작용에 대해 더 많은 것을 알 수 있을 것이다.

표준 모형 힉스 입자가 쿼크 및 전하를 띤 경입자(전자, 뮤온, 타우)의 coupling은 질량에 비례한다. 따라서 가능한 한 힉스 입자는 무거운 입자로 붕괴하려는 성질을 보인다. 아직까지 새로이 발견된 입자와 페르미온들의 상호작용 여부를 밝히기에는 데이터가 충분치 않았다. 올해까지 수집될 데이터로 페르미온 중 질량이 상대적으로 큰 b-쿼크와 타우(τ) 경입자로 붕괴하는 모드의 연구 결과를 기대할 수 있을 것 같다.

지금까지 확실하게 125 GeV 입자의 존재를 보여준 경우는 광자(photon) 쌍 또는 Z 입자 쌍으로 붕괴하는 경우들이다. 표준 모형에서 힉스입자가 광자 쌍으로의 붕괴는 양자 고리 효과(quantum loop effect)에 의해서만 가능하다. 표준 모형에서는 이 양자 고리에 탑 쿼크가 있는 경우가 거의 대부분의 기여를 하게 된다. 그것은 탑 쿼크의 질량이 표준 모형 입자 중 가장 크기 때문이다. 그러나 표준 모형 힉스인지를 밝히기 위해서는 정말 힉스 입자와 탑 쿼크가 직접 상호작용하는가를 밝혀야 한다. 현재 데이터에서는 125 GeV 입자가 2개의 광자로 붕괴하는 비율이 표준모형 예측값보다 크게 나와 탑쿼크와의 상호작용에 대한 관심이 고조되어 있다.

힉스 입자는 탑 쿼크(t), 반 탑 쿼크($\bar{t}$) 쌍으로 붕괴할 수 있는데 그것은 힉스 입자의 질량이 탑 쿼크 질량의 두 배보다는 작기 때문이다. 따라서 힉스 입자의 붕괴로부터 힉스 입자와 탑 쿼크의 상호작용을 직접적으로 측정할 수는 없다. 다행히도 상호작용을 측정할 수 있는 방법은 탑쿼크-반 탑쿼크 쌍과 더불어 힉스 입자가 나오는 모드($t\bar{t}H$)다.^[5]

125 GeV 질량의 힉스 입자는 대부분 b 쿼크-반 b 쿼크 쌍으로 붕괴할 것으로 기대되어 실험 데이터에서는 $t\bar{t}b\bar{b}$ 모드에서 힉스 입자 신호가 보일 것이다. 문제는 배경 사건 중

Fig. 1. Current measurements on the top quark mass and Higgs boson mass show that the electroweak vacuum is metastable and to achieve stability, new physics must at least enter at 10^{10} GeV.^[7]

에서 $t\bar{t}b\bar{b}$ 가 나올 수 있고 이러한 배경 사건의 크기는 신호의 몇 배가 된다. 최근 CMS 실험에 참여하고 있는 한국 공동 연구자들은 대부분 배경사건이겠지만 $t\bar{t}b\bar{b}$ 모드의 존재의 약한 증거를 세계 최초로 봤다.^[6] $t\bar{t}b\bar{b}$ 모드로 힉스와 탑 쿼크의 상호작용을 연구하기 위해서는 2015년 이후 모을 많은 양의 데이터가 필요하다.

힉스입자와 새로운 물리

125 GeV 입자가 표준 힉스 입자라면 이미 새로운 물리현상에 대해 일반적인 이야기를 할 수 있다. 우리가 우주에 존재한다는 사실은 우주의 진공(vacuum)이 우주 나이 안에서는 안정되어 있다는 것을 의미한다. 표준 모형에서 우주의 진공의 특성은 힉스 퍼텐셜에 의해 결정된다. 이 퍼텐셜은 양자 고리 효과에 의해 변형될 수 있는데 힉스 입자의 질량에 의해 퍼텐셜에 최소값이 존재하지 않을 경우 진공이 불안정해진다고 한다. 원칙적으로는 양자 고리에 아직까지 우리가 모르는 고에너지 현상까지도 포함시켜야 하고 이 경우 어떻게 퍼텐셜 모양이 바뀌는지는 표준 모형 이후의 새로운 물리를 알아야 계산할 수 있다.

RGE(renormalization group equation)을 통해 표준모형의 고에너지 현상이 퍼텐셜에 어떤 영향을 미치는지 계산할 수 있다. 고에너지 현상이 양자고리에 들어왔을 때 진공이 불안정해진다면 우리가 추측할 수 있는 것은 그 에너지 대역에

REFERENCES

- [5] W. Beenakker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 201805 (2001).
- [6] CMS Collaboration, "First Measurement of the cross section ratio $ttbb/ttjj$ in pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV" CMS-PAS-TOP-12-024 (2012).
- [7] G. Degraess *et al.*, "Higgs mass and vacuum stability in the Standard Model at NNLO" arXiv:1205.6497 (2012).

서 vacuum을 안정시킬 수 있는 새로운 현상이 있을 것이라는 것이다. 125 GeV 힉스와 173 GeV 탑쿼크의 존재가 말해주는 것은 현재 진공은 우주 나이보다는 더 오랫동안 그 안정성을 유지할 수 있다는 것이다. 진공이 영원히 안정되기 위해서는 적어도 10^{10} GeV 에너지 영역에서는 새로운 물리 현상이 있어야 한다는 것도 알아냈다(그림 1).

초대칭 모형인 MSSM(Minimal supersymmetric standard model)에서는 전하량이 0인 중성 힉스 입자들이 3개 있는데 이중 가벼운 것은 약 130 GeV 이하일 것으로 예측되고 특정 이론적 변수 영역에서는 표준 모형 힉스와 같이 행동한다. 따라서 125 GeV 힉스 입자만 놓고 보면 초대칭 모형의 예측이 맞는 것처럼 보인다. 그러나 구체적인 힉스 입자의 질량 및 붕괴 양상은 여러 이론적 변수에 의해 결정되고 기존의 데이터와 부합하기 위한 변수의 범위는 어느 정도 제한되어 있다. 경우에 따라서는 힉스 질량의 상한선이 125 GeV보다 작을 수도 있다.

초대칭 모형 중 많이 연구가 되어왔던 cMSSM(constrained MSSM)의 경우 몇 가지 시나리오(AMSB, GMSB)에서 예측하는 힉스 질량은 125 GeV보다 적어 타당하지 않은 시나리오다. cMSSM의 mSUGRA 시나리오도 상당부분 이론적 변수의 범위가 축소됐는데 위계의 문제(hierarchy problem)를 해결하기 위해 만들어진 이론에서 여전히 위계의 문제가 존재하게 되어 모형의 매력이 반감됐다. Split supersymmetry

또는 High-scale SUSY 모형의 경우 가능한 이론적 변수 값들이 많이 줄어들었지만 초대칭이 깨지는 에너지 스케일이 통일장 에너지보다는 한참 낮아 일부 LHC에서 탐색이 가능할 것으로 보인다.^[8] 이러한 다양한 초대칭 모형들은 검출기에서의 신호가 상당히 다를 수 있다. 요즘은 실험적 탐색에 있어서 특정 시나리오를 집중적으로 연구하는 것보다는 다양한 시나리오들의 신호 특성들을 몇 개의 부류로 분류를 할 수 있다는 것에 착안하여 model independent 탐색을 많이 하고 있다. 따라서 고려가 많이 안 된 시나리오들에 대해서도 실험적 연구가 가능하다.

결론

125 GeV 입자가 표준 모형 힉스 입자라는 것을 보이기 위해서는 탑 쿼크와 어떻게 상호작용하는가를 밝혀야 하는 중요한 일이 남아 있다. 만약 이 입자가 표준 모형 힉스일 경우 표준 모형 이후의 가능한 이론적 모형과 초대칭 모형의 이론적 변수 공간에 제약을 가한다. 그러나 여전히 LHC 실험에서 새로운 입자 현상의 발견 가능성은 남아있다.

REFERENCES

- [8] A. Arbey *et al.*, Phys. Lett. B **708**, 162 (2012).