

탑 쿼크(Top quark)의 전후방 비대칭성과 새로운 물리

글_유채현·고등과학원 물리학부 조교수

표준모형(Standard Model)에서 자연계를 이루는 기본 입자들은 여섯 개의 렙톤(lepton)과 여섯 개의 쿼크(quark), 그들의 상호작용을 매개하는 입자, 그리고 그들의 반입자들로 구성되어 있다. 그중에서 탑 쿼크(Top quark)는 질량이 가장 큰 입자이다. 탑 쿼크의 질량은 약 173GeV이다. 이것은 금 원자와 비슷한 수준이며 양성자 질량의 약 185배이다. 다른 쿼크들의 질량은 탑 쿼크보다 최소 40배 이상 낮은 질량을 가지고 있다. 표준모형에서 질량은 힉스장과 상호작용하는 유가와(Yukawa) 항으로 주어진다. 탑 쿼크의 유가와 결합상수는 1에 가까운 숫자를 갖고 있다. 큰 유가와 결합상수 때문에, 탑 쿼크는 발견되기 전부터 전기약작용 이론의 자발적 대칭성 붕괴와 새로운 물리(New Physics)에 대한 단서를 줄 것으로 예상하였다.

탑 쿼크는 1995년에 미국 페르미 국립 가속기 연구소(Fermilab)에 있는 테바트론(Tevatron) 가속기에서 처음으로 발견이 되었으며[1], 이후 2009년 유럽 CERN에서 대형 강입자 충돌기(LHC)에서 재발견이 되었다. 매우 큰 질량 때문에 이 두 가속기에서만 탑 쿼크가 생성되었다. 현재까지 테바트론에서는 약 10^6 개의 탑 쿼크와 탑 반쿼크 쌍이 생성되었다. LHC에서는 4년간 약 10^6 개 이상의 탑 쿼크와 반쿼크 쌍이 생성되었으니, LHC가 “탑 공장 (Top Factory)”라고 불리는 것도 이해가 된다. 내년부터 LHC가 재가동이 되면 더욱 많은 탑 쿼크가 생성되어 탑 쿼크의 성질을 더욱 자세하게 탐구할 수 있을 것이다.

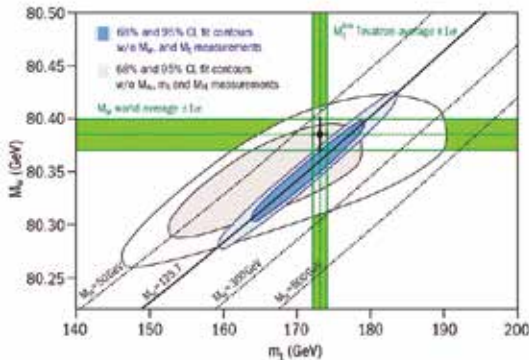


그림 1. 탑 쿼크(t), W 보손, 힉스 보손(H)의 질량 관계

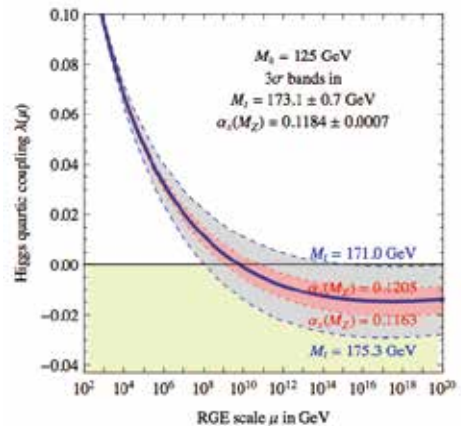


그림 2. 에너지 크기에 따른 힉스 보손의 quartic coupling



탑 쿼크의 성질 중에서 가장 중요한 것 중의 하나는 탑 쿼크의 질량이다. 그림1에서처럼 탑 쿼크의 질량은 게이지 보손의 질량과 힉스 보손의 질량과 관련이 있어서, 세 입자의 질량을 정밀하게 측정하면 표준모형의 검증과 새로운 물리의 단서를 줄 수 있다. 탑 쿼크의 질량의 중요성은 그림2에서도 드러난다. 그림 2는 힉스장의 포텐셜($\mathcal{L}_S = D_\mu \Phi^\dagger D^\mu \Phi - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$) 중에서 quartic coupling λ 의 에너지 크기에 따른 값을 보여준다. 이 값이 음수가 되면 힉스장의 포텐셜이 안정된 진공 기댓값을 가지지 못하게 되고, 진공 기댓값이 불안정한 기댓값을 가지거나 준안정 (metastability) 상태를 가지게 된다. 이런 상태에서는 우주의 진공 기댓값이 더 낮은 에너지로 이동할 수 있어서 자칫 현재의 상태가 급속도로 붕괴할 가능성이 존재한다. 그림 2에서 보듯이 탑 쿼크의 질량이 171 GeV보다 작다면 λ 값이 플랑크 스케일($M_p \sim 10^{18}$ GeV)까지 음의 값을 가지지 않을 수 있다. 테바트론에서 측정된 탑 쿼크의 질량은 173.29 ± 0.87 GeV이고, LHC에서 측정한 값은 173.29 ± 0.95 GeV이다. 두 실험에서 측정한 값이 매우 정확하게 일치하는 것도 놀라운 일이다. 이 값이 의미하는 것은 표준모형만을 고려하면 약 10^{10} GeV 스케일에서 λ 값이 음의 값을 가지게 된다는 것이다. 다른 의미로는 10^{10} GeV 까지는 표준모형 외의 새로운 물리가 존재해야 함을 의미하거나, 진공 기댓값이 준 안정적인 상태로 존재함을 의미한다.

테바트론의 질량 측정이 아직은 LHC보다 더욱 높은 정밀도를 보이고 있지만, 곧 LHC가 테바트론을 추월할 것으로 예상된다. 그러나 테바트론과 LHC의 차이점을 보여주는 관측량이 존재한다. 테바트론은 양성자(p)-반양성자(\bar{p}) 충돌기이지만 LHC는 양성자-양성자 충돌기이다. 테바트론은 초기 충돌이 반전성(parity)에 대해 음의 값을 갖지만, LHC는 양의 값을 갖게 된다. 반전성에 대해 음의 값을 갖는 관측량은 LHC보다 테바트론이 장점을 가지고 있다. 반전성에 대해 음의 값을 갖는 대표적인 관측량이 탑 쿼크의 전후방 비대칭성 (Top forward-backward asymmetry, A'_{fb})이다. 전방 지역은 초기의 양성자의 방향으로 결정되고, 탑 쿼크의 전후방 비대칭성은 전방 지역과 후방 지역에서 생성된 탑 쿼크 개수의 차이에 의해서 정의된다.

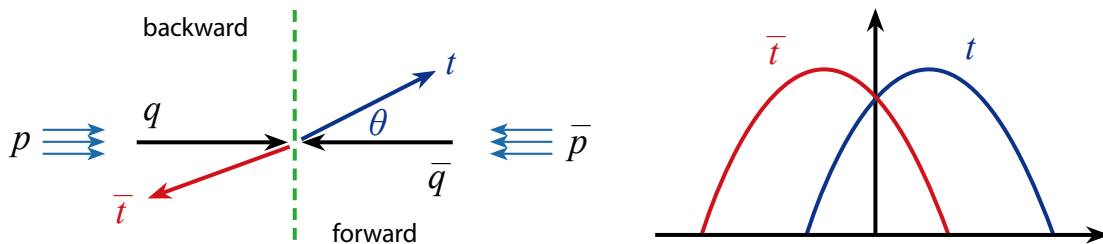


그림 3. 쿼크-반쿼크 충돌에서 전방(forward) 지역과 후방(backward) 지역에서 생성된 탑 쿼크와 탑 반쿼크의 분포도.



탑 쿼크와 탑 반쿼크의 생성은 크게 두 가지 과정에서 일어난다. 하나는 쿼크와 반쿼크가 충돌해서 탑 쿼크와 탑 반쿼크가 생성되는 과정($q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$)이고, 다른 하나는 두 개의 글루온이 충돌해서 생성되는 과정($gg \rightarrow t\bar{t}$)이다. 글루온들이 충돌하는 경우는 반전성에 대해 양의 값을 가지므로 전후방 비대칭성이 영이 된다. 그러나 쿼크-반쿼크 충돌은 반전성에 대해 음의 값을 가지므로 전후방 비대칭성이 영이 아닌 값을 가질 수 있다. 강한 결합 상수(QCD coupling constant)의 가장 낮은 차원에서는 전후방 비대칭성이 영이 되지만 높은 차원의 보정을 합하면 전후방 비대칭성이 약 0.05의 값을 갖게 된다. 양의 전후방 비대칭성 값은 그림 3에서 이해될 수 있다. 쿼크와 반쿼크는 각각 양성자와 반양성자의 파톤일 확률이 가장 높다. 그 이유는 쿼크는 양성자의 원자가 쿼크(valence quark)이지만 반쿼크는 양성자의 바다 쿼크(sea quark)이고, 반대로 반쿼크는 반양성자의 원자가 쿼크이지만 쿼크는 반양성자의 바다 쿼크이다. 그리고 바다 쿼크보다 원자가 쿼크가 상호작용에 참여할 확률이 훨씬 높다. 강한 상호작용의 쿨롱 포텐셜(Coulomb potential) 때문에 쿼크는 같은 컬러 전하(color charge)를 가지는 탑 쿼크를 밀어내고, 반대의 컬러 전하를 가지는 탑 반쿼크를 끌어당기게 된다. 마찬가지로 반쿼크는 탑 반쿼크를 밀어내고, 탑 쿼크는 끌어당긴다. 결과적으로 그림 3에서 보듯이 탑 쿼크는 전방 지역에서 더 많은 분포를 보이고, 탑 반쿼크는 후방 지역에서 더 많은 분포를 보이게 된다. 이 분포도 차이가 전후방 비대칭성의 근원이다.

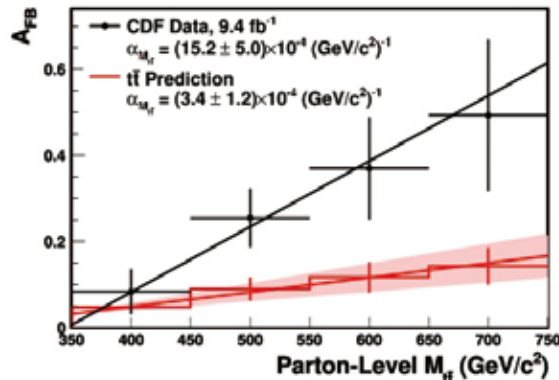


그림 4. 탑 쿼크-탑 반쿼크 쌍의 불변 질량에 대한 전후방 비대칭성

2008년 테바트론의 CDF 연구단에서 처음으로 탑 쿼크의 전후방 비대칭성을 측정하였다[2]. 이후 D0 연구단에서도 측정되었는데, CDF의 관측량이 표준모형의 예측으로부터 약간 벗어난 결과를 보이고 있다. 탑 쿼크 또는 탑 반쿼크 중의 하나는 렙톤과 젯(jet)으로 붕괴하고 다른 하나는 모두 젯으로 붕괴하는 과정에서 가장 최근의 관측 결과는 CDF에서는 $A'_{fb} = 0.164 \pm 0.047$ 이고, D0에서는 $A'_{fb} = 0.106 \pm 0.030$ 이다. CDF의 결과는 표준모형의 예측으로부터 2σ 이상 떨어져 있어서 표준



모형을 벗어난 새로운 물리에 대한 힌트로 볼 수 있다. D0의 마지막 결과는 표준모형과 CDF의 결과 사이에 있지만, 최초로 D0에서 발표한 결과는 CDF처럼 표준모형으로부터 2σ 이상 떨어져 있었다. CDF의 결과가 더욱 흥미로운 것은 그림 4에서 보듯이 탑 쿼크-탑 반쿼크의 불변질량이 작은 쪽에서는 어느 정도 표준모형의 예측과 같지만, 큰 쪽에서는 표준모형의 예측과 매우 큰 차이를 보이고 있다는 것이다. 불변 질량이 큰 영역에서 차이는 3σ 이상을 보이고 있다. 이 차이가 표준모형을 벗어난 새로운 물리에 의해 주도된다고 하면 흥미로운 결과를 도출할 수 있다. 이 그래프에서 불변 질량이 매우 큰 영역에서 값이 내려가게 되면 탑 쿼크보다 무거운 입자가 1TeV보다 작은 영역에서 존재한다는 것을 강하게 암시하고 있다. 불변질량이 매우 큰 영역에서 그래프가 떨어지지 않으면 무거운 입자의 질량이 매우 무거우리라는 것을 암시한다. 그림 4로부터는 그래프가 떨어지게 되는지 아니면 계속 증가하는 형태를 보이는지 알 수가 없다. 테바트론이 2011년에 가동이 중단되어 더는 데이터를 얻을 수 없는 것이 안타까울 뿐이다.

2σ 에서 3σ 정도의 차이를 새로운 물리의 신호로 보기에는 적절치 않을 수 있다. 과거 많은 실험에서 2σ 이상의 차이를 보였지만, 결국 더 많은 데이터가 쌓이게 되면 표준모형의 예측대로 수렴해가는 경우가 왕왕 있었기 때문이다. 그러나 이 신호를 무시하는 것도 적절치 않은 일일 것이다. 1980년대에 PETRA 실험에서 중심에너지가 34 GeV로 두고 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 과정에서 각분포를 측정을 하였는데, QED(양자동역학)의 예측과 미묘하게 다른 결과가 나왔다. 이것은 나중에 질량이 90 GeV인 Z 보손의 교환 때문에 생겼다는 것이 밝혀졌다. 이처럼 탑 쿼크의 전후방 비대칭성이 표준모형을 넘어서는 물리의 존재를 암시하는 것일 수 있다.

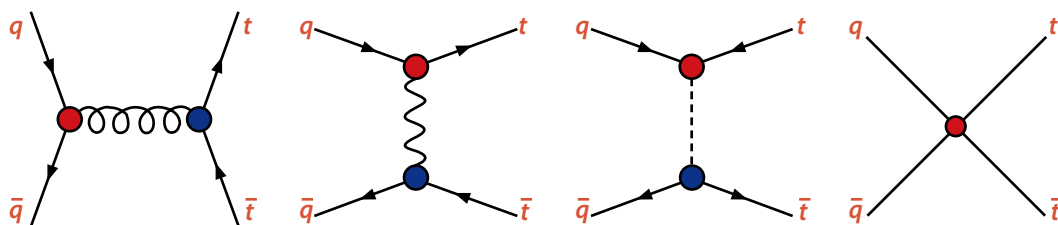


그림 5. s 채널, t 채널, u 채널, 접촉 상호작용들이 탑 쿼크-탑 반쿼크 쌍생성에 기여하는 파인만 그림들

처음 CDF에서 실험 결과가 발표된 이후로 테바트론의 탑 쿼크 전후방 비대칭성을 설명하기 위해서 많은 새로운 모델들이 제안되었다. 새로운 모델들은 그림 5로 분류될 수 있다. s 채널에 새로운 입자가 교환되는 모델들은 axigluon 모델, KK 글루온 모델 등을 들 수 있다. t 채널에 새로운 입자가 교환되는 모델들은 맛깔(flavor)에 비대각인 결합상수를 가지는 Z' 모델, W' 모델, 스칼라 입자가 교환되는 모델 등을 들 수 있다. 그 외에 색삼중항(color-triplet) 쌍쿼크(diquark) 모델의 스칼라



입자는 표준모형의 게이지 전하가 $(\bar{3}, 1, -4/3)$ 이어서 그림 5의 세 번째 그림과 같은 u 채널 교환 과정이 존재할 수 있다. 또한, 새로운 입자의 질량이 매우 크면 테바트론의 에너지 영역에서는 마지막 그림과 같은 접촉 상호작용을 하는 것으로 보인다. 이와 같은 새로운 모델들의 조건은 전후방 비대칭성을 설명함과 동시에 다른 많은 표준모형과 일치하는 관측량에 미치는 영향은 적어야 한다. 예를 들면 탑 쿼크와 탑 반쿼크 쌍생성의 산란 단면적은 표준모형의 예측과 일치하고 있어서, 새로운 모델의 예측이 산란 단면적 실험값의 오차범위 내에 있어야 한다. 그 외에도 새로운 물리가 테바트론과 LHC에서 측정된 표준모형과 일치하는 많은 관측량의 오차범위 내에 있어야 한다. 특히 LHC에서는 매우 많은 수의 탑 쿼크가 생성되어서 관측량이 더 정교해지고 있다. 위에서 언급한 많은 모델은 이미 LHC 실험으로 이미 배제되었거나 거의 배제되고 있다. 필자와 동료들은 탑 쿼크의 전후방 비대칭성과 관련하여 카이랄(chiral) $U(1)$ 모델을 제시하였다[3]. 이 모델은 맛깔(flavor)에 비대각인 결합상수를 가지는 Z' 모델을 일반화시킨 모델이라 할 수 있다. 이 모델에서 새로운 힉스 장들이 도입되어야 함을 밝혔고, 새로운 힉스 입자들 덕분에 LHC의 몇몇 실험의 제약들을 피해갈 수 있음을 밝혔다. 테바트론은 이미 실험을 중지하여서 더는 새로운 모델들을 검증할 수 없다. 그러나 내년부터 다시 LHC가 13 TeV의 에너지에서 가동되면 필자의 모델을 비롯한 아직 배제되지 않고 있는 다른 모델들을 검증 또는 배제할 수 있을 것으로 생각된다. LHC 실험이 6년 동안 지속한 테바트론의 탑 쿼크 전후방 비대칭성에 대한 해답을 주기 바란다.

References

- [1] F. Abe et al. [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. 74, 2626 (1995).
- [2] T. Aaltonen et al. [CDF Collaboration] Phys. Rev. D 83, 112003 (2011).
- [3] P. Ko, Y. Omura and C. Yu, Phys. Rev. D 85, 115010 (2012); JHEP 1201, 147 (2012); Eur. Phys. J. C 73, 2269 (2013).