LHC에서의 새로운 입자 발견의 의의와 전망

DOI: 10.3938/PhiT.21.047

김 동 희

Future Prospects and Significance of New Particle Discovery at the LHC

DongHee KIM

A Higgs-like particle has been discovered by both the CMS and the ATLAS experimental group at the LHC. The CDF and D0 experimental groups at the Tevatron also claim to have evidence for the existence of the new particle in the range. The significance of and the future prospects for the new particle discovery during the next forty years are discussed. This discovery will have a big impact on not only the LHC running plan for the next 10 years but also future accelerator projects. Finally, worldwide efforts in future collider physics will be introduced in terms of several accelerator projects.

힉스입자로 여겨지는 새로운 입자가 LHC 가속기의 CMS^[1]와 ATLAS^[2] 실험 그룹에 의해 공식적으로 확인되고 연이어 테바트론 가속기를 이용한 실험인 CDF와 D0 그룹은 이를 뒷받침할 만한 증거^[3]를 내놓았다. 1995년 공식적으로 톱쿼크가 발견되고 힉스입자 등 다른 새로운 입자를 찾으려고 노력한 지 17년이 지나 새로운 입자가 발견된 지금까지의 기간 동안 입자물리학계에는 새로운 물리 현상의 발견을 위하여 많은 변화가 있어왔다. 1995년 즈음에 CERN의 LHC가 태동하여 가속기 및 검출기의 설계 및 제작이 시작되었고 페르미

연구소의 테바트론 가속기는 에너지를 올리고 검출기의 대폭적인 보강을 한 상태로 가동을 시작하여 새로운 입자의 발견에 집중하고 있었다.

작금의 LHC는 작동을 시작한 지 2년 여 밖에 되지 않았고 본래 목표 에너지의 절반 수준인 7~8 TeV에서의 순조로운 작동을 뒤로 하고 14 TeV 작동을 위한 준비 과정으로서의 가속기 보완이 향후 2년 여 계획되어 있다. 이에 최근에 발견된 새로운 입자 발견의 의의를 중장기로 나누어 LHC 14 TeV를 중심으로 향후 10년여를 예측하고 더 나아가 2050년 정도까지의 입자 물리 분야를 조망하고자 한다.

LHC 14 TeV: 향후 10년

테바트론보다 에너지와 데이터 획득의 양에서 압도적으로 우위인 LHC는 2008년 9월 가동을 시작한 지 일주일 남짓 지나 작동에 문제를 일으킨다. CERN이 2010년 가을 LHC가 본래 목표 에너지보다 두 배 낮은 7 TeV에서 가동을 시작할 때만 해도 LHC 가속기의 턱없이도 느린 데이터 획득의 양에 경쟁력을 상실할 것 같았던 테바트론은 가동 연장을 꿈꾸고 있었다. 그러나 7 TeV에서의 가동이 정상으로 되지만 하면 테바트론은 경쟁력을 상실할 것이라는 것은 불을 보듯 뻔하므로 과감히 가동 종료를 선언한 게 2011년 9월, 그 당시에 LHC는 이미 많은 새로운 입자 탐색 분야에서 테바트론의 결과를 훌쩍 뛰어넘고 있었다.

표준모형 예측에서 마지막으로 남은 힉스 입자는 2011년 3월까지만 해도 테바트론의 결과가 선도적이었는데 LHC의 CMS 및 ATLAS 그룹이 여름부터 압도하기 시작했다. 2011

저자약력

김동희 교수는 미국 시라큐스대학에서 입자물리실험으로 박사(1990)학위를 받았다. 미국 페르미연구소에서 연구원으로 활동(1990-1992)하였으며 현재 경북대학교 물리학과 교수(1993-)이자 WCU 고에너지 충돌 물리 연구 사업단장(2009-)이다. 주 연구 분야는 강입자 충돌을 통한 새로운 입자 탐색으로 테바트론의 CDF 실험과 CERN의 LHC의 CMS 실험에서 새로운 물리 현상의 탐구에 공헌하고 있다. (dkim@knu.ac.kr)

REFERENCES

- [1] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012).
- [2] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012).
- [3] CDF and D0 Collaboration, Phys. Rev. Lett. **109**, 071804 (2012).

년 겨울의 결과는 질량이 114 GeV에서 127 GeV 영역까지의 13 GeV라는 매우 좁은 밴드 안에 힉스 입자 존재 유무를 설정해 놓았다. 다른 한편으로 두 그룹은 공히 125 GeV 근처에서 약하지만 신호를 포착했다. 연이어 2012년 여름에 이 영역에서 발견이 되었다. 다만 아직 표준모형에서 예측하는 힉스 입자로 단정 짓기에는 이른 감이 있다.

이를 확신하기 위해서는 몇 가지 측정이 필요하다. 힉스처럼 여겨지는 입자가 125 GeV 질량의 가벼운 영역에 존재하므로 무거운 질량의 입자에 비해 상대적으로 양산하기 쉬우므로 새로운 입자와 다른 여타 기본입자와의 상호작용의 연구가 용이하다. 우선은 스핀 1/2의 경입자와 쿼크들과 힉스가 어떻게 상호작용하는가 하는 표준모형의 예측을 확인하는 것이다. 예를 들어 힉스가 타우 쌍으로 붕괴하는 채널에서 입자의 확인은 상대적으로 매우 급하다.

이와 아울러 입자의 스핀의 양을 알아내야 한다. CMS는 매우 복잡한 분석 방법을 통해서 발견된 입자가 보존이라는 것을 알아냈으나 스칼라입자인지는 아직 확인되지 않고 있다. 설령 LHC가 입자의 스핀이 얼마인가를 알아낼지라도 이 새로운 보존이 다른 입자와의 상호작용의 형태를 얼마나 정확하게 측정할 수 있느냐는 전혀 다른 문제이다. 새로운 입자에 대한 LHC 실험의 현재 결과는 오직 30에서 40% 정도의 측정 오차로 표준모형의 예측과 일치하고 8 TeV의 실험이 끝나는 내년 초에 약 20%까지 오차를 내릴 수 있으며 향후 10년 여 수 %까지 오차^[4]를 줄일 수 있을 것이다. 다른 한편으로 만약 125 GeV의 힉스입자가 맞다면 질량의 크기가 다른 많은 이론적 모형에 제한을 줄 수 있다. 예로 만약 새로운 입자가 힉스입자라면 초대칭 모형의 3세대 초대칭 입자인 스톱 쿼크의 질량이 그리 무겁지 않은 1 TeV 이하일 것으로 많은 모형이 예측한다. 즉, 가벼운 힉스는 다른 여러 입자의 질량에 제한을 주어 그 존재 유무를 확인시켜 주는 것이다.

일반적으로 표준모형 외의 다른 입자들이 발견되지 않았을 지라도 표준모형이 자연을 부분적으로 설명한다는 불안전성에는 이의가 없다. 이는 우리가 아직 모르는 새로운 형태의 물리 현상이 존재할 수도 있을 것이라는 반증이 될 수도 있기 때문에 다른 새로운 입자 존재 가능성을 LHC 실험을 통하여 찾고 있다. 우선 기존의 표준모형을 간단하게 확장함으로써 제시되는 새로운 게이지보존인 Z' 및 W' 입자의 탐색이 있을 수 있고 기존의 4차원 시공간 외에 차원이 부가적으로 있음으로 예측되는 그래비톤 등 각종 입자, 페르미온과 보존의 대칭을 부여하여 그로부터 파생되는 초대칭 입자들 등 많은 가능한 새로운 입자들이 LHC를 통하여 발견되어질 수가 있다. 에너지가 높아짐으로 테바트론 실험으로는 볼 수 없었던 TeV 영역에서 사건들이 모든 붕괴 채널에서 나타나기 시

Fig. 1. Example of very high transverse mass events from a single lepton(electron and muon) channel. A number of events show the energy greater than 800 GeV. Of particular, the electron channel has 2.3 TeV event while background in the region is estimated at the level of 10^{-3} . The events could be due to the statistical fluctuation but could also be the low energy tail of the real particle. Both the CMS and the ATLAS have this kind of characteristics in the events in many channels. Therefore it is very important to run at 14 TeV to untangle.

작했으며 이들이 무엇이라고 단정짓기에는 시기상조일지라도 주의 깊은 분석이 필요한 것은 사건들이 새로운 입자의 낮은 에너지 영역에서의 꼬리일지도 모르기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 더 높은 에너지에서 탐색하는 것이 매우 중요하다.

이렇듯 힉스라 여겨지는 입자의 17년여 만에 발견이라는 쾌거는 우리가 모르는 다른 새로운 입자가 있을지도 모른다는 상상을 더해 줄 뿐이다. 기실 LHC는 본래 설계에너지에서 가동하고 있는 것이 아니므로 이런 상상은 충분히 실재가 될 수 있다. 지난 2년여 7~8 TeV의 에너지에서 가동한 LHC가 14 TeV의 에너지에서 가동된다면 무엇이 튀어 나올지는 전혀 예측이 가능치 않다. 실제로 지금 다른 중요 채널에서 여태껏 보지 못했던 높은 에너지의 사건이 계속 튀어나온다. 이것이 통계적 요동일 수도 있지만 다른 한편으로 빔 에너지가 닿지 못하는 영역에서의 새로운 입자의 존재 가능성을 부인할 수도 없다.

보통 입자 검출기에서 전자나 뮤온 등의 경입자의 검출은 쿼크 등에 비해 물질과의 상호작용이 전자기적 작용으로 인해 그 행태가 쿼크 등이 물질과 반응하는 정도에 비해 비교적 간단하여 매우 좋은 검출 효율의 경입자 검출기가 만들어진다. 이에 CMS와 ATLAS 그룹도 예외는 아니어서 CMS의 경우 $PbWO_4$ 결정을 사용하여 수% 내의 분해능으로 전자나 광자를 검출하여 그 에너지를 알 수 있게 된다. 그러므로 전자 등의 경입자로 붕괴하는 채널의 연구는 새로운 물리 현상의 탐색에 있어 매우 중요하다. 현재 비록 7~8 TeV 에너지

REFERENCES

- [4] M. Chalmers, Nature **488**, 572 (2012).

의 상황에서 일지라도 매우 높은 에너지의 사건들이 나타나는데 주목한다.

그림 1은 8 TeV에서의 한 개의 경입자 붕괴를 통해 재구성한 횡질량 분포^[5]이다. 800 GeV 이상의 영역에서 신호로 보이는 사건들이 많음을 알 수 있다. 특히 전자 채널에서는 2.3 TeV의 사건이 있고 이 영역에서 배경사건은 10^{-3} 정도이다. 7 TeV 데이터^[6]에서도 나타난다. 이러한 현상은 경입자 쌍으로 붕괴하는 채널의 불변 질량 분포^[7]에서도 공히 나타나며 그 외 다른 채널에서도 예외가 아니다. 이들이 과연 단순 통계요동인지 아니면 새로운 입자의 낮은 에너지의 꼬리인지는 현재로서는 모른다. 8 TeV의 에너지와 14 TeV의 양성자-양성자 충돌 시에 새로운 사건이 일어날 확률은 10배 이상으로 커지므로 TeV 에너지 영역에서 새로운 물리 현상의 존재 여부를 알기 위해서 14 TeV에서의 데이터 획득은 매우 중요하다.

2013년 2월까지 8 TeV에서의 데이터 획득을 수행하고 LHC 가속기는 작동이 중단되고 14 TeV에서의 가동을 위하여 향후 약 2년여 동안 가속기 부품을 교체한다. LHC는 향후 10여 년 동안 14 TeV라는 더 높은 에너지에서 더 많은 데이터를 이용하여 발견된 새로운 입자의 성질을 측정하는데 주력할 것이다. 이와 아울러 본래 설계 에너지인 14 TeV를 넘어서는 대기권이 새로운 입자의 발견과 함께 LHC에 의해 기획되고 있다.

입자물리실험 조망: 향후 40년

앞으로 10년 정도의 14 TeV에서의 LHC의 가동 이후 CERN은 향후 40년 동안에 지금의 LHC 링에서의 실험에 대한 모든 가능성을 타진하고 있다. 2018년 정도까지 14 TeV의 양성자-양성자 충돌 실험을 수행한 후에 Super-LHC라 불리는 가속기와 검출기의 대규모 업그레이드를 거쳐 방대한 데이터의 획득을 위한 고휘도 환경에서의 14 TeV 충돌(HL-LHC: High Luminosity - LHC) 실험이 2030년 정도까지 계획되어 있다. HL-LHC 후는 가능한 시나리오가 몇 개 있을 수 있다. 우선 2030년대에는 LEP3라 불리는 250 GeV에서의 전자-양전자 충돌을 통하여 연간 수만 개의 힉스 입자를 만들어내어 물리현상의 정밀 측정을 꾀하려는 시나리오가 있다. 2040년대에 양성자-양성자 충돌에너지를 33 TeV(또는 28 TeV)로 높여 새로운 물리현상의 탐색에 진력한다는 계획^[8]이다.

LHC가 강입자 충돌 가속기로서의 설계에너지인 14 TeV 및 고휘도 환경에서의 HL-LHC와 더 높은 에너지의 HE-LHC는 현재와 미래의 기술 발전이라는 측면에서 주어진 LHC링

Fig. 2. Scattering Cross-section of various phenomena according to the beam energy. Solid line indicates 8 TeV pp collisions at the LHC. Dashed lines indicate 1.99, 7, 14 and 33 TeV in turn. A linear increase in energy gives exponential increase in the cross-section.

에서 가능한 것으로 여겨진다. 이에 반하여 LEP3는 LHC 터널 내에 새로운 링을 건설하여 전자-양전자를 새로이 발견된 입자의 질량에 맞추어 양산하겠다는 시나리오이다.

표준모형의 엄중한 검증은 위해서는 힉스와 다른 입자의 상호작용 등 여러 관련 물리 현상을 1% 이내의 오차로 측정해야 한다. 이 정도의 정확성을 가진 이론적인 계산 결과가 몇 년 내에 나올 수 있는 반면에 LHC를 사용하여 1% 내로 측정하는 것은 불가능하다. 양성자-양성자 충돌인 LHC 가속기는 새로운 입자의 발견에 용이한 강입자 충돌형 가속기이므로 정밀 측정을 위한 가속기는 아니기 때문이다. 정밀 측정을 가능케 하는 가속기는 경입자를 빔으로 쓰는 경우이다.

LHC가 작동하고 있는 현재 발견을 위한 계기로서 사명을 수행하고 있으므로 차세대가속기로서 경입자 충돌형 가속기가 좋은 추천 계기가 된다. 경입자는 기본입자이므로 그들이 충돌 전 가지고 있는 에너지 모두가 충돌 후 생성되는 입자

REFERENCES

- [5] ICHEP(International Conference on High Energy Physics) presentation, Melbourne, Australia, July 7 2012.
- [6] CMS Collaboration, Journal of High Energy Physics **08**, 023 (2012).
- [7] CMS Collaboration, Phys. Lett. B **714**, 158 (2012).
- [8] The LHC, High Energy Frontier, The European Strategy for Particle Physics Symposium, Krakow, 10-12 Sept 2012.

Fig. 3. A possible scenario of the LHC for the next forty years. The LHC is being planned to run at high luminosity(HL-LHC) environment after 14 TeV running. The e+e- particle factory(LEP3) and 33 TeV high energy LHC(HE-LHC) are under planning after the HL-LHC. The plan after the HL-LHC phase is under discussion.

들의 에너지로 쓰일 수 있다. 그러므로 새로이 발견된 입자의 질량에 에너지를 맞추어 경입자를 충돌시키면 엄청난 양의 입자를 생성시킬 수가 있다.

하나의 선택으로서 현재 존재하는 LHC 링 주위로 새로운 가속기 링을 설치하여 전자와 양전자를 충돌시키는 것이다. 이를 LEP3라 하는데 이 제안은 빔 당 120 GeV를 생성시켜 240 GeV의 전체에너지를 얻어 힉스입자를 생성시킬 수 있다. 최근의 기술의 발달로 충돌물을 매우 크게 하여 엄청난 양의 힉스 입자를 양산할 수 있다. LEP3의 장점은 현존하는 LHC 입자 가속기의 부분을 재사용할 수 있고 CERN이 보유하고 있는 최첨단의 데이터 획득, 유지 등의 전문성을 이용할 수 있다는 점이다. 이 점들이 소요 비용을 절감할 수 있는 요소인데 LHC 건설비용인 60억 달러의 3배에서 6배까지 절감할 수 있어 LEP3 건설비용은 10억에서 20억 달러 정도로 추산된다. LHC 터널 자체가 LHC 링을 제거하지 않고 새로운 경입자 충돌가속기를 건설할 수 있게 되어 두 형태의 가속기가 동시에 작동할 수 있도록 설계되어 있는 장점이 있다.

이러한 장점에도 불구하고 LEP3는 예정 에너지인 240 GeV 이상 에너지를 올릴 수는 없어 힉스보다 훨씬 무거운, 있을지도 모르는 어떠한 입자도 연구하지 못하는 단점이 있다. 만약 LHC가 향후 초대칭 입자, 부가차원에서의 입자 또는 힉스보다 무거운 새로운 입자를 발견할 경우를 상정하면 문제는 자명하다. LEP3의 정해진 링의 크기 때문에 싱크로트론 복사로 인한 에너지 잃음이 너무 강하여 에너지를 올리질 못하므로 힉스보다 더 무거운 입자를 양산하는 것은 불가능하기 때문이다. 오직 가능한 방법은 터널의 반경을 늘리는 것이므로 이는 새로운 터널의 건설이 요구된다.

또 다른 힉스 공장의 가능성으로서 둘레가 약 1.5 km 정도로서 LEP3 링보다 훨씬 크기가 작은 뮤온 충돌 가속기^[9]를 예로 들 수 있다. 뮤온이 전자보다 약 207배 더 무거우므로

싱크로트론 복사로 인한 에너지 잃음이 매우 작기 때문에 전자가속기보다 훨씬 짧은 둘레의 가속기가 가능하다. 이에 덧붙여 향후 에너지를 올리는 것 또한 가능하다.

전자가속기에 비해 상대적으로 강한 장점에도 불구하고 뮤온 충돌 가속기는 뮤온 자체가 2.2 마이크로초의 수명을 가지고 이들이 전자와 중성미자로 붕괴하는 성질 때문에 이의 건설에 기술적인 문제가 있다. 물론 뮤온의 수명은 보통 원자 이하의 세계에서 입자의 수명이 나노 초 이하인 것들에 비해 매우 긴 시간이라는 하지만 공학적인 관점에서는 계기적으로 조정이 매우 어려운 짧은 시간이다. 가속기에서 뮤온이 생성되면 양성자빔을 금속 표적에 때려 생성되는 입자들 중에 뮤온을 골라내어 이들을 모아서 빔으로 만들어 가속시켜야 하는데 이 모든 것이 짧은 수명을 고려해 뮤온이 다른 입자로 변하기 전에 수행되어야 하는 기술적 난관이 있다. 기술적 문제가 쉽지 않음으로 가능할지는 두고 볼 일이다.

1980년대에 시작된 수백 GeV급의 선형가속기에 대해서 전 세계의 연구소와 대학들의 콘소시엄에 의해 국제선형가속기(ILC: International Linear Collider)^[10] 연구가 지속되고 있다. 이 가속기는 약 30 km 길이의 0.5 TeV와 단계적으로 1 TeV까지 에너지를 올릴 수 있도록 이미 알려진 초전도 가속 기술을 채택하고 있다. 즉 기술적으로 증명되어 건설하기 용이하다. 그러나 전체 소요 비용이 약 67억 달러로 추정되고 있다. ILC는 가속기뿐만 아니라 검출기 영역에서 차세대검출기에 관한 R&D를 오래 전부터 수행해 오고 있고 이를 바탕으로 ILC 검출기^[11]에 대한 설계 등을 해오고 있다. 다른 한편으로 CERN에 의해 주도되고 있는 CLIC(Compact Linear Collider)는 길이가 거의 50 km 정도이고 궁극적으로 3 TeV 에너지 도달을 위해 새로운 가속 기술을 제시했다. 그러나 CLIC은 ILC 프로젝트에 비하여 초기 단계이므로 구체적 소요 비용 등이 제시되지 않고 있다.

ILC과 CLIC의 설계는 이론적으로 폭넓게 연구되어 왔지만 이들이 건설되어 순조롭게 작동될지는 불투명하다. SLAC의 100 GeV 정도의 에너지의 SLC(Stanford Linear Collider)가 순항을 하는데도 많은 기간이 필요하였고 특히 원하는 양의 luminosity를 얻는데 애를 먹은 경험으로 미루어 ILC 또는 CLIC은 훨씬 더 어려운 전망이다. 그럼에도 불구하고 많은 물리학자들은 선형가속기를 LHC에 이은 차세대가속기로 여기는데 주저하지 않는다. 우선 힉스입자의 검증을 위하여

REFERENCES

- [9] E. Hand, Nature **462**, 260 (2009).
- [10] ILC Technical Progress Report, ILC-Report-2011-030.
- [11] ILC Physics and Detectors, 2011 Status Report, ILC-Report-2011-033.

Fig. 4. Schematic diagram^[12] of International Linear Collider. Total length is about 31 km.

250 GeV로 가동을 시작하고 500 GeV까지 에너지를 업그레이드하는 단계를 거친다. 이 단계에서 힉스가 어떻게 그 자신과 반응하며 톱쿼크 같은 가장 무거운 입자와 어떻게 상호작용하는지를 연구할 수 있다. 500 GeV보다 더 높은 에너지로 올리는 것 또한 가능하다.

다른 한편으로 ILC 등은 건설에 막대한 비용이 요구되므로 각 나라의 비용 분담, 어느 나라가 유치하느냐 하는 등의 숙

제가 있다. 앞서 밝힌 대로 LHC는 14 TeV에서의 양성자-양성자 충돌의 가동을 향후 10년여 할 것이다. 이 기간 동안에 인류가 몰랐던 새로운 물리 현상이 발견될지도 모른다. 금년 발견된 새로운 입자와 더불어 14 TeV 에너지에서 발견될지도 모르는 새로운 물리현상은 ILC 같은 차세대가속기 프로젝트의 현실화에 커다란 도움이 될 것이다.

향후의 이러한 옵션들은 자신이 생존해 있는 이 우주를 이해하고자 하는 본능에 집착을 보이는 인류의 알고자 하는 노력의 일환이다. 아무리 많은 시간이 소요된다 할지라도 인류의 모험과 도전은 계속될 것이며 이는 인류가 다른 동물과는 다른 독보적인 개체라는 것을 증명하는 또 다른 반증이기도 하다.

REFERENCES

- [12] ILC web, <http://www.linearcollider.org/about/What-is-the-ILC/Facts-and-figures>.