새로운 에너지에서의 LHC 물리

DOI: 10.3938/PhiT.22.058

김 동 희

14-TeV LHC

DongHee KIM

Since the discovery of the Higgs particle, great expectations have existed that new phenomena may be found at new energies. The LHC is being prepared for an increase in energy to 13 (14) TeV and for the start of operation a year from now. Here, the physics potentials at the new energy of the LHC will be stressed.

힉스입자의 발견은 표준모형의 완성이라는 측면에서 괄목할 만하다. 그렇다고 표준모형에서 마지막으로 예측되는 입자가 발견되었다고 우리가 우주의 모든 물리적 현상을 이해한 것은 결코 아님은 자명하다. CMS와 ATLAS 실험 그룹은 힉스입자 탐색 연구 토픽을 제외하고도 150여 가지가 넘는 새로운 형태의 물리현상을 찾기 위하여 노력하고 있다. 힉스 입자의 발견은 있을지도 모르는 여러 새로운 물리 현상의 발견에 기폭제 역할을 하고 있다. 당연히 힉스입자를 발견한 LHC 실험은 탄력을 받을 것인데 향후 어떻게 진행될 것이며 새로운 에너지에서 있을 수 있는 물리현상을 어느 정도 영역까지 찾을 수 있는지를 조망한다.

LHC 가동의 향후 계획^[1,2]

LHC는 2013년 2월까지 8 TeV에서의 데이터 획득을 끝내

저자약력

김동희 교수는 미국 시라큐스대학에서 입자물리실험으로 박사(1990) 학위를 받았다. 미국 페르미연구소에서 연구원으로 활동(1990-1992)하였으며 WCU 고에너지 충돌 물리 연구 사업단장(2009-2013)을 거쳤다. 현재 경북대학교 물리학과 교수(1993-)이다. 주 연구 분야는 강입자 충돌을 통한 새로운 물리 현상의 탐색으로 CERN의 LHC의 CMS 실험을 수행 중에 있다. (dkim@knu.ac.kr)

Fig. 1. LHC operation schedule for the next ten years. Total integrated luminosity before phase 2 will be 300 fb⁻¹. During the phase 1 period there is one more shutdown of the LHC to install upgrade components to the Detector. Integrated luminosity and running time to reduce by a factor of two the statistical error based on flat luminosity(halving time).

고 가동을 중단시킨 상태(그림 1에서의 LS1)에서 빔에너지를 높이기 위하여 가속기 부품을 교체하고 있다. 이 새로운 에너지는 인류가 여태껏 성취하는 가장 높은 에너지인데다가 획득할 데이터의 양이 기존보다 10배 이상이기 때문에 새로운 물리현상을 찾으려는 관점에서 가히 획기적이다. 지난 3년여 7, 8 TeV에서의 실험이 서론이었다면 지금부터 향후 10년여 LHC 실험은 본론이라 할 수 있다.

예정대로라면 2014년 11월, 13 TeV에서의 가동이 시작되고 1년여, 데이터를 획득하게 된다. 그 후 LHC의 본래 설계 에너지인 14 TeV는 2016년 초에 시작될 것으로 사료된다. 2021

REFERENCES

- [1] High Energy Frontier, LHC, European Strategy for Particle Physics Symposium, Krakow, Sep. (2012).
- [2] LHC Performance Workshop, "Charmonix 2012", Feb. (2012).

Fig. 2. Tracking Efficiencies of CMS pixel Detector according to the number of pileup. New pixel detector, that will be install at LS2 period, shows near 80% tracking efficiency while current one with 40% at 100 pileup.

년 정도까지 14 TeV의 양성자-양성자 충돌 실험을 거쳐 300 fb⁻¹ 데이터를 획득할 예정으로 있다. Phase 1이라 불리는 이 기간 동안에 검출기의 보안을 위하여 1년 동안 한차례 가속기 휴지 기간(LS2)이 있다. 그러므로 Phase 1 동안에 7(8) TeV에서 획득한 양의 약 10배로서 만약에 기존의 7(8) TeV의 데이터 획득의 속도라면 약 17년 걸리게 되므로(그림 1에서 halving time) 가속기의 새로운 에너지에서의 작동 계획이 매우 도전적임을 알 수가 있다.

Phase 1 이후에 Super-LHC라 불리는 가속기와 검출기의 대규모 업그레이드를 거쳐 방대한 데이터의 획득을 위한 고휘도 환경에서의 14 TeV 충돌(HL-LHC: High Luminosity - LHC) 실험이 2030년대 초까지 계획되어 있다. 이 기간을 phase 2라 하는데 획득 예정의 데이터의 양은 3000 fb⁻¹가 목표로서 HL-LHC 이전의 phase 1의 14 TeV 실험에서의 데이터 획득 양보다 10배 이상 크다.

검출기 업그레이드

LHC 가속기의 새로운 빔계수(에너지, 휘도 등)에서의 작동 계획에 맞추어 검출기의 보완^[3]이 필요하다. 7(8) TeV 데이터 획득 기간과 비교하여 우선 에너지가 약 2배 커지고 획득하려고 하는 데이터 역시 phase 1의 기간에서만 약 10배이고 phase 2를 합하면 100배에 이른다. 휘도가 높아지려면 순간 휘도(instantaneous luminosity)를 높여야 하므로 그만큼 검출기가 받는 피로도도 커질 수밖에 없다. LHC의 경우는 Tevatron과는 달리 고휘도 환경이므로 빔이 한번 충돌할 때 양성자들이 여러 번 정면충돌이 일어나므로 실제 쓸 만한 사건(예로서 매우 높은 횡운동량 사건)을 그로부터 골라내야 하는 어려움이

Fig. 3. Cross-sections of various decay from hadron collisions. Red arrow indicates 14 TeV implying about 10 times higher cross-section than 8 TeV.

있다. 충돌 시 양성자들의 정면충돌이 8 TeV에서 20 정도에서 새 환경에서는 100 이상으로 늘어난다. 이를 파일업(pileup)이라 하는데 파일업이 커지므로 측정의 효율이 매우 낮아진다. 그러므로 기존의 측정 한계를 넘어서는 최적의 조건이 되기 위해서 검출기의 보완은 필수적이다.

검출기의 업그레이드는 세 번에 걸쳐 가속기 작동 휴지기에 가속기의 보완과 함께 이루어지게 된다. 검출기의 세부 종류는 CMS와 ATLAS가 비록 다를지라도 기본적으로 새로운 가속기 환경에서 보완의 관점에서는 비슷하다. CMS의 경우^[4] 붕괴 입자들의 검출 능력을 높이기 위하여 아직 많은 부분이 설치되지 않은 전방향(forward) 영역의 세부검출기들이 LS1과 LS2 기간에 새로이 설치하고, phase에 따라 세부검출기별로 필요한 부분을 보완한다. 특히나 고휘도 환경에서의 강한 방사능 피폭으로 인해 빔파이프를 감싸고 있는 벡스검출기와 궤적검출기는 LHC 작동 휴지기 LS2에 완전히 교체되고 3년 뒤인 HL-LHC 환경에서 강한 방사능 피폭 환경으로 인하여 다시 한번 새로이 교체된다.

데이터 획득의 비율이 최소한 6배 커지는 새로운 환경에서

REFERENCES

- [3] J. Olsen, 'CMS future plans' Snowmass energy frontier workshop, July (2013).
- [4] CMS upgrade week, <http://CMSUP2013.desy.de>, DESY June (2013).

입자의 선별을 위한 트리거(trigger)도 발견된 힉스 입자의 질량, 결합상수 등을 좀 더 정밀하게 측정하기 위하여 통과 허용 에너지를 낮게 유지해야 하며 그와 동시에 모든 가능한 붕괴 채널에서 새로운 물리 현상의 발견을 최대화시키는데 주안점을 두고 있다. 컴퓨팅의 경우도 예외가 아니어서 최소한 기존의 효율을 유지하도록 수십 페타바이트의 방대한 데이터의 처리 능력을 가지도록 보완한다.

14 TeV LHC 물리

LHC는 향후 15년여 동안 14 TeV의 에너지에서 더 많은 데이터를 획득하여 발견된 힉스입자의 성질을 좀 더 정밀하게 측정하며 더 나아가 있을 지도 모를 새로운 물리 현상의 탐색에 주력할 것이다. 충돌에너지가 기존에 비해 2배에 이르므로 대부분의 물리 현상의 산란단면적이 약 10배 증가하므로 그만큼 새로운 입자의 발견 가능성이 그 어느 때보다 커졌다. 언급했듯이 이 기간은 크게 두 단계(phase 1, 2)로 나뉘어져 있다.

우선 1단계에서 초대칭모형 입자, 또는 새로운 게이지보존 등 그 외 다른 새로운 입자가 가질 수 있는 질량 영역을 기존보다 2배 이상 탐색할 수 있음으로 새로운 입자의 발견을 위한 연구가 가장 활발히 진행될 것이다. 발견된 힉스입자의 질량, 스핀, 공명의 폭, 결합상수 등 힉스입자의 성질에 대한 측정이 한층 정확해질 것이다. 벡터-벡터 산란의 측정이 본격적으로 이루어질 전망이다. 그 외 표준모형이 예측하는 희귀붕괴 현상의 측정 폭을 더 넓힐 수 있을 것이다.

고휘도 환경의 2단계에서는 1단계에서 혹 새로운 입자가 발견되었다면 새로운 입자의 특성의 측정에 주력할 것이고 초대칭입자, 또는 다른 여타 입자의 탐색 가능 질량 영역을 더 넓힐 것이다. 힉스입자의 성질 등이 더욱 더 정밀하게 측정될 것이고 힉스와 다른 기본입자의 결합상수가 5% 이내, 8 TeV에서는 전혀 측정되지 못했던 힉스들의 자체 결합상수가 30% 정도에서 측정될 것으로 기대된다. 희귀붕괴 측정의 정밀도를 한층 높일 것으로 기대된다.

힉스입자의 성질의 포괄적 이해

발견된 입자를 힉스입자로 공식적으로 확인한 데에는 힉스입자가 가지는 여러 물리적 특성이 실험 결과와 일치하기 때문이다. 적어도 힉스가 다른 입자로 붕괴하는 형태 중 몇 개의 붕괴 형태는 확실히 관측이 되었고 그들의 생성률과 갈래비가

Fig. 4. Signal strengths of various Higgs decay channels from ATLAS and CMS experiments. The precision for individual channels varies from 30% to even 50% depending on channel while the precision after combined is about 15% level.

실험 오차 내에서 일치한다. 더 나아가 힉스보존이 스칼라 입자이므로 스핀이 0이고 패리티가 +(even)이라는 것을 통계적으로 발견된 입자가 pseudo 스칼라가 아닌 스칼라^[5,6]로 밝혀졌다.

더 나아가 힉스라면 입자가 발견된 두 개의 광자로 가는 채널과 두 개의 Z 보손으로 붕괴하는 채널 외에 다른 붕괴 채널에서도 신호가 있다는 정황이 나와야 하나 두 개의 채널 외에 다른 채널들은 신호가 있다는 정황을 보이는 것도 있고 아직 없는 것도 있다. 힉스입자와 기본입자의 상호작용의 크기는 기본입자의 질량의 크기에 비례하기 때문에 상대적으로 질량이 작은 뮤온, 전자 등은 8 TeV에서는 상호작용의 강도가 너무 작기 때문에 검색되지 않았다.

그러므로 14 TeV 시대에서의 힉스입자 연구는 크게 두 가지로 대별될 수 있는데 하나는 8 TeV에서 측정된 붕괴모드와 그로부터의 질량을 더 정밀하게 측정하며 다른 하나는 산란단면적이 너무 낮아 아직 도출되지 않았거나, 도출되었으나 통계적으로 너무 낮은 모든 붕괴 채널을 측정하는 것이다. 새로운 에너지에서 힉스입자의 물리적 특성을 모든 면에서 정확도가 커질 것이다. 더군다나 힉스입자의 모든 붕괴 채널이 측정 가능하며 벡터 보존 퓨전(Vector Boson Fusion: VBF)에 의한 과정을 거친 붕괴 현상도 모두 관측될 것이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 CMS와 ATLAS에서 측정된 σ/σ_{SM} 은 다양한 붕괴 채널에 따라 정확도가 다르지만 두 그

REFERENCES

- [5] CMS collaboration, Phys. Rev. Lett. **110**, 081803 (2013).
- [6] ATLAS collaboration, Phys. Lett. B **726**, 120 (2013).

를 모두 30%에서 50% 수준이다. 얼핏 보기에 CMS의 σ/σ_{SM} 값은 1보다 작은 경향이며 ATLAS는 1보다 큰 경향을 보인다. 그럼에도 두 결과의 불일치를 얘기하기에는 오차가 너무 크다. 14 TeV 에너지에서 300 fb⁻¹의 데이터로 이 값의 정확도가 모두 5% 내외로 줄어든 것으로 예측된다. HL-LHC의 3000 fb⁻¹ 환경에서 3% 이내의 정확도로 측정하려는 것이 목표이다. 또한 힉스입자 질량 영역에서 아직 피크 (peak)가 보이지 않고 여분이 존재하는 $b\bar{b}$, $\tau\tau$ 등의 채널의 8 TeV 결과에 비교하여 새로운 에너지에서는 $b\bar{b}$, $\tau\tau$ 등에서도 5 σ 이상의 결과를 얻을 것으로 사료되며 $\mu^+\mu^-$ 붕괴도 측정될 수 있을 것이다. 특히나 HL-LHC에서는 힉스 자신의 결합상수도 30% 수준으로 측정될 수 있다.

경입자만을 포함하는 채널에서의 새로운 현상

실험적 관점에서 경입자의 검출의 용이성으로 경입자만으로 붕괴하는 채널들은 새로운 물리 현상을 찾는 데 가장 주 탐색 대상의 하나이다. 일반적으로 충돌형 검출기들은 경입자의 측정에 강하여 CMS와 ATLAS 실험 모두 이들 경입자를 90% 이상의 효율을 가지고 검출해내고 있다. 물리적으로도 새로운 물리 현상이 존재한다면 입자가 나올 가능성이 가장 먼저 있을 수 있는 채널이기 때문이다. 새로운 입자가 나타날 경우 다른 복잡한 붕괴를 가지고 있는 채널에는 나타나고 경입자만으로 붕괴하는 채널에는 보이지 않는 경우는 매우 드물기 때문이다.

LHC에서 양성자와 양성자의 충돌로부터 전자와 양전자 또는 두 뮤온 등 경입자 쌍으로 붕괴($pp \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$)하는 경우와 전자나 뮤온 등 하전된 경입자와 중성미자로 붕괴($pp \rightarrow e\nu, \mu\nu$)하는 경입자만으로 붕괴하는 채널은 실험적 관점에서 매우 중요하다. 이들 붕괴 채널은 새로운 물리 현상의 발견 가능성이 있다는 판단 아래 획득된 데이터의 선별 작업이 거의 즉각적으로 이루어지고 있다.

8 TeV 데이터 분석 결과^[7,8]는 여태껏 나타나지 않았던 2 TeV 이상의 매우 높은 에너지에서 사건들이 있는 것처럼 보여 준다. 물론 이것이 실제 입자가 아니고 단순한 통계적 요동이라고도 볼 수도 있지만 다른 한편으로 자연의 새로운 현상의 폭로일지도 모른다는 의구심도 있기 때문이다. 따라서 이들 채널에 대해서 매우 세심한 주의를 기울일 필요가 있다. 더 나아가 향후 14 TeV 에너지에서는 무엇이 나올지 전혀 모르는 상황이므로 큰 기대를 걸고 있는 실정이다.

이들 경입자만으로 붕괴하는 채널은 이론적으로 해석할 수

Fig. 5. Transverse mass distribution from a single electron (CMS) and dimuon invariant mass distribution (ATLAS) with full 8 TeV data. For both, there are very high energy events while the background in the region is estimated at the level of 10^{-2} to 10^{-3} . The events could be due to the statistical fluctuation but could also be the low energy tail of the real particle beyond a search region with the given energy.

있는 여러 모형들이 존재한다. 우선 표준모형을 간단히 확장시킨 모형들^[9]에서 W 및 Z 보손 외에 더 무거운 게이지 보손이 소개된다. 예를 들어 표준모형의 Left-Handed SU(2)에 Right-handed SU(2) 대칭을 부여한 Left-Right 대칭 모형에서는 Right-handed current에 결합하는 게이지 보손이 부가적으로 요구된다. 중성보손은 sequential Z'뿐만이 아니라 E_6 와 SO(10) GUT 모형에서는 $Z_\psi, Z_\eta, Z_\chi, Z_l$ 등 여럿의 중성 보손들이 등장한다. 그 외에도 여분의 U(1) 게이지 대칭성을 지니는 모형들이 많이 있으며, 초끈에서 유도되는 모형들도 일반적으로 U(1) 대칭성을 많이 가진다. 즉, 여분의 게이지 입자는 새로운 물리법칙들에 자연스럽게 등장하는 입자들이다. 부가차원 (Extra Dimension: ED)에서도 경입자만으로 붕괴하는 채널을 예측하는데 대표적으로 Warped ED에서의 Randall-Sundrum graviton,^[10] LED (Large ED)^[11]에서의 M_s , split-UED (Universal ED)^[12]에서의 Kaluza-Klein W 등이 그것이다. 그 외에 Contact Interaction^[13]에서도 단일 경입자를 통해 구속에너지 Λ 값을 구하는 시도가 있다.

REFERENCES

- [7] CMS collaboration, Phys. Rev. D **87**, 072005 (2013).
- [8] ATLAS collaboration, ATLAS-CONF-2013-017 (2013).
- [9] Refer P. Langacker, Physics Report **72**, 185 (1981); J. L. Rosner, Phys. Rev. D **54**, 1078 (1996).
- [10] L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83**, 3370 (1999).
- [11] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. Dvali, Phys. Lett. B **429**, 263 (1998).
- [12] K. Kong, S. C. Park and T. G. Rizzo, JHEP **04**, 081 (2010).
- [13] K. Lane, F. Paige, T. Skwarnicki *et al.*, Physics Report **278**, 291 (1997).
- [14] twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/WebHome#Upgrade_Projects_and_Physics_Pro.

예로서 W 입자의 경우 8 TeV 모든 데이터를 적용하여 3.35 TeV까지의 질량 영역을 제외시켰고 Z 의 경우도 비슷한데 14 TeV에서는 6.5 TeV 정도까지 탐색^[14]이 가능하다.

초대칭 입자

힉스입자의 발견으로 초대칭 입자의 존재 유무가 한층 더 탄력을 받게 되었다. 물론 초대칭 모형 입자 중의 뉴트랄리노(neutralino: $\tilde{\chi}_1^0$ LSP)는 암

흑물질 후보로서도 고려되며 통일 결합 상수의 단일화를 할 수 있다는 등 여러 측면에서 힉스 발견 이후 주목을 받고 있는 것은 사실이다. 너무 다양한 초대칭 모형 중에 몇몇 매우 간단한 - 변수를 줄이거나 가정을 통해 단순화한 - 모형들은 힉스입자의 발견으로 인해 이미 제외되었고 기존의 스칼라쿼크와 글루이노를 찾는 정형화된 방법론, 즉 여러 붕괴 패턴을 찾는 다음 물리계수를 적용하여 계수들을 질량과 함께 제외시키는 방법론에서도 탈피하는 추세를 보이게 되었다.

힉스입자의 질량이 126 GeV라는 것은 힉스입자가 가볍다는 뜻이다. 가벼운 힉스입자로 인해 표준모형의 톱쿼크에 대응되는 초대칭 입자인 스칼라 톱쿼크(scalar top quark)와 버텀쿼크에 대응되는 스칼라 버텀쿼크(scalar bottom quark) 등의 질량이 기존의 모든 가능한 질량의 영역에서 상대적으로 가벼워야 한다는 제약을 받게 된다. 이는 매우 엄중한 귀결^[15]이고 가벼우면 현 상태의 에너지에서 검출기에 걸릴 수 있는 확률이 크기 때문에 그 존재 여부를 비교적 빨리 알 수 있다. 힉스의 발견의 영향으로 초대칭 모형이 상정하는 많은 물리계수 하에서 스칼라 쿼크와 글루이노의 탐색에서 3세대 초대칭 입자의 탐색으로 대세가 바뀌어 버렸다.

3세대 초대칭 입자는 양성자-양성자 충돌에서 글루이노의 매개에 의해서 생성될 수 있으며 비록 산란단면적은 많이 작으나 3세대 초대칭 입자가 직접 생성될 수도 있다. 붕괴의 실험적 관측 여건의 특성 상 이들은 제트와 잃어버린 에너지 및 b 입자 tagging의 방법을 통하여 탐색한다. 차이지노(chargino: $\tilde{\chi}_1^\pm$)나 뉴트랄리노($\tilde{\chi}_2^0$) 또는 스칼라 경입자 쌍 등이 생성되어 다량의 경입자와 잃어버린 에너지로 붕괴하는 채널도 있다.

CMS와 ATLAS에서의 8 TeV 결과^[16-18]는 글루이노가 약 1350 GeV까지 그에 따른 LSP의 질량이 650 GeV까지 제외

Fig. 6. Gluino mass limit with various decay mode measured at CMS with 8 TeV data(left) and Estimated 5 σ discovery reach at 14 TeV 300 fb⁻¹ data.

시켰다. 스칼라 톱쿼크, 차이지노 및 뉴트랄리노는 약 650 GeV 정도까지 제외되었다. 14 TeV에서 이들 초대칭 입자의 질량 탐색 영역이 모두 2배 정도까지 커질 전망이다. 만약에 존재하여 발견을 하기 위한 5 σ 조건하에 질량 탐색 가능 영역은 글루이노가 1.7 TeV, 스칼라쿼크가 750~950, 스버텀이 600~700, 차이지노가 500~600 GeV로서 8 TeV의 결과보다 대폭 향상될 전망이다.

끝맺으며

언급하였듯이 LHC가 가동을 시작한 지는 불과 3년여 지났을 뿐이다. 비록 원래 목표에너지보다는 두 배 정도 낮은 에너지인 7(8) TeV에서의 가동일지라도 고난도 기술이라는 관점에서 놀라우리만치 매우 성공적이었고 그로부터 힉스입자가 발견되었고 그 외 수많은 새로운 결과를 쏟아내었다. 2014년 후반기에 시작될 새로운 에너지인 13(14) TeV의 가동을 통한 실험은 그야말로 실험의 본론이라 할 수 있다. 새로운 에너지에서 약 15년여 가동을 계획하고 있는 LHC로부터 표준모형을 뛰어넘어 인류가 몰랐던 새로운 자연 현상이 속속 도출되어 우주에 대한 인류의 호기심이 부족하나마 충족되고 자연에 대한 이해가 고양되기를 희망한다.

REFERENCES

- [15] Refer H. Baer, V. Barger and P. Huang, JHEP **109**, 1205 (2012).
- [16] CMS collaboration, Phys. Lett. B **725**, 243-270 (2013).
- [17] CMS collaboration, Phys. Rev. D **88**, 052017 (2013).
- [18] ATLAS collaboration, JHEP **10**, 130 (2013).