ICHEP 2018 – 학술 프로그램 및 일반강연

DOI: 10.3938/PhiT.27.045

이현민·최성열·최수용·권영준

Scientific Highlights of and Public Lectures from the 39th International Conference of High Energy Physics

Hyun Min LEE, Seong Youl CHOI, Su-Yong CHOI and Youngjoon KWON

We describe a few highlights of the scientific results presented at the 39th International Conference of High Energy Physics (ICHEP2018), and present a short summary of the public lectures delivered during the conference. From among nearly 1100 abstracts submitted to ICHEP2018, approximately 700 talks were selected for parallel sessions on 16

tracks, and an additional 250 abstracts were selected for poster presentations. In the plenary session, 36 scientific talks, including the 'Summary and Outlook' by Prof. Paul Langacker, were given. Some of the notable results included excess of electron-neutrino signals from the MiniBooNE experiment that might be interpreted as being due to sterile neutrinos, deviations from the predicted distributions of top-pair spin correlations reported by ATLAS, and measurements of the Higgs coupling to fermion pairs by both CMS and ATLAS. Moreover, recent developments for novel accelerators and detectors, including a status report on the new SuperKEKB collider, were reported. Much strengthened efforts for applying machine-learning techniques to HEP also attracted many participants' attention. Moreover, growing activities in research on the cosmic frontier have become more interesting and important for our understanding of the fundamental nature of our Universe.

들어가는 말

1950년 이후 (거의) 2년마다 개최되어 온 국제입자물리학회(International Conference on High Energy Physics, 약칭 'ICHEP')은 입자물리와 천체물리 등의 실험 및 이론분야의 가장 최근의 주요한 발견과 발전이 보고되고 토의되며 또한 주요 미래 실험계획들에 대한 깊은 검토와 논의를 하는, 입자물리 분야의 가장 핵심적인 최고 권위 국제학술대회 중 하나이다.

올해 2018년 서울에서 개최된 제39차 ICHEP(이하 'ICHEP 2018')은 표준모형이 지난 50년 동안 정밀하게 검증되고 2012년 힉스입자의 발견으로 확립된 상황에서 미래 고에너지 물리 분야의 발전방향을 장기적으로 허심탄회하게 조망하는 회합의 장으로서의 역할을 성공적으로 담당하였다.

ICHEP2018은 ICHEP의 전통적인 진행방식을 따라 첫 3일간(7월 5일 - 7일) 분과회의(parallel sessions)를 진행하여 700여 명의 실험 및 이론 연구자들이 주제에 따라 분류된 세션에서 연구자 자신의 최근 연구결과를 발표하였고 후반부 3일 동

저자약력

이현민 교수는 입자이론 분야 연구로 서울대학교 물리학 이학박사(2002)를 취득 후, Bonn 대학교(2002-2004), DESY 연구소(2004-2006), 카네기멜론 대학교(2006-2008), 맥 메스터 대학교(2008-2009), CERN 이론그룹(2010-2012), 고등과학원(2012-2013) 조교수를 거쳐 현재 중앙대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 2013년 고등과학원 학술상, 그리고 2015년 우수성과 교육부장관상을 수상한 바 있다. ICHEP-2018-Seoul 조직위원회 총무 부간사를 맡았다. (hminlee@cau.ac.kr)

최성열 교수는 입자이론 분야 연구로 서울대학교 물리학 이학박사(1990)를 취득 후, 독일 DESY 연구원(1990), 서울대학교 이론물리연구소 연구원(1992), 일본 KEK 연구원(1994), 연세대학교 우수도보 초빙연구원(1996)과 고등과학원 연구원(1998)을 거쳐, 현재 전북대학교 물리학과 교수(2000-)로 재직 중이다. 한-CERN 이론물리 공동연구 및 신진인력 양성사업의 한국측 책임자(2015-2018)를 역임한 바 있다. ICHEP-2018-Seoul 프로그램 위원회 위원(2018)을 역임하였다. (sychoi@jbnu.ac.kr)

최수용 교수는 입자실험 분야 연구로 서울대학교 물리학 이학박사(1999)를 취득 후, Univ. of California, Riverside(1999-2005) 연구원, 성균관대학교(2005-2010) 조교수, 부교수를 거쳐 현재 고려대학교(2010) 물리학과 교수로 재직 중이다. CMS 실험에 참여하고 있으며 한국CMS연구단장을 역임한 바 있다. ICHEP-2018-Seoul 프로그램 위원회 위원(2018)을 역임하였다. (suyong@korea.ac.kr)

권영준 교수는 입자실험 분야 연구로 Stanford 대학교 물리학 이학박사(1993)를 취득 후, Rochester 대학교 연구원을 거쳐 현재 연세대학교 물리학과(1996-) 교수로 재직 중이다. Belle 실험과 Belle II 실험에 참여하고 있으며 2018년 4월부터 Belle 실험 Co-spokesperson을 맡고 있다. 한국물리학회 입자및장물리분과 위원장(2017.1-2018.12)을 역임하였고 ICHEP-2018-Seoul 조직위원 겸 프로그램위원장을 맡았다. (yjkwon63@yonsei.ac.kr)

안(7월 9일 - 11일)에는 전체회의(plenary sessions)를 열고 해당 분야의 연구를 주도하는 전문가들이 분과회의에서 발표된 내용들을 중심으로 핵심 연구 성과들을 정리하고 발전방향을 조망하고 해결과제를 제시하였다. 또한 분과회의의 진행과 동시에 개최된 포스터 세션에서는 약 250개의 논문이 포스터 형태로 발표되어, 이번 ICHEP2018에서 발표된 학술논문의 개수는 거의 1000개에 달한다. 분과회의와 전체회의 사이에 낀 하루(7월 8일)는 여러 가지 위성회의들로 채워져 학회 참가자들이 자유롭게 참석하거나 혹은 휴식 및 관광을 할 수 있도록 하였다. 학술 발표 외에도 석학 2인의 대중강연을 개최하여(7월 8일 저녁 Gian Giudice; 7월 10일 저녁 Michael Turner) 연구자뿐 아니라 일반인도 고에너지물리의 중요성과 의미를 생생하게 전달받는 기회를 제공하였다.

분과회의의 준비 및 진행

2018년 7월 5일부터 7월 7일까지 진행된 분과회의에서는 16개 분과로 나누어 진행하였다. 하루에 4개의 세션(오전 2개, 오후 2개) 동시에 10개의 회의실에서 진행되어 사흘 동안 총 120개의 분과회의 세션이 열렸다. 당초 학회에 제출된 초록은 약 1100개에 달했으며 이들을 16개 분과 120개의 세션에 효율적으로, 주제에 맞게 배정하는 작업은 조직위 산하 프로그램 위원회¹⁾와 각 분과별로 임명된 세션 컨비너(convener)들에 의해 진행되었다.²⁾

많은 중요한 결과들이 발표된 분과회의들 중에서 특별히 언급하고 싶은 것은 중성미자 분과에서 스테랄 중성미자에 관한 최신 결과들이 집중적으로 발표된 세션, 그리고 컴퓨팅 분과에서 기계학습의 입자물리 응용에 관한 집중 세션 등이다. 이 세션들은 10개의 분과회의실 중 가장 큰 300석 규모의 회의실이 가득 찼만큼 많은 참가자들의 지대한 관심을 모았다. 7월 5일 오전 11시에 스테랄 중성미자를 주제로 진행된 중성미자 분과 세션에서 Alejandro Diaz는 MiniBooNE 실험의 결과가 기존 LSND 결과와 잘 일치하며 LSND와 MiniBooNE 결과를 합칠 경우 6.1σ 수준으로 신호가 확실하다고 발표하였으며(그림 1), 이 결과는 최소한 한 종류의 스테랄 중성미자가 존재한다는 가정과 잘 맞는다고 보고하였다.

한편 같은 날 오후 2시에 컴퓨팅 및 데이터 처리 분과에서 기계학습 주제로 진행된 세션에서는 CMS, ATLAS, LHCb 및 BES III 등 대형 입자실험들에서 사용되고 있는 기계학습에 관해 집중적인 발표가 이루어졌다. 특히 LHCb 실험의 Fedor Ratnikov와 ATLAS 실험의 Hasib Ahmed는 각각 전자기 열량계 모의실험을 기계학습으로 대체하는 가능성에 대해 발표하였다. 전자기 열량계는 광자와 전자에 민감하게 반응하는데 이 반

Fig. 1. (Top) Energy distribution of the charged-current quasi-elastic electron-neutrinos (ν_e) from MiniBooNE. (Bottom) The allowed region of $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)$ determined from the charged-current quasi-elastic electron-neutrinos measured by MiniBooNE. The result is consistent with the existing LSND result. The signal significance of 4.8σ from MiniBooNE becomes 6.1σ when combined with the LSND.

응을 GEANT 등 기존의 도구를 사용하여 모의실험을 하는 경우 많은 전산자원과 시간이 필요하여 새로운 방법의 모의실험 방식이 요구되고 있었다. 이 세션에서는 특히 기계학습의 최신 동향인 생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Networks, 약칭 'GAN')을 이용하여 훨씬 빠른 시간과 적은 전산자원으로 기존 방식과 유사한 성능의 모의실험이 가능함을 발표하였다.

1) 프로그램 위원회는 본 원고의 저자들로 구성되었다.

2) ICHEP2018의 각 분과별 세션 컨비너 명단은 아래 웹사이트에 나와 있다.
<https://indico.cern.ch/event/686555/page/12297-session-conveners>.

전체회의에서의 주요 학술 발표

2018년 7월 9일부터 7월 11일까지 전체회의에서 환영사, 인사말 등을 제외한 순수 학술 발표는 총 36건으로 그중 이론 발표가 7건, 실험 및 기타³⁾ 발표가 28건, 그리고 학회 마무리 강연이 있었다. 그밖에도 전체회의에서는 IUPAP/C11 보고 및 젊은 과학자 시상식, 우수 포스터 시상식, ICFA 보고, 그리고 주요 입자물리 연구소장들이 무대 위에서 장래를 전망하고 대비하는 토론을 진행한 Directors' Forum 등을 진행하였다. 전체회의에서 보고된 학술발표의 내용을 주제별로 나누어 요약하면 아래와 같다.

1. 중성미자(Neutrinos)

(1) 중성미자 이론 및 렙톤의 비대칭성(Seguey Petcov)

중성미자 물리에서 중요한 질문은 중성미자가 디락 혹은 마요라나 페르미온 입자인지 여부와, 렙톤의 상호작용에서 CP 대칭성의 깨짐 문제, 중성미자 질량의 순서, 중성미자 질량 절대크기 등이다. 지금까지 대기 중성미자, 태양 중성미자, 또는 가속기 및 원자로 중성미자를 이용한 실험(Super-K, SNO, T2K, Double Chooz, Daya Bay, RENO 등)을 통해 중성미자의 질량 차이와 섞임각을 정밀하게 측정해왔다. 중성미자의 새로운 물리 현상은 스테랄 중성미자, 무거운 마요라나 입자, 전하 +2를 띠는 새로운 힉스 입자, 새로운 중성미자의 상호작용, 렙톤 맛깔 바뀔 등을 포함한다. 중성미자에 대한 새로운 물리 모형을 구성하는데 중요한 점은 중성미자의 질량을 설명하는 시소(See-Saw) 기작, 바리온 비대칭성과의 관련성, 중성미자의 섞임각 크기를 설명하는 맛깔 대칭성 등이다. 특히, 바리온 비대칭성을 위한 CP 대칭성 깨짐이 PMNS 행렬에 의해서 주어진 경우에, LHC나 Hyper-K, DUNE 등 미래 중성미자 실험에서 낮은 에너지에서 구현되는 렙톤의 비대칭성을 직접 검증할 수 있다.

(2) 중성미자 실험(Masashi Yokoyama, Michele Weber, Ruben Saakyan)

중성미자 물리 실험 결과 및 전망에 관한 강연은 장거리(long-baseline) 중성미자 빔 실험, 단거리(short-baseline) 중성미자 빔 실험, 그리고 가속기 미사용 실험 이렇게 세 개로 나누어져 진행되었다. 장거리 중성미자 빔 실험에서 추구하는 주요 주제는 중성미자 진동 파라미터의 정밀 측정(특히 θ_{13} 와 θ_{23}), 질량 계층(mass hierarchy), 그리고 CP 비대칭성 여부 등이다. 핵반응로를 중성미자원으로 사용한 Daya Bay(중국), Double Chooz(프랑스), RENO(한국) 실험들이 각각 중성미자 진동에 관한 최신 정밀측정 결과들 특히 $\sin^2 \theta_{13}$ 측정값을 보고하였다. Daya Bay 실험은 통계오차와 계측오차를 합쳐서

Fig. 2. The CP-asymmetry phase δ_{CP} measured by T2K (top) and by NOvA (bottom).

5%의 정밀도를 달성하였고 RENO 실험은 계측오차 약 5%, 통계오차와 합쳐서 약 7%의 정밀도를 달성하였다. 중성미자들 간의 질량 차이를 나타내는 파라미터인 Δm_{ee}^2 의 측정값은 약 3% 정밀도로 보고되었다. 질량계층 문제와 CP 비대칭성 여부 문제는 T2K(일본), NOvA(미국) 실험에서 연구결과를 발표하였다. T2K 실험과 NOvA 실험은 가속기에서 생성된 중성미자를 사용하는 유사한 방식의 장거리 빔 실험인데 중성미자 생성지점과 검출기까지의 거리가 각각 295 km(T2K), 810 km(NOvA)로 차이가 있다. 이 길이의 차이는 중성미자와 물질 간의 반응 정도에 차이를 주며, 그 결과 NOvA 실험이 질량 계층성에 좀 더 민감하고 T2K 실험은 CP 비대칭성에 좀 더 민감하여 두 실험은 상호보완적인 정보를 제공하는 것으로 알려져 있다. 두 실험에서 발표한 최신 결과에 따르면 질량 계층성은 두 실험 모두 정상 계층성(normal hierarchy)을 선호하는 것으로 나타났다. T2K 실험의 경우 측정 데이터를 정상 계층성과 역전 계층성의 베이지안 확률로 비교한 결과 정상 계층

3) '기타'에 해당하는 부분은 산업체, 교육 및 대중화, 다양성 등 특수주제에 관한 발표들로 이루어졌다. 이는 ICHEP 학회를 주관하는 IUPAP/C11에서 정책적으로 반드시 포함해 오고 있는 부분이다.

Fig. 3. Measurement of Higgs-to-fermion-pair couplings: (Left) $H \rightarrow b\bar{b}$ results from ATLAS, (Middle) ttH results from ATLAS, and (Right) ttH results from CMS.

성의 확률이 역전 계층성에 비해 약 8배에 해당한다. CP 대칭성 깨짐을 나타내는 위상 δ_{CP} 의 측정결과는 두 실험이 약간 다른 결과를 보여준다(그림 3). T2K 데이터는 정상 계층성 가정 하에 $\delta_{CP} \approx -\pi/2$ 영역을 선호하는 것으로 나타났고 $\delta_{CP} = 0$ 을 2σ 이상으로 배제할 수 있음을 보인 반면, NOvA 데이터는 같은 정상 계층성 가정 하에 $\delta_{CP} = 0.17\pi$ 값을 선호하는 것으로 나타났다. 두 실험 모두 δ_{CP} 에 관해 2σ 이상의 정밀도를 달성함을 보였고 이는 가까운 장래에 경입자에서의 CP 대칭성 깨짐 관측 가능성을 매우 높이는 것이다.

2. 에너지 프론티어(Energy Frontier)

(1) 표준 모형의 힉스, 탑 쿼크, 약전자기 대칭성 등(Matthew Dolan)

표준 모형에서 힉스 입자의 질량 문제, 진공 상태의 불안정성 문제 등 약전자기 대칭성의 자발적인 붕괴를 이해하는데 탑 쿼크의 정밀 실험은 하나의 핵심 단서를 줄 수 있다. 또한 탑 쿼크 붕괴에서 비롯되는 잃어버린 에너지는 많은 새로운 입자의 검출에 중요한 배경 신호가 되므로, 탑 쿼크의 정밀 실험은 매우 중요하다. 탑 쿼크의 생성 단면적을 이론적으로 결정하기 위해서 QCD와 약전기 상호작용의 효과를 각각 NNLO, NLO의 고차항까지 고려하여 정밀한 실험 결과와 비교해야 한다. 결과적으로, 탑 쿼크의 정밀 계산을 통해서 강한 상호작용의 세기와 글루온의 파톤 분포 함수를 정밀 유도할 수 있고, 탑 쿼크의 생성 단면적의 분포를 통해 새로운 물리를 유추할 수 있다. WW, ZZ와 같이 표준 모형의 두 개의 게이지 보손을 생성하는 과정으로부터 전하를 띤 새로운 보손이나 페르미온 입자, 그리고 무거운 매개 입자 등의 효과를 간접적으로 측정할 수 있다. 최근에는 Deep Learning같은 기계 학습을 도입하여 가속기 현상론에서 많은 문제들을 더욱 효율적으로 해결할

수가 있다. 예를 들어서, Deep Neutral Network를 이용해 컴퓨터 이미지로 W 제트와 QCD 제트를 구별할 수 있다.

(2) LHC 실험 주요 결과 발표(Tancredi Carli, Shahram Rahatlou)

유럽 핵입자 연구소(CERN)의 거대 강입자 가속기(LHC)를 활용하는 4개의 큰 실험의 결과에 대한 발표가 있었다. 2015년부터 질량 중심 에너지 13 테라 전자볼트의 에너지에서 양성자끼리 충돌시키는 실험을 하고 있다. 힉스 입자 및 고에너지 현상 탐색에 특화되어 있는 ATLAS와 CMS 실험 그룹은 2017년까지 수집된 데이터를 이용하여 힉스 입자의 성질을 측정하였다. 2016년 ICHEP 때와 비교하면 힉스가 b 쿼크, 타우 경입자, 탑 쿼크와 직접 상호작용하는 것을 관측했다(그림 3). 힉스 입자가 질량이 큰 쿼크(b 쿼크와 탑쿼크)와 스핀 양자수 1인 광자, W 입자, Z 입자와는 표준 모형의 예측과 오차 범위 내에서 일치한다. 실험적 결과를 종합하면 힉스 입자의 성질은 표준모형에서 예측하는 성질과 잘 들어맞는다는 결론에 도달하게 된다.

또한, LHC는 탑쿼크와 b쿼크 공장으로서 이들 입자를 매우 많이 생산하여 정밀 측정이 가능하다. ATLAS 실험에서는 쌍생성된 탑 쿼크들의 스핀 상관성을 측정하였는데 흥미롭게도 표준모형에서 약 3.2σ 벗어나는 결과를 얻었다(그림 4). 이것이 어떤 의미를 지니는지는 아직 더 연구가 필요하다. 더구나 경쟁 실험인 CMS 실험의 결과를 지켜봐야 한다. 이번 학회에서 매우 많은 새로운 결과들이 발표되었지만 3σ 를 넘는 새로운 결과는 드물었기에 이 결과가 주목을 받았다.

LHC 가속기를 사용하는 실험들 중 LHCb는 b쿼크의 성질을 정밀하게 측정할 수 있게 설계되어 있는 실험이다. 일본 Belle 실험과는 경쟁관계이면서도 보는 현상이 달라 많은 이들의 관심을 끄는 실험이다. 소위 CKM 행렬의 parameter 중 하나인

Fig. 4. The distribution of azimuthal angle difference between top quarks measured by ATLAS. The measured distribution shows 3.2σ deviation from the QCD NLO prediction

γ 값을 측정했는데 어떤 b 쿼크의 붕괴를 보는가에 따라 다소 다른 결과가 나와서 흥미로웠다. 이외에 여러 희귀 붕괴모드에 대한 측정과 이로써 잘 반응하지 않는 가벼운 새로운 입자의 존재에 대해 탐색했다.

에너지 극한에서의 미개척 영역의 탐색을 통하여 초대칭 이론 및 표준모형을 포괄하는 새로운 이론적 모형들에서 예측하는 현상들에 대한 실마리를 찾고자 했다. 테라 전자볼트 이상의 질량 영역을 탐색했고 아직까지 새로운 현상은 없다.

LHC 실험들은 2035년까지 운영이 되고 이번 발표 때 사용한 데이터의 약 35배에 달하는 데이터를 더 수집하게 될 것이다. 이 데이터로부터 힉스의 희귀 현상을 관측하게 될 것이라고들 예상한다. 힉스입자가 뮤온 입자쌍으로 붕괴하는 것도 보게 될 것이다. 많은 물리학자들의 관심은 힉스입자 두 개가 같은 사건에서 생성되는 것이다. 실험적으로 매우 드물 것으로 예상된다. 이 현상을 발견함으로써 우주의 진공 상태, 즉 힉스 퍼텐셜을 정량적으로 재구성할 수 있게 되어 매우 중요한 의미를 지닌다. 우주의 힉스 퍼텐셜의 모양에 따라 우리 우주의 안정성에 대한 이해가 가능해진다.

3. 맛깔 물리(Flavor Physics)

(1) 맛깔 이론 및 전망(Svetlana Fajfer)

표준 모형에서는 게이지 대칭성으로 무거운 렙톤의 붕괴 과정은 렙톤의 맛깔에 거의 의존하지 않는다. 그러나 최근에 B-메존의 실험 결과에 따르면 B-메존이 렙톤으로 붕괴하는 과정이 렙톤의 맛깔에 의존한다. $R(D^{(*)})$ 혹은 $R_{K^{(*)}}$ 등의 실험 측정값을 표준 모형으로 설명할 수 있는 정도는 각각 0.01%

정도로 작게 나타난다. B-메존의 실험 결과가 새로운 물리를 의미하는지 판단하기 위해서, QCD 격자 계산을 통해서 메존 붕괴의 핵자 행렬을 더욱 정밀하게 결정하고, LHCb와 Belle 2에서 양질의 새로운 실험 데이터를 얻어야 한다. 이 B-메존의 이상 붕괴 현상이 실재한다면, 그 현상을 설명하는 렙톤 입자의 맛깔에 따라서 다른 상호작용을 하는 새로운 게이지 입자 Z' 이나 스칼라 입자가 있을 것으로 예측되고, 이는 다른 메존의 붕괴, 타우 렙톤의 붕괴 그리고 LHC에서 추가 실험으로 검증할 수 있으리라 기대된다. 한편, 표준 모형에서 뮤온 입자의 비정상 자기 쌍극자 모멘트의 값을 결정하는데 하드론 보정항의 격자 계산 결과에서 큰 성과가 보고되고 있다. 이와 병행하여, 미국 페르미 국립 입자가속기 연구소에서 진행되는 E989 실험이나 일본의 J-PARC에서 진행되는 E34실험에서, 2019년 이후로 뮤온 입자의 비정상 자기 쌍극자 모멘트의 정밀한 실험값을 발표할 예정인데, 이로부터 새로운 물리의 존재 여부를 밝혀낼 수 있으리라 기대된다.

(2) 맛깔 물리 실험(Phillip Urquijo, Niels Tuning, Satoshi Mihara)

맛깔 물리 실험에 관한 강연은 B, D, K 등 강입자계의 맛깔 현상 및 렙톤의 맛깔 현상 연구로 구분하여 세 개의 강연으로 구성하였다. 먼저 강입자계의 CP 대칭성 깨짐과 CKM 현상을 주제로 강연한 Phillip Urquijo는 해당 분야의 여러 주요 결과들을 소개하면서 우리나라 음식 김치와 고추장에 빗대어 중요한 결과들은 '김치처럼 spicy하다', 또는 몇몇 아주 중요하다고 간주한 결과들은 '고추장만큼 hot하다'라는 표현을 사용하여 청중들의 주목도를 높였다. 고추장에 비유된 뜨거운 결과 중 하나는 최근 수년간 ' $R(D^{(*)})$ 이상현상(anomaly)'이라 불리며 매우 주목받고 있는 $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ 붕괴율에 관한 측정 결과들이다. Belle, BaBar, LHCb 실험 결과를 모두 합쳐 얻은 평균 값이 표준모형의 예측치에 비해 약 3.9σ 벗어난다는 것이다. Niels Tuning은 B, D, K 중간자의 희귀붕괴 측정 결과에 관해 강연하였다. 특히 최근 수년간 ' $R_{K^{(*)}}$ 이상현상(anomaly)'이라 불리며 지대한 관심을 받고 있는 $B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell^-$ 붕괴의 최신 연구결과들을 소개하였다. 이러한 이상현상들의 이론적 해석 및 함의에 관해서는 Fajfer의 맛깔물리 이론 강연에서 다루어졌다. Satoshi Mihara가 맡은 렙톤의 맛깔 현상 강연에서는 $\mu \rightarrow e \gamma$ 와 같은 하전 렙톤의 맛깔변환 반응의 탐색 결과 및 전망, 그리고 뮤온(μ)의 이상자기모멘트($(g-2)_\mu$) 측정의 현황 및 전망 등이 보고되었다. 현재 $\mu \rightarrow e \gamma$ 반응 탐색의 가장 강력한 붕괴율 상한값은 스위스 Paul Scherrer 연구소(PSI)의 MEG 실험에서 얻은 4.2×10^{-13} 이다(90% 신뢰도). MEG

실험의 업그레이드인 MEG II 실험은 향후 3년간 데이터를 취득하여 붕괴 상한선을 10배 가량 작게 만드는 계획으로 실험을 진행하고 있다. 그밖에도 미국 페르미연구소(FNAL)의 Mu2e, 일본 J-PARC 연구소의 COMET 실험 등에서 붕괴율 상한값을 10^{-17} 수준으로 향상시키는 것을 목표로 실험을 진행하고 있다. $(g-2)_\mu$ 측정에 대해서는 FNAL과 J-PARC에서 준비 중인 실험의 현황과 전망을 보고하였다.

4. 입자물리 첨단 기술 및 전망(Technology and Future)

전체회의 첫날인 7월 9일 오후에 개최된 'Tech & Future' 주제의 전체 세션에서는 입자물리 실험을 위한 검출기와 가속기 및 컴퓨팅 시스템의 개발 현황 및 미래 전망, 그리고 산업에의 응용 등에 관한 강연들이 이어졌다.

(1) 입자 검출기 연구 개발(Daniela Bortoletto)

입자 물리학 역사를 돌이켜 볼 때 새로운 돌파구를 마련할 수 있었던 것은 새로운 첨단 실험적 도구의 개발이 있었기 때문이다. 입자가 지나가면서 남기는 신호는 매우 약한데 그것을 더욱 더 정밀하고 빠른 시간 안에 검출하는 것이 관건이다. 100배 더 희귀한 현상을 관찰하기 위해 100배 시간을 들여 관찰할 수는 없기 때문이다. 따라서 더욱 더 큰 가속기, 입자 검출장치와 함께 정밀도를 높이는 검출기가 필요하다.

검출기 세션들의 발표 정리하는 자리에서 많은 시간을 LHC 실험들의 업그레이드에 할애했다. 가까운 장래인 2023-2025에 주요 실험들은 대대적인 검출기 성능 업그레이드를 앞두고 있다. 업그레이드 비용은 약 10년 전 검출 장치를 만든 비용의 반 이상이 든다. 예컨대 CMS 실험에만 약 3000억 원이 업그레이드 프로젝트에 소요될 것이다. 높은 방사선 환경에서도 작동할 수 있는 반도체 기반 하전입자 궤적 검출기가 교체될 것이고 FPGA에 궤적을 찾는 알고리즘을 심어서 빠르게 그리고 정밀하게 관심있는 입자 생성 과정을 포착할 수 있을 것이다. 30 picosecond의 분해능을 가진 얇은 검출기 층이 비교적 최근에 제안되었고 LHC 데이터에서 시간이라는 새로운 변수를 데이터 분석에서 다룰 수 있게 되어 신호를 재미있는 사건들을 더욱 잘 찾을 수 있을 것이다. 이번 업그레이드 이후 10년 동안 고휘도 환경에서 실험이 수행될 것이다.

입자물리학 실험은 아이디어로부터 실험 시작 시간까지 20년 정도가 걸린다. 현재 개발된 기술로는 달성하기 어려운 성능의 실험을 구상한다. 원하는 성능을 얻기 위해 어떤 R&D를 해야 하는지 단계적으로 접근하여 장기간 연구, 개발한다. 중소기업과 함께 기술을 개발하고 해외 중소기업들은 개발한 기술을 다른 응용분야에 적용하려고 한다. 실리콘 광증배관이라

는 SiPM 기술은 고에너지 실험연구자들의 수요에 의해 개발이 된 제품이다. 새로운 실험의 필요에 맞게 꾸준히 성능 개량과 함께 새로운 아이디어 접목이 이뤄지고 연구가 활발한 분야다. 최근에 SiPM을 만드는 회사인 SensL이 자율 주행차의 핵심인 LiDAR의 개발 회사에 의해 인수되었다. 첨단의 기초과학 연구를 위해서는 첨단의 검출기가 필요하고 이러한 기술은 반드시 널리 쓰이게 된다.

우리나라 IBS 지하 물리 연구단에서 개발 중인 검출기도 주목을 받았다. 이 검출기는 원자핵의 희귀 이중 베타 붕괴 사건을 측정할 목적으로 섬광을 내는 물리브덴 기반 결정을 쓰는 데 여기서 나오는 포논(phonon) 신호를 동시에 측정함으로써 현재 세계 최고 정밀도를 지닐 것으로 예상되고 있다.

(2) 가속기, 컴퓨팅, 산업 응용 등

가속기 개발 및 전망에 관한 강연은 두 개로 구성되었는데 일본 KEK 연구소의 Kazunori Akai가 SuperKEKB의 작동 현황, 최신 결과 및 전망에 대해 발표하였다. SuperKEKB 가속기를 이용한 Belle II 실험의 Phase 2 작동이 2018년 3월부터 7월까지 성공적으로 진행되어 일정량의 입자충돌 데이터를 Belle II 검출기에 기록하였으며 2019년 초에 시작될 Phase 3 작동을 기대하게 하였다. Phase 2에서 달성한 SuperKEKB 최대 휘도는 $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이고 이는 목표치에 근접하는 결과이다. 현재 에너지 프론티어에 있는 양성자 충돌기의 특징을 보완하고 좀 더 정밀한 측정 및 새로운 물리의 탐색을 가능하게 하는 옵션으로 차세대 전자-양전자 충돌기 프로젝트들이 준비되고 있다. Xinchou Lou는 현재 논의되고 준비되고 있는 ILC, CLIC 등 선형 충돌기와 CEPC, FCC-ee 등 원형 충돌기의 특징, 개발 현황, 전망 등을 설명하였다. 중성미자 실험의 경우에도 일본의 T2HK, 미국의 DUNE 실험들이 2020년대 후반부 데이터 획득을 목표로 현재 추진 중이다. Jae Yu가 이 실험들의 개발 현황 및 전망에 관해 발표하였다. Liz Sexton-Kennedy는 '고에너지 물리를 위한 소프트웨어와 컴퓨팅의 미래' 주제의 강연에서 ATLAS 실험 하나만으로도 이미 5 exabyte가 넘는 데이터 양을 저장하는 상황으로 개별 실험에서의 데이터 저장 및 처리를 위한 전산자원 수요는 급격히 늘어나고 있으며 이를 위해 데이터 저장과 전송을 위한 국제협력이 절실하다고 강조하였다. 또한 기계학습 등 차세대 입자물리 실험의 데이터 분석 환경의 변화에 적응할 수 있어야 함을 청중들에게 과제로 남겼다. 이 세션의 마지막 강연자인 Petra Riedler는 입자물리 실험에서 개발된 신기술들이 산업체에 응용되는 다양한 사례들, 그리고 입자물리 실험을 위한 다양한 산학협력 현황들에 관해 보고하였다.

5. 기타 분야

(1) 초끈이론 현미경을 통해 본 블랙홀부터 큐비트까지 (Tadashi Takayanagi)

과거에 Bekenstein-Hawking 공식을 이해하려는 많은 노력을 통해 도달한 홀로그래피(holography) 개념은 현재 초끈 연구의 핵심이다. ADS/CFT 등가성(correspondence)은 양자 중력과 그 자체의 정의까지 탐구할 매우 강력한 접근방법을 제공한다. 특히 ADS/CFT 틀에서 양자 얽힘의 연구는 양자 얽힘으로부터 시공간이 발현된다는 참신한 아이디어에 영감을 주었다. 이 분야의 해결할 과제로는 ADS/CFT의 구체적 증명, 다른 시공간들로의 ADS/CFT 일반화, 블랙홀 정보역설의 확실한 해석, ADS/CFT 통한 더 많은 양자정보량의 탐색, 열린 초끈론에서의 홀로그래피 파악 등이 있다.

(2) 강한 핵력과 하드론 이론 및 격자 계산(Phiala Shanahan)

QCD 격자 계산의 최근 성과에 따르면, 격자 계산을 사용하지 않은 경우에 비해 높은 정밀도로 강한 핵력의 크기와 무거운 쿼크의 질량을 결정할 수 있다. B-meson이 렙톤으로 붕괴하는 경우, K-meson이 파이온과 두 개의 중성미자로 붕괴하는 경우에 핵자 행렬 계산, 파톤 밀도 함수의 정밀한 계산, 먼거리 중성미자 실험에서 중성미자의 에너지를 재구성하기 위해서 필요한 핵자 행렬 계산 등 QCD 격자 계산의 연구와 적용 범위가 확대되고 발전되고 있다.

(3) 암흑 물질 연구 및 우주론(Manuel Drees, Masashi Hazumi, Hyun Su Lee, Yannis Semertzidis)

Lambda CDM 이론으로 팽창하는 현대 우주론이 정립되었으나, 암흑 물질과 암흑 물질의 기본적인 이해는 입자 물리와 우주론에서 공통적으로 중요한 문제이다. 우주 배경 복사의 관측 결과는 간단한 스칼라 입자로 기술되는 인플레이션 이론의 예측과 잘 일치하고 있다. 우주 배경 복사와 Lambda CDM에 따라서 결정된 허블 상수와, SN1a 초신성의 거리를 측정하여 결정된 허블 상수 사이에 99% 신뢰도로 차이를 보이고 있는데, 미래에 더 많은 데이터에 의해서 허블 상수를 더 정밀하게 측정함으로써 방향이 결정될 것이다. Dark Energy Survey (DES)는 우주 배경 복사와 비슷한 수준의 정밀도로 현재 우주에서 물질의 비균일성과 우주의 총 물질 에너지를 측정하였다. SDSS-III의 일부 프로젝트인 BOSS의 거시 은하 구조로부터 중성미자 질량의 합이 0.16 eV보다 작다는 것을 보였다. 입자 물리에서 암흑 물질의 많은 후보가 있는데, 그 중에 워프 암흑 물질의 검출을 위한 많은 실험이 진행되고 있는데, PandaX, LUX, XENON 등 실험들이 암흑 물질의 상호작용의 크기를 강하게 제한하고 있다. 앞으로 가까운 미래에 향상된 워프 암흑 물질의 실험에서는 워프

암흑 물질의 변수 영역을 넘어서 중성미자의 배경 신호를 관측할 수 있을 정도의 민감도에 도달할 것으로 예측된다. 우주 초기에 새로운 입자가 우주의 밀도를 지배하는 경우에서처럼 워프 암흑 물질의 생성 과정에 대한 더 많은 연구가 진행되고 있고, 액시온 입자, FIMP, SIDM, 한 종류 이상의 입자로 구성되어 암흑 물질, 새로운 기작에 의해서 생성되는 암흑 물질을 검출할 수 있는 새로운 직접, 간접적인 실험들이 제안되고 있다.

암흑물질 및 액시온 탐색 연구는 우리나라에서도 기초과학연구원(IBS) 산하 '지하실험연구단(CUP)'과 '액시온 및 극한상호작용연구단(CAPP)'을 통해 활발히 이루어지고 있다. CUP 연구단의 Hyun Su Lee는 암흑물질 탐색에 관한 강연에서 WIMP 후보에 대한 탐색 결과를 종합하여 보고하였다. XENON-1T 실험에서 30 GeV 질량의 WIMP 산란단면적을 $4 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ 까지 낮춘 것을 포함해서 2중상(dual-phase) 액체 TPC 검출기를 사용한 실험들이 수십 ~ 수백 GeV 영역의 질량을 가진 WIMP 탐색을 주도하고 있고 빠르게 산란단면적 상한선을 낮추고 있다고 하였다. 또한 수 GeV 및 그 이하의 질량을 가진 WIMP 탐색을 위해 여러 검출기술들이 개발되고 있음을 보고했다. 현재 12.9σ 의 신호를 보이고 있는 DAMA/LIBRA 결과를 검증하기 위해 SABRE, ANAIS, COSINE 등의 실험이 진행되고 있다. 특히 국내에서 진행되고 있는 COSINE-100 실험의 59.5 일치 데이터를 분석하여 표준 헤일로 모형에서 WIMP와 핵자간의 스핀무관 상호작용에 의한 신호가 나타나지 않았다는 점에서 1단계 DAMA/LIBRA 결과와 배치되는 결과를 보고하였다. 이와 아울러 COSINE-100 실험은 이론적 모형에 무관한 DAMA/LIBRA 결과 검증을 위해서 현재 585일치 데이터를 분석하여 annual modulation 탐색을 시도하고 있다. CAPP 연구단의 Yannis Semertzidis는 액시온 탐색을 위해 세계 각 곳에서 진행되고 있는 실험의 현황 및 전망을 소개하였고 특히 우리나라의 CAPP 연구단에서 진행하는 CULTASK 실험의 현황을 보고하였고 2020년에는 25 T 자기장을 사용한 실험이 가능하다고 전망하였다. 그밖에도 태양에서 생성되는 액시온의 탐색 등 다양한 방법으로 진행되는 실험들을 소개하였다.

대중강연

이번 ICHEP2018에서는 CERN의 Gian F. Giudice 교수와 시카고 대학의 Michael S. Turner 교수가 각각 “기묘한 블랙홀 세상 <The Strange World of Black Holes>”과 “쿼크와 우주 <Quarks and the Cosmos>”라는 제목으로 대중강연을 하였다.

이 대중강연들에 많은 초중고, 대학생 및 일반 참가자들이 참가한 가운데, 학생들은 신기한 블랙홀의 세계와 극미 소립자 세계와 거대 우주의 필수불가결한 연관성에 감탄하며 많은 질

문들을 열정적으로 쏟아 내었다. 강연 후에는 다수의 참가자가 강연자들과의 기념촬영을 하였고, Giudice 교수는 저서 <젯토 스페이스>의 한글번역본에 대한 진필 사인회를 가졌다.

두 대중강연의 내용을 간략하게 정리하면 아래와 같다.

1. 대중강연 1: 기묘한 블랙홀 세상(Gian F. Giudice)

강연은 먼저 가수 사이의 율동 장면을 여러 프레임으로 보여주며 시공간의 개념을 쉽게 설명하고, 아인슈타인의 일반상대론에서 물질은 시공간의 구조를 결정하고 반대로 시공간은 물질의 운동을 결정함을 시각적으로 보여주었다. LIGO 실험에서 두 블랙홀이 충돌하여 발생한 중력파의 관측을 2016년 2월 전 세계에 공표하였을 때, 한국 과학자들도 LIGO 실험에 활발하게 참여하고 있음을 강조하였다. 중력파의 원인이 된 블랙홀의 기본 성질, 블랙홀의 사건 지평선, 양자역학에 의한 블랙홀의 호킹 복사 현상, 블랙홀 엔트로피와 홀로그래피 원리, 그리고 초끈이론과의 연관성 등을 설명하였다. 블랙홀과 비슷하게, 팽창하는 우주에도 사건 지평선이 있음을 설명하고, 우주의 초기 상태를 이해하기 위해 CERN에 있는 LHC에서 거대한 입자 충돌 실험이 수행되어 왔다고 소개하였다. 입자물리 연구는 마치 전체 그림을 모르는 상태에서 흩어져 있는 퍼즐들을 끼워 맞추는 문제와 같다는 한국계 입자물리학자 고 이휘소 박사의 명언을 언급하면서, 과학 연구에 높은 능력과 가능성을 갖고 있는 한국 과학자들을 높이 평가하였다.

2. 대중강연 2: 쿼크와 우주(Michael S. Turner)

우선 우주는 상상할 수 없을 정도로 큰 반면에 기본 소립자는 상상하기 어렵게 작다는 것이 밝혀져 왔음을 생생하게 설명하였다. 놀랍도록 이 양 극단의 세계에 깊은 연결고리가 있음을 밝히고 그 고리가 바로 그 매우 큰 세상과 바로 그 매우 작은 세상에 대한 우리 인류의 이해를 획기적으로 진전시켜 왔음을 설파하였다. 또한 우주가 매우 젊고 매우 작은 상태에 있을 때 일어나는 사건들 현재 우리가 보고 있는 우주를 형성하고 소립자들에 대한 정보를 드러낸다는 점을 설명하였다. 강연자가 손수 그린 화려하고 정확한 정보를 담은 도식들을 활용하여, 암흑물질, 암흑에너지와 급팽창(inflation)이 어떻게 우주 모습을 형성하고 소립자와 관련된 미스터리를 해결할 어떤 실마리를 던져 주는지를 생생하고 구체적으로 기술하였다. 마지막으로 빅뱅 전에 무슨 일이 있었는지, 우주는 어떤 종말을 맞이할지와 시공간의 특성 등을 포함한 우주에 대한 큰 질문들을 언급하면서 강연을 마무리하였다. 명성에 걸맞게, Turner 교수의 적절한 비유와 특유의 유머는 강연 내내 관객석에 웃음꽃이 만발하도록 하였다.

그밖에도 휴식일인 7월 8일(일요일)에 국립과천과학관에서 플라네타리움 쇼를 개최하였다. 'Phantom of the Universe'라는 제목의 이 쇼는 로렌스 버클리 연구소의 Michael Barnett 과 공동 연구자들이 함께 제작한 것으로 ICHEP2018 학회를 위해 제공하였고 과천과학관에서 상영을 허가하여 이루어졌다. 당일 2회에 걸쳐 상영된 플라네타리움 쇼에서는 고려대 최수용 교수가 일반인 관람객들을 대상으로 '소립자에서 우주까지'라는 대중강연을 하여 일반인들이 흥미있게 쇼의 내용을 잘 이해하도록 하였다.

맺는 말

ICHEP2018에서는 3일간의 분과 회의와 3일간의 전체회의, 그리고 포스터 세션까지 합쳐서 1000개에 육박하는 학술논문이 발표되어 명실공히 입자물리학의 최고 권위 학회로서 손색이 없는 학술 프로그램이 진행되었다. 특히 스테릴 중성미자의 존재 가능성에 대한 실험 발견, 에너지 프론티어에서 탑쿼크쌍 생성시 스핀 상관성이 이론 예측과 차이가 난다는 발견, 그밖에도 많은 새로운 발견들을 통해 이 분야의 학술 활동의 역동성을 실감할 수 있었다. 특히 기존의 고에너지물리학의 좁은 영역에 머무르지 않고 우주론, 천체물리 등과의 융합 연구 결과들이 활발히 발표되었고 기계학습 등 소프트웨어, 가속기 및 검출기 하드웨어, 산업체 응용 등 여러 분야의 연구, 개발 활동과 연계되는 움직임이 더욱 활발해진 것을 잘 보여주는 학회였다.

ICHEP2018의 마무리 강연은 프린스턴 고등과학연구소의 Paul Langacker가 맡았다. 이 강연에서 그는 뉴턴의 중력 이론이 "멋지게 성공적"이었으며("spectacularly successful") 200여 년을 살아남았지만 결국 상대성이론으로 대체된 것처럼 입자물리 표준모형이 마찬가지로 멋지게 성공적이며 현재까지 50년을 살아남고 있지만 플랑크 척도에 이르는 우주 시공간의 모든 면을 아우르는 새로운 이론으로 대체되어야 하고 이를 위해 새로운 패러다임이 필요함을 역설하였다. 이를 달성하기 위해서는 에너지 프론티어, 중성미자를 포함하는 정밀측정 프론티어, 우주론과 천체물리 등 각 방면에서의 진지한 노력과 천재적 영감, 그리고 자연이 인류에게 베푸는 행운이 필요하다고 말하였다. 한편 고에너지물리 연구가 국제협력의 좋은 모범이 되고 있다고 강조하며 고에너지물리학계에서 이루어지고 있는 대중화, 다양성 추구 및 차별금지, 그리고 연구 부산물(spin-off)로서의 산업체 응용 등의 노력을 언급하였다. 이것은 ICHEP의 주관기관인 IUPAP/C11의 정책에 따라 강조되고 있는 부분이기도 하다. 모쪼록 ICHEP2018의 성공적 개최가 국내 고에너지물리 분야, 나아가서 기초과학의 발전에 한발 더 나아가는 좋은 계기가 되길 바란다.