10년 후의 입자 물리학

DOI: 10.3938/PhiT.23.015

남 순 건

Particle Physics: Looking Forward – the Next 10 Years

Soonkeon NAM

Particle Physics has been going through a really exciting period recently. The discovery of the Higgs particle and the observation of a primordial gravitational wave are just two of the many exciting developments. Based on the developments in particle physics, both theoretical and experimental, during the last 50 years, we look forward to what might be the status of particle physics 10 years from now. We expect major developments in supersymmetry, dark matter, and physics beyond the standard model. We also foresee a major development in the field of the very early universe. On the theoretical side, more emphasis on experimental quantum gravity will follow.

10년 후의 입자물리학이 어떤 모습을 가지고 있을지를 말한다는 것은 그 어떤 것보다도 어려운 일이다. 5년 뒤의 모습이려면 현재의 여러 가지 연구동향을 토대로 어느 정도 예측이 가능하다고 본다. 그리고 30년 후의 일은 어느 누구도 장담하지 못하기 때문에 많은 상상력을 동원해도 된다. 반면에 10년 후의 일은 현재의 동향으로 예측 가능한 경계에 있는 시점이며, 면서도 상상의 나라를 마음대로 펼 수도 없는 시점이다. 10년

후면 필자가 정년퇴직하게 되는 시점이다. 필자가 1984년에 대학원 박사과정에서 입자물리학을 본격 연구하기 시작하여 연구 경력 40년을 마치는 해가 바로 10년 후인 2024년인 것이다. 따라서 비교적 어려운 과제임에도 불구하고 해보기로 했다. 사실 30년 전에 필자는 입자물리학이 현재와 같이 비약적으로 발전하리라 상상을 하지 못했기 때문에 앞으로 10년을 내다본다는 역할을 제대로 할 수 있을지 조금 의문이 들기는 하지만, 지난 30년의 경험이 그때보다는 미래를 좀 더 잘 예측할 수 있게 하지 않을까 하는 조심스러운 기대를 하게 한다.

그럼 이런 어려운 과제를 어떻게 풀어나갈 수 있을까? 미래의 예측을 위해서는 역사적 고찰이라는 방법이 그래도 제격이라 생각된다.

입자물리학의 역사를 되돌아보면 크게 세 시기로 나뉘다고 볼 수 있다고 필자는 생각한다.

입자물리학의 태동기인 20세기 초 - 1950년대 (약 60년)

입자물리학의 성장기인 1960년대 - 1980년대 (약 30년)

입자물리학의 완숙기인 1990년대 - 현재 (약 20년)

라고 필자가 임의로 나누어 보았다.

현재 입자물리학에서 추구하고 있는 많은 연구 주제들이 형성되고 제기되었던 때는 성장기였다고 생각된다. 지난 20년 동안은 그때 제기되었던 수많은 문제들을 이론적, 실험적으로 풀려왔던 시기라 볼 수 있다. 물론 지난 20년 동안에도 제기된 중요한 문제 몇 가지 - 예를 들어 가속 팽창하는 우주의 발견과 암흑에너지 - 가 있기는 하지만 대부분의 문제 제기는 이미 성장기에 되었던 것이다. 따라서 그 당시 제기되었으나 아직도 해결되지 않은 문제들에 많은 물리학자들이 매달려 있기 때문에 앞으로 10년을 내다본다면, 바로 이런 미해결 문제들을 풀러가는 시기가 될 것이라 생각이 든다. 입자물리학은 그 성격상 거대한 실험장비들이 수반된다. 따라서 10년 후의 입자물리학을 내다보는 데는 이러한 실험장비들이 어떻게 준비되고 있고, 업그레이드되는 일정이 어떠한지를 아는 것도 매우 중요하다. 물론 이런 장비에서 전혀 예측하지 않은 새로운 현상,

저자약력

남순건 교수는 서울대학교 자연과학대학 물리학과를 졸업(이학사, 1982)하고, Yale 대학교 물리학과를 졸업(Ph.D, 1987)한 후 Virginia Tech, MIT, 서울대에서 박사후연구원(1987-1991)을 거쳐 1992년부터 지금까지 경희대학교 이과대학 물리학과(서울캠퍼스) 교수로 재직 중이다. 경희대학교 일반대학원 원장(2012-2014), 경희대학교 미래정책원장(2014-현재)을 맡아왔고, 한국물리학회 입자물리학분과 위원장(2011-2014)으로 활동하였다. 저서로는 '스트링코스모스'가 있다. (nam@khu.ac.kr)

입자들의 발견이 있을 수도 있다.

필자가 입자물리학과 위원장을 맡았던 지난 3년간은 최근 들어 입자물리학에서 가장 놀라운 발견이 많았던 때라고 이야기할 수 있다. 두 가지만 든다면 2012년 발표된 힉스(Higgs) 입자의 발견이고 또 다른 하나는 올해인 2014년 초에 발표된 우주 배경복사의 편광에 투영된 원시우주의 중력과 흔적의 발견일 것이다. 1980년대에 있던 W, Z 입자의 발견에 비견할 만한 대단한 결과들이다. 이미 힉스입자의 발견에 따라 2013년에는 50년 전 이론을 제안한 사람들에게 노벨상이 주어지기도 했다. 여기서 한 가지 짚고 넘어가야 하는 것이 있는데, 대규모 실험결과에 대한 노벨상의 가능성이다. 힉스입자의 발견에는 유럽공동체에서 10조 원을 들여 만든 CERN에 위치한 LHC라는 입자가속기에서 ATLAS와 CMS라는 입자검출기를 사용한 수천 명의 물리학자들이 공동연구한 실험팀들의 대단한 공로가 들어갔는데, 노벨상을 이들에게 주는 것이 기술적으로 어려워 보인다. 앞으로도 얼마든지 새로운 입자들이 발견될 수도 있는데, 그때마다 이런 논란이 있을 수 있다. 미리 밝히는데, 여러 가지 연구에 관련된 구체적인 연구자의 이름을 일일이 다 거명하기에는 지면이 너무 작게 배정되어 가장 유명한 사람과 가장 활발히 연구하는 사람도 이름을 언급하지 않기로 하고 글을 쓴다.

그럼 입자물리학에서의 미해결 문제들은 어떤 것들이 있고, 이를 해결하기 위해 어떤 노력을 하고 있는지 살펴보기로 하자. 입자물리학에는 표준모형(Standard Model)이라는 이론이 있다. 이 이론은 물질의 구성은 쿼크(quark)와 렙톤(lepton)들로 이루어져 있고, 이들의 상호작용은 강작용, 약작용, 전자기작용으로 되어있고, 이러한 상호작용을 매개하는 입자들로 강작용을 매개하는 글루온(gluon), 약작용을 매개하는 W, Z입자, 전자기작용을 매개하는 광자(photon)가 있다는 것이다. 그리고 쿼크와 렙톤의 질량을 부여하는 입자로 힉스입자가 있다. 이들 입자들과 그들의 상호작용은 양자장론(quantum field theory)으로 기술되고 특별한 형태의 대칭성을 가지고 있다. 지난 30여 년간은 입자물리학 표준모형을 한 부분씩 실험적으로 검증해 나간 기간이라 봐도 과언이 아니다. 쿼크모형은 정확히 50년 전인 1964년 제안되었다. 6가지의 쿼크가 있는데, 쿼크모형이 제안되기 전에 발견되었던 입자들을 설명하기 위한 up, down, strange quark 세 가지가 있고, 1974년 charm 쿼크 발견, 1977년 bottom 쿼크 발견, 1995년 top 쿼크 발견으로 표준모형의 중요한 구성요소인 쿼크의 발견은 모두 종료되었다.

렙톤은 전자, 뮤온(muon), 타우입자와 이들과의 짝을 이루는 세 가지 중성미자(neutrino)로 이루어져 앞에서의 6개의 쿼크와 매우 유사하게 6가지가 있다. 전자는 이미 1897년 발견되

었고, 뮤온은 40년 후인 1936년 발견되었다. 타우입자는 뮤온 발견 약 40년 후 1977년에 발견되었다. 재미있는 사실은 타우입자를 발견하고 현재 약 40년이 되었다는 점이다. 그럼 또 다른 렙톤이 더 있을 수 있을까하는 의문이 생길 수 있다. 그에 대한 답은 '더 이상은 없다'이다. 이론과 실험에서 더 이상의 렙톤의 발견은 없다고 말하고 있다. 입자물리에서는 서로 다른 렙톤들은 다른 플레이버(flavor)를 가지고 있다고 말한다. 세 가지만의 플레이버가 자연에 있다는 이야기이다.

그럼 중성미자는 어떻게? 1930년에 전자중성미자가 이론적으로 제안되었다. 그리고 이 입자를 발견하는데 26년이 걸렸다. 1956년이 되어서야 실험적으로 그 존재가 입증된 것이다. 뮤온중성미자는 1940년대 이론적으로 제안되었고, 약 20년 걸린 후 1962년 실험으로 검증되었다. 타우중성미자는 타우입자가 발견된 1977년 곧바로 이론에 포함되었으며, 약 20여 년 후인 2000년에 실험으로 검증되었다. 여기서 우리는 매우 재미있는 패턴을 볼 수 있다. 입자가 이론적으로 제안되고 실험적으로 검증되는데 20여 년씩 걸렸다는 점이다.

그럼 이제 10년 후의 입자물리학의 모습을 예측해 보자.

중성미자의 질량의 기원 문제 해결

표준모형에서는 중성미자의 질량은 영이다. 그런데 실험적으로는 중성미자들은 매우 작지만 영이 아닌 질량을 가지고 있다. 표준모형을 넘어서 어떤 이론이 필요하다는 것이다. 중성미자의 질량에 대한 가장 강력한 실험적 증거는 한 가지 중성미자가 다른 중성미자로 스스로 변환한다는 것이다. 이러한 중성미자의 변환에 대해서는 국제적으로 많은 실험이 되어왔고, 국내에서도 경쟁력을 가지고 실험해오고 있다. 따라서 중성미자의 질량을 주는 메커니즘을 규명하는 것이 현재 입자물리학의 숙제 중 하나고, 이미 많은 연구가 되었으나, 앞으로 10년 후에는 중성미자의 질량이 왜 있는지 그 이유를 알고 있을 수 있을 것이다.

힉스입자에 대한 심층연구

2012년 7월에 발견이 발표된 질량이 $125 \text{ GeV}/c^2$ 인 힉스입자는 2013년 초에 확실히 스핀이 영인 스칼라 입자임이 밝혀졌다. 그래서 표준모형에서 마지막으로 남은 힉스입자의 발견으로 크게 보도된 바 있다. 그리고 패리티도 +임이 입증되었다. 그러나 과연 이 입자가 표준모형에서 이야기하는 바로 그 힉스 입자인지, 아니면 여러 가지 힉스입자를 도입하는 더 복잡한 모형의 일부인지는 아직 실험적으로 검증되지 않았다. 현재 가동을 중단하고 있는 LHC가 2015년에는 현재의 8 TeV보

다 약 2배 높은 13–14 TeV에서 재가동할 예정이다. 그리고 luminosity로 불리는 빔의 intensity도 높아질 예정이다. 그렇게 되면 현재의 데이터보다 대략 5배 정도 더 정밀 데이터가 수집될 것이다. 이를 기반으로 그 후에 수년간 바로 위에서 제기된 문제, 즉 힉스입자의 여러 가지 성질, 예를 들어 다른 입자들로의 붕괴에 대한 세밀한 연구를 통해 과연 힉스 입자가 표준모형의 그것인지 아닌지를 판명하게 될 것으로 예측된다. 필자가 예측하건데 가장 단순한 형태의 힉스입자는 아니지 않을까 한다.

LHC에서 나올 새로운 물리학

LHC는 2012년 후반부터 2014년 기간 동안 에너지를 업그레이드 중이다. 사실 현재까지는 원래 설계된 에너지보다 낮은 에너지에서 가동하고 있었다. 그리고 3년 정도 가동한 후에 또 다시 2018년 휘도(luminosity)를 이제까지 가동되었던 것의 2배인 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-2}$ 로 업그레이드하고 에너지도 안정적으로 14 TeV에서 가동되도록 업그레이드할 예정이다. 즉, 원래 설계되었던 LHC의 최대치를 달성한다는 것이다. 그리고 또 3년 정도 가동한 후 2022년에 또 1년 정도 업그레이드를 하여 luminosity를 $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-2}$ 로 대폭 늘린다는 계획이 있다. 따라서 10년 후에는 이러한 LHC가 가동되고 있을 것이다. 그럼 이렇게 업그레이드되는 LHC에서 2015년 이후 수년간 과연 어떤 새로운 현상을 찾게 될 것인가?

여러 가지 가능성을 다 놓고 따져보도록 한다. 첫 번째 가능성은 10년 후에도 새로운 그 어떤 것도 발견되지 않을 가능성도 있다. 그렇게 되면 입자물리학계는 상당히 당혹스러움에 빠질 것이다. LHC를 뛰어넘는 입자가속기에 대한 논의가 더 활발해지게 되는 계기가 될 수도 있으나, 이를 위한 자원 마련이 쉽지 않고, 또한 몇 가지 새로운 물리학이 발견된 상황보다는 새로운 입자가속기의 건설을 정당화하기가 더 어려울 수도 있다. 그리고 이론적으로도 완전하지 않은 표준모형을 어떻게 치료하고 보다 완성된 이론을 논의하는 것이 이미 수많은 나와 있는 혼란스러운 상태가 계속될 수도 있다.

다른 가능성은 물론 표준모형을 넘어서는 새로운 물리현상들이 몇 가지 발견되는 것이다. 일단 힉스입자들의 생성되는 정도 또는 붕괴되는 정도가 표준모형에서 예측하는 것과 차이가 나는 실험 데이터가 나올 수 있다. 그리고 새로운 입자들이 발견될 수도 있다. 그럼 이런 현상들을 과연 어떻게 설명할 것인가. 이미 표준모형은 이론적으로 완성된 이론으로 볼 수 없다는 것이 오래 전부터 지적되어왔고, 그 한계를 극복하기 위한 제안들이 오래 전부터 여러 가지 형태로 나와 있다. 수많은 이론 연구들이 이러한 확장된 모형에 대한 것이었다. 그럼 표준

모형을 넘어서 확장된 모형들이 어떤 것들이 있었는지 살펴보고 하자.

표준모형을 넘어서서

표준모형의 한계점에는 앞서 언급한 중성미자의 질량문제 외에도 힉스입자 같은 스핀이 0인 스칼라 입자 때문에 나타나는 문제가 또 있다. 이는 전문적인 용어로는 계층문제(hierarchy problem)이라 불리는 문제이다. 1960년대부터 물리학자들은 물리학에는 자연스러움(naturalness)이 있어야 한다고 생각해 왔다. 즉, 물리적 차원(예를 들어 길이, 시간, 질량)이 없는 물리법칙에서의 계수는 그 값이 1 근처의 값을 가져야 하지 수 천만 또는 수억 분의 일이라는 매우 크거나 매우 작은 값을 가지는 것은 자연스럽지 않다는 것이다. 이는 이런 매우 크거나 매우 작은 차원이 없는 계수들은 억지로 물리현상을 끼워 맞추려는 경우에 들어온다는 것으로 제대로 된 물리법칙들은 이런 fine tuning이 없어야 한다는 주장이다. 아무리 복잡한 대상이라도 수많은 계수를 도입하여 그 계수의 값을 잘 조절만 하면 얼마든지 끼워 맞추는 것으로서 일반적인 법칙을 추구하고 이를 통해 예측을 하려는 근본 물리법칙에는 있어서는 안 된다고 생각하는 것이다. 물론 자연법칙이 우리가 좋아하건 싫어하건 상관없이 이렇게 fine-tune된 계수를 가지고 있다고 볼 수도 있으나, 물리학자들의 경험상 그렇지 않다고 생각하는 것이다.

그럼 이런 자연스러움이란 기준에서 표준모형에는 어떤 문제가 있을까 살펴보자. 표준모형에서는 계층문제라는 것이 있다. 이는 표준모형에 나오는 기본계수들, 예를 들어 입자의 질량 등이 측정치와 매우 상이한 것에서 기인하는 문제이다. 그럼 어떻게 이렇게 상이함이 나타나는가 비전문가는 매우 궁금할 것이다. 이러한 문제를 이해하기 위해서는 ‘재규격화(renormalization)’이라는 조금 어려운 개념이 필요하다. 그럼 일단 재규격화에 대해 간단히 설명한 후 다시 본론으로 돌아오자. 기본 입자들의 상호작용을 기술하는 이론은 양자장론이다. 이는 입자들이 만들어지고 없어질 수도 있는 현상을 설명하기 위해 1930년대에 만들어진 양자론이다. 양자장론에서는 물리량을 계산하다보면, 적분구간이 영에서 무한대까지 해야 하는 경우가 많은데, 그럴 경우 흔히 무한대 값이 나오게 된다. 이러한 문제점을 해결하는 방법이 1940년대에 도입되었는데, 이러한 무한대 값에서 무한대 값을 잘 빼게 되면 유한한 값이 나오게 되고, 그 값이 바로 실험측정치로 비교될 수 있는 값이라는 것이다. 즉, 물리량을 계산할 때는 그 물리량에 양자역학적 효과들을 같이 넣어 계산해야 한다. 예를 들어 힉스입자의 질량을 계산하면 그 실제 측정치보다 비교할 수 없을 정도로 매우 커

지게 된다. 그 이유는 양자효과에서 불확정성 원리가 허용하는 범위 내에서 만들어졌다 없어지는 virtual particle들의 효과들이 들어오기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 엄청난 fine tuning을 해야 하는데 이는 자연스럽지 않다는 것이다. 따라서 10^{-19} m보다 작은 미시세계에서는 반드시 새로운 물리학이 존재한다는 것을 강하게 시사한다. 이런 문제점은 이미 1970년대부터 제기되었다. 이러한 문제를 자연스러움을 유지하면서 해결하기 위해서 제안된 여러 가지 아이디어들이 있는데, 그 중 제일 대표적인 아이디어가 초대칭성(supersymmetry)이라는 아이디어이다.

초대칭성입자들의 발견과 그 성질 연구

초대칭성이란 개념은 간단하게는 모든 입자들이 스핀이 1/2 씩 차이가 나는 짝을 가지고 있다는 것이다. 예를 들어 스핀이 1/2인 전자(electron)는 스핀이 0인 selectron이라는 새로운 입자인 짝이 있다는 것이다. 초대칭성이 자연에 존재하면, 힉스입자의 질량을 계산할 때 전자에 의한 양자효과만이 아니고 selectron에 의한 양자효과도 들어오는데, 그 값이 서로 부호가 반대이면서 절댓값이 같게 나오기 때문에 두 양자 효과가 서로 상쇄해서 0이 되기 때문에 앞에서 말한 계층문제가 발생하지 않는다는 것이다. 그리고 fine-tuning 없이 자연스러운 이론이 된다는 것이다. 즉 표준모형을 확장하여 초대칭성을 가지게 하면, 표준모형의 모든 입자들이 그 초대칭성 짝을 가지게 되고 이러한 입자들의 발견을 예측하게 되는 것이다. 물론 완벽한 초대칭성이 있다고 하면 전자의 질량과 selectron의 질량이 정확히 같아야 하지만, 분명히 전자질량의 selectron이 발견된 바 없으므로 초대칭성이 만약 있다면 반드시 깨어진 대칭성일 것이고 selectron의 질량은 훨씬 더 무거울 것이다.

초대칭성 이외에도 다른 방식으로 계층문제를 해결하려는 시도들이 많이 있으나, 지면관계상 여기서는 초대칭성을 위주로 이야기하기로 하자. 초대칭성은 스핀이 1/2 만큼 차이 나는 입자의 짝의 존재를 이야기하는 것이다. 즉, 페르미온(fermion)이 있다면 보손(boson)짝이 있다는 것이다. 따라서 초대칭성이 과연 맞는지 아닌지를 실험적으로 검증할 필요가 있고, LHC에서의 중요한 과제는 이러한 초대칭성 짝 입자들의 발견이라 할 수 있다. 조심스레 예측하건데 10년 후의 입자물리학에서는 초대칭성은 실험으로 검증된 이론으로서 새로 발견된 초대칭성 입자의 성질들의 정밀 측정에 많은 노력이 들어가리라 생각되고, 이러한 정확한 데이터에 기반을 둔 많은 이론들이 더 높은 에너지의 영역에서의 이론에서의 효과들, 특히 초기 우주에서의 현상들에 대한 연구를 활발히 할 것이라 예견할 수 있다. 초대칭성 짝 입자들 중에서 제일 질량이 낮으면서 전

기를 띠고 있지 않은 입자들은 더 이상 붕괴하지 않는 안정된 입자들일 것이다. 그러면서, 전기적 상호작용을 하지 않으니, 빛과도 반응하지 않고 빛을 내지 않는 입자, 즉 암흑 물질의 강력한 후보일 수 있다.

암흑물질의 검출

앞으로 입자물리학에서 10년간은 암흑물질의 검출에 가장 많은 노력이 기울어질 것이다. 암흑물질은 그 존재에 대해서는 천체물리학적으로 이미 잘 알려져 있으나, 실제로 암흑물질을 구성하는 물질을 검출한 적은 없다. 즉, 천체에서는 중력적으로 영향을 미치는 것이 중력렌즈라든지, 은하계의 회전속도라든지, 우주의 거대 구조 형성에 미친 영향이라든지를 통해 그 존재는 확실히 알려져 있다. 그리고 우주배경복사의 데이터 분석 등을 통해 우주에서의 그 구성비가 보통의 물질의 5배 정도라는 것도 알려져 있다. 그러나 과연 어떤 입자들이 암흑물질을 구성하고 있는지는 전혀 알려진 바 없다. 암흑물질 검출에는 크게 두 가지 방법이 사용될 것이다. 우선 LHC에서 더 높은 에너지로 올리면서 이제까지 에너지가 낮아서 발견할 수 없었던 초대칭입자를 발견하려는 노력을 할 것이다. 앞으로 10년간 가장 중요한 실험이 될 것이 분명하다. 그런데 암흑물질 검출 실험은 반드시 높은 에너지의 입자가속기만 필요한 것은 아니다. 이미 잘 알려진 대로 보통의 입자의 5배 정도 많은 암흑물질이 우주에 들어 있기 때문에 암흑물질은 얼마든지 우리 주위에 떠돌아다닐 수 있다. 다만, 상호작용이 매우 약하기 때문에 쉽게 검출할 수 없을 뿐이다. 암흑물질을 지구에서 검출하기 위해서는 매우 정밀하고, 외부의 잡음이 없는 곳에 검출기를 놓을 필요가 있다. 온도에 의한 잡음을 막기 위해 100 mK 이하의 극저온에 검출기를 넣고 실험을 한다. 그 대표적인 실험이 CDMS이다. 이러한 실험에서는 지구가 태양주위를 공전하면서 암흑물질을 부딪히고 지나가기 때문에, 암흑물질이 더 많이 모여 있는 곳을 지나칠 때마다 1년 주기로 더 많은 데이터가 나올 수도 있다. DAMA라는 실험그룹에서는 이런 데이터를 제시했으나, 아직 완전히 검증되지는 않은 것이다. 이렇게 검출하고자 하는 암흑물질을 통칭해서 WIMP(weakly interacting massive particle)로 부른다. WIMP 검출은 이미 국내에서도 수년 전부터 KIMS 실험에서 해오고 있었고, 작년부터는 보다 큰 규모의 실험으로 IBS의 CUP(Center for Underground Physics)에서 향후 10년간 WIMP 검출 실험을 할 것이다. 따라서 10년 뒤의 물리학에서는 낙관적으로 볼 때 한국에서 WIMP를 발견하는 성과가 있지 않을까 한다. 암흑물질에는 또 다른 후보가 있는데 액시온(axion)이라 불리는 입자가 있는데, 이는 자연스러움의 문제에 하나 더 있는 강한 CP 문

제라는 것이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 도입된 입자가 액시온인데, 이런 입자가 정말로 존재한다면, 강한 자기장 속에서 빛으로 전환될 수 있다. 액시온은 암흑물질의 전부는 아니지만 중요한 구성성분이 될 수 있다. 액시온 검출 또한 작년 부터 IBS의 CAPP(Center for Axion and Precision Physics Research)에서 세계에서 가장 경쟁력 있는 검출장치를 만들기 시작했기 때문에 10년 뒤에는 역시 한국에서 액시온 물리학에 대한 단초를 제공할 것으로 예견된다.

우주론과 입자물리학

입자물리학은 기본적으로 우주의 생성원리와 그 구성물질의 성질연구이다. 즉, 가장 중요한 응용분야는 우주의 탄생의 비밀을 밝히는 것이고 특히 빅뱅 직후의 우주의 상태를 연구하는 것이 그 큰 목적 중에 하나이다. 40년 전만 하더라도 우주론을 연구한다는 것이 그다지 정밀하지 않은 물리학으로 받아들여졌고, 이론 또한 정교하지 않은 것으로 여겨졌다. 그러나 1970년대에 초기 우주에서 급속팽창(inflation)이 있을 수 있다는 이론이 제시된 후 입자물리학과 초기 우주론은 매우 가까워졌다. 인플레이션 이론은 1초도 안 되는 짧은 시간에 우주의 부피가 10^{80} 배 이상 커졌다고 이야기하는 이론이다. 그럼에도 불구하고, 과연 이때의 우주 상태를 관측을 통해 검증할 수 있을까에 대해 연구자들은 반신반의 했었다. 그런데 1992년 미국의 COBE(Cosmic Background Explorer) 위성에서 최초로 우주 배경복사에서 10만분의 1도 정도의 온도 차이를 나타내는 우주의 비등방성(anisotropy)을 발견함으로써 초기우주론이 본격적 정밀과학 시대로 들어서게 되었다. 그 후 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 위성에서 2003년 보다 정밀한 우주 배경복사 데이터가 나오고 유럽의 PLANCK 위성이 2013년 그들의 데이터를 내놓음으로써 초기 우주의 양자요동에 의해 만들어진 우주 배경복사의 비등방성이 완전히 받아들여진 것이다. (여기서도 대략 10년마다 한 번씩 중요한 데이터가 발표된 것을 확인할 수 있다. 앞으로 10년 후 어떤 놀라운 데이터가 발표될지 큰 기대가 된다.) 인플레이션이론에서는 우주 초기에 어떤 스칼라 장이 있어 그 장의 위치에너지가 우주를 가속팽창시키는 암흑에너지로서 작용하고 그 퍼텐셜 아래 부분으로 내려온 후 진동하는 양자요동에 의한 우주배경복사의 비등방성의 근원이라는 일련의 시나리오가 신빙성있게 받아들여지게 된 것이다. 그러나 과연 인플레이션 이론이 유일한 이론인지 아니면 다른 여러 가지 다른 이론들(예를 들어 다중우주의 충돌..)도 제안된 바 있는데, 어떤 것이 더 맞는지 분간하기가 어려웠고, 특히 인플레이션이 일어나는 에너지 스케일에서의 물리학을 직접 데이터로서 분석한다는 것은 거의 불가능해

보였다.

그런데 정말로 놀라운 결과가 2014년도 3월에 발표된 것이다. BICEP2(Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2)라는 우주 배경복사를 남극점에서 관측한 실험에서 우주 배경복사의 편광에 초기 우주의 중력파의 흔적이 투영된 것을 발견한 것이다. 기본적으로는 편광의 방향에 '소용돌이' 패턴이 있는데 이것이 초기 우주의 중력파에 의해서 만들어진 것이기 때문이다. 이 실험이 정말로 완전히 옳다고 검증되기 위해서는 다른 관측(예를 들어 PLANCK)에서 재현할 필요가 있다. 왜냐하면 우주 배경복사의 편광의 소용돌이가 있을 수도 있기 때문에 이러한 '잡음'의 효과를 완전히 배제할 필요가 있다. 우주먼지는 우리의 은하계 방향에 많이 있고 BICEP2는 은하방향을 벗어난 방향에서 관측한 것은 맞으나, 너무나도 놀랍고 중요한 결과이기 때문에 반드시 재검증이 필요한 결과임에 틀림없다. 일단 관측이 왜 남극에서 되었느냐 궁금할 수 있는데, 우주 배경복사인 마이크로파는 수분에 잘 흡수가 된다. 그런데 남극점이 지구에서 가장 대기가 건조한 지역이기 때문에 그곳에서 관측을 한 것이다. 만약 초기 우주의 중력파의 흔적이 정말로 관측되었다면, 이 중력파는 진정으로 인플레이션이 일어난 10^{-27} 초 당시의 양자요동의 직접적인 효과이기 때문에 본격적으로 인플레이션이 일어난 에너지에서의 물리학을 직접적으로 볼 수 있게 된 것이다. 즉, 이제는 인플레이션 이론이 실험적으로 검증 가능한 이론이 된 것이다. 왜 중력파가 중요하냐 하면 빛을 통해 우주의 과거를 볼 수 있는 한계는 우주나이 38만 년 되었을 때까지이다. 그 이전은 빛을 통해서는 도저히 직접 볼 수 없는데, 그 이유는 그 이전에는 우주는 플라스마 상태로 뜨거워서 빛이 플라스마 속의 이온들과 계속적으로 충돌하기 때문에 과거에서 오던 빛도 다 산란해서 원래의 모습을 보일 수 없기 때문이다. 우주가 식으면서 전자들이 원자에 갇히는 순간, 즉 우주나이 38만 년쯤부터는 우주는 투명해졌다. 그래서 그때의 빛은 산란하지 않고 우리에게 전해질 수 있는 것이다. 즉, 현재의 우주 배경복사는 38만 년 당시의 우주 모습을 보여주는 것이다. 그러나 중력파는 시공간 자체의 요동이기 때문에 우주가 이온으로 가득 차 있는지에 상관없이 전파되는 것이다. 인플레이션이 일어나는 당시에 에너지의 요동에 의해 이와 맞추어 중력파가 발생하게 되고 이 중력파가 전파되면서 우주 배경복사에 특별한 흔적을 남기게 되는 것을 관측한 것이다.

양자중력 및 끈이론의 검증

앞에서 언급한 초기 우주의 중력파는 인플레이션이 일어난 당시의 에너지 영역이고 이 에너지 영역은 양자중력의 영역에

거의 다가선 영역이다. 양자중력이란 일반상대성이론은 기본적으로 양자역학과는 서로 모순이라는 것부터 시작하여 그럼 일반상대성이론과 양자역학을 아우르는 새로운 더 큰 이론이 필요한데 이 더 큰 이론을 일컫는 말이다. 이론적으로는 분명히 필요성이 있는데, 그 에너지가 너무 높아서 도저히 인간이 실험으로 검증할 수 없다고 여겨져 왔던 이론이다. 그런데 BICEP2의 실험 결과 발표 후로는 이제 양자중력도 실험으로 검증 가능한 것이 되었다고 생각할 수 있다. 양자역학과 일반상대성이론을 아우르는 더 큰 이론체계로는 끈이론이 가장 유력하고 가장 많은 연구가 된 이론이다. 1980년대 중반 이후부터 매우 활발한 연구가 되었던 끈이론은 수학에 더 가까운 것 아닌가 하는 지적을 많이 받아온 것이 사실이다. 물론 끈이론적 아이디어에 기반하여 입자물리학 현상론 또는 우주론에 대한 연구가 많았음에도 불구하고, 그 수많은 아이디어를 실험적으로 구분해 내기란 불가능하다고 여겨져 왔다. 그러나 앞으로 10년간은 그런 우려를 불식시키는 10년이 되지 않을까 하는 전망을 해본다. 지난 30년 동안 정교하게 개발한 수많은 아이디어와 엄밀성을 가진 끈이론이 이제 정말 혹독한 시험을 치고 확고한 물리이론으로서 정립하게 되는 기간이 될 것으로 기대된다. 따라서 10년 후의 입자물리학에서는 검증 가능한 양자중력효과에 대한 연구가 매우 활발한 주제로 되어있을 수 있고, 실험학자들도 양자중력의 기본을 숙지하려 하는 시기가 되지 않을까 전망해본다.

10년 후에도 풀리지 않을 문제

암흑에너지 현재 논의가 되고 있는데 10년 후에도 풀리지 않아 계속 연구가 되고 있을 문제가 어떤 것이 있을까 생각해 본다. 우선 암흑에너지의 문제라 할 수 있다. 20세기 마지막에 정말 놀라운 관측결과가 나왔는데, 이는 우주가 현재 가속팽창하고 있다는 사실이다. 보통의 물질과 암흑물질로 가득 찬 우주라면 이들의 당기는 중력에 의해 우주는 팽창하되 감속 팽창할 수밖에 없다. 그런데 우주는 실제로는 점점 더 팽창속도가 커지는 가속팽창을 하고 있고, 이는 서로 밀치는 그 어떤 것이 우주에 물질보다 더 많은 영향을 미치고 있다는 사실을 의미한다. 서로 밀치는 그 어떤 것을 우리는 암흑에너지라 부르고 있다. 그러나 이 암흑에너지가 과연 어떤 것인가에 대해서는 현재 전혀 힌트가 없다. 수많은 아이디어가 있지만, 그 어느 하나 속 시원한 것이 없는 것이 사실이다. 그리고 앞으로 10년 이내에 이 문제가 해결될 것이라 여겨지지 않는다.

다중우주의 실체 매우 오랜 기간 우리는 우리가 살고 있는 이 우주가 유일한 우주라 여겨왔다. 따라서 유일하다는 뜻의

Universe라 불려왔다. 그러나 끈이론에서는 우리 우주와는 다른 물리법칙을 가지고 있는 다른 우주의 존재를 시사한다. 그리고 다른 맥락에서이지만, 인플레이션 이론에서도 계속적으로 만들어지는 우주를 이야기하고 있다. 그래서 우리는 다중우주(Multiverse)를 생각하게 된다. 그러나 이러한 아이디어들이 과연 어떤 방식으로 10년 안에 검증될 수 있을지 전혀 알 수 없다.

새로운 입자가속기 현재 LHC 이후의 입자가속기에 대한 많은 논의가 되고 있다. 예를 들어 ILC(International Linear Collider)가 있다. 가장 낙관적으로 보면 2020년대 중반 이후 건립이 되어 2030년대가 되기 전에 데이터가 나올 수 있을 수 있으나, 10년 후에는 분명히 데이터가 나오지 않을 것이다. 그러나 실제로 건설이 조만간 시작된다면, ILC에서 나올 수 있는 많은 입자물리학에 대한 수많은 연구가 진행될 것이다.

M-이론의 실체에 대해서 여러 끈이론도 결국 하나의 더 큰 이론인 M-이론으로 모이게 된다. 다만, 특별한 경우에서의 M-이론에 대해서는 잘 알고 있으나 본연의 M-이론을 기술하는 수학적인 언어가 아직 없다고 본다. 앞으로 10년 안에 만족스러운 수학적 언어가 나올지 확실하지 않다.

결론

입자물리학은 정말로 흥미로운 물리가 쏟아져 나오는 문지방에 현재 서있다. 이러한 현재 상황에 비추어 볼 때 앞으로 10년간은 많은 결과들이 나올 것으로 본다. 암흑물질의 발견! 초대칭성 입자의 발견! 등의 뉴스가 분명 10년 안에 있을 것으로 예견된다. 그리고 필자가 도저히 예측할 수 없는 것은 전혀 기대치 않았던 현상의 발견이다. 이러한 발전을 토대로 10년 후의 입자물리학은 성숙된 분야로서 우주생성원리를 설명하는데 한 발짝 더 다가선 모습으로 있을 것이 분명하다. 그 분야의 장래는 결국 그 분야로 진입하는 신진 물리학자들의 역량에 달려 있다. 현재 전 세계적으로 어떤 신진 물리학자들이 입자물리학을 공부하고 있는가 보면, 과거 수십 년과 마찬가지로 매우 열의있고 능력있는 사람들이 너무나도 많다. 타 분야들과는 달리 이 분야는 진정으로 이 분야를 꼭 하고 싶은 사람들로만 되어있기 때문에 이들이 마음껏 연구할 수 있는 환경이 주어지는 한 그들의 능력은 꽃필 것이다. 한국에서의 환경도 지난 20년간 비약적으로 발전하였기 때문에, 신진 학자들이 걱정하지 않고 장기적으로 연구할 수 있는 환경만 완비된다면, 한국의 입자물리학은 전 세계에서 두드러진 발전을 할 것이라 기대한다.