

# 우주 냉성 비밀을 밝히는 끝없는 도전

글 | 박태선 \_ 고등과학원 연구조교수 tspark@kias.re.kr · 계범석 \_ 고등과학원 연구원 bkyae@kias.re.kr

다 른 분야와 마찬가지로 입자 및 천체 물리학계에서도 지난 30년간 너무나도 눈부신 발전이 있었다. 인간의 눈을 피해 숨어 있었던 자연의 비밀에 대한 인류의 도전은 그대로 자연에 대한 깊은 이해와 인류 지성의 진보로 이어졌다. 지난 30년간 입자 및 천체 물리학계에서 활발하게 논의되었던 여러 중요한 화두 중에서 중성미자 질량의 발견, COBE에 의한 우주배경복사 관측, 그리고 통일이론을 알아본다.

## 실험 통해 '중성미자도 질량 가진다' 검증

태양을 빛나게 하는 에너지원은 태양 중심부에서 일어나는 핵융합 반응이다. 이러한 핵반응에 의해서 태양에서 방출되는 중성미자의 플럭스에 대해 바콜의 이론이 제기되었고, 이를 확인하기 위한 데이비스 연구진의 홈스테이크 실험을 비롯한 여러 실험이 수행되었다. 그러나 모든 실험에서 중성미자는 이론치의 1/3에 지나지 않았다. 그 후 카미오칸데 II 실험에서 태양 중성미자뿐 아니라 우주선이 대기와 충돌하면서 만들어지는 대기 중성미자의 경우에도 같은 문제가 있다는 사실이 확인되었다. 이 문제를 풀기 위해 물리학자들은 지금까지 질량이 없다고 믿어졌던 중성미자가 사실은 아주 작지만 질량이 있고, 이 유한한 질량이 서로 다른 종류의 중성미자 사이의 변환을 일으킨다는 가설을 세웠다. 중성미자에는 전자, 뮤온, 타우라는 세 가지 렙톤에 대응되는 각각의 중성미자가 있고, 이들의 질량이 서로 다르다면 외부와의 자극이 없더라도 서로간의 변환이 일어난다. 태양의 경우, 중심부의 온도가 1억도 정도에 지나지 않기 때문에 가장 가벼운 렙톤인 전자의 짝에 해당하는 전자 중성미자만 생성된다. 이렇게 생성된 전자 중성미자가 지구까지 오는 사이에 뮤온 중성미자나 타우 중성미자와의 중첩상태로 바뀌었고, 지구상에서 전자 중성미자만을 측정하면 전체 중 약 1/3만 관측이 되는 것이다.

이 가설은 슈퍼-카미오칸데 등에서 이루어진 대기 중성미자에 대한 실험, 캐나다의 SNO에서 행해진 태양 중성미자에 대한 실험, 또 KamLAND 등 여러 곳에서 이루어진 핵발전소에서 발생하는 중성

미자에 대한 실험 등을 통해 마침내 검증되었다. 특히 SNO 실험에서는 전자 중성미자뿐만 아니라 다른 종류의 중성미자들을 모두 측정하여 전체 중성미자의 플럭스를 다 합하면 태양모델 이론치와 동등하다는 것을 증명하였다. 이 실험을 통해 태양에서는 오직 전자 중성미자만 만들어지지만 이 전자 중성미자 중 2/3가 지구까지 오면서 다른 중성미자로 변환된 것을 증명한 셈이다.

중성미자가 질량을 가진다는 사실은 우선 그간 중력을 제외한 물리법칙을 설명한다고 믿어져 왔던 표준모형에 보완이 필요함을 의미한다. 이는 이 표준 모델이 질량이 0인 중성미자를 예측하기 때문이다. 또한 중성미자의 질량과 서로 다른 중성미자 사이의 변환을 기술하는 믹싱 앵글은 우주의 전체 질량, 초신성 폭발, 빅뱅 등 천체 물리학에 지극히 중요한 일익을 담당한다. 특히 지난 30년간 연구되어 온 많은 이론들이 중성미자의 질량이 0이 아님을 시사하고 있어서, 여러 중성미자들의 질량과 믹싱 앵글 등 중성미자의 여러 파라미터들을 정확히 결정하고 이러한 모든 현상을 가장 잘 설명하는 이론을 찾는 것은 현재 입자물리학계의 하나의 큰 화두이다. 그러한 작업은 표준모형을 넘어서서 보다 궁극의 이론으로 안내하는 중요한 실마리를 제공할 수 있기 때문이다.

## COBE와 우주배경복사

1965년, 펜지아스와 윌슨에 의해 우연히 발견된 우주배경복사(CMB)는 우주의 시초에 대한 빅뱅 모델의 가장 강력한 증거로 여겨져 왔다. 이 모델에 따르면 우주의 초기는 전자와 양성자, 그리고 빛으로 이루어진 아주 뜨거운 플라즈마 상태였으며, 이 때 빛은 톱슨 산란에 의해 플라즈마와 계속 반응해 플라즈마에 구속된 상태였다. 그로부터 약 38만 년 후 팽창에 의해 우주의 온도가 약 3천K 정도로 식었을 때 전자와 양성자가 전기적으로 중성인 수소원자로 결합되면서 빛 갈래기가 자유로이 날아다니게 되어 우주 전체에 가득 차며, 그 이후 우주는 팽창을 거듭하고 그 결과 우주의 온도는 단열팽창에 의해 온도가 계속 낮아져 현재 우리가 약 2.7K의 흑체복사 스펙트럼

에 해당하는 우주배경복사를 관측한다는 시나리오이다. 이 모델은 그간 여러 도전을 받아왔는데, 1987년 버클리-나고야 팀이 수행한 관측에서 우주배경복사가 이상적인 흑체복사 스펙트럼으로부터 다소 다르며, 이는 빅뱅 모델 대신 정상우주론을 의미한다는 주장 등이 그것이다. 1989년, 스무트와 매더 등의 지휘하에 NASA에서 쏘아 올린 COBE는 이런 논쟁을 불식시켰다. COBE에 실린 세 가지 관측 장비 중 하나인 FIRAS는 우주배경복사가 2.725K의 이상적인 흑체 복사와 완벽하게 일치함을 보였기 때문이다.

해리슨과 젤도비치 등은 빅뱅 모델에 입각해 우주의 초기 상태가 크기 불변인 가우스 분포를 가지며 10만분의 1 정도의 비균질성을 띠고 있으며, 이 초기우주의 비균질성은 우주배경복사에도 그 흔적이 남아 있다고 예측하였는데 이 역시 COBE에 의해 관측되었다. 즉, COBE는 10만분의 1 수준으로 우주의 등방성(우주의 모든 방향에서 오는 배경복사가 똑같음)을 보였고, 처음으로 그 10만분의 1 수준에 남아있는 비등방성을 측정하였다. 이 비등방성은 은하 등의 생성에 필요한 '씨앗'의 역할을 한다. COBE의 관측은 그러나 해상도가 높지 않아 보다 자세한 정보를 얻기 위해 기구에 관측장비를 실어 배경복사를 관측하는 실험이 이어졌는데 'BOOMERANG'이나 'MAXIMA' 등의 실험이 그것이다. 특히 2003년에 쏘아 올려진 WMAP 프로젝트는 훨씬 높은 해상도로 COBE 결과를 대신하고 있다. 지금까지 얻어진 WMAP의 데이터는 우주에 대해 여러 사실들을 알려주고 있는데, 예컨대 우주의 나이는 약 137억 년이며, 우주의 구성이 4%의 원자나 분자 등의 보통 물질, 22%의 보이지는 않지만 존재하는 암흑물질, 그리고 우주의 팽창을 설명하기 위해 도입된 미스터리한 74%의 암흑 에너지로 구성되어 있다. 또한 우주론의 여러 모델 중 대폭발 이후 기하급수적인 팽창이 있었다는 인플레이션 모델이 지금까지의 데이터와 가장 잘 부합됨을 보이며, 우주의 팽창계수인 허블 상수가 약 70km/s/Mpc임을 보인다는 것 등이다. 또한 WMAP은 우리 우주가 다시 수축하지도 않고 또 팽창이 가속되지도 않는 기하학적으로 평평한 시공간 구조임을 밝혀준다. 암흑물질과 암흑에너지의 기원, 그리고 CMB의 편극, 사중극자에 대한 데이터가 이론치보다 낮게 나오는 것에 대한 설명 등이 현재 활발히 연구되고 있다.

### 양성자 붕괴를 예측하는 '대통일 이론'

지난 30년간 입자물리학계에서의 또 하나의 화두는 '통일 이론'이 아니었나 싶다. 야심차게도 인류가 지금까지 관찰한 모든 상호작용

을 하나의 틀 안에서 설명하고자 하는 '통일 이론'까지 도전할 수 있게 된 것에는, 아마도 표준모형의 성공에 힘입은 바가 클 것이다. 약 30년 전에 정립된 표준모형은 그 이전까지의 이론과 실험의 결과들을 명쾌하게 요약하고 있었을 뿐 아니라, 이후에 수행된 실험들을 통해 그 모형이 예측했던 결과들이 추가로 확인됨에 따라, 현재까지도 자연을 기술하는 기본 이론으로 믿어지고 있다. 그래서 지난 30년간 입자물리 발전의 역사를 뒤돌아 볼 때, 표준모형은 보다 궁극 이론을 구현하고자 한 이론 학자들에게는 출발점이 되었으며, 그 모형에서의 결과들은 새로운 현상을 찾고자 했던 실험 학자들에게도 넘어서야 할 하나의 '기준'이 되었다.

표준모형은 '약-전자기 상호작용'을 기술하는 글래쇼-와인버그-살람의 이론과 '강한 상호작용'을 기술하는 QCD를 이론적 모순이 없도록 결합시킨 이론으로서 '자발적으로 깨어진'  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 의 게이지 대칭성을 갖는 '양자 장 이론'이다. 글래쇼-와인버그-살람은 그전까지는 서로 다른 상호작용이라고 여겨져 왔던 약작용과 19세기 영국의 물리학자 맥스웰에 의해 정립된 전자기 상호작용을, 맥스웰의 이론에서 관찰되었던  $U(1)$  게이지 대칭성을 확장함으로써 성공적으로 통합할 수 있었다. 그리고 그런 확장된 게이지 대칭성은 힉스 메커니즘이라 불리는 대칭성의 자발적 붕괴 과정을 도입하여, 왜 우리가 사는 실험실 밖의 세계에서는 오직 전자기 상호작용만이 쉽게 관찰되는지를 잘 설명하였다. 이런 약작용과 전자기 상호작용간의 통합적 이해는 통일이론을 향한 중요한 진보로 평가되었으며, 이후 통일이론 연구에 대한 강한 자극이 될 수 있었다.

게이지 이론의 성공에 힘입어, 70년대 중반부터  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 보다 더 큰 게이지군을 도입하여 강한 상호작용과 약-전자기 상호작용을 통합하고자 하는 노력이 시작되었다. 첫시도로서 게오르기와 글래쇼는  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 을 포함하는 가장 간단한 단순군인  $SU(5)$ 를 도입하여 표준모형의 서로 다른 상호작용들을 하나의 상호작용으로 이해하고자 하였다. 그 이후에도 이런 아이디어를 이어받아  $SO(10)$ 과  $E(6)$ 와 같은 보다 더 큰 게이지군을 도입하는 작업이 이루어져 왔다. 이런 이론들은 통상적으로 대통일 이론이라 부른다. 대부분의 대통일 이론들은 양성자 붕괴를 예측하고 있는데, 앞으로의 실험에서 검증되어야 할 주요 과제로 남아있다.

### 초대칭 이론과 초중력 이론

표준모형을 넘어서려는 또 다른 계열의 이론적 노력은 기존의 시공간의 대칭성을 기술하는 푸앵카레 대칭성을 일반적인 형태로 확장

## 지난 30년, 학계를 뒤흔든 새 이론과 실험들

한 초대칭 이론의 발전으로 이어졌다. 초대칭 이론은 정수 스핀을 갖는 보손 입자와 반정수 스핀을 갖는 페르미온 입자간의 대칭성을 주는데, 1980년대 초반에 표준모형의 미세조정 문제를 해결할 수 있는 방법을 줄 수 있다는 사실이 알려지면서, 표준모형 또는 대통일 이론과 결합된 형태의 초대칭 이론들이 많이 연구되기 시작했다.

또한 초대칭 표준모형은 현재 우주의 구성물 중 많은 부분을 차지하고 있는 암흑물질의 존재를 잘 설명할 수 있을 뿐 아니라, 표준 모형의  $SU(2) \times U(1)$  게이지 대칭성의 자발적 붕괴를 이끄는 동력학적 설명을 가능하게 하는 장점도 가지고 있어, 현재까지도 물리학자들의 많은 관심을 끌고 있다. 게다가 1990년대 초반에 알려진 실험의 결과가 표준모형이 초대칭 이론에 기반을 둘 경우,  $10^{16}$  GeV 이상의 높은 에너지 스케일에서(또는 약  $10^{-30}$  cm 이하의 미시 세계에서) 대통일 이론이 존재함을 의미하는 것으로 해석되면서 이런 형태의 이론들이 학계에서 더욱 심각하게 받아들여지게 되었다.

하지만 낮은 에너지에서의 초대칭의 존재를 입증하는 초대칭 짝입자들이 아직까지 발견되지 않고 있어, 이들에 대한 탐색은 내년부터 가동 예정인 CERN의 가속기 실험에서 수행될 중요한 과제 중 하나가 되고 있다. 사실 우리가 사는 낮은 에너지의 세계에서는 초대칭이 없으므로, 초대칭 이론이 맞는 이론이라면,  $SU(2) \times U(1)$  게이지 대칭성처럼 높은 에너지 스케일에서 초대칭이 깨졌다고 봐야 한다. 이에 대한 올바른 답을 줄 수 있는 이론이 초중력 이론이다. 초중력 이론은 초대칭을 국부대칭으로 볼 때 나오는 이론으로서 자연스럽게 중력 이론을 포함하고 있다. 하지만 초중력 이론은 양자역학적으로 완벽하지 못하여 다만 낮은 에너지에서만 잘 맞을 수 있는 하나의 유효장 이론으로 간주되고 있다.


### 진정한 통일이론의 후보 '끈이론'

양자역학적으로 문제가 없는 중력 이론은 지금까지 연구된 이론들 중에서 오직 초끈 이론에서만 가능하다. 게다가 이 이론은 낮은 에너지에서는 근사적으로 특별한 형태의 초중력 이론을 줄 수 있다. 끈이론의 역사는 강한 상호작용을 설명하기 위해 처음 도입되었던 1960년대까지 거슬러 올라간다. 하지만  $SU(3)$  게이지이론으로 강한 상호작용이 잘 기술됨이 밝혀지면서 오직 몇몇 학자들에 의해서만 계속 연구되다가, 1980년대 중력 상호작용을 포함한 진정한 통일 이론이 될 수 있다는 점이 지적되면서 학계에서 크게 부각되기 시작하였다.

1970년대 끈이론에 초대칭성이 도입되면서 끈이론은 자체 모순 없는 10차원의 이론으로서 정립될 수 있었다. 특히 1984년 그린과 슈

바르츠에 의해 10차원 초중력 이론의 이상향이 소거될 수 있음과 그런 메커니즘이 끈이론을 상징했을 때 아주 자연스럽게 설명됨을 보임으로써, 끈이론의 연구에 대한 폭발적인 관심을 끌기 시작했다. 게다가 당시까지 알려졌던 Type I, Type II-A, Type II-B 끈이론 이외에, 그들이 하나의 가능성으로 제시했던  $E(8) \times E(8)$ 의 게이지 대칭성을 포함하는 새로운 형태의 이형 끈이론이 곧 발견되고, 10차원 중 6차원이 작은 크기의 칼라비-아우 공간에 말릴 때, 그 끈이론이 4차원  $E(6)$  대통일 이론이 될 수 있음이 밝혀지면서, 중력 상호작용과 게이지 상호작용 모두를 하나의 틀 안에서 설명할 수 있는 진정한 통일 이론의 후보로 심각하게 받아들여지기 시작하였다.

1990년대 이후에는 서로 다른 끈이론이라 생각되던 Type I, Type II-A, Type II-B, 그리고  $E(8) \times E(8)$ ,  $SO(32)$  이형끈 등 여러 끈이론들 사이에 관계가 지워지기 시작하였다. 이런 끈이론 사이의 통일은 'M 이론'이라 지칭되는 11차원의 단일 이론으로 완성될 것으로 믿어지고 있다. 특히 1990년대 초반에 연구되었던 초중력 이론들의 쏠리톤 해들이 1990년대 중반 '디-브레인'의 발견에 의해 제대로 이해되기 시작하였는데, 그 발견은 90년대 중반 이후의 끈이론 발전을 이끈 중요한 단초가 되었다. 디-브레인의 발견으로 게이지 이론들을 기하학적으로 이해할 수 있는 길이 열렸다. 말다케나에 의해 제시되었던, 통상 AdS/CFT 이중성으로 불리는 그의 추측은 게이지 이론에서의 여러 문제들을 다른 방향에서 해결해 보려는 또 다른 시도들을 가능케 하였다. 지금까지 지난 30년간 입자 및 천체 물리학계에서 논의되어왔던 몇 가지 중요한 주제들을 아주 간략하게 살펴보았다. 제한된 지면에 그 뜨거웠던 논의들을 충분히 담기에는 턱없이 부족했음은 물론이다. 그리고 필자들의 제한된 지식으로 인하여 그 중요성에도 불구하고 이 글에서 소개하지 못한 많은 다른 중요한 주제들도 있었음을 밝힌다.

입자 및 천체 물리학계에서는 다가오는 몇 년 후부터 가동 예정인, 차세대 가속기 실험인 LHC(Large Hadron Collider), COBE/WMAP의 뒤를 이을 PLANCK, 암흑물질 탐사에 대한 CDMSII, 등 중요한 실험들이 계획되고 있다. 이런 실험들을 통해 인류가 지금까지 보지 못했던 세계로 조금씩 더 다가갈 수 있을 것이고, 그 실험들로부터의 결과들은 앞으로 30년간의 입자 및 천체 물리학계 발전에 지대한 영향을 끼칠 것임에 의심할 여지가 없을 것이다. 



글쓴이 박태선(왼쪽)과 계범석은 서울대학교 물리학과에서 박사학위를 받았다.

# 21세기 이론물리학의 패러다임 ‘끈이론’

글 | 이범훈 \_ 서강대 물리학과 교수 bhl@sogang.ac.kr

현대 물리학의 양대 기둥은 20세기 초에 알려진 양자론과 상대론이다. 양자론은 물질계의 구성 및 성질을 원자 및 분자에 근거하여 이해할 수 있는 토대를 제공함으로써 현대 물리학 뿐만 아니라 화학, 생물학 및 의·약학 등 현대 과학과 첨단 정밀 기술 발전의 기초를 제공하였다. 한편, 상대론은 에너지와 질량이 동등하다는 원리 등을 토대로 원자 핵 및 초미세 물질세계의 현상을 이해하고 나아가 핵에너지의 응용을 가능하게 하는 틀을 제공하였다.

시공간의 구조에 대한 아인슈타인의 일반 상대성 이론은 1919년에 천체 현상의 관측을 통하여 입증되었고, 우주의 진화 등 거시적인 계를 이해하는 이론적 토대를 제공하여왔다. 상대성 이론은 실생활과 무관한 과학적 호기심 차원이 아니라 근래에는 생활 주변에서 접할 수 있는 과학 기술을 통하여 현대 생활에 깊숙이 자리 잡기 시작하고 있다. 일례로, 현재의 위치추적시스템(GPS)에서 군사용의 고정밀도를 얻기 위해서는 지구로 인하여 주위 시공간이 휘어지는 상대성이론에 따른 현상에 대한 보정을 하여야만 얻을 수 있다.

이와 같은 현대 물리학의 양대 기둥인 미세 물질세계의 양자론과, 거시적인 계에 적용된 시공간에 대한 일반 상대론을 하나의 통합된 원리로 이해할 수 있을까? 이 자연스럽게 제기되는 질문에 대하여 이론 물리학자들이 많은 노력을 하였음에도 불구하고 직접 시공간의 이론을 양자론과 결합하여 미세세계에 적용하려는 시도는 해결 불가능한 무한대의 양을 포함하는 등 모순을 지녀 실패로 돌아갔다. 다행히 20세기가 끝나기 전인 1980년대에 들어와 양자론과 상대성이론의 양대 기둥을 포함하고 새로운 틀에서 물질계를 이해할 수 있는 이론으로 보이는 끈이론이 탄생되어 각광을 받게 되었다.

었다.

## 양자론의 발전과 미세 물질 구조의 이해

양자론은 원자 및 분자, 나아가 이 보다 작은 규모의 물질 구조를 이해할 수 있게 해주었다. 이러한 발전은 보다 대규모의 가속기의 건설을 통하여 큰 에너지의 입자를 충돌시킬 수 있게 되어 원자보다 훨씬 작은 규모의 물질세계의 미세 구조 이해가 가능해진 결과이다.

1970년대에 정립된 표준 모형에 의하면, 모든 물질계를 구성하는 근본적인 입자는 스핀이 1/2로 페르미온인 렙톤과 쿼크, 그리고 스핀 1의 보존으로서 입자간의 상호작용을 매개하는 게이지 입자로 구성되어 있고, 상호작용의 대칭을 일관성 있게 기술하기 위한 힉스 입자와 이들의 반물질로 구성된다. 렙톤과 쿼크는 대칭성의 성질에 따라 가족으로 나누는데, 1980년대 후반의 정밀 실험과 우주론 등에 따르면 가족의 수는 세 세대로 이루어진 것으로 믿어진다. 이 가족의 제1세대는 렙톤이 전자와 전자 중성미자로, 쿼크는 위쿼크, 아래쿼크로 구성되어있다. 제2세대는 렙톤은 뮤온과 뮤온 중성미자, 쿼크는 맵시쿼크와 기묘쿼크로 구성되어 있으며, 끝으로 제3세대는 렙톤은 타우와 타우 뉴트리노, 쿼크는 꼭대기쿼크와 바닥쿼크로 구성되어 있다. 쿼크의 전하는 위, 맵시, 꼭대기 쿼크는 양성자 전하의 2/3, 그리고 아래, 기묘, 바닥 쿼크는 -1/3의 전하를 지니고 있다. 일례로, 양성자는 위쿼크 2개와 아래쿼크 하나로, 그리고 중성자는 위쿼크 하나와 아래쿼크 2개로 구성되어 있으며, 파이온 등 중간자라 불리는 입자들은 쿼크와 반쿼크들로 구성되어 있다. 이들 6개의 쿼크는 1990년대에 와서 실험적으로 꼭



## 지난 30년, 학계를 뒤흔든 새 이론과 실험들

대기 쿼크가 입증됨으로써 존재가 모두 직접 확인되었다.

한편, 물질을 구성하는 렙톤과 쿼크 등의 상호작용은 이를 매개하는 게이지 입자를 통하여 일어남으로써 삼라만상의 변화를 일으키게 된다. 예로서, 우리에게 가장 익숙한 상호작용인 전자기 상호작용은 전자기장이 매개하는데 이를 양자화한 입자를 광양자라 부르고, 이 광양자가 전자기 상호작용의 게이지 입자이다. 원자 핵 및 중간자를 구성하는 쿼크 상호간의 강한 상호작용을 매개하는 게이지 입자는 글루온이라 명명되었다. 핵의 붕괴 등은 약 상호작용을 통하여 매개되는 데 이들 매개 입자는 전하를 지닌 W와 전하를 지니지 않은 Z가 매개한다고 예측되었으며, 이는 1982년 유럽 원자핵 공동 연구소(CERN) 실험에서 발견되어 표준모형의 입자를 강화하였다.

렙톤 중 뉴트리노는 약 상호작용만 하여 그 성질을 정밀히 측정하는 것이 쉽지 않으나 이들이 질량을 가지고 있고 또한 양자역학적으로 서로 섞인다는 것이 최근의 실험에 의하여 밝혀지게 되었으며, 우리나라를 포함하여 세계 여러 곳에서 보다 정밀한 관측을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

표준모형은 현재까지 실험과 기본적으로 크게 상치되지 않고 있으나 아직 이 이론의 구성요소인 힉스 입자는 발견되지 않은 상태이며, 페르미온과 보존간의 대칭성질인 초대칭 등 실험적으로 검증이 되어야 할 중요 성질들이 많이 있다. 현재 유럽 원자핵 공동 연구소에 건설 중으로 2007년 말부터는 가동될 것으로 기대되는 대형 헤드론 가속기(LHC)는 보다 근본적인 이론들을 확인해 줄 것으로 기대된다.

### 또 하나의 축, 상대성이론과 우주 거시 구조

일반 상대성이론은 시공간을 이해할 수 있는 틀을 제공하여 주었고, 이를 통하여 거시적인 우주의 구조와 진화 이해에 많은 진전이 이루어졌다. 관측에 의하면 우주가 팽창하고 있고, 우주가 팽창함에 따라 우주 배경 복사의 온도는 점차 낮아질 것으로 예측되는데 이에 대한 증거는 1965년 펜지아스와 윌슨에 의하여 입증되었다. 이는 초기 우주로 갈수록 보다 높은 온도와 에너지의 상태가 됨을 의미하므로 초기우주에 대한 이해는 미세적인 구조의 이론을 필요로 하는 것이 된다. 이와 같이, 미세 구조에 대한 이론은 바로 거대 구조에 대한 이해를 가능케 하는 상호 관련성이 있다.

한편, 우주는 균일하고 등방적인 것이 아니라, 은하와 별 등 다양한 스케일의 구조를 지니고 있다. 이들을 만들어 줄 우주배경복사

의 요동의 증거도 1990년대 초에 코비(COBE) 위성 관측을 통하여 확인되었다. 더 나아가, 1990년대 후반의 과학 기술의 발전에 힘입어, 우주의 팽창이 가속팽창을 하고 있음도 확인되었고, 이를 통하여 우주를 채우고 있는 물질과 에너지의 대부분은 관측이 되지 않은 암흑 에너지와 암흑 물질로 되어 있음을 알게 되었다. 이러한 암흑에너지와 암흑 물질에 대한 기원과 성질에 미세 구조인 입자물리학의 발전이 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이와 같이 우주 구조에 대한 문제들은 미세 구조의 이론에 도전적인 질문을 던져주고 미세구조의 새로운 이론은 우주구조의 새로운 이해를 가능하게 하여 준다.

중력과 관련하여 블랙홀은 매우 독특한 위치를 지닌다. 이들의 존재는 초기 우주 진화단계에서 형성될 수도 있으며, 또한 태양보다 수배 이상의 질량을 지닌 별들이 궁극적으로 블랙홀이 된다고 알려져 있고, 우리 은하의 중심을 포함하여 모든 은하의 중심에는 매우 거대한 블랙홀이 형성되어 있다고 알려져 있다. 블랙홀은 그 내부에서는 물질이 빠져 나오지 못하는 지평선이 존재한다. 그 중심부는 특이점을 지니고 있는 시공간의 구조로 나타나며, 이 특이점은 고전적인 상대론에 의하면 피할 수 없는 구조이다. 한편 호킹에 의하면 블랙홀은 질량에 비례하는 온도를 지닌 열역학적인 계와 같아서 양자론적으로 불안정하여 질량이 주는 에너지를 다 증발시킨다. 또한, 유한 온도를 지닌 블랙홀은 엔트로피도 지니는데, 진화 과정에서 유니타리 성질과 엔트로피 손실문제가 있으며, 엔트로피를 계가 가질 수 있는 상태의 수로 표현하는 통계역학적인 성질이 고전 중력의 틀 내에서는 설명되지 않는다. 이들 문제들이 1990년대의 끈이론의 획기적인 발전에 따라 끈이론으로 설명되기 시작하였음은 큰 개가라 할 수 있다.

### 양자론과 상대론을 하나로 묶는 틀 '끈이론'

끈이론은 1960년대에 핵력 연구의 과정에서 처음 등장되었다. 양성자와 중성자 등은 쿼크로 구성되어 있는데 이들 쿼크사이의 상호작용은 전자기력이나 중력과는 달리 거리가 가까울 때에는 매우 약하게 작용하다가 멀리 떼어 놓으려 할수록 에너지가 끈과 같이 거리에 비례하여 강하게 작용하는 성질을 보여 결국 쿼크를 떼어냄이 불가능함을 말하여 준다. 핵력에 관련하여 등장한 끈이론은 1970년대 후반에 들어와 중력을 포함하는 이론이 될 수 있다는 발견이 이루어진 후 일대 전환점을 맞이하게 되었다.

그러하여 1984년에 처음으로 시공간에 대한 일반상대성 이론과

양자론을 포괄하는 무모순의 이론을 지닌 끈이론이 탄생하게 되었다. 그런데, 끈이론은 양자론과의 결합과정에서 무모순을 지니기 위하여서는 시공간이 우리가 살고 있는 4차원과 달리 10차원이어야 한다는 것이다. 이에 따라 10차원의 끈이론에서 출발하여 현재 우리가 살고있는 4차원 시공간에서의 입자이론을 유도하기 위하여 1980년대에 많은 연구들이 있어 왔으나, 사실상 그리 성공적이지 못하였다. 뿐만 아니라 끈이론은 제1형(Type I)의 열린 끈이론, 제2형(Type II)의 A, B 두 종류의 닫힌 끈이론, 이형 끈이론 등 여러 종류가 알려져 모든 것을 통합하는 이론으로서의 기대감이 반감되는 등으로 인하여 1980년대 말부터 끈이론에 대한 연구는 점차 그 열기가 약하여 졌다.

그러다 1990년대 중반 들어 소위 제2차 혁명이라 불리는 대 진전을 이루게 되었다. 그리하여 이전에 알려진 수 개의 다른 끈이론이 모두 M이론이라 불리는 이론의 여러 단면에 불과하다는 하나의 통일된 관점이 주어졌다. 이후 끈이론은 6개월이 멀다하고 새로운 발견을 이루어 냈으며, 매우 짧은 기간에 엄청난 연구의 발전을 이루었다. 이 획기적인 발전은 끈이론의 스펙트럼에 일차원 구조의 끈뿐만 아니라 디-브레인이라 불리는 여러 종류의 고차원의 비섭동적인 요소가 들어 있다는 발견에 바탕을 두고 있다.

디-브레인은 열린 끈의 끝점이 놓여야 하는 공간을 제공하는 것인데 이러한 발견은 그간 중력이론만으로는 해결하지 못하였던 문제를 비롯하여 많은 난제들을 해결하는 실마리를 제공하여 주었다. 일례로, 중력이론에서 특별한 위치를 점하는 블랙홀의 엔트로피는 지평선의 넓이에 비례하는 성질이 있음을 앞에서 언급한 바 있는데, 디-브레인을 이용하여 블랙홀의 구조를 이해하면 블랙홀의 엔트로피가 블랙홀의 미세상태인 끈의 상태의 수의 로그로 주어지는 통계역학적인 개념과 일치함을 보여주어, 끈이론이 양자론적인 중력이론으로서의 가능성이 높음을 입증하였다. 또 다른 예로 전기를 지닌 전자와 달리 자기의 극을 지닌 자기 단 극자를 들 수 있다. 많은 장이론 모형에서 자기 단극자가 존재하는 데, 이는 공간의 어디에서든지 존재할 수 있고 또한 내부적인 배열이 다를 수 있으며, 전기와 자기를 다 지니는 다이온도 다양하게 구성할 수 있다. 이러한 연속적으로 많은 해는 수학적으로 편미분 방정식을 통하여 기술되는데 이를 직관적으로 이해하기는 거의 불가능한 것이다. 그러나 디-브레인은 이들을 기하학적으로 쉽게 이해할 수 있게 해줄 뿐만 아니라 다양한 구조를 쉽게 추측가능하게 해 준다.

한편, 시공간의 차원에 따라 장이론의 성질은 매우 다르며, 이들

사이의 관계를 일반적으로 지을 수는 없다. 그러나 디-브레인으로 구현될 수 있는 장이론의 경우에는 끈이론이 지닌 다양한 대칭에 의하여 연결된 다른 차원의 디-브레인 간의 관계를 통하여 관련 장이론의 성질 비교도 기하학적으로 쉽게 이해할 수 있게 된다. 특히, 홀로그래피 원리에 의하면, 평평한 4차원 시공간에서의 등각 장이론과 이보다 한 차원 높은 5차원에서 음수의 우주상수를 지니는 소위 '반(反) 드 시터(Anti de Sitter)' 공간에서의 중력이론이 동등하게 연관되어 있다. 이후, 평평한 4차원 시공간에서 실제 모형에 보다 가까운 장이론의 모형을 이에 상응하는 5차원 공간에서의 중력이론과 연결 짓는 연구가 다양하게 이루어지고 있다.

이와 같이 끈이론은 중력의 양자론적인 성질을 기술할 수 있을 것을 보여주었을 뿐만 아니라, 장이론에 있어서는 많은 비섭동적인 성질을 이해하는 새로운 틀을 제공하였다. 디-브레인은 현상론적으로도 고차원의 이론에서 출발하여 4차원 시공간의 이론이 나올 수 있는 많은 새로운 틀을 제공하였다. 한편, 우주론에도 이를 바탕으로 많은 모형을 제공하였고 현재 많은 연구가 진행 중이다.

양자론과 상대론의 양대 기둥을 통합한 틀의 후보로서 끈이론이 20세기 말에 등장한 이래, 끈이론은 몇 개의 난제와 퍼즐을 성공적으로 설명하는 등 중력이론과 상대성이론을 포함하는 초 미세구조 및 우주를 설명할 새로운 이론물리학의 틀로서 각광을 받게 되었다. 20세기 초 양자론의 발전에 있어서 가장 간단한 원자인 수소 원자의 스펙트럼이 양자론 정립의 단서를 제공하고 이의 발견을 이끄는 안내자의 역할을 한 것과 같이, 끈이론에 있어서 블랙홀의 역할은 마치 양자론에서 수소 원자의 역할과 같이 끈이론의 정립에 단서를 제공할 것으로 기대된다.

그러나 아직도 끈이론의 실체를 충분히 규명하기에는 연구되어야 될 많은 문제들이 산적해 있어, 이에 대한 보다 깊은 이해를 하기까지에는 또 한 번의 혁명이라 할 새로운 발전이 요청되는 상황이다. 21세기에 이를 성공적으로 이해하고, 그 결과 끈이론이 양자론과 상대론을 하나로 묶는 틀로 정립된다면, 21세기 기초과학은 이 새로운 원리에 의하여 획기적으로 발전할 것으로 기대된다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 물리학과 졸업 후 동 대학원에서 석사학위를, 콜럼비아대학교에서 박사학위를 받았다. 현재 양자시공간연구센터 소장을 겸임하고 있다.