

초끈이론

세상을 만난다



글 _ 이필진
고등과학원 물리학부 교수

끈 이론은 잘 알려져 있다시피, 자연의 근본 이론을 표방하는 하나의 패러다임이다. 그러나, 역시 잘 알려져 있듯이 아직까지도 실험이나 관측을 통해 확인되지 않았다는 커다란 취약점을 가지고 있다. 최근 필자는 ‘String Theory Meets the Real World’ 라는 제목으로 모 대학에서 초청 강연을 하면서 약간의 원성을 산 일이 있다. 과대 광고의 소지가 다분하였음은 본인에게 처음부터 인정하고 강연을 시작했으므로 그다지 못매를 맞지는 않았지만, ‘Meets’ 를 ‘To Meet’ 정도로 바꾸었으면 조금 더 사실에 가까웠을까?

끈 이론은 1970년대 초에 양성자나 중성자와 같은 핵자들의 구조에 대한 하나의 양자 역학적인 모델로서 탄생을 하였는데, 끈 양자 색역학(QCD)을 포함한 게이지 양자 장론에 자리를 내어주고, 1970년대를 조용히 보내야만 했다. 이것이 끈 이론이 세상을 만나려 한 첫 시도였다. 재미있는 것은 오늘의 끈 이론이 각광을 받게 된 가장 중요한 이유, 즉 끈 이론에는 양자중력이 항상 포함되어 있다는 엄청난 사실이, 끈 이론의 첫 암흑기인 이 기간에 알려졌다는 점이다. 이는 1975년 John H. Schwarz와 Joel Scherk, 그리고 Tamiaki Yoneya 등에 의해 발견되었다.

Schwarz는 오랫동안 Caltech에서 선임연구원으로 일했는데, 일설에 의하면 다시 리처드 파인만(Richard Feynman)

에게 꽤나 구박을 받았다고 한다. 아마도 스스로를 바빌론적인^{주)} 과학자라고 말하기 좋아하는 파인만에게는, 이 ‘끈’이라는 작은 물체를 근간으로 하는 이론을 받아들이기 매우 어려웠을 것이다. 사실, 고무줄 같이 생긴 일차원적 물체가 우주의 근본 구성원이라는 생각이 어디 만화에나 나올 법한 발상이라는 느낌을 부정하기는 힘들다.

이 끈 이론이 초끈이론이라는 새로운 옷을 입고, 하나의 패러다임으로 다시 각광을 받게 된 것이 1983년의 Schwarz과 Michael Green의 짧은 논문 하나를 통해서였다. 당시에는, 새로운 가속기 실험 결과가 끊임없이 나오면서, 소립자 이론의 예측이 착착 맞아 들어가고 후자의 이론체계가 거의 자리를 잡아가고 있는 시점이었다. 이 때문이었는지 학문의 선두에 있던 학자들은 아인슈타인 후 미제로 남아 있던 양자 중력에 다시금 관심을 쏟기 시작하던 시기이기도 했다.

이 시기에는 대체적으로 자연의 구조를 명확히 알아가고 있다는 확신에 차 있었고, 중력의 양자화 문제가 소립자의 그것에 비해 근본적으로 얼마나 다른 종류의 문제인가 혹은 초끈이론의 구조가 얼마나 복잡한지가 충분히 인지되지 못하고 있었지 않나 싶다. 양자 중력의 이해보다는 그 존재에 만족하는 정도였고, Green과 Schwarz의 결과가 관심을 끌었던 이유는, 오히려 당시 존재하는 것으로 알려진 소립자들과 그 상호작용을 양자 중력과 한 울타리에 넣을 수 있는 가능성을 처음으로 보였기 때문이었다.

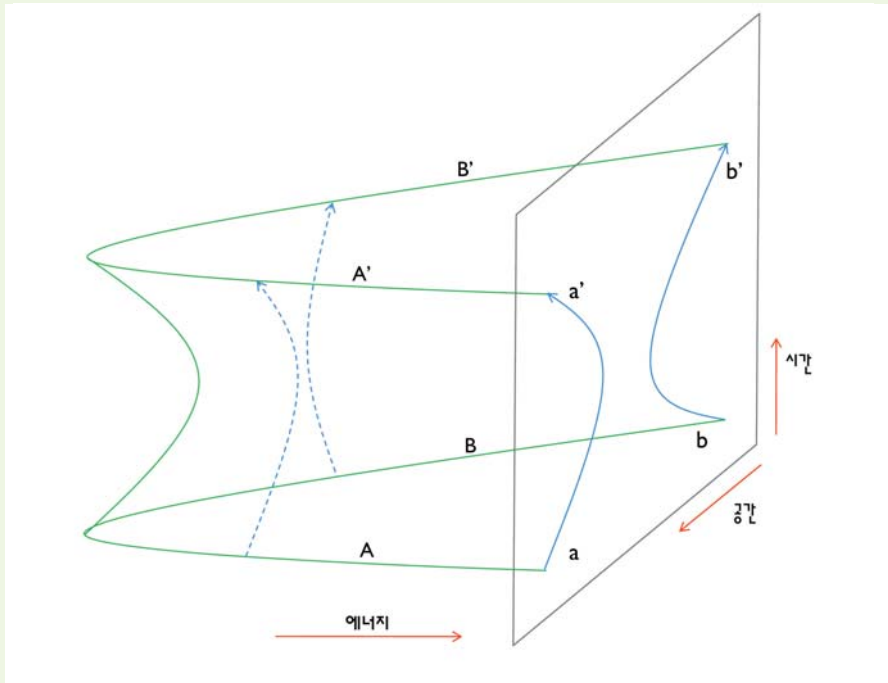
그리고 1980년대의 초끈 연구는 이런 맥락에서 계속되어, 주로 이미 검증된 소립자 이론들을 자연스럽게 포함하는 특별한 초끈을 찾는데 주된 관심을 갖고 있었다. 이렇게 실험결과와 부합하는 특정 이론을 흔히 ‘표준모형’이라고 부른다. 초끈의 ‘표준모형’을 찾으려던 이 노력은 끈 이론이 실제 세상과 만나려 한 두 번째의 시도였다.

그로부터 20여 년이 흐른 지금, 그리고 1990년대 중반 또 한 번의 큰 변화를 겪은 현재의 초끈이론은 무엇을 할 수 있을까? 초끈이론에 대한 전문가들 자신이 가진 현재의 시각은 1980년대의 그것과 상당히 다른 것이다. 과거의 연구 중점이 소립자 ‘표준모형’을 재구성하는데 있었다면, 지금의 초끈이론은, 이와 달리 이 새로운 패러다임의 구조적인 이해에 그 중점이 있다.

숨겨진 구조의 가장 기괴한 일례를 들자면, 1970년대, 끈 이론의 첫 현신을 무용지물로 만들었던 양자 색역학(QCD)을 이제는 초끈이론 체계 안에 들어있는 일종의 ‘중력’으로서 이해 할 수 있다는 것이다. 어떻게 이렇게 이상한 일이 있을 수 있을까? 사실 QCD안에 ‘끈’과 같이 보이는 구조, 즉 ‘QCD끈’이 있음은, 초기의 끈 이론이 나오게 된 실험적인 배경이기도 하며 오랫동안 회자되어온 추측이다. 그러나, 이와 초끈이론의 끈과는 별 상관이 없다는 것이 최근까지의 정설이었다. 하지만 1997년 AdS/CFT라는 새로운 가설이 발견되고 연구되면서 전혀 다른 국면을 맞았다.

이를 위해, 양자 장론의 가장 중요한 문제인 재규격화에 대하여 먼저 설명해 보자. 재규격화의 기본적인 틀은 주어진 입자들이 서로 상호 작용을 하는 방식이, 그 에너지의 크기에 따라 조금씩 다르게 주어진다라는 점에 있다. $a + b \rightarrow a' + b'$ 라는 현상을

주) 이는 실용주의적이고 경험적인 과학의 방식을 이야기하는 용어임. 반대 개념으로는 추상적인 사고에 중점을 두는 그리스적 과학이 있음.



기록하되 $a+b$ 의 합쳐진 에너지가 10배씩 커질 때 마다 하나씩 따로따로 기록하였다 고 하자. 재규격화란, 이렇게 에너지가 10배가 될 때 마다 조금씩 달라지는 상호 작용을 서로 연결하는 작업이라고 생각하면 된다. 물론, 고전적인 역학에서 기대하는 것과는 완전히 다른 방식으로 연결된다는 것이 양자 장론과 그 재규격화를 매우 복잡하게 만드는 이유이다.

이제, 각 에너지에서의 $a + b \rightarrow a' + b'$ 라는 현상이 그려진 그림들을 한곳에 모아 에너지의 크기에 따라 정렬하자. 그러면, 원래 있던, $a + b \rightarrow a' + b'$ 가 그려진 4차원 시공간에서의 그림들이 에너지를 새로운 축으로 쪽 늘어서고, 이들을 부드럽게 연결하면 5차원의 그림이 그려질 것이다. 원래 그림이 a, b 와 a', b' 라는 입자들의 궤적이었으므로 이들을 다른 에너지 방향으로 전부 연결하면, 각각 A, B 와 A', B' 이라는 끈들의 궤적이 그려지게 될 것이다.

즉 $a + b \rightarrow a' + b'$ 이라는 그림을 에너지마다 하나씩 그리는 대신, $A + B \rightarrow A' + B'$ 이라는 끈과 끈의 상호작용이 가상의 5차원 시공간에서 그려지는 것이다. 물론 여기서 끈이 늘어진 방향은 주로 에너지 방향이 될 것이지만, 즉 $a + b \rightarrow a' + b'$ 의 상호작용이 에너지에 따라 조금씩 달라지므로 원래의 4차원 시공간 방향으로도 조금씩 늘어져 있을 것이다.

AdS/CFT라는 구조가 알려 주는 것은, $a + b \rightarrow a' + b'$ 라는 핵자들의 상호 작용을 알기 위해 4차원 QCD를 쓸 수도 있지만, 그 대신 5차원에서의 $A + B \rightarrow A' + B'$ 라는 끈들의 상호 작용을, 특정한 끈 이론을 사용해서 기술해도 된다는 것이다. 이때, 이 늘어진 끈들을 4차원 방향에다 투영한 것이 다름 아닌 위에 언급한 'QCD 끈' 이라는 것

이 AdS/CFT가설의 설명이다. 특히, a, b의 상호작용에 관여하는 입자의 종류가 매우 많아지면 이에 해당하는 5차원 끈 이론은 오히려 점점 단순해져서, 마침내 5차원 '중력' 만으로 상호작용을 기술할 수 있다고 한다.

다만, 이 때 말하는 '중력' 은 우리 우주의 천체를 관장하는 실제의 중력을 이야기 하는 것이 아니라, 아인슈타인의 일반상대성이론의 체계를 그대로 가지지만 그러나 QCD와 관련하여 5차원의 Anti de Sitter (AdS) 라는 가상의 시공간에 나타나는 수학적 체계를 말한다. QCD를 풀어주는 일종의 컴퓨터라고 하는 게 옳겠다.

이 이야기를 하는 이유는 초끈이론 체계를 보는, 그리고 사용하는 시점이 바뀌어 가고 있음을, 이 예시가 분명히 보여주기 때문이다. 양자 장론을 비유하여 이야기 하자. 후자는 분명히 소립자의 첫 이론 모형인 QED에서 시작되었으나, 양자 장론은 하나의 모형에 국한된 이론이 아니라 물리학 전반에 걸쳐 쓰이고 있는 패러다임이며 계산 방식이다. 예를 들어 초전도체 현상, 분수 양자홀, 넓게는 상전이 현상 전반이 모두 양자 장론 없이는 이해하기 힘든 자연 현상들이다.

마찬가지로 작게는 소립자들 크게는 우리 우주의 '표준모형' 을 만들기 위해 만들어진 초끈이론 역시 이제는 이 특정한 응용에 묶여있는 것은 아닌 듯 하다. AdS/CFT 라는 미묘한 구조를 가지고 있음으로 인하여, 이제 초끈이론은 핵자들의 상호작용인 QCD를 계산하는 방법으로서 다시 한번 사용되고 있으니 말이다. 가는 길이야 어찌 되었건, 세상을 향했던 그 첫 번째 시도가 과거에는 상상도 못했을 이상한 방법으로 현실화 되고 있는 것이다.

이제 초끈이론의 원래 목적으로 돌아와 보자. 사실, 우리 우주의 모든 근본적인 상호작용과 소립자를 모두 설명하는 '표준모형' 을 찾는 작업은 아직 그 결실을 보고 있지 못하다. 즉, 이에 해당하는 특정한 초끈이론은 아직도 발견되지 않고 있다. 그러나 이는 초끈이론의 체계가 불충분하기 때문이라기보다는 오히려 그 광활함에 있는 것 같다. 이 패러다임의 광활함은 위의 AdS/CFT라는 이상한 현상이 있음을 통하여 일부 보았지만, 우리 우주의 현재 모습에만 눈을 돌려 특정한 응용에만 관심을 쏟는다면 해도 역시 나타나는 현상이다.

위에 언급했듯이 1980년대 초끈이론가들의 꿈은, '유일무이(唯一無二)' 한 모델이 하나 자연스럽게 나타나 중력이론과 소립자 이론이 통합된 '표준모형' 이 되어 주는 것이었다. 지금 생각해 보면, 이는 마치 양자 장론을 잘 이해하고 나면, QCD가 '유일무이(唯一無二)' 한 이론으로 나타날 것이라고 기대하는 것과 크게 다르지 않다. 이는 사실이 아닐 뿐 아니라, 양자 장론이라는 패러다임의 효용성을 매우 과소평가하여야만 할 수 있는 기대이다. 마찬가지로, 초끈이론이라는 새로운 패러다임에 '유일무이(唯一無二)' 한 모델이 있기를 바라는 것이 무리라는 것은 쉽게 볼 수 있다.

그렇다면, 초끈이론으로 만들 수 있는 모델의 다양함은 어느 정도일까? 이미 1980년대에 5가지의 초끈이론만이 10차원에 존재함이 알려져 있었고, 그 비교적 작은 숫자가 많은 연구자들을 매료 시켰다. 그러나 실제 우주는 4차원이므로 나머지 6

차원을 안 보이도록 하는 과정이 필요한데, 이의 한 방법은 6차원의 공간을 작은 다양체로 바꾸는 것이다. 이에 적절한, 흔히 Calabi-Yau 다양체로 알려진 공간의 종류가 최소한 수 만 가지임이 이미 1980년대 말경에 알려지게 되었으나, 당시만 해도, 초끈이론의 상호작용들을 다 이해하면 이 수 만 가지 중 하나만이 살아 남을 것이라는 기대가 남아 있었다.

그러나, 이러한 상호 작용들을 상당히 이해하게 된 지금, 최근의 연구 결과에 따르면, 가능성이 줄어들기는커녕 엄청나게 늘어나 버렸다. 현재 알려진 것으로는, 이 수 만가지 다양체가 모두 다 가능할 뿐 아니라, 이 각각의 다양체를 가지고 만들 수 있는 4차원 이론 모형의 종류가 하나가 아니고, 작게는 수십 가지에서 많게는 10^{500} 가지까지 엄청나게 '다양' 하다. 물론, 6차원을 안 보이도록 하는 방법으로 다양체를 사용하는 것 자체가 아주 특별한 경우에 불과하다는 것을 알고 나면, 위의 숫자들 역시 최소한의 가짓수에 불과하다는 사실을 알게 된다.

이는 과거에 초끈이론이 가지고 있던 신화를 분명히 깨어버리고 있지만, 그렇다고 해서 그다지 놀랄 것은 없다. 모든 과학이 그렇듯이 이론이 세상을 설명하기 위해 맞추어지지, 이론에 맞추어 세상이 만들어 지지 않는다는. 이렇게 보면, 초끈이론이라는 패러다임이 만들어낼 수 있는 모형의 종류가 많으면 많을수록 우리 세상에서의 실험과 관측에 맞아떨어지는 '표준 모형' 을 만들어 낼 가능성이 많아질 뿐이다.

이런 시각이, 그 논리적인 옳고 그름을 떠나, 그다지 곱게 받아들여 지지 않는 데에는, 현재 초끈이론의 특수성, 즉 주어진 모형의 결과물들을 직접 자연과 연결할 만한 관측 사실이 아직도 없다는 사실 때문이다. 필자의 소견으로는 이러한 '진퇴維谷(進退維谷)' 의 상황을 풀어줄 것은 초기 우주에 관련된 천체 물리적인 관측 밖에 없지 않나 생각된다.

우리의 우주는 이상하리만큼 간단하다. 예를 들어 거시적으로나마 우주에 특정한 방향성이 없고 특별한 지점도 없다는 관측사실이 오래 전부터 받아들여져 왔는데, 이를 설명하는 패러다임이 소위 급팽창 우주, 즉 과거에 한번 '뽕튀기' 를 거치면서 모든 것이 희석되었고, 그 백지 위에 현재의 우주가 만들어 졌다는 생각이다. 이 '뽕튀기' 의 잔재는 오늘의 우주에서 아직도 남아 있는데, 이의 관측을 통해 최근 우리 우주의 나이가 138억년 정도임을 정확히 알아내기도 하였다.

이러한 초기 우주는 초끈이론이 한 몫을 할 수 있는 가능성이 가장 많은 시기이다. 예를 들어 급팽창이 끝나는 시점에 초끈들의 잔재들이 남아 지금도 곳곳에 기다랗

이런 시각이, 그 논리적인 옳고 그름을 떠나,
그다지 곱게 받아들여 지지 않는 데에는,
현재 초끈이론의 특수성, 즉 주어진 모형의
결과물들을 직접 자연과 연결할 만한
관측 사실이 아직도 없다는 사실 때문이다.
필자의 소견으로는 이러한 進退維谷의 상황을
풀어줄 것은 초기 우주에 관련된 천체 물리적인
관측 밖에 없지 않나 생각된다.

게 늘어져 있을 가능성이 제기되고 있는데, 만일 이들을 관측할 수 있다면, 아마도 초끈이론의 아킬레스 건, 즉 그 존재의 의문점을 단 번에 해결하지 않을까 싶다. 이는 초끈이론이 세상을 만날 수 있는 가장 확실한 방법이기도 하다.

한편, 급팽창에는 우주 상수라고 불리는 일종의 에너지밀도가 필요한데, 가장 간단한 이론들의 경우 당시의 값과 현재의 관측 값을 비교하면 무려 10^{110} 배 정도 차이가 난다고 한다. 현재의 값이 왜 이렇게 작아 졌는지를 이를 설명하는 문제가 우주 상수 문제인데, 이는 현재 이론 물리의 난제 중 난제이다. 이에 대하여, 일부 초끈이론가들은 최근 조금 엉뚱한 설명을 하나 던져 주었다. 즉, 우주상수가 '과학적인 인간원리'로만 설명할 수 있는 일종의 환경 변수로 물리적 법칙이나 이론으로 설명할 수 없을 것이라는 것이다.

위의 무수한 모형의 존재는 무수한 우주로 이어지고, 그 중 일부에는 은하와 별, 행성 등이 나타날 수 있을 것인데, 재미있는 사실은 현재의 우주 상수의 값이 관측된 값보다 10배 이상 컸다면, 은하 자체의 생성이 그리고 따라서 행성의 출현이 물리적으로 불가능해진다는 결과이다. 초기 우주의 급팽창과 같이, 우주를 백지 상태로 돌려놓기 때문이다. 따라서, 마치 지구의 평균 표면 온도가 섭씨 10도 부근인 것이 자연의 물리 법칙과 아무 상관 없는 환경적 우연이듯, 우주 상수도 그럴 것이라는 생각이다.

10^{500} 가지의 우주가 존재하면, 그 중 일부가 특별히 작은 우주 상수를 가지고 있고, 그 일부 우주들에서만 은하가 탄생한다는 것이 그다지 대수로운 일은 아니라는 것이다. 이 견해를 초끈이론의 '결과물' 이라고 하기에는 무언가 만족스럽지 않지만, 그렇다고 그 가능성을 무시하기도 힘든 것이 사실이다.

지금의 초끈이론은 중요한 기로에서 있는지도 모른다. 그동안 초끈이론은 양자 중력에 대한 이해를 깊게 해주었고, 이를 통해 양자 장론의 새로운 면을 알게 하였으며, 심지어는 수학의 새로운 분야를 만들어 내기도 하였으나, 실제 세상과는 아직도 거리를 두고 있다. 그러나, 초끈이론에 대한 초기의 오해가 걷어져 가면서, 이 패러다임을 어떻게 사용해야 할지에 대한 조금 더 명확한 구도가 나타나고 있다. 세상이라는 초상화는 아직 구상 중이지만, 최소한 밑그림 그리는 방법을 조금은 배운 것 같다. 초끈이론이 어디에서 어떻게 우리의 실제 세상을 만나게 될지 궁금하다. [KIAS](#)

Profile

이필진 교수 현재 고등과학원 물리학부 교수이다. 캘리포니아 공과대학에서 1994년 박사학위 취득 후 컬럼비아 대학교 코넬 대학에서 M이론과 초대칭 양자론에 대한 연구를 하였고, 현재는 초끈이론의 입자 현상론 및 우주론에의 응용에 관심을 쏟고 있다.