

간단한 물리학의 역사와 모든 것의 이론으로서의 초끈 이론

초끈 이론(superstring theory 혹은 string theory)은 모든 것이 끈으로 이루어져 있다는 이론이다. 초끈 이론에 따르면 이 세상은 우리가 쉽게 느낄 수 있는 4차원(공간 3차원+시간 1차원)이 아닌 11차원으로 되어 있다고 한다. 이 글에서는 모든 것의 이론(Theory of Everything)이 무엇인가를 설명하기 위해 간략한 물리학의 역사에 대해 설명하고 모든 것의 이론이 어떻게 초끈이론과 연관이 되어 있나를 설명하겠다.

물리학자들은 항상 세상의 이치를 연구하기 위해 노력해 왔다. 항상 세상의 모든 현상을 적은 숫자의 방정식이나 원리로부터 이해하기 위해 노력해 왔다. 물리학의 시작은 17세기 뉴턴(Newton)의 만유인력의 법칙으로부터 시작했다고 보는 것이 정확할 것이다. 뉴턴은 사과가 땅으로 떨어지는 것, 달이 지구 주위를 도는 것, 달이 조수간만의 차를 일으키는 것이 사실은 $F = -\frac{GMm}{r^2}$ 라는 간단한 방정식으로부터 얻어질 수 있다는 것을 보여, 세상을 놀라게 했다. 사실, 사과가 땅으로 떨어지는 것과 달이 지구 주위를 도는 것은 어떻게 보면 전혀 연관이 없는 현상처럼 보이지 않는가!

200년 후 사람들은 전기와 자기가 밀접한 관련이 있다는 것을 알게 되었다. 예를 들어 전류가 없던 곳에 전류가 흐르기 시작하면 나침반의 방향이 바뀐다. 그리고 도선에 자석을 움직거리면, 도선에 전류가 흐르게 된다. 19세기에 맥스웰(Maxwell)은 이 모든 현상을 네 가지 간단한 방정식으로 정리했다.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

이 방정식에는 발전기의 원리, 변압기의 원리, 전자석의 원리, 모터의 원리, 나침반의 원리, 정전기의 원리 등 모든 전기 자기 현상이 숨어져 있다. 게다가 맥스웰은 빛이 전자기파라는 것을 알아냈다. (맥스웰이 전자기파의 속력을 구했는데, 그것이 그 당시 알려져 있던 빛의 속력과 일치했다. 나중에 헤르츠가 빛이 전자기파라는 것을 실험적으로 검증했다.) 즉, 빛의 굴절, 회절, 반사 같은 빛에 관련된 모든 현상도 전자기 현상인 것이다. 즉 빛의 모든 현상과 전자기

현상이 이 네 개의 간단한 방정식으로 설명되는 것이다. (differential form이라는 방법을 쓰면 이 네가지 식을 두 식으로 쓸 수 있다. $dF = 0$, $dF^* = j$. 정말로 간단하지 않은가! 개인적으로 이야기하자면, 필자는 수학 수업 숙제로 이 사실을 배우고 나서, 간단한 모든 것의 이론이 있다는 확신을 하게 됐다.)

20세기 초에는 물리학계에서 두가지 큰 혁명이 있었다. 아인슈타인(Einstein)의 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론, 하이젠베르크(Heisenberg)와 슈뢰딩거(Schrödinger)의 양자역학이 그것이다. 특수 상대성 이론은 빛의 속력이 일정하다는 데서 출발한다. 빛의 속력은 초속 약 30만 km인데 쉽게 생각하기에는 이 빛을 초속 29만 km로 따라 가면 빛의 속력이 초속 만 km로 보일 것이다. 그러나 실제로는 빛을 아무리 빠른 속도로 쫓아가더라도 빛의 속력은 여전히 초속 약 30만 km로 보인다. 빛의 속력이 일정하다는 것은 마이켈슨과 몰리의 실험으로 보여졌다. 아인슈타인은 이 원리로부터 빨리 가는 물체의 시간은 느리게 가고, 질량은 늘어나며, 길이는 줄어든다는 것을 보였다. 10년 후, 아인슈타인은 뉴턴의 만유인력의 법칙과는 다른 중력의 이론인 일반 상대성 이론을 발견한다. 일반 상대성 이론은 뉴턴역학으로는 설명을 못했던 수성의 궤도를 설명했으며, (뉴턴의 만유인력의 법칙이 예측하는 수성의 궤도와 실제 수성의 궤도에는 아주 미세한 차이가 있었다.) 태양의 중력에 의해 별에서 온 빛이 얼마나 구부러져야 하는지를 계산하였는데, 이는 1919년 일식 때의 관측에 의해 검증돼 아인슈타인은 일반 대중에게도 널리 알려지게 됐다. 아인슈타인의 상대성 이론이 1916년에 발표된 후 사람들은 계속 연구를 하여 빛도 빠져나올 수 없는 블랙홀의 존재를 예측하였고 그 존재를 실제로 관측으로 확인하였다. 즉 아인슈타인의 상대성 이론은 뉴턴의 만유인력 법칙이 설명하는 모든 현상을 설명할 수 있을 뿐만 아니라, 뉴턴의 만유인력 법칙으로 설명할 수 없는 태양의 중력에 의한 구부러짐, 수성의 궤도, 블랙홀 등도 설명할 수 있다.

한편, 19세가 말부터 미시세계에서 일어나는 현상들은 뉴턴의 법칙이나 맥스웰의 법칙으로 설명할 수 없다는 것이 밝혀졌다. 이를 1920년대에 하이젠베르크가 행렬의 방법으로, 슈뢰딩거가 미분방정식을 써서 양자역학을 만들어 해결했다. 곧, 파울리는 행렬역학을, 슈뢰딩거는 미분방정식을 이용하여 수소 원자에서 나오는 빛의 파장 스펙트럼을 계산했는데, 둘 다 실제 실험 결과와 일치했다. 이것은 놀라운 일이다. 왜냐하면, 사실 수학을 약간 공부한 사람은 알겠지만 행렬이란 것은 미분방정식과 아주 다른 것이기 때문이다. 얼마 지나지 않아 슈뢰딩거는 하이젠베르크의 행렬역학과 슈뢰딩거의 미분방정식은 아주 다르게 보이지만, 서로 동등하다는 것을 증명했다. 이 시점에서 다음 구절을 언급하고 싶다. “우리는 새 역학(즉, 양자역학)이 고전역학을 근사한게 아니라, 오히려 논리적으로 일관된 체계로의 고전역학의 체계적인 연장이라고 생각한다.” (p. VI Elementare Quantenmechanik (Zweiter Band der Vorlesungen über Atommechanik), Berlin: J, Springer Verlag)

양자역학이 이렇게 창립된 후 그 후 한 동안은 실제 일어나는 현상에 이 방정식을 대입해서 푸는 것에 많은 사람들이 시간을 보냈다. 그리고 놀랍게도 그 결과는 모두 실제 실험결과와 일치했다. 또한 양자역학이 생겨난지 얼마되지 않아 에렌페스트(Ehrenfest)는 양자역학이 거시 세계에서는 뉴턴의 법칙이 된다는 것을 보였다. 즉 다시 말하자면, 양자역학은 뉴턴의 법칙이 설명할 수 있는 거시세계를 이미 다 설명할 수 있는 것이다. 또한 슈퍼컴퓨터가 나온 이후로는 슈뢰딩거의 파동방정식을 더 잘 풀수 있게 됐는데, 실제 물리학자들이 연구해

본 결과, 슈뢰딩거의 파동 방정식은 주기율표나 원자의 성질 같은 화학의 모든 법칙을 실제적이 아니라면 적어도 이론상으로나마 설명할 수 있었다.

양자역학이 만들어진 후 2-3년 후 디랙(Dirac)은 양자역학을 특수상대론에 맞게 고쳐 써, 디랙 방정식을 만들었다. 그런데 이는 반전자의 존재를 예측했는데 반전자는 곧 실험으로 검출되었다.

양자역학이 만들어진 후 2-30년 후에는 특수 상대론적 양자역학을 더욱 발전시켜, 파인만(Feynman), 도모나가(Tomonaga), 슈윙거(Schwinger)가 양자전기역학을 만들어 많은 전자기적인 현상들을 놀라운 정확성으로 설명하였다. 파인만의 비유를 빌리자면, 양자전기역학적인 이론의 결과와 실험결과가 뉴욕과 로스앨러모스 사이의 거리의 산출에서 머리카락 굵기 이내의 차이로 일치하는 거와 다름 없다고 한다. (뉴욕에서 로스앨러모스의 거리는 약 3000km이다.) 즉, 양자역학이 거시세계에서 뉴턴의 법칙이 되듯이, 양자전기역학은 맥스웰이 설명할 수 있던 전자기 현상을 모두 설명할 수 있고, 동시에 다른 많은 현상들을 놀라운 정확성으로 설명할 수 있는 것이다.

물리학자들은 연구를 계속하여, 이 세상에는 네가지 힘(전자기력, 약력, 강력, 중력)만이 있다는 것을 밝혀냈다. 이 중 전자기력, 약력, 강력을 설명하는 이론을 표준 모형(Standard Model)이라고 하는데, 1970년대 초반에 완성되었다. 즉 자연계의 모든 힘과 현상이 이 네가지 힘으로부터 나온다는 것이다. 예를 들어 심리학의 현상들은 생물학의 현상에 근원을 두고 있을 것이다. 생물학의 현상은 화학적으로 봤을 때 복잡한 DNA 현상이나 뇌의 화학작용에 의해 일어나서 그럴 것이다. DNA 현상 같은 화학적인 분자의 법칙은 양자역학적인 물리 법칙에 근원을 두고 있다. 즉 복잡한 심리 현상도 물리 법칙에 근원을 두고 있는 것이다.

그러나 실제적인 측면에서는, 모든 현상을 표준 모형과 중력으로부터 설명하는 것은 어렵다. 예를 들어 앞에서 이야기했듯이, 원자들을 자세히 설명하는데도 슈퍼컴퓨터가 필요하다. 그런데 조금 더 복잡한 분자나 더욱 더 복잡한 DNA, 단세포 동물 같은 것은 더 빠른 슈퍼 컴퓨터가 필요할 것이다. 실제로 단세포 동물만 하더라도 현재 나와 있는 아무리 빠른 컴퓨터라도 슈뢰딩거의 양자역학 방정식을 풀어내지 못한다. 그런데 하물며 모든 것을 이 네 가지 힘을 가지고 설명할 수 있겠는가. 또한 심리학 현상을 생물학으로 설명해 내거나, 생물학 현상을 화학 현상으로 설명하는 것도 쉽지 않다. 그러니 단순히 모든 것이 네 가지 힘으로 설명된다는 거와 그것을 실제로 설명하는 것은 차이가 있다. 하지만, 그렇다고 모든 자연현상을 이 네가지 힘으로 귀결했다는 것이 대단하지 않다는 것은 아니며 이를 연구하는 것이 의미 없다는 것은 아니다.

표준모형과 중력(아인슈타인의 일반 상대성 이론)이 모든 현상이 일어나는 이치라고는 하지만 물리학자들의 도전은 여기서 끝난 것이 아니다. 첫째로 표준모형이 왜 그런 모형이었냐의 문제가 있다. 왜 다른 모형이면 안 되냐의 문제가 남아 있다. 표준 모형에는 20여개의 자유상수(free parameter)가 있는 걸로 알려져 있는데, 왜 이 상수들이 이런 값을 갖고 다른 값을 가지면 안 되냐의 문제가 있다. 즉 이 상수들은 계산될 수 없으며, 실험으로 측정되어 계산할 때 손으로 직접 집어 넣어 줘야 하는 값이다. 이런 상수들 중 하나가 와인버그 각(Weinberg angle)으로 전자기력과 약력의 크기의 비율을 나타내 주는 상수인데 왜 전자기력과 약력의 크기 비율이 다른 값이 아닌 왜 29도가 되어야 하는지 사실 아무도 모르고 있다. 둘째로 아인슈타인의 일반상대성 이론이 양자역학에

맞게 쓰여져 있지 않다는 것이다. (고리양자중력이론이 이것을 할 수 있다지만 아직 널리 받아지지 않는 것이다.) 양자역학이 맞는 이론이라면, 모든 이론을 양자역학에 맞게 쓸 수 있어야 한다. 하지만, 일반상대성 이론은 그렇게 쓰는 것이 쉽지 않다는 것으로 알려져 있다.

하지만, 초끈 이론은 이 두 가지 문제를 모두 해결할 수 있는 가능성이 있다. (아직 초끈 이론이 완전히 풀린 게 아니기 때문에 가능성이 있다고 표현했다.) 초끈 이론에는 자유상수(free parameter)가 없다. 즉 이 말은 앞에서 이야기한 와인버그 각 같은 상수 같은 것을 초끈 이론에서는 직접 계산해 보는 것을 시도한다는 것이다. 그 뿐만 아니라, 왜 자연계에 세 가지 힘이나 다섯 가지 힘이 아닌 네 가지 힘이 있는지도 설명하려고 노력하고 있으며 이 힘의 세세한 성질들을 설명하려고 노력하고 있다. 또한 초끈 이론은 중력을 양자화할 수 있는 것 뿐만 아니라, 초끈이론을 계산하다 보면, 중력이 자연스럽게 유도 되는 것을 볼 수 있다. 초끈이론이 어떻게 이론을 전개해 나가나를 보면 놀랍다. 대략적으로 이야기한다면, 초끈이론에는 단지 두 가지 가정만 있다. 첫째, 끈의 '작용'은 끈이 스치고 지나간 면적에 비례한다. 여기서 '작용'이란 물리학자들이 물체의 운동방정식을 구할 때 필요한 유일한 것이다. 두번째는 초대칭성이다. (초대칭성이 뭔가는 다른 글에 설명해놓았다.) 물리학자들이 이러한 두 가지 원칙만으로 얼마나 많은 일들을 했냐를 생각하면 정말 놀랍다. 이해를 돕기 위해 예를 들겠다. 20세기 초, 물리학자들은 유체역학에서 난류를 설명하기 위해 나비에-스토크스 방정식이 충분한지 아니면 다른 개념이 필요한지 몰랐다. 하이젠베르크는 전자가 맞다는 것을 증명했다. 1924년 그는 다음과 같이 썼다. “지금까지 얻어진 모든 결과는, 그들이 서로 상반되는 것처럼 보여도, 간단한 하나의 수학적 체계로 설명될 수 있다.” (Über die Stabilität und Turbulenz von Flüssigkeitsströmen, Ann. d. Phys. (4) 74, p627, “The historical development of quantum theory, volume 2,” p60-61에 있는 영문 번역으로부터 번역) 물리학자들은 서로 상반되는 것처럼 보이는 다섯가지 끈이론을 유도해냈지만, 나중에 이 이론들이 긴밀히 서로 관련되어 있어서, 상반되는 것은 문제되지 않는다는 것을 보였다. (다음 글에서 이에 대해 더 자세히 이야기하겠다.)

요약하자면 우리는 다음과 같은 관계식(analogy)을 얻을 수 있다.

양자역학: 화학 = 초끈 이론: 표준 모형+중력

즉 화학의 법칙은 양자역학으로 설명이 되듯이, 표준모형과 중력은 초끈 이론으로 설명할 수 있는 가능성이 있다는 것이다.

필자가 알기로는 일반인을 위해 쓰여진 한국어로 잘 설명된 초끈 이론 책에는 네 권 정도 있다. 브라이언 그린이 쓴 엘러건트 유니버스와 우주의 구조, 미치오 가쿠가 쓴 평행 우주, 박재모가 쓴 초끈 이론이 그것이다.