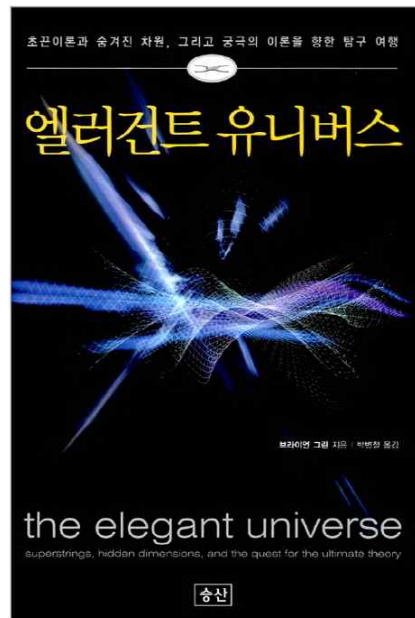


엘리гант 유니버스 브라이언 그린 - 송산 -



서문

알버트 아인슈타인은 자연계에 존재하는 모든 힘(중력, 전자기력, 강력, 약력)을 하나의 통일된 원리로 설명하는 통일장이론을 완성하기 위해 생애 마지막 30년 동안 노력하였지만 성공하지 못함.

아인슈타인이 세상을 떠난 후, 모든 현상을 설명해 줄 하나의 이론체계를 만들어냄. 그 이론이 초끈이론임. 이 초끈이론은 통일장이론을 완성시켜줄 강력한 후보로 각광을 받고 있다.

1부 지식의 변두리에서

제 1 장 끈(string)으로 단단히 묶다

p21 : 현대물리학은 두 개의 커다란 기둥에 의하여 유지. 하나는 방대한 스케일의 우주를 설명해주는 아인슈타인의 일반상대성이론이고, 다른 하나는 분자 원자를 비롯한 소립자의 세계를 설명해주는 양자역학이다.

p22 : 각자의 분야에서 의심의 여지가 없이 전혀 없이 잘 들어맞는 두 개의 이론이 ‘서로 양립할 수 없다’는 것이다.

- 거시적 우주와 미시적 우주는 서로 다른 법칙의 지배를 받고 있을까, 우주는 양쪽 극단의 성질들을 동시에 가질 수 있으므로 미시세계의 양자역학과 거시세계의 일반상

대성 이론이 동시에 적용되어야 올바른 답을 얻을 수 있을 것이다.

p23 : ‘가장 근본적인 단계에서 만물의 섭리를 서술하는’ 초끈이론이 일반상대성 이론과 양자역학 사이의 대립관계를 해소시켜줄 가장 강력한 후보.

p24 : 초끈이론은 시공간과 물질의 근원을 기존과는 전혀 다른 시각에서 바라보기 때문에 우리가 이 이론을 별 불편없이 받아들이려면 어느 정도 시간이 지나야 할 것이다.

▶ 세번의 충돌사건

p24 : 두 개의 이론이 서로 충돌하는 세 가지 큰 사건

① 빛을 따라 잡을 수 없다 - 아인슈타인의 특수 상대성이론

p25 : 시간과 공간은 모든 사람에게 동일하게 느껴지는 ‘절대적인’ 물리량이 아니라, 개개인의 운동 상태에 따라 구조와 외형이 변형되는 ‘상대적인’ 물리량이다. 시간과 공간의 기존 개념에 수정을 가함.

② 중력의 개념에 대한 혁명 - 아인슈타인의 일반상대성 이론

p25 : 중력을 행사하는 데는 ‘전혀 시간이 소요되지 않는다.’는 뉴턴의 만유인력의 법칙을 수정하게 함.

- 시간과 공간은 관측자의 운동 상태에 영향을 받을 뿐만 아니라, 물질이나 에너지가 존재하는 곳에서는 휘틀리고 휘어질 수도 있는, 참으로 난해한 물리량이 됨

- 시공간의 왜곡현상은 한 지점에서 다른 지점으로 중력이 전달되는 수단으로 작용한다.

③ 물리학자들은 1900년부터 30년 동안 미시세계에 적용되는 양자역학을 발전시켰는데 이는 일반상대성이론과 심각한 충돌을 가져옴.

p26 : 일반상대성이론에 의해 기하학적으로 매끄럽게 휘어진 공간은 양자역학이 예견하는 혼란스러운 미시세계와 정면으로 상충. 1980년대 중반 들어 끈이론이 해결책을 제시

- 끈이론에 의하면 우주가 3차원으로 이루어진 것이 아니라 훨씬 더 높은 차원을 가지고 있다는 것이다. 이 여분의 차원이 미세한 영역 안에 단단히 꼬인 채로 숨어있기 때문에 눈으로 감지되지 않는다.

- 차원이란 시공간의 구조와 특성을 담고 있는 가장 기본적인 물리량

p39 : 끈이론에 의하면 만물의 최소단위인 끈이 진동하는 방식에 따라 겉으로 나타나는 형태가 달라진다.

p43 : 끈이론은 현재 개발 도중에 있는 이론으로 이해되어야 한다.

2부 시간과 공간, 그리고 양자의 딜레마

제 2 장 시간과 공간 그리고 관찰자의 눈

특수상대성이론 : 어떤 물체도, 신호도, 영향력도, 빛보다 빠르게 움직일 수는 없다.

서로에 대하여 등속운동을 하고 있는 관찰자들에게는 모든 물리법칙들이 동일한 형태로 나타난다.

p57 : **상대성이론의 기본원리** : 모든 운동은 상대적이다. 이것이 상대성 원리의 핵심이다.

p58 : 힘이 작용하지 않고 있는 상태에서 진행되는 모든 운동은 다른 대상과의 상대적인 비교 하에서만 서술될 수 있다. ‘힘이 작용하지 않는다.’는 전제가 매우 중요한 의미를 가짐.

p59 : 힘을 느꼈다면 그는 가속운동을 하면서 움직인 것이 분명하다. 등속운동은 상대적이지만, 가속운동은 상대적이지 않다.

p60 : 힘이 작용하지 않는 모든 운동(정지상태 포함)은 상대적이기 때문에 등속운동을 하고 있는 다른 물체를 기준으로 삼아 ‘그것에 대한’ 운동 상태를 서술하는 것이 우리가 할 수 있는 최선이다.

– 등속으로 이동하고 있는 모든 관찰자들에게 ‘모든 물리법칙은 동일하다’

▶ 빛의 속도(광속)

p63 : 광원과 관찰자의 상대속도에 상관없이 관측된 빛의 속도는 언제나 동일하다.

▶ 진실의 결과

p65 : 속도란 정해진 시간 내에 얼마나 먼 거리를 이동할 수 있는지를 나타내는 척도이다.

– 속도는 시간과 공간의 개념과 밀접하게 연관되어 있다. 빛의 속도는 어떤 상태에서 관측을 하건 간에 항상 불변이다. 라는 말은 상식에 위배된다.

▶ 시간 개념의 혁명 : 제 1부

p66 : 광속 불변의 성질을 이용하면 우리가 습관적으로 받아들이고 있는 시간의 개념이 잘못되어있다

p68 : 두 관찰자가 서로에 대하여 등속운동을 하고 있는 경우, 한 관찰자의 눈에 동시에 일어난 사건은 다른 관찰자가 볼 때 결코 동시에 일어나지 않는다.

p70 : 서로에 대하여 상대적으로 움직이고 있는 두 명의 관측자들은 그들의 눈앞에 서 일어나 사건들의 동시성에 의견일치를 볼 수가 없다.

▶ 시간개념의 혁명 : 제 2부

p70 : ‘시간’이라는 개념은 어떻게 정의되어야 할까?

p71 : 시계는 ‘정확한 주기운동을 수행하는 기계장치’라고 대충 정의 내릴 수 있다.

- 완전하게 규칙적인 주기운동이라는 말속에 시간의 개념이 내포되어 있다.
- 물체의 운동이 시간에 어떠한 영향을 미치는가?

p74 : 정지해 있는 관찰자의 입장에서 볼 때, 움직이는 시계속의 광자가 더 먼 거리를 이동한 것이다. 게다가 어떤 상태에서 측정해도 항상 불변이기 때문에 두 시계에서 광자의 이동 속도는 동일하다. 등속으로 이동하고 있는 광자시계는 정지해 있는 광자시계보다 느리게 갈 것이다. 앞에서 우리는 시계가 재깍 거리는 속도를 시간의 척도로 정의했으므로, 결국 움직이는 광자시계에서는 시간 자체가 느리게 흘러간다는 결론을 내릴 수 있다.

▶ 달리는 물체의 수명

p76 : 정지해 있는 관찰자가 볼 때 이동 중인 시계는 자신의 시계보다 느리게 가는 것처럼 보이며, 이동 속도가 빠를수록 느려지는 정도도 커지는 것이다. 이것은 시계의 성질이 아니라 시간 자체의 독특한 성질이다.

p76 : 움직이고 있는 사람의 시간은 정지해 있는 사람의 시간보다 늦게 흘러간다.

- 시간이 늦게 가는 것은 시계에만 해당하는 것이 아니다. 움직이는 사람의 심장박동을 비롯한 모든 생체현상도 똑같이 느려져서, 정작 당사자는 아무런 변화도 느끼지 못한다.

p77 : 움직이고 있는 사람의 입장에서 보면 시간과 함께 진행되는 모든 현상이 느려지기 때문에 본인은 아무런 변화도 느낄 수 없다.

▶ 도대체 누가 움직이고 있는가?

p79 : 움직이는 뮤온이 볼 때에는 자신의 시계보다 정지해 있는 뮤온의 시계가 늦게 가는 것이다.

p81 : 이것이 상대성이론의 핵심이다. 서로 상대방의 시계가 늦게 가는 이 모순적인 상황을 확인할 수 있는 방법은 무엇일까? 방법이야 있지만, 결과는 항상 실망스럽다.

p84 : ‘상대운동을 하고 있는 두 명의 관찰자가 볼 때, 상대방의 시계는 내 것보다 느리게 간다.

▶ 운동 공간에 미치는 효과

p84 : 시간은 운동에 의하여 영향을 받는다. 그런데 운동은 시간뿐만 아니라 공간까지도 변형시키는 성질을 가지고 있다.

p85 : 등속운동을 하고 있는 모든 물체는 진행방향으로 길이가 줄어든다.

▶ 시공간에서의 운동

p86 : 빛의 속도가 관측 상태에 상관없이 항상 일정하다.

- 움직이는 물체는 동작이 슬로우 모션으로 진행되며 길이가 짧아진다.

p88 : 특수상대성 이론의 핵심 : 서로 다른 방향의 차원들에 대하여 운동이 분배된다.

- 물체의 운동은 공간이 아닌 시간을 통해서 이루어진다.

p89 : 시간과 공간이 한데 묶여 질 수 있는 차원이라면 공간속에서 정의된 물체의 이동속도를 시간의 개념 속에서 정의 할 수 있지 않을까? 할 수 있다.

p90 : 상대운동을 하고 있을 때 움직이는 물체의 시계는 늦게 간다. 즉, 시간적 관점에서 볼 때 물체의 속도가 느려진 것이다.

- “모든 물체는 시공간(spacetime) 속에서 항상 빛의 속도로 이동한다.”고 아인슈타인은 주장

- 정지해 있는 모든 물체들은 한결같이 동일한 속도를 유지한 채로 시간 차원을 따라 이동하고 있다.

p91 : 공간 이동속도의 최대치는 시간차원 쪽의 운동이 모두 공간이동 쪽으로 할당되었을 때 나타난다. 그러므로 물체의 이동속도는 광속을 초과할 수 없다.

▶ $E = mc^2$ 의 의미는 무엇인가?

p93 : 물체의 속도가 빨라지면 에너지가 증가한다. 물체의 이동속도가 빨라질수록 질량이 증가하는 것을 의미한다. 입자의 질량이 커지면 그만큼 가속시키기 어려워진다.

p94 : 빛의 속도보다 빠르게 하려면 무한대의 에너지가 필요하다. 그러므로 모든 물체는 빛보다 빠르게 달릴 수 없는 것이다.

- 모든 물체는 빛보다 빠르게 달릴 수 없는 것이다.

- 빛보다 빠르게 움직이는 입자는 ‘타기온’이라는 명칭을 가지고 있음

제 3 장 뒤틀림(warps)과 굴곡(ripples)

p95 : 빛보다 빠른 운동은 있을 수 없다는 전제는 뉴턴의 중력이론과 정면으로 충돌을 일으켰다. 아인슈타인은 이 문제를 해결해주는 일반상대성이론을 완성하였다.

- 일반상대성이론의 핵심은 시간과 공간은 중력에 의해 뒤틀리고 구부러져 있다는 것이다.

p96 : 1642년 영국에서 태어난 뉴턴의 업적으로 가장 중요한 것이 ‘중력(만유인력)’이론이다. 중력의 세기는 두 가지에 의하여 결정된다. 하나는 물체를 이루고 있는 구성물질의 양이고, 다른 하나는 두 물체사이의 거리이다.

p100 : 뉴턴의 중력이론은 물체의 운동을 매우 정확하게 설명해주지만, ‘중력이 왜 작용하는가?’에 대한 질문에는 답을 하지 못한다.

p102 : 뉴턴이 설명하지 못했던 '중력의 근본적인 성질'을 아인슈타인이 규명을 한 것이다.

p106 : 가속운동을 하면 힘이 느껴진다. 경험에서 출발

- 외부와 완전히 차단된 상태에서 중력과 가속운동의 효과를 구분하는 것은 불가능하다.

- 지구를 떠나는 로켓의 내부에서 중력을 일정하게 유지하려면, 지구에서 멀어질수록 중력의 크기는 작아진다. 그러면 로켓을 가속시킨다. 가속되는 로켓의 내부의 중력의 크기가 커진다.

- 등가원리 : 중력과 가속운동은 완전하게 동일하다

p108 : 아인슈타인은 다루기 힘든 중력을 가속운동의 개념으로 바꾸어서 이해한다면 중력의 싸고 있는 베일을 벗겨낼 수 있다고 생각

▶ 가속운동과 휘어진 시공간

p109 : 1912년 중력과 가속운동의 관계를 특수상대성이론에 접목시키는 작업을 완료함

p111 : 중력과 시공간 사이의 관계

- 움직이는 물체는 진행방향으로 길이가 줄어든다.

p113 : 정상상태의 공간은 유클리드 기하학으로 서술되지만, 가속운동을 겪고 있는 공간은 유클리드식 '평평함'을 잃어버리고 휘어진다.

- 가속운동은 공간뿐만 아니라 시간까지도 휘어지게 한다.

p115 : 특수상대성이론에 의하면 빨리 움직일수록 시간은 느리게 진행된다.

- 위치가 변할 때 마다 시간이 다른 속도로 흘러간다면, 그것은 곧 시간이 휘어져 있음을 의미하는 것이다.

p116 : 가속도가 커졌기 때문에 시간의 휘어진 정도, 즉, '시간의 곡률'이 커진 것이다.

- 휘어진 시공간 자체가 중력의 존재를 의미한다.

▶ 일반상대성이론의 기본개념

p118 : 태양처럼 질량을 가진 물체가 우주공간에 존재하면, 그 일대의 공간의 질량의 존재로 인하여 휘어진다.

p120 : 질량의 존재가 공간을 왜곡시킴으로써 중력이 전달되는 것이다. 즉, 중력은 질량으로부터 공간이 왜곡되면서 나타나는 현상이다.

p122 : 중력의 매개체는 휘어진 우주공간이다.

p124 : 존휠러 : 질량은 공간에게 어떻게 휘어져야 할지를 말해주고, 공간은 질량에게 어떤 경로로 움직여야 할지를 말해준다.

▶ 모순점의 해결

p126 : 중력은 빛의 속도로 전달된다.

▶ 시간의 왜곡

p129 : 중력이 크면 클수록 시간은 더욱 크게 왜곡된다.

▶ 일반상대성이론의 실험적 증거

p130 : 뉴턴의 중력이론이 가지고 있었던 단 하나의 문제점은 ‘중력이 전달되는데 전혀 시간이 소요되지 않는다.’는 것이었다.

▶ 블랙홀과 빅뱅, 그리고 팽창하는 우주

p133 : 특수상대성 이론의 효과는 운동하는 물체의 속도가 빠를수록 크게 나타나는 반면에, 일반상대성이론의 효과는 물체의 질량이 커서 시공간의 왜곡이 심할수록 크게 나타난다.

p138 : 질량과 에너지의 분포에 따라 시공간이 변형된다.

- 우주는 일정한 크기로 머물러 있는 것이 아니라 팽창하거나 수축한다는 것을 일반상대성 이론의 방정식은 보여준다.

p139 : 1920년 러시아의 기상학자 알렉산더 프리드만은 아인슈타인의 일반상대성이론 방정식을 이용하여 은하들이 매우 빠른 속도로 서로 멀어지고 있음을 증명.

- 우주의 시계를 역으로 돌리면 우주가 수축하면서 모든 은하들이 한곳에 모이게 된다. 우주가 막 탄생하던 순간에는 모든 것이 하나의 ‘점’안에 거의 무한대의 밀도로 응축되어 있을 것으로 추정.

p140 : 그러다가 어느 순간에 대폭발(big bang)이 일어나 사방으로 흩어지면서 우주의 진화가 시작되었다고 추정

p142 : ‘현대 이론물리학의 최대 난제’는 일반상대성이론과 양자역학의 조화롭게 섞는 일이다. 양자역학의 세계로 들어가 보자

제 4 장 불가사의한 미시세계

p145 : 독일의 물리학자 막스 플랑크가 양자역학의 서막을 열음

- 양자역학은 원자적 미시세계에서 일어나는 현상을 설명해주는 이론

파동을 서술하는 경우, 파장, 진동수, 진폭이라는 세 개의 용어를 주로 사용

p151 : 전자기파들은 주파수에 상관없이 모든 동일한 양의 에너지를 실어 나른다.

- 무한개의 파동이 존재할 수 있다. 그러므로 이들 모두의 에너지를 합한 양은 무한대

가 된다.

p154 : 유한한 에너지의 양을 만들기 위한 막스 플랑크의 주장

p155 : 에너지의 최소단위인 ‘덩어리’의 크기는 파동의 주파수에 비례한다. 진동수가 큰 빛 = 짧은 파장은 에너지의 최소단위가 크고, 반대로 진동수가 작은 빛 = 긴 파장은 에너지의 최소단위가 작다는 것을 의미한다.

- 긴 파장의 복사 보다는 짧은 파장의 복사가 더 많은 에너지를 실어 나른다.

- 모든 진동수의 전자기파들에게 일종의 물체의 에너지에 기여할 수 있는 전자기파의 개수가 유한하기 때문에 결국 전체 에너지의 양은 유한해진다. ‘책임량’이 일괄적으로 할당되어 있는 상태이다. 그러나 진동수가 커서 에너지의 최소단위가 이 책임량을 초과해 버린 전자기파는 전체 에너지에 기여하지 못하는 상태를 유지한다.

p156 : 에너지의 최소 기본단위가 존재하는 한, 그리고 진동수가 증가함에 따라 최소 단위도 증가하는 한, 그 총량은 항상 유한할 수 밖에 없다.

- 에너지의 최소단위는 파동의 주파수가 증가할수록 커진다.

p158 : 왜 에너지가 최소단위의 덩어리들로 되어있는지 플랑크 자신도 알 수가 없었다. 하지만 아인슈타인이 ‘광전효과’라는 현상으로 에너지의 최소단위를 설명

- 광전효과 : 진동수가 큰 빛을 쏘이면 튀어나오는 전자의 속도가 빨라지고, 진동수가 작은 빛을 쏘이면 전자의 속도가 느려진다. 빛이 강해지면 튀어나오는 전자의 수만 증가할 뿐, 전자의 속도는 변함이 없다.

p159 : 입사광의 강도가 아닌 입사광의 주파수가 전자의 표면 탈출 여부를 결정하고 있는 것이다. 그리고 입사광의 진동수는 튀어나온 전자의 에너지(속도)도 좌우하고 있음을 알 수 있다.

▶ 파동인가, 입자인가?

p169 : 빛이 입자라면 간섭무늬를 어떻게 설명할 수 있는가 ?

p171 : 광전효과는 빛이 입자임을 보여주는 것이고, 간섭무늬는 빛이 파동이라는 것을 보여준다. 즉, 빛은 입자적 성질과 파동적 성질을 동시에 가지고 있다.

▶ 불가사의한 양자역학

p186 : 1927년 독일의 물리학자 하이젠베르크 ‘불확정성원리’

p188 : 위치의 오차를 줄이면 상대적으로 속도의 오차가 커지고, 속도의 오차를 줄이면 위치의 오차가 커진다.

p189 : 전자를 비롯한 모든 물체들은 정확한 위치와 정확한 속도를 결코 동시에 가질 수 없다.

제 5 장 새로운 이론의 필요성이 대두되다 : 일반상대성이론과 양자역학

p194 : 물리학자들이 막상 두 개의 이론을 합쳐놓고 보니, 마치 불과 화약을 섞어 놓은 것처럼 일대 재난이 발생하고 말았다. 양자역학과 일반상대성이론의 방정식들을 섞어 놓고, 여기에 물리문제를 적용시키면 항상 말도 안 되는 답이 튀어나왔다.

p195 : 입자의 위치와 속도를 동시에 정확하게 측정할 수 없다는 것은 곧 미시세계가 원래부터 혼란스러운 세계였음을 의미한다.

p197 : 혼란의 원인은 무엇인가? 모든 것들이 관계되어 있다. $E = mc^2$ 에 의하여 에너지는 물질로 바뀔 수 있고, 반대로 물질이 에너지로 전환될 수 있다.

- 에너지 격동이 심해지면, 아무것도 없는 진공 속에서 전자와 양전자가 갑자기 생겨날 수 있으며, 에너지를 빠른 시간에 되돌려 주어야 하기 때문에 진공 중에서 느닷없이 탄생한 전자와 양전자는 곧바로 합쳐져 소멸한다.

- 에너지와 운동량이 취할 수 있는 모든 형태의 물리량에서 언제든지 발생할 수 있다.

▶ 양자장이론(QFT, Quantum Field Theory)

p199 : 양자역학이 제대로 완성되려면 특수상대성이론이 반드시 고려되어야 한다.

- 양자전자기학이란 맥스웰의 전자기장의 양자화한 이론이다.

p200 : 물리학자들은 양자전자기학을 이용하여 빛이 광자라는 미립자로 이루어져 있음을 확인하였고, 광자가 전자와 같은 하전입자들과 상호작용을 한다는 사실을 수학적으로 완벽하게 규명하였다.

- 1960-1970년대 물리학자들은 ‘강력’의 양자장론에 해당하는 ‘양자색역학’과 ‘약력’의 ‘양자장론’에 해당하는 ‘약전자이론’을 만들어 내는데 성공하였다.

- 양자색역학은 양자강력학이라는 이름으로 불려야 하지만, ...

p201 : 약전자라는 말 속에는 힘의 성질에 관한 매우 중요한 의미가 들어있다.

- 1970년대 물리학자들은 자연계에 존재하는 4종류의 힘 중에서 중력을 제외한 세 가지의 힘을 양자역학적으로 설명하는데 성공하였다.

p202 : 중력을 제외한 세 종류의 힘과 3가지 족의 입자들에 관한 이론을 입자물리학의 표준이론 또는 표준모델이라고 부르고 있다.

▶ 전령입자(Messenger Particle)

p202 : 전자기장을 이루는 최소단위의 입자 : 광자 photon

- 강력장을 이루는 최소단위 : 글루온 gluon

- 약력장을 이루는 최소단위 : 위크 게이지 보손 weak gauge bosons

p203 : 전기장에서 같은 부호의 하전입자들 사이를 매개하는 광자는 상대방으로부터 멀어지라는 메시지를 전달하고, 서로 다른 부호의 하전입자들을 매개하는 광자는 서로

가까이 오라는 뜻의 메시지를 전달하는 것이다.

p204 : 이러한 이유로 광자는 전자지력의 '전령입자 messenger particle' 이라고 불리기도 한다.

p204 : 중력의 전령입자 '중력자'가 등장할 것 같아 보이지만,

p207 : 현재 지금까지도 양자중력이론을 완성하지 못했다.

▶ 일반상대성이론 대 양자역학

p207 : 일반상대성이론과 양자역학을 한데 합치려면 아주 작은 스케일에서 나타나는 공간의 특성을 고려하여야 한다.

p209 : 중력은 공간(시공간)의 곡률로 표현된다.

p211 : 양자적 요동이 극심한 초미세영역에서는 일반상대성이론을 도저히 써먹을 수가 없다.

- 양자역학적 영향의 크기를 좌우하는 플랑크상수가 너무 작으데다가, 중력이라는 힘 자체가 워낙 약하기 때문에 양자적 요동은 상상하기조차 힘들 정도로 지극히 작은 스케일에서 나타난다.

- 만일 우리가 원자 하나를 우주의 크기만큼 확대한다고 하면 플랑크길이는 겨우 나무한 그루 크기를 넘지 않는다. (스케일이 $10^{-33}cm$)

플랑크 상수 [-常數 , Planck's constant]

1900년 독일의 물리학자 플랑크(Max Planck, 1858~1947)가 흑체복사곡선을 묘사하는 방정식을 구하기 위해 도입한 상수로, 플랑크는 흑체복사의 진동자에 대해 두 가지 가정을 세웠다. 하나는 진동자가 가질 수 있는 에너지의 값은 임의의 값이 아니며 $\epsilon = h\nu$ 로 주어지는 값만을 가질 수 있다(ν : 진동자의 진동수). 다른 하나는 진동자가 복사하는 에너지는 연속적인 것이 아니라 양자(quantum)의 덩어리로 복사된다.

위의 가정에서 사용된 상수 h 가 플랑크상수이며, 물질입자의 입자성과 파동성을 보증하는 상수로서, 불연속성과 불확정성을 보이는 양자역학적 미시세계의 본질에 관계하는 중요한 상수이다. 일반적인 경우 작용량의 크기가 이 상수에 비해 매우 큰 역학현상에 대해서는 양자역학의 특정한 경우($h \rightarrow 0$)로서 고전역학이 성립한다. h 의 값은 $6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ 이다.

3부 우주의 교향곡

제 6 장 그것은 그냥 음악일 뿐이다 : 초끈이론(Superstring Theory)의 본질

p215 : 초끈이론에 의하면 미시세계의 만물들은 모두가 조그만 끈으로 이루어져 있으며, 이들이 진동하는 패턴에 따라 우주의 운명이 결정된다.

- 표준모델에 의하면 우주를 구성하는 최소단위는 ‘점’ 처럼 생긴 입자들이며, 이들은 더 이상 내부구조를 가지지 있지 않다.

p216 : 끈이론의 가장 큰 특징은 일반상대성이론과 양자역학의 충돌을 무마시킬 수 있는 가능성을 지녔다는 것이다.

p217 : 모든 물질과 힘들을 하나의 근본단위, 즉, 진동하는 끈으로부터 설명하기 때문에, 통일된 물리법칙을 이끌어내는데 매우 적절한 이론이다.

p218 : 소립자의 형태를 극소형의 ‘진동하는 1차원 끈’으로 간주하였을 때, 핵자들 사이의 상호작용을 수학적으로 표현한 것이. 오일러 베타함수이다.

p219 : 끈이론은 강력만을 설명하는 이론이 아니다. 그것은 중력까지도 포함하는 양자 이론이다.

p220 : 끈이론 속에는 4가지의 힘(중력, 전자기력, 강력, 약력)과 모든 물질들이 포함된다.

p228 : 진동이 격렬한 끈일수록 에너지가 크고, 진동이 줄어들면 에너지도 작아진다.

p231 : 끈이론으로부터 구체적인 물리량을 계산해내는 것은 아직도 희망사항이다.

▶ '초강력 끈'으로부터 유도되는 세 가지 결과

p233 : 끈의 진동방식(진동이 격렬할수록 에너지가 크다)과 장력)장력이 클수록 에너지가 크다)이 그것이다.

p235 : 중력을 전달하는 입자의 질량이 정확하게 0이라는 뜻이다. 중력은 빛의 속도로 전달되는데 질량을 조금이라도 가진 입자는 이 속도를 낼 수가 없기 때문이다.

▶ 끈이론에 등장하는 중력과 양자역학

p237 : 끈이론의 가장 매력적인 그것이 중력과 양자역학의 충돌을 화해시켰다는 것이다.

- 일반상대성이론은 중력에 의해 시공간이 ‘부드럽게’ 휘어진다고 주장하는 반면, 양자역학은 초미세 영역에서 일어나는 양자적 요동 때문에 시공간이 도저히 부드럽게 휘어질 수 없음을 천명하였다.

p242 : 점입자와 달리, 끈은 탐사용으로 사용되는데 있어서 두 가지의 장애요소를 가지고 있다. ‘양자적 요동’과 ‘유한한 크기’가 바로 그것이다. 끈의 에너지를 증가시키면 첫 번째 장애는 감소하지만, 궁극적으로 두 번째 장애가 두드러지게 나타난다. 우리가 어떤 방법을 동원한다 해도, 끈을 이용하여 플랑크 길이 이하의 초미세 영역을 탐사하는 것은 결국 불가능하다는 뜻이다.

p243 : 끈으로는 플랑크길이보다 작은 영역의 구조를 탐사할 수는 없다.

p244 : 시공간의 양자적 요동은 관측될 수 없으므로 존재하지 않는다. 이것이 끈이론으로 부터 내려진 결론이다.

▶ 교묘한 손재주?

p244 : 그동안 현대 이론물리학이 직면해왔던 충돌문제는 사실 따지고 보면 물리학 스스로가 야기시킨 셈이다. 그동안 우리는 물질을 이루는 최소단위 입자와 힘을 매개하는 입자들을 ‘점입자’로 간주해왔기 때문에 무한히 작은 영역의 성질까지 모두 밝혀야 한다는, 일종의 의무감을 갖고 있었다. 그리고 초미세 영역에서 도저히 해결할 수 없는 문제에 직면하게 되었다.

p245 : 점이 아닌, ‘아주 작은’ 입자가 최소단위를 이룬다는 가정 하에서 하나의 이론체계를 만들어내는 것은 너무나도 어려운 일이었다. 이 이론은 양자역학의 확률보존법칙, 즉 입자는 갑자기 사라지지 않는다는 기본법칙에 부합되어야 할 뿐만 아니라, 모든 물체와 정보의 이동속도는 빛보다 빠를 수 없다는 특수상대성 이론과도 맞아 떨어져야 했다.

- 끈이론이 갖고 있는 가장 큰 장점은 모든 물리학 관련 이론들이 요구하는 까다로운 조건들을 하나도 빠짐없이 포용할 수 있다는 점이다. 게다가 끈이론은 현대물리학의 천덕꾸러기였던 중력을 양자화 시켜줄 해결사의 자질도 충분히 갖고 있다.

p248 : 점입자들끼리 충돌하는 경우에는 상호작용이 일어난 시점과 장소가 정확하게 기술될 수 있지만, 끈의 경우에는 이런 식의 정의가 불가능하다.

p253 : 끈의 상호작용이 시작되는 위치와 시간은 관측자마다 천차만별이고, 이 모든 사람들의 관점은 동등해야 하기 때문에, 결국 끈의 상호작용이 시작되는 시공간은 점입자보다 훨씬 넓게 퍼져 있는 셈이다.

- 중력의 경우, 이 퍼짐효과는 초미세 영역의 특성을 어느 정도 희석시키는 역할을 한다.

p254 : 끈은 특정크기를 갖고 있음에도 불구하고, 양자역학의 범주 안에서 성공적으로 기술될 수 있다.

- 그리고 둘째로, 수많은 진동패턴들 중 하나가 중력의 매개입자인 중력자와 정확하게 일치하기 때문에, 중력까지도 자연스럽게 포함하는 ‘만물의 이론’으로 다분한 가능성이 있다.

- 점입자의 개념은 만물의 최소단위를 수학적으로 이상화시킨 것으로서, 끈이론의 출현과 더불어 그 입지를 상실하였다. 그렇다면 ‘두께는 없고 오로지 길이만 있는’ 끈이라는 개념 역시 수학적으로 이상화 된 것은 아닐까?

제 7 장 초끈(Superstring)의 초(super)란 과연 무슨 뜻인가?

p257 : 이론의 타당성을 입증해주는 최상의 보증수표는 실험을 통한 증거이지만, 이것이 여의치 않을 때 과학자들은 종종 논리의 아름다움을 쫓아 갈 길을 정하곤 한다. 물론, 이런 식으로 선택된 길이 반드시 진리로 연결된다는 보장은 없다.

p258 : 초끈이론은 초대칭을 가진 이론의 원조격이자 최고봉을 이루는, 이 분야의 독보적 존재라 할 수 있다.

p260 : 물리학자들은 물리법칙들이 갖고 있는 이 두 가지 성질(시간과 장소에 따라 변하지 않는 성질)을 서술할 때, ‘대칭’의 개념을 사용한다. 다시 말해서, 물리학자들은 ‘시간과 장소가 변해도 물리법칙은 변하지 않는다.’는 사실을 ‘시간과 장소의 변환에 대한 물리법칙의 대칭성(불변성)으로 이해하고 있는 것이다.

p262 : 시간과 공간, 그리고 운동과 관련된 대칭성 이외에, 자연계에 내재되어 있는 다른 대칭성은 있을까?

- 1967년 시드니 콜먼과 제프리 맨둘라는 시간과 공간, 그리고 운동에 대하여 지금까지 논한 것 이외에 더 이상의 대칭이 존재하지 않는다는 것을 이론적으로 입증하였다.

- 일부 물리학자들은 하나의 탈출구를 발견하였다. 과거의 물리학자들이 한 번도 생각해 보지 않았던 또 하나의 대칭, 그것은 바로 스핀(Spin)에 대한 대칭이었다.

▶ 스핀(Spin)

p263 : 전자는 반드시 자전운동(스핀)을 하고 있어야 한다.

p264 : 모든 전자들은 ‘항상 동일한 회전속도를 유지하면서 영원히 돌아간다.’ 그러므로 스핀이 없는 전자는 더 이상 전자로 간주될 수 없다.

- 전자의 스핀은 $1/2$ 이고, 중력을 제외한 매개입자(광자, 위크 게이지 보손, 글루온)의 스핀은 1, 중력의 스핀인 2이다.

p266 : 스핀을 고려한다면 자연계에는 수학적으로 정의될 수 있는 또 하나의 대칭성이 존재한다. 이것이 바로 초대칭(super symmetry)이다.

- 초대칭 역시 양자역학적으로 정의된 시공간상에서 사물을 바라보는 시점을 바꾸었을 때, 나타나는 대칭성으로 이해되어야 한다.

▶ 너무나도 많은 가능성들이 ‘초’당혹감을 유발하다.

p279 : 1985년 끈이론에 초대칭을 도입하는 방법이 하나가 아니라 무려 다섯 가지가 있었다.

- 각각의 방법들은 보손과 페르미온의 진동패턴을 짝짓는다는 공통점을 갖고 있긴 했지만, 구체적인 “짝짓기 방식”이 전혀 달랐으므로 도저히 같은 이론으로 간주될 수 없었다.

p280 : 다섯 가지의 끈이론이 존재하였지만, 이는 하나의 이론을 다섯 가지 방법으로

설명한 것에 불과하다.

제 8 장 눈에 보이는 것 이상의 차원을 찾아서

p282 : 경험은 직관을 낳는다. 경험의 역할은 이것뿐만이 아니다. 경험은 우리에게 인지되는 모든 대상들을 분석하고 해석하는 기반을 마련해 준다.

- 보편적인 경험들은 그 내용을 정확하게 규명하거나 반론을 제기하기가 쉽지 않다는 공통점이 있다.

p283 : 차원과 관련된 우주의 이러한 성질은 너무도 당연한 사실이기 때문에 반론의 여지가 전혀 없을 것 같다.

- 그러나 1919년 스웨덴의 수학자 오스카 칼루자는 무모하게도 4차원 우주론에 반기를 들었다. 이 우주공간은 3차원이 아니라 더 ‘많은’ 차원으로 구성되어 있을 지도 모른다는 것이 그의 주장이었다.

▶ 칼루자의 아이디어를 클라인이 보강하다.

p286 : 공간차원은 스케일 면에서 두 가지로 구별될 수 있는데, 넓은 영역으로 뻗어 있어서 쉽게 감지되는 차원과 좁은 영역 속에 감겨 있어서 쉽게 감지되지 않는 차원이 바로 그것이다.

- 스웨덴 수학자 오스카 클라인은 “우리가 살고 있는 우주공간은 스케일이 큰 차원과 좁은 영역 속에 감추어진 차원이 함께 공존하고 있다”는 결론을 내렸다.

p290 : 우주공간의 모든 지점에 조그만 원형 차원이 추가로 존재한다.

- 숨겨진 원형차원은 공간상의 모든 점에 존재하는 전혀 새로운 차원이다.

p291 : 1926년 클라인은 영역의 크기를 계산했는데, 숨겨진 차원은 거의 플랑크 길이의 영역이내에 존재하고 있다.

- 물리학자들은 ‘좁은 공간 속에 또 하나의 차원이 존재할 수도 있다.’고 주장하는 이 이론을 가리켜 ‘칼루자-클라인 이론’이라고 불러왔다.

▶ 높은 차원의 통일이론

p299 : 칼루자는 하나의 공간차원을 추가시킴으로써, 아인슈타인의 중력이론과 맥스웰의 빛이론(전자기학)을 하나로 통합했다.

- 공간에 하나의 차원을 추가하였더니, 이들 둘 사이의 깊은 관계가 드러난 것이다.

- 중력은 기존 3차원 공간의 진동에 의해 전달되고, 전자기력은 새롭게 도입된 숨겨진 차원의 진동에 의하여 전달되는 것 이었다.

p300 : 칼루자이론에 의하여 계산된 전자의 질량과 전하 사이의 관계에서 실제의 측정값과 너무 큰 차이를 보였고, 오류를 수정하지 못하였기 때문에 외면당하기 시작했다

다.

▶ 현대판 칼루자-클라인 이론

p302 : 칼루자가 도입한 원형차원은 일반상대성이론과 전자기학의 긴밀한 상호관계를 보여주었지만, 이것만으로는 불충하다는 주장이 설득력을 가지기 시작.

- 1970년대 중반 무렵에 여러 개의 차원이 숨겨져 있는 고차원 우주론에 관한 연구가 집중적으로 이루어졌다.

p307 : 끈이론이 맞으려면 이 우주는 1차원의 시간과 9차원의 공간으로 이루어져야 있어야 한다

▶ 몇 가지 질문들

p307 : 왜 하필이면 9차원 공간이어야 하는가?

- 끈이론의 주장대로 이 우주가 9차원의 공간과 1차원의 시간으로 이루어져 있다면 왜 그들 중 3차원의 공간만이 우리의 눈에 보이며 나머지 6차원은 숨어있으며 왜 6차원이어야 하는가?

p308 : 왜 여분의 차원은 공간차원이어야 하는가?

▶ 여분의 차원이 갖는 물리학적 의미

p311 : 숨겨진 차원들의 기하학적 특성은 끈의 진동패턴을 결정하는 하나의 요인으로 작용한다. 그리고 끈의 진동패턴은 소립자의 질량이나 전하를 나타내기 때문에, 결국 우주의 가장 근본적인 특성은 숨겨진 차원의 기하학적 특성(크기나 모양)등에 의해 좌우되고 있는 셈이다.

제 9 장 실험적 증거들

p307 : 에드워드 위튼은 끈이론이 실험적으로 확인할 수 있는 중요한 사실을 이미 예견했다고 주장했다.

“끈이론은 중력이 존재한다는 사실을 이론적으로 증명했다.”

- 끈이론을 연구하는 학자들은 일반상대성이론에 대해 전혀 알지 못하더라도 끈이론의 논리만으로 중력의 존재를 유도해 낼 수 있다,

▶ 쏟아지는 비난들

p317 : 끈이론은 옳은 이론인가? 아무도 모른다

- 적용범위에 한계가 없는 “만물의 이론”이 정말로 존재한다면, 끈이론은 이 조건들을 모두 만족시킬 수 있는 유일한 후보이다.

p322 : 끈이론 학자들은 자연이라는 산의 정상에 홀로 오르는 것을 결코 원치 않는다. 그들은 실험가들과 짐을 나누어 진 채로 정상에 함께 오르기를 희망하고 있다.

▶ 실험으로 가는 길

p322 : 관측 기술에 일대 혁신이 일어나지 않는 한, 미세한 끈을 직접 눈으로 확인할 수는 없다.

p323 : 끈을 관측할 수 있는 가속기는 ‘우주 전체의 크기’와 비슷해야 한다.

- 끈의 길이보다 훨씬 큰 영역에서 관측된 값으로부터 끈의 존재여부를 판단해야 하는 것이다.

p326 : 중요한 것은 끈이론이 입자의 족의 개수뿐만 아니라 각 입자의 질량에 대해서도 ‘왜 그런 값을 가질 수 밖에 없었는지’를 설명해 줄 수 있다는 사실이다.

p329 : 수많은 칼라비-야우 도형들 중 대다수는 현실과 매우 동떨어진 답을 주겠지만 (입자족의 수, 상호작용의 종류 등), 이들 중에는 관측결과와 유사한 결과를 주는 도형도 있을 것이다. 다시 말해서, 특정한 형태로 숨겨져 있는 차원을 가정하면 그 결과로 얻어진 끈이 진동패턴이 기존의 입자들과 매우 비슷하게 맞아 떨어질 수도 있다는 뜻이다.

p330 : 끈이론은 중력을 양자역학적 체계 속에 합류시킨 일등 공신임을 마음속에 깊이 새겨야 할 것이다.

▶ 초대칭입자(Super particles)

p331 : 끈이론이 지닌 기본적인 특징은 이론 자체가 매우 높은 대칭성을 갖고 있다는 점이다. 여기에는 직관적으로 쉽게 이해될 수 있는 일반적인 대칭뿐만 아니라, 대칭의 개념을 수학적으로 크게 확장시킨 초대칭까지 포함된다.

- 초대칭입자가 존재한다는 것은 끈이론이 예견한 ‘일반적인’ 사실이므로, 아직 해결되지 않은 문제들의 결과에 상관없이 끈이론과 그 운명을 같이할 수밖에 없다.

p332 : 초대칭입자가 발견된다 해도 그것이 끈이론의 당위성을 입증하지는 못한다는 것이다.

- 초대칭 입자가 발견되지 못했다 하더라도, 끈이론이 사장되지는 않는다.

▶ 다른 가능성들

p335 : ① ‘뉴트리로는 질량이 매우 작긴 하지만, 0은 아니다.’ 라는 사실이 실험적으로 발견된다면, 아마도 끈이론은 그 이유를 설명할 수 있을 것이다.

- ② 만일 양성자 붕괴현상이 실제로 관측된다면 이 과정을 이론적으로 설명할 만한 후보는 현재로서는 끈이론뿐이다.

- ③ ‘먼 곳까지 힘이 전달되는’ 전혀 새로운 형태의 힘이 실험적으로 발견된다면, 끈

이론에 의한 새로운 물리학이 탄생할 것이다.

- ④ 암흑물질의 정체가 더욱 정확하게 알려지면 끈이론의 신빙성도 함께 검증될 것이다.

- ⑤ 우주상수의 값이 작긴 하지만, 0이 아니라는 사실이 실험적으로 확인된다면, 끈이론은 그 이유를 설명할 수 있을 것인가? 이 역시 끈이론의 진위여부를 검증하는 중요한 분수령이 될 것이다.

p338 : 지금까지의 정황으로 미루어 볼 때, 끈이론 학자들은 실험적 증거가 전혀 없는 이론을 연구하면서 앞으로 몇 세대를 더 보내게 될 것이다.

- 끈이론은 분명히 추구할 만한 가치가 있는 이론이다. 양자역학과 중력을 조화롭게 결합시키고 자연계의 모든 현상들을 하나의 체계 속에 통일시키는 이토록 막강한 이론을 어디서 또 찾을 수 있겠는가?

4부 끈이론과 시공간의 구조

제 10 장 양자기하학(Quantum Geometry)

p341 : 아인슈타인은 자신의 새로운 중력이론을 수학적으로 서술하는데 리만기하학이 안성맞춤임을 간파하여, 일반상대성이론을 리만기하학의 언어로 말끔하게 완성시킬 수 있었다.

- 플랑크 길이 이하의 초미세 영역에서는 끈이론에 부합되는 전혀 다른 새로운 기하학이 도입되어야 한다. 이것이 바로 ‘양자 기하학’이다.

- 리만기하학과는 달리, 양자기하학에는 끈이론에 안성맞춤인 수학이 미리 마련되어 있지 않다. 그래서 끈이론 학자들은 수학자들과 함께 필요한 수학을 조금씩 만들어가고 있는 형편이다.

p344 : 끈이론은 리만기하학을 중력에 적용하는데 어떤 한계가 있음을 지적하고 있다.

- 두 점 사이의 거리에 기초를 둔 리만 기하학을 초미세 영역에 적용하려면, 끈이론의 논리에 따라 약간의 수정을 가해야 한다.

▶ 우주마당

p345 : 천문학자들과 천체물리학자들은 우주의 팽창 여부를 판단할 수 있는 실험적 증거를 찾기 위해 노력하고 있으며, 이들 중 가장 신뢰할 만한 자료는 바로 ‘우주의 평균밀도’이다.

p346 : 우주의 평균밀도가 소위 말하는 임계밀도보다 크다면, 우주는 물질들 사이의 중력에 의해 어느 날 팽창을 멈추고 수축하게 될 것이다.

p348 : 끈이론은 이 우주는 결코 플랑크 길이 이하로 수축될 수 없다는 것을 경이로운 방법으로 증명하는데 성공하였다.

p352 : 원형차원이 점차 가늘어져서 그 굵기가 플랑크 길이에 이른 후에 계속해서 더욱 가늘어지는 현상은 “원형차원이 플랑크 길이만큼 가늘어진 후에 다시 점차 굵어지는” 현상과 물리적으로 동등하다는 것이다.

- 수축하는 우주는 팽창하는 우주와 동일하게 취급될 수 있다.

▶ 끈이 가질 수 있는 여러 가지 상태론

- 우리가 할 일은 끈의 진동에너지와 감김에너지의 크기가 원형차원의 굵기에 따라 어떻게 달라지는지를 알아내는 것이다.

p353 : 원형차원의 반지름이 작아지면 필연적으로 끈의 에너지가 증가하는 것이다.

- 끈의 최소 감김에너지는 원형차원의 반지름에 비례한다고 말할 수 있다.
- 원형차원의 반지름이 작아지면 감김에너지는 감소하지만 진동에너지는 증가한다.

▶ 최소한의 크기

p369 : ‘감기지 않은 끈으로 측정했을 때 우주의 반지름은 R 이며 수축하고 있다.’라는 주장은 ‘감겨진 끈으로 측정했을 때 우주의 반지름은 $1/R$ 이며 팽창하고 있다.’는 주장과 완전히 동일하다.

p370 : 우리가 측정방법의 난이도를 따지지 않고 플랑크 길이 이하의 영역을 감기지 않은 끈으로 측정하려고 한다면, 그 영역을 볼 수 있을 것이다.

▶ 거울대칭에 담겨있는 수학과 물리학

p378 : 끈이론이 몰고 온 가장 큰 변화는 기하학과 시공간 사이의 관계를 정의했던 아인슈타인의 경직된 듯한 교리에 어느 정도의 자유가 허락되었다는 것이다.

- 원리적으로 거울대칭은, 전혀 상관이 없을 것 같았던 한 쌍의 칼라비-야우공간이 끈이론의 체계안에서 동일해질 수 있음으로 보여주고 있다.

p379 : 어떤 경우에는 거의 불가능했던 계산이 거울대칭 짝에 대해서는 단 몇 줄에 해결되기도 한다.

p380 : 거울대칭은 특히 수학자들에게 비상한 관심을 끌었다. 수학분야에서 수년 동안 해결되지 않고 있던, 어떤 문제가 이 방법으로 해결되었기 때문이다.

제 11 장 공간찢기(Tearing the Fabric of Space)

p381 : 공간을 찢는 것이 가능할까?

- 아인슈타인의 일반상대성이론은 공간을 찢는 것이 불가능하다고 단호하게 주장하고

있다.

p383 : 웜홀은 우주의 한 지점에서 다른 지점으로 이동하는 지름길의 역할을 한다.

p384 : 웜홀의 존재여부를 판단하기 위해서는 우선 공간을 찢는 것이 가능한 일인지를 확인해야 한다.

- 블랙홀의 엄청난 질량은 공간을 극도로 왜곡시켜, 블랙홀의 중심에 해당되는 공간에 마치 구멍이 뚫린 듯한 비정상적 구조를 야기시킨다. 웜홀의 경우와는 달리, 블랙홀은 관측을 통해 그 존재가 확인 되었으므로 블랙홀의 중심부에서 일어나고 있는 사건들은 단순한 추론이 아니라 과학적 논리로 해결되어야 한다.

p386 : 구보다 훨씬 규모가 큰 칼라비-야우도형의 내부에서 일어나는 과정으로 가느다란 부분은 잘라내고 내부에 또 하나의 구를 삽입시킨 뒤, 구의 크기를 점차 부풀려 나가는 일련의 과정을 ‘플립변환(Flop transition)’이라고 한다.

▶ 조금씩 진보를 보인다.

p390 : 실제로 공간이 찢어질 수 있다는 엄밀한 증명은 여전히 미지로 남아있다.

p391 : 시공간의 플립변환은 거울대칭으로부터 유도될 수 있는 유일한 결론이었다.

▶ 위튼식 해결법

p402 : 위튼식 증명법은 공간이 찢어질 때 점입자이론과 끈이론 사이의 차이점에 중점을 두고 있다. 가장 중요한 차이점은 이것이다. 공간이 찢어지는 순간에 끈은 두 가지 형태의 운동을 할 수 있지만, 점입자는 오직 한가지 형태의 운동만이 가능하다는 것이다.

▶ 결과

p404 : 아무런 장애를 일으키지 않으면서 공간이 찢어질 수 있음을 증명하였다.

- 시공간이 찢어지면, 그 결과로 어떤 현상이 나타날 것인가?

p405 : 하나의 칼라비-야우 공간이 다른 칼라비-야우 공간으로 변환될 때, 끈의 진동 패턴에 따른 입자족의 명단이 변하지 않는다는 사실을 알아내었다. 칼라비-야우 공간이 찢어질 때 실제로 영향을 받는 것은 입자의 질량, 즉 끈의 진동패턴에 의해 결정되는 ‘에너지’이다.

p406 : 우주공간이 찢어질 수도 있다는 점을 받아들인 상태에서 오늘날 입자들의 질량이 안정되어 있는 이유를 설명한다면, “현대의 관측장비들이 감지할 수 없을 정도로 공간의 찢어짐 현상이 느리게 진행되고 있기 때문”이라고 말할 수 있다.

제 12 장 끈이론 이상의 이론 : M-이론(M-Theory)을 찾아서

p407 : 궁극의 이론이라면, 다른 형태의 자유도를 전혀 허락하지 않으면서 논리적 불일치나 모순점 없이 이 우주를 유일하게 설명할 수 있어야 한다. 다시 말해서, ‘... 이것은 이렇게 될 수밖에 없기 때문에 이래야만 한다.’는 식의 논리가 가능하다는 뜻이다.

p408 : 통일장이론을 향해 달려가는 현대 물리학은 자연법칙에 어떤 엄격한 대전제가 있음을 굳게 믿고 있다.

- 끈이론은 기대에 부응하지 못했다. 물리학자들이 찾아낸 끈이론은 다섯 가지나 된다.

p409 : 다섯 개의 끈이론들 중에서 애써 하나를 골라 거기에 제시된 방정식을 풀어봐도, 여전히 여러 개의 해가 얻어졌던 것이다.(여분의 차원을 좁은 영역 내에 감아넣는 방법이 여러 가지였다.)

p410 : 끈이론이 여러 개 존재하는 이유는 바로 이 방정식을 근사적인 형태로 서술하는 방법이 유일하지 않기 때문이다.

- 다섯 개의 서로 다른 끈이론들의 공통된 ‘몸통’을 어떻게 찾을 수 있을까?

p412 : 여러 종의 끈이론들을 하나로 통합하는 새로운 이론을 ‘M-이론’이라 부른다.

- 서로 별개의 이론처럼 보였던 여러 개의 끈이론들이 하나로 통합된다면, 우주의 삼라만상을 설명해주는 만물의 이론은 비로소 완성될 것이다.

- M-이론은 근본적으로 두 가지의 특징을 가지고 있다.

p413 : 9차원의 공간과 1차원의 시간 이외에 또 하나의 공간차원을 추가시켰다. 이렇게 하면 기존의 다섯 가지 끈이론들이 매우 우아하게 하나로 통합되기 때문이다.

- 진동하는 끈뿐만 아니라 ‘진동하는 2차원 막(membrane)’이나, ‘진동하는 3차원 막(three-brane)’ 등 여러 가지 다른 요소들을 포함하고 있다는 점이다.

제 13 장 끈/M-이론의 관점에서 본 블랙홀

p406 : 일반상대성 이론과 양자역학 사이의 충돌은 ‘자연의 모든 법칙들이 하나의 커다란 원칙하에 조화를 이루고 있다.’는 우리의 신념에 심각한 손상을 입혔다.

- 극단적인 물리적 상태는 블랙홀 내부에서 지속되는데, 그 구조를 이해하려면 양자역학으로 기술된 중력이론이 반드시 필요했던 것이다.

- 지금 이 문제를 풀어줄 1순의 후보는 단연 끈이론이다.

▶ 블랙홀과 소립자

p456 : 일반적으로 블랙홀은 엄청나게 큰 몸집을 가진 천문학적 대상이며, 소립자는 물질을 이루는 최소단위이기 때문이다.

- 블랙홀과 소립자가 동일한 존재의 다른 모습일 수 있다.

- 블랙홀이 함유하고 있는 전기전하와 다른 힘전하, 그리고 블랙홀의 스핀(자전)상태 등이 고유의 특징에 속한다. 그런데 블랙홀이 갖고 있는 개개의 특징은 이것이 전부다. 질량이 같고 힘전하도 같고, 또 스핀까지 같은 두 개의 블랙홀은 물리적으로 완전히 동등하다.

p457 : 소립자이건, 블랙홀이건 간에, 이들의 특성은 질량과 힘전하, 그리고 스핀에 의해 결정되기 때문이다.

- 태양보다 몇 배나 질량이 큰 천문학적 스케일의 블랙홀은 덩치가 너무 커서 거기에 양자역학을 적용한다는 자체가 무의미하다. 이런 경우에는 오로지 일반상대성이론만이 블랙홀의 특성을 규명할 수 있다.

- 그러나 질량이 작은 블랙홀로 가면 양자역학이 중요한 역할을 하기 시작한다.

p460 : 끈이론으로 간신히 길들여 놓았던 어떤 ‘무한대’의 양이 공간의 수축으로 인해서 다시 말썽을 일으키는 것이다.

▶ 다시 블랙홀과 소립자로 돌아와서

p467 : 시공간이 정말로 찢어진다면, 우리는 그것을 어떻게 실험적으로 확인할 수 있을까?

- 우리가 발견했던 새로운 찢김현상(코니폴드변환‘Conifold transition’)은 물리학적 재난을 불러일으키지 않으면서 ‘관측 가능한’ 물리량을 제시하고 있다.

p470 : 공간이 코니폴드 변환을 겪을 때, 블랙홀은 점차 작아져서 결국에는 광자와 같은 질량이 없는 물체가 된다.

- 끈이론에서 ‘질량없는 입자’란, 어떤 특정한 모드로 진동하고 있는 끈에 불과하다. 이렇게 해서 끈이론은 역사상 처음으로 블랙홀과 소립자 사이의 관계를 구체적으로 규명할 수 있었다.

▶ 블랙홀 녹이기

p471 : 시공간을 찢는 코니폴드 변환이 가해지면 칼라비-야우 도형의 위상이 달라지는데, 이로부터 우리는 블랙홀과 소립자가 물과 얼음처럼 동일한 존재의 다른 모습임을 알 수 있으며, 천문학의 대상이었던 블랙홀을 끈이론의 범주 안에서 이해할 수 있게 되었다.

▶ 블랙홀의 엔트로피

p406 : 수십 년간 해결되지 않았던 가장 대표적인 문제가 ‘블랙홀의 엔트로피’ 문제다.

p473 : 엔트로피란 무질서도(disorder)나 무작위도(randomness)를 구체적인 수치로 나타낸 물리량이다.

- 엔트로피에 대하여 엄밀하게 정의를 내리려면 미시적인 양자역학적 범위의 입자계에서 거시적 성질(에너지가 압력)을 변화시키지 않는 채로 입자들을 재배열하는 방법의 수를 셀 수 있어야 한다.

p474 : 엔트로피라는 것이 주어진 물리계의 전체적인 무질서도를 나타내는 양자역학적 개념임을 깊이 새겨주기 바란다.

- 물리계의 엔트로피는 항상 증가만 할 뿐 결코 감소하지 않는다.

▶ 얼마나 검어야 ‘검다’고 말할 수 있는가?

p477 : 1974년 호킹은 정말로 놀라운 사실을 하나 발견하였다.

- “블랙홀은 완전히 검지 않다”는 것이다.

- 중력이 커서 그 어떤 것도 블랙홀의 중력권에서 벗어날 수가 없기 때문이다.

- ‘블랙홀도 양자역학적으로 복사를 방출할 수 있다.’

- 양자역학의 불확정성 원리에 의하면 아무 것도 없는 진공 중에서도 수많은 가상입자들이 수시로 생성되었다가 사라지는 한바탕의 난리가 벌어지고 있다.

p478 : 블랙홀은 분명히 엔트로피를 갖고 있었으며, 온도도 갖고 있었다.

p479 : 블랙홀의 온도는 상상을 초월할 정도로 낮지만, 엔트로피의 양은 실로 엄청나다.

▶ 다시 끈으로...

p480 : 스트로밍거와 바파는 끈이론에서 새롭게 발견된 요소들을 재료 삼아 특정 부류의 블랙홀을 재구성하는데 성공하였다.

- 현실적인 의미의 블랙홀이 아니라 아무것도 없는 허당으로부터 블랙홀을 만들어내는데 성공하였다.

p481 : 극단적인 블랙홀에 대해서는 끈이론을 이용하여 블랙홀의 엔트로피를 이해하는데 성공을 거둔 것이다.

▶ 아직도 남아있는 블랙홀의 신비

p482 : 엔트로피에 얽힌 비밀이 밝혀지긴 했지만, 블랙홀에는 아직도 밝혀지지 않은 커다란 문제가 남아 있다. 그 중 하나는 결정론적 개념을 토대로 블랙홀을 이해하는 것이다.

- 프랑스의 라플라스는 만일 우리가 주어진 한 순간에 우주 안에 있는 모든 입자들의 위치와 속도를 알 수 있다면 뉴턴의 운동방정식을 이용하여 그 모든 입자들의 과거와 미래를 알아낼 수 있다.

- 결정론적 관점에서 볼 때, 모든 삼라만상이 빅뱅이후로부터 이미 결정된 수많은 입자들의 위치와 속도에 의해 좌우되고 있는 것이다.

- 양자역학의 불확정성원리는 라플라스가 말했던 결정론적 우주관을 와해시켰다. 우리는 우주를 이루고 있는 구성입자들의 위치와 속도를 ‘동시에’ 정확하게 알아 낼 수가 없기 때문이다.

p483 : “미래의 어느 한 순간에 특정 사건이 일어날 확률은 그 사건을 서술하는 파동함수의 과거 값으로부터 완전하게 결정된다.” 이것이 바로 결정론의 양자역학 버전이다.

p485 : 아직 승자가 가려지지 않는으나, 최근에 호킹은 끈이론이 새롭게 발견한 블랙홀의 성질에서 출발하여, 블랙홀로 빨려 들어간 정보가 되살아나올 수도 있음을 발견하였다.

p486 : 블랙홀의 중심부의 시공간은 무한대의 곡률로 휘어져서 결국에는 구멍이 뚫리게 된다. ‘시공간의 특이점’이라 부르는 곳이 바로 이 지점이다.

- 아인슈타인 방정식을 도구 삼아 블랙홀의 중심부를 꾸준히 연구해온 물리학자들은, 우리가 속한 우주의 시간이 끝나는 그 지점에서 다른 우주의 시간이 시작된다고 말한다.

제 14 장 우주론(Cosmology)

p488 : 가장 근본적이면서도 공통적인 질문은 다음의 세 가지로 축약될 수 있을 것이다.

- 우주는 어떻게 태어났는가? 우주는 왜 지금과 같은 모습을 하고 있는가? 우주는 어떠한 법칙에 따라 진화하는가?

- 끈이론이 탄생하기 이전의 우주론을 ‘우주의 표준모형’이라고 부른다.

p490 : 약 150억 년 전에 엄청난 에너지를 가진 작은 덩어리가 대폭발을 일으키면서 모든 공간과 물질들이 그 안에서 쏟아져 나왔다.

p491 : 과연 빅뱅이론을 무작정 믿어도 좋을 것인가? 이 이론은 어느 정도의 신뢰도를 가지고 있는가?

▶ 빅뱅이론의 검증

p492 : 빅뱅이론의 진위여부를 결정하는 다소 간접적인 검증방법이 ‘우주배경복사’이다.

- 무언가가 팽창되면 온도가 내려간다.

p493 : 빅뱅무렵에 탄생했던 ‘원시광자’들이 150억년 세월을 거치면서 절대온도 0K에 가까이 식은 채로 아직도 우주 전역을 돌아다니고 있다.

- 우주 전역에 걸쳐서 $1m^3$ 에 평균 4억개의 원시광자가 아직도 존재하고 있다.

p495 : 플랑크 에너지를 넘어서는 영역에서는 끈이론에 의존할 수 밖에 없는 것이다.

- 초기의 우주에서는 중력을 제외한 세 종류의 힘들(약력, 강력, 전자기력)이 서로 구별되지 않는 하나의 힘으로 존재했었다.

- 물리학자들은 이 힘을 가리켜 ‘대통일힘’ 또는 ‘초힘’이라고 부른다

p496 : 현재 우리에게 관측되는 힘들은 초고온, 초에너지 상태에서 그 개성이 드러나지 않는다. 초창기 우주가 바로 이러한 상태였다. 그러나 시간이 흐름에 따라 우주가 팽창하고 온도가 내려가면서 고도의 대칭성이 붕괴되고, 몇 단계의 갑작스러운 표변화를 거치면서 자연계의 힘들은 지금과 같이 비교적 대칭성이 낮은 형태를 띠게 되었다.

- 상변화의 결과물과 물분자들이 갖고 있는 대칭성이 줄어들었다는 사실이다. 액체상태로 있을 때에는 어떠한 방향에서 보더라도 물의 모습이 동일했는데(회전대칭성), 고체의 얼음은 더 이상 그렇지 않다. 얼음은 독특한 결정구조를 갖고 있기 때문에 자세히 들여다보면 보는 각도에 따라 외형이 다름을 알 수 있다.

- 물의 상변화가 회전대칭성을 붕괴시키는 쪽으로 일어난 것이다.

p497 : 물리계의 온도를 낮추면 어느 임계점에서 상 변화가 일어나며, 그 결과로 기존의 대칭성 중 일부가 붕괴된다.

▶ 우주적 수수께끼

p499 : 우주 배경복사를 세밀하게 연구한 결과, 우주 어느 곳에서 날아온 복사이건 간에 온도가 거의 균일하다는 사실이 밝혀졌다.

- 이 우주가 그토록 광활한데, 어쩌서 그토록 획일적인 온도를 유지하고 있단 말인가?

p500 : 우주공간내의 두 지점이 열을 교환하여 같은 온도가 되려면 두 지점 사이의 거리가 ‘빅뱅이 일어나던 시점부터 지금 이 순간까지 빛이 도달할 수 있는 거리’ 보다 짧아야 한다.

- 빅뱅과 동시에 한 지점에서 출발한 빛은 주어진 시간동안 다른 지점에 도달할 수 없다.

- 물리학자들은 표준 빅뱅 모델에 이러한 문제가 있음을 감지하고 구체적인 계산을 수행한 결과, 우주 전역이 열교환으로 동일한 온도가 되는 것은 이 이론으로 설명 불가능하다는 결론을 내렸다. 이 문제를 ‘지평선 문제’라고 부른다.

- 지평선이라는 단어 속에 ‘우리가 볼수 있는 한계’ 또는 ‘빛이 도달할 수 있는 한계’라는 뜻이 내포되어 있기 때문이다.

- 이 문제 하나 때문에 표준 빅뱅이론이 틀렸다고 말할 수는 없다. 그러나 우주전역이 균일상태라는 것은, 아직도 우리가 중요한 무언가를 놓치고 있음을 강하게 암시하고 있다.

▶ 인플레이션(Inflation)

p501 : 1979년 MIT 앤런구스 교수가 이 부분을 채워주는 논문을 발표하였다.

- 이러한 문제가 발생한 이유는 빅뱅의 시점을 향하는 우주의 수축속도가 충분히 빠르지 않다는데 있다.

p502 : 중력 때문에 우주의 팽창속도가 늦춰진다. 지평선 문제는 이러한 사실로부터 부터 비롯되었다.

- 지수함수적으로 팽창한다는 가설을 받아들인다면 반보다 한참 못 미치는 시점까지만 되돌려도 두 지점 사이의 거리를 반으로 줄일 수 있다. 이렇게 되면 두 개의 지점 사이에는 정보교환이 이루어질 시간이 충분하기 때문에 동일한 온도가 유지될 수 있다.

p503 : 이로부터 기본의 ‘표준우주론 모델’은 ‘팽창우주론 모델’로 대체되었다.

▶ 우주의 끈이론

p503 : 그림 14.1에는 우리가 아직 한번도 언급하지 않은 부분이 있다. 빅뱅과 플랑크 시간 사이의 시간대(온도 $10^{32}K$, 시간 10^{-43} 초)가 그것이다.

p504 : 정확하게 빅뱅의 시점, 즉 시간=0 에 이르면 우주의 크기가 아예 사라지면서 온도와 밀도는 무한대가 되어, 탄탄한 기반을 자랑하는 고전적 중력이론, 즉 일반상대성이론은 이 시점에서 완전 무용지물이 되고 만다.

- 이런 상황에서 자연은 우리에게 단호히 말하고 있다. “우선은 일반상대성이론과 양자역학을 조화롭게 합쳐놓은 뒤에 다시 도전한다.”

- 빅뱅의 비밀을 밝혀줄 수 있는 유일한 희망 바로 끈이론이다.

- 끈이론이 도입된 새로운 우주론은 아직 초보단계를 벗어나지 못하고 있다.

- 끈이론이 표준 우주론 모델에 수정을 가할 수 있는 부분은 대충 세 가지로 요약될 수 있다.

① 끈이론은 이 우주가 가질 수 있는 최소한의 크기를 예측할 수 있다.

② 끈이론의 작은반경/큰반경 이중성도 우주의 비밀을 벗기는데 결정적 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

③ 끈이론은 4차원 보다 훨씬 많은 차원을 가지고 있기 때문에 우주에 대한 이해는 한층 깊어질 것이다.

▶ 태초에, 플랑크 크기만한 덩어리가 있었다.

p500 : 시간을 과거로 되돌릴수록 우주의 온도가 상승하는 것은 당연한 사실이나, 이것은 우주의 크기가 플랑크 크기보다 큰 동안에만 적용된다는 사실이다.

- 시간을 더 되돌려서 우주의 크기가 플랑크 크기보다 작아지면, 그때부터 온도는 오히려 감소하기 시작한다. 왜 그럴까?

- 원형차원들이 수축하면서 우주의 온도가 올라간다. 그런데 차원의 반경이 플랑크

길이를 지나 계속해서 작아지면, 이것은 차원의 반경이 증가하는 것과 물리적으로 완전히 동일하다.

p506 : 차원의 팽창은 곧 온도의 감소를 의미하기 때문에 우주의 크기가 플랑크 크기보다 작아지면, 온도의 증가추세는 감소하는 추세로 전환된다.

- 우주가 처음 탄생했을 무렵에, 끈이론이 말하는 공간차원들은 모두가 플랑크 크기만한 다중차원 공간 속에 담겨져 있었다. 그런데 이 덩어리가 폭발을 일으키면서 여러 개의 차원들 중 단, 세 개만이 팽창되기 시작하였고, 나머지 차원들은 여전히 플랑크 크기의 영역 안에 남게 되었다.

p508 : 팽창하는 차원은 스스로 팽창능력을 키워 나가면서 거의 아무런 제한 없이 자신의 규모를 키워나간 끝에 지금과 같이 방대한 공간을 형성하게 된 것이다.

▶ 우주론과 칼라비-야우 도형

p509 : 브란덴 버거와 바파는 문제를 단순화시키기 위하여 모든 공간차원들이 원형이라고 가정하였다.

- 빅뱅이 일어난 직후 초고온 상태에서, 여전히 초미세 영역에 머물러 있던 칼라비-야우 공간들은 찢어졌다가 다시 붙는 격렬한 춤을 추면서 수시로 그 형태가 변해갔을 것이다. 그러다가 우주의 온도가 내려가고 세 개의 차원이 크게 확장되면서 칼라비-야우 공간의 변화가 진정되어, 결국은 지금과 같은 모습으로 진화되었을 것이다. 앞으로 물리학자들에게 남은 과제는 칼라비-야우 공간의 변천단계를 원리적으로 규명하여 현재의 모습을 찾아내는 것이다.

▶ 빅뱅이 일어나기 전에는?

p511 : 선 빅뱅기(pre big bang)의 시나리오에 의하면, 당시의 우주는 빅뱅이론에서 말하는 것과 전혀 다른 상태였다고 한다. 즉 지극히 좁은 영역 안에 모든 내용물과 공간이 콕콕 눌러진 채로 담겨있는 초고온 덩어리에서 시작된 것이 아니라, 진정한 초기 우주는 아주 차갑고 공간적으로 무한히 큰 상태에서 시작되었다는 것이다. 이러한 상태에서 끈이론 방정식을 적용하면 우주내의 모든 지점들은 다른 모든 지점들에 대하여 엄청난 속도로 멀어져 가게 된다.

- 선 빅뱅기 이론은 학자들 사이에 치열한 공방을 야기시키면서 비상한 관심을 끌고 있는데, 끈이론이 어떤 식으로 결말을 내려줄지는 아직 분명하지 않다.

▶ 우주론적 고찰과 궁극의 이론

p514 : 우주론은 우리에게 매우 깊고 심오한 레벨에서 자연을 이해할 수 있는 길을 열어준다. 만물이 ‘어떻게’ 시작되었는지를 아는 것은, 곧 그들이 ‘왜’ 시작되었는지를 이해하는 지름길이기 때문이다. 물론 그렇다고 해서 현대 과학이 ‘어떻게’와 ‘왜’라

는 질문을 연결할 만한 논리를 가지고 있다는 뜻은 결코 아니다.

p515 : 초기의 뜨거웠던 우주가 진화하면서 여분의 차원은 여러 차례의 변환 과정을 겪었으며, 온도가 충분히 내려간 후에는 하나의 칼라비-야우 공간으로 정착되었다.

- 칼라비-야우 공간의 구체적인 형태는 입자와 힘의 특성을 좌우 하므로, 우주가 지금과 같은 모습을 띠고 있는 것은 태초부터 결정된 운명이었다고 생각할 수도 있다.

p516 : 표준우주론과 급속팽창이론이 황당한 초기조건(무한대의 에너지, 무한대의 밀도, 무한대의 온도)을 전혀 다루지 못한다는 사실이다. 끈이론이 우주론의 영역에 접목되면서 무한대의 문제는 피할 수 있게 됐지만, 우주의 탄생 과정에 얽힌 비밀은 여전히 미지로 남아있다.

- 끈이론과 M-이론이 접목된 우주론도 아직은 초기 단계이기 때문에, 이것이 과연 우주의 초기 조건을 물리학법칙으로 표현하여 ‘만물의 이론’이라는 이름값을 해줄 것 인지는 아무도 알 수 없다.

- 우리의 우주가 단 하나만 존재하는 것이 아니라, 비슷한 규모의 우주들이 상상을 초월하는 방대한 영역에서 마치 다도해처럼 산재해 있다고 가정해보자.

p517 : 지금까지 알고 있는 모든 것들은 전 우주에 걸쳐 성립하는 물리학의 테두리 안에서 이해할 수 있으나, ‘다른 우주’에서도 동일한 물리학 법칙이 성립한다는 보장은 없다.

p519 : 궁극의 이론은 모든 종류의 힘들과 모든 물질의 특성을 양자역학적으로 서술 할 수 있어야 하며, 우리의 우주에 적용되는 올바른 우주론을 제시할 수 있어야 한다. 그러나 만약에 다른 우주론이 사실로 밝혀진다면 입자의 질량과 전하, 힘의 크기 등이 문제가 아니다. 설명해야 할 항목들이 엄청나게 많아 질 것이다.

5부 21세기형 통일이론

제 15 장 앞으로의 전망

p525 : 앞으로 1세기가 지나면 초끈이론 또는 M-이론은 지금의 석학들도 짐작하기 어려울 정도로 커다란 진보를 이룰 것이다.

p526 : 마지막 장에서는 끈이론과 관련된 다섯 가지의 핵심적인 질문을 제기하고, 해답의 윤곽을 찾음으로써 끈이론의 미래를 추정해 보고자 한다.

▶ 끈이론의 저변에 깔려있는 기본원리는 과연 무엇인가?

p527 : 가장 큰 교훈 중의 하나는 물리학의 중요한 법칙들이 대칭성의 원리와 깊게 연관되어 있다는 것이었다.

- 특수상대성원리는 상대성의 대칭원리, 즉 등속운동을 하고 있는 모든 관찰자들의

관점이 동일하다는 원리에 기초를 두고 있으며, 중력을 다룬 일반상대성원리는 등속운동뿐만 아니라 임의의 운동을 하고 있는 모든 관찰자들의 관점이 동등하다는 ‘등가원리’에 기초를 두고 있다. 뿐만 아니라, 약력과 강력 그리고 전자기력은 이보다 다소 추상적인 게이지 대칭성을 갖고 있다.

– “힘은 왜 존재하는가?”라는 질문이 “자연은 왜 대칭성에 의존하는가?”라는 질문으로 전환될 뿐, 근본적인 의문은 남는다.

p528 : 우주의 법칙은 모든 관측자들에게 동일하다고 보는 것이 훨씬 더 자연스러운 관점일 것이다.

p531 : 일반상대성 이론과 핵심적인 역할을 하고 있는 시공간의 기하학적 모델이 과연 여러 위치들 사이의 관계를 서술하기 위한 도구 불과한 것인가? 아니면 시공간이라는 것이 우주만물의 존재를 좌우하는 근본적인 개념인가?

▶ 끈이론은 실험적으로 검증될 수 있는가?

p538 : 끈이론의 여러가지 특성들 중에서도 가장 중요한 세 가지

① 중력과 양자역학은 우주의 작동원리를 설명하는 불가분의 요소, 끈이론이 통일을 이루어 내었다,

② 우주를 이해하는 핵심적 아이디어들은 스핀, 입자족, 매개입자, 게이지 대칭, 등가원리, 대칭성의 붕괴, 초대칭 등이다. 끈이론에 모두 함축되어있다.

③ 기존의 표준모델은 실험을 통해 결정되는 19개의 변수를 갖다. 끈이론은 진위여부를 실험적으로 판단할 만한 방법이 없다.

p539 : 끈이론 학자들은 자신의 이론을 실험적으로 검증할 수 있는 방법을 찾기 위해 부단한 노력을 기울이고 있다.

p544 : 우리 모두는 각자의 길에서 진리를 찾는 탐구자이며, 자신이 왜 여기에 있는지를 알기 위해 부단히 노력하고 있다.

END