

우주의 구조 - 브라이언 그린-

- ▶ 시간과 공간이란 무엇일까? 물리적 실체인가? 그저 편의에 의하여 도입된 개념인가? 정말로 실재하는 것은 무엇인가?
 - ▶ 텅빈 공간이란 무엇인가? 허구인가 실존하는가?
- 과학을 전공하지 않은 일반 독자들에게 복잡하고 다양한 우주의 법칙을 설명하고 이해를 돕는 것이 이 책 “우주의 구조”의 목적이다.

I 진리의 각축장

1장 진리로 가는 길 / 시간과 공간은 왜 지금과 같은 모습을 하고 있는가 ?

- 뉴턴과 라이프니츠에게 있어서 시간과 공간이란 모든 사물들이 존재하고 모든 사건이 발생하는 무대를 칭하는 하나의 어휘에 불과하였다. 하지만 아인슈타인에게는 시간과 공간은 우주의 비밀이 숨어있는 물리적 실체였다.
- 우주의 진화에 가장 중요한 역할을 해 온 주역은 시간과 공간이다.

▶ 고전물리학

- 많은 사람들이 이루어낸 업적의 대부분은 뉴턴에게 돌아갔다. 그는 지구의 운동을 단 몇 개의 방정식으로 정확하게 설명했기 때문이다.
- 뉴턴의 운동방정식은 물체의 운동을 설명하였고, 맥스웰방정식은 전기 및 자기와 관련된 현상을 훌륭하게 설명하였다.
- 제기되는 문제 : 물체에 힘을 가하면 움직인다. 물체의 운동이 일어나는 배경은 공간이다. 그렇다면 공간의 본질은 무엇인가? 공간은 과연 물리적 실체인가? 우주를 이해하기 위하여 인위적으로 도입한 추상적인 개념인가?

* 1900년대 켈빈은 물리학에 남아 있는 문제 “빛의 특성에 관한 문제”와 “달궈진 물체가 내뿜는 복사와 관련된 문제” 두 가지에 대하여 언급하였는데 이는 기존의 물리학을 갈아엎는 도화선이 되었다.

▶ 빛의 특성에 관한 문제

- 1905년 아인슈타인은 “시간과 공간은 절대적이지 않으며 서로 무관하지도 않다. 관측자의 운동 상태에 따라 얼마든지 다르게 보일 수 있으며, 서로 긴밀하게 연관되어 있다”고 하면서 기존 물리학에 결정타를 날렸다.

▶ 양자적 실체 / 물체가 내뿜는 복사와 관련된 문제

- 1930년대 양자역학이라는 새로운 물리학을 도입하였다. 이는 원자적 스케일의 작은 영역에서 얻어진 실험데이터를 설명하기 위하여 도입하였다.

- 고전물리학은 임의의 시간에 어떤 물체의 위치와 속도를 알고 있다면, 그 물체의 과거와 미래의 위치와 속도 까지도 알아낼 수 있다.
- 양자역학의 법칙을 따르다 보면 어떤 물체의 상태를 정확하게 측정해도 그 물체의 과거나 미래를 정확하게 예측하는 것은 불가능하다.

▶ 우주론적 실체

- 현대과학이 설명하기 가장 어려운 것이 “시간”이다. 시간차원에서 볼 때 모든 사건들은 어떤 특정한 방향으로만 진행되며, 우리는 그것을 당연하게 받아들이고 있다. 시간의 비대칭성(과거에서 미래, 한쪽방향으로만 흐름)은 대체 어디서 비롯된 것일까?
- 시간과 공간의 특성을 정확하게 이해하려면, 초기 우주의 특성을 일련의 방정식으로 서술할 수 있어야 한다. 이 작업을 위한 이론이 통일장이론이다.
- 아인슈타인은 두 개의 상대성 이론과 시간과 공간 그리고 중력을 하나의 법칙으로 통합하는데는 성공했지만, 통일장 이론을 완성하지는 못했다.

▶ 통일장이론을 연구하는 물리학자들은 난관에 직면했다. 일반상대성 이론과 양자역학이 서로 충돌하였기 때문이다. 일반상대성이론은 별이나 은하와 같은 거대한 규모에 적용되는 물리학이었고, 양자역학은 원자규모의 미시적 세계를 대상으로 삼고 있다.

- 블랙홀과 같이 질량은 크고 부피가 작은 것에서는 일반상대성이론과 양자역학이 충돌한다. 일반상대성이론과 양자역학이 조화롭게 결합되지 못하면 압축된 별의 최후와 우주의 근원도 영원히 미지로 남을 수밖에 없다. 일반상대성이론과 양자역학을 하나의 이론체계로 통합시키려는 물리학자들의 노력은 초끈이론이라는 최첨단 통일이론을 탄생시켰다.

▶ 초끈이론에 의하면 어떤 특정한 패턴으로 진동하는 작은 끈(진동하는 에너지)은 거기에 해당하는 질량과 전기전하를 가지게 된다. 초끈이론은 아인슈타인의 통일장 이론을 완성시킬 수 있는 가장 강력한 후보이다. 초끈이론으로 일반상대성이론과 양자역학을 결합시키려면 기존의 개념을 버리고 “9차원의 공간과 1차원의 시간”이라는 가정을 받아들여야 한다.

▶ 초끈이론을 발전시킨 M-이론에 의하면 이 우주는 10차원의 공간과 1차원의 시간이 결합된 11차원 시공간으로 이루어져 있어야 한다. 시간과 공간의 진정한 성질을 알아낸다면 그것은 인류 지성의 위대한 승리로 역사에 기록될 것이다.

2장 회전하는 물통과 우주

- 공간의 정체는 무엇인가? 공간은 물리적 실체인가? 아니면 인간의 상상력이 만들어낸 추상적 개념인가?

- 뉴턴이 주장하는 공간

어떠한 경우에도 운동을 판단할 만한 기준계가 존재한다고 하였다. 모든 존재를 포함하면서

모든 사건들이 발생하는 무대인 공간은 실재하는 물리적 실체로서, 운동의 여부를 판단하는 궁극적 기준계의 역할을 한다. 이를 절대공간이라 한다. 절대공간은 어떠한 기준도 필요없이 완전하게 정지해 있다. 절대공간을 이동시키는 것은 불가능하다.

뉴턴은 절대공간의 개념을 정확한 정의 없이 도입한 후, 그 안에서 운동을 서술하는 식으로 고전역학의 체계를 세웠다.

- 아인슈타인 주장하는 공간

“공간이라는 단어는 우리의 경험과 직접적인 관계가 없기 때문에 그 의미가 불확실하다.” - 아인슈타인 -

- 라이프니츠가 주장하는 공간

어떠한 논리를 동원한다고 해도 공간은 존재하지 않는다. 공간은 물체들 사이의 상대적 위치를 결정하는 편리한 방법에 불과하다. 그러므로 위치를 결정할 대상(물체)이 하나도 없는 공간은 더 이상 존재의 의미가 없는 것이다. - 라이프니츠 -

- 이 우주는 공간상의 어느 위치에 자리잡고 있는가?

▶ 절대공간에 기초를 둔 뉴턴의 운동법칙이 초기 물리학계를 평정하였다. 즉, 뉴턴의 절대공간을 인정한다는 것은 곧 절대적인 가속도의 개념을 수용한다는 것이었다.

- 하지만, 등속 직선운동을 할 때에는 오직 상대운동만이 물리적 의미를 가진다. 그렇다면 가속운동은 왜 상대적 개념으로 이해할 수 없는가? 라는 문제가 제기되었다.

- 이와 관련해서 텅빈 공간에 달랑 하나의 물체만 존재하는 경우에는 그 물체의 회전운동을 감지할 방법이 없다. 운동을 비교할 대상이 전혀 없다면 가속운동 자체의 의미가 없어진다. - 에른스트 마흐 -

뉴턴의 주장은 완전범죄를 범한 자는 증거가 없어 처벌할 수 없지만, 어디까지나 죄인이다. 마흐의 주장은 완전범죄를 범한 자는 죄가 없는 사람이다.

- 텅빈 공간에서는 가속운동을 느끼지 못한다. 가속운동을 할 때 느껴지는 힘은 우주내의 모든 천체들이 복합적으로 작용하여 나타나는 결과인 셈이다. 눈에 보이지 않는 절대공간을 운동의 궁극적 기준으로 삼았던 뉴턴과는 달리, 마흐는 우주 전역에 걸쳐 분포되어 있는 모든 물체들을 운동의 기준으로 삼았다.

* 20세기 초에 아인슈타인이라는 천재는 마흐의 원리에서 출발하여 새로운 중력이론인 일반상대성이론을 발견하였다.

3장 상대성과 절대성

- 시공간은 아인슈타인이 만들어 낸 추상적 개념인가? 아니면 실재하는 물리적 실체인가?

- 특수상대성이론은 200여년전 뉴턴이 확립했던 시간과 공간의 절대적인 구조를 완전히 와해시키고 새로운 개념의 시공간을 창시하였다. 시간과 공간은 서로 밀접하게 얽혀 있어 분리하

여 생각하는 것 자체가 불가능하다는 것이다.

- “공간은 존재하는가?”라는 질문은 “시공간은 과연 존재하는가 ?” 라는 질문으로 대치되었으며, 아인슈타인에게 빛의 중요성을 일깨운 사람은 맥스웰이었다.

▶ 맥스웰

- 전기와 자기와 관련된 현상을 4개의 방정식으로 설명하는데 성공하였다.

- 맥스웰이 연구하는데 있어서 패러데이의 실험결과를 적극 활용하였으며, 가장 큰 업적은 장(field)의 개념을 물리학에 도입한 것이다.

▶ 장은 “눈에 보이지 않으면서 공간을 가로지르면서 형성되는 무엇”으로 설명할 수 있다.

- 패러데이는 전기장의 분야까지 연구를 수행하였으며, 전기와 자기현상이 서로 밀접하게 관련되어 있다는 것은 덴마크 물리학자 외르스테드가 실험을 통하여 찾아내었다. 맥스웰은 외르스테드와 패러데이가 알아낸 실험적 사실을 수식으로 말끔하게 정리한 것이다.

- 맥스웰은 4개의 방정식으로부터 전자기장은 파동의 형태로 전달된다는 것을 알아냈으며, 그 값은 빛의 속도가 된다고 하였다. 따라서 빛은 전자기파라는 결론에 도달하였다.

- 여기서 문제가 발생한다. 파동의 속도란 매질에 대한 속도를 나타낸다. 따라서 빛이 전달하는 매질을 “에테르”라고 명하고 물리학자들은 이를 찾기 위하여 노력하였다.

▶ 절대공간은 가속운동을 정의하고, 에테르는 빛의 운동을 정의하는 것이다.

- 1887년 마이컬슨과 몰리는 실험을 통하여 빛의 속도는 관측자나 광원의 운동상태에 상관없이 시속 30만킬로미터가 된다는 것을 알았지만 실험결과를 설명하는 데는 실패하였다. 이 질문에 대한 답은 아인슈타인의 혁명적 이론에 의하여 해결되었다.

▶ 1905년 6월 아인슈타인은 “움직이는 물체의 전기역학에 관하여”라는 논문을 발표하면서 에테르의 가설에 대하여 종지부를 찍었다.

- 아인슈타인의 추론

‘빛은 자기 자신과 같은 속도로 따라오는 관측자에게 어떠한 모습일까?’

‘상대속도가 0이므로 빛의 속도로 달리는 관측자에게 빛은 정지해 있는 모습으로 보인다.’ 하지만, 맥스웰 방정식에 의하면 빛은 결코 정지 상태에 있을 수 없다.’

‘에테르가 관측되지 않는 이유는 에테르가 존재하지 않기 때문이다.’

‘빛은 다른 파동들과는 달리 매질없이 전달되는 특이한 파동이다.’

‘관측자가 빛을 따라가던, 빛에서 멀어지던 어떠한 상황에서도 빛의 속도는 일정하다.’

‘빛이 정지해 있는 모습을 확인할 방법이 없다.’

‘빛의 정체가 무엇이기때 그토록 희한한 성질을 가지는가?’

‘물체의 속도란 이동한 거리를 소요된 시간으로 나눈 값이다. 이동한 거리는 공간의 물리량이고 시간은 시간의 물리량이다.’

‘시간과 공간은 어떤 특성을 가지고 있는가? - 시간과 공간은 빛의 속도가 관측자의 운동상

태에 상관없이 항상 일정하게 보이도록 하기 위해, 관측자의 운동상태에 따라 다르게 나타난다.'

‘물체는 공간을 따라 이동할 수도 있고, 시간을 따라 이동할 수도 있다.’

‘공간에 정지해 있는 관측자에게는 시간의 움직임만이 존재된다. 하지만 공간을 움직이기 시작하면 관측자에게는 시간을 따라 움직이던 운동의 일부가 공간의 이동에 사용된다.’ 따라서 공간에서 움직이는 관측자에게 있어 시간은 정지해 있는 관측자의 시계보다 느리게 간다.

‘공간을 이동하는 속도는 어떠한 경우에도 광속을 초과할 수 없다.’

‘특수상대성이론의 효과는 물체의 공간이동속도가 광속에 가까워질수록 두드러지게 나타난다.’

- 특수상대성이론은 등속운동의 조건에서 / 일반상대성 이론은 가속운동조건에서 설명하는 이론이다.

- 서로에 대해 움직이고 있는 관측자들은 사건의 동시성(둘 이상의 사건이 동시에 일어났는지, 아니면 시간차를 두고 일어났는지)에 대하여 의견일치를 볼 수 없다.

- 완전히 텅빈 공간에서 회전하는 물통은 과연 무엇에 대해 회전하는가 ?

뉴턴 : 절대공간에 대하여 회전한다.

마흐 : 회전을 판단할만한 기준이 없으므로 물통이 회전을 한다해도 안한 것과 똑같다.

아인슈타인 : 절대 시공간에 대하여 회전한다.

- 가속운동은 시공간에서 직선이 아닌 곡선의 궤적으로 나타나며, 이것이 바로 가속운동의 증거가 된다.

▶ 특수상대성이론과 중력을 포함하는 더욱 강력한 이론을 위하여 고려할 점

- 뉴턴에 의하면 중력은 전달되는데 전혀 시간이 걸리지 않는다.

- 중력은 어떤 과정을 거쳐 방대한 영역으로 전달되는가?

- 중력은 모든 물체에 작용하며, 어느 누구도 그 힘을 피해갈 수는 없다.

* 아인슈타인은 “중력과 가속운동은 서로 비슷한 정도가 아니라 똑같은 현상이다.”라고 생각하고, 중력을 상쇄시키는 방법을 찾았다. 그 방법은 간단했다. 운동상태를 적당히 바꾸면 중력에 의한 힘 즉, 중력이 작용하는 것과 똑같은 상황을 만들어 낼 수도 있다. 아인슈타인은 중력에 의한 힘과 가속운동에 의한 힘을 어떻게 구별할 수 있을까 고민했지만 결국 구별할 수 없다고 결론을 내리고, 물리학계에 중력과 가속운동이 물리적으로 동일하다는 ‘등가원리principle of equivalence’를 발표하였다.

- 중력과 가속운동은 동일한 현상이므로, 만일 당신이 중력의 영향을 느낀다면 그것은 곧 당신이 가속운동을 하고 있다는 뜻이다.

“자유낙하하는 물체(관측자)는 힘을 느끼지 않는다. 그러므로 가속운동을 하고 있지 않은 것이다. 아무런 힘도 느끼지 않는 관측자들의 관점이 운동을 논할 수 있는 진정한 기준이 된다.”

- 당신의 몸이 아무런 저항없이 중력에 의해 끌려가고 있다면 당신은 텅빈 우주공간에 가만히 떠있는 느낌을 받을 것이다. 이것이 가속운동이 전혀 없는 상태이다. 아무런 힘도 느끼지 않는 관측자만이 자신이 정지상태에 있음을 주장할 수 있다. 아인슈타인은 중력과 가속운동 사이의 관계를 등가원리로 매듭짓고, “중력은 어떻게 전달되는가?” 라는 문제의 해답을 찾기 시작하였다.
- 가속운동을 한다는 것은 매 순간마다 속도가 변한다는 뜻이고, 시간단면이 돌아간 정도는 상대속도에 따라 달라진다고 했으므로, 가속운동이 개입되면 시간단면들이 더 이상 평행하지 않고, 매순간 마다 돌아간 각도가 달라질 것이다.
- 가속운동을 하고 있는 관측자의 시간단면(어느 한순간에 바라본 공간)은 휘어져 있어야 한다.

“중력과 가속운동은 완전히 동일한 현상이라고 했으므로, 가속운동으로 인하여 공간이 휘어진다면, 중력에 의해서도 공간은 휘어져야 한다.”

- 물질과 에너지의 존재는 시공간의 굴곡을 결정하며, 그 근처를 지나가는 모든 물체들의 경로는 눈에 보이지 않는 시공간의 굴곡에 따라 좌우된다. 이것이 아인슈타인이 생각한 중력작용의 원리이다.
- 중력의 전달속도는 빛의 속도와 정확하게 일치한다. 이로써 아인슈타인은 특수상대성이론과 모순을 일으키지 않는 새로운 중력이론을 완성하였다.
- 일반상대성 이론은 수학적으로 우아하고 논리체계가 확고하며 중력과 관련된 문제들을 모두 해결한 최초의 ‘완벽한 중력이론’으로서 시간과 공간을 바라보는 기존의 시각을 완전히 바꾸어 놓았다.
- 시공간은 무형의 추상적 개념이 아니라 실제로 존재하는 ‘그 무엇’이다.

4장 얽혀 있는 공간

양자적으로 서로 분리되어 있다는 것은 무엇을 의미하는가 ?

- 특수상대성이론과 일반상대성이론을 수용한다는 것은 뉴턴의 절대공간과 절대시간의 개념을 포기한다는 뜻이다. 1900-1930년대는 물리학에 상대성이론이 도입되면서 우주의 개념에 혁명적인 변화의 바람이 불었다. 하지만 다른 곳에서 또 다른 혁명의 바람이 물리학계를 거꾸로 뒤집어 놓았다.
- 이러한 변화는 20세기가 시작되는 무렵에 막스플랑크가 흑체복사 문제와 관련된 논문을 발표하면서 부터이다. 30여년 간의 연구 끝에 비로서 물리학의 한분야로 자리잡은 “양자역학”이 그것이다. 양자역학은 수십 년 동안 정밀한 실험을 거치면서 올바른 이론임이 입증되었으므로 우리는 이 한계를 사실로 받아 들여야 한다.
- 하나의 입자는 하나의 특성을 뚜렷하게 가지고 있는 것이 아니고 몇 가지 특성의 중간지점에 애매하게 있다가 관측을 시도했을 때, 비로소 그 중 하나의 특성이 뚜렷하게 나타난다. 뿐

만 아니라, 입자들 사이에는 어떤 연결고리가 존재하며, 한 입자를 관측하여 특성이 알려지면 그 결과는 다른 입자의 관측결과에 즉각적인 영향을 준다.

- 관측행위 자체가 관측대상의 속성을 변화시킨다는 것이다.

- 상대성이론은 물체의 속도가 아주 빠르거나 중력이 아주 클 때 그 효과가 두드러지게 나타나며, 양자역학은 원자와 같은 미시적인 세계에서 그 가치를 발휘하는 물리학이다.

▶ 파동을 쏘다. 간섭무늬는 피실험체의 파동성을 판별하는 기준이 된다.

- 1927년 클린턴 데이비슨과 레스터 저머는 니켈 결정을 향해 전자빔을 발생하는 실험을 수행하였다. 그리고 전자의 빔이 파동의 성질을 가지고 있음을 증명하였다. 그러므로 양자적 세계에서 모든 물체는 파동성과 입자성을 동시에 가지고 있는 것이다.

- 측정행위 자체가 전자를 교란시켜서 확률파동의 측면이 붕괴되면 그때 비로소 전자의 위치는 하나의 명확한 값으로 나타난다.

- 1927년 하이젠 베르크가 불확정성의 원리를 발표 하였는데 불확정성원리는 양자적 우주에 확률이 필연적으로 개입될 수밖에 없는 이유를 정확하게 설명한다.

“하나에 대하여 많이 알게 될수록 다른 하나에 대한 정보는 그만큼 빈약해진다.”

- 두 개의 특성을 “동시에 정확하게” 아는 것은 불가능하다.

- 위치를 정확하게 측정하려는 행위는 행위 자체가 관측물체의 속도를 바꿔놓는다. 즉, 전자의 속도를 정확하게 측정하고자 한다면 전자의 위치를 정확하게 측정하는 것은 포기해야 한다.

“불확정성은 관측행위 자체가 관측대상을 교란시키면서 필연적으로 나타나는 현상이다.”라고 하이젠 베르크는 말하였다.

- 불확정성은 입자의 파동성에 그 뿌리를 두고 있다. 모든 파동에 똑같이 적용되는 불확정성 원리는 양자역학의 세계를 지배하는 기본법칙으로서, 파동-입자의 이중성을 간단명료하게 보여주고 있다.

▶ 양자역학에 대한 반론

- 대부분의 물리학, 특히 양자역학은 측정 가능한 대상만을 다룰 수 있다. 측정될 수 없는 것들은 물리학의 대상이 아닌 것이다. 한 입자의 위치와 속도를 동시에 측정할 수 없다면 “입자는 위치와 속도라는 속성을 모두 가지고 있는가?” 라는 질문은 아무런 의미가 없는 것이다.

“1920년대 양자적 스핀을 도입하면 이로부터 실체의 존재 여부를 평가하는 시험을 할 수 있다.”

“두 개 이상의 축에 대하여 스핀을 정할 수 없다 해도 입자가 모든 방향으로 명확한 스핀성분을 가지고 있다면 그로부터 파생되는 결과를 현실적인 실험으로 확인 할 수 있다”고 주장.

- 동일한 축에 대한 스핀의 측정하도록 두 감지기를 세팅해 놓고 양쪽으로 날아오는 전자의 스핀을 측정하면 항상 같은 결과가 나올 것이다.

- 1964년 존 벨이 획기적인 실험을 제안함으로써 양자적 실체에 관한 추상적인 논쟁을 검증 가능한 문제로 바꾸어 놓았다.

“측정하고자 하는 스핀의 방향을 무작위로 바꾸어가면서 동일한 실험을 여러 번 실행했을 때, 두 전자의 스핀이 동일하게 나오는 경우가 전체 실행 횟수의 50%를 넘어야 한다. 만일 두 전자의 스핀이 일치하지 않는 경우가 반 이상이 나타난다면 EPR(아인슈타인, 포돌스키, 로젠의 이니셜)의 주장은 틀린 것이다.”

- EPR의 주장 : 양자역학이 입자의 위치와 속도를 동시에 알아내지 못함에도 불구하고 입자는 ‘정확한 위치와 속도’라는 속성을 가진다고 주장하였을 뿐만아니라 입자는 모든 측에 대한 스핀성분도 정확하게 갖고 있고, 불확정성의 쌍을 이루는 모든 양들을 정확한 값으로 가지고 있다고 주장하였다. 이후 1980년대 프랑스의 알랭 아스펙과 그 동료들은 최신장비를 동원하여 시험을 수행하였다.

“두 대의 감지기가 동일한 스핀 값을 나타내는 경우가 전체 시행횟수의 50%를 넘기지 않음을 확인(정확하게 50%)”

“여기에 있는 물체에 어떠한 짓을 하건 저기에 있는 물체는 아무런 영향을 받지 않는다.”는 EPR의 입장은 여기에 있는 물체에 어떠한 짓을 하면 “저기에 있는 물체는 지대한 관심을 가진다.”는 것으로 결론 내림

- 특수상대성이론과의 비교 : 두 광자의 스핀은 서로 연관되어 있지만, 이들 사이에는 아무런 정보의 교환도 이루어지지 않는다. 또한 하나의 관점에 특별한 속성을 부여하는 것은 “모든 관점을 동일하다”라는 특수상대성이론의 대원칙에 정면으로 위배된다. 아직 이 문제는 수수께끼로 남아 있다.

우리는 공간의 기본적인 특성이 하나의 물체와 다른 물체를 구별짓는 것이라고 생각해 왔다. 하지만 양자역학적 연결고리는 두 물체를 하나로 묶어서 서로 영향을 주고받도록 만들어 주고 있다. 그렇다면 시간은 어떠한가?

II 시간과 경험

5장 얼어붙은 강 / 시간은 정말 흐르고 있는가 ?

- 시간은 우리에게 가장 친숙하면서도 가장 이해하기 어려운 개념이다. 누구에게나 공평하게, 그리고 누가 보아도 동일하게, 흐른다는 시간의 보편성과 절대성은 특수상대성이론과 일반상대성이론의 등장으로 폐기 되었다. 시간이 상대적이고 개인적인 개념이 되어 버린 것이다. 미래는 가능성으로 가득 차 있는 반면, 과거는 이미 일어난 사건들의 집합에 불과하다는 것을 우리는 경험으로 알고 있다.

▶ 시간에 관한 우리의 경험

시간은 어떻게든 흘러가는 것으로 보인다. 시간은 오직 한 방향으로만 흘러간다. 그렇다면 시간은 정말 흐르고 있는가?

- 물리학자들은 시간이 흐름을 물리적 법칙으로 표현하려고 노력을 해왔으나, 아직 그 누구도 성공하지 못했다. 사실 아인슈타인의 특수상대성이론에 입각해서 보면 ‘시간은 흐르지 않는다.’는 표현이 더 적절할 것 같다.

- 미래를 향해 흘러가는 시간 속에서 우리가 느낄 수 있는 유일한 현상은 ‘지금’뿐이다. 물리학자들은 지금 이 순간을 과거와 미래로부터 골라내는 법칙을 아직도 찾지 못하고 있다.

- 지금 이 순간에 존재하는 것은 무엇인가? ‘존재’라는 것을 생각할 때, 지금 존재하는 목록에 없다는 암묵적인 방법을 사용하고 있다. 즉, 물체에서 반사된 빛이 우리의 눈에 들어와야 하므로 우리 눈에 보이는 모습은 바로 지금 이 순간의 모습은 아니다. 거리에 따라 보정을 하여야 한다.

두 관찰자가 정지해 있다면 ‘지금’이라는 것은 정확하게 일치한다. 하지만 하나의 관찰자가 운동을 하기 시작하면 두 관찰자가 느끼는 ‘지금’은 현격하게 달라진다.

모든 사건들은 발생한 시간과 장소에 상관없이 그냥 거기에 존재하는 것으로 간주할 수 있다. 하나의 ‘시공간 안에서 그냥 존재한다.’ 이들은 시공간의 한 점을 점유한 채 영원히 그 곳에 있을 것이다. 전체 시공간을 하나의 실체로 본다면 모든 시간은 영원히 있는 것도 아니고 그냥 거기에 있는 것이다. 시공간의 어느 지점에 있건 그 순간을 겪고 있는 것이다. 변화란 시간의 진행과 함께 일어나는 사건이며, 그 자체가 시간의 흐름을 계량하는 척도이다. 하나의 순간은 시간을 이루는 구성요소로서, 절대로 변하지 않는다. 공간 속의 한 점은 얼마든지 이동할 수 있지만, 시간 속의 한 순간은 절대로 변할 수 없다. 공간 속에서 하나의 점이 이동했다면 그 점은 이전과 다른 위치에 놓이게 된다.

시간은 너무나도 미묘한 문제이어서 우리가 그 속성을 다 이해하려면 앞으로도 많은 시간이 필요할 것이다.

6장 우연과 화살

시간은 방향성을 가지고 있는가 ?

시간은 특정한 방향을 따라 흐르는가? 우리가 기억할 수 있는 것(과거)과 기억할 수 없는 것(미래) 사이에는 분명한 구별이 있다. 바로 이러한 이유 때문에 “시간은 방향성을 가지고 있다”고 말할 수 있는 것이다.

기본입자들의 운동 상태와 특성으로부터 이들의 변화가 한쪽 방향으로만 진행되는 이유를 설명해주는 심오한 법칙이 존재할 것이다. 이 법칙을 찾아낸다면 시간이 방향성을 갖고 있는 이유도 속 시원하게 설명될 것이다. 시간이 흐르는 방향을 정반대로 바꿔도 모든 물리법칙들은

여전히 성립한다.

시간 되짚기 대칭성은 모든 물리법칙에 일반적으로 적용된다. 물론 시간을 되짚는다고 해서 시간이 거꾸로 흐른다는 뜻은 아니다. 시간은 항상 한쪽 방향으로 (과거에서 미래로) 흐르고 있다. 그러나 모든 물체의 운동은 반대 방향으로 진행된다고 가정해도 물리법칙에 전혀 위배되지 않는다.

계란이 깨지는 것을 되돌릴 수 있는가 ? 시간되짚기 문제를 따지고 들어 가다보면 우리는 엔트로피라는 개념과 필연적으로 마주치게 된다.

엔트로피

루트비히 볼츠만이 엔트로피의 개념을 창안하고 관련된 수학체계를 세움 $S = k \log W$

볼츠만은 물리계를 이루는 수많은 입자들과 물리계의 전체적인 특성을 연결시켜주는 엔트로피의 개념을 도입함으로써, 고전통계역학의 새로운 지평을 열음

엔트로피는 주어진 물리계가 처할 수 있는 상태의 수와 관련된 개념이다. 엔트로피가 높다는 것은 특정 상태에 처하는 방법의 수가 많다는 뜻이고 엔트로피가 작다는 것은 그 방법의 수가 작다는 것을 의미한다.

엔트로피의 특징 : 엔트로피는 주어진 물리계의 무질서한 정도, 즉, 무질서의 정도를 나타내는 양이다. 물리계는 고-엔트로피 상태로 이동하려는 경향이 있다.

엔트로피와 열역학 2법칙 그리고 시간의 방향성

열역학 1법칙 : 에너지 보존법칙

열역학 2법칙 : 모든 물리계는 고-엔트로피의 상태로 이동하려는 경향이 있다.

열역학의 2법칙은 시간의 방향성을 강하게 시사하고 있는 것 같다. 여러 개의 구성원소로 이루어진 물리계의 변화는 주로 한쪽 방향으로만 진행되기 때문이다. 시간이 흐르는 방향을 따라가면 엔트로피는 항상 증가한다. 엔트로피는 시간의 방향성을 이해하는데 도움이 되기는 하지만, 과거와 미래가 다르게 보이는 이유를 완벽하게 설명하지는 못한다는 것이 볼츠만의 생각이었다.

열역학 2법칙의 저변에 깔려있는 확률-통계적 논리는 현재를 기점으로 하여 과거와 미래의 두 방향에 똑같이 적용될 수 있다. 즉,

“시간이 미래로 진행되면서 주어진 물리계가 고-엔트로피 상태로 이동할 확률이 압도적으로 높다면, 시간이 거꾸로 진행될 때에도 물리계는 고-엔트로피 상태로 이동할 확률이 압도적으로 높다는 것이다.”

물리법칙 자체가 과거와 미래를 구별하지 않기 때문에 필연적인 결과이다. 시간이 미래로 진행하면서 엔트로피가 증가한다면, 시간이 과거로 진행될 때에도 엔트로피는 증가하여야 한다. 그렇지 않으면 과거에 저-엔트로피 상태에 대하여 설명할 수 있어야 한다. 이를 설명하기

위해서는 초창기에 아주 특별한 조건이 부가되어야 한다.

엔트로피가 작은 물체는 어떻게 만들어졌는가?

모든 생명체들은 저-엔트로피를 고-엔트로피 에너지로 전환하는 일종의 전환 장치이다. 저 엔트로피에 대한 관심은 태양에너지로부터 출발한다. 우주는 극-저 엔트로피 상태에서 출발하였다는 점이다.

엔트로피가 크다는 것은 “물리적 상태에 거의 변화를 주지 않으면서 구성물질의 배열을 바꿀 수 있는 방법의 수가 많다”는 뜻이다. 그러므로 블랙홀은 최대-엔트로피 상태에 있다고 말할 수 있다.

우주의 질서(저-엔트로피)를 창조한 궁극적인 원천은 바로 빅뱅 그 자체였다. 초기의 질서정연한 상태가 엔트로피 증가의 원인인 것이다. 미래는 엔트로피가 증가하는 방향이며, 시간이 흐르는 방향은 고도의 질서가 갖추어진 극-저 엔트로피 상태의 초기 우주에서 이미 결정되어 있었다. 극-저 엔트로피 상태인 빅뱅으로부터 시간의 방향성을 설명하려고 하는 경우, 우리는 초기의 우주가 무슨 수로 그토록 완벽한 질서를 획득할 수 있었는지 설명하여야 한다.

7장 시간과 양자

양자의 세계에서 시간의 본질을 추적하다.

시간의 방향성을 규명하는 것이 우리의 목적이다. 그러나 양자역학에 입각한 시간의 개념은 지금도 논쟁의 대상이 되고 있으므로 명확한 결론을 내기는 어려운 상황이다.

양자 역학은 하나의 전자가 두 개의 구멍을 동시에 통과하는 것을 허용한다. 1965년 천재과학자 리처드 파인만은 “하나의 결과가 여러 가지 방법으로 나타날 수 있는 경우, 모든 가능한 사건은 동시에 진행된다.”라고 하였으며 이 모든 가능한 경우들이 최종결과가 나타날 확률에 나름대로 기여하고 있으며, 각각의 확률을 모두 더한 결과는 양자역학이 예견하는 총 확률과 정확하게 일치한다는 것을 증명 하였다.

하나의 광자에 의해서도 간섭무늬는 발생한다. 즉, 하나의 광자는 두 개의 길을 동시에 거쳐서 온다. 슬릿이 무한개가 되면 개개의 광자는 무한히 많은 길을 동시에 거쳐서 스크린의 한 점에 도착하게 된다. 간단하게 말해서 일어날 수 있는 모든 가능한 과거들을 한꺼번에 더해야 현재를 이해할 수 있다 입자가 취할 수 있는 경로는 양자역학의 확률 속에 내포되어있다.

더 이상 분리될 수 없는 입자들이 여러 개의 경로를 지나간다는 것은 받아들이기 어려운 제안이다. 전자는 파동성과 입자성을 동시에 가지고 있지만, 그 두 가지 성질은 결코 동시에 측정되지 않는다. 광자감지기를 켜면 광자는 무조건 입자처럼 행동하면서 파동성을 상실하여 간섭무늬가 사라지며, 광자감지기를 끄면 파동성으로 행동하면서 간섭무늬를 만들어 낸다.

양자역학의 세계에서 광자의 과거는 유일하게 결정되지 않고 여러 가지 가능한 과거들이 중첩된 상태로 있다가 관측이라는 행위가 개입되었을 때, 비로서 그들 중 하나의 과거가 대표선수 내지는 대표과거로 나타난다.

어떠한 경우에도 현재의 행위로 과거가 바뀌는 일은 없다. 그렇다면 차선택으로 과거가 현재에 미치는 영향을 제거할 수는 없을까? 라는 질문에 대하여 생각해본다.

광자감지기를 이용하여 광자 오른쪽 왼쪽 중 하나를 통과하여 진행하여 왔다고 하면 파동성을 잃어버린다. 하지만 광자의 경로를 적절하게 변형시켜 광자의 경로정보를 지워버리면 파동성이 회복되면서 간섭무늬가 다시 나타난다. 이러한 과정을 거치면 미래에 일어날 사건의 도움을 받아 과거의 스토리가 완성되는 셈이다.

위장전술 ; 마치 자연은 순진한 관객들을 교묘하게 속여서, 고전적인 시공간 개념을 하늘같이 믿게 만들어 놓고, 속으로는 양자적 특성을 은밀하게 간직하고 있는 것 같다.

고전역학은 1960년대 말에 뉴턴이 발견한 운동방정식에 기초를 두고 있으며, 고전 전자기학은 1800년대 말에 발견한 맥스웰의 방정식에 기초하고 있다. 특수상대성이론은 1905년에 아인슈타인이 발견한 방정식에서 비롯되고 있고, 일반상대성이론은 1915년 역시 아인슈타인이 발견한 방정식에 기초하고 있다.

이 모든 방정식은 과거와 미래를 동등하게 취급한다는 공통점을 가지고 있으며, 이 공통점은 시간의 방향성 문제를 다루지 않는다. 고전 물리학 어느 곳을 찾아봐도 앞으로 가는 시관과 뒤돌아 가는 시간을 구별하는 방정식은 없다. 과거와 미래는 고전적으로 동등한 개념이었던 것이다.

파동함수가 시간을 따라 변해가는 과정은 슈뢰딩거 파동방정식에 의하여 수학적으로 엄밀하게 결정된다. 여기에는 티끌만큼의 모호함도 없다.

관측으로 인하여 파동함수가 붕괴되는 현상은 지난 80년 동안 수많은 역설과 수수께끼를 양산하며 지금까지도 명확하게 규명되지 않고 있다.

파동함수의 붕괴는 여러 가지 가능성이 동시에 존재하는 양자적 세계와 관측이라는 행위를 통해 단 하나의 값을 가지는 현실세계로 변환되는 과정을 투영하고 있다.

파동함수가 관측이라는 행위에 의하여 붕괴되는 이유는 무엇인가?

파동함수의 붕괴를 설명하는 방정식은 따로 있는가?

파동함수와 관측사이의 괴리를 해소시키고, 관측행위의 저변에 숨어 있는 실체를 찾기 위하여 물리학자들은 노력하고 있다. 이것과 관련된 주요 이론은 다음과 같다.

① 관측이라는 것을 통하여 입자의 위치를 정확하게 100% 인지하게 되면, 이렇게 급격한 ‘지식의 변화’는 파동함수의 급격한 변화로 나타난다.

② 다중우주 해석 : 관측을 통하여 어떤 특정한 값을 얻었다면 그것은 무한히 많은 우주 중 하나의 우주에서 일어난 사건이고, ‘다른 값이 얻어지는 사건’은 다른 우주에서 진행되는 것이다.

현재 많은 학자들로부터 지지받고 있는 해결책은 “결어긋남”이론이다. 결어긋남이란 미시세계에 적용되는 양자역학과 확률의 간섭이 거의 일어나지 않는 일상적인 세계를 연결시켜주는 개념으로 주변 환경의 결어긋남 현상이 파동함수의 규칙을 교란시키면서 양자역학의 신기한

특성이 일상적인 확률로 전환되는 것이다. 결어긋남이란 거시적 물체에 존재하는 ‘상식을 벗어난 양자적 특성’을 희석시킨다. 주변 환경과 주고받는 상호작용에 의해 양자적 특성이 상실되는 것이다. 결어긋남이 양자적 간섭현상을 배제시킨다는 아이디어를 도입하여 양자적 확률을 고전적인 확률로 변환시키는 데는 성공했지만, 파동함수에 내재되어 있는 다양한 가능성들을 아직도 현실적인 개념으로 이해되지 않고 있다. 관측이 실행되었을 때, 왜 단 하나의 결과만을 우리에게 모습을 드러내는가? 그 많던 나머지 가능성들은 다 어디로 사라졌는가? 많은 가능성들 중에서 어떤 결과가 선택될지 미리 알 수 는 없다. 일부과학자들은 특정결과가 선택되는 과정을 따지고 드는 것은 의미가 없다고 하지만 앞으로 더욱 깊이 연구되어야 한다고 생각한다.

관측문제는 어디까지 해결되었으며, 시간의 방향성과는 어떤 관계에 있는가? 양자적 실체와 일상적인 경험을 연결하는 두가지 방법은 다음과 같다.

- ① 슈뢰딩거 방정식을 유지 : 파동함수를 하나의 지식으로 간주하는 이론과 다중우주해석론, 그리고 양자적 결어긋남 등과 같이 슈뢰딩거의 파동방정식을 이론의 종착점으로 보는 접근 방법으로 시간의 대칭성이 유지가 됨
- ② 슈뢰딩거 방정식을 수정 : 슈뢰딩거 방정식을 수정하거나 다른 방정식을 추가하여 문제를 해결하는 방법으로 시간의 대칭성이 유지될 수도 붕괴될 수도 있음

시간에 대하여 비대칭법칙을 수용하면, 시간이 한쪽방향으로만 흐르고 그 반대방향으로는 결코 흐리지 않는 이유를 부분적으로나마 이해할 수 있다. 그러나 시간에 대하여 대칭적인 법칙의 경우와 마찬가지로, 이 경우에도 먼 과거에 엔트로피가 지극히 작았던 이유를 어떻게든 설명해야 한다. 결국은 우주의 탄생-빅뱅으로 모든 문제가 귀결된다.

III 시공간과 우주론

8장 눈송이와 시공간

우주의 대칭성과 진화

현대과학이 이론 가장 위대한 업적을 나타내는 문장

“이 세계는 원자로 이루어져 있다.”

“우주가 운영되는 법칙에는 대칭성이 깔려있다.”

시간과 공간의 진정한 특성을 찾아 초기 우주로 거슬러 올라가면서, 대칭성이야 말로 우주의 신비를 벗겨줄 가장 강력한 후보이다. 물리학에 대칭의 개념이 도입되지 않았다면 현대물리학은 지금과 같은 업적을 이루지 못했을 것이다. 대칭성이란 어떤 변환에 대해서 물체의 외형이 변하지 않는다는 것을 의미한다. 가장 높은 대칭성을 가지는 물체는 구(공)이다.

뉴턴법칙은 ‘위치를 바꾸는 변환’에 대하여 불변이다. 위치 장소가 바뀌어도 운동법칙은 변하지 않는다.

맥스웰의 전자기 법칙, 아인슈타인의 특수 및 일반상대성이론, 그리고 양자역학 등 모든 현대물리학 법칙은 한결같이 병진대칭성을 가지고 있다.(translational symmetry) 또 다른 법칙이

회전대칭이다.(rotational symmetry) 이 대칭성은 공간상의 모든 방향이 동등하다는 것을 기본으로 한다. 즉 ‘바라보는 방향을 달리해도 물리 법칙은 변하지 않는다.’ 자연법칙은 병진대칭과 함께 회전대칭을 가지고 있다. 아인슈타인은 빛의 속도를 불변량을 보면서 또 하나의 대칭성을 추가시켰다. 즉, 빛의 속도는 관측자의 속도변환에 대해서 대칭성을 가진다는 것이다.

이런 법칙은 왜 존재하는가? 대칭성은 자연의 법칙을 깔끔하게 정리하는데 매우 유용하다. 그러나 물리학에서는 대칭이라는 개념 자체가 없어서는 안될 필수요소로 취급된다. 우리는 주변 환경의 변화를 통해 시간의 흐름을 느낀다. “시간은 자연이 모든 사물의 변화를 기록하기 위해 채택한 방법이다.” 그러므로 시간은 과거와 미래에 대하여 대칭적이지 않다. 모든 삼라만상이 시간 축을 따라 아무런 변화도 겪지 않는다면, 우주의 진화나 변화 같은 것도 전혀 일어나지 않을 것이며, 시간을 인식하는 것 자체가 불가능해 질 것이다. 시간이 존재한다는 것은 곧 과거-미래 대칭성이 존재하지 않는다는 것을 의미한다.

우주가 균일하다면 전 우주에 걸쳐 동일하게 적용되는 시간의 개념을 정의할 수가 있다. 즉, 우주의 균질성은 범 우주적인 시간의 등시성을 보장해준다. 우리의 우주는 시간이 의미를 상실할 정도로 정적이지 않을뿐더러, 복잡함을 걱정하지 않아도 될 만큼 충분한 공간적 대칭성을 가지고 있다.

우주의 팽창은 지금까지 이루어진 과학적 발견들 중에서 가장 중요한 발견이자 우주의 과거를 규명하는데 가장 중요한 정보를 제공하고 있다. 프리드만과 르메트르는 물질과 복사에 의한 중력이 전 우주에 걸쳐 작용하면 우주공간은 고정된 크기를 유지하지 못하고 팽창하거나 수축을 경험하여야 한다는 결론에 도달하였다.

은하들이 서로 멀어지는 것은 공간 내부의 국소적인 팽창이 아니라 ‘공간’자체가 팽창하면서 나타나는 현상이다. 팽창하는 우주속의 시간은 공간과 함께 이동하고 있기 때문에 등시성이 붕괴되지는 않는다. 하지만, 공간의 운동 상태에 따라 시간은 달라지기 때문에 천문학자들은 우주 어디서나 통용되는 표준시간을 찾고 있으며, 균일하게 변하는 공간이 그 답을 제시하고 있다.

팽창우주의 미묘한 특성으로 다음과 같은 것이 있다.

- ① 팽창하는 우주의 중심은?
- ② 은하의 운동은 공간 자체가 팽창하면서 야기된 것이다.
- ③ 팽창이 적용되는 한계는?

공간이 팽창하면 은하들 사이의 거리만 멀어질 뿐 은하자체가 팽창하지는 않는다. 우주 전체의 생김새를 무슨 수로 알 수 있다는 말인가? 우리의 구세주는 역시 대칭성밖에 없다. 모든 지점과 모든 방향으로 대칭성을 가지는 도형을 찾다보면 몇 개의 후보가 남는다. 이들 후보에는 무한히 큰 원과 무한히 큰 평면 등이 있다. 구의 표면이나 무한히 큰 평면은 경계라는 것이 없다. 공간의 구조를 규명하는데 대칭이 결정적인 실마리를 제공한다. 대칭이라는 개념이 시간

과 공간의 정체를 밝혀줄 가장 강력한 도구가 된다. 아직 결론이 난 것은 아니지만, 우주공간의 곡률은 0이라는 쪽에 무게가 실리고 있다. 이는 무한히 큰 평면의 구조를 말한다.

이제부터, 시공간의 문제에 팽창하는 우주를 결합시켜 보자. 지금 이순간 우주 전체의 모습을 인식할 수는 없다. 멀리 있는 천체가 우리의 시야에 들어오기 위해서는 많은 시간이 걸리기 때문이다. 우주가 탄생하던 순간에 대해서는 사실 알려진 것이 별로 없다. 그래서 우리는 초기 우주의 시간단면을 두리몽실하게 얼버무려 놓은 채로 우주의 역사를 논할 수밖에 없다.

지금의 우주가 무한히 크다면 빅뱅으로 거슬러 올라가도 공간은 여전히 무한대이다. 빅뱅은 어느 한 지점에서 일어난 사건이 아니라 전 공간에 걸쳐 한꺼번에 일어난 사건으로 이해되어야 한다. 그리고 빅뱅이 일어난 후 공간이 팽창했다는 점은 이전과 다르지 않지만 전체공간의 크기는 빅뱅 이전에도 이미 무한히 컸기 때문에 더 이상 커지지 않았다고 보아야 한다. 평탄한 무한공간 모델은 시공간의 거시적 구조를 설명해줄 가장 유력한 후보라고 말할 수 있다.

9장 증발된 진공

열(熱)과 무(無) 그리고 통일(統一)

우주는 지금도 팽창하고 있다. 그 안에 있는 물질들은 공간의 팽창과 함께 넓은 지역으로 퍼져나가고 있으며 그 결과 우주의 온도와 밀도는 점차 낮아지고 있다. 우주공간은 대칭성과 균질성을 유지하고 있다. 이것은 우주가 어느 정도 안정화된 상태로 접어든 상황이고, 모든 변화가 급격하게 진행되던 탄생초기의 우주는 전혀 다른 모습이었을 것이다.

우주 탄생의 직후에는 고도의 대칭성이 급격하게 붕괴되었고 이때 일어난 일련의 변화들은 향후 장구한 세월동안 우주의 운명을 좌우하는 결정적인 요인이 되었다. 탄생 직후 존재했던 물질과 힘의 기본구조는 지금과는 전혀 달랐다. 이 모든 역사는 열과 대칭성의 긴밀한 관계 속에 함축되어 있다. 이를 위해서는 ‘텅빈 공간’ 그리고 ‘완전한 무’의 의미를 생각해 보아야 한다.

빅뱅이 일어난 직후에 우주는 엄청난 고온이었고 그 후로 공간이 팽창하면서 급격하게 식었으므로 초기우주의 역사를 이해하려면 온도가 변할 때 나타나는 일련의 현상들을 알고 있어야 한다. 온도에 따라 얼음이 물과 수증기가 변하는 것을 상전이라고 한다. 1970년대 물리학자들은 우주를 구성하는 물질들 뿐만아니라 우주 자체도 상전이를 일으킬 수 있다는 놀라운 사실을 알아냈다. 즉, 온도가 내려가는 대부분의 시간동안 큰 변화를 겪지 않다가 어떤 임계온도에 다다랐을 때 격렬한 변화를 겪으면서 그동안 보유하고 있던 많은 대칭성을 잃어버렸다는 것이다. 우주가 점차 식어가다가 임계온도에 도달하면 얼음처럼 얼어붙는 것이 아니라 그 안에 어떤 장(정확하게 힉스장 Higgs field)이 출현하게 된다. 온도가 충분히 내려가면서 다른 장들이 거의 0에 가까운 평균값을 가지게 되었을 때, 전 공간에 걸쳐 0이 아닌 어떤 특정한 값으로 ‘동결’된 장을 힉스장이라고 함. 수증기가 물방이 된 것과 같음) 엄청나게 긴 세월동안 계속되어 에너지가 더 이상 줄어 들 수 없는 가장 작은 상태에 이르게 될 것이다. 공간을 가득 채우고 있는 일상적인 장들의 값이 0이 될 때, 최소에너지 상태가 된다. 즉, 장의 값이 0일 때,

에너지도 0이 되는 것이다. 그러나 힉스장의 경우, 힉스장의 값을 0으로 만들려면 에너지를 올려야 하고 에너지가 올라가면 공간은 이전보다 ‘덜 빈’ 상태가 된다. 물리학자들은 전 우주 공간이 힉스장으로 가득 차 있을 때, 최소한의 에너지를 갖는다고 믿고 있다.

질량이란 물체의 움직임이 변할 때, 가속운동을 할 때, 그 변화에 저항하는 척도이다. 가속운동에 저항하는 물체의 속성은 대체 어디서 비롯된 것일까?

관성의 근원은 무엇인가?

정지상태의 기준을 설정하는 문제

뉴턴의 기준 : 절대 공간

마흐의 기준 : 멀리 있는 별

아인슈타인의 특수상대성의 기준 : 절대적인 시공간

아인슈타인의 일반상대성의 기준 : 중력장

정지상태의 기준을 설정하고 가속도를 정의한다고 해도 “물체는 왜 가속운동에 저항하는가?”라는 질문에는 답하지 못한다. 즉, 질량의 근원이 되는 관성을 설명하지 못하는 것이다. 하지만, 힉스는 이 질문에 나름대로 답을 제시한다.

물체의 속도를 바꿀 때, 힘을 가해야 하는 이유는 힉스장이 물체의 운동상태가 변하는 것을 방해하고 있기 때문이다. 힉스장은 오직 가속운동이 일어날 때에만 저항력을 행사한다. 입자의 질량이 작다는 것은 입자와 힉스장 사이의 상호작용이 그만큼 작다는 뜻이다. 대부분의 물리학자들은 힉스장이 없다면 모든 입자들의 질량이 없을 것이라고 굳게 믿고 있다.

힉스장은 10^{15} 도 보다 온도가 낮아지면서 나타나기 시작한다. 힉스장이 없는 초고온에서는 가속운동을 하는 입자가 아무런 저항도 받지 않기 때문에 질량도 0으로 사라진다. 온도가 클 때에는 힉스장의 값이 격렬하게 진동하면서 평균적으로 0을 유지하고 있었다.

힉스장이 형성되면서 질량이 없던 입자들이 일제히 질량을 가지게 되며, 입자들 사이의 대칭성이 크게 줄어든다. 즉, 입자의 질량들 사이에 존재하는 대칭성이 힉스장의 등장과 함께 사라진 것이다. 힉스장이 형성되면서 초래된 대칭성의 붕괴는 물질을 이루는 입자뿐만 아니라 힘을 전달하는 매개입장도 질량을 부여했다.

힉스장이 형성되기 이전에 모든 입자들은 질량이 0이라는 공통점을 갖고 있었을 뿐만 아니라 모든 점에서 근본적으로 동일한 입자였다.

힘입자는 특정한 힘을 매개하는 입자이므로 이들 사이에 대칭성이 존재한다는 것은 곧 그들이 매개하고 있는 힘들 사이에도 대칭성이 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 오늘날 우주공간을 가득 채우고 있는 힉스장이 증발될 정도로 온도가 높았던 과거의 우주에서는 약한 핵력과 전자기력이 동일한 힘이었던다는 뜻이다. 온도가 충분히 높은 상태에서는 힉스의 장과 약력과 전자기력의 차이점이 없다는 것이다.

글래쇼, 와인버그 그리고 살람은 1세기 전에 이루어진 통일작업을 더욱확장하여 약력과 전자기력이 동일한 힘의 다른 모습이었다는 것을 알아내었다. 이 통일된 힘이 ‘약전자기력’이다.

오늘날 약력과 전자기력이 확연하게 구별되는 것은 바로 이들 사이에 존재했던 대칭성이 힉스장의 출현과 함께 붕괴된 것이다. 자연의 저변에 존재하는 대칭성은 힉스장이 증발될 정도로 고온상태가 되어야 그 모습을 완전하게 드러낸다. 이들 3명은 표면적인 자연현상에 머물지 않고 그 깊은 곳에 숨어있는 대칭성을 찾아냄으로써 자연계에 존재하는 네 종류의 힘들을 하나로 통일하는 원대한 작업을 기틀을 마련하여 1979년도에 노벨상을 수상 하였다. 이후, 우주의 온도가 지극히 높았을 때에는 모든 힘들이 하나의 형태로 존재하다가, 온도가 내려가면서 우주적 위상변화가 일어남에 따라, 지금과 같이 네 종류의 힘으로 분리되었다는 것이 대통일 이론의 가설에 제기되었다.

조자이와 글래쇼는 우주의 온도가 10^{28} 도 이하로 내려가면서 하나의 힉스장이 우주공간을 채우면서 (이를 대통일 힉스장 Grand unified Higgs) 글루온과 다른 입자들의 질량이 달라지면서 강력과 약전자기력이 갈라지고, 이후 온도가 10^{15} 도 이하로 내려가면서 우주는 또 한번의 제 2차 위상변화를 겪으면서 약전자기 힉스장(electroweak Higgs)을 형성하면서 약전자기력 즉, 약력과 전자기력이 갈라졌다고 주장하였다. 이를 위해서는 양성자는 매순간 반전자와 파이온으로 붕괴되어야 하는데 (소위 양성자붕괴) 아직까지 실험으로 검증되지 못하고 있다. 결과적으로 초기 우주에 풍부하게 존재했던 대칭성이 온도의 하강과 함께 붕괴되어 지금의 모습으로 진화해 왔다는 것만은 분명한 사실이다.

힉스장의 존재여부는 수년 이내에 실험적으로 검증될 것이다. 현재 스위스 제네바의 유럽물리연구소 CERN(Centre European pour la recherche Nuclaire)에서 건설한 강입자 충돌가속기(LHC large hardron collider)에서 힉스입자를 검출할 것으로 예상하고 있다. 만일 힉스장이 발견되지 않는다면 지난 30여년 간의 입자물리학의 이론은 대대적인 수정이 불가피 하다.

힉스[higgs] : 힉스 입자는 1964년에 영국의 이론물리학자 힉스(P.W. Higgs)가 주장한 것으로, 그의 이름을 따 명명되었다. 힉스는 기본입자들과 상호작용해 질량을 부여하는 가설적인 입자로, 힉스가 질량을 만들어내는 원리는 힉스장으로 설명된다. 힉스장은 우주 공간 어디에나 존재하며, 소립자가 힉스장을 지나가면서 얼마나 힉스장과 상호작용을 많이 하는가에 따라 소립자의 질량이 결정된다. 상호작용이 강할수록 질량이 무거워진다. 이처럼 힉스는 물질을 구성하지는 않지만 물질의 기본을 이루는 소립자에 질량을 부여하는 매개체로 추정되고 있는 입자로 질량의 근원과 우주 생성 비밀을 밝혀낼 단서가 된다는 점에서 입자물리학에서는 아주 중요한 문제 가운데 하나이다. 그러나 힉스 입자는 자연 속에서 그냥은 볼 수 없다. 따라서 가속기로 입자를 충돌시켜 이 에너지로 힉스 입자를 생성해야 한다. 힉스 입자는 생성되자마자 다른 입자들로 붕괴되는 데, 이들 붕괴된 입자들을 분석함으로써 힉스 입자의 존재를 알 수 있다. 따라서 스위스 제네바 소재 유럽입자물리연구소(CERN)는 거대 가속기를 작동시켜 힉스 소립자를 찾아내기 위한 연구를 진행해왔다. 또 우리나라를 포함해 30여국가 연구진들이 공동으로 참가하는 ‘대형 강입자 충돌형 가속기(LHC)’의 2007년 가동을 목표로 건설공사가 진행 중이다.

힉스장 발견으로 나타나는 효과

① 현재 우주가 가지는 다양한 모습이 아득한 과거에는 거대한 대칭성의 일부로 존재하였음을 확인할 수 있다.

② 진공에 대한 개념을 더욱 확고하게 할 수 있다. 즉, 과학적인 진공을 새롭게 정의할 수 있다. 텅빈 공간이라고 해서 그 안에 아무것도 없어야 할 필요는 없다. 도저히 견어낼 수 없는 무언가가 공간에 존재한다면 텅빈 공간은 그것을 포함한 채로 정의될 수 있기 때문이다.

전체적으로 보면 시간은 엔트로피가 증가하는 방향으로 흐른다고 생각할 수 있다. 이 주장이 설득력을 가지려면 우주가 어떻게 극저-엔트로피 상태에서 시작되었는지 설명할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 우주탄생의 순간에 어떠한 일이 일어났는지 규명해야 한다.

10장

빅뱅의 재구성

무엇이 폭발했는가 ?

빅뱅이론은 대폭발이 일어난 직후부터 우주의 진화과정을 설명하는 이론이지, 무엇이 폭발했으며, 왜 폭발했는지, 또 어떻게 폭발했는지, 정말로 폭발이 있기는 했는지, 이런 의문점들은 여전히 미지로 남는다. 표준빅뱅이론의 최첨단 버전은 ‘인플레이션 우주론’이다. 이 이론은 우주 초창기의 비밀을 상당부분 설명해 줄뿐만 아니라 “초기 우주는 어떻게 극-저 엔트로피 상태를 획득하였는가?”라는 질문에 중요한 실마리를 제공하고 있다. 인플레이션 우주론에 의하면 지극히 짧은 순간에 초기 우주의 중력은 무지막지한 척력으로 작용하여 그 안에 들어 있는 물질들을 바깥쪽으로 사정없이 밀어냈다는 것이다.

밀어내는 중력 즉, 척력은 아인슈타인이 제시한 “우주상수”를 기원으로 한다. 아인슈타인의

우주론은 팽창이나 수축이 발생하지 않는 “정적인 우주”이었다. 그러나 일반상대성이론의 방정식을 우주전체에 적용하면 “정적인 우주”의 해가 얻어지지 않는다. 그의 방정식에 의하면 팽창하거나 수축하는 우주였다. “영원히 변하지 않는 정적인 우주”를 구현하기 위하여 1917년 그의 방정식에 “우주상수”의 항을 추가하여 “정적인 우주”를 구현하였다.

우주상수는 우주공간에는 질량과 에너지에 의한 인력보다 음압에 의한 척력이 더 강하기 때문에 전체적으로는 바깥쪽으로 밀어내는 척력이 작용하는 것을 의미한다. 아인슈타인은 중력에 의한 인력과 척력이 균형을 이루도록 우주상수의 값을 적절히 선택함으로써 정적인 우주모형을 완성하였다. 하지만, 1929년 허블의 우주관측결과 우주는 끊임없이 팽창하고 있다는 사실이 알려지게 된 후, 아인슈타인은 자신의 방정식에서 우주상수를 철회하였다. 하지만, 1980년 이 우주상수는 완전히 새로운 형태로 재탄생하게 된다. 우주가 팽창하는 원인을 묻는다면 현지답사가 불가능하기 때문에 일반상대성 이론에 의지하는 수밖에 없다.

뉴턴의 방정식이 운동의 원인을 설명하지 못하는 것처럼, 아인슈타인의 방정식도 우주가 팽창하고 있다는 사실만 알려줄 뿐, 팽창이 일어나게 된 근본적인원인을 설명하지는 못했다.

구스와 타이는 과냉각된 힉스장의 에너지가 우주의 팽창에 영향을 준다고 생각하고 1979년 12월 내용을 구체화 하여 발표하였는데 내용은 다음과 같다. “힉스장의 전 우주공간에 0이 아닌 에너지를 부여할 뿐만 아니라, 전 공간에 걸쳐 균일한 음압을 만들어 낸다는 것이다.” 그의 계산에 의하면 에너지와 압력에 관한한, 아인슈타인의 우주상수와 동일한 성질을 가지고 있다. 즉, 힉스장은 밀어내는 중력의 원천이었던 것이다.

과냉각된 힉스장과 우주상수의 차이점

- ① 우주상수는 우주가 팽창해도 변하지 않는 상수지만, 과냉각된 힉스장은 반드시 상수일 필요가 없다. 힉스장은 아주 짧은 시간동안 우주상수처럼 행동했다는 것이다.
- ② 아인슈타인은 밀어내는 중력과 끌어당기는 중력이 정확하게 상쇄되도록 우주상수의 값을 인위적으로 선택한 반면, 구스와 타이는 힉스장에 의한 에너지가 음압을 어떠한 인위적인 요소없이 계산하였다. 그들이 얻은 값은 아인슈타인이 선택한 값의 무려 10^{100} 배가 되는데 이정도면 힉스장으로부터 생성된 밀어내는 중력은 우주공간을 팽창시키고도 남는다.

구스의 아이디어로부터 탄생한 우주론은 다음과 같다.

우주의 밀도가 매우 높았을 때, 힉스장(인플라톤장 inflaton field)은 음압을 가지고 있었기 때문에 중력적으로 엄청난 척력을 행사하여 공간내의 모든 것들을 서로 멀리 도망가게 만들었다. 이 척력은 위력이 매우 커서 10^{-35} 초라는 극히 짧은 시간 동안 작용했음에도 불구하고 우주 공간을 엄청난 크기로 부풀려 놓았다. 현재 계산으로는 $10^{30} \sim 10^{100}$ 정도로 팽창된 것으로 추정된다. 갑작스러운 팽창이 시작된 지 10^{-35} 초 후에 인플라톤장은 고에너지 상태에서 이탈하면서 밀어내는 중력도 사라졌다. 이 시점부터는 기존의 빅뱅이론과 같아진다.

인플레이션 우주론과 관련된 두 가지 중요한 사항

① 인플레이션은 초기의 우주가 경험한 중대한 사건임에는 틀림없지만, 그것으로 우주가 탄생하였다고 볼 수는 없다. 인플레이션 우주론이 맞다면 그 다음으로 해결할 점은 “우주에는 왜 인플라톤 장이 존재하였는가? 그 와중에 시간과 공간은 어떻게 형성되었는가? 텅빈 공간은 왜 텅비어 있지 않는가?

② 인플레이션 우주론이 유일한 우주론이 아니다. **밀어내는 중력과 공간의 팽창을 논리적으로 설명할 수 있다면 얼마든지 새로운 우주론으로 수용될 수 있다.**

인플레이션 우주론이 등장하기 전에 상황

우주의 방대한 공간에 걸쳐 철쭉같이 어두운 물체로 뒤덮여 있다. -암흑물질- 회전하는 은하의 가장자리에 있는 별들은 바깥쪽으로 이탈되어야 하는데 가장 자리의 별들이 은하에서 이탈되지 않으려면 은하전체의 질량보다 훨씬 크다면 가장자리의 별들이 은하에서 이탈하지 않는 이유를 설명할 수 있다. 이를 암흑물질이라고 한다. 은하의 외형을 설명하려면 암흑물질은 반드시 존재하여야 한다.

은하의 분포로부터 우주에 존재하는 암흑물질의 총량을 계산할 수 있다. 암흑물질의 평균밀도는 임계밀도의 약 25% 이며, 빛을 발하는 전체의 밀도 5%를 추가하면 현재 우주의 밀도는 인플레이션 우주론이 예견하는 밀도의 30% 정도가 된다고 할 수 있다. 나머지 70%도 우주의 어디에선가 찾아야 한다.

1990년대 로렌스 버클리 연구소의 ‘사울 펄뮤터’가 이끄는 천문학 팀 그 외 연구팀은 초신성을 50여개 가까이 발견하고, 초신성까지의 거리 그리고 멀어지는 속도로부터 우주의 팽창속도를 연대별로 계산하였는데 우주의 나이가 70억년이 되는 시점부터 공간의 팽창속도가 갑자기 빨라졌다는 것을 알아내었다. 이 측정결과가 ‘잃어버린 70%’의 비밀과 밀접하게 연관되어 있다.

아인슈타인의 우주상수는 공간의 팽창과 상관없이 항상 동일한 값을 유지하고 있으므로 시간이 흐르다보면 밀어내는 중력이 끌어당기는 중력보다 강해져서 팽창속도가 점차 빨라지는 시점이 찾아온다. 그 시점이 70억년이라는 것이다.

초신성이 멀어져 가는 속도는 일상적인 물체로부터 작용하는 끌어당기는 중력과 우주상수에서 기인하는 밀어내는 중력의 차이에 따라 달라진다. 초신성 연구팀은 우주의 팽창속도가 70억년부터 점차 빨라지고 있음을 발견하였다. 그러므로 지금은 끌어당기는 중력보다 밀어내는 중력이 더 강한 상태이다. 그렇다면 이 척력의 원천은 무엇일까? 70%의 정체가 바로 우주상수에서 기인하는 암흑에너지의 양과 일치한다고 결론지었다.

임계밀도의 70%를 차지하는 우주상수, 일상적인 물질 5% 그리고 암흑물질 25%를 더하면 인플레이션 우주론이 예견하는 임계밀도가 정확하게 재현된다.

초신성의 관측결과와 인플레이션 우주론을 결합하여 재현시킨 우주의 역사

탄생초기의 우주의 에너지는 에너지 중심에 안착한 인플라톤 장에 의해 좌우되었다. 그 시기에 인플라톤 장은 음압을 만들어 내어 엄청난 위력으로 공간을 팽창시켰으며, 그로부터 10^{-35} 초가 지난 후, 인플라톤 장이 최저에너지 상태로 떨어지면서 급격한 팽창은 진정되었고, 이 때 방출된 에너지는 일상적인 물질과 복사로 전환되었다. 그 후로 수십억년 동안 이 물질들은 우리에게 익숙한 끌어당기는 중력을 행사하여 공간의 팽창속도를 늦춰왔다. 그리고 우주가 점차 커지고 물체들 사이의 거리가 멀어지면서 끌어당기는 중력도 점차 약해졌다. 그러다가 우주의 나이가 70억 살이 되었을 때 (지금으로부터도 약 70억년 전) 일상적인 물체에 의한 중력(인력)보다 우주상수에 의한 중력(척력)이 더 커졌으며, 그 결과 우주의 팽창속도는 서서히 빨라지기 시작했다.

인플레이션 우주론에서 제시되는 의문점

- ① 인플레이션 이 일어나기 전에도 우주는 존재하였는가?
- ② 인플라톤 장은 무엇 때문에 최소에너지 상태에서 벗어나 인플레이션의 원인이 되는가?
- ③ 우주는 왜 일상적인 물질 5%, 암흑물질 25%, 암흑에너지 70%로 이루어졌는가?

11장 다이아몬드를 가진 하늘의 양자

인플라톤과 양자적 요동, 그리고 시간의 일방통행

인플레이션이론 체계가 구축된 후, 발표된 연구는 주로 은하의 구조, 우주의 총 에너지, 그리고 시간의 방향성에 관한 문제들이 주류를 이룬다.

- ① 큰 스케일에서 볼 때, 우주는 매끄러운 곡률에 균일한 본포를 보인다. 그러나 상대적으로 작은 규모에서 볼 때, 은하나 별들이 한곳에 뭉쳐있는 이유는 무엇인가?
- ② 장소에 따라 무작위로 일어나는 양자적 요동의 차이가 미시적인 영역에서 비균질성의 원인이 되었다. 인플레이션 이론이 맞다면 현재 1조개가 넘는 것으로 추정되는 모든 은하들은 먼 옛날에 양자역학이 하늘에 새겨놓은 흔적인 셈이다.
- ③ 우주배경복사의 온도는 인공위성으로 정밀하게 측정이 가능하다. 소수점 네자리까지 고려하면 배경복사의 온도는 장소에 따라 달라지며 온도의 차이가 하늘에서 방향성을 가지고 나타난다는 점이다.

우주공간에 미세한 양자적 요동이 발생하면 온도가 평균보다 조금 높거나 낮은 지역이 생긴다.(밀도가 평균보다 조금 높은 곳에서는 방출되는 광자는 그만큼 강한 중력장을 빠져 나와야 하기 때문에 더 많은 에너지가 소모된다. 그러므로 이들 에너지와 온도는 밀도가 작은 곳에서 방출된 광자보다 낮다.) 이러한 생각에 입각하여 정확한 계산을 수행하면 이론값과 관측 결과는 정확하게 일치한다.

배경복사의 미세한 온도 차이는 인플레이션 우주론이 제시한 양자적 요동에 기인 한 것이 분명하다.

인플레이션 우주론이 우주가 생겨난 이유도 설명할 수 있을까? 아직 답을 제시할 단계는 아

니다. 하지만, 현재 우주에 존재하는 질량과 에너지는 언제 어떻게 형성되었는가에 대한 흥미로운 해결책을 제시하고 있다. 우주가 팽창함에 따라 질량과 복사는 중력에게 에너지를 빼앗기고 인플라톤 장은 중력으로부터 에너지를 획득한다. 인플레이션이 진행되는 동안 인플라톤 장의 에너지 밀도가 변하지 않았다는 것은 인플라톤 장의 총에너지가 공간의 전체부피에 비례해 왔음을 의미한다. 즉, 인플라톤 장에 함유된 에너지의 총량은 공간이 팽창할수록 증가한다.

표준빅뱅이론은 초기 우주의 질량이 지금보다 엄청나게 많았다고 주장하는 반면, 인플레이션 우주론은 고작 20파운드짜리 인플라톤 장이 인플레이션을 경험하면서 중력으로부터 에너지를 충당하여 현존하는 모든 질량을 만들어냈다고 주장한다. 이는 ‘초기우주는 왜 텅비어 있지 않았는가?’라는 질문에 답을 할 수는 없지만, 현존하는 질량의 근원을 나름대로 이해할 수는 있다.

우주의 한구석에 불과한 우리의 시공간으로부터 우주 전체의 진화과정을 유추할 수 있다는 것은 놀라운 사실이다.

시간의 방향성을 설명하기 위해서 초기우주가 극저-엔트로피 상태이었고, 그 후로 우주는 엔트로피가 큰 미래로 진화해왔다고 결론지었다. 인플레이션 우주론이 제시하는 극저-엔트로피에 대한 내용은 다음과 같다.

초기우주에는 물질이 전 공간에 걸쳐 고르게 분포되어있다고 믿고 있다. 그런데 분포가 균일한 상태는 일반적으로 엔트로피가 큰 상태에 해당한다. 그러나 중력이 개입하면 상황은 달라진다. 중력이 작용하고 있는 공간에서 어떤 물질이 균등하게 분포하고 있다는 것은 엔트로피가 아주 작은 상태를 의미한다. 왜냐하면 중력은 물질을 한 지점으로 집중시키는 역할을 하고 있기 때문이다. 잡아당기는 중력은 질량덩어리와 공간의 주름을 더욱 크게 만드는 쪽으로 작용하지만, 밀어내는 중력은 그 반대로 작용하여 결국은 매끈하고 균일한 공간이 형성되는 것이다. 인플레이션이 끝나던 무렵에 우주공간은 엄청난 크기로 팽창되었으므로 곡률의 분균일성은 불어난 풍선의 표면처럼 매끈하게 퍼졌고, 질량덩어리도 거의 무시할 정도로 희미해졌다. 게다가 인플레이션이 끝나던 무렵에 인플라톤 장의 에너지가 위치에너지의 바닥으로 떨어지면서 여분의 에너지로부터 탄생한 일상적인 입자들은 전 공간에 걸쳐 고르게 분포되었다는 것이다.

인플레이션 우주론은 중력에 의한 엔트로피가 매우 작은 과거를 상정함으로써 시간이 한쪽방향으로 흐를 수밖에 없는 논리적 기틀을 제공하고 있다. 시간은 항상 엔트로피가 증가하는 쪽으로 흘러가며 이것이 바로 ‘미래’이다.

인플레이션이 일어나려면 어떤 조건이 만족되어야 하는가? 인플레이션은 인플라톤 장이 위치에너지라는 그릇의 중심에 있는 정점에 잠시 동안 위치하면서 필연적으로 나타난 결과이다. 그러므로 인플라톤 장이 이와 같은 상태에 놓이게 되는 확률을 계산하는 것이 필요하다.

우주는 인플레이션으로 인해 창조된 것이 아니라 이미 존재하고 있던 우주가 어느 순간에 인플레이션을 겪으면서 팽창했다고 생각하는 것이 우리의 최선이다. 원시우주가 고에너지 상태에서 요동을 치다보면 언젠가는 인플라톤 장이 적절한 값을 가지면서 갑자기 모든 것이 바뀔

으로 터져나가는 인플레이션 팽창이 시작될 것이다. 대부분의 경우에 인플라톤 장의 요동은 인플레이션이 일어날 조건을 만족하지는 못한다. 원시우주는 인플레이션에 필요한 초기조건을 어떻게든 획득하였을 것이다.

볼츠만은 지금 우리의 눈에 보이는 모든 것들이 무질서한 상태에서 아주 드물게 나타나는 요동에 의한 탄생하였다고 주장하였다. 이러한 볼츠만의 아이디어와 인플레이션 우주론이 접목하면 다음과 같은 설명이 가능해진다. 아주 조그마한 원시우주가 저-엔트로피 상태로 점프하면서 인플레이션이 촉발되었고, 그 결과로 지금과 같은 방대한 우주가 탄생한 것이다. 인플레이션은 공간의 형태와 균일성, 그리고 은하와 배경복사의 경우처럼 부분적인 균일성 모두를 설명해 준다. 우리의 눈에 보이는 모든 것들은 혼돈상태의 원시우주에서 우연히 일어난 요동으로부터 탄생되었다.

약 20파운드의 무게에 크기는 10^{-26}cm 에 불과했던 고-엔트로피 상태의 원시우주는 인플레이션이 일어날 수 있는 조건을 운 좋게 획득하여 짧은 시간 동안 엄청난 규모로 팽창하였다. 이 기간 동안 공간은 매끈한 상태를 유지하면서 방대한 규모로 확장되었으며, 팽창이 진정될 무렵에는 인플라톤 장이 엄청나게 증폭된 에너지를 방출하여 물질과 복사가 공간을 거의 균일하게 채우게 되었다. 그리고 인플라톤 장에 의한 밀어내는 중력이 약해지면서 끌어당기는 중력이 전 공간을 지배하게 되었다.

끌어당기는 중력은 양자적 요동으로 생겨난 작은 불균일성을 기점으로 물질이 뭉쳐지도록 만든다. 인플레이션 이론은 지평선 문제와 평형성 문제, 그리고 천체의 기원과 초기우주의 저-엔트로피문제 등 전혀 연관성이 없어 보이는 다양한 문제들을 일거에 해결하는 하나의 답을 제시하였다. 다음 단계로 넘어가려면 가장 초창기의 우주를 설명하는 새로운 이론을 개발하여야 한다. 이 작업을 수행하려면 물리학자들을 괴롭혀 왔던 극단적인 환경에서 양자역학과 일반상대성이론이 양립할 수 없다는 문제를 해결하여야 한다. 이 문제를 해결해 줄 가장 유력한 후보가 초끈이론 superstring theory 이다.

IV 근원과 통일

12장 끈 위의 세계 / 끈이론이 말하는 시공간의 구조

뉴턴은 운동법칙과 중력법칙을 발견할 때, 원자의 구조를 알고 있을 필요가 없었으며, 맥스웰은 전자를 비롯한 하전입자들의 특성을 모르는 상태에서 전자기학을 체계를 세웠으며, 아인슈타인은 새로운 중력이론인 일반상대성이론을 연연구할 때 우주의 역사를 세세히 알고 있을 필요가 없었다. 이들 각각의 발견은 우주의 개념을 정립하는데 필요한 퍼즐의 조각들로 공헌하였다. 퍼즐이 다 맞춰졌을 때 어떤 그림이 나올지는 아무도 알 수 없다.

이 모든 업적들을 종합해보면 복잡함에서 단순함으로 변해가는 어떤 흐름을 알 수 있다. 복잡다단한 자연현상들이 어떤 하나의 궁극적인 법칙으로 통합되어 가고 있는 것이다. 최근 이론물리학계의 동향은 분명히 ‘궁극의 이론’을 향해 수렴하고 있다.

글래쇼-살람-와인버그는 전자기력과 약력이 약전자기력이라는 하나의 힘에서 분리되었다는 사실을 증명하였다. 약전자기력과 강한핵력을 통일하는 이론은 아직 완성되지 않았지만, 세 개

의 힘(전자기력, 약력, 강력)은 양자역학적 관점에서 볼 때 분명한 공통점이 있다. 하지만, 중력의 열개를 설명하는 일반상대성이론은 나머지 세 힘을 설명하는 이론체계에서 많이 벗어나 있다.

통일이론의 최대 현안은 일반상대성이론과 양자역학을 조화롭게 결합하여 자연에 존재하는 네 가지 힘들을 하나의 이론으로 통일시키는 것이다. 그런데 중력(일반상대성이론)과 양자역학을 하나로 묶는 것은 가장 어렵고 난해한 문제로서 물리학자들을 끊임없이 괴롭혀왔다. 내막을 살펴보자

양자역학이 가지는 특징은 불확정성원리, 확률과 파동함수의 개념이다. 이중에서 고전역학과 결별을 선언하게 된 직접적인 원인은 불확정성의 원리이다. 1930년에 발견된 불확정성의 원리는 입자의 위치와 속도 그리고 장의 값과 그 값이 변하는 빠르기(시간에 대한 변화율)는 어떤 경우에도 동시에 정확하게 측정될 수 없다는 것이다. 양자적 불확정성은 미시세계가 혼란스러운 요동으로 가득 차있다는 것을 보여준다. 이 요동은 아무것도 없이 텅 비어있는 (물질도 없고 장도 존재하지 않는) 공간에도 여전히 진행되고 있다. 공간을 아마도 완벽하게 비워도 현대 물리학이 주장하는 허스의 바다는 여전히 그곳에 남아있다. 그런데 여기에 양자적 요동까지 도입하면 진공의 실체는 더욱 미묘해진다.

1948년 네덜란드 물리학자 헨드릭 카시미르는 진공요동을 관측하는 방법을 제안하였는데 이는 진공 속에 놓여진 서로 다른 두 개의 금속판에 서로 당기는 힘을 측정하는 방법이다. 두 개의 금속판 사이에서 양자적 요동이 제거되면(금속판의 사이에서는 전자기장의 값이 0이 되는 요동만 살아남는다.) 금속판의 사이와 외부에 압력의 불균형이 초래되고 이는 두 금속판이 서로 가까워지는 쪽으로 압력이 작용한다는 것이다. 이 힘을 카시미르의 힘이라고 한다. 10년 후 네덜란드 물리학자 마르쿠스 스파네이가 최초로 카시미르 힘을 관측하는데 성공하였다. 텅빈 공간은 양자적 불확정성에 의해 끊임없이 요동치고 있다.

지금까지의 설명은 ‘공간 안에서 일어나는 장의 양자적 요동’에 대한 설명이다. 그렇다면 ‘공간 자체의 양자적 요동은 어떻게 되는가?’

아인슈타인은 일반상대성이론에서 중력을 공간의 휘어짐으로 표현하였다. 중력장은 공간의 형태를 기하학적으로 변형시킴으로써 자신의 존재를 드러낸다. 중력장은 다른 장들과 마찬가지로 양자적 요동을 겪고 있다. 불확정성원리에 의하면 중력장은 아주 작은 스케일에서 위아래로 요동치고 있다. 중력장은 ‘공간의 형태’와 동의어 이므로 중력장이 요동친다는 것은 곧 공간의 형태가 무작위적으로 요동친다는 뜻이기도 하다. 이 요동은 아주 작은 영역에서의 요동이기에 때문에 미세한 영역으로 들어갈수록 불확정성은 더욱 두드러지게 나타나며, 양자적 요동도 한층 더 격렬해진다. 플랑크 길이 이내의 영역과 플랑크시간 이내의 짧은 시간간격에서는 양자적 불확정성에 의해 시공간이 난장판을 이루고 있기 때문에 일상적인 시간과 공간의 개념을 적용할 수가 없다.

일반상대성이론과 양자역학의 방정식을 결합하면 대부분의 경우에 ‘무한대’라는 황당한 답이 얻어지는 것이 문제이다. 일반상대성이론은 별과 은하, 우주전체의 팽창 등 거시적 규모에서 일어나는 현상들을 매우 정확하게 서술하고 있으며, 양자역학은 분자와 원자 및 아원자 규모

에서 일어나는 모든 현상들을 놀랄 정도로 정확하게 서술하고 있다. 질량이 크면 공간을 심하게 왜곡시키므로 일반상대성이론을 적용해야 하고, 그 질량이 점유하고 있는 공간이 엄청나게 작기 때문에 양자역학도 동원되어야 한다. 우주의 초창기는 왜 아직도 베일에 싸여 있는 것일까? 그 주된 요인은 바로 일반상대성이론과 양자역학이 이 연대에서 충돌을 일으키기 때문이다. 우주의 진정한 근원을 알고 싶다면 우리는 어떻게든 일반상대성이론과 양자역학 사이의 충돌을 무마시켜서 하나의 조화로운 이론으로 재구성해야 한다. 많은 과학자들이 일반상대성이론과 양자역학사이의 충돌을 무마시켜줄 가장 강력한 후보로 초끈이론을 꼽고 있다.

1968년 가브리엘레 베네치아노는 고에너지 입자가속기 실험을 통하여 핵력의 구조를 연구하는 동안 실험데이터가 무려 200년 전에 스위스 수학자 레온하르트 오일러가 발견했던 수학공식 ‘오일러 베타함수’와 정확하게 일치하는 것을 발견하였지만 이유를 알지는 못하였다.

1970년 레너드 서스킨드와 홀거 닐센 난부 요이치로가 수수께끼를 해결하였다. ‘두 개의 입자 사이에 아주 작고 가느다란 고무줄 같은 것이 연결되어 있어서 그 줄을 통해 핵력이 작용한다고 가정하고 이 과정을 양자역학적으로 서술하면 오일러의 베타함수와 동일한 결과를 얻을 수 있다는 것을 발견하였다. 이론 물리학의 역사를 바꾼 초끈이론의 전신 - 끈이론은 이렇게 탄생하였다.

끈이론은 1970년대 핵력과 관련된 새로운 데이터와 일치하지 않는 것으로 나타났고, ‘양자색역학’이론은 끈의 개념을 전혀 사용하지 않은 채로 새로운 데이터를 말끔하게 설명해 버려 끈이론은 물리학의 무대에서 사라질 것 같아 보였다. 슈워츠와 세크는 끈의 길이에 대대적인 수정을 가하여 이론적으로 알려져 있던 중력자를 재현하는데 성공하면서 끈이론이 다시 생명력을 가지기 시작하였다.

중력은 매우 약한 힘이고, 끈의 길이가 길수록 매개되는 힘은 더욱 강해지기 때문에 슈워츠와 세크는 끈이론이 중력과 조화를 이루려면 끈의 길이가 플랑크 길이까지 작아져야 한다고 결론내렸다. 중력을 양자화 시키는데 성공한 끈이론이 가지는 가장 큰 문제점은 ‘비정상성’과 관련된 문제로서 -에너지 보존법칙과 같은 신성불가침의 절대법칙을 무너뜨리는 양자적 대재난- 반드시 비정상성의 문제를 해결해야 했다.

1984년 슈워츠와 세크는 끈이론을 괴롭히던 비정상성이 서로 상쇄된다는 것을 증명함으로써 끈이론은 양자역학적으로 타당한 이론이 되고 제1차 혁명기를 가져옴

끈이론은 모든 입자들을 ‘ 아주 작은 영역에서 특정에너지를 가진 채 진동하는 끈’으로 간주한다. 끈은 만물의 최소단위일 수도 있고 그보다 작은 스케일에서 또 다른 세부구조가 존재할 수도 있다.

모든 물체는 전자와 두 종류의 사촌입자(뮤온과 타키온), 6종류의 쿼크, 3종류의 뉴트리노로 구성되어 있다. 하지만 끈이론에 의하면 물질을 이루는 최소단위는 단 하나뿐이다. 그 하나는 다름아닌 끈이다. ‘ 진동패턴이 다른 끈은 각기 다른 입자의 형태로 그 모습을 드러낸다. 끈이 진동하는 방식에 따라 특정한 질량과 전기전하, 그리고 특정한 스핀 등 입자의 고유한 특성이

창출된다는 것이다. 모든 입자들은 하나의 끈이 다양한 패턴으로 진동하면서 모든 종류의 입자들을 만들어 내고 있는 것이다. 끈이론은 물질을 이루는 입자뿐만 아니라 전령입자들 까지도 동일한 끈의 진동으로 간주하고 있다. 끈이론의 가장 중요한 특징은 기본입자를 점(크기가 없음)이 아닌 끈(길이를 가지고 있어 공간의 한 부분을 점유)으로 본다는 차이점이 일반상대성이론과 양자역학을 조화롭게 결합할 수 있다.

초미세 영역에서 중력장이 경험하고 있는 난리법석은 이리저리 정신없이 돌아다니는 수많은 중력자들로부터 기인한 현상으로 간주할 수 있다. 끈이론에 의하면 중력자는 점이 아니라 진동하는 끈이며, 이 끈은 대략 플랑크 길이 (10^{-33}cm) 정도의 길이를 가지고 있다. 끈이론에 의하면 중력자는 점이 아니라 플랑크 길이 정도의 크기를 가지고 있으며, 이 길이가 바로 중력을 분해할 수 있는 한계에 해당된다.

끈이론은 ‘자세히 들여다볼 수 있는 정도’에 분명한 한계를 두고 있다, 그리고 이 한계는 양자역학과 일반상대성이론이 충돌을 일으키는 영역보다 훨씬 크다. 중력장의 최소단위는 중력자이고, 그보다 작은 스케일을 논하는 것은 의미가 없으므로 플랑크 길이 이하의 초미세 영역에서 제아무리 난장판이 벌어지고 있다해도 전혀 문제될 것이 없다. 중력자라는 최소단위 스케일에서 벌어지는 물리학을 서술하면 우리의 할 일은 다한 것이며, 그 이상의 서술은 할 수도 없고, 할 필요도 없다. 끈이론은 이런 논리로 중력과 양자역학을 과학역사상 최초로 조화롭게 연결시킬 수 있었다.

초미세 공간과 초미세 시공간에 대하여 어떤 정보를 담고 있는가? 일단 ‘시간과 공간은 연속적이다’라는 기존의 개념이 심각한 위협을 받고 있다는 것은 분명하다. 우리가 일상적으로 겪고 있는 시간과 공간은 플랑크 스케일의 최소단위 요소로 이루어진 불연속적 객체가 되는 것이다. 즉, 끈이론에 의하면 시간과 공간을 잘라서 플랑크 길이(끈의 길이 10^{-33}cm)나 플랑크시간(빛이 플랑크 길이만큼 진행하는데 걸리는 시간, 10^{-43}sec) 단위에 이르면 더 이상 세분화하는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 거리와 시간이 플랑크 스케일 이하로 작아지면, 더 이상의 분할이 무의미해지는 쪽으로 어떤 변환을 일으킬 수도 있다.

끈이론은 양자역학과 일반상대성이론의 충돌문제를 해소한 이론이자 모든 힘과 물질의 특성을 ‘진동하는 끈’이라는 하나의 이론체계로 통일할 수 있는 이론이며, 초미세 영역에서 일어나는 모든 현상을 설명해주는 이론이다. 끈이론은 우주에 대한 우리의 이해 수준을 현격하게 끌어올려줄 가장 강력한 후보가 되는 것이다. 끈을 본다는 것은 책의 글씨를 100억광년 떨어진 거리에서 판독하는 것과 거의 같은 수준의 작업이다.

전하의 질량이나 전하가 지금과 조금만 달랐어도 우주는 지금과 전혀 딴판으로 진화했을 것이다. 가장 근원적인 단계에서 우주를 이해하려면 입자들이 지금과 같은 특성을 가지게 된 원인을 규명해야 한다. 소립자들은 그 많은 가능성들을 중에서 왜 하필이면 지금과 같은 특성을 선택한 것일까? 끈이론에 의하면 입자의 특성은 끈의 고유한 진동패턴에서 창출되고 있으므로 앞의 질문에 대하여 나름대로 답을 제시할 수 있다.

끈이론이 말하는 끈의 진동으로부터 입자의 특성이 창출되는 과정은 다음과 같다. 끈이론이 말하는 입자의 질량이란 진동하는 끈의 에너지에 해당된다. 진동이 강하고 격렬할수록 에너지는 커지고, 큰 에너지는 아인슈타인의 관계식을 통해 큰 질량에 대응된다. 광자나 중력자와 같이 질량이 0인 입자에 해당하는 끈은 가장 조용하게 진동하고 있다.

모든 입자의 개별적 특성은 끈이 가질 수 있는 모든 진동패턴들 중 하나에 반드시 대응되어야 한다. 스핀이 1/2인 진동패턴은 물질입자에 대응되어야 하고 스핀이 1인 진동패턴은 매개입자에 정확하게 대응되어야 한다. 그리고 스핀이 0인 힉스입자가 실험을 통해서 발견된다면 끈이론에는 여기에 해당하는 진동패턴이 반드시 존재해야 한다.(p486)

입자족 1		입자족 2		입자족 3	
입자	질량	입자	질량	입자	질량
전자 electron	0.00054	뮤온 muon	0.11	타우 tau	1.9
전자-뉴트리노 electron-neutrino	$< 10^{-9}$	뮤온-뉴트리노 muon-neutrino	$< 10^{-4}$	타우-뉴트리노 tau-neutrino	$< 10^{-3}$
위-쿼크 up-quark	0.0074	맵시쿼크 charm-quark	1.6	꼭대기-쿼크 top-quark	189
아래-쿼크 down-quark	0.0074	이상-쿼크 strange-quark	0.16	바닥-쿼크 bottom-quark	5.2

질량은 양성자의 값을 1로 보고 계산

힘	힘입자(전령입자)	질량
강력(핵력)	글루온(gluon)	0
전자기력	광자(photon)	0
약력	W, Z 입자	86, 97
중력	중력자(graviton)	0

그동안 누적된 실험데이터에 따르면 질량이 큰 입자일수록 불안정한 경향을 가지고 있다. 그러므로 끈이론과 입자물리학이 공유할 수 있는 부분은 가장 작은 에너지에 해당하는 질량이 0인 입자의 진동 뿐이다.

끈이론은 20세기 물리학을 떠받치고 있는 두 개의 주춧돌 일반상대성이론과 양자역학이론을 하나로 결합가능하게 하였다. 하지만 끈이론에 의하여 계산된 입자의 질량이 너무 크다는 문제점이 대두되었다. 끈이론이 가지는 문제의 가장 결정적인 것은 차원에 관한 문제이었다. 초끈이론은 중력과 양자역학을 수학적 불일치 없이 조화롭게 결합시켰지만, 방정식이 3차원 공간에서 수학적으로 심각한 장애를 일으켰다. 초끈이론이 수학적으로 문제를 일으키지 않으려면 우리가 살고 있는 공간은 3차원이 아닌 9차원이어야 했다. 여기에 시간을 더하면 10차원의 시공간이 된다. 과연 끈이론의 주장대로 우리는 9차원 공간에서 살고 있는 것일까?

1919년 무명의 독일 물리학자 테오도르 칼루자는 중력과 전자기력을 통일하는 방법에 대하여

고민하였는데 그는 4차원 공간(5차원 시공간)에서 자신을 논리를 펼쳐나갔다. 이후 칼루자는 공간의 차원을 확장시킴으로써 일반상대성이론의 방정식과 맥스웰의 전자기 방정식을 하나로 통일 시키는 새로운 이론 체계를 구축하였다.

1926년 스웨덴의 물리학자 오스카 클라인은 칼루자의 아이디어를 조금 수정하여 여분의 차원이 숨어있는 곳을 구체적으로 지적하였다.

숨어있는 차원

클라인은 가느다란 밧줄의 표면에 커다란 차원과 조그마한 차원이 공존하고 있는 것처럼 우주공간의 차원도 그런 식으로 구성되어 있다고 생각하였다. 여분의 차원은 대략 플랑크길이 정도의 영역 안에 숨어있다. 이 정도로 작다면 관측장비로 감지되지 않는 것은 너무도 당연하다.

칼루자의 의도는 일반상대성이론과 전자기학을 통합하는 것이었으므로, 칼루자-클라인 이론은 아인슈타인이 추구하던 통일장이론의 출발점이었던 것이다. 사실, 칼루자는 논리적인 필연성에 의하여 새로운 차원을 도입한 것이 아니라, 일단 차원을 확장시킨 후에 그 결과를 분석하다가 일반상대성이론과 전자기학이 통합된다는 사실을 우연히 발견하였다. 끈이론의 방정식은 오로지 10차원 시공간 (9차원 공간+1차원 시간)에서만 제대로 작동된다. 즉, 끈이론도 칼루자-클라인이론처럼 여분의 차원을 필요로 했던 것이다. 끈이론은 시공간의 차원은 이러이러해야 한다는 이론적 근거를 제시하였다. 이는 끈이론의 계산을 통해 수학적으로 유추된 결과이다. 6개의 차원이 아주 작은 영역안에 돌돌 말려 있다면, 우리는 이 공간을 3차원으로 인식하며 살고 있을 것이다.

끈이론의 방정식은 차원의 개수 뿐만 아니라 숨어있는 차원의 형태까지 예견하고 있다. 끈이론이 예견하는 여분의 6차원은 ‘칼라비-야우 공간’이라 불리는 형태로 이는 끈이론이 등장하기 훨씬 이전에 ‘유지니오 칼라비’와 ‘칭 퉁 양우’라는 두 사람의 수학자에 의하여 이미 알려져 있었다. 만일 끈이론이 맞는다면 초미세 영역의 공간은 우리의 상상을 초월할 정도로 복잡하고 다양한 세계가 된다. 끈이론의 방정식은 독립적인 진동패턴들이 반드시 만족해야할 조건을 부과하고 있다. 이 조건이 만족 되지 않으면 끈이론의 수학은 붕괴되고 방정식도 의미를 상실한다. 오직 9차원 공간만이 진동패턴에 부과된 제한 조건을 완벽하게 만족시킬 수 있다. 끈이론이 9차원 공간에서만 성립하는 것은 바로 이 때문이다.

끈의 진동패턴은 숨어있는 차원의 기하학적 구조에 따라 달라진다. 여분차원의 정확한 크기와 형태는 끈의 진동패턴에 결정적인 영향을 주며, 입자의 특성은 이로부터 전적으로 좌우된다. 우주의 기본구조는 입자의 특성에 의해 전적으로 좌우되고 있으므로, 결국 우주의 비밀은 칼라비-야우 공간의 기하학적 특성에 고스란히 담겨있는 셈이다. 끈이론의 조건을 만족하는 칼라비-야우공간은 무려 수십만 개나 존재한다. 이들 중에서 실제의 우주공간과 일치하는 칼라비-야우공간을 찾아내는 것이 끈이론이 직면하고 있는 가장 큰 문제이다. 현재 알려진 방정식만으로는 여분차원의 크기조차 결정할 수 없다. 지금시점에서 결론을 내리기 어렵지만 상황은 매우 희망적이다.

우주의 초기에는 현존하는 3차원도 아주 작은 영역 속에 갇혀있었으므로 ‘기존의 3차원’이나 ‘여분의 차원’이라는 구분도 존재하지 않았었다. 어떤 이유에서인지는 몰라도 이들 중에서 여섯 개의 차원은 그대로 남아있고 나머지 세 개는 팽창하는 공간과 함께 엄청난 규모로 커져서 오늘에 이르고 있다.

13장 막(brane) 위의 우주

M-이론이 예견하는 시간과 공간

특수상대성이론은 두 개의 기본원리(광속불변의 원리와 등속으로 움직이는 모든 관측자들에게 물리법칙이 동일하게 나타난다는 원리)에서 출발하였고, 일반상대성이론은 등가원리라는 것이 있고, 양자역학에는 불확정성원리가 있다. 하지만 끈이론에는 이론의 근간을 이루는 원리라고 딱히 내세울 만한 것이 없다.

끈이론에 원리가 없는 주된 원인은 이론의 전체적인 조망없이 지엽적으로 개발되었기 때문이다. 목적(모든 물질과 힘을 양자역학 체계하에서 하나로 통일하는 것)은 매우 원대하지만 이론 자체는 다분히 산발적인 과정을 거치면서 개발되어왔다는 것을 의미한다. 몸통을 먼저 만든 후에 다리를 붙여나간 것이 아니라 우연히 발견된 다리들을 조합하여 몸통의 실체를 추적해 나가는 형국이 된 것이다.

최근들어 학자들의 기대는 ‘끈이론의 제2차 혁명기’를 거치면서 더욱 확고해졌다. 특히 숨어 있는 차원 하나가 추가로 발견되면서 끈이론을 실험적으로 검증할 수 있는 가능성이 한층 더 높아졌다. 지난 30년 동안 논리적, 수학적으로 타당한 끈이론이 하나가 아니라 다섯 개나 발견되었다. 그리고 1995년 에드워드 위튼이 크리스 헐과 폴 타운센드, 아쇼크 센, 마이클 더프, 존 슈워츠 등의 연구결과를 종합하여 다섯 개의 끈이론을 하나로 통합하는데 성공하였다. 위튼은 다섯 개의 끈이론이 ‘하나의 이론을 수학적으로 분석하는 다섯 가지 방법’에 대응된다는 사실을 알아낸 것이다. 이들은 별개의 이론이 아니라 하나의 이론을 각기 다른 방법으로 해석한 결과였던 것이다. 그러면 하나의 이론은 무엇인가 “현재 학자들은 그것을 ”M-이론“이라는 다소 모호한 이름으로 부르고 있다. 다섯 개의 이론을 연결해주는 위튼의 번역사전을 잘 이용하면 하나의 이론으로 답을 구할 수 없는 문제를 다른 이론으로 해결할 수 있다.

칼루자는 시공간을 5차원으로 확장하여 중력과 전자기력을 하나로 통일하였고, 끈이론 학자들은 10차원 시공간을 도입하여 양자역학과 일반상대성이론을 통합하는 기틀을 마련했듯이, 위튼은 11차원의 시공간을 도입하여 다섯 개의 끈이론을 하나로 통합하였다.

왜 끈이어야 하는가? 왜 모든 입자들이 1차원의 끈으로 이루어져 있다고 주장하는가? 일반상대성이론과 양자역학을 조화롭게 결합시킬 때 가장 중요한 역할을 했던 것은 만물의 기본단위(입자)가 점이 아니라는 가정이었다. 그렇다면 굳이 1차원 끈일 필요는 없지 않은가? 이유는 1차원 끈은 방정식과 관련된 대칭의 수가 무한히 많은데 반해, 기본단위를 2차원 이상으로 확장시키면 대칭이 급격하게 줄어들기 때문이다. 위튼의 분석에 의하면 만물의 근원은 2차원의 막(brane, membrane(막, 세포막)에서 만들어짐)일 수도 있고, three-brane 3차원 객체일 수도 있으며, p-차원 p-brane일 수도 있다는 것이다.

중력의 매개입자인 중력자는 끈의 최저에너지 진동패턴들 중 하나에 해당되며, 중력자가 매개하는 중력의 크기는 끈의 길이에 비례한다. 그런데 중력은 매우 약한 힘이므로 끈의 길이는 아주 짧아야 한다. 끈의 진동으로 나타나는 중력자가 중력을 매개한다는 가정하에 관련 계산을 해보면, 끈의 길이는 플랑크 길이의 1000배이내인 것으로 추정된다.

이런 식으로 설명을 하면 큰 에너지를 가지는 끈은 중력자와 직접적인 관계가 없으므로 길이가 짧을 이유가 없다. 실제로 많은 에너지가 투입될수록 끈은 더욱 격렬하게 진동한다. 그러면 어느 시점이 지나고 나면 끈의 에너지는 다른 효과를 나타내기 시작한다. 진동하는 끈의 길이가 길어지는 것이다. 고차원의 p-브레인은 굳이 작을 이유가 없다. 그렇다면 무한히 큰 1차원은 끈이나 2차원은 무한히 넓게 펼쳐진 막을 3차원부터는 상황이 달라진다. 3-브레인은 3차원 객체이므로 우리에게 익숙한 공간을 점유하는 3차원을 가득 채우고 있을 것이다. 우리가 3-브레인에서 살고 있다는 소위 ‘브레인세계 가설’은 끈이론학자들이 최신 제안한 사실이다. 이 가설은 M-이론에 접근하는 새로운 방법을 제시해주고 있다. 과거의 끈이론은 만물의 최소단위로 1차원 끈만을 허용했지만, M-이론은 10차원 이내에서 임의의 차원을 가지는 p-브레인의 존재를 허용하고 있다.

1995년 캘리포니아 대학의 조 폴친스키는 ‘끈의 몸통은 자유롭게 진동할 수 있지만, 열린 끈의 양쪽 끝은 어떤 영역안에 들어붙어 있거나 구속되어 있다고 생각하고 열린 끈의 양끝이 어떤 p-브레인 차원 영역 이내에서 움직이도록 제한되어 있다면, 그 영역은 바로 p-브레인이어야 한다는 결론을 내렸다. 브레인의 특성은 그 브레인에 들러붙어 있는 끈을 분석하여 알아낼 수 있다. 폴친스키 덕분에 우리는 고차원 브레인과 관련된 대부분의 문제를 1차원의 끈에 관한 문제로 단순화 시킬 수 있게 되었다.

우리의 우주는 브레인인가 ?

만일 우루기 3-브레인 안에서 살고 있다면 시공간은 추상적이고 모호나 개념이 아니라 끈이론/M-이론을 구성하는 물리적 실체가 된다. 우리는 끈이론을/M-이론이 요구하는 여분의 차원이 아주 작은 공간 안에 감겨있다고 가정하였다. 그러나 브레인 세계 가설을 수용하고 이 문제를 다시 생각해 보면 여분의 차원은 반드시 작은 공간에 숨어 있을 필요가 없다. 여분의 차원이 기존의 3차원 공간만큼 크다고 해도, 광자가 3-브레인을 이탈하지 못하는 한 우리는 여분의 차원을 볼 수가 없다. 여분의 차원은 너무 작아서 안 보이는 것이 아니라 그것을 볼 방법이 없어서 감지되지 않을 수도 있다.

약력과 강력도 전자기력처럼 3-브레인을 이탈할 수 없다. 브레인 세계 가설에 입각하여 수학적인 계산을 해보면 강력과 약력을 매개하는 입자들도 열린끈의 특정한 진동패턴에 해당되며, 이들의 양끝은 과자와 마찬가지로 3-브레인에 속박되어 있기 때문에 여분의 차원을 감지하지 못한다. 하지만 중력은 사정이 달라진다. 중력자는 닫힌끈의 진동패턴에 대응된다. 닫힌 끈은 ‘끝’이라는 것이 없기 때문에 브레인에 속박되어 있을 이유가 없다. 그러므로 브레인 가설에서 중력은 기존의 3차원과 여분의 차원사이에 정보를 교환할 수 있는 유일한 수단인 것이다.

1967년 뉴턴이 발견한 중력법칙은 작용하는 힘은 거리제곱에 반비례한다는 것에 대해서는 현재에도 의심의 여지가 없다. 그렇다면 왜 거리제곱에 반비례 하는가? 그 해답은 공간의 차원과 밀접하게 관계가 있다. 즉, 중력의 크기를 위한 역선의 총 개수는 정해져 있고 거리가 길어짐에 따라 단위면적을 통과하는 역선의 개수는 거리제곱에 반비례하는 값으로 계산된다는 점에서 이해할 수 있다. 2차원 우주라고 가정하면 중력의 거리의 제곱에 반비례하지 않고 거리에 직접 반비례하게 된다. 만약에 1차원 우주라고 하면 두 물체 사이의 중력은 거리에 무관하게 된다. 반대로 4차원 우주에서는 세제곱에 반비례하고, 5차원에서는 거리의 네제곱에 반비례하며, 6차원 공간에서는 거리의 5제곱에 반비례한다. 방대한 규모에서 볼 때 우주공간은 분명 3차원이라고 할 수 있다. 하지만 어느 정도 작은 스케일까지 검증되어 있는가? $1/10\text{mm}$ 까지는 중력의 역제곱 비례법칙이 검증되어 있다. 하지만, 이보다 작은 거리에서는 중력의 크기를 측정하기가 결코 쉽지 않다. 중력이 워낙 약한 힘인데다가 거리가 아주 가까워지면 양자적 효과까지 나타나면서 실험이 아주 복잡해지기 때문이다.

중력에 대한 두 가지 결론

- ① 가까운 거리에서 중력이 거리에 반비례하면 그 공간은 2차원이다.
- ② 수많은 실험을 통하여 중력이 거리제곱에 반비례한다는 사실을 의심의 여지없이 증명하고 있으므로 우리의 공간은 3차원임이 분명하다. $1/100\text{mm}$ 이하의 짧은 거리에서 중력의 변화를 측정하는 실험은 기술상의 한계 때문에 아직 실행되지 못했다.

중력장이 여분의 차원을 완전히 채운 후에는 더 이상 퍼져 나갈 곳이 없으므로 거리에 따른 변화가 나타나지 않는다.

중력과 관련하여 지금까지 수행된 실험결과로 볼 때, 만일 우리가 3-브레인에 살고 있는 것이 사실이라면 여분차원의 크기는 거의 $1/10\text{mm}$ 까지 허용된다.

실험물리학자들은 1mm 이내의 거리에서 중력이 거리 역제곱 비례법칙으로부터 벗어나는 사례를 발견하기 위해 지금도 안간힘을 쓰고 있지만, 아직 믿을 만한 결과가 발표된 것은 없다.

브레인 가설에 등장하는 끈의 길이는 기존의 생각보다 훨씬 클 수 있다. 실제로 여분차원의 크기와 끈의 크기는 서로 밀접하게 관련되어 있다. 여분차원의 크기가 클수록 중력의 많은 부분이 그쪽으로 투입되어, 3차원에 공간에 나타나는 중력은 그 만큼 약해진다. 브레인 가설 여분 차원은 우리가 생각한 것보다 훨씬 클 수도 있다는 가능성을 받아들이면 중력이 약한 이유는 다음과 같이 설명된다. 중력은 원래 약한 힘이 아니었는데 상당부분이 여분차원의 공간속으로 흘러들어갔기 때문에 우리에게 약하게 나타날 수도 있다는 것이다.

현재 물리학자들의 계산에 의하면 최저에너지 상태에 있는 끈의 길이는 10^{-18}m 보다 길 수는 없다. 이는 이전에 추정되었던 플랑크 길이에 비하면 $1\text{억} \times 10\text{억}$ 배나 커진 셈이다. 이 정도면 입자가속기로도 충분히 감지될 수 있는 크기이다. 만일 끈과 여분의 차원이 충분히 커서 실험적으로 발견된다면 그 여파는 상상을 초월할 것이다.

현재 우주론을 연구하고 있는 과학자들은 두 가지 접근방법을 시도하고 있다. 하나는 끈이론 /M-이론의 체계가 잡히면 우주 초창기의 풀리지 않는 수수께끼들도 자연스럽게 해결될 것이라는 입장이며, 두 번째 방법은 브레인 세계가설을 인용하여 전혀 새로운 형태의 우주론을 구축하는 것이다. 이 모델을 주기적 모델이라고 부르고 있다.

현재 인플레이션 이론과 주기적 우주모델은 각기 나름대로 우주론을 제시하고 있지만, 어느 쪽도 완전한 이론이라고 할 수는 없다. 현대에 이르러 끈이론 /M-이론은 주기적인 우주의 개념을 새로운 형태로 제기하고 있다. 슈타인하르트와 투록은 두 개의 3-브레인이 충돌하면서 나타나는 물리적 특성들이 인플레이션 팽창이 막 일어나기 시작한 시점의 특성과 매우 정확하게 일치한다고 주장하였다. 단계별 진행상황을 정리하면 다음과 같다.

- ① 우리의 3-브레인은 이웃한 3-브레인과 충돌한다.
- ② 충돌을 겪은 후 팽창하면서 온도가 내려가고, 초기 플라즈마 상태에서 물질이 서서히 뭉치면서 별이나 은하와 같은 천체들이 형성되기 시작한다.
- ③ 70억년이 지나면 팽창이 충분히 진행되어 일상적인 에너지/복사보다 암흑물질의 음압에 의한 팽창이 더욱 두드러져서 팽창속도는 더욱 빨라진다.
- ④ 이렇게 시간이 지나면 우리의 3차원 공간은 엄청난 규모로 커져서 거의 텅빈 우주가 될 것이다.
- ⑤ 이 시점이 되면 충돌에 의한 반발이 끝나고 두 개의 3-브레인은 서로를 향해 다가가기 시작한다. 두 개의 브레인이 가까워질수록 브레인에 붙어있는 끈은 양자적 요동을 겪으면서 미세한 굴곡을 만들어내고 이 굴곡은 시간이 흐를수록 더욱 크게 나타난다. 그러다가 두 개의 3-브레인은 대충돌을 일으키면서 다시 새로운 주기를 시작하는 것이다.

브레인 세계가 충돌한다는 가정은 이미 성공을 거둔 인플레이션 이론과 크게 다르지만 양자적 요동으로부터 초기의 비균질성이 초래된다는 점에서는 두 이론이 일치하고 있는 것이다.

인플레이션 이론은 “우주의 초창기에는 인플레이션이 일어나기 알맞은 조건이 이미 갖추어져 있었다.”는 가정을 이론적 근거없이 내세워야 한다는 것이 문제이다.

주기적 우주론도 우주의 주기적 변화가 처음부터 시작된 시점이 존재한다는 것을 의미하기 때문에 인플레이션 이론의 경우와 마찬가지로 그 시작이 어떻게 촉발되었는지를 추가로 설명하여야 한다. 하지만, 주기적 모델의 가장 큰 매력은 관측으로 알려진, ‘팽창의 가속화와 암흑 에너지의 존재를 별 무리없이 설명해 준다는 장점이 있다.

V 실체와 상상의 세계

14장 이상과 현실

실험을 통해 시간과 공간의 실체를 규명하다.

여분의 차원과 암흑물질(암흑에너지), 질량의 기원과 힉스입자(힉스장), 초기우주의 상태, 초대칭, 그리고 끈이론의 타당성 등 최근에 제기된 이론들은 현재 실험이 진행 중이거나 구체적

인 실험 일정이 잡혀 있는 실정이다.

중력은 시공간에 곡률을 만들어내는 원천이므로 중력파는 곡률을 전달하는 파동에 해당된다. 전자기파나 음파, 또는 물결파와는 달리 중력파는 공간에 대하여 이동하는 것이 아니라 공간과 함께 이동하는 특성을 가지고 있다. 중력은 아주 약하면서도 모든 곳에 존재하는 힘이다. 자연에 존재하는 네 가지 힘들 중에서 중력은 물질과의 상호작용이 가장 약하다. 즉, 중력은 빛이 통과하지 못하는 지역도 자유롭게 통화할 수 있으므로 눈에 보이지 않는 곳의 정보를 수집하는 훌륭한 수단이 될 수 있다. 세계 여러 곳의 관측기구들은 과거와 전혀 다른 방법으로 우주를 바라보고 있다. 즉, 빛이 아닌 중력파를 이용하여 우주를 관측하고 있는 것이다. 향후 이루어지는 천문관측의 상당부분은 전자기력이 아닌 중력의 도움으로 이루어 질 것이다.

중력만이 여분의 차원을 발견할 수 있다는 확실한 증거를 가진다. 현실세계에서 중력이 약하게 나타나는 것은 중력이 원래 약한 힘이 이어서가 아니라 중력의 일부가 여분차원으로 흘러들어갔기 때문이다. 따라서 아주 짧은 거리에서 측정을 시도하면 여분차원으로 새어나가는 것을 방지할 수 있으므로 중력은 더욱 강하게 나타날 것이다.

힉스입자는 힉스장을 이루는 최소단위의 입자로서 다른 일상적인 입자들에게 질량을 부여하는 근원으로 추정되고 있다.

초대칭을 실험적으로 확인하는 것이다. 초대칭은 스핀이 반정수만큼 다른 입자들을 초대칭 짝으로 연결시켜 주는 것이다. (스핀이 1/2인 모든 입자들은 스핀이 0인 초대칭 짝을 가지게 되고, 스핀이 1인 입자들은 스핀이 1/2인 초대칭 짝을 가지게 된다.) 초대칭의 확인은 끈이론이 앞으로 나아가기 위해 반드시 해결해야 할 숙제임을 분명하지만, 끈이론의 타당성을 입증해 주지는 못한다.

우리의 이론이나 실험에 의하면 양성자 중성자와 같은 일반적인 입자들이 우주의 5%를 이루고 있고, 25%는 암흑물질, 70%는 암흑에너지로 이루어져 있음을 확인하였다. 암흑물질과 암흑 에너지의 정체에 대해서는 알려진 것이 없다. 양성자와 중성자가 어떤 식이든 교묘하게 얽혀서 빛을 발하지 않는 형태로 뭉쳐있다고 보는 것이 자연스러운 추측이겠으나, 다른 이론에 입각해서 보면 이것도 그다지 설득력이 없다.

평평한 우주의 밀도는 임계밀도와 같아야 하는데 일상적인 물질과 암흑물질이 전체의 30%를 차지하고 암흑에너지가 나머지 70%를 점유하고 있다고 가정하면 모든 계산이 정확하게 들어맞는다.

15장 순간이동과 타임머신

시간과 공간을 마음대로 넘나들 수 있을까 ?

현재에서 미래로 : 광속으로 날아가는 우주선을 타고 우주여행을 하고 돌아옴

현재에서 과거로 : 시공간을 초월하는 웜홀을 만들면 가능

왜 현재에 미래에서 온 사람이 없는가? 아직까지 타임머신이 만들어지지 않았기 때문

16장 암시적인 미래

시간과 공간의 전망

시공간을 무한히 분할하는 것이 정말로 불가능하다면, 거기에는 우리가 모르는 초미세 구조가 숨어 있음이 분명하다. 시공간의 궁극적인 실체는 (만일 존재한다면) 더이상 분해될 수 없으며, 거시적인 관점에서 바라본 시공간은 전혀 다른 모습을 띠고 있을 것이다. 물리학자들은 정보가 태부족인 와중에도 시공간의 근원을 끈질기게 추적하여 몇 개의 단서를 더 찾아내는데 성공하였다. 그중 가장 중요한 것이 바로 블랙홀에서 찾아낸 단서이다. 블랙홀의 특성을 좌우하는 것은 질량과 전기전하, 그리고 스핀뿐이다. 블랙홀의 외형은 이렇게 단순하지만, 그 내부의 거대한 비밀창고이다. 동일한 크기의 모든 가능한 물체들 중에서 블랙홀은 가장 큰 엔트로피를 가지고 있다.

엔트로피는 물체의 외형에 변화를 주지 않으면서 내부구조의 배열을 바꾸는 방법의 수로 정의하였음

블랙홀은 최대 엔트로피를 가지는 유일한 물체이다. 주어진 공간에 주입될 수 있는 엔트로피의 최대값은 동일한 크기의 블랙홀에 내재되어 있는 엔트로피와 같다. 그렇다면 주어진 크기의 블랙홀은 어느 정도의 엔트로피를 가지고 있을까?

1970년 야콥 베켄슈타인과 스티븐 호킹은 블랙홀의 엔트로피가 부피에 비례하지 않고 사건지평선의 면적에 비례한다는 사실을 발견하였다. 블랙홀의 반지름이 두 배로 커지면 부피는 8 (2^3)으로 커지고 표면적은 4 (2^2)으로 증가한다는 것이다. 블랙홀은 동일한 크기를 가지는 어떤 물체보다 높은 엔트로피를 가지고 있지만, 그 값은 우리가 생각하는 것만큼 크지는 않다. 블랙홀의 엔트로피는 표면적에 비례하며, 주어진 영역에 존재할 수 있는 엔트로피의 최대값은 그 영역의 표면적에 비례한다.

최대 엔트로피가 중요하게 취급되는 이유는 다음과 같다.

엔트로피의 극한값은 공간의 궁극적인 구조가 불연속이라는 단서를 제공하고 있다.

엔트로피의 극한값 자체가 물리적으로 매우 중요한 의미를 지닌다.

물리학자들은 엔트로피가 최대인 공간을 완벽하게 설명할 수 있는 이론을 찾고 있다. 그것이야말로 가장 근본적인 단계에서 자연을 서술하는 이론이기 때문이다. 주어진 영역의 최대 엔

트로피가 그 영역의 부피가 아닌 면적에 비례한다면 무질서도의 원인이 되는 근본적인 자유도는 영역의 내부가 아닌 표면에 존재하게 된다. 만일 그렇다면 우주의 물리적 과정들은 우리에게 에워싸고 있는 표면위에서 진행되고 있는 셈이다.

시공간의 구성 요소를 찾는 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있는데 그 중 하나는 끈 이론에 기초를 두는 접근법이고, 다른 하나는 루프-양자중력 이론에 기초를 두고 있다.

① 끈이론 : 이미 존재하는 시공간에서 진동하는 끈이 아니라 시공간이 존재하지 않는 단계에서도 끈을 서술할 수 있는 이론체계를 만들어야 한다. 즉, 시간과 공간이 개입되지 않는 새로운 끈이론이 필요하다는 뜻이다.

② 루프양자중력 : 일반상대성이론과 양자역학을 결합하는 또 하나의 대안으로 1980년대 중반에 탄생한 이론이다. 끈이론이 작은 영역에서 출발하여 큰 영역으로 진화해 왔다고 하면 루프-양자중력은 큰 영역에서 출발하여 작은 영역으로 진화해 왔다고 할 수 있다.

끈이론은 진동하는 끈의 배경으로 시간과 공간의 존재를 이미 가정하고 있다는 점에서 성공적인 이론으로 간주하기는 좀 어렵다. 그런데 이와는 대조적으로 루프-양자중력은 시공간을 배경으로 하고 있지 않다.

지난 한 세기 동안 우리는 아인슈타인의 특수 및 일반 상대성이론과 양자역학을 통해 시간과 공간에 감춰진 많은 비밀들을 밝혀 낼 수 있었다. 시간의 팽창효과와 상대론적 동시성, 시간단면의 방향, 중력에 의해 왜곡되는 시간과 공간, 물리적 실체의 확률적 성질, 그리고 멀리 떨어져 있는 물체들 간의 얽힘 등은 19세기만 해도 상상조차 하지 못했던 새로운 발전이었다.

현대의 과학자들은 전혀 예상하지 못했던 새로운 아이디어로 무장하고 있다. 우주의 대부분을 이루는 것으로 추정되는 암흑물질과 암흑에너지 그리고 아인슈타인의 일반 상대성이론으로부터 예견되는 중력파는 우리로 하여금 우주의 구조를 근본적인 단계에서 다시 생각하도록 만들었고 힉스장의 개념은 질량의 근원을 밝혀줄 후보로 기대를 모으고 있다. 뿐만 아니라 우주의 생김새를 결정하는 인플레이션이론은 우주 전역이 균일한 밀도를 가지게 된 이유와 시간이 한 쪽방향으로만 흐르는 이유를 나름대로 설명하고 있으며, 끈이론은 점으로 생각했던 입자들에 크기를 부여함으로써 모든 입자와 힘을 하나의 이론체계로 통일시키는 기틀을 마련하였다. 끈이론의 수학에서 나타난 여분의 차원들도 앞으로 10년 이내에 대형 입자 가속기를 통해 관측 가능할 것으로 기대되고 있다. 또한, 우리의 우주가 더 높은 차원 속에서 떠다니고 있는 수많은 3-브레인 중 하나라는 브레인 세계 가설과 시간과 공간이 미세구조(시간이나 공간적 성질을 전혀 가지지 않는 요소)를 가지고 있다는 가설도 제시되어 있다.