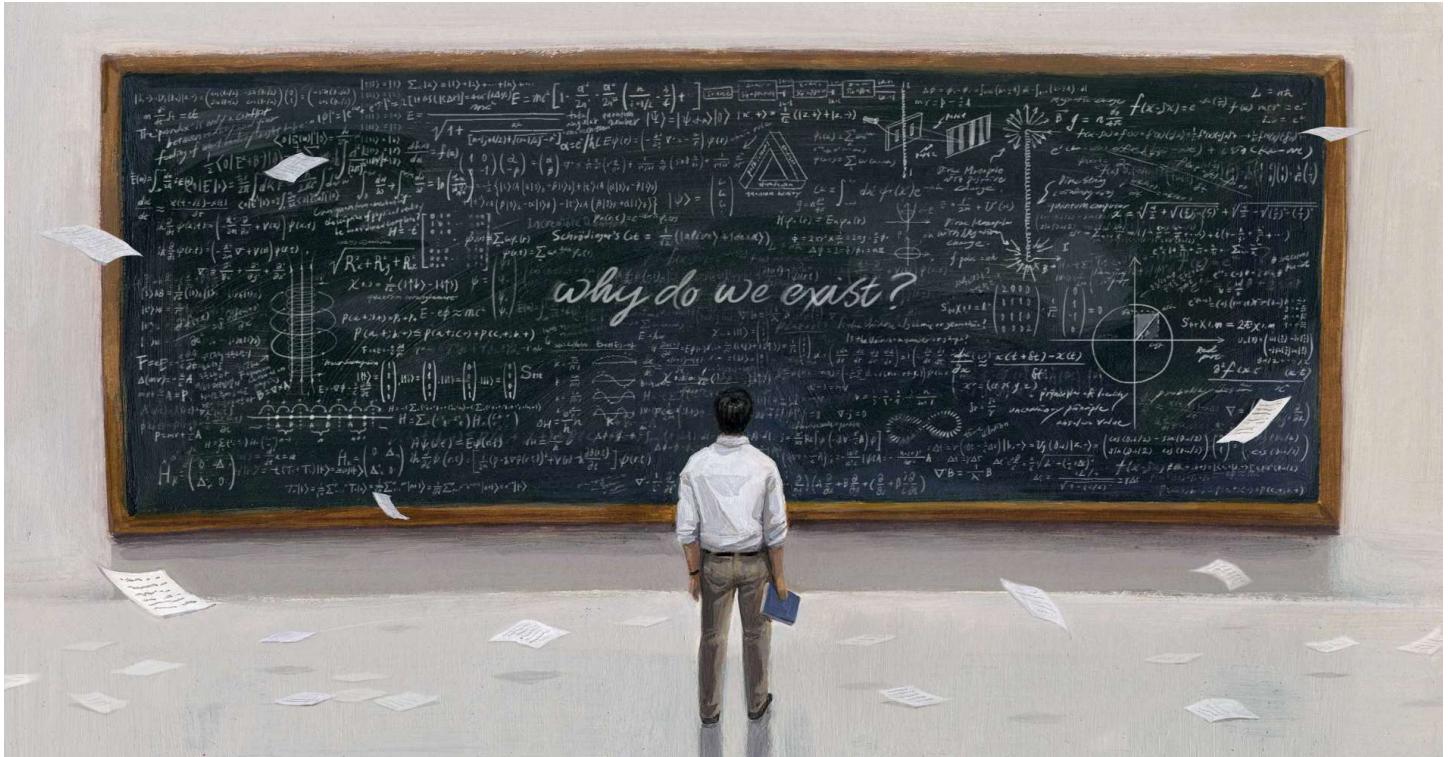


믿기 힘든 양자 Incredible Quantum [14]: 끝맺으며

2021년 11월 5일

박권



“싸움은 싸울수록 경험되지 않았고, 지나간 모든 싸움은 닥쳐올 모든 싸움 앞에서 무효였다.”

-김훈, <칼의 노래>

얼마나 많은 독자들이 눈치챘는지 모르겠지만, 지금까지 <믿기 힘든 양자>의 모든 장에는 하나의 공통점이 있다. 그것은 첫 문장이 모두 “있다”라는 동사로 끝난다는 점이다.

여기에는 두 가지 이유가 있다.

첫 번째 이유는 글쓰기의 어려움과 관련이 있다. 글을 쓰는 것은 언제나 매우 어렵다. 특히, 핸수로 4년 동안 <믿기 힘든 양자> 시리즈를 써 오면서 필자는 첫 문장을 떼는 것이 가장 어렵다고 느꼈다. 어떻게 시작해야 할지 막막할 때가 한 두 번이 아니었다. 글은 쓸수록 경험되지 않았고, 지나간 모든 글은 닥쳐올 모든 글 앞에서 무효였다.

이 난관을 극복하기 위해서 필자가 개발한 묘수가 바로 반복적인 루틴routine을 만드는 것이었다. 첫 문장이 무조건 “있다”로 끝난다면 이제 “무엇”이 있을지만 생각하면 된다. 사소해 보이지만, 이 간단한 루틴은 필자에게 엄청나게 큰 마음의 위안을 주었다.

두 번째 이유는 조금 더 중요하다. 필자가 <믿기 힘든 양자> 시리즈를 통해서 전달하고자 한 핵심과 관련이 있기 때문이다.

필자가 생각하기에, 모든 근본적인 질문은 결국 “있는 것”, 즉 존재의 의미로 귀착된다. 우리는 가끔 다음과 같은 우스개 소리를 하고는 한다. 우리는 살기 위해서 먹는가, 아니면 먹기 위해서 사는가? 우습게 들리지만 곰곰이 잘 생각해 보면 이것은 우리 존재의 의미에 관한 근본적인 질문이다.

우리는 왜 존재하는가?

Why do we exist?

언뜻 생각하면, 과학은 이 질문에 아무런 관심이 없는 듯하다.

그런데, 아니다. 정반대이다. 사실 과학은 우리 존재의 의미와 밀접하게 연결되어 있다. 조금 더 엄밀하게 말하자면, 과학은 우리가 어떻게 존재하는지에 큰 관심을 둔다.

우리는 어떻게 존재하는가?

How do we exist?

여기서 “우리”를 우리 몸을 구성하는 물질이라고 생각한다면, 이 질문은 당연하게도 과학의 영역에 속한다. 특히, 이 질문이 물질의 가장 근본적인 구성 요소인 원자의 작동 원리에 관한 것이라면 물리학은 정답을 말해 준다. 정답은 바로 양자역학이다.

그런데 여기서 “우리”를 단순히 물질이 아니라 인류, 즉 자아 의식을 지니고 우주를 이해할 수 있는 지능을 가진 존재라고 생각한다면, 이야기가 조금 복잡해진다. 특히, 이 관점에서 앞선 질문을 아래와 같이 살짝 바꾸어 볼 수 있다.

우리는 어떻게 존재할 수 있는가?

How can we exist?

이제 이 질문은 다음과 같은 이유로 “우리는 왜 존재하는가”와 밀접하게 연결된다.

우선, 만약 우리가 존재하는 것이 자연스러운 일이라면, 그것에 특별할 이유가 있을 필요가 없다. 그저 일어날 일이 일어난 것이기 때문이다. 과학은 모든 것에 자연스러운, 다시 말해서 필연적인 설명이 있기를 바란다. 따라서 이것은 과학이 선호하는 설명이다.

반면, 만약 우리가 존재하는 것이 부자연스러운 일이라면, 그것에는 모종의 특별한 이유가 있을지 모른다. 그런데 그렇게 되면 이제 질문은 과학이 아니라 종교의 영역을 넘나들게 된다.

하지만 상황을 이렇게 두 가지 경우로 구분하는 것은 인위적이다. 왜냐하면 무엇이 자연스럽거나 부자연스럽다는 것을 판단하는 것 자체가 우리의 과학 수준에 좌우되기 때문이다.

이 사실을 체감하기 위해서 필자의 개인적인 경험에서 우리나라온 예를 하나 들어 보자.

“

우리는 왜 존재하는가?

우리는 어떻게 존재하는가?

우리는 어떻게 존재할 수 있는가?

”

필자는 고등학교 때 물리 수업에서 지구의 공전이 뉴턴의 만유인력의 법칙으로부터 유도된다는 것을 배웠다. 그런데 필자는 지구의 공전 주기가 왜 하필이면 365일인지 궁금해졌다. 그리고 더 나아가 지구의 자전 주기는 왜 1일인지 궁금해졌다. 그래서 물리 선생님에게 물어보았다. 답은 싱거웠다. 지구의 공전과 자전 주기는 태양계가 형성될 때 주어진 초기 조건에 의해서 우연히 결정된다는 것이다. 특별한 이유가 없다.

비슷하게, 달이 지구의 주위를 한 바퀴 도는 공전의 주기는 특정한 일수로 정해질 이유가 없다. 물론 달의 자전 주기도 마찬가지이다.

그런데 재미있게도 달의 공전과 자전 주기는 1달로 똑같다. 왜 그럴까? 이것은 그저 초기 조건이 우연히 딱 맞은 결과인가, 아니면 필연적으로 그래야 할 이유가 있는가?

답부터 말하면, 약간의 우연과 필연적인 이유의 결합이다.

“약간의 우연”은 지구와 달이 애초에 형성될 때 충분히 가까운 거리를 두고 떨어져 있었다는 것이고, “필연적인 이유”는 이른바 조석 고정 tidal locking이라고 불리는 현상이다.

조금 더 자세하게 설명하면 다음과 같다.

지구와 달은 애초에 형성될 때 충분히 가까웠다. 이렇게 가까운 거리에서 지구와 달은 서로에게 강한 조석을 일으킨다. 다시 말해서, 지구는 달을 찌그러뜨리고, 달은 지구를 찌그러뜨린다. 특히, 지구에 비해서 질량이 작은 달은 상대적으로 많이 더 찌그러져서 계란과 같이 한 쪽으로 긴 타원체 ellipsoidal solid가 된다.

이러한 상황에서 달의 장축 major axis, 즉 타원체의 긴 부분이 지구와 달을 연결하는 선을 벗어나면 회전력 torque이 작용한다. 이 회전력은 결국 달의 장축을 지구와 달을 연결하는 선과 정렬시키게 되는데, 그렇게 되면 달의 공전과 자전 주기가 똑같아지게 된다. 이후 다양한 마찰의 효과로 지구와 달은 점점 더 멀리 떨어지게 되었지만 한번 동기화된 달의

공전과 자전 주기는 그대로 고정된다. 이것이 바로 조석 고정이다. (참고로, 태양과 지구는 너무 멀리 떨어져 있어서 조석 고정이 되지 않는다.)

정리하면, 달의 공전과 자전 주기가 똑같은 이유는 약간의 우연이 필연을 만난 결과이다.

그런데 만약 우리가 조석 고정에 대해서 잘 알지 못했다면 어땠을까? 우리는 아마 달의 공전과 자전 주기가 똑같은 이유가 그저 아주 큰 우연이거나, 아니면 그렇게 되도록 모종의 초자연적인 힘이 작용했기 때문이라고 생각했을 것이다.

필자가 생각하기에, “우리가 어떻게 존재할 수 있는가”에 대한 답도 이와 비슷하다.

구체적으로, 우리 우주는 마치 자아 의식과 지능을 지닌 고등 생명체가 존재할 수 있도록 아주 미세하게 조정된 듯 보인다. 이른바 미세 조정 fine-tuning 문제이다.

미세 조정

미세 조정 문제의 예로 “희귀 지구 rare earth” 가설이 있다.

희귀 지구 가설에 따르면 인류와 같은 고등 생명체를 탄생시킬 수 있는 행성, 즉 지구가 존재할 확률은 지극히 희박하다.

우선, 지구는 적절한 은하계의 적절한 위치에 있다. 우리 은하계의 중심부에는 거대 블랙홀이 있을 뿐만 아니라 별의 밀도가 매우 높다. 만약 지구가 은하계의 중심부에 너무 가까웠다면 블랙홀에서 나오는 엑스선 X-ray과 감마선 gamma ray, 그리고 초신성 supernovae의 폭발은 우연히 발생한 생명체를 무자비하게 몰살했을 것이다. 반대로, 지구가 은하계의 중심부에서 너무 멀었다면 초신성 등의 별에서 생성되는 무거운 원자의 밀도가 너무 낮았을 것이다. 이렇게 되면 고등 생명체에 필요한 복잡한 분자를 구성할 수 없다.

“

희귀 지구 가설에 따르면 인류와 같은 고등 생명체를 탄생시킬 수 있는 행성, 즉 지구가 존재할 확률은 지극히 희박하다.

“

비슷하게, 지구는 태양로부터 적절한 거리를 두고 떨어져 있다. 우리가 아는 한, 고등 생명체는 액체 형태의 물을 필요로 한다. 그렇게 되기 위해서 행성은 별로부터 너무 가깝거나 멀어서는 안 된다. 이렇게 적절한 거리를 두고 떨어진 지대를 “골디락스 존 Goldilocks zone”이라고 부른다.

또한 지구와 함께 태양계를 구성하는 다른 행성들은 모두 적절한 크기를 지니고 있다. 특히, 지구보다 바깥쪽 궤도를 돌고 있는 목성은 큰 질량으로 혜성 및 소행성과 같은 외부에서 들어오는 각종 위험 요소를 빨아들여서 지구를 보호한다.

마지막으로, 지구의 위성인 달의 크기가 적절하게 크다. 달은 태양계 속 모든 위성 중에서 본 행성 대비 크기가 가장 큰 위성이다. 이렇게 큰 달은 기울어진 지구의 자전축이 안정적으로 유지되도록 적절한 중력을 작용한다. 또한 큰 달은 충분한 조석간만의 차를 만들어내어 생명의 탄생지로 믿어지는 바닷물 웅덩이, 즉 원시 수프 primordial soup를 만들어 낼 수 있다.

그렇다면 이처럼 희귀한 지구는 과연 어떻게 존재할 수 있게 된 것일까? 이것은 아주 큰 우연인가, 아니면 모종의 초자연적인 힘 때문인가?

모른다.

사실, 희귀 지구 가설과는 비교할 수 없을 정도로 스케일이 훨씬 더 큰 미세 조정 문제가 있다.

바로 우주 상수 cosmological constant의 미세 조정이다.

우주 상수는 1917년 아인슈타인이 일반상대성이론에 도입한 상수이다. 아인슈타인은 우리 우주가 시간에 따라서 변함없이 일정하다고 생각했다. 이른바 정적 우주 static universe이다. 그런데 만약 중력만 존재한다면 우리 우주는 결국 수축해야 한다. 따라서 우리 우주가 변함없이 일정하게 존재하기 위해서는 중력에 의한 수축을 상쇄시키는 모종의 반발력이 존재해야 한다. 이 반발력이 바로 우주 상수이다.

이후 1929년 우주가 팽창한다는 허블의 법칙이 발견된다. 이 발견은 아인슈타인으로 하여금 우주 상수를 “일생 최대의 실수 biggest blunder”라고 부르며 철희하게 만든다. 하지만 재미있게도 우주 상수는 1998년 우주의 가속 팽창의 발견을 통해서 화려하게 부활하게 된다. 간단하게 말해서, 우주 상수가 양이면 우주는 가속 팽창을 하게 된다. 참고로, 우주의 가속 팽창을 발견한 3명의 천체물리학자인 펄먼터 Saul Perlmutter, 슈미트 Brian Schmidt, 리스 Adam Riess는 2011년 노벨물리학상을 수상하였다.

그런데 사실 가속 팽창에는 이론적으로 큰 문제가 있다. 구체적으로 말해서, 우주 상수는 0이 아니지만 0에 아주 가까운 작은 양수로 미세 조정된 듯 보인다는 것이다. 우리는 우주 상수가 이렇게 미세 조정되었을 때에만 존재할 수 있다.

조금 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

만약 우주 상수가 충분히 큰 양수였다면 우주의 팽창이 너무 빨리 일어나서 은하나 별이 탄생할 기회가 없었을 것이다. 다시 말해서, 은하나 별이 형성되기 위해서는 적절한 시간 동안에 중력 수축이 일어나야 하는데, 우주 상수가 너무 크면 그럴 여유가 생기지 않는다. 반면, 만약 우주 상수가 충분히 큰 음수였다면 우주는 은하나 별, 그리고 그 안에 고등 생명체가 생기기 전에 너무 빨리 중력 수축이 일어나서 붕괴되었을 것이다.

믿기 힘든 양자 Incredible Quantum

1. 들어가며 Introduction
2. 가장 순수한 형태의 파동 Purest Form of Wave
3. 파동 방정식 Wave Equation
4. 게이지 대칭성 Gauge Symmetry
5. 양자 삼위일체 1부 Quantum Trinity Part 1
6. 양자 삼위일체 2부 Quantum Trinity Part 2
7. 두 상태 이야기 A Tale of Two States
8. 위상의 귀환 Return of the Phase
9. 양자 얹힘 Quantum Entanglement
10. 더 높은 차원으로 To Higher Dimensions
11. 양자 물질 상태 Quantum States of Matter
12. 많음, 다른, 그리고 양자 More, Different, and Quantum
13. 상대성과 양자, 통합되다 Relativity and Quantum, Unified
14. 끝맺으며 Epilogue

우주 상수는 다른 말로 암흑 에너지^{dark energy}이다. 거칠게 말해서, 암흑 에너지는 우주 공간 자체가 지니는 진공의 영점 에너지이다. 따라서 우주 상수가 미세 조정되어 있다는 것은 진공의 영점 에너지가 양자역학적으로 미세 조정되어 있다는 것을 의미한다. 다시 한번, 이것은 아주 큰 우연인가, 아니면 초자연적인 힘 때문인가?

얼마 전에 유명을 달리한, 현시대 가장 위대한 이론 물리학자 중의 한 사람인 스티븐 와인버그 Steven Weinberg는 1987년 우주 상수의 미세 조정 문제를 이른바 인류 원리^{anthropic principle}를 이용해서 해결할 수 있다고 주장했다. 인류 원리의 핵심은 다음과 같다.

우주에 인류라는 지능을 지닌 고등 생명체가 태어나 자신들이 살고 있는 우주를 관찰하고 이해하려면 그런 고등 생명체의 탄생에 용이한 환경이 전제되어야 한다. 이 전제 조건을 만족하기 위해서는 우주 상수가 너무 크지도, 너무 작지도 않은 적절한 값이어야 한다. 즉, 우리가 우주 상수는 왜 이렇게 미세 조정되어 있는가 하고 묻는 것 자체가 그 이유를 설명한다는 것이다.

혹시 이전에 인류 원리에 대해서 들어보지 못한 독자들은 지금쯤 적잖이 당황했을지 모르겠다. 인류 원리는 정상적인 과학의 원리로 느껴지지 않기 때문이다.

사실, 어찌 보면, 인류 원리는 액션 영화의 원리에 가깝다.

액션 영화에서 주인공은 왜 아무리 총알이 빗발쳐도 쉽사리 죽지 않을까? 그 이유는 간단하다. 주인공이 영화 중간에 죽는다면 그 사람은 더이상 주인공이 아니기 때문이다. 혹은 영화 중간에 주인공이 죽는 액션 영화는 애초에 만들어지지 않기 때문이다. 결론적으로, 액션 영화의 주인공은 쉽게 죽을 수 없다.

엄밀하게 말해서, 인류 원리는 동어반복 tautology이다. 인류 원리는 모든 것을 설명하는 것처럼 보이지만 사실은 아무것도 설명할 수 없다. 그리고 그렇기 때문에 인류 원리는 틀릴 수조차 없다. 인류 원리는 그저 아주 큰 우연을 결과적으로 보니 우연이 아니었다고 주장하는 것에 불과하다.

그렇다면 우주 상수의 미세 조정 문제를 해결하기 위해서 모종의 초월적 존재가 필요한가? 즉, 신이 개입하여야 하는가? 그럴 수도 있고 아닐 수도 있다. 다만, 만약 그렇다면 이것은 신이 우주 상수를 결정하는 초기 조건에 개입하고 그 이후로는 우주의 작동에 관여하지 않는다는 것을 의미한다. 이와 관련해서 앨런 튜링 Alan Turing은 다음과 같은 말을 했다.

“과학은 미분 방정식이다. 종교는 경계 조건이다.”

Science is a differential equation. Religion is a boundary condition.

여기서 우주의 모든 작동 원리는 미분 방정식에 의해서 기술된다는 사실을 기억하자. 다시 말해서, 뉴턴의 운동 방정식, 맥스웰의 방정식, 슈뢰딩거 방정식, 아인슈타인 방정식 등은 모두 미분 방정식이다. 그런데 미분 방정식을 풀기 위해서는 경계 조건, 혹은 초기 조건이 필요하다. 경계 및 초기 조건은 외부에서 주어지는 것이므로 과학의 영역이 아니다. 튜링이 말했듯이, 이것은 종교의 영역일지 모른다.

”

양자역학은 우연과 필연이 믿기 힘들 만큼 절묘하게 어우러진 이론이다.

”

결론적으로, 우리는 외부에서 주어지는 초기 조건의 영향을 받을 수밖에 없다. 그리고 그 이유가 인류 원리든지 초월적 존재든지 초기 조건은 우리가 존재할 수 있게끔 미세 조정되어 있다.

다만, 어떤 숭고한 “목적”이 있는지 모르겠으나 미세 조정된 초기 조건은 현재 우리에게 기막힌 우연으로 다가온다. 반면, 과학은 필연을 추구한다. 가능할지 모르겠으나, 우리가 그리는 과학의 본모습은 앞선 달의 조석 고정 문제와 같이 이 기막힌 우연을 약간의 우연과 필연의 만남으로 바꾸어 설명하는 것이다.

이런 관점에서 보면, 양자역학은 우연과 필연이 믿기 힘들 만큼 절묘하게 어우러진 이론이다. 그래서 그런지 양자역학은 우리 우주를 놀라울 정도로 정확하게 기술한다.

필자는 그동안 <믿기 힘든 양자> 시리즈를 통해서 양자역학이 우리 우주를 어떻게 기술하는지 자세하게 이야기했다. 이제 그 내용을 총정리하고자 한다.

총정리

<믿기 힘든 양자>는 총 14개의 장으로 이루어져 있다.

1. 들어가며 Introduction

영화 <컨택트 Arrival>에서 루이스는 외계인과 소통하는 방법을 배우면서 서서히 시공간에서 일어나는 모든 일을 한꺼번에 훤叵어 볼 수 있게 된다. 이것은 그녀가 외계인처럼 양자역학을 직관적으로 이해할 수 있게 되었다는 것을 의미한다. 양자역학에 따르면, 일어날 수 있는 일은 모두 동시에 일어난다. 그리고 놀랍게도 일어날 수 있는 모든 일은 서로 간섭을 일으킨다.

2. 가장 순수한 형태의 파동 Purest Form of Wave

양자역학에서 모든 일은 파동 함수에 의해서 기술된다. 그런데 <어린 왕자>의 여우가 말한 대로 정말 중요한 것은 눈에 안 보인다. 파동 함수도 그렇다. 파동 함수는 단순히 확률이 아니라 실수와 허수라는 두 숫자로 이루어진 복소수로 주어진다. 눈에 안 보일지라도 파동 함수는 물리학자들의 마음에 어떤 강력한 이미지를 떠오르게 한다. 바로 오일러의 공식이 말해주는 가장 순수한 형태의 파동이다.

3. 파동 방정식 Wave Equation

과학은 미분 방정식이다. 파동 함수는 슈뢰딩거 방정식이라는 미분 방정식을 만족한다. 간단하게 말해서, 슈뢰딩거 방정식은 드브로이의 파동-입자 이중성 wave-particle duality과 아인슈타인의 광전 효과 photoelectric effect에 관한 두 이론이 결합하여 탄생한다. 특히, 미분 방정식의 관점에서 슈뢰딩거 방정식은 시간에 대한 1차 미분 방정식이라는 사실이 중요하다. 파동 함수의 확률론적 해석과 밀접하게 연결되기 때문이다.

4. 게이지 대칭성 Gauge Symmetry

슈뢰딩거 방정식에는 기묘한 자유도가 숨어있다. 이 자유도는 파동 함수의 절대값의 제곱이 실제로 측정 가능한 확률이라는 성질에 기인한다. 다시 말해서, 파동 함수의 위상 phase을 임의로 바꾸더라도 슈뢰딩거 방정식이 지니는 수학적 구조와 그것이 기술하는 물리량에는 아무런 변화가 없어야 한다. 이것을 게이지 대칭성 gauge symmetry이라고 부른다. 이렇듯 게이지 대칭성은 온전하게 양자역학적 성질이다. 그런데 게이지 대칭성은 양자역학이 탄생하기 전 이미 맥스웰의 방정식 Maxwell's equations에 담겨 있었다. 놀랍게도 고전 전자기학은 양자역학의 출현을 미리 암시하고 있었던 것이다. 우리가 아는 한, 게이지 대칭성은 전자기력을 포함한 우주의 모든 근본적인 힘의 원리다. 결국, 양자역학은 믿기 힘들 만큼 불가능해 보이지만 우리가 존재하기 위해서 반드시 필요한 것이다.

5. 양자 삼위일체 1부 Quantum Trinity Part 1

양자역학은 마치 펜로즈의 “불가능한 삼각형 Impossible Triangle”처럼 언뜻 공존하는 것이 불가능해 보이는 서로 다른 세 관점이 하나의 전체를 이룬다. 세 관점은 바로 (1) 파동 함수와 슈뢰딩거 방정식으로 기술되는 파동 역학 wave mechanics, (2) 연산자와 하이젠베르크 방정식으로 기술되는 행렬 역학 matrix mechanics, (3) 파인만의 경로 적분 path integral이다. 이 중에서 경로 적분에 따르면, 입자는 모든 가능한 경로를 거쳐서 이동하며, 입자의 확률을 주는 파동 함수는 모든 가능한 방식으로 출력된다. 이것은 다름 아니라 영화 <컨택트>에서 묘사된 양자역학의 관점이다.

6. 양자 삼위일체 2부 Quantum Trinity Part 2

우주는 수인가 모양인가? 조금 생뚱맞게 들리는 이 질문은 양자역학의 본질에 대해서 묻는다. 파동 함수 자체는 실제로 측정할 수 없다. 하이젠베르크는 양자역학이 실제로 측정 가능한 물리량으로 표현되어야 한다고 생각했다. 양자역학에서 모든 측정 가능한 물리량은 연산자로 표현된다. 그리고 연산자는 수학적으로 행렬의 형태를 띤다. 행렬 역학은 이러한 행렬의 동역학을 다루는 양자역학의 이론 형식이다. 행렬 역학의 관점에서 보면 우주는 행렬로 표현되는 수이며, 그것의 동역학은 연산자들 사이의 대수 관계에 의해서 결정된다.

7. 두 상태 이야기 A Tale of Two States

오컴의 면도날에 의해서 불필요한 장식을 모두 덜어낸 가장 핵심적인 양자역학 문제는 무엇일까? 필자가 생각하기에, 그것은 두 상태 문제이다. 우리는 두 상태 문제를 통해서 행렬의 대각화 diagonalization, 슈뢰딩거의 고양이, 슈테른-게를라흐 실험 Stern-Gerlach experiment, 파울리 행렬 Pauli matrix, 그리고 스핀 spin 등과 같은 양자역학의 가장 중요한 개념들을 배울 수 있다. 아직 끝이 아니다. 두 상태 이야기는 현재 진행형이다. 두 상태 문제의 진가는 최근 베리 위상 Berry phase 과 위상 물질 topological matter을 통해서 드러나고 있다.

8. 위상의 귀환 Return of the Phase

역사적으로 위상이라는 화두는 반복해서 현대 물리학 연구의 중심으로 화려하게 귀환했다. 구체적으로, 위상은 파동-입자 이중성을 보여주는 영의 이중 슬릿 실험 Young's double slit experiment, 벡터 퍼텐셜의 실재성을 드러내는 아하로노브-봄 효과 Aharonov-Bohm effect, 가공의 자기 홀극 magnetic monopole이 야기하는 베리 위상, 그리고 위상 절연체 topological insulator까지 마치 타임 슬립에서처럼 우리에게 계속 반복해서 돌아왔다. 이제 우리는 다음과 같은 질문을하게 된다. 앞으로 위상은 또 다시 어떻게 귀환할 것인가?

9. 양자 얹힘 Quantum Entanglement

슈뢰딩거의 고양이는 원래 삶과 죽음의 중첩으로 드러나는 양자 얹힘의 비합리성을 비판하기 위해서 고안된 사고 실험이다. 비슷하게, 아인슈타인 Einstein, 포돌스키 Podolsky, 로젠 Rosen은 양자 얹힘과 파동 함수의 확률론적 해석을 비판하기 위해서 EPR 역설을 고안한다. EPR 역설에 따르면, 양자역학은 빛보다 빠른 “유령과 같이 으스스한 원거리 작용 spooky action at a distance”을 야기하므로 상대성 이론과 양립 가능하지 않다. 하지만 EPR 역설은 실제 역설이 아니며, 양자역학이 아닌 이른바 “숨겨진 변수”를 가지는 고전적인 확률 이론으로도 설명할 수 있다. 그런데 놀랍게도 이러한 고전적인 확률 이론은 반드시 만족해야 하는 부등식 Bell's inequality이다. 반면, 양자

역학은 벨의 부등식을 만족할 필요가 없다. 결국, 양자역학과 고전적인 확률 이론의 대결은 벨의 부등식의 위배가 실험적으로 검증됨으로써 양자역학의 승리로 끝나게 된다. 실패한 EPR 역설은 이후 아이러니하게도 양자 얹힘의 두 가지 경이로운 응용으로 이어지게 된다. 바로 양자 텔레포테이션^{quantum teleportation}과 양자 컴퓨터^{quantum computer}이다.

10. 더 높은 차원으로 To Higher Dimensions

소설 <플랫랜드>의 주인공 A 스웨어는 2차원 세계에 살고 있다. 그에게 3차원은 상상하기 어렵지만, 1차원과 0차원은 싱거울 정도로 쉽다. 두 상태 문제는 말하자면 “거의 0차원”에서 발생하는 양자역학 문제이다. 우리가 살고 있는 3차원으로 올라가기 위해서 우리는 상상력을 동원해 많은 상태 문제를 풀어야 한다. 여기서 많은 상태 문제는 규칙적인 격자 구조 속에서 움직이는 입자의 동역학을 기술하는 양자역학 문제이다. 결론적으로, 많은 상태 문제의 대각화는 격자 속 입자가 블로흐 파동^{Bloch wave}을 이루며, 그것의 에너지가 다양한 형태의 에너지띠^{energy band}를 형성한다는 사실을 말해 준다. 예를 들어, 2차원 벌집 격자에서 발생하는 그래핀^{graphene}은 디랙 원뿔^{Dirac cone} 구조의 에너지띠를 형성한다. 놀랍게도, 그래핀 속 전자는 질량이 없는 빛처럼 행동할 수 있다.

11. 양자 물질 상태 Quantum States of Matter

물리학의 역사는 거칠게 보면 “물질은 무엇인가”라는 질문에 답을 하는 과정이다. 물질은 가장 기본적으로 원자로 구성된다. 양자역학은 원자가 어떻게 안정된 전자 구조를 지닐 수 있는지 설명한다. 구체적으로, 안정된 전자 구조는 시간 독립적인 슈뢰딩거 방정식의 해인 에너지 고유상태^{eigenstate}로 주어진다. 특히, 다른 모든 원자를 이해하는 데에 바탕이 되는 수소 원자의 에너지 고유상태 문제는 정확히 풀리는 몇 안 되는 양자역학 문제 중의 하나이다. 더 나아가, 원자는 금속 결합을 통해서 규칙적인 격자 구조를 지니는 고체를 형성할 수 있으며, 그 안에서 전자는 페르미 액체를 이룬다. 모든 물질은 양자역학 없이 존재할 수 없다. 하지만 진정한 의미에서 양자 물질은 위상의 효과가 거시 스케일에서 살아남는 물질이다. 이러한 물질은 입자의 개수가 많아질 때 발생할 수 있다.

12. 많음, 다른, 그리고 양자 More, Different, and Quantum

자유 의지와 결정론은 양립 가능한가? 어찌 보면 결정론과 거의 동의어로 느껴지는 과학은 우주의 모든 일이 정확한 인과 관계에 의해 맞물려 돌아간다고 말한다. 하지만 결정론은 생각보다 그리 굳건하지 않다. 바로 고전역학의 카오스^{chaos}와 양자역학의 코펜하겐 해석^{Copenhagen interpretation} 때문이다. 다시 말해서, 카오스와 코펜하겐 해석은 궁극적으로 열역학 제2 법칙을 야기함으로써 정확한 인과관계의 사슬을 끊어버린다. 하지만 이것은 또 다른 재앙이다. 왜냐하면 열역학 제2 법칙은 결국 우주의 모든 질서가 사라진다는 것을 의미하기 때문이다. 다행인 것은 일시적일지도라도 자발적 대칭성 붕괴^{spontaneous symmetry breaking}라는 메커니즘을 통해서 다시 새로운 질서가 나타날 수 있다는 사실이다. 자발적 대칭성 붕괴의 근원은 상호작용, 즉 힘이다. 그리고 우주의 모든 근본적인 힘은 게이지 대칭성에 기인한다. 따라서 근본적으로 우주의 모든 새로운 질서는 양자역학 덕분에 존재할 수 있다.

하지만 양자역학은 우리에게 힘이라는 선물을 준 후에 눈에 띄지 않는 미시 세계로 사라져 버린다. 그렇다면 양자역학은 거시 세계에서 반드시 사라져야 하는가? 아니다. 거시 스케일에서 위상의 효과가 살아남는 양자 물질들이 존재한다. 예를 들어서, 페르미온 양자 물질의 대표인 양자 홀 상태^{quantum Hall state}와 보존 양자 물질의 대표인 보즈-아인슈타인 응축^{Bose-Einstein condensate} 및 초유체^{superfluid}가 있다. 특히, 또 다른 양자 물질인 초전도체^{superconductor}는 매우 특별하다. 초전도체가 게이지 대칭성의 자발적 붕괴, 다시 말해서 힙스 메커니즘^{Higgs mechanism}이라는 우주의 비밀을

우리에게 알려주기 때문이다. 즉, 우리 우주의 모든 물질은 힙스 메커니즘을 통해서 질량을 가질 수 있다. 여기 아주 묘한 점이 있다. 게이지 대칭성의 존재와 붕괴는 각각 우리 우주가 존재하기 위해서 가장 필수적인 두 요소인 힘과 질량을 준다는 점이다. 다시 한번, 우리 우주는 정말 양자역학 덕분에 존재할 수 있다.

13. 상대성과 양자, 통합된다 Relativity and Quantum, Unified

우주의 비밀에 가까이 다가가면 갈수록 우리는 온갖 종류의 무한을 맞닥뜨리게 된다. 그런데 묘하게도 많은 경우에 무한은 상대성 이론과 밀접하게 연결되어 있다. 특히, 상대성 이론과 양자역학의 통합은 다양한 종류의 예상치 못한 무한을 발생시킨다. 재미있는 것은 무한의 극복을 통해서 어쩌면 현대 물리학의 가장 중요한 발전들이 이루어져 왔다는 사실이다. 우선, 슈뢰딩거 방정식은 상대론적 에너지-운동량 관계식에 맞추어 디랙 방정식 Dirac equation 으로 수정될 수 있다. 디랙 방정식에 따르면, 진공은 사실 비어있는 것이 아니라 무한히 펼쳐진 음의 에너지 준위들이 모두 꽉 채워진 상태이다. 이를바 디랙 바다 Dirac sea 이다. 디랙 바다를 통해서 우리는 반물질 antimatter 이라는 매우 놀라운 발견을 하게 된다.

진공에는 디랙 바다 외에 또 다른 종류의 무한이 숨어있다. 직관적으로 말해서, 진공은 양자역학적으로 생겼다 없어졌다를 반복하는 광자들로 가득 차 있다. 이러한 광자의 양자요동 quantum fluctuation 으로 인해서 진공은 영점 에너지 zero-point energy 라고 불리는 바닥상태 에너지를 지니게 된다. 놀랍게도, 진공의 영점 에너지는 언뜻 무한으로 발산하지만 실제 실험적으로 측정가능한 효과를 만들어낼 수 있다. 이것은 다름 아니라 카시미르 효과 Casimir effect 이다. 또한 진공의 양자요동은 전자를 흔들 수 있다. 이를바 램 이동 Lamb shift 라고 불리는 이 현상은 우리로 하여금 무한을 체계적으로 극복할 수 있는 새로운 양자 이론을 개발하도록 이끈다. 이 새로운 양자 이론의 이름은 양자장론 quantum field theory 이다.

14. 끝맺으며 Epilogue

모든 근본적인 질문은 결국 존재의 의미로 귀착된다. 우리는 어떻게 존재할 수 있는가? 놀랍게도, 우리 우주는 우리가 존재할 수 있도록 미세하게 조정된 듯 보인다. 그 이유가 인류 원리든지 초월적 존재든지 이것은 우리에게 기막힌 우연으로 다가온다. 반면, 과학은 필연을 추구한다. 양자역학은 우연과 필연이 믿기 힘들 만큼 절묘하게 어우러진 이론이다. 그래서 그런지 양자역학은 우리 우주를 놀라울 정도로 정확하게 기술한다.

감사

이제 정말 <믿기 힘든 양자> 시리즈를 끝맺을 때가 되었다. 감사의 말을 남기고 싶다.

<믿기 힘든 양자>는 2018년 고등과학원이 발행하는 과학 전문 웹진인 HORIZON이 창간되면서 시작되었다. 당시 필자는 HORIZON의 편집위원 중의 한 명이었다. 필자가 편집위원이 된 이야기는 한국물리학회의 홍보 잡지인 <물리학과 첨단기술> 2018년 9월호의 “과학의 창”이라는 코너에 필자가 쓴 글에 자세히 나와 있다. 짧게 요약하면 다음과 같다.

일은 우연히 벌어졌다. 필자는 2017년 어느 날 당시 고등과학원에 새로 부임하신 이용희 원장님을 비롯한 여러 교수님들과 구내식당에서 점심 식사를 하고 있었다. 항상 그렇듯이 우리는 세상 돌아가는 이야기를 하고 있었다. 직업이 직업이다 보니 자주 나오는 화제 중의 하나는 과학, 특히 물리학의 앞날에 관한 것이고는 했다. 그날도 원장님은 고등과학원이 물리학의 앞날을 위해서 이바지할 수 있는 방법이 무엇인가라는 화두를 던졌다.

많은 물리학자들은 물리학이 위기에 처했다고 생각한다. 이러한 생각의 가장 큰 근거는 물리학이 예전만큼 학생들에게 인기가 없으며, 이에 교육이 점점 더 부실해지고 있다는 것이다. 이것은 악순환이다. 인기가 없으니 많이 가르칠 필요가 없고, 많이 가르치지 않으니 배울 기회가 없다. 그리고 배울 기회가 없으니 인기는 더 없어진다.

필자가 생각하기에, 이러한 악순환의 고리를 끊기 위해서는 물리학자들이 대중이 이해할 수 있는 쉬운 글로 물리학을 설명해야 한다. 물론 쉽지 않은 일이다. 하지만 물리학자들도 한때는 물리학을 동경하던 대중의 한 사람이었으므로, 정말로 노력한다면 어렸을 때의 마음으로 돌아가 물리학에 대한 진심을 대중에게 온전히 전달할 수 있을 것이다. 그리고 그렇게 되어 대중이 물리학을 이해하는 수준이 높아진다면 점점 더 고차원적인 물리 이야기를 해도 대중이 따라올 수 있을 것이다.

필자는 몰랐다. 원장님과 이런 대화를 나누는 동안 필자는 이미 고등과학원에서 발행하게 될 웹진의 편집위원으로 임명되었다던 사실을... 필자는 그렇게 편집위원이 되었고 HORIZON은 태어나게 된다. (참고로, HORIZON은 필자가 나중에 지은 이름이다.) 이 자리를 빌어 HORIZON을 탄생하게 해 주신 이용희 전 원장님께 깊은 감사의 마음을 전하고 싶다.

어찌 보면, <믿기 힘든 양자>는 앞으로 HORIZON에 실릴 글들이 나아갈 방향을 보여주어야 한다는 사명감에 쓰였다.

HORIZON의 발간을 준비하면서 가장 어려웠던 것 중의 하나는 대중성과 전문성 사이에서 HORIZON이 추구하는 적절한 균형점을 찾는 일이었다. 이것은 HORIZON의 정체성에 관계된 중요한 일이었다.

HORIZON은 보통의 대중 과학서보다 높은 수준의 전문성을 추구한다. 그렇다면 이 목표를 원고 청탁할 때 작가에게 어떻게 설명할 수 있을까? 가장 직접적인 방법은 예시를 보여주는 것이다. 앞서 말했듯이, <믿기 힘든 양자>는 그러한 예시를 보여주기 위해서 쓰였다.

물론 그것이 다는 아니다. 필자는 오래전부터 양자역학에 대해서 책을 쓰는 것이 꿈이었다. 필자는 복잡한 수학 공식 너머에 존재하는 아름다운 양자역학의 세계를 최대한 있는 그대로 독자들에게 보여주고 싶었다. 그래서 양자역학에 관한 연재글을 쓰겠다고 자처했다. 물론 그때는 <믿기 힘든 양자>가 이렇게 4년이나 이어질 정도로 큰일이 될 줄은 몰랐다.

필자의 이런 무모한 프로젝트를 처음부터 지금까지 적극적으로 지원해 주시고 계신 HORIZON 편집위원장 국형태 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리고 싶다. 또한 다른 여러 편집위원분들, 고등과학원 계산과학부 현창봉 교수님, 성균관대 물리학과 한정훈 교수님, 한양대 철학과 이상욱 교수님, 그리고 KAIST 수리과학과 엄상일 교수님께도 심심한 감사의 말씀을 드린다.

그리고 빠뜨릴 수 없는 중요한 분이 있다. HORIZON의 실무를 담당하고 있는 고등과학원 홍보 담당 박소미 씨다. 모든 HORIZON 글의 발행 및 교정은 전적으로 소미 씨의 손에 달려있다. 특히, HORIZON의 가장 큰 자랑거리 중의 하나인 아름다운 일러스트는, 훌륭한 일러스트 작가님을 섭외하고 원고 내용에 딱 맞는 아이디어를 구상하는 소미 씨의 안목에서 나오고 있다. 필자도 소미 씨와 함께 <믿기 힘든 양자>의 일러스트를 구상하면서 재미있었던 기억이 많이 있다. 누구에게보다 특별한 감사를 드리고 싶다.

마지막으로, <믿기 힘든 양자> 시리즈는 처음 바랐던 것 이상의 많은 관심을 받았다. 필자 개인적으로는 진심이 독자들에게 닿은 것 같아서 큰 감동을 받았다. 그동안 부족한 글을 읽어준 독자분들에게 이 글을 바친다.