거시 세계와 양자 현상: Schrödinger 고양이

DOI: 10.3938/PhiT.21.051

이진형

Macroscopic World and Quantum Phenomena: Schrödinger's Cat

Jinhyoung LEE

As we are accustomed to everyday life, we may find quantum phenomena to be strange. If quantum phenomena were to happen often in our macroscopic world, we would react as if we had seen a ghost. A person to whom we were talking could move to another seat out of our sight in a moment, or his/her face could change. We might question if we are who we are. Fortunately experiencing quantum phenomena in everyday life is extremely hard. However, interestingly, quantum physics predicts that quantum phenomena can occur in the macroscopic world, regardless of our everyday experience. If that prediction is correct, why is experiencing quantum phenomena hard? Such a seemingly contradictory discussion was clearly raised by Schrödinger in his thought experiment, the so-called 'Schrödinger cat paradox.' Haroche's group and Wineland's group have independently performed experiments on the paradox. In this article, I discuss the historical background and the physical implications of the Schrödinger cat paradox.

일상에 익숙한 사람들에게 양자 현상은 참으로 기묘하다고 생각할 만하다. 양자 현상이 지금 당장 거시 세계에서도 빈번히 발생한다면, 사람들은 귀신을 본 듯 소스라치게 놀랄 것이 분명하다. 잠시 한눈을 판 사이에 대화 중이던 사람이 딴 의자에 앉아

있고, 눈을 깜빡이면 모습이 변하고... 이쯤 되면 내가 나인지도 의심하게 되지 않을까? 다행인지 불행인지 (아주 특별한 경우를 빼고) 양자 현상을 일상에서 경험하기란 매우 어렵다. 재미있는 점은 우리의 경험 여부와 상관없이 양자 물리학 이론은 거시 세계에서도 얼마든지 양자 현상이 일어날 수 있다고 예측한다. 만약 이 예측이 옳다면, 왜 양자 현상을 우리는 경험하지 못할까? 모순처럼 보이는 이러한 사실을 보이기 위해, Schrödinger는 'Schrödinger 고양이 역설'이란 사고 실험을 제안하였으며, 2012년 노벨 물리학상을 수상한 Haroche 교수와 Wineland 박사는 이에 대한 실험을 수행하였다. 저자는 이 글을 통해 Schrödinger 고양이 역설에 대한 배경과 의미를 서술하고자 한다.

머릿말

2012년 10월 9일, Serge Haroche 교수와 David J. Wineland 박사가 노벨 물리학상을 수상하였다. 노벨상 위원회 보도 자료에 따르면, "양자 세계에서 입자 제어(particle control in a quantum world)"에 관한 업적이 수상 이유라고 제시하였다. 좀더 구체적으로 "두 수상자는 이전까지 도달 하리라 생각하지 못했던, 양자역학적 본성을 유지한 채 '개별 입자를 측정하고 조작하는 방법'을 독립적으로 발명하고 발전 시켰다"^[1]라고 적시하였다. 두 사람의 업적에는 Schrödinger 고양이 역설과 관련한 (각각 광자와 이온을 이용한) 실험도 포함되어 있다.^[1] 이 글은 Schrödinger 고양이에 관한 실험의 배경과 의미를 설명하기 위해 쓰였다.

양자 물리학의 기초 개념

1. 양자 현상의 특성

양자 물리학(quantum physics)은 전자나 원자와 같은 미시 세계(microscopic world)에서 일어나는 현상을 설명하기 위한 이론 체계이다.^[2] 거시 세계(macroscopic world)의 현상과 달

저자약력

이진형 교수는 서강대학교 물리학과 이학박사(2000)로 서강대학교 BK21 연구원(2000-2001), 서울시립대학교 양자정보처리연구단 책임연구원(2001-2002), 영국 Queen's University Research Fellow(2001-2003)를 거쳐, 현재 한양대학교 물리학과 교수(2003-)로 재직 중이다. (hyoung@hanyang.ac.kr)

리 미시 세계의 현상은 몇 가지 다른 특성을 갖고 있다. 중요한 특성 중 하나는 에너지나 각운동량 같은 물리량(observable)이 거시 세계에서 관측되는 것과 달리 불연속 값들 중 하나가 검출된다. 이는 거시 세계의 경우와 다르다. 예를 들어 야구공은 처음 던지는 속도를 바꾸면 에너지가 달라지는데, 가능한 에너지 값은 유리수와 무리수를 포함한 임의의 실수 중 하나로 연속적이다. 이와 달리 원자 내 전자와 같은 미시 물리계(system)는 에너지와 각운동량 값의 분포가 각각 불연속(discrete)이다.²⁾ 이를 “물리량(에너지 혹은 각운동량 등)이 양자화(quantize)되어 있다”고 말한다. 또한 물리량 값의 차이(때로는 양자화된 물리량이 있는 물리계 그 자체)를 양자(quantum)라고 부른다.

또 다른 중요한 특성이 있는데, ‘동일한 조건’에 있음에도 불구하고, 불연속인 검출 값이 측정 때마다 달라진다. 달리 말하면 반복 측정(repeatable test)에서 검출 값의 재현성(reproducibility)이 없다. 이때 어떤 값이 검출되는지에 대한 그 어떤 규칙도 발견할 수 없고 마치 우연히 결정되는 듯하다. 물론 예외가 있는데, 미소 물리계를 아주 특별한 조건 하에 두면 특정 값만 검출되게 할 수 있다.³⁾ 하지만, 일반적인 조건하에서 검출 값을 특정짓는 규칙은 없고, 단지 검출 값들의 확률만 결정할 수 있다. 이런 의미에서 “미소 물리계는 ‘비결정론(indeterminism)’ 법칙을 따른다,” 혹은 “미소 물리계는 ‘통계적 결정론(statistical determinism)’ 법칙을 따른다”고 말한다.²⁾ 한편, 검출 값이 재현되지 못하는 이유를 측정 장치와의 상호작용 (혹은 측정하려는 행위 그 자체) 때문이라고 보기도 한다. 예를 들어 Heisenberg는 광학 현미경 사고 실험에서 (1) 전자의 위치를 정확히 측정하려면 파장이 매우 짧은 빛을 사용해야 하고 (2) 매우 짧은 파장의 빛은 운동량이 매우 크기 때문에 (3) 관찰 대상인 전자의 운동량을 크게 변화시킨다고 설명한 적이 있다.³⁾ (이것을 불확정성 관계와 연결하려는 시도에 큰 이견이 있을 수 있지만) Heisenberg의 현미경 사고 실험이 시사하는 바는 “미시 물리계는 측정에 의해 크게 영향 받는다”는 것이다. 이는 거시 세계 현상과 크게 다르다. 야구공을 아무리 쳐다봐도 그 위치나 운동량이 달라지진 않는다.

미시 현상의 중요한 또 다른 특성은 양자 간섭이다. 통상적으로 간섭은 파동의 주요 성질로 입자와 파동을 구별하는 중요한 근거 중 하나이다. (예를 들어, 빛이 입자인지 파동인지에 대한 오랜 논란은 Young이 수행한 쌍슬릿 실험에서 파동으로 매듭지어졌다.⁴⁾ 전자는 입자로 간주되었는데, 이는 Millikan의 기

름 방울 실험⁵⁾ 등에서 대전된 물체의 전하가 전자 전하의 정수 배로 양자화되어 있음이 밝혀졌기 때문이다. 이는 전자가 더 작은 전하 입자로 쪼개지지 않음(indivisibility)을 시사한다. 거시 세계에서, (관찰 도중) 쪼개지지 않는 물리계(입자)는 간섭이라는 현상을 보이지 않는다. 빛이나 물결 대신 야구공으로 Young의 쌍슬릿과 같은 실험을 해보면, 슬릿 뒤 벽에 나타나는 야구공의 흔적은 (파동과 달리) 간섭 무늬가 아니다. 대신 슬릿 바로 뒷 부분에 (슬릿 통과시) 굴절된 야구공 흔적이 각각 있을 뿐이다. 쪼개진다는 성질이 간섭을 일으키기에 충분한 것은 물론 아니지만 간섭을 위해 필요하다 (다르게 말하면, 쪼개지지 않는 거시 물리계는 간섭을 보이지 않는다). 거시 세계 파동은 모두 쪼개질 수 있으며, 한 곳에 모이면서 간섭을 한다.

쪼개지진 않지만 미시 세계 입자인 전자로 쌍슬릿 실험을 하면 어떻게 될까? 전자를 한번에 하나씩 보내 슬릿 뒤 스크린에서 검출하면, 처음 몇 번 시행 결과로는 간섭 무늬를 보이지 않는다. 차라리 벽에 있는 야구공 흔적과 비슷하다. 하지만, 계속 반복 시행하면 신기하게도 점차 간섭무늬를 갖춰 간다.⁶⁾ 즉, “미시 물리계는 쪼개지지 않는 경우에도 ‘반복 시행’을 하면 ‘간섭’을 한다.” 도대체 쪼개지지 않는 전자는 무엇과 혹은 무엇이 간섭하는 걸까? 이에 대해 Dirac은 “[양자 물리계]는 자기 자신과 간섭한다”고 표현하였다.⁷⁾ 이러한 간섭은 거시 세계에서 나타나는 파동의 특성과 분명 다르며 이를 ‘양자 간섭’ 혹은 보다 일반적으로 ‘양자 결맞음(quantum coherence)’이라고 말한다.

2. 양자 중첩 상태

미시 세계 현상을 기술 및 설명하기 위해 물리학자들은 양자 물리학이란 매우 독특한 물리 이론을 체계화하기에 이르렀다. 우선 앞서 언급한 특성을 요약하면 다음과 같다.

- C.1. (양자화) 검출 값이 불연속인 물리량
- C.2. (통계적 결정) 물리량의 검출 값은 확률로 결정
- C.3. (양자 간섭) 입자인 경우에도 간섭 현상 발생

REFERENCES

- [1] S. Haroche, Phys. Today **51**, 36 (1998).
- [2] A. Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods* (Kluwer Academic Publishers, 1995).
- [3] W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory* (1930), p. 21.
- [4] T. Young, *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807), Vol. 1, p. 464.
- [5] R. A. Millikan, Phys. Rev. **2**, 109 (1913).
- [6] O. Donati, G. F. Missiroli and G. Pozzi, Am. J. Phys. **41**, 639 (1973).
- [7] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Fourth Edition (Oxford, 1958).

1) [They] have independently invented and developed methods for measuring and manipulating individual particles while preserving their quantum-mechanical nature, in ways that were previously thought unattainable.

2) 대표적인 예가 흑체 복사나 원자 방출 스펙트럼 선이다.

3) 그렇지만 이 조건 하에서 다른 물리량을 측정하면 그 검출 값은 훨씬 무작위적이 된다. 이러한 두 물리량을 “불확정성 관계에 있다”고 말한다.

4) 실제로는 ‘양자 물리계’ 대신 ‘광자’라고 썼다.

이 중 (C.1)과 (C.2) 특성을 갖는 물리계는 (약간 다른 의미에서) 거시 세계에서라도 찾을 수 있다. 예를 들어 동전 던지기 같은 경우, 검출되는 것은 앞면 혹은 뒷면으로 불연속적 물리량이다. 아무렇게나 던진다면 (초기 조건을 알 수 없기 때문에) 앞과 뒤가 나올 확률은 동일하게 1/2이다.⁵⁾ 이렇게 고전 통계학을 따르는 동전을 ‘고전 동전’이라고 부르자. 반면에 양자 간섭(C.3)도 보이는 전자 스핀(혹은 광자 스핀) 같은 양자 물리계를 ‘양자 동전’이라고 부르자.

고전 동전 던지기를 기술할 때 필요한 것은 앞면이 나올 확률 p_h 와 뒷면이 나올 확률 p_t 이다. 이를 벡터 $\vec{p}$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{p} = (p_h, p_t) \quad (1)$$

각 확률은 0과 1사이의 값이고 (즉 $0 \leq p_h \leq 1$, $0 \leq p_t \leq 1$), 확률의 총합 $p_h + p_t = 1$ 이다. 던져서 어떤 면이 나왔다면 그 이후 동전은 발견된 면에 항상 있다. 예를 들어 던져서 앞면이 나온 후 동전의 확률 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{p} = (1, 0) \quad (2)$$

양자 동전 던지기를 기술할 때도 고전 동전처럼 각 면이 나올 확률이 필요하다. 한편, 파동의 보강 및 소멸 간섭 등을 기술하려면 음수나 복소수가 요구되며, (C.3)인 양자 간섭의 경우도 마찬가지이다. 이를 위해 양자 동전에서는 확률을 직접 사용하는 대신 ‘확률 진폭’이란 개념을 도입한다. 이 경우 각 면이 나올 확률은 확률 진폭의 절댓값 제곱으로 정의한다. 양자 동전을 위한 확률 진폭 벡터 $\vec{\psi}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{\psi} = (\psi_h, \psi_t). \quad (3)$$

여기서 확률 진폭 ψ_h 와 ψ_t 는 일반적으로 복소수이다. 이때 양자 동전의 앞면 혹은 뒷면을 검출할 확률은 다음과 같다.

$$p_h = |\psi_h|^2, \quad p_t = |\psi_t|^2. \quad (4)$$

양자 물리학에서 주로 사용하는 표기는 사실 식 (3)과 좀 다르다. 약간 색다른데, Dirac이 처음 제안하였다. 식 (3)을 Dirac 표기로 바꾸면 다음과 같다.

$$|\psi\rangle = \psi_h |\text{앞}\rangle + \psi_t |\text{뒤}\rangle. \quad (5)$$

5) 원리적으로 고전 물리학 체계는 결정론이며 초기 조건의 불확실성이 통계 특성을 보이는 이유이다. 반면에 양자 물리학 체계는 초기 조건의 불확실성 여부와 상관없이 원리적으로 비결정론이며 통계 특성을 보인다.

6) de Broglie의 물질파에서 양자 상태는 물질 파동을 기술하는 파동 함수이며 실재한다. 이때, 붕괴된 물질 파동이 측정 도중 순식간에 다른 파동으로 변함을 뜻한다. 얼마나 순식간일까? 광속보다 빠를까? 이러한 문제는 지금도 연구되고 있지만 이 글의 논지에서 벗어나므로 더 이상 논하지 않기로 하자.

$|\text{앞}\rangle$ 과 $|\text{뒤}\rangle$ 는 수학적으로 ‘좌표계’의 기저(basis) 단위 벡터이다. 양자 물리학에서는 ‘측정 기저(measurement basis)’ 벡터라고 부른다. 동일 좌표계만 사용한다면 (즉, 동일 기저만 사용한다면), 식 (3)처럼 기저 벡터를 구체적으로 표시하지 않아도 된다. 반면, 양자 물리학의 경우, 측정 방법을 바꾸는 것이 수학적으로는 좌표계를 바꾸는 것이기 때문에 기저 벡터를 식 (5)처럼 드러내놓고 쓰는 것이 대부분 편리하다. 확률 진폭 벡터 $|\psi\rangle$ 를 양자 물리학에서는 ‘양자 상태(quantum state)’ 혹은 ‘양자 상태 벡터’라고 부른다. 또한, 식 (5)에서 $\psi_h \neq 0$ 이고 $\psi_t \neq 0$ 인 양자 상태를 ‘중첩 상태(superposition state)’ 혹은 ‘양자 중첩 상태’라고 부른다.

양자 동전을 측정하여 어떤 면이 검출되었다면 이후 양자 동전은 검출된 면에 있게 된다. 예를 들어, 앞면이 검출되었다면 검출 후 양자 동전은 다음 상태에 있다.

$$|\psi\rangle = |\text{앞}\rangle \quad (6)$$

다시 말하면, 측정 과정 중에 양자 상태는 중첩 상태인 $\psi_h |\text{앞}\rangle + \psi_t |\text{뒤}\rangle \rightarrow |\text{앞}\rangle$ 인 검출값의 상태로 바뀐다. 이를 ‘붕괴(collapse)’라고 부른다.^[8] 앞서 고전 동전에서 던지기 전후의 확률 변화와 비교할 때, 붕괴는 특별히 이상하지는 않다. 하지만, de Broglie의 물질파에서 붕괴는 물리적으로 가능할 것 같지 않은, 굉장히 이상한 개념이다.^{[8],[6]}

3. 양자 얽힌 상태

고전 동전이 2개라면 검출될 경우는 4가지이다. 첫 번째 동전이 앞면, 두 번째 동전이 뒷면일 때, 순서쌍 (앞, 뒤)로 표기하자. 검출될 경우는 다음 4가지이다: (앞, 앞), (앞, 뒤), (뒤, 앞), (뒤, 뒤). 각 경우가 나올 확률을 순서대로 p_{hh} , p_{ht} , p_{th} , p_{tt} 라고 하면, 확률 벡터 $\vec{p}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{p} = (p_{hh}, p_{ht}, p_{th}, p_{tt}). \quad (7)$$

반면에 양자 동전이 2개라면 양자 상태(혹은 확률 진폭 벡터) $|\psi\rangle$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$|\psi\rangle = \psi_{hh} |\text{앞, 앞}\rangle + \psi_{ht} |\text{앞, 뒤}\rangle + \psi_{th} |\text{뒤, 앞}\rangle + \psi_{tt} |\text{뒤, 뒤}\rangle$$

이때 두 동전 모두 앞면일 확률은 $p_{hh} = |\psi_{hh}|^2$ 로 주어지며 다른 확률도 유사하게 주어진다.

REFERENCES

- [8] L. E. Ballentine, *Quantum Mechanics* (Prentice-Hall, New Jersey, 1990).

동전이 여럿 있다면, 동전들 사이에 상관성이 있을 수 있다. 예를 들어 두 고전 동전 A 와 B 를 임의로 던졌는데, 고전 동전 A 가 앞면일 때 고전 동전 B 가 항상 앞면이고 A 가 뒷면일 때 B 가 항상 뒷면이면 이 두 고전 동전은 서로 붙어 있는 경우와 다를 바가 없다. 이 경우 확률 벡터는 $\vec{p} = (p_{hh}, 0, 0, p_{tt})$ 이다. 양자 동전의 경우도 유사한 상관성이 있을 수 있다. 방금 언급한 고전 동전 2개와 유사한 양자 상태는 다음과 같이 주어진다.

$$|\psi\rangle = \psi_{hh}|\text{앞, 앞}\rangle + \psi_{tt}|\text{뒤, 뒤}\rangle \quad (8)$$

이와 같이 상관성이 있는 양자 (중첩) 상태를 Schrödinger가 명명한 대로 ‘얽힌 상태(entangled state)’ 혹은 ‘양자 얽힌 상태’라고 부른다. 얽힌 상태에 있는 양자 동전들은 고전 상관성과 다른, 매우 독특한 상관성을 보이며 다음 절에서 좀 더 자세히 서술하겠다.

Einstein-Podolsky-Rosen 역설

1. 코펜하겐 해석과 국소 실재론

미시 세계 현상은 거시 세계 현상과 다른 독특한 특성을 갖고 있다. 앞서 설명한 양자 간섭은 대표적인 예이다. 이러한 특성 때문에 양자 물리학을 체계화하는 동안 많은 물리학자들 사이에 수많은 논쟁이 있었다. 그 중 Bohr와 Einstein 사이의 논쟁은 익히 잘 알려져 있다. 이러한 논쟁은 양자 물리학에 대한 해석(interpretation)이 여러 가지로 갈라지는 결과를 낳았다. 그 중 Bohr, Heisenberg, Born 등 코펜하겐(Copenhagen) 학파가 제시한 코펜하겐 해석은 물리학계 내 정통 해석으로 받아들여지고 있지만, 비국소 숨은 변수 이론(nonlocal hidden variable theory)과 다중 우주론(multiverse, many-world 혹은 many-mind 이론으로도 불린다) 등의 해석도 현재 공존하고 있는 상황이다. 특히, 코펜하겐 해석과 숨은 변수 이론은 양자 물리학 태동기부터 논의가 이어지고 있다.

코펜하겐 해석에서 측정은 매우 중요한 과정이다.^[2,8] 주어진 물리계의 물리량은 측정 과정을 통해서 그 값이 결정된다고 본다. 달리 말하면, 측정 전에는 물리량 값을 결정할 수 없다는 입장이다. 측정 장치가 완벽해도 마찬가지이다. 이러한 견해는 기존의 Newton 역학, 전자기학, 상대성 이론과 다르다. 기존의 고전 물리학 이론에서 ‘측정이란 이미 결정된 물리량 값을 확인하는 과정’이라고 본다. 고전 물리학 이론은 ‘측정 전에 이미 물리량의 값이 결정되어 있다’는 의미에서 실재론(realism)이다. 반면에 코펜하겐 해석은 비실재론이다.^[2]

1935년 Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) 등 세 명의 물

리학자는 코펜하겐 해석이 불안정하다고 비판하였다.^[9] EPR의 논문은 상대론에 바탕을 둔 ‘국소성(locality, 혹은 인과율)’과 앞서 언급한 실재론을 양자 물리학 체계와 대비시켰다는 점에서 큰 의의가 있다. 고전 이론의 두 핵심 개념인 국소성과 실재성을 가정한 이론을 ‘국소 실재론(local realism)’이라고 부른다. EPR의 논문에서는 두 입자의 위치와 운동량에 관한 논의지만, 그 핵심 논지는 (앞서 언급한 양자 동전인) 입자의 스핀 각운동량에도 적용할 수 있으며, 논의의 편의를 위해 스핀 1/2인 두 입자에 대해 논의하도록 하자.^[10]

2. 스핀의 불확정성 관계

스핀 각운동량은 3차원 벡터로 세 개의 물리량(혹은 관측량)을 성분으로 갖는다: $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$. 만약 z -축 성분인 s_z 를 측정하면 두 가지 값 $\pm \frac{1}{2}\hbar$ 중 하나를 검출하게 된다. $s_z = \hbar/2$ 은 스핀 각운동량 벡터가 z 축에 근접해 있음을 의미하고 $s_z = -\hbar/2$ 은 $-z$ 축에 근접함을 뜻한다. 이런 의미에서 $s_z = \hbar/2, -\hbar/2$ 를 각각 스핀 ‘위(up)’와 ‘아래(down)’라고 부른다. s_z 를 반복 측정하면 일반적으로 두 값이 (확률을 제외한) 어떤 규칙없이 무작위로 검출된다. 특별한 조건으로 입자의 스핀을 준비하면 항상 $s_z = \hbar/2$ 이 검출되게 할 수 있다. 이 경우 검출 값의 편차(혹은 불확정도 Δs_z)는 0이다: $\Delta s_z = 0$. 비슷하게 다른 스핀 성분 $s_{x,y}$ 을 측정할 수 있고 이들의 불확정도 $\Delta s_{x,y}$ 도 구할 수 있다. 양자 물리학 체계에서 일반적으로 스핀 성분의 불확정도 간의 관계는 다음과 같다.^[8]

$$\Delta s_x \Delta s_y \geq \frac{\hbar |s_z|}{2}. \quad (9)$$

여기서 $\overline{s_z}$ 는 성분 s_z 의 평균 검출 값이고 $|s_z|$ 는 그 절대값이다. 이러한 관계를 ‘불확정성 관계(uncertainty relation)’라고 부르며, 스핀이 그 어떤 양자 상태에 있더라도 반드시 만족하는 관계식이다. $\overline{s_z} \neq 0$ 인 경우, 두 불확정도 $\Delta s_{x,y}$ 를 동시에 0이 되게 할 수 없음을 알 수 있다. 이는 위치와 운동량의 불확정성 관계($\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$)에 대응된다. 코펜하겐 해석에 따르면 스핀 성분은 측정을 통해 그 값이 결정되며 이들 성분이 위 식을 만족하기 때문에 두 스핀 성분을 ‘동시에 정확하게 규정’하는 것은 불가능하다.

REFERENCES

- [9] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- [10] D. Bohm, *Quantum Theory* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1951).

3. 물리적 실체와 코펜하겐 해석 비판

이제 EPR의 논의를 스핀-1/2인 입자 두 개에 적용해 보도록 하자.^[10] EPR은 물리적 실체(혹은 그에 기반한 물리량의 실재성)를 다음과 같이 정의하였다.^[9] “주어진 물리계에 그 어떤 물리적 영향을 주지 않은 채, 물리량의 값을 정확하게 예측할 수 있다면, 해당 물리량은 ‘물리적 실체(physical reality)의 한 요소(an element)’이다.”^[7] 이러한 정의는 (일상 경험에 익숙한 우리의) 직관에 굉장히 잘 부합한다. 하지만, 양자 물리계에 바로 적용할 수는 없다. 스핀의 한 성분을 측정한다면 측정 장치가 미시 물리계인 스핀에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이러한 문제를 피하기 위해 EPR은 입자 두 개를 고려하였다.

두 입자 A와 B를 준비단계에서 짧은 시간 동안 상호작용시킨 후, 더 이상 두 입자 간 상호작용이 없도록 서로 멀리 떨어뜨린다. 이때 두 입자의 스핀 양자 상태는 다음과 같이 양자 물리학 체계가 허용하는 얽힌 상태에 있도록 만든다.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{위}, \text{아래}\rangle_{zz} - \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{아래}, \text{위}\rangle_{zz} \quad (10)$$

여기서 zz 란 두 스핀 모두 z 축 성분을 측정하겠다는 의미이다. 이 얽힌 상태는 상관성이 있는데, 입자 A의 스핀 성분 s_z^A 가 ‘위’를 향할 때 입자 B의 스핀 성분 s_z^B 는 반드시 ‘아래’를 향한다. 혹은 반대로 입자 A의 스핀 성분 s_z^A 가 ‘아래’를 향할 때 입자 B의 스핀 성분 s_z^B 는 반드시 ‘위’를 향한다. 이 두 가지 경우의 확률이 각각 1/2이다. 이 양자 얽힌 상태 $|\psi\rangle$ 가 재미있는 점은 다른 축 성분 측정에 대해서도 비슷한 상관성을 갖는다는 점이다. 즉, 동일한 양자 상태가 xx 측정(혹은 yy 측정)에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$|\psi\rangle = \frac{e^{i\phi_x}}{\sqrt{2}}|\text{위}, \text{아래}\rangle_{xx} - \frac{e^{i\theta_x}}{\sqrt{2}}|\text{아래}, \text{위}\rangle_{xx} \quad (11)$$

$$= \frac{e^{i\phi_y}}{\sqrt{2}}|\text{위}, \text{아래}\rangle_{yy} - \frac{e^{i\theta_y}}{\sqrt{2}}|\text{아래}, \text{위}\rangle_{yy} \quad (12)$$

여기서 $|\text{위}\rangle_x$ 란 스핀의 x 축 성분이 x 축 상에서 ‘위’를 향하고 있음을 대변한다. 다른 표기도 유사한 의미이다.

얽힌 양자 상태 $|\psi\rangle$ 에 있는 두 입자는 매우 특이한 상관성을 보이며, EPR 주장과 같이 코펜하겐 해석에 뭔가 문제가 있는 것처럼 보인다. 먼저 식 (11)처럼 스핀의 x -축 성분을 측정하는 경우를 생각해 보자. 입자 A의 x -축 스핀 성분만 측정한다면 그 검출 값이 ‘위’가 나올 확률이 1/2이고 ‘아래’가 나올 확률이 1/2

이다. 이 상황에서 x -축 성분 값은 확률을 제외하고 무작위로 검출된다. 하지만, 일단 검출 값이 ‘위’라면 입자 B의 x -축 스핀 성분 값은 ‘아래’임이 100% 확실하다. 여기서 중요한 것은 입자 B를 측정하지 않아도 그 스핀 성분 값을 미리 알 수 있다는 점이다. 이때 한 가지 중요한 가정이 필요하다. 두 입자가 아주 멀리 떨어져 있어서, 입자 A의 측정이 입자 B의 측정에 영향을 미치지 않는다는 가정이 그것이다. 이 가정을 국소성이라고 부른다. 국소성을 가정하면 입자 A 측정을 통해 입자 B에 아무런 물리적 영향을 주지 않은 채 100% 확실하게 입자 B의 x -축 스핀 성분을 예측할 수 있다. 즉, (EPR이 주장한) 물리적 실체의 정의에 따라, 입자 B의 x -축 스핀 성분 s_x^B 는 (물리적 실체의 한 요소란 의미에서) 실재하며 측정 전에 미리 결정되어 있다. 동일한 얽힌 양자 상태에 대해 식 (12)처럼 y -축 스핀 성분 측정을 고려하면 유사한 결론에 도달한다. 즉, 입자 B의 y -축 스핀 성분 s_y^B 도 실재한다. 한편, 코펜하겐 해석에 따르면 두 물리량 s_x^B 과 s_y^B 을 동시에 정확하게 규정하는 것은 불가능하다. 두 물리량이 실재함에도 불구하고 코펜하겐 해석에서는 이들을 동시에 정확하게 규정할 수 있는 방법이 없다. 이런 의미에서 EPR은 코펜하겐 해석이 불완전하다고 주장하였다.^[9] 대신, 미시 현상 실험에서 드러나지 않은 변수(숨은 변수, hidden variable)가 있을 가능성을 제시하였다.^[8] EPR 논의가 국소성과 실재성에 기초하고 있음에 주목한다면, “코펜하겐 해석은 국소 실재론과 양립할 수 없다”고 말할 수 있다.

4. Bell의 정리와 국소 실재론의 종말

EPR 주장 후 Bohr가 반론을 제시했지만, 이들의 논란은 당시 대다수 물리학자들에게 외면 받았다. 이 논란을 검증할 실험 방법이 없었고, 양자 물리학 체계가 실험 결과와 잘 일치했기 때문이었다. 대다수 물리학자들은 이 논의를 철학의 문제로 간주하였다.

1964년에 이르러, Bell이 실험적으로 검증 가능한 방법을 제시하였다.^[11] 먼저 그는 자신의 이름으로 명명된 부등식을 유도하였다. Bell 부등식은 국소 실재론에 바탕을 둔 그 어떤 이론이라도 반드시 만족해야 한다. 그런 후 Bell은 양자 물리학이 Bell 부등식을 위배한다는 것을 증명하였다. 즉, 실재성과 국소성을 동시에 가정한 이론은 양자 물리학 체계와 양립할 수 없고, 동시에 양자 물리학은 국소 실재론의 제약을 뛰어넘는다는 점을 보인 것이다. 이 증명에서 식 (10)과 같은 양자 얽힌 상태가 중요한 역할을 한다. “국소 실재론의 제약인 Bell 부등식을 양자 물리학은 위배할 수 있다”는 명제를 Bell의 정리(Bell's theorem) 혹은 (잘 정의한 용어는 아니지만) 비국소성(nonlocality)이라고

REFERENCES

- [11] J. S. Bell, Physics 1, 1 (1964).

7) 번역문은 원문과 좀 다르며, 비전문가가 이해하기 쉽도록 번역하였다. 원문은 다음과 같다. “If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equality to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.”
8) 나중에 Bohm이 비국소 숨은 변수 이론을 제안하는데 영향을 미쳤다.

도 부른다. 1982년 Aspect 등은 비국소성에 대한 실험을 성공적으로 수행하였고, 그 실험 결과는 양자 물리학이 예측한 결과와 일치하였다.^[12] 즉, 실험은 국소 실재론이 틀렸다고 말한다. 그럼, 국소 실재론이 가정한 실재성과 국소성 중 어떤 가정이 틀린 것일까? 모두 틀린 걸까? (비국소성이란 용어 때문에 국소성이 틀렸다고 생각하겠지만) 실험을 통해 어떤 가정이 틀렸는지는 아직 알지 못한다. 다만, 실험과 잘 일치하는 양자 물리학의 정통 해석(코펜하겐 해석)은 실재성을 부정하고 국소성은 인정한다. 또, 제한적이긴 하지만 ‘비국소(nonlocal)’ 실재론이 실험과 일치하지 않는다는 결과도 최근 발표되었다.^[13] 아마도 자연은, 적어도 미시 세계는 실재성이 없는 것 같다.

Schrödinger 고양이

1. 양자 물리학과 보편성

Schrödinger는 자신의 이름으로 명명된 Schrödinger 방정식을 도출해 양자 물리학 체계를 정립하는데 크게 기여하였다. 그럼에도 불구하고, 코펜하겐 해석에 큰 불만을 갖고 있었다. 앞서 서술했듯이 코펜하겐 해석은 실재성을 부정하며 물리량의 값은 측정 후에 비로소 결정된다. 비국소성과 같은 미시 세계 현상을 서술하는데 있어 이러한 해석이 요구되는 듯하지만, 거시 세계 현상에도 적용해야 하는지는 상당히 회의적이다. 이는 실재론인 상대성 이론이나 전자기학 등이 거시 현상을 매우 잘 서술하기 때문이다. 만약 코펜하겐 해석이 ‘거시 세계에서 실재성이 왜 그리고 어떻게 드러나는지’ 설명하지 못한다면, 미시 세계에만 적용되는 제한적 해석이라는 주장이 가능하다.^[2] 양자 물리학 체계의 보편성이 의심 받게 될 것이다. 이에 대한 논의는 ‘Schrödinger 고양이 역설’에서 처음 시작되었다.

Schrödinger는 EPR 논문 발표 이후 Einstein과 깊이 토론하였고 그 유명한 Schrödinger 고양이 사고 실험을 제안하였다.^[14] 이 사고 실험에서, Schrödinger는 “미시 세계가 비실재적으로 기술되어야 한다면 거시 세계도 비실재적으로 기술해야 함”을 보였다. 아마도 Schrödinger는 역으로 ‘거시 현상이 실재론으로 기술될 수 있음은 의심의 여지가 없다. 따라서 (미시 현상만 서술 하더라도) 비실재론인 코펜하겐 해석은 매우 의심스럽다’고 항변한 듯하다.

2. Schrödinger 고양이 역설

Schrödinger 고양이 사고 실험은 다음과 같다. 닫으면 내부를 ‘볼’ 수 없는 상자가 있다고 가정하자. 상자 안에 전자기파를 방출할 수 있도록 들뜬 상태에 있는 원자, 전자기파를 검출하면 독극물을 배출하는 장치, 그리고 살아있는 고양이를

넣는다. 원자는 일반적으로 들뜬 상태와 바닥 상태 중 하나로 검출된다. 고양이는 독극물을 먹지 않아 살아 있거나 반대로 먹어서 죽어 있는 두 가지 경우 중 하나로 관찰된다. 상자를 닫으면 내부를 볼 수 없기 때문에 외부에서 내부에 있는 물리계들을 측정하거나 검출할 방법은 없다. 실험이 시작되는 시점에 원자는 들떠 있고 고양이는 살아 있다고 가정하자. 이는 다음과 같은 양자 상태로 표현된다.

$$|\text{들뜬 원자, 산고양이}\rangle.$$

방출 반감기 쯤 시간이 지났을 때, 원자는 1/2 확률로 여전히 들뜬 상태로 남아 있거나 다른 1/2 확률로 전자기파를 방출하고 바닥 상태에 있게 된다. 하지만 (상자 밖에서) 측정을 하지 않았기 때문에 여전히 양자 중첩 상태에 있다. 즉,

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{들뜬 원자}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{바닥 원자}\rangle.$$

원자가 바닥 상태로 떨어지면, 전자기파가 방출되며 이를 검출한 독극물 장치는 독극물을 배출하고 고양이는 먹고 죽는다. 이 상태를 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{들뜬 원자, 산고양이}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{바닥 원자, 죽은 고양이}\rangle$$

여기서 중요한 점은 원자와 고양이의 상태가 확률 벡터가 아닌 확률 진폭 벡터인 양자 상태에 여전히 있다는 사실이다. 이 양자 상태는 얽힌 상태인 식 (8)이나 비국소성을 보인 식 (10)과 매우 흡사하며, 고양이가 비국소성과 같은 양자 간섭을 보일 수 있음을 의미한다. 이는 고양이도 원자처럼 비실재론인 코펜하겐 해석으로 기술해야 함을 시사한다. 하지만, 이러한 결론은 이상하다고 느끼게 할 만하다. “뭐야! 측정 전에는 고양이가 죽었는지 살았는지 알 수 없다니!” Einstein이 Bohr에게 한 말도 생각날 만하다. “Bohr, 당신이 보지 않았다고 달이 저기 없다는 건가요?”^[15] 즉, Schrödinger는 비실재론인 코펜하겐 해석이 일상 경험에 반한다고 항변한 것이다.

Schrödinger 고양이 사고 실험은 여러 가지 면에서 비판

REFERENCES

- [12] A. Aspect, P. Grangier and G. Roger, Phys. Rev. Lett. **49**, 91 (1982); 1804 (1982).
- [13] S. Gröblacher, T. Paterek, R. Kaltenbaek, C. Brukner, M. Zukowski, M. Aspelmeyer and A. Zeilinger, Nature **446**, 871 (2007).
- [14] E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (The present situation in quantum mechanics)* (Naturwissenschaften, 1935). (Translated by John D. Trimmer in Proceedings of the American Philosophical Society).
- [15] A. Pais, Rev. Mod. Phys. **51**, 863 (1979): “Do you really think there isn't moon if you aren't looking at it?”

받을 수 있다. 이 사고 실험에서 고양이를 entropy가 0인 물리계로 가정하였는데 실제 고양이는 entropy가 0일 수 없다. 또 원자와 고양이가 전자기파 검출기와 독극물 장치를 통해 상호작용한다고 가정하였는데, 이러한 장치를 통해 원자가 고양이에게 영향을 줄 수는 있지만 고양이가 원자에게 영향을 줄 수는 없기 때문에 상호작용일 수 없다.

이러한 비판에도 불구하고 Schrödinger 고양이 역설은 ‘코펜하겐 해석이 적용되는 영역이 어디까지인지’에 대한 보편성에 의문을 제기했다는 점에서 큰 의의가 있다. 아이러니하게도 고양이 역설은 코펜하겐 해석이 거시 세계에도 적용될 수 있을 가능성을 열어 주었다. 이 점에서 코펜하겐 학파에게 깊은 인상을 남겼다.

고전 세계의 출현

양자 물리학의 정통 해석인 코펜하겐 해석이 보편적이라면, 거시 세계는 어떻게 실재성이 있는걸까? 이를 설명하는 이론은 두 가지인데 하나는 정론으로 간주되는 ‘결폴림(혹은 결홀어짐, decoherence program)^[16]이라는 이론이고 다른 하나는 최근에 제안된 것으로 ‘어설피게 보기(coarse-grain measurement)^[17]라는 이론이다.^[9]

결폴림 이론을 제안한 Zeh와 Zurek 등은 Schrödinger 고양이의 entropy가 0일 수 없음에 주목한다. 즉, 고양이는 주변 환경인 공기 분자나 상자 분자 등과 항상 상호작용을 한다. 달리 말하면, 사람은 상자 내부를 볼 수 없지만, 주변 환경은 고양이를 ‘볼’ 수 있다. 결폴림 이론은 상자 안 고양이가 설혹 처음에 양자 상태에 있더라도 주변 환경과 상호작용하면서 양자 결이 풀려 버린다고 말한다. 즉, 상호작용을 통해 고양이의 상태는 다음과 같이 변한다.

$$\vec{\psi} = (\psi_a, \psi_d) \longrightarrow \vec{p} = (|\psi_a|^2, |\psi_d|^2). \quad (13)$$

여기서 Dirac 표기인 $|\psi\rangle$ 대신 확률 진폭 벡터 $\vec{\psi}$ 를 사용하였다. $\psi_{a,d}$ 는 고양이가 살거나 죽을 확률 진폭으로 일반적으로 복소수이며 양자 간섭이 가능하다. 하지만, 결폴림(상태 변화) 후 고양이의 상태는 살거나 죽을 확률인 $|\psi_{a,d}|^2$ 로만 기술되며 양자 간섭이 불가능하다. 즉, 주변 환경과 상호작용을 하면서 양자 물리계는 자신의 양자 결맞음을 잃게 되고 고전 확률로 기술된다. 결폴림 이론은 이런 식으로 비실재론에서 실재론으로 전이하면서 고전 세계가 출현한다고 설명한다.

Haroche 교수 연구팀은 최근 고양이 상태를 흉내내고 측정하면서 어떻게 양자 결이 풀려 고전 상태로 가는지 실험하였다.^[18]

9) ‘결폴림’(‘결홀어짐’)이란 번역은 학계에서 어느 정도 동의가 이루어졌지만, ‘어설피게 보기’는 이 글에서 처음 번역한 것으로 물리학계에서 동의가 이루어지지 않았다.

또한 양자 되먹임 방법을 적용하여 결폴림 효과를 줄이거나 없애서 양자 상태를 안정화할 수 있는 실험 방법도 제시하였다.^[19] 한편 Wineland 박사 연구팀은 이온의 운동을 이용하여 고양이 상태를 흉내내고 이 상태의 결폴림 효과를 관찰하였다.^[20,21]

‘어설피게 보기’ 이론을 제안한 Brukner와 Kofler는 결폴림 이론과 관점이 다르다. 이들도 주변 환경으로 인해 결폴림이 발생한다는 점에 동의한다. 하지만, 주변 환경과 상호작용하지 않을 때 고양이는 어떻게 될 것인가? 여전히 비실재론으로 기술해야 할까? ‘어설피게 보기’ 이론은 측정에 주목한다. 미시 현상을 관측하기 위해서 측정 장치는 고도로 정밀해야 한다. 역으로 ‘어설피게 본다’면 양자 간섭을 관측하기는 매우 어렵다. 일상에서 사람들이 양자 현상을 경험하지 못하는 이유는 어설피게 보기 때문이라는 주장이다. Brukner와 Kofler는 ‘예리하지 않은 측정’ 때문에 Schrödinger 방정식이 Newton 방정식으로 귀착됨을 보였다. 이러한 주장은 상당히 신빙성이 있는데, 특히 양자 역학에서 고전 역학으로의 전이를 설명하고 있기 때문이다 (앞서 결폴림 이론은 양자 역학에서 고전 통계로의 전이까지만 설명한다). 하지만, 아직 설익은 주장이며 좀 더 연구가 진전될 필요가 있다.^[22]

맺음말

일상에 익숙한 사람들에게 양자 현상은 참으로 기묘하다고 생각할 만하다. 하지만, 저자와 같은 양자 물리학자에게 거시 세계는 더 기괴하다. 잠시 한눈을 판 사이에 대화 중이던 사람이 딴 의자에 앉아 있고, 눈을 깜빡이면 모습이 변해야 하는데 실제로는 그렇지 않다. 왜 아닐까? Schrödinger 고양이는 그런 모습일 텐데... 이를 설명하는 결폴림 이론이나 어설피게 보기 이론 등이 있고, Haroche 교수와 Wineland 박사가 수행한 실험 결과가 있지만, 아직까지 고전 세계가 출현하는 이유는 명확하지 않다. 좀 더 많은 연구가 진행되면서 보다 명확해질 것을 기대해 본다.

REFERENCES

- [16] W. H. Zurek, “Decoherence and the transition from quantum to classical”, Phys. Today **44**, 36 (1991); Rev. Mod. Phys. **75**, 715 (2003).
- [17] J. Kofler and C. Brukner, Phys. Rev. Lett. **99**, 180403 (2007); Phys. Rev. Lett. **101**, 090403 (2008).
- [18] S. Deléglise, I. Dotsenko, C. Sayrin, J. Bernu, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche, Nature **455**, 510 (2008).
- [19] C. Sayrin, I. Dotsenko, X. Zhou, P. Peaudecerf, T. Rybarczyk, S. Gleyzes, P. Rouchon, M. Mirrahimi, H. Amini, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche, Nature **477**, 73 (2011).
- [20] C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King and D. J. Wineland, Science **272**, 1131 (1996).
- [21] C. J. Myatt, B. E. King, Q. A. Turchette, C. A. Sackett, D. Kielpinski, W. H. Itano, C. Monroe and D. J. Wineland, Nature **403**, 269 (2000).
- [22] H. Jeong, M. Paternostro and T. Ralph, Phys. Rev. Lett. **102**, 060403 (2009).