측정의 사용과 양상 해석

DOI: 10.3938/PhiT.21.015

이충형

Use of Measurements and the Modal Interpretation of Quantum Mechanics

Chunghyoung LEE

This essay presents a basic conceptual framework for the use of measurements and introduces the modal interpretation of quantum mechanics. A measurement is 'used' when a value is ascribed to the measured observable based on its outcome, and four different ways of using measurements (combinations of 'retrospective,' 'prospective,' 'individualistic,' and 'collective' use) are distinguished. Using this distinction, differences among various interpretations are analyzed, and the peculiar features of the modal interpretation are highlighted.

측정의 사용에 주목해야 하는 이유와 양상 해석

이 글이 말하고자 하는 바는 두 가지이다. 먼저 측정의 사용을 위한 몇 가지 개념들을 제안하고 이를 통해 양자역학의 양상 해석(the modal interpretation)을 소개한다. 이렇게 글을 구성하는 이유는 다음과 같다.

양자역학은 우리가 직접적으로 경험하는 세계의 여러 현상들에 대해 매우 정확한 예측을 제공한다. 이러한 양자역학을 참인 이론으로 받아들이면, 인간의 감각으로 직접 경험하는 현상뿐만 아니라, 직접 경험하지는 못하는 미시 세계의 모습에 대해 양자역학이 말해 주는 바가 무엇인지에 대해서도 관심을 갖게 된다. 그런데 양자역학은, 우리가 직접적으로 경험하는 현상들을 예측하고 통제하기 위해 필요한 최소한의

틀을 제공할 뿐, 미시 세계의 구석구석이 어떻게 생겼고 어떤 방식으로 작동하는지를 모두 말해 주지는 않는다. 양자역학이 대답하지 않는 질문들에 대해 양자역학과 조화로운 대답을 제공하는 것이 해석이다.

이론과 해석은 서로 연속적으로 이어져 있어서, 이를 명확히 구분 짓는 일은 불가능한 일이지만, 주어진 세계상의 어느 부분이 대다수의 물리학자들이 공유하는 이론의 직접적 귀결에 가깝고, 어느 부분이 경험으로부터의 직접적인 증거가 결여된 해석에 가까운 부분인가를 판단하는 일은, 양자역학을 이해하는 데에, 그리고 여러 다양한 해석들을 구분하고 이들 사이의 우열을 판단하는 데에 매우 중요하다. 이를 판단할 가장 중요한 기준은 결국 측정 결과들이 어떤 직접적 함의를 갖는가를 명확히 따져 보는 것이다. 이를 위해 필자는 측정의 사용을 위한 몇 가지 개념들을 제안하고 이를 통해 양자역학의 여러 특성과, 다종 다기한 해석들 사이의 차이를 잘 조명할 수 있음을 보이려 한다. 이러한 개념들은 양자역학을 사용해서 양자 측정을 기술하려는 소위 측정의 양자 이론(the quantum theory of measurement)을 위한 기본적인 틀을 제공하게 된다.^[1]

이 글의 두 번째 목적은 양자역학의 양상 해석을 소개하려는 것이다. 왜 굳이 측정의 사용에 대한 고찰과 양상 해석을 결부시켜 이야기하려 하는가의 이유는 다음과 같다. 양자역학의 코펜하겐 해석에 따르면 물리적 대상계의 상태는 측정이 이루어지느냐 그렇지 않느냐에 따라 전혀 다른 방식으로 변한다. 측정이 이루어지지 않는 경우, 대상계의 상태는 슈뢰딩거 방정식의 해로서 결정론적으로 주어진다. 반면, 측정이 이루어지는 경우에는 투사 가설이 적용된다. 즉, 측정되는 물리량에 대응하는 연산자의 여러 고유 벡터 중의 하나로

저자약력

이충형 교수는 미국 미네소타 대학 철학과 박사(2006년)로써 현재 캘리포니아 주립대(프레즈노) 철학과 조교수로 재직 중이며, 포스텍 인문사회학부 대우조교수를 겸하고 있다. (chunglee@postech.edu)

REFERENCES

- [1] P. Busch, P. Lahti and P. Mittelstaedt, *The Quantum Theory of Measurement*, 2nd ed. (Berlin, Springer, 1996); Asher Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods* (Dordrecht, Kluwer, 1995).

상태가 붕괴되며, 이 과정은 비결정론적이고 비가역적이라는 것이다.

측정 장치 역시 물리적 대상이고 측정 역시 이러한 대상들의 물리적 상호 작용일 터인데, 왜 하필 측정이라는 특정 상호 작용만이 이렇게 다르게 기술되어야만 하는가? 이 질문에 대한 코펜하겐 해석의 답을 만족스럽지 않게 여기는 대안적 해석들 중 상당수 역시 측정이 다른 물리적 상호 작용과는 다른 특이한 상호 방식이라고 인정하고 왜 그런가에 대한 설명을 제시한다.

이와 달리 양자역학의 양상 해석은 측정 과정 역시 다른 물리적 상호 작용과 완전히 동일한 방식으로 기술되어야 한다는 전제에서 출발한다. 즉, 측정이 일어나는 경우에도 대상과 측정 장치를 포함한 전체계의 상태는 슈뢰딩거 방정식에 따라서 변하게 되고 상태가 붕괴되는 일은 일어나지 않는다는 것이다. 반면 측정에 따른 상태의 붕괴를 받아들이지 않는 많은 해석들이 양자역학적 상태를 대상이 가진 물리적 특성이 아닌 인식 주체가 가진 정보의 표상으로 여기는 도구론적 반실재론적 태도를 취하는 데 반해, 양상 해석은 양자역학적 상태를 대상계의 물리적 특성으로 인정하는 실재론적 태도를 취한다.

측정의 사용에 대한 고찰과 양상 해석을 결부시켜 이야기하려 하는 이유는, 양상 해석이 양자역학적 상태를 실재론적으로 해석하면서 측정 과정 역시 다른 물리적 상호 작용과 완전히 동일한 방식으로 기술하려는 매우 독특한 해석으로서 측정의 양자 이론과 잘 부합되기 때문이다. 두 번째 절부터 네 번째 절까지 측정의 사용에 대한 몇 가지 개념들을 여러 예를 들어 소개하고 이를 통해 다섯 번째 절에서 양상 해석의 여러 특징과 문제점 등을 진단한다.

측정의 사용을 위한 개념들

측정이 대상계의 물리적 특성을 파악할 목적으로 이루어질 때, 이 측정을 **사용**한다고 하자.^[2] 그런데, 양자역학에서 측정을 사용할 시, 측정을 **개별적으로** 사용하는지 아니면 **집합적으로** 사용하는지를 구분하는 것이 매우 중요하다. 측정을 개별적으로 사용할 시, 주어진 개별 대상계에 하나의 측정을 실시하여, 이 개별 대상계의 특성을 알아낸다. 반면 집합적으로 측정을 사용할 시에는, 어떤 특별한 방식(혹은 특정한 물리적 상태)으로 준비된 복수의 대상계들의 집합(ensemble)에 대한 정보를 구하기 위해 복수의 측정을 실시한다. 1989년에 보고된 히타치 고등 연구소의 도노무라 연구팀이 수행한 유명한 이중 슬릿 실험을 예로 들어보자.^[3]

도노무라 등은 당시 최신의 민감한 측정기를 사용하여 전

자 하나만을 이중 슬릿(실제로는 전자 복프리즘)에 보냈을 때에도 형광 스크린에 이미지가 나타나는 장치를 만든 뒤, 여러 전자들을 하나하나 슬릿에 보내는 실험을 하였다. 그랬더니 한 번에 많은 전자들을 보내 간섭 실험을 하는 경우와 마찬가지로 전자를 각각 보내는 경우에도 스크린에 하나하나의 점이 생기면서 결국에는 같은 간섭무늬가 생기는 결과를 얻었다. 이러한 간섭 실험은 전자가 파동적 특성을 가지고 있다는 주장을 뒷받침하는 증거로 제시되곤 하는데 이를 개념적으로 잘 분석할 필요가 있다.

먼저 이 실험에서 형광 스크린에 나타나는 하나하나의 점들은 각각 독립적으로 얻어질 수 있는 개별 측정의 결과들이다. 이 개별 측정들 각각은 쏘아진 전자들 각각이 파동적 특성을 가지고 있다고 말하지 않는다. 오히려 각각의 전자들이 특정 위치에 있는 스크린 원자에 부딪쳐 빛을 만들어 내는 입자적 성격을 가지고 있음을 말해준다. 반면, 이러한 각각의 점들이 모여서 만든 측정 결과들은 집합적으로, 쏘아진 복수의 전자들이 파동적 성격을 가지고 있음을 보여준다. 즉, 도노무라 실험의 측정 결과 자체는, 개별 전자들은 입자적 성격이, 반면 전자들은 집합적으로 파동적 성격이 있음을 보여주는 것이다.

여기서 한발 더 나아가, 전자들이 집합적으로 파동적 성격을 가지고 있으면, 개별적으로도 그러하다는 가정을 사용하면, 개별 전자는 입자적, 파동적 성격을 둘 다 가지고 있다는 결론을 내릴 수 있다. 특히 도노무라 실험 외에 많은 실험 결과들에 의해 지지받는 양자장 이론은, 세계를 근본적으로 구성하는 것은 파동이고, 이러한 파동과는 독립적으로 존재하는 물질이 따로 있는 것이 아니라, 전자와 같은 입자들은 파동의 한 특성인 에너지 덩어리라는 세계상을 제시하는 것처럼 보인다. 이런 맥락 하에서 많은 이들이 도노무라의 실험 결과를 개별 전자들의 파동적 성격을 드러내는 것으로 받아들이나, 실험 결과의 의미를 특정 이론 하에 해석하려는 것은 매우 자연스러운 일이지만, 여전히 이런 행위가 해석이라는 점은 명확히 해야 한다. 양자장 이론보다 더 경험적으로 성공적이며 더 포괄적인 이론이 있어서, 세계를 근본적으로 구성하는 것이 파동이 아닌 다른 것이라는 세계상을 제시한다면, 그리

REFERENCES

- [2] For a detailed explanation of the notions to be introduced and their applications, please see: Chunghyoung Lee, *Uses of quantum measurements: Conceptual/theoretical frameworks for measurements and collapse-free posterior value ascriptions*, University of Minnesota, Ph. D. Dissertation (2006).
- [3] A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki and H. Ezawa, *American Journal of Physics* **57**(2), 117 (1989).

고 이런 이론 하에서는 도노무라 실험 결과가 다르게 해석될 것이라는 점을 감안한다면, 이 점은 명확해진다.^[4] 핵심은 도노무라 실험이 개별 전자의 파동성을 보여준다는 주장은 논란의 여지가 있는 해석이 가미된 주장이며, 이런 해석은 부수되는 여러 질문들-가령 개별 전자가 파동처럼 운동하다가 어떻게 입자적 성격을 보여주는가-에 만족할 만한 답을 주어야 제대로 된 해석이다.

또한 흔히 양자역학은 (예외적인 경우를 제외하곤) 확실하지 않은 확률적 예측만을 제공한다고 말한다. 하지만 이는 양자역학의 경험적 성공을 가려버리는 주장이다. 개별 측정의 경우, 양자역학이 확률적 예측을 하는 것은 맞다. 하지만 양자역학의 대부분의 실험은 많은 개별 측정이 모인 집합적 측정을 하는 경우이고, 이러한 집합적 측정 결과에 대한 양자역학의 예측은 매우 정확하다. 개별 우라늄 원자가 언제 붕괴할지에 대해서는 확실성이 떨어지는 확률적 예측을 제공하지만, 엄청난 수의 우라늄 원자들로 이루어진 덩어리가 언제 어떤 상황에서 연쇄 반응을 일으키며 폭발할 것인가에 대한 예측은 매우 정확한 것이다. 이는 가령 투표 결과와 같은 집합적 측정에 대한 예측이 양자역학의 예측에 비해 얼마나 부정확한가를 비교하면 명확하다. 양자역학이 확률적 예측만을 제공한다는 말은 측정의 이런 집합적 사용을 무시한 말이다.

양자역학과 이에 대한 여러 해석을 이해하는 데 도움이 되는 또 하나의 구분은 측정의 **사전적** 사용과 **사후적** 사용을 구분하는 것이다. 측정 과정은 대상계와 측정 장치를 준비하는 단계, 그리고 이들이 서로 상호 작용하는 단계, 그리고 측정 장치에 상호 작용의 결과가 기록되는 단계로 이루어진다. 그런데 측정 결과는 측정 장치와의 상호 작용 전에 (측정과는 독립적으로) 대상계가 가지고 있던 속성에 대해 말해 줄 수도 있고, 상호 작용 후에 (측정에 의해, 또는 측정에 상대적으로) 갖게 되는 속성에 대해 말해 줄 수도 있다. 전자의 경우가 측정이 사전적으로 사용되는 경우이고, 후자가 사후적으로 사용되는 경우이다. 고전 역학에서는 거의 의미가 없을 이 구분은 양자역학에서 중요하다. 왜냐하면, 코펜하겐 해석은 측정을 개별적 & 사전적으로 사용하는 것을 금지하기 때문이다. 파스쿠알 요르단(Pascual Jordan)의 다음의 주장을 보자.

다음은 양자 물리의 전형적인 관찰 과정이다: 예를 들어 고립된 전자의 정확한 위치를 결정(bestimmen)하기를 원한다고 하자. 원칙적인 방법은 가시광선보다 더 짧은 파장을 지닌 빛을 사용한 현미경으로 전자를 들여다보는 것이다. 이 관측에서 우리는 전자가 결정을 내리게 강제한다(zwingen). 즉, 전자가 특정한 위치를 갖도록 강제하는 것이다. 관측 이전에는 전자는 여기에도 저기에도 있지 않다.

결정을 내리지 않은 것이다. ... 만약 다른 실험을 통해 그 전자의 속도를 측정한다면 이는 그 전자가 어떤 특정 속도 값을 갖도록 강제하는 것이고, 그리고 우리는 전자가 선택한 값을 관찰하는 것이다. 이러한 결정을 내릴 때, 전자가 이전의 실험에서 내렸던 위치에 대한 결정은 완전히 지워지게 된다.^[5]

요르단이 특이한 주장을 하고 있는 것이 아니다. 유명한 과학사학자 막스 야머(Max Jammer)에 따르면, “1930년대에서 50년대 사이에 쓰인 양자역학의 교과서 중에서, 관찰이 이루어지기 전까지는 물리량의 값은 아무 의미가 없다는 주장을 부인하는 경우를 찾기는 매우 힘들다”는 것이다.^[6]

반면, 코펜하겐 해석은 측정의 개별적 & 사전적 사용은 금지하면서도 개별적 & 사후적 사용은 허용한다. 즉 측정을 사전적으로 사용할 수 있느냐 없느냐가 매우 중요한 문제인 것이다. 이 점은 네 번째 절에서 보다 자세히 살펴볼 것이다.

하이젠베르크의 불확정성 원리에 대한 두 가지 상이한 해석

이러한 측정의 개념들을 사용하여 양자역학의 여러 특성과, 다중 다기한 해석들 사이의 차이를 잘 조명할 수 있다. 먼저 한 가지 예로, 하이젠베르크의 불확정성 원리를 분석해 보자.

1927년 하이젠베르크가 불확정성의 원리를 처음 제기했을 때, 그는 이를 두 가지 상이한 방식으로 정당화하려 했다.^[7] 첫 번째 방식은 현재 대다수의 양자역학 교과서에 나오는 것으로, 불확정성 관계를 가우시안 분포를 가진 상태에서부터 유도하는 방식이고, 두 번째는 소위 감마선 현미경 사고 실험에 의존한 것이었다. 하이젠베르크는 이 두 방식으로 정당화되는 결론이 하나의 같은 원리라고 생각했지만 실제로 이 둘은 전혀 다른 측정의 사용 방식에 기인하는 상이한 결과로 이해되어야 한다.

첫 번째 방식부터 자세히 살펴보자. 다음과 같은 위치 좌표 q 에 대해 가우시안 분포를 띤 상태에 있는 입자가 있다면,

REFERENCES

- [4] For another example, Leslie Ballentine, an advocate of statistical interpretation, says that Tonomura *et al.*'s experiment shows that “[e]vidently, quantum particles are indeed particles.” Leslie Ballentine, *Quantum Mechanics, A Modern Development* (World Scientific Publishing, 1998), pp. 4, 138.
- [5] Pascual Jordan, *Erkenntnis* **4**, 215 (1934), pp. 226-227.
- [6] Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (New York, Wiley, 1974), p. 246.
- [7] Werner Heisenberg, *Zeitschrift für Physik* **43**, 172 (1927).

$$\Psi(q) = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{q^2}{4(\Delta q)^2}\right) \quad (1)$$

Δq 는 이 가우시안 분포의 표준 편차 값과 일치한다. 위 상태를 푸리에 변환을 써서 운동량 좌표로 표시하면,

$$\Phi(p) = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{4\pi^2 p^2 (\Delta q)^2}{h^2}\right) \quad (2)$$

이 되는데, 이 분포의 표준 편차 Δp 는 $\frac{h}{4\pi\Delta q}$ 가 되게 되어,

$$\Delta q \Delta p = \frac{h}{4\pi} \quad (3)$$

가 성립되게 된다.

1929년 시카고 대학 강의에서 하이젠베르크는 (3)식의 Δq 와 Δp 가 마치 “주어진 하나의 입자의 위치와 운동량 값에 대한 지식의 불확정성의 정도”를 나타내는 것처럼 제시한다.^[8] 하지만 이런 해석은 받아들이기 힘들다. 입자가 (1)의 상태에 있을 경우 위치를 측정하면 그 결과는 실수의 어떤 값도 가질 수 있으므로, Δq 를 위치 측정값의 범위를 나타내는 것으로 해석할 수 없다. 그게 아니라 Δq 는 (1)의 상태를 지닌 많은 수의 입자들의 위치 측정 결과 값의 표준 편차 값으로 해석되어야 한다. 마찬가지로 Δp 역시 (1)의 상태 - (1)과 (2)는 동일한 상태를 표상 - 의 입자들의 운동량 측정값들의 표준 편차 값으로 해석되어야 한다. 따라서 (3)식은 개별 입자들에 적용되는 것이 아니라 측정의 집합적 사용에 대응되는 앙상블의 통계적 특성에 대해 말하는 것으로 이해되어야 한다.

하이젠베르크가 불확정성 원리를 정당화하는 두 번째 방식은 이와 달리 개별 입자에 적용된다. 하나의 전자에 파장이 λ 인 감마선을 쏘인 후 산란된 빛을 현미경으로 관찰하는 사고 실험을 수행했을 때, 측정된 위치 값의 불확실성의 정도 δx 는 대략 $\frac{\lambda}{\sin\theta}$ (θ 는 그림 1에서 보듯이 전자와 현미경의 가장자리가 이루는 각)로 주어진다. 그런데, 콤프턴 효과에 의해 빛과 부딪힌 전자는 빛으로부터 운동량을 전달받게 되는데, 그 전달되는 양의 불확실성의 정도 δp 는 대략 $\frac{h}{\lambda} \sin\theta$ 로 주어진다. 따라서 측정 직후,

$$\delta x \delta p \sim h \quad (4)$$

의 관계가 성립하게 된다.

(4)의 식은 (3)과는 여러모로 다르다. 먼저 (4)의 δx 는 (3)의 Δq 와는 달리 단일 입자의 위치 값에 대한 불확실성의 정도를 나타낸다고 해석하는 것이 타당하다. 따라서 (4)식은 측정

Fig. 1. Heisenberg's γ -ray microscope thought experiment.

의 개별적 사용에 해당한다. 뿐만 아니라 여기서의 측정의 사용은 사후적이라는 점이 중요하다. 왜냐하면 측정을 개별적 & 사전적으로 사용할 수 있다면, 하이젠베르크의 불확정성 원리는 성립하지 않게 되기 때문이다. 가령 그 운동량 값에 대해 아주 잘 알고 있는, 즉 δp 값이 매우 작은 전자가 있다고 하자 - 이런 전자가 있을 수 있다는 것은 양자역학이 허용한다. 불확정성 원리는, 특정 물리량 값을 측정하는 데에 한계가 있다는 주장을 하는 것이 아니므로, 이 전자의 위치를 그 불확정성의 값 δx 가 임의의 작은 값이 되도록 측정할 수 있다. 이 경우, 이 전자의 위치 측정이 개별적 & 사전적으로 사용된다면, 이 위치 측정값은 측정이 이루어지기 전의 전자의 위치에 대해 말해주는 것으로 해석될 것이고, 따라서 측정이 이루어지기 직전의 δx δp 의 값은 임의로 작아질 수 있다. 따라서 불확정성 원리가 성립하려면, 양자역학의 개별적 & 사전적 사용이 금지되어야 한다. 이런 이유에서 하이젠베르크는 “불확정성의 원리는 과거에 대한 것이 아니라,” 측정 후에 부여된 사후적 값에 대해 성립하는 것이라고 말한 것이다.^[9] 즉, (4)는 어떤 측정이 이루어진 직후, 우리가 주어진 단일한 입자의 위치와 운동량 값에 대해 알고 있는 정보의 불확실성의 정도를 나타내는 것으로 해석되어야 하는 것이다.

또한 (3)식이 양자역학으로부터 유도되는 식으로, 임의의 상태에 대해서도 부등식으로 일반화될 수 있는 식인데 반해, (4)의 식은 양자역학으로부터 직접 유도되지 않을 뿐만 아니라 그 식 또한 근사식이고, 그리고 모든 상태와 모든 측정에 대해 일반화된 식이 아닌 특정 사고 실험으로부터 유도된 것이라는 점도 중요하다. 따라서 어떤 특정한 상황에서는 성립하지

REFERENCES

- [8] Werner Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Theory* (Chicago, University of Chicago Press, 1930), p. 20.
- [9] *ibid.*

않을 가능성이 있는데, 실제로 (4)의 식이 말하는 것보다 더 정확하게 비가환 관측량들을 측정할 수 있다는 주장들이 여럿 제기되었다. 예를 들어 일본의 물리학자 마사나오 오자와는 EPR 실험의 경우, 입자 2의 위치를 측정함으로써 입자 1의 위치를 간접 측정할 수 있고, 이 경우 입자 1의 운동량 값에 미치는 교란 값이 0이므로 δx δp 값이 0이라고 주장하며, 보다 정확한 불확정성의 원리는 다음과 같이 표현되어야 한다고 말한다.^[10]

$$\epsilon(Q)\eta(P) + \epsilon(Q)\sigma(P) + \sigma(Q)\eta(P) \geq \frac{\hbar}{2}.$$

여기서 $\epsilon(Q)$ 와 $\eta(P)$ 는 각각 위치 측정시의 오류 값과 이에 따른 운동량 교란치를 나타내고 — 대략적으로 (4)식의 δx 와 δp 에 대응 —, 그리고 $\sigma(Q)$ 와 $\sigma(P)$ 는 (3)식의 Δq 와 Δp 에 대응한다. 이 흥미로운 주장은 여러 논란의 여지가 있는데, 먼저 오자와가 (4)의 δx 와 δp 를 매우 좁게, δx 를 위치 측정과 관련된 오류치로, 그리고 δp 를 위치 측정 때문에 생기는 운동량 교란치로 해석하는 것이다. 그리고 그는 $\sigma(Q)$ 와 $\sigma(P)$ 를 실험 이전에 가지고 있는 대상계에 대한 정보의 불확실성의 정도로 해석한다. 하지만 하이젠베르크의 의도는, 이 둘을 구분하지 않고 δx 와 δp 를 모두 대상계에 대해 측정 이후 사후적으로 갖게 되는 불확실성의 정도로 해석하는 것이다. 이렇게 해석한다면, EPR 실험의 경우에, 입자 2에 대한 위치 측정이 입자 1의 운동량 값에 교란을 주지 않는다고 가정하더라도, 여전히 입자 1의 운동량 값에 대한 측정후의 불확실성 정도는 0이 아니게 된다. 하이젠베르크의 의도가 어쨌든 간에 불확실성의 정도를 $\epsilon(Q)$, $\eta(P)$, $\sigma(Q)$, $\sigma(P)$ 로 나누어 구분하여 보다 정밀한 원리를 유도하려는 오자와의 시도는 유의미한 일이다. 결론을 말하자면, (4)로 나타내어지는 불확실성의 원리는 개별 대상계에 적용되는 것으로 정확히 무엇을 의미하는지는 (3)보다 훨씬 논란의 여지가 많으며, 이의 잘 해석하기 위해서는 측정을 어떤 방식으로 사용하는지를 명확히 구분해야 한다는 것이다.

여러 해석들의 차이와 구분

앞 절에서 살펴보았듯이, 코펜하겐 해석의 가장 중요한 특성의 하나가 측정의 개별적 & 사전적 사용을 거부하는 것이다. 코펜하겐 해석이 측정의 개별적 & 사전적 사용을 거부하는 이유는, 측정 이전에는 (고유 상태에 있는 경우를 제외했을 때) 개별 대상계의 물리량 값이 정해져 있지 않다고 보기 때문이다. 이런 관점을 뒷받침해주는 것들이 바로 벨 부등식, 코첸-스페커(Kochen-Specker) 정리, 글리슨(Gleason)의 정리 등과 같은 소위 금지 정리들(no-go theorems)이다. 하지만

이들 정리들은 고전 역학과 완전히 같은 방식으로 측정을 개별적 & 사전적으로 사용하는 것이 불가하다는 점만을 보일 뿐, 소위 비국소적(nonlocal)이고 맥락적(contextual)인 방식으로 측정을 개별적 & 사전적으로 사용하는 것을 금지하지는 않는다. 따라서 비국소적이고 맥락적인 숨은 변수 이론은 양자역학과 모순되지 않으면서도 측정을 개별적 & 사전적으로 사용할 수 있게 한다.

대신 코펜하겐 해석은 (다른 모든 해석과 마찬가지로) 측정의 집합적 & 사전적 사용은 받아들인다. 즉 앙상블에 대한 여러 측정값들의 통계가 측정 이전의 앙상블의 특성에 대해 말해 준다는 주장은 코펜하겐 해석이 받아들인다. 이러한 측정의 집합적 & 사전적 사용 없이는 양자역학의 실험적 검증은 불가능하기 때문이다. 코펜하겐 해석, 그리고 그 외의 많은 해석들의 가장 큰 문제점의 하나는, 왜 측정이 개별적 & 사전적으로 사용될 수 없음에도 불구하고 집합적 & 사전적으로는 사용될 수 있는가에 대해 만족할 만한 답을 내놓지 못한다는 데에 있다.

이 문제를 해결하고자 등장한 해석들이 성향 해석(the propensity interpretation)과 통계적 해석(the statistical interpretation)이다. 성향 해석은 측정의 집합적 & 사전적 사용을 통해 알게 된 앙상블의 특성을 앙상블을 이루는 개별 대상계의 성향(propensity)으로 해석한다. 즉, 개별 입자들은 측정이 일어나기 전에는 유리의 깨지기 쉬운 성질과 같이 겉으로는 드러나지 않은 성향만을 갖고 있다가, 측정이 일어나면 겉으로 드러나는(manifest) 속성, 즉 물리량 값을 갖게 된다는 주장이다. 반면 앙상블 혹은 통계적 해석은 양자역학의 대상은 근본적으로 개별 입자들이 아니라 앙상블이라고 주장하면서, 측정은 개별적 & 사전적으로 사용될 수 없는 것이라고 한다. 하지만 성향 해석과 통계적 해석의 위 문제에 대한 이런 답변들은 만족스럽지 않다. ‘왜 유리가 깨어지느냐’에 대한 질문에 대해 성향 해석은 ‘유리는 잘 깨어지는 성향을 가지고 있다’는 답변을 주는 것과 같고 — 이같은 답은 ‘유리는 왜 잘 깨어지는 성향을 갖느냐’라는 질문에 대한 좋은 답이 없는 한 거의 무의미하다 —, 통계적 해석은 ‘유리는 잘 깨어지게 마련이다’라고 답하는 것과 같기 때문이다 — 이는 ‘왜 유리가 깨어지느냐’라는 질문에 대한 답이 아니다.

코펜하겐 해석이 측정의 개별적 & 사전적 사용을 금지하는 데에 반해, 폰 노이만의 투사 가설은 측정의 개별적 & 사후적 (따라서 집합적 & 사후적) 사용을 받아들인다. 투사 가설은 측정을 단순히 물리량의 값을 부여하기 위한 개별적 & 사후적 사용에 국한시키지 않고, 대상계에 대한 최대의 정보를 포함하

REFERENCES

- [10] Masanao Ozawa, Physics Letters A **318**, 21 (2003).

고 있는 상태를 부여하는 데에 사용하기까지 한다. 코펜하겐 해석을 주장하는 많은 이들이 투사 가설을 받아들이는데, 그들은 측정의 개별적 & 사후적 사용이 정당한 이유가 바로 측정이 측정값을 사후적으로 만들어 내기 때문이라고 생각한다.

그렇다면 이들은 왜 측정을 하면 대상계가 측정값을 물리량 값으로 갖게 된다고 믿는가? 이는 폰 노이만의 반복 측정 가설(von Neumann's repeated experiment hypothesis), 즉, 어떤 실험 준비 절차를 통해 준비된 대상계에 어떤 물리량을 측정한 직후 동일한 측정을 반복했을 때, 측정값들이 모두 처음 측정값과 일치한다는 가설을 거의 대부분이 받아들이기 때문이다. 폰 노이만의 반복 측정 가설이 참이라면, 측정 직후 대상계가 측정값을 물리량의 값으로 가지고 있다고 보는 것은 매우 자연스러운 일이다. 더 나아가 소위 고유치-고유 상태 연계(the eigenvalue-eigenstate link)를 사용하면, 대상계는 측정 직후 측정값에 해당하는 고유 상태에 있다고 결론내릴 수 있으므로, 바로 투사 가설이 따라 나온다.

이 반복 측정 가설을 과연 투사 가설을 사용하지 않고 만족시킬 수 있을까? 대다수의 해석들은 반복 측정 가설을 만족시키기 위해 투사 가설이나 투사 가설 비슷한 것을 사용한다. 투사 가설이나 투사 가설 비슷한 것을 사용하지 않으면서 측정을 다른 일반적인 물리적 상호 작용과 차별적으로 다루지 않는 해석들은 크게 두 가지로 갈리는데, 한 부류는 양자역학의 상태를 대상이 가진 물리적 특성이 아닌 인식 주체가 가진 정보의 표상으로 간주하는 것들이고 다른 부류는 상태를 물리적 특성으로 여기는 실재론적 해석들이다. 후자의 대표적인 해석들이 바로 드브로이-봄의 숨은 변수 이론, 결폴림(decoherence) 이론, 그리고 바로 양상 해석이다. 이 양상 해석의 특징과 문제점을 다음 절에서 살펴보자.

양상 해석의 특징과 문제점

양상 해석은 양자역학 표준 이론의 동역학적 체계를 수정 없이 수용한다. 즉, 대상계는 양자역학의 이론이 규정하는 동역학적 상태(dynamical state)를 갖고, 이 동역학적 상태는 표준적인 방식으로 전개된다는 것이다. 그런데 앞에서 살펴보았듯이, 이 가정에 더해 폰 노이만의 반복 측정 가설과 고유치-고유 상태 연계(the eigenvalue-eigenstate link)를 받아들이면, 투사 가설은 자연스럽게 유도된다. 따라서 투사 가설을 거부하기 위해서는 이 중에 하나를 부인해야 하는데, 양상 해석은 고유치-고유 상태 연계 중 고유치→고유 상태 부분, 즉, 대상계가 어떤 물리량 값을 가지고 있다면 이 대상계는 그 물리량 값에 해당하는 고유 상태에 있다는 주장을 받아들이지 않는다. 다시 말하면 대상계가 어떤 물리량의 고유 상태에

있지 않아도, 동역학적 상태에 의해 완전히 결정되지는 않는 방식으로, 그 물리량 값을 가질 수 있다는 것이다. 이렇게 대상계가 어떤 물리량 값을 가진 상태를 값 상태(value state)라 부르는데, 동역학적 상태는 대상계가 가질 수 있는 여러 값 상태들이 무엇들인지만을 결정하지 구체적으로 어느 특정 값 상태를 가지고 있는지를 결정하지는 않는다는 것이다. '양상 해석'이라는 이름은 철학에서 가능성과 필연성 등을 양태 혹은 양상(modality)이라 부르는데, 양상 해석이 동역학적 상태와 동역학 법칙들은 대상이 어떤 성질들은 가질 수 있는가의 가능성만을 규정한다고 보는 데서 기인한 이름이다.

이 점을 폰 노이만의 측정 이론과의 차이를 부각하여 좀 더 자세히 살펴보자. 폰 노이만은 가장 단순한 측정 과정을 다음과 같이 기술한다. 먼저 어떤 물리량 E 에 해당하는 연산자의 고유 벡터들을 $|e_i\rangle$ 라 하고, 측정 직전 대상계 S 는 $|\phi\rangle = \sum_i c_i |e_i\rangle$ 의 상태에 그리고 측정 장치 A 는 $|A_0\rangle$ 의 상태에 있다고 하자. 그렇다면 측정 직전, 전체계 $S+A$ 는

$$|\psi(t_0)\rangle = \sum_i c_i |e_i\rangle |A_0\rangle \quad (5)$$

의 상태에 있다.

이후 대상계와 측정 장치가 상호 작용을 하게 되면, 전체계의 상태는 다음과 같이 변화한다.

$$|\psi(t_1)\rangle = \sum_i c_i |e_i\rangle |A_i\rangle \quad (6)$$

여기서 $|A_i\rangle$ 들은 측정 장치의 상이한 측정 결과 값들에 대응하는 벡터들이다. 마지막으로 폰 노이만은 (6)에 투사 가설을 적용하여, 측정이 끝난 직후 대상계의 상태는 특정 고유 벡터 $|e_k\rangle$ 로 그리고 측정 장치의 상태는 $|A_k\rangle$ 로 붕괴하게 된다고 주장한다. 즉, 측정 직후 전체계의 상태는

$$|\psi(t_2)\rangle = |e_k\rangle |A_k\rangle \quad (7)$$

이라는 것이다.

투사 가설을 거부하는 양상 해석은 (6)에서 (7)로의 상태의 전환을 인정하지 않는다. 즉, 측정이 끝난 직후에도 대상계는 (6)의 상태에 있으며, 그러면서도 대상계와 측정 장치는 측정치에 대응하는 명확한 물리량 값을 가진다는 것이다. 이 측정치가 정확히 어떤 값인지는 동역학적 상태 (6)이 완전히 결정해 주지 않기 때문에 (6)은 단지 가능성만을 기술한다는 것이 양상 해석의 주장이다. 즉 양상 해석은 어떤 측정 장치가 있을 수 있는 서로 다른 거시 상태들을 하나의 동역학적 상태로 취급하는데, 이는 양자역학의 상태가 대상계에 대한 최대한의 물리적 정보를 포함한 것으로 보는 많은 물리학자들이 받아들

이지 않는 부분이다 — 하지만, 측정 문제에 대한 해결책은 어느 해석이나 매우 별난 주장으로 보이기 마련이다.

그렇다면 양상 해석은 반복 측정 가설을 어떻게 만족시키는가? 대상계 S 와 측정 장치 A 가 상호 작용하여 측정값이 산출된 후, 전체계 $S+A$ 가 (6)의 상태에 있는 경우 대답이 간단하다. S 와 A 외에 또 다른 측정 장치 B 가 있어, B 를 사용하여 다시 물리량 E 를 측정한다고 하자. 이들이 상호 작용을 하게 되면 전체계 $S+A+B$ 의 상태는

$$|\Psi(t_3)\rangle = \sum_i c_i |e_i\rangle |A_i\rangle |B_i\rangle \quad (8)$$

여기서 $|B_i\rangle$ 들은 측정 장치 B 의 측정 결과 값들에 대응하는 벡터들로, 각각의 i 에 대해서 $|A_i\rangle$ 와 $|B_i\rangle$ 는 같은 물리량 값을 나타낸다. 만약 (6)의 상태에서 측정 장치 A 가 $|A_k\rangle$ 에 해당하는 측정값을 나타내고 있을 경우, (8)의 상태에서 측정 장치 B 는 $|B_k\rangle$ 에 해당하는 측정값을 나타낸다고 하면 반복 측정 가설이 간단히 만족된다. 이와 같은 결과는 좀 더 복잡한 실험 상황에도 일반화될 수 있는데, 만약 대상계가 어떤 값 상태에 있고 이를 교란 없이 측정 가능하다면, 투사 가설 없이도 항상 반복 측정 가설을 만족시킬 수 있는 것이다.^[11]

이제 양상 해석의 여러 부류와 문제점들을 간단히 살펴보기로 하자. 양상 해석에 의하면 대상계의 동역학적 상태가 값 상태를 결정하지는 않는다. 하지만 동역학적 상태가 가능한 값 상태들이 어떤 것들일지에 대해 제약을 가할 수 있는데, 이 제약이 어떤 것이냐에 따라 양상 해석의 부류들이 나누어지게 된다. 반 프라센의 양상 해석의 경우, 그 제약이 가장 느슨하다.^[12] 즉 어떤 동역학적 상태에 있는 대상계에 임의의 측정을 하였을 때, 측정값으로 나올 수 있는 모든 값에 해당하는 상태들이 다 가능한 값 상태들이라고 규정한다.

반면 양상 해석을 옹호하는 대부분의 이들은 좀 더 많은 제약을 부여한다. 먼저 코첸(Kochen)의 경우를 보자.^[13] 부분계 α 와 β 로 이루어진 복합계 ω 가 있을 경우, 쌍직교분해 정리(the biorthogonal decomposition theorem)에 의해, ω 의 상태는 항상 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$|\Psi\rangle = \sum_i c_i |\alpha_i\rangle |\beta_i\rangle \quad (9)$$

여기서 $|\alpha_i\rangle$ 와 $|\beta_i\rangle$ 들은 각각 α 와 β 의 힐버트 공간의 직교 맞춤(orthonormal) 벡터들이다. 만약 c_i 들이 모두 상이한 값을 가질 경우, 어떤 값 k 에 대해 α 와 β 는 각각 투사 연산자 $|\alpha_k\rangle\langle\alpha_k|$, $|\beta_k\rangle\langle\beta_k|$ 에 해당하는 값 상태를 갖고, 또 그렇게 될 확률이 $|c_k|^2$ 이라는 것이 코첸의 양상 해석의 근간이다.

이러한 코첸의 해석은 전체계가 순수 상태일 때만 적용되는 문제가 있는데 이를 보완한 것이 버마스와 디크스의 해석이다.^[14] 이들 해석에 따르면, 임의의 대상계 ω 가 임의의 혼합 상태 $W = \sum_i \omega_i |\omega_i\rangle\langle\omega_i|$ (여기서 W 는 density matrix)에 있을 때, 각각의 i 에 대해서 $|\omega_i\rangle\langle\omega_i|$ 에 해당하는 값 상태를 가질 수 있다는 것이다.

버마스와 디크스의 해석은 양상 해석 중 가장 정교한 세계상을 제시하고, 또 이 해석을 몇 가지 그럴듯한 기본 가정들로부터 측정의 양자 이론(the quantum theory of measurement)을 사용하여 도출할 수 있는 등의 여러 장점이 있다. 하지만 보다 정교한 구체적인 세계상을 제시하기에 문제도 여럿 발생한다. 대표적인 문제점들이 첫째, 버마스와 디크스의 해석에 따라 부여된 값 상태들이 특수 상대론과는 어긋나게 로런츠 불변하지 않다는 것이고, 둘째는 셋 이상의 부분계로 구성된 복합계에 적용될 경우 모순을 일으킬 수 있다는 것이며, 셋째는 측정 장치의 측정값과 대상계의 측정된 물리량 값이 완전한 상관 관계를 이루지 않고 불완전한 상관 관계만이 성립하는 경우, 측정 장치의 측정값에 대응되는 상태와는 전혀 다른 값 상태를 부여될 수 있다는 것이며, 넷째는 결핍론 이론(decoherence theory)과 전혀 다른 예측을 하는 것처럼 보인다는 것이다.^[15]

이들 문제는 대부분 코첸의 해석에서도 발생한다. 하지만 반 프라센의 해석의 경우에는 이들 문제를 피할 수 있는데, 그 이유는 반 프라센의 경우 값 상태를 정하는 규칙이 매우 느슨해서 이들 문제가 발생하지 않도록 값 상태를 가지고 있다고 가정하는 것이 가능하기 때문이다. 결국 양상 해석의 문제는 위의 문제점들이 발생하지 않으면서도 반 프라센의 해석보다 훨씬 더 자세한 세계상을 제시하는 것인데, 현재까지 아직 만족스러운 해결책이 제시되어 있지 않다.

REFERENCES

- [11] Please see Chaps. 4-5 of [1] for the definition of a non-disturbing measurement and the proofs of these claims.
- [12] Bas van Fraassen, *Quantum Mechanics* (Oxford, Clarendon Press, 1991).
- [13] Simon Kochen, A new interpretation of quantum mechanics, In *Symposium on the Foundations of Modern Physics 1985*, P. Mittelstaedt and P. Lahti (eds) (Singapore, World Scientific, 1985), pp. 151-169.
- [14] P. Vermaas and D. Dieks, *Foundations of Physics* **25**, 145 (1995).
- [15] For the fourth problem, which I believe to be the most important one, see Lee, "The modal interpretation of quantum mechanics and the distinction between proper and improper mixtures," *The Korean Journal for the Philosophy of Science* **14**(1), 1-31 (2011).