

양자역학의 측정에서 완전성과 확률서술: 폰노이만, 헤르만, 하이젠베르크, 론돈-보에의 논의*

김재영[†]

이 논문은 양자역학에서 측정의 문제와 미결정성의 문제를 폰노이만의 측정이론, 숨은 변수 금지 정리, 인과성과 완전성에 기반을 둔 헤르만의 반박, 하이젠베르크의 가장자리 논변, 론돈-보에의 측정이론을 중심으로 논의한다. 폰노이만은 양자역학의 형식체계에 서 측정 과정의 핵심을 명료하게 드러냈지만, 심신평행론의 테두리를 벗어나지 못하고 측정과 관련된 문제를 숨은 변수 금지 정리로 연결시켰다. 하지만 헤르만의 상세한 논의를 통해 이것이 부적절한 전제를 출발점으로 삼은 것이었고, 측정 문제는 결정론의 문제와 구별된다는 점이 분명해졌다. 헤르만은 인과성과 완전성의 문제를 신크트주의적인 초월관념론을 통해 논의하려 했으나, 그럼으로써 물리학자들의 접근에서 멀어졌다. 론돈-보에는 폰노이만과 하이젠베르크 등의 논의를 가장 선명하고 간단하게 정리한 측정이론을 보여주었다. 론돈과 보에의 현상학적 접근은 측정 문제를 해결하는 데 새로운 관점이 될 수 있으며 개념적 난점을 해결하기 위한 유용한 접근임을 제안한다.

주요어: 측정의 문제, 인과성과 완전성, 폰노이만의 숨은 변수 금지 정리, 그레테 헤르만, 론돈-보에의 현상학적 접근.

* 본 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 KAIST 부설 한국과학영재학교의 연구 프로그램의 일환으로 수행되었음.

† KAIST부설 한국과학영재학교 전임교원(zyghim@ksa.kaist.ac.kr)

1. 연구문제

양자역학에서 가장 핵심적인 문제는 측정과정에서 필연적으로 도입해야 하는 상태변화의 비인과성과 여기에서 나타나는 확률서술을 어떻게 이해할 것인가 하는 것이다. 폰노이만이 힐버트 공간 이론을 이용한 양자역학의 수학적 기초에서 측정과정의 이론을 상세하게 전개하면서 숨은 변수 금지 정리를 논의한 것은 바로 이것 때문이었다.¹⁾

존 스튜어트 벨이 1966년 폰노이만의 숨은 변수 금지 정리 증명의 오류를 지적하면서, 이를 바탕으로 양자역학의 확률 서술의 의미를 더 깊이 논의할 기회가 열렸다.²⁾ 그러나 벨의 숨은 변수에 대한 논의보다 아인슈타인-포돌스키-로젠 역설에 관한 논문이 먼저 출판되었고, 여기에 관심이 몰리면서 숨은 변수 이론과 확률적 서술의 성격에 대한 논의는 양자역학의 기초를 다루는 연구에서 조명을 덜 받았다.

그런데 이 문제는 이미 1933년 그레테 헤르만이 명료하게 다루었고, 이와 관련하여 하이젠베르크 및 바이트제키와 논쟁을 벌이면서 1935년에 인과성과 완전성에 대한 상세한 논의를 전개했다.³⁾ 이는 그해 발표된 아인슈타인-포돌스키-로젠의 논문과 맞닿아 있다. 하이젠베르크는 양자역학의 결정론적 완전화라는 문제를 다룬 논문을 작성했으나 발표하지 않았다.⁴⁾

1939년 프리츠 런던과 에드몽 보에는 양자측정의 이론을 다룬 작은 책을 썼다.⁵⁾ 이 책에 담긴 새로운 접근에는 철학적 현상학의 관점이 녹아들어 있다. 런던과 보에의 논의는 폰노이만의 논의가 지니는 근본적 한계를 극복하고 양자역학에서 측정의 문제와 확률의 개념을 가장 적절하게 이해할 수 있는 틀이다. 그동안 단지 폰노이만의 논의를 잘 요약한 것으로 여겨지면서 그 핵심 주장이 오해되었으나, 최근에 다시

1) von Neumann (1932); von Neumann (2018).

2) Bell (1966).

3) Hermann (1935a); Hermann (1935b).

4) Heisenberg (1985).

5) London & Bauer (1939).

주목받고 있다.⁶⁾

이 논문은 론돈-보에의 접근을 폰노이만의 숨은 변수 금지정리와 연결하여 이해하고자 한다. 이를 위해 먼저 폰노이만의 측정이론과 숨은 변수 금지정리를 검토한 뒤, 그레테 헤르만의 1934-35년 논의를 살펴보고, 1935년 하이젠베르크의 미출판 원고를 논의한다. 헤르만의 논의는 폰노이만의 접근이 지니는 근본적 한계를 넘어서려는 시도였으나 신크트주의적 논의에 머물면서 더 나아가지 못한 면이 있다. 론돈-보에의 현상학적 논의를 헤르만의 접근과 비교함으로써, 양자역학의 측정문제가 물리적 대상과 측정장치의 물리적 상호작용으로 환원될 수 없는 근본적으로 새로운 문제임을 이해할 수 있다.

이 논문은 양자역학에서 측정의 문제에 대한 독자적인 해석을 제시하려는 것이 아니라 폰노이만, 헤르만, 하이젠베르크, 론돈과 보에 등이 측정의 문제를 논의한 내용을 재구성하여 연결하는 데 주안점이 있다. 이는 이후 현상학적 접근을 원용하여 측정의 문제를 해결하기 위한 더 넓은 범위의 연구프로그램의 출발점이다.⁷⁾

2. 폰노이만의 측정 이론과 숨은 변수 금지 정리

폰노이만은 상태의 의미와 역할을 다음과 같이 말하고 있다.⁸⁾

상태(Zustand)는 이론적 구성물일 뿐이며 실제로 이용할 수 있는 것은 측정의 결과만이다. 물리학의 문제는 과거의 측정 결과와 미래의 측정 결과 사이의 관계를 마련하는 것이다. 이는 언제나 ‘상태’라는 보조 개념을 도입함으로써 이루어지는데, 물리이론은 한편으로 **과거의 측정들로부터 현재의 상태를 어떻게 추론할 것인지** 말해 주어야 하고,

6) French (2020); Alves (2021); French (2023).

7) 일반적으로 철학 분야의 연구논문은 핵심 논제가 제기되고 이에 대한 연구자의 독자적 주장을 논증하는 방식을 따를 수도 있지만, 또한 이를 위한 예비단계로서 기존의 연구 흐름을 검토하면서 이를 재구성하는 방식을 따를 수도 있다. 이 논문은 후자의 방식을 따르며, 후속 연구에서 전자의 방식으로 확장할 것이다.

8) von Neumann (1932), p. 178; von Neumann (2018), pp. 219-20.

다른 한편으로 **현재의 상태에서부터 미래의 측정들을 어떻게 추론할 것**인지 말해 주어야 한다(인용자 강조).

폰노이만은 측정과정에 관한 일반적 고려로부터 대상계에서 일어날 수 있는 작용의 진행(Vorgehen 또는 Eingriff; 시간의 흐름에 따른 상태의 변화)에 근본적으로 다른 두 종류가 있음을 지적한다.⁹⁾

우리는 계 S 또는 양상블 $[S_1, \dots, S_N]$ 의 시간적 변화에 근본적으로 다른 두 가지 방식을 갖는다. 첫째, 측정을 통한 임의적인(willkürlich) 변화로서, 다음 공식으로 주어진다.

$$(1.) \quad D \rightarrow D' = \sum_n \langle \phi_n | D | \phi_n \rangle P[\phi_n]$$

둘째, 시간의 흐름(Zeitablauf)에 따라 저절로 일어나는 변화로서, 다음 공식으로 주어진다.

$$(2.) \quad \varphi \rightarrow \varphi' = e^{-\frac{2\pi i}{h}tH} \varphi$$

이는 상태의 시간 전개에 두 가지 방식이 있다는 것이며, 흔히 (1.)의 과정을 ‘R 과정(reduction)’으로, (2.)의 과정을 ‘U 과정(unitary)’으로 부른다. (2.)의 과정 또는 ‘U 과정’에서는 상태가 슈뢰딩거 방정식을 따라 인과적으로 변화하는 반면, (1.)의 과정 또는 ‘R 과정’은 측정의 과정으로서 인과적이지 않다. 표준적인 논의에 따라 측정 후의 상태를 생각해 보자. 측정을 통해 가령 고유값 중 하나로서 $[A]' = a_k$ 의 결과를 얻고 난 뒤에 아무런 다른 작용을 가하지 않고 대상과 측정장치를 내버려 둔다면, 다시 물리량 A 를 측정할 때 그 값은 확률 1로 a_k 가 될 것이다. 따라서 중간에 어떤 일이 일어나는지 알 수 없지만, 일단 측정을 통해 $[A]' = a_k$ 라는 결과를 얻었다면, 대상계의 상태는 그 고윳값에 대응하

9) von Neumann (1932), p. 186; von Neumann (2018), p. 230.

는 고유상태 $|\phi_k\rangle$ 가 되어야 할 것이다. 이런 이유로 디랙은 측정이 대상계의 상태를 새로운 고유상태로 도약하게 만든다고 표현했다.¹⁰⁾

폰노이만은 측정의 과정에서 일어나는 상태의 변화에 대해 다음과 같이 말한다.¹¹⁾

측정이나 그와 관련된 주체적 인식(subjektiven Apperzeption)의 과정은 물리적 환경에 대비하여 새로운 실체(Wesenheit)이며 **후자로 환원될 수 없다**는 것은 전적으로 옳은 말이다. 이는 통제할 수 없는 개인의 내적 삶(Innenleben des Individuums)으로 이어진다. 그렇지만, 과학적 세계관에 대한 다음의 요구조건(이른바 심리-물질 평행론)은 근본적이다. 즉, 주관적 인식의 물리외적인(außerphysikalischen) 과정은 마치 그것이 물리적 세계에서 일어나는(in der physikalischen Welt stattfände) 양 서술되어야 한다. 다시 말해서 주관적 인식의 부분들에 대상적인 주변세계의 (보통의 공간에서의) 물리적 과정을 병치시켜야 한다. 온도를 측정하는 간단한 예를 들어 보자. 이 온도는 온도계로 측정된다. 수은기둥의 길이를 관측자가 읽는다. 관측자의 눈에 들어간 빛은 망막에 상을 만들며, 우리는 이 상이 관측자의 망막에 기록되었다고 말한다. 망막에 맺힌 상은 화학적 과정을 거쳐 시신경을 통해 두뇌에 이르며, 우리는 두뇌 세포 속의 이 화학적 변화가 관측자에게 인식되었다고 말한다. 우리가 어느 정도까지, 즉 수은관까지인지, 온도계 눈금까지인지, 망막까지인지, 두뇌까지인지 계산할 수 있을지는 모르지만, 언젠가는 이렇게 말해야 한다: ‘그리고 이것이 관측자에게 인식되었다.’ 즉, 우리는 항상 이 세계를 두 부분으로 나누어야 한다. 하나는 관측되는 계(beobachtete System)이고 다른 하나는 관측자(Beobachter)이다. 앞의 부분에서는 (최소한 원리적으로라도) 우리는 모든 물리적 과정을 원하는 만큼 정확하게 따라갈 수 있다. 뒤의 부분에서는 이것이 무의미하다. 둘 사이의 경계의 위치는 얼마든지 임의적이지만, 어디엔가에 경계가 놓여야 한다는 사실은 달라지지 않는다. ... 실험은 ‘어느 관측자가 어떤 확실한 (주관적인) 관측(bestimmte Wahrnehmung)을 수행하였다.’와 같은 문장만을 말할 수 있으며, ‘어떤 물리량이 어떤 확실한 값(bestimmten Wert)을 가지고 있다.’와 같은 문장은 허용되지 않는다. 양자역학은 세계의 관측되는 부분에서 일어나는 사건을 (2.)의 과정의 도움으로 기술하는데, 이는 관측하는 부분(즉, 관측자)과 상호작용하지 않는 한에서만 그러하다. 그러나 그런

10) Dirac (1958), p. 36.

11) von Neumann (1932), pp. 223-4; von Neumann (2018), pp. 271-3.

상호작용이 일어나자마자, 즉 측정이 시작되자마자 (1.)의 과정을 적용할 것이 요청된다. 이렇게 해서 이중적 정식화가 정당화된다. 이를 논의하기 위하여 세계를 세 부분으로 나누자. I은 실제로 관측되는 계이고, II는 측정장치이고, III은 실제의 관측자이다. 경계는 I과 II+III 사이에 놓일 수도 있고, I+II와 III 사이에 놓일 수도 있다. (앞의 예에서, 첫 번째 경우와 두 번째 경우를 비교하면 I은 풀고자 하는 계이고, II는 온도계이며, III은 빛+관측자이다. 두 번째 경우와 세 번째 경우를 비교하면 I은 풀고자 하는 계+온도계이고, II는 빛+관측자의 눈이며, III은 관측자이다. 세 번째 경우와 네 번째 경우를 비교하면 I은 관측자의 망막까지의 모든 것이며, II는 망막, 시신경, 뇌이며, III은 추상적인 '나'이다.) 즉, 어느 경우에는 (2.)의 과정을 I에 적용하고, I과 II+III 사이의 상호작용에 (1.)의 과정을 적용할 수도 있고, 다른 경우에는 I+II에 (2.)의 과정을, I+II와 III 사이의 상호작용에 (1.)의 과정을 적용할 수도 있다. (각각의 경우 모두에서 III은 계산 외부(*außerhalb der Rechnung*)에 머물러 있다.)

폰노이만은 양자역학에서 측정의 문제를 논의하는 과정에서 주체적 인식이나 개인의 내적 삶을 언급하면서 이것이 계산 외부에 머물러 있다고 말한다. 따라서 결국 측정되는 계와 측정장치 사이의 상호작용에 대한 이론이 대상계+측정장치와 측정자 사이의 상호작용으로 확장될 수 없다고 인정한다. 그러나 “주관적 인식의 물리외적인 과정은 마치 그것이 물리적 세계에서 일어나는 것처럼 서술되어야 한다”고 말함으로써 관측자도 측정장치처럼 물리학적으로 기술할 수 있으리라는 생각을 버리지 않고 있다.¹²⁾

폰노이만이 소위 분산 없는 상태가 있을 수 없음을 증명함으로써 양자역학과 논리적으로 연결된 숨은 변수 이론이 존재하지 않음을 증명했다고 주장한 것은 다름 아니라 확률의 문제에서 ‘주체적 인식’이나

12) 최근 Laudisa (2025)는 폰노이만이 측정 과정에서 의식이 사영을 일으킨다고 주장했다고 여기는 기존의 믿음을 반박했다. 폰노이만은 측정에서 물질적 측면과 관측자의 의식적 측면을 심신평행론의 관점에 국한함으로써 의식의 역할에 대해서는 불가지론의 입장을 선택했으며, 관측자와 물리적 대상 사이의 경계가 유연함을 지적하고 실용적인 태도를 지켰다는 것이다. 후속 연구에서 폰노이만의 논의를 더 깊이 살펴봄으로써 단지 폰노이만의 생각을 재구성하는 데 그치지 않고 양자역학의 측정 문제가 지닌 의미를 더 심화하여 논의할 수 있을 것이다.

‘개인의 내적 삶’을 배제하기 위한 것이었다. 이를 통해 관측자도 측정 장치처럼 양자역학의 수학적 기초 안에 포함하여 물리학적으로 서술할 수 있다.

폰노이만은 양자역학에 나타나는 측정결과와 확률적 서술이 어디에서 비롯된 것인지 묻고 이에 대한 답변으로 다음 두 경우를 상정한다.

- (I.) 개별계에 대하여 추가적인 조정변수들을 알 수 없는 경우: 만일 추가적인 조정변수들을 정확히 알 수 있다면 측정결과를 정확히 예측할 수 있고 양자역학적 분산은 사라질 것이다.
- (II.) 모든 개별계가 동일한 상태에 있으며, 별개의 추가적 조정변수가 없으며, 자연의 법칙이 인과적이지 않은 경우: 측정결과를 정확히 예측할 수 없는 이유는 **우리의 지식 부족 때문이 아니라 자연이 그 자체로 원래 그렇기 때문이다.**

(I.)에서 언급된 추가적 조정변수는 양자역학의 형식이론에 들어 있지 않다. 그래서 폰노이만은 이를 ‘숨은 조정변수(verborgener Parameter)’라 불렀다. 이와 같이 숨은 변수를 도입하여 양자역학의 개념적 기초를 논의하는 접근이 숨은 변수 이론이다. 숨은 변수 이론의 주된 관심은 “상태벡터와 함께 덧붙여지는 변수(숨은 변수)들의 값을 주면, 개별 측정의 결과를 정확하게 결정할 수 있게 하는 그런 변수들이 있어서, 양자역학적 상태를 이 변수들로 규정되는 상태들의 통계적 앙상블로 간주할 수 있는가?”였다. 이 잘 정의된 가상적 상태는 ‘분산 없는(Streuungslos, dispersion-free) 상태’이다. 만일 개개의 측정 결과가 정확하게 결정된다면 확률서술이 불필요하게 되고, 물리량 R 에 대하여 기댓값(Erwartungswerte) $Erw(R)$ 은

$$Erw([R - Erw(R)]^2) = Erw(R^2) - [Erw(R)]^2 = 0$$

이라는 조건, 즉 분산이 0이라는 조건을 충족시켜야 하기 때문이다.

구체적으로, 폰노이만이 숨은 변수 없음을 증명하기 위해 세운 전제

는 다음과 같다.¹³⁾

A'. 임의의 물리량 R 이 음의 값을 가질 수 없다면 $Erw(R) \geq 0$ 이어야 한다.

B'. 임의의 물리량 $R, S, \dots$ 와 임의의 실수 $a, b, \dots$ 에 대하여 다음 등식이 성립해야 한다.

$$Erw(aR + bS + \dots) = aErw(R) + bErw(S) + \dots$$

양자역학의 수학적 서술에서는 모든 물리량에 힐버트 공간의 자기수반(에르미트) 연산자가 대응하며, 상태는 힐버트 공간의 벡터에 대응한다. 양자역학의 대수적 구조에서는 다음 규칙이 성립한다.

I: 물리량 R 이 연산자 $\hat{R}$ 로 표현된다면, 물리량 $f(R)$ 은 연산자 $f(\hat{R})$ 로 표현된다.

II: 물리량 $R, S, \dots$ 이 연산자 $\hat{R}, \hat{S}, \dots$ 로 표현된다면, 물리량 $R + S + \dots$ 은 연산자 $\hat{R} + \hat{S} + \dots$ 로 표현된다. (물리량 $R, S, \dots$ 이 동시에 측정가능하다는 가정은 필요하지 않다.)

폰노이만은 이 전제들을 충족하는 가장 일반적인 기댓값 함수가

$$Erw(R) = Spur(\hat{U}\hat{R})$$

로 주어짐을 증명했다. 여기에서 $\hat{R}$ 은 물리량 R 을 나타내는 에르미트 연산자이며, $\hat{U}$ 는 통계연산자 또는 상태연산자로서 자국 1인 양의 자기수반 자국류 연산자이고, $Spur()$ 는 대각합(trace)이다. 상태연산자를 행렬로 나타내면 밀도행렬이 된다. 순수상태인 경우에는 상태연산자가 $\hat{U} = P_\phi$ 와 같이 사영연산자로 주어지므로

13) von Neumann (1932) p. 165; von Neumann (2018) p. 203.

$$Erw(R) = Spur(\hat{U}\hat{R}) = (\hat{R}\phi, \phi) = \langle \phi | \hat{R} | \phi \rangle$$

가 된다.

즉 폰노이만은 A', B', I, II를 전제하면서 양자역학의 힐버트 공간 정식화를 유지하려면, 그 상태는 반드시 상태연산자로 주어짐을 증명했다. 이제

$$Erw(R^2) = [Erw(R)]^2$$

를 충족시키는 기댓값 함수가 존재하는지 따져보아야 한다. 그런데 상태의 수학적 서술이 상태연산자로 주어진다면, $Spur(\hat{U}\hat{R}^2) \neq [Spur(\hat{U}\hat{R})]^2$ 이기 때문에 위의 조건을 충족하는 상태연산자가 존재하지 않는다. 따라서 힐버트 공간 정식화에서 숨은 변수들의 분산 없는 상태는 존재할 수 없다. 즉 통계역학의 경우처럼 더 기본적인 이론의 확률적 서술의 결과로 양자역학이 나타난 것이 아니다.

폰노이만은 이 증명을 기반으로 양자역학의 힐버트 공간 정식화에서 드러나는 확률적 서술은 불가피하며 인과율을 거론할 수 없다는 결론을 내렸다.

“현재로서는 자연에서 인과율에 관한 어떤 논의도 계속할 이유가 없다고 할 수 있다. 왜냐하면 거시적 경험은 근본적으로 이러한 목적에 적합하지 않기 때문에 어떤 경험도 인과율의 존재를 뒷받침하지 못하며, 기본 과정에 대한 우리의 경험과 상통하는 유일한 이론인 양자역학은 인과율과 모순되기 때문이다.”¹⁴⁾

14) von Neumann (1932), p. 173; von Neumann (2018), p. 213.

3. 숨은 변수 금지정리의 오류와 그레테 헤르만

1966년 존 스튜어트 벨이 “양자역학의 숨은 변수 문제”라는 논문에서 폰노이만의 금지정리를 다시 살펴보기 전까지 폰노이만의 영향력은 막강했고, 폰노이만의 증명이 틀렸다고 생각한 사람은 별로 없었다.¹⁵⁾ 벨의 논의는 정확히 폰노이만의 증명에 담긴 ‘오류’를 향해 있다.

벨에 따르면, 폰노이만의 증명 과정에서 가장 핵심적인 가정은 “임의의 두 에르미트 연산자의 실수 선형결합은 하나의 관측가능량을 나타내며, 기댓값의 선형결합은 선형결합의 기댓값과 같다.”라는 것이다.¹⁶⁾ 벨은 폰노이만이 제시한 위의 전제 중 특히 B’에 반대했다. 얼핏 보면 기댓값 함수의 선형성을 요구하는 것이 합리적인 듯 보이지만, 서로 가환이 아닌 연산자들로 표현되는 물리량들을 고려하면 그러한 전제가 부당함을 알 수 있다는 것이다. 즉 그 연산자들의 합의 기댓값이 기댓값들의 합으로 주어지는 것은 II와 같은 양자역학의 경우에 특별하게 성립하는 것이다. 이를 가상적인 분산 없는 상태들에 대해서도 성립한다고 가정해야 할 이유가 없다는 것이 벨의 주장이었다.

이후 벨은 “폰노이만의 ‘매우 일반적이고 그럴듯한 가설들’은 사실 말이 되지 않는다.”라고 더 강하게 비판했다.¹⁷⁾ 심지어 나중에는 한 인터뷰에서 “폰노이만의 증명은 엇나간 것이 아니라 엉터리입니다. 단지 틀린 게 아니라 어리석습니다.”라고 말하기도 했다.¹⁸⁾ 그러나 폰노이만의 명성과 권위는 실로 대단한 것이어서 벨의 논문이 나오기까지 사실상 아무도 폰노이만의 증명이 잘못된 것으로 생각하지 않았다.¹⁹⁾

15) Bell (1966), 특히 p. 448.

16) Bell (1966) pp. 448-9.

17) Bell (1982).

18) Bell (1988).

19) 벨의 논의를 중심으로 폰노이만의 불가능성 증명은 폰노이만의 오류로 여겨져 왔지만, 이에 반대하는 견해도 있다. Bub (2010), Dieks (2017) 참조.

그레테 헤르만은 벨의 논문보다 33년 이른 1933년, “결정론과 양자역학”이라는 제목의 초고에서 폰노이만의 금지 정리가 틀렸음을 밝히고 대안을 제시했다. 그러나 그 업적은 오랫동안 감추어져 있었다. 1935년에 이 논문 초고를 확장하여 “양자역학의 자연철학적 기초”라는 제목의 논문을 발표했는데, 그 논문이 실린 곳은 <프리스 학파 저작집 (Abhandlungen der Fries'schen Schule)>이라는 알려지지 않은 학술지였고, <자연과학들 Naturwissenschaften>에 실린 다섯 쪽짜리 요약문에는 폰노이만의 증명에 대한 논의가 빠져 있었다.²⁰⁾

이 논문 초고의 핵심적인 질문은 다음과 같다.

“양자역학의 여러 주장자가 주장하듯이 어떤 특성의 물리적 측정의 결과가 원리적으로 예측불가능하다는 것은 양자역학의 필연적인 정리 중 하나인가, 아니면 가능한 물리적 경험의 설명을 위해 양자이론의 가치에 흠집을 전혀 내지 않고 이 이론으로부터 그러한 주장을 떼어낼 수 있는가?”²¹⁾

헤르만은 이 논문 초고에서 후자가 가능함을 설득력 있게 논증하고 있다. 하이젠베르크가 제기한 불확정성 원리 또는 미결정성 정리는 존재론적으로 심각한 문제를 제기한다. 차라리 측정의 교란에서 비롯된 것이라면 실용적 차원에서 원하는 정도의 정밀도로 측정을 수행하는 방안을 고안해 낼 수도 있겠지만, 불확정성 원리 또는 미결정성 정리는 물리학 이론의 차원에서 특성의 물리량들이 확정된 값을 지니지 않는다는 주장이다.

헤르만이 양자역학의 자연철학적 기초로서 다루는 핵심 개념은 예측가능성의 한계이다. 인과율과 예측가능성의 문제를 입자-파동 이중성 실험들과 불확정성 관계를 통해 고찰한 뒤에 파동함수의 확률해석을 다룬다. 양자역학에서 확률이 필연적으로 나타난다 해도 실상 더 근본적인 이론이 있고 그 하부의 이론에 대한 통계적 처리를 통해 확률이 나오는 것이라면, 즉 양자역학의 확률이 지식의 부족을 나타낼 뿐이라

20) Hermann (1935a); Hermann (1935b); Hermann (1996); Hermann (1999).

21) Hermann (1935a), Hermann (2017), p. 188.

면, 양자역학에서 인과율과 예측가능성에 심각한 문제가 있는 듯이 보이는 개념적 난점을 해결할 수 있다. 이것이 소위 숨은 변수의 문제이다. 앞에서 살펴본 것처럼 폰노이만이 숨은 변수 이론이 가능하지 않음을 증명한 것은 이후 양자역학의 개념적 전개에서 결정적인 역할을 했다. 양자역학이 완결된 이론이고 더 하부의 이론이 있는 게 아니라는 함축을 지니기 때문이다. 그러나 이는 인식론적으로 위기 상황이다. 양자역학에 내재해 있는 불확정성 또는 미결정성과 여기에서 비롯된 예측불가능성과 인과율에 대한 도전이 도무지 피할 수 없는 것이라면, 우리가 자연과학 특히 물리학에 기반을 두고 근원적인 사유를 할 수 없다는 의미일 수도 있다.

이 대목에서 헤르만이 주목한 것이 폰노이만 증명의 오류이다. 폰노이만의 증명이 옳지 않다면 아직 숨은 변수 이론을 통해 예측가능성과 인과성을 살릴 가능성이 남아 있는 것이다. 헤르만은 폰노이만의 증명에는 논리적 순환이 있었고, 가정해서는 안 되는 가정을 암묵적으로 포함했기 때문에 그 자체로 잘못된 증명은 아니라 해도 하나의 정리로서는 근본적인 어려움을 안고 있음을 밝혔다. 헤르만이 지적한 것은 동시에 측정할 수 없는 물리량들에 대응하는 연산자의 합에 대한 기댓값이 기댓값의 합과 같다는 가정이 순환적이라는 점이었다. 즉 두 물리량 R, S 에 대하여 $((R+S)\varphi, \varphi) = (R\varphi, \varphi) + (S\varphi, \varphi)$ 가 성립하기 위해서는 두 물리량을 동시에 측정할 수 있어야 한다. 여기에서 핵심은 $(R\varphi, \varphi)$ 라는 수학적 표현의 의미가 무엇인가 하는 것이다. 숨은 변수 금지 정리를 증명하기 위해서는 이 표현이 양자역학의 기댓값과 같다고 가정하면 안 된다. 두 물리량을 동시에 측정할 수 있다면 통계적으로 공통된 파동함수 φ 를 할당할 수 있지만, 그렇지 않다면 위의 등식을 증명해야 한다. 하지만 폰노이만의 증명 과정에서는 이 증명이 빠져 있고, 오히려 전체 논증의 가정으로 들어 있다. 결국 양자역학의 서술을 분산 없는 상태에 대한 통계적 서술로 바꾸려는 숨은 변수 이론이 존재하지 않는다는 폰노이만의 증명은 순환적이며, 단지 그 가정을 용인하는 특별한 종류의 숨은 변수 이론을 금지할 뿐이라는 것이 헤르만의 결론이었다.

헤르만은 “결정론과 양자역학” 초고를 디랙에게 보냈다. 그 기본 형식체계가 디랙의 이론이었기 때문이다. 디랙이 여기에 답신했는지는 알 수 없다. 그런데 이 초고는 코펜하겐으로도 보내졌다. 초고가 남아 있지는 않지만, 보어와 바이츠제커가 헤르만의 논문을 심각하게 받아들여 답신했고, 또 이를 하이젠베르크와도 논의했다. 바이츠제커가 1933년 12월 17일 헤르만에게 보낸 편지에 따르면 1934년 1월 베를린에서 헤르만과 하이젠베르크가 만나는 약속을 잡았지만, 결국 성사되지 않았다. 1934년 2월 9일 헤르만이 하이젠베르크에게 보낸 편지를 근거로 하면, 헤르만은 2월에 이미 라이프치히에 와 있었다. 헤르만이 라이프치히에 얼마나 머물렀는지는 알 수 없지만, 그 무렵 학술교류의 결과가 1935년 3월에 발표된 “양자역학의 자연철학적 기초”였다. 이 논문을 논의하기 전에 하이젠베르크가 같은 해에 쓴 원고를 살펴보자.

4. “양자역학의 결정론적 완전화가 가능할까?”

1935년 5월 미국물리학회와 <피지컬 리뷰>에 발표된 아인슈타인-포돌스키-로젠(EPR)의 논문(“물리적 실재에 대한 양자역학의 서술이 완전하다고 할 수 있을까?”)은 독특한 사고실험을 통해 양자역학이 모순적인 이론은 아니지만 실재에 대한 완전한 서술이 아니라는 논증을 제시함으로써 많은 물리학자에게 심각한 논쟁거리를 던졌다.²²⁾ 파울리는 1935년 6월 15일에 하이젠베르크에게 보낸 편지에서 EPR 논문에서 다루어지는 논변을 상세하게 이야기하면서, 그 논문을 반박하는 논문을 투고해 보라고 권했다.²³⁾

파울리는 아인슈타인이나 라우에 같은 구세대는 양자역학이 올바르

22) 이와 관련된 다양하고 풍부한 논의는 대개 EPR과 보어의 논쟁 정도로 축소된 형태로만 알려져 있다. Bacciagaluppi and Crull (2024)는 이와 관련된 주요 사료의 영어 번역과 함께 관련된 논의를 상세하게 다루고 있다.

23) Pauli (1985), pp. 402–5.

긴 하지만 불완전하다는 생각을 버리지 못한다고 지적한다. 그는 불완전한 이론이란 이론에 포함된 명제를 바꾸지 않으면서 이론에 포함되지 않은 새로운 명제를 통해 완전하게 만들 수 있는 이론을 가리킨다고 말하면서 기체분자운동론을 예로 들었다. 이론의 불완정성 개념은 이론이 제시하는 확률 서술이 서술자의 지식의 부족함을 나타낸다. 파울리는 하이젠베르크가 이전에 말했던 ‘가장자리’ 이야기를 상세하게 논의해 보라고 조언했다. 대개 ‘하이젠베르크 가장자리(절단, Schnitt)’라 부르는 것은 거시적 측정장치/측정자와 미시적 대상 사이에 놓이는 경계를 가리킨다. 하이젠베르크는 1929년 시카고 대학 초청강연 때부터 이 가장자리가 유동적임을 주장했으며, 1934년 하노버에서 열린 의학자 학술회 강연에서도 이를 다루었다.

하이젠베르크는 파울리의 요청에 부응하여 7월 2일에 보낸 답신에 “양자역학의 결정론적 완전화가 가능할까?”라는 제목의 짧은 논문을 동봉했다.²⁴⁾ 세 개의 절로 이루어진 이 논문에서 §1은 ‘가장자리’의 위치가 유동적임을 상세하게 해명하고, §2에서는 이를 이용하여 숨은 변수를 도입하여 양자역학을 결정론적으로 만드는 것이 허용되지 않음을 밝히고 있다. §3은 그레테 헤르만의 논문에 대한 논평과 함께 양자역학의 결정론적 완전화가 불가능한 이유는 양자역학이 이미 완전한 이론이기 때문임을 설명한다.

먼저 §1에서 하이젠베르크는 양자역학에 고유한 통계적 예측은 거시적 측정장치와 미시적 대상 사이의 ‘가장자리’에서만 가능함을 주장한다. 왜냐하면 슈뢰딩거 방정식을 엄밀하게 따르는 미시적 대상에서는 상태가 결정론적이고, 측정장치와 측정자를 서술하는 고전역학적 영역도 결정론적인 방정식을 따라 서술되기 때문이다. 그런데 이 가장자리는 원자 A와 이에 대한 측정장치인 B, 그리고 다시 이 둘이 복합된 A+B에 대한 측정장치 C로 연장할 수 있고 측정자까지 계속 이동할 수 있다. 이러한 가장자리의 이동은 전체적인 서술에서 일관되어야 하며 모순을 일으키지 않아야 하므로 어떤 식으로든 유동적이

24) Heisenberg (1985). 이에 대한 역사적 맥락과 세부 내용에 대하여 Bacciagaluppi and Crull (2009) 참조.

어야 한다.

숨은 변수 이론은 모종의 추가적 변수를 도입하여 양자역학의 통계적 예측을 결정론적인 것으로 바꾸려는 기획이다. 하이젠베르크는 §2에서 측정의 상황을 다른 물리량의 측정으로부터 영향을 받을 때(이른바 맥락 의존적인 경우)와 그렇지 않은 경우로 구별한다. 앞의 경우에는 측정결과가 관측의 맥락에 따라 달라지는 것이므로, 가장자리의 유동성을 기반으로 가장자리를 고전역학으로 서술할 수 있는 영역으로까지 후퇴시킨다면, 관측을 한참 나중에 하더라도 앞에서 거시적 사건이 일어날 수 있음을 의미하기 때문에 불합리하며 이런 종류의 숨은 변수 이론은 허용되지 않는다고 하이젠베르크는 주장한다. 맥락독립적인 경우에는 그런 종류의 숨은 변수 이론이 양자역학의 확립된 경험적 현상과 모순됨을 보일 수 있다. 따라서 이 경우에도 숨은 변수 이론은 있을 수 없다. 후자는 알파선을 방출하는 방사성원소의 예로 설명된다. 대상계 A가 방사성원소라고 측정장치 B는 회절격자라고 하자. 만일 숨은 변수가 존재하여 알파입자가 회절격자에 충돌하는 각도와 방향을 정확히 예측할 수 있다고 가정하면, 그 충돌은 국소적이어서 경험적으로 확립된 회절간섭무늬를 설명할 도리가 없다. 숨은 변수가 있다면 간섭무늬는 사라진다.²⁵⁾ 따라서 이 경우에도 숨은 변수를 도입하여 양자역학을 완전하게 만들고자 하는 시도는 실패한다.

§3은 하이젠베르크의 접근이 헤르만과의 교류에 직접적이며 광범위하게 영향을 받았음을 명료하게 보여준다. 하이젠베르크는 자서전이라 할 수 있는 <부분과 전체>에서 한 장을 할애하여 헤르만과의 논쟁을 다루었지만, 이를 단순히 칸트 철학이 양자역학에 가지는 함의에 대한 이야기로 애써 축소하여 서술한다. 이와 달리 1935년의 미출판 원고에서는 숨은 변수를 도입하여 양자역학을 완전한 이론으로 바꾸는 것이 근본적으로 불가능하다는 생각을 헤르만의 논의와 매우 유사한 방식으로 전개하고 있다. 단지 헤르만의 논의와 비슷한 것이 아니라 적극적으로 헤르만의 1935년 논문을 인용하고 그 중요성을 강조하고 있다.

25) 이는 1980년대 이래 상세하게 다루어진 ‘결풀림(decoherence)’과 연관된다.

5. 헤르만의 인과성과 완전성

하이젠베르크는 1932년 폰노이만의 저서를 인용하긴 하지만 거기에 담긴 숨은 변수 금지정리는 직접 반박하지 않았다. 이와 달리 헤르만은 “결정론과 양자역학”에서 폰노이만의 증명에 담긴 순환논리를 정확하게 지적하고 반박함으로써 숨은 변수가 금지되지 않는다는 논의로 나아갔다.

헤르만은 1934년 라이프치히로 가서 하이젠베르크 및 바이츠제커 등과 교류하면서 결정론에 관련된 생각을 바꾸었다.²⁶⁾ 폰노이만의 증명은 양자역학에 숨은 변수를 도입하여 기체분자운동론(열통계역학)에서처럼 통계적 서술의 기반에 놓여 있는 더 근본적인 이론을 도입할 가능성을 차단하는 듯 보였다. 그러나 그 증명이 잘못되었다 하더라도, 그것이 곧 숨은 변수 이론이 가능하며 이를 통해 결정론을 회복해야 함을 필연적으로 함축하는 것은 아니다. 즉 19세기 물리학을 풍미한 라플라스 악마의 결정론이 유지될 수 있다는 것은 아니다.

숨은 변수 이론의 핵심은 양자역학의 확률통계적 서술을 인식적(epistemic) 확률로 이해할 수 있는가, 아니면 이것이 세계가 근본적으로 무작위적이기 때문에 나타나는 존재적(ontic) 확률로 보아야 하는가의 문제이다. 전자의 접근은 확률을 도입하지 않는 더 근본적인 궁극이론이 존재하고 이에 대한 확률통계적 서술이 양자역학이라고 믿는 것이다. 이런 경우 하이젠베르크 부등식은 인식적 불확실성(uncertainty)이나 측정상의 교란을 통한 부정확한 지식을 의미한다. 이와 달리 후자의 접근에서는 가환이 아닌 물리량들에 대해 존재적 미결정성(indeterminacy)을 인정하며, 더 근본적인 궁극이론을 굳이 도입하지 않는다.

하이젠베르크는 이 문제를 더 깊이 파고들지 않고 미결정성과 관련된 하이젠베르크 부등식이 양자역학을 이해하기 위한 근원적인 원리라는 주장으로 나아갔지만, 헤르만은 물리세계에 왜 존재적 미결정성이 존재한다고 말하는 것인지, 그리고 그것이 모든 과학이론에 적용되는 인과성과 어떤 관계에 있는지 논의했다.

26) 헤르만은 1934년 어머니에게 보낸 편지들에서 하이젠베르크의 영향을 직접 언급하고 있다. Herrmann (2017), pp. 463-72.

헤르만의 “양자역학의 자연철학적 기초”는 세 개의 장과 18개의 절 (§)로 이루어져 있다. 1장 “예측가능성의 한계”는 인과성과 예측가능성의 관계를 라플라스의 악마와 연결시키고 (§1), 양자역학의 이중성과 미결정성 관계식을 예측가능성의 관점에서 논의한 뒤 (§§2-3), 파동함수의 확률해석을 명료하게 하고 나서 (§§4-5), 디랙의 최대관측 개념을 비판하고 (§6) 폰노이만의 숨은 변수 금지 정리 증명의 오류를 지적한다 (§§7-10). 이로부터 라플라스 악마의 종말을 논의한다 (§11). 2장에서는 인과성과 양자역학 (§12), 대응과 상보성 (§13), 상보적 표현의 필연성 (§14), 고전적 자연서술과 양자역학적 자연서술 (§15)을 차례로 논의한다. “초월관념론”이라는 제목이 붙은 3장은 이율배반의 문제 (§16), 비판철학과 양자역학 (§17), 진리의 분열 (§18)을 논의한다.

헤르만은 이 논문의 도입부에서 양자역학은 동역학의 한 형태일 뿐이지만 이로부터 인과성이라는 철학적 개념이 근본적인 도전을 받고 있다고 진단한 뒤, 이를 어떻게 극복할 수 있을 것인가 해결책을 모색하는 것을 목표로 설정한다. 라플라스 악마의 핵심은 현재의 상태는 과거 상태의 결과이며 미래 상태의 원인이라는 것이다. 따라서 현재 상태를 알면 이로부터 일어났거나 일어날 모든 일을 예측할 수 있다. 그러나 하이젠베르크의 미결정성 관계식에 따르면, 위치가 정확히 정해지면 운동량이 결정되지 않고 마찬가지로 운동량이 정확히 정해지면 위치가 정해지지 않는다. 이러한 원리적 한계는 양자역학의 형식체계가 근본적으로 제한된 예측만을 허용함을 의미한다. 또한 슈뢰딩거의 파동역학에서 파동함수의 절대값 제곱이 전자가 그 위치에 있을 확률을 나타낸다는 것은 언제나 물리계의 양상블에 대한 서술임을 지적한다. 개별 전자의 위치는 어느 구간 안에서 분산을 보일 수밖에 없다. 따라서 전자의 위치에 대한 정확한 예측은 필연적으로 배제된다.

헤르만의 “양자역학의 자연철학적 기초”의 §10은 바이츠제커의 1931년 논문²⁷⁾에 대한 상세한 분석을 담고 있다. 바이츠제커가 19살 나이에 발표한 이 논문에는 하이젠베르크가 제안한 현미경 사고실험을 확장하여 전자가 속박된 판을 어디에 놓는가에 따라 전자의 입자성을

27) Weizsäcker (1931); Filk (2016).

보거나 파동성을 볼 수 있다는 논변이 있다. 전자들이 있는 판에 빛을 쏘이면 빛 양자가 전자와 산란한 뒤 렌즈를 거쳐 스크린에 상을 만든다. 바이트제커는 하이젠베르크와 파울리가 세운 양자전기역학의 형식 체계를 이용하여 단일 빛 양자의 파동함수를 고전적인 전자기파와 같은 방식으로 계산했다. 전자가 있는 판을 이미지 평면(Bildebene)에 놓으면 빛 양자의 파동함수가 구면파로 서술되기 때문에 이를 이용하여 전자의 위치를 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 이 경우 전자의 방향 즉 운동량은 알 수 없다. 이와 달리 전자가 있는 판을 렌즈의 초점 평면(Brennebene)에 놓으면 전자와 산란한 빛 양자가 평면파로 서술되기 때문에 이를 이용하여 전자의 진행방향과 운동량을 정확히 계산할 수 있다. 하지만 이 경우에는 전자의 위치를 알 수 없다. 이는 하이젠베르크가 미결정성 관계에서 주장한 내용과 일치한다.

헤르만은 바이트제커의 논의를 확장한다. 바이트제커는 전자와 빛 양자의 산란을 하이젠베르크-파울리 양자전기역학으로 계산하고 그 계산 결과가 하이젠베르크 미결정성 관계와 일치함을 보이는 것을 목표로 삼았지만, 헤르만은 이를 통해 전자에 대해 무엇을 알 수 있는가 하는 문제로 옮겨갔다. 전자가 간혀 있는 판에 주목하는 대신 빛 양자가 렌즈를 통과한 뒤 사진건판에 어떻게 상을 맺는가에 주목하면 양자역학의 근본적인 문제를 다룰 수 있다. 헤르만은 (1) 사진건판을 이미지 평면에 놓으면 전자의 위치에 대한 정보를 정확히 얻을 수 있지만 운동량은 알 수 없고, (2) 사진건판을 초점 평면에 놓으면 빛 양자에서 전자로 전달된 운동량에 대한 정보를 정확히 얻을 수 있지만 위치 정보는 알 수 없음을 명료하게 논의한 뒤에 세 번째 경우를 덧붙인다. 이것은 사진건판을 아예 두지 않음으로써 빛 양자를 검출하지 않고 제 갈 길을 가게 하는 것이다. 이때 빛 양자와 전자의 상태는 어떻게 서술될까?

“이때 빛 양자와 전자로 구성된 물리계의 파동함수는 각 항이 전자를 서술하는 파동함수와 빛 양자를 서술하는 파동함수의 곱이 되는 선형 결합이다. 이 빛 양자와 전자의 선형결합에서는 각각은 그 자체로 서술되지 않으며, 오직 서로에 대한 관계를 통해서만 서술된다. 한쪽의 상태가 다른 쪽의 상태와 연관되어 있다.”²⁸⁾

이 단락은 이제까지 양자역학의 역사를 탐구하던 연구자들의 눈에 띄지 않았지만, 슈뢰딩거가 1935년 11월 무렵부터 논의하기 시작한 양자얽힘(Verschänkung)의 개념을 정확히 서술하고 있다. 헤르만은 양자역학의 근본 문제가 이 상태의 상대성과 얽힌 상태를 명료하게 이해하는 것에 달려 있음을 분명하게 서술하고 있다.²⁹⁾ 가정법적 상태서술, 즉 만일 사진건판을 이미지 평면에 놓는다면 전자의 위치를 정확히 예측할 수 있고, 만일 사진건판을 초점 평면에 놓는다면 전자의 운동량을 정확히 예측할 수 있는 그런 상태의 서술이 숨은 변수의 문제를 해결할 수 있는 핵심적인 실마리라는 것이다.

헤르만은 1장의 마지막 절(§11)에서 라플라스 악마의 종말을 선언한다. 양자역학에서 미결정성 관계에 기반을 둔 논의에서 확률적 서술은 불가피하며, 라플라스 악마로 대변되는 결정론은 이제 양자역학에서 자리를 찾을 수 없다. 양자역학의 형식체계에서는 미래의 측정에 대한 예측이 원리적으로 가능한가에 의문을 제기하고 있다. 그렇다면 이대로 자연과학에서 가장 근본적이라 할 인과성을 포기해야 할 것인가? 헤르만의 대답은 ‘아니오’이다. 헤르만이 하이젠베르크와 바이츠제커와 토론하면서 한 말이 좋은 실마리가 된다. 헤르만은 칸트를 인용하면서 인과성의 원리는 경험을 통해 확증되거나 반박될 수 있는 경험적 주장이 아니라 선험적임을 강조한다. 인과성의 원리는 자연과학을 가능하게 하는 근본적인 전제이며 사고의 도구이다.³⁰⁾

하지만 헤르만이 단지 칸트 철학을 양자역학에 적용하려던 것이라 보면 안 된다. 헤르만은 처음에 인과율을 결정론과 직접 연결되는 것으로 받아들여서 양자역학에서 결정론을 복원하려 했으나, 하이젠베르크 및 바이츠제커와의 대화를 통해 이 접근을 버렸다. 그러나 인과율을 버리는 것은 자연과학의 접근 전체를 바닥부터 부정하는 것이다.

헤르만은 양자역학에 내재된 확률서술의 문제를 양자역학에 고유한 상태의 상대적 서술에 연관시키면서, 보어의 상보성 개념에서 고전적

28) Herrmann (2017) p. 232

29) Schrödinger (1935a); Schrödinger (1935b); Schrödinger (1936).

30) Heisenberg (1969).

상태서술과 양자역학적 상태서술이 둘 다 필요하다는 논증으로 나아간다. 보어에 따르면, 양자역학은 대응원리와 상보성원리에 기반을 두어야 하며, 상보성 서술은 필연적이다. 그런데 헤르만은 당시의 물리학자들과 확연하게 구별되는 관점을 제시했다. 이 상보성이라는 것은 가령 입자와 파동의 상보성 같은 것에 국한하는 물리적 개념이 아니다. 그것은 오히려 자연을 서술하는 방식에서 고전적 서술과 양자역학적 서술이 필연적으로 함께 있어야 함을 의미한다. 여기에서 고전적 서술이라는 것은 단순히 고전역학의 개념과 수학적 언어로 서술한다는 의미가 아니라 일상 언어를 통한 서술에 더 가깝다.

헤르만은 자신의 접근을 야코프 프리드리히 프리스와 레오나르트 벨존의 개념에 기반을 둔 칸트의 비판철학(신칸트주의)으로 연결한다.³¹⁾ 초월관념론이 필요한 이유를 바로 양자역학에서 가져오는 셈이다. 다르게 말하면, 양자역학의 난점들을 초월관념론을 통해 해소하려는 프로젝트이다. 헤르만은 이후 “과거의 이론과 현대의 이론에서 물리적 예측의 기초”(1937a)와 “현대물리학이 인식이론에 대해 가지는 의미”(1937b) 등에서 양자역학의 기초를 칸트의 초월철학에 입각하여 더 상세하게 논의했다. 이것은 양자역학에 내재하는 확률통계적 서술을 물리학에 국한하여 해결하는 대신 철학적 논의로 확장하는 것이라 할 수 있다.

헤르만은 양자역학에서 결정론을 구제하는 것이 근본적으로 가능하지 않음을 인정하면서 결국 존재적 미결정성이 양자역학의 불가피한 결론임을 받아들였지만, 인과율을 버릴 수는 없었다. 헤르만이 찾아낸 해결책은 역예측이다. 헤르만에 따르면, 양자역학적 상태를 정확하게 알더라도 측정결과가 어떻게 될지 결정론적으로 예측하는 것은 일반적으로 허용되지 않지만, 측정결과를 안다면 그 눈금의 값으로부터 처음 상태를 역추적할 수 있다.³²⁾ 따라서 원인-결과의 연쇄는 훼손되지 않는

31) 프리스주의자로서의 헤르만의 접근에 대한 더 상세한 논의로 Paparo (2017)를 참조할 것. 칸트 철학과 헤르만의 자연철학의 연결점에 대하여 Kauark-Leite (2012) pp. 101-154 참조.

32) 익명의 심사자는 주어진 상태가 고유상태가 아니라면 측정 후 관측값으로부터 원래 상태의 확률진폭에 대한 정보를 회복할 수 없으므로 헤르만의 이 주장이 옳지 않다고 지적했다. 그러나 양자상태 토모그래피(Quantm State Tomography)에서는 앙상블에

다. 오히려 여기에 추가적인 숨은 변수를 도입하면 원인-결과의 연쇄가 과잉결정되어 문제를 일으킨다.³³⁾ 따라서 숨은 변수를 도입하여 양자역학의 완전성을 확보하겠다는 기획은 근본적으로 잘못된 방향이다.

헤르만은 양자역학의 측정 문제가 결정론의 문제와는 다른 더 근본적인 문제이므로 물리학의 틀 안에서 해결될 수 없다고 믿었다. 이후의 논의에서는 양자역학이 이미 완전한 이론임을 전제한 채로 신칸트주의적 초월관념론의 주장들을 통해 양자역학의 측정 문제가 부적절한 문제라는 방향으로 나아가고 있다. 헤르만의 논의를 당대의 물리학자들이 거의 따르지 않은 것은 물리학의 문제를 해결하는 데 거의 도움이 되지 않는 듯이 보였기 때문이라 할 수 있다.³⁴⁾

6. 론돈-보에의 측정이론

1939년 프리츠 론돈(Fritz London)과 에드몽 보에(Edmond Bauer)는 양자측정의 이론을 근본적으로 새롭게 다룬 이론을 발표했다.³⁵⁾ 론돈-보에는 대상계, 측정장치, 관측자 각각의 상태를 모두 고려함으로써, 관측자를 논의의 대상에서 제외했던 폰노이만의 측정이론을 확장했다. 그러나 이는 단순히 새로운 측정이론을 하나 만들려던 것이 아니었다.

양자역학의 서술은 근본적인 모순을 드러낸다. 입자의 운동은 확률적으로만 정해지지만, 이 확률의 시간적 변화는 인과적 법칙에 따른다.

대한 측정결과로부터 여러 기법을 사용하여 원래의 상태를 실용적으로 찾아낼 수 있다. 헤르만의 논의에서는 확률서술이 언제나 앙상블에 대한 것이고, 그 실질적 내용은 현대의 양자상태 토모그래피와 연결되기 때문에, 헤르만의 문장이 틀렸다고 말할 수 없다. 또한 헤르만의 논의는 측정결과와 측정 전의 상태가 연결되어 있기 때문에 인과율 즉 원인-결과의 연쇄가 훼손되지 않는다는 점이 중요하다.

33) Herrmann (2017) p. 226

34) 이 논문의 접근에서는 헤르만이 대상세계가 인식 주체 또는 관측자와 독립하여 실재한다는 전제에서 벗어나지 못했다는 점이 중요하다.

35) London and Bauer (1939). 이 논문의 영역본은 Shimony, A., Wheeler, J. A., Zurek, W. H., McGrath J. and McLean McGrath S.의 세 판본으로 있던 것을 1982년에 종합한 것이 Wheeler and Zurek (1983), pp. 217-59에 실렸다.

상태를 나타내는 슈뢰딩거 함수 ψ 는 인과적 법칙에 따라 변화하므로, 특정 순간의 상태에 대한 지식을 가지고 있으면 나중 상태에 대한 지식을 유일하게 결정할 수 있다. 그러나 상태는 특정 순간의 관심 대상이 되는 계에 대한 데이터 모음이다. 물리량에 대한 예측이 일의적이지 않다면, 이는 상태에 대한 우리의 지식이 완전하지 않기 때문이거나 아니면 인과성이 성립하지 않기 때문이다. 그러나 특정 순간의 상태에 대한 지식으로부터 나중 상태에 대한 지식을 일의적으로 얻을 수 있다면, 여하간 대상에 대한 최대의 서술을 확보하고 있다는 말이 된다. 그렇다면 도대체 어디에서 확률이 개입하는가?

론돈-보에는 다음과 같은 딜레마를 제시한다.

1. ψ 함수가 브라운 운동처럼 보통의 확률함수의 성질을 지닌다고 상상할 수 있다. 확률은 구체적 상황에서 실현될 가능성의 정도를 예측해 주며, 관측을 수행하고 난 뒤에는 우리가 대상에 대해 가지고 있는 지식을 갱신할 수 있다. 이 경우 ψ 함수는 대상 자체의 상태가 아니라 대상에 대한 우리의 부분적 지식의 상태를 나타낼 것이다.
2. 반대로 ψ 함수가 광학의 파동함수처럼 대상적인 속성을 지닌다고 상상해 보자. 그러면 이는 대상의 상태에 대한 완전한 최대의 서술을 나타낸다. 그러나 그런 경우 ψ 함수가 확률을 나타낸다는 말을 이해할 수 없게 된다. ψ 함수로부터 얻을 수 있는 실험적인 예측을 확인하고 그중 어떤 결과가 실현되는지 관측할 수 있지만 특정의 확률로만 그렇게 할 수 있다면, 무슨 권리로 이미 완전한 지식을 가지고 있는 것에 대해 관측이 새로운 지식을 더해 준다고 말할 수 있는가?

론돈-보에는 이 대목에서 결국 대상의 상태에 대한 미결정성이 발생하는 곳은 정확히 측정의 순간임을 지적한다. 왜냐하면 측정 이전 상태의 서술은 슈뢰딩거 방정식처럼 인과적 규칙을 따르므로 미결정성이 생겨날 수 없고, 측정 이후에는 고전적인 서술이 되므로 역시 미결정성이 생겨날 수 없기 때문이다. 이는 하이젠베르크가 언급한 가장자리 논변과 같다.

론돈-보에는 양자역학의 고유한 ‘잠재성’ 확률(‘potential’ probabilities)과 기존의 확률 개념을 구별하기 위해 통계연산자 또는 밀도행렬의 형식체계를 도입한다. 이와 관련된 여러 수학적 개념과 도구를 소개한 뒤에 순수상태는 혼합상태의 형식으로 나타낼 수 없음을 증명하고 있다. 이 형식체계가 빛을 발하는 것은 두 개의 부분계로 이루어진 복합계를 다룰 때이다.³⁶⁾

계가 두 부분계 I과 II로 이루어져 있고 각각의 계가 모두 순수상태에 있어서

$$\psi(x) = \sum_k \psi_k u_k(x) \quad (\text{계 I})$$

$$\phi(y) = \sum_\rho \phi_\rho v_\rho(y) \quad (\text{계 II})$$

로 서술될 때, 두 부분계가 접촉하기 전에는 복합계의 상태는

$$\Psi(x, y) = \psi(x)\phi(y) = \sum_{k, \rho} \psi_k \phi_\rho u_k(x) v_\rho(y)$$

가 되지만, 두 부분계가 접촉하여 상호작용하고 난 뒤에는 위와 같은 곱의 꼴로 쓸 수 없고, 일반적으로

$$\Psi(x, y) = \sum_{k, \rho} \Psi_{k\rho} u_k(x) v_\rho(y)$$

로 서술된다. 이때 어느 한 부분계만 본다면 계 I의 상태는 $P_{lk}^I = \sum_\rho \Psi_{l\rho} \Psi_{k\rho}^*$ 로, 계 II의 상태는 $P_{\sigma\rho}^{II} = \sum_k \Psi_{k\sigma} \Psi_{k\rho}^*$ 로 서술됨을 보일 수 있다. 즉 상호작용 이전에는 개별적으로 순수상태에 있었던 두 부분계가 상호작용 이후에는 반드시 혼합상태로 변환된다는 것이 증명된다.

36) 슈뢰딩거의 논의를 인용하거나 언급하고 있지는 않지만, 이는 슈뢰딩거가 1935년말에 도입한 얽힘의 개념과 일치한다.

상호작용 이후의 계의 상태 서술이 혼합상태가 된다는 것은 각 부분에 대해 확률을 계산할 때 전체적인 지식에서 포기해야 할 부분이 있음을 의미한다. P^I 의 정의에서 첨자 ρ 에 대한 합은 계 II의 상태에 관해 아는 것을 포기한다는 의미이며, 이 지식의 상실 때문에 확률이 나타난다는 것이 론돈과 보에의 주장이다.³⁷⁾

여기까지는 양자역학에서 측정의 과정을 서술하는 형식체계에서 얻힌 상태라는 개념을 도입하여 설명한 것이지만, 론돈-보에의 새로운 주장이 거기에 이어 등장한다.

상태 $\psi(x) = \sum_k \psi_k u_k(x)$ 에 있는 계(대상)의 물리량 $F(x, p_x)$ 를 측정하기 위해, 측정장치와 상호작용을 시켜야 한다. 측정장치의 눈금의 위치를 $G(y, p_y)$ 로 나타내고 그 고윳값을 $g_0, g_1, \dots, g_\rho$ 라 하고, 그 때의 고유상태를 $v_0(y), v_1(y), \dots, v_\rho(y)$ 라 하자. 측정의 상호작용 이전에는 두 부분계로 이루어진 전체계의 상태가 $\Psi(x, y) = v_0(y) \sum_k \psi_k u_k(x)$ 의 꼴이지만, 측정의 상호작용 이후에는 일반적으로 $\Psi(x, y) = \sum_{k, \rho} \Psi_{k\rho} u_k(x) v_\rho(y)$ 의 상태가 된다. 임의의 상호작용은 측정이 아니며, 측정이 이루어지기 위해서는 눈금의 위치 g_ρ 로부터 f_k 를 일대일로 대응시켜야 한다. 이것이 가능한 것은 첨자 $\rho_{(k)}$ 를 k 로 치환할 수 있는 경우뿐이다. 이렇게 되면 $g_k = g_{\rho_{(k)}}$ 가 f_k 가 대응하며, 측정 이후의 상태는 $\Psi(x, y) = \sum_k \psi_k u_k(x) v_k(y)$ 로 서술된다. 이 상태함수는 물리량의 값이 f_k 가 될 확률이 $p = |\psi_k|^2$ 이며, 또한 측정장치의 눈금이 g_k 가 될 확률도 $p = |\psi_k|^2$ 임을 말해 준다. 따라서 $G = g_k$ 이면 언제나 $F = f_k$ 임을 알 수 있다.

37) 론돈과 보에는 확률이 나타나는 이유를 존재적 미결정 때문이 아니라 지식의 부족함 때문이라고 본다.

그런데 이 서술은 대상과 측정장치의 복합계가 순수상태에 있다가 측정의 상호작용을 하고 나면 대상과 측정장치가 각각 혼합상태로 변환된다는 것을 말해 줄 뿐이다. 따라서 이것만으로는 대상에 대해 새로운 파동함수를 기대할 수 없다. 대상과 측정장치를 상호작용시키고 측정장치의 눈금과 대상의 물리량이 일대일 대응하도록 만든다고 해서 측정을 한 것은 아니다. 측정장치의 눈금을 읽어야 비로소 측정이 일어난다. 눈금을 읽는 관측자가 등장해야 한다.

“관측자가 이론이 예측한 혼합상태의 다른 성분 중에서 하나를 선택하고 관측되지 않은 것을 배제하고 이를 통해 대상에 새로운 파동함수, 즉 관측자가 찾아낸 순수상태의 파동함수를 할당할 수 있는 권리를 갖게 되는 것은 정확히 관측을 통한 지식의 증가이다.”³⁸⁾

이와 같은 혼합상태로부터 순수상태로의 전환에서 관측자의 의식이 근본적인 역할을 한다. 관측자의 효과적인 개입이 없다면 새로운 상태함수를 얻을 수 없다. 그러나 의식이 물리적으로 상태의 전환을 일으킨다고 말하면 안 된다. 이를 분명하게 보기 위해 (관측자 x)+(측정장치 y)+(관측자 z)의 세 부분계로 이루어진 앙상블을 생각하자. 전체 상태함수는 위의 경우와 마찬가지로

$$\Psi(x, y, z) = \sum \psi_k u_k(x) v_k(y) w_k(z)$$

로 쓸 수 있다. 여기에서 $w_k(z)$ 는 관측자의 여러 다른 상태들이다. 세 부분계 전체를 새로운 대상으로 본다면, 별로 달라질 것은 없다. 전체의 ‘대상’은 순수상태에 있지만, 각 부분계는 이 ‘엄힘’을 통해 혼합상태에 있으며, 실상 어느 상태에 있는지는 알 수 없고, 단지 확률만 알 뿐이다.

그런데 관측자가 스스로 자신을 보면, ‘대상’은 (원래의 대상)+(측정장치)만이다. 관측자는 관측자 자신과 매우 특별한 특성의 관계에 있

38) London and Bauer (1939), p. 181; London and Bauer (1982), p. 251

다. “관측자는 ‘내적 성찰의 능력(faculté d’introspection)’을 가지고 있어서 매 순간 자신의 상태를 추적할 수 있다. 이 ‘내적 지식(connaissance immanente)’ 덕분에 관측자는 자기 자신에 대하여 자신의 대상성을 구성할(constituer) 수 있는 권리가 있어서 ‘나는 상태 w_k 에 있다.’ 또는 ‘나는 $G = g_k$ 임을 본다.’ 또는 심지어 직접 ‘ $F = f_k$ 이다.’라고 말할 수 있다.”³⁹⁾

이 구성의 창조적 행위를 ‘대상화’라 부를 수 있다. 이 과정을 통해 관측자는 자신의 고유한 대상의 틀을 정립하고 관심 대상에 관한 지식을 새롭게 얻을 수 있다.

따라서 측정의 과정에서 계에 새로운 ψ 함수를 생성하는 것은 대상과 측정장치 사이의 신비한 상호작용이 아니다. 이는 자신을 기존의 함수로부터 스스로 분리할 수 있는 ‘나(Moi)’의 의식일 뿐이며, 관측자는 관측을 통해 대상에 새로운 대상성을 세워서 새로운 함수 $\psi(x) = u_k(x)$ 를 할당할 수 있다.

론돈-보에의 접근은 후설 현상학의 틀 위에 있다. 현상학은 하나의 단일한 이론이라기보다는 상관주의에 바탕을 둔 철학적 운동이라 할 수 있는데, 전문분야, 경향, 시기에 상관없이 대부분의 현상학자가 받아들이는 다섯 가지 특징이 있다.⁴⁰⁾ (1) 현상학자들은 인식(그리고 일부는 평가와 행동까지)을 증거에 근거하여 정당화하는 경향이 있는데, 증거란 어떤 종류의 사물에 대해 가능한 한 가장 명확하고, 분명하고, 적절한 방식으로 드러난 사물 자체에 대한 인식이다. (2) 현상학자들은 자연계와 문화계의 대상뿐 아니라 숫자와 같은 이상적 대상, 심지어 의식적인 생명 자체도 드러나게 할 수 있다고 믿는 경향이 있다. (3) 현상학자들은 탐구가 대상을 향한 ‘만남’과 그에 상응하는 ‘만남의 대상’에 초점을 맞춰야 한다고 강조하는 경향이 있다. (4) 현상학자들은 원인, 목적 또는 근거를 통한 설명보다 보편적, 선형적, ‘직관적(eidetic)’ 용어를 사용하는 서술의 역할을 더 중요하게 인정하는 경향이 있다. (5) 현상학자들은 후설이 초월현상학에서 판단중지(Epoche)와 현상학적

39) London and Bauer (1939), p. 181; London and Bauer (1982), p. 252

40) Embree et al. (1997) pp. 1-2.

환원이라고 부르는 것이 유용한지, 또는 심지어 가능한지 논쟁하는 경향이 있다.

현상학의 핵심은 상관주의 또는 관계적 존재론이다. 후설은 “세계의 존재 자체는 ... 실제로 존재하는 의식으로부터 독립된 의미를 지니지 않는다. 원리적으로 세계는 그것과 관계되는 경험하는 의식의 상관물, 그리고 단지 가능한 것이 아니라 실제 의식과 관계되는 상관물로서만 존재한다.”라고 말한다.⁴¹⁾ 현상학에서 실재는 의식이 구성하는 것이다. 후설에 따르면, “우리가 ‘의식’하는 대상은 상자 속에 있는 것처럼 단순히 의식 속에 있는 것이 아니므로, 상자 안에서 발견하거나 잡아낼 수 있는 것이 아니다. ... 대상은 먼저 우리에게 대하여 존재하는 것으로서, 또 우리에게 대하여 간주되는 것으로서, 대상적인 지향성의 다양한 형태로 구성된다.”⁴²⁾

론돈과 보에의 접근에서 물리적 대상과 의식은 애초에 분리되어 존재하는 것이 아니다. 이는 후설의 현상학과 직접 연결된다. 후설은 “내 자신의 의식 활동을 반성할 때, 내가 가진 경험은 자기 경험(*Selbsterfahrung*)이라 해도 다른 모든 경험(*Erfahrung*)과 마찬가지로, 이미 존재했던 어떤 것, 즉 특정한 인지 행위를 향한 일종의 지향으로 구성된다. 그러나 나는 그것을 반성함으로써 내재적 지각 행위의 대상으로 변형/구성한다.”⁴³⁾라고 주장했다.

요컨대, 론돈-보에의 접근에서 측정과정에서 필연적으로 나타나는 확률적 서술과 상태의 비결정론적 전환은 대상계와 측정장치 사이의 물리적 상호작용으로 환원되지 않으며, 더 근본적인 숨은 변수 이론이 필요하지 않다. 이 접근이 독보적인 것은 대상세계가 인식 주체 또는 관측자와 독립하여 실재한다는 전제를 근본적으로 넘어서기 때문이다.

41) Husserl (2004), p. 78.

42) Husserl (2004), p. 169.

43) Husserl (1973), pp. 492-3.

7. 글맺음

이제까지 우리는 양자역학에서 가장 중요한 문제인 측정의 문제와 미결정성의 문제를 폰노이만의 측정이론, 숨은 변수 금지 정리, 인과성과 완전성에 기반을 둔 헤르만의 반박, 하이젠베르크의 가장자리 논변, 런던-보에의 측정이론을 중심으로 살펴보았다.

폰노이만은 양자역학의 형식체계에서 측정 과정의 핵심을 명료하게 드러냈지만, 심신평행론의 테두리를 벗어나지 못하고 측정과 관련된 문제를 숨은 변수 금지 정리로 연결했다. 하지만 헤르만의 상세한 논의를 통해 이것이 부적절한 전제를 출발점으로 삼은 것이었고, 측정 문제는 결정론의 문제와 구별된다는 점이 분명해졌다. 헤르만은 인과성과 완전성의 문제를 신칸트주의적인 초월관념론을 통해 논의하려 했으나, 그럼으로써 물리학자들의 접근에서 멀어졌다. 런던-보에는 헤르만과의 직접적인 연결점은 없었지만, 폰노이만과 하이젠베르크 등의 논의를 가장 선명하고 간단하게 정리한 측정이론을 보여주었다. 여기에서 현상학적 접근이 측정 문제를 해결하는 데 결정적이라는 점이 드러난다. 현상학적 접근은 양자역학에 대한 전혀 새로운 관점을 주고 양자역학을 둘러싼 여러 개념적 난점을 해결하기 위한 유용한 접근이다.

이후의 연구에서는 양자역학에 대한 현상학적 접근이 관계적 양자역학, QBism, 서울해석과 어떻게 연결되는지 살펴볼 것이다.

참고문헌

- Alves, P. M. S. (2021), “Fritz London and the measurement problem: a phenomenological approach”, *Continental Philosophy Review* 54: pp. 453–81.
- Bacciagaluppi, G. and Crull, E. (2009), “Heisenberg (and Schrodinger, and Pauli) on hidden variables”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40: pp. 374–82.
- _____ (2024), *The Einstein Paradox: The Debate on Nonlocality and Incompleteness in 1935*, Cambridge University Press.
- Bell, J. S. (1966), “On the problem of hidden variables in quantum mechanics”, *Reviews of Modern physics* 38: pp. 447-52, reprinted in Bell (1987)
- _____ (1982), “On the impossible pilot wave”. *Foundations of Physics* 12, pp. 989-99, reprinted in Bell (1987)
- _____ (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press.
- _____ (1988), “Interview”, *Omni*, May 1988.
- Bub, J. (2010), “Von Neumann’s no hidden variables proof: a re-appraisal”, *Foundations of Physics* 40: pp. 1333-40.
- Crull, E., and Bacciagaluppi, G. (eds.) (2016), *Grete Hermann: Between Physics and Philosophy*, Springer.
- Dieks, D. (2017), “Von Neumann’s impossibility proof: Mathematics in the service of rhetoric”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 60: pp. 136-48.
- Dirac, P.A.M. (1958), *The Principles of Quantum Mechanics*. Cambridge University Press.
- Embree, L. et al. (eds.) (1997), *Encyclopedia of Phenomenology*, Springer.

- Filk, T. (2016), “Carl Friedrich von Weizsäcker’s ‘Ortsbestimmung eines Elektrons’ and its Influence on Grete Hermann”, Crull and Bacciagaluppi (2016), pp. 71-83.
- French, S. (2020), “From a Lost History to a New Future: Is a Phenomenological Approach to Quantum Physics Viable?”, in Wilsche and Berghofer (2020) pp. 205-25.
- _____ (2023), *A Phenomenological Approach to Quantum Mechanics: Cutting the Chain of Correlations*, Oxford University Press.
- Heisenberg, W. (1969), *Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, Piper.
- _____ (1985), “Ist eine deterministische Ergänzung der Quantenmechanik möglich?”, in Pauli (1985), pp. 407-18.
- Herrmann, G. (1933), “Determinismus und Quantenmechanik”, in Herrmann (2017), pp. 185-203.
- _____ (1935a), “Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik (Auszug)”, *Die Naturwissenschaften* 42: pp. 718-21, in Herrmann (2017), pp. 259-67.
- _____ (1935b), “Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik”. *Abhandlungen der Fries’schen Schule* 6, pp. 69-152, in Herrmann (2017), pp. 205-58.
- _____ (1937a), “Über die Grundlagen physikalischer Aussagen in den älteren und den modernen Theorien”, in Herrmann (2017), pp. 275-334.
- _____ (1937b), “Die Bedeutung der modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis”, in Herrmann (2017), pp. 335-77.
- _____ (1996), *Les Fondements philosophiques de la mecanique quantique*, Schneel A. and Soler, L. (trans), Vrin.
- _____ (1999), “The foundations of quantum mechanics in the philosophy of nature”, Lumma, D. (trans.), *The Harvard Review*

- of *Philosophy* 7: pp. 35–44.
- Herrmann, K. (ed.) (2017), *Grete Henry-Hermann: Philosophie-Mathematik-Quantenmechanik. Ausgewählte Schriften und Korrespondenzen aus den Jahren 1925 bis 1973*, Springer.
- Husserl, E. (1901), *Logischen Untersuchungen*, Bd. II. De Gruyter
- _____ (1973), *Zur Phänomenologie der Intersubjektivität: Texte aus dem Nachlass, Zweiter Teil: 1921-1928*, Kern, I. (ed.), Husserliana Bd. XIV, Den Haag: Martinus Nijhoff.
- _____ (2004), *Transzendentaler Idealismus: Texte aus dem Nachlass (1908-1921)*, Rollinger, R. D. (ed.), Husserliana Bd. XXXVI, Dordrecht: Springer.
- Kauark-Leite, P. (2012), *Théorie quantique et philosophie transcendante: dialogues possibles*, Hermann Éditeurs.
- Laudisa, F. (2025), “Between myth and history: von Neumann on consciousness in quantum mechanics”, *Studies in History and Philosophy of Science* 114: pp. 1-8.
- London, F. and Bauer, E. (1939), “Le problème de la mesure en physique. La théorie de l’observation en mécanique quantique”, *Exposés de Physique Générale III*, pp. 1–51, Hermann.
- _____ (1983) “The theory of observation in quantum mechanics”, in Wheeler and Zurek (eds.) (1983), pp. 217-59.
- Paparo, G. “Grete Hermanns naturphilosophischer Ansatz in der Quantenmechanik”, in Herrmann (2017) pp. 3-14.
- Pauli, W. (1985), *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a., Band II: 1930–1939*, Meyenn, K. v., Hermann A. and Weisskopf, V. F. (eds.), Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schrödinger, E. (1935), “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Die Naturwissenschaften* 23: pp. 807-812, 823-828, 844-849,
- _____ (1980), “The present situation in quantum mechanics: A

- translation of Schrödinger's 'Cat Paradox' paper.", Trimmer, J. D. (trans.), *Proceedings of the American Philosophical Society* 124: pp. 323-38, reprinted in Wheeler and Zurek (1983), pp. 152-167.
- _____ (1935), "Discussion of Probability Relations Between Separated Systems", *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 31: pp. 555-662.
- _____ (1936), "Probability Relations Between Separated Systems", *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 32: pp. 446-52.
- von Neumann, J. (1932), *Mathematische Grundlage der Quantenmechanik*. Springer
- _____ (2018), *Mathematical Foundation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press.
- Weizsäcker, K. F. (1931), "Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop", *Zeitschrift für Physik* 70: pp. 114-30.
- Wheeler, J. A. and Zurek, W. H. (eds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press.
- Wiltsche, H. A. and Berghofer, P. (eds.) (2020), *Phenomenological Approaches to Physics*. Springer.

논문 투고일	2026. 06. 21.
심사 완료일	2026. 07. 14.
게재 확정일	2026. 07. 14.

Completeness and Probability in Quantum Mechanical Measurement: von Neumann, Hermann, Heisenberg, and London-Bauer

Ghim, Zae-young(Korea Science Academy of KAIST)

This paper discusses the measurement problem and the problem of indeterminacy in quantum mechanics, focusing on von Neumann's measurement theory, the no-hidden-variables theorem, Hermann's refutation based on causality and completeness, Heisenberg's argument of the "cut" (Schnitt), and the London-Bauer measurement theory. While von Neumann clearly illustrated the core of the measurement process within the formal system of quantum mechanics, he did not escape the framework of psycho-physical parallelism and linked the issues related to measurement to the no-hidden-variables theorem. However, Hermann's detailed analysis revealed that his theorem was based on an inappropriate premise and clarified that the measurement problem is distinct from the problem of determinism. Hermann attempted to address the problems of causality and completeness through Neo-Kantian transcendental idealism, but this caused her to move away from the approaches used by physicists. London and Bauer presented a measurement theory that synthesized the discussions of von Neumann and Heisenberg in the most lucid and concise manner. Within their work, it is revealed that a phenomenological approach is decisive in resolving the measurement problem.

Keywords: Measurement problem, Causality and Completeness, von Neumann's no hidden variable theorem, Grete Hermann, Phenomenological approach of London and Bauer

