

성향 해석과 양자역학의 존재론적 기초*

김 재 영†

양자역학의 상태함수를 성향으로 해석하는 접근을 검토함으로써 양자역학의 존재론적 기초를 논의할 기본틀을 마련한다. 마제노의 짐행성과 맥스웰의 양자 성향일 이론을 실마리로 삼아 하이젠베르크의 잠재성 논의를 성향 개념을 중심으로 새롭게 재해석하면서 하이젠베르크의 논의는 양자역학의 상태함수를 성향으로 해석하는 것과 같음을 주장한다. 나아가 장회익의 사건야기성향과 존재표출성향을 살펴본 뒤, 장회익의 제안이 하이젠베르크의 논의를 비판적으로 평가할 계기가 됨을 논의한다. 이로부터 하이젠베르크의 잠재성과 장회익의 사건야기성향이 동등함을 주장한다.

주요어 : 양자역학의 상태함수, 성향 해석, 잠재성, 사건야기성향, 존재론적 기초

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

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

1. 문제 설정

물리학 이론으로서 양자역학은 매우 잘 작동하는 계산도구이며 새로운 응용으로 쉽게 이어질 수 있는 통합적 개념들이다. 그러나 세계에 대한 자연철학적 서술로서의 양자역학은 미시적 물리 세계뿐 아니라 현실에 대해서도 심각한 문젯거리가 되어 왔다. 수학적 형식체계와 실험실에서 만나는 사건 또는 현상 사이의 괴리는 실상 새로운 문제가 아니지만, 양자역학에서는 이 문제가 더 선명하게 도드라졌다.

マイ클 레드헤드는 양자역학의 형식체계에 대한 해석을 분류하기 위해 “양자역학에서 계의 상태가 Q라는 물리량의 고유상태가 아닐 때 Q의 값에 대해 무엇을 말할 수 있는가?”라는 질문을 던지고, 이에 대한 세 가지 대답을 제시한다.¹⁾

A 견해: Q는 선명하지만(sharp), 알 수 없는 값을 갖고 있다. (숨은 변수)

B 견해: Q는 선명하지 않은 값을 갖고 있다. (성향 및 잠재성)

C 견해: Q의 값이 정의되지 않거나 무의미하다(meaningless). (상보성)

흔히 코펜하겐 해석으로 불리기도 하는 C 견해에서는 관찰자의 측정 행위를 통해 닐스 보어가 ‘현상’이라 부른 것이 만들어지며, 그 측정이 없다면 물리량에 대해 말하는 것이 무의미하다고 본다. 이와 달리 A 견해는 고전역학의 존재론과 마찬가지로 이론적 서술 이전에 물리량은 선명하게 실재하지만, 단지 현재의 이론이 그것을 모두 담아내지 못한다고 본다.

이 논문에서 주목하는 것은 B 견해에서 말하는 성향(propensity, tendency, disposition)이라는 개념이 양자역학이 전제하는 존재론에 대해 어떤 새로운 통찰을 보여줄 수 있을까 하는 문제이다.²⁾ 양자역학의

1) Redhead (1987), p. 45

2) 이 논문에서는 ‘성향’으로 번역되는 propensity, tendency, disposition 등의 용어가 지니는 차이에는 주목하지 않는다. 일반적인 형이상학에서의 성향과 관련된 논의는 최소화하고 양자역학과 관련된 문제에 집중하기로 한다(Bird 2012; Vetter 2015; Anjum

존재론과 성향을 연결하는 접근은 헨리 마제노와 칼 포퍼를 비롯하여 아브너 쉬모니, 니콜라스 맥스웰, 마우리시오 수아레스, 마우로 도라토, 니콜라 지생, 장회익 등 여러 물리학자와 철학자가 논의했다. 이 논문에서는 기존의 성향 관련 논의를 정리하고 중요한 논점을 살펴본 뒤 양자역학에서 성향의 존재론적 쟁점을 검토하고자 한다.

다음 절에서 마제노의 잠행성 해석과 맥스웰의 양자 성향을 이론을 핵심적으로 살펴보고, 여기에 이어 하이젠베르크의 존재성 논의와 장회익의 사건야기성향 및 존재표출성향을 상세히 살펴본 뒤, 이를 바탕으로 양자이론의 존재론적 기초를 탐구하기 위한 실마리를 제시하면서 글을 맺는다.³⁾

2. 양자이론과 성향: 마제노의 잠행성과 맥스웰의 양자 성향을 이론

(1) 마제노의 잠행성

1954년 3월 미국 위싱턴 철학회의 존 헨리 기념 학술대회에서 예일 대의 물리학 및 자연철학 교수 헨리 마제노는 양자이론의 해석에 대한 흥미로운 아이디어를 제시했다(Margenau 1954; McKnight 1958).

1952년 데이비드 봄이 양자역학에 대한 새로운 해석을 제안한 직후였기 때문에, 마제노는 봄의 논문과 제안을 분석하면서, 양자역학을 비롯한 물리학 이론에 대한 세 가지 해석을 제시했다. 이를 위해 마제노는 한여름 밤의 반딧불 이야기를 꺼낸다. 반딧불은 여기저기서 깜빡거

and Mumford 2018; Meincke 2020 등 참조).

3) 포퍼는 확률의 새로운 대안적 해석으로 성향 해석을 제안하고 이것이 양자역학의 이해에서 핵심이 된다고 믿었으며, 이를 발전시켜 성향의 형이상학이 가능성을 제안했다 (Popper 1957, 1967, 1982; Popper 1990). 이 논문에서 포퍼가 전개한 성향해석과 성향의 형이상학을 함께 다를 필요가 있으나 이와 관련한 연구는 김재영 (2021)에서 부분적으로 진행되었고, 더 상세하고 본격적인 논의가 필요하므로, 이 논문에서는 다루지 않는다.

4 김재영

리며 모습을 드러내지만, 그 사이에서 어떻게 움직였는지는 알 수 없다. 반딧불의 모습과 전자의 거동을 비슷하다고 보면 어떨까?

첫 번째는 역학적 논제(Mechanical Thesis)로서 봄, 드브로이, 비지에 등의 접근에서는 우리가 확인할 수 없는 반딧불의 움직임을 물리학 이론이 모두 서술할 수 있다고 믿는다. 이는 고전역학에서와 마찬가지로 전자의 궤적과 그에 대한 수학적 서술을 구별하지 않는다. 그러나 전자를 태우고 다니는 ψ 마당은 익숙한 파동과 다르다. 가령 원자의 바닥상태에서 전자는 정지해 있지 않고, 복소수로 표현되는 ψ 마당이 물리적 실재가 아닐 가능성이 높고, 특히 전자의 위치를 확인할 때 공간 전체를 채우고 있던 ψ 마당이 전자 주변으로 오그라드는 것은 너무나 신비한 일이라는 것이 마제노의 비판이다.

둘째 해석은 형식론적 논제(Formalistic Thesis)로서, 전자의 궤적이 시간과 공간 속에 있을지 물라도 물리학의 형식체계에서 알 수 있는 것은 ψ 함수뿐이며 이를 제곱한 것이 확률이고, 그 확률은 대상에 대한 주관적 지식을 대변한다는 것이다. 마제노는 닐스 보어의 권위 아래 있으며 다수의 물리학자가 받아들이고 있는 이 해석에 따르면 측정의 순간에 ψ 함수가 순식간에 오그라드는데, 이것을 납득할 수 없으며, 측정하는 주체와 대상 사이의 근원적인 이원론을 받아들이기 어렵다고 말한다.

마제노가 대안으로 제시하는 세 번째 해석(Third Interpretation)은 관찰가능량 또는 물리적 속성을 소유된 것(possessed observable)과 감추어진(잠행적인) 것(latent observable)으로 구별하자는 것이다. 이는 로크 이래 철학에서 상세하게 논의되어 온 제일속성과 제이속성의 구별과 상통한다. 질량, 전하, 스피드 같은 것은 소유된 물리량으로서 언제나 있는 제일속성이지만, 전자의 위치와 같은 감추어진 물리량은 항상 거기에 있다고 말할 필요가 없다. 이 잠행(潛行)하는 물리량은 마치 반딧불의 위치처럼, 확인하는 순간에 드러나는 것으로 충분하다. ψ 함수를 제곱한 값으로부터 각 위치에서 확인할 수 있는 확률을 계산할 수 있다. 이 확률은 주관적 지식이 아니라 한 번의 관찰로 확인할 수 있는 대상적 속성이다. ψ 함수는 상이한 실험적 맥락에서 상이한 값을 갖는 잠행

적 물리량의 성향이다.

마제노가 제시한 세 가지 해석은 레드헤드가 제시한 세 가지 견해와 해석과 잘 맞는다. 특히 레드헤드의 B 견해는 마제노가 세 번째 해석이라고 부른 것을 잘 요약하고 있다. 이는 실재론에 대한 믿음을 포기 하지 않으면서도 측정과정과 관찰자에 대한 과도한 의존에서 벗어날 수 있으며, 그러면서도 고전역학적 존재론을 고집하지 않는다.

(2) 맥스웰의 양자 성향알 이론

니콜라스 맥스웰은 소위 정통양자이론(OQT, Orthodox Quantum Theory)의 문제점을 비판하면서, 독특한 ‘양자 성향알 이론(quantum propensiton theory)’을 오랫동안 주장해 왔다(Maxwell 1974, 1988, 1993, 1994, 1998, 2004, 2006, 2011).

맥스웰이 보기의 OQT는 (1) 양자가설과 더불어 측정에 대한 고전적 가설을 반드시 동반해야 하는데, 이 측정의 개념이 정확하지 않으며, (2) 측정과정을 확률적으로 서술할지(양자역학) 아니면 결정론적으로 서술할지(고전역학) 모호하며, (3) 서로 충돌하는 두 가설군(QP+CP)을 병치함으로써 임시방편적이며, (4) 설명해야 할 고전적 상황을 전제해야 한다는 점에서 비설명적이며 (5) 측정장치에 대한 완결된 이론이 없다는 점에서 한계가 있으며, (6) 우주 전체에 대한 측정장치를 설정할 수 없으므로 적용범위에서 제한적이며, (7) 근본적으로 일반상대성이론과 통일할 수 없다. (8) 특히 OQT는 입자-파동 이중성이라는 근본적 결함을 가정한다.

맥스웰은 “양자 대상이 입자인가 아니면 파동인가?”라고 묻는 것은 잘못된 질문이고, 그 대신 “(i) 잠재성으로서 문제가 없고 근본적으로 확률적인 대상은 어떤 종류가 있는가? (ii) 양자 대상을 그와 같이 문제 가 없고 근본적으로 확률적인 대상으로 해석할 수 있는가?”라고 물어야 한다고 주장한다. 그러면서 형이상학에서의 성향 개념을 적극적으로 원용하여 입자/파동이란 개념 대신 성향으로 정의되는 대상을 내세우고 이를 양자 성향알(quantum propensiton)이라 불렀다. 위의 질문은 “(i) 성향알의 종류는 어떤 것이 있는가? (ii) 양자대상을 모종의 성향알로

해석할 수 있는가? 있다면 어떤 종류인가?”로 바꾸었다.

맥스웰의 성향알 이론은 대상에 대한 범주적 속성(질량, 전하, 스피)과 성향적 속성(상태함수)을 혼합하여 ‘입자/파동’이라는 지칭 대신 ‘성향알’이라는 새로운 이름을 가져왔다. 그러나 실질적으로 이러한 접근은 별로 성공적이지 못하다. 동역학적 서술은 변화를 다루지만, 주어의 역할을 하는 동역학적 특성과 술어의 역할을 하는 상태의 개념을 명료하게 구별해야 한다. 술어로서의 상태는 변화할 수 있지만, 서술대상을 규정하는 주어로서의 동역학적 특성은 그러한 변화에도 불구하고 정체성을 유지하는 것으로 여겨야 한다. 그렇지 않으면, 동역학적 변화 속에서 질량과 전하와 스피의 값이 변한다고 말하거나 서술대상의 규정이 불명확해져 버린다. 그런 점에서 맥스웰의 ‘성향알 이론’은 동역학적 서술에서 주어적인 요소인 동역학적 특성과 술어적인 요소인 상태를 혼동함으로써, 상태에 대한 성향 해석을 서술모형으로 확장하는 부적합한 접근이다. 그러나 맥스웰은 소위 정통양자이론에서 입자인가 파동인가 하고 묻는 것이 부적합한 질문임을 강조하면서 이를 해결할 방안으로 성향 개념을 내세웠다는 점에서 중요한 계기를 마련해 주었다.

3. 양자이론과 성향: 하이젠베르크에 대한 재해석

베르너 하이젠베르크는 1955년부터 1956년까지 영국 세인트앤드류 대학에서 진행된 기퍼드 강연의 제목을 “물리학과 철학”으로 정하고 “현대물리학의 혁명”이라는 부제를 달았다(Heisenberg 1958, 1959). 1958년에 출간된 강연록에서 처음으로 ‘코펜하겐 해석’이란 표현이 나오고 그와 관련하여 보어의 상보성 원리와 불확정성 원리에 대한 논의가 상세하게 나오기 때문에, 양자역학의 측정 문제에 대한 하이젠베르크의 독특한 관점이 제대로 평가받지 못했다(Camilleri 2009). 또 이 강연록 이전에 널리 인정된 소위 ‘코펜하겐 해석’이 사실상 없었으며, 오히려 이 점에 이후에 ‘코펜하겐 해석’이 만들어진 것이라는 돈 하워드의 주장은 거의 정설로 인정되고 있다(Howard 2004). 그러나 후기 하

이젠페르크의 논의는 곧이곧대로 코펜하겐 해석이라고 볼 수 없는 부분이 있다. 우리는 여기에서 성향과 관련된 논의를 통해 하이젠페르크를 다시 해석하고자 한다.

하이젠페르크의 “물리학과 철학”은 열 개의 장으로 이루어져 있는데, 그중 2장의 끝부분에서 그때까지 별로 언급하지 않던 아리스토텔레스의 가능태에 대해 말하기 시작했다.⁴⁾

보어, 크라머스, 슬레이터의 확률파(probability wave)는 어떤 일이 일어날 성향(tendency)을 의미하는 것이다. 아리스토텔레스 철학의 오래된 개념인 ‘가능태 potentia’의 정량적인 판본이다. 이는 사건에 대한 관념과 실제의 사건 사이에 있는 어떤 것을 끌어들였으며, 이것은 가능성과 실재 사이에 있는 이상한 종류의 물리적 실재이다.⁵⁾

흔히 확률파라는 용어와 개념은 보른에게서 나온 것으로 여긴다. 1926년 슈뢰딩거가 “고윳값 문제로서의 양자화” 연작논문에서 파동역학의 형식체계를 발표했다. 1927년 막스 보른이 파동역학을 산란문제에 적용하는 과정에서 파동함수의 절댓값 제곱을 대상이 존재할 확률로 해석하자고 제안했다. 이를 ‘확률파’라고 부른 이유는 당시 파동함수가 일종의 파동을 서술한다고 여겨졌지만 그로부터 계산할 수 있는 것은 대상이 특정 상태에 존재할 확률이기 때문이다. 그런데 하이젠페르크는 이보다 이른 1924년 보어-크라머스-슬레이터(BKS)의 논문에서 이 개념이 시작된 것으로 서술한다.

1913년 널스 보어가 제안한 원자모형에서 빛(복사)은 낡은 전자기학

4) 아리스토텔레스의 형이상학에서 논의되는 potentia는 ‘가능태’로 옮기고, 하이젠페르크가 말하는 potentiality 또는 Potentialität는 ‘잠재성’으로 옮기고자 한다. ‘가능성’은 possibility의 번역어로 쓴다. 또 하이젠페르크가 acutality 또는 Aktualität로 쓴 개념은 ‘현실성’으로 옮긴다. 하이젠페르크의 본문에서 tendency(독일어판 Tendenz)로 쓴 개념은 대개 ‘경향’으로 옮기기도 하지만, 이 논문의 관점에서는 실질적으로 ‘성향’(propensity)과 동의어로 보고, ‘경향’과 ‘성향’의 차이는 무시할 것이다. 하이젠페르크의 potentiality와 베르그손/들뢰즈의 잠재태(le virtuel)의 관계에 대해서는 후속 연구에서 살펴볼 것이다.

5) Heisenberg (1958), p. 41.

으로 서술되었다. 1923년 겨울 코펜하겐을 방문한 존 슬레이터가 처음 아이디어를 내고 보어와 크라머스가 합세하여 “복사의 양자이론”이 만들어졌다. 이 이론에 따르면, 물질에서 흡수되거나 방출되는 전자기복사는 아인슈타인이 제안한 빛 양자의 형태이지만, 맥스웰 전자기학에 따른 전자기장에 이끌린다. 전이가 없을 때도 원자 안에는 원자가 만드는 전자기장이 있으며, 원자가 흡수하거나 방출하는 빛알(광자)의 모든 파장이 들어 있다. 그런데 빛알이 흡수되거나 방출되는 확률은 전자기장의 푸리에 성분의 진폭으로부터 정해진다. 전자기장은 가상의 진자로 이루어져 있다. 이 이론에서는 에너지와 운동량이 개별적으로 보존되는 것이 아니라 확률통계적으로만 보존된다. 결과적으로 BKS 이론의 예측을 반증하는 실험 결과를 발터 보테와 한스 가이거가 얻은 뒤에 이 이론은 사라졌다. 그러나 바로 이 이론에서 확률파라는 개념이 살아남았으며, 이것이 양자역학을 이해하는 데 중요한 역할을 한다는 것이 하이젠베르크의 주장이다.

하이젠베르크에 따르면, 기존의 확률은 지식의 정도를 나타내지만 BKS 이론의 확률파는 어떤 일이 일어날 성향을 나타낸다. 이를 연장하여, 양자역학에서 등장하는 “확률함수는 오직 사건이 일어날 성향과 그 사건에 대한 우리의 지식을 나타낸다”⁶⁾는 것이 하이젠베르크의 생각이다. 그에 따르면,

확률함수는 객체적 요소와 주체적 요소를 결합한다. 확률함수는 잠재성 또는 성향[아리스토텔레스 철학에서의 ‘기능태(potentia)’]에 관한 서술을 포함한다. 이 서술은 완전히 객체적이며 어느 관찰자에도 의존하지 않는다. 또 확률함수는 계에 대한 우리의 지식에 관한 서술을 포함한다. 이는 물론 다른 관찰자마다 다를 수 있다는 점에서 주관적이다. … 확률함수는 성향이라는 객체적 요소와 불완전한 지식이라는 주관적 요소를 갖는다.⁷⁾

6) Heisenberg (1958), p. 46.

7) *Ibid.*, pp. 53-4.

이안 해킹(Hacking 2006)에 따르면, 확률이론 초기부터 대상적/통계적인 확률과 인식적 확률이 나뉘어 있었다. 대상적 확률은 인식주체가 대상을 얼마나 알고 있는지와 무관한 본연의 성질이다. 이와 달리 인식적 확률은 대상에 대해 주체가 가진 정보의 부족함을 가리킨다.

하이젠베르크의 논의는 이러한 확률의 이중적 의미 또는 해석에 대해 더 상세한 분석을 시도하지 않은 채 뭉뚱그려진 개념으로 성향과 아리스토텔레스의 가능태에 대해 말하고 있는 것으로 평가되었다. 그래서 쉬모니를 비롯하여 여러 철학자가 하이젠베르크가 말하는 아리스토텔레스의 가능태는 단지 비유에 불과하다고 저평가했다.

그러나 하이젠베르크의 텍스트는 더 깊이 음미할 가치가 있다(Jaeger 2017). 텍스트만 보면 확률 개념의 주관주의 해석과 대상주의 해석을 섞어놓은 것처럼 보인다. 그러나 하이젠베르크는 물리학자가 ‘순수 상태’라 부르는 이상적 경우에는 불완전한 지식이라는 주관적 요소가 무시할 만큼 작아서 성향이라는 객체적 요소만 보아도 좋다고 말한다. 이는 물리학의 언어로 말하면, 통계연산자(밀도행렬) $D = \sum w_i P[|\psi_i\rangle]$ 에서는 대상은 어느 한 상태에 있지만 단지 정확히 어디에 있는지 알 수 없다는 무지의 해석을 적용할 수 있지만, 순수 상태 $P[|\psi_i\rangle] = |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ 의 경우에는 주관적 요소를 고려하지 않아도 된다는 것과 같다.

하이젠베르크는 확률파를 논의하면서 “‘잠재성’으로부터 ‘현실성’으로의 전이는 관찰의 행위 동안 일어난다.”⁸⁾라고 말하지만, 이것은 관찰자라는 사람과 무관하다.

“잠재성으로부터 현실성으로의 전이는 대상이 측정장치 즉 세계의 나머지 부분과 상호작용을 하자마자 일어난다. 이는 관찰자의 마음에서 결과를 기록하는 행위와는 연결되지 않는다. 그러나 확률함수의 불연속적 변화는 기록의 행위와 함께 일어난다. 왜냐하면 확률함수의 불연속적 변화 속에 이미지를 갖는 것은, 기록의 순간에 일어나는 우리 지식의 불연속적 변화이기 때문이다.”⁹⁾

8) *Ibid.*, p. 54.

9) *Ibid.*, p. 55.

하이젠베르크가 여기에서 주목하는 것은 단지 양자역학을 어떻게 해석할 것인가 하는 문제가 아니라 양자역학이라는 파격적인 이론이 어떤 새로운 존재론으로 이어질 수 있는가 하는 문제이다.

알려진 수학적 도식으로 주어진 실험 상황을 어떻게 나타낼 수 있는지 묻는 대신 다른 질문이 제기되었다. 즉, 수학적 형식체계로 표현될 수 있는 것과 같은 그런 실험적 상황만이 자연에서 생길 수 있다는 것이 참일까? 이것이 실상 참이라고 가정하면 뉴턴 이후 고전 물리학의 기초가 되어 온 개념의 사용에 한계가 있음을 알게 된다.¹⁰⁾

BKS 이론의 확률파에 대한 논의는 ‘코펜하겐 해석’에 대한 상세한 설명과 비판에 대한 해명으로 이어지지만, 여기에서 우리가 주목하는 것은 9장 “양자이론과 물질의 구조”에서 말하는 아리스토텔레스의 물질(질료) 개념에 대한 설명이다.

물질(질료)은 그 자체로 실재가 아니라 단지 가능성 또는 ‘가능태’일 뿐이다. 그것은 형상을 통해 존재한다. 자연과정에서 아리스토텔레스가 ‘본질’이라 부른 것은 그저 가능성에 불과한 것으로부터 형상을 통해 현실성으로 옮겨간다.¹¹⁾

이것은 물질의 구조에 대한 자연철학적 관념들을 주마간산으로 언급하는 것이 아니다. 하이젠베르크는 양자역학에서 가장 핵심이 되는 ‘상태’를 바로 아리스토텔레스 자연철학의 관념으로 이해할 수 있다고 주장하는 것이다.

한 쌍의 복소수가 ‘명제(상태서술)’를 나타낸다면, 그 명제가 참이 되는 자연의 ‘상태’ 또는 ‘상황’이 존재해야 한다. 상보적 명제에 대응하는 ‘상태들’은 바이츠제케가 ‘공존 상태’라 부른 것과 같다. 이 ‘공존’이란 용어가 상황을 올바로 기술한다. ... 이 ‘상태’라는 개념이 양자 이론의 존재론에 관한 최초의 정의를 이루게 될 것이다. 이 ‘상태’ 특히 ‘공존하는 상태’라는 단어는 보통의 물질주의의 존재론과 너무나 달라서 적절한 용어를 사용하고 있는 것인지 의심하게 된다. 다른 한편 ‘상태’라는 말을 실재가 아니라 어떤 잠재성을 서술한다고 보면 (심지어 ‘상태’라는 말을 ‘잠재성’이라는 용어로 대치해도 좋을 것이다) ‘공존하는 잠재성’이라는 개념이 꽤 그럴듯해진다. 왜냐하면 하나의 잠재

10) *Ibid.*, p. 42.

11) *Ibid.*, p. 147.

성이 다른 잠재성과 연관되거나 겹칠 수 있기 때문이다.¹²⁾

하이젠베르크는 대체로 과격한 실증주의자로서 현상으로 확인할 수 있는 것만 받아들이려 했으며 소위 코펜하겐 해석을 주창하고 펼친 장본인이라고 평가된다. 그러나 하이젠베르크의 물리철학을 탐구한 물리학자이자 현상학자 페트릭 에이던 힐란의 생각은 다르다.

힐란은 관찰가능한 것을 B-관찰가능성과 E-관찰가능성으로 구별한다 (Heelan 1965, 2016). 보어의 관점에서 비롯한 B-관찰가능성의 원리는 시간과 공간 속에서 고전적 관념을 통해 일상의 언어로 서술할 수 있어야 비로소 관찰가능한 것이라 규정하는 반면, 아인슈타인의 관점에서 비롯한 E-관찰가능성의 원리는 수학적 형식체계 안에서 서술할 수 있는 것까지 추상적인 의미의 관찰가능성을 인정한다. 힐란이 보기에, “하이젠베르크가 시작한 ‘관찰가능성’의 추상적 의미에서는 비고전적인 양들도 수학적 형식체계 안에서 관찰가능한 것이 될 수 있으며 비고전적 언어에서 서술적 존재론의 일부가 됨이 인정된다.”¹³⁾

막스 보른 및 파스쿠알 요르단과의 공동저작(삼인작, Dreimännerarbeit)과 하이젠베르크가 단독으로 쓴 1925-6년의 논문들과 당시의 편지 등으로부터 판단하면, 하이젠베르크는 아인슈타인의 직접적 영향 아래 E-관찰가능성의 원리를 추구했으나, 코펜하겐 이론물리연구소에서 보어와 논쟁하면서 보어의 B-관찰가능성을 받아들였다는 것이 힐란의 주장이다. 하이젠베르크가 다시 E-관찰가능성으로 돌아간 계기가 바로 기포드 강연이었다는 것이다. 여기에서 하이젠베르크가 “원자나 기본입자는 그 자체로 실재가 아니다. 원자나 기본입자는 사물 또는 사실의 세계가 아니라 잠재성 또는 가능성의 세계를 이룬다.”¹⁴⁾라고 말하는 것을 성향의 관점에서 재해석한다면, 하이젠베르크도 레드헤드가 B 견해로 분류한 것을 옹호했다고 보는 것이 적절하다.¹⁵⁾

12) *Ibid.*, p. 185.

13) Heelan (2016), p. 59.

14) *Ibid.*, p. 186.

15) 포퍼는 확률에 대한 해석과 더불어 양자역학의 대안적 해석으로 성향 해석을 제시했지만, 그의 견해는 실상 재해석된 하이젠베르크와 충돌하지 않으며, 오히려 확률이론

3. 장회의 사건야기성향과 존재표출성향

장회의는 양자역학에 대한 새로운 존재론을 제안하면서 양자역학적 상태의 의미를 ‘사건야기성향’과 ‘존재표출성향’으로 제시했다(장회의 2022). 이 개념을 이해하기 위해서는 먼저 고전역학에서 상태를 어떻게 규정할 것인가 따져보아야 한다. 고전역학에서 상태는 위치와 운동량을 좌표로 하는 위상공간의 한 점으로 정해진다. 이 위상공간을 마치 그물처럼 구획을 만들고 각각의 기본단위마다 변별체를 설치한다. 변별체를 설치한 곳의 위상공간상 좌표를 ξ_i 라 부르면, 고전역학적 상태는 그 좌표에 있거나 없거나 둘 중 하나일 티이므로, 가령 변별체를 설치한 위치를 차례로 적을 때 그 중 j 번째에서 변별체에 흔적이 남기는 상황이다. 이를 $[\dots, 0, 0, 0, \dots, 1, 0, 0, \dots]$ 와 같이 나타낼 수 있다. 더 일반적으로 j 번째 좌표의 상태를 $\Psi_C(j) = \delta_{ij}(\xi_i)$ 와 같이 나타낼 수 있다.

그런데 실제 상황에서는 이렇게 가장 세분화된 위치를 적을 수 없으므로, 변별체의 위치에 대한 단위를 뭉뚱그려서 상태를 나타낼 수 있다. 이를 가령 $[a_1, a_2, \dots, a_j, \dots]$ 로 쓸 수 있다. 더 일반적으로 표현하면 $\Psi_C^E = \sum_j a_j \Psi_C(j) = \sum_j a_j \delta_{ij}(\xi_i)$ 으로 나타낼 수 있는데, 양자역학으로의 확장을 염두에 두어 $\sum_j |a_j|^2 = 1$ 이 되게끔 선택하기로 한다. 장회의은 이를 ‘상태인식함수’라 부르고 있다. 앞의 Ψ_C 가 정말 대상이 특정 상태에 있거나 또는 없거나 하는 상황을 존재적으로 나타내는 반면, 이 상태인식함수에서 $|a_j|^2$ 은 인식적 확률을 나타낼 뿐이다. 즉 대상의 상태에 대한 주관적 지식 또는 정보를 말해 주는 역할을 한다.

상태인식함수가 유용한 것은 변별체에 흔적이 남은 뒤에 새로운 상태인식함수를 설정할 때이다. k 번째 변별체에 흔적이 남는다면 새로운 상태인식함수는 그에 따라 $\Psi_C'^E = \delta_{ik}(\xi_i)$ 가 되며, k 번째 변별체에 흔적

의 해석으로 나아간 포퍼의 접근이 하이젠베르크의 프로그램을 완성하는 과정이라고 볼 수 있다(김재영 2021).

이 남지 않는다면 $\Psi'_C^E = \sum_{j \neq k} a'_j \delta_{ij}(\xi_i)$ 와 같이 계수가 재조정된다. 이것은 슈뢰딩거가 측정 이후에 기댓값 목록이 달라진다고 말한 것에 상응한다(김재영 2014). 그러나 여기에서 일어나는 갑작스러운 목록 변화와 계수의 조정은 순전히 서술자의 주관적 지식 또는 정보에 국한되며 물리적인 변화가 아니다.

장회익의 양자역학적 상태는 $\Psi_Q = \sum_j c_j \delta_{ij}(\xi_i)$ 의 형태로 주어진다. 여기에서 c_j 는 규격화 조건 $\sum_j |c_j|^2 = 1$ 을 만족하는 복소수 상수이며, $|c_j|^2$ 는 위치 ξ_i 에 놓인 변별체 위에 사건을 일으킬 확률이다. 양자역학의 상태 Ψ_Q 는 고전역학의 상태인식함수 Ψ_C^E 와 모양이 같으며 변별체와의 만남(즉 측정) 이후에 계수가 재조정되는 것도 같지만, 여기에서

계수 c_j 는 대상 자체의 물리적 상태를 나타내는 존재적 성격을 가진다. ... 이러한 존재적 성격으로 인해 계수 c_j 는 변별체와 물리적 관계를 맺을 뿐 아니라 인식주체가 이것에 대해 얼마나 알고 있느냐 하는 점과는 무관하게 동역학 법칙에 맞추어 독자적으로 변화해가는 객체적 성격을 가진다. ... 이것은 대상 물체가 아니라 어디까지나 대상이 아닌 성향 곧 대상의 속성에 해당하는 것이다.¹⁶⁾

양자역학의 상태가 성향에 해당한다고 말할 때의 성향은 대상이 변별체와 만나서 사건을 일으키는 성향을 가리킨다. 상태공간(실질적으로 물리적 공간일 수도 있음)에서의 각 점에 이와 같은 성향이 내재해 있으며, 성향은 변별체와의 만남에서 모습을 드러낸다. 그런 점에서 대상이 어떤 효과를 나타내어 그 존재를 드러내는 성향과도 같다. 그래서 장회익은 이를 ‘존재표출성향’이라 부르자고 제안한다. 장회익의 성향은 정량적으로 상태함수의 전개계수 즉 확률진폭과 같다.

이를 수아레스가 마제노의 잠행성 해석을 성향 해석의 표준적 틀로 제안한 것과 비교할 수 있다.

16) 장회익 (2022), p. 140.

집행적 물리량 Q 를 빛띠분해 표현으로 $Q = \sum_n a_n |\phi_n\rangle \langle \phi_n|$ 으로 나타낼 때, 계의 상태 Ψ 를 Q 의 고유상태들의 선형결합 $\Psi = \sum_n c_n |\phi_n\rangle$ 으로 쓸 수 있다고 하자. 계가 상태 Ψ 에 있다는 것은 Q 를 측정하면 계가 고윳값 a_n 을 확률 $|c_n|^2$ 으로 발현하는 성향을 지닌다는 말과 같다.¹⁷⁾

수아레스의 접근은 표준적인 양자역학의 형식체계를 그대로 사용하면서 성향을 “계가 상태 Ψ 에 있다”는 말의 의미로 설정한다. 상태함수의 선형결합에서 계수의 값(일반적으로 복소수)을 성향의 값이라고 부르는 게 좋을지 아니면 그 값을 그냥 성향이라고 부르는 게 좋을지 더 따져볼 필요가 있지만, 장회익의 논의는 마제노와 수아레스의 틀과 매끄럽게 잘 맞아떨어지는 것을 볼 수 있다.

요컨대 장회익은 양자역학의 상태함수를 성향이라는 존재적 개념을 통해 이해해야 한다고 주장한다.

4. 양자이론의 성향 존재론

장회익의 새로운 존재론적 접근은 동역학적 서술의 메타적 구조에 기반을 두고 있다. 이는 물질세계와 서술세계를 구별하고, 다시 물질세계를 대상계와 변별체로 나누고, 서술세계를 경험표상영역과 대상서술영역으로 나누는 것이다.¹⁸⁾ 이에 따르면, 변별체는 물질세계에 속하는 존재이면서도 동역학적 서술의 대상이 되지 않고 물질적 요소이면서도 주체의 영역에 해당한다. 변별체와 대상이 만나는 사건으로부터 서술자는 “변별체에 나타난 사건의 흔적을 읽어 이를 대상의 처음 상태로 지정하게 된다.”¹⁹⁾ 변별체에 나타난 표상과 대상의 상태를 연관시킬 일반적 방식을 규약의 형태로 설정해야 하는데, 그것이 장회익이 제안하는 ‘측정의 공리’이다. 처음 상태를 얻고 나면

17) Suárez (2007), p. 420. 더 상세한 것은 Suárez (2004a), Suárez (2004b) 참조.

18) 장회익 (2022), pp. 54-52.

19) *Ibid.*, p. 51.

인식주체는 변화의 법칙 즉 동역학 방정식에 따라 대상의 상태를 시간의 함수로 산출할 수 있게 되며, 이것이 곧 대상에 대한 동역학적 서술에 해당한다. 이를 통해 대상이 관여할 ‘사건’을 예측하기 위해선, 다시 상태를 표상과 연관시키는 일반적 방식을 활용해, 미래 임의의 시간에 대상이 변별체를 다시 스칠 경우 어떠한 결과가 나타날지를 말할 수 있게 된다.²⁰⁾

그런데 장희익의 이런 구도와 매우 유사한 논의가 하이젠베르크의 서술에도 나타난다.

따라서 실험에 대한 이론적 해석은 세 가지 구별되는 단계가 요청된다. (1) 처음의 실험 상황을 확률함수로 해석하는 일; (2) 이 함수가 시간이 흐름에 따라 어떤 변화하는지 추적하는 일; (3) 계에 대한 새로운 측정을 서술하는 일로서, 그 측정의 결과를 확률함수로부터 계산할 수 있다. 첫째 단계에서는 불확정성 관계를 충족시키는 것이 필요조건이다. 둘째 단계는 고전적 개념으로서 서술될 수 없다. 처음의 관찰과 다음의 측정 사이에 계에서 무슨 일이 일어나는지 서술할 방법이 없다. ‘가능한 것’으로부터 ‘실제의 것’으로 변화되는 것은 오로지 셋째 단계에서만이다.²¹⁾

이 셋째 단계에서 무슨 일이 일어나는 것일까? 장희익은 “대상 자체의 존재적 측면에서 보면 양자역학적 상태는 대상이 시공간 속에 존재하는 하나의 존재 양상을 대표한다”²²⁾라고 말하고 있는데, 하이젠베르크가 ‘가능한 것’으로부터 ‘실제의 것’으로 변화하는 것이라고 말하는 것과 맞닿아 있다.

장희익은 하이젠베르크의 접근을 비판적으로 평가한다. “확률함수가 실제와 연결되는 것은 오직 새로운 측정이 이루어질 때만이라는 주장은 스스로 반실재론이라는 입장을 강하게 함축한다. 즉 대상의 상태함수는 대상이 지닌 실제의 일부가 아니라는, 따라서 우리가 대상에 대해 추측하는 그 무엇일 뿐이라는 관념을 내포한다.”²³⁾라고 하면서, “하이

20) *Ibid.*, p. 51.

21) Heisenberg (1958), pp. 46-7.

22) 장희익 (2022), p. 144.

23) 장희익 (2022), p. 278.

젠베르크를 비롯한 거의 모든 사람은 이 과정을 관측 행위와 직결시킴으로써 마치도 인간의 관측 행위가 이러한 사건발생 과정에 필수적으로 관여하는 것으로 과잉 해석하고 있다.”²⁴⁾라고 비판한다. 그러나 이러한 비판은 1958년 이전의 하이젠베르크의 논의이거나 하이젠베르크에 대한 표준적인 견해에 기반을 둔 것으로 보인다.

하이젠베르크가 말하는 측정의 과정은 사실상 “대상이 변별체와 조우하여 사건이 발생하는 상황을 매우 정교하게 서술한 것”²⁵⁾이며, 하이젠베르크는 이것이 관측의 심리적 행위(psychical act)에 적용되는 것이 아니라 물리적 작용(physical act)에만 적용됨을 강조하고 있다. 다시 말해 대상과 측정장치(즉 변별체)가 만나는 순간 사람의 개입이나 정신적 요소와 전혀 무관하게 ‘잠재성’이 ‘현실성’이 된다고 말한다. 여기에서 ‘잠재성’은 곧 마제노의 ‘잠행성’ 및 포퍼의 ‘성향’과 실질적으로 같은 것이며, 장회의 ‘존재표출성향’과 직접 맞닿아 있다고 보는 것이 적절하다.

양자역학에서의 확률은 비호환 물리량들에 대해 콜모고로프 공리를 충족시키지 않으며, 양자사건 집합의 대수적 구조는 불 대수를 이루지 않는다(Hughes 1989). 특히 베이즈 정리와 관련한 험프리즈의 역설을 고려하면 양자성향은 표준적인 확률이 아닌 것으로 보인다. 그렇다면 아예 양자성향이 보통의 확률과 다른 일반화된 확률이라 하고 양자성향에 대한 대수적 구조를 별도로 탐구하는 것도 선택지가 된다.²⁶⁾ 플라비오 델산토와 니콜라 지생은 잠재성 실재론(potentiality realism)이라는 이름의 물리학의 해석을 제안했다(Del Santo and Gisin 2023). 실제의 요소로서 물리량의 실제 값이 아니라 잠재성, 즉 개별적인 사건에서 얻을 수 있는 내재적이고 객체적인 성향을 내세우는 것이다. 델산토와 지생은 이를 확장하여 벌런타인이 “결정론보다 약한 인과성의 정도”(Ballentine 2016)로 규정한 성향이야말로 대상이 지닌 내재적 속성을 받아들이자고 제안한다. 잠재성 실재론은 어떤 이론적 틀에 대해서도 실재론과 근본적인 비결정론을 회피시킬 수 있는 해석이다.²⁷⁾

24) *Ibid.*, p. 279.

25) *Ibid.*, p. 279.

26) 이에 대해 더 상세한 것은 김재영 (2021) 참조.

델산토와 지생의 잠재성 실재론을 양자역학의 성향 존재론으로 재해석하면 이는 하이젠베르크의 논의와 직접 연결되며, 결국 장회익의 사건야기성향/존재표출성향에 대한 논의와 실질적으로 같은 주장을 하는 것이 된다.

5. 맷음말

우리는 마제노의 잠행성 해석이 역학적 해석이나 코펜하겐 해석과 다른 제3의 길이 될 수 있음을 보았으며, 맥스웰의 양자 성향을 이론이 제기한 문제는 타당하지만 그 해결책은 적절하지 않음을 지적했다. 아리스토텔레스적인 잠재성 개념을 중심으로 한 하이젠베르크의 접근이 널리 알려진 코펜하겐 해석과 다르다는 점을 살펴보고, 장회익의 사건야기성향 및 존재표출성향을 상세하게 논의했다.

하이젠베르크는 양자역학의 형식체계가 상태의 겹침을 허용하며 측정의 과정이 양자역학과 구별되는 특별한 문제이지만, 이를 잠재성으로 부터 현실성으로의 전이라고 보는 접근을 통해 이해할 수 있음을 주장했다. 이는 곧 양자역학의 상태함수 Ψ 를 성향으로 해석하는 것과 같다. 헬란을 따라 하이젠베르크의 관찰가능성이 B-관찰가능성이 아니라 E-관찰가능성임을 받아들인다면, 1958년 이후의 하이젠베르크를 오히려 주관주의 및 이원론에 기반을 둔 코펜하겐 해석과 분리할 수 있다.

양자역학의 상태를 사건야기성향 및 존재표출성향으로 보아야 한다는 장회익의 주장은 하이젠베르크가 측정의 문제를 다루면서 잠재성이 현실성으로 전환하는 것임을 주장한 것과 내용상 같은 것임을 보았다.

우리는 이후의 후속연구에서 양자장이론의 존재론과 성향의 존재론을 연결할 실마리를 찾아보고자 한다. 나아가 양자장이론의 성향 존재론이 잠재성 실재론과 어떻게 연결될 수 있을지 살펴볼 것이다.

27) 이와 관련하여 Dorato (2007) 및 Dorato (2011), Bschor (2016) 참조.

참고문헌

- 김재영 (2014), 「통계적 양상을 해석과 측정의 문제」, 『과학철학』 17권 1호, pp. 73-111.
- _____ (2021), 「칼 포퍼의 <탐구의 논리>와 양자역학의 성향 해석」, 『철학·사상·문화』 36호, pp. 1-24.
- 장희의 (2021), 『양자역학을 어떻게 이해할까?』, 한울.
- Anjum, R. L. and Mumford, S. (2018), *What Tends to Be: The Philosophy of Dispositional Modality*, Routledge.
- Ballentine, L. E. (2016), “Propensity, probability, and quantum theory”, *Foundations of physics* 46: pp. 973-1005.
- Bird, A. (ed.) (2012), *Properties, Powers, and Structures: Issues in the Metaphysics of Realism*, Routledge.
- Bschir, K. (2016), “Potentiality in Natural Philosophy”, in Eastman, T. E., Epperson, M. and Griffin, D. R. (eds.) *Physics and Speculative Philosophy: Potentiality in Modern Science*. De Gruyter.
- Camilleri, K. (2009), *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics: The Physicist as Philosopher*, Cambridge University Press.
- Del Santo, F. and Gisin, N. (2023), “Potentiality realism: A realistic and indeterministic physics based on propensities”, arXiv:2305.02429
- Dorato, M. (2007), “Dispositions, relational properties, and the quantum world”, in Kistler, M. and Gnassounou, B. (eds.), *Dispositions and Causal Powers*. Ashgate, pp. 249-70
- _____ (2011), “Do Dispositions and Propensities Have a Role in the Ontology of Quantum Mechanics? Some Critical Remarks”, in *Probabilités, causes and propensities in physics*, Springer Netherlands, pp. 197-219.
- Hacking, I. (2006), *The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and*

- Statistical Inference*, Second Edition, Cambridge University Press.
- Heelan, P. A. (1965), *Quantum Mechanics and Objectivity: A Study of the Physical Philosophy of Werner Heisenberg*, Nijhoff.
- _____(2016), *The Observable: Heisenberg's Philosophy of Quantum Mechanics*, Peter Lang.
- Heisenberg, W. (1943), "Die 'Beobachtbaren Grossen' in der Theorie der Elementarteilchen", *Z. Physik* 120: pp. 513-38.
- _____(1958), *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, Harper.
- _____(1959), *Physik und Philosophie*, Ullstein Bücher.
- Howard D. (2004), "Who Invented the 'Copenhagen Interpretation'? A Study in Mythology", *Philosophy of Science* 71: pp. 669-82.
- Jaeger, G. (2014), *Quantum Objects: Non-Local Correlation, Causality and Objective Indefiniteness in the Quantum World*, Springer.
- _____(2017), "Quantum potentiality revisited", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 375. doi: 10.1098/rsta.2016.0390.
- Kastner, R. E., Kauffman, S. and Epperson, M. (2018). "Taking Heisenberg's Potentia Seriously", *International Journal of Quantum Foundations* 4: pp. 158-72.
- Margenau, H. (1954), "Advantages and disadvantages of various interpretations of the quantum theory", *Physics Today* 7: pp. 6-13.
- Maxwell, N. (1988), "Quantum propensiton theory: A testable resolution of the wave/particle dilemma", *British Journal for the Philosophy of Science* 39: pp. 1-50.
- _____(2011), "Is the Quantum World Composed of Propensitons?", in *Probabilités, causes and propensities in physics*, Springer Netherlands, pp. 221-43.
- McKnight, J. L. (1958), "An Extended Latency Interpretation of Quantum Mechanical Measurement", *Philosophy of Science* 25: pp. 209-22.

doi:10.1086/287601.

- Meincke, A.S. (ed.) (2020), *Dispositionalism: Perspectives from Metaphysics and the Philosophy of Science*, Springer.
- Popper, K. (1957), “The propensity interpretation of the calculus of probability and the quantum theory”, in S. Körner (ed.) *Observation and Interpretation*, Butterworth, pp. 65-70.
- _____(1967), “Quantum Mechanics without “The Observer””, in M. Bunge (ed.), *Quantum Theory and Reality*. Springer, pp. 7-44.
- _____(1982), *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Hutchinson.
- _____(1990), *A World of Propensities*, Thoemmes.
- Redhead, M. (1987), *Incompleteness, Nonlocality and Realism*, Oxford University Press.
- Suárez, M. (2004a), “On Quantum Propensities: Two Arguments Revisited”, *Erkenntnis* 61: pp. 1-16.
- _____(2004b), “Quantum Selections, Propensities, and the Problem of Measurement”, *British J. Phil. Science* 55: pp. 219-55.
- _____(2007), “Quantum propensities”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38: pp. 418-38.
- _____(ed.) (2011), *Probabilities, Causes and Propensities in Physics*, Springer.
- Vetter, B. (2015), *Potentiality: From Dispositions to Modality*, Oxford University Press.

논문 투고일	2025. 08. 12.
심사 완료일	2025. 09. 30.
게재 확정일	2025. 11. 11.

Propensity Interpretation and the Ontological Foundation of Quantum Mechanics

Zae-young Ghim (Korea Science Academy of KAIST)

From the approaches of interpreting the state function of quantum mechanics as propensity, we attempt to establish a fundamental framework for discussing the ontological foundation of quantum mechanics. Starting Margenau's latency interpretation and Maxwell's propensiton theory, we reinterpret Heisenberg's discussion of potentiality centered on the concept of propensity. We argue that Heisenberg's discussion is equivalent to interpreting quantum mechanical state functions as propensity. Furthermore, after examining Zhang Hweik's event-causing propensity and existence-manifesting propensity, it is discussed that Zhang Hweik's proposal provides an opportunity to critically evaluate Heisenberg's discussion. From this, it is argued that Heisenberg's potentiality and Zhang Hweik's event-causing propensity are equivalent.

Key Words: wavefunction of quantum mechanics, propensity interpretation, potentiality, event-causing propensity, ontological foundation

