

## 자연의 원리: 측정과 자연현상<sup>†</sup>

김 명 석<sup>‡</sup>

자연과학의 성공 특히 물리학의 성공을 설명하는 것은 과학철학의 주요 과제 중 하나인데, 이 논문은 물리학의 성공이 물리학이 채택한 원리에 바탕을 두고 있다고 주장한다. 물리학자는 자연 현상이 드러내는 구조가 그 현상을 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않는다고 가정한다. “물리학은 개별 물리학자에 상대적이지 않다”는 이 가정을 “자연의 원리”라고 부를 수 있다. 합당한 물리이론은 바로 이 원리에 뿌리를 두고 있어야 한다. 실제로 고전역학, 상대성이론 등 표준 물리이론들은 이 원리에 의해 재구성될 수 있다. 이 논문에서 양자역학조차도 이 원리를 바탕으로 재구성될 수 있다는 것을 한 본보기로서 들어 놓았다. 자연의 원리는 측정될 수 있는 것의 범위를 한정하는 조건이며, 한 양이 물리량이 되기 위한 조건, 한 측정이 물리량의 측정이 되기 위한 조건이다. 우리가 사물들로부터 측정 가능한 것들을 읽어낼 때, 그리고 그것들을 통해 세계를 기술할 때, 세계는 물리량을 가진 사물들의 세계, 사물들이 물리 속성을 드러내는 세계, 물리 현상들이 출몰하는 세계로 나타난다. 이런 의미에서 자연의 원리는 세계를 물리 세계로, 곧 코스모스로 꾸민다.

【주요어】 물리학의 성공, 객관성, 자연의 원리, 대칭성, 코스모스

<sup>†</sup> 이 논문의 초안은 2010년 7월 1일 강원대학교에서 열렸던 한국과학철학회 학술대회에서 발표되었다. 이 논문에 대해 깊은 대화를 나누고 논평을 해주셨던 김유신, 이정민, 이종원 선생께, 또한 그 이후 줄곧 물음을 던졌던 생 각실험실의 김가영과 이보미에게 깊은 감사를 드린다. 포부만 넘치고 치밀 하지 못한 이 논문의 개선을 위해 유익한 비평과 조언을 주신 이 논문의 심사자들께, 1997년 자연의 원리를 처음 구상할 당시 설익은 내 생각에 몹 시도 큰 의미를 부여하신 신오현 선생께 각별히 감사드린다.

<sup>‡</sup> 국민대학교 교양대학, myeongseok@gmail.com.

## 1. 물리학의 성공을 설명하는 다른 방식

자연과학은 현상을 설명하고 예측하는 데 성공하였는가? 당연히 성공하였다. 특별히 물리학은 확실히 성공하였다. 물리학자들이 양립할 수 없는 서로 다른 이론들을 놓고 경쟁하는 일은 점차 드물어지고 있다. 그들은 고전역학, 전자기학, 열 및 통계역학, 양자장론, 일반상대성이론 등과 같은 표준이론들을 대체로 수용한다. 펜로즈에 따르면, 이론의 예측과 실험 결과 사이의 일치 정도가 양자장론의 경우 99.999999999%에 달하고, 일반상대성이론의 경우 99.99999999999%에 달한다. 물리이론의 주장들은 객관성을 갖고 있다고 해도 이제 거의 틀리지 않다. 적어도 나는, 물리이론들이 참이라고, 물리학이 기술하는 대상들은 실제로 존재한다고 말하는 데 주저하지 않는다. 여기서 “참임”이나 “실제로 존재함”을 어떻게 이해할지 학자들 사이에 의견이 분분하지만, 내 생각에, 물리이론은 “하늘에 떠 있는 저해는 내 눈동자보다 크다”만큼이나 참인 문장들로 가득 차 있으며, 원자 전자 블랙홀 등과 같은 물리 대상들도 하늘의 해나 내 눈동자만큼이나 실제로 존재한다. 물리학의 이러한 성공은 어떻게 해명될 수 있는가?

이 물음에 대해, 성공하는 양 보일 수밖에 없는 방식으로 물리 현상들이, 이론의 도식에 의해, 패러다임에 의해, 표상되고 재구성되었기 때문이라는 칸트 식 또는 쿤 식<sup>1)</sup> 답변이 상당한 지지를 받고 있다. 물리 현상들이 이론가의 패러다임에 의해 표상되고 재구성되었기 때문에, 그런 패러다임을 통해 물리 현상을 기술하고 예측하는 것이 옳은 것처럼 그 이론가에게 보일 뿐이라는 것이다. 패러다임을 통해 자연 현상을 보는 것은, 패러다임에 맞지 않는 현상들을 보지 못하게 하며, 패러다임에 어긋나는 방식으로 현상을 이해하는 것은 그 패러다임 내에서는 합당한 연구 과제로 인정받지

1) 쿤은 자기 견해를 “다윈 이후의 칸트주의” 또는 “범주가 이동하는 칸트주의”라고 밝힌다.(이정민 2012, p. 198) “범주가 이동한다”는 말은 칸트의 범주가 인간 지성에 내장되어 영원히 고정된 개념이었던 반면 [쿤의] 어휘집은 하나로 규정되지 않는다는 뜻이다. 과학의 발전과 함께, 그리고 한 공동체에서 다른 공동체로 넘어가면서 공약불가능한 방식으로 변화하는 것이다.(Ibid.)”

못한다. 여기서 이론가의 도식이나 패러다임은, 인간 유전자가 진화 역사의 우연한 구성물이었듯이, 과학 역사의 우연한 구성물일 뿐이다. 인간 행태가 유전자의 지령으로부터 벗어나는 것이 철저 진화주의자에게 불가능한 일인 듯이, 과학자의 실행이 현행 과학 패러다임으로부터 벗어나는 것은 철저 과학 역사주의자에게는 불가능한 일이다. 우리가 보는 세계는 유전자의 매트릭스 또는 패러다임의 매트릭스 내에 있는 구조물일 뿐이다. 종의 분화가 끝난 뒤, 과학 혁명이 마무리된 뒤, 우리는 그 이전으로 돌아갈 수 없고, 그 이전과는 전혀 다른 방식으로 세계를 바라볼 수밖에 없으며, 앞으로 생길 새로운 분화와 혁명에서도 마찬가지로의 단절이 벌어질 것이다.

나는 물리학의 성공을 설명하는 다른 방식이 있다고 믿는다. 물리학자들에게 오히려 더 익숙한 방식이 있는데 이 글에서 그 방식을 요약하고 해설하고자 한다. 물리학자들은 “대칭성 원리”라는 것을 통해 물리 현상을 묘상하고 물리이론을 재구성한다. 대칭성 원리는 짧게 말해 “물리학은 물리학자에 상대적이지 않아야 한다”는 원칙이다. 물리학자들은 자연 현상에서 찾을 수 있는 패턴 또는 구조가 그 현상을 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않는다고 가정한다. 많은 물리학자들, 과학철학자들이 이와 같은 대칭성 원리를 알고 있고, 심지어 이 원리를 통해 표준 물리이론들이 재구성된다는 것까지도 잘 알고 있다. 하지만 이 원리와 이것의 역할이 아직 충분히 성찰되지 않았다고 생각한다.

“대칭성 원리”를 이 글에서는 “자연의 원리”라고 달리 부르고자 한다. 자연의 원리 또는 대칭성 원리는 실제로 전문 물리학자들에게 매우 익숙하다. 이 원리를 물리이론의 구성에 적극 활용한 물리학자는 단연 아인슈타인이다. 1905년에 대칭성 원리를 통해 특수상대성이론을, 1915년에는 일반상대성이론을 구성해내었다. 그에게 대칭성 원리는 “허용될 수 있는 동역학 법칙을 제약하는 자연의 으뜸 모습”<sup>2)</sup>이다. 위그너는 1920년대 후반에 이 원리를 양자역학에, 그리고 모든 물리이론으로 확대 적용할 것을 제안했다.<sup>3)</sup> 그가 이런 제안을 했을 때 물리학자들은 처음에 냉담했지만 20세기

<sup>2)</sup> Gross (1995), p. 46.

<sup>3)</sup> Wigner (1931), (1967), pp. 28-50. 물리학에서 대칭성이 하는 역할에 대한 라이프니츠, 칸트, 헤르만 바일, 오이게네 위그너, 피에르 퀴리 등의 다

후반으로 접어들면서 이 제안은 물리학에서 거의 표준이 되었다. “오늘날 대칭성 원리는 자연에 대한 우리 기술에서 가장 근본이 되는 부분으로 간주된다.”<sup>4)</sup>

위그너는 대칭성 원리를 양자 현상과 상대성 현상 모두에 적용함으로써, 그리고 사물의 심층 내부 구조에 적용함으로써, 질량, 전하량, 고유풀 등 사물의 근본 속성을 추상해내었다. 이로써 그는 근본입자를 정의하고, 그 정의에 따라 입자들을 분류했다. 오늘날 표준모형에 등장하는 쿼크, 렙톤, 게이지 입자 등은 대칭성 원리를 통해 상정된 근본입자들이다. 물리학자들은, 대칭성 원리를 통해, 세계를 물리 사물들로 분할하고, 세계를 바로 이러한 사물들의 집적체로서 간주한다. 이런 방식으로 우리가 물리 세계라 부르는 세계가 구성된다.

이 글에서 나는 다음과 같은 것을 주장하고자 한다. 첫째, 물리 이론은 자연의 원리와 경험으로부터 재구성될 수 있다. 먼저 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않는 자연 현상, 또는 자연을 보는 틀이나 관점 등을 바꾸어도 변하지 않는 자연 현상을 찾는다. 예컨대 상대성이론의 경우 “빛의 속도는 30만 km/s이다”라는 마이컬슨과 몰리의 실험 또는 경험은 그것을 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않으며, 자연을 보는 틀이나 관점 등을 바꾸어도 변하지 않는 사실이다. 그 다음 자연의 원리에 따라, 위와 같은 불변 사실을 보존하는 방식으로 기존 개념들을 변경한 뒤, 그 개념들 사이의 관계를 유도해 낸다. 가령 광속 불변의 사실을 보존하는 방식으로 시간, 공간, 속도, 질량 개념 등을 변경한 뒤 이들 개

---

양한 문헌들은 Brading and Castellani (2003)에서 찾아볼 수 있다.

- <sup>4)</sup> Gross (1995), p. 46. 레더먼 · 힐 (2012). 우주의 탄생과 진화는 대칭성뿐만 아니라 매우 우연하게 벌어지는 대칭성 붕괴에 의해 이루어진다는 것이 물리학자들에게 잘 알려져 있다.(Close 2000) 그럼에도 우주를 구성하는 입자들과 그 변화를 지배하는 동역학은 대칭성에 근거하고 있다.(Icke 1995) 열역학에서 비가역 과정 같은 비대칭 현상들을 대칭성의 관점에서 해명하려는 시도에 대해서는 Ismael (2001), pp. 85-106을 보라. 실제 세계에 존재하는 규칙성과 무작위성은 법칙의 규칙성과 초기 조건의 무작위성에 각각 대응시킬 수 있다. 과학은 초기 조건이 왜 그런 방식으로 무작위성을 띠는지에 관심을 두기보다 법칙이 왜 그런 방식으로 규칙성을 띠는지에 더 많은 관심을 둔다.

념들 사이의 관계를 유도할 때 상대성이론이 구성된다. 제2절에서 자연의 원리가 무엇인지 여러 가지 표현들을 써서 정식화할 것이다. 실제로 고전 역학, 상대성이론 등 표준 물리이론들은 이 원리로부터 구성될 수 있는데, 특히 제3절에서 양자역학조차도 이 원리로부터 구성될 수 있다는 것을 짧게나마 해설하고자 한다. 제4절에서 물리이론이 자연의 원리를 통해 구성된다는 우리의 논제가 고대와 근대에는 어떤 방식으로 다르게 제안되었는지 회고하면서 이 원리의 형이상학을 음미할 것이다.

제2절에서 다시 언급하게 될 텐데, 둘째, 자연의 원리는 측정 가능한 현상, 우리가 흔히들 “물리 현상”이라 부르는 것의 범위를 한정한다. 자연의 원리는 하나의 측정이 물리량에 대한 측정이 되기 위한 조건으로 기능한다. 자연의 원리는 측정될 수 있는 것의 범위를 한정하는 조건이기 때문에, 주어진 한 현상을 이 원리에 따라 기술할 수 있다면 그 현상은 물리 현상으로 인정된다. 첫째와 둘째 주장은 다음 셋째 주장을 뒷받침해준다. 셋째, 자연의 원리를 통해 구성된 물리 이론은 보편성 또는 객관성을 띠지 수밖에 없다. 왜냐하면 이 원리 즉 “물리학은 물리학자에 상대적이지 않다”를 지배하는 이론은 개별 물리학자에 상대적인 이론이 될 것이기 때문이다. 이 원리를 통해 재구성된 물리이론은 개별 물리학자에 상대적일 수 없다. 노직은 객관성 개념을 구성하는 요소들을 다음과 같이 추려내었다. (i) 객관 사실은 다른 시간들, 다른 감각기관들, 다른 사람들 등 상이한 각도들에서도 접근될 수 있다. (ii) 객관 사실에 대해서는 여러 사람들 사이에 의견 일치가 있다. (iii) 객관 사실은, 사람들의 믿음, 욕구, 희망, 그것에 대한 관찰이나 측정에 독립된 채, 성립한다. (iv) 객관 사실은 다양한 변환에 대해서 불변한다. 어떤 것에 객관성을 부여하는 것, 객관성을 구성하는 것은 곧 불변성이다.<sup>5)</sup> 이러한 객관성 개념을 따를 때, 자연의 원리를 통해 구성된 물리이론은 마땅히 객관성을 띠게 될 것이다.<sup>6)</sup> 둘째와 셋째 주장에 대한 보

5) (iv)는 객관성 개념의 다른 세 요소를 설명하고 뒷받침해준다.(Nozick 2001, pp. 75-6) “한 속성 또는 관계가 적절한 변환들에 대해 불변할 때 그것은 객관적이다.”(Ibid., p. 79) 객관성의 한 지표로서 변환 속 불변 개념에 대한 해설과 비평은 이상원 (2013)을 보라.

6) 과학 이론의 본성과 구조에 대한 이 논문의 주장은 사실 과학에 대한 좌익의 견해를 비판하기 위해 제안되었다.

다 자세한 해명은 이 논문에서 생략한다.<sup>7)</sup>

7) 이 논문의 심사위원들은 다음과 같은 물음을 제기했다. 첫째, CP 대칭성의 깨어짐에 대해서는 잘 알려져 있고 이 사실은 우주의 탄생 과정을 매우 잘 설명해주며, 우주배경복사 관측을 통해서 이 대칭성 깨어짐이 정량적으로 측정되었다. 대칭성의 깨어짐을 측정하고 이를 설명하는 과학이론은 자연의 원리를 위배하는가? 둘째, 자연과학이 자연의 원리에 기초해야 한다는 요구는 동역학이론에만 적용되는 것이 아닌가? 물질이나 생명을 다루는 화학물리학이나 생물물리학 등에도 적용되는가? 셋째, 불확정성 원리는 양자현상이 자연의 원리를 위배한다는 것을 보여주는 것이 아닌가? 양자역학은 자연의 원리에 어긋나는 일을 허용하는 이론이 아닌가? 넷째, 인식론 측면에서 자연의 원리는 과학자들이 물리이론을 경험과 함께 구성할 때 의존하는 원리이다. 형이상학 측면에서 대칭성은 실제로 존재하며 근본 대칭성은 근본 실재로서 존재한다는 원리이다. “왜 물리학이 성공했는가”를 설명하려면 우리는 그 원리의 형이상학 측면에 의존해야 하는데, 그 원리의 형이상학 측면까지 우리가 받아들여야 하는가?

이에 대한 나의 잠정 답변은 다음과 같다. 첫째, 심사위원들이 제기한 것처럼 아마도 대칭성 깨어짐을 통해 우주의 역사에 전기가 마련된 것으로 보인다. 빅뱅 자체가 가장 중요한 대칭성 깨어짐이며, 짝생성 짝소멸의 비대칭성 때문에 안정된 물질 우주가 생성되었다. 대칭성 깨어짐을 통해 시간의 흐름 자체가 생성되는지도 모른다. 나는 아직 대칭성 깨어짐을 체계 이론 안에서 이해할 능력을 갖고 있지 않다. 하지만 양자장론과 일반상대성이론이 대칭성 원리를 통해 구성될 수 있다면, 이 이론 내에서 설명될 수 있는 대칭성 깨어짐 현상들은 대칭성 원리 자체를 위협하지 않는다. 이것은 좌우 대칭이 깨어진 얼굴이 존재한다는 사실이 양자장론과 일반상대성이론이 대칭성 원리를 통해 구성될 수 있다는 주장의 반례가 되지 않는 것과 같다. CP 대칭성의 깨어짐은 더 근본이 되는 대칭성이 따로 있다는 것을 말해줄 뿐이다.

둘째, 나는 자연과학의 경우 대체로 환원주의를 지지한다. 물질 이론들은 입자물리학에 기초해야 할 텐데 입자물리학은 대칭성 원리에 따라 렙톤과 쿼크 및 게이지입자 등과 같은 근본 입자를 개별화하고 분류한다. 또한 화학물리학이나 생물물리학은 고전역학, 전자기학, 양자역학, 상대성이론 등의 응용이어야 한다고 생각한다. 만일 후자의 동역학 이론들이 자연의 원리를 통해 체계화되고 정식화된다면 화학물리학이나 생물물리학도 자연의 원리에 기초한 것이라고 말할 수 있다. 다만 열 및 통계역학은 다소 어중간한 위치에 놓여 있는 것으로 보인다. 한편에서는 고전역학이나 양자역학으로부터 재구성될 수 있는 이론으로 볼 수 있고, 다른 한편 별도의 원리들로부터

정식화될 수 있는 이론으로 볼 수 있다. 후자의 경우 열 및 통계역학의 원리들도 자연의 원리 아래에 포섭될 수 있는지에 대해 긍정 답변을 말할 자신이 아직 없다. 첫째 물음에서 쟁점이 된 대칭성 깨어짐 같은 현상이 독립된 열 및 통계역학의 원리에서 비롯된 것일 수 있다.

셋째, 불확정성 원리의 토대가 되는 관계식  $[X, P] = i\hbar$  자체는, 제3절에서 압축하여 설명하겠지만, 자연의 원리를 통해 유도되는 관계식이다. 각주 24의 식 (4.2)가 나중에 위치 물리량과 운동량 물리량의 동시 측정 불가능성을 표현하는 수식으로 해석되는 그 관계식이다. 나는 이런 해석 자체를 받아들이지 않지만, 불확정성 원리를 어떻게 해석하든 이 원리는 양자역학이 자연의 원리로부터 재구성될 수 있다는 주장을 약화하지 못한다. 내 생각에 자연의 원리를 위배하는 양자현상은 없다. 다만 유의해야 할 점은 자연의 원리가 양자역학의 구성을 위해 우리에게 요구하는 것이 개별 물리량의 측정 차원이 아니라는 점이다. 제3절에서 다시 말하겠지만 자연의 원리가 요구하는 것은 첫째, 한 물리량의 측정값 스펙트럼은 틀을 바꾸어도 바뀌지 않을 것, 둘째, 한 사건의 발생 확률은 틀을 바꾸어도 바뀌지 않을 것이다.

넷째, “빛의 속도는 초속 30만 km이다”라는 사실을 생각해 보자. 이 사실은 이 속도를 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않는다. 이 불변 사실 또는 불변량은 과학자 사회의 구성물이 아니다. 그것은 말하자면 ‘자연의 로고스’이다. 이것은 “어떤 변환에도 불구하고 불변하는 구조가 존재한다”는 것을 입증하는 경험 사실이다. 이 사실의 ‘존재’는 자연의 원리가 형이상학 측면을 갖는다는 것을 입증한다. 다시 말해 “빛의 속도는 초속 30만 km이다”가 그 속도를 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 아랑곳하지 않고 정말로 사실인 한, 자연은 실제로 그런 구조를 갖고 있다. 이 사실이 모든 관성계에서 성립하도록 속도, 시간, 질량 개념 등을 바꾼 것이 바로 상대성이론이다. 보다 정확히 말해, 그 사실을 함축하지 않는 이론은 합당한 이론이 아니며 그 사실을 측정하지 못하는 측정은 올바른 측정이 아니라는 식으로 경험과 이론 자체를 재규정할 때 상대성이론이라는 ‘패러다임’이 산출된다. 상대성이론이 자연의 원리에 의해 구성되었다는 것은 이런 의미이다. 반면 고전역학은 상대성이론의 토대가 되는 자연 원리의 형이상학 측면을 위배하는 이론이며 실제로 특정 정밀도 이상에서는 객관성을 잃은 이론이다. 이 점에서 고전역학은 낮은 객관성을 갖는 반면 상대성이론은 더 높은 객관성을 갖는다. 특수상대성이론에 비해 일반상대성이론이, 비상대론 양자역학에 비해 양자장론이 더 깊은 대칭성에 기초해 있다는 점에서 후자 이론이 전자보다 더 높은 객관성을 갖는다.

## 2. 자연의 원리

우리는 세계 내 현상들에서 모종의 패턴을 발견한다. 이 패턴을 경험하기 때문에 우리는 사물들과 그 속성들과 그 변화들이 존재한다고 믿게 된다. 사물들 사이의 속성 차이와 그 변화를 기술하기 위해 속성에 숫자를 부여하는데 이러한 양화 과정을 “측정”이라 한다. 만일 어떤 속성이 측정될 수 있는 속성이라면, 우리는 그 속성을 “물리 속성” 또는 보다 간단히 “물리량”이라고 부르고, 한 사물이 물리량을 가질 때 우리는 그 사물을 “물리 사물” 또는 “물리 대상”이라고 부른다. 물리 사물 또는 물리 대상은 보다 짧게 “물질”이나 “물체”라고 달리 부를 수 있다. 물리학은 물리 사물의 물리 속성을 다루는 학문이기 때문에, 물리학은 세계로부터 측정할 수 있는 것들을 추상하는 학문이다.<sup>8)</sup> 물론 숫자를 부여하는 모든 과정이 측정 과정인 것은 아니다. 숫자를 부여하는 과정이 측정 과정이 되기 위해서 지켜야 하는 규범 같은 것이 반드시 있다. 세계가 오직 측정할 수 있는 것만으로 이루어져 있는 것은 아니기 때문에, 우리는 측정할 수 없는 것이 있다고 믿을 수 있다. 그래서 측정할 수 없는 것과 측정할 수 있는 것을 구별하는 원리 같은 것이 필요하다.

측정이론은 단지 두 가지 존재를 가정한다. 하나는 측정대상들이고 다른 하나는 수들이다. 그러나 측정대상은 수를 가지지 않는다. 수는 사물에 고유하게 내재되어 있지 않으며, 사물의 한 부분도 아니고, 사물 표면에 붙어 있는 것도 아니다. 사물에 수를 할당하는 것은 그 사물을 다른 사물들과 관련시키는 하나의 방법일 뿐이다. 가령 사물이 얼마의 질량을 가지느냐는 것은 관계의 문제이다. 이 관계는 사물과 수의 관계라기보다 한 사물과 다

---

8) 자연주의자들은 세계가 곧 물리 세계 또는 물질 세계라고 믿는다. 물리 세계를 다른 말로 “자연 세계” 또는 “자연계”라고 부른다. 오늘날 “자연”의 용례는 주로 물리 세계를 뜻하는 것으로 제한되지만, 초기 자연철학자나 근대철학자에게 자연 세계는 물리 세계만을 뜻하지 않았다. 이 글에서는 “자연”과 “세계”를 동의어로 사용하지 않을 것이다. “자연 세계”, “물리 세계”, “코스모스” 등은 단지 세계의 물리 측면만을 뜻한다. 앞으로 설명할 “자연의 원리”는 단지 세계를 자연 세계로서 기술하는 원리일 뿐이다. 나는 전체 세계가 자연의 원리에 따라 재구성될 수 있다고 생각하지 않는다.



른 사물 사이의 관계이다. 예를 들어 사물에 질량 수치를 할당하는 것은 특정 현상과 연관하여 사물들 사이에 모종의 관계가 성립한다는 표식이다.<sup>9)</sup> 따라서 양화의 과정은 일반적으로 여러 사물들을 비교하는 과정을 반드시 요구한다. 이 점에서 측정은 여러 사물들 사이에 나타나는 규칙 패턴들 중에서 특정 현상을 선택하여 부각하는 조작과정이다.

만일 특정 현상과 연관하여 사물들 사이의 관계에 아무런 규칙이 없다면 사물에 수를 할당하는 것은 불가능하다. 이 관계는 측정 절차, 측정 장치, 스케일, 도량형, 관심, 욕망, 의지 등에 의존하지 않을 것이다.<sup>10)</sup> 결국 측정은 이런 것들에 의존하지 않는 현상들의 관계 패턴을 추적하는 과정이어야 한다. 이것은 측정 가능한 것들이 지켜야 하는 규범에 해당한다. 우리는 이 규범을 어기는 어떠한 인식 과정도 측정이 될 수 없으며, 이 규범을 어긴 채 사물에게 숫자를 귀속하는 것은 물리 속성의 귀속일 수 없다고 요청할 수 있다. 이렇게 요청된 규범은 무엇이 물리 속성인지, 무엇이 물리 속성이 될 수 없는지를 규정해 준다. 우리는 이 규범을 “자연의 원리”라 부르기로 하자.

자연의 원리: 현상들 사이의 관계에는, 그 현상을 측정하는 장치나 사람의 안팎 사정에 영향 받지 않는 패턴 또는 구조가 존재한다. 우리가 어떤 자세, 어떤 태도, 어떤 시각, 어떤 각도, 어떤 틀로 자연을 본다 하더라도 그 자연에는 모종의 동일한 패턴 또는 구조가 존재한다.

“현상을 측정하는 사람 또는 도구”를 “물리학자”로 정의하고, “현상들 사이의 관계에 나타나는 패턴 또는 구조를 탐구하고 기술하는 것”을 “물리학”으로 정의하면, 자연의 원리를 다음과 같이 짧게 표현할 수 있다.

<sup>9)</sup> Krantz et al. (2006), pp. 1-6. 고전역학에서 사물에 질량을 부여하는 과정에 대해서는 Symon (1971), pp. 5-7을 보라.

<sup>10)</sup> 가령 길이 측정의 경우, 사물 A, B, C에 대해 A가 B보다 길고, B가 C보다 길 경우, A는 C보다 길어야 한다. 이 관계는 측정 절차, 측정 장치, 스케일, 도량형, 관심, 욕망, 의지 등에 의존하지 않는다. 나아가 A가 B보다 3배 길다면, 그 어떤 측정 절차, 측정 장치, 스케일, 도량형을 가져와도 A가 B보다 3배 길어야 한다. 이러한 요구들은 “길이”라는 속성 자체를 정의한다.

물리학은 물리학자에 상대적이지 않다.

여기서 “X는 Y에 상대적이지 않다”는 “Y가 어떤 자세, 어떤 태도, 어떤 시각, 어떤 각도, 어떤 틀에서 자연을 측정한다 하더라도 X는 Y에게 동일하다”를 뜻한다.

전문 물리학 교과서에서 이 자연의 원리를 흔히 “대칭성 원리”라 부른다.<sup>11)</sup> 자연의 원리는 다음과 같이 표현할 수 있다.

물리학은 측정 위치에, 측정 방향에, 측정 시간에, 상대적이지 않다. 물리법칙은 좌표계의 옮김, 돌리기, 흐름 등에 의존하지 않는다.<sup>12)</sup>

여기서 측정 위치와 방향 및 시간은, 보다 엄밀하게 말해, 측정 대상이 놓여 있는 좌표계에 해당한다. 가장 많이 사용하는 좌표계는 관성 좌표계인데 이 좌표계 내에 놓인 사물들은 관성의 법칙 또는 뉴턴 제1운동법칙을 만족한다. 물리학자 또는 측정 장치의 정향을 바꾸는 것은 곧 좌표계를 다른 좌표계로 바꾸는 것과 같다. 한 관성 좌표계를 다른 관성 좌표계로 변환하는 것을 좌표변환이라 하며 특히 사물이 놓여 있는 시공간 좌표계를 다른 좌표계로 바꾸는 것을 시공간 대칭변환이라 한다. 시공간 좌표변환에는 크게 두 가지가 있는데 하나는 갈릴레이 변환이고, 다른 하나는 로렌츠 변환이다. 어떤 변환이 우리 세계에 적합한지는 우리의 경험에 달려 있다. 만일 빛의 속력이 일정하다는 우리의 경험이 없었다면, 우리는 갈릴레이 변환이 우리 세계에 적합하지 않다는 것을 알지 못했을 것이다.<sup>13)</sup>

11) 바일은 “대칭성”을 “비율들의 조화”라고 설명했다.(Weyl 1952, preface) “대칭성”을 우리말로 “한결같음” 또는 “결맞음”이라고 옮겨도 된다. 대칭성에 관한 보다 일반적인 논의는 Rosen (1995)를 보라.

12) 이것을 다음과 같이 표현할 수도 있다. (i) 자연을 보는 공간 위치 또는 실험 장치의 위치를 바꾸어도 물리학자는 똑같은 자연법칙을 발견하게 될 것이다. (ii) 자연을 보는 공간 방향 또는 실험 장치의 방향을 바꾸어도 물리학자는 똑같은 자연법칙을 발견하게 될 것이다. (iii) 자연을 보는 시간 또는 실험하는 시점을 바꾸어도 물리학자는 똑같은 자연법칙을 발견하게 될 것이다.

13) 로렌츠 변환은 빛의 속도가 좌표변환에도 여전히 불변하는 변환이다. 측정 장치의 배향을 변경하는 올바른 변환이 갈릴레이 변환이나 로렌츠 변환이

시공간 대칭변환에는 (i) 옮김 틀 바꾸기: 좌표계를 특정한 위치로 옮기는 것, (ii) 돌림 틀 바꾸기: 좌표계를 특정한 각도만큼 돌리는 것, (iii) 흐름 틀 바꾸기: 좌표계의 시간 눈금을 얼마의 시간만큼 흘리는 것 따위가 있다. 이러한 변환들은 물리법칙의 내용을 바꾸지 못한다. (i)과 같은 옮김 틀 바꾸기에 의해서 물리법칙의 내용이 변하지 않는다는 사실을 물리학자들은 공간의 동질성이라 한다. 이것이 뜻하는 것은 측정 장치 또는 관측자가 놓여 있는 위치에 따라 물리법칙이 달라지지 않는다는 것이다. 물리법칙은 모든 위치에서 한결같고, 물리학자는 그가 놓여 있는 위치에 따라 다른 물리법칙을 보지 못한다. 이곳에 물리법칙과 저곳에 물리법칙은 똑같다. (ii)와 같은 돌림 틀 바꾸기에 의해서 물리법칙의 내용이 변하지 않는다는 사실을 물리학자들은 공간의 등방성이라 한다. 이것이 뜻하는 것은 측정 장치 또는 관측자가 놓여 있는 방향에 따라 물리법칙이 달라지지 않는다는 것이다. 물리법칙은 모든 방향에서 한결같고, 물리학자는 그가 세계를 보는 방향에 따라 다른 물리법칙을 발견하지 못한다. 이쪽 물리법칙과 저쪽 물리법칙은 똑같다. (iii)과 같은 흐름 틀 바꾸기에 의해서 물리법칙의 내용이 변하지 않는다는 사실을 물리학자들은 시간의 동질성이라 한다. 이것이 뜻하는 것은 관측하는 시간에 따라 물리법칙이 달라지지 않는다는 것이다. 물리학자는 그가 세계를 보는 시간에 따라 다른 물리법칙을 발견하지 못한다. 실험하는 시간을 앞당기거나 늦춘다고 해서 물리법칙이 달라지지 않는다. 어제 물리법칙과 오늘 물리법칙은 똑같다.

대칭성은 다음 세 가지 항목을 요구한다. (i) 사물들, (ii) 틀 바꾸기 또는 변환들: 사물들을 보는 틀을 바꿈, (iii) 불변량 또는 보존량: 틀을 바꾸어도 여전히 남아 있는 어떤 것. 대칭성에서 가장 중요한 요소는 불변량이다. 틀을 앞뒤로 옮기거나, 보는 방향을 회전하여 틀을 틀거나, 보는 시간을 돌려서 틀을 감아도 바뀌지 않는 어떤 양이 존재한다는 것이다. 사물들 보는 방식을 바꾸어도 바뀌지 않는 것 즉 불변량이 있을 때 우리는 거기에 대칭성이 있다고 말한다. 그리고 대칭성이 있으면 거기에 모종의 불변량이 있

---

나의 문제는 특수한 현상에 의해 결정된다. 경험에 의하면 빛의 속도는 측정 장치의 배향에 관계없이 일정하다. 이 단서와 양립하는 변환은 로런츠 변환이다.

다. 따라서 자연에 대칭성이 있다고 말하는 것은, 자연을 보는 방식을 변화 시켜도 변하지 않는 불변량이 있다고 말하는 것과 같다.<sup>14)</sup> 이 불변량들을, 나아가 이 불변량들의 관계를 우리는 “법칙”이라 부른다. 자연의 원리란 자연 세계에 근본 대칭성이 존재한다고 말하는 것, 그래서 자연 세계에 불변량 또는 법칙이 있다고 말하는 것이다.

통상 공간의 동질성으로부터 이른바 선형운동량 보존법칙이라는 것이, 공간의 등방성으로부터 각운동량 보존법칙이라는 것이, 시간의 동질성으로부터 에너지 보존법칙이라는 것이 도출된다. 사물들이 가진 운동량들과 에너지들의 비율이 갈릴레이 변환에서도 보존될 것을 요구할 때 우리는 고전 역학을 얻게 된다.<sup>15)</sup> 여기서 중요한 점은 대칭성 원리 또는 자연의 원리로 부터 운동량, 각운동량, 에너지 등의 개념이 정의된다는 점이다. 물론 고전 역학의 경우 시간 개념과 공간 개념을 원초 개념으로 가정한 후 시간과 공간의 동질성, 공간의 등방성으로부터 다른 개념들이 정의된다. 그 다음 사물들이 가진 운동량들과 에너지들의 관계들이 로렌츠 변환에서도 보존될 것을 요구할 때 우리는 상대성이론을 얻게 된다.<sup>16)</sup> 여기서 고전역학에서

14) Nöther (1918), pp. 183-207. 그녀는 대칭성이 있는 곳에 불변량이 있다는 것을 증명했다. 측정, 과학이론, 과학 표상, 불변성, 대칭성 등의 관계에 대해서는 Suppes (2002), pp. 97-127을 보라. 한편 반 프라센은 물리이론이 대칭성에 기반하고 있지만 이것이 자연법칙의 필연성 또는 세계의 결정론을 함축하지는 않는다고 주장한다.(van Fraassen 1989, p. vii) 내 생각에, 경험에 적합한 한 물리이론이 대칭성에 기반하고 있다는 사실은 자연법칙의 필연성이나 세계의 결정론을 함축하지 않는다 하더라도, 그런 사실은 그 물리이론이 객관성을 띤다는 것을 함축한다.

15) Gregory (2006), pp. 356-61.

16) Einstein (1905). 그는 이 논문에서 “전자기학과 광학의 동일 법칙들이 역학 방정식이 잘 지켜지는 모든 관성계에서 타당할 것이다”라는 것을 하나의 “공준”으로서 요청하면서 이것은 “상대성 원리”라고 불렀다. 아인슈타인은 애초에 자신의 이론이 “불변 이론”이라 불리기를 희망했다.(스튜어트 2010, p. 287) 아인슈타인이 “상대성 원리”라고 부른 것은 “불변성 원리”라고 부를 수 있고 나는 이것을 “대칭성 원리” 또는 “자연의 원리”라고 달리 부를 수 있다고 주장하고 있다. 아인슈타인은 상대성 원리 외에 “빛이, 광원의 운동 상태에 독립하여, 언제나 확정된 속도  $c$ 를 갖고 진공 속에서 전파된다”는 마이컬슨과 물리의 실험 사실을 “또 다른 공준”으로 요청한다.

정의된 운동량 개념과 에너지 개념이 수정되는데, 이것은 고전역학에서 원초 개념으로 상정한 시간과 공간 개념이 수정되어야 한다는 것을 함축한다. 이것을 수정해야 하는 이유는 광속과 관련된 경험과 그 경험이 모든 좌표계에서 보존되어야 한다는 자연 원리의 요구 때문이다.

나아가 사건들이 발생할 확률이 갈릴레이 변환에도 보존될 것을 요구할 때 우리는 양자역학을 얻게 된다. 사건들이 발생할 확률이 로렌츠 변환에도 보존될 것을 요구할 때 아마도 양자장론을 얻게 될 것이다. 보다 근본이 되는 대칭성으로부터, 우리는 질량 보존법칙이나 전하량 보존법칙을 유도해낼 수 있다. 이런 방식으로 “질량”과 “전하량” 등이 의미 있는 술어로 확정되면 이 술어들을 통해 사물들을 분류하게 된다. 실제로 입자물리학에서 질량이 다르거나 전하량이 다르면 다른 유형의 입자로 분류된다. 이처럼 대칭성에 근거하여 근본 물리량을 정의하고 이 근본 물리량에 따라 사물들을 분류하고 분할하는 것은 물리학자들이 세계를 분할하고 분류하고 기술하는 방식이다. 물리학자가 도입한 술어들은 오직 자연의 원리를 따르는 한에서만 물리 술어가 될 수 있다. 자연의 원리를 따르지 않는 어떤 것도 물리 술어가 될 수 없다.

### 3. 본보기: 양자역학의 구성

상대성이론이 자연의 원리에 의해 구성된다는 것은 낯익은 이야기이다. 하지만 양자역학도 그런 방식으로 구성될 수 있다는 점은 낯설지 모르겠다. 양자역학의 사례를 통해, 자연의 원리가 물리이론을 형성하는, 그래서 세계를 물리 세계로 드러나게 하는 원리라는 것을 예시하고자 한다.<sup>17)</sup> 먼저 우리는 다음과 같은 사실을 경험한다.<sup>18)</sup> 이 경험을 “양자 경험” 또는 “양자

---

그런 다음 “이러한 두 공준은 운동하는 물체에 대한 단순하고 일관된 전자기학 이론을 얻는 데 충분하다”고 주장했다.

<sup>17)</sup> 아래에 요약될 방식으로 양자역학을 정식화한 최초 문헌은 아마도 Jordan (1969)이다. 엄밀한 세부 계산을 알고 싶다면 Ballentine (1998)을 참고하기 바란다. 또는 저자의 미출판 원고 (2000)을 보라.

현상”이나 “양자 사실”이라고 하자.

- 양자 경험1: 측정된 물리량은 대체로 임의의 연속 값이 아니라, 제한된 불연속 값을 갖는다.
- 양자 경험2: 개별 측정 결과는 대체로 예측되지 않고 다만 특정 결과를 얻을 확률만 알 수 있다.

물론 이러한 양자 경험을 어떻게 이해할지는 고전 물리학에, 나아가 고전 경험에 의존한다. 우리는 고전 물리학을 통해 사물들을 원자, 전자 등으로 분할하고 자기장, 스핀 등과 같은 물리량을 이미 상정했다.<sup>19)</sup> 하지만 고전 물리학만으로 이러한 양자 경험 또는 양자 현상을 제대로 이해할 수 없다. 고전 물리학과는 다른 방식으로 현상을 표상해야 한다.

양자 경험을 제대로 이해하기 위해 사물의 상태를 적절한 방식으로 표상할 필요가 있다. 이러한 과정을 양자 알고리즘이라 한다. 양자 알고리즘은 두 알고리즘으로 이루어져 있는데 하나는 양자 경험1을 수학으로 정식화하는 양자화 알고리즘이고, 다른 하나는 양자 경험2를 수학으로 정식화하는 통계 알고리즘이다.<sup>20)</sup> 양자역학의 정식체계를 산출한 알고리즘이 어떻게

18) 원자핵을 중심으로 전자가 공전하는 원자는 그 자체로 하나의 작은 자석처럼 거동한다. 이 자석의 세기를 자기모멘트라 한다. 자기모멘트의 방향과 크기는 입자의 회전 방향과 속도에 의해 결정된다. 그리고 물체의 자전을 흔히 ‘스핀’이라 하는데, 전자는 스핀으로 인해 그 자체로 하나의 작은 자석처럼 여겨질 수 있다. 이 자석의 세기를 스핀 자기모멘트라 하는데 스핀 자기모멘트를 측정함으로써 전자의 스핀을 측정할 수 있다. 1922년경 슈테른과 게를라흐는 스핀을 측정하기 위해 원자를 균일하지 않은 자기장 속으로 통과시켰다. 실험 결과, 전자의 스핀 값이 오직  $+\hbar/2$ 와  $-\hbar/2$  중에서 한 값만 취하는 것으로 드러났다. 그 사이의 다른 값은 가질 수 없었는데, 다시 말해 스핀 값의 범위는 연속이 아니라 불연속이었다. 그리고 똑같은 절차를 통해 마련된 전자들이라 하더라도 서로 다른 스핀 값을 가질 수 있었다. 다만 절반은  $+\hbar/2$ 로, 나머지 절반은  $-\hbar/2$ 로 측정되었다.  $\hbar$ 는 플랑크 상수  $h$ 를  $2\pi$ 로 나눈 아주 작은 상수이다. 이 상수의 크기는 우리 논의에서 전혀 중요하지 않다. 편의상  $\hbar = 1$ 로 놓아도 된다.

19) 물론 이 고전 물리학은 고전 경험들로부터 자연의 원리를 통해 고전 물리 세계를 이론적으로 재구성한다. 뉴턴 역학이 자연의 원리에 의해 구성될 수 있다는 점을 기억해두기 바란다.

발견되었느냐 하는 물음은 긴 이야기를 요구한다. 긴 이야기 가운데 우리가 특별히 주목해야 할 원리가 포함되어 있는 것은 아니기 때문에 이 자리에서는 다만 그 결과만을 요약한다.

- 양자화 알고리즘: 물리량  $Q$ 의 가능한 측정값은 그 물리량에 대응하는 연산자 또는 바꾸개  $Q$ 의 고유값들 중에 하나이다.<sup>21)</sup>
- 통계 알고리즘:  $|\psi\rangle$  상태에 있는 사물에 대해 물리량  $Q$ 를 측정했을 때, 그 측정값  $v_m(Q)$ 가  $q$ 일 확률  $\text{Prob}(v_m(Q)=q|\psi)$ 는 확률 진폭  $\langle q|\psi\rangle$ 에 의해 주어진다.<sup>22)</sup>

두 알고리즘에 의해 상태, 물리량, 측정값, 확률 등을 표상하는 것을 “양자 표상”이라 부를 수 있겠다. 표상하는 것은 벡터, 바꾸개, 내적 등과 같은 수학 항목이고 이것에 의해 표상되는 것은 실제 세계에서 벌어지는 현상이다. 남은 과제는 개별 물리량, 가령 운동량과 에너지를 표상해주는 바꾸개를 찾아내는 것이다. 논리학이나 수학은 이러한 연결을 위한 단서를 제공하지 않는다. 라이프니츠가 말했듯이, 경험과 모순율만으로는 물리학을 구성할 수 없다. 개별 상태와 개별 벡터의 연결, 개별 물리량과 개별 바꾸개의 연결을 위한 단서를 주는 그 이상의 원리가 필요하다. 여기서 대칭성 원리 또는 자연의 원리가 요구된다. 자연의 원리는 양자 경험이 유지되는 방식으로 세계를 기술할 것을 요구한다. 이 요구를 만족하는 이론을 얻게 된다면, 우리는 그 이론을 “양자이론” 또는 “양자역학”이라고 합당하게 부를 수 있다. 이 관점에서 양자역학이란 곧 양자 경험을 보존하는 이론이다.

우리가 탐구하는 사물이 상태  $|\psi\rangle$ 에 있다고 가정해 보자. 만일 우리가 이 사물을 보는, 또는 이 사물을 기술하는 틀을 바꾸면, 그 틀에서 본 이

20) Redhead (1989).

21) 사물의 상태는 벡터  $|\psi\rangle$ 를 통하여 표상하고 물리량  $Q$ 는 그 물리량에 대응하는 바꾸개 또는 연산자  $Q$ 를 통하여 표상한다. 물리량을 표상할 수 있는 바꾸개는 그 바꾸개의 기댓값과 고유값이 언제나 실수가 나오도록 에르미트 바꾸개로 제한한다. 한 사물이 어떤 측정값을 가질지는 그 사물의 상태 (벡터)와 주어진 물리량(바꾸개)의 관계에 의해서 결정된다.

22) 즉  $\text{Prob}(v_m(Q)=q|\psi) = |\langle q|\psi\rangle|^2$ . 여기서  $\langle q|\psi\rangle$ 는 벡터  $|q\rangle$ 와  $|\psi\rangle$ 의 내적이다.  $|q\rangle$ 는 바꾸개  $Q$ 의 고유벡터이며 그 고유값은  $q$ 이다. 바꾸개  $Q$ 는 물리량  $Q$ 에 대응하는 에르미트 바꾸개이다.

사물의 상태가 달라질 것이다. 다시 말해 시공간 좌표변환을 수행하면 사물의 상태는  $|\psi\rangle$ 에서 가령  $|\psi'\rangle$ 로 변환될 것이다. 여기서  $|\psi\rangle$ 와  $|\psi'\rangle$ 는 벡터 공간의 원소들인데 시공간 좌표변환을 하면 그에 따라 이 벡터 공간 전체가 바뀐다. 하지만 실제로 바뀌는 것은 이 벡터 공간의 기선(basis)이며, 애초 기선에서 본  $|\psi\rangle$ 가 다른 기선에서 본  $|\psi'\rangle$ 로 바뀌게 된다. 기선이 바뀌면 그에 따라 바꾸개도 변환되는데, 가령 한 물리량  $Q$ 에 대응하는 바꾸개  $Q$ 는 다른 바꾸개  $Q'$ 로 변환될 것이다.

자연의 원리는 틀을 바꾸어도 양자 사실들이 여전히 사실로 남아 있을 것을 요구한다. 즉 자연의 원리는 구체적으로 다음을 요구한다.

- (1) 아무개 물리량의 측정값 스펙트럼은 틀을 바꾸어도 바뀌지 않는다.
- (2) 한 사건의 발생 확률은 틀을 바꾸어도 바뀌지 않는다.<sup>23)</sup>

이제 (1)과 (2)를 통해 정식체계를 구성하는 과제가 남았다. 이 과정은 다소 복잡한 수학 계산과 이론을 요구한다. 이를 가능한 한 수식을 절제하며 요약할 텐데 부디 엄밀성 없이 논의를 전개한다고 오해하지 말기를 바란다. 엄밀한 논리를 위한 일부 수식들은 각주에 남겨 놓았다.

통계 알고리즘에 나오는 확률 진폭  $\langle q|\psi\rangle$ 는 벡터  $|q\rangle$ 와  $|\psi\rangle$ 의 내적이다. 이 내적이 달라지지 않는 방식으로 좌표를 변환시키는 것을 유니타리 변환이라 한다. (2)를 만족하는 틀의 바꿈 즉 시공간 대칭변환은 유니타리 변환이어야 한다.<sup>24)</sup> 유니타리 변환을 만들어내는 변환 바꾸개로서, 옮김 틀

<sup>23)</sup> (1)을 수식으로 표현하면:  $Q'|q'\rangle = q|q'\rangle$ . (2)를 수식으로 표현하면:  $|\langle q|\psi\rangle|^2 = |\langle q'|\psi'\rangle|^2$ . 여기서  $|q\rangle$ 와  $|q'\rangle$ 는 각각  $Q$ 와  $Q'$ 의 고유상태이고,  $q$ 는  $|q\rangle$ 의 고유값이다. 수식 (1)은 많은 설명이 필요한데 지면의 제약 때문에 간략하게만 언급한다. 먼저  $Q$ 의 고유값  $q$ 과  $Q'$ 의 고유값  $q'$ 는 동일한 물리량  $Q$ 의 측정값들인데  $q$ 의 가능한 값들의 범위(스펙트럼)는  $q'$ 의 그것과 같아야 한다. 애초 고유값 관계식  $Q|q\rangle = q|q\rangle$ 는 틀이 바뀐 뒤  $Q'|q'\rangle = q'|q'\rangle$ 로 바뀌게 될 텐데, 새로운 틀에서 얻을 측정값  $q'$ 는  $q$ 와 같아야 한다. 왜냐하면 틀이 바뀌면서 사물의 상태를 표상하는 벡터가  $|q\rangle$ 에서  $|q'\rangle$ 로 바뀌지만 그와 함께 물리량을 표상하는 바꾸개도  $Q$ 에서  $Q'$ 로 덩달아 바뀌기 때문이다.

<sup>24)</sup> 사물의 상태  $|\psi\rangle$ 를  $|\psi'\rangle$ 로 변환시키는, 즉  $|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$ 를 만족하는



좌표변환 바꾸개  $U$ 를 생각해 보자. 이 좌표변환은 두 상태벡터의 내적  $\langle \phi | \psi \rangle$ 를  $\langle \phi' | \psi' \rangle$ 로 변환시킬 것이다. 좌표변환 바꾸개  $U$ 의 수반 바꾸개  $U^\dagger$ 를 도입하면, 정의상  $\langle \phi' | = \langle \phi | U^\dagger$ 이다. 즉  $\langle \phi' | \psi' \rangle = \langle \phi | U^\dagger U | \psi \rangle$ 이다. 만일  $UU^\dagger = U^\dagger U = I$ 를 만족한다면  $\langle \phi | \psi \rangle = \langle \phi' | \psi' \rangle$ 를 만족할 것이다.  $UU^\dagger = U^\dagger U = I$ 를 만족하는 변환을 유니타리 변환이라 하는데 이런 변환은 확률 진폭을 보존한다. 위그너 정리에 의하면  $\langle \phi | \psi \rangle = \langle \phi' | \psi' \rangle$ 를 만족하는 변환은 언제나 유니타리 변환이다. 다시 말해 두 상태벡터의 내적 또는 확률 진폭을 보존하는 변환은 유니타리 변환이다.

시공간 대칭변환  $U$ 에 의해 물리량  $Q$ 에 대응하는 바꾸개  $Q$ 는  $Q'$ 로 변환되고,  $Q$ 의 고유상태  $|q\rangle$ 들은 각각  $Q'$ 의 고유상태  $|q'\rangle$ 로 변환된다. 이제 식 (1)로부터  $Q' U |q\rangle = q U |q\rangle$ 를 얻는데, 양변에  $U^\dagger$ 를 곱하면  $U^\dagger Q' U |q\rangle = q U^\dagger U |q\rangle$ 를 얻는다. 우변은  $q |q\rangle = Q |q\rangle$ 와 같다. 이것이 모든  $|q\rangle$ 들에 의해서 성립할 경우 우리는  $Q = U^\dagger Q' U$ 를 얻을 수 있다. 달리 표현하면  $Q' = U Q U^\dagger$ 이다. 따라서 물리량  $Q$ 에 대응하는 바꾸개  $Q$ 는 시공간 좌표변환  $U$ 에 의해서  $U Q U^\dagger$ 로 변환된다.

이제 좌표계의  $x$  좌표를 이동시켜, 물리계의  $x$ -축 위치를  $x$ 에서  $x+a$ 로 이동시키는 옮김 변환  $U(a)$ 를 생각해 보자. 만일 물리계의 위치 상태가  $|x\rangle$ 라면  $U(a)|x\rangle = |x+a\rangle$ 이다. 옮김 변환의 정도를 가늠하는 변수  $a$ 는 모든 실수값을 다 가질 수 있다. 그리고 위치 눈금을 처음에  $a_1$ 만큼 이동시키고, 그 다음에  $a_2$ 를 이동시키는 옮김 변환은  $U(a_2)U(a_1)$ 이다. 그래서  $U(a_2)U(a_1)|x\rangle = U(a_2)\{U(a_1)|x\rangle\} = U(a_2)|x+a_1\rangle = |x+a_1+a_2\rangle = U(a_1+a_2)|x\rangle$ . 따라서  $U(a_1+a_2) = U(a_1)U(a_2)$ . 특히  $U(a) = U(b)U(a-b)$ . 또  $I = U(0) = U(b)U(-b)$ 이기 때문에  $U(-b) = U(b)^{-1} = U(b)^\dagger$ . 이런 관계식들이 임의의 실수에 대해 성립하기 위해서  $U(a)$ 는 다음과 같은 형태를 취해야 한다. 적절한 에르미트 바꾸개  $K$ 에 대하여  $U(a) = \exp(iKa)$ . 여기서  $\exp$ 는 지수함수이고,  $i$ 는  $\sqrt{-1}$ 이다.

이제 우리는 다음과 같은 틀 변환 바꾸개를 도입한다.

$$(3.1) \exp(-iP_x a) |x, y, z\rangle = |x+a, y, z\rangle$$

$$(3.2) \exp(iG_x v) |x, y, z\rangle = |x+vt, y, z\rangle$$

$$(3.3) \exp(-iJ_x \theta) |x, y, z\rangle = |x', y', z'\rangle$$

$$(3.4) \exp(-iHs) |\psi(t)\rangle = |\psi(t+s)\rangle \text{ 또는 } d|\psi(t)\rangle/dt = -iH|\psi(t)\rangle$$

마찬가지 방식으로  $\exp(-iP_x a)$ ,  $\exp(-iP_y a)$ ,  $\exp(iG_y v)$ ,  $\exp(iG_z v)$ ,  $\exp(-iJ_y \theta)$ ,  $\exp(-iJ_z \theta)$ 를 정의할 수 있다. 수식 (3)들이 말해주듯이  $\exp(-iP_x a)$ 는 좌표계의  $x$  좌표를  $-a$ 만큼 이동시켜, 물리계의  $x$ -축 위치를  $x$ 에서  $x+a$ 로 옮기는 옮김 틀 바꾸개이다.  $\exp(iG_x v)$ 는 좌표계의  $x$  좌표를  $-v$ 의 속력으로 옮겨, 물리계의  $x$ -축 위치를  $x$ 에서  $x+vt$ 만큼 옮기는 옮김

바꾸개, 돌림 틀 바꾸개, 흐름 틀 바꾸개를 각각 만들어낼 수 있다. 그리고 이러한 틀 바꾸개를 생성시키는 “만들개”가 있는데 우리는 옮김 틀 바꾸개, 돌림 틀 바꾸개, 흐름 틀 바꾸개 등을 생성시키는 만들개들을 찾아야 한다. 이제 여러 바꾸개들과 만들개들을 모아서 다음과 같이 정의하자.

$$(5.1) \text{ 위치 바꾸개 } \mathbf{Q} = (Q_x, Q_y, Q_z) = (X, Y, Z)$$

$$(5.2) \text{ 속도 바꾸개 } \mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^{25)}$$

$$(5.3) \text{ 옮김 틀 바꾸개 만들개 } \mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)$$

틀 바꾸개이다.  $\exp(-iJ_x\Theta)$ 는 좌표계의  $x$ -축 방향으로  $-\Theta$ 만큼 회전시켜, 물리계의 위치를  $x$ 에서  $x'$ 로,  $y$ 에서  $y'$ 로,  $z$ 에서  $z'$ 로 돌리는 돌림 틀 바꾸개이다.  $\exp(-iHs)$ 는 좌표계의 시간좌표를  $-s$ 만큼 이동시켜 물리계의 상태를  $|\psi(t)\rangle$ 에서  $|\psi(t+s)\rangle$ 로 흘려보내는 흐름 틀 바꾸개이다. 여기서  $P_x, G_x, J_x, H$  등을 틀 바꾸개의 만들개(generator)들이다.

수식 (3)들은 이런 만들개들이 어떤 바꾸개여야 하는지를 표현하고 있다. 한편 수식 (3)들은 각주 23의 수식 (1)과 (2)를 만족해야 한다. 이 요구 조건으로부터  $P_x, G_x, J_x, H$  등이 맺어야 하는 관계식들을 도출할 수 있다. 매우 복잡한 수학 계산이 요구되지만, 결과만 정리하면 다음과 같다.

$$(4.1) [Q_\alpha, Q_\beta] = [G_\alpha, G_\beta] = [P_\alpha, P_\beta] = [Q_\alpha, G_\beta] = [P_\alpha, H] = [J_\alpha, H] = 0$$

$$(4.2) [Q_\alpha, P_\beta] = [G_\alpha, V_\beta] = i\delta_{\alpha\beta}I, [G_\alpha, P_\beta] = i\delta_{\alpha\beta}MI, [G_\alpha, H] = iP_\alpha$$

$$(4.3) [J_\alpha, Q_\beta] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}Q_\gamma, [J_\alpha, P_\beta] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}P_\gamma, [J_\alpha, G_\beta] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}G_\gamma, \\ [J_\alpha, J_\beta] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}J_\gamma$$

여기서  $M$ 은 적절한 실수이고,  $I$ 는 항등 바꾸개이다.  $Q$ 는 사물의 위치  $Q$ 를 표상하는 바꾸개인데  $Q_x = X, Q_y = Y, Q_z = Z$ 이다. 또한 두 바꾸개  $A$ 와  $B$ 의 맞바꾸개  $[A, B]$ 는  $AB-BA$ 로 정의된다.  $[A, B]$ 가 0일 경우,  $A$ 와  $B$ 는 ‘맞바꿀 수 있다’고 한다. 또한  $\alpha, \beta, \gamma$ 는  $x, y, z$  중에 하나의 값을 가진다.  $\delta_{\alpha\beta}$ 는 정의상  $\alpha=\beta$ 일 경우 1이고,  $\alpha\neq\beta$ 일 경우 0이다.  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ 는  $\alpha\beta\gamma$ 가 모두 다를 경우에만  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$ 는 0이 아니다.  $\alpha\beta\gamma$ 가 모두 다를 경우,  $\varepsilon_{xyz} = \varepsilon_{zyx} = 1$ 이고 나머지는  $-1$ 이다.

- 25) 속력 바꾸개  $V_x$ 는 그 기댓값  $\langle V_x \rangle = \langle \psi | V_x | \psi \rangle$ 이  $X$ 의 기댓값  $\langle X \rangle$ 의 미분과 같도록 정의된다. 즉  $d\langle X \rangle/dt = \langle V_x \rangle$ ,  $d\langle Y \rangle/dt = \langle V_y \rangle$ ,  $d\langle Z \rangle/dt = \langle V_z \rangle$ . 각주 24의 수식 (3.4)로부터  $\langle V_x \rangle = d\langle X \rangle/dt = \{d(\langle \psi(t) |) / dt\} X | \psi(t) \rangle + \langle \psi(t) | X \{d(| \psi(t) \rangle) / dt\} = i\langle \psi(t) | HX | \psi(t) \rangle - i\langle \psi(t) | XH | \psi(t) \rangle = i\langle \psi(t) | HX - XH | \psi(t) \rangle = i\langle \psi(t) | [H, X] | \psi(t) \rangle$ . 따라서  $V_x = i[H, X]$ . 마찬가지로  $V_y = i[H, Y]$ ,  $V_z = i[H, Z]$ 이다.

$$(5.4) \text{ 독립 틀 바꾸개 만들개 } \mathbf{J} = (J_x, J_y, J_z)$$

$$(5.5) \text{ 흐름 틀 바꾸개 만들개 } H$$

우리는 이런 만들개들의 수학 표현이 어떠해야 할지 아직 모른다. 이 바꾸개들과 만들개들은, 자연의 원리에 따라, (1)과 (2)를 만족해야 한다. 이를 만족하기 위해  $P_x, G_x, J_x, H$  등이 적절한 관계를 맺어야 하는데, 다소 복잡하겠지만 엄밀한 계산을 통해 이들의 관계식들을 실제로 구해낼 수 있다. 그리고 이들의 관계식들로부터 이들이 서로 어떤 함수 관계를 맺어야 하는지도 계산해낼 수 있다. (1)과 (2)를 만족하기 위해  $\mathbf{Q}, \mathbf{V}, \mathbf{P}, \mathbf{J}, H$  사이에 다음과 같은 관계식이 성립해야 한다는 것을 증명할 수 있다.<sup>26)</sup>

$$(6.1) \mathbf{P} = M\mathbf{V}$$

$$(6.2) H = \{\mathbf{P} - \mathbf{A}\}^2/2M + W^{27)}$$

$$(6.3) \mathbf{J} = \mathbf{Q} \times M\mathbf{V}$$

여기서 바꾸개  $\mathbf{A}$ 와  $W$ 는  $\mathbf{Q}$ 의 적절한 함수이다.  $\mathbf{A}$ 는 흔히 벡터 퍼텐셜이

<sup>26)</sup> Ballentine (1998).

<sup>27)</sup> 이 관계식은 고유헤스핀 같은 내부 구조를 갖고 있지 않는 경우에만 성립한다. 사물이 내부구조를 갖지 않을 경우, 엄밀한 증명에 의하면,  $\mathbf{Q}$ 와  $\mathbf{P}$  모두와 맞바꿀 수 있는 바꾸개는 항등 바꾸개의 스칼라배이다. 사물 바깥에 다른 사물이 없을 경우, 그래서 사물이 외부로부터 아무런 영향도 받지 않을 경우,  $H = \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}/2M + E_0 = \frac{1}{2}M\mathbf{V} \cdot \mathbf{V} + E_0$ 이다. 이것으로부터 보다 일반화된 식 (6.2)를 얻을 수 있다. 한 사물이 외부로부터 힘을 받을 경우, 이 사물은 진공이 아니라 힘마당에 놓여 있게 된다. 힘마당은 시공간의 동질성과 등방성을 깨뜨린다. 힘마당은 특정한 방향과 특정한 위치에 특수한 권위를 부여한다. 예컨대 중력장은 물리계를 특정한 방향으로 운동하게 만들고, 특정한 위치로 쏠리게 한다. 그렇다고 해서 유니타리 변환을 정의하는  $\mathbf{P}$ 와  $\mathbf{J}$ 의 형태가 변경되는 것은 아니다.  $P_x$ 에 의해 물리계의 위치가  $x$ 에서  $x+a$ 로 바뀔 경우, 힘마당도  $P_x$ 에 의해 똑같이 이동한다. 사물이 외부로부터 힘을 받으면, 사물의 상태변화 패턴이 수정된다. 시간에 따른 상태변화를 관장하는 바꾸개는  $H$ 인데, 사물이 힘마당 속에 놓일 경우 바로 이  $H$ 의 형태가 변경된다. 이 경우 바꾸개  $H$ 의 의미는 새롭게 정의되어야 한다.  $H$ 는 시간 축을 따라 기하학적으로 시간 눈금을 옮기는 변환에 관계하는 바꾸개가 아니라 물리계의 동역학적 진행을 발생시키는 바꾸개가 된다.

라 하고  $W$ 는 스칼라 퍼텐셜이라 한다.

바꾸개  $Q$ 는 사물의 위치를 표상하는 바꾸개이고 바꾸개  $V$ 는 사물의 속도를 표상하는 바꾸개이다. 식 (6)에 등장하는  $M$ 은 상수이다. 이 상수를 우리가 탐구하는 사물에게 고유한 어떤 속성으로 이해해도 된다. 가장 단순한 물리학에서 이 고유속성은 사물의 질량이다.  $M$ 을 질량으로 해석하고 kg 단위를 가진 것으로 보면  $P$ 는 고전역학에서 운동량의 단위를,  $J$ 는 각운동량의 단위를,  $H$ 는 에너지의 단위를 가지게 된다.<sup>28)</sup> 이제 틀 바꾸개 만

<sup>28)</sup> 길이 차원을  $[L]$ 이라 쓰고 시간 차원을  $[T]$ 라 쓰고 질량 차원을  $[M]$ 이라 쓰면,  $V$ 는 정의상  $\langle V \rangle = d\langle Q \rangle/dt$ 이기 때문에,  $V$ 의 차원은  $[L][T^{-1}]$ 이다. 한편 만일  $Q_a$ 의 차원이 길이 차원  $[L]$ 이라면, 각주 24의 식 (4.2)이 성립하기 위해,  $P_a$ 의 차원은 길이의 역수 차원  $[L^{-1}]$ 이어야 한다. 식 (6.1)에서 좌변이  $[L^{-1}]$  차원을 갖고 있기 때문에 우변  $MV$ 도  $[L^{-1}]$  차원을 갖고 있어야 한다. 결국  $M$ 의 차원은  $[L^{-2}][T]$ 이어야 한다. 우리가  $M$ 을 질량으로 간주하기 위해서 식 (6)의 각 항목들의 단위를 재조정해야 한다.  $[M][L^2][T^{-1}]$ 의 차원을 갖는 어떤 상수를 도입한 후, 이것을  $M$ 에 곱해준 후 그것을  $m$ 으로 재정의하면 그  $m$ 은 질량 차원을 갖게 된다.  $[M][L^2][T^{-1}]$ 의 차원을 갖는 단위는  $\text{kg} \cdot \text{meter}^2/\text{sec} = \text{Joule} \cdot \text{sec}$ 이다. 여기서  $\text{Joule} = \text{Newton} \cdot \text{meter} = (\text{kg} \cdot \text{meter}/\text{sec}^2) \cdot \text{meter} = \text{kg} \cdot \text{meter}^2/\text{sec}^2$ 이다. 이 단위를 가진 상수로는  $\hbar = 1.054573 \times 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$ 가 있다. 이 상수를 도입할 경우  $M\hbar$ 의 차원은 질량과 동일하다. 우리는  $M\hbar$ 가 질량  $m$ 에 대응하는 바꾸개  $mass$ 와 동일하다고 가정할 수 있다. 즉  $mass = M\hbar$ . 이 바꾸개는 항등바꾸개  $I$ 에  $M\hbar$ 를 곱한 것인데 여기서  $M\hbar$ 의 차원은  $[M]$ 이다. 아무튼 이 가정에 의하면  $M = mass/\hbar$ . 이를 (6.1)에 대입하면  $P = mass \cdot V/\hbar$ 이다. 역학에서 질량  $\times$  속도는 운동량(momentum)이기 때문에,  $mass \cdot V$ 는 운동량에 대응하는 바꾸개라고 볼 수 있다. 따라서  $P = momentum/\hbar$ . 그리고 식 (6.3)에  $M = mass/\hbar$ 를 대입하면  $J = Q \times mass \cdot V/\hbar$ 이다. 여기서  $mass \cdot V$ 는 운동량인데 위치와 운동량의 외적은 각운동량이다. 따라서  $J = angular\ momentum/\hbar$ . 마찬가지로  $M = mass/\hbar$ 를 식 (6.2)에 대입하면  $H = energy/\hbar$ 를 얻는다. 이제 다음과 같은 단위 규약을 도입한다. 애초에 도입한 각 바꾸개는 다음과 같이 바뀐다.  $M$ 은  $m/\hbar$ 로,  $P$ 는  $P/\hbar$ 로,  $J$ 는  $J/\hbar$ 로,  $H$ 는  $H/\hbar$ 로. 이 경우 틀 바꾸개는 다음과 같이 바뀐다.  $\exp(-iP_a a)$ 는  $\exp(-iP_a a/\hbar)$ 로,  $\exp(-iJ_x \Theta)$ 는  $\exp(-iJ_x \Theta/\hbar)$ 로,  $\exp(-iHt)$ 는  $\exp(-iHt/\hbar)$ 로. 대부분의 물리학 교과서는 이 방법을 취한다. 이렇게 할 경우 식 (4)는 다음과 같이 변경된다.  $[Q_a, P_\beta] = \delta_{a\beta} \hbar$ ,  $[Q_a, H] = iP_a/m$ ,  $[J_a, Q_\beta] = i\epsilon_{a\beta\gamma} \hbar Q_\gamma$ ,  $[J_a, P_\beta] = i\epsilon_{a\beta\gamma} \hbar P_\gamma$ ,

들개  $P$ ,  $J$ ,  $H$  들을 다음과 같이 간주할 수 있다. 옮김 틀 바꾸개 만들개  $P$  = 운동량을 표상하는 바꾸개, 돌림 틀 바꾸개 만들개  $J$  = 각운동량을 표상하는 바꾸개, 흐름 틀 바꾸개 만들개  $H$  = 에너지를 표상하는 바꾸개. 이것은 고전 경험을 통해 구성된 고전 물리량들을 새롭게 표상할 규칙을 제공한다. 이 규칙은 자연의 원리를 통해 구성되었다.

흐름 틀 바꾸개 만들개  $H$ 는 사물의 상태  $|\psi(t)\rangle$ 가 시간에 따라 어떻게 진행될지에 관한 정보를 품고 있다. 이런 정보를 완전히 품고 있는 것을 물리학에서 “해밀토니안”이라 한다. 앞에서 말했듯이, 단위를 재조정할 경우, 해밀토니안  $H$ 는 사물의 에너지를 표상하게 된다. 양자화 알고리즘에 따르면 이 해밀토니안의 고유값은 에너지의 가능한 측정값들을 말해준다. 바꾸개  $H$ 의 고유값을 “에너지 스펙트럼” 또는 “에너지 준위”라 하는데, 에너지 준위는 우리가 세계에서 경험하는 현상들 중에 하나이다. 우리가 사물에게 에너지라는 속성을 귀속할 수 있게 된 것은 시간 틀을 바꾸어도 현상들에 스며들어 있는 현상의 구조가 변하지 않을 것이라는 원리를 우리가 믿고 있었기 때문이다. 이런 원리를 바탕으로 현상들을 보게 될 때 우리는 사물들에게 에너지를 귀속할 수 있게 되고, 우리는 사물을 에너지를 가진 대상으로 보게 된다. 고전역학이든 양자역학이든, 자연의 원리를 통해 세계를 보면 세계는 에너지를 가진 것들이 출몰하는 곳으로 나타난다.

자연에는 가능한 경험 즉 가능한 측정의 범위를 정해주는 구조가 스며들어 있다. 에너지의 가능한 측정 범위를 정해주는 것은 식 (6.2)이다. 이 식은 에너지 준위를 계산하는 방정식을 우리에게 알려준다. 이 방정식은 다음과 같이 쓴다:

$$(7) \quad H|\psi\rangle = E|\psi\rangle.$$

이 방정식을 고유값 방정식이라 하는데 고유값 방정식에서 주어진 것은  $H$  이고 풀어야 하는 것은 고유값  $E$ 와  $E$ 에 대응하는 고유상태  $|\psi\rangle$ 이다. 이

---

$[J_\alpha, J_\beta] = i\varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \hbar J_\gamma$ . 여기서  $G_\alpha$  대신에 이것과 같은  $mQ_\alpha$ 를 대입하였고, 항등 바꾸개는 표기하지 않았다. 식 (4.4)는  $H|\psi(t)\rangle = i\hbar \partial |\psi(t)\rangle / \partial t$ 로 바뀐다.

방정식을 미분방정식의 형태로 바꿀 경우 슈뢰딩거의 파동방정식을 얻게 된다.<sup>29)</sup> 이 절에서 애써 주장하고자 하는 것은 바로 이것이다. 슈뢰딩거 파동 방정식은 양자 사실들이 자연의 원리를 따라야 한다는 조건 즉 (1)과 (2)로부터 유도되었다는 점이다. 이제 이 방정식을 풀면 사물이 시간에 따라 어떤 상태에 처하게 되는지를 말해주는 상태함수  $\psi(x,y,z,t)$ 를 얻게 된다. 통계 알고리즘에 따르면, 이 함수는 시간  $t$ 에  $|\psi\rangle$  상태에 있는 사물에 대해 위치를 측정했을 때, 그 측정값이  $x, y, z$ 일 확률 진폭이다.<sup>30)</sup> 결국 슈뢰딩거 방정식을 풀면 우리가 겪을 수 있는 가능한 경험의 범위와 그런 경험을 할 확률을 얻게 된다. 이것은 자연에서 일어날 수 있는 것과 일어날 수 없는 것을 알려준다. 이것은 자연적인 것의 범위를 한정해준다. 이 방정식은 자연의 원리를 통해 발견한, 자연 속에 스며들어 있는 바로 그

<sup>29)</sup> 식 (6.2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left[ \frac{(-i\hbar \vec{\nabla} - \vec{A}(x,y,z,t))^2}{2m} + W(x,y,z,t) \right] \psi(x,y,z,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x,y,z,t)}{\partial t}$$

여기서  $\psi(x,y,z,t)$ 는 상태 벡터  $|\psi\rangle$ 와 위치 고유상태  $|x,y,z\rangle$ 의 내적  $\langle x,y,z| \psi \rangle$ 로서  $|\psi\rangle$ 의 위치 표현 또는 좌표 표현이다. 이 함수를 파동함수 또는 상태함수라 한다. 그리고  $-i\hbar \vec{\nabla}$ 은 운동량 바꾸개  $\mathbf{P}$ 의 위치 표현이다. 식 (3.1)에 따르면 바꾸개  $P_x$ 는 다음과 같이 작용한다.  $\exp(-iP_x a/\hbar)|x\rangle = |x+a\rangle$ . 이로부터  $\langle x|\exp(iP_x a/\hbar) = \langle x+a|$ 이다. 양변에  $|\psi\rangle$ 를 작용하면  $\langle x|\exp(iP_x a/\hbar)|\psi\rangle = \langle x+a|\psi\rangle$ . 좌변  $\exp(iP_x a/\hbar)$ 를 테일러 급수 전개하면  $1 + iP_x a/\hbar + O(a^2)$ 이다. 여기서  $O(a^2)$ 는  $a^2$  이상의 차수를 가진 항들을 말한다. 따라서 좌변은  $\langle x|\exp(iP_x a/\hbar)|\psi\rangle = \langle x|1 + iP_x a/\hbar + O(a^2)|\psi\rangle = \langle x|\psi\rangle + \langle x|iP_x a/\hbar|\psi\rangle + O(a^2) = \psi(x) + a\langle x|iP_x/\hbar|\psi\rangle + O(a^2)$ 이다. 반면에 우변은  $\psi(x+a)$ 이다. 이 함수를  $a$ 에 대하여 테일러 급수 전개하면  $\psi(x+a) = \psi(x) + a\psi'(x) + O(a^2)$ 이다. 여기서  $\psi'(x)$ 는  $\psi(x+a)$ 를  $x$ 에 대해서 미분한 뒤  $a$  대신에 0을 대입한 값이다. 이것은  $\psi(x+a)$ 에서  $a$  대신에 0을 대입한 후  $x$ 에 대해서 미분한 것과 동일하다. 우변과 좌변이 모든  $a$ 에 대해 같기 위해서는  $\langle x|iP_x/\hbar|\psi\rangle = \partial \psi(x)/\partial x$ 이어야 한다. 따라서  $P_x = -i\hbar \partial/\partial x$ 이다. 마찬가지로  $P_y = -i\hbar \partial/\partial y$ ,  $P_z = -i\hbar \partial/\partial z$ 이다. 종합하면  $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z) = -i\hbar (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ . 여기서  $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ 는 간단히  $\nabla$ 로 표기하고 ‘델’이라 읽는다.

<sup>30)</sup> 즉  $|\psi(x,y,z,t)|^2 = \text{Prob}(v_m(X)=x, v_m(Y)=y, v_m(Z)=z|\psi)$ . 연속함수의 내적은 적분으로 표현되어야 하기 때문에 이 표현은 물론 엄밀히 말해 옳은 것은 아니다. 하지만 우리 논의에 큰 지장이 되지 않을 만큼 충분히 옳다.

현상의 구조이다. 다시 강조하건대, 이 방정식을 얻을 수 있었던 것은 자연의 원리를 통해 세계를 보았기 때문이다. 이 원리가 참인 만큼 우리가 얻은 방정식도 참이고 이 방정식을 통한 세계 기술도 참이다.

우리는 양자역학의 사례를 통해 자연의 원리가 물리이론을 구성하는 원리라는 것을 보았다. 특별히 양자역학의 경우, 자연의 원리는 양자 현상들이 슈뢰딩거 파동 방정식을 지킬 것을 요구한다. 이 방정식을 통해 우리는 에너지 준위를 계산할 수 있는데 우리가 측정할 에너지의 가능한 범위를 한정한다. 또한 자연의 원리는 에너지, 운동량, 질량 등 다양한 물리량들이 어떤 방식으로 서로 관계 맺어야 할지를 규제한다. 이러한 교훈을 일반화하면, 보다 근본 차원에서 볼 때, 자연의 원리는 측정할 수 있는 것과 없는 것을 가르는 원리, 그래서 측정 자체를 규제하는 원리이다.

자연의 원리는 세계로부터 측정 가능한 것들을 추상한다. 우리가 측정 가능한 것들을 읽어낼 때, 그리고 그것들을 통해 세계를 기술할 때, 세계는 물리량을 가진 사물들의 세계, 사물들이 물리 속성을 드러내는 세계, 물리 현상들이 출몰하는 세계로 보이게 된다. 이런 의미에서 자연의 원리를 통해 추상된 세계는 물리 속성을 가진 물리 사물들로 구성된 세계 곧 물리 세계이다. 자연의 원리가 참인 만큼 우리의 추상도 객관적이고 그렇게 기술된 물리학도 객관적이다. 물리 세계는 정말로 측정 가능한 것들로 충만해 있다. 하지만 이 말은 오직 측정 가능한 것들만으로 세계가 이루어져 있음을 함축하지 않는다.<sup>31)</sup>

## 4. 자연의 원리와 코스모스의 출현

---

31) 한 심사자께서는 “이 말은 마치 저자의 모든 주장을 뒤엎는 것처럼 보인다”고 비평하셨다. 하지만 이 말은 세계에 자연의 원리를 따르지 않는 것들이 있다는 말이지 물리 세계에 자연의 원리를 따르지 않는 것들이 있다는 말은 아니다. 물리 세계가 세계의 모든 것은 아니다. 물리 세계는 전체 세계를 자연의 원리에 따라 분할하고 분류하고 기술한 것일 뿐이다. 각주 35를 보라.

초기 자연철학자들은 자연이란 일어날 일의 가능성에 제한을 두는 어떤 것이라고 생각했고, 이들 중 누군가는 자연을 “꾸밈” 즉 “코스모스”라 부르기 시작했다.<sup>32)</sup> 군사령관이 사병과 병마를 사열하듯이, 행정관이 법을 사리에 맞게 집행하듯이, 요리사가 식재료를 조합하여 맛있게 요리하듯이, 청소부가 더러운 것들을 말끔하게 치우듯이 이 자연 세계는 아름답게 정렬될 수 있다. 이오니아의 자연철학자들은 자연을 코스모스로 꾸미는[kosmeo] 자연의 총사령관, 이른바 “우두머리”, “으뜸”, “처음”, “원리”를 찾아 나섰다. 오늘날에도 물리학자들은, 초기 자연철학자들처럼, 자연을 코스모스로 꾸미는 으뜸 또는 원리를 찾는다.

현대 물리학자들은 “대칭성 원리”라고 부르는 것 즉 “물리학은 측정 위치에, 측정 방향에, 측정 시간에, 상대적이지 않다”는 원리를 통해 현상을 재구성했다. 이미 아주 오래 전 피타고라스는 자연을 꾸미는 원리를 수들과 그 비례 관계[symmetria]와 도형에서 찾았다.<sup>33)</sup> 그는 “대칭성” 또는 “심메트리아”를 자연의 으뜸으로 여겼는데 그에게 “대칭성”이란 “수들 사이의 비례관계”를 뜻한다. 고대 그리스 자연철학자들은 현상들 사이 또는 물리량들 사이의 비례 관계를 “로고스”라고 부르곤 했다. 그들은 우리가 어떤 자세, 어떤 태도, 어떤 시각, 어떤 각도, 어떤 틀, 어떤 스탠스, 어떤 뷰포인트, 어떤 앵글, 어떤 프레임으로 자연을 본다 하더라도 그 로고스가 한결같다고 믿었다. 어떠한 틀을 통해 세계를 보더라도 그 속에서 똑같은 비율 구조가 드러나는 방식으로 세계를 기술할 때 바로 그 때 우리가 보게 되는 것을 우리는 “코스모스”라고 부를 수 있다. 코스모스는 원리의 지배에서 벗어나는 것들을 치워버린, 말끔하게 정돈한, 꾸민 세계인데 오늘날 우리는 이 세계를 “물리 세계”라 부른다.

32) 블래스토스 (1998), p. 37. “퀴지올로고이가 한 일은 예외를 없애는 것이다. 퀴시스 형태로 이미 존재하는 것을 유지하면서 그 밖의 것을 모두 없앴으로써, 세계를 코스모스로 만든다. [...] 세계를 그렇게 퀴시스로 가득 채워, 그 밖의 어떤 것에도 여지를 남기지 않는다.”

33) 탈레스 외 (2005), p. 186. 아에티오스의 단편. “피타고라스는 처음으로 철학을 바로 이 용어로 불렀으며, ‘수들’과 ‘이들 사이의 비례관계들’—이것들을 그는 화성들이라고도 부른다—그리고 이 둘로 이루어진 원소들, 이른바 기하학적인 것들을 원리들이라고 했다.”



라이프니츠는 뉴턴의 “수학 원리”가 자연철학을 구성하는 데 충분하지 않다고 생각했다. 동일율과 모순율로부터 비록 산수와 기하학을 증명하는 데 충분하지만, 동일율과 모순율과 같은 수학 원리만으로는 자연철학 즉 물리학을 구성할 수 없다는 것이다.

수학에서 물리학으로 가려면, 그 너머의 원리, 어떤 일이든 그 일이 다른 방식이 아니라 왜 이 방식으로 일어나는지 이유가 있다고 말하는 원리, 이른바 충족이유의 원리가 필요하다. 평형에 관한 책에서, 수학에서 물리학으로 가려고 했던 아르키메데스가 이 위대한 충족이유율을 특수한 경우로 활용해야 했던 것도 바로 이 때문이다. 완벽한 대칭을 이룬 양팔저울과 이 저울 양쪽에 똑같은 무게를 지닌 물체를 올려놓았다고 생각해 보라. 아무 것도 움직이지 않을 것이다. 그는 저울의 한 쪽이 내려가야 할 이유가 전혀 없기 때문에 그럴 것이라고 보았다.(Leibniz 1716, pp. 3-4)

라이프니츠는 물리학을 위한 새로운 원리를 도입한다. 그것은 충족이유율인데 그는 이것을 “물리학의 원리” 그래서 “동역학의 원리 즉 힘의 원리”라고 불렀다.<sup>34)</sup> 다른 글에서 그는 물리학을 위한 원리를 “자연의 원리”라 부르기도 했다. 고대 자연철학자부터 현대 물리학자까지 그들은 존재 세계를 코스모스로 치장하는, 세계에서 코스모스를 읽어내는 원리를 찾고자 했는데 이 논문에서 그 원리를 라이프니츠의 명명에 따라 “자연의 원리”라 불렀다.

이제 보다 더 높은 시각에서 현상들을 보도록 하자. 우리는 세계 내 현상들을 기술하거나 설명하기 위해 세계를 사물들 또는 사건들로 분할한다. 이

<sup>34)</sup> Leibniz (1716), p. 4. 물리학자들의 대칭성 원리는 사실 라이프니츠의 충족이유율에 그 기원을 두고 있다. 아무 것도 없는 가상적 빈 공간 속에 정지해 있는 사물이 갑자기 움직일 아무런 이유가 없다. 아무 것도 없는 가상적 빈 공간 속에 움직이던 사물이 특정 위치에서 더 빨리 움직이거나 더 늦게 움직일 아무런 이유가 없다. 아무 것도 없는 가상적 빈 공간 속에 정지해 있는 사물이 갑자기 회전할 아무런 이유가 없다. 아무 것도 없는 가상적 빈 공간 속에 회전하던 사물이 특정 방향에서 더 빨리 회전하거나 더 늦게 회전할 아무런 이유가 없다. 시공간은 이토록 완벽한 대칭을 이루고 있다. 물리학자들은 이러한 것을 공간의 동질성, 시간의 동질성, 공간의 등방성이라 부른다고 제2절에서 말했다.

사물과 사건은 세계 내 현상들의 변화들을 추적하기 위해서 도입된 것들이다. 우리는 이렇게 전체 세계로부터 분할된 것들이 서로 인과 관계를 맺고 있는 양 말하게 된다. 물리학은 나름의 방식으로 세계를 물리 사건들과 사물들로 분할함으로써 이것들을 인과관계의 관계항들로서 상정한다. 동역학 법칙은 물리 속성들의 변화를 지배하며 물리 속성들을 관련짓고 그 변화를 기술한다. 우리는 개별 인과작용이 이 동역학 법칙을 예화하는 것으로 이해하게 된다. 하지만 물리 사물들이 물리이론이 말해주는 그런 방식으로 서로 인과관계를 맺어야 한다는 것은 그 자체로 시퍼런 사실이 아니다. 오히려 자연의 원리라는 메타뷰포인트에 의해 구성된 사실이다. 다시 말해 물리 속성들, 이 속성들의 관계로서 동역학 법칙, 법칙을 예화하는 인과관계들의 관계항으로 물리 사물들, 물리 속성의 담지자로서 물리 사물들은 다양한 현상들이 자연의 원리를 따른다고 했을 때 상정되어야 할 것들이었다.<sup>35)</sup>

## 참고문헌

- 그레고리 블래스토스 (1998), 『플라톤의 우주』, 이경직 옮김, 서광사. [원서: Vlastos, G. (1975), *Plato's universe*]
- 김명석 (2000), 『양자역학의 정식체계』, 미출판 원고.
- 리언 레더먼 · 크리스토퍼 힐 (2012), 『대칭과 아름다운 우주』, 안기연 옮김, 승산. [원서: Lederman, L. and Hill, T. (2007), *Symmetry*]

<sup>35)</sup> 세계를 물리 사물들로 분할하는 것은 여러 가능한 방식들 중 하나일 뿐이다. 전체로서 우리 세계는 물리 재료들의 단순한 총합이 아니다. 전체로서 우리 세계가 그 자체로 물리 세계라고 단정해서는 안 된다. 물리학을 통해 세계를 분할하는 것이 유일한 분할 방식이라고 볼 이유는 없기 때문이다. 세계를 추상하는, 세계를 분할하는 다른 방식이 있을 수 있다. 나는 세계 내 현상들의 변화들을 추적하는 다른 방법이 있다고 믿는다. 그것을 해석학이라 불러도 좋다. 해석학은 물리학과는 전혀 다른 방식으로, 전혀 다른 원리를 바탕으로 세계를 분할한다. 물리학이 세계를 측정 가능한 물리 현상들이 출몰하는 곳으로, 물리 세계로, 코스모스로 꾸미듯이, 해석학은 세계를 해석 가능한 지향 현상들이 출몰하는 곳으로, 지향세계로, 코핀으로 가꾼다.

*and the beautiful universe]*

- 이상원 (2013), 「불변으로서의 객관성」, 『과학철학』 16권 2호, pp. 26-96.
- 이언 스튜어트 (2010), 『아름다움은 왜 진리인가』, 안재권 · 안기연 옮김, 승산. [원서: Stewart, I. (2007), *Why Beauty Is Truth*]
- 이정민 (2012), 「쿤과 과학적 철학의 이념」, 『과학철학』 15권 2호, pp. 175-208.
- 탈레스 외 (2005), 『소크라테스 이전 철학자들의 단편 선집』, 김인곤 등 옮김, 아카넷.
- Ballentine, L. E. (1998), *Quantum Mechanics: A Modern Development*, World Scientific.
- Brading., K. and Castellani, E. (eds.) (2003), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, Cambridge University Press.
- Close, F. (2000), *Lucifer's Legacy: The Meaning of Asymmetry*, Oxford University Press.
- Einstein, A. (1905), "On the Electrodynamics of Moving Bodies", English translations by G. B. Jeffery and W. Perrett 1923, <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www>
- Gregory, R. D. (2006), *Classical Mechanics*, Cambridge University Press.
- Gross, D. J. (1995), "Symmetry in Physics: Wigner's Legacy", *Physic Today*, December 1995, pp. 46-50.
- Icke, V. (1995), *The Force of Symmetry*, Cambridge University Press.
- Ismael, J. (2001), *Essays on Symmetry*, Garland Publishing, New York.
- Jordan, T. F. (1969), *Linear Operators for Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Krantz, D. et al. (2006), *Foundations of Measurement Volume I: Additive and Polynomial Representations*, Dover Publications, New York.

- Leibniz, G. W. (1716), *Exchange of Papers between Leibniz and Clarke*. English translations by J. Bennett, <http://www.earlymoderntexts.com>
- Nöther, E. (1918), “Invariant Variation Problems”, translated by M. A. Tavel 1971, *Transport Theory and Statistical Physics* 1(3): pp. 183–207. arXiv:physics/0503066.
- Nozick, R. (2001), *Invariances: The Structure of Objective World*, Harvard University Press.
- Redhead, M. (1989), *Incompleteness, Nonlocality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Clarendon Press.
- Rosen, J. (1995), *Symmetry in Science: An Introduction to the General Theory*, Springer, New York.
- Suppes, P. (2002), *Representation and Invariance of Scientific Structures*, CSLI, Chicago.
- Symon, K. (1971), *Mechanics*, Addison-Wesley, 3rd edition.
- van Fraassen, B. C. (1989), *Law and Symmetry*, Clarendon Press, Oxford.
- Weyl, H. (1952), *Symmetry*, Princeton University Press.
- Wigner, E. P. (1931), *Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra*, translated by J. J. Griffin, Academic Press, New York 1959.
- (1967), *Symmetries and Reflections*, Ox Bow Press, Woodbridge 1979.

논문 투고일	2015. 02. 10
심사 완료일	2015. 03. 04
게재 확정일	2015. 03. 18

---

## The Principle of Nature: Measurement and Natural Phenomena

Myeongseok Kim

---

Philosophy of science takes as one of its task to explain the success of natural science, in particular of physics. The success of physics could be explained by the fact that physicists, in general, assume that ratio structure in the natural phenomena cannot be altered by measuring apparatus or observer's situation. This assumption that physics is not relative to physicists is named as "the Principle of Nature." I claim that the adequate theories of physics should be based on the principle of nature. In fact the standard theories of physics has been builded up by this principle, I illustrates, as example, how quantum mechanics is constructed on the principle of nature. Because the principle of nature is an constraint that delineates the measurables, when we describe the world by virtue of the principle, we see the world as measurable, say, as cosmic world.

**Key Words:** Objectivity, Principle of nature, Success of physics, Symmetry, Cosmos