

'불확정성 원리' 정립

하이젠베르크의 「양자이론적 운동학 및 역학의 구체적인 내용에 관하여」

글_ 고인석 전북대 과학문화연구센터 전임연구원 kiskis00@chollian.net

사람의 호기심은 무한하다.
예를 들어 키가 몇이면 체중이 얼마이며 나이가 몇살이면 신체구조는 어떻게 변하는지를 알고 싶어한다.

이러한 특수한 쌍의 원리를 규명하려는 시도는 많이 있어왔다. 이번 호에서는 쌍의 불확실성을 규명하려는 양자역학의 불확정성의 원리를 알아본다.

기획연재순서

- ① 닐스 보어
- ② 하이젠베르크
- ③
- ④
- ⑤

지난 2월호에 소개된 바 있는 닐스 보어가 원자의 구조, 원자로부터 방출되는 복사파의 성질, 그리고 플랑크의 작용양자라는 세 요소를 결합시켜 수소원자모형을 제시함으로써 양자역학 형성의 출발점에서 결정적인 기여를 했던 사람이라면 이번 호에 소개하는 베르너 하이젠베르크(Werner Heisenberg)는 양자역학 이론을 지탱하는 한 기둥인 행렬역학을 체계화하고, '불확정성의 원리'를 발표하여 양자역학의 특징적인 면모를 밝힌 사람이다.

양자역학을 보는 두 관점의 대립 보어-하이젠베르크 vs 아인슈타인-슈뢰딩거

보어와 하이젠베르크 두 사람을 잠시 비교해 보자. 보어는 스스로 양자역학적 체계의 구축과 발달을 주도하면서도 '우리는 양자역학을 도대체 어떻게 이해해야 하는가'라는 철학적 문제를 놓고 늘 고심했다. 여기 소개되는 하이젠베르크의 논문과 같은 해에 이탈리아 코모의 학술대회 강연에서 보어가 도입한 '상보성'의 개념은 이런 고심이 낳은 대표적

산물이었다.

반면, 보어에게서 많은 영향을 받았을 뿐만 아니라 여러 해 동안 코펜하겐의 보어 밑에서, 혹은 보어와 함께 공동작업을 해온 하이젠베르크는 다른 관점을 지니고 있었다. 그는 양자역학의 이론적 구조—특히 수학적 구조—가 명확해진 후에야 물리학자가 고민할 거리는 더 이상 남아있지 않다고 여겼다. 따라서 그에게 문제는 개념들을 명확히 규정하고, 그렇게 규정된 개념을 가지고 양자역학의 내용을 명료하게 기술하는 것뿐이었다. 그가 세상에 소개한 불확정성의 원리를 예로 들어 보자면, 하이젠베르크에게 그것이 사고의 여정이 낳은 하나의 종착점이었던 반면, 보어에게는 그것이 바로 고민의 출발점이었다. 그리고 코모 강연의 내용은 바로 이런 고민의 결과였다. 양자역학의 역사를 들여다볼 수 있는 하나의 시각을 얻기 위해 등장인물을 들만 더 끌어 들여 보자. 물론 양자역학의 구축 과정에는 최소한 수십 명의 1급 물리학자들이 연루되어 있으므로, 두 명의 이름을 추가하는 것이 공헌자의 완전한 목록을 작성한다거나 하는 일과는 무관하다.

Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

Von W. Heisenberg in Kopenhagen.

Mit 2 Abbildungen. (Einsgegangen am 23. März 1927.)

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (§ 1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (§ 2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (§ 3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Beobachtungsexperimente diskutiert (§ 4).

Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, daß die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält. Zum Beispiel glauben wir die Einsteinsche Vorstellung vom geschlossenen dreidimensionalen Raum anschaulich zu verstehen, weil für uns die experimentellen Konsequenzen dieser Vorstellung widerspruchsfrei denkbar sind. Freilich widersprechen diese Konsequenzen unseren gewohnten anschaulichen Raum-Zeitbegriffen. Wir können uns aber davon überzeugen, daß die Möglichkeit der Anwendung dieser gewohnten Raum-Zeitbegriffe auf sehr große Räume weder aus unseren Denkgesetzen noch aus der Erfahrung gefolgert werden kann.

1

ZEITSCHRIFT FÜR
PHYSIK

HERAUSGEGEBEN UNTER MITWIRKUNG
DER
DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

VON
KARL SCHEEL

DREIUNDVIERZIGSTER BAND

Mit 245 Textfiguren
(Abgeschlossen Mai - Juli 1927)



VERLAG VON JULIUS SPRINGER, BERLIN

1927

2

1 여기 소개된 하이젠베르크의 논문(1927) 첫 부분

2 하이젠베르크의 논문이 실린 학술지의 표지

양자역학의 역사적 고찰 설명

두 사람은 바로 아인슈타인(Albert Einstein)과 슈뢰딩어(Erwin Schrödinger)다. 슈뢰딩어는 1926년 『아날렌 데어 뷔치』(Annalen der Physik)과 『나투어비쎄샤프텐』(Naturwissenschaften)에 이른바 파동역학의 관점에서 양자역학적 현상을 서술하는 이론을 발표해 물리학자들의 주목을 받는다.

그런데 흥미로운 점은, 오늘날 양자역학을 공부하려는 그 누구도 피해갈 수 없는 ‘슈뢰딩어 방정식’을 도입한 그가 당시에는 자기 이론이 양자역학의 주요한 방법론이 되리라곤 전혀 생각지 못했다는 사실이다.

당시의 양자역학을 바라보는 슈뢰딩어의 관점의 배경엔 그에게 많은 영향을 준 아인슈타인이 있었는데, 1905년 광전효과에 대한 연구를 통해 양자역학의 출범에 중대한 동력을 제공하기도 했던 아인슈타인은 진짜 이유가 궁금해질 정도로 끝까지 양자역학을 의심 가득한 눈으로 바라보았다. 즉, 그는 당시의 적잖은 동료 물리학자들과 더불어 ‘양자도약’이나 ‘확률론적 인과’ 같은 ‘이상한’ 얘기를

포함하고 있는 양자역학이 결코 물리학의 종착점이 될 수는 없으며 멀지않아 한 단계 고양된 고전물리학으로 나아가기 위한 불편한 임시 단계일 뿐이라고 생각했다. 그리고 슈뢰딩어는 자신이 고안해 낸 파동방정식이 바로 이런 회귀를 가져오는 결정적인 계기가 될 것으로 확신했다.

슈뢰딩어가 그의 이론을 발표한 직후엔 그 자신뿐만 아니라 하이젠베르크를 포함한 보어 진영 역시 이 이론을 양자역학에 대해 적대적인 이론이라고 보았다. 그래서 보어는 슈뢰딩어를 코펜하겐으로 초청해 놓고서는 그의 파동역학이 지닌 의미를 따져묻고 나아가서 슈뢰딩어를 코펜하겐식의 관점으로 개종시켜 보려는 뜨거운 토론을 며칠 동안이나 계속하기도 했다.

보어-하이젠베르크 진영과 아인슈타인-슈뢰딩어 진영의 대결은 코모 대회 뒤에 브뤼셀에서 열린 솔베이 회의에서 유명한 보어-아인슈타인 논쟁을 통해 재연되기도 했다. 양자역학의 역사에는 거장들의 상호 협력뿐만 아니라 이처럼 흥미로운 대결도 깔려 있었다.

가장 수학적인 논리의 양자역학

이제 하이젠베르크가 그 유명한 ‘불확정성의 원리’를 발표한 그의 논문 『양자이론적 운동학 및 역학의 구체적인 내용에 관하여』(Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik)로 시선을 옮겨보자. 이 논문은 당시 물리학 분야를 선도하는 학술지였던 『차이트슈리프트 뷔어 뷔치』(Zeitschrift für Physik) 43호(1927년)에 발표되었으며, 투고자의 소속은 ‘코펜하겐대학교 이론물리학 연구소’로 되어 있다(이 논문은 그가 물리학 강사 겸 보어의 조수로서 코펜하겐에 머물던 시기에 작성되었다).

먼저 이 논문의 제목에 포함된 ‘anschaulich’라는 표현을 짚어보도록 하자. 앞에서는 ‘구체적인’이라고 옮겨 두었지만 그것은 ‘눈으로 본다’는 뜻의 동사 ‘anschauen’에서 온 말로, ‘눈앞에 그려보고 눈으로 만져볼 수 있는’의 의미를 지녔다. 즉, 하이젠베르크는 이제 막 그 수학적 구조가 알려지기 시작한 양자역학에 구체적으로 어떤 물리적 의미가 담겨있는지를 논하겠다는 취지를 논

문의 제목에 담아내고 있다.

또 우리는 저자가 이와 같은 표현을 쓴 직접적 동기를 논문 끝부분에 달린 한 각주에서 읽어낼 수 있다. 거기서 하이젠베르크는 슈뢰딩어의 최근 이론을 언급하면서, 양자역학과 자기가 새로 제안한 파동역학을 비교하여 전자는 “끔찍할 정도로 추상적이고 눈에 잡히는 바 (즉, 구체성이) 없다”고 공격하는 것에 대해 불만을 표시하고 있다. 이로써 판단할 때 저자는 이 논문에서 양자역학의 구체적인 내용을 그려내 보임으로써 그런 공격이 부당하다는 사실을 입증하겠다는 실질적인 목표 역시 염두에 두고 있었다고 생각된다.

쌍의 구성을 설명하는 켈레이론 증명

논문은 다음과 같은 내용이 실린 요약문으로 시작된다.

“이 논문에서는 우선 위치, 속도, 에너지와 같은 낱말들에 대한 정확한 정의를 내리는 일이 시도될 터인데, 이들 각각의 정의는 양자역학의 영역에서도(이전의 물리학에서와) 마찬가지로 유효성을 지니게 될 것이다. 그리고 나서 나는 제대로 켈레를 이론(kanonisch konjugiert; 영어로는 canonically conjugated) 물리량들을 동시에 측정하고자 할 경우 반드시 특유의 부정확성이 끼여들 수밖에 없다는 사실을 증명할 것이다. 이와 같은 부정확성은 양자역학의 논의에 통계학적인 맥락이 등장하게 되는 주된 이유가 된다.” 필자는 앞에서 하이젠베르크를 수학적 구조가 명료하면 만족하는 물리학자로 서술했지만, 그것은 닐스 보어와의 대비를 뚜렷이 한다는 의미에서 그런 것

이었지 그가 계산만 깔끔하게 풀리면 그것으로 물리학의 일이 끝났다고 보는 물리학자였다는 얘기는 아니다. 오히려 이 논문을 들여다보고 있노라면 실로 마치 한 편의 (과학)철학 논문을 읽고 있다는 느낌이 든다. 그리고 훌륭한 이론도 이론이러니와 스물 여섯 살의 젊은 물리학자가 이처럼 체계적이고도 명료한 글을 쓸 수 있다는 데 감탄하게 된다.

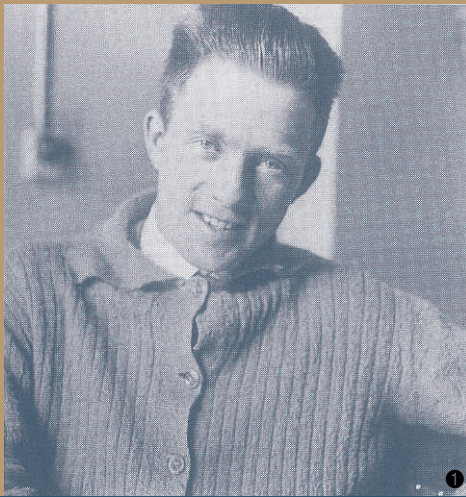
저자는 논문의 앞쪽 3분의 1을 물리학의 몇몇 주요 개념들을 분석하는 데 할애했다. 개념 분석이 있은 후 저자가 내린 결론은 “고전(물리학) 이론에서 역학적인 대상을 기술하기 위해 사용되는 모든 개념들은 원자 수준의 현상과 관련해서도 고전적 개념들과 유사한 방식으로 정확하게 정의할 수 있다”는 것이었다. 하이젠베르크의 이런 생각은 보어가 1920년 즈음 정식화했던 대응원리(correspondence principle)의 큰 틀 안에 들어 있었다. 그리고 나서 하이젠베르크는 이미 행렬역학 기반의 양자역학에서 도출되었던 식 $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$ 로부터 $p, q = \frac{h}{2\pi}$ 라는 관계식을 증명해낸다. 여기서 h는 플랑크 상수이고, p, q는 서로 켈레를 이루는 물리량, p, q의 측정에 있어서 정확성의 폭(즉 이것이 0일 경우 측정은 완전히 정확한 셈이다)을 가리킨다. 두 항을 곱한 값이 상수가 된다면, 둘 중 하나가 줄어들수록 다른 하나는 커지고, 또 반대편이 작아지면 이편이 커질 수밖에 없다. 이것은 한 대상의 위치와 운동량처럼 켈레를 이루는 두 물리량의 값을 동시에 마음먹은 대로 꼭 집어 정확히 말할 수 없도록 만드는 관계다. 위치를 정확하게 잡아내는 측정 장치는 운동량에 대해 평평

짐한 정보밖에 제공하지 못하고, 운동량 측정의 정밀도를 높이도록 세팅을 조절하면 이번엔 위치의 불확실성이 커져 버린다.

여기 등장하는 h는 일상세계의 규모에 비하면 너무 작은 크기여서, 이런 ‘불확정성’은 야구공이나 로켓의 역학에선 문제될 일이 없다. 그러나 예컨대 규모가 원자 이하인 수준으로 내려가면 상황이 달라진다. 측정의 정확성에 내재된(필자가 측정의 정확성에 '내재되어 있다'는 다소 위험한 표현을 쓰는 것은 이러한 관계가 20세기초 측정기기의 수준이나 실험자의 능력을 반영하는 성격의 것이 아니라 원리적인 것임을 분명히 하기 위한 이유에서다) 이런 근본적 한계는 예를 들어 전자의 위치(x)와 운동량(p)간에, 또는 에너지(e)와 시간(t) 사이에 성립한다.

양자의 불확정성 원리 정립

물론 이 논문의 역사적 의의는 불확정성의 원리를 정립했다는 점에 있었다고 해야할 것이다(그러나 그것을 표현하는 대표적인 식으로 알려진 $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$ 는 이 논문에 그 꼴로 등장한 바 없다). 하지만 필자가 보기에 저자의 의도는 앞서 언급한 것처럼 양자역학의 구체적인 역량을 입증하는 것, 그리고 비록 양자역학이 ‘통상적인 역학(ordinary mechanics)’과는 확연히 다른 성격의 이론일지라도 미시계에 대한 역학과 거시계 역학 사이에 ‘부드러운 넘나들기’가 가능하다는 것을 보이는 데 무게가 실려 있었다. ‘미시역학으로부터 거시역학으로 옮겨가기’라는 제목이 붙은 제3절에서 하이젠베르크는 양자역학의 관점에서 출발하더



① 1924년경의 하이젠베르크

② 1927년 벨기에 브뤼셀에서 열린 솔베이 학술대회에서 찍은 사진(부분)/ 맨 뒷줄 오른쪽에서 세 번째가 하이젠베르크, 그 왼쪽이 볼프강 파울리, 다시 한 사람 건너 에르빈 슈뢰딩거가 서 있다. 둘째 줄엔 보어와 막스 보른, 디랙 등이, 그리고 맨 앞줄엔 아인슈타인이 눈에 띈다.

라도 우리가 관찰할 수 있는 거시계의 모든 현상들을 구체적으로 설명해낼 수 있다고 역설한다. 동시에 그는 슈뢰딩거의 파동역학이 매력적이긴 하지만 엄밀한 의미에서 그의 접근방식은 오로지 정확히 조화진동에 해당하는 제한된 경우에만 적용 가능하다고 비판하는 것을 빼먹지 않는다.

양자역학과 인과율

논문의 끝부분에서 하이젠베르크는 앞에서 언급되었던 양자역학의 통계학적 특성에 대해 서술한다. 그는 이제까지 양자역학에 대해 전개되어 온 (코펜하겐식의) 이해가 올바르다면 양자물리학에는 근본적으로 통계론적인 성격이 포함될 수밖에 없다고 말한다. 그러나 여기서 우리는 이 말의 의미를 조심스럽게 이해할 필요가 있다. 양자물리학이 통계론적 특성을 지닌다는 얘기를 “제아무리 정밀한 자료들이 주어진다 해도 결과에 대해서는 언제나 확률론적으로밖에 예측할 수 없다”는 의미로 해석하는 것은 옳지 않다. 양자역학에서도 운동량 보존이나 에너지 보존 같은 관계는 정확하게 성립하며, 그런 의미에서 ‘콩 심은데 콩 난다’는 인과의 법칙은 근본적으로 흔들리


지 않는다. 그러나 하이젠베르크가 지적하는 문제는 우리가 ‘콩이 어떻게 심어졌는지’를 정확히 알 수 없다는 데 있다.

그는 “인과법칙을 ‘만일 현재에 대해서 정확히 알 수 있다면 우리는 미래에 대해서도 정확히 말할 수 있다’는 식으로 표현할 경우, 양자역학이 가르쳐 주는 것은 ‘만일 ~라면 ...이다’에서 뒤쪽 부분 즉 미래예측 가능성에 대한 주장이 아니라 앞쪽의 가정 부분이 잘못되었다는 점”이라고 잘라 말한다. 우리는 원리적으로 현재를 완전히 파악할 수가 없다. 다시 한 번 강조하지만, 우리의 능력이나 노고가 부족해서가 아니라 양자역학적인 불확정성의 원리가 가로 걸려있기 때문이다. 예컨대 한 전자의 현재 상태를 알고자 그것의 위치를 정확히 측정할 수는 있지만 위치측정의 정확도가 커지면 커질수록 그것의 운동량에 대한 정보는 점점 부정확하게 흐릿해질 수밖에 없기 때문이다.

사실 양자역학이 인과율에 미친 영향에 대한 얘기는 여기서 끝나지 않고 줄줄이 이어진다. 오늘까지도 그것은 완전히 해명된 문제라고 보기 어렵다. 그러나 이 논문의 내용에만 귀를 기울이더라도 최소한 허튼소리는 피할 수 있을 것이다.

예비과학자들에 필독서로 추천

하이젠베르크는 훌륭한 물리학자였다. 비록 실험물리학에 대한 관심이 소홀했던 까닭에 뮌헨 대학에서 박사학위를 따는 데는 약간의 어려움이 있기도 했지만 이미 20대 초반에 그는 세계적인 물리학자의 반열에 올라 있었고, 1932년에는 양자역학에 대한 공헌으로 노벨 물리학상을 받았다. 어떻게 해서 그는 그렇게 훌륭한 물리학자가 될 수 있었을까?

책을 별로 좋아하지 않던 필자가 대학 초년생 시절 꼭 빠졌었고 지금도 들여다볼 때마다 감동을 받는 책으로 그가 쓴 일종의 회고록인 『부분과 전체』가 있다. 학생들에게 이과, 문과를 가리지 않고 늘 권하고픈 책이기도 하다. 또 필자 생각으로 진짜 훌륭한 과학자를 만들어내는 데 필요한 ‘바탕 문화’가 어떤 것인지에 대해 비록 옛날 얘기고 또 먼 나라 얘기일 지언정 많은 가르침을 준다는 점에서 교육과 정책을 담당하는 분들에게도 꼭 일독을 권하고픈 책이다. 



글쓴이는 서울대 물리학과와 연세대 대학원 철학과를 졸업하고 독일 Universität Konstanz에서 과학철학 전공으로 박사학위, 연세대 철학연구소 전문연구원, 광운대 겸임교수, 서울대 KAIST 강사를 역임했다.