



Werner Heisenberg

베르너 하이젠베르크(Werner Karl Heisenberg, 1901~1976)는 1925년 행렬에 대한 수학적 지식이 거의 없는 상태에서 행렬역학에 대한 핵심적인 내용이 들어있는 상징적인 곱셈을 처음으로 제안해 혼란스럽던 20년대 원자 물리학계에 양자역학이라는 새로운 역학 체계를 확립하는 새로운 돌파구를 열었다.

하이젠베르크의 학창 시절

양자역학의 형성을 비롯해서 현대물리학의 발전에 지대한 공헌을 한 하이젠베르크는 1901년 12월 5일 독일 뷔르츠부르크에서 태어났다. 본래 베스트팔렌 사람이었던 그의 아버지 아우구스트 하이젠베르크는 바이에른에서 고전어를 가르치는 김나지움 선생을 하다가 교수 자격을 얻기 위해 뮌헨에서 뷔르츠부르크로 떠났고, 여기서 그의 둘째 아들이었던 베르너를 얻었다. 1910년 1월 아우구스트는 독일에서 단 하나뿐인 뮌헨대학의 중세 및 근세 그리스 문헌학 정교수로 초빙되었고, 이에 따라 베르너 하이젠베르크는 뮌헨 사람으로 세상에 알려지게 되었다.

1911년 하이젠베르크는 막스 플랑크가 나온 명문학교인 뮌헨의 막스밀리안 김나지움에 입학했다. 제1차 세계대전 기간 중에 하이젠베르크의 아버지는 예비역 보병장교로 소집되어 프랑스 전선에 투입되었다가 1916년

부상을 입고 집으로 되돌아왔다. 부모의 가르침이 중요했던 이 시기에 하이젠베르크는 어른들의 보살핌이 거의 없이 대부분을 혼자서 공부하게 되었다. 김나지움을 졸업할 때까지 그는 미적분학, 타원함수 등을 독학으로 배웠으며, 정수론에 관한 논문을 출판하려는 시도도 했었다. 김나지움 시절에 그가 감명 깊게 읽었던 플라톤의 『티마이오스』에 나오는 물질관은 평생토록 물질 법칙을 바라보는 그의 관점에 영향을 미쳤다. 김나지움을 우수한 성적으로 졸업한 하이젠베르크는 1920년 뮌헨대학에 입학했다.

뮌헨대학에서의 첫 학기 때부터 하이젠베르크는 사고에 있어서 대담성과 독창성을 발휘하기 시작했다. 갓 입학한 하이젠베르크는 쾰른의 세미나에서 당시에 많은 분광학자들과 물리학자들을 괴롭혔던 이상제만효과를 설명하기 위해서 $+1/2$, $-1/2$ 의 양자수를 도입하는 황당한 생각을 했다. 이런 설명은 양자수를 원자의 정상상태에서 나타나

는 정상파로 비유해서 이해했던 쯔머펠트에
게는 깜짝 놀랄 일이었다. 즉 당시의 보어와
쯔머펠트에 의해 발전했던 고전 양자론에서
는 양자수가 1, 2, 3, 4, ...와 같은 정수만을
허용했지, $+1/2$, $-1/2$ 과 같은 분수는 허용
하지 않았기 때문이다.

하이젠베르크보다는 1년 선배였지만 서로
절친한 친구로 지냈던 파울리는 만약 $1/2$ 이
양자수가 된다면 $1/4$, $1/8$, $1/16$ 도 똑같이 양
자수가 되어야 한다고 주장하면서, 하이젠베
르크의 주장이 지닌 문제점을 지적했다. 이
에 대해서 하이젠베르크는 '성공은 수단을
정당화한다'고 응변하면서 자신의 방법의 타
당성을 주장했다. 하이젠베르크가 $1/2$ 양자
수를 도입한 것은 현대적인 의미의 스핀의 도
입을 의미하지는 않는다. 그는 이 $1/2$ 의 양자
수의 원인을 전자의 자전에 의한 것이 아니라
원자핵 가까이에서 빠른 속도로 움직이는 궤
도전자의 상대론적 효과에 의한 것으로 이해
했기 때문이다. 이것을 하이젠베르크의 초기
'중핵 모형'이라고 부른다. 물론 하이젠베르
크의 이 중핵 모형은 파울리의 배타원리의 발
견에 따라 그 지위를 상실하게 되지만, 그가
주장한 $1/2$ 의 양자수는 파울리의 배타원리에
서도 받아들여지게 된다.

하이젠베르크와 '방랑시절'

1922년 6월 하이젠베르크는 때마침 괴팅
겐 대학에 초청되어 양자역학에 대한 강연을
하던 닐스 보어를 처음으로 만났다. 후일 '보
어 축제'(Bohr-Festspiele)라고 불리게 될
이 강연에는 보른, 프랑크, 쯔머펠트, 파울

리, 훈트, 요르단, 란데, 게를라흐 등 훗날 양
자역학의 형성에 결정적인 역할을 하게 될 대
부분의 학자들이 괴팅겐에 함께 모여 약 열흘
간 서로 진지한 토론을 벌였다. 하이젠베르
크도 자신의 스승인 쯔머펠트의 주선으로 이
모임에 참가해서 닐스 보어와 진지한 토론을
할 기회를 얻었고, 이때 보어와의 만남을 통
해 자연을 바라보는 새로운 관점을 갖는 데
많은 자극을 받았다.

1922년 9월 초 쯔머펠트는 미국 위스콘신
대학에 6개월 동안 객원교수로 가게 되었고,
자신의 수제자인 하이젠베르크를 괴팅겐의
막스 보른에게 보냈다. 이리하여 하이젠베르
크는 괴팅겐 대학의 보른 밑에서 이론 물리학
을 다루는 수학적 방법을 철저히 배울 기회
를 얻게 되었다. 보른과의 협동 작업을 통해
하이젠베르크는 헬름 문제가 기존의 고전양
자론에 의해서는 해결되지 않는다는 것을 분
명하게 인식했다. 삼체 문제에 대한 일반적
인 논의 과정을 통해 하이젠베르크는 현재의
양자 조건이 잘못됐던지 아니면 전자의 운동
이 더 이상 고전역학적 방정식을 따르지 않는
다는, 보다 근본적인 차원의 변혁이 없이는
헬름의 문제가 해결되지 않는다는 것을 분명
히 느끼게 되었다.

1924~25년 겨울 하이젠베르크는 어려운
독일 경제 상황 중에도 룩펠러 재단 장학생으
로 닐스 보어와 함께 연구할 절호의 기회를
얻게 되었고, 보어로부터 물리학의 철학적
의미에 대해서 많은 것을 배우게 된다. 훗날
하이젠베르크는 회고하기를, 자신은 뮌헨의
쯔머펠트에게는 물리학 분야가 할 만한 것이

라는 희망을 배웠고, 괴팅겐의 막스 보른에게서는 수학을, 그리고 코펜하겐의 보어에게서는 철학을 배웠다고 술회했다. 하이젠베르크는 이 세 사람에게 대변되는 서로 다른 학문적 전통을 두루 섭렵한 결과 양자역학이라는 새로운 역학 체계를 완성할 수 있었던 것이다.

행렬역학의 등장

1925년 4월 초 하이젠베르크는 코펜하겐에서 보어로부터 원자 구조에 관한 많은 훈련을 받은 뒤 사강사의 의무인 강의를 하기 위해 독일로 되돌아왔다. 1925년 5월부터 하이젠베르크는 지금까지와는 다른 새로운 방법으로 원자론의 문제를 접근하기 시작했다. 그는 일단 고전전자기적인 가상 진동자를 이용해 고전적인 운동방정식을 만든 다음에, 새로운 양자법칙을 얻어내기 위해 보어의 대응 원리에 따라 기존역학 체계로부터의 의도적인 일탈을 모색했다. 한 예로서 그는 고전적인 다주기 체계에 상응하는 위치 좌표를 푸리에 급수로 전개했고 이 계수들이 양자론적인 결과에 맞도록 하기 위해서 어떤 조작이 필요한가를 면밀히 살폈다.

1925년 6월 7일 하이젠베르크는 건초병을 치료하기 위해 2주간 휴가를 내고 북해의 휴양지인 헬골란트 섬으로 향했다. 이 헬골란트 섬에서 하이젠베르크는 비조화 진동자에 대한 수학적 형식화를 다시 추구했고, 바로 이곳에서 행렬역학으로 구체화되는 핵심적인 생각을 얻어냈다. 헬골란트에서 돌아온 하이젠베르크는 자신이 생각해낸 새로운 양

자론적 방법이 에너지 보존 법칙을 만족한다는 것을 증명할 수 있었고, 마침내 1925년 7월 새로운 역학체계인 행렬역학의 기본적인 개념들을 얻어내는 데 성공했던 것이다.

하지만 하이젠베르크 자신은 행렬역학의 출현을 예고한 이 역사적인 논문에서 그가 사용한 상징적인 곱셈이 수학적으로는 행렬의 곱셈에 해당한다는 것을 인식하지 못했다. 이것을 처음으로 알아낸 사람은 괴팅겐의 수학적 전통 내에서 성장했던 막스 보른이었다. 즉, 보른은 하이젠베르크의 논문을 살펴본 뒤, 하이젠베르크가 사용한 상징적 곱셈이 바로 자신이 대학시절부터 배워서 잘 알고 있었던 일종의 행렬곱셈이라는 것을 알아차렸다. 오늘날 우리가 하이젠베르크 교환식이라고 부르는 식은 물론 하이젠베르크의 논문에 하나의 상징적인 곱셈으로 나타나 있기는 하지만, 그것을 행렬로 처음으로 표현한 사람은 보른과 그의 학생이었던 요르단(Pascual Jordan, 1902~1980)이었다. 1926년 초 보른, 하이젠베르크, 요르단은 서로 힘을 합쳐서 소위 '3인 논문'을 출판했다. 이 논문의 출현과 함께 1926년 초 뒤늦게 행렬역학의 가치를 인정한 파울리가 수소의 발머계열식을 행렬역학적인 방법으로 성공적으로 풀어냄으로써 행렬역학은 그 기본적인 모습을 갖추게 되었던 것이다.

하이젠베르크의 불확정성원리

1927년 초 하이젠베르크는 감마선 현미경에 의한 사고실험을 통해서 불확정성원리라는 새로운 사고틀을 찾아냈다.

하이젠베르크가 불확정성 원리에 대한 기본적인 개념을 창안하고 있는 동안 양자역학의 철학적 기초에 대해 몰두하고 있었던 보어도 이와 비슷한 견해에 도달했다. 우리는 항상 거시세계의 용어와 거기에서 얻어진 개념을 바탕으로 원자현상이라는 미시세계를 기술할 수밖에 없기 때문에 미시세계를 기술하는 우리의 용어에는 어떠한 한계가 있기 마련이다. 즉 원자현상의 기술에 있어서 한 용어의 무모순성은 항상 그것의 정의가능성과 관찰가능성의 상보적 관계 때문에 제한을 받게 된다. 이것을 보어의 '상보성 원리'라고 하는데, 보어의 이 상보성 원리와 하이젠베르크의 불확정성 원리가 서로 합쳐져서 양자역학에 대한 정통 해석으로 자리를 굳히게 되는 코펜하겐 해석이 확립되게 된다.

하이젠베르크가 불확정성 원리를 어떻게 창안하게 되었는지는 확실치 않다. 하지만 대략 3가지 방향에서 그 영향 관계를 생각할 수 있다. 우선 현미경의 분해능 문제는 하이젠베르크의 박사 학위 구두시험에서 빈이 하이젠베르크에게 질문했던 것이었다. 박사 시험에서 낭패를 본 경험이 하이젠베르크의 뇌리에 강하게 각인되었을 가능성은 충분히 있다. 또 다른 하나는 하이젠베르크의 절친한 친구이며 동료 물리학자인 파울리가 불확정성 원리를 창안하기 직전에 하이젠베르크에게 보낸 편지의 내용이다. 1926년 10월 19일 파울리는 하이젠베르크에게 다음과 같은 내용이 담긴 편지를 보냈다. “우리는 운동량이라는 눈으로 세상을 볼 수 있고 위치라는 눈으로도 세상을 볼 수 있다. 그러나 이상하게도 운동량과 위치의 눈을 동시에 뜨면 틀리게

된다.” 이 말에서 우리는 하이젠베르크의 불확정성원리에 아주 근접했던 파울리의 생각을 엿볼 수 있다. 그러나 양자역학에 대한 철학적 해석을 최종적으로 주창한 사람은 파울리가 아니라 파울리의 말을 옆에서 듣고 있었던 하이젠베르크였던 것이다.

마지막으로는 하이젠베르크 자신의 주장으로 아인슈타인의 영향이다. 하이젠베르크의 회고에 의하면 당시에 아인슈타인은 하이젠베르크에게 관찰이란 것은 관찰하려는 현상과 감각의 연관성을 정해주는 자연법칙을 우리가 알고 있을 때에만 의미가 있으며, 관찰할 수 있는 것이 무엇인지를 결정해 주는 것이 바로 이론이라는 말을 해주었다고 한다. 하이젠베르크는 바로 이 말을 듣고 양자역학의 철학적 해석인 불확정성 원리의 기본적인 착상을 할 수 있었다. 하지만 아인슈타인은 양자역학이 지닌 비결정론적인 성격에 대해 무척 못마땅하게 생각했고, 죽을 때까지 상보성원리를 주창한 보어와 양자역학의 유효성 문제를 두고 논쟁을 벌였다.

제2차 세계대전 후 재건과 하이젠베르크

1927년 하이젠베르크는 26세의 나이로 라이프치히 대학 정교수가 되었고, 1933년에는 독일 물리학회에서 수여하는 막스 플랑크 메달과 물리학자로서 최고의 명예인 노벨 물리학상을 수상했다. 제2차 세계대전 동안 하이젠베르크는 독일의 핵개발에서 핵심적인 역할을 했으며, 전 후 독일 과학을 대표할 책임이 있는 과학자로서 폐허화된 독일 과학을

인 물 탐 구

재건하는 데 많은 노력을 기울였다. 1949년 3월에 창립된 독일 연구협회의 의장직을 맡는 한편, 자신이 독일이 경제적으로 어려웠던 시기에 록펠러 재단의 장학금의 도움으로 코펜하겐으로 가서 닐스 보어와 함께 연구했던 경험을 되살려 훔볼트 재단의 재건에 힘쓰게 된다. 훔볼트 재단에서는 박사 학위를 한 젊은 학자들에게 독일에서 공부할 기회를 제공했는데, 하이젠베르크는 이 재단의 초대 이사장을 맡으면서 독일에서 우수한 학문 연구 활동이 이루어지도록 하는 데 많은 노력을 기울였다. 또한 1956년부터는 독일 원자력

문제에 대해 정부에 자문을 하는 등 전후 독일의 과학 정책에도 많은 영향을 미쳤다.

자신의 자전적인 책인 『부분과 전체』(1969)와 현대물리학에 대한 자신의 철학적 견해를 소개한 『물리학과 철학』(1959)을 비롯한 많은 비전문적인 저작을 통해서도 20세기 과학 사상에 많은 영향력을 발휘했으며, 1976년 2월 1일 독일 뮌헨에서 생애를 마감했다. **KRIA**

- 내용출처 : 한국물리학회

