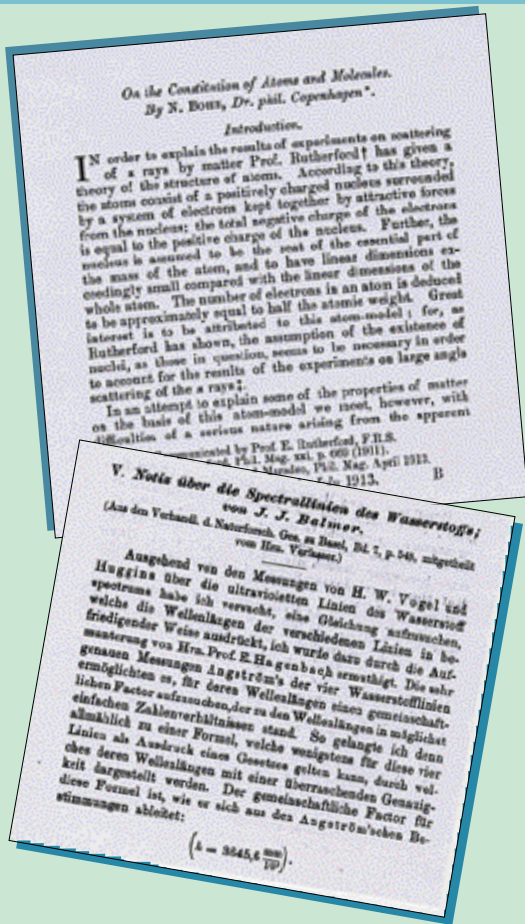


닐스 보어의 「원자와 분자의 구조」

고전탈피... '양자역학'의 효시

글_고인석 전북대 과학문화연구센터 전임연구원, kiskis00@chollian.net



사물들을 나누고 또 나뉘 더 이상 나눌 수 없는 최소의 부분까지 파고 들어감으로써 대상의 본질을 파악할 수 있으리라는 생각은 비단 데모크리토스나 레우키푸스 같은 고대 그리스의 원자론자들에게서만 발견되는 견해가 아니다. 그런 생각은 물질에 관한 탐구에 있어 여전히 가장 널리 받아들여지고 있는 전제 가운데 하나다. 오늘날 물리학자들이 소립자를 연구하고 초끈을 논하는 일 역시 같은 정신의 맥락 속에 있다.

‘원자’의 서양말인 ‘아톰(atom)’은 옛 그리스말에서 부정을 뜻하는 요소 ‘아(a)와 ‘자르다’에 해당하는 동사 ‘tomein’에서 온 ‘톰(tom)’의 결합으로 이루어져 있고, ‘아톰’은 그 원래 뜻에서 ‘더 이상 나뉘어질 수 없는 것’을 가리킨다. 더 이상 나눌 수 없으니까 가장 작고 근본적인 요소이고, 만물이 그것으로 구성되는 궁극의 레고 조각 같은 것이다. 그런데 지난 20세기가 막 시작되었을 무렵, 그러니까 지금부터 100년 전쯤 물리학자들은 차츰 ‘원자의 구조’라는 문제에 시선을 모으고 있었다. 원자를 하나의 점과 같은 알갱이로 보는 사람들이 여전히 많았지만, 19세기말 음극선관 실험을 통해 알려진 새로운 입자 ‘전자’의 위치는 이미 확고해져 있었고, 이제 물리학은 물질을 구성하는 최소의 부분이라고 일컬어져 오던 원자가 다시 어떤 부분들의 어떤 조합으로 이루어져 있는지를 규명하는 일에 착수하고 있었다.

1909년부터 1911년까지 영국 맨체스터에서 어니스트 러더포드가 주도하는 연구그룹이 원자의 구조에 관해 축적한 연구결과는 당시의 물리학에 근본적인 혁신을 중용하고 있었다. 아주 얇은 금속막에 알파(α)입자—그 정체는 물론 ‘헬륨원자의 핵’이지만 당시로서는 그렇게 표현할 수 없었다—를 쏘아대고 산란(scattering)의 패턴을 살펴

기획연재순서

- ① 닐스 보어
- ②
- ③
- ④
- ⑤

보는 실험(러더포드는 실험을 주도한 자신에게조차 이 실험의 결과가 대단히 놀라운 것이었음을 다음과 같은 표현에 담아냈다: “그것은 마치 15인치짜리 포탄을 얇은 종잇장애다 썩냈는데 포탄이 튕겨져 돌아온 것 같은 느낌이었다”)의 결과를 토대로 러더포드는 중심에 양(+의 전기를 띠고 원자의 질량 거의 전부를 차지하는 질량을 지닌 핵과, 음(-)의 전기를 띠고 핵 주위를 회전운동하는 전자로 이루어진 원자의 모습을 그려냈다(이와 같은 러더포드의 원자모형은 사실 고전 전자기학 이론과 상충하는 것이었지만, 여기서 살펴볼 보어의 논문에 의해 이 점이 지적되기 전까지는 그것의 정확한 물리적 의미와 문제점이 드러나지 않았다).

1913년, 양자역학 등장

사람들은 20세기에 이루어진 가장 중요한 과학적 업적 중 하나로 양자역학을 꼽기를 주저하지 않는다. 실로 미시세계로부터 초거시세계에까지 이르는 양자역학의 적용 범위는 포괄적인 진리를 추구하는 물리학의 성격을 모범적으로 예증한다. 그런데 이처럼 중요한 이론인 양자역학이 정확히 언제 등장했는가 하는 물음을 던져 보면, 뜻밖에도 대답이 간단치 않다.

역사에 관한 얘기를 포함하고 있는 양자물리학 교과서들은 대개 19세기에서 20세기로 바뀔 무렵의 흑체복사 연구 그리고 막스 플랑크 등의 이름을 언급한다. 실제로 흑체복사 현상을 기술하기 위해 플랑크가 ‘작용 양자’ (quantum of action)라는 개념을 도입한 것이 1900년이었고 이 개념이 양자역학의 역사에서 중대한 구실을 한 것도 사실이지만, 이를 두고 양자역학의 탄생이라고 말하기는 아무래도 무리인 듯싶다. 한편 아인슈타인에게 1921년 노벨 물리학상을 안겨준 광전효과 연구는 1905년의 작품이었고, 그것은 분명 양자라는 개념이 5년 전 그것을 탄생시켰던 특정 문제영역의 울타리를 넘어서는 계기였다. 그러나 ‘양자역학’이라고 불릴 만한 이론은 아직 그 어느 곳에도 존재하지 않았다.

‘양자역학’이라는 말이 처음 등장한 것은 1924년이였다. 막스 보른은 당시 물리학 분야의 가장 중요한 학술지 중 하나였던 『차이트슈리프트 퓌어 퓌직』(Zeitschrift für Physik)에 『Über Quantenmechanik』이라는 논문을 발표했고, 다음 해엔 보른과 파스쿠알 조르단의 『Zur Quantenmechanik』, 또 그 다음 해엔 하이젠베르크까지 참여해서 세 사람의 공동논문 『Zur

Quantenmechanik, II』가 같은 학술지에 발표되었다. 제목은 하나같이 ‘양자역학(에 관하여)’ 정도로 번역될 만한 것들이다. 하지만 이보다 앞서 1918년쯤엔 이미 ‘양자이론’ (quantum theory)이라는 표현이 널리 쓰이고 있었고, 이 개념과 관련된 내용을 더듬어 가며 당시의 문헌들을 뒤적거리다 보면 우리는 양자이론의 기원을 찾아 적어도 다시 몇 년을 더 거슬러 올라가게 된다.

이렇게 얘기가 복잡해질 양이면 그냥 마음 편하게 “양자역학은 1900~25년에 어느 틈엔가 슬그머니 탄생했다”고 말해버려도 그리 나쁘진 않을 것 같다. 그러나 조금 더 꼬집어 말하고 싶은 사람에게 제안할 수 있을 한 가지 대답은 위의 두 해 사이 한가운데쯤인 1913년이요, 그 대답의 근거엔 원자 구조에 관한 덴마크의 물리학자 닐스 보어의 논문이 놓여있다. 이 논문은 보어가 자신을 세상에 널리 알린 계기가 되었을 뿐만 아니라 20세기 물리학의 성과 가운데서도 노르자위에 해당하는 양자역학의 발달사 속에서 한 결정적인 장면을 이룬다.

스펙트럼, 원자구조, 양자 관계 규명

유럽에서도 제일 오래된 왕국의 역사를 지닌 덴마크는 그린란드를 빼면 땅덩어리도 아주 작고 인구는 500만 명을 겨우 넘을 뿐인 조그만 나라다. 그렇지만 덴마크는 이제까지 자연과학 분야에서만 여덟 명의 노벨상 수상자를 배출한 수준 높은 과학기술의 전통을 갖고 있다. 그리고 그 가운데서도 가장 빛나는 이름은 아마도 닐스 보어일 것이다.

수소원자모형에 관한 ‘3부작’ (Trilogy)이라고 불리기도 하는 보어의 논문 『On the Constitution of Atoms and Molecules』(원자와 분자의 구조에 관하여)는 영국에서 발간되는 학술지 『필로소피컬 매거진』(Philosophical Magazine)에 1913년 7월, 9월, 11월 세 차례로 나뉘어 게재되었다. 1911년초 코펜하겐 대학에서 금속의 전자이론에 관한 연구로 박사학위를 받은 스물 여섯 살의 보어는 같은 해 9월부터 J.J. 톰슨이 이끌고 있던 영국 케임브리지의 캐번디시연구소에서, 그리고 다음 해 3월부터 넉 달 동안 맨체스터의 러더포드와 함께 연구했고, 이 논문은 코펜하겐으로 돌아온 보어가 이 시기의 성과, 특히 맨체스터에서의 경험을 독창적인 관점에서 정리하고 해석한 결과물이다. 논문의 제1부는 원자구조 일반, 즉 원자핵과 그것에 구속된 전자 이야기를 담고



있고, 제2부는 한 개의 핵을 지닌 물리계인 원자, 그리고 제3부는 둘 이상의 핵을 지닌 물리계, 즉 분자의 구조를 주제로 삼고 있다.

논문의 도입 부분에서 보어는 당시의 물리학이 처해 있던 문제 상황을 다음과 같이 묘사한다.

“알파선을 가지고 행해진 실험의 결과를 설명하기 위해서 러더포드 교수는 원자의 구조에 관한 한 가지 이론을 제시했다. 그 이론에 따르면 원자는 양의 전하를 지닌 핵과 그것의 전자기적 인력에 의해 구속된 채 그 주위를 움직이는 일군의 전자들로 구성되어 있고, 전자의 총 음전하는 핵의 양전하와 정확히 맞먹는다. [...] 그러나 이와 같은 원자모형을 토대로 물질의 기본 성질을 설명해 보려는 우리의 노력은 앞서 서술된 바 전자의 불안정성(C) 고전적인 물리학 이론에 따르면 전기를 띤 입자가 원운동이나 타원운동처럼 ‘가속된 운동’을 하는 경우엔 전자기파의 방출이 일어나고, 이는 에너지의 손실을 의미하기 때문에 전자는 자연히 점점 에너지를 잃으면서 원자핵의 전기적 인력에 끌려와 붙어버릴 수밖에 없다. 그렇다면 세상 만물을 이루고 있는 원자들은 제 구조를 유지할 수 없다는 결론이 나온다, 때문에 난관에 직면하게 된다. [...] 그런데 최근 에너지 복사에 관한 이론이 발달함과 동시에 흑체복사, 광전효과, 뢰트겐선 등 다양한 영역의 현상들을 놓고 수행된 실험을 통해서 포착된 새로운 가정에 대한 직접적인 입증사례들이 등장하면서 이런 문제를 다루는 우리의

방법에 근본적인 변화가 생기기 시작했다. 즉 이런 문제들에 대한 논의의 결과, 우리는 고전적인 전기동역학 이론이 원자 수준의 대상들을 다루는 데 부적절하다는 사실을 인정하게 되었다.”

보어는 그의 논문에서 당시의 물리학이 직면한 난국을 타개하기 위해 ①원자에서 방출되는 복사파의 스펙트럼 ②플랑크의 양자가설 ③원자의 구조라는 세 가지 요소를 한 문맥 속에 끌어다 묶는다. 그리고 우리는 바로 이와 같은 종합을 보어의 ‘3부작’이 이룩한 위대한 공헌으로 평가할 수 있다. 이 세 가지는 모두 당시 물리학에서 활발하게 논의되고 있던 주제들이었을 뿐만 아니라 물리학자들은 이것들간에 모종의 상관관계가 성립한다는 사실을 이미 감지하고 있었지만, 자연의 본성 속에서 이 요소들이 어떻게 서로 얽혀있는지를 처음으로 풀어내 보인 이는 1913년의 보어였다.

원자모형으로 선스펙트럼 설명

서로 다른 원소의 가스를 채운 방전관은 저마다 다른 색으로 빛난다. 모든 원소는 스펙트럼에 제각기 고유한 띠모양의 배열을 나타내기 때문에 스펙트럼 분석은 아주 적은 양의 시료만 있어도 대상의 정체를 정확히 밝혀준다. 이것은 대단히 유용한 사실이었고, 1880년대 키르히호프와 분젠 등의 활약 이후로 스펙트럼 분석은 금세 많은 과학자들의 실험실에서 일상적인 도구가 되었다. 그러나 이런 현상의 근거, 즉 어떻게 해서 각 원소가 스펙트럼에 나타나는 띠의 파장과 강도 등에서 고유한 패턴을 나타내는가 하는 물음은 20세기 들어서도 여전히 규명되지 않고 있었다. 스펙트럼 분석이 원자의 구조에 대한 탐구와 연결된 것이 20세기 초였고, 톰슨과 러더포드가 이끄는 그룹들이 선스펙트럼으로 가시화되는 원자의 복사를 원자의 구조와 결부시켜 설명하고자 애쓰고 있었다.

원자에서 나오는 복사파의 성질이 원자의 내부구조 특히 전자의 운동과 결부되어 있다는 심증은 보어의 연구가 시작될 즈음 벌써 짚어져 있었다. 보어도 논문 속에서 언급하고 있는 J.W. 니컬슨의 연구(1911~12)는 스펙트럼에 나타나는 선들의 고유한 진동수를 원자 안에서 궤도운동중인 전자의 진동과 결부시켰고, 이는 당시 이 문제에 관심을 가진 물리학자들 대부분의 견해를 대표하는 해석이었다. 또 고전 전자기학의 토대 위에서 볼 때 이것은 가능한 단 하나의 해석이기도 했다. 그러나 불행히도 그것은

틀린 해석이었다. 보어는 여기서 과감하게 고전 물리학의 한계를 좌악 그어 표시하면서 새로운 이론의 장을 열고 있다.

보어의 해결책은 어찌 보면 허탈한 느낌을 줄 만큼 싱거운 것이었지만, 분명 대담한 것이었다. 러더포드의 원자구조가 지닌 가장 치명적인 약점은 전자가 정상상태를 유지할 수 없다는 것이었는데, 보어는 “바닥의 정상상태에서 전자는 에너지 손실을 수반하는 전자기파를 방출하지 않고 존재한다”고 가정해버리고 있기 때문이다. 1913년의 보어는 다음과 같은 두 중심가정을 출발점으로 삼아 원자의 구조를 설명했다.

(1) 정상상태에 있어서 계의 동역학적 평형은 통상적인 역학, 즉 고전역학의 토대 위에서 서술이 가능한 반면, 상이한 정상상태들간의 전이가 문제되는 경우 그러한 기반 위에서 다루어질 수 없다.

(2) 전자가 한 정상상태에서 다른 정상상태로 옮겨갈 경우 단일한 파장을 지닌 복사파의 방출이 수반되는데, 이 복사파의 진동수와 방출된 에너지의 관계는 플랑크의 [복사]이론에 의해 주어진다($\Delta E = h\nu$).

우리는 여기서 한편으로 고전 물리학의 토대에 여전히 한 발을 디디고 서 있으면서 다른 한편으로 뚜렷이 그것의 테두리를 벗어나고 있는 보어의 모습을 발견한다. 1913년 3월에 3부작 논문의 첫 부분을 받아 읽은 러더포드는 보어에게 다음과 같은 구절이 담긴 편지를 보냈다. “수소 스펙트럼의 근원이 어떤 것인가 하는데 대한 당신의 생각은 아주 창의적일 뿐만 아니라 매끄럽게 돌아갈 것처럼 보입니다. 그러나 플랑크의 생각이 고전역학과 뒤범벅되어 있어서, 그 바탕에 깔린 물리적 아이디어가 어떤 것인지 파악하기가 어렵군요.” 러더포드의 반응은 당연한 것이었다. 보어는 옛 것과 새 것의 절묘한 조합을 통해서 새 시대의 기틀을 마련하고 있었던 것이다.

화룡점정, 발머의 식


물리학의 발달을 조망하는 거시적인 관점에서 보자면 1913년의 보어가 이룩한 공헌의 요체는 이미 위의 두 가정에 들어있지만, 보어의 논문이 당시의 물리학자들을 감동시키고 그들의 관심을 이 새로운 물리학 쪽으로 끌어당길 수 있었던 요인은 원자의 선스펙트럼에 관한 정밀한 계량적 해석에 있었다. 보어는 그 때까지 실험을 토대로 확립되어 있던 물리상수들의 값과 자신의 새

로운 가정으로부터 출발해서, 이른바 ‘발머의 식’을 통해 표현되는 스펙트럼 선들의 규칙성을 명쾌하고 정확하게 설명해낼 수 있었던 것이다. 발머의 식은 말하자면 보어의 수소원자모형이 탄생하기 위해 보태져야 했던 마지막 포인트였다. 보어는 코펜하겐으로 돌아온 뒤인 1913년 초에야 비로소 발머의 식에 관한 얘기를 접했는데, 그러자마자 곧장 그것의 물리적 의미에 대한 문제에 매달렸다고 한다.

스위스 바젤대학의 강사이면서 한 여학교의 수석선생님이기도 했던 J.J.발머가 일찍이 1885년에 제안했던 식—발머의 식—이 수소원자의 스펙트럼에 나타나는 선들의 파장에 숨어있는 규칙성을 이미 성공적으로 포착해내고 있었다는 점은 흥미롭다. 당시 60세였던 발머는 놀랍게도 실험테이터에 기반을 둔 단 네 개의 숫자 $\frac{9}{5}, \frac{4}{3}, \frac{25}{21}, \frac{9}{8}$ 에서 출발하여 $\lambda \propto \frac{m^2}{m^2 - n^2}$ (m, n 은 정수)라는 규칙성을 건져냈는데, 이러한 발머의 통찰은 1913년의 보어가 복사파의 진동수에 대해

$$\nu = k \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (\text{단, } n \text{은 정수 그리고 } k = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3})$$

과 같은 식을 내놓는 데 결정적인 발판을 제공했다.

가장 단순한 원자인 수소원자의 구조에 관한 보어의 아이디어는 성공적이었고, 그의 논문은 플랑크의 양자가설을 수용하여 구축된 새 원자이론의 시발점이 되었다. 물론 그 뒤의 역사가 말해 주듯 보어의 모형은 더 복잡한 구조를 지닌 원자에는 잘 들어맞지 않았다. 그도 그럴 수밖에 없는 것이 보어는 단 한 가지—나중에 ‘주양자수’라는 이름을 얻은—양자수(quantum number)만을 고려했을 뿐이고, 전자들간의 전기적 상호작용 역시 고려하지 못했기 때문이다. 이런 까닭에 사람들은 원래 제목이 ‘원자와 분자의 구조에 관하여’인 이 논문을 다만 ‘수소원자모형에 관한 논문’으로 기억하고 있다. 그러나 과학의 진보는 이처럼 대담하고 치밀하면서도 한편으로 불완전한 기여의 조각들이 모여 이루어지는 법이다. 어쨌든 보어의 1913년 연구는 원자의 미세한 구조가 규명되는 과정에 놓인 하나의 커다란 징검돌이 되었다. 보어는 그 후에도 코펜하겐에서 여러 물리학자들을 이끌며 또 더 많은 물리학자들과 교류하면서 양자역학의 발달을 주도해 갔다. 



글쓴이는 서울대 물리학과와 연세대 대학원 철학과를 졸업하고 독일 Universität Konstanz에서 과학철학 전공으로 박사학위, 연세대 철학연구소 전문연구원, 광운대 겸임교수, 서울대와 KAIST 강사를 역임. 현재 전북대 과학문화연구소의 전임연구원으로 있다.