양자론 형성과 실험의 역할

DOI: 10.3938/PhiT.21.025

임 경 순

The Role of Experiments in the Formation of Quantum Theory

Gyeong Soon IM

Many physicists often mention quantum theory in explaining the Franck-Hertz experiment, the Ramsauer effect, and alpha-particle scattering. These experiments, however, emerged within relatively autonomous traditions. This paper treats some famous experiments that developed independently from quantum theory. The interpretation of α -particle scattering, for instance, is connected with quantum theory. Many physicists, including E. Rutherford, however, did not use quantum theory in treating the collision process. It was not until 1929 that a clear quantum mechanical description of α -particle scattering emerged.

과학 발전에 있어서 이론의 역할에 대해서는 지난 1950년대부터 상당히 많은 논의가 진행되었으며 이에 따라 팔목할

만한 연구 성과가 얻어졌다. 1920년대부터 빈 학파에 의해 주도된 논리실증주의 운동에 대한 반발로 철학계에서는 소위 후기경험주의 조류가 나타나게 되는데, 이 조류의 영향 아래서 과학이론 발달의 구조적 측면에 대한 논의, 관찰의 이론 의존성에 대한 인식, 그리고 보조가설이나 미봉가설에 의해서 야기되는 과학이론에 대한 전체론적 이해 등을 바탕으로 과학이론에 대한 역사적 측면의 연구가 활발하게 진행되었다.

이런 후기 경험주의는 관찰과 이론 사이의 대응원리에 바탕을 두고 있던 논리실증주의 내지 논리경험주의의 문제점을 지적하는 데에는 상당히 커다란 역할을 했던 것으로 평가되고 있다. 그러나 이런 과정에서 후기경험주의와 관련을 맺으면서 전개되었던 과학사 연구가 지나치게 이론만을 강조하고 실험 분야를 무시하는 형태로 나타났다는 것은 여러 학자들에 의해서 지적되어 왔다. 결국, 단순한 관찰을 넘어선 물질적 문화의 한 부분으로서의 실험에 대해서는 80년대에 이르러서야 구체적으로 논의되고 주요 관심의 대상이 되었다.

과학사에서 실험에 관한 관심은 1980년대 이후에 급격하게 높아졌다. 현대물리학에 대한 과학사 연구를 보아도 1960년대에서 70년대까지는 주로 양자역학과 상대성이론의 이론 형성 과정에 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 1980년대 이후에는 표준이론의 형성과정에 대한 연구보다는 이런 이론적인 전개와 부분적으로 관련을 맺으면서 성장해온 고에너지 실험 물리학에 대한 연구에 대한 관심이 높아졌다. 20세기 후반에 올수록 이론보다는 실생활과 보다 밀접한 관련을 맺고 발전한 실험 물리학에 대한 연구가 많아졌다.

실험에 대한 관심은 비단 과학사 분야뿐만이 아니었다. 이언 해킹의 과학철학, 브뤼노 라투르 과학인류학 연구에서 알 수 있듯이 이 시기에 실험, 실험 장비, 연구실에 대한 다양한 연구가 줄을 이었다. 실험의 중요성에 관한 논의를 진행시킨 과학사가들 가운데 현재 미국에서 가장 영향력 있는 사람으로 아마도 피터 갈리슨을 꼽을 수 있다. 그는 현대사회 속에서 행해지는 실험과정은 실지로는 논리실증주의의 대응원리

저자약력

임경순 교수는 서울대 물리학과를 졸업하고 독일 함부르크 대학 과학사 박사(1991) 학위를 취득하였다. 한국브리태니커 과학 담당 책임연구원(1991-1992), 미국 캘리포니아 대학교(버클리) 박사후 연구원(1992-1993)을 역임하고, 국가과학기술자문회의 전문위원(2002-2003), 대통령 자문 정책기획위원(2003-2005), 국가인적자원위원회(2007-2008), 포항 생명의 숲 가꾸기 국민운동본부 공동대표(2001-2008), 한국과학창의재단 미래융합문화사업단장(2009-2010), 한국과학사학회 부회장, 한국산업클러스터학회 부회장, 한국물리학회 홍보위원장을 역임하였다. 현재 포항공대 인문사회학부 과학사 교수(물리학과 겸임 교수)로 재직 중이며 포스텍 과학문화연구소장, 과학기술진흥센터장을 맡고 있다. 수상 경력으로는 한국과학사학회 논문상(1995), 한국과학기술도서상(1997)을 수상하였고, 주요 저서로는 『과학사 신론』(김영식 공저)(다산출판사, 1999), 『현대물리학의 선구자』(다산출판사, 2001), 『과학을 성찰하다』(사이언스북스, 2012) 등이 있다. (gsim@postech.ac.kr)

나 후기 경험주의의 관찰의 이론의존성이라는 단순도식만으로는 도저히 이해할 수 없는 복합적인 발전 형태를 띠고 있다고 주장하고 있다.

피터 갤리슨과 제한 요소

자신의 박사 학위 논문과 그 뒤를 이어진 일련의 연구를 통해 갤리슨은 20세기 실험물리학에 대한 새로운 과학 발전 모델을 제시하였다. 20세기에 들어서면서 물리학자들은 동질적인 집단이 아니라 실험물리학자와 이론물리학자라는 상대적으로 자율적인 두 집단으로 나뉘어졌다. 그 두 집단들은 상이한 교육과정을 겪었으며, 연구 활동에서 사용하는 그들의 방법이나 기술도 상당히 달랐다.

이론물리학자들은 주로 수학적 방법론을 가지고 나름대로 독자적인 활동을 하고 있으며, 실험물리학자들도 실험장치, 기구의 물질적 조건, 이론의 선별적 수용을 바탕으로 하는 자신들의 부분적으로 자율적인 연구전통을 가지고 연구를 행한다. 예를 들어 거대한 입자가속기를 사용하는 현대의 고에너지물리학 실험에 있어서는 실험 장치 자체가 과학연구의 장기적인 방향을 결정한다.

피터 갤리슨의 논의는 기본적으로 이론과 실험, 실험장치가 지니는 장기지속의 특성을 살피고 있다. 우선 그는 장기적 제한요소, 중기적 제한요소, 단기적 제한요소의 개념을 사용하여 이론, 실험, 실험장치가 상대적 자율성을 가지고 발전하는 모습을 그리고 있다. 피터 갤리슨은 제한요소에 대한 자신의 생각이 페르낭 브로델이 『지중해와 필립2세 시기의 지중해 세계』에서 언급한 지리학적 시간(geographical time), 사회적 시간(social time), 개별적 시간(individual time)의 개념과 연결시키고 있다.^[1] 지리학적 시간은 문명의 커다란 경향을 포괄한다. 사회적 시간은 봉건제와 같은 중기적인 제한요소와 관련된다. 마지막으로 개별적 시간은 특정한 왕이 칙령이나 조약을 공포하는 개별적인 사건 역사를 포함한다. 브로델은 이들 지리학적 시간, 사회적 시간, 개별적 시간을 서로 중첩적으로 활용하여 전쟁의 선포와 같은 특정한 결정이 왜 이루어지는가에 대한 풍부한 설명을 제공하고 있다.

물리학의 역사를 기술하면서 갤리슨은 이 브로델의 장기적, 중기적, 단기적 제한 요소의 개념을 활용하고 있다. 즉 이론적 실험적 믿음, 거대 장치의 존재 등이 실험자들에게 자신들의 믿음과 실험 결과를 수용하는 데 어떻게 작용하는가 하는 것을 다양한 수준에서 설명하고 있다. 예를 들어 중성류 발견 실험에서 이론적인 측면의 장기적 제한 요소는 통일이론이며, 중기적 제한 요소는 게이지 이론이고, 단기적 제한 요소는 모델이나 현상론적 법칙 등이다. 실험적인 측면에서 보면 장기

적 제한 요소는 장치의 유형이고, 중기적 제한요소는 특정한 장비이며, 단기적 제한요소는 개별 실행이다.^[2]

양자역학과 램사우어 효과

20여 년 전 현대물리학의 성립과정을 연구하던 필자는 양자역학의 역사라는 거대한 이야기의 흐름 속에서 역사가들의 기억 속에서 망각되고 있었던 대상의 한 예로서 양자투과효과의 일종인 램사우어 효과의 전개과정을 중심으로 그 현상을 다루던 실험물리학자들의 연구 행태를 살펴보았다.^[3] 이 연구를 통해서 필자는 양자역학의 발전과는 별도로 상대적으로 자율적이고 국소적으로 발전했으며 자체의 생애를 가지고 전개되었던 실험의 존재를 확인할 수 있었다. 램사우어 효과가 비록 양자효과였다고 할지라도 대다수의 실험물리학자들은 양자역학의 발전에 거의 영향을 받지 않았으며, 자신들의 다양한 연구전통 속에서 상대적으로 자율적인 방식으로 자신들의 실험을 진행시켜 나갔다.

램사우어 효과에 관한 실험 이외에도 당시에는 소위 충돌과정이라는 형태로 구분될 수 있는 광범위한 이론적, 실험적 활동이 있었다. 우선 이론적인 작업으로는 넓게 보면 양자역학 분야가 형성되고 있었고, 그 과정에서 충돌 과정에 관한 양자론도 양자역학 분야의 한 부분으로서 막스 보른을 중심으로 연구되고 있었다. 또한 막스 보른이 하고 있던 이론적 작업은 충돌 과정에 관한 수많은 실험들과 밀접히 연결이 되어 있었다.

한편 당시에 진행된 실험으로는 비정상 알파입자 산란 실험, 알파 입자 투과 실험, 전자 회절 실험, 원자핵 내부로부터의 알파 입자 방출에 관한 실험, 제임스 프랑크와 그의 공동 연구자들이 행했던 소위 제 1종 충돌과 제 2종 충돌, 마지막으로 느린 전자의 행태에 관한 실험으로 램사우어 효과에 관한 실험들이 있었다.

충돌과정과 실험

충돌 과정이라는 범주는 여러 측면에서 흥미 있는 연구 대

REFERENCES

- [1] Peter Galison, *How experiments end* (Chicago, The University of Chicago Press, 1987), p. 246; Fernand Braudel, *The Mediterranean and the Mediterranean World in the Age of Philip II* (New York, Haper & Row, 1972).
- [2] Peter Galison, *How experiments end*, p. 254.
- [3] Gyeong Soon Im, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **25**, 269 (1995).

상을 제공하고 있다. 우선 20세기 초에 이르러 물질의 구조와 성질에 대해서 새롭게 연구할 수 있는 다양한 실험 수단이 발견되었다. 음극선의 발견, 방사선의 발견을 시작으로 해서 소위 ‘광선 물리학(ray physics)’은 실험 물리학의 중심이 되게 된다. 1900년부터 1930년에 이르는 동안 넓게 보아서 양자역학이라는 새로운 이론 체계가 형성되었으며, 또한 소위 광선물리학에 속한다고 할 수 있는 수많은 실험들에서 엄청나게 많은 중요한 실험결과들이 나와서 원자의 구조에 대한 이해가 폭발적으로 넓어졌다. 광선의 본질이 전자파이거나 입자이거나 상관없이 광선 물리학이 다루는 것은 대개 충돌과정에 관한 것이었다.

X-선을 쏘거나, 전자를 충돌시키거나, 알파입자를 원자핵에 충돌시켜 원자핵의 구조를 연구하는 것과 같은 모든 실험은 결국 현상적인 측면에서는 충돌 과정이라고 분류할 수 있다. 20세기 초에 행해진 상당수의 실험이 충돌 과정에 관한 것이었다는 사실로부터 이 분야가 이론과 실험과의 관계를 조망해볼 수 있는 좋은 예가 될 수 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다. 보어의 원자 모형을 확증한 프랑크와 헤르츠의 충돌 실험도 충돌 과정이었으며, 아인슈타인의 광양자 가설에 대한 확증 실험이었던 콤프턴과 보테-가이거의 X-선 산란 실험도 이에 해당되었다. 또한 람사우어 효과에 관한 실험도 드브로이 물질파 이론과 연결을 맺고 있었으며, 전자 회절 실험은 물질파 이론을 확증하는 실험으로 평가받았고, 러더퍼드와 그의 공동연구자들에 의해서 전개된 비정상 알파 입자 산란 실험은 보른에 의해 전개된 충돌과정에 대한 양자론과 연결을 맺고 있었다. 결국 양자역학의 결정적인 특징인 비결정론적인 세계관의 출현도 이 충돌 과정에 대한 실험과 직접, 간접적으로 연결을 맺고 있었던 것이다.^[4]

충돌 과정에 관한 논의는 양자역학이라는 새로운 이론 체계가 형성됨에 있어서 그 중요한 한 부분을 차지하고 있다. 즉, 아인슈타인이 발전시킨 광양자 가설과 파동-입자 이중성 개념, 보어가 제창한 원자 내 에너지 준위 개념, 드브로이의 물질파 개념, 하이젠베르크의 행렬역학, 슈뢰딩거의 파동역학, 슈뢰딩거의 파동 방정식에 대한 보른의 통계적 해석, 하이젠베르크의 불확정성 원리, 보어의 상보성 원리 등과 같이 서로 모순되었지만 상호보완적이었던 양자역학 이론 내의 주요 개념들 내에서 충돌 과정에 관한 양자론은 나름대로의 조그마한 영역을 차지하고 있는 것이다.

양자론과 상대적으로 독립적이었던 관련 실험들

프랑크 헤르츠 실험은 보어의 원자 모형을 입증하는 실험으로 기초물리학 교재에 소개되고 있다. 하지만 이 실험은 본

래 보어 원자 모형과는 독립적으로 실험이 진행되었다. 1914년 제임스 프랑크와 구스타프 헤르츠는 전자를 수은 증기의 원자에 충돌시키는 실험을 했다. 이 실험에서 프랑크와 헤르츠는 수은 원자가 4.9 eV 만큼의 에너지를 단계적으로 흡수하는 것을 발견했다. 이 소위 프랑크-헤르츠의 실험은 보어의 원자 모형을 확증하는 실험으로 많은 교과서에 알려져 있다. 하지만 1914년 당시 프랑크와 헤르츠는 보어의 정상 상태에 대한 개념을 알지 못한 채로 이 실험을 했다. 즉 프랑크와 헤르츠의 실험은 전자와 원자의 충돌 실험을 하는 과정에서 얻어진 것으로 보어의 학문적 네트워크와는 다른 연구 전통 내에서 발전한 것이었다.

전쟁이 끝난 뒤인 1919년 프랑크와 헤르츠는 보어의 원자 모형에 대한 논의를 접할 수 있게 되었고, 자신의 실험이 바로 보어의 원자 모형을 확증하는 실험이라는 것을 알게 되었다. 그들의 실험이 보어의 원자 모형 가설을 입증하는 것이었다는 사실은 전쟁이 끝나갈 무렵에서야 물리학자들에게 인식되었다. 물론 1925년 프랑크와 헤르츠는 보어의 원자 모형을 실험적으로 확증한 공로로 노벨 물리학상 수상자가 되었다.

인공 원소 변환 실험도 양자역학과 직접적인 관계 속에서 발전한 것은 아니었다. 1914년 마스던은 섬광계수기로 알파입자의 운동을 연구하는 실험을 하던 중, 대단히 빠르고 알파입자보다 멀리까지 도달할 수 있는 수소입자의 존재를 확인했다. 그는 이것이 확실치는 않지만 아마도 라듐C와 같은 방사성 물질에서 나오는 것으로 추정했다. 전쟁기간 중 러더퍼드는 틸름이 마스던의 이 실험을 면밀하게 검토했는데, 1919년 그는 마스던이 관찰한 수소 입자가 방사성 물질에서 직접 나온 것이 아니라 인공적으로 원소변환이 일어나 생긴 것이라고 하는 놀라운 결론을 내리게 된다. 즉, 라듐C에서 나온 알파입자가 공기 중의 질소와 충돌해서 산소의 동위원소가 생기고 여기서 빠른 속도의 수소가 생겼다는 것이다. 핵변환은 이제 자연적으로 발생하는 것이 아니라 인공적으로도 가능하다는 것이 확인되었다.

원소의 인공변환 실험을 계기로 러더퍼드는 1919년부터 약 10여 년 동안 ‘핵자 위성 모형’을 발전시켰다. 즉 원자핵 속에서는 몇몇 작은 원자핵들이 서로 위성 운동과 유사한 복잡한 운동을 하고 있다는 것이다. 그는 빠른 알파입자로 가벼운 원소의 핵에 매우 가깝게 접근시킬 때 이들 입자들의 상호작용에서 나타나는 힘이 역제곱법칙에 따르지 않는다는 것

REFERENCES

- [4] Gyeong Soon Im, Archive for History of Exact Sciences 50, 73 (1996).

에 주목하고, 이것이 핵 내부의 복잡한 구조 때문이라고 설명했다. 이외에도 그는 핵 내부에 전자가 양성자와 결합하여 중성을 나타낸다는 가설을 내놓았는데, 이런 주장은 1932년 제임스 채드윅이 중성자를 발견함으로써 비로소 완전한 모습을 띠게 된다.

양자역학이 발전함에 따라 핵자와 알파입자와의 상호작용에서 나타나는 힘의 관계가 역제곱법칙에서 벗어나는 것이 핵자의 구조적인 문제가 아니라, 고전역학에서 벗어나는 양자역학적 효과라는 주장이 대두되었으나, 러더퍼드는 이것을 받아들이지 않았다.

양자투과효과 및 모트의 충돌이론

1928년 러시아의 젊은 과학자 가모브(George Gamow)는 핵 내부에서 빠져나오는 알파입자의 에너지가 핵자 내의 포텐셜 장벽에 비해서 상당히 낮은 것에 주목했다. 그는 이런 현상을 높은 에너지 장벽을 낮은 운동에너지로 뛰어넘을 수 있는 일종의 양자투과효과로 해석함으로써 핵붕괴 현상을 성공적으로 설명했다. 거의 같은 시기에 미국 프린스턴 대학의 로널드 거니와 에드워드 콘돈도 이와 비슷한 견해를 발표했다. 이들의 작업은 과학자들로 하여금 핵 현상을 설명하는 데 새로운 양자역학을 적극적으로 활용하게 만들었을 뿐만 아니라, 핵붕괴를 일으키는 데는 반드시 커다란 에너지의 입자만이 가능한 것은 아니라는 것을 실험물리학자들에게 인식시켜주어 핵물리학의 실험 방향에도 커다란 영향을 미쳤다.

1928년부터 케임브리지의 모트는 미국 칼텍의 오펜하이머의 견해에 따라 충돌현상에 파울리의 배타원리를 적용하여 알파 입자 및 전자의 산란 현상을 면밀하게 양자역학적으로 기술해나갔다. 1929년 모트는 보스-아인슈타인 통계를 이용해서 계산한 양자역학적 알파 입자의 산란값과 러더퍼드가 계산한 고전적인 산란값 사이에는 45° 일 때 최대값 2의 비율로 차이가 나는 것을 계산했다. 모트의 계산 결과는 곧 러더퍼드의 밑에서 연구하던 케번디시 연구원들이었던 블랙킷과 채드윅의 실험에 의해서 1930년 마침내 입증되었다. 이때 블랙킷은 자신이 1920년대를 통해서 계속 개량을 해오던 구름상자의 방법을 통해서 이것을 확인했으며, 채드윅은 러더퍼드와 함께 측정을 계속해오던 섬광계수기 방법에 의해 이것을 입증했다.

결어: 양자역학과 실험의 관계

충돌 과정과 관련된 실험은 양자역학의 이론체계 전체와 직접적으로 관련을 맺고 있었던 것은 아니었다. 프랑크와 헤르츠의 실험은 애초에는 보어의 원자 모형과는 직접적인 연관이 없이 진행되었다. 러더퍼드는 충돌과정에 관한 양자론의 도움이 없이도 비정상 알파입자 산란실험을 진행시켜 나갔고, 심지어 양자역학적인 설명에 대해서는 암묵적인 거부감마저 표실했다.

컴프턴의 실험도 밀리컨의 프랑크 상수 h 의 결정 실험과 마찬가지로 아인슈타인의 광양자 가설의 전체 논의와 연결된 것은 아니었다. 이런 논의들은 상당 부분 공통의 개념들을 사용하고 있었지만, 학자에 따라서는 컴프턴 효과를 도플러 효과의 한 예로 이해하는 등 파동론적인 해석도 가능했기 때문이다. 물질파의 존재를 입증한 데이비슨과 저머, 그리고 G. P. 톰슨의 전자 회절 실험의 경우에도 하이젠베르크의 불확정성 원리나 보어의 상보성 원리와는 직접적인 상관이 없었다. 더구나 당시 미국의 과학자들은 불확정성 원리나 상보성 원리와 같은 철학적 논의에 열매이지 않고도 나름대로의 실용주의적인 전통 속에서 자신들의 실험을 전개시켜 나갔다. 램사우어와 타운슨트와 같은 과학자들은 양자론의 도움 없이도 자신들의 실험을 성공적으로 이끌어 나갔던 것이다. 이들 두 사람들 사이의 논쟁에서는 이론적인 것보다는 실험 장치의 차이가 더욱더 근본적인 대립의 원인이었다.

제한된 범위에서 나타난 현상이지만 양자역학의 형성 과정이 충돌 과정에 대한 실험과 밀접한 연관을 가지고 진행된 경우도 있었다. 1918년부터 행해진 프랑크와 그의 공동 연구자들의 실험은 분명히 보어의 원자 모형에 바탕을 두고 수행된 것이었다. 괴팅겐에서 스포너, 민코프스키, 엘자서 등이 행한 램사우어 효과에 대한 실험도 또한 양자론을 염두에 둔 이론의존적인 실험이었다. G. P. 톰슨의 전자 회절 실험도 역시 드브로이 물질파 이론에 바탕을 둔 실험이었다. 명백히 이들 실험은 이론의존적이었다.

1930년 이후에 채드윅과 블랙킷이 행한 비정상 알파 입자 산란 실험은 과거의 러더퍼드와 채드윅의 실험과는 달리 분명히 모트의 양자역학적인 충돌과정 이론에 바탕을 둔 실험이었고, 그 실험의 결과로써 그들은 모트의 충돌과정 이론을 입증하였다. 양자역학의 형성과정에서 실험과 이론은 서로 상대적인 자율성을 가지며 동시에 서로 영향을 주고받으며 함께 성장했던 것이다.