QED 노벨상 수상 50주년 기념

QED가 완성되기까지의 역사와 의미

DOI: 10.3938/PhiT.24.022

임 채 호

QED: Theory and History

Chaiho RIM

We describe what QED is and how QED has got its current form.

1965년 노벨물리학상은 도모나가(Sin-Itiro Tomonaga, 일본, 1906-1979), 슈윙거(Julian Seymour Schwinger, 미국, 1918-1994), 파인만(Richard Phillips Feynman, 미국, 1918-1988)에게 수여되었다. 노벨위원회는 이들이 양자전기동역학(Quantum Electrodynamics, QED)에 대한 기본적인 연구를 통해 소립자 연구에 지대한 공헌을 했다고 평가했다. QED가 무엇이길래 노벨위원회는 이들의 업적을 그렇게 높이 산 것일까?

QED는 전하를 가진 물질이 만들어내는 모든 자연현상을 다룬다. 19세기에 알려진 자연현상으로는 전하끼리 작용하는 힘(쿨롱의 법칙), 전류가 만드는 자석(암페어 법칙), 자석으로 생산하는 전기(패러데이 법칙), 그리고 전기와 자기가 어울려 만드는 전자파(맥스웰의 전자파)가 있었다. 여기에서 동역학이란 전하나 자석이 정지해 있는 것이 아니라, 진동할 때 나타나는 현상이 주된 관심사라는 뜻이다. 따라서 전기동역학에서는 전류와 전자파가 전하의 움직임과 어울려 나타난다. 우리는 모든 전기와 자기 현상을 종합한 맥스웰 방정식을 고전적인 전기동역학(classical electrodynamics)이라고 부른다.

그런데 전기 동역학은 20세기에 들어서면서 급격한 변화를 맞게 된다. 그 변화의 중심에는 원자가 있었다. 물질을 구성하는 원자와 분자를 자세히 관찰할 수 있게 됨에 따라 전하를 가진 물질들이 보여주는 자연현상은 고전적으로 알아왔던 방식

과는 다르다는 것이 알려졌다. 고전적인 생각으로 보면, 원자 안에서 전자가 공전하면 전자파가 나와야 한다. 그러나 원자는 저절로 전자파를 발생시키지 않는다. 이러한 이상한 전자의 움직임을 파악하기 위해, 과학자들은 전자를 입자 대신 물질파로 보기 시작했다. 이에 따라 전기동역학에도 물질파의 개념을 도입해야만 했다.

한편 원자 안에서 공전하는 전자는 아주 빠른 속력으로 움직인다. 거의 광속에 접근하는 속력이다. 물질이 광속에 가까운 속력으로 움직이게 되면 새로운 자연현상이 보인다. 1905년 아인슈타인이 발견한 특수상대론에 의하면, 전자의 운동에너지는 고전적으로 생각하던 에너지가 아니라 질량에너지로 고려하는 새로운 형태의 에너지로 표현해야 한다.

결국 원자라는 세계에서 새롭게 발견되는 자연현상을 설명하려면, 양자현상과 특수상대론이라는 2가지의 새로운 개념을 도입해야만 했다. 그 결과 고전적인 전기동역학은 20세기 이후 양자전기동역학이라는 새로운 변신을 하였다.

1920년대 중반에 시작하여 1940년대 후반에 완성된 QED는 인류가 찾아낸 값진 인류의 유산이다. 원자를 가장 정밀하게 다룰 수 있는 이론을 만나게 되면서, 물질을 자유자재로 다룰 수 있게 되었고, 원자보다 더 작은 세계에 존재하는 핵과 소립자도 이해할 수 있는 기틀을 만들었다. QED를 완성하면서 얻은 지식을 바탕으로 우주 안에 존재하는 모든 물질의 구조와 우주초기까지도 다룰 수 있는 새로운 이론들을 개발할 수 있게 되었기 때문이다. 그러나 QED가 만들어지는 과정에는 커다란 굴곡이 있었다. 성공과 좌절, 그리고 한계를 극복하고 이루어낸 성공의 과정이 있었다. QED가 어떤 과정을 거쳐 만들어졌고, 이렇게 완성된 QED가 향후 물리학 발달에 어떤 영향을 끼쳤는지 알아보자.

저자약력

임채호 교수는 스토니브룩 대학교에서 박사 학위(1984년)를 취득하고 1984년 전북대학교 조교수로 시작하여 현재 서강대학교 정교수로 재직 중이다. 저서로 등각장론(민음사, 1993) 및 교양으로 읽는 물리학강의(지성사, 2015) 등이 있다. (rimpine@sogang.ac.kr)

QED의 시작과정

1. 양자의 도입과정

QED는 전자와 빛을 양자현상으로 다룬다. 양자라는 개념은

20세기 들어서면서 나타났다. 전자는 전하를 띤 물질이다. 따라서 전자를 입자로 취급하는 것은 당연해 보인다. 하지만 전자는 원자 안에서 핵 주위를 공전하는 모습에서 문제가 생겼다. 전자가 공전하게 되면, 전자는 원자를 안테나로 만들어 전자파를 외부로 송출할 것이기 때문에, 외부에서 에너지를 공급 받지 못한다면 자신의 모든 에너지를 잃어야 한다. 그러나 자연에서 이런 원자는 발견되지 않는다. 보어는 원자가 안정하다는 것을 전자의 공전궤도가 특별하다는 것으로 보았는데, 나중에 알고 보니 보어의 생각은 전자를 물질파로 보는 것과 같은 생각이었다.

전자가 물질파라는 아이디어는 드브로이가 1924년 주장하였고, 1927년 데이비슨과 거머가 전자선을 이용하여 전자가 간섭을 일으킨다는 사실을 실험으로 확인했다. 이러한 와중에 1926년 슈뢰딩거는 물질파를 기반으로 전자의 운동을 예측할 수 있는 슈뢰딩거 방정식을 제시했다. 슈뢰딩거 방정식 덕분에 과학자들은 원자 안에 놓인 전자가 가질 수 있는 에너지를 정밀하게 계산해낼 수 있었다. 한 걸음 더 나아가 분자의 화학반응도 슈뢰딩거 방정식으로 설명이 되었다.

양자라는 개념의 또 다른 측면은 빛에서 나왔다. 파동을 입자의 흐름으로 해석하는 시각이다. 빛은 전자파이다. 적어도 20세기 이전에는 맥스웰이 찾아낸 전자파로 빛이 해석되었다. 그러나 전자파에 입자의 성격이 있다는 실마리는 플랑크에 의해 밝혀졌다. 그는 뜨거운 물체가 내는 빛의 색 분포를 설명하는 과정에서 양자(광자)라는 개념을 도입했다. 그리고 광전효과(빛을 쏘이면 금속표면에서 전류가 나오는 현상)에서 그 실체가 증명되었다. 아인슈타인은 광전효과를 광자의 작용으로 해석했고, 밀리컨은 실험을 통해 자신이 파동이라고 믿었던 빛이 입자의 성격도 있다는 것을 증명했다. 원래 양자라는 용어는 플랑크가 빛이 덩어리처럼 보인다는 현상을 설명하기 위해 도입했지만, 지금은 원자세계에서 발견되는 모든 입자를 총칭하는 대명사가 되었다.

이후 빛과 전자를 고전적으로 보던 견해는 수정이 되기 시작했다. 전자와 광자는 파동과 입자의 특성을 넘나든다. 이러한 특성을 1927년 하이젠베르크는 불확정성 원리라는 새로운 개념으로 재정립했다. 보어는 이러한 특성을 상보성이라는 용어로 불렀다. 양자는 입자의 특성과 이에 반하는 파동의 특성을 모두 가지고 있지만, 입자의 특성을 보면 파동의 특성은 보이지 않고, 파동의 특성을 보면 입자의 특성이 보이지 않는다. 이처럼 양자에 대한 개념을 정립하는 과정을 거치면서 전자는 물질파로, 광자는 입자로 다루는 방식이 학계의 정설로 굳는 듯 했다.

그러나 입자와 파동을 바라보는 입장의 갈등은 상존해 있었다. 특히 보른이 물질파를 확률로 다루어야 한다는 해석을 받

표하자 아인슈타인은 “신은 주사위를 던지지 않는다.”라는 말로 응수하면서 확률적 해석에 반대했고, 슈뢰딩거는 ‘슈뢰딩거 고양이’라는 예화를 들면서 고양이 생사도 양자세계의 입장에서 확률로 바라보아야 하는가, 양자세계와 고전세계의 경계는 어디인가에 대한 의구심을 나타냈다.

디랙은 1927년 이러한 입자와 파동의 갈등을 해결하는 방법을 생각해냈다. 빛을 광자들의 집합으로 본다는 것은 빛을 입자로 다루는 견해다. 이와 달리 빛을 전자파로 표시한다는 것은 빛을 파동으로 다루는 견해다. 그렇다면 전자파를 입자와 동등하게 다룰 수 있는 방법이 있는가? 디랙은 전자파를 나타내는 파동의 각 모드들을 진동자처럼 취급하기로 했다. 각 진동자들은 광자를 생성하고 소멸하는 연산자로 대응시킬 수 있다. 생성과 소멸 연산자가 하이젠베르크가 도입한 것처럼 불확정성 원리를 만족하도록 만들면, 빛을 나타내는 파동도 입자와 똑같은 입장에서 다룰 수 있다.

디랙은 각 진동자들을 양자화하는 과정을 제2양자화라고 불렀다. 그리고 이렇게 양자화된 물질파를 양자장이라고 부른다. 이에 비해 하이젠베르크가 입자의 좌표와 운동량 사이에 도입한 불확정원리는 제1양자화라고 부른다. 디랙은 양자장을 도입함으로써 빛을 입자로 보는 입장과 빛을 파동으로 보는 입장 사이의 갈등을 극복할 수 있었다.

디랙의 주장은 큰 반향을 일으켰다. 그렇다면 물질과 또한 이같은 입장에서 다룰 수 있지 않을까? 같은 해에 조르단이 처음으로 물질파를 양자장으로 바꾸려고 시도했다. 그리고 이 과정에서 제2양자화된 연산자는 광자와는 다른 형태의 교환연산자 공식을 만족해야 한다는 사실을 위그너와 함께 밝혔다. 디랙이 도입한 연산자는 광자를 생성 소멸시킨다. 그런데 광자는 보존에 해당하므로 하이젠베르크가 도입한 교환자 공식($qp - pq = i\hbar$)을 만족한다. 이에 비해 조르단이 도입한 연산자는 전자를 생성 소멸시킨다. 전자는 페르미온이고, 파울리가 찾은 것처럼 배타원리를 만족한다. 그 결과 전자를 생성, 소멸시키는 연산자는 반-교환자 공식($qp + pq = i\hbar$)을 만족한다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 입자와 파동으로 보는 갈등은 일단 봉합되었다.

2. 상대론의 도입과정

특수상대론은 1905년 아인슈타인에 의해 도입되었다. 자연현상을 표현하는 방정식은 어떤 관성계에서 보아도 같은 형태로 보여야 한다. 그리고 진공에서의 광속은 어떤 관성계에서 보아도 같아야 한다. 1920년대 당시 양자와 관련된 최대의 문제는 슈뢰딩거 방정식을 특수상대론과 결부시키는 것이었다. 슈뢰딩거 방정식은 양자의 속도가 광속에 비해 느릴 때 적용되는 방정식이다. 어떤 관성계에서 보아도 같은 형태로 표시되

려면 슈뢰딩거 방정식을 어떻게 발전시켜야 하는가?

슈뢰딩거는 시간에 따라 변하는 파동의 모습을 하밀토니안이 결정한다고 보았다. 하밀토니안은 총에너지(운동에너지와 위치 에너지의 합)에 해당되며, 위치와 운동량으로 표시된다. 디랙은 슈뢰딩거처럼 전자기파 역시 ‘하밀토니안’이 시간의 변화를 만들어내는 것으로 이해했다. 슈뢰딩거 관점에서 보면 전자기파는 물질파처럼 이해되고, 전자기파를 양자장으로 구성하는 것은 당연하게 보였다.

그러나 하밀토니안으로 쓰는 방식으로는 상대론을 도입하는 문제가 쉽지 않다. 파울리와 하이젠베르크는 하밀토니안 대신 라그랑지안으로 전자기파의 움직임을 다루면서 양자화하는 방식을 제시했다. 이 방식을 쓰면 상대론을 도입하는 것이 아주 간단하다. 디랙도 1928년 라그랑지안을 이용하여 전자가 만족하는 방정식을 상대론적인 형태로 썼다.^[1] 그리고 물질파의 모드는 반-연산자를 만족한다고 생각했다.

원래 라그랑지 방식은 뉴턴의 운동방정식을 다루는 또 다른 방법이었다. 따라서 디랙은 라그랑지안 방식이 고전적인 입자를 다루는 방식이라고 보았다. 그리고 전자를 양자화하려면 슈뢰딩거 방정식처럼 하밀토니안 방식으로 취급해야 한다고 보았다. 이러한 관점에서 디랙은 디랙방정식을 상대론적인 양자역학으로 취급하고, 상대론적인 전자의 움직임을 고전적인 입자로 다루는 방식을 연구하기 시작했다.

원래 전자는 스핀을 가지고 있기 때문에 2개의 성분을 가진 물질파로 표시된다. 그런데 디랙은 물질파가 시간적으로 변하는 모습을 시간의 1차 미분으로 표시해야 한다고 보았기 때문에, 물질파가 아인슈타인의 상대론과 부합하고, 시간의 1차 미분으로 쓰여지는 파동방정식을 만들고 싶었다. 그 결과는 의외였다. 디랙이 찾아낸 파동방정식에는 음의 에너지를 가지는 2개의 성분이 더 생겨났다. 이것은 양의 에너지를 가지는 물질파와 음의 에너지를 가지는 물질파가 동시에 나타난다는 뜻이다.

원래 아인슈타인이 찾은 정지 질량에너지는 유명한 $E=mc^2$ 이다. 전자가 움직이면 운동에너지까지도 고려해야 한다. 그 결과 에너지는 $E^2=(mc^2)^2+(pc)^2$ 의 관계를 만족한다. 결국 전자 에너지는 양의 제곱근 $E=\sqrt{(mc^2)^2+(pc)^2}$ 으로 표시된다. 디랙은 양의 에너지를 가진 전자만을 고려했는데, 상대론을 만족하는 방정식에는 음의 제곱근을 가지는 전자가 동시에 나타나게 되는 것이다. 이를 어떻게 해석해야 하는가?

사실 디랙이 디랙방정식을 발견하기 이전에 이미 클라인은 $E^2=(mc^2)^2+(pc)^2$ 을 양자화하는 과정을 써서 파동방정식을 만든 적이 있었다. 클라인이 찾은 방정식은 슈뢰딩거 타입이 아니라 시간의 2차 미분으로 표시되는 형태이었다. 그런데 여기에도 똑같은 문제가 나타났다. 즉, 파동의 에너지가 음이 되

는 에너지가 존재했던 것이다. 상대론을 적용하면, 일반적으로 양의 에너지뿐 아니라 음의 에너지를 가진 파동도 같이 나타난다.

QED의 성공과 위기

디랙은 음의 에너지가 존재한다는 것을 물리적으로 설명하기 위해 진공을 다시 해석했다. 그동안 모든 사람들은 진공을 아무것도 없는 세계로 생각했으나, 디랙은 달랐다. 그는 진공을 음의 에너지를 가진 전자(전자바다)로 가득 찬 세계로 생각했다. 전자는 파울리의 배제율을 만족하기 때문에, 전자가 이미 가득 차 있다면 양의 에너지를 가진 전자는 전자바다에 더 이상 들어갈 수 없다. 진공이란 전자가 이미 가득 찬 공간이다.

그렇다면 음의 에너지를 가진 전자를 빼낼 수는 없을가? 충분한 에너지를 공급한다면 불가능하지 않을 것이다. 전자바다에 있는 전자를 빼내려면 에너지를 얼마나 공급해야 하는가? 전자바다에 정지해 있는 전자는 $-mc^2$ 이라는 음의 에너지를 가지고 있다. 이와 달리 전자바다 밖에서 존재하는 전자는 $+mc^2$ 이라는 양의 에너지를 가지고 있다. 따라서 전자바다에서 전자 하나를 진공 밖으로 빼내려면, 적어도 $2mc^2$ 이라는 에너지를 공급해야 한다. 그 결과 전자바다에는 구멍이 하나 생기고, 전자바다 밖에는 양의 에너지를 가진 전자가 하나 존재한다.

디랙은 전자바다에 생긴 구멍을 반입자로 해석했다. 전자의 반입자를 최초로 도입한 것이다. 상대론적인 양자역학을 만들면 반입자가 나타난다. 이러한 디랙의 제안은 1932년에 반입자가 우주선 입자 궤적에서 발견됨에 따라 디랙의 해석은 제대로 된 것이임이 입증되었다.

전자의 스핀은 자석과 반응한다. 전자의 스핀이 자석역할을 하는 것이다. 전자의 자석 크기를 나타내는 양이 자기모멘트이고, 이 양은 스핀에 비례한다. 이 비례하는 양을 g-factor라고 부른다. 그런데 디랙 방정식에 의하면, g-factor가 2가 된다. 이 결과는 슈뢰딩거 방정식으로는 설명이 되지 않는다. 반입자의 등장과 함께 g-factor는 디랙이 구축한 QED가 옳다는 것을 보여주는 이정표이기도 하였다. 디랙은 1933년 슈뢰딩거와 함께 노벨상을 공동수상한다.

그러나 QED 성공은 여기까지인 듯싶었다. 디랙 방정식에는 심각한 문제가 숨어있었다. 무한대의 양이 출현했기 때문이다. 전자는 전하를 가지고 있기 때문에 전자파와 반응한다. 전자파

REFERENCES

- [1] P. A. M. Dirac, Proceedings of the Royal Society A117, 610 (1928).

와 반응하는 모습은 섭동이론으로 이해할 수 있다. 전자는 전자파를 잠깐 방출했다가 흡수하기도 하고, 전자파는 전자와 반전자를 잠깐 만들었다가 사라지게 할 수도 있다. 이러한 자연 현상은 전자와 전자파가 반응하여 만들기 때문에 섭동이론을 써서 그 효과를 알아볼 수 있다. 그러나 전자파 때문에 달라지는 전자의 에너지를 구해보면, 2차 섭동항에서 심각한 문제가 나타난다. 에너지가 무한대가 되기 때문이다.

반입자의 등장은 여러 가지 개념적인 문제를 일으켰다. 디랙은 디랙방정식이 슈뢰딩거 방정식처럼 전자 1개를 다루는 식이라고 보았다. 슈뢰딩거 방정식을 사용할 때는 페르미온의 개수가 늘어나는 법이 없다. 그런데 반입자의 등장으로 인해 에너지만 충분하면 입자와 반입자가 쌍으로 생겨날 수 있다. 즉, 한 개의 전자가 3개의 페르미온(전자 2개, 반전자 1개)으로 늘어날 수 있는 가능성이 얼마든지 있다.

진공에 대해서도 새로운 문제가 생겼다. 진공이라 하더라도 입자와 반입자가 쌍으로 생겨났다 없어지는 일이 수없이 되풀이 될 수 있다. 이러한 쌍생성, 쌍소멸이 생기면 진공의 에너지가 달라질 수 있다. 그런데 진공의 에너지가 섭동이론으로 계산하면 무한대가 된다. 디랙은 무한대가 나오는 문제를 해결하기 위해 노력했지만 허사였다. 그래서 그는 양자 전자기학을 더 이상 신뢰할 수 없다고 생각했다.

QED의 부활과 완성

QED에서 문제가 생길 즈음, 세계는 2차대전 of 소용돌이로 들어갔고, 많은 학자들은 연구실에 남아 있을 수가 없었다. 전쟁이 끝나서야 QED의 연구가 다시 시작되었다. 전쟁의 와중에 많은 학자들이 미국으로 이주하게 되었고, 전쟁이 끝나자 학문의 중심은 미국으로 옮겨갔다. 학자들이 다시 연구를 진행하기 위해서는 기존에 진행되었던 연구에 대한 이해가 필요했다. 승전국이었던 미국에서는 새로운 환경 속에서 연구의 맥을 잇기 위해 QED와 관련된 워크숍이 마련되었다.

1947년 6월에 열린 Shelter Island conference는 그 기폭제가 되었다. 젊고 유망한 학자들을 모으고, 기존의 학자들이 QED에 대한 연구를 강의했으며, 최근 실험실에서 진행되던 실험에 대한 소개도 있었다. 특히 Lamb-shift(수소 원자 안의 전자가 가지는 에너지에 대한 연구)는 큰 관심을 끌었다.

수소원자에는 전자가 하나 존재한다. 보어의 원자모형에 의하면 전자가 가지는 두 번째 높은 에너지로는 S와 P 상태가 존재한다. 전자의 스핀을 고려하지 않는다면 S에는 하나의 상태가, P에는 3개의 상태가 존재한다. 보어의 이론에 의하면, 이 S와 P상태의 에너지는 같다. 그런데 전자는 스핀을 가지고 있고, 전자가 핵을 공전하기 때문에 전자의 에너지는 스핀 때

문에 달라진다. 디랙의 이론에 따르면 P 상태는 2개의 다른 에너지 상태로 분리되고, P의 낮은 에너지 상태는 S 상태의 에너지와 같게 된다.

그런데 실제 실험을 해보니 같아야 할 두 상태의 에너지에 미세하게 차이가 있다는 것이 알려졌다. 이 발견을 Lamb-shift라고 부른다. 당시 전쟁 중에 개발되었던 전자파 기술이 이러한 정밀 실험을 가능하게 하였다. 이 미세한 에너지 차이를 어떻게 설명할 것인가?

이 문제를 시작으로 젊은 학자들은 QED에 관한 연구를 시작했다. 슈윙거, 도모나가, 파인만, 다이스 등은 디랙이 QED에서 발견하였던 문제점들을 새로운 관점에서 파악하게 되었고, QED를 한결음 더 진보된 형태로 발전시켰다.

QED의 부활을 시도할 당시 여러 학자들 중에서 슈윙거가 단연 선두에 있었다. Shelter Island Conference에서 돌아온 슈윙거는 Lamb-shift를 설명하기 위해 씨름했다. 그는 디랙의 이론을 사용하여 전자의 에너지가 달라지는 모습을 계산하고자 했다. 슈윙거는 디랙 방정식에 나오는 전자파를 디랙이 도입한 것처럼 제2양자화시켰다. 그리고 물질파와 전자파를 연산자의 변환을 통해 새롭게 정의하여 방정식을 다시 표현했다. 슈윙거의 목적은 전자와 전자파가 반응하는 모습을 가능한 분리하여 보자는 것이었다. 그는 이러한 변환을 통해 기존에 나타났던 무한대를 분리시켰고, 이 무한대를 원래 있던 질량에 흡수하여 새롭게 정의된 질량을 만들어 냈다. 그는 새롭게 정의된 질량을 실험실에서 관찰되는 전자의 질량과 동일시켰다. 이렇게 질량을 다시 정의하는 조치를 재규격화라고 부른다. 이러한 재규격화는 이미 다른 과학자들도 시도한 적이 있었다. 결국 슈윙거는 질량을 재규격화하여 무한대양을 제거한 후 2차 섭동을 통해 수소원자의 에너지에서 나타난 Lamb-shift를 설명할 수 있었다.^[2]

슈윙거는 자신의 방법을 더욱 발전시켜 g-factor도 계산했다. 디랙 이론에 의하면 2이지만 섭동에 의하면 약간의 차이가 난다. 이 차이는 당시에 갈륨에 자장을 걸어 찾아낸 값과 아주 가까웠다. 실험값은 2.00114인데 비해, 슈윙거가 계산한 값은 2.0016이었다. 이 값을 계산하는 데에도 역시 무한대가 나왔지만 전하를 재규격화함으로써 무한대를 없앴다. 디랙방정식을 재규격화하여 무한대를 흡수하고, 섭동과정을 거쳐 실험값과 비교할 수 있는 양을 계산해낸 것이다. 슈윙거가 찾아낸 계산 방법은 QED에 대한 신뢰를 회복하는 계기가 되었다.

그러나 슈윙거의 계산방식은 아주 복잡했다. 슈윙거의 방법은 디랙 방정식에 나오는 광자와 전자를 양자장으로 만들고,

REFERENCES

- [2] J. Schwinger, Phys. Rev. **74**, 1212 (1948).

이들을 변환시켜 원하는 물리량을 찾아내는 아주 복잡한 방식이다. 슈윙거의 방법은 물리적인 의미를 쉽게 설명할 수 있는 장점이 있었지만, 문제는 계산이 너무 복잡해서 당시에 슈윙거 이외에는 그 과정을 이해할 수 없다는 것이었다. 그의 강의에 수많은 사람이 참석했지만, 그의 계산방식을 이해하는 사람은 별로 없었다.

한편 디랙이 1928년 디랙 방정식을 도입할 당시에 돌아가 보면, 디랙은 전자를 상대론적으로 다루기 위해 라그랑지안 방식을 사용했다. 디랙은 전자를 먼저 고전적인 입자로 취급하고 이를 통해 양자역학으로 대응시키려고 했다. 디랙의 이러한 방식을 계승한 사람이 파인만이다.

파인만은 슈윙거와는 전혀 다른 방식으로 전자를 다루었다. 그는 지도교수이었던 월러의 영향을 받아 시공간의 한 점에서 다른 점으로 입자가 전파하는 방식으로 전자의 움직임을 파악하고자 했다. 그는 길적분이라는 아이디어를 사용하여 한 점에서 다른 점으로 전파하는 확률을 도입했는데, 이 확률은 슈뢰딩거 방정식을 만족한다. 슈뢰딩거 방정식은 하밀토니안이 시간의 변화를 주도하는데 비해, 파인만이 도입한 길적분은 라그랑지안이 확률을 주도한다. 디랙이 추구하고자 했던 일을 파인만이 길적분을 통해 돌피구를 만든 것이다.

라그랑지안은 위치와 속도를 이용하여 입자를 다루는데 비해, 하밀토니안은 위치와 운동량을 사용하는 방식이다. 라그랑지안 방정식은 상대론적으로 움직이는 입자의 궤적을 다루는데 적합하고, 하밀토니안은 하이젠베르크의 불확실성을 나타내는데 적합하다. 두 가지 방식은 보는 관점이 서로 다르기 때문에, 그동안 하밀토니안 방식으로 길들여져 있던 학계는 파인만이 도입한 길적분을 받아들이 준비가 전혀 되지 않은 상태였다. 파인만이 길적분을 워크샵에서 발표하자, 보어를 비롯해 많은 과학자들은 파인만의 강의를 이해할 수가 없었다. 더구나 반입자를 다루기 위해 파인만은 시간이 과거로 흘러가는 경로를 잡았다. 이러한 방식은 학계가 받아들이기에 너무 생소한 것이었다.

파인만은 학계의 이런 반응에 상심했지만, 낙담하는 대신 길적분 방식을 통해 슈윙거가 계산한 결과를 쉽게 계산할 수 있다는 장점을 알렸다. 슈윙거 방식과 길적분 방식은 전혀 다르게 보이지만, 계산한 결과는 같다. 슈윙거 방식은 아주 복잡하지만 길적분 방식은 눈에 보이는 방식으로 쉽게 구할 수 있다.

한편 유카와와 동문이었던 도모나가 또한 슈윙거의 방식과 비슷한 일을 일본 내에서 수행하고 있었다. 1929년 디랙과 하이젠베르크가 일본을 방문하여 도쿄의 리켄 연구소에서 강의할 때 유카와와 함께 그 강의를 듣고 매우 감동을 받았다. 그가 졸업한 후 리켄 연구소로 옮겨 니시나 그룹에 들어간 후, 1937년에는 하이젠베르크가 있던 라이프찌히 대학으로 연구를

떠났다. 그러나 1939년 전쟁이 발발하자 귀국할 수밖에 없었다. 전후에 다시 핵력과 관련한 양자장론 연구를 연구실의 후배들과 같이 수행하면서 무한대를 흡수하는 방식을 연구하였다. 도모나가 추구했던 양자장론의 방식은 슈윙거의 방식과 유사했다.^[4] 도모나가의 위대한 점은 패전국의 분위기에서 궁핍했던 시절을 극복하면서 연구실 내의 젊은이들과 어울려 연구를 수행했던 점이다. 이후 오펜하이머가 도모나가의 연구그룹이 얻은 결과를 서구에 알림으로써 도모나가 연구실 그룹은 다시 서구와 소통하게 되었다.

다이슨은 파인만의 길적분 방식과 슈윙거-도모나가의 양자장 변환 방식이 같은 것이라는 것을 보였다. 그는 섭동론을 사용하는 방식을 이용하여 파인만과 슈윙거가 같은 계산을 하고 있다는 것을 보였다. 다이슨의 노력으로 파인만의 길적분이 유용하다는 것이 알려졌다. 특히 파인만 도표로 불리는 그림은 수식을 길게 표시하기보다는 그림의 형태로 보여줌으로써 어떤 계산을 하는지를 간단하게 보여주기 때문에 이제는 물리학계에서 파인만도표가 정설로 굳게 되었다.

QED의 영향과 의의

다이슨은 파인만의 길적분 방법을 사용하여 섭동론을 체계적으로 만들었다.^[5] 그는 섭동론에서 나타나는 무한대를 어떻게 흡수할 수 있는지를 체계적으로 연구했고, QED의 경우 무한대를 원래 있던 질량, 전하량, 그리고 파동함수에 흡수시켜 재규격화할 수 있음을 보였다. 원래 있던 물리량을 재규격화하면 더 이상 다른 무한대가 나오지 않는 이론을 재규격화가 가능한 이론이라고 부른다. QED가 대표적으로 재규격화가 가능한 이론이다. 재규격화된 QED는 이제 정밀한 계산을 할 수 있는 이론으로 변했다. 한때 섭동론에서 제기된 무한대 때문에 신뢰를 잃은 적도 있었지만, 이러한 한계가 극복됨으로써 화려한 부활을 하게 되었다.

QED가 재규격화 가능한 이론이라는 점은 재규격화가 가능한 이론만이 자연을 나타내는 기본적인 이론일 것이라는 신념을 심어 주었다. 이후 재규격화 이론을 찾는 일이 20세기 후반에 집중되었다. 이 과정에서 QED뿐 아니라 양-밀스 이론으로 대변되는 양자 전기약력 이론과 양자색역학이 급격한 발전을 하였다. 전기약력이란 전자기와 핵붕괴를 통합하는 이론이며, 이휘소 박사도 이 통합이론에 큰 역할을 하였다.

REFERENCES

- [3] R. Feynman, Phys. Rev. **76**, 769 (1949).
- [4] S. Tomonaga, Phys. Rev. **74**, 224 (1948).
- [5] F. Dyson, Phys. Rev. **75**, 1736 (1949).

무한대로 축발된 재규격화이론은 스케일에 따라 물리량이 달라진다는 새로운 사실을 알려주고 있다. 우리가 관찰하는 전하량의 세기가 보는 스케일에 따라 달라진다는 점이다. 전하량의 크기를 나타내는 미세구조 상수는 원자에서 볼 때는 $1/137$ 이지만, 핵 속 깊은 곳에서 보면 그 크기가 더 커진다. 전자의 전하량이 미시세계로 들어갈수록 커진다는 사실은 상당한 충격으로 다가왔다. 양자색역학은 핵력의 상호작용을 나타내는 양자장론이다. 양자색역학으로 보면 쿼크와 글루온은 아주 강력한 힘을 주고받지만, 재규격화 때문에 양성자나 중성자 속 깊은 곳으로 들어가면 쿼크와 글루온이 주고받는 힘은 오히려 약해진다. 쿼크와 글루온들은 핵 속 깊은 곳에서는 자유롭게 움직이고 있다. 섭동이론에서 나온 무한대가 자연의 새로운 질서를 알려주고 있었다.

물질파가 가진 특성 중의 하나는 간섭을 일으킨다는 점이다. 파도가 서로 만나면 파도가 커지기도 하고 사라지기도 한다. 이러한 간섭의 효과를 결정하는 것은 파도의 모양이다. 만나는 파도의 모양이 같으면 파도가 커지고, 뒤집어진 모양의 파가 만나면 사라진다. 물질파의 경우도 비슷하다. 위상에 따라 간섭무늬가 생겨난다. 간섭을 결정하는 이러한 위상은 어떻게 측정할 수 있는가? 파도의 경우 파의 모양을 측정하는 것은 어렵지 않다. 모양을 눈금 잣대로 잴 수 있다. 그러나 물질파의 경우에는 약간 다르다. 물질파는 눈에 보이지 않는다. 이 때문에 물질파를 다루려면 사인이나 코사인 함수가 아니라 복소함수를 사용한다. 이때 나타나는 위상은 파도의 위상과는 약간

다르다. 특히 모든 점에서 똑같은 잣대를 사용할 필요가 없다. 각 점마다 위상을 재는 자가 다르지만, 각기 다른 자를 환산해주는 환산표가 있기 때문이다. 이러한 환산표의 역할을 하는 것이 바로 전자파, 즉, 광자다. 이 때문에 광자를 게이지 보손이라고 부르기도 한다. 게이지란 자의 눈금을 표시하는 말이다. QED 안에는 이러한 게이지 대칭성이 숨어있다.

QED가 가진 게이지 대칭성과 재규격화 가능성은 미시세계를 다루는 규범이 되었다. QED를 가이드로 해서 미시세계를 대변하는 이론들을 찾아냈다. QED로는 원자를, 양-밀스 이론으로는 핵을 다룰 수 있게 되었고, 이를 바탕으로 핵 속 깊은 곳을 연구할 수 있게 되었다. 우주의 태초부터 존재하던 감마선, W 보손, Z 보손, 힉스 보손과 쿼크, 렙톤 등도 구체적으로 연구할 수 있는 능력을 보유하게 되었다.

가끔 사람들은 묻는다. 양자장론이 우리 실생활에 필요한 것일까? 하지만, 사람들은 뉴턴의 만유인력이 왜 필요하냐고 묻지는 않는다. 그러나 다른 한편으로 생각해 보면, 케플러 법칙으로 행성과 위성의 움직임을 예측할 수 있는데, 만유인력이 왜 필요한 것이냐고 반문할 수 있다. QED와 양자장론은 별과 우주를 연구할 수 있는 방법을 제시하였고, 그 결과 지구에 사는 우리 역시 우주의 역사와 밀접한 관계가 있다는 것을 깨닫게 해주었다. 만유인력이 19세기의 철학을 이끌었듯이 QED 역시 실생활에 중요한 역할을 하고 있을 뿐 아니라 인류 문화의 발전에 보이지 않는 역할을 하고 있다는데 이의를 달 사람은 없을 것이다.