QED 노벨상 수상 50주년 기념

QED 이후의 양자장론 발전

DOI: 10.3938/PhiT.24.024

이 기 명

Beyond QED

Kimyeong LEE

In this brief review, further developments in particle physics and quantum field theory are reviewed. Especially, the Standard Model of elementary particles and forces is emphasized.

양자역학과 양자장론은 20세기의 물리학의 근본현상을 설명하는 기본적인 도구가 되었다. 특히 70년대 설립된 소립자현상의 표준모형은 알려진 거의 모든 현상을 이해하는 근본적인 이론적 발견이다. 양자장론은 또한 응집물리와 통계물리의 근본적인 도구가 되었다.

Planck, Einstein과 Dirac이 시작한 빛의 양자화, 광자화 및 전자의 양자화는 QED라는 이론으로 정착되었다.^[1] 1930년대 후반의 연구에서 무한대가 나타나는 섭동 계산이 발견되었는데, 이를 해결하는 방법으로 이론에 나타나는 맨값(bare quantity)과 관측되는 물리량 사이의 차이를 설명하는 재규격화가 제안된다. 처음에는 Lorentz 변환에 대해 양자섭동 계산이 불변성을 갖지 않아 계산을 일관성 있게 하기가 매우 어려웠다. 그러나 1940년대 후반에 Tomonaga, Schwinger, Feynman이 특수상대성이론을 보존하는 QED의 섭동이론을 개발하고 재규격화의 과정을 통하여 QED 이론을 완성하였다. 섭동 계산을 통하여 전자의 비정상 자기모멘트의 값을 Schwinger가 처음으로 계산해냈는데, 이제는 10여 자리 숫자까지의 계산이 가능하다. 이 계산은 QED의 발전 후 소립자들의 표준모형의 기여를 포

함한 이론값과 실험치가 1조분의 일의 오차 안에서 일치함을 보인다.

1950년 전후에는 매우 다양한 강작용과 약작용의 실험적인 발견이 있었는데 QED를 일반화한 양자장론적인 이해가 매우 어려웠다. 그러나 몇 가지 주요한 발전이 있었다. 우선 양-밀스 이론의 발견이다. 파울리가 6차원 일반상대론을 4차원으로 Kaluza-Klein 축소화 과정에서 얻었던 양-밀스 이론과 비슷한 이론을 세미나에서 발표한 적이 있으나 학술지에는 출간하지 않았고, C. N. Yang과 R. Mills가 1954년에 이론을 발견하여 논문으로 발표하였다. 이 양-밀스 이론은 QED에 있는 가환적인 국소게이지 대칭성을 비가환 리군에 관련된 게이지 불변성을 갖도록 일반화한 것으로서, 후에 70년대에 수립된 소립자들의 표준모형인 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 게이지이론의 근본이 되었다. 양-밀스이론은 질량이 없는 벡터입자를 예측하지만 50년대 초반에는 광자 이외에 그러한 입자가 알려지지 않아서 양-밀스 이론이 초기에는 심각하게 고려되지 않았다.

Nambu와 Goldstone은 60년대 초에 어떤 주어진 양자장론의 바닥상태인 진공이 이론의 온곳(global) 대칭성을 존중하지 않으면, 골드스톤 보손이란 무질량 소립자가 있어야 함을 보였다. Nambu는 특히 강작용 현상에 나선형대칭성의 자발적 붕괴가 있고, 질량이 상대적으로 작은 파이온 입자들이 이러한 골드스톤 보손임을 보였다. 초전도체의 Meissner 효과를 설명하는 London 방정식이 Lorentz 변환에 불변하도록 하는 힉스 메커니즘은 60년대에 Nambu, Anderson, Brout, Englert, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble 등의 기여로 발견되었다. 어떤 포텐셜을 갖는 스칼라장이 양-밀스 이론과 게이지 결합을 하였을 때, 이러한 힉스 메커니즘을 통해서 게이지 입자들이 질량을 얻게 되고, 또한 스칼라장의 지름(radial) 방향의 자유도가 힉스입자라는 질량을 갖는 입자로 나타난다. $SU(2) \times U(1)$

저자약력

이기명 교수는 콜럼비아대학 박사 학위를 취득하고(1987년), 콜럼비아대 부교수와 서울대 교수를 거쳐 현재 고등과학원 물리학과 교수 및 부원장으로 재직 중이다. NSF Presidential Young Investigator(1991), Alfred Sloan Fellow(1991), 한림원 정회원(2004), 국가석학(2006), 대한민국 최고과학기술인상(2014)을 받았다. (klee@kias.re.kr)

REFERENCES

- [1] Silvan S. Schweber, *QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger and Tomonaga* (Princeton University Press, 1994).

게이지이론은 60년대 초반에 전자기-약력의 힘을 통일하는 이론으로 Glashow가 제안하였는데, 60년대 후반에 이르러 Weinberg와 Salam은 이 이론이 저에너지에서 힉스 메카니즘에 의해 U(1) QED로 나타난다고 제안하였다. 와인버그-살람 이론에서는 전하가 있는 무거운 W-벡터입자와 무전하의 Z-벡터입자의 존재를 예측하고 Higgs 보손의 존재를 예측한다. 이러한 입자들의 존재는 1980년대에 실험적으로 검증되었다.

모든 물리현상에는 그 현상의 특징적인 크기(scale)가 존재한다. 예를 들어서 어떠한 물리적 이벤트는 시공간에서의 위치뿐만 아니라 크기라는 변수를 도입할 수 있다. 50년대 중반에 Gell-Mann과 Low가 QED 현상에 scale의 변화와 주어진 scale에서의 결합상수를 도입하였다. 주어진 결합상수 $\alpha(\mu)$ 는 scale μ 의 함수이고, scale의 어떤 기준점 M에서 결합상수의 함수이다. 이 기준점을 변화시키면서 기준점의 결합상수 $\alpha(M)$ 을 적절히 변화시키면, 초기의 결합상수는 변하지 않는다. 이를 표현하는 방정식이 재규격화군 방정식으로 알려져 있다. 이 재규격화군 방정식은 Stueckelberg와 Petermann, 그리고 Gell-Mann과 Low의 연구를 거친 뒤 Callan과 Symanzik에 의해 현재 알려진 형태로 완성되었다. 한편 Landau는 1955년경 QED의 결합상수가 유한한 고에너지에서 무한대로 발산하는 것을 발견하여 QED가 물리이론으로서는 자체적으로 부조리함을 보여서 양자장론의 인기를 많이 떨어뜨렸다.

반면 1960년대 중반부터 Kadanoff, Wilson 등은 재규격화의 의미를 어떠한 scale에서의 효과이론에서 찾았는데, 그 스케일보다 고에너지 또는 작은 거리에서의 여러 물리 현상을 평균화한 효과로 재규격화가 나타남을 보였다. 이들의 연구에 의하면 QED는 Landau pole보다 저에너지에서는 물리적으로 의미가 있는 효과이론인 것이다. 그러나 Landau pole 부근의 고에너지에서는 QED가 불완전하며 새로운 물리의 도입을 요구한다. 후에 표준모형, 통일장이론 등을 통하여서 이런 이론적인 부조리가 극복된다.

강작용현상인 핵, 양성자, 중성자의 물리는 Heisenberg가 1930년대 초반에 isospin 대칭성을 발견하여 어느 정도 진전이 있었으나, 그 뒤에 수많은 강작용 입자와 현상을 발견하여 1950-1960년대에는 대부분의 학자들이 양자장론적 소립자로 접근하는 것을 포기하였다. 그러나 Gell-Mann과 Ne'eman이 up, down의 isospin 이외에 strangeness라는 양자수를 추가하여 SU(3) 맛(flavor) 대칭성을 도입하고, 이어서 Gell-Mann과 Zweig의 top, down, strange 쿼크들의 제안, 그리고 Greenberg, Han-Nambu 등의 color 자유도 제안 등을 통하여 70년대 초반에는 강작용의 이론으로 SU(3) 양-밀스 이론에 근거를 둔 QCD라는 양자색소이론을 Gell-Mann 등이 제안한다. QCD는 여덟 종류의 글루온이란 벡터입자와 세 개의 색깔을

갖는 쿼크가 상호작용하는 이론이다.

양-밀스이론의 재규격화와 양-밀스-힉스이론의 재규격화는 구조론의 학자들과 Veltman 및 'tHooft가 70년대 초에 보였다. 이러한 이론적인 성과는 60년대 후반에 완성된 Glashow-Weinberg-Salam의 $SU(2) \times U(1)$ 양-밀스-힉스이론이 전기-약력 표준이론이 되는데 중요한 동기가 되었다.^[2] 또한 겔만 등이 제안한 SU(3) 양자색소이론은 강상호작용의 표준이론이 되었다. 특히 Gross, Wilczek 및 Politzer는 양-밀스이론의 결합상수가 저에너지에서 강해지고 고에너지에서 약해진다는 점근적 자유성(asymptotic freedom)을 발견했는데 이는 60년 후반에 실험과 함께 개발된 파톤(parton) 모형을 잘 설명하고 있다.

격자 QCD의 발전은 저에너지나 먼 거리에서 색깔양자의 구속이 강한상호작용 이론인 QCD 안에서 일어남을 보여준다. 즉 양성자나 중성자 안에 있는 분수전하를 갖는 쿼크들을 각각 따로 자유롭게 관측할 수 없음을 의미한다. 현재 격자 QCD는 강 상호작용을 하는 많은 물리현상을 10% 정도의 정확도를 가지고 계산할 수 있으며, 1%의 오차를 갖는 정확도로 많은 물리량을 계산하는 것을 목표로 하고 있다.

QED 이론의 상관함수(correlation function)를 섭동적으로 재규격화하는 과정에는 국소 게이지 대칭성을 유지하기 위하여 Ward-Takahashi 항등식을 사용하고 Lorentz 게이지 조건에서 나타나는 유령 입자를 처리해야 하는데 이는 매우 고급스러운 양자장론적 방법이다. 양-밀스이론에서는 Faddeev와 Popov가 1960년대 말에 게이지 고정과 유령입자를 도입하였다. 또한 게이지 불변성에 의해 양-밀스이론의 상관함수들이 Slavnov-Taylor 항등식을 만족하고 있음이 70년대 초반에 알려졌다. 1970년대 중후반에는 양-밀스 이론에서 게이지 불변성을 유지하는 섭동이론의 하나로 BRST 대칭성이라는 페르미온적 방법이 개발되었다.

1970년대 초반에 발견된 초대칭성(페르미온-보손)은 1970년대에 표준모형의 초대칭화로 응용되었다.^[3,4] 또한 4차원에서 최대의 초대칭성을 갖는 N=4 초대칭적 양-밀스 이론들이 발견되었다. 초대칭 이론에서는 모든 게이지 벡터 입자에 스핀이 1/2인 게이지노라는 페르미온이 있고, 모든 물질에 초대칭적인 짝이 있다. 예를 들어 쿼크에는 초대칭 짝으로 스퀴크라는

REFERENCES

- [2] Matthew D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model* (Cambridge University Press, 2014).
- [3] J. Terning, *Modern Supersymmetry: Dynamics and Duality* (Oxford Science Publications, 2009).
- [4] Y. Tachikawa, *N=2 Supersymmetric Dynamics for Pedestrians* (Springer, 2014)

스칼라 쿼크입자가 있다. 초대칭 이론은 라그랑지안이 초대칭성을 가지고 있다. 물론 자연계는 알려진 소립자들의 초대칭 짝이 아직 발견되지 않았기에, 초대칭성은 존재한다 하여도 진공에서 깨져야 한다. 다양한 초대칭적 표준모형들에는 관측된 소립자들의 초대칭 짝이 매우 무거워서 실험적으로 아직 검출되지 않아야 한다는 이론적 제약이 있다. 초대칭적 표준모형의 여러 가지 변형들은 현재도 LHC 실험에 새로운 현상을 줄 수 있는 주요한 후보로 많이 연구되고 있다.

1970년대 중반부터는 대통일이론이 매우 활발하게 연구되었는데, 이는 표준모형의 3가지 결합상수가 고에너지에서 서로 가까이 감으로서 3개의 게이지 그룹이 SU(5)나 SO(10) 또는 E6 등의 커다란 하나의 게이지그룹으로 통일된다는 이론이다. 표준모형의 물질을 이루는 쿼크와 렙톤들이 큰 게이지 군의 하나의 표현으로 자연스럽게 나타나는데, 이 이론에서는 양성자가 양자역학적으로 붕괴가 가능함이 알려져 있다. 고에너지에 초대칭성을 가정하면 결합상수의 통일이 더욱더 정확히 이루어진다. 또한 왜 이러한 대통일이론의 통일 에너지 스케일은 플랑크 스케일에 가까운 10^{16} GeV 정도이며 전기약력이론인 와인버그-살람이론은 100 GeV인가 하는 '자연스러움의 문제'를 일부 설명할 수 있다. 현재 대통일이론은 큰 진보는 없으나 여전히 많은 관심을 받고 있다.

1960년대 초반에 발견된 CP의 붕괴는 현재 우리가 사는 세상이 반물질은 거의 없고 물질로만 구성되었음을 설명하기 위한 필요조건이다. 빅뱅우주론에서도 물질 생성의 전제조건이지만, 중입자(baryon)의 물질 생성에 관한 중요 문제가 우주론에서 풀린 것은 아니다. 특히 표준 모형만으로는 급속팽창과 중입자 물질 생성을 아직 해결하기 어렵다. 전기약력이론에서는 KM 질량 행렬에 CP붕괴 위상이 존재한다. 강상호작용에서는 CP의 깨짐이 매우 적다. 예를 들면 중성자는 전기쌍극자 모멘트가 매우 작다. 이 문제를 해결하는 하나의 가설인 액시온

(axion) 입자의 물리는 1970 후반에 도입된 후 이론적으로 계속 발전하고 있다. 현재 국내 IBS의 한 연구팀 등이 보기 힘든 액시온 입자를 찾으려는 노력을 하고 있다.

현재 중성미자가 질량을 가지고 있다는 것과 다른 종류 사이에 양자 역학적 진동을 하고 있다는 것은 실험적으로 많이 검증되었다. 이러한 표준모형을 넘어서는 현상의 이론적인 바탕은 아직 제대로 정립되지 않았다. 급팽창 우주론에서의 여러 모델링과 천체적인 관측을 통해 현 우주의 68% 정도는 암흑에너지, 27%는 암흑물질, 4-5%는 우리가 알고 있는 물질로 구성되어 있음이 알려졌다. 암흑에너지와 암흑물질의 자세한 성질과 다른 물리와의 연관성은 중력을 통한 상호작용을 제외하고는 거의 알려지지 않았다. 현재 이들의 실체에 대한 여러 가설과 실험들이 활발히 연구되고 있다.

1960년대 후반에 시작된 초끈이론은 양자중력이론으로 각광을 받고 있다. 80년대 중반에 Green-Schwarz가 10차원에서 정합성을 가진 초끈 이론을 발견한 것을 시작으로 90년대 Polchinski의 D-brane, Witten의 M-이론, Maldacena의 AdS-CFT 등의 아이디어의 발견은 초끈이론 발전의 원동력이 되었다. 이러한 발전과 함께 다양한 시공간 차원에서 초대칭적 양자장론의 이해, 초등각이론의 이해 등에 장족의 발전이 일어나고 있다. QED에서 시작한 양자장론은 현재로 입자현상론, 초끈이론, 응집물리, 수학에서 활발하게 활용되고 있다. 어떤 학자는 양자장론을 21세기의 Calculus로 간주하고 있다. 이러한 유용한 도구가 더욱더 개발되고 활용되기를 기대한다.

한국 출신 물리학자들은 QED의 발전에는 많이 기여할 기회가 없었지만, 60년대 이휘소 박사를 시작으로 많은 연구자들이 현재 입자현상론과 양자장론, 초끈이론, 우주론 등의 이론물리학과 소립자 등의 실험 발전에 꾸준히 주요한 기여를 해오고 있다.