강한 양자전자기학과 전망

DOI: 10.3938/PhiT.24.027

김 상 표

Strong QED and Perspective

Sang Pyo KIM

Quantum electrodynamics (QED) has been precisely tested in the region of weak electromagnetic fields with a few photons. A strong electromagnetic field with a huge number of coherent photons can enhance the interaction with virtual electrons in the Dirac sea and result in vacuum polarization and the creation of pairs of electrons and positrons. A strong QED action describes quantum nonlinear electrodynamics and the medium of a quantum vacuum and predicts interesting nonperturbative quantum effects, such as pair creation and birefringence. Calculating the complex QED action for general electromagnetic fields has been one of the challenging issues of theoretical physics. The recent development of intense lasers may open a window for probing the structure of quantum vacuum and exploring fundamental physics and may lead to laboratory astrophysics.

양자전자기학(quantum electrodynamics)은 일반상대성이론과 함께 가장 정밀한 이론으로 검증되었다. 양자전자기학은 전하와 전자기장의 상호작용을 기술하는 양자이론으로 디랙 전자이론, 맥스웰 이론과 디랙 진공에 기초를 두고 있다. 지난 수십년 동안 양자전자기학 연구는 약한 전자기장이나 소수의 광자와 전자의 상호작용을 정확히 기술하는데 목표를 두었다. 그러나 최근 십년은 강한 전자기장이나 무수히 많은 광자와 전

자의 상호작용에 대한 연구와 이를 검증하려는 시도가 이루어졌고 가까운 장래에 초강력 레이저를 이용한 강한 양자전자기학(strong QED) 현상을 검증하려는 실험이 제안되고 있다. 본 글에서는 강한 양자전자기학의 역사적 배경, 물리적 의미와 이론적으로 해결해야 할 문제 그리고 전망을 소개한다.

디랙 진공의 역사적 배경

디랙(Dirac)은 1928년에 전자의 상대론적 이론인 디랙 방정식을 발표하였다.^[1] 디랙 전자이론은 전자의 스핀을 설명하지만 상대성이론이 갖는 음의 에너지 해의 문제를 여전히 내포하고 있다. 고전이론에서는 물리량이 연속으로 변하기 때문에 양의 에너지 해와 음의 에너지 해에는 분명한 구별이 있다. 그럼에도 불구하고 양자이론에서 음의 에너지 해를 물리적으로 해석하는 논문을 발표한다. 모든 음의 에너지 상태는 일부 작은 속도를 제외하고 가득 차 있으며 완벽히 균질한 분포는 완전히 관측할 수 없다는 홀(양공) 개념을 도입하였다.^[2] 1932년 앤더슨(Anderson)이 양전자(positron)를 발견하기 이전이므로 전자의 반입자로서 양성자를 고려하지만 중요한 발전은 디랙 전자이론이 예측한 음의 해를 디랙 진공으로 해석하였고 반입자를 디랙 진공의 홀로서 예측하였다는 점이다. 진공자체의 물리적 의미는 1934년 세인트 존 대학 강연에서 제안되었다. “거의 모든 음의 에너지 상태가 점유되어 있고 거의 모든 양의 에너지 상태가 점유되지 않은 전자의 분포에 정밀한 의미를 부여할 수 있다. (중략) 앞서 말한 가정의 물리적인 결과를 탐구하는 일과 전자기장이 진공편극(vacuum polarization)의 성질에 관한 물리현상을 유발하는지를 보는 것은 남은 과제이다.”^[3] 전자기장에 의해 진공이 편극될 수 있음을 최초로 제안한 사람도 디랙이었다. 우리는 이 진공을 디랙 진공(Dirac

저자약력

김상표 교수는 펜실베이니아주립대학교에서 박사학위를 받은 후 1992년부터 군산대학교에 재직하고 있다. 엘버타대학교 이론물리연구소, 대만대학교 천체물리연구소, 교토대학교 유카와 연구소에서 초빙교수를 역임하였다. 양자우주론, 블랙홀, 비평형 양자이론과 강한 양자전자기학을 연구하고 있다. (sangkim@kunsan.ac.kr)

REFERENCES

- [1] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. Lond. A **117**, 610 (1928).
- [2] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. Lond. A **126**, 360 (1930).
- [3] P. A. M. Dirac Math. Proc. Cambridge Phil. Soc. **30**, 150 (1934).

sea)이라고 부른다. 반도체에서 전자-양공이론(electron-hole theory)은 디랙 진공의 개념을 적용한 것이다.

하이젠베르크-오일러 진공편극

디랙이 상대론적 전자기론을 발표한 후에 하이젠베르크는 양자전자기학에서 양공이론(hole theory)의 중요성을 인식하였다. 하이젠베르크는 양자전자기학에서 디랙 진공의 양자요동으로 인하여 맥스웰 이론이 양자비선형 전자기학으로 대체될 수 있음을 깨달았다.^[4] 하이젠베르크와 학생인 오일러는 빛과 빛의 산란(light-light scattering)의 물리적인 의미를 연구하여 양자 진공(quantum vacuum)이 매질과 같은 성질을 가짐을 밝히고 맥스웰 항을 보정하는 1차 항을 계산하였다.^[5] 하이젠베르크-오일러 양자전자기학 작용량(Heisenberg-Euler QED action)으로 알려진 1차양자보정항은 맥스웰 스칼라(Maxwell scalar)의 제곱과 유사스칼라(pseudoscalar)의 제곱으로 표현된다. 맥스웰 스칼라는 전기장의 제곱과 자기장의 제곱의 차이로 전기장과 자기장에 선형인 맥스웰 방정식을 준다. 따라서 1차양자보정항은 맥스웰 방정식에 전기장과 자기장의 제곱에 비례하는 비선형 항을 제공하여 진공편극(vacuum polarization)을 유발한다. 빛과 빛의 산란 면적은 미세구조상수(fine structure constant)의 네제곱과 전자 콤프턴 파장(Compton wavelength)의 네제곱에 비례하고 빛의 파장의 제곱에 반비례하기 때문에 양자비선형 효과는 매우 작고 측정하기 어려웠다. 1936년에 하이젠베르크와 오일러는 일정한 전자기장에 의한 완전한 1차고리 작용량을 얻었다.^[6] 하이젠베르크-오일러 양자전자기학 작용량은 그림 1과 같이 무한개의 파인만 도형의 합에 해당하는 비섭동적인 결과이다. 1951년에 슈윙거(Schwinger)는 고유시간 적분(proper-time integral) 방법을 도입하여 일정한 전자기장에 의한 양자전자기학 작용량을 계산하였다.^[7] 이 방법은 전자기장 배경에서 전자의 진행자를 적분하여 얻는데 계산과정이 복잡하지만 무한개의 파인만 도형을 합하는 방법보다 효율적이고 직관적이다. 그림 1에서 내부 고리는 디랙 진공에 있는 전자의 진행자를, 외부 물결선은 외부 전자기장으로부터 주어진 광자를 나타낸다. 진공편극은 전하와 운동량 보존법칙으로 인하여 짝수개의 꼭짓점을 갖는 무한개 파인만 도형의 합과 같다.

디랙 진공의 구조는 강한 전자기장이 작용하기 전과 작용한 후가 다르다[그림 2]. 고전 전자기학에서 전자는 균일한 자기장 내에서 사이클로트론 진동수를 갖는 원운동을 한다. 비상대론적인 양자역학에서 전자는 란다우 준위(Landau level)를 갖고 균등한 에너지 간격으로 벌어져있다. 란다우 준위는 고체물리를 비롯한 여러 물리학 현상에 중요한 개념으로 적용되고

Fig. 1. Feynman diagrams for vacuum polarization. The internal loop corresponds to a virtual electron and the external wavy lines correspond to external photons. The figure is adopted from J. Korean Phys. Soc. **61**, 1206 (2012).

있다. 그러나 자기장의 크기가 아주 클 경우 전자의 양자상태는 상대론적인 영역에 속하여 디랙 방정식으로 기술된다. 모든 란다우 준위 에너지를 합하고 재규격화하면 하이젠베르크-오일러 작용량을 얻을 수 있다. 이는 란다우 준위에 의해 디랙 진공의 구조가 변화됨을 의미한다. 바닥준위 에너지가 전자의 질량 에너지와 같아지는 자기장의 크기를 자기장 임계값이라 하고 $B_c = m^2 c^2 / e \hbar = 4 \times 10^{13}$ G(가우스)이다.

슈윙거 입자쌍 생성

전기장이 없을 때의 디랙 진공은 전자가 $-m$ 아래 모든 음 에너지의 양자상태를 채우고 있어 음의 에너지에서 양의 에너지 상태로 천이하기 위해서는 $2m$ 의 간극을 극복해야 한다. 그러나 전기장이 작용하면 전자의 양과 음의 에너지는 전기퍼텐셜에 의해 그림 2와 같이 기운다. 전기장 E 가 작용하면 진공의 전자는 전기퍼텐셜 $-eEx$ 를 갖게 되어 진공 간극이 경사를 이룬다. 따라서 음의 에너지에 있는 전자는 양자역학적으로 터널링하여 양의 에너지 상태로 천이할 수 있고 전자-홀 이론 따라서 전자와 양전자가 생성된다. 일정한 전기장 내에서 전자의 양자 터널링 확률이 전자-양전자 쌍 생성율과 같다. 전기퍼텐셜의 기울기는 전기장의 크기에 비례하기 때문에 강한 전기장은 양자 터널링의 확률을 높인다. 양자적인 관점에서 보면 양자요동이 가상적인 전자와 양전자 쌍을 만들지만 전자와 양전자 쌍은 다시 결합하여 소멸한다. 그러나 전기장으로부터 전자가 전기퍼텐셜 에너지를 충분히 얻을 수 있거나 외부 전기력

REFERENCES

- [4] W. Heisenberg, Sächsische Akad. Wissen. **86**, 317 (1934).
- [5] H. Euler and B. Kockel, Naturwiss. **23**, 246 (1935).
- [6] W. Heisenberg and H. Euler, Zeit. Phys. **98**, 714 (1936).
- [7] J. Schwinger, Phys. Rev. **82**, 664 (1951).

Fig. 2. Dirac sea. The red lines denote the Dirac sea of negative energy states separated from positive energy states while the blue lines denote energy states tilted by the electrostatic potential energy.

이 쿨롱힘보다 클 경우 전자-양전자 쌍은 실제 입자로 분리될 수 있다. 에너지 관점에서 전자의 컴프턴 파장 거리에서 전기 퍼텐셜 에너지 차이가 전자-양전자 쌍의 질량 에너지보다 클 경우 디랙 진공은 자연스럽게 입자쌍을 방출하게 된다. 이 전기장 크기의 임계값은 $E_c = m^2 c^3 / e \hbar = 10^{16}$ V/cm이다. 양자 터널링 확률의 지수계수는 전기장의 임계값과 전기장 크기의 비율에 의해 결정되기 때문에 전자-양전자 쌍생성은 임계값에 가까운 전기장에서 효율적이다. 임계값에 해당하는 전기장의 세기는 $I_c = 4 \times 10^{29}$ W/cm²이며 슈윙거 극한(Schwinger limit)으로 불린다.

한편 전기장에 의한 입자 쌍생성은 진공이 불안정함을 의미한다. 전기장 내에서 디랙 진공은 양자 터널링 현상으로 인하여 자발적으로 붕괴하고 그 붕괴율은 입자 쌍생성율에 의해 결정된다. 진공이 전자기장에 의해 자발적으로 붕괴하기 위해서는 양자전기학 작용량이 허수부분을 가져야 한다. 하이젠베르크-오일러와 슈윙거 양자전기학 작용량은 고유시간적분이 단순 극을 갖기 때문에 허수부분을 준다. 작용량의 실수부분이 진공편극(vacuum polarization)이고 허수부분의 두 배를 진공지속률(vacuum persistence)이라고 부른다. 진공지속률은 나중 진공이 처음 진공에 남아 있을 확률을 의미하며 단위시간과 공간당 붕괴하는 비율을 결정한다. 입자 쌍생성률이 클수록 진공지속률도 커진다.

강한 배경에서 양자작용량과 입자생성

강한 전자기장에 의한 진공 구조와 입자 쌍생성은 양자장론이 예측하는 비섭동적인 현상이다. 대표적인 비섭동 현상인 호킹 복사(Hawking radiation)도 블랙홀에 의한 진공 구조의 변화로부터 방출되는 입자이다. 진공의 양자요동이 가상 입자쌍을 생성-소멸하는데 전기장이나 블랙홀 사상지평선이 입자쌍을 분리시켜 실제 입자로서 방출시킨다. 아무리 강한 자기장

이 작용하더라도 생성된 가상 입자 쌍은 서로 반대 방향으로 반원을 따라 만나게 되어 반드시 소멸된다. 따라서 자기장은 진공을 편극시킬 수 있지만 입자 쌍을 생성하지는 못한다. 슈윙거 입자 쌍생성과 호킹 복사는 다음 도형과 같이 진공의 양자요동에 근거를 두고 있으며 다양한 양자장론 방법으로 설명되었다.

강한 전자기장 현상

강한 전자기장을 포함하는 현상으로 중성자별과 초강력 레이저를 들 수 있다. 중성자별 중에서 일부인 자석별(magnetar)은 임계값보다 백배 이상까지 큰 자기장을 표면에서 가질 수 있다. 중성자별의 중심은 동력학적 기작에 의해 임계값보다 훨씬 큰 자기장을 갖는 것으로 예측되고 있다. 중이온 충돌로 생기는 쿼크-글루온 플라즈마에서도 순간적이지만 쿼크 임계값을 훨씬 넘는 색소전기장(chromoelectric field)이 만들어지는 것으로 제안되고 있다. 수많은 간섭성 광자를 중첩하고 증폭하여 광학적인 붕괴 한계를 넘는 크기의 전자기장을 만드는 CPA(chirped pulsed amplification) 방법이 Mourou에 의해 제안되었다.^[8] 현재 이 방법을 이용한 PW(Peta Watt, 10¹⁵ W)급 레이저 시설이 초강력 레이저 연구단(CoReLS/IBS: 남창희 단장)에 가동 중에 있고(물리학과 첨단기술 October 2013), 유럽은 ELI(Extreme Light Infrastructure)를 건설 중에 있으며 10 PW급 레이저 시설을 설치할 계획이다.^[9] 이들 레이저는 마이크로미터의 공간에 압축된 펨토초의 펄스 형태를 띠고 있다(1 J의 전자기파를 1마이크로미터 제곱의 공간에 압축된 1펨토초 펄스를 만들 경우 10²³ W/cm²의 세기가 되며 임계 세기보다 백만 배 작고 전기장 크기는 임계값보다 천배 작다.) IZEST(International Center for Zetta- and Exawatts Science and Technology)는 궁극적으로 슈윙거 극한의 전자기장을 발생시

REFERENCES

- [8] D. Strickland and G. Mourou, Optics Comm. **55**, 447 (1985).
- [9] <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>.

Fig. 3. Evolution of intense lasers: ELI will reach the sub-Schwinger limit while IZEST will target for the Schwinger regime. Figure is adopted from <http://www.izest.polytechnique.edu/jsp/accueil.jsp?LANGUE=1>.

켜 근본적인 물리학을 연구하고자 한다.^[10]

강한 양자전자기학 과제

하이젠베르크-오일러와 슈윙거가 일정한 (상수) 전자기장에서 1차고리 양자전자기학 작용량을 계산한 이후 일반적인 전자기장 분포에서 작용량을 계산하는 일은 장이론에서 중요한 문제로 인식되어 왔다. 일정한 전자기장이 무한한 공간에 작용하거나 무한한 시간 동안 지속되는 것은 물리적으로 실현하기 어려운 환경이다. 전자의 컴프턴 파장 내에서 전자기장의 변화가 작을 경우 하이젠베르크-오일러와 슈윙거 작용량을 근사적으로 적용할 수 있지만 오차가 클 수 있다. 따라서 일반적인 전자기장 분포에서 유효작용량을 계산하여 예측하는 문제는 실험으로 비선형 양자전자기 현상을 측정하는데 필수적인 요소이다. 그러나 전자기장 배경에서 디랙 방정식이 선형임에도 불구하고 유효작용량 계산은 사소하지 않은 문제이다. 예를 들어 자기장이 공간상에 국한되었을 경우 전하의 란다우 준위는 일정한 간격을 갖지 않는다. 따라서 란다우 준위 총에너지를 계산하여 재규격화하는 방법에는 제한이 있다. 마찬가지로 공간에 국한된 전기장이나 펄스 형태의 전기장에 의한 유효작용량을 계산하는 문제도 기존의 방법에 제한이 있다. 디랙 방정식의 그린 함수를 구하여 적분하는 방법이 있지만 일정한 전자기장 분포를 벗어난 경우 적용하기 어려운 단점이 있다.

슈윙거-드위트(Schwinger-DeWitt) 변분작용량 방법(variational action principle)에 근거한 처음-나중 형식(in-out formalism)에서 작용량은 처음진공과 나중진공의 산란행렬로 표현된다.^[11] 전자기장에서 처음진공과 나중진공을 정하기 위해서는 디랙 방정식의 해를 구해야 한다. 전자기장의 작용으로 전자는 처음진공과는 다른 나중진공 상태에 놓여있게 된다. 처음진공과 나중진공은 보골리우보프(Bogoliubov) 변환으로 표현되고 그 계수는 각각 진공지속성과 입자 쌍생성률을 결정한다. 최근에 저자를 포함한 국내 연구그룹은 보골리우보프 계수가 감마함수로 주어짐을 발견하고 감마함수 재규격화 방법을 도입하여 유효작용량을 고유시간의 적분으로 표현하였다. 이를 적용하여 공간에 국한되거나 펄스형태인 전기장 또는 자기장에 의한 양자전자기학 작용량을 계산하였다.^[12] 또 다른 방법인 파인만(Feynman) 세계선 적분(worldline integral) 방법이 양자 작용량을 계산하는데, 세계선 순간자(worldline instanton)가 입자 쌍생성을 계산하는데 사용되고 있다.^[13]

강한 양자전자기학의 전망

초강력 레이저는 강한 양자전자기학을 실험의 영역으로 이끌고 있다. 슈윙거 한계를 넘는 전자기장은 진공의 양자구조를 탐색할 수 있는 도구로서 근본 물리학 문제를 연구하는 방법 중 하나이다.^[14] 전기장에 의한 자발적인 입자 쌍생성은 디랙 진공구조를 규명해 줄 것이다. 전자기장에 의한 진공편극은 시험 레이저빔의 복굴절을 야기할 수 있다. 초강력 레이저를 이용한 광자-광자 산란을 관측할 수 있다. 강한 전기장을 이용하여 전자를 가속시킬 경우 언루(Unruh) 효과를 관측할 수 있다. 슈윙거 한계인 전기장으로 전자를 가속할 경우 언루 온도는 질량에너지에 해당된다. 양자전자기학에서 양자적 진공구조를 이해하는 것은 양자색소동력학에서 구속문제를 비롯한 비섭동적 현상을 이해하는데 실마리를 던질 것으로 추정된다.

REFERENCES

- [10] G. A. Mourou and T. Tajima, Science **331**, 41 (2011).
- [11] B. S. DeWitt, Phys. Rept. **19**, 295 (1975).
- [12] S. P. Kim, H. K. Lee and Y. Yoon, Phys. Rev. D **78**, 105013 (2008); S. P. Kim, H. K. Lee and Y. Yoon, Phys. Rev. D **82**, 025015 (2010); S. P. Kim, Phys. Rev. D **84**, 065004 (2011).
- [13] C. Schubert, Phys. Rept. **355**, 73 (2001).
- [14] G. V. Dunne, Eur. Phys. J. D **55**, 327 (2009).