

QED 노벨상 수상 50주년 기념

QED 정밀 테스트

DOI: 10.3938/PhIT.24.025

원 은 일

Precision Tests of Quantum Electrodynamics

Eunil WON

Selected experimental tests of the theory of quantum electrodynamics (QED) are reviewed, with particular emphasis on the charged lepton magnetic and the electric dipole moments, where the most severe tests of QED have been done. The implications of such tests and the possibility for new physics beyond the standard model of particle physics are discussed.

소 개

이번 글에서는 양자전기역학(이하 QED)의 정밀 측정 실험을 통한 QED 이론 검증에 대하여 정리합니다. QED는 전기전하를 가지고 있는 입자의 상호작용에 대한 이론으로 전기전하를 가진 기본입자인 전자, 뮤온, 또는 타우 경입자와 전자기장의 상호작용이 그 대상이 됩니다. 그러나 전자보다 약 3,000 배 이상 더 무거운 타우 경입자의 경우에는^[1] 다양한 입자들로 붕괴하기 때문에 QED 관련 실험 측정 또는 관련 테스트는 그 민감도가 다소 떨어지는 경우가 일반적입니다. 마찬가지로 전자보다 약 200배 무거운 뮤온 입자의 경우 정지 계에서 평균 수명 2.2 마이크로초를 가지고 전자 및 중성미자 2개로 붕괴합니다. 얼핏 생각하면 이 또한 정밀 QED 테스트에는 단점이 될 수 있다고 생각되지만 사실 뮤온의 경우 뮤온 스핀 방향에 대한 정보를 비교적 쉽게 알 수 있고 또한 많은 양의 뮤온을 빛의 속도에 가깝게 가속하여 저장 링에 저장할 수가 있어서 전자와 비교하여 서로 상호보완적인 연구를 할 수 있습니다.

저자약력

원은일 교수는 미국 로체스터대학에서 입자물리학 실험으로 박사를 받았으며 지금은 고려대학교 물리학과 교수로 재직하고 있다. 전공은 입자물리학 실험으로 우주론에도 관심을 가지고 있다. (eunil@hep.korea.ac.kr)

QED 이론에 의하면 전자, 뮤온, 타우 경입자 모두 전기 전하 $\pm 1e$ (단위는 전자의 전기전하 단위, 입자의 경우 음수부호, 반입자의 경우 양수 부호)로서 그 내부구조가 없습니다. 따라서 세 입자 모두 전기쌍극자모멘트 값은 0이 되어야 합니다. 또한 이 입자들은 모두 경입자들로 내부 스핀 양자수가 1/2입니다. 이러한 경우 자기쌍극자모멘트 값은 QED 이론에서 0이 아닌 값을 갖고 그 값 또한 정확하게 예측할 수 있습니다. 이러한 자기쌍극자모멘트 $\vec{\mu}$ 의 크기는 Bohr magneton $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ 에 비례하게 되어 스핀 \vec{S} 를 갖는 경입자의 자기쌍극자모멘트는 $\vec{\mu} = -\frac{g}{2}\mu_B\frac{\vec{S}}{\hbar/2}$ 으로 표시됩니다. 여기서 비례상수 g 는 QED 이론에서 계산가능한 양으로서 순수 Dirac 이론에서는 정확하게 $g/2 = 1$ 이고, 양자고리 효과를 고려하면 QED 이론에서는 $g/2$ 는 1에서 약간 벗어나는 값을 예측합니다. 이러한 내용은 QED 이론이 맞는다는 가정에서 출발한 결론일 뿐으로 새로운 물리 현상이 자연에 존재한다면 0이 아닌 자기쌍극자모멘트의 값 또는 $g/2$ 의 실험값이 QED 이론에서의 예측 값과 많이 달라질 것입니다. 이제 전자와 뮤온을 이용한 이 두 모멘트의 최신 실험결과를 살펴보고 그 의미 및 앞으로의 전망에 대하여 이야기하겠습니다.

전 자

전하를 가진 경입자 중 가장 가벼운 전자의 경우 현재 가장 정밀한 자기쌍극자모멘트 실험 결과는 미국 하버드 대학교 물리학과의 Gabrielse 교수 그룹에서 무려 지난 20년 이상 진행한 실험결과에 있습니다.^[2] 극저온에서 단일 전자를 전기 사극자 퍼텐셜을 사용하여 포획 후 균일한 자기장을 걸어주어 포

REFERENCES

- [1] Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>.
- [2] D. Hanneke, S. Fogwell and G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. **100**, 120801 (2008); B. Odom, D. Hanneke, B. D'Urso and G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. **97**, 030801 (2006).

획된 전자의 에너지 준위가 전자의 스핀 및 사이클로트론 주파수만의 함수인 양자 시스템을 구현하는 것이 이 실험의 핵심입니다. 사실 이 실험은 전통적인 입자물리학 실험이 아니라 원자 물리 기술력을 사용하여 수행하였고 필자의 전문분야가 아니라서 실험 방법에 대해서는 더 이상의 논의 없이 그 결과만 논의하겠습니다. 이 실험을 통한 QED 이론의 테스트는 궁극적으로 $g_e/2$ 의 실험 측정값과 이론 계산값의 차이로 나타낼 수 있고 이는 참고문헌 [2]에 따르면 $|\delta g_e/2| < 15 \times 10^{-12}$ 가 됩니다. 즉 QED 이론이 천억분의 일 수준에서 실험과 일치한다는 의미입니다. 유효숫자 12자리까지 계산하는 것도 놀랍지만 그러한 정확도에 이르기 위하여 20년 이상 동안 실험을 수행했다는 것은 더욱 놀랍습니다. 실험을 하는 물리학자로서 경외감마저 느끼게 합니다. 앞으로 진행될 실험에서 전자의 반입자인 양전자에 대한 $g_e/2$ 까지 동일한 정밀도로 구하게 되면 경입자 부분에서 charge-conjugation, parity, time reversal (CPT) 변환에 대한 가장 민감한 테스트를 할 수 있게 되는 매우 중요한 의미를 갖게 됩니다.

한편 위에서 언급했듯이 전자의 전기쌍극자모멘트는 QED 이론에서는 0이 되는 것을 예측합니다. 이 물리량에 대한 실험은 하버드 대학과 예일대학의 공동 그룹 ACME(Advanced Cold Molecule Electron EDM)에서 진행하였지만 전자의 자기쌍극자를 측정했던 Gabrielse 교수 그룹이 실험을 이끌고 있습니다. 이 실험에서는 극성분자 중 하나인 thorium monoxide (ThO) 분자빔을 강한 전기장이 있는 공간에 넣어 스핀세차운동을 일으키고 광학 펄핑으로 방출되는 빛의 공간 비대칭성을 측정하여 전기쌍극자모멘트를 측정합니다. 그 결과 전자의 전기쌍극자에 대한 상한선을 측정하여 $|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{cm}$ 으로 설정하였습니다.^[3] 이 실험의 의미는 다음과 같습니다. 우선 물분자의 전기쌍극자모멘트가 대략 $O(10^{-10}) \text{ e} \cdot \text{cm}$ 인 것과 비교하면 실험적으로 매우 민감한 정도의 실험이라고 하겠습니다. 또한 QED 이론이 이정도 수준까지 테스트 되었다고 생각할 수 있고 더 나아가 0이 아닌 전기쌍극자모멘트를 예측하는 새로운 물리현상에 대한 제한을 준다고 생각할 수 있습니다. 즉, 0이 아닌 전기쌍극자모멘트는 T 변환을 의미하게 되어 위의 결과는 1-3 TeV 스케일의 에너지에서 T 변환 깨짐을 주는 새로운 물리현상에 제한을 주는 것으로 이는 유럽의 거대 강입자가속기 실험의 민감도보다 더 높습니다.^[3]

뮤온

뮤온 경입자는 현대 가속기물리학 기술력으로 많은 양을 100% 스핀 분극 상태에서 생산하여 자기장이 있는 저장 링에

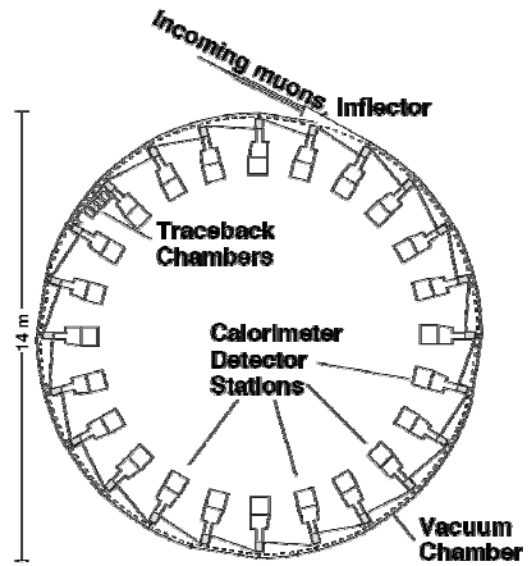


Fig. 1. A conceptual diagram of the muon storage ring at BNL. Electron detectors are located inside the circular muon storage ring.^[6]

저장할 수 있습니다. 이를 바탕으로 뮤온의 $g_\mu/2$ 값과 전기쌍극자모멘트를 미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL)에서 측정하였습니다.^[4] 그 측정 방법은 다음과 같습니다. 뮤온이 균일하고 시간의 함수가 아닌 전기장(\vec{E})과 자기장(\vec{B})에서 운동을 하면 뮤온의 스핀은 세차운동을 하게 됩니다. 이 경우 뮤온 정지계에서 뮤온 스핀세차운동의 각속도($\vec{\omega}_a$)를 기술하는 방정식^[5] 광속도의 크기를 c 라고 했을 경우

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \left(\vec{\beta} \times \frac{\vec{E}}{c} \right) + \frac{\eta}{2} \left(\frac{\vec{E}}{c} + \vec{\beta} \times \vec{B} \right) \right]$$

으로 주어지게 됩니다. 여기서 $\vec{\beta}$ 와 γ 는 상대론적 인자, m 은 뮤온의 질량입니다. 복잡해 보이는 위의 수식은 사실 세 가지의 항으로 되어 있어서 처음의 두 항은 자기쌍극자모멘트, 그리고 세 번째 항은 전기쌍극자모멘트와 관계있습니다. 세 번째 항은 QED 이론에서는 없어야 하는 항이고 그 세기를 매개변수 η 로 표시한 것입니다. 뮤온의 운동량을 선택적으로 결정하여 두 번째 항도 없앨 수 있고 따라서 이제 첫 번째 항 $\vec{\omega}_a = -(e/m) a_\mu \vec{B}$ 만 살아나게 됩니다. 이 운동량 값은 뮤온의 경우 3.09 GeV/c이고 이 값을 magic 운동량 값으로 부르고 이러한 경우 뮤온 저장 링의 직경은 대략 14 m 정도가 필요함

REFERENCES

- [3] The ACME Collaboration, Science **343**, 269 (2014).
- [4] G. W. Bennett, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 161802 (2004).
- [5] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd Ed.

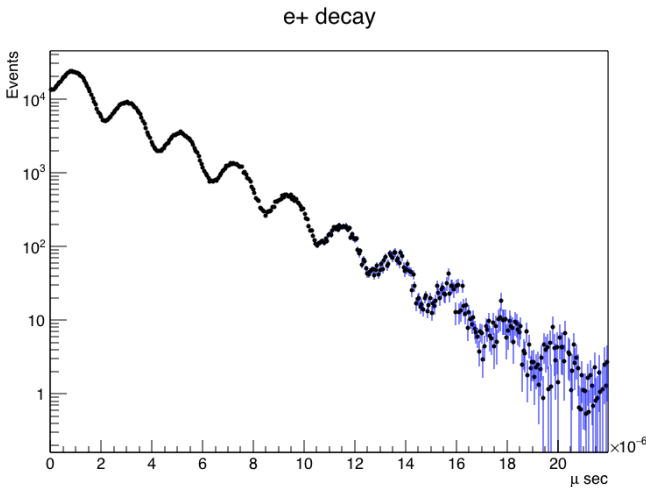


Fig. 2. A simulation of positron time from anti-muon decays. The muon decay is in the exponential decay term and the spin precession is shown as oscillation in time.

니다(그림 1 참고). 이러한 상황에서 스핀방향이 뮤온의 운동량 방향에 정렬된 뮤온을 자기장의 수직으로 입사시키면 이제 뮤온은 아주 간단한 원운동을 하게 됩니다. 뮤온이 원운동을 함에 따라 스핀은 원운동의 평면에서 세차운동을 하게 되어 스핀방향은 원의 내부와 외부를 번갈아 가며 향하게 됩니다. 이 진동의 주기가 바로 뮤온의 $g_\mu/2$ 와 직접적 관계가 있는 것입니다. 여기서 핵심적인 사실은 뮤온이 붕괴되어 전자와 두 개의 중성미자로 붕괴시 전자의 붕괴 방향과 붕괴 당시 뮤온의 스핀방향과 상관관계가 있다는 사실입니다. 이는 뮤온 붕괴가 약상호작용 붕괴임에 기인합니다. 만일 원운동 궤적 내부에 전자의 존재 및 그 시간을 측정할 수 있는 검출기를 그림 1과 같이 설치한다면 그림 2와 같은 전자의 시간 분포를 볼 수 있고 이를 이용하여 뮤온의 $g_\mu/2$ 값을 측정합니다.

BNL에서는 magic 운동량을 갖는 뮤온을 직경이 14 m에 달하는 저장 링에 저장한 후 $g_\mu/2$ 값을 측정하였습니다. 그 측정값은 $g_\mu^{\text{exp}}/2 = 1.011659214(8)(3)$ 으로 그 정밀도는 전자의 경우에 비하여 다소 떨어집니다. 그러나 흥미로운 점은 전자의 경우와 달리 실험 측정값이 이론값과 차이가 난다는 점입니다. 이는 그림 3에서 알 수 있습니다. 이는 엄밀히 말하면 QED 이론만을 테스트하는 것은 아닌 것이 이론 계산의 오차에는 QED 이론 오차, 강상호작용 섭동 계산에서 오는 이론 오차들이 섞여 있기 때문입니다. QED 이론의 테스트와는 별도로 현재 표준모형의 예측과 실험 중 이정도 수준으로 일치하지 않는 결과는 현재로서는 거의 없기 때문에 이에 대한 미래 실험들이 필요한 상황입니다.

뮤온의 전기쌍극자모멘트가 0이 아닌 유한한 값을 가지면 전자 스핀은 원운동 평면에 수직으로 세차운동을 하게 됩니다.

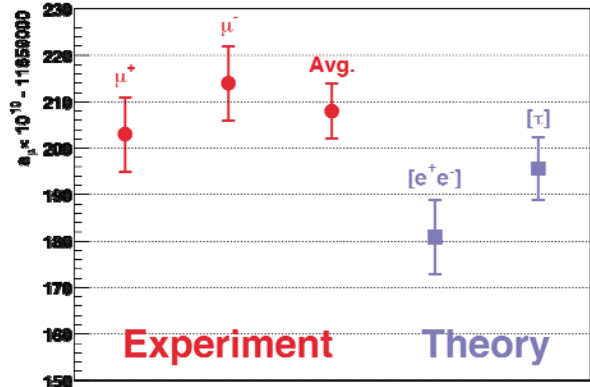


Fig. 3. The experimental values (red, left) from E821 and theoretical values (blue, right) are compared.

이 세차운동은 자기쌍극자모멘트에 의한 세차운동보다는 훨씬 더 느리고 붕괴하는 전자의 위-아래 비대칭을 측정함으로써 알 수 있습니다. 마찬가지로 같은 BNL 실험에서 뮤온의 전기쌍극자모멘트에 대한 상한값은 $|d_\mu| < 1.8 \times 10^{-19} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 으로 설정되었습니다.^[6] 이 결과 역시 전자 경우에 대한 상한값보다는 많이 떨어지는 값이 됩니다.

위에서 언급된 뮤온의 $g_\mu/2$ 값이 이론 결과와 실험결과가 정말로 불일치하는지를 궁극적으로 파악하기 위하여 2017-2018년 시작을 목표로 미국과 일본에서 각각 경쟁적으로 두 가지의 실험을 계획 중에 있습니다. 미국실험은 시카고 근교에 있는 Fermilab에서 수행될 예정인데 기본적으로 BNL 실험의 확장이기 때문에 여기에서는 실험 방법을 자세히 설명하지 않겠습니다. 일본에서 수행될 실험은 토카이 시에 소재한 일본양성자 가속기연구기구(Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC)에서 실험이 수행될 예정입니다. 이 실험은 전혀 다른 방법으로 접근합니다. 우선 양성자를 표적에 산란시켜 표면뮤온을 생성합니다. 이 표면뮤온은 양성자 충돌로 만들어진 파이온 중간자가 표적 표면에서 정지한 후 뮤온+중성미자로 붕괴하였을 경우의 뮤온으로 사실은 양의 전기 전하를 가진 뮤온의 반입자(μ^+) 뜻합니다. 이렇게 만들어진 뮤온은 그 스핀 방향이 운동 방향의 반대로 위치하게 됩니다. 이 표면 뮤온을 다시 표적에 산란시켜 양전하의 뮤온반입자와 전자의 공명상태인 muonium(뮤오늄)을 만들게 됩니다. 이 경우 표적은 뮤오늄을 가장 많이 만들 수 있는 silica-aerogel을 사용합니다. 이렇게 만들어진 뮤오늄은 진공에서 열 운동에너지만 가지고 표적으로부터 확산되는데 이때 펄스 레이저를 이용하여 이온화

REFERENCES

- [6] G. W. Bennett, *et al.*, Phys. Rev. D **80**, 052008 (2009).
- [7] G. A. Beer, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 091C01.

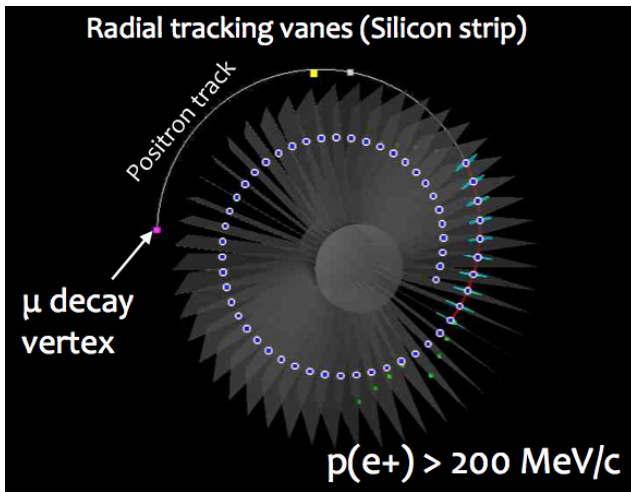


Fig. 4. A simulation drawing of muon decay in a J-PARC experiment in Japan. The maximum radial diameter of the detector is about 66 cm.

시켜 극저온의 뮤온을 얻습니다.^[7] 이렇게 복잡한 과정을 통하여 극저온 뮤온을 얻으려는 이유는 위의 스핀세차운동 각속도 수식으로 돌아가면 알 수 있습니다. 미국 실험에서는 두 번째 항을 없애기 위하여 magic 운동량 값을 사용하였지만 일본 실험의 경우 뮤온 빔을 집속시키기 위한 전기장을 없애는 방법으로 두 번째 항을 없앱니다. 극저온 뮤온의 경우 뮤온의 크기는 매우 작기 때문에 뮤온 빔을 집속시킬 수 있습니다. 이러한 극저온 뮤온은 이제 원하는 운동량만큼 자유롭게 가속시켜서 실험을 준비할 수 있게 되는 것입니다. 현재 일본 실험에서는 운동량을 300 MeV/c로 가속시켜 이를 3 T의 자기장 공간에 저장 합니다. 이러한 경우 뮤온의 저장 공간은 직경이 약 66 cm로 상대적으로 아주 작게 형성이 됩니다(그림 4 참고). 이렇게 전혀 다르게 실험을 설계하면 장단점이 있습니다. 장점으로는 독립적인 실험 방법으로 독립적인 테스트가 가능합니다. 단점으로는 기존과는 다른 계통오차를 다루게 되어 다시 새롭게 연구를 수행하여야 할 것이며 또한 새로운 방법이 과연 성공적으로 구현될 것인가에 대한 위험도 있습니다. 하지만 실험의 묘미는 새로운 방법으로 새로운 연구를 함에 있지 않겠습니까?

위에서 언급한 뮤오늄은 수소원자와 달리 오로지 경입자들로만 이루어진 “원자”입니다. 이러한 뮤오늄에서 hyperfine splitting 진동수를 QED 이론으로 수소원자의 경우와 달리 매우 정확하게 측정할 수 있습니다. 실험 방법은 뮤오늄을 원통형 진공 상자에 저장한 후 일정한 크기의 자기장(1.7 T)을

인가하여 Zeeman splitting을 만들어 낸 후 전자와 뮤온이 만드는 스핀 구조에 의한 에너지 차이를 라디오주파수 공명 기술력을 이용하여 측정합니다. 최근 이론에 의하면^[8] 이 진동수는 $\nu_{HFS}^{th} = 4463.302891(272)$ MHz로서 63 ppb의 오차를 가지고 있습니다. 이에 대한 뮤오늄 hyperfine splitting 실험은 1999년에 수행되었는데^[9] 그 결과는 $\nu_{HFS}^{exp} = 4463.302765(53)$ MHz로서 12 ppb의 오차를 가지고 있어서 이론과 실험이 유효숫자 일곱 자리까지 일치하고 있습니다.

향후 미래 전망

여러 기본 경입자에 대한 다양한 물리량을 열자리 이상 그 값을 놀랄 정도로 정확하게 예측하는 50년 역사의 QED 이론은 단순히 실험을 통한 검증을 하기 위한 이론이 아니라 우리가 알지 못하는 새로운 물리현상을 탐색하는데 필요한 이론적 도구로 유용하게 쓰이고 있습니다. 양전자의 $g_e/2$ 측정이 전자의 값만큼 정밀하게 이루어진다면 우리는 이제 CPT 검증을 아무도 하지 못했던 영역에서 처음으로 할 수 있게 됩니다. 또한 현재 유일하게 QED 영역에서 이론과 실험이 불일치하고 있는 뮤온의 $g_\mu/2$ 값도 현재 건설 중인 미국, 일본의 두 독립적인 실험에서 서로 다른 방법으로 정밀 측정을 계획하고 있습니다. 이는 앞으로 5년 이내 입자물리학 분야에서 가장 주목하는 실험 중 하나로 생각되고 있습니다. 한편으로는 뮤온 $g_\mu/2$ 실험에서 스핀 각진동수를 측정하여 $g_\mu/2$ 로 변환하는데 필요한 매개변수가 뮤오늄의 hyperfine splitting 진동수가 됩니다. 따라서 현재 12 ppb의 상대적 오차를 (93%가 통계오차) 줄이기 위한 새로운 실험이 일본의 J-PARC에서 건설 중에 있습니다. 이 실험은 뮤온 $g_\mu/2$ 실험 시작 바로 직전에 수행될 예정입니다. 50년 역사의 QED 이론이 2015년 오늘날에 와서는 새로운 물리현상을 탐색하고 이해하는 다양한 실험 노력의 기반인 정밀한 이론적 도구로 쓰이고 있습니다. 앞으로 한국의 많은 실험 연구자들이 이러한 다양한 노력에 동참하고 더 나아가 우리나라에서도 경쟁력있는 QED 정밀 측정 실험을 할 수 있는 시기가 오기를 희망해 봅니다.

REFERENCES

- [8] D. Nomura and T. Teubner, Nucl. Phys. B **867**, 236 (2013).
- [9] W. Liu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 711 (1999).