CP 대칭성 깨짐 연구로써의 양성자 전기 쌍극자 모멘트 측정 실험*

DOI: 10.3938/PhiT.24.032

Selcuk Haciomeroglu (번역: 이명재)

The Proton Electric Dipole Moment (pEDM) Experiment As a Very Sensitive CP-violation Probe

Selcuk HACIOMEROGLU (Translated by Myeongjae LEE)

The origin of the asymmetry between the amounts of matter and antimatter in the early Universe, leading to the domination of matter at our time, still remains a mystery. Many potential solutions have been explored, but a mechanism based on CP-violation (*i.e.*, breaking a combined charge and mirror image symmetry) seems to be most promising. In this article, we present the work of the Center for Axion and Precision Physics (CAPP) of the Institute for Basic Science on the pEDM experiment, aiming at probing the CP-violation via the EDM, a CP-violating quantity. We explain the basics of the experimental techniques to be employed, as well as their roles and purposes. We point out the consequences of a potential strong CP-violation detection for the New Physics.

우주는 물질로 가득 차 있고, 이는 우주의 물질-반물질 비 대칭성으로 인한 것이다. 이러한 비대칭성의 원인은 아직 알려져 있지 않으나, CP 대칭성 깨짐 현상이 가장 중요한 원인으로 생각되고 있다. 이 글은 기초과학연구원 엑시온 및 극한 상호작용연구단(Center for Axion and Precision Physics research, CAPP)의 양성자 전기 쌍극자 측정 실험에 대해 기술하였다. 기본적인 실험 테크닉과 함께, 이 실험을 통해 측정되는 전기

쌍극자 모멘트가 결과적으로 새로운 물리 이론의 탐구에 미치는 영향을 논의하였다.

우주는 빅뱅 이후로 138억 년의 시간이 흘렀고, 지금의 우주는 물질로만 가득 차 있다. 물질과 반물질 사이에 비대칭이 존재하는 이유는 아직까지 알려져 있지 않다. 하지만 많은 입자물리학의 표준 모형은 CP 대칭성 깨짐 현상을 도입하고 이를 통해 물질-반물질 비대칭을 설명하고 있다.

모든 물리 현상에는 대칭성이 존재한다. CP(Charge-Parity) 대칭성이란, 어떤 좌표계에서 물질에 적용되는 물리 법칙과 동등한 법칙이 거울 대칭 좌표계에서 반물질에도 적용된다는 것을 의미한다. 지난 50년간의 실험에서 CP 대칭성이 깨어지는 것이 관찰되었고,^[1,2] 이를 통해 입자물리의 표준 모형이 수정되었다. CKM(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 메커니즘이 도입되었으며,^[3] 이를 통해 실험과 이론이 일치함을 보여주었다. 그러나 CKM 메커니즘에 의해 설명되는 약상호작용에서의 대칭성 깨짐만으로는 우주의 물질-반물질 비대칭을 설명하기에 부족하고, 새로운 CP 대칭성 깨짐 현상의 근원이 필요하다. 새로운 CP 대칭성 깨짐 현상은 기존의 표준모형으로는 설명되지 않기 때문에, 반드시 새로운 물리 이론을 필요로 한다.

본 엑시온 및 극한 상호작용 연구단은 양성자의 전기 쌍극자 모멘트(proton electric dipole moment, pEDM) 측정을 통해 CP 대칭성 깨짐 현상을 연구한다. 표준 모형에서 CKM 메커니즘을 통해 예측되는 양성자의 전기 쌍극자 모멘트는 10^{-31} e.cm 정도로 매우 작지만, 초대칭 이론 등에서는 더 강한 CP 대칭성 깨짐을 도입함으로써, 더 큰 양성자 전기 쌍극자 모멘

REFERENCES

- [1] Christenson, J. *et al.*, Phys. Rev. Lett. **13**(4), 138 (1964).
- [2] Aubert, B., *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**(9), 091801 1-8 (2001).
- [3] Kobayashi, M. and Maskawa, T., Prog. of Th. Phys. **49**(2), 652 (1973).

저자약력

Selcuk Haciomeroglu 박사는 Istanbul Technical University에서 물리학으로 박사학위(2013)를 받았다. Istanbul Technical University, Research Assistant(2005-2009), Brookhaven National Laboratory, Visiting Researcher(2009-2011), Istanbul Technical University, Research Assistant(2011-2013)를 거쳐 2014년부터 현재 IBS CAPP에서 연구위원으로 재직 중이다. (selcuk@ibs.re.kr)

* 이 글(원제: The Proton Electric Dipole Moment (pEDM) Experiment As a Very Sensitive CP-violation Probe)은 독자의 이해를 돕기 위해 영문으로 작성된 원고를 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단(CAPP) 연구위원인 이명재 박사가 번역하였다.

Fig. 1. The proton beams will be injected into the ring with their spins polarized in the same direction with momentum ($t=0$). They will be stored under in an all-electric ring. In case of a measurable EDM, vertical spin component will grow over time. The rate of this grow is proportional to the proton EDM.

트 값을 예측한다.

양성자 전기 쌍극자 모멘트 측정 실험의 목표는 이를 10^{-29} e.cm 수준으로 측정하는 것이며, 이는 현재의 실험 한계치보다 10만 배 정밀한 수준이다.^[4] 이 값이 의미하는 것은, 양성자 내부의 전하 분포 1차 모멘트를 스핀의 방향을 기준으로 10^{-29} cm라는 매우 작은 분해능으로 측정해 낸다는 것이다. 이 값은 실제로 매우 작은 값으로, 양성자의 크기와 비교하여 10^{-29} cm의 분해능은 태양계에서 1 cm를 구분해 내는 것과 비교할 수 있다.

실험은 운동량 방향으로 편극화된 양성자 빔을 강한 전기장 하에서 약 15분 동안 저장하기 위하여 전기장만으로 구성된 저장링을 이용한다. 양성자의 스핀 방향으로 전기 쌍극자 모멘트가 존재한다면, 반지름 방향(수평방향) 전기장에 의해 스핀이 수직 방향으로 세차운동을 할 것이다. 강한 전기장 하에서 양성자의 수직 방향 스핀 편극의 변화율은 양성자의 전기 쌍극자 모멘트에 비례한다(그림 1).

양성자는 저장링에 약 10^4 번 입사되고, 한번 입사된 양성자는 약 10^3 초 동안 저장된다. 실험에서 가장 중요한 요소 중의 하나로, 입사되는 양성자 빔은 둘로 나뉘어져 서로 반대 방향으로 회전하게 되는데, 반대방향으로 회전하는 두 빔은 수백억 번 이상 만나게 되지만, 둘 사이의 상호작용은 무시할 수 있는 수준이다. 이러한 구조는 실험의 대칭성을 향상시켜서, 몇몇 계통 오차를 제거할 수 있는 방법을 제공한다.

저장링은 약 500미터 길이로 구성된다. 양성자 빔은 약 100개의 묶음으로 구성되며, 광속의 60%의 속도로 회전하여, 한번 회전에 약 3 μ sec이 소요된다. 전기장을 이용한 저장링을 만들기 위해서는 쌍극 전자석과 같이 양성자의 진행 경로를 휘어지게 만들 수 있는 deflector가 필요한데, 이를 위해 3 cm 간격의 두 개의 평행 판으로 부채꼴 모양의 전극을 만들고, 240 kV의 전위차를 걸어서, 이 전극 사이에 양성자 빔이 통과시킨다. 빔은 반지름 방향으로 8 MV/m 전기장을 통과하면서 수직 방향 스핀의 세차 운동이 발생한다. 이 전기장의 크기는

Fig. 2. The ring will be composed of a sequence of deflectors and drift regions. The deflectors are essentially concentric plates with some curvature. They will be separated by 3 cm, through which the beam will pass. The deflectors will be separated by drift regions. The drifts will host the measurement and control units like quadrupoles, BPMs, RF cavity etc. The figure is not to scale for better visibility.

Fig. 3. The cross section of an electrostatic quadrupole with the beam (shown in red) passing through. Quadrupoles are utilized for focusing the beam around the design orbit (origin in the cross section). It is ideally composed of four plates of hyperbolic shape, but simpler geometries are also possible in practice. A quad always focuses the beam in one direction (vertical for this case) and defocuses in the other. So, both focusing and defocusing quadrupoles are used in a typical accelerator in an alternate focusing configuration. The direction of focusing is determined by the sign of the potential on the plates.

매우 크기 때문에 특별히 주의 깊게 만들어진 전극판을 필요로 한다.

저장링에는 이와 같은 deflector가 약 50개 있으며, 각각은 직선형의 가속관으로 연결되었다(그림 2). 직선형 가속관은 4극 전자석, 6극 전자석(전자석이라고는 하지만 실제로는 자기장이 아닌 전기장만을 사용한다), RF 공진기, 빔 위치 측정기와 같은 장치들을 설치하기 위하여 반드시 필요하다. 4극 전자

REFERENCES

- [4] Baker, C., *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 131801 (2006).

Fig. 4. An RF cavity creates an oscillating electric field inside, in the longitudinal direction. It is utilized for synchronizing the particles to the ideal particle. This makes sure that the momentum of every particle will average to the “magic momentum” (See Figure 5 for additional information).

Fig. 5. The longitudinal electric field in the RF cavity oscillates in the revolution frequency of the ideal particle. Therefore the ideal particle comes to the cavity at zero phase. However, the slow particle reaches the cavity in a positive phase and gains energy inside the RF cavity. Similarly, the particles with larger momentum than the magic reaches the cavity at the negative phase. Then, the RF cavity takes out some energy from the particle. This makes sure that every particle has a magic momentum on average.

석은 빔이 원래 위치에서 벗어나는 정도에 따라 전기력을 가하여, 빔을 집속시키는 용도로 사용하는데, 양성자 빔이 수직/수평방향으로 진동하면서 저장링 밖으로 나가는 것을 막는다(그림 3). 6극 전자석은 4극 전자석과 비슷하며 빔의 운동량 보정에 사용된다.

양성자 전기 쌍극자 모멘트 측정 실험의 가장 중요한 특징은, 양성자들의 운동량이 0.7 GeV/c라는 특수한 값을 유지해야 한다는 것이다. 이 값에서 운동량이 벗어날수록 수평방향

Fig. 6. A computer aided design (CAD) drawing of shielding prototype. It is basically composed of two layers of mu-metal, separated by a few cm. The length of the prototype is 2.25 m and the outer radius is 65 cm. The beampipe will be covered by these shielding layers.

스핀 세차 운동이 빨라지며, 전기 쌍극자 모멘트 측정의 감도를 심각하게 떨어뜨린다. 실제적으로는 양성자의 운동량은 0.7 GeV/c 주변에서 넓은 분포를 보이기 때문에, 이를 보정하기 위하여 RF 공진기를 사용한다. RF 공진기에는 빔의 진행 방향으로 진동하는 전기장이 형성되어 있으며, 진동 주파수를 양성자의 저장링 회전 주파수에 맞추어, 양성자 운동량이 0.7 GeV/c보다 작으면 에너지를 얻고, 이 값보다 크면 에너지를 잃는 방식으로 작동한다(그림 4, 5). 이를 통해 양성자의 수평방향 스핀 세차 운동을 10^3 초 동안 1 라디안 이내로 유지할 수 있다.

양성자는 전기 쌍극자 모멘트 외에도 자기 쌍극자 모멘트도 존재하며, 이는 배경 자기장 하에서 스핀이 수직 방향으로 세차 운동하게 한다. 그러므로 순수하게 전기 쌍극자 모멘트만 측정하기 위해서는 자기장을 정밀하게 통제하고 이해하여야 한다. 이를 위해, 초전도 양자 간섭장치(superconducting-quantum-interference-devices, SQUID)를 이용하여 제작된 빔 위치 측정기를 사용한다. 자기장에 의한 계통 오차를 제거하기 위하여 두 단계의 방법이 사용된다. 첫째, 자기장 차폐 시설 연구이고, 두 번째, 빔 위치 모니터를 이용한 정밀 측정이다. 자기장 차폐의 경우, 모든 가속관과 저장링에 대하여 자기장 차폐 설비를 하여, 내부 자기장의 크기를 1 nT 이하로 유지한다. 본 연구단은 이러한 자기장 차폐 시설의 모형을 만들어서 테스트를 진행하고 있다(그림 6). 이 모형은 독일 Peter Fierlinger 연구그룹에 의해 설계되었으며, 이 그룹은 이미 세계에서 가장 좋은 성능의 자기장 차폐 설비를 만든 바 있다. 효과적인 자기장 차폐를 위해서 여러 종류의 Mu-metal의 조합을 사용하였으며, 차폐체 구조의 최적화, 효과적인 degaussing

방법 수립 등의 연구가 필요하며, pEDM 실험을 위한 기술 이전과 최적화가 진행 중이다.

두 번째 단계로 자기장 차폐 내부에 존재하는 반지름 방향의 매우 작은 자기장을 정밀 측정하고, 이를 보정하는 방법이다. 이때, 저장링을 서로 반대 방향으로 회전하는 양성자 빔을 이용한다. 두 빔의 수직 방향 간극의 크기는 반지름 방향(수평방향) 자기장의 크기에 비례하는데, 이는 다시 수평 방향으로 자기장을 형성하고 그 크기는 수직 방향 빔의 집속 강도에 비례한다. 이 자기장의 크기는 10^{-18} T 정도의 크기으로써, 현존하는 어떤 자기장 측정 장치로도 직접 측정할 수 없다. 본 연구단은 이러한 매우 작은 자기장을 높은 신호-잡음 비율로 측정해 내기 위하여, 4극 전자석의 세기를 특정 주파수로 변조시키고, 이를 통해 빔의 수직방향 집속 강도를 변화시킨 후, SQUID를 이용하여 두 반대 방향 빔 사이 간극을 측정하는 방식의 연구를 진행하고 있다. 이때 사용될 SQUID는 한국표준연구소의 이용호 박사 연구팀과 함께 개발과 최적화 연구를 진행 중이다.

스핀 편극의 측정도 양성자 전기 쌍극자 모멘트 측정 실험에서 매우 중요한 연구 주제이다. 양성자 빔이 저장링에 저장되는 10^3 초 동안 일정한 비율로 추출된다. 저장링에는 두 개의

탄소 타겟이 설치되어 있는데, 양성자 빔이 저장링을 회전함에 따라 일정한 비율의 양성자가 탄소 타겟과 충돌하게 되고, 이때 산란된 양성자는 검출기와 반응하게 된다. 검출기에서 검출되는 양성자의 위치는 수직 방향 스핀의 평균값에 대한 정보를 담고 있으며, 이를 통해 스핀 세차를 측정할 수 있다. 스핀의 세차가 측정된다는 것은 전기 쌍극자 모멘트가 0이 아님을 의미한다. 검출기로서는 실리콘 검출기, Micromega, 가스 전자 증폭관(Gas electron multiplier, GEM) 검출기 등이 연구되고 있으며, 본 연구단은 박성태 박사의 주도하에 GEM 검출기의 설계 및 제작과 성능 평가 등의 연구를 진행하고 있다.

지금까지 양성자 전기 쌍극자 모멘트 국제 공동 연구그룹은 많은 계통 오차와 가속기 구조, 빔의 안정성 등의 이슈에 대해 연구하여 왔으며, 실험의 가능성을 보여주고 있다. 빔 위치 모니터와 양성자 검출기는 현재 본 연구단에서 연구가 진행 중이다. 이 실험은 국제 공동 연구로써 한국이 많은 기여와 주도적 참여를 하고 있다. 성공적인 양성자 전기 쌍극자 모멘트를 측정한다는 것이 표준모형을 넘어서는 더 강한 CP 대칭성 깨짐의 존재와, 더불어 새로운 물리 이론과 직접적으로 연관되어 있는 바, 이 실험의 중요도 또한 매우 높다고 할 수 있다.