엑시온 및 극한상호작용 연구단

엑시온 검출을 위한 초전도 RF 공진기의 개발

DOI: 10.3938/PhiT.24.030

이진환·장원준·이도유·Harry W. Themann·Yannis K. Semertzidis

Development of Superconducting RF Cavities for Axion Detection

Jinhwan LEE, Wonjun JANG, Doyu LEE, Harry W. THEMANN and Yannis K. SEMERTZIDIS

One of the central research topics of modern cosmology has been to determine how the universe has been expanding after the big bang and how the symmetry between particles and antiparticles is broken in the universe we know of. One way leading to the solutions of these problems is to identify the properties of dark matter, whose existence has been proven indirectly, and to understand the link between dark matter and the strong CP symmetry problem. The Institute

for Basic Science center for axion and precision physics (CAPP) has been generously supported by its host institute, the Korea Advanced Institute for Science and Technology (KAIST) and was granted new research space on the nearby Munji campus. The CAPP research center is determined to lead worldwide research on the axion and other precision physics by realizing an ultra-low-temperature RF facility, high-field superconductor magnets, an RF amplifier with high sensitivity, and ultra-low-loss superconducting resonators that are distinct from those of our collaborating predecessors ADMX and CAST-CERN. In this article, we present the necessity for this research and the basic principles and direction of the development efforts on the superconducting cavity with an ultra-high quality factor, and we discuss potential impact of this research on general physics and high technology.

저자약력

이진환 교수는 서울대학교 물리학 박사(2002)로서 서울대학교 반도체공동 연구소 박사후연구원(2002-2004), Cornell대학교 박사후연구원(2004-2009)을 거쳐 현재 KAIST 물리학과 교수로 KAIST-KRISs 측정과학우수 연구센터장을 맡고 있다. (jinhwan@kaist.ac.kr)

장원준 박사는 고려대학교 이학박사(2014)로서 University of Tokyo에서 방문연구원, 고려대학교 박사후연구원을 거쳐 현재 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단 (CAPP) 연구위원으로 재직 중이다. (jwj8125@ibs.re.kr)

이도유는 KAIST 물리학과 이학사(2014)로, 현재 KAIST에 재학 중이며, IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단(CAPP)에서 연구활동을 하고 있다. (du5698@kaist.ac.kr)

Harry W. Themann 박사는 SUNY Stony Brook에서 물리학 이학박사(2011) 학위를 받고, 현재 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단(CAPP) 연구위원으로 재직 중이다. (themann@ibs.re.kr)

Yannis K. Semertzidis 단장은 University of Rochester(NY, USA) 물리학 이학박사(1989)로서 University of Rochester, Research Associate(1990-1992), Brookhaven National Laboratory(BNL), Assistant Physicist(1992-1995), CERN, PPE Division, Fellow(1993-1995), BNL, Department of Physics, Associate Physicist(1995-1997), BNL, Department of Physics, Physicist(1997-2000), BNL, Tenured Physicist(2000-2012), BNL, Senior Scientist with Tenure(2012-현재)를 거쳐 현재 KAIST 물리학과 교수 겸 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단 (CAPP) 단장으로 재직 중이다. (yannis@kaist.ac.kr)

대폭발 후 우주가 어떻게 팽창해 나가는가와 은하계가 어떻게 현재의 모습을 가지게 되었는가, 그리고 입자와 반입자 사이의 대칭성이 어떻게 깨어지게 되었는가 하는 의문들은 현대 우주론의 핵심적인 연구 과제이다. 이들 문제에 대한 공통적인 해결 방안은 현재 간접적으로 그 존재가 증명되고 있는 우주의 암흑 물질의 정체를 밝히고, 그 암흑 물질과 우주의 strong CP 대칭성 문제와의 연결 고리를 밝히는 일이 될 것이다. IBS CAPP 엑시온 연구단은 호스트 기관인 KAIST의 안정적인 지원을 얻어 최근 인근의 문지 캠퍼스에 새로운 연구 공간을 확보하였으며, 현재 선발 주자인 ADMX 및 CAST-CERN과 차별되는 극저온과 초고자기장 및 초전도 공진기의 실현을 통해 세계의 엑시온 및 극한상호작용 관련 연구를 주도해 나가고자 한다. 이에 이들 핵심 연구 주제들에 대한 필요성과 연구 방향 및 전망을 소개하고자 한다.

엑시온은 Peccei와 Quinn 등에 의해 우주의 strong CP 대칭성 문제를 해결하기 위해 제안되고, 이후에 한국의 김진의 교수를 포함한 KSVZ, DFSZ의 두 그룹의 과학자들에 의해 발

Fig. 1. (Upper) The aerial picture of the Creation hall in KAIST Munji campus where the IBS CAPP is to be accommodated. (Lower) Rendered design of the low vibration and RF shielded labs under construction for axion detection and other precision physics measurements.

전된, 미소 질량과 매우 긴 수명을 가진 가상의 암흑 물질 입자 후보의 하나이다.^[1] 액시온은 우주 탄생시에 대량으로 생성되었고 현재에도 태양에서 생성되고 있는 것으로 예상되고 있다. 액시온은 전기적으로 중성이며 중성미자와 유사하게 일반 입자(전자, 양성자, 중성자 등)나 빛과는 거의 반응하지 않을 뿐 아니라,^[1] 페르미온인 중성미자와는 달리 보존이어서 그 자체와의 상호작용도 극히 적은 것으로 알려져 있다. 액시온은 큰 운동 에너지와 미소한 질량, 그리고 극히 미소한 중력 외의 상호작용으로 인해 지구나 태양의 중력에 대해서는 탈출 속도보다 훨씬 큰 평균 속도를 가짐으로써 포획되지 않고, 은하계 수준의 규모에서는 중력에 의해 포획되어 은하계와 유사한 크기의 속이 짙은 공과 유사한 형태로 희박하게 은하계 주위에 분포하고 있는 것으로 예상되고 있다. 최근의 연구 결과에 의하면 현재의 은하계가 지금과 같은 형태와 크기를 유지할 수 있는 것은 그리고 우주에 분포하는 은하계들의 거시적인 구조를 결정하는 것은, 은하계 내부의 항성과 행성과 성간물질 등을 이루는 일반 입자(전자, 양성자, 중성자 등)로 된 물질보다

1) 따라서 이 글을 읽고 있는 동안에도 우주 속을 떠다니는 수억 개의 액시온들이 빠른 속도로 마치 텅 빈 공간을 지나듯 우리 몸을 뚫고 지나가고 있는 것으로 예상된다.

Fig. 2. Simulated picture of the super-galactic scale structure of our universe. One single yellow dot corresponds to an entire galaxy with millions of millions ($10^{11} \sim 10^{12}$) of stars. The gravitational interaction of the galaxies made of ordinary matter with the dark matter shown as purple filamentary fibers is thought to be the reason the galaxies are captured by the dark matter forming filamentary super-galactic distribution. (Figure courtesy by Max Planck Institute for Astrophysics).

5배 정도 더 높은 평균 밀도로 은하계 속과 주변에 분포하는 암흑 물질 때문인 것으로 알려지고 있다.^[1] 특히 액시온은 다른 암흑물질 후보인 WIMP나 MACHO와 달리 보존으로서 자체 마찰이 거의 없는 특성이 있어 은하계 크기의 공 모양의 분포를 유지할 수 있는 암흑 물질의 가장 좋은 후보이다. 액시온의 질량은 대략 전자 질량의 10^{-11} 배 정도로 GHz 주파수 대역의 마이크로파 광자와 같은 정지 질량 에너지를 가질 것으로 예상되며, 은하계 내의 별들의 운동을 설명하는 주된 암흑 물질(Galactic Dark Matter Halo Axion)로 판명될 경우 그 평균 운동 에너지는 자체 정지질량 에너지의 백만분의 1 정도일 것으로 추측되고 있다.^[1] 그러면 어떤 물질과 빛과도 거의 상호작용하지 않는 이 액시온의 존재를 어떻게 하면 검출할 수 있을까?

Sikivie에 의하면 맥스웰 방정식이 액시온과 전자기파와의 Primakoff 상호작용에 의해 미소하게 변경되는데 이로 인해 매우 강한 자기장 속에서는 액시온이 자체 에너지(질량에너지와 운동에너지의 합)에 비례하는 에너지를 가진 순수한 광자로 변환될 수 있다.^[2] 이 효과를 활용하여 액시온을 고자기장 속에서 마이크로파 형태로 검출하여 액시온의 정지 질량과 운동

REFERENCES

- [1] Jihn E. Kim and Gianpaolo Carosi, Rev. Mod. Phys. **82**, 557 (2010).
- [2] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. **51**, 1415 (1983); P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. **52**, 695 (1984).

Fig. 3. (Left two figures) The quality factor of a microwave cavity at TM_{010} mode is determined mainly by the ratio of the characteristic impedance of the vacuum to the surface resistance of the cavity wall. (Third figure) At high frequency the surface resistance of a superconducting film is proportional to the density of normally conducting quasiparticles generated mostly by thermal excitations. The upper limit of the quality factor of a superconducting resonator made of wide gap superconductor can be as high as 10^9 - 10^{11} . (Right-most figure, courtesy from TESLA superconducting cavity project) Indeed the cavity made of Nb which superconducts only at low magnetic field and therefore unusable for the axion cavity can have zero-field quality factor as high as 10^{11} .

에너지의 분포, 밀도, 광자와의 상호작용 효율 등 제반 물리적 성질을 파악하고 이론과 비교하는 것이 본 CAPP 연구단 및 공동 연구 그룹인 ADMX의 엑시온 검출 연구의 주요 목표라 할 수 있다.^[3] 그 외에도 태양에서 X선과 고자기장의 상호작용으로 발생할 것으로 예상되는 고에너지 엑시온을 지구상의 고자기장 자석 속에서 X선으로 재변환하여 측정하려는 시도가 CERN에서 CAST 프로젝트로 진행 중에 있으며 본 연구단에서도 참여하고 있다.^[4]

개별적인 엑시온이 Primakoff 변환에 의해 고자기장 내에서 변환된 극히 미약한 마이크로파 신호를 현대의 저잡음 증폭기로 검출하기 위해서는 무작위적으로 발생하는 이 마이크로파 신호를 지속적으로 공진기 내부에서 중첩시켜 전자 회로로 검출할 수 있을 정도의 큰 진폭의 마이크로파를 만들 수 있어야 하는데, 이를 위해서는 “손실을 이겨내며 파동을 지속적으로 중첩시킬 수 있는 능력”의 척도를 나타내는 “품질 계수(Quality factor, Q-factor)”가 매우 큰 마이크로파 공진기가 필요하다.²⁾ 고자기장 속의 공진기 안에서 측정될, 엑시온이 변환된 마이크로파의 세기는 Sikivie에 의해 제안된 다음 공식으로 예측할 수 있다.^[2]

2) 공진기의 품질 계수는 엄밀히는 마이크로파의 매 진동마다 공진기가 가진 전체 마이크로파 에너지의 어느 비율이 손실되어 없어지는가를 측정하여 그 역수로 나타내게 되는데, 대부분의 경우 공진기에서 도체로 된 구성 부품 표면에서 수평한 성분의 자기장이 진동할 때 표면으로부터 skin depth 만큼의 두께로 흐르는 표면 전류가 발생시키는 줄(Joule)열이 공진기의 마이크로파 에너지 손실의 원인이 된다. 현재 초고순도 구리나 알루미늄 등 상전도 도체 공진기로는 고자기장에서는 10^4 정도의 품질 계수가 가능할 것으로 생각되고 있다.

Fig. 4. (Upper) The magnetic flux quantum $\vec{B}\Phi_0$ penetrating through a type-II superconductor film in an applied magnetic field feels the Lorentz force $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}\Phi_0$ by a surface current $\vec{j}$ flowing on the surface of the superconductor. When this force causes the diffusive motion of the flux quantum $\vec{v} = D\vec{F} = D\vec{j} \times \vec{B}\Phi_0$, it induces an electric field in the direction of the surface current $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v} = D\vec{B} \times \vec{F} = D\vec{B} \times (\vec{j} \times \vec{B}\Phi_0)$ and generates Joule loss of up to $P = \vec{E} \cdot \vec{j} = D\vec{B}\Phi_0 j^2 > 0$. Since the flux quanta can be trapped by non-superconducting nanoparticles in the superconducting film, we can suppress the motions of flux quanta and the Joule loss by distributing the nanoparticles at high density throughout the superconducting film. (Lower) The distribution of the magnetic flux quanta measured on the surface of a Fe-based superconductor $\text{Sr}_2\text{VO}_3\text{FeAs}$ at 5 K in 7 Tesla magnetic field. The middle figure is the distribution of surface atoms and electrons, while the right figure is the distribution of the flux quanta measured on the same area.

$$P_{nm} = (3 \times 10^{-18} \text{ W}) \left(\frac{V}{10^5 \text{ cm}^3} \right) \left(\frac{B_0}{10 \text{ T}} \right)^2 \times \frac{1}{n^2 m^2} \left(\frac{m_a}{1.24 \times 10^{-5} \text{ eV}} \right) \left(\frac{N}{6r} \right)^2 \min(1, 10^{-6} Q_{nm})$$

여기서 n 과 m 은 공진기 내부의 TM_{nm0} 모드의 인덱스이며 Q_{nm} 은 해당 모드에 대한 공진기의 품질 계수이며 m_a 는 예측되는 엑시온의 질량이며 $N/6r$ 은 1에 가까운 수이다. 따라서 대략 10 T 고자기장 속에서 30 L 용적의 마이크로파 공진기를 10^6 이상의 품질 계수로 만들면 변환된 마이크로파의 세기는 약 10^{-18} W에 해당하며, 공진기의 품질 계수가 10^6 미만일

REFERENCES

- [3] <http://depts.washington.edu/admx/home.html> - ADMX web site.
- [4] J. Ruza, J. K. Vogela and M. J. Pivovarov, Phys. Proc. **61**, 153 (2015).

Fig. 5. (Left) The rendered design of a superconducting cavity for axion detection. (Right) The distributions of energy loss showing the loss occurring in a small gap between frequency tuning rod and the hole in one end-face of the model cavity for TM_{010} mode as a function of the depth of the gap. In IBS CAPP the researchers try to solve all possibilities of energy loss in realistic situations by performing carefully designed FEM simulations.

경우 그에 비례하여 검출되는 신호 세기가 낮아짐을 알 수 있다.³⁾ 따라서 공진기의 유효 용적을 크게 하고 초전도 자석 또는 하이브리드 자석을 이용하여 자기장을 강하게 하며 초전도 공진기를 이용하여 품질 계수를 $10^6 - 10^7$ 정도까지 개선할 수 있는 방향으로 본 CAPP 연구단 및 공동 연구 중인 ADMX 연구단의 기술 개발이 이루어지고 있다.

잘 알려진 대로 초전도체는 임계온도 아래에서 전기저항이 절대적으로 0이 되며 따라서 고품질 초전도 전선만으로 된 고리는 전류가 한번 가해지면 영구히 흐르게 되어 우주의 나이 만큼 긴 시간이 흘러도 그 자기장이 측정 가능할 만큼 감소하지 않는다는 것이 실험적으로 증명된 바가 있다. 실제로 초전도 공진기를 이용하면 고자기장이 가해지지 않은 경우 초전도체 종류에 따라서는 약 10^{11} 정도까지의 품질계수도 달성 가능한 것으로 보고되고 있다.^[5] 하지만 고자기장 속에서는 많은 초전도체가 초전도성을 잃으며, 또한 초전도성을 잃지 않는 경우에도 마이크로파 대역에서는 아래에 설명될 새로운 에너지 손실 발생 가능성이 존재하게 되어 이를 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

우선 자기장이 없는 경우에도 초전도 공진기가 마이크로파에 대해서 최소한 이론적으로 무한대의 품질 계수를 보장하지 않는 이유는 무엇일까? 그것은 절대 영도의 온도가 아닌 이상 초전도 전류를 가능케 하는 전자쌍뿐 아니라, 초전도 겹을 이기는 열적 요동 등으로 인해 전자쌍이 깨어진 전자의 상전도

Fig. 6. For the research on performance improvement of superconducting film in high magnetic field at cryogenic temperature, the researchers are building a special low temperature high field STM equipped with superconducting film growth and analysis system.

상태가 동시에 존재하는데 기인한다.^[6,7] 즉 마이크로파로 인한 초전도체 표면의 전기장 진동은 이들 두 가지 전자의 성분 즉 초전도 전자쌍과 상전도 전자에 동시에 작용하여 이들을 진동하게 만드는데 초전도 전자쌍의 진동은 전기장의 진동과 90도의 위상차를 가져 에너지 손실을 전혀 주지 않으나 상전도 전자의 진동은 전기장의 진동과 위상차를 가지지 않게 되어 줄(Joule)열을 발생시킨다. 따라서 액시온 검출기용 초전도 물질의 종류를 결정할 때는 초전도 전자쌍의 밀도 대비 상전도 전자의 밀도가 충분히 낮은 초전도 물질을 선택하는 것이 바람직하며, 같은 초전도 물질에 대해서도 공진기의 온도를 초전도 겹을 온도로 환산한 크기보다 충분히 낮추어 최소한 열적인 요동에 의한 상전도 전자의 생성을 억제하는 것이 중요하다.

그 외에도 초전도체는 결맞음 길이와 투과 깊이라는 두 물리량의 대소 관계에 따라 1종과 2종의 두 가지로 나뉘는데, 1종 초전도체는 대체로 0.01 - 0.1 T 정도 작은 크기의 자기장만 걸리게 되면 전체가 초전도를 잃어버리는데 반해, 2종은 수 - 수십 T의 큰 자기장 속에서도 전반적으로 초전도의 성질을 잃지 않는 대신 가해진 자기장이 매우 작은 단위 자속(magnetic flux quantum)으로 나뉘어져 각각이 초전도체를 실가닥처럼 뚫고 지날 수 있게 허용한다.^[8] 따라서 수 T 이상

REFERENCES

- [5] B. Aune *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **3**, 092001 (2000).
- [6] J. R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity* (Addison-Wesley, Redwood City, 1983).
- [7] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity* (McGraw-Hill, New York, NY, 1996).
- [8] A. A. Abrikosov., Rev. Mod. Phys. **76**, 975 (2004).

3) 참고로 10^{-18} W는 지구 지름만큼 떨어진 두 사람이 보통의 휴대폰으로 직접 교신할 경우 수신되는 신호 세기에 해당한다.

의 고자기장에서 동작해야 할 엑시온 검출용 공진기를 이루는 초전도체는 반드시 2종이어야 하며, 우리는 특정한 2종 초전도체 내에서 개별 단위 자속이 마이크로파에 대해 어떻게 반응하는지를 이해해야 할 필요가 있다.

초전도 자속 이론에 의하면 2종 초전도체를 관통하는 단위 자속 $\hat{B} \Phi_0$ 은 그 초전도체에 흐르는 전류 $\vec{j}$ 에 의해 $\vec{F} = \vec{j} \times \hat{B} \Phi_0$ 와 같은 로렌츠 힘을 받게 되는데, 만약 이 로렌츠 힘과 초전도체 내의 요철 포텐셜에 의해 자속이 $\vec{v} = D\vec{F} = D\vec{j} \times \hat{B} \Phi_0$ 의 속도로 움직이게 된다면 초전도체 내부에 $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v} = D\vec{B} \times (\vec{j} \times \hat{B} \Phi_0)$ 의 국소적인 전기장이 발생하게 된다.^[9,10] 이 전기장은 필연적으로 $\vec{j}$ 방향의 성분을 가지고 있어 최대 $P = \vec{E} \cdot \vec{j} = DB \Phi_0 j^2 > 0$ 의 열손실을 발생시킨다. 따라서 초전도체 내의 요철 포텐셜을 강하게 하여 (매우 작은 D 에 해당) 자속이 로렌츠 힘에 반응하여 운동하지 않도록 특수한 자속 고정 구조를 가진 초전도체를 개발할 필요성이 있고 본 연구단에서는 강한 임계 자기장, 큰 초전도 갭과 최소의 상전도 전자 밀도를 가진 몇 가지 초전도체를 택하여 특수한 자속 고정 구조를 가지는 초전도체로 이루어진 공진기의 개발을 진행하고 있다. 특히 수 T 이상의 고자기장에서는 수십 나노미터 수준의 자속 고정자 간격이 필요하므로 첨단 나노 구조 합성기술, 초저온 고자기장 주사탐침현미경 등을 활용한 나노 측정기술 등 다방면의 첨단 기술을 활용하여 연구가 진행되고 있다. 또한 공진기 내부의 주파수 가변용 기계 구조와 마이크로파 검출

안테나와 증폭기의 각 부위에서 발생하는 불필요한 에너지 손실을 최소화한 공진기 설계를 통해, 궁극적으로는 $10^7 - 10^8$ 정도의 품질 계수를 가진 초전도 공진기 개발을 달성하기 위해 연구를 진행하고 있다.

높은 품질 계수를 가지는 초전도 공진기의 개발에 의해 궁극적으로 우리 은하계에 포획된 엑시온의 존재 확인은 물론 그 운동 에너지 분포와 밀도와 변환 효율을 정밀히 확정할 수 있다면 이를 통해 strong CP 문제 해결을 통한 우주의 물질-반물질의 비대칭성 이해, 암흑물질의 성질과 분포 측정을 통한 우주와 은하계의 형성 과정 이해 등 현재 우주론의 남은 주요 문제들의 실마리를 밝혀낼 수 있을 것으로 기대된다. 또 실용적으로도 초전도체의 밴드구조와 갭대칭성을 활용한 저손실 마이크로파 초전도체 개발, 고품질 초전도 박막 성장 및 나노 구조 합성 기술을 통한 초전도 자속 제어 기술, 초저온 기술 및 초정밀 마이크로파 측정 기술 등이 모두 융합된 본 연구를 통해, 초전도체를 이용한 고주파 에너지 전송 및 초미세 마이크로파 신호의 초원거리 송수신 기술 개발과 응용에도 새로운 전기를 가져다 줄 수 있을 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [9] Y. B. Kim, C. F. Hempstead and A. R. Strnad, Phys. Rev. **139**, A1163 (1965).
- [10] John Bardeen and M. J. Stephen, Phys. Rev. **140**, A1197 (1965).