엑시온 및 극한상호작용 연구단

IBS 엑시온 및 극한상호작용 연구단의 초저온 엑시온 검출 장치 소개

DOI: 10.3938/PhiT.24.031

정 우 현

The Coldest Axion Experiment at CAPP/IBS/KAIST in Korea

Woohyun CHUNG

The axion, a hypothetical elementary particle arising from the Peccei-Quinn solution to the strong-CP problem, is a well-established dark matter candidate. The IBS Center for Axion and Precision Physics Research (CAPP) in Korea will explore the dark matter axion by using the method suggested by Sikivie, converting the axions into microwave photons in a resonant cavity permeated by a strong magnetic field. CAPP's first microwave axion experiment in an ultra-low-temperature setup is being launched at the KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) campus this summer and will utilize top of the line equipment and technology. The progress of and future plans for the axion experiment will be discussed.

개 요

암흑물질은 우주에 존재하는 물질 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 것으로 알려져 있지만, 여전히 우리에게는 신비로운 존재로 남아있다. “보이지도 않고(invisible)”, “파악할 수도 없기(intangible)” 때문이다. 과학자의 언어로 하면 빛과 반응하지 않고 다른 물질과도 거의 반응을 하지 않는다는 이야기다. 거슬러 올라가서 1930년대에 천문학자인 Fritz Zwicky가 처음 그 존재를 알린 이후, 수많은 과학자들의 무수한 시도에도 불구하고 꼬리조차 들어내지 않는 이유다. 지금까지의 연구와 관

저자약력

정우현 박사는 서울대를 거쳐 University of Pittsburgh에서 입자 물리학 실험으로 박사학위(1995년)를 받았고 Fermilab의 Collider 실험인 CDF에 University of Wisconsin 소속 Scientist로 참여(2013년)했으며, 작년부 터 기초과학연구원의 엑시온 및 극한상호작용 연구단에 합류하여 한국 최초의 엑시온 검출 장치를 구축하는 연구를 수행 중이다. (gnuwcw@ibs.re.kr)

측의 결과라면, 우리에게 알려지지 않은 전혀 새로운 입자일 거라는 정도랄까.

엑시온은 바로 그 암흑물질을 이루고 있으리라 생각되는 새로운 입자 후보 중의 하나다. 여기서 재미있는 사실은 엑시온의 이론적 근거가 암흑물질을 염두에 두고 만들어지지 않았다는 사실이다. 70년대 말 스탠포드 대학의 Roberto Peccei와 Helen Quinn 두 교수가 quantum chromodynamics의 숙제였던 strong CP 문제를 해결하기 위한 새로운 field(장)의 필요성을 주장했으며,^[1] 이에 상응하는 가상의 입자는 엑시온(axion)이라 불렸다. 모든 문제를 깨끗하게 해결하는 입자라는 의미에서 당시 저명한 물리학자인 Frank Wilczek은 가장 잘 팔리는 세제(?)의 이름을 가져다 붙였다. 엑시온이 암흑물질에 대한 의문도 깨끗하게 씻어낼 수 있을까?

반면, 가장 강력한 암흑물질 후보인 WIMP(Weakly Interacting Massive Particle)와의 격차는 근래에 급속히 좁혀지고 있는 상황이다. 최근까지 진행된 20여 개의 WIMP 실험 결과가 모두 빈손으로 돌아왔기 때문이다.

엑시온의 검출

과연 엑시온을 어떻게 검출할 수 있을까? 가장 안일한 방법은 엑시온이 광자 두 개로 변환되기를 기다리는 것이다. 문제는 이때 걸리는 시간이 10^{50} 초 정도라는 것이다. 우주의 나이가 10^{18} 초임을 감안하면 함부로 기다릴 수 있는 시간이 아니다. 여기서 당시 플로리다 대학의 Pierre Sikivie 교수의 기발한 아이디어가 나왔다. 1983년 논문^[2]에서 그는 강력한 자기장에 놓인 엑시온의 반응을 계산했다. 만약 암흑물질이 엑시온이라면 우리는 항상 엑시온의 질량에 해당하는 주파수로 진동하는 장(field) 안에 둘러 싸여있다고 가정했다. 강한 자기장은 서

REFERENCES

- [1] R. Peccei and H. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977); Phys. Rev. D **16**, 1791 (1977).
- [2] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. **51**, 1415 (1983); Phys. Rev. D **32**, 2988 (1985).

로 다른 주파수의 무수한 virtual photon들을 만들어내고 이들 중에서 엑시온의 주파수에 해당하는 virtual photon들이 엑시온의 광자로의 변환을 격발시키며, 이 반응이 전자기와 공진기 안에서 일어날 때 변환된 광자로부터 나오는 검출 신호는 그 공진기의 Q(Quality) 값만큼 증폭되어 나온다는 것이다. 이 멋진 아이디어에 반해서 수년 내에 두개의 실험이 시작되었으며 그 중 하나가 명맥을 이어 내려온 것이 바로 지구상의 유일한, 그리고 가장 성공적인 엑시온 실험인 ADMX(Axion Dark Matter eXperiment)다. 가장 성공적이라는 ADMX는 지난 25년 동안(1990년경에 ADMX로 개명) 왜 엑시온을 못 찾았을까? 여기서 Sikivie의 공식을 살펴볼 필요가 있다. 그에 따르면 엑시온이 광자로 변환되는 강도(conversion power)는 자기장의 제공에 비례하고, 공진기의 용적과 Q값에 비례하며 현재 ADMX의 실험값을 집어넣어도, 검출 신호의 강도가 10^{-22} W 정도밖에 되지 않는다. 이 정도 신호라면 지구에서 쏘아올린 파이오니어 10호가 명왕성을 지나 120억 km 떨어진 곳에서 보내는 신호에도 미치지 못하다. 결국 검출기의 감도(sensitivity)가 엑시온 신호를 구별할 만큼 미치지 못했기 때문이라 할 수 있다. 90년대 후반에 불붙기 시작한 SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)의 개발에 힘입어 제대로 된 결과를 내기 시작한 것은 몇 년 되지 않는다.

엑시온 및 극한 상호작용 연구단

기초과학연구원의 엑시온 연구단(이하 줄여서 CAPP, Center for Axion and Precision Physics Research)은 세계 최고 수준의 엑시온 연구를 지향하고 그에 걸맞는 시설을 확보하여 10년 안에 엑시온의 존재 유무를 확신을 가지고 (발견하든지 없다고 결론짓기 위해 설립되었다. CAPP 주 검출 장치의 디자인이 Sikivie의 모델을 따르는 이유로 ADMX 검출 장치와의 비교가 불가피하다. 여기서 ADMX 검출 장치를 자세히 들여다보자. 우선 ADMX 공진기는 내경 40 cm, 높이 1 m 가량의 실린더형이고 이 공진기를 싸고 있는 solenoid형 8 T 자기장의 초전도 자석이 중심이며 증폭기와 주파수 변환 장치(구리 도금이 된 봉의 위치로 TM_{010} mode의 공진 주파수를 변환시킨다) 등이 함께 2 K 정도의 온도를 유지해 주는 냉각기 안에 위치하고 있다. 공진기에서 나온 검출 신호는 냉각기 안의 증폭기(SQUID)를 거쳐 상온의 RF 신호처리 장치로 연결된다. 냉각기의 온도를 거의 2 K까지 내리는 이유는 잡음을 없애기 위함이며 이때 공진기에서 나오는 라디오 주파수의 신호를 증폭하는 장치는 지구상에서 가장 감도가 좋은 라디오라고 생각하면 된다. ADMX 공진기는 스테인레스 스틸 재료에 구리 도금되었으며 Q 값은 50000-100000 정도이다. 이러한 구성의 검출기로 ADMX

Fig. 1. The projected sensitivity of ADMX after the dilution refrigerator is added. ADMX will be sensitive to even the most pessimistically coupled dark matter axions in the range 1 μ eV to 10 μ eV (the most attractive mass range) in the very near future [http://depts.washington.edu/admx/future.html].

는 460 MHz(1.9 μ eV)에서 860 MHz(3.5 μ eV) 정도까지 스캔을 했으며 그 범위 안에 엑시온은 존재하지 않음을 90% 신뢰도로 증명했다. 이론적으로 가능한 엑시온의 질량의 범위가 1 μ eV에서 100 μ eV인 점을 감안하면 아직 갈 길이 먼 셈이다. 그림 1에 보는 바와 같이 이론이 제시하는 KSVZ(Hadronic Coupling) limit까지 검증을 했으나 DFSZ(Minimum Coupling)에 가까이 가는 감도는 도달하지 못한 상태다. 최근 미국 에너지청과 NSF의 승인을 받아 차세대 암흑물질 실험에 선정된 ADMX는 Gen2 (Generation 2) 실험의 준비를 끝냈으며 그림 1에 보는 바와 같이 감도를 DFSZ까지 올리는 동시에 더 높은 주파수 영역도 탐구하려는 계획이다. ADMX Gen2의 자세한 계획은 우선은 새로운 희석 냉동기를 구축해서 공진기와 증폭기(SQUID)의 온도를 300 mK까지 내리고 고주파수 영역의 높은 Q값의 공진기를 초전도체 내벽 coating을 통해 제작하여 감도를 올리고 전체 실험의 시간을 줄이는 것이다.

후발 주자로서 CAPP의 계획은 한편으로는 ADMX와의 공동 연구를 통해 선지식을 습득하고 다른 한편으로는 대전 지역의 연구소나 대학의 지역 인적자원을 통해 양적으로나 질적으로 ADMX보다 모든 면에서 월등한 검출기를 구축하는 것이다. 공동연구의 방향으로 CAPP이 20 T 이상의 고자기장의 초전도 자석과 공진기를 제공하고 ADMX는 UC Berkeley의 Irfan Siddiqi 교수가 제작한 차세대 JPA 증폭기와 DAQ electronics, 그리고 U. of Washington의 CENPA Lab에 장소를 제공해서 CAPP/IBS - ADMX 공동의 이름으로 실험을 구축하는 것이며 양측의 양해각서가 오가는 중이다. 한편 대전 카이스트에서의 엑시온 실험 구축은 표준 연구소와의 공동 연구로 차세대 SQUID의 제작(5년 프로젝트), 초빙 연구위원인 카이스트 이진환 교수의 공진기의

Fig. 2. Prof. Choi's BlueFors dilution refrigerator.

초전도 coating(2년 프로젝트), 그리고 미국 BNL(Brookhaven National Laboratory)의 Superconducting Magnet R&D group과의 공동 연구로 초극 고자기장(25 T) 초전도 자석 개발 (3년 프로젝트) 등이 진행되고 있다. 특히 BNL에서 개발 중인 25 T 초전도 자석은 내경이 10 cm의 HTS(High-Temperature Superconductor) 기술이 적용된 새로운 형태의 콤팩트(외경 30 cm)한 디자인이며 일반 초전도 자석을 외부에 한겹 더해서 35 T나 40 T까지도 가능한 자석이다. 스테인레스 스틸을 절연체로 써서 내구성을 높인 점도 특이 사항이다. ADMX와의 공동연구를 통한 경험의 축적과 열거한 공동 프로젝트들의 성공적 수행은 CAPP의 액시온 실험 구축에 탄력을 제공해 줄 뿐만 아니라 지대한 경쟁력을 줄 것이다. ADMX Gen2와 비교해도 10배에서 100배 정도 실험 감도의 증대가 기대된다.

초저온 액시온 실험

CAPP의 액시온 검출 장치가 구축될 카이스트 문지 캠퍼스의 창조관의 실험 공간은 올해 말, 늦어도 내년 초반에 완성된다. 기존의 건물 한쪽에 2층 높이로 액시온 전용 냉각기 7대가 들어설 수 있는 공간이 무진동 시설과 함께 구축되도록 설계가 마무리되었고 공사가 곧 시작될 예정이다. 이번 여름 CAPP의 초빙 연구위원인 카이스트의 최형순 교수의 배려로 실제 우리의 액시온 검출기에 쓰일 희석 냉각기와 정확히 같은 모델인 BlueFors LD400 냉각기와 9 T 자기장의 초전도 자석(내경 6 cm)을 4개월간 사용할 수 있게 됐다. 최고 사양의 SQUID 증폭기 없이 액시온을 탐구할 만큼의 감도는 갖추지 못하겠지만 액시온 검출기의 기본 구조를 만들고, 다가올 완전한 액시온 실험을 준비하는 engineering run으로서 더 없이 좋은 기회가 아닐 수 없다. 그림 2는 최형순 교수의 냉각기 사진이다.

Fig. 3. Cavity and frequency tuning system installed in a support structure and everything inside magnet.

우리가 그동안 준비해온 것들을 하나씩 살펴보자. 우선 액시온 검출기의 심장이나 다름없는, 액시온의 광자로의 변환이 일어나는 공진기는, 최대의 Q값을 가져야 하고, 고유 주파수를 원하는 범위 내에서 변화시킬 수 있는 기능을 가져야 한다. 액시온 실험에서 공진기의 Q값이 커지기 쉽지 않은 이유는 자기장 때문이다. 보통의 초전도체는 임계온도 하에서 초전도 성질을 띠지만 임계 자기장을 넘어서면 초전도 성질을 잃어버리기 때문에 일반 금속보다도 못하다. 초전도체가 되지 않는 금속 중에서 구리는 좋은 후보 중 하나다. Q값은 대략 $RRR(\text{residual resistance ratio} = \text{resistance}@296\text{K}/\text{resistance}@4\text{K})$ 의 제곱근에 비례하고, 순도가 높은 구리는 RRR이 높으므로 꽤 높은 Q값을 얻을 수 있다. 6N(99.9999%) 구리의 경우 RRR이 40000까지도 가능하며, magnetoresistance 때문에 RRR이 9 T 자기장에서 400(100분의 1)까지 떨어진다고 해도 Q값은 최고 400000까지도 가능하다. Sputtering 기술로 고순도 구리를 증착시키는 방법과 아예 얇은 고순도 구리를 스테인리스 스틸 벽에 붙이는 방법을 써서 두 가지 다른 공진기를 제작 중이다.

공진기의 고유 주파수를 변화시키는 가장 간단한 방법은 유전율이 크고 손실이 적은 (alumina 혹은 sapphire) 유전체 막대를 공진기 안에서 회전시키는 것이다. 이때 1 μrad 정도의 아주 미세한 회전을 정확하게 해야 하기 때문에 cryogenic piezoelectric actuator를 사용한다. 그림 3은 공진기와 주파수 변환 장치가 지지 구조 위에 놓인 모습과 냉각기와 초전도 자석 안에 설치되었을 때의 모습이다. 초전도 자석 안에 공간을 최대 확보하기 위해 외경 5 cm(내경은 4.6 cm)로 디자인되었고 TM₀₁₀ 모드의 공진 주파수는 6 GHz 정도에서 작동하도록 제작되었다.

빈 냉각기 안의 mixing chamber의 온도는 약 10 mK이므로 OFHC(Oxygen Free High Conductivity) 구리를 써서 열의

Fig. 4. Participants of the rf lab measurements. The lecturer, Dr. Fritz Caspers (CERN) and people from CAPP, RISP and PAL are discussing and learning the rf measurement using network analyzer.

전도를 잘 다스리면 공진기의 온도는 50 mK를 넘지 않으리라는 게 냉동기 전문가인 최형순 교수의 예측이다. 여지껏 2 K를 웃돌던 엑시온 공진기의 온도가 기록적으로 떨어지지 않을까 생각한다. 냉각기 안에 전자장치는 몇 가지 없다. 공진기에서 신호가 나오는 쪽에 cryo-circulator를 달아 안으로 들어가는 신호를 제거하고 SQUID 증폭기 대신에는 cryo-HEMT 증폭기를 사용하여 30 dB 정도 증폭을 하고 나머지 60 dB 정도는 상온에서 한다. 그러나 여기에 감도가 좋은 SQUID가 증폭기 대신에 들어간다면 아주 주의를 기울이지 않으면 온갖 문제가 발생할 수 있다. SQUID는 자기장의 차폐를 nT 이상으로 철저히 해야 하며, 고주파에서는 공진기에서 증폭기로 가는 도중 얼마든지 잡음이 들어갈 수 있기 때문이다.

상온에서의 RF(Radio Frequency) 신호 처리 및 데이터 분석은 ADMX와 같이 heterodyne 방식으로 mixer(frequency down-conversion)와 local oscillator(LO)를 써서 IF(intermediate band frequency)로 바로 변환시킨다. 그리고 두 갈래로 나누어 하나는 spectrum analyzer로 보내 직접 볼 수 있게 하고 다른 하나는 fast digitizer로 보내져 나중에 offline으로 분석할 수 있게 한다. RF 신호 처리 방식을 설계하는 과정에서 유럽 핵입자 물리 연구소(CERN)의 저명한 과학자인 Fritz Caspers 박사를 초청하여 일주일간의 특별 Lecture를 본 연구단의 김영임 박사와 함께 계획하고 성공리에 마쳤다. CAPP 연구원 이외에도 기초 과학연구원의 중이온 가속기 사업단, 포항 가속기 연구소의 연구원들도 참여하여, 회로이론, RF 공진기, Network Analyzer의 Q 값 측정의 원리와 smith chart에 대한 이해를 돕고 RF 측정 장비의 설계에 많은 도움을 받았다. 이는 본 연구단의 활동이 본 연구단뿐 아니라 다른 연구단의 연구에도 기여를 하는 활동이다.

Fig. 5. The lecturer, Dr. Fritz Caspers (CERN), and Dr. Young-Im Kim at CAPP/IBS who organized and prepared the entire rf training courses.

Fig. 6. System diagram for axion detector signal processing and acquisition.

그림 4는 Caspers 박사와 여러 연구원들이 대표적인 RF 측정 장비인 Network Analyzer의 원리에 대해 논의하는 사진이다.

DAQ와 slow control은 PSI에서 개발되어 TRIUMF에서 관리하는 MIDAS(Maximum Integrated Data Acquisition System)으로 framework를 삼았다. 그림 6은 엑시온 검출기를 관장하는 MIDAS의 system diagram이다.

결론

지금까지 암흑물질과 그 강력한 후보로 떠오른 엑시온, 엑시온 실험을 한국에 구축하고 그 분야에서 세계적 중심이 되고자 하는 기초 과학 연구원의 엑시온 및 극한 상호작용 연구단의 포부와 계획, 그리고 이번 여름 처음 시작되는 초저온 엑시온 실험에 대해 알아보았다. 암흑물질에 대한 탐구는 과학의 숙제이며 엑시온의 발견은 우주를 이해하고자 하는 우리의 노력에 거대한 이정표가 될 것이다. 더 많은 사람들의 관심을 기대해본다.