엑시온 암흑물질*

DOI: 10.3938/PhiT.24.029

Dominika Konikowska (번역: 김영임)

Axion Dark Matter

Dominika KONIKOWSKA (Translated by Young-Im KIM)

In its effort to answer a key question in contemporary physics - “What is the nature of the missing matter in the Universe, the so-called dark matter?” - the Center for Axion and Precision Physics Research (CAPP) of the Institute for Basic Science looks aims to discover the axion, a leading dark matter candidate. In this article, we present a basic theoretical overview and motivation for the CAPP’s key axion search experiment, including the principles behind the CAPP’s approach to axion detection. We also review the strategies employed to overcome the extreme challenges related to the discovery of this elusive elementary particle.

“우주에서 누락된 물질, 이른바 암흑물질의 본질은 무엇인가?”와 같은 현대 물리학의 핵심질문에 대답하는 노력의 일환으로 기초과학연구원(Institute for Basic Science, IBS)의 엑시온 및 극한 상호작용 연구단(Center for Axion and Precision Physics Research, CAPP)은 암흑물질의 강력한 후보인 엑시온을 발견하는 것을 목표로 하고 있다. 이 글에서 본 연구단의 핵심인 엑시온 탐색 실험의 이론, 동기, 그리고 엑시온 검출 방법의 원리를 설명할 것이다. 그리고 이 찾기 힘든 기본 입자의 발견과 관련된 굉장히 어려운 문제들을 극복할 전략에 대해서도 설명할 것이다.

최근 우주론 관측^[1,2]에 따르면 “우리가 알고 있는” 물질은 전

저자약력

Dominika Konikowska 박사는 University of Warsaw 이학박사(2009)로서 University of Wuerzburg(2010-2011)와 Bielefeld University (2011-2013)에서 Postdoc, KAIST에서 Visiting Scientist(2014)를 거쳐 현재 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단(CAPP)에서 Research Manager, Research Fellow로 재직 중이다. (dominika@ibs.re.kr)

Fig. 1. Matter energy density in the Universe: components.

체 우주의 5%를 구성하고 있다(그림 1). 전반적으로 물질/에너지 밀도에 지배적인 공헌을 하는 것은, 서로 다른 물리적 특성을 따라 이름 붙여진 암흑물질(약 27%)과 암흑 에너지(약 68%)이다.

“표준” 물질과 비교하면 우주에는 암흑 물질(DM)이 5배 이상 있다. 현대 물리학의 다양한 측면과 일관성이 요구하는 몇 가지 일반적인 특징 이외에 DM의 정확한 본질은 아직 발견되지 않았다. DM 프로파일 측정에 따르면,^[1] DM은 대부분이(전체가 아닌) 차가운 암흑물질(Cold dark matter, CDM)로 구성되어 있을 거라 기대된다. 이론적 CDM 모델 구축 노력과 실험적 CDM 검색 모두가 표준모형 너머의 물리를 포함하여 이미 수 년 동안 입자물리에서 가장 활발한 분야이다.

우주의 누락된 질량을 설명할 수도 있는 다수의 CDM 후보

REFERENCES

- [1] P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], *Astron. Astrophys.* **571**, A22 (2014) [1303.5082[astro-ph.CO]].
- [2] G. Hinshaw *et al.* [WMAP Collaboration], *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 19 (2013) [1212.5226[astro-ph.CO]].

* 이 글(원제: Axion Dark Matter)은 독자의 이해를 돕기 위해 영문으로 작성된 원고를 IBS 엑시온 및 극한상호작용연구단(CAPP) 연구위원인 김영임 박사가 번역하였다.

Fig. 2. Horizontal position of the pool table is maintained by gravity. Analogically, in Peccei-Quinn solution to the strong CP problem, axion effectively maintains the CP symmetry. For further details please see [10].

중 두 개가 현재 선두적인데 그것은 뱀프(WIMPs, weakly interacting massive particles)와 액시온(Axion)이다.^[3,4] 뱀프는 일반적으로 입자물리의 표준모형 너머의 다양한 이론의 새로운 물리에서 비롯되었다. 하지만 CERN에 있는 대형 강입자 충돌기(Large Hadron Collider, LHC)에서 초대칭 이론의 흔적을 찾지 못하여 초대칭 이론의 여러 시나리오에서 알려진 “기본” 뱀프는 서서히 뒤로 물러나게 되었다.

만약 현재 연구 영역에서, DM 찾기 중 뱀프신호를 찾지 못한다면 모델이 재조정될 수도 그리고 새로운 제한을 피할 수도 있지만 이것은 액시온에는 적용되지 않는다. 이 가상의 기본입자는 표준모형에서, “왜 중성자 전기 쌍극자 모멘트는 정말 작나?” (그것의 실험값은 예측값보다 적어도 10배 작을 수 있다.)의 질문에 대답하는 것 같은, 이른바 강한 CP^[6,9] 문제를 해결할 수도 있다. 어떻게 액시온이 강한 CP 문제를 해결할 수 있는지 보여주는 흥미로운 비유가 그림 2에 나와 있다. 게다가 그것은 일반적으로 액시온 필드 진동 주파수로 약 200 MHz에서 200 GHz에 해당하는, 즉 10^{-6} eV에서 10^{-3} eV^[9]의 특정 질량 범위에서 강력한 CDM 후보이다. 그리고 뱀프와 달리, 적절한 실험적 노력으로 액시온은 발견되거나 혹은 DM 후보에서 제외될 수 있다.

그 결과, 특히 DM 영역에서의 액시온 검색은 LHC에서 새로운 물리 검색의 관점에서 중요성을 더해왔다. 기초 과학 연구원의 액시온 및 극한 상호작용 연구단(그림 3)에서 새롭고 핵심적인 액시온 검색 실험을 개발하기에 지금이 최적의 시기이다.

Fig. 3. CAPP members as of September 2014.

Fig. 4. Axion to photon conversion.

아주 가벼운 액시온 입자의 발견은 입자물리학에 거대한 영향을 미칠 것이다.

그러나 강력한 이 DM 후보를 발견하는 것은 매우 어렵다. 전자기장에 유사 스칼라 입자의 결합인 QCD 액시온 발견을 위한 주요 전략은 매우 약한 액시온-광자-광자 커플링에 근거한다. 강한 자기장에서, 액시온이 광자로의 변환 신호가 그림 4에 나와 있다. 이 방법은 CAPP에 의해 설계된 액시온 실험

REFERENCES

- [3] E. W. Kolb and M. E. Turner, *The Early Universe* (Addison-Wesley, 1990).
- [4] G. Bertone, D. Hooper and J. Silk, *Phys. Rept.* **405**, 279 (2005) [hep-ph/0404175].
- [5] G. 't Hooft, *Phys. Rept.* **142**, 357 (1986).
- [6] J. E. Kim, *Phys. Rept.* **150**, 1 (1987).
- [7] H. Y. Cheng, *Phys. Rept.* **158**, 1 (1988).
- [8] R. D. Peccei, *CP Violation*, in: edited by C. Jarlskog, *Adv. Ser. Direct. High Energy Phys.* (World Scientific, Singapore, 1989), p. 503.
- [9] J. E. Kim and G. Carosi, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 557 (2010) [0807.3125[hep-ph]].
- [10] P. Sikivie, *Phys. Today* **49N12**, 22 (1996) [hep-ph/9506229].

Fig. 5. Directions of the constant magnetic and the oscillating electric fields in axion search experiments (axion background field in pink).

의 핵심 기초이다.

중요한 엑시온 실험 DM 검출 노력의 바탕이 되는 아이디어는 그림 5¹⁾에 나와 있다. 직류(DC) 자기장(B)에서, 엑시온이 광자로 변환하는 것을 다음과 같이 설명할 수 있다: 엑시온은 전기장과 자기장의 곱에 커플링된다. 직류 전기장의 존재 하에서 아주 희미한 전기장의 진동이 나타나는데 이것은 엑시온 배경 필드와 같은 주파수로 나타난다. 만약 직류의 자기장이 공간으로 묶여있는 경우, 진동하는 전기장은 맥스웰 방정식에서처럼 방위 진동 자기장을 유발한다.

같은 공진 주파수를 갖는 마이크로파 공동같이 만약 경계조건에서 공진 구조가 있다면 진동하는 자기장이 진동하는 전기장의 진폭을 향상시키기 위하여 전류를 생성한다. 엑시온 DM에서 광자의 변환에 의해 생성된 총 (아주 작은) 전력은 엑시온 DM의 지역밀도, 엑시온-광자-광자 결합 상수, 엑시온 질량, 그리고 실험의 기술적 변수들과 관련되어 있다. 예를 들어 10^{-24} W 변환 전력은 우리가 화성에 있는 휴대전화에서 지구상의 신호를 수신하려는 것만큼 작다.

엑시온 DM에서 예상되는 마이크로파 광자의 변환 파워는 비록 매우 작지만 그것은 1에서 20 μeV 의 엑시온의 질량으로 현재 실험의 능력한계 안에 있기에 실험이 가능하다. 중요한 실험적인 걸림돌은 엑시온 질량 혹은 그 진공 주파수를 모르는 것이다. 1에서 20 GHz의 영역에서 매우 미세한 단위로 검

1) 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 [11]을 참조.

Fig. 6. Gain in the DM axion discovery potential of CAPP axion search experiment over ADMX, with the intermediate experimental improvements.

색되어야 한다.

이 검출 방법에 따른 엑시온 검색은 검출기의 민감도에 따라 가속될 수 있다. 이 목표를 달성하기 위해 자기장 값의 증가, 자기장의 부피 증가 또는 마이크로파 공동 쿨-인자의 증가와 같은 기술 향상을 시도할 수 있다.

현재 엑시온 암흑물질 탐색은 ADMX(Axion Dark Matter eXperiment)가 주도하고 있다. 그럴듯한 엑시온의 DM 후보의 경계는 제2세대 ADMX 실험^[12]에 의해 도달될 수도 있다. 새로운 기술의 향상은 1-20 μeV 질량 범위에서 ADMX가 엑시온을 검출 또는 제외하는 것을 허용하는 것을 목적으로 하지만, 그것은 DM의 100% 구성을 가정하고 있다.

CAPP는 이미 진행 중인 해당 연구 개발과 함께, 아래에 제시된 중요한 실험적 향상을 통한 엑시온 검출 민감도 향상을 통해 ADMX가 하는 것보다 엑시온 DM 매개 변수공간에 더 멀리까지 도달할 수 있다(그림 6).

1. 더 높은 자기장: ADMX는 7.5 T를 사용하는 반면 우리는 25 T의 자기장으로 실험할 것이다. 엑시온의 광자 전환율은 자기장의 제곱에 비례하므로, 우리는 ADMX보다 10배 정도 높은 민감도에 직접적으로 도달할 것이다.
2. 더 높은 마이크로파 공동 쿨-인자: 우리는 큰 자기장에 견딜 수 있는 초전도 마이크로파 공동 구축을 위한 연구를 시작했다. 이를 통해 우리는 약 15의 이득 계수를 기대한다.
3. 더욱 더 높은 자기장: 약 25 T 정도의 다른 자석을 구축을 시작으로 우리는 35 T, 마침내 40 T로 이동하는 것을 계획하고 있다. 이는 우리에게 2.5의 전력이득 계수를 줄 것이

REFERENCES

- [11] J. E. Kim, Y. Semertzidis and S. Tsujikawa, Front. Phys. **2**, 60 (2014) [1409.2497[hep-ph]].
[12] J. Clarke, Int. J. Mod. Phys. B **24**, 20n21, 3999 (2010).

다.

4. 부피 증가: 우리는 동시에 두 가지 다른 방식의 접근을 할 것이다. 액시온에서 광자의 변환이 부피와 함께 증가하기에, 우리는 위상 맞춤의 10개의 마이크로파 공동을 병렬로 놓는 것(약 10배)과 토로이드 모양의 공동 구조(약 10에서 20배 계수 증가)를 검토하고 있다.

위에 설명된 실험적 개선을 통해, 우리는 약 7500의 전체 이득 계수를 달성할 것으로 기대하고 이것은 변환 전력을 $1.5 \cdot 10^{-24}$ W에서 $1.1 \cdot 10^{-20}$ W로 이동하는 것인데 이것은 DM 액시온 발견을 향한 거대한 발걸음을 옮기는 것이 될 것이다.

만약 DM의 100%가 액시온으로 구성되어 있고,²⁾ 위와 같은 실험 계획을 통해, ADMX가 액시온을 검출할 것으로 계획하는

2) 왜 DM이 오직 단일 종류의 입자로만 구성되어야 하는지 물리적으로 잘 동기부여된 이유는 없다. 우주의 보여지는 기본적인 부분으로부터의 기본입자는 매우 다른 물리적 특성을 가진 다수의 소립자를 포함하고 있다.

시점에 CAPP는 이미 액시온을 검출했거나 아니면 유사한 액시온 질량 범위에서 액시온 DM 성분을 10% 혹은 더 낮게 제외할 수 있을 것이다.

액시온 물리 실험을 세계적으로 선도하는 연구센터가 될 목표로, CAPP는 강력한 액시온 탐구 실험의 확립, 궁극적으로 DM 액시온 발견뿐 아니라 다른 액시온 실험과 유익한 상호 협력을 목표로 하고 있다. 이들은 5에서 6 GHz 영역에서의 액시온 발견을 위한 액시온 DM 실험을 시작하는 CAST(CERN Axion Solar Telescope), 6에서 8 GHz 영역에서의 액시온을 위한 ADMX, 그리고 “가장 차가운 액시온 DM 실험”이라고 불리는 4에서 5 GHz의 KAIST에서의 실험 등이 있다. 이러한 협력에서의 활동은 실험 솔루션 및 전략을 위한 훌륭한 시험 무대이고, 따라서 우리의 중요한 실험적 노력을 완벽하게 보완하기 위해 세계의 주요 액시온 DM 실험을 한국에 확립하고 있다.