

Trapping effects on axion dark matter by shift symmetry breaking and their cosmological implications

著者	Nakagawa Shota
number	99
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3452号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00137481

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	中川 翔太	提出年	令和 4 年
学位論文の 題目	Trapping effects on axion dark matter by shift symmetry breaking and their cosmological implications (シフト対称性の破れによるアクシオンダークマターに対する束縛効果とその宇宙論的意義)		

論文目次

1. Introduction
 2. QCD axion
 3. Extra Peccei-Quinn symmetry breaking and trapping effect
 4. Trapping effect on axion dark matter
 5. QCD axion with the Witten effect
 6. Conclusions
- Appendix A. Basics for standard cosmology
- Appendix B. Vacuum structure in QCD
- Appendix C. Useful equations for numerical calculations of abundance
- Appendix D. Calculations of isocurvature perturbation

One of the most plausible candidates for dark matter (DM) is QCD axion. In addition to nonperturbative effects of QCD, the QCD axion could acquire extra potentials from other explicit breaking effects of shift symmetry, i.e., the Peccei-Quinn (PQ) symmetry. Such extra PQ breaking potentials must be suppressed to satisfy the experimental bound on the neutron electric dipole moment. However, the axion potential from QCD is negligibly small at high temperatures in the early universe, and therefore tiny extra potentials can have a sizable effect on the dynamics of axion. When the axion is temporarily trapped by the extra PQ breaking potential, the dynamics is expected to be significantly modified compared to the conventional scenario. This is the trapping effect. In this thesis, we study the trapping effect on the dynamics of the QCD axion and identify a viable parameter region in which the axion can explain DM.

We begin with investigating fundamental properties of the trapping effect in a general setup. According to our analysis, we find that the adiabaticity of the physical system is an important factor in determining the dynamics of axion. To study the detail of the dynamics, we consider two types of extra PQ breaking potential. First, we consider the case when the axion acquires a time-independent

potential with multiple minima (based on our work [3]). We find that the abundance of axion can be enhanced or suppressed, depending on the initial position of axion θ_{ini} , and that the isocurvature perturbation can be significantly suppressed. In particular, when the axion is temporarily trapped around a wrong vacuum, the abundance is independent of the decay constant as long as the trapping effect is strong enough. As a result, the axion can explain DM for arbitrary decay constant $f_\phi \lesssim 10^{11}$ GeV. The isocurvature perturbation is suppressed as can be seen from the right panel of the figure below. It is nontrivial that the axion with small f_ϕ can saturate the total DM abundance, and such axions have relatively strong couplings with the SM particles, so that they can be more easily probed by future haloscope experiments, such as MADMAX and BREAD. Second, we consider a time-dependent extra potential from the Witten effect of hidden monopoles (based on our works [1] and [2]). We investigate the trapping effect by the Witten effect in a broader parameter region of the initial position of axion than previous studies. We find that the abundance can be suppressed as long as the trapping effect is sufficiently strong.

The analysis of these two concrete scenarios helps us understand how the violation of adiabaticity affects the axion dynamics. We clarify that the trapping effect by extra PQ breaking has a significant impact on the viable parameter region for QCD axion DM, and the new predictions of axion DM motivate experiments probing a different parameter region from the conventional QCD axion DM.

- [1] **S. Nakagawa**, F. Takahashi and M. Yamada, Trapping Effect for QCD Axion Dark Matter, JCAP 05 (2021) 062 [2012.13592].
- [2] **S. Nakagawa**, F. Takahashi and M. Yamada, Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination, Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 181103 [2103.08153].
- [3] K. S. Jeong, K. Matsukawa, **S. Nakagawa** and F. Takahashi, Cosmological effects of Peccei-Quinn symmetry breaking on QCD axion dark matter, JCAP 03 (2022) 026 [2201.00681].

QCD アクシオンはダークマターの有力候補の一つであり、QCD の非摂動効果に加え、シフト対称性 (Peccei-Quinn 対称性) の破れによってポテンシャルを得ると考えられる。中性子の電気双極子モーメントに関する実験的な制約を満たすためには、QCD 以外の余剰な PQ 対称性の破れを抑制する必要があるため、アクシオンのダイナミクスにはほとんど影響しないと考えられてきた。しかし、本論文において中川氏は、宇宙初期の高温では漸近的自由性のために QCD からのポテンシャルは無視できるほど小さく、わずかな余剰なポテンシャルでさえもアクシオンのダイナミクスに大きな影響を与えることを見出した。特に、この余剰な PQ 対称性の破れによってアクシオンが一時的にトラップされると、ダイナミクスが従来のシナリオから大きく変化することがあり、この影響をトラッピング効果と呼ぶ。この博士論文で中川氏は、QCD アクシオンのダイナミクスに対するトラッピング効果を研究し、ダークマターを説明するためのアクシオンの実現可能なパラメータ領域を特定した。まず、一般的な設定におけるトラッピング効果の基本的な性質を調べ、系の振る舞いに関する断熱性がアクシオンのダイナミクスを決定する重要な要素であることを見いだした。さらにダイナミクスの詳細を調べるために、QCD 非摂動効果に加えて余剰な PQ の破れを持つようなポテンシャルを考えた。前半では、余剰なポテンシャルが時間によらない場合を考察し、その結果、アクシオンの存在量は初期位置によって増減することを見出した。具体的には、強い CP 位相が消える低エネルギーの真空中に連続的に変化する場合、アクシオンの存在量は強く抑制されることがわかった。一方、アクシオンが偽真空中に一時的に捕捉された場合、その捕捉効果が十分強ければ、アクシオン存在量は大きくなり、特にアクシオン質量や崩壊定数に依存しないことを発見した。そのため従来非常に困難であった小さなアクシオン崩壊定数の場合においても、アクシオンによってすべてのダークマターを説明することが可能になった。博士論文後半では、隠れたセクターに存在するモノポールが作り出す Witten 効果を考察し、アクシオンの存在量がやはり系の進化の断熱性によって理解できることを見出した。

以上の研究成果に関して、ダークマターの有力候補である QCD アクシオンの初期宇宙進化に関する新規な成果であると認められる。本論文は共著論文に基づいているが、中川氏はその主要な計算および解析、図の作成、本文の執筆に関して主要な役割を担っている。本論文については、当該分野の国内外における研究動向、研究動機、アクシオン模型に関する説明、様々な計算や解析に関する詳細な記述がなされており、博士論文として十分に認めることができるという判断に至った。