

# Неоднородности аксионо-подобного поля в Гаусс-Бонне гравитации

Максим Краснов, группа A23-121.  
Научный руководитель: Хлопов М.Ю.

01.07.26

## Цель

Целью данной работы является изучение эффектов фазового, происходящего из-за Гаусс-Бонне взаимодействия.

В данной презентации рассматривается модель, в которой Гаусс-Бонне скаляр связан с комплексным скалярным полем типа Печчей-Квин:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{1}{2}R - \partial\Phi\partial\Phi^* - \frac{\lambda}{4}(f^2 - 2\Phi\Phi^*)^2 - \frac{1}{8}\xi(|\Phi|)R_{GB}^2 + \mathcal{L}_{inf}(\chi) \right] . \quad (1)$$

где

$$\xi = \frac{1}{6}\alpha\phi^2 = \frac{1}{6}\alpha|\Phi|^2, \quad \mathcal{L}_{inf}(\chi) = \frac{1}{2}(\partial\chi)^2 - \frac{1}{2}M^2(1 - e^{-\chi})^2. \quad (2)$$

## Минимум потенциала

В стандартном сценарии, после нарушения симметрии, которое происходит на энергетическом масштабе  $f$  поле приобретает своё вакуумное значение

$$\langle \Phi \rangle = \frac{f}{\sqrt{2}} e^{i\phi/f}, \quad (3)$$

но в нашей модели вакуумное среднее  $f_{\text{eff}}(t)$  (VEV) зависит от времени:

$$f_{\text{eff}}(t) = f \sqrt{1 - \frac{\alpha H^2}{\lambda f^2} (H^2 + \dot{H})}. \quad (4)$$

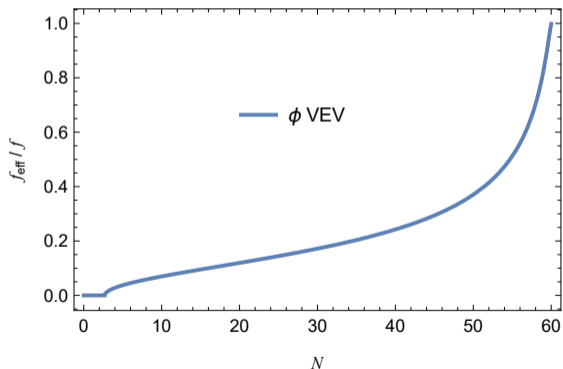
В Лагранжиане три свободных параметра:

$$\lambda = 10^{-6}, \quad f = AM, \quad \alpha = \frac{b}{M^2}, \quad A = 10^3, \quad b = 37.25. \quad (5)$$

Значения в (5) выбраны, чтобы поле  $\Phi$  было субдоминантным по отношению к инфлатону, что достигается условием  $\lambda f^4 \ll M^2 M_{Pl}^2$ .

# Эволюция VEV

С выбранными параметрами, минимум потенциала эволюционирует следующим образом:



Условие  $f_{\text{eff}}(t) > 0$  ещё не означает нарушение симметрии, но является необходимым условием.

Рис. 1: Положение минимума потенциала как функция е-фолда.

## Эволюция радиальной части поля — $\phi$

Стохастическая эволюция поля описывается уравнением Ланжевена:

$$\phi_{,N} \simeq -\frac{V_{\text{eff},\phi}}{3H^2} + \Xi_\phi \simeq -\frac{m_{\text{eff}}^2}{3H^2}\phi + \Xi_\phi, \quad (6)$$

из которого следует уравнение для эволюции среднего квадрата:

$$\langle \phi^2 \rangle_{,N} \simeq -\frac{2m_{\text{eff}}^2}{3H^2} \langle \phi^2 \rangle + \left( \frac{H}{2\pi} \right)^2. \quad (7)$$

Изначально поле расположено вблизи нуля и аксион (аксионо-подобная частица) не определена. Мы задаём условие выхода поля  $\phi$  на классическую эволюцию:

$$\partial_{,N} \langle \phi^2 \rangle = 10 \times H^2 / (4\pi^2). \quad (8)$$

# Классическая эволюция $\phi$

Используя уравнения на предыдущем слайде мы можем задать начальные условия для классической эволюции поля.

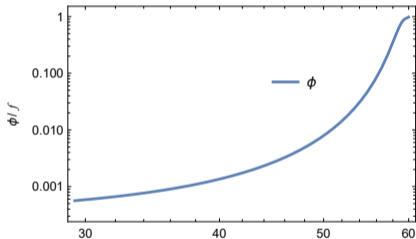


Рис. 2: Классическая эволюция поля  $\phi$ , начальные условия для которой получены с помощью численного решения уравнения Ланжевена.

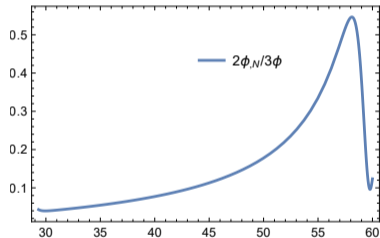


Рис. 3: Параметр медленного скатывания радиальной части комплексного скалярного поля.

# Спектр мощности флуктуаций фазы

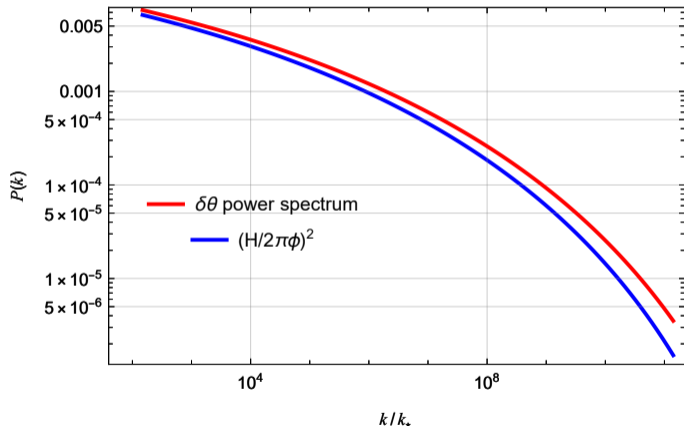


Рис. 4: Спектр мощности флуктуаций фазы. Здесь  $k_*^{-1} \approx 0.4 Au$  — масштаб, соответствующий е-фолду классикализации поля.

Можно показать, что при медленном скатывании радиальной части поля:

$$P_{\delta\theta}(k) = \frac{k^3}{2\pi^2} |\delta\theta_k|^2 \simeq \frac{H^2}{4\pi^2 \phi^2}, \quad (9)$$

что связывает решение уравнения Муханова-Сасаки для фазы с классическим решением для  $\phi$ .

## Возможный космологический сценарий

- Усредняя по фазе потенциальную энергию аксионо-подобного поля:

$$\langle U(\theta) \rangle = \Lambda^4 \langle 1 - \cos \theta \rangle = \Lambda^4, \quad (10)$$

что даёт среднюю плотность энергии фазы по Вселенной. Чтобы не противоречить наблюдениям, параметр  $\Lambda \sim 10^{-10} \text{ GeV} \rightarrow m_a \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ eV}$ . То есть возможный сценарий — ultra-light fuzzy dark matter. Ограничение —  $\Omega_a \leq 1\%$ .

- Распределение начальной фазы по областям даёт возможность создания сети доменных стенок, окружённых струнами. (Ещё не смоделировано).

## Выводы и планы

- Гаусс-Бонне скаляр позволяет обойти ограничение по изокривизне для аксионо-подобной частицы.
- В рамках модели получен масштабно-зависимый спектр мощности флуктуаций фазы.
- Модель приводит к первично неоднородному аксионо-подобному полю, которое может образовать сети доменных стенок, ограниченных струнами, что требует дальнейшего изучения.

Спасибо за внимание!

# Педпрактика

Корпоративный портал НИЯУ МИФИ 30 июня 2026, 11:52 mlkcaslov

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## Краснов Максим Александрович Учебная нагрузка 2025/2026 учебный год

Семестр	Вид работы	Кафедра	Группа	Количество	Количество часов
<b>Аудиторная нагрузка</b>					
Осень 2025	ПР Физика. Лицей	23		0	30
Осень 2025	ПР Физика (электричество и магнетизм)	23	624-502	24	32
Осень 2025	ПР Физика (электричество и магнетизм)	23	624-605	25	32
Осень 2025	ПР Физика (электричество и магнетизм)	23	624-504, С24-501	29	32
Осень 2025	ПР Физика (электричество и магнетизм)	23	624-511	24	32
Весна 2026	ПР Квантовая механика	40	623-104	22	45
Весна 2026	ПР Физика. Лицей	23		0	36
Весна 2026	ПР Физика (оптика и основы квантовой механики)	23	624-502	22	30
Весна 2026	ПР Физика (оптика и основы квантовой механики)	23	624-504, С24-501	27	30
Весна 2026	ПР Физика (оптика и основы квантовой механики)	23	624-511	19	30
Весна 2026	ПР Физика (оптика и основы квантовой механики)	23	624-605	25	30
<b>Осенний семестр 2025/2026 учебного года</b>					<b>158</b>
<b>Весенний семестр 2025/2026 учебного года</b>					<b>201</b>
<b>2025/2026 учебный год</b>					<b>359</b>
<b>Общая нагрузка</b>					<b>359</b>

## Публикации по теме диссертации

- 1 M.A. Krasnov, D.Z. Berkimbayev, A. Addazi, Y. Aldabergenov, M.Yu. Khlopov, Domain wall formation from  $Z_2$  spontaneous symmetry breaking/restoration in scalar-Einstein-Gauss-Bonnet theory, *Physics of the Dark Universe*, Volume 53, 2026, 102378, ISSN 2212-6864, <https://doi.org/10.1016/j.dark.2026.102378>. (Q1)
- 2 Krasnov, M.; Nikulin, V. Clusters of PBHs in a Framework of Multidimensional  $f(R)$ -Gravity. *Particles* 2026, 9, 12. <https://doi.org/10.3390/particles9010012> (Q1)
- 3 Krasnov, M., Khlopov, M., Trivedi, O. Axion-like Scalar Field in Kantowski–Sachs Background. *Phys. Atom. Nuclei* 88, 546–549 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063778825600721> (Q4)
- 4 Konstantin Belotsky, Maxim Krasnov, Stanislav Pugachev. Investigation of the dynamics of interaction of a cluster of primordial black holes with stellar cluster. *IJMPD* Vol. 33, No. 14 (2024) <https://doi.org/10.1142/S0218271823400102> (Q2)
- 5 Krasnov, M., Belotsky, K. Possibility of Weakening the Constraint on Abundance of Primordial Black Holes from Eridanus II. *Phys. Atom. Nuclei* 86, 1533–1537 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063778824010265> (Q4)