



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа студента на тему:

# Проявления аксионоподобных моделей

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Д. Ф. –М. Н., ПРОФЕССОР М. Ю. ХЛОПОВ  
ВЫПОЛНИЛ: СТУДЕНТ ГРУППЫ Б19 -102 УЛЬМАСКУЛОВ ЭРИК МАРАОВИЧ

Москва 2023



# Инфляционная модель

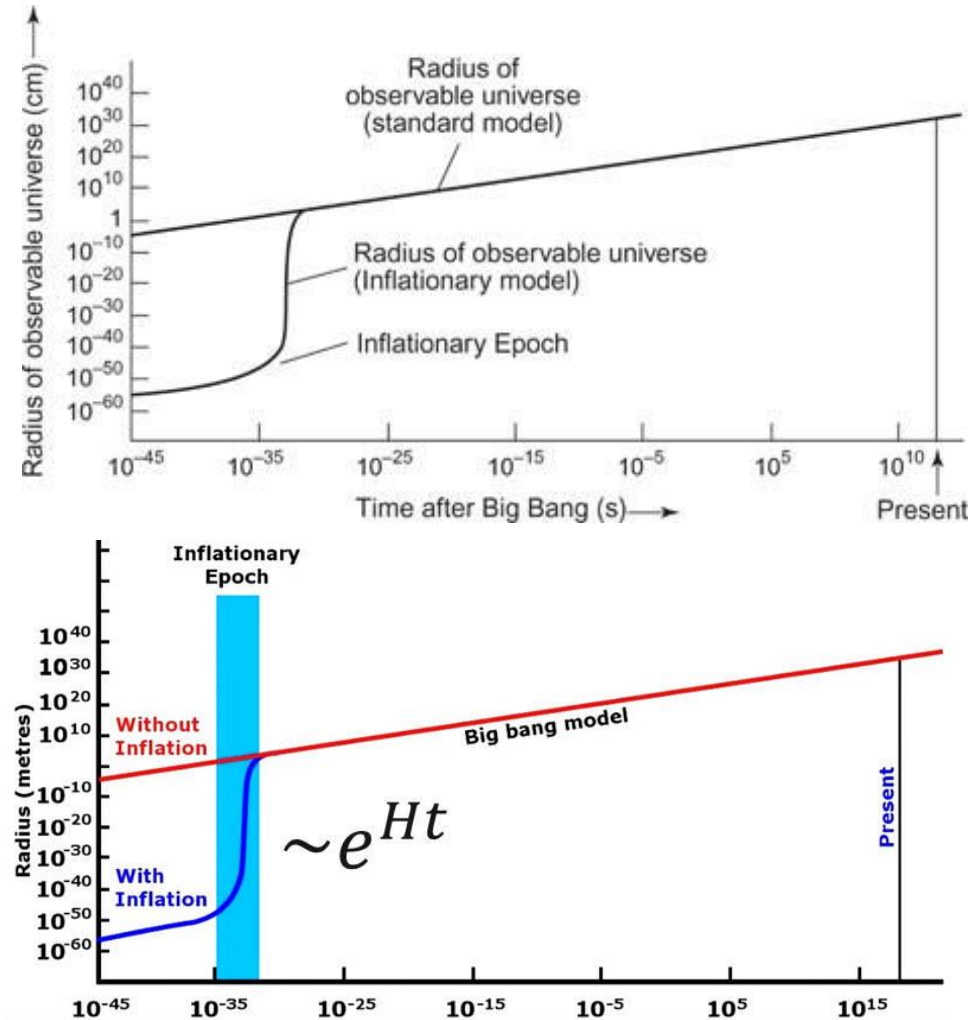


Рис. 1 (а), (б) Иллюстрация инфляционного расширения

- Инфляционная теория — один из главных кандидатов на роль теории, описывающей эволюцию ранней Вселенной.
- Она позволяет решить ряд проблем, возникающих в теории горячего Большого взрыва
- Вселенную, на начальном этапе своего развития, сопровождала стадия экспоненциального расширения
- Плотность энергии слабо зависит от времени, чтобы осуществлялось экспоненциальное расширение

Действие нового скалярного поля:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left( \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right)$$

Уравнение Эйлера-Лагранжа:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -\frac{\partial V}{\partial \phi}$$

Условие медленного скатывания:

$$H\dot{\phi} \sim V'$$

Условие на потенциал:

$$\left( \frac{\dot{\phi}}{\phi} \right)^2 \ll V(\phi)$$

**Получено ограничение  
на потенциал:**

$$\epsilon_V = \frac{M_{pl}^2}{16\pi} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \ll 1$$

$$\eta = \frac{M_{pl}^2}{8\pi} \frac{V''}{V} \ll 1$$

Выражения для давления и плотности энергии:

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \dot{\phi} \right)^2 + V(\phi)$$

$$p = \frac{1}{2} \left( \dot{\phi} \right)^2 - V(\phi)$$

1-е уравнение Фридмана:

$$H^2 = \frac{8\pi G \rho}{3M_{pl}^2} = \frac{8\pi G}{3M_{pl}^2} \left( \frac{1}{2} \left( \dot{\phi} \right)^2 + V(\phi) \right)$$

# Примеры потенциала инфлатона

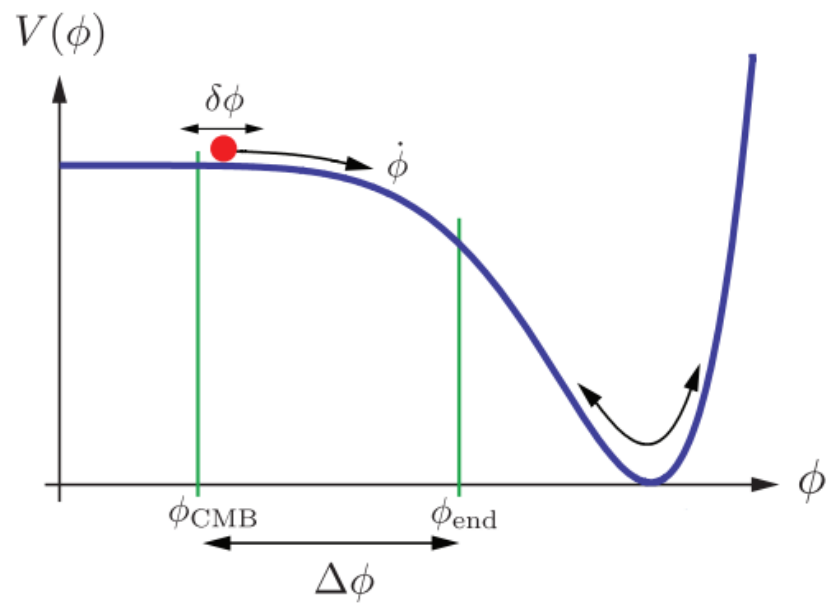


Рис. 2 (а) Пример потенциала

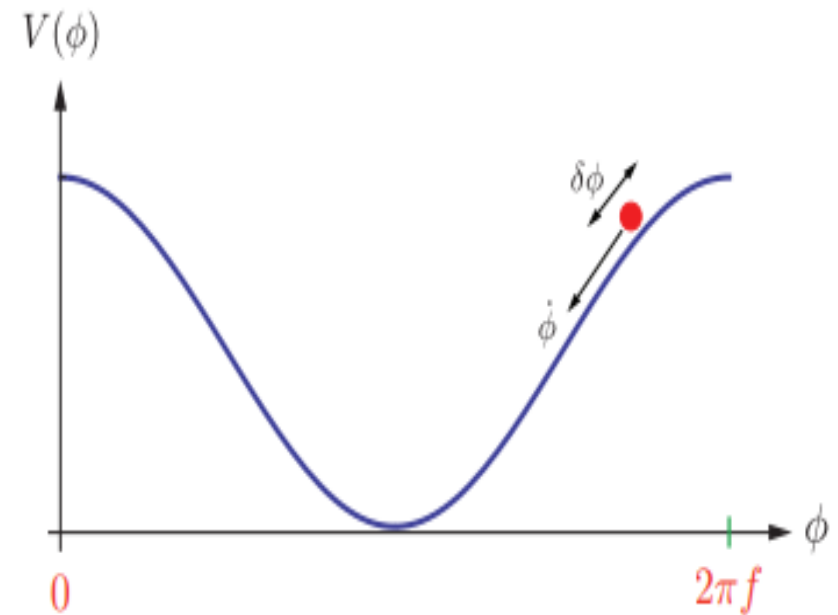


Рис. 2 (б) Пример потенциала

$\theta$  слагаемое в лагранжиане стандартной модели:

$$\Delta L = \frac{\alpha_s}{8\pi} \theta G_{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}$$

Получаемая оценка дипольного момента:

$$d_n \sim \theta \cdot 10^{-16} \cdot e \cdot \text{см}$$

Экспериментальное ограничение:

$$d_n \lesssim 3 \cdot 10^{-26} \cdot e \cdot \text{см}$$

**Необходимость объяснение малости параметра – проблема сильного CP-нарушения**

$$|\theta| \lesssim 0.3 \cdot 10^{-9}$$

# Первичные возмущения

Спектр мощности скалярных возмущений:

$$P_s = A_s \left( \frac{k}{k_*} \right)^{n_s - 1 + \frac{d n_s}{d \ln k} \ln \left( \frac{k}{k_*} \right)}$$

Где:

- $A_s$  - Амплитуда скалярных возмущений
- $k$  - Конформный импульс
- $n_s$  - спектральный индекс

Спектр мощности тензорных возмущений  
(гравитационных волн):

$$P_t = A_t \left( \frac{k}{k_*} \right)^{n_t}$$

Характеристика, связывающая  
спектры – тензорно-скалярное  
отношение:

$$r = \frac{A_t}{A_s}$$

Целью работы является рассмотрение модели, где аксион относится к скрытому сектору физики элементарных частиц. В данной модели он выполняет роль инфлатона, обеспечивающего инфляцию. В скрытом секторе присутствуют аналоги  $u$  и  $d$  кварков, которые не имеют зарядов, характерных  $u$  и  $d$  кваркам стандартной модели.

# Потенциал поля

Потенциал поля рассматриваемой модели:

$$V(a) = -m_\pi^2 f_\pi^2 \sqrt{1 - \frac{4m_u m_d}{(m_u + m_d)^2} \sin^2 \left( \frac{a}{2f_a} \right)}$$

Где:

- $m_u$ - масса u кварка скрытого сектора
- $m_d$ - масса d кварка скрытого сектора
- $m_\pi$ - параметр пионного поля
- $f_\pi$ - пионного поля



$$n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$$

$$r = 16\epsilon$$

где:

$$\epsilon = \frac{M_p^2}{2} \left( \frac{V_a(a)}{V(a)} \right)^2 = \frac{M_p^2}{2} \left( \frac{1}{2f_a} \right)^2 \left( \frac{\tilde{V}_{\tilde{a}}(\tilde{a})}{\tilde{V}(\tilde{a})} \right)^2 < 1$$

$$\eta = M_p^2 \frac{V_{aa}}{V} = M_p^2 \left( \frac{1}{2f_a} \right)^2 \frac{\tilde{V}_{\tilde{a}\tilde{a}}}{\tilde{V}}$$

# Исследуемые характеристики модели

Вычислим 1-ю производную:

$$\tilde{V}_{\tilde{a}} = \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{\sin(2\tilde{a})}{\sqrt{1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}}}$$

Вычислим 2-ю производную:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{\tilde{a}\tilde{a}} &= \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{2\cos(2\tilde{a}) \sqrt{1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}} + \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{\sin(2\tilde{a}) \sin(2\tilde{a})}{\sqrt{1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}}}}{1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}} = \\ &= \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{2\cos(2\tilde{a}) - \frac{8R}{(R+1)^2} \cos(2\tilde{a}) \sin^2 \tilde{a} + \frac{2R}{(R+1)^2} \sin^2(2\tilde{a})}{\left(1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}\right)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{2\cos(2\tilde{a}) - \frac{4R}{(R+1)^2} (2\cos(2\tilde{a}) \sin^2 \tilde{a} + \frac{1}{2} \sin^2(2\tilde{a}))}{\left(1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}\right)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{2\cos(2\tilde{a}) - \frac{4R}{(R+1)^2} (\cos(2\tilde{a}) - \cos^2(2\tilde{a}) + \frac{1}{2} \sin^2(2\tilde{a}))}{\left(1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}\right)^{\frac{3}{2}}} = \\ &= \frac{2R}{(R+1)^2} \frac{2\cos(2\tilde{a}) + \frac{2R}{(R+1)^2} (1 - \cos(2\tilde{a}))^2}{\left(1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}\right)^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

Число возрастаний масштабного фактора:

$$N(a) = \int_{a_{end}}^a \frac{d(a')}{\sqrt{2\epsilon}}$$

$$N_{tot} = \frac{N_0}{4} \ln \frac{\sin^2 \tilde{a}_{cmb} (1 - \sin^2 \tilde{a}_{cmb})^{B_0-1}}{\sin^2 \tilde{a}_{end} (1 - \sin^2 \tilde{a}_{end})^{B_0-1}} \approx 50 \div 60$$

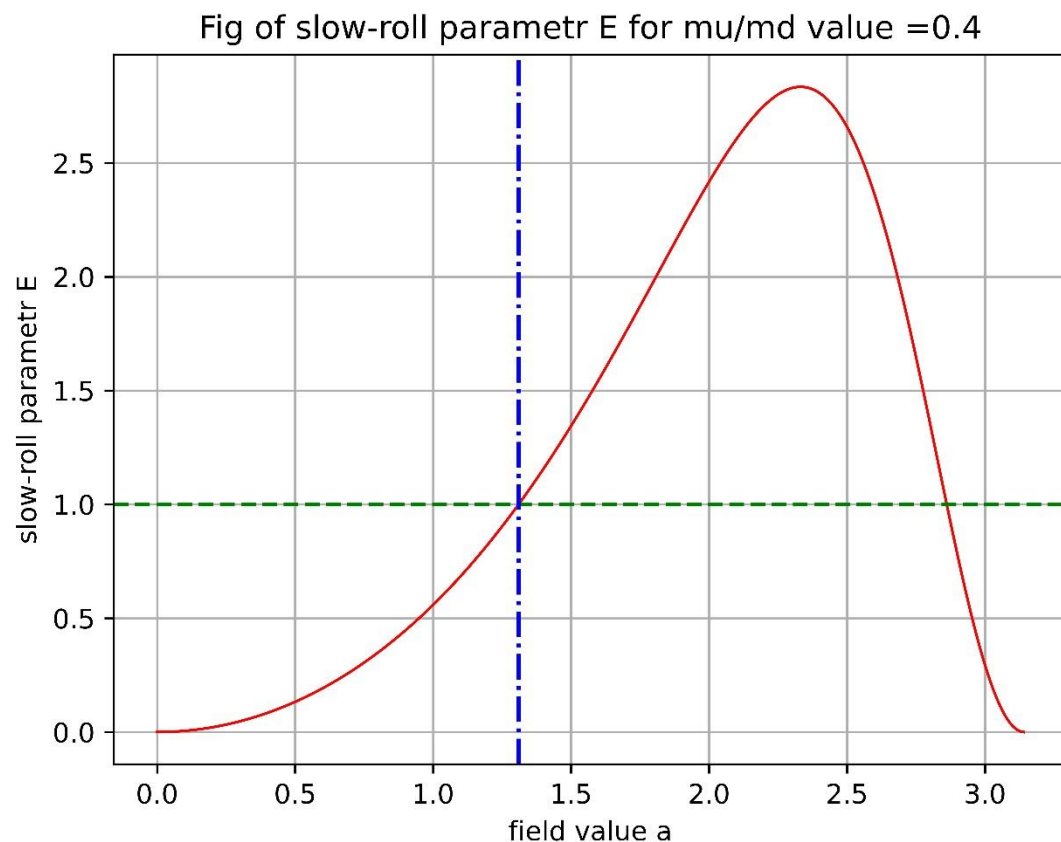
Условие окончания инфляции:

$$\epsilon(\tilde{a}_{end}) = 1 :$$

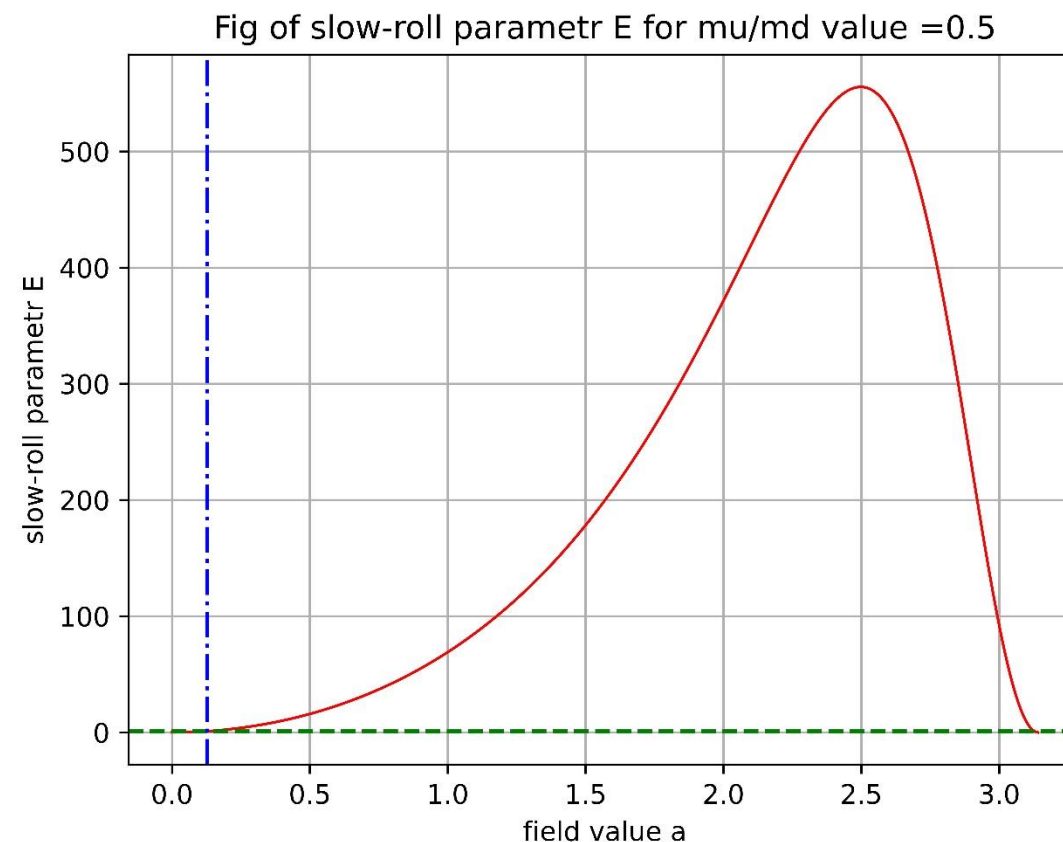
Получаем систему  
уравнений:

$$\begin{cases} n_s|_{cmb} = 1 - 6\epsilon_{cmb} + 2\eta_{cmb} \\ r_{cmb} = 16\epsilon_{cmb} \\ \frac{N_0}{4} \ln \frac{\sin^2 \tilde{a}_{cmb} (1 - \sin^2 \tilde{a}_{cmb})^{B_0-1}}{\sin^2 \tilde{a}_{end} (1 - \sin^2 \tilde{a}_{end})^{B_0-1}} \approx 60 \\ \frac{M_{pl}^2}{2f_a^2} \frac{R^2}{(R+1)^4} \frac{\sin^2 2\tilde{a}_{end}}{\left(1 - \frac{4R}{(R+1)^2} \sin^2 \tilde{a}_{end}\right)^2} = 1 \end{cases}$$

# Анализ полученных свойств



**Рис. 3 (а) Параметр медленного скатывания для  $f_a = 0.2 M_{pl}$**



**Рис. 3 (б) Параметр медленного скатывания для  $f_a = 0.02 M_{pl}$**

$$n_s = 0.9626 \pm 0.0057$$

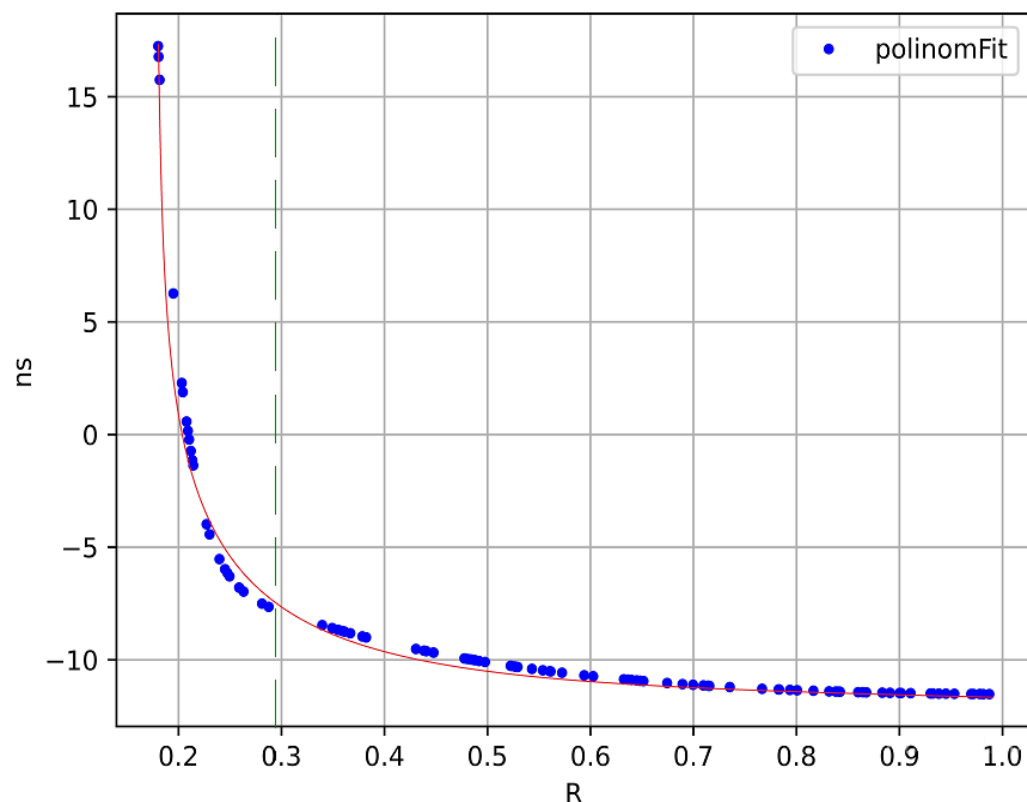


Рис. 4 (а) спектральный индекс скалярных возмущений для  $f_a = 0.02 M_{pl}$

Fig of slow-roll parametr E for  $\mu/md$  value =1.0 in log scale

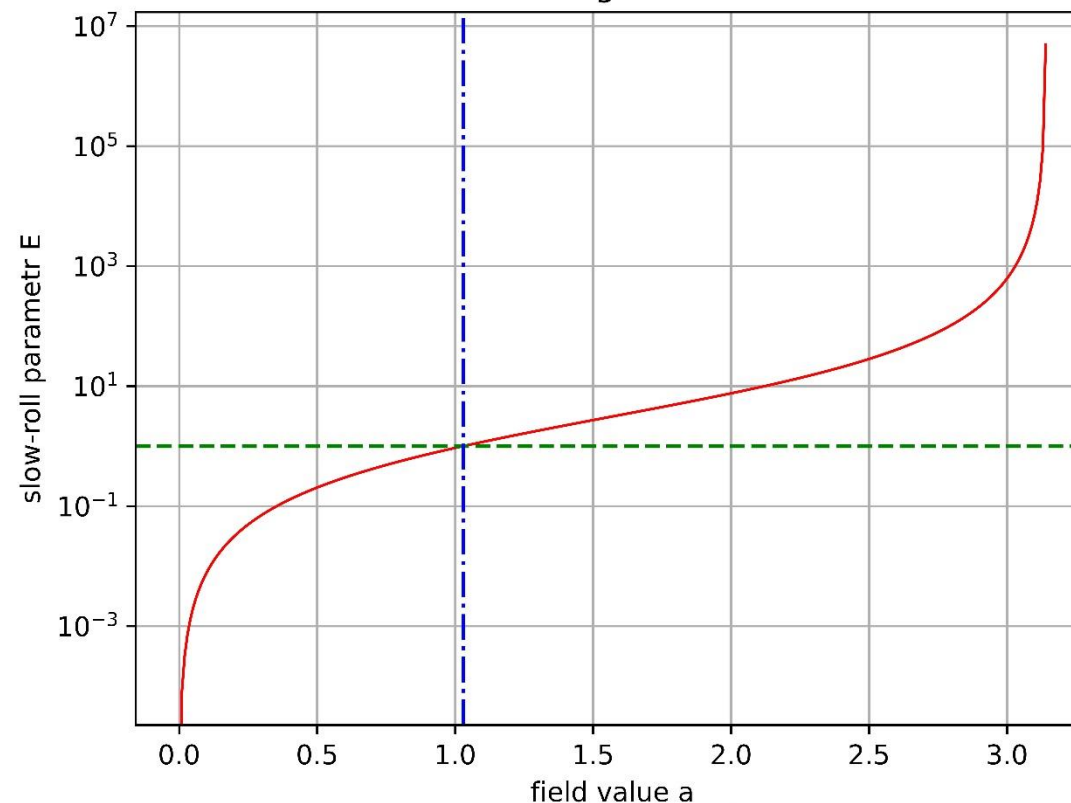
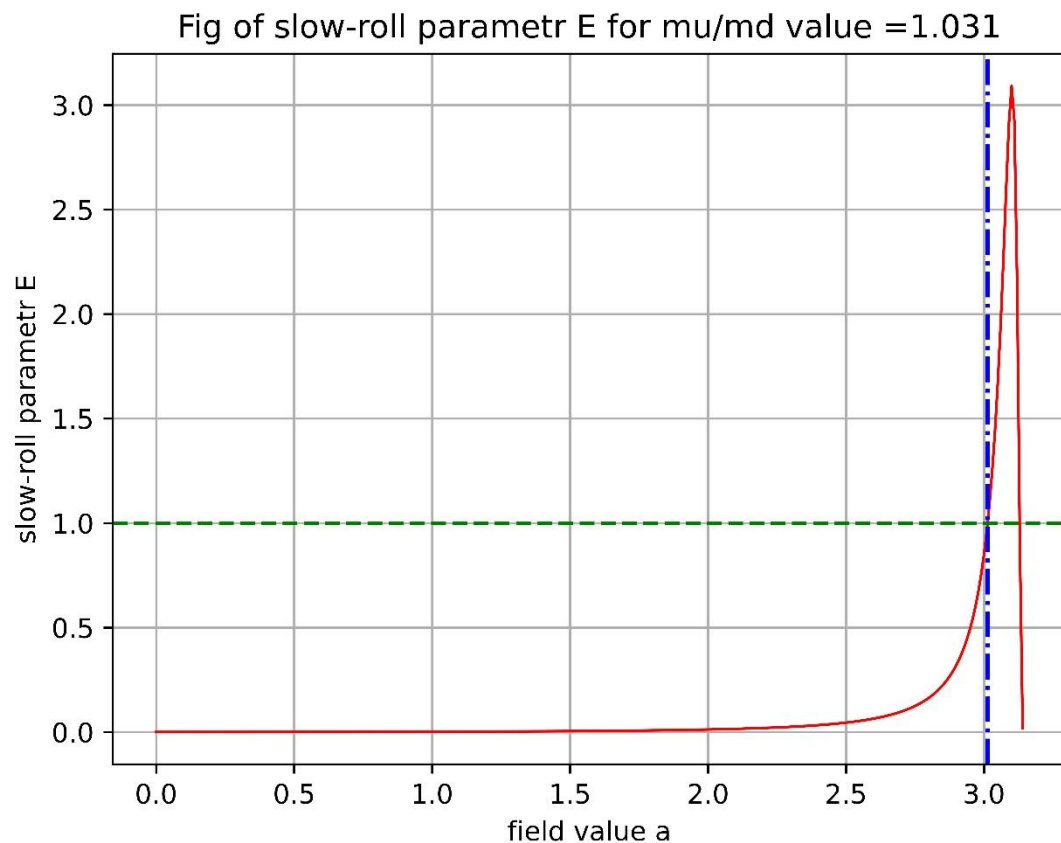
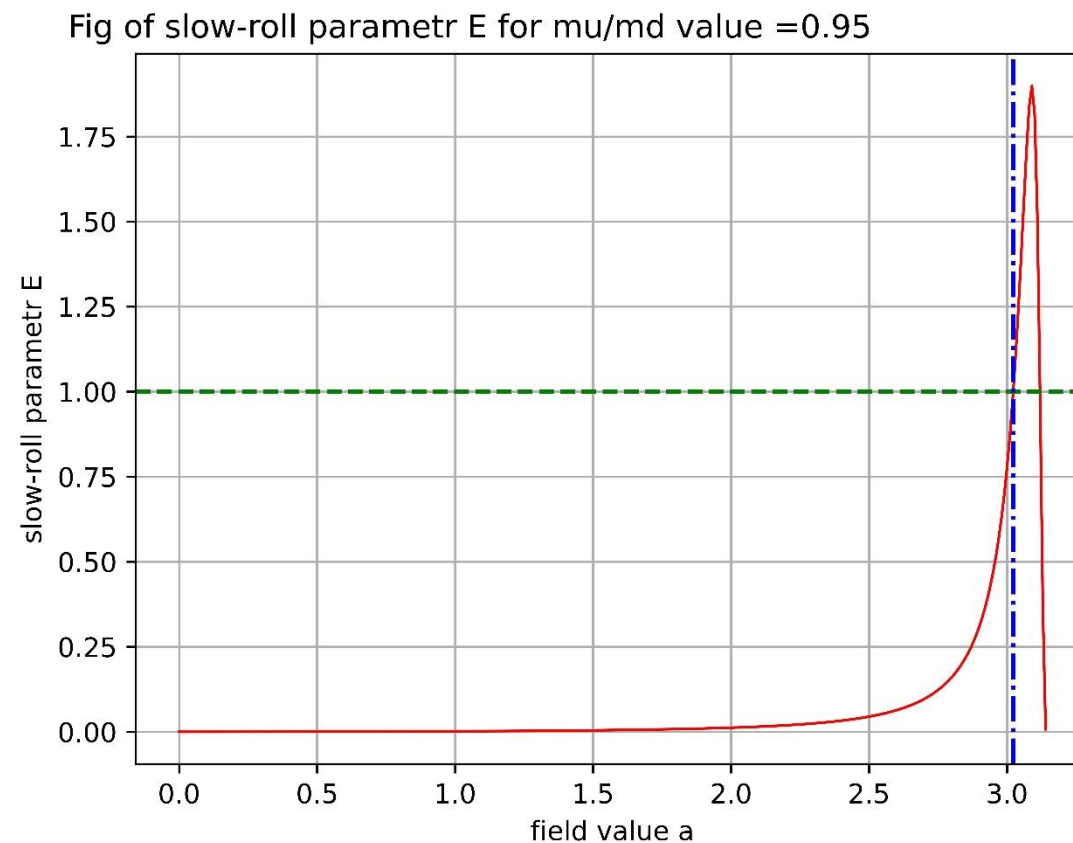


Рис. 4 (б) Параметр медленного скатывания для  $f_a = 0.02 M_{pl}$  в логарифмическом масштабе

# Анализ полученных свойств



(а)



(б)

Рис. 5 (а), (б) Параметр медленного скатывания для  $f_a = 5 M_{pl}$  для различных соотношений  $\frac{m_u}{m_d}$

$$n_s = 0.9626 \pm 0.0057$$

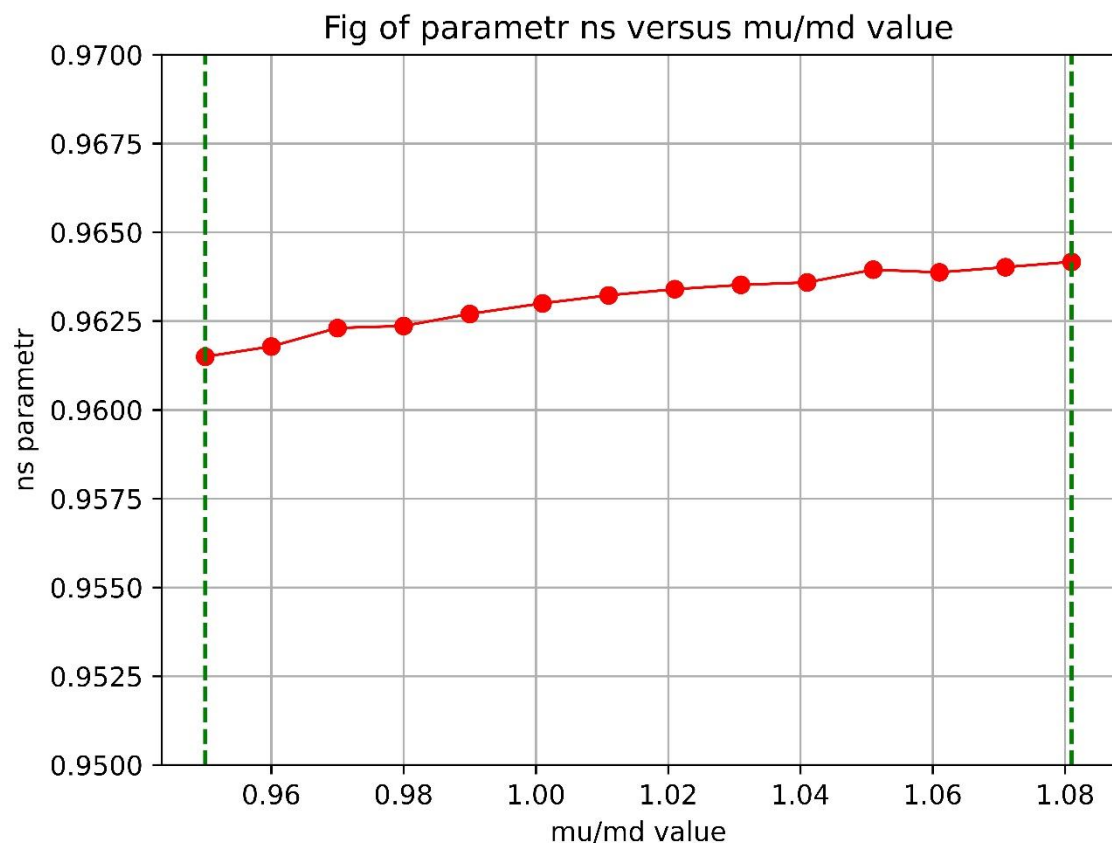


Рис. 6 (а) спектральный индекс скалярных возмущений для  $f_a = 5 M_{pl}$

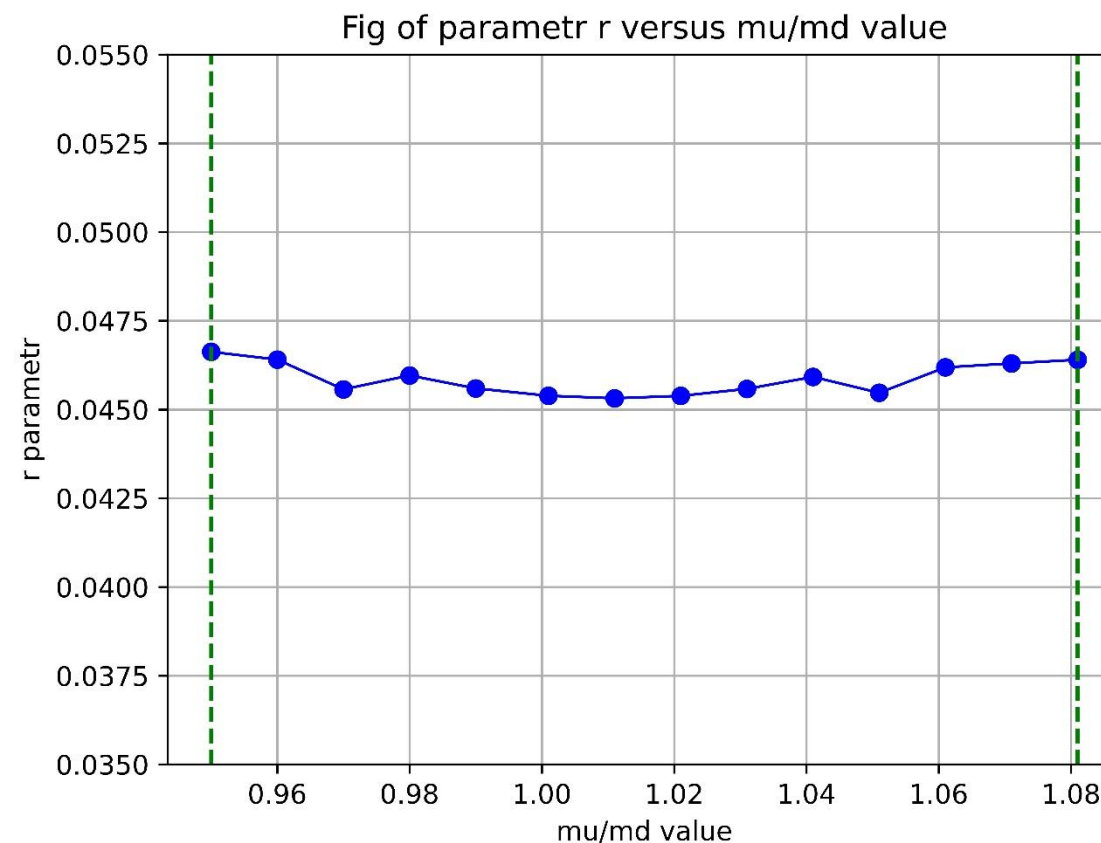


Рис. 6 (б) тензорно-скалярное отношение для  $f_a = 5 M_{pl}$

# Анализ полученных свойств

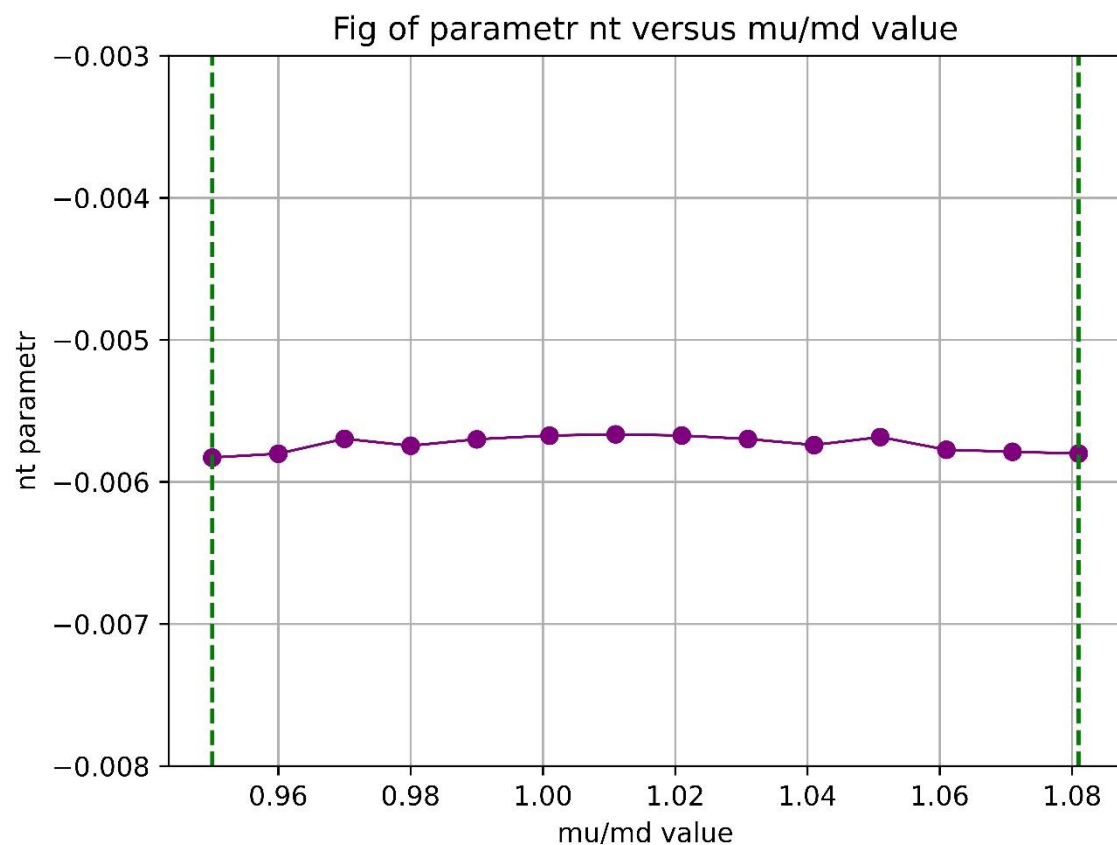


Рис. 7 (а) наклон спектра мощности тензорных возмущений для  $f_a = 5 M_{pl}$

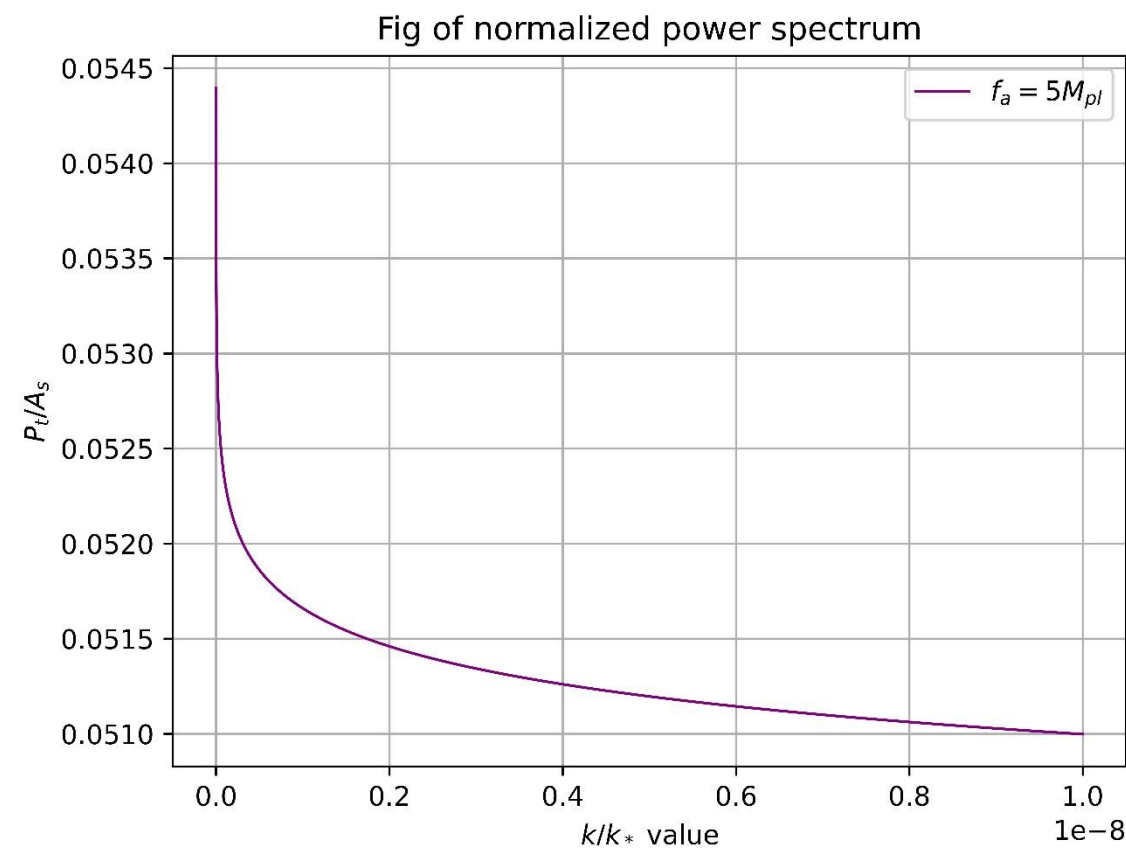


Рис. 7 (б) нормированный спектр мощности тензорных возмущений для  $f_a = 5 M_{pl}$



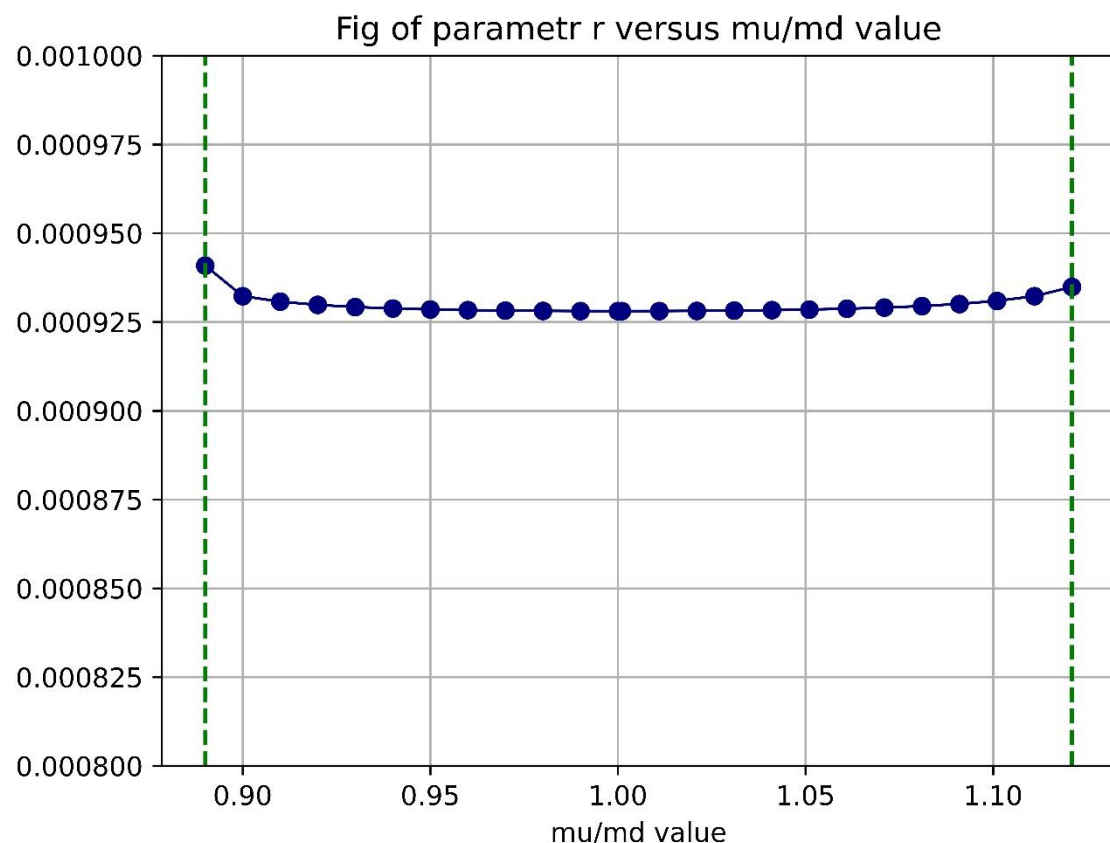


Рис. 8 (а) тензорно-скалярное отношение для  $f_a = 3 M_{pl}$

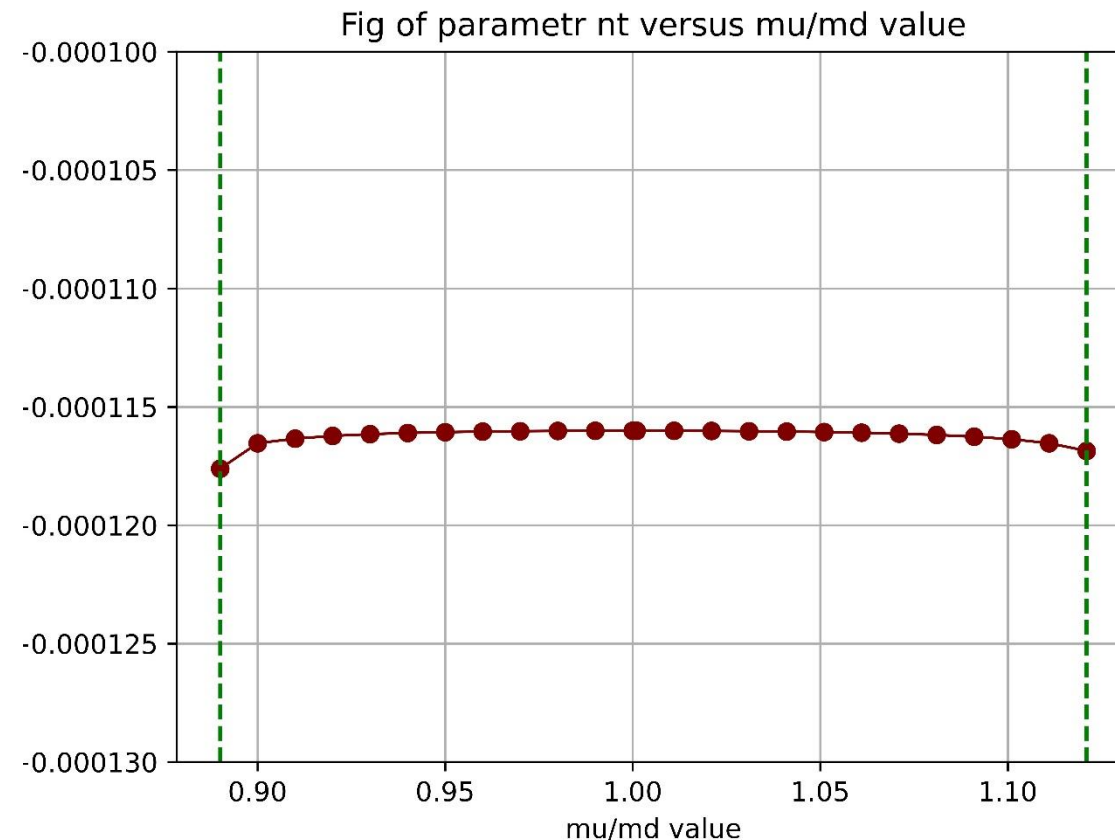
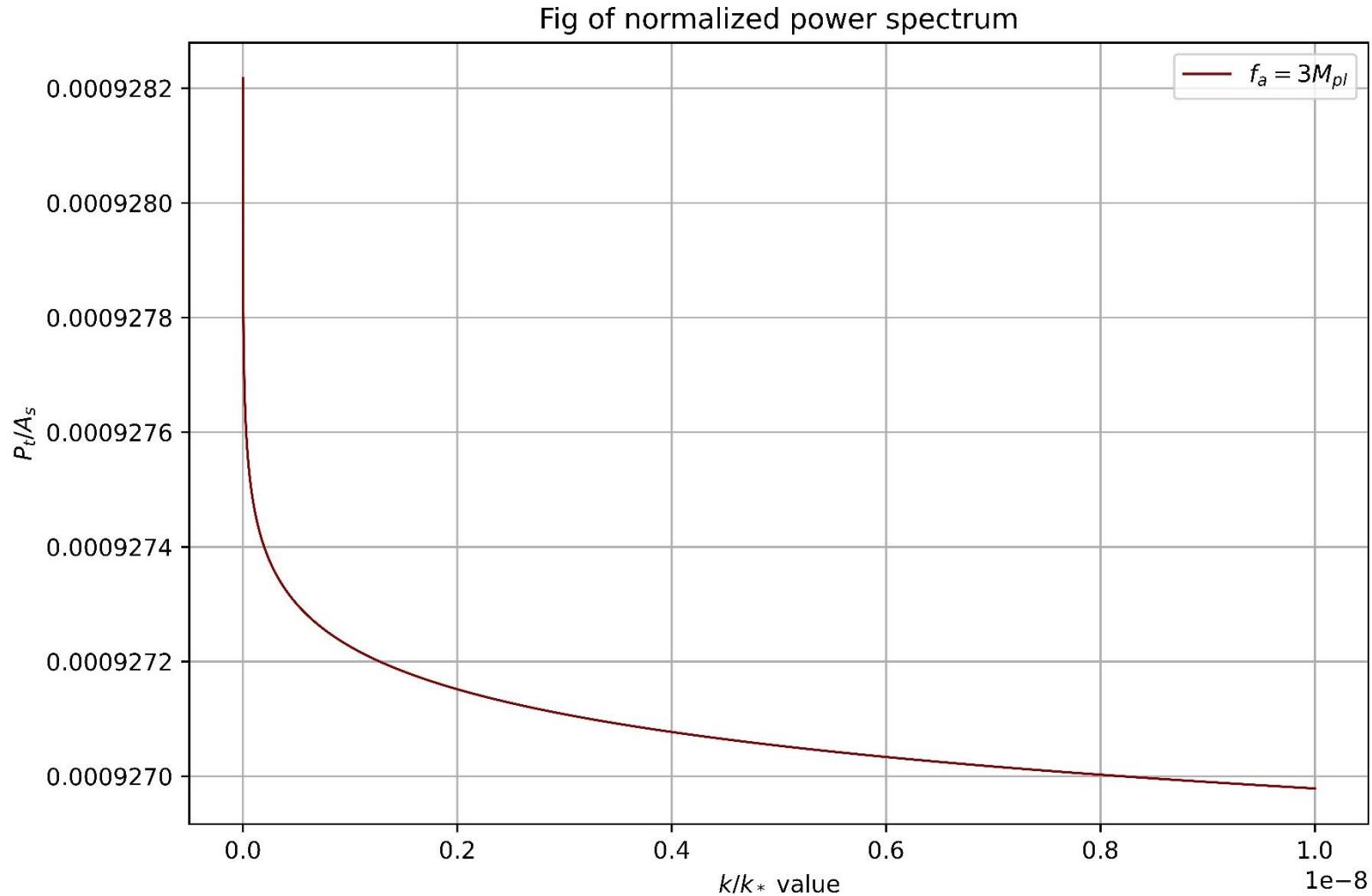


Рис. 8 (б) наклон спектра мощности тензорных возмущений для  $f_a = 3 M_{pl}$

# Анализ полученных свойств



**Рис. 7 (б) нормированный спектр мощности тензорных возмущений для  $f_a = 3 M_{pl}$**

- ❖ Проанализирована определенная модель аксионоподобного поля, используемого в качестве инфлатона и получены ее основные характеристики
- ❖ Проведен анализ полученных результатов в зависимости от свободного параметра модели на основании экспериментальных данных
- ❖ Получена область значений параметра модели, где результат является схожим с экспериментом:

$$2 \cdot M_{pl} \lesssim f a \lesssim 10 \cdot M_{pl}$$

**Спасибо за внимание**



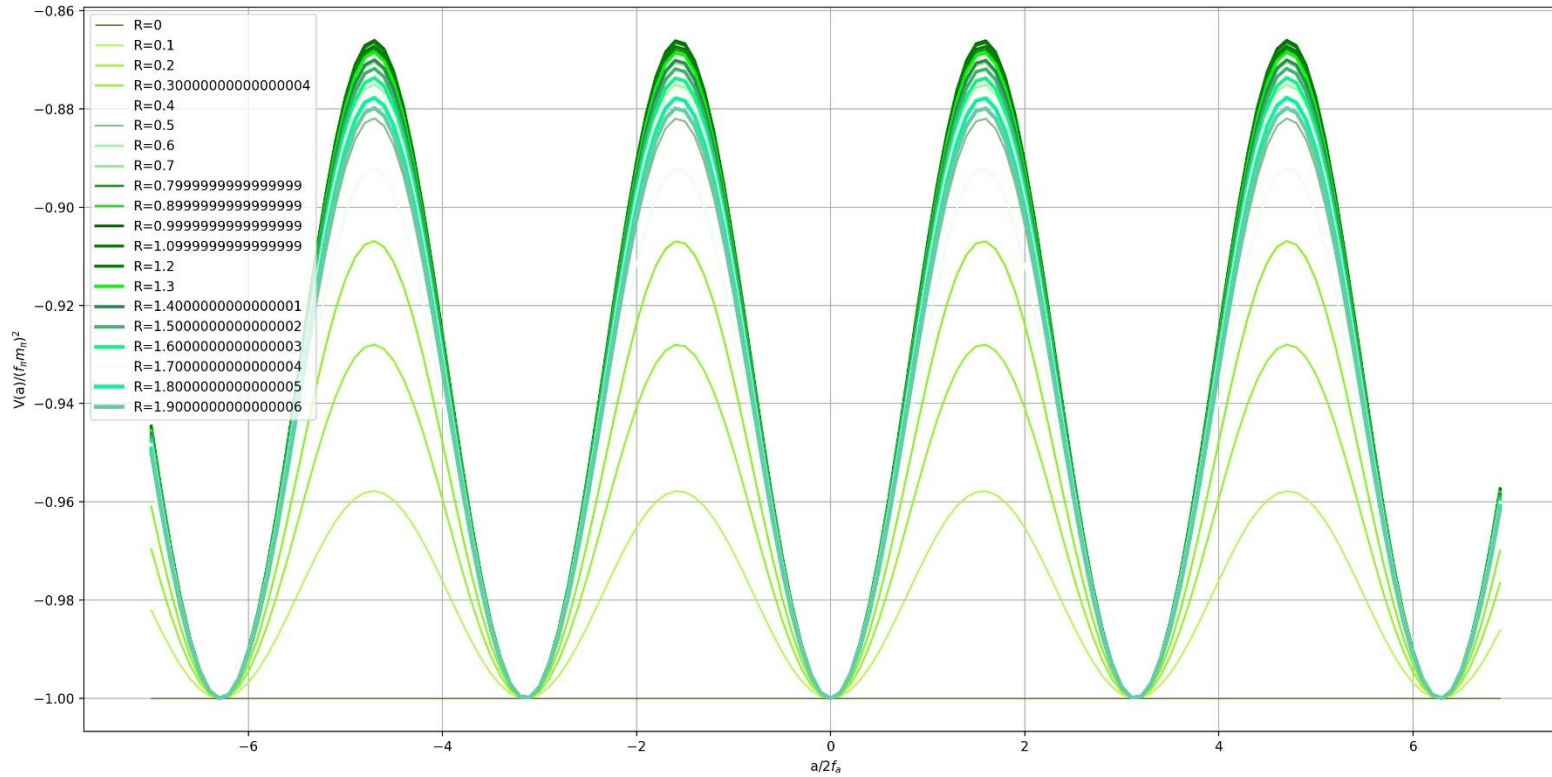


Рис. 8 потенциал модели для различных соотношений  $\frac{m_u}{m_d}$

$$N_e(\phi) = \int_{\phi}^{\phi_e} H(\phi) \frac{d\phi}{\dot{\phi}} = \int_{\phi_e}^{\phi} 3H^2 \frac{d\phi}{V'} = \frac{8\pi}{M_{Pl}^2} \int_{\phi_e}^{\phi} \frac{V}{V'} d\phi,$$