

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»»

УДК 524.83

**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ С
НЕСТАБИЛЬНОЙ СКРЫТОЙ МАССОЙ**

Научный руководитель

проф., д.ф.-м.н.

_____ Хлопов М. Ю.

Научный консультант

postdoctoral fellow

_____ Shambel Sahlu

Студент

_____ Корсакова М. Д.

Москва 2026

Содержание

1	Введение	2
2	Теоретическая часть	3
2.1	Космологическая модель с распадом	3
2.2	Аналитическое решение	4
3	Практическая часть	6
3.1	Использование пакета CLASS	6
3.2	Параметры моделей	6
3.3	Спектры мощности $P(k)$	8
3.4	Спектры анизотропии CMB	10
4	Заключение	12

1 Введение

Современная космология основывается на модели Λ CDM, которая успешно описывает наблюдательные данные, включая анизотропию реликтового излучения, крупномасштабную структуру Вселенной и ускоренное расширение. Несмотря на это, природа скрытой массы остается одной из основных нерешенных проблем современной физики. Одним из возможных расширений стандартной космологической модели является рассмотрение нестабильной скрытой массы, способной распадаться на релятивистские продукты.

Актуальность данной работы связана с исследованием возможных отклонений от стандартной модели Λ CDM. Распад скрытой массы может оказывать влияние на динамику расширения Вселенной, эволюцию плотностей компонент и формирование космологических возмущений. Наличие дополнительной релятивистской компоненты способно приводить к изменениям спектров мощности материи и анизотропии реликтового излучения, что делает подобные модели интересными с точки зрения анализа современных космологических наблюдений.

Целью данной работы является исследование космологической модели с нестабильной скрытой массой и анализ влияния распада скрытой массы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- рассмотрены уравнения непрерывности для нестабильной скрытой массы и релятивистских продуктов распада;
- выполнено численное моделирование в пакете CLASS;
- построены спектры мощности $P(k)$ и спектры анизотропии CMB;
- проведено сравнение модели распадающейся скрытой массы с моделью Λ CDM.

2 Теоретическая часть

2.1 Космологическая модель с распадом

В работе рассматривается модель Вселенной, в которой скрытая масса (Unstable Dark Matter, UDM) является нестабильной и распадается на релятивистские частицы. Эволюция плотностей описывается системой уравнений непрерывности [4]:

$$\dot{\rho}_{\text{UDM}} + 3H \rho_{\text{UDM}} = -\Gamma \rho_{\text{UDM}}, \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_{\text{rel}} + 4H \rho_{\text{rel}} = +\Gamma \rho_{\text{UDM}}. \quad (2)$$

Здесь:

- ρ_{UDM} — плотность нестабильной скрытой массы;
- ρ_{rel} — плотность релятивистских продуктов распада;
- H — параметр Хаббла;
- Γ — скорость распада.

Первое уравнение описывает эволюцию плотности нестабильной скрытой массы в расширяющейся Вселенной. Дополнительный член $-\Gamma \rho_{\text{UDM}}$ учитывает уменьшение плотности скрытой массы за счет ее распада на релятивистские частицы. Таким образом, плотность скрытой массы уменьшается быстрее, чем в стандартной модели ΛCDM .

Второе уравнение описывает динамику релятивистской компоненты, возникающей в результате распада скрытой массы. Правая часть уравнения $+\Gamma \rho_{\text{UDM}}$ описывает поступление энергии от распадающейся скрытой массы в релятивистскую компоненту. Следовательно, между двумя компонентами происходит перенос энергии, который влияет на общую динамику космологической модели.

Если предположить, что релятивистские продукты распада вносят вклад в суммарную плотность темной энергии, то можно получить модифицированное уравнение непрерывности.

Полная плотность Вселенной записывается в виде

$$\Omega_i = \Omega_b + \Omega_{cdm} + \Omega_{udm} + \Omega_{DE} = 1, \quad (3)$$

где эффективная темная энергия определяется соотношением

$$\Omega_{DE} = \Omega_{rel} + \Omega_{\Lambda}. \quad (4)$$

При такой параметризации уравнение непрерывности можно переписать через эффективную плотность темной энергии:

$$\dot{\rho}_{DE} + 4H(\rho_{DE} - \rho_{\Lambda}) = \Gamma\rho_{UDM}. \quad (5)$$

Данная параметризация представляет интерес для дальнейшей реализации модели в пакете CLASS и исследования влияния распада скрытой массы на эволюцию эффективной темной энергии. В рамках настоящей работы эта задача не рассматривалась и полученное уравнение приведено как направление дальнейшего исследования.

2.2 Аналитическое решение

В предыдущем семестре было получено аналитическое выражение для плотности релятивистских продуктов распада:

$$\begin{aligned} \rho_{rel}(z) = & (1+z)^4 \rho_{rel,0} - \rho_{udm}(z) + \\ & + \rho_{udm,0}(1+z)^4 \left[1 - \int_0^z \frac{1}{(1+z')^2} \exp\left(\int_0^{z'} \frac{\Gamma(H(z''))}{H(z'')(1+z'')} dz''\right) dz' \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Полученное выражение позволяет учитывать вклад распадающейся скрытой массы в энергетический баланс Вселенной.

Полная плотность энергии рассматриваемой модели включает вклад барионного вещества, излучения, космологической постоянной, скрытой массы и релятивистских продуктов распада:

$$\rho_{all}(z) = \rho_{udm}(z) + \rho_r(z) + \rho_b(z) + \rho_{\Lambda}(z) + \rho_{rel}(z). \quad (7)$$

После подстановки аналитического решения для $\rho_{rel}(z)$ получаем:

$$\rho_{all}(z) = \rho_r + \rho_b + \rho_\Lambda + (1+z)^4 \rho_{rel,0} +$$

$$+ \rho_{udm,0} (1+z)^4 \left[1 - \int_0^z \frac{1}{(1+z')^2} \exp \left(\int_0^{z'} \frac{\Gamma(H(z''))}{H(z'')(1+z'')} dz'' \right) dz' \right] \quad (8)$$

Полученная формула демонстрирует влияние распада скрытой массы на суммарную плотность энергии и, следовательно, на динамику расширения Вселенной.

3 Практическая часть

3.1 Использование пакета CLASS

Для численного анализа использовался космологический пакет CLASS (Cosmic Linear Anisotropy Solving System), предназначенный для вычисления космологических наблюдаемых величин в рамках заданной модели расширения Вселенной [1]. В основе рассматриваемого подхода лежат уравнения непрерывности для различных компонент Вселенной (барионы, распадающаяся скрытая масса, тёмная энергия), определяющие эволюцию их плотностей в зависимости от параметров Ω_i и постоянной распада Γ .

В рамках работы были реализованы несколько моделей:

1. стандартная модель Λ CDM;
2. три модели с распадом скрытой массы и различными значениями параметра распада Γ ;

На основе вычислений строились:

- спектры мощности материи $P(k)$, характеризующие распределение вещества на различных масштабах;
- спектры анизотропии реликтового излучения CMB, отражающие угловые флуктуации температуры.

3.2 Параметры моделей

В ходе исследования использовались результаты анализа космологических параметров, полученные для различных наборов данных [2].

Таблица 1: Параметры модели Λ CDM.

Parameter	CMB	CMB+DESI	CMB+DESI+PantheonPlus	CMB+DESI+Union3	CMB+DESI+DESY5
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.04^{+0.014}_{-0.0141}$	$3.05^{+0.0145}_{-0.0157}$	$3.05^{+0.0138}_{-0.0151}$	$3.05^{+0.0136}_{-0.015}$	$3.05^{+0.0143}_{-0.0145}$
n_s	$0.965^{+0.0039}_{-0.00397}$	$0.97^{+0.00375}_{-0.00343}$	$0.97^{+0.00315}_{-0.00329}$	$0.97^{+0.00332}_{-0.0033}$	$0.969^{+0.00329}_{-0.00321}$
$100\theta_s$	$1.04^{+0.000294}_{-0.000291}$	$1.04^{+0.000272}_{-0.000314}$	$1.04^{+0.000279}_{-0.000274}$	$1.04^{+0.000277}_{-0.000272}$	$1.04^{+0.000278}_{-0.00028}$
$\Omega_{\text{cdm}} h^2$	$0.12^{+0.00121}_{-0.0012}$	$0.118^{+0.000676}_{-0.000747}$	$0.118^{+0.000576}_{-0.000583}$	$0.118^{+0.000641}_{-0.000639}$	$0.118^{+0.00064}_{-0.00065}$
H_0	$67.4^{+0.543}_{-0.541}$	$68.4^{+0.314}_{-0.291}$	$68.3^{+0.268}_{-0.266}$	$68.3^{+0.291}_{-0.287}$	$68.2^{+0.289}_{-0.291}$
Ω_m	$0.315^{+0.00742}_{-0.00738}$	$0.301^{+0.00372}_{-0.00419}$	$0.302^{+0.00331}_{-0.00332}$	$0.302^{+0.00367}_{-0.0037}$	$0.304^{+0.00354}_{-0.00388}$
σ_8	$0.81^{+0.00598}_{-0.00597}$	$0.806^{+0.00588}_{-0.00652}$	$0.807^{+0.00557}_{-0.00634}$	$0.808^{+0.00576}_{-0.0059}$	$0.808^{+0.00595}_{-0.00599}$
$S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m/0.3}$	$0.831^{+0.0127}_{-0.0128}$	$0.808^{+0.00871}_{-0.00888}$	$0.81^{+0.00774}_{-0.00828}$	$0.811^{+0.0081}_{-0.00805}$	$0.813^{+0.00792}_{-0.008}$
χ^2_{min}	3175	3533	4651	3110	4903
AIC	3191	3549	4667	3126	4919

Таблица 2: Параметры моделей с распадом

Parameter	CMB+DESI DR2 BAO	CMB+DESI DR2 BAO + Union3	CMB+DESI DR2 BAO+PantheonPlus
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.08^{+0.0166}_{-0.0233}$	$3.09^{+0.0141}_{-0.0153}$	$3.08^{+0.0136}_{-0.0137}$
n_s	$0.999^{+0.00469}_{-0.00156}$	$0.997^{+0.00432}_{-0.00226}$	$0.998^{+0.00538}_{-0.00342}$
$100\theta_s$	$1.04^{+0.00017}_{-0.000265}$	$1.04^{+0.000344}_{-0.000366}$	$1.04^{+0.000185}_{-0.000433}$
$\Omega_b h^2$	$0.0231^{+0.000191}_{-0.00014}$	$0.0231^{+0.000168}_{-0.000124}$	$0.0231^{+0.000138}_{-0.000131}$
$\Omega_{udm} h^2$	$0.135^{+0.000766}_{-0.00053}$	$0.135^{+0.000706}_{-0.000817}$	$0.135^{+0.000685}_{-0.000828}$
Γ_{udm}	$0.00123^{+6.76 \times 10^{-5}}_{-0.00073}$	$0.00766^{+0.00198}_{-0.00716}$	$0.00561^{+4.54 \times 10^{-5}}_{-0.00511}$
H_0	$74^{+0.314}_{-0.375}$	$73.8^{+0.358}_{-0.337}$	$73.9^{+0.365}_{-0.362}$
Ω_m	$0.289^{+0.00337}_{-0.00257}$	$0.291^{+0.0036}_{-0.00419}$	$0.291^{+0.00341}_{-0.00385}$
σ_8	$0.852^{+0.00881}_{-0.00938}$	$0.854^{+0.00695}_{-0.00701}$	$0.854^{+0.0065}_{-0.00539}$
$r s_{drag}$	$138^{+0.116}_{-0.217}$	$138^{+0.154}_{-0.189}$	$138^{+0.176}_{-0.195}$
$S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m/0.3}$	$0.837^{+0.0101}_{-0.00986}$	$0.842^{+0.00988}_{-0.00933}$	$0.841^{+0.00827}_{-0.00806}$
χ^2_{\min}	5467	6091	5282
AIC	5491	6115	5306

3.3 Спектры мощности $P(k)$

Для различных моделей были построены спектры мощности материи $P(k)$. Сравнение с базовой моделью Λ CDM показало, что введение распада скрытой массы приводит к заметным изменениям амплитуды спектра. При этом сравнение между различными моделями с распадающейся скрытой массой показывает, что различия между ними остаются пренебрежимо малыми в пределах выбранного диапазона параметра распада Γ . Это свидетельствует о слабой чувствительности спектра $P(k)$ к вариациям Γ в рассматриваемой области параметров.

При малых значениях волнового числа k (крупные масштабы) спектр в модели Λ CDM оказывается выше, чем в моделях с распадом скрытой массы. Это связано с тем, что в сценариях с распадом плотность скрытой массы в ранние эпохи оказывается меньше, что приводит к менее эффективному росту возмущений на больших масштабах.

В то же время на больших значениях k (малые масштабы) наблюдается обратная тенденция: спектры моделей с распадом становятся выше, чем в Λ CDM. Это поведение может быть связано с перераспределением мощности вследствие модифицированной динамики роста возмущений.

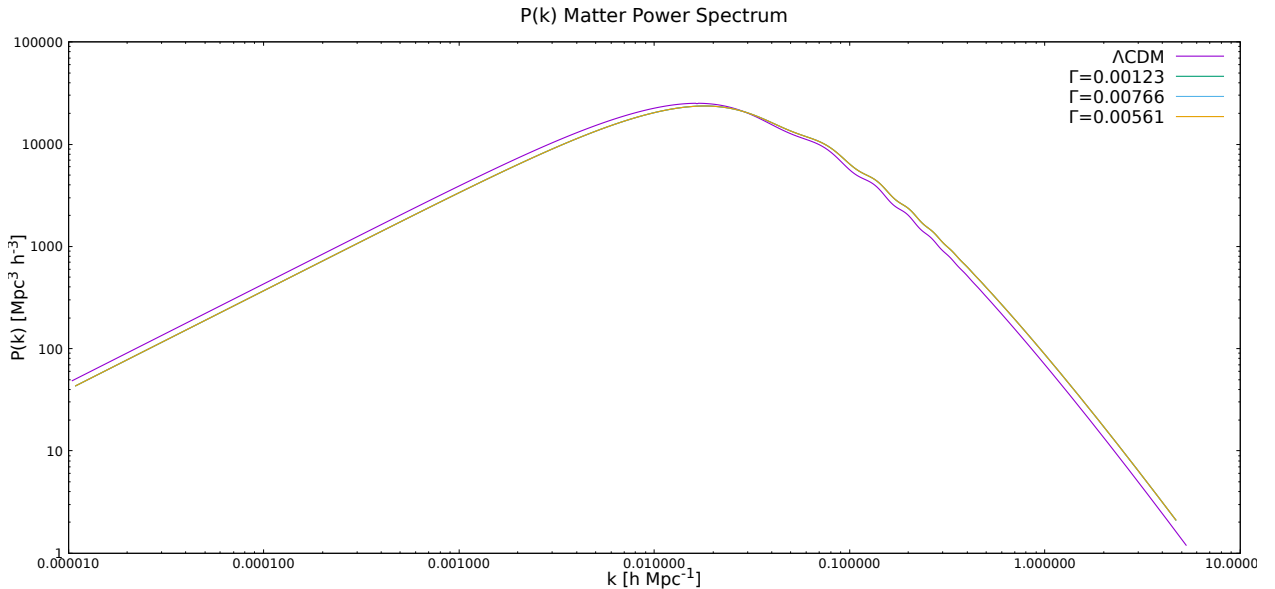


Рис. 1: Спектр мощности материи $P(k)$

Был также построен график относительного отклонения спектров по отношению к Λ CDM. На масштабах вплоть до $k \approx 0.36 h/\text{Mpc}$ относительная разность изменяется в пределах от -0.15 до 0.4 , что указывает на слабое, но несимметричное перераспределение мощности между моделями с распадом скрытой массы и стандартной космологией. На больших значениях волнового числа наблюдается резкое увеличение относительного отклонения, достигающее значений порядка ~ 2 . Такое поведение связано с усилением влияния распада на малых пространственных масштабах, где эволюция возмущений более чувствительна к изменению плотности скрытой массы.

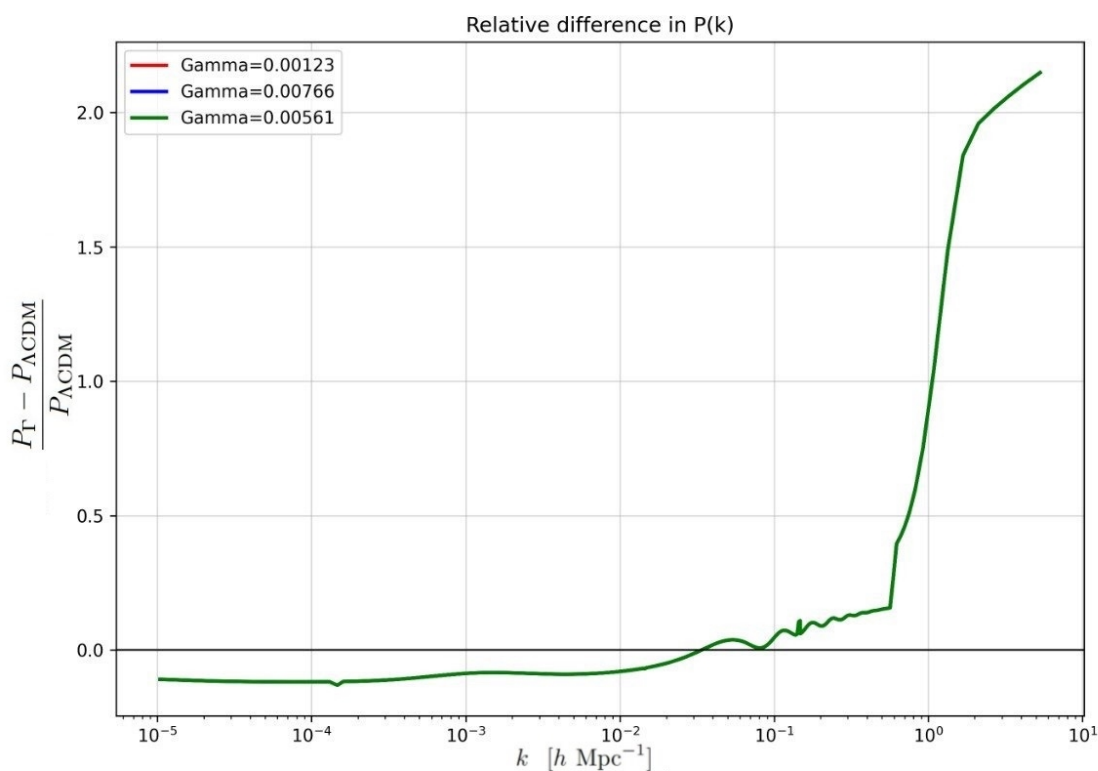


Рис. 2: График относительного отклонения спектра мощности материи от модели Λ CDM

3.4 Спектры анизотропии СМВ

Также были исследованы спектры анизотропии реликтового излучения СМВ. Вычисления проводились в пакете CLASS для нескольких вариантов модели распадающейся скрытой массы. Сравнение с моделью Λ CDM показало, что изменения спектров СМВ также являются небольшими.

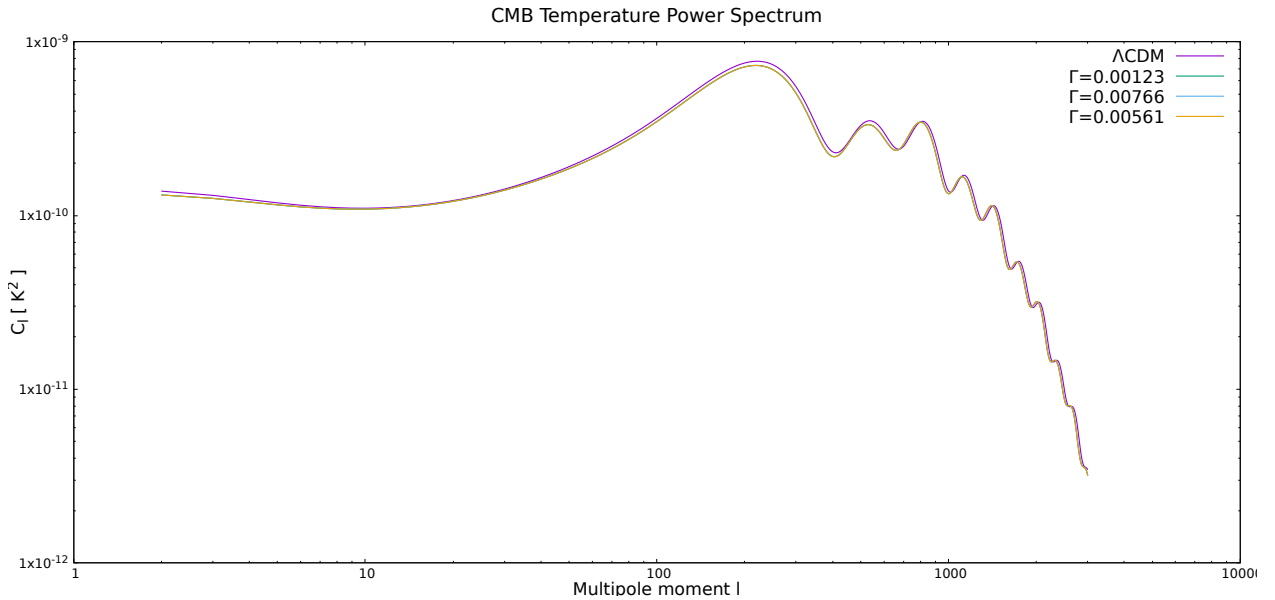


Рис. 3: Спектр мощности температурных анизотропий реликтового излучения

Также был построен график относительной разности спектров анизотропий реликтового излучения СМВ по отношению к модели Λ CDM. В области малых мультипольных моментов относительные отклонения остаются отрицательными и по модулю не превышают значения 0.1, что указывает на слабое подавление амплитуды спектра в моделях с распадом скрытой массы на крупных угловых масштабах.

При переходе к большим значениям ℓ наблюдаются выраженные флуктуации относительной разности, что связано с ростом чувствительности спектра к малым изменениям параметров модели на мелких угловых масштабах, а также с ослаблением амплитуды самого спектра C_ℓ в этой области.

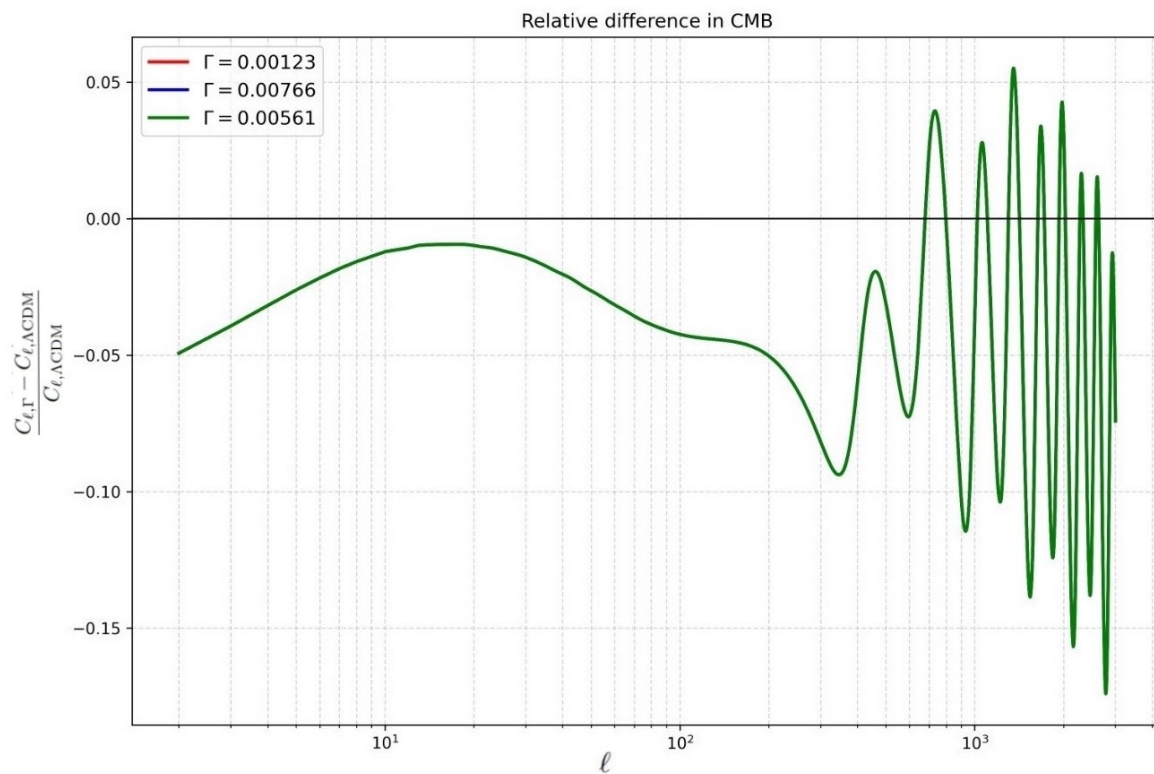


Рис. 4: График относительного отклонения спектра температурных анизотропий реликтового излучения от модели ΛCDM

4 Заключение

В данной работе исследовалась космологическая модель с нестабильной скрытой массой, основанной на уравнениях непрерывности для распадающейся компоненты и её релятивистских продуктов. Для релятивистской компоненты использовано аналитическое решение, полученное ранее, что позволило последовательно описать перенос энергии между компонентами в ходе космологической эволюции.

В рамках численного анализа с использованием пакета CLASS были вычислены спектры мощности материи $P(k)$ и спектры анизотропий реликтового излучения СМВ для стандартной модели Λ CDM и моделей с распадом скрытой массы. Проведено сравнение полученных спектров при различных значениях параметра распада Γ .

Результаты показали, что введение распада скрытой массы приводит к систематическим, но количественно малым отклонениям от Λ CDM. При этом различия между моделями с различными значениями Γ в рассмотренном диапазоне оказываются незначительными, что указывает на слабую чувствительность наблюдаемых космологических величин к вариациям данного параметра.

Таким образом, рассматриваемая модель остаётся согласованной с наблюдательными ограничениями при малых значениях параметра распада и не приводит к существенным изменениям предсказаний стандартной космологической модели. Полученные результаты подтверждают, что эффект распада скрытой массы в исследованном диапазоне параметров носит слабый характер.

Список литературы

- [1] Blas D., Lesgourgues J., Tram T. *The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS)*. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2011.
- [2] Planck Collaboration. *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*. Astronomy & Astrophysics, 2020.
- [3] Wang S., Zhao Z.-C. *New constraints on cosmological gravitational waves from CMB and BAO in light of dynamical dark energy*. arXiv:2507.06930, 2025.
- [4] Yadav M., Chavan P., Guha Sarkar T. *Semi-cosmographic constraints on decaying dark matter and dynamical dark energy: DESI DR2 BAO and 21 cm intensity-mapping forecasts*. arXiv preprint arXiv:2603.23247, 2026.