

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»
Кафедра № 40 «Физика элементарных частиц»**

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.,
группа Б23-102**

28.05.2026

Цель работы

Исследование космологической модели с нестабильной скрытой массой и анализ влияния распада скрытой массы на спектры мощности материи и анизотропии реликтового излучения

Задачи

- Рассмотреть уравнения непрерывности для распадающейся скрытой массы и продуктов распада.
- Выполнить численное моделирование с использованием пакета CLASS.
- Построить спектры мощности материи $P(k)$ и спектры анизотропии CMB.
- Провести сравнение моделей распадающейся скрытой массы со стандартной моделью Λ CDM.

ТЕОРИЯ

Уравнения непрерывности:

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

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

Здесь:

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

Полученное ранее аналитическое решение:

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

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Были рассмотрены модели с параметрами из следующих таблиц:

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	$0.852^{+0.00881}_{-0.00938}$	$0.854^{+0.00695}_{-0.00701}$	$0.854^{+0.0065}_{-0.00539}$
τS_{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

ПОЛУЧЕННЫЕ СПЕКТРЫ

$P(k)$ Matter Power Spectrum

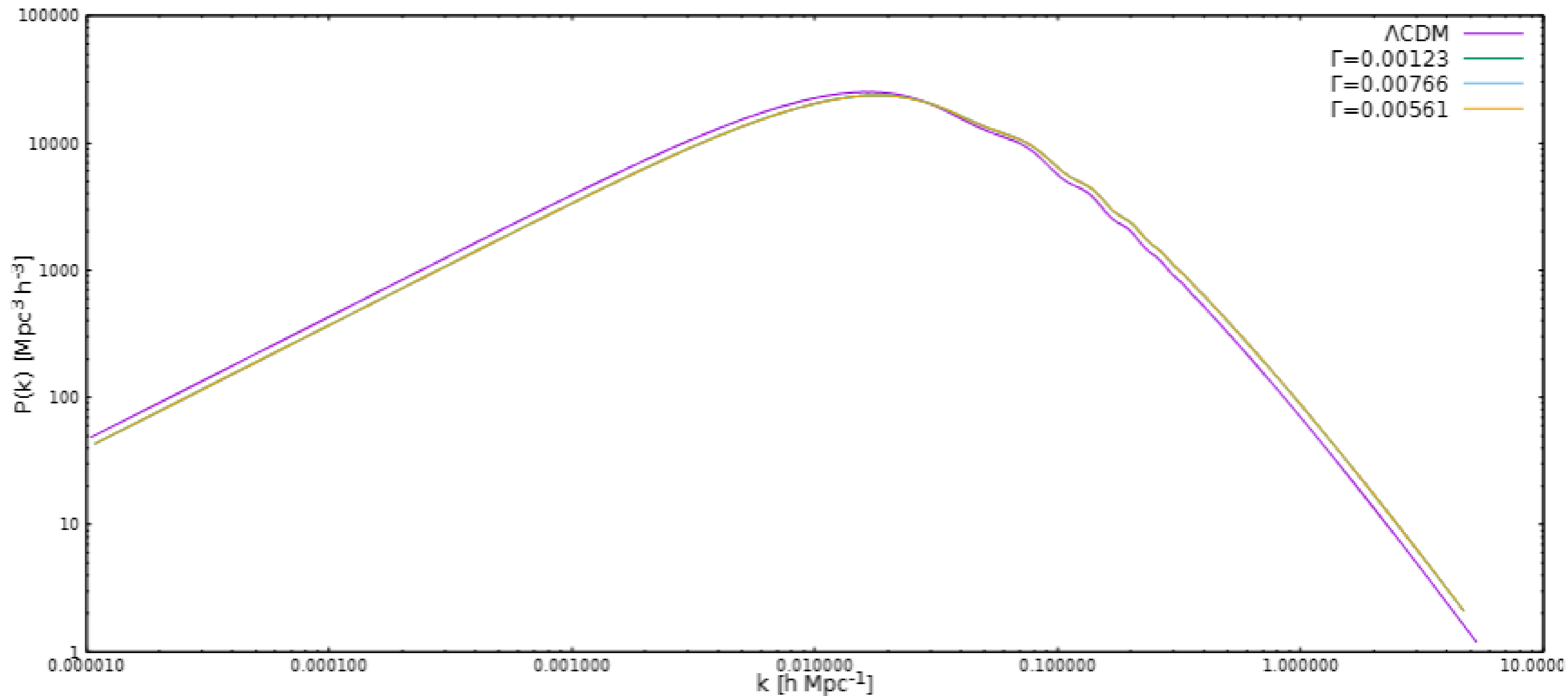


Рис. 1: Спектр мощности материи $P(k)$

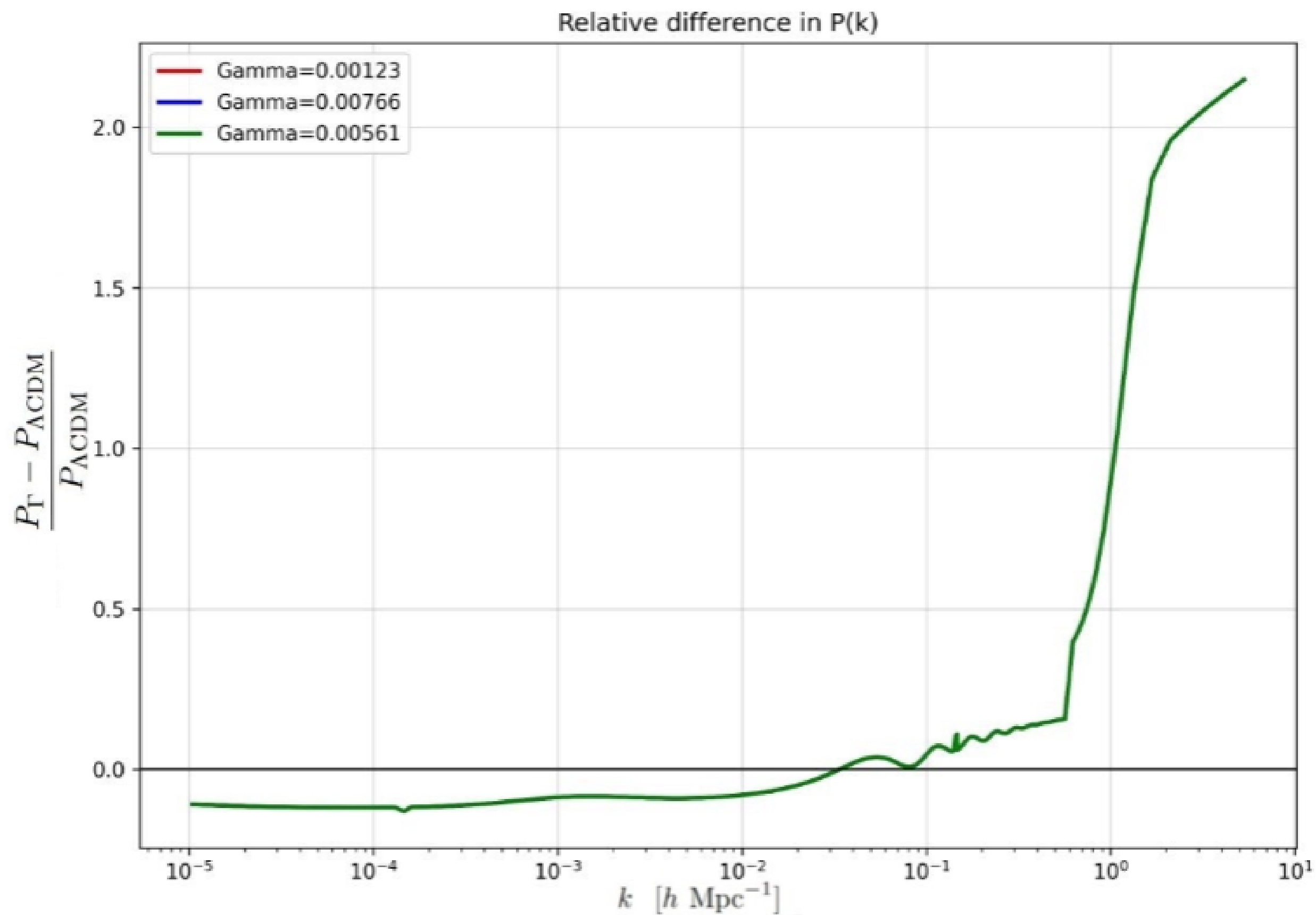


Рис. 2: График относительного отклонения спектра мощности материи от модели ΛCDM

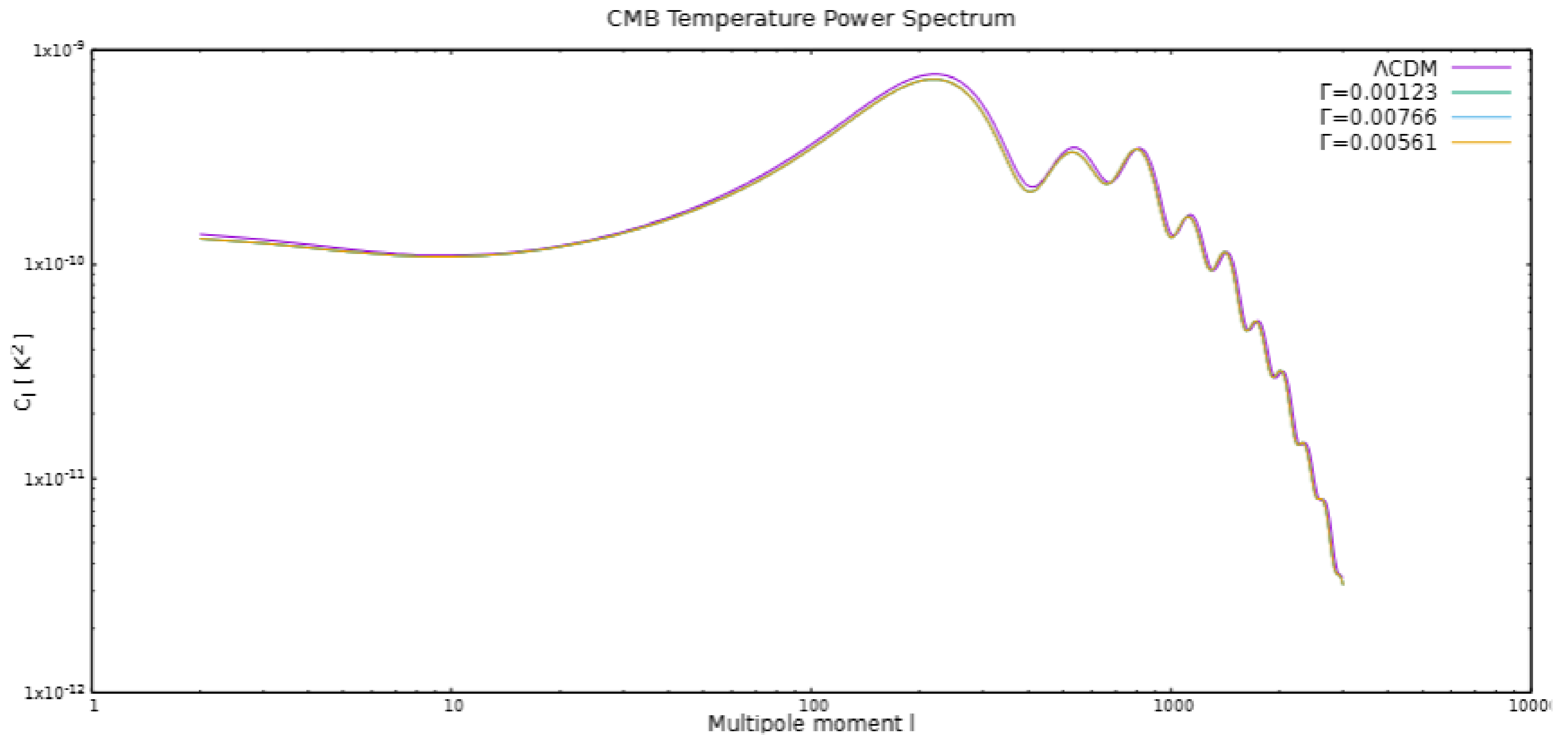


Рис. 3: Спектр мощности температурных анизотропий реликтового излучения

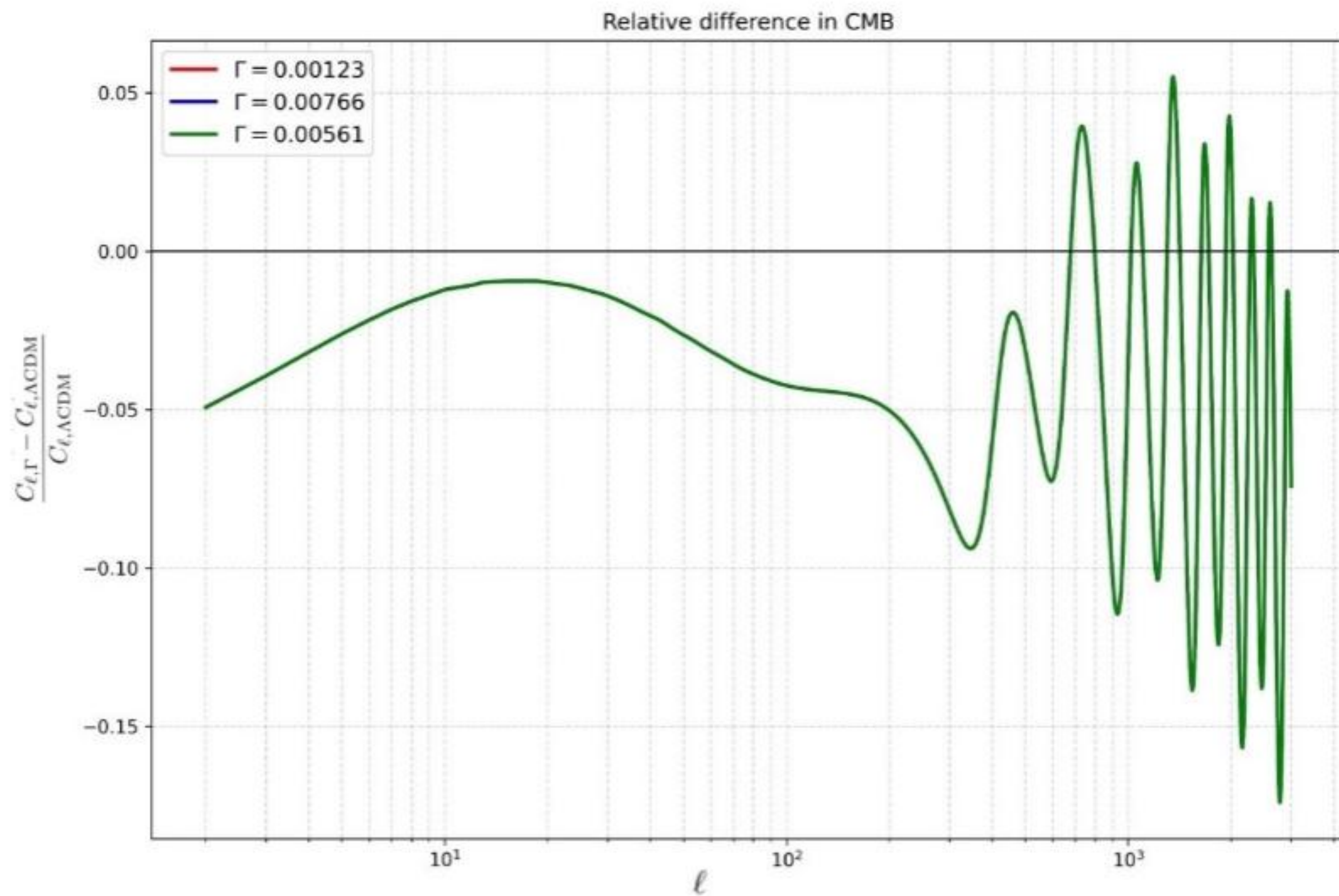


Рис. 4: График относительного отклонения спектра температурных анизотропий реликтового излучения от модели ΛCDM

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены задачи:

- Произведено численное моделирование в пакете CLASS
- Построены спектры мощности материи $P(k)$ и спектры анизотропии CMB
- Проведено сравнение моделей распадающейся скрытой массы с моделью Λ CDM

Перспективы дальнейших исследований:

- Исследование более широкого диапазона параметра распада Γ
- Модификация уравнений непрерывности
- Реализация более сложных моделей распадающейся скрытой массы в пакете CLASS