

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

# **ПАРАМЕТР ХАББЛА В МОДЕЛИ ВСЕЛЕННОЙ С НЕСТАБИЛЬНОЙ СКРЫТОЙ МАССОЙ**

**Научный руководитель  
проф., д.ф.-м.н.**

**Хлопов М. Ю.**

**Научный консультант**

**Краснов М. А.**

**Студент**

**Корсакова М. Д.,  
группа Б23-102**

**25.12.2025**

**Цель:** вывод выражения для параметра Хаббла  $H(z)$  как функции красного смещения

**Задачи:**

1. Получить выражение для плотности нестабильной скрытой массы
2. Вывести выражение для плотности релятивистских продуктов распада
3. Получить выражение для параметра Хаббла  $H(z)$  в рамках модели путём подстановки найденных выражений для плотностей в первое уравнение Фридмана.

# ТЕОРИЯ

**Первое уравнение Фридмана:**

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho_{\text{all}}(t)$$

$a(t)$  - масштабный фактор

$H(t) = \dot{a}/a$  - параметр Хаббла, характеризующий скорость расширения Вселенной

$\rho_{\text{all}}$  - суммарная плотность энергии всех компонент Вселенной

$G$  - гравитационная постоянная

**Уравнение непрерывности:**

$$\frac{d\rho}{dt} + 3H(\rho + p) = 0$$

$\rho, p$  - плотность и давление компоненты Вселенной

# ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

$$\frac{d\rho_{\text{udm}}}{dt} + 3H\rho_{\text{udm}} = -\Gamma\rho_{\text{udm}} \Rightarrow \rho_{\text{udm}}(z) = \rho_{\text{udm},0}(1+z)^3 \exp \left[ -\Gamma \int_{z_1}^0 \frac{dz'}{H(z')(1+z')} \right]$$

$$\frac{d\rho_{\text{rel}}}{dt} + 4H\rho_{\text{rel}} = +\Gamma\rho_{\text{udm}} \Rightarrow \rho_{\text{rel}}(z) = -\rho_{\text{udm}}(z) + \\ + \rho_{\text{udm},0}(1+z)^4 \int_z^0 \exp \left[ -\Gamma \int_{z_1}^0 \frac{dz'}{H(z')(1+z')} \right] \frac{dz_1}{(1+z_1)^2}$$

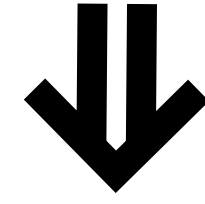
$\rho_{\text{udm}}(z)$  - плотность нестабильной скрытой массы

$\rho_{\text{rel}}(z)$  - плотность релятивистских продуктов распада

$\Gamma$  - постоянная распада

$$\Gamma \sim 10^{-28} \text{ с}^{-1}$$

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



$$H(z) = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} [\rho_{r,0}(1+z)^4 + \rho_{b,0}(1+z)^3 + \rho_{\Lambda,0} + \rho_{udm,0}(1+z)^4 \int_z^0 \exp \left[ -\Gamma \int_{z_1}^0 \frac{dz'}{H(z')(1+z')} \right] \frac{dz_1}{(1+z_1)^2} ]}$$

$$\rho_r(z) = \rho_{r,0}(1+z)^4 \quad - \text{плотность релятивистских частиц}$$

$$\rho_b(z) = \rho_{b,0}(1+z)^3 \quad - \text{плотность барионной материи}$$

$$\rho_{\Lambda}(z) = \rho_{\Lambda,0} = \text{const} \quad - \text{плотность тёмной энергии}$$

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты:

1. Получены аналитические выражения для  $\rho_{\text{udm}}(z)$ ,  $\rho_{\text{rel}}(z)$  из уравнений непрерывности
2. Получено аналитическое выражение для параметра Хаббла из первого уравнения Фридмана

Задача на будущее: рассмотреть предельный случай мгновенного распада скрытой массы

Ожидается, что неявное выражение для параметра Хаббла сведётся к явному алгебраическому.