

Спонтанный бариосинтез с большой начальной фазой

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

03.07.25

Цель

Целью данной работы является нахождение зависимости барионной асимметрии в простой модели спонтанного бариосинтеза от начальной фазы.

Модель представлена Лагранжианом:

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \Phi^* \partial^\mu \Phi - V(\Phi) + i\bar{Q}\gamma^\mu \partial_\mu Q + i\bar{L}\gamma^\mu \partial_\mu L - m_Q \bar{Q}Q - m_L \bar{L}L + g(\Phi \bar{Q}L + \Phi^* \bar{L}Q), \quad (1)$$

где

$$V(\Phi) = \lambda[\Phi^* \Phi - f^2/2]^2. \quad (2)$$

Нарушение симметрии

После нарушения симметрии, которое происходит на энергетическом масштабе f поле приобретает своё вакуумное значение

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

после чего Лагранжиан приобретает вид ($\theta = \phi/f$):

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{f^2}{2} \partial_\mu \theta \partial^\mu \theta + i \bar{Q} \gamma^\mu \partial_\mu Q + i \bar{L} \gamma^\mu \partial_\mu L - m_Q \bar{Q} Q - m_L \bar{L} L + \\ & + \frac{gf}{\sqrt{2}} (\bar{Q} L e^{i\theta} + \bar{L} Q e^{-i\theta}) - V(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

и имеет следующие симметрии:

$$Q \rightarrow e^{i\alpha} Q, \quad L \rightarrow L, \quad \theta \rightarrow \theta + \alpha. \quad (5)$$

Барионный ток

Преобразуем Лагранжиан, положив $\alpha = -\theta$ и получим:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \frac{f^2}{2} \partial_\mu \theta \partial^\mu \theta + i \bar{Q} \gamma^\mu \partial_\mu Q + i \bar{L} \gamma^\mu \partial_\mu L - m_Q \bar{Q} Q - m_L \bar{L} L + \\ & + \frac{gf}{\sqrt{2}} (\bar{Q} L + \bar{L} Q) + \partial_\mu \theta \bar{Q} \gamma^\mu Q - \Lambda^4 (1 - \cos \theta). \quad (6)\end{aligned}$$

Уравнение движения в плоском пространстве

Полуклассическое уравнение движения скалярного поля в пространстве Минковского имеет вид

$$\ddot{\theta} + \frac{\Lambda^4}{f^2} \sin \theta = \frac{g^2}{\pi^2} \lim_{\omega \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^0 dt' \left[\frac{\sin^2 \omega t'}{t'} \right] \times \\ \times \left[\ddot{\theta}(t + t') \cos \Delta\theta - \dot{\theta}^2(t + t') \sin \Delta\theta \right] \equiv \mathcal{I}. \quad (7)$$

Для его решения мы полагаем

$$\frac{\omega f}{\Lambda^2} \gg 1 \text{ и } \omega < \infty. \quad (8)$$

Проинтегрируем $\mathcal{I}(t)$ по частям:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(t) = & \frac{g^2}{\pi^2} \frac{\sin^2 \omega t'}{t'} \dot{\theta}(t + t') \cdot \cos [\Delta\theta] \Big|_{-\infty}^0 - \\ & - \frac{g^2}{\pi^2} \int_{-\infty}^0 \dot{\theta}(t + t') \cdot \cos [\theta(t + t') - \theta(t)] \cdot \left(\frac{\omega \sin (2\omega t')}{t'} - \frac{\sin^2 (\omega t')}{t'^2} \right) dt'. \end{aligned} \quad (9)$$

Пользуясь известными представлениями дельта-функции:

$$\frac{\omega \sin (2\omega t')}{t'} - \frac{\sin^2 (\omega t')}{t'^2} \approx \pi \omega \delta(t'). \quad (10)$$

Получаем

$$\ddot{\theta} + \frac{g^2 \omega}{\pi} \dot{\theta} + \frac{\Lambda^4}{f^2} \sin \theta = 0. \quad (11)$$

Перейдём к производной по $\Lambda^2 t/f$ (обозначено $'$):

$$\theta'' + \frac{g^2 \omega f}{\Lambda^2 \pi} \theta' + \sin \theta = 0. \quad (12)$$

Введём обозначение $\Gamma = \frac{g^2 \omega f}{\Lambda^2 \pi}$ и будем рассматривать эту величину как свободный параметр.

Зная решение уравнения (12), можно вычислить концентрацию барионов и антибарионов

$$n_{B, \bar{B}} = \frac{g^2 f^2}{2\pi^2} \int_0^m \omega^2 d\omega \left| \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2i\omega t \pm i\theta(t)} dt \right|^2. \quad (13)$$

Барьонная асимметрия в плоском пространстве

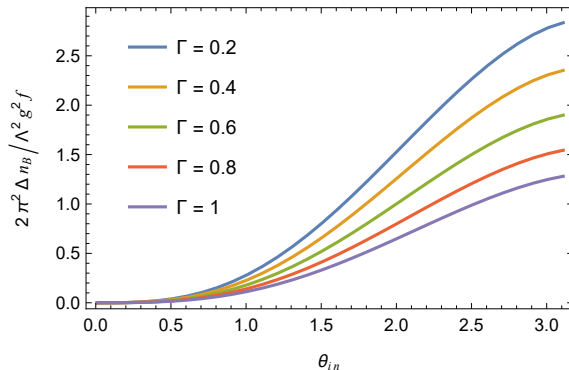


Рис. 1: Барьонная асимметрия $\Delta n_B = n_B - n_{\bar{B}}$ в зависимости от начальной фазы при различных значениях Γ .

Динамика в конформной метрике Фридмана

В конформной метрике Фридмана ($g_{\mu\nu} = a^2 \eta_{\mu\nu}$) Лагранжиан можно переписать в виде (фермионы переопределены $\psi \rightarrow \psi/a^{3/2}$):

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} f^2 a^2 \partial_\mu \theta \partial^\mu \theta + i \bar{Q} \partial_\mu \gamma^\mu Q + i \bar{L} \partial_\mu \gamma^\mu L + \partial_\mu \theta \bar{Q} \gamma^\mu Q + \\ + g f a (\bar{Q} L - \bar{L} Q) - a^4 U(\theta). \quad (14)$$

Полуклассическое уравнение движения имеет вид

$$\partial_\mu (a^2 \partial^\mu \theta) + a^4 \frac{\Lambda^4}{f^2} \sin \theta = - \frac{4g^2}{\pi^2} a(\tau) \int_0^\infty \omega^2 d\omega \int_{-\infty}^0 a(\tau + \tau') \times \\ \times \sin(2\omega\tau') \sin[\theta(\tau + \tau') - \theta(\tau)] d\tau'. \quad (15)$$

Используя тот же приём, что и в пространстве минковского, получаем

$$\ddot{\theta} + \left(2\frac{\dot{a}}{a} + \frac{g^2\omega}{\pi}a^2 \right) \dot{\theta} + a^4 \frac{\Lambda^4}{f^2} \sin \theta = 0. \quad (16)$$

После обезразмеривания ($\tau \rightarrow \Lambda^2\tau/f = \eta$): (Для РД стадии $a \propto \tau$.)

$$\theta'' + \left(\frac{2}{\eta} + \Gamma\eta^2 \right) \theta' + \eta^4 \sin \theta = 0, \quad (17)$$

где $\Gamma = g^2 f \omega / \pi \Lambda^2$.

Решение уравнения движения в метрике Фридмана (1)

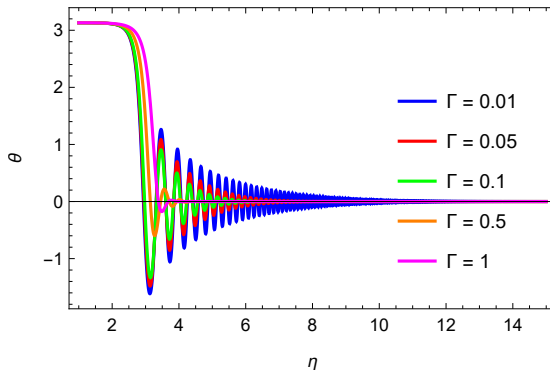


Рис. 2: Численное решение уравнения (17) с начальной фазой близкой к π при различных значениях Γ .

Решение уравнения движения в метрике Фридмана (2)

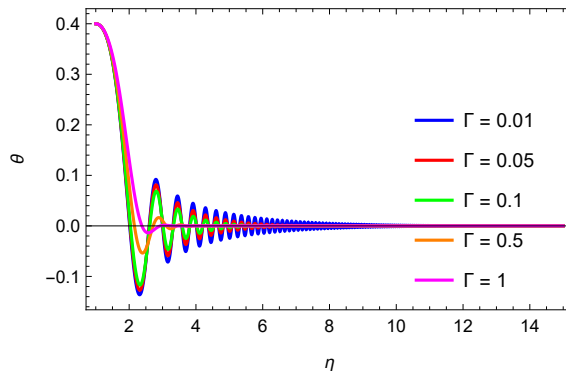


Рис. 3: Численное решение уравнения (17) с малой начальной фазой при различных значениях Γ .

Концентрация барионов в метрике Фридмана

Концентрация барионов даётся следующим выражением:

$$n(Q, \bar{L}) = \frac{1}{V} \sum_{s_Q, s_{\bar{L}}} \int \widetilde{dp} \widetilde{dq} \left| \langle Q(p, s_Q), \bar{L}(q, s_{\bar{L}}) | i \frac{gf}{\sqrt{2}} \int d^4x a(\tau) \bar{Q}(x) L(x) e^{i\theta(\tau)} | 0 \rangle \right|^2, \quad (18)$$

что приводит к

$$n_{b, \bar{b}}(\tau) = \frac{g^2 f^2}{2\pi^2 a^3(\tau)} \int_0^{\Lambda^2/f} \omega^2 d\omega \left| \int_{\tau_{in}}^{\tau} d\tau' a(\tau') e^{2i\omega\tau' \pm i\theta(\tau')} \right|^2. \quad (19)$$

Барионная асимметрия в метрике Фридмана

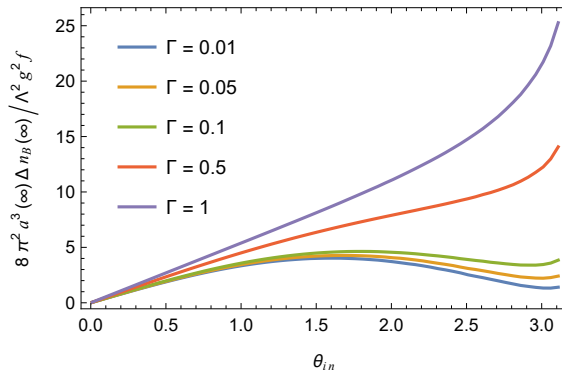


Рис. 4: Барионная асимметрия $\Delta n_B = n_B - n_{\bar{B}}$ в зависимости от начальной фазы при различных значениях Γ .

Выводы

В метрике Минковского:

- С ростом начальной фазы темп производства частиц замедляется.
- Темп распада Γ скалярного поля оказывает незначительное влияние на барионную асимметрию.

В метрике Фридмана:

- При малой начальной фазе асимметрия пропорциональна θ_{in} .
- Темп распада Γ скалярного поля оказывает существенное влияние на барионную асимметрию как функцию начальной фазы.

Спасибо за внимание!