Cosmological Constant Suppression in Non-Stationary Scalar Covariant State

Киселев В.В. (МФТИ, НИЦ КИ-ИФВЭ)
Айнбунд А.Б. (МФТИ)

arXiv:
e-Print: 2411.16181 [hep-th]
e-Print: 2501.05274 [hep-th]

Ускоренное расширение Вселенной

Проблема масштаба $\Lambda_{\mathrm{DE}} \sim 10^{-3}$ эВ

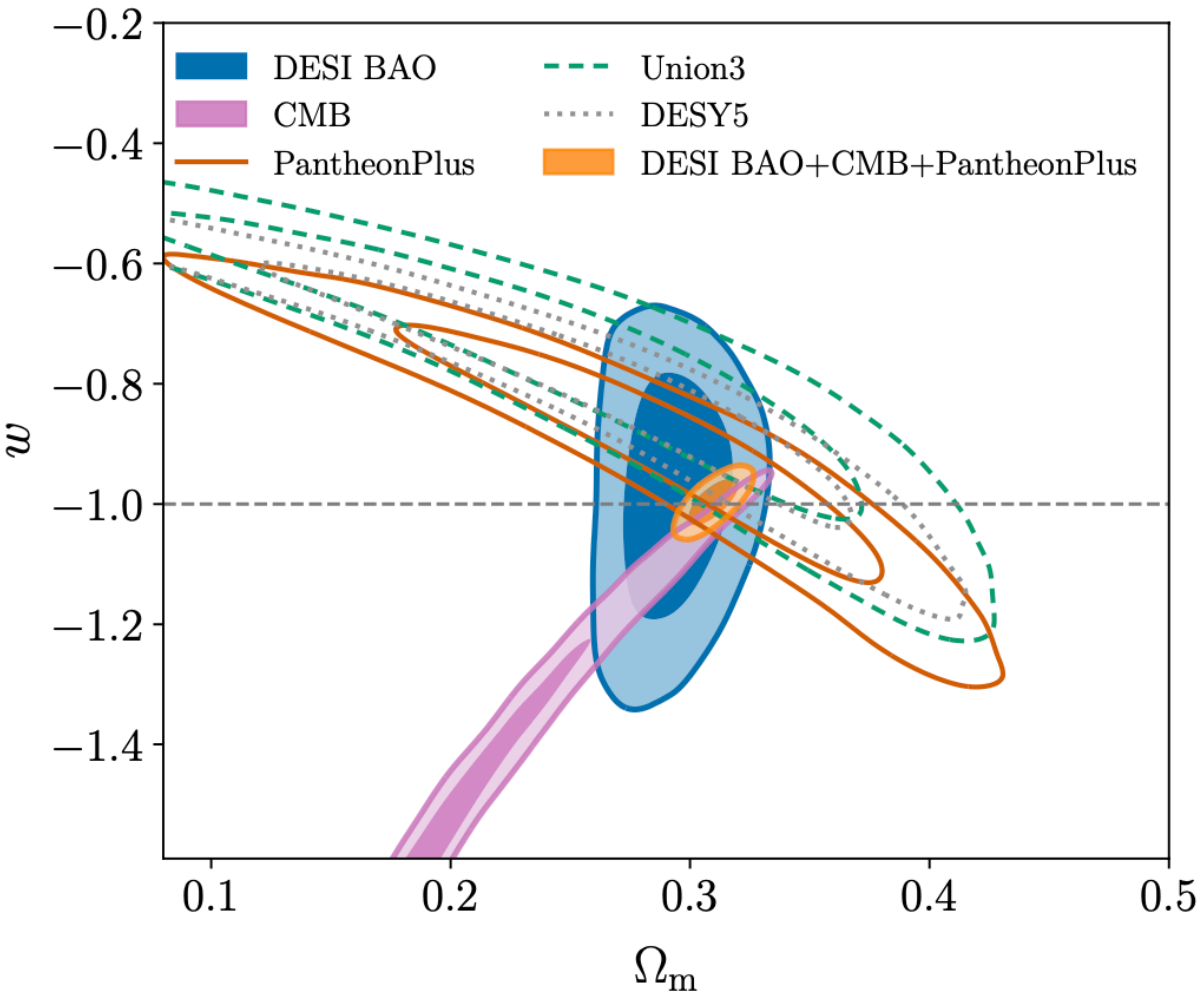
- $p = w \cdot \rho$, $w \approx -1$

  w — уравнение состояния

- $\rho = (\Lambda_{DE})^4$

- **ΛCDM**

$$\left.\begin{aligned} \Omega_{\mathrm{m}} &= 0.3095 \pm 0.0069, \\ w &= -0.997 \pm 0.025, \end{aligned}\right\} \quad \begin{array}{l}\text{DESI+CMB} \\ \text{+PantheonPlus}\end{array}$$



Ускоренное расширение Вселенной

Проблема масштаба $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3}$ эВ

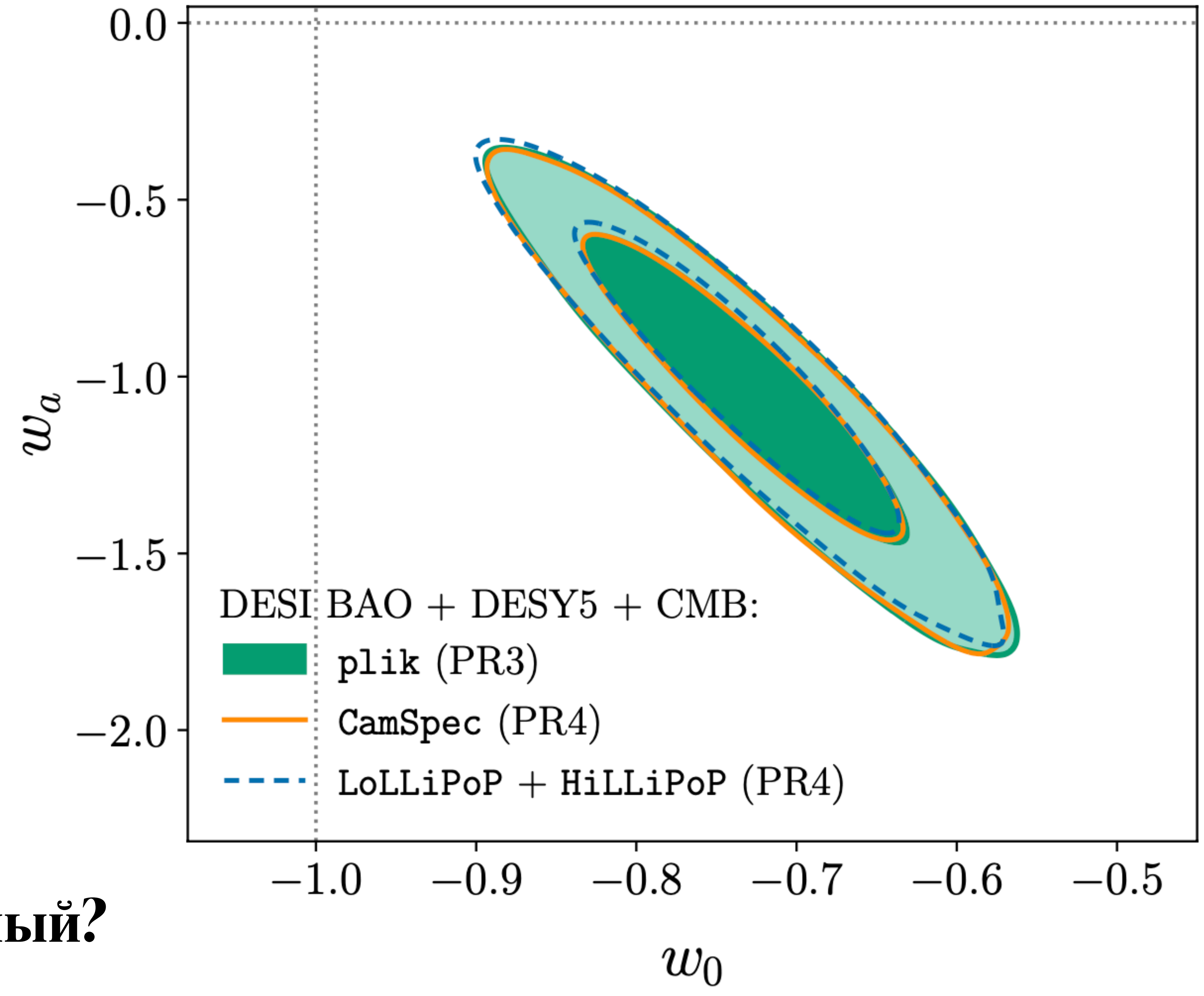
- $w(a) = w_0 + w_a \cdot (1\text{-}a)$,

  a — масштабный фактор

- $\rho \approx (\Lambda_{DE})^4$

- $w_0 w_a$ CDM

$$w_0 = -0.827 \pm 0.063, \qquad w_a = -0.75^{+0.29}_{-0.25}$$



Масштаб $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3}$ эВ фундаментальный?

Масштаб $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3}$ эВ

квантовые эффекты

- Классический предел абсолютной пустоты

$$T_{\mu\nu}(\text{nothing})\Big|_{cl} = 0$$

$$T^{\text{cl.}}_{\mu\nu} = \mathrm{tr}\big(\hat{\rho}\,\hat{T}_{\mu\nu}\big)$$

density matrix $\hat{\rho}$ for non-stationary quantum states of fields

- квантовые флуктуации
- нестационарное состояние,
- инвариантный вакуум:

$$\mathrm{tr}\big(\hat{\rho}\,\hat{T}_{\mu\nu}\big)_{\text{inv.}} = W_{\text{vac}} \cdot \langle \text{vac}|\hat{T}_{\mu\nu}|\text{vac}\rangle + \mathrm{tr}_{\text{non-vac}}\big(\hat{\rho}\,\hat{T}_{\mu\nu}\big) = W_{\text{vac}} \cdot \rho^{\text{bare}}_{\text{vac}}\, g_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}\big[\Phi_{\text{cl.}}\big]$$

$$\Lambda \sim 10^{16}\ \text{GeV},\quad \rho^{\text{bare}}_{\text{vac}} \sim \Lambda^4$$

$$W_{\text{vac}} \ll 1$$

теория с двумя масштабами

$$n_{\text{eff}} \sim \tilde{m}_{\text{Pl}}/\Lambda \qquad W_{\text{vac}} = \mathrm{e}^{-n_{\text{eff}}} \qquad n_{\text{eff}} \sim 250$$

Dark Energy

и эффективное число квантов

$$\rho_{\mathrm{DE}} = W_{\mathrm{DE}} \cdot \rho_{\mathrm{vac}}^{\mathrm{bare}}, \qquad p_{\mathrm{DE}} = w_{\mathrm{DE}} \cdot \rho_{\mathrm{DE}}$$

$$\dot{\rho}_{\mathrm{DE}} + 3H(\rho_{\mathrm{DE}} + p_{\mathrm{DE}}) = 0$$

эмпирические данные эволюции:

T_{00} и w(a)

$$\dot{W}_{\mathrm{DE}} \cdot \rho_{\mathrm{vac}}^{\mathrm{bare}} + 3H(1 + w_{\mathrm{DE}})\, W_{\mathrm{DE}} \cdot \rho_{\mathrm{vac}}^{\mathrm{bare}} = 0$$

$$N \stackrel{\mathrm{def}}{=} \ln a(t). \qquad \boxed{W_{\mathrm{DE}} = \mathrm{e}^{-n_{\mathrm{eff}}(N)}}$$

$$n_{\mathrm{eff}}(N) \approx n_{\mathrm{eff}} + n' \cdot N + \frac{1}{2}\, n'' \cdot N^2.$$

$$w_{\mathrm{DE}} = -1 - \frac{1}{3}\left(\ln W_{\mathrm{DE}}\right)'$$

$$w_0 = -1 + \frac{1}{3}\, n', \qquad w_a = -\frac{1}{3}\, n''$$

$$0.3 < n' < 0.75, \qquad 1.7 < n'' < 3.$$

- $w(a) = w_0 + w_a \cdot (1-a)$

Cut-off

действие скалярного поля

- Фурье «туда-и-обратно»
- поворот Вика «туда-и-обратно»

$$S = \int \mathrm{d}^4 x \, \frac{1}{2} \left(\phi(x) \left(-\partial_\mu \partial^\mu \phi(x) \right) - m^2 \phi^2(x) \right)$$

4D isotropic solutions with a cut-off alike Λ

Wick rotation $p_0 = \mathrm{i} p_4$ with $p^2 = -p_{\mathrm{E}}^2$

$$S_{4\mathrm{D}} = \mathrm{i} \frac{1}{(2\pi)^3} \int \mathrm{d}\Omega_3 \cdot \int p_{\mathrm{E}}^3 \frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{E}}}{2\pi} \frac{1}{2} \Phi^*(p_{\mathrm{E}})(-p_{\mathrm{E}}^2 - m^2)\Phi(p_{\mathrm{E}}) = \frac{\mathrm{i}}{4\pi} \langle p_{\mathrm{E}}^3 \rangle_\Lambda \int \frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{E}}}{2\pi} \frac{1}{2} \Phi^*(p_{\mathrm{E}})(-p_{\mathrm{E}}^2 - m^2)\Phi(p_{\mathrm{E}})$$

$$S_{4\mathrm{D}} = \frac{1}{4\pi} \langle p_{\mathrm{E}}^3 \rangle_\Lambda \int \frac{\mathrm{d}k}{2\pi} \frac{1}{2} \Phi^*(k)(k^2 - m^2)\Phi(k) \qquad \Phi(k) = \frac{1}{\Lambda^3} \int \mathrm{d}\tau \, \mathrm{e}^{\mathrm{i}\tau k} \phi(\tau) \qquad \mathrm{i} p_{\mathrm{E}} = k$$

$$S_{4\mathrm{D}} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle p_{\mathrm{E}}^3 \rangle_\Lambda}{\Lambda^6} \int \mathrm{d}\tau \, \frac{1}{2} \phi(\tau) \left(-\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}\tau^2} - m^2 \right) \phi(\tau)$$

Действие с $\Lambda \cong$ в конечном объеме (инвариантно)

Инвариантный вакуум

under cut-off Λ

$$\phi(x) \mapsto \phi(\tau) \quad \text{and} \qquad \int \mathrm{d}^4x \ldots \partial_\mu \ldots \partial_\nu \ldots \;\mapsto\; \frac{1}{\Lambda^3} \int \mathrm{d}\tau \;\ldots \frac{1}{4}\, g_{\mu\nu} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau} \ldots \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau} \ldots$$

$$T_{\mu\nu} = (\partial_\mu \phi)(\partial_\nu \phi) - \tfrac{1}{2}\, g_{\mu\nu}\big((\partial_\lambda \phi)^2 - m^2\phi^2\big) \;\mapsto$$

$$\mapsto\; T^\Lambda_{\mu\nu} = \tfrac{1}{4}\, g_{\mu\nu}\dot\phi^2 - \tfrac{1}{2}\, g_{\mu\nu}\big(\dot\phi^2 - m^2\phi^2\big) = -\tfrac{1}{4}\, g_{\mu\nu}\dot\phi^2 + \tfrac{1}{2}\, g_{\mu\nu} m^2\phi^2$$

$$\rho^{\text{bare}}_{\text{vac}} = \langle \text{vac} | T^\Lambda_{00} | \text{vac} \rangle = \frac{1}{8}\, m\Lambda^3 > 0$$

масштабы?

Масштабы

когерентное состояние инфлатона нестационарно

$$S_{\mathrm{int}} + S_{\mathrm{EH}} = -\frac{1}{2}\,\tilde{m}_{\mathrm{Pl}}^2 \int \mathrm{d}^4x\,\sqrt{-g}\,R\cdot\Big(1+\frac{\varphi}{\Lambda_{\mathrm{int}}}\Big)$$

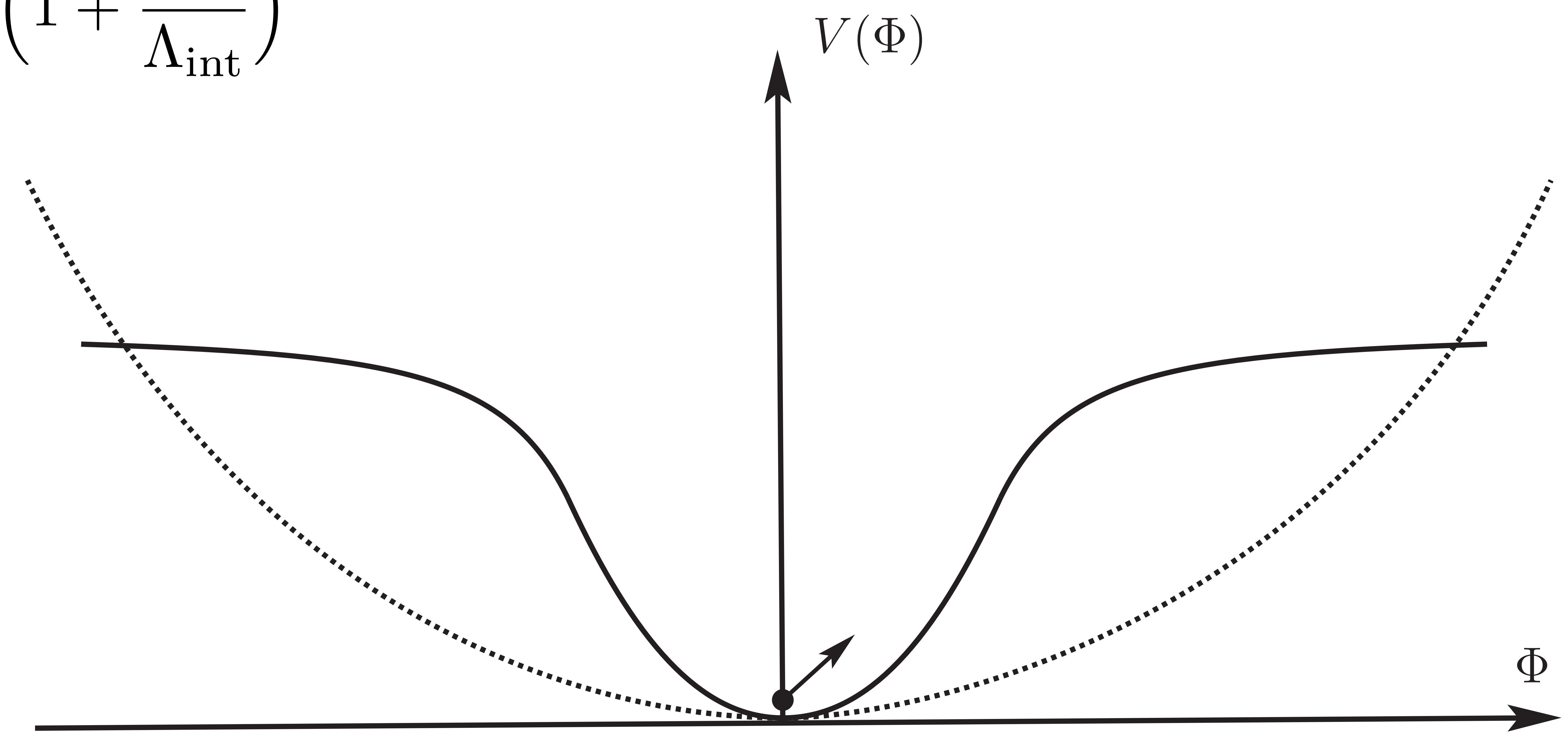
$$g_{\mu\nu} \mapsto \frac{1}{\Omega(\varphi)}\,\mathrm{g}_{\mu\nu} \qquad \Omega(\varphi) = 1 + \frac{\varphi}{\Lambda_{\mathrm{int}}}$$

$$\Phi = \tilde{m}_{\mathrm{Pl}}\sqrt{3/2}\,\ln\Omega(\varphi)$$

$$V_E = \frac{1}{2}\,m^2\Lambda_{\mathrm{int}}^2\left(1-\exp\Big(-\frac{\Phi}{\tilde{m}_{\mathrm{Pl}}}\cdot\sqrt{2/3}\Big)\right)^2$$

$$V_C = \frac{1}{2}\,m^2\Lambda_{\mathrm{int}}^2 \qquad m_{\mathrm{inf}}^2 = \frac{2}{3}\,m^2\cdot\frac{\Lambda_{\mathrm{int}}^2}{\tilde{m}_{\mathrm{Pl}}^2}$$

Jordan frame to Einstein frame



аттрактор Старобинского (по Линде и Ко)

Масштабы

когерентное состояние инфлатона нестационарно

анализ однопетлевого эффективного действия
инфлатона при наличии обрезания

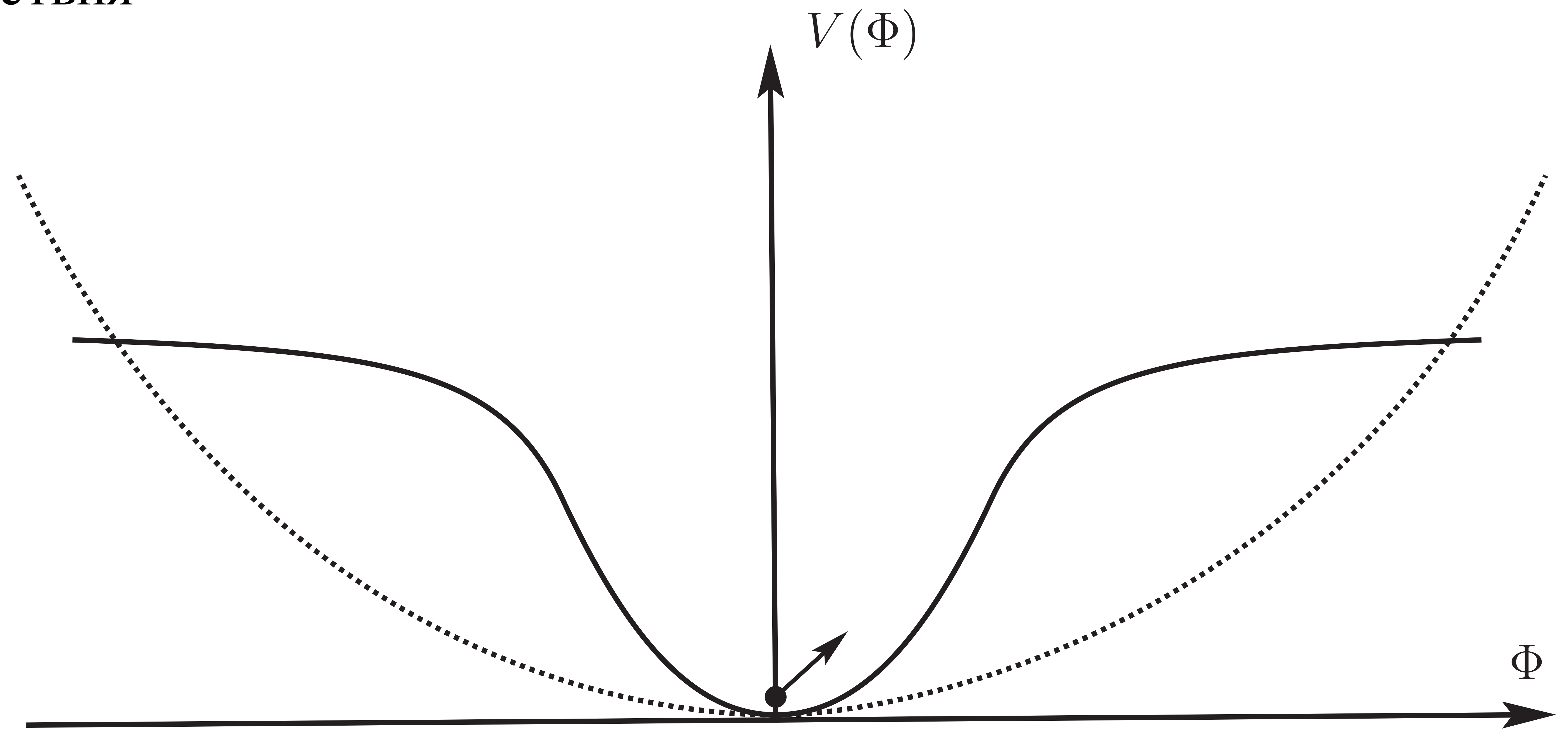
$$m \sim \Lambda \sim \Lambda_{\text{int}} \sim V_C^{1/4} \sim 10^{16}\ \text{GeV}$$

в основном и когерентном состоянии

$$\tfrac{1}{2}\, m = V_{[3]}\, \rho_{\text{vac}}^{\text{bare}} \qquad V_{[3]} = \frac{4}{\Lambda^3}$$

$$\langle E \rangle \sim \langle n \rangle\, m \sim \tilde{m}_{\text{Pl}}$$

$$\langle n \rangle \sim 250$$



Итоги

динамическая модель реализации космологического масштаба $\Lambda_{DE} \sim 10^{-3}$ эВ

- **когерентное состояние скального поля с обрезанием $\Lambda \sim 10^{16}$ ГэВ O.K.**
- **2 масштаба O.K.**
- **другие источники плотности вакуумной энергии:** ρ_{add}
- **...**

common vacuum state

$$|0_{\mathrm{add}}\rangle \otimes |0\rangle\, \mathrm{e}^{-\langle n\rangle/2}$$

Thanks!