Темная энергия из-за квантовых поправок к эффективному потенциалу

JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH

BLTP

Денис Толкачёв

Дмитрий Казаков

Равиль Яхиббаев

Содержание

- Общее введение: метод эффективного потенциала, главные логарифмы

- Обобщённое ренормгрупповое уравнение для главных расходимостей (логарифмов)

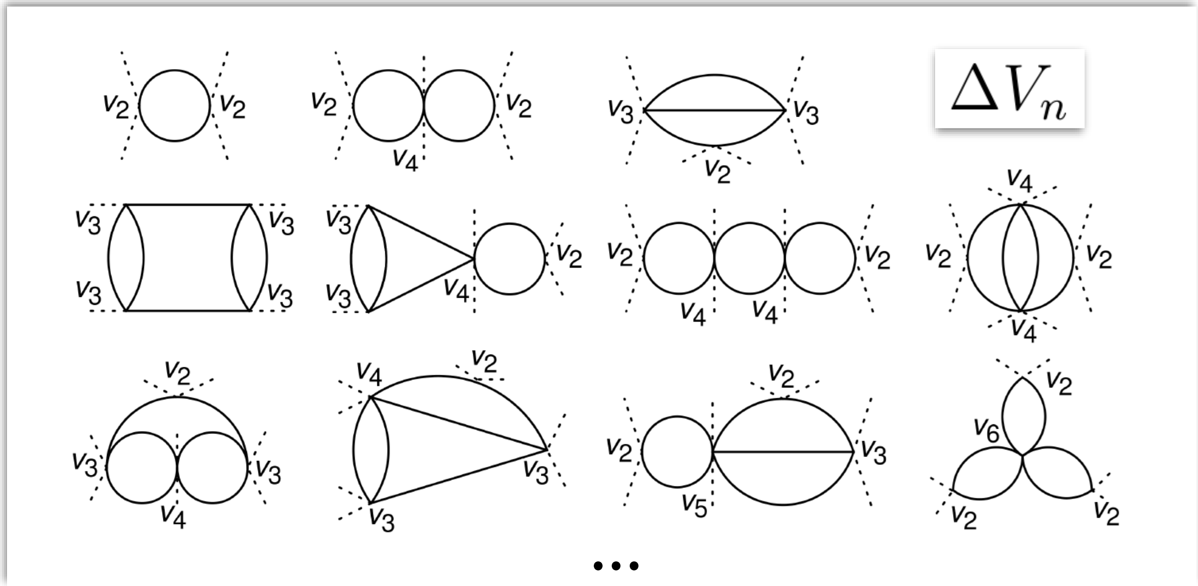
- **Приложения в инфляционной космологии**

Эффективный потенциал

$$Z(J) = \int \mathcal{D}\phi \ \exp\left(i \int d^4x \ \mathcal{L}(\phi, d\phi) + J\phi \right)$$

Метод эффективного потенциала дополняет классический потенциал квантовыми петлевыми поправками

$$W(J) = -i \log Z(J)$$



Эффективное действие

$$\Gamma(\phi) = W(J) - \int d^4x J(x)\phi(x)$$

Правила Фейнмана

$$v_n = \frac{\partial^n}{\partial \phi^n} V(\phi)$$

$$m^2(\phi) = g v_2(\phi)$$

10.1007/JHEP04(2023)128

Логарифмы

Перенормируемая теория → **Неперенормируемая теория**

$$g^{2n} c_n \log(\varphi^2/\mu^2)^n \Rightarrow V_n(g,\varphi)\log(v(g,\varphi)/\mu^2)^n$$

$$d = 4 - 2\epsilon \quad \boxed{\frac{1}{\epsilon^n}}$$

Теорема Боголюбова-Парасюка

о локальности контрчленов

Коэффициент и степень совпадают

$$1/\epsilon \to -\log$$

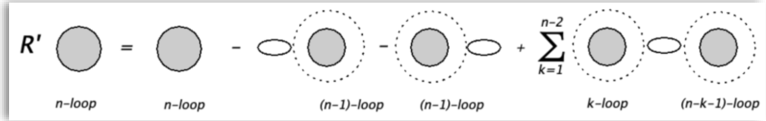
R-операция:

$$\boxed{\mathcal{R}G = \prod_{\gamma}(1 - K_\gamma)G}$$

$$\mathcal{R}G = (1 - K)\mathcal{R}'G$$

10.1007/JHEP04(2023)128

Обобщённое РГ уравнение



$$n\Delta V_n = \frac{1}{2} v_2 D_2 \Delta V_{n-1} + \frac{1}{4}\sum_{k=1}^{n-2} D_2 \Delta V_k D_2 \Delta V_{n-1-k}, \quad n \geq 2$$

$$D_2 = \frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}\phi^2}$$

$$\Sigma(z,\phi) = \sum_{n=0}^{\infty} (-z)^n \Delta V_n(\phi)$$

$$z = g/\epsilon$$

Обобщённое РГ уравнение для произвольного скалярного потенциала

$$\boxed{\frac{d\Sigma}{dz} = -\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\Sigma\right)^2, \Sigma(0,\varphi) = V_0(\varphi)}$$

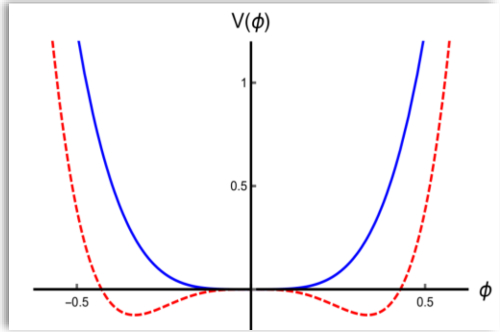
$$\boxed{\Sigma'(z) = -\frac{3}{2}\Sigma(z)^2}$$

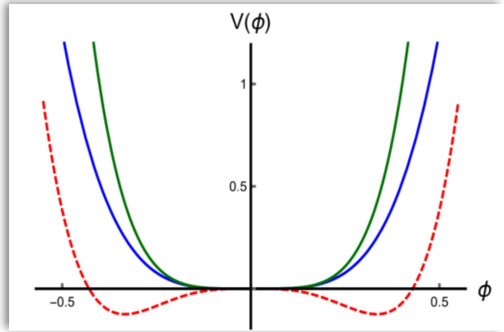
$$V_{eff}(g,\phi) = \Sigma(z,\phi)\Big|_{z\to -\frac{g}{16\pi^2}\log g v_2/\mu^2}$$

$$v_n = \frac{\partial^n}{\partial\phi^n} V(\phi)$$

Механизм Коулмана - Вайнберга

$$V_0(\phi) = g\phi^4/4!$$

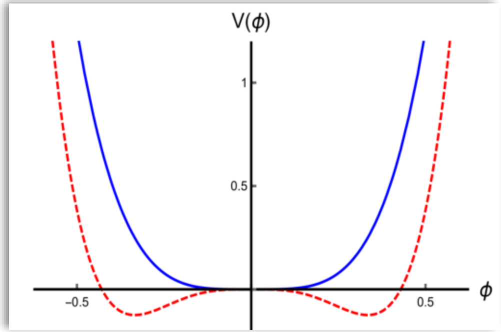


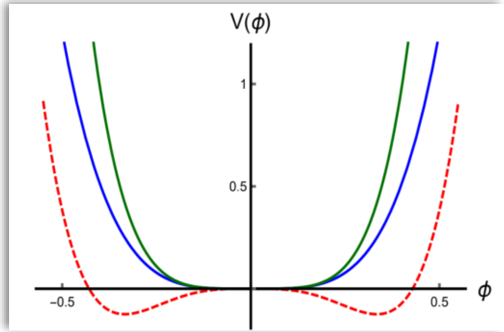


$$V_{eff}^{RG} = \frac{g\phi^4/4!}{1 - \frac{g}{16\pi^2}\frac{3}{2}\log\phi^2/\mu^2}$$

Механизм Коулмана - Вайнберга

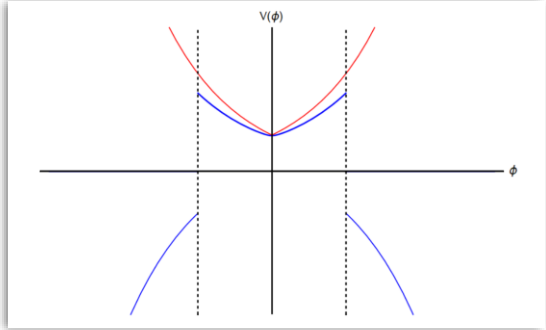
$$V_0(\phi) = g\phi^4/4!$$





$$gV_0 = ge^{|\phi/m|}$$

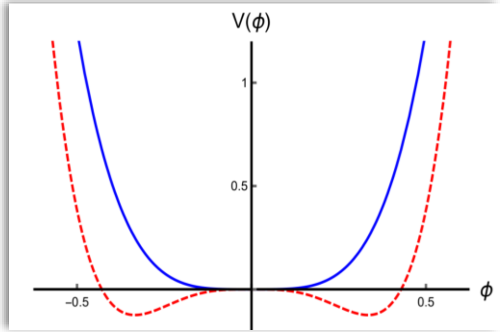
$$V_{eff}^{RG} = \frac{g\phi^4/4!}{1 - \frac{g}{16\pi^2}\frac{3}{2}\log\phi^2/\mu^2}$$

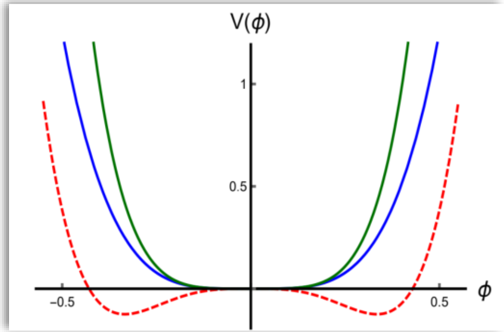


Механизм Коулмана - Вайнберга

SYM теория

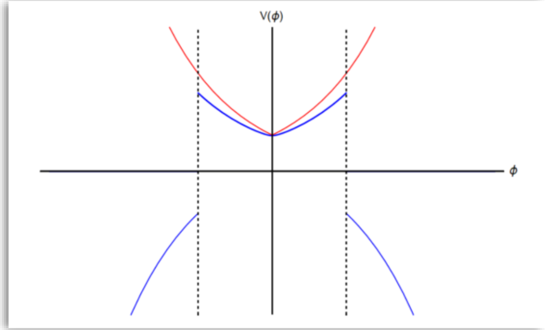
$$V_0(\phi) = g\phi^4/4!$$

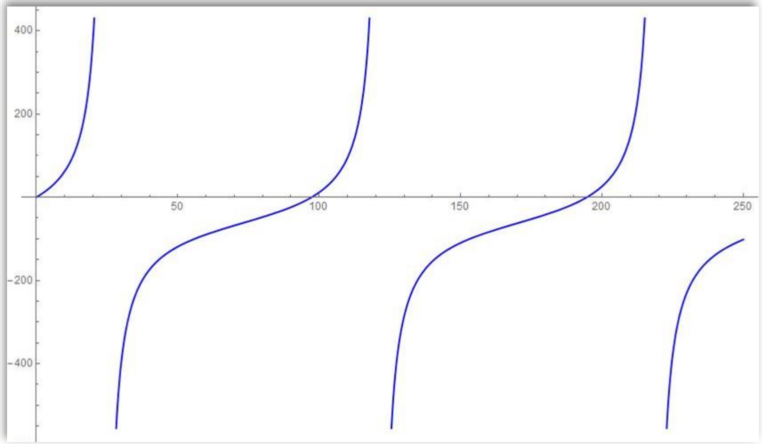




$$gV_0 = ge^{|\phi/m|}$$

$$V_{eff}^{RG} = \frac{g\phi^4/4!}{1 - \frac{g}{16\pi^2}\frac{3}{2}\log\phi^2/\mu^2}$$

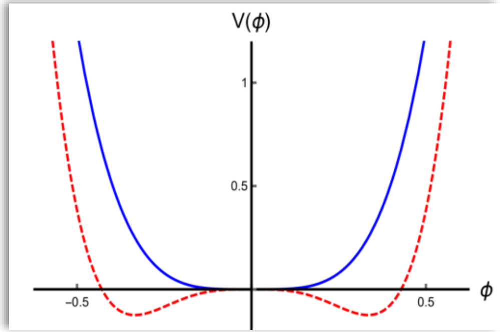


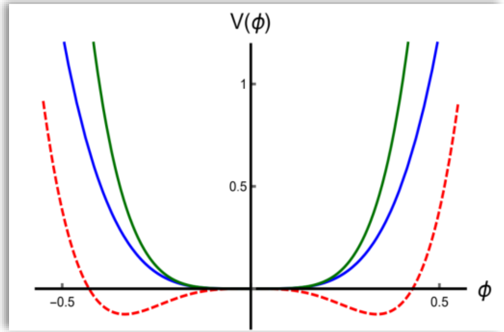


$$\Sigma = 4\frac{\sqrt{\frac{5}{3}}\tan(z/(8\sqrt{15}))}{1 - \sqrt{\frac{5}{3}}\tan(z/(8\sqrt{15}))}$$

Механизм Коулмана - Вайнберга

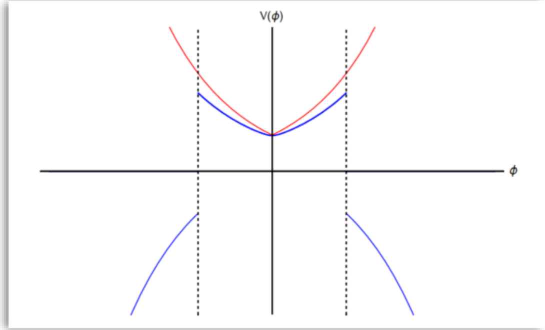
$$V_0(\phi) = g\phi^4/4!$$

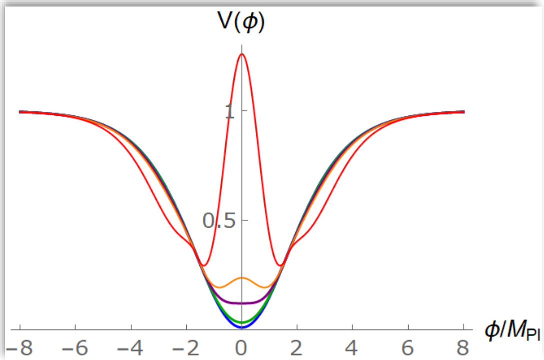




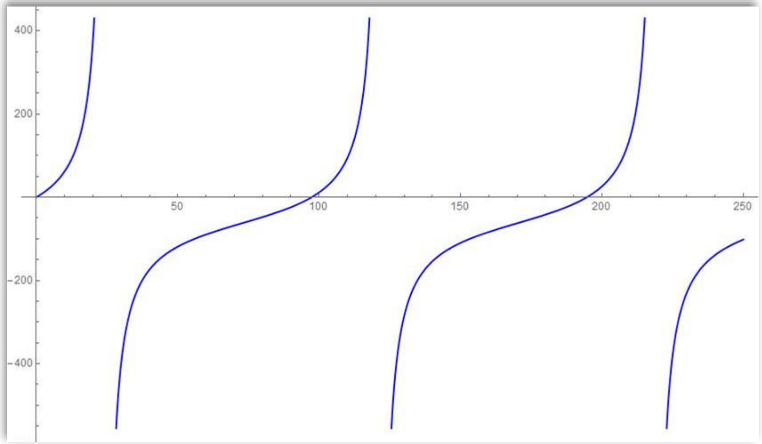
$$gV_0 = ge^{|\phi/m|}$$

$$V_{eff}^{RG} = \frac{g\phi^4/4!}{1 - \frac{g}{16\pi^2}\frac{3}{2}\log\phi^2/\mu^2}$$





SYM теория



$$\Sigma = 4\frac{\sqrt{\frac{5}{3}}\tan(z/(8\sqrt{15}))}{1 - \sqrt{\frac{5}{3}}\tan(z/(8\sqrt{15}))}$$

JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

Инфляция в режиме медленного скатывания

$$3M_{pl}^2 H^2 = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V}{\partial \phi} = 0$$

Renata Kallosh and Andrei Linde JCAP07(2013)002

T-тип α-аттрактор для канонического поля

$$V = \tanh^{2n}(\phi/(\sqrt{6\alpha M_{Pl}^2}))$$

Обобщение

$$F(\tanh(\frac{\phi}{\sqrt{6}}))$$

$$V \to V_{eff}$$

JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

Инфляция в режиме медленного скатывания

$$3M_{pl}^2 H^2 = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V_{eff}$$

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{\partial V_{eff}}{\partial \phi} = 0$$

Дополнительное уравнение

$$\frac{d\Sigma}{dz} = -\frac{1}{4}(D_2\Sigma)^2, \quad \Sigma(0,\phi) = V_0(\phi)$$

$$V_{eff}(g,\phi) = \Sigma(z,\phi)|_{z\to -\frac{g}{16\pi^2}\log g v_2/\mu^2}$$

Renata Kallosh and Andrei Linde JCAP07(2013)002

T-тип α-аттрактор для канонического поля

$$V = \tanh^{2n}(\phi/(\sqrt{6\alpha M_{Pl}^2}))$$

Обобщение

$$F(\tanh(\frac{\phi}{\sqrt{6}}))$$

$$V \to V_{eff}$$

JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

Уравнения для T и E моделей

$$\frac{d\Sigma}{dz} = -\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\Sigma\right)^2, \Sigma(0,\varphi) = V_0(\varphi)$$

$$V(\varphi) = g\tanh^{2n}\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)$$

T-модель $x = z/M^4$

$$y = \tanh^{2n}(\varphi/\sqrt{6\alpha}M)$$

$$V(\varphi) = g\left(1 - e^{-\sqrt{\frac{2}{3\alpha}}\frac{\varphi}{M}}\right)^n$$

E-модель $x = z/M^4$

$$y = (1 - e^{\sqrt{\frac{2}{3\alpha}}\frac{\varphi}{M}})^n$$

JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

Уравнения для T и E моделей

$$\boxed{V(\varphi) = g\tanh^{2n}\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)}$$

$$\boxed{\frac{d\Sigma}{dz} = -\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\Sigma\right)^2, \Sigma(0,\varphi) = V_0(\varphi)}$$

T-модель $x = z/M^4$

$$y = \tanh^{2n}(\varphi/\sqrt{6\alpha}M)$$

$$\boxed{V(\varphi) = g\left(1 - e^{-\sqrt{\frac{2}{3\alpha}}\frac{\varphi}{M}}\right)^n}$$

E-модель $x = z/M^4$

$$y = (1 - e^{\sqrt{\frac{2}{3\alpha}}\frac{\varphi}{M}})^n$$

T-модель

$$S_x = -\frac{n^2\left(y^{2/n}-1\right)^2}{36\ y^{4/n}\alpha^2}\left(ny^2\left(y^{2/n}-1\right)S_{yy} + \left(y^{2/n}((n-1)y+2y) - (n-1)y\right)S_y\right)^2$$

$$S(0,y) = y,\ S(x,1) = 1,\ S_x(x,1) = 0$$

E-модель

$$S_x = -\frac{4n^2}{9\alpha^2}y^{2-\frac{4}{n}}\left(y^{1/n}-1\right)^2\left(\left(n\left(y^{1/n}-1\right)+1\right)S_y + ny\left(y^{1/n}-1\right)S_{yy}\right)^2$$

Логарифмы

Перенормируемая теория

$$g^{2n} c_n \log(\varphi^2/\mu^2)^n$$

➡

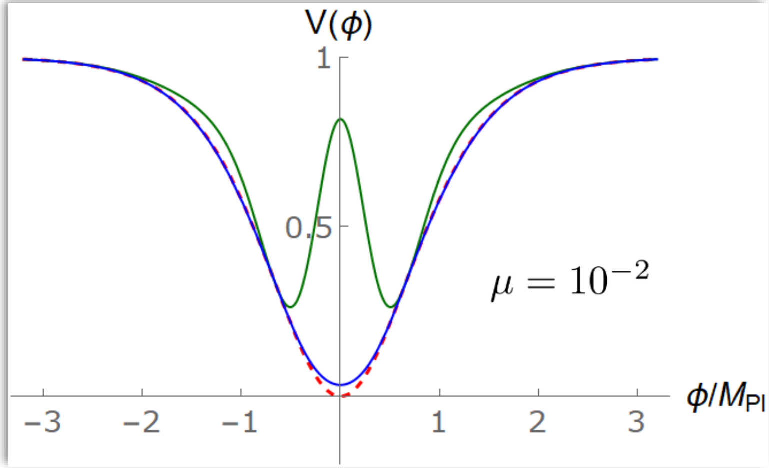
Неперенормируемая теория

$$V_n(g,\varphi) \log(v(g,\varphi)/\mu^2)^n$$

?

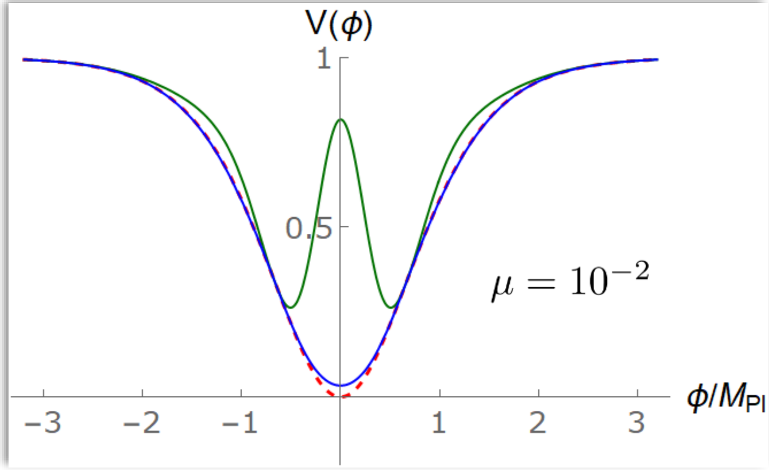
JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

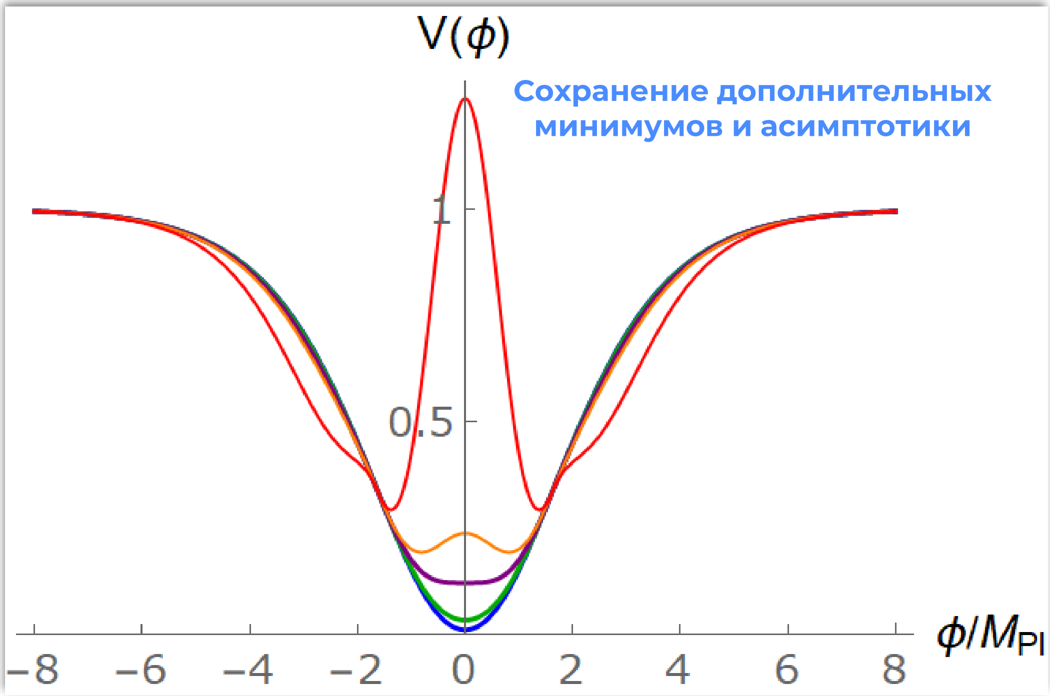
$$V(\varphi) = g \tanh^{2n}\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)$$



JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

$$V(\varphi) = g\tanh^{2n}\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)$$

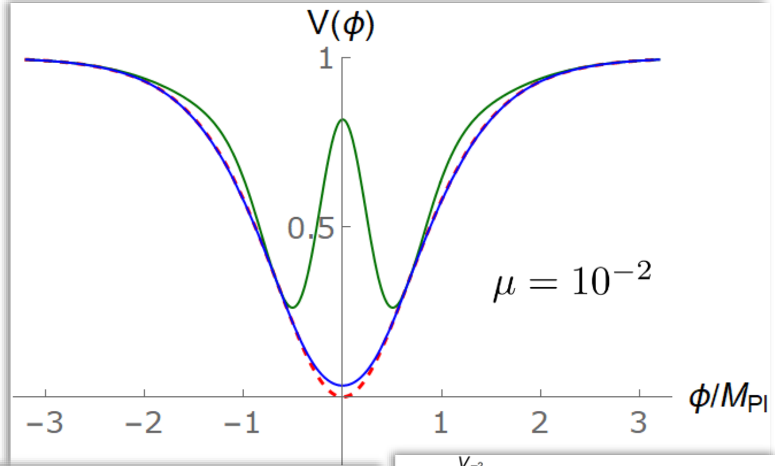


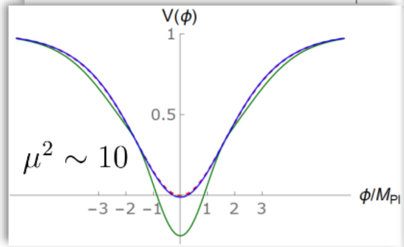


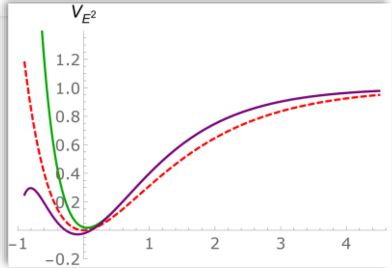
Голубая $\mu^2 = 0.6$, зеленая $\mu^2 = 10^{-2}$, пурпурная $\mu^2 = 10^{-10}$, оранжевая $\mu^2 = 10^{-16}$, красная $\mu^2 = 10^{-36}$

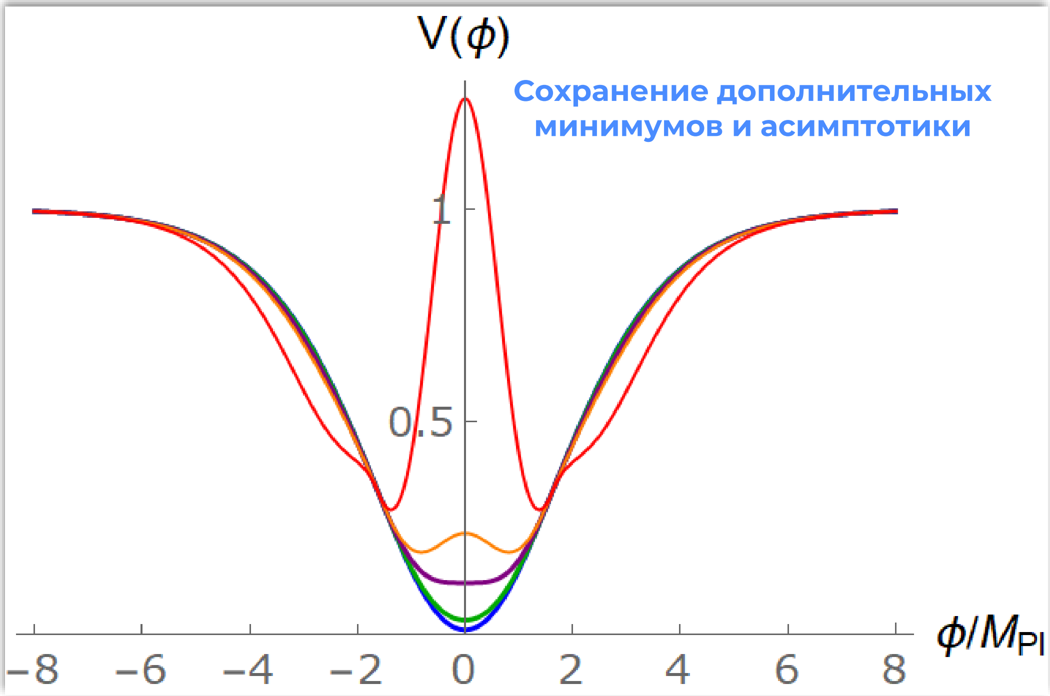
JCAP. 10.1088/1475-7516/2023/09/049

$$V(\varphi) = g\tanh^{2n}\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)$$









Голубая $\mu^2 = 0.6$, зеленая $\mu^2 = 10^{-2}$, пурпурная $\mu^2 = 10^{-10}$, оранжевая $\mu^2 = 10^{-16}$, красная $\mu^2 = 10^{-36}$

Первый главный логарифм для T и E моделей

$$V_{eff}(g,\varphi) = V_0 + \frac{g}{16\pi^2}\frac{v_2^2}{4}\log\left(\frac{gv_2}{\mu^2}\right) + \dots \qquad \varphi = 0, \log = \Lambda$$

T-модель

$$\boxed{\mu^2 = \frac{g}{3\alpha M_{Pl}^2} e^{-576\pi^2 \frac{\alpha^2}{g^2}\Lambda M_{Pl}^4}}$$

E-модель

$$\boxed{\mu^2 = \frac{4g}{3\alpha M_{Pl}^2} e^{-36\pi^2 \frac{\alpha^2}{g^2}\Lambda M_{Pl}^4}}$$

$$g = 10^{-10} M_{Pl}^4,\ M_{Pl} = (8\pi G)^{-\frac{1}{2}}, \alpha = 1, \Lambda = 10^{-120} M_{Pl}^4$$

$$\boxed{\mu \approx 10^{-6} M_{Pl}}$$

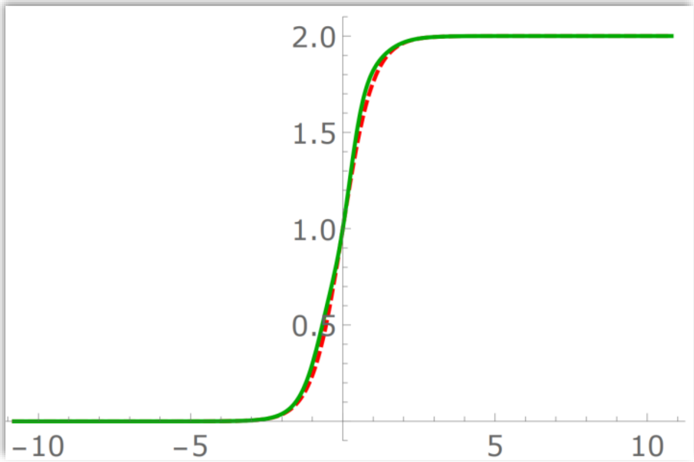
$$\mu < \frac{10^{-5} M_{Pl}}{\sqrt{3\alpha}} \Rightarrow \Lambda > 0$$

$$\mu < 2\frac{10^{-5} M_{Pl}}{\sqrt{3\alpha}} \Rightarrow \Lambda > 0$$

Поправка к темной энергии

$$V=\gamma\sqrt{6\alpha}\left(\tanh\left(\frac{\varphi}{\sqrt{6\alpha}M}\right)+1\right)$$

$$\boxed{\mu^2=\frac{\gamma\sqrt{6\alpha}\tanh\left(\frac{\varphi_F}{\sqrt{6\alpha}M}\right)}{3\alpha M_{Pl}^2\cosh^2\left(\frac{\varphi_F}{\sqrt{6\alpha}M}\right)}\exp\left(-9\pi^2M_{Pl}^4\alpha^2\Lambda/(6\gamma^2\alpha))\frac{\sinh^6\left(\frac{\sqrt{\frac{2}{3}}\varphi_F}{\sqrt{\alpha}M}\right)}{\sinh^8\left(\frac{\varphi_F}{\sqrt{6\alpha}M}\right)}\right)}$$



$$\alpha=0.02,\ \varphi=(-35,-45)M_{Pl},\ \mu\simeq10^{-12}M_{Pl}$$

Y. Akrami, R. Kallosh, A. Linde, and V. Vardanyan. Dark energy, α-attractors, and large-scale structure surveys. JCAP, 06:041, 2018.

$$\Lambda=\Lambda(\varphi),\ \ \Lambda(-\infty)=0$$

Выводы

- Получено обобщенное РГ уравнение, суммирующие ведущие логарифмические вклады от квантовых петель для скалярного потенциала произвольной формы

- Можно ожидать новых свойств от таких обобщенных потенциалов

- Возможно, такое дополнительное уравнение пригодится в космологии либо где-то ещё

Спасибо за внимание