Негауссовости в модели Вселенной с отскоком

Котенко Максим

Научные руководители

Петров Павел Константинович, Агеева Юлия Александровна

Альтернатива Инфляции

$$T_{\mu\nu}n^{\mu}n^{\nu} > 0$$

Изотропное условие энергодоминантности(NEC)

NEC $\longrightarrow$ $\rho + p \geq 0$ $\longrightarrow$ $\dot{H} \leq 0$

Поэтому ОТО требует модификаций

$$\mathcal{S}_{hh} = \int dt d^3x \frac{a^3}{8}\left[\mathcal{G}_T \dot{h}_{ij}^2 - \frac{\mathcal{F}_T}{a^2} h_{ij,k} h_{ij,k}\right]$$

$$\mathcal{S}_{\zeta\zeta} = \int dt d^3x a^3 \left[\mathcal{G}_S \dot{\zeta}^2 - \frac{\mathcal{F}_S}{a^2}\zeta_{,i}\zeta_{,i}\right]$$

Квадратичные действия для возмущений метрики

$$\int_{-\infty}^{t} a(t)(\mathcal{F}_T + \mathcal{F}_S) dt = \infty,$$

$$\int_{t}^{+\infty} a(t)(\mathcal{F}_T + \mathcal{F}_S) dt = \infty$$

Запрещающая теорема для возмущений FLRW фона

Возможно её избежать, устремив к нулю коэффиценты $\mathcal{G}_T, \mathcal{F}_T, \mathcal{G}_S, \mathcal{F}_S \to 0$ при $t \to -\infty$

Отбор моделей

$$r = \frac{\mathcal{A}_T}{\mathcal{A}_\zeta}$$

Отношение амплитуды тензорных возмущений к амплитуде скалярных возмущений метрики

$$\mathcal{P}_\zeta \equiv \mathcal{A}_\zeta \left(\frac{k}{k_*}\right)^{n_S - 1}, \quad n_S = 0.9649 \pm 0.0042$$

Спектральный индекс

$$f_{\rm NL} = \frac{10}{3} \frac{A_\zeta}{\sum_{i=1}^{3} k_i^3}$$

Негауссовость первичных возмущений

Модель Вселенной с отскоком

$$\mathcal{S}=\int d^4x\sqrt{-g}\left\{G_2(\phi,X)-G_3(\phi,X)\Box\phi+G_4(\phi,X)R+G_{4X}\left[(\Box\phi)^2-(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2\right]\right\}$$

$$X=-\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi,$$

Общее действие в теории Хорндески

$$\mathcal{S}=\int d^4x\sqrt{-g}\left[A_2(\hat{t},N)+A_3(\hat{t},N)K+A_4(\hat{t},N)(K^2-K_{ij}^2)+B_4(\hat{t},N)R^{(3)}\right]$$

Получаемое из него действие нашей модели в ADM формализме с метрикой $ds^2=-N^2d\hat{t}^2+\gamma_{ij}\left(dx^i+N^id\hat{t}\right)\left(dx^j+N^jd\hat{t}\right)$

Где для возмущений около FLRW фона взяли

$$\mathrm{N}=N_0(\hat{t})(1+\alpha),$$

$$N_i=\partial_i\beta+N_i^T,$$

$$\gamma_{ij}=a^2(\hat{t})\left(\mathrm{e}^{2\zeta}(\mathrm{e}^h)_{ij}+\partial_i\partial_jY+\partial_iW_j^T+\partial_jW_i^T\right)$$

С унитарной калибровкой

$$Y=0,\ W_i^T=0$$

$$A_2(\hat{t},N) = \hat{g}(-\hat{t})^{-2\mu-2}\cdot a_2(N)$$

$$A_3(\hat{t},N) = \hat{g}(-\hat{t})^{-2\mu-1}\cdot a_3(N)$$

$$A_4 = A_4(\hat{t}) = -B_4(\hat{t}) = -\frac{\hat{g}}{2}(-\hat{t})^{-2\mu}$$

$$a_2(N) = c_2 + \frac{d_2}{N}$$

$$a_3(N) = c_3 + \frac{d_3}{N}$$

$$\longrightarrow$$

$$3\chi^2 - 6\chi + c_2N^2 = 0,$$

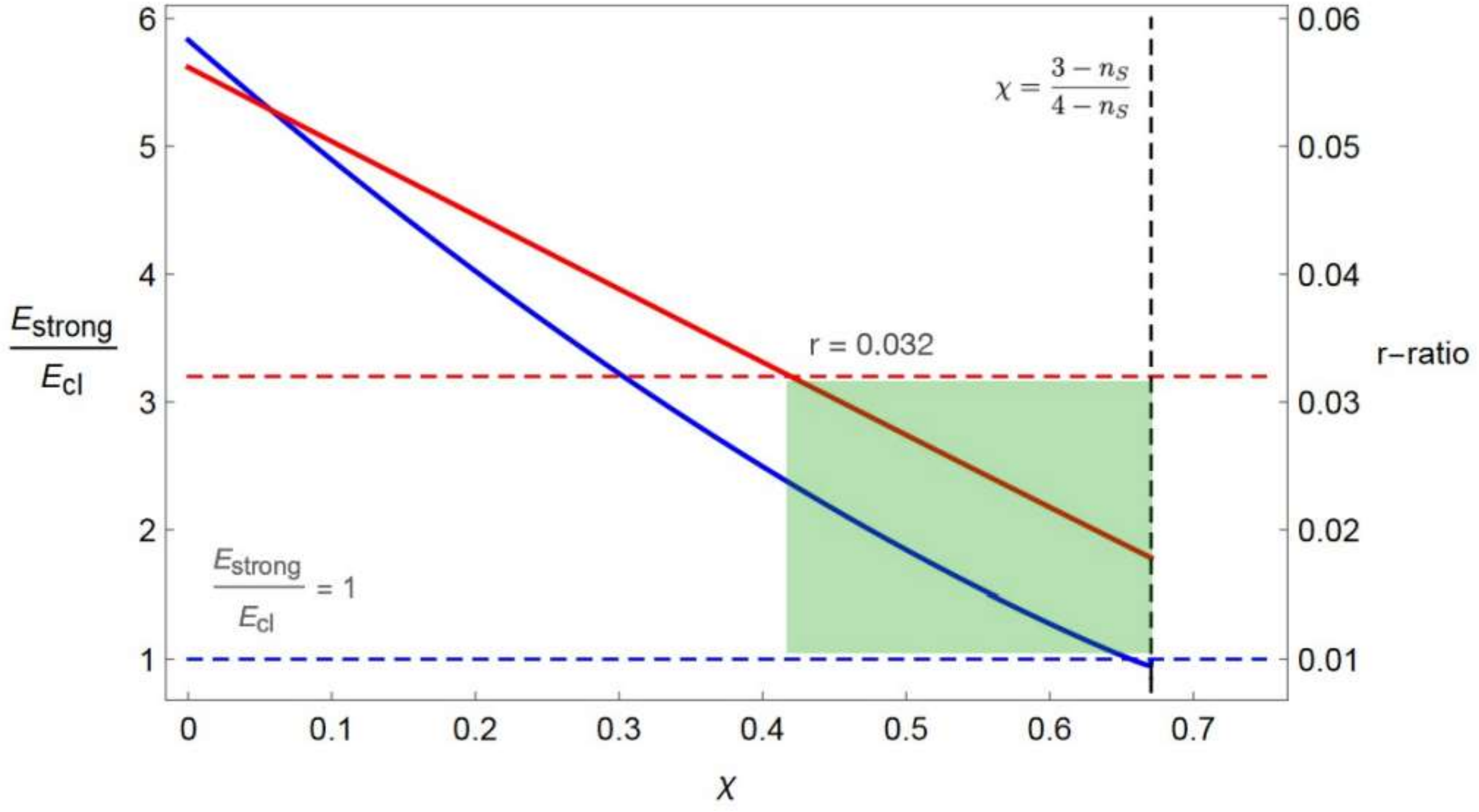
$$3\chi^2 + 2(2\mu+1)(1-\chi) - \kappa N + c_2N^2 = 0,$$

$$\kappa = c_3(1+2\mu) - d_2.$$

$$u_T^2 = \frac{\mathcal{F}_T}{\mathcal{G}_T} = 1$$

$$u_S^2 = \frac{\mathcal{F}_S}{\mathcal{G}_S} = \frac{f_S}{g_S}$$

$$r = \frac{\mathcal{A}_T}{\mathcal{A}_\zeta} = 8g_S u_S^{2\nu}$$



$\frac{E_{\text{strong}}}{E_{\text{cl}}}$
r−ratio
$\chi = \frac{3-n_S}{4-n_S}$
r = 0.032
$\frac{E_{\text{strong}}}{E_{\text{cl}}} = 1$
χ
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
1
2
3
4
5
6
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06

Вычисление негауссовости

$$\frac{d}{dt}(a^3\mathcal{G}_S\dot{\zeta}) - a\mathcal{G}_S u_s^2\partial^2\zeta = 0$$

Уравнение движения из квадратичного действия для скалярных возмущений

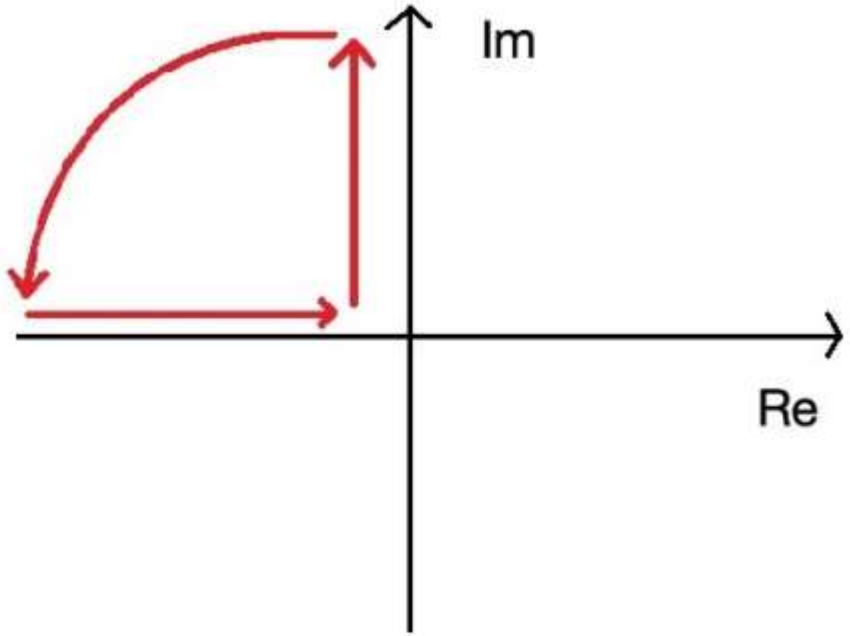
$$\zeta(\tau,\boldsymbol{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3}\int d^3\boldsymbol{k}\zeta(\tau,\boldsymbol{k})e^{i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x}}, \quad \zeta(\tau,\boldsymbol{k}) = u(\tau,\boldsymbol{k})a(\boldsymbol{k}) + u^*(\tau,-\boldsymbol{k})a^\dagger(-\boldsymbol{k})$$

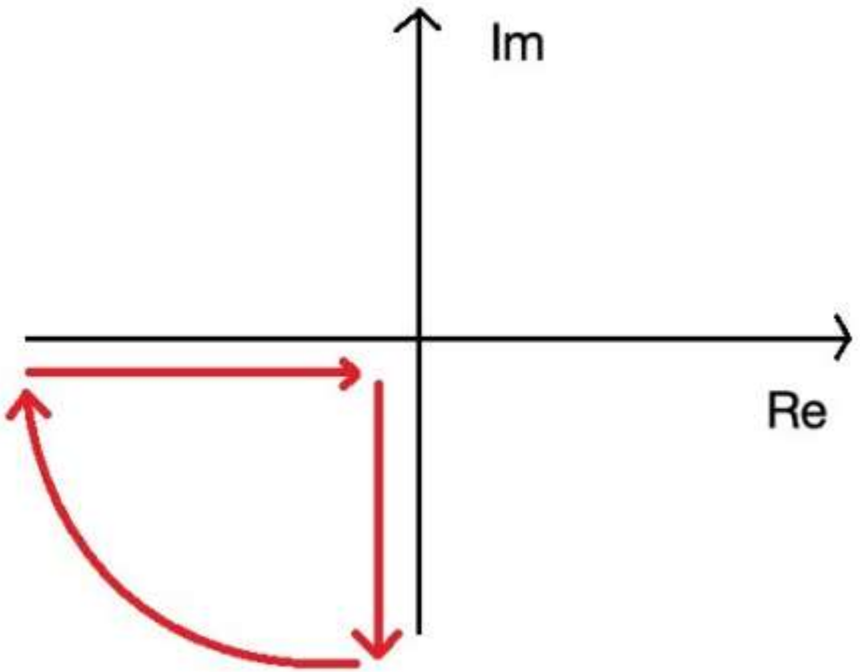
$$\left[a(k_1), a^\dagger(k_2)\right] = (2\pi)^3\delta^{(3)}(k_1 - k_2), \quad \left[a(k_1), a(k_2)\right] = \left[a^\dagger(k_1), a^\dagger(k_2)\right] = 0$$

$$u(k,\tau) = \frac{1}{\sqrt{2u_S k}}\frac{(d(1-\chi)(-\tau))^{\frac{\mu-\chi}{1-\chi}}}{d\sqrt{gg_s}}\left(1 - \frac{i}{u_S k\tau}\right)e^{-iu_s k\tau}$$

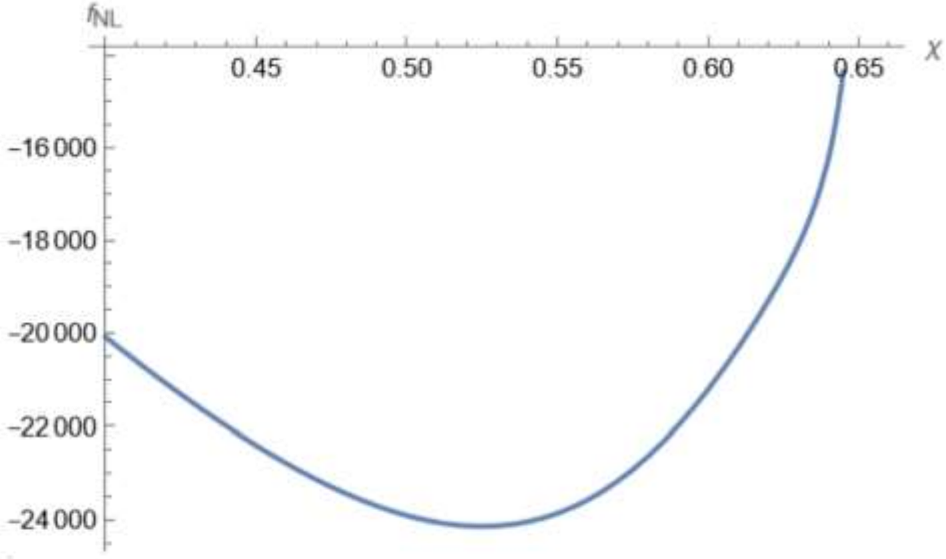
$$\langle\zeta(\boldsymbol{k}_1)\zeta(\boldsymbol{k}_2)\zeta(\boldsymbol{k}_3)\rangle = -i\int_{\tau_i}^{\tau_f} d\tau a\langle 0|\left[\zeta(\tau_f,\boldsymbol{k}_1)\zeta(\tau_f,\boldsymbol{k}_2)\zeta(\tau_f,\boldsymbol{k}_3),\mathcal{H}_{\rm int}(\tau)\right]|0\rangle$$

$$\begin{aligned}\mathcal{S}^{(3)}_{\zeta\zeta\zeta} = \int dt\mathbb{L}_{\zeta\zeta\zeta} = \int Ndt\ a^3d^3x\Bigg\{&\Lambda_1\frac{\dot\zeta^3}{N^3}+\Lambda_2\frac{\dot\zeta^2}{N^2}\zeta+\Lambda_3\frac{\dot\zeta^2}{N^2}\partial^2\zeta+\Lambda_4\frac{\dot\zeta}{N}\zeta\partial^2\zeta\\ &+\Lambda_5\frac{\dot\zeta}{N}\left(\partial_i\zeta\right)^2+\Lambda_6\zeta\left(\partial_i\zeta\right)^2+\Lambda_7\frac{\dot\zeta}{N}\left(\partial^2\zeta\right)^2+\Lambda_8\zeta\left(\partial^2\zeta\right)^2+\Lambda_9\partial^2\zeta\left(\partial_i\zeta\right)^2\\ &+\Lambda_{10}\frac{\dot\zeta}{N}\left(\partial_i\partial_j\zeta\right)^2+\Lambda_{11}\zeta\left(\partial_i\partial_j\zeta\right)^2+\Lambda_{12}\frac{\dot\zeta}{N}\partial_i\zeta\partial_i\psi+\Lambda_{13}\partial^2\zeta\partial_i\zeta\partial_i\psi+\Lambda_{14}\frac{\dot\zeta}{N}\left(\partial_i\partial_j\psi\right)^2\\ &+\Lambda_{15}\zeta\left(\partial_i\partial_j\psi\right)^2+\Lambda_{16}\frac{\dot\zeta}{N}\partial_i\partial_j\zeta\partial_i\partial_j\psi+\Lambda_{17}\zeta\partial_i\partial_j\zeta\partial_i\partial_j\psi\Bigg\}\quad,\psi=(1/N)\partial^{-2}\dot\zeta\end{aligned}$$

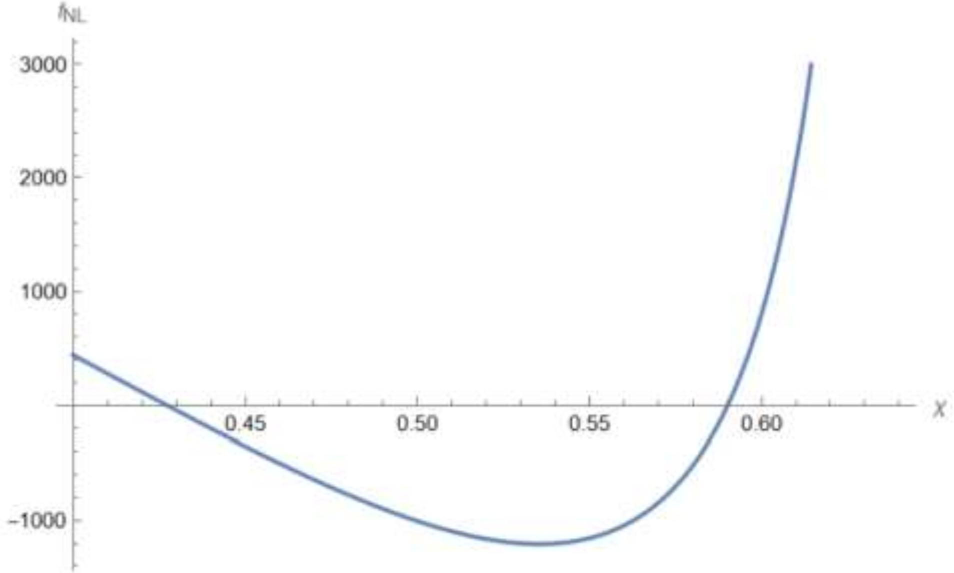




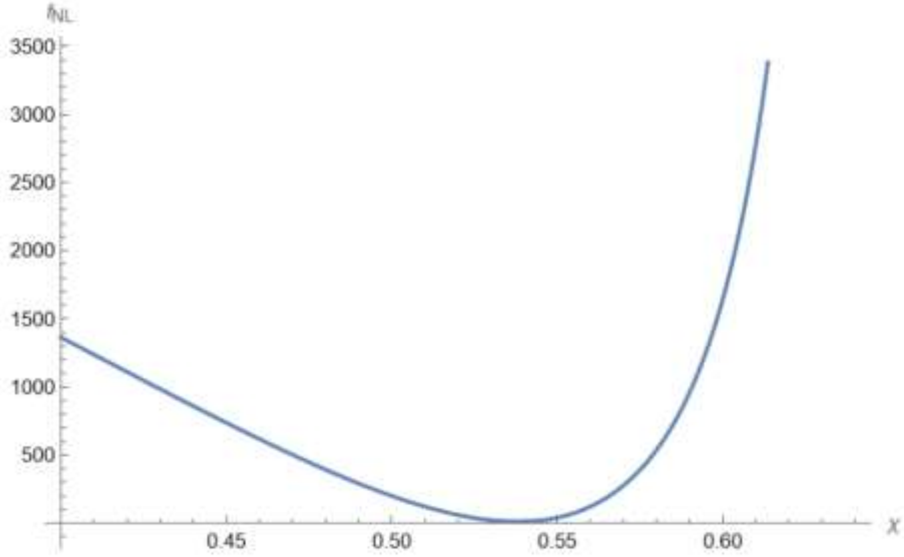
$$
\begin{aligned}
& i\int_{-\infty}^{-\tau_f} d\hat{\tau}(-\hat{\tau})^{\alpha}\left(A(-\hat{\tau})e^{i\hat{\tau}} - A(-\hat{\tau})^{*}e^{-i\hat{\tau}}\right) \\
&= -\int_0^{\infty} d\phi\left((-i(\phi+i\hat{\tau}_f))^{\alpha}A(-i(\phi+i\hat{\tau}_f))e^{-\phi-i\hat{\tau}_f} + (i(\phi-i\hat{\tau}_f))^{\alpha}A^{*}(i(\phi-i\hat{\tau}_f))e^{-\phi+i\hat{\tau}_f}\right) = \\
&= -\int_0^{\infty} d\phi e^{-\phi}(\hat{\tau}_f)^{\alpha}\left((-i\phi)^{\alpha}A(-i(\phi+i\hat{\tau}_f))e^{-i\hat{\tau}_f} + (i\phi))^{\alpha}A^{*}(i(\phi-i\hat{\tau}_f))e^{i\hat{\tau}_f}\right) = \\
&= -2Re[\int_0^{\infty} d\phi A^{*}(-i(\phi+i\hat{\tau}_f),k)e^{-(\phi+i\hat{\tau}_f)}]
\end{aligned}
$$



Заивисмость негауссовости от χ при $c_3 = 1$, $d_3 = -2$, $N = 0.0042$



Заивисмость негауссовости от χ при $c_3 = 1$, $d_3 = -2$, $N = 0.01$



Заивисмость негауссовости от χ при $c_3 = 1$, $d_3 = -2$, $N = 0.0124$

N	χ
0.0042	[0.6545, 0,6546]
0.0100	[0.4257,0.4321], [0.5889, 0.5905]
0.0124	[0.5301, 0.5456]