

Разогрев Вселенной после инфляции

И. И. Ткачёв

Институт ядерных исследований РАН, Москва

14 Мая 2014, Москва

Астрофизический поиск темной материи

- Распад темной материи в Галактическом гало, $X \rightarrow 2\gamma$

$$E = m_X/2$$

$$L = M \cdot \Gamma$$

Письма в ЖЭТФ, неопубликовано.

- "Telescope search for multi-eV axions,"

Bershady, Ressell and Turner, Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 1398

M. Turner, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2489

- "Strategy for Searching for a Dark Matter Sterile Neutrino,"

Boyarsky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov and I.T., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 261302.

- Возможный сигнал:

Bulbul et al, arXiv:1402.2301

Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskiy, Franse, arXiv:1402.4119

- "Massive sterile neutrinos as warm dark matter,"

Dolgov & Hansen, Astropart. Phys. 16 (2002) 339

Астрофизический поиск темной материи

- Распад темной материи в Галактическом гало, $X \rightarrow 2\gamma$

$$E = m_X/2$$

$$L = M \cdot \Gamma$$

Письма в ЖЭТФ, неопубликовано.

- "Telescope search for multi-eV axions,"

Bershady, Ressel and Turner, Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 1398

M. Turner, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2489

- "Strategy for Searching for a Dark Matter Sterile Neutrino,"

Boyarsky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov and I.T., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 261302.

- Возможный сигнал:

Bulbul et al, arXiv:1402.2301

Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskiy, Franse, arXiv:1402.4119

- "Massive sterile neutrinos as warm dark matter,"

Dolgov & Hansen, Astropart. Phys. 16 (2002) 339

Астрофизический поиск темной материи

- Распад темной материи в Галактическом гало, $X \rightarrow 2\gamma$

$$E = m_X/2$$

$$L = M \cdot \Gamma$$

Письма в ЖЭТФ, неопубликовано.

- "Telescope search for multi-eV axions,"

Bershady, Ressel and Turner, Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 1398

M. Turner, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2489

- "Strategy for Searching for a Dark Matter Sterile Neutrino,"

Boyarsky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov and I.T., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 261302.

- Возможный сигнал:

Bulbul et al, arXiv:1402.2301

Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskiy, Franse, arXiv:1402.4119

- "Massive sterile neutrinos as warm dark matter,"

Dolgov & Hansen, Astropart. Phys. 16 (2002) 339

Астрофизический поиск темной материи

- Распад темной материи в Галактическом гало, $X \rightarrow 2\gamma$

$$E = m_X/2$$

$$L = M \cdot \Gamma$$

Письма в ЖЭТФ, неопубликовано.

- "Telescope search for multi-eV axions,"

Bershady, Ressel and Turner, Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 1398

M. Turner, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2489

- "Strategy for Searching for a Dark Matter Sterile Neutrino,"

Boyarisky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov and I.T., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 261302.

- **Возможный сигнал:**

Bulbul et al, arXiv:1402.2301

Boyarisky, Ruchayskiy, Iakubovskiy, Franse, arXiv:1402.4119

- "Massive sterile neutrinos as warm dark matter,"

Dolgov & Hansen, Astropart. Phys. 16 (2002) 339

Астрофизический поиск темной материи

- Распад темной материи в Галактическом гало, $X \rightarrow 2\gamma$

$$E = m_X/2$$

$$L = M \cdot \Gamma$$

Письма в ЖЭТФ, неопубликовано.

- "Telescope search for multi-eV axions,"

Bershady, Ressel and Turner, Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 1398

M. Turner, Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2489

- "Strategy for Searching for a Dark Matter Sterile Neutrino,"

Boyarsky, Neronov, Ruchayskiy, Shaposhnikov and I.T., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 261302.

- Возможный сигнал:

Bulbul et al, arXiv:1402.2301

Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskiy, Franse, arXiv:1402.4119

- "Massive sterile neutrinos as warm dark matter,"

Dolgov & Hansen, Astropart. Phys. 16 (2002) 339

- "Could The Metastable Vacuum Burn?"

Berezin, Kuzmin, I.T., Phys. Lett. B **124** (1983) 479.

- "Когерентные осцилляции скалярного поля образующие компактные астрофизические объекты,"

И.Т., Письма в Астрономический Журнал **12** (1986) 726.

- "On the possibility of Bose star formation,"

I.T., Phys. Lett. B **261** (1991) 289.

- "Axion miniclusters and Bose stars,"

Kolb and I.T., Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3051

- "What if dark matter is bosonic and selfinteracting?"

Riotto and I.T., Phys. Lett. B **484**, 177 (2000)

- "Could The Metastable Vacuum Burn?"

Berezin, Kuzmin, I.T., Phys. Lett. B **124** (1983) 479.

- "Когерентные осцилляции скалярного поля образующие компактные астрофизические объекты,"

И.Т., Письма в Астрономический Журнал **12** (1986) 726.

- "On the possibility of Bose star formation,"

I.T., Phys. Lett. B **261** (1991) 289.

- "Axion miniclusters and Bose stars,"

Kolb and I.T., Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3051

- "What if dark matter is bosonic and selfinteracting?"

Riotto and I.T., Phys. Lett. B **484**, 177 (2000)

- "Could The Metastable Vacuum Burn?"

Berezin, Kuzmin, I.T., Phys. Lett. B 124 (1983) 479.

- "Когерентные осцилляции скалярного поля образующие компактные астрофизические объекты,"

И.Т., Письма в Астрономический Журнал 12 (1986) 726.

- "On the possibility of Bose star formation,"

I.T., Phys. Lett. B 261 (1991) 289.

- "Axion miniclusters and Bose stars,"

Kolb and I.T., Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3051

- "What if dark matter is bosonic and selfinteracting?"

Riotto and I.T., Phys. Lett. B 484, 177 (2000)

- "Could The Metastable Vacuum Burn?"

Berezin, Kuzmin, I.T., Phys. Lett. B **124** (1983) 479.

- "Когерентные осцилляции скалярного поля образующие компактные астрофизические объекты,"

И.Т., Письма в Астрономический Журнал **12** (1986) 726.

- "On the possibility of Bose star formation,"

I.T., Phys. Lett. B **261** (1991) 289.

- "Axion miniclusters and Bose stars,"

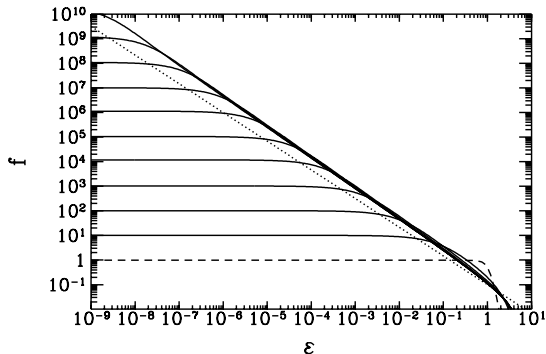
Kolb and I.T., Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 3051

- "What if dark matter is bosonic and selfinteracting?"

Riotto and I.T., Phys. Lett. B **484**, 177 (2000)

- "Kinetics of Bose condensation,"

Semikoz and I.T., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3093

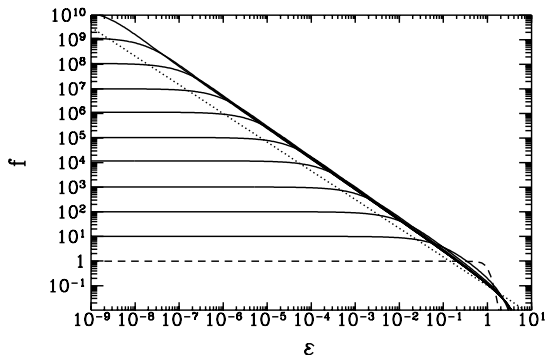


- "Quantum dew,"

Khlebnikov and I.T., Phys. Rev. D 61 (2000) 083517

- "Kinetics of Bose condensation,"

Semikoz and I.T., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3093



- "Quantum dew,"

Khlebnikov and I.T., Phys. Rev. D 61 (2000) 083517

- "Reheating after inflation,"

Kofman, Linde, and Starobinsky, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 3195

- "Universe reheating after inflation,"

Shtanov, Traschen, and Brandenberger, Phys. Rev. D 51 (1995) 5438

- "On Particle Creation By A Time Dependent Scalar Field,"

Dolgov and Kirilova, Sov. J. Nucl. Phys. 51 (1990) 172

- "Reheating after inflation,"

Kofman, Linde, and Starobinsky, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 3195

- "Universe reheating after inflation,"

Shtanov, Traschen, and Brandenberger, Phys. Rev. D 51 (1995) 5438

- "On Particle Creation By A Time Dependent Scalar Field,"

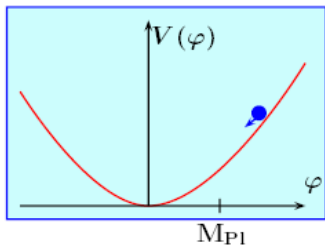
Dolgov and Kirilova, Sov. J. Nucl. Phys. 51 (1990) 172

Уравнения поля

$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} + m^2\varphi = 0$$

При $H > m$ скатывание поля происходит медленно.

Поскольку $H \sim m\varphi/M_{\text{Pl}}$, то условие медленного скатывания эквивалентно $\varphi > M_{\text{Pl}}$.



$$\varphi > M_{\text{Pl}}$$

Режим инфляции

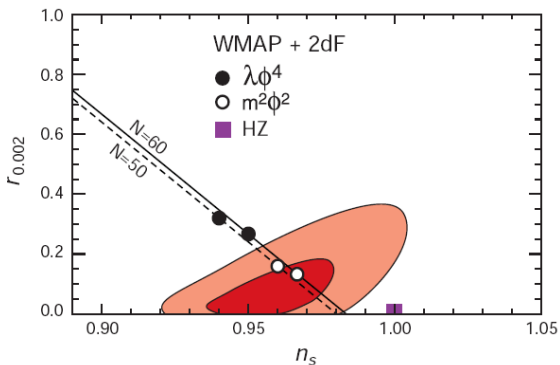
$$\varphi < M_{\text{Pl}}$$

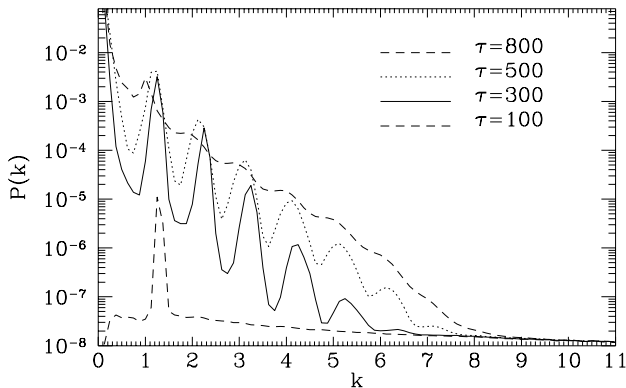
Режим разогрева

Анализ спектра флуктуаций реликтового излучения приводит к ограничениям на параметры потенциала поля инфлатона

$$m \sim 10^{13} \text{ GeV}$$

$$\lambda \sim 10^{-13}$$





- "Classical decay of inflaton,"

**ЭПОХА ТУРБУЛЕНТНОСТИ И
УСТАНОВЛЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ**

Вопросы:

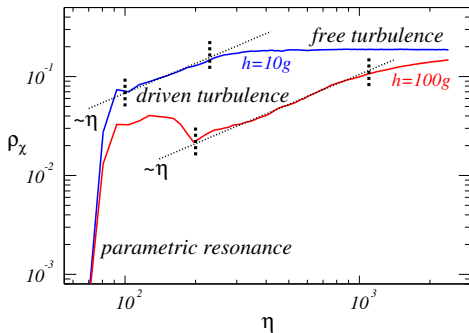
- Как устанавливается равновесие в системе?
- Когда? Чему равна равновесная температура?

представляют общий интерес и важны в практических приложениях. К ответу на них чувствительны:

- Предсказания инфляционных моделей
- Сценарии бариогенезиса
- Предсказываемая концентрация гравитино и других реликтовых частиц
- Спектр первичных возмущений

Три стадии разогрева

$$V(\chi, X) = \frac{1}{4}\phi^4 + \frac{g}{2}\phi^2\chi^2 + \frac{h}{4}\chi^4$$



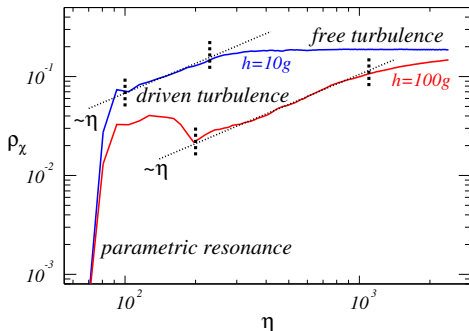
- Параметрический резонанс
- Турбулентность с накачкой
- Распадная турбулентность

- "Turbulent thermalization,"

Micha and I.T., Phys. Rev. D **70** (2004) 043538

Три стадии разогрева

$$V(\chi, X) = \frac{1}{4}\phi^4 + \frac{g}{2}\phi^2\chi^2 + \frac{h}{4}\chi^4$$



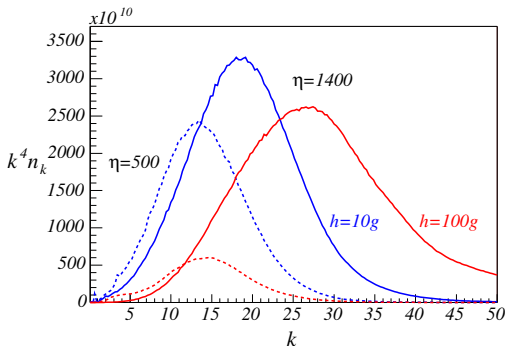
- Параметрический резонанс
 - Турбулентность с накачкой
 - Распадная турбулентность
- При больших h и/или g параметрический резонанс заканчивается раньше.

- "Turbulent thermalization,"

Micha and I.T., Phys. Rev. D **70** (2004) 043538

Три стадии разогрева

$$V(\chi, X) = \frac{1}{4}\phi^4 + \frac{g}{2}\phi^2\chi^2 + \frac{h}{4}\chi^4$$



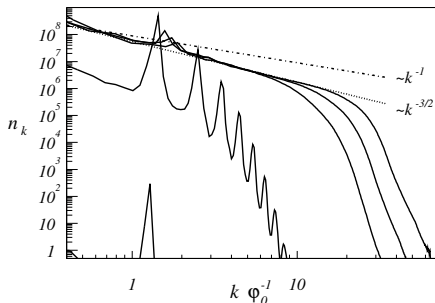
- Параметрический резонанс
- Турбулентность с накачкой
- Распадная турбулентность

Но функции распределения эволюционируют быстрее.

- "Turbulent thermalization,"

Micha and I.T., Phys. Rev. D **70** (2004) 043538

Турбулентный спектр

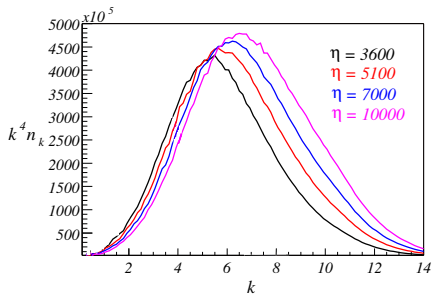


Спектр на решетке после
масштабного преобразования
 $x^\mu \rightarrow x^\mu \phi_0$

Пусть $n \sim k^{-\alpha}$. Теория стационарной волновой
турбулентности предсказывает

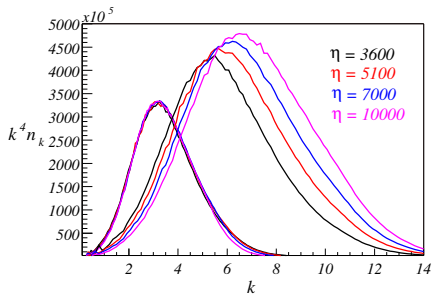
- $\alpha = \frac{3}{5}$ для 4-частичных взаимодействий
- $\alpha = \frac{2}{3}$ для 3-частичных взаимодействий

Автомодельная эволюция



Числа заполнения на решетке в
режиме распадной турбулентности

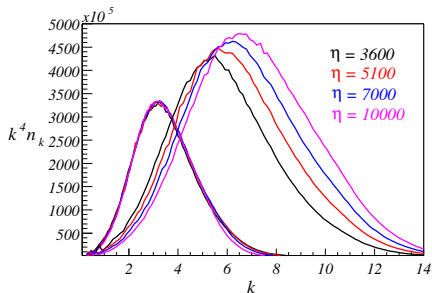
Автомодельная эволюция



Числа заполнения на решетке в
режиме распадной турбулентности

$$n(k, t) = t^{-q} n_0(kt^{-p})$$

автомодельны с $p = \frac{1}{5}$



Числа заполнения на решетке в режиме распадной турбулентности

$$n(k, t) = t^{-q} n_0(kt^{-p})$$

автомодельны с $p = \frac{1}{5}$

Теория:

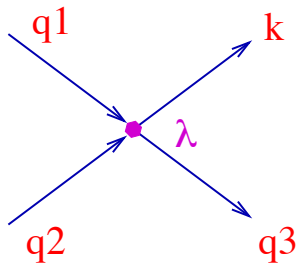
Распадная турбулентность

- $p = \frac{1}{7}$ для 4-частичных взаимодействий
- $p = \frac{1}{5}$ для 3-частичных взаимодействий

Турбулентность с накачкой

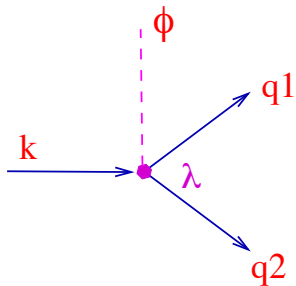
- $p = \frac{3}{7}$ для 4-частичных взаимодействий
- $p = \frac{2}{5}$ для 3-частичных взаимодействий

Как 3-частичные взаимодействия могли появиться в $\lambda\phi^4$ -теории?



- Недавно точно такое же турбулентное скейлинговое поведение было обнаружено при исследовании установления равновесия в столкновениях тяжелых ионов.

Как 3-частичные взаимодействия могли появиться в $\lambda\phi^4$ -теории?

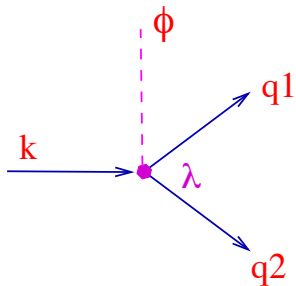


3-частичный интеграл столкновений может быть получен из 4-частичного подстановкой

$$\frac{n_p}{\omega_p} \rightarrow \frac{n_p}{\omega_p} + (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\vec{p}) \bar{\phi}_0^2$$

- Недавно точно такое же турбулентное скейлинговое поведение было обнаружено при исследовании установления равновесия в столкновениях тяжелых ионов.

Как 3-частичные взаимодействия могли появиться в $\lambda\phi^4$ -теории?



3-частичный интеграл столкновений может быть получен из 4-частичного подстановкой

$$\frac{n_p}{\omega_p} \rightarrow \frac{n_p}{\omega_p} + (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\vec{p}) \bar{\phi}_0^2$$

- Недавно точно такое же турбулентное скейлинговое поведение было обнаружено при исследовании установления равновесия в столкновениях тяжелых ионов.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СИЛЬНО
НЕРАВНОВЕСНОМ ПОСТИНФЛЯЦИОННОМ
СОСТОЯНИИ ПОЛЕЙ МАТЕРИИ**

Нетепловые фазовые переходы

Быстрый распад инфлатона \Rightarrow Большие флуктуации

Эффективная масса Хиггсовского поля

$$m_H^2 = -\mu^2 + g^2 \langle X^2 \rangle$$

зависит от дисперсии поля X . Дисперсию можно оценить как

$$\rho_X \approx k^2 \langle X^2 \rangle \approx m^2 M_{\text{Pl}}^2$$

Грубая оценка дает $\langle X^2 \rangle \sim M_{\text{Pl}}^2$, что может приводить к фазовым переходам в ТВО.

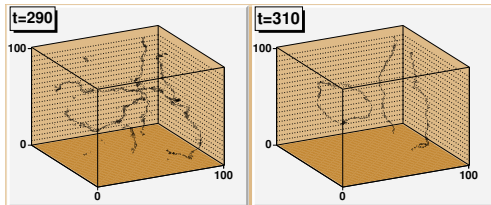
- "Nonthermal phase transitions after inflation,"

Kofman, Linde and Starobinsky, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 1011

- "Phase transitions at preheating,"

I.T., Phys. Lett. B 376 (1996) 35

Нетепловые фазовые переходы

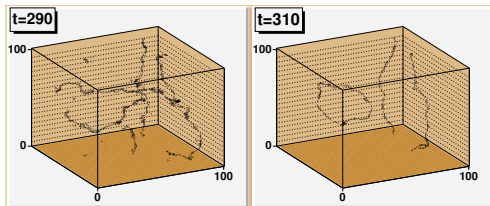


Образование
космических струн

$$V(\phi) = \lambda(\phi_1^2 + \phi_2^2 - v^2)^2$$

$$v \sim 10^{16} \text{ GeV}$$

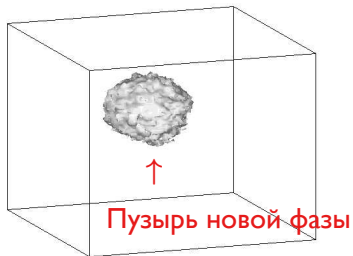
Нетепловые фазовые переходы



Образование
космических струн

$$V(\phi) = \lambda(\phi_1^2 + \phi_2^2 - v^2)^2$$

$$v \sim 10^{16} \text{ GeV}$$



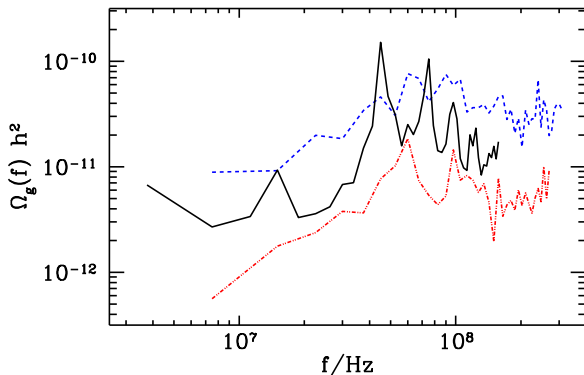
Фазовые переходы первого рода

$$V(\phi, X) = \lambda(\phi^2 - v^2)^2 + g^2 \phi^2 X^2$$

$$g^2/\lambda = 200$$

Khlebnikov, Kofman, Linde & I.T. (98)

Реликтовый фон гравитационных волн



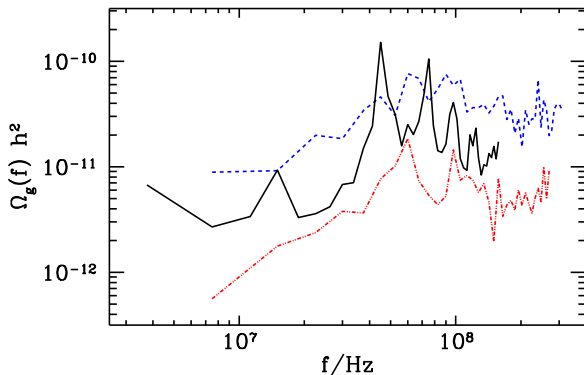
- "Relic gravitational waves produced after preheating,"

Khlebnikov and I.T., Phys. Rev. D 56 (1997) 653

- "Relic backgrounds of gravitational waves from cosmic turbulence,"

Dolgov, Grasso and Nicolis, Phys. Rev. D 66 (2002) 103505

Реликтовый фон гравитационных волн



- "Relic gravitational waves produced after preheating,"

Khlebnikov and I.T., Phys. Rev. D 56 (1997) 653

- "Relic backgrounds of gravitational waves from cosmic turbulence,"

Dolgov, Grasso and Nicolis, Phys. Rev. D 66 (2002) 103505

**РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ
ИНФЛЯЦИОННОЙ
СТАДИИ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ**

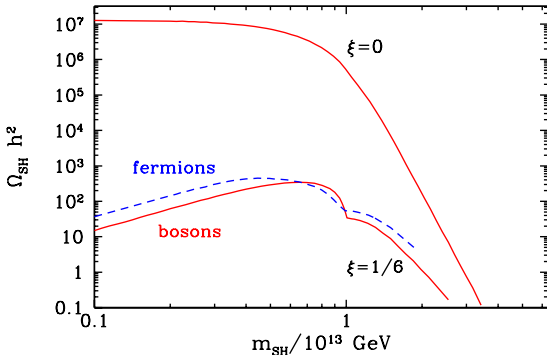
Гравитационное рождение

Плотность числа рождённых
конформных частиц

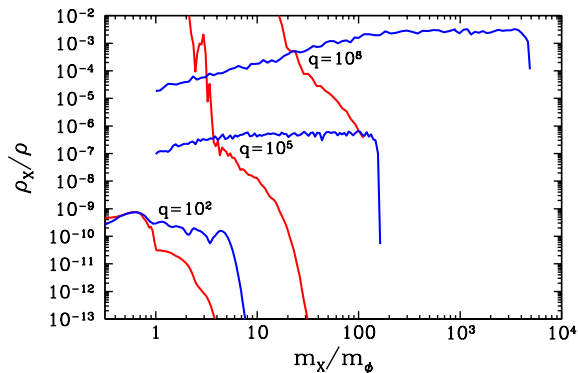
$$n \sim m_{\text{sh}}^3$$

(фермионы или скаляры

с $\xi = \frac{1}{6}$, где $\mathcal{L} = \frac{1}{2}\xi R\varphi^2$)



Рождение фермионов в конце инфляции



Модель инфляции

$$V(\phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2$$

Эффективная масса

фермионов

$$m_{\text{eff}} = m_\psi + g\phi(t)$$

бозонов

$$m_{\text{eff}}^2 = m_X^2 + g^2\phi^2(t)$$

Красные линии: доля рождённых бозонов

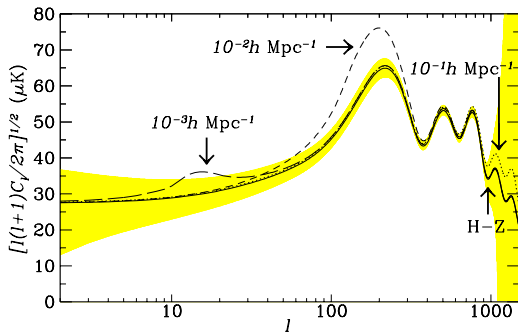
Голубые линии: доля рождённых фермионов

Сверхтяжёлые фермионы и особенности в СМВ

Сверхтяжёлые фермионы будут рождаться во время медленного скатывания, если

$$m_{\text{eff}} = m_{\psi} + g\phi(t)$$

Обратное влияние приведёт к особенностям в спектре СМВ



$$\delta(k) = \frac{H^2}{\dot{\phi}}$$

Обозначим амплитуду
особенности $\equiv A$