

Н.А. Архипова, Н.Н. Федоров

Факультет Физики Национального Исследовательского Университета «Высшая Школа Экономики», Россия, Москва

Аннотация

Исследуется продолжительная эволюция полей на стадии первичного разогрева Вселенной после инфляции. Прехитинг - стадия эволюции Вселенной, на которой инфлатон после стадии медленного скатывания на инфляции, начинает осциллировать вблизи минимума своей потенциальной энергии и выступать в роли вынуждающей внешней силы в уравнениях движения других полей, находившихся на инфляции в квантовом состоянии с относительно малой амплитудой. Численный расчет динамики системы для больших времен показывает, что на ранней стадии прехитинга энергия материального поля за счет параметрического резонанса вырастает до энергии инфлатона, но спустя довольно значительное время, при котором энергии полей выравниваются и происходит многократная перекачка энергии из одного поля в другое, энергия материального поля убывает быстрее энергии инфлатона. Это может говорить о том, что параметрического резонанса может быть недостаточно для распада инфлатона и перекачки его энергии в энергию материальных полей.

Тёмная энергия

За астрофизическое открытие ускоренного расширения Вселенной в 2011 г. была присуждена Нобелевская премия. Это ускорение объясняется присутствием во Вселенной гипотетической тёмной энергии. Существует несколько теоретических кандидатов для объяснения её природы:

- космологическая постоянная Λ ;
- энергия вакуума или вакуумный конденсат, оставшийся после серии фазовых переходов во Вселенной, но его значение, рассчитанное в соответствии с законами микрофизики, оказывается на 120 порядков больше значения, следующего из астрофизических наблюдений;
- квинтэссенция - неизвестное эволюционирующее скалярное поле, отличное от инфлатона, плотность которого была очень мала, но со временем, в результате эволюции, оно стало доминировать;
- гравитация, изменяющаяся на больших расстояниях;
- реликт инфляции - нераспавшаяся часть первичного скалярного поля - инфлатона.

В данной работе рассмотрен последний способ.

Инфляция и прехитинг

Теория космологической инфляции, которая приводит к экспоненциальной эволюции масштабного фактора, благодаря определенному скалярному инфлатонному полю, решила многие проблемы, существующие в космологии, а именно: проблему плоскостности, изотропии и однородности пространства и времени, независимости от начальных условий, достаточный рост первичных неоднородностей, изотропию анизотропии космического фонового излучения. Согласно современным представлениям, инфляция произошла в интервале времени от 10^{-42} с до 10^{-36} с. Инфляционное расширение - это состояние медленного скатывания, когда потенциальная энергия поля преобладает над его кинетической энергией, во время этого процесса потенциальная энергия поля уменьшается.

В конце этого процесса инфлатон начинает колебаться вблизи минимума своей потенциальной энергии. И именно в этот момент начинается история горячей Вселенной – энергия инфлатона перекачивается в материальные поля, которые до этого находились в квантовом состоянии, рождаются частицы, они термализуются и появляется понятие температуры, которая этот момент очень высока. В качестве возможного объяснения механизма этой стадии предполагается "параметрический резонанс".

Существует великое множество способов задать тип инфлатонного потенциала и материальных полей, а также тип их взаимодействия, что, в свою очередь, порождает целый ряд моделей.

Инфляционная модель и модель прехитинга

Рассмотрим лагранжиан полей в ранней Вселенной, состоящий из части, принадлежащей инфлатону ϕ и некоторому скалярному полю χ , находившемуся на стадии инфляции в квантовом состоянии с очень маленькой амплитудой:

$$L = L_\phi + L_\chi$$

$$L_\phi = \frac{1}{2}(\dot{\phi}_i \dot{\phi}^i) - V(\phi)$$

$$L_\chi = \frac{1}{2}(\dot{\chi}_i \dot{\chi}^i - g^2 \phi^2 \chi^2)$$

Где $g^2 \phi^2 \chi^2$ отвечает за взаимодействие полей.

В данной задаче рассматривается потенциал поля ϕ следующего вида:

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

Варьированием лагранжиана по полям получаем следующую систему уравнений, описывающую все этапы эволюции системы:

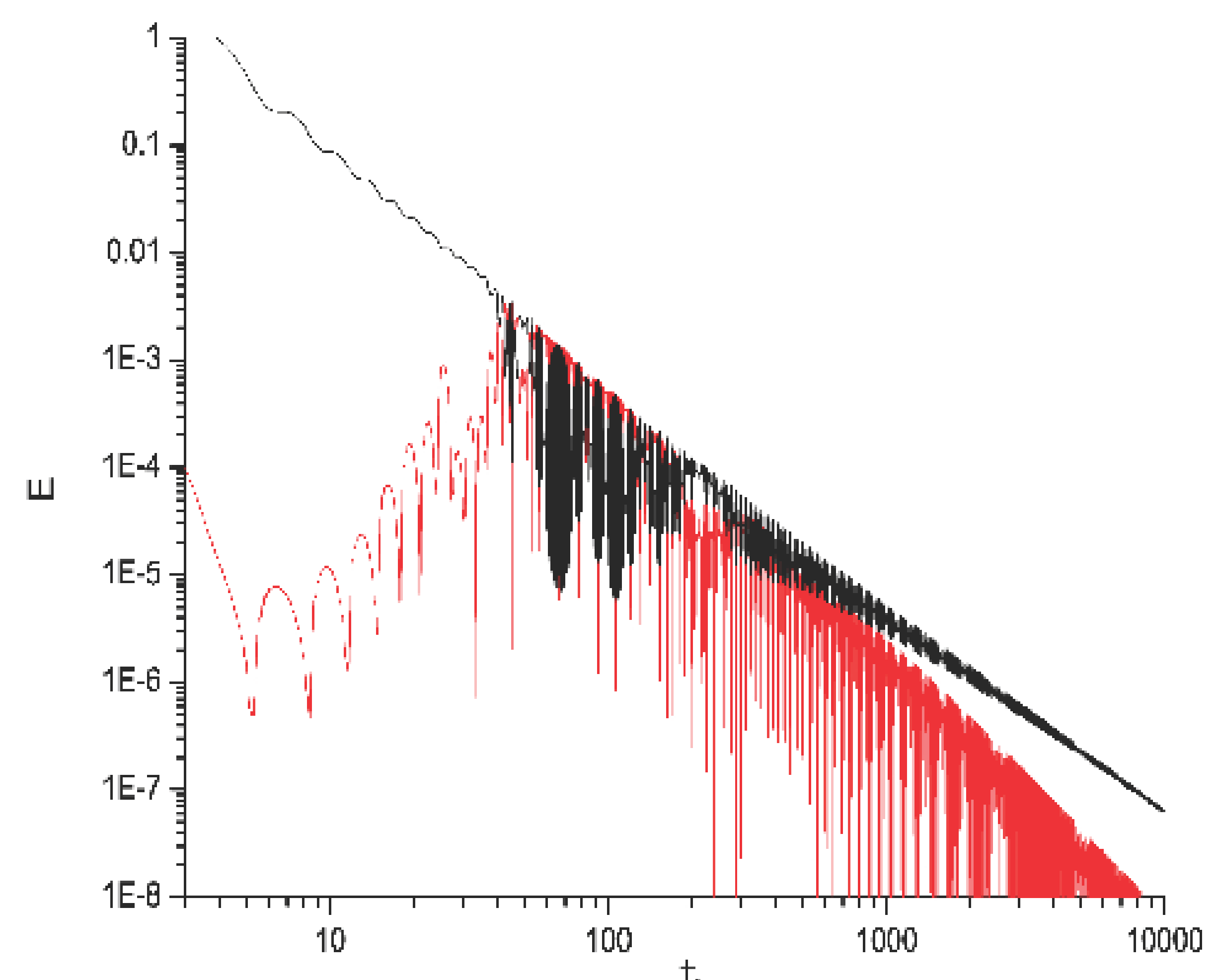
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V_{,\phi} = 0$$

$$\ddot{\chi} + 3H\dot{\chi} + V_{,\chi} = 0$$

где H – хаббловский параметр, следующий из уравнения ОТО:

$$H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} + \frac{\dot{\chi}^2}{2} + V(\phi) + V(\chi) \right)$$

Численное решение этой системы для эволюции энергии полей:



Эволюция энергии поля в модели $g=100$. Черная кривая показывает эволюцию инфлатона, а красная - эволюцию энергии материального поля.

Результаты и выводы

Численный расчет динамики системы в течение длительного времени показывает, что на ранней стадии прехитинга, благодаря параметрическому резонансу, энергия материального поля возрастает до энергии инфлатона, и его энергия перекачивается в энергию материальных полей. А через довольно значительное время энергии полей выравниваются, и энергия перекачивается из одного поля в другое и обратно. Затем энергия материального поля уменьшается быстрее, чем энергия инфлатона. То есть в данной модели и при заданной фиксированной константе взаимодействия инфлатона с материальным полем механизм параметрического резонанса не приводит к полному распаду инфлатона и перекачке его энергии в энергию материального поля. Более того, оставшаяся энергия инфлатона со временем снова начинает доминировать, и это можно интерпретировать как современное проявление темной энергии, которая и вызвала повторное ускоренное расширение Вселенной.

Далее планируется исследовать влияние величины константы взаимодействия и других типов инфлатонных потенциалов на ход прехитинга и распад инфлатона.